塑料注射成型与模具设计指南

徐佩弦　编著

以塑料注射成型工艺与模具设计为纲
系统全面地介绍了塑料注射成型工程

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

塑料注射成型与模具设计指南

徐佩弦　编著

机 械 工 业 出 版 社

本书以塑料注射成型工艺与模具设计为纲，系统全面地介绍了塑料注射成型工程。其内容包括：塑料及注射制品、塑料注射成型的基础理论、注射成型工艺、注射模具的基本结构、精密注射成型、注射成型精度和成本分析、注射制品的结构和模具设计、浇注系统的设计、成型零件设计、脱模和抽芯机构设计、模具温度调节系统设计、热流道注射模具设计、特种注射成型与模具设计、注射模具 CAD/CAE。本书技术内容先进、图表丰富、实用性强，是一本现代塑料注射成型工程技术著作。

本书可供从事塑料注射制品设计、生产和模具设计的工程技术人员使用，也可作为相关专业在校师生的教学参考书。

图书在版编目（CIP）数据

塑料注射成型与模具设计指南/徐佩弦编著. —北京：机械工业出版社，2013.9

ISBN 978-7-111-43724-6

Ⅰ.①塑… Ⅱ.①徐… Ⅲ.①注塑-塑料成型-指南②注塑-塑料模具-设计-指南 Ⅳ.①TQ320.66-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 195491 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：陈保华 责任编辑：陈保华 郑 弦

版式设计：霍永明 责任校对：纪 敬

封面设计：姚 毅 责任印制：杨 曦

北京圣亚夫亚美印刷有限公司印刷

2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 48.5 印张 · 2 插页 · 1087 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-43724-6

定价：119.00元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

策划编辑：（010）88379734

电话服务 网络服务

社服务中心：（010）88361066 教材网：http://www.cmpedu.com

销售一部：（010）68326294 机工官网：http://www.cmpbook.com

销售二部：（010）88379649 机工官博：http://weibo.com/cmp1952

读者购书热线：（010）88379203 **封面无防伪标均为盗版**

前　言

塑料的注射成型过程是借助螺杆或柱塞的推力，将已塑化的塑料熔体以一定的压力和速率注入闭合的模具型腔内，经冷却固化定型后开模而获得制品。注射成型是广泛应用的塑料加工方法之一，也是综合性的现代主流加工工艺。注射成型在整个塑料制品生产中占有重要地位。

塑料注射成型涉及塑料原料、注射制品、注射工艺、注射模具、注射机和生产成本等方方面面。本书以塑料注射成型工艺与模具设计为纲，系统全面地介绍了塑料注射成型工程。书中首先介绍了塑料的注射成型性能，并阐明注射成型制品的结构和质量，详细分析塑料制品的注射工艺性；在此基础上，全面介绍了塑料注射模具的设计，对注射模具的浇注系统、脱模机构和温度调节系统等的设计原理和模具结构进行了详细、深入的解析；还介绍了注射机的合模机构、注射装置和控制系统，分析了与注射机、注射模具相关的注射原理、过程和条件；着重介绍了热流道注射成型与模具、气体辅助注射成型和微孔塑料注射成型技术；最后介绍了塑料注射的计算机辅助工程 CAE 和注射模的计算机辅助设计 CAD 在应用方面的基础知识。

笔者有长期从事材料工程专业教学和科研的经历，有机会长期在注射成型和模具制造企业参与技术工作，了解各种不同专业学历的新一代技术人员的知识需求。本书以塑料流变学和传热学的基础理论及大量的实例和图表介绍了注射工艺和注射模具的设计；以必要的理论分析，详细论述注射成型的主要技术问题，包括塑料熔体的流动充模、注塑件冷却收缩、残余应力和翘曲、塑料成型制品的精度和质量问题、注射成型生产成本等。书中对于塑料制品、注射工艺和模具结构的力学分析达到了一定的深度，对注射模的脱模机构和侧向分型抽芯机构，都有由简到繁详细的分析，也为应用 CAD/CAE 进行了理性引导。

在本书编写过程中，得到各位同仁的支持和指教，得到机械工业出版社的热忱帮助和支持，在此表示诚挚的感谢。

本书涉及大量的高分子材料和工程的技术资料，而且它们还在不断地推陈出新，但愿这些内容有益于读者，也请读者对书中不足和错误之处批评指正。

徐佩弦

目　录

前言

第 1 章　塑料及其注射制品 …… 1

1.1　塑料的分类和品种 …… 1

1.1.1　热塑性塑料及热塑性弹性体 …… 1

1.1.2　热固性塑料 …… 8

1.1.3　注射用特种塑料 …… 11

1.2　塑料及其制品的性能 …… 18

1.3　塑料注射制品的应用和试制 …… 50

1.3.1　塑料注射制品的应用 …… 50

1.3.2　塑料注射制品的试制 …… 58

参考文献 …… 65

第 2 章　塑料注射成型的基础理论 …… 66

2.1　塑料注射加工的行为特性 …… 66

2.1.1　塑料注射加工中的传递现象 …… 66

2.1.2　聚合物的形态转化 …… 74

2.2　塑料熔体的流动 …… 77

2.2.1　非牛顿塑料熔体的流动 …… 77

2.2.2　塑料熔体在管隙中的流动分析 …… 88

2.3　影响黏性流动的因素 …… 95

2.3.1　剪切速率、温度和压力的影响 …… 96

2.3.2　相对分子质量和添加剂的影响 …… 99

2.3.3　塑料熔体的弹性和熔体破裂 …… 101

2.4　塑料熔体注射充模和保压的计算机模拟 …… 104

2.4.1　黏度方程 …… 105

2.4.2　流动充模和保压的数值分析 …… 107

2.5　塑料注射成型热力学 …… 115

2.5.1　热传导方程和热物理性能 …… 116

2.5.2　注射成型冷却过程中的热量传递 …… 121

参考文献 …… 130

第 3 章　注射成型工艺 …… 131

3.1　注射机的基本结构 …… 131

3.1.1　注射成型 …… 131

3.1.2　注射塑化装置 …… 138

3.1.3　合模装置 …… 148

3.2　注射生产的准备 …… 155
3.2.1　塑料成型的工艺特性 …… 155
3.2.2　注射生产的准备和后处理 …… 160
3.2.3　塑料的着色 …… 166
3.3　注射成型工艺 …… 176
3.3.1　注射充模和成型的过程 …… 176
3.3.2　物料的温度和塑化计量 …… 179
3.3.3　模具的温度和冷却时间 …… 186
3.3.4　常用塑料的注射成型工艺 …… 190
参考文献 …… 197
第4章　注射模具的基本结构 …… 198
4.1　注射模具的结构 …… 198
4.1.1　注射模具的结构组成和分类 …… 198
4.1.2　双分型面注射模具 …… 200
4.1.3　侧向分型抽芯机构 …… 201
4.1.4　型腔压力分析 …… 206
4.2　分型面和排气设计 …… 209
4.2.1　分型面设计 …… 209
4.2.2　排气设计 …… 214
4.3　合模导向机构 …… 219
4.4　工艺参数校核 …… 229
4.5　注射模具材料 …… 232
4.5.1　塑料模具用钢及其处理 …… 233
4.5.2　各种注射模具用钢的性能和选用 …… 236
4.5.3　注射模具用铝合金和铜合金 …… 243
4.6　注射模具的设计 …… 245
参考文献 …… 252
第5章　精密注射成型 …… 253
5.1　残余应力、收缩和翘曲 …… 253
5.1.1　取向 …… 253
5.1.2　残余应力 …… 261
5.1.3　体积收缩及 *P-V-T* 的关系 …… 267
5.1.4　翘曲变形 …… 277
5.2　熔合缝 …… 284
5.2.1　熔合缝的生成 …… 284
5.2.2　熔合缝的力学性能 …… 289
5.2.3　熔合缝的控制和多浇口顺序进料的消痕工艺 …… 296
5.2.4　快速热冷循环成型技术 …… 302
5.3　注射机的控制系统 …… 303

5.3.1 注射机的闭环控制 …… 304
5.3.2 计算机控制注射机 …… 311
5.3.3 高速注射和电动注射机 …… 319
参考文献 …… 323
第 6 章 注射成型精度和成本分析 …… 324
6.1 注塑件的精度和质量分析 …… 324
6.1.1 注塑件的精度 …… 324
6.1.2 注塑件的质量分析 …… 333
6.2 注射成型的成本分析 …… 349
6.2.1 型腔数和注射成型成本的确定 …… 349
6.2.2 热流道注射成型的成本分析 …… 353
6.3 注射模具的成本概算 …… 356
6.3.1 注射模具的早期成本简易估算 …… 356
6.3.2 注射模具价格计算法 …… 359
6.3.3 系统网络早期概算注射模具成本 …… 366
6.4 注射模具的验收和维修 …… 380
参考文献 …… 386
第 7 章 注射制品的结构和模具设计 …… 387
7.1 注射制品的壁厚和刚性设计 …… 387
7.1.1 注塑件的壁厚 …… 387
7.1.2 肋、凸台、边缘、曲面、支承面及圆角 …… 389
7.2 制品注射成型的工艺性 …… 395
7.2.1 孔的设计 …… 395
7.2.2 脱模斜度 …… 399
7.2.3 表面装饰 …… 402
7.3 嵌件设计 …… 403
7.4 螺纹联接设计 …… 408
7.5 塑料齿轮及注射模具 …… 418
参考文献 …… 431
第 8 章 浇注系统的设计 …… 432
8.1 流道系统的设计 …… 432
8.2 浇口设计 …… 440
8.2.1 浇口的形式和尺寸 …… 440
8.2.2 浇口位置 …… 449
8.3 平衡布置流道尺寸计算 …… 452
8.4 非平衡布置流道尺寸计算 …… 460
参考文献 …… 465
第 9 章 成型零件设计 …… 466
9.1 成型零件结构设计 …… 466

9.2　成型零件工作尺寸计算 …… 471
9.3　型腔模板和垫板构件的力学计算 …… 488
9.3.1　中小型模具的力学计算 …… 488
9.3.2　大中型模具侧壁的刚度计算 …… 497
9.3.3　大中型模具型芯垫板的刚度计算 …… 502
9.4　型芯构件的力学计算 …… 504
参考文献 …… 508
第 10 章　脱模和抽芯机构设计 …… 509
10.1　开模与脱模 …… 509
10.2　脱模力计算 …… 517
10.2.1　脱模力的简单估算法 …… 518
10.2.2　脱模力的热应力解析计算法 …… 520
10.3　脱模机构 …… 530
10.3.1　简单脱模机构 …… 530
10.3.2　定模脱模和双脱模机构 …… 539
10.3.3　顺序脱模和浇道凝料脱模机构 …… 543
10.3.4　二级脱模机构 …… 552
10.4　侧向分型抽芯机构 …… 557
10.4.1　斜导柱侧抽机构 …… 557
10.4.2　弯销和斜导槽侧抽机构 …… 572
10.4.3　斜顶杆侧抽机构 …… 576
10.4.4　斜滑块侧抽机构 …… 581
10.5　螺纹脱模机构 …… 584
参考文献 …… 591
第 11 章　模具温度调节系统设计 …… 592
11.1　冷却系统的简略计算 …… 592
11.2　冷却系统设计 …… 596
11.3　冷却系统计算 …… 601
11.4　加热功率计算 …… 610
参考文献 …… 612
第 12 章　热流道注射模具设计 …… 613
12.1　热流道系统和技术 …… 613
12.1.1　典型结构和系统 …… 613
12.1.2　塑料材料的影响 …… 619
12.1.3　热流道系统的温度调节 …… 624
12.2　热流道系统的传热学和流变学计算 …… 629
12.3　喷嘴 …… 642
12.3.1　浇口设计 …… 642
12.3.2　各类喷嘴设计 …… 650

12.3.3 喷嘴上的加热器 …… 659
12.4 流道板设计 …… 662
12.4.1 流道板的加热和绝热 …… 662
12.4.2 流道板的加热功率和热损失计算 …… 669
12.4.3 热膨胀补偿预测 …… 674
12.4.4 流道板的结构和装配 …… 680
12.5 先进的热流道注射模 …… 691
12.5.1 热流道注射模的总体结构 …… 691
12.5.2 叠式的热流道注射模 …… 698
参考文献 …… 703
第 13 章 特种注射成型与模具设计 …… 704
13.1 气体辅助注射成型与模具设计 …… 704
13.2 热固性塑料注射成型与模具设计 …… 710
13.2.1 热固性塑料注射成型工艺 …… 710
13.2.2 热固性塑料注射模具设计 …… 714
13.3 微孔塑料注射成型技术 …… 721
13.3.1 微孔塑料的性能和注射原理 …… 721
13.3.2 微孔塑料的注射工艺和注射模 …… 727
参考文献 …… 732
第 14 章 注射模具 CAD/CAE …… 733
14.1 注射模具 CAD 的相关技术 …… 733
14.2 注射模具 CAD …… 739
14.2.1 注射模具 CAD 设计方法 …… 739
14.2.2 注射模具 CAD 的装配 …… 747
14.2.3 注射模具 CAD 数据库 …… 753
14.3 注射模具 CAE 的应用 …… 756
14.3.1 注射模具 CAE 分析的功能和作用 …… 756
14.3.2 CAE 的注射制品、模具和工艺设计的优化 …… 761
参考文献 …… 767

第 1 章　塑料及其注射制品

塑料是注射加工的对象。塑料新材料和注射新制品的开发，是注射工艺和模具技术发展的动力。本章概要介绍塑料的分类和常用品种，侧重陈述塑料及注射制品的力学性能和应用性能，也介绍一些与注射加工和注射成型相关的特性。成功的注射成型过程的最终评估，是以注射制品的质量为依据的。因此，必须关注塑料制品的物理性能指标、测试和检验。最后，讨论塑料注射制品的试制过程。

1.1　塑料的分类和品种

塑料是高分子材料中最大的一类材料。塑料的定义是以聚合物为主要成分，并在成品加工的某阶段可流动成型的材料。聚合物是指高相对分子质量的聚合产物，故又称为高聚物。塑料是以聚合物为基体，含有添加剂的材料。

本节介绍注射生产的热塑性塑料和热固性塑料的常用品种，还介绍热塑性弹性体、玻璃纤维增强和一些特种的复合塑料的品种。

1.1.1　热塑性塑料及热塑性弹性体

1. 热塑性塑料

热塑性塑料是指在特定的温度范围内，能反复加热软化和冷却硬化的材料。这类塑料基本是以聚合反应得到的高聚物为主配制的。聚合物由长分子链组成。热塑性聚合物的分子链有线性的或支链的结构。用相对平均分子质量来表征和测定聚合物分子链的长度。相对分子质量越大，固态聚合物的力学强度越好；黏流态聚合物的黏度更高。

按冷却期间高聚物的分子结构形态，热塑性聚合物可分成两大类：一类是具有无定形结构的聚合物；另一类是具有结晶结构的聚合物。无定形结构塑料中的微观分子以缠结的连接形式保持着紊乱状态。结晶结构的塑料中，分子链沿着已生成的晶核有序地折叠着，但其周围是无定形结构。结晶度是结晶型塑料用来说明结晶态结构的百分率。结晶结构的分子比无定形分子聚集有序且密集。因此，结晶型塑料的冷却成型收缩率比无定形塑料大。同一种结晶型塑料，由于冷却过程的温度条件不同，晶核生成和晶体生长受时间制约，会有不同的结晶度。结晶度较高的塑料收缩率较大，刚性和拉伸强度有些提高，而冲击强度下降。

（1）聚乙烯（PE）　它是乙烯聚合的结晶型塑料。熔体的流动性能好。

低密度聚乙烯 LDPE，用高压法生产，结晶度较低（为 45% ~65%）；热变形温度在 1.82MPa 载荷下为 50℃；其柔软性、断裂伸长率、冲击强度和透明性较好；适用于吹塑薄膜和挤出线缆绝缘层。

高密度聚乙烯 HDPE，用低压法生产，有 85% ~95% 的高结晶度；热变形温度（1.82MPa）为 78℃；具有较高力学强度和使用温度；适宜中空吹塑，注射和挤出各种瓶、盆、桶、片材、管材和异形材。

注塑级 HDPE 的熔体流动速率为 5 ~20g/10min；注塑温度为 180 ~250℃；模具温度为 180 ~250℃。

还有一种超高分子量聚乙烯 UHMWPE，为相对分子质量大于 7 万的高密度聚乙烯，有很高的力学强度和耐磨性能，熔体黏度特高，可制成减摩耐磨的支承和传动件。

瓶、筒和罐的 HDPE 密封盖可因为强力打开而撕裂，主要是由于材料强度不足和盖子太薄，HDPE 桶上不能直接嵌金属手柄，金属柄周围的塑料会因负载应力过大而断裂脱开。贮存洗涤液的 PE 容器会引发环境应力裂纹。管装洗头膏的 PE 螺牙帽盖，生成环境应力裂纹后在紧固力的触发下，很容易断裂。HDPE 吹塑的桶类容器，装有水和固态物后坠地，一般不会破裂，但装了洗手液生成了应力裂纹后，从 1m 高度坠落就会破裂。这种桶的底部需有渐变的斜度和大圆弧的圆角。用短玻璃纤维增强的 PE 塑件，在污染环境下又有振动负载时，连接紧固部位较容易出现裂缝。

PE 和聚丙烯（PP）在受热和光照下会发生氧降解，致使塑料件脆化，损失了弯曲和拉伸强度。氧化作用的程度与时间，可以用红外线光谱来监察和测量。家用的塑料装饰植物在摆放了 15 年后，会见到叶片从枝梗上脱落，叶根的装配接头断裂，枝杈上插装叶片的套管开裂，这是 PE 的脆化断裂所致（尽管装饰植物的自重小，装配接头处的应力也不大）。经红外线谱的对比分析可知，由于氧化产生了羰基吸收比率变化，增大叶根的接头，添加抗氧化剂，能改善此种老化现象。

（2）聚丙烯（PP）它是密度小而耐热性较好的结晶型聚合物。其热变形温度（1.82MPa）为 102℃，物理性能与 PE 相近，成型收缩率大，熔体流动性好，有突出的抗疲劳性能。聚丙烯是最有活力、产能产量和消费需求增长最快的热塑性塑料。

注塑级聚丙烯的品种按聚合类型可分为均聚聚丙烯、无规共聚聚丙烯和抗冲击共聚聚丙烯。均聚聚丙烯的刚性和耐热性都较高，低温抗冲击性能差。无规共聚聚丙烯熔点低，透明性好，韧性比均聚聚丙烯有所改善。抗冲击共聚聚丙烯的综合性能优良，改进了低温抗冲击性能，已广泛应用于汽车零配件和家用电器的注塑件。

汽车工业促使聚丙烯发展了众多的品种，有高流动、高抗冲击、高结晶、低收缩和低气味等品种。高流动抗冲击共聚聚丙烯适用于大型薄壁壳体的注射生产。同时可降低加工温度和压力。高抗冲击共聚聚丙烯用于汽车保险杠等多种注塑件，是橡胶增韧和无机粉剂填充的塑料。高结晶抗冲击共聚聚丙烯强度高，热变形温度和固化温度高。低收缩率的聚丙烯的横向收缩率为 0.81%，纵向收缩率为 0.79%，横纵向收缩比为 1.03。不但有较低的成型收缩率，而且各向同性。可以替代 ABS 注射尺寸精度较高的制品。经玻璃纤维增强和无机粉剂填充的 PP 品种也被大量使用，都有比注塑级 PP 要小的成型收缩率。但短玻璃纤维增强 PP 塑料的各向异性很明显。

PP 不像 PE 那样因环境应力开裂而失效。但它的耐老化能力比 PE 差。在氧化和降解中分子链上失去氢原子，伴有主链断裂导致力学性能下降。例如，卷发筒在吹风干燥

头发时被氧化，使用寿命较短。另外，PP 的低温冲击强度低。它的玻璃态转化温度 T_g 为 -20℃左右，在此温度早已脆化。PP 制造的壳体等结构件，如果经受过 0℃以下的冷冻，就要注意可能会出现的破裂现象。因此需经复合或共混改性方法加以改善。其次，使用着色剂（例如用酞菁颜料）会影响 PP 注塑件的收缩率。着色剂如同成核剂那样会影响结晶度。另外，用 PP 做贮有液体食物的扁瓶，保质期不长，瓶中水分会因损耗而减少。与 PE 相比，PP 瓶壁的水汽渗透速率要高些。这样势必要增加容器的壁厚。

（3）聚氯乙烯（PVC）　根据成型加工和使用的性能要求，在 PVC 树脂中加入各种添加剂，可制成各种性能的塑料制品。添加增塑剂可以降低熔融温度和熔体黏度。添加不同比例的增塑剂，可获得不同软硬程度的 PVC 制品。加入稳定剂，使 PVC 在成型过程和使用中不易老化。润滑剂则在加工中减少摩擦热，并使制品表面光滑。

结晶型 PVC 树脂为白色或淡黄色粉末。供给注射加工的 PVC 粒子具有无定形聚合物特征。注塑级的硬 PVC 成型收缩率较小（0.07% ~0.4%）。其熔体的热稳定性差，最高注射温度为 195℃。成型温度的范围小，料筒温度为 170 ~190℃，喷嘴温度高于料筒温度 10℃，模具温度为 35 ~40℃。PVC 对模具有腐蚀作用，模具的成型零件表面要镀铬处理，或用不锈钢制造模具的成型零件。

软 PVC 被用来吹塑薄膜、压延片材和挤出线缆护套。硬 PVC 用来挤出各种棒材、管材、板材、型材和门窗异型材。注射级硬 PVC 的熔体流动性较差，用于注射成型管接头和较小的结构件。注射和挤出时的加热塑化温度，对成型制品的断裂性能有影响。特别在受到高速冲击时，硬 PVC 的冲击强度较低。硬 PVC 管道和阀类塑料件，突然受到液压冲击时容易开裂。改性可以提高硬 PVC 的冲击强度，但同时也降低了制品的刚度。80℃以上的过热环境，会使硬 PVC 制品变形软化，其刚性降低而弹性提高，电绝缘性能下降。

（4）聚苯乙烯（PS）　它是无色透明塑料，透光率仅次于聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）。着色性、耐水性和化学稳定性良好。PS 的电绝缘性能优良。但不耐苯和汽油等有机溶剂。PS 是无定形聚合物，固态密度为 1.05g/cm^3，熔融态密度为 0.98 ~0.93g/cm^3。其熔体流动性好，且不易分解，有良好注射工艺性；可在 120 ~180℃较宽的温度范围内注射流动；分解温度在 300℃以上；力学性能一般，抗冲击性能差。模压和蒸汽加热成型的发泡 PS，广泛用于包装和保温制品。

聚苯乙烯塑料制品在坠落和冲击时容易断裂。其塑料件壁厚应均匀一致，各连接面处应有圆角；且不宜设计嵌件。塑料件中残余应力过大时，会出现应力发白和裂纹，使透明性下降。构件不能承受动态的弯曲载荷，不能设计制造弹性夹钳等。PS 有较大的热膨胀系数。交替的膨胀和收缩力会使塑料件的连接基座产生开裂。蠕变使 PS 塑料件只有 15 ~20 年的正常工作期限。热变形和蠕变综合作用于 PS 灯罩类装饰件，由于灯源的热量，一年左右就会开裂。在连接面上，即使塑料件工作温度不超过 45 ~50℃，仍会发生蠕变。

（5）抗冲聚苯乙烯（HIPS）　为丁苯橡胶增韧改性的聚苯乙烯，与 PS 相比有较高的韧性和冲击强度。如果相对分子质量偏低，或橡胶含量较少，或注射工艺不良，则会

有较低的强度，更高的残余应力。例如：用 HIPS 制造的笔杆有较高的残余应力，使用几次就会开裂；扭簧扣压的晾衣服的衣夹，由于交变弹簧力的作用，钢丝扣压处的夹头很快就断裂；单薄无筋条的简易衣架，也易弯曲折断。对于 200～300mm 以上的 HIPS 构件，需注意自重。对其支撑位置产生的弯曲应变，应受到限制。HIPS 的制品不宜露天使用。它的抗氧化和热化学阻抗的稳定性较差。在承载情况下，扭曲和弯曲时会产生热变形或疲劳裂纹。

（6）ABS　系苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚的无定形塑料。ABS 是简称，英文名为 Acrylonitrile-Butadiene-Styrene。ABS 通常有比 HIPS 好的韧性，有较好的综合力学性能；熔体流动性中等，易于注射成型；熔体对剪切速率敏感，常用针点式浇口注射；有较宽的熔体加热范围（180～240℃）；模具温度为 50～75℃，较高的模具温度可改善注塑件表面的光泽。成型收缩率小（0.3%～0.8%），制品尺寸稳定。ABS 是重要的广泛使用的工程塑料。其品种牌号很多，有各种高抗冲击、中抗冲击、耐热型、阻燃型或透明型等。各品种的物理性能和成型加工性能有差异。ABS/PC 混合塑料件，可提高耐热温度到 120℃左右。

ABS 常用来制造各种壳体和结构件，以及经电镀等表面处理的装饰件。ABS 的面板、壳体和结构件制造的仪表，通常设计寿命为 10 年。仪表中最早开裂的部位是壳体上的螺纹牙，还有受到装配紧固力的螺钉孔和台柱。仪表中动力电动机或重物的作用会使结构件开裂损坏，也会有疲劳裂纹。倘若仪表的环境条件很差，壳体的横截面上会出现环境应力裂纹。

（7）AS　为丙烯腈与苯乙烯共聚的无定形塑料，也可简写成 SAN。其透光率与 PS 相当，韧性和强度超过 PS，有较好刚性并耐刻划。AS 抗冲击性能好，但对缺口敏感，熔体的流动性也较好，注射成型收缩率为 0.2%～0.5%；利用其透明和半透明性，注射生产各种照明灯具上制件和装饰性的小尺寸壳体、按钮和表盘等，但需注意到 AS 制品在注射成型时易生成残余应力，会引发裂纹。AS 在成型加工和使用中与溶剂接触，有环境应力开裂的现象；倘若用 AS 制造热咖啡的容器，由于化学作用和高温，会使容器开裂。

（8）聚甲基丙烯酸甲酯（PMMA）　是丙烯酸类树脂中最重要的一种，属透明度高的无定形塑料；常以板材供应，俗称有机玻璃；但比无机玻璃轻得多，且抗冲击、耐振；具有良好的电绝缘性、染色性和二次加工的装饰性能。用聚苯乙烯改性的 PMMA 为 372 品种，珠光有机玻璃是国内常用的塑料品种。PMMA 熔体的流动性中等，其熔体黏度比 PE 和 PS 高，对加热温度比较敏感，超过 245℃以上即会分解。不良的注射工艺会影响制品的透明度和强度。PMMA 的氧指数为 17.3，属易燃塑料。

由于 PMMA 的脆性，使它不能承受高的应力。在钻孔切削时很容易开裂。PMMA 的螺纹孔在室温下拧紧时也会开裂。有机玻璃的表面硬度差，易被硬物擦伤起划痕，实施专门的表面涂覆可以有所改善。环境应力裂纹是 PMMA 的又一弱点，尤其是在平均相对分子质量较低时。

（9）聚酰胺（PA）　系多品种的结晶型聚合物，坚韧且耐疲劳，表面摩擦系数低又

耐磨，但极能吸湿；熔点高，熔融温度范围窄；结晶至熔化的相变过程温度：PA6 在 215～225℃，最高注射温度为 250℃；PA66 相变在 250～265℃，最高注射温度为 285℃；PA610 相变在 210～225℃，最高注射温度为 250℃；PA12 相变在 175～185℃，最高注射温度为 230℃。注射前必须充分干燥物料。熔体黏度低，注射成型时很容易出现流涎和溢边。模具温度的高低影响结晶度和生产率，在较大范围（10～40℃）中，按需要选定。注塑件的成型收缩率大，PA6 有 0.7%～1.4% 的收缩率，其他品种有 1.6% 左右的收缩率，且有波动。成型的制品因吸湿等原因，尺寸不稳定。

PA6 弹性好，冲击强度高，吸水性较大；PA66 强度高，耐磨性好；PA610 与 PA66 性能相似，但吸水性和刚性都较小；PA12 的吸水性小，成型收缩率较小些，制品尺寸较稳定；PA1010 半透明，吸水性较小，耐寒性较好；玻璃纤维充填含量达 33% 的 PA，其力学性能和耐热性能有很大提高，成型收缩率有明显下降；PA/ABS 混合物中 ABS 占 15%～20%，冲击强度有很大提高。

聚酰胺制品的失效有四个特征：

首先，PA 在高温下加工时的水解作用会使材料降解。因此原料中的含水量必须严格限制。降解使 PA 的平均相对分子质量降低，造成制品强度下降。

第二，PA 在固化结晶时，要有充裕的结晶时间，结晶度越高，晶粒越细，抗冲击性能越好。为获得一定的性能，必须控制好结晶度。

第三，制品在使用期内吸水，能起增韧作用。如果制品的水分含量低，常会太脆而失效。水对 PA 制品可能是需要的，也可能不需要。控制制品中含水量，是防止注塑件失效的重要方面。

第四，PA 制品中含水量也影响到尺寸。吸水膨胀会改变尺寸，使塑料尺寸超出公差，也会使粘接等加工困难。

聚酰胺齿轮与聚甲醛齿轮啮合传动已普遍应用，一般用于小模数齿轮。用来传递动力的模数 1mm 以上的聚酰胺齿轮，还需慎重试验。由于疲劳强度不足，在与金属齿轮啮合时，PA 齿轮上的轮齿会全部折断。

（10）聚碳酸酯（PC）　由于大分子链结构的刚性强，使其结晶能力差，属于无定形聚合物。PC 有突出的抗冲击和抗蠕变性能，并较能耐寒耐热，使用温度的范围宽，（－130～130℃）。PC 的力学性能和电绝缘性能优良，并有较好的透明度；制品成型收缩率较小，注塑件尺寸精度高。PC 是产量仅次于 PA 的工程塑料。

PC 熔体的黏度高，流动性差，最高注射温度为 300℃。高温下含有微量水，会引起水解，加工前要严格干燥处理。所需模具的温度高（80～100℃）。在脱模温度下，PC 注塑件的弹性模量高，与模具钢表面间的摩擦系数大，成型件脱模困难。物料注射充模时流动和温差产生的残余应力较高，尤其在注塑件的嵌件周围、成型孔的周边和截面突变处，在外力等环境因素下，易产生应力开裂。PC 制品有较高的缺口敏感性，疲劳强度低。PC 注塑件还有高温水解的特性，在 65℃以上的高湿条件下会产生应力开裂。

玻璃纤维或碳纤维增强后，可明显提高力学强度和改善耐热性，但冲击强度下降。

PC 的混合塑料品种很多：PC/ABS 改善熔料加工流动性，降低制品的残余应力；PC/HDPE 降低熔体黏度，提高制件的冲击强度，减少应力开裂；PC/POM 提高耐溶剂性能、耐应力开裂和耐热性能；PC/PMMA 的制品光泽美观，耐紫外线；PC/PA 混合，使冲击强度提高，更耐化学腐蚀。

（11）聚甲醛（POM） 是高结晶度的聚合物，具有优良的物理和力学性能，耐磨、耐水、耐腐蚀，耐蠕变和耐疲劳性能好。均聚 POM 与共聚 POM 由于分子结构不同，性能有差异。均聚 POM 的密度、结晶度和力学性能稍高一些。而共聚 POM 的热稳定性、化学稳定性及加工性能稍好一些。共聚 POM 应用较均聚 POM 广泛。

共聚 POM 熔体流动性中等。物料熔融温度范围小。共聚 POM 在 165～175℃间结晶熔化，需模具温度 80～100℃。共聚 POM 热敏性强，容易分解。熔体最高注射温度为 200℃。熔体温度过高或保持熔融状态的时间过长，会溢出刺激性甲醛气体，制品会变色或起泡。共聚 POM 的成型收缩率大（1.5%～3.5%），且波动范围大，用玻璃纤维增强改性，可减小成型收缩率；添加聚四氟乙烯、石墨和二硫化钼等可制成耐磨自润滑的支承或传动零件。POM 制品的热稳定性差，易燃烧；长期在大气中暴晒，老化较快。

（12）聚苯醚（PPO） 聚苯醚的英文名为 Polyphenylene Oxide，简写为 PPO。由于分子链的链段内旋困难，导致刚性增大，为无定形聚合物。成型收缩率和吸水性小，阻燃性能好。热变形温度高达 190℃。其熔体流动性差，需 300～330℃的高温加热熔化。纯 PPO 加工困难，难以注射成型制品。生产中用聚苯乙烯混合（PPO/PS），名为 Noryl 塑料，应用最多。其热性能和力学性能与聚苯乙烯含量有关，与聚碳酸酯相近。其黏度比聚碳酸酯低，高于 ABS。料筒温度为 315～340℃；喷嘴温度为 300～320℃；模具温度为 110～150℃；成型收缩率为 0.3%。

PPO/PS 耐热难燃，力学性能突出，电绝缘性能优异，用于电子电器产品上的耐热、高压和高频的绝缘制件，用于计算机、打印机和复印机等办公用品的壳体，及汽车和机电产品上的结构件。制品的工作温度约在 100℃，其化学阻抗性能差。用 PPO/PS（Noryl）塑料生产电热水壶，在厨房里接触了油脂后，会生成环境应力裂纹；在加热和冷却的循环使用下，会产生热疲劳裂纹。

下面介绍的聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）和聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）同属于结晶型的饱和聚酯，为热塑性的工程塑料。

（13）聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT，PBTP） PBT 为结晶型热塑性树脂，纯 PBT 的力学性能性能一般，熔体的黏度较低，很少应用。经玻璃纤维增强后，力学性能大幅度提高。弯曲弹性模量达到 8.82GPa。热变形温度（1.82MPa 下）为 220℃，介电绝缘性能优良。增强 PBT 的流动性良好，但成型的温度范围较窄（225～235℃）。PBT 的黏度对剪切速率的敏感性大于对温度的依赖。注射成型制品的取向很明显。纯 PBT 的成型收缩率为 1.7%～2.3%，玻璃纤维增强后的 PBT 约为原收缩率的 1/4～1/2，玻璃纤维含量越高，收缩率越小。

PBT 有阻燃增强品级。也有低翘曲的无机填料充填的品种。PBT/PET 混合塑料，

改善了翘曲变形，使制品有光泽。PBT/PC 混合，改进了耐热温度和冲击强度。它们主要用于电子电器和仪器仪表邻域。

（14）聚对苯二甲酸乙二醇酯（PET）　PET 自 1946 年工业化以来，主要用于纤维、薄膜和吹塑瓶。大批量透明瓶的型坯，需经注射成型加工。PET 是高度对称芳环的线性聚合物，易于取向；熔融温度较高，加热温温度范围较小（270～290℃），分解温度为 300℃；熔体流动性良好，且对流动剪切速率敏感；需较高的模具温度（85～130℃），以促使成型制品结晶，壁厚大时取较高模具温度。PET 的成型收缩率很大，一般为 1.8%，加入玻璃纤维后可降至（0.2～1.0）%。PET 在 -50～100℃范围内，基本保持常温下的力学性能，常用来注射成型电子电器和汽车配件。PET 有含 30% 玻璃纤维的增强工程塑料，有 PET/PC 和 PET/PA 等共混品种。

2. 热塑性弹性体

通常把弹性模量小于 10^4MPa 的材料称为弹性体。弹性体在室温下能被反复拉伸至原始长度的 2 倍以上，应力解除后能大致回复到原始长度和形状。橡胶是典型的弹性体。但橡胶不能通过热熔融再生造型。热塑性弹性体（TPE，thermoplastic elastomer）在常温下具有弹性，在熔融温度下能反复熔化后成型。TPE 的价格高于一般的橡胶。制备热塑性弹性体的主要方法，是橡胶与塑料共混。

热塑性弹性体的高分子链段是具有弹性的软段，又有常温下约束大分子运动的硬段。软段为材料的连续相；硬段作为分散相。在熔融温度下，硬段被离解并和软段混合；冷却后硬段能重新分散在软段连续相中。

热塑性弹性体与硫化橡胶相比，弹性、抗蠕变性、耐溶剂性和耐油性能等，还有待改进。TPE 制品容易与其他材料粘合，但表面修饰尚有困难。

热塑性弹性体的种类较多。较重要的有聚苯乙烯系、聚烯烃系、聚酯系、聚氨酯系和聚酰胺系等。新型的 TPE 品种仍在开发研制中。

热塑性弹性体注射成型时的加热熔融温度取决于相混塑料，比各种塑料熔融温度还低些。TPE 的熔体黏度对温度的依赖性较大，与塑料相同而与橡胶不同。TPE 在注射成型时收缩率大致为 1.0%～1.5%。由于 TPE 的种类众多，有不同塑料与橡胶配比，又有各种添加剂，需要材料供应商提供熔体加热温度、模具温度和注射成型收缩率。TPE 在注射成型时，浇口凝料很难拉断，要求浇口细长并有锐边，能切断。

（1）聚苯乙烯系热塑性弹性体（TPS）　TPS 的典型代表是苯乙烯-丁二烯-苯乙烯嵌段共聚物（SBS）、苯乙烯-乙烯-丁烯-苯乙烯共聚物（SEBS）。SBS 的密度为 0.94g/cm^3，SEBS 的密度为 0.91g/cm^3，拉伸强度可达 30MPa。邵氏硬度可在 30～75A 之间调节，透明性好，着色性能优异。SBS 用于柔性结构件和电线绝缘层，需求量很大。注射加热温度为 180～240℃。模具温度为 20～50℃。SBS 与 SEBS 之间的最大差异在于老化性能。双键经加氢后生成的 SEBS 稳定性良好，耐化学药品性能优良。SEBS 容易消毒灭菌、无需交联剂、毒性低，可作为医疗器械用材料，可制造密封件、血袋、奶嘴、医用插管、软管和手术衣等。

（2）聚烯烃系热塑性弹性体（TPO）　用动态硫化技术机械掺混 EPDM/PP 而得，

其价格比乙丙橡胶 EPDM 低，也称为 EPDM 热塑性弹性体。它避免了交联剂的毒性，省却了多种配合剂；废品废料可回收加工。其密度为 0.88～0.97g/cm^3，比 EPDM 橡胶的 1.1g/cm^3 小些；可在 -60～135℃温度范围内使用；硬度范围广，邵氏硬度可在 35～90A 范围调节；对应有拉伸强度 4.4～27.6MPa，拉断伸长率为 330%～600%。TPO 具有良好抗疲劳、耐酸碱与臭氧的性能。因其耐候性好，主要用于汽车配件（汽车用的保险杠和软管等）和建筑密封件（建筑上用的防水密封件，如玻璃板的防振密封衬垫、铝塑门窗的密封条等）。注射加热温度为 180～200℃。模具温度为 15～40℃。注射时成型收缩率为 1.2%。

（3）聚酯系热塑性弹性体（TPEE） TPEE 高分子内有结晶的聚酯硬段部分，又有非结晶的软段部分。TPEE 的拉伸强度大于 30MPa，弹性为工程塑料的 3～6 倍，耐疲劳、耐油、耐化学药品并耐溶剂侵蚀。其使用温度范围宽，为 -50～130℃；且邵氏硬度在 35～80D 范围可调。缺点是不耐热水和强酸。TPEE 的综合性能优良，适用于耐高低温、耐候且有薄壁要求的汽车配件。可制造减振板、密封环和液压软管等。由于绝缘性能好，用于电气开关和接插件的保护罩。TPEE 的注射加热温度为 200～250℃。模具温度为 20～50℃。注射时成型收缩率为 1.0%～1.5%。

（4）聚氨酯热塑性弹性体（TPU） TPU 的高分子硬段由扩链剂（如丁二醇）加成到二异酸酯上形成，软段由聚酯或聚醚构成。TPU 的品种多，性能范围广。其拉伸强度为 25～70MPa。

TPU 的耐磨性非常突出，添加石墨、二硫化铜、硅油和氟化物后，摩擦系数显著降低；撕裂强度高，回弹性好，且耐油；在干燥条件下的最高使用温度为 70～80℃，脆化温度可达 -53℃；用于鞋底、胶轮、手柄、仪表板和密封件等。注射加热温度为 190～240℃。模具温度为 20～40℃。注射时成型收缩率为 0.8%～1.4%。TPU 的改性品种很多，透明级的透光率可达 85%。

（5）聚酰胺系热塑性弹性体（TPAE） TPAE 也是由软、硬嵌段交替组成的多嵌段共聚物。其硬段为聚酰胺 PA；软段为聚酯或聚醚。它的硬段有许多种，例如 PA6、PA66、PA11 和 PA12 等，加上软硬段比例不同，使 PATE 有许多品种和相当宽的性能变化可调配。如邵氏硬度可在 65A～75D 范围调配。

TPAE 的低温韧性好，回弹性高，有良好耐油和耐化学药品性能。TPAE 制品耐磨耗，接触面上压强和线速度的 *pv* 极限值比较高。它有较高的弹性模量和使用温度，可以用于体育用品的球拍和运动鞋，汽车用的软管、减振片、密封垫等，工业上用的传送带和轧辊等。TPAE 的注射加热温度为 200～260℃，模具温度为 20～50℃。

1.1.2 热固性塑料

热固性塑料是指在一定的温度和压力下熔融，保持一定的时间而固化，固化后成为不能熔融、不能溶化的刚硬材料。热固性塑料所用热固性树脂一般采用缩聚法合成，在交联固化中要释放低分子产物。20 世纪 20 年代开始，热固性塑料的成型加工采用压缩模塑（又称压制或热压模塑）和压注模塑（又称传递或压铸模塑）。生产中注塑周期

长，劳动强度高，生产率低。到了 20 世纪 60 年代，热固性塑料出现了注射成型工艺，能实现生产自动化，适合大批量生产。现代注射成型热固性塑料的比例已经超过传统模塑成型。有关热固性塑料的注射成型工艺和模具将在第 13 章中介绍，这里侧重介绍能注射成型的几种热固性塑料。

注射级热固性塑料需专门配制，对原料的要求很高：要求拉西格法流动性大于 200mm，有较好的流动性；还要有较宽的塑化温度范围；物料应在较低温度下能塑化；在料筒内塑化和停留时间内，不能发生固化反应；在料筒温度下保持流动状态的时间应在 10min 以上；需要物料的稳定性好，必要时加入稳定剂，抑制低温时的交联反应；而熔料进入模具型腔后，要迅速固化，以缩短成型周期。

（1）酚醛塑料（PF）　是使用最早、产量最高的热固性塑料。其成本低，易模塑，有低蠕变和良好刚性，耐酸和溶剂，但不耐碱，仅能着暗色，冲击强度差。

以酚醛树脂为基体的酚醛塑料品种很多。木粉充填的酚醛塑料，俗称胶木，成本低且易成型，用于制造普通的低压电气开关。石棉纤维增强的酚醛塑料用于化工防腐和摩擦制动。玻璃纤维填充的酚醛玻璃钢制品，强度高并有良好耐热性和耐蚀性。近年来开发的新品种，有快速固化的酚醛塑料、浅色无氨酚醛塑料和阻燃耐电弧酚醛塑料等。用苯乙烯和二甲苯改性的酚醛塑料，具有良好防霉抗潮性能和较好力学性能。

注射成型的酚醛塑料粉有多种牌号。这类物料的拉西格法的流动性为 130～200mm。其中树脂含量为 45%～55%，充填木粉、矿物粉或石棉。固化制品的弯曲强度为 60～70MPa，有的用于低电压、有的用于注射成型耐热或耐电弧电器的绝缘结构件。也有已挤出造粒的注射物料。这类物料的注射成型收缩率为 0.6%～1.3%，该项指标可以由供需双方商定。模具温度为 160℃，动模比定模高 10～15℃。料筒前部为 80～100℃，料筒后部为 40～60℃；注射压力为 80～150MPa。玻璃纤维增强酚醛塑料用酚醛树脂胶液浸渍玻璃纤维，经烘干成型后切粒。粒料有 3～6 月贮存期。注射成型收缩率为 1.0% 左右。模具温度为 165～180℃。注射压力为 80～150MPa。固化制品的弯曲强度为 80～120MPa。

（2）环氧塑料（EF）　是以环氧树脂为基体的各种复合材料，有良好的力学、化学阻抗和电绝缘性能；工作温度可达 130℃；耐盐水且耐候性好；成型收缩率小；易注射成型各种电工和机械零件。环氧树脂与金属、无机材料和各种纤维有突出的粘结性能，因此用于微电子器件的塑封，并制造覆铜箔的印制电路板。

通常将环氧树脂与潜伏式固化剂等配成胶液，浸渍填料或增强材料，经烘干造粒，用热固性塑料注射成型。注射成型的制品主要用于电气和汽车行业，生产有耐热要求的绝缘件和结构件。料筒温度从 40℃逐渐升至喷嘴为 90℃。模具温度为 150～200℃。

脲、三聚氰胺与甲醛等经缩聚反应，生成含有氨基或酰胺基的树脂称为氨基树脂 AF。添加助剂后称氨基塑料，主要用做粘合剂，其次是涂料和纤维，少量用于塑料制品生产。应用得最多的是脲醛塑料（UF）和三聚氰胺甲醛塑料（MF）。

（3）脲醛塑料（UF）　是以脲甲醛树脂为基体，纤维素为填料，有多种添加剂的塑料，可制成半透明和不透明塑料。其色泽如玉，俗称电玉塑料，容易着色、难燃、电

绝缘性比 PF 好，使用温度为 100℃，用于瓶盖、纽扣、日用品和电工零件，但抗冲击能力差，吸水率高，易吸潮变形开裂。结构复杂的 UF 制品用注射成型。料筒温度从 45℃逐渐升至喷嘴为 110℃。模具温度为 140～150℃。

（4）三聚氰胺甲醛塑料（MF） 是以三聚氰胺甲醛树脂为基体，纤维素为填料，有多种添加剂的塑料。耐水性和耐热性比 UF 好，使用温度可达 150℃；自熄并耐电弧；刚硬且表面有玻璃质感；无毒且不易沾染；但尺寸稳定性和冲击强度低；用于制造杯盘餐具、日用品和电器零件。注射成型时用三聚氰胺甲醛树脂，加入添加剂后用溶剂配制成胶液，一般要再浸渍纤维素等填料，若是玻璃纤维增强 MF，要再浸渍玻璃纤维，然后干燥筛制成塑料粉或者再造粒注射料。料筒温度从 60℃逐渐升至喷嘴为 110℃。模具温度为 165～170℃。

（5）聚氨酯泡沫塑料（PUR，PU） 聚氨酯是由异氰酸脂与多元醇反应合成。聚氨酯有热塑性弹性体的品种（TPUR，TPU）。聚氨酯泡沫塑料制品的密度从 6～1220kg/m^3。采用的原料和添加剂不同，生产方法或工艺条件也不同，可获得性能相差很大的聚氨酯制品。聚氨酯软质泡沫塑料的交联结构最低；硬质泡沫塑料有高度交联结构。

聚氨酯可以制成低密度的泡沫制品，密度为 10～80kg/m^3。软质的低密度泡沫塑料，开孔率达 95%，用于包装、家具和交通工具上的坐垫与靠垫，具有高的拉断伸长率和回弹性，有装饰型、回弹型和阻燃型品种。其生产方法有块状连续法和模塑法。块状聚氨酯泡沫塑料经计量混合搅拌，在移动槽中冷却，批量生产后切割。模塑聚氨酯泡沫塑料制品是间歇生产，在闭合模具中发泡成型，数分钟后脱模。硬质的低密度泡沫塑料有细小均匀泡孔，热导率很低，主要用做建筑物的绝热材料一般现场浇注发泡成型，也有连续化生产，用于保温冷藏、防振和包装。

密度处于 250～1000kg/m^3 范围的聚氨酯泡沫塑料，有较高的硬度和较低的回弹性。可制成高密度的半硬质泡沫塑料、整皮模塑泡沫塑料或硬质泡沫塑料的制品。它们几乎都是以模塑方法生产。半硬质的高密度泡沫塑料在受到冲击载荷时可以吸收高能量，用于汽车和包装的吸振件。整皮模塑泡沫塑料制品在模塑时发泡剂过量充模，又因模具的冷却形成高密度皮层，又称为结构泡沫制品，用于制造汽车的内饰件，如转向盘、把手、仪表板等。硬质的高密度泡沫塑料为刚性材料，模塑的制品具有闭孔结构，压缩强度为 0.11MPa 左右，用于汽车的顶篷衬里、门板内衬，耐热和高抗冲击的机壳和仪器罩。

大量的结构泡沫制品用反应注射 RIM 加工。结构泡沫制品具有皮层-微孔芯-皮层的结构。反应注射工艺是将液体反应性组分通过混合头撞击混合，注入闭合模具，生产制品。RIM 能生产各种弹性或刚性的整皮模塑泡沫制品，用于汽车保险杠、散热器格栅和内饰件，各种器械的外包覆层。反应注射还用来生产聚氨酯非发泡的弹性体制品，并有短纤维或填料增强的品种，具有较高的弯曲强度和硬度，用来制造薄壁构件、汽车结构件（如防护板和挡泥板等）。

（6）不饱和聚酯塑料（UP） 不饱和聚酯塑料在室温下有适宜的黏度，又能在常温和常压下加工成型。用玻璃纤维增强的不饱和聚酯制品，在复合材料工业中应用最多。

此种通用型不饱和聚酯以黏稠状液体成型玻璃钢制品，质轻、强度高，又能在室温下固化，便于手糊法加工船体等大型壳体，因此被应用在航空、船舶和建筑行业。

湿式不饱和聚酯模塑料，用于中高压电器的绝缘结构件。干式不饱和聚酯塑料在室温下不需要特殊条件，可以贮存一年以上，并可在普通的热固性塑料注射机上全自动成型，已有耐热、阻燃和耐漏电等电气绝缘品种。

不饱和聚酯添加玻璃纤维和多种填料，在加工线上连续生产片状 SMC 或块状 BMC 模塑原材料，再经热压模塑固化成各种板或壳类结构件，已用于汽车、建筑和家具等行业。将 BMC 配制成湿式预混料，在专门的 BMC 注射机上，可以模塑成型高强度、高精度、防潮、防腐的制件。

1.1.3　注射用特种塑料

本节介绍注射用特和工程塑料、玻璃纤维增强复合塑料、导电和导磁塑料。

1. 注射用特种工程塑料

特种工程塑料有突出的力学性能和热性能。这些材料的熔化温度高，熔体的黏度高，对注射工艺和注射模有特殊要求。

（1）聚酰亚胺（PI）　它是分子主链中具有稳定的芳杂环结构的聚合物。英文名为 Polyimide，简写为 PI。热固性聚酰亚胺早在 1961 年开始，用做粘结剂，生产薄膜和层压制品。直到 20 世纪 70 年代后才有注射级和挤出级 PI 问世。这里介绍能注射成型的热塑性醚酐型 PI。它表现出优异的耐热和耐低温特性。其分解温度可达 240℃，－180 ~ 200℃下可长期使用。PI 的力学强度高，介电性能优异，且难燃。而且抗蠕变的能力强，耐辐射性能好，有优良的耐油和耐溶剂性能，主要用于汽车发动机的配件、油泵和气泵盖、电子电器用的高温插座和计算机硬盘等。PI 的熔融温度高，熔料的黏度高，温度对黏度影响大，而流动剪切速率影响小，要求注射机的料筒温度能加热到 410℃。注射成型收缩率为 0.5% ~1%，模具温度为 180 ~ 210℃。

聚酰亚胺有很多品种，还有热塑性的注射品种聚醚酰亚胺（PEI）和热固性的聚酰胺酰亚胺（PAI）等。

（2）聚醚酰亚胺（PEI）　它具有优良的力学性能和电绝缘性。由于 PEI 分子主链引入了大量的柔性基团，改善了熔体的流动性；为无定形聚合物，可作为热塑性工程塑料注射和挤塑成型，但耐热性比聚酰亚胺 PI 有些下降；长期使用耐高低温在 －160 ~ 170℃。新开发的玻璃纤维、碳纤维增强品种，有玻璃纤维含量为 10% ~40% 的各种品级，其注射成型收缩率为 0.7% ~0.8%；控制注射机料筒和喷嘴的加热温度为 310 ~ 420℃，模具温度为 100 ~ 175℃。新开发的 PEI/PPS、PEI/PC 和 PEI/PA 等混合塑料，其注塑件广泛应用在电子电气、电机、航空和医用器械等领域。

（3）聚苯硫醚（PPS）分子主链中带有苯环与硫原子交替链结，结构对称、规则，为高结晶度的热塑性塑料。其强度和硬度均较高，但冲击强度低下，阻燃性好，吸水率极低。纯 PPS 熔体的黏度低，而与无机填料、增强纤维的亲和性以及与其他聚合物的相容性好；以玻璃纤维增强后，会大幅度提高冲击强度，可配制成许多改性的品种和各种

混合塑料。

30% ~65% 玻璃纤维增强 PPS 在较宽的温度范围内有很好的力学性能和电绝缘性能。玻璃纤维增强 PPS 的注射温度为 310 ~350℃，熔体黏度中等，且对流动剪切速率不敏感。模具温度为 135 ~160℃，温度高使结晶充分，提高制品质量。制品的热变形温度为 265℃左右，连续使用温度为 200 ~240℃；在电子电器产品上用做连接器和结构件。其成型收缩率为 0.2% ~0.5%，制品的尺寸稳定性好，可精密注射成型。PPS/PTFE 改进了润滑性和耐蚀性，可以制作齿轮等传动件。PPS/PA 改善了熔体的流动性，制品具有高韧性。

（4）聚醚醚酮（PEEK） 耐高温、阻燃和耐辐射突出的 PEEK，由英国 Victrex 公司于 1982 年推出，商品名为 Victrex PEEK，为结晶型热塑性塑料。纯 PEEK 的弯曲弹性模量为 3.94GPa；玻璃化转变温度为 149℃；热变形温度（1.8MPa）为 160℃；在 -65℃低温下仍能保持常温下的冲击强度。纯 PEEK 的连续使用温度虽与聚酰亚胺 PI 相当，但成型加工性和耐高温水解性能优于 PI。PEEK 的注射温度为 350 ~400℃。其熔体黏度与聚碳酸酯相当，黏度随剪切速率增加而逐渐下降。模具温度为 165 ~190℃，制品有较高的结晶度。

30% 玻璃纤维增强的 PEEK 制品，连续使用温度提高到 240℃，弯曲弹性模量为 8.87 ~11.3GPa。该公司 2002 年推出耐热 PEEK2HT 的品种，玻璃化转变温度为 157℃，熔点为 374℃，可用于注射成型；温度高于 300℃时，能保持良好的力学和物理性能。各种矿物充填改性和玻璃纤维增强的品种，弯曲弹性模量能高达 15GPa，用标准消毒方法 250 次而不降解，用做承受高温下传动的链条零件、医疗器械和密封件。

聚砜类塑料是指大分子链上含有砜基和芳核的聚合物。它包括下述的三个品种：聚砜（PSF）、聚醚砜（PES）和聚芳砜（PASF）。其中 PSF 产量最大，应用最广。

（5）聚砜（PSF 或 PSU） 它是以双酚 A 和 4,4'-二氯二苯砜为原料，经缩聚反应制备的热塑性工程塑料。其耐热性和抗水解性能优良，高温下对酸碱和热水稳定，可在 -100 ~150℃温度范围内长期使用。PSF 为无定形聚合物，成型收缩率为 0.6% ~0.8%，制品半透明。注射机料筒和喷嘴加热温度高达 320 ~390℃。熔体黏度高，其流动性对温度敏感，对注射压力和流动剪切速率不敏感。模具温度宜为 90 ~150℃，对成型长流程及复杂制品的模具取较高温度。

PSF 为电子电器领域内理想的绝缘材料，又可在汽车制造和精密机械中取代金属，适用于需蒸煮的医疗器械和家用器具。ABS/PSF 混合塑料材质坚韧、耐高温。PSF 有玻璃纤维增强的刚硬品种。

（6）聚醚砜（PES） 聚醚砜由英国 ICI 公司于 1972 年开发成功，商品名为 Victrex。其大分子主链由砜基、醚基和亚苯基组成；刚性、强度和耐热性大都介于 PSF 和聚芳砜 PASF 之间。注射料筒温度达到 300 ~360℃；模具温度为 110 ~130℃。PES 为无定形聚合物，成型收缩率为 0.6% ~0.7%；在 180℃高温下连续使用，制品尺寸稳定；耐化学性和耐应力开裂在无定形塑料中是优异的。PES 与 PSF 共聚物，具有较好流动性。该共聚物具有比聚砜更高的热变形温度；比聚醚砜更低的吸水率。其组分含量不同

有不同品种，也有玻璃纤维增强的品种和碳纤维改性导电品种。其电绝缘性优良，又具有阻燃性。在电子电器行业中，PES 用做绝缘的零件。PES 刚强、耐热，在航空、机械、汽车、医疗器械和厨房用具等领域都有应用。PES 有很好的折射率，可用于照明和光学器材的零部件。

（7）聚芳砜（PAS，PASF）　又称为芳香族聚砜。PAS 最早由美国 3M 公司于 1967 年开发。其大分子主链含有大量的联苯结构，刚性比 PSF 和 PES 进一步提高；熔融温度和熔体黏度更高，加工更困难；注射料筒温度达到 320 ~ 450℃；模具温度为 230 ~ 260℃。PAS 为无定形聚合物，成型收缩率为 0. 8%。与聚砜 PSF 相比较，PAS 的强度和耐热性有明显提高。其拉伸强度提高 25%；耐热温度由 150℃增加到 260℃，在 300℃下可短期使用。PAS 的硬度、耐磨性和耐蠕变性能都有提高；耐酸碱及水蒸气性能优良；对燃料油、烃油、硅油及氟利昂等呈现稳定；但不耐某些极性溶剂，例如二甲基甲酰胺及丁内酯等。在电子电器行业，PAS 用于高等级绝缘的零件。PAS 与四氟乙烯或石墨共混，可制造高负载和高温轴承。

（8）液晶聚合物（LCP）　液晶聚合物是指在一定条件下能以液晶相态存在的聚合物，其英文名为 Liquid Crystal Polymer，简称 LCP。LCP 是指聚合物的一种状态。在此种状态下，聚合物分子排列的序列介于结晶固体和各向同性液体之间。它一方面具有流体的很好的流动性，另一方面又具固体分子排列的很强的方向性。用注射成型的是热致液晶聚合物，是一种因温度变化而呈现液晶性能的聚合物。

热致液晶聚合物 TLCP（Thermotropic Liquid Crystal Polymer）依靠自身分子内的刚性链的高度取向起自增强作用，有很高的强度和模量，近年来，已用于高档精密的接插件的制造。

TLCP 用于接插件生产，制品的尺寸稳定性优异，能承受电子元器件组装时波峰焊或直流焊的热作用，而且有低的吸湿性和线胀系数，又有良好的抗蠕变性能。各公司生产的 TLCP 结构有所不同，按材料的热变形温度 HDT 大致分成三类。Ⅰ类如 Xydar，其热变形温度 HDT = 260 ~ 350℃，注射温度为 400 ~ 427℃；Ⅱ类如 Vectra，其 HDT = 230 ~ 260℃注射温度为 280 ~ 285℃；Ⅲ类如 Rodran，HDT = 180 ~ 220℃。Ⅰ类品种可在 240℃连续使用 10 万 h。最高使用温度为 350℃。它的耐锡焊性最好，在 300 ~ 340℃下可经受 60s。Ⅱ类的耐锡焊性也很好，在 260 ~ 280℃为 10s；而且耐低温性能优异，在 - 196℃下拉伸强度不变，缺口冲击强度保持常温的 70% 以上。未充填的 PLCP 在 23℃浸入水中的吸水率为 0. 08%；线膨胀系数在流动方向上为 $<1\times10^{-5}$/℃，在垂直流动方向上为 $(5\sim9)\times10^{-5}$/℃。在室温下未充填 TLCP（Vectra A950）的初始弯曲模量为 6. 9GPa，经 150h 后蠕变弯曲模量为 6. 1GPa。经玻璃纤维增强后的初始和蠕变模量均高于 30% 玻璃纤维增强的 PBT。

TLCP 用于接插件生产是由于在注射成型时有良好的流动性和较小的成型收缩率，适合成型薄壁和尺寸精度高制品。Ⅰ类液晶的熔体黏度与一般聚乙烯和聚丙烯相当；Ⅱ类液晶的黏度与聚酰胺 66 相近。Ⅲ类的黏度更小。液晶的成型收缩率很低，添加了玻璃纤维后垂直流动方向的收缩率小于 0. 4%，沿着流动方向的收缩率更低。

大量的 TLCP 由玻璃纤维增强、碳纤维增强或无机物充填。增强和改性改善了某些力学性能，也降低了物料成本。TLCP 制品能黏结和超声波焊接，是优秀电子电气绝缘材料，但注射时需高温熔融并需 100℃以上的模具温度。

（9）聚芳酯（PAR） 聚芳酯又称为芳香族聚酯或聚酚酯，是分子主链上由芳香环和酯键构成的热塑性塑料，英文名称为 Polyarylate。PAR 为无定形透明聚合物，透光率可达 87%；弯曲强度为 95 ~ 115MPa；有良好的抗蠕变、抗冲击和耐磨性能。PAR 的玻璃化转变温度为 193℃；热变形温度为 175℃；热分解温度为 443℃；阻燃性好，氧指数为 36. 8；成型收缩率小，仅为 0. 05%；线胀系数小，成型制品的精度高；耐焊锡性能好。

PAR 具有一定的极性，在高频下的绝缘性受到影响，但在中低频范围内有优良的电绝缘性能；电性能受温度和湿度的影响小，耐电弧性好，因此用于注射成型电气接插件和开关类制品、汽车和医疗器械上耐热的透光或照明的制件，也用于高温条件下工作的小型叶轮和壳体，及传动零件。

PAR 的熔体黏度很高，是聚碳酸酯熔体黏度的 10 倍，而且熔体的流动接近牛顿流体，黏度受剪切速率影响很小，加上物料熔融温度范围窄，注射加工困难，一般需加入热稳定剂（常用亚磷酸三苯酯）；料筒温度高达 280 ~ 350℃，模具温度控制在 120 ~ 140℃；物料在加工前需长时间高温干燥处理。

2. 玻璃纤维增强复合塑料

（1）纤维增强复合塑料 纤维增强塑料的基体是热固性或热塑性塑料，用纤维材料充填。通常基体的强度较低，而纤维填料具有较高的刚性但呈脆性。两者复合得到的增强塑料，其纤维承受了很大的载荷应力。基体树脂通过与纤维界面上的剪切应力，支承了纤维并传递了外载荷。

热固性纤维增强塑料略写成 FRP（Fiber reinforced plastics）；热塑料纤维增强塑料略写成 FRTP（Fiber reinforced thermoplastics）；若用玻璃纤维增强则加前缀 G，例如 GFRP、GFRTP；如果用碳纤维增强则加前缀 C；用硼纤维则加前缀 B；用芳纶聚酰胺纤维（Kevlar）增强则加前缀 K。

增强塑料以玻璃纤维占使用优势，其品种很多。无碱玻璃（E-Glass）为常用普通纤维。其碱金属氧化物含量很低，具有优良的化学稳定性和电绝缘性。高强度玻璃纤维（S-Glass）含有镁铝硅酸盐等成分，具有比 E-Glass 纤维高 10% ~ 50% 的强度。由于化学成分和生产工艺的不同，还有高模量、中碱和高碱等各种玻璃纤维。碳纤维具有较大的刚性和优良的耐蚀性，常用于增强热固性塑料。硼纤维本身是钨丝和硼的复合材料，具有较高的弹性模量，但纤维较粗且制造成本高，常用环氧树脂作为基体。低密度的芳纶纤维国内已经制造并使用，它用于承受拉应力的缆绳和承力构件。常用纤维的性能见表 1-1。各种纤维属弹性材料，应力-应变属性基本上是一条直线。

表面处理是在纤维表面涂覆表面处理剂。表面处理剂包括浸润剂及一系列偶联剂和助剂。偶联剂能在纤维与基体树脂间形成一个良好黏合界面，从而有效地提高两者的黏结强度，也提高了增强塑料的防水、绝缘和耐磨等性能。

表 1-1　常用纤维的性能（平均值）

纤　　维	密 度 /g · cm^{-3}	直　径 / μm	拉伸模量 / GPa	拉伸强度 / MPa	热膨胀系数 / ℃$^{-1}$
无碱玻璃纤维(E-Glass)	2. 55	6 ~ 13	75	2000	5×10^{-6}
高强度玻璃纤维(S-Glass)	2. 49	5 ~ 10	85	4500	2.9×10^{-6}
高模量碳纤维(HM-Carbon)	1. 85	6 ~ 8	400	2000	$\sim 1.5 \times 10^{-6}$
高强度碳纤维(HT-Carbon)	1. 80	5 ~ 9	220	3000	$\sim 1.5 \times 10^{-6}$
硼纤维(Boron)	2. 60	100 ~ 140	400	3400	8×10^{-6}
芳纶纤维(Kevlar 49)	1. 44	7. 5 ~ 12	140	3100	—

纤维增强塑料的性能主要取决于纤维品种和性能；取决于纤维的含量，常用纤维含量为 10% ~80%；还取决于纤维的长短，连续长纤维与短切纤维的增强作用有差异；也取决于纤维在基体中的取向和排列。另一方面，基体树脂的种类和性能，也决定了增强塑料的工作特性和所适用的环境条件。增强塑料成本取决于纤维和树脂的成本。

热固性玻璃纤维增强塑料的基体常用不饱和聚酯和环氧树脂等。常用模压工艺生产模塑增强制品。纤维在垂直模压压力的平面上，呈二维取向和排列。有长纤维的单向取向；有长纤维的相互垂直的双向取向；有短纤维在平面上的随机取向和排列。

纤维增强材料为分散相，基体为热固性树脂或热塑性塑料，被用来制造各种结构制品。玻璃纤维增强不饱和聚酯的玻璃钢，早已用来生产贮罐容器、管道、叶片和冷却塔等。它们常用机械缠绕纤维，人工手糊成型。现代建筑、汽车和电器等各邻域，需大批量地高效生产各种纤维增强的塑料制品，已大量应用了片状 SMC、厚片 TMC 或团状 BMC 的预玻璃纤维增强塑料，注射成型各种形状复杂、精度高的高强度模压制品。其中团状 BMC 的预制玻璃纤维增强塑料可以注射成型。

（2）玻璃纤维增强热塑性塑料　热塑性玻璃纤维增强塑料的基体有 PP、PA、ABS、POM、PC 和 PBT 等，主要应用注射工艺生产短纤维增强的注射成型制品。常用无碱玻璃纤维（E-glass），其密度为 2. 55g/cm^3；直径为 6 ~ 13μm；拉伸模量为 75GPa；拉伸强度为 2000MPa；线胀系数为 5×10^{-6}℃$^{-1}$；直径为 10μm；长径比为 25 左右。纤维经表面处理剂涂覆，与基体塑料形成良好黏合界面。大多数的注塑件具有复杂的各向异性，主要为单向取向，也有单向和双向取向的组合。表 1-2 为 PA66 单向模塑件的力学性能。

表 1-2　PA66 单向模塑件的力学性能

材　　料	纤维含量(质量分数,%)	密度/kg · m^{-3}	拉伸强度/GPa	拉伸模量/GPa
PA66	—	1140	0. 07	2. 8
PA66/玻璃	0. 40	1460	0. 02	11. 2
PA66/玻璃	0. 40	1340	0. 28	24. 0
PA66/玻璃/碳	0. 20C/0. 20G	1400	0. 24	20. 0
PA66/玻璃珠	0. 40	1440	0. 09	5. 6

纤维的含量对增强塑料的性能有直接的影响。纤维的含量越高，强度和刚度提高，但呈脆性，同时也降低了热膨胀性和吸水率。表 1-3 列举了增强 PA66 中玻璃纤维含量对性能的影响。

表 1-3 增强 PA66 中玻璃纤维含量对性能的影响

性 能	纤维含量(质量分数,%)						
	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
密度/kg·m^{-3}	1140	1210	1280	1370	1460	1570	1700
拉伸强度/GPa	0.07	0.09	0.13	0.18	0.21	0.23	0.24
拉断伸长率(%)	60	3.5	3.5	3.0	2.5	2.5	1.5
弯曲模量/GPa	2.8	4.2	6.3	9.1	11.2	15.4	19.6
热膨胀系数/10^{-6}℃$^{-1}$	90	37	32	30	29	25	22
吸水率(24h)(%)	1.6	1.1	0.9	0.9	0.6	0.5	0.4

玻璃纤维增强热塑性塑料的熔体黏度高，流动充模的流程比小。熔体对成型机械和注射模有较强的磨耗。注塑件各向异性，故有较大的翘曲变形。制品的熔合缝区的力学性能比无缝材料低许多，故制品设计必须遵循壁厚一致和结构对称原则。模具浇注系统设计时，应减少熔合缝并使熔合缝相互错开。

(3) 块状的模塑复合塑料 (BMC) BMC (Bulk Molding Compound) 以不饱和聚酯为基体，所用玻璃纤维有短切散丝或纤维毡。纤维长度为 6mm 左右，纤维含量为 15% ~30%，配以稀释剂、阻聚剂、交联剂和引发剂，控制模塑料的黏度、交联固化和贮存期。用量很大的填料有碳酸钙、水合氧化铝、高岭土、滑石粉和粉状聚乙烯等。

BMC 模塑料用液浆在混合机中进行混料搅拌，然后烘干捏合成团块，或者挤出成条状。这些湿式的预混料，需密封包装，供压制模塑成型。

BMC 模塑料有两种方法成型：

一种是用热固性塑料的成型模具和液压机模压成型。经计量的模塑料置于型腔中，加热、加压固化。也可用压铸成型，模塑料置于加料室，加压加热后由浇注流道注入型腔，可压铸有金属嵌件的较高精度的制品。

另一种方法是注射成型，生产率高，制品精度高，但需要用 BMC 料的专用注射成型机。螺杆长径比小，料筒的调节温度在 60℃以下，还要有强制输送团块料的加料装置，模具须加热和排气，保证物料流动和固化。玻璃纤维增强塑料对模具和成型机的零件有强烈的摩擦和磨损，模具和零件必须用耐磨钢材制造。BMC 模塑料的成型收缩率小于 0.5%，可注射成型尺寸精度高，凸台和开孔多、有嵌件的复杂结构件。

3. 导电和导磁塑料

(1) 导电塑料 复合型导电塑料是导电材料填充在塑料中的复合材料。纳米导电塑料是用纳米级的导电材料填充，提高了复合型导电塑料的性能。结构型导电塑料是高导电的高分子材料，由聚合物分子结构提供有导电能力的载流子。这里只介绍复合型导电塑料。

常用电阻值来衡量导电塑料的导电性。金属材料的体积电阻率一般在 $10^{-5}\Omega \cdot cm$ 以下。表 1-4 介绍了复合型导电塑料的分类、组成及应用。

表 1-4 复合型导电塑料的分类、组成及应用

材料分类	基体材料	填料	应 用 实 例
绝缘塑料 ($>10^{10}\Omega \cdot cm$)	塑料、橡胶	绝缘材料	各种电气绝缘材料

（续）

材料分类	基体材料	填料	应 用 实 例
半导体性塑料（$10^{7}\sim10^{10}\Omega\cdot cm$）	硝基橡胶	金属氯化物	静电记录纸、感光纸
防静电塑料（$10^{4}\sim10^{7}\Omega\cdot cm$）	塑料、橡胶、合成纤维	炭黑、金属粉末、碳纤维、金属纤维	静电消除器、医用橡胶制品、地毯、印刷辊、纺织轮
导电性塑料（$10^{0}\sim10^{4}\Omega\cdot cm$）	塑料、橡胶	炭黑、金属粉末、碳纤维	弹性电极、室外电气设备
高导电性塑料（$10^{-3}\sim10^{0}\Omega\cdot cm$）	塑料、橡胶、环氧树脂	炭黑、金属粉末	导电的涂料、导电橡胶、导电胶黏剂

复合型导电塑料质轻，成型加工容易，导电性能可调，成本较低，已有较多应用。下面按填料和纤维充填形态分别介绍。

1）导电填料充填的导电塑料。导电填料有碳系、金属分散系和导电氧化物。

碳系填料中，石墨因受粒度影响，制得导电塑料的体积电阻率较高（$10^{2}\sim10^{4}\Omega\cdot cm$），较少采用。应用得最多的是炭黑。炭黑价廉品种多，对导电要求适应性强，电阻率可在较大范围（$10^{0}\sim10^{8}\Omega\cdot cm$）内调整。炭黑的粒径为 30～100nm。粒度越细，粒子的比表面积越大，分散后粒子的间距越小，导电性越好。高密度聚乙烯/炭黑和聚对苯二甲酸乙二醇酯/炭黑是常见的导电塑料。

电位器是重要的电子元件。碳膜电位器中的电阻体是将酚醛树脂与炭黑或石墨拌成导电浆料，用丝网印刷或涂抹在酚醛纸胶板或环氧玻璃纤维板表面，然后经加热交联固化制成的。用新型导电塑料制造电位器上的电阻体，其耐磨性好，寿命长，动态噪声小，功率大。这种导电塑料是将炭黑或石墨掺入酚醛或环氧等热固性树脂，经模压固化，或覆于瓷基板或塑料基板上固化制成。也可将碳纤维等导电物质掺入聚酯或聚酰胺等塑料制成。

金属填料用银粉或金粉，可获得特别高的电导率，但价格昂贵。铜粉或铝片被经常使用。金属粉末在塑料中形成链状的导电通道比较困难。金属粉末的体积分数达到 40%～50%，才会使复合塑料的电阻明显下降。体积电阻率在 $10^{4}\Omega\cdot cm$ 以下才成为导电塑料。环氧树脂/铜粉导电塑料是常用的品种。

金属氧化物能高效地赋予塑料导电性。例如氧化锌晶须，微晶体上有针状晶须结构，形成导电通道。10%～30%（体积分数）的金属氧化物与 PP 复合，其体积电阻率为 $7.1\times10\Omega\cdot cm$，比相同量的金属粉充填塑料的导电率低一个数量级。

2）纤维充填的导电塑料

① 碳纤维作为导电填料，其导电能力介于炭黑与石墨之间。用沉积聚合工艺可使碳纤维的导电性能增大 100 倍。碳纤维对导电塑料有力学增强效果。ABS/碳纤维是常见的导电塑料。它用直径 7mm 的聚丙烯腈基碳纤维，纤维密度为 $1.7g/cm^{3}$，拉伸强度为 2800MPa，纤维的体积电阻率为 $1.8\times10^{-3}\Omega\cdot cm$，短切成 3cm 或 6cm。当碳纤维的体积分数达到 2% 时，复合塑料就成为导电体。纤维长度提高和表面处理时间延长，都有利于提高导电性。

② 金属纤维填充的导电塑料，主要用于电磁屏蔽制品。金属纤维在塑料中形成链状导电通道概率较大。金属纤维在塑料基体中形成均匀的导电网络。较少的填充量即可获得较好导电性能。纤维的长径比越大，导电或屏蔽的效果越好。铝或铝合金纤维的密度低，导电性虽好但易氧化；金和银纤维的电性能好；镍纤维的抗氧化性好，但价格昂贵。常用的是不锈钢纤维，其直径为 7μm，与 PC 或 PS 等基体复合，充填量为 5% ~ 10%（体积分数），能达到 40dB 的屏蔽效果；也被常用价格较便宜的黄铜纤维。

（2）磁性塑料　磁性塑料（Magnetic Plastics）可分为复合型和结构型两类。结构型磁性塑料目前尚处于探索阶段，只限于十几种高分子磁性材料，有的含金属原子；复合型磁性塑料，是无机磁粉添加到聚合物中混合而制成的硬质磁体。塑料作为磁性体的胶黏剂。混炼造粒后必须在一定外加磁场下成型为所需制品。

复合型磁性塑料的基体，选用熔体黏度低、热稳定性好和力学性能良好的热塑性或热固性塑料。常用的热塑性塑性塑料有聚丙烯 PP、聚乙烯 PE、乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 EVA、聚苯硫醚 PPS、聚对苯二甲酸丁二醇酯 PBTP、聚酰胺（PA6、PA66、PA12），混入磁粉后，主要用注射方法，也有用挤出或压延方法成型磁性塑料制品；常用的热固性塑料有环氧树脂 EP 和酚醛树脂 PF，混入磁粉后，用压制法成型。

所用磁粉有稀土类和铁氧体类。稀土型磁性塑料的磁性高，是电子电气领域不可缺少的材料，但价格高，产量不大，现大多用 PA、EVA 和 EP 为基体。用稀土元素与过渡金属元素 Zr、Hf 和 Nb 等，按比例组成稀土类合金磁粉充填。

常用的是铁氧体磁粉，制成铁氧体类磁性塑料。铁氧体磁粉一般为钡铁氧体（$BaO \cdot 6Fe_2O_3$），和锶铁氧体（$SrO \cdot 6Fe_2O_3$）。其平均粒径为 1.0 ~ 1.5μm。铁氧体类磁粉的质量分数为 80% ~90%，应用得最多的胶黏剂是 PA6。

与烧结的磁铁一样，磁性塑料也有各向同性和各向异性之分。在相同的配方下，各向同性磁性塑料的磁性仅为各向异性磁体的 1/3 ~ 1/2。对注射模具施加高能磁场，是获得各向异性的磁性塑料制品的方法。在磁性塑料熔体注入模具前 0.5 ~ 1.5s，就使磁场线圈通电。磁性塑料注射成型制品的配方中除磁粉外，还有增塑、稳定和润滑等添加剂。

磁性塑料制品具有磁铁和塑料的双重性能，加工方便，成本低廉。铁氧体磁性塑料与传统的铁氧体磁性体和磁钢相比，密度较小，能成型形状复杂、薄壁或带嵌件的制品，但磁性较差。磁粉充填过多，会影响制品强度。铁氧体磁性塑料生产技术成熟，广泛地应用在电子电气、文具和玩具等领域，例如电冰箱和冷藏库的密封件、传真机和复印机的磁性零件。另外，还有一类磁性橡胶制品，具有磁性和橡胶的高弹性，它由磁粉、橡胶和助剂配制和成型，除用于磁性密封片和衬垫外，还广泛用于办公用品、音像电子产品和仪器仪表中。

1.2　塑料及其制品的性能

本节介绍的性能有力学性能、热性能、化学阻抗性能、渗透性、阻燃性、耐候性、

电性能、光学性能、摩擦磨损和硬度，侧重于介绍性能的测量指标、测试技术，有助于合理选择材料和分析塑料制品的失效形式，进而拟订塑料制品的性能指标和测试方法。

1. 力学性能

塑料件受到各种载荷时的应力分析，通常可参照金属材料的力学分析方法。但由于塑料材料性能的特殊性，在长期静载荷作用下，塑料的应变行为和塑性破坏，对时间和温度有明显的依赖性。在塑料制品的工程设计中，必须考虑静载荷下的形变行为和屈服现象，此外，还必须考虑塑料件对冲击载荷的响应特性。

（1）静载荷下的形变行为

1）应力与应变　在静载荷下塑料制品的弹性和塑性形变，会改变塑料件的形状和尺寸。为防止塑料制品在使用寿命期限内变形失效，首先应了解影响塑料力学性能的因素。

应力-应变行为是静态载荷下塑料力学性能的最重要特征。由于塑料品种的多样性，更因为塑料制品对环境、工作条件及加工工艺的依赖性和敏感性，掌握塑料件所用材料在特定条件下的应力-应变行为，是进行制品力学设计和测试的先决条件。下述五个方面是影响塑料力学性能的主要因素。

① 材料。固态高分子聚合物的力学性能，主要取决于主链的化学结构。共聚、支化与侧基、嵌段与接枝也都影响了化学结构。影响塑料性能的因素有：相对分子质量分布及其分子取向、交联、结晶度与结晶形态、增塑、增韧、增强、聚合物的混合等。

按照材料短期拉伸应力-应变曲线及其断裂形态，塑料可分为脆性和塑性两类，如图 1-1 所示。具有如图 *b*、*c* 和 *d* 拉伸曲线的塑料为塑性材料。*b* 曲线无明显的屈服点。*d* 曲线是典型的塑性材料的拉伸应力-应变曲线，具有比例极限、屈服应力、拉伸强度和断裂伸长率。曲线 *d* 上（1）区是材料失去弹性后，应力开始缓慢变化的屈服区；（2）区为“应力软化”的颈缩范围；（3）区为大应变的冷拉状态区域；（4）区是断裂前“应变硬化”阶段。

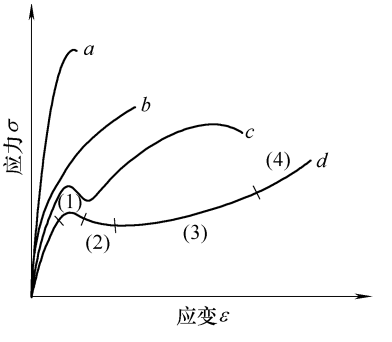


图 1-1　各种塑料的应力-应变曲线

a—脆性断裂；*b*—稍有屈服后断裂
c—颈缩后断裂　*d*—颈缩并冷拉后断裂

图 1-2 是四种塑料的拉伸应力-应变曲线。右图为应变 5% 范围内的放大图。由左图可知常用的 PC、PC/ABS、ABS 和 HIPS，具有 115%、58%、90% 和 40% 的拉断伸长率。

② 温度。与金属相比，塑料是对环境温度很敏感的材料。聚合物的状态转变温度有：玻璃态转化温度 T_g；无定形聚合物的软化温度 T_f；结晶型聚合物的熔点 T_m。在塑料工程中，通常以一定载荷下的热变形温度作为塑料制品使用的环境温度上限。

温度会影响固态聚合物的塑性和断裂形式。图 1-3 是聚丙烯（PP）从 −60℃ 到 100℃ 各状态下的拉伸应力-应变曲线。低温下聚丙烯呈脆性断裂；温度升高后，可观察

到颈缩屈服现象，但断裂伸长率不超过 10%；在高于玻璃态转化温度 T_g 后，出现稳定的颈缩和冷拉现象；在更高的温度下，聚丙烯呈黏流态。

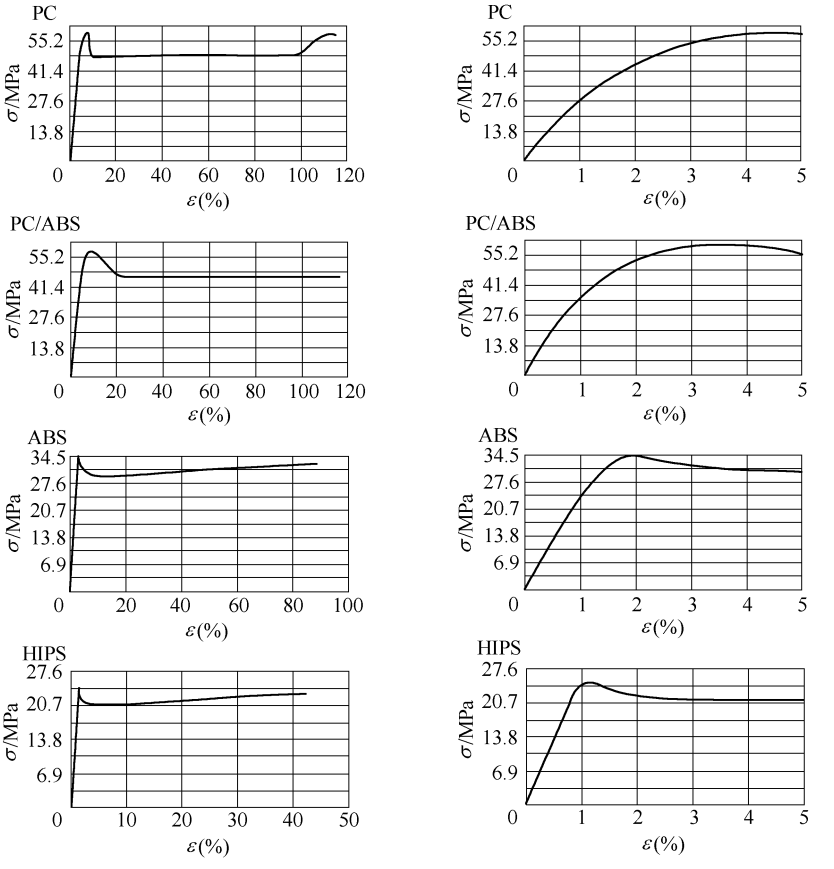


图 1-2　四种热塑性塑料的拉伸应力-应变曲线

③ 时间。在长时期的应力或应变作用下，塑料的响应有蠕变和松弛行为。塑料的力学性能是时间的函数。在间歇应力作用下，还存在应变的回复现象。黏弹性在塑料制品设计和应用中必须考虑。此外，塑料试样在施加载荷时的应力或应变速率也必须关注，应限制在“静态”范围内。例如试样拉伸速度应在 250mm/min 以下。

④ 压力。在气体或液体静压力下，各种塑料的力学行为对一些特殊场合使用的塑料制品至关重要。静压增加了试样实际密度，使材料中的裂纹、疵点和弱点得到密合或压缩。因此，聚合物随着静压增加，

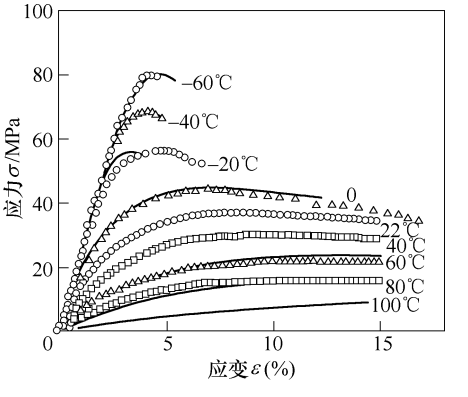


图 1-3　PP 在各温度下的应力-应变曲线

注：应变速率 $\varepsilon = 5.2\%\ \mathrm{min}^{-1}$，$T_g = -20℃$。

弹性模量和屈服应力随之略有增大。

⑤ 加工。塑料制品大多在材料加热后成型。塑料经加热成黏流态或高弹态，在压力下流动变形。冷却固化成型后，塑料制品力学性能有异于塑料原有性能。成型中产生的熔合缝、取向和残余应力影响着制品力学性能。在塑料件中截取的试样与原材料试样的应力-应变行为，有着明显的差异。

力学负载按负载与试样关系，有拉伸、压缩、弯曲、剪切和扭转五种基本类型，如图 1-4 所示。

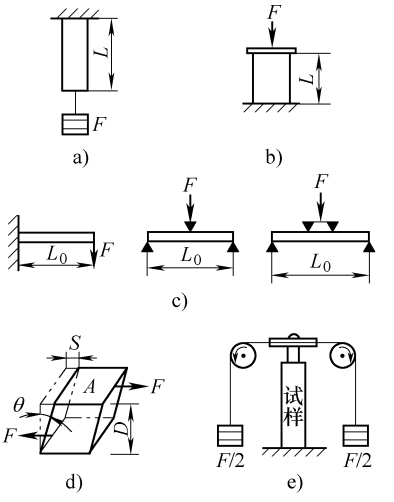


图 1-4　塑料试样的五种基本负载类型

a）拉伸　b）压缩　c）弯曲（悬臂、三点、四点）　d）剪切　e）扭转

比较同一材料在拉伸和压缩负载下的两种应力-应变曲线，脆性 PS 在压缩负载下有屈服点，并有更高的压缩强度和断裂压缩率，许多聚合物的压缩强度是拉伸强度的 1.5 ~ 4 倍。

2）弹性模量。弹性模量是固态塑料刚性的量度。它的重要性在于胡克定律建立的应力与应变的线性关系。

弹性模量是材料于屈服点以下的弹性范围内，在外力作用下所测得材料对变形的阻抗。也就是作用应力 σ 和产生的应变 ε 的比值，即

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1-1}$$

通常存在拉伸弹性模量 E（或 E_t）、压缩模量、弯曲弹性模量和剪切模量 G。

在图 1-4d 所示的剪切单元中，剪切应力 σ_S 和剪切应变 γ 分别为

$$\sigma_S = \frac{\text{剪切力 } F}{\text{剪切表面 } A} \tag{1-2}$$

$$\gamma = \frac{\text{剪切位移量 } S}{\text{两剪切面间距离 } D} = \tan\theta \tag{1-3}$$

在剪切或扭转试验中测得的剪切弹性模量为

$$G = \frac{\sigma_S}{\gamma} \tag{1-4}$$

设单向拉伸期间，试样拉伸方向也即纵向应变为 ε_L，在试样横截面上应变为 ε_T。它们比值称泊松比，即

$$\upsilon = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \tag{1-5}$$

泊松比 υ 的最大理论值为 0.5，常用塑料的 υ 为 0.35 左右。橡胶和软塑料的泊松比接近 0.5。当 $\upsilon = 0.5$ 时，$E = 3G$，剪切模量 G 为最小。一些典型材料的拉伸弹性模量 E_t、弯曲弹性模量 E_b、泊松比 υ、屈服应力 σ_y 和硬度见表 1-5。

表 1-5 典型材料的力学性能

材料	拉伸弹性模量 E_t/GPa	弯曲弹性模量 E_b/GPa	泊松比 υ	屈服应力 σ_y/MPa	硬度
铝合金	70	70	0.34	276	90HBW
结构钢	207	207	0.27	248	200HBW
合金钢	207	207	0.27	1090	220HBW
轴承铜合金	103			124	65HBW
PA66	3.4	1.3	0.32	45	120R
PA66 + 40% GF	6.9	4.1		140	95M
PTFE	1.5	1.5	0.46	36	100R
PPO/PS	2.5	2.4		50	115R
PC	2.4	2.3	0.38	62	118R
ABS	2.1	2.1	0.35	41	100R
PEI	3.0	3.3		105	109M
PEI + 40% GF	11	11	0.37	180	114M
PP	1.5	1.5	0.35	34	90R
PS	2.7	2.8	0.35	50	75M
UHMWPE + 30% GF	5.5	5.4	0.46	55	80R

注：硬度一列，HBW 表示布氏硬度，R、M 为洛氏硬度的标尺。

塑料工程中使用得最多的是拉伸应力-应变试验。现代的万能力学性能测试仪还能进行弯曲和压缩应力-应变试验。区别于金属材料的力学测试仪，它能测试各种温度状态下塑料试样的力学性能。

3）各向异性。注射成型塑料件和合成纤维是各向异性材料。它们在两个相互垂直方向的弹性模量不同。两者之比最高可达 5 ~ 6 倍；有的相差很小，可以忽略。各向异性材料对应存在不同的泊松比。从理论上完整地描述各向异性材料的模量要用繁琐的数学矢量。工程上是依照材料取向的对称性来测量和描述其模量。如图 1-5所示，这类单向取向系统有纵向拉伸模量 E_L、横向拉伸模量 E_T、横向剪切模量 G_{TT}和纵向剪切模量 G_{LT}。G_{LT}也称为纵-横剪切模量。

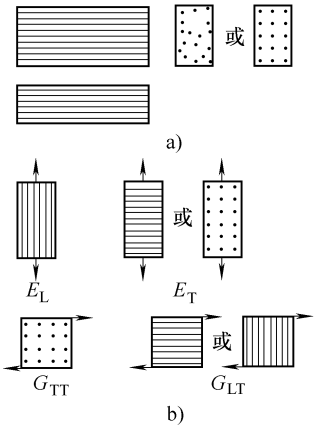


图 1-5 单向取向的弹性模量

a）单向取向材料 b）弹性模量 E_L、E_T、G_{TT}和 G_{LT}

单向取向塑料制品包括有：纤维、薄膜、一个方向热拉伸的薄片、含有一个方向纤维增强的塑料管或板。一些窄长条的注塑件主要是单向取向，但大多数注塑件是复杂的各向异性，为单向和双向取向的组合。

塑料工程中各向异性系统是双向取向，或称平面随机取向。如图 1-6 所示的四个独立弹性模量 E_P、E_T、G_P 和 G_T，说明在 b 图中还有两个对应的泊松比。典型双向取向的塑料制品有：经两个方向拉或吹的薄膜、滚轧加工的板、短纤维在平面上随机取向的复合制品。

4）弯曲弹性模量。常用矩形梁试样的三点弯曲测试方法（如图 1-4c 中所示）测

得。弯曲弹性模量为

$$E_b = \frac{FL_0^3}{4CD^3Y} \tag{1-6a}$$

对应的最大拉伸应力和最大应变为

$$\sigma_{max} = \frac{3FL_0}{2CD^2} \tag{1-6b}$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{6DY}{L_0^2} \tag{1-6c}$$

式中　L_0——两支承点之间距离；

F——在间距 L_0 中间的负载；

Y——测得的 L_0 中央的变形量；

C——试样宽度；

D——试样厚度。

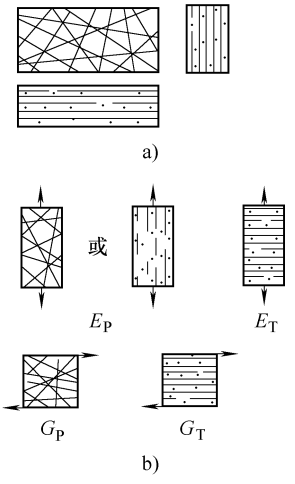


图 1-6　双向取向的弹性模量

a）双向取向材料　b）弹性模量 E_P、E_T、G_P 和 G_T

我国塑料拉伸性能测定相关标准是 GB/T 1040.1 ~ 4—2006、GB/T 1040.5—2008，塑料压缩性能测定相关标准是 GB/T 1041—2008，塑料弯曲性能测定相关标准是 GB/T 9341—2008。

5）影响弹性模量的因素。常用塑料材料的弹性模量大致为 $10^3 \sim 10^4$MPa。影响弹性模量的因素主要有以下几点：

① 聚合物主链的刚性和侧基的极性，使材料具有较高模量。

② 结晶型塑料的结晶度和热固性塑料的交联度高，会使模量有所提高。

③ 塑料取向方向模量高于各向同性的该种塑料的模量；垂直取向方向的模量低于无取向材料。

④ 塑料模量是温度 T 的函数，也是时间 t 的函数。温度升高至 T_g、T_f 或 T_m 以上时模量有很大下落。图 1-7 和图 1-8 展现了几种塑料的弯曲强度和弯曲弹性模量对温度的依赖。蠕变现象的特征是弹性模量随时间推延而下降。

⑤ 填料使塑料模量改变，大致按“混合规律”推断。高模量刚性填料使塑料模量增大；反之，低模量的填料或空气做填料使塑料的模量减小。

⑥ 塑料对于试验速度和应变速率是敏感的。试验加载速度快，模量值略高些。

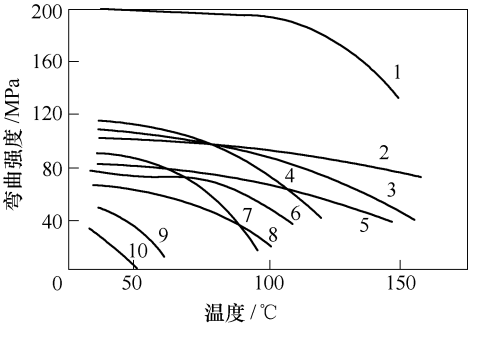


图 1-7　几种塑料的弯曲强度与温度的关系

1—GF 充填 PF　2—EP　3—木粉充填 PF
4—GF 增强 PC　5—PPO　6—GF 增强 POM
7—POM　8—PC　9—ABS　10—PE

（2）屈服现象　在塑料制品设计和使用中，屈服点是个重要参量。屈服条件是静载荷下塑料件设计的依据。塑料件的失效过程中可观察到剪切屈服和银纹屈服。

1）屈服条件。塑性塑料的屈服应变 ε_y 通常在5%～15%范围内。屈服应力 σ_y 取决于聚合物种类是无定形还是结晶型，也取决于温度和应变速率等条件。聚合物在加载超过屈服点后再卸载，其应力与应变表现十分复杂。它既有弹性恢复的滞后，又有永久变形的塑性，还有着明显的时间和温度的依赖性。

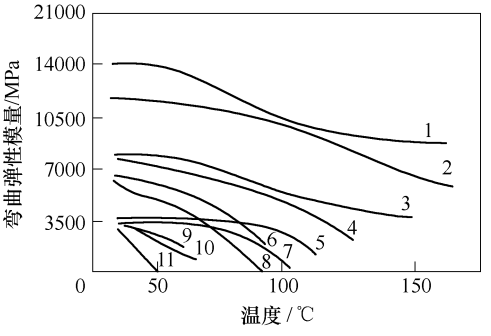


图 1-8 几种塑料的弯曲弹性模量与温度的关系

1—GF 充填 PF 2—EP 3—木粉充填 PF 4—PPO 5—GF 增强 PC 6—GF 增强 POM 7—PC 8—POM 9—ABS 10—PA 11—PE

对脆性塑料或某些塑料的某种受力状态，例如剪切或压缩，在应力-应变曲线上没有屈服点。此时，塑料工程中所需的屈服应力 σ_y，可由近似约定获得。如图1-9所示，一种方法是在应变 $\varepsilon = 2\%$ 时，作应力-应变曲线起始部分的平行线 AB，与曲线1交点 B 的应力可作为屈服应力。另一种方法是对应力-应变曲线2的起始部分和最终部分，作两条切线 OE 和 EC。此两条切线的交点 E 所对应的应力，即为屈服应力。

在静载塑料结构件设计中，应以2%左右的应变和低于屈服点的应力作为制品设计或校核计算的允许值，以保证制品在短时期内的刚性。

2）屈服失效。塑料制件的颈缩和银纹化通常作为受载失效的先兆。塑料件的屈服失效过程一般分为剪切屈服和银纹屈服两类。前者从材料的剪切流动角度，认为塑性形变材料的密度是很少或没有改变；而银纹屈服属于膨胀屈服。两者的微观构象是不同的。

① 剪切屈服。由于几何上的或材料结构上的原因，塑料件上出现塑性变形总是非均匀的，塑性变形仅发生在局部部位。该部位的应力和应变高于其他未进入塑性变形的部位。在其几何上更加削弱后，使应力更集中，变形量更大。而塑性的塑料在拉伸力下出现颈缩后，又由于冷拉而变硬，抑制了应力升高，使塑料件在结构上稳定下来。

塑料件的非均匀塑性变形，可简化成拉伸受力状态下的三种几何形状下的屈服变形模型，如图1-10所示，有圆柱体上的颈缩、矩形薄板上的倾斜细颈和柱体内的剪切带。

图1-10a所示圆柱上的颈缩，在颈缩的三个方向都存在变形速率。圆柱上的颈缩是一种无约束的非均匀塑性变形。

图1-10b所示为薄板上的倾斜细颈。对于宽度比厚度大得多的薄板，与拉力垂直的宽度方向不产生变形。拉力作用下形成局部向里收拢变薄的倾斜细颈。沿着斜细颈长度方向的伸长变形速率为零。倾斜细颈的方向角的理论值 $\beta = 54.7°$。该细颈的上半部分与下半部分不发生剪切错动。

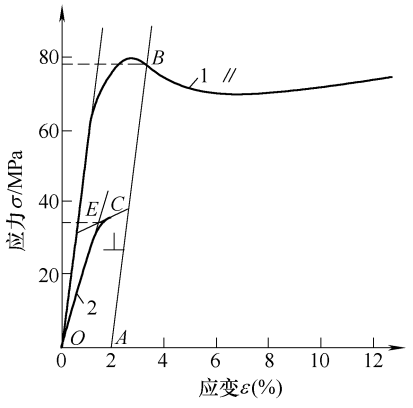


图 1-9　脆性聚合物的屈服应力

1—平行（//）取向方向

2—垂直（⊥）取向方向

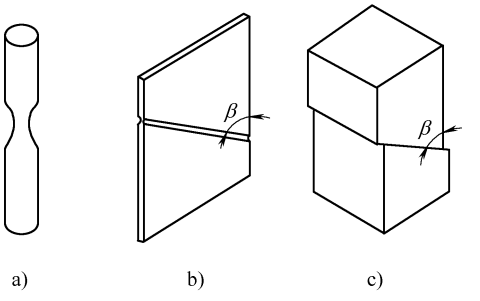


图 1-10　拉伸状态下三种塑性变形模型

a）圆柱上的颈缩　b）薄板上的倾斜细颈

c）柱体内的剪切带

图 1-10c 所示为柱体内的剪切带。在塑料件内的诱发点上，由于简单剪切生成圆盘状的剪切带。在理想的塑性条件下，此极薄的剪切带与拉伸方向成 45°倾角。又经剪切带周边材料的弹性变形调整，形成剪切面。塑料件的横截面不变，但有错动。

② 银纹屈服。一些透明的无定形聚合物和某些结晶型聚合物及环氧树脂，由于应力或环境因素的作用，会在表面或内部出现微小成片银纹带。银纹的界面使光线全反射而出现银色闪光。银纹与裂纹有密切关系，但它不是裂纹。由微纤构成的银纹具有体积膨胀的特性。银纹中含有沿着作用应力方向取向的微纤与空隙相间排列。而普通裂纹中不含有任何高分子材料。银纹化是部分固态聚合物在塑性流动中产生的现象。这些高分子材料宏观的屈服失效、蠕变断裂、疲劳破坏和环境应力开裂前都有银纹化现象。光学和透明塑料制品不允许有银纹出现。

（3）冲击载荷　塑料制品在使用或运输过程中的撞击会使其变形或断裂。冲击失效是高速负载作用下发生的力学现象。瞬时施加的冲击载荷使塑料件具有很高的应变速率。

1）冲击试验和冲击强度。冲击试验是在高速冲击载荷作用下，用于测定材料抗冲击性能的方法。冲击强度是评价材料抵抗冲击能力或判断材料脆性与韧性程度的量度。抗冲击性能是难于准确表征的力学参数之一。即使是用标准试样及标准试验方法，也只能得出在特定条件下只有相对比较意义的试验结果。高分子材料冲击试验的方法有摆锤式、落锤式和拉伸冲击式。

最常见的摆锤式冲击试验有简支梁式（GB/T 1043.1—2008）和悬臂梁（GB/T 1843—2008）两种形式试验。它们的冲击速度为 2.9 ~ 3.8m/s。简支梁试样冲击也称为三点弯曲冲击，是一种高速的弯曲试验。简支梁冲击强度 a_k 的单位为 J/cm^2 或 kJ/m^2。悬臂梁的 a_k 用 J/cm 或 J/m。

这两类试样又分无缺口和带缺口两种。缺口试样的冲击强度反映了材料的抗裂纹扩

展的性能，表 1-6 列有若干塑料带缺口悬臂梁的测试结果；而无缺口试样的冲击强度反映了试样裂纹引发前所吸收的能量。

表 1-6 若干塑料带缺口悬臂梁式冲击强度 （单位：J/m）

塑料材料	冲击强度 a_k	塑料材料	冲击强度 a_k
聚碳酸酯 PC	640 ~ 854	聚酰胺 66	53. 3 ~ 160
硬质聚氯乙烯 RPVC	53. 3 ~ 1070	聚酰胺 6	53. 3 ~ 160
聚苯乙烯 PS	13. 3 ~ 31. 3	聚甲醛 POM	107 ~ 160
高抗冲 ABS	266 ~ 533	聚氟乙烯 PVF	53. 3 ~ 1070
中等冲击强度 ABS	37 ~ 234	聚四氟乙烯 PTFE	107 ~ 215
低密度聚乙烯 LDPE	> 853	聚苯醚 PPO + 25% 玻璃纤维	74. 6 ~ 80
高密度聚乙烯 HDPE	27 ~ 1017	一般常用酚醛树脂	13. 3 ~ 18. 7
硝酸纤维素 CN	267 ~ 273	棉织物填充酚醛	53. 3 ~ 160
乙基纤维素 EC	187 ~ 320	玻璃纤维填充酚醛	53. 3 ~ 1600
醋酸纤维素 CA	53. 3 ~ 298	玻璃纤维填充环氧树脂	10 ~ 30
聚丙烯 PP	27 ~ 107	聚酰亚胺 PI	0. 9

试样被冲断后的飞出功为实际总冲击能的 29% ~ 83% 。因为断裂过程和断裂特征不同而差别很大，所以很难对材料作规律性的评价。目前已普遍采用仪器化的摆锤冲击仪，在冲击断裂过程中，能自动记录试样承受的冲击载荷随时间的变化，从而计算断裂过程所吸收能量。

冲击断裂形式主要分塑性和脆性两大类。冲击下的塑性断裂有明显的屈服现象，有颇大的应变，是在颈缩中断裂的。脆性断裂是一种多裂口断裂，有细小尖片，并有表面光滑的区域。冲击中首批活动裂纹，瞬时转变成不稳定生长的裂缝，触发断裂。无定形聚合物的断裂断面上，除光滑的镜面外，其余为较粗糙的指纹状。结晶型聚合物的断裂断面，多数呈麻纹状态。

落锤式冲击仪能改变落锤重量和高度，能使板状或片状试样开裂或断裂，也适用于泡沫塑料的抗冲击性能分析。它是一种平板弯曲的冲击试验。仪器化的落锤冲击仪，能测出冲击能量，还能获得试样材料的冲击应力-应变曲线。

拉伸冲击试验是在一定温度和拉伸速率下，评价材料撕裂所需能量，适合韧性的塑料薄膜的试样，能在拉伸状态下，较精确地确定材料的断裂强度和拉断伸长率。

2）影响抗冲击性能的因素。塑料试样及制品上，缺口、环境温度和湿度、冲击速度及材料取向会影响抗冲击性能。

① 缺口和应力集中。有缺口塑料件的冲击强度较弱的主要原因是缺口造成了应力集中。塑料件表面的人为缺口或刻痕、塑料件中的裂纹或其他缺陷，都会使冲击强度明显下降。

各种聚合物及其复合材料对缺口敏感性是不同的。表 1-6 所列多种塑料带缺口的悬臂梁的冲击强度可以说明这一点。图 1-11 表明不同聚合物的缺口尖角曲率半径对冲击强度的影响。缺口尖角的曲率半径越小，应力越小，冲击强度越低。

② 温度和湿度。无定形聚合物在温度升高到邻近玻璃态转化温度 T_g 或更高时，冲击强度有很大的提高。结晶型聚合物处于 T_g 以上，比在 T_g 之下有更大的冲击强度。须

注意，塑料制品在低温下呈现冲击脆性，但对不同塑料的影响程度不同。在湿度较高的环境下，吸水率较高的聚酰胺比干燥状态的冲击强度高几倍。

③ 冲击速度。韧性塑料随着应变速率提高，将由塑性断裂转变为脆性断裂。不同聚合物及复合材料对冲击速度的敏感性有差异。聚碳酸酯 PC 和增韧的塑料对载荷速度的敏感性较低。在同样的冲击能量下，高的冲击速度易于使脆性材料断裂。

④ 材料取向。如果冲击力平行于材料取向方向，通常会使冲击强度增加。反之，如果冲击力垂直取向方向，则抗冲击性能变差。塑料件在使用中，其取向对抗冲击性能有害而无利。取向的注塑件在冲击载荷下会在最弱方向断裂。但塑料制品表面具有压缩应力，能有效提高其表面的抗冲击性能。

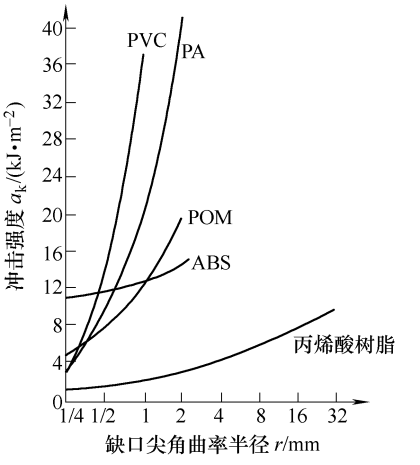


图 1-11　五种聚合物的缺口尖角曲率半径对冲击强度的影响

2. 热性能

以短期热性能、低温下脆化、长时间的热降解和高温加工四个领域进行塑料的热性能的测试研究。

（1）短期热性能　聚合物的短期热性能有熔点、软化温度及力学性能随温度的变化，还有线胀系数和热导率。所指的力学性能有屈服应力、拉伸强度和硬度。所有这些性能的测量已达到相当高的精确度。但是不能以这些短期热性能来推测长时期的老化性能。这些性能被用来比较材料和进行质量控制，并限制材料的应用。

成型的热固性塑料和硫化的橡胶制品已经交联，不存在熔点或软化温度。这些材料有一个分解温度。

拉伸或弯曲的应力-应变试验应该在加热箱中进行，以提供一定温度下的短期的屈服应力、弹性模量和拉断伸长率。绝热的“热箱”也应该可用液态 CO_2 进行低温试验。

热变形温度 HDTUL（Heat deflection temperature under load）或 HDT，是塑料试样浸在一种等速升温的液体传热介质中，在简支梁的静弯曲负载作用下，试样弯曲变形达到规定值时的测定温度。如图 1-12 所示，传热介质常用低黏度的变压器油或硅油。其等速升温的速度为（12℃ ±1℃）/6min。若砝码负载为 W，试样宽度为 b、高度为 t，两支座中心间距离为 L，则试样的最大弯曲正应力为

$$\sigma = \frac{3WL}{2bt^2} \tag{1-7}$$

负荷与试样的几何参数，使试样产生最大弯曲正应力 σ = 1.82MPa 或 0.45MPa。在试样中点弯曲变形量达到 0.21mm 时，此时的温度即为相应应力 σ 下的热变形温度。以上所述是GB/T 1634.1～3—2004 中的塑料负荷变形温度测定方法。对应美国标准 ASTM

D648、德国标准 DIN 53458，国际标准 ISO 75，各标准测得热变形温度值相差不大。ASTM D648 标准中，试样中点下垂量为 0.254mm。表 1-7 所列各种材料的热性能均为 ASTM 标准所测。玻璃纤维增强能改善大多数塑料的高温强度和刚度，热变形温度明显提高。

维卡软化温度是塑料于液体传热介质中，在一定的负荷和一定的等速升温条件下，试样被 1mm² 针头压入 1mm 时的温度。我国相关标准是 GB/T 1633—2000《热塑性塑料维卡软化温度（VST）的测定》。在使用负荷 1000g 时与国外 ASTM D1525 和 ISO 306 标准相似。本方法适用于质量控制和材料热性能比较。对于无定形或低结晶的塑料，此种测试方法排除了软化以前蠕变变形的影响。目前，维卡试验方法还被用于橡胶密封垫的热性能测试。

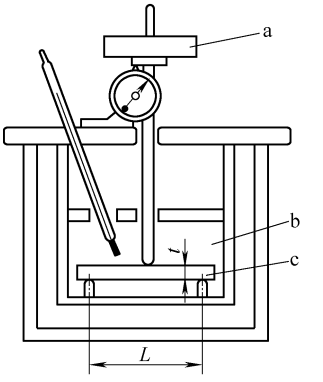


图 1-12　热变形温度测量仪的示意图

a—负荷 W　b—传热介质　c—试样

（2）低温下脆化　在低温下所有聚合物都会增加刚度，减小柔度，无定形聚合物和结晶型聚合物中的无定形形态转变到玻璃态。低温也降低了分子链上结合键的柔度，减小了自由体积。所有这些导致了塑料在低温下的脆化，减小了冲击阻抗能力。

标准的低温下拉伸试验要耗费许多时间。其拉伸模量的数据很难理解。因此设计了一些扭转试验的方法测得剪切弹性模量。例如，对应 ISO 458，ASTM D1043 定义了专门的扭转试样被冷冻变形时的温度。又如：对应 ISO 974，ASTM D746 将截面 0.25in × 0.075in（1in = 25.4mm）试样的自由端伸出 1in，浸泡在低温液体中，在控制温度下降过程中，对试样进行冲击。当 10 个试样中有 5 个被击断时，认定为脆化温度。我国相关标准是 GB/T 5470—2008《塑料　冲击法脆化温度的测定》。它仅适用于软质塑料。

（3）长时间的热降解　在长时处于高温下，一些原因促使塑料产生不可逆的降解：被空气中的臭氧攻击而氧化；增塑剂添加成分的挥发；由于较快的蠕变速度和较差的抗疲劳性，引起聚合物分子链的逐步断裂。一些聚合物的分子结构中存在敏感的弱点，例如支链、不饱和的双键、聚合时剩余的引发剂、活性的氢原子或不稳定的分子链的始末端。这些弱点是氧、臭氧、潮气、各种辐射的射线或者热的攻击点。热降解的结果几乎都是高分子链的断裂，导致平均相对分子质量的下降。在这热解聚过程中，分子链束的始末端越来越多，使材料的热稳定性越来越差。当然，每种聚合物在一定条件下有各自的热降解的机理。

各种塑料在较高的温度下长期连续安全工作的合适温度，国外手册上已有 UL 温度指标（Underwriters Laboratories temperature index）。它的全称是无负载下连续安全工作的额定温度。试样在负载作用下，会增加塑料热性能的复杂性。因此，该试验试样要排除力学应力的作用，大量试样要在加热箱中按设定温度保温 60000h（美国 UL746）或 20000h（ISO 2578），再测试电性能（E）和力学性能（M）为原有性能 50% 时的 UL 温度。各种塑料的热性能见表 1-7。其中：E 是指仅考虑电性能达到 50% 的合适温度；

$E+M$ 是电性能和力学性能均达到 50% 的工作温度；$E+M'$ 是指电性能和力学性能达标，但不考虑冲击性能。

表 1-7　各种塑料的热性能　　（单位：℃）

材料	玻璃态转化温度与熔化温度 T_g/T_m	热变形温度（1.82MPa）	维卡软化温度（10N）	UL 温度		
				E	$E+M$	$E+M'$
ABS	88～120/—	77～113	—	60	60	60
均聚甲醛	—/175～180	124～136	162	105	85	90
共聚甲醛	—/160～175	85～121	105	105	95	105
聚甲基丙烯酸甲酯	85～105/—	68～99	114	50	50	50
醇酸树脂 TS	—	177～260	—	130	130	130
聚邻苯二甲酸二烯丙酯 TS	—	160～288	—	130	130	130
铸造环氧树脂 TS	—	46～288	—	90	90	90
环氧树脂+30% 玻璃纤维 TS	63～90/—	124～288	—	130	130	130
三聚氰胺甲醛树脂 TS	—	177～199	—	130	130	130
酚醛树脂 TS	—	149～188	—	150	150	150
聚酰胺 66	—/255～265	75～100	240	125	75	85
聚酰胺 66+30% 玻璃纤维	—/260～265	122～255	240	130	130	130
聚碳酸酯	150/—	121～132	155	125	115	125
聚对苯二甲酸丁二醇酯	—/220～270	50～85	—	130	130	140
聚对苯二甲酸乙二醇酯+30% 玻璃纤维	70/260	190～260	—	130	130	130
聚醚酰亚胺	215/—	198	—	170	170	170
聚苯硫醚+30% 玻璃纤维	—/275～285	264	—	220	200	220
聚丙烯	-20/165	49～60	134	65～125	65～125	65～125
聚苯乙烯	74～105/—	76～94	—	50	50	50
聚四氟乙烯	-150/327	<121	—	180	180	160
聚氨酯	—/75～137	70～127	—	120	50	120
硅橡胶	—	>500	—	150～250	140～230	—
低密度聚乙烯	-110/115	<40	—	50	50	50
苯乙烯—丙烯腈共聚物	—/100～120	101～104	—	50	50	50
聚砜	190/—	174	—	150	140	150
脲甲醛树脂 TS	—	127～143	—	100	100	100
硬聚氯乙烯	87/—	60～77	85	50～110	50～110	50～85
聚醚醚酮	—/334	160	—	240	240	—

注：TS 指热固性塑料。

有一种 UL 温度指标是安全的最高连续使用温度 MCUT（Maximum continuous use temperature），在 MCUT 下的空气中，塑料制品使用 100000h，即 11.4 年，对热-氧降解老化有材料性能稳定的安全期。可与表 1-7 上的 UL 温度作比较。各种塑料的 MCUT 与聚合物的合成和混合有关，与塑料配方和加工相关。表 1-8 列出了各品种聚酰胺和酚醛树脂的安全最高连续使用温度。

表 1-8　安全的最高连续使用温度　　（单位：℃）

塑料	MCUT	塑料	MCUT	塑料	MCUT
ABS/中等冲击	70	聚酰胺 PA/反应注射	70	酚醛树脂 PF/发泡	120
共聚甲醛 POM	90	聚酰胺 PA/透明	90	酚醛树脂 PF/玻璃纤维充填,高抗冲	160
均聚甲醛 POM	85	聚酰胺 PA11	70	酚醛树脂 PF/云母和玻璃纤维充填,电工	180
聚醚醚酮 PEEK	250	聚酰胺 PA12	70	酚醛树脂 PF/云母充填,电工	170
聚醚酰亚胺 PEI	260	聚酰胺 PA6	80	酚醛树脂 PF/矿物充填,耐热	185
聚四氟乙烯 PTEF	180	聚酰胺 PA66	80	酚醛树脂 PF/木屑充填,通用	150
共聚丙烯 PP	90	聚酰胺 PA610	70	酚醛树脂 PF/夹玻璃纤维布层压板	150
均聚丙烯 PP	100	聚酰胺 PA612	70	酚醛树脂 PF/夹棉布层压板	105
环氧树脂 EP/通用	130	PA/ABS	70	酚醛树脂 PF/夹纸层压板	90

另外，还有一种短时的热性能测试方法——热重量分析法（TGA，Thermograrimetric analysis）。用热重量分析测试仪，让试样以一定速率升温。降解物质的挥发和汽化，使试样质量损失。例如：PVC 试样在惰性气体或真空中被加热至 275℃，就有汽化的 HCl 析出。随着温度继续升高进一步降解，试样成为不饱和主链、焦炭和微小残片的混合物。此方法可作为聚合物热保护途径研究和质量控制的测试手段。

（4）高温加工　塑料替代金属的重要性能指标之一是最高耐受温度。它包括分解温度、熔融温度和短期耐热工作的温度范围。表 1-9 所列为加热成型时各种塑料加工时的最高温度。

表 1-9　加热成型时各种塑料的最高温度　　（单位：℃）

塑料种类	短期耐热温度范围	分解温度	熔融温度
聚酰亚胺	260 ~ 430	—	—
聚硅氧烷	200 ~ 300	—	—
氟碳树脂类(氟塑料)	150 ~ 250	500 ~ 550	—
聚酰胺-酰亚胺	270 ~ 290	—	340 ~ 390
环氧树脂 TS	80 ~ 250	—	150 ~ 220
聚苯硫醚	250 ~ 260	—	330 ~ 390
酚醛树脂 TS	100 ~ 280	—	150 ~ 230
聚醚砜	150 ~ 200	—	330 ~ 420
双酚 A 型聚砜	170 ~ 200	—	330 ~ 420
三聚氰酰胺	150 ~ 200	—	120 ~ 200
热固性聚酯 TS	65 ~ 200	—	140 ~ 200
脲甲醛树脂 TS	100 ~ 175	—	150 ~ 200
聚酰胺	110 ~ 175	300 ~ 400	260 ~ 290

（续）

塑料种类	短期耐热温度范围	分解温度	熔融温度
聚碳酸酯	80 ~ 150	340 ~ 440	280 ~ 350
聚苯醚	80 ~ 130	—	230 ~ 350
聚丙烯	80 ~ 130	320 ~ 400	200 ~ 300
聚氨酯	80 ~ 250	—	230 ~ 280
聚氯乙烯	70 ~ 110	200 ~ 300	160 ~ 180
缩醛树脂 TS	90 ~ 110	—	185 ~ 225
ABS 与 SAN	70 ~ 105	250 ~ 400	180 ~ 240
聚苯乙烯	50 ~ 100	300 ~ 400	180 ~ 260
ABS/PC 混合物	88 ~ 93	—	280 ~ 350
丙烯酸类树脂	60 ~ 93	180 ~ 280	180 ~ 250
纤维素类	50 ~ 93	—	60 ~ 120
聚乙烯	50 ~ 85	—	160 ~ 240
氯化聚乙烯	-60（低温工作温度）	—	150 ~ 220
聚氨酯	-60（低温工作温度）	—	230 ~ 280
氟硅树脂	-73（低温工作温度）	—	—
聚硅氧烷	-130（低温工作温度）	—	—
氟碳树脂（氟塑料）	-185（低温工作温度）	—	—

注：TS 指热固性塑料。

塑料的分解温度是指在此温度附近降温后，可保持原有的全部性能。表 1-9 中的分解温度是试样在惰性气体中试验确定的。如果在大气中，由于氧的作用而分解较快。聚合物分解过程主要是热能促使结合键断裂，故表中数据与空气中测得分解温度有差异。

耐热性更高的还有聚苯并味唑 PBI，短期耐热可达 600℃以上。用前述的 TGA 方法，在惰性气体里质量损失 5%。倘若在空气中保温 10h，试验达 370℃，有质量损失 5% 。能耐此高温是由于主链上有芳烃的闭环结构，使聚合物的刚性、熔点和转化温度提高。分子链段转动困难而耐热的聚合物，还有聚醚醚酮 PEEK、聚酰胺-酰亚胺 PAI 和聚苯硫醚 PPS 等。

主链上含有非碳的无机原子，也能提高热稳定性，例如聚硅氧烷（为硅和氧结合的分子链）。各种硅油、含硅脂和硅橡胶，虽然化学稳定性差，但工作温度可达 -90 ~ 250℃。由硅橡胶改性的聚二甲基硅氧烷 PDMS，有优良的低温柔软性，玻璃态转化温度 $T_g = -125$℃。

聚四氟乙烯 PTFE 的连续工作温度为 185 ~ 150℃。氟塑料有良好的热稳定和耐低温性能。碳—氟结合的键合能为 461kJ/mol，高于碳-氢的键合能 408 kJ/mol。氟原子比氢原子大，盘旋在碳—碳主链周围起了护套作用。PTFE 是高结晶度的聚合物，结晶熔点为 327℃。平均相对分子质量有（10 ~ 100）× 10^6，380℃时黏度高达 10^{12} Pa · s。PTFE 发生分解温度为 400℃，但在 230 ~ 330℃经 200h 以上也会发生分解，甚至加热温度 150 ~ 220℃并且施加负载，超过 1000 天也会分解。PTFE 不能注射加工，常用烧结方法

成型。氟塑料中聚三氟氯乙烯 PCTFE、全氟（乙烯—丙烯）共聚物 FEP 和全氟烷氧基聚合物 PFA 可以注射成型。

3. 化学阻抗

塑料制品和薄膜的耐蚀性，与材料的吸水性和水解关系密切。

（1）耐蚀性　描述聚合物的这项性能，要用化学试剂浸渍试验方法，需进行范围广又大量的化学试验，要控制一定温度和经历较长的规定时间。取出试样后，要立即作质量和力学性能的测试，也有测量试样厚度的。力学性能主要是测试弹性模量、有缺口的悬臂梁冲击和硬度等。然后与原始试样的质量和力学性能作对比。目前技术手册上绝大多数的塑料耐化学性能数据，是根据国外的 ISO 175 和 ASTM D543 塑料耐化学试剂性能标准测定的。我国对于塑料、玻璃纤维增强热固性塑料的相关测试标准分别是 GB/T 11547—2008、GB/T 3857—2005。大约有 50 种具有潜在腐蚀作用的化学试剂在无负荷作用下，轮流浸渍测试。

被浸渍后的试样有体积膨胀的现象，甚至出现裂纹或/和裂缝。聚合物在化学液体中浸泡，其膨胀过程有两个阶段：第一阶段，可溶的聚合物表面被化学溶剂溶解和吸收；第二阶段，溶液通过聚合物的自由体积而扩散。化学阻抗能力表现在化学溶液在聚合物中的扩散速率，归结于溶液与聚合物产生的各种化学反应。

聚四氟乙烯在强酸、碱和溶剂中有优异的化学稳定性。但溶液或熔融状态的碱金属能夺取 PTFE 中的氟原子，生成金属氟化物，附结在材料表面，从而使 PTFE 表面具有可粘结的特性。如用溶有金属钠的氨液浸渍 PTFE，在其表面变色后可用环氧树脂粘结。PTFE 溶于二氯二氟甲烷类的碳氢氟化物，有 5% ~10% 的膨胀量，但并不渗透，而且是可逆的。

（2）吸水和水解　塑料的吸水性是个重要的性能。水是“万能的溶剂”。水解反应使许多聚合物的主链降解，促使材料的拉伸强度和刚度下降，增大了蠕变的速率。最典型的是聚酰胺的水解过程。水中的氢原子能攻击酰胺基 N—H—O 中的氢原子，与带负电的氢原子结合，使主链断裂。聚酰胺分子结构中酰胺基密度减小，能改善吸水性能。半结晶的聚酰胺中的无定形区的水解反应更加迅速。因此，聚酰胺等塑料在挤出或注射前，对物料要充分干燥。聚酯和聚氨酯也有类似的弱点。

水会影响复合塑料中颗粒填料或增强纤维与基体聚合物的结合程度。结合界面上的脱粘会导致材料的破坏。填料和玻璃纤维经混料前的偶联剂处理，可阻止水分扩散。这些偶联剂如硅烷等都是憎水的。纯热固性聚合物的水分的吸收和扩散是很低的。但是用木粉等吸水性填料充填后，吸水大增。

吸水使塑料材料产生缓慢水解，还使塑料件的尺寸不稳定。聚酰胺注塑件在模塑后要作调湿处理。吸水塑料件的绝缘性变差，是电气零件潜在的危险。吸水量和吸水百分率是选用塑料品种的重要指标。我国相关标准是 GB/T 1034—2008《塑料　吸水性的测定》，此标准等同 ISO 62 和 ASTM D570。表 1-10 是 ASTM D570 标准测试的各种塑料的吸水率，是将试样浸入 23℃的蒸馏水 24h，测得的相对于原始质量的吸水百分率。

表 1-10　各种塑料的吸水率

塑 料 材 料	吸水率(%)	塑 料 材 料	吸水率(%)
氟碳树脂(氟塑料)	0 ~ 0. 01	聚砜	0. 22
聚苯硫醚	< 0. 05	ABS	0. 20 ~ 0. 45
热固性聚酯	0. 02	共聚甲醛	0. 22
聚乙烯	< 0. 01	聚酰胺酰亚胺	0. 28
聚丙烯	< 0. 01	聚碳酸酯	0. 15 ~ 0. 18
硬聚氯乙烯	0. 07 ~ 0. 40	聚氨酯弹性体	0. 70 ~ 0. 90
聚苯乙烯	0. 03 ~ 0. 10	木粉充填酚醛树脂	0. 30 ~ 1. 20
环氧树脂	0. 04 ~ 0. 20	聚酰胺 66	1. 00 ~ 2. 80
聚甲基丙烯酸甲酯	< 0. 3	聚酰胺 6	1. 5
丙烯腈类	0. 10 ~ 0. 40	聚酰胺 11	0. 40
热固性 PET 片状模压料	0. 10 ~ 0. 15	聚酰胺 12	0. 25
聚醚醚酮	0. 14	硝酸纤维素	1. 00 ~ 2. 00
软聚氯乙烯	0. 15 ~ 0. 75		

4. 渗透性

聚合物的渗透性是区别于金属的特征之一。在固态聚合物的高分子链之间有很大的自由空间。因此，气态和液态的小分子能容易地渗过聚合物表面，并在高分子结构中扩散。许多聚合物材料的渗透性，既是优点也是缺点。例如：液态饮料用塑料容器容易渗透，CO_2 等会引起化学侵蚀和溶解。纯涤纶 PET 纤维的衣料，因 PET 的憎水性，不透气和水，身着不舒服。与天然棉纤维混纺后才有改善。可以控制渗透的薄膜是一项高技术产品。PTFE 多孔薄膜，厚度为 20 ~ 40μm，孔隙率为 65% ~ 85%，可用于外科手术用的皮肤覆盖材料。

气体或液体在聚合物的高浓度一侧，向着低密度的另一侧渗透，以一定温度和时间可测得渗透量。其单位时间的渗透量为渗透系数 P_g。渗透是一个很复杂的溶解-扩散过程。气体与液体的渗透机理不同。无定形和结晶型聚合物的被渗透的机理也不同。其中气体对无定形聚合物的渗透最简单。常用 O_2 和 CO_2 等气体对各种塑料薄膜进行渗透试验。考核和比较各种塑料及其品种的透气性，对食品等包装材料的选择有指导意义。我国塑料薄膜透气性试验相关标准是 GB/T 1038—2000。对应有 ISO2556 和 ASTM D1434 气体渗透率标准。表 1-11 是 ASTM 标准测得的各种塑料在 30℃下对 O_2 和 CO_2 的渗透系数。其中对水汽的渗透系数相当于透湿系数。

表 1-11　各种塑料薄膜在 30℃下的渗透系数

[单位：$10^{10}cm^3 \cdot cm/(cm^2 \cdot s \cdot cmHg)$]

塑 料 薄 膜	对 O_2	对 CO_2	对水汽 90% RH
聚丙烯腈	0. 0003	0. 0018	300
聚偏二氯乙烯	0. 0053	0. 029	1
聚对苯二甲酸乙二醇酯	0. 035	0. 17	175
聚酰胺 6	0. 038	0. 16	275
未增塑聚氯乙烯	0. 045	0. 16	275
高密度聚乙烯	0. 40	1. 80	12

（续）

塑 料 薄 膜	对 O_2	对 CO_2	对水汽 90% RH
异丁烯-异戊二烯橡胶	1.30	5.18	120
聚碳酸酯	1.40	8.0	1400
聚丙烯	2.20	9.2	65
聚苯乙烯	2.63	10.5	1200
氯丁橡胶	4.0	25.8	910
聚四氟乙烯	4.9	12.7	33
低密度聚氯乙烯	6.9	28.0	90
天然橡胶	23.3	153	2600
聚硅氧烷	605	3240	40000

注：1cmHg = 1333.22Pa。

透气性试验是在一定温度下，试样两侧保持一定的气体压差，测量试样低压侧的气体压力变化。按下式计算透气系数

$$p_g = \frac{\Delta p}{\Delta t} \times \frac{V}{S} \times \frac{d}{p_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{1}{p_1 - p_2} \tag{1-8}$$

式中 $\frac{\Delta p}{\Delta t}$——在稳定透过时，单位时间内低压侧气体压力变化的算术平均值（cmHg/s）

V——低压侧体积（cm^3）；

S——试样的试验面积（cm^2）；

d——试样厚度（cm）；

T——试验温度（K）；

$p_1 - p_2$——试样两侧的压差（cmHg）；

T_0，p_0——标准状态下的温度和压力（K，cmHg）。

在模塑制品生产中，通常用直接试验方法获知渗透结果。对于模塑瓶和挤出塑料管，是通过测试气体压力损失或液体渗漏，得到与壁厚的关系。

5. 阻燃性

建筑行业和交通工具上应用的塑料制品，首先考虑材料的是阻燃性。防止火灾和环境保护要求人们重视塑料燃烧性的研究。如表 1-12 所示，各种塑料有可燃、慢燃、自熄和不燃之分。

表 1-12 各种塑料的可燃性

塑 料 种 类	氧指数(%)	UL 等级	点着温度/℃	评估
聚甲基丙烯酸甲酯	17	—	—	可燃
聚丙烯	17	—	—	可燃
聚乙烯	17	—	340	可燃
聚苯乙烯	18	—	360	可燃
聚对苯二甲酸乙二酯	21	—	—	慢燃
聚碳酸酯	26	V-2	—	自熄
ABS	30	HB	—	自熄

（续）

塑料种类	氧指数(%)	UL 等级	点着温度/℃	评估
聚砜	30	V-0	—	自熄
聚酯酰亚胺	—	V-0	—	自熄
脲甲醛树脂	35	V-0	—	自熄
未增塑聚氯乙烯	43	V-0	390	不燃
聚酰胺-酰亚胺	50	V-0	—	不燃
聚四氟乙烯	90	V-0	—	不燃

含有氟和氯的塑料是不燃的。聚四氟乙烯是阻燃材料。未增塑的聚氯乙烯，在燃烧中分解的 HCl 有抑制作用，高温下释放的烟雾，含有毒的氯气。聚碳酸酯和聚氨酯是自熄的塑料，当火焰和热量撤去后燃烧会熄灭。绝大多数热塑性塑料容易点燃和燃烧。塑料升温加热达到点燃温度后，分解和氧化塑料表面材料，生成可燃气体，各种复杂的反应和自由基的产生，促使了燃烧和生成热量，伴随着有大量烟雾和有害气体逸出。燃烧的最终残留物是碳。表层碳的生成，如同屏障，有阻燃作用。

用户安全和防火法规要求塑料材料阻燃。塑料的阻燃性，根据它所在海平面高度上支持塑料样品燃烧的最低含氧量，即氧指数 OL 来评定。我国相关标准是 GB/T 2406.1—2008 和 GB/T 2406.2—2009，对应的是 ASTM D2863 和 ISO 4589 标准。氧指数是在规定条件下，试样在氧、氮混合气体中，维持平稳燃烧所需的最低氧气浓度，以氧气所占的体积百分数表示。普通大气中的氧指数是 22%，故在表 1-12 中超过此值的塑料大致是自熄和不燃的。

另一方法是 GB/T 4610—2008 规定的点着温度测定，对应 ASTM D1929 标准。点着温度是在规定的试验条件下，从材料中分解出的可燃气体，经外火焰点燃并燃烧一定时间的最低温度。它的试样是粒度 0.5 ~ 1.0mm 的颗粒塑料。

美国保险商实验所的 UL94 燃烧标准，目前被广泛引用。它是将试样水平和垂直放置，用本生灯（Bunsen burner）点燃，观察试样燃烧速度、自熄和滴落物。依阻燃性提高顺序：94HB 水平、94V-2、94V-1、94V-0、94V-5。其中 94HB 为水平燃烧，其他均为垂直燃烧。图 1-13 所示是 UL94 塑料试样的可燃性的检测方法。它们对应我国标准是 GB/T 2408—2008《塑料　燃烧性能的测定　水平法和垂直法》。

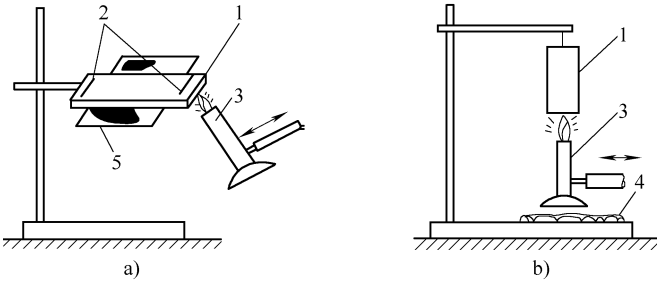


图 1-13　UL94 塑料试样的可燃性检测

a）UL94HB 水平燃烧测试　b）UL94V2-V1-V0 垂直燃烧测试

1—测试的塑料试样　2—标记线　3—本生灯　4—棉花　5—金属丝网

UL94HB 水平燃烧的测试，用于慢燃不能自熄的塑料。此为 UL94 阻燃性的最低等级。经常是垂直方向的 V-0、V-1 或 V-2 方式不能通过时，才采用这种方法。UL94V0 是保险阻燃等级。UL94V-1 评定方法与 V-0 类似。它允许自燃时间较长一些。UL94V-2 评定方法与 V-1 相同，但它允许燃烧的熔体滴下时能点燃棉花。UL94V-5 是最严格的检测方法。

此外，我国还有 GB/T 2407—2008，用于评定硬质塑料的可燃性；GB/T 6011—2005，用于评定纤维增强塑料的可燃性。电加热的炽热棒用碳化硅制成，主要以烧蚀距离来评定。

提高塑料材料的阻燃性有许多途径，常用的是添加阻燃剂。由于各种塑料的燃烧过程很复杂，故阻燃剂的品种也很多。它们起抑制燃烧和阻碍火焰蔓延的作用，使用得最多的是氯、溴、锑、磷和铝的化合物。有的阻燃剂在高温时熔融渗出到表面，形成密封膜；有的热分解后产生不燃气体，稀释可燃气体；有的促使塑料炭化消耗热能，减小引燃可能性；有的捕获羟基，延缓燃烧反应过程。

阻燃剂使用不当，会在注射加工时逸出刺激性气体，腐蚀模具和螺杆等成型机械零件。含阻燃剂的塑料是热敏感性物料，成型加工时需慎重对待。

采用无机填料（如氢氧化铝、碳化钙和玻璃纤维等）也有阻燃作用。随着它们的含量增加，可燃成分减少、发热量降低、阻燃性提高。燃烧时制品表面生成灰化的无机被膜，对氧气有隔离作用。

将自燃聚合物与不燃聚合物共混，如 ABS 和聚氯乙烯共混，可使 ABS 阻燃性提高。制品表面被覆不燃物质和难燃物质后，火焰的直接作用被阻隔。

6. 耐候性

耐候性是指塑料暴露在日光、冷热和风雨等气候条件下的稳定程度。耐候性与热氧老化、光氧老化、湿热老化、化学老化、臭氧老化和生物老化等有关。它是塑料性能在气候条件下的一项综合评估。

气候条件通常是指受到太阳直接辐射时塑料抗紫外线辐射的能力。绝大多数塑料在受到紫外线辐射后性能下降；塑料制品的表面出现褪色和银纹；表面硬度也有丧失。

紫外线 UV（Ultraviolet radiation）不能透过窗玻璃。但室外的紫外线照射足以使聚合物分子链破裂，使塑料变色，最终脆裂和粉化。波长在 280 ~ 320nm 的 UV 对聚合物最为危险。室外的热和湿气又加快了 UV 降解的过程。组合作用具有更大的危险性。

我国塑料自然气候暴露试验方法的相关标准是 GB/T 3681—2011。它是一种长时期的低成本的比较试验法：根据我国气候条件以热带、温带、寒带、高原和沙漠来设置暴露场地；按标准制作的试样，置于室外的暴露试样架上，此架面向正南，一般倾斜 45°；暴露角使试样获得最大的年辐射量；然后定期测试试样的几项性能，与原始值比较。在受到紫外线辐射的 6 ~ 12 个月里，绝大多数塑料的抗冲击性能会降低。

表 1-13 是 ASTM D1435 标准中各种塑料的室外耐候性（暴露架倾斜 45°，在美国南部测得）。表中列出了各种热塑性塑料的耐候特征，更说明了紫外线稳定剂的作用。光稳定剂或称 UV 稳定剂，是能够抑制塑料光老化的添加剂，主要有光屏蔽剂和紫外线吸

收剂两种。塑料中添加炭黑作为光屏蔽剂，可使紫外线能量转变成热能，且成本低廉。倘若室外使用塑料件不能是黑色，则用白色颜料和无机颜料起光反射作用，同时添加紫外线吸收剂，使塑料避免与紫外线直接作用，保护塑料制品。

表 1-13　各种塑料的室外耐候性

塑料材料	UV 稳定剂	暴露天数/d	拉伸强度变化(%)	断裂伸长率变化(%)	可视变化
聚甲醛	有	3656	−3	−24	失去光泽
聚甲基丙烯酸甲酯	有	1825	−16	−36	微黄
乙酸丁酸纤维素	有	1277	−8	−2	无
全氟(乙烯-丙烯)共聚物	无	5475	0	0	无
聚酰胺 66	无	1825	−68	−98	—
聚酰胺 66	有	1825	−11	−78	—
聚酰胺 12	有	730	+5	−9	微黄
聚酰胺-酰亚胺	无	250	0	−7	无
聚对苯二甲酸丁二醇酯	无	1825	−50	−47	—
聚对苯二甲酸丁二醇酯	有	1825	−3	−20	—
高密度聚乙烯	有	1826	+6	−90	失去光泽
高密度聚乙烯	黑色	3652	−8	−22	失去光泽
聚丙烯	有	365	−24	−22	—
聚氨酯	黑色	1490	−25	+2	—
苯乙烯-丙烯腈共聚物	有	240	+2	−10	失去光泽
未增塑聚氯乙烯	有	720	−8	−12	灰色
未增塑聚氯乙烯	无	720	−5	−8	无
聚碳酸酯	有	1095	−1	−83	发黄

为了测试紫外线稳定剂的作用，国外有实验室的加速试验方法。ASTM D499 对应 ISO 4892，是将试样放入特殊的箱里，用碳弧灯产生的紫外线辐射，让试样交替循环加温和干燥；ASTM D2565 对应 ISO 4892，是用氙弧灯和水的耐候性试验标准。

7. 电性能

塑料和橡胶因具有电绝缘性，被广泛地用来制造电线电缆、印制电路板、电气开关、接插件和电子电气设备的机壳。所有的聚合物和大多数塑料都是电的绝缘体，但其绝缘性能各有差异。塑料制品的绝缘性能，不仅与聚合物种类有关，还与各种添加剂性能有关。绝缘性能还与温度、交变电场频率、湿度等环境因素有关。

（1）塑料的绝缘性能　塑料的绝缘性能有相对介电常数和介质损耗；塑料的耐压性能有介电强度、耐电压性和耐电弧性；功能塑料的导电性能有电阻和电阻率、体积电阻系数和表面电阻系数塑料件的电学性能，将决定电工产品设计时的材料选择，塑料件的设计和试验方法的确定。

1）相对介电常数。在电极形状一定的电场作用下，某塑料为介质时的电容 C_x 与以真空为介质的电容 C_v 之比，称为相对介电常数（ε），即

$$\varepsilon = \frac{C_x}{C_v} \tag{1-9}$$

ε 表征了塑料储蓄电能大小的物理量。聚合物及添加剂的极化程度越高，在电极上感应产生电荷越多，相对介电常数越大，该塑料的绝缘性越差。ε 最低的是聚四氟乙烯，$\varepsilon=2.1$；较高的是 PA6，$\varepsilon=4.7$。ε 值与温度、频率、潮湿环境等有关。

相对介电常数 ε 也被称为介电常数或介电系数。对电极施加有直流电场或交流电场，我国有 GB/T 1409—2006《测量电气绝缘材料在工频、音频、高频（包括米波波长在内）下电容率和介质损耗因数推荐方法》。此标准对应 ASTM D150。

2）介质损耗。在交变电场作用下，塑料介质在取向极化过程中，伴随着有能量的损耗。介质中耗散功率与外加电压和电流乘积的比值，被称为介质损耗，可表达为

$$\text{介质损耗}=\frac{\text{损耗功率}}{\text{外加电压 } U\times\text{电流 } I}=\cos\phi\approx\tan\delta \qquad (1\text{-}10)$$

ϕ 为外加压与电流的相位差。如图 1-14 所示，$\delta=90°-\phi$，称为损耗角。$I\cos\phi=I_c\tan\delta$，相当于 ab 部分的电流被损耗。当 $\phi\rightarrow 90°$时，$\cos\phi\rightarrow\tan\delta$，$\tan\delta$ 称为介质损耗角正切或介质损耗因数。

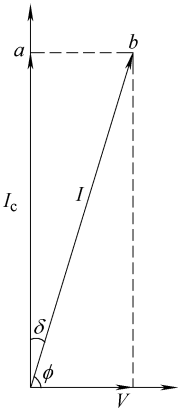


图 1-14　介质损耗

介质损耗角正切 $\tan\delta$，是表征该绝缘材料在交流电场下能量损耗的一个参量，是外施电压与通过试样的电流之间相角的余角正切。在 10^6Hz 交变电压下，$\tan\delta$ 最低的是聚乙烯，$\tan\delta=0.0001$；较高的是 PA6 及环氧树脂，$\tan\delta=0.03$。为方便起见，常用角度的弧度单位来描述。因为 $\delta\rightarrow 0$，$\tan\delta\rightarrow\delta$（弧度），$1\mu\text{rad}=10^{-6}\tan\delta$。$\tan\delta$ 与频率、温度和湿度，以及使用的添加剂有关。

3）介电强度。也被称为击穿强度 E_b。它是在规定试验条件下，在连续升高的电压下电极间试样被击穿时的电压与试样厚度之比，常用 kV/mm 作为单位。我国关于绝缘材料电气强度试验方法的相关标准有 GB/T 1408.1—2006、GB/T 1408.2—2006、GB/T 1408.3—2007。击穿电压 U_b，是用连续均匀升压或逐级升压方法，使试样发生击穿时的电压值，单位为 kV。国外的介电强度测试有 ASTM D149 标准。表 1-14 所列为美国所测各种塑料的短时电性能。

表 1-14　各种塑料的短时电性能

塑料材料	耐电弧 /s	介电强度 /(kV/mm)	介电常数 (23℃,60 Hz)	介质损耗角正切 (23℃,60 Hz)
聚四氟乙烯	>200	16~20	2.1	0.0005
聚丙烯	150	—	2.2	0.0001
高密度聚乙烯	150	19~20	2.3	0.0001
ABS	—	13~20	3.2	0.0007
聚碳酸酯	10~20	15~18	3.2	0.0009
聚酰胺	>600	20~30	3.7	0.05
环氧树脂	45	16~20	5.0	0.05

4）耐电压性。耐电压性表示塑料的耐压能力。耐压试验是一种非破坏性试验，适用于已成型的塑料制品。耐电压是试样在一定电压作用下，在规定的时间内没有发生击

穿的电压值，以 kV 和 min 为单位表示。将制品放到电压试验装置上，停留 1min，若制品未被击穿，就称该电压为塑料制品的耐电压值。

5）耐电弧性。其表示塑料对电弧、电火花的抵抗能力。测试时，将钨棒磨成的两根电极放在塑料试样上，极间距 6mm，两电极间施以高压，以电弧破坏试样所需时间（s）来表示塑料的耐电弧性。我国相关标准是 GB/T 1411—2002《干固体绝缘材料　耐高压、小电流电弧放电试验》。表 1-14 中的耐电弧时间系按 ASTM D495 标准测得。它的两电极间距为 6.35mm。

6）体积电阻率。塑料的电阻是一定条件下的实验值。它与试样形状、电压施加方法和环境因素有关。我国相关标准是 GB/T 1410—2006《固体绝缘材料体积电阻率和表面电阻率试验方法》，对应国外有 ASTM D257 标准。绝缘电阻取决于体积电阻和表面电阻，均以 Ω 表示。在电工塑料件应用时，关注的是体积电阻率和表面电阻率。它们有严格的测试条件。

体积电阻率也称体积电阻系数，是在试样体积电流方向的直流电场强度，与该处的电流密度之比。

$$\rho_V = \frac{S}{t} \times \frac{V}{I_V} \tag{1-11}$$

式中　ρ_V——体积电阻率（Ω · cm）；

V——电极间直流电压（V）；

I_V——流经试样体积间的电流（A）；

S——测量电极面积（cm^2）；

t——试样厚度（cm）。

铜的 $\rho_V = 2 \times 10^{-6}\Omega \cdot cm$。一般 $\rho_V = 10^8\Omega \cdot cm$ 以上的塑料为绝缘体，如聚酰胺 11 的 $\rho_V = 3 \times 10^{14}\Omega \cdot cm$，聚四氟乙烯的 $\rho_V = 10^{18}\Omega \cdot cm$。

7）表面电阻率。也称表面电阻系数，是沿试样表面电流方向的直流电场强度，与单位长度的表面传导电流之比。在平板试样上，内外放置两个圆形电极，外环形电极内径为 D；内圆电极直径为 d，$D > d$；在试样上两极间的环形表面上作用有径向漏电流则有

$$\rho_S = \frac{2\pi}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \times \frac{V}{I_S} \tag{1-12}$$

式中　ρ_S——表面电阻率（Ω）；

D——环电极内径（cm）；

d——测量电极的直径（cm）；

V——电极间的直流电压（V）；

I_S——流经试样表面的电流（A）。

（2）电绝缘塑料材料的选用　应从塑料的极性、温度与湿度、添加剂和静电等方面，讨论电绝缘塑料材料的选用和改性。在工业生产时还必须全面考虑加工工艺、生产

率和成本。

电绝缘材料又称电介质。塑料是良好的绝缘材料，但是，在外电场作用下还是会发生电导、极化、损耗和击穿等现象。塑料在电场作用下，会有很小的漏电流。用体积电阻率（ρ_V）和表面电阻率（ρ_S）表述塑料的绝缘电阻；又用相对介电常数（ε）来表征塑料被极化程度；用介质损耗因数（tanδ），又称介质损耗角正切，表述在交变电场下能量的损耗程度；用介电强度（E_b）描述施于塑料试样两端的外电场强度高于某临界值。电流使材料丧失绝缘性而被击穿。电工工程用耐电压性（kV 或 min）和耐电弧性（s）作为防止电击穿的指标。表 1-15 列出了常用塑料的电性能。这些性能数据都是在标准测试条件下获得的。各种塑料材料制品的介电性能，因添加剂、温度与湿度、加工工艺等影响而有差异。

塑料材料应对强电的绝缘，通常是指工业用电 380V 以上的电压。在高压下工作的变压器、开关和电真空附件等，必须防止电导和击穿，对塑料有介电强度要求，还有阻燃和长期使用的要求。对电力输送几百千伏耐压的电缆料，还有耐候性要求。

对通信、雷达和微波无线电装备等，塑料材料应对交流高频电流绝缘，首先要求选用相对介电常数 ε 和介质损耗因数 tanδ 数据小的塑料。必须关注塑料在高频下的极化和损耗。表 1-16 列示塑料的介质损耗因数和使用频率范围。

加入小分子的阻燃剂和增塑剂等极性物质，会增加塑料的介电损耗，还会使介电强度下降。添加各种矿物无机填料和玻璃纤维的塑料，也会导致增大相对介电常数 ε 和介质损耗因数 tanδ。吸水的玻璃纤维增强塑料在老化后，介质损耗明显增大。

塑料不吸潮也不润水时，其电性能基本不变。当塑料吸潮时，材料的体积电阻率和表面电阻率都下降，而 ε 和 tanδ 有上升。塑料不吸潮但润水时，表面电阻率下降。受水分影响较大的塑料有酚醛塑料、脲醛塑料、聚酰胺和纤维素塑料。充填木粉等有机填料和玻璃纤维增强塑料，受水分影响较大。有机硅和聚四氟乙烯基本不受潮湿影响。

表 1-17 的耐热等级反映绝缘材料热性能指标。添加无机填料比添加有机材料，有 B、F 和 H 的较高的耐热等级。要达到 200℃以上耐热等级，要选用聚四氟乙烯和聚酰亚胺等耐热塑料。

塑料在加工和使用过程中接触和摩擦会产生静电。由于塑料的漏导速度很慢，例如聚四氟乙烯、聚乙烯、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯的静电可持续几个月。塑料的吸水性有利于静电的漏导。吸水性好的塑料例如聚酰胺和醋酸纤维素等，随吸水增加，静电荷降低。一般塑料的体积电阻率在 $10^{15}\Omega \cdot cm$ 以上，容易积累静电。因此，塑料件表面极易受到污染；而在 $10^{10}\ \Omega \cdot cm$ 以下的、电绝缘性较差的塑料不易污染。

因此，抗静电塑料越来越受到人们的重视。简便有效的方法是使用抗静电剂。抗静电剂多半是亲水性的表面活性物质，具有不断向聚合物表面迁移的性质。其分子结构一端带有亲水基团，朝向聚合物表面，并吸附水分，形成一层导电膜，从而提高了聚合物表面的导电性，使静电加速疏导，避免积蓄。外静电剂用涂覆、浸渍或喷雾方法涂于制品表面；内静电剂是在塑料成型前加入，效果较好具有永久性。具有导电材料填充的复合塑料，体积电阻率为 $10^4 \sim 10^7\Omega \cdot cm$，为防静电的塑料。

表 **1-15** 常用塑料的电性能

材料	体积电阻率（23℃50% RH）/ /Ω·cm ASTM D257	介电强度（3.18mm 短时）/（kV/mm）ASIM D149	相对介电常数 ASTM D150			介质损耗因数/ $\times 10^{-4}$ ASTM D150			耐电弧性 /s ASIM D495	吸水率（24h,3.18mm）（%） ASTMD570
			60Hz	10^3Hz	10^6Hz	60Hz	10^3Hz	10^6Hz		
PTFE	$>10^{18}$	48	<2.1	<2.1	<2.1	<2.	<2.	<2.	>200	0.00
LDPE	$>10^{16}$	45～100	2.25～2.35	2.25～2.35	2.25～2.35	<5	<5	<5	130～160	<0.015
HDPE	$>10^{16}$	45～50	2.30～2.35	2.30～2.35	2.30～2.35	<5	<5	<5	—	<0.01
PP	$>10^{16}$	50～66	2.20～2.60	2.20～2.60	2.20～2.60	<5	<5～18	<5～18	136～185	<0.01
PS	$>10^{16}$	50～70	2.45～2.65	2.4～2.65	2.4～2.65	1～3	1～3	1～3	60～80	0.03～0.01
ABS	$(1\sim5)\times10^{16}$	35～50	2.4～5.0	2.4～4.5	2.4～3.8	30～80	40～70	70～150	50～85	0.2～0.45
POM	6×10^{14}	50	—	3.7	3.7	—	40	40	—	0.25
PC	2.1×10^{16}	15.2	2.97～3.17	3.02	2.92～2.93	0.009	0.0021	0.01	10～120	0.15～0.18
30% 玻璃纤维 PC	4×10^{16}	18	3.0～3.53	—	3.0～3.48	0.0009～0.0013	—	0.0067～0.0075	5～120	0.15～0.20
聚甲基丙烯酸酯	$>10^{14}$	45～55	3.5～4.5	3.0～3.5	2.2～3.2	400～600	300～600	200～300	无痕迹	0.3～0.4
PA66	$10^{14}\sim10^{15}$	39～47	4.0～4.6	3.9～4.5	3.4～3.6	140～400	200～400	400	130～140	1.5
PA6	$10^{12}\sim10^{15}$	44～51	3.9～5.5	4.0～4.9	3.5～4.7	400～600	110～600	300～400	—	1.3～1.9
PVC	$>10^{16}$	42.5～130	3.2～3.6	3.0～3.3	2.8～3.1	70～200	90～170	60～190	60～80	0.07～0.4
改性 PPO	$>10^{16}$	22	2.64	2.64	2.64	0.0004	0.0004	0.0009	75	0.065
30% 玻璃纤维 PBT	10^{16}	18.4～23	3.7～3.61	3.60	—	0.002～0.0017	0.002～0.0025	—	130	0.07～0.08
增强阻燃 PBT	10^{16}	—	4.0	3.80	3.70	—	0.02	0.02	80	—
PPS	4.5×10^{16}	20.2	—	3.11	3.22	—	0.0004	0.0007	—	0.02
40% 玻璃纤维 PPS	4.5×10^{16}	19.6	—	3.7	3.88	—	0.001	0.0013	34	0.05
TLCP（Ⅱ类 Vectra）	$(0.8\sim6)\times10^{16}$	7～28	—	4.1～5.7	3.7～5.1	—	0.015～0.028	0.016～0.037	122～181	0.03～0.1
EP	$10^{12}\sim10^{17}$	44～50	3.5～5.0	3.3～4.5	3.3～4.0	20～100	20～200	30～500	45～120	0.08～0.15
MF（a-纤维素）	$(0.8\sim2)\times10^{12}$	27～30	7.9～9.5	7.8～9.2	7.2～8.4	300～830	150～360	270～450	110～140	0.1～0.6
PF	$10^{12}\sim10^{13}$	35～40	6.5～7.5	5.5～6.0	4.0～5.5	100～150	100～500	400～500	—	0.3～0.4
PF（矿物充填）	$10^{9}\sim10^{12}$	10～25	—	14～30	9～15	—	1000～3000	700～2000	—	0.12～0.36

表 1-16 塑料的介质损耗因数和使用频率范围

品 种	介质损耗因数	使用频率范围
PTFE	$<2\times10^{-4}$	最优秀的高频绝缘材料，用于 >500MHz
PE、PP、PS、PB	$<3\times10^{-4}$	用于 <300 ~ 500MHz
ABS、AS、玻璃纤维充填硅树脂、聚醚、PDAP、硅橡胶、二甲苯树脂	$<100\times10^{-4}$	用于 1 ~ 500MHz
PVC、PF、POM、UF、PC	$<500\times10^{-4}$	用于 <10MHz

表 1-17 耐热等级及适用材料

耐热等级	温度/℃	适用材料
Y	90	脲醛树脂等；木材、棉花、纸、纤维等天然纺织品；醋酸纤维和聚酰胺纤维织物等
A	105	浸渍油漆的棉纱、天然丝、再生纤维、纸板、木质板和层压木板等
E	120	聚酯纤维与薄膜、漆包线、有机填料模塑料、布基或纸基层压板热固性塑料、丙烯酸酯塑料等
B	130	添加玻璃纤维、云母和石棉等填料的塑料或层压制品、耐热型树脂基复合材料等
F	155	玻璃纤维、云母和石棉等增强的树脂基复合材料或耐热复合材料等
H	180	玻璃纤维、云母和石棉等增强的有机硅复合材料或耐热复合材料等
200℃	200	聚四氟乙烯、新型耐热塑料（如聚酰亚胺、双马来酰亚胺等）
220℃	220	聚四氟乙烯、新型耐热塑料（如聚酰亚胺、双马来酰亚胺等）
250℃	250	聚四氟乙烯、新型耐热塑料（如聚酰亚胺、双马来酰亚胺等）

8. 光学性能

总透光率 T_t 是可见光透过材料的光通量 T_0 与入射光通量 T_i 之比。

$$T_t = \frac{T_0}{T_i} \tag{1-13}$$

但光线在材料中通过时，有角度偏离的散射现象。定义透明塑料的最大偏离角度为 2.5°。这部分偏离的透射光通量 T_s 与入射光 T_i 之比，称为扩散透光率 T_d。

$$T_d = \frac{T_s}{T_i} \tag{1-14}$$

T_d 说明了材料的散射特性。扩散透光率 T_d 与总透光率 T_t 之比称为雾度 h_a。

$$h_a = \frac{T_d}{T_t} \tag{1-15}$$

总透光率大且雾度小的塑料才是透明度好的材料。一些塑料的总透光率和雾度等性能见表 1-18。一些无定形聚合物是透明的；结晶型聚合物的散射现象减小了透光率，产生如雾般的模糊。透光塑料玻璃和光学塑料透镜要求透光率高且雾度小；照明灯罩要求有高的透光率，但雾度要高，以消除光源的眩目。

光线通过透明材料时产生折射现象，是由于光在不同介质中传播速度不同所引起的。透明材料的折射率，定义为光在真空中传播速度与光在该材料中传播速度之比。折射率 n_D 在数值上可表述为入射角 i 的正弦与折射角 r 的正弦之比。

表 1-18　一些塑料的性能

性能参数	PMMA	PS	PC	AS	MS	ADC (CR-39)	JD	HEMA	PMP (TPX)	Trogamid-T
密度/(g/cm^3)	1.19	1.06	1.20	1.07	1.09	1.32	1.19	1.16 ~ 1.17	0.83	1.12
总透光率(%)	92	88	89	88	90	91	90	97	90	90
雾度(%)	<2.0	<3.0	<3.0		<3.0					
折射率 n_D	1.491	1.590	1.586	1.569	1.562	1.498	1.607	1.43 ~ 1.45	1.465	1.566
线胀系数/($\times10^{-5}$℃$^{-1}$)	7.0	7.0	6.8	6.5	6.5	12	8.8		11.7	6
玻璃化转变温度 T_g/℃	105	87	135				112		20 ~ 30	
热变形温度 T_s/℃	92	82	130	87 ~ 104	78 ~ 89	140	90			130
最高连续使用温度/(℃)	92	75	124	104	100				160	90
吸水率(%)	0.3	0.05	0.15	0.66	0.15	0.2	0.06	39 ~ 60	<0.05	0.41

注：最高连续使用温度指该温度下 90d 不变形。

$$n_D = \frac{\sin i}{\sin r} \tag{1-16}$$

试验时用专门波长的钠光测得塑料的折射率 n_D，如表 1-18 所列。较大的折射率会使光学透镜中光线偏离，造成图像失真。聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA 的折射率小于普通无机玻璃，与光学无机玻璃折射率相近。

折射率大于 1 的任何透明材料，当光线从材料内向空气中折射时，入射角大于某个临界角度时，光线不能折射到空气而全部被内部反射。将透明 PMMA、聚苯乙烯 PS 或聚碳酸酯 PC 等制成细丝，有弯折时都可使光线沿细丝传递。此种“光管效应”现已用于光导纤维。单根塑料纤维（直径 0.15 ~ 3.0mm）用来传递电子信息或直接制成医用窥视潜镜。用无机玻璃制造的光导纤维，在外层也被覆透明塑料，以起防振和保护作用。

聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA，俗称有机玻璃，是光学性能最好的塑料。用来制造光学透镜、太阳镜、光纤和光盘等。聚苯乙烯 PS 是很普及的光学塑料，用来制造照相机透镜和光纤等。聚碳酸酯 PC 是综合性能优良的透明工程塑料，用来制造防护玻璃和大型灯罩等。它们为三大透明塑料。

透明塑料与无机硅玻璃相比，质轻、耐冲击，容易着色和加工。制造平板或略弯的透明塑料板成本较低，所以大量用来制造安全防爆的透明制品，例如汽车上前后车灯。透明塑料着色或涂上荧光材料，制造反射亮度高的各种信号制品，应用也很多。但是透明塑料不耐磨，易刻划痕迹；制品的尺寸稳定性差；不耐高温和低温，耐候性差；有的塑料在阳光下会泛黄。

苯乙烯-丙烯腈共聚物，常缩写成 AS 或 SAN。AS 的透光率与 PS 相当，但折射率稍低。透明状态 AS，用于灯具的外壳，家用电器的表盘、按钮和小壳体等。半透明的 AS，用于工艺装饰品或日用品。

苯乙烯-甲基丙烯酸甲酯共聚物 MS，透光率优于 PS，耐候性和耐磨性优于 PMMA，

可替代 PMMA，用于注射成型的透明塑料。

二甘醇双烯丙基碳酸酯 ADC（CR-39），是透明的热固性塑料，抗冲击且硬度高，用来制作各种经染色或镀膜的眼镜片。

JD 系列光学塑料是聚醚砜 PES 的衍生共聚物，也属热固性塑料。国内研制和批量生产光学塑料，采用浇铸法生产透镜。

聚甲基丙烯酸羟乙酯 HEMA，是软质隐形眼镜材料，具有高吸水性，镜片的透气性和生理相容性好。

聚 4-甲基-1-戊烯（poly-4-methyl-1-pentene）简写为 PMP，商品名为 TPX。它是结晶型的透明塑料，熔体黏度低、便于成型，有较好的耐热性，但硬度低、成型收缩率大，用于医疗器械、食品容器和照明用具。

透明聚酰胺 Trogamid-T，对苯二甲酰三甲基己二胺是无定形的聚合物，吸水率较高，雾度低，具有工程塑料的综合力学性能和耐热性。

9. 摩擦磨损

塑料用于轴承、齿轮和带轮时，必须熟悉塑料的摩擦磨损和硬度性能。高分子聚合物及其复合塑料在摩擦与磨损性能方面表现奇异，因此成为现代“摩擦学”的重要研究对象。塑料与金属相比，摩擦和磨损具有其特殊性。对这个问题的深入了解，不仅有助于塑料轴承和齿轮的设计，也提供了塑料及橡胶的传动螺母、导轨、滑轮、传送带和刹车片等制品设计的理论基础。

（1）摩擦　摩擦系数是受众多因素影响的物理量。

1）滑动摩擦。根据黏附剪切理论，两个接触物体的表面由于存在表面粗糙度（Ra），它们间的实际真实接触面积比起表观面积是十分小的。$Ra = 10\mu m$ 的两表面接触时，真实接触面积只占表观接触面积的 0.01% ~1% 。两表面间的摩擦力，是接触点峰尖的弹性、或弹性和塑性变形的结果。这些接触点的切向变形形成了摩擦阻力。设真实接触面积为 A，接触面上法向正压力为 N，则有

$$A = \frac{N}{\sigma_y} \tag{1-17}$$

式中，σ_y是摩擦副中软材料的屈服应力。摩擦力 F 正比于 σ_y，且由于

$$F = \tau A \tag{1-18}$$

式中，τ 是摩擦副中软材料的剪切强度。由此，摩擦系数定义成

$$f = \frac{F}{N} = \frac{\tau}{\sigma_y} \tag{1-19}$$

大多数塑料的剪切强度与屈服应力之比为 1/3，因此 f 值在 0.2 ~0.4 之间。

静摩擦系数是两接触固体之间产生初始运动所需克服的切向阻力 F 和施于接触表面上的正压力 N 之比，如图 1-15a 所示，可用倾斜滑板上的滑块，以有初始滑动时的滑板倾角 θ 求得。表 1-19 列出了 13 种材料组成摩擦副的静摩擦系数 f_s。滑板以 13°/s 的速率增加倾角，接触压力为 184Pa，公称接触面为 4cm × 4cm，在室温 20℃ 和湿度 60% RH 环境中，且界面干燥时，测得 f_s。在特定条件下的这些数值，还与摩擦副的上下位

置有关，摩擦系数数值有较大离散性。因此，确定摩擦数据时，必须与实验操作条件尽可能接近。

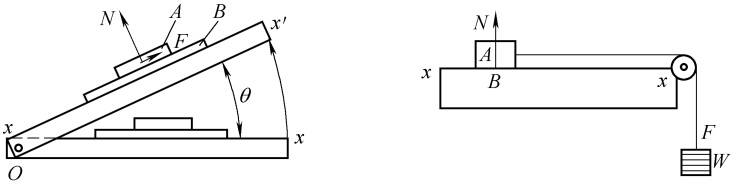


图 1-15　测量摩擦系数的装置

a）测静摩擦系数　b）测动摩擦系数

动态摩擦系数的测定如图 1-15b 所示。用重物经定滑轮拖曳运动物体，$f_k = F/N$。表 1-20 是接触压力为 80Pa，滑动速度为 6.2cm/s，于常规环境条件下测得的 f_k 值。通常动摩擦系数 f_k 小于静摩擦系数 f_s。结晶型热塑性塑料有较小的 f_k（0.1 ~ 0.25），且不受材料组合影响。

表 1-19　13 种材料组合的静摩擦系数 f_s

上面 / 底部	铝或钢	POM	PA6	PMMA	PC	ABS	PP	PE	PF	PS	EP	EP + 10% SiO_2	PTFE
铝或钢	0.55	0.43	0.44	0.47	0.57	0.49	0.45	0.42	0.39	0.37	0.49	0.44	0.35
POM	0.25	0.32	0.23	0.28	0.23	0.31	0.38	0.24	0.21	0.75	0.19	0.23	0.20
PA6	0.60	0.33	0.73	0.51	0.48	0.52	0.45	0.41	0.52	0.48	0.58	0.39	0.38
PMMA	0.70	0.45	0.44	0.46	0.64	0.43	0.48	0.46	0.63	0.48	0.49	0.49	0.36
PC	0.55	0.31	0.44	0.50	0.52	0.60	0.45	0.56	0.30	0.44	0.43	0.36	0.41
ABS	0.51	0.31	0.41	0.48	0.50	0.54	0.47	0.44	0.47	0.58	0.62	0.50	0.34
PP	0.38	0.31	0.38	0.32	0.36	0.37	0.39	0.35	0.39	0.40	0.35	0.37	0.22
PE	0.24	0.26	0.22	0.32	0.24	0.26	0.28	0.35	0.36	0.27	0.29	0.37	0.20
PF	0.30	0.28	0.38	0.41	0.53	0.41	0.51	0.60	0.37	0.31	0.28	0.28	0.27
PS	0.44	0.26	0.33	0.39	0.46	0.58	0.50	0.35	0.48	0.46	0.43	0.37	0.38
EP	0.40	0.32	0.46	0.36	0.33	0.27	0.43	0.54	0.40	0.44	0.38	0.43	0.38
EP + 10% SiO_2	0.54	0.29	0.46	0.49	0.53	0.43	0.54	0.49	0.33	0.45	0.33	0.43	0.41
PTFE	0.31	0.27	0.28	0.33	0.17	0.25	0.25	0.24	0.26	0.31	0.25	0.24	0.13

表 1-20　11 种材料组合的动摩擦系数 f_k

上面 / 底部	钢	PF	PC	PA6	POM	PMMA	ABS	PP	PS	PE	PTFE
钢	0.67	0.52	0.36	0.10	0.18	0.39	0.38	0.32	0.52	0.11	0.10
PF	0.47	0.37	0.42	0.51	0.11	0.31	0.20	0.27	0.50	0.07	0.10
PC	0.30	0.43	0.43	0.10	0.20	0.55	0.49	0.48	0.48	0.09	0.09
PA6	0.19	0.15	0.13	0.07	0.07	0.09	0.19	0.08	0.10	0.07	0.10
POM	0.13	0.19	0.14	0.09	0.18	0.09	0.19	0.18	0.16	0.09	0.10
PMMA	0.57	0.46	0.42	0.17	0.11	0.55	0.18	0.47	0.45	0.12	0.10
ABS	0.37	0.23	0.27	0.13	0.17	0.19	0.18	0.21	0.14	0.10	0.10

（续）

上面 / 底部	钢	PF	PC	PA6	POM	PMMA	ABS	PP	PS	PE	PTFE
PP	0.30	0.31	0.33	0.12	0.19	0.08	0.32	0.35	0.29	0.13	0.11
PS	0.37	0.39	0.38	0.17	0.05	0.35	0.26	0.25	0.47	0.16	0.11
PE	0.14	0.15	0.09	0.08	0.09	0.07	0.13	0.12	0.16	0.14	0.11
PTFE	0.12	0.12	0.11	0.09	0.10	0.11	0.09	0.11	0.11	0.10	0.08

2）滚动摩擦。滚动摩擦系数 f_r 比滑动摩擦系数小一个数量级。工程中常见的是钢柱或钢珠在塑料或橡胶表面上的滚动。滚动摩擦阻力很小，传统的斜面法可以测量，但装置复杂又需精密，故常用振子法。利用振子双向位移幅度随时间衰减求出摩擦力矩 M 或摩擦力 F，也可直接测量滚动体速度的降低来推算。

按理论力学的滚动摩擦平衡条件（如图 1-16 所示），驱动力矩需克服的摩擦力矩 M 应为

$$M = FR = Pe \tag{1-20}$$

式中　F——切向摩擦力；

R——旋转体半径；

P——作用于滚动体上的负荷；

e——偏心距。

由此得滚动摩擦系数为

$$f_r = \frac{F}{P} = \frac{e}{R} \tag{1-21}$$

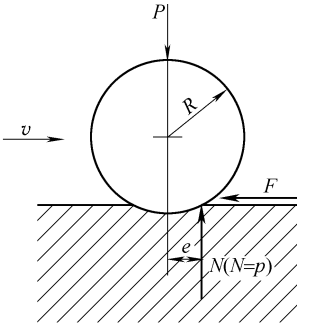


图 1-16　滚动摩擦的平衡力图

滚动摩擦理论基于弹性力学的赫兹公式，还须考虑塑料黏弹性造成的滞后损失。由于滚动体负荷 P 的作用，在塑料平板上产生凹陷的弹性变形。滚动体向前滚离时，弹性变形不能瞬时完全恢复，有极小部分滞后恢复的变形，阻碍了滚动体的运动。平板表面硬度越高，滚动摩擦阻力矩 M 越小。滚动摩擦系数 f_r 与滚动体半径 R 成反比。滚动摩擦系数 f_r 还与平板温度、表面粗糙度、滚动体速度和空气阻力有关。

3）影响摩擦的因素。大多数实用塑料在环境温度 80℃以下，摩擦系数随温度升高而提高。湿度提高会使吸水率较强的塑料品种（PA6 等）的 f_k 值变大，但对一般塑料（PA12、PE 等）并无影响。对不吸水的 PTFE，湿度提高反而使动摩擦系数下降。

塑料的表面粗糙度会影响摩擦性能。例如注射成型时缓慢冷却，对塑件表面抛光，可降低动摩擦系数。润滑剂通常能降低摩擦系数，但必须选择适宜的润滑剂，避免油或润滑液对塑料产生溶胀现象。

对称分子链排列的聚合物具有较小的摩擦阻力。交联热固性树脂与钢的摩擦系数 f_k 平均值为 0.51。无定形塑料与钢的 $f_k = 0.22 \sim 0.48$。PC、ABS 和 PVC 的 f_k 较低。结晶型塑料 $f_k = 0.11 \sim 0.31$。PE 和 PTFE 因分子结构对称性较好而有较低的摩擦系数。

随着聚合物相对分子质量增大，摩擦系数有所提高。结晶型高聚物的摩擦系数通常较小，随着高聚物结晶度提高使动摩擦系数降低。平行取向方向的动摩擦系数，通常比垂直取向方向的小。

玻璃纤维或碳纤维充填的增强塑料，可获得较高刚性，因而减小了摩擦。硅油、聚四氟乙烯、石墨和二硫化钼充填可有效降低塑料的动摩擦系数。

（2）磨损　影响磨损的首要因素是材料及摩擦副材料的配对。影响摩擦的因素也对磨损起作用。摩擦与磨损是同一过程的两个方面。磨损关系到运动件的工作寿命和精度。

1）磨损类型和机理。粘着磨损和磨粒磨损是塑料制品的主要磨损类型。其他还有腐蚀磨损、老化磨损和蠕变磨损等。在工程实际中，塑料件磨损往往是多种因素的综合结果。

粘着磨损是磨损量最大的一种磨损类型。它的磨损量与滑动距离成正比，与载荷成反比，但与软材料的硬度或屈服应力成反比。在界面上生成转移膜的现象是它的特征。

固态聚合物在合适速度下，产生向对摩表面转移的薄膜。不仅会转移到聚合物表面，也会转移到对磨的金属或玻璃等表面。发育良好的转移膜是连续成片的，例如 PTFE、UHMWPE、HDPE 和 LDPE 所生成的转移膜。也有断续的例如 PA66 和 POM 等。而 PP 和 PMMA 等形成转移膜较困难，而且是成块或成条状。对摩擦起平衡作用的转移膜厚度为 2 ~ 3nm，能起到对界面的润滑作用，使磨损速率趋于稳定。转移膜的产生取决于滑动速度、温度和路程，与负载关系不大。转移膜产生和破碎是剪切磨损过程。PTFE 在高聚物中剪切强度最低，在粘着剪切过程中先形成取向转移膜，而后形成纤维状细条，最终生成细丝磨屑，此时有很高磨损速率。

磨粒磨损是硬质颗粒在摩擦界面上对软材料起刨削作用。根据硬质颗粒状态可分为自由状态的磨蚀和冲击磨蚀。在硬质点对塑料的刨削过程中，伴有较大的弹性和塑性变形。磨粒磨损的速率不但与材料表面压痕硬度、表面破裂的强度和应变有关，还与磨损的类型、形态和尺寸有关。

2）磨损量。磨损量是依据重量变化或尺寸变化进行测定的。塑料的磨耗量比金属的少，但由于塑料易受温度、湿度及静电场等影响，测试工作比金属材料困难得多。只有那些与实际工作条件接近的试验装置，才能对磨损性能作出较为可靠的预测。

在磨损试验中，磨损量正比于载荷 N 与摩擦距离 S。磨损量 W 的关系式可表示为

$$W = KNS \tag{1-22}$$

式中，K 为磨损系数，表征为在单位载荷下，单位滑动距离的磨损量，常以载荷 1N、滑动距离 1mm 的体积磨损量（mm^3）表示，也称为磨损比例常数，用于比较材料的耐磨性能。表 1-21 所列数据是用旋转钢圆盘端面对塑料试样圆销端面，短时快速测试的结果。摩擦距离为 100m，速度为 0.208m/s，载荷为 33N。此表可用于比较各种塑料的磨损性能。

表 1-21　几种塑料的磨损系数 K

［单位：$10^{-8}mm^3/(N \cdot mm)$］

材料	PA	RPVC	HDPE	PC	PF	POM	PMMA	PP	PS	PTFE
K	1.02	1.48	3.07	4.34	4.73	5.09	6.57	16.03	57.80	74.22

还可用摩擦面的磨损深度 d 来表达磨损量。由式（1-22）得到关系式为

$$d = \frac{W}{A} = \frac{KNS}{A} = Kpvt \tag{1-23}$$

其中　　$S = vt, N = pA$

式中　v——相对运动速度；

t——摩擦时间；

p——接触压强；

A——表观接触面积。

在塑料径向轴承的设计和试验中，采用径向磨损系数 K_r，将径向磨损量与其他工作参数联系起来，则有：

$$d_r = 10^3 K_r pvt \tag{1-24}$$

式中　d_r——轴承径向磨损深度（mm）；

p——径向压力（MPa）；

v——轴表面速度（m/s）；

t——工作时间（s）；

K_r——径向磨损系数（mm^2/N）。

10. 硬度

硬度是材料对一定形状硬物压入的阻抗能力。对于完全结晶的金属，其硬度与材料的塑性及材料表面的耐磨性有较好的必然联系。而对于塑料与橡胶，由于微观结构的复杂性和具有黏弹性，以上的关系有较大近似。由于硬度测量方便，它经常作为塑料、橡胶材料及其制品的一项综合力学性能，来比较材料和制品的质量。

（1）邵氏硬度　使用邵氏（Shore）硬度计，将规定形状的压针在弹簧压力下压入试样，把压针压入试样的深度转换为邵氏硬度值。邵氏硬度分为邵氏 A 和邵氏 D 两种：邵氏 A 的压针尖端有个微小平面，适用于较软的塑料和橡胶；邵氏 D 适用于较硬的塑料和橡胶。我国相关标准是 GB/T 2411—2008《塑料和硬橡胶　使用硬度计测定压痕硬度（邵氏硬度）》。

（2）球压痕硬度和洛氏硬度　我国相关标准是 GB/T 3398.1—2008《塑料　硬度测定　第 1 部分：球压痕法》和 GB/T 3398.2—2008《塑料　硬度测定　第 2 部分：洛氏硬度》。GB/T 3398.1—2008 是参考 ISO 2039-1：2001 制定的。球压痕硬度是指以规定直径的钢球，在试验负荷作用下垂直压入试样表面，保持一定时间后单位压痕面积上所承受的平均压力。GB/T 3398.2—2008 是参考 ISO 2039-2：1987 制定的。洛氏硬度根据钢球直径和主负荷大小有四种标尺。常用的是 M 和 R 标度。M 标尺时钢球直径为 6.35mm，主负荷为 980.7N。R 标尺时钢球直径为 12.7mm，主负荷为 588.4N。

（3）布氏硬度　布氏硬度也是一种球压痕硬度，常用于金属材料，也可用于刚硬塑料，以便进行硬度对比。用一定直径的球压头在恒定负荷下压入试样，用负荷除以球压头造成的球形凹穴的面积，就是布氏硬度标度。

（4）巴氏硬度　用巴氏（Barcol）硬度计测量。压头顶端有直径 0.157mm 小平面，

此圆锥体压头在标准弹簧的压力下压入试样，以压痕深浅来表征试样的硬度。我国相关标准是 GB/T 3854—2005《纤维增强塑料巴氏（巴柯尔）硬度试验方法》，适用于测定纤维增强塑料及其制品的硬度，也可用于非增强的硬塑料。

（5）刮痕硬度　刮痕（Scratch）硬度是指材料对另一种材料刻划的阻抗能力，用于塑料测试的是比尔巴姆（Bierbaum）试验法。用正方体的钻石的尖角对准试样，以 3g 重负荷刻划试样，用负荷除以抓痕宽度的平方表示其硬度，也有采用不同硬度铅笔刻划试样的柯氏（Kohinoor）试验法。

表 1-22 是国外测得的各种常见塑料的硬度，可供对照。表 1-23 中的各种硬度标度的比较，只是经验数据，仅供参考。

表 1-22　各种常见塑料的硬度

塑料材料	洛氏硬度		邵氏硬度 D	巴氏硬度
	M	R		
高抗冲 ABS		85 ~ 109		
聚甲醛	94	120		
丙烯酸树脂	85 ~ 105			49
纤维素塑料		30 ~ 125		
玻纤充填环氧树脂	100			
聚四氟乙烯			50 ~ 65	
聚三氟氯乙烯		75 ~ 95	76	
改性聚苯醚	78	119		
聚酰胺 66		108 ~ 120		
聚酰胺 6		120		
聚碳酸酯	70	116		
刚性聚酯	65 ~ 115			30 ~ 50
高密度聚乙烯			60 ~ 70	
中密度聚乙烯			50 ~ 60	
低密度聚乙烯			41 ~ 46	
聚丙烯		90 ~ 110	75 ~ 85	
硬聚氯乙烯		117	65 ~ 85	
聚硅氧烷	84			
聚砜	69	120		

表 1-23　塑料的各种硬度标度的比较

布氏硬度	洛氏硬度		邵氏硬度		典型制品
	M	R	D	A	
25	100				很硬
16	80				
12	70	100	90		
10	65	97	86		
9	63	96	83		较软
8	60	93	80		
7	57	90	77		
6	54	88	74		软的
5	50	85	70		

（续）

布氏硬度	洛氏硬度		邵氏硬度		典型制品
	M	R	D	A	
4	45		65		
3	40		60	98	高尔夫球
2	32		55	96	
1.5	28		50	94	
1	23		42	90	阀的垫圈
0.8	20		38	88	
0.6	17		35	85	
0.5	15		30	80	
				60	内轮胎
				50	橡胶软管
				35	橡胶带
				10	

1.3 塑料注射制品的应用和试制

塑料注塑件的产量多，制品的应用面广。这是因为塑料制件与金属零件相比，一些优点有实用价值。塑料材料的密度低，一般为0.9～1.4g/cm^3；按单位质量计算的比强度高；又具有耐腐蚀和绝缘性能。在较多品种中，有的减摩或耐磨性能良好，有的防振抗冲击性能优异，有的耐疲劳性能突出。塑料制品被大量用做工程结构件，例如电子仪表、家用电器和通信设备等的机壳、机架和机座。在许多特殊的应用场合非塑料件莫属，例如输送腐蚀性介质的泵和阀；植入人体的人工器官，要有优异的化学稳定性和生理相容性能；短期与人体接触，又被反复使用的医疗器械，必须承受蒸汽热和辐射消毒；音响和办公设备中的无噪音的塑料齿轮，无法用油润滑的轴承和滚轮，只能采用减摩和耐磨的自润滑的塑料。近年来，透明塑料制品，从镜片、光盘到照明灯具又拓展了新的应用领域。

塑料制品能得到广泛使用还由于它的可加工性。多数塑料的熔化温度为170～300℃。各种塑料熔体的黏度在很大的范围内，都适合注射加工成型。它可经纤维增强或用添加剂改性，一定程度地改善制品所需的某些性能。另外，塑料制品着色容易，又可进行多样修饰，使它能经过“浓装淡抹”后走进千家万户。

本节主要介绍塑料注射制品在电子电器、汽车工业和建筑家具领域的应用，塑料制品的试制过程和塑料材料的选择，以及各种注塑件设计、生产、质量和应用的要求。

1.3.1 塑料注射制品的应用

塑料注射制品在各个行业都有广泛应用。全面介绍所有的注射制品应用是困难的，这里以大家熟识的家用电子电器、汽车工业和建筑家具三个领域的应用，讨论注塑件的生产和材料选用。

1. 电子电器工程的注塑件

仪表、通信、信息技术的电子电器产业发展很快。塑料有优异的电绝缘性能，又是隔热、抗振和密封性能，能替代金属被广泛应用于电子电器产品的机壳、机架和结构件。有的塑料注射制品作为机壳外饰件，有的作为支承结构件，有的产品中有塑料注射成型的齿轮、带轮和棘轮等传动件。电子电器大量使用标准的电子元件和接插件，大都是注射成型制品。注塑件既能设计成实用和美观制件，又能大批量低成本注射成型。

（1）家用电器的塑料注射制品　常用的家用大电器有电冰箱、洗衣机、电视机和空调器等；小家电产品有电风扇、音响、吸尘器、照相机和摄像机等；厨房用品有微波炉、电饭煲、洗碗机等；电子信息产品有手机、计算机、扫描仪等；电子办公用品有传真机、电话机、打印机、复印机和绘图仪等。

1）电冰箱。它的塑料用量占全重的 40% ~50% 。内胆、门内衬和密封条等是挤出成型生产的制品。冰箱的箱体用 PVC 复合钢板制造，用聚酯与环氧树脂粉剂喷涂。冰箱周围的隔热层，用硬质聚氨酯泡沫塑料注射成型。果菜盒和肉盘等与食品接触的透明或半透明容器，通常用 AS 塑料注射成型。冰箱顶框、冰块盘和门把手等，用 ABS 或 HIPS 注射成型。冰箱顶框扁平面大，易出现翘曲变形。

2）洗衣机。它的塑料用量占全重的 1/3 以上。大型薄壁的内桶应能够耐热，注水温度最高要有 100℃；要求耐洗涤剂、润滑油和各种油腻，还要耐冲击和振动。波轮式洗衣机的内桶常用改性聚丙烯与橡胶共混塑料注射成型，也有用玻璃纤维增强聚丙烯生产，要求注射熔料的流动速率在 15 ~30g/10min。内盖板和底板等用改性 PP，外盖板和底座等用 ABS。搅拌叶轮用玻璃纤维增强的 PA 或 PP。其他机械传动零件，卡爪、齿轮和杠杆等用 POM。滚筒式洗衣机存储洗衣粉的盒或盖、喷淋盖和过滤器零件，对改性 PP 塑料的耐热和耐洗涤剂的要求更高。有专门配制的 PP 注塑料，用超细碳酸钙、乙烯-丙烯-二烯烃三元共聚物 EPDM 和 HDPE 改性。

3）电视机。电视机的机壳包括前框和后盖两个注塑件。大多采用综合力学性能好、表面光泽的 ABS 注射成型，也用高光泽的 HIPS 和改性 PP 塑料注射成型。电视机机壳有 UL94V-0 级的阻燃性能的要求。这些 ABS、HIPS 和改性 PP 用料都是阻燃级，因此也用 ABS/PVC 和 PPO/PS 混合塑料注射机壳。电视机机壳外表面都经喷涂装饰，大多用各种丙烯酸类涂料加入铝粉，涂层有金属感。为保证涂层质量，机壳注塑件对残余应力的状况，对表面凹陷与流动痕等质量问题有较严格要求。电视机屏幕尺寸越来越大，多采用热流道技术和气体辅助注射成型技术。

4）空调器。对空气调器上的风机、空气过滤器、进气窗、前面板和后壳体等注塑件，有强度及刚性、耐热、抗蠕变和抗振等要求。风机零件在温热风流中要保持刚性，用添加 20% ~30% 玻璃纤维充填的 ABS 或 AS 制造。进气窗和前面板用 HIPS 注射成型，有抗静电防积灰的要求。后壳体等一些注塑件会附着油烟，要用耐化学药品的 ABS。空调的室外机历来用喷塑钢板制造箱体，有耐候和耐老化要求，现在研制改用耐候性强的塑料注射加工，正在试制的物料有：丙烯腈/二元或三元乙丙橡胶/苯乙烯共聚物 AES、丙烯腈/苯乙烯/丙烯酸酯共聚物 ASA、耐候改性 PP。

5）照相机。现代照相机中精密工程塑料注塑件的数量，占全部零件的1/3，已处于主导地位。机壳用玻璃纤维增强 ABS，使照相机的重量减轻。一些支架、扳手和滑块等，用玻璃纤维增强 PA66。制动片和转轴等几个传动零件，用碳纤维增强 PA66。一些换向轮和开启环等用玻璃纤维增强 PBT。一些调焦圈和镜头底座等用玻璃纤维增强 PC。按钮、开关和止动杆等用 POM 注塑。

6）打印机。传送纸张的注塑件应该耐磨，要求阻燃并耐热 90℃。打印机在工作时有周期性振动。机壳和框架用玻璃纤维增强 ABS。传动齿轮用 POM，透明注塑件用 PC。运动件用 PC/PS 混合塑料。

7）复印机。底盘和框架等多用玻璃纤维增强 PBT 塑料。光电发热使复印机的某些部位有 100℃甚至 200℃的高温。棘轮等传动件要用刚硬耐磨耐热的 PPS 和 PEEK 塑料。

8）光盘。光盘的基片是注压成型的塑料制品，上面镀有极薄一层金属，成为光记录元件。用信号调制的激光照射到圆盘上，金属被熔化成一串椭圆形凹痕，记录了信息。刻录光盘用激光束读取，为非硬的物体接触。与磁记录制品相比，光盘保真性好，容量大又可随意读取。光盘分为音频光盘 CD 和视频光盘 VCD 及 DVD，并有只读型、读写型和可抹型三种。适用于制造光盘的材料有 PC 和 PMMA。其流动性得到了改善，熔体的流动速率为 70 ~ 90g/10min。光盘制品的双折射率被降低，视频光盘常选用 PMMA，但两者的吸湿都较大。新的光盘材料，例如聚环已基乙烯（PCHE）、新型的热塑性聚酯、改性双酚 A 环氧树脂和茂金属聚乙烯（mPE）等，正在开发中。

（2）电工接插件　由于注塑件能与导电金属相互连接，电子电器上的接插件被大量应用。接插件是导体连接器和开关的总称。接插件主要由金属导体和塑料绝缘体组成。其功能是实现电路之间、导线之间、电器设备之间、电源与电器设备间的连接或断开。它本身既是保证电路畅通或断开的刚体，又是能配对使用的组装件。

接插件已不只是家用电器的插头和插座。电子设备的接插件，朝小型化和密集化方向发展。使接插件间距从 2.5mm 向 1.2mm 缩小，并将继续朝间距仅为 0.6mm 发展。电子装备的接插件上连接导线线数，从几十线向几百线发展。因此，对接插件的精度和尺寸稳定性要求也很高：孔距一般为公差与配合的 6 级精度，甚至更高；还要求接插件相应提高表面精度，外形的平整度限制在 0.13mm 以下。

接插件在各种使用场合会有不同的结构设计。轿车上电线线束所用的接插件，插座连接已捆扎的线束。插头装配到轿车上与另一股线束相联。各自的排孔中装配导电良好的金属插头销和插座片，以使接插件在轿车颠簸中电接触稳定可靠。此种接插件的互换性要求很高。为适应轿车的流水线快装要求，采用弹性卡夹和铰链的联接方法。此类接插件常用 PA66、PA6、PBT 和 PP 精密注射成型。

1）接插件的主要技术性能。接插件的技术性能因使用的电性能要求、工作场合不同而有差异，在工业和商业上有详细的标准。

① 绝缘介电性能。要有合适的相对介电常数、介质损耗因数和耐电压性，对于高频接插件要求更为严格。导电接插件之间塑料绝缘层厚度需足够，以避免高频对注塑件造成损伤，或引起电路中信号的损失。在高湿度（95% RH）和高温（40℃）下，绝缘

电阻大于 20 ~ 100mΩ；在正常条件下，绝缘电阻大于 500 ~ 1000mΩ。

② 良好的表面电阻。以阻止塑料绝缘层表面产生交叉漏电流。如在潮湿环境下，电场使金属银向酚醛塑料上迁移后，形成漏电流。在一般情况下，可能的漏电流应限制在导体电流的 0. 1% 以下。塑料中某些阻燃剂的渗出，也可能引起漏电流。还有在高电压下，塑料表面形成的碳化通路，也会产生漏泄电流。为此，必须限制塑料的相比漏电起痕指数（CTI）。

③ 良好的耐电弧性。在小型接插件中，塑料绝缘层离金属电触头的电弧区很近，只有几分之一到几毫米，为此，应防止电弧给予注塑件表面以永久性损伤。例如电视机电源开关上塑料耐弧性要求在 180s 以上，在试验电压 500V 下，不产生电弧和击穿现象。

④ 力学性能。主要是塑料的拉伸强度和冲击强度。在冲击振动条件下，插拔的插头与插座要达到一定寿命次数，无变形或开裂损伤。高的抗蠕变性能要保证在使用期间，接插件不至于性能变劣。此外，接插件中塑件的最小壁厚，也应从力学性能考虑；塑料件的形状和位置精度，若关系到导体插合方向的平行度和直线性，则必须从严控制。

⑤ 耐热性。接插件的接线端大都要承受焊接时的热作用，在常规产品中，按国家标准规定焊槽法亦即波峰焊，是 260℃ 温度下（5 ± 1）s 或（10 ± 1）s，或在 350℃ 温度下（3. 5 ± 0. 5）s；红外再流焊 10s 内达 220 ~ 250℃，而烙铁法为 350℃ 温度下（10 ± 1）s。在电子设备组装中，接插件要经受 215 ~ 277℃ 高温。另一方面，接插件在接通与断开等工作中会产生热量，在 40 ~ 85℃ 的工作温度下能维持功能正常。

2）接插件用塑料。接插件中的塑料件多为注射成型。其体积小、壁厚薄、几何公差和尺寸精度要求高。注射模大都采用众多细长型芯，以及薄片镶拼结构。模腔最薄可达 0. 2mm。要求塑料熔体黏度低，流动性好。塑料的成型收缩率要小，收缩率波动范围要窄，且方向性不明显。注塑件残余应力小。一些多线连接器，形状细长，易于取向和产生残余应力，注塑件因此易发生翘曲变形，甚至开裂，应于特别关注。

酚醛树脂是最早用于制造接插件的热固性塑料，因有残留氨，且易吸水，只能用于绝缘性要求不高的场合。氨基塑料中的三聚氰胺甲醛树脂，由于不易炭化，有比酚醛塑料强的耐电弧性、耐漏电性，但吸水率仍较大。热固性塑料由于成型的生产率低，废料不能利用，大都已被热塑性塑料替代。

聚酰胺最早用于制造接插件，以 PA6 用量最多，但由于吸水后，有尺寸变化和绝缘性变差，不适合高频下绝缘性能要求高的场合使用。PA46（聚己二酰丁二胺）是丁二胺与己二酸缩聚而成。30% 玻璃纤维增强后热变形温度为 285℃，尺寸稳定性好，也被用于接插件的注射成型。

玻璃纤维增强聚对苯二甲酸丁二醇酯（PBT）已成为接插件的主流材料。其耐热性高，电绝缘性好，耐溶剂且尺寸稳定。同时，聚碳酸酯、聚砜、改性聚苯醚和聚甲醛等也有广泛应用。

随着接插件高精度和小型化要求的提高，已开始采用改性聚苯硫醚（PPS）和液晶

聚合物 TLCP。它们的耐热性高、尺寸稳定、刚性好，是颇有前途的接插件材料。接插件常用热塑性塑料材料的电性能见表 1-15。

2. 汽车工业的注塑件

现代汽车工业用塑料替代钢、有色金属和玻璃等制造零件，不仅使汽车减轻质量，降低能耗，也使汽车造型更美观，还节约制造成本。现代的每辆轿车平均使用塑料占总质量的 10% ~12%，达 150kg 左右。

现代轿车生产中，塑料材料替代金属的进程发展很快。汽车上塑料使用量最多是聚丙烯 PP，其次是聚氨酯 PU，第三位是聚氯乙烯 PVC。按汽车上注塑件的作用，可分为内饰件、外装件、功能件和附属配件。内饰件有仪表板、车门内板、门主柱盖板和杂物箱等。外装件有保险杠、散热器栅格板和挡泥板等。汽车中许多高强度的功能件，例如风扇叶片、进气与排气的歧管、空滤器罩、散热器水室、蓄电池箱、气缸盖罩等，都用工程塑料注射成型。附属配件有车灯照明件、空气过滤器、音响和仪表等。

在汽车工业的发展中，PP 的应用和改性成果显著。汽车保险杆的专用改性 PP，已是合成树脂厂大批量生产品种。汽车转向盘和仪表板多用聚氨酯反应注射工艺。进气与排气的歧管用玻璃纤维增强的聚酰胺 PA 注射时，采用了型芯熔化的新技术。团块不饱和聚酯 BMC 的注射成型新技术，被用于车灯反射镜的生产。

汽车上外挂的覆盖件有保险杠、散热器栅格板和车轮的挡泥罩板。前后的保险杠是轿车的主要注塑件之一。散热器栅格板位于车头，冷却散热发动机，一般用 ABS 或 PC/ABC 混合塑料注射成型。车轮的挡泥罩板主要用硬质泡沫聚氨酯，进行反应注射成型，也用增韧改性的 PP 注射成型。

汽车里的内饰件有车门内板、仪表板、箱盖、座椅和各种护板等，要求安全、无环境污染和舒适。座椅坐垫等用聚氨酯反应注射成低密度泡沫塑料。

车门内板由骨架、泡沫塑料和表皮构成。骨架由 ABS 注射成型。表皮是植绒化纤织物布料。将织物布包覆在注射模的型芯上，与 PP 或 PU 的发泡塑料粘合在一起，最终用真空热成型方法与骨架连成一体。刚性的装饰板，用玻璃纤维增强 PP，注射到已有化纤织布的模具中，用热流道注射的针阀式喷嘴，按顺序控制多个喷嘴注射，可避免熔合缝。

1）汽车保险杠。在汽车发生碰撞时，保险杠用自身的变形吸收能量，有安全保险功能；其次是装饰作用，以便与车身统一着色。汽车上有前后两个保险杠，轻碰撞时能恢复变形；严重碰撞时能将冲击力传导分散给车身。软质保险杠用反应注射的聚氨酯发泡成型。制品作为横杠的面罩，背部要有刚硬的骨架，衬有钢板。普通轿车的保险杠是用硬质的改性 PP 注射成型，就不用骨架支撑了。保险杠壁厚多为 3.6mm 左右，并有加强肋的设计。国内常用汽车保险杠的专用 PP 料，在 PP 物料中加入氧化物调节相对分子质量，再与乙烯-丙烯-二烯烃三元共聚物 EPDM 共混造粒。加入紫外线吸收剂和抗氧剂，加入滑石粉和碳酸钙等无机填料。常温和 -30℃下，有缺口试样的冲击强度 > 600J/m。其熔体的黏度较高，流动速率 2 ~6g/10min。要求保险杠表层在涂装时能耐烘烤和干燥。注射成型保险杠多在大型注射机上并用热流道技术注射成型。成型温度为

190 ~ 230℃，注射成型收缩率为 1. 2% 。

保险杠是汽车上重要的外装件，各汽车公司都在试制新材料和新工艺：用聚烯烃类热塑性塑料弹性体 TPO 替代聚氨酯 PU；也有用 PC/PBT 聚碳酸酯与聚对苯二甲酸丁二醇酯混合物制造；采用吹塑成型工艺生产改性 PP 的保险杠有许多长处。这种改性 PP 塑料的熔体黏度很高，用相对平均分子质量 3.5×10^4 以上的 PP 改性，吹塑成双壁中空的保险杠，低温韧性、刚性和弯曲强度有很大提高。

2）仪表板。仪表板可分成软质和硬质两种，要求耐热，表观质量好，且不能反射强的光线。用于载重汽车和客车的硬质仪表板是单层无表皮，用改性 PP、ABS 或改性 PPO 等注射成型。用于轿车的装饰型软质仪表板由表层、缓冲层和骨架三部分构成。表层的常用材料有 PU、PP 或 ABS/PVC 塑料的片材。片材经裁剪后加热，用真空热成型表面有皮纹的仪表板。骨架用 ABS 注射成型，也有用高填料的 PP 模压成型；也有用钢板冲压成型。两者之间用半硬质发泡 PU 浇注成型。

仪表板是汽车重要的内饰件，应有足够的刚度和抗冲击能力，能牢固装配各种仪表，承受行驶过程中的颠簸。在挡风玻璃透入的太阳光辐射下，在发动机的余热下，仪表板上半部的热变形温度为 100 ~ 120℃，下半部的热变形温度为 85 ~ 90℃，要求尺寸稳定，有防眩和舒适的装饰，使用寿命 10 年以上。

3）挡泥板。卡车用挡泥板用薄钢板制作，再接装橡胶板。轿车用塑料挡泥板作为甩泥水的功能件，也是外饰件。挡泥板的工作环境很差，有较高的低温冲击强度和硬度等要求，主要用硬质泡沫聚氨酯，进行反应注射成型。与一般非发泡注塑件不同，聚氨酯挡泥板厚度为 6 ~ 12mm，局部厚度为 3mm，用加强肋提高挡泥板刚性和强度。其内部圆角半径大于 3mm，外部圆角半径大于 1. 5mm，以便于低黏度物料流动充模。凸台必须有角筋支撑，制品和凸台应有脱模斜度 2°为好。国外有用改性 PP、PPO/PA 和 PA/PP 混合热塑性塑料注射挡泥板。

4）转向盘。转向盘作为结构功能件，用塑料层包覆了金属骨架。骨架的钢条直径 9 ~ 11mm，将轮缘和轮辐放在夹具中定位焊接，再精密铸造铝质轮壳。中央的轮壳要切削加工花键孔。

绝大多数轿车转向盘包覆半硬质的整皮聚氨酯塑料。整皮泡沫聚氨酯塑料反应注射时，对原料、工艺和模具有专门要求。在聚氨酯泡沫反应注射机上，将骨架作为内嵌件注射成型。转向盘整体结构刚硬坚固。整皮泡沫的包覆有致密的纹饰表皮，使手感舒适。其外韧而内软，有一定的缓冲作用，而且色调要与内饰件协调。过去曾用泡沫塑料包裹后，再加复 PVC 表皮，但工艺过程复杂。

5）汽车照明灯具。汽车照明灯具品种很多：前部有前照灯、雾天用灯、示宽灯、转弯的曲线灯和方向灯；汽车后部有刹车灯、方向指示灯、夜显尾灯、倒车灯和车牌照明灯等。它们不仅是照明和安全驾驶的功能件，也是汽车的外饰件。塑料汽车照明灯具比玻璃与金属灯具的重量轻又耐冲击振动，而且设计和制造方便。汽车灯具主要有透光罩壳、反射镜和透镜三方面的注塑件。

① 照明透光罩壳。聚碳酸酯 PC 是透光罩壳的首选材料。夹固的底座用 ABS 或改

性 PP，它们可以设计在一起。

② 反射镜。反射镜结构复杂，曲面和尺寸精度要求高，并要求注射镜片的稳定性好；用 PC、PBT 或 PA 注射成型后再表面处理；经底面涂漆，表面真空铝蒸镀，外加防铝氧化的涂层；用不饱和聚酯 UP 的玻璃纤增强的团状模塑料 BMC 注射成型反射镜，由于生产自动化程度高，制品质量稳定，现今发展很快。它要用热固性塑料注射成型机或专用的 BMC 注射机成型。

③ 透镜。用 PMMA 或 PC 注射成型。透镜表面要加硬质涂层，来提高耐擦伤性能。常用改性丙烯酸涂料。

3. 建筑业用塑料制品材料

现代建筑行业的塑料用量很大，但大部分是挤出成型的板、条、管材和型材。大批量注射成型的有：塑钢门窗的滑轮和手柄等配件；进水和排污等管道的连接件；室内挂钩和托架等；还有卫生洁具用品。

作为建筑制品除应考虑力学等性能外，应考虑阻燃性、耐候性、健康型和稳定性。

建筑行业应用的塑料制品有阻燃性要求。建筑物室内的塑料吊顶、隔墙、地板及它们附件，规定不能燃烧或者产生的烟量很低。对塑料门窗和广告牌等用于户外的制品，有耐候性规定和标准，要求在日光、冷热和风雨等气候条件下材料性能稳定，在寿命期内保持制品功能。

家具材料里含有一些挥发性的有机化合物（Volatile organic compounds，VOC），如甲醛、苯、二甲苯和氯化氢等。这些挥发物污染室内空气，对建筑物中的居住人会造成潜在和慢性的疾病，出现头痛、疲倦和皮肤过敏等症状。这是建筑用塑料制品设计和生产中需注意的问题。

环境因素对建筑用塑料材料的危害，是建筑制品设计所必须考虑的重要方面。建筑制品受到热、光、氧、水和霉菌作用，塑料材料发生高分子链降解、增塑剂迁移和稳定剂丧失等一系列物理化学变化、以致制品性能不断恶化、变软、发脆、龟裂和变色等，最后完全破坏或丧失使用价值。此过程通常称为塑料制品老化。塑料对老化的抵抗能力就是材料的稳定性。

各种建筑塑料制品的使用环境不同，老化失效的特征不同。玻璃钢等屋面被长期曝晒于大气中。而室内聚氯乙烯地板被湿气和霉菌作用。各种塑料的稳定性也有差异。在表 1-24 中列举了各种塑料和橡胶，对热氧化、光氧化、湿气、臭氧氧化和燃烧的稳定性比较。有关塑料制品的阻燃，前面已经有所介绍。下面介绍热氧化、光氧化、湿气、臭氧氧化的稳定性。

表 1-24　常用塑料与橡胶对各种环境因素的稳定性比较

材　料	环境因素				
	热氧化	光氧化	湿气	臭氧氧化	燃烧
热塑性塑料					
聚乙烯	中	劣	优	优	劣
聚丙烯	劣	劣	优	优	劣
聚苯乙烯	良	劣	优	优	劣

（续）

材　　料	环 境 因 素				
	热氧化	光氧化	湿气	臭氧氧化	燃烧
热塑性塑料					
聚氯乙烯	中	中	良	优	良
聚四氟乙烯	优	优	优	优	优
聚甲醛	劣	劣	中	良	劣
聚苯醚	中	劣	良	优	中
聚丙烯腈	良	中	良	优	良
聚乙酸乙烯酯	中	中	良	优	劣
聚甲基丙烯酸甲酯	良	优	良	优	劣
聚酰胺 66	中	中	中	优	劣
聚对苯二甲酸乙二醇酯	良	中	良	优	中
聚碳酸酯	良	中	良	优	中
聚砜	优	劣	良	优	中
ABS	劣	劣	良	优	劣
热固性塑料					
羊毛充填酚醛树脂	良	中	劣	优	中
云母充填酚醛树脂	良	良	良	优	良
脲甲醛树脂	优	优	优	优	良
聚酯型聚氨酯	中	中	中	优	劣
橡胶					
聚异戊二烯	劣	劣	良	劣	劣
聚异丁烯	良	劣	优	优	劣
聚丁二烯	劣	劣	良	劣	劣
聚氯丁二烯	良	劣	良	良	良
丁苯橡胶	劣	劣	良	劣	劣
乙丙橡胶	中	劣	优	优	劣
硅橡胶	优	优	优	优	良

1）热氧化。在无氧的高温下，塑料的大分子链会裂解成单体，或者在大分子链上断开和生成一些低分子物质，如自由基、离子、H_2 和 CO。聚氯乙烯热降解释放出氯化氢。聚甲醛在热环境中放出单体甲醛。即使使用环境远低于理论裂解温度，某些聚合物已开始热降解。小部分化学键处于高能态时会使分子链断裂。

建筑制品都在有氧环境中使用。氧在一定温度条件下，剧烈地攻击大分子链中的弱键，引起材料的热氧老化。聚乙烯在无氧条件下，290℃时仍很稳定，但在有氧条件下，温度低于 200℃，也会发生热氧老化。热氧攻击破坏塑料制品的基本原因是氧化反应。在塑料材料的聚合生产过程中，在塑料加工塑化的剪切加热时，氧的攻击和热能产生了起始的自由基和过氧化物。制品在常温下使用时，热氧化继续进行，不断生成弱键和形成自由基，使得塑料的分子链断裂，分子结构形态发生变化，材料性能丧失。

对于大多数塑料制品，添加抗氧剂能提高其热氧稳定性。

2）光氧化。大多数塑料制品，特别是无色透明制品，长期受阳光、水银灯或荧光灯照射，会发生明显的老化。制品失去光泽、泛黄、变脆、龟裂，性能下降直至丧失使

用价值。户外的广告箱、路灯罩和雷达天线罩，这些制品的光稳定性是首要问题。

光线中的紫外线与聚合物分子链的有些键能大致相当，能破坏塑料制品内部分子结构形态。大多数塑料分子结构，并无吸收阳光能力，但是它们在合成和加工过程中，生成了多种羰基、过氧化物和双键型物质，它们能吸收紫外线，使塑料材料处于被激发的不稳定状态。许多缩聚反应合成的塑料，如聚酯、聚酰胺和聚碳酸酯分子结构含有羰基基团。光活化的分子能量的一部分，在热振动中消耗；另一部分进行了光化学反应。羰基吸收了光量子后，长分子链发生断裂，并生成自由基。所引发的自由基催化氧化，再引发氧化降解反应，形成一个愈演愈烈的恶性老化过程。

天然橡胶和二烯烃类橡胶对光照敏感，部分降解、部分交联，性能很快变劣老化。

光稳定剂，除光屏蔽剂和紫外线吸收剂外，还有猝灭剂和自由基捕捉剂。使用光稳定剂应注意对各种塑料的适用性和与其他添加剂的协同应用。

3）水解。塑料制品加工前，原料粒子必须以一定干燥温度和时间烘干，使含水量达到标准。否则，加工时水分会使塑料分子链断裂，塑料制品的性能下降，这种现象称为短时的老化。水能渗透几乎所有的聚合物。制品在潮湿和高温环境下吸水。塑料制品使用是长期的水解过程。聚酰胺有较大的吸水性，而 PE、PP、PS 和 PTFE 等有良好的耐水性。

建筑塑料制品在使用期内，总会与空气中水分接触。塑料地板和墙脚受湿气较多。塑料屋面和门窗更会受到霜降雨淋。塑料分子中含有容易被水解的化学基团，例如 CONH、COOR 和 CN 等，在酸或碱的催化作用下被水解。倘若这些基团是在主链上，严重水解会使材料性能受到较大影响；若这些基团在支链上，影响就小得多。聚酰胺分子中的 CONH 酰氨基属于亲水基团。PA6 的饱和吸水率为 10% 以上，PA610 的为 3.4% ~3.5% 。聚酰胺制品吸水后发生膨胀。酰氨基的水解使相对分子质量下降。

聚氨酯和聚酯也同样会因水解反应导致主链断裂。常温下聚碳酸酯有较好的水解稳定性，但较高的温度提高了水对 PC 的渗透，特别在酸性的环境中更容易水解。聚甲醛吸水性很小，但在酸或碱的环境中易发生水解。增塑的聚氯乙烯与未增塑 PVC 不同，前者易发生水解。酚醛树脂和不饱和聚酯在碱性介质中易水解，在酸性介质中较为稳定。

4）臭氧老化。臭氧是大气中的组成部分，但含量极少。在雷电闪击时和紫外线光源附近，臭氧的浓度才有增加。臭氧是一种强氧化剂，橡胶的不饱和键的分子结构，易于被臭氧作用。因此橡胶制品常被臭氧老化破坏。多数塑料的分子结构饱和时，臭氧不能与之作用。但是，ABS 具有丁二烯橡胶的不饱和成分，不少塑料品种也经橡胶增韧改性，许多塑料品种，特别是聚烯烃，在合成和加工过程中，也会产生少量的不饱和分子结构。臭氧与双键的反应会引起分子链断裂，产生自由基后进一步引发氧化反应。

臭氧与氧不同，它只在塑料制品表面起反应。因此，可添加 0.5% 左右石蜡，在制品表面形成保护薄膜。制品表面的涂层也能起到保护塑料制品的作用。胺类或含硫化物的抗臭氧剂能起化学稳定作用，它们能快速与臭氧反应形成保护膜。

1.3.2 塑料注射制品的试制

每件注射制品的生产过程是一项系统工程。本节讨论的注射制品的试制是这项工程

的前期策划阶段。它包括制品的失效分析、设计和材料选择。不容置疑，此阶段工作优劣将影响注射成型和模具设计，从而影响注射制品的质量。

1. 失效分析

塑料制品失效分析是在塑料材料学的基础上，研究塑料及制品的失效形式和机理，从而预测塑料制品的安全使用期，指导和监控塑料及其制品的设计、生产和使用的全过程。完善的塑料制品设计还应包括制品的失效分析、成本核算和制品的功能和性能测试。了解塑料制品的失效形式有助于深入了解注射成型工程的全过程，有助于全面并深入认识塑料制品的质量。

（1）失效分析方法　塑料和塑料制品的失效，有力学、机械、物理和化学等因素。在众多因素中，对塑料材料的力学性能认识是讨论的基础。

由于构成的分子和结构不同，塑料与金属材料性能差异很大。相对而言，金属件的设计较为容易，因为金属材料与其制品的性能相差较小。金属零件的功能和性能可较准确地计算和预测。塑料制品的设计和试验测试必须考虑三个主要特点。

1）负载。作用于塑料件的负载有拉伸、压缩、弯曲、剪切和扭转五种基本类型和它们的组合。金属件的力学计算以强度为主，在精密机械设计时，才较多考虑刚度问题。塑料件的力学分析计算以刚度计算为主。普通塑料的弹性模量是钢材的 1/100 ~ 1/50。塑料结构件在负载下容易产生塑性变形；在大多数场合因变形过大而丧失工作能力。另一方面，塑料的注射加工方法都要求注塑件壁厚不能过厚。塑料制品设计者追求薄壁组合的形体，以结构设计来提高注塑件的刚性。

塑料的负载校核计算有短期和长期的区分。塑料件在恒定负载下蠕变和在恒定变形下的应力松弛，在 5 年、10 或 15 年的使用期限下有很明显的发展。塑料件在周期性交变载荷下，不但有疲劳破坏、冲击疲劳破坏，还有应变滞后热的生成。塑料件对负载施加的速率很敏感，有特殊的抗冲击性能。

2）温度。比起金属件，塑料制品是对环境温度很敏感的材料。塑料的热变形温度和低温脆化温度限制了塑料件的工作温度。各种塑料件的工作温度范围较小。塑料件的屈服应力和弹性模量等力学性能随温度升高而下降。塑料件的电绝缘性能和耐化学腐蚀性能等也会随温度提高而丧失。

3）时间。在长期的应力与应变作用下，塑料有蠕变和松弛行为。塑料的力学性能是时间的函数。塑料材料的弹性模量随时间增长而降低。黏弹性在塑料制品的设计和应用中必须考虑。另一方面，塑料件在长期使用中，会逐渐衰老而失效。热、光、氧、化学介质，气体和液体会使塑料件塑化、降解、脆化、渗透、溶胀、变色、脱黏和开裂，有随时间增长而缓慢恶化的过程。

对于不同用途的塑料制品，各有其行业的实用性试验标准和指标。实用性试验（Performance test）与塑料材料试验有相同的原理，但注重考察塑料结构件对变形和破裂的阻抗能力，考察塑料件在工作环境下长时期的功能和性能变化。例如塑料管件的环境应力裂缝试验，要从塑料管件中截取试样，并采用模拟环境的“加速试验”方法。

塑料制品的性能与其制造材料的性能有很大差距。这是由于材料性能测试试样和环

境条件的局限性，是由于塑料件对负载响应的特殊性，对温度、时间、形状和尺寸的敏感性。又由于塑料件的加工经历，使材料损失了一些性能，因此在塑料件的设计过程中，必须进行失效分析来预测失效形式和寿命，以保证使用期内功能和性能满足要求。

（2）塑料制品的失效类型　塑料制品的多样性，工作条件和环境的复杂多变，以致塑料件的失效形式众多，需要正确确定一个或几个主要失效形式进行理论计算和试验预测。下面介绍几种常见的失效形式，供分析时参考。

1）屈服失效。屈服点是塑性变形的起点。剪切屈服和银纹屈服是塑料件破坏的先兆。短时静态负载作用的塑料件，用屈服点以下的许用应变或允许应力，作为塑料件上危险截面上的极限应变或极限应力。

2）蠕变和松弛失效。负载长期作用的塑料件产生过大的蠕变形变，最终会蠕变断裂。蠕变塑料件的材料，其蠕变模量随着时间增长而下降。用蠕变模量计算塑料件上最大的变形量，应该小于塑料件工作寿命期的极限变形量。压力装配的连接件和有预应力的密封件，其本身的应力松弛会使连接松动，密封失效。

3）冲击失效。受冲击的塑料件的形变和断裂是常见的失效形式。冲击负载的作用时间极短，塑料件的变形速率很高。材料、取向、缺口、温度和冲击速度都影响着塑料件的冲击性能。脆性聚合物与弹塑性聚合物及其复合塑料，有不同的冲击断裂机理。聚合物在低温和高速变形下有独特的冲击断裂特征。理论预测各种塑料件被冲击破坏是困难的。塑料件的破坏性冲击性能测试是常用的。

4）疲劳失效。在长期的交变应力作用下，疲劳裂纹的生成和扩展导致塑料件最终断裂。各种塑料的抗疲劳性能有较大差异。疲劳破坏是塑料齿轮和传动带等传动零件的失效形式，也是交通工具上受振动塑料件的失效形式。塑料件疲劳破坏的交变载荷的作用频率在 10Hz 以下。过高的频率会产生力学致热的失效。

5）力学致热。在振动负载的激励下，塑料响应之后使一部分能量以热的形式被耗散。单位时间产生的热量与振动频率、应变幅和损耗角正切成正比。一旦塑料件的工作系统失去热平衡，会软化失效。

6）环境失效。气体和液体对塑料制品的渗透、扩散和溶解，会使整体力学性能劣化。并引发环境应力裂缝。化学介质、热、光和氧的环境导致塑料件渐渐变质老化，缩短了使用寿命。

7）慢性裂缝生成。慢性裂缝生成 SCG（Slow crack growth）的特点是在静载荷或静应力作用下，塑料及制品中裂纹的初始值，而后有缓慢成长过程，由小裂纹到大裂缝断裂的过程。它有别于动态载荷作用下生成的冲击裂纹和疲劳裂纹。慢性裂缝生成过程中受到环境因素和活性介质作用，会促进裂纹扩展和裂缝的生成。

塑料及制品长期在低应力作用，并在非溶剂的液体中浸泡，产生裂纹和生成慢裂缝。在长期的测试过程中，塑料材料有从韧性到脆化的转化现象。这种环境应力裂纹 ESC（Environmental stress crazing）最早应用于塑料管的老化性能测试，可用显微观察测量裂纹随时间的成长过程。环境应力裂纹 ESC 可被视为低应力和环境试剂作用下的蠕变开裂。蠕变开裂失效排除了环境因素作用。许多情况下，环境条件加速慢性裂缝

生成。

大量存在水、溶液、油脂、燃油、清洁剂和各种活性介质，与塑料材料及制品短时间接触或长期浸泡，同时又在低应力作用下，也有慢性裂缝生成。这种裂缝称为应力腐蚀裂纹 SCC（Stress corrosion crazing）。尽管它也存在裂纹的初始化和缓慢成长过程，应力腐蚀裂纹是由于化学反应使分子链断裂，又借助应力作用加快了材料开裂的速率。但各种塑料制品形状各异，各种制品的体积和表面积之比相差很大。塑料片和薄膜，比厚壁试样更容易腐蚀。具有残余应力的注塑件，容易生成应力腐蚀裂纹。加上热降解和水解等因素，经常微波加热和蒸汽消毒的注塑件，开裂失效更为常见。

8）摩擦与磨损。摩擦使运动塑料件的工作能量有损失，导致塑料件表面材料的损耗和损伤。磨损破坏了塑料件摩擦表面的性能、形状和尺寸精度。伴随产生的塑性变形、热软化和热熔化、裂纹和撕裂，使塑料件过早丧失表面接触运动功能。

9）成型加工形成的损伤。熔合缝是塑料件的重要缺陷，造成了塑料件与原材料的力学性能的差距。塑料成型制品的取向、残余应力和收缩影响塑料件的内部和表面质量、形状和尺寸精度。以上两类损伤形成了塑料件材质的弱点和缺陷，也是上述各种失效产生和加剧的内在原因。

在许多情况下，由两个或两个以上相关因素，在同一时期和一定温度下，对塑料制品的失效有增强作用。例如：氯 + 紫外线、电场 + 水、臭氧 + 应力、射线辐射 + 氧、溶剂 + 应力等，这些综合失效形式已被关注和研究。

（3）塑料制品的失效原因　据对塑料制品失效事件的 5 千次统计，环境应力裂纹，占 25%。各种失效形式出现比例，由多到少排列；依次为缺口类的缺陷而被冲击开裂、蠕变和松弛失效、动态疲劳裂纹、化学侵蚀失效、紫外线攻击失效、热降解失效。

安全使用期塑料制品设计的目标之一，是避免在使用期内早期失效。塑料制品在使用期内，存在塑料缓慢降解和性能衰减。确定塑料件的安全使用期，涉及整机产品的安全使用期和塑料件的更换期，决定了塑料制品的使用价值和经济价值。

人为因素是塑料制品失效的重要因素。据统计，其中约 1/2 的原因是塑料选择错误；错误的结构设计和加工质量低劣，各占 20%；其次是使用不当或犯规使用，例如 PET 饮料瓶里装热水。

1）材料选择错误。塑料制品供应商和使用者，从审美观念要求制品着色光亮和表面容易修饰，倾向于选用 ABS 等无定形塑料。塑料制品的加工者，愿选用成型收缩率较小的无定形塑料，例如 ABS、PC、PS 和 PMMA 等，便于达到塑料件的尺寸精度。从失效分析观点，要考虑到无定形热塑性塑料的动态抗疲劳性能差，而且对于慢性裂缝 SCG 和应力腐蚀裂纹 SCC 生成的阻抗能力，比结晶型塑料差，因此，塑料齿轮不能错误用 ABS 和 PC 注射成型，应该用结晶型的聚甲醛 POM 和聚酰胺 PA 模塑。

2）错误的结构设计。塑料注塑件的转角为锐边和锐角，凹槽和缺口无圆角过渡，受到作用载荷时存在应力集中，容易开裂和缺损。螺纹联接的部位，瓶口螺纹和螺纹盖帽容易受载开裂。螺栓或螺钉夹固的凸台和柱孔必须正确设计，避免在联接载荷下，应力过多集中；注意塑料材料的抗冲击性能对缺口的敏感性。制品上微小缺口或划痕会影

响慢性裂缝生成的速率。

3）加工质量低劣。众多塑料制品提早失效是由于在制品生产厂的加工过程中，已经受到损伤。这类失效是可预见的。塑料制品生产过程有效的质量控制和严格管理验收，可以避免或减少失效可能。

常见的生产过程对制品造成损伤的有：塑料改性混料的质量差，材料复合加工低劣和在加热加工过程中热降解和水解；制品材料中存在气囊和熔合缝；在后期加工的焊接、粘结和切割过程中遭受损伤。

注射成型固化后的塑料制品内，存在残余应力，残余应力较高的部位，如浇口附近或金属嵌件周围，容易生成慢性裂缝。被焊接部位曾受到过短时高温加热，存在温差残余应力；粘接部位曾受到活性胶黏剂和助剂侵蚀，这些也容易生成慢性裂缝。

2. 注射制品设计

在塑料制品生产中，工程技术人员必须熟悉制品设计的有关理论、方法、结构和造型。塑料制品设计又与注射成型模具设计的关系密切。对于仿制产品中的注塑件，塑料注射模的设计和制造比较顺利。这是因为有注塑件实样作为模具设计的依据。而初次设计的注塑件试制品，理应允许注射模具有较长的生产周期。

（1）设计要求　塑料材料的黏弹性，使其制品呈现对时间和温度的依赖性。注塑件不但在强度和刚度等力学性能方面，在静载荷下比钢材差许多，而且在各种频率的交变载荷下或在冲击载荷下，在各种环境条件下有不少特殊的失效形式。对塑料制品的使用寿命和可靠性设计，还处于科研和探索阶段。塑料制品设计的困难之处，在于聚合物材料的弹性模量低。因此，塑料制品设计更讲究有效地利用材料，使注塑件具有适用的刚性。追求几何形状的完美性的刚性设计，对塑料制品设计很重要。

塑料制品不同于金属零件，很少采用刀具进行切削加工。绝大多数聚合物的加工成型都经过熔体的流动和形变，通过模具来加工成型制品。塑料熔体在压力下充满模具的型腔，或在模具表面边界作用下成型，进而冷却固化。因此，塑料制品设计必须熟练掌握与之相应的成型模具的设计、制造和应用。

生产中的塑料熔体经模具的冷却系统作用快速固化。因此，制品的收缩存在波动和不均匀，使塑料制品的形状和尺寸精度的控制较为困难。塑料制品的精度取决于塑料材料注射成型方法、模具精度和冷却系统等因素。注射成型也决定了塑料制品必须厚度均匀。它由薄板构成，其厚度必须以所承受力学载荷和绝缘等使用要求确定，并保证塑料熔体能顺利充满型腔。

设计塑料制品首先要确定制品的功能和性能指标，然后选择合适材料，决定成型加工工艺。注塑件设计有方案拟订、结构设计、生产准备和定型三个阶段。

（2）拟订设计方案　在接受了设计任务后，需全面收集有关的资料和技术数据，进行综合分析后，必需做四步工作：

首先要科学地确定制品的功能和性能。注塑件所具有的功能包括使用功能和环境功能。在一定时间、空间和环境下，需要完成诸如包装、抗振、绝热、结构支承、电气绝缘和机械传动等功能。注塑件的性能有力学、热力学、物理和化学等性能。要注意到塑

料的性能不等于塑料制品的性能。大多数塑料经加热熔融和冷却固化成型，原材料的性能会损失下降，会出现新的内在缺陷，影响注塑件的性能。常用塑料制品一般都参照汽车、建筑、包装和电气各行业的指标和测试标准。

第二步是选择合适的塑料。不仅要保证实现制品的功能和性能，也要考虑可加工性和生产成本。经常选择几种材料，用对比分析方法确定。

第三步是确定制品的加工方法。各种加工方法适用于一定形状和尺寸，具有一定的加工精度和生产率，要有相应成型模具和设备。同时确定注塑件的装配方法和表面修饰要求。

第四步是对注塑件进行失效分析。针对注塑件对时间、温度和环境的敏感性，为保证在使用期限里注塑件有可靠的功能和性能，必须按主要失效形式进行预测性的理论计算和相应的实验测试。轴与套的注塑件压力装配后，要计算温度升高和应力松弛后的传递力矩。塑料齿轮设计，必须进行在弯曲疲劳、接触点蚀和热膨胀下的模数和中心距的理论计算。在重要的场合需对制品进行冲击或疲劳、耐候或渗透等测试。

拟订方案时，要遵循多个方案分析比较和逐步优化的常规方法。

（3）结构设计　考虑注塑件的结构，基本上有功能结构、工艺结构和造型结构三方面。注塑件的结构设计主导了注射模的设计。它的每个细节都要与模具结构设计应对。因此，注塑件的设计师与模具设计工程师之间交流合作意义重大。

功能结构设计是结构设计的核心，主要是确定使用功能实现的制品形状、尺寸和壁厚。注塑件结构设计要做静载荷下短时和长期的变形校核；有的要进行动载荷冲击、疲劳、滞后热和磨损等校核。

合理的工艺结构设计是制品生产的前提。关系到注塑件质量、生产率和成本。聚合物流变学是工艺结构设计的理论基础，用以考虑注射成型的可行性。必须合理处理流动性、收缩率、嵌件和脱模等技术问题。注塑件的合理联接设计，采用螺纹联接或弹性卡夹联接，简化了单个注塑件，还能实现与非塑料件的联接，并保证了流水线上对注塑件的高效装配。

对于机壳、面板、仪表板和日用塑料制品，要通过外部造型设计予以装饰和美化。着色、喷涂、彩饰、被覆植绒织物、镀覆金属和模塑图案等修饰与美术相结合，能给人以美感。

结构设计要用工程制图进行形体的空间思维。各种草图、轴侧图、三视图和三维造型是相互交流的工程语言。现代的计算机三维造型保证了设计质量。例如：变形金刚玩具的造型设计，能保证各零件在多种装配关系下，不产生干涉。三维造型也为下一步的计算机充模流动数值模拟分析准备了形体数据。制作一些模型可以帮助结构设计。例如用透明的有机玻璃板粘结成机壳模型。设计中要跟各专业工程师和模具设计师一起工作。现代计算机技术也为注塑件设计提供各种专业软件与数据库。例如弹性卡夹、塑料铰链和塑料齿轮等辅助设计软件。在结构设计的最后阶段，慎重确定注塑件的尺寸精度、几何公差和表面质量的要求是项重要的工作。最后要绘制塑料制品生产用工程图。

（4）生产准备和定型　完成了注塑件的图样设计后，还必须与工艺工程师和模具

工程师合作，对制品成型进行计算机模拟和生产验证，并进行修改，直至定型。

注射成型制品有各种 CAE/CAD 数值分析软件。注塑件三维造型后，计算机模拟注射工艺，可获知塑料熔体的充模流动、保压冷却、固化收缩和翘曲变形的分析结果。在此过程中，需对注塑件设计进行修正和优化。大型注射壳体壁厚相差 0.1mm，就会明显影响熔体充模流动和制品材料成本。计算机分析软件校验和预测，是塑料新产品设计优化和制品优质的保证。

塑料制品与金属零件一样有规模效应。由于成型模具成本很高，生产批量与每个注塑件制造成本成反比。注塑件试制周期，还包括金属模具的机械加工周期。专门的注塑件生产，还需设计和制造专用的成型机。

此外，塑料制品的标准化和系列化程度反映了塑料工业的发展水平。对各种瓶盖、塑料门窗附件、塑料管的接头等产品的标准化工作，今后必将有更大进展。

3. 塑料材料的选择

塑料材料的选择是塑料制品设计的重要组成部分。在制品注射成型后，考虑更换材料是困难和麻烦的，甚至是不可行的。材料的选择不仅要保证塑料制品的功能和性能，还要考虑加工生产、成本和供应。注射加工和模具设计的工程师了解和认知加工材料的性能，是实施工程项目的前提。在熟悉塑料材料分类和品种的基础上，要了解：塑料基体聚合物是热塑性还是热固性；结晶型还是无定形；聚合物混合物的比例；塑料中添加剂的配方；增强塑料的纤维分数。

从材料手册和材料制造商的说明书，以及塑料材料的计算机数据库，设计者可掌握全面和近期的材料信息。材料性能项目所列数值，一般是此种材料性能的平均值，应该从材料供应商处获取详细的材料性能清单。现代注射成型的 CAE 计算机辅助软件中的材料数据库，已经成为了解材料性能的重要途径。

（1）材料的性能　材料性能一般包括四方面：

1）加工性能：熔体流动速率（g/10min）、熔化温度（结晶型聚合物为熔点）、加工温度范围、料筒和喷嘴的加热温度、模具温度、注射成型的压力、固液态的压缩比、注射成型收缩率，以及塑料流动的流变曲线和冷却固化的 *P-V-T* 状态曲线。

2）力学性能：拉伸强度、拉断伸长率、拉伸屈服应力、压缩强度（断裂或屈服）、拉伸模量、弯曲模量（分别在 22℃、92℃、120℃和 150℃）、带缺口悬臂式冲击强度、硬度。

3）热性能：线胀系数、热变形温度（1.82 MPa 和 0.45 MPa）、热导率、比热容。

4）物理性能：固态和熔融态的密度、吸水率（24h）、介电强度（短时升压）。

材料的性能测试是规定的试样在标准的试验条件下进行。试样与塑料制品的形状和尺寸有很大差异。材料经加工后，绝大多数的注塑件的性能比原始材料低。因此，所选择材料性能要比注塑件的性能高，应该考虑安全系数。

（2）对照选用塑料材料品种乃至品级，材料的选择大致有四个步骤：

1）提出注塑件所需性能项目。除了前述的加工性能、力学性能、热性能和物理性能外，还有实现各种功能的专项性能。例如：包装用制品，需提出透明性、抗化学腐

蚀，对气体和液体的渗透性；食品包装还要有食用无害要求；室内的日用注塑件应有阻燃性能要求；室外用品必须有耐候性等各项抗老化性能；电工注塑件有各种绝缘性能要求。

2）提出对原材料性能项目的最低数值清单。设计一个刚性热塑性塑料的注射成型结构件，对原材料性能的最低数值要求。包括拉伸强度、弯曲模量、热变形温度、带缺口悬臂冲击强度和断裂伸长率的对原材料性能数值要求。

3）初步选定一批候选材料。根据对原材料性能的要求，选定几种初选材料。可凭生产经验，以对材料品种的性能先进性和成本的了解，开列所考虑材料的清单，然后淘汰一批。

4）根据专门的性能和材料成本最终选定材料。对注塑件进一步分析比较。蠕变模量、介电强度、成型收缩率和材料成本。对于有刚度和精度要求的注塑件，还要比较可注射成型塑料件较高尺寸精度。如果两种材料收缩率相近，必要时可用成型模具试射注塑件进行分析比较。适用的塑料品种没有商品供应时，可以专门配制复合材料。对聚合物添加填料、用两种聚合物混合，有可能获得所需的改性塑料，但需要时间和资金。

参 考 文 献

[1] 王文广. 塑料材料选用［M］. 北京：化学工业出版社，2001.
[2] 周达飞. 汽车用塑料［M］. 北京：化学工业出版社，2003.
[3] 张玉龙. 电气电子工程用塑料［M］. 北京：化学工业出版社，2003.
[4] 徐佩弦. 塑料制品设计指南［M］. 北京：化学工业出版社，2007.

第 2 章　塑料注射成型的基础理论

了解塑料注射成型的基础理论，才能把握注射工艺的拟定和注射模具的设计；才能清醒地运行注射模流动分析计算机软件。这些基础理论包括：塑料材料形态的转变、黏流态的流动特性、塑料的黏度方程和影响塑料黏度的因素等。塑料的注射流动充模和冷却固化同时伴随着热传递，因而本章还将介绍热力学的基础知识和注射模冷却过程的基础理论。

2.1　塑料注射加工的行为特性

注射成型加工是对塑料材料加热熔化，然后冷却固化定型的过程。本节介绍注射加工中的传递现象，并陈述塑料形态转变的特征。

2.1.1　塑料注射加工中的传递现象

塑料加工的科学理论基础主要是流体的动量传递、热量传递和质量传递，统称为传递现象。

1. 注射成型加工的基本步骤

注射成型能一次成型外形复杂、尺寸精确或带有嵌件的塑料制品，几乎能加工所有热塑性塑料和某些热固性塑料；生产率高且易实现自动化。注射成型是间歇生产过程。每次注射周期经过模具闭合、注射熔料、保压、冷却固化、开模和顶出注塑件。另外，注射装置在保压完成后螺杆旋转，塑化下一次注射的物料。如图 2-1 所示，螺杆由高压油推动，将积聚的塑料熔体射入模具的型腔。塑料熔体注射成型有如下的基本步骤。

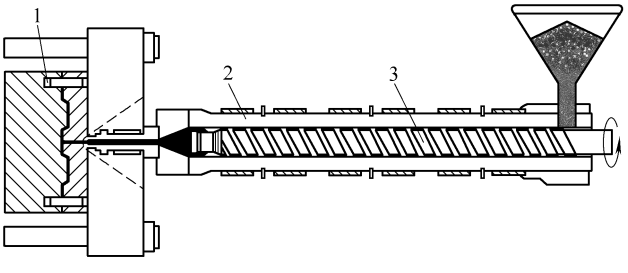


图 2-1　一般的注射成型

1—闭合的模具　2—塑化装置　3—塑化和注射的螺杆

（1）混合和加料　多数塑料制品不是由纯聚合物制成，而是以聚合物为基体又添加各种助剂的混合物。添加剂用于改进基体聚合物的性质。有的添加剂用量较大，构成塑

料的重要组分；有的用量甚微。各种添加剂与基体聚合物的相容性和分散机理是很不相同的。

塑料加工中涉及混合的另一情况，是给定的聚合物与其他聚合物相混，被称为聚合物的混合物。添加相在分散相中的浓度，及它们之间的相容性会影响聚合物混合物的性能改进。

由于注射机螺杆的长径比较小，比挤出机螺杆的混合功能差，因此，加添加剂的塑料、短玻璃纤维增强塑料和聚合物混合物，大都用经造粒的颗粒料供应给塑料加工厂。甚至着色剂的添加也用色母颗粒，供应注射生产。

这些颗粒料生产由高分子合成材料厂生产。混合的配方研究不仅要满足最终制品的工作性能要求，还需考虑塑料的注射加工性能。

颗粒料以长径比为 1 的圆柱体居多，常见尺寸为 3 ~ 5mm。其他有热切而成的扁圆柱、辊压切制的方块料。必须了解固态粒料的输送流动，尤其是在注射机料斗中，以重力或加载送料的过程。

（2）熔融、输送和加压　聚合物热导率低，传热慢，而且有可能热降解或热分解，要限制加热温度和经受加热时间。寻求更高的熔融速率和均化质量，一直是注射塑化装置设计的目标。几十年前，由单独的料筒电热，发展到料筒加热与螺杆剪切加热共同熔融塑料粒子，一直沿用至今。这是因为螺杆在塑化的同时也输送了塑料熔体。

高黏度的塑料熔体要在短时间内充满长流程又狭窄的型腔，必须有几百到几千大气压的压力，沿程的压力降很大。计算机的流动分析软件，重大功能是在于能寻觅注射压力，保证制件型腔内有合理压力分布，让成型制件有均布的密度。

（3）化学反应　热固性塑料成型过程中存在化学反应，模具必须加热并保证排出低分子挥发物。反应加工是同时进行化学反应和聚合物加工的技术。反应注射成型（React injection molding，RIM）技术主要用于热固性树脂体系。两个组分的液态原料高压撞击混合后，注射进成型模具，进一步完成聚合和交联反应，固化成产品。RIM 是将液态单体的聚合反应和注射成型结合在一起。液体原料的黏度低，流动性好；反应过程的温度低于 60℃；从撞击混合到制品脱模的时间，通常约为 1min。反应注射充模的计算机模拟分析，必须考虑化学反应速率和程度，及反应热。

（4）冷却固化和脱模　塑料加工最终要获得优质且稳定的制品。注塑件从加热温度冷却到室温，冷却速率越低，温差残余应力越小，对提高制品内在质量有利。但是，过长的冷却时间是生产率所不允许的。因此注射模具的冷却系统设计，首先要提高冷却效率，同时也要保证模具内塑料件均匀一致地冷却。例如：注塑件的外轮廓和内壁面应有同样致冷温度，不均匀的收缩和残余应力，会使固化后的塑件产生翘曲变形。

注塑件冷却固化后，塑件收缩，对型芯包紧力很大。在顶出脱模过程中要克服摩擦阻力。由于存在聚合物从黏流态到固态的粘附作用，与钢模壁之间存在很大的摩擦系数。为了顺利脱模，不损伤塑料制品，对脱模力预测计算的数值分析还在探索研究中。

2. 塑料注射加工的特征

塑料注射成型加工先由固态原料加热塑化成黏流态，经成型后冷却固化为制品。聚

合物具有大分子的长链，有着大分子链的柔顺性、大分子链的链状结构和构象。它的形态转化决定了注射加工的特征。

（1）链状结构和构象　聚合物大分子链的链状结构可以是线型的、支链型的或网状体型的。前两者的聚合物可以反复加热和冷却，称为热塑性聚合物；后者是较低相对分子质量的预聚物经交联反应后生成，只能在交联时进行一次加热，固化后经受高温不会软化，称为热固性聚合物。此两类的塑料有不同的加工方法、不同的加工机械和模具装备。

高分子聚合物是很大数目的结构单元连接而成的长分子链。由于单键的内旋转，具有许多不同的构象。在流动和温差的诱导下，成型过程中的聚合物熔体处于分子构象的变化和发展中，致使最终的固态聚合物的构象影响着制品的性能。也就是说，注射加工方法和工艺条件影响着制品的性能。取向、结晶和松弛是聚合物分子构象的发展结果。注射加工方法和条件决定的流动剪切速率和成型冷却速率等，影响制品各部位的应力史和应变史；影响制品的物理和力学性能。

（2）高黏度和非牛顿性　聚合物的相对分子质量很高，通常在 $10^4 \sim 10^7$。例如，低密度聚乙烯的平均相对分子质量为 1.5 万～3.5 万；高密度聚乙烯的平均相对分子质量为 5 万～14 万。聚合物熔体的黏度也很高。熔体的黏度随着相对分子质量升高而增大。在注射成型加工的温度范围内，有 $10^2 \sim 10^4$Pa·s 的高黏度。熔体的流动性是注射成型加工的关键。高压熔体在注射模的型腔中，是窄缝隙里的喷泉流动。高黏度熔体在注射模内流动中有很大的压力降。为此必须给以高压并提供足够的热量。熔体在注射模的几何型腔的壁面固定，是外压力作用下的压力流动。熔体在层状稳定流动状态下，质点速度仅沿着与流动方向垂直的方向发生变化，为剪切流动。

聚合物熔体剪切流动的黏度呈现假塑性的非牛顿属性。黏度随剪切速率的增大而降低。在注射模的型腔中，流动熔体通常有 $10^2 \sim 10^4 s^{-1}$ 的剪切速率。对于一定的注射熔体量，压力的变动和型腔流通截面形状和尺寸变化，会有流动剪切速率变化。剪切稀化的黏度对加工条件的确定有指导意义。通过调整剪切速率，控制熔体黏度以使加工易于进行。在注射成型中，让变稀的熔体通过 1mm 直径的针点式浇口，有利于一模多腔所生产注射制品的一致性。

聚合物熔体还具有弹性。注射模中熔体经小浇口射入大型腔。弹性恢复使射出物很不稳定，会出现蛇形流动和熔体破碎，影响制品质量。

（3）低的导热性　多数聚合物的热导率低于 0.33W/（m·K）。经过增强改性的塑料，有所提高的热导率也在 0.5W/（m·K）左右。比起钢的热导率 30～50W/（m·K），相差两个数量级。这使得塑料的加热和冷却需要很长时间。厚度不同的聚合物物料的加热或冷却速率相差很大。大致与厚度的平方成正比。为了缩短加热时间，塑化装置设计以薄层物料为基础，让塑料粒子在螺杆的浅螺槽里加热熔融。同样道理，塑料制品设计也以薄的壁厚为准则。

3. 传递现象分析

从以上考察塑料注射加工的步骤和特征，考察大分子组成的流体微团运动所造成的

传递，要从守恒原理出发，用微分方程（例如连续性方程、动量方程和能量方程）形式描述传递规律。解这些方程得到速度分布、温度分布和压力分布。三种传递现象在塑料加工中往往同时存在。且三种传递现象有类似机理和类似的数学表达方式。传递现象分析的原理和方法是塑料加工理论研究的基础。不过，注射加工时塑料熔体的流动、动量传递是最重要的。

（1）流动类型　首先认识塑料熔体在注射加工中动量传递的类型，介绍动量方程在注射加工邻域中应用。

1）层流和湍流。聚合物熔体黏度高，在注射流动中剪切速率一般小于 $10^4 s^{-1}$，因此雷诺数通常小于 1。在螺杆旋转塑化和注射推进时，塑料熔体呈现层流状态；在注射模的型腔中流动充填时，一般也呈现层流状态；只有在剪切速率超过 $10^4 s^{-1}$，剪切应力超出塑料熔体的临界值时，会出现弹性湍流和熔体破碎，破坏成型制品的质量。

2）稳定流动与不稳定流动。流体在输送通道中流动时，该流体在任何部位的流动状况保持恒定，不随时间而变化，即一切影响流体流动的因素都不随时间而改变，此种流动称为稳定流动。所谓稳定流动，并非是流体在各部位的速度以及物理状态都相同，而是指在任何一定的部位，它们均不随时间而变化。

在正常运行的挤出机中，塑料熔体沿螺杆螺旋槽向前流动属稳定流动。其流速、流量、压力和温度等参数的分布均不随时间而变动。经过数十年众多学者的不懈研究，在以往经典的三几何段和三物理段的螺杆塑化理论的基础上，现在已经有了较完善的计算挤出过程的三段七区的理论。其中也应用了螺旋槽剪切传输和塑料材料形态转变等基础理论，它基本上符合稳定流动的动量传递、热量传递和质量传递理论的分析结果。但是，对于新型螺杆和双螺杆的挤出理论，还处于发展阶段。

流体在输送通道中的流动过程，其流动状况都随时间而变化，即影响流体流动的各种因素随时间而变动，此种流动称之为不稳定流动。

例如在注射成型的充模过程中，塑料熔体的流动属于不稳定流动。因为此时在模腔内的流动速率、温度和压力等各种影响流动的因素均随时间变化。但是，注射流动速度快，充模时间短，在流动分析时通常视其为稳定流动，简化了计算式而误差不大。

在注射加工的塑化过程中，螺杆旋转的剪切热和料筒外加热，让塑料在传输中从固态转化成黏流态。与挤出螺杆的区别在于注射螺杆塑化是间歇行为。螺杆在熔体的反力作用下后退，注塑装置对螺杆施加背压，因此，注射螺杆的塑化过程是塑料材料的不稳定流动。但至今没有注射螺杆塑化过程的理论。注射机的塑化量的计算借用挤出螺杆的计算式，好在误差很小。

3）一维流动、二维流动和三维流动。当流体在流道内流动时，由于外力作用方式和流道几何形状的不同，流体内质点的速度分布具有不同特征。

在一维流动中，流体内质点的速度仅在一个方向上变化。即在流道截面上任何一点速度只需用一个垂直于流动方向的坐标表示。例如，塑料熔体在等截面圆管内作层状流动时，其速度分布仅是圆管半径的函数，是一种典型的一维流动。

在二维流动中，流道截面上各点的速度需要用两个垂直流动方向的坐标表示。流体

在矩形截面通道中流动时，其流速在通道的高度和宽度两个方向均发生变化，是典型的二维流动。

流体在截面变化的通道中流动，如锥形通道，其质点速度不仅沿通道截面的纵、横两个方向变化，而且也沿主流动方向变化。即流体的流速要用三个互相垂直的坐标表示，因而称为三维流动。

二维流动和三维流动的动量方程，其数学处理比较一维流动的要复杂很多。有的二维流动，如平行板狭缝通道，或者间隙很窄的圆环通道，按一维流动作近似处理时不会有很大的误差。众所周知，注塑件的成型制品的型腔是由狭窄的缝隙构成的，浇注流道大多为圆管或接近圆管，都便于简化成一维流动。早期的计算机的注射模具流动（mold flow）分析软件，实际上是按一维的动量方程进行流动分析。

（2）动量传递和动量方程　动量方程有两种形式，奈维－斯托克斯方程是实用形式。

1）动量方程。动量方程（momentum equation）是动量守恒原理在流体运动中的表现形式，其展开式见表 2-1 所列。

动量守恒原理要求流体系统的动量变化率等于该系统上的全部作用力，见表中直角坐标系 x 分量的动量方程的展开式。

表 2-1　动量方程的展开式

坐标系	方　　程
直角坐标系 (x,y,z)	x 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)=\rho g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)$
	y 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_y}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_y}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_y}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)=\rho g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right)$
	z 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_z}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right)$
柱面坐标系 (r,θ,z)	r 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_r}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta}-\frac{v_\theta^2}{r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=\rho g_r-\frac{\partial p}{\partial r}+\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr})+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta}-\frac{\tau_{\theta\theta}}{r}+\frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z}\right]$
	θ 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_\theta}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{v_r v_\theta}{r}+v_z\frac{\partial v_\theta}{\partial z}\right)=\rho g_\theta-\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta}+\left[\frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2\tau_{r\theta})+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta}+\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z}\right]$
	z 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_z}{\partial \theta}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz})+\frac{1}{r}\frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right]$

表 2-1 中　　$\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial t}\right)$——流体的局部动量的变化率；

$\rho\left(v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)$——流体的体积动量的变化率；

ρg_x——质量力，g_x为重力加速度在 x 方向分量；

$-\frac{\partial p}{\partial x}$——压力；

$\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)$——表面黏性力。

2）奈维－斯托克斯方程。奈维-斯托克斯方程（Navier-Stokes equation），简写 N-S 方程。它从微分形式的动量方程演化而来，见表 2-2 所列。在聚合物熔体加工时，常用 N-S 方程在不可压缩下的形式。表中直角坐标系，动量方程的展开式中各分量（$i=x$，y，z）有

$$\rho\left(v_x\frac{\partial v_i}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_i}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_i}{\partial z}\right)=0$$

非牛顿流体应用 N-S 方程时，可将牛顿黏度 μ 置换成非牛顿黏度 η。

表 2-2　奈维-斯托克斯方程的展开式

坐标系	方　　程
直角坐标系 (x,y,z)	x 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_x}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_x}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)=\rho g_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2\tau_x}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\tau_x}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\tau_x}{\partial z^2}\right)$
	y 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_y}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_y}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_y}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_y}{\partial z}\right)=\rho g_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2\tau_y}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\tau_y}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\tau_y}{\partial z^2}\right)$
	z 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_x\frac{\partial v_z}{\partial x}+v_y\frac{\partial v_z}{\partial y}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2\tau_z}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\tau_z}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\tau_z}{\partial z^2}\right)$
柱面坐标系 (r,θ,z)	r 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_r}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_r}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta}-\frac{v_\theta^2}{r}+v_z\frac{\partial v_r}{\partial z}\right)=\rho g_r-\frac{\partial p}{\partial r}+\mu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rr})\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2}\right\}$
	θ 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_\theta}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{v_r v_\theta}{r}+v_z\frac{\partial v_\theta}{\partial z}\right)=\rho g_\theta-\frac{1}{r}\frac{\partial p}{\partial \theta}+\mu\left\{\frac{\partial}{\partial r}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_\theta)\right]+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial \theta^2}+\frac{2}{r^2}\frac{\partial v_r}{\partial \theta}+\frac{\partial^2 v_\theta}{\partial z^2}\right\}$
	z 分量 $\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_z}{\partial \theta}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 v_z}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2}\right]$

（3）热量传递和能量方程　等温流动是指流体各处的温度保持不变。在等温情况下，流体与外界可以进行热量传递，但传入和输出的热量应保持相等。

在塑料注射加工成型条件下，塑料的流动一般均呈现非等温流动状况。注射机的料筒和喷嘴与注射模被控制在不同的温度。即使模具温度恒定，黏度高和剪切速率大的熔体，流动过程中有生热和热效应。黏性流体在模具的通道里，压力流动时，黏滞损耗的能量转变为热，熔体温度升高，使其在流道径向和轴向存在一定的温度差。塑料熔体的注射充模实际上是非等温的流动。但将熔体充模流动阶段当做等温流动过程处理，并不会有过大的误差，却可以使充模过程的流动分析大为简化。

各种塑料制品的固化是在不同条件下进行的。热塑性塑料制品是由低温模具的传导而冷却的。热固性塑料模压成型制品则需加热。聚合物相变时热性能有突变，必须关注结晶型聚合物的固化与无定形聚合物的区别。

为提高传热效率或冷却效率，增大注射熔体温度与模具温度差往往受到限制。高温会造成聚合物熔体热降解或热分解。温度太低的模具冷却界面，会使注塑件产生过大的温差残余应力。由于不能充分松弛，冻结的残余应力会引起翘曲变形。因此，熔体温度、模具温度与冷却时间，关系到生产率和制品的质量，也是注射工艺设计的重要参量。

能量方程（energy equation）是能量守恒原理在流体运动中的表现形式。表 2-3 所示运动流体能量方程的展开式是实用能量方程。它以可测量的温度 T 的变化率形式表述。在固定质量流体微元中的总能量变化率，等于单位体积的流动能量、热能的净流量和应力所做功之和。推导傅里叶热传导方程时忽略能量方程中的后两项。

表 2-3　运动流体能量方程的展开式

坐标系	方　　程
直角坐标系 (x,y,z)	$\rho C_V\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_x\frac{\partial T}{\partial x}+v_y\frac{\partial T}{\partial y}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x}+\frac{\partial q_y}{\partial y}+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)-T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho\left(\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)+$ $\left[\left(\tau_{xx}\frac{\partial v_x}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial v_y}{\partial y}+\tau_{zz}\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)+\tau_{xy}\left(\frac{\partial v_x}{\partial y}+\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)+\tau_{xz}\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial x}\right)+\tau_{yz}\left(\frac{\partial v_y}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)\right]$
柱面坐标系 (r,θ,z)	$\rho C_V\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_r\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=-\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rq_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial q_\theta}{\partial \theta}+\frac{\partial q_z}{\partial z}\right)-T\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rv_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)+$ $\left\{\left[\tau_{rr}\frac{\partial v_r}{\partial r}+\tau_{\theta\theta}\frac{1}{r}\left(\frac{\partial v_\theta}{\partial \theta}+v_r\right)+\tau_{zz}\frac{\partial v_z}{\partial z}\right]+\tau_{r\theta}\left[r\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{v_\theta}{r}\right)+\frac{1}{r}\frac{\partial v_r}{\partial \theta}\right]+\tau_{rz}\left(\frac{\partial v_r}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)+\tau_{\theta z}\left(\frac{1}{r}\frac{\partial v_z}{\partial \theta}+\frac{\partial v_\theta}{\partial z}\right)\right\}$

表 2-3 中　C_V——比定容热容；

q_i——导热通量，即单位时间通过单位面积热量；

$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_\rho$——固定密度的压力对温度的变化率。

在注射充模流动的数值分析中，表 2-3 的运动流体能量方程太复杂。将其第一项引入热扩散的热导率 λ，将导热通量 q_i 演化成温度梯度；又假定塑料熔体为不可压缩流

体，可将第二项去除；考虑注射流动时的黏性摩擦的热效应，将能量方程的最后一项化成黏度 η 与剪切速率平方的函数，就可以得到黏性运动流体在非恒温条件下能量方程的直角坐标系（x，y，z）展开式

$$\rho C_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_x\frac{\partial T}{\partial x}+v_y\frac{\partial T}{\partial y}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\eta\left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial y}+\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v_y}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial v_z}{\partial x}+\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2\right] \tag{2-1}$$

式中　C_{p}——比定压热容［J/(kg · K)］；

λ——热导率［W/(m · K)］；

η——非牛顿黏度（Pa · s）。

式中注射充模流动时的剪切应力和剪切速率的关系为

$$\tau_{xy}=\tau_{yx}=\eta\,\dot{\gamma}_{xy}=\eta\left(\frac{\partial v_x}{\partial y}+\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\eta\,\dot{\gamma}_{yz}=\eta\left(\frac{\partial v_y}{\partial z}+\frac{\partial v_z}{\partial y}\right)$$

$$\tau_{zx}=\tau_{xz}=\eta\,\dot{\gamma}_{zx}=\eta\left(\frac{\partial v_z}{\partial x}+\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)$$

（4）物质传递和连续性方程　在注射保压阶段，螺杆有缓慢少量的推进。注射模型腔里的聚合物物料有所增加，其密度有提高。因此，计算机模拟分析保压过程的密度分布，必须考虑物质的传递。

注射加工中的物质传递现象，还表现在配方混料的过程、螺杆塑化的过程，还有多色多组分的注射等。有的需要强化，有的要弱化。物质传递机理包括分子扩散和对流扩散。聚合物熔体的分子扩散系数很低。聚合物物系的物质传递系数，对温度和黏度有很强的依赖性。

连续性方程（continuity equation）是质量守恒原理在流体运动中的表现形式。在选定的时空坐标系（x，y，z，t）中，考察在流动过程中速度 v 和密度 ρ 的分布，见表 2-4。若为稳定流动，某位置密度不随时间变化，其$\frac{\partial \rho}{\partial t}=0$。而不可压缩流体矢量场的连续性方程为

$$\frac{\partial v_x}{\partial x}+\frac{\partial v_y}{\partial y}+\frac{\partial v_z}{\partial z}=0$$

表 2-4　连续性方程的展开式

坐标系	方　　程
直角坐标系 (x,y,z)	$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x)+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z)=0$
柱面坐标系 (r,θ,z)	$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r)+\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial \theta}(\rho v_\theta)\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z)=0$

2.1.2　聚合物的形态转化

注射过程是塑料形态转化的过程。本节通过聚合物形态的热力学转化，说明形态对温度的依赖性，并进一步陈述聚合物的各种固体形态。

1. 聚合物形态的热转化

图 2-2a 所示为低分子材料的比体积 V 与温度 T 的变化曲线。以恒定速度加热时，比体积随温度线性地增加；当达到熔点 T_m 时，保持此温度不变，比体积会突变增大；再进一步加热升温，比体积又随温度升高而增加，但增加的速度与以前不同。熔点的热力学意义，是该温度时晶体与液体的自由能相等，共处于平衡系统中。低于熔点时该材料是线弹性体，分子排列是有序的结晶体；高于熔点时，该材料是线性黏性流体，属于无定形材料。材料在熔点发生相变，从晶相转变为液相。

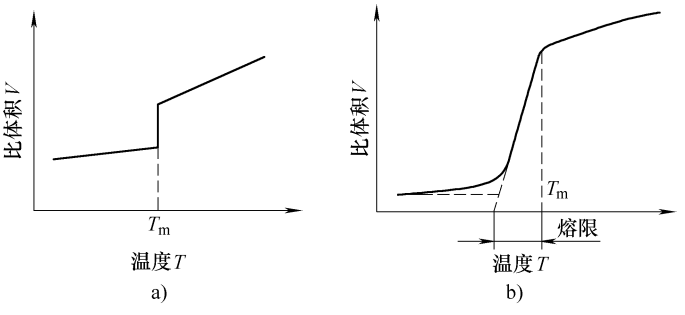


图 2-2　固相与液相的转化

a）低分子材料　b）结晶型聚合物

聚合物的状况与上述不同，固相与液相的界限是不明确的。如图 2-2b 所示，比体积随温度增加呈局部曲线关系；继续加热，比体积随温度有快速增加。与低分子材料不同，结晶型聚合物的相转变在一定的温度范围内发生。这个温度范围通常称熔限。熔限的上限点称为平衡熔点 T_m。

结晶型聚合物在熔点以上处于黏流态。结晶聚合物的固态也就称为结晶态。结晶聚合物总是有无定形区的存在。结晶度为结晶区的含量。结晶度影响着此类聚合物的力学性能。聚合物的结晶过程与分子构象密切相关。结晶度与晶体形态取决于高分子链的对称性、柔顺性和结晶速率。

注射模具是让塑料熔体结晶的容器，结晶度关系到模具温度。与低分子材料相比，聚合物结晶有如下三个特点：

1）同一聚合物在结晶温度不同时，结晶速率不相同，存在结晶速率最快的温度。

2）不同聚合物的结晶速度差别很大。

3）凡有结晶能力的聚合物，熔体冷却时从熔点至玻璃化转变温度之间的任何温度，均可发生结晶。

结晶型聚合物的玻璃化转变温度 T_g，是指其无定形部分的玻璃化温度，指激发或

冻结无定形区分子链段的活动性的温度。

无定形聚合物在恒定外力作用下，它的变形-温度关系如图 2-3 所示。在温度变化过程中，它呈现两种转变和三种力学状态。温度低于玻璃化温度 T_g 时，表现为具有弹性变形的玻璃态；温度在黏流温度 T_f 以上时表现为黏流态，T_f 是流动转变温度；材料温度介于 T_g 与 T_f 之间时，表现为高弹态。各种无定形聚合物的三种力学状态出现的温度区域很不相同。

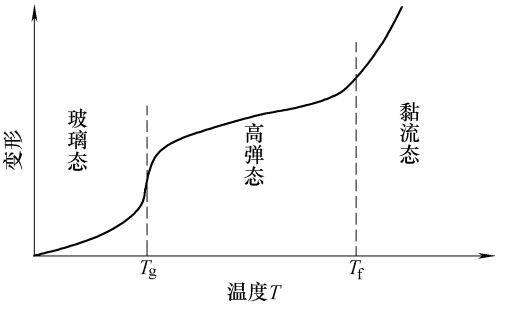


图 2-3　无定形聚合物的变形-温度曲线

交联的热固性聚合物，只有一种力学状态。常温下的热固性塑料制品处于玻璃态，而橡胶制品是高弹态。由于永久的交联代替了暂时的分子链缠结，交联的整体就是个大分子，因此不发生形态转化，故没有黏流态。

无定形聚合物在玻璃化转变温度时不发生结晶作用。发生玻璃态与高弹态的转变，是力学性能的转折点。弹性模量有几个数量级的变化。拉断伸长率、屈服应力和拉伸强度等有突变。其他热力学、电磁学和光学性能等也有急剧变化。有多种实验方法来测定聚合物的玻璃化温度。

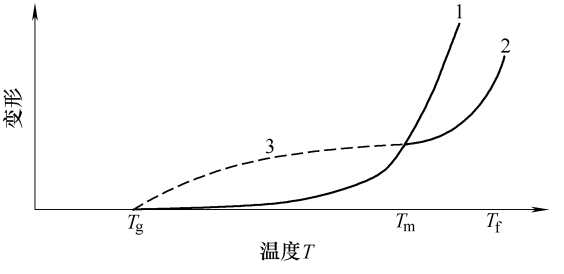


图 2-4　结晶型聚合物的变形-温度曲线

1—$T \geqslant T_g$；$T_f < T_m$ 进入黏流态　2—$T \geqslant T_m$，$T_f > T_m$ 时先进入高弹态；$T > T_f$ 时变成黏流态　3—$T > T_g$ 进入高弹态

结晶型聚合物存在结晶区和无定形区两相。无定形区的聚合物也存在三种力学状态和两种转变。由于结晶区分子链的有序折叠，有着类似物理交联的作用。图 2-4 所示为结晶型聚合物的变形-温度曲线。

在玻璃化温度 T_g 以下，聚合物呈现玻璃态力学性能。温度升高到 T_g 时，结晶型聚合物中的无定形区部分发生玻璃化转变，进入高弹态，如虚线 3 所示。由于结晶区的存在，结晶区的刚性比高弹态的无定形区大得多，因而晶态聚合物在未达到熔点 T_m 前，形变较小地增加。此时聚合物呈皮革状柔软的弹塑态。这种无定形区形变随着聚合物结晶度的增加而减小，直至观察不到明显的玻璃化转变。温度继续升高到熔点 T_m 时，结晶区熔融。若聚合物的相对分子质量较小，使黏流温度 T_f 小于熔点时，结晶型聚合物熔融后直接进入黏流态，如曲线 1 所示。倘若聚合物的相对分子质量较大，使黏流温度 T_f 大于熔点 T_m，则结晶型聚合物熔融后先转变成高弹态，直至温度升高到黏流温度 T_f 时，才转变成黏流态，如曲线 2 所示。结晶型高聚物在熔融后还处于高弹态，不利于流动充填模具的型腔。因此要控制注射级聚合物的相对分子质量。

2. 聚合物的固体形态

在塑料工程中必须考虑到聚合物力学性能的多元性。各种塑料制品主要依照弹塑性和黏弹性的力学规律进行设计计算。对注射成型加工，首先要考虑固态注塑件的弹塑性能。因为它是制品质量的重要方面。

固态聚合物在实验条件下表现为弹性体，尽管它的变形和回复对时间有明显的依赖性。尽管它是非胡克弹性体，各种聚合物对胡克定律的遵循有较大差异，但在塑料工程中，经常近似地作为弹性体来处理其应力-应变行为。固态聚合物的弹性模量很低。刚性较好的聚合物及其复合材料，弹性模量通常为 $10^2 \sim 10^4$MPa；橡胶类高弹性体的模量为 $0.2 \sim 5 \times 10^2$MPa。大多数固态高聚物具有屈服现象，外力使其超过屈服极限后，会产生不可逆的塑性变形。

除了以上提到弹塑态、玻璃态、高弹态和结晶态等多种形态外，还有取向态和液晶态。下面简要陈述三种形态。

（1）高弹态　无定形聚合物在黏流温度 T_f 和玻璃化温度 T_g 之间的力学状态称高弹态。其基本特征是：弹性模量低，延伸率大，在不太大的外力下可产生很大变形，外力除去后又能恢复原状。相对分子质量极大的长分子链卷曲成无规线团，分子构象万千。分子链构象的可变性所导致的柔性，宏观上反映了固态聚合物的高弹性。无定形聚合物在适当温度和一定条件下，都可处于高弹态。无定形塑料在高弹态下，能容易进行吹塑和热成型等加工。在注射喷嘴中的无定形塑料常处于高弹态，使开放式喷嘴能能容易地热力闭合与开放喷射。倘若注射喷嘴中为结晶型塑料，则需要严格控制开放式喷嘴的温度。

室温下高弹态的橡胶为网状结构。在交联点之间的网链段处于卷曲状态，可在外力下发生定向伸展，去除外力后，又可由分子热运动而卷曲起来。交联点之间的网链段收缩，交联点密度增加，使网链的卷曲程度越差，高弹变形量就越少。倘若网链比分子链还短，如环氧树脂和酚醛树脂那样，就失去了弹性。

（2）取向态　聚合物分子有长链的特征。由于它的柔顺性，在力场和温度场等作用下，分子链将沿着外场方向排列。聚合物的取向现象，有分子链、链段、晶片和晶粒等取向。取向态与结晶态区别在于，前者是一维或二维有序排列，而结晶态是三维有序结构。

取向使高分子材料的力学性能、热学性能和光学性能等呈现各向异性，并有显著变化。在取向方向上的弹性模量和拉伸强度增加；而垂直于取向方向的弹性模量和拉伸强度降低。在取向方向导热较快；而垂直于取向方向导热较慢。

聚合物的取向有分子链沿着一个方向排列的单轴取向，例如经喷丝和拉伸的合成纤维；有分子链沿着平面平行的方向排列，例如双向拉伸的聚对苯二甲酸乙二醇酯薄膜。注塑制品的取向按薄板组合结构展开，以聚合物熔体的层流平面的流动方向排列，又有垂直平面的温度差造成的取向。

无定形聚合物的取向程度可分成两类：一类是整个分子链取向，但链段并未取向；另一类是分子链段取向，但分子链并未取向。可以说，在外力场作用下，由于剪切流动

造成的取向是分子链取向，而温度场造成的是链段取向。

取向是在外场作用下，分子链和链段克服材料内部黏滞阻力，进行有向排列，然后又被“冻结”起来，在一定条件下是可逆过程。热力学的解取向需要内能和时间。

结晶型聚合物的取向比较复杂，不仅有无定形的分子链和链段的取向，还有晶粒的取向，伴随有晶片取向和晶面滑动。不同晶态聚合物有不同的取向机理。

（3）液晶态　液晶态被称为气态、固态和液态之外的物质第四态，现已被广泛应用。液晶态是介于有序的晶态和无序的液态之间的一种中间相态。

液晶态的分子排列存在着位置上的无序性，但在取向上仍有一维或二维的长程有序性。分子一维有序排列的向列型液晶，具有灵敏的电响应特性和光学特性，在电场或磁场中会被诱导取向，因而可制成显示元件。有的液晶材料在溶液中生成，称溶致型液晶，在高浓度液晶溶液纺丝时，可获得高强度和高模量的纤维。

热致液晶聚合物（thermotropic liquid crystal polymer，TLCP）在一定的温度区间内为液晶态。成型时的 TLCP 熔体，大分子链的有序取向，使分子链之间较少缠结，熔体的黏度较低，大致与聚乙烯或聚丙烯的黏度相当，且对剪切作用十分敏感，有明显的剪切变稀的现象，特别适用于注射模塑成型薄壁和长流程的复杂制品。冷却固化后，它依靠自身分子的刚性链的高度取向起自增强作用，有很高的强度和模量。现代工业化的热致液晶聚合物是芳香族共聚酯，也称液晶聚酯。其注塑件有各向异性，且熔合缝的强度低下，因此需要玻璃纤维或碳纤维等来增强与填充改性。

2.2　塑料熔体的流动

几乎所有的塑料的成型技术，都是依靠外力作用下的流动与变形，实现从塑料原料到制品的转变。掌握塑料熔体的流动与变形的现象和基本原理，了解流动类型和特点，以及在注射模中的流动规律，对拟定注射工艺和设计注射模具有指导意义。

2.2.1　非牛顿塑料熔体的流动

塑料熔体在注射成型流动过程中的黏度变化极为复杂。本节陈述聚合物熔体的非牛顿性和流变曲线的测定和解读。

在剪切流动中，按剪切应力与剪切速率的关系，可以分为牛顿型流动和非牛顿型流动。

1. 牛顿型流动

流体流动时，内部抵抗流动的阻力称为黏度。它是流体内摩擦力的表现。为了研究剪切流动的黏度，可将这种流体的流动简化成图 2-5 所示的层流模型。

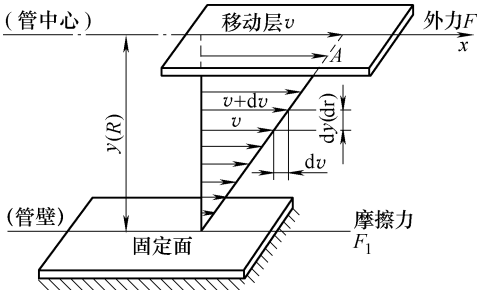


图 2-5　剪切流动的层流模型

图 2-5 所示的稳定的剪切流动出现在

塑料熔体的注射过程。采用直角坐标系，$y=0$ 处流体是静止的。$y=h$ 处的流体则以与上平面相同的速度 v_{max} 沿 x 方向运动。此种流动发生在两平行板间的窄缝之中。假如采用圆柱坐标系，对于圆柱中央 $r=0$ 处，流体以 v_{max} 沿 x 方向运动。在管壁上（$r=R$）流动是静止的。此种流动是发生在压力作用下圆管道中的剪切流动。

将这种切变方式的流动，可看作许多彼此相邻的薄液层沿外力作用方向进行着相对移动。图 2-5 中的 F 为外部作用于面积 A 上的剪切力。F 克服面积 A 下各层的流体间的内摩擦力，使以下各层流体向右流动。单位面积上的剪切力称剪切应力，以 Pa 为单位。剪切应力 τ 是流动方向的单位面积的剪切力，反映了流体内摩擦的粘滞阻力，有

$$\tau=\frac{F}{A} \tag{2-2}$$

流体以速度 v 沿剪切力方向移动。黏性阻力和固定壁面阻力的作用，使相邻液层之间出现速度差。假定液层对固定壁面无滑移，与壁面接触的液层的流动速度为零。在间距为 $\mathrm{d}y$ 的两液层面的移动速度分别为 v 和（$v+\mathrm{d}v$）。$\mathrm{d}v/\mathrm{d}y$（或 $\mathrm{d}v/\mathrm{d}r$）是垂直液流方向的速度梯度，称为剪切速率，以$\dot{\gamma}$表示，其单位为 s^{-1}，有

$$\dot{\gamma}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}y}\qquad 或\dot{\gamma}=\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}r} \tag{2-3}$$

设液体运动方向为 x 轴正向，运动距离 $\mathrm{d}x$ 与相应的移动时间 $\mathrm{d}t$ 之比为速度，$v=\mathrm{d}x/\mathrm{d}t$。速度梯度

$$\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=\frac{\mathrm{d}(\mathrm{d}x/\mathrm{d}t)}{\mathrm{d}y}=\frac{\mathrm{d}(\mathrm{d}x/\mathrm{d}y)}{\mathrm{d}t}$$

因此，剪切速率$\dot{\gamma}$也可理解成间距为 $\mathrm{d}y$ 的液层，在 $\mathrm{d}t$ 时间内的相对移动距离，或者是在单位时间内剪切力作用下液体产生的切应变。

理想黏性流体的流动符合牛顿型流体的流变方程。遵循牛顿黏性定律的牛顿型流体，其剪切应力与剪切速率成正比。有

$$\tau=\mu\dot{\gamma} \tag{2-4}$$

式中，比例系数 μ 为牛顿黏度，单位为 Pa·s（$1\mathrm{Pa}\cdot\mathrm{s}=1\mathrm{N}\cdot\mathrm{s}/\mathrm{m}^2$）。它是流体本身所固有的性质，其大小表征抵抗外力所引起的流体变形的能力，反映了物料流体的流动性优劣。

剪切应力 τ 与剪切速率$\dot{\gamma}$的关系曲线，也称为流动曲线或流变曲线，如图 2-6 所示。牛顿型流动曲线是通过原点的直线。该直线与轴夹角 θ 的正切值是流体的牛顿黏度。即

$$\mu=\frac{\tau}{\dot{\gamma}}=\mathrm{tg}\theta$$

牛顿流体的应变是不可逆的。纯黏性流动的特点，是在其应力解除后应变永远保持。牛顿黏度与温度有密切关系。真正属于牛顿流体的只有低分子化合物的液体或溶液，如水和甲苯等。

2. 非牛顿型流动

图 2-6 所示的 a 和 c 流动曲线，流体的剪切应力和剪切速率之间呈现非线性的曲线关系。凡不服从牛顿黏性定律的流体称为非牛顿流体。这些流体在一定的温度下，其剪

切应力和剪切速率之间不成正比关系。其黏度不是常数，而是随剪切应力或剪切速率而变化的非牛顿黏度 η_a，如图 2-7 所示。

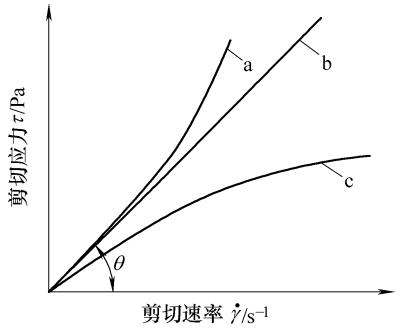


图 2-6　各种类型流体的 τ - $\dot{\gamma}$ 流变曲线

a—膨胀性流体　b—牛顿流体　c—假塑性流体

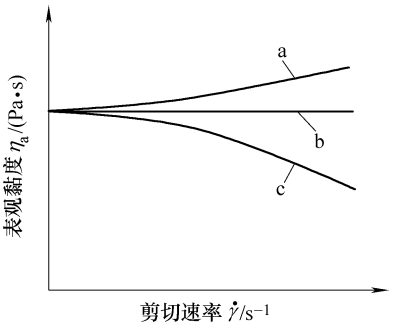


图 2-7　各种类型流体的 η_a- $\dot{\gamma}$ 流变曲线

a—膨胀性流体　b—牛顿流体　c—假塑性流体

假塑性流体是非牛顿流体中最常见的一种。橡胶和绝大多数聚合物及其塑料的熔体和浓溶液，都属于假塑性流体。如图 2-6 所示，此种流体的流动曲线是非线性的。剪切速率的增加比剪切应力增加得快。又如图 2-7 所示，此种流体的流变曲线，其特征是黏度随剪切速率或剪切应力的增大而降低，常说成是剪切变稀的流体。聚合物的细长分子链，在流动方向的取向使黏度下降。

膨胀性流体（如图 2-6 所示）的流动曲线，剪切速率的增加比剪切应力增大要慢一些。又如图 2-7 所示，此种流体的流变曲线，其特征是黏度随剪切速率或剪切应力的增大而升高，常说成是剪切增稠的流体。聚合物熔体与固体颗粒填料体系等属于此种流体。在较高剪切速率下的碳酸钙填充的塑料熔体具有膨胀性。在静止状态，固体粒子密集地分布在液相中，能较好排列并填充在间隙中。在高剪切速率的流动时，颗粒沿着各自液层滑动，不进入层间的空隙，出现膨胀性的黏度增加。

描述假塑性和膨胀性的非牛顿流体的流变行为，用幂律函数方程

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \tag{2-5}$$

式中　K——流体稠度（Pa · s）；

　　n——流动指数，也称非牛顿指数。

流体稠度 K 值越大，流体越黏稠。流动指数 n 可用来判断非牛顿流体与牛顿型流体的差别程度。n 值离整数 1 越远，则呈非牛顿性越明显。对于牛顿流体 $n=1$，此时 K 相当于牛顿黏度 μ。对于假塑性流体 $n<1$；对于膨胀性流体 $n>1$。

将幂律函数方程与牛顿流体的流变方程 $\tau=\mu\dot{\gamma}$ 进行比较，化成

$$\tau = K\dot{\gamma}^n = (K\dot{\gamma}^{n-1})\dot{\gamma} \tag{2-6a}$$

令

$$\eta_a = K\dot{\gamma}^{n-1} \tag{2-6b}$$

得

$$\tau = \eta_a\dot{\gamma} \tag{2-6c}$$

式中，η_a 被定义为非牛顿型塑料熔体的表观黏度（Pa · s）。

3. 流变曲线

注射成型是在一定压力下的塑料熔体，经流动充填模具型腔而实现的。塑料熔体有比一般流体高得多的黏度，通常有 $10^2 \sim 10^3$Pa·s，并且有非牛顿的假塑性流体的特征。

生产中通常用黏度的相对值，来评估熔体的流动性。热塑性塑料熔体流动速率试验方法 GB3682 使用最普遍。熔体流动速率，是在一定温度和负荷下，10min 通过标准口模的熔体质量。口模内径 2.095mm，长 8mm。负荷用的砝码及料筒自动控制的温度，均要按标准条件进行。熔体流动速率（g/10min），对应国外 ASTM D1238 标准，被译为熔体指数（Melt flow index）或熔体流动速率（Melt flow rate），缩写 MFI 或 MFR。注射模塑料熔体的 MFI 为 1～50g/10min 。薄膜吹塑的 MFI 是 0.3～12g/10min。

塑料熔体的流动速率测量方便，其仪器简单，数据容易获得。它是工业企业对熔体黏度的相对测定法。但此数据不能用于熔体流动的黏度、体积流率、剪切应力与剪切速率及流程压力损失的计算。塑料熔体的黏度特性要用流变仪测得。常用如图 2-8所示毛细管流变仪，进行在压力作用下剪切流动有关流变参数的测定和分析。熔体流动速率仪的口模长径比比较小，L/D 大约为 4。而毛细管流变仪，L/D 大致有 20～40。前者是对挤出物称重得知流量，而流变仪上装有传感器，测出活塞杆的压力和位移，又经自动计时，可获知柱塞下降速度，推算出熔体流经口模的流量。它的载荷和柱塞速度有很大的调节范围。

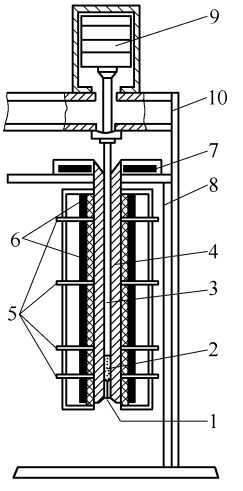


图 2-8 毛细管流变仪

1—口模 2—聚合物 3—柱塞 4—料筒 5—热电偶 6—加热器 7—加热盘 8—支框 9—负重 10—机架

恒定压力作用在柱塞上，把装在料筒里经熔化的物料从毛细管中挤出，测得柱塞下移速度，由流量、压力、温度和毛细管几何参量，获得如图 2-9 所示的流变曲线。

常见的有毛细管最大剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系曲线，如图 2-9a 所示。表观黏度 η_a 与 $\dot{\gamma}$ 的关系如图 2-9b 所示曲线。

注射充模的热塑性塑料熔体的黏度不但与温度和压力有关，而且随流动的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 增大而下降，即有“剪切变稀”的现象。如图 2-9b 所示，表观黏度 η_a 随 $\dot{\gamma}$ 增大而下降。因此，要用非牛顿流体的流变方程，以幂律指数 n 来描述。

熔体在圆管中流动时，若 τ 为管壁的最大剪切应力，有

$$\tau = \frac{\Delta pR}{2L} \tag{2-7}$$

式中 Δp——管道两端的压力差（Pa）；R——管径（m）；L——管道长度（m）；

$\dot{\gamma}$ 为管壁上的剪切速率，也称为表观剪切速率，有

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} \tag{2-8}$$

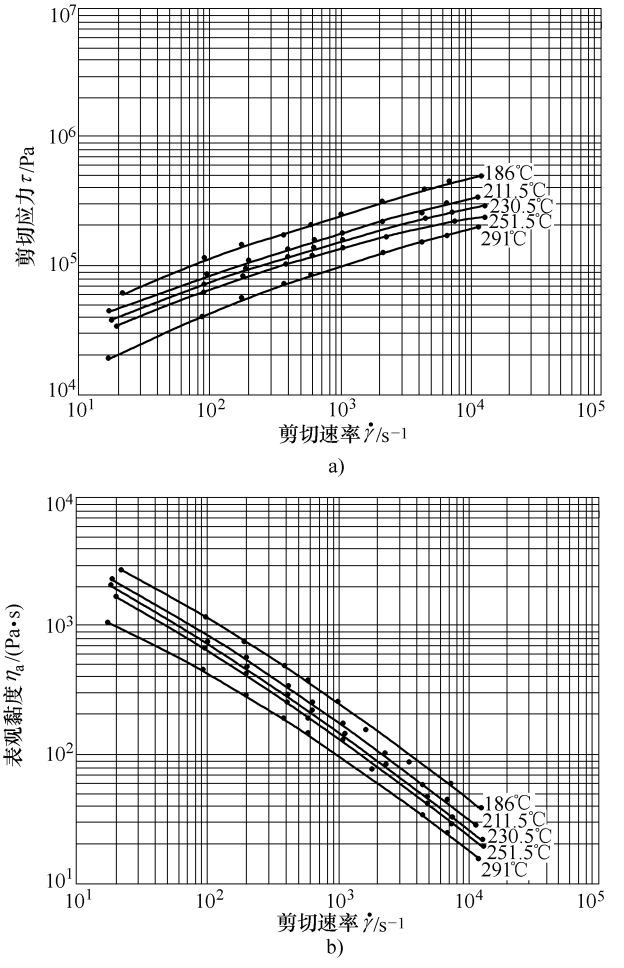


图 2-9　聚丙烯的流变曲线

a）剪切应力 τ-剪切速率$\dot{\gamma}$流变曲线　b）表观黏度 η_a-剪切速率$\dot{\gamma}$流变曲线

MFI = 10.8g/10min　毛细管 L/D = 40/1

式中，Q 为体积流率。Q 可用被充模的型腔体积 V，与注射机常规充模时间 t 之比求得。

近年来，国内在流道和型腔的充模流动分析的工程计算时，为方便应用流变数据，常用

$$\tau = K'\dot{\gamma}^n \tag{2-9}$$

式中，K'为表观稠度（Pa · s）。从流变仪测得的数据为表观的稠度、黏度和剪切速率。“表观”一词常冠以实验测定的流变参量。实验测定值在一定条件下，只能片面或局部地观察到流变参量，要经过修正，才能获知真实的稠度、黏度和剪切速率。用毛细管流变仪测定的非牛顿流体的流变曲线，需进行两项修正方能成为真实的流变曲线；一项是非牛顿修正，又称为雷比诺维茨修正；另一项是入口修正，又称为贝格里修正。

在未修正的 τ-$\dot{\gamma}$流变曲线上可获知 K'。不过真实值与表观值相差不大，在工程计算时可以忽略差异。有关系

$$K' = K\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n \tag{2-10}$$

稠度 K'与 K 相差不大，当 $n=0.1$ 时

$$\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n = \left(\frac{3\times 0.1+1}{4\times 0.1}\right)^{0.1} = 1.125$$

当 $n=0.9$ 时

$$\left(\frac{3n+1}{4n}\right)^n = \left(\frac{3\times 0.9+1}{4\times 0.9}\right)^{0.9} = 1.025$$

聚合物熔体在工程上的实用计算方程，用 K'和 n 描述，也就是用流变的表观参量来进行运算。这样，数据不经修正处理，来源方便。工程上还习惯将剪切速率的范围 $\Delta\dot{\gamma}=\dot{\gamma}_1-\dot{\gamma}_2$内的流变曲线，视为小段直线。在此区间内有一定的表观 K'和近似 n 值。如表 2-5 所列是我国 20 世纪末实测的表观稠度 K'和幂律指数 n 的数据。熔体流变数据用 N-m-s 制单位，对于制品和模具设计很不方便，因此常用 N-cm-s，单位黏度单位用 N·s/cm^2。表 2-5 中，表观稠度 K'的单位为 Pa·s（$=10^{-4}$N·s/cm^2）。

表 2-5　几种塑料熔体的表观稠度 K'和幂律指数 n

名称	牌号和生产厂	温度/℃	$\dot{\gamma}=10^2\sim10^3\,s^{-1}$		$\dot{\gamma}=10^3\sim10^4\,s^{-1}$		$\dot{\gamma}=10^4\sim10^5\,s^{-1}$	
			n	K'/Pa·s	n	K'/Pa·s	n	K'/Pa·s
LDPE	112A 兰州石化厂	160	0.32	21800	0.32	22000	0.32	22100
		180	0.35	14700	0.35	14700	0.35	14700
		200	0.38	10100	0.37	10900	0.37	10900
HIPS	兰州石化厂	200	0.26	30400	0.24	30900	0.26	31000
		220	0.26	22400	0.26	22600	0.26	22900
		240	0.27	15500	0.27	156030	0.27	15600
HIPS	南京塑料厂	200	0.29	21300	0.29	21400	0.29	21400
		220	0.29	14800	0.29	14900	0.29	14900
		240	0.29	11100	0.29	11200	0.29	12100
POM	M60 上海溶剂厂	180	0.56	6000	0.36	24000	0.16	151700
		200	0.60	4100	0.37	20300	0.18	116000
		220	0.61	3200	0.38	16900	0.20	80000
ABS	301 兰州石化厂	220	0.32	24900	0.26	35600	0.11	152300
		240	0.38	11500	0.31	18800	0.16	74500
		260	0.44	5400	0.36	9500	0.21	37700
ABS	IMT-100 上海高桥化工厂	220	0.34	19500	0.27	31700	0.18	72700
		240	0.38	11500	0.31	18500	0.20	51000
		260	0.41	7300	0.33	12700	0.23	31900
PMMA	372 上海金笔塑料厂	220	0.20	70600	0.20	70000	0.19	76400
		240	0.25	32100	0.25	32000	0.24	34800
		260	0.30	15100	0.30	14800	0.30	14200

（续）

名称	牌号和生产厂	温度/℃	$\dot{\gamma}=10^2\sim10^3\,s^{-1}$		$\dot{\gamma}=10^3\sim10^4\,s^{-1}$		$\dot{\gamma}=10^4\sim10^5\,s^{-1}$	
			n	K'/Pa·s	n	K'/Pa·s	n	K'/Pa·s
HDPE	7006A 齐鲁石化公司	220	0.56	2500	0.43	6200	0.30	20600
		240	0.57	2000	0.44	5000	0.33	13900
		260	0.57	1800	0.47	3500	0.34	11600
HDPE	2200J 扬子石化公司	220	0.52	4100	0.40	9500	0.25	38100
		240	0.53	3300	0.42	7100	0.30	21500
		260	0.54	2800	0.43	6100	0.31	14800
PP	J340 扬子石化公司	220	0.27	18700	0.26	20000	0.11	80100
		240	0.30	13800	0.26	18300	0.13	60400
		260	0.31	11700	0.26	16500	0.15	45500
PP	1400 燕山石化公司	220	0.31	12900	0.24	20900	0.15	47900
		240	0.31	11300	0.24	18600	0.18	32300
		260	0.32	9400	0.27	13200	0.18	30400
PBT	上海涤纶厂	240	0.77	1300	0.44	13100	0.30	47700
		260	0.90	300	0.57	2800	0.43	10300
		280	0.91	200	0.68	800	0.52	3400
PBT	301-G30 北京化研所	240	0.59	2200	0.52	3400	0.41	10000
		260	0.60	1200	0.57	1500	0.45	4400
		280	0.63	600	0.57	900	0.47	2100
PA1010	吉林石井沟化工厂	240	0.61	2200	0.42	8100	0.24	42500
		260	0.72	700	0.51	2900	0.28	24300
		280	0.77	300	0.62	800	0.36	8900
PA6	上海塑料制品十八厂	240	0.84	400	0.50	4100	0.29	28400
		260	0.90	200	0.59	1500	0.33	16200
		280	0.97	100	0.64	700	0.37	9000
PA66	黑龙江尼龙厂	280	0.80	300	0.61	1200	0.35	12900
		300	0.90	100	0.68	400	0.42	4600
		320	0.93	30	0.79	100	0.54	800
PS	666D 燕山石化公司	200	0.28	18500	0.28	18500	0.27	20500
		220	0.30	11600	0.30	11600	0.29	12600
		240	0.31	7900	0.31	7900	0.30	8500
PSF	S-100 上海曙光化工厂	340	0.50	14000	0.35	39100	0.17	20400
		360	0.55	7200	0.38	23000	0.20	32000
		380	0.63	2800	0.43	11300	0.24	64800
PC	6709 重庆长风	290	0.81	1000	0.77	1400	0.74	1900
		310	0.84	400	0.79	600	0.75	900
		330	0.80	400	0.70	800	0.60	1900
PC	GF20 重庆长风	280	0.58	7500	0.58	7400	0.58	7200
		300	0.59	6300	0.49	12500	0.40	30700
		320	0.66	2200	0.51	6300	0.36	24600
RPVC	12 成都科技大学	180	0.42	27900	0.27	78600	0.10	411000
		200	0.43	22700	0.28	63600	0.12	277200

图 2-10 所示为 ABS 的 η_a 与 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线。国外各种品种和牌号塑料的流变数据已经大量问世，用先进的注射机上的流变仪（on-line measurement）测得，并储存于计算机的专业数据库中。用这种表观黏度 η_a 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线，可以求出剪切速率某区间内的表观稠度 K' 和流动指数 n，得到表 2-6 所列的数据后，可方便用于人工的流变学计算。

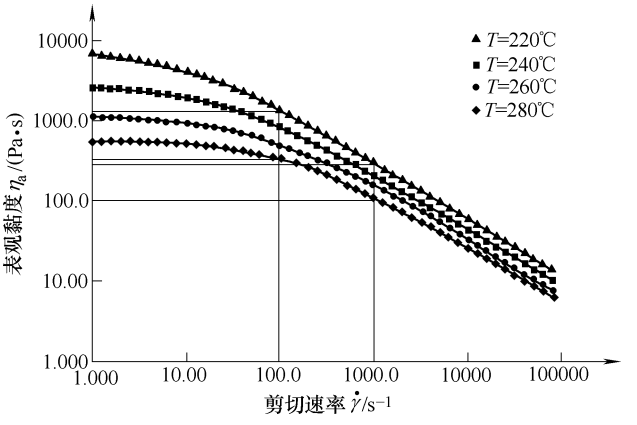


图 2-10　ABS 的表观黏度 η_a 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线

（MFI = 13g/10min）

（1）从图 2-10 的 ABS 的流变曲线求得其 K' 和 n 的步骤

1）读 220℃剪切速率 $\dot{\gamma}$ 对应的黏度 η_a 值

对 $\dot{\gamma} = 10^2 s^{-1}$，读实际值和坐标区间值，将比值经指数运算。

得　　$\eta_{a1} = 10^{3.105263}$ Pa · s = 1274Pa · s

对 $\dot{\gamma} = 10^3 s^{-1}$，读实际值后，经指数运算。

得　　$\eta_{a2} = 10^{2.4210526}$ Pa · s = 264Pa · s

2）由两点的联立方程求解 K' 和 n

$$\eta_1 = K' \cdot \dot{\gamma}_1^{n-1}$$

$$\eta_2 = K' \cdot \dot{\gamma}_2^{n-1}$$

$$K' = \frac{\eta_{a1}}{\dot{\gamma}_1^{n-1}} = \frac{\eta_{a2}}{\dot{\gamma}_2^{n-1}}$$

代入后得　　$$\frac{1274}{100^{n-1}} = \frac{264}{1000^{n-1}}$$

解此方程得　　$n = 0.316 = 0.32$

代入方程得　　$$K' = \frac{\eta_{a1}}{\dot{\gamma}_1^{n-1}} = \frac{1274}{100^{0.32-1}} \text{Pa} \cdot \text{s} = 29186 \text{Pa} \cdot \text{s}$$

3）校核后取平均值

$$K' = \frac{\eta_{a2}}{\dot{\gamma}_2^{n-1}} = \frac{264}{1000^{0.32-1}} \text{Pa} \cdot \text{s} = 28947 \text{Pa} \cdot \text{s}$$

剪切速率 $\dot{\gamma}$ 在 $10^2 s^{-1}$ 至 $10^3 s^{-1}$ 区间内时

$$n = 0.32 \qquad K \approx K' = 2.91 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

表 2-6　一些国外生产塑料的表观稠度 K' 和流动指数 n

剪切速率 $\dot{\gamma}/s^{-1}$		$10^2 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^5$
ABS		Lustran ABS 1146：Lanxess		
260℃	K'/Pa·s	17545	22465	23059
MFR：4 g/10min	n	0.346	0.31	0.307
ABS		Lustran ABS Elite HH 1827：Lanxess		
260℃	K'/Pa·s	5647	14839	18313
MFR：13 g/10min	n	0.469	0.329	0.306
ABS		ABS MP220N：LG Chemical		
221.7℃	K'/Pa·s	19714	24745	25884
MFR：20g/10min	n	0.288	0.255	0.25
ABS/PC		ABS + PC 9901 Yellow 6307：Diamond Polymers		
260℃	K'/Pa·s	3713	8672	10043
MFR：22g/10min	n	0.536	0.413	0.397
ABS + 20% GF		Stylac-ABS R240A：Asahi Kasei Corporation		
236.7℃	K'/Pa·s	17147	29982	23788
MFR：无	n	0.324	0.243	0.268
PP		Hostalen PPT 1052：SF Hoechst		
253.3℃	K'/Pa·s	4860	8322	7658
MFR：31.6 g/10min	n	0.401	0.323	0.332
PP		Hostalen PPUX 9057 HS：Targor		
243.3℃	K'/Pa·s	2591	6059	7618
MFR：10 g/10min	n	0.47	0.347	0.322
PP		PPV 2762：Kemcor Australia		
266.7℃	K'/Pa·s	2957	3057	2274
MFR：22 g/10min	n	0.388	0.383	0.415
PP + 10% 滑石		Marlex(R)CBF-265 PP：Phillips Sumika Polypropylene Company		
245.9℃	K'/Pa·s	766	6286	17437
MFR：26.5	n	0.628	0.323	0.212
PP + 20% 滑石		TPP20AF：Ferro		
221.3℃	K'/Pa·s	9599	12474	11791
MFR：4 g/10min	n	0.354	0.316	0.322
PP + 25% GF		Akrolen PP GFM 25/15 Schwarz(1415)：Akro-Plastic GmbH		
240℃	K'/Pa·s	2217	4603	4859
MFR：15	n	0.461	0.355	0.349
PP + 30% GF		Gapex RPP30EV30HB：Ferro		
247℃	K'/Pa·s	15839	22038	23905
MFR：4 g/10min	n	0.306	0.258	0.249
PP/ERDM + 32% 矿物		RAU EMPP 138 926 929(R2360)：Rehau AG & Co		
246.7℃	K'/Pa·s	2939	4962	6071
MFR：6 g/10min	n	0.421	0.345	0.323
HDPE		SABIC HDPE M80063：SABIC Europe B. V		
246℃	K'/Pa·s	1397	8889	22723
MFR：8 g/10min	n	0.669	0.401	0.299

（续）

剪切速率 $\dot{\gamma}/s^{-1}$		$10^2 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^5$
HDPE		782：NOVA Chemicals		
230.7℃	K'/Pa·s	4663	9750	8883
MFR:9 g/10min	n	0.434	0.327	0.337
PMMA		PMMA IF-850：LG Chemical		
266.7℃	K'/Pa·s	1109	2682	4527
MFR:11 g/10min	n	0.602	0.474	0.417
PMMA		Acrypet VH5：Mitsubishi Rayon		
260℃	K'/Pa·s	476	3969	16539
MFR:6 g/10min	n	0.8	0.493	0.338
PS		Polystyrene 804：TOTAL Petrochemicals		
246.7℃	K'/Pa·s	4280	10798	19993
MFR:10 g/10min	n	0.387	0.253	0.186
PS/PMMA		Zylar 631：NOVA Chemicals		
226.7℃	K'/Pa·s	8704	11776	20249
MFR:5 g/10min	n	0.405	0.361	0.302
HIPS		Polystyrene 3631：TOTAL Petrochemicals		
240℃	K'/Pa·s	6322	12875	8344
MFR:15 g/10min	n	0.39	0.287	0.334
HIPS		Polystyrene 800：TOTAL Petrochemicals		
210℃	K'/Pa·s	14313	18345	11893
MFR:6 g/10min	n	0.312	0.276	0.323
PS/PMMA		Zylar 530：NOVA Chemicals		
226.7℃	K'/Pa·s	7157	9105	9879
MFR:5 g/10min	n	0.409	0.374	0.365
PC		Apec 1795：Bayer Material Science		
340℃	K'/Pa·s	595	4957	37212
MFR:31 g/10min	n	0.834	0.527	0.308
PC		Apec 1805：Bayer Material Science		
343.3℃	K'/Pa·s	1947	10931	50797
MFR:10g/10min	n	0.737	0.487	0.32
PC/PS		Lupoy GN-5001SF1：LG Cemical		
246.7℃	K'/Pa·s	1401	4313	4766
MFR:1810g/10min	n	0.634	0.471	0.46
PC+30% GF		Panlite G-3130 Nat：Teijin Chemicals		
303.3℃	K'/Pa·s	6570	21394	39240
MFR:3.9 g/10min	n	0.652	0.481	0.415
PC+10% GF		Panlite G-3110 Nat：Teijin Chemicals		
303.3℃	K'/Pa·s	2554	25286	102451
MFR:4.6 g/10min	n	0.752	0.42	0.268
PA6		KEPAMID 1300 CRM：Korea Engineering Plastics Company Ltd		
266.7℃	K'/Pa·s	246	1164	2688
MFR:50g/10min	n	0.814	0.589	0.498
PA66		Zytel 101 NC010：Dopont Europe		
293.3℃	K'/Pa·s	139	761	8980
MFR:24g/10min	n	0.918	0.672	0.404

（续）

剪切速率 $\dot{\gamma}/s^{-1}$		$10^2 \sim 10^3$	$10^3 \sim 10^4$	$10^4 \sim 10^5$
PA66		Scanamid PA66 A120 Fp20；Polykemi		
303.3℃	K'/Pa·s	201	1459	8158
MFR:7g/10min	n	0.862	0.575	0.388
PA12		Grilamid L16 LM；EMS-Grirory		
256.7℃	K'/Pa·s	167	1061	6439
MFR:50 g/10min	n	0.875	0.607	0.411
PA66 + 14% GF		M2279 PA66 GF14 IM；Delphi Packard Electric Systems		
289.7℃	K'/Pa·s	380	3709	27087
MFR：无 g/10min	n	0.818	0.488	0.272
PA6 + 30% GF		Kepamid 1330 GF；Korea Engineering Plastics Company Ltd		
273.7℃	K'/Pa·s	514	3088	11618
MFR:8g/10min	n	0.766	0.506	0.362
POM		Delrin 900 NC010；Dupont Engineering Polymers		
218.3℃	K'/Pa·s	449	4824	28776
MFR:11g/10min	n	0.829	0.485	0.291
POM + 25% GF		Lucel GC-225；LG Chemical		
211.7℃	K'/Pa·s	1987	7846	12528
MFR:8 g/10min	n	0.638	0.439	0.388
PBT + 30% GF		Valox 420-1001；GE Plastics(USA)		
260℃	K'/Pa·s	1177	10871	57475
MFR：无 g/10min	n	0.787	0.465	0.284
PBT/PET + 30% GF		Schuladur PCR GF30；A Schulman NA		
266.7℃	K'/Pa·s	1013	3840	9547
MFR:14 g/10min	n	0.686	0.493	0.394
PPO/PS + 30% GF		GenericPPO/PS(Noryl)；Generic Shrinkage Characterised Material		
303.3℃	K'/Pa·s	12654	18477	22375
MFR：无 g/10min	n	0.351	0.296	0.275
PPO/PA		GenericPPO/PA(Noryl)；GenericShrinkage Characterised Material		
289.3℃	K'/Pa·s	1941	3816	5410
MFR：无 g/10min	n	0.592	0.494	0.456
PPS		Supec G402；GE Plastics(Europe)		
326.7℃	K'/Pa·s	3389	4253	3912
MFR：无 g/10min	n	0.536	0.503	0.512
PPS + 30% GF		Supec G301T；GE Plastics(Europe)		
326.7℃	K'/Pa·s	6801	8891	13197
MFR：无 g/10min	n	0.209	0.47	0.427
PEEK		Lubricomp PDX-L-91475；LNP Engineering Plastics		
388.3℃	K'/Pa·s	4610	8710	14569
MFR：无 g/10min	n	0.586	0.484	0.428
LCP + 30% GF		Xydar G-930 NT；Solvay Advanced Polymers		
356.7℃	K'/Pa·s	200	602	534
MFR：无 g/10min	n	0.67	0.51	0.523
SAN		Absolan AS2300；Lanxess		
260℃	K'/Pa·s	2065	5068	6260
MFR:30 g/10min	n	0.5	0.37	0.347

（2）注塑件的设计与流变分析

在注塑件的设计中，应该将注塑件成型型腔和注射模具的浇注系统进行统一考虑，进行流变学和传热学的分析。现有的各种流动分析方法可以经人工计算，获知在充模过程中和流程各位置的体积流率、剪切应力与剪切速率、各段流程的压力损失，从而在以下两方面避免塑件形状和尺寸的不良设计。

1）要保证注射充模时熔体具有合理的剪切速率。塑料熔体在模具的通道间隙中剪切速率应为 $10^2 \sim 10^4 s^{-1}$。过低充模速率会使熔体流动性变差；过高的剪切速率，在型腔内会出现湍流或涡流，会产生熔体喷射并且破碎，将成型废次的注塑件。熔体在模内流动应是雷诺数很低的层流。

2）要保证型腔的充模压力。塑料熔体的压力传递能力较差，流经各流程的流道和浇口时，压力逐渐下降会使注射到注塑件型腔的熔体压力不足。进入注塑件型腔的熔体压力应有（250 ~ 500）× 10^5 Pa。为此，一方面浇注系统的流道要有足够的截面尺寸；另一方面注塑件型腔流程不能太长太薄，致使料流末端压力不足，造成注塑件密度低、收缩率大，严重的甚至不能注满。因此，必须由各种塑料熔体的流程比来校核注塑件的壁厚。

众所周知，对注射成型进行计算机模拟，是流动和冷却分析的先进和有效方法。现代的注射成型计算机辅助工程 CAE（Computer aid engineering）软件，能辅助注射制品和模具设计。它是决策性的软件，将注塑件设计、模具设计、注射工艺拟订和试模、注射，依次进行数值分析，并可进行反复修改进行优化，直观地在计算机屏幕上模拟出实际成型过程，预测注塑件设计对产品影响，直接观察到注塑件上熔合缝和气囊的位置，预见注塑件成型时剪切速率，温度场和压力场，判断注塑件上密度不足、凹陷和注不满等缺点，为改进注塑件和模具设计提供科学依据。

但是，计算机模拟的前提是计算机造型，应让计算机获知注塑件和浇注系统所有形体和尺寸的信息，然后，用有限元数值分析方法将形体离散化，进行网格划分。常用的是二维流动模型的分析方法。将三维的塑件展平，有分支地展成若干个流程，作为圆管件、圆板件、平板件或圆环板件相串联。因为塑料注射件是薄壁板的组合件，二维的计算机浇注系统模拟应用广泛。在应用 CAE 软件辅助设计注塑件和模具时，对分型面、浇道的分布和尺寸、浇口的形式和位置，设计师应该有所考虑。

2.2.2 塑料熔体在管隙中的流动分析

压力作用下的聚合物熔体在管道内流动，称压力流动或泊肃叶流动（Poiscuille flow）。施加在流体上的外压力产生了速度场。体系的边界是刚性和静止不动的。

注射模具的型腔通道形状和尺寸的变化繁多，但流通截面归纳起来，基本上是圆管形和狭缝形两种。

由于聚合物熔体的黏度很高，且服从非牛顿的幂律定律，在通常情况下为稳态层流。在压力流动分析时，假定聚合物熔体是不可压缩的：在流道壁面上的流动速度为零；且流体的黏度不随时间变化（实际上，聚合物熔体在压力下的流动是非等温的），

在大多数情况下按等温和不可压缩的压力流动处理，其计算结果所引起误差很小，在注射工程上是可行的。

1. 圆管中流动

圆管流通形状简单，最为常见。在圆管中高聚物的压力流动是一维的剪切流动。

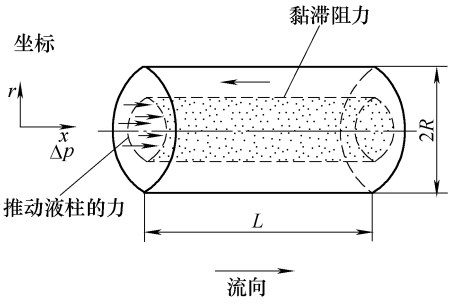


图 2-11　流体单元液柱

（1）圆管中的牛顿流体　如图 2-11 所示，在无限长的圆管中取半径为 r、长度 L、两端压力差为 Δp 的流体单元。为了维持流体在圆管中的稳态流动，沿管长必须有一定的压力差。

在受推力 $\pi r^2 \cdot \Delta p$ 下流动时，又受到黏性阻力。该阻力为剪切应力 τ 与液柱表面 $2\pi rL$ 之积。有力平衡式

$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi rL\tau$$

因此有沿半径方向的剪切应力分布式

$$\tau = \frac{\Delta pr}{2L} \tag{2-11}$$

在管中心 $r=0$ 处，$\tau=0$。在管壁 $r=R$ 上，得到剪切应力最大值

$$\tau = \frac{\Delta pR}{2L}$$

由牛顿黏性定律，在圆管中的牛顿流体的剪切速率为

$$\dot{\gamma} = -\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}r} = \frac{\tau}{\mu} = \frac{\Delta pr}{2\mu L} \tag{2-12a}$$

式中 v 为线速度，它是半径 r 的函数。管中心的流速最大；随 r 的增大，v 减小。在管中心 $r=0$ 处，$\dot{\gamma}=0$。在管壁 $r=R$ 上，有最大剪切速率

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta pR}{2\mu L} \tag{2-12b}$$

假设在管壁 R 上没有滑动，用 $V=0$ 代入式（2-12），积分得管中速度的分布

$$v_{(r)} = \frac{\Delta p}{4\mu L}(R^2 - r^2) = \frac{\Delta pR^2}{4\mu L}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \tag{2-13}$$

式（2-13）说明，牛顿流体在等截面圆管中流动速度分布为抛物线，如图 2-12 所示。

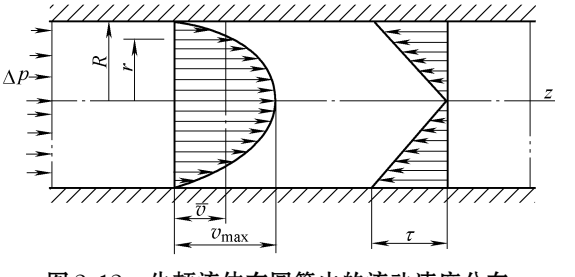


图 2-12　牛顿流体在圆管中的流动速度分布

将式（2-13）对 r 作整个截面 S 积分，可得体积流率 Q 为

$$Q=\int_0^R v_{(r)}\mathrm{d}S=\int_0^R v_{(r)}2\pi r\mathrm{d}r=\frac{\pi\Delta pR^2}{8\mu L} \tag{2-14}$$

这就是哈根-泊肃叶（Hagen-Poiseuille）方程，比较式（2-12b）和式（2-14），可得管壁上剪切速率（也就是表观剪切速率）

$$\dot{\gamma}=\frac{4Q}{\pi R^3} \tag{2-15}$$

（2）圆管中的非牛顿流体的速度方程　由于绝大多数聚合物熔体都是非牛顿流体，它们在圆形通道中的流动，显然不能用前述的牛顿流体流动方程来描述。考虑到非牛顿流体的特性，须引入流动指数 n。推导幂律流体的速度方程有两种途径。一种是用图 2-11圆管通道的力平衡流动模型；另一种是直接用表 2-1 动量方程的柱面坐标系（r，θ，z)的 z 分量展开式。

1）圆管道的力平衡流动模型推导　见图 2-11，由式（2-11）$\tau=\frac{\Delta pr}{2L}$和式（2-6a）$\tau=K\dot{\gamma}^n$代入，可得

$$\tau=\frac{\Delta pr}{2L}=-K\dot{\gamma}^n=-K\left(\frac{\mathrm{d}v_z}{\mathrm{d}r}\right)^n$$

经移项后，化为

$$\mathrm{d}v_z=-\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot r^{\frac{1}{n}}\mathrm{d}r$$

将此式积分，代入边界条件后可得非牛顿流体的速度方程

$$v_z=\frac{n}{n+1}\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}R^{\frac{n+1}{n}}\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right] \tag{2-16}$$

2）直接用动量方程的柱面坐标系 r 分量展开式推导。见表 2-1 动量方程的柱面坐标系（r，θ，z）z 分量

$$\rho\left(\frac{\partial v_z}{\partial t}+v_r\frac{\partial v_z}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial v_z}{\partial\theta}+v_z\frac{\partial v_z}{\partial z}\right)=\rho g_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\tau_{rz})+\frac{1}{r}\frac{\partial\tau_{\theta z}}{\partial\theta}+\frac{\partial\tau_{zz}}{\partial z}\right]$$

在稳定流动状态下，速度 v_z 于时间 t 的导数为零。在圆管内层流的条件下，周向速度 v_θ 和径向速度 v_r 为零。而且速度 v_r 和剪切应力 τ_{rz} 对于周向 θ 和轴向 z 的导数为零。柱面坐标系的轴向 z 的动量方程简化成

$$\frac{\partial p}{\partial z}=\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r\cdot\tau_{rz})$$

又有非牛顿流体在圆管的轴向 z 流动的状态方程

$$\tau_{rz}=K\dot{\gamma}_{rz}^n=-K\left(\frac{\partial v_z}{\partial r}\right)^n$$

代入上式后先对 r 积分，得

$$\frac{\partial v_z}{\partial r}=-\left(\frac{\partial p}{\partial z}\cdot\frac{r}{2K}\right)^{\frac{1}{n}}$$

再次对 r 积分，同样可得到式（2-16）所示非牛顿流体的速度 v_z 方程。

（3）圆管中的非牛顿流体的体积流率方程。对式（2-16）的速度 v_z 方程，作整个圆管截面积分，管内体积流率为

$$Q=\left(\frac{\pi R^3 n}{3n+1}\right)\left(\frac{R\Delta p}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}=\frac{\pi n}{3n+1}\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}R^{\frac{3n+1}{n}} \tag{2-17}$$

整理后可得圆管通道内流体流动的压力降

$$\Delta p=2KL\left(Q\frac{3n+1}{\pi n}\right)^{n}R^{-(3n+1)} \tag{2-18a}$$

由式（2-10），将稠度 K 置换成表观稠度 K'，有压力降

$$\Delta p=\left(\frac{4}{\pi}\right)^{n}\frac{2K'LQ^n}{R^{3n+1}} \tag{2-18b}$$

对于牛顿流体 $n=1$，$K=\mu$，式（2-17）可演变成牛顿流体的流率方程

$$Q=\frac{\pi R^4\cdot\Delta p}{8\mu\cdot L} \tag{2-19}$$

又可将式（2-16）演变成牛顿流体的速度方程

$$v_z=\left(\frac{\Delta pR^2}{4\mu L}\right)\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^2\right] \tag{2-20}$$

（4）圆管中的非牛顿流体的速度分布　将式（2-17）除以 πR^2，便得到圆管内非牛顿流体的平均速度。即

$$\bar{v}_z=\frac{Q}{\pi R^2}=\frac{nR}{3n+1}\left(\frac{R\Delta p}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{2-21}$$

将 $r=0$ 代入速度分布方程式（2-16），可获知管中央的最大流速

$$v_{\max}=\frac{nR}{n+1}\left(\frac{R\Delta p}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{2-22}$$

将速度方程式（2-16）除以平均速度的式（2-21），可得到无量纲速度曲线方程

$$\frac{v_z}{\bar{v}_z}=\left(\frac{3n+1}{n+1}\right)\left[1-\left(\frac{r}{R}\right)^{\frac{n+1}{n}}\right] \tag{2-23}$$

可绘制非牛顿流体的流速分布为柱塞流动，如图 2-13 所示。由式（2-23）可知，牛顿流体在 $n=1$ 时，速度分布曲线为抛物线。假塑性的非牛顿流体在 $n<1$ 时，速度分布曲线较抛物线平坦。n 值越小，管中心部分的速度分布越平缓，曲线形状类似于柱塞。

1）柱塞流动中混合作用不良。高聚物熔体在柱塞流动中，受到剪切作用较小，均化作用差，对于多组分物料的加工尤为不利。

2）最大剪切应力和最大剪切速率在管壁上。

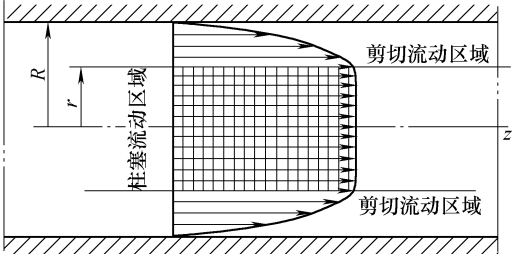


图 2-13　非牛顿流体在圆管内的流速分布为柱塞流动

3）流体在管中的平均流速及其体积流率，均随管径和压力增大而增加。随流体黏度和管长的增加而减少。

4）曾假定在管壁的流速为零，但实际上熔体在管壁上有滑移现象。熔体在较长的圆管内流动过程中，还伴随有聚合物相对分子质量效应。相对分子质量较低的在流动中逐渐趋于管壁附近，使这一区域流体黏度降低，流速有所增加。由此两种原因，熔体的流动速率实际上比计算值大。如果熔体在狭小流道中流动，在管壁上产生冷却固化的皮层，使有效管径变小，则在高压下产生喷泉流动。

2. 圆锥管道中的压力流动

圆锥形通道如图 2-14 所示。设其大小端半径分别为 R_1 和 R_2，锥角为 2θ，全长 L。取其任意位置上的半径为 r，离大端距离为 l。有几何关系

$$r = R_1 - l\tan\theta \ ,\tan\theta = -\frac{\mathrm{d}r}{\mathrm{d}l} \ , \ \mathrm{d}l = -\cot\theta \mathrm{d}r$$

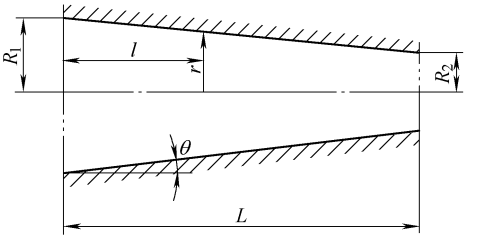


图 2-14　圆锥形通道

由圆柱管道中流体的压力降算式(2-18a)，将 Δp 视作 $\mathrm{d}p$，列出 $\mathrm{d}r$ 对应长度 $\mathrm{d}l$ 上压降的微分方程。再对 r 积分后整理得圆锥形通道压力降

$$\Delta p = \frac{2K\cot\theta}{3n}\left(\frac{3n+1}{\pi n}Q\right)^n (R_2^{-3n} - R_1^{-3n}) \tag{2-24a}$$

若以 $\cot\theta = L/(R_1 - R_2)$ 代入式（2-24a），得另一形式压力降算式

$$\Delta p = \frac{2KL}{3n(R_1 - R_2)}\left(\frac{3n+1}{\pi n}Q\right)^n (R_2^{-3n} - R_1^{-3n}) \tag{2-24b}$$

若以表观稠度 K' 置换以上两式中稠度 K，可得聚合物熔体在圆锥形通道中流动的又一组压降计算式

$$\Delta p = \frac{2K'\cot\theta}{3n}\left(\frac{4}{\pi}\right)^n Q^n (R_2^{-3n} - R_1^{-3n}) \tag{2-25a}$$

$$\Delta p = \frac{2K'L}{3n(R_1 - R_2)}\left(\frac{4}{\pi}\right)^n Q^n (R_2^{-3n} - R_1^{-3n}) \tag{2-25b}$$

3. 狭缝中流动和应用

在聚合物流变学的流动分析方程中，狭缝通道是矩形通道的特例。如图 2-15 所示，截面宽度 W 与厚度 h 之比，$W/h < 6$ 时应考虑作为矩形通道处理。狭缝通道假定熔体在无限宽的两平板之间作压力流动忽略了两侧面方向上的黏性阻力。注射模的制品壳板，成型板厚的间隙 h 对于板面宽度 W 要小得多，是典型的狭缝通道。注射模具的矩形分流道及侧浇口等，属矩形通道。但矩形通道的流动方程很复杂。倘若用狭缝通道计算式，会

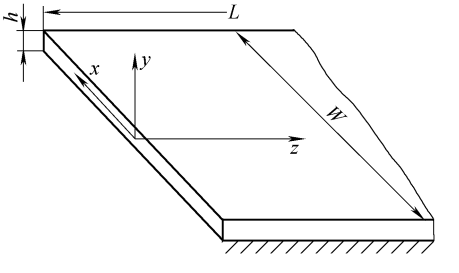


图 2-15　等截面狭缝通道

有一定的误差。W/h 越接近 1，误差越大。

两平行板间非牛顿流体的压力流体的速度分布式

$$v_z = \frac{n}{n+1}\left(\frac{\Delta p}{KL}\right)^{\frac{1}{n}}\left[\left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{n+1}{n}} - y^{\frac{n+1}{n}}\right] \tag{2-26}$$

如图 2-15 所示，熔体经此通道不计入两侧壁对流量的影响，将式（2-26）积分便得聚合物熔体在等截面狭缝通道中的体积流量

$$Q = \frac{2n}{2n+1}\left(\frac{\Delta p}{KL}\right)^{\frac{1}{n}} W\left(\frac{h}{2}\right)^{\frac{2n+1}{n}} \tag{2-27}$$

非牛顿流体在狭矩形通道中流动的剪切速率和剪切应力为

$$\dot{\gamma} = \frac{4n+2}{n} \times \frac{Q}{Wh^2} \tag{2-28a}$$

$$\tau = \frac{h\Delta p}{2L} \tag{2-28b}$$

对流程长 L 的压力损失计算式

$$\Delta p = \left(\frac{4n+2}{n}\right)Q^n \times \frac{2KL}{Wh^{2n+1}} \tag{2-29}$$

在 $n=1$ 时，有牛顿流体在狭矩形通道中流动的流量和压降计算式

$$Q = \frac{\Delta p W h^3}{12KL} \tag{2-30}$$

$$\Delta p = \frac{12KLQ}{Wh^3} \tag{2-31}$$

此时稠度 K 等于牛顿黏度 μ。其牛顿流体在狭缝通道流动的剪切速率和剪切应力

$$\dot{\gamma} = \frac{6Q}{Wh^2} \tag{2-32a}$$

$$\tau = \frac{h\Delta p}{2L} \tag{2-32b}$$

此外，对于厚度 h 方向有线性变化的窄楔形流道、对于宽度 W 方向有线性变化的宽楔形流道、或两个方向均有线性变化的鱼尾形流道，它们各自的流量和压降计算式可参见有关专业著作。

4. 计算示例

下述的注射模型腔压力的分析计算示例，具体应用了本章的流变学的基础知识。掌握人工计算分析方法，在注射工程和注射模的设计中有现实意义，有助于理解和掌握现代计算机辅助的模拟分析技术。

用 ABS 塑料在国产 100cm³ 注射机上，

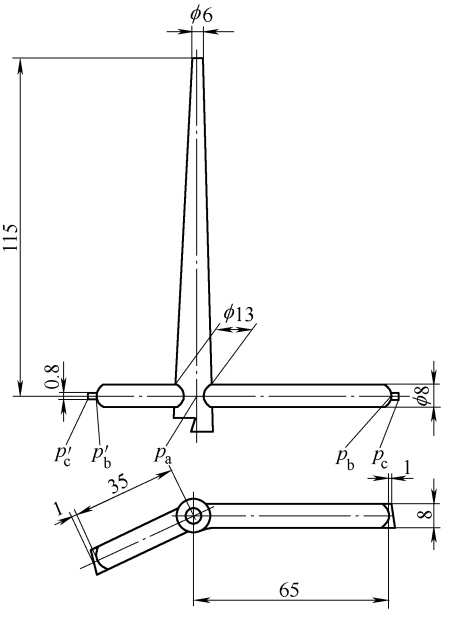


图 2-16　ABS 机壳注射模的浇注系统

生产体积 $V=427\text{cm}^3$ 的机壳。有如图 2-16 所示的浇注系统，位于机壳中框用两个浇口注射壳体的型腔。若熔体温度 $T_m=220℃$，注射压力 $p_o=80\text{MPa}$。流动熔体经注射机和模具流道后，有沿程的压力损失，试计算壳体型腔的最大充模压力，和所需锁模力。

采用上海高桥化工厂生产 IMT-100 的 ABS 塑料注射成型机壳。在正常的注射条件下，料筒和模具分流道中熔体流动的剪切速率在 $\dot{\gamma}=(10^2\sim10^3)\text{s}^{-1}$ 范围内。查本章的表 2-5，在 $T_m=220℃$ 下，$n=0.34$，$K'=19500\text{Pa}\cdot\text{s}=1.95\text{N}\cdot\text{s/cm}^2$。注射机的喷嘴和模具的主流道有 $\dot{\gamma}=(10^3\sim10^4)\text{s}^{-1}$。查得 $n=0.27$，$K'=3.17\text{N}\cdot\text{s/cm}^2$。模具的矩形浇口有 $\dot{\gamma}=(10^4\sim10^5)\text{s}^{-1}$。查得 $n=0.18$，$K'=7.17\text{N}\cdot\text{s/cm}^2$。

1）在常态的充模速度下，充填 427cm^3 的注射量的注射时间 $t=4\text{s}$。可得体积流率

$$Q=\frac{V}{t}=\frac{427}{4}\text{cm}^3/\text{s}=107\text{cm}^3/\text{s}$$

2）求熔料在注射机的料筒和喷射中的压力损失 Δp_1 和 Δp_2。已知此注射机的料筒半径 $R_1=4.0\text{cm}$；料筒里螺杆前贮料长度 $L_1=4.0\text{cm}$。喷嘴半径 $R_2=0.275\text{cm}$；长度 $L_2=2.0\text{cm}$。

代入熔体在圆锥形通道中的压力降计算式（2-25b），有料筒中的压降

$$\begin{aligned}\Delta p_1&=\frac{2K'L}{3n(R_1-R_2)}\left(\frac{4}{\pi}\right)^n Q^n(R_2^{-3n}-R_1^{-3n})\\&=\frac{2\times1.95\times22.5}{3\times0.34(4.0-0.275)}\left(\frac{4}{\pi}\right)^{0.34}\times107^{0.34}\times(0.275^{-3\times0.34}-4.0^{-3\times0.34})\text{MPa}\\&=428.5\ \text{N/cm}^3=4.29\ \text{MPa}\end{aligned}$$

代入熔体在圆管通道中的压力降计算式（2-18b），有注射机喷嘴中的压降

$$\Delta p_2=\left(\frac{4}{\pi}\right)^n\frac{2K'LQ^n}{R^{3n+1}}=\left(\frac{4}{\pi}\right)^{0.27}\frac{2\times6.17\times2\times107^{0.27}}{0.274^{3\times0.27+1}}\text{MPa}=4.95\text{MPa}$$

3）求熔体在模具浇注系统的压力损失。用式（2-25b）计算模具圆锥形主流道中熔体流动的压力降。见图 2-16，主流道小端 $R_2=0.3\text{cm}$；大端 $R_1=0.65\text{cm}$；长度 $L=11.5\text{cm}$。

$$\begin{aligned}\Delta p_3&=\frac{2K'L}{3n(R_1-R_2)}\left(\frac{4}{\pi}\right)^n Q^n(R_2^{-3n}-R_1^{-3n})\\&=\frac{2\times3.17\times11.5}{3\times0.27(0.65-0.3)}\left(\frac{4}{\pi}\right)^{0.27}\times107^{0.27}\times(0.3^{-3\times0.27}-0.65^{-3\times0.27})\text{MPa}\\&=18.87\ \text{MPa}\end{aligned}$$

熔体进入右侧的圆管分流道，有 $L_S=6.5\text{cm}$，$R_S=0.4\text{cm}$，用（2-18b）计算压力降。由于流道分叉，各分流道流量 $Q_S=Q/2=107/2=53.5\text{cm}^3/\text{s}$，有

$$\Delta p_4=\left(\frac{4}{\pi}\right)^n\frac{2K'LQ^n}{R^{3n+1}}=\left(\frac{4}{\pi}\right)^{0.34}\frac{2\times1.95\times6.5\times53.5^{0.34}}{0.4^{3\times0.34+1}}\text{MPa}=6.78\text{MPa}$$

熔体进入左侧的圆管分流道，有 $L_S=3.5\text{cm}$，$R_S=0.4\text{cm}$。其压力降比右侧小，有

$$\Delta p_4'=\left(\frac{4}{\pi}\right)^n\frac{2K'LQ^n}{R^{3n+1}}=\left(\frac{4}{\pi}\right)^{0.34}\frac{2\times1.95\times3.5\times53.5^{0.34}}{0.4^{3\times0.34+1}}\text{MPa}=3.65\text{MPa}$$

熔体流经矩形浇口，有浇口宽 $W=0.8\text{cm}$，高 $h=0.08\text{cm}$，长 $L=0.1\text{cm}$。熔体在浇口中具有较高的剪切速率，用式（2-10）将查得 $n=0.18$，表观稠度 $K'=7.17\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm}^2$，换算成

$$K=K'\left(\frac{4n}{3n+1}\right)^n=7.27\left(\frac{4\times0.18}{3\times0.18+1}\right)^{0.18}\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm}^3=6.34\text{N}\cdot\text{s}/\text{cm}^3$$

用熔体在狭缝通道中的压降式（2-29），近似计算矩形浇口中压力损失

$$\Delta p_5=\left(\frac{4n+2}{n}\right)Q^n\cdot\frac{2KL}{Wh^{2n+1}}=\left(\frac{4\times0.18+2}{0.18}\right)^{0.18}\times53.5^{0.18}\times\frac{2\times6.34\times0.1}{0.8^{0.18}\times0.08^{2\times0.18+1}}\text{MPa}=1.37\text{MPa}$$

4）从注射压力 $p_o=80\text{MPa}$ 始，由以上各段的压力降逐次递减，可得浇口出口在分型面上的熔体压力。

右侧浇口熔体注入型腔的压力

$$p_c=p_o-\Delta p_1-\Delta p_2-\Delta p_3-\Delta p_4-\Delta p_5=(50-4.29-4.95-18.87-6.78-1.37)\text{MPa}=43.7\text{MPa}$$

左侧浇口熔体注入型腔的压力

$$p'_c=p_o-\Delta p_1-\Delta p_2-\Delta p_3-\Delta p'_4-\Delta p_5=(50-4.29-4.95-18.87-3.65-1.37)\text{MPa}=46.9\text{MPa}$$

5）校核分型面上的锁模力

由图 2-16 上浇注系统在分型面的投影面积 A_S 计算

$$A_S=[\pi\times0.65^2+0.8\times(6.5+3.5)+0.8\times0.1\times2]\text{cm}^2=9.49\text{cm}^2$$

图示各处压力：

$$p_a=51.9\text{MPa},p_b=45.11\text{MPa},p'_b=48.2\text{MPa},p_c=43.7\text{MPa},p'_c=46.9\text{MPa}$$

取它们平均值

$$p_{cp}=50\text{MPa}$$

计算浇注系统熔体在分型面的胀模力

$$p_S=p_{cp}A_S=50\text{MPa}\times9.49\text{cm}^2=47.5\text{kN}$$

由塑料壳体制品图可知塑件在分型面的胀模面积 $A_F=150\times10^2\text{mm}^2$。型腔压力低于熔体射出浇口的压力 p_c 和 p'_c，现取平均值 $p'_{cp}=40\text{MPa}$。

计算注塑件型腔熔体在分型面的胀模力

$$p_p=p'_{cp}A_p=40\times156\times10^2\text{kN}=624\text{kN}$$

已知此台注射机具有的最大锁模力是 400t，折合 3924kN。大于所需锁模力 $(624+48)\text{kN}=672\text{kN}$。

2.3　影响黏性流动的因素

绝大多数聚合物熔体属于假塑性的非牛顿流体。在注射流动中，熔体黏度是受各种因素影响的变量。它不但取决于物理条件，受剪切速率、温度和压力的影响，还与聚合物的分子参数和添加剂有关。以下讨论主要影响因素时，假设其他因素是不变的。塑料熔体不但有黏性还有弹性。不稳定的熔体流动和熔体破裂会影响注塑制品的质量。

2.3.1　剪切速率、温度和压力的影响

注射流动的塑料熔体黏度受物理状态的影响很大，不但是温度和压力条件的函数，而且还依赖剪切速率。

1. 剪切速率的影响

聚合物熔体的显著特征是具有非牛顿行为，其黏度随剪切速率的增加而下降。在高剪切速率下的熔体黏度比低剪切速率下的黏度小几个数量级。不同高聚物熔体在流动过程中，随剪切速率的增加，黏度下降的程度是不同的，如图 2-17 所示。

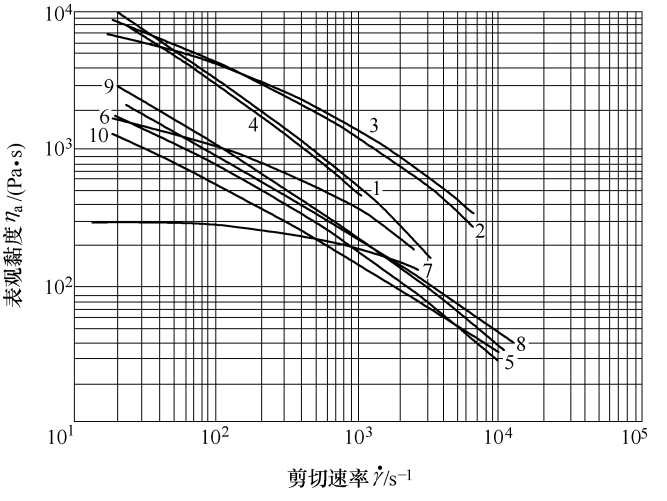


图 2-17　几种聚合物的表观黏度与剪切速率的关系

1—ABS（210℃）　2—聚砜（310℃）　3—聚碳酸酯（270℃）　4—聚甲基丙烯酸甲酯（200℃）
5—软聚氯乙烯（170℃）　6—聚酰胺 1010（230℃）　7—聚对苯二甲酸乙二醇酯（270℃）
8—聚丙烯（180℃，MFR = 2.61）　9—聚苯乙烯（190℃）
10—低密度聚乙烯（150℃，MFR = 6.58）

不同聚合物的黏度对剪切速率的依赖性，其敏感性有明显区别。表 2-7 为几种聚合物熔体在熔融温度范围于 $(10^3 \sim 10^4)\,s^{-1}$ 的剪切速率时的非牛顿指数 n。表中指数 n 越小，非牛顿性越明显。根据 n 的大小比较，敏感性较明显的有 LDPE、PP、PS、HIPS、ABS、PMMA 和 POM；HDPE、PA1010 和 PBT 的敏感性一般；PA6、PA66 和 PC 为最不敏感。

表 2-7　几种聚合物熔体在 $(10^3 \sim 10^4)\ s^{-1}$ 剪切速率时的非牛顿指数 n

聚合物	牌号和生产厂	温度/℃								
		160	180	200	220	240	260	280	300	320
LDPE	112 兰州石化厂	0.32	0.35	0.37						
PP	J340 扬子石化公司				0.26	0.26	0.26			
PS	666D 燕山石化公司			0.28	0.30	0.31				
HIPS	兰州石化厂			0.24	0.26	0.27				

（续）

聚合物	牌号和生产厂	温度/℃								
		160	180	200	220	240	260	280	300	320
ABS	IMT100 上海高桥化工厂				0. 27	0. 31	0. 33			
PMMA	372 上海金笔塑料厂				0. 20	0. 25	0. 30			
POM	M60 上海溶剂厂		0. 36	0. 37	0. 38					
HDPE	7006A 齐鲁石化公司				0. 43	0. 44	0. 47			
PA1010	吉林石井沟化工厂					0. 42	0. 51	0. 62		
PBT	上海涤纶厂					0. 44	0. 57	0. 68		
PA6	上海塑料制品十八厂					0. 50	0. 59	0. 64		
PA66	黑龙江尼龙厂							0. 61	0. 68	0. 79
PC	6709 重庆长风							0. 77 290℃	0. 79 310℃	0. 70 330℃

了解聚合物熔体黏度对剪切速率的依赖性，对掌控注射加工有重大意义。熔体在注射模流道和成型型腔中，有（$10^2 \sim 10^4$）s^{-1}的剪切速率，其黏度有几倍到几十倍的变化，可以通过调节流通截面尺寸，来保证熔体的流动性。例如在塑料注射模中采用针点式的浇口，熔料以 $10^4 s^{-1}$左右的高剪切速率、以低黏度注入型腔。现代的高压高速注射成型薄壁注塑件，就是充分发挥了塑料熔体的剪切变稀的性能。

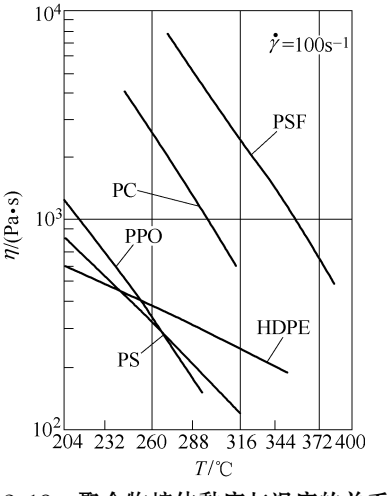


图 2-18　聚合物熔体黏度与温度的关系

2. 温度的影响

控制注射温度是调节塑料熔体流动性的重要手段。随着温度升高，聚合物分子间的相互作用力减弱，黏度下降。但是各种聚合物熔体对温度的敏感性有所不同。如图 2-18 所示，在温度升高时，材料 PC 的黏度比 HDPE 的黏度下降明显。

在温度范围为 $T > T_g + 100℃$ 时，聚合物熔体黏度对温度的依赖性，可用阿伦尼乌斯（Arrhenius）方程来表示。视剪切速率恒定的黏性流动的活化能不同，黏度表示为

$$\eta = A \exp(E_{\dot{\gamma}}/RT) \tag{2-33}$$

式中　A——与材料性能和剪切速率有关的常数（Pa · s）；

$E_{\dot{\gamma}}$——在恒定剪切速率下的黏流活化能（J/mol）；

R——气体常数［8. 12J/(mol · K)］；

T——热力学温度（K）。

活化能是高分子链流动时用于克服分子间作用力，以便更换位置所需的能量，也就是每摩尔运动单元流动时所需要的能量。故活化能越大，黏度对温度越敏感，温度升高时的黏度下降越明显。几种聚合物熔体在一定剪切速率下的活化能见表 2-8。此表为特

定材料在某个温度下的恒定剪切速率的 $E_{\dot{\gamma}}$ 值。比较 $E_{\dot{\gamma}}$ 值大小可知，对于活化能较小的聚合物，例如 PE 和 POM 等，用升高温度来提高成型时的流动性，其效果有限，而用增高温度来提高 PMMA 和 PC 等活化能较高物料的流动性是可行的。

表 2-8　几种聚合物熔体的活化能

聚合物	$\dot{\gamma}/s^{-1}$	$E_{\dot{\gamma}}$/(kJ/mol)	聚合物	$\dot{\gamma}/s^{-1}$	$E_{\dot{\gamma}}$/(kJ/mol)
POM(190℃)	$10^1 \sim 10^2$	26.4 ~ 28.5	PMMA(190℃)	$10^1 \sim 10^2$	159 ~ 167
PE(MFI 2.1,150℃)	$10^2 \sim 10^3$	28.9 ~ 34.3	PC(250℃)	$10^1 \sim 10^2$	167 ~ 188
PP(250℃)	$10^1 \sim 10^2$	41.8 ~ 60.3	NBR(丁腈橡胶)	10^1	22.6
PS(190℃)	$10^1 \sim 10^2$	92.1 ~ 96.3	NR(天然橡胶)	10^1	1.1

3. 压力的影响

聚合物熔体是可压缩的流体。聚合物熔体在压力 0.1 ~ 10MPa 下成型，其体积压缩量小于 1%。注射加工时，施加压力可达 100MPa，此时会有明显的体积压缩。体积压缩必然引起自由体积减小，分子间距离减小，将导致流体的黏度增加，流动性降低。

随着压力的提高，黏度以指数关系下降。静压力 p 的影响系数定义为

$$\Gamma = \frac{\mathrm{d}\ln\eta}{\mathrm{d}p} \tag{2-34}$$

对于热塑性聚合物熔体，压力对黏度的影响系统平均值 Γ 等于 $0.033 \times 10^{-5}\,\mathrm{Pa}^{-1}$ ($0.33\,\mathrm{MPa}^{-1}$)。有相应的计算式

$$\eta = \eta_{\mathrm{rp}} \mathrm{e}^{\Gamma p} \tag{2-35}$$

式中，η_{rp} 为常压下物料的黏度。如果 $p = 100 \times 10^5\,\mathrm{Pa}$，则有 $\eta/\eta_{\mathrm{rp}} = 1.39$，见表 2-9。

表 2-9　聚合物熔体的黏度与静压力 p 的关系

$p/\times 10^5\,\mathrm{Pa}$	30	100	300	500	1000	3000
η/η_{rp}	1.11	1.39	2.70	5.29	27.9	22.026

在测定恒定压力下黏度随温度的变化和恒温下黏度随压力的变化后，得知压力 Δp 增加与温度下降 ΔT 对黏度的影响是等效的。在塑料加工工程中，以此来考虑静压力对黏度的影响。

在聚合物熔体成型时，通常会遇到黏度的压力效应和温度效应同时起作用。压力和温度对黏度影响的等效关系，可用换算因子 $(\Delta p/\Delta T)_\eta$ 来处理。以此因子来确定与产生黏度变化所施加的压力增量相当的温度下降量。几种聚合物熔体的换算因子 $(\Delta p/\Delta T)_\eta$ 见表 2-10。

表 2-10　几种聚合物熔体的换算因子 $(\Delta p/\Delta T)_\eta$

聚合物	$(\Delta p/\Delta T)_\eta$/(℃/MPa)	聚合物	$(\Delta p/\Delta T)_\eta$/(℃/MPa)
聚氯乙烯	0.31	共聚甲醛	0.51
聚酰胺 66	0.32	低密度聚乙烯	0.53
聚甲基丙烯酸甲酯	0.33	硅烷聚合物	0.67
聚苯乙烯	0.40	聚丙烯	0.86
高密度聚乙烯	0.42		

例如低密度聚乙烯在常压和 167℃下的黏度，要在 100MPa 压力下维持不变，需升高多少温度。根据表 2-10 中换算因子为 0.53℃/MPa，温度升高为

$$\Delta T = 0.53 \times (100 - 0.1)℃ \approx 53℃$$

换言之，此熔体在 220℃和 100MPa 时的流动行为，与在 167℃和 0.1MPa 时的流动行为相同。

在注射成型的高压下，黏度的提高相当于温度下降了几十度，并且还存在剪切速率对黏度的影响。在计算机对注射成型的流动分析时，为了描述熔体黏度与剪切速率、压力和温度的函数关系，建立起这三个参量的材料黏度方程。这将在本章的 2.4 节中陈述。

2.3.2　相对分子质量和添加剂的影响

相对分子质量对熔体黏度影响明显。相对分子质量的分布、分子链的支化程度和添加剂对熔体的流动性影响不可忽视。

1. 相对分子质量和结构的影响

在聚合物的注射加工中，相对分子质量对对熔体黏度有重要意义。本节讨论其对黏度的关系，也同时讨论相对分子质量分布宽度和支化影响。

（1）相对分子质量　聚合物熔体的流动是分子重心沿流动方向的位移。相对分子质量越大，分子链越长且包含的链段数目越多，流动位移越困难。因此，黏度随着相对分子质量的升高而增加。研究表明，各种聚合物有一临界相对分子质量 M_c。如图 2-19 所示：当重均相对分子质量 M_w 小于 M_c 时，聚合物熔体的零剪切黏度 η_0 与重均相对分子质量 M_w 成正比；当 M_w 大于 M_c 时，η_0 随着 M_w 的增大，具有 3.4 的指数关系。这说明高分子链之间形成大量缠结区，大幅度地增加黏度。由于此时缠结区的缠结点数目主要与重均相对分子质量大小有关。有表述为

$$\eta_0 = K_1 M_w \qquad (M_w < M_c) \qquad (2\text{-}36a)$$

$$\eta_0 = K_2 M_w^{3.4} \qquad (M_w > M_c) \qquad (2\text{-}36b)$$

K_1 和 K_2 是经验常数。对于不同聚合物，K_1 大致在 1～1.6 之间；K_2 在 2.5～5.0 之间。

表 2-11 为各种聚合物的临界相对分子质量 M_c 的实验值。M_c 明显地依赖于各种高分子链的刚性。聚苯乙烯分子链的刚性比聚甲基丙烯酸甲酯大，更比聚乙烯大得多。大分子链的缠结是聚合物的重要结构特征。重均相对分子质量 M_w 小于 M_c 时，链缠结有解缠现象，致使未能形成有效的拟网状结构。此外，剪切速率 $\dot{\gamma}$ 越大，聚合物分子链的缠结越容易破坏，有黏度变稀的现象。

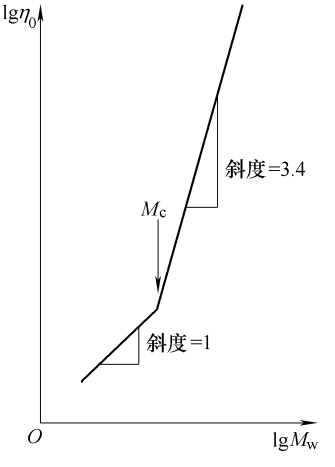


图 2-19　零剪切黏度取决于重均相对分子质量

表 2-11　几种聚合物的临界相对分子质聚合物量 M_c

聚合物	M_c	聚合物	M_c	聚合物	M_c
聚乙烯	3800	聚丙烯	7000	聚乙酸乙烯酯	23000
聚酰胺 6	5000	聚碳酸酯	13000	聚甲基丙烯酸甲酯	28000
聚丁二烯	5600	聚异丁烯	17000	聚苯乙烯	30000

从成型加工考虑，降低物料的相对分子质量可以改善流动性，但会影响制品的力学性能。通常，注射成型用聚合物的相对分子质量较低；挤出成型用聚合物的相对分子质量较高；吹塑成型容器成型用的相对分子质量介于两者之间。天然橡胶的相对分子质量要求控制在 20 万左右；合成纤维的相对分子质量一般较低，为 2 ~ 10 万；注射成型塑料的相对分子质量控制在纤维和橡胶之间。

（2）相对分子质量分布　在相同的平均相对分子质量下，分子量分布宽的聚合物熔体中，一些较大的长分子链所形成的缠结点，在剪切速率增大时缠结的破坏作用明显。黏度下降较分布窄的多些。

此外，分布宽的聚合物熔体中低相对分子质量部分含量较多。在剪切流动中，低相对分子质量部分起润滑增塑作用。在剪切速率提高时，黏度下降更为明显。因此，相对分子质量分布宽的聚合物熔体，更便于注射成型。但是过宽的相对分子质量分布，低相对分子质量级分含量过多，会给制品的力学性能带来不良影响。

（3）支化　当相对分子质量相同时，分子链是直链型还是支链型及其支化程度，对黏度也有影响。在零剪切速率下，低密度聚乙烯的黏度低于高密度聚乙烯。在注射流动的剪切速率 $10^2 \sim 10^4 s^{-1}$下，支链型低密度聚乙烯的黏度比直链型高密度聚乙烯低。

对于低密度聚乙烯，因为支链短，使分子链之间距离增大，缠结点减少，在较高的剪切速率下，支化链破坏了分子链间的缠结作用，其黏度小于高密度聚乙烯。但是对于长支链，主链和长支链都能形成缠结点，会使黏度增大。

2. 添加剂的影响

注射成型的塑料常充填的添加剂是各种填料和短纤维，都会使流动熔体的黏度增大。聚氯乙烯成型塑料添加增塑剂和润滑剂，能改善其熔体的流动性。

（1）填料　塑料中的填料不但填充了空间，降低了成本，而且改善了塑料的某些物理和力学性能。常见的填料有碳酸钙、陶土、钛白粉和石英粉等。

填料的加入，一般会使聚合物熔体的流动性降低。填料对熔体流动性的影响与填料粒径大小和颗粒的形状等有关。粒子小的填料，会使其分散所需的能量较多，加工时流动性差；但制品的表面较光滑，强度高。反之，粒子大的填料，其分散性和流动性都较好；但制品表面粗糙，强度下降。此外，填充的聚合物熔体的流动性还受众多因素的影响，例如填料的类型及用量、表面处理剂的类型、填料与聚合物基体之间界面作用等。

（2）短纤维　短玻璃纤维增强塑料，必须以熔融状态经注射加工后才能成型制品。在注射流动过程中，纤维充填直接增加塑料的黏度。而且纤维的运动状态决定了固化后制件中纤维的取向。注射加工纤维的取向研究和控制，近几年来已取得很大进展，已经能用计算机技术预测取向。

熔融态的玻璃纤维增强塑料在流动时，呈现剪切和拉伸应力状态。纤维含量的增加会提高液态物料的黏度，而且比未充填的聚合物呈现更大的非牛顿性。纤维充填塑料的取向比纯聚合物更明显。

黏流态的纤维增强塑料在注射模的流道和型腔间隙中流动时，沿流程的几何形状和尺寸改变，直接影响流动状态，从而改变纤维在熔体中的取向。在截面收敛时，会使取向加剧。反之，流动方向上的截面扩展时，会使短纤维转向，甚至会使纤维的取向与流动方向垂直。

在计算机模拟分析时，先进行增强塑料熔体流动的速度场有限元分析。再进行短纤维的运动分析，从而预测的纤维的取向过程。要从纤维的长度和直径之比，要以纤维在聚合物中的浓度，建立起低浓度、中等浓度和高浓度的复合体系的流变模型。

2.3.3　塑料熔体的弹性和熔体破裂

聚合物熔体不仅具有较高的黏性，还有明显的弹性。弹性也与塑料的成型加工密切相关。本节讨论塑料熔体弹性的原理和熔体的破裂。

1. 熔体的弹性

对于固态或橡胶态黏弹性材料的黏性和弹性的研究已相当深入。在加工成型的时间周期内对聚合物熔体流动中的弹性，往往与黏性各自分别处理。研究熔体的弹性，一般从应力的弹性回复入门。

聚合物熔体受剪切应力或拉伸应力作用，不但有消耗能量的流动，同时也储存能量。一旦作用应力或边界约束去除，此储存的弹性能会产生回复形变。

对于聚合物熔体的剪切流动，剪切弹性模量 G 是去除的剪切应力 τ 与可回复弹性剪切应变 γ_R 之比，写成

$$G=\frac{\tau}{\gamma_R} \tag{2-37}$$

对于聚合物熔体的拉伸流动，拉伸弹性模量 E 是去除的拉伸应力 σ 与可回复拉伸弹性应变 ε_R 之比。写作

$$E=\frac{\sigma}{\varepsilon_R} \tag{2-38}$$

图 2-20 所示是 170℃的某品级聚乙烯熔体的流动特性数据。横坐标的剪切应力 τ 的对数值，对应对数剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的斜线，有熔体的剪切黏度 η 为

$$\eta=\frac{\tau}{\dot{\gamma}} \tag{2-39}$$

在纵坐标的对数轴上，可读出对应的 $\eta(\mathrm{N\cdot s/m^2})$。也可在纵坐标上读到剪切弹性模量 $G(\mathrm{N/m^2})$，用对应横坐标上剪切应力 $\tau(\mathrm{N/m^2})$，计算出回复弹性剪切应变 γ_R。

图 2-20 上横坐标也是拉伸应力 σ（$\mathrm{N/m^2}$）。对于拉伸应变速率 $\dot{\varepsilon}$，有熔体的拉伸黏度 η_E 为

$$\eta_E=\frac{\sigma}{\dot{\varepsilon}} \tag{2-40}$$

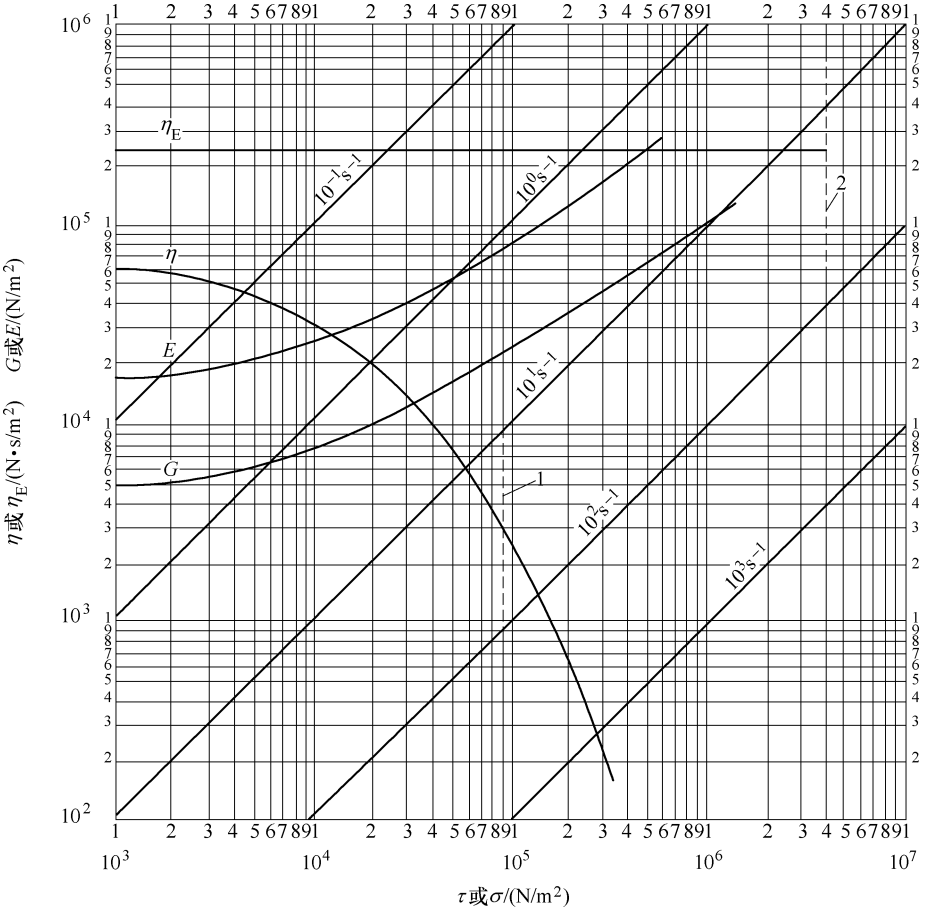


图 2-20　170℃聚乙烯熔体的流动特性

虚线 1—不稳定流动　虚线 2—熔体破裂

用拉伸黏度曲线 η_E(N·s/m²)，读到横坐标拉伸应力 σ，可计算得拉伸应变速率 $\dot{\varepsilon}$。利用熔体弹性模量 E(N/m²) 曲线，以对应的拉伸应力 σ，可计算得回复的拉伸弹性应变 ε_R。

从各种聚合物熔体的 G、η、E 和 η_E流动特性曲线可知，剪切弹性模量 G 和拉伸黏度 η_E分别随剪切应力 τ 和拉伸应力 σ 的增加而增大。而剪切黏度 η 随剪切应力 τ 增大有明显下降。聚乙烯、丙烯酸类树脂、聚酰胺 66 以及低聚合度的线性聚合物，其拉伸黏度 η_E几于与拉伸应力 σ 无关。一般支化聚合物如低密度聚乙烯，其拉伸黏度 η_E随 σ 增加而增大。一般高聚合度的线型聚合物如聚丙烯，其 η_E随 σ 增加而减小。

又从图 2-20 可知，聚合物熔体在低剪切应力 $\tau < 10^4$Pa 时，剪切模量 G 大致为常数。约在 $\tau > 10^4$Pa 时，剪切黏度 η 急剧下降，熔体会出现不稳定流动。拉伸正应力$\sigma > 10^6$Pa 时，会出现熔体破碎。这都是因为熔体内弹性能储存过大，弹性表现突出。

弹性变形在外力除去后的松弛回复快慢，由松弛时间 $\lambda = \eta/G$ 或 $\lambda_E = \eta_E/E$ 决定。

如果实际变形的时间 t 比高聚物熔体的松弛时间 λ 或 λ_E 大很多，则熔体的形变主要为黏性流动。因为弹性变形在此时间 t 内，几乎都已松弛了。反之，如果实际变形的时间 t 比熔体的松弛时间 λ 或 λ_E 小得多，则以弹性变形为主。

与剪切黏度相比，高聚物熔体的剪切模量对温度、压力和相对分子质量并不敏感，但都显著地依赖于聚合物的相对分子质量的分布。聚合物熔体特征是在相对分子质量高，相对分子质量的分布宽时，弹性表现最为明显。因为相对分子质量高的熔体黏度高，而且相对分子质量的分布宽时，剪切弹性模量低。因此，熔体所具有的松弛时间长。弹性变形的松弛过程长，弹性表现就充分。

2. 熔体的破裂

当挤出速率逐渐增加时，挤出物表面将出现不规则的现象，甚至使内在质量受到破坏，此类现象统称为熔体破裂（melt fracture）。

聚合物熔体从小浇口对空注射中，在熔体挤出速率较低时，挤出物具有光滑表面和均匀形状；当挤出速率达到某值时，挤出物表面失去光泽且表面粗糙，类似于橘皮纹；当挤出速率再升高时，挤出物表面出现众多的不规则的结节、扭曲或竹节纹，甚至支离和断裂成碎片或柱段，如图2-21所示。这种现象称为熔体破裂。这些现象说明，在低的剪切应力或速率下，各种因素引起的扰动被熔体黏性所抑制；而在高的剪切应力或速率下，流体的弹性恢复的扰动难以抑制，且发展成不稳定流动，引起流体的破裂。

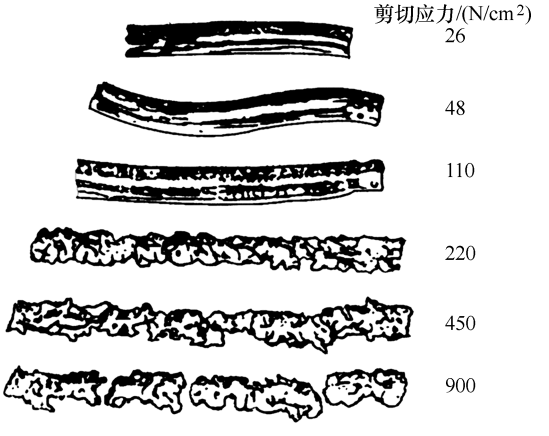


图 2-21　聚甲基丙烯酸甲酯于 170℃、不同挤出速率下的挤出物

熔体破裂不仅在挤出物的外观出现畸变、支离和断裂，而且破坏到挤出物内部。对产生此种严重破坏原因有两种意见。一种认为熔体中贮存的弹性剪切应变能转变成表面自由能，破坏了挤出物。另一种看法是，在浇口及其上游的通道内由于熔体各处受应力作用的历史不尽相同，因而离开浇口后所出现的弹性恢复就不可能一致。如果弹性恢复力不为熔体所容忍，就会引起熔体破裂。

熔体破裂现象是聚合物熔体所产生弹性应变和弹性恢复的总结果，是一种综合现象。塑料熔体在注射模内流动过程中，不稳定的流动和熔体破裂将会在制品上出现流动痕迹，并损伤力学和物理性能。熔体从小浇口射入大型腔，很容易形成蛇形流动和熔体破裂。通常注塑件都为薄壁结构，型腔间隙多为 1 ~ 3mm。矩形浇口的高度约为制品壁厚的一半。射入的熔体在模具壁面间的窄缝中流动，阻力减小了熔料的能量，弹性恢复受到约束，让熔体稳定推进。注射模的浇口及其位置的设计，必须考虑避免不稳定流

动。以下一些因素影响着熔体破裂的出现。

1）发生不稳定流动现象所确定的临界剪切应力为 10^5Pa（$=10$N/cm^2）数量级。并随着温度升高而略有增加。临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 随着浇口长径比的增加而增大，同时也随着温度升高而有增加。图 2-22 所示为临界剪切应力 τ_{cr} 和临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 对温度的依赖关系。

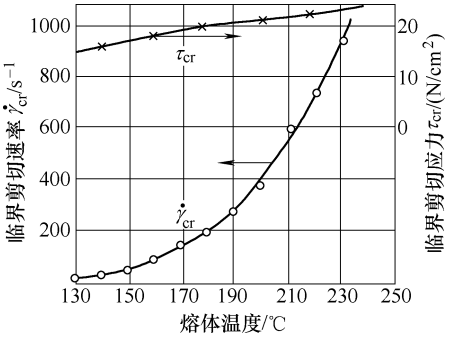


图 2-22 PE 熔体临界剪切应力 τ_{cr} 和临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 对温度的依赖关系

2）浇口的入口角对临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 的影响较大。PE 熔体将入口角从 180° 改为 30°，临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 提高了 10 倍多。使用流线型的结构是防止聚合物熔体滞留并防止挤出物不稳定的有效方法。

3）各种聚合物熔体的临界剪切应力 τ_{cr} 在 $10^5 \sim 10^6$Pa 范围内。随聚合物品种和品级不同临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 有所差异。表 2-12 列示了多种聚合物的 τ_{cr} 和 $\dot{\gamma}_{cr}$ 值。

表 2-12 若干熔体的临界剪切应力 τ_{cr} 和临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$

聚合物	熔体温度 T/℃	临界剪切应力 τ_{cr}/(N/cm^2)	临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$/s^{-1}
LDPE MFR2. 1	150	15 ~ 20	50
LDPE MFR2. 0	190	13. 0	600
HDPE Mn = 4×10^4	200	25 ~ 30	—
HDPE Mn = 15.5×10^4	240	30. 0	—
PS	190	9. 0	300
PS	210	14. 8	2140
PP	200	10. 0	350
PP	260	10. 0	1200
PVC	210	25. 0	100
PVC	188	20. 0	400
PMMA	200	40. 0	260
PA66	275	90. 0	2.8×10^5

4）临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 随着相对分子质量增加而降低。相对分子质量大的聚合物熔体，在较低的剪切速率时也会发生熔体破裂。对于注射模塑来说，临界剪切速率 $\dot{\gamma}_{cr}$ 数值显得特别重要。相对分子质量低的聚合物熔体，适宜高速注射模塑。

2.4 塑料熔体注射充模和保压的计算机模拟

塑料熔体注射充模过程模拟分析，包括浇注系统分析和注塑件型腔流动分析。浇注系统分析目的是确定合理的流道布置和尺寸，确定浇口的数目和位置。型腔流动有注射充模和保压分析，目的是确定型腔的合理形状和尺寸，得到最佳的注射压力、注射速率、保压压力和时间等工艺参数。

注射成型充模流动过程的数值模拟分析，是描述一维和二维不稳定和非等温的非牛

顿流体的流动过程。它有三个重要因素，即注塑制品及浇注系统的结构造型；塑料熔体的流动特性描述；流动控制方程的有限元分析求解。

2.4.1　黏度方程

聚合物熔体在注射成型中的流动黏度 η 与压力 p、温度 T 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 相关。其熔体流动材料的剪切应力本构关系描述成

$$\tau = \eta(p, T, \dot{\gamma})\dot{\gamma} \tag{2-41}$$

在注射流动过程的数值分析时，各种塑料的流动黏度的方程必须是压力 p、温度 T 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的函数，其黏度 η 值随时供流动控制方程调用。

1. 聚合物的普适流动曲线

大量的聚合物熔体的黏性流动实验和流变曲线，概括了图 2-23 所示的熔体的普适流动曲线。由于此类曲线的黏度与剪切速率的变化范围很广，所以用对数坐标 $\lg\eta$-$\lg\dot{\gamma}$ 表达。

1）聚合物的流动曲线可以分为三个区域：

① 在低剪切速率下，斜率为零；在 $\lg\tau$-$\lg\dot{\gamma}$ 坐标上斜率为 1。此状态的流体符合牛顿流体定律，称为第一牛顿流动区。在 $\lg\eta$-$\lg\dot{\gamma}$ 坐标的该区的黏度为零剪切黏度 η_0，即 $\dot{\gamma}\to 0$ 时的黏度。

② 剪切速率增大，流动曲线的斜率小于 1，其流动指数 $n<1$，称为假塑性流动区。该区的黏度为表观黏度 η_a。在该区的 $\dot{\gamma}$ 增大时，η_a 减小。聚合物熔体加工成型时所经历的剪切速率，通常在此范围内。

③ 当剪切速率继续增大，在高剪切速率区流动曲线为另一个斜率为零的直线，也符合牛顿流体定律，称为第二牛顿流动区。高剪切速率区的黏度为极限剪切黏度 η_∞，即 $\eta_\infty = \lim\limits_{\dot{\gamma}\to\infty}\eta$。如图 2-23 所示，一般实验不容易达到这个区域。因为远未达到这个区域的 $\dot{\gamma}$ 值，已经出现了不稳定的流动。

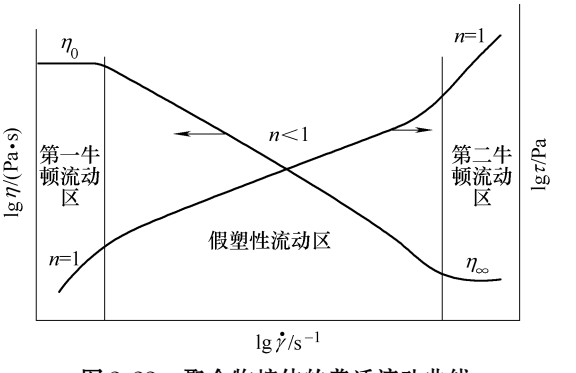


图 2-23　聚合物熔体的普适流动曲线

常见的普适流动曲线是理论推断的示意曲线。聚合物的零剪切黏度、表观黏度和极限黏度有 $\eta_0 > \eta_a > \eta_\infty$ 关系。

2）对聚合物的普适流动曲线的黏度特性，通常以分子链缠结的观点来解释：

① 当聚合物的相对分子质量超过某临界值后，分子链间存在着相互缠绕点或因范德瓦尔斯力作用形成链间的物理交联点。在分子热运动作用下，这些物理交联点处于不断解体和重建的动平衡状态。整个聚合物熔体具有不断变化着的拟网状结构。

② 在低剪切速率下，大分子链的高度缠结，流动阻力很大。由于剪切速率很小，

链缠结点的破坏等于缠结的形成，黏度能保持恒定的最大值 η_0，具有牛顿流体的流动行为。

③ 当剪切速率增大时，大分子链在剪切作用下发生构象变化。随着剪切速率增大，缠结的解除和破坏增多，而缠结的重建越来越少。大分子链和链段沿着流动方向的取向越来越明显。这样使流动阻力减小，表观黏度 η_a 下降，表现了假塑性的剪变稀的流动特征。

④ 当剪切速率继续增大时，在强剪切作用下，大分子链的拟网状结构完全被破坏。高分子链沿着剪切方向高度取向排列，流体黏度达到最小值 η_∞，且有牛顿流体的流动行为。

2. 聚合物材料的黏度方程

目前一些注射流动分析软件，采用的非牛顿流体的黏度方程有以下三个。

1）取决于温度的幂律方程。它是基于阿伦尼乌斯（Ahrrenius）黏流活化能方程演变的经验公式。以

$$\tau = \eta(T,\dot{\gamma})\dot{\gamma}$$

有

$$\eta(T,\dot{\gamma}) = \tau/\dot{\gamma} = A\,\mathrm{e}^{T_a/T}\dot{\gamma}^{n-1} \tag{2-42}$$

式中 n——流动指数，也称非牛顿指数；

T——聚合物熔体的温度；

A——聚合物材料的黏度常数；

T_a——与聚合物材料活化能有关的常数。

2）修正的五参数 Cross 黏度方程，它是五个材料参数（n，τ^*，B，T_b，β）构成的。黏度是压力 p、温度 T 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的函数。

$$\eta(\dot{\gamma},T,p) = \frac{\eta_0(T,p)}{1+\left(\dfrac{\eta_0\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \tag{2-43a}$$

式中，n 为流动指数；τ^* 为材料常数，描述了由牛顿黏度过渡到幂律黏度的剪切应力水平。零剪切黏度 η_0 是温度和压力的函数，采用阿伦尼乌斯类型方程表达式

$$\eta_0(T,p) = B\exp\left(\frac{T_b}{T}\right)\exp(\beta p) \tag{2-43b}$$

式中，B，T_b，β 都是材料常教。B 为材料的黏度常数；T_b 反映 η_0 对温度的敏感性；β 体现 η_0 对压力的灵敏度。

采用阿伦尼乌斯类型方程表达式（2-43b），不仅可以描述高剪切速率时熔体的非牛顿流体流动行为，也能描述低剪切速率下的零剪切黏度。在大部分聚合物熔体充填模腔时，能较为精确地描述黏度值，但不适用在保压阶段描述较低温度时的黏度。

3）修正的七参数 Cross 黏度方程，它是七个材料参数（n，τ^*，D_1，D_2，D_3，A_1，$\hat{A}_2$）构成的。黏度是压力 p、温度 T 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的函数。零剪切黏度 $\eta_0(T,\ p)$ 采用 WLF（Williams、Lardel and Ferry）类型方程表达式

$$\eta_0(T,p)=D_1\exp\left(-\frac{A_1(T-T_s)}{A_2(T-T_s)}\right) \tag{2-44}$$

其中

$$T_s=D_2+D_2p$$

$$A_2=\hat{A}_2+D_3p$$

对于无定形聚合物，WLF 类型方程表征的熔体黏度更接近于真实黏度。采用 WLF 型方程表达式（2-44），能在较宽的剪切速率范围内，描述聚合物熔体充填和保压过程的黏度。

2.4.2　流动充模和保压的数值分析

注塑件是按照壁厚相等的薄板组合形体的结构设计的。由于聚合物熔体的高黏度和非牛顿性、不良的热传导性能，要求注塑件有较小壁厚，常见在 5mm 以下，而且整个制件的壁厚均匀一致，以使聚合物熔体有较稳定的流动充模过程，注塑件又有较均衡的冷却固化过程。热塑性聚合物熔体具有剪切变稀的特征，应使注塑件型腔在熔体充模流动时的剪切速率的大小和方向有合理分布，应使熔体保压补缩充分、注塑件密度均匀。

1. 一维流动充模数值分析

一维流动模拟是对图 2-24 所示的两种典型的型腔，进行充模流动数值分析。图 2-24a 是中心浇口的圆盘形模具型腔；图 2-24b 为浇口在一端的长条形型腔。一维流动还应包括圆管流道内的流动。

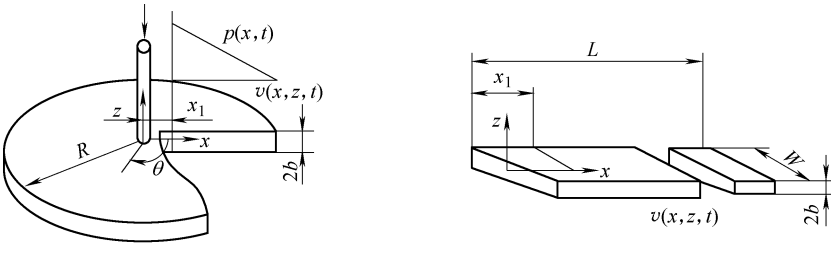


图 2-24　一维流动的两种典型的型腔

a）中心浇口的圆盘形型腔　b）浇口在一端的长条形型腔

（1）控制方程及边界条件　由表 2-2 奈维－斯托克斯方程，直角坐标系（x，y，z）的 x 分量展开式，将牛顿黏度 μ 置换成非牛顿黏度 η，有一维充模流动的动量控制方程

$$\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)=0 \tag{2-45}$$

由式（2-1）黏性运动流体在非恒温条件下能量方程的直角坐标系的一维展开式

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)=\lambda\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}+\eta\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2 \tag{2-46}$$

又有体积流率

$$q_V=\Gamma(x)\int_{-b}^{b}v_x\mathrm{d}z \tag{2-47}$$

式中，$\Gamma(x)$是模具型腔的形状系数：对圆盘形型腔，$\Gamma(x)=2\pi x$；对长板条形型腔，$\Gamma(x)=W$，W 为长板条宽。

引入下列速度场和温度场的边界条件

$$在\ z=\pm b\ 时，v_x=0 \tag{2-48a}$$

$$在\ z=0时，\frac{\partial v_x}{\partial z}=0 \tag{2-48b}$$

$$在\ x=x_1时，T=T_e \tag{2-49a}$$

$$在\ z=\pm b\ 时，T=T_W \tag{2-49b}$$

$$在\ z=0时，\frac{\partial T}{\partial z}=0 \tag{2-49c}$$

$$在\ x=x_{\min}(t)时，\frac{\partial T}{\partial x}=0 \tag{2-49d}$$

式中 T_e——浇口处温度；

T_W——模具型腔壁面的温度；

$x_{\min}(t)$——t 时刻熔体前沿的位置。

（2）一维压力场和温度场的数值解法 对式（2-45）积分，并将流量方程式(2-47)和边界条件式（2-48）代入，可得压力梯度

$$p'=\frac{q_V}{2\Gamma(x)S} \tag{2-50}$$

式中 p'——压力梯度的模，$p'=\left|-\frac{\partial p}{\partial x}\right|$

S——熔体的流动率。$S=\int_0^b \frac{z^2}{\eta}\mathrm{d}z$

同时，还可求得剪切速率 $\dot{\gamma}$、流动速度 v_x和黏性热 ϕ，有

$$\dot{\gamma}=\frac{p'z}{\eta} \tag{2-51a}$$

$$v_x=\int_0^b \dot{\gamma}\mathrm{d}z \tag{2-51b}$$

$$\phi=\eta\left(\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)^2=\eta\dot{\gamma}^2 \tag{2-51c}$$

至此，可分析求解得出熔体流动时的压力场和速度场。

对于薄壁制件，可用有限差分法求解温度。由于温度场对称分布，可以考虑上半部分将图形分为若干等分，如图 2-25 所示。

温度场可离散为

$$T_{(i,j,k)}=T_{(x_i,z_j,t_k)} \tag{2-52}$$

和表示网格位置有下列关系：

$$z_j=(j-1)\Delta z\ ,\Delta z=\frac{b}{N}$$

$$x_{i+1}=x_i+\Delta x_i\ ,i=1,2,3\cdots M$$

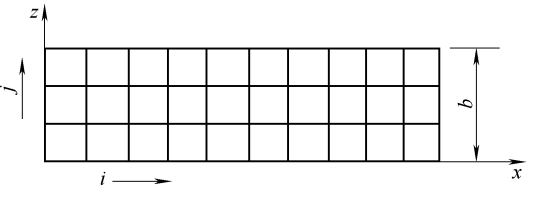


图 2-25 有限差分法网格划分

$$t_1 = 0\ ,t_{k+1} = t_k + \Delta t_k\ (k \geqslant 1)$$

依照式（2-46）注射的能量方程，利用向后的差分格式，流动熔体能量方程的全隐式差分法分析式为

$$\rho C_p\left(\frac{T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}}{\Delta t_{k-1}} + v_{i,j,k-1}\frac{T_{i,j,k} - T_{i-1,j,k}}{\Delta x_{i-1}}\right) = \lambda\left(\frac{T_{i,j+1,k} - 2T_{i,j,k} + T_{i,j-1,k}}{\Delta z^2}\right) + \phi_{i,j,k-1} \tag{2-53}$$

式中，速度场的 $v_{i,j,k-1}$ 和黏性热 $\phi_{i,j,k-1}$ 利用上一时刻的值。

2. 二维流动充模数值分析

注塑件在计算机造型后，进行有限元网格自动划分（常有三角形和四边形两种单元供选用），输入注射充模的温度、压力、时间和速度等工艺条件，选调注射机的技术参数，调用聚合物熔体材料的流变性能。一般流动分析软件有密度分布、剪切速率分布、充模熔体前沿流线、熔体温度场和压力场、熔合缝和气囊分布等。对输出结果有碍成型制品的质量，则需修改注塑件结构，例如壁厚等；也可修改浇注系统，例如浇口数目和位置等；也可修正工艺条件，直到实现合理的充模流动。

（1）流动分析的偶合路径法　建立起上述的一维流动数学模型，圆管、圆盘和矩形条的型腔基本流动单元后，还可以增添锥形管道等流动单元。为分析注塑件型腔中的流动，还需增添中心侧浇口的扇形流动单元，和中心侧浇口的圆环形流动单元，如图 2-26所示。后者需要借助二维流动分析程序来模拟熔体在型腔内流动。

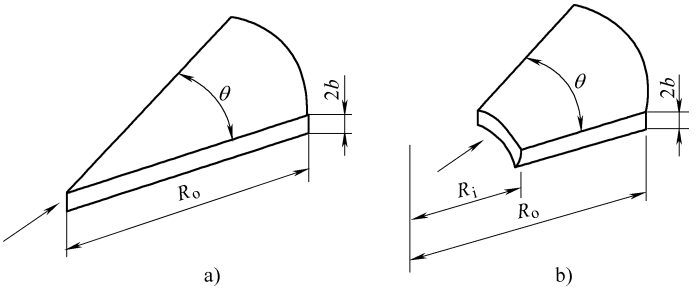


图 2-26　二维的流动单元

a）中心侧浇口的扇形流动单元　b）中心侧浇口的圆环形流动单元

图 2-27 所示的注塑件，可采用二维的控制方程来分析熔体的流动。如图 2-27b 所示，将三维空间上的注塑件展平，再设置浇口，划分流动路径和流动单元。然后用一维和二维分析程序进行流动分析。这种划分流动途径，然后再根据各路径将型腔分解成若干串联的二维流动单元，称为耦合流动路径法（couple flow path）。

图 2-27b 所示的耦合流动路径，经计算机对注塑件造型后，由软件自动执行完成。其后的流动分析的步骤如下：

1）定义时间步长 $\Delta t = t_f/(N \cdot M)$，$t_f$ 为充模时间，N 和 M 是给定的时间间隔数。某一时间步长是对的路径上串联着的一个单元的流动，步长可根据单元的充满时间调整。

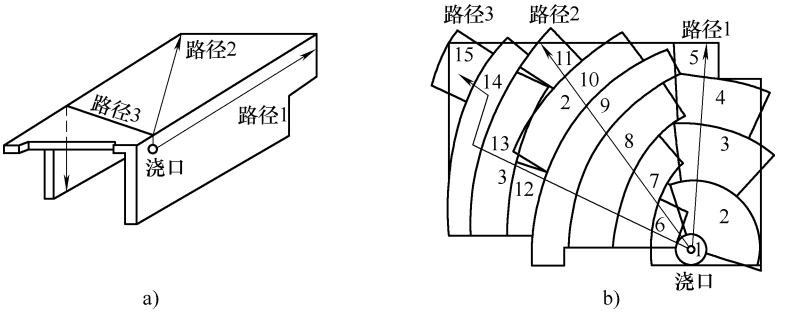


图 2-27　注塑件的展平及划分器和流动单元

a）注塑件　b）展平及划分路径和流动单元

2）在某单元内的熔体流动过程中，在每个时间步长内都应更新该单元的温度场。

3）每条流动路径的入口压力近似相等。从浇口处的压力始，每条路径末端压力为大气压力。所以在任何时刻，每条路径的总压力降应该相等。根据这一条件，利用迭代法在每一时间步长内，沿每条流动路径更新各自体积流量。直到某流动路径的最后一个单元被全部充满。在后续的时间步长内，其体积流量为零。

4）根据更新后的体积流量，计算熔体在每一个未充满单元内的前沿位置。

5）计算单元内的压力场和速度场等。

6）返回步骤 2，重复计算过程，直至全部流动路径内的单元均被熔体充满为止。

在一维和二维流动分析时，多用有限差分和有限元混合的方法。此种流动模拟能胜任模具型腔复杂的几何边界的处理。

（2）二维流动的控制方程　聚合物熔体在图 2-28 所示任意形状的扁薄的型腔间隙中充模流动。C_e 表示浇口区；C_o 为型腔的边界；C_m（t）为 t 时刻熔体前锋推进位置。型腔间隙为 $2b$，也即注塑件壁厚。坐标原点位于型腔间隙的中央面上，置于料流的起始位置。

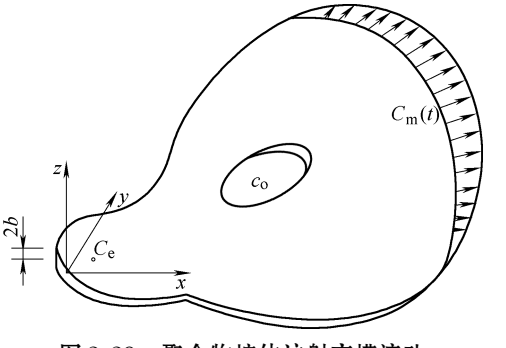


图 2-28　聚合物熔体注射充模流动

1）二维的流动模型。考虑图 2-28 所示的薄壁二维型腔的充模流动，由前连续性方程、动量方程和能量方程的直角坐标系的展开式，有四个注射控制方程：

$$\frac{\partial (b\bar{v}_x)}{\partial x}+\frac{\partial (b\bar{v}_y)}{\partial y}=0 \tag{2-54}$$

$$\frac{\partial p}{\partial x}-\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)=0 \tag{2-55}$$

$$\frac{\partial p}{\partial y}-\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial v_x}{\partial z}\right)=0 \tag{2-56}$$

$$\rho C_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_{\mathrm{x}}\frac{\partial T}{\partial x}+\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\lambda\frac{\partial^{2}T}{\partial z^{2}}+\eta\left[\left(\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial z}\right)^{2}+\left(\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial z}\right)^{2}\right] \tag{2-57}$$

边界条件

$$z=\pm b\ ,\ v_{\mathrm{x}}=v_{\mathrm{y}}=0\ ,\ T=T_{\mathrm{W}} \tag{2-58}$$

$$z=0\ ,\ \frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial z}=\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial z}=0\ ,\ \frac{\partial T}{\partial z}=0 \tag{2-59}$$

在 C_{e} 浇口处

$$T=T_{\mathrm{e}} \tag{2-60}$$

其黏度

$$\eta=\eta(\dot{\gamma},T,p)$$

剪切速率

$$\dot{\gamma}=\left[\left(\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial z}\right)^{2}+\left(\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial z}\right)^{2}\right]^{\frac{1}{2}}$$

2）求解速度场。对式（2-55）和式（2-56）进行积分处理，并应用边界条件式（2-59），有

$$\eta\left(\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial z}\right)=\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)z$$

$$\eta\left(\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial z}\right)=\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)z$$

将此两式再次积分，并应用边界条件式（2-58），有

$$v_{\mathrm{x}}=\left(\frac{\partial p}{\partial x}\right)\int_{z}^{b}\frac{z}{\eta}\mathrm{d}z \tag{2-61a}$$

$$v_{\mathrm{y}}=\left(\frac{\partial p}{\partial y}\right)\int_{z}^{b}\frac{z}{\eta}\mathrm{d}z \tag{2-61b}$$

用式（2-61a）和式（2-61b）沿 z 方向积分，得熔体的平均流速为

$$\bar{v}_{\mathrm{x}}=\left(-\frac{\partial p}{\partial x}\right)\frac{S}{b} \tag{2-62a}$$

$$\bar{v}_{\mathrm{y}}=\left(-\frac{\partial p}{\partial y}\right)\frac{S}{b} \tag{2-62b}$$

这里熔体流率

$$S=\int_{0}^{b}\frac{z^{2}}{\eta}\mathrm{d}z \tag{2-63}$$

3）求解压力场。将式（2-62）的平均速度$\bar{v}_{\mathrm{x}}$和$\bar{v}_{\mathrm{y}}$代入式（2-54），得压力场的控制方程

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(S\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial p}{\partial y}\right)=0 \tag{2-64}$$

应用有限元法进行数值分析，要将式（2-64）偏微分方程演变成代数方程。应用伽辽金（Galerkin）加权余量法，引入权函数 W。W 为单元形函数。又运用散度定理，设 Ω 为型腔中熔体已充填区域。又将边界条件$\frac{\partial p}{\partial n}=0$ 代入，n 为型腔壁面的法向，可得到

$$\int_{\Omega}\left(\frac{\partial W}{\partial x}+\frac{\partial W}{\partial y}\right)\left(S\frac{\partial p}{\partial x}+S\frac{\partial p}{\partial y}\right)\mathrm{d}\Omega \tag{2-65}$$

将区域 Ω 分成单元，单元内的压力分布用有限元法的多项式近似表达

$$p(x,y,t)=\sum_{k=1}^{N}N_{\mathrm{k}}(x,y)p_{\mathrm{k}}(t) \tag{2-66}$$

式中 N——单元的节点数；

$p_{\mathrm{k}}(t)$——单元节点 t 时间压力；

$N_{\mathrm{k}}(x,y)$——单元形函数，$N_{\mathrm{k}}=W_{\mathrm{k}}$。

又有 $$N_{\mathrm{k}}=(a_{\mathrm{k}},b_{\mathrm{k}},c_{\mathrm{k}})/2A$$

式中 A 为三角形单元的面积，其 $k=1,2,3$。

有限元网格上各节点的压力，N_{k}用权函数依次求出。其权函数的常数 a_{k}、b_{k} 和 c_{k} 要建立方程解出。有关有限元数值分析的进一步演示，请参阅有关专著。还有温度场的求解方程，熔体流动前沿位置和两股熔体前锋相遇等求解方程，这里不再列出。图2-29是一模有大小两件注射型腔的模拟分析结果。从有限元网格单元建立，到流动速度、压力场和温度场的分布显示。

3. 保压过程数值分析

在保压阶段温度变化显著，压力变化幅度大，熔体密度变化大，必须考虑熔体的可压缩性，也因此必须采用更宽温度范围的黏度模型；同时，必须考虑熔体的比热容和热导率随温度的变化；在保压过程中存在固液相变化，必须考虑结晶型聚合物在熔点附近密度的突变及结晶潜热的释放。

（1）型腔内保压过程流变方程 型腔可简化为相距很近的两平行壁面之间的空间，如图 2-28 所示。又由表 2-4，有连续性方程的直角坐标系（x，y，z）展开式

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_{\mathrm{x}})+\frac{\partial}{\partial y}(\rho v_{\mathrm{y}})+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_{\mathrm{z}})=0 \tag{2-67}$$

又有表 2-2 奈维－斯托克斯方程的展开式，直角坐标系（x，y，z）的 x 和 y 分量引进两个控制方程；又利用注射流动时的剪切应力和剪切速率的关系式，有

$$0=-\frac{\partial p}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial z}\right) \tag{2-68}$$

$$0=-\frac{\partial p}{\partial y}+\frac{\partial}{\partial z}\left(\eta\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial z}\right) \tag{2-69}$$

用能量方程式（2-57）

$$\rho C_{\mathrm{p}}\left(\frac{\partial T}{\partial t}+v_{\mathrm{x}}\frac{\partial T}{\partial x}+v_{\mathrm{y}}\frac{\partial T}{\partial y}\right)=\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\eta\left[\left(\frac{\partial v_{\mathrm{x}}}{\partial z}\right)^{2}+\left(\frac{\partial v_{\mathrm{y}}}{\partial z}\right)^{2}\right] \tag{2-70}$$

式中比定压热容 C_{p}和热导率 λ 应为温度的函数 $C_{\mathrm{p}}(T)$和 $\lambda(T)$。

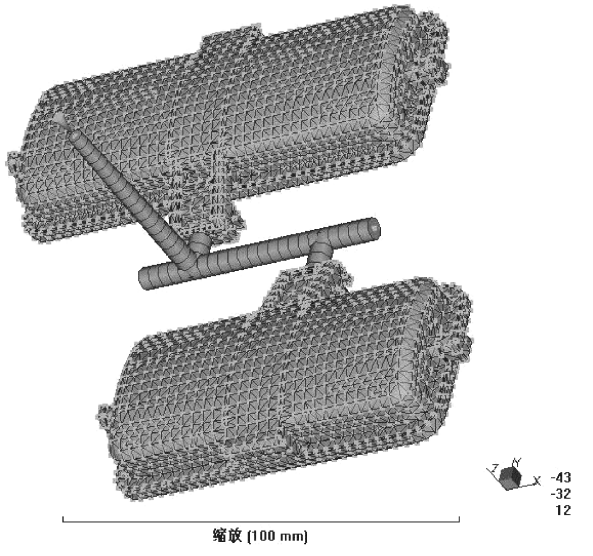
（2）保压过程的控制方程 以上的二维的流变方程应推演成保压过程的控制方程。将密度随时间的变化，转化为密度随温度、压力的变化，随后再改写成计算机有限元数值分析的方程。

假设熔体的流动对型腔中心层对称，对于图 2-28 上的模壁处熔体无滑移，压力下

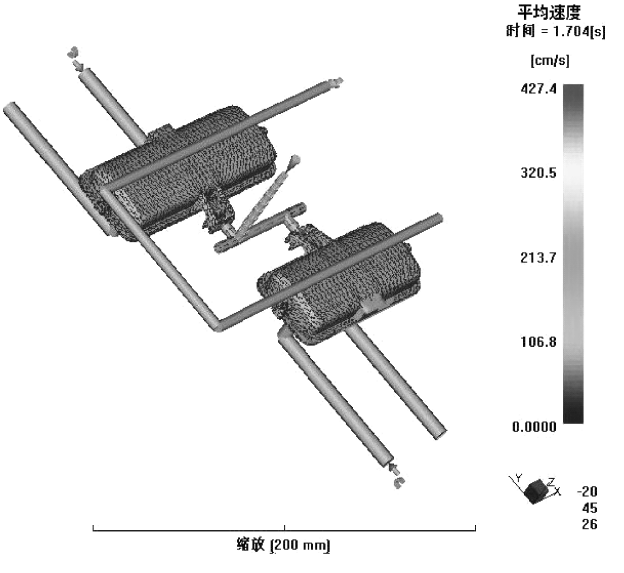
的剪切流动的边界条件有

对于 $z = \pm b$　　$v_x = v_y = 0$ ，$T = T_W$　　(2-71a)

对于 $z = 0$　　$\dfrac{\partial v_x}{\partial z} = \dfrac{\partial v_y}{\partial z} = 0$ ，$\dfrac{\partial T}{\partial z} = 0$　　(2-71b)



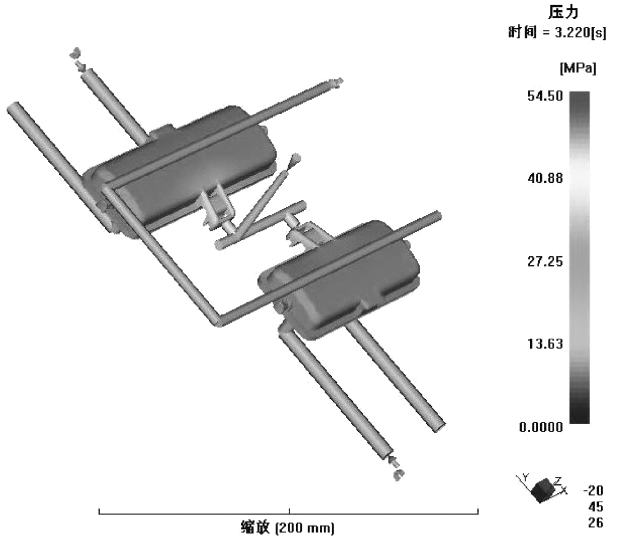
a)



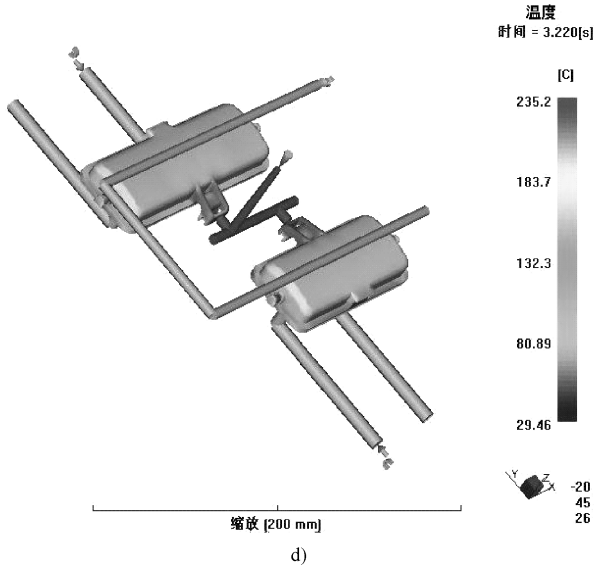
b)

图 2-29　计算机的熔体注射流动分析的演示

a）有限元网格单元　b）1.7s 时流动速度分布



c)



d)

图 2-29　计算机的熔体注射流动分析的演示 （续）

c）3.2s 时压力场分析　d）3.2s 时温度场分析

分别对式（2-68）和式（2-69）在 z 方向积分，并利用边界条件式（2-71b），有

$$\frac{\partial v_x}{\partial z} = -\frac{p'_x z}{\eta}\ ,\ \frac{\partial v_y}{\partial z} = -\frac{p'_y z}{\eta} \tag{2-72}$$

其中

$$p'_x = \left| -\frac{\partial p}{\partial x} \right|,\ p'_y = \left| -\frac{\partial p}{\partial y} \right|$$

再次对式（2-72）积分，并利用边界条件式（2-71a），有

$$v_x = p'_x\varphi \ ,\ v_y = p'_y\varphi \tag{2-73}$$

其中

$$\varphi = \int_0^b \frac{z}{\eta}\mathrm{d}z$$

可得在方向上单位长度的质量流率为

$$Q_{mx} = 2\int_0^b \rho v_x \mathrm{d}z = 2S \cdot p'_x \ ,\ Q_{\mathrm{my}} = 2\int_0^b \rho v_y \mathrm{d}z = 2S \cdot p'_y \tag{2-74}$$

其中

$$S = \int_0^b \rho\varphi \mathrm{d}z$$

对式（2-67）在厚度方向上积分，则有

$$2\frac{\partial}{\partial t}\int_0^b \rho \mathrm{d}z + \frac{\partial Q_{mx}}{\partial x} + \frac{\partial Q_{\mathrm{my}}}{\partial y} = 0 \tag{2-75}$$

在保压阶段，密度 ρ 是温度 T 和压力 p 的函数。将式（2-75）中第一项密度随时间的变化，转化为密度随温度、压力的变化及温度、压力随时间的变化，有

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial t}\int_0^b \rho \,\mathrm{d}z &= \frac{\partial p}{\partial t}\int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial p}\right)_{\mathrm{T}}\mathrm{d}z + \int_0^b \left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}} \cdot \frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{d}z \\ &= \frac{\partial p}{\partial t}\left[\int_0^x \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{l}}}{\partial p}\right)_{\mathrm{T}}\mathrm{d}z + \int_x^b \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{s}}}{\partial p}\right)_{\mathrm{T}}\mathrm{d}z\right] + \int_0^x \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{l}}}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{d}z + \\ &\quad \int_x^b \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{s}}}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{d}z + (\rho_{\mathrm{l}} - \rho_{\mathrm{s}})_{z=x}\frac{\partial x}{\partial t}\end{aligned} \tag{2-76}$$

式中，压力在厚度上不发生变化，故$\frac{\partial p}{\partial t}$与 z 无关而可提到积分号前。其中下标 l 和 s 分别表示液相和固相；x 是固液相交界面的位置；最后一项是针对结晶型聚合物在固液相交界面处，密度不连续而引入的。将式（2-76）和式（2-74）代入式（2-75），有

$$G\frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\left(S\frac{\partial p}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(S\frac{\partial p}{\partial y}\right) = -F \tag{2-77a}$$

$$G = \int_0^x \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{l}}}{\partial p}\right)_{\mathrm{T}}\mathrm{d}z + \int_x^b \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{s}}}{\partial T}\right)_{\mathrm{T}}\mathrm{d}z \tag{2-77b}$$

$$F = \int_0^x \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{l}}}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{d}z + \int_x^b \left(\frac{\partial \rho_{\mathrm{s}}}{\partial T}\right)_{\mathrm{p}}\frac{\partial T}{\partial t}\mathrm{d}z + (\rho_{\mathrm{l}} - \rho_{\mathrm{s}})_{z=x}\frac{\partial x}{\partial t} \tag{2-77c}$$

在保压过程中主要考虑压力影响。在迅速升高的压力下，制品密度大而使补料得以进行。G 项起驱动作用使制品密度变化。在进入冷却阶段后温度变化大时，F 项起驱动作用，使制品密度变化。直至浇口冻结，制品质量确定不变。

2.5　塑料注射成型热力学

塑料的注射加工，是首先将其加热成熔体，在成型后再冷却固化定型。一方面是流动与变形的过程，另一方面又伴随着热传递。本节研究和讨论注射成型中的热传递现象。

2.5.1　热传导方程和热物理性能

塑料加工过程中的热传递过程，所涉及的传热参量特征是对温度的依赖性。这些参量是温度和压力的函数。以定态还是非定态下材料热性能参量进行热传递分析，是聚合物及其复合塑料的热传递原理及其方程应用的前提。非定态下的热传递分析有一定难度，必须应用电子计算机和数值分析方法。

1. 热性能参量与温度

单相聚合物固态与熔体的热性能，其主要参量是密度 ρ（kg/m^3）、比定压热容 C_p［$J/(kg \cdot K)$］、热导率 λ［$W/(m \cdot K)$］、热扩散率 a（m^2/s）又称热扩散系数 k（mm^2/s）。

密度为体积质量。在一些场合，如在考察状态方程时用质量体积，以比体积 V（m^3/kg）表述

$$V = \frac{1}{\rho} \tag{2-78}$$

聚合物的密度 ρ 和比体积 V 随温度 T 与压力 p 而变化。图 2-30 所示为几种聚合物在大气压下，比体积随温度升高而增大的过程。注意到结晶型聚合物在熔融或固化过程中，比体积有突变。在高压注射压力下，应该考虑压力对密度的影响。

图 2-31 所示是热导率 λ 与温度的关系。聚合物是导热性能很差的绝热材料。λ 在 1W/(m·K) 以下。结晶型聚合物熔体的热导率比固态小。在注射加工过程中，导热性能影响着塑料的熔化效率，和成型制品的冷却固化速率。

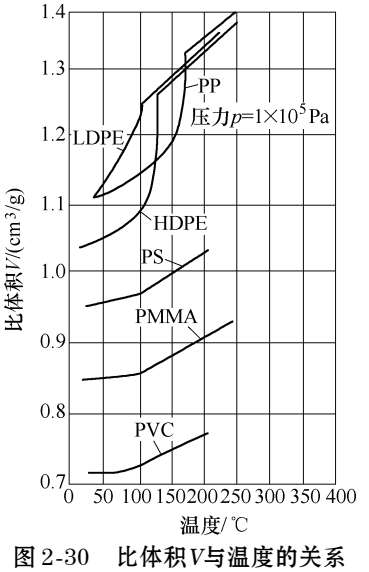


图 2-30　比体积 V 与温度的关系

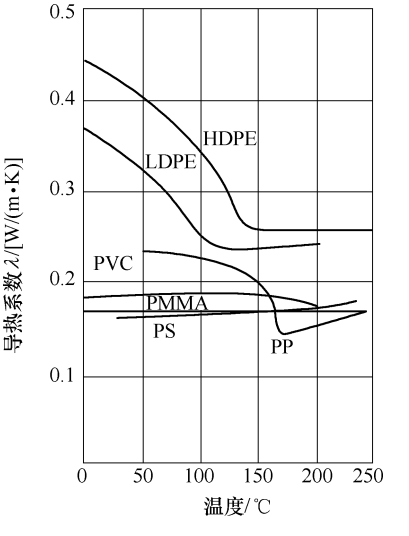


图 2-31　热导率 λ 与温度的关系

图 2-32 所示是比定压热容 C_p 与温度的关系。结晶型聚合物的比定压热容，在熔化的较窄的温度范例中有跃变过程。压力对热导率和比热容的影响，在一般工程计算中可

以不计。

在聚合物加工的非稳态温度场的计算中，热导率 λ 与热储存能力 ρC_p 的比值是热扩散率

$$a = \frac{\lambda}{\rho C_p} \tag{2-79}$$

工程计算时，常以比定压热容 C_p 替代比定容热容 C_V。图 2-33 所示为热扩散率 a 与温度的关系，同样忽略压力的影响。

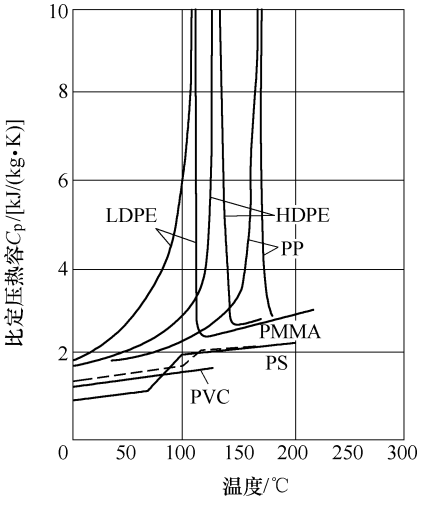


图 2-32　比定压热容 C_p 与温度的关系

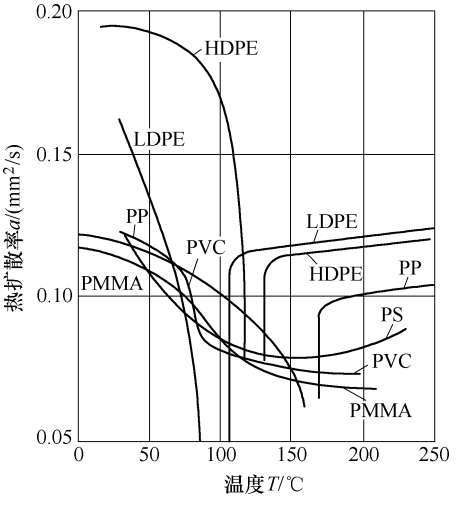


图 2-33　热扩散率 a 与温度的关系

2. 傅里叶导热定律和方程

如果流体是不可压缩的，而且黏度很低，可忽略黏性摩擦引起的温度变化，对于表 2-3 的运动流体能量方程中的后两项可予忽略，则被简化成

$$\rho C_V\left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x\frac{\partial T}{\partial x} + v_y\frac{\partial T}{\partial y} + v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \tag{2-80}$$

导热通量 q_i 为单位时间通过单位面积的热量，也即热流密度。其直角坐标系的分量为

$$q_x = -\lambda\frac{\partial T}{\partial x},\ q_y = -\lambda\frac{\partial T}{\partial y},\ q_z = -\lambda\frac{\partial T}{\partial z}$$

代入式（2-80）后得直角坐标系（x，y，z）的热传导的傅里叶方程

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v_x\frac{\partial T}{\partial x} + v_y\frac{\partial T}{\partial y} + v_z\frac{\partial T}{\partial z} = a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{2-81}$$

同样，对于柱面坐标系的能量方程简化成

$$\rho C_V\left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_r\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta} + v_z\frac{\partial T}{\partial z}\right) = -\left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(rq_r) + \frac{1}{r}\frac{\partial q_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) \tag{2-82}$$

导热通量 q_i 的分量

$$q_r = -\lambda\frac{\partial T}{\partial r},\quad q_\theta = -\lambda\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta},\quad q_z = -\lambda\frac{\partial T}{\partial z}$$

代入式（2-80）后得柱面坐标系（r，θ，z）的热传导的傅里叶方程

$$\frac{\partial T}{\partial t}+v_r\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{v_\theta}{r}\frac{\partial T}{\partial \theta}+v_z\frac{\partial T}{\partial z}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) \tag{2-83}$$

塑料熔体和模具钢的热传导是注射模冷却系统热力学分析的主要项目，也是热流道注射模设计的理论基础。

3. 单相聚合物材料的热性能参数

图 2-34 所示是实测的无定形聚碳酸酯的热性能，记述了比定压热容 C_p、热导率 λ、热扩散率 a 和密度 ρ 与温度的关系。除了 C_p，都是随着温度连续变化的。C_p在 153℃时有突变。这与 PC 的玻璃化转变温度 T_g 有关。无定形聚合物通常在 T_g 以上进行成型加工。此状态下的无定形聚合物的热性能变化很小。PC 在 480K 时，C_p = 1.926kJ/(kg·K)；在 535K 时，C_p = 2.093kJ/(kg·K)。

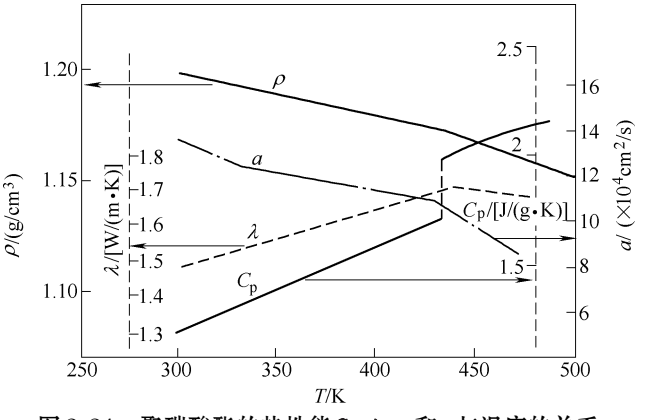


图 2-34　聚碳酸酯的热性能C_p、λ、a 和ρ 与温度的关系

图2-35 所示是实测的结晶型聚丙烯的热性能，说明比定压热容 C_p、热导率 λ 和密度 ρ 与温度的关系。比定压热容 C_p在熔点范围上有个尖峰跳跃过程。此峰尖曲线下的面积与结晶过程有关，反映了分子链或链段脱离晶格束缚所需的能量，称熔融热焓 ΔH_m，也称为熔化潜热。因此，对结晶型聚合物在热传递工程计算时，热性能参数的确定要慎重。

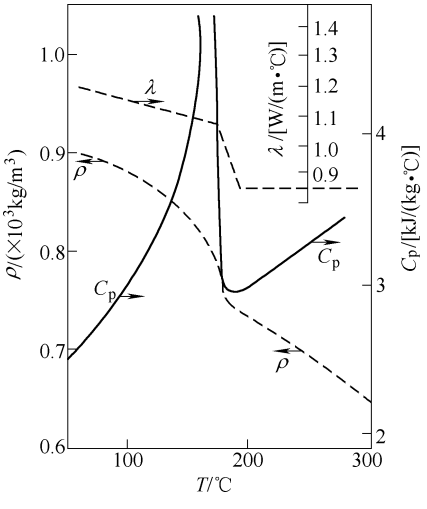


图 2-35　聚丙烯的热性能C_p、λ和ρ 与温度的关系

室温下几种聚合物的热性能见表 2-13。一些国产聚合物在室温下的热性能见表 2-14。其中不流动温度 T_0 是聚合物在一定载荷和阻力下，不发生流动的最高温度。当实际温度低于聚合物的不流动温度时，其剪切速率为零。150℃时几种聚合物的热性能见表 2-15。在流动充模的计算机分析软件中，为调用材料在不

同温度下的热性能数据，将 C_p、λ 和 ρ 随温度的变化，用多项式拟合。在工程计算中，对某个温度范围取热性能 C_p、λ 和 ρ 的平均值，或者取恰当参考温度下的数据。

表 2-13　室温下几种聚合物的热性能

聚合物	密度 ρ /(g/cm^3)	比定压热容 C_p /[kJ/(kg · K)]	热导率 λ /[W/(m · K)]	玻璃化转变温度 T_g/℃	熔点 T_m /℃
ABS	1. 16	1. 25 ~ 1. 67	0. 188 ~ 0. 335	80	
PA66	1. 13 ~ 1. 15	0. 46	0. 243	57	240
PC	1. 20	1. 25	0. 192	149	
PETF	1. 37	1. 25	0. 289	80	249
LDPE	0. 910 ~ 0. 925	2. 30	0. 335		
HDPE	0. 940 ~ 0. 965	2. 30	0. 460 ~ 0. 519	－78	141
PMMA	1. 17 ~ 1. 20	1. 46	0. 167 ~ 0. 521		
POM	1. 42	1. 46	0. 230	－82	183
PS	1. 04 ~ 1. 09	1. 34	0. 100 ~ 0. 138	107	
PTFE	2. 00 ~ 2. 14	1. 05	0. 250		
PUR(热塑性)	1. 05 ~ 1. 25	1. 67 ~ 1. 88	0. 070 ~ 0. 310	－46 ~ －18	
R-PVC	1. 30 ~ 1. 45	0. 84 ~ 1. 25	0. 125 ~ 0. 293		
PP	0. 91	2. 14	0. 172	－10	165
PEEK	1. 401(结晶型) 1. 263(无定形)	1. 34	0. 251	144	334 ~ 343
PPS	1. 34 (结晶型) 1. 44 (无定形)	1. 09	0. 289	88	285 ~ 290

表 2-14　一些国产聚合物在室温下的热性能

聚合物	产品牌号	生产厂	密度 ρ /(g/cm^3)	比定压热容 C_p /[kJ/(kg · K)]	热导率 λ /[W/(m · K)]	热扩散率 a /(×10^{-8}m^2/s)	冻结温度 T_Z/℃	不流动温度 T_0/℃
ABS	301	兰化	1. 04	1. 95	0. 238	11. 7	100	135
HDPE	2200J	扬子	0. 97	3. 38	0. 230	7. 0	120	130
HIPS		兰化	1. 04	1. 90	0. 140	7. 1	80	125
LDPE	112A	兰化	0. 92	3. 12	0. 230	8. 0	90	95
PA1010	Ⅱ型	吉化	1. 05	2. 72	0. 105	3. 7	190	200
PA6		上化	1. 13	2. 60	0. 352	12. 0	190	215
PA66	Ⅱ型	黑尼	1. 13	2. 65	0. 362	12. 0	200	250
PBT		上涤	1. 29	2. 05	0. 210	7. 9	220	225
PC	6705	长风	1. 18	1. 66	0. 193	9. 8	200	210
PC	PG-3	常化	1. 19	1. 79	0. 193	9. 1	200	210
PMMA	372	上金	1. 17	1. 67	0. 209	10. 7	115	145
POM	M60	上溶	1. 39	2. 88	0. 230	5. 7	150	160
PP	1400	燕化	0. 91	2. 81	0. 190	7. 5	155	170
PP	1340	扬子	0. 91	2. 83	0. 190	7. 4	150	170
PS	666D	燕化	1. 06	1. 83	0. 130	6. 9	80	135
PSU	S-100	上曙	1. 37	1. 86	0. 190	7. 5	220	235

表 2-15　150℃时几种聚合物的热性能

聚合物	密度 ρ/(g/cm^3)	比定压热容 C_p/[kJ/(kg · K)]	热导率 λ/[W/(m · K)]
LDPE	0. 782	2. 57	0. 241
HDPE	0. 782	2. 65	0. 255
PP①	0. 867	2. 80	0. 142
PVC	1. 31	1. 53	0. 166
PS	0. 9997	2. 04	0. 167
PMMA	1. 11		0. 195

① PP 为 180℃时的热性能。

4. 聚合物的比焓

比焓是在特定条件下，单位质量物质所含的热量。比焓 H（kJ/kg）与材料的温度关系如图 2-36 所示。熔融热焓 ΔH_m是结晶型聚合物在熔点 T_m 附近所需的热量。而结晶热焓 ΔH_c是完成结晶时释放的热量。通常认为 $\Delta H_m = \Delta H_c$。结晶型聚合物的熔融和结晶是在特定条件下热力学和动力学的复杂过程。真实熔点或结晶温度与聚合物的相对分子质量有关。结晶温度提高时结晶热焓 ΔH_c有些增加；较高相对分子质量聚合物的 ΔH_c较低些。表 2-16 所列的几种高聚物的 ΔH_m和 ΔH_c仅为参考。几种常见的热塑性塑料熔体凝固时释放的固化热焓 ΔH，有表列在第 11 章中。它是注射模温度调节系统设计时，计算成型塑料释放热量的材料性能数据。

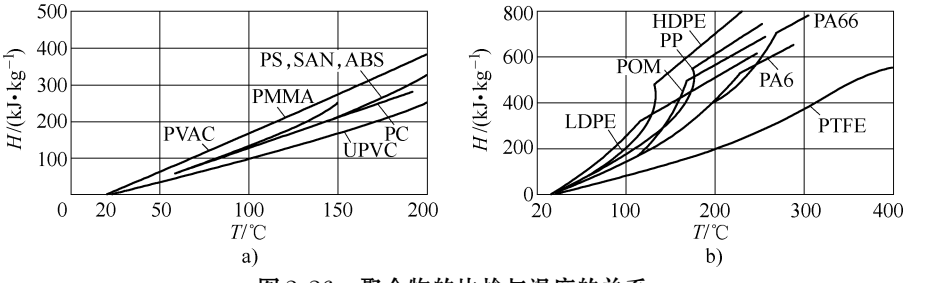


图 2-36　聚合物的比焓与温度的关系

a）无定形聚合物　b）结晶型聚合物

表 2-16　一些聚合物的熔融热焓 ΔH_m和结晶热焓 ΔH_c

聚合物	ΔH_m/(kJ/kg)	ΔH_c/(kJ/kg)	聚合物	ΔH_m/(kJ/kg)	ΔH_c/(kJ/kg)
POM	249		PET	137	126
HDPE	218 ~ 245	286	PBT	247	
LDPE	138		PTFE	57	
PP	209. 3		PEEK	130	
PA66	205	195	PPS	105	
PA6		190			

5. 聚合物的复合塑料的热性能

刚性粒子充填的聚合物，通常提高了复合塑料的熔体黏度和固态的模量，也提高了热变形温度。但是，填料和基体的热膨胀系数不一致，使复合塑料的性能有一些不容忽视的弱点。刚性填料的热导率 λ_1，一般比聚合物的热导率 λ_2大，例如玻璃纤维导热系

数有 1.021W/(m·K)。由混合律可近似推算出复合材料的热导率 λ，通常比纯聚合物略的大些。有些填料的比热容 C_p 比聚合物略小，如碳纤维的比定压热容为 1.26 kJ/(kg·K)。因此复合后材料的比热容比基体的小。

复合塑料的热性能密度、比定压热容 C_p、热导率 λ 和热扩散率 a，可用复合材料的基体、填料或纤维的体积组分或质量组分，推算复合塑料的热性能。混合律为

$$\Gamma = \Gamma_1\phi_1 + \Gamma_2\phi_2 \tag{2-84}$$

式中　Γ——复合塑料的热性能；

Γ_1——基体聚合物的热性能；

Γ_2——填料或纤维的热性能；

ϕ_1——基体聚合物的组分；

ϕ_2——填料或纤维的组分。

2.5.2　注射成型冷却过程中的热量传递

注射加工实质上是热交换过程，高温熔融态的塑料在模具型腔内冷却固化。当达到脱模温度时，模具开启，脱模机构将注塑件推出模具。冷却过程是指浇口中塑料冻结凝固到注塑件脱模顶出这个阶段。

注射模的热交换理论冷却系统的设计，在第 11 章模具温度调节系统中有详细陈述。这里着重从塑料成型热力学方面讨论注塑模冷却过程的计算机模拟、数值分析的主要原理和方法。

1. 注射模温度场分析

高温塑料熔体带入模具中热量的绝大部分经模具传给冷却系统，由冷却介质携出模具。其余热量由模具表面以对流和辐射方式传递给周边环境。注射成型是周期性间歇生产过程。模具温度场的变化也是周期性变化过程。注塑冷却过程是三维瞬态传热，在工程应用的温度场分析中简化为稳态传热。模具的瞬态温度是周期性波动，但只要注射工艺条件不变，注射周期内的平均温度恒定。热导率和比热容等热性能参数，取周期内的平均值。注射模具内的热交换主要有三方面：一是模具与注塑件之间的热传导；二是模具与冷却系统之间的对流换热；三是模具同周围环境之间的对流和辐射热交换。

注射模具同周围环境之间的热交换，详细计算式见第 11 章模具温度调节系统设计。另外，在第 12 章有关于热流道系统传热学的实用计算方法。成型加工时输入的热量是塑料高温熔体注入的。在注射模具系统热平衡计算时，用单位时间的热量 Q（kJ/h，J/s）描述。也有很少的热量由注射机的喷嘴传导给模具。输出的热量除了冷却液携走了绝大部分热量外，注射模本体同周边环境也有热量散失。注射模热量散失有三条途径、注射模的顶面和底面对注射机模板的热传导；注射模表面的辐射散热；注射模表面的散热对流。

（1）模具与注塑件之间的热传导　模具与注塑件之间通过型腔面进行热传导，在冷却分析中并不考虑接触面上的传热，而是把型腔接触面作为边界条件应用。由于注射制品为薄壁构件，厚度比另两个方向的尺寸小得多，假定热流仅沿型腔表面法向传递，

则注塑件的热传导简化为一维的非稳态导热。由式（2-81）傅里叶方程简化成沿壁厚 x 方向的热传导方程

$$\frac{\partial T}{\partial t}=a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}\right) \tag{2-85}$$

在型腔壁的法向 x 方向的导热通量

$$q_x=\frac{Q}{A}=-\lambda\frac{\partial T}{\partial x} \tag{2-86}$$

式中 Q 为注塑件单位时间内释放的热量；A 为注塑件的表面积。

热流在塑料进入模具的钢壁时，应有

$$q_x=-\lambda\frac{\partial T}{\partial x}=\alpha'(T_W-T_x) \tag{2-87}$$

式中 T_W 为模具型腔壁面的温度；T_x 是注塑板件在壁厚方向 x 位置的温度。α' 是注塑件与模具型腔壁之间的传热系数，有 $\alpha'=430\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})$。

（2）平板形和圆柱形注塑件的冷却时间　如图 2-37 所示的注塑板件，在温度为 T_W 的模具型腔壁面间。壁厚 $H=2b$。

冷却期间注塑板件无热源，应用一维热传导式（2-85）和式（2 -87），有

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=\frac{1}{a}\cdot\frac{\partial T}{\partial t} \tag{2-88}$$

初始条件

$$t=0\ ,\ T=T_x=f(x) \tag{2-89}$$

边界条件

$$x=0\ ,\ \frac{\partial T}{\partial x}=0 \tag{2-90}$$

$$x=b\ ,\ T=T_W$$

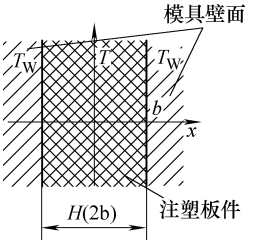


图 2-37　注塑板件在温度 T_W 的模具型腔壁面间冷却

引入二元温度函数 $T(x,\ t)=T_x-T_W$，用分离变量法解得式（2-88）的通解为

$$T(x,t)=(C\cos\beta x+D\sin\beta x)\text{e}^{-a\cdot\beta\cdot t} \tag{2-91a}$$

式中 β 为比例常数，$a(\text{m}^2/\text{s})$ 是热扩散率又称导温系数。此式代入边界条件式（2-90），则 $D=0$ 而有

$$T(x,t)=C\cos\beta x\text{e}^{-a\cdot\beta\cdot t} \tag{2-91b}$$

将此式代入式（2-87），加以整理后得

$$\frac{\mu}{B_i}=\cot\mu \tag{2-92}$$

其中

$$B_i=\frac{\alpha' b}{\lambda}\ ,\ \mu=\beta b$$

无因子（Biot）数 B_i 中，$\alpha'[\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{℃})]$ 为注塑板件与模具型腔壁之间的传热系数。$\lambda[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$ 是塑料的热导率。注塑板件壁厚 $H=2b$。

式（2-92）为特征方程，有无穷多个根

$$\mu_1 < \mu_2 < \cdots < \mu_n$$

将不同特征值 μ_n 代入式（2-91b）中得到不同的特解，其一般式为

$$T(x,t) = C_n \cos\mu_n \frac{x}{b} e^{-\mu_n^2 \cdot a \cdot t/b^2} \qquad n = 1,2\cdots$$

此特征方程的微分形式的终解

$$T(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\mu_n \frac{x}{b} e^{-\mu_n^2 \cdot a \cdot t/b^2} \tag{2-93}$$

将此式代入初始条件式（2-89），有

$$T(x,0) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos\mu_n \frac{x}{b} = f(x)$$

$f(x)$ 可在（0，b）区域内将函数 $|\cos\mu_n x/b|$ 展成傅里叶 Fourier 级数，得

$$f(x) = C_1 \cos\mu_1 x/b + C_2 \cos\mu_2 x/b \cdots + C_n \cos\mu_n x/b \tag{2-94}$$

可证明 C_n 为

$$C_n = \frac{2\mu_n \int_0^b f(x) \cos\mu_n \frac{x}{b} \mathrm{d}x}{b(\mu_n + \sin\mu_n \cdot \cos\mu_n)} \qquad n = 1,2\cdots\cdots \tag{2-95}$$

则

$$T(x,t) = T_x - T_W = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\mu_n}{b} \cdot \frac{2\mu_n \int_0^b f(x) \cos\mu_n \frac{x}{b} \mathrm{d}x}{b(\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n)} \cdot \cos\mu_n \frac{x}{b} \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot a \cdot t/b^2} \tag{2-96}$$

设定注塑料板件在冷却起始时的初始温度是均匀分布，前边界条件式（2-89）扩展为

$$T_0 = T(x,0) = T_x = f(x) = 常数$$

将式（2-96）中的积分项解得

$$\int_0^b f(x) \cos\mu_n \frac{x}{b} \mathrm{d}x = \frac{b}{\mu_n}(T_0 - T_W)\sin\mu_n$$

代回式（2-96）中，注塑板件的中央层 $x = 0$ 处的温度 T，把解改写成

$$\frac{T - T_W}{T_0 - T_W} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\sin\mu_n}{\mu_n + \sin\mu_n \cos\mu_n} \cdot \cos\mu_n \frac{x}{b} e^{-\mu_n^2 \cdot a \cdot t/b^2} \tag{2-97}$$

注塑板件与模具型腔壁之间的传热系数 $\alpha' = 430\mathrm{W/(m^2 \cdot ℃)}$，现取整为 $\alpha' \approx 500\mathrm{W/(m^2 \cdot ℃)}$。塑料的热导率为 $\lambda = 0.2 \sim 0.9\mathrm{W/(m \cdot K)}$。注射板件壁厚 $H = 2b = 1 \sim 10\mathrm{mm}$，因此解得

$$B_i = \frac{\alpha' b}{\lambda} = (0.56 \sim 13.89) \times 10^3$$

B_i 值较大，对式（2-92）中认为 $B_i \to \infty$，特征方程的根为

$$\mu_n = (2n-1)\frac{\pi}{2} \qquad n = 1,2\cdots$$

把 μ_n 代回式（2-97）得

$$\frac{T - T_W}{T_0 - T_W} = \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \frac{4}{(2n+1)\pi} \cdot \cos\frac{(2n-1)\pi x}{2b} e^{-(2n-1)^2 \pi^2 a \cdot t/4b^2} \tag{2-98}$$

当注塑板件的中央层 $x=0$ 处的温度 T 低于热变形温度，或注塑件有足够的刚性就可以脱模。

当注塑板件的壁厚较厚时，式（2-98）右侧级数取第一项就能满足工程上的需要，可得到冷却时间计算式

$$t=\frac{(2b)^2}{\pi^2 a}\ln\left[\frac{4(T_0-T_W)}{\pi(T-T_W)}\right] \tag{2-99}$$

当注塑板件的壁厚较薄时，式（2-98）右侧傅里叶级数可得到冷却时间计算式

$$t=\frac{(2b)^2}{\pi^2 a}\ln\left[\frac{8(T_0-T_W)}{\pi^2(T-T_W)}\right] \tag{2-100}$$

以上两式中 a——塑料的热扩散系数［$mm^2/s(m^2/s)$］；

b——注塑板件的厚度的二分之一［mm（m）］；

T_0——注射塑料熔体的初始温度（℃）；

T_W——模具型腔壁面的温度（℃）；

T——注塑板件的中心层的脱模温度，应低于塑料材料的热变形温度（℃）。

塑料圆柱体的半经为 R 时冷却时间计算式

$$t=\frac{16R^2}{9\pi^2 a}\ln\left[\frac{5.13(T_0-T_W)}{\pi(T-T_W)}\right] \tag{2-101}$$

塑料球体的半径为 R 时冷却时间计算式

$$t=\frac{R^2}{\pi^2 a}\ln\left[\frac{2(T_0-T_W)}{(T-T_W)}\right] \tag{2-102}$$

式（2-101）和式（2-102）的 a、T_0 和 T_W 含义同上；T 是 $r=0$ 时注塑板件中央的脱模温度，应低于塑料材料的热变形温度。此两式推导过程与式（2-99）和式（2-100）相似。同样需注意到：结晶型塑料在固化的相变过程中潜热释放没有考虑；注塑件在冷却过程中自身的收缩，会脱离型腔模壁。众多因素使理论冷却时间计算，要在注射生产中修正。

（3）模具与冷却管道之间的对流换热　对流换热是模具冷却介质的流动载热与塑料制品热传导联合作用的结果。强制对流的特征是模具内流体对制品表面的热流密度因流动而增大。

在对流冷却过程中，流体传给聚合物物体表面的热流密度，也称导热通量 q_n，由傅里叶定律和牛顿冷却定律给出。垂直流动方向的法向热流密度为

$$q_n=-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha(T_W-T) \tag{2-103}$$

式中 $\frac{\partial T}{\partial n}$——法向的温度梯度（K/m）；

α——传热系数［$W/(m^2\cdot K)$］；

T——流体的某代表性温度，通常取法向截面上流体的平均温度，也称主体温度；

T_W——冷却管道壁的温度。

凡影响热流密度 q_n（W/m²）的因素都会影响传热系数 α 的数值。按牛顿冷却定律测定各种情况下的传热系数，并将其关联成经验表达式。注射模冷却系统的对流热交换的影响因素有

$$\alpha = f(v, \rho, l, \mu, \lambda, C_p)$$

α 与冷却介质的物理性能、密度 ρ、黏度 μ（Pa·s）、定压比热容 C_p 和热导率 λ 有关；与冷却通道表面尺寸特征、管径 d 或长度 l 有关；与强制对流的流速 v 有关。这些参量中 ρ、μ、C_p 和 λ 都是依赖温度的变量。冷却注射模管道中冷却液流动的雷诺数较大，用流体的平均温度来查取这些参量。

这些参量组合成无因次形式

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = f\left(\frac{\rho d v}{\mu}, \frac{C_p \mu}{\lambda}\right) = f(Re, Pr) \tag{2-104}$$

式中　$Nu = \dfrac{\alpha d}{\lambda}$——努塞特（Nusselt）数；

$Re = \dfrac{\rho d v}{\mu}$——雷诺（Reynolds）数；

$Pr = \dfrac{C_p \mu}{\lambda}$——普朗特（Prandtl）数。

传热过程的准数关系式

$$Nu = ARe^a Pr^b \tag{2-105}$$

式中，A 为系数，a 和 b 是指数，都由对流热传递的各种状态和条件确定。

注射模具的金属冷却管道，内壁光滑。为了提高对注塑件的冷却效率，冷却液必须以高流速的湍流流动。对管径 D，要求雷诺数达到

$$Re = \frac{\rho d v}{\mu} > (6000 \sim 10000)$$

其管道长度 L，应有 $L/D > 10$，冷却流体的传热关系式

$$N_u = \frac{\alpha d}{\lambda} = 0.23 Re^{0.8} Pr^{0.4} \tag{2-106}$$

压力下强制湍流流动时，对流传热发生在管壁附近，流体主体温度比较均匀。这里的热性能参量及无量纲量 Re 与 Pr 均按流体进出口温度的平均值决定。

2. 一维的稳态冷却分析

影响注射模冷却系统的因素是多方面的，建立数学模型时要作合理的简化，尽管分析结果的精度有限，但可作为高精度数值分析的初步设计。一维的稳态冷却分析就是忽略模具温度的周期性波动，将注射模的冷却过程简化成稳态的热传导问题；同时，用管道中冷却液的平均温度来考虑传热效果；又假定型腔壁面的温度均匀不变。对于平直的注射模用一维冷却方法，如图 2-38 所示。冷却管道与型腔壁面距离为 a，等距分布的管道之间的距离为 b，型腔壁面的温度为 T_W。

由式（2-106）获得冷却流体在管壁上的传热系数 α［W/(m²·K)］的计算式。用

限止温度波动率 J 的方法可解得几何参数 b/a，有

$$J = 2.4\left(\frac{\alpha d}{\lambda}\right)^{0.22}\left(\frac{b}{a}\right)^{2.8}\ln\left|\frac{b}{a}\right| \tag{2-107}$$

式中 λ［W/(m·K)］为模具钢板热导率。冷却管道直径 d，由冷却液流量和湍流的雷诺数初步估算得到。限止波动率对于无定形塑料，$J<5\%$；结晶型塑料，$J<2.5\%$。可先设定 $b/a=0.5$ 代入，以后逐次减小，直至达到允许的限制波动率 J。

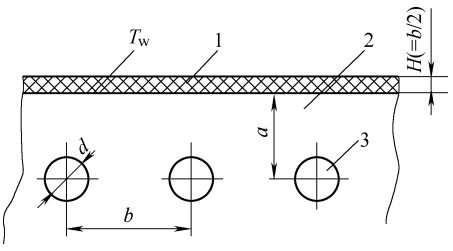


图 2-38　一维的稳态冷却分析的模式

1—注塑平板　2—模具钢板　3—冷却管道

T_W—型腔壁面的温度

确定了 b/a 值后，再由需要冷却液带走的热量 Q 计算距离 a 和 b。带走的热量 Q 经注射模的热平衡计算获得。注射模具的热传导计算式为

$$Q = \frac{0.87(T_W - T_{cp})\alpha\lambda d}{0.87b\lambda + \alpha d[a - 0.13(\pi d - b)]} \tag{2-108}$$

可用 a 的最小值代入，对于 b/a 得到 b。以后 a 以毫米逐次增加，直到达到热量 Q 值。a 的最小值可参阅第 11 章，以产生型腔壁的压塌的强度条件计算。一维的稳态冷却方程能用迭代数学运算实现解题。

3. 二维的非稳态和边界冷却分析

（1）二维的非稳态的冷却分析　大多数注射制品是薄壁板件的组合体。冷却管道在平面上有 x 和 y 两个方向布置。在冷却过程中模具的温度场 T（x，y，t）是随时间和位置变化的不稳定的热传导过程。

二维的注射模温度场的非稳态求解方程

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + q^0_{(x,y)} \tag{2-109}$$

式中，ρ、C_p和 λ 为模具钢材的密度、比定压热量和热导率。模板钢材材质均匀且各向同性，它们是常数。$q^0_{(x,y)}$［W/(m²·K)，J/(m·s·K)］是模具中热源通量。

又有域内初始条件　　$T(x,y,t_0) = T_0$　　(2-110a)

对各 Γ 边界条件　　$-\lambda\dfrac{\partial T}{\partial n} = \alpha_\Gamma(T - T_f)$　　(2-110b)

式中　T_0——模具的初始温度；

$\dfrac{\partial T}{\partial n}$——对各 Γ 边界上外法向的温度梯度；

α_Γ——各 Γ 边界上的传热系数；

T_f——对各传热介质的温度。

要把此方程演化成有限元的离散化方程，经计算机运算解出模具的温度场。

（2）二维稳态的边界元方法冷却分析　注射模具冷却过程的瞬态导热过程的边界条件很复杂，因此常作为稳态处理。并将边界各件作多元描述，求解模具表面、冷却管

道表面和注塑件的型腔表面的温度分布。边界元方法与有限元方法相比，将求解空间区域问题转化为边界问题。能以较少的计算量求解边界的温度场。

注射模二维稳态边界元的热传导方程

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right)=q^0_{(x,y)} \tag{2-111}$$

域内初始条件同式（2-110a）。

注射模表面对大气界面，有大气温度 T_0

$$T(x,y)=T_0 \tag{2-112a}$$

对注射模温度场分布的对称面上，有

$$\frac{\partial T(x,y)}{\partial n}=0 \tag{2-112b}$$

对于注射模的周边、冷却管道和型腔的边界条件 Γ_1、Γ_2 和 Γ_3 分别陈述，可参考图 2-39，有

$$-\lambda\frac{\partial T(x,y)}{\partial n}=\alpha_{\Gamma i}[T(x,y)-T_{\Gamma i}(x,y)] \tag{2-113}$$

1）注射模的周边的边界条件 Γ_1，由模具同周围环境之间的热交换的分析获得。对于模具周边的传热系数 $\alpha_{\Gamma 1}$，有表面对大气环境 T_0 的传导方程

$$q_{\Gamma 1}=-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha_{\Gamma 1}(T-T_0) \tag{2-114a}$$

2）在注射模内冷却管道的边界条件 Γ_2，见“模具与冷却管道之间的对流换热”一节的分析。对于管道壁面的传热系数 $\alpha_{\Gamma 2}$，流体的某代表性温度为 T_f，有冷却液对模板的传导方程

$$q_{\Gamma 2}=-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha_{\Gamma 2}(T-T_f) \tag{2-114b}$$

3）注塑件型芯和型腔壁面的边界条件 Γ_3，见“模具与注塑件之间的热传导”一节的分析。对型腔壁面的传热系数 $\alpha_{\Gamma 3}$，注塑件在壁厚方向的位置上温度为 T_x，有注塑件对模板的传导方程

$$q_{\Gamma 3}=-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=\alpha_{\Gamma 3}(T-T_x) \tag{2-114c}$$

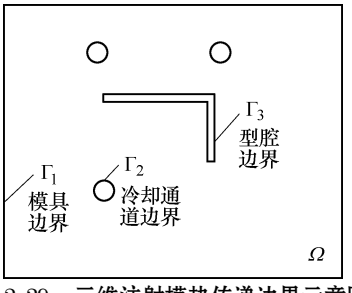


图 2-39　三维注射模热传递边界示意图

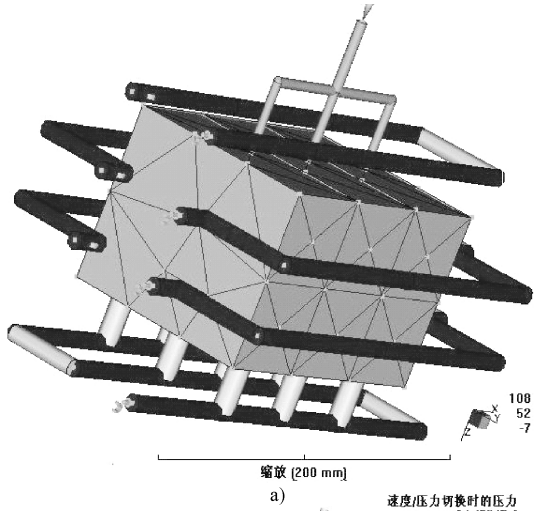
Γ_1—模具同周围环境之间界面

Γ_2—模具与冷却管道之间界面

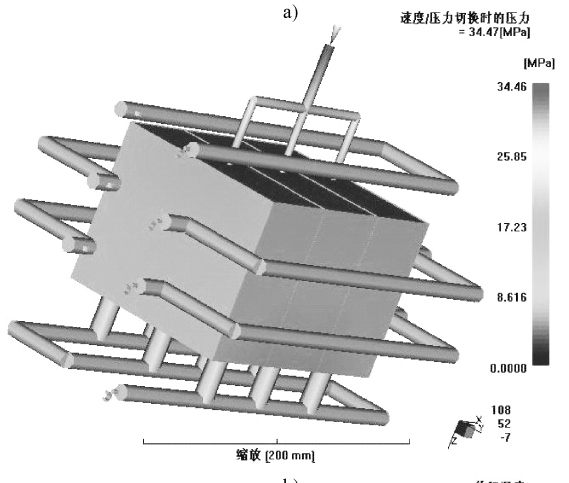
Γ_3—模具与注塑件之间界面

Ω—注射模传热体的空间区域

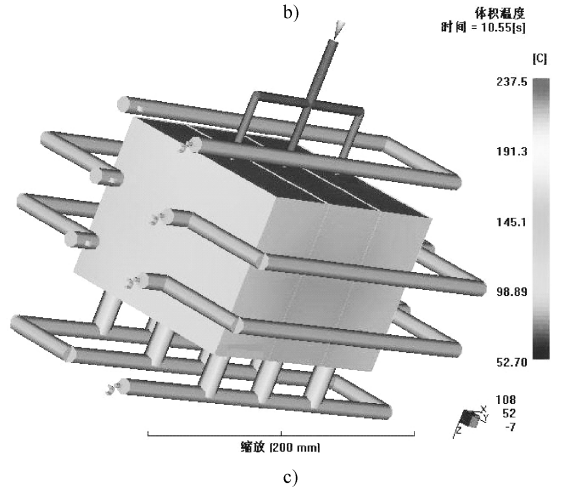
图 2-40 所示是二维稳态边界元冷却过程计算机模拟结果的图形输出。蓄电池箱体积 190 × 152 × 127mm，壁厚 1.27mm；用聚丙烯充填 20% 的矿石粉，注射量 538cm^3，计 482g；熔料注射温度 230℃。图 2-40a 所示用四进四出的水冷却管道布置。注射模的控制温度为 50℃。二维冷却过程的计算机模拟，用壁厚的中性层分析，可预测注塑件的温度和压力变化。图 2-40c 和图 2-40d 可查询到成型冷却到 10s 时的温度和压力分布。浇道附近的电池箱底面温度 187℃，远侧角 179℃。对应的压力为 21MPa 和 18MPa。延续分析可确定合理的冷却开模时间，并改进冷却管道布置。



a)



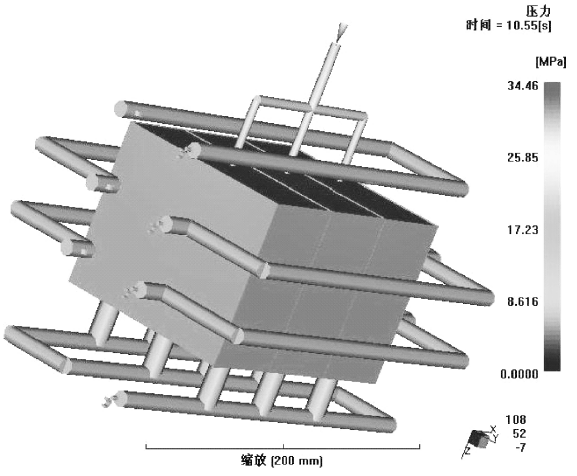
b)



c)

图 2-40　蓄电池箱的冷却过程的计算机模拟

a）管道布置和网格划分　b）保压切换时的压力　c）冷却至 10s 时的温度分布



d)

图 2-40　蓄电池箱的冷却过程的计算机模拟 （续）

d）10s 时的压力分布

4. 三维非稳态和稳态的边界元方法冷却分析

对于三维的注塑模 Ω 域（图 2-39 所示）内，冷却过程的非稳态热传递完整方程为

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}+q^0(x,y,z) \tag{2-115}$$

注射模钢板材料是各向同性的，其热导率 $\lambda=\lambda_x=\lambda_y=\lambda_z$。三维的注射模 Ω 域内温度场 $T(x,\ y,\ z,\ t)$冷却过程的非稳态热传递方程为

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)=\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}+q^0(x,y,z) \tag{2-116}$$

Ω 域内初始条件

$$T(x,y,z,t)=T_0(x,y,z) \tag{2-117a}$$

各个热传递方程的代号的含义由前所述。边界条件有三方面：

1）注射模表面对大气界面 Γ_1，大气温度为 T_0时，有界面温度

$$T(x,y,z,t)=T_0(x,y,z,t) \tag{2-117b}$$

2）对注射模的冷却管道界面 Γ_2，界面的法向上有热流通量 q_j时，有热流

$$q(x,y,z,t)=q_j(x,y,z,t) \tag{2-117c}$$

3）对注射模型腔的冷却界面 Γ_3，注塑件温度为 T_∞。界面的法向上有热流通量

$$-\lambda\cdot q_{\Gamma 3}(x,y,z,t)=\alpha_{\Gamma 3}[T(x,y,z,t)-T_\infty(x,y,z,t)] \tag{2-117d}$$

三维的注射模非稳态热传递方程的数值分析太复杂，因此建立稳态热传递方程，作如下简化和假设。

1）用稳态冷却过程近似替代瞬态过程，不考虑注射模升温初始阶段的温度变化，不考虑注射模随注射周期的温度波动。

2）模具型腔的热流通量沿注塑件型腔表面的法线方向传递，对较复杂形体较难把

握。根据注塑件为薄壁板件的组合，不考虑板平面方向的热传导，这样将注塑件展开，按壁厚方向的一维非稳态热传导分析。

3）假定模具钢材各向同性。

4）假定在冷却过程中，注塑件在模具型腔壁面上完全接触，不考虑注塑件冷却收缩后，与壁面脱离而产生热阻。

通过简化，三维的注射模稳态热传递方程为拉普拉斯（Laplace）方程，不含时间变量。对注射模 Ω 域内的热传导的三维温度场，有

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0 \tag{2-118}$$

边界条件简化后注射模表面界面 Γ_1，有

$$T=T_0 \tag{2-119a}$$

边界条件简化后界面 $\Gamma_i=\Gamma_2+\Gamma_3$，有

$$\frac{\partial T}{\partial n}=\frac{q_{\Gamma 2}}{\lambda}-\frac{\alpha_{\Gamma 3}}{\lambda}T \tag{2-119b}$$

热传递方程各式的代号含义如前所述。其中 n 为模具 Γ_2 和 Γ_3 表面的单位外法线方向矢量。当 $\alpha_{\Gamma 3}=0$ 时为 Γ_2 边界条件。当 $q_{\Gamma 2}=\alpha_{\Gamma 3}\cdot T_\infty$ 时为 Γ_3 边界条件。

参 考 文 献

[1] 申长雨．塑料模具计算机辅助工程［M］．郑州：河南科学技术出版社，1998.

[2] 张佑生．塑料模具计算机辅助设计［M］．北京：机械工业出版社，1999.

[3] 申长雨．注射成型模拟及模具优化设计理论与方法［M］．北京：科学出版社，2009.

[4] 吴崇峰．实用注塑模 CAD/CAE/CAM 技术［M］．北京：中国轻工业出版社，2000.

[5] 徐佩弦．高聚物流变学及其应用［M］．北京：化学工业出版社，2003.

第 3 章　注射成型工艺

塑料的注射成型过程借助螺杆或柱塞的推力，将已塑化的热塑性塑料熔体以一定的压力和速率注入闭合的模具型腔内，经冷却固化定型后开模而获得制品。

对塑料制品的形状几乎没有复杂性限制，而且是一次注射成型，允许注射模具内有不同注塑件的多个成型型腔，也允许注射模具内有相同注塑件的多个成型型腔。注射成型具有中等生产率。循环时间主要由注塑件壁厚决定，最短在十几秒以内，可增加每副模具的型腔数来提高生产率。

注射成型能模塑带有各种材质嵌件的制品。金属或硬质材料的骨架嵌件，能提高注塑件的强度和刚度。表面嵌件能装饰制品或使注塑件耐磨。导电金属使绝缘的塑料制品中有通电的接插头。带螺纹的嵌件，能实现注塑件之间的联接。在金属模具型腔表面的修饰和标记对注塑件是有用的。

注塑件的大小，小到不足 1g，大到几十 kg 没有限制。注塑件厚度与熔体充模流程比有关。小件薄壁，大件厚壁，要求单个塑料注射制品的壁厚均匀一致。

在一定温度范围内具有适宜流动性的热塑性塑料都能注射成型。多数塑料的熔化温度在 170 ~ 300℃。各种塑料熔体的流速在 5 ~ 50g/（10min）范围内，都能注射成型。

注射成型可注射高精度的注塑件，但比金属零件的尺寸精度低；有较好的表面质量和尺寸稳定性，但需要高精度的模具和注射机。注射成型也易于实现注射生产过程的自动化。

3.1　注射机的基本结构

掌握注射成型工艺要从了解注射机的基本结构开始。本节着重陈述注射机的塑化装置和合模装置。

3.1.1　注射成型

注射成型的工艺循环操作是使塑料材料物理形态转变而成型制件，也是注射机各装置部件动作和功能执行的过程，所以必须首先了解注射机的基本结构、分类和规格。

1. 注射机的基本结构

（1）基本结构　塑料注射成型是由金属压铸模塑成型原理发展而来的。早在 1982 年就有了金属注射成型的工艺，并有了金属注射压铸机。20 世纪初，已经有将琥珀和纤维素树脂熔化后，注射成型成简单的制品。直到 1932 年，有了料筒电加热、柱塞推进注射的塑化，在加热料筒内添加了鱼雷状的分流棱，提高了塑化能力，注射成型技术才有了较大发展。

而热固性塑料以粉剂为原料，放置在加料室内，用液压机加压，并对模具加热。物

料熔化后经浇注系统进入型腔，固化交联后定型。制品有较高质量和尺寸精度。这称为传递模塑工艺，早在 20 世纪 20 年代已经推行，以后风行了几十年。

柱塞式塑化装置的塑料塑化质量差，每次塑化量有限，一般在 60cm^3 以下。20 世纪 30 年代的塑化装置，在加热料筒中用螺杆旋转剪切塑化，再用柱塞压力推进注射。首先在德国，直到 1956 年，才实现了往复运动的螺杆塑化并注射，传统的塑料注射机总体结构基本定型。热塑性塑料的注射成型工艺沿用至今。下面介绍这类移动螺杆式的注射机。

图 3-1 所示为卧式往复螺杆注射机。注射塑化装置在定模板 8 的右侧，而合模装置在左侧。电动机驱动装置和液压泵在机座里。图示注射机有注射液压缸、注射装置移动液压缸、合模液压缸，和螺杆旋转用液压旋转马达。还有液压控制系统的控制阀和油箱等装在机座内或在注射机的各个位置。电气控制装置有的在独立的控制柜里，有的安装在定模板前。

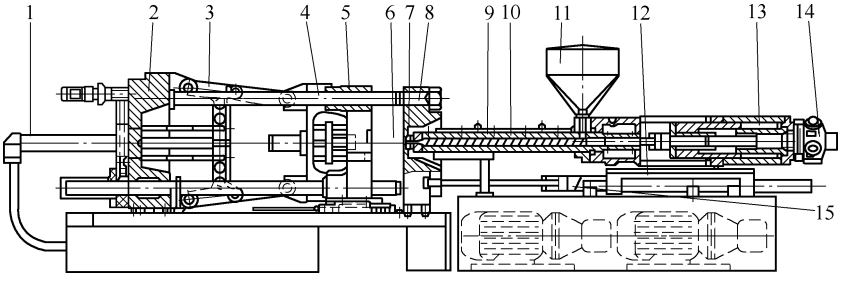


图 3-1　往复螺杆注射机

1—合模液压缸　2—后模板　3—双曲肘　4—拉杆　5—动模板　6—装注射模空间
7—喷嘴　8—定模板　9—往复式螺杆　10—料筒　11—料斗　12—注射装置的导轨
13—注射液压缸　14—旋转液压马达　15—注射装置的牵引液压缸

（2）注射塑化装置　其作用是将塑料原料由料筒电加热，又经螺杆混合、均化和剪切加热，塑化成黏流态。再以很高的压力和速度注入模具型腔。注射装置主要由料斗、加料装置、电加热的料筒、旋转并移动的螺杆、注射喷嘴和计量装置等组成。

当液压马达驱动螺杆旋转时，固态塑料粒子被压缩、加热、剪切而熔化。熔融的塑料积聚在螺杆头的前面，迫使螺杆与注射液压缸的活塞后退；完成计量后，螺杆止转，塑化结束。在密闭模具中，注塑件的冷却固化时间比塑化时间长，要等到注射模打开，注塑件被顶出，重新闭合后，液压缸才能注射定量的塑料熔体。

整个注射装置在床身的导轨上。可由牵引液压缸往复拖动。在注射和保压时注射喷嘴紧压贴合在注射模的凹坑上。高压熔料经模具的主流道射入型腔。

（3）合模装置　由模板、拉杆、合模机构、制品顶出机构、调模机构和安全门等组成。

注射成型时，熔融塑料通常是以 40 ~ 200MPa 的高压注射。为了保持注射模紧密闭合，合模液压缸和机械肘杆机构，要提供足够的锁模力。合模装置不但启闭模具，还在开模运动的后期驱使模具的脱模机构推顶固化的注塑件。

合模装置的动模板牵引动模慢速开模，保证注塑件顺利脱离定模型腔。动模在运行途中应是快速移动，以压缩辅助时间。在开模运动的后期，在动模的脱模机构对注塑件的顶出运动时也应该减速，以保护注塑件不受脱模损伤。合模装置牵引动模闭模时，为避免与定模碰撞，应减速接近定模。

（4）液压系统　为了实现注射工艺过程中注射装置和合模装置的动作程序，对液压系统的执行液压缸和液压马达提供液压动力并进行控制。有液压泵及驱动电动机，有附设的管道、油箱和滤油器等。对压力油有压力调节、控制流量和流向的各种液压阀。这些液压控制阀又与电气控制系统连接。

（5）控制系统 对于液压油的温度、机筒的温度、模具温度、锁模力、注射压力和速率等几十个参数，在一定时间里要保持某一数值；还要保证注射周期内，螺杆、喷嘴和动模等功能零部件按照逻辑顺序在确定的时刻达到所要求的数值和方向。控制系统的直接目标是监控加工过程，以保证注塑件的质量。

2. 注射成型循环过程

在注射成型循环的时间周期内，注射装置与合模装置相互协作，完成注射成型的动作程序，生产质量合格的注塑件。

（1）注射成型的循环动作

图 3-2 所示为螺杆式注射成型机的循环动作，可以分成四个阶段。

1）锁模与注射。模具被低压快速推进闭合。当动模将要合上定模时，动模低速行进；确认模腔内无异物时，自动切换成高压锁模。

模具锁紧后，注射装置前移，使喷嘴贴合模具。由注射液压缸以高速高压给力螺杆，将螺杆熔料注入模具的闭合型腔。

2）保压与补缩。塑料熔体注入低温模腔后有较大收缩，应进行熔料补充，使制品密实；料筒内预留一定的熔料量，注射螺

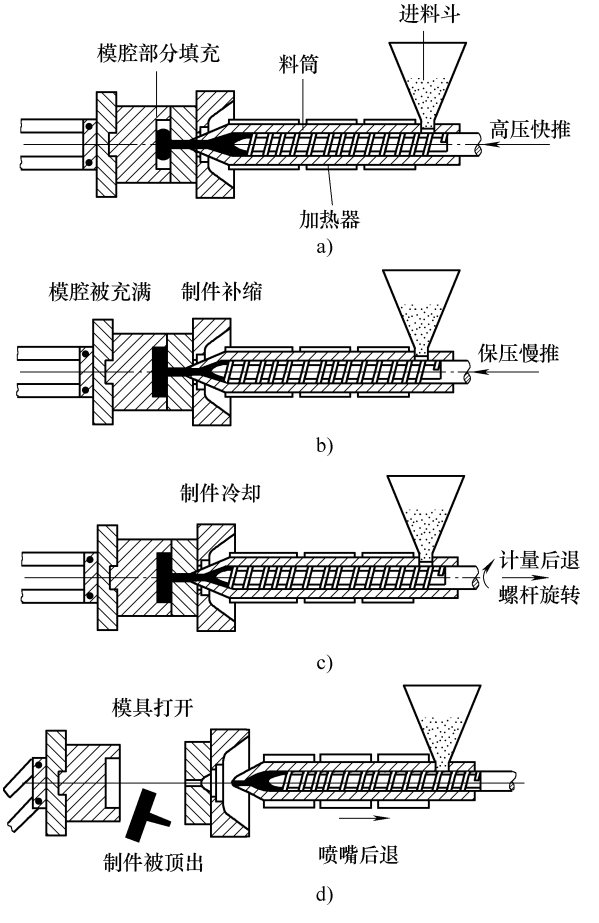


图 3-2　螺杆式注射成型的循环动作过程

a）锁模与注射　b）保压与补缩

c）塑化与冷却　d）开模并顶出

杆以高压少量地向前推挤；模具内浇口冻结时，应撤除保压压力。注塑件在密封的模腔中冷却固化。

3）塑化与冷却。制品冷却的同时，螺杆在液压马达驱动下转动，将来自料斗的粒料沿螺旋槽向前输送。粒料受料筒外加热和螺杆剪切热的共同作用逐渐软化，并最终完全熔融。由于螺杆头部熔体压力的作用，迫使螺杆转动时发生后退。注射液压缸可调节到25MPa以下的压力，阻挡螺杆的后退，这个阻力被称为背压。螺杆的后移量可折算成塑化后积存的熔体体积。当螺杆退回到一次注射所需的计量值时，由监测信号控制螺杆停止转动，完成了塑化。

4）开模并顶出。通常要求预塑时间少于注塑件的冷却时间。制品冷却定型后模具开启。在开启移动的后期，注射机合模装置上的顶杆或者液压缸活塞，驱使动模的脱模机构顶出注塑件。

（2）注射成型周期

注射成型周期指完成一次注射成型工艺过程所需的时间。它包含着注射成型过程中所有的时间，直接关系到生产效率的高低。注射成型周期的时间组成如图3-3所示。图示冷却时间从保压结束到开模为止，被称为模具内的冷却时间。实际上模内注塑件，自熔体流动充满型腔后，即刻开始冷却。在开模后，在室温下的注塑件还会继续冷却。

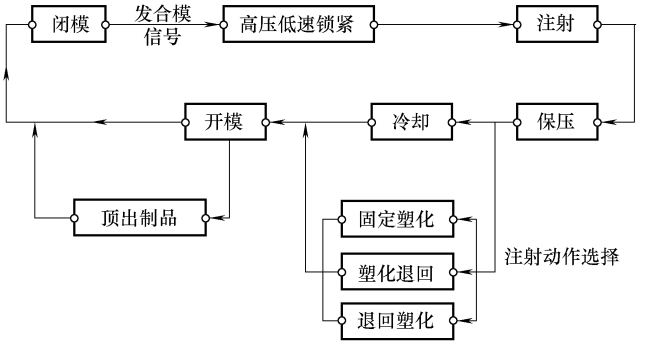


图3-3　注射成型机工作循环周期

注射机在加工结晶型塑料时，喷嘴不宜长时间同低温的模具接触。有时，注射机刚开始生产，需要用喷嘴来加热模具。在注射成型周期较长时，应减少喷嘴对模具的热传导。因此，注塑装置的支座应在每一循环中往复运动移动一次，称注射座的整体移动。由于注射座的移动和不移动，出现了三种塑化加料方式。

1）固定塑化。注射机在各个工作循环中，喷嘴始终同模具接触，也就是注射座固定。这种方式比较适合于加工温度较宽的无定形塑料，也称为固定加料方式。

2）塑化退回。整体退回是在螺杆塑化计量之后。这种方式用于开放式喷嘴并需要较高背压进行塑化的场合，以减轻喷嘴的流涎现象。对于料斗加料塑化是在喷嘴后退之前，故也称为前加料方式。

3）退回塑化。整体退回以后，才进行螺杆塑化计量。适合于加工结晶型塑料，也称为后加料方式。

3. 注射机的分类和规格

伴随着注射工艺的发展，注射机向大型化、微型化、高速、高度自动化和专用化方向发展。

（1）注射机的种类　注射机的注射装置有柱塞式和螺杆式两种。柱塞式注射装置的塑化质量差；料筒内压力损失为注射压力的 30% ~50%；注射速度先慢后快；大多用于小注射量的立式注射机。螺杆式注射装置配有适用于各种塑料熔体的螺杆 2 ~3 根。有的配有新型螺杆，也已有专用的排气螺杆。注射装置的机座可以前后移动，按注射工艺要求实现固定加料、前加料或后加料。注射装置的喷嘴是与模具直接作用的部件。喷嘴的结构形式很多，可分成直通式和自锁式两类。始终敞开的直通式喷嘴，对于各种黏性物料，为适应各模具的型腔厚度和流程比，满足补缩等工艺，需要有多种结构形式。自锁式喷嘴的喷孔，除了注射和保压两个阶段打开外，其余时间是关闭的。喷嘴的外球面和孔径，必须与模具主流道杯上凹球坑和孔径相吻合。模具上的定位圈必须与注射机定模板的中心孔密配。

注射机的合模部件有液压机械式和全液压式两类。液压机械式是由液压缸的活塞杆驱动单曲肘或双曲肘机构，以曲肘机构实现运动特性和增力作用，且有自锁能力。其较小行程是定值，需要调模机构适应模具高度的小范围变化，并调整锁模力。它用于中小型注射机。大型注射机采用全液压合模装置，所需运动和力学特性由复杂的液压系统实现，其行程大且可调节。注射机的动模板可在任意位置停留，直接由油路压力获得锁模力。

尽管卧式注射机占大多数，但也有立式注射机在生产中应用。两者的区别对模具设计关系重大。例如关系到脱模机构和型腔板等零部件的自重、注塑件和浇道凝料的坠落或取出、嵌件的装固等。因此，要作不同的处理。

通用注射机按加工能力、注射装置和合模部件的结构及控制系统分类，见表 3-1 和图 3-4。国产注射机主要技术参数可见表 3-2、表 3-3 和表 3-4。国外生产的注射机以合模力 kN 作为注射机规格的命名。这三个表可对照认识国外注射机的型号。

表 3-1　按注射机成型能力分类

类型	合模力/kN	理论注射容积/cm^3	类型	合模力/kN	理论注射容积/cm^3
超小型	160 以下	16 以下	大型	5000 ~12500	4000 ~10000
小型	160 ~2000	16 ~630	超大型	16000 以上	16000 以上
中型	2500 ~4000	800 ~3150			

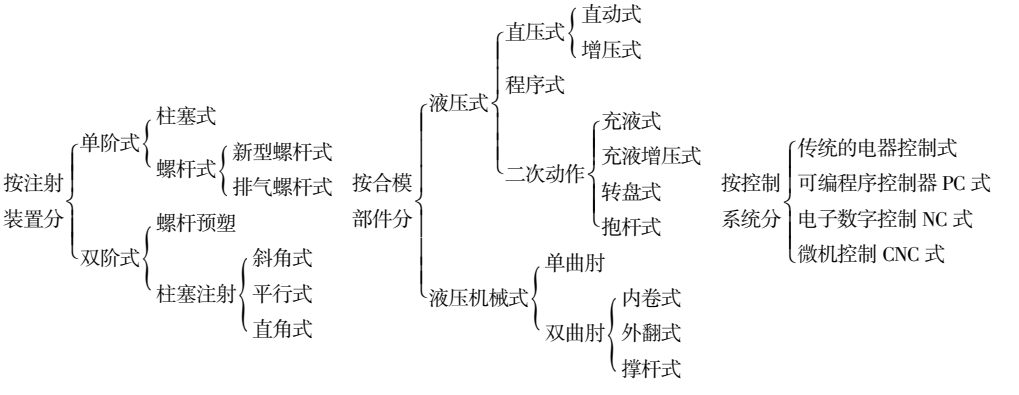


图 3-4　注射机的分类

表 3-2 国产注射机的合模力系列（JB/T 7267）

系列	合模力/kN														
第一系列	160	200	250	320	400	500	630	800	1000	1250	1600				
第二系列	180	220	280	360	450	560(600)	710	900	1100(1200)	1400(1500)	1800				
系列	合模力/kN														
第一系列	2000			2500			3200		4000		5000				
第二系列	(2100)2200(2400)			(2700)2800(3000)			(3500)3600		(4200)(4300)4500		5600(5700)				
系列	合模力/kN														
第一系列	6300		8000	10000		12500	16000		20000	25000	32000	40000	50000		
第二系列	(6500)7100(7500)		9000	11000		14000	18000		22000	28000	36000	45000			

表 3-3 国产注射机的理论注射体积系列（JB/T 7267）

理论注射体积系列/cm^3	16	25	40	63	100	160	200	250	320	400	500	630	800	1000
实际注射量/g	14	22	36	56	89	143	179	223	286	357	446	56.2	714	890
塑化能力/$g \cdot s^{-1}$	2.2	3.3	5.0	6.9	9.7	11.7	13.9	16.1	18.9	22.2	26.4	29.2	33.3	37.5
注射速率/$g \cdot s^{-1}$	20	30	40	55	75	90	100	110	120	140	170	210	250	300
注塑压力/MPa	≥150							≥140						
理论注射体积系列/cm^3	1250	1600	2000	2500	3200	4000	5000	6300	8000	10000	160000	25000	40000	
实际注射量/g	1115	1425	1785	2230	2855	3570	4460	5652	7140	8925	14280	22310	35700	
塑化能力/$g \cdot s^{-1}$	42.5	50.0	58.3	66.7	76.3	88.9	100.0	116.7	133.3	144.4	175.0	222.2	305.6	
注射速率/$g \cdot s^{-1}$	350	400	450	500	600	700	800	900	1000	1100	1500	2200	3300	
注塑压力/MPa	≥150							≥140						

表 3-4 国产注射机的模具安装尺寸（JB/T 7267） （单位：mm）

拉杆内间距	模具定位孔直径		注射喷嘴球半径
	基本尺寸	极限尺寸	
200 ~ 233	80	+0.054	10
224 ~ 279	100	0	15
280 ~ 449	125	+0.063	20
450 ~ 709	160	0	25
710 ~ 899	200	+0.072	30
900 ~ 1399	250	0	35
1400 ~ 2239	315	+0.081	
≥2240		0	

随着现代电子技术发展，注射机控制系统升级换代较快。微型计算机或单板机控制的注射机已较常见。其控制系统由 CPU、存储器、显示器等组成，并有初始化和调试、注射和模具动作、压力和速度控制、数字 PID 调节、油路和诊断等功能软件。注射机工艺参数控制精度高，制品质量及一致性好。电子计时精度 0.1s 之内，制品重量误差在 0.2% 以下。塑件尺寸误差在 ±0.03% ~ ±0.05% 以下。温度和压力精度在 2 ~ 5℃和 1×10^5Pa 之内。微机控制注射机可集中监控，也可显示和存储几十种工艺参数。采用比例电磁阀等液压元件，实现了连续平滑控制，避免了零部件的冲击，延长了使用寿命。而且控制系统工作可靠，配置了精密注射模后可实现高精度注塑件的注射。

（2）注射机的注射装置技术参数

1）螺杆直径：螺杆的外径尺寸（mm），以 D 表示；

2）螺杆有效长度：螺杆上有螺纹部分的长度（mm），以 L 表示；

3）螺杆长径比，L/D；

4）螺杆压缩比：螺杆加料段第一个螺槽容积 V_2 与计量段最末一螺槽容积 V_1 之比，V_2/V_1；

5）注射行程：螺杆注射移动最大距离，也即螺杆计量时后退最大距离（cm）；

6）理论注射体积：螺杆（或柱塞）头部截面积与最大注射行程的乘积（cm^3）；

7）注射量：螺杆（或柱塞）一次注射 PS 的最大质量（g），或注射的最大容积（cm^3）；

8）注射压力：注射时螺杆（或柱塞）头部给予塑料的最大压力（MPa，N/m^2）；

9）注射速度：注射时螺杆（或柱塞）移动的最大速度（cm/s）；

10）注射时间：注射时螺杆（或柱塞）走完注射行程的最短时间（s）；

11）注射速率：单位时间内注射的理论容积，螺杆（或柱塞）截面积乘以螺杆（或柱塞）的最大速度（cm^3/s）；

12）螺杆转速：物料塑化时螺杆最低与最高转速（r/min）；

13）塑化能力：单位时间内可塑化 PS 物料的最大质量（kg/h）；

14）螺杆转矩：物料塑化时驱动螺杆的最大转矩（N · m）；

15）螺杆驱动功率：物料塑化时驱动螺杆的最大功率（kW）；

16）喷嘴接触力：喷嘴与模具的最大接触力，即注射座推力（kN）；

17）喷嘴伸出量：喷嘴伸出前模板即模具安装面的长度（mm）；

18）料筒加热功率；料筒和喷嘴的加热总功率（kW）。

此外，还有料筒和喷嘴加热方式和加热分段、螺杆驱动方式、螺杆头和喷嘴结构、喷嘴孔径和球面半径等。

（3）注射机合模部件技术参数

1）锁模力：为克服塑料熔体胀模，给模具的最大锁模力（kN）；

2）成型面积：在一定的型腔压力下，与锁模力对应的在分型面上最大的型腔投影面积（cm^2）；

3）开模力：模具具有的开启力（kN）；

4）开模行程：模具的动模可移动的最大距离（mm）；

5）开模（合模）速度：开模（合模）时动模板移动的最高速度（m/s）；

6）模板尺寸：定模板和动模板的安装平面的外形尺寸（mm）；

7）模具最大尺寸：注射机上能安装模具的最大外形尺寸（mm）；

8）模具最大（最小）厚度：注射机上能安装闭合模具的最大（最小）厚度（mm）；

9）模板最大（最小）开距：定模板与动模板之间的最大（最小）间距（mm）；

10）拉杆间距：注射机拉杆的水平方向和垂直方向内侧的间距（mm）；

11）顶出行程：顶出装置顶出时的最大位移（mm）；

12）顶出力：顶出装置顶出时的最大推力（kN）；

此外，还有合模方式和调模方式等。

（4）注射机整机的性能参数

1）泵电机的额定功率（kW）；

2）单耗：单位时间耗能（kW/h）；

3）空循环周期或空循环次数：注射机在不加入塑料时一次循环的最短时间或每小时循环次数；

4）料斗容量：料斗内储料的有效容积（dm^3）；

5）油箱容量（m^3）；

6）体积：整机外形长（m）×宽（m）×高（m）。

此外，模具温度控制装置，也称模具恒温器或调温箱，是精密注射不可少的附属装置。它可通过插入模具的热电偶，进行模具温度的检测。或者对进入模具的冷却水按设定的水温要求，进行加热或冷却，而且可保证冷却水的压力和流量。对动模和定模有两套模温控制系统尤其适用。

3.1.2 注射塑化装置

这里从技术参数和关键零部件两方面来认识塑化装置。

1. 注射塑化装置的技术参数

（1）理论注射体积　理论注射体积是注射螺杆直径 D_S（cm）的螺杆作最大的注射行程 S_{max}（cm）推进时的容积。有

$$V=\frac{\pi}{4}D_S^2S_{max}\quad(cm^3)\tag{3-1}$$

螺杆直径由注射机的系列决定，一般 $S_{max}=(4\sim5)D_S$，因此有国产注射机的理论注射体积系列（JB/T 7267），见表 3-3。

以塑料质量（g）计量的注射量是以聚苯乙烯熔料为注射物，对空注射的最大量，有一定的参考价值。注射成型生产时，各种塑料的实际注射量与塑料熔体密度、注射流程中的阻力和从螺杆头的回流等因素有关，很难从注射体积计算预测精确的注射量。

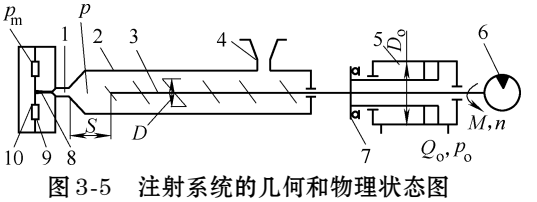


图 3-5　注射系统的几何和物理状态图

1—喷嘴　2—注射装置　3—螺杆　4—料斗　5—注射液压缸　6—液压马达　7—止推轴承　8—模具的主流道　9—模具的流道　10—模具的浇口

p_m—型腔压力　p—注射压力

S—注射行程（螺杆行程）　D—螺杆直径

M、n—液压马达输出转矩和转速

Q_o、p_o—液压系统供油的流量和油压　D_o—注射液压缸直径

（2）注射压力　注射压力是反映注射机的注射能力，并关系制品质量的重要技术参数。注射系统如图 3-5 所示。注射压力 p（MPa）是由注射液压缸 5 通过注射螺

杆提供的，与其建立的型腔压力 p_m（MPa）有关。

1）注射压力 p 与型腔压力 p_m 的关系

$$p = p_m + \sum \Delta p \tag{3-2}$$

式中　$\sum \Delta p$——模具的浇注系统的主流道、分流道和浇口的压力损失总和。

$\sum \Delta p$ 与流道和浇口的截面形状和尺寸、各段长度以及塑料熔体的流变性能有关。

模具浇注系统的压力损失总和 $\sum \Delta p$ 应限制在 35MPa 范围内。型腔压力 p_m 见表 3-13，按模具制品型腔的注射充填要求确定，应限制在 50MPa 范围内。

2）注射压力 p 与注射油压 p_0 的关系

$$p = p_0 \frac{A_0}{A} = p_0 \frac{D_0^2}{D^2} \tag{3-3}$$

式中　D_0、A_0——注射液压缸的直径（cm）、有效面积（cm^2）；

D、A——螺杆的直径（cm）、作用面积（cm^2）。

（3）注射速度　注射速度 v（cm/s）是表示注射时螺杆移动的最大速度。它为螺杆注射行程 S 与注射时间 t_1 之比

$$v = \frac{S}{t_1} \tag{3-4}$$

塑化速率 q（cm^3/s）是表示单位时间内熔料从喷嘴射出的理论容量。即螺杆截面 A 与注射速度 v 的乘积。有

$$q = A \cdot \frac{S}{t_1} = A_v \tag{3-5}$$

在注射生产时，调节注射液压缸的供油流量来获得合理的塑化速率和注射速度。现代高速注射的速度达到 15 ~ 20 cm/s。表 3-5 列出了注射成型常用的塑化速率。表值也是设计普通注射机技术参数时的基本塑化速率。

表 3-5　注射成型常用的塑化速率

注射容积/cm^3	注射速度/(cm/s)	注射时间/s	塑化速率/(cm^3/s)
100	8	1	75
250	8.5	1.25	110
500	9	1.5	170
1000	9.5	1.75	300
2000	10	2.25	450
4000	10.5	3.0	700
6300	11	3.75	900
10000	12	5.0	1100

（4）塑化能力　塑化能力是指注射装置在 1h 内所能塑化物料的能力（kg）。注射装置应能在注射周期的时间内，保证提供下次注射所需的足量的熔料。

塑化能力的计算，在常规的螺杆和工艺操作下，可使用挤出理论中螺杆均化段的熔体输送能力的公式计算。在注射机塑化时，螺杆承受的背压不高，压力流流率和漏流流率较低。将原公式中的这二项算式略去，用效率系数 k 加以修正。塑化的体积流率有下式

$$Q = 0.5k\pi^2 D^2 h_3 n\sin\theta\cos\theta \tag{3-6}$$

式中　Q——螺杆塑化的体积流率（cm^3/s）；

k——塑化效率修正系数，0.85～0.9；

D——螺杆的直径（cm）；

h_3——螺杆均化段的螺旋槽深度（cm）；

n——螺杆的转速（r/s）；

θ——螺杆螺纹的升角（°）。

如果塑化能力 G 用质量单位（kg/h）表述，要用塑料熔体密度 ρ_m 换算，见表3-16。塑化能力有下式

$$G = 1.8k\rho_m\pi^2 D^2 h_3 n\ \sin\theta\ \cos\theta \tag{3-7}$$

式中　G——螺杆的塑化能力（kg/h）；

ρ_m——塑料熔体的密度（g/cm^3）；

其余各参数同式（3-6）。

2. 注射装置的关键零部件及驱动参数

（1）注射装置机座的导向和移动　注射座座落在与主轴线平行的导轨或双导杆上，与机筒的方向一致。如图 3-6 所示，通常有三种导向类型：双导杆与液压缸的活塞连在一起；双导杆与双液压缸各自导向和驱动；床身上导轨导向与液压缸驱动。

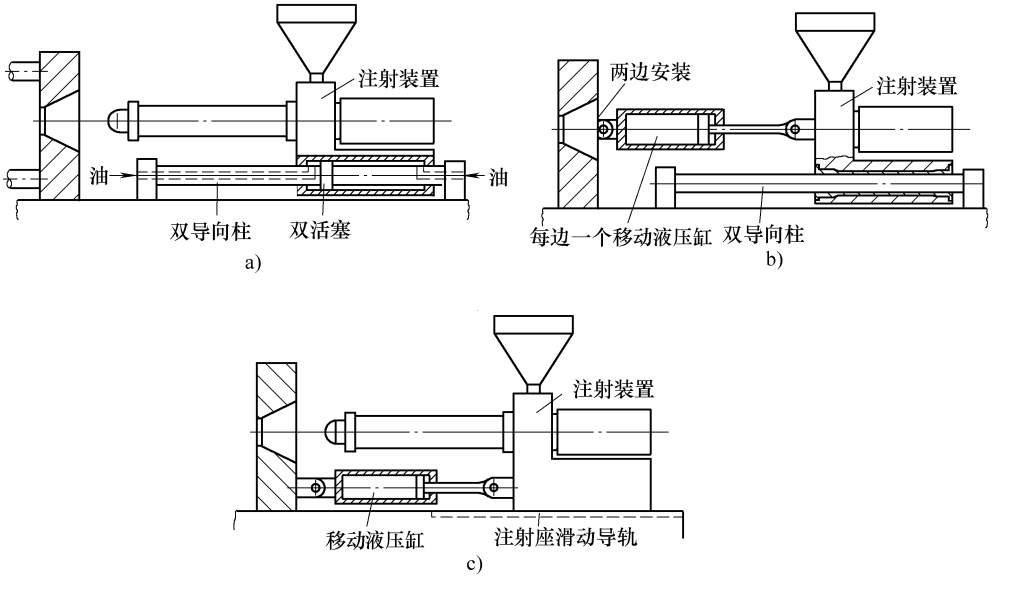


图 3-6　注射装置的导向和驱动

a）双导向柱与液压缸的活塞连在一起　b）双导向柱与双液压缸　c）导轨导向与单液压缸

虽然注射座与喷嘴频繁高速移动，但运动平稳，表 3-6 给出了注射装置的运行速度。行进速度的变化无突变。表 3-7 列出了喷嘴与模具浇口套之间的接触压力。该压力足以防止高压熔体的泄漏喷射。

表 3-6　注射装置的运行速度

注射机的合模力/kN	最高速度/(mm/s)	最低速度/(mm/s)
<500	300 ~ 400	20 ~ 40
510 ~ 2000	250 ~ 300	30 ~ 50
2001 ~ 10000	200 ~ 250	40 ~ 60
>10000	200	50 ~ 100

表 3-7　喷嘴与模具浇口套之间的接触压力

注射机的合模力/kN	接触压力/kN	注射机的合模力/kN	接触压力/kN
500	50 ~ 80	10000	220 ~ 280
1000	60 ~ 90	20000	250 ~ 350
5000	170 ~ 220		

（2）螺杆旋转驱动系统

1）螺杆旋转的方式。常见的螺杆旋转的驱动方式有三种。图 3-7 所示为传统的电动机驱动的螺杆旋转系统。常用三相异步电动机，传动经离合器、减速变速齿轮箱，用可滑移的花键，套在螺杆的后轴段。现今已有用变频器控制电动机的转速，并对螺杆转动采取制动和避免反转的措施。

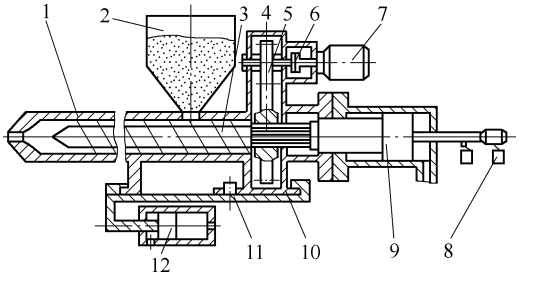


图 3-7　电动机驱动的螺杆旋转系统简图

1—料筒　2—料斗　3—螺杆　4—花键　5—齿轮箱　6—离合器　7—电动机　8—计量装置　9—注射液压缸　10—注射座　11—注射座回转装置　12—注射座移动液压缸

液压马达的结构与液压泵相似，但它是把液压能量转化成机械转矩与转动。通常使用转速缓慢的径向活塞的液压马达，其特征是运转平稳。图 3-5 是单液压缸轴线式的液压马达螺杆旋转装置。螺杆、注射液压缸和液压马达三者在一条轴线上排列。如果让注射液压缸的活塞跟螺杆一起转动，对液压缸活塞的密封要求高，还增加了螺杆旋转的阻力，因此没有实用价值。图 3-5 的系统上装有止推轴承，液压缸活塞并不转动。装有轴承的线式注射装置有两种结构。一种是将液压马达装固在注射座上，即与料筒连在一起。另一种是液压马达装在活塞的外伸套上。由于液压马达很轻，它可随着螺杆和活塞一起进退。故称为随动式单液压缸的液压马达螺杆旋转装置，其机械结构复杂而应用不多。

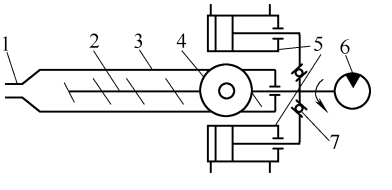


图 3-8　双液压缸的螺杆与液压马达的直接连接系统

1—喷嘴　2—螺杆　3—机筒　4—进料口　5—注射液压缸　6—液压马达　7—轴承

图 3-8 所示为双液压缸的螺杆与液压马达的直接联接。两个注射液压缸平行放置在料筒的两侧。液压马达和螺杆直接连接在一起，并随螺杆和活塞杆作轴向往复运动，见图 3-9。这种螺杆旋转和移动方式，螺杆、活塞杆和液压马达三者的连接关系简便，注射装置的总长度短，成为液压马达驱动的

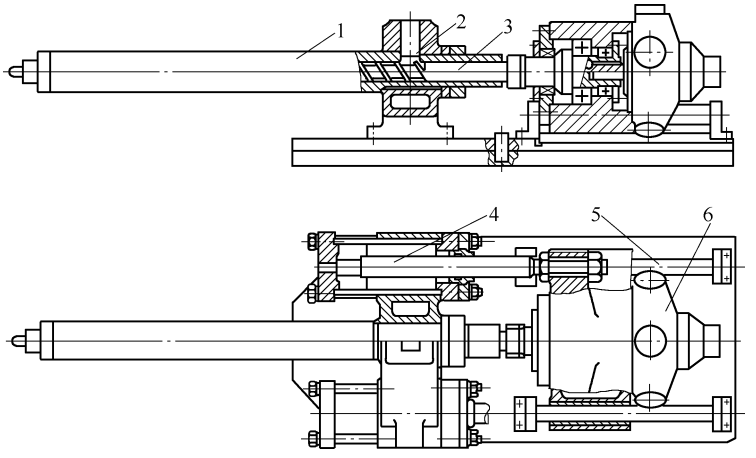


图 3-9　双液压缸的液压马达直接驱动的注射装置

1—机筒　2—进料口　3—螺杆　4—注射液压缸　5—导柱　6—液压马达

主要形式。

2）螺杆的转矩和转速。热塑性塑料塑化所需能量，最高可达 60% 是螺杆旋转的剪切热供给的。螺杆的驱动转矩 T 和转动速度 n 使物料得到有效的剪切、混合和输送。热塑性塑料和热固性塑料所需的转矩如图 3-10 所示。加工橡胶所需的转矩 T 大体上等于加工热塑性塑料所需转矩。塑化热固性塑料所需转矩在直线 1 和 2 之间。加工硬质聚氯乙烯、聚碳酸酯和丙烯酸类塑料需要较高的转矩，有沿直线 2 的 T 值。聚乙烯和聚苯乙烯所需的转矩较低，为沿直线 3 的 T 值。其余的热塑性塑料所需转矩在在直线 2 和 3 之间。

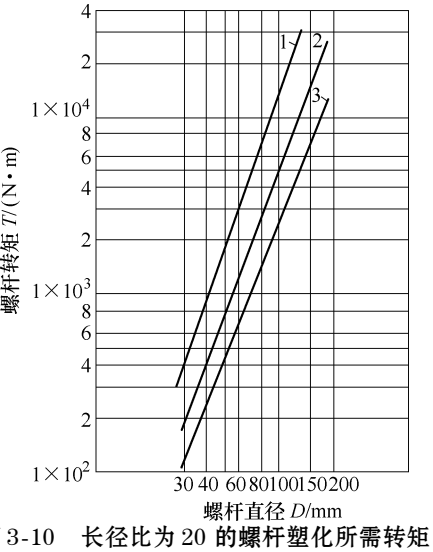


图 3-10　长径比为 20 的螺杆塑化所需转矩

直线 1 和 2 之间，塑化热固性塑料；
直线 2 和 3 之间，塑化热塑性塑料；
直线 2，加工 HPVC 和 PC 等；
直线 3，加工 PE、PP 和 PS 等

常用螺杆的圆周速度 v 来讨论合适转速 n，然后计算驱动螺杆所需的功率 $N = T \cdot n$。螺杆的圆周速度 v 有三种状态。

低黏度的热塑性塑料，如 PE、PP 和 PS 等，要求有较高塑化速率，螺杆应有较高的圆周速度（$v = 1.0 \sim 1.5$m/s）。加工工程塑料时的常规圆周速度 $v = 1.2 \sim 1.4$m/s。加工热固性塑料和橡胶需要较低的圆周速度（$v = 0.05 \sim 0.2$m/s）。

（3）螺杆　注射机的螺杆是从挤出机螺杆演化而来。螺杆塑化和输送塑料物料的理论已经相当成熟。并发展了多种新型螺杆。

1）标准螺杆。螺杆通过对螺旋槽中的物料进行输送和混合，在电热机筒与材料之间进行热传递；另一部分是螺杆转动时，由机械能转化产生的剪切热和摩擦热。与柱塞式注射机相比较，螺杆式注射机的熔融速率明显提高。柱塞式注射机只能用于直径小于20mm 的机筒。常规螺杆通常分为三段，如图3-11 所示。从料斗始，有进料段 L_1、压缩段 L_2 和计量段 L_3。常规螺杆的长径比（L/D）为 20∶1。螺杆太短则不能获得恰当的塑料塑化质量。长螺杆的长径比（L/D）为（22∶1）~（24∶1），会使塑化时间太长，将导致一些热敏性塑料降解。它们只用于高速注射成型。注射机的螺杆在料筒中往复注射和塑化，受到轴向注射压力。而挤出机的螺杆是连续旋转塑化，因此可以有较大的长径比，常容许长径比（L/D）为 25∶1。

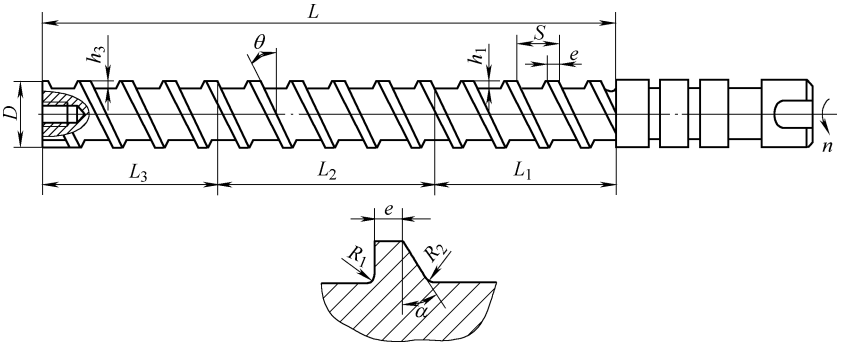


图 3-11　加工热塑性塑料的常规螺杆

L_1—进料段　L_2—压缩段　L_3—计量段　α—螺棱后角（25°~30°）

S—螺距，$=D$　θ—螺旋升角，$=17.8°$　e—轴向螺棱宽

螺杆直径决定了注射量和塑化能力。注射螺杆直径 D 与往复行程之比常取 3 左右。但此喂料行程超过直径 D 的 3 倍后，塑料熔体的均化质量受到影响。螺杆直径大，相应的注射液压缸直径也增大。行程过长会使螺杆的有效长度缩短太多，影响塑化均匀性。

图 3-11 列出了螺杆的几何参量。进料段 L_1 又称输送段或加料段。螺槽深度 h_1 深，提高了物料的供应量，但削弱了螺杆根部的强度。注射机螺杆在后退运动中接受料斗的供料，它应有足够的输送长度，一般 $L_1=(9\sim10)D$。压缩段 L_2 又称塑化段。物料在锥形的螺槽空间中受到压缩。塑料不断地从固态转变为黏流态。合适长度和几何参量 h_1 的收缩量，要与该种塑料塑化所需的物理压缩比相当。对于结晶型塑料件，例如 PE、PP 和 PA 等，物理压缩比为 3~4，应使用压缩段较短的突变螺杆，压缩段 $L_2=(5\%\sim15\%)L$。对于无定形塑料，例如 ABS 和 PS 等，物理压缩比较小（1.6~2.5），应使压缩段 $L_2=(20\%\sim30\%)L$，是适应性较强的通用型螺杆。表 3-8 列出了这种通用型的热塑性塑料常规螺杆的主要尺寸。对黏度高的塑料，例如 HPVC 等，用压缩段渐变的螺杆，$L_2=50\%L$。计量段 L_3 又称均化段或熔融段。与挤出螺杆相比，其计量段相应要缩短些。

表 3-8 热塑性塑料常规螺杆的主要尺寸

直径/mm	进料螺槽深度 h_1/mm	计量螺槽深度 h_3/mm	螺槽深度比 h_1/h_3	螺杆单面径向间隙/mm	注 释
30	4.3	2.1	2.0∶1	0.15	表面粗糙度 $Ra2\sim4\mu m$ $R_1\approx1\sim4mm$ $R_2\approx5mm(D=30\sim60mm)$ $R_3\approx10mm(D=60\sim100mm)$ 螺距 $S=D$ 轴向螺棱宽 $e\approx0.07\ D$ 长径比 $L/D=20$
40	5.4	2.6	2.1∶1	0.15	
60	7.5	3.4	2.2∶1	0.15	
80	9.1	3.8	2.4∶1	0.20	
100	10.7	4.3	2.5∶1	0.20	
120	12	4.8	2.6∶1	0.25	
>120	max14	max5.6	max3∶1	0.25	

要求螺杆的输送、混合和均化的效果要好。对普通塑料要求塑化产量高，螺杆的圆周速度为0.4～1.5m/s。对有一般混合要求的物料，圆周速度为0.1～0.3m/s。对各种塑料材料，例如加工硬质聚氯乙烯、加工热固性塑料或加工橡胶弹性体等，都有专门设计和制造的螺杆。它们有不同的螺杆几何参量。对高效混合要求物料，要在压缩段的末段设置剪切单元，在计量段中设置混合单元。

2）加工热固性塑料的螺杆。在低温下螺杆塑化的热固性塑料所需能量，最高可占90%是由螺杆旋转的剪切热和摩擦热提供的。为防止在螺槽中热固性塑料因过度的剪切热，引发化学反应而固化，与常规的加工热塑性塑料的螺杆相比，具有较浅的螺槽深度，而且加工热固性塑料螺杆的长度较短，长径比仅为（12∶1）～(15∶1)。计量螺槽深度与进料螺槽深度之比为（1∶1）～(1∶1.3)，也就是计量段与进料段的螺槽深度接近或者相等。但它的螺棱宽度较大，大约为 $e=0.15\sim0.2D$，以阻止注射时物料的回流，也使螺杆在料筒中旋转稳定，减少磨损。加工热固性塑料螺杆的主要尺寸见表3-9。

表 3-9 加工热固性塑料螺杆的主要尺寸

直径 D/mm	螺槽深度(进料 h_1/计量 h_3)/mm	轴向螺棱宽 e/mm
30	4	4
40	4.5/4	5
50	5.5/5	6
60	7	7
75	8.5	8.5
80	12	12

图3-12所示为加工热固性塑料的塑化装置。不带止回阀的热固性塑料螺杆，其头

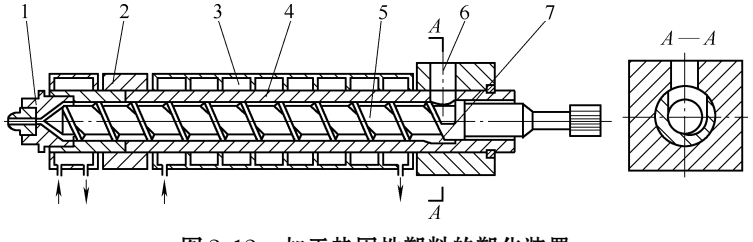


图 3-12 加工热固性塑料的塑化装置

1—喷嘴 2—料筒头连接套 3—加热夹套 4—料筒 5—螺杆 6—加料口 7—进料凹槽

顶部的锥角 60° ~ 90°。它与喷嘴孔之间的间隙，最大取 0.5mm。加工湿聚酯和酚醛树脂要用止回阀。

3）螺杆的材料和处理。注射螺杆承受塑化时的转矩和注射的高压，受到塑料材料的腐蚀和磨损。螺杆在加料段的螺旋槽根部，常见的损坏是疲劳断裂。长期加工聚氯乙烯物料、添加矿物填料和阻燃剂的塑料，加工玻璃纤维增强塑料的螺杆，会有严重的腐蚀和磨损。渗氮钢 38CrMnAl 是最常用的螺杆钢种。螺杆经渗氮处理，渗氮层厚 0.5 ~ 0.8mm，硬度达 65 ~ 70HRC，表面粗糙度优于 $Ra = 0.8\mu m$。近年来，螺杆表面用离子渗氮，离子渗氮层厚 0.4mm。用碳化钨或钨铬钴等合金硬化表面，具有更高的防护能力。

注射机的料筒也有同样的抗腐蚀和耐磨损的要求，也用渗氮钢 38CrMnAl 制造，内表面经渗氮处理，硬度不低于 65HRC。近年来，双金属料筒得到应用。它用新型合金浇铸料筒的里衬，厚度达 1.5 ~ 2mm。

（4）螺杆头　螺杆前端面上有螺纹孔，可将所需的螺杆头拧接起来。常规的螺杆头应为尖头锥。其锥角应该与料筒头或喷嘴的锥孔相配。这是为了减少注射流动阻力，防止螺杆头部产生滞料。图 3-13 是锥角 α = 20° ~ 30°的螺杆头，用于注射高黏度或热敏性的塑料，例如加工硬质 HPVC。其中一种是带有螺棱的螺杆头。

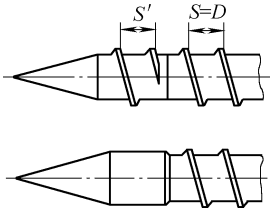


图 3-13　加工高黏度或热敏性塑料的螺杆头带有螺棱的螺杆头，螺距 $S = (0.5 \sim 1)S$

最高的注射压力产生于螺杆头前端。在注射和保压推进中，防止注射熔料的倒流很有必要的结构。同时也提高了塑化计量的精度。在注射工程中，在螺杆头上专门加装止回阀。图 3-14 是滑动式止逆环螺杆的结构。当螺杆旋转塑化时，来自螺槽的熔料，在输送的压力下顶开了止逆环，如图 3-14 下半剖视所示。熔料经螺杆头上的通道，进入螺杆头的前端。在此空间里熔料增多并被计量。它克服液压缸的背压，迫使螺杆后移。当螺杆在前推时，高压熔料将止逆环滑移至止推垫，两者贴合密封，阻止熔料倒流。这种止逆环式的止回阀，适合中、低黏度的塑料。

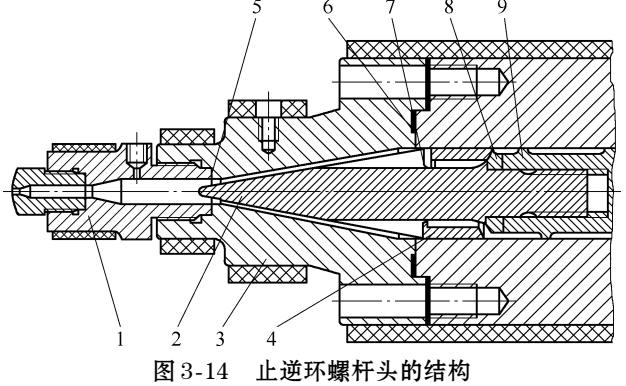


图 3-14　止逆环螺杆头的结构

1—螺纹联接的喷嘴　2—螺杆头　3—料筒头　4—滑动环　5—喷嘴的密封面
6—料筒的密封面　7—凹槽通道　8—止推垫　9—螺杆

有销钉和钢珠等多种止逆阀的螺杆头，要求注射操作时，能快速关闭密封，有效地防止倒流；在塑化时有足够通道输送熔料，且通道畅通无死角；要求设计合理，而且制造精良。

（5）喷嘴　喷嘴是联接塑化装载和注射模具输送塑料熔体的通道，在塑化时应能阻止熔料从喷嘴中流出。喷嘴可分成两大类，一类是敞开式的喷嘴。在注射保压完成后，无论是喷嘴保持与模具接触还是退返，它依靠塑料自身相变而固化或半固化闭合。闭合效果取决于各种塑料的固化温度和结晶温度；取决于喷嘴温度控制和结构等因素。也与螺杆塑化时的背压有关。另一类是可机械闭合的阀式喷嘴，可防止熔体从喷嘴口流涎和拉丝，可减少冷料积聚。

1）敞开式喷嘴。图 3-15 所示为三种常用的依靠热力闭合的敞开式喷嘴。图 3-15a 所示为 PVC 喷嘴。它结构简单，压力损失小，补缩效果好，但容易形成“冷料”与“流涎”现象，主要用于加工厚壁注塑件和热敏性的高黏度塑料。图 3-15b 所示为延长型喷嘴。它延长了喷嘴口的长度，可给喷嘴外部加热，补缩好、射程远，但有“流涎”现象，用于加工厚壁制品和高黏度塑料。图3-15c所示为小孔型喷嘴。喷嘴孔内可贮存较多熔料，也可给喷嘴外部加热，不易形成冷凝料。其口径小而射程远，“流涎”现象较少见，主要用于加工低黏度物料，和注射成型薄壁和形状复杂的制品。

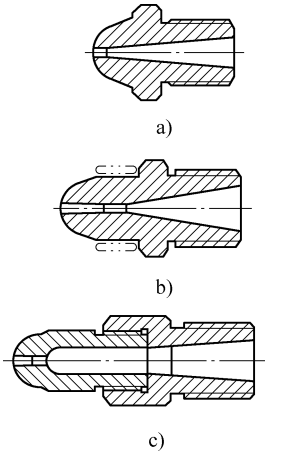


图 3-15　三种常用的敞开式喷嘴

a）PVC 喷嘴　b）延长型喷嘴

c）小孔型喷嘴

2）阀式喷嘴。这里介绍的四种阀式喷嘴有四种。弹簧针式自闭喷嘴和接触滑动式自闭喷嘴如图 3-16 和图 3-17 所示，是依靠注射循环过程自动闭合和开启阀芯。由于喷嘴口的通道阻力大，会有额外的剪切生热。另两种是液压驱动的可控制的阀芯，分别是轴向顶针和横向销钉启闭喷嘴，如图 3-18 和图 3-19 所示。可控喷嘴的长度加大，结构复杂，需设置驱动液压缸。该液压缸的控制连接注射机的控制程序。它们对各种喷嘴所适用的塑料见表 3-10。发泡注射成型时不用敞开式喷嘴，推荐使用液压驱动的可控阀式喷嘴。

图 3-16 为弹簧针式自闭喷嘴。喷嘴的注射通道曲折狭窄，有较大的阻力和节流作用，使注射熔体的剪切升温。必须有足够的注射压力才能克服弹簧力，开启阀针。一般避免将弹簧装在喷嘴里，以减少剪切效应。图 3-17 是接触滑动式自闭喷嘴。喷嘴里有个滑动的密封阀芯。当喷嘴靠上注射模的浇口套时，在接触力作用下打开通道，进行注射和补缩。当注射装置后退时，该阀芯在熔体压力下关闭喷嘴。由于喷嘴没有外加热，温度控制差。

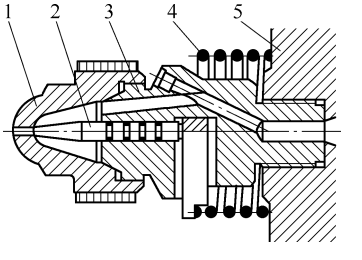
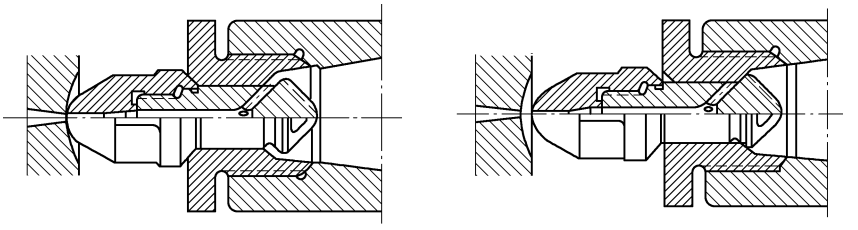


图 3-16　弹簧针式自闭喷嘴

1—喷嘴头　2—阀针　3—阀座

4—弹簧　5—料筒



a)　　b)

图 3-17　接触滑动式自闭喷嘴

a）喷嘴在接触压力下开启　b）喷嘴在熔体压力下关闭

图 3-18 所示可控轴向顶针喷嘴用液压缸驱动启闭，使用方便，锁闭可靠，压力损失小，计量准确。图 3-19 所示液压驱动的可控横向销钉喷嘴中，图 3-17a 是将销钉推拉，图 3-17b 是将销钉转动，都必须保证销钉的定位正确，才能保证喷嘴内流动通道截面一致。

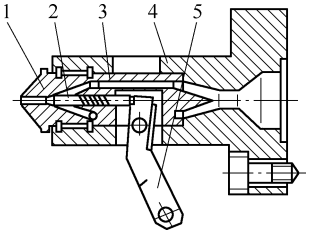
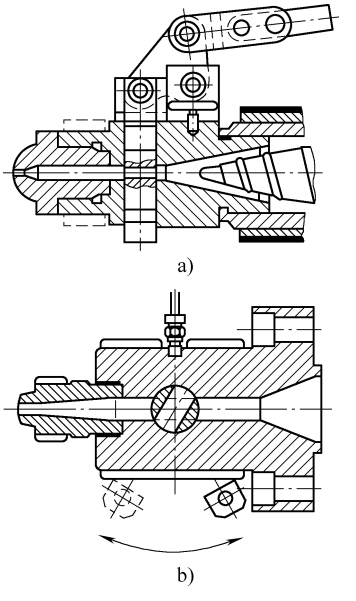


图 3-18　液压驱动的可控轴向顶针喷嘴

1—喷嘴头　2—顶针　3—阀座

4—喷嘴体　5—液压缸驱动杆



a)　　b)

图 3-19　液压驱动的可控横向销钉喷嘴

a）销钉被推拉启闭　b）销钉被转位启闭

表 3-10　推荐各种喷嘴所适用的塑料

塑料材料	喷嘴种类				
	敞开式（见图 3-15）	弹簧针式自闭（见图 3-16）	接触滑动式自闭（见图 3-17）	液压驱动的可控轴向顶针（见图 3-18）	液压驱动的可控横向销钉（见图 3-19）
ABS	●	○	○	○	○
CA	●	○	○	○	○
CAB	●	○	○	○	○
PA	○	○	○	●	●
PAI	○	○	○	○	●
PBT	○	○	○	●	●
PET	○	○	○	●	●
PC	●	○	○	○	○

（续）

塑料材料	喷嘴种类				
	敞开式（见图 3-15）	弹簧针式自闭（见图 3-16）	接触滑动式自闭（见图 3-17）	液压驱动的可控轴向顶针（见图 3-18）	液压驱动的可控横向销钉（见图 3-19）
PE	●	○	●	○	○
PEEK	○	○	○	○	●
PMMA	●	○	○	○	○
POM	●	○	○	○	○
PP	●	○	●	○	○
PPO	●	○	○	○	○
PPS	○	○	○	○	●
PVC	●	—	—	—	—
SAN	●	○	○	○	○
发泡注射成型	—	○	—	●	●
热固性塑料	●	—	—	—	—
热塑性弹性体	●	—	—	—	—

注：●—推荐；○—可行；— —不可行。

3）喷嘴口径。喷嘴头制成球形，其曲率半径小于注射模上凹坑的半径才能贴合。该部位接触压力高，有频繁的碰撞，又有很大的温度变化，是塑料熔体反喷和流涎等事故的多发段。喷嘴的口径应与螺杆的直径 D 成比例。对于低黏度塑料，喷嘴的口径为螺杆的直径的 1/15 ~ 1/10；对于高黏度塑料，喷嘴的口径是（1/15 ~ 1/20）D。表 3-11 为国内喷嘴口径设计情况。表 3-12 是欧洲的喷嘴球头和口径设计。

表 3-11　国内喷嘴口径设计情况　　（单位：mm）

注射量/g		30 ~ 200	250 ~ 800	1000 ~ 2000
敞开式	通用类	2 ~ 3	3. 5 ~ 4. 5	5 ~ 6
	硬聚氯乙烯	3 ~ 4	5 ~ 6	6 ~ 7
弹簧针式自闭式		2 ~ 3	3 ~ 4	4 ~ 5

表 3-12　欧洲的喷嘴球头和口径设计

合模力/kN	球头半径/mm		喷嘴口径/mm		
	热塑性塑料	热固性塑料和橡胶	热塑性塑料	热固性塑料	橡胶
<500	10(35)	10(35)	3 ~ 5	5 ~ 8	4 ~ 6
500 ~ 1000	10(35)	15(35)	4 ~ 6	6 ~ 8	5 ~ 7
1000 ~ 5000	15(35)	20(35)	5 ~ 8	8 ~ 10	6 ~ 8
5000 ~ 10000	35	35	6 ~ 10	8 ~ 10	8 ~ 10
>10000	35	35	10 ~ 12	—	—

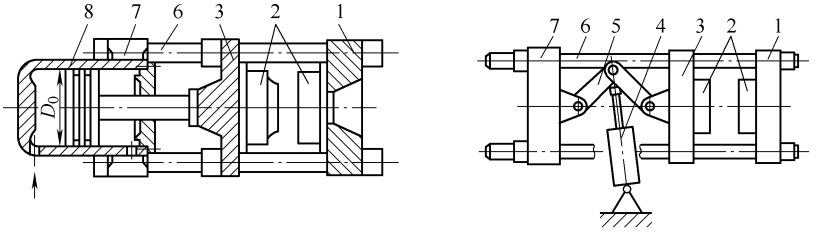
3. 1. 3　合模装置

合模装置上安装着注射模具，在每个注射周期里给予动模以启闭行程，保证在熔体注射时把模具锁紧，并在开模时顶出成型制品。因此，合模装置的结构和机械动作，关系到注塑件生产的效率和质量。

1. 合模装置的特性

认识合模装置的力学和运动特性，区别液压-机械式和全液压式的特征，是掌握和控制注射机的关键。要求动模板在启闭行程中快速行进；又要在开模和闭模时低速分离和接触，在开模的最后，顶出脱模注塑件时又要是慢速。

（1）合模机构的分类　合模装置按工作原理分，主要有液压-机械式和全液压式两大类型，如图 3-20 所示，主要由模板、拉杆、合模机构、顶出机构、调模机构及其他附属装置所组成。图 3-20a 是单缸直压式的合模装置，可用于移动模板速度低和合模力小场合。增大液压缸直径能提高合模力，但需要很大的进油流量，才能维持原有的移模速度。单缸直压式的合模装置不能兼顾合模力和移模速度。图 3-20b 是单曲肘的液压驱动的合模装置。单曲肘机构对于合模液压缸作用力的增力倍数不高，但动模板有较大的工作行程。



a)　　b)

图 3-20　合模装置的基本类型

a）全液压式　b）液压-机械式

1—前模板　2—注射模　3—动模板　4—移模液压缸　5—肘杆机构

6—拉杆　7—后模板　8—合模液压缸

全液压式与液压-机械式合模机构各自的特点简述如下：

1）全液压式合模机构的动模板行进，慢快慢的变速是通过复杂的液压系统控制的；而液压-机械式机构对合模力有增力作用。肘杆机构本身让动模板运动有变速性能，因而它的液压系统可较简单。

2）全液压式合模机构的动模板行程大，而且可方便地调整其大小；而液压-机械式机构的工作行程是一定的，而且较短。

3）为容纳不同的注射模的高度，液压-机械式合模装置有复杂的调整动模板位置的机构；全液压式合模机构安装注射模容易。

4）全液压式合模机构获得的较大锁模力来自液压力，其锁模力大小可显示并可调节；液压-机械式机构的锁模力，由调模机构调节拉杆-模具系统的弹性变形获得，调节其大小很困难，但有自锁功能，在失去液压动力时保持锁模力。

5）全液压式机构的开模力是锁模力的（10 ~ 15）%；但液压-机械式合模装置有较大的开模力。

6）全液压式合模机构有较长的使用寿命；液压-机械式机构的制造精度和注射模的精度对寿命的影响大。

7）大中型注射机采用全液压式合模装置较多；注射量 500cm^3 以下的注射机大都是液压-机械式合模装置。

（2）合模力和锁模力　合模力（clamping force，P_{cm}）是合模运动和终结时，动模板对注射模的驱动紧闭力；锁模力（locking force，P_{cm}）是注射模合模后，高压熔体注入模腔时动模板对注射模的锁紧力。一般两者通用，作为表征注射机规格的主要参数。锁模力 P_{cm}（kN）应能克服由于模腔压力 p_m（MPa）形成的胀模力，构成合模装置沿轴向的力平衡。模腔压力 p_m 是塑料熔体注入模具型腔瞬时的压力，它与熔体流程有关，一般是指模腔在分型面上的平均压力。表 3-13 为不同制品和物料条件下的模腔压力 p_m。若 A 为塑料制品在分型面上的投影面积，（mm^2，cm^2），其表达方式为

$$P_{cm} \geqslant p_m \cdot A \tag{3-8}$$

表 3-13　不同制品和物料条件下的模腔压力 p_m

塑料制品和物料条件	模腔压力 p_m/MPa	应用示例
易成型制品	25	PE、PP 和 PS 等壁厚均匀的日用品或容器
一般制品	30	高模具温度下薄壁和容器类制品
高黏性物料成型高精度制品	35	ABS 和 PMMA 等有精度要求的工业零件，如壳体、盖板和支架等
高黏度物料注射高精度与难充模制品	40	高精度的机械零件，如齿轮和凸轮等

合模装置要保证注射模在注射时有足够的锁模力，在熔体的压力下不产生开缝和溢料现象。同时又影响注射机的注射量和模板最大成型面积。表 3-14 为在一定的型腔压力下，与注射量对应的在分型面上最大的型腔投影面积。

表 3-14　注射量对应的最大成型面积

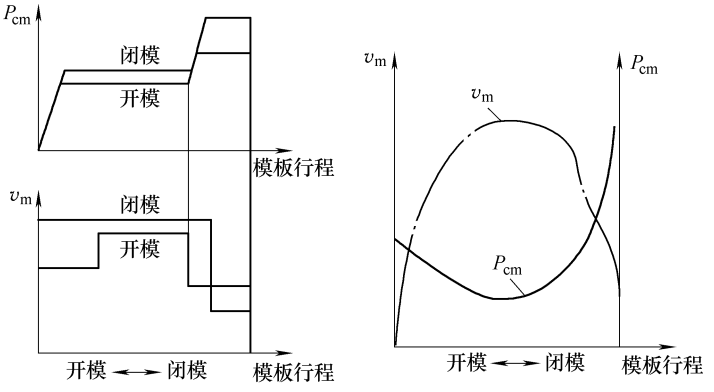
注射量/g	30	90	150	250	360	500	600	1000	1500～2000
最大成型面积/cm^2	<80	<180	<350	<600	<750	<850	<1000	<1500	2000～2500

（3）开合模速度　在整个动模板行程中，要求速度可变。在合模时由快至慢，在开模时由慢到快再至慢。图 3-21a 所示为液压式开闭模过程中，由液压系统控制的动模板合模力 P_{cm}和移模速度 v_m 的变化；图 3-21b 所示为液压-机械式开闭模过程中，由于肘杆机构增力作用使动模板合模力和移模速度的变化。

为了缩短成型周期，动模板移动速度呈提高的发展趋势：我国标准规定为≥24m/min；国外注射机一般为 30～35m/min；高速可达 40～50m/min。液压-机械型注射机的肘杆机构可以获得较快的开合模速度，是全液压合模机构的 1.4～1.8 倍；最高速已达 70～90m/min；慢速时在 2.4～3.6m/min 范围内。

（4）装模空间　注射机上装模空间与注射模设计的关系密切。在模具设计的初始阶段，应确定注射机的型号及其装模的各参数。

1）模板尺寸和拉杆的间距如图 3-22 所示，动模板上模板尺寸（$H \times V$）和拉杆



a)　　b)

图 3-21　动模板开闭过程中合模力 P_{cm}和移模速度 v_m的变化

a）全液压式　b）液压-机械式

间距($H_0 \times V_0$)，应能保证安装该注射机相对应注射量的注射模。表 3-4 列示了国产注射机的模具安装尺寸（JB/T 7267）。通常，模板面积大约是拉杆间有效面积的 2.5 倍。

2）模具厚度。对于一定公称注射量的某型号注射机，其合模装置有相应的成型面积，也对应模架的安装面积。模具的闭合高度 H 变化也有限制。模具最大厚度（H_{max}）和最小厚度（H_{min}）是注射机上能安装闭合模具的最大（最小）厚度。模具高度 H 应该大于 H_{min}和小于 H_{max}，否则，闭合模具不能实现所需的锁模力。

3）模板间距。对于全液压型注射装置，动模板的行程 S 是可调整的。如图 3-23 所示，模板间距 L 是指动模板与前模板之间的最大运动距离。最大模板间距 L 等于活塞运动的最大开模行程 S 和模具最大厚度 H_{max}之和。为使成型注射件在脱模后能顺利落下，最大模板间距 L 一般为成型制品高度的 3 ~ 4 倍。全液压型注射装置允许注射模有较大闭合高度 H，也能适应闭合高度有较大的变动范围 ΔL。

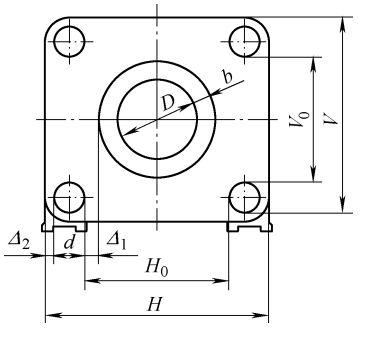


图 3-22　模板尺寸和拉杆的间距

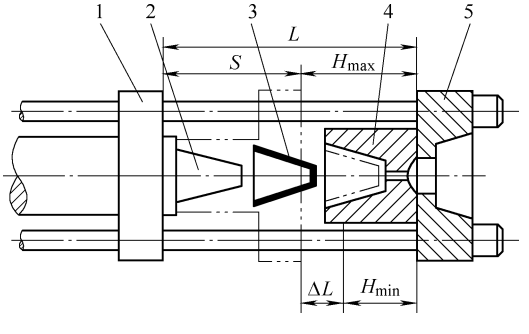


图 3-23　全液压型注射装置的模板间距

1—动模板　2—动模型芯　3—塑料制品

4—定模　5—前模板

对于液压-机械型注射装置，动模板的行程 S 是固定的。行程 S 不小于模具最大厚度 H_{max} 或注塑件最大高度的 2 倍。最大模板间距 L_{max} 等于动模板的行程 S 加上调模机构的调节距离 ΔL。这个调节距离 ΔL 就是 H_{max} 与 H_{min} 之差。

2. 液压-机械合模装置

液压-机械合模装置利用各种形式的肘杆机构。液压驱动使拉杆-模具合模机构形成弹性变形量。合模力大小取决于肘杆变形的初始位置角的大小，而与锁紧后的液压力无关。肘杆机构有增力作用，移模速度快而且变速平稳，压缩合模的刚度高于液压式。注射时胀模小，锁模可靠。液压-机械合模必须有调模机构。调模机构的作用是调节动模板与前模板间距，以适合不同模具的要求，同时也对合模力大小进行调节。液压-机械式开模时所用的顶出机构，都为固定在注射机上的圆顶杆。其塑料制品的顶出力和速度，取决于开模力和移模速度。

（1）单曲肘合模　单曲肘合模的工作原理如图 3-24 所示。压力油进入液压缸上部，活塞下移，将肘杆推动模板移合至定模。此时，肘杆并未成平直排列，有初始位置角 α 和 β，见图 3-24a。合模液压缸继续进油升压，拉杆被拉伸，两肘杆如图 3-24b 所示成一直线，肘杆、模板和模具受压缩，位置角 α 和 β 趋于零。此并列的合模机构产生的协调弹性变形量为 ΔL_p。由此对模具的预紧压力，即为合模力为 P_{cm}。

模具合紧后所有受力构件遵守胡克定律，拉杆的弹性变形量

$$\Delta L_p = \frac{P_{cm} L_p}{ZEA_p} \qquad (3\text{-}9a)$$

也即

$$P_{cm} = ZC_p \Delta L_p \qquad (3\text{-}9b)$$

式中　L_p——拉杆的有效长度；

A_p——拉杆的截面积；

ΔL_p——拉杆的弹性变形量；

Z——拉杆数；

E——拉杆的弹性模量；

C_p——拉杆的刚度，$C_p = \dfrac{EA_p}{L_p}$。

肘杆机构对液压缸推力有放大特性，故称为增力机构，用放大倍数 M 表达

$$M = \frac{P_{cm}}{P_o}$$

式中　P_{cm}——肘杆机构的合模力；

P_o——液压缸活塞的推力。

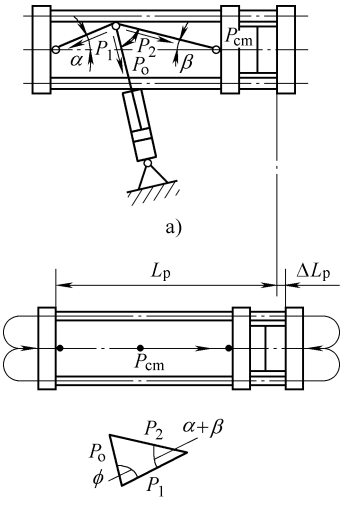


图 3-24　单曲肘合模的工作原理

a）接触碰合　b）预紧闭合

为了得到大的合模力，必须有大的初始角，对应有较大的模具闭合高度。但是继续增大初始角，也就是模具实际高度超过了模具最大厚度 H_{max}，由于活塞的推力不够，肘杆机构不能伸直。通常，单曲肘的初始位置角 $\alpha = 6° \sim 7°$ 对应 H_{max} 时，具有最大有效

推力。

图 3-25 所示为单曲肘合模装置。它的移模液压缸在注射机的床身中。动模板有两块，中间有螺旋副调模机构，调整两块动模板之间的间距，对应模具高度获得肘杆的初始位置角 α 和 β。由于单曲肘截面承受的推力有限，此合模装置适合于合模力 100t（注射量 125g）以下的小型注射成型机。

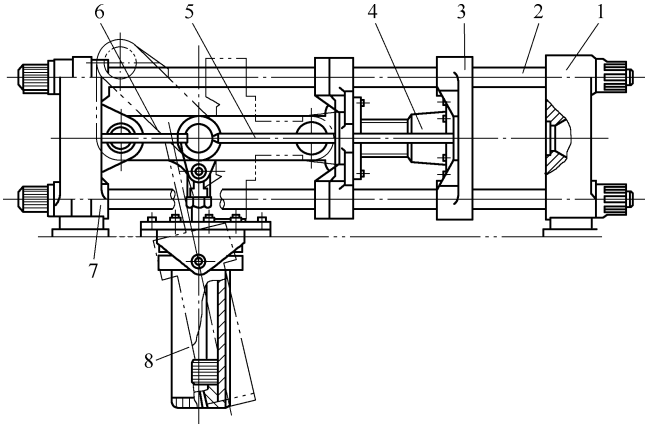


图 3-25　单曲肘合模装置

1—前模板　2—拉杆　3—动模板　4—调模机构　5—顶出机构
6—单曲肘机构　7—后模板　8—移模液压缸

（2）双曲肘合模　图 3-26 所示为对称排列双曲肘合模装置。其优点是增力放大倍数大，提高了合模力，并且对动模板的载荷均匀。但双曲肘结构比单曲肘复杂，移模行程较短，适合于中小型注射机成型机。图 3-26 所示调模机构是通过调节前肘杆长度，实现模具厚度与合模力的调节。肘杆上装有正、反螺纹的调节螺母。在调节长螺母外侧，还有两个锁紧螺母。图 3-26 所示顶出机构，顶出杆固装在动模板的中央的位置。动模后移时停靠脱模机构，将注塑件从动模型芯上顶出。

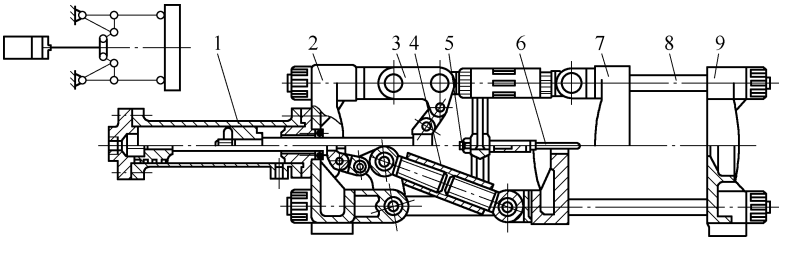


图 3-26　双曲肘合模装置

1—移模液压缸　2—后模板　3—双曲肘机构　4—调模机构　5—顶出机构
6—顶出杆　7—动模板　8—拉杆　9—前模板

3. 液压合模装置

全液压注射装置的力学和运动特性是靠液压系统液压缸的结构配合液压阀控制压力

和流量实现的。液压合模装置的动模板行程可以用机械-电气开关调节。此方法简便，但安全和可靠性差。有行程可调的特殊液压缸，用机械结构限制活塞移动位置。单缸直压式的合模装置要实现足够大的合模力，快速和变速移动模板是有困难的。

中大型注射机上可专门设置顶出液压缸实现塑料制品的脱模顶出。液压顶出可以满足注塑件脱模的位置、速度、脱模力、行程和二次顶出的要求，且可以自行复位，适应自动化生产；但结构复杂，脱模力不如机械顶出大。许多注射机同时设有液压和机械两种顶出机构。一般是机械顶杆设在模板两侧，而液压顶出设在动模板中央位置。为了适应不同制品的顶出距离，顶出液压缸的行程或机械顶出杆的位置必须可以调节。

（1）单缸直压式　图 3-20a 所示是液压式合模装置的基本形式。它是依靠液压驱动单个液压缸活塞直接实现对模具的启闭与锁紧。其合模力为

$$P_{cm}=\frac{\pi D_0^2}{4}p_0\times 10^{-1} \tag{3-10}$$

式中　P_{cm}——液压缸活塞的合模力（kN）；

p_0——液压油的压力（MPa）；

D_0——合模液压缸的直径（cm）。

移模速度

$$v_m=\frac{Q}{A}=\frac{40Q}{\pi D_0^2} \tag{3-11}$$

式中　v_m——动模板移模速度（m/min）；

Q——液压油的流量（L/min）；

A——合模液压缸活塞的截面面积（cm^2）。

单缸直压式合模装置只用于移模速度低、合模力又小的注射成型机。单缸直压式的液压缸活塞增大，势必要很大的液压油流量才能提高移模速度，难以兼顾移模速度和合模力这两方面。因此，下面介绍两种液压式合模装置，即中小型注射机上的增压式合模装置和中大型注射机常用充液增速式合模装置。

（2）增压式　增压式合模装置采用小直径液压缸来提高合模速度，再通过提高液压油压力实现大的合模力，如图 3-27 所示。合模时，压力油首先进入合模液压缸。由于液压缸直径 D 较小，可以有一定的合模速度。合模后，液压油转向进入增压液压缸。增压液压缸活塞一端直径 D_0 大于另一端直径 d_0。合模液压缸中工作液的压力提高，从而提高了锁模力。其移模速度由进入合模液压缸的流量 Q 和活塞面积 A 决定。

移模速度

$$v_m=\frac{Q}{A} \tag{3-12}$$

合模力

$$P_{cm}=Ap=p_0\left(\frac{D_0}{d_0}\right)^2A \tag{3-13}$$

式中，p 为增压后合模液压缸内的液压；$\frac{D_0}{d_0}$为增压液压缸活塞两端直径比。

增压式的两液压缸对密封的要求较高，使工作液压油压的升高受到限制。一般可增油压至 20 ~ 32MPa，最高可增至 20 ~ 32MPa。而合模液压缸的活塞直径缩小也受到限制，故移模速度不够快。

（3）充液增速式　图 3-28 所示为充液增速式合模装置的示意图。它以小直径液压缸用做高速移模，以大直径液压缸保证取得大的合模力。

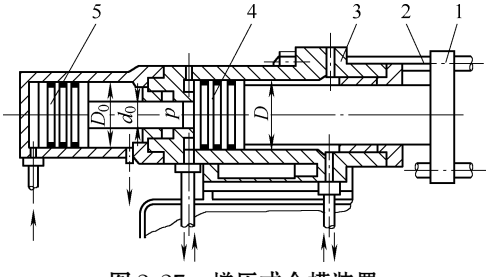


图 3-27　增压式合模装置

1—动模板　2—拉杆　3—前模板
4—合模液压缸　5—增压液压缸

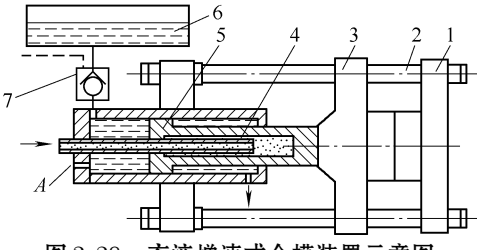


图 3-28　充液增速式合模装置示意图

1—前模板　2—拉杆　3—动模板　4—移模液压缸
5—合模液压缸　6—充液油箱　7—液控单向阀
A—压力油接口

合模时，压力油首先进入小直径移模液压缸，实现快速移模。与此同时，合模液压缸活塞随模板一起运动，使合模液压缸内形成负压。液控单向阀打开，充液油箱内大量工作油充入合模液压缸。当动模板行进至模具闭合时，合模液压缸左端 *A* 口接通压力油，充液的液控单向阀关闭。此时，合模液压缸的大活塞在压力油作用下，获得锁模力。

此外，一些大型注射机还必须缩短合模液压缸长度，减小液压油的吞吐量。有多种特种液压式合模装置，请参见有关专著。

3.2　注射生产的准备

3.2.1　塑料成型的工艺特性

在注射加工过程中涉及的塑料物理性能是多方面的，1.2 节和 2.3 节已经有了详细陈述。本节陈述的塑料密度、熔体的流动性和成型收缩率是注射成型工程中的重要工艺参数。

1. 塑料的密度

（1）固态密度　表 3-15 所列为固态塑料在室温下的密度。塑料中密度最低的是聚-4-甲基-1-戊烯 P4MP（0.83g/cm^3），最高的为聚四氟乙烯 PTFE（2.2g/cm^3）。填料添加和玻璃纤维增强后的塑料，密度增加。金属的密度一般有 2.7 ~ 9.1g/cm^3，钨的密度高达 22.7g/cm^3；陶瓷材料的密度在 2.1 ~ 5.1g/cm^3 之间。

（2）塑料熔体密度　塑料原材料经加热塑化，熔融态塑料的密度降低，见表 3-16。

表 3-15 常用塑料的密度 （单位：g/cm^3）

名 称	密 度	名 称	密 度
热塑性塑料		热塑性塑料	
LDPE	0.917～0.932	ABS	1.01～1.08
HDPE	0.932～0.965	ABS +（20%～40%）GF	1.23～1.36
PP 均聚	0.90～0.91	丙烯酸酯树脂	1.17～1.20
PP 共聚	0.89～0.905	PMMA	1.19
PB（聚-1-丁烯）	0.91～0.925	AS	1.07～1.08
P4MP（聚-4-甲基-1-戊烯）	0.833～0.835	PTFE（聚四氟乙烯）	2.14
PEC（氯化聚乙烯）	1.13～1.26	PVF（聚氟乙烯）	1.38～1.40
PS 均聚	1.04～1.05	FEP（四氟乙烯-六氟丙烯共聚）	2.12～2.17
PS 高抗冲击	1.03～1.06	PVC 软质	1.2～1.4
PA6	1.12～1.14	PVC 硬质	1.4～1.6
PA6 +（30%～35%）GF	1.35～1.42	MPPO（改性 PPO）	1.04～1.10
PA66	1.13～1.15	PSU	1.24
PA66 +（30%～35%）GF	1.35～1.42	PSU +（20%～30%）GF	1.38～1.45
PA11	1.03～1.05	PPS	1.35
PA12	1.01～1.02	PPS +40% GF	1.64
PC	1.2	PEEK	1.30～1.32
PC +（10%～40%）GF	1.24～1.52	PEEK +（20%～30%）GF	1.40～1.44
POM 均聚	1.42	LCP（液晶聚合物）	1.35～1.84
POM 共聚	1.40	PEI（聚醚酰亚胺）	1.27
共 POM +25% GF	1.61	PEI +10%～30% GF	1.34～1.57
PBT	1.31	PES（聚醚砜）	1.37
PBT + GF	1.45～1.67	PAS（聚芳砜）	1.36
热固性塑料		热固性塑料	
EP	1.11～1.40	UP（不饱和聚酯）	1.01～1.46
PE	1.24～1.32	PU（聚氨酯）	1.10～1.50
热塑性弹性体		热塑性弹性体	
聚烯烃类	0.88～0.98	PS 二烯烃类	0.90～1.2
聚酯类	1.10～1.28	聚氨酯类	1.05～1.25

注：GF—玻璃纤维充填；成分中的百分数指质量分数。

表 3-16 几种塑料的熔体密度

塑 料 材 料	测定温度 T/℃	熔体密度 ρ_m/（g/cm^3）
酚醛树脂（F101）	109	0.76
聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA	201	1.1
聚丙烯	230	0.75
聚苯乙烯	214	0.98
ABS	233	0.93
聚酰胺 1010	234	0.93
聚对苯二甲酸乙二醇酯 PET	284	1.17
聚碳酸酯 PC	264	1.1
聚砜 PSF（PSU）	311	1.17

注射成型时每次注入模具的塑料量，可以通过测定螺杆前面熔料的体积求得。注射计量以固态塑料容积 V_i 表示

$$V_i = \alpha' V_m \tag{3-14a}$$

可得每次注射质量　$G = \rho V_i = \rho_m V_m = \alpha' \rho V_m$

由此得　$$\rho_m = \alpha' \rho \tag{3-14b}$$

两式中　V_i——模具型腔和浇道的容积（cm^3）；

V_m——注射计量熔体的容积（cm^3）；

G——对模具每次注射的质量（g）；

ρ——注射塑料的固态密度（g/cm^3）；

ρ_m——塑料熔体密度（g/cm^3）；

α'——密度修正系数。无定形塑料可取0.95，结晶型塑料可取0.85。

密度修正系数反映液态塑料密度比固态塑料低。无定形塑料大约低7%左右。一些结晶型塑料大致低15%～20%。例如：PS固体密度是1.05g/cm^3；塑化后熔体密度为0.98g/cm^3。

（3）松密度和物理压缩比　注射机料斗内塑料原材料是松散的，有圆柱粒子、切碎屑片、粉剂或纤维絮等，其占有的体积为松密度。松密度与料斗中物料贮存高度有关。物料贮存高度大时，重力使松密度增大。固态塑料密度与原材料松装密度之比为物理压缩比。例如：聚酰胺PA原料粒子的松密度为0.475g/cm^3；物理压缩比为2.3；PS粒子的松密度为0.59g/cm^3；物理压缩比为1.78。

螺旋槽为等距不等深的螺杆，它的几何压缩比必须大于物料的物理压缩比。对于PA等结晶型塑料，螺杆的几何压缩比取3.0～3.5。而PS等无定形塑料的几何压缩比取2.0～2.8。物理压缩比实为塑料原材料与成型注塑件的体积之比，其值大于1。松密度表述了原材料的松散程度。比体积是指单位质量的松散塑料的体积。在原料贮存和输送时用体积计量。热固性模具的加料室要用体积计算，也要用比体积计量。显然，比体积和物理压缩比过大，塑化时排气量大，塑化效率降低。

2. 塑料熔体的流动性

注射成型是在一定压力下的塑料熔体，经流动充填模具型腔而实现的。塑料熔体有比一般流体高得多的黏度，通常有$10^2 \sim 10^3$Pa·s，并且有非牛顿的假塑性流体的特征。描述各种塑料的黏度，用流变曲线是科学的方法。但已往流变数据测算和应用有一定难度。注射生产企业已习惯用熔体流动速率，比较塑料熔体的流动性。

生产中通常用黏度的相对值，来评估熔体的流动性。热塑性塑料熔体流动速率测试仪，如图3-29所示（GB 3682）使用最为普遍。熔体流动速率是在一定温度和负荷下，10min通过标准口模的熔体质量。口模内径2.095mm，长8mm。负荷用的砝码，及料筒自动控制的

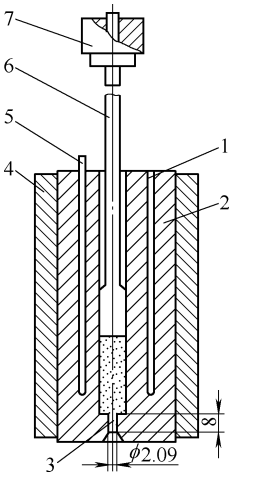


图3-29　热塑性塑料熔体流动速率测试仪

1—热电偶　2—料筒　3—出料孔
4—保温层　5—电加热棒
6—柱塞　7—负载

温度，均要按标准条件进行。熔体流动速率（g/10min），对应国外 ASTM D1238 标准，被译为熔体指数（Melt flow index），缩写 MFI 或 MI。注射塑料熔体的 MFI 为 5 ~ 50g/10min。MFI 为 15 ~ 25g/10min 时最适宜注射流动充模。熔体流动速率是同一种热塑性塑料，不同规格品级的重要区别标志。薄膜吹塑的 MFI 是 0.3 ~ 12g/10min。为防止吹塑过程中熔体黏度过稀而破裂，需要高黏度的塑料品级。

塑料熔体的流动速率测量方便，其仪器简单，数据容易获得。但此数据不能用于熔体流动的黏度、体积流率、剪切应力与剪切速率及流程压力损失的计算。

图 3-30 所示为塑料流程比测试注射模，有阿基米德螺旋线布置的窄小流道。将定量的某种塑料，在一定熔融温度和注射压力下注入，测得流程长度，除以流道截面的厚度就得到流程比。一些塑料熔体的最大流程比见表 3-17。

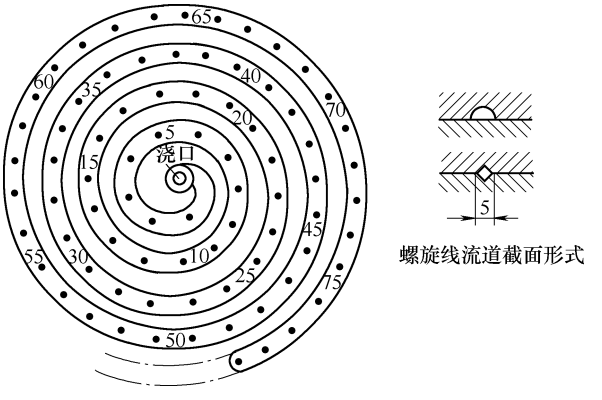


图 3-30 塑料流程比测试注射模

表 3-17 是一些塑料熔体在 80 ~ 90MPa 压力下的最大流程比 FLR_{max}。螺旋槽的间隙（流程厚度）2.5mm。由表 3-17 可知，高黏度物料如 PC、PSU 等的 FLR_{max} 在 100 ~ 130，中等黏度物料如 ABS 和 POM 等的 FLR_{max} 在 160 ~ 250；而低黏度物料如 PE 和 PA 等的 FLR_{max} 在 300 左右。

表 3-17 一些塑料熔体的最大流程比

塑　料	熔融温度/℃	模具温度/℃	FLR_{max}
ABS	218 ~ 260	38 ~ 77	160 ~ 175
聚甲醛	182 ~ 200	77 ~ 93	140 ~ 250
丙烯酸类	190 ~ 243	49 ~ 88	130 ~ 150
聚酰胺 6	232 ~ 288	77 ~ 93	150 ~ 300
聚酰胺 11	191 ~ 194	77 ~ 93	150 ~ 300
聚对苯二甲酸丁二醇酯	221 ~ 260	66 ~ 93	300
聚碳酸酯	277 ~ 321	77 ~ 99	100 ~ 110
液晶 +30% GF	310 ~ 340	66 ~ 93	300
低密度聚乙烯	98 ~ 115	15 ~ 60	275 ~ 300
高密度聚乙烯	125 ~ 140	20 ~ 60	225 ~ 250
聚丙烯	168 ~ 175	15 ~ 60	350
改性聚苯醚	203 ~ 310	93 ~ 121	200 ~ 250
聚苯乙烯	232 ~ 274	27 ~ 60	200 ~ 250
聚氨酯	170 ~ 204	27 ~ 66	200
聚氯乙烯	196 ~ 204	21 ~ 38	100
聚酯酰亚胺	350 ~ 415	65 ~ 175	200

注：注射压力为 80 ~ 90MPa。当流程厚度小于 2.5mm 时，取表值的下限。

热固性塑料采用图 3-31 所示的拉西格测试模，测定流动性。按 GB 1404 标准，将某种塑料在料腔中热压成锭后，在规定温度和压力下挤压，测得 3min 内小孔中挤出塑料长度（mm）。挤出长度越长的塑料品种，流动性越好。

3. 塑料的成型收缩率

注射生产中，成型收缩率的定义为

$$S=\frac{L_m-L}{L_m}\times 100\%$$

换算后得

$$L_m=\frac{L}{1-S} \tag{3-15}$$

式中　S——计算的成型收缩率；

L_m——模具成型零件在室温下的实际尺寸（mm）；

L——注塑件在室温下对应的实际尺寸（mm）。

目前国内实际应用的成型收缩率的定义为

$$S=\frac{L-L_m}{L}\times 100\%$$

换算后得

$$L_m=L(1+S) \tag{3-16}$$

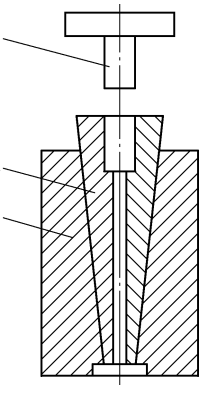


图 3-31　热固性塑料拉西格测试模

1—压柱　2—模腔　3—模套

从物理概念而言，式（3-15）中 S 说明了收缩率是绝对收缩量对于收缩前的尺寸之比，比较确切；式（3-16）换算得 L_m 对模具成型零件尺寸计算较为方便。

将式（3-16）按二项式定理展开，可得到

$$L_m=\frac{L}{1-S}=L(1+S+S^2+S^3+\cdots)\approx L(1+S)$$

由于收缩率在 $10^{-2}\sim 10^{-3}$之间，后面的 $S^2+S^3+\cdots$可以略去。

注射塑料在高温高压的熔融状态下充模（常见各种熔体温度为 170～300℃），然后被冷却固化。通常脱模温度为 20～100℃。塑料材料有比金属约大 2～10 倍的线膨胀系数。不同塑料有不同的成型收缩率。无定形和热固性塑料的成型收缩率较小，在 1% 以下；结晶型塑料的成型收缩率在 1% 以上。表 3-18 列出了常用的注射塑料的成型收缩率。用无机填料充填、用玻璃纤维增强的塑料有较低的成型收缩率。成型收缩率越大，其收缩率的波动范围也越大。现代注射生产中，为使成型收缩稳定，花费很高成本采用了许多高新技术。

表 3-18　常用注射塑料的成型收缩率　（单位：mm/mm）

塑　料	成型收缩率	塑　料	成型收缩率
注射用酚醛塑料	0.008～0.011	聚甲基丙烯酸甲酯	0.002～0.008
聚苯乙烯	0.002～0.006	聚碳酸酯	0.005～0.007
高抗冲击聚苯乙烯	0.002～0.006	聚碳酸酯,玻璃纤维增强	0.001～0.003
ABS	0.005～0.007	硬聚氯乙烯	0.002～0.005
AS	0.002～0.007	醋酸纤维素	0.003～0.008

（续）

塑　　料	成型收缩率	塑　　料	成型收缩率
聚苯醚	0.007～0.010	聚酰胺6,玻璃纤维增强	0.004～0.008
经聚苯乙烯改性聚苯醚	0.005～0.007	聚酰胺66	0.015～0.022
聚砜	0.005～0.007	聚酰胺66,玻璃纤维增强	0.007～0.010
聚丙烯	0.010～0.025	聚酰胺610	0.010～0.020
聚丙烯,玻璃纤维增强	0.004～0.008	聚酰胺610,玻璃纤维增强	0.003～0.014
$CaCO_3$ 充填聚丙烯	0.005～0.015	聚酰胺1010	0.010～0.025
聚苯硫醚	0.001～0.005	聚酰胺1010,玻璃纤维增强	0.003～0.014
聚苯硫醚,玻璃纤维增强	0.001～0.002	聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.012～0.020
ABS/聚碳酸酯共混	0.005～0.009	聚对苯二甲酸乙二醇酯,玻璃纤维增强	0.003～0.006
聚甲醛	0.020～0.025	聚对苯二甲酸丁二醇酯	0.014～0.027
聚甲醛,玻璃纤维增强	0.013～0.018	聚对苯二甲酸丁二醇酯,玻璃纤维增强	0.004～0.013
高密度聚乙烯	0.020～0.050	聚芳砜	约0.008
低密度聚乙烯	0.015～0.050	聚醚砜	0.004～0.008
聚酰胺6	0.007～0.014	聚醚酰亚胺	0.0055～0.0085

3.2.2　注射生产的准备和后处理

为使注射成型生产顺利进行和保证制件的质量，生产前需要进行原材料的预处理、清洗料筒、预热嵌件和选择脱模剂等准备工作。制件从模具中脱模后，按需要还要进行修剪、整形、退火或调湿等后处理。

1. 生产准备

生产前对注射成型原材料的处理，主要包括原材料质量检验、着色和预热干燥。有关塑料的着色剂和着色工艺在下面专节陈述。

（1）原料预处理　各种注射制品生产厂的塑料原料来源不同。生产电器电子和汽车等产品注塑件，原料来自合成树脂厂的塑料粒子。只需处理少量的回头料，预处理工作是检验原材料质量。现代的废旧塑料回收与利用行业有很大发展。这里简单介绍废旧塑料的再生，也是注射制品最终处理。

1）检验原材料质量。根据注射成型对物料的工艺规程的要求，检验物料的含水量、外观色泽、颗粒情况和有无杂质。生产中有大量的废料要再用，称为回头料。常见的是注射时成型的浇注系统的凝料和成型时的废品。这类废塑料多按塑料的品种收集分类，污染少而便于处理。这些回头料在去除杂质、分类、洗涤和干燥后，可以由切碎机切成碎片，或由粉碎机将碎片磨切成粉状，再经挤出造粒。回头料只能以20%～25%以下的比例混入新料。高精度的塑料制品不能有回头料混入注射成型。聚合物经过多次加热熔化，相对平均分子量会有下降，影响塑料制品的性能。

为了保证注塑件的精度和质量，保证模具设计和制造质量以及满足注射工艺要求，对原材料的注射成型收缩率进行检测。还要用热塑性塑料进行熔体流动速率试验，了解塑料熔体的流动性。为了明确注射机的加热温度参数，还要测试塑料的热性能。测试和纪录原材料的某些力学性能和物理性能，将来与注射制品的性能逐项比照，用来分析注射工艺的合理性。

2）废旧塑料的回收与利用。在塑料制品使用中产生的废料，是废旧塑料回收的主要来源。日常生活中的鞋类、日用制品和包装物、电器电子产品的机壳、建筑物的门窗和板料管材，农业用的薄膜，它们集中回收后，由专业厂再生利用。

对回收的废旧制品需经分类，要进行鉴别和分离。以外观观察和燃烧的火焰特点可以简易鉴别。分离是将废旧塑料中混有金属、橡胶、织物和泥沙等杂物分开后去除。人工分拣的效率很低，各国都在致力研究各种分离技术，各种物理或化学方法有十多项。例如风力分类法，将粉碎的废旧塑料粉，喷入分类槽，横向送风，利用对气流的重力和阻力的合力之差，进行筛选分离。此方法适用于区分密度大小有明显差别的物料，可将塑料与金属、泡沫塑料分开。

大批量的废旧塑料的再生利用，大致有四个方面：其一是分类清洗后，粉碎造粒，重新成型；其二是改性后再用，经配料充填添加剂，重新着色造粒后再成型，也有加入碳酸钙等无机填料，成型复合再生制品；其三是热分解化学再生，热分解废旧塑料可以生产油品、聚合物单体或化工原料；最后是将残留物掩埋将其降解。

（2）预热干燥　塑料制品吸水后会引起许多性能变化，例如电绝缘性能降低、弹性模量减小、尺寸胀大等。聚合物分子链上含有氧、羟基、酰胺基等亲水基团的塑料，具有明显的吸水倾向。塑料中的某些添加剂，对制件的吸水性也有影响。

吸水性是常温下将塑料试样浸泡在蒸馏水中 24h，测得对原始质量的吸水百分率。它是实验室的平衡条件测得吸水率。与塑料的吸水率有关的是塑料原材料的含湿量，取决于运输和贮存过程中，从环境中吸收的水分。温度、空气相对湿度和贮存时间等，决定原材料的含湿量。表 3-19 所列的塑料的吸水率，下限值取自实验室的吸水性；上限为原材料的可能含湿量。未经干燥或干燥不充分的塑料供给料，成型时会使制品出现银纹丝和气泡，也会使注塑件的力学和电性能下降。应根据注射工艺允许的含水量进行预热干燥，除去物料中过多的水分及挥发物。

表 3-19　部分热塑性塑料的吸水率与允许的含水量

塑　料	吸水率(%)	允许含水量(%)	塑　料	吸水率(%)	允许含水量(%)
ABS	0.2 ~ 0.45	0.1	聚碳酸酯	0.15 ~ 0.24	0.01 ~ 0.02
聚甲醛	0.22 ~ 0.35	0.1	聚苯醚	0.07 ~ 0.2	0.05
聚甲基丙烯酸甲酯	0.3 ~ 0.8	0.05	聚乙烯	<0.01	0.5
氯化聚醚	0.01	0.01	聚丙烯	<0.03	0.5
聚酰胺 66	1.5 ~ 2.8	0.1 ~ 0.2	聚砜	0.22	0.05 ~ 0.1
聚酰胺 6	1.3 ~ 3.0	0.1 ~ 0.2	聚苯乙烯	0.03 ~ 0.10	0.1
乙酸丁酸纤维素	0.9 ~ 1.3	0.2	聚苯硫醚	0.02 ~ 0.08	0.1
聚对苯二甲酸丁二醇酯	0.08 ~ 0.1	0.02	聚对苯二甲酸乙二醇酯	0.15①	0.02

① 0.15% 是聚对苯二甲酸乙二醇酯原材料的可能含湿量。PET 薄膜的吸水率小于 0.6% 。

除了包装良好的聚乙烯、聚丙烯和聚苯乙烯等不易吸湿物料在成型前不必干燥外，许多品种如 ABS、聚酰胺 PA、聚碳酸酯 PC 和聚对苯二甲酸丁二醇酯 PBT 等，在成型前必须进行干燥处理。有些品种的干燥要求很高，例如 PC 和 PBT 塑料的允许含水量很低。

预热干燥方法很多，下面介绍常见的三种方法。长时间高温受热易氧化的塑料，宜采用真空干燥。

1）空气循环干燥。空气循环干燥用于多品种和小批量注射生产，用红外线和远红外线加热塑料粒子。干燥盘上物料厚度以 18～19mm 为宜，不超过 30mm，以利于空气循环流通。部分热塑性塑料在空气循环干燥箱中的干燥条件，见表 3-20。这种干燥方法由于塑料粒子堆砌紧密，粒子表面水分汽化干燥后，粒子内的水分向表面的扩散传递速率很慢；缺少强气流作用，干燥效果差；电能消耗高，占用厂房面积大，劳动强度大。

表 3-20　部分热塑性塑料在空气循环干燥箱中的干燥条件

塑　料	温度/℃	时间/h	塑　料	温度/℃	时间/h
软聚氯乙烯	70～80	3～4	聚苯醚	95～110	2～4
硬聚氯乙烯	70～80	3～4	聚甲醛	110	2
聚碳酸酯	120	6～8	聚对苯二甲酸乙二醇酯	130	3～4
ABS	85～96	4～5	聚对苯二甲酸丁二醇酯	110～120	3～4
聚砜	120～140	3～4	聚甲基丙烯酸甲酯	90～95	6～8

2）沸腾干燥。图 3-32 所示为卧式沸腾干燥机，用于大批量塑料粒子的干燥。将塑料粒子悬浮在热气流中干燥，颗粒表面均匀地接触热气流，水汽不断被热空气带走，增强了塑料粒子本身传热和水分扩散，增大了粒子表面水分汽化速率。沸腾干燥方法高效节能，而且干燥处理时间短。其干燥条件见表 3-21。

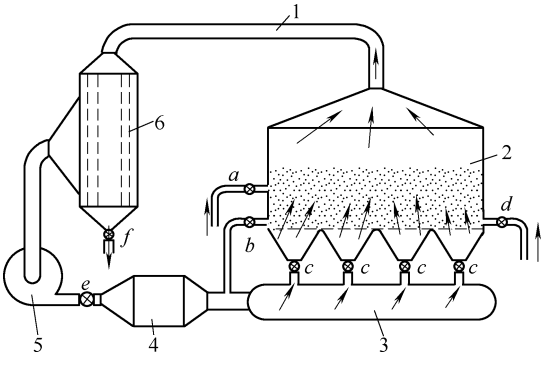


图 3-32　卧式沸腾干燥机示意图

1—风管　2—沸腾床箱体　3—热风整流筒　4—电加热器　5—离心风机　6—袋式过滤器

表 3-21　部分热塑性塑料在沸腾干燥机中的干燥条件

塑　料	温度/℃	时间/h	塑　料	温度/℃	时间/h
聚氯乙烯	70～80	<0.5	聚苯硫醚	150～170	2.0
聚苯乙烯	90～100	<0.5	聚甲醛	110～120	0.5～1.0
聚乙烯	90～100	<0.5	聚对苯二甲酸乙二醇酯	150～170	2.0
聚丙烯	100～120	<0.5	聚对苯二甲酸丁二醇酯	120～135	2.0
ABS	100～110	0.5～1.0	聚甲基丙烯酸甲酯	100～120	1.0
AS	90～100	0.5～1.0	聚碳酸酯	120～140	2.0
聚酰胺	120～130	0.5～1.0	聚砜	130～150	1.0～2.0

3）料斗式干燥。图 3-33 所示为料斗式干燥装置，用于中小型注射机，为单机的塑料粒子干燥。干燥器装在注射装置的料斗上。输入的热空气从干燥器底部，穿流贮存的塑料粒子。排出的空气经除湿加热箱，用分子筛除湿，经电加热再泵压入料斗。这样可避免经塑料粒子时重新受湿。料斗的容积和加料量，要与注射机的塑化能力相互协调。另一类料斗式干燥器并无除湿加热箱，风机和加热器吊装在料斗侧旁。部分塑料在料斗式干燥装置中的干燥条件见表 3-22。

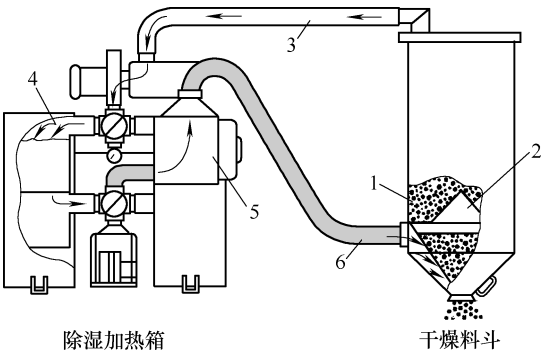


图 3-33　料斗式除湿干燥装置示意图

1—气体分流锥　2—除湿的塑料粒子　3—排气管
4—吸湿的空气　5—干热空气　6—空气管

表 3-22　部分塑料在料斗式干燥装置中的干燥条件

塑　　料	温度/℃	时间/h	塑　　料	温度/℃	时间/h
聚乙烯	70 ~ 80	1	聚碳酸酯	100 ~ 120	2 ~ 3
聚氯乙烯	65 ~ 75	1	聚甲基丙烯酸甲酯	70 ~ 85	2
聚丙烯	70 ~ 80	1	ABS	70 ~ 85	2
聚苯乙烯	70 ~ 80	1	AS	70 ~ 85	2
聚酰胺	90 ~ 100	2. 5 ~ 3. 5	纤维素塑料	70 ~ 90	2 ~ 3

（3）清洗料筒　注射加工中需要改变生产的制品、更换塑料的品种、调换塑料的着色或者出现物料的热分解，都应该对注射机的料筒进行清洗。螺杆式注射机通常采用直接换料法清洗料筒。换料清洗料筒常按从下几种方式进行。

1）替换塑料的成型温度高于残留物料的加工温度。应将料筒和喷嘴温度升至替换塑料的最低成型温度，即表 3-23 所列换料时的清洗温度。加入替换塑料或其回头料，并连续对空注射，直到前期存留物料清洗完毕。

2）替换塑料的成型温度低于残留物料的加工温度。应将料筒和喷嘴温度升至替换塑料的最高成型温度，加入替换塑料并对空注射。切断电源后，调节料筒温度至表3-24所列的换料清洗温度，继续加入替换塑料并连续对空注射，直到前存留物料清洗完毕。

3）替换塑料的成型温度与残留物料的加工温度相差不大。料筒和喷嘴温度不变更或略作调整。先加入替换塑料的回头料，连续对空注射。

4）残留料是热敏性的塑料。对硬聚氯乙烯 RPVC 和聚甲醛 POM 等热敏性的塑料，残留料筒中，应用黏度较高品级的聚乙烯和聚苯乙烯，作为过渡换料清洗料筒见表3-25。

5）采用专用料筒清洗剂。适用了成型温度在 180 ~ 280℃内的各种热塑性塑料，及中小型的注射机。专用料筒清洗剂是相对分子量较高的热塑性弹性体，在 100℃以上就

呈现高弹态，在使用温度范围内不熔融。无色的粒状清洗剂加入料筒后，如软橡胶物料沿螺旋槽推进，将料筒内残留塑料带出。

表 3-23 塑料的成型温度高于残留物料加工温度的料筒清洗

残留塑料	加工温度/℃	替换塑料	成型温度/℃	清洗温度/℃
LDPE	160～220	HDPE	180～240	180
LDPE	160～220	PP	210～280	210
PS	140～260	ABS	190～250	190
PS	140～260	PMMA	210～240	210
PA6	220～250	PA66	260～290	260
PA66	260～290	PET	280～310	280
PS	140～260	PC	250～310	250
PC	250～310	PET	280～310	280
ABS	190～250	PPO	260～290	260
PPO	260～290	PPS	290～350	290
PPO	260～290	PSF	310～370	310

表 3-24 塑料的成型温度低于残留物料加工温度的料筒清洗

残留塑料	加工温度/℃	替换塑料	成型温度/℃	清洗温度/℃
HDPE	180～240	LDPE	160～220	180
PP	210～280	LDPE	160～220	210
PP	210～280	HDPE	180～240	210
ABS	190～250	PS	140～260	190
PA66	260～290	PA6	220～250	260
PMMA	210～240	PS	140～260	210
PET	280～310	PA66	260～290	280
PC	250～310	PS	140～260	250
PET	280～310	PA66	260～290	280
PPO	260～290	ABS	190～250	260
PPS	290～350	PPO	260～290	290
PSF	310～370	PPO	260～290	310

表 3-25 残留热敏性塑料的料筒清洗

残留塑料	加工温度/℃	过渡换料	加工温度/℃	第一次清洗温度/℃	替换塑料	成型温度/℃	第二次清洗温度/℃
RPVC	190～215	HDPE	180～240	190	PA66	260～290	260
RPVC	190～215	PS	140～260	190	ABS	190～250	190
RPVC	190～215	PS	140～260	190	PC	250～310	250
RPVC	190～215	HDPE	180～240	190	PET	280～310	280
POM	180～220	HDPE	180～240	180	PPO	260～290	260
POM	180～220	HDPE	180～240	180	PET	280～310	280
POM	180～220	PS	140～260	180	ABS	190～250	190
POM	180～220	PS	140～260	180	PC	250～310	250
POM	180～220	PS	140～260	180	PMMA	210～240	210

（4）预热嵌件　对于有嵌件的注塑件，由于金属嵌件与塑料的热性能和收缩率差别大，导致嵌件周边材料因热应力而出现裂纹，使嵌件与塑料的连接强度很弱。注射成

型前对嵌件预热，减小它与塑料熔体的温差，降低嵌件与周围塑料产生的收缩差。

对于柔软的塑料如 PE 等，对综合力学性能良好的 ABS 等塑料，且嵌件又较小时，易被熔融的塑料加热，嵌件可不预热。对于分子链刚性大的塑料，例如聚苯乙烯、聚苯醚、聚碳酸酯和聚砜等，一般均需预热嵌件。钢嵌件预热温度为 110℃。铝和铜等嵌件的预热温度可提高到 150℃。

（5）选择脱模剂　注射制品的顺利脱模取决于正确的模具设计和精良的制造，也与注射工艺有关。但有时为了能顺利脱模，注射生产时可采用脱模剂。喷涂于模具表面的脱模剂，能降低注塑件与模具成型零件表面之间的脱模阻力，改善脱模性能，要求脱模剂有一定的热稳定性，不腐蚀模具的成型表面，而且在模具型腔表面不残留分解物，又不影响塑料制品的表面的光泽，通常将脱模剂喷涂在局部粘模，制件可能有损伤的位置。对外观质量要求高的制件和透明的塑料制品，不宜使用脱模剂。常用的脱模剂和适用塑料制品如下述。

1）硅油。适用于 ABS、PS 等各种塑料，脱模效果好，有长效功能。

2）硬酯酸锌。适用于聚酰胺之外的各种塑料，多用于高温的模具。

3）液体石蜡。又称白油，适用于聚酰胺等塑料，多用于低温的模具。

4）硬脂酸丁酯。适用于硬质塑料和增强塑料。

5）硅酯类。适用于热固性塑料及 PC、POM 等塑料。

2. 制件后处理

注射成型过程中，塑料熔体不稳定的剪切流动、物料塑化的不均匀和模具内注塑件的快速冷却，制件内存在流动和温差残余应力，存在不均匀结晶、收缩和取向。制件脱模后会引起时效变形，会使制件的力学性能、光学性能及表观质量变坏，严重时还会产生裂纹甚至开裂。这对厚壁和带有金属嵌件的制品更为明显。为了缓解这些质量问题，可对制件进行后处理。常用的后处理有退火和调湿两种。对制品精度要求高、制件的使用环境温度范围变化大时，应该进行后处理。表 3-26 列有部分热塑性塑料的后处理工艺。

表 3-26　部分热塑性塑料的后处理工艺

塑　　料	加热温度/℃	保温时间/h
ABS	70	2 ~ 4
聚酰胺 1010	90 ~ 100	4 ~ 10
增强聚酰胺 66	100 ~ 110	4 ~ 10
聚甲基丙烯酸甲酯	70	4 ~ 6
聚碳酸酯	100 ~ 130	2 ~ 8（或 1 ~ 2h/mm）
聚甲醛	90 ~ 145	4
聚苯醚	150	4
聚苯乙烯	70	2 ~ 4
聚酰亚胺	150	4
增强聚对苯二甲酸乙二醇酯	130 ~ 140	0. 33 ~ 0. 5
聚砜	110 ~ 130	2 ~ 8（空气）
	160 ~ 165	2 ~ 4（空气）1 ~ 5min（甘油）

退火是将塑料制品加热到玻璃化转变温度 T_g 以上，和黏流温度 T_f（T_m）以下的某一温度，进行一定时间保温的热处理过程。制件材料利用退火的热量，强化分子链的松弛过程，从而消除和降低注塑件内的残余应力。对于结晶型注塑件，退火能提高结晶度，加速二次结晶和后期结晶，但过量退火会使晶体粗大。此外，退火对制品有解取向的作用，能提高注塑件的韧性。退火温度一般在制件的使用温度以上 10 ~ 20℃，至热变形温度以下 10 ~ 20℃进行。保温时间与塑料品种和制件的厚度有关，也有按每毫米的制件壁厚需要半小时保温来估算。退火的热源或加热介质有红外线灯、鼓风烘箱以及热空气、热水、热油和液体石蜡。退火后的制件，以缓慢冷却为好，以防止产生热应力。

调湿处理是调整制件含水量的后处理工序。主要用于吸湿性很强且又容易氧化的聚酰胺等塑料制品。聚酰胺制品在空气中存放时，容易吸收水分而膨胀，在使用过程中尺寸不稳定。此外，聚酰胺制品在高温下与空气接触还会氧化变色。因此，将刚刚脱模的注塑件放在热水中处理，加快达到吸湿平衡，也隔绝空气防止氧化，同时也起到退火作用。适量水分能对聚酰胺制品起增塑作用。调湿处理的加热介质常为 100℃沸水，或 80 ~ 100℃的醋酸钾水溶液（水与醋酸钾的比例为 1/1. 25）。保温时间与制件厚度有关，通常有 2 ~ 9h。

3. 2. 3 塑料的着色

日常生活中的塑料商品充满五彩缤纷的色彩。工业生产用的塑料管道和电讯器材等，为呈现其功能也要着色。塑料着色还可以改善制品的耐候性。不透明塑料的颜色由表面反射光的波长决定。对所有波长光都能吸收的制品呈黑色。如果能把照射到它表面上的所有波长的光都反射出去，那制品就是白色。透明塑料的颜色则是透过光的波长决定的。能很好透过所有波长的光，这塑料就为无色透明体。本节将从塑料注射制品着色的视角，陈述着色工艺的基础知识。

1. 塑料着色剂

着色剂是能改变物体颜色，或将原来本无色的物体染上颜色的物质。塑料着色剂是指能够使塑料着色的物质。塑料着色剂除了一般着色剂所必须具有的光学着色性能外，还必须满足塑料制品加工和使用条件。这里介绍常用的无机颜料、有机颜料、染料和特效的塑料着色剂。

（1）着色剂的分类和性能

着色剂分为颜料和染料两大类。颜料是不溶解于水和油的着色剂。它是以微粒子状态分散于塑料中而使塑料着色的。与此相反，染料是能溶解在水和油中的着色剂，有水溶性染料和油溶性染料之分。它是被溶解于塑料中，而使塑料着色的。不论是颜料还是染料，按其来源，都可分为天然和合成的两大类。此外，还有金属、荧光和珠光等特殊着色剂。

颜料有无机颜料和有机颜料。无机颜料通常是金属氧化物、硫化物和炭黑等，主要用于不透明或半透明塑料制品的着色。有机颜料都是含有苯环的有机物，例如偶氮和酞

菁等颜料。这类颜料很少用于塑料制品的着色。染料分水溶性、醇溶性和油溶性染料，适用于硬质透明塑料。有还原桃红、分散红和溶剂紫等，用于聚苯乙烯、丙烯酸类塑料、聚碳酸酯、聚酯和硬质聚氯乙烯等塑料着色。

塑料着色剂的光学性能有：色调与色光、着色力和遮盖力。在选用着色剂时，还必须考察它着色的塑料制品的加工性能和适用性能、分散性、耐热性、耐迁移性、耐光性和耐气候性，对于着色剂的化学和物理性能、电气性能和毒性也应该关注。

1）分散性。将干燥的颜料润湿并减少其团聚体或凝聚体大小的过程称为分散。分散性就是着色剂被分散的难易程度，是塑料着色质量的关键。

要求着色时，颜料或染料应能很容易分散或溶解到塑料中去。在大多数情况下，塑料的着色和成型是同时进行的。塑料物料混炼时间和剪切作用不充分，会使着色剂在塑料中分散和溶解不良，致使塑料制品出现混色不均的斑点和条痕等缺陷。

颜料经润湿剂润湿，减小颜料之间的凝聚力，然后粉碎细化。细化后在塑料熔料熔体中均匀分散和混合。颜料粒径大于30μm时，塑料制品表面产生斑点或条痕。粒径为10～30μm时，制品表面无光泽。粒径小于5μm时，能满足一般制品的要求，但对于单丝直径为10～30μm的纤维，和厚度小于10μm的薄膜，则要求颜料粒径小于1μm。

通常有机颜料比无机颜料难以分散。不同颜料在塑料熔体中的分散难易不同。例如炭黑和喹吖啶酮颜料难以分散。颜料在塑料熔体中的分散程度，与加工温度下对聚合物的润湿程度有关。延长塑化混料时间，提高加工温度，增大机械剪切力能使颜料对聚合物的润湿性增大，分散程度提高。颜料在不同塑料中的分散效果不同。在含极性基团塑料中的分散程度常比在不含极性基团塑料中的分散程度高。颜料在熔融温度高的塑料中的分散程度，比在熔融温度低的塑料中的分散程度高。必要时可使用合适的分散剂，借以改善颜料在塑料中的分散状态。

2）耐热性。着色剂的耐热性，是指塑料在加工温度下，着色剂在颜色和性能方面抗变化的能力。通常要求着色剂的耐热温度和时间，大于着色塑料的成型加工温度和加热时间。否则，着色剂会变色甚至分解。

大多数无机颜料的耐热性较好，能在200～300℃的高温下使用。有机颜料一般在200℃以上会发生变色，只有酞菁、喹吖啶酮和偶氮之类的少数有机颜料的耐热性稍好。

着色颜料应该有发生变色的温度和时间。例如酞菁绿和酞菁蓝为325℃/30min、喹吖啶酮紫为300℃/30min和325℃/10min。着色剂的加热温度越高，耐热时间越短。如果着色剂在塑料加工温度下耐热时间为5～10min，已属于热敏性的物料，很难保证塑料制品质量。着色塑料在塑化后，熔体有很长的传输通道和停留时间，需要有多于30～60min的热稳定时间。

颜料在各种聚合物介质中的热性能表现不同。例如氯乙烯中的群青颜料容易受氯化氢的作用而分解。对聚碳酸酯、聚酰胺和聚氯乙烯等着色塑料试样，需加热20min以上测定颜料的耐热性，根据国家标准测定色变程度。

3）耐迁移性。塑料中颜料会从制品内部迁移至表面，或者迁移到相接触的塑料或溶剂中，因此有对着色塑料中颜料不迁移的使用要求。颜料的迁移有喷霜和渗色两种

情况。

① 喷霜。塑料制品中溶解的颜料从内部迁移至表面，并逐渐结晶析出的现象，称为喷霜。无机颜料不溶于塑料。只有染料才溶于塑料，会发生喷霜现象。一些有机颜料也能够部分溶于塑料，也会出现喷霜现象。喷霜使塑料制品表面失去光泽，表面的耐磨和耐溶剂性能变差。喷霜与颜料在聚合物中溶解度密切相关。

② 渗色。各种颜料和染料都能产生渗色现象。渗色与增塑剂一类的添加剂有关，即与塑料配方中的液态组分有关。

一种是塑料制品含有增塑剂。许多有机颜料部分地溶解在增塑剂中。在增塑剂迁移到制品接触表面时发生渗色。因此有许多有机颜料不能用于增塑的聚氯乙烯或聚氨酯弹性体。

另一种是塑料制品并不含有增塑剂，但与含有增塑剂的制品接触，在塑料制品的表层，被增塑剂部分溶解的颜料进入另一制品中。也有渗色于含有溶剂成分的液体中。对儿童玩具类的增塑制品，对于液体和食品的包装材料，都必须考虑到渗色的可能性。着色的软聚氯乙烯制品要考虑颜料迁移，评价对未着色片材的沾染情况。

4）耐光性和耐候性。着色塑料暴露于日光中，保持初始颜色的能力称为耐光性。耐候性为在太阳辐射与大气条件作用下，着色塑料颜色的稳定性。因为湿度是大气条件的重要参数，耐候性可视为耐光性和耐湿性的综合性能。

着色剂的耐候性好，其耐光性也好。无机颜料大部分有良好的耐光和耐候性。少数品种光照后变暗。有些有机颜料的耐光性差；有的耐光牢度好，但耐候性差。颜料的耐候性更差。有机颜料和染料的耐光和耐候性是由化学结构决定的，因此要限制使用有机着色剂。

塑料受光照和大气条件作用后，会发生氧化和降解，也会使着色剂变色。着色剂的性能对聚合物载体有很大依赖性。同一种颜料添加在不同塑料中，耐光牢度有数级之差。因此，检测着色塑料的耐光性和耐候性，比评估着色剂更有实际意义。着色塑料的耐光性，常用褪色试验的 8 级表示法。此称为蓝色色标的耐光牢度试验。用氙灯照射试样，8 级为耐光牢度最高，达到褪色的照射时间为 700 ~ 800h。1 级最低，照射 4h 出现褪色。耐候性测试是把着色塑料置于室外，定期对比颜色变化。样品放置在纬度 23°的晒场，且倾角 45°朝南，用 5 级表示法，5 级最好。

5）着色力。这是指某颜料着色制品所需的颜料量。其着色力越高，比颜料量越小。着色力是颜料对光线吸收和散射的结果。吸收能力越大，着色力越强。它还与颜料粒子的细化和分散程度有关。一般而言，相似色调的颜料，有机颜料比无机颜料的着色力强。

着色力可以检测评定。它用试样色板的稀释比与标准色板作比较。但各国标准不同，比较方法不同。各专业公司获得数据，只能是颜料着色力的相对比较值。塑料着色时颜料添加量极少，仅为 1% 左右，因此常用配方中颜料百分比浓度作评估。

6）遮盖力。着色剂用于塑料制品的遮盖力，是指它阻止光线穿透的能力。颜料的遮盖力可反映其透明性。遮盖力大，透明性差。遮盖力是颜料对光线散射和吸收的结

果。白色颜料主要是散射，彩色颜料的吸收能力起作用较多。例如：钛白粉的遮盖力，换算成干燥颜料为45～50g/m^2，锌白为100g/m^2，钛白粉的遮盖力最好。有机颜料和染料的遮盖力小，适用于透明制品。它们与无机颜料如钛白混用，则可用于不透明制品。

（2）无机颜料　无机颜料通常是金属的氧化物和硫化物、铬酸盐和钼酸盐等。它们不溶于普通溶剂和塑料，耐迁移性和光稳定性优良，成为大量用于不透明塑料制品的着色剂。但是，铬酸铅和镉金属的化合物等颜料会溶解胃酸，导致生物毒性，已被其他无机颜料替代。

1）白色。有多种白色着色剂，性能和应用有别。

① 钛白粉（TiO_2）。钛白具有很高白度及遮盖力，耐热又耐光，为最佳白色颜料，在着色剂中使用得最多。常用的金红石型钛白粉，其折射率为2.7，密度为4.2g/cm^3，性能优于锐钛型钛白。

钛白粉颗粒越细，着色力越高。最好粒径范围是0.25～0.3μm。当粒径为0.25μm时，不透明度最大。更细的0.18μm钛白粉，对蓝-紫波长区能产生较强的光散射，因此产生淡蓝效果，适用于略带黄色的塑料。

钛白粉在塑料制品中，反射所有的照射的光线，故而不透明呈白色。然而在较薄的薄膜中，会有少量光线透过，所以呈灰白色。制品的不透明性与钛白粉用量有关。制品的白度还与塑料基体的品种有关。以同样的钛白粉量，在半透明的聚丙烯中的白度，明显高于在不透明的聚氯乙烯中的白度。

② 硫化锌（ZnS）。为白色的软性颜料，折射率为2.37，特别适用于玻璃纤维增强塑料的着色，可避免着色过程中纤维被磨损损伤。硫化锌可以改善聚烯烃塑料的耐光牢度。硫化锌氧化后会生成无色的硫酸锌；与铅反应可生成黑色的硫化铅。为保证塑料的稳定性，硫化锌被限制在聚氯乙烯中着色。

锌钡白（ZnS/$BaSO_4$）中含有硫化锌，同样适合玻璃纤维增强塑料的着色。氧化锌（ZnO）因化学稳定性不好，能与酸反应，并可溶于碱溶液，一般不用做热塑性塑料的白颜料。白色的三氧化锑（Sb_2O_3）因涉及毒性，已不用做颜料，但用做阻燃剂。白垩（$CaCO_3$）因为低至1.58的折射率，不能用做白色颜料，而作为填料使用。

2）黄色。过去，黄色颜料用镉黄，又名硫化镉（CdS）；或用铬黄，又名铬酸铅[Pb(Cr，S)O_4]。这两种颜料因毒性已被国外的法令禁用。这里介绍三种黄颜料的替代品。

① 钒酸铋或钼酸铋（$BiVO_4$/$BiMoO_6$）。商品索引号为颜料黄184。它有良好的遮盖力、耐光牢度和耐候性。耐酸碱、不溶、无毒性，耐热性为260～300℃/30min，可用于多种塑料着色。但对聚碳酸酯和聚酰胺等高温加工的塑料，需对耐热性进行测试。着色塑料在塑化过程中，要避免过度的剪切作用。

② 镍锑钛黄[(Ti，Ni，Sb)O_2]。商品索引号为颜料黄53。此颜料不溶，且化学性质稳定，有很强的遮盖力，耐光性和耐候性优良，常用牌号耐热240～260℃/5min，着色力较低，也可用于淡黄着色。

3）绿色。用于绿色的无机颜料有铬绿（Cr_2O_3）、钴铬绿（$CoCr_2O_4$）和钴钛绿

[$(Co, Ni, Zn)_2TiO_4$]，都用于不透明的热塑性或热固性塑料制品着色。

铬绿用于深绿着色，不能用于鲜艳的绿色调，而且非常硬，对加工设备螺杆和模具等有磨蚀作用，因此应用较少。它被确认是绿色无害的三价氧化铬。

钴铬绿和钴钛绿颜料可以得到浅绿或柔和的色调，耐光性和耐迁移性好，耐热达300℃，适用于多种塑料着色。

4）蓝色。品种较多，可归为三类：群青蓝、钴蓝和铁蓝。铁蓝在120℃以下才稳定，很少用于塑料制品着色。

① 群青蓝。群青是硅酸铝的含硫复合物，分子结构复杂；视组成和粒度不同，可有不同色泽品级；着色鲜明，有增白和调色功能，大部分品种耐热350～400℃。群青蓝颜料对酸敏感生成硫化氢；与铝化物反应生成硫化铝，因此用于包装材料和聚氯乙烯着色时，要酌情考察稳定性。群青紫是另一种紫色颜料。它的耐热性比群青蓝差，为280～300℃/5min。

② 钴蓝（$CoAl_2O_4$）。由氧化钴和氧化铝经高温煅烧制得，耐光性和耐迁移性很好，具有鲜明的红光蓝色，已用于多种塑料着色；耐热性和着色力比群青蓝差些，钴被结合进氧化钴的晶格，呈化学惰性；不溶，无毒性。

5）红色。过去使用的钼络红和镉红，含有铬酸铅和硫化镉等为有毒物质，已被禁用。氧化铁红和正在开发的硫化铈是塑料的红色着色剂。

从赤铁矿提取的天然氧化铁红含有杂质，已不用做着色剂。人工合成氧化铁（Fe_2O_3）粒径均匀，有优异的耐热性，高的着色力和遮盖力，很好的耐光牢度和耐候性，适宜用作各种塑料的着色剂；但对聚氯乙烯是例外，特别是室外的PVC制品，例如电缆护套。氧化铁与聚氯乙烯塑料中HCl化合，在潮湿环境中会引起PVC解聚。

6）炭黑。大部分炭黑用于橡胶制品的增强填充剂。炭黑也是重要的黑色颜料。其他黑色颜料的着色力低，很少用于塑料着色。炭黑在塑料着色剂中仅次于钛白粉。炭黑用多种原料和技术生产，主要是用槽法和炉法生产炭黑。炭黑的性能取决于粒径分布和凝聚体结构，也与比表面积和表面化学性能有关。

各种工艺生产的炭黑粒径范围大，为10～300nm。遮盖的比表面积：粗炭黑为$10m^2/g$，超细炭黑达$1200m^2/g$。颗粒凝聚结构有高有低。

对塑料制品着色，粒径20nm左右的炭黑的黑度高，着色力最强，但分散性差。作为紫外线吸收剂时，用中等细度高结构的炭黑。浓度达到2.5%时，对聚烯烃塑料着色可达到最佳的稳定效果。为防静电和导电添加炭黑，只有达到某等级含量，会有电阻率的突然下降，再随炭黑浓度增加而下降。塑料制品的导电性能与炭黑的比表面积和凝集体结构密切相关。结构越高，在塑料中产生的电子通道的可能性越大。

（3）有机颜料　有机颜料是复杂的有机化合物，分子结构中含有发色和助色的原子基团。有机颜料在聚合物中有一定的溶解度。其粒径小、透明度高、分散性好且色泽鲜艳。与无机颜料相比，耐热性和耐光性差，并有迁移现象。有机颜料品种繁多，大量用于石墨、涂料和纺织品着色。用于塑料制品着色时，必须考察耐热性、耐光性和迁移性，查阅颜料的商品目录，掌握颜料的性能数据和积累塑料制品着色经验。

有机颜料主要分为两大类。一类是偶氮颜料，含有偶氮基团—N = N—。单偶氮颜料含有一个偶氮基团；双偶氮颜料含有两个偶氮基团。另一类是非偶氮颜料，称为杂环颜料。

1）偶氮颜料。有单偶氮、双偶氮、偶氮染料色淀和吡唑啉酮染料色淀颜料。

① 单偶氮颜料中的苯并咪唑酮系，有颜料黄、橙、红、紫、棕，用于许多塑料制品着色。其中：200 ~ 220℃耐热性差的颜料，只能用于加工温度低的 PVC 制品，用于 PP、PAN 和聚丙烯腈的纺丝着色；中等耐热 220 ~ 270℃的颜料，用于 PVC、PE、PP 和 PS 等低的加工温度制品；耐热 270 ~ 300℃的才能用于 PS、PMMA、ABS、PA6 和 PC 等多种塑料制品着色。必须考察这些颜料在各种聚合物中的耐热温度和时间，需注意到某些品种的耐热温度，在颜料浓度低时的下降现象。

② 双偶氮颜料中双乙酰基乙酰芳胺系的颜料黄，和吡唑啉酮系颜料红，因含有联苯胺衍生物，早在 1994 年被德国列为禁用。

偶氮缩合系有颜料黄、橙、红和棕色。少数品种在 PE 中耐热达到 280 ~ 300℃，可用于 PVC、PE、PS、PMMA、ABS、SAN 和 PC 塑料，但不能用于 PA。耐热性一般的品种，在 PE 中耐热 260 ~ 280℃，只能用于 PVC、PE 和 PET 塑料制品及纺丝着色。

③ 偶氮染料色淀是一些水溶性染料和重金属无机盐作用生成的不溶性沉淀物。

β 萘酚系染料色淀有颜料红和颜料橙等品种。耐热性、着色力和耐光牢度有好、中等或差的。个别耐热品种能用于多种塑料着色，但不能用于 PA。

酰基乙酰胺系染料色淀有颜料黄，只有中等耐热性，在 PE 中耐 240 ~ 260℃，被限用于加工温度低的 PVC、PE、PP 和 PS 塑料。

④ 吡唑啉酮系染料色淀，有颜料黄为常用的耐热性颜料，着色力和耐光性中等，可用于 PVC、PE、PP、ABS、SAN 和 PMMA 等。有的品种不能用于 PC 或 PA。

2）杂环颜料。颜色取决于杂环体系的变体和取代基；取决于晶型或异构现象。杂环颜料一般都有优良的耐光性和耐溶剂性，除酞菁外都比较昂贵。杂环颜料种类众多，这里只介绍酞菁颜料、喹吖啶酮颜料和二　嗪颜料。其他还有如吡咯并吡咯二酮（DDP），有颜料红和颜料橙，也多有应用。

① 酞菁颜料。它是有机颜料中最大的种类，应用性能优良，但在聚合物熔体中的分散性差，不能用色粉着色，而且对高密度聚乙烯（HDPE）制品的收缩有影响，使性能变脆。

无取代基的铜酞菁颜料是蓝色的，有五种晶态。β 型晶态的铜酞菁的耐热性好，为绿光蓝。α 型晶态的铜酞菁，添加氯原子后热稳定性有改进，为红光蓝。这两种颜料蓝在 PE、ABS 和 PC 中有 300℃的耐热温度，又有优良的光牢度，适用于大部分塑料着色。但普通级的颜料蓝，因含有铜离子杂质，会影响热固性塑料的硫化和固化。

用氯或溴取代后的铜酞菁是绿色颜料，有蓝光绿和黄光绿品种，也有良好的耐热性和耐光牢度，用于增塑聚氯乙烯，无迁移现象。在 PA、ABS、PC 或 PET 塑料着色前需作耐热实验。

② 喹吖啶酮颜料。有颜料紫和颜料红的塑料制品着色剂，着色力中等，在聚合物

熔体中分散困难，对 HDPE 制品的收缩有影响，有优良的耐光牢度和耐热性，在 PE、PS 和 ABS 中耐热为 290 ~ 300℃。可用于多数塑料着色，用于增塑聚氯乙烯制品时无迁移现象，用于 POM 着色时，颜料浓度低于 0.1%，可能在模具表面形成沉淀。

③ 二噁嗪颜料。用于多种塑料制品着色是颜料紫，着色力强，具有中等耐热性，在 PE 中耐热 280℃。随着白色冲淡的增加，耐热性明显下降，对 HDPE 制品收缩有影响。

（4）染料　一定加工温度下可以完全溶解于聚合物的着色剂为染料。无机染料不能应用于塑料着色，只有有机染料可用于塑料着色。着色的有机染料不能溶于水，以防止在潮湿条件下的迁移。要考察染料溶解于溶剂、脂或油的性能，在用于包装塑料制品时慎重评测染料的迁移性。PS、PMMA 和 PC 等无定形塑料有较高的玻璃化转变温度。在室温下染料没有迁移到制品表面的可能。

染料主要用于 PS、PMMA、SAN、PC 和 PET 透明塑料着色。加入的质量分数通常在 0.01% ~0.1%。染料也用于不透明塑料，要用钛白颜料遮盖，以较高加入的质量分数配色。染料用于透明塑料所呈现颜色，只是光线吸收和反射的作用；而用于不透明塑料，是颜料粒子对光线的吸收、反射和散射的共同效果。

染料着色塑料在高温中加工，有升华现象。一些染料品种的熔点较低，只有 115 ~ 209℃。染料随着温度升高，从固态直接转变为气态，而未经历液态。在高温注射成型中，溶于聚合物熔体的部分染料转变成气态。气态染料在低温的模具型腔壁面上沉积。沉积物在塑料制品的表面形成缺陷。此外，在塑料着色中，染料溶解不充分，会导致制品的色斑和色纹。溶解染料在聚合物熔体中分布不均匀也会引起色纹。

（5）特效着色剂　各种金属粉颜料、荧光颜料和珠光颜料的着色有特殊效果。

1）金属色。所有金属粉颜料是由金属或合金组成，用于塑料中可产生仿金属的颜色和光泽。金属色颜料包括铝粉和铜合金粉。常用的铝粉有银白色的光泽，被俗称银粉。铜锌粉呈淡金或真金色，又称铜金粉。金属粉颜料的粒径大小是获得金属色效果的关键。

使用金属着色剂的塑料要有一定的透明度，要使金属颜料在塑料中分散良好。金属粉用量较多，为塑料的 1% ~2%；常和染料或珠光粉一起配色，能产生良好彩色效果；但要尽量避免与钛白粉等配伍使用。强化塑料制品的取向，可提高金属效果。要注意减少注塑件中的熔合缝和改善熔合缝的强度。

① 铝粉。鳞片状的铝粉，其片径和厚度比为 100∶1。铝粉在研磨中延展，表面积增大，遮盖力随之增加。铝粉易氧化，对温度和剪切作用敏感，在高剪切下易断裂。铝粉表面包覆氧化硅保护膜。

铝粉有不同品种。颗粒平均直径为 5μm 的铝粉，着色力和遮盖力很好；颗粒直径平均为 20 ~ 30μm 的铝粉，与彩色颜料共同使用；颗粒平均直径为 330μm 的铝粉，有特殊闪烁效果。铝粉着色剂以粉、浆和色母粒的形态供应。

② 铜金粉。铜金粉中含锌量提高，色泽从红光到青光。它的着色效果因颗粒粗细而异。粗粉为 50 ~ 100μm，着色塑料呈亮金色；细粉直径为 10 ~ 20μm，光泽柔和。着

色的铜金粉都经二氧化硅包覆处理。金属铜易使聚丙烯降解，故不宜用于聚丙烯着色。

2）珠光颜料。珠光颜料着色能模仿天然珍珠的光泽。珍珠光泽是光线在许多薄片上多次反射和透射的视觉效果。珠光颜料是用二氧化钛或/和其他金属氧化物在微细云母上涂覆制得。云母上先涂覆氧化锡，能提高颜料的耐光牢度；二氧化钛涂层厚度介于40～60μm，涂覆后获银白色；控制氧化钛的厚度，由于视角不同和光的干涉，可获得幻彩；增加三氧化二铁涂层，可获得金色；含有其他金属化合物时，能获得铜色和红色等。

珠光颜料的效果取决于云母粒径的分布。粒径为5～25μm，能获得银光闪烁；粒径为10～50μm，有灿烂光亮；粒径为30～150μm，有明亮光亮。珠光颜料用于透明塑料，聚合物透明度越好，色泽和光亮度越好。珠光颜料在塑料中的用量为0.5%～2%，着色薄壁制品和薄膜时用量更多些。它也与透明有机颜料、炭黑或酞菁配伍，获得各种金属光泽。

云母片的脆性大，要防止珠光颜料被破坏。在色母粒生产和着色塑料塑化时，剪切作用要尽量小。珠光颜料是微小鳞片，在注射成型时强化取向和减少熔合缝很重要。

3）荧光颜料。荧光颜料能储存所吸收的日光能量，过后在黑暗中发光。无机荧光颜料是某些金属的硫化物，耐热性好，但颗粒较粗，不适合用于薄壁注塑件。有机荧光颜料还能吸收紫外光线，储存和转化成可见光。红色用若丹明（Rhodamines）；黄色用氨基萘酰亚胺；其他颜色用酞菁等配色得到。

有机荧光颜料使用时，先分散在改性的聚酰胺或聚酯基体中，经碾磨成细粉，以提高颜料的热稳定性。塑料中颜料的质量分数在1%～2%。为提高着色塑料的光稳定性，需加入紫外线吸收剂，但会因此而降低亮度。有机荧光颜料对加热温度和时间很敏感，热损伤会使其失去部分的明亮度。被局限应用于加工温度低的塑料，有如LDPE和PP等。

2. 塑料配色与着色工艺

塑料着色关系到塑料制品最直观的装饰质量，有其复杂性和难度，理应由配色工程师操作。这里就配色和着色工艺作一般提示。

（1）配色　颜料的各种色彩特征是色调，有红黄橙绿蓝紫棕黑白、金属色、珠光色和荧光色等。配色是将基础色的颜料混合，可以得到许多过渡色或中间色。另一方面，一种色调的颜色，在光波作用下的视觉效果会不同，有色光现象。有明与暗、鲜艳与阴晦；在太阳光与人工光源下还会有同色异谱现象。因此配色有基本色的拼合，也有色光的混合。有经验的配色专业人员，按塑料制品的设计要求选用着色剂后，先制成小样，初步确认后，拟定合理的投产着色工艺。有些塑料制品着色要求很高。例如电视的前框与后盖，分别着色并注射成型后，它们的颜色和色光要一致。因此，计算机配色技术，和测色与比色的光学仪已得到应用。

1）在着色剂的合理选择和匹配方面，应强调如下几点：

① 要获得着色剂耐热性能的准确数据。不但获知耐热温度，还要知道耐热时间；不但获得着色剂本身的热性能，还要有着色后塑料中颜料的热性能，并与塑料基体的耐

热性能作比较；而且，相匹配的着色剂的热稳定性必须相近。

② 选用匹配着色剂的耐光性和耐候性相近的品种。如果性能相差很大，日久之后的色调和色光会变得面目全非。

③ 选用分散性相近的品种。颜料分散后粒径大小及在塑料基体中均匀分散，影响到着色力和遮盖力。

2）要了解基体塑料的性能及着色剂对塑料制品性能的影响：

① 必须了解塑料的本色与色光以及材料的透明性。有的塑料本色淡黄或泛黄，如果要着浅色，先要遮盖黄色；珠光、荧光或金属色，对透明性好的塑料才有效果；在配制浅色和白色时，塑料本身的色光影响明显。

② 无机颜料的类型、颗粒大小和长径比及其浓度，会影响着色塑料的收缩和取向，以致影响制品的翘曲变形。有机颜料在结晶型塑料中，起成核剂的作用。细小有机颜料成为晶核，引发结晶生长，影响塑料的结晶度和结晶形态，从而影响制品的力学性能。例如酞菁颜料在 HDPE 的较大注射制品中，收缩的不均匀引起翘曲变形。

③ 了解塑料中各种添加剂对着色剂的影响。例如：添加增塑剂后，会引起着色剂迁移。添加剂中的有些化合物，会使颜料变色。例如：热稳定剂的铅盐和镉化物，与某些含硫的无机颜料反应生成黑色硫化物。

④ 对于注射成型的各塑料品种，它们的熔体黏度有差别，例如热温度范围不同。即使是注射加工，如果采用热流道注射，由于塑料熔体在模具的流道中停留，必须考察颜料的耐热时间。无机颜料的硬度和荧光颜料的抗剪切破坏，关系到塑料成型机械。选用着色剂时必须熟悉塑料加工工艺、成型模具和机械。

⑤ 认识到一些着色剂的毒性和迁移性能。对食品包装和儿童玩具的着色，要符合卫生和禁用法规。

（2）着色工艺　着色剂的形态有粉状、糊状、分散液、色粒和色母粒。着色工艺方法随着色剂形态而不同，有各自特点。

1）粉态色料和干法着色。粉料包括干色料、润湿性色料和颜料原粉。将粉状着色剂与塑料原料均匀混合后，直接加工成型的方法称干法着色。

干色料是经金属皂、白油和松节油等分散剂表面处理的颜料。因容易粉尘污染、计量困难、分散性差，不能用于薄膜等制品的着色，适宜于经常换色的小批量塑料制品。

润湿性色料是含有高浓度颜料的树脂粉碎而成，分散性优良，能自动计量，主要用于聚氯乙烯制品着色。

颜料原粉着色的分散性差，计量不便，有粉尘污染，主要用于酚醛等热固性树脂着色。

2）糊状色料着色。颜料和有机液体（常用增塑剂、多元醇和脂肪酸甘油酯等液体）混合成糊状着色剂。颜料需研磨和打浆，有优良的分散性，主要用于软质聚氯乙烯、不饱和聚酯和聚氨酯等塑料制品。

3）液体色料着色。将颜料分散在液体载体中，制成高沸点的着色分散液。液体载体通常用矿物油或脂肪酸衍生物，还掺混表面活性剂、发泡剂或抗静电剂等。无机颜料

负载量可高达 50%；有机颜料负载量约 20%，适用于各种塑料的挤出和注射制品。但用量过大时，液体载体会影响物品性能，不适合高浓度着色。

4）色粒着色。用粉状或糊状颜料与制品塑料混合塑炼，制成着色颗粒。色粒着色的分散性好，但增加了造色粒工序，提高了成本；用于多种热塑性塑料，不能用于荧光颜料等易破损的着色剂。

5）色母粒着色。用经过预处理的颜料均匀分散到载体树脂中，塑化造粒制得。色母粒的载体树脂使用与制品塑料一致、高档的塑料制品。但有时也选用不同的树脂；要求载体树脂与颜料的相容性和分散性好；其黏度接近制品塑料，不影响制品塑料的性能。高浓度的色母料，载体树脂越少，影响越小。色母粒的颜料负载量可达 50%，甚至更高。色母粒直接与本色的制品塑料混合塑化，颜料分散性好，使用和换色方便，一般用量为 3% ~4%。也可加入各种稳定或阻燃等添加剂制成多功能的色母料。

（3）各种塑料着色　各种塑料有各自的着色剂和着色工艺。

1）聚烯烃，聚烯烃塑料有低密度聚乙烯（LDPE）、高密度聚乙烯（HDPE）和聚丙烯（PP）等。LDPE 的熔融温度较低，为 110 ~126℃；HDPE 和 PP 的熔融温度较高，分别为 126 ~136℃和 165 ~175℃。不同品级注射物料，有不同的熔体黏度。以 PP 熔体为例，注射级 PP 有范围较宽的各品级，为 5 ~45g/10min。因此，应区别考虑着色剂的耐热性和分散性。

LDPE 着色时需考虑有机颜料的迁移性。HDPE 着色时，需考虑酞菁等一些有机颜料影响结晶，会使制品有较大的收缩和翘曲变形。

聚烯烃塑料制品在室外使用时，光降解作用不容忽视。炭黑、酞菁和氧化铁等能吸收和反射紫外线，是光屏蔽物质，有利于聚烯烃制品的光稳定性。但是它们的作用不及光稳定剂。在有机颜料和光稳定剂同时作用时，颜料会起光敏作用，有些会与稳定剂发生作用。与偶氮黄和偶氮红的不良配伍，会引起光稳定性下降，促进老化。

聚烯烃塑料制品在使用和加工中，不可避免地会发生氧化反应，导致分子链断裂。特别是聚丙烯对氧化作用非常敏感。除了单偶氮红对纯 PP 有加速氧化外，其他如炭黑、群青和酞菁等还可提高抗氧性能。但是，有些颜料与抗氧剂配伍时会发生反应。其中间产物有催化 PP 氧化降解作用，减弱抗氧剂功能。例如炭黑、单偶氮、酞菁和喹吖啶酮等，不宜与酚类抗氧剂并用。在 PP 着色时，需仔细考察颜料与抗氧剂配伍时的氧老化作用。通常 PP 合成过程添加过抗氧剂的产品才出厂。

2）聚氯乙烯。聚氯乙烯（PVC）受热会分解出氯化氢；PVC 制品中加入增塑剂和其他添加剂，因此存在着色剂的稳定性和迁移性问题。氯化氢可使耐酸性较弱的着色剂变色。

许多有机颜料在增塑剂中只有一定程度的溶解性。使用的制品在温度较低时，颜料溶解度降低，出现过饱和析出，和随增塑剂迁移。不溶性偶氮颜料的迁移性，要比色淀性偶氮颜料的大。聚氯乙烯制品中，含铝和锡的稳定剂与硫化物颜料会发生化学反应。无机颜料的电绝缘性比有机颜料好。

3）聚甲基丙烯酸甲酯。又称为有机玻璃的制品，透明性好；着色色谱范围广，没

有迁移问题。户内制品用染料着色，保持制品透明性；户外制品宜选耐候性好的着色剂，如钛白、酞菁和铁红等。有机玻璃的板和棒，在单体中加入着色剂后，与分散剂一起研磨成浆，然后再聚合和成型。此种用途的着色剂对聚合反应的物理和化学作用无影响。

4）聚酰胺。它是结晶型聚合物，加工温度高，耐热性在290℃以上。无机颜料可以着色。聚酰胺熔体的还原性强，对有机颜料和染料选用有限制。除考察耐高温外，还须考虑化学性，常用酞菁和喹吖啶酮等有机颜料和蒽醌等染料。

此外，聚酰胺有亲水性，各种颜料或色母粒都应经干燥处理。尼龙丝的染色，利用了聚酰胺的极性，需专门着色。

5）聚碳酸酯。它的透明性好，不存在着色剂的迁移。但成型加工温度高，熔料黏度高。聚碳酸酯受热易水解，着色剂应充分干燥，常用耐热300℃以上的钛白、炭黑、酞菁、偶氮、喹吖啶酮和苯并咪唑酮等颜料。已有实验证实，有机颜料着色的聚碳酸酯存在热分解现象。着色浓度越高，相对分子质量下降越大。

6）环氧树脂。为了使热固性塑料固化反应顺利进行，着色剂的加入应不至于明显影响固化反应，不与固化剂等各种添加物发生化学反应。环氧树脂液态时有较高黏度，着色剂的分散较困难。着色剂的粒径和含水量有较严格要求。环氧树脂的耐光性欠佳，作为室内制品使用时，对着色剂的耐光性和耐候性可要求低些。对制品有耐光和耐候要求时，环氧树脂有变色和发黄趋势，常用深色颜料遮盖。

3.3 注射成型工艺

本节将讨论注射成型的主要工艺条件。注射充模和成型的过程和制品质量的关系，将在第5章中深入分析；本节叙述塑化计量和工艺，介绍物料温度、背压压力和螺杆转速选择和调度的方法，还陈述模具温度、冷却时间的确定和计算；然后介绍聚苯乙烯、聚丙烯、ABS、聚酰胺和聚碳酸酯五种塑料的工艺规程。

3.3.1 注射充模和成型的过程

注射加工的流动充模和冷却成型是塑料物理状态变化的过程。

1. 注射充模

注射液压缸以高压将塑料熔体经料筒前喷嘴和注射模的浇口与流道，输入制品成型的型腔。这个熔体的传输过程可分为流动充模、保压补缩和倒流三个阶段。

（1）流动充模　图3-34是注射成型的压力与时间的关系曲线，也是三个位置的塑料熔体的压力随时间的变化曲线。第1曲线表示螺杆头前熔料的压力变化，也是注射液压缸的活塞推力的压力变化。微电脑控制注射机，可以测定并显示该曲线。第2条曲线表示喷嘴出口处熔料的压力变化。第3条曲线表示注射模中浇口出口处熔料的压力变化。压力可用压力传感器测出。

要理解熔体压力在流动充模中的压力变化，必需了解到：塑料熔体是高黏度的流

体，而且具有明显的弹性；塑料熔体的密度随压力变化；在进入成型型腔前的流程中，由于料筒、喷嘴、流道与浇口的阻力，不断消耗注射压力；在流动充模的熔体传输过程中，料筒和喷嘴有一定的加热温度，而进入模具后低温的流道壁面对熔体有冷却作用。因此，塑料熔体的流动充模过程，不但是假塑性非牛顿流体质量和动量的传输过程，又是熔体能量变化的过程。

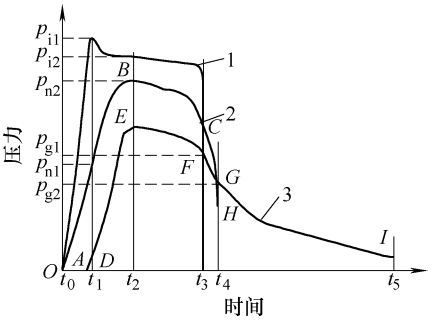


图 3-34　注射成型的压力-时间曲线

1—注射压力曲线　2—喷嘴出口处熔料的压力曲线
3—注射模中浇口出口处熔料的压力曲线

1）注射压力曲线。图 3-34 中，t_0 为螺杆开始推压熔体的时刻。在压力曲线 1 上，p_{i1}为螺杆的注射压力，t_2 为熔体充满型腔的时刻，故时间段 $t_0 \sim t_2$ 为整个充模阶段。t_1 为塑料熔体冲出浇口，进入成型模腔的时刻。$t_0 \sim t_1$ 为流动前期。在流动前期，喷嘴口和流道中熔体的压力急剧上升，梯度很大。在 $t_1 \sim t_2$ 注射充模的后期，型腔内塑料熔体被充满，p_{i2}为切换的保压压力。控制 t_2 的保压切换时刻十分重要，过早切换会使制品的密度不足。

2）喷嘴出口处熔料的压力曲线。图 3-34 中，在流动前期流道中熔体的压力，由 A 上升至 B 点。B 点对应喷嘴出口的保压压力 p_{n2}，显然，p_{i1}-p_{n2}为注射后期塑料熔体在料筒和喷嘴传输时的压力损失。而在模具内压力从 p_{n1}升至 p_{n2}。t_3 是螺杆后撤时刻。此时压力曲线 1 上螺杆头的注射压力急剧降至零。在 $t_2 \sim t_3$ 的保压期间，塑料熔体在保压压力下补充给模具的制件型腔。螺杆一旦后撤，流道中熔体压力自 C 点迅即下落至 H 点。在此期间，流道中熔体压力和温度下降很快，而制件型腔内的熔体压力较高。如果浇口有足够大的流通截面，塑料熔体会倒流至流道中。

3）浇口出口处熔料的压力曲线。图 3-34 中，自 t_1 时刻熔体冲出浇口，压力在流动充模期间自 D 上升至 E 点。自 E 至 F 点，制件型腔内塑料得到压实和补缩。F 点有螺杆后撤时的型腔压力 p_{g1}。在时间 $t_1 \sim t_4$ 期间，熔料充填并压实了制件型腔，而塑料熔体温度在下降。t_4 是截面狭窄的浇口中塑料冻结的时刻。自 t_4 起制件型腔成为密封容器，停止质量传递。p_{g2}是浇口冻结时刻的型腔中塑料的内压。从 G 点到 I 点，型腔内生产的注塑件，其内压和温度不断下降，形体冷却收缩。直到时间 t_5，模具的分型面打开。

（2）保压补缩 在整个充模阶段结束后，螺杆不能立即退回。必须在前段位置保持一定压力，螺杆缓慢推进。塑料熔体有补给型腔的保压流动，此时螺杆前端压力称保压压力，俗称二次注射压力。与注射充模阶段对型腔压实不同，此时型腔内熔体温度已下降，黏度升高，只是低速流动。而压力的传递起主导作用，影响注塑件的质量。产生保压流动的原因是模具壁间附近的熔体因冷却而产生体积收缩。在浇口冻结之前，熔体在保压压力下，产生补缩的流动。此时在注射机的料筒内，螺杆前端应有一定量的熔体，

经喷嘴和流道系统至型腔末端，能够传输质量和压力。

保压阶段的压力是影响模腔压力和补缩程度的主要因素。较高的保压压力提高了模腔的内压，补进了较多物料，增大了制品的密度，也提高了注塑件内密度分布的均匀性。同时，熔体压力增大和持续保持，可提高熔合缝的力学强度，也可提高塑料与金属嵌件的连接牢度。但是，由于保压压力和流动是在成型物的温度在不断下降时进行的，较高的压力会在制品中产生较大的残余应力和大分子取向。使制品在使用期内容易翘曲变形，甚至开裂。

在一定的保压压力下，延长保压时间能向型腔中补进更多些熔料。其效果与提高保压压力相似。如果浇口的截面较大，又保持较长的保压时间，模腔中塑料凝固之后浇口才冻结，模腔的内压将缓慢下降。这有利保证薄壁深腔的大型注塑件的质量。反之，保压时间不足，浇口又不能及时冻结，则物料会从模具型腔中倒流，型腔内压力会下降很快。

（3）倒流　如果模具内的浇口没有冻结就撤除保压压力，则塑料熔体在较高的模具型腔压力作用下发生倒流。倒流使模腔压力很快下降。倒流将持续到浇口冻结为止。浇口冻结以后才结束保压是注射生产操作的失误。浇口冻结后制品的密度不会变化了。因此，使用不同的保压时间，对注塑件进行称量，可寻觅合适的切换时间。浇口截面的大小和形状决定了冻结的时刻。注射模内采用针点式的小浇口，一般不会发生倒流。大型的注塑件，采用主流道型的大浇口，保压时间可长达 1 ~ 1.5min。保压时间对制品的密度和尺寸的精度有较大的影响。曾发生倒流的注射成型制品的密度不足，其表面有凹陷，内部有真空泡等缺陷。

2. 冷却定型

（1）压力与温度变化　成型周期中型腔内熔体压力 p 与温度 T 的关系，可画出图 3-35 所示的典型的压力和温度关系曲线。该图是将模腔压力周期图上的时间 t_0 t_1 … t_4 用型腔内熔体温度 T_0、T_1、T_2、T_3、T_4 替代，并将纵横坐标轴对调。

图 3-35 上曲线 *DE* 时段为浇口尚未冻结，但保压补料已结束，因此存在倒流而使型腔压力急剧下降。从浇口冻结点 *E* 开始，型腔内的塑料量不再改变，所以型腔压力与温度沿着直线 *a* 变化。倘若保压于 *D* 点结束时，浇口早已冻结封闭，则模腔内的压力与温度沿直线 *b* 变化。

浇口封闭后，型腔内压与温度的关系可用修正的状态方程描述。聚合物熔体密度 ρ 是温度和压力的函数。其表达式为

$$(p+\pi)(V-\omega)=R'T \qquad (3\text{-}17a)$$

或

$$\rho=\frac{1}{V}=\frac{p+\pi}{R'T+\omega(p+\pi)} \qquad (3\text{-}17b)$$

式中　p——型腔壁受到的压力（N/cm^2）；

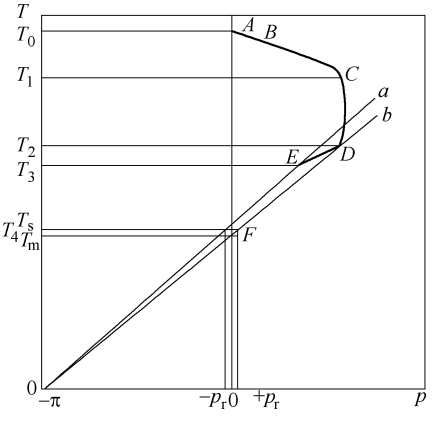


图 3-35　型腔内熔体压力与温度关系曲线

π——各种塑料内压力常数（N/cm^2）；

V——塑料的比体积（cm^3/g）；

T——熔体的热力学温度（K）；

ω——热力学温度为零时材料的体积容（cm^3/g）；

R'——修正的摩尔气体常数［$N \cdot cm^3/(cm^2 \cdot g \cdot K)$］。

若干聚合物的状态参量见表 3-27。

表 3-27　若干聚合物的状态参量（π、ω 和 R'）

聚　合　物	$\pi/(N \cdot cm^{-2})$	$\omega/(cm^3 \cdot g^{-1})$	$R'/(N \cdot cm^3 \cdot cm^{-2} \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$
聚苯乙烯 PS	19010	0.882	8.16
通用聚苯乙烯 GPS	34840	0.807	18.90
聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA	22040	0.734	8.49
乙基纤维素 EC	24510	0.720	14.05
醋酸丁酸纤维素 CAB	26080	0.688	15.62
低密度聚乙烯 LDPE	33520	0.875	30.28
高密度聚乙烯 HDPE	34770	0.956	27.10
聚丙烯 PP	25300	0.922	22.90
聚甲醛 POM	27550	0.633	10.60
聚酰胺 610 PA610	13510	0.860	18.50
聚酰胺 66 PA66	30450	0.914	7.38

式（3-17a）中，π、ω、R'皆为常数。因此，该方程是以 V 为斜率的直线方程。浇口冻结后，型腔内塑料的压力与温度沿着一条等容线或等密度线变化。冻结点不同，型腔内的塑料量不同，等容线的斜率不同。但所有等容线都通过 p-T 图的原点。即 $p = -\pi$，热力学温度 T 为零。

（2）固化脱模　根据图 3-35 可以合理确定模具打开的温度和压力的条件。首先，型腔内的注塑件应该冷固到具有足够的刚度和硬度。开模时的温度应低于塑料的热变形温度。脱模温度 T_s 太高，在制件脱模后还会有较大的无模具约束的收缩。制件变形后，有较大形状和尺寸误差。因此，开模温度范围在 T_s 和模具工作温度 T_m 之间。通常，脱模温度 T_s 高于工作温度 T_m，约 5 ~ 10℃。如果出现制件在脱模时刚性差而受到损伤，应降低模具工作温度 T_m 后再调整开模温度。

其次，开模时型腔内的残余压力不能高于某个 $+p_r$ 值。太高会引起注塑件和凹模表面间过大的黏附力，使开模力增大。残余压力也不能小于某个负压值 $-p_r$。否则易出现缩孔和凹陷，使制品收缩率过大，对型芯包得过紧，致使脱模困难。上述的两组温度与压力限制条件，拟定了开模的合理区域。凡浇口冻结后型腔内塑料冷却的等容线通过这一区域，都属于优质的注射工艺。

3.3.2　物料的温度和塑化计量

影响注射成型质量的因素很多，在塑料原材料、注射机和模具确定后，注射工艺条件的选择与控制便是决定制品质量和生产率的主要因素。这里就物料温度、压力和时间的合理选择，进行一般性讨论。

1. 物料温度

要区分塑料注射加工的注射温度和塑化温度。合理选择注射机料筒和喷嘴温度，保证塑料熔体在充填模具型腔时有适宜的流动性能。

（1）注射温度　注射温度是从注射机喷嘴射出的熔体温度。熔料的注射温度在流动充满模具型腔的过程中是不断下降的。下降的速率与模具型腔壁面的温度有关。表3-28列示了部分塑料熔体的注射温度与模具型腔壁的温度。塑料熔体是假塑性的非牛顿流体，它的黏度不但依赖温度和压力，还与流动剪切速率有关。因此，分析判断塑料熔体在模具中的温度分布和变化，最有效的工具是计算机辅助注射流动的数值分析和模拟。为调整和控制注射温度，可参考图3-36。该图列举有注射温度变化对注射成型工艺和制件质量的影响。

表3-28　部分塑料熔体的注射温度与模壁的温度

塑　　料	注射温度/℃	模壁温度/℃	塑　　料	注射温度/℃	模壁温度/℃
ABS	200～270	50～90	GRPA66	280～310	70～120
AS(SAN)	220～280	40～80	碳纤维 PA66	280～305	90～120
ASA	230～260	40～90	PA11,PA12	210～250	40～80
GRPS	180～280	20～70	PA610	230～290	30～60
HIPS	170～260	20～75	POM	180～220	60～120
LDPE	190～240	20～60	PPO	220～300	80～110
HDPE	210～270	30～70	GRPPO	250～345	80～110
PP	250～270	20～60	PC	280～320	80～110
GRPP	260～280	50～80	GRPC	300～330	100～120
CA	170～250	20～90	PSF(PSU)	340～400	90～150
PMMA	170～270	40～70	GRPBT	245～270	70～110
PAR 聚芳酯	300～360	80～130	PBT	240～260	65～80
SPVC	170～190	20～50	GRPET	260～300	85～120
RPVC	190～215	20～60	PET	250～255	65～115
PA6	230～260	40～60	PES 聚醚砜	330～370	110～150
GRPA6	270～290	70～120	PEEK 聚醚醚酮	350～400	165～190
PA66	260～290	40～80	PPS 聚苯硫醚	310～350	135～160

注：GR—玻璃纤维增强。

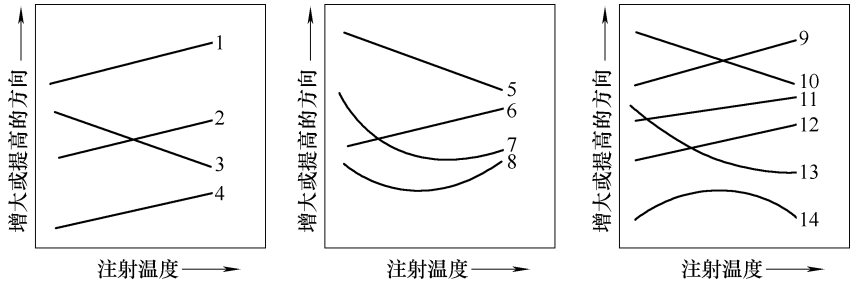


图3-36　注射温度变化对注射成型工艺和制件质量的影响

1—渐变（低压缩比）螺杆的塑化量　2—突变（高压缩比）螺杆塑化量　3—充模压力　4—充模流程长度
5—料流方向的冲击强度　6—与料流垂直方向的冲击强度　7—料流方向的收缩率
8—与料流垂直方向的收缩率　9—结晶型塑料的密度　10—通过浇口的压力损失　11—热变形温度
12—熔合缝的强度　13—料流方向的弯曲和拉伸强度　14—取向程度

（2）料筒和喷嘴的塑化温度　料筒和喷嘴加热是使塑料塑化和流动，但不能产生热分解。因此，料筒和喷嘴温度应控制在塑料流动温度 T_f 或熔点 T_m，至塑料的热分解温度 T_d 之间。料筒温度的分布，一般从料斗到喷嘴由低到高，以使塑料的温度平缓上升让其均匀塑化。

柱塞式注射机中塑化热量主要依靠热传导，因此要设定较高的料筒温度，比螺杆式的料筒温度高 10 ~ 30℃。由于螺杆剪切塑化有较多的摩擦热，为防止塑料过热分解，有时靠近喷嘴前段的温度，略低于中段的温度。注射时塑料熔体在螺杆或柱塞的高压下高速通过喷嘴小孔，会产生摩擦热，使熔体温度升高约摄氏十度左右。因此，喷嘴设置温度通常略低于料筒的最高温度。表 3-29 是一些塑料的料筒和喷嘴设置温度的推荐方案。

表 3-29　一些塑料的在螺杆式料筒和喷嘴处的温度设置

塑　　料	料筒温度/℃			喷嘴温度/℃
	加料后段	中　　段	前　　段	
HDPE	180 ~ 200	200 ~ 220	220 ~ 260	210 ~ 240
PP	160 ~ 210	200 ~ 230	190 ~ 220	210 ~ 240
ABS	170 ~ 190	180 ~ 230	210 ~ 230	220 ~ 230
阻燃 ABS	170 ~ 190	200 ~ 220	180 ~ 190	180 ~ 190
电镀 ABS	200 ~ 210	230 ~ 250	210 ~ 230	190 ~ 210
SPVC	125 ~ 150	140 ~ 170	160 ~ 180	150 ~ 180
RPVC	140 ~ 160	160 ~ 180	180 ~ 200	180 ~ 200
PCTFE 聚三氟氯乙烯	250 ~ 280	270 ~ 300	290 ~ 330	340 ~ 370
PMMA	150 ~ 180	170 ~ 200	190 ~ 220	200 ~ 220
PMMA/PC	210 ~ 230	240 ~ 260	220 ~ 240	220 ~ 240
POM	150 ~ 180	180 ~ 205	195 ~ 215	190 ~ 215
PC	220 ~ 230	240 ~ 290	260 ~ 280	260 ~ 270
PA6	200 ~ 210	220 ~ 240	220 ~ 230	200 ~ 230
PA66	220 ~ 250	260 ~ 280	250 ~ 265	240 ~ 260
GRPA66	230 ~ 260	260 ~ 290	260 ~ 270	250 ~ 260
GRPBT	210 ~ 220	240 ~ 260	230 ~ 240	210 ~ 230
PPS 聚苯硫醚	260 ~ 280	320 ~ 340	300 ~ 310	280 ~ 300
PPO 聚苯醚	260 ~ 280	300 ~ 310	320 ~ 340	320 ~ 340
改性 PPO	230 ~ 250	240 ~ 270	230 ~ 240	220 ~ 240
PSU(PSF)聚砜	250 ~ 270	270 ~ 290	290 ~ 320	300 ~ 340
CAB 醋酸丁酸纤维素	130 ~ 140	150 ~ 175	160 ~ 190	165 ~ 200
CA 乙酸纤维素	130 ~ 140	150 ~ 160	165 ~ 175	165 ~ 180
CP 丙酸纤维素	160 ~ 190	180 ~ 210	190 ~ 220	190 ~ 220
线性聚酯	70 ~ 100	70 ~ 100	70 ~ 100	70 ~ 100
AK 醇酸树脂	70	70	70	70

选择各种塑料适当的料筒和喷嘴设置温度时，还有以下的提示。

1）对于无定形的塑料，一般有较宽的注射温度范围，可用较低的料筒和喷嘴加热温度。可用提高注射速率方法，降低熔体黏度。对于结晶型塑料，注射温度的范围较窄，要严格控制料筒和喷嘴加热温度，避免发生热降解。

2）对于各种无机矿物质和纤维充填的塑料，视添加剂的比例，为提高熔料的流动性，要用较高的料筒和喷嘴温度。但对添加有机染料的塑料，加热温度要严格控制。

3）对于热敏性塑料例如聚氯乙烯和聚甲醛等，以及添加阻燃剂塑料，要严格控制料筒和喷嘴加热，应取较低设置温度。为防止塑料热降解，还必须控制其保持熔体状态的时间，这对用热流道注射成型尤其重要。

4）对于注射成型薄壁长流程复杂制品时，熔体流程比较大，要用较高的料筒和喷嘴加热温度，保证熔料能顺利流经狭长的型腔间隙。对带有金属嵌件的制件也需要较高的注射温度。厚壁注塑件的熔体注射温度可以低些，料筒和喷嘴设置温度选择下限。

5）为了避免喷嘴头的流涎现象，可以让加热温度略低于机筒的最高温度。但是，低黏度的结晶型塑料只能用阀式喷嘴。

2. 塑化计量

固体粒状塑料在注射机的料筒内经压实、加热、剪切及混合等作用后，转变成熔体的过程称为塑化。物料经过塑化，要求达到所需的成型温度，具有合适的流动性；而且塑料熔体内必须组分均匀、密度均匀、黏度均匀和温度分布均匀，还要尽量避免聚合物及添加剂热分解，热分解物的含量应尽可能少。这样才能保证熔体顺利注射充填模具型腔，才有可能获得质量合格的塑料制品。

（1）螺杆式塑化　塑化质量主要由塑料的受热状况和所受的剪切作用决定。往复移动螺杆式注射机，螺杆转动对物料产生剪切作用，以机械力强化了塑化过程，同时又有摩擦热的生成，因而对塑料的塑化效果比柱塞式注射机要好得多。塑料在螺杆式注射机内熔融塑化过程，与螺杆式挤出机内的熔融塑化过程类似。但两者存在差异：挤出机料筒内物料的熔融是稳态的连续过程，移动螺杆式注射机料筒内，物料的熔融是一个非稳态的间歇式过程；在注射螺杆的塑化过程中，螺杆边旋转边后退，存在可调节的液压缸背压，螺旋槽的物料固体床解体比挤出螺杆早；在料筒前端的塑化熔料压力下，旋转螺杆后退时，存在有一定的反向压力流和漏流。

对于柱塞式注射机，固态塑料粒子在料筒内受到柱塞的推力，几乎不受剪切作用。塑化所需的热量，其大部分源自装有加热装置的高温料筒。塑料的热导率低，热传导很慢。在料筒径向方向上物料温度分布不均匀，近料筒壁的物料温度偏高，料筒中央的温度偏低，而且没有混合和剪切作用，塑料熔体的组分和黏度的均化程度低。在料筒的轴线上，柱塞对物料的压力，经过固态和半固态的粒子后，才传递到塑料熔体，因此，射出塑料熔体的温度不超过加热料筒和喷嘴的温度。而螺杆塑化的压实、剪切、混合和输送作用强，均化效果好。因此，射出塑料熔体的温度会超过料筒和喷嘴的加热温度。

计量是将塑化好的熔体定温、定压和定量射出料筒所进行的准备过程。这个计量过程是由注射机控制螺杆或柱塞，与塑化过程同时完成。计量的准确性不仅与注射机的控制系统精度有关，而且还受料筒和螺杆的几何要素的影响。很显然，计量精度越高，获得高精度的制品的可能性越大。

塑化能力的计算，可使用挤出理论中螺杆均化段的熔体输送能力的计算公式。常规螺杆塑化的熔料输出取决于正向流率 Q_S。在注射机塑化时，螺杆承受有背压 p_b，又有

压力流流率 Q_p 和漏流流率 Q_l，见图 3-37。完整的塑化体积流率有下式：

$$Q = Q_S - Q_p - Q_l \tag{3-18a}$$

$$Q = \frac{\pi D(\pi D\tan\theta - e)h_3 n\cos^2\theta}{2} - \frac{(\pi D\tan\theta - e)h_3^3 \sin\theta\cos^2\theta}{12\eta_h L_3} \times p_b - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \tan\theta}{12\eta_\delta e L_3} p_b \tag{3-18b}$$

式中　Q——螺杆塑化的体积流率（cm^3/s）；

D——螺杆的直径（cm）；

h_3——螺杆均化段的螺旋槽深度（cm）；

n——螺杆的转速（r/s）；

θ——螺杆螺纹的升角（°）；

e——螺杆上螺棱的轴向宽度（cm）；

L_3——螺杆均化段轴向长度（cm）；

p_b——注射液压缸给螺杆的塑化背压（0.1MPa）；

δ——螺杆与料筒的间隙（cm）；

η_h——螺杆的螺旋槽塑料的黏度（kg·s/cm）；

η_δ——螺杆与料筒的间隙 δ 中塑料的黏度（kg·s/cm）。

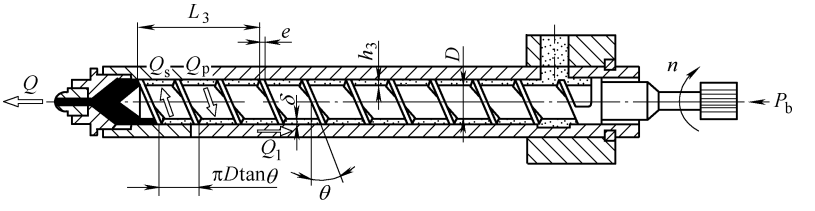


图 3-37　注射机螺杆塑化的流率和几何参数

由式（3-18）可知，均化段的几何参数对输出的体积流率和背压的影响：

1）在无背压的情况下，$p_b = 0$，则 $Q_p = Q_l = 0$。塑化量 $Q = Q_S$，它与螺杆转速 n 和螺旋槽深 h_3 成正比。

2）当螺杆与料筒的间隙 $\delta = 0$，可略去漏流流率 Q_l。压力流流率 Q_p 是螺旋槽深 h_3 的三次方关系。槽深 h_3 虽可提高输出流率 Q，但使背压 p_b 的调节作用减弱。

（2）热均匀性　塑料在柱塞式注射机中只依靠柱塞推动，几乎没有混合作用。物料的温度升高主要来自料筒的热传导。如图 3-38 所示，由于塑料的导热性能差，致使料筒壁附近的物料温度高些，料筒中央的物料温度低。此外，熔料在料筒中央处的流速高于外层，中央处物料在料筒中的停留加热时间短，这将进一步扩大径向温差。用这种温度分布不均匀的熔体成型的塑料制品，会有诸多的质量问题。料筒中装有分流梭后，仍然存在温差。因此，柱塞式注射机的料筒和喷嘴的加热温度要高些，让中央处的物料也能熔融。但这易造成料筒壁附近的物料热分解。如果延长物料在料筒中停留时间，则会降低注射生产率。在螺杆式注塑装置内，由于螺杆的剪切和混合作用，加速了料筒的热传导并产生摩擦热，物料升温快而且温度均匀。在塑化时螺杆的转速提高，剪切作用强烈时，物料的温度会超过料筒和喷嘴的加热温度，见图 3-38 所示。

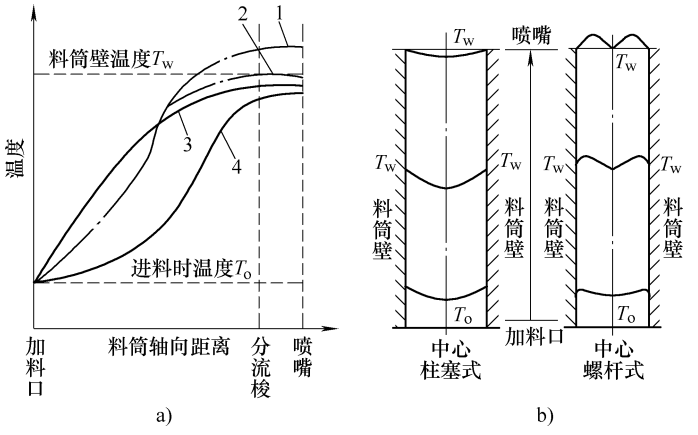


图 3-38　注射机料筒内塑料的温度变化曲线

a）轴向温度分布　b）径向温度分布

1—剪切作用强烈的螺杆式注射机　2—剪切作用平常的螺杆式注射机

3—柱塞式注射机的料筒壁附近　4—柱塞式注射机的料筒中央

3. 背压压力和螺杆转速

背压压力和螺杆转速是不容忽视的工艺参数。保证各种塑料物料有优良的塑化质量，又有恰当的塑化时间，要考虑众多的因素。

（1）背压压力　背压压力是螺杆在预塑成型物料时，对其前端汇集的熔体所施加的反压力，也称塑化压力，简称背压。增大背压可驱除物料中的气体，提高熔体的密实程度。螺杆前端熔体的内压力增大后，螺杆后退速度减小，螺杆对物料的剪切作用加强，摩擦热量增多，熔体温度上升，塑化效果提高。

以式（3-18）分析，单增大背压 p_b 会增加压力流流率 Q_p 和漏流流率 Q_l，使塑化能力下降，必须同时提高螺杆转速 n，才既能提高塑化效果，又提高塑化能力。背压增大后螺杆后退移动速度减慢，塑化时间延长是必然的。但物料塑化应该在注塑周期内完成计量。

背压的大小与塑料品种、喷嘴种类和塑化加料方式有关，并与螺杆转速相对应。螺杆的传动额定功率是有限的，过大背压和转速，会使螺杆转矩不足，传动系统过载。因此有以下三方面考量。

1）采用直通式喷嘴和后加料方式塑化时，开放式喷嘴在较长时间处于对空状态，容易发生流涎现象，因此而应该用较小背压。采用阀式喷嘴和前加料方式时，背压可取大些。

2）对于热敏性的塑料，例如硬聚氯乙烯、聚甲醛和聚三氟氯乙烯等，为防止塑化时剪切摩擦力过大引起热分解，背压应尽量取小值。

3）对于高黏度的塑料，例如聚碳酸酯、聚砜和聚苯醚等，在一定的背压下，螺杆以低转速高转矩剪切塑化。背压应随塑料品种调节大小，但不宜使用过大背压，以防止螺杆的传动功率超载。

（2）螺杆转速　塑化时螺杆的转矩和旋转速度是物料在输送中被剪切和混合的原动力。螺杆转速影响塑化能力和塑化效果。一般首先以塑料熔体的黏度考虑螺杆的转速。低黏度物料的转速较低。但是，它与背压、转矩和塑化能量有以下三方面的复杂关系。

1）提高螺杆转速增大塑化能力，缩短塑化时间，但是对塑化效果是不利的，会使物料的混合和均化质量下降。必须给以一定的背压，保证足够塑化时间，补偿塑化质量。

2）螺杆转速提高后，更大的传动转矩给力物料输送和剪切混合。背压提升也会提高螺杆的工作转矩。

3）在高转速、大转矩和高背压作用下，螺旋槽中物料剪切产生热量增大，熔料的塑化温度提升。在塑化能量中，机械剪切能量大于料筒外加热能。为防止熔体过热，可适当降低料筒加热温度。

通用注射机的塑化装置，按塑化热塑性塑料的黏度所需转矩设计螺杆直径。再按塑化速率（螺杆应有的圆周速度 $v=0.4\sim1.5\text{m/s}$），由机械传动提供相应的加工转速。因此，加工人员理应选择的圆周速度 v，根据螺杆直径确定转速 n。对于直径为 50～70mm 的螺杆，常用注射机能提供的螺杆最高转速为 400～500r/min，最大背压为 20～30MPa，已经能满足各种热塑性塑料塑化所需的机械能。表 3-30 可供选择螺杆转速和塑化背压参考，但要以正确使用喷嘴类型和加料方式为前提，还需考虑塑料品级和塑化温度，权衡塑化能力和质量，进行修正调节。

表 3-30　部分塑料的背压和螺杆转速（推荐）

塑　　料	塑化背压 p_b/MPa	螺杆转速 n /（r/min）
硬聚氯乙烯	尽量小	15～30
聚苯乙烯	3.5～10	50～200
20% 玻璃纤维充填聚苯乙烯	3.5	50
聚丙烯	3.5～7	30～150
30% 玻璃纤维充填聚丙烯	3.5	30～75
高密度聚乙烯	3.5～10	40～120
30% 玻璃纤维充填高密度聚乙烯	3.5	40～60
聚砜	0.35	20～30
聚碳酸酯	3.5	20～40
聚酰胺 66	3.5	30～50
玻璃纤维增强聚酰胺 66	3.5	20～40
改性聚苯醚	3.5	25～75
20% 玻璃纤维充填聚苯醚	3.5	25～50
可注射氟塑料	3.5	50～80
纤维素塑料	3.5～14	50～300
丙烯酸类塑料	2.8～5.5	20～40
聚甲醛	0.35	40～50
25% 玻璃纤维充填聚甲醛	0.35	40～50
ABS	3.5～7	30～120
热塑性聚酯	1.7	20～60
15%～30% 玻璃纤维充填热塑性聚酯	1.7	20～60

3.3.3 模具的温度和冷却时间

模具的温度决定了各种成型制件的冷却时间。模具温度和冷却时间是密切相关的工艺参数，也是注射模的温度调节系统设计的前提。

1. 模具温度

塑料熔体在型腔内凝固时将释放热量，与注射模进行热交换。模具温度调节系统是使整个成型型腔壁面，在整个批量生产中保持合适的温度。

（1）模具温度对注塑件质量的影响　高温塑料熔体在模具型腔内凝固成制品时，将释放大量的热量。为适应各种不同塑料品种，需将型腔壁维持在某一适当温度。模具温度对制件质量的影响如下所述。

1）模具温度过高，会使制品在脱模过程中和脱模后发生变形，使其形状和尺寸精度降低。

2）模具温度过低，会降低塑料熔体的流动性，使制件轮廓不清，甚至不能完全充满型腔。或在充模过程中，由于熔体前锋的温度降低过多而产生明显的冷接缝，导致制品的力学性能下降。过低的模温，还会使制品表面不光滑，产生各种表面缺陷。

3）低温充模时，如果熔体流速不是足够高，则制品内残余应力较大，易引起翘曲变形或应力开裂。特别是某些高黏度的塑料，此种现象尤为明显。

4）通常对柔性的塑料，如聚烯烃等，应该使用低的模具温度，以降低其制品的成型收缩率，提高制件尺寸精度，并缩短成型周期，提高生产效率。

5）对于某些结晶型塑料，例如聚甲醛等，使用高的模温有利于结晶过程进行。有利的结晶，能提高制品的密度和结晶度，避免其制品在存放或使用过程中尺寸发生变化。

6）对于熔体黏度高的刚性塑料，例如聚碳酸酯等，使用高模温有利于流动充模，可降低其制品的应力开裂现象。

注射模具温度的波动及分布不均匀，也会使塑料制品质量变坏。模温直接关系制品的成型收缩率。模温波动会使批量生产制品尺寸不稳定，从而降低制品尺寸精度，甚至出现尺寸误差过大的废品。这对成型收缩率较大的结晶型塑料影响更为明显。

模具型腔温度分布的不均匀，例如模具型芯壁和型腔壁面温差过大，会导致注塑件厚度截面上残余应力分布不均匀，固化后注塑件会出现变形翘曲。塑料件中局部范围残余应力过大会引起裂纹和开裂。这对刚硬的聚碳酸酯等制品尤为重要。

总之，如图 3-39 所示，提高模温能改善制品表面的粗糙度，使轮廓清晰，熔合缝不显现。提高模温有利于结晶型塑料的结晶过程，有利于高黏度熔体的充模流动，也有利于减小制品中残余应力；但是会延长冷却时间和注射成型周期，也会使脱模温度过高，使注塑件在脱模中受到损伤。

（2）模具温度对生产效率的影响　冷却时间在整个注射成型周期中约占 50% ~ 80%。在保证注塑件质量前提下，限制和缩短冷却时间是提高生产效率的关键。让高温熔体尽快降温固化，模温调节系统应有较高的冷却效率。注入模具的塑料熔体所具有的

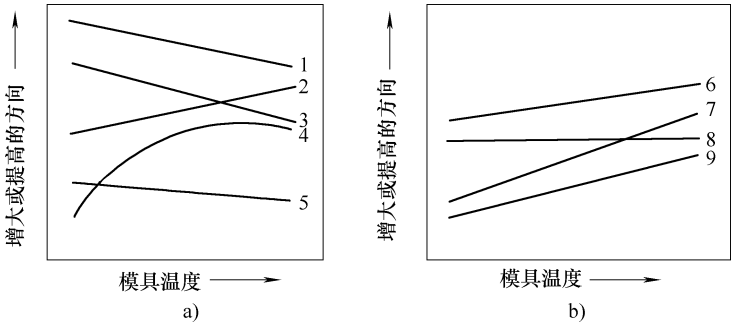


图 3-39　模具温度对塑料的一些成型条件和制品性能的影响

1—塑料熔体的黏度　2—熔合缝的强度　3—注射生产效率　4—制品内残余应力　5—制品表面粗糙度
6—制品的冷却时间　7—制品的密度和结晶度　8—成型收缩率　9—制品的翘曲变形

热量，由模具传导、对流和辐射，散传于大气和注射机的，仅占 5% ~30% 。热量大部分由冷却水携走。缩短冷却时间途径有三个方面。

1）冷却水应处于湍流状态。模具冷却管道中冷却水应处于高速湍流状态，流速 v = 0.5 ~ 1.5m/s，甚至更高。雷诺数 Re > 4000，使冷却管道孔壁与冷却介质之间的传热系数提高。资料表明，湍流流体在 $Re > 10^4$ 时，其传热能力比层流高 10 ~ 20 倍。

2）扩大模具与冷却水的温差。在模温一定时，采用低温的冷却水。但倘若设计不当，会加剧模温分布的不均匀。采用低于室温的冷却水时，有可能使型腔表面凝聚大气中的水分。

3）增大冷却介质的传热面积。也就是尽量增大管道孔径和增加孔数，但是受到模具结构（例如脱模零件、镶块接缝）的限制。对于大型注射模，为提高制件的合格率，在开机前必须将模具预热到适宜温度。为此，有些注射模备有加热和冷却两套装置。

2. 冷却时间计算

注射模不仅是射料熔体的成型设备，而且还是热交换器。模具温度调节系统直接关系注塑件的质量和生产效率，是注射模设计的核心内容之一。大型注射模具的冷却系统设计尤其重要，计算也较为复杂。对于大多数模具温度较低的塑料注射，仅设置模具冷却系统。但对于模温超过 80℃的塑料，以及大型模具还需要设置加热装置。

注射成型周期是指完成一次注射成型工艺过程所需的时间。它包含注射成型过程中所有的时间，直接关系到注射成型生产效率。注射成型周期的时间组成如图 3-3 所示。注射成型周期由四部分组成：注射时间，约占个成型周期的 5% ；脱模推出制件时间，约占 10% ；其他操作时间，约占 5% ；冷却时间，约占 80% 。合理确定冷却时间是保证制件质量和提高生产效率的关键所在。

注射过程中塑料熔体冷却时间，通常是指塑料熔体从充满模具型腔起，到可以开模取出注塑件为止的时间。可以开模取出注塑件的时间，常以注塑件已充分凝固，具有一定强度和刚度为准。用注塑件厚度计算冷却时间的计算式，按无定形和结晶型塑料分为两类。

（1）无定形塑料

1）薄壁塑件。无定形注塑件的薄壁制品，通常按注塑件断面的平均温度 t_x，由式（2-100）计算冷却到该温度的时间。

$$t=\frac{H^2}{\pi^2 k}\ln\left[\frac{8(T_c-T_m)}{\pi^2(T_x-T_m)}\right] \tag{3-19}$$

式中 k——塑料的热扩散系数（mm^2/s），查表 3-31；

H——注塑件的厚度（mm）；

T_c——注射塑料熔体的初始温度（℃），查表 3-31；

T_m——模具温度（℃），查表 3-31；

T_x——注塑件的平均脱模温度，应低于塑料材料的热变形温度（℃），其冷却时间查表 3-31。

表 3-31 部分塑料成型冷却时间计算的参考数值

材料名称	热扩散系数 k/(mm^2/s)	初始温度 T_c/℃	模具温度 T_m/℃	注塑件平均脱模温度 T_x/℃	断面中心层脱模温度 T_y/℃
PC	0.105	230～290	80～100	90～110	132～140
CA	0.085	150～200	40～70	50～75	70～88
CAB	0.085	190～250	50～70	60～110	75～126
PS	0.080	150～190	20～70	50～70	82～104
SAN(AS)	0.080	220～250	50～80	85～90	90～110
ABS	0.08～0.10	190～240	40～70	50～70	90～108
PMMA	0.075	180～230	40～60	50～70	80～109
RPVC	0.070	150～200	15～60	45～60	70～82
PSF	0.110	280～330	130～150	135～155	182
GF-PBT	0.090	240～260	60～80	65～85	150～165
PA66	0.085	250～280	50～80	60～90	150～180
PA6	0.070	210～240	50～80	60～90	140～176
PP	0.065	170～220	50～60	55～70	102～115
LDPE	0.090 模温 35℃ 0.075 模温 60℃	140～200	35～60	50～60	50～60
HDPE	0.095 模温 35℃ 0.055 模温 60℃	150～230	35～60	50～60	65～82
POM	0.065 模温 50℃ 0.050 模温 90℃	180～220	50～90	90～120	158～174

2）厚壁制品。只要其厚度方向的两表面皮层有足够刚性就可脱模。最厚部位的中心层温度大致在该物料的热变形温度附近，就可用塑料的热变形温度或略低于该温度作为脱模温度 T_y，由式（2-99）来计算冷却到该温度的时间。

$$t=\frac{H^2}{\pi^2 k}\ln\left[\frac{4(T_c-T_m)}{\pi(T_y-T_m)}\right] \tag{3-20}$$

式中 T_y——制件最厚部位中心层达到的脱模温度（℃），查表 3-31。

H、k、T_c 和 T_m 含义同上。

使用式（3-20），还要进一步校验注塑件各表面层所达到的温度，以判断凝固程度。制品厚度方向的温度以中心层为对称轴，呈抛物线分布规律。定义 x 变量为距中心层的位置，则有

$$T_{(x)} = T_m + (T_c - T_m)\cos\left(\frac{\pi x}{H}\right) \times \frac{4}{\pi}\exp\left(-\frac{\pi^2 k T_y}{H^2}\right) \tag{3-21}$$

式中　$T_{(x)}$——注塑件脱模时，距中心层 x 的断面层的温度（℃）；

其中　　x——距注塑件厚度中心层的任意断面距离（mm）；

T_c、T_m、k、H 和 T_y 含义同前。

使用此式的前提是制品厚度两侧模具型腔壁温度 T_m 相等。若有温差，则温度分布抛物线不对中心层对称。

以上两种公式在推导过程中，假定充模熔料温度是均一的；假设注塑件在模内冷却过程中，始终与型腔壁紧密接触；在冷却过程中，假设模具型腔表面的温度均匀，且始终保持均一；按两平行的大平面壁的注塑件来推导，忽略成型件侧面的冷却作用。故计算结果存在与实际的偏差。塑料的热扩散系数随着温度而变化，结晶型塑料的这种情况比较明显。所以以上计算式对结晶型塑料不适用。

（2）结晶型塑料　以下是三种结晶型塑料冷却时间的经验公式。

1）聚乙烯（$\rho = 0.945 g/cm^3$），适用范围 $T_c = 193.3 \sim 248.9℃$，$T_m = 4.4 \sim 79.4℃$。

棒：
$$t = 1.2396R^2\left(\frac{T_c + 28.9}{185.6 - T_m}\right) \tag{3-22}$$

板：
$$t = 0.7998H^2\left(\frac{T_c + 28.9}{185.6 - T_m}\right) \tag{3-23}$$

2）聚丙烯，适用范围 $T_c = 232.2 \sim 282.2℃$，$T_m = 4.4 \sim 79.4℃$。

棒：
$$t = 0.6566R^2\left(\frac{T_c + 490}{223.9 - T_m}\right) \tag{3-24}$$

板：
$$t = 0.3785H^2\left(\frac{T_c + 490}{223.9 - T_m}\right) \tag{3-25}$$

3）聚甲醛，适用范围 $T_c > 190℃$，$T_m < 125℃$。

棒：
$$t = 0.7161R^2\left(\frac{T_c + 157.8}{157.8 - T_m}\right) \tag{3-26}$$

板：
$$t = 0.3627H^2\left(\frac{T_c + 157.8}{157.8 - T_m}\right) \tag{3-27}$$

以上各式中，R 为棒状注塑件半径（mm）；H 为板状注塑件厚度（mm）。

表 3-32 是七种塑料制件在不同壁厚下的冷却时间。必须明了，注塑件的冷却时间与壁厚的平方成正比关系。

表 3-32 塑料制品厚度与所需冷却时间

制品厚度/mm	冷却时间 t/s						
	ABS	PA	HDPE	LDPE	PP	PS	PVC
0.5			1.8		1.8	1.0	
0.8	1.8	2.5	3.0	2.3	3.0	1.8	2.1
1.0	2.9	3.8	4.5	3.5	4.5	2.9	3.3
1.3	4.1	5.3	6.2	4.9	6.2	4.1	4.6
1.5	5.7	7.0	8.0	6.6	8.0	5.7	6.3
1.8	7.4	8.9	10.0	8.4	10.0	7.4	8.1
2.0	9.3	11.2	12.5	10.6	12.5	9.3	10.1
2.3	11.5	13.4	14.7	12.8	14.7	11.5	12.3
2.5	13.7	15.9	17.5	15.2	17.5	13.7	14.7
3.2	20.5	32.0	25.5	22.5	25.5	20.5	21.7
3.8	28.5	32.0	34.5	30.9	34.5	28.5	30.0
4.4	38.0	42.0	45.0	40.8	45.0	38.0	39.8
5.0	49.0	53.9	57.5	52.4	57.5	49.0	51.1
5.7	61.0	66.8	71.0	65.0	71.0	61.0	63.5
6.4	75.0	80.0	85.0	79.0	85.0	75.0	77.5

3.3.4 常用塑料的注射成型工艺

注射成型工艺的选择和拟定，必须充分掌握塑料材料的性能。由于塑料材料品种繁多，新品种又不断涌现，必需取得合成树脂企业提供的材料说明书。它应该详细和准确地列出塑料的热性能和力学性能、塑料黏流态的流变曲线和熔体流动速率及注射成型收缩率。也有提供注射机料筒、喷嘴和模具温度等控制参量。工艺的选择是科学分析和技术应用的过程，也是不断修正优化的过程。现将五种常见的热塑性塑料的注射成型工艺作综合性分析和介绍。

1. 聚苯乙烯塑料

聚苯乙烯塑料本身的吸水率很小，成型一般制件可以不予干燥，但对外观质量要求较高的注塑件，可在成型前进行干燥处理，在 70～80℃温度下干燥 2～4h。

聚苯乙烯为无定形塑料，黏度适宜，流动性较好。聚苯乙烯的成型温度范围较宽，热稳定性也好，注射成型比较容易。在黏流态时熔料的温度有少许波动，不会影响注射流动过程。

如图 3-40 流变曲线所示，聚苯乙烯熔料的黏度对剪切速率和温度都比较敏感，在注射成型中无论是增大注射速率，还是升高料筒温度都会使黏度下降明显。注射压力为 60～120MPa，较高的注射压力让熔体高速注入型腔，但模具型腔内压力尽量低些，并分布均匀。料筒温度可控制在 140～230℃之间，喷嘴温度为 170～190℃。把物料温度加热到 190～215℃，有利熔体流畅充模。但料温过高使聚合物过热分解，使制件上出

现花斑、银纹、发白、泛黄和气泡。这对透明的聚苯乙烯制品是严重的缺陷。

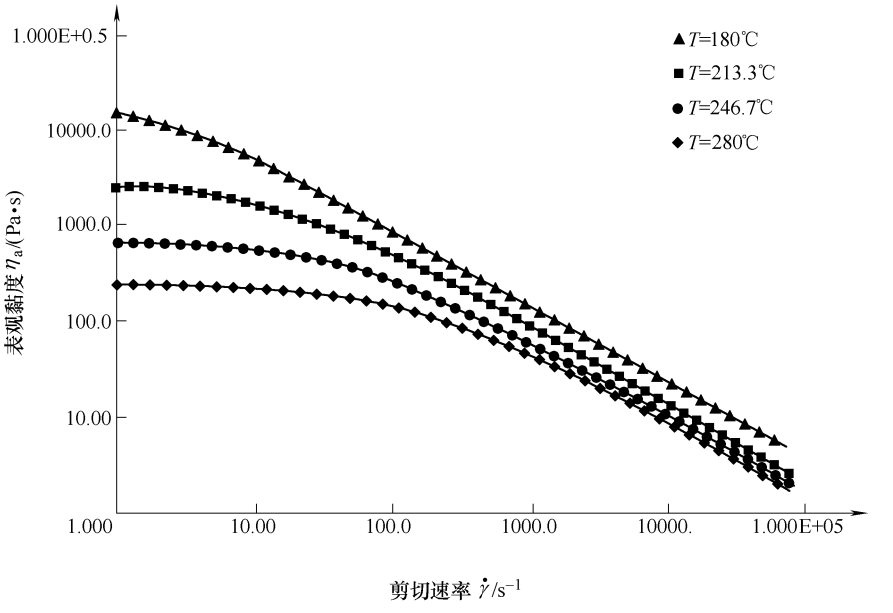


图 3-40　聚苯乙烯的表观黏度 η_a 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线

（MFI = 10g/10min，200℃）

聚苯乙烯的分子链刚硬，成型中容易产生分子取向和残余应力，甚至在制件中生成银纹和开裂。聚苯乙烯注塑件的冷却速度不宜过快（模具常用水冷却，模具温度为 40 ~ 45℃）。为此：模具温度应维持稳定，模具壁的温度分布均衡，其温差低于 ±2.5℃；并对制件进行退火处理，将制件放入 65 ~ 75℃热水中处理 1 ~ 4h，然后缓慢冷却至室温；而且聚苯乙烯不宜带有金属嵌件，嵌件周边塑料容易开裂；聚苯乙烯制件浇口的附近区域，内应力集中，容易产生各种缺陷，在注射模设计时，要注意优化浇口位置和类型。

聚苯乙烯塑料的成型收缩率为 0.3% ~ 0.7%，制件的弹性小，硬度高，脱模困难。为使制件顺利脱模，模具的型芯取较大的斜度 1° ~ 2°。

2. 聚丙烯塑料

聚丙烯为结晶型聚合物，吸水率很低，约为 0.03% ~ 0.04%，注射前一般不需要干燥，必要时可在 80 ~ 100℃下干燥 3 ~ 4h。

聚丙烯在 160 ~ 175℃有比较明显的熔点，分解温度为 350℃，所以注射成型的熔体温度较宽，约为 200 ~ 260℃。注射级的聚丙烯的熔体流动速率为 15g/10min 左右，熔体的流动性较好。一般料筒温度控制在 210 ~ 270℃，喷嘴温度可比料筒温度低 10 ~ 30℃。生产薄壁制品时可取较高的料筒温度；反之，生产大型厚壁制品时为防止熔料在料筒内停留时间过长而分解，料筒温度应适当低些。聚丙烯在 270 ~ 300℃以上的高温下，长

时间停留会有热降解的可能。

如图 3-41 流变曲线所示，聚丙烯的黏度对剪切速率的依赖性比温度影响大。因此，在注射充模时，提高注射速率和注射压力来改善熔体的流动性，比通过提高温度有利。尽管高温对提高熔体流动性影响不大。但可改善压力传递和补缩，有利于克服制件的凹陷，减小收缩在各位置和各方向的差异。一般采用的注塑压力为 70 ~ 120MPa。

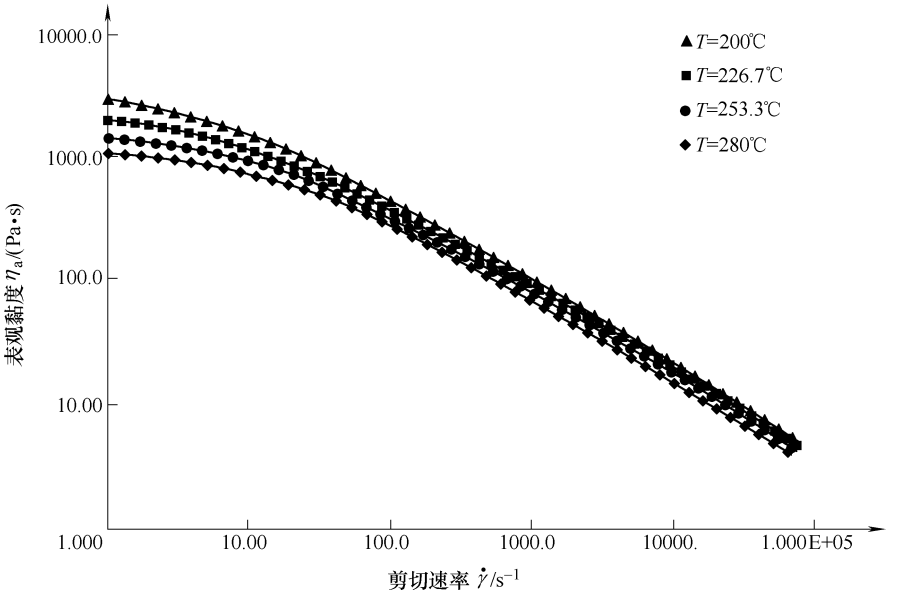


图 3-41　聚丙烯的表观黏度 η_a 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线

（MFI = 31. 6g/10min）

聚丙烯的结晶能力较强，120 ~ 130℃时具有最高的结晶速率，提高模具温度将有助于增加注塑件的结晶度。采用较高的模具温度 60 ~ 90℃，不仅有利于结晶，也有利于分子链的松弛，减轻制品的取向，并降低残余应力，从而改善制品的力学性能；但是由于冷却时间延长，影响了注射生产率。因此，只有在成型长流程和复杂制件或充模流动不佳时，才采用高模温。一般情况下，多维持 30 ~ 50℃的模具温度。倘若模具温度过低，注塑件冷却太快，浇口冻结过早，不仅制品的密度小，结晶度低，而且残余应力大，制品质量变差。制件冷却速度不仅影响结晶度，还影响晶体结构。骤冷时分子结构形态不稳定，力学和物理性能较差。聚丙烯注射模采用针点式小浇口时，成型制件的收缩率较大，因此，要以高温熔料注射弥补。采用矩形浇口，有中等截面，保证充分注射和补缩，降低制品的收缩。

由于聚丙烯的玻璃化转变温度低于室温，其制件在室温下存放中会有收缩现象。原因是聚丙烯注塑件在脱模后仍在结晶。制件的厚度越大，后期收缩量越大。后期收缩量

的 90% 约在制品脱模后 6h 内完成，剩余 10% 发生在随后的 10 天内。对尺寸稳定性要求较高的制件，应将制件在沸水中浸泡 10 ~ 15min，进行退火处理。

3. ABS 塑料

ABS 是丙烯腈-丁二烯-苯乙烯的三元共聚物。与聚苯乙烯相比，它具有较好的综合性能。丙烯腈赋予 ABS 较高的耐热性和表面硬度。但因极性的腈基易吸水，吸水率为 0. 2% ~0. 45%，表面吸水率可达 0. 3% ~0. 8%。所以 ABS 粒料成型前必须进行干燥处理。料斗干燥时，加热温度为 70 ~ 85℃，需 2 ~ 4h，使含水量降至 0. 1% 以下。如果对于制品有优良光泽要求，或在湿热的季节，干燥加热时间需长达 4 ~ 8h，还须防止已干燥的 ABS 再度受潮。

ABS 是无定形塑料，黏流态的成型温度范围较宽，比聚苯乙烯熔体有较高些的黏度，对流动剪切速率敏感（见图 2-10 的 ABS 流变曲线）。对薄壁和复杂的制件，注射生产时，采用较高的注射速率和压力；在注射成型时，常用 0. 6 ~ 1. 8mm 直径的针点式浇口。因此，其浇口冻结时刻的型腔压力决定了制品的质量。注射成型时，料筒温度在 190 ~ 250℃。提高 ABS 物料温度，熔体黏度降低很少。熔体注射温度高于 250℃，首先导致 ABS 中丁二烯降解，将会分解和产生有毒挥发物，物料变色甚至炭化。ABS 注射模的温度相对较高，在注射大型复杂制品时，需要有 60 ~ 80℃高温。通过改变 ABS 中各单体的组分的比例，有许多品种类别的 ABS，它们有不同的性能，加工的工艺条件也有差异，见表 3-33。

表 3-33　ABS 塑料螺杆式注射机成型工艺

种　　类	通用型	高流动型	电镀型	耐寒型	耐热型
料筒温度/℃	190 ~ 250	180 ~ 190	200 ~ 250	200 ~ 250	200 ~ 250
喷嘴温度/℃	190 ~ 220	170 ~ 180	200 ~ 220	200 ~ 220	200 ~ 220
模具温度/℃	40 ~ 80	40 ~ 80	40 ~ 80	40 ~ 80	40 ~ 80
注塑压力/MPa	70 ~ 110	60 ~ 100	70 ~ 110	70 ~ 110	70 ~ 110

成型后的注塑件，一般不需要热处理。如果注塑件要表面电镀装饰时，应在70 ~ 75℃空气介质中，视壁厚厚度处理 2 ~ 4h。以消除残余应力，得到装饰完好的制品。

ABS 塑料的成型收缩率较小，一般为 0. 4% ~0. 7%。ABS 塑料容易着色，可以注射成型各种色泽艳丽的制件。模具型腔经研磨抛光，达到镜面的表面粗糙度；采用适宜的注射工艺，较高的模具温度，可以得到高度光泽的制品。

4. 聚酰胺塑料

聚酰胺是指主链上含有大量重复酰胺键的塑料。其化学结构有差异，品种众多。其中聚酰胺 6、聚酰胺 66、聚酰胺 610 和聚酰胺 1010 应用较多。

聚酰胺在分子结构中因含有亲水的酰胺基，容易吸水。聚酰胺 6 吸水性最高；聚酰胺 66 次之；聚酰胺 610 的吸水率为聚酰胺 66 的一半；聚酰胺 1010 的吸水性最低。聚

酰胺 6 的吸水率在平衡状态为 1.3% ~3.0%。水分对这些塑料的物理性能有明显的影响。如果用已吸湿的聚酰胺物料注射成型，会引起熔体的黏度下降，使注塑件表面出现气泡、银丝和斑纹等缺陷，制品的内在质量和力学性能变差。在成型前必须将物料的含水量降至 0.2% 以下。干燥处理聚酰胺塑料时应防止氧化变色，最好用真空干燥，脱水率高而时间短。干燥条件为：真空度 9.3×10^5Pa，烘箱温度 90 ~ 110℃；料层厚度 25mm 以下，干燥时间 8 ~ 12h；常压下干燥空气温度要低些，干燥时间增加。干燥处理后的塑料即时加盖，雨天的存放时间不超过 1h，晴天限制在 3h 内。如果采用沸腾干燥方法，见表 3-20；料斗式干燥见表 3-21。

聚酰胺为结晶型塑料，有明显的熔点，视不同品种而异，大致在 200 ~ 270℃。聚酰胺的熔融温度较高，而其范围较窄，约 10℃ 左右，如图 3-42 所示（PA6 的流变曲线）。而且，提高熔体流动剪切速率时，对其黏度下降影响较小。采用螺杆式注射机，料筒温度比其熔点高 10 ~ 30℃，因此，应采用压缩段较短的突变螺杆。聚酰胺熔体的黏度低，有很大的充模流程比。为防止螺杆注射推进时发生过多漏流，螺杆头部应有滑动式止逆环。熔料也容易在注射模中泄漏，溢料会在制件上生成飞边，所以要求注射模上运动零件的配合间隙要很小。为防止喷嘴口熔体流涎，可用阀式喷嘴，一般用外弹簧针式自闭喷嘴为好。而且熔体的热稳定性差，容易分解，生产中料筒的加热温度不宜超过 300℃，熔料加热时间不要超过 30min。几种聚酰胺塑料在螺杆式注射机的注射成型工艺参数见表 3-34。

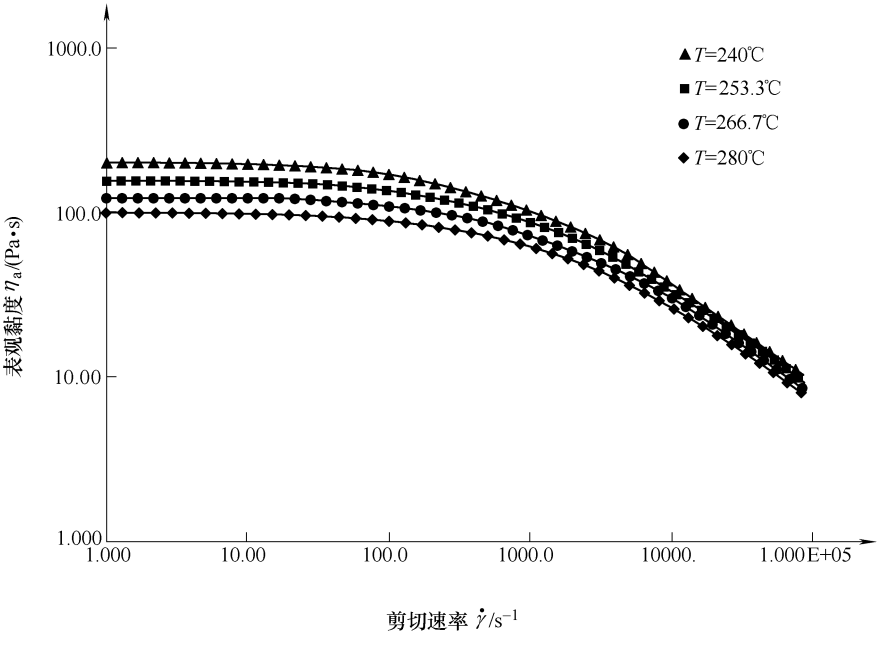


图 3-42　聚酰胺 6 （PA6） 的 η_a 与 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线

（MFI = 50g/10min，235℃）

表 3-34　几种聚酰胺塑料螺杆式注射机的注射成型工艺参数

类　　别	聚酰胺 6	聚酰胺 66	聚酰胺 610	聚酰胺 1010
熔点/℃	210 ~ 215	250 ~ 260	215 ~ 225	205 ~ 210
真空干燥温度/℃	100 ± 5	100 ± 5	90 ~ 100	100 ± 5
干燥时间/ h	15 ~ 25	16 ~ 24	14 ~ 16	8 ~ 12
料筒温度/℃	220 ~ 250	260 ~ 290	230 ~ 260	210 ~ 230
喷嘴温度/℃	215 ~ 240	260 ~ 280	225 ~ 255	205 ~ 225
模具温度/℃	60 ~ 80	40 ~ 100	40 ~ 100	40 ~ 100
注塑压力/MPa	40 ~ 140	40 ~ 140	70 ~ 140	40 ~ 100
成型收缩率/ %	1. 5	1. 5 ~ 2. 2	1. 5 ~ 2. 0	1. 0 ~ 2. 5

模具温度（通常控制在 40 ~ 100℃）对制品的物理和力学性能影响较大。模温高时结晶度高，制品的硬度、耐磨性、刚性和耐热等性能提高；模温低时，结晶度低，制品的拉断伸长率、韧性和透明性较好。一般应控制模具温度，使制品有适宜的结晶度，从而得到较好的综合性能。模具温度还取决于注塑件的壁厚。厚壁制品应有较高模具温度，而且还能减小残余应力。为此，注射模同时兼备有冷却和加热的温度调节装置。

聚酰胺注塑件在脱模后尺寸不稳定。搁置或退火处理能使它发生收缩，而吸湿则会引起膨胀。按照机械零件的精度要求，进行退火处理和/或调湿处理。对于使用温度高于 80℃，或精度要求较高的聚酰胺制品需退火处理。聚酰胺制品退火处理在隔氧条件下进行，将制品放在热油、液体石蜡或充氮炉中，在 100 ~ 120℃温度下处理一定时间，按厚度需 10 ~ 60min，然后缓慢冷却至室温。聚酰胺的调湿处理见 3. 2. 3 的制件后处理一节所述。调湿要用热水处理，加快达到吸湿平衡，也隔绝空气防止氧化，同时也起到退火作用。

5. 聚碳酸酯塑料

聚碳酸酯是刚硬又有韧性的工程塑料。但其制品易发生环境应力裂纹，难以带金属嵌件注射成型。用于注射成型的聚碳酸酯相对分子质量常为 2 万 ~ 4 万。聚碳酸酯的热稳定性和力学强度随相对分子质量的增加而提高。其熔体黏度也随着相对分子质量的增加而加大。

聚碳酸酯主链上有亲水的酯基，容易吸水分解。在高温下对水分很敏感，微量水分也会造成聚碳酸酯水解，相对分子质量下降，性能劣化，所以在成型前必须严格干燥。可采用沸腾干燥（温度 120 ~ 140℃，时间 1 ~ 2h）、真空干燥（温度 110℃，真空度 9.5×10^5Pa，时间 10 ~ 25h）。干燥后的含水量应小于 0. 02% 。注射时最好用注射机料斗式干燥器再干燥。物料的干燥程度不足，对空注射时从喷嘴流出的条料表面不光亮，内部夹有气泡。干燥程度很差时，深色的熔料黏度很低，并有分解气体喷出。干燥合格的喷出条料应均匀光亮，无细丝和气泡。

聚碳酸酯属于无定形塑料，其玻璃化转变温度较高，为 149 ~ 150℃，其黏流态温度在 220 ~ 240℃。由于主链上刚性的苯环存在，熔体的黏度比聚苯乙烯高很多，而且其流动特性接近牛顿流体（见图 3-43）。聚碳酸酯有较高的热稳定性和很宽的成型温度范围。熔体黏度受剪切速率的影响较小，但对温度的变化十分敏感，因此，在注射成型

时，通过提高温度来降低黏度，比增大压力更有效。

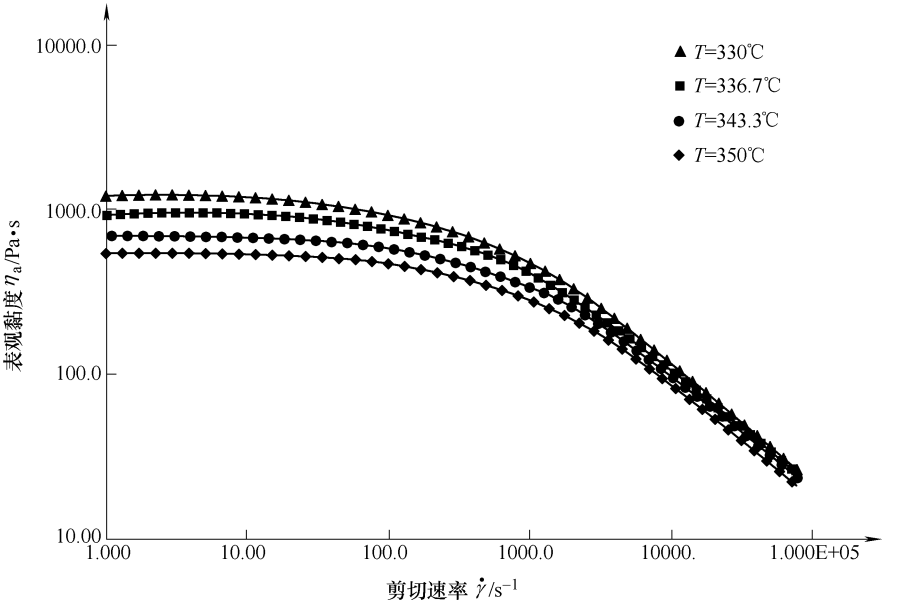


图 3-43　聚碳酸酯的表观黏度 η_a 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线

（MFI = 10g/10min，330℃）

成型温度的选择与聚碳酸酯的相对分子质量、制件的壁厚和注射机的类型等有关，一般控制在 250 ~ 310℃范围内。注射成型应选用相对分子质量稍低物料，其熔体有较好的流动性，但制品的韧性会有所降低。为保证薄壁制件型腔内的充模流动性，应有较高的成型温度（285 ~ 310℃）。螺杆式注射机的成型温度为 250 ~ 285℃，柱塞式的为 270 ~ 310℃。两类注射机的喷嘴均应加热，温度为 260 ~ 310℃。加料口一端的料筒温度要求高于 230℃，应在聚碳酸酯的软化温度以上，以提高物料升温塑化的速率。

聚碳酸酯熔料的黏度很高，成型长流程和薄壁的复杂注塑件需要较高的注射压力。螺杆式注射机为 80 ~ 130MPa，柱塞式为 100 ~ 160MPa。选用高料温和低压力有利于减少成型制件内的残余应力。由于聚碳酸酯的成型收缩率较小，保压时间不应过长，以免制件脱模困难、出现应力开裂。

聚碳酸酯注射模的模具温度为 80 ~ 120℃。对薄壁制件模温为 80 ~ 100℃，对厚壁制件成型的模温为 100 ~ 120℃。成型聚碳酸酯的注射模，应该备有加热装置（用热油循环或用电热棒或电热板）。较高的模温可减小注塑件中的温差残余应力，但延长了注射周期。金属嵌件在放入模具前，要预热到模具温度。

聚碳酸酯制品内的残余应力可通过退火处理基本消除。退火加热温度为 100 ~ 130℃，处理时间视制件的厚度而定，以 1 ~ 2h/mm 计，保温 2 ~ 8h。热处理时间对制件的性能影响显著，如图 3-44 所示。其硬度、弯曲强度、热变形温度和拉伸屈服极限都有提高；但是制件的冲击强度和断裂伸长率会有下降，不过在保温 2h 之内并

不明显。

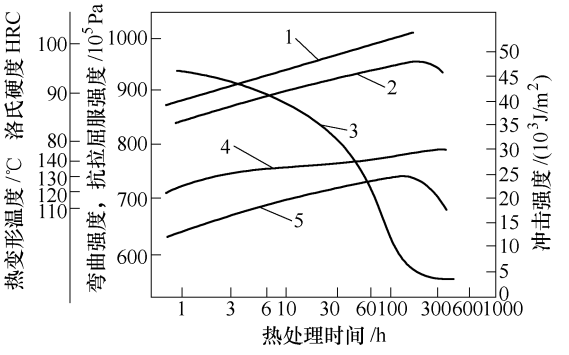


图 3-44　热处理时间对聚碳酸酯制件性能的影响

1—洛氏硬度（120℃）　2—弯曲强度（130℃）　3—冲击强度（130℃）

4—热变形温度（130℃）　5—拉伸屈服极限（130℃）

参 考 文 献

[1] 北京化工大学，华南理工大学. 塑料机械设计［M］. 2 版. 北京：中国轻工业出版社，1995.

[2] 黄虹. 塑料成型加工与模具［M］. 北京：化学工业出版社，2003.

[3] 刘来英. 注塑成型工艺［M］. 北京：机械工业出版社，2004.

第 4 章　注射模具的基本结构

本章介绍三种典型注射模具的工作原理和基本结构，描述注射模具设计的基础知识，陈述注射模的分型面和排气的设计、合模导向机构设计和选用、注射工艺参数的校核及模具制造材料的选用，从而了解注射模具设计的过程。

4.1　注射模具的结构

注射成型模具是用闭合和开启的型腔，成型一定形状和尺寸塑料制品的工具。本节介绍单分型面、双分型面和侧向分型抽芯三种典型的注射模结构。

4.1.1　注射模具的结构组成和分类

1. 注射模的结构组成

凡是注射模，均可分为动模和定模两大部件。注射充模时，动模与定模闭合，构成型腔和浇注系统；开模时，动模与定模分离，取出制件。定模安装在注射机的固定板上；动模则安装在注射机的移动模板上。

图 4-1 为典型的单分型面注射模。根据模具上各个零部件的不同功能，可由以下七个系统机构组成。

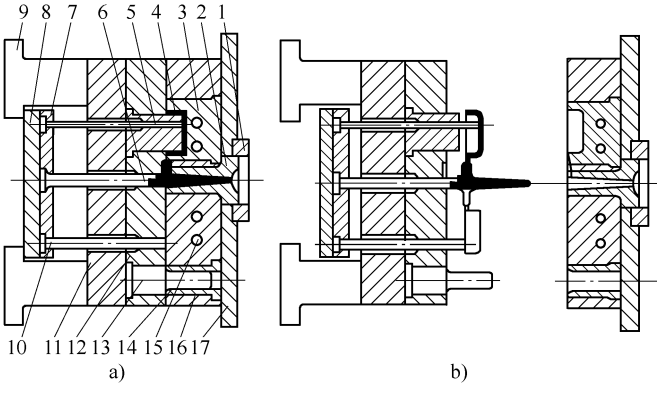


图 4-1　单分型面注射模

a）闭合充模　b）开模取件

1—定位环　2—主流道衬套　3—凹模　4—型芯　5—顶杆　6—拉料杆　7—顶出固定板
8—顶出板　9—动模座　10—回程杆　11—动模垫板　12—动模板　13—导柱
14—导套　15—冷却水管道　16—定模板　17—定模安装板

（1）成型零件　指构成型腔，直接与熔体相接触并成型塑料制件的零件。通常有凸模、型芯、成型杆、凹模、成型环、镶件等零件。在动模和定模闭合后，成型零件确定了注塑件的内部和外部轮廓和尺寸。图 4-1 所示模具的型腔是由凹模 3、型芯 4 和动模板 12 构成的。

（2）浇注系统　将塑料熔体由注射机喷嘴引向型腔的流道称为浇注系统，由主流道、分流道、浇口和冷料井组成。图 4-2 为单分型面注射模上的浇注系统。

（3）导向与定位机构　为确保动模和定模闭合时，能准确导向和定位对中，通常分别在动模和定模上设置导柱和导套。深腔注射模还必须在主分型面上设有锥面定位。有时为保证脱模机构的准确运动和复位，顶出固定板 7 和顶出板 8 也设置导向零件。

（4）脱模机构　是指在开模过程的后期，将注塑件从模具中脱出的机构。图 4-1 中脱模机构由顶杆 5、拉料杆 6、顶出固定板 7、顶出板 8 及回程杆 10 组成。

（5）侧向分型抽芯机构　带有侧凹或侧孔的注塑件，在被脱出模具之前，必须先进行侧向分型或拔出侧向凸模或抽出侧型芯。

（6）温度调节系统　为了满足注射工艺对模具温度的要求，模具设有冷却或加热的温度调节系统。模具冷却，一般在模板内开设冷却水道；加热则在模具内或周边安装电加热元件。有的注射模须配备模具温度自动调节装置。

（7）排气系统　为了在注射充模过程中将型腔内原有气体排出，常在分型面处开设排气槽。小型腔的排气量不大，可直接利用分型面排气，也可利用模具的顶杆或型芯与配合孔之间间隙排气。大型注射模必须设置专用排气槽。

单分型面注射模也称两板式注射模，见图 4-1。单分型面注射模的主流道设在定模一侧，分流道设在分型面上，开模后制件连同流道凝料一起留在动模一侧。动模上的脱模机构顶出制件和流道凝料，在打开的动模和定模之间，取走注塑件和流道凝料。在模具重新闭合时，一般有回程杆 10 使脱模机构复位。

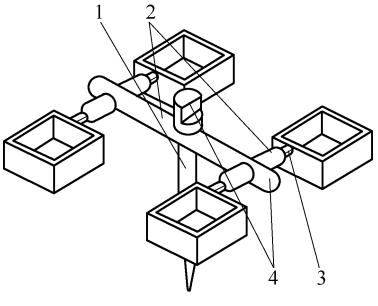


图 4-2　单分型面注射模的浇注系统

1—主流道　2—分流道
3—矩形浇口　4—冷料井

2. 注射模的分类

（1）按塑料品种分类　注射成型最早用于热塑性塑料制品加工，特别是大量地用于工程塑料的成型。目前，热固性塑料和橡胶也已大量应用注射模生产制品。它们需用专门的注射机进行塑化。物料注射至模具后，在较高的温度下进行交联固化定型。低发泡塑料注射成型，是在塑料中加入一定量的发泡剂，在低发泡注射模的型腔内发泡膨胀后固化成型。聚氨酯等几种塑料可用反应注射方法成型。流动性好的反应液在模具内固化迅速。反应注射模是一种成型周期短，生产率高的注射模。共注射模具是以不同塑料或不同着色，分先后二次注射于模具内。注射成型对各种黏流态塑料有良好的适应性。黏流态塑料有不同的流动性，在型腔内的物理和化学固化成型过程也不同。因此，各种物料的注射模的结构各有其

特点。

（2）按模具型腔容量分类　一般将模具型腔容积 3000cm^3 以上，模具质量大于 2t，需锁模载荷约 600t 以上的注射模称大型注射模。大型注射模的设计制造难度高，价格昂贵，必须慎重考虑塑料熔体流动性、模具的力学特性和温度调节系统。习惯上，又把模具型腔容积在 100cm^3 以下的注射模划为小型。介于两者之间为中型注射模。

（3）按注射件尺寸精度分类　模塑过程中，注塑件成型收缩率很难稳定地控制。高精度的注塑件生产涉及众多因素，是综合性技术难题。近年来在大批量生产中，电子、电器、仪表、照相机等精密产品里，接插件、齿轮、支架板等塑料零件的精密注射技术有所进展。由此将中小型注射模中，成型精密级注塑件的模具称为精密注射模。这类模具能生产的精密注塑件，尺寸公差应达到 SJ/T 10628—1995 中的 1 ~ 2 级精度，达到 GB/T 14486—2008 中的 MT2 ~ MT3 级精度（大致相当于金属件的公差配合标准 GB/T 1800. 2-2009 中的 IT8 ~ 9 级精度）。精密注射模成型零件的加工精度达到 IT6 ~ 7 级，且型腔表面达到镜面。

（4）按注射模总体结构分类　最常用的分类方法是按注射模总体结构分类。注射模结构取决于注塑件的复杂程度及其浇注系统不同类型，主要有以下七种典型结构。

① 单分型面注射模具；

② 双分型面注射模具；

③ 带有活动镶件的注射模具；

④ 侧向分型抽芯注射模具；

⑤ 机动卸螺纹注射模具；

⑥ 热流道注射模具；

⑦ 叠式注射模具。

（5）按模具成型型腔数目分类　按模具成型型腔数目可分成单型腔和多型腔注射模。对小尺寸大批量生产的注塑件，一模多腔注射成型，成倍地提高生产率，已经实现一次成型 32 个或 64 个瓶盖制品注塑。另外，还有一次成型几个不同制品的多型腔注射模。

除上述五种分类方法外，还可按所安装注射机类型分成立式和卧式注射机用的注射模，或角式注射机上用的注射模。

4. 1. 2　双分型面注射模具

双分型面注射模系泛指浇注系统凝料和制品由不同分型面取出。此类注射模亦称三板式注射模，如图 4-3 所示。与单分型模具相比，在定模边增加了一块可往复移动的型腔板 13。此板也称为型腔中间板或流道板，多用于针点浇口的单型腔或多型腔模具。开模 A 面分型时，型腔板与定模板作定距分离，供人工取出或自由下落浇注系统凝料；B 面分型时，型腔板 13 与脱模板 5 相互分离，然后再由脱模机构顶出板 9、顶杆 11 和脱模板 5，将注塑件从型芯上脱出。

点浇口是直径 1mm 左右、长约 0. 6mm 的塑料圆柱。采用点浇口可以把制品和浇注

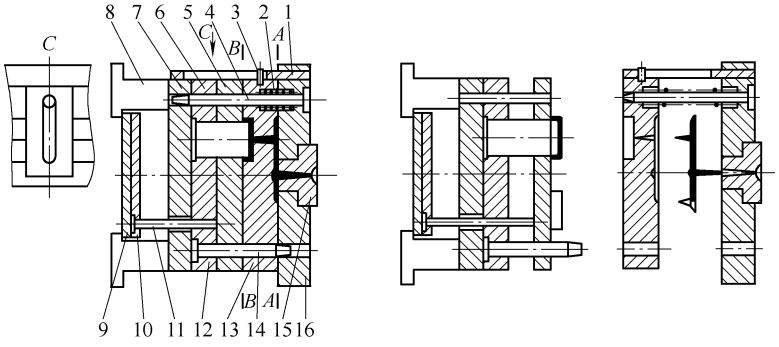


图 4-3　双分型面注射模

a）闭合充模　b）开模取出塑件和浇道凝料

1—定距拉板　2—压缩弹簧　3—限位销钉　4—导柱　5—脱模板　6—型芯固定板
7—动模垫板　8—动模座　9—顶出板　10—顶出固定板　11—顶杆　12—导柱
13—型腔板　14—型芯　15—主流道衬套　16—定模板

系统的凝料在模内分离。为此应该设计浇注系统凝料的脱出机构，保证将点浇口拉断，还要可靠地将浇注系统凝料从定模板或型腔板上脱离。

此种模具的结构较复杂，模板有顺序动作过程，而且浇注系统凝料较多。如果将流道加热，在定模中设置加热的流道板和顶针浇口的喷嘴，将演变成热流道注射模。

4.1.3　侧向分型抽芯机构

侧向分型与抽芯机构简称为侧抽机构，用来成型具有外侧凸起、凹槽和孔的注塑件，成型壳体制品内侧的局部凸起、凹槽和盲孔。注射模侧抽机构的运动零件多，动作复杂。本节主要描述斜导柱机械力驱动的侧抽机构。

1. 外侧分型

外侧分型注射模是以两个对合滑块，来成型注塑件整个侧向外形，也称瓣合模。图 4-4 是一组典型的外侧分型注射制品。

图 4-4 上所示的外形对称的注塑件，侧向分型面必须经过中心线。瓣合模成型的注塑件在外形上会留下拼合缝。因此在模具的使用期内，应保证侧滑块的拼合精度和足够的侧向压力。螺纹管接头制件上明显的拼合缝影响旋合联接功能。对笔套类塑件，唯一可取的侧向分型面必须设在弹性夹头的最高凸起处。

如图 4-5 所示，斜导柱驱动的侧向分型机构由斜导柱、滑块、导滑槽、定位装置和锁紧楔组成。在动模一侧的成型滑块，装在动模板上的导滑槽内，滑块上的导轨在导滑槽内可精确地往复运动。在定模边固定有与开模方向成倾角 α 的斜导柱，它与滑块上的斜孔成大间隙动配合。开模时滑块在斜导柱上滑动，由侧向分力驱动滑块进行侧向分型。滑块脱离斜导柱后，定位装置对滑块起定位和固定作用，以使斜导柱在合模时能再

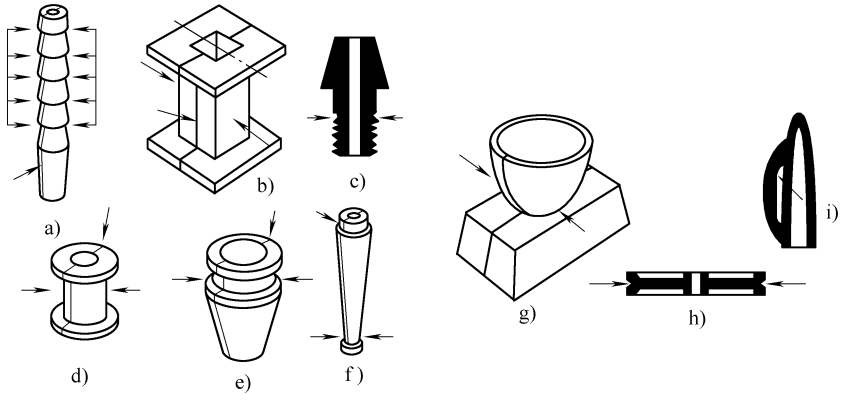


图 4-4　需外侧分型的注塑件

a）管接头　b）方形骨架　c）螺纹管接头　d）圆筒骨架　e）接头
f）管轴杆　g）蛋杯　h）带轮　i）笔套

次对准插入。在合模中，斜导柱有一与前相反的复位分力，驱使滑块回复。斜导柱不能承受熔体充模时很大的侧压力，故要用锁紧楔紧压滑块于成型位置，保证注塑件的尺寸精度，防止产生溢料。斜导柱与斜孔有较大间隙，在合模时便于插入；在注射时避免与锁紧楔干涉；在开模时让锁紧楔先行脱离与滑块斜面的接触。

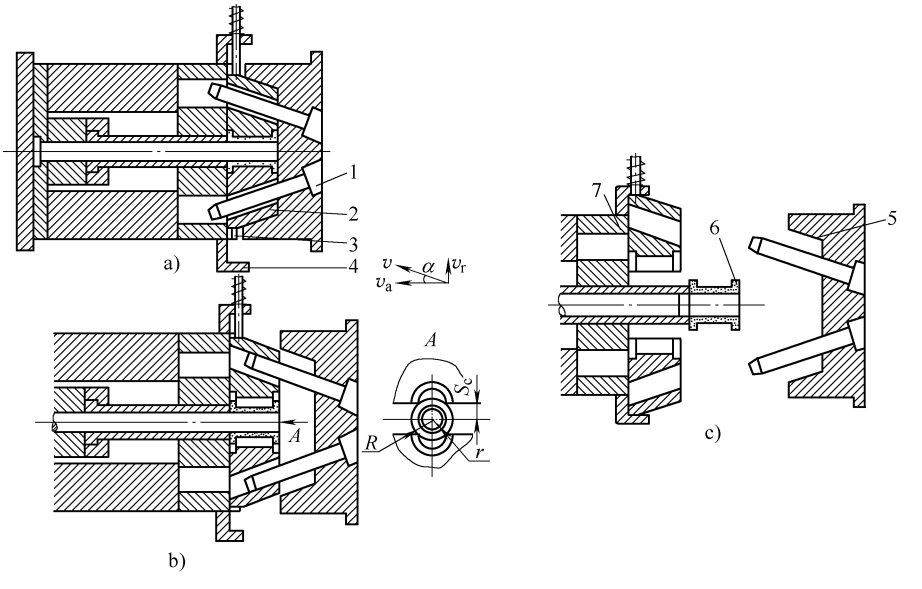


图 4-5　斜导柱驱动的侧向分型注射模

a）合模状态　b）开模过程　c）开模终止
1—斜导柱　2—侧向成型滑块　3—导滑槽　4—定位装置　5—锁紧楔
6—圆筒骨架注射件　7—动模

在开模时，滑块以速度 v 沿斜导柱轴线方向运动。它是动模于开模方向的牵连运动 v_a，和滑块在动模导滑槽中相对运动 v_r 的合速度，如图 4-5b 所示。其 v 和 v_a 速度矢量的夹角为斜导柱的安装倾角 α，故滑块侧向抽拔速度

$$v_r = v_a \tan\alpha \tag{4-1}$$

又如图 4-5 所示，侧滑块的抽拔距是指从成型位置起始，到滑块移至的不妨碍注塑件脱模顶出的位置。临界抽拔距 S_c 定义为：侧滑块与注塑件外形在模板上的投影不相重合的移动距离。而实际抽拔距 S，应计入安全余量和误差补偿量 2 ~ 3mm。

随着斜导柱安装倾角 α 增大，抽拔距 S 增大，但是所需的开模力和斜导柱受到的法向作用力也随之增大，会造成模具无法开启，并存在斜导柱折断的危险；此时抽拔速度过快，还会损伤注塑件。然而，倾角 α 过小，会使斜导柱机构处于自锁状态而不能开模。所以斜导柱倾角 α 在 12° ~ 25°比较适宜。

斜导柱驱动的侧向分型与抽芯机构由五个零部件所组成。它们是滑块、导滑槽、斜导柱、定位装置和锁紧楔。

（1）滑块和导滑槽　滑块上的成型表面是型腔的组成部分，应该用优质塑料模具钢制成并经抛光。小型滑块可采用整体式；但较大滑块大多用组合式结构。

滑块常用 T 型槽导向，加工方便且刚性好。构成导滑槽的压板或导轨以采用组合式为佳，这样便于使用高硬度淬火钢。摩擦表面应有 40HRC 以上的硬度。滑块的导轨和导滑槽应有足够的制造精度，保证滑块在使用期限内运动平稳，无上下窜动和卡滞现象。滑块在抽拔后，滑块外伸于导滑槽外过长，会因自重产生歪斜，影响闭模时斜导柱插入。所以滑块停留在导滑槽内的长度，应大于滑块导轨长度的三分之二。

（2）斜导柱　斜导柱由滑动段和固定段组成，紧固在定模板中。斜导柱安装倾角 α 和滑动段长度决定了侧向抽拔距。注射机的开模方向行程距离要保证滑块脱离斜导柱。斜导柱用高碳钢淬火保证硬度，并有足够直径保证弯曲强度。

（3）锁紧楔　又称压紧楔。它在注射过程中，使侧滑块将型腔紧密闭合，所以要求有足够的刚性。它可利用定模板直接加工出锁紧楔（例如图 4-5 注射模上的锁紧楔），称整体式。它能承受较大侧压力，但需要大厚度的定模板，切削耗钢多。如图 4-7 注射模上的锁紧楔，镶嵌在定模板中，结构紧凑且牢靠，刚性也好。它应该用淬硬钢制造，但需要较大的定模板面积。装配式的锁紧楔依靠螺钉和定位销固定，螺钉承受很大拉力。其加工和修配容易，但刚性差，易松动。为此，有时采用里外双重锁紧来保证刚性。锁紧楔的许用变形量小于 0.05mm。锁紧楔角 α' 应大于斜导柱的安装倾角 α，$\alpha' = \alpha + (2° \sim 3°)$。以使在开模瞬时，先脱离侧滑块。

（4）定位装置　为保证滑块在抽拔后停留在准确位置上，机构必须有定位装置。该装置如图 4-5 和图 4-7 所示，常用挡块、钢珠或球头柱销定位。定位后还需用弹簧或自重来固定滑块。定位表面应有较高的硬度和精度。

2. 外侧抽芯和局部型腔成型

图 4-6 上所示为具有侧面孔、凸起或凹槽的各种塑件。其中 a ~ f 注塑件必须从侧向抽出成型型芯。其临界抽拔距 S_c 等于孔的深度。其侧向抽拔力可用 8.3 节薄壁或厚

壁注塑件脱模力计算式求得。图 f 注塑件侧面凸起数字和图 g 塑件侧面凹槽，必须用侧滑块从外侧局部成型。其 S_c 等于凸起高度或槽的深度。

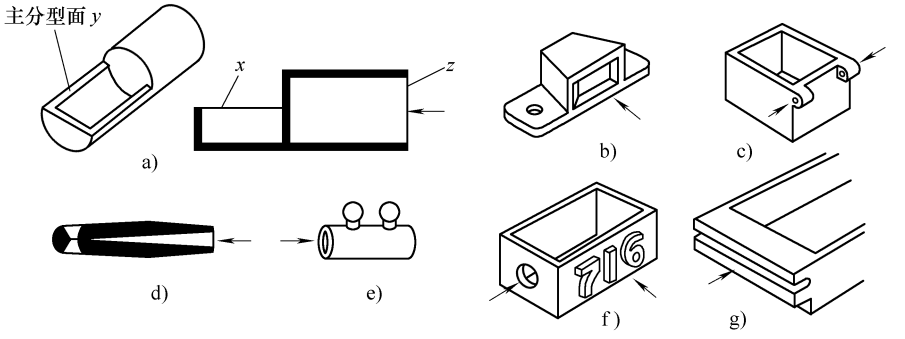


图 4-6　需外侧抽芯和局部型腔成型的注塑件

a）侧圆孔　b）侧槽支架　c）盒盖支承侧孔　d）长锥孔　e）筒侧孔
f）盒侧壁上凸字　g）盒侧壁上凹槽

图 4-7 所示是最常见的斜导柱驱动的外侧抽芯或局部型腔成型的注射模。斜导柱固装在定模上，滑块装在动模上。侧抽芯机构必须在开模方向，圆筒注塑件脱模之前完成抽拔动作，还必须在闭模过程中让机构复位。在模具的侧滑块领先复位过程中，顶杆或顶管还尚未退到闭模位置，以致滑块与它们相撞产生干涉现象。当然，可让顶出零件安排在不干涉的位置，由回程杆与定模相碰后，驱动顶杆等脱模机构零件复回。但有时无法避免两者在主分型面上投影的重合。

图 4-8 所示为产生干涉的几何条件。所示的复位位置是侧型芯与某个顶杆在同一侧平面上。Δl 为侧型芯与顶杆在主分型面上重合的侧向距离。Δh 是顶杆端面与侧型芯在开模方向的最近距离。当

$$\Delta l > \Delta h \tan\alpha \qquad (4\text{-}2)$$

时会产生干涉。两者重合距离 Δl 过大，侧型芯过低即 Δh 较小，容易发生干涉。在判断会产生干涉现象时，则须采用先复位机构。弹簧式先复位机构将压缩弹簧安装在顶杆固定板和动模底面之间。顶出注塑件时弹簧受压。一旦合模，在弹簧力作用下脱模机构立即复位。但弹簧力作用有限，仅适用于立式和小型注

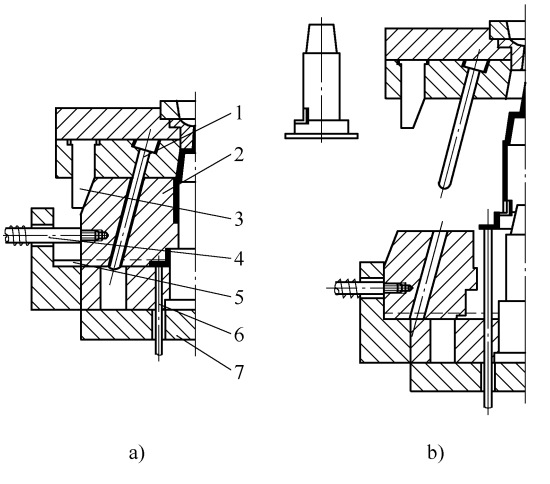


图 4-7　斜导柱驱动外侧抽芯的注射模

a）合模状态　b）开模侧抽芯和顶出状态
1—斜导柱　2—侧向抽芯滑块　3—锁紧楔　4—定位装置
5—导滑槽　6—顶杆　7—动模

射模。较大的注射模，须利用装在顶杆固定板上的铰链、杠杆或三角滑块，合模时定模给以碰撞压力，迫使脱模机构领先侧抽滑块复位。

3. 内侧局部型腔成型

注塑件内表面上的凸起、凹槽和盲孔，依靠向内侧抽拔的滑销或滑块成型。它们是成型型芯的一部分，但其运动受到空间条件限制。图 4-9 所示是直线机动顶出注塑件，而后由人工侧拉脱模。这种侧向抽拔，只适用于内侧表面单向的局部成型要求。图 a 为内滑销成型，在开模时侧拉注塑件，在制品的内侧面上有拼合缝。图 b 为用内滑块成型单侧内表面凸凹槽全长，拼合缝在另外两个内侧面上。在开模时将镶块与注塑件一起从动模上取出。在模外的侧向抽芯，镶块返回模具。另一种是注塑件圆孔中整个周边均有凸或凹槽时，在设计注塑件时就应考虑强制脱模。因为这类注塑件不能内侧抽。

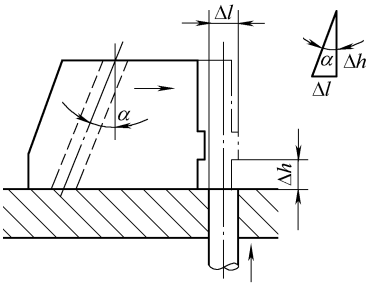


图 4-8　产生干涉的几何条件

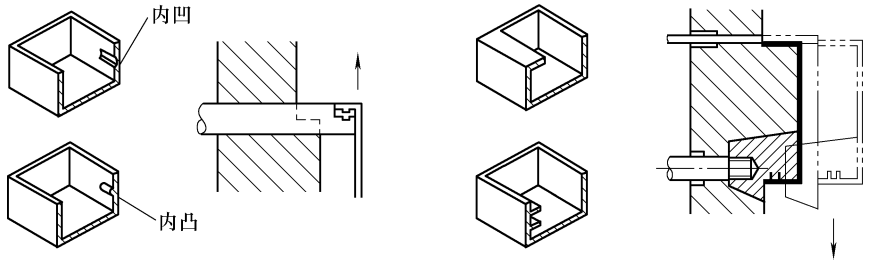


图 4-9　机动顶出后人工侧拉

a）滑销内侧成型　b）滑块内侧成型

如果几个方向有多个内侧成型，必须用倾斜运动的斜顶杆或滑块来实现完全机动的侧向抽拔。此种机构复杂，设计制造困难。

图 4-10 为较常见的一种内侧抽芯的斜顶机构，称为斜顶杆与铰链联接的内侧抽机构。如图 4-10 所示，斜顶杆 4 的头部有成型制品的内侧凹。斜顶杆安装在主型芯 7 中开设的斜孔内。斜顶杆下部装有铰链。在脱模顶出过程中，由铰链座的推顶，使斜顶杆的头部向模具中

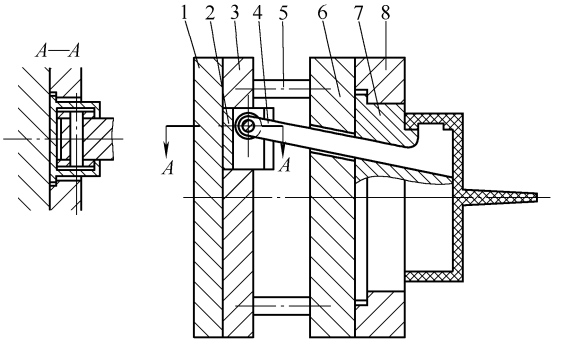


图 4-10　斜顶杆与铰链联接的内侧抽机构

1—顶出板　2—滑座　3—顶出固定板　4—斜顶杆　5—复位杆　6—动模垫板　7—动模主型芯　8—型芯固定板

心靠拢。注塑件在脱离主型芯的同时完成斜顶杆头部的侧抽动作。铰链座夹固在顶出板和顶出固定板之间。有的在斜顶杆的头下端装滚柱。

4.1.4 型腔压力分析

型腔压力是注射模设计时各项计算的依据。在浇注系统设计、模腔壁厚和垫板的强度与刚度计算、型芯的偏移和变形计算、所需锁模力校核等运算中，要将型腔压力作为已知条件。型腔压力大小会影响开模力和脱模力，是决定注塑件质量的重要因素。型腔压力的分布和变化与温度一起，将决定固化后注塑件的密度和密度分布。借助注射模CAE/CAD的有限元分析软件进行型腔压力的计算机模拟；借助模具型腔压力的测定进行注射机参量的自动调节控制，能实现理想的注射成型工艺。但是由于昂贵的设备和技术难度，难以普遍实行。

1. 型腔压力要求

1）注射充模时，要保证熔体具有合理的剪切速率。塑料熔体在模具的通道间隙中剪切速率应为 $10^2 \sim 10^4 s^{-1}$。过低充模速率会使熔体流动性变差；过高的剪切速率，在型腔内会出现湍流或涡流，会产生熔体喷射并且破碎，将成型废次的注塑件。熔体在模内流动应是雷诺数很低的层流。

2）要保证型腔的充模压力。塑料熔体的压力传递能力较差，经各流程的流道和浇口，压力逐渐下降，会使注射到注塑件型腔的熔体压力不足。进入型腔的熔体压力应有 $(250 \sim 500) \times 10^5 Pa$。为此，一方面浇注系统的流道要有足够的截面尺寸；另一方面注塑件型腔流程不能太长太窄，致使料流末端压力不足，造成塑料制品密度低、收缩率大，严重的甚至不能注满，因此，必须由各种塑料熔体的流程比来校核塑件的壁厚。

2. 型腔压力分布

广义的型腔压力是模内塑料熔体流经位置和时间的函数。型腔压力分布链的位置状态，如图4-11所示。主流道末端具有最大的分型面上的压力 p_A。浇口处具有注塑件型腔的最大压力 p_B（两处常是压力测定点）。喷嘴出口处的压力 p_Z，是模具浇注系统压力的源头。在双分型注射模的型腔板上，浇注系统较复杂且流程长。从 p_Z 至 p_B 有较大浇

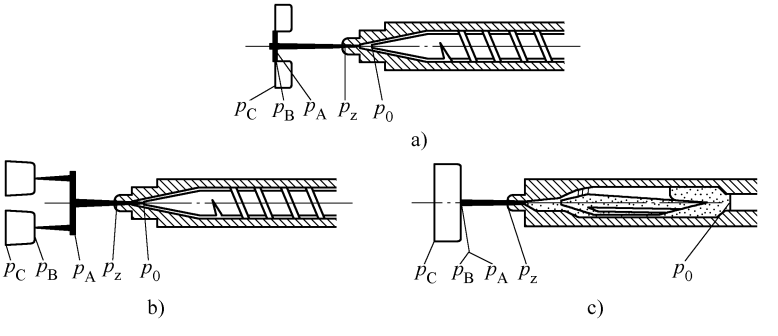


图4-11 型腔压力分布链示意图

a）单分型面注射模 b）双分型面注射模 c）柱塞式料筒与单分型面注射模

注系统压力降 Δp_r。熔流末端压力 p_e 倘若过低则会影响注塑件质量，甚至不能注满，故熔体末端压力 $p_e \geqslant 10 \sim 25\text{MPa}$。注塑件型腔的压力从 p_Z 降至 p_e 为模腔压力降 Δp_c。若型腔流程的截面较简单，可用流变学压力降公式估算。

型腔压力的源头是注射压力 p_0，它可由每台注射机的油压表上读出的最大值 p_i 换算得到

$$p_0 = p_i \left(\frac{D}{d_S}\right)^2 = p_i \left(\frac{p_{max}}{p'}\right) \tag{4-3}$$

式中　p_0——调用的注射压力（MPa）；

D——注射液压缸活塞直径（mm）；

d_S——注射螺杆或柱塞直径（mm）；

p_{max}——注射机的最大注射压力（MPa）；

p'——注射机液压泵的额定油压（MPa）；

p_i——注射过程中油压表上的最大值，即表压（MPa）。

由图 4-11a 和 b 图可知，螺杆头处 p_0 至喷嘴 p_Z 间存在压力降 Δp_Z。Δp_Z 是圆管中的非牛顿流变的压力降，按照第 2 章式（2-18b），喷嘴为圆柱孔道，其压力降计算式为

$$\Delta p_Z = \left(\frac{4}{\pi}\right)^n \frac{2K'Q^n L_Z \times 10^4}{R_Z^{3n+1}} \tag{4-4}$$

式中　Δp_Z——塑料熔体流经注射机喷嘴的压力降（Pa）；

n——塑料熔体非牛顿指数，$n < 1$；

K'——熔体剪切黏度系数（$\text{N} \cdot \text{s/cm}^2$）；

Q——熔体流经喷嘴的体积流量（cm^3/s）；

L_Z——喷嘴长度（cm）；

R_Z——喷嘴半径（cm）。

［例］　PP 熔体的温度 $T_m = 240℃$，注射时计量容积 $V = 427\text{cm}^3$，注射时间 $t = 2.4\text{s}$。经注射机喷嘴的剪切速率 $\dot{\gamma} = 10^4 \sim 10^5 \text{s}^{-1}$。喷嘴内半径 $R_Z = 0.275\text{cm}$、长 $L_Z = 2.0\text{cm}$。计算 PP 熔体流过喷嘴的压力降 Δp_Z。

［解］　流经喷嘴的熔体体积流量

$$Q = \frac{V}{t} \tag{4-5}$$

代入已知条件计算得 $Q = 178\text{cm}^3/\text{s}$。又由表 2-5 查得牌号为 J340 的 PP 的 $n = 0.13$，$K' = 6.04\text{N} \cdot \text{s/cm}^2$。代入式（4-4）得熔体流经喷嘴的压力降为

$$\Delta p_Z = \left(\frac{4}{\pi}\right)^{0.13} \frac{2 \times 6.04 \times 178^{0.13} \times 2 \times 10^4}{0.275^{3 \times 0.13 + 1}} \text{MPa} = 2.94\text{MPa}$$

由实验曲线可知，螺杆式注射装置中的压力降为

$$\Delta p_e = p_0 - p_z = (2.0 \sim 2.5)\Delta p_z \tag{4-6}$$

此式中的放大系数，系指活塞和螺杆等运动件的摩擦阻抗，以及螺杆头前剩余熔体段的压力降。通常螺杆式注射装置中的压力降 $\Delta p_e = 10 \sim 20\text{MPa}$，但注射高黏度熔体，或是

使用高阻抗喷嘴，如阀式喷嘴，Δp_e 会更大，需作计算预测或专门的测量。此外，在型腔压力估算时，所使用的注射压力 p_0 必须小于注射机的最大注射压力 p_{max}，为注射车间现场留有充分调节注射压力的余地。

若将非牛顿塑料熔体，视为短时间恒温状态，且在各流段中处于恒剪切速率，则可用牛顿流体计算式计算压力降。对于圆管道有

$$\tau = K'\dot{\gamma}^n = K'\dot{\gamma}^{n-1}\dot{\gamma} = \eta_a\dot{\gamma} \tag{4-7}$$

且按定义

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}, \quad \tau = \frac{R\Delta p}{2L}, \quad \Delta p = \frac{2L\tau}{R} \tag{4-8}$$

式中 L 和 R——圆管长和半径（cm）；

η_a——塑料熔体表观黏度（N·s/cm^2）；

τ——剪切应力（N/cm^2）；

Δp——圆管道两端的压力降（N/cm^2，1N/cm^2 = 10^4Pa）。

由式（4-8）计算该段流程中剪切速率 $\dot{\gamma}$。从上例中数据，可得

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3} = \frac{4\times 178}{\pi \times 0.275^3}\text{s}^{-1} = 10900\text{s}^{-1}$$

然后在 PP 塑料流动曲线的 $\tau - \dot{\gamma}$ 图上，查到对应剪切应力 τ。也可代入式（4-7）得到

$$\tau = K'\dot{\gamma}^n = 6.04\times 10900^{0.13}\text{N/cm}^2 = 20.23\ \text{N/cm}^2 = 20.23\times 10^4\text{Pa}$$

由式（4-8）有压力损失

$$\Delta p_Z = \Delta p = \frac{2L\tau}{R} = \frac{2\times 2\times 2.023\times 10^5}{0.275}\text{MPa} = 2.94\text{MPa}$$

计算结果与上述数值相差很小。此种计算方法称之为塑料熔体压力降的工程计算法。

柱塞式注射装置有与螺杆式注射装置不同的塑化原理和结构。由于粒料区的作用，装置内压力阻抗较大。不过，柱塞式注射装置常见公称注射量均在 60cm^3 以下。经实验测得，柱塞式注射装置中的压力降为

$$\Delta p_e = p_0 - p_r = 30\text{MPa} + (0.1 \sim 0.2)p_0 \tag{4-9}$$

式中，第一项 30MPa 压降是加热室和喷嘴的黏流区的压力损失；第二项是被压缩的粒料区的压力损失，它与柱塞压力 p_0 成正比。其折算系数与注射加工时的注射量有关，当注射量较大时取大值。

3. 型腔压力变化

将型腔压力变化对注射成型时间进程作图，就得到型腔压力周期图，如图 4-12 所示。（对应图 4-11b 双分型面注射模的浇道、浇口和型腔各位置的压力对时间的变化）。

图 4-12 所示 $t_0 \sim t_1$ 称注射时间。塑料熔体进入型腔，并达到最远处，而且压力得到急剧升高。$t_1 \sim t_2$ 为保压时间，也称压实补缩阶段，螺杆作少量推进，以维持一定压力。在时间 t_1，模内物料温度明显下降。在时间 t_2 螺杆后撤。喷嘴口压力 p_Z 下降最快。$t_2 \sim t_3$ 为倒流时间。时间 t_3 是注射模中内浇口的冻结时间。螺杆后撤时，内浇口尚未冻结，型腔内熔体回头倒流至浇道。$t_3 \sim t_4$ 是静态冷却时间。t_4 是模具打开时间。p_r 为该时间

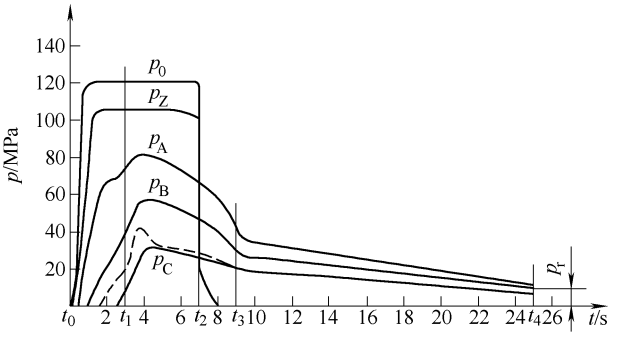


图 4-12　注射成型型腔压力周期图

p_0—注射压力　p_Z—喷嘴压力　p_A—料流进入型腔压力　p_B—型腔压力　p_C—料流末端型腔压力

的型腔内的残余压力。

在注射保压阶段，在分型面上，型腔压力 p_A 决定了锁模力。锁模力不足或分型面不平整，会产生塑料熔体溢料。也注意到位于料流末端型腔压力 p_c 较低，在该位置的分型面上设置有排气槽。

4.2　分型面和排气设计

注射模设计过程中，首先是合理确定分型面，往往是在模具结构设计的最后设置排气槽。排气系统主要利用分型面，排气槽大都开设在分型面上。在不能利用分型面排气时，必须熟知其他途径的排气设计。

4.2.1　分型面设计

在注射模具中，用于取出注塑件或浇注系统凝料的面通称为分型面。常见的取出注塑件的主分型面与开模方向垂直。主分型面将注射模分成定模和动模两部分，也有从主分型面取出并放回活动型芯，或放置嵌件。注射模有一个或多个分型面，还有采用与开模方向一致的侧向分型面。采用点浇口的双分型面的注射模，注塑件与浇道凝料分别从两个分型面中取出。分型面大都是平面，也有倾斜面、曲面或台阶面。

分型面的选择不仅关系到注塑件的正常成型和脱模，而且涉及模具结构与制造成本。在选择分型面时，应遵守以下原则。

（1）分型面应选择在注塑件的最大截面处　如图 4-13a、图 4-13c 所示，否则，如图4-13b所示，无法脱模和加工型腔。无论注塑件以何方位布置型腔，都应将此作为首要原则。

（2）尽可能地将注塑件留在动模一侧　因为在动模一侧设置和制造脱模机构简便易行。为了让注塑件留在动模一侧，图 4-14a 将型芯设在动模的型芯上，薄壁注塑件对型芯产生有足够的包紧力；但是遇到厚壁塑件或者没有型芯，如图 4-14b 所示，可将注塑件型腔设在动模一侧的型腔里。

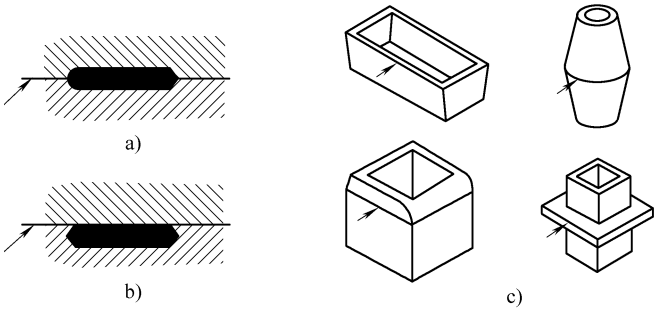


图 4-13　分型面应选在注塑件的最大截面处

a）分型面在注塑件的最大截面处　b）最大截面在型腔内　c）箭头所指为分型面

（3）有利于保证塑件的尺寸精度　图 4-15a 为保证双联齿轮的齿廓与孔的同轴度，两齿轮型腔和型芯都设在动模一侧；若分设在动模与定模两侧，见图 4-15b。会受到导柱与导套配合精度及它们磨损的影响。又如图 4-16a 所示，为了保证注塑件两台阶间距尺寸 L 的精度，应将两台阶面置于模具同一侧；否则如图 4-16b 布置，尺寸 L 精度受到分型面制造精度和锁模力的影响，会引起较大误差。

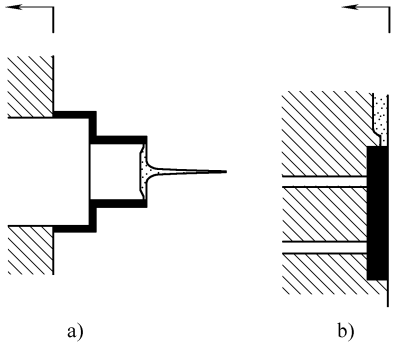


图 4-14　注塑件应尽可能留在动模一侧

a）注塑件留在动模的型芯上

b）注塑件留在动模的型腔里

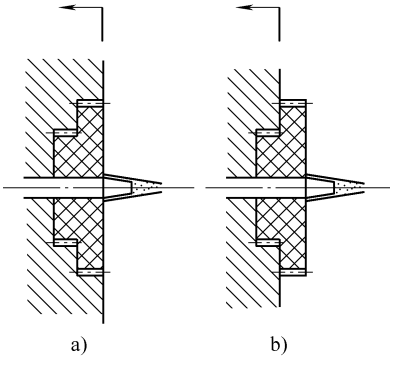


图 4-15　有利于保证注塑件的同轴度

a）两齿轮都设在动模同一侧

b）两齿轮分别设在动模和定模两侧

（4）有利于保证注塑件的外观质量　分型面上型腔壁面稍有间隙，熔体就会在注塑件上产生飞边。飞边影响注塑件的外观质量。因此在光滑平整表面或圆弧曲面上，应尽量避免选择分型面，如图 4-17a 所示。而图 4-17b 的选择显然不当。

（5）考虑满足注塑件的使用要求　注塑件在模塑过程中，有一些很难避免的工艺缺陷，例如脱模斜度、分型面上的飞边以及顶杆与浇口痕迹等。在分型面设计时，应从使用角度避免这些工艺缺陷影响塑件功能。如图 4-18b 所示，塑件完全在动模一侧脱出，会使脱模斜度过大。图 4-18a 分别在动模、定模安排型腔，可减小脱模斜度。又如图 4-19b 上的注塑件轴需与圆孔支撑，或轴上传动零件的孔有配合要求，但分型面飞边

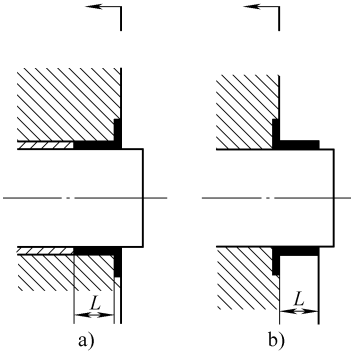


图 4-16　有利于保证注塑件尺寸精度

a）两台阶置于动模一侧成型

b）两台阶由动模和定模分别成型

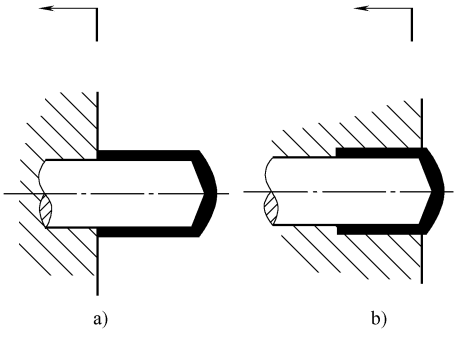


图 4-17　有利于保证注塑件外观质量

a）圆弧曲面由型腔成型

b）圆弧曲面上设置分型面

痕迹会影响运转功能；若如图 4-19a 在有飞边两侧，留有与圆孔的单边间隙 0.15 ~ 0.25mm，便不会影响其转动。

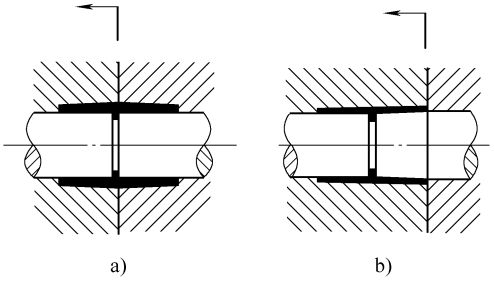


图 4-18　有利于减小注塑件的脱模斜度

a）分别在动模和定模脱模，脱模斜度小

b）在动模一侧脱出，脱模斜度大

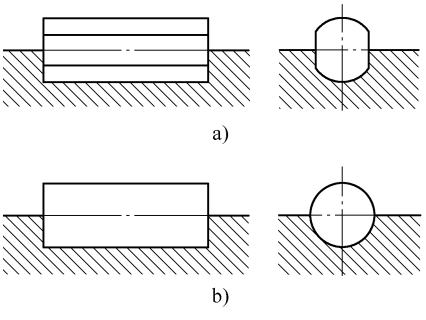


图 4-19　有利于保证塑料轴的转动功能

a）飞边处在有间隙孔中

b）转轴柱面上会有飞边

（6）注塑件在主分型面上的投影面积应小于所用注射机的成型面积　减小注塑件在合模平面上的投影面积，可减小所需锁模力。如图 4-20 所示的弯角板块类注塑件，图 a 的选择比图 b 为好。但是按图 a 布置后模具的闭合高度较大。

（7）长型芯应置于开模方向　当注塑件在相互垂直方向都需设置型芯时，如图 4-21a所示，将较短型芯置于侧抽芯方向，有利于减小抽拔距，因为侧向分型抽芯机构的抽拔距较小；若按图 4-21b 布置，需要尺寸很大的斜导柱抽芯机构。

（8）有利于排气　应将分型面置于熔体充模流动的末端，如图 4-22a 所示；而图 4-22b所示熔体溢料面与分型面垂直，熔体不能从分型面溢出。注塑件在压缩中成型，虽然翻边壁厚的尺寸精度高，但不能利用分型面排气。又如图 4-23a 所示，料流的末端气体可利用分型面排气；而图 4-23b 所示，气体会在型腔中积聚。

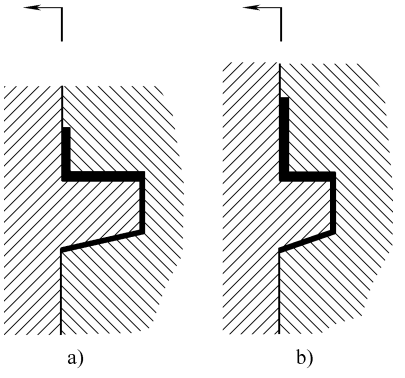


图 4-20　有利于减小注塑件在合模平面上的投影面积

a）注塑件在分型面上的投影面积小

b）成型注塑件需较大的锁模力

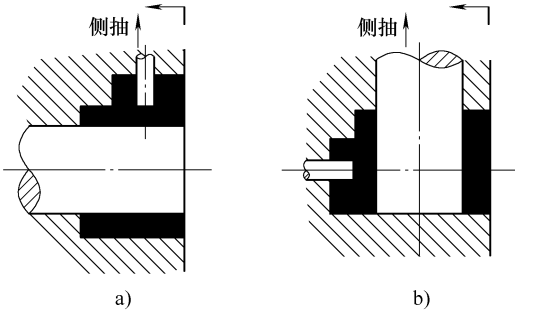


图 4-21　较长型芯应置于开模方向

a）长型芯设在开模方向

b）长型芯设在侧抽方向

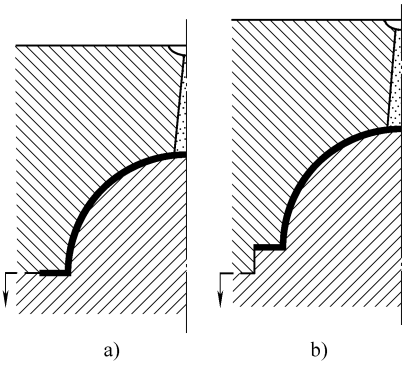


图 4-22　分型面应有利于排气

a）利用分型面排气　b）不能利用分型面排气

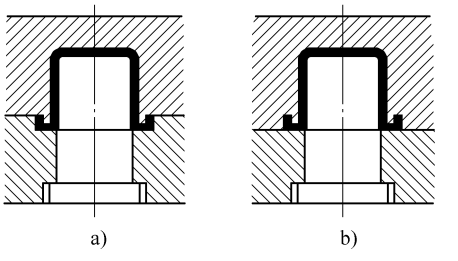


图 4-23　料流的末端排气

a）利用分型面排气　b）气体在型腔中积聚

（9）应有利于简化模具结构　为此在安排制件在型腔中方位时，尽可能避免侧向分型或抽芯。特别是避免在定模部分侧向抽芯，如图 4-24 所示。图 4-24a 布置方位可避免侧向抽芯，模具结构比图 4-24b 简单。

（10）非平面分型面的选择，应有利于型腔加工和方便脱模　图 4-25、图 4-26 和图 4-27 中的倾斜面、曲面和阶梯面分型面，用磨削加工使动模与定模密配是不可能的，常采用电火花对合加工。

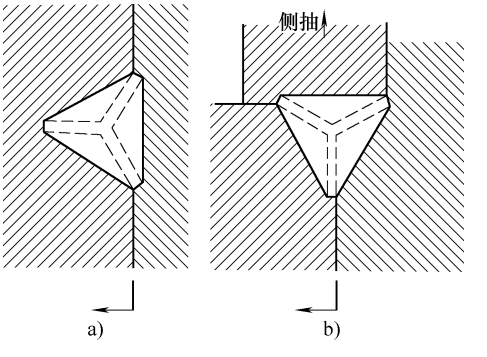


图 4-24　应有利于简化模具结构

a）模具简单　b）需侧向抽芯

图 4-25a 所示斜面分型时型腔加工方便。图 4-26 所示曲面分型时，孔的成型和壳体的脱模方便。图 4-27a 所示平面分型需侧向抽芯。图 4-27b 阶梯面分型需异形型芯成型孔，阶梯分型面加工困难。

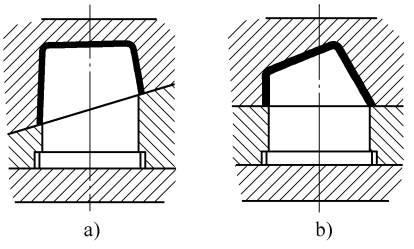


图 4-25　斜面分型

a）斜面分型使型腔加工方便　b）分型面加工方便

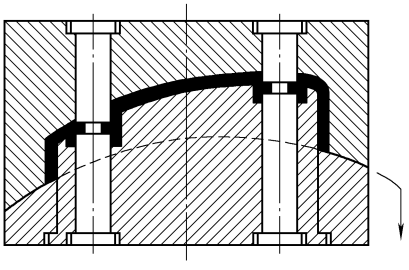


图 4-26　曲面分型

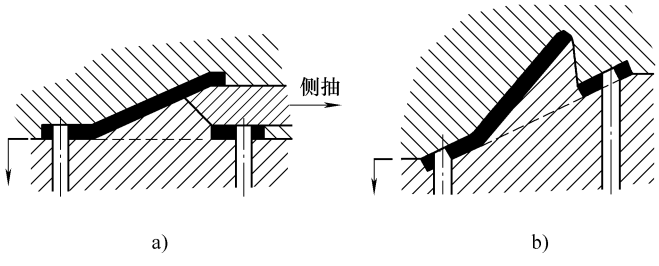


图 4-27　阶梯面分型

a）平面分型需侧向抽芯　b）阶梯面分型需异形型芯

设计非平面分型面时，应注意模具侧向的力平衡，如图 4-27a 那样。如图 4-28b 所示，由于型腔布置对开模方向的不对称，注射时动模与定模间存在侧向作用力，不利于开模和脱模。若由于注塑件的几何尺寸限制不能作图 4-28a 那样的平衡设计，则应设有粗壮的导柱并加装锥面斜面定位机构。

注射模有些模板之间的分离运动，并没有注塑件或流道凝料取出。例如：动模上的推件板被脱模推杆顶离动模；定模上的脱卸板将主流道和分流道凝料推离定模。但都没有对注塑件或流道分型。对于一些特殊注塑件，分型面设计是困难的技术问题。由于涉及制品的几何尺寸精度和质量，分型面选择后应得到注塑件设计人员的认可。

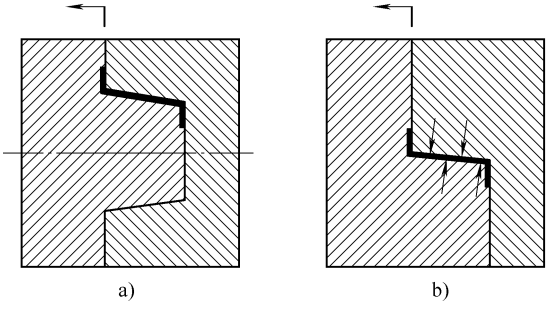


图 4-28　非平面分型时模具侧向的力平衡

a）侧向作用力被平衡　b）动模与定模受到侧向作用力

4.2.2 排气设计

从某种角度而言，注射模也是一种置换装置。即塑料熔体注入模腔同时，必须置换出型腔内空气和从物料中逸出的挥发性气体。排气系统是注射模设计的重要组成部分。本节详细讨论该计算式的推导过程和物理条件，可供实用计算时参考。

1. 排气设计

（1）排气不良的危害 排气和排气槽设计不合理，将会产生下述的弊病：

1）增加熔体充模流动的阻力，使型腔不能充满，会使注塑件棱边不清。

2）在制品上呈现明显可见的流动痕和熔合缝，其力学性能降低。

3）滞留气体使注塑件产生银纹、气孔、剥层等表面质量缺陷。

4）型腔内气体受到压缩后产生瞬时局部高温，使塑料熔体分解变色，甚至碳化烧焦。

5）由于排气不良，降低了充模速度，增长了注射成型周期。

越是薄壁制品、越是远离浇口的部位，排气槽的开设越重要。对于小型精密制品的注射成型也要重视排气设计，因为除了能避免制品的注射量不足和表面灼伤外，还可以消除各种缺陷。对于几何形状复杂的制件，模具上排气槽的开设在试射后确定。

（2）排气系统设计方法

1）利用分型面排气是最简便的方法，排气效果与分型面的接触精度有关。减少实际锁模面有利排气。利用模块结构，可减小锁模接触面，但锁模接触面的宽度不能低于15mm。

2）利用顶杆与孔的配合间隙排气，必要时对顶杆作些排气的结构措施，如图4-29所示。对于型腔的封闭死角，可增设推杆作排气用。推杆排气隙的长度为2～3mm，开设排气槽和沟。推杆与孔的配合长度不小于10mm，或为推杆直径的2～3倍。顶端利用推管同样也能排气，其排气结构如图4-30所示。型芯也被利用排气，其排气结构如图4-31所示。以上三图中图示单向间隙 δ 可为表4-1所列的常用排气槽高度 h 的一半。排气通道表面顺气流方向抛光，无锐角。

3）利用球状合金颗粒烧结块渗导排气，如图4-32所示。透气钢块应有足够的承压能力，设置在注塑件隐蔽处，并须开设排气通道。透气钢的透气效果与厚度成反比，钢块的排气方向厚度30～50mm。但透气钢块的强度和刚度较低，既要有足够截面的排气坑，又要有较好支承。图4-33a所示透气钢块的刚性差，透气途径长。改用图4-33b的高强度钢支承又作大面积透气。透气钢块的成型面和出气底面的精加工，只能用电火花成型。透气钢硬度为35～38HRC，可以机械切削加工。用脱模剂之类的液体涂在透气钢块的工作面上，从底面吹入压缩空气，检查气泡涌起。如果透气钢块阻塞，可以清洗后再用。将透气钢块加热至500℃，保持1h，冷却后浸入丙酮至少15min，然后用压缩空气吹出残渣。如效果不好，重复加热、溶渣和吹气。

4）在熔合缝位置开设冷料井，在贮留冷料前也滞留了少量气体。也有在锁模分型面上，挖贮气小坑，引留少量气体。

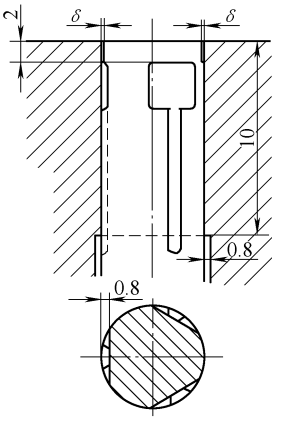


图 4-29　兼排气的顶杆

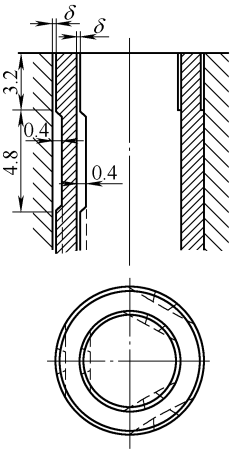


图 4-30　兼排气的推管

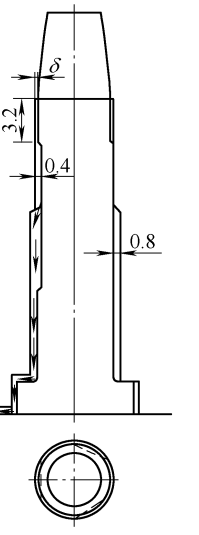


图 4-31　兼排气的型芯

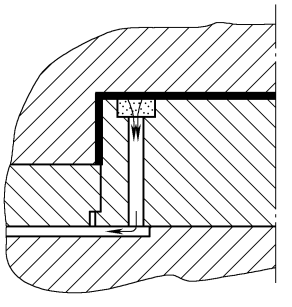


图 4-32　烧结金属块渗导排气

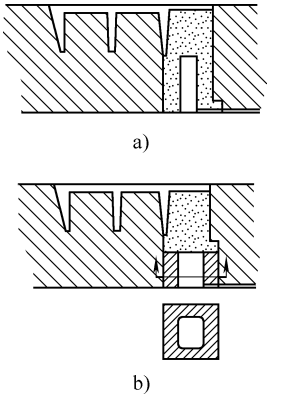


图 4-33　透气钢块的排气设计

a）排气效果差　b）排气坑效果好

5）可靠有效的方法，是在分型面上开设专用排气槽，如图 4-34 所示，尤其大型注射模必须如此。排气槽通常设在分型面的动模一侧，应开设在熔体最后充满的部位。图 4-34 为单个侧浇口的型腔，排气槽大致设在浇口对面。排气槽截面尺寸，既要有利于排气，又要不溢料。因此，对于黏度较低的塑料熔体应有较小的排气槽高度 h，见表 4-1。高压塑料熔体冲着排气隙口，熔体容易溢进排气槽。因而，熔料在排气槽隙口垂直流过时，排气槽高度 h 和排气隙 δ 容许稍大些。

排气槽流通截面 S，应按所需排气量由式（4-26）确定，然后计算得排气槽宽度 W 和槽的数目。槽宽度 W 取 2 ~ 6mm，优选了 3.2 ~ 5mm。气流方向的排气槽长度 L 取 1 ~ 2mm，一般不超过 2mm。排气槽表面应顺气流方向进行抛光。排气槽后续的导气沟应适

当增大，以减小排气阻力。其高度 $h'=0.8\sim1.6$mm，单个宽度 $W'\geqslant W=3.2\sim5$mm。分型面上排气沟为梯形或半圆截面，优选梯形截面，以便于清除溢进的塑料。圆筒形注塑件，在采用中央浇口时，应在分型面的型腔周围均匀布置排气槽，并设置环形的导气沟。

6）对于大型模具，可利用镶拼的成型零件的缝隙排气。图 4-35 所示为点浇口设计的浇口套镶件排气间隙和环形导气沟。

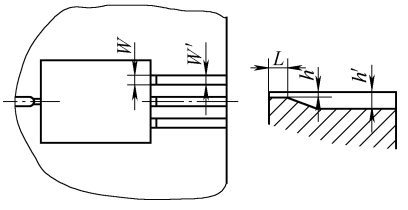


图 4-34　开设专用排气槽和导气沟

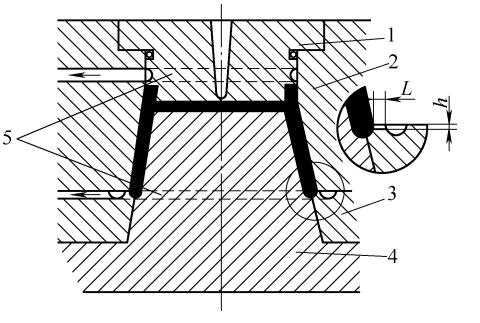


图 4-35　绕口套镶件排气间隙和环形导气沟

1—浇口镶件　2—型腔板　3—推板
4—动模型芯　5—环形导气沟

表 4-1　常用的排气槽高度

塑 料 名 称	排气槽高度 h/mm
聚酰胺类塑料	≤0.015
聚烯烃塑料	≤0.02
PS、ABS、AS、SAN、POM、PBT、PET、增强聚酰胺	≤0.03
PC、PSU、PVC、PPO、丙烯酸类塑料及其他增强塑料	≤0.04

排气槽的表面、推杆和镶块的排气间隙，在注射生产时会留下塑料的残余物。污垢会堵塞排气截面。压缩空气可在每次开模时吹去污物。可动零件上的排气槽和排气隙有一定的自我清理能力。紧固型芯和镶块上的排气间隙上污物清理困难，要设计清理的通道，后续的排气沟的截面要足够大。

2. 排气槽的截面尺寸计算

塑料熔体注射充模时，型腔内气体被压缩成气室，然后经排气口喷出。

（1）气体压缩　注射模排气过程的第一阶段，是充模的高温塑料熔体将型腔内气体驱赶压缩至死角，形成一个高温高压的气室。此阶段既不是等温过程，也不是绝热过程，而是气体动力学的多方过程理想气体的多方过程中，压力 p 和体积 V 的关系满足下式：

$$p\cdot V^n=\text{恒量} \tag{4-10}$$

n 称多方指数，$n=1$ 时为等温过程，$n=\gamma=1.4$ 时为绝热过程。此气室的状态是第二阶段排气槽喷排气体时的初始条件。许多设计理论，均按照临界的有效排气来计算排

气槽的截面积。此气室的温度和压力，应根据注射工艺确定。此气室处于熔体料流的末端，压力 $p=20\text{MPa}$，被压后气体温度 T 升高至 300℃左右。此时气室中气体可能分解和烧焦塑料物料。有危害状态的多方指数为

$$n=\frac{\lg p-\lg p_0}{\lg V_0-\lg V}=\frac{\lg(20/0.1)}{\lg(100/1)}=1.15 \tag{4-11}$$

式中　V_0——包括浇注系统在内的型腔总体积；

p_0——原型腔内具有的标准大气压（$p_0=0.1\text{MPa}$）；

V——被压缩气室的体积，拟定为 V_0 的 1%。

$$\frac{V}{V_0}=\left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{1}{n}}=\left(\frac{0.1}{20}\right)^{\frac{1}{1.15}}=0.01 \tag{4-12}$$

被压气室的温度，由多方过程

$$p^{n-1}\cdot T^{-n}=\text{恒量}$$

得到

$$T=T_0\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{n-1}{n}}=293\times\left(\frac{20}{0.1}\right)^{\frac{1.15-1}{1.15}}=584℃ \tag{4-13}$$

模内气体从 20℃经压缩升温达 311℃。若按系统不与外界交换热量的绝热过程计算，则被压气室温度还要高得多。介于等温和绝热过程之间的多方过程是符合注射充模实际的。这里存在误差，在形成气室前，模具中的排气槽是开放的。但由于气压低、充模快，先期被排出的气体不多，由上述假定推算的气室温度和压力比实际要偏大些。

（2）排气槽的喷射　推导的第二阶段，把排气槽视为喷气管。由于排气过程迅速，来不及与外界有明显的热量交换，因此作为绝热过程处理。有参量比热容比

$$\gamma=c_p/c_v \tag{4-14}$$

式中，c_p 为定压比热容，c_v 是定容比热容，对于空气 $\gamma=1.4$。根据气体动力学的流量函数所述，喷管的质量流量称为密流 m'，单位截面积 A 的密流有

$$m'/A=\rho v \tag{4-15}$$

式中，v 为喷管的排气流速，气体密度

$$\rho=\rho'/(RT') \tag{4-16}$$

又有喷管排气的音速公式，音速为

$$a=\sqrt{\gamma RT'} \tag{4-17}$$

以上式（4-16）和式（4-17）中，气体常数 $R=287.04\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$；$T'$为喷管中气体的热力学温度；$p$ 为喷管中气体的压力，代入式（4-15）后得

$$\frac{m'}{A}=p'\left(\frac{v}{a}\right)\sqrt{\frac{\gamma}{RT'}} \tag{4-18}$$

其中 $v/a=M$ 称为马赫数。前述 T 和 p 为第一阶段所生成气室的滞止温度和压力。此时气体的动能完全转化为热焓的滞止状态。根据能量守恒关系，它们与喷管中气体的温度 T'和压力 p'有以下关系

$$\frac{T}{T'}=1+\frac{\gamma-1}{2}M^2 \tag{4-19}$$

$$\frac{p}{p'}=\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \tag{4-20}$$

代入式（4-18）后，可得

$$\frac{m'}{A}=\frac{p}{\sqrt{T}}\sqrt{\frac{\gamma}{R}}\frac{M}{\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma+1}{2(\gamma-1)}}} \tag{4-21}$$

在 M 给定的情况下，气体密流 m' 与滞止压力 p 成正比，与滞止温度 T 的平方根成反比。如果滞止的压力 p 给定，密流 m' 只是 M 数和 γ、R 的函数。

如果气流的 M 数达到 1，出现临界密流，对应着喷管的临界面积 A，有

$$\frac{m'}{A}=\frac{p}{\sqrt{T}}\sqrt{\frac{\gamma}{\mathrm{R}}\left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \tag{4-22}$$

用 $\gamma=1.4$，$R=287\mathrm{J/(kg\cdot K)}$ 代入后，得排气槽截面积的计算式

$$\frac{m'}{A}=0.040418\frac{p}{\sqrt{T}} \tag{4-23}$$

密流 m' 用常温常压下型腔体积 V_0 和空气密度 $\rho=1.16\mathrm{kg/m^3}$ 代入，用注射充模时间 t 计算：

$$m'=m/t=\rho V_0/t \tag{4-24}$$

再用气室的高温 $T=584\mathrm{K}$ 和高压 $p=20\mathrm{MPa}=20\times10^6\mathrm{N/m^2}$，代入式（4-22），得到排气槽截面积的设计计算式：

$$A=3.5\times10^{-5}V_0/t \tag{4-25}$$

上式中 A（$\mathrm{m^2}$ 或 $\mathrm{cm^2}$）与 V_0（$\mathrm{m^3}$ 或 $\mathrm{cm^3}$）的单位一致。为计算方便，型腔体积 V_0 用 $\mathrm{cm^3}$ 代入，截面 A 单位是 $\mathrm{mm^2}$，于是有

$$A=3.5\times10^{-3}\frac{V_0}{t} \tag{4-26}$$

式中　A——排气槽的截面积（$\mathrm{mm^2}$）；

V_0——包括浇注系统的型腔体积（$\mathrm{cm^3}$）；

t——注射充模时间（s）。

式（4-26）计算关键是充模时间的正确估测。建议按第 8 章的表 8-1 注射机公称注射量与注射时间，根据模具实际型腔体积 V_0 来确定 t。

（3）计算修正　考虑到有些塑料品种的热分解温度高于或低于前假定 $T_\mathrm{K}=584\mathrm{K}$，可对式（4-25）进行气体温度的修正

$$A=3.5\times10^{-5}\sqrt{\frac{584}{293}}\sqrt{\frac{293}{T_\mathrm{K}}}\times\frac{V_0}{t}$$

于是物料分解温度 T_K 修正的排气槽截面积的计算式为

$$A=5\times10^{-5}\sqrt{\frac{293}{T_\mathrm{K}}}\times\frac{V_0}{t} \tag{4-27}$$

当某种物料的热分解温度较低，T_K 小于 584K 时，则计算得到截面积 A 会略大些，

以避免熔体被烧焦。同样，式（4-27）中的 V_0 和 A 量纲是一致的。

对式（4-26）和式（4-27）的计算结果，常见的修正意见有：

1）当注射模有顶杆、分型面等其他排气通道时，截面积 A 可斟酌减小；

2）排气槽长期使用后有积垢，会减小有效截面积，A 可略大些。

［例］　有型腔体积 $V_0 = 100\text{cm}^3$ 的模具开设排气槽。参考表 8-1，取充模时间 $t = 1.5\text{s}$。求排气槽截面尺寸。

［解］　由式（4-26）得排气槽面积

$$A = 3.5 \times 10^{-3} \times \frac{V_0}{t} = 3.5 \times 10^{-3} \times \frac{100}{1.5}\text{mm}^2 = 0.23\text{mm}^2$$

再由表 4-1，按塑料物料取排气槽高度 $h = 0.02\text{mm}$，高度 h 的制造公差为 $\pm 0.005\text{mm}$。排气槽总宽度 11.5mm，单个排气槽宽度 4mm，需三个排气槽，排气方向的长度取 1.5mm。

随着高速注射的发展，真空排气系统将被采用。在如图 4-32 所示的烧结金属块后侧，配以真空抽气。以上陈述的是热塑性塑料注射模的排气系统。热固性塑料注射模的排气系统更为重要。排出气体质量中需计入化学反应产生的气体质量。

4.3　合模导向机构

模具闭合时要求有准确的方向和位置。具有一定精度的合模导向机构是注射模的基础。注射模具的标准化，首先是模架的标准化和系列化。我国注射模具的标准化已经达到较高的水平。

1. 导柱导向机构

（1）导向机构的功用　在注射模中，指引动模和定模之间按一定方向闭合和定位的装置，称之为合模导向机构。它有导柱导向和锥面斜面导向两种机构。导柱导向机构是每副注射模必须具备的，锥面斜面导向机构起辅助和增强的作用。此外，在卧式注射机上的注射模，其脱模机构也需设置导柱导向机构如图 4-36 所示。

导向机构的功能为定位与导向、承压和支撑。

1）定位作用。为避免模具在装配时，因方向搞错而损坏成型零件。并在模具闭合后，使型腔在工作过程中能保持正确形状和位置；确保注塑件壁厚的均匀性。

2）导向作用。在动模向定模闭合行进中，导向机构应首先接触，引导动模沿准确方向和位置闭合，避免凸模首先进入型腔而发生损伤事故。为此，导柱必须比凸模端面高出 6～8mm，如图 4-37b 所示；反之，图 4-37a 属不合理设计。

3）承受一定侧压力。高压塑料熔体注入型腔时，由于型腔侧面不对称；或由于模具的重心，与型腔在分型面上投影的几何中心不一致，会产生较大的单向侧压力，均须由合模导向机构来承担。但当单向侧压力过大时，还需增设锥面或斜面定位机构。

4）支撑定模型腔板或动模推件板。对于双分型面注射模，导柱还需支撑定模型腔板的重力，也对此型腔板导向和定位。对于脱模机构中设置的导柱，也有此种功能。

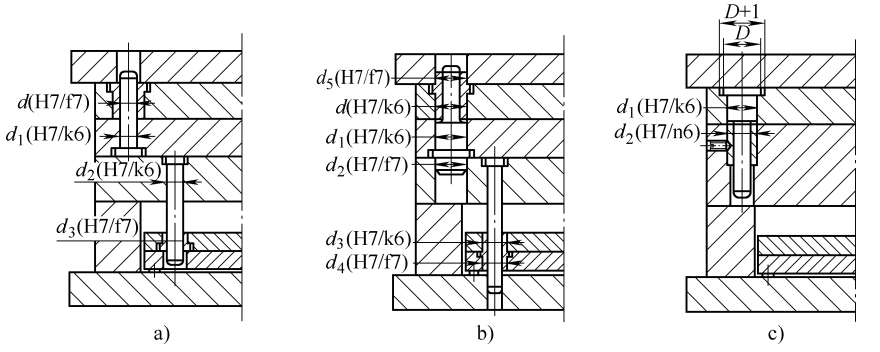


图 4-36　导柱导向机构

a）导套在定模上，脱模机构有短导套　b）长导套在定模上，脱模机构有长导套

c）导套在动模上，脱模机构无导向

对注射模导柱导向机构的基本要求是定位准确、导向精确，并具有足够的刚性和耐磨性。

（2）导柱导向机构　主要包括导柱和导套两种零件，分别安装在动、定模两边。

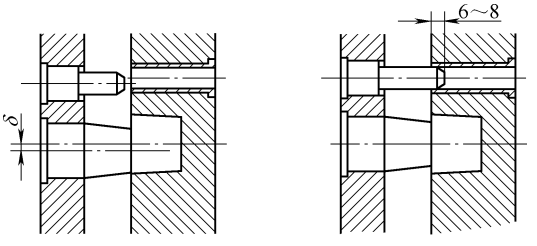


图 4-37　导柱的导向作用

a）短导柱引起型腔错位　b）长导柱导向

1）导柱。按导柱的作用，导柱可分为固定部分和滑动部分。固定部分带有凸肩的头部，在固定时定位在模板上。导柱前端均须有锥形引导部分，滑动段有储油槽。

导柱的基本结构形式有两种。一种是除安装部分有凸肩外，固定部分与滑动部分直径相同，称带头导柱（GB/T 4169.4），见图 4-38。另一种是安装部分有凸肩，使安装的配合部分直径比外伸的滑动部分直径大，称有肩导柱（GB/T 4169.5），如图 4-39 所示。带头导柱用于生产批量不大的模具，可以不用导套。有肩导柱配用导套，用于大批量生产，并有高精度导向的模具。

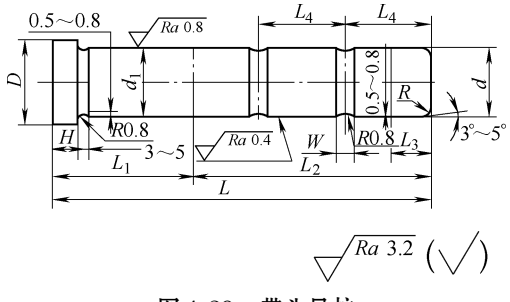


图 4-38　带头导柱

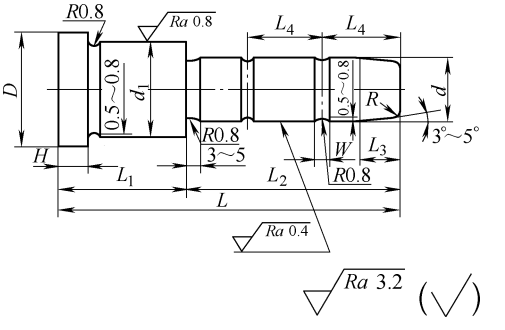


图 4-39　有肩导柱

有肩导柱的固定部分配合直径应与导套的外径一致。也就是导柱的滑动段直径 d 与固定段直径 d_1 对应，见表 4-2。外装在模具另一边的导套安装孔，可以和导柱固定孔以同一尺寸加工而成，保证了同轴度。导柱直径尺寸随模具模板外形尺寸而定，见表4-3。模板尺寸越大，导柱间中心距应越大，所选导柱直径也应越大。

表 4-2　有肩导柱的滑动段直径与固定段直径　　（单位：mm）

滑动段直径 d	12	16	20	25	30	35	40	50	60	70	80
固定段直径 d_1	18	25	30	35	42	48	55	70	80	90	108

表 4-3　导柱直径 d 与模板外形尺寸的关系　　（单位：mm）

模板外形尺寸	≤150	>150～200	>200～250	>250～300	>300～400
导柱直径 d	≤16	16～18	18～20	20～25	25～30
模板外形尺寸	>400～500	>500～600	>600～800	>800～1000	>1000
导柱直径 d	30～35	35～40	40～50	60	≥60

2）导套。无论带导套或不带导套的导向孔，都应设计为通孔，或专门设计排气槽，以避免模具闭合时有空气阻力。导套常用的结构形式也有两种，一种是直导套（GB/T 4169.2—2006），见图 4-40。直导套常用于厚模板的导向，需与模板上导向孔有较精密的配合。为防止被导柱拖出，应该有紧定螺钉固定。如图 4-36c 所示的导套上有沉坑，也有加工侧向小孔或环形凹槽。另一种是带头导套（GB/T 4169.3—2006），见图 4-41。带头导套安装需要复以垫板。这种导套长度取决于模板厚度。这两种导套中，孔的工作部分长度一般是孔径的 1～1.5 倍。

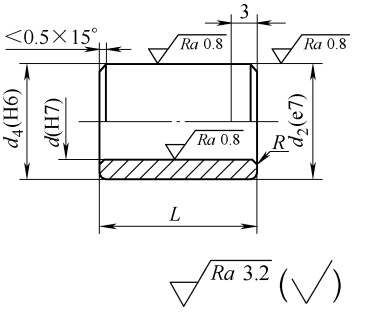


图 4-40　直导套

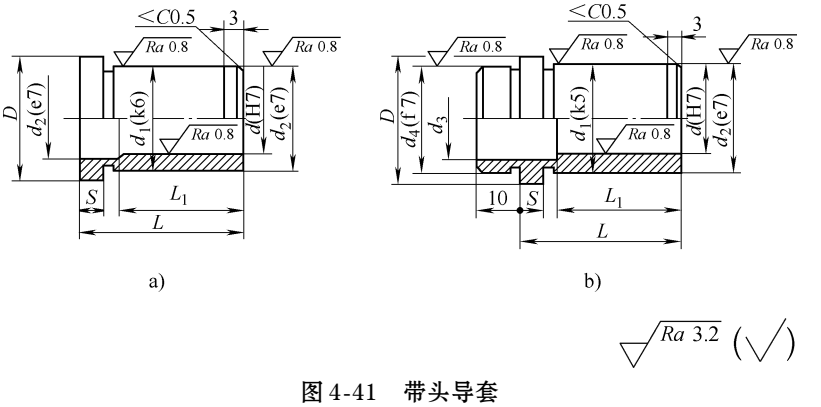


图 4-41　带头导套

a）Ⅰ型带肩导套　b）Ⅱ型带肩导套

导柱和导套的材料为 T8A 或 T10A，淬硬到 50～55HRC；也有用 20 或 20Cr 钢渗碳 0.5～0.8mm 厚，淬硬到 56～60HRC。导套的硬度一般低于导柱的硬度，以减轻磨损并

防止滑动时拉毛配合面。导柱和导套的滑动与固定表面的粗糙度均为 $Ra0.8\mu m$。

3）导柱与导套的配用。图 4-36 为导柱与导套组合实例。导柱与导套孔之间采用 H7/f7 间隙配合；导柱和导套与模板的固定段采用过渡配合 H7/k6 或 H7/n6。

图 4-38 ~ 图 4-40 所示的，导柱伸入端应有锥形头和圆角。对应的导套进入孔也有圆弧角，保证导柱插入顺利。导柱滑动段长度大于导套的孔长。在模具闭合时导柱要伸出导套。导柱固定段要短于模板的固定孔。导套端面要埋进模板面 1mm 以上，避免妨碍模板之间接触。

在装动模和定模时，为了认定方向方便，四根导柱布置并非对模板中心对称，其中有一根有 2mm 的偏置。

导柱可以安装在动模上，可以保护动模上主型芯不受损伤；也可以固定在定模上，动模一边取注塑件和放嵌件，没有导柱妨碍较为方便，也可防止导柱上的油污弄脏注塑件。

（3）塑料注射模具的标准化　塑料注射模具制造在现代工业中属于单件生产，只有一部分模具是批量很小的生产，从设计到制造完成需要很长的周期。一套中等尺寸和复杂程度的注射模，一般需要数月才能完成，其中加工制造达上千工时。因此，模具生产周期长，价格昂贵，也影响了电子信息等产品的更新换代。对模具零件的标准化设计和专业化生产能有效缩短生产周期和降低生产成本，使模具生产厂大致能减少 30% ~ 50% 的机械加工的工作量。

注射模具的标准化早在 20 世纪 80 年代就开始了，已经有了标准化和系列化的注射模架的专业生产。我国于 1990 年颁布并实施了关于塑料注射模　中小型模架和塑料注射模大型模架的国家标准（GB/T 12556.1—1990、GB/T 12555.1—1990，现已被 GB/T 12555—2006 替代）。而后，龙记模架和日本双叶电子工业株式会社下属的富得巴（Futaba）在珠江三角洲和长江三角洲设立模架及标准件的生产厂，有较大规模并占有市场；也建起了许多模架、热流道装备、模具标准零件生产企业和模具专用钢材供应商。高端的德国 HASCO 标准模架和美国 DME 标准模架也有商品供应。

我国模具标准化技术委员会在制定塑料注射模技术条件、模架和零件的国家标准时，全面采纳了 ISO/TC29/SC8 公布的通用零件标准，还参照和部分采纳了德国的 DIM 标准和 HASCO 企业标准、美国 DME 公司标准、日本 JIS 标准和双叶电子工业公司标准。有关塑料注射模具的最近的国家标准见表 4-4。

表 4-4　有关塑料注射模具的国家标准

序号	标 准 名 称	标　准　号
1	塑料成型模术语	GB/T 8846—2005
2	塑料注射模技术条件	GB/T 12554—2006
3	塑料注射模模架	GB/T 12555—2006
4	塑料注射模模架技术条件	GB/T 12556—2006
5	塑料注射模零件	GB/T 4169.1—2006 ~ GB/T 4169.23—2006
6	塑料注射模零件技术条件	GB/T 4170—2006

GB/T 4169. 1—2006 ~ GB/T 4169. 23—2006 制定了 23 种注射模零件标准，见表 4-5。

表 4-5　塑料注射模零件标准

序号	标 准 名 称	标　准　号
1	塑料注射模零件　推杆	GB/T 4169. 1—2006
2	塑料注射模零件　导套	GB/T 4169. 2—2006
3	塑料注射模零件　带头导套	GB/T 4169. 3—2006
4	塑料注射模零件　带头导柱	GB/T 4169. 4—2006
5	塑料注射模零件　有肩导柱	GB/T 4169. 5—2006
6	塑料注射模零件　垫块	GB/T 4169. 6—2006
7	塑料注射模零件　推板	GB/T 4169. 7—2006
8	塑料注射模零件　模板	GB/T 4169. 8—2006
9	塑料注射模零件　限位钉	GB/T 4169. 9—2006
10	塑料注射模零件　支承柱	GB/T 4169. 10—2006
11	塑料注射模零件　圆形定位件	GB/T 4169. 11—2006
12	塑料注射模零件　推板导套	GB/T 4169. 12—2006
13	塑料注射模零件　复位杆	GB/T 4169. 13—2006
14	塑料注射模零件　推板导柱	GB/T 4169. 14—2006
15	塑料注射模零件　扁推杆	GB/T 4169. 15—2006
16	塑料注射模零件　带肩推杆	GB/T 4169. 16—2006
17	塑料注射模零件　推管	GB/T 4169. 17—2006
18	塑料注射模零件　定位圈	GB/T 4169. 18—2006
19	塑料注射模零件　浇口套	GB/T 4169. 19—2006
20	塑料注射模零件　推杆导柱	GB/T 4169. 20—2006
21	塑料注射模零件　矩形定位件	GB/T 4169. 21—2006
22	塑料注射模零件　圆形拉模扣	GB/T 4169. 22—2006
23	塑料注射模零件　矩形拉模扣	GB/T 4169. 23—2006

（4）注射模标准模架　现将 GB/T 12555—2006《塑料注射模模架》从结构、类型、组合尺寸及选择方法作如下介绍。

1）标准模架的结构形式。模架按应用方式分成以单分型面的直浇口和双分型面的点浇口两种基本结构形式，见图 4-42 和图 4-43。

2）标准模架的结构类型　模架按模具所采用浇口形式、制件脱模方式和动定模组成的特征，又划分成直浇口模架、点浇口模架和简化点浇口模架。

① 直浇口模架。直浇口模架有 12 种，应用于主流道型直浇口、矩形侧浇口及潜伏式浇口。其中基本型四种（如图 4-44 所示的 A、B、C 和 D 型）；直身基本型四种；和直身无定模座板型四种。

直浇口基本型 A 型：定模和动模均为两块模板，设置推杆脱模机构，适用于主流道型直浇口和矩形侧浇口，可采用斜导柱侧向抽芯的注射成型模具。

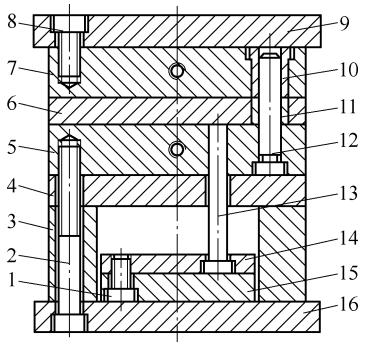


图 4-42　单分型面的直浇口模架

1、2、8—内六角螺钉　3—垫块　4—支承板
5—动模板　6—推件板　7—定模板
9—定模座板　10—带头导套　11—直导套
12—带头导柱　13—复位杆　14—推杆固定板
15—推板　16—动模座板

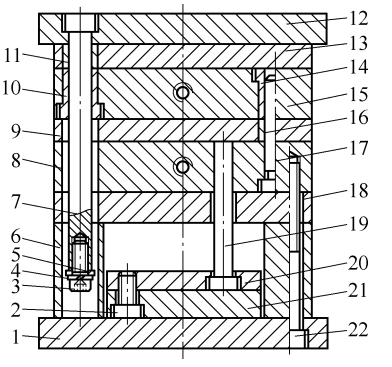


图 4-43　双分型面的点浇口模架

1—动模座板　2、3、22—内六角螺钉　4—弹簧垫圈
5—挡环　6—垫块　7—拉杆导柱　8—动模板
9—推件板　10、14—带头导套　11、16—直导套
12—定模座板　13—推料板　15—定模板　17—带头导柱
18—支承板　19—复位杆　20—推杆固定板　21—推板

直浇口基本型 B 型：定模和动模均为两块模板，设置推件板脱模机构，适用于薄壁壳体类塑料制品，制件表面无推顶痕迹。

直浇口基本型 C 型：定模采用两块模板，动模为一块模板，设置推件板脱模机构，适用于单分型面注射模具。

直浇口基本型 D 型：定模采用两块模板，动模为一块模板，设置推件板脱模机构，适用于薄壁壳体类塑料制品，制件表面无推顶痕迹。

直身直浇口基本型，分为 ZA 型、ZB 型、ZC 型和 ZD 型。结构和用途与直浇口基本型基本相同，只是去掉了动、定模座板的台肩，减小了模具的安装尺寸，但要求加工其他安装结构。

直身直浇口无定模座板型，分为 ZAZ 型、ZBZ 型、ZCZ 型和 ZDZ 型。在直身直浇口基本型模架上去

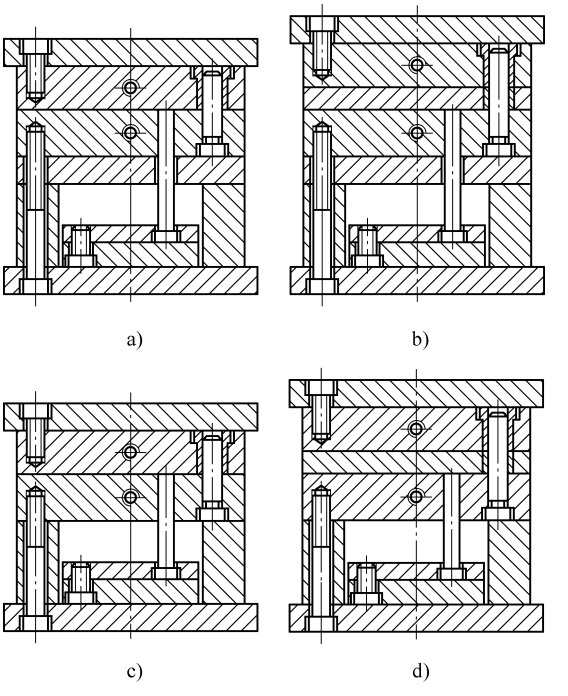


图 4-44　直浇口基本型模架

a）直浇口 A 型　b）直浇口 B 型
c）直浇口 C 型　d）直浇口 D 型

掉了定模座板。

② 点浇口模架。点浇口模架有 16 种，结构形式为采用点浇口的双分型面或多分型面的注射模。其中点浇口基本型四种，如图 4-45 所示的 DA、DB、DC 和 DD 型。直身点浇口基本型四种、点浇口无推料板型四种、直身点浇口无推料板型四种。

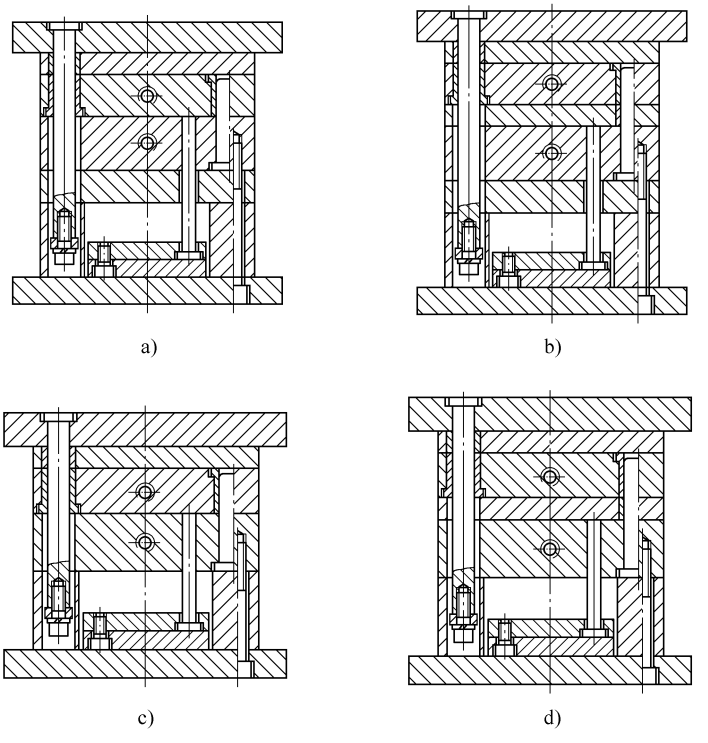


图 4-45　点浇口基本型模架

a）点浇口 DA 型　b）点浇口 DB 型　c）点浇口 DC 型　d）点浇口 DD 型

点浇口基本型，是由直浇口基本型 A ~ D 型对应派生而成的。在定模上增加了推料板和一套拉杆导柱机构。在定模一侧除了取出浇注系统凝料的分型外，推料板与定模座板分离可脱出流道凝料，实现定距分型自动脱落浇道凝料。

直身点浇口基本型，分为 ZDA 型、ZDB 型、ZDC 型和 ZDD 型。在点浇口基本型模架上去掉了动、定模座板的台肩，减小了模具的安装尺寸，但要求加工其他的安装结构。

点浇口无推料板型，分为 DAT 型、DBT 型、DCT 型和 DDT 型。在点浇口基本型模架的定模上，去掉了推料板，成为双分型面的注射模。

直身点浇口无推料板型，分为 ZDAT 型、ZDBT 型、ZDCT 型和 ZDDT 型，在点浇口无推料板型的基础上去掉了动、定模座板的台肩。

③ 简化点浇口模架。对点浇口模架中的 A 型和 C 型进行对应简化，如图 4-46 所

示，将模具中的拉杆导柱改为长导柱，同时去掉短导柱导向；在采用点浇口成型时，要安装顺序开模机构简化点浇口模架。有简化点浇口基本型 JA 和 JC、直身简化点浇口型 ZJA 和 ZJC 和直身简化点浇口无推料板型 ZJAT 和 ZJCT。

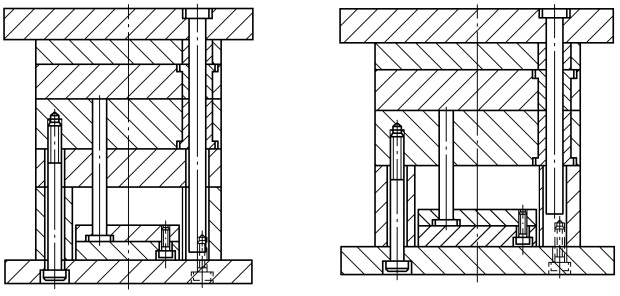


图 4-46　简化点浇口基本型模架

a）简化点浇口 JA 型　b）简化点浇口 JC 型

（5）导向件及螺钉安装形式　根据使用要求，模架中的导向件及螺钉可以有不同安装形式。

1）模架中的导柱和导套，有正装：导柱安装在动模上，导套安装在定模上，代号取 Z；反装：导柱安装在定模上，导套安装在动模上，代号取 F。

2）点浇口模架中的拉杆导柱可以安装在导向导柱的外侧，也可装在内侧，如图 4-47所示。

3）模架中的脱模机构可以加装推杆导柱及限位钉，如图 4-48 所示。

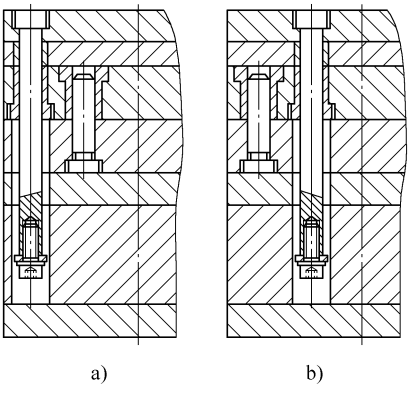


图 4-47　拉杆导柱的安装形式

a）拉杆导柱在外侧　b）拉杆导柱在内侧

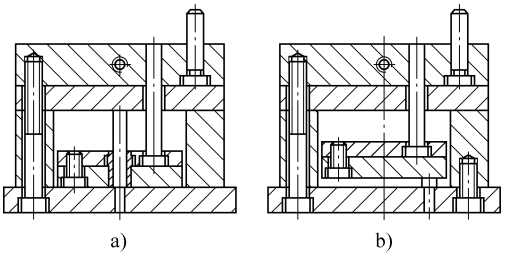


图 4-48　加装推杆导柱及限位钉

a）加装推杆导柱　b）加装限位钉

4）模架中的模板厚度较大时采用直导套。

（6）基本型模架组合尺寸　标准中的组合尺寸为零件的外形尺寸和位置尺寸。直浇口模架和点浇口模架组合尺寸如图 4-49 所示。

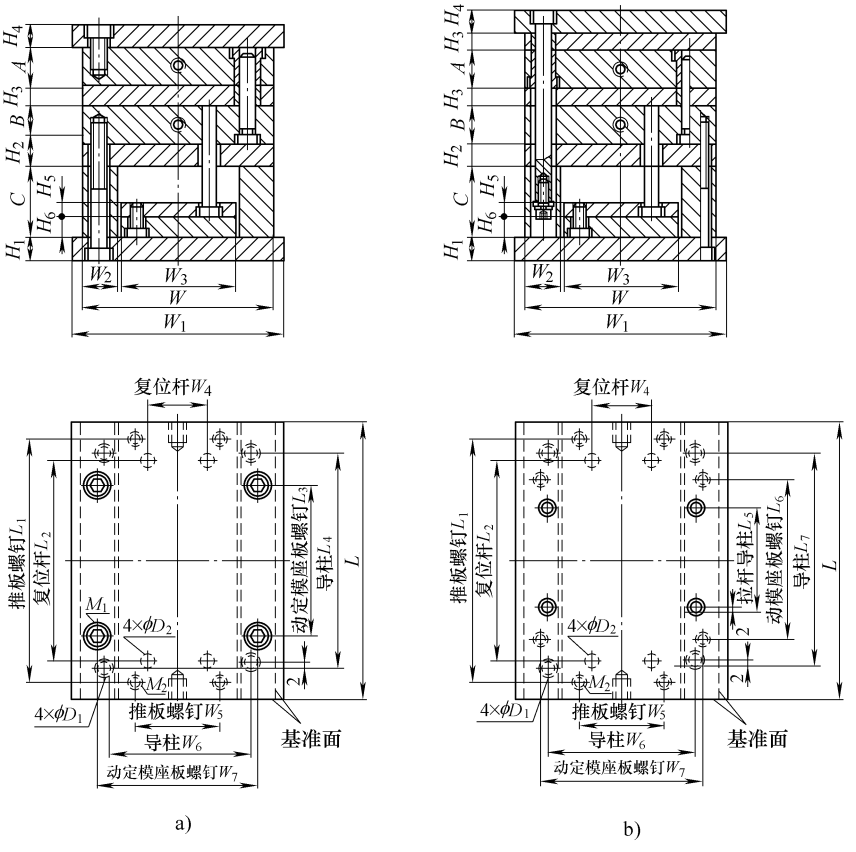


图 4-49　基本型模架组合尺寸图示

a）直浇口模架　b）点浇口模架

在模架组合系列中，以模板的宽度尺寸作为系列的主参数，各配以一组长度尺寸要素，共组成 110 个尺寸系列，适用模板尺寸范围 $W \times L$ =（150mm × 150mm）~（1250mm × 2000mm）。又按照同品种且同系列，对模板厚度 A、B 和垫块高度 C 作为选定模架的规格。

塑料注射模模架规格的标记：模架—型号—系列—规格—标准号。例如，直浇口 A 型模架，模板周界 $W \times L$ 为 200mm × 250mm，模板厚度 A = 50mm、B = 40mm 和垫块高度 C = 70mm。标记；模架 A2025-50 × 40 × 70 GB/T 12555—2006。又如，点浇口 B 型模架，模板 $W \times L$ 为 300mm × 350mm，A = 50mm、B = 60mm、C = 90mm，拉杆导柱长度 200mm。标记；模架 DB3035-50 × 60 × 90-200 GB/T 12555—2006。

（7）标准模架的选择方法　模架的选择是注射模具设计过程中的重大决策。在以下四方面的设计计算完成之后进行。

1）注塑件在模具中布置确定后，浇注系统也已初步设计。

2）对模板上型腔的侧壁和底板厚度，进行强度和刚度的力学设计或校核计算。

3）要确定脱模机构的推杆工作行程；侧向分型抽芯机构的滑块抽拔行程。

4）选定了注射机的型号，保证模具在注射机上的安装和固定。

模架的选用的经验公式，有推板宽度（见图 4-49），W_3（mm）应满足

$$W_3 \geqslant w + 10\text{mm} \tag{4-28}$$

式中，w 是注塑件在分型面上的投影宽度（mm）。

复位杆之间的间距（见图 4-49）L_2（mm）还应满足

$$L_2 \geqslant l + d + 10\text{mm} \tag{4-29}$$

式中，l 是注塑件在分型面上的投影长度（mm），d 是复位杆的直径（mm）。

2. 锥面斜面定位机构

锥面定位机构多用于大型、深腔和精度要求高的注塑件，特别是薄壁偏置不对称的壳体。大尺寸注塑件在注射时，成型压力会使型芯与型腔偏移，侧向压力会使导柱导向过早失去对合精度。过大侧压力不能让导柱单独承受，因此要用锥面斜面定位。锥面斜面定位同时也提高了模具的刚性。

图 4-50 为双锥面定位机构的注射模，常用于圆筒类塑件；必须保留导柱导向机构。导柱前部的辅助长度，在锥面接触定位前起导向作用。锥面斜角 10° ~ 20°，高度在 15mm 以上；两锥面都要淬火处理。

图 4-51 为斜面定位机构的注射模，常用于矩形型腔的模具。四条淬硬的斜面镶条，安装在模板的间隙中。这种结构加工简单，通过对镶条斜面调整动模与定模的定位精度；接触面磨损后镶条便于更换。须注意，斜面方向应该在型腔压力下使接触面贴合更紧密。

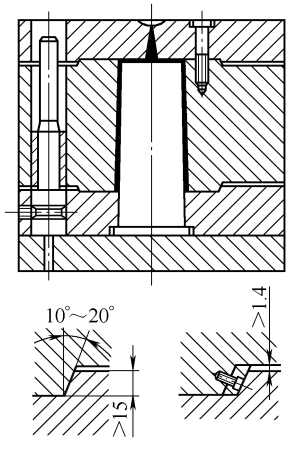


图 4-50　双锥面定位机构的注射模

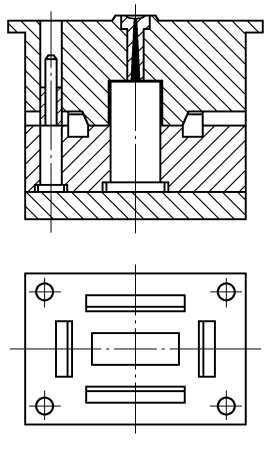


图 4-51　斜面定位机构的注射模

大中型注射模采用对合精确定位机构，是为了提高定模与动模对准精度。在定模和动模上分别安装对合的定位零件，辅助和精整模具闭合精度。合模精确定位机构已经系列化、标准化和商品化。

合模精确定位机构，一类是定位侧滑块，安装在模具的四面边壁上，如图 4-52 所示；另一类是直身定位滑块，如图 4-53 所示，安装在模具的分型面上；也有长 150mm 直身定位对合条；除了双平面定位外，还有单斜面和双斜面定位的。定位块用淬透钢（DIN 1.2343，ASTM H11）或渗氮钢（DIN 1.7131）制造，其硬度为 50～56HRC。

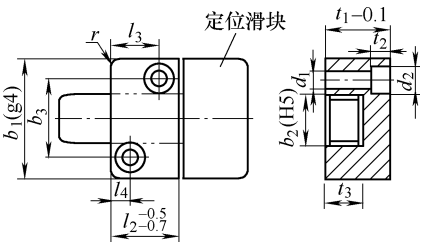


图 4-52　定位侧滑块

$t_3=12\sim25\text{mm}$；$b_2=16\sim25\text{mm}$；$t_1=20\sim40\text{mm}$；$l_2=22\sim66\text{mm}$；$b_1=40\sim100\text{mm}$

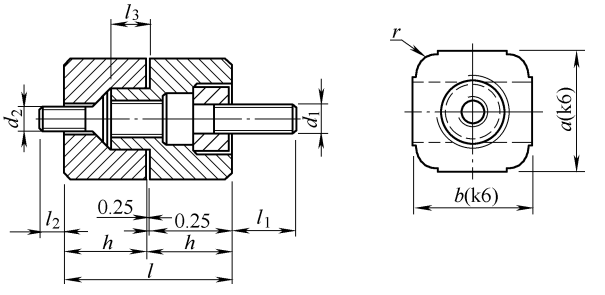


图 4-53　直身定位滑块

$a=b=20\sim40\text{mm}$；$h=14\sim22.5\text{mm}$；$l_3=3.5\sim9.5\text{mm}$

4.4　工艺参数校核

在模具设计过程中应该对注射机的注射量、注射压力和锁模力等工艺参数进行校核。

1. 注射量校核

（1）注射量以容积表示：

最大注射容积　　$V_{\max}=\alpha V$

可得最大注射质量　　$G_{\max}=\rho V_{\max}=\alpha\rho V$　　（4-30）

（2）注射量以质量表示：

最大注射容积　　$V_{\max}=\dfrac{\alpha G}{\rho_{PS}}$

可得最大注射质量　　$G_{\max}=\dfrac{\alpha\rho G}{\rho_{PS}}$　　（4-31）

式（4-30）和式（4-31）中

$V_{\max}$——模具型腔和浇道的最大容积（cm^3）；

$G_{\max}$——模具中注塑件和浇注系统凝料的最大质量（g）；

V——注射机型号规格的容积注射量（cm^3），等于螺杆头面积乘上注射行程；

G——注射机型号规格的质量注射量（g），等于对空注射 PS 熔料的最大质量；

ρ——注射塑料的固态密度（g/cm^3）；

ρ_{PS}——聚苯乙烯 PS 的固态密度（$1.05g/cm^3$）；

α——注射系数，取 0.75～0.85，无定形塑料可取 0.85，结晶型塑料可取 0.75。

注射系数 α 反映液态塑料的密度比固态塑料的低。一些结晶型塑料大致低 15%；无定形塑料大约低 7% 左右。PS 熔体密度是 $0.97g/cm^3$，加压后熔体密度是 $1.02\ g/cm^3$。即液态塑料的比容比固态的大。还需考虑到注射中，料筒壁与螺杆间间隙处的回流。低黏度物料回流略大些，并且还有保压补缩的需要。

倘若实际注射量过小，注射机的塑化能力得不到发挥，塑料在料筒中停留时间就过长。所以 $V_{min}=0.25V$，$G_{min}=0.25G$。故每次注射的实际容积注射量 V' 或质量 G' 应满足

$$V_{min}<V'<V_{max}$$

或

$$G_{min}<G'<G_{max} \tag{4-32}$$

2. 锁模力校核

高压塑料熔体刚充满模具型腔时会产生沿开模方向的胀模力。该胀模力前大小等于注塑件和浇注系统在分型面上的投影面积 A 乘以分型面上模腔的平均计算压力 q。模具锁模力必须大于胀模力，才能防止分型面上产生溢边，保证塑件在深度方向的尺寸精度（见图 4-54）。因此

$$F\geqslant KAq \tag{4-33}$$

式中 F——注射机的额定锁模力（kN）；

A——注塑件与浇注系统在分型面上的总投影面积（cm^2）；

q——分型面上模腔的计算压力（N/cm^2）；

K——安全系数，通常取 1.1～1.2。

模腔计算压力 q，应由本章 4.1.4 节型腔压力计算方法进行测算。如图 4-54 所示，模腔最大压力 q_{max} 为主流道末端压力 p_A。最低压力 q_{min} 为型腔末端压力 p_c。模腔计算压力 q 常取此两者的平均值。在数据不足时可用经验推测，常取注射压力 p_0 的一半，$q=0.5p_0$，大致范围为 $(200\sim400)\times10^5$ Pa。黏度较高的塑料熔体、精度较高的塑料制品应取最大值。

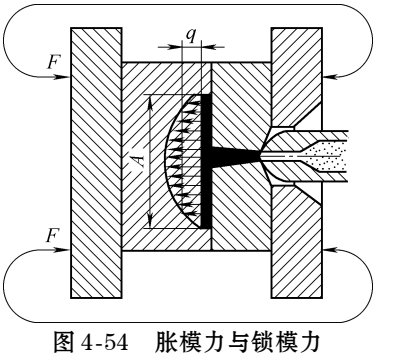


图 4-54 胀模力与锁模力

3. 最大注射压力校核

注射机的额定注射压力即为它的最高压力 p_{max}，应该大于注射机成型所需调用的注射压力 p_0，即

$$p_{max}\geqslant K'p_0 \tag{4-34}$$

式中 K'——安全系数，常数为 1.25～1.4。

所需注射压力 p_0 由本章 4.1.4 节 型腔压力分析所述，由所需型腔压力 Δp_c、浇注系统压力降 Δp_r 和注射装置中的压力降 Δp_c 组成，需分别计算和推测。生产中，p_0 大致

在（700 ~ 1000）× 10^5 Pa 范围。

4. 安装参数校核

（1）模具厚度校核　模具厚度 H_m，也称模具闭合高度，必须满足

$$H_{min} \leqslant H_m \leqslant H_{max} \tag{4-35}$$

式中　H_{min}——注射机合模部件允许的最小模厚，即注射机动模板与定模板间的最小开距（mm）；

H_{max}——注射机允许的最大模厚（mm）。

（2）开模行程校核　开模行程校核与注射机合模装置结构类型有关。

1）液压-机械合模装置。注射机合模装置的工作行程是曲肘机构的行程，其行程 H 一定，且较小。液压-机械合模装置有调节注射机动模板与定模板间距的装置，以适应模具闭合高度 H_m 的变化。因此，曲肘机构的行程与模具闭合高度无关。

单分型面注射模见图 4-55，应满足

$$H \geqslant H_1 + H_2 + (5 \sim 10)\,\text{mm} \tag{4-36}$$

式中　H ——注射机动模板的开模行程（mm）；

H_1——注塑件顶出距离 ，即脱模行程（mm）；

H_2——包括浇注系统凝料在内的注塑件高度（mm）。

双分型面注射模见图 4-56 所示，应满足

$$H \geqslant H_1 + H_2 + a + (5 \sim 10)\,\text{mm} \tag{4-37}$$

式中　a ——定模板和型腔板之间的分离距离，mm；此距离 a 应足以取出浇注系统的凝料。

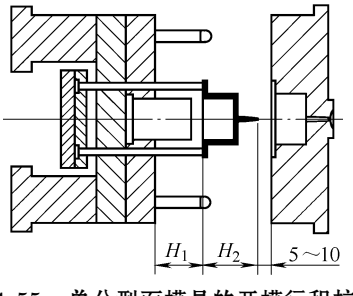


图 4-55　单分型面模具的开模行程校核

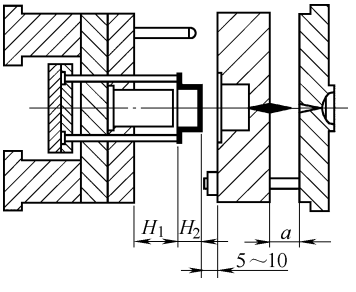


图 4-56　双分型面模具的开模行程校核

由于模具厚度 H_m 已满足式（4-35）要求，固定不变的曲肘行程 H 在行程校核中与模具厚度无关。

2）液压合模装置。全液压式的合模装置，模具行程可以在一定范围内调节。合模装置的行程 H，等于动、定模之间的最大开距 L 减去模厚 H_m。若模具厚度增加，则开模行程减小。如图 4-57 所示，开模行程与模具厚度有关。

单分型面注射模

$$H = L - H_m \geqslant H_1 + H_2 + (5 \sim 10)\,\text{mm} \tag{4-38a}$$

即

$$L > H_m + H_1 + H_2 + (5 \sim 10)\,\text{mm} \tag{4-38b}$$

双分型面注射模

$$H = L - H_m \geqslant H_1 + H_2 + a + (5 \sim 10)\,\text{mm} \tag{4-39a}$$

即

$$L > H_m + H_1 + H_2 + a + (5 \sim 10)\,\text{mm} \tag{4-39b}$$

（3）具有机动侧抽机构的模具　机动侧抽机构依靠开模行程，由斜导柱等零件完成侧向分型或抽芯的抽拔距，如图 4-58 所示，故必须校核开模行程 H 是否满足完成抽拔距 S_c 所对应的开模行程 H_c。

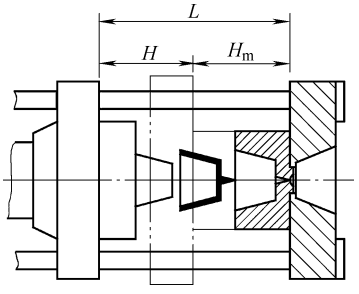


图 4-57　液压合模装置的行程校核

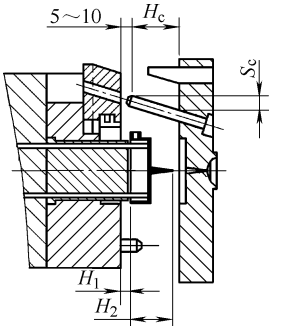


图 4-58　机动侧抽机构的开模行程校核

1）当 $H_c > H_1 + H_2$ 时，则以上几个校核公式中的 H_1 和 H_2 两项用 H_c 代替，其他各项不变。

2）当 $H_c \leqslant H_1 + H_2$ 时，仍用以上校核公式。

若依靠开模行程完成脱卸塑件上的螺纹，则要保证开模行程中具有驱动螺纹型芯或型环旋出所需的行程。

（4）顶出装置校核　各种型号注射机的顶出装置、顶出形式和最大顶出行程各不相同，模具的脱模机构应与之相适应。脱模行程应小于注射机的顶出行程。

（5）安装尺寸校核　除前述安装定位圈和喷嘴匹配外，还需校核：

1）设计模具的长、宽方向尺寸要与注射机模板尺寸和拉杆间距相适应。模具应能穿过拉杆间空间安装到注射机的模板上。

2）注射机的动、定模板上有许多一定间距的螺孔，用来固装模具的动模和定模。设计模具时，动、定模的安装和固定必须与这些螺孔位置与孔径相适应。一般有两种装夹方法：一种是用螺栓穿过这些孔，再用压板压紧模板，这种方法对孔距要求灵活；另一种是直接用螺钉紧固，模板上所钻孔的尺寸和位置，必须与注射机模板上螺纹孔相吻合。这对较重的大型模具，紧固可靠又安全。

4.5　注射模具材料

塑料注射模具形状复杂，尺寸精度和表面粗糙度的要求很高，因而对模具材料的力学性能、镜面研磨抛光、图案蚀刻、热处理变形性能和尺寸稳定性都有很高要求。此外，还要求材料具备一定的强韧性、耐磨性、耐蚀性。本节介绍制造模具的钢材、铝合金和铜合金等，并介绍塑料模具零件的热处理和表面处理。

4.5.1　塑料模具用钢及其处理

注射模的模架和成型零件、型腔和型芯等零件，主要选用合金钢和普通钢。

1. 塑料模具钢的性能

（1）工作条件和失效形式　塑料注射模具的型腔受到 25 ~ 80MPa 的熔体压力，工作温度达 150 ~ 350℃。注射模的型腔压力和温度随着熔体的充模、流动和冷却、固化而周期性变化。模具的型腔间隙表面受到高压塑料熔体挤压而摩擦磨损。注塑件在脱模时，型芯的侧面又被磨损。一些塑料和添加剂对钢制的成型零件表面有腐蚀作用。

塑料模具的常见失效形式有磨损、腐蚀、塑性变形、断裂、机械疲劳和热疲劳。

1）磨损。高压力的塑料熔体在模腔内流动，凝固中的塑料件从模具中脱出，对模具的成型表面有摩擦，引起成型零件磨损。当塑料中含有较硬的矿物粉和玻璃纤维填料时，则磨损更为剧烈。随着模具使用时间增加，磨损量加大，模腔表面粗糙、拉毛并产生划痕，使成型的注塑件的表面粗糙。旧模具的成型表面经抛光后，才能继续使用。模具注射生产时磨损量和修模的抛光量，使模具的型腔尺寸增大，型芯径向尺寸变小，最终使塑料制品壁厚尺寸超差，模具报废。

2）腐蚀。塑料中含有氯或氟原子时，在加热温度下有热分解，塑料中含有阻燃剂等添加剂也会在加热状态时分解，同时产生的有害气体等挥发物，会腐蚀模具。腐蚀会加快磨损，磨损的表面又促进腐蚀。

3）塑性变形。在很高的型腔压力下，型腔板和型芯因刚度不足而产生塑性变形。注射模的型腔底板产生凹陷。细长型芯会发生弯曲变形。成型零部件上的棱边和棱角会有塌陷。成型表面硬化层太薄，型腔表面强化或材料的热处理不当也会造成塑性变形。注射模模板的塑性变形会卡滞脱模机构的运动。成型零部件的塑性变形会影响塑料制品的尺寸精度。

4）断裂。在很高的型腔压力下，模板的强度不足会产生断裂。成型零件的结构复杂，所产生应力集中，可能使型芯和凹模型腔产生裂纹并断裂。

5）疲劳和热疲劳。注射模的型腔压力，是随着注射周期而循环变化的，使型腔表面受到脉动应力作用，产生疲劳裂纹而使模具零件破坏。注射模的热负荷也是循环变化的，型腔表面反复受热和冷却，在高应力区萌生热疲劳裂纹；加上型腔表面的脉动应力，使热疲劳裂纹扩展，最终产生疲劳断裂。

（2）塑料模具钢的使用性能要求

1）足够的强度和硬度，使承受高压负荷时弹性变形很小，不产生塑性变形。注射模成型表面的硬度在 38 ~ 45HRC 范围内。如果成型表面形状简单，抛光要求高，工作硬度可取高些；对于上百万次的注射寿命要求，表面硬度更高；反之，硬度值取低些。

2）良好的耐磨性使注射模成型表面粗糙度和尺寸精度能长期保持合格，有较长的使用寿命。

3）对有些塑料品种，如聚氯乙烯和含有阻燃剂塑料，必须考虑选用有耐腐蚀性能的钢种。

4）较好的耐热疲劳性能。注射模型腔不仅受高压塑料熔体冲刷，而且还受冷热温度交变的应力作用。普通的高碳钢，可经热处理获得高硬度，但韧性差，易形成表面裂纹，不宜采用。

（3）塑料模具钢的加工性能要求

1）机械切削加工性能。要选用易于切削，且在加工后能得到高精度零件的钢种。为此，以中碳钢与中碳合金钢最常用，这对大型模具尤其重要。易切削的预硬钢，以32～40HRC硬度供应坯料，现被广泛采用。对需电火花加工的零件，还要求该钢种的烧伤变质层较薄。含碳量较高的工具钢，电加工中常有片状的剥离现象。

2）镜面抛光性能。注射模成型零件工作表面，都需研磨抛光成镜面。对于模具型腔的表面粗糙度，*Ra* 在0.16～0.08mm之间。粗糙度低于 *Ra*0.05mm 时可呈现镜面光泽。用于制造透明塑料制品的模具，对模具材料的镜面抛光性能要求更高。镜面抛光性能不良的材料，在抛光时会出现针眼、空洞和斑痕等缺陷。镜面抛光性能主要与模具钢的纯洁度、硬度和金属显微组织等因素有关。硬度高，晶粒细有利于镜面抛光。脆硬的夹杂物和金属组织不均匀，会降低模具钢的镜面抛光性能。因此，镜面模具钢大多是经过电渣熔炼或真空熔炼的超纯净钢。要求钢材硬度35～40HRC为宜。过硬表面会使抛光困难。钢材的显微组织应均匀致密，极少杂质，无疵斑和针点。

3）锻造和冷挤压性能。模具零件经过热锻成型，能提高力学性能。钢材的导热性好，在热锻时容易内外热透。材料的塑性好，容易热锻成型。注射模的较小型腔采用冷挤压方法加工时，要求原材料钢坯硬度位于135HBW，伸长率大于35%。

4）热处理和表面处理工艺性能。模具零部件经淬火或调质处理后，会产生变形。一些合金钢材的淬透性和淬硬性好，热处理后变形小。对于某些模具零件需要进行渗碳、渗氮或镀铬等表面处理，需关注材料的适应性。

5）焊接性能。模具在加工中，可能由于修补等原因，需要进行焊接。含碳量较低的钢材，焊接性能较好。

2. 常用热处理工艺

钢是铁碳合金，碳的含量不超过2%，有少量的硅和锰。低碳钢的碳含量的质量分数为0.1%～0.3%。高碳钢碳的质量分数为0.75%以上。碳钢经热处理后，能改善某些力学性能。塑料模具热处理工艺有退火、正火、淬火、固溶、回火、时效及冷处理等。

（1）退火　将金属材料加热至较高温度、保持一段时间然后缓慢冷却，以得到接近于平衡状态的金相组织，称为退火。退火的目的是使化学成分均匀，消除或减少内应力，改善力学性能及加工性能。并为成型零件的最终热处理准备合适的内部组织。塑料模具钢热处理的方法多样。按加热温度可分为两类。一类是临界温度以上的相变重结晶退火，包括完全退火、不完全退火、晶粒细化退火、扩散退火和球化退火等；另一类是临界温度以下的低温退火，包括软化退火、再结晶退火及去应力退火。按冷却方式可分为连续退火、等温退火、快冷-缓冷退火等。

（2）正火 按含碳量将碳钢加热到共析温度以上30～50℃，均温后在空气中冷却，

得到珠光体型的组织，称为正火。钢经过正火能提高强度和韧性等力学性能，消除残余应力。正火可分为普通正火、二段正火和等温正火等。

（3）淬火　淬火是将钢或合金加热到一定温度，保持适当的时间以获得相应的高温相，然后迅速冷却，获得远离平衡状态的不稳定金相组织。钢的淬火主要是得到强度高，耐磨性好的马氏体或贝氏体。钢淬火的处理方法很多，按加热温度的不同可分成完全淬火、不完全淬火、高温或低温淬火等。按淬火加热介质，有热浴淬火、真空和液体淬火等。按冷却方法，有连续、分级、喷液淬火等。

（4）固溶　将钢或合金加热到一定温度并保持一定的时间，然后迅速冷却下来，使高温的金相组织保留，并获得过饱和溶体，称固溶热处理。奥氏体不锈钢、马氏体时效钢、铍青铜以及铝合金常用固溶处理。

（5）回火　回火是指淬火或正火的钢材，加热到相变临界点以下某温度，保持一定的时间。然后以适当的速度冷却至室温。回火的目的是使淬火或正火得到的不稳定组织转变为稳定组织，适当降低硬度，提高塑性及韧性，消除或减少残余的内应力。按回火的加热温度，可分成低温、中温和高温回火。淬火加高温回火称为调质处理，是中碳钢最常用的热处理方法。按回火次数，有一次和多次回火。

（6）时效处理　高温淬火或固溶处理而得到的过饱和固溶体，在室温下停放相当一个时间，或在某一温度下加热，使合金的偏聚或强化相沉淀，此过程称时效处理。铍青铜和铝合金时效后，强度和硬度都有提高。

（7）冷处理　钢或合金淬火后，立即冷却到0℃以下的工艺，称为冷处理。冷处理可消除淬火钢中的残余奥氏体。减小 Cr12MoV 等钢种在电加工过程中开裂的危险。根据冷处理的温度不同，可分成-80℃以上的一般处理，和 -80 ~ -196℃的深冷处理。

3. 表面处理

用加快扩散的方式使欲渗金属或非金属元素渗入金属材料的工件表面，形成表面合金层的工艺称为表面处理，或叫做热扩渗技术。它属于化学热处理，所获得的扩渗层是与基材间形成合金结合，具有很高的结合强度。这是其他涂层方法，如电镀、喷涂或化学镀，甚至物理气相沉积技术所无法比拟的。

表面处理所用扩渗材料有碳、氮、硅、硼、钛或钨等，都不同程度应用于各类模具表面处理。本小节简略介绍塑料注射模上应用得最多的渗碳和渗氮工艺。

（1）渗碳　渗碳使低含碳（0.15% ~0.3%）钢零件表面获得高碳（1%）左右后，继续适当淬火和回火处理，以提高表面硬度、耐磨性和疲劳强度，同时芯部保持良好韧性和塑性。

注射模模架的导柱和导套零件用渗碳和淬火处理工艺。其表面硬度、耐磨性和疲劳强度，比高碳钢淬火处理零件要好。

在一模多腔的注射模上成型零件，选用含碳量低、塑性变形性能好的 20、20Cr 或 12CrNi3A 等钢材。先将其退火状态的零件冷挤压成型，再进行渗碳处理。若注射模成型矿物质或玻璃纤维充填的塑料，渗碳层深度 1.3 ~ 1.5mm；对刚性塑料有渗碳层深度 0.8 ~ 1.2mm；对有尖角和窄槽的成型零件，则以 0.2 ~ 0.6mm 为好。渗碳达到表层含

碳量 0.7% ~1.0% 范围内。经渗碳淬火后，不但硬度高，而且表层有较好的抛光性能，容易达到镜面程度。

渗碳工艺主要有下述三种。

1）气体渗碳。用煤油、煤气或石油液化气等为渗碳剂，对低碳钢提供活性碳原子。渗碳温度为 900 ~950℃，依照渗碳深度，渗碳时间为 2 ~6h。此方法生产效率高，效率可以控制，渗碳层的质量和力学性能较好，但易产生内氧化。此种方法目前应用最广。

2）固体渗碳。把零件和固体渗碳剂装入渗碳箱中，用盖子和耐火泥封好。加热温度为 900 ~950℃，保温足够长时间，获得一定厚度渗碳层。固体渗碳剂通常是一定粒度的木炭与质量分数为 15% ~20% 的碳酸钙。其质量不易控制，易产生内氧化，适用于单件小批量生产。

3）真空渗碳。用甲烷和丙烷作为渗碳剂，加热温度为 1030 ~1050℃。渗碳和扩散过程间歇进行。渗碳速度快，约为气体渗碳时间的一半。在真空环境中操作，渗碳层浓度均匀，不产生内氧化，特别适合形状复杂零件渗碳。

（2）渗氮　在含有活性氮的介质中，使钢制零件的表面渗入氮元素并形成渗氮层，此种表面化学处理方法称渗氮或氮化。渗氮是在 500 ~600℃温度下使活性氮原子渗入钢工件表层中，形成各种氮化物 FeN、CrN 和 AlN 等，得到比渗碳更高的硬度，达到 1000 ~1200HV，能提高耐磨损、耐腐蚀和疲劳强度等性能。渗氮过程温度较低，通常随炉冷却，工件变形小。注射模的滑块等零件、塑料成型注射机的螺杆等零件都用中碳合金钢渗氮处理。

一般结构钢在渗氮之前均采用调质处理；高碳钢渗氮前经过淬火和低温回火处理。渗氮工艺主要有下述三种。

1）气体渗氮。在渗氮炉中通入氨气及其他气体。利用氨气受热分解，产生活性氮原子。由于渗氮温度较低，需要几十小时甚至上百小时加热渗氮。渗氮层较薄，一般在 0.5mm 左右。渗氮层脆性较高，不能承受较高的接触应力和冲击载荷。

2）固体渗氮。用粒状渗氮剂与工件同时装入箱中加热完成渗氮。渗氮剂的载体为蛭石、木炭粒和多孔陶瓷，吸附了尿素和三聚氰酸等供氮。这种渗氮方法适用于小批量的多种工件的处理。

3）离子渗氮。在真空室内施以 400 ~700V 的高电压，通入氨气和氮氨混合气体。以真空容器为阳极，钢零件为阴极，氮正离子高速冲击零件表面生成氮化物，形成渗氮层。此方法渗氮速度快，零件变形小，渗氮层脆性低，操作条件好，无公害。缺点是形状复杂的零件，很难同时达到一致的渗氮硬度和深度。

4.5.2　各种注射模具用钢的性能和选用

这里介绍注射模的制造钢材，分析力学性能和加工性能，为塑料成型模具零件强度和刚度计算提供力学性能数据，为加工注射模提供工艺依据，讨论注射模具钢的选用。

1. 注射模具钢的性能

低碳钢有较好的焊接和锻压的加工性能。中碳钢有较好的金属切削加工性能，是制造注射模用量最多的碳素钢，经适当的调质处理，可提高强度和硬度。高碳钢经淬火后有相当高的硬度，是淬火型注射模具钢。但是碳素模具钢热处理后的力学性能，不能满足注射模的强度、耐磨、耐蚀和抛光加工性能的要求。为进一步提高注射模的性能和使用寿命，重要的零件都已采用合金钢制造。合金钢是在碳素钢的基础上，在冶炼时加入一些合金元素。一些合金钢已分类为预硬型、耐蚀型和镜面型的常用钢种。

（1）碳素型注射模具钢

1）普通碳素钢。按 GB 700 规定，其牌号用 Q 和屈服极限应力表示。其中使用最多为 Q235，其屈服极限不低于 235MPa；还规定含锰少于 0.8%㊀，含硅少于 0.8%，有害杂质硫和磷少于 0.05%。常用牌号还有 Q215、Q255 和 Q257。模具中受力不大的支承结构件、垫板和垫块等常用 Q235。其可焊性好，价格较低。

2）优质碳素结构钢。GB 699 规定了这类钢材的化学成分和力学性能。优质碳素结构钢的含锰量为 0.35% ~0.8%，含硅量为 0.17% ~0.37%，有害杂质硫和磷的控制较严，不超过 0.035%。这类钢材制造的零件应该经过热处理后使用。它的编号为该牌号的平均含碳量的万分数表示。

3）20 钢的渗碳淬火。20 钢的含碳量为 0.20%。注射模的导柱与导套有用低碳钢制造。零件切削加工后，经表面渗碳，再经淬火和低温回火，使导柱与导套表面耐磨，而芯部坚韧耐冲击。将零件置于渗碳介质中，加热后保温一定时间，让碳在零件表层扩散。固体渗碳介质是 3 ~5mm 粒度的木炭。渗透后零件先经正火，随后重新加热淬火，并低温回火。气体渗碳介质多采用煤油，同样需加热淬火，并低温回火。

根据零件的渗碳表面积、磨削加工余量和磨损量，制定所需渗透层的深度（多为 0.8 ~1.5mm），由渗碳介质、保温温度和时间等工艺条件，来达到技术要求的渗碳深度。15 钢和 25 钢也为渗碳钢。淬火后的表面硬度达到 55HRC 以上。硬度与淬火方法和工艺有关。低碳合金钢 18CrMoTi、20CrMnTi 和 12CrNi13 等常见的渗碳深度为 0.9 ~1mm，淬火硬度为 58 ~62HRC。

（2）调质型注射模具钢

1）中碳钢。含碳量在 0.3% ~0.55% 之间的中碳钢，在注射模上常用 45、50 和 55 钢。与低碳钢相比，中碳钢的强度和硬度提高，而塑性有所下降。经调质处理，硬度达到 250HBW 左右。其切削加工性能好，化学成分和力学性能见表 4-6 和表 4-7。中碳钢可以焊接，但焊前需预热，焊后要退火。整体淬火的中碳钢零件的硬度低于 50HRC，而且变形大。表面淬火硬度可达 50HRC。中碳钢的热处理工艺，见表 4-8。

45 钢常用于注射模的模板。由于模板水淬时容易变形并开裂，一般都在正火状态下使用。成型零部件应该用 50 钢或 55 钢，有比较好些的耐磨性和抛光性能。

㊀未加说明的含量皆为质量分数。

表 4-6 中碳钢的化学成分

钢号	化学成分(质量分数,%)							
	C	Si	Mn	P	Ni	S	Cr	Cu
45	0.42 ~ 0.45	0.17 ~ 0.37	0.50 ~ 0.80	≤0.035		≤0.25		
50	0.37 ~ 0.50							
55	0.52 ~ 0.60							

表 4-7 中碳钢的力学性能

钢号	力学性能(不小于)					钢材交货状态硬度 HBW	
	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ/(%)	ψ/(%)	a_k/(J/cm^2)	未热处理	退火态
45	600	355	16	40	39	≤229	≤197
50	630	375	14	40	31	≤241	≤307
55	645	380	12	35	—	≤255	≤217

注：σ_b—抗拉强度；σ_s—屈服强度；δ—断后伸长率；ψ—断面收缩率；a_k—冲击韧度。

表 4-8 中碳钢的热处理工艺

钢 号	退火温度/℃	淬火温度/℃	回火温度/℃
45	850	840	600
50	830	830	600
55	820	820	600

2）中碳合金钢。常用牌号有 40Cr、35CrMo 和 38CrMoAl 等。合金元素的加入，提高了材料的淬透性和强度，也提高了渗氮处理的效果。调质处理后的中碳合金钢，有良好的综合力学性能，但硬度不超过 250HBW，并不耐磨，故应在调质处理后，进行表面淬火加低温回火，硬度可达 52HRC。要求零件表面有很好的耐磨性，并且又耐腐蚀和耐疲劳，可用 38CrMoAl 或 35CrMo 在调质后再进行渗氮处理。注射模中已广泛采用的预硬钢，是从中碳合金调质钢发展而来的注射模专用钢种。

3）38CrMoAl 钢的渗氮处理。38CrMoAl 钢有优良的力学性能和渗氮性能。它含碳 0.35% ~0.42%，含铬 1.35% ~1.65%，含钼 0.15% ~0.25%，含铝 0.70% ~1.10%。零件经调质后渗氮处理，表面有硬度高的氮化物，芯部有良好韧性，为注射机的螺杆和料筒的常用材料，也用于玻璃纤维增强塑料和腐蚀性塑料的注射模上成型零件和滑块。渗氮层达 0.4 ~0.6mm，表面硬度可达 70HRC 以上。

（3）淬硬型注射模具钢

1）碳素工具钢。其含碳量比中碳结构钢高。它的牌号为 T，后面加上平均含碳量的千分之几，例如 T8、T10，平均含碳量是 0.8% 和 1.0%。用 A 表示的高级优质钢，例如 T5A、T10A 和 T12A，其有害杂质硫和磷限制在 0.03% 以下。软化热处理为球化退火，用于注射模中的浇口套、定位圈和小型芯；强化热处理为淬火加低温回火，硬度在 60HRC 以上，耐磨性好，用于注塑模中的导柱、导套、小型芯和镶片等耐磨零件。碳素工具钢的化学成分、力学性能、热处理工艺分别见表 4-9 ~表 4-11。

表 4-9　碳素工具钢的化学成分

钢　号	化学成分(质量分数,%)				
	C	Mn	Si	P	S
T8A	0.75 ~ 0.84	≤0.40	≤0.35	≤0.02	≤0.03
T9A	0.85 ~ 0.94				
T10A	0.95 ~ 1.04				
T12A	1.15 ~ 1.24				

表 4-10　碳素工具钢的力学性能

钢　号	淬　火			回　火		退火
	温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	温度/℃	硬度 HRC	硬度 HB
T8A	720 ~ 800	水	≥62	180 ~ 200	≥60 ~ 62	≤187
T10A	760 ~ 780	水、油	≥62	180 ~ 200	≥60 ~ 62	≤197
T12A	760 ~ 780	水、油	≥62	180 ~ 200	≥60 ~ 62	≤207

表 4-11　碳素工具钢的热处理工艺

钢　号	淬　火			回　火	
	加热温度/℃	冷却介质	硬度 HRC	加热温度/℃	硬度 HRC
T8A	780 ~ 800	水、油、硝盐或碱	63 ~ 66	160 ~ 180	60 ~ 63
	800 ~ 820		62 ~ 64	180 ~ 200	58 ~ 62
T9A	770 ~ 790		62 ~ 66	160 ~ 180	62 ~ 63
T10A	790 ~ 810		63 ~ 65	180 ~ 200	61 ~ 63
T12A	780 ~ 800		63 ~ 66	160 ~ 180	63 ~ 64
	800 ~ 820		63 ~ 65	180 ~ 200	62 ~ 63

2）高碳弹簧钢。含碳量在 0.55% ~0.70% 之间。常用牌号为 60 优质碳素钢，经淬火加中温回火热处理，制造螺旋弹簧和注射模中的推杆。它有比中碳钢更高的强度和硬度。

3）合金弹簧钢　常用的牌号有 65Mn 和 60Si2Mn，属于高碳合金钢。当弹簧截面较小时，市场供应经强化处理的钢丝，自行绕制成螺旋弹簧后，经 250℃、30min 去应力处理后应用。较大截面的弹簧，热成型后进行淬火加中温回火，具有良好弹性，现今有系列化商品供应。

4）H13 耐热淬火钢。美国的热锻模具钢种，相当于我国的 4Cr5MoSiV1 钢。H13 含碳 0.38%，含铬 5.3%，含矾 0.9%，含钼 1.3%，含硅 1.0%。H13 的合金与上两种钢相比较，不含钨，增加了铬和钒的含量。其淬透性和耐磨性好，有良好的热强度和热疲劳强度，适用于 600℃ 以下的热加工模具。1020℃ 淬火后，以 560℃ 回火，硬度为 56HRC，用来制造高温下强摩擦的注射模型腔和型芯，制造注射模热流道的喷嘴，可以保证模具的长寿命。H13 钢还可以进行渗氮处理。

（4）预硬型注射模具钢　预硬钢是指以易于切削和抛光的硬度供应钢坯，模具制造中不必热处理，能保证加工后获得较高的形状和尺寸精度，有利于缩短注射模的生产周期。

1）国产 3Cr2Mo（相当于 P20 ）钢材，将模板预硬化后以硬度 36 ~ 38HRC 供应，

抗拉强度 1330N/mm^2。3Cr2Mo 预硬钢的化学成分、力学性能、热处理工艺见表 4-12 ~ 表 4-14。P20（美）是国内外流行的注射模成型零件、模芯体积块和镶拼件的用材。

表 4-12 3Cr2Mo 预硬钢的化学成分

元素	C	Si	Mn	Cr	Mo
含量(质量分数,%)	0.28 ~ 0.40	0.20 ~ 0.80	0.60 ~ 1.00	1.40 ~ 2.00	0.30 ~ 0.58

表 4-13 3Cr2Mo 预硬钢的力学性能

回火温度/℃	硬度/HRC	σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ(%)	ψ(%)
149	54	1954	1358	11	25
204	53	1907	1482	12	37
260	52	1907	1489	12	40
316	50	1755	1469	12	44
371	48	1669	1427	12	46
427	46	1548	1358	12	47
482	44	1429	1289	12	51
538	41	1324	1193	14	51
566	38	1241	1100	14	54
593	35	1158	1041	16	58
621	30	996	896	18	59
649	26	896	789	18	62

表 4-14 3Cr2Mo 预硬钢的热处理工艺

正　火		淬　火		回　火	
加热温度/℃	冷却方法	加热温度/℃	淬火介质	加热温度/℃	保温时间/h
900	空冷	870 ~ 900	油	480 ~ 590	1

2）3Cr2NiMo（国产 718 预硬钢），是 3Cr2Mo 合金钢添加镍后的钢种，以预硬状态供货。供应钢坯硬度 280 ~ 350HBW。其含碳 0.38% ~ 0.42%，含铬 1.9% ~ 2.1%，含镍 1.0% ~ 1.1%，含钼 0.3% ~ 0.4%。经淬火加高温回火的试样，抗拉强度为 1070MPa，屈服极限为 977MPa，伸长率为 18.6%。局部淬火表面的硬度为 56 ~ 62HRC。钢材纯净，组织细密，抛光性能好。

3）在预硬钢中加入硫，能改善切削性能，适合大型模具制造。国产 SM1（55CrNiMnMoVS）和 5NiSCa（5CrNiMnMoVSCa），预硬后硬度为 35 ~ 45HRC。但切削性能类似中碳钢。

（5）耐蚀型注射模具钢　聚氯乙烯或含有溴化物等添加剂的塑料，在加热成型时有腐蚀性气体产生。硬质聚氯乙烯塑料管的连接件成型注射模，用马氏体不锈钢制造。这类含铬不锈钢 2Cr13、3Cr13 和 3Cr13Mo 等，含有 13% 质量分数的铬。其中 3Cr13 经油淬并高温回火处理后，硬度≥240HBW，拉伸强度 σ_b = 1100 ~ 1470MPa，但耐磨抛光性能和导热性能差，不能制造注射模的成型零件。注射模采用沉淀硬化型的不锈钢 0Cr17Ni4Cu4Nb。

0Cr17Ni4Cu4Nb（国产 17-4PH，曾简称 PCR）是含碳量低、耐腐蚀和可焊性好的硬质不锈钢；固溶处理后，具有一定的可加工性；再经时效处理，零件尺寸变形微小；

主要用于耐腐蚀的高精度模具的成型零件。0Cr17Ni4Cu4Nb 耐蚀钢的化学成分、力学性能、热处理工艺分别见表 4-15 ~ 表 4-17。

表 4-15　0Cr17Ni4Cu4Nb 耐蚀钢的化学成分

元素	C	Mn	Si	Cr	Ni	Cu	Nb	S	P
含量(质量分数,%)	≤0.07	≤1.00	≤1.00	15.50 ~ 17.50	3.00 ~ 5.00	3.00 ~ 55.00	0.15 ~ 0.45	≤0.030	≤0.035

表 4-16　0Cr17Ni4Cu4Nb 耐蚀钢的力学性能

热处理工艺		σ_b/MPa	σ_s/MPa	δ(%)	ψ(%)	硬度 HRC
固溶处理	时效处理					
	480℃4h + 空冷	≥1315	≥1175	≥10	≥40	≥40
1040℃ + 水冷或空冷	550℃4h + 空冷	≥1017	≥1000	≥12	≥45	≥35
	580℃4h + 空冷	≥1000	≥865	≥13	≥45	≥31
	620℃4h + 空冷	≥930	≥725	≥16	≥50	≥28

表 4-17　0Cr17Ni4Cu4Nb 耐蚀钢的热处理工艺

固溶处理			软化处理			时效处理		
温度/℃	时间/h	硬度/HRC	温度/℃	时间/h	硬度/HRC	温度/℃	时间/h	硬度 HRC
900	2	45	700	2	28	500 ~ 520	6 ~ 8	40

(6) 时效硬化型注射模具钢　镜面钢多数是属于析出硬化钢，也称之时效硬化钢。它用真空熔炼方法生产。

1) 国产 PMS (10Ni3CuAlVS)，与日本 NAK80 相似。供货硬度 30HRC，易于切削加工。在真空环境下经 500 ~ 550℃，以 5 ~ 10h 时效处理，钢材弥散析出复合合金化合物，使钢材硬化，硬度为 41 ~ 45HRC。PMS 镜面钢的化学成分和力学性能分别见表 4-18 和 4-19。PMS 钢耐磨性好，且处理过程变形小，材质纯净，可镜面抛光，能光腐蚀精细图案，还有较好电加工及抗锈蚀性能，工作温度达 300℃，抗拉强度为 1400N/mm^2。

表 4-18　PMS 镜面钢的化学成分

元素	C	Si	Mn	Ni	Cu	Al	Mo	P,S
含量(质量分数,%)	0.08 ~ 0.16	≤0.35	1.50 ~ 1.65	2.90 ~ 3.60	0.8 ~ 1.2	0.8 ~ 1.2	0.02 ~ 0.5	≤0.03

表 4-19　PMS 镜面钢的力学性能

钢　种	时效温度/℃	硬度 HRC	σ_s/MPa	σ_b/MPa	δ(%)	ψ(%)	a_k/(J/cm^2)
PMS(含硫)	510	42.5	1169.1	1303.5	16	49.2	14.7 ~ 17.1
	530	41.5	1194.6	1292.7	15	52.7	20.6
PMS (低硫)	510	42.7	1264.5	1331.9	14.7	47.8	21.6
	530	41.8	1191.7	1252.5	14.6	55.7	21.6

2) SM2 镜面钢 (20CrNi3AlMnMo)，含碳 0.17% ~ 0.23%，含铬 0.8% ~ 1.25%，含镍 3.0% ~ 3.5%，含铝 1.0% ~ 1.5%，含锰 0.8% ~ 1.2%，含钼 0.2% ~ 0.5%。SM2 为时效硬化易切削钢，经加热固溶，520℃时效 6 ~ 10h 后，有硬度 39 ~ 45HRC。切削加工和抛光性能好。可以达到 *Ra*0.029mm 的镜面。SM2 可以渗氮或氮碳共渗。

3）高强度的镜面钢 8CrMn（8Cr5MnWMoVS），预硬 33 ~ 35HRC，易于切削，淬火时空冷，硬度可达 42 ~ 60HRC，抗拉强度达 3000N/mm^2，可用于大型注射模以减小模具体积。

2. 注射模具钢的选用

注射模的种类很多，这里讨论注射模生产的钢材选用，见表 4-20 和表 4-21。

首先，考虑钢材在注射条件下的力学性能和加工性能。硬度在 30HRC 以下的钢材，抛光的镜面质量差，磨削面的质量不均匀。由于注射模的型腔复杂，还要依靠手工抛光。硬度在 50HRC 以上钢材抛光困难。镜面抛光的质量还取决于钢材基体组织致密，不含杂质和气孔。常用 50 或 55 调质钢，生产热塑性注射模的成型零件。硬度 250 ~ 280HBW 的钢材，易于切削加工，旧模具修复时的焊接性能较好，但抛光性和耐磨性较差。合金钢的强度比碳素钢高，热处理性能也有明显提高。常用的预硬钢和镜面钢，都是中碳和高碳的合金钢中适合注射模生产的钢种。我国引进国外生产钢种来制造注射模，主要是美国 P 系列的注射模具钢种，和 H 系列的热锻模钢种，例如 P20、H13、P20S、H13S。我国已生产专用的注射模具用的钢种，并以模板和棒料供应。

其次，考虑到注射成型塑料的性能、熔融塑料的黏度对成型零件的摩擦磨损程度、成型塑料的腐蚀性，采用硬度适宜的不锈钢制造成型零件，也有用渗碳或渗氮处理注射模的成型零件表面。早期用电镀铬层防腐蚀，但电镀层的厚度和质量很难控制，棱边和尖角有过厚的镀层，影响成型零件的尺寸精度；然而镀铬层的硬度高，低精度的注射模生产仍有采用。

再其次，考虑到注射模的工作寿命和模具材料的成本，选用钢种时应按塑料制品生产批量、塑料物料品种及注塑件精度与表面质量要求确定，见表 4-20。所选钢种应使注射模能减少抛光修模的次数，能长期保持型腔的尺寸精度，达到大批量生产的使用寿命期限。这对 30 万以上注射次数，和玻璃纤维增强塑料的注射成型生产尤其重要。

表 4-20　注射模具钢材选用

塑料与制品	型腔注射次数	适 用 钢 种
PP、HDPE 等一般塑件	10 万次左右	50、55 正火
	20 万次左右	50、55 调质
	30 万次左右	P20
	50 万次以上	P20、718
工程塑料	10 万次左右	P20
精密塑件	20 万次以上	PMS、SM1、718
玻璃纤维增强塑料	10 万次左右	PMS、SM2
	20 万次以上	38CrMoAl 渗氮、H13
PC、PMMA、PS 透明塑料		PMS、SM2
PVC 和阻燃塑料		17-4PH

注：P20—3Cr2Mo，718—3Cr2NiMo，PMS—10Ni3CuAlVS，SM1—55CrNiMnMoVS，SM2—20CrNi3AlMnMo，17-4PH—0Cr17Ni4Cu4Nb。

表 4-21　注射模零部件的选材

零部件名称	钢　种	热处理	硬　度
导柱、导套	1)20（0.5～1.2mm） 2)T8A 3)T10A	渗碳＋淬火＋低温回火 淬火＋低温回火 淬火＋低温回火	56～62 HRC 50～55 HRC 58～62 HRC
顶杆、拉料杆	1)65 2)65Mn 3）T8A	局部淬火＋低温回火 调质处理 退火 端部淬硬	40～45 HRC ≤302 HBW ≤187 HBW 50～55 HRC
拉板,拉杆	1)45 2)T8A	调质处理 淬火＋回火	28～32 HRC 40～45 HRC
浇口套	1)T8A 2）T8A	淬火＋低温回火 退火 凹坑淬硬	62 HRC ≤187 HBW 50～55 HRC
螺钉	45	正火	≤229 HBW
模板	45	正火	≤229 HBW
滑块	1)T8A 2)T10A 3)P20	淬火＋回火 活动部分:淬火＋回火 淬火＋回火(预硬)	40～45 HRC 54～58 HRC 30～38 HRC
斜导柱	1)T8A 2)T10A	淬火＋回火 淬火＋回火	50 HRC 54～58 HRC
导滑槽	1)T8A 2)T10A	淬火＋回火 淬火＋回火	52～56 HRC 54～58 HRC
锁紧楔	T10A	淬火＋回火	54～58 HRC
垫块,垫板	Q235	正火	
一般要求的型腔和型芯成型零件	1)50,55 2)50,55 3)T8A,T10A	正火 调质处理 淬火＋低温回火	≤241HBW,≤255 HBW 250～280 HBW 62～66 HRC
精度和寿命要求高的型腔和型芯成型零件	1)P20 2)718	淬火＋回火(预硬) 淬火＋高温回火(预硬)	30～38 HRC 280～350 HBW
精度和抛光要求高的型腔和型芯成型零件	1)PSM 2)SM2	固溶＋时效处理 固溶＋时效处理	41～43 HRC 39～45 HRC
耐腐蚀要求高的型腔和型芯成型零件	17-4PH	固溶＋时效处理	40～45 HRC
耐磨性要求高的型腔和型芯成型零件	1)H13 2)38CrMoAl 渗氮	淬火＋回火 调质处理＋渗氮	61～63 HRC 950～1100 HV

4.5.3　注射模具用铝合金和铜合金

本节介绍在制造注射模的铝合金和铜合金。与铜和铝合金相比，铸造锌合金的熔点最低（390℃），能方便铸造模具零件。尽管锌合金的力学性能接近铝合金，但锌合金模具的工作温度低于 150～170℃，而且易腐蚀和蠕变，不能长期使用，只能用于可小

批量生产的吹塑和热成型模具。铝合金在低温低压的注射模具制造中应用得较多。铍青铜已经广泛用来制造注射模中的传热零件。

1. 铝合金

纯铝加入镁、锌、铜和硅等合金元素，又通过固溶强化和时效强化等方法，提高其强度和改善铸造性能。国内外已选用铸造铝合金来制造反应注射模具。

（1）铝合金的分类和特性　根据铝合金的化学成分和生产工艺，分成变形铝合金和铸造铝合金两大类。变形铝合金按性能又分成防锈铝合金、硬铝、超硬铝和锻造铝四种。这四种铝合金的代号分别用 LF、LY、LC 和 LD 字母和顺序号组成。铸造铝合金按加入的主要合金元素，分为 Al-Si、Al-Cu、Al-Mg 和 Al-Zn 等合金。又用铸造 ZL 和三个数字来表示。如 ZL101、ZL201、ZL301 和 ZL401 等，依次是铸造铝硅合金、铸造铝铜合金、铸造铝镁合金和铸造铝锌合金。

铝合金的密度小、熔点低，加工性和导热性能优于钢，用来铸造聚氨酯反应注射模具、聚苯乙烯发泡模。铝合金的不足之处是高温强度低，且高温下模具的形状和尺寸不稳定。由于热导率比钢高，使模塑成型的周期缩短，用来制造低温、低压的注射模。

（2）铝合金和热处理

1）ZL101 为热处理强化的铝-硅-镁系铸造铝合金。含 Si（质量分数）6.5% ~ 7.5%，含 Mg0.20% ~0.40%，余量为铝。熔体有优良的流动性，铸造方便。铸件气密性强；热裂和疏松程度低；又具有良好的耐腐蚀和焊接性能。其力学性能和热处理工艺详见表 4-22 和表 4-23。

表 4-22　ZL101 合金的力学性能

铸造方法	热处理状态	σ_b/MPa	δ(%)	硬度/HRC
S,R,J	F	≥160	≥2	≥50
S,R,J	T2	≥140	≥2	≥45
J	T4	≥190	≥4	≥50
S,R	T4	≥180	≥4	≥50
J	T5	≥210	≥2	≥60
S,R	T5	≥200	≥2	≥60
SB,RB	T6	≥230	≥1	≥70
SB,RB	T7	≥200	≥2	≥60
SB,RB	T8	≥160	≥3	≥55

注：S—砂型铸造；R—熔模铸造；J—金属模铸造；B—变质处理；F—铸造状态；T—热处理状态（见表 4-23）。

表 4-23　ZL101 合金的热处理工艺

热处理状态	固溶处理			人工时效		
	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质及温度	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质
T2	—	—	—	300 ± 10	2 ~ 4	空气或炉冷
T4	535 ± 5	2 ~ 6	水 60 ~ 100℃	—	—	—
T5				150 ± 5	2 ~ 4	空气
T6				200 ± 5	3 ~ 5	
T7				225 ± 5		
T8				250 ± 5		

2）LC9 铝锌镁铜系列的高强度变形铝合金，含 Zn（质量分数）5.1% ~6.1%，含 Mg20% ~30%，含 Cu12% ~20%，含 Cr0.16% ~0.30%，余量为铝；经固溶处理，加热温度 460 ~475℃，约 80℃水冷，有 390 ~530MPa 的拉伸强度；经时效处理，加热（140 ±5）℃、16h，有良好的抗应力腐蚀的性能；长期使用温度不超过 125℃；温度升高时，LC9 铝合金的强度下降；以棒或板供货，用来制造需加快热传导的注射模零件。

2. 铜合金

铜合金分成黄铜、青铜和白铜。黄铜是以锌为主的铜合金，以字母 H 表示。青铜是以锡、铍、锆、钛为主要合金元素的铜合金，以 Q 表示。白铜是以镍为主的铜合金，以 B 表示。铍青铜是以铍为主的青铜。

铍青铜有良好的导热性，又有足够的强度和硬度，可以制造注射模的成型零件，常用来制造型芯和镶嵌件，改善导热性能，提高注射模的冷却效率。铍铜零件表面可电镀铬，镀层 10 ~20μm，提高防腐、耐磨性能。但铍铜合金弹性模量比较低，热膨胀系数大，零件在高温、高压下易变形，成型尺寸不稳定。铍青铜在机械切削加工时，要避免切削表面过热，温度超过 290℃，会产生表面硬脆现象，切削时要确保优质乳化液供应，保证冷却效果。

铍青铜 CuBe，铍含量为 1.9% ~2.2%（也可表示为 CuBe2），含钴量为 0.35% ~0.65%，密度为 8.3g/cm^3。它以冷轧和铸造方式供应。冷轧 CuBe 坯料需经时效处理。选 370 ~430℃保持温度 3h，加热温度从低到高，获得硬度从高到低 42 ~38HRC，如果以 330℃加热 3h，得到硬度 44HRC 以上，会使材料的脆性增大。在最佳的热处理工艺下，CuBe 有拉伸弹性模量 $E=131\text{GPa}$，拉伸强度 $\sigma_b=1275\sim1480\text{MPa}$，屈服极限 $\sigma_S=1140\sim1380\text{MPa}$，热膨胀系数 $17.5\times10^{-5}℃^{-1}$，热导率 115 ~130W/（m·K）。另一种铸造 CuBe，在铸造厂经固溶处理（600 ~800℃、3h），再用 10 ~100℃的水淬火，有 38HRC 硬度，拉伸强度 $\sigma_b=1100\sim1150\text{MPa}$。另一种铍青铜为 CuCoBe，有较高的含钴量，密度为 8.78g/cm^3，热导率高达 210 ~260W/（m·K）。

4.6　注射模具的设计

先进的注射模具在使用寿命期限内保证制品质量，并要有良好的技术经济指标。这要求模具动作可靠、自动化程度高、热交换效率好、成型周期短。其次，合理选用模具材料、恰当确定模具制造精度、简化模具加工工艺、降低模具的制造成本亦十分重要。

1. 注射模设计特点

注射模设计并不是机械加工装备的设计，它属于塑料加工装备设计。在注射模设计时，必须充分注意到以下三个特点。

1）塑料熔体大多数属于假塑性的非牛顿流体，能“剪切变稀”。它的流动性依赖于物料品种、剪切速率、温度和压力。因此须按其流变特性来设计浇注系统，并校验型腔压力及锁模力。

2）注射模为承受很高型腔压力的耐压容器，应在正确估算模具型腔压力的基础

上，进行模具的结构设计。为保证模具的闭合、成型、开模、脱模和侧抽芯的可靠性，模具零件和注塑件的刚度与强度等力学问题必须充分考虑。

3）在整个成型周期中，注塑件-模具-环境组成了一个动态的热平衡系统。将注塑件和金属模的传热学原理应用于模具温度调节系统的设计，以确保制品质量和最佳技术经济指标的实现。

尽管注射模设计和制造的技术难度较高。但由于注射成型方法有其他塑料成型方法无法取代和无可比拟的优点，已引起人们普遍关注。注射模设计理论及方法，已经历了从经验设计到理论设计的过程，也经历了从二维计算机绘图设计，到三维的智能化的模具设计过程。

2. 传统的注射模设计过程

注射模的类型不同，注塑件的复杂程度不同和模具结构不一，可用不同设计方法和步骤。科学的设计步骤可提高模具设计质量和效率。以下所述是中等复杂程度的注射模的常规设计步骤。

（1）模具设计任务书　模具设计时必须清楚用户所有的要求和希望，因此在接受订货的同时，要与对方技术人员充分协商，将协商的结果全部记录在模具设计任务书上。任务书记录对模具设计各技术项目的研究结果，是模具设计工作的依据，也是今后模具设计审核的依据。

（2）拟定设计方案

1）注射成型工艺的可行性分析：

① 接受注塑件图或实物，应该明确塑料材料、生产批量、尺寸精度与技术条件，了解注塑件的功用及工作条件。

② 了解注塑件材料的力学性能和热性能，以及与注射工艺有关的参数。

③ 审核注塑件的注射成型工艺性，讨论壁厚、筋、圆角、粗糙度、尺寸精度、表面修饰、脱模斜度、形状和嵌件等的可行性。

④ 计算出注塑件的体积和质量。

2）确定设计方案。通过边计算、边绘草图的方法来拟定模具设计方案，至少有两个方案进行分析比较。需要讨论的内容及大致步骤如下：

① 确定型腔数目及选择注射机型号；

② 确定分型面及考虑排气措施；

③ 决定模具的总体结构、凹凸模的结构，同时考虑模具制造工艺的可行性；

④ 拟订注射工艺方案，确定注射各阶段的时间、压力、温度及速率；

⑤ 设计浇注系统，确定浇口形式和位置，决定主流道、分流道和冷料井的形式及尺寸；

⑥ 脱模机构设计；

⑦ 侧向分型及抽芯机构的设计；

⑧ 导向机构设计或确定所选用的标准模架；

⑨ 冷却系统设计；

⑩ 确定模具与注射机的联接。

(3) 绘制装配图和零件图　装配图按工作位置布置，以先里后外、由上而下的次序进行。即先绘注塑件、凹凸模，再绘浇注系统……两个或三个视图同时进行。其要求有：

1）按国家机械制图标准和注射模具图的习惯画法绘制；

2）反映全部零件并编序号，有详细的明细表，标注模具的外形尺寸与注射机的有关尺寸。

3）应有注塑件图或注塑件的轴测图；

4）注明技术条件，其内容有：叙述动作过程、模板的平行度要求、装配要求、试模要求、脱模行程、抽拔距、所用注射机型号；

5）零件图须按国家机械制图标准绘出。

二维的电子计算机绘图，提高了工程图的质量，也便于电子信息网络的快捷传递。

(4) 编写设计说明书和模具使用说明书

1）设计说明书除了编入设计任务书、注塑件图、注射成型工艺可行性分析、设计方案讨论和说明外，还应有以下校核和设计计算的主要内容：

① 模具与注射机有关参数的校核；

② 型腔数目的确定计算；

③ 对浇注系统流道和注塑件的流程比校核，以及冷却时间的计算；

④ 型腔压力的估算和浇注系统的尺寸计算；

⑤ 成型零件制造尺寸的计算；

⑥ 模具型腔壁厚和垫板厚度的强度与刚度校核，以及型芯的偏移和变形计算；

⑦ 开模力和脱模力的计算，脱模顶杆直径与根数的计算；

⑧ 侧向抽拔力及斜导柱强度计算，抽拔距的校核及斜导柱长度计算；

⑨ 调温系统的热平衡和传热面积计算，水管的直径、长度和数量以及冷却水参量计算；

⑩ 弹簧的强度和刚度计算。

2）模具生产企业还需编写使用说明书，便于设计师对模具的生产者和使用者进行技术交流。注射模使用说明的内容有：

① 注塑件的特征，塑料材料和注射工艺介绍。

② 模具结构介绍。常附有：二维的模具正视装配图，型腔数和流道和浇口说明，定模和冷却管道示意图，注塑件脱模方式和动力说明。

③ 说明模具注射时的动作过程，标明脱模顶出距离和侧向抽拔距离。

④ 列出模具使用的注意事项，说明模具上各机构正常运行的调整要求。

⑤ 说明模具的保养，提出模具存放前的检验和保养的要求。

《塑料注射模技术条件》GB/T 12554 标准，是编写模具使用说明书的准则。

(5) 设计审核　模具设计中的差错和疏忽会影响注塑件质量，延误交货。全面和认真审核，可保证优质模具生产。审核要确保：模具设计计算和结构合理、全套图纸无差错、模具加工和注塑件生产经济且可行。审核可按技术项目或专业分别由多人承担，并作审核记录。

审核内容一般可包括：

1）模具质量与寿命、注塑料制品质量是否符合用户要求，注射机选用是否正确；

2）有关模具基本结构合理性，该模具各组成系统和机构是否合理可靠；

3）对设计图的审核，应要求装配图和零件图表达清楚，尺寸及精度标注准确无误，技术要求全面合理；

4）模具加工工艺审核，应检查零件加工可行性，模具装配方便，有调整余地，并适合模具车间加工条件。

3. 现代的注射模设计过程

现代的注射模设计是以电子计算机的三维造型为特征，将计算机辅助工程、辅助设计及制造联成一体的设计过程。近年来，基于电子计算机性能提高和普及、基于 CAE/CAD/CAM 实用软件发展并智能化、基于数字控制的电加工机床、铣床和加工中心普遍使用，现代注射模设计逐步形成和完善。图 4-59 描述了现代的注射模设计的内容。注射模设计的实用计算机软件使设计过程有了重大变革。

（1）注塑件的设计造型　长期以来，注塑件按使用的功能和性能要求，选用塑料材料后，经结构设计描绘在二维的工程图上，并依照工程图设计和生产注射模。现代的注射模设计必须有注塑件的三维造型，其特点如下。

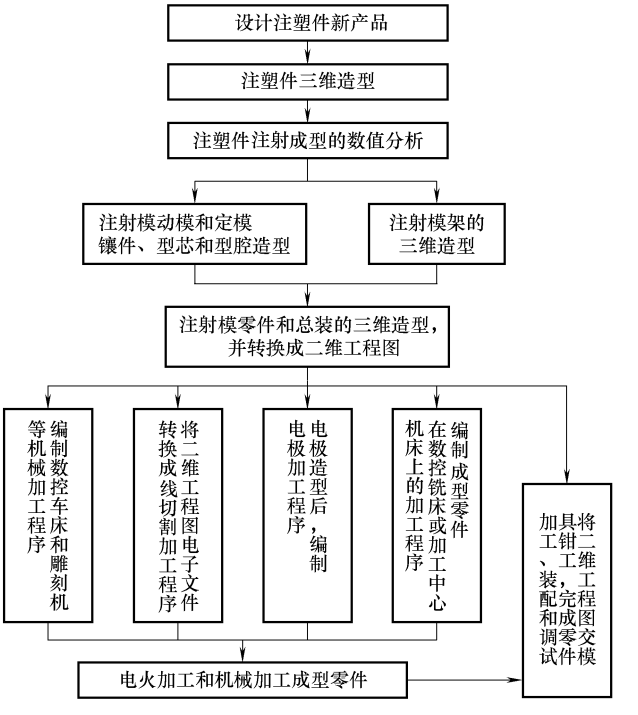


图 4-59　现代注射模设计过程

1）能给出直观的形象、详尽准确的注塑件形状和结构；能给注塑件设置脱模斜度，方便检测壁厚的均匀性。

2）为注射模的三维设计和注射成型的数值分析，提供三维造型的数据文件；为创建分型面、型芯和型腔的成型零件提供基础；为注射成型的分析，提供有限元网格划分的形体。

3）三维造型的注塑件，可由软件系统生成二维工程图，但需逐一标注尺寸和偏差。

4）在各种机电产品设计中可对若干注塑件（或者若干注塑件与金属件）进行三维

的装配体造型，可以检查相互的干涉；但对零件间的配合与公差，电子计算机不能辅助。

（2）塑料制品注射成型的数值分析

1）将单个三维注塑件引入分析软件的系统，可设置单个或多个塑料熔体注入点。塑料制品注射成型的数值分析，对注塑件设计有如下的引导和校核作用。

① 检查大型注塑件的流程比，确定合理的壁厚。

② 检查气囊和熔合缝的位置，确定浇口数目和位置。

③ 分析软件有自动寻找最佳浇口位置的功能。

2）将单个或多个三维注塑件引入分析软件的系统，甚至可将几个不同的注塑件引入分析系统，对模具的注射成型的数值分析，要进行如下的操作。

① 由分析软件的浇注引导模块，输入参数，添加浇注系统的主流道、分流道和浇口，也可直接造型，还可以将流道系统设置为加热状态。

② 由分析软件的冷却引导模块，输入参数，添加冷却管道，也可直接造型，并设置冷却水的温度和流量参数。

③ 启用分析软件的塑料材料库。可查阅世界著名供应商的各种塑料品种的力学、流变学、热力学性能和注射工艺条件。调用注塑件设计的材料，作数值分析。

④ 现有注射成型的数值分析软件，对浇道和冷却管道，采用二维圆柱体的有限元网格划分。对成型注塑件型腔，可选用中性层、表平面或三维的网格划分。不同网格划分，得到的数值分析结果的项目不同，精度也有差异。

3）塑料制品注射成型的数值分析，对注射模设计和注射工艺成型有引导和校核作用。

① 可检测在一定注射压力和注塑速率下的塑料熔体流动充模，预测到保压压力下的型腔压力，检察到气囊和熔合缝的分布，以改善浇注流道和浇口的设置，优化注射成型工艺，必要时修改注塑件的设计和塑料材料的选择。

② 可在一定的冷却水供应参数和管道布置下，检测注塑件上温度分布和固化过程，以改善冷却系统设计。

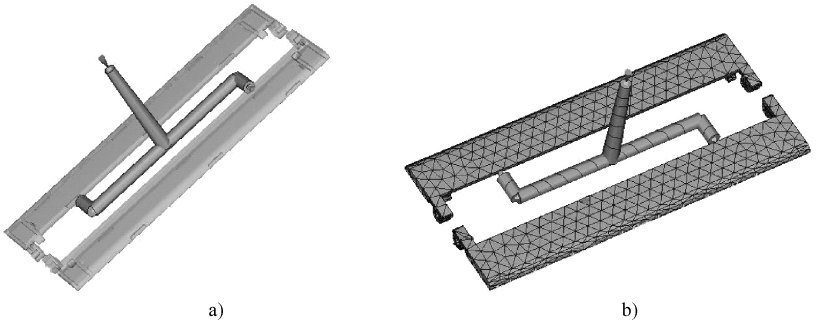
③ 可预测到注塑件上各位置在各方向的收缩和变形，以修正注塑件设计，优化注射成型工艺，改善浇注系统和冷却系统设计，减小翘曲变形量，使注塑件的尺寸和形位精度达到要求。

众所周知，对注射模进行计算机模拟，是流动和冷却分析的先进和有效方法。现代的注射成型计算机辅助工程 CAE（Computer aid engineering）软件，能辅助注射制品和模具设计。它是决策性的软件，将注塑件设计、模具设计、注射工艺拟订和试模、注射，依次进行数值分析，并可进行反复修改逐步优化，直观地在计算机屏幕上模拟出实际成型过程，预测注塑件设计对产品的影响，直接观察到注塑件上熔合缝和气囊的位置，预见注塑件成型时剪切速率、温度场和压力场，判断注塑件上密度不足、凹陷和注不满等缺陷，为改进注塑件和模具设计提供科学依据。

计算机模拟的前提是计算机造型，应让计算机获知注塑件和浇注系统所有形体和尺

寸的信息。然后，用有限元数值分析方法将形体离散化，进行网格划分。常用的是二维流动模型的分析方法。将三维的注塑件展平，有分支地展成若干个流程，分解为圆管件、圆板件、平板件或圆环板件相串联。因为注塑件是薄壁板的组合件，二维的计算机浇注系统模拟应用广泛。在应用 CAE 软件辅助设计注塑件和模具时，对分型面、浇道的分布和尺寸、浇口的形式和位置，设计师应该有所考虑。

现有的分析软件的三维造型功能较差，但各种三维软件造型的注塑件，经文件格式的转换，大多能被分析软件读出并分析。注塑件被自动网格划分后，当有限元单元的联通域、定向、重叠和匹配率等各项网格指标不合格时，就需要人工修补。这是一项费时的技术操作。图 4-60 是一模两件铰链盖流动充模分析前的网格化图形。分析完成后，可生成报告文件，可在没有分析软件的微机上读出。



a)　　b)

图 4-60　一模两件的成型制件网格化

a）浇注系统造型　b）注射成型制件网格化

（3）三维的计算机辅助机械设计和制造　20 世纪 80 年代，计算机辅助设计 CAD 技术，逐步由二维向三维过渡。电子计算机的三维设计符合机械设计的空间思维过程。设计者可借助计算机将人脑思维中的机械零件和它们的装配，转变为可视的、可分析的、可修改的和可模拟机械切削加工的实体模型。

三维的 CAD 软件用参数化（各种图形和形体描述参数化）和基于特征的实体建模，将各种零件的许多特征，经过叠加、相交和切割等操作，编辑成型，与设计思维和零件的加工过程吻合。

早期的三维的计算机辅助机械设计和计算机辅助机械制造软件是分别编制的。有的是面向数控切削加工，辅助编制刀具轨迹等加工程序。它有三维造型和编辑的功能。有的是面向大型机械工程设计，不但有三维零件造型和装配设计功能，也使 CAD 和 CAM 一体化。

随着三维软件的发展和版本更新，随着微型计算机性能提高、功能不断扩充并向着集成化方向发展，集成了工程图绘制、有限元分析和运动机构分析等功能。进入本世纪，三维集成的 CAE/CAD/CAM 软件在相互竞争中，又向智能化和专业化方向发展。

（4）注射模三维设计的智能化　各种三维数字模型的集成化 CAE/CAD/CAM 软件，向专门化方向扩展，继而又发展了弹簧和齿轮等常用件的参数化设计，用特征建模发展

了螺栓联接等标准件的调用数据库。

模具设计专门行业，面对单件无批量的生产，存在繁重的设计工作量，有大批的设计人员。模具零件主要在电子数字控制的电加工机床、数控铣床和加工中心机床上加工。三维设计软件按常规操作，设计造型模具零件后又装配汇集，需要调用大量菜单；高频率的鼠标点击，有较长的设计周期和繁重的操作。智能化的注射模和冷冲模设计等模块发展成功，可提高三维模具设计的效率。

注射模智能化设计的外挂模块，主要具有如下功能。

1）提供各专业厂商的各种三维模架的数据库，并能参数化建模；提供顶杆、回程杆、定位圈和浇口套等常用件的三维造型的数据库。

2）对注塑件除脱模斜度的处理外，还有收缩率计算和分型面的定义。

3）引导外侧滑块机构设计。

4）引导内侧滑杆机构设计。

5）引导浇注系统的设计。

6）引导冷却系统的设计。

7）对注射模各零件的干涉检查和开模仿真。

注射模的智能化设计，一方面在注塑件脱模斜度和收缩率三维处理后，定义分型面，继而建立动模和定模的镶块（图 4-61 成型镶块），同时完成了型芯的建立和型腔成型件的造型；另一方面，建立模架集成，同时完成模板、导柱和导套的造型。然后，将模板切割出凹腔后，把动模和定模的镶块编辑进模架，如图 4-62 所示。在计算机智能化程序引导下，添加定位圈和浇口套，建立外侧滑块机构和内侧滑杆机构，模板上挖出流道和浇口，挖出冷却管道，在模架里调节顶杆长度。最后完成成型零件的数控加工的编程，并将部分零件和总装图转成二维工程图。

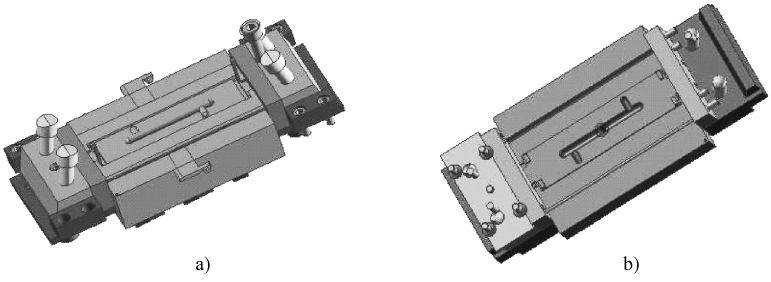
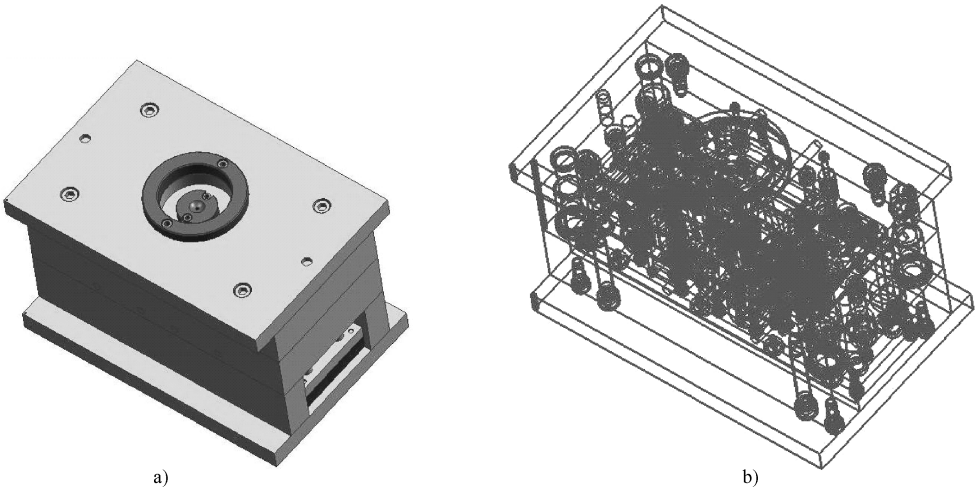


图 4-61　建成的成型镶块

a）动模的镶块　b）定模的镶块

但是，目前的智能注射模模块，尚不能引导结构复杂的模具设计，在成型零件的工作尺寸计算时，单纯考虑注塑件的收缩率，没有考虑模具上型芯和型腔磨损，没有考虑模具可动零件磨损对成型注塑件的尺寸精度的影响。智能化计算机设计，还只是辅助模具设计。



a)　　b)

图 4-62　与模架集成建成的注射模

a）外观　b）透视线框

参 考 文 献

[1]　刘朝福．注射模具设计师速查手册［M］．北京：化学工业出版社，2010

[2]　唐志玉．塑料模具设计师指南［M］．北京：国防工业出版社，1999

第 5 章　精密注射成型

塑料注塑件的质量，包括内在性质质量、表观质量和制品的形状及尺寸精度。影响注塑件质量的因素是多方面的，控制难度很高。本章深入分析取向、残余应力、收缩和翘曲变形，研讨注塑件熔合缝的强度。在注塑件的应力分析过程中，也介绍了改善制品质量的方法，然后介绍现代注射机控制系统的发展，讨论注射工艺的优化方法，全面陈述精密注射成型的新技术、基础理论及新概念。但是，深入研究精密注射的有关理论和方法，还需要阅读有关的专著。

5.1　残余应力、收缩和翘曲

塑料注塑件的质量都与制件的取向、残余应力和体积收缩密切相关。例如常见的翘曲变形、应力开裂、银纹和发白等现象。整个注射过程里，塑料熔体注射充填到低温的模具中，塑料受到压力和热传递的作用，经过黏流态、高弹态至玻璃态转变，经高压压实和冷却固化成型。

塑料注射制品的力学性能和尺寸稳定性很大程度上取决于注射工艺。塑料制品对收缩和翘曲比其他材料更敏感。当注塑件的厚度与平面尺寸相比较小时，那些薄壁圆板和仪表板，对翘曲非常敏感；而壁厚制件如透镜，则对收缩更为敏感。最终的注塑件质量受模具型腔设计的影响。

本节研究固化注塑件的形态，陈述取向、残余应力和体积收缩的产生和测试，以及这些现象与注射工艺的关系，同时还简略介绍计算机模拟的理论基础。

5.1.1　取向

无定形聚合物大分子的径向由几个原子组成，而长度方向由成千上万原子组成，两者相差悬殊。注射充模流动和冷却时，温度差造成注塑件取向，使制品在力学性能、热性能和光学性能上存在各向异性。

1. 实验和原理

对注塑件取向的研究，是利用光学性能和热性能在取向方向和垂直取向方向之间的性能差值，描述各方向上各位置的取向程度。测试方法有双折射、红外线、x 射线的衍射和热收缩。常用的是热收缩和双折射。

（1）热收缩法　无取向的分子链经过注射成型后具有取向状态。这种形变因冷却固化而冻结下来。将取向注塑件加热到玻璃化转变温度或熔点以上，取向聚合物分子会有分子热运动的回复，分子链段重新卷曲起来，导致塑料试样尺寸冷却后再次收缩。可用各方向收缩率的差异来判断各位置的取向程度。

将被测注塑件用切片机割得所测位置与方向的试样。对厚度方向要切得多片，以测得各位置的收缩率分布。自浇口始的沿着和垂直流动方向的收缩率，可在各位置切得长方条，来观察二维方向取向状态。还需进一步考虑到一个方向收缩会牵制另一方向。平行流动方向的收缩率 $S_{\parallel}$ 和垂直流动方向的收缩率 $S_{\perp}$ 的精确值应为

$$S_{\parallel}=1-\frac{1}{1+\dfrac{L_0}{L}-\sqrt{1-S_{\perp}}} \tag{5-1a}$$

$$S_{\perp}=1-\frac{1}{1+\dfrac{W_0}{W}-\sqrt{1-S_{\parallel}}} \tag{5-1b}$$

式中　L_0 和 W_0——切下试样的最初长度和宽度；

L 和 W——对应的已热收缩长度和宽度。

这两个式子需相互迭代计算解出。

在热收缩的实验中有两个影响需要考虑。首先是试样加热温度和时间，应确定一个能达到收缩平衡状态的数值；其次是在收缩过程的后阶段，由于试样表面的拉伸作用，有加速收缩趋势。其试样长度与宽度之比大于 10，允许在长度方向的分子链段充分卷曲。

（2）双折射法　透明注塑件和高聚物熔体已广泛采用双折射的光学技术来测量取向。双折射流变仪是无接触的光学测量方法。光束集中在很小的光轴上瞬时完成，测得各向异性。再经光弹性方程获知内应力。经一定数量整的切片试样测定，可测出注塑件的应力分布。

1）双折射率。折射率是光线作用透明试样时，入射角的正弦与折射角正弦之比。折射率与材料品种和光的波长有关。注塑件在有取向存在时，取向方向与垂直取向方向的折射率有明显的差异。双折射率 Δn 是由塑料试样结构形态的各向异性引起的。它定义为在两个相互垂直方向上，各测得的折射率 $n_{\parallel}$ 和 $n_{\perp}$ 的最大代数差

$$\Delta n=n_{\parallel}-n_{\perp} \tag{5-2}$$

如图 5-1 所示，用已知波长的单色光源，经起偏板后光束就成为依赖于偏振平面的振动波。若被测试样是单相透明具有不均匀内应力的薄片，它存在相互垂直、具有不同折射率 $n_{\square}$ 和 $n_{\perp}$ 的两个平面，称双折射平面。偏振光束以平行此试样的双折射平面的方向射入，会分解成两个垂直平面上的分量。这两个分量以不同光速通过塑料试样，有两个不同的折射率。

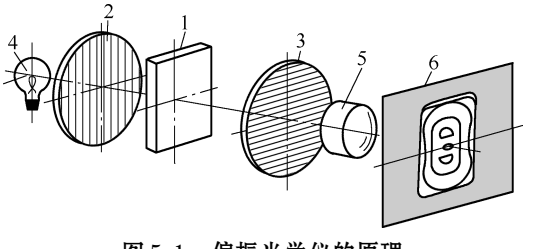


图 5-1　偏振光学仪的原理

1—试样　2—起偏板（偏光板）　3—检偏板（分析板）
4—光源　5—光学系统　6—屏幕

在试样中两个相垂直的振动分量，与起偏板垂直的检偏板来保证波长相同。但有光速的快慢，存在一个光程差 Δ。离开试样后两振动矢量叠加，

形成螺旋曲线。经检偏板和光学系统处理，取光束通路上一点，光矢量是椭圆。将其射影在屏幕上，看到有特殊角度的椭圆形的干涉条纹等倾线。当采用单色光和一对正交偏振板时，从屏幕上线条可读出条纹序数，即为相位差 m。由真空中的光束波长 λ 可求出光程差为 λm。再得到单位光程差

$$\Delta = \frac{\lambda m + R}{d} \tag{5-3}$$

式中 d 为试样的厚度。Δ 为单位长度的相位光程差，它反映了单色光在试样的相正交面上的光速差。由于光束在试样中存在速度的衰减，需计入光速阻滞值 R。单位光程差 Δ 就是折射率 $n_{\parallel}$ 和 $n_{\perp}$ 之差，定义为试样的双折射率，有

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} = \Delta \tag{5-4}$$

2）光弹性效应。测双折射率，可反映材料的各向异性。根据光弹性效应，存在光学双折射率与内应力的线性关系，对于应力张量 σ_{ij} 和双折射率张量 n_{ij}，有

$$n_{ij} = c\sigma_{ij} \tag{5-5}$$

此常数 c 是应力光学系数。c 值取决于聚合物材料的化学结构和构象。对给定的聚合物，它取决于相对分子质量和相对分子质量分布。它还对温度和时间有依赖性。对于 PS 料，应力光学系数 c 为 $4.8 \times 10^{-5}\,\mathrm{cm^2/N}$。

对于固态聚合物的应力分析，常用光弹性方程

$$\Delta n = c\Delta\sigma \tag{5-6}$$

如图 5-2 所示，$\Delta\sigma$ 为特定方向上的应力差。又有 $\Delta n = n_{11} - n_{22}$。其应力差 $\Delta\sigma$ 又有

$$\Delta\sigma = \sqrt{N_1^2 + 4\sigma_{12}^2} \tag{5-7a}$$

$$N_1 = \sigma_{11} - \sigma_{22} \tag{5-7b}$$

式中　N_1——第一法向应力差；

σ_{11}——注塑件充模流动方向正应力，x 方向的法向应力；

σ_{22}——注塑件宽度方向正应力，y 方向的法向应力；

σ_{12}——x 平面上，即流动截面上的剪切应力。

为研究注塑件在各方向上各位置的取向情况，将注塑件以浇口位置作为坐标原点，切成如图 5-2 所示小片。图示 x 方向为熔体流动方向，也是注塑件长度方向。x 为 1；y 为 2；z 是 3。因此，对长试条试样应从浇口起的位置，对切片层测量。假定型芯和型腔壁是恒温的，并是无限宽的注塑件。为测出流动诱导取向，按照一维条件建立第一法向应力差 N_1 与剪切应力 σ_{12} 的关系

$$N_1 = A\sigma_{12}^{\alpha} \tag{5-8}$$

式中 A 和 α 是经验常数。

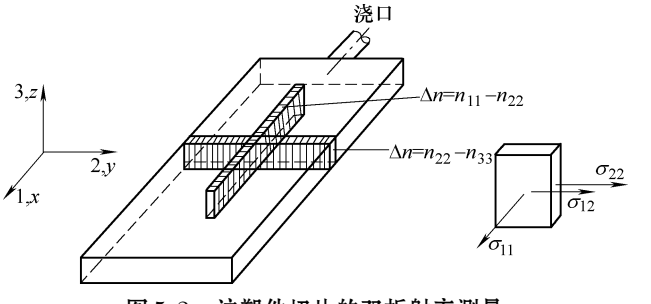


图 5-2　注塑件切片的双折射率测量

（3）聚合物取向原理

图 5-3 所示是热塑性塑料的

矩形条和四分之一圆片的取向实测试样。用偏振光学仪的光束，穿过透明的 PC 试样。可以见到图示的干涉条纹。条纹等倾线按取向增加程度等值排列。取向程度朝着浇口方向增加。最小的取向是塑料熔体在模具型腔里最后填充的地方。

导致注塑件壁厚方向的各向异性的原因是塑料熔体在型腔间隙中的喷泉流动，如图 5-4b 所示。喷泉流动在模腔壁上首先形成取向的冻结皮层，迫使间隙中央的聚合物分子链，在变窄的通道中，沿层流方向流向前端。料流前锋喷流到型腔壁面上时，有 v 型的内拉，接着粘附到新的壁面上。然后，中央的熔料在缓慢冷却中沿流动方向固化。这里的聚合物分子链获得一定的松弛。而皮层在冷模壁的作用下骤冷。如图 5-4c 所示，厚度方向表面层的取向程度最高，次表层次之，芯部的取向程度最低。



图 5-3　厚度为 1.7mm 的 PC 试样的干涉条纹

图 5-4 是四分之一圆片上的干涉条和分子取向。圆板型腔与矩形条型腔不同，从浇口注入的塑料熔体存在半圆周向的扩展流动。因此存在双轴取向的特征。图 5-4c 所示为 r/d 圆片上，不同半径 r 在壁厚 d 方向的双折射率。距浇口远的大半径 r 的双折射率下降。还可经实测证实；在同一型腔中壁厚 d 愈小，双折射率增大；经模膛内松弛或塑件退火后双折射率下降。

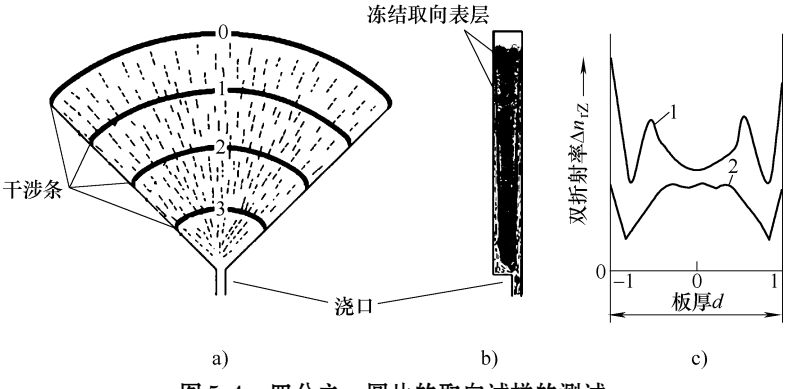


图 5-4　四分之一圆片的取向试样的测试

a）干涉条和取向　b）壁厚间隙中喷泉流动　c）注塑件壁厚方向双折射率分布

1—浇口附近位置　2—大半径的远处位置

无定形聚合物的取向有两种形态。聚合物熔体在玻璃化转变温度 T_g 以上流动，有较强的剪切应力作用，会使整个分子链取向排列。在较低温度下，较弱的外力作用产生分子链段的取向。后者可将注塑件加热后缓冷，进行退火而解取向。高分子链取向后，外加拉力由共价键承受。而垂直分子链排列方向是较弱的范德华力起作用，致使力学性能有方向性。聚合物材料中的弱点和疵点（甚至裂纹）在取向过程中转变成平行取向方向的闭合状态。相反，在垂直取向方向。它们成为产生应力集中的破坏性结构。

结晶型聚合物从熔点 T_m 始的冷却结晶过程中，由流动剪切应力作用生成按取向方

向排列的变形球晶或柱晶。它们中的片晶按取向方向折叠。因此，取向晶体的晶轴和共价键里有方向性。在晶体之间的无定形部分，在取向力作用下随着晶体的变形，分子链也按取向方向紧绷。结晶型塑料的注射制品在加热退火时，有再结晶的解取向过程，但效果是有限的。

（4）短纤维充填热塑性塑料　玻璃纤维增强热塑性塑料的基体有 PP、PA 和 ABS 等各种聚合物。常用的玻璃纤维直径 6 ~ 13μm，长径比为 25 左右。玻璃纤维的体积组分常为 10% ~33% 。PA 的玻璃纤维体积组分达到 55% 。短玻璃纤维增强的注塑件的强度和刚度等力学性能有明显提高，注射成型收缩率比聚合物注塑件低。短玻璃纤维增强的注塑件的取向分布与聚合物注塑件取向基本相似，但有两个方面的区别。

由于短玻璃纤维的取向与聚合物基体的流动充模方向一致，而玻璃纤维的热收缩率比聚合物低，遵照填料和基体的混合规律，玻璃纤维增强塑料的长度试样，其流动充模方向的成型收缩率小于垂直取向方向的横向收缩率。

黏流态的短玻璃纤维增强塑料，在注射模的流道、浇口和制品型腔中剪切流动时，一方面在壁厚的小间隙中作喷泉流动并取向；另一方面在扩展或收敛平面上，受到流程的几何形状和尺寸直接影响，在三维空间中短纤维有旋转后取向现象。图 5-5a 所示是注塑板件的表面层，短纤维沿着模具壁面的流动方向排列。图 5-5b 所示为注塑板的中央层，在型腔收敛中纤维有转向运动过程。

（5）热固性塑料的取向　热固性塑料的模塑制品，通常不考虑分子链的取向。注塑件在固化期间，高分子发生了交联。热固性聚合物的凝固是分子链相互连接成网络结构。

许多热固性聚合物要用颗粒状填料充填和玻璃纤维增强。酚醛树脂和环氧树脂的压缩模塑或压注制品的性能，依赖填充物的数量、种类和取向程度。压缩模塑时，凸模的压力直接作用于制件上。可统计 x 射线图，分析纤维填料在各方向的体积分数。而压注模塑时，物料在加料室中熔融，经浇注系统的通道流入制件的型腔。压力由加料室传递到型腔，流动诱导纤维状填料的取向。

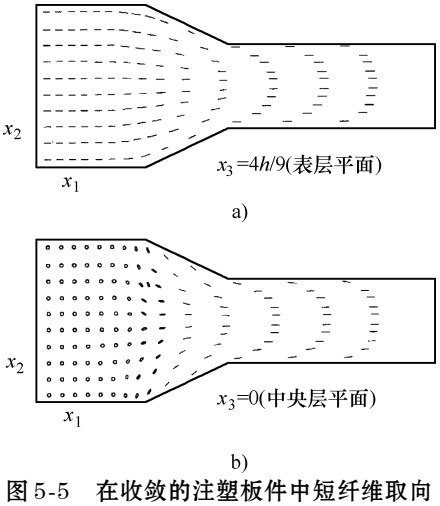


图 5-5　在收敛的注塑板件中短纤维取向

a）板的表面层　b）板的中央层

片状复合塑料 SNC 的模压制品，是将玻璃纤维、不饱和聚酯及大量的粉状填料，在加热和加压模具型腔中，经流动、凝胶后固化。纤维的 x 射线图见图 5-6a。纤维在各方向的取向的体积分数见图 5-6b。

2. 取向的组成

注塑件产生取向是两方面原因的综合结果。其一是熔体充模流动的诱导。在充模流动过程中，剪切应力和正应力导致了长分子链的有序排列，会被低温的模具冷料冻结成取向状态。其二是温差的诱导。存在着：熔体与模具的温差；模具各区域的温差；注塑

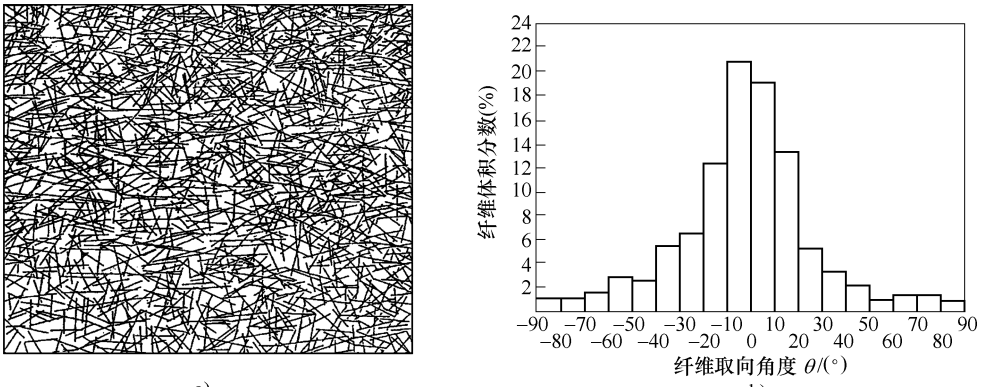


图 5-6　含 33% 纤维的热固性模压板的取向

a）制品中纤维的 x 射线图　b）模压板上的纤维取向的体积分数

件结构的各组元温度随时间变化等因素。由于塑料的热导率低，模具与注塑件系统处于不均匀的非恒定的温度场中。非平衡的热状态使注塑件的密度不均匀。冷却中不均匀收缩造成的取向，在得不到松弛情况下冻结下来。下面从流动和温差诱导取向的理论研究与实验结果分别陈述。

（1）流动诱导取向　图 5-7 是 PS 矩形条试样。在距浇口 160mm 处，厚度方向 σ_{12}、N_1 和 Δn 于冷却固化时的分布。PS 试样尺寸为 $W \times 2b \times L = 51\text{mm} \times 2.54\text{mm} \times 480\text{mm}$，试样厚度 $d = 2b$，有较大的长宽比。模具型腔壁温度低于玻璃化转变温度 T_g。对厚度切片截面用偏振仪测得双折射率 Δn，绘成图 5-7c 的厚度各位置 y/b 上的 Δn 的数值曲线。再由式（5-6）、式（5-7）和式（5-8）绘出剪切应力 σ_{12} 和法向应力差 N_1 的厚度方向分布。这些图横坐标的右侧为冷的模壁数据，左侧为试样芯部数据。

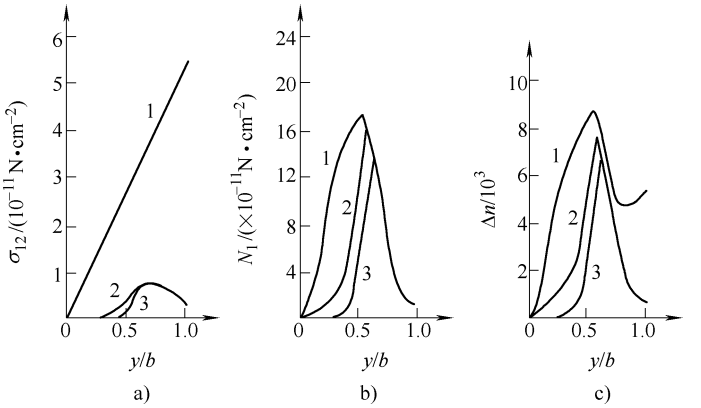


图 5-7　试样厚度方向 σ_{12}、N_1 和 Δn 于冷却固化时的分布

a）剪切应力　b）第一法向应力差　c）双折射率

1—2.5s 注射流动后终止　2—流动停止后 0.05s　3—松弛结束

从图 5-7 上 1 线所示为流动充模结束时具有最大的流动取向。充模终止后，2 线所

示为 0.05s 内芯部区域完成大部分松弛。越向冷模壁松弛效果越差。3 线所示的流动诱导取向在试样外表层最为明显，而峰值在次表层。在冷模壁区域剪切应力和法向应力差最早被冻结。对于纯流动诱导的取向，在低温模壁和注塑件松弛的综合作用下，厚度方向的最大取向在次表层，中心层取向最小。

（2）温差诱导取向　温度诱导取向也是用光学偏振仪测定。原始试样应该是无流动诱导取向，无双折射率显示。经加热到初始温度后快速降温，最后测出诱导的取向程度和分布。图 5-8 所示是 PS 试样有三种初始温度，在水中骤冷到 30℃后的温差取向分布。图 5-9 为 PC 试样具有初始温度 180℃，分别用水冷、在铜板之间冷却和气冷到 20℃或 120℃后的取向状态。

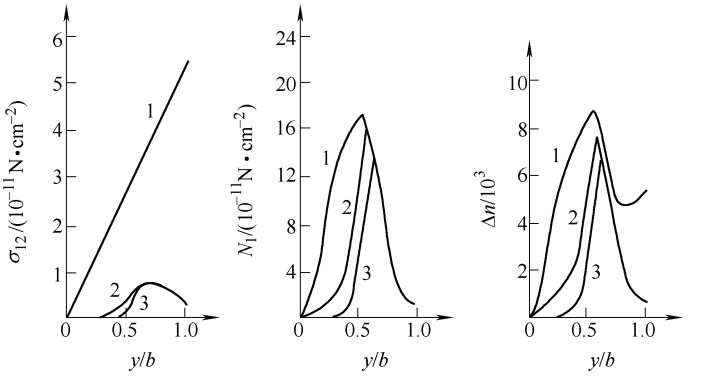


图 5-8　在水中骤冷到 30℃的 PS 试条厚度方向的双折射率

厚 $2b$ = 0.26cm，曲线 1、2 和 3 的三个试样初始温度各为 130℃、150℃和 170℃

由图 5-8 和图 5-9 可知，温差诱导的取向程度在芯部和表层最大，呈抛物线分布。从双折射率的数值可知，PC 试样芯部为拉应力，表层为压应力。PMMA 试样也是如此。但 PS 试条与它们相反。试样初始温度越高，双折射率的绝对值越大，取向程度越高。同样的初始温度和冷却温度，但试样处于不同的冷却介质中，如水冷与两铜板间冷却，它们的取向程度大致相同。在空气中慢冷，明显地降低了取向程度。两板之间约束骤冷，强化了试样表面和冷却介质之间相互作用，更接近于模具中注塑件的冷却过程。

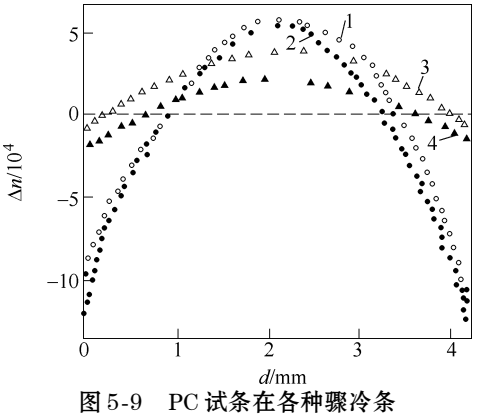


图 5-9　PC 试条在各种骤冷条件下的双折射率

从初始温度 180℃　1—在水中骤冷到 20℃

2—在两铜板之间冷却到 20℃

3—在两铜板之间冷却到 120℃

4—在空气中冷却到 20℃

关于加热试样在骤冷取向后的自然松弛过程，已知 PS 试件没有明显松弛，永久取向被永久冻结。而 PMMA 试条的松弛过程很慢，约一年时间双折射率才减少 50%。

在注射成型生产过程中，必然有熔体流动诱导取向。也会有低温模具诱导的温差取向。最终一起冻结在注塑件中。无定形塑料熔体的流动导致了长分子链有序排列取向。而温差诱导的取向是分子链段的取向。因此，在玻璃化转变温度附近退火处理的注塑件，温差取向会解冻，对应的双折射率会下降，而流动取向没有明显的解冻和松弛。

3. 聚合物取向与注射成型

了解注塑件上取向分布，可以在制定注射工艺和设计模具方面加以控制和利用。

（1）取向分布　流动和温差诱导的取向冻结后，注塑件的取向在厚度方向中心层的取向最低但不为零。双折射率 Δn 的最大值在次表层，表面层也有相当高的 Δn。图 5-10所示 PS 试样的各切片距浇口有不同位置，而且厚度有变化。它们的双折射率的分布有两方面的特征。

1）距浇口各位置的双折射率 Δn 的分布，从浇口始越远越小。

2）在注塑试件厚度增大的情况下，厚度截面上的双折射率总体下降。非均匀的厚度诱导了非均匀的双折射率。图 5-10 上曲线 1 是加厚起始截面位置，拐角上的双折射率最大。

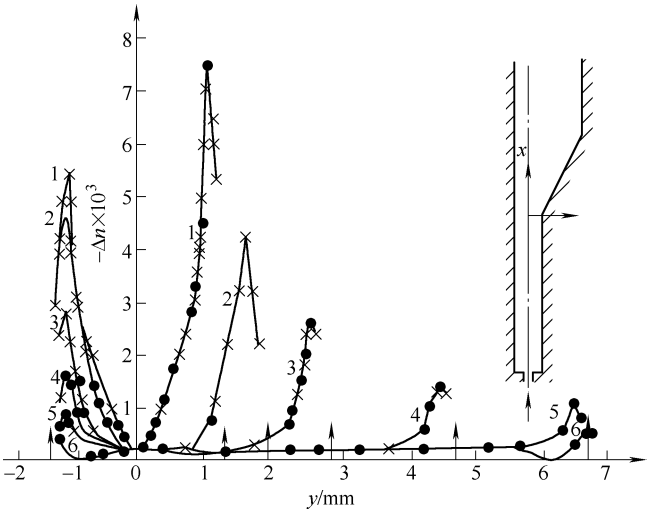


图 5-10　PS 试样不同位置厚度变化时的双折射率的分布

注塑试件 $W\times2b\times L=51\text{mm}\times2.54\text{mm}\times480\text{mm}$，模具温度 $T_m=40℃$

熔体温度 $T_c=223℃$，充模速率 $v=0.465\text{m/s}$

距加厚起始截面位置 x（mm）：1-0；2-16；3-40；4-89；5-140；6-210

（2）取向与注射工艺　在注射工艺条件中，熔体温度和保压压力对注塑件的取向程度影响较大。

1）熔体温度。图 5-11 说明了熔体温度和充模速率提高后，最大双折射率 Δn_{max} 降低。熔体温度提高，增强了分子热运动，提高了高分子链在液态和固态的松弛程度。充模速率提高缩短了注射流动时间，有利保持熔体温度，有利于解取向。反之，熔体温度降低，会增大注塑件表面取向层的厚度。模具温度提高也与熔体温度一样，有利降低取向，但不如熔体温度影响那样显著。

2）保压压力。试件厚度方向的折射率分布如图 5-12 所示。浇口冻结前的保压压力对注塑件取向有较大影响。在保压阶段进行补料充填，会使注塑件厚度方向有两个双折射率的峰值。熔体在较低温度和较高压力下，诱导了在里侧的第二个大的双折射率峰值。随着保压压力增大，这两个峰值都有增大，而且在保压压力消除后，不能获得明显松弛，只有注塑件中心层仍保持较高温度，有较弱的最低取向。

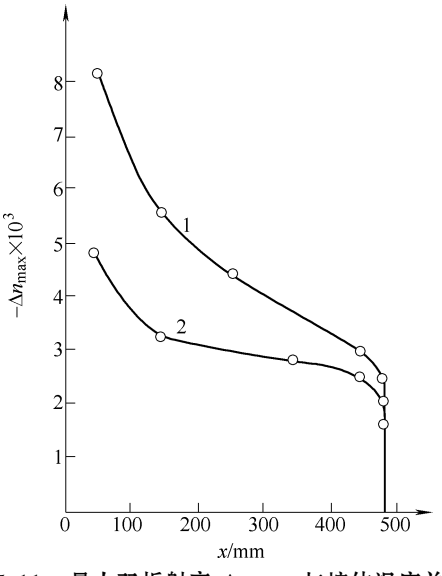


图 5-11　最大双折射率 Δn_{max} 与熔体温度关系

1—模具温度 $T_m=60℃$，熔体温度 $T_c=210℃$，充模速率 $v=0.56m/s$

2—$T_m=60℃$，$T_c=244℃$，$v=0.82m/s$

PS 试样 $W\times2b\times L=51mm\times2.54mm\times480mm$

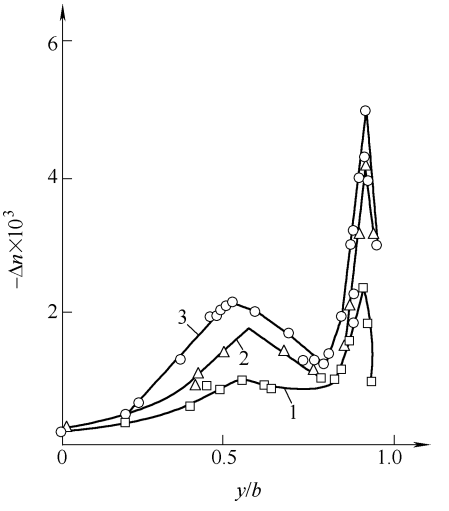


图 5-12　各种保压压力下试件厚度方向的折射率分布

PS 试样 $W\times2b\times L=40mm\times2.54mm\times120mm$，距浇口 10mm 的截面，模具温度 $T_m=30℃$，熔体温度 $T_c=227℃$，体积流率 $Q=36cm^3/s$，型腔压力：线 1—14×10^5Pa；线 2—35×10^5Pa；线 3—70×10^5Pa

（3）模具设计与取向　取向方向的力学性能和收缩率大于均质材料。而垂直取向方向的力学性能和收缩低于均质材料。平行和垂直取向，两个方向的收缩率之比反映两者的力学性能差异程度。取向方向有较高的弹性模量和断裂伸长率。

如图 5 -13a 所示为具有紧固内螺纹金属嵌件的信号灯，为使注塑件与嵌件的连接牢度提高，采用底部侧向浇口（B 处）。嵌件周围塑料具有圆周方向的取向，倘若浇口设在顶部（A 处），由于是轴线方向取向，两者的连接强度差。图 5-13b 所示塑料铰链，浇口应设在铰链附近（A，B 处），使充模熔体沿铰链弯曲轴线方向流动。而且在塑件脱模后即行弯折，增强铰链区域的取向程度，有利提高其弯曲疲劳强度。

5.1.2　残余应力

注塑件内残余应力存在导致了制品的不稳定，直接影响注塑件内在的物理和力学性

能，破坏了外观质量，也引起了形状和尺寸误差。残余应力所导致的翘曲变形、应力开裂、发白和银纹等质量问题困扰着注射生产。因此，对残余应力的研究，是注射加工工艺的重大课题，也是拟定最佳注射工艺的依据。

1. 残余应力的组成和分布

注塑件中的残余应力是由残余流动应力和温差残余应力组成的一种内应力。塑料熔体不稳定的充模流动，在充模和保压阶段，物料受到高剪切应力的正应力作用，诱导了隐藏在注塑件内的残余流动应力，使固化后注塑件具有取向形态与各向异性。由于注射模具温度的不均匀，更因为模内注塑件迅速冷却，在温差作用下诱发了注塑件内的热应力，成为温差残余应力。另一方面，由于塑料材料的黏弹性，注塑件在成型和使用过程中内应力有松弛现象。

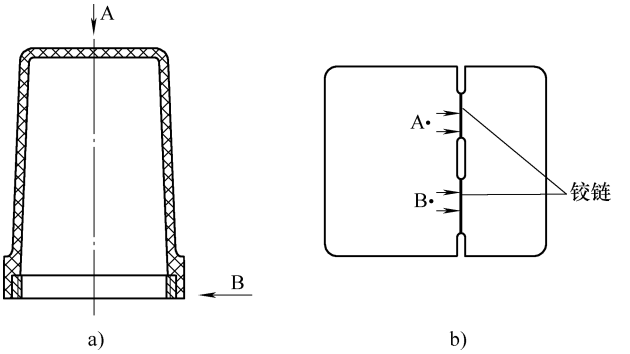


图 5-13　信号灯和铰链

a）提高信号灯嵌件连接强度　b）保证塑料铰链疲劳强度

要严格区别注塑件中的残余流动应力和温差残余应力是很困难的。但通过对试样的热处理和不同的测试手段，还是可以大致分别测得这两种应力的大小和分布。

（1）残余流动应力

对于透明塑料可用光的双折射法测得残余流动应力。图 5-14 是 PS 在厚度方向残余流动应力（$\sigma_x - \sigma_y$）的分布。残余流动应力为聚合物熔体在制品厚度尺寸的模隙内喷泉流动所致，均为拉应力，两表层的拉应力最大，芯部最低。

PS 注塑件在浇口附近，厚度的次表层可测得最大残余流动应力为 2MPa 左右。熔体温度 T_c 和充模速率 v 对残余流动应力影响最大。模具温度 T_m 提高有利降低取向程度，但并不显著。

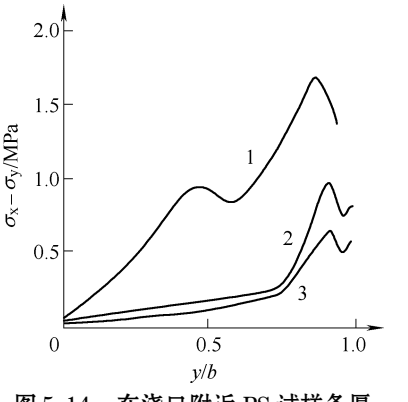


图 5-14　在浇口附近 PS 试样条厚度方向残余流动应力的分布

b—注塑件的二分之一厚度

1—试样 $W \times 2b \times L = 51\text{mm} \times 2.54\text{mm} \times 480\text{mm}$，$T_m = 60℃$，$T_c = 210℃$，$v = 0.56\text{m/s}$

2—试样 $W \times 2b \times L = 76\text{mm} \times 3.81\text{mm} \times 456\text{mm}$，$T_m = 60℃$，$T_c = 215℃$，$v = 0.71\text{m/s}$

3—试样 $W \times 2b \times L = 76\text{mm} \times 3.81\text{mm} \times 456\text{mm}$，$T_m = 40℃$，$T_c = 224℃$，$v = 0.36\text{m/s}$

（2）温差残余应力　将注塑件加热到初始温度 T_i，然后骤冷到浸浴温度 T_∞。这样排除了残余流动应力后，一般用去层法来测得该注塑件的温差残余应力。图 5-15 所示为 PMMA 和 PS 在注塑件厚度方向的温差应力分布曲线。注塑件厚度方向的温差残余应力呈抛物线分布。表层是压缩应力，向中性层降

低，至芯部为拉伸应力。通常是最大压缩应力大于拉应力。应力大小主要取决于物料品种和浸浴冷却温度。初始温度的影响较小。增加注塑件厚度，对表层的压缩应力影响不大，却提高了芯部的拉伸应力。对其他物料，如 PC、PPO（Noryl）、PA 的骤冷条的测定和预测计算，大多数物料温差残余应力的最大压缩应力为 20～30MPa，芯层的拉伸应力在 7～ 10MPa 之内。

图 5-14 和图 5-15 中 PS 的残余流动应力与骤冷条的温差残余应力相比较，两者的单值最大应力值分别为 1.8MPa 与 9MPa。流动残余应力相比之下是较小的。若远离浇口则两种应力相差更大，残余流动应力比温差残余应力要小一个数量级。从温差残余应力大致可预测注塑件的翘曲变形程度。目前，理论预测和计算机模拟注塑件的残余应力分布，通常将残余流动应力与温差残余应力分开处理，然后简单叠加。

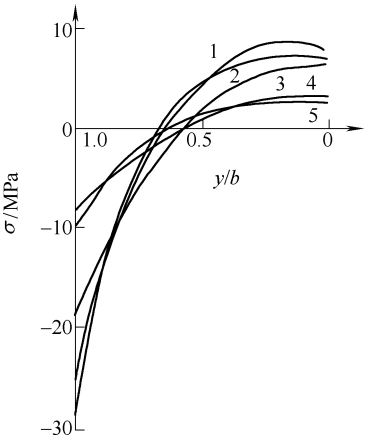


图 5-15　PMMA 和 PS 骤冷试样条在厚度方向的温差残余应力分布曲线

1—PMMA　$2b=3mm$，$T_i=170℃$，$T_\infty=0℃$

2—PMMA　$2b=3mm$，$T_i=130℃$，$T_\infty=0℃$

3—PMMA　$2b=3mm$，$T_i=170℃$，$T_\infty=22℃$

4—PS　$2b=2.6mm$，$T_i=150℃$，$T_\infty=23℃$

5—PS　$2b=2.6mm$，$T_i=130℃$，$T_\infty=23℃$

2. 去层法测量残余应力

从 20 世纪五十年代开始，就进行了塑料制品残余应力的测量。测量方法很多，有环境应力开裂法、钻孔法、表面硬度法、去层法、应力松弛法、光弹性的双折射法等。目前资料表明，去层法能很好地适用多种品种聚合物材料，足以测定各种形状制件的残余应力分布。其测量误差可控制在 5 % ～ 10% 之内。

1951 年，Bell 电话公司实验室的 R. G. Treuting 和 W. T. Read，创始用去层法测定锡磷青铜冷轧弹簧片的残余应力分布根据去层后试样的弯曲曲率，计算各层的残余应力。直到 20 世纪七十年代，才开始用去层法分析骤冷注塑件的温差残余应力分布。

具有残余应力的自由状态试样，每个截面上的内应力处于平衡状态。去除了有内应力的一层材料后，会留下不平衡应力。当外约束撤去后，去层后试样因储存在内部的不平衡内应力而变形。此时的变形力与该层的残余应力大小相等，方向相反。但需注意，去层法是利用刚性材料的弹性，而塑料具有黏弹性，测试过程中存在松弛与蠕变，还存在切削力及环境条件的影响。

注塑件试样的长度与宽度之比应大于 6，诸如 60mm × 10mm × 5mm、150mm × 25mm × 6mm 等，以避免试样尺寸对曲率的影响。用铣削方法，每次最好铣去 0.03 ～ 0.05mm。卧铣铣削会引入更多的拉应力，立铣铣削会使表层引进压应力，以立铣为好，且应采用高速铣床。可用黏性胶带将试样固压在铣床工作台上，尽量避免将去层切削时的干扰留下，确保铣削表面不能有熔融现象。去层后的变形试样可利用光束在凸圆弧上的反射来测得曲率。

假定理想试样在（x – z）截面上的内应力分布为常量，仅在厚度上有残余应力变化，也没有应力集中区域，去层后产生线性的纯弯曲，如图 5-16 所示，其内应力 $\sigma(y)=\sigma_x(y)=\sigma_z(y)$，而曲率 $\rho(y)=\rho_x(y)=\rho_z(y)$，则各层上的内应力可用下式求出

$$\sigma(y)=\frac{-E}{6(1-\nu)}\left[(b+y_1)^2\frac{\mathrm{d}\rho(y_1)}{\mathrm{d}y_1}+4(b+y_1)\rho(y_1)-\int_{y_1}^{b}\rho(y)\mathrm{d}y\right] \tag{5-9}$$

式中　σ（y）——各层上的残余应力；

$y=\pm b$——原始试样的上下表面；

$y=y_1$——去层后 y 方向的新表面位置；

$\rho(y)=\rho_x(y)$——长度 x 方向的各层曲率；

E——试样材料的弹性模量；

ν——试样材料的泊松比。

广义的去层法测试可用于各向异性的式样，分别测得 $\rho_x(y)$ 和 $\rho_z(y)$ 两个方向的曲率，然后综合计算在 x 方向各位置的 $\sigma_x(y)$ 的应力值。

已经用去层法直接测量注塑件的残余应力。先用各种工艺条件注射较大面积例如 110mm × 110mm、各种厚度的成组注塑件，然后从浇口附近到料流末端的几个位置，割得较小试条例如 50mm × 10mm，这样可测得各位置在各工艺条件下，残余应力在厚度方向上的数值和分布，从而研究注射工艺对残余应力的影响。除了特殊的工艺条件和浇口附近位置，一般情况下残余应力的分布和数值跟骤冷注塑件的温差残余应力相近。

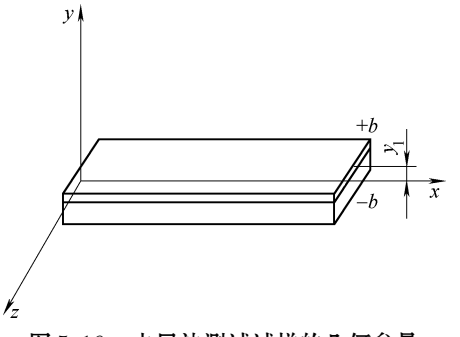


图 5-16　去层法测试试样的几何参量

整个测试过程必须考虑到应力松弛。制得试样与铣削去层之间的时间越短越好。注塑件去层后，一般三天后再测量曲率，以使试样弯曲达到平衡位置，必要时要用时间量进行松弛修正，用下式得到当时的曲率。

$$\rho(y_1,t)=\rho_1(y_1,0)+\rho_2(y_1,t) \tag{5-10}$$

式中　$\rho_1(y_1,0)$——为铣削到 y_1 层时的瞬时曲率；

$\rho_2(y_1,t)$——经过时间 t 的附加曲率。

去层法也因此被用来进行松弛的研究。此外，去层法也可测知密度在试件厚度方向的分布。

3. 注射工艺条件的影响

这里从试样的残余应力分布曲线图来说明注射工艺条件的影响。熔体温度和制件厚度的影响显著。模具温度变化对残余应力的影响，与注射成型的聚合物材料有关。

（1）熔体温度　图 5-17 说明了塑料熔体温度对残余应力的影响。曲线 1 的 PS 熔体温度为 244℃，高于曲线 2 的 210℃。高温度熔体注塑件，在厚度方向的残余应力以抛物线分布。芯部为拉应力；而表层为压缩应力。型腔末端的残余应力大于浇口附近应力

值，说明在高的熔体温度下，冷却中产生的温差残余应力起决定性作用。在低的熔体温度下，残余流动应力较高些，尤其是在浇口附近，甚至超过了温差压缩应力，在注塑件的表层出现了拉伸应力。

（2）制件的厚度　图 5-18 所示的 PS 试样条厚度为 3.81mm，大于图 5-17 上 PS 试样条厚度 2.54mm。两图上的残余应力分布曲线形状相似。但较厚试样条表层的压缩应力比薄试样条大些。说明试样条越厚，温差残余应力的影响越强，残余流动应力的影响较小。厚壁注塑件的收缩率大，制件表面易出现凹陷的缺陷，而在厚壁的中央容易出现真空泡。

（3）模具温度　模具温度和注射速率对 PS 等无定形注塑件的残余应力的程度和分布影响不大。注射速率增大，与增大注塑件厚度一样，会增加表层的压缩应力。但是，改性 PPO 等高黏度无定形塑料，模具温度提高对残余应力降低是明显的。

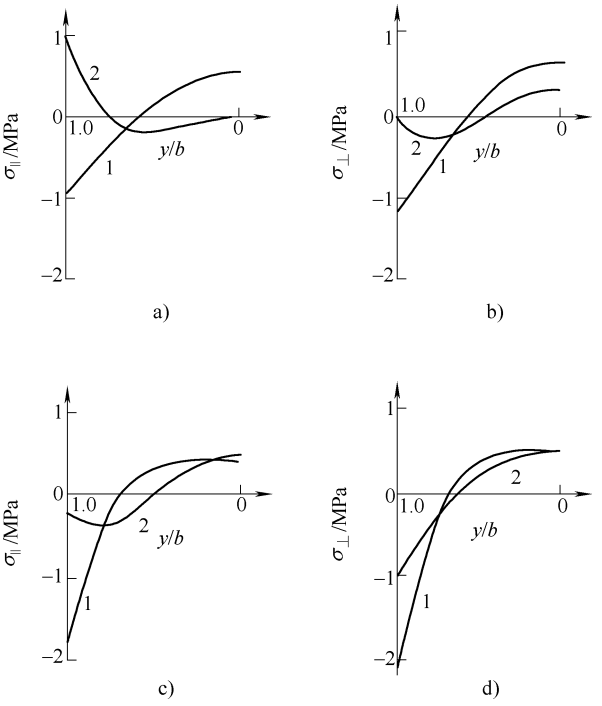


图 5-17　PS 试样条的熔体温度对残余应力分布的影响

a) 和 b)—在浇口附近　c) 和 d)—在型腔末端

1—T_m = 60℃，T_c = 244℃，v = 0.82m/s；

2—T_m = 60℃，T_c = 210℃，v = 0.56m/s；

$W \times 2b \times L = 51 \times 2.54 \times 480$mm；

$\sigma_{\parallel}$—平行流动方向残余应力；

$\sigma_{\perp}$—垂直流动方向残余应力

模具温度对结晶型聚合物注射件的残余应力影响很大。PA6 注塑件的残余应力，在厚度方向以表层压缩和芯部拉伸呈抛物线分布。在模具温度 25℃时，最大压缩应力达 6.5MPa；最大拉伸应力为 3.5MPa。若提高模温至 100℃，压缩与拉伸应力分别为 1.2MPa 和 0.8MPa。残余应力大小与模具温度成反比。

（4）残余应力的计算预测　注塑件的残余应力计算工作，最早是假设注塑件是各向同性，忽略残余流动应力和固化中的松弛现象。将温差残余应力当做残余应力的近似解。它要用有限元方法在电子计算机上解出。在对注塑件作离散化处理后，第一步是对注塑件进行温度场的计算，以一维的厚度方向热传导方程为例，

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \tag{5-11}$$

式中　T——温度；

t——时间；

y——热传导的注塑件厚度 b 方向位置；

k——热导率；

ρ——密度；

C_p——比热容。

该方程预测了注塑件空间各位置的热历史 $T(y, t)$。其边界和初始条件为

$$T(y,0)=T_i$$

$$\frac{\partial T(0,t)}{\partial t}=0$$

$$-k\frac{\partial T(b,t)}{\partial t}=h(T(b,t)-T_\infty) \tag{5-12}$$

式中　h——注塑件与钢模具的热交换系数，h = 150J/(m² · s · K)；

T_∞——模具温度；

T_i——充模结束时物料温度。

第二步是应力场计算。注塑件上各节点在冷却过程和温度分布中存在温度差 ΔT_i。该温度差使各元素产生内应力 $\Delta\sigma_i$。它用热弹性公式计算。

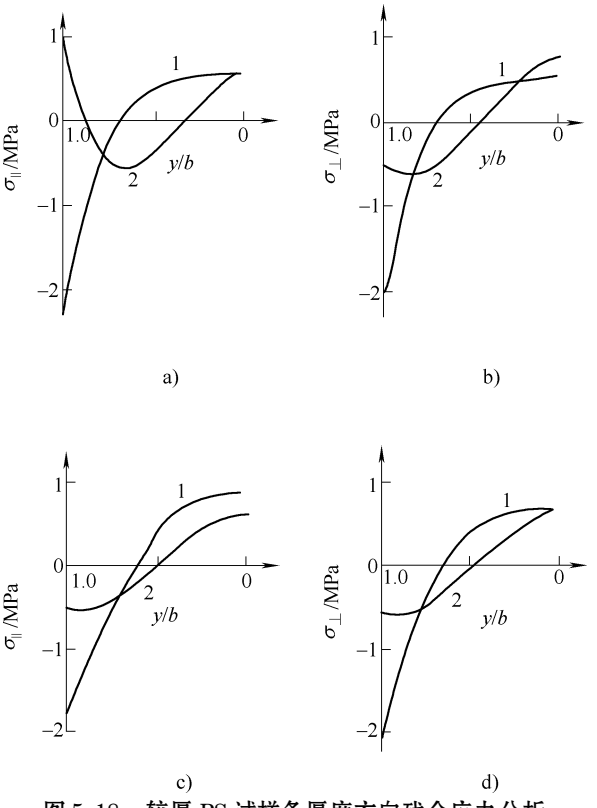


图 5-18　较厚 PS 试样条厚度方向残余应力分析

a)和 b)—在浇口附近　c)和 d)—在型腔末端

1—T_m = 60℃，T_c = 247℃，v = 0.7m/s

2—T_m = 60℃，T_c = 215℃，v = 0.71m/s

$W\times 2b\times L$ = 76 × 3.81 × 456mm

$$\Delta\sigma_i=\frac{E_i}{1-\nu}(\Delta\varepsilon-\alpha_i\Delta T_i) \tag{5-13}$$

式中，$\Delta\varepsilon$ 为收缩率，它取决于每瞬时的力平衡。对于泊松比 ν、弹性模量 E 和线膨胀系数 α，在玻璃态转化温度 T_g 之上和以下取不同数据，甚至采用温度的函数值。其中

$$\Delta\varepsilon=\frac{\sum\alpha_i\Delta T_iE_i}{\sum E_i} \tag{5-14}$$

最先用有限元方法计算残余温差应力是在 1976 年，当时应力热弹性方程式比式(5-13)更为简略。

到 20 世纪 80 年代，开始借助玻璃制品的残余应力计算方法，考虑松弛影响。用 Williams、Landel 和 Ferrey 提出的 WLF 方程式，来求解注塑件的温差残余应力，称之为热的黏弹性方法。它引入了虚温度概念，但与松弛时间等计算参量相关。

近年来，注塑件残余应力计算技术有了新进展。将注射充模和保压阶段的压力场引入注塑件，计算预测了残余流动应力。把模具温度场与塑件温度场相衔接，用更符合实际的边界条件进行热交换计算，还考虑脱模时与脱模后产生的残余应力，并已开拓到三维注塑件，已能计算孔板和矩形盒件的残余应力分布和变形；但是，还有众多技术问题，例如：残余流动应力和温差残余应力的合成；模具本身弹性变形和型芯对注塑件收缩的限制等，还有待解决。

5.1.3　体积收缩及 *P-V-T* 的关系

注塑件是塑料材料在非恒定的温度场中冷却收缩，在充模流动和保压中补缩，以及在其后的模具内冷却成型的各阶段，收缩的物理条件有区别。模具设计师用注射成型收缩率来计算成型零件尺寸，与计算机模拟、与预测的体积收缩率有关联也有差别。

1. 密度分布

在高压和骤冷条件下成型的注塑件上，密度分布是不均匀的，致使注塑件内残余应力分布不均，影响着材料的各向异性和翘曲变形。注塑件上密度的不均匀性，主要表现在壁厚和流程两个方面。

（1）厚度方向的密度分布　用去层法测量残余应力，也可测出注塑件沿厚度方向的密度分布。将每次铣削去除的微量材料，浸在 25℃蒸馏水中，使用精密天平测其重量。为排除注射流动的影响，将无定形塑料试样加热到高弹态，然后骤冷处理，考察致热后试样的密度分布。高分子链的热运动和松弛，导致试样厚度方向密度分布不均。这与温差残余应力的分布有必然的联系。

注塑件表层的密度有突变，而芯部的密度为常数。5mm 厚的改性 PPO 试样的表层密度最低，向中心层增加了 5%。而 6mm 厚的 PMMA 试样，表层的密度高且有突变，芯部密度低并趋于稳定。PS 试样也有同样的情况，密度变化都不超过 0.5%。

（2）注射流程方向的密度分布　图 5-19和图 5-20 是 PS 料注射 $W \times 2b \times L = 40\text{mm} \times 2.54\text{mm} \times 120\text{mm}$ 型腔，浇口尺寸为 5mm×6mm×1mm。经测试密度分布，说明注射工艺参数中，注射温度和保压压力对凝固后密度影响最大。

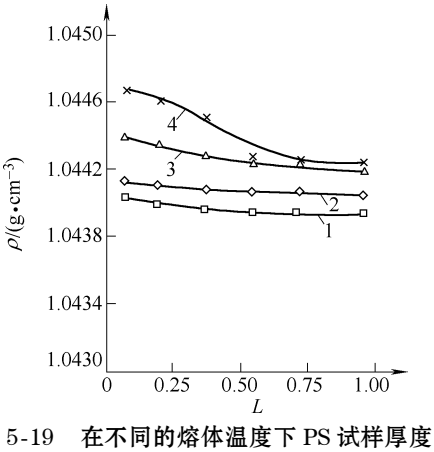


图 5-19　在不同的熔体温度下 PS 试样厚度上的平均密度在长度方向的分布

1—熔体温度 $T_c = 180℃$　2—$T_c = 200℃$

3—$T_c = 220℃$　4—$T_c = 240℃$

模具温度 $T_m = 30℃$，体积流率 $Q = 36\text{cm}^3/\text{s}$，

型腔保压压力 $70 \times 10^5\,\text{Pa}$

图 5-19 有四条在注塑件长度 L 方向的密度分布曲线。在其他工艺条件固定的情况下，物料分别到 180℃、200℃、220℃和 240℃熔融。在前三种较低模具温度下固化注塑件，在其长度方向上密度几乎没有变化。但高温 240℃下的熔体注射的注塑件，

其浇口附近的密度比注塑件末端的要低。这是因为在熔体流程上存在较大温差。在型腔末端，已降温的熔体较早被冷却固化。而在浇口附近，较高的熔体温度下经保压压力作用，有少量物料补充。在熔体温度较低时浇口冻结早，就不存在补缩。

图 5-20 说明了作用于型腔保压压力的作用。注射螺杆施加的保压压力越高，越会有较多物料继续进入型腔，促使浇口一端注塑件的密度高于末端。反之，低的保压压力，没有或很少影响密度。因此存在一个临界保压压力。倘若保压压力终止时间为浇口冻结之时或稍后，临界压力之上的保压压力对密度分布影响重大。从实验数据可知，这个临界压力依赖于浇口尺寸、熔体温度和流动速率。

2. 收缩的三阶段

注射成型过程，按塑料和注塑件发生收缩的不同条件和其特征，可分成三个阶段：第一和第二两个阶段，从塑料熔体充模流动始，到注塑件脱模为止。第三阶段在脱离模具后，直到制件冷却到环境温度。

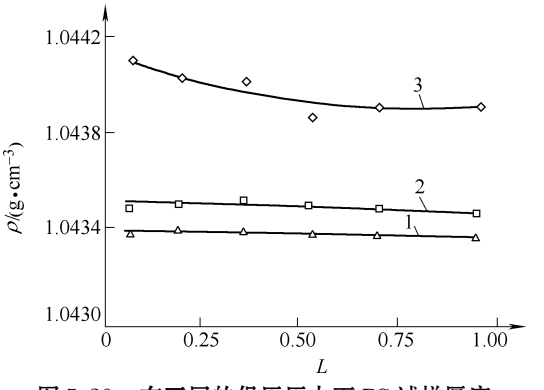


图 5-20 在不同的保压压力下 PS 试样厚度上的平均密度在长度方向的分布

$T_c = 200℃$，$Q = 7.2 cm^3/s$，$T_m = 30℃$

型腔保压压力：1 线—$14 \times 10^5 Pa$；

2 线—$35 \times 10^5 Pa$；3 线—$70 \times 10^5 Pa$

（1）充模流动和保压补缩阶段

注射充模流动在短时间内塑料熔体就很快充满型腔，并达到数百大气压的高压，并且在很大程度上可通过保压压实过程得到补偿。模内制品型腔的塑料不断压实和增加质量，一直进行到浇口中塑料凝固为止。此阶段塑料熔体的收缩，主要取决于模具型腔内塑料熔体压力和压力的传递。

此充模流动和保压补缩阶段，要保证注塑件有足够的密度，并保证密度分布均匀。密度不足会使成型制品的收缩过大。密度分布不均匀，会使注塑件上各方向各个位置的收缩有较大差异，最终影响注塑件的几何公差和尺寸精度。

（2）浇口冻结后模内冷却阶段

浇口内塑料冻结后，已无熔料进入制件的型腔。直到开模为止，注塑件质量不变。浇口冻结时型腔中的压力大小和压力分布，对注塑件的收缩起决定性作用。在密闭的型腔里，模具温度使注塑件冷却凝固。浇口冻结时，型腔压力 p 随之下降，塑料材料收缩，注塑件的密度 $\rho(g/cm^3)$ 增加，比体积 $V(cm^3/g)$ 减小。

无定形聚合物在浇口封闭后，熔体的比体积、型腔内压与温度的三者关系可用式（3-17a）修正状态方程描述。有

$$(p + \pi)(V - \omega) = R'T$$

注塑件的一种状态 p_1-V_1-T_1 转变为另一种状态 p_2-V_2-T_2 时，可以预测体积收缩率。

结晶型塑料的结晶过程复杂，有比无定形塑料大很多的收缩率。而且该聚合物的结

晶度越高，收缩率越大。在此阶段决定性因素是模具温度。模具温度越高，注塑件冷却速率较慢，则结晶度较高，收缩率较大些。结晶型聚合物中有无定形部分，其 p-V-T 关系依照上述修正状态方程。结晶型塑料依照状态方程的前提是结晶度和模具温度。比体积 V 需视结晶度而定。

在模具内的注塑件收缩时，各个一维尺寸的收缩率可分为约束收缩和自由收缩两种状况。例如一个塑料套筒，成型型芯决定了内孔直径。因钢制型芯的刚性约束作用，内孔直径的收缩率较小。套筒的轴向长度可无约束收缩，长度的收缩率大于内孔直径。各成型尺寸的收缩率按注射模型的实际状况才能精确测定。现代计算机辅助设计应用体积收缩率计算模具成型零件尺寸。通常需凭经验，对个别成型零件尺寸的收缩率作修正。

（3）脱离模具后的收缩阶段　在第三阶段，注塑件脱模后只发生自由收缩。这时制品体积的缩小和尺寸的收缩，主要取决于注塑件的脱模温度与环境介质温度之差。脱模温度只略高于模具温度，常用模具温度 T_m 计算。在注射成型工程中此阶段尺寸收缩值为

$$\Delta L = L_{30}\alpha(T_m - T_0) \tag{5-15}$$

式中　α——塑料的线膨胀系数（1/℃）；

T_m——模具温度（℃）；

T_0——室温（℃）；

L_{30}——注塑件脱模 30min 后的尺寸（mm）；

ΔL——注塑件从脱模到 30min 后的尺寸收缩量（mm）。

此阶段的收缩有时间效应。注塑件的收缩是由一个状态转变成另一种状态的结果。温度和压力下降，比体积就相应提高成另一值。不过，比体积的变化并不与温度和压力的变化同步，而有滞后。滞后的时间往往很长，竟有长达几个月。例如：PS 制品自离开模具 1h 后，到 3 个月为止，有线收缩率 0.0005mm/mm。无定形塑料件收缩滞后的原因是聚合物的高分子链，自一种平衡状态转变为另一种平衡状态，必须经过排列过程。其间分子链要进行扩散或移动。这对大分子是比较费时的，不像低分子材料那样瞬时完成。

结晶型塑料也存在后期收缩，在结晶过程中，往往要有很长时间进行少量的剩余结晶。PP 注塑件后期结晶和收缩会有数年，而且在室温下的松弛也需要很长时间。例如：POM 注塑件在六个月后测出 0.001mm/mm 的增缩。将注射制品加热退火处理，就提高了聚合物的松弛与结晶的速度和程度，因此，退火制件有新的收缩。

3. 注射工艺条件的影响

注塑件的几何精度，在许多场合是制件质量的首要问题。较小的制品收缩率，特别是制品收缩率的稳定性，是精密注射成型的关键。注塑件的平均密度提高，则平均收缩率相应减小。因此影响密度和收缩两者的工艺因素的作用大致上是一致的。

影响收缩的首要因素是注射材料。无定形塑料注射成型收缩率较小。相同的塑料制品，用聚合物的相对分子质量分布宽度较大的品级注射，比相对分子质量分布宽度较小的原料，其收缩率要大些。各种结晶型塑料的收缩率都较大。对相同质量的注塑件，结晶度高的制件，其收缩率要大些。此外，原料的粒度大小相差悬殊，塑化物料的温度不

均，会导致制件的收缩率波动较大。注射加工中收缩率的波动，影响注塑件的精度。

（1）注射压力和保压压力　浇口冻结时的型腔压力也称之“封口压力”。该压力越高，制品收缩率越小。反之，该压力使制件的平均密度越低，则收缩率越大。封口压力，包括注射压力、保压压力和保压时间能被稳定可靠控制，则注塑件的收缩率一致性好。图 5-21 说明了几种塑料在浇口冻结时的型腔压力与成型收缩率的关系。

在注射生产时，螺杆头提供的注射压力和保压压力，经过注塑机的料筒、喷嘴和注射模的主流道、分流道与浇口，塑料熔体沿流程的压力已损失了 1/3～1/2。而且，给予制品型腔的封口压力沿流程还在降低。因此，熔体充填流程的压力损失的预测计算，和模具型腔压力的传感器检测，对模具设计和工艺控制有重大意义。

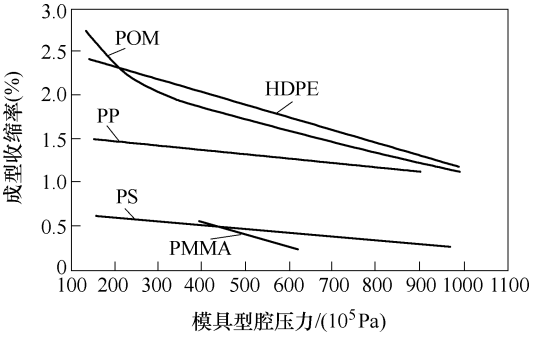


图 5-21　浇口冻结时的型腔压力与成型收缩率的关系

保压时间长，能充填的物料就多。注塑件的平均密度高，则收缩率小。但以浇口冻结之时为限，一般保压时间大于 30s 后，对收缩率的影响就很小了。而且，流动性较好的 PP 和 PA 等聚合物熔体，其保压压力和保压时间对收缩的影响较为明显。注射速率对制品收缩率的影响不大。它的作用被其他工艺参量所掩盖。

（2）物料温度和模具温度　注射充模时，物料温度提高，并不因注塑件冷却温度范围大而影响收缩率。相反，物料温度高有利于注射压力和保压压力的传递。封口压力的提高使注塑件的收缩率降低。这对熔体黏度较低的 PE、PP、PA 和 POM 等塑料较为明显。

模具温度对薄壁注塑件成型收缩率的影响见图 5-22 所示。在注射过程中，塑料熔体首先在模具壁面上冷却成皮层。低的模具温度有利皮层增厚和凝固。它的保温作用有利于保压补缩。因此，模具温度越低，注塑件的收缩率越小。模具的冷却系统的优化设计，在注射生产中保证模具温度稳定，对提高注塑件收缩率一致性有更重要作用。

（3）制品和模具设计　如图 5-23 所示，注塑件的壁厚越大，其收缩率越大。注射成型厚壁注塑件，在浇口冻结时，固化皮层在制件厚度中所占比例低。壁厚中央有相当多的聚合物被收缩。同一注塑件上有厚薄不一致的壁厚，有不同的收缩率，将会引起塑件翘曲变形。

模具浇口的截面积大小会影响注塑件的收缩。在保压压力和时间充分的条件下，浇口的截面积越大，注塑件的收

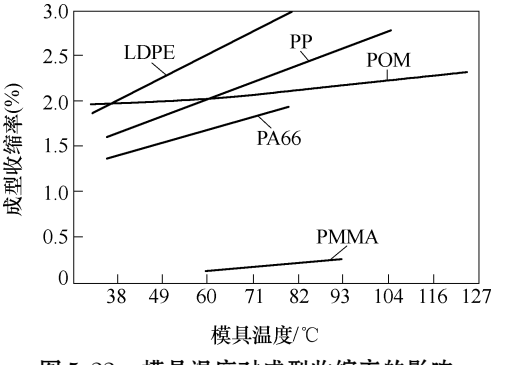


图 5-22　模具温度对成型收缩率的影响

缩率越小。大截面的浇口，保持熔融状态的时间长，塑料充分补偿型腔，注塑件的平均密度高。针点式的小截面浇口，浇口过早冻结使注塑件的收缩率增大。离浇口越远的部位，其收缩率越大，因此，大型制件型腔的流程比不能太大，必要时增加浇口。

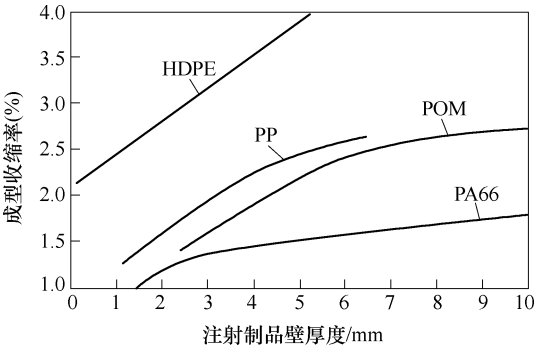


图 5-23　注射制品壁厚度与成型收缩率的关系

4. 聚合物 *p-V-T* 的关系

考量聚合物 p-V-T 的关系就是指，在注射过程中的模具型腔压力 p、容积 V 和温度 T 的变化规律。它为计算机辅助注射成型工程进行收缩和翘曲的数值分析提供聚合物材料的基本性能数据。现代的计算机辅助工程 CAE 的注射成型分析软件，已经实现了注塑件的收缩分析。

注塑件的体积收缩比自由状态的骤冷注塑件的收缩复杂得多。多阶段、多参量的注射过程，使收缩率的理论计算相当困难。体积收缩理论分析最终获得的结果是成型注塑件各位置的容积收缩率。这里的体积均为单位质量的体积，全称比体积。

（1）容积收缩率　塑料注射成型工程中收缩的定义是指制件尺寸对于模具型腔尺寸的绝对减小量或相对减小量。在塑料的物理性能项目中，有线膨胀系数 α（1/℃）。它是塑料长试条在温度变化时，无模具约束的一维膨胀率。

三维的容积收缩率是体积的相对变化率

$$S_V = \frac{V_i - V_r}{V_r} \tag{5-16}$$

式中 V_i 是注塑件上某位置某时间塑料的容积。V_r 为对应位置在室温时的容积。它与成型收缩率 S 的关系为

$$S = (1 + S_V)^{\frac{1}{3}} - 1 \tag{5-17}$$

显然，此换算式是粗糙的：没有考虑注射成型塑料制品的各向异性，聚合物平行取向方向的收缩率大于垂直方向的收缩率。只是假定注塑件的三个方向尺寸收缩率是相等的；另外，也没有考察到型芯和嵌件等模具型腔结构的约束作用，对收缩率的影响。

在注射过程中，基于温度场和压力场的任一点的密度和收缩都是时间和位置的函数。在注射成型的计算机辅助工程 CAE 中，基于有限元的网格单元划分，需要预测注塑件上单元体和时间段的密度分布和收缩率，来分析体积收缩。预测比体积收缩率用下式

$$S_V = \frac{\overline{V}_i - V_r}{\overline{V}_i} \tag{5-18}$$

式中　$\overline{V}_i$——初始的熔体容积的平均值；

V_r——室温下注塑件的容积。

由于在注射成型期间，熔体在很短时间内经受剧烈的压力和温度变化。初始的熔体体积 $\overline{V}_i$，并不对应均衡的温度和压力。它只能采用专门的平均容积来计算

$$\overline{V}_i = \frac{1}{t_p}\int_0^{t_p}\overline{V}(t)\,dt \tag{5-19}$$

式中 t_p——充模熔体到达所考虑位置需要的时间段（从零位起始）；

$\overline{V}(t)$——对所考虑位置，在型腔间隙方向对时间 t 的平均容积。

因此，

$$\overline{V}(t) = \frac{1}{b}\int_0^b V(y,t)\,dy \tag{5-20}$$

b 为试样条厚度的一半。随着时间的延续，计算变化着 $\overline{V}_i$，最终输出注塑件上比体积收缩率 S_V 的信息。

注射成型的体积效应，是在充模、保压和冷却阶段的温度和压力变化下的体积收缩。无定形聚合物熔体在经过黏流温度 T_f 和玻璃化转变温度 T_g 的冷却过程中，注塑件有着非平衡的容积变化。

早在 20 世纪 30 年代就有了物体体积状态变化理论。在温度变化时，自由体积也随之变化。自由体积被 V_f 定义

$$V_f = V - V_e \tag{5-21}$$

式中 V——物体可作用的体积，也就是可以扩展到的体积；

V_e——物体材料分子所占有的体积。

在较高的温度下，分子热运动可使分子占有较大的体积。因此，V_e 可理解为有效的实际体积。自由体积 V_f 是将来可提供分子热运动的剩余空间，也是材料可热膨胀的自由空间。

1955 年，Williams，Landel 和 Perrey 经实验测试，引入了温度-时间的转化系数，将实际比体积 V_e 测算扩展到聚合物的玻璃化转变温度附近，用于注射成型的保压冷却阶段的比体积预测。但以上的注射成型的体积效应，没有考虑注射成型时型腔的压力变化。

早在 1950 年 Spencer 对理想的气体的 p-V-T 方程进行修正，以适合描述聚合物熔体密度的物理状态。式（3-17a）又称范德瓦尔斯（Wander Waals）状态方程，有

$$(p+\pi)(V-\omega) = R'T$$

利用该方程可进行等压状态的热膨胀研究。也可在等温状态下，分析在加压下聚合物容积的变化 ΔV 与原容积 V_0 之比的相对值，与压力 p 的关系。可得体积弹性系数

$$k_V = \frac{p}{\Delta V/V_0} \tag{5-22a}$$

及倒数的体积压缩系数

$$\beta_V = \frac{\Delta V/V_0}{p} \tag{5-22b}$$

但是聚合物在注射成型中，形态从熔融态转变到固态，有很大的压力和温度变化范围。这种单域的状态方程及其曲线，对于固态聚合物尤其不适用。

（2）Tait 状态方程　计算机辅助注射成型的数值模拟时，需要精确描述聚合物 p-V-T 关系。随着聚合物 p-V-T 测试技术的开发，双域的 Tait 状态方程已应用在计算机数值分析。如图 5-24 所示，双域的 p-V-T 曲线，能较好地描述在注射成型过程中塑料熔体经历的注射、保压和冷却固化过程，在很大的温度和压力变化范围，较准确地反映容积的变化。

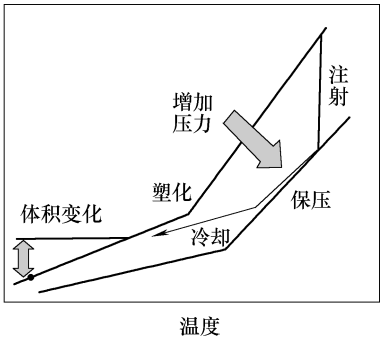


图 5-24　注射成型过程的p -V -T 曲线

双域 Tail 状态方程，对于温度 T 和压力 p 下的容积为

$$V(T,p)=V_0(T)\left\{1-C\ln\left[1+\frac{p}{B(T)}\right]\right\}+V_t(T,p) \tag{5-23}$$

式中　C——无量纲常数，$C=0.0894$；

$B(T)$——温度的函数，与压力 p 量纲相同。

其中　当 $T>T_i(p)$　　$V_0=b_{1,L}+b_{2,L}(T-b_5)$

　　当 $T<T_i(p)$　　$V_0=b_{1,S}+b_{2,S}(T-b_5)$　　(5-24a)

又　　当 $T>T_i(p)$　　$B(T)=b_{3,L}\exp[-b_{4,L}(T-b_5)]$

　　当 $T<T_i(p)$　　$B(T)=b_{3,S}\exp[-b_{4,S}(T-b_5)]$　　(5-24b)

及　　当 $T>T_i(p)$　　$V_t(T,p)=0$

　　当 $T<T_i(p)$　　$V_t(T,p)=b_7\exp[b_8(T-b_5)-b_9p]$　　(5-24c)

式中　T_i——转变温度，对于结晶型聚合物是结晶温度 T_m；对于无定形聚合物为玻璃化转变温度 T_g；

$T_i(p)$——压力的线性函数，有

$$T_i(p)=b_5+b_6p \tag{5-24d}$$

以上各式中，$b_1\sim b_9$ 为各种聚合物材料的无量纲常数。下脚 L 代表液态；S 代表固态。

在一定的压力下，结晶型聚合物与无定形聚合物的容积随温度的变化有区别，如图 5-25 所示。图 5-25a 上结晶型聚合物在熔点 T_m 附近密度发生突变，体积有很大收缩。双域 Tail 状态方程中，$V_t(T,\ p)$反映了在 T_i 为转变温度时的密度突变。见式（5-24c），对无定形聚合物代入 $b_7=0$ 后让 $V_t(T,\ p)=0$。

从 p-V-T 曲线的数据，还可以获得高压下的热膨胀系数 α、等温压缩系数 β 和热压系数 γ 等热力学数据。分别为

$$\alpha=\left|\frac{\partial\ln V}{\partial T}\right|_P=\frac{1}{V}\left|\frac{\partial V}{\partial T}\right|_P \tag{5-25a}$$

$$\beta=-\left|\frac{\partial\ln V}{\partial V}\right|_T=-\frac{1}{V}\left|\frac{\partial V}{\partial p}\right|_T \tag{5-25b}$$

$$\gamma=\left|\frac{\partial p}{\partial T}\right|_V \tag{5-25c}$$

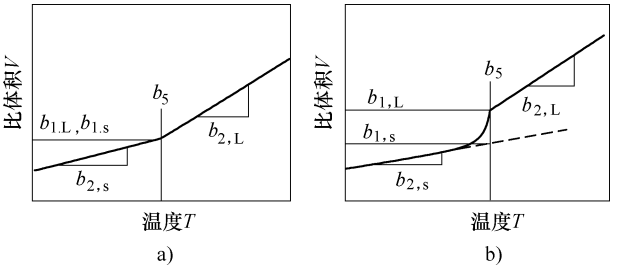


图 5-25　二类聚合物的 p-V-T 变化曲线示意图

a）无定形聚合物　b）结晶型聚合物

双域 Tail 状态方程比单域 Spencer 状态方程更能准确地描述聚合物材料的密度变化。Tail 状态方程考虑了结晶型聚合物在熔点附近的密度突变，能描述注射成型全过程的容积变化，是个普适方程。但是在玻璃态下，还与实验结果存在差距。因此，还在完善发展之中。

（3）p-V-T 状态曲线的应用　应用 p-V-T 状态曲线确定工艺参数已经是现代注射成型工艺的重要方法。从图 5-26 状态曲线的工艺路线上，可确定注塑件的收缩率

$$S=\frac{\sqrt[3]{V_2}-\sqrt[3]{V_1}}{\sqrt[3]{V_2}} \tag{5-26}$$

式中　V_2——浇口冻结时的容积；

V_1——常压室温下的容积。

在 p-V-T 状态曲线上设计并控制注射成型工艺路线，可以减小注塑件的收缩率，并保证收缩率的稳定性。在图 5-26的 p-V-T 状态曲线上，温度 T_4 的塑料熔体自 A 点始注射。型腔压力 p 在不断升高。到达 B 点时充满型腔，有型腔压力 p_B 和容积 V_B。其后有两条工艺路线。

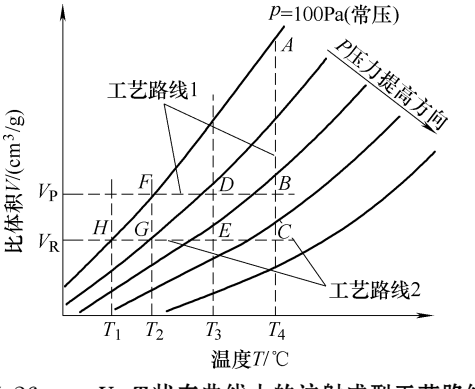


图 5-26　p-V-T 状态曲线上的注射成型工艺路线

1）第 1 条工艺路线 A-B-D-F-H

在 D 点熔体温度下降至 T_3，浇口冻结。压力降低至 p_D，容积 $V_D=V_B$。

在 F 点温度下降至 T_2，此时压力降至 p_F。容积 $V_F=V_D$，型腔内质量不变。

在 H 点温度下降至 T_1，此时压力降至 p_H = 常压。容积下降至 V_H。

因此，第 1 条工艺路线有最大的容积收缩率

$$S_1=\frac{\sqrt[3]{V_D}-\sqrt[3]{V_H}}{\sqrt[3]{V_D}}=\frac{\sqrt[3]{V_F}-\sqrt[3]{V_H}}{\sqrt[3]{V_F}} \tag{5-27a}$$

2）第 2 条工艺路线 A-B-C-E-G-H

在 E 点熔体温度下降至 T_3，浇口冻结。有压力 p_E，容积 $V_E = V_C$。

经过 G 点，到达 H 点。温度下降至 T_1，此时压力降至 p_H = 常压。其容积 $V_H = V_G = V_E = V_C$。

因此，第 2 条工艺路线有最小的容积收缩率

$$S_2 = \frac{\sqrt[3]{V_E} - \sqrt[3]{V_H}}{\sqrt[3]{V_E}} = 0 \tag{5-27b}$$

在注射生产时工艺路线在第 1 和第 2 之间设计。同一种物料，选取接近第 1 工艺路线，则注塑件有较大的收缩率。在浇口冻结 D 点前，保压补缩不充分，封口压力 p_D 较低。此种工艺路线称为低压注射工艺。

同种物料，选取类同第 2 工艺路线，则注塑件收缩率较小。在浇口冻结 E 点前，高温熔体在高压下注射压实充分，封口压力 p_E 较高。此种工艺路线称为高压注射工艺，能保证塑料制品致密均匀的密度，有较高的形位和尺寸精度，需要注射机具有足够大的注射压力和锁模力，由此，推出了高速高压注射成型新工艺，促使精密成型注射机的开发。

图 5-27 为一种聚丙烯（PP）的 p-V-T 曲线图。用上述的两种工艺路线分析容积收缩率。对照图 5-27 上的标号，按第 1 条工艺路线时，注射温度 T_4 = 250℃，型腔压力 p_B = 50MPa，其容积 $V_D = V_F = 1.235\text{g/cm}^3$；开模温度 T_1 = 70℃，常压下容积 $V_H = 1.105\text{g/cm}^3$，代入式（5-27a）可得最大的容积收缩率

$$S_1 = \frac{\sqrt[3]{V_D} - \sqrt[3]{V_H}}{\sqrt[3]{V_D}} = \frac{\sqrt[3]{V_F} - \sqrt[3]{V_H}}{\sqrt[3]{V_F}} = \frac{\sqrt[3]{1.235} - \sqrt[3]{1.105}}{\sqrt[3]{1.235}} = 0.0364$$

按照第 2 条工艺路线时，要有型腔压力到达 p_C = 250MPa，才有最小的容积收缩率 $S_2 = 0$，这需要有超高压的注射机，技术上实现很困难。

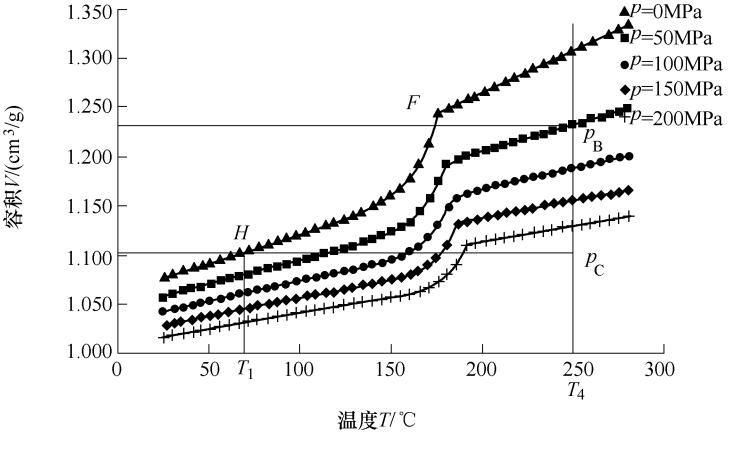


图 5-27　PP 塑料的 p -V -T 状态曲线

图 5-28 是 30% 短玻璃纤维增强 PP 的 p-V-T 状态曲线，再用上述的两种工艺路线分析容积收缩率。按第 1 条工艺路线时，注射温度 $T_4 = 250℃$，型腔压力 $p_B = 50MPa$，型腔容积 $V_D = V_F = 0.978g/cm^3$。开模温度 $T_1 = 70℃$，常压下容积 $V_H = 0.912g/cm^3$，代入式（5-27a）可得最大的容积收缩率

$$S_1 = \frac{\sqrt[3]{V_F} - \sqrt[3]{V_H}}{\sqrt[3]{V_F}} = \frac{\sqrt[3]{0.978} - \sqrt[3]{0.912}}{\sqrt[3]{0.978}} = 0.0230$$

短玻璃纤维增强 PP 的最大容积收缩率小于前聚丙烯的收缩率值。如果按第 2 条工艺路线时，要有型腔压力高达 $p_C = 250MPa$ 左右，才有最小的容积收缩率 $S_2 = 0$。

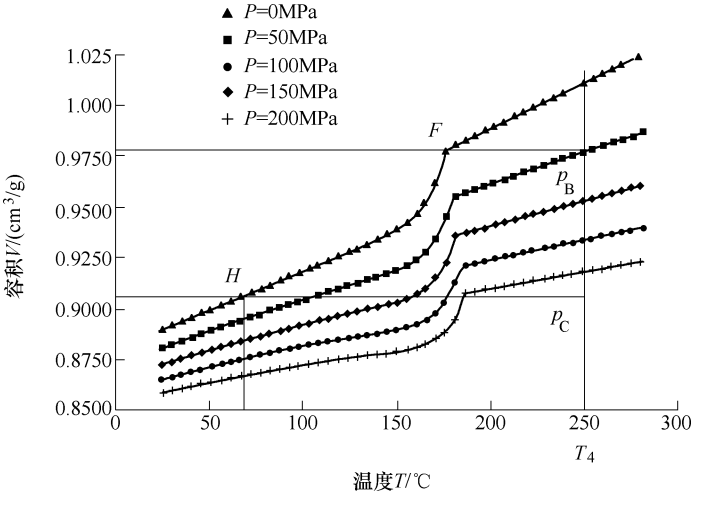


图 5-28　短玻璃纤维增强 PP 的 p-V-T 状态曲线

在状态曲线的应用方面，p-V-T 的控制技术是精密注射的一条途径。在 p-V-T 曲线图上，预先设计能保证制件精度的最佳工艺路线。同时，注射机和注射模的 p-V-T 等参数在生产运行中被检测。反馈的信息经自动调节，控制注射与保压的切换、浇口冻结点和开模等转换点，控制众多的温度、压力、速度和计量等参量。

（4）p-V-T 状态测试　注射成型 CAE 软件中，每种牌号的塑料进行收缩和翘曲数值分析，都要有 p-V-T 关系数据支持，建立起数千种塑料的 p-V-T 关系的数据库。

我国近年来进口了数台昂贵的聚合物 p-V-T 测试仪。这种仪器能达到 20 ~ 250MPa 压力范围。温度范围为常温 ~ 290℃或常温 ~ 420℃。冷却速度为 1 ~ 35℃/min 范围，可控制。聚合物样品室有良好的密封性。有直接加压，也有用水银间接传压。仪器有加热冷却系统、加压动力系统、传感器及数据采集控制系统。终端连接电子计算机，有专门的软件操作输出实测结果。

塑料材料的 p-V-T 状态曲线和流变曲线是注射成型数值分析的两项重要的性能。从事塑料加工的工程技术人员不但在应用计算机 CAE 分析时，明白它们的作用，更应该根据这两类数据，优化注射工艺和注射模设计。

5.1.4　翘曲变形

本节将讨论注射成型制品产生翘曲变形的原因、减小翘曲变形的途径，介绍翘曲变形的数值分析原理和实例。

1. 产生翘曲的原因

在注射成型加工过程中，在模具型腔的熔料流程方向上，压力递减明显。在注塑件的壁厚方向，模壁的骤冷作用产生残余热应力。注射加工使成型的注塑件内的密度分布不均匀，各质点的能量分布不均匀，具有的力学性能在各个方向上有差异。

翘曲变形的原因是注塑件上各方向的收缩率和各处的残余应力不均匀。注塑件的变形大小取决于聚合物材料的刚性。刚强塑料具有较好的抵抗变形的能力。但由于注塑件结构的复杂性，例如壁厚不一致、形体不对称，制件中的残余应力作用不对称、不平衡，在注塑件的刚性不足时，制件出现对原模具型腔形体偏移。

图 5-29 所示为注塑件壁厚的残余热应力引起翘曲变形。在注塑件骤冷过程中，壁厚的两表面上模壁温度有差异，制件两侧的冷却速率不同，造成壁厚方向的温差残余应力分布不均匀和不对称，在薄片离开模具的约束后，板面方向拉伸力与压缩力不相等，制件的刚性不足以抵抗作用力，薄条试样产生翘曲变形。

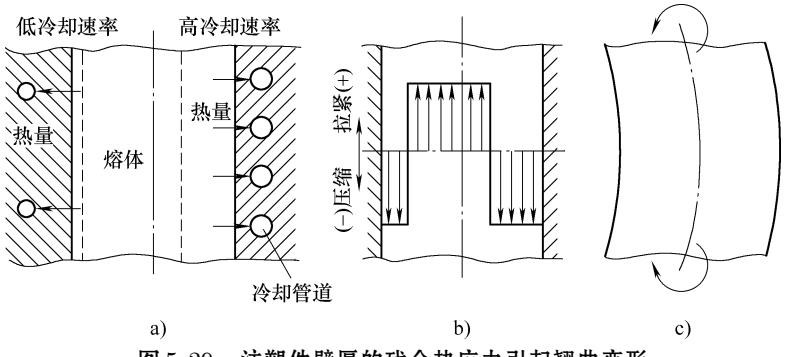


图 5-29　注塑件壁厚的残余热应力引起翘曲变形

a）不平衡冷却过程　b）成型后的非对称的残余热应力　c）翘曲变形

图 5-30 所示是矩形注塑壳体的翘曲变形。由于型芯散热慢，温度较高，壳体的内拐角处难以冷却；而型腔壁的温度较低，壳体外表面及转角处的冷却速率快，成型注塑件四侧面出现凹曲变形。

2. 减小翘曲变形的途径

如前所述，5.1.1 取向一节中“聚合物取向与注射成型”；5.1.2 残余应力一节中“注射工艺条件的影响”；5.1.3 体积收缩及 p-V-T 的关系一节中“注射工艺条件的影响”，这些小节中，凡是能减少注塑件取向、收缩和残余应力的注射工艺的举措，都能减小制品的翘曲变形。这里在塑料材料、注塑件设计和注射模设计三方面，强调减小翘曲变形的途径。

（1）塑料材料　无定形塑料的成型收缩率比结晶型塑料要小，通常小于 1%，结晶

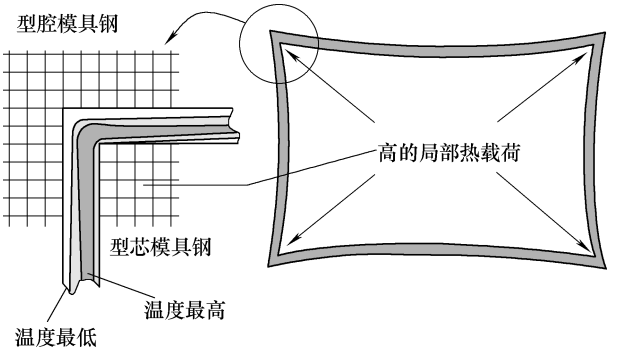


图 5-30　矩形注塑壳体的翘曲变形

型塑料大都在 2% 左右。它们成型的注塑件在各方向上收缩率的差异也大些。结晶型塑料注塑件的翘曲变形也大些。另一方面，聚合物材料愈刚强，其注塑件的翘曲变形较小。

（2）注塑件设计　注塑件不能单纯依靠增大壁厚来提高刚性，而应该采用加强肋、曲面、翻卷和凸台等结构设计方法。为减少翘曲变形对于注塑件设计有三条原则。

1）注塑件形体以一致壁厚的板件组合而成。

2）注塑件形体结构要对称。

3）注塑件壁厚的转角处应有较大圆角。

（3）注射模设计　浇口的位置和浇口的数目是减小翘曲变形的重要因素。在厚壁处设置浇口，便于塑料熔体传递压力，反之，在薄壁处开始浇注，最后充填厚壁间隙，必须提高注射压力和保压压力才能压实，使得注塑件上残余应力增大。而且，从浇口始的流程比不宜太大。对于大型制品必须采用多个浇口，各浇口充填的流程比应该大致相等。

冷却系统的设计和效果是减小翘曲变形的另一重要因素。注射模型腔各位置模壁温度不均匀，会造成注塑件各部位冷却速率差异。贴近冷模壁的熔料冷却快，反之凝固慢，使塑料板件在壁厚方向的残余应力分布对中央面不对称，形成薄板注塑件翘曲变形。另一方面，熔体从浇口开始的充模流程中，浇口附近保压充分、取向明显、物料致密；而流程的末端，充模熔体的温度下降，压力传递差，因此，该位置的密度低，收缩率大，也会造成制品翘曲变形。传统的冷却系统设计，采用局部位置加强冷却，又在局部位置避免冷却，来布置冷却管道。但设计困难，效果不够好。

3. 翘曲变形数值分析简介

计算机辅助注射成型的注塑件翘曲变形的预测，对保证制件的质量有重大意义。1978 年国外推出首套用于注射成型流动充填阶段的模拟软件 Moldflow，后来发展了对注塑件的冷却和收缩的数值分析。几十年来伴随着聚合物性能测试技术的发展；有限元理论和技术的提高；计算机技术硬件和软件的发展，直到本世纪初才实现了翘曲变形的模拟分析。本小节以简单的几何模型概略介绍翘曲变形的数值分析。

（1）简单的几何模型求解

以矩形截面一侧浇注的塑料条为几何模型，介绍非对称的残余应力和不均匀的热应力的变形计算式。

塑料熔体在模具型腔中充模流动的不稳定性，在模具壁面间冷却速率的不均衡；或者是注塑件壁厚不均匀和形体不对称，都会产成残余应力分布对于弯曲的中性层或轴线不对称。脱模后必将产生翘曲变形。图 5-31 所示为壁厚 $2b$，宽度 a 和长度 l 的注塑条。由于型腔的上下壁面温度有差异，壁厚方向的压力大于拉力，产生在 y 方向的弯曲变形。

图 5-31 所示的残余应力分布对 x 轴不对称，引起注塑条的弯曲变形。壁厚方向应力分布 $\sigma_{(y)}$ 应该满足如下的平衡方程：

$$\int_{-b}^{b}\sigma_{(y)}\,\mathrm{d}y = 0 \qquad (5\text{-}28)$$

或中的应力与应变有如下关系

$$\sigma_{(y)} = \frac{E}{1-\nu}[\varepsilon_{t_0 t} - \alpha\Delta T_{(y)}] \qquad (5\text{-}29)$$

式中　$\varepsilon_{t_0 t}$——板条对于型腔的总收缩率；

$\Delta T_{(y)}$——板条壁厚 y 方向温度差；

α——塑料的热膨胀系数；

E——材料的拉伸弹性模量；

ν——材料的泊松比。

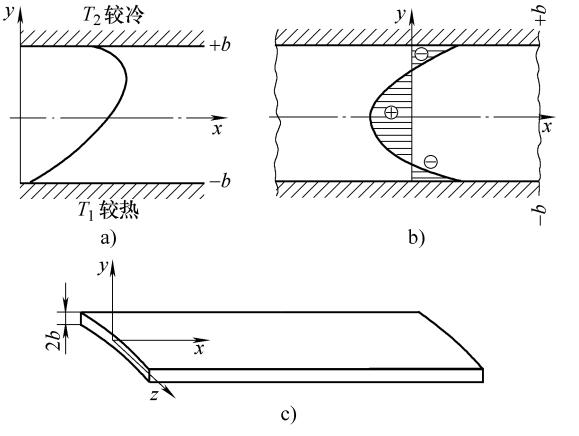


图 5-31　非对称的残余应力分布导致注塑条翘曲

a）注塑条在壁厚方向的温度分布　b）残余应力分布

c）引起矩形条在 y 方向的弯曲变形

应力分布产生的弯曲力矩：

$$M = \int_{-b}^{b}\sigma_{(y)}\,y\,\mathrm{d}y \qquad (5\text{-}30)$$

如果注塑件的收缩被模具的壁面约束，则式（5-29）中 $\varepsilon_{t_0 t}=0$。这种情况下残余应力主要是模壁的冷却作用造成的。不均匀的模壁温度会引起注塑件的翘曲变形，可用式(5-28)～式(5-30)计算。其中沿制件壁厚方向温度场各层的温度：

$$T = \left[\frac{1}{2}(T_1+T_2) + \frac{1}{2}(T_1-T_2)\frac{y}{b}\right] \qquad (5\text{-}31)$$

将式（5-31）和式（5-28）代入式（5-29），可得沿制件厚度的应力分布

$$\sigma_{(y)} = \frac{\alpha E}{1-\nu}\left[\frac{1}{2}(T_1+T_2) + \frac{1}{2}(T_1-T_2)\frac{y}{b}\right] \qquad (5\text{-}32)$$

将式（5-32）代入式（5-30），可得致使弯曲变形的热力矩

$$M=\frac{\alpha Eb^2}{3(1-\nu)}(T_1-T_2) \tag{5-33}$$

这个由于不均匀的模具温度造成的热力矩使注塑件翘曲变形，对于简支梁几何模型可得到弯曲挠度

$$\delta=\frac{16M}{(1-\nu)D\pi^4}\sum_{m=1}^{m}\sum_{n=1}^{n}\frac{\sin\left(m\pi\frac{x}{l}\right)\sin\left(m\pi\frac{z}{a}\right)}{mn\left[\left(\frac{m}{l}\right)^2+\left(\frac{n}{b}\right)^2\right]} \quad (m,n=1,3,5\cdots) \tag{5-34}$$

式中

$$D=\frac{2Eb^3}{3(1-\nu^2)}$$

当 $a=l$ 为方板时，可得最大的弯曲挠度。

注塑件是薄壁板的组合结构，需要将薄壁壳体分解成多种几何模型。除矩形板条的几何模型外，还有圆盘板、壁厚转角和加强肋等几何模型。

（2）翘曲分析方程简介　翘曲分析方程是针对薄壁板壳结构注塑制品的，又能集成注射成型各阶段的分析数据。考量注塑件材料的各向异性和温度影响，各项应力与应变关系综合为

$$\{\boldsymbol{\sigma}\}=[\boldsymbol{D}](\{\boldsymbol{\varepsilon}_e\}-\{\alpha\}\Delta T-\{\boldsymbol{\varepsilon}_p\})+\{\sigma_i\}$$

式中　$\{\boldsymbol{\sigma}\}$——应力矢量；

$[\boldsymbol{D}]$——刚度矩阵；

$\{\boldsymbol{\varepsilon}_e\}$——边界载荷下的应变矩阵；

$\{\alpha\}$——热膨胀系数；

ΔT——注塑件表面的温度差；

$\{\boldsymbol{\varepsilon}_P\}$——收缩引起的应变矩阵；

$\{\boldsymbol{\sigma}_i\}$——由剪切流动引起的初始应力。

要实现翘曲分析，需完成下述前置数值运算。

1）对模具和注塑件进行温度场分析。计算模具型腔表面和注塑件壁厚上下表面的温度及温度差。注塑件的温度场通过热传导方程有限差分法计算。

2）对注射成型的流动充模过程进行数值分析。计算熔体的温度、型腔的压力、流动流速、剪切速率与剪切应力及分子取向。

3）对注射成型的保压压实过程进行数值分析。计算型腔内的压力和温度的分布，以及注塑件的密度分布和容积收缩分布。

4. 翘曲分析实例

本例用短玻璃纤维增强 PP 注射成型建筑模板分析翘曲变形。建筑工地浇灌混凝土需要大小各种模板，这里介绍其中一副注射模，如图 5-32 所示。模板面积为 300 × 600mm；塑料模板质量为 1510g；面板壁厚 4mm；侧板厚 4.2mm；纵隔板厚 3.2mm；横隔板厚 2.5mm；边角肋为 2.5 ~ 3mm。

要注射成型数公斤的玻璃纤维增强塑料模板，存在两方面的技术难题。一方面，短玻璃纤维充填的塑料熔体黏度高，注射困难。用较成熟的热流道技术，让浇注流道中塑料熔体保持熔融状态，便于压力传递。只要流道直径和喷嘴数目合理，能够流动充满型腔。另一方面，短玻璃纤维增强的成型模板常有明显翘曲变形。塑料分子链和短玻璃纤维在流动中形成的取向，使模板各部位和各方向收缩不均匀。脱模后冷却固化模板有翘曲变形。因此，必须优化注射过程，限制翘曲量。本案例用 CAE 分析软件，从喷嘴浇口数目、喷嘴位置、制件设计和塑料材料四方面分析与翘曲变形的关系，保证玻璃纤维增强塑料制品注射成型成功。

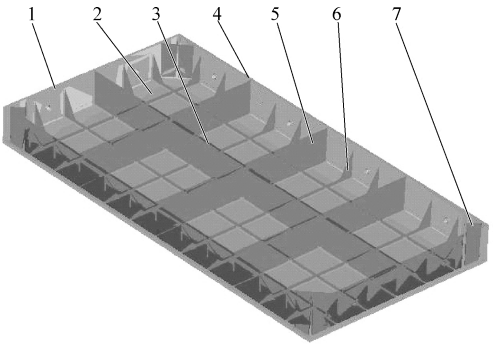


图 5-32　玻璃纤维增强 PP 建筑模板（反面）

1—短侧壁　2—模板面　3—纵向隔板
4—长侧壁　5—横向隔板　6—加强肋　7—三角肋

运行注射成型 CAE 分析软件时，有些材料供应商不能提供流变曲线和 *P-V-T* 状态曲线等性能数据，只能在软件的材料数据库中选用性能相近的国外企业生产的材料牌号。表 5-1，列有短玻璃纤维增强 PP 注塑料主要性能的比较。在塑料熔体充模和模板的翘曲分析中，调用数据库中 Hostacom G3 No1：GF Hoechst 的性能数据，其 *P-V-T* 状态曲线如图 5-28 所示。PP 塑料（Hostalen　PPN 1032：SF Hoechst）的 *P-V-T* 状态曲线如图 5-27 所示。

表 5-1　各种聚丙烯 PP 注塑料

性能	供应商	Hostacom G3 No1：GF Hoechst	Hostalen　PPN 1032：SF Hoechst	Hostacom M2 No1：SF Hoechst
密度/(g/cm^3)	1.13	1.1324	0.929	0.929
熔体流动速率/(g/10min)	3.2	4.9	12	8.7
充填含量(%)	短玻璃纤维 30	短玻璃纤维 30	无	滑石粉 20
弯曲弹性模量/MPa	4800	5212	1340	1530

（1）增加喷嘴浇口数目减小翘曲　运行 CAE 分析软件，可决定热流道喷嘴数目，保证熔体顺利流动充模。中等黏度熔料、面积 300×600mm 的模板常用双喷嘴。但短玻璃纤维增强的高黏度熔料，如图 5-33 所示熔体取向，两股料流前锋在模板中央形成熔合缝，短纤维排列方向一致。由于模板采用纵横正方形隔板结构，塑料熔体在隔板间隙中被引流。在模板的中央，塑料分子链和玻璃纤维被横向取向。在熔合缝区的材料强度只是非缝区的 0.6～0.7。模板翘曲变形时，中央的弯曲挠度最大。因此，造成从长边的两侧壁引起模板中央开裂。

为防止模板中央开裂，改善熔合缝强度，此模板用三喷嘴注。如图 5-34 所示，注射模板的平均纤维取向趋于改善。增加的中央喷嘴缩短了每个喷嘴注射流程，保证模板四角和侧壁的熔体充填，改变了熔合缝分布。熔合缝位置偏移，模板翘曲明显减小。

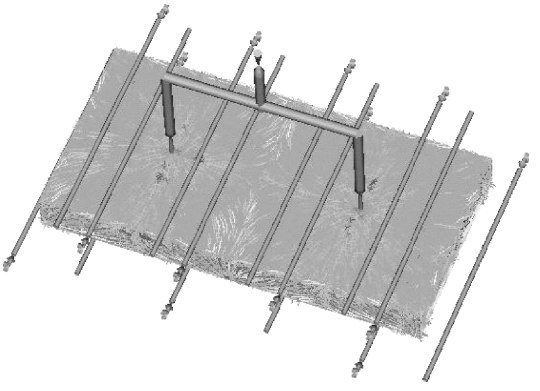


图 5-33　玻璃纤维增强 PP 模板双喷嘴时熔合缝区的取向

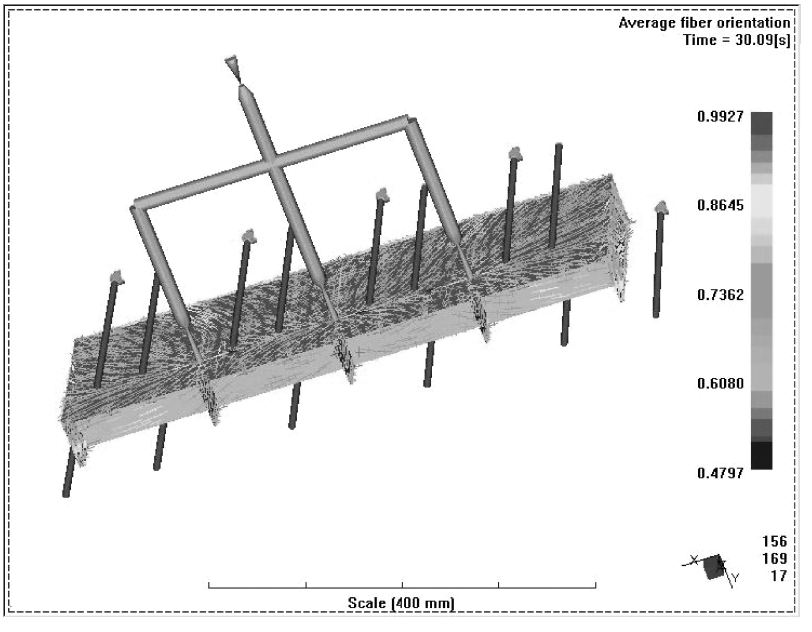


图 5-34　玻璃纤维增强 PP 正向注射模板的平均纤维取向 （剖切）

模板注射成型后放在机床的工作台上，实际测量的平面弯曲变形量 2.5mm。对此模式用分析软件，做了流动-翘曲分析。翘曲模拟的最大变形挠度为 3.23mm，相对于实测，误差在 25% 以内。翘曲分析没有冷却分析过程和数据，变形量的误差较大。再进行冷却-流动-翘曲分析，考虑冷却对翘曲的影响，改善了模拟注射的工艺条件。如图 5-35所示，平面弯曲变形量，即 y 方向面板中央翘曲量为 0.58mm，底面下角变形量为 −1.18mm，总量达到 1.76mm。说明翘曲分析时，冷却分析过程对数据影响很大。

（2）改进喷嘴浇口的位置减小翘曲　同样模板 300mm × 600mm，翻转在注射模中的位置。三喷嘴布置在模板的反面，见图 5-30 中纵向隔板与横向隔板的十字交叉处。表 5-2 所列玻璃纤维增强 PP 模板反向注射，进行计算机模拟的 y 向翘曲量，玻璃纤维

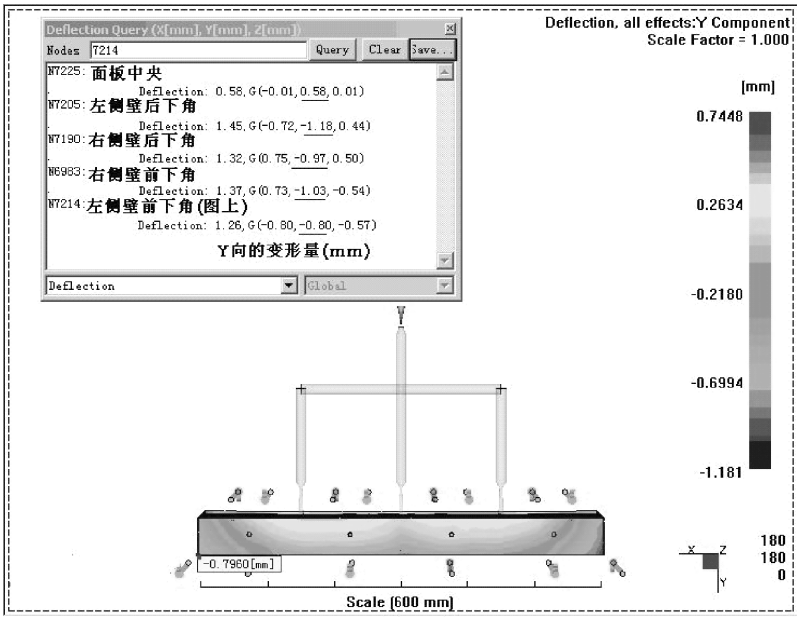


图 5-35　玻璃纤维增强 PP 正向注射模板的翘曲变形量

增强建筑模板翘曲量减小 10%，仅为 1.57mm。这是由于利用隔板和加强肋作熔体流动的通道，流料较为畅通，取向有所改善。另外，模板在模具中反置，在模板的表平面上就没有三个喷嘴浇口的料柄。

表 5-2　五种状态注射模板计算机模拟的 *y* 向翘曲量　（单位：mm）

模拟注射模式	面板中央	面板长侧壁中央	翘曲最大的底角	翘曲最小的底角	总量
玻璃纤维增强 PP 模板正向注射	0.58	0.29	−1.18	−0.80	1.76
PP 模板正向注射	0.19	0.13	−0.57	−0.20	0.76
滑石充填 PP 模板正向注射	0.26	0.09	−0.56	−0.20	0.82
玻璃纤维增强 PP 模板反向注射	0.59	0.23	−0.98	−0.78	1.57
改进增强 PP 模板反向注射	0.28	−0.07	−0.36	−0.07	0.64

（3）改善结构设计减小翘曲　模板结构设计不合理，是造成模板弯曲翘曲的主要原因。对于模板的材料分布中性平面，上下材料的分布，很不对称。对于短玻璃纤维增强塑料注射成型的矩形板材，沿纤维排列的纵向收缩率，小于垂直纤维的横向收缩率。注射成型的实验试条，纵向收缩率为 0.3%，横向收缩率为 0.6%。由于塑料熔体充模流动决定了纤维的取向；又由于对纵横中性形面，材料收缩不平衡，造成了双向弯曲。其中以长纵向的弯曲翘曲为主。

改进设计的建筑模板，增加了底板与面板对称，模板外形尺寸和总高不变。注射模采用纵横两个方向侧向抽芯，提高了长边的弯曲刚度和整块模板的刚性。采用三喷嘴热流道系统反向注射模板。以同样短玻璃纤维增强材料和注射工艺，计算机预测 *y* 向模板工作平面翘曲总量 0.64mm（见表 5-2 所列）。模板工作平面四个底角基本一致，中间

凹陷 0.6mm 左右，可获得尺寸精度和稳定性良好的塑料模板。如果增加纵横向隔板和引流筋条，还有减小翘曲量的可能。但是，注塑件重量增大，注射模的结构复杂。

（4）塑料材料对翘曲的影响　为了探索减小玻璃纤维增强建筑模板翘曲量的方法，对 300mm × 600mm 模板用聚丙烯塑料注射。热流道喷嘴正向浇注不变，计算机模拟的翘曲的总变形量仅为 0.57mm + 0.19mm = 0.76mm，详见表 5-2 所列。翘曲的总变形量，用面板中央和最大的底角翘曲量之和相叠加。PP 注射模板翘曲的总变形量比玻璃纤维增强模板的要小得多。如果用充填 20% 滑石粉的 PP 注射，模拟的翘曲总变形量为 0.82mm，使纯 PP 注射模板的翘曲量略大些。说明短玻璃纤维增强的注塑件的取向和各向异性最为明显。各方向的收缩率和各处的残余应力不均匀决定了翘曲变形量。

5.2　熔合缝

熔合缝（Knit-line or Weld-line）是塑料制品中的一个区域。它是彼此分离的塑料熔体相遇后熔合固化而形成的。熔合缝区域的形态和结构有别于注塑件的其他部分，因此有特殊的力学性能。绝大多数熔合缝的力学性能低于注塑件的其他区域，是整个注塑件中的薄弱环节。因此，熔合缝的力学性能往往就是塑料制品的强度。

熔合缝的存在比注塑件上任何缺陷更为重要。它是材料性能与注塑件性能存在差距的主要表现。本节论述热塑性塑料注塑件熔合缝的形成及其力学性能和影响因素，改性与增强聚合物和聚合物混合物的熔合缝力学性能，以及熔合缝性能的改善，多浇口顺序进料和快速热冷循环的消痕工艺。

5.2.1　熔合缝的生成

了解熔合缝的生成原因，将有助于理解熔合机理和分析熔合缝的力学性能。

1. 生成原因

注射制品的几何构形复杂，模具型腔内的塑料熔体分离成多股熔流是不可避免的。由于塑料制品的结构需要模腔内设置型芯，有的要安放各种嵌件，有些模具的浇注系统需设计成多浇口，以及注塑件壁厚变化和模具型腔的曲折，都会形成熔合缝。小浇口大型腔，高的剪切速率和低的熔体黏度都会造成熔体的喷射。蛇形的射流会冷固成波状折叠的熔合缝。这种有疵瘢的注塑件应设法避免。熔合缝生成有以下四个原因。

1）多个浇口的浇注系统；

2）模具的型芯和型腔中安放的嵌件；

3）注塑件的厚度变化；

4）熔体在型腔中是束状喷射流。

对于较大的复杂型腔，为减小熔体充模的流程比或为其他原因，模具的浇注系统设计成多个浇口。从多个浇口射出熔体可归结为两种形式，如图 5-36 所示。图 5-36a 为两股熔流对接汇合，熔合缝的生成速度很快。图 5-36b 所示为并列两个浇口射出两股料流。此两熔流前锋是圆弧形，相遇时夹角称前沿角 α，生成了并合的熔合缝。此前沿角随这

两熔流推进越来越大。对于 PS 熔料，在 $\alpha = 140° \sim 150°$时两股熔流合而为一后，熔合缝也随之消失。

要成型注塑件上的孔，在模具中必须设置型芯。型腔中有时需安放金属嵌件，待充模固化后与注塑件连结成一体。充模熔料行进中冲撞型芯或嵌件被分离成两股，绕道后重新相遇汇合成熔合缝。图 5-37 所示仪表板上有三个型芯和五个嵌件，会生成八条熔合缝。它们有不同方向和长度。

尽管注塑件设计要求厚度均匀一致，但实际上很难实现。注塑件壁厚（型腔间隙）变化会使熔体分离，尔后汇合生成熔合缝，如图 5-38 所示。图上周边的壁厚是中央的两倍。熔体在厚截面的型腔中流速加快，因此有部分熔体返回，导致了熔合缝生成，并又包裹空气于薄截面上。此外，模具型腔在空间的曲折，也会使熔体分离后又会合，在侧壁上生成熔合缝。

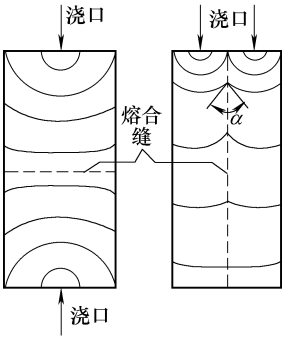


图 5-36　注射矩形型腔的双浇口具有的两种类型的熔合缝

a）相对对接熔合缝

b）并列合并熔合缝

（箭头为浇口，虚线为熔合缝）

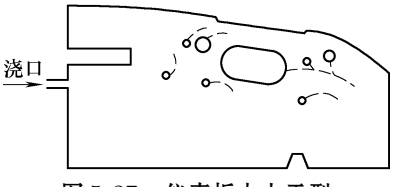


图 5-37　仪表板上由于型芯和嵌件生成的熔合缝

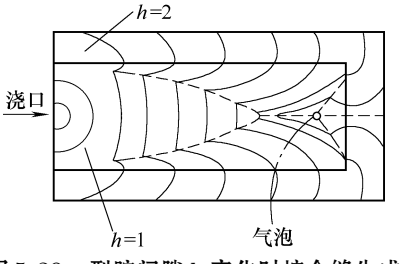
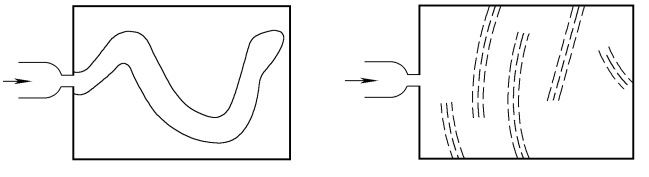


图 5-38　型腔间隙 h 变化时熔合缝生成（虚线为熔合缝，末端为所包裹空气）

小浇口大型腔，高的剪切速率和低的黏度会造成熔体喷射。喷射的熔体从浇口以蛇形注射到型腔的末端后折叠，冷固后产生波纹状的熔合缝，如图 5-39 所示。它会形成表面疵瘢等缺陷，力学性能很差，应通过改善注射条件和改进模具设计来避免。



a)　　b)

图 5-39　熔体喷射造成的熔合缝

a）喷射　b）熔合缝生成

分离熔体在汇合前的流动经历不同，熔合缝可分为热合对接缝和冷合流线缝。在多浇口充模时，模内的多股熔流各行其道后相遇，熔流前锋没有遇到过障碍物，熔合时温度较高，称为热合对接缝。单股熔流在遇到型芯、嵌件或型腔壁面这些低温障碍物后，

熔流前锋经冲撞分离成若干股，然后重新会聚熔合。这样形成的熔合缝称为冷合流线缝。对 PS 料，热合对接缝的强度约是无熔合缝制件的 70%；而冷合流线缝的强度只有无缝制件的 50% 左右。

2. 熔合机理

注射过程中塑料熔体以高压、高速射入低温的模具型腔，经过定时的保压补缩然后冷却；熔体充模流动中首先接触冷模壁形成冻结皮层；后续熔体推进在皮层中作喷泉流动，如图 5-40 所示。芯部流体的速度分布是较扁平的曲线。如同喷泉的熔体前锋不断地将芯部熔体向四周扩展，形成新的皮层，如图 5-40a 所示。图 5-40b 中，示踪的着色球体微粒置于推进的熔体里。微粒在充填流动中变形为弧形片状，进入前锋后固化于皮层。

型腔中塑料熔体固化后，按形态和特性可分成表皮层、次表层和芯部。由于流动和冷却状态的不同，它们的密度、残余应力和取向程度有差别。

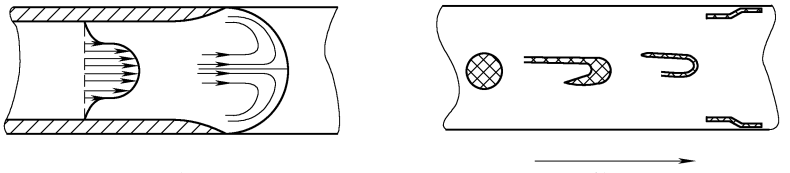


图 5-40　塑料熔体在型腔中的喷泉流动

a）速度分布廓线-熔流前锋　b）示踪球形微粒在充模中变形和变动位置

熔合缝生成中，有两股对冲的塑料熔体的源流。在流动中温度逐渐降低，黏度增高。这两股熔流的前锋有图 5-41 所示的熔合成缝过程。两股源流的锋面之间，存在不断被压缩的气体。在它们相遇瞬间，前沿成火山口形状，见图 5-41a 和 b 所示。喷泉运动的熔体迅速向四周扩展流动。被压缩气体，甚至还有污染物被赶至模壁后，陷入塑料件表层。由中心向模壁推移熔体受阻后冷却收缩，在固化的塑料件表面形成 V 形缺口，见图 5-41c 和 d。固化后熔合缝实际上是个三维空间熔合区。熔合缝由表及里分为 V 形缺口、弱熔合区和强熔合区。

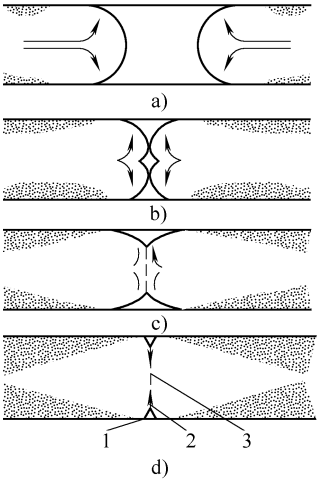


图 5-41　熔合缝的形成过程

a）两股源流前锋

b）相遇时的火山口形状

c）熔合扩展流动　d）冷却固化

1—V 型缺口　2—弱熔合区

3—强熔合区

从以上所述熔合过程可知，熔合缝区域的塑料形态结构与无缝区差别很大。

造成熔合缝力学性能较差的原因有如下四个方面。

1）注塑件外表层的 V 形缺口底部通常潜伏着裂纹，在承受载荷时会产生应力集中。该缺口的产生及其形态取决于物料品种、型腔结构、排气程度和工艺条件。用逐次铣削的方法，逐次铣深沟槽后抛光，将

试样进行拉伸强度测试，直至断裂强度不再增大，这样可测知 V 形缺口的深度。测到 PS 的缺口深 $h_w = 0.2 \sim 0.3$mm，而 PC 的缺口深 $h_w = 0$。如图 5-42 所示，PS 的缺口深度越大，有缝试样拉伸强度越差。

2）两股熔流前沿在对流中，由于喷泉扩展和被压气体作用，分子链取向是无规则的。它们在相遇后向模壁作扩展流动，熔合缝的长分子链取向垂直于充模流动方向。有添加剂的注塑件的熔合缝中，片状或纤维状的填料也是这种取向方向。这使熔合区的力学性能有别于无缝区。

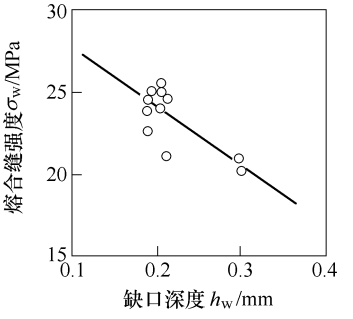


图 5-42　PS 熔合缝的 V 形缺口深度与拉伸强度

3）熔合区域不完善的熔合，使得熔合缝力学性能较差。两股熔流交汇时的熔合连接程度，取决于分子链扩散和纠缠所需能量的满足。其熔合质量主要取决于加工条件所提供的能量。熔合完善的程度与熔体温度和熔合时间有关。生产中注射工艺条件要求模具壁低温冷却，使固化速率快，熔流前锋在充模中温度下降明显。熔体在厚度方向上存在温度梯度。交汇界面上的空气和杂质，都使两熔流接触后重新扩散和纠缠存在困难。两股熔流界面很难完全消除。

4）对无定形的热塑性塑料，主要通过长分子链取向确定熔合缝区域的形态和力学特性。而结晶型的热塑性塑料，是由晶粒大小、结晶度及其分布确定熔合缝区域的取向。生产中，结晶型塑料的加工条件比无定形塑料的更为重要。

以上是对熔体前沿汇合的熔合痕迹的分析。近年来，对各种热塑性塑料，包括结晶型和玻璃纤维增强塑料熔合缝的内部结构形态进行了研究，并借助电子显微镜和偏振光显微镜对如图 5-43a 的熔合缝横截面切片进行了观察，发现在横截面内分子形态呈菱形分布，如图 5-43b 所示，可分为熔合带 1、菱形区 2 和压缩区 3。在注塑件外围表层有沟槽，伴有裂纹和真空泡等疵点。两股熔流的分子链在熔合带相互扩散、纠缠。其熔合程度和垂直于流动方向的取向决定了熔合缝的强度。由于熔合缝区域是由表及里逐渐固化，压缩包围了冷却较迟的菱形区。该区的分子取向是顺着流动方向逐步转向。该菱形区的发育程度与注射工艺条件密切相关。

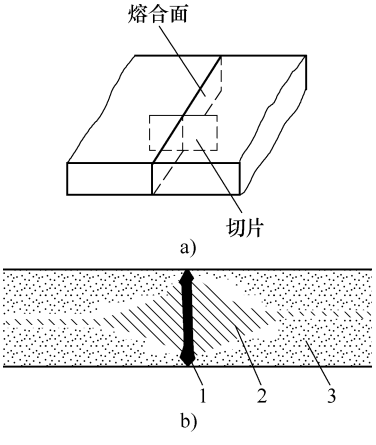


图 5-43　熔合缝横截面形态

a）显微镜观察的切片位置

b）熔合缝横截面的菱形模式

1—熔合带　2—菱形区　3—压缩区

3. 实验研究

几十年来对熔合缝的实验研究，世界各国已积累了大量实验资料。主要有两类：一类是对各种材料的熔合缝各截面的显微观察；另一类是对各种塑料的熔合缝力学性能进行对比性测试。

目前许多国家都有熔合缝试验型腔模具设计标准。美国的标准试验型腔如图 5-44a 所示。ASTM D647 标准有对接缝和流线缝两种。图 5-44b 所示为德国常用的对接试样和孔板试样。该注塑孔板试样与钻孔孔板进行流线缝的对比测试。孔板试样，其尺寸为 60mm × 20mm × 2mm，两孔孔径 10mm。它的对照试样应是注射成型的无孔板，然后钻削加工相应的两孔。

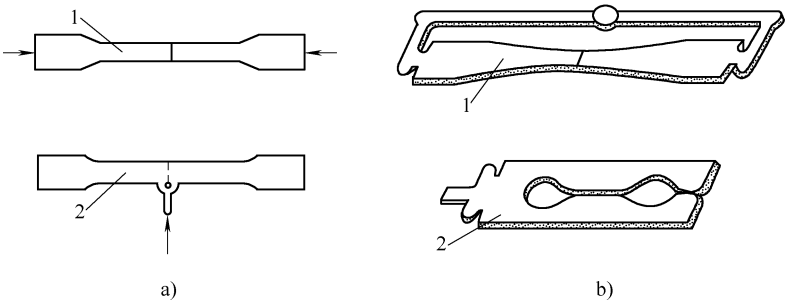


图 5-44　两类熔合缝试样

a）美国标准：1—对接缝拉伸试样　2—流线缝拉伸试样

b）德国采用：1—对接缝拉伸试样　2—双孔板试样

如图 5-45 所示为一模二套四件、有拉伸试样和冲击试样的注射模。有缝和无缝试样型腔在同一模具中，注射工艺条件相同。各浇口按注射压力相同原则布置型腔，并计算确定流道尺寸。型腔中的试件用推块均匀脱模顶出。

不同的拉伸速度会影响拉伸强度。试验时拉伸夹头速度常用 1 ~ 5mm/min。冲击试验的冲击速度约为 4m/s。

对各种样品进行单向拉伸的实验，可直接进行材料应力应变曲线的测试，着重研究熔合缝的屈服特性，用熔合缝强度与无熔合缝性能对比性表达方法。目前通常采用实验方法确定熔合缝系数 α_{kl}，其定义为

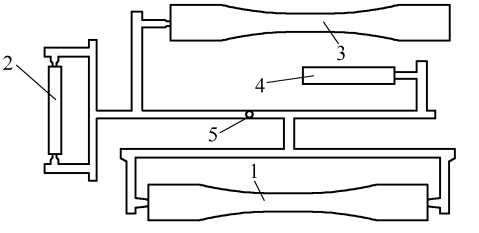


图 5-45　有缝和无缝的拉伸和冲击试样的注射模

1—对接有缝试样型腔　2—有缝冲击试样型腔

3—无缝拉伸试样型腔　4—无缝冲击试样型腔

5—主流道

$$\alpha_{kl} = \frac{\sigma_w}{\sigma_n} = \frac{A_o - A}{A_o} \tag{5-35}$$

式中　σ_w——有熔合缝试样的力学性能；

σ_n——无熔合缝试样，对应 σ_w 的力学性能；

A_o——熔合缝的截面面积；

A——分子链非联结的截面积。

可以用理论计算方法预测 PS 物料固化后熔合缝区域内分子链未能联结的截面积，从而确定熔合缝强度，能较好地与实验值相吻合。这说明理论方法已能用于无定形塑料热合缝的强度预测，但计算复杂，并缺乏材料性能数据。

一些简捷的关系式，可帮助掌握熔合强度的一般规律。将 PC 屑在一定的压力和温度下，置于压铸模中做熔合试验，可得到熔合强度 σ_w 与熔合时间 t 的关系，有

$$\sigma_w = At^{\frac{1}{4}} \tag{5-36}$$

式中　A——与相对分子量有关的参量。

图 5-46 描述了四种聚合物的熔合缝系数 α_{kl} 与（$T_p - T_g$）的关系。其中，T_p 是熔体的温度，T_g 为聚合物的玻璃化转变温度。PC 在注射期间大约有 $T_p - T_g = 150℃$。PC 分子链重新扩散和纠缠有较充分的时间。而 PS 有 $T_p - T_g = 100℃$，熔合缝强度较差。注意到 PP 的 $T_g = -10℃$，是在模具温度之下。与一些结晶型聚合物相似，熔体温度波动 T_p 对系数 α_{kl} 影响较小。

熔合缝的蠕变断裂和疲劳断裂也被关注。共聚甲醛注射的单浇口和双浇口试样，作蠕变和疲劳的熔合缝性能对比，在 50MPa 应力作用下，蠕变断裂的 $\alpha_{kl} = 0.28$；在 40MPa 应力下，$\alpha_{kl} = 0.56$。在（1.67 ~ 5.0）Hz 交变频率下，循环次数 10^5 时，疲劳断裂的 $\alpha_{kl} = 0.60$；在 10^6 次循环下，$\alpha_{kl} = 0.77$。对聚丙烯的对接熔合缝的疲劳测试，熔合缝使注塑件的疲劳性能参数损失约 40%。

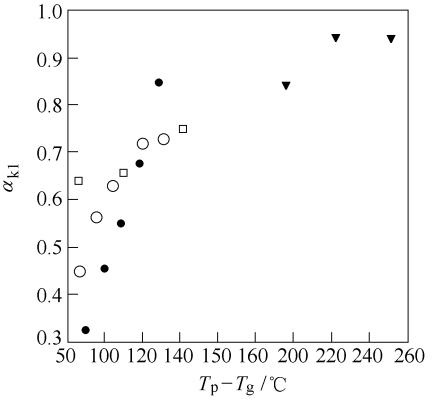


图 5-46　熔合缝系数 α_{kl} 与（$T_p - T_g$）关系模塑拉伸试样：○-PS；　●-PC；　▼-PP；　□-HIPS

5.2.2　熔合缝的力学性能

熔合缝的力学性能首先与材料有关。熔合缝系数 α_{kl} 与聚合物品种、聚合物改性和共混的配方有关，注射加工工艺也影响着 α_{kl} 值。

1. 聚合物的熔合缝

这里对 PS、SAN、ABS、PC 和 POM 五种纯聚合物塑料熔合缝试样的力学性能和工艺条件，依据实验测试进行分析讨论。

（1）熔合缝的屈服特性　根据多种聚合物的双浇口对接熔合缝试样的力学测试，按熔合缝试样的屈服特性，聚合物大致可分为脆性聚合物和韧性聚合物。前者有 PS、SAN 和 PMMA 等，其熔合缝系数 α_{kl} 即使在最佳工艺条件下成型也在 0.6 ~ 0.7 以下；而韧性聚合物如 POM、PP、PC 和 ABS 等，其 α_{kl} 值在 0.7 ~ 0.8 以上。

脆性聚合物的熔合缝有较深的 V 型缺口，由于裂缝的扩展呈脆性断裂。图 5-47 上 PS 的拉伸应力-应变曲线有三种不同熔体温度的试样。有熔合缝试样的屈服点明显地低于无缝试样的屈服点。从图中实验数据可知，降低熔体温度后的无缝试样，由于提高了流动方向的取向程度，出现较高的屈服点。与此相反，有缝对接试样由于较低熔体温度使熔合质量差，并有颇大 V 型缺口，其屈服点和强度下降。模具温度降低也有类似的影响。

韧性特出的 PC 对接熔合缝试样的拉伸应力-应变曲线，如图 5-48 所示。PC 熔合缝上 V 型缺口极细微。尽管试样在不同熔体温度下注塑，但对应力-应变曲线并无影响。有缝与无缝试样的弹性模量相等。有缝试样的屈服点比无缝试样的略低一些。但有缝试样的断裂伸长率只有无缝试样的一半。

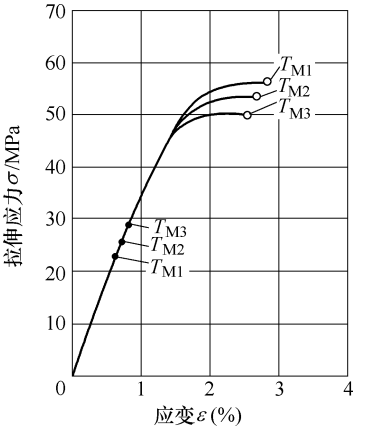


图 5-47　不同熔体温度下 PS 的对接熔合缝与无缝试样的拉伸应力-应变曲线

○—无缝试样屈服点

•—有缝试样屈服点

熔体温度：T_{M1}-210℃；T_{M2}-230℃；T_{M3}-250℃；

模具温度：40℃；型腔压力：30MPa；

夹头速度：5mm/min

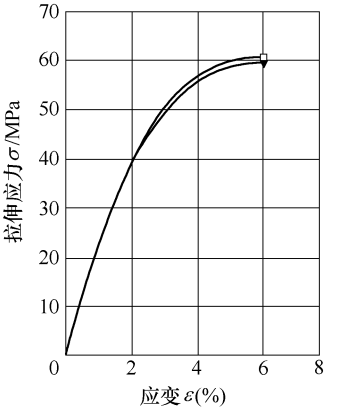


图 5-48　不同熔体温度下 PC 的对接熔合缝与无缝试样的拉伸应力-应变曲线

□—无缝试样屈服点

▼—有缝试样屈服点

熔体温度：200℃、320℃、340℃；

模具温度：120℃；型腔压力：30MPa；

夹头速度：5mm/min。

（2）熔体和模具的温度对熔合缝性能影响　在注射工艺条件中，熔体和模具的温度对熔合缝力学性能影响最大。表 5-3 中五种聚合物试样的注射成型的熔体和模具温度，及型腔压力均已注明。不同的力学性能的 α_{kl}（例如屈服点与断裂点、拉伸与冲击、应力与应变等的 α_{kl}）在数值上有差别。对于对接缝与流线缝，载荷与熔合缝间方向不同时 α_{kl} 也有区别。

表 5-3　五种聚合物试样的注射工艺参数

聚合物	熔体温度/℃			模具温度/℃		型腔压力/MPa	
	低	中	高	低	高	对接试样	孔板试样
PS	210	230	250	40	60	30	70
SAN	220	235	250	40	60	30	70
ABS	200	230	260	60	90	30	70
PC	300	320	340	90	120	30	50
POM	190	210	230	60	90	30	70

图 5-49 和图 5-50 分别为表 5-3 所列五种物料拉伸试验和冲击试验的熔合缝系数 α_{kl} 实验值，表明了熔合缝的力学性能。

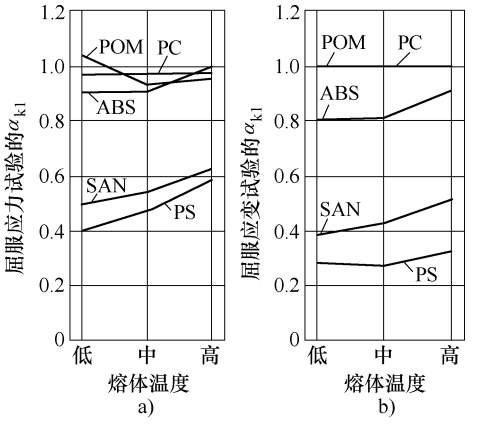


图 5-49　对接熔合缝拉伸试验的熔合缝系数 α_{kl}

a）屈服应力之比　b）屈服应变之比

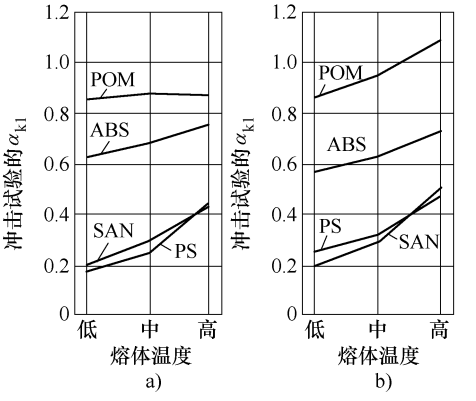


图 5-50　对接熔合缝冲击试验的熔合缝系数 α_{kl}

a）低的模具温度　b）高的模具温度

脆性材料如 SAN 和 PS 没有或没有明显的屈服点。因此，要按拉伸断裂时的应力和应变值分别求得图 5-49 中的 α_{kl}。熔合缝拉伸断裂时应力的 α_{kl}低于 0.6。断裂时应变的 α_{kl}低于0.5。如图5-50 所示，冲击下的脆性材料的熔合缝系数 α_{kl}低于0.3。这是由于熔合缝的缺口底部的应力集中引发了试样破坏。

韧性材料例如 ABS、POM 和 PC 是按屈服点的应力和应变值分别取得图 5-49 中的熔合缝系数 α_{kl}。其拉伸屈服点应力 α_{kl}为 0.9 以上。应变屈服点 α_{kl}为 0.8 以上。如图 5-50 所示，冲击下韧性材料的 α_{kl}为 0.6 以上。其中 POM 冲击强度 α_{kl}接近 1。这是由于这些韧性材料有高的伸长率和颈缩现象，致使熔合缝缺口底部的应力集中减弱。

1）熔体温度的影响　提高加工温度，尤其是提高模具温度能使熔合缝的力学性能提高，对熔合缝冲击强度的提高也明显。在较高的加工温度下，一方面熔合缝的汇合熔融程度好，冲击强度提高；另一方面由于无缝试样取向程度降低，致使冲击强度降低。综合影响 α_{kl}的结果，会出现 POM 和 PC 的 α_{kl}大于 1 的状况。

2）模具温度的影响　对结晶聚合物例如 POM、PA6 等的熔合缝研究结果表明，模具温度比熔体温度更为重要。例如：PA6 的熔合缝在 130℃模温，且保压充分，由于冷却平稳结晶充分，在显微镜观察下没有缺口和沟槽。相反，模具温度在 30℃时产生沟槽。沟槽和真空泡是在塑料件冷却收缩阶段形成的。较低的模具温度形成较深的沟槽，并使真空泡位置分布在塑料件外表层。其次在较高加工温度下，高的保压压力和较长的保压时间可有效提高上述菱形区的发育程度，也增加了熔合缝的平均密度，从而提高了熔合缝强度。

（3）熔合缝方向　对孔板试样的拉伸试验说明了冷合缝的强度。图 5-51 表示用两根芯棒进行的拉伸试验。有缝试样与无缝钻孔试样是不同的。塑孔试样的断裂出现在远离浇口、

孔与末端边缘间的那条熔合缝上。这是由于芯棒的传力关系，使熔合缝最终在拉应力作用下断裂。而钻孔试样，因孔两侧的截面最小，致使侧向拉断。图 5-52a 所示是这组对照实验结果的比值 α_{kl}。韧性材料的 α_{kl} 为 0.8 以上；脆性材料的 α_{kl} 为 0.4 以上。熔体温度对脆性材料 α_{kl} 的提高影响颇大。

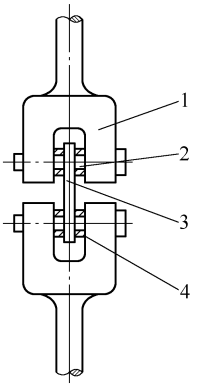


图 5-51　孔板试样用芯棒的整体拉伸

1—拉伸夹头　2—芯棒　3—孔板试样　4—定位套

将孔板试样平分成两半使之各有一孔，取远离浇口的半块，进行垂直熔合缝方向的拉伸试验。塑孔试样与钻孔试样对照的 α_{kl} 值见图 5-52b。除了 PC 外，其他材料的 α_{kl} 值均比前整体拉伸强度降低了许多。由此表明施加载荷的方向与熔合缝长度方向的关系，是影响熔合缝系数的重要因素。

（4）其他工艺条件的影响　型腔压力对大多数纯聚合物的 α_{kl} 值影响较小。但保压压力和时间增大，对 PA6 和 LDPE 少数结晶型聚合物的 α_{kl} 值提高的颇有影响。充分保压能使熔合缝区域密度提高，提高了在熔合缝两侧菱形区内结晶程度，而且缩小了 V 型缺口。结晶型聚合物在熔合缝区域的结晶过程和形态较复杂，还需进一步研究。例如：对于 PP 物料，较高模具温度并不能有效提高熔合缝强度，而加入成核剂后强度提高明显。

实验证明，提高充模速率对熔合缝强度的影响并不明显。在众多影响因素中，值得注意的是注塑件的厚度。一般而言，增加熔合缝处的厚度，有利于提高熔合缝强度。较薄注塑件的熔合缝强度较差，即使提高加工温度，由于松弛不充分，也不能改善强度。

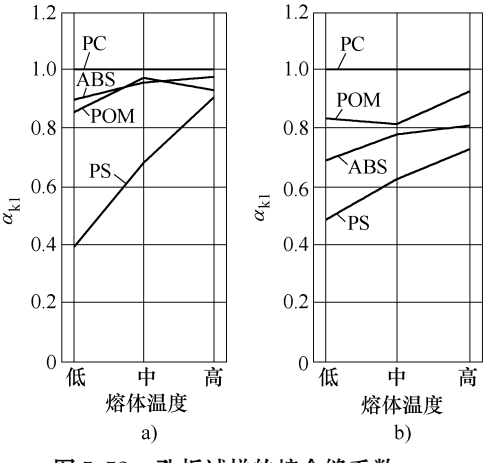


图 5-52　孔板试样的熔合缝系数 α_{kl}

a）孔板试样用芯棒的整体拉伸

b）分离后孔板试样拉伸，拉力垂直于熔合缝

2. 复合塑料的熔合缝

绝大多数复合塑料的 α_{kl} 比纯聚合物的 α_{kl} 低的原因有三个：

其一，由于充模熔体的前沿部分是纯聚合物，各种颗粒或玻璃纤维填料等分散相作为载体在后续熔流中推进，在熔合缝区域里，分散相分布不均匀，而且其体积密度低于非熔合区；

其二，具有一定长径比的颗粒或纤维填料在熔合缝区域中的取向与流动方向垂直，填料长径比越大，或填料含量越多，α_{kl} 越低；

其三，在聚合物基体汇合并重新扩散时，填料颗粒或纤维与基体的界面黏结很难完善，容易脱黏。

表 5-4 是 PP 和 PC 聚合物及其复合塑料的力学性能对比。各种添加剂特别是玻璃纤

维、大多数复合塑料的有缝试样比无缝试样的性能都有下降。

表 5-4　PP 和 PC 及其复合塑料熔合缝试样的力学性能的对比

材料	断裂强度 σ/MPa		熔合缝系数 α_{kl}	拉伸弹性模量　E/GPa	
	无缝	有缝		无缝	有缝
PP	33	30	0. 90	1. 8	1. 6
PP + 30% 短玻璃纤维	50	22	0. 44	6. 4	2. 8
PP + 30% 长玻璃纤维	78	18	0. 23	6. 6	2. 8
PP + 30% 玻璃珠	21	21	1. 00	2. 0	2. 0
PP + 30% 滑石粉	32	11	0. 34	3. 8	2. 0
PC	60	60	1. 00	2. 4	2. 2
PC + 30% 短玻璃纤维	111	47	0. 42	6. 6	5. 3

（1）改性聚合物　由表 5-5 可以看出，云母改性 PP 比纯 PP 的 α_{kl} 值低。未用硅烷处理的云母，在同样云母含量下，其 α_{kl} 还要下降 0. 05 ~ 0. 10。说明了对填料处理所起的改善熔合缝强度的作用。

表 5-5　云母改性 PP 的熔合缝系数

材　　料	占质量比(%)	熔合缝系数 α_{kl}
云母充填 PP	5	0. 86
	20	0. 50
	40	0. 31
硅烷处理云母充填的 PP	5	0. 85
	20	0. 55
	40	0. 40

在橡胶粒子增韧聚合物（例如抗冲击聚苯乙烯）的熔合缝区域内，橡胶粒子的含量较少并存在橡胶粒子被排挤后的空穴，有的橡胶粒子变成扁平状。因此，有缝试件的塑性变差，熔合缝的抗拉强度较好，α_{kl} = 0. 85 ~ 0. 89；但断裂伸长率之比为 α_{kl} = 0. 30 ~ 0. 50，是很低的。另外，抗冲击的聚苯乙烯的熔合缝强度对模具温度和注射、保压压力也很敏感。测试证实：注射压力 60MPa 时拉伸强度的 α_{kl} 约为 0. 5；注射压力提高至 80MPa 时，拉伸强度的 α_{kl} 上升至 0. 95。

（2）聚合物的混合物　各种聚合物混合物的因是否熔合，其熔合缝区的形态和性能，存在差别。图 5-53 为 HDPE/PA（体积分数 25/75）的熔合缝结构形态。由图 5-53a 可以看出：材料中无相容剂时，较厚皮层上基本上无分散相；次皮层的分散相粒子体积大，并有变形；芯部分散相体积也较大。熔合缝宽度达 600μm。如图 5-53b 所示，添加了相容剂后，熔合缝宽度为 200μm，分散相尺寸小，无变形，且分布均匀。尽管熔合缝

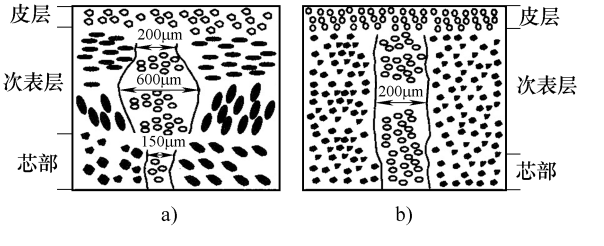


图 5-53　HDPE/PA 的熔合缝结构形态示意图

a）无相容剂　b）有相容剂

内仍缺少分散相，但力学性能已有改善，熔合缝强度比无相容剂时提高 15% ~40% 。

PC/PE（80/20）混合物用乙烯/乙酸乙烯酯共聚物 E/VAC 作相容剂时，相容剂的用量和熔体温度对 PC/PE 混合物的熔合缝性能影响很大。在 E/VAC 质量分数达 0.5% ，且温度为 300℃时，其 α_{kl} 最大，弹性模量的 α_{kl} 为 0.55。其他各项的熔合缝系数也有 0.55 ~0.85，此时，分散相粒子最小，平均为 2μm。实验表明 E/VAC 不但可降低分散相尺寸，也可改善相界面的黏合性能。但 E/VAC 含量超过 0.5% 时，各项 α_{kl} 下降明显。

（3）玻璃纤维增强热塑性塑料的熔合缝　玻璃纤维增强热塑性塑料制品中的熔合缝，由于熔合缝中纤维取向垂直于流动方向，见图 5-54a，而使塑料件增强效果不好。为此，对熔合缝进行了深入研究。

玻璃纤维增强 PC 对接熔合缝试样，玻璃纤维含量 10% 时，无缝的拉伸强度 σ_n = 73.5MPa；含 20% 时，σ_n = 96.3MPa；含 40% 时，σ_n = 130MPa。料筒温度 280℃，模具温度 80℃，冷却时间 20s，注射采用二阶压力控制，在两股熔流前锋相遇时，转换成保压压力，试样拉伸实验的结果见图 5-55。

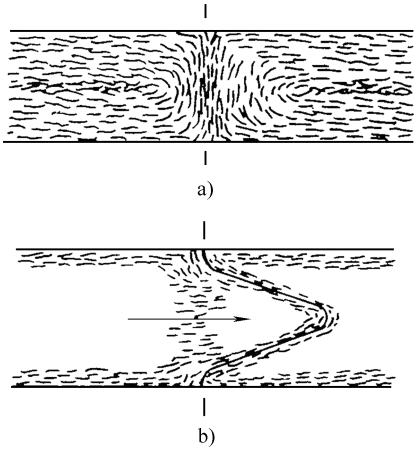


图 5-54　玻璃纤维增强热塑性塑料的熔合缝

a）纤维的菱形分布模式　b）静压差使纤维倒流

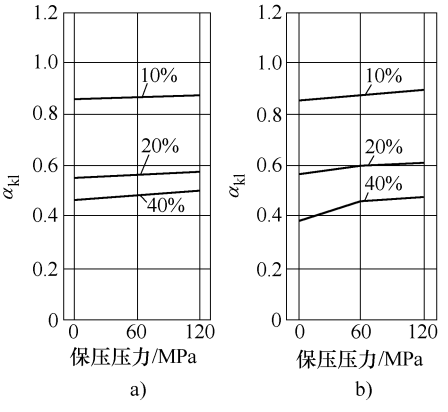


图 5-55　玻璃纤维增强 PC 对接熔合缝拉伸试验的熔合缝系数 α_{kl}

a）注射压力对应 10% ~40% 为 54 ~69MPa

b）注射压力 90MPa

由实验数据可知，玻璃纤维含量愈高，α_{kl} 值愈低，而保压压力的提高可增加熔合缝的强度。由于充模熔流的前锋中玻璃纤维含量低于后续源流中的含量，提高保压压力可增加熔合缝区域截面上的玻璃纤维含量。沿着厚度为 3.2mm 的熔合缝断裂面，割出 20 个 0.16mm 宽切片。用偏振光显微镜计数每个切片上的纤维，作纤维数目分布图，见图 5-56。由图可知，当保压压力为零时，在厚度方向的两个次表层上，有两个纤维分布的峰值；而在保压压力 120MPa 时有多个峰值，总纤维数目大增，分布也较均匀。

但是增大保压压力，熔合缝强度仅提高 4% ，并不理想。关键在于改变熔合缝中纤维取向。已有实验证实，如果在两股熔流相遇瞬间转换保压压力，它们前锋间存在足够

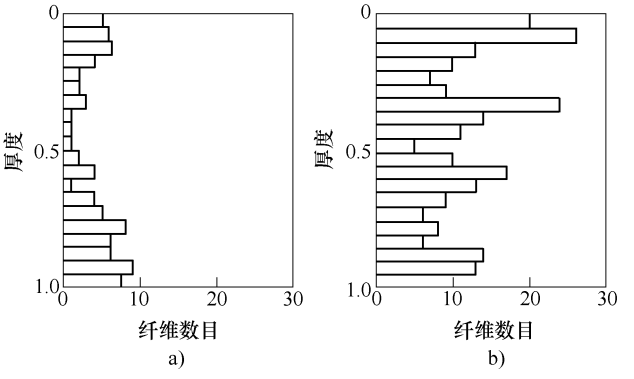


图 5-56　纤维数目在厚度方向的分布

a）保压压力 0MPa　b）保压压力 120MPa

注：除玻璃纤维含量 10%、注射压力 48MPa 外，其他条件同图 5-55 实例。

的压力差，则会出现图 5-54b 的纤维取向分布。由高压一方熔体夹带纤维楔入低压一方，使熔合缝处纤维呈交叉分布，熔合缝强度可提高 40%。这样 20% 玻璃纤维增强 PC 的熔合缝系数 α_{kl} 可达 0.76。通常取得两股熔流前锋不平衡静压的方法是采用多浇口的布置。

短玻璃纤维增强的聚丙烯，其熔合缝强度 σ_w 与玻璃纤维的体积含量 ϕF，有关系式

$$\sigma_w = \sigma_{nw}\left[1 - \left(\frac{4\phi}{\pi}\right)^{1/2}\right] \tag{5-37}$$

式中　σ_{nw}——无缝区材料的强度。

此式假定熔合缝中纤维取向垂直所施加的作用应力，并考虑到纤维与基体界面脱黏在断裂之前。其他 PA 和 PC 等玻璃纤维增强塑料的熔合缝强度 σ_w 均高于式（5-37）的计算值。

从侧浇口注入的熔流，对冲型芯或嵌件生成的流线缝，如图 5-37 所示。此流线缝内纤维取向平行于从侧浇口进入源流方向，并大致有 2 ~ 8mm 的宽度。此宽度取决于材料、型腔深度和型芯直径。至于圆盘型腔，常以中心处的垂直浇口充模。众所周知，盘内纤维方向按圆周切向扩展流动方向排列。倘若中途遇到型芯，其熔合缝内纤维有偏斜角度。这涉及纤维取向角度的复杂估算。

3. 各种塑料的熔合缝性能

熔合缝区域的力学性能与熔流汇合前的经历有关。熔合区的温度、压力和时间等工艺条件对熔合质量也有明显影响。众多材料注射的有缝与无缝试件的对比分析表明，注射成型材料的种类是熔合缝强度系数 α_{kl} 的决定性因素。表 5-6 列出了一些塑料的熔合缝系数。

表 5-6 各种塑料的熔合缝系数

材　　料	拉伸强度熔合缝系数	断裂伸长率熔合缝系数	冲击强度熔合缝系数
PS	0. 45 ~ 0. 65	0. 30 ~ 0. 55	0. 25 ~ 0. 65
SAN	0. 50 ~ 0. 64	0. 40 ~ 0. 52	0. 20 ~ 0. 48
PC	1. 0	0. 42 ~ 0. 44	
ABS	0. 90 ~ 0. 98	0. 80 ~ 0. 90	0. 50 ~ 0. 80
PP	0. 85 ~ 0. 96	1. 08 ~ 1. 13	
POM	0. 85 ~ 1. 02	1. 0	0. 86 ~ 1. 08
PBT	0. 96 ~ 1. 02	0. 75 ~ 1. 08	
PET	0. 98	1. 0	
HIPS	0. 85 ~ 0. 89	0. 30 ~ 0. 50	
PS + 20% GF	0. 45 ~ 0. 49	0. 49 ~ 0. 50	
PC + 10% GF	0. 85 ~ 0. 87		
PC + 20% GF	0. 55 ~ 0. 58		
PC + 30% GF	0. 47 ~ 0. 51		
PP + 20% 滑石粉	0. 34		
PP + 20% 云母	0. 55		
PP + 40% 云母	0. 40		
PP + 20% GF	0. 73 ~ 0. 86	0. 60 ~ 0. 79	
PBT + 30% GF	0. 50 ~ 0. 53	0. 54 ~ 0. 62	
PET + 35% GF	0. 24 ~ 0. 49	0. 27 ~ 0. 44	
PPS + 40% GF	0. 24 ~ 0. 28	0. 33 ~ 0. 40	

按熔合缝性能的特征，注射物料大致可分为一下 7 类。

1）脆性的无定形聚合物。例如 PS 和 SAN 的有缝试样在拉伸试验中没有屈服点，断裂表面粗糙，其 α_{kl} 值低于 0. 6。

2）韧性的无定形聚合物。例如 PC 和 ABS 的 α_{kl} 值接近 1。在拉伸有缝试样时，有颈缩现象和明显的屈服点。

3）结晶型的聚合物。例如 PP、POM、PBT 和 PET 的 α_{kl} 值大于 0. 8，熔合缝区域的结晶形态、结晶度、晶粒粗细和取向等决定了熔合缝的性能。

4）橡胶增韧的聚合物。例如抗冲击聚苯乙烯和增韧丙烯的熔合缝拉伸强度较高，α_{kl} 值为 0. 85 ~ 0. 89。断裂伸长率的 α_{kl} 值为 0. 30 ~ 0. 50。熔合区的塑性很差。熔合缝的性能与橡胶粒子的分布和形态有关。

5）颗粒填料充填的聚合物。其熔合缝的强度较差。熔合缝的性能与填料用量和偶合处理等因素有关。

6）短玻璃纤维增强的聚合物。玻璃纤维在熔合缝区域分布密度低，又有垂直流动方向的取向，致使熔合强度差。

7）聚合物的混合物。熔合缝区域的形态差，力学性能低，应用相容剂能得到改善。

熔合缝力学性能测试结果不仅是对有缝注射制品的性能预测评估的依据，也是注射用料性能的重要指标。

5. 2. 3 熔合缝的控制和多浇口顺序进料的消痕工艺

因为熔合缝性能的改善有较大余地，它作为高分子材料和塑料制品研究的重大课题，近年来进展很大。要改善熔合缝的性能，注射制品设计、模具设计和注射工艺条件

控制非常重要。改善注射工艺的途径已被普遍掌握。现代计算机的流动分析、对注塑件的熔合缝生成的仿真模拟，为熔合缝性能改善提供了辅助工具。本节介绍近年来发展起来的消痕工艺：热流道多个针阀式喷嘴的时间顺序控制注射。

1. 熔合缝的控制

（1）注射制品和模具优化设计　模具设计者应有控制熔合缝的能力。计算机流动分析软件能辅助设计者预测熔合缝位置。设计模具的浇注系统和冷却系统，优化浇口的形式、数目和位置，能控制熔合缝生成位置、方向和性能。

在制品和模具设计时，应避免在注塑件上强度与刚度最薄弱位置出现熔合缝；必要时在熔合缝位置设置冷料井，引出两股熔流的前锋，在冷却固化后割去；增加浇口，可缩短流程，避免低温熔流的不良熔合；避免在熔合缝位置设置低温的冷却管道。

浇口的位置和数目能改进熔合缝强度。如图 5-57a 所示，*A* 位置设置浇口，熔合缝的位置和方向使此塑料板强度优于 *B* 浇口的板。图 5-57b 上，只在 *A* 处设浇口会使孔的外侧熔合缝破坏边缘的强度，增设了 *B* 位置浇口可获得改善。

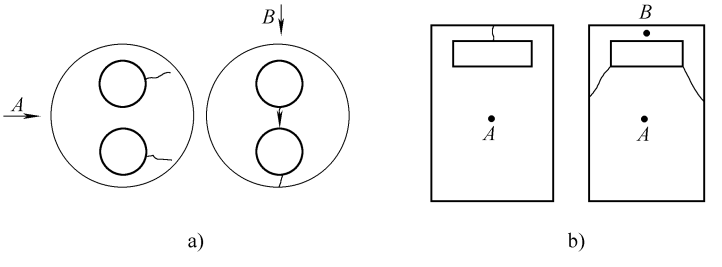


图 5-57　改善注射板件的熔合缝强度

a）改变浇口位置　b）增加浇口

合理利用流程差也可使并合的流线缝产生偏移和楔入，利用熔合缝形貌来提高强度。如图所示 5-58 所示，并列两浇口会使熔体同时到达 t_1 线。由于其中一股熔流继续推进，浇口之间流线缝在侧向压力差下偏移，见图 5-58b 所示。提高短玻璃纤维增强注塑件上熔合缝强度的方法是改变熔合缝中的纤维取向，也可使熔流的一方以高压携带纤维楔入低压的另一方熔体中。具体实现方法是在制品或模具设计中，使两股熔流有不同的流程，使熔体在不同压力下对接熔合。

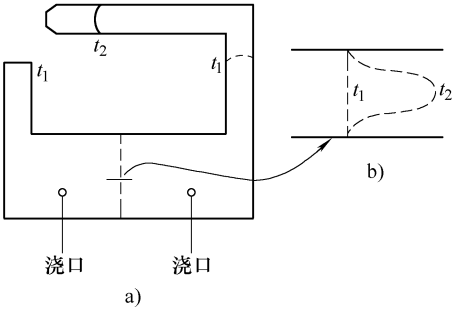


图 5-58　并列的流线缝由流程压差产生偏移楔入

a）t_1 瞬时，熔流的前沿位置

b）并列的流线缝截面 t_2 时的形貌

（2）聚合物改性和注射料流控制　由前所述，对于颗粒或纤维改性的注塑件上的熔合缝，其填料含量和长径比，及是否经偶联剂处理也是很重要的因素。

在材料为多相组合时，两股熔流前锋中，组合成分产生熔合缝的形态控制，应成为配方优化的目标。各种最佳配比的添加剂被用来促使分散相粒子细化，减少粒子变形；促使分散相分布均匀；促使多相界面的黏结，都能有效提高熔合缝强度系数。不合适的混合和添加剂会损失熔合缝性能。

近年来，用优化材料配方的办法改善多相组分材料熔合缝的研究有很大进展。ABS品种很多，其熔合缝力学性能被关注。为促使 ABS 熔合缝中橡胶粒子与 ABS 基体的粘合，减小其在熔合缝区的变形，加入适量的添加剂，可提高熔合缝强度，尤其是有缝试样作高速拉伸时的熔合缝强度。但是，阻燃 ABS 拉伸强度的 α_{kl} 比纯 ABS 的 α_{kl} 下降约 30%。所以，聚合物的改性，必须对熔合缝的力学性能作比较测试，保证有熔合缝注射制品的质量。

热流道注射模采用多点针阀式喷嘴可以控制注塑件上熔合缝的位置。在多点针阀式喷嘴与注射机控制系统之间串入多点的时间继电器。时间继电器控制各喷嘴里阀针的驱动气缸活塞。各喷嘴开启进料的时间差可以调节。近年来，这种热流道喷嘴的时间继电器已经商品化。在注射生产现场调整熔合缝的位置，避免在板件的可见侧边和两孔之间出现熔合缝。

注塑件经退火处理，对结晶型聚合物的熔合缝有一定的强度改善作用。对于高黏度 PP 熔合缝，注射成型塑料熔体的 MFI 为 5g/10min，其强度可提高 10%。对较低黏度 PP 的品级，仅提高 3%。

2. 阀式热流道喷嘴的无缝注射

近代，大型的塑料板或壳体多采用热流道多喷嘴注射成型，以减少注射流程，保证压力传递和制品的密度。大型门板、护板和汽车保险杠由于多喷嘴进料，制品上有可见熔合缝。为掩饰熔合痕迹，采用包裹包覆织布或喷涂装饰。这里介绍，热流道多个针阀式喷嘴的时间顺序控制注射方法，可消除多喷嘴生成的熔合缝。但是这种针阀式热流道喷嘴的无缝注射，更加依赖于计算机流动模拟分析；依赖于针阀式喷嘴的热流道系统的成型质量；依赖于注射的时间顺序控制的精度。

多喷嘴时间顺序控制浇注的总注射时间延长了，但注射压力可以较低，在消除制件上熔合缝的同时，也减轻了注塑件的残余应力，减小了翘曲变形。

轿车顶棚后压条用长条织物衬里的聚丙烯注塑件，用低压注射成型模具生产。它必须采用热流道浇注系统，并用多个针阀式喷嘴串接。开模时，让织物均匀复贴在动模上，然后依次逐点地自动控制注射。在较低的注射压力下，保证织物与塑料粘结复合。制品上无熔合缝，无明显的翘曲变形。这种在织物衬里上注射的方法称为模内复合，即 IML（in-mould lamination）。

（1）制品特征　制品用于轿车顶棚，四周有大圆弧，并有里弯翻边。制品总长 970～1007mm，宽 125mm，板厚 2.5mm。塑料板投影面积 1224mm^2。乳白色聚丙烯 PP 板的里侧，有六个竖立夹卡和六个夹槽座，用来紧固在汽车顶板上。制品上还均布三个十字插头，用做对准定位。图 5-59 是 PP 塑料注射衬里板的造型，上表面上有装夹结构和筋条。织物的外表面是斜纹纺织面料，与塑料粘结面是衬绒。注射模开启时，四周放

有余量的织物衬布，紧绷在动模的型芯上。

（2）低压串接注射原理　织物衬里内饰件注射时，塑料熔体在型腔里充模流动。一侧是光滑模具钢壁面，另一侧是合成纤维衬绒，引起 PP 熔料的流动剪切速率，对间隙中心层分布不对称，冷却固化后制品中有颇大的残余流动应力。另一方面，动模一侧铺放的织物绒布，使制品两侧的冷却效率相差大，固化制品中有较大残余温差应力。实行多浇口顺序开启，无熔合缝，可减小了翘曲变形，更提高了压条板的刚性和强度。

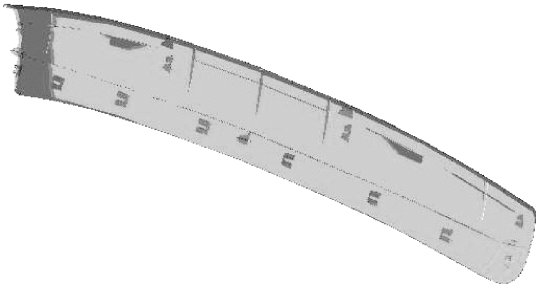


图 5-59　PP 塑料注射衬里板造型

串接式注射原理见图 5-60 所示。注射从中央的针阀式喷嘴 Z1 开始，临近的喷嘴 Z2 和 Z3，只有当熔料前沿经过它们时才打开。最后打开的喷嘴 Z4 和 Z5 射出熔料，将型腔充满后，所有的喷嘴必须打开，以实施保压过程。喷嘴的数目和热流道的几何参数应该用计算机模拟软件建立。生产现场已经使用了具有时间顺序控制的多组气动（或液压）换向阀。从型腔的中央起始完成的熔料充填，由时间继电器控制这些针阀式喷嘴。这种时间控制器与热流道温度控制器合成一个仪表。

在型腔被熔体充填时，从相反方向与熔料前峰相遇是不允许的。这会使织物衬里萎缩起皱。用串接式的几个注射点，传输料流的前锋，保证织物被均匀保压在模壁上。在保压阶段，众喷嘴对每个充填区提供相同的低压力降。

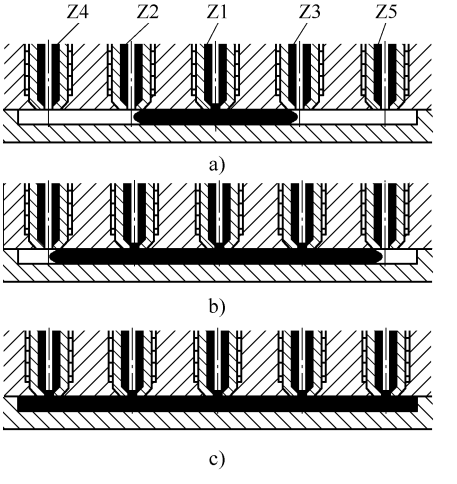


图 5-60　串接式注射原理

a）中央喷嘴 Z1 打开

b）料流前锋到达时，两侧喷嘴依次打开

c）所有喷嘴打开，最终充满型腔并保压

（3）模具结构特征　在 IML 模具内，塑料层在定模一边注射，织物放置在动模型腔内。脱模顶出系统和热流道系统必须设置在定模上。

热流道系统的针阀式喷嘴的针阀由气缸启闭，而且脱模顶出板也用气缸驱动。可防止任何漏油污染织物衬里。制品的多余衬里在专用切割机床上切除。

动模上的织物衬里制品必须强化冷却。由于织物的绝热性能使注射制品冷却困难。织物衬里也使注射充模的料流不对称，导致向衬里翘曲变形。在定模的喷嘴区需加强冷却固化，来抵消制品条朝着中央的翘曲变形。

（4）热流道浇注系统　注塑模采用五个气动针阀式分喷嘴。图 5-61 所示 Z1 ~ Z5 喷嘴有长 5mm 倒锥的大浇口，3 ~ 3.9mm 口径。喷嘴的阀针直径 7.5mm，流道直径 16mm。由于定模成型面凹进，从图中件 6 的定位支承座算起，喷嘴长度 482 ~ 495mm。由于驱动气缸安装在定模固定板中，分喷嘴相对模具中心偏置 106 ~ 122mm 安装。

主流道喷嘴长 112mm。下游横流道总长 736mm，直径 16mm。抵达 Z1 ~ Z5 喷嘴的各支流道长 106 ~ 122mm，直径 16mm。

流道板长 888mm，宽 196mm，厚 60mm。以平均 25mm 的空气间隙，支架在定模的空腔中。流道板上有五个加热区，各自测温并调节。主流道喷嘴单独加热。由于定模上设置脱模机构，五个分喷嘴很长。对各喷嘴设计二个加热和温控区，有效地防止了沿喷嘴流道的温度分布不均匀，消除塑料熔体过热分解的现象。该热流道系统有十六个加热和温度控制区。

（5）流动分析　喷嘴针阀控制的五个浇口，如果不能正确实现顺序控制，或五个浇口同时注入型腔，如图 5-62 所示，则会产生四条熔合缝。这些熔合缝使注塑件的强度严重下降，且有严重的翘曲变形。

在织物衬里上的注射量为 412cm^3，而热流道系统中加热塑料有 780cm^3，设置环境温度 25℃，熔体温度 265℃，模具温度 60℃，用注射时间控制充模，设定时间 3s，让型腔充模流动速率在 103 ~ 135cm^3/s 合理范围内。经流动分析调试，注塑件型腔全部充满时间为 3.5s。此为速度控制充模转变到压力控制的时间。

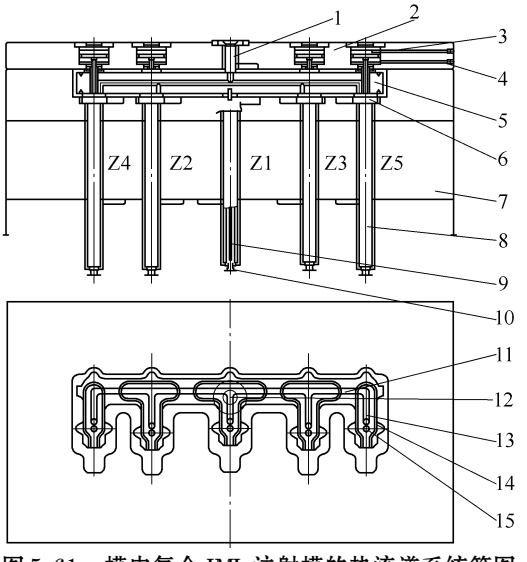


图 5-61　模内复合 IML 注射模的热流道系统简图

1—主流道单喷嘴　2—定模固定板　3—喷嘴阀针的驱动气缸　4—导气管道　5—热流道板　6—喷嘴的定位支承座　7—定模板　8—分喷嘴　9—喷嘴阀针　10—浇口套　11—横流道　12—主喷嘴位置　13—支流道　14—加热线圈　15—分喷嘴位置

在动用流动分析的热流道系统工具的过程中，设置塑料熔体的针阀式浇口的性能。在针阀控制器的浇口对话框中，输入浇口小端与大端直径 3 ~ 3.9mm，用时间控制的方法，确定各浇口开启时间。在此注塑件的模拟过程中，经多次测试获得料流从 Z1 浇口充满型腔体积的 45% 、到达 Z2 或 Z3 的时间为 1.85s ；从 Z2 或 Z3 到达 Z4 或 Z5 的时间为 0.97 s，此时已充满型腔体积的 76% 。实现了图 5-63 的料流前锋的控制后，取得如图 5-64 所示的无长条熔合缝的效果。

五个喷嘴浇口同时被针阀关闭时间，经多次测试确定为 12s。针阀关闭时间太早，注塑件的保压补缩不充分，影响制品质量；关闭时间太迟，浇口附近塑料熔体冷却，影

响针阀关闭动作。要保证浇口附近有 220℃以上温度，让注塑件有最佳体积收缩率。设置的注射机螺杆控制的保压时间为 11s，比浇口关闭提早 1s，使得两个控制时间都起作用。

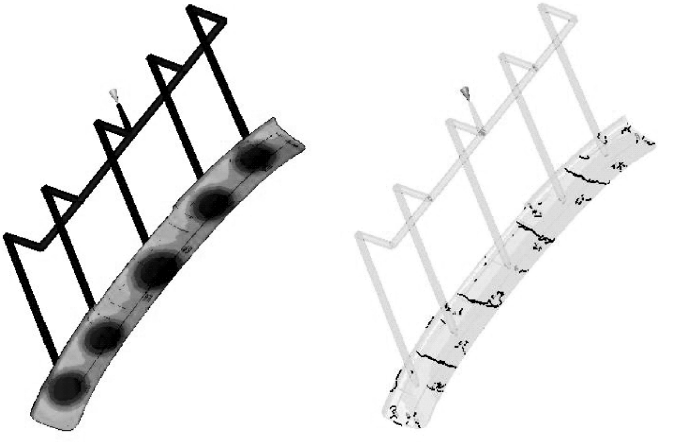


图 5-62　五个浇口同时充模和有缝的制品

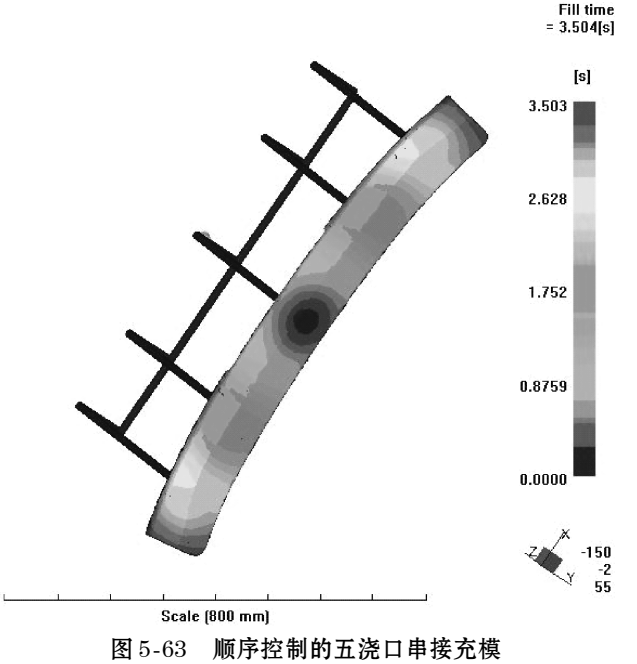


图 5-63　顺序控制的五浇口串接充模

流动分析时，自动调节速度和压力。保压控制经对话框设定，逐步降低保压压力。采用曲线保压能减小保压作用，避免了过保压现象。注入模具的最大注射压力，在 1.8s 时达 660×10^5Pa。注塑件型腔压力在 4s 时达到最高（500×10^5Pa）；到 6s 时，型腔大部分已降至 160×10^5Pa，实现了长时间的低压保压。

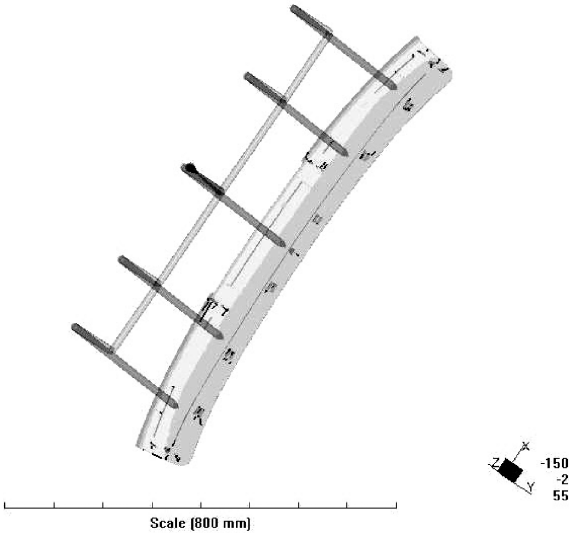


图 5-64 顺序控制针阀式喷嘴无缝注射的 PP 压条板

方案的工艺设置很重要，尽管计算机分析一次时间很长，也必须多次设定各喷嘴针阀开关时间，才能达到无缝注射。计算机流动分析，对注射生产现场有指导意义。

5.2.4 快速热冷循环成型技术

快速热冷循环成型技术（rapid heating cycle molding，RHCM）又称为高光无痕注射成型技术，蒸汽注射成型技术。

1. 原理和特征

模具温度对注塑件质量的影响很大。传统的冷模具设计片面追求低的模温，降低冷却时间，提高生产率。低温模具使熔料在注射进料中快速冷却，致使注塑件的质量不佳。

模具温度加热到注塑塑料的热变形温度以上，在注射和保压阶段塑料熔体在高温型腔中流动充填并补缩进料。熔体能较好保持注射温度，进料的流动阻力小，压力传递畅通。因此，塑料熔体能与型腔壁面贴合良好，能很好地充填窄小间隙或细小的凹槽拐角，将细微结构完整地复制在注塑件上，能获得表面粗糙度低的外观高光的注塑件。

与传统的冷型腔中的充模流动相比，在高模温中进料的熔体温度不会急剧下降，不会在型腔壁上形成冷凝皮层。高温熔体能充分扩散，可消除注塑件上的流动痕。熔料分离后熔体前锋的温度较高，有足够能量汇合交融，提高了熔合缝强度并消除了熔合的痕迹。

高温的熔料也能更有效补缩。因此，成型制件密度足够并均匀。制件上没有凹陷等缺陷，残余应力减小。注塑件的强度和刚度也有提高。

在高模温型腔中充填保压后，模具又快速冷却，致使注塑件的表层迅速固化。从而保证制件光泽与平整，轮廓清晰。此种注塑件无需喷涂修饰。

它有两方面特点：一方面，在注射和保压阶段，用加热介质使模具快速加热到注射塑料的热变形温度以上，然后改用冷却介质快速冷却，实现动态的模具温度控制；另一

方面，模具的介质通道随着制品轮廓面布置，使模型壁面温度均匀。

2. 快速变换模具温度技术

快速变换模具温度与传统的模温控制技术相比，加热和冷却模具较复杂，动态调节控制模温较困难，该项技术还在发展中。模具的快速加热方法有电加热、蒸汽加热、电磁感应加热、红外线加热和火焰加热等。这里介绍已成功用于注射生产的前三种。

（1）电加热　常用电热管、电热板或电热圈等电阻加强元件加热模具。加热速度快（为 1 ~ 3℃/s），温度控制范围可大于 350℃。在注射成型中，将模具的型芯和型腔快速加热至接近聚合物的玻璃化转变温度，并保持该温度至注射完成；然后，用冷却水对模具快速冷却，待注塑件固化后，再利用压缩空气将模具中的冷却水快速排出。

电热-水冷变换的模温控制方法，比用热油加热模具效率高，也便于实现。电加热器直接安装在模具内，需专门的模具结构设计，必要时还需考虑绝热措施，防止过多的热损耗。检测与调节模具温度的仪表系统成本较高。

（2）蒸汽加热　可将高温蒸汽和冷凝水交替循环输入模具内的管道。模具升温速度可达 4℃/s，模具型腔表面温度可达 160℃。熔料的冷却速度可达 6℃/s。为了保证模温能均匀分布，又能快速变化，管道要布设合理，与型腔面的距离合适且一致。

也有用高压热水和冷凝水交替循环输入模具内的管道。为了提高模具温度的控制精度，保证注塑件的质量，采用随形介质通道的模具结构设计，但会增加模具零件的加工量，同时，必须有准确的模具温度调节系统。

（3）电磁感应加热　电磁感应只是在模具成型表层加热至集肤深度。加热的体积范围小，升温速度快，可达 40℃/s。加热温度可达 190℃，而且温度分布均匀。电磁感应系统与模具之间无传热介质，热效应高。此加热方法已用于手机塑料外壳注射模。

电磁感应通过控制输入线圈的频率和电流，可调节加热温度，也可对生成熔合缝的部位过进行局部加热。多重线圈电磁感应加热比单层线圈更有效。内置式的电磁感应加热器能实现微结构的局部加热。

3. 随形介质通道

快速热冷循环成型注塑，要求模具在最短时间内均匀传热。要使模具的成型表面温度均匀，并能快速上升与下降。因此建议对传统的模具的冷却介质管道设计进行改造。模具的介质通道随着制品轮廓面设计，且传热壁厚一致。动模型芯块和定模型腔块要用组合结构。其中成型构件壁厚约 10mm，有承受型腔高压的刚性，还需耐热合金钢制造。该成型构件能耐热疲劳，又能较好传热导，型腔表面能被镜面研磨抛光。

随形介质通道的设计和加工困难。因此，对动模型芯仍旧按线型的介质管道设计。而定模型腔块设计有随形介质通道。这样注射成型塑料壳体的外表面光亮无痕，壳体内表面质量较差。

5.3　注射机的控制系统

为实现精密注射成型，提高注射制品的质量，注射机的控制质量至关重要。本节简

要介绍现代注射机的控制系统和精密注射技术的发展；了解注射机的可编程序控制器和计算机控制；还介绍高速注射成型新技术和电动注射机的应用。

5.3.1 注射机的闭环控制

注射机实现塑料注射成型的塑化、计量、注射、合模、锁模和顶出的基本加工工艺过程和原理，几十年来未曾改变。早期注射机的电气控制线路，依靠继电器和液压阀，注塑件的重量误差很大。现代注射机的控制系统，随着电子自动化技术和数控技术的发展，历经变革，发展到用微型计算机控制注射机。

1. 闭环控制

控制系统的目标是监控注射加工过程。控制效果是最终的注射制品质量优化。控制是要使某个工艺参数在一定时间里保持某数值。注射机的众多工艺参数经闭环控制，提高注射加工过程的控制精度。

注射机过程控制的基本方法见图 5-65 所示。过程控制的人工手动部分，用来装拆模具和检修调整注射机，用于生产准备和试模阶段。由液压系统和电气控制系统联合组成顺序控制电路，实现全自动生产。在注射机的安全门关闭后，工艺过程的各个动作按照预定程序自动进行。早期注射机用两位式的电磁液压阀，把液压系统的执行液压缸，与电器线路的程序动作连接起来。电气行程开关和时间继电器等控制了注射与合模装置的协调工作。除了料筒和喷嘴的加热温度为闭环过程控制外，其余压力和速度等工艺参数都用开环过程控制。

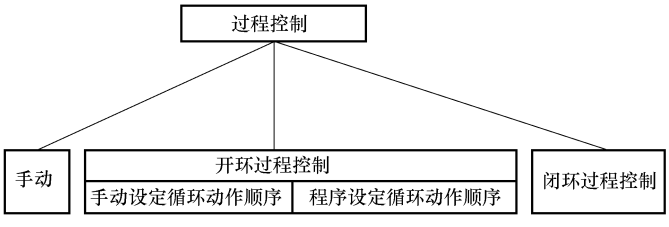


图 5-65 注射机过程控制的基本方法

在开环控制系统，系统的输出量对系统的控制作用没有影响，既不需要对输出量进行测量，也不需要将输出量反馈到系统输入端与输入量进行比较。

以图 5-66a 所示的螺杆位移开环控制为例，必须保持螺杆移动速度 v 的稳定。它是由压力阀的阀芯位置 y 来控制的。而液压系统压力 p、液压油的温度 T 和塑化熔料对螺杆的反作用力 P_s 都会影响螺杆移动速度 v。

其中输入的液压油压力 p，可以经液压调节阀控制螺杆的注射液压缸的流量，使螺杆保持一定的速度。而干扰变量油温 T 和熔体反压力 P_s 不能够被系统识别，也不能得到补偿。图 5-66b 为开环控制的方框图，系统的油压可以通过控制器补偿，而干扰变量油温和熔体反压力对螺杆速度 v 产生直接影响。当出现干扰时，因无反馈环节，系统不能完成既定的工作。

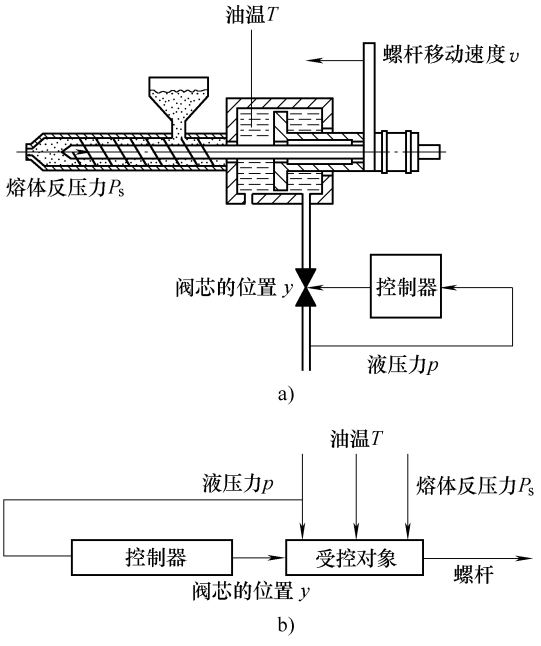


图 5-66　螺杆位移速度的开环控制

a）控制回路　b）控制框图

图 5-67 所示为螺杆位移闭环控制实例。螺杆移动速度 v 应该维持恒定，并与给定值 w 进行比较。控制器确定给定值与测定的实际值之间的偏差，并且通过调节流量伺服阀的阀芯位置 y，使得这个差值趋向于零。这样，系统中的液压力 p、油温 T 和熔体反压力 P_s 的影响都被捕获，并被消除。

闭环控制系统能够反馈输出受控制的信号，并连续将它的值与给定值比较。干扰导致与给定值的偏差，被用来修正被控制的输出量。在闭环控制系统中，必须测量被控制的输出信号。控制器能补偿各种干扰的影响。

由上例可知，与开环相比，闭环控制系统的特点有：

1）系统输出信号对控制作用有直接影响。

2）有反馈环节，并应用反馈作用来减小系统误差，以使系统的输出量趋于给定值。

3）当出现干扰时可以减弱其影响。

4）系统可能工作不稳定，因此存在稳定性校核问题。

闭环控制系统有了信号反馈，因而系统的响应，对外部干扰和内部参数变化有自行调节功能，对于控制对象有精确的控制。但是，被控制对象可能出现过调，对象的响应速度要合理，不能引起参量的过大振荡，存在复杂的稳定性问题。

不存在任何扰动时，可采用开环控制；当存在无法预计的扰动，系统中的元件参数

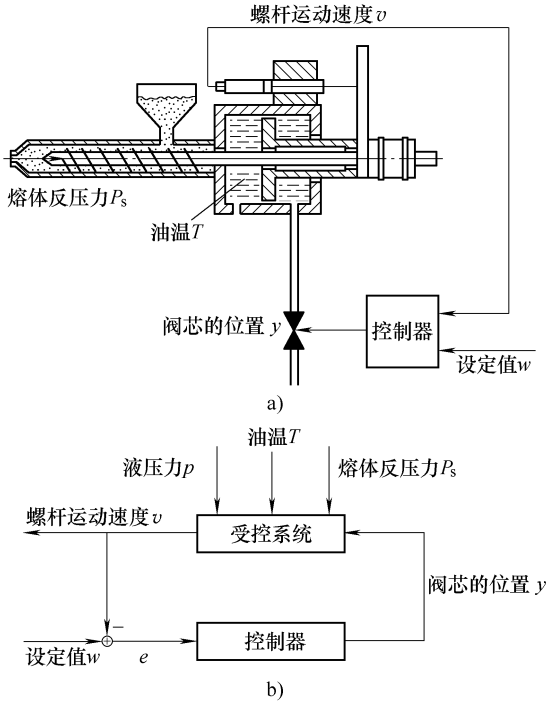


图 5-67　螺杆位移闭环控制

a）控制回路　b）控制框图

存在无法预测的变化时，闭环系统呈现明显的优越性。

注射机的控制系统不能直接对注射成型的注塑件的质量进行测量和监控。注塑件的质量指标很多，包括内在物理质量、表面质量和形状尺寸精度，很难在周期性的间歇生产中直接测量。当今还是通过注射工艺过程中的温度、压力和速度等参量，进行间接控制。理论上，这种与注塑件质量有关的间接控制的效果比直接控制差些。即便是现代的计算机控制的注射机，还是用若干个工艺参量，间接控制注塑件的质量。它将超过工艺参数公差范围生产的注塑件，作为废品处理。

注射成型中，模具的型腔压力和温度比注射压力和温度对制品质量的影响更为明显。因为对注射模的监控比较麻烦，在当今注射生产中有意空缺。将模具的型腔压力和温度作为控制对象，是精密注射控制系统设计的目标。

如果注射机系统的参量和环境变化比较显著，例如系统元件的精度随时间丧失，要求控制系统能随时识别，并自行调整和修改系统参量。这就是注射机控制系统的自适应功能，已成为注塑机精密注射可靠性的指标。

2. 温度测量和控制

最早的注射机只有料筒和喷嘴是闭环的温度控制。为了保证最终的注射制品质量，现代注射机的温度控制对象增设了热流道系统、液压油和注射模。注射工艺实验的注射

机还会增设熔料温度、螺杆温度和料斗温度等控制。

注射机的温度测量都用热电偶。注射机的料筒加热温度在 500℃以下，因此用国际电工委员会 IEC 标准的 K、J 或 E 分度号的热电偶。K 型用镍铬-镍硅双金属丝，测量温度范围≤400℃，允许偏差 ±1.6 ~ ±3℃；J 型用铁-康铜，测量温度范围 -40 ~ 750℃，允许偏差 ±1.5℃或 ±2.5℃；E 型用镍铬-康铜，温度范围 -40 ~ 800℃，允许偏差 ±1.5℃。为防止信号的失真和延迟，热电偶的热接触端的位置，应能减小控制对象实际温度的偏差。热电偶元件的精细安装，关系到温度的精确控制。

图 5-68 为料筒的温度控制回路。图上料筒的加热分成 3 ~ 4 个独立区，大型注射机有 5 个以上温控区。每个温控区有独立的加热器。电阻加热是料筒加热的主要方法。精制的加热器有较高的热效率，不但与料筒的接触传热良好，而且有绝热优良的隔热罩。

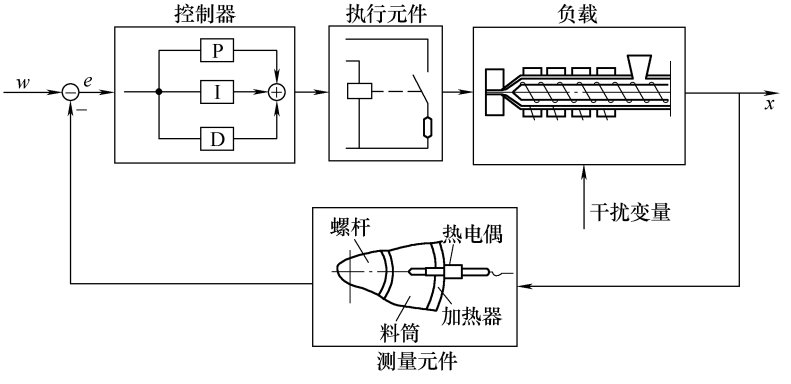


图 5-68　注射机料筒的温度控制回路

料筒的加热温度与熔体温度是两个控制温度。要监测熔体温度应将热电偶的接触点放在喷嘴口的中央。熔体温度相比料筒温度，有 ±30℃的偏差是完全可能的。

料筒的加热和冷却存在惯性，加热期间存在干扰，要求料筒的温度控制系统的响应时间短又有良好稳定性。早期的工业自动化原理，给定值的偏差 e 是用模拟量，进行比例、积分和微分的调节。对调节器输出的控制量 $u(t)$ 的原理表达式

$$u(t) = K\left[e(t) + \frac{1}{T_I}\int_0^t e(t)\mathrm{d}t + T_D\frac{\mathrm{d}e(t)}{\mathrm{d}t}\right] + u_0 \tag{5-38}$$

式中　K——比例系数；

u_0——控制的基准量。

式中第一项称为比例调节器。偏差 $e(t)$ 一旦产生，调节器立即产生控制作用。控制量 $u(t)$ 朝着减小偏差方向变化。比例系数 K 决定了控制作用的强弱。比例调节器的控制量存在阶跃性的误差，会引起被控对象的振荡。

为了提高系统稳定性，将第一项加上第二项构成比例积分调节器。式中 T_I 为可选定的积分时间。它通过逐次作用，减小控制量的误差，达到被控对象的稳定状态，但降低了响应速度。

式（5-38）中的三项构成了比例积分微分调节器。加入微分项可以控制偏差 $e(t)$，

在瞬间的微分时间 T_D 内，能提早减小偏差。减小控制量 $u(t)$ 的超调，从而减少调节时间，加快了系统稳定过程。

模拟量的电子线路控制器已经很少使用，大都采用数字电子线路的控制器。这种数字控制器具有微处理器的功能。数字式控制器用计算机程序进行 PID（比例积分微分）控制，简便可靠，可以实现高级复杂的控制算法。PID 控制的最常用算法有两种，即位置控制算法和增量控制算法，还可以提供生产管理的监控接口，用程序防止生产过程中的故障和事故。

图 5-69 是计算机控制系统的基本框图。若执行机构需要，控制器输出量 u 便用 D/A 转换器，将数字量转成模拟量。反馈信号要用采样器将其断续化，然后再用 A/D 转换器数字化。相对于系统控制参量的变化，采样的频率应足以保证检测量的准确性。

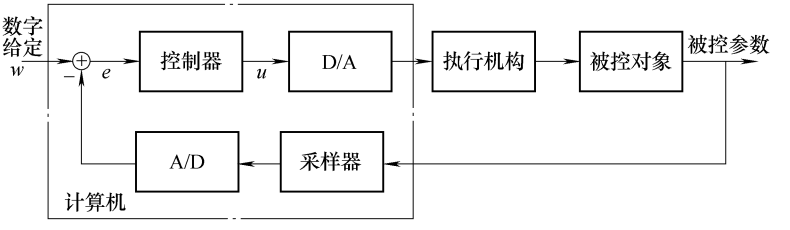


图 5-69　计算机控制系统的基本框图

（1）PID 位置控制算法　若以 T 为采样周期，k 为采样序号，式（5-38）的 PID 算法的积分和微分项不能直接准确计算，只能用数值分析方法逼近，算出控制量 $u(k)$。这种 PID 位置控制的算法为

$$u(k) = K_P e(k) + K_I \sum_{j=0}^{k} e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \tag{5-39}$$

式中　K_P——比例系数；

$K_I = K_P \dfrac{T}{T_I}$——积分系数；

$K_D = K_P \dfrac{T_D}{T}$——微分系数；

T_I——积分时间常数；

T_D——微分时间常数；

T——采样周期；

k——采样序号，$k = 0, 1, 2\cdots$；

$e(k)$——第 k 次采样时输入的偏差。

位置控制的算法的优点是原理简单、易于实现，常用于执行机构阀芯位置的控制。但是，每次输出的 $u(k)$ 对应执行机构的先前位置。如果 $u(k)$ 量大，会引起执行机构位置大幅度变化。一旦出现故障，误动作的影响大。

（2）PID 增量算法　如果执行机构需要的不是控制量的绝对值，而是其增量 $\Delta u(k)$。

它通过步进电机控制对象，应该用 PID 增量算法，有

$$\Delta u(k) = K_P \Delta e(k) + K_I e(k) + K_D[\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \tag{5-40}$$

式中　$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$——偏差值的增量，

其他代号同式（5-39）。

位置式算法的控制器每次的输出与过去状态有关。式（5-39）中要用到过去偏差的累加值 $\sum_{j=0}^{k} e(j)$，容易产生较大的累积误差。而增量式的控制器只需计算增量，计算误差对控制对象的影响较小。

注射机的料筒、热流道系统和模具等的温度控制，应用模糊控制器。使用模糊控制器必须在线检测被控对象的误差和误差的变化率。按照调控法则，用模糊条件语句修改系数 K_P、K_I 和 K_D。让 PID 调节器输出优化的控制量，可得到良好的温度调节效果。它全称为全参数模糊自整定 PID 调节器，是高精度的温度自动控制方法。

3. 压力测量和控制

注射和保压压力控制，有压力随时间变化曲线的屏幕显示，要求测量螺杆头前的熔料注射压力。模具的型腔压力是影响制品收缩率和质量的关键。它的测量和控制是精密注射成型的特征。

（1）螺杆头前的注射压力测量　测量注射液压缸的压力，提供的压力变化曲线只能间接反映注射和保压过程，不能作为注射和保压的控制信息。在模具内安装压力传感器，缺少空间，又影响制品的外观。每个注射制品的生产模具，有一定的使用周期，因此，测量模具型腔压力在技术上有难度，在经济上耗费大。将压力传感器安装在螺杆头前的料筒里是最佳选择。

如图 5-70 所示，压电应力传感器嵌装在料筒里，不接触塑料熔体。在螺杆推进位置，熔料的注射压力引起料筒的应力变化由传感器测出。大多数压电传感器输出与机械负荷成正比的信号。这信号必须放大并转化成相应的电压。传感器的输出量与熔体压力成正比，有足够的灵敏度，信号漂移量小，还可以与注射模内的压力传感器的输出信号对照校正。

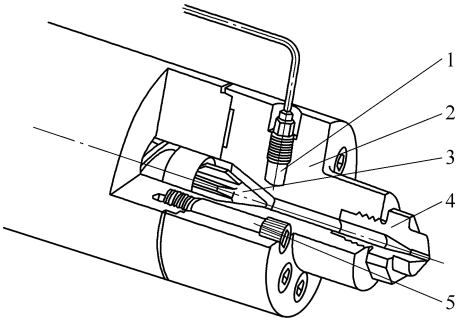


图 5-70　嵌装在料筒里压电应力传感器

1—压力传感器　2—料筒　3—螺杆
4—喷嘴　5—联接螺钉

（2）模具型腔压力测量　测量注射模的型腔压力，可以记录压力变化到保压阶段结束。此时熔体收缩，不再与模腔的内壁接触。压力传感器应该安装在浇口输出端的附近，可以较长时间获得压力信息，在型腔的料流末端位置也可设置传感器，可以监测模具分型面上出现飞边时的压力值。

模腔压力传感器的设置方法有两种。如图 5-71 所示，压力传感器直接安装在模具的型腔面上。传感器表面与塑料熔体接触。传感器上芯柱与安装孔应有良好配合，要让

芯柱无阻力传力，又要防止熔体侵入。芯柱与型腔面齐平，但还会在制品表面上留下痕迹。

图 5-72 所示为间接测量法。它利用模具上的脱模顶杆零件，间接传递型腔压力。压力传感器装在滑杆头部。滑杆装在顶出板的槽中。滑杆连同导线可方便装拆。在不需要测量型腔压力时，可以用实心钢杆填塞，保证顶杆脱模。而这个压力监测滑杆可以在各副注射模上使用。顶杆与孔壁有摩擦阻力，滑杆感应头与顶杆端面应有良好接触。

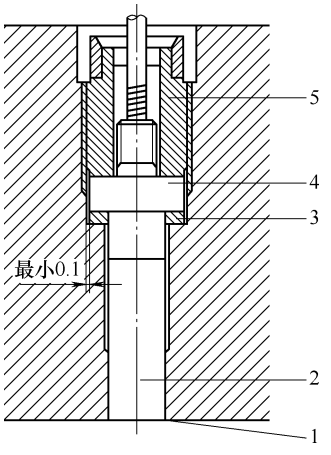


图 5-71　压力传感器直接安装在模具的型腔面上

1—模具型腔表面　2—芯柱　3—垫片
4—感应石英元件　5—安装螺纹管

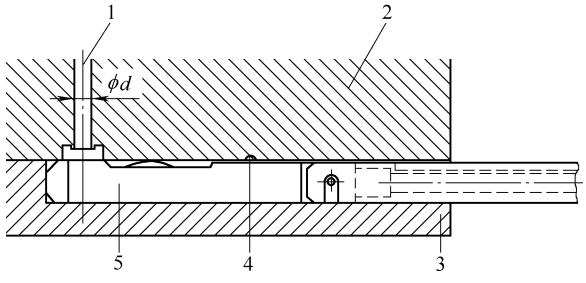


图 5-72　压力传感器间接测量模具型腔压力

1—顶杆　2—脱模固定板　3—顶出板
4—定位装置　5—压力感应滑杆

还有一种测量注射模型腔压力的方法，是在注塑机的拉杆上贴应变片。根据拉杆上的拉伸应变变化，测出注射过程中模具分型面上的胀模力，从而控制合模机构施加足够的锁模力。

常用注射机的注射和保压切换过程，依赖于时间和螺杆行程控制，也有依赖于注射压力或型腔压力的控制（使用 PI 或 PID 控制器）。有的注射机在注射阶段和保压阶段用不同的方法，控制螺杆注射推进的速度和充模压力，目前还在开拓具备注射参量优化功能的控制。如果采用了合适的控制策略，和具有足够响应的比例阀和伺服阀，就可以减少干扰，保证注射制品具有优良质量和稳定的重量。

在外部干扰的因素中最难解决的是塑料熔体黏度的波动。塑料熔体的黏度与注射压力和体积流量有关，于是设计了基于熔料黏度的控制系统，检测注射螺杆速度，由测量值与设定值偏差判断熔料的黏度变化。系统通过修正料筒加热温度来稳定黏度，但响应很慢；也可修正注射速度，或修正塑化时的螺杆转速和背压。

4. 注射速度和注射压力控制

注射机的注射速度和注射压力是两个独立控制量。注射速度由流量比例阀控制注射液压缸和螺杆位移。在多级注射的控制中，每一级的切换点和速度由操作者设定并输

入，通过位移传感器，经计时器转换成速度。当注射液压缸的位移切换到另一级注射段时，与给定速度值的偏差量，经控制器给出输出量，使流量比例阀改变液压缸流量，螺杆达到该级的注射速度。目前多数注射机的注射速度是开环控制。注射与保压阶段的切换是用螺杆的位置信号实现的，此时螺杆头前要有一定塑料熔体的体积。

同样，注射机的注射压力控制类似速度控制，对螺杆补缩推进位置分段进行多级压力切换。但是，保压阶段的螺杆位移量很小，不易控制。一次保压力对二次保压压力切换，尤其是逐次各级压力切换，用定时器完成。压力设定值经控制器处理后输出指令，经信号放大，控制电磁比例压力阀实现多级压力。

5. *p-V-T* 的最佳保压控制

有了注射模型腔的压力和温度的测量，就可以实现基于 *p-V-T* 压力-容积-温度状态曲线的优化控制。*p-V-T* 最佳保压控制能获得低取向和高精度的塑料制品。

p-V-T 控制首先要确定在等比体积下压实的压力值。图 5-73 为某塑料保压过程的 *p-V-T* 状态变化曲线。直线Ⅰ是恒温 T_M 注射，在点Ⅱ切换到保压阶段。p_M 为型腔的最高压缩压力。在线Ⅲ是型腔压力 $p_M=130MPa$ 的保压阶段。从点Ⅳ处浇口冻结，线Ⅴ阶段的型腔内是容积恒定的等比体积阶段。注射制品在冷却中成型。控制浇口冻结的温度和压力，对制品的形状尺寸精度起决定性作用，也使注塑件的取向、残余应力和翘曲变形程度最小。在型腔温度下降到脱模温度 T_E 时，型腔压力等于大气压（100kPa），开模顶出注塑件。

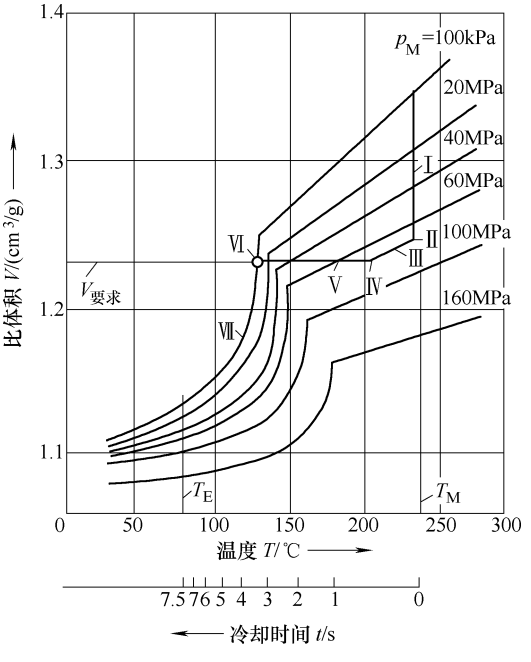


图 5-73　保压过程 *p-V-T* 状态变化曲线

p_M—熔体压力　T_M—熔体温度　T_E—脱模顶出温度

在控制操作时，以保压时间作为起始点，根据保压压力、模具温度、脱模温度和制件的壁厚以及材料的热性能，微处理器计算冷却时间并控制开模时间。注射生产时，熔体温度和模具温度有变化时，微处理器会调节保压曲线和冷却时间，从而保证注射制品的重量恒定。

5.3.2　计算机控制注射机

随着微电子技术、数控和计算机技术的发展，注射机的控制系统经历了几次更新换代。本节概略介绍可编程序控制器、计算机控制注射机及注射机智能化。

1. 可编程序控制器

现代注射机的控制系统的主流是采用可编程序控制器（programmable logical controller，PLC）搭建的控制。PLC 是以微处理器为核心的工程控制工业计算机。它用电液比例元件和可编程序控制器相联接的控制装置，其体积小、功能强，响应速度快，可靠性高。

（1）PLC 的硬件　PLC 的硬件主要有：

1）中央处理器 CPU 有运算处理功能。CPU 也称微处理器，有算术逻辑运算和程序控制功能。

2）存储器有只读存储器 ROM 和读写存储器 RAM。ROM 存储系统监控程序，不可改写。RAM 存贮应用程序和数据。

3）输入和输出单元 I/O 大都按注射功能划分的接口模块，可以扩充。各路备有模拟量 *A* 与数字量 *D* 的转换器。

4）有定时器和计数器。

（2）PLC 的软件　PLC 软件有两部分：

1）系统监控程序　它们由 PLC 制造厂编制，有系统的时间、存储空间和程序块调用的管理功能，监控各路的执行和接口运行及自我诊断，用于故障测试、查找和处理，放置在 ROM 存储器中。

2）应用程序　由 PLC 制造厂编制，用于注射过程各阶段和各工艺参量的参数设定。

（3）PLC 控制的注射机　图 5-74 为可编程序控制器 PLC 注射机的控制系统框图，说明了 PLC 与注射被控对象的检测元件和执行机构的关系。

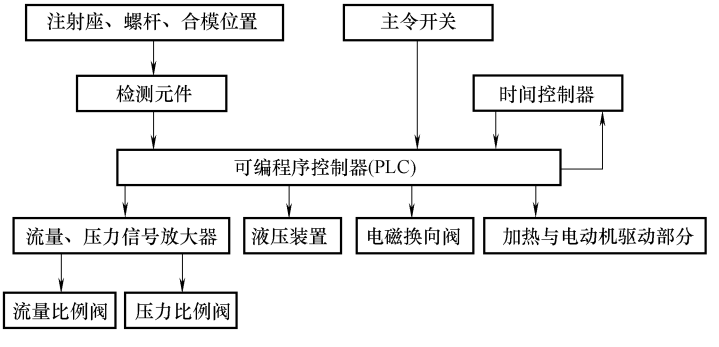


图 5-74　PLC 控制注射机的控制系统框图

可编程序控制器 PLC，有下面三方面优点。

1）提高了控制能力。比例电磁阀比电气继电器组成的控制装置，控制质量高，能实现复杂的控制功能。比例电磁阀连续动作过程，避免冲击等干扰，延长了控制元件的寿命。

2）适应能力强。PLC 可修改程序指令，选择控制方案，实现多种保压切换和多级注射等功能。PLC 面板将控制集中，便于注射机操作，调试方便。

3）提高了可靠性。PLC 采用现代集成化电子线路，抗干扰能力提高和无故障寿命长。

常见 PLC 控制注射机的加工操作，以图形化的指令和数据输入。操作面板上有小屏幕显示输入框，并有操作的文字和图表说明；下方有输入按键，除数码键和主操作键外，在一个区域中有合模装置的控制开合模和脱模按键。在另一个区域有注射装置的控制射出、塑化、注射座和料筒加热温度等按键。它们可以调出对应的屏幕界面，输入指令和数据。

2. 计算机控制注射机

图 5-75 所示是计算机的注射过程控制框图。首先要将注射成型过程中的压力、温度和速度的模拟量由电子转换器译成数字。然后由计算机语言，将测定值与给定值在程序运行中对比。如超出极限值，则计算机发出警告并作处理。在闭环控制系统，差值信号转换成所需调整量，指令执行机构动作。

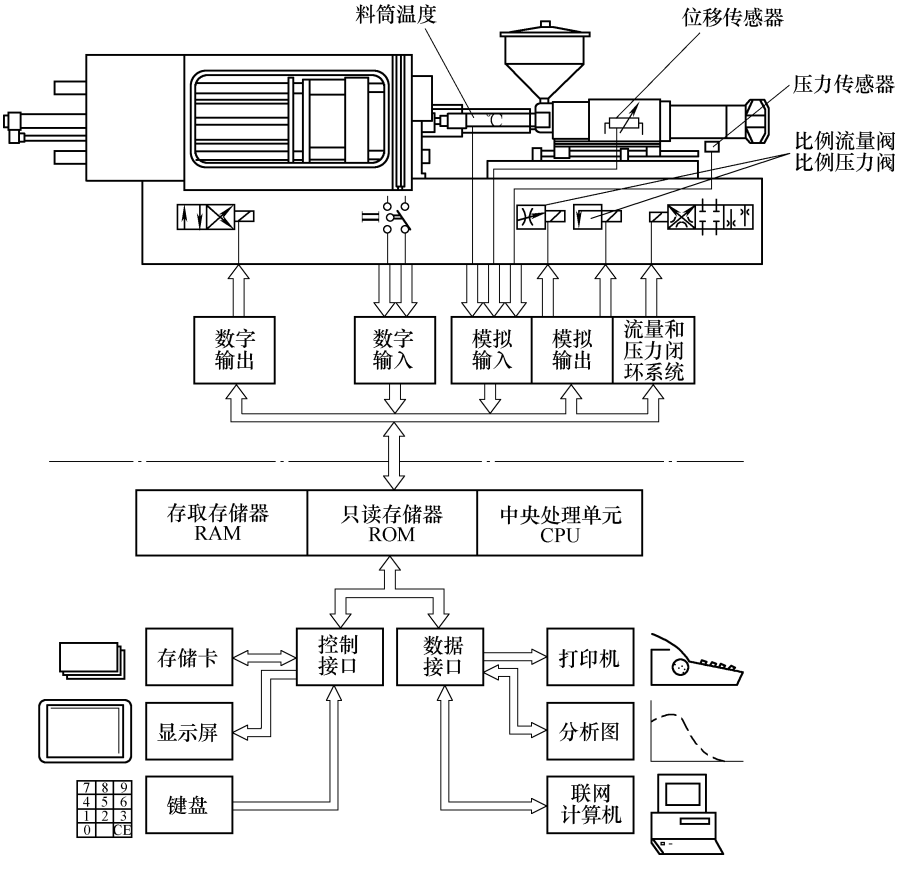


图 5-75　计算机的注射过程控制框图

（1）注射机的计算机硬件

1）中央处理单元 CPU。早期用 8 位二进制代码，现用 16 或 32 位进制的 CPU，运

行速度快，有较强的数字和逻辑运算能力，有强大的数据处理与交换能力和程序控制能力，还有中断处理和信号接口功能，由累加寄存器、数据寄存器、程序寄存器和地址寄存器等组成。

2）只读存储器 ROM。用来存储基本程序、指令和数据，存储计算机的操作系统，注射工艺过程的各种程序。ROM 存储器的内容是厂方编程写入的，不允许改变内容，断电后不会失去。现代已有可擦除的只读存储器 EPROM，可用专门的工具和方法擦除程序和数据，也允许多次擦除和写入。

随机存取存储器 RAM 存放运算的中间数据，输入的指令。RAM 中的数据随时可以重新写入和读取。

计算机上除了以上的芯片存储器外，还有磁性存储器。这些磁卡和磁盘，可擦、可写大容量的程序和数据，读写可储存注射机历来的几十套加工指令和数据；也能外接磁性存储器，与其交换工艺指令和数据，也可实现注射工艺资料的外部管理。

3）输入输出接口 I/O。依从注射机诸多的控制对象的需要设置。模拟量的输入接口用于若干热电偶、位移和压力传感器，数字量的输入接口用于各限位开关，还有计算机操作键盘的输入接口。输出方面有连接电磁阀的数字量接口，和使用比例阀的模拟量接口。

4）显示器和键盘。高分辨率的显示器有强大的图形显示功能，用计算机操作键盘输入指令和数据。

（2）注射机的计算机软件

1）监控程序。用于完成参数输入和显示，进行运行过程监控和故障处理等。

2）工作程序。用于完成注射过程的各种控制功能，有 PID 控制软件、温度控制软件、液压油控制软件、注射控制软件、开合模具控制软件和初始化软件等。

3）诊断程序。用于有关控制系统各部分的自我诊断，以便维修。

（3）计算机控制系统与 PCL 比较

1）注射机的计算机控制系统是汇集现代先进技术专用系统，模块结构合理，因此，计算机控制系统的精度、稳定性和抗干扰能力都有提高。计算机控制注射机生产制品的重量误差下降到 0.7% 以下。如果实现注射模型腔压力控制，制品的重量误差可下降到 0.15% 以下，无定形塑料制品的尺寸精度可达到 ±0.0012mm/mm，结晶型制品的精度可达到 ±0.002mm/mm。

2）注射机的控制功能更齐全并完善，操作自动化程度提高，多级注射和多级保压实施方便。模具厚度调节功能使次模具更换时调整注射机的时间缩短。

3）计算机控制系统配有显示器和键盘，能高质量显示图形、动画、文字和数据，实现友好的人机交互界面；能显示各种注射状态曲线，直观监视注射过程，及各装置机构的工作状态；有注射压力状态曲线和螺杆位置等显示，并能与参考曲线比较，辅导工艺参数调整操作。现代的显示器已有触摸式显示屏，可快速转换画面。

4）注射机的计算机操作系统构建在当今 windows 操作系统的平台上，能实现计算机联网，输出打印等功能。可通过局域网进行厂内的多台注射机远程控制，也可以通过

因特网远程操控；可利用 windows 操作系统环境下的软件，为注射工艺状态控制、控制系统智能化提供了支持。

（4）工艺状态控制　注射工艺状态控制，也称统计过程控制（statistical process control，SPC）。SPC 利用统计规律对注射过程中的多个参量进行监控，发现参数异常及时判断处理，并发出警告，从而达到保证制件质量的目的。

衡量注塑件质量的指标很多，直接在注射生产中测量很困难。只能对监测工艺参量间接监控。计算机控制系统在线及时采样、记录、统计、处理和显示工艺参量。

在成批量的注射生产中，计算机对工艺参数的异常波动进行监察和处理。首先确定保证制品质量的工艺参数 CL 中心线，一般用注射工艺的给定值，决定上限控制线 UCL 和下限控制线 LCL，见图 5-76；监察到注射加工参数超过 UCL，或低于 LCL 的制件视为不合格，注射机上有执行机构将落下的废品，推翻到存贮筐中。

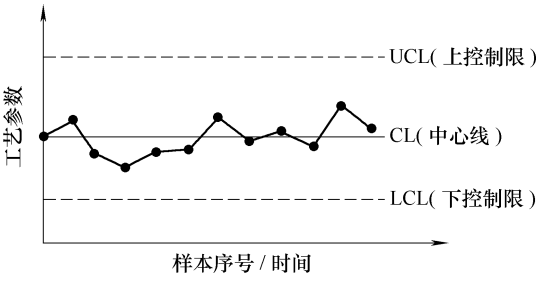


图 5-76　注射工艺状态控制线

上下限控制线根据概率统计理论决定。注射生产的批量制品质量统计也服从正态分布，见图 5-77 所示。图示正态分布函数 $N(u, \sigma^2)$ 的制品的合格率，取决于中线 u 值和宽度因子 σ。按正态分布的 3σ 准则，在正态分布图上（$u-3\sigma$，$u+3\sigma$）区间内注塑件的合格率为 99.73%。因此，在微机控制注射机的生产中，按 3σ 准则设置工艺参数的公差和对称的上下偏差。

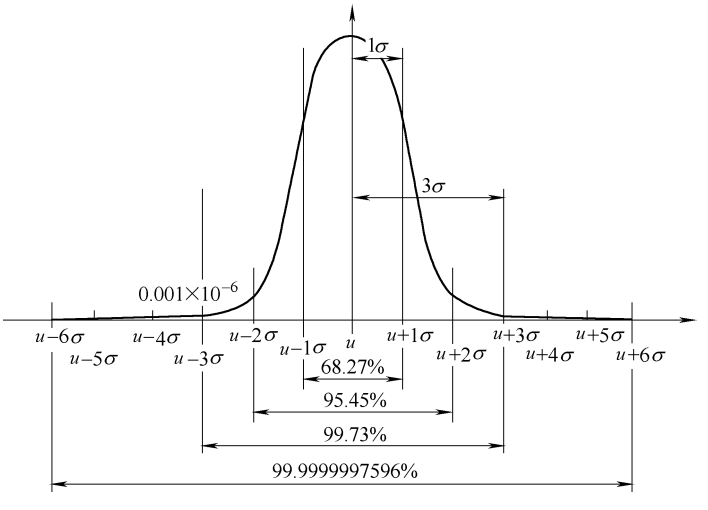


图 5-77　正态分布区间的合格率

进行的 SPC 注射生产，还要选择若干个较重要的工艺参量，成组地监控统计。单一的温度或压力参量不能合理统计制件的合格率，生产中需查阅各种控制图表，科学地

编制控制标准，对工艺状态异常进行诊断，并采取措施。

3. 计算机控制注射机的智能化

注射机的专家系统（expert system of injection molding machine）是现代注射机控制系统的发展方向。如图 5-78 所示的注射机完整的控制系统框图中，还有注射制品质量的反馈和工艺参量给定值设定需接入到系统里。可编程序控制器或计算机控制的注射机，能够完成注射加工的状态控制，保证注射加工的温度、压力、位移和时间等参量保持恒定，使注射生产的全部制品的重量和质量稳定。但是，这些工艺过程的指令和参数值的选取，还是依赖操作人员的知识和经验。

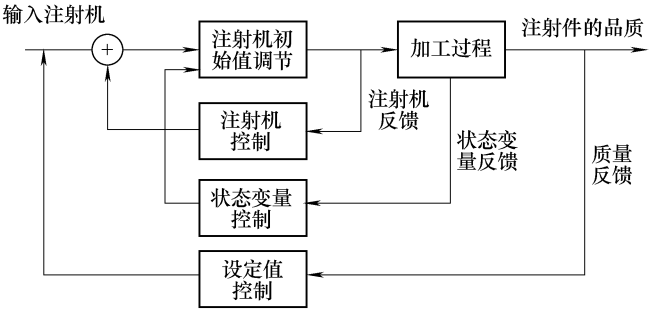


图 5-78　完整的注射机的控制系统框图

注射机控制参量的设定，一直困扰着操作者，也影响制品的质量。注射工艺的众参数正确设定是困难的。一方面，注射加工的控制过程是在间接监控注射制品的质量；另一方面，注射机的控制的对象是多变量、间歇工作，响应滞后且又离散，还不能建立起定量的模型。注射机的专家系统是一种智能的计算机控制系统，它以计算机程序求解高难度的工艺参量的设定值。

（1）注射机的专家系统三方面的特征

1）知识获取。注射机的专家系统的程序有大量的塑料材料、注射机、注射工艺和注射模的概念、数据和相关知识，经编辑后存入数据库；也将一些经验数据汇集到知识库中，把经过应用的某种塑料材料，某类注射模的某种制品的工艺参数存入数据库，需要时作为置换新模具的初始化的工艺参数；也将典型的注射压力分析曲线和螺杆推进速度曲线存入数据库，需要时作为工艺调试阶段对比校准的依据。

注射机专家系统的知识库，不但应该能方便调用，传授给计算机，还应该能不断补充和修正，有学习和丰富知识库的功能。注射工艺知识获取要经过问题识别、概念化、形式化，有些工艺规程要经过注塑件质量检测，反复设计和实验才能完善。

2）模糊推理。注射工艺参量繁杂且多变，注塑件质量指标的项目多样。注射机的专家系统要面对许多不确定的问题。而计算机只能处理定量的数据。这就要用模糊理论和模糊推理方法，处理数据的不全或不精确。用语言中的超出、尚可、可行、好或最好一类的词汇，将工艺参量定量化和区间化，并赋予属性，成为隶属函数和模糊集。计算机程序可以确定模糊集之间的关系，也可进行模糊推理。常用“若……则”（if…then），和“若……则……否则”（if…then…else）。

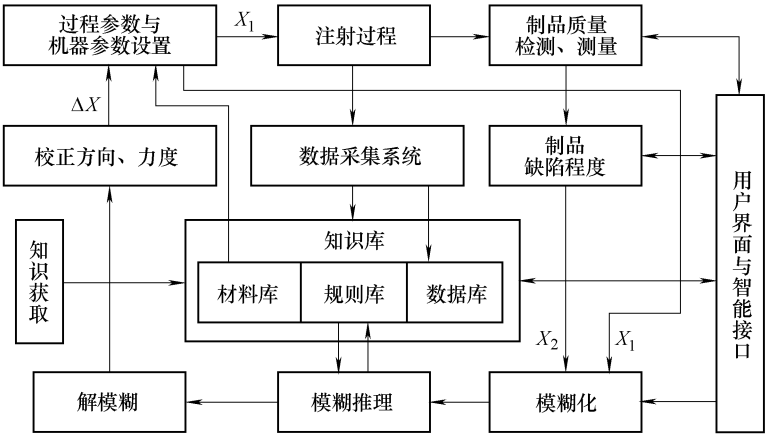


图 5-79　模糊推理消除制品缺陷程序的框图

某个“设定注射参数及消除制品缺陷”的程序，其运行框图如图 5-79 所示。它有个强大的知识数据库，知识获取方便直观。可以测量的注射制品的质量有：尺寸、重量、表面粗糙度、力学性能和颜色等；不容易或不精确的有：气泡、流动痕、熔合缝和烧焦等等。首先，要对制品质量缺陷模糊化，也要对采样的注射工艺参数模糊化，然后经程序运行得到模糊推理。例如得到这样推理：如果制品有气泡缺陷而且保压时间太短，则增加保压时间，再进一步，用加权平均法解模糊，按强度规则解出修正量。

3）多目标优化　注射机专家系统的参量优化就是注射成型工艺的优化，或者认为是注射工艺优化的组成部分。其他还有塑料选材专家系统和注射模设计专家系统等。

从数学的角度理解，工艺优化就是在注射成型过程参数空间寻找可行的点。该点对应一组可成型最佳或接近最佳的制品质量的工艺参数。由于影响注射制品的各项质量指标的工艺参数相互制约甚至相互矛盾，所有的质量指标全部达到最优是不可能的。对一个质量指标的过分追求会使最优点超出约束范围。

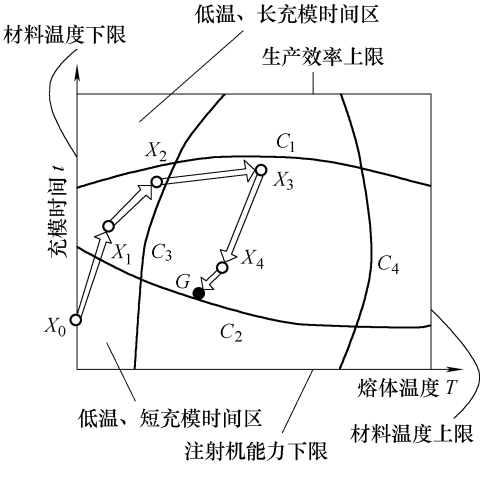


图 5-80　工艺参数设计优化

以熔体温度和注射时间对制品质量的影响为例。工艺参数的设计和优化可以用图 5-80 表示。工艺参数的搜索空间为塑料材料的温度参数和注射机效能参数。C_1、C_2、C_3、C_4 为不同缺陷制品对应的约束。约束限制的区域为解的可行域。优化过程的初始点（X_0）可以为搜索空间的任意点。然后基于一定的准则和优化技术，经过 X_1、X_2、X_3、X_4，最后到达 G。路径矢量的方向和长度受优化参数的类型和量级的

影响。由此可见，注射成型工艺优化是通过一系列搜索，使制品质量达到最优的过程。

注射成型工艺的优化，属于有约束非线性规划问题

$$\text{Min} \quad F(X) \tag{5-41}$$

又

$$g_j(X) \leqslant 0 \qquad j = 1,2,\cdots,m$$

$$h_i(X) = 0 \qquad i = 1,2,\cdots,l$$

式中，X 为设计变量，是工艺参数的集合。由于注射工艺参数很多，根据实验结果筛选对制品质量影响较大的变量作为设计参量。目标函数 $F(X)$ 为制品质量指标与工艺参数的关系函数。$g_j(X)$ 与 $h_i(X)$ 为注射机、材料等对成型过的限制条件。由于注射制品质量和工艺参数之间的关系非常复杂。要用基于神经网络技术建立两者之间的关系模型，建立约束函数关系；要用因素实验设计技术，研究注射工艺参数对制品质量的影响。

（2）专家系统举例　这里介绍两个注射机的专家系统的软件——“注射机参数的初始化设定”和“模腔几何形状辨识与分级注射参数的设定”。它们是注射工艺参数设定的重要程序。

1）注射机参数的初始化设定。初始化设定参数通常从生产无缺陷制品前提下开始，并实现高效的生产率。若为提高生产率设置注射周期为最小，会因此导致制品缺陷的出现。一组好的初始化参数，将为以后寻找无缺陷制品的注射打下良好基础。

重要的过程参量有：熔体温度、模具温度、冷却水温度、注射速度、保压压力、保压时间、冷却时间、螺杆转速和塑化背压。决定和影响这些注射参量的还有注射机操作和控制参数，例如熔体温度与料筒的各段加热温度和喷嘴温度相关；塑料塑化时的螺杆转速和背压也有影响，但可忽略。

熔体温度 T 与充模流动时间 t 的设定，可以用式（5-41）描述为式（5-42a）的数学式；目标函数 Min $F(X)$ 描述成注射周期 Min $t_{注周}(T, t)$ 为最小值，获得高效生产。它应该是最小充模时间 t、最短的保压时间 $t_{保}$ 和冷却时间 $t_{冷}$ 之和。有

$$\text{Min}\ t_{注周}(T,t) = t + t_{保} + t_{冷} \tag{5-42a}$$

图 5-80 所示优化注射时间和熔体温度参数的搜索的四边线，除了注射机能力的上下限制线外，两侧材料限制线为塑料熔体温度限制线。分解温度 T_{max} 和熔融温度 T_{min} 的关系：

$$T_{min} \leqslant T \leqslant T_{max} \tag{5-42b}$$

对塑料熔体在模具型腔内的剪切流动，为防止不稳定的流动产生制品流动痕的缺陷，用临界剪切速率 $\dot{\gamma}'$ 和剪切应力 τ' 限制剪切速率 $\dot{\gamma}_{max}$（T，t）和剪切应力 τ_{max}（T，t）。有

$$\dot{\gamma}_{max}(T,t) \leqslant \dot{\gamma}' \tag{5-42c}$$

$$\tau_{max}(T,t) \leqslant \tau' \tag{5-42d}$$

最后，添加经验公式的限制

$$\frac{V}{v} \leqslant t \leqslant \frac{1}{5} t_{保} \tag{5-42e}$$

式中 V 为注射模的型腔体积；v 是注射机的最高注射速度。

经以上几个约束条件限制，设定的初始的充模流动时间 t_0 和初始熔体温度 T_0，对应于图 5-80 上的框中 X_0 点，有条件用优化技术达到优化点 G。

2）模腔几何形状辨识与分级注射参数的设定。计算机控制的注射机，在螺杆头前有熔体的压力和温度传感器，有螺杆位移和速度的监测，在注射现场能获知实际的注射压力变化曲线。

实验证实，在恒定的注射速度下，注射压力曲线的变化与注射模型腔的几何形状和大小有关。在熔料充模的主流道、分流道、浇口流程中，流经矩形、扇形或筒形通道时，流动阻力不同。因此，在恒定的注射速度下，在压力-螺杆位置曲线或在压力-时间曲线上，都有伴随着型腔几何形状改变的压力突变。

计算机控制的注射机有注射速度 5 ~ 10 级的多级注射功能。操控分级注射时，分段和速度设定可用计算机专家系统实施。运行注射机专家系统程序设定多级注射，可使塑料熔体在模具型腔流动时避免流速突变，具有稳定的剪切速率和剪切应力，可以避免产生制品缺陷。

“分级注射参数设定程序”编制中，用该注射模具的压力曲线的分析数据，计算压力曲线突变的斜率，用流变学的模具型腔流动的流量、压力降、剪切速率和剪切应力的计算式，限制曲线的斜度，得到多级注射的分段位置和各级的注射速度。

通常，监察压力曲线，“试凑”分级注射参数，凭经验操作往往会失去多级注射的价值。应用注射机专家系统，在注射现场设定分级注射参数，保证精密注射成型，这种注射机专家系统设定方法，也应用于设定多级保压压力和保压时间的参数。

5.3.3　高速注射和电动注射机

随着电子信息产业的发展，移动电话、数码相机和笔记本电脑等产品上的小型塑料制件大批量生产。这些注塑件的壁厚薄且精度高。制件的壁厚小于 1.5mm，它的流程比在 100 ~ 150 以上。为此发展了高速精密的注射成型技术，以 300 ~ 800mm/s 的高速推进螺杆注射，更有以 800mm/s 以上超高速注射成型。此项技术涉及高速注射工艺、注射材料、精密注射模、液压式高速注射机和全电动注射机的发展。

1. 高速注射成型的工艺特征

实现超常规的高速注射，必须使用具有高速注射能力的注射机。同时要提高注射模的精度，并用流动性良好的注射材料。

（1）高速注射成型原理　注射螺杆的高速推进，塑料熔体高剪切速率的充模流动，其注射工艺有三大特点。

1）塑料熔体以极高的剪切速率充填模具型腔。由于塑料熔体的假塑性的非牛顿流体特性，熔料黏度变稀。另一方面，高剪切发热，熔体温度升高也使黏度下降。尽管型腔通道狭窄，但塑料熔体的流动性良好。

2）塑料熔体充填压实的时间很短。塑料熔体在高温低黏度下充模流动，有利于压力传递，因此能减少注塑件的取向、残余应力和翘曲变形，也能改善熔合缝的强度。

3）薄壁制品在成型型腔中的间隙很窄。在形成皮层后，让塑料熔体流动的间隙更

小。而且薄壁制品的冷却时间短，冷凝快，使得在长流程中的流动阻力很大。为了高速充填制品的型腔，必须以很高的注射压力达到高速的螺杆推进速度，要有 100 ~ 200MPa 的高压，甚至超高压的注射。

（2）高速注射机　高速精密注射机，一类是全液压的高速注射机，另一类是电动高速注射机，也有电液混合式。对高速注射机有下述的技术要求。

1）有高速和高压注射能力的大功率注射驱动装置。高速注射机的注射压力应有 200MPa 左右。高速精密注射机的注射压力达到 300MPa 以上，可以注射成型壁厚 0. 15 ~ 0. 6mm 的制件，而且在高压下，注塑件在容积变化小的状态下固化成型，注射成型收缩率低，制件尺寸精度高。液压驱动的注射机常用蓄能器输出大功率注射动力。而全电动注射机用高功率的伺服电动机实现高速注射。

2）执行机构有快速响应特性。要求注射过程和合模机构的动作响应为 0. 001s 的毫秒级，采用比例电磁阀和电液伺服阀，并减小控制系统中液压和电器元件的重量及惯性。但这方面的潜力有限。全电动注射机用伺服电动机驱动注射、塑化和开合模，而且机械传动链短，传动精度高，执行机构的快速响应特性明显。

3）具有高精度和稳定的控制系统。主要是指每次注射的计量精度和它的重复性。精密注射制品的重量误差低于 0. 5% 。有更高重复精度的高精度注射，制品的重量误差控制在 0. 15% ~ 0. 3% 。由于塑料熔体的黏弹性，注射速度越高时，在注射保压的切换点，注射压力的振荡越明显，应该有更先进的液压、机械和控制系统。

4）具有塑化能力强的塑化装置。高速注射生产的注射成型周期较短，只有数秒钟。要求螺杆的塑化能力强。螺杆的设计和制造满足高速注射要求。

5）具有刚性强和精度高的合模装置。对合模装置的机构零件的刚性和模板的平行度要求高。运动平稳无冲击。对低黏度的塑料熔体应避免产生分型面上溢料。

（3）精密注射模　高速高压注射的精密模具，成型薄壁小型注塑件。精密注射最突出的质量要求是制件的形状位置和尺寸的精度。首先是单个注塑件的尺寸达到图样或样品的精度。还要求各个型腔成型的注塑件的尺寸误差都在公差之内。更重要的是该批次的上万个制件都达到尺寸精度。精密注射模具的设计和制造涉及诸多的方面，更有许多细节。在本书的大部分章节中都有分析讨论。这里提出四个必须关注的问题。

1）在模具设计中，对塑料制品的注射成型收缩率要有准确的预测。精密级注塑件的尺寸公差很小，相比之下塑料的成型收缩率很大。模具成型零件设计必须用实际收缩率计算型芯和型腔的尺寸。

应用 CAE 注射模的分析软件，对精密模具设计有两方面的贡献。其一是正确选择浇口的位置、数量和类型，它们影响流动充模的取向和流程比，也会影响成型收缩率在制件各部位的差异；另一方面，获得多型腔模具的流道和浇口的平衡浇注，它影响各型腔注塑件固化成型的物理条件，最终影响到各型腔注塑件的尺寸误差。

注射成型存在流动取向和收缩不均匀。例如：圆筒制件的内孔，由于型芯的约束作用，其收缩率小于圆筒的外径；又如：厚壁的收缩率大于薄壁截面。成型收缩率在各方向各部位的差异必须考虑。目前还依靠经验积累，对成型零件尺寸进行收缩率的修正，

有时还必须经过试模和修模多次补偿。

2）要提高模具的制造精度。首先要提高成型零件的制造精度，尤其是成型表面的研磨抛光质量。导柱与导套的制造精度，关系到定模与动模的对准和分型面的平行度，影响制件的尺寸精度。脱模机构零件的精度也要有相应提高，只有提高运动零件的精度，才能保证配合面之间的间隙，不致让塑料熔体的泄漏。同样，空隙的位置和尺寸精度，要让模腔内气体顺利排出。

3）具有精确和稳定的模具温度的控制系统。设计模具的冷却系统应用 CAE 注射模的分析软件，能模拟模具内注塑件的冷却效果，保证定模和动模各部位对制件均匀冷却，减小残余应力引起注塑件翘曲变形。精密注射模必须连接模具温度控制机，以维持与注塑件热交换的平衡状态。

4）要提高模具的使用寿命。保持注射模的成型精度，关键在于模具零部件使用优质钢材，有良好的热处理和表面处理。不但要求成型零件有优良的耐磨和抛光性能，模具上的运动零件都要能耐磨。

2. 电动式注射机

全电动式注射机具有两大特点：注射过程控制精度高，而且能耗低。注塑件的重量重复精度高，其误差只有 0.01%，成为塑料注射成型机的发展趋势。电动注射机常用于光学元件和医疗器件等的精密注射制品的生产，而且在电动式注射机的基础上，又发展了多组分的注射机和微注射成型机。

电动式注射机有全电动式和电液混合式两类。

全电动式注射机的注射装置上，螺杆旋转塑化、螺杆的推进和后退，以及注射座的移动采用电动机驱动。合模装置的模板开合、锁模和制件脱模顶出也全部采用电动机驱动。如图 5-81 所示，其中注射装置的螺杆塑化和注射是用伺服电动机驱动。合模装置的模板开合和顶出机构也用伺服电动机驱动。而注射座的移动和模具厚度调整用普通电动机驱动。

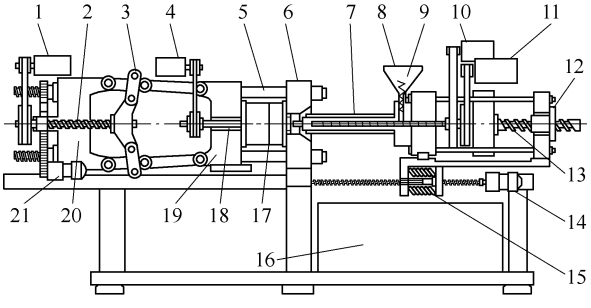


图 5-81　全电动式注射模的基本结构

1—开合模伺服电动机　2—开合模传动的滚珠丝杆　3—双曲肘机构　4—脱模顶出的伺服电动机
5—拉杆　6—固定板　7—螺杆和料筒　8—加料料斗　9—塑料粒子　10—螺杆旋转伺服电动机
11—注射伺服电动机　12—压力传感器　13—注射的滚珠丝杆　14—注射座推进电动机
15—压紧喷嘴的弹簧　16—数控装置　17—注射模　18—推顶杆　19—动模板
20—后台板　21—模具厚度调整电动机

电液混合式注射机发挥液压系统和电气系统各自长处。但是混合式注射机对螺杆旋转必然采用伺服电动驱动；而合模装置的锁模机构是液压驱动。用液压缸推拉连杆或双曲肘机械机构，锁模力大又能自锁；其余的螺杆的推进和后退、注射座的移动、模板开合和制件顶出机构，有液压驱动或者用电动机驱动。其中模板开合，推荐用伺服电动机驱动为好，可便于控制开合模的速度和保证模板停留的位置精度。

电动式注射机常用“伺服电动机-同步齿形带-滚珠丝杆与螺母”驱动注射螺杆推进或模板开合。同步齿形带中央嵌有增强的纤维绳，它由工程塑料注射成型。由传动带里侧的齿形与两个带轮上齿廓啮合传递转矩和改变转速。它有良好的传动精度，但传动带的寿命不长，因此有伺服电动机直接传动滚珠丝杆与螺母的改革。

滚珠丝杆与螺母的传动装置早就是精密机械的常用零件。滚珠在螺母套里的封闭回路中循环滚动。传动的精度高而且效率极好。有专门机构消除在移动螺母换向时产生的间隙。

（1）伺服电动机　伺服电动机是接受控制系统指令的可控制的电动机。它由电动机、驱动与变频的电子线路两部分组成。直流伺服电动机有电刷和整流子，不适合在注射机上应用，已经被交流伺服电动机所替代。全电动注射机有两种交流伺服电动机在使用。

1）永磁同步伺服电动机和驱动器。该电动机定子为三相对称绕组。转子用稀土永磁材料产生固定方问的磁场。定子产生的旋转磁场，拖动转子同步旋转。伺服电动机上装有磁极位置传感器，用来检测转子的位置。应用得最多的是基于光电原理的旋转编码器。它输出方波脉冲信号告知当前转子的位置。还装有转速传感器检测转速。永磁同步电动机的伺服驱动器，由空间矢量脉宽调制器等组成，有效控制输入电动机的交流电。永磁同步伺服电动机的驱动效率高、闭环控制精度高、变速响应快、制动性能好、输出转矩大。

2）三相异步伺服电动机和变频器。又称诱导式伺服电动机，是变频调速控制的三相异步感应电动机。它与普通异步电动机一样，通过定子的旋转磁场，在转子产生感应电流并输出电磁转矩。伺服电动机上装有编码检测器，输出位置信号。变频器把控制系统的位置指令与测得位置信号进行比较，得到速度指令，经矢量处理后用脉宽调制电路，控制输入定子的三相电源电流，使伺服电动机按指令要求输出转速和转矩。

（2）全电动式注射机的注射装置　注射装置的基本结构如图 5-82 所

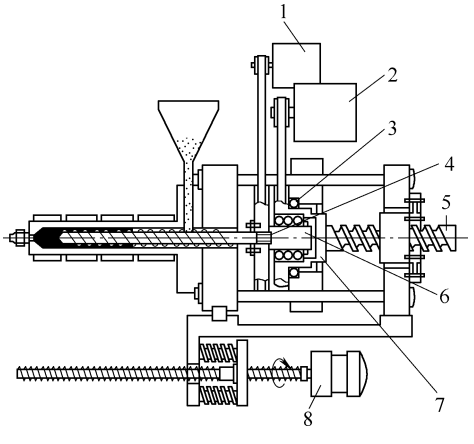


图 5-82　全电动式注射机的注射装置基本结构

1—塑化计量交流伺服电动机　2—注射交流伺服电动机　3—推力轴承　4—压力传感器　5—滚珠丝杆　6—主轴　7—滚珠螺母　8—注射座调整电动机

示，有三个电动机传动机构。它们是注射推进机构、塑化旋转机构和注射座弹压机构。

注射推进机构是用交流伺服电动机驱动同步齿形带。再拖动滚珠螺母旋转。螺母的移动被轴承约束。丝杆连同主轴与螺杆向前推进。

塑化机构是用计量交流伺服电动机驱动。塑料粒子在料筒电热和螺杆剪切热的共同作用下，沿螺槽推进，积聚在螺杆头前的塑料熔体产生反推力，螺杆和主轴承受到压力被传感器检测，由注射交流伺服电动机掌控螺杆后退的速度，控制背压来保证塑化质量。螺杆后移到计量完成位置时，位移传感器的信号让计量伺服电动机制动，以此实现精确计量。

注射座调整机构用普通丝杆螺母传动。两个限位开关控制注射座在导轨上的前后位置。电动机经减速后驱动丝杆转动。螺母套推拉注射座整体移动。要有弹簧压力机构将喷嘴弹压到注射模上，并消除丝杆螺牙与螺母之间的间隙。注射座调整机构也用交流伺服电动机驱动。

（3）全电动式注射机的合模装置　全电动式注射机的合模装置如图 5-83 所示。模具的开合模动作是：锁模交流伺服电动机 2 经同步齿形带驱动滚动丝杆旋转，强使套架 3 内螺母推拉双曲肘机构，伺服电动机响应控制系统指令，精确控制注射模的动模开闭的位置和移动速度，螺母套架的轴向推力，经双曲肘机构几十倍的放大作用，紧锁模具，防止高压熔料胀模。

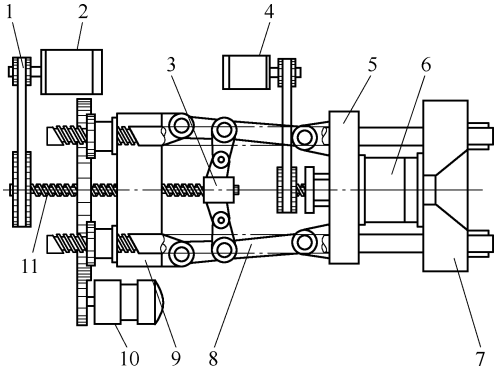


图 5-83　全电动式注射机的合模装置基本结构

1—同步齿形带　2—锁模交流伺服电动机　3—滚珠螺母套架　4—脱模顶出交流伺服电动机　5—动模板　6—注射模　7—定模板　8—双曲肘机构　9—后模板　10—模具厚度调整电动机　11—开合模滚珠丝杆

顶出交流伺服电动机也经齿形带驱动滚动丝杆旋转，螺母套推顶注射模的脱模机构，可以控制脱模距离和速度，保证顺利脱模不损伤注射件。不过有的电动式注射机上，用普通电动机驱动，成本低，但效果差。

模具厚度调整电动机经轮系减速，中央大齿轮驱动套在四根拉杆上的四个齿轮，小齿轮内孔有阴螺纹，拉杆上有阳螺纹，小齿轮旋转时，阴螺纹套推拉后模板移动，适应各种模具的闭合厚度。

参 考 文 献

[1]　徐佩弦. 塑料件的失效［M］. 北京：国防工业出版社 . 1998.

[2]　李忠文、朱国宪. 注塑机电子电气电路［M］. 北京：化学工业出版社，2006.

[3]　钟汉如. 注射机控制系统（第二版）［M］. 北京：化学工业出版社，2008.

[4]　杨卫民. 注射成型新技术［M］. 北京：化学工业出版社，2008.

第 6 章　注射成型精度和成本分析

塑料注射生产制品的质量和注射模具的质量虽然是两个概念，但有紧密的联系。注射件生产中，通常以最终的塑料制品的质量来评价模具的设计和制造质量。注射模的生产成本是注射生产成本的组成部分。本章在这两方面都作详细的讨论分析，既介绍现实的经验方法，又有现代理论分析计算。塑料注射制品的精度和注射生产成本分析，是塑料注射工程中的重要问题。注射工艺工程师和注射模工程师都要学会正确处理注射制品的和注射模的质量与生产成本之间的关系。

6.1　注塑件的精度和质量分析

注射制件的质量检测和评议包括四个方面。其一是注塑件的尺寸和形状位置精度；其二是注塑件的表面粗糙度；其三是注塑件的表观质量；其四是注塑件的内在性能质量。本章将介绍注塑件的前两方面的精度的检测；介绍注塑件的表观质量的评议和分析。（注塑件的内在性能质量，在第 1 章中已经从注塑件的材料、性能、应用和失效，作了多视角讨论。）

6.1.1　注塑件的精度

注塑件设计图上的及制造公差、尺寸和形状位置精度以及表面粗糙度，这些关系到塑料制品装配时的互换性和使用功能，也关系到注射工程的经济性。

1. 影响因素

注塑件的精度比金属零件低，是由塑料的性能和加工工艺特征决定的。

（1）材料方面　注射材料成型收缩率的非均一性是注塑件精度低下的主要原因。注射塑料在高温高压的熔融状态下充模流动（常见各种熔体温度为 170 ~ 300℃），然后被冷却固化（通常脱模温度为 20 ~ 100℃）。塑料材料有约比金属大 2 ~ 10 倍的线膨胀系数。不同塑料有不同的成型收缩率。无定形和热固性塑料的成型收缩率较小些，在 1% 以下；结晶型塑料的成型收缩率在 2% 左右。表 3-18 列出了常用的注射塑料的成型收缩率。用无机填料充填，用玻璃纤维增强的塑料有较低的成型收缩率。成型收缩率越大，其收缩率的波动范围也越大。塑料的冷却固化收缩是材料分子结构所决定的。与高分子材料的相对平均分子质量及其分布有关，在聚合物合成时不可能达到相对分子质量均一。成型收缩率的不稳定是造成注射制品尺寸误差的内在因素。在现代注射成型生产中，为使成型收缩稳定，花费了很高的成本，采用了许多高新技术。

塑料材料对时间、温度、湿度和环境条件的敏感性，在注射成型制品后更加严重。注塑件的尺寸和几何精度的稳定性差。各种塑料品种的尺寸稳定性有差异，对塑料材料

增强改性后可以获得改善。也有对注塑件采用时效、退火和调湿等处理方法，可稳定制品在使用中的精度。

（2）注射工艺方面　操作工艺条件发生变化，注射周期各阶段的温度、压力和时间会影响注塑件的收缩、取向和残余应力。成型条件波动所造成的误差占注塑件公差的 1/3。

注射成型设备的控制精度误差影响注塑件的精度。注射装置的塑化和注射参量变化是影响注射成型的物理条件，关系到制品材料密度和成型收缩率的稳定。合模装置的闭模定位误差和锁模力的控制误差，都会影响注塑件的精度。

（3）模具状态方面　模具成型零件尺寸的制造误差是产生塑料制件误差的重要因素。对于小尺寸的注塑件，模具的制造误差占注塑件公差的 1/3。单个型腔注射模的成型制品精度较高。模具的型腔数目每增加一个，就要降低注塑件 5% 的精度。

模具型腔与型芯的磨损，包括型腔表面的修磨和抛光，造成这些成型零件的误差，占注塑件公差的 1/6。模具磨损后会使成型塑料壳体制件的壁厚变厚，造成壁厚超差

模具可动零件间的配合位置误差，例如模具动模与定模的对准定位误差，造成圆筒壳体制件的径向壁厚尺寸误差。分型面的配合误差，会造成注塑件高度尺寸误差。与模具上运动零件有关的注塑件尺寸，其精度较低。

模具冷却系统设计和调节不当，使模具温度的不稳定。模温分布不均匀并随着时间的波动，造成成型注塑件的收缩不均匀。

模具零件在注射高压下的弹性变形和塑性变形，产生成型型腔尺寸变化，会影响注塑件的精度。脱模机构的作用力不当，使被顶出注塑件变形，也会影响注塑件的精度。

此外，注塑件壁厚均匀一致，形体又对称，可使注塑件收缩均衡。提高注塑件的刚性，例如合理设置加强肋和金属嵌件等，能减少注塑件翘曲变形，都有利提高注塑件的精度。

2. 模塑塑料件尺寸公差

塑料件的尺寸公差，我国早年使用的是 SJ 1372-78（原四机部）标准和 WJ 1266-81（原五机部）标准。这两个标准内容相同，塑料件尺寸精度分为八级。现在使用《塑料件尺寸公差》SJ/T 10628—1995，是电子行业标准，替代 SJ 1372—78《塑料制件尺寸公差》。基本尺寸由原来最大尺寸 500mm 增加到 1600mm。公差等级扩展到 10 级。高精度等级对 >120mm 以上尺寸段，添增了相应公差值。SJ/T 10628 公差标准使用较广，将在第 9 章中详细介绍，应用于成型零件尺寸计算。

《工程塑料模塑塑料件尺寸公差》GB/T 14486—1993 早年实施。标准规定了热固性和热塑性工程塑料模塑件的尺寸公差。它适用于注塑、压塑、传递和浇铸成型的工程塑料模塑的塑料件，不适用于挤塑成型、吹塑成型、烧结和泡沫制品。它引用 GB/T 1800 的有关公差和配合的标准。模塑件尺寸公差代号为 MT。公差等级分为七级。

新标准 GB/T 14486—2008《塑料模塑件尺寸公差》，将原公差尺寸范围从 0 ~ 500mm 扩展到 0 ~ 1000mm，增加了对应的公差值。原标准 GB/T 14486—1993 中的公差值普遍小于德国工业标准 DIM16901 中同精度同尺寸制品的公差值，但在 0 ~ 100mm 范围内也有相反的情况。修订时部分参照了德国工业标准 DIM 中这些较小的公差值，以

适应模塑件精度日益提高的现状和要求。

1）新标准 GB/T 14486 与德国国家标准 DIM 16901：1982《塑料模塑件尺寸公差与检验条件》基本一致，有两个方面的主要差异。

① 基本尺寸分段不同，GB/T 14486—2008 标准基本尺寸分段与 ISO 286-1：1988 标准相同，0～1000mm 分成了 28 个尺寸段，而德国标准只有 21 个尺寸段。

② 公差值与尺寸值之间的关系有差异，在对应精度等级下，在 0～100mm 小尺寸范围内两者公差值相近。或德国标准个别公差略小于 GB/T 14486—2008 标准，但在大尺寸范围内则相反。国标公差比德国标准小。就精度而言，约高半个精度等级。

2）GB/T 14486—2008 标准各级公差数值列于表 6-1。常用材料模塑件的公差等级选用见表 6-2。不列入表中的材料，按收缩特性值 $\overline{S}$ 选用的公差等级见表 6-3。

此标准只规定公差。基本尺寸的上、下偏差可根据工程的实际需要分配，未注公差的尺寸允许偏差见表 6-1 和表 6-3。

表 6-1 模塑件尺寸公差表 （单位：mm）

公差等级	公差种类	基本尺寸								
		>0～3	>3～6	>6～8	>10～14	>14～18	>18～24	>24～30	>30～40	>40～50
标注公差的尺寸公差值										
MT1	a	0.07	0.08	0.09	0.10	0.11	0.12	0.14	0.16	0.18
	b	0.14	0.16	0.18	0.20	0.21	0.22	0.24	0.26	0.28
MT2	a	0.10	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22	0.24	0.26
	b	0.20	0.22	0.24	0.26	0.28	0.30	0.32	0.34	0.36
MT3	a	0.12	0.14	0.16	0.18	0.20	0.24	0.26	0.30	0.36
	b	0.32	0.34	0.36	0.38	0.40	0.42	0.46	0.50	0.54
MT4	a	0.16	0.18	0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.42	0.48
	b	0.36	0.38	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.62	0.68
MT5	a	0.20	0.24	0.28	0.32	0.38	0.44	0.50	0.56	0.64
	b	0.40	0.44	0.48	0.52	0.58	0.64	0.70	0.76	0.84
MT6	a	0.26	0.32	0.38	0.46	0.52	0.60	0.70	0.80	0.94
	b	0.46	0.52	0.58	0.66	0.72	0.80	0.90	1.00	1.14
MT7	a	0.38	0.46	0.56	0.66	0.76	0.86	0.98	1.12	1.32
	b	0.58	0.68	0.76	0.86	0.96	1.05	1.18	1.32	1.52
未注公差的尺寸允许偏差										
MT5	a	±0.10	±0.12	±0.14	±0.16	±0.19	±0.22	±0.25	±0.28	±0.32
	b	±0.20	±0.22	±0.24	±0.26	±0.29	±0.32	±0.35	±0.38	±0.42
MT6	a	±0.13	±0.16	±0.19	±0.23	±0.27	±0.31	±0.35	±0.40	±0.47
	b	±0.23	±0.26	±0.29	±0.33	±0.36	±0.40	±0.45	±0.50	±0.57
MT7	a	±0.19	±0.23	±0.28	±0.33	±0.38	±0.43	±0.49	±0.56	±0.66
	b	±0.29	±0.33	±0.38	±0.43	±0.48	±0.53	±0.59	±0.66	±0.76

（续）

公差等级	公差种类	基本尺寸								
		>50 ~65	>65 ~80	>80 ~100	>100 ~120	>120 ~140	>140 ~160	>160 ~180	>180 ~200	>200 ~225
标注公差的尺寸公差值										
MT1	a	0.20	0.23	0.25	0.29	0.32	0.36	0.40	0.44	0.48
	b	0.30	0.33	0.36	0.39	0.42	0.46	0.50	0.54	0.58
MT2	a	0.30	0.34	0.38	0.42	0.46	0.50	0.54	0.60	0.66
	b	0.40	0.44	0.48	0.52	0.56	0.60	0.64	0.70	0.76
MT3	a	0.40	0.46	0.52	0.58	0.64	0.70	0.78	0.86	0.92
	b	0.60	0.66	0.72	0.78	0.84	0.90	0.98	1.06	1.12
MT4	a	0.56	0.64	0.72	0.82	0.92	1.02	1.12	1.24	1.36
	b	0.76	0.84	0.92	1.02	1.12	1.22	1.32	1.44	1.56
MT5	a	0.74	0.86	1.00	1.14	1.28	1.44	1.60	1.76	1.92
	b	0.94	1.06	1.20	1.34	1.48	1.64	1.80	1.96	2.12
MT6	a	1.10	1.28	1.48	1.72	2.00	2.20	2.40	2.60	2.90
	b	1.30	1.48	1.68	1.92	2.20	2.40	2.60	2.80	3.10
MT7	a	1.54	1.80	2.10	2.40	2.70	3.00	3.30	3.70	4.10
	b	1.74	2.00	2.30	2.60	3.10	3.20	3.50	3.90	4.30
未注公差的尺寸允许偏差										
MT5	a	±0.37	±0.43	±0.50	±0.57	±0.64	±0.72	±0.80	±0.88	±0.96
	b	±0.47	±0.53	±0.60	±0.67	±0.74	±0.82	±0.90	±0.98	±1.06
MT6	a	±0.55	±0.64	±0.74	±0.86	±1.00	±1.10	±1.20	±1.30	±1.45
	b	±0.65	±0.74	±0.84	±0.96	±1.10	±1.20	±1.30	±1.40	±1.55
MT7	a	±0.77	±0.90	±1.05	±1.20	±1.35	±1.50	±1.65	±1.85	±2.05
	b	±0.87	±1.00	±1.15	±1.30	±1.45	±1.60	±1.75	±1.95	±2.15

公差等级	公差种类	基本尺寸								
		>225 ~250	>250 ~280	>280 ~315	>315 ~355	>355 ~400	>400 ~450	>450 ~500	>500 ~630	>630 ~800	>800 ~1000
标注公差的尺寸公差值											
MT1	a	0.52	0.56	0.60	0.64	0.70	0.78	0.86	0.97	1.16	1.39
	b	0.62	0.66	0.70	0.74	0.80	0.88	0.96	1.07	1.26	1.49
MT2	a	0.72	0.76	0.84	0.92	1.00	1.10	1.20	1.40	1.70	2.10
	b	0.82	0.86	0.94	1.02	1.10	1.20	1.30	1.50	1.80	2.20
MT3	a	1.00	1.10	1.20	1.30	1.44	1.60	1.74	2.00	2.40	3.00
	b	1.20	1.30	1.40	1.50	1.64	1.80	1.94	2.20	2.60	3.20
MT4	a	1.48	1.62	1.80	2.00	2.20	2.40	2.60	3.10	3.80	4.60
	b	1.68	1.82	2.00	2.20	2.40	2.60	2.80	3.30	4.00	4.80
MT5	a	2.10	2.30	2.50	2.80	3.10	3.50	3.90	4.50	5.50	6.90
	b	2.30	2.50	2.70	3.00	3.30	3.70	4.10	4.70	6.80	7.10

（续）

公差等级	公差种类	基本尺寸									
		>225~250	>250~280	>280~315	>315~355	>355~400	>400~450	>450~500	>500~630	>630~800	>800~1000
标注公差的尺寸公差值											
MT6	a	3.20	3.50	3.90	4.30	4.80	5.30	5.90	6.90	8.50	10.50
	b	3.40	3.70	4.10	4.50	5.00	5.50	6.10	7.10	8.70	10.80
MT7	a	4.50	4.90	5.40	6.00	6.70	7.40	8.20	9.60	11.90	14.80
	b	4.70	5.10	5.60	6.20	6.90	7.60	8.40	9.80	12.10	15.00
未注公差的尺寸允许偏差											
MT5	a	±1.05	±1.15	±1.25	±1.40	±1.55	±1.75	±1.95	±2.25	±2.80	±3.45
	b	±1.15	±1.26	±1.35	±1.50	±1.65	±1.85	±2.05	±2.35	±2.90	±3.55
MT6	a	±1.60	±1.75	±1.95	±2.15	±2.40	±2.65	±2.95	±3.45	±4.25	±5.30
	b	±1.70	±1.85	±2.05	±2.25	±2.50	±2.75	±3.05	±3.55	±4.35	±5.40
MT7	a	±2.25	±2.45	±2.70	±3.00	±3.35	±3.70	±4.10	±4.80	±5.95	±7.40
	b	±2.35	±2.55	±2.80	±3.10	±3.45	±3.80	±4.20	±4.90	±6.05	±7.50

注：1. a 为不受模具活动部分影响的尺寸公差值；b 为受模具活动部分影响的尺寸公差值。

2. MT1 级为精密级，只有采用严密的工艺控制措施和高精度的模具、设备、原料时才能选用。

表 6-2　常用材料模塑件公差等级的选用

材料代号	模塑材料		公差等级		
			标注公差尺寸		未注公差尺寸
			高精度	一般精度	
ABS	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物		MT2	MT3	MT5
CA	乙酸纤维素		MT3	MT4	MT6
EP	环氧树脂		MT2	MT3	MT5
PA	聚酰胺	无填料填充	MT3	MT4	MT6
		30% 玻璃纤维填充	MT2	MT3	MT5
PBT	聚对苯二甲酸丁二醇酯	无填料填充	MT3	MT4	MT6
		30% 玻璃纤维填充	MT2	MT3	MT5
PC	聚碳酸酯		MT2	MT3	MT5
PDAP	聚邻苯二甲酸二丙烯酯		MT2	MT3	MT5
PEEK	聚醚醚酮		MT2	MT3	MT5
PE-HD	高密度聚乙烯		MT4	MT5	MT7
PE-LD	低密度聚乙烯		MT5	MT6	MT7
PESU	聚醚砜		MT2	MT3	MT5
PET	聚对苯二甲酸乙二醇酯	无填料填充	MT3	MT4	MT6
		30% 玻璃纤维填充	MT2	MT3	MT5
PF	苯酚-甲醛塑料	无机填料填充	MT2	MT3	MT5
		有机填料填充	MT3	MT4	MT6
PMMA	聚甲基丙烯酸甲酯		MT2	MT3	MT5

（续）

材料代号	模塑材料		公差等级		
			标注公差尺寸		未注公差尺寸
			高精度	一般精度	
POM	聚甲醛	≤150mm	MT3	MT4	MT6
		>150mm	MT4	MT5	MT7
PP	聚丙烯	无填料填充	MT3	MT4	MT6
		30% 无机填料填充	MT2	MT3	MT5
PPE	聚苯醚;聚亚苯醚		MT2	MT3	MT5
PPS	聚苯硫醚		MT2	MT3	MT5
PS	聚苯乙烯		MT2	MT3	MT5
PSU	聚砜		MT2	MT3	MT5
PUR-P	热塑性聚氨酯		MT4	MT6	MT7
PVC-P	软质聚氯乙烯		MT5	MT6	MT7
PVC-U	未增塑聚氯乙烯		MT2	MT3	MT5
SAN	（丙烯腈-苯乙烯）共聚物		MT2	MT3	MT5
UF	脲-甲醛树脂	无机填料填充	MT2	MT3	MT5
		有机填料填充	MT3	MT4	MT6
UP	不饱和聚酯	30% 玻璃纤维填充	MT2	MT3	MT5

表 6-3　收缩特性值 $\bar{S}$ 选用的公差等级

收缩特性值 $\bar{S}$(%)	公差等级		
	标准公差尺寸		未注公差尺寸
	高精度	一般精度	
>0 ~1	MT2	MT3	MT5
>1 ~2	MT3	MT4	MT6
>2 ~3	MT4	MT5	MT7
>3	MT5	MT6	MT7

3）此标准的附录，规定了如下术语：

① 成型收缩率（molding shrinkage）：在（23 ± 2）℃时，型腔尺寸 L_m 与模塑件相应尺寸 L_p 之差，同型腔尺寸 L_m 的比值，以百分数表示。

$$S_M = [(L_m - L_p)/L_m] \times 100\% \tag{6-1}$$

式中　S_M——成型收缩率（%）；

L_p——成型后在标准环境下放置 24h 后的模塑件尺寸（mm）；

L_m——模具的相应尺寸（mm）。

② 流向收缩率（molding shrinkage in flow direction）：

S_{Mp}——成型时沿料流方向的成型收缩率（%）。

③ 横向收缩率（molding shrinkage in transverse direction）：

S_{Mn}——成型时垂直于流动方向的成型收缩率（%）。

④ 成型收缩率差（difference of molding shrinkage in flow and transverse direction）：

ΔS_M——成型时流向收缩率 S_{Mp} 与横向收缩率 S_{Mn} 之差（%）。

$$\Delta S_M = S_{Mp} - S_{Mn} \tag{6-2}$$

⑤ 收缩特性值（shrinkage property value）：

$\overline{S}$——流向收缩率与流向和横向收缩率之差的绝对值之和（%）。

$$\overline{S} = |S_{Mp}| + |\Delta S_M| \tag{6-3}$$

4）此标准对成型模塑尺寸分成两类：

① 不受模具活动部分影响的尺寸 a，如图 6-1 所示。它是指在同一动模或定模的零件中成型的尺寸。例如由动模上型芯成型的径向尺寸，或在定模型腔中成型的径向尺寸。

② 受模具活动部分影响的尺寸 b，如图 6-2 所示。它是指可活动的模具零件共同作用所构成的尺寸。它也是指由相对位置可发生变化的两个或更多模具零件共同成型的尺寸。可活动的零件在模具生产中不断磨损。主要可以从模架导柱导套和分型面精度损失判断对模塑件上成型尺寸有否影响。例如：壳体模塑件的壁厚和底厚尺寸；受动模零件、定模零件和滑块共同影响的尺寸。

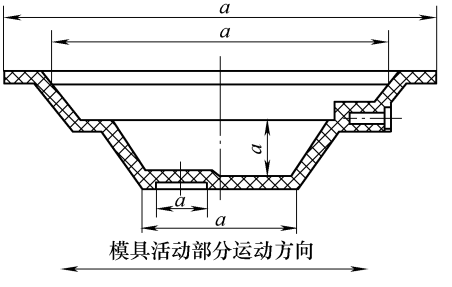


图 6-1　不受模具活动部分影响的尺寸a

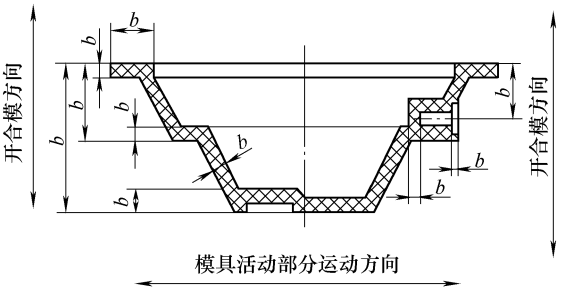


图 6-2　受模具活动部分影响的尺寸b

5）此标准又规定脱模斜度一般不包括在公差范围之内。脱模斜度的大小应在图样上单独标出，并且应在图样上标明基本公差尺寸所在位置。标注方法如图 6-3 所示。如果要求脱模斜度包括在该尺寸的公差范围内，则应加以特别说明。

3. 塑料件的表面粗糙度

塑料件的表面粗糙度是指制品表面具有小间距的峰谷所构成的微观几何形状不平度。不平度越大则塑料件表面粗糙度越大。塑料件的表面粗糙度将影响其外观、安装配合的可靠性和使用性能。光亮柔滑的日用器皿和高档包装瓶盒外观，要有很小的表面粗糙度保证。塑料轴承的摩擦面和塑料齿轮的工作面等都需达到较高等级的表面粗糙度要求。

GB/T 3505—2009 规定多种高度方向的评定指标，优先推荐轮廓算术平均偏差值 Ra。如图 6-4 所示，在一个取样长度 l 内被测轮廓上各点至轮廓中线，偏移距离绝对值的平均值称为轮廓算术平均偏差。被测轮廓一般需要五个以上的轮廓峰和轮廓谷，峰谷

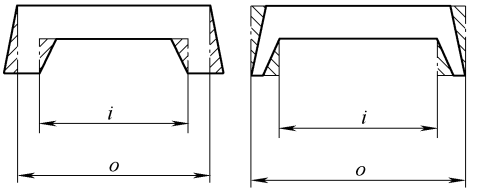


图 6-3　有脱模斜度的模塑件的基本尺寸标注方法

a）i：内尺寸；o：外尺寸为基本尺寸

b）i：内尺寸；o：外尺寸为基本尺寸

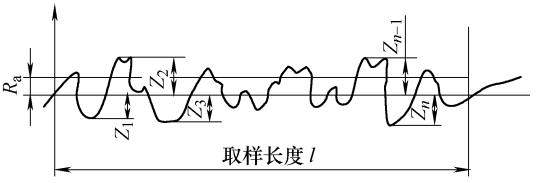


图 6-4　轮廓算术平均偏差

各点的偏移距离分别为 Z_1、Z_2、Z_3、…、Z_n，有

$$Ra = \frac{1}{l}\int_0^l |Z(x)|\mathrm{d}x \tag{6-4}$$

或近似为

$$Ra = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} |z_i|$$

塑料制品的表面粗糙度按 GB/T 14234《塑料件表面粗糙度》规定，由表 6-4 对应不同加工方法和不同塑料材料选取 Ra 数值。模具型腔表面粗糙度和塑料材料直接决定塑料制品的表面粗糙度。注射工艺也影响着塑料制品的表面粗糙度，较高的模具温度有利改善制品。

表 6-4　不同加工方法和不同材料能达到的表面粗糙度

加工方法	材料		Ra 参数值范围/μm											
			0.012	0.025	0.050	0.100	0.200	0.40	0.80	1.60	3.20	6.30	12.50	25
注射成型	热塑性塑料	PMMA(有机玻璃)												
		ABS												
		AS												
		聚碳酸酯												
		聚苯乙烯												
		聚丙烯												
		聚酰胺												
		聚乙烯												
		聚甲醛												
		聚砜												
		聚氯乙烯												
		聚苯醚												
		氯化聚醚												
		PBT												
	热固性	氨基塑料												
		酚醛塑料												
		硅酮塑料												

（续）

加工方法	材　料	*Ra* 参数值范围/μm											
		0.012	0.025	0.050	0.100	0.200	0.40	0.80	1.60	3.20	6.30	12.50	25
压制和挤胶成型	氨基塑料												
	酚醛塑料												
	密胺塑料												
	硅酮塑料												
	DAP												
	不饱和聚酯												
	环氧塑料												
机械加工	有机玻璃												
	聚酰胺												
	聚四氟乙烯												
	聚氯乙烯												
	增强塑料												

注：增强塑料件的 *Ra* 数值应相应增大两个档次。

标准规定取样长度 l 应从下列系列数值中选取：0.08mm、0.25mm、0.8mm、2mm、5mm、8mm。评定长度 l_n 要选取 5 个连续的取样长度，$l_n = 5 \cdot l$。若被测表面粗糙度均匀分布，评定长度 l_n 可取小于 5 个取样长度；反之，可取大于 5 个取样长度。在规定表面粗糙度要求时，必须给出表面粗糙度参数值和取样长度两项基本要求，必要时可规定加工纹理、加工方法和加工顺序等。表面粗糙度不适用于表征制品的表面缺陷。塑料件表面粗糙度的标注方法按 GB/T 1031—2009，与金属制品相同。

注塑件表面质量用 GB/T 14234—1993《塑料件表面粗糙度》来评估。但是注塑件的表面质量，与塑料材料的光泽程度和透明性有关。注塑件表面宏现不平度很差，较低的表面硬度和形体尺寸的不稳定性，使注塑件表面的微观不平度很难测量和评估。

提高注塑件表面质量的有效途径之一，是提高模具型腔表面的质量。按我国《塑料模具型面类型和粗糙度》标准，MFG（Mould Finish Comparison Guide）模具型面类型有：MFG A 类金刚石研磨膏抛光，模具型面表面粗糙度 *Ra* 0.008 ~ 0.063μm；B 类砂纸抛光，*Ra* 0.063 ~ 0.32μm；C 类油石抛光，*Ra* 0.32 ~ 1.6μm；D 类喷砂抛光，*Ra* 0.25 ~ 0.63μm；E 类电火花加工，*Ra* 0.40 ~ 20.0μm。注射生产的注塑件表面粗糙度总比型腔表面差些，而且与注射工艺有关。对有光学透明性要求的注塑件，模具成型表面的质量要求很高。有外观要求的注塑件，也要花费大量人工抛光。

4. 注塑件的形状位置公差

一些塑料柔软，使注塑件的形状位置误差很难检测。但是用工程塑料注射的制品有安装配合要求，必须保证几何精度。这里介绍一些约定俗成的几何公差的规定，可供图样标注和实物检测参考。

1）脱模斜度一般不计入公差带，如需要计入公差须在图样上标明。除有约定，轴类尺寸一般测量大端；通孔类尺寸一般测量小端；不通孔尺寸测量大端。孔与轴有装配

要求的尺寸在装配段的斜度最大为 15′。

2）对注塑件的未注平面度公差用下式计算，系数 k 查表 6-5。

合格的平面度≤ k ×（制件长度/制件壁厚）

表 6-5　计算平面度公差的系数 k

制件壁厚 /mm	塑料的成型收缩率≤ 1%	塑料的成型收缩率 > 1%
≥3	0. 023	0. 03
<3	0. 018	0. 025

3）制件塑料的成型收缩率小于 1%，注塑件的未注垂直度公差按制件的基本尺寸查表 6-6。

表 6-6　未注垂直度的公差　（单位：mm）

基本尺寸	≤10	>10 ~16	>16 ~25	>25 ~40	>40 ~63	>63 ~100	>100 ~160	>160 ~250	>250 ~400	>400 ~630	>630
公差	0. 2	0. 25	0. 3	0. 4	0. 5	0. 6	0. 8	1	1. 2	1. 5	2

4）注塑壳体的壁厚误差影响壳体刚性，也反映模具型芯与型腔的定位精度。注塑件的未注壁厚公差，在不影响成型和装配前提下的允许偏差见表 6-7。

表 6-7　注塑件的未注壁厚公差　（单位：mm）

制件壁厚	≤1. 5	1. 5 ~25	≥2. 5
公差	±0. 1	±0. 3	±0. 5

5）在保证一定壁厚的条件下，自攻螺钉底孔的注塑件按表 6-8 要求成型。以保证在装配流水线上顺利装配产品。此表适用于 ABS 塑料的底孔，其他塑料要按螺钉的旋攻力矩调整底孔大小。底孔轴线长度方向斜度在 15′内。

表 6-8　自攻螺钉的塑料底孔和公差　（单位：mm）

螺钉规格	M3	M4	M5
大端孔径	2. 4 ±0. 1	3. 5 ±0. 1	4. 4 ±0. 1

6. 1. 2　注塑件的质量分析

注塑件的表面粗糙度和表面缺陷状况常被首先检测。常见的表面缺陷有：凹陷、真空泡、气孔、流动痕、无光泽、发白、银纹、剥层、暗斑纹、烧焦、裂纹、翘曲、溢料飞边及可见熔合缝等。作为装饰零件，表面缺陷影响美观。作为结构件，这些缺陷影响了工作性能。表观质量也是制件内部质量的反应。在第 5 章中已经从冷却固化、收缩和残余应力、流动充模和熔合缝等方面作了深入讨论。本节将结合注射生产，从塑料材料、制品结构、注射工艺条件、注射机和注射模具作综合质量分析。

1. 试模中常见的注塑件缺陷及解决方法

正常的塑料熔体流动状态，在成型型腔小间隙截面上是喷泉流动，如图 6-5a 所示。

在模壁上形成皮层，熔料从中央涌出。在另一方向的大面积板面上是流线的平行推进，如图 6-5b 所示。高黏度的塑料熔体要实现正常的流动状态，需要有足够的压力（25 ~ 50MPa）、合适的剪切速率（$10^3 \sim 10^4 s^{-1}$）。由此稳定的层流推进，将型腔内空气挤压，并从流程终端顺利排气。过高的压力和过窄的间隙下的熔体流动速率很高，会有过大的剪切速率，熔体的流动会失去稳定状态。又经过热流道系统中过长时间的存留，过热熔体分解变色，发黄或成褐色，或烧糊成焦黑。在小浇口大型腔的注射状态下，高能量的熔料会引成射流冲至型腔底部，以蛇形喷射（如图 6-6 所示），堆积在型腔里。熔体喷射时过高剪切应力和剪切速率，会使熔体破碎，引成湍流和涡流。在冷却固化时，破碎的熔体之间混有空气，不能很好熔合，会出现剥层和龟裂。塑料熔体充满型腔后就开始冷却固化。为提高生产率需缩短注射周期，以低温的模具对注塑件进行骤冷处理。塑件的不均匀收缩决定了制品的尺寸和形位误差。注塑件的分子取向和残余应力影响着制品的翘曲变形。

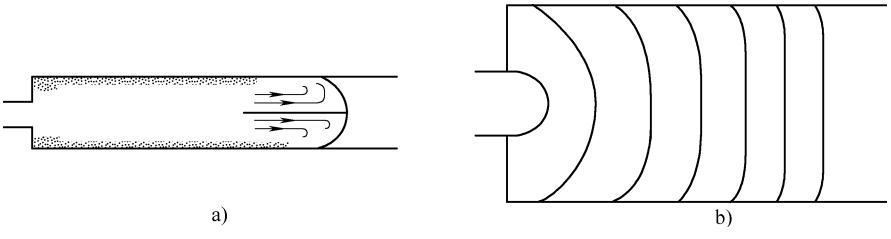


图 6-5　塑料熔体在型腔内的流动状态

a）在注塑件壁厚的间隙内　b）在板平面的型腔内

（1）注塑件未注完整　塑料壳体四角和边缘上，没有注满。在足够高的压力下仍然不能充满型腔获得完整制品。其原因可能有以下几个方面。

1）注射机塑化能力不足。注射机的实际塑化能力达不到模具型腔所需要注射量。型腔尚未注满，注射螺杆抵达料筒最前端已无物料充填。为此必须更换塑化能力更大的注塑机。

2）充模流动阻力过大。模具的浇注系统长度过长，而截面尺寸太小。浇注系统的压力损失已超过 35MPa，使制品型腔的充模压力不足。大型制品的壁厚过薄，注射成型的流程比过大。增大冷流道截面，会增加流道凝料消耗原材料。建议用热流道浇注系统，有利于压力传递。

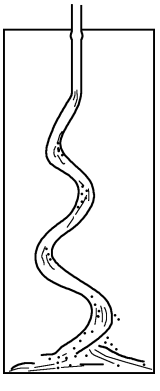


图 6-6　小浇口大型腔中的熔体蛇形喷射

3）前锋冷料堵塞。注射机喷嘴较长时间处于低温，内部存有低温冷料。在主流道末端应设有冷料井。如果冷料井的容积不足，冷料的流动速度慢，在低温模壁作用下，会堵塞在小浇口和窄间隙中。

4）模壁温度过低。低温模壁会使型腔间隙内冻结皮层加厚。对薄壁制品，当冻结层厚度超过型腔间隙一半时，熔料无法继续流动。提高注射速度可增大熔体流动能量；

适当提高模具温度也能解决问题。

5）型腔排气不良。排气不畅时，被挤压的压缩空气抵御了熔体，降低了充模流动速率。无法排气的死角，使制品不能注满。要清除已有排气通道中的污垢等堵塞物；必要时增设排气通道。

（2）注射中溢边，注塑件上有飞边　溢边是充模时熔体料流从模具分型面或间隙中溢出，冷却后形成飞边。产生的原因是多方面的。

1）锁模力不足，塑料熔体在高压下将分型面涨开。溢料尤其是多发在塑料低黏度熔体的注射成型中。注射时计量过多会胀模，或者注射压力过高也会胀模。应降低注射压力；或调高合模装置的锁模力。

2）模具成型零件之间间隙偏大，在注塑件上形成飞边。应提高模具零件的镶拼和装配精度。

3）模具刚性不好，型芯变形或偏移，模板弹性变形。模具设计时必须校核成型零部件在高压注射下的刚度。

（3）表面凹陷，注塑件中有真空泡或气囊　透明或半透明塑料制品的厚壁和拐角处能够看到真空泡，俗称气囊。其实深色制品中也有，就是看不到。凹陷经常出现在有肋和凸台交错的壁厚表面。产生真空泡和凹陷的根本原因是壁厚不均匀，在壁厚部位的过量收缩。当壁厚的表皮先行冷却且又刚硬时，中央部位塑料在缓慢冷却中，被向外表层拉伸，形成负压真空泡。相反，厚壁中央塑料冷却时，温差热应力将柔软的表层拉向里层，就形成凹陷。生产中要严格进行塑料粒子的干燥；注射时增大注射压力和保压压力，使用热流道有利于压力传递，能减少远离浇口的料流末端的真空泡和凹陷；也需降低模具温度，提高冷却效率来防止凹陷。产生这些缺陷的原因可能有以下几项。

1）注塑压力低。充模结束时不能将物料压缩到适当密度；保压压力低，注塑件在冷却收缩过程中不能将物料补入型腔；或者因保压补缩时间短而发生倒流，致使型腔压力迅速下降。

2）模具的浇口、分流道和主流道截面尺寸偏小。模具的中小型浇口最早冻结，不能将物料补入型腔；大浇口浇注时，不可忽略流道和主流道过早冻结的可能性；主流道和流道过长，也会增加补料的阻力，使型腔压力不足。

3）原材料收缩率偏大。结晶型塑料如聚烯烃和聚酰胺等的成型收缩率比无定形塑料大得多，因此宜采用低温、高压注射。但熔体温度过低，会使黏度增加，会增加补料的阻力。

（4）熔合缝　熔合缝是塑料制品中的一个区域。熔合缝的力学性能低于塑料件的其他区域，是整个塑料件中薄弱环节。熔合缝也有碍制品的外观，成为废次品的“告示”。避免熔合缝生成往往是不可能的，在注射成型和模具设计时能够做到的有以下两方面。

1）改善熔合缝的强度。在注射生产时，提高注射压力、加快注射速度和提高模具温度，能增强熔合缝的强度。同时还必须使两股料流前锋汇合处排气畅通。

2）改变浇口位置和数目，改进熔合缝的位置和方向，避免多条熔合缝聚集分布在同一条线上。使熔合缝生成在次要且隐蔽的位置。

有关熔合缝的生成与力学性能，熔合缝的控制和消痕工艺，见第 5 章 5. 1 节。

（5）流动痕和银纹　注塑件上能见到料流推进的痕迹。在制件表面出现成束、成片银白色的条纹。这与原材料和螺杆塑化质量有关，要正确判断气体等挥发性物质的来源。

1）原材料中水分未干燥去除，或已干燥的物料重新吸潮。

2）合成生产的塑料原材料不合格，含有未除净的低分子物和溶剂，含有未聚合的单体。

3）塑料材料或添加剂，在高温下或长时间加热分解产生气体。

4）塑料原材料被污染，从输送处理、塑化装置和模具上粘上水或挥发物，在高温下产生气体。

5）在螺杆塑化和注射充模流动时卷吸和溶合气体。

（6）暗斑和暗纹　注射制品上出现黑色或褐色的糊料斑点，或者变色的已分解糊料的流纹。这是部分塑料熔体温度过高或加热时间过长，又经高剪切流动的激化，引起塑料分解后，进一步被烧糊或烧焦；排气不畅受阻时，高温高压的气体也会灼伤注塑件的边角。采用热流道注射后，这种熔体局部过热的可能性增加，热流道系统中的剩料和滞料会在注塑件上留下暗斑和暗纹。

（7）浇口痕迹　针点式浇口留在注塑件上的痕迹最小。主流道型的大浇口，在注塑件上留下大的料头。剪去或切割浇口料头时，要避免仍然残留凸起，也要避免深挖到注塑件表面以下。剪切时要使用锐利的刀片或尖头剪刀钳等专用工具。各种热流道喷嘴在注塑件上会留下各种印痕和浇口痕迹。浇口附近是制品缺陷的重灾区，大浇口的根部会有真空泡。对应部位有凹陷。浇口附近残余应力较大且集中，还会出现应力发白、银纹和开裂。

（8）翘曲变形　注塑件的翘曲变形，是在注射制品脱离了模具型腔后，在自由状态下，制品的形状偏离了原金属模具成型型腔的位置。注射制品的内部密度和质量的不均衡，是产生翘曲变形的原因。在塑料熔体流动充模和冷却固化成型时，注塑件上各部位的收缩和分子取向并不一致。残余流动应力和温差残余应力分布在各位置不均衡，当残余应力不为塑料材料和塑料件结构的刚性所容忍时，产生了永久的变形。防止注塑件的翘曲是一项综合的系统工程。要选取弹性模量大的塑料材料；注塑件有刚性的结构设计；要有最佳的流动充模和保压工艺；要有高效和均匀的模具冷却系统；还要有安全均匀的脱模等。

保证注塑件的精度和质量，注塑件结构的合理性是前提。注塑件是壁厚均匀薄板组合的形体。注塑件的壁厚是塑料结构的最基本要素。其他的形体和尺寸，例如加强肋和圆角等，都是以壁厚为参照。如果壁厚不均匀，会使塑料熔体的充模速率和冷却收缩不均匀，由此产生许多质量问题，例如凹陷、真空泡、翘曲变形、开裂，产生颇大的尺寸误差。壁厚均匀一致是注塑件设计的重大原则。注塑件壁厚均匀一致，形体又对称，可

使注塑件收缩均衡，提高注塑件结构的刚性。

在生产实际中，塑料制品表面质量的缺陷还有很多。例如制品表面无光泽，它与材料品种，也与型腔表面抛光质量有关。又例如色泽不均、颜色不一致。它与着色剂选用和着色工艺有关，也受注射工艺影响。还有在注射制品的脱模过程中，由于注塑件过薄过软，其强度不足，对型芯的包紧力过大，在强行脱模时，会使注塑件表面留下擦痕，或者变形起皱。在细顶杆作用的注塑件部位，产生应力发白和凹陷等。产生以上所述各种注射制品的质量问题，追其原因，是由塑料材料、塑料制品结构、注射模具、注射机和注射工艺所致。在生产现场还要找到主要的起支配作用的原因，这就要求技术人员有全面的注射生产的专业知识，才能正确诊断并克服缺陷。

2. 注射生产中常见制品缺陷及对策

本小节的表 6-9 ~ 表 6-11，以 ABS、PA 和 PC 三种塑料的注射制品的缺陷进行诊断分析，并作为解决质量问题的导向。

表 6-9　ABS 注射制品质量检验导向

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
缺料或未注满	注射压力太低	增加注射压力
	熔料温度太低	升高熔料温度
	喷嘴孔径太小	使用较大尺寸喷嘴
	料斗无物料或下料有故障	解除料斗故障或加更多物料
	喷嘴流动途径堵住	除去喷嘴中堵塞物并发出警告
	模具中不能有效排气	按注射物料体积，校核排气截面尺寸；也要查找阻塞物，消除排气故障
	浇口和流道尺寸太小	增加浇口和流道截面尺寸
	模具温度太低	提高模具温度
气泡、气陷、灼伤斑纹	注射压力太低	增加注射压力
	注射速度太高	降低注射速度
	在注射料筒中滞留时间太长	每次注射量应是注射机料筒塑化能力的 30% ~65%
	在注塑件上浇口的位置是从薄壁到厚壁	改变浇口位置，从厚壁至薄壁
	流道尺寸太小	增加流道截面尺寸
	模具中不能有效排气	按注射物料体积，校核排气截面尺寸；也要查找阻塞物，消除排气故障
展开的流纹、浇口伤痕和其他表面疵点	喷嘴浇口尺寸太小	使用更大尺寸的喷嘴
	注射速度太高	减小注射速度
	喷嘴流动途径堵塞	去除喷嘴里任何堵塞物，谨慎使用
	料筒分布温度太高	降低料筒温度，尤其要降低料筒中段温度

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
展开的流纹、浇口伤痕和其他表面疵点	模具温度太低	提高模具温度
	浇口尺寸太小	扩大浇口尺寸
	不能有效排出模具中气体	按材料供应商的要求，校核排气槽尺寸；也要检查排气隙槽和阻碍排气的堵塞物
	回头料中粉末太多	用类似吸尘器的自动装置去除过多粉剂
	树脂没有有效干燥	对照材料供应商的干燥要求，检查干燥装备的运行、干燥物料的输送管和接头；如果使用回头料，检查大尺寸的片状料
	物料被污染	查询材料供应商对物料的前期处理装卸过程，去除污染物
显见和弱的熔合缝	喷嘴温度太低	提高喷嘴温度
	熔料前锋汇合处有气体	在熔料前锋汇合处增添排气措施，例如用多孔排气钢块
	注射压力太低	增加注射压力
	注射速度太低	提高注射速度
	模具温度太低	提高模具温度，至少达到材料供应商推荐的最低温度
	流道尺寸太小	增加流道截面尺寸
	树脂没有有效干燥	对照材料供应商的干燥要求，检查干燥装备的运行、干燥物料的输送管和连接头；如果使用回头料，检查大尺寸的片状料
凹陷	注射压力太低	增大注射压力
	熔料温度太高	降低熔体温度
	料斗中料空或架桥封结	去除料斗中的架桥封结，料斗加满物料
	循环周期太短	调整保压时间
	注射速度太慢	提高注射速度
	流道尺寸太小	增加流道截面尺寸
	浇口尺寸太小，在注塑件充填前冻结	增大浇口尺寸，检测浇口冻结时间
模具中超常的飞边	注射压力太高，模具分型面开放出气	减小注射压力
	锁模力太低	增大锁紧力
	保压压力太高	降低保压压力
	熔体的流动速率 MFR 太高，黏度低	在不损失注塑件特性的前提下，改选熔体流动速率（MFR）较低的物料

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
注塑件和主流道凝料粘模	保压压力过高	降低保压压力
	进入型腔的材料太多	减少注射量
	料筒温度过低，使主流道凝料粘模	提高料筒温度
	熔体温度太高，使型腔中注塑件粘模	降低熔料温度
	喷嘴头与模具上主流道套不合适	检查喷嘴与主流道套的同轴度
	喷嘴口与主流道入口不匹配	检查喷嘴和主流道套，校核两者对接曲面和口径
	主流道通道有毛刺或缺口凹槽	切削主流道套里所有毛刺，去除凹槽
	模具温度太高	降低模具温度
	模具型腔中有毛刺、凹槽或其他表面缺陷	切削加工成型零件上的毛刺，去除凹槽和其他表面缺陷
	材料没有足够的润滑性能	使用润滑性能较好的材料
暗斑	注射机净化不够	适当预净化，必要时手工清理料筒和喷嘴
	熔体温度过高	降低熔体温度
	物料滞留在料筒和喷嘴	去除任何锐边或其他会滞留物料和割破熔体的部位
	物料中含有油、油脂或模具清洁剂	开始注射前，清除任何工作表面上过多的油、油脂或模具清洁剂
	模具无排气能力	落实排气措施
光泽过亮或太差	熔体温度太低	提高熔体温度
	模具温度太低	提高模具温度
	物料里的添加剂糊化表面	降低熔体温度和改善排气
	模具无排气能力	落实排气措施
	注射压力过低	增大注射压力
	注射速度过低	增加注射速度
	模具表面粗糙度不适当	按注塑件表面粗糙度的要求，改善模具的表面粗糙度
	注塑件上熔合缝显露	回顾前熔合缝一项的解决途径
	有灼伤痕	降低熔体温度，检查排气畅通与否
	浇口区有展开流痕或混浊	增大浇口尺寸
	材料品级有太高或太低的光泽	按需要优选或高或低光泽的品级

注：表面粗糙度的峰谷纹理会使塑料制品表面光泽变化。过高的保压压力、过高的熔体温度和注射速度也会降低制品光泽。在发光体的照射下，光滑表面有更亮的光泽。

表 6-10 聚酰胺注射制品质量检验导向

缺陷或故障	诊 断	对 策
黑条纹	料筒和螺杆没有完全净化	按要求预净化
	料斗口使物料烧伤或降解	降低料斗附近加热圈的温度
	料斗进水被关断	检查料斗的水路,或接通水管
	物料污损	去除所有污物,与材料供应商接触,了解物料前期状况
	从模具中沾染油或脂	去除模具表面任何油脂
	材料干燥时间太长	对照干燥条件,检查干燥料斗有否功能失调
	注射量与料筒塑化量之比太低,物料在料筒中滞留时间太长	调换另一台有较小注射料筒的注射机,能减少滞留时间
脆化	熔化温度太高使物料降解	降低熔化温度
	塑化背压太高使材料过热	减小背压
	螺杆转速太快	降低螺杆转速
	注射速度太快	降低注射速度
	注射量与塑化量之比太低,物料滞留在料筒时间太长	调换注射机有较小注射料筒的,能减少滞留时间
	材料被污染	去除任何污物,了解材料的前期处理状况
	模具温度太高	降低模具温度
烧伤斑痕	熔体温度太高使材料降解	降低熔化温度
	塑化背压太高使材料过热	减小背压
	螺杆转速太快	降低螺杆转速
	注射速度太快	降低注射速度
	注射量与塑化量之比太低,物料滞留在料筒时间太长	调换有较小注射料筒的注射机,能减少滞留时间
	注射循环周期太长	缩短注射周期
	模具不能有效排气	按注射物料量校核熔料前锋汇接位置的排气槽尺寸
	浇口位于孔的周围,或在使压力降低很大的位置,以致形成熔合缝	移动浇口的位置
	浇口尺寸太小,使熔体强力剪切	增加浇口尺寸
	在喷嘴、主流道、分流道和浇口的通道上有锐角和毛刺	切削或研磨、抛光所有的锐角和毛刺
	熔体流动速率 MFR 太低,物料干燥时间太长	改用高 MFR 品级物料;问讯供应商,明确干燥条件;检查干燥料斗有否失调

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
隐现变色	熔体温度太高使材料降解	降低熔体温度
	注射量与塑化量之比太低，物料滞留在料筒时间太长	调换有较小注射料筒的注射机，能减少滞留时间
	整个注射周期太长	降低注射循环周期
	用低温材料的色母料	改用耐高温的色母料
	回头料中细粉超量	使用吸尘器类装置降低细粉含量
	物料在高温下不稳定	改选热稳定的聚酰胺
脱粘和脱层	熔料温度太低	提高熔体温度
	模具温度太低	增高模具温度
	料筒和螺杆清理不完全	按材料供应商要求预先清洗
	塑化背压太低	提高背压
	螺杆转速太慢	提高螺杆转速
	材料被污染	问讯材料供应商，回顾原材料处理状态，去除所有污垢
	色母料基体树脂的相容性差	选用与聚酰胺相容性好的色母料
材料褪色	料筒和螺杆清理不完全	按材料供应商要求预先清洗
	熔体温度太高	降低熔体温度
	注射量与塑化量之比太低，物料滞留在料筒时间太长	调换有较小注射料筒的注射机，能减少滞留时间
	后面的加热圈温度设置太高	降低后加热段的温度
	塑化背压太高使材料褪色	减小背压
	注射速度太快	减慢注射速度
	材料被污染	问讯材料供应商，回顾材料原处理状态，去除所有污垢
小型注塑件的过量收缩	注射循环周期太短	增加注射周期
	塑化背压太低	提高背压
	没有螺杆前的保压补缩物料	按供料商要求加大物料垫
	注射速度太慢	提高注射速度
	熔体温度过低，使熔料冷却快	提高熔体温度
	熔体温度过高，使物料对型腔过量补缩	降低熔体温度
	滑动的止逆环磨损，使注射计量不稳定	置换螺杆头上的止逆环
	模具温度太高	降低模具温度
	主流道、分流道和浇口尺寸太小	增加主流道、分流道和浇口的截面尺寸

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
小型注塑件的过量收缩	聚酰胺材料成核结晶差	改用结晶度高的品种
	注塑件脱模时温度太高	骤冷制件，但制品中残余应力增大
	效率低下的模具冷却使模具和制件冷却不稳定	检查冷却管道位置和冷却水供给
注塑件的飞边	注射保压时间太长	减少保压压力
	锁模力太低	改用有较高锁模力的注射机
	注射压力太高	降低注射压力
	注射速度太快	减慢注射速度
	熔体温度太高	降低熔体温度
	模具温度太高	降低模具温度
	模具分型面不能平整密合	改善分型面配合，重新压紧对合
	温度调节控制器出错	替换温度控制器
	模具排气不畅	按材料供应商的排气要求，按注射物料量校核熔料前锋汇接位置的排气槽尺寸
	树脂不能有效干燥	回顾材料供应商的干燥要求，检查干燥设备状况，检查干燥料斗的条件和联接。如果用回头料，检查大片物料的尺寸
	模具上配合表面污垢阻碍完全密闭	清理和抛光模具上的污垢
	熔体流动速率（MFR）太高	改用熔体流动速率（MFR）低的材料，或用高结晶成核品级的聚酰胺
喷嘴口流涎	树脂没有有效干燥	回顾材料供应商的干燥要求，检查干燥设备状况，检查干燥料斗的条件和联接。如果用回头料，检查大片物料的尺寸
	喷嘴温度太高	降低喷嘴温度
	注射速度太快	减慢注射速度
	熔料温度太高	降低熔体温度
	塑化后的减压不足	增加螺杆头处的“返吸”减压
	喷嘴口太大	调换小口喷嘴
	用标准斜度的喷嘴	调用反向斜度的喷嘴
	喷嘴或主流道套有毛糙或破裂	替换喷嘴或主流道套
	整个循环周期太长	减小注射周期
喷嘴口冻结闭合	喷嘴温度太低	提高喷嘴温度
	喷嘴加热圈失效	换装加热圈

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
喷嘴口冻结闭合	加热圈位置后离喷嘴	朝前装好喷嘴
	喷嘴加热圈功率偏低	调换高功率加强圈
	注射周期太长	降低注射周期
	喷嘴口尺寸太小	改换大口径的喷嘴
	使用标准斜度的喷嘴	改用反向斜度的喷嘴
	模具温度太低	提高模具温度
螺杆头前熔体倒流	螺杆磨损	检测螺杆的螺棱，替用新螺杆
	料筒磨损	测量料筒与螺杆间的间隙，替换或修理料筒衬套
	料斗结块使送料口狭窄	送料口除去结块物料
	料斗空	料斗中放置物料，或检查送料系统故障
	塑化背压太高	减小背压
	料斗附近的加热器太高或太低	检查和调整料斗附近加热器的位置
	树脂没有有效干燥	回顾材料供应商的干燥要求，检查干燥设备状况，检查干燥料斗的条件和联接。如果用回头料，检查大片物料的尺寸
欠注	螺杆头前料垫已无料可补射	增添缓冲料垫
	螺杆塑化设置有误差，注射计量少	增加计量，扩大螺杆塑化设置
	螺杆头上止逆环磨损，熔体返流波动	用新的止逆环替换
	注射速度太慢	增加注射速度
	注射压力太低	增加注射压力
	熔体温度太低	提高熔体温度
	加热器故障	更换加热器
	料斗冷却水中断，使物料在料斗里架桥	开通冷却水循环，排堵或疏通
	注射机液压系统故障	与注射机供应商磋商，对注射机的液压系统进行诊断和检修
	料筒塑化能力太小	调换塑化能力大的注射机
	模具温度太低	提高模具温度
	浇口或流道尺寸太小	增大浇口或流道尺寸
	熔料充模流动时不能平衡浇注	检测各种欠注充模式样，用二维或三维充模流动分析，改进模具浇注系统设计，实现平衡浇注
	熔体的流动速率（MFR）太低	改选熔体流动速率（MFR）较高的物料

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
欠注	模具不能有效排气	校核熔料前锋汇合区域的排气槽尺寸
	喷嘴口的尺寸太小	改用大口径喷嘴
	材料干燥过度	遵照材料供应商推荐的干燥条件
凹陷	保压时间太短	增加保压时间
	注射压力太低	增大注射压力
	熔体温度太高	降低熔体温度
	注射循环时间太短	延长注射周期中的冷却时间
	注射速度太慢	加快注射速度
	螺杆头前料垫已无料可补射	增添缓冲料垫
	螺杆头上止逆环磨损	用新的止逆环替换
	浇口位于注塑件隆起的截面上	改成从较薄的名义壁厚位置浇注
	浇口尺寸太小	增大浇口尺寸
	模具温度太高	降低模具温度
	主流道或流道尺寸太小	增加主流道或流道尺寸
	熔体的流动速率(MFR)太低	改选熔体流动速率(MFR)较高的物料
流纹或银纹	树脂不能有效干燥	回顾材料供应商的干燥要求,检查干燥设备状况,检查干燥料斗的条件和联接。如果用回头料,检查大片物料的尺寸
	模具温度太高	降低模具温度
	喷嘴温度太高	降低喷嘴温度
	喷嘴长度过长	改换短喷嘴
	喷嘴、主流道、流道和浇口途径上有尖角或毛刺	切除或抛光所有尖角和毛刺
	注射速度太快	降低注射速度
	浇口尺寸太小	增加浇口尺寸
	浇口数目少,促使高剪切流动	添加浇口
	注射量与塑化量之比太低,物料滞留在料筒里时间太长	模具调换有较小注射料筒的注射机,能减少滞留时间
	塑化背压太高	降低背压
	材料受到水污染	找到水污染源
	塑化后的减压过大,空气侵陷在熔料	降低“返吸”压力
	喷嘴尺寸太小	调换较大口径喷嘴

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
流纹或银纹	主流道、分流道和浇口尺寸太小	增加主流道、分流道和浇口尺寸
	材料被污染	问讯材料供应商，查清材料前期的处理过程。去除任何污垢
粘着模具型腔	注射压力太高	降低注射压力
	保压时间过长	减少保压时间
	注射周期太短	延长注射周期中的冷却时间
	熔体温度太高	降低熔体温度
	脱模斜度不足	增加脱模斜度
	脱模顶出时受注塑件上侧向槽阻碍	得到制品生产委托方允许，去除凹凸槽的设计
	模具温度太低	增加模具温度
	材料缺乏润滑性	改换具有内润滑剂的材料
粘着在主流道圆锥孔中	注射压力太高	降低注射压力
	保压时间过长	减少保压时间
	喷嘴温度太低	提高喷嘴温度
	使用标准斜度的喷嘴	改用反向斜度的喷嘴
	喷嘴与主流道套不能对准接触	喷嘴头与主流道套凹坑重新匹配
	主流道的斜度不足	增加主流道孔的斜度
	螺钉不能紧固主流道套	改进设计和制造
	比起主流道入口，喷嘴口太小	改用较大口径的喷嘴；两者对准时名义尺寸同；或者喷嘴口径比主流道入口小 0.5mm 左右
	材料缺乏润滑性	改换具有内润滑剂的材料
气孔	螺杆头前料垫已无料可补射	增添缓冲垫物料
	螺杆头上止逆环磨损，使气体陷入	用新的止逆环替换
	注射压力太低	提高注射压力
	保压压力太低	提高保压压力
	注射速度太快	降低注射速度
	熔体温度太低	提高熔体温度
	熔体温度太高使材料过热	按材料供应商推荐加热条件，降低熔体温度
	浇口和流道尺寸太小	增加浇口和流道尺寸
	模具不能有效排气	校核熔料前锋汇合区域的排气槽尺寸
	模具温度太高，使物冷却缓慢	降低模具温度
	模具温度过低	提高模具温度

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
翘曲	注射循环周期太长	缩短注射周期
	熔体温度太低，流动受阻，在注塑件中生成较高残余应力	在熔体加热的温度范围内提高熔体温度
	熔体温度太高，使注塑件密实过度	在一定温度范围内降低熔体温度
	保压时间太短，不能有效补缩	增加保压时间
	保压时间太长使制件密实过度	降低保温时间
	注射速度太慢，使制件生成高残余应力	提高注射速度
	注射速度太快使制件密实过度	降低注射速度
	顶杆数目不能足够脱模	改善和修正顶杆脱模机构
	顶杆顶坏或太短	更换坏顶杆或替换短顶杆
	打开模具速度太快	降低开模速度
	浇口、流道或主流道尺寸太小	增加浇口、流道或主流道尺寸
	模具里制件不能充分冷却	检查冷却管道回路，或添加管道，或冷却水改道联接
熔合缝	注射压力太低	提高注射压力
	注射速度太慢	增加注射速度
	熔体温度太低	提高熔体温度
	模具温度太低	提高模具温度
	两股熔料前锋间有气囊	提高熔合位置的排气能力，设排气槽或埋置透气钢块
	浇口位于嵌件或型芯前，或于扩展的型腔使熔料分流	改变浇口位置
	注塑件的名义壁厚太薄	增大名义壁厚，或改用熔体流动速率（MFR）高的物料
	型芯杆偏移，影响熔合缝在型芯侧边上的熔合位置	改善型芯杆的支承结构，防止偏移

表 6-11　聚碳酸酯注射制品质量检验导向

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
黑斑	注射机没有完全净化	按换料清洗要求操作。如有必要，人工清洗止逆环、料筒和螺杆
	物料中细粉超量	使用吸尘器类装置降低细粉含量。也要检查材料处理系统的传输管道中的任何尖角
灼伤痕	喷嘴温度太高	降低喷嘴温度
	注射速度太快	降低注射速度
	注射保压时间过长	降低保压时间

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
灼伤痕	模具不能有效排气	校核排气槽尺寸;检查有否妨碍或阻塞排气
	浇口尺寸太小	在不妨碍去除浇口的情况下,增大浇口
	料筒的加热器故障	校验并校准加热器,或替换坏的加热器
褪色	注射机没有净化好	按换料清洗要求操作。如有必要,人工清洗止逆环、料筒和螺杆
	熔体温度太高	降低熔体温度
	喷嘴温度太高	降低喷嘴温度
	注射周期太长	缩短注射周期
	材料被污染	问讯材料供应商,查清材料前期的处理过程,去除任何污垢
	模具不能有效排气	校核排气槽尺寸,检查有否妨碍或阻塞排气
	注射机型号太大。注射量与塑化量之比太低,材料在料筒里滞留时间太长	调换塑化能力较小的注射机,提高注射量与塑化量之比
喷射	注射速度太快	降低注射速度
	熔体温度过低	增加熔体温度
	模具温度太低	提高模具温度
	太小的浇口尺寸限制流动,提升了注入型腔的熔料的压力	扩大浇口尺寸
	浇口朝着大而深的型腔注入	移动浇口位置,由大而深的型腔注入浅壁或翼腔
注塑件脆化	树脂不能有效干燥	回顾材料供应商的干燥要求,检查干燥设备状况,检查干燥料斗的条件和联接。如果用回头料,检查大片物料的尺寸
	材料被污染	接触材料供应商,查清材料前期的处理过程。去除任何污垢
	回头料投入太多	减少回头料投入
	熔体温度太高	降低熔体温度
	料筒的加热器故障	校验并校准加热器,或替换坏的加热器
凹陷和/或真空泡	注射压力太低	增加注射压力
	注射保压时间太短	增加保压时间
	注射速度太慢	提高注射速度

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
凹陷和/或真空泡	注射速度过快	降低注射速度
	模具温度太低	提高模具温度
	模具温度过高	降低模具温度
	熔体温度太低	提高熔体温度
	熔体温度过高	降低熔体温度
	浇口和/或流道尺寸太小，在冻结前不能填满型腔	扩大浇口尺寸
粘型腔	注射速度太快	降低注射速度
	注射保压时间太长	缩短保压时间
	模具闭合时间太短	增加模具闭合时间
	模具温度太高	降低模具温度
	熔体温度过高	降低熔体温度
	注塑件的设计不利于脱模	在注塑件上增大脱模角度以促使顶出
	在型腔上有凹槽和咬边	切削和研磨、抛光凹槽和咬边
粘型芯	注射压力太高	降低注射压力
	注射保压时间太长	缩短保压时间
	模具闭合时间太长	减少模具闭合时间
	熔体温度太低	提高熔体温度
	熔体温度过高	降低熔体温度
	注塑件设计不利于脱模	在注塑件上增大脱模角度以促使顶出
	在型芯上有凹槽和咬边	切削和研磨、抛光凹槽和咬边
扩展痕、银纹、泼溅痕	树脂没有有效干燥	回顾材料供应商的干燥要求，检查干燥设备状况，检查干燥料斗的条件和联接。如果用回头料，检查大片物料的尺寸
	材料被污染	接触材料供应商，查清材料前期的处理过程，去除任何污垢
	熔体温度过高	降低熔体温度
	注射速度太快	降低注射速度
	太小的浇口尺寸限制流动，增加了注入型腔的熔料的剪切速率	扩大浇口尺寸
	塑化背压太低	增大背压
	塑化后的减压太多，吸取的空气溶入熔体	减少螺杆头处的“返吸”减压

（续）

缺陷或故障	诊　　断	对　　策
翘曲、注塑件变形	动模和定模的冷却速率不一致	平衡动模和定模的冷却速率，按经验要使两者的温度差在 ±5℃内
	注塑件被脱模顶出后翘曲	校验脱模后注塑件的处理
	注射保压时间太短	增加保压时间
	模具闭合时间太短	延长模具闭合时间
	脱模后的注塑件温度太高	在冷却池中骤冷注塑件，但是会生成内应力
熔合缝	注射压力太低	提高注射压力
	注射速度过慢	增高注射速度
	注射保压时间太短	增加保压时间
	模具温度太低	提高模具温度
	熔体温度过低	增加熔体温度
	熔合区排气受阻	清理排气通道
	浇口位置助长了熔合缝形成	为移位熔合缝而改变浇口位置

6.2　注射成型的成本分析

注射成型成本核算的结果是每件塑料制品的价格。它涉及塑料材料、注射生产和模具制造等诸多方面的成本，是涉及多个企业的生产经营的总核算。提高注射成型生产效率的重要方法是一模多腔的模具设计。本节讨论型腔数目的合理确定，估算注射成型的成本。提高注射成型效率的另一方法是采用热流道技术，为此，引导出另一种核算注射成型成本的方法。成本综合分析对注射工艺和模具设计方案拟定有指导意义。

6.2.1　型腔数和注射成型成本的确定

最经济型腔数的确定，实质上是注塑件生产成本的经济核算。但是，在设计注射模的初始方案决定阶段，浇注系统等技术参数尚属未知。因此，下述型腔数的确定是一种估算的预测方法，一些参数要凭经验来假定。在模具设计完成后，可根据这个方法再细化，进行生产总成本和每个注塑件成本的核算。

1. 影响型腔数的因素

影响最经济型腔数 n_w 的因素，有技术参数和经济指标两个方面。技术参数有锁模力、最小和最大注射量、塑化能力、模板尺寸和流变参数。这里只考虑注射机锁模力和最大注射量两个主要参数。技术经济指标是从制品尺寸精度和经济效果考虑。对一模多腔整体嵌入式的注射模，影响型腔数的重要因素有如下四个。

（1）注射机锁模力

$$n_1 = \frac{(F/p_c) - B}{A} \tag{6-5}$$

式中　n_1——由锁模力决定的型腔数；

F——注射机的锁模力（N）；

p_c——型腔内塑料熔体的压力（MPa）；

B——浇道和浇口在模具分型面上的投影面积（mm^2）；

A——每个制件在分型面上的投影面积（mm^2）。

浇道和浇口在分型面上的投影面积 B，在模具设计前是未知值。根据对多型腔模的统计分析，大致是每个注塑件在分型面上投影面积 A 的 0.2 ~ 0.5 倍，因此可用平均值 $1.35A$ 估算。型腔内塑料熔体的压力 p_c 主要由注射压力等决定，大致在 25 ~ 40MPa。易成型制品取低值；高黏度物料、制品精度高时取大值。实际所需锁模力应小于该台注射机的名义锁模力。为留有余地用 $0.8F$ 估算。因此实用估算式为

$$n_1 = \frac{(0.8F)/p_c}{1.35A} = \frac{0.6}{Ap_c} \tag{6-6}$$

（2）注射机的注射量

$$n_2 = \frac{V_G - V_C}{V} \tag{6-7}$$

式中　n_2——由注射量决定的型腔数；

V_G——注射机的公称注射量（cm^3）；

V_C——浇道和浇口的总体积（cm^3）；

V——每个成型注塑件的体积（cm^3）。

生产中每次实际注射量应为公称注射量 V_G 的 0.45 ~ 0.75 倍，现取 0.6 V_G 进行估测。同样浇道和浇口的总体积 V_C 是未知值。据统计，每个注塑件所需浇注系统体积是注塑件体积 V 的 0.2 ~ 1 倍。当物料黏度高、注塑件小、型腔数多又作平衡布置时，浇注系统的体积甚至还要大。现以 $1.6V$ 作为预测估算，有

$$n_2 = \frac{0.6V_G}{1.6V} = \frac{0.375V_G}{V} \tag{6-8}$$

（3）注塑件精度　根据经验，模具每增加一个型腔，注塑件的尺寸精度要降低 4%。故有

$$n_3 = [(M - d\% \times L_Z)/(d\% \times L_Z \times 4\%)] + 1 \tag{6-9}$$

将上式简化得

$$n_3 = 2500\frac{M}{dL_Z} - 24 \tag{6-10}$$

式中　n_3——由注塑件精度决定的型腔数；

L_Z——注塑件上决定制品精度的一个典型的公称尺寸（mm）；

M——该 L_Z 尺寸的公差值的二分之一（mm）；

d——采用单型腔模具时，该种注塑件能达到的公差系数。

L_Z 可由注塑件图上取尺寸较大、精度等级最高的公称尺寸。公差系数 d 值主要取决于注塑件材料的模塑收缩率，反映收缩率波动可控范围，大致是成型收缩百分率的十

分之一。结晶型聚合物如 PA、POM 等，可取 $d=0.2\sim0.3$；无定形聚合物 PS、ABS、PC 等，可取 $d=0.05\sim0.07$。

例如：有一 ABS 的套筒注塑件，其孔 ϕ50mm 有配合要求，按 SJ/T 10682—1995 的 3 级至 6 级精度，注塑件孔的尺寸应是 $50^{+0.11}_{0}$mm、$50^{+0.14}_{0}$mm、$50^{+0.20}_{0}$mm、$50^{+0.28}_{0}$mm。其中 $L_Z=50$mm，对应 M 分别为 0.06mm、0.07mm、0.10mm、0.14mm，取 $d=0.05$ 代入式（6-10）计算得 $n_3=36$、47、76、116。若是 POM 注塑件，取 $d=0.2$ 代入后计算得 $n_3=-9$，-5，1，11。出现负值即为不能达到制品的精度要求。

（4）经济效果的限制　注射机成型全部定货的总成本是

$$K=N\left(\frac{U\theta}{3600n_4}\right)+K_F+K_G+n_4K_{M1} \tag{6-11}$$

式中　K——全部注塑件的成本费（元）；

N——注塑件定货总数；

n_4——由经济效果决定的型腔数，$n_4=\sqrt{\dfrac{NU\theta}{3600K_{M1}}}$；

U——注射机每小时的加工费，包括设备折旧、人工费、耗能等（元/时）；

θ——模塑成型周期（s）；

K_F——对于总定货，生产所消耗塑料物料，包括浇注系统凝料的总材料费（元）；

K_G——与型腔数无关的模具制造成本（元）；

K_{M1}——制造一个模具型腔嵌件的成本（元），$K_M=K_G+n_4K_{M1}$。

对于同样型号规格的注射机，由于生产厂不同，新旧不同，每小时的加工费 U 应有差异。注射周期 θ 主要根据注射工艺而定。在注塑件冷却时间确定后才能估测。模具的 K_G 成本大致上是参照标准模架价格。模具成本 K_M 也可由 K_G 乘上加工难度的扩大系数估算。其他还有模架寿命、型腔嵌件寿命、型腔嵌件置换备件、试模和修模等众多成本问题，都可以根据式（6-11）细化。

上述计算需对现有的各台注射机进行一遍。将每台注射机的四种型腔数进行比较，存在一个可行的型腔数。只有对所有注射机上的花费总成本进行比较，才可获得最小的也就是最佳的可行的型腔数 n_w。计算工作量是很大的。

2. 一般计算方法

先进行 n_1、n_2 和 n_4 综合考虑，初步拟订最经济型腔数，再经精度、模板尺寸等校核后确定，然后可计算注塑件生产总成本。若型腔数

$$n=\frac{Q}{q} \tag{6-12}$$

式中　Q——注射机的技术参数，前述 F 或 G；

q——与 Q 对应的注塑件的技术参数，前述 A 或 V。

将 Q/q 替代式（6-11）中的型腔数 n_4，得

$$K=N\frac{U\theta q}{3600Q}+K_F+K_G+\frac{Q}{q}K_{M1} \tag{6-13}$$

当 $\mathrm{d}K/\mathrm{d}Q=0$ 时，注塑件的成本最低，即

$$-\frac{NU\theta q}{3600Q^2}+\frac{K_{M1}}{q}=0$$

得

$$\frac{U}{Q^2}=\frac{3600K_{M1}}{Nq^2\theta} \tag{6-14}$$

由此，可安排计算步骤如下：

1）由已知 N、q、θ 和 K_{M1} 计算得式（6-14）右侧数值；

2）将现有的各台注射机 U 和 Q 计算式（6-14）左侧数值，列成表格存放，供查阅；

3）用计算的数值对照表格数值，选定数值最相近的那台注射机；

4）计算 $n=Q/q$，得初拟的型腔数；

5）对其余的技术参数例如注塑件精度、模板尺寸等加以校核，确定最经济型腔数 $n_w \leqslant n$。

［**例**］ 总定货量 $N=3\times10^6$ 件注射制品。每一型腔所需锁模力 $q=180\mathrm{kN}$，注射机锁模力 $Q=3000\mathrm{kN}$。注射机每小时运行成本 $U=28.5$ 元。每个型腔嵌件成本 $K_{M1}=2530$ 元。拟订的循环周期 $\theta=30\mathrm{s}$。试确定最经济的型腔数。

［**解**］ 计算现有的各台注射机的特征参数，其中有一台锁模力 $Q=3000\mathrm{kN}$ 的注射机，有

$$\frac{U}{Q^2}=\frac{28.5}{3000^2}\text{元}/[\mathrm{h}\cdot(\mathrm{kN})^2]=0.0317\times10^{-4}\text{元}/[\mathrm{h}\cdot(\mathrm{kN})^2]$$

$$\frac{3600K_{M1}}{Nq^2\theta}=\frac{3600\times2530}{3\times10^6\times180^2\times30}\text{元}/[\mathrm{h}\cdot(\mathrm{kN})^2]=3.14\times10^{-6}\text{元}/[\mathrm{h}\cdot(\mathrm{kN})^2]$$

$$n=\frac{Q}{q}=\frac{3000}{180}=16.6$$

经其余参数校核，取型腔数 $n_w=14$。

3. CAD 计算法

按现有注射机台数编号设为变量 I，建立注射机参数的数组。先输入注塑件订货总数 N、各台注射机的锁模力 $F(I)$、制造一个模具型腔嵌件的成本 K_{M1}、与型腔数无关的模具制造成本 $K_C(I)$ 等；再循环计算每台注射机的 $n_1(I)$、$n_2(I)$、$n_4(I)$、n_3，取它们的最小值为可行的型腔数 $n(I)$；计算对应的总成本 $K(I)$，比较各台注射机生产的总成本。运行计算机程序见图 6-7，得 $K_{min}(I)$。其对应注射机上的 $N(I)$，即为最经济的型腔数 n_W。

用最经济型腔数的实际加工成本的方程式计算结果分析，见图 6-8。塑料材料费 K_F 一般不受型腔数 n_W 的影响，除非浇注系统有特殊的设计。模具成本 K_M 随着型腔数增加而增大。注射费用 K_U 随着型腔数增加反而减小。对于某台注射机存在最经济的型腔数 N_W，可获得最低生产成本 K_{min}。并不是型腔数越多经济效益越好。根据实践，按上述理论得到最经济型腔数指定的模具设计方案，比较主观“经验”推断型腔数，总成本往往能降低 10% ~20%。

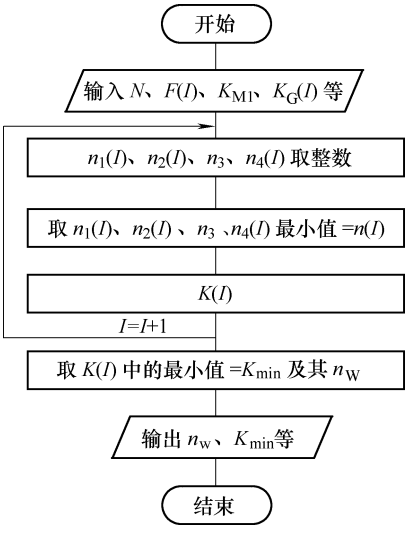


图 6-7　最经济型腔数的 CAD 程序框图

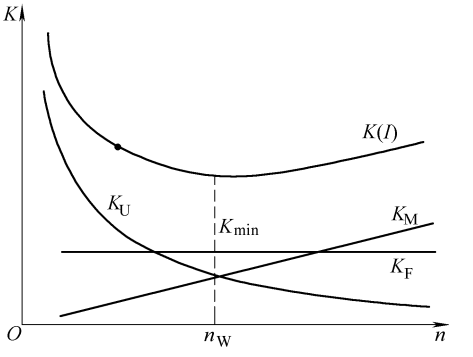


图 6-8　注射成型中各项成本与型腔数的理论关系曲线

6.2.2　热流道注射成型的成本分析

热流道模具生产的成本分析，是热流道技术的使用合理与否的一个方面。成本分析的目的是确定采用热流道是否有利可图。成本分析必须包含所有的费用。

在现代塑料加工生产条件下，生产者面临着使用热流道模具还是传统的冷流道模具的选择。面对注塑件生产批量的成本分析，将会使这个选择有更大利润。只有当成本上差异不大时，热流道系统的优缺点，才成为重要的考虑因素。经验数据表明，对于完全去除了冷流道系统的成本，目前国际上认为一个注射点平均成本为 750 ~ 1000 英镑。热流道技术首先应该使用在需要节约塑料和缩短注射周期的场合。而对于大型的单型腔模具，热流道技术使用的目的是为了减小塑料熔体注射充模的流程比，保证大型注塑件的质量。

1. 成本分析

对于不同类型浇注的成本比较，有如下的描述参量。

A——原材料价格（元/kg）；

B——年产量（件/年）；

C——模具的生产年限，也即折旧年限（年）；

D——注塑件的重量（kg）；

n——型腔数；

F——注射成型成本（元/h），包括注射机的折旧费，和水及电能的运行成本；

G——人工成本（元/h），包括薪金和社会保险成本；

H——模具价格（元）；

θ——注射周期（s）；

J——流道赘料质量（kg）；

K——回头料价格（元/kg），回头料成本约为原材料价格的30%；

L——模具维修成本（%/年），大约为模具成本的5%；

M——模具价格的利息（%/年），现约为20%。

1）材料成本（元/千件）：

无流道凝料

$$K_{\mathrm{m}} = AD \times 1000 + \frac{(A-K)J}{n} \times 1000$$

流道凝料循环利用

$$K_{\mathrm{m}} = AD \times 1000 + \frac{KJ}{n} \times 1000$$

回头料的成本较低，但循环使用使制件质量有累积性的降低。对制品有质量要求时，不允许用回头料，例如食品和药品的包装、医用注射器和渗析器等。有回头料的生产过程节约原材料与无流道凝料的热流道生产相比，对于降低塑料成本并不明显。

2）制造成本（元/千件）：

$$K_{\mathrm{w}} = \frac{(F+G)\theta \times 1000}{3600n}$$

3）模具成本（元/千件）：

$$K_{\mathrm{f}} = \frac{H}{B}\left(\frac{1}{C} + \frac{L+M}{100}\right) \times 1000$$

由以上三项得注塑件的总成本（元/千件）

$$K_{\mathrm{p}} = K_{\mathrm{m}} + K_{\mathrm{w}} + K_{\mathrm{f}}$$

2. 实例

下面讨论一模八腔的熔体传输方案如图6-9所示。

图6-9a所示为具有冷流道和边缘式浇口，为单分型面的模具结构，也能用潜伏式浇口。

图6-9b所示为开放式的主流道单喷嘴，消除了主流道赘料，也可缩短主流道的长度。此方案可使主流道和流道废料减少约40%，注射周期减小约10%。

图6-9c所示为应用流道板和两个开放式喷嘴。与图a设计相比较，主流道和流道赘料减少60%～70%。

图6-9d所示为每个型腔都用热流道喷嘴供料，去除了冷流道，允许降低注射温度，

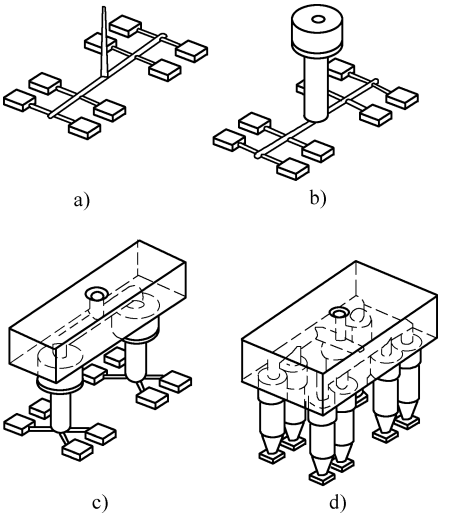


图6-9　一模八腔模具的熔体传输方案

a）冷流道　b）、c）热流道与冷流道组合　d）热流道

并进一步缩短循环周期。注塑件在中央顶端被浇注，能让壁厚减薄，不再需要回收废料。这方面的费用可添补到设备上去。但模具成本相对较高，注塑件超过一百万，才能获得盈利。

现将图 6-9 所示为一模八腔注射模的熔体传输方案。四个传输方案如前述。考虑三种批量的计划：三年内生产一百五十万件、三百万件或六百万件。

（1）计算过程假设

1）由于易于自动化，因使用热流道模具生产的单件成本是较低的，制造生产成本无需因热流道应用而提高。

2）热流道的控制装置的折旧计入到设备的成本中。

3）废料循环的材料成本，不应用在此例中。

表 6-12　一模八腔注射模的四种传输方案成本比较

代号	项目	单位	总产量	图 6-9a	图 6-9b	图 6-9c	图 6-9d
A	原材料价格	元/ kg		2. 5			
B	年产量	件/年	150 万件	50 万件			
			300 万件	100 万件			
			600 万件	200 万件			
C	模具的折旧期	年		3			
D	注塑件的重量	kg		0. 005			
E	型腔数			8			
F	注射成型成本	元/h		8. 3			
G	人工成本	元/h		4. 2	3. 8	3. 3	1. 7
H	模具价格	元		16400	18000	23300	34200
θ	注射周期	s		20	18	17	16
J	流道赘料	kg		0. 009	0. 0075	0. 002	0
K	回头料价格	元/ kg		0. 8			
L	模具维修成本	%/年		5			
T	模具价格利息	%/年		20			
K_m	材料成本	元/千件		14. 4	14. 1	12. 9	12. 5
K_w	制造成本	元/千件		8. 7	7. 6	6. 8	5. 6
K_f	模具成本	元/千件	150 万件	19. 0	20. 9	27. 0	39. 7
			300 万件	9. 5	10. 4	13. 5	19. 9
			600 万件	4. 8	5. 2	6. 8	9. 9
K_p	制品成本	元/千件	150 万件	42. 1	42. 6	46. 7	57. 8
			300 万件	32. 6	32. 1	33. 2	38. 0
			600 万件	27. 9	26. 9	26. 5	28. 0
	成本降低	%	150 万件		—	—	—
			300 万件		1. 5	—	—
			600 万件		3. 6	5. 0	—

（2）按表 6-12 计算结果对各方案的成本讨论

1）150 万件批量，使用热流道并不合理。

2）300 万件批量，与图 6-9a 方案比较，使用图 6-9b 方案模具可降低 1.5% 成本。

3）600 万件批量，使用图 6-9b 种方案模具可降低 3.6% 成本；使用图 6-9c 种方案模具，可降低 5% 的成本。采用八个喷嘴的完全热流道系统图 6-9d 种方案模具，生产成本提高了 0.35%。但是还应该从制品质量和加工的技术优势方面评估 d 方案的使用。

4）以上是成熟的热流道注射生产条件下的成本分析。对于初次起步，包括采用热流道，或引进热流道与冷流道组合，其费用分析包括直接花费和间接的生产成本和投资。以下的费用必须计入：

① 购买热流道系统的设备。

② 购买所需的机械设备，大多数情况下指购买注射机。

③ 自动化工作的装备，或提高自动化操作效率的设备。例如快速钳取的机械手、下落注塑件的传输装置、贴标签的装置等。

④ 购置监视注塑件脱模顶出的设备。

⑤ 强化热流道系统操作的加工设备（循环热态仪、磁性栅架、专用喷嘴等）。

⑥ 维修费用（替换损坏的加热器和密封件等）。

⑦ 员工培训费用。

6.3 注射模具的成本概算

注射模具大都是单项制造，具有新产品开发研制的特征。影响模具价格的因素多，成本概算较为困难。注射模具生产周期短，早期成本估算很重要。

6.3.1 注射模具的早期成本简易估算

成本的早期概算在制品开发周期中起重要的作用。虽然模具成本占总注射制品成本的比例不大，但是模具的设计阶段的众多因素，会牵涉到制品成本的 70% ~80%。如果在模具设计初期做些必需的修正，就可以节省制品成本，提高制品的质量和生产率。为了达到这个目的，制品成本必须在早期就做出精确的概算。制品成本是许多成本的总和，例如材料成本、加工装备成本、直接劳动力成本、管理经营费用和工程成本。

对模具制造者，注射模的早期成本估计尤为重要。模具制造公司接洽持有制品设计图的客户时，行情工程师要在短时间内，根据给出的制品的加工需求，做出初步设计，例如型腔数目、分型面和模架等。估算出模具成本的关键是评估的准确性。如果评估价格比实际成本低很多，公司接单生产将会面临损失；另一方面，如果估价高于实际成本，公司将会失去生产订单。目前，工程师主要通过经验来进行估价，这样很可能导致估价不准确和不一致。成本估算是制造工程师的职能。在模具设计中，设计工程师的制造和成本知识有限。很明显，对于模具行情工程师和设计工程师，都需要有又快又好的早期成本概算系统工具。

1. 影响模具价格的因素

（1）生产成本　生产成本是模具价格的主要组成部分，是影响价格的主要因素。同一副模具在不同的企业中制造，尽管价格中所包含的因素一致，但是机械化加工程度、手工操作比例大小，生产工艺路线合理状态等有区别，因而所用的费用却不尽相同。随着产品质量的不断提高，对模具的规格和精度要求日益提高，迫使模具生产厂必须配置高精度机床，以机电加工代替手工操作。制造成本的降低要依靠合理的设计、加工流程和标准件利用率、零部件系列化来实现。同时，对于如何减少试模次数、降低试模成本，也是降低生产成本的重要环节，CAE/CAD/CAM 用于模具制造业，大大减少了试模次数、提高了试模的成功率。

（2）供货周期　模具制造厂向产品厂提供模具的周期是该厂新产品能否尽早问世的重要条件之一。模具供货周期与模具销售价格有着直接的关系。供货时间相对缩短，模具价格相对提高，是模具产品社会效益的具体体现。这种良性循环，使新产品及早问世，也迫使专业模具厂以各种手段缩短生产周期。更新设备、改进加工手段，向时间要效益成为模具厂的奋斗目标之一。它也将促进模具行业提高水平。因此，供货周期缩短带来的模具价格上浮这一现象，在模具价格变化中表现突出，并成为模具估价的一个重要组成部分。

（3）市场状况　处于激烈的市场竞争中，产品更新换代周期很短，电子信息类新产品层出不穷，模具随之翻新、改型。一副前所未有的模具设计思想、基本结构或型腔造型，提供了有独到之处的新产品或配件，在市场上独占鳌头，即使它的加工成本与一副相类似的模具成本相同，它的价格也应相对提高。因为它为新产品赢得了市场，它使产品创出了一个“新”字。这种模具价格的浮动，无疑是符合市场经济竞争规律的。

（4）高技术成分　模具是注塑件批量生产的基础工艺装备。作为技术密集型产品，模具估价方法中必然含有模具高技术成分，以体现价格与价值彼此相应的发展原则。我国的模具市场价格还低于国际市场，影响了模具行业的技术进步。难度越大的模具，它的技术附加值越高。高技术成分在价格中占的比例约占 10% ~30% 或更高。把模具的技术价值，作为重要组成部分计算在价格之中，以体现高技术、高精度模具的技术价值，是市场竞争中模具工业发展的重要环节。

（5）模具寿命　一种新产品通常在不断更新改型中得到完善，产品寿命决定了模具的计划寿命，因此，并非模具寿命越长越好。寿命值剩余过多的模具，因产品改型而被搁置，本身也是一种浪费。模具的价格与预期寿命有直接关系。我国模具标准中明确规定大中型注射模具一般寿命为 10 万次，中小型为 15 ~20 万次。但是，有的新产品预期生产只有几万次甚至更少。寿命要求不高，在保证同样精度的情况下，可以降低制造成本，对产需双方都有利。在日新月异的产品更新年代，模具预期寿命影响模具价格的问题不容忽视。

2. 早期成本简易估算

模具制造从一种辅助工艺装备的生产行业发展成为直接面向市场的基础工业。模具作为产品，商品化的模具价格，已成为供需双方共同关心的问题。在多年经营、制造实

践中，形成了三种行之有效的简易估算法，现介绍如下。

（1）经验估算法　依照模具价格组成的基本原则

模具价格 = 完成成本 + 税金 + 利润

= (材料费 + 工本费) + 税金 + 利润

其中通常按下列比例估算：

1）模具原材料及标准件占模具总费用的 20% ~30%；

2）工本费包含模具设计费和加工费，占总价格的 70% ~80%；

3）税金：上缴所得税金是利润的 35%，增值税是增值部分的 17% 。

模具估价时所得利润率为产值的 15% ~30%。对于大中型复杂模具适当增加，一般利润率取产值的 20% ~35%。

模具制造成本与制造时间有着密切的联系，可参考表 6-13。生产周期长短可以直接影响该模具盈利的多少，即实际生产周期短于预计周期时，实际盈利将大于预计盈利，反之亦然。因此，有必要对模具制造所需时间与占用的成本比例有全面了解，以便合理安排生产工艺，作为价格估算的依据。

表 6-13　模具制造时间与成本的关系

分　　类	占用时间(%)	占有成本(%)
模具设计	10	5 ~15
材料和备料	5	15 ~25
常规粗加工	10	10
型腔加工	40 ~60	30 ~50
手工加工及研抛	5	5
试模	10	5

（2）模架价格系数法　模具设计方案确认后，模具基本结构和几何尺寸可初步确认，模架规格随之可知。可以由模架制造厂供应此种规格模架的价格，作为估算模具价格的依据。每模具所需模架费用是基数，只要乘以相应的系数即可。因此，根据经验可得

模具价格 = (2. 5 ~6) × 模架费

在模具结构比较简单的情况下，系数可以取小值；型腔及结构较为复杂的模具，要取偏大值。这种估算方法简单易行，在模具行业中广泛使用。

（3）类比法　成本概算基于相似性原理。使用基本成本价的典范，再计入各种成本因子，例如尺寸和复杂性对成本的影响。最终的成本和变化的成本因素之间，假设是线性的关系。

尽管注射模具多是单件生产的产品，但在市场需求量大的品种上市时，经常出现要同时生产两副模具以上的情况。这时，类比第一套进行估价，用户可以接受。

也有这种情况，市场需求量特大的产品，许多厂家都竞相开发类似的模具投放市场。这时，该产品在一段时间内形成了固定的价格，各企业之间都遵守这个价格，只在

小范围内上下浮动。比如，在一段时间内啤酒周转箱模具，价格在 7 ~ 8 万元，汽水周转箱模具价格在 5 ~ 6 万元内变动等，这时的模具估价，就要遵守市场价格规律办事。

市场价格随着市场变化和其他因素的影响而变化。比如，计算机或电视机的显示器模具定价，以每英寸几万元为基数，所做的屏幕在逐步扩大，从 14in 已开发到 29in 甚于 34in（1in = 25. 4mm），将基数乘屏幕尺寸，可估算市场价格。当然，在估价过程中，随着同类模具难度提高，原材料、能源及其他费用提高，也是要考虑的重要因素。

6. 3. 2　注射模具价格计算法

注射模价格的简单估算法，是多年来广大模具工作者在实际工作积累、并广泛流传使用的一些经验。由于注射模具品种规格繁多，技术特性千差万别，各地价格的制定又多缺乏科学依据，难以将各种复杂的技术因素估计得当。针对此种现状，中国模具行业协会经营管理委员会推荐如下模具价格详细计算方法。

1. 注射模具价格构成

商品价格由产品成本、流通费用、税金和利润构成。模具作为一种商品，在市场上流通情况大不相同。供需双方直接见面定价成交，使价格中不含流通费用只含销售费用。模具销售价格可表示为

$$M = M_e + m = M_0 + e + m \tag{6-15}$$

式中　M——模具销售价格（元）；

M_e——模具销售成本（元）；

e——模具销售费用（元）；

m——税金利润（元）；

M_0——模具生产成本（元）。

模具生产成本是模具在制造过程中所发生的各种费用之和。有

$$M_0 = G + D + C + Q + W + E + U + F \tag{6-16}$$

式中　G——人工费（元）；

D——设计及技术服务费（元）；

C——材料费（元）；

Q——能源费（元）；

W——管理费（元）；

E——专用工具、工装费（元）；

U——试模费（元）；

F——试制性不可预见费（元）。

式（6-16）中构成模具生产成本项主要是根据模具生产独有的“单件试制性”和“技术、资金、劳动力三密集”特点而单项列支的。模具的实际生产成本在与需方定货时，只是各种成分逐项统计的汇总估算，待模具制成后方可得出详细准确的结算。

2. 注射模具价格计算方法

注射模具的主要零部件是动模、定模、型腔和型芯，采用优质模具钢，经过多道工

序加工而成。设定采用常规制造工艺流程是：铣削（仿形铣、数控铣、工具铣）、电加工（电火花成形、线切割成形）、磨削（成形磨、坐标磨），经模具钳工研修、抛光、装配，再经反复试模与修整，直至严格检验合格后才算完成模具的制造过程。

注射模具销售成本的主要成分是人工费 G 和原材料费 C，只要设法通过有关公式将这两项费用计算出来，注射模具销售成本的主体就出来了。

同时，注射模具设计工作量的大小与制件的复杂程度、精度、模具结构等因素有关，而制件质量及模具状况又与模具的制造工时有关。因此，注射模具设计费 D，通常与注射模具的人工费 G 之间有一线性关系，即

$$D = dG \tag{6-17}$$

式中 d——注射模具设计费系数，见表 6-21。

因此，注射模具的销售成本还可以写成

$$M_0 = G(1 + d) + C + Q + W + E + U + F \tag{6-18}$$

（1）人工费 G 计算式 在注射模具中，从设计投产、备料至试模合格验收为止，所发生的全部工时费用总和为

$$G = A\sum T \tag{6-19}$$

式中 $\sum T$——型腔模具制造全过程中的总工时（h）；

A——型腔模具制造中单位工时的平均金额（元/h）。

根据模具规格大小、结构繁易、精度高低的不同。影响制造总工时 的最主要因素有

1）制件外形长、宽和高的尺寸；

2）制件几何体的复杂程度；

3）制件精度；

4）模具成型部位表面的粗糙度；

5）模具结构等。

因此，注射模具制造总工时的计算公式可表示为

$$\sum T = T_0K_1K_2K_3K_4(1 + K_5) \tag{6-20}$$

式中 T_0——注射模具制造基点工时（h），表 6-14；

K_1——注射模具型腔深度系数，表 6-15；

K_2——注塑件形状复杂系数，表 6-16；

K_3——注塑件精度系数，表 6-17；

K_4——注射模具成型部位表面粗糙度系数，表 6-18；

K_5——注射模具结构系数，表 6-19。

（2）基点工时 T_0 用于计算注射模具制造总工时 $\sum T$ 的基础参数，称之为基点工时。表 6-14 中列出了直浇口塑料注射模具标准模架常用规格的制造基点工时 T_0 值。

注塑件在开模方向上的投影面积决定着模具动、定模的周边尺寸。例如，两个几何体相似的注塑件，它们在开模方向上的投影面积不同，则它们相应的模具规格就不同。

各种规格模具的基点工时中，均含有模具加工的不可预见及自然工时费。

表 6-14　直浇口塑料注射模具的模架制造基点工时 T_0

模具规格	自制模架 T_0/h	模具规格	自制模架 T_0/h
1215	186	3035	268
1520	196	3545	309
1820	202	4550	369
2020	210	5063	441
2030	216	6380	617
2330	234	8090	926
2530	240	9010	1277

在尚无模具施工图而只有制件图或注塑件样品的情况下，可用下列经验公式近似确定该制件相应的模具规格。

$$L = l/I \tag{6-21}$$

式中　L——模具的定模边长（mm）；

l——制件在开模方向上的投影边长（mm）；

I——系数，$I = 0.6$。

（3）型腔深度系数 K_1　模具型腔深度不等，加工工时自然不相等。如果两个制件投影面积相等，制件高度不等，加工较深型腔所需要的工时较多。如果深度相等，但它们在开模方向上投影面积不等，在一般情况下，加工投影面积大的型腔，比加工投影面积小的型腔较为容易。因此，选择深度系数要考虑制件在开模方向上的投影面积。

如表 6-15 所示，在选择型腔深度系数 K_1 时，要以制件最大轮廓尺寸，算出它在开模方向上的投影面积，作为型腔的横截面积。以制件在开模方向上的最大高度，作为型腔的最大深度。然后在相应的面积和深度范围内选取相应的型腔深度系数 K_1。一模多腔时，要以相对加工量最大的一个型腔横截面积和深度为依据进行选择。

表 6-15　型腔深度系数 K_1

型腔深度/mm	型腔横截面/mm²					
	<1000	1000～5000	5000～10000	10000～22500	22500～40000	>40000
≤10	1.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
>10～20	1.12	1.08	1.04	1.03	1.03	1.02
>20～30	1.24	1.16	1.08	1.06	1.06	1.04
>30～40	1.36	1.24	1.12	1.09	1.09	1.06
>40～50	1.50	1.32	1.10	1.12	1.12	1.08
>50～60	1.62	1.40	1.20	1.16	1.16	1.10
>60～70		1.48	1.24	1.20	1.20	1.12
>70～80		1.58	1.30	1.24	1.24	1.14
>80～90		1.65	1.36	1.28	1.28	1.16
>90～100		1.75	1.42	1.32	1.32	1.18

（续）

型腔深度/mm	型腔横截面/mm^2					
	<1000	1000～5000	5000～10000	10000～22500	22500～40000	>40000
>100～125		2.00	1.48	1.38	1.38	1.20
>125～150		2.35	1.56	1.42	1.42	1.22
>150～175			1.64	1.50	1.50	1.24
>175～200				1.58	1.58	1.26
>200～250				1.68	1.68	1.30
>250～300				1.80	1.80	1.36
>300～400				1.94	1.94	1.44
>400～450				2.10	2.10	1.60

（4）注塑件形状复杂系数 K_2　制件形状复杂程度系数 K_2 见表 6-16。按照国家标准制图的正规制件图样，图面标准尺寸应不会重复出现。通常情况下，制件尺寸数目量越多，则制件的几何形状越复杂（非圆曲面的情况除外），与注塑件相应的模具型腔几何形状复杂程度就越大。

表 6-16　制件形状复杂系数 K_2

制件尺寸数目	≤10	10～20	20～30	30～40	50～60	6070	70～80	80～90
K_2	1.00	1.10	1.20	1.25	1.50	1.65	1.80	2.00
制件尺寸数目	90～100	100～120	120～150	150～200	200～250	250～300	300～400	400～500
K_2	2.20	2.70	3.25	3.90	4.30	4.40	4.60	4.90

在选取 K_2 值时，须遵循以下几点规定：

1）当制件几何体有非圆曲面时，其非圆曲面部分按 100～150 个尺寸数目计；

2）当制件上有螺纹时，螺纹的每个尺寸要素按 5 个尺寸数目计；

3）当一模有两个不同制件型腔时，总尺寸为二者之和；

4）当一模有几个相同型腔时，总尺寸数目等于一个制件尺寸数目的几倍。

（5）注塑件精度系数 K_3　注塑件精度要求直接影响着总工时的多少，高精度的模具才能生产出高质量的制件。但是，有了高精度的模具，也会因制件材质不同而使制件达到的精度不同。为此，通常以工程塑料所能达到的精度等级为依据。塑料精度等级，见本章的表 6-1 和表 6-2。根据这两个表可在表 6-17 查得注塑件精度系数 K_3 值。其步骤：

1）依照制件材质由表 6-1，确认注塑件的一般精度等级。

2）将制件图上所标注的尺寸公差值与表 6-2 中相应的精度等级逐一对照，并将制件图上的小于精度等级公差值的尺寸数目逐一累计。

3）依据累计的比“一般精度”提高了的尺寸数目在表 6-17 中选取相应的精度系数 K_3 值。

表 6-17　注塑件精度系数 K_3

说明	制件尺寸精度相对于一般精度				
	制件上最高的尺寸精度为一般精度	5 个或少于 5 个尺寸的精度提高一级	6 个 ~ 10 个尺寸的精度提高一级	11 个 ~ 20 个尺寸的精度提高一级	多于 20 个尺寸的精度提高一级
K_3	1.00	1.05	1.10	1.20	1.30 ~ 2.00

（6）成型部位表面粗糙度系数 K_4　其值见表 6-18。型腔或型芯表面粗糙度的等级，一般要比制件本身要求的表面粗糙度低一级。

表 6-18　模具成型部位表面粗糙度系数 K_4

Ra/μm		0.800	0.400	0.200	0.100	0.050	0.025	0.012	0.008
K_4	型腔和型芯全部表面	1.00	1.05	1.10	1.20	1.32	1.58	2.00	3.00
	型腔或型芯全部表面	1.00	1.025	1.050	1.10	1.160	1.300	1.500	2.00
	型腔和型芯局部表面	1.00	1.012	1.025	1.050	1.080	1.150	1.250	1.50

（7）型腔结构系数 K_5　涉及模具结构方面的要素很多，很难将所有要素全部包含在模具结构系数之中，只能择其中最主要、最普通的结构要素取而代之。在表 6-19 中包含了三个最主要、最普通的结构要素，即侧抽芯、主分型面及开模次数。其相应的系数称为“子系数”，并分别以代号 K_{51}、K_{52}、K_{53} 表示。其相互关系为

$$K_5 = K_{51} + K_{52} + K_{53} \tag{6-22}$$

表 6-19　型腔结构系数 K_5

结构要素	侧抽芯									主分型面		开模次数		
	无	1 处		2 处		3 处		4 处		平面	非平面	1 次	2 次（点浇口）	3 次
		全部	局部	全部	局部	全部	局部	全部	局部					
$K_5 = K_{51} + K_{52} + K_{53}$	K_{51}									K_{52}		K_{53}		
	0	0.15	0.10	0.25	0.15	0.35	0.20	0.45	0.25	0	0.12	0	0.15	0.20

需要说明的是注射模具内外抽芯的方式很多，结构也相应不同。在表 6-19 中的侧抽芯系数 K_{51} 是以最通常采用的斜导柱与滑块方式为基础而设定的。如果遇到模具采用其他侧向分型抽芯机构时，K_{51} 值可以适应修订。侧向分型机构视为侧抽芯结构。

（8）单位工时平均金额 A　式（6-19）中单位工时平均金额 A 是计算型腔制造工时费 G 的重要参数。如果从企业完全成本 M_e 中去掉原材料费 C、设计费 D、专用工具费 E、试模费 U、销售费 e 这五项费用后，所余下的那部分成本暂且称为“不完全成本”，A 就是企业不完全成本与企业实际工时之比值，即

$$A = \text{不完全成本/实动工时}$$

由于各企业在人员结构、设备配置、管理水平等诸方面的情况不尽相同，因此，各企业间的 A 值也就不同。即使是同一企业，随着时间的推移，企业内部结构的变化，A 值也是不断变化的，有必要在一段时间内进行修订。可见，A 需要根据本企业在一段时

期内的具体情况予以测算。因此，在这里很难给 A 赋予一个固定值。

在测算 A 值时还应考虑以下两点：其一，模具作为技术密集型产品，在它的价格中应反映出技术价值，应含有适当比例的高技术成分；第二，中小型模具与大型模具均有采用精密设备加工的可能，但采用的设备规格不同，因此 A 值也应有些差异。

3. 材料费 C 计算公式

注射模具材料费 C，是指制造一副模具所需全部金属材料的购置费用。当外购标准模架时，模具材料费等于模架购置费、模具标准件购置费、部分耗用钢材费（含锻件费）等三部分费用之和。

当自制模架时，模具材料费等于所有耗用钢材费（包括不同牌号钢材及锻件费），和其他标准件购置费这两项之和。可用如下公式来表示

$$C = P(1 + K_b)a_1 + \sum a_{2i} \tag{6-23a}$$

$$K_b = K_{b1} + K_{b2} + K_{b3} + K_{b4} + K_{b5} + K_{b6} \tag{6-23b}$$

式中 C——材料费（元）；

P——模架毛质量（kg），$P = 1.3P_o$；

P_o——模架质量（kg）；

K_b——与模具结构有关的材料质量修正系数，见表 6-20；

a_1——模具钢材单价（元/kg）；

$\sum a_{2i}$——模具标准件费用总和。

表 6-20 与模具结构有关的材料修正系数 K_b

结构要素		修正系数 K_b	
推出制件	推杆(管)推出	K_{b1}	0.15
	推件板推出		0.20
浇口	直浇口	K_{b2}	0
	点浇口		0.25
镶件	仅动模有镶件	K_{b3}	0.20
	定模、动模均有镶件		0.30
主分型面	为平面	K_{b4}	0
	为非平面		0.15
侧抽芯	无	K_{b5}	0
	有		0.05
侧抽芯方式	无	K_{b6}	0
	斜导柱		0.10
	斜滑块		0.15

每副模具使用的钢材有多种，而其中以中碳钢为多。将各种牌号钢材费用积累起来，便可得到模具材料的总费用。

4. 销售价格计算中的其他参数

除人工费 G 和材料费 C 的计算外，下面逐项分析其他参数。

（1）型腔模具设计费系数 d　模具生产厂承接模具制作时，在图样方面通常存在着以下三种情况：其一，订货方自带模具施工图，模具厂只需对现在图样进行审核，制订出加工工艺便可加工。第二，订货方提供制件图，模具厂依据注射制品图设计模具施工图并加工模具；第三，订货方只提供注塑件样品，模具厂需对制件样品进行测绘，然后经订货方签字认可，再进行模具设计及加工。

针对这三种情况，模具设计费系数 d 应有所不同，见表 6-21。

表 6-21　模具设计费系数 d

设计分类	审核模具图样	依制件图设计模具图	依制件样品设计模具
d	0.02 ~ 0.04	0.12 ~ 0.14	0.14 ~ 0.16

在样件测绘过程中，如果采用普通测量手段可依照该表系数。若采用三坐标测量仪等高精度测绘手段时，d 值应有所变化。其费用可由双方协商确定。

（2）模具利润 r_1、税率 r_2、利税率 r_0　目前模具行业的平均成本利润率、综合税率及利税率，如表 6-22 所列。

表 6-22　模具的利润率、税率及利税率

成本利润率 r_1	综合税率 r_2	利税率 r_0
20% ~ 30%	10% ~ 15%	25% ~ 35%

在式（6-15）中，税金利润 m 可分解为税金 m_1 和利润 m_2，有如下定义表达式

$$\text{成本利润率 } r_1 = \text{税金 } m_1 / \text{销售成本 } M_e$$

$$\text{综合税率 } r_2 = \text{利润 } m_2 / \text{税金利润 } m$$

$$\text{利税率 } r_0 = (\text{税金 } m_1 + \text{利润 } m_2) / \text{销售价格}$$

各企业实际生产中情况不同，其率值将有所差异。由于模具规格大小、精度高低、加工难易程度等因素，也促使利润率值上下浮动。

（3）模具专用工具费 E　模具制造过程中所涉及的专用工具，主要有专用特型刀具，电火花加工用电极，仿形铣用模型，以及必要的样板等。这些专用工具费用主要由制造过程中所需工时费及材料费构成。

（4）试模费 U　试模是模具制造过程中重要的工序。当专业模具厂没有合适的设备供试模时，则需要外协试模。这样，每进行一次试模，都需要试模运输费和设备使用费，此时试模费用将有所增加。

通常大中型模具试模次数在 3 ~ 5 次，中小型模具为 1 ~ 3 次。随着 CAE/CAD/CAM 技术的推广使用，试模次数将逐步减少，试模费比例逐步缩小，加工周期随之缩短。

（5）不可预见费 F　注射制品曾经制造有模具，并已经注射生产。这类模具生产比较顺利。注射制品安装在新开发产品上，注塑件的设计和加工有试制的性质，必然存在着一定的风险。需要一些预想不到的费用，其金额大小很难估计。大型复杂模具风险更

大。因此，每副模具的销售价格中，含有适当比例的不可预见费是合理的。根据本企业的实际情况，将该费用控制在模具销售价格的 3% ~5% 为好。各企业也可根据模具的实际情况，双方协商确认。

6.3.3 系统网络早期概算注射模具成本

注射模具的零部件设计和制造的成本评估，要比注射加工注塑件困难得多。这是由于设计注射模具本身就是项艰巨的任务，影响模具成本的因素是多维的。成本和这些因素之间关系也是复杂和非线性的。因而，如果不能发展基于数学及科学原理的精确分析模式，将会是十分困难的。另一方面，模具行业非常希望有个精确的计算机模式，快速地完成模具成本概算。成本函数的近似处理方法，必将成为发展注射模具成本早期概算的工具。

系统网络的成本函数应用了近似引导方法。它根据制品设计所涉及模具制造工艺的成本的关系，并以模具加工实际构成为成本的组分。参照注射制品与模具成本的历史数据，处理设计成本与制造成本有关的因子之间的近似关系。

在本节中，首先介绍成本函数用于系统网络的处理方法；然后按模具零部件设计及其与制造关系，识别成本因子，陈述历史资料和成本数据的使用，了解近似的成本函数使用系统网络的过程。

1. 应用系统网络的近似成本函数

成本函数近似处理方法中主要有两个阶段。首先是数据准备阶段，定义成本函数的变量，并收集历史数据。第二阶段，系统网络的近似函数建立和使用。

（1）定义成本函数的变量　数据准备，定义成本函数变量的步骤如下。

1）塑料制品/模具零部件的邻域需要定义。常定义整段时间的某公司生产的制品/零部件，应选择在材料成本和制造技术/业务关系稳定的时间段。

2）在设计工作中需要确立所有成本关系因子（cost-related factors，CFs）。定义邻域内所有制品/零部件，都应确定成本关系因子 CFs。

3）每个 CFs 的数量都要建立量化方案。有两种类型的 CFs。第一种是连续的数量值。它能被简单的规准量化。第二种是设计变量，一般没有任何数值被分配到每个需量化的变量。通常，依照成本因子 CF 的各个成本花费的不同状态，指定数值并不按比例关系。要求量化方案对每个成本因子 CF 的所有状态都要考虑。

4）收集历史成本数据。个案进程和范例的选择能有效用于近似函数。因此，前期生产制品/工件的工艺资料全部编入范例中。对于每个选择的范例，它的成本因子 CFs 被摘取和量化。活动性成本用于故障处理，最终建立起一系列活动成本的 {CFs} 函数。

在这一阶段结束后，应收集了一套完整的范例。每个范例点都需要设置许多 $(CF_1, CF_2, \cdots, CF_n)$→成本。设定 n 为 CFs 总数。

建立数字化范例后，在 $(CF_1, CF_2, \cdots, CF_n)$ 和成本之间设立近似函数有不同方法。这种回归方法是对近似函数的传统处理方法。通过历史数据回归分析，获得系数和

指数。然而，成本和 CFs 之间的非线性关系是未知的，这就必须作些假设。

（2）系统网络的近似函数　人工神经系统网络（artificial neural networks，NN）是使用计算机模仿生物神经系统的信息化技术。NN 的重要应用之一是可用于不明确输入与输出关系的系统模式中。通常，系统没有精确的信息，仅能研究已有实际系统的有用范例，并使网络认识它。给出固定的人工网络，用随机梯度方法，使之执行网络参量的修改，最终使损耗函数确实最小。在各种 NN 中，逆向传输 NN（back propagation NN，BP-NN）从一些范例认识输入与输出的关系，适用于近似函数。

在 BP-NN 中有输入层和输出层，在它们之间有一个到几个的隐藏层。每层都有许多过程单元，称为神经元。图 6-10 所示的三层 BP-NN 系统，只有单一输出、加权的输入和经神经元计算，再从总和减去它的临界值，并且经转换函数运算后输出结果，可用下式表达：

$$y_i = f_i\left(\sum_{j=1}^{n} w_{ij}x_j - s_i\right) \tag{6-24}$$

式中，x_j 为当前的输入，y_i 是最终的神经元的输出，w_{ij}是与 x_j相关联的加权数，s_i 为各神经元的临界值，f_i 是转换函数。w_{ij}的值决定了输入对神经元的影响有多强。在试算过程期间，权重的数量值能改变。它主要通过神经元适应新信息的机理，完成认识过程。BP-NN 参照了它们的试用算法（training algorithm），获得误差的逆向传送。这个网络开始试用时，指定所有权重的随机值，随后输入当前网络，然后从每层上的每个神经元，经过整个网络向前传送，影响实际的输出。将实际输出和它对应的目标输出估算出差异，作为输出层中每个神经元的误差。这个误差经过整个网络返回传送，在专门的神经元中，按差错的直接比例，调整联接单元的权重。通过这种网络方法减少误差。由于对每个输入范例的输出目标是已知的，所以这个试算过程也称控制试算（supervised training）。

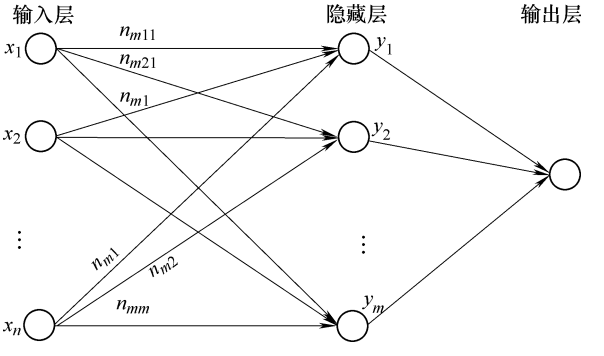


图 6-10　三层 BP-NN 系统

在 NN 的认识阶段，应设置误差的允许范围，作为停止试算的临界值。一旦试算完成，NN 设定了最终的权重和偏差，代表了近似的成本函数。给出新的制品/零部件后，先做 CFs 提取和定量，然后输入给 NN，完成成本概算。

2. 注射模的成本相关因子

与成本相关的因子 CFs 影响着模具的成本。这些因子包括模具零部件的技术要求。它从客户的要求而来，又有基于设计者提出的要求。举例说，零部件规格包括注塑件的尺寸、质量和公差、支承类型和数量、肋和凸台。同样也有相关模具零件的结构、装饰花纹及表面粗糙度。概念化模具设计的技术要求包括型腔的数目、分型面的形状。注塑

件外侧或/和内侧凹凸槽，也对应着一些滑块或/和斜顶杆的需要。

成本相关因子 CFs 的确定，主要参照模具报价、有经验的设计和制造工程师的意见。现有下列 19 个 CFs 已经被定义，这些因子被量化，将它们的作用状态，用 0 到 1 之间的数值设置到每个 CF。CFs 和它们的量化设计陈述如下。

1）型腔的数目，N。决定于概念化的模具设计阶段。型腔的数目越多，模具的价格就越高。设定公司制造模具型腔的最大数目为 16，有 $CF_1 = N/16$。

2）注射制品质量。假设公司的最大质量制品为 2000g，则有 $CF_2 = W/2000$。

3）制品在分型面上的投影面积，A /cm^2。投影面积的越大，会增加型芯和型腔板，及模架的成本。假设本公司的制品有最大投影面积 30000cm^2，则 $CF_3 = A/30000$。

4）开模方向的模具高度，H /cm。模具高度越大，会增加型芯和型腔模板的成本。假设本公司的模具最大高度 H 为 30cm，$CF_4 = H/30$。

5）模具的类型。模具的四种类型和与它们相应的 CF_5 如下。

① 冷流道两板模，$CF_5 = 0.1$；

② 冷流道三板模，$CF_5 = 0.13$；

③ 单喷嘴热流道模具，$CF_5 = 0.2$；

④ 多喷嘴（2～6）热流道模具，$CF_5 = 0.5$。

6）分型面的类型。分型面分离动模和定模。越复杂的分型面，加工的成本就越大。下面给出了分型面的六种类型和与它们相对应的 CF_6。

① 平面分型，$CF_6 = 0$；

② 单个阶梯平面，$CF_6 = 0.3$；

③ 单个的阶梯平面或简单曲面，$CF_6 = 0.5$；

④ 多于四个的阶梯平面，$CF_6 = 0.63$；

⑤ 复杂的曲面，$CF_6 = 0.75$；

⑥ 有阶梯的复杂的曲面，$CF_6 = 1$。

7）定模上滑块机构的数量，NS_{cavity}。滑块机构垂直开模方向，从注射制品外侧凹槽中抽出。滑块机构组装到型腔，需要液压力来抽拔，因此增加了成本。假设在模具型腔上滑块机构的数量最多为 2，则有 $CF_7 = NS_{cavity}/2$。

8）动模上滑块机构的数量，NS_{core}。比起在定模上的滑块机构，此种滑块机构的成本较低。机构由斜导柱和弹簧作用抽拔成型零件。然而。增加滑块机构的数量，一定会增加模具的成本。在模具中滑块机构最大的数量为 12，有 $CF_{10} = NS_{core}/12$。

9）内侧抽机构的数量，NL_{large}。内侧抽机构斜顶杆沿着开模方向，在注塑件的侧凹槽上抽拔。模具中增加内侧抽机构的数量，会增加模具的成本。模具中内侧抽机构的最多数目为 4，则有 $CF_9 = NL_{large}/4$。

10）小型内侧抽机构的数量，NL_{small}。模具中的小内侧抽机构的最多数目为 8，$CF_{10} = NL_{small}/8$。

11）表面粗糙度。提高对模具成型表面粗糙度的要求无疑会增加成本。下面列举的表面粗糙度要求和与之对应的 CF_{11} 值。

① 无要求，$CF_{11}=0.1$；

② 标准无光泽，$CF_{11}=0.15$；

③ 不反光低粗糙度，$CF_{11}=0.2$；

④ 镜面低粗糙度，$CF_{11}=0.3$；

⑤ 最低粗糙度，$CF_{11}=4$。

12）装饰雕刻。模具有三种常见的装饰雕刻类型：普通凹字，隆起文字或商标，模内标签和图形。CF_{12}定量如下所述。

① 没有雕刻，$CF_{12}=0.1$；

② 普通刻凹字，$CF_{12}=0.2$；

③ 隆起文字或商标，$CF_{12}=0.5$；

④ 模内标签和图形，$CF_{12}=0.7$。

13）型芯的结构。若在动模一侧，$CF_{13}=0.2$；另外方式，$CF_{13}=0.1$。

14）型腔的结构。若在定模一侧，$CF_{14}=0.2$；另外方式，$CF_{14}=0.1$。

15）制品上的尺寸公差。塑料制品尺寸公差的要求，对模具制造过程和加工成本有着很大的影响。这是因为模具制造者按很小公差制造模具。它只是经模塑过程余留下来的公差带。下面给出的 CF_{15}定量。

① 大于 ±0.5mm，　$CF_{15}=0.01$；

② 近似 ±0.35mm，$CF_{15}=0.07$；

③ 近似 ±0.25mm，$CF_{15}=0.17$；

④ 近似 ±0.20mm，$CF_{15}=0.33$；

⑤ 近似 ±0.1mm，　$CF_{15}=0.67$；

⑥ 近似 ±0.05mm，$CF_{15}=0.8$；

⑦ 近似 ±0.03mm，$CF_{15}=1.0$。

16）制品上的肋。肋的存在会增加模具的制造成本。以塑料制品上肋的大致数量和类型，CF_{16}的定量如下所述。

① 没有肋，$CF_{16}=0.1$

② 高度 <10mm 为低的，和 <5 条是少的，$CF_{16}=0.12$；

③ 高度 <10mm 为低的，和 >5 条是多的，$CF_{16}=0.15$；

④ 高度 >10mm 为高的，和 <5 条少的，$CF_{16}=0.17$；

⑤ 高度 >10mm 为高的，和 >5 条多的，$CF_{16}=0.4$。

17）制品上的装饰。存在装饰会增加模具的制造成本。按装饰的大致数量和类型，CF_{17}的定量如下所述。

① 没有装饰，$CF_{17}=0.1$ ；

② 深度 <1mm 为浅的，和 <5 片是少的，$CF_{17}=0.12$；

③ 深度 <1mm 为浅的，和 >5 片是多的，$CF_{17}=0.15$；

④ 深度 >1mm 为深的，和 <5 片是少的，$CF_{17}=0.17$；

⑤ 深度 >1mm 为深的，和 >5 片是多的，$CF_{17}=0.4$。

18）脱模顶出机构类型。共有四种不同的类型，会导致不同的成本。CF_{18}定量如下。

① 顶杆脱模，$CF_{18}=0.1$；

② 片条顶出，$CF_{18}=0.2$；

③ 板块顶出，$CF_{18}=0.35$；

④ 双脱模，$CF_{18}=0.5$。

19）液压缸的数目 $N_{hydraulic}$。液压缸的使用会额外增加模具成本。模具中液压缸数量最多为 4 ，则有 $CF_{19}=N_{hydraulic}/4$。

以上 CF 的类型，在电子产品的模具制造中得到了认同。以公司先前的模具生产作为量化因子基准，对其他类型模具进行成本概算时，这些因子应该被重新验证。标准化的因子要重新定义。

基于上面 CF 的定义，对 92 副生产模具的零件进行检验，并提取它们的 CFs。依照制造数据，计算了它们对应模具的实际成本。这些成本值乘以常数因子，保证了真实性。92 套 CFs 的设置和成本数据，列于表 6-23 中。

虽然收集的制品样本，仅是公司生产模具的一部分，但已充分代表整个范围里模具的大多数。例如：注射制品样本的质量从 2g 到 2000g，投影面积从 5cm^2 到 14360cm^2，其成本为 20000 美元到 500000 美元，见图 6-11 所示的制品范例成本分布。

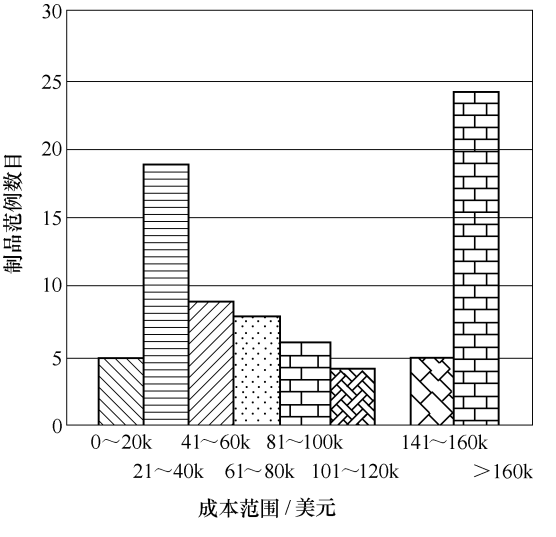


图 6-11 制品范例成本分布

3. 系统网络线路

系统网络的操作有三个阶段。要从一些输入到输出范例中，搞清输入与输出关系。第一步选择系统网络结构，包括层的数目，每层的神经元数目和每层所用的转换功能。第二步用所选择的系统网络，操作所使用的范例，直到在实际输出和目标输出之间的误差趋于收敛。如果误差在已定目标误差之内，认为操作完成。第三步，用一些测试范例来测验操作的系统网络。测试的范例不是操作实例。如果概算的误差在测试范例的目标误差内，操作和测验认为是成功的，系统网络使用顺利。通常，整个过程是操作-误差的反复迭代。

（1）系统网络的构建　反馈传输系统网络应用 MATLAB 系统网络工具箱，完成程序编写。在输入层，一些神经元与成本相关因子是相同的，为上述 $CF_1 \sim CF_{19}$的应用。在输出层仅有一个神经元表述成本。系统网络有一个或者很多个隐藏层。实际上，近似的非线性关系有个隐藏层就足够了，所以，这里应用了一个隐藏层。隐藏层的转变函数

表 6-23　92 套 CFs 的设置和成本数据

No	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
1	0.13	0.055	0.0485	0.83	0.20	1.00	0	0.33	0	0.5	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.15	0.12	0.10	0.50	169,000
2	0.25	0.005	0.0036	0.18	0.10	0.30	0	0.18	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.10	0.10	0.10	0	23,400
3	0.13	0.05	0.0453	0.4	0.20	1.00	0	0.5	0	0.88	0.40	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	143,000
4	0.06	0.275	0.086	0.6	0.20	0.50	0	0	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.10	0	163,800
5	0.13	0.005	0.0009	0.03	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	17,000
6	0.13	0.1	0.0072	0.16	0.10	0.10	0	0.33	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	37,100
7	0.13	0.1	0.0132	0.27	0.20	0.30	0	0.5	0	0	0.15	0.20	0.20	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	81,900
8	0.13	0.2	0.0072	0.16	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.35	0	23,400
9	0.06	0.005	0.008	0.23	0.20	0.63	0	0.17	0	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.12	0.12	0.10	0	25,200
10	0.13	0.01	0.0101	0.22	0.10	0.30	0	0	0	1	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	25,400
11	0.06	0.1	0.0117	0.18	0.20	0.10	0	0	0.25	0.38	0.15	0.10	0.10	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0.25	115,600
12	0.130	0.05	0.0117	0.28	0.20	0.30	0	0.17	1	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.12	0.12	0.35	0	156,000
13	0.06	0.3375	0.0053	0.33	0.20	0.50	0	0.17	0.25	0.25	0.15	0.10	0.10	0.20	0.67	0.15	0.17	0.10	0.25	202,800
14	0.13	0.08	0.012	0.35	0.20	0.50	0	0.17	1	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.57	0.15	0.12	0.10	0	169,000
15	0.13	0.235	0.017	0.42	0.50	0.63	0	0.67	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.40	0.40	0.10	0	478,400
16	0.06	0.3625	0.0487	0.53	0.20	0.50	0	0.17	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.40	0.10	0	247,000
17	0.06	0.375	0.035	0.67	0.50	0.50	0	0.17	1	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0.50	257,400
18	0.13	0.0015	0.0009	0.03	0.10	0.30	0	0	0	0.5	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.12	0.10	0	37,100
19	0.25	0.001	0.0002	0.03	0.01	0.01	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.57	0.12	0.12	0.10	0	15,600
20	0.13	0.0025	0.0007	0.04	0.10	0.30	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	12,600
21	0.06	0.0005	0.001	0.02	0.10	1.00	0	0.08	0	0	0.20	0.10	0.10	0.10	0.80	0.15	0.10	0.10	0	48,100
22	0.13	0.0015	0.0017	0.03	0.50	1.00	0	1	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.80	0.15	0.10	0.10	0	39,300
23	0.13	0.03	0.0028	0.17	0.50	0.63	0	0.33	0	0	0.15	0.20	0.20	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	114,400

（续）

No	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
24	0.25	0.03	0.0077	0.01	0.50	0.63	0	0.67	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	101,400
25	0.13	0.015	0.0043	0.02	0.10	0.63	0	0.5	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.10	0.10	0	78,000
26	0.063	0.35	0.499	0.57	0.50	0.50	0	0.083	0	0.25	0.20	0.10	0.10	0.20	0.67	0.12	0.12	0.10	0.50	247,000
27	0.125	0.005	0.004	0.027	0.10	0.30	0	0.333	0	0.25	0.20	0.50	0.10	0.20	0.67	0.12	0.10	0.10	0	83,000
28	0.063	0.003	9E-04	0.023	0.20	1.00	0	0.167	0	0.625	0.20	0.20	0.10	0.20	0.80	0.10	0.10	0.10	0	98,300
29	0.125	0.006	0.003	0.077	0.10	0.10	0	0.083	0	0	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.10	0.10	0	52,000
30	0.25	0.002	3E-04	0.017	0.10	0.10	0	0	0	0	0.20	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	16,700
31	0.125	0.005	0.002	0.07	0.10	0.50	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.10	0	69,900
32	0.125	0.005	0.004	0.067	0.10	0.30	0	0	0	0.375	0.20	0.10	0.10	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0	39,000
33	0.063	0.3	0.053	0.077	0.50	0.50	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.35	0	179,400
34	0.125	0.045	0.009	0.12	0.50	0.50	0	0	0	0	0.10	0.20	0.10	0.10	0.67	0.12	0.12	0.10	0	91,000
35	0.063	0.375	0.007	0.083	0.20	0.63	0	0	1	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.40	0.10	0.10	0	171,674
36	0.063	0.4	0.037	0.567	0.50	1.00	0	0.167	0	0.25	0.15	0.20	0.10	0.10	0.80	0.15	0.15	0.10	0.25	247,000
37	0.063	0.1	0.035	0.533	0.20	0.10	0	0.083	0.25	0	0.20	0.10	0.30	0.10	0.67	0.17	0.10	0.35	0	63,700
38	0.125	0.004	5E-05	0.05	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	23,000
39	0.125	0.01	0.006	0.2	0.50	0.30	0	0.333	0	0	0.15	0.10	0.30	0.20	0.67	0.15	0.10	0.10	0	41,600
40	0.063	0.1	0.013	0.063	0.20	0.10	0	0.083	0	0	0.15	0.50	0.10	0.20	0.80	0.17	0.10	0.10	0	93,600
41	0.125	0.01	0.003	0.033	0.50	1.00	1	0.333	0	0	0.15	0.10	0.10	0.20	1.00	0.12	0.10	0.10	0	115,000
42	0.25	0.0025	4E-04	0.04	0.50	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	1.00	0.12	0.12	0.10	0	110,000
43	0.125	0.08	0.019	0.15	0.20	1.00	0	0	0.75	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.80	0.12	0.12	0.10	0	42,000
44	0.125	0.08	0.019	0.15	0.20	1.00	0	0	0.75	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.80	0.12	0.12	0.10	0	38,000
45	0.125	0.001	2E-04	0.133	0.10	0.10	0	0	0.00	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.80	0.10	0.12	0.10	0	12,000
46	0.125	0.0015	2E-04	0.053	0.10	0.10	0	0.00	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.80	0.10	0.10	0.10	0.10	0	30.000

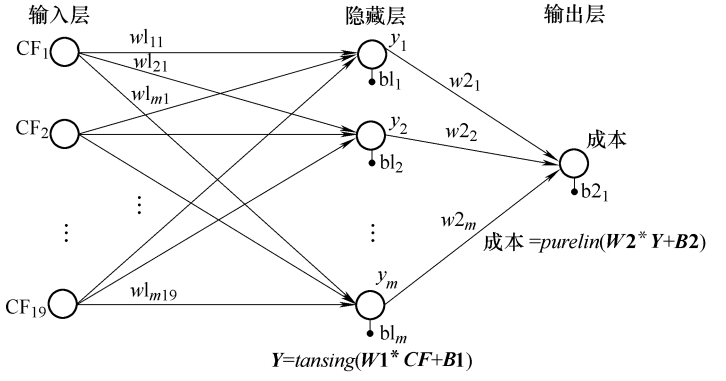
（续）

No	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
47	0.125	0.075	0.013	0.0767	0.20	0.75	0	0.333	1.00	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.80	0.12	0.12	0.10	0.25	158,000
48	0.125	0.075	0.013	0.08	0.20	0.75	0	0.333	1.00	0	0.15	0.20	0.10	0.20	1.00	1.00	0.12	0.10	0	156,000
49	0.125	0.075	0.013	0.0767	0.20	0.75	0	0.333	1.00	0.125	0.15	0.20	0.10	0.20	0.50	0.12	0.12	0.10	0	15,800
50	0.0625	0.28	0.025	0.4167	0.20	0.10	0	0.167	0.50	0.02	0.15	0.20	0.10	0.20	1.00	0.17	0.10	0.10	0.50	310,800
51	0.125	0.013	0.0012	0.05	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.80	0.12	0.12	0.10	0	52,000
52	0.125	0.0001	0.0003	0.007	0.10	0.10	0	0	0	0	0.20	0.10	0.20	0.20	1.00	0.10	0.10	0.10	0	113,000
53	0.25	0.005	0.0004	0.043	0.10	0.10	0	0	0	0	0.20	0.10	0.20	0.20	1.00	0.10	0.10	0.10	0	23,000
54	0.125	0.008	0.0022	0.04	0.10	0.10	0	0.3	0	0	0.20	0.10	0.20	0.20	1.00	0.12	0.10	0.10	0	38,000
55	0.25	0.004	0.0004	0.083	0.10	0.50	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	1.00	0.10	0.10	0.10	0	16,500
56	0.125	0.002	0.0001	0.08	0.10	0.30	0	0.2	0	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.80	0.10	0.10	0.10	0	30,000
57	0.25	0.04	0.0025	0.1	0.20	0.50	0	0.3	0	0.5	0.15	0.10	0.10	0.20	0.50	0.10	0.10	0.10	0	45,000
58	0.063	0.325	0.045	0.15	0.20	0.10	0	0	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.80	0.10	0.10	0.35	0	179,800
59	0.25	0.01	0.0010	0.107	0.10	0.10	0	0.1	0	0.13	0.15	0.20	0.10	0.20	0.80	0.10	0.12	0.10	0	17,000
60	0.125	0.15	0.015	0.367	0.20	0.10	0	0.1	0.25	0.25	0.15	0.20	0.10	0.20	1.00	0.00	0.10	0.10	0.25	156,000
61	0.063	1	0.0833	0.533	0.20	1.00	0	0.3	1	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.40	0.15	0.10	0.50	429,100
62	0.125	0.3	0.0074	0.083	0.20	0.50	0	0.3	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.10	0.35	0	70,000
63	0.125	0.05	0.0014	0.067	0.10	0.50	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	50,000
64	0.063	0.5	0.0181	0.3	0.2	1.00	0	0.2	0	0	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.40	0.10	0.10	0	60,000
65	0.063	0.7	0.0533	0.15	0.20	0.63	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.10	0.10	0	214,600
66	0.063	0.8	0.0493	0.35	0.20	1.00	0	0.2	0	0	0.15	0.20	0.20	0.20	0.67	0.40	0.10	0.10	0	321,800
67	0.063	0.5	0.0216	0.1	0.20	1.00	0	0.2	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.12	0.10	0	107,300
68	0.063	1	0.15	0.367	0.10	1.00	0	0.1	0	0	0.15	0.20	0.20	0.10	0.67	0.40	0.12	0.10	0	536,500
69	0.125	0.3	0.0074	0.083	0.20	0.50	0	0.3	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.12	0.10	0	60,000

（续）

No	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
70	0.063	0.75	0.0447	0.167	0.20	0.63	0	0.1	0	1	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	180,000
71	0.063	0.5	0.04	0.1	0.20	0.63	0	0.1	0	0.75	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.10	0.10	0.25	193,100
72	0.063	0.65	0.0517	0.1	0.20	0.63	0	0.2	0	0.63	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.12	0.10	0.50	214,600
73	0.125	0.01	0.0021	0.093	0.10	0.50	0	0	0	1	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	60,000
74	0.125	0.3	0.0074	0.083	0.20	0.50	0	0.3	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.12	0.10	0	70,000
75	0.125	0.01	0.0021	0.05	0.10	0.50	0	0	0	1	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	65,000
76	0.063	0.8	0.0417	0.4	0.10	1.00	0	0.1	0	0	0.15	0.10	0.10	0.20	0.67	0.40	0.40	0.10	0	321,900
77	0.125	0.3	0.0074	0.25	0.20	0.50	0	0.3	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.17	0.10	0	60,500
78	0.125	0.005	0.0076	0.027	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	35,000
79	0.063	0.008	0.0022	0.26	0.10	0.63	0	0.2	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.50	0	40,000
80	0.125	0.004	0.0012	0.033	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.10	0.10	0	30,000
81	0.125	0.002	0.0001	0.013	0.10	0.10	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	70,000
82	0.063	0.01	0.02	0.15	0.13	0.63	0	0.1	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.40	0.12	0.10	0	214,000
83	0.063	0.4	0.0583	0.2	0.20	0.63	0	0.3	0	0.50	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0.25	180,000
84	0.063	0.5	0.0583	0.247	0.20	0.63	0	0.3	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0.25	40,000
85	0.063	0.005	0.0008	0.027	0.13	0.63	0	0.3	0	0.13	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	40,000
86	0.125	0.065	0.0022	0.117	0.20	0.63	0	0.2	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0	90,000
87	0.125	0.003	0.0014	0.027	0.10	0.30	1	0.3	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.12	0.10	0	30,000
88	0.125	0.003	0.0013	0.027	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.12	0.12	0.10	0	30,000
89	0.125	0.035	0.0040	0.15	0.10	0.63	0	0	0	0.25	0.15	0.20	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	60,000
90	0.063	0.025	0.0043	0.04	0.10	0.63	0	0	0	0.25	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	55,000
91	0.25	0.004	0.0001	0.063	0.10	0.10	0	0	0	0	0.30	0.10	0.10	0.10	0.67	0.17	0.10	0.10	0	25,000
92	0.063	0.015	2E029	0.193	0.10	0.63	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.15	0.10	0.10	0.10	0	60,000

是 tan-sigmoid；而线性函数 purloin 用在输出层。此系统网络的结构说明在图 6-12。在隐藏层中神经元的数目需要决定。***CF*** 是输入向量。***W*1** 是输入层和隐藏层之间内部连接的权重矩阵；***W*2** 是隐藏层和输出层之间内部连接的权重矩阵。***B*1** 和 ***B*2** 分别是在隐藏层和输出层里的神经元的偏置向量。



$$\boldsymbol{CF}=[\mathrm{CF}_1,\mathrm{CF}_2,\cdots\mathrm{CF}_{19}]^{\mathrm{R}}\quad \boldsymbol{B1}=[\mathrm{bl}_1,\mathrm{bl}_2\cdots,\mathrm{bl}_m]^{\mathrm{T}}\quad \boldsymbol{Y}=[y_1,y_2\cdots,y_m]^{\mathrm{T}}\quad \boldsymbol{B2}=[\mathrm{b2}_1]$$

$$\boldsymbol{W1}=\begin{vmatrix} wl_{1,1} & wl_{1,2} & \cdots & wl_{1,19} \\ wl_{2,1} & wl_{2,2} & \cdots & wl_{2,19} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ wl_{m,1} & wl_{m,2} & \cdots & wl_{m,19} \end{vmatrix} \qquad \boldsymbol{W2}=[w2_1,w2_2\ \cdots,w2_m]$$

图 6-12　成本概算的 BP 逆向传输系统网络

（2）操作过程　以上陈述的系统网络，已经用逆向传输操作规则（back propagate training rule）进行了测试。隐藏层中的神经元数量需要决定，所以在各次的操作-误差循环期间，开始动用 20 个 CFs 神经元，每次操作有 10 至 100 个 CFs 神经元的增量。每个专门系统网络中，用随机功能以-1 到 +1 之间赋值。然后将权重和误差，逐次调整到最小的网络误差的平方和。朝着误差急剧下降方向，不断改变权重和误差。

通常，操作运行在以下一个条件下即可停止。

1）误差的平方和，比用户目标误差小；

2）达到数量最大信号。

然而在目标误差未知时，可观察误差的平方和收敛于某个值的趋势，作为操作次数增加的信号。所以，设置的目标误差实际上不能达到。另一方面，在任何瞬时，都计算误差的平方和的相对变化率（relative changing rate）。每当 500 次操作完成时，给出如下相对变化率

$$RCR_i=\frac{SSE_{(i+1)\times 500}}{SSE_{i\times 500}} \tag{6-25}$$

i = 1，2，3…

$SSE_{(i+1)\times 500}$ = 在 $(i+1)\times 500$ 次的误差平方和；

$SSE_{i\times 500}$ = 在 $i\times 500$ 次的误差平方和。

设置的最大测试次数是很大的数值，才能保证操作中，误差的平方和收敛于一定值。在测试 500 次后的每个校核点，如果 $0.99 < RCR < 1.01$，则操作停止。

为了能更快地操作网络，用两种措施提高测试效率。动量和适应速率（momentum and adaptive learning rate）已经被联接到操作程序中。动量可以减少逆向传输中，对表层细微枝节的敏感性，帮助网络避免因微小误差而阻塞。另一方面，高的适应速率能保证网络畅通。然而，如果适应速率太大，研究问题时就会跳过微小的误差而不能收敛。适应速率的使用，能做到让运行步距大到足以保持运作速率。

当完成了系统网络的操作后，误差平方和依照的相对变化率 *RCR* 收敛。观察到大多数操作实例概算误差都达到很小的值，相对误差小于 5%。然而，这并不意味着系统网络操作得很好，还会有数据失常（over-fitting）。过程的验证必须应用系统网络，校核是否具有概括能力。应用系统网络的实例来引导验证过程，并不包含在操作过程里。这些实例的概算成本与它们实际成本作比较，如果这些实例的相对概算误差，与操作实例是可比较的，系统网络被认为是有概括能力的；否则，这是个失常网络，不能使用。

（3）操作和验证结果　在目前的应用中，在表 6-23 中的 92 个 CFs 范例，都用来作为操作的实例。在表 6-24 中另外的 10 个 CFs 作为验证范例。共有 9 个系统网络被操作，神经元的数目在隐藏层中从 20 到 100 的范围内。经几次测试后，在 *RCR* 标准下它们作为收敛处理。然后应用 10 个验证范例，对每个范例的相对概算误差（relative estimation error，*REE*）计算式：

$$REE_i = \frac{Cost_{i,\mathrm{e}} - Cost_{i,\mathrm{a}}}{Cost_{i,\mathrm{a}}} \tag{6-26}$$

这里 $Cost_{i,\mathrm{e}}$ 是概算成本，$Cost_{i,\mathrm{a}}$ 是范例 i 的实际成本。操作 9 个不同的系统网络，对于 10 个范例的 *REE* 结果，表述在表 6-25 中。最后一列说明了 10 个范例的 *REE* 平均值。

系统网络在隐藏层中 70 个神经元能得到最好的结果。而其他的结果则很差。$NN_{0\to\infty}$ 的系统网络覆盖了模具中整个范围的成本。在 10 个 CFs 范例中，*REE* 的平均值是 4.6%，范例 7 有最大的 *REE* 值为 14%。对于早期注射模成本概算，这个结果很让人满意。

（4）不同成本范围的系统网络　当范例的成本范围很大时，操作中很难找到系统网络能容纳范例的最大和最小两头的成本。这涉及要有最好系统网络的构造和参量的问题。举例说，在表 6-25 中除了隐藏层的 70 个神经元外，其他验证范例生成概算误差很大。解决这个问题的途径，是对系统网络建立不同成本范围。在目前的研究中，已注意到图 6-11 中，有 43 个范例的成本小于 6 万美元；另外 49 个范例的成本大于 6 万美元。因此，决定建立起两个系统网络来处理这两组范例。这两个系统网络通过测验来决定隐藏层的神经元数目。它们的结构是相同的。表 6-26 中的验证范例被用来测试各自的操作网络。

表 **6-24** 验证范例数据

No	CF_1	CF_2	CF_3	CF_4	CF_5	CF_6	CF_7	CF_8	CF_9	CF_{10}	CF_{11}	CF_{12}	CF_{13}	CF_{14}	CF_{15}	CF_{16}	CF_{17}	CF_{18}	CF_{19}	成本/美元
1	0.063	0.006	0.0002	0.05	0.13	0.75	0	0.17	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	42,000
2	0.063	0.003	0.0015	0.027	0.10	0.30	0	0	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.15	0.12	0.10	0	35,000
3	0.063	0.5	0.0583	0.247	0.20	0.63	0	0.33	0	0	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0	190,000
4	0.063	0.4	0.0058	0.2	0.20	0.50	0	0.33	0	0.5	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.12	0.10	0	214,590
5	0.063	0.004	0.0002	0.05	0.13	0.75	0	0.17	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.10	0	40,000
6	0.125	0.1	0.0132	0.267	0.20	0.30	0	0.5	0	0	0.15	0.20	0.20	0.10	0.67	0.17	0.12	0.10	0	80,000
7	0.125	0.006	0.0034	0.077	0.10	0.10	0	0.08	0	0.375	0.20	0.20	0.10	0.10	0.67	0.15	0.10	0.10	0	48.000
8	0.125	0.605	0.0021	0.07	0.10	0.50	0	0	0	0	0.20	0.20	0.10	0.20	0.67	0.40	0.10	0.10	0	71,000
9	0.125	0.3	0.0074	0.083	0.20	0.50	0	0.33	0	1	0.15	0.20	0.10	0.20	0.67	0.17	0.12	0.10	0	62,000
10	0.063	0.008	0.0022	0.26	0.10	0.63	0	0.17	0	0	0.15	0.10	0.10	0.10	0.67	0.10	0.10	0.50	0	40,000

表 6-25 验证范例的相对概算误差

隐藏层中的神经元数目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	*REE* 平均值
20	2%	25%	43%	-27%	8%	-6%	-1%	-35%	68%	10%	23%
30	7%	31%	43%	-24%	13%	-8%	-6%	-37%	42%	18%	23%
40	17%	9%	9%	-30%	23%	-4%	-18%	3%	40%	-23%	17%
50	7%	29%	43%	-26%	13%	-1%	-8%	-37%	48%	15%	23%
60	10%	63%	3%	-10%	15%	3%	-30%	-6%	29%	-5.5%	22%
70	**-7%**	**0%**	**-4%**	**0%**	**-3%**	**-9%**	**-14%**	**-4%**	**-5%**	**0%**	**4.6%**
80	-12%	-9%	9%	-9%	-8%	-9%	-10%	7%	58%	-23%	15%
90	7%	-11%	-1%	-16%	13%	-6%	9%	6%	21%	-3%	9%
100	10%	-9%	8%	-17%	15%	6%	-26%	6%	44%	10%	15%

表 6-26 验证范例的相对概算误差（ <6 美元）

隐藏层中的神经元数目	1	2	5	7	9	10	*REE* 平均值
20	19%	11.4%	25%	-3.5%	-5%	0%	10.6%
30	17%	2.9%	23%	-3.5%	-5%	-2.5%	8.8%
40	4.8%	-11%	10%	-1.4%	-5%	0%	5.4%
50	-4.8%	5.7%	2.5%	8.8%	-5%	2.5%	4.9%
60	2.4%	5.7%	7.5%	8.8%	-3%	-2.5%	5.0%
70	**-2.4%**	**0%**	**2.5%**	**8.8%**	**-5%**	**0%**	**3.1%**
80	-2.4%	-10%	2.5%	4.7%	-6%	-2.5%	4.8%
90	-2.4%	8.5%	5%	4.7%	-5%	-2.5%	4.7%
100	-9.5%	2.8%	-5%	8.8%	-5%	-2.5%	5.6%

因为43个范例成本小于6万美元，所以测验9个系统网络。在表6-26中10个范例中的6个（编号1，2，5，7，9，10）成本小于6万美元，所以测试它们。测试9个不同的系统网络的6个范例，其 *REE* 结果在表6-26中列出。其中的最后一列显示了6个范例的 *REE* 的平均值。隐藏层的70个神经元产生了最好的结果，*REE* 的平均值为3.1%。其他的系统网络也产生了很好的结果。70个隐藏的神经元表达为 $NN_{0\to 60k}$。

因为49范例成本大于6万美元，所以9个系统网络同样要经过测验。在表6-24中10个范例中的4个（编号3，4，6，8）成本大于6万美元，所以它们也用来测试。测试9个不同的系统网络的4个范例，其 *REE* 结果示列在表6-27中。其中的最后一列显示了4个范例的 *REE* 的平均值。在隐藏层中的80个神经元产生了最好的结果，*REE* 的平均值为3.1%，这个系统网络表达为 $NN_{60k\to\infty}$。另一方面，测试其他两个系统网络，在隐藏层中有30到100个神经元，同样也产生较令人满意的结果。也使得在不同成本范围下，增强了对各不同系统网络的操作功能。在这种方法下，对某个成本范围很容易

表 6-27　验证范例的相对概算误差（ >6 万美元）

隐藏层中的神经元数目	3	4	6	8	*REE* 平均值
20	-11%	-21%	113%	139%	70%
30	0%	-18%	4%	8%	7.5%
40	2%	-48%	28%	42%	30%
50	2%	-48%	28%	42%	30%
60	2%	-14%	39%	8%	15.8%
70	16%	0%	1%	-7%	6%
80	**-5%**	**-2%**	**3%**	**-3%**	**3.1%**
90	22%	-27%	-8%	8%	16%
100	3%	-10%	5%	-6%	5.8%

寻找并操作适合的系统网络。

在目前的三个测验系统网络中（$NN_{0\to\infty}$，$NN_{0\to 60k}$，$NN_{60k\to\infty}$），必需有为注射新制品成本概算的策略。这里成本概算过程分为三个阶段。

1）给出新注射制品和成本提取和量化相关因素 CFs。

2）应用 $NN_{0\to\infty}$ 概算模具的成本 $Cost_{rough}$。

3）如果 $Cost_{rough}$ <6 万美元，应用 $NN_{0\to 60k}$ 生成模具的最终概算成本；其他情况，可应用 $NN_{60k\to\infty}$ 最终生成模具的概算成本。

4. 综述

传统的模具成本评估存在一些问题。因为在早期的成本概算时，无法利用成本函数形式，也不能利用实用的历史成本数据直接校正成本概算。应用系统网络的成本函数近似处理方法目前已表明有助于解决这两个问题。这种处理方法能应用于注塑模的成本概算。在注射制品设计和模具概念设计时，在早期的估价阶段，都要定义注射模的成本相关因子 CFs，在发展中安装有效的信息。对所有这些 CFs 在可能状态下的量化方案已经建立。从先期生产的一些模具，注射制品范例的 CFs 提取和量化，使其与它们的实际成本一致，已经发展了系统网络的程序结构，决定了构造、操作和验证。验证结果证实，此方法能够满意地概算成本。对不同的成本范围，操作使用不同的系统网络，能得到更好的结果。

总之，这种早期成本概算方法的优点如下。

1）成本相关因子 CFs 概括了模具概念设计和零部件设计中所有方面的成本。行情工程师和模具设计者能容易提取这些因素。

2）没有必要知道成本函数的实际形式。利用先前生产模具的零部件设计和它们的成本数据，逆向传输系统网络通过近似函数引导它们的关系。

3）以系统网络的操作形式，建立的成本函数能被修改。用新的范例一次又一次调整自身来适应新的制造环境，再重新测试系统网络。

另一方面，这种方法也受到某些限制。首先，隐藏层的数目和每个隐藏层的神经元

有操作误差。它会浪费时间，且不能保证最后的选择结构是最好的。第二，成本方面的CFs研读困难。此外，流行的系统网络模式不能提供设计者更好解决问题的工具。

6.4 注射模具的验收和维修

注射模具的适用性验收是为了证明模具达到这样的要求：模具能稳定、持续、高效地生产合格的注射制品，并能达到合理使用寿命。模具验收应该包括注射制品和模具两方面的验收。对注射制品和模具验收涉及多方面的各种要求和诸多数据，在模具订购方和承揽者有争议时，按实用原则，不能求全。对一些直接影响到模具的使用性能、安全性和经济性等具有关键性否定意义的方面进行验收。

验收和维修工作按模具承揽合同和引用以下国家标准。

① GB/T 1184—1996《形状和位置公差　未注公差值》。

② GB/T 1804—2000《一般公差　未注公差的线性和角度尺寸的公差》。

③ GB/T 12554—2006《塑料注射模技术条件》。

④ GB/T 14486—2008《塑料模塑件尺寸公差》。

⑤ GB/T 12556—2006《塑料注射模模架技术条件》。

⑥ GB/T 4170—2006《塑料注射模零件技术条件》。

⑦ GB/T 4169.1～4169.23—2006《塑料注射模零件》。

⑧ GB/T 825—1988《吊环螺钉》。

⑨ GB/T 2918—1998《塑料试样状态调节和实验的标准环境》。

1. 注射制品的验收

（1）验收准备

1）样品提供。受检样品应是正常试模完成的注射成型制品。注射制品应该是在连续试模中从第20个到50个间选取3到10个检测样品。

受检样品应在成型之后，在标准温度（23℃ ±2℃）和湿度（50% ±5%）状态下放置24h或经“后处理”。检测工作环境按GB/T 2918—1998《塑料试样状态调节和实验的标准环境》；检测方法参考GB/T 17037.4—2003《塑料热塑性塑料材料试样的制备　第4部分：模塑收缩率的确定》。

2）数据准备。提供注塑件的二维视图或三维造型，应有技术要求和全部尺寸等检测数据；提供模具定制的合同和技术协议；确认的模具设计图样，或电子文档。

3）材料确认。对注射制品的塑料材料品牌和牌号进行核对。对塑料材料的流动性能、热性能和成型收缩率等，有关各方应有一致认识。

（2）表面外观　所有的外观面不能有缺料、缩痕、飞边、开裂、料疤、冷料痕、焦痕、银纹、发白和可见熔合缝等。但要注塑件完美无缺是困难的，分级的容忍度很有必要。注塑件外观根据使用特点将表面分成四种。

*A*面——直接面对使用者和凸出的外观面部分。一般为注塑件的正面和前顶面。*A*面不允许有擦伤、划痕、暗斑、凹痕和条痕。

B 面——使用者间接或较少面对的表面部分。一般为注塑件的侧面和后顶面。

C 面——正常使用时使用者不会面对的表面部分。一般为注塑件的平视不可见的后侧面和有装饰的背面。

D 面——注塑件的底部和无装饰的背面；或注塑件安装后不外露的部位；或产品内部的结构件。*D* 面允许有擦伤、划痕、暗斑、凹痕和条痕，但不允许这些缺陷影响制件的强度刚度。

A 面应尽可能避免可见熔合缝，应尽可能减少熔合缝，将熔合缝改造在 *B* 面或 *C* 面上。所有的可见熔合缝，在用于抚摸时没有深度感。

A 面和 *B* 面不允许有缩痕，疑似缩痕应以无手感为准。*C* 面可以有轻微的缩痕存在，但以不变形、不穿孔为限。

注塑件与人有接触的部位不应有飞边、锐边和突刺。外观分型线上的飞边应小于 0.03mm；在夹固电线或软质管等部位的飞边也应小于 0.03mm。

注塑件不允许有顶杆的顶出白印。如果注塑件的表面有喷涂、烫印或电镀加工予以遮盖，可以验收。但白印处不允许高出表平面，不得影响制件强度。

注塑件上仿真纹面的花纹须均匀，疏密度和深浅度一致。注塑件的皮纹面上不能有粗糙的加工痕迹存在。花纹与光面的界线分明平直。皮纹面应有大于 4° 的脱模斜度，不能有脱模拉毛痕迹。

（3）尺寸检测　注射制件上的尺寸，分为关键尺寸、一般尺寸和次要尺寸。关键尺寸是有互换性要求的装配尺寸，或关系注塑件实用功能的尺寸，由技术合同和图样标明，按尺寸公差和约定的方法检测。有强刚度要求的注塑件，其壁厚也会列入关键尺寸，按尺寸公差和测定点检测。

一般尺寸是注塑件上未注公差的尺寸，常指壁厚尺寸和壁厚相关尺寸及边缘性尺寸。通常，这类尺寸是受模具上活动零件影响的尺寸，要确保注塑件壁厚不穿孔、无缩痕和起皱，确保壁厚均匀。未注公差的尺寸按国标 GB/T 14486 执行。制件上直观可见的圆角、曲线和曲面是否连贯并平滑过渡，也应作为一般尺寸检验的组成部分。

次要尺寸是非边缘性的和非工作面的尺寸，不需要检测的尺寸。

注射成型行业有约定；

1）脱模斜度一般不计入公差，如要计入公差需标示。有互换性要求的装配配合段的斜度最大为 15′。

2）除另有约定，被检制件的轴类尺寸测量大端；通孔类尺寸测量小端；不通孔类尺寸测量大端。

（4）安装配合检测　注塑件与相关零件实现能互换的安装和连接是有技术难度的。例如上下壳体安装、盖板与孔框的配合、自攻螺钉的旋入等，首先要确保安装注塑件无缺损、翘曲变形量在尺寸公差内、嵌件牢固连接在注塑件上。与安装配合相关的尺寸必须是经检测的关键尺寸。

由于注射成型过程中收缩率不稳定，又因一般注塑件的刚性差，有颇大的弹性变形，注塑件还必须进行安装配合检测。注塑件与相关零件的试验性装配是验收的最终标

准，即能否实现装配件的外观和功能，能否在装配流水线上方便安装。经常要对注塑件设计、塑料材料选用、注射成型的稳定性和注射模制造等诸多方面进行修正。注射制品的检测是注射成型工程中的重要手段和步骤。

2. 注射模具的验收

注塑件通过验收后要对注射模进行验收。主要是检查结构零部件状况，和检测模具的注射运行状态。其目的是保证注射生产连续和注射模使用寿命。注射模具的验收应遵循实用和关键性原则。

（1）检查结构零部件状况

1）模架的装配精度检测。定模固定板和动模底板的平行度、导柱与导套对模板的垂直度应符合 GB/T 12556 规定。模架上导柱或导套、复位杆的动作灵活，无拉伤痕迹。复位杆端面应与接触面贴合，只允许有不大于 0.05mm 的间隙。

2）检查模具的脱模机构和侧向分型抽芯机构。顶杆、顶管、推板或滑块等工作行程和及复位应该到位。活动零件的配合间隙合理，动作平稳可靠，不允许有干涉现象。检查各弹簧的稳定性，工作行程的压缩量是否合理。

3）检查制造模具的钢材。所选用钢材应符合相应牌号的技术标准，检查模具成型零件和浇注系统零件的钢材和热处理硬度，表 6-28 所列为最低要求。成型对模具易腐蚀的塑料时，成型零件应采用耐腐蚀钢材，或在成型面采取防腐蚀措施。成型对模具易磨损的塑料时，成型零件硬度不低于 50HRC，否则成型表面应做表面硬化处理，硬度应高于 500HV。

表 6-28 注射模具成型零件和浇注系统零件的钢材和热处理硬度

零件名称	钢　材	硬度/HRC
型芯、定模镶块、动模镶块、活动镶块、推杆、浇口套	45、40Cr	40～45
	CrWMn、9Mn2v	48～52
	Cr12、Cr12 MoV	52～58
	3 Cr2Mo	预硬态 35～45
	4 Cr5 MoSiV 1	45～55
	3 Cr12	45～55

钢材表面不允许有夹砂、裂缝和气孔。模具成型零件不能用烧焊修补，若要采用烧焊须经订购方同意。

（2）检测模具的注射运行状态

交验注射模具必须完成一次模具正常运行情况下的生产性试模。大型模具试模运行 24h 或注射 1000 次；中型模具运行 8～16h 或注射 1000 次；小型模具运行 2～4h 或注射 1000 次。生产性试模目的是验证注射制件质量的稳定性；验证模具的脱模等机构运动的可靠性；验证模具温度控制和排气等的效果。

在注射运行状态下检测的主要项目有下列几项。

1）对连续注射的注射制件进行统计性检测，关键尺寸误差在公差范围；检查一模

多腔注射模各个型腔成型制件，关键尺寸误差在公差范围。

2）检查在注射压力下，注射模与注射机的配合、分型面配合、滑块配合和镶拼件配合，是否有溢料飞边生成；检查熔料流动充模时，排气是否正常。

3）对大中型模具用百分表检测各模板在注射压力下的变形。变形量大于 0.2mm，可认定模具刚度过低。

4）在 0.6MPa 压力下冷却液是否有泄漏；隔水片和喷管等是否到位；冷却液在管道内是否为紊流状态。

5）所有液压缸的活塞杆配有限位开关，反馈信号正确；油路接通后油压正常，没有漏油。

6）在 0.7MPa 压力下检查气路有无漏气。

7）所有电气线路必须经过绝缘检测，用 500V 摇表测得绝缘电阻不低于 2MΩ；布线正确，固定牢靠；接线盒应位于模具生产位置的上表面。

8）热流道注射模和气体辅助注射模要检查其附属设备的工作状态。

（3）检查模具的外观、安全性和备件

1）模板平直，外形尺寸整齐，表面应涂覆防锈剂。

2）模具外表面应有标志，标明模具号、出厂日期、供方名称。

3）大于 10kg 的模具零部件都必须在合理位置上设有吊装孔，以利安全吊装和拆卸。

4）模具吊装孔必须在模具的重心位置。在模具的四个侧面和每半模上都必须安装吊环螺钉。吊环螺钉直径按国标 GB/T 825 执行。

5）吊装螺孔深度要大于吊环螺钉直径的 1.5 倍，并保证吊环肩能紧贴螺孔表面。

6）大中型模具必须有锁模板，以保证在吊装和搬运时的闭合状态。

7）推杆等活动零件磨损快，非标准的易损零件应按合同要求的数量验收。

3. 注射模具的维修

模具寿命是指在整个使用周期中，按正常方式使用、保养、维修，直至模具主体无法满足注射成型制品基本要求的期限。正常保养和维修、活动零件磨损修复、意外损坏和修复，都保证了注射模具的寿命。

（1）正常保养和维修

1）注射模具的正常使用。应该按规定使用适当的注射机：按规定使用设计指定的原材料；生产过程中不发生硬物撬动或冲击，不发生异物夹入或异常闭合；使用符合规定要求的工业电源、冷却水、液压油和气体；对活动摩擦部位定期和及时润滑。

2）注射模具的正常保养。对注射生产的模具经常或定期进行：对活动部位进行润滑保养；对紧固件进行紧固检查；对限位装置和信号反馈器件进行检查；对电器进行漏电等安全检查；对活动部件进行清理、清洁和润滑；模具使用完毕后必须吹净水管道内余水，待模具冷却后喷涂防锈液或防锈油；模具存放时要有木板枕填，外露面有防锈措施。通常，注射模具使用达到一万次注射后，进行定期保养和维修。

3）注射模具的正常维修。对冷却系统的管道和接头等要除锈去垢、防堵、防漏；

对活动磨损零件及时更换和修复；对分型面和封合面出现溢料和飞边时，要及时填补修整；对电气加热和控制系统要及时排除故障、更换损坏器件；对液压系统及时更换失效的密封件，定期更换液压油；对气动系统要及时更换失效的密封件和油气过滤器。

（2）常见的磨损和修复　模具使用一段时间后，活动零件磨损影响注射制品的精度，需要对下述零部件进行修复。

1）导柱与导套。长期使用注射模，反复开启和闭合会产生导柱与导套磨损，间隙增大会使定模与动模的定位精度变差。导柱与导套周边均匀磨损，可更换新导套。导柱与导套之间有单面磨损过重，为导柱固定部位产生松动所致，需更换导柱。导柱或导套有局部拉伤现象，原因是配合过紧、表面有污物，或有中心距误差。轻者可局部研磨抛光；重者需更换导柱或导套。

2）定位块和定位止口。图 6-13 所示双向定位块条，磨损使 L 尺寸变小，定位误差增大。可在其下端面垫上 δ 厚垫片，恢复尺寸 L。再将 M 面上磨去 δ 厚。

如图 6-14a 所示单向止口部位装有耐磨垫板，可在 M 面上配加厚的新垫板。图 6-14b 所示没有装垫板，在不影响型腔尺寸情况下可在定模的 N 面上磨去 δ 厚。如磨损严重，用 a 图的加装垫板结构。

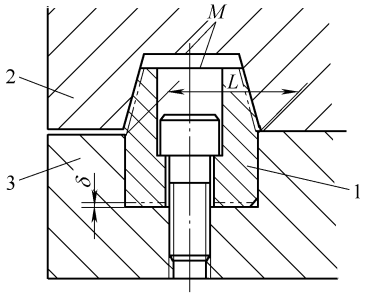


图 6-13　双向定位块的修复

1—定位块条　2—定模板　3—动模板

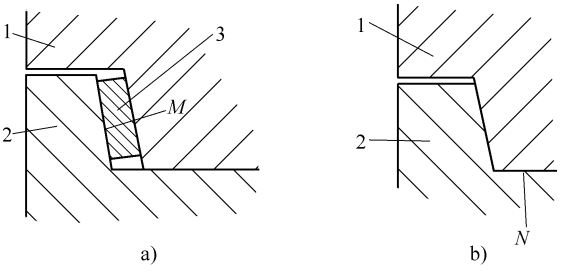


图 6-14　单向定位止口的修复

a）已有垫板的修复　b）止口的修复

1—定模板　2—动模板　3—耐磨垫板

3）分型面。注射模具使用一段时间后，分型面上清晰的棱边变成圆角钝口，使注塑件上生成飞边。产生分型面磨损的原因是多方面的。注射量过多，分型面反复胀开；分型面上粘有余料没有及时清理；还有注塑件与模具的正常磨损。一般维修可在平面磨床上磨去 0.2 ~ 0.4mm。但注塑件在型腔深度方向尺寸会变小，必要时须对型腔进行修正。

4）型芯和镶块松动。型芯和镶块是紧配固定于模板上，但在注射压力下有弹性变形。模具使用时间长了，接合面上产生缝隙，使注塑件上会有飞边，需要更换型芯或镶块，重新研配固定面。

5）运动件。图 6-15a 上活动型芯杆的头部与斜楔承压板有严重磨损，使此型芯不能精确复位，可以修磨 F 面，补偿磨损量。图 6-15b 上活动斜顶杆对承压块有严重的磨损，替换耐磨承压块可以恢复制件成型面尺寸精度。

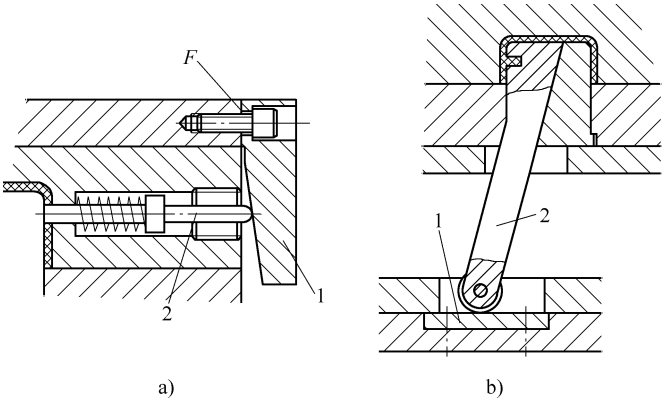


图 6-15　运动件修复

a）侧型芯压紧　b）内抽斜顶杆

1—承压块　2—活动件

6）研合面。注塑件上的通孔的成型型芯大都用顶面研合，长期使用后会在孔底中生成飞边，使通孔不通。这是因为悬臂固定的型芯，在型芯顶上有倒边，可设法将型芯提高，重新研合。通孔不通是注射成型中常见的问题，如果研合面是曲面，修复比较困难。

7）推杆。推杆折断是比较常见的，因为推杆小孔加工的直线度和表面粗糙度较差。众多推杆推顶时的附加力矩造成推杆弯曲以致折断。有的顶杆的凸肩为焊接连接，内应力会产生断裂。折断的推杆会撞坏型腔，要及时发现并更换。

（3）意外损坏及修复　意外事故使模具受损必须重视。避免意外损坏的关键在于预防。

1）异物损坏型腔。型腔内如果掉入塑料残物，受损情况较轻；若掉入金属零件，会使型腔遭到严重破坏；修复的方法主要是镶拼、补焊和挤胀等。高光亮型腔面和纹饰面要恢复如初是不可能的。正常注射生产时，模具上方不可放置任何工具和杂物；暂停关机时必须使模具处于闭模状态；模具在经过加工修理后，要严格清理，防止杂物留在型腔内，然后才能合模；经过运输和搬动的模具，要开模检查和清理。

2）折断的推杆或成型杆损坏型腔。折断的推杆、拉料杆或成型杆，在脱模机构复回时，会留在型腔里，再次闭模时会损伤成型零件，要及时发现，卸下模具，换上备用件。

3）残留料沫损伤。残留料沫会损伤排气槽和分型面，每次闭模前要检查飞边残屑、凝料碎末有否残留，清理干净后再闭模注射。

4）运动机构损毁。在注射压力下，模架导向机构、脱模机构和侧向分型抽芯机构的运动零件，受到周期性强力载荷，会出现受力构件和弹簧断裂，机构失灵，严重的会损毁模具。因此，在注射生产中，增大注射压力要谨慎，避免超高压注射。

参 考 文 献

[1] Charles A. Harper. Hand Book of Plastic Processes [M]. John Wiley & Sons, lnc. Hoboken New Jersey U S A, 2006.

[2] J. Y. H. Fuh, Y. F. Zhang, A. Y. C. Nee, M. W. Fu. 计算机辅助注射模设计和制造 [M]. 徐佩弦译. 北京: 机械工业出版社, 2010.

[3] 丹尼尔·弗伦克勒. 亨里克·扎维斯托夫斯基. 注射模具的热流道 [M]. 罗伯特·沃克登英译, 徐佩弦译. 北京: 化学工业出版社, 2005.

[4] 唐志玉. 塑料模具设计师指南 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

第 7 章　注射制品的结构和模具设计

设计塑料制品除了保证其在使用期限中的功能和性能，还必须考虑注射成型的工艺性，保证塑料熔体顺利充满模具型腔，保证固化的成型制件的质量；而且要简化模具结构，提高注射成型的效益。制品结构设计是注射成型工程中的重要的步骤。

7.1　注射制品的壁厚和刚性设计

壁厚是注塑件结构的最基本要素，其他的形体和尺寸（如加强肋和圆角等）都是以壁厚为参照的。壁厚又是注射成型时熔体充模的工艺参数。随着现代注射成型工程的发展，注射制品的壁厚趋于更薄。通常用制品结构的设计方法来提高注塑件的刚性。

7.1.1　注塑件的壁厚

注塑件是壁厚均匀的薄板组合的形体。如果壁厚不均匀，会使塑料熔体的充模速率和冷却收缩不均匀，由此产生许多质量问题，如凹陷、真空泡、翘曲，甚至开裂。壁厚均匀一致是注塑件设计的重大原则。如图 7-1 所示，遇有壁厚不均匀的结构，在保持注塑件的功能和主要尺寸不变的前提下，作必要改进。

当制品的结构要求壁厚进行适当的变化时，相邻两壁厚的比，对于热塑性塑料限制在 1:2 之内，热固性塑料应小于 1:3，而且要有平滑过渡，不能有突变，如图 7-2 所示。在模具型腔中，壁厚对应的大间隙应置于流程的上游，这样才有利于注射保压时的压力传递。

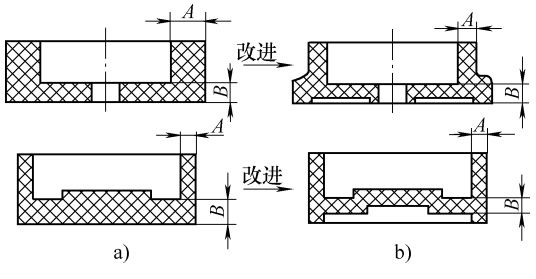


图 7-1　注塑件壁厚均一化设计二例

a）侧壁和底板 $A \neq B$　b）侧壁和底板 $A = B$

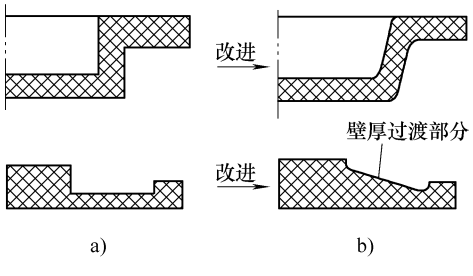


图 7-2　注射制品壁厚平滑过渡二例

a）壁厚变化有突变　b）改进成平滑过渡

热塑性塑料注塑件的常见壁厚为 2 ~ 4mm，热固性注塑件的壁厚一般为 1 ~ 6mm。在取较小的壁厚时，要考虑制品在使用和装配紧固时的强度和刚度。作为电气零件使用时，壁厚与绝缘性能有关。有时还需考虑在脱模顶出过程中，注塑件变形损伤的限制。

过小的型腔间隙，会使高黏度熔体注射充模发生困难。对于注塑件的刚性要求，通常不是增加注塑件壁厚，而是增设加强肋等以形体的刚性结构设计来满足。

过大壁厚不但增强了制品重量，浪费了原材料，也多耗费了对这些过量塑料的加热和充模的能量。更重要的是增加了冷却时间，因为冷却时间与壁厚的平方成正比。表 7-1 是热塑性注塑件壁厚的推荐值。

表 7-1 一些注塑件壁厚的推荐值 （单位：mm）

塑料材料	最小注塑件	小注塑件	中等注塑件	大注塑件
聚酰胺	0.45	0.76	1.5	2.4～3.2
聚乙烯	0.60	1.25	1.6	2.4～3.2
聚苯乙烯	0.75	1.25	1.6	3.2～5.4
高抗冲击聚苯乙烯	0.75	1.25	1.6	3.2～5.4
硬聚氯乙烯	1.20	1.60	1.8	3.2～5.8
聚甲基丙烯酸甲酯	0.80	1.50	2.2	4.0～6.5
聚丙烯	0.85	1.45	1.75	2.4～3.2
氯化聚醚	0.90	1.35	1.8	2.5～3.4
聚碳酸酯	0.95	1.80	2.3	3.0～4.5
聚苯醚	1.20	1.75	2.5	3.5～6.4
醋酸纤维素	0.70	1.25	1.9	3.2～4.8
乙基纤维素	0.90	1.25	1.6	2.4～3.2
丙烯酸类	0.70	0.90	2.4	3.0～6.0
聚甲醛	0.80	1.40	1.6	3.2～5.4
聚砜	0.95	1.80	2.3	3.0～4.5

对于大型和中型的注塑件，壁厚要多次校核慎重确定。注塑件设计的计算机软件，塑料熔体注射充模流动和冷却固化分析软件都是很好的辅助工具。但运行 CAD 软件都要有注塑件的计算机三维造型。通常，在最初的注塑件设计阶段，用流程比校核注塑件壁厚是必要的和可行的。

流程比 *FLR*（Flow length ratio）校核式为

$$FLR = \sum_{i=1}^{n} \frac{L_i}{s_i} \leqslant FLR_{\max} \tag{7-1}$$

式中 L_i——各段流程长度（mm）；

s_i——各段流程厚度（mm）；

$FLR_{\max}$——最大流程比，由表 7-2 查得。

表 7-2 一些塑料熔体的最大流程比

塑料	熔融温度/℃	模具温度/℃	$FLR_{\max}$
ABS	218～260	38～77	160～175
聚甲醛(POM)	182～200	77～93	140～250

（续）

塑料	熔融温度/℃	模具温度/℃	FLR_{max}
丙烯酸类	190 ~ 243	49 ~ 88	130 ~ 150
聚酰胺 6(PA6)	232 ~ 288	77 ~ 93	150 ~ 300
聚酰胺 11(PA11)	191 ~ 194	77 ~ 93	150 ~ 300
聚对苯二甲酸丁二醇酯	221 ~ 260	66 ~ 93	300
聚碳酸酯(PC)	277 ~ 321	77 ~ 99	100 ~ 110
液晶 + 30% GF	310 ~ 340	66 ~ 93	300
低密度聚乙烯(PE)	98 ~ 115	15 ~ 60	275 ~ 300
高密度聚乙烯(PE)	125 ~ 140	20 ~ 60	225 ~ 250
聚丙烯	168 ~ 175	15 ~ 60	350
改性聚苯醚	203 ~ 310	93 ~ 121	200 ~ 250
聚苯乙烯	232 ~ 274	27 ~ 60	200 ~ 250
聚氨酯	170 ~ 204	27 ~ 66	200
聚氯乙烯	196 ~ 204	21 ~ 38	100
聚酯酰亚胺	350 ~ 415	65 ~ 175	200

注：注射压力为 80 ~ 90MPa。当流程厚度小于 2.5mm 时，取表值下限的 70% ~ 80%。

如图 7-3 所示的流程比应包括浇注系统的流程，该示例的流程比为

$$FLR = \frac{L_1}{s_1} + \frac{L_2}{s_2} + \frac{L_3}{s_3} + \frac{2L_4}{s_4} + \frac{L_5}{s_5}$$

显然，流程比与浇口数目和位置有关。流程比最大值是用阿基米德螺旋线型腔试射的结果。试射压力为 80 ~ 90MPa，螺旋槽的间隙为 2.5mm。由表 7-2 可知，高黏度物料（如 PC 等）的 FLR_{max} 为 100 ~ 130，中等黏度物料（如 ABS 和 POM 等）的 FLR_{max} 为 160 ~ 250，而低黏度物料（如 PE 和 PA 等）的 FLR_{max} 为 300 左右。

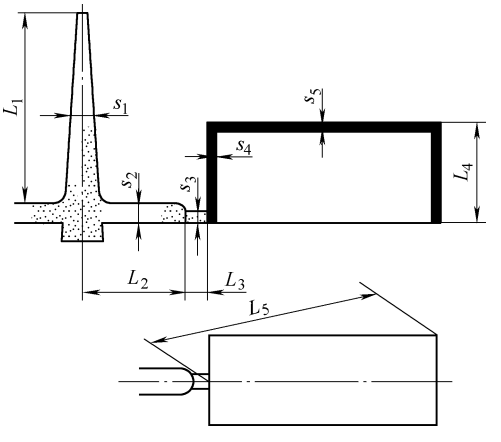


图 7-3　流程比计算示例

本节是从注射成型角度考虑注塑件的壁厚。众所周知，壁厚是注塑件的主要参量，理应以静态与动态、短期与长期，以及连接等各个方面的力学分析，来设计计算，力学或电工设计与注射工艺校核壁厚的工作必须同时进行。

7.1.2　肋、凸台、边缘、曲面、支承面及圆角

1. 加强肋

由于注塑件是壁厚均匀的薄板组合体，要提高注塑件的抗弯刚度，通常用增设薄板加强肋的方法，它同时也能减小注塑件的翘曲变形，提高抗蠕变性和抗冲击性能。此

外，添加肋改善了塑料熔体的充模流动，或缩短了流程或增加了流程的截面。

加强肋的设置，其形状要正确，尺寸要与壁厚 s 成一定比例。图 7-4 所示为热塑性塑料的肋的设计。肋的高度不超过 $3s$；肋的根部厚度不超过 $0.75s$。肋的根部过厚会在注塑件外表面产生凹陷，在材料中央产生真空泡。

图 7-5 所示为热固性塑料的肋的设计。肋的底宽 t 不超过制品壁厚 s。底宽 t 小于 1.6mm 时，肋的高度 h 不超过 $2s$；通常肋的高度不超过 $3s$。对于纤维充填热固性塑料，加强肋的内圆角 R 按肋的高度大小取 $R=0.8\sim5$mm，以改善熔体的流动性，提高肋的根部强度。

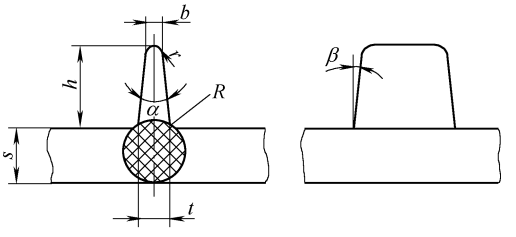


图 7-4　热塑性注塑件上加强肋的形状和尺寸

注：$t=(0.4\sim0.75)s$；$h=(2.5\sim3)s$；$\alpha=4°\sim6°$；$\beta=2°$；$R\geqslant(0.25\sim0.4)s$；$r\geqslant(0.125\sim0.25)s$；两肋中心的间距 $=(3\sim4)s$。

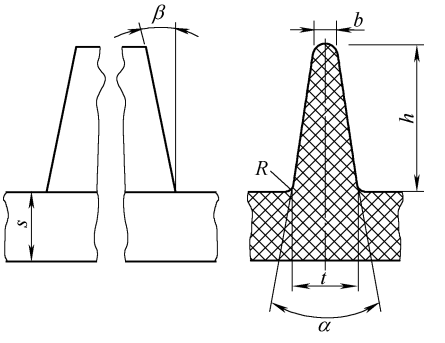


图 7-5　热固性注塑件上加强肋的形状和尺寸

注：$t\leqslant s$；$h=(2\sim3)s$；$\alpha=10°$；$\beta=5°$；$b=0.5t$；$R\geqslant0.8\sim5$mm。

还有一种并列多条肋的框式结构注塑件，如图 7-6 所示，两肋之间的间距 d 至少为 $2.5s$。这种结构相当于中空的矩形截面梁，用料不多，但有较大的抗弯截面模量，能承受较大的弯曲负载。

如图 7-7 所示，加强肋是常用的刚性结构设计方法。图示的注射成型板件上有四种结构形式的加强肋。第一种是全长加强肋。肋的方向应沿着弯曲梁的纵向平面；第二种是部分长度的肋，它与侧壁没有交汇；第三种是低于侧壁的全长肋；第四是角板式加强肋，它的设置是为了增强侧壁。在注射模具设计时，浇口位置要使加强肋的布排沿着塑料熔体充模时的流向，要有利排气，还要考虑到易于脱模顶出。

加强肋的分布应该相互错开，尽量避免两条肋十字交汇。图 7-8 所示的布置，减少了塑料在局部汇集过多而形成凹陷和真空泡的可能。

侧长边与短边接近的大面积平板，如图 7-10 所示，常用网状肋条板。肋条的合理布置和结构、提高刚性和节省体积用料，是肋条板设计的目标。先分析如图 7-9 所示的单个肋条：梁或板的外表面上布置的肋应该轻薄，肋宽是底板壁厚的 $0.4s$；泡沫塑料的加强肋宽度，等于底板厚度 s；一般加强肋的宽度为 $(0.6\sim0.75)s$。假定肋宽等于底板 s、肋的高度 h 从 $(1.5\sim5)s$，h 越大，板的刚度增大，但肋条板成型困难，注射成型时熔体流动充模和固化后脱模困难。

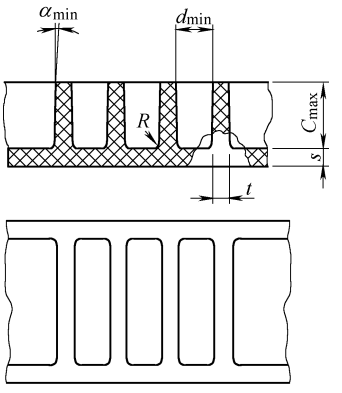


图 7-6　多肋加强板的结构尺寸

注：$\alpha_{min}=0.5°$；$t=(0.5\sim0.75)s$；$d_{min}=2.5s$；$R=0.25s$；$C_{max}=3s$。

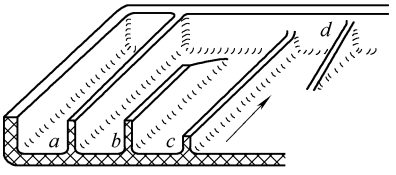


图 7-7　注塑梁上的加强肋

a—全长肋　*b*—部分长度肋

c—较低的肋　*d*—角板式肋

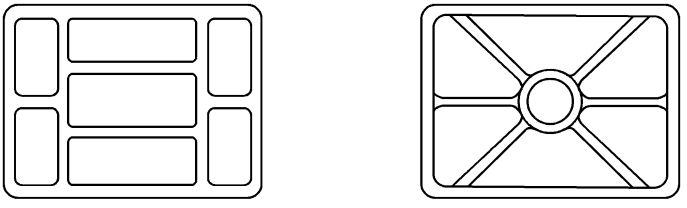


图 7-8　加强肋的合理分布

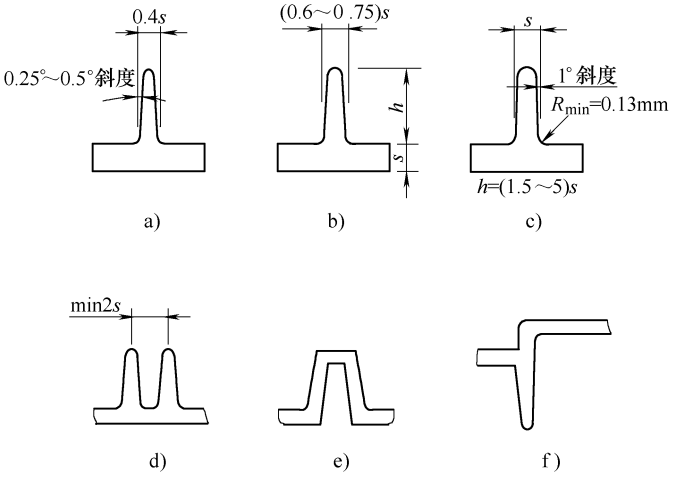


图 7-9　梁或板上的肋的设计

a）板的外表面上的肋　b）加强肋　c）发泡制品上的加强肋

d）肋之间的最小间距　e）芯厚肋　f）渐变肋

在网状交叉肋板基础上，又发展了圆筒桩头为节点的网格肋条板，如图 7-10 所示。圆桩头改善了交叉肋条汇合部位的工艺性，减少注射成型时产生凹陷和真空泡，容许十字网格肋再增对角肋，提高了肋条板的刚性。

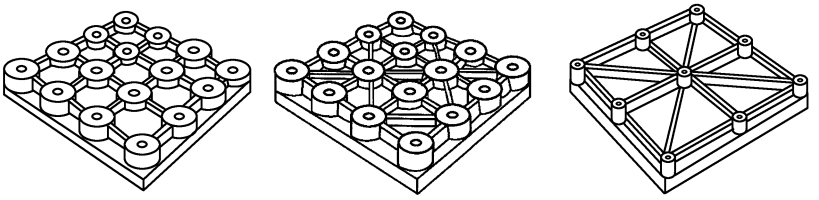


图 7-10　圆筒桩头为节点的网格肋条板

a）圆筒节点直肋　b）圆筒节点直肋加对角肋　c）星形节点辐射肋

2. 凸台

注塑件壁上的柱状凸台，一般用来与其他零件装配连接。它要求承受较大的紧固力，容易开裂。图 7-11、图 7-12 和图 7-13 所示为一些凸台的结构和尺寸。当凸台设置在大平面上或者远离壁边时，应该有两条、三条或四条加强肋，有斜角片也有片条的。加强肋也往往设置在制品的边缘及已有肋的部位。肋不但加强了凸台，而且改善了对凸台的流动充模。

通常凸台比相邻几何结构高一些，其形状为圆柱形最多，也有方形、矩形或椭圆棱柱体。凸台的外径应等于孔径的 2 倍。其壁厚不超过注塑件壁厚 s，或为壁厚 s 的一半。凸台高度 h 不超过外径的 2 倍，或等于壁厚 s 的 3 倍；凸台应有足够的脱模斜度；凸台与壁面接合处应有足够的圆角。

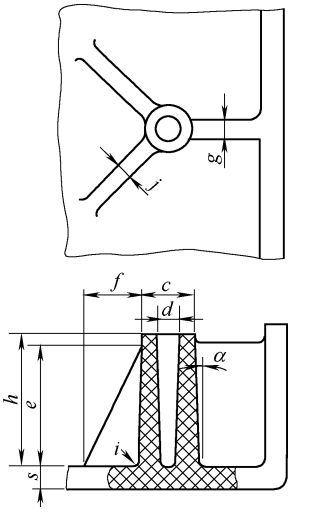


图 7-11　凸台的结构尺寸

s—注塑件壁厚　d—装配孔孔径

注：$c=2.0\sim2.5d$；$h=3s$；$e=0.9h$；$f=(0.3\sim1)e$；$\alpha=0.5°\sim1.5°$；$i=0.25s$；$j=g=0.6s$。

外侧凸台通常用于制品的连接和固定，如图 7-14 所示。凸台为中空等壁厚的结构，参照前述结构尺寸。凸台高度一般与宽度相等或不超过宽度的 2 倍。

3. 边缘

除了加强肋，还有一些常见的提高注塑件刚性的结构。例如图 7-15 所示的壳体边缘用各种形式的结构，既能使提取方便，还都能提高容器外壳的刚性。

4. 底盖曲面和侧壁增强

由于注塑件上的大平面容易翘曲变形，所以如图 7-16 所示，将一些容器的底面或顶盖面设计成波浪形或拱形曲面以提高刚性；又如图 7-17 所示，沿着制品侧壁，在适当部位设置肋条或台阶，都可以提高刚性。

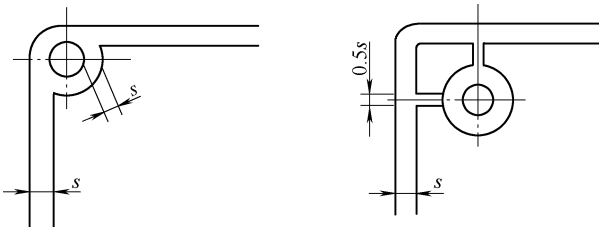


图 7-12　周角上的凸台结构

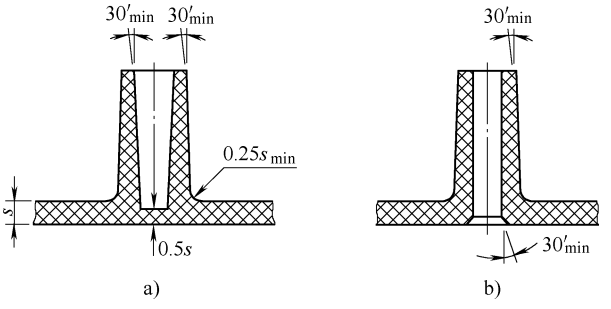


图 7-13　通孔与不通孔的凸台结构

a）不通孔凸台，内孔与外圆斜度方向相反　b）通孔凸台，内孔与外圆斜度方向相同

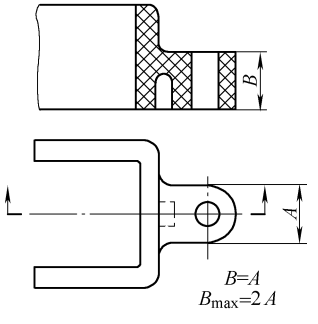


图 7-14　注射制品外侧的凸台

A—凸台宽度　*B*—凸台高度

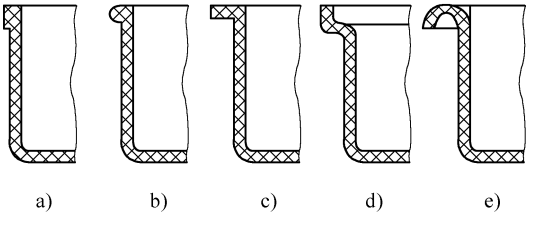


图 7-15　增强壳体刚性

a）增厚　b）凸缘　c）翻折　d）弯曲　e）翻卷

5. 支承面

当注塑件需要一个支承面时，让整个注塑件的底面接触承压是不合理的。因为底平面不可能平整，翘曲变形使支承不稳定。图 7-18a 所示为用三个或更多底脚为底面支承；图 7-18b 所示为用凸台的周边凸条或长凸条支承。条状支承能提高底面的刚性。当底面上同时具有支承条和加强肋时，支承面应比肋高出 0.5mm 左右。要求支承凸条面

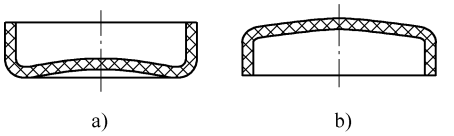


图 7-16　增强壳体底盖刚性

a）底面凹曲　b）顶盖凸拱

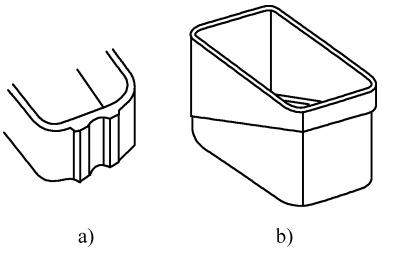


图 7-17　增强壳体侧壁刚性

a）肋条　b）台阶

平整，有一定的承压面积，相互间分布间距要大。图 7-19 所示用两个或三个凸台支脚作为支承面，能减少装配接触面。

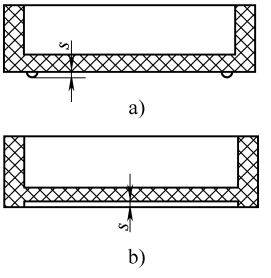


图 7-18　壳体支承面

a）三点底脚　b）周边凸条

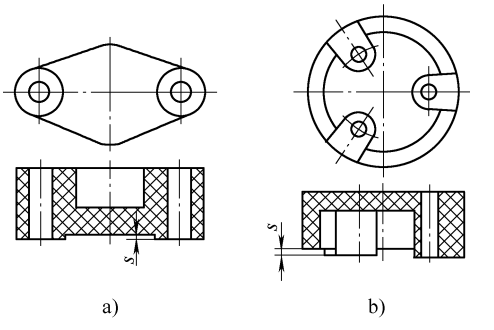


图 7-19　凸台支脚

a）两个支脚　b）三个支脚

6. 圆角

注塑件上的角落，即内外表面的转折处，以及加强肋的根部等处，应设计成圆角。注塑件的圆角半径一般不小于 0.5mm。对于脆性的聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯等，圆角半径不小于 1.0～1.5mm。注塑件对缺口和尖角较为敏感，尤其是在动载荷作用下更是如此。转角区域的应力集中系数 k 见图 7-20。圆角半径 r 与悬臂梁厚度 s 之比为 0.25～0.75 时，转角处的最大应力是根部平均应力的 1.5～2 倍。因此，圆角 r/s 应在 $0.25s$ 以上。过大的圆角（$r>0.75s$）并无意义。采用图 7-21 所示的保持壁厚一致的内外圆角，是一种最佳的设计。内外圆角半径必须是 $r=s/2$，$R=3s/2$。

注塑件上采用圆角不仅降低了应力集中系数，提高了抗冲击抗疲劳能力，而且改善了塑料熔体的流动充模性能，减少了流动阻力，降低了局部的残余应力，防止了开裂和翘曲，也使注塑件外形流畅美观。成型模具型腔有了对应的圆角，提高了成型零件的强度。还需注意，在分型面、顶杆和推块的运动配合面及镶块的接缝处，通常不设置圆角，以防止漏料和产生飞边。

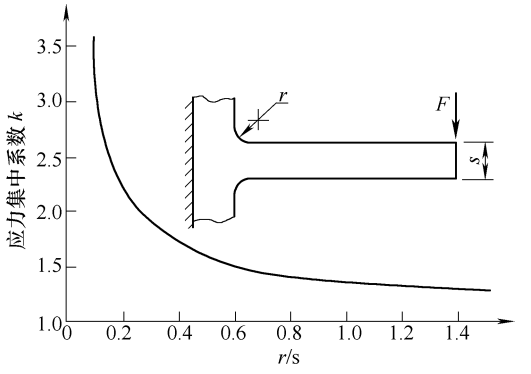


图 7-20　圆角与应力集中系数 k

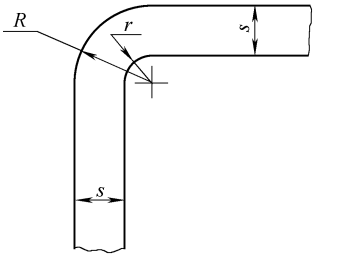


图 7-21　内外圆角的转折

7.2　制品注射成型的工艺性

设计注塑件上的孔，拟定模具脱模斜度，装饰制件表面，与注射工艺和模具设计的关系最密切。

7.2.1　孔的设计

注塑件上注射成型的孔，有的是为了装入其他零件，有些还有配合精度的要求；有的孔是起修饰作用；或者为了省些物料；也有是为了专门散热通风等。多数孔是由模具中的型芯或型芯杆直接成型的。其类别有不通孔、通孔、阶梯孔、凹阶孔和交截孔；按注射成型时与主分型面的开模方向关系，有平行孔、垂直孔和倾斜孔。

1. 孔径、孔深和孔距

成型孔的直径和深度，对应模具上是型芯的直径和高度。不通孔对应模具上的型芯是悬臂梁，通孔的型芯可设计成简支梁。在几百个大气压的注射熔体单向压迫下，细长的、悬臂支承的型芯更容易弯曲变形，型芯的位置更易偏移。表 7-3 所推荐的最小直径、最大长径比可用来限制孔的设计。

表 7-3　成型孔的极限尺寸　　（单位：mm）

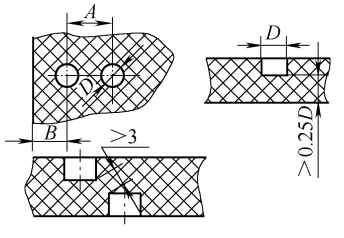
成型方法	塑料名称	最小孔径 d	最大孔深		孔边最小厚度
			不通孔	通孔	
热固性塑料压制与压注	压塑粉	3	压制 $2d$ 压注 $4d$	压制 $4d$ 压注 $8d$	$1d$
	纤维塑料	3.5			
	碎片塑料	4			
热塑性塑料注射成型	聚酰胺	0.2	$4d$	$10d$	$2d$
	聚乙烯				$2.5d$
	软聚氯乙烯				

（续）

成型方法	塑料名称	最小孔径 d	最大孔深		孔边最小厚度
			不通孔	通孔	
热塑性塑料注射成型	聚甲基丙烯酸甲酯	0.25	3d	8d	2.5d
	硬聚氯乙烯				2d
	氯化聚醚	0.3			
	聚甲醛				
	聚苯醚				
	抗冲聚苯乙烯				
	聚碳酸酯	0.35	2d	5d	2.5d
	聚砜				2d

型芯对充模熔体有分离作用，在孔的下游一侧有熔合缝。脆性塑料和玻璃纤维充填塑料的熔合缝区域的力学性能很差。因此在两孔之间，在孔与边缘之间的尺寸有所限制。两成型孔之间和孔与边缘之间的极限尺寸推荐值见表 7-4。

表 7-4　两成型孔之间和孔与边缘之间的极限尺寸　（单位：mm）



孔径 $D\geqslant$	孔间距 $A\geqslant$	孔边距 $B\geqslant$
1.5	3.5	2.3
2.0	4.5	3.0
3.0	6.0	4.0
4.0	7.5	4.5
5.0	9.5	5.5
6.0	11.0	6.0
8.0	15.0	8.0
10.0	19.0	9.0

2. 孔的成型

在设计成型孔时还需注意以下几方面：

1）对于装配紧固用的联接孔，应设置凸台，有时还附设凸台的加强肋。如图 7-22a 所示，固定孔的孔间距与孔边距过小，孔边缘强度不够。图 7-22b 所示为采用凸边增厚孔的边缘。

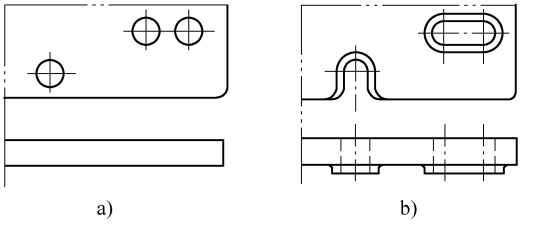


图 7-22　凸边增厚孔的边缘

a）固定孔的孔间距与孔边距过小　b）凸边增厚加强

2）制品上孔间距有公差要求的装配用孔，其孔间距受收缩率影响而有误差。如图 7-23 所示，在设计制品时可考虑将其中一个圆孔改为长腰形孔。

3）用注射模上两个悬臂型芯对接成型通孔，如图 7-24 所示。受定模与动模的定位误差影响，两段成型孔不同轴。可用图 7-24b 所示方法，其中一根型芯比制品孔径大 0.8mm，保证成型孔的使用要求。

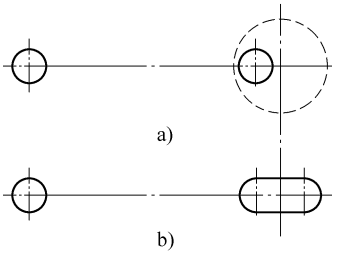


图 7-23　补偿孔距误差的设计

a）孔间距有误差　b）改为长腰形孔

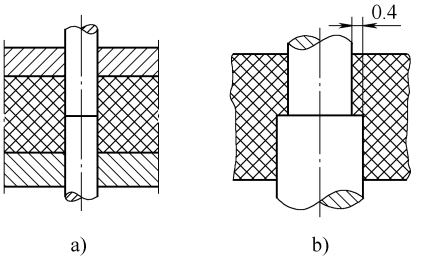


图 7-24　对接两型芯的成型设计

a）对接两型芯孔　b）其中一根型芯比制品孔径大 0.8mm

4）采用简支梁模式的型芯，其刚性好。但是对模板上用于与型芯配合的孔的精度要求高，不能有熔体泄漏。而且应当是通孔，溢料能方便清理。图 7-25a 的型芯设计不能用于热固性塑料制品的通孔成型。热固性塑料的溢料刚硬很难清理，会压弯折断型芯，常用的是图 7-25b 所示的型芯成型。

5）在成型两个垂直的截交孔时，小孔型芯应先从侧向抽拔，再脱出大孔型芯，如图 7-26 所示。

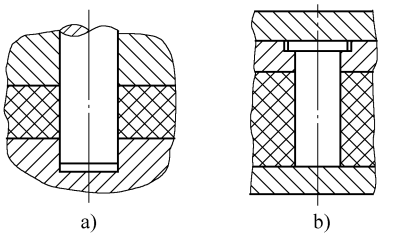


图 7-25　常用的型芯成型通孔的结构

a）不宜采用型芯头触底　b）型芯成型通孔结构

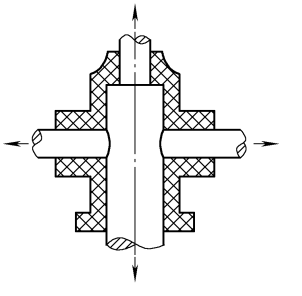


图 7-26　成型两个垂直的截交孔的型芯成型

6）成型不通孔时，底部壁厚应大于 1/6 孔径，如图 7-27a 所示。若底部壁厚小于 1/6 孔径，则应如图 7-27b 所示，设计成不通孔底壁外凸，凸出底部壁厚 c 等于制品壁厚 s 为好，且转角为圆角。

7）通孔成型型芯侧背在熔体料流分离后重新汇合，生成强度较差的熔合缝。如图 7-28 所示，可先注射成型不通孔，再用钻头切削加工成通孔。该成型不通孔深度应为制品壁厚 s 的 2/3。

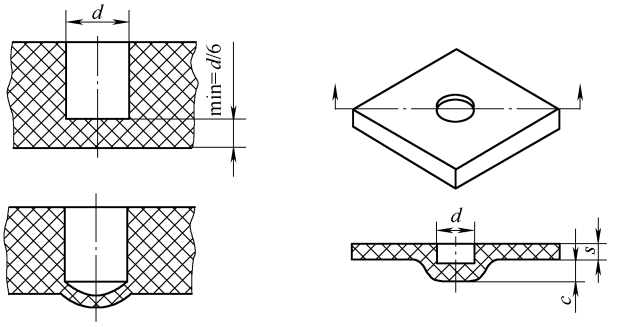


图 7-27　不通孔时底壁外凸的设计

a）不通孔的底部　b）不通孔底壁外凸的设计

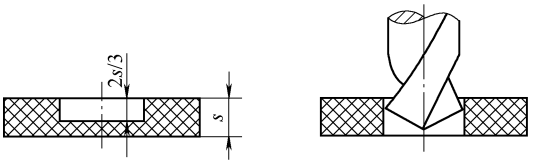


图 7-28　先成型的盲孔再切削加工

8）对于矩形孔，塑料熔体流经型芯侧背时，易形成可见的流动痕迹，可用加大侧背圆角等方法来改善，如图 7-29 所示。

9）壳体侧壁上的通孔有熔合缝生成。改成图 7-30b 所示的敞口槽，消除了熔合缝，又避免了用侧向抽芯机构，从而简化了模具。

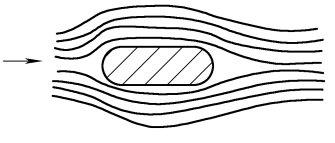


图 7-29　矩形孔成型型芯侧背设计

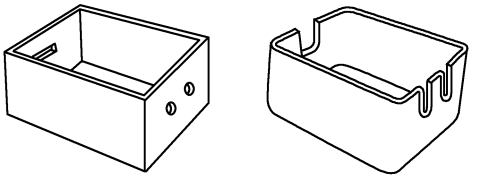


图 7-30　壳体侧壁上的通孔改为敞口槽

a）侧壁上的通孔　b）改为敞口槽

3. 可简化模具的孔设计

改变注塑件外形的结构设计，避免侧向分型抽芯，简化了模具。例如图 7-31a 所示的矩形孔成型，需侧向抽芯。改成图 7-31b 和图 7-31d 所示的斜侧壁，或改成图 7-31c 和图 7-31e 所示的台阶侧壁，从而避免了侧向抽芯。

图 7-32a 所示的口杯把手，在注射成型时需侧向分型。改成图 7-32b 后，避免侧向

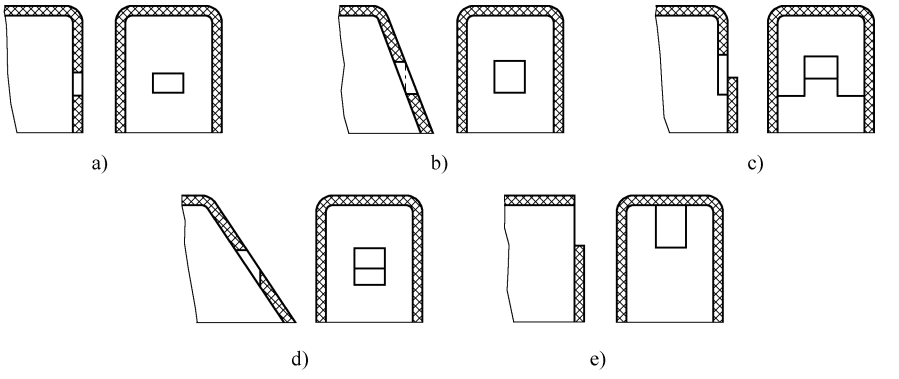


图 7-31　改变注塑件侧壁避免侧孔抽芯

a）需侧向抽芯成型矩形孔　b）侧壁斜向后型芯拼合　c）台阶侧壁可避免侧抽
d）侧壁斜向大，免侧抽　e）侧孔在底壁避免侧抽

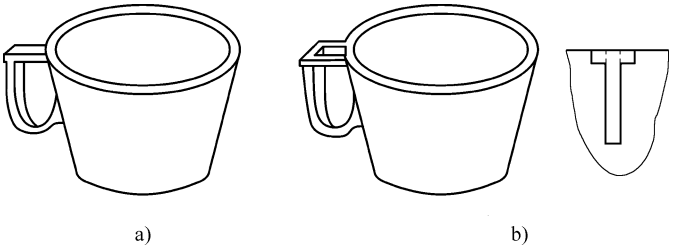


图 7-32　口杯把手避免侧向分型

a）需侧向分型成型把手　b）避免侧向分型的把手

分型。图 7-33a 的结构设计需用内侧抽芯成型侧向内凸台。改成图 7-33b 后，可避免内侧抽。但需外侧抽成型侧孔。再改成图 7-33c 可避免侧抽。

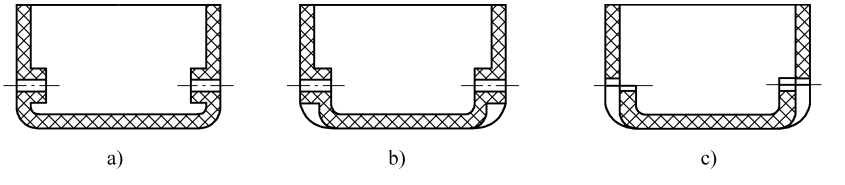


图 7-33　内侧凹注塑件的改进

a）底部需内侧抽芯　b）避免内侧抽芯　c）避免侧向抽芯

注塑件上斜孔、坡形孔、阶梯孔和三通等形状复杂的孔，设计成双向拼合的型芯组为好，见图 7-34。

7.2.2　脱模斜度

注塑件从成型模具中脱模时，要克服开模力和脱模力。开模是指注塑件外形从型腔

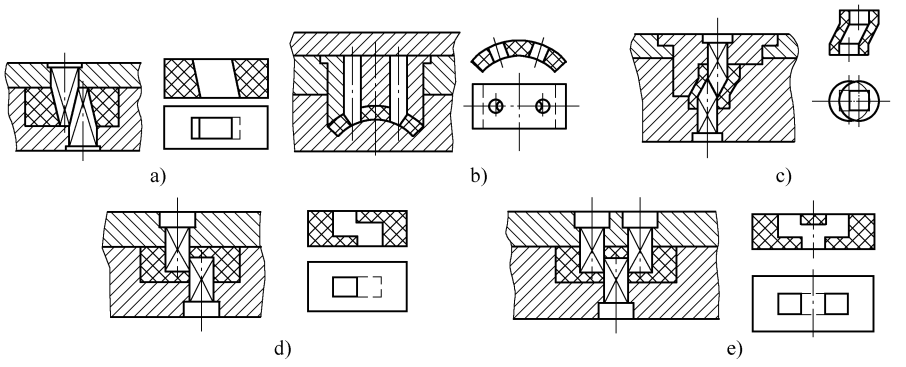


图 7-34　拼合型芯成型复杂孔

a）成型斜向矩形孔　b）成型曲面上的锥形孔　c）成型斜向矩形通孔
d）成型曲折矩形通孔　e）成型矩形的三通

中脱出。脱模是指注塑件的内孔表面从模具的型芯上脱出。模内注塑件有冷却收缩过程，成型注塑件的孔壁对型芯有径向的包紧力。在脱模温度下，注塑件从型芯上推顶脱出时的摩擦力很大。孔底封闭的注塑件，脱模时还有真空吸力存在。因此，脱模力比开模力大得多。过大脱模顶出力会使注塑件变形、发白、起皱和表面擦伤。脱模斜度是决定脱模力大小的众多因素之一。脱模力不但与注塑件的材料性能、几何形状和尺寸、注塑件金属成型零件的表面性能等有关，还与注射工艺的压力和温度有关。因此，脱模斜度应该在对注射成型时的脱模力分析和估算的基础上确定。

沿着脱模时抽拔运动方向扩张的脱模斜度，如图 7-35 所示。如果脱模斜度出现负值，就成为有破坏性的强制脱模。注塑件在克服脱模摩擦运动方向上应有斜度。

对有脱模斜度的表面，应该明确尺寸基准，如图 7-35 上的 d 和 D 所示。对于孔类的内形尺寸 d，应保证其小端尺寸达到公差要求。对于轴类的外形尺寸 D，应保证大端尺寸符合公差要求。这样才能保证装配时的互换性。在此情况下，斜度 α 可不包括在制品尺寸公差内。

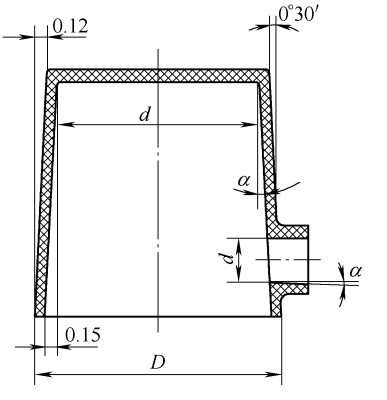


图 7-35　注塑件的脱模斜度

如图 7-35 所示用角度和线性尺寸标注法，注塑件图上要夸大斜度。而用比例标注法［例如 1∶50（折合斜度 1.15°）］，＜1∶100（折合斜度 0.57°），“＜”表示脱模斜度方向，则不必在视图上绘出斜度。在技术条件栏里说明脱模斜度，也是常用的表达方法。

热塑性塑料的注塑件，对于型芯的脱模斜度最小为 30′，型腔中的塑件外表面可以为 20′或更小。但对玻璃纤维增强塑料，对型芯的脱模斜度要考虑在 1°30′以上。热固性

塑料的注塑件，对型芯的脱模斜度最小为 20′。如果注塑件的内外表面的脱模斜度相同，则注塑件的壁厚就均匀一致。脱模斜度与塑料材料的弹性模量关系密切。刚硬的塑料，收缩包紧力大。脱模斜度是影响脱模力大小的重要因素，可以经分析计算来比较。推荐各种塑料的脱模斜度见表 7-5。脱模斜度随脱模高度增加而减小。表 7-6 所列为各种塑料制品内外表面的脱模斜度，与表 7-5 中 50 ~ 80mm 脱模高度的斜度相当。

表 7-5　各种塑料的脱模斜度

脱模高度/mm		<6	>6 ~ 10	>10 ~ 18	>18 ~ 30	>30 ~ 50	>50 ~ 80	>80 ~ 120	>120 ~ 180	>180 ~ 250
塑料类别	自润性好的塑料(例聚酰胺、聚甲醛等)	1°45′	1°30′	1°15′	1°	0°45′	0°30′	0°20′	0°15′	0°10′
	软质塑料(例聚乙烯、聚丙烯等)	2°	1°45′	1°30′	1°15′	1°	0°45′	0°30′	0°20′	0°15′
	硬质塑料(例聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯、ABS、聚碳酸酯和注射型酚醛塑料等)	2°30′	2°15′	2°	1°45′	1°30′	1°15′	1°	0°45′	0°30′

表 7-6　各种塑料制品内外表面的脱模斜度

塑 料 名 称	制品外表面脱模斜度	制品内表面脱模斜度
聚酰胺 PA	20′ ~ 40′	25′ ~ 40′
玻璃纤维增强聚酰胺 GF-PA	20′ ~ 50′	20′ ~ 40′
聚乙烯 PE	20′ ~ 45′	25′ ~ 45′
氯化聚醚 CP	25′ ~ 45′	30′ ~ 45′
聚甲基丙烯酸甲酯 PMMA	30′ ~ 50′	35′ ~ 1°
聚碳酸酯 PC	35′ ~ 1°	30′ ~ 50′
聚苯乙烯 PS	35′ ~ 1°30′	30′ ~ 1°
ABS	40′ ~ 1°20′	35′ ~ 1°
抗冲聚苯乙烯 HIPS	35′ ~ 1°30′	30′ ~ 1°
聚甲醛 POM	35′ ~ 1°30′	30′ ~ 1°

在确定脱模斜度过程中，要考虑三个方面的关系：

1）在必须保证塑件尺寸精度时，脱模斜度造成的制品尺寸误差必须限制在该尺寸公差之内。

2）为避免或减小脱模力过大而损伤注塑件，对于收缩较大、形状复杂、对型芯包紧面积较大的注塑件，应该考虑较大的脱模斜度。

3）为使开模后注塑件留在动模一侧的型芯上，可以考虑注塑件的内表面取较小的脱模斜度。

此外，有花纹的侧表面需特大的脱模斜度，常见有 4° ~ 5°。每 0.025mm 花纹深度要取 1°以上的脱模斜度。壳类注塑件上有成排的网格或孔板时，斜度要取 4° ~ 8°以上。网格、孔越多越密，斜度越大。

7.2.3　表面装饰

为了美观制品的外形，也有的是为了提高制品表面的摩擦等性能，常对制品表面进行装饰处理。

1. 花纹

在手柄和旋钮等注塑件的表面上，设置凹凸花纹可增大摩擦力，以便于操作。在带有螺纹的瓶盖类制品的外表面上成型花纹，既利于成型时止转，又便于使用时产生开启扭矩。

图 7-36 所示的两种直纹便于模具制造和脱模。细花纹和粗花纹的尺寸见表 7-7。花纹不得影响制品的脱模，且要求整修方便。菱形走向花纹很难脱模。花纹贯通，在分型面处凹凸花纹的毛边清理费时，以及花纹在制品周围表面的中央，模具制造和脱模都很困难。花纹应顺着脱模方向，并沿着脱模方向有一定斜度。花纹的高度大于 0.3mm，高度不超过宽度。花纹不能太细小，以免加工模具困难。对于圆锥表面上的花纹，特别注意其可加工性。花纹一般均布在制品表面上，也有分组集中布置的。

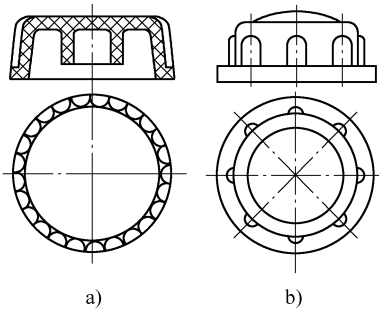
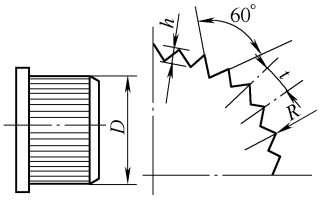
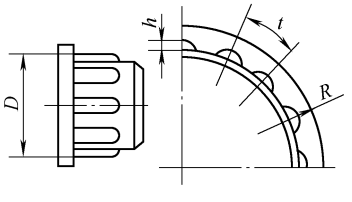


图 7-36　制品侧表面上花纹

a）细花纹　b）粗花纹

表 7-7　细花纹和粗花纹的尺寸　　（单位：mm）

	细花纹				粗花纹			
图例								
直径 D	≤18	>18～50	>50～80	>80～120	≤18	>18～50	>50～80	>80～120
齿距 t	1.2～1.5	1.5～2.5	2.5～3.5	3.5～4.5	$4R$			
半径 R	0.2～0.3	0.3～0.5	0.5～0.7	0.7～1	0.3～1	0.5～4	1～5	2～6
齿高 h	$0.86t$				$0.8R$			

在塑料制品端平面上，可以是圆形条纹，也有直条纹或网状花纹。在圆形表面上用同心圆条纹，或者用条纹线相互夹角为 90°的网状条纹；在矩形或正方形表面上用平行的直条纹，或采用沿对角线方向布置的交角为 90°的网状花纹。网状花纹的两条纹交角不能太小。交角太小会产生尖角，对制品强度和模具加工不利。过去，成型平面条纹用机械切削加工，费工费时。现在用橘皮纹等图案替代，可用金属表面腐蚀方法加工模具。

2. 装饰图案

注塑件表面的凹陷、流动痕和疵点等缺陷，在较大平面上总有显露。近年来，表面带有装饰图案花纹的注塑件得到广泛应用。表面修饰提高了注塑件的外观质量和附加值。常见的注塑件表面修饰有皮革纹、橘皮纹、细砂花纹、织物纹和木纹等。模具型腔表面的图案花纹加工方法有手工、机械、激光雕刻、电脉冲成型和电化学加工等。目前，大多采用照相化学腐蚀法。要求提供放大 1 ~ 2 倍的大反差的黑白着墨画稿。画稿上白色将来在注塑件面上是凹部，黑色在注塑件上是凸部。细条不能过密，这与花纹的强度有关。金属被腐蚀表面显露出花纹即可。如果在注塑件的侧壁上设置花纹，必须有很大的脱模斜度（3° ~ 10°）。

3. 文字、标记及符号

注塑件表面上的文字、标记和符号可以注射成型。如图 7-37 所示，注塑件表面上的标记有三种类型。

1）表面上凹入的标记，在成型模具上要加工凸形文字或标记，需要大面积切削加工，较为困难。

2）图 7-37b 上，注塑件表面上的凸形标记，在模具上可用冷挤压、电蚀或化学腐蚀加工凹形，或用数控雕刻机床加工，都比较方便。文字凸起高度常为 0.4 ~ 0.8mm，不低于 0.2mm，不超过 1.2mm。标记宽度不小于 0.3mm。标记之间的间隔要大于 0.4mm。标记本身有 8°以上脱模斜度。但凸形的塑料标记容易损坏。

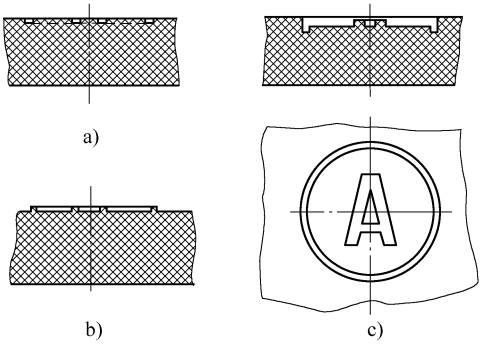


图 7-37　注塑件表面标记的设计

a）凹形标记　b）凸形标记　c）凹坑里的凸形标记

3）图 7-37c 所示是在注塑件的表平面下凹坑中的凸形标记。此有标记的部位用镶块零件拼装。这是最常用的设置标记的方法。注意坑中的凸形标记，要比注塑件表面低 0.2mm 左右。

7.3　嵌件设计

注塑件中的嵌件是预置于模具型腔中的零件，熔体充模后与塑料连接固化成整体。嵌件用金属、玻璃、陶瓷、塑料和木材等制成，其中金属嵌件使用最多。模具中安放嵌件，费工又费时，较大嵌件还需预热，很难用机械手操作。嵌件错放，定位不准，甚至失落，会使注塑件报废并损坏模具。嵌件与注塑件的连接强度是此类制品的弱点，并将影响到长期使用的蠕变和老化性能。

1. 嵌件的作用

塑料与金属相比，它的力学性能例如强度、刚度、稳定性和耐磨性等较差。注塑件

有时需具备一些特殊功能，例如导电、导磁、传热、高度绝缘、透明、双色标记和修饰等，这只有用不同材质的嵌件来实现。

（1）提高注塑件的力学性能　汽车转向盘和手柄等注塑件，用金属做骨架嵌件，如图 7-38 所示，再用手感良好的结构泡沫塑料注射成型，保证了这些注塑件的强刚度和尺寸稳定性。塑料齿轮和带轮等的中央孔，常用金属轮壳或金属轴作为嵌件，保证了与轴承之间的耐磨性。

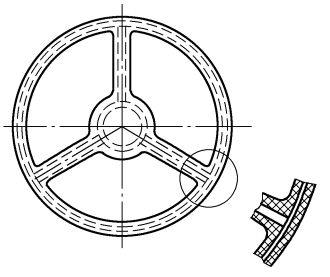


图 7-38　塑料转向盘的嵌件

（2）起连接作用　注塑件需要可拆卸连接时，直接在注塑件上成型螺纹是很困难的，而且塑料螺纹牙的强度较差。金属螺母和螺钉嵌件，对多处紧固的箱与盖很适用。此外，可用金属薄片之类易变形零件，插入注塑件上预留的孔槽中，扭转或弯折后连接在塑料制品上，见图 7-39。

（3）起导电作用　电子电气装备上大量使用的接插件，现都用塑料作为绝缘基体，用铜合金、银等作为导电嵌件，贯穿注塑件又相互绝缘，如图 7-40 所示的焊片、插头和插座。不过，多孔多排的插座或插头常采用装配式嵌件。经弯曲成型的导电铜片富有弹性，可卡夹在注塑件的凹槽孔中。

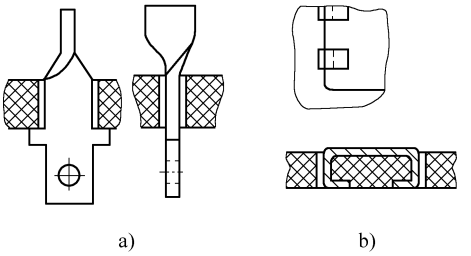


图 7-39　在预留孔中装插并固定嵌件

a）插入后扭转的导电片　b）插入后弯折的装饰片

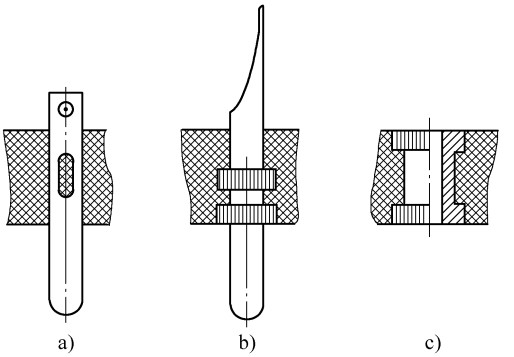


图 7-40　电工接插件

a）焊片　b）插头　c）插座

2. 嵌件的制造

金属嵌件是大批量生产的有一定精度的机械零件，要求结构简单且对称，便于用高效的压力加工生产，例如冲裁、弯曲、冷锻和滚压；尽量利用冷拉和冷轧的型材，以减少和避免金属切削加工；要保证定位和配合尺寸的精度；无论是销柱、套筒或板条都应该有倒角并去飞边，以保证与注塑件的牢固连接。

对于嵌件与注塑件的材料选用，要考虑到成型的冷却过程中两种材料不同的线胀系数（见表 7-8）。热固性塑料线胀系数小，易于与金属嵌件紧固；热塑性塑料与金属嵌件线胀系数相差很大。对于脆性塑料，例如聚苯乙烯 PS、乙烯-醋酸乙烯共聚物 EVA 和

四氟乙烯-六氟乙烯共聚物 FEP 等，不宜采用金属嵌件；聚丙烯不宜用黄铜嵌件。

表 7-8　若干材料的线胀系数　　（单位：$\times 10^{-5}/℃$）

材料	线胀系数	材料	线胀系数
酚醛塑料	2.5 ~ 6	钢	1.13 ~ 1.18
酚醛玻璃纤维模压塑料	0.4 ~ 0.66	铜	1.71 ~ 1.75
氨基塑料	2.5 ~ 5.5	黄铜	1.75 ~ 1.88
聚苯乙烯	6 ~ 10	青铜	1.79
聚碳酸酯	4 ~ 7	银	1.98
ABS	8 ~ 12	铝	2.4
聚乙烯	13 ~ 25	刚玉陶瓷	0.35 ~ 0.4
聚酰胺 66	8 ~ 10	高频陶瓷	0.50 ~ 0.55
聚酰胺 66 +30% 玻璃纤维	2.3 ~ 4.0	石英玻璃	0.55

3. 嵌件的形状和表面应设计适当伏陷物

在设计过程中，必须考虑到嵌件与注塑件的连接牢度和注射过程可行。

1）圆柱表面滚花：交叉滚轧的麻柱状花纹如图 7-41a 所示。其连接效果比直纹滚花好，直径滚花在轴线方向易于松动。

2）切口和冲孔：对于片状嵌件，如图 7-41b 所示，用冲压切口或孔当做伏陷物。

3）压扁和弯折：对于细的圆条嵌件，可局部压扁，也可弯折，如图 7-41c 所示。

将六角棒料切割后做成嵌件，由于尖角作用和柱面光滑，抗扭和抗拉都很差。

4）开槽：可在圆柱表面开圆环槽，但周向易松动。如图 7-42 所示，嵌件以圆环槽和直纹滚花组合，效果较好。

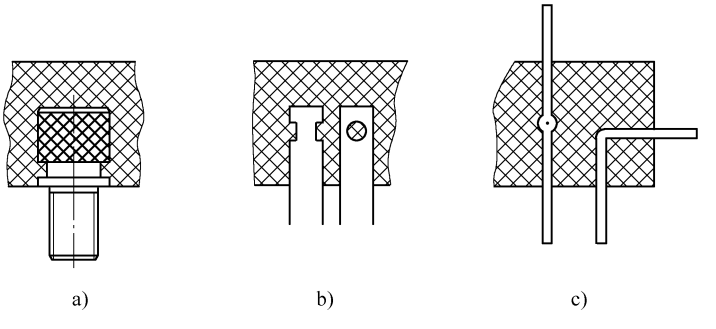


图 7-41　嵌件上的伏陷物

a）圆柱表面滚花　b）切口和冲孔　c）压扁和弯折

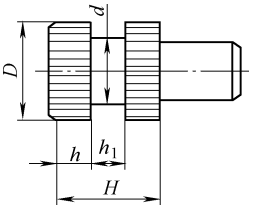


图 7-42　嵌件上的开槽

注：$H = D \sim 2D$；$h = 0.3H$；$h_1 = 0.3H$；$d = 0.75D$。

4. 嵌件在模具内必须可靠定位

嵌件在动模的合模运动中不应松动，在高压熔体冲压下不偏移、不漏料。图 7-43 所示圆柱螺钉嵌件，模具上的圆柱孔与螺杆嵌件上轴段有 H8/f8 配合定位尺寸。图 7-43a 所示螺杆嵌件的轴线方向定位差，熔体有溢入螺纹牙的可能。图 7-43c 所示轴线方向有凸肩定位，熔料不会溢入螺纹牙。图 7-44a 所示螺母嵌件为不通孔，嵌件插入模具上定位芯棒。图 7-44b 所示嵌件为通孔螺母，这就要用可拆卸的螺钉芯棒。在模具外旋

入螺母嵌件，然后一起定位到模具上。

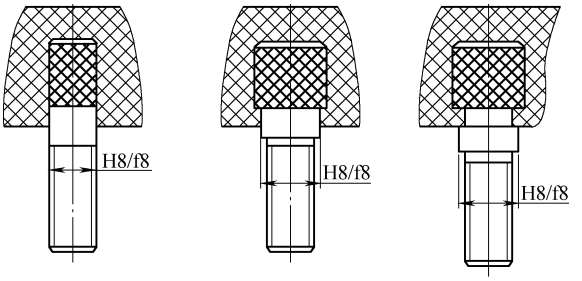


图 7-43　圆柱螺钉嵌件在模具内的定位方式

a）外径定位　b）台阶圆柱定位　c）凸肩定位

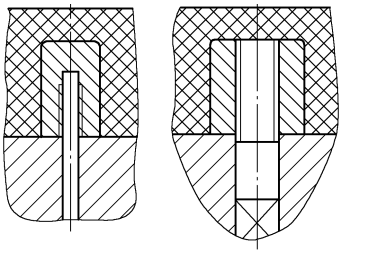


图 7-44　螺母套嵌件在模具内的定位方式

a）不通孔螺母　b）通孔螺母

5. 给薄弱嵌件以支撑

为防止成型过程中熔体冲击或冷却收缩引起嵌件移位，可使用定位杆和支撑杆，如图 7-45a 所示。为了防止柱状嵌件被高压熔体压歪，嵌件高度 h 不宜超过定位直径 d 的 2 倍，必要时给以支撑，如图 7-45b 所示。为防止细长杆在成型时弯曲变形，用如图 7-45c所示的支撑杆。对面积较大片状嵌件及全埋在注塑件中的嵌件，例如汽车转向盘，都用模具上的芯柱支撑。

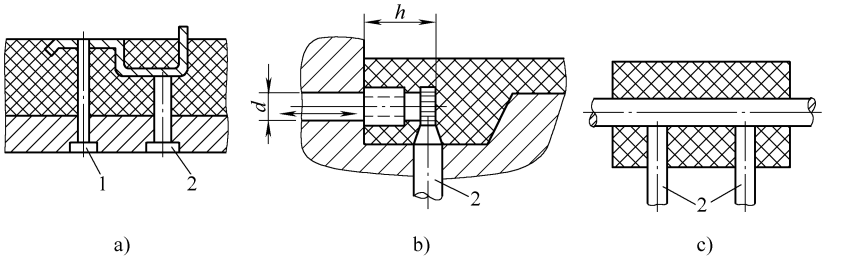


图 7-45　对嵌件的支撑

a）使用定位杆和支撑杆　b）支撑侧向套　c）支撑细长杆

1—定位杆　2—支撑杆

6. 金属嵌件周围的塑料需要足够的厚度

由于金属与注塑件的线胀系数等热性能差异较大，在冷却固化后嵌件周围的塑料有较大的残余应力。嵌件周围同时存在熔合缝，减弱了材料的力学性能。因此，金属嵌件周围的塑料需要足够的厚度，如表 7-9 和表 7-10 所列推荐值。

表 7-9　金属嵌件周围塑料层的最小壁厚　（单位：mm）

塑料材料	金属嵌件的外径 D		塑料材料	金属嵌件的外径 D	
	1.5 ~ 16	16 ~ 25		1.5 ~ 16	16 ~ 25
酚醛塑料	0.8D	0.5D	聚甲醛、聚甲基丙烯酸甲酯	0.5D	0.3D
聚酰胺 66	0.4D	0.3D	醋酸纤维素	0.9D	0.8D
聚酰胺 6	0.5D	0.4D	ABS	1.0D	0.8D

表 7-10　不同直径金属嵌件周围的最小塑料层壁厚　　（单位：mm）

塑　料	嵌件直径					
	4	6	10	12	20	25
ABS	4	6	10	12	20	25
聚甲醛(POM)	1.6	4	5	6	10	12
改性聚苯醚(PPO)	1.6	4	5	6	10	12
聚碳酸酯(PC)	1.6	4	5	6	10	12
高密度聚乙烯(HDPE)	4	6	10	12	20	25
聚丙烯(PP)	4	6	10	12	20	25
纤维素塑料	4	6	10	12	20	25
通用级酚醛树脂(PF)	2.4	4	5	5.5	8	9
中等冲击强度酚醛	2	3.5	4	5	7	8
高冲击强度酚醛	1.6	3	3.5	5	7	8
脲醛(UF)	2.4	4	5	5.5	8	9
环氧树脂(EP)	0.5	0.75	1	1.3	1.5	1.8
醇酸(AK)	4	5	6	8	9	10
邻苯二甲酸二烯丙酯(DAP)	4	5	6	8	9	10
热固性聚酯	2.4	4	4.5	5	6	7
热塑性聚酯	1.6	4	5	6	10	12
密胺(MF)	4	5	5.5	8	9	10

7. 嵌件在塑料制品中的位置

嵌件在注射制品中的位置直接关系到制品外观、强度及使用性能，对成型操作、模具结构及制品修整等都有影响。

1）为方便成型操作和简化模具，制品中嵌件的轴线应平行模具启闭运动方向，避免嵌件轴线垂直或倾斜于模具启闭方向。

2）如果嵌件底面紧靠制品壁面，如图 7-46 所示，型腔中塑料沿壁厚收缩，而有金属嵌件收缩很小，该部位将引起壁面凸起。为此，嵌件底部制品塑料最小厚度 t 应大于 $D/6$。如果是用做导电嵌件，应有高于制品表面的凸台 h，以免电火花和电阻发热引起金属嵌件松动。

3）热固性塑料件断面上相邻两嵌件之间的最小距离应大于 4mm，如图 7-47 所示。否则，易引起嵌件之间塑料裂纹；若嵌件用于传导电流，会引起短路。

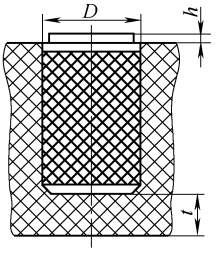


图 7-46　嵌件底部塑料的最小厚度

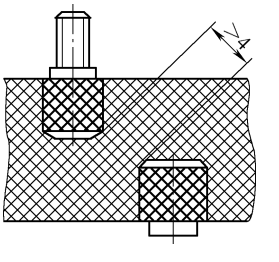


图 7-47　两金属嵌件之间的最小距离

8. 螺纹嵌件的设计

如图 7-48a 所示，阴螺纹的螺母全部嵌入塑料制品中。嵌件端面与制品表面平齐，如图 7-46 所示。嵌入制品内部的嵌件端面的边缘应成倒角或倒圆，以改善嵌件周边注塑件的内应力，避免开裂。有效螺纹长度为阴螺纹直径的 1.5 倍。封胶轴段长 0.8mm，该直径偏差为 ±0.05mm。如图 7-48b 所示阳螺纹的螺钉嵌件，一端嵌入塑料制品中，边缘应成倒角或倒圆，另一端伸出制品表面，保证螺杆与制件表面垂直。

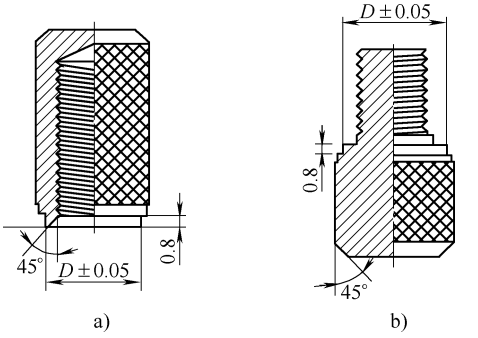


图 7-48　金属螺母和螺钉嵌件设计

a）螺母嵌件　b）螺钉嵌件

7.4　螺纹联接设计

依靠螺纹将注塑件之间或与其他材料零件联接在一起，统称为螺纹联接，可在注塑件上直接加工阳螺纹或阴螺纹与联接件上螺纹啮合紧固；或用注塑件上的金属螺纹嵌件，进行螺纹联接；也有用金属螺栓或螺钉等紧固件来联接注塑件。自攻螺钉因塑料材料易挤压和切削而应用广泛，已是注塑件常用的一种螺纹联接方法。

1. 螺纹设计

（1）注塑件的螺纹联接　螺纹联接是使用最广的可拆联接方式，但用于注塑件联接时有许多特点和难点，以下技术问题必须注意。

1）注塑件上的螺纹牙强度较差，成型困难。

2）注射成型注塑件上螺纹孔或螺钉孔的周边，存在熔合缝。该处材料强度比无缝区低。

3）塑料联接件在紧固后有较高残余应力，存在应力集中。蠕变使联接件的尺寸和联接强度不稳定。

4）螺纹联接的注塑件间的紧固应力的松弛，使制品对气体或液体的密封不可靠。因此须附加柔性或弹性密封垫。

另外，注塑料件的螺钉联接使制品结构复杂，零件数目增多。在采用不同材料，如金属螺钉联接时要仔细考虑热膨胀问题。塑料螺纹紧固同不锈钢那样，可用于高湿度和腐蚀性的场合。塑料螺纹联接与其他连接方法一起使用，往往有很好的效果。如黏接在一起的大型注塑件，注塑件间附加的机械螺纹联接，起定位和夹紧作用。在黏接后的制品使用中，螺纹联接起保障安全作用。

（2）螺纹联接方法

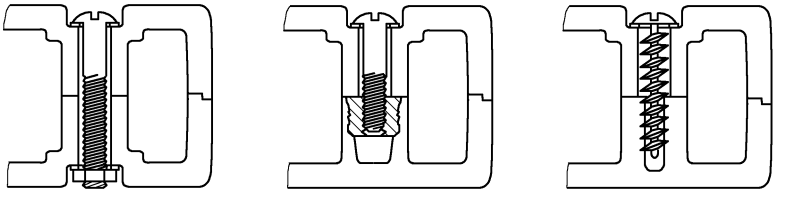
1）螺栓联接。如图 7-49a 所示，用标准螺栓或螺钉，利用注塑件上已有的通孔，并要有螺母和垫圈的装配联接。此种联接可靠耐久，但零件的数目多。设计时要避免螺

栓头和螺母突出在注塑件表面上。在冲击和振动环境下，还需考虑锁紧结构。

由于金属螺栓的强度比塑料件大得多，一般用较小直径的螺栓 4 ~ 22mm。如果采用空心螺栓，则直径可为 6 ~ 50mm。

2）螺钉联接。如图 7-49b 所示，用螺钉紧固啮合在注塑件上的带内螺纹的金属嵌件上。在注射成型注塑件时，要在模具中安放螺纹嵌件。也有将金属嵌件压入注塑件的。金属嵌件制造成本较高。嵌入注塑件又需专门的工序或工具。嵌件周边塑料的牢固强度很难保证。因此，此种方式用在小型塑料制品的联接。嵌件的螺纹公称直径在 8mm 以下。不过，螺钉联接的装配件较少，整体外观较好，装拆也方便。

3）自攻螺钉联接。如图 7-49c 所示，用金属自攻螺钉，在塑料件上预制孔，装配时攻旋螺钉构成联接。它适用于大批量的产品生产，但拆卸次数很有限。此种联接所用的零件最少，成本也最低。它在装配期间成型相啮合的螺纹，对装配力矩等技术要求高，常用自攻螺钉的直径为 M2 ~ M6。



a)　　b)　　c)

图 7-49　塑料壳体的机械夹固螺纹联接

a）螺栓联接　b）螺钉联接　c）自攻螺钉联接

4）注射成型螺纹。　成型注塑件上的外螺纹，用带内螺纹的成型环，在脱模时必须旋转退出，因此模具结构复杂。另一方法是用瓣合的滑块成型。但被成型的外螺纹的侧向有分型飞边。聚酰胺管接头大都用此方法成型。注塑件上的内螺纹，可用带螺纹的成型杆成型，也须在脱模时旋退，也有用强制顶出脱模的，但只能用于细小的半圆形螺纹。

塑料螺钉与塑料螺母的螺纹联接，应用于需要电绝缘和化学阻抗的场合，且必须无热膨胀匹配问题，但存在蠕变现象和颇大的成型成本。适用的塑料材料有聚酰胺、聚甲醛、聚丙烯、聚四氟乙烯和聚酰亚胺。

我国目前尚无注塑件的螺纹标准，多参照金属螺纹联接的有关标准，常用 60°牙型角的三角螺纹。注塑件上螺纹多用粗牙，且应当用较大圆角以减小应力集中。此外就是寸制管螺纹，牙型角 55°，牙顶有较大圆角。用于螺纹密封的管螺纹，螺纹分布在锥度为 1:16 的圆锥管壁上。还有一种米制管螺纹，牙齿角 60°，螺纹牙为平顶，螺纹分布在锥度 1:16 的圆锥管壁上。

玻璃瓶塑料盖的联接螺纹多采用圆形牙型，以避免尖角处应力集中，也可强制脱模。若采用牙根宽而牙型窄小的圆牙，还有利于牙距误差的补偿。

（3）塑料螺纹设计　为了便于成型塑料螺纹，有以下须遵循的设计要点：

1）塑料螺纹精度较低，一般为6～9级。成型的内螺纹，由于螺纹型芯较易加工，所以其精度可比外螺纹高1级。螺纹大径小于2mm，螺距小于1mm时，不宜采用塑料螺纹联接。

2）螺纹的旋合长度不大于螺纹直径的1.5倍。

3）螺纹中径应有0.1～0.4mm间隙。必要时在大径上设2.5°～4°的脱模斜度。

4）注塑件上内、外螺纹的起始和结束应有过渡的孔或台阶0.5mm左右，如图7-50所示。该台阶增加螺纹牙的强度，还对螺纹联接的配合起引导作用。

5）螺牙的始终端不应有突变，以防螺纹牙崩裂，保证旋合，如图7-50所示，应有过渡长度 L，保证螺牙始末的强度。注塑件上螺纹的始末过渡长度 L 见表7-11。

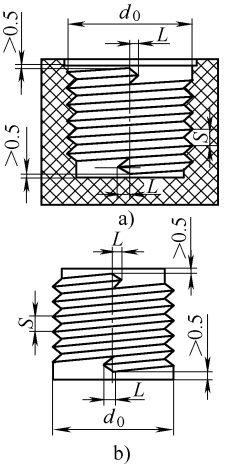


图7-50　注塑件上内外螺纹的设计

a）内螺纹　b）外螺纹

6）同一制品上有多段螺纹时各段螺纹的螺距和旋向应相同，以便于成型螺纹旋转脱模，如图7-51a所示。用一个螺纹型芯杆成型，模具结构简单。如果同一孔中的两段螺纹的旋向不同，或螺距不同，需用组合螺纹成型。如图7-51b所示，其中一段螺纹用活动嵌件，注塑件脱模后在制品上人工旋出。

表7-11　注塑件上螺纹的始末过渡长度 L　　（单位：mm）

螺纹直径	螺距 S			
	<0.5	>0.5～1	>1～2	>2
≤10	1	2	3	4
>10～20	2	3	4	5
>20～30	2	4	6	8
>30～40	3	6	8	10
>40	3	8	10	12

7）两塑料制件以内外螺纹联接，若要求两制品在联接面完全接触，如图7-52所示，可在外螺纹末端增加凹槽，使末端的无螺纹轴段置于凹坑中。

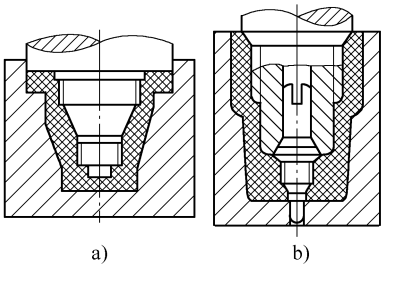


图7-51　多段螺纹的注射成型

a）两段螺纹的旋向和螺距相同　b）两段螺纹的旋向或螺距不同

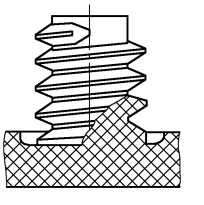


图7-52　保证联接面接触的外螺纹

8）用推件板强制脱出螺纹制品时，螺牙发生弹性变形。为防止螺牙在强制脱模过程中破裂，螺牙用半圆形或者圆角的梯形。因此，刚性热固性塑料和脆性的热塑性塑料（例如丙烯腈-苯乙烯共聚物 AS、聚苯乙烯 PS 和聚碳酸酯 PC 等）的螺纹注射成型，不宜强制脱模。对于螺牙的变形可进行应变校核，校核公式为

$$(d_{大} - d_{小})/d_{小} \leqslant e \tag{7-2}$$

式中　$d_{大}$、$d_{小}$——分别为注塑件外螺纹的大、小径尺寸（mm）；

e——螺牙塑料的应变，见表 7-12。

表 7-12　强制脱螺纹的允许应变

塑料材料	65℃时应变	塑料材料	65℃时应变
ABS	0.08	低密度聚乙烯(LDPE)	0.21
聚甲醛(POM)	0.05	高密度聚乙烯(HDPE)	0.06
丙稀酸塑料	0.04	聚丙烯(PP)	0.05
聚酰胺(PA)	0.09		

传动用螺纹有矩形螺纹、梯形螺纹和锯齿形螺纹一般螺杆用金属，螺母用聚酰胺、浇铸（MC）聚酰胺，氯化聚醚或聚甲醛等。螺母与金属套镶嵌在一起，螺母的各塑料螺纹圈上受力较均匀，效果会更好。校核设计时，在塑料螺母的螺纹圈上作载荷分析，其组合压应力小于材料的允许压应力。

2. 螺栓联接

机械螺栓或螺钉、螺母和垫圈被广泛地用于注塑件的联接装配。此种联接的结构形式有两种。一种是螺栓头和螺母暴露在塑料件的表面上，注塑件上预制通孔，装配方便，尤其便于自动装配。对于注塑件，应用较多的是另一种埋藏式结构，即将螺栓头和螺母置于预制的凹坑内，使塑料制品表面平整，便于外观装饰美化，有时甚至成型六边形的凹坑，起止转作用，便于装配。

螺栓联接不同材料的盘和片材时，如图 7-53 所示，需考虑不同的热膨胀特性。图

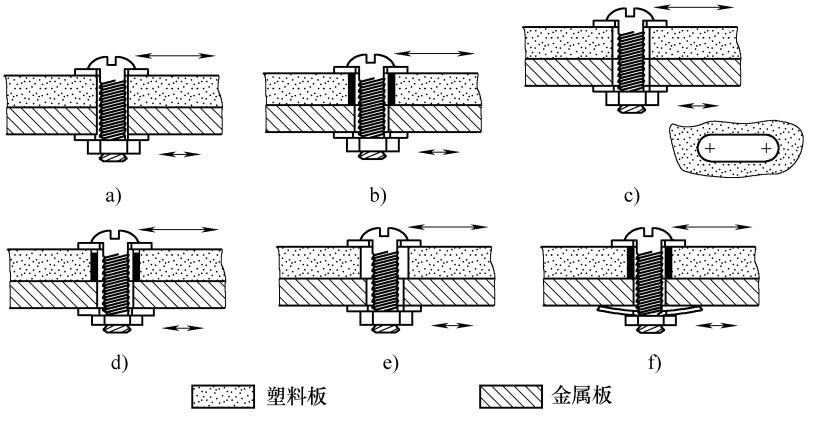


图 7-53　塑料板和金属板的螺栓联接的设计

a）装配孔的间隙过小　b）添加金属套　c）开腰形槽　d）加弹性垫片　e）大间隙的装配孔　f）用弹簧垫圈

7-53a 中的孔与螺栓间的间隙太小。被联接的金属件和注塑件被严格地约束，无伸缩和位移的余地。联接件容易产生弯曲变形和引发内应力。如图 7-53b 所示，采用较大的装配孔，并添加金属套于注塑件的孔中。这样允许热补偿和位移，使两联接件容易对准，且能平整地联接。如图 7-53c 所示腰形槽，使联接件在一个方向可调整移位。图 7-53d 中，两联接件之间加装弹性垫片，可补偿压缩负载，耐久地保持夹紧力。如图 7-53e 所示，对热膨胀较大的注塑料件用大间隙的装配孔，这样两个被联接件的对准误差会很大。图 7-53f 所示为用弹簧垫圈实现轴向压缩负载的补偿。

图 7-54 说明塑料壳体螺栓联接的设计。图 7-54a 所示是无支承柱的错误设计。在螺栓紧固力作用下，壳体会产生很大的变形和偏移。图 7-54b 所示为正确设计，不但设置支承座，而且在支承面之间留一定间隙。支承柱被压缩前，壳体可利用外侧定位槽调整接触状态。在螺母并紧旋压后螺栓受到拉力，支承柱受压缩力。因此，壳体的结构设计应有足够的壁厚和支承，以保证在压缩状态下装配件的稳定性。螺栓与装配孔之间一般有约 0.25mm 的内径间隙。既有利对准装配，也允许温差补偿。

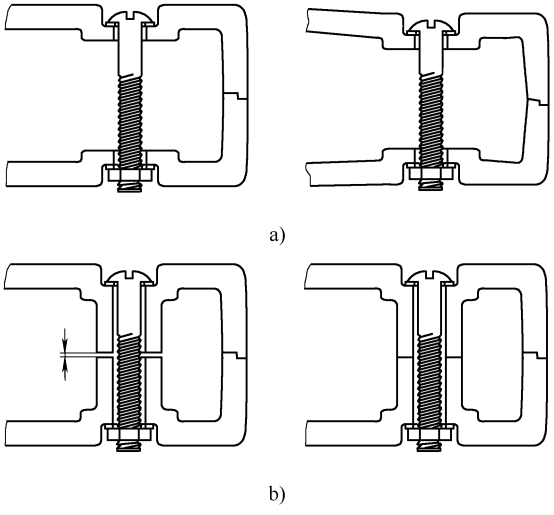


图 7-54　塑料壳体间螺栓联接的设计

a）错误　b）正确

螺栓联接在装配时要施加预紧力。在两联接件接触后还要追加一定的紧固旋转力。在联接件的使用期内，预紧力补偿制品的热膨胀；补偿制品的翘曲变形和各参量的变化。垫圈用于螺栓头、螺母与注塑件表面之间，可使负载均匀，并减小应力集中。使用弹簧垫圈可防止在冲击和振动下螺栓联接松动，也补偿了松弛的预紧力。在大多数情况下使用的钢制螺栓或螺钉，会对注塑件产生过量的紧固力，因此必须控制装配旋紧螺栓的力矩。如图 7-53b所示，在注塑件的装配孔中加装金属套，可限制对注塑件的紧固力。这种金属套可以在装配时插入，也可压力装配，也有作为嵌件成型到注塑件中。

金属螺栓联接注塑件时主要的技术问题是两者的热膨胀匹配。塑料的线胀系数比钢大。装配后，倘若环境温度发生变化，将会导致被联接件上压缩应力增大或减小。假定钢螺栓的线胀系数为零，在低于装配温度时注塑件收缩，使预紧力减小，引起松动。在高于装配温度时，注塑件产生热膨胀后压缩负载增大，会引起翘曲变形和应力开裂。因此，必须严格控制旋紧力矩。

举例说，如图 7-54b 所示在室温下用 M6 螺栓和螺母联接注塑件。每个螺栓的作用长度为 50mm。注塑件的联接面接触后，螺栓被旋紧 0.25 圈。已知 M6 螺栓的螺距为

1mm。在螺栓附近区域，产生的压应变为

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{0.25 \times 1}{50} = 0.005$$

此塑料材料的压缩模量 $E_c = 1200\text{MPa}$，因此压应力大约为

$$\sigma = E_c \varepsilon = 1200 \times 0.005\text{MPa} = 6\text{MPa}$$

实际上，注塑件之间紧固一般是多个螺栓相联接，要按多个螺栓受拉伸和注塑件受压缩的综合刚度计算。

被联接注塑件受到的压应力，会随时间推移松弛，更会在环境温度下降时减小。弹性模量也会随温度变化。上例中，倘若此塑料线胀系数是 $8 \times 10^{-5}/℃$；钢的线胀系数为 $11 \times 10^{-6}/℃$。两者相差 $69 \times 10^{-6}/℃$。从室温 22℃起始，在降低到 -50℃前，两注塑件间就无压应力了。如果采用铝合金螺栓，具有约 2 倍的钢材线胀系数。与注塑件有较好的热匹配，但成本较高。

3. 自攻螺钉

自攻螺钉的联接紧固方法，在大批量生产的电气、仪表和电子产品的装配中得到广泛应用。装配联接时不用垫圈，或者采用与垫圈组合在一起的螺钉头，可不使用嵌件和螺母，装配联接零件最少，成本低，而且适合在装配流水线上，采用电动或气动工具快装。

（1）有关自攻螺钉的技术术语

1）底孔（即预制孔）：用注射成型或钻孔在注塑件上加工出接受自攻螺钉的孔。该孔径比螺钉的大径小；比螺钉的小径大。底孔有两种，一种是可排屑的通孔；另一种是孔底封闭的不通孔。如图 7-55 所示，螺钉通过其中一个注塑件的通孔，然后旋入另一注塑件上的底孔。此联接件上通孔与螺栓外径间的间隙为 $z = 0.25\text{mm}$。

2）螺钉的啮合长度：螺钉轴线方向穿过底孔的螺纹部分长度，包括刮削部分螺纹长度。

3）螺钉的作用深度：如图 7-55 所示，螺钉啮合到孔座壁的径向深度。控制螺钉的作用径向深度比为

$$U = \left(\frac{d - D_s}{d - d_1}\right) \times 100\% \quad (7\text{-}3)$$

其螺钉螺纹半径方向的深度 $u = 0.5(d - D_s)$。

4）最大的旋进力矩：如图 7-56 所示，螺钉旋进使被联接件开始接触合并的力矩，是起始旋进阶段的最大力矩。

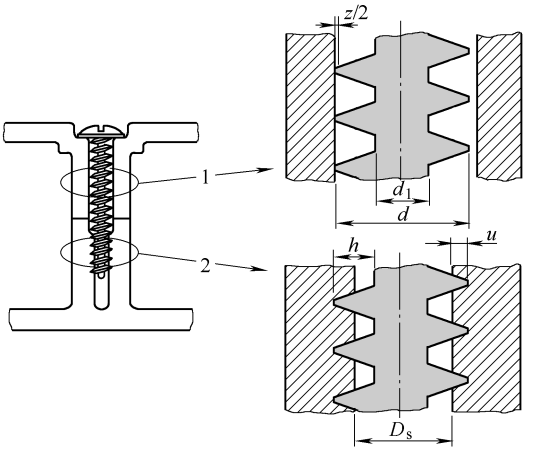


图 7-55　自攻螺钉的联接

1—通过间隙孔　2—攻旋的不通孔

$z/2$—半径上的间隙　d—螺钉的大径　d_1—螺钉的小径

h—螺牙深度　u—螺钉的径向深度　D_s—孔座上底孔的内径

5）紧固力矩：被联接件压缩负载增加时，推荐的旋进终止力矩。最大旋进力矩 T_{in} 至紧固力矩 T 间施加的是预紧力矩。

6）剥裂力矩：被联接件底孔的牙深区域材料，在自攻螺钉的紧固作用下，被挤压超过屈服点 C 后出现破坏时的力矩 T_{lim}。

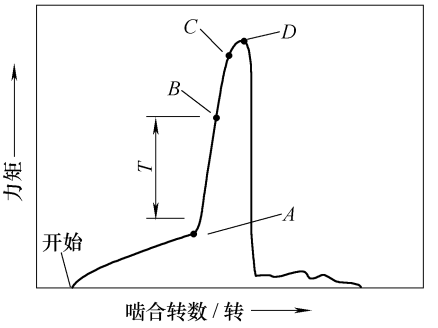


图 7-56 自攻螺钉攻旋啮合转动与力矩的关系

A—最大旋进力矩 T_{in} *B*—紧固力矩 *T*

C—屈服点 *D*—剥裂力矩 T_{lim}

（2）装配工作过程 自攻螺钉由间隙孔引导，插入到另一联接件的底孔中，刮削或挤压螺牙。螺钉就位后使两被联接件接触。达到最大旋进力矩后，在螺牙少量旋紧中，力矩较快上升。螺栓受到拉伸，被联接件受到预紧压缩负载。底孔周围材料受到螺牙挤压，超过塑料屈服点直至破坏。因此，力矩一般控制在剥裂力矩与最大旋进力矩之间（$T_{lim} \sim T_{in}$）的 1/4 ~ 1/2 范围，即推荐紧固力矩不超过 $T_{lim} \sim T_{in}$ 的 1/2 力矩点。

$$T \leqslant T_{in} + 0.5(T_{lim} \sim T_{in})。$$

（3）装配过程的力矩分析 在螺钉—孔座—材料的整个自攻螺钉系统攻旋设计中，有图 7-57 上三种啮合旋转与力矩的状态曲线。图 7-57a 所示为剥裂力矩 T_{lim} 与最大旋进力矩 T_{in} 之比高，又有高的剥裂力矩 T_{lim}。此种状态最能顺利地攻旋装配，且不破坏底孔材料。这主要是由精确合理的底孔直径决定的，当然也与联接件材料的综合力学性能和拉伸强度、螺钉类型、啮合长度和螺钉作用深度、孔座壁的厚度和孔座结构有关。图 7-57b 所示曲线状态是由于过大的底孔直径所致，其 T_{lim} 与 T_{in} 之比较高，但 T_{lim} 太低。螺牙附近的底孔材料容易破损，预紧力不能达到所需值。图 7-57c 所示是过小的底孔，虽有较高剥裂力矩，但 T_{lim} 与 T_{in} 之比较小，需很大的旋进和旋紧力矩，但实际获得预紧力不大。为达到一定的螺钉啮合长度，攻旋时容易损坏底孔螺牙。

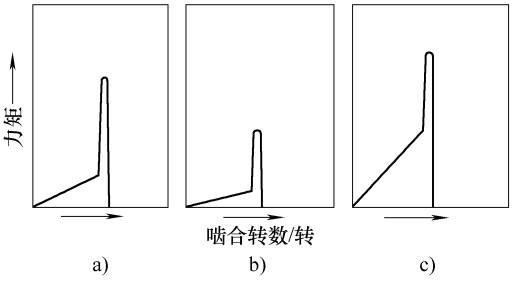


图 7-57 底孔大小对旋转与力矩状态曲线影响

a）合理底孔 b）过大底孔 c）过小底孔

为了保证批量生产的流水线装配质量，自攻螺钉的联接设计应进行例行试验；用测力矩装置获得上述啮合旋转与力矩的关系曲线；使用应变仪测得螺钉孔座的周向膨胀应变；用压缩负载传感器或应变仪，测得被夹固的压紧负载。需要进行长时期和环境条件下的蠕变和松弛试验，检测压应力和应变的变化。

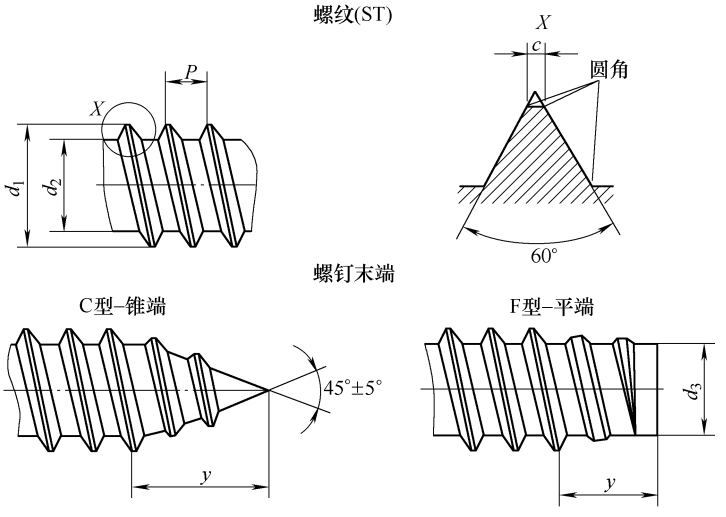
4. 自攻螺钉类型

自攻螺钉分成挤压类和刮削类。下面介绍国家标准系列的自攻螺钉。国外用于塑料

制品装配的专用自攻螺钉种类很多，这里作概略介绍。

（1）挤压类自攻螺钉　它以钢制螺纹对塑料底孔挤压，挤塑出阴螺纹，与旋进的自攻螺钉啮合。塑料螺牙对螺钉的旋进有很大的阻抗力矩，也有较大的残余应力。挤压类自攻螺钉主要用于弹性模量较低的塑料联接件，也用于结构泡沫注塑件。此种自攻螺钉末端有 C 型的锥端和 F 型的平端。自攻螺钉用螺纹见表 7-13。

表 7-13　自攻螺钉用螺纹（GB/T 5280—2002）　　（单位：mm）



螺纹规格		ST1.5	ST1.9	ST2.2	ST2.6	ST2.9	ST3.3	ST3.5	ST3.9	ST4.2	ST4.8	ST5.5	ST6.3	ST8	ST9.5
$P\approx$		0.5	0.6	0.8	0.9	1.1	1.3	1.3	1.3	1.4	1.6	1.8	1.8	2.1	2.1
d_1	max	1.52	1.90	2.24	2.57	2.9	3.3	3.53	3.91	4.22	4.8	5.46	6.25	8	9.65
	min	1.38	1.76	2.1	2.43	2.76	3.12	3.35	3.73	4.04	4.62	5.28	6.03	7.78	9.43
d_2	max	0.91	1.24	1.63	1.90	2.18	2.39	2.64	2.92	3.10	3.58	4.17	4.88	6.20	7.85
	min	0.84	1.17	1.52	1.80	2.08	2.29	2.51	2.77	2.95	3.43	3.99	4.70	5.99	7.59
d_3	max	0.79	1.12	1.47	1.73	2.01	2.21	2.41	2.67	2.84	3.30	3.86	4.55	5.84	7.44
	min	0.69	1.02	1.37	1.60	1.88	2.08	2.26	2.51	2.69	3.12	3.68	4.34	5.64	7.24
c	max	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15
y（参考）	C 型	1.4	1.6	2	2.3	2.6	3	3.2	3.5	3.7	4.3	5	6	7.5	8
	F 型	1.1	1.2	1.6	1.8	2.1	2.5	2.5	2.7	2.8	3.2	3.6	3.6	4.2	4.2
号码		0	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16	20

注：y 为不完整螺纹的长度；“号码”供参考。

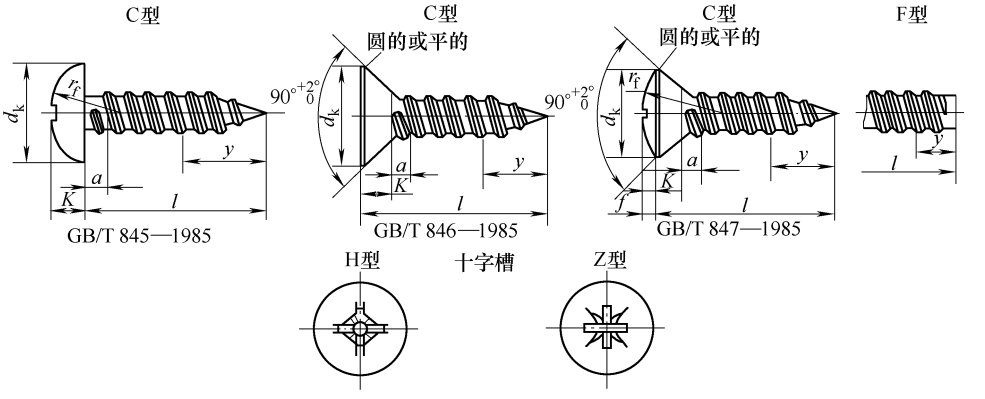
标记示例：自攻螺纹　GB/T 5280　ST3.5

自攻螺钉力学性能相关标准 GB/T 3098.5—2000 规定，自攻螺钉用渗碳钢制造，表面硬度应大于 45HRC。对于塑料材料，应有足够的硬度和刚度，且作表面镀锌钝化处理。

1）十字槽盘头自攻螺钉、十字槽沉头自攻螺钉和十字槽半沉头自攻螺钉的类型与尺寸见表 7-14。

表 7-14 十字槽盘头自攻螺钉、十字槽沉头自攻螺钉和十字槽半沉头自攻螺钉的类型与尺寸

（单位：mm）



螺纹规格				ST2.2	ST2.9	ST3.5	ST4.2	ST4.8	ST5.5	ST6.3	ST8	ST9.5
P（螺距）				0.8	1.1	1.3	1.4	1.6	1.8	1.8	2.1	2.1
a（max）				0.8	1.1	1.3	1.4	1.6	1.8	1.8	2.1	2.1
d_k（max）	GB/T 845			4	5.6	7	8	9.5	11	12	16	20
	GB/T 846、GB/T 847			3.8	5.5	7.3	8.4	9.3	10.3	11.3	15.8	18.3
K（max）	GB/T 845			1.6	2.4	2.6	3.1	3.7	4	4.6	6	7.5
	GB/T 846、GB/T 847			1.1	1.7	2.35	2.6	2.8	3	3.15	4.65	5.25
y（参考）	C 型			2	2.6	3.2	3.7	4.3	5	6	7.5	8
	F 型			1.6	2.1	2.5	2.8	3.2	3.6	3.6	4.2	4.2
$r_f \approx$	GB/T 847、GB/T 845			4 3.2	6 5	8.5 6	9.5 6.5	9.5 8	11 9	12 10	16.5 16	19.5 16
槽号				0	1	2			3		4	
十字槽插入深度	H 型	GB/T 845	min	0.85	1.4	1.4	1.9	2.4	2.6	3.1	4.15	5.2
			max	1.2	1.8	1.9	2.4	2.9	3.1	3.6	4.7	5.8
	Z 型	GB/T 845	min	0.95	1.45	1.5	1.95	2.3	2.55	3.05	4.05	5.25
			max	1.2	1.75	1.9	2.35	2.75	3	3.5	4.5	5.7
	H 型	GB/T 846	min	0.9	1.7	1.9	2.1	2.7	2.8	3	4	5.1
			max	1.2	2.1	2.4	2.6	3.2	3.3	3.5	4.6	5.7
	Z 型	GB/T 846	min	0.95	1.6	1.75	2.05	2.6	2.75	3	4.15	5.2
			max	1.2	2	2.2	2.5	3.05	3.2	3.45	4.6	5.65
	H 型	GB/T 847	min	1.2	1.8	2.25	2.7	2.9	2.95	3.5	4.75	5.5
			max	1.5	2.2	2.75	3.2	3.4	3.45	4	5.25	6
	Z 型	GB/T 847	min	1.15	1.8	2.25	2.65	2.9	2.95	3.4	4.75	5.6
			max	1.4	2.1	2.7	3.1	3.35	3.4	3.85	5.2	6.05
l 范围	GB/T 845			4.5～16	6.5～19	9.5～25	9.5～32	9.5～38	13～38	13～38	16～50	16～50
	GB/T 846、GB/T 847			4.5～16	6.5～19	9.5～25	9.5～32	9.5～32	13～38	13～38	16～50	16～50
l 系列	4、5、6.5、9.5、13、16、19、22、25、38、45、50											

螺纹规格 ST3.5、公称长度 l = 16mm、H 型槽、镀锌钝化的 C 型十字槽盘头自攻螺钉、十字槽沉头自攻螺钉和十字槽半沉头自攻螺钉的标记分别为：

自攻螺钉　GB/T 845　ST3.5×16

自攻螺钉　GB/T 846　ST3.5×16

自攻螺钉　GB/T 847　ST3.5×16

2）开槽盘头自攻螺钉（GB/T 5282—1985）、开槽沉头自攻螺钉（GB/T 5283—1985）和开槽半沉头自攻螺钉 GB/T 5284—1985。螺纹规格 ST3.5、公称长度 l = 16mm、表面镀锌钝化的 C 型开槽盘头自攻螺钉、开槽沉头自攻螺钉和开槽半沉头自攻螺钉的标记分别为：

自攻螺钉　GB/T 5282　ST3.5×16

自攻螺钉　GB/T 5283　ST3.5×16

自攻螺钉　GB/T 5284　ST3.5×16

3）六角头自攻螺钉（GB/T 5285—1985）和十字槽凹穴六角自攻螺钉（GB/T 9456—1988）。螺纹规格 ST3.5、公称长度 l = 16mm、表面镀锌钝化的 C 型六角头自攻螺钉和十字槽凹穴六角头自攻螺钉的标记分别为

自攻螺钉　GB/T 5285　ST3.5×16

自攻螺钉　GB/T 9456　ST3.5×16

（2）刮削类自攻螺钉　它具有丝锥刀具（俗称螺丝攻）的功能。在此种螺钉的最初几牙上开有纵向切削槽，在攻旋刮削时会产生塑料切屑，对于不通孔要提供足够的容屑深度。刮削类自攻螺钉用于高模量的热塑性塑料和热固性塑料，也适用于玻璃纤维增强塑料。因有刮削塑料过程，紧固后的塑料及附近的残余应力较小。为保证连接强度，要有足够的啮合长度，即螺钉长度较长些。需注意重新装配螺钉时要防止乱牙。

精密机械用紧固件的十字槽自攻螺钉刮削端的相关标准是（GB/T 13806.2—1992）。螺纹规格 ST2.2、公称长度 l = 8mm、镀锌钝化的 A 型十字槽盘头自攻螺钉有刮削端，B 型十字槽沉头自攻螺钉有刮削端，C 型十字槽半沉头自攻螺钉有刮削端，它们的标记分别为：

自攻螺钉　GB/T 13806.2　ST2.2×8

自攻螺钉　GB/T 13806.2　BST2.2×8

自攻螺钉　GB/T 13806.2　CST2.2×8

5. 孔座设计

注塑件的孔座设计与自攻螺钉联接系统一起影响联接质量。孔座应该离开塑料壳体周壁边一定的距离，如图 7-58 所示。或者用肋与孔座相接；或者用型芯成型双肋与孔座相连；或者让独立孔座用角板肋增强。这样避免了孔座坐落在塑料周边上，引起壁厚过大和不均匀，成型后会产生凹陷和真空泡。另一方面，有利于两联接件接触面的定位和均匀地并紧。

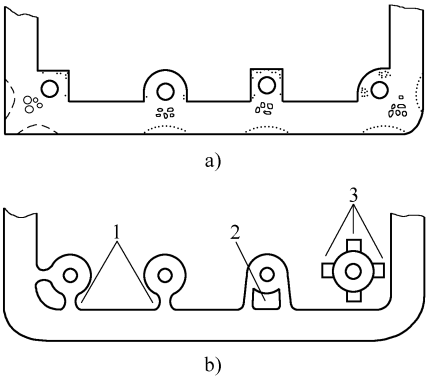


图 7-58　孔座的位置

a）位置不当　b）正确位置

1—用肋与边壁相连　2—模塑双肋

3—独立的孔座

图 7-59 所示孔座的增强角板肋条一般有三片或四片。肋条增强了孔座的抗扭和抗弯刚性；能改善熔体注射充模时的流动性，并有利排气。孔座的壁过薄，在攻旋力矩和压缩负载下会产生变形。孔座的壁太厚，过大的成型收缩会产生凹陷和真空泡。建议孔座的外径应为 2.5 ~ 3 倍螺钉的公称直径。此外，孔座和肋条的根部都应有恰当的圆角，以防止应力集中，提高孔座强度且有利模塑。孔座外形和底孔都应有足够的脱模强度。

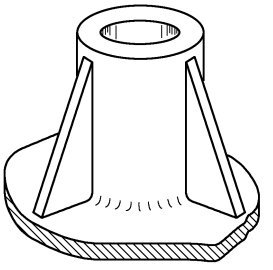


图 7-59 孔座和加强肋

关于孔座的高度见图 7-60。过短的不通孔深度，使底端有过大壁厚，会产生凹陷和真空泡。但过高的孔座和过深的底孔，会使悬臂的型芯过于细长。细长型芯不能直接冷却，温度偏高，孔座的脱模顶出有困难。小型芯易产生偏移和弯曲变形，而且寿命有限。如图 7-60c 所示，要合理地分配通孔长度 L_t 和不通孔深度 L_b。不通孔的底部等于或小于平均壁厚。在满足啮合深度、确保连接强度的前提下，尽可能减小不通孔深度 L_b。表 7-15 列出了热塑性塑料的底孔尺寸。若采用表中数据，应进行必要的验证。

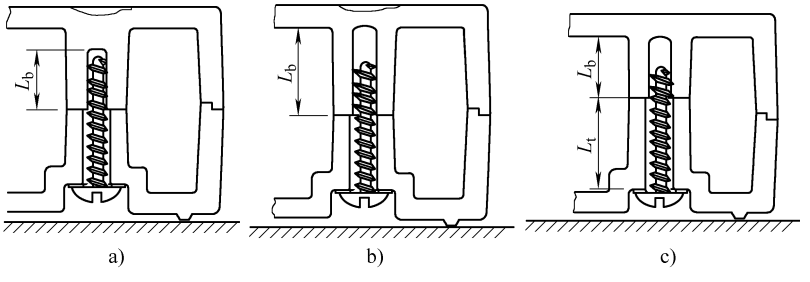


图 7-60 通孔长度和不通孔深度的合理分配

a）不通孔过短 b）不通孔太深 c）合理

表 7-15 C 型和 F 型自攻螺钉用热塑性塑料的底孔 （单位：mm）

螺钉规格	ST2.2	ST2.9	ST3.5	ST3.9	ST4.2	ST4.8	ST5.5	ST6.3
标准深度孔径	1.78	2.36	2.90	3.17	3.43	3.91	4.57	5.53
不通孔中最小深度	6.5	6.5	6.5	8.0	8.0	8.0	10	16

7.5 塑料齿轮及注射模具

注射成型的塑料齿轮多用于精密机械传动，为模数小于 1.5mm 的小齿轮。由于塑料齿轮噪声低、惯性小、耐腐蚀、成本低，能在无润滑条件下运行，在许多场合（例如电子音像产品和办公用电子装备）非塑料齿轮莫属。塑料齿轮的生产是项综合性技术，涉及塑料材料、塑料齿轮的设计与测量、注射模具的设计和制造等方面。

1. 塑料齿轮的失效和材料

塑料齿轮设计包括塑料轮齿的失效和配对齿轮材料选用、齿轮强度及模数的设计或校核计算。有关齿轮强度及模数的计算过程，在笔者著的《塑料制品设计指南》中有详细介绍。

（1）塑料齿轮的失效　塑料齿轮齿根弯曲疲劳折断、齿面接触疲劳点蚀、齿廓磨损和齿面表层的热软化，是塑料齿轮传动的失效形式。应根据齿轮弯曲疲劳强度和齿面接触疲劳强度，科学设计计算啮合齿轮的模数，并圆整到标准系列。在 0.5 ~ 2 范围内，国家标准第一系列模数（mm）有：0.5、0.6、0.8、1、1.25、1.5 和 2；第二系列模数（mm）有 0.7 和 1.75。计算式根据弹性力学、疲劳强度和接触强度的力学原理推导，与金属齿轮设计相同，但必须考虑塑料齿轮材料对温度和线速度的敏感性，置以必要的修正系数。另一方面，塑料齿轮啮合的摩擦和磨损试验，也为齿轮材料和齿轮传动的寿命提供依据，应根据齿轮摩擦和磨损的预测，选用配对两齿轮的材料。

与圆柱齿轮分度相切的工作圆周力为

$$F_t = \frac{2T_1}{d_1} \tag{7-4}$$

式中　F_t——分度圆的工作圆周力（N）；

d_1——小齿轮的分度圆直径（mm）；

T_1——小齿轮转矩（N · mm）。

根据塑料齿轮的材料特性，在正常的工作中损坏的情况主要是以下四种。

1）齿根弯曲疲劳破坏。塑料轮齿受到作用于齿顶的法向作用力的周期性弯曲载荷，在齿根的危险截面上，弯曲应力超过弯曲疲劳的最大应力而折断破坏。

塑料的疲劳试验说明，在周期载荷下，比恒定载荷更容易在没有可察觉的塑性变形下引起脆性断裂。许多塑料的疲劳曲线形状与金属相类似，由于塑料存在“热软化”现象，疲劳试验必须在低频条件下进行，试验时间很长。表 7-16 给出一些塑料齿轮的弯曲疲劳极限应力 σ_{Fo}。σ_{Fo}，是在低速平稳的啮合传动、齿轮模数 $m = 1$、轮齿受周期性负载的循环次数 $N = 10^6$ 的条件下获得的。在设计或校核塑料齿轮模数 m 和轮齿宽度 b 时，齿根的弯曲应力应该小于疲劳极限应力 σ_{Fo}。

表 7-16　一些塑料齿轮的弯曲疲劳极限应力 σ_{Fo}　（单位：MPa）

塑料	未充填 σ_{Fo}	玻璃纤维增强 σ_{Fo}	塑料	未充填 σ_{Fo}	玻璃纤维增强 σ_{Fo}
ABS	20	41	聚碳酸酯	41	62
共聚甲醛	38	48	聚酯	24	55
均聚甲醛	45		聚氨酯	17	
聚酰胺	41	83			

结晶型聚合物的抗疲劳载荷能力比无定形聚合物的要好。聚甲醛有 75% 的结晶度，显示了优异的抗疲劳性能。塑料的抗疲劳性能与温度关系密切，温度升高时抗疲劳性能下降。聚酰胺等塑料随吸水率的增加而抗疲劳性能下降。用玻璃纤维增强的塑料，其抗疲劳性能会得到改善。塑料齿轮在传动过程中，受到作用于齿顶的法向作用力的周期性

弯曲负载。在齿根的危险截面上，弯曲应力超过弯曲疲劳极限时，轮齿会出现折断破坏。

2）齿面的接触疲劳点蚀破坏。塑料齿面之间的磨损与金属齿面相比，其剪切粘合、磨蚀和腐蚀的磨耗并不严重，但塑料齿面的疲劳尤其特出。在周期性的赫兹接触应力下，在节线附近出现疲劳点蚀，这种表面剥落的小坑将破坏正常的啮合。塑料的弹性模量随温度上升而下降明显，使接触应力增加，加剧疲劳点蚀产生。

用钢制小齿轮与塑料齿轮啮合，由于塑料的黏弹性和柔软性，其摩擦性能趋近于塑料齿轮之间的表面性能。与金属齿轮相配的塑料齿轮的点蚀并不能得到改善，但金属齿轮有助于改善塑料齿轮的散热条件。用润滑方法改进相啮合塑料齿轮的摩擦性能，其效果不如金属齿轮那样显著。一般塑料齿轮（例如聚酰胺）采用轻度的初始润滑，效果好而采用广泛。

3）轮齿的“热软化”破坏。塑料齿轮在高速运转时，轮齿在周期性弯曲载荷下，其塑料变形恢复的滞后而生成的热量超过了通过热传导、热辐射和热对流所散出的热量。塑料齿轮的温度升高，使之变形、断裂甚至熔融。齿面会出现局部小片透明点，齿形表层被推挤。热量渐次积累，直到齿轮熔融“软化”，断裂失效。这种现象被称为滞后热效应，简称“热软化”。

塑料导热不良，所产生的摩擦热若与散热失去平衡，温度上升会使齿面间的摩擦系数增大，引起齿面擦伤，软化加剧。随着应力增加，变形滞后产生的热量也增加。在一定的应力下，随着温度的升高和负载频率的增加，产生热量也增加。如果轮齿的散热不良，齿轮温度将明显上升。又由于温度升高，每个变形循环产生热量随之增加，热量渐次积累，直到齿轮“软化”失效。

随着高速复印机、计算机外围设备中广泛使用塑料齿轮，这种现象已经常能观察到。例如：聚酰胺 PA66 齿轮在某场合一千万次循环载荷下，基本上没有磨损和疲劳失效。但在另一高速和散热不良场合，在 25% 的最大允许应力下，只经过近万次循环载荷，齿轮就失效了。齿形被推挤，出现局部小片透明点。而在这个载荷下，该聚酰胺齿轮是具有无限的疲劳寿命的。“热软化”失效的热量来源于塑料轮齿内部材料在变形时的内摩擦。在加载和卸载时应力与应变的闭环曲线上，加载时应力高于卸载时应力，这一封闭面积转变为热能。

因此，必须对高速转动的塑料齿轮进行热平衡计算。但鉴于各品种塑料齿轮的每次循环所产生滞后热量的数据很难得到，目前只能就已失效齿轮进行改善散热条件的计算。

表层热软化发生在塑料齿轮传动线速度过大和散热条件差的工作状态下，例如均聚甲醛的线速度 $v>4\text{m/s}$，聚酰胺 66 的线速度 $v>20\text{m/s}$。防止热软化，要用热稳定性好、刚性大的增强塑料。与金属齿轮啮合有助于改善塑料齿轮的散热条件；也有用金属嵌件导热的。轮辐上设置散热孔或片条，可增加散热面积。也应该控制和调节塑料齿轮传动装置的环境温度。

4）齿廓磨损。齿轮在长期啮合工作过程中，磨损使齿厚明显变瘦，渐开线齿廓失

真，因此降低了传动质量，瞬时转速不稳定，会产生噪声。齿厚变薄会使齿侧间隙增大，转动换向时会有冲击，在仪表指针传动过程中会造成回差。

在一对齿轮啮合传动中，沿渐开线齿面的摩擦力将使齿轮表层产生剪切变形，因粘着作用而产生磨耗。塑料导热不良，温度上升会使齿面间的摩擦增大，引起齿面擦伤，磨损加剧。与塑料/塑料配对齿轮相比，钢/塑料齿轮的负载对磨损的影响较小些。

对于模数 m 大于 1mm 的传递功率的塑料齿轮，磨损往往是主要失效形式。磨损速率大于齿面疲劳点蚀的速率，于是表面点蚀不断被磨去。在这种情况下，塑料齿轮寿命取决于磨损速率。

负载的增加对塑料齿轮磨损量的影响最明显。在相同的负载和运转次数条件下，运转转速增大则磨损增加。即使啮合传动比为 1，主动轮的磨损量也会稍大些。

（2）塑料齿轮材料　最早，曾经用 ABS 和聚碳酸酯 PC 塑料齿轮，其成型收缩率较小。但这种齿轮的磨损严重，只能用于手动的机械记数装置。也曾经滚齿切削加工制造充填的热固性塑料齿轮。现今普遍用聚酰胺 PA 和聚甲醛 POM 注射生产齿轮。它们的摩擦系数小，弹性模量较高且疲劳强度又较好。但这些结晶型塑料，注射成型收缩率在 2% 左右，为无定形的 ABS 和 PC 塑料的 4 倍。塑料轮齿的渐开线齿廓和齿轮啮合精度较难达到。

由齿轮工作特性可知，只有摩擦系数小且磨耗低、弹性模量高刚性大、弯曲疲劳强度高、滞后热效应小的聚合物，才能用做塑料齿轮材料。

1）常用的注射成型齿轮材料如下。

① 聚酸胺。PA6 和 PA66 使用较多。PA11 和 PA12 在潮湿的工作条件下有低的吸水性，但较为昂贵。PA1010 的性能及吸水性介于它们之间。

② 聚甲醛。均聚甲醛和共聚甲醛都用于齿轮制造。它们有低的摩擦系数和吸水性，良好的抗疲劳性能和尺寸稳定性。

③ 聚酯。常用的是玻璃纤维充填 PBT。它有较好尺寸稳定性和耐热性能。

④ 聚氨酯。被认为是有发展前途的齿轮成型材料。它有高弹性、强韧性和较好的耐磨性，因而多用于制造要求噪声很小的齿轮。

结晶型聚合物在摩擦磨损和抗疲劳性能方面优于无定形聚合物。然而，无定形聚合物有低的成型收缩率和高的注射精度。适合制造齿轮的无定形聚合物有聚碳酸酯、改性聚苯醚和聚砜。聚苯硫醚和超高分子量聚乙烯作为新材料，开始被应用于齿轮制造。

纯聚合物齿轮在强度等方面是缺乏竞争力的。经玻璃纤维和碳纤维增强的聚合物，会使塑料的拉伸强度和弯曲弹性模量增大，工作温度提高，热膨胀系数降低，摩擦磨损能得到改善。经增强和添加内润滑剂的聚合物齿轮，其性能可以与铸铁、铝和铜合金制造的齿轮比美。

2）添加内润滑剂，可使小模数塑料齿轮的摩擦磨损性能得到显著改善。仪器上的塑料齿轮，在聚甲醛或聚酰胺齿轮内添加有 13% ~20% 聚四氟乙烯。常用的内润滑剂有以下几种。

① PTFE。具有极低的摩擦系数。添加聚四氟乙烯的塑料齿轮在运转时，在齿面上形成高性能的润滑膜。

② 硅油。它与聚合物只是部分相容，不相容部分能迁移至表面，形成边界润滑膜。添加剂量根据相容性要控制适当。硅油与 PTFE 可以一起使用，在摩擦表面形成耐热润滑脂，效果更佳。

③ 石墨。它是价廉的添加剂，但改善表面润滑效果较小。

④ MoS_2。它仅对聚酰胺有效果。在聚酰胺熔体冷却结晶时，它起成核剂的作用，从而提高了聚酰胺的结晶度。

避免不恰当的配对材料选择，是塑料齿轮设计中必须考虑的问题。没有内润滑剂的纯聚合物与钢配对啮合时，有较高的磨耗。尤其是 PC 或 Noryl（改性 PPO）与钢啮合摩擦时，呈现高的磨损。在聚合物与钢、聚合物与聚合物配对的材料中加入适量内润滑剂，在轻载运行下其磨损系数显著降低。通常同一塑料材料配对，会呈现高的磨损，其中以无定形聚合物 PC 和改性 PPO 为最甚。选择不同聚合物进行恰当配对，可获得低的磨耗，甚至无需加入内润滑剂。例如：POM 齿轮与 PA66 齿轮配对时，磨损较低。

2. 塑料齿轮的精度和注射成型

塑料齿轮主要用热塑性塑料在模具中注射成型。用液态浇铸的塑料毛坯，甚至用无齿形型腔的模具成型毛坯，然后机械切削加工齿形，特别是塑料齿条和斜齿轮，在小批量生产中是可取的。但是聚合物在刚硬的模具型腔中冷却形成的表层，比切削加工的齿廓表面具有低的摩擦系数和优良的使用性能。

塑料齿轮尚有某些弱点，如热膨胀和吸湿后尺寸不稳定，强度和刚度差，弹性变形大等。可作为低速和小功率的传动零件，但在一般精密机械的工作条件下，往往需要较高的齿轮传动精度。提高塑料齿轮的精度是替代金属齿轮的关键。影响塑料齿轮精度的因素是多方面的。

保证一对塑料齿轮传动精度，要确保单个渐开线塑料齿轮的精度，还要保证一对啮合齿轮的传动精度。

提高塑料齿轮精度需要正确的轮齿齿廓和齿轮结构设计、合理的模具设计、较高的模具精度和严格控制注射工艺。保证啮合齿轮的传动精度，要进行啮合时的几何参数计算、齿轮传动的侧隙和中心距计算等，还要保证机架精度及限制齿轮的工作温度等。

（1）塑料齿轮的传动精度　塑料齿轮精度测量很重要。不能在整机装配时，才对齿轮的啮合情况作简单的可用或不可用的判断，而应该在零件制造阶段，就要使齿轮达到所要求的精度等级和侧隙的要求。

塑料齿轮的一般测量包括：公法线长度变动 ΔF_w，保证侧隙；齿圈径向圆跳动 ΔF_i，保证传递运动的准确性；用投影仪测量齿形误差 Δf_i，保证载荷分布的均匀性。从经济观点来看，这样单项精度测量的效率很低，不能满足批量生产的质量控制要求。因此，根据小模数（1.5mm 以下）渐开线圆柱齿轮精度制（GB/T 2363—1990）和国外有关塑料齿轮精度的资料，建议采用表 7-17 所示的检验项目。

表 7-17　塑料齿轮精度的检验项目

精度指标	检验项目	误差符号
传递运动的准确性	$\Delta F_i''$径向综合误差	F_i''
传动的平稳性	$\Delta f_i''$径向相邻齿综合误差	f_i''
载荷分布的均匀性	ΔF_b 齿向误差	F_b
侧隙	ΔEa 双啮合中心距偏差	Eas 、Eai

在这四项中，$\Delta F_i''$、$\Delta f_i''$、ΔEa″三项可以在齿轮双面啮合综合检查仪上方便地测出。双面啮合仪除不能反映齿廓的切向误差外，齿廓双面的转角误差都能反映，也能间接反映齿轮毛坯的轴向圆跳动，反映齿廓与中心孔的偏心误差。

此外，必须考虑到塑料特性。由于塑料具有较高的弹性变形，测量时必须有一定的测量力。在双面啮合仪上，应根据齿轮的宽度和模数合理地施加测量力。图 7-61 所示为塑料齿轮的测量力齿宽和模数。

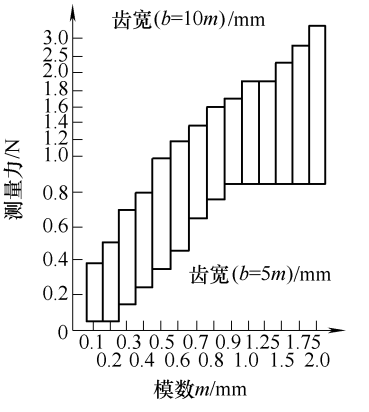


图 7-61　塑料齿轮的测量力、齿宽和模数

齿轮传动时圆周方向的侧隙是正常啮合的保证。为此，塑料齿轮传动的齿侧间隙和两轮间的中心距，要经严密的计算。齿轮传动机构在室温和干燥条件下装配。塑料齿轮在热膨胀和吸水后，齿的厚度增大。塑料的热膨胀系数是钢材的 4 ~ 8 倍。齿厚方向膨胀后，会使侧隙减小，以至卡滞。齿轮啮合副的侧隙减小，经几何关系折算到两轮的中心距上。两轮之间经折算的中心距大于标准中心距，可补偿传动时的侧隙减少。用双面啮合中心距测量仪，对塑料齿轮进行测量，得到被测塑料齿轮的中心距的变动量，可换算得到单个齿轮可提供的周向侧隙。考虑到塑料齿轮的刚性比金属齿差，必须在较小的测量力作用下才能准确测量。大批量生产的注塑齿轮，常用投影仪检查齿廓。在模具加工时也需对模具型腔和电极齿轮进行精确测量，可参照金属齿轮的精度和公差的标准检测。

（2）塑料齿轮的注射成型　注射成型是最后决定塑料齿轮精度的重要步骤。注射成型时重要的工艺参数是：注射压力、注射时间、塑料温度、模具温度和冷却时间；此外，注射机的重复精度、塑料收缩率的变动范围也很重要。在注射过程中，用双面啮合综合检查仪，不断对塑料齿轮进行检测，随时调整和控制注射条件。

综合国内外资料，对照 GB/T 2363—1990 中的精度制，一次成型的塑料齿轮可以达到 9 ~ 10 级精度；而要达到 7 ~ 8 级的较高精度是困难的，但还是可能的。

模具结构对保证齿轮精度是非常重要的。多联齿轮型腔应在分型面的一侧，型芯的固定与型腔都应该在动模上。一模一件对提高模塑齿轮精度有利。

塑料齿轮的注射成型应该用精密模具，并按精密模塑成型工艺生产。塑料齿轮从模具到注射成型应该由专门厂生产，能生产塑料的斜齿轮、蜗杆、锥齿轮、齿条、多联齿

轮等，可以缩短模具制造周期。精湛技术可以较多地采用一模多腔（一模四腔甚至八腔）的模具，提高模塑生产率。因此，专门化生产是精密塑料齿轮生产的方向。高精度塑料齿轮将进一步取代金属齿轮，更广泛地应用于各个领域。

模具的齿轮型腔收缩率和渐开线齿廓收缩的估算，其实际情况是复杂的。但假如影响收缩的各种因素都得到有效的控制，塑料齿轮各尺寸形状收缩较均匀，则齿轮型腔的模数 m_C 应大于注射齿轮的标准模数 m。

塑料齿轮模具的精度要求主要在齿廓处。如果模具的成型型腔是标准的渐开线齿廓，由于塑料冷却固化后收缩，如图 7-62 所示，齿顶变窄，齿根变厚，将影响到塑料齿轮传动时转速的平稳性，进而影响到齿轮的使用寿命。

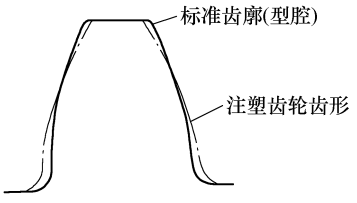


图 7-62　标准齿轮和注射齿轮的比较

众所周知，齿轮的模数是齿轮尺寸计算的最基本参数，所以由型腔注射经冷却后的塑料齿轮的分度圆应具有标准模数和标准压力角，即齿轮型腔应是放大了的非标准模数的齿轮。在实际计算时，实际收缩率 S 应根据经验有差异地对应算出各个参数，并需考虑到收缩的方向性和各齿轮参数的特殊性。由于齿的冷却快，而整个齿轮冷却慢，计算公法线长度收缩率应是齿顶圆直径计算收缩率的 0.8 倍。

通常是用电火花加工模具型腔，为此，制造模具型腔的电极齿轮的渐开线压力角，必须按塑料材料收缩率减小。制造电极齿轮的齿轮滚刀的压力角，应相应修正。

$$\cos\alpha_C = (1+S)\cos\alpha \tag{7-5}$$

式中　α_C——模具型腔齿轮的压力角；

α——塑料齿轮的压力角，为标准压力角；

S——注射条件和齿轮各个参数的实际收缩率，常用该塑料的平均注射成型收缩率。

型腔齿轮还必须修正的几何参数有模数、分度圆直径和周节等，计算公式分别为

$$m_C = (1+S)m \tag{7-6}$$

$$d_C = m_C z \tag{7-7}$$

$$t_C = \pi m_C \tag{7-8}$$

式中　m_C——模具型腔齿轮的模数；

m——注射齿轮的模数，按国家标准系列选取；

d_C——模具型腔齿轮的分度圆直径；

t_C——模具型腔齿轮的周节；

z——齿数。

模具上型腔齿轮的其余几何参数均用 m_C 和 α_C 计算，包括公法线长度等。

显然，要注射塑具有标准齿廓的塑料齿轮，其模具型腔齿轮的齿廓渐开线，应比标准齿廓的渐开线平直；其曲率半径稍大。为此，需用专门的非标准滚刀加工电极齿轮。

用电火花加工模具型腔的关键是电极齿轮的加工。用包络法，采用标注模数刀具加工正位移的电极齿轮，虽然型腔齿轮的周节均匀，但塑造出齿轮的齿形误差大。如果将模具型腔齿轮加工成标准模数的正位移的修正齿轮，齿顶圆增大，但其分度圆上的模数和压力角还是标准的。与标准齿轮相比，齿顶圆上齿厚变小，即齿顶变尖；齿根圆上齿厚变大。用这种电极加工型腔，注射成型的齿轮冷却收缩后，其分度圆上的模数是非标准的，且小于标准模数，齿形误差就较大。用仿形法加工电极齿轮，可对刀具进行修正，得到等于型腔模数的电极齿轮，但齿轮的周节均匀性差。

采用下降时同时可回转的电极的特殊夹具，能加工斜齿轮的型腔，但螺旋角不能大于 10°。数控电火花机床可实现齿轮电极在垂直升降的同时作旋转运动，并有电极平动修正功能。高精度的模具型腔需要有高精度的电极。塑料齿轮—齿轮型腔—电极齿轮三者精度大致有 1 ~ 2 级的逐次升级。

线切割加工齿轮型腔，可用型腔齿轮模数 m_C 计算编程，缺点是型腔表面粗糙度高。用高精度的慢走丝线切割，能加工正齿轮和斜齿轮型腔，其表面粗糙度 Ra 为1.6 ~ 3.2μm。经研磨抛光后 Ra 可达到 0.4μm。也有采用冷挤方法挤出整体式齿轮型腔的，尤其是用于挤出锥齿轮型腔。

（3）塑料齿轮的结构和注射成型在设计薄片式塑料齿轮时，要从塑料特性考虑齿轮的形状。基本要求是壁厚均匀和形状对称。不均匀的壁厚会引起不均匀的收缩，以致产生内应力、凹陷、熔接缝等。图 7-63 所示较小的齿轮一般是薄片式，齿顶圆在 50mm 以下，齿轮宽度为 1.5 ~ 3.5mm。较大齿轮采用整体辐板结构。辐板的布置要对称。辐板的变形会影响到齿轮精度。不均匀的变形最终影响到一对齿轮的啮合质量，即减小齿轮啮合时的实际啮合线长度，也减小了啮合时沿齿廓曲面的接触线长度。

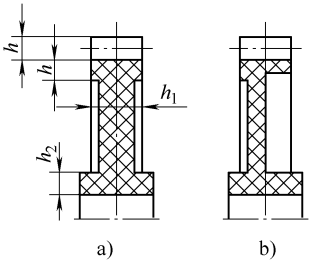


图 7-63　塑料齿轮的结构设计

a）对称辐板　b）偏向一侧

注：h = 全齿高；$h_1 \geqslant 1.1h$；$h_2 \geqslant 1.2h$

塑料齿轮为整体辐板结构时不允许在辐板上开孔，以避免在齿缘上生成熔合缝。轮齿根部的轮缘应大于全齿高。轮缘辐板和安装孔套厚度，都应控制在全齿高的 1.1 ~ 1.2 倍。塑料齿轮有较大宽度时才采用加强肋，需对称布置，肋条厚是平均壁厚的 0.7 倍左右。齿轮的安装孔、转矩传递和轴向定位的结构有弹性卡夹、圆销孔、异形孔和长轴套等。这些结构的注射成型需要侧向分型抽芯机构，使塑料齿轮注射模结构复杂，设计和制造困难。

采用斜齿圆柱齿轮可获得较好的传动能力，并减小噪声。但由于塑料刚性差，如果负载较大，对一个齿来说，变形是不均匀的。因此，塑料斜齿轮工作时的实际传动精度较低。塑料斜齿轮的模具设计和制造也比较困难。因此，除特别需要外，一般采用塑料直齿轮。

双联或三联的多联齿轮、锥齿轮等传动零件，即使用金属切削加工也相当困难，所以其零件设计必须注意壁厚均匀，见图 7-64。更要注意浇口的位置，以防止内应力不

均匀而使收缩率不一致。多型腔的流道系统，应该经过平衡浇注设计。塑料熔体流经各个针点式浇口时，应保证多个型腔的注射压力和温度一致。

制造精密齿轮时，齿坯必须有相应的精度。齿轮应以孔或带嵌件的轴为基准轴线。在齿轮设计和模具设计时就明确基准端面，按照渐开线圆柱齿轮精度制（GB/T 10095.1—2008、GB/T 10095.2—2008）推荐的齿坯公差数值表，确定齿轮孔或轴的尺寸、几何公差。齿坯的精度取决于模具精度和结构，也与注射条件有关。

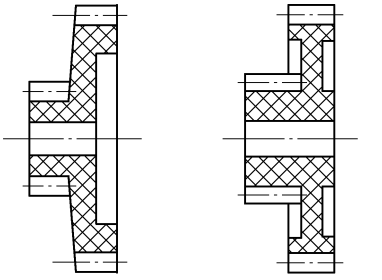


图 7-64　双联齿轮设计

a）应避免　b）壁厚一致

为了保证精度，塑料齿轮成型时一模注射一件。型芯和型腔在动模一侧，保证齿廓与安装孔的同轴度。注射聚酰胺 PA 和聚甲醛 POM 齿轮，采用三点甚至四点的针点式浇口。偏近轮心周向分布，可避免熔合缝出现在齿廓。如图 7-65 所示，微小塑料齿轮（齿顶圆直径在 15mm 以下）采用的偏置三个针点式浇口，设置在辐板上。如果针点式浇口设置在轴孔轮毂上，注射面上要有小凹坑，以避免影响齿轮端面的安装定位。

采用主流道式的三爪针点或环隙浇口，能保证塑料熔体辐射扩展，齿轮均匀地收缩。尺寸较大的齿轮（齿顶圆直径在 50mm 以上）或聚碳酸酯齿轮，采用主流道式浇口，使之位于型腔中心，并使用锥形拉料杆，如图 7-66 所示。

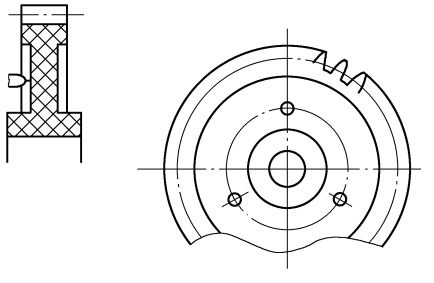


图 7-65　多点式的点浇口

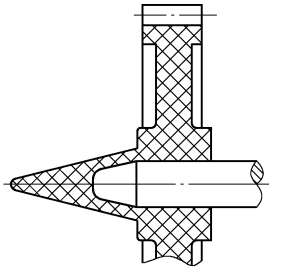


图 7-66　主流道式浇口

3. 塑料齿轮的注射模结构

1）圆柱直齿轮注射模。图 7-67 所示注射硬质聚氯乙烯 RPVC 齿轮的模数 m = 1mm，齿数 z = 36，齿轮内孔有矩形槽，用键传递转矩。RPVC 的成型收缩率较小，又是一模一齿轮注射，因此，该齿轮有较好的精度。

RPVC 是高黏度的熔体，采用主流道型的爪形浇口，保证齿廓的成型质量。型芯 13 有圆锥头，对定模起中心定位作用，保证了齿轮内孔与齿廓的同轴度。为此，型芯固定杆 2 将型芯 13，固定在动模座板 1 上。

内推管 10 和外推管 12 同时推顶塑料齿轮，无顶出痕迹，能保证在脱模时不变形。

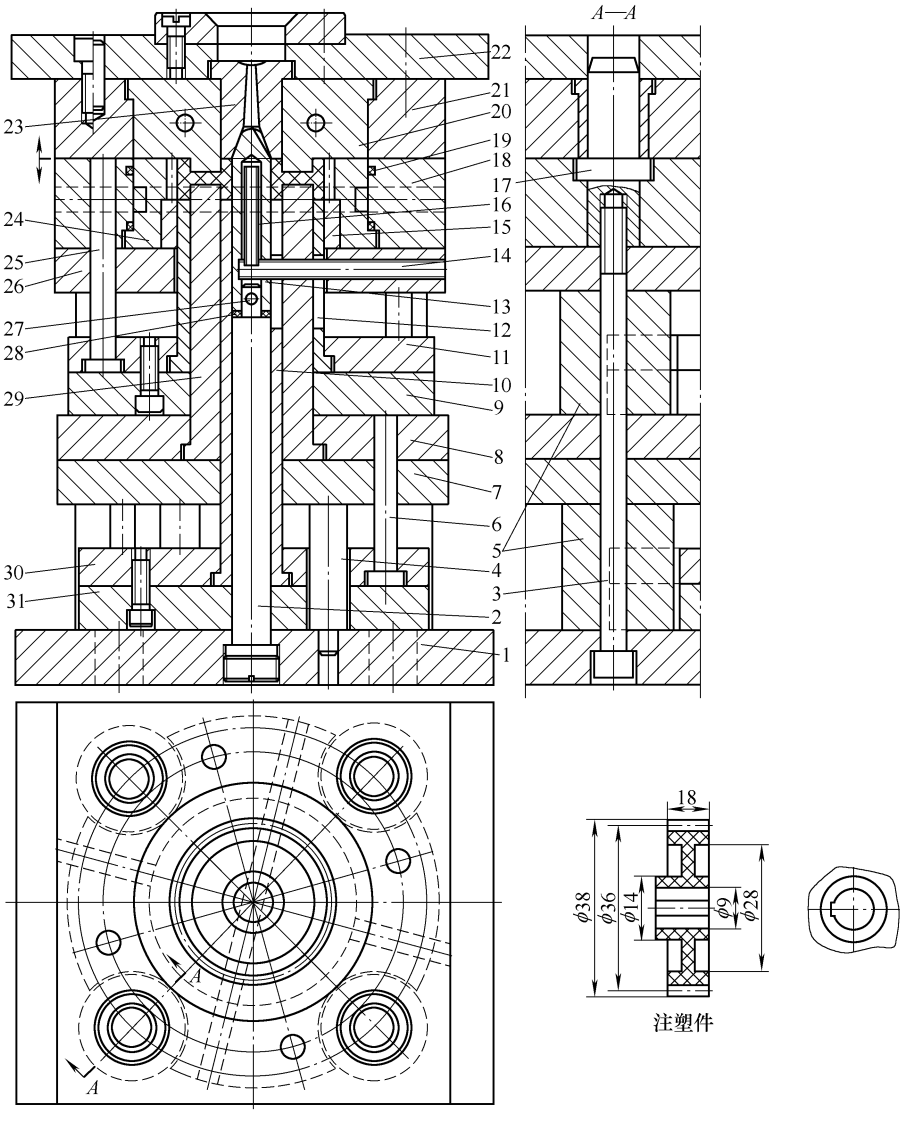


图 7-67　RPVC 圆柱直齿轮注射模

1—动模座板　2—型芯固定杆　3—螺钉　4—支承柱　5—垫块　6—推杆　7、26—支承板
8—镶件固定板　9、31—推板　10—内推管　11—推杆固定板　12—外推管　13—型芯
14—横向进水管　15—镶套　16—冷却水管　17—导柱　18—动模板　19—密封圈
20—定模镶件　21—定模板　22—定模座板　23—浇口套　24—齿廓镶套　25—复位杆
27—圆柱销　28—密封垫　29—动模镶套　30—推杆固定板

注射机的推杆推动推板 31 和内推管 10，又推动推杆 6 经推板 9 同时推顶外推管 12。

模具的齿廓镶套 24 用 P20 钢制造，预硬处理硬度为 48 ~ 50HRC。齿廓是非标准模数，用线切割加工型腔，抛光至 $Ra = 0.2\mu m$。

2）斜齿轮注射模。图 7-68 所示注射模，一模成型两件聚甲醛斜齿轮。齿轮的模数 $m=1\text{mm}$，齿数 $z=28$。斜齿轮依靠 6mm 穿孔，装配横销后传递转矩。为此，需要两行四个侧向抽芯机构。点浇口开模时自动拉断，注射模设置顺序开模机构。在小孔的型芯 4 抽拔后，才能有长推管 20 的顶推齿轮。注意到长推管 20 下面有滚珠轴承，在长推管推顶同时被斜齿轮齿廓强制旋转。中央两齿轮带头导柱 33 对推杆固定板 19 导向。左右两对连杆 36 延时脱模机构的运动。两齿轮长型芯 14 固装在动模底部的固定板 15 上，以保证齿轮内孔与齿廓的同轴度。

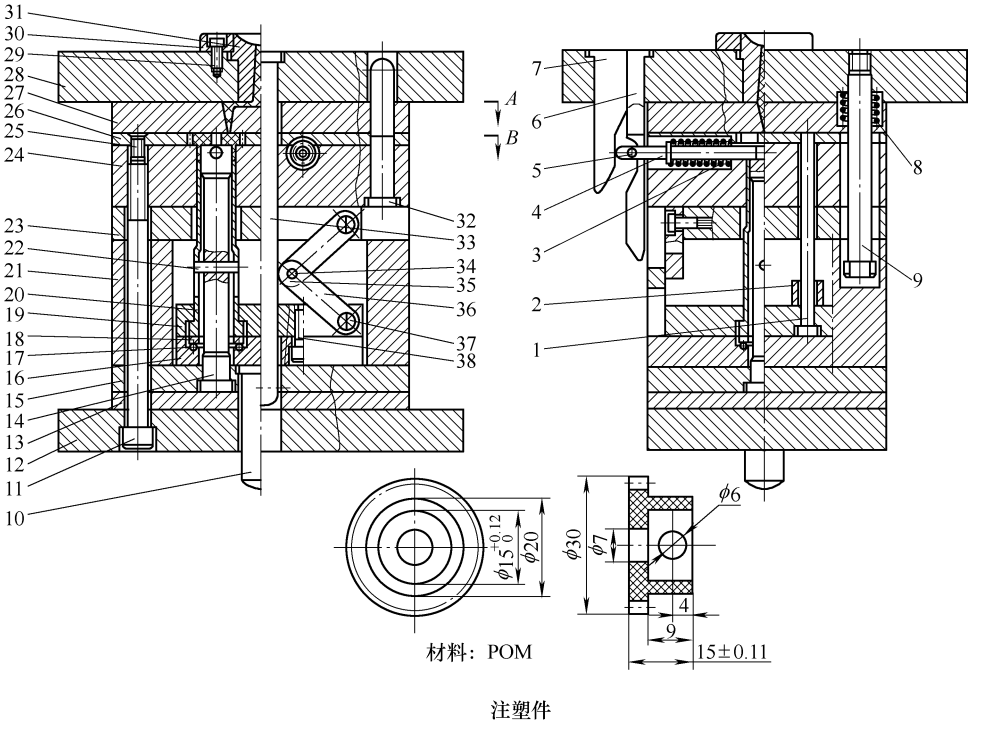


图 7-68　POM 一模二斜齿轮注射模

1—复位杆　2—限位套　3、8—弹簧　4—型芯　5、22、34—销钉　6—导板　7—斜楔　9—拉杆　10—下顶杆　11、25、29、38—螺钉　12—动模固定板　13、21—垫板　14—型芯　15—固定板　16—推板　17—钢球　18—垫圈　19—推杆固定板　20—长推管　23—支撑板　24—凹模　26—上模板　27—浇口板　28—定模固定板　30—定位圈　31—浇口套　32、33—带头导柱　35—止动螺钉　36—连杆　37—专用螺钉

注射成型后，开模时利用弹簧 8 使浇口板 27 与定模固定板 28 之间（*A* 面）分型。拉断点浇口后，在导板 6 和销钉 5 作用下抽出侧向小型芯 4。*B* 面继续开模，拉杆 9 拉住浇口板定距。

注射机的下顶杆 10、推板 16、推杆固定板 19 和长推管 20 推顶动模中的斜齿轮。在被固定的销钉 22 作用下推管 20 沿轴向旋转，将斜齿轮推出型腔。合模时，复位杆 1 回归。

3）带嵌件的双联齿轮注射模。双联齿轮的模数 $m = 1.5\text{mm}$，用高强度低摩擦系数的聚酰胺 PA66 成型，并用冶金粉末嵌件做轴套。该齿轮齿数 $z_1 = 17$ 和 $z_2 = 18$，是传递较大转矩的齿轮。图 7-69 所示双联齿轮注射模有四个型腔，主流道下有四个分叉流道。聚酰胺熔体由矩形侧浇口引入双联齿轮的隔板，再充填两齿廓。

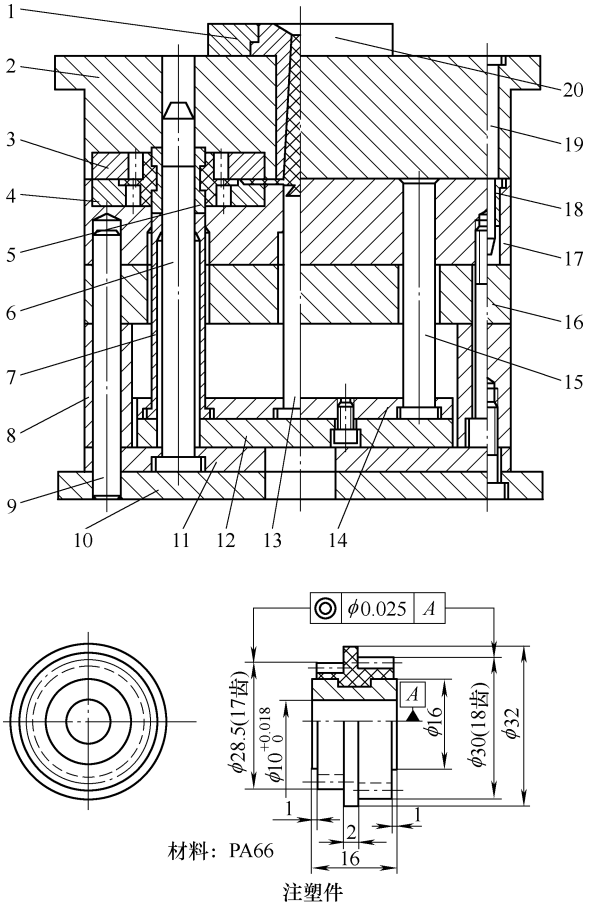


图 7-69　PA66 一模四件带嵌件的双联齿轮注射模

1—浇口套　2—定模板　3—上齿廓镶件　4—下齿廓镶件　5—粉末冶金嵌件　6—主型销
7—顶出套　8—支承块　9—圆柱销　10—后垫板　11—前垫板　12—后顶板　13—拉料杆
14—前顶板　15—复位杆　16—动模垫板　17—动模板　18—导套　19—导柱　20—定位圈

双联齿轮的同轴度要求精度较高。对注射模的各零部件的设计与加工都必须有相应的尺寸与形状的精度。特别是定模板 2、动模板 17、动模垫板 16、前垫板 11 和前顶板 14 等上的安装定位孔等，均要求用精密坐标镗床或坐标磨床加工。该模具中的上齿廓镶件 3 和下齿廓镶件 4 都设计成镶块嵌件，以便两齿轮的齿廓能采用线切割加工。

由于粉末冶金嵌件 5 与主型销 6 的配合精度高，为保证成型齿轮能被顶出套 7 顺利顶出，主型销的前段要有一定的制造公差，避免与齿轮孔有过大摩擦磨损，又能与定模板上导向孔配合。

4）锥齿轮注射模。图 7-70 所示注射模成型四件聚碳酸酯 PC 锥齿轮，齿轮的模数 $m=1\text{mm}$，齿数 $z=20$。开模时在弹簧 33 作用下，模具从定模固定板 17 与定模板 15 处（*A* 面）首先分型。到达一定距离后拉杆 32 拉住凹模套板 26，使动模再从支承板 3 与定模的凹模套板 26 在 *B* 处分型。此时，弹簧 20 推动上推板 25，使浇注系统的点浇口自动断开，其凝料脱落。锥齿轮留在型芯 4 上，将由推管 2 推出。

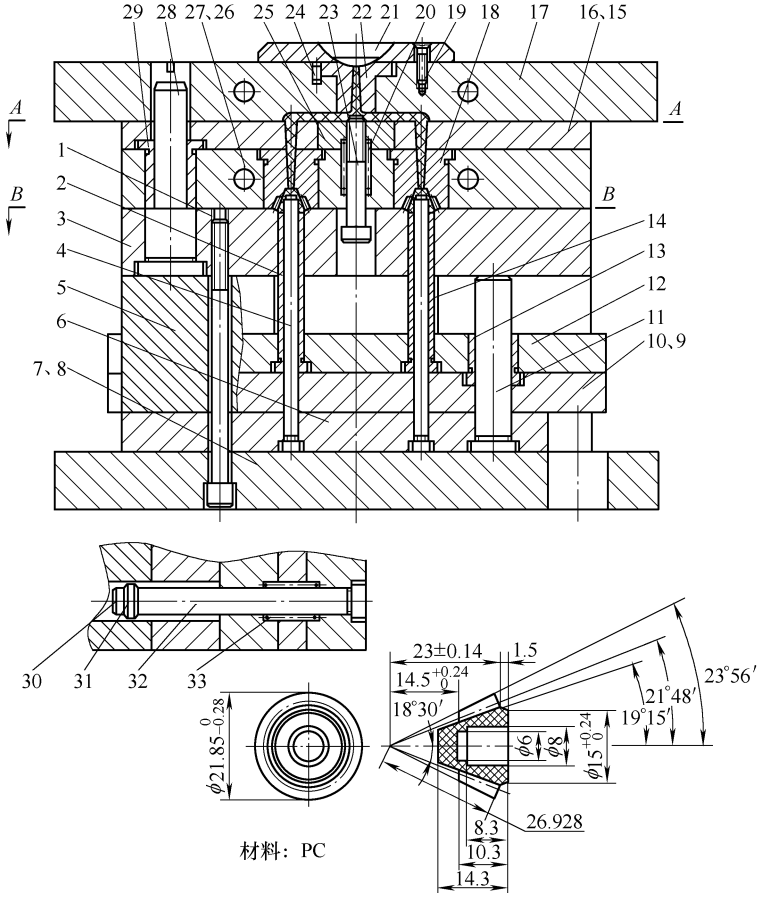


图 7-70　PC 一模四件锥齿轮注射模

1、9、16、19、23、30—螺钉　2—推管　3—支承板　4—型芯　5—垫块
6—型芯固定板　7—动模固定板　8、24、27—销钉　10—推板　11—带头导柱
12—推管固定板　13—带头导套　14—复位杆　15—定模板　17—定模固定板
18—凹模　20、33—弹簧　21—定位圈　22—浇口套　25—上推板
26—凹模套板　28—有肩导柱　29—带头导套　31—垫块　32—拉杆

参 考 文 献

[1]　杨占尧. 注塑模具典型结构图例［M］. 北京：化学工业出版社，2005.
[2]　申开智. 塑料制品设计方法及应用实例［M］. 北京：国防工业出版社，2007.
[3]　徐佩弦. 塑料制品设计指南［M］. 北京：化学工业出版社，2007.

第 8 章　浇注系统的设计

浇注系统一般均由主流道、分流道、浇口和冷料井组成，是引导塑料熔体从注射机喷嘴到模具型腔为止的一种完整的输送通道。它具有传质、传压和传热的功能，对注塑件质量具有决定性影响。本章陈述冷流道设计。

8.1　流道系统的设计

浇注系统的设计合理与否，影响着模具的整体结构及其工艺操作的难易程度。用塑料熔体流变学参量和公式，设计计算浇注系统，已成功地应用于计算机注射模流动分析。同样也可以通过人工计算，实现浇注系统的正确设计。

1. 浇注系统的功能

浇注系统的作用是将塑料熔体顺利地充满到模腔深处，以获得外形轮廓清晰，内在质量优良的塑料制件，因此要求充模过程流畅有序、压力损失小、热量散失少、排气条件好、浇注系统凝料易于与制品分离或切除。

（1）浇注系统的组成　各种类型注射机模具的浇注系统如图 8-1 所示。一般均由四部分组成。

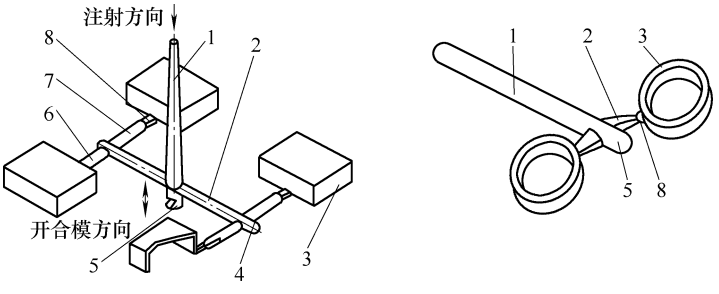


图 8-1　浇注系统的组成

a）卧式注射机的浇注系统　b）角式注射机的浇注系统

1—主流道　2—分流道　3—制品　4—分流道冷料井　5—主流道冷料井

6、7—第二分流道　8—浇口

1）主流道。指由注射机喷嘴出口起到分流道入口止的一段流道。它是塑料熔体首先经过的通道，且与注射机喷嘴在同一轴线。

2）分流道。指主流道末端至浇口的整个通道。分流道的功能是使熔体过渡和转向，通常由一级分流道和二级分流道，甚至多级分流道组成。单型腔模具中分流道是为了缩短流程；多型腔注射模中分流道是为了分配物料。

3）浇口。指分流道末端与型腔入口之间狭窄且短小的一段通道。它的功能是使塑料熔体加快流速注入型腔内，有序地填满型腔，且对补缩具有控制作用。

4）冷料井。通常设置在主流道和分流道转弯处的末端。其功用为“捕捉”和贮存熔料前锋的冷料。冷料井也经常起拉勾浇注系统凝料的作用。

（2）浇注系统设计的原则

1）浇注系统与注塑件一起在分型面上，应有流量、压降和温度分布的均衡布置。

2）尽量缩短流程，以降低压力损失，缩短充模时间。

3）浇口位置的选择，应避免产生湍流、涡流、喷射和蛇形流动，并有利于排气和补缩。

4）避免高压塑料熔体对型芯和嵌件产生冲击，产生变形和位移。

5）浇注系统凝料脱出方便可靠，易与注塑件分离或切除，注塑件上切口整修容易，且外观无损伤。

6）熔合缝位置需合理安排，必要时配以冷料井或溢料槽。

7）尽量减少浇注系统的用料量。

8）浇注系统应达到所需精度和粗糙度，其中浇口须有 IT8 级以上精度。

（3）浇注系统布置　在多腔模中，分流道的布置有平衡式和非平衡式两类，一般以平衡式为宜。

1）平衡式布置。从主流道末端到各型腔的分流，其长度、断面形状和尺寸都对应相等。这种布置可使塑料熔体均衡地充满各个型腔。一起出模的各注塑件质量和尺寸精度的一致性好；但分流道较长，对熔体阻力大，浇注系统凝料多。如图 8-2 所示的圆周均布，较适宜圆形注塑件；而 H 形排列，适宜于矩形注塑件。

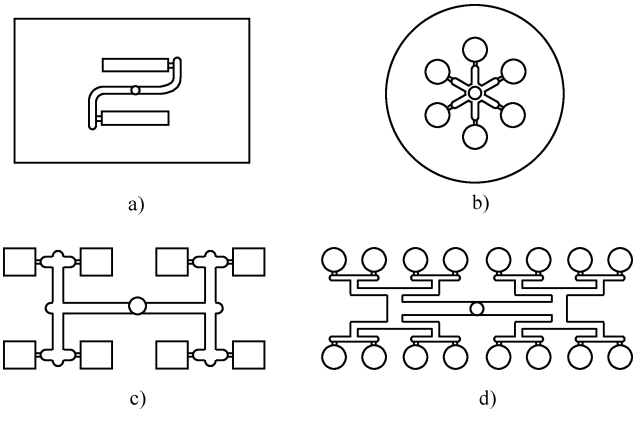


图 8-2　浇注系统平衡式布置

a）、b）圆周排列　c）、d）H 形排列

2）非平衡式布置。见图 8-3，由于从主流道末端到各个型腔的分流道长度各不相等，为达到均衡充模，可将浇口尺寸按距离主流道远近进行修正。此种布置，流程虽短，但制件质量一致性很难保证。

浇注系统无论是平衡式或非平衡式布置，型腔均应与模板中心对称。使型腔和流道的投影中心与注射机锁模力中心重合，避免注射时产生附加的倾侧力矩。

2. 流道系统的设计

流道系统设计包括主流道、分流道和冷料井布置及其结构设计。

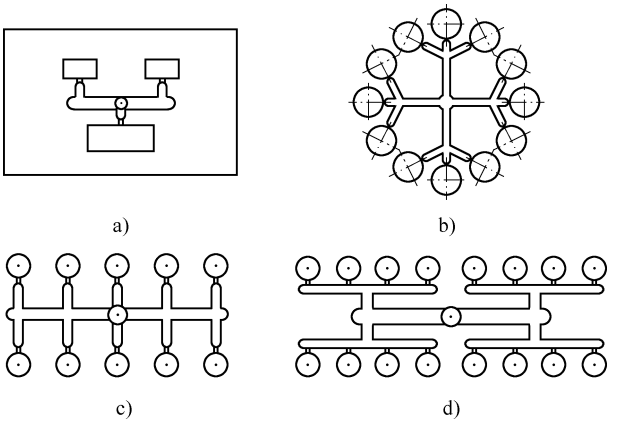


图 8-3 浇注系统非平衡式布置

a）一模注射不同注塑件 b）星形不平衡布置 c）一字布排 d）H 形不平衡布置

（1）主流道 直浇口式主流道呈截锥体，见图 8-4。主流道入口直径 d，应大于注射机喷嘴直径 1mm 左右。这样便于两者能同轴对准，也使得主流道凝料能顺利脱出。主流道入口的凹坑球面半径 R，应该大于注射机喷嘴球头半径约2～3mm。反之，两者不能很好贴合，会让塑料熔体反喷，出现溢边致使脱模困难。锥孔壁粗糙度 $Ra \leqslant 0.8\mu m$ 。主流道的锥角 $\alpha = 2° \sim 4°$。过大的锥角会产生湍流或涡流，卷入空气；过小锥角使凝料脱模困难，还会使充模时流动阻力增大，比表面增大，热量损耗大。

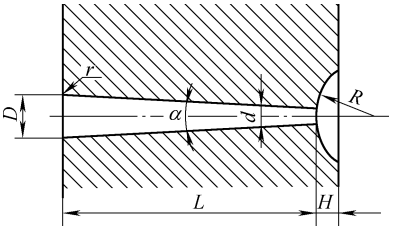


图 8-4 直浇口式主流道

d = 喷嘴孔径 + 1mm；R = 喷嘴球面半径 +（2～3）mm；$\alpha = 2° \sim 4°$；$r \approx 0.125D$；$H = 0.3 \sim 0.4R$

主流道的长度 L，一般按模板厚度确定。但为减小充模时压力降和减少物料损耗，以短为好。小模具的 L 控制在 50mm 之内。在出现过长主流道时，可将主流道衬套挖出深凹坑，让喷嘴伸入模具。也有在主流道的上游设置加热喷嘴。在熔料流量较大，黏度较高时，大端直径 D 设计得大些。主流道的出口端应该有较大圆角 $r = 1 \sim 2mm$，或 $r \approx 0.125D$。

小型模具可将主流道衬套和定位环制成一体，见图 8-5a。主流道衬套里侧端面承受熔体高压，入口端面受喷嘴的冲撞和挤压，因此，需要有足够硬度和可靠紧固。如图 8-5b 所示，衬套用 T8 或 T10 经淬火后硬度为 50～55HRC。衬套里端面与熔体的接触面积尽可能小些，并由定位环压紧。定位环外圆与注射机定模板上定位孔应为动配合。

（2）分流道

1）截面形状。分流道的种类及截面形状如图 8-6 所示。从压力传递角度考虑，要求有较大的流道截面积；从减少散热考虑应有小的比表面 S。圆形截面 $S = 4/d$；半圆截面 $S = 4.63/d$；矩形截面，若 $h = 0.125\pi d$，则 $S = 5.02d$；若正方形边长 d，则有 $S = 4/d$。其中圆形截面最理想，使用越来越多。方形截面由于脱模困难，多不采用。梯形

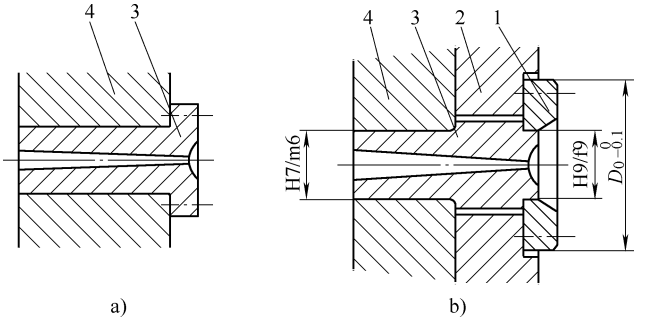


图 8-5　主流道衬套与定位环

a）整体的主流道杯　b）衬套与定位环

1—定位环　2—定模垫板　3—主流道衬套　4—定模板

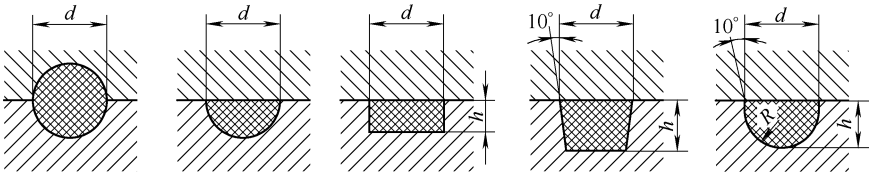


图 8-6　各种分流道的截面

a）圆形截面　b）半圆截面　c）矩形截面　d）梯形截面　e）U 形截面

截面比表面 S 虽然大些，但因加工和脱模方便，应用广泛，以 $h/d = 2/3 \sim 4/5$，梯形侧边斜度 5° ~ 15°为宜。U 形截面与梯形类似，使用较多。

2）截面尺寸。一般分流道直径在 3 ~ 12mm，大流量和高黏度物料充模，可达 13 ~ 16mm。塑料熔体在分流道内流动剪切速率 $\dot{\gamma}$ 在 $10^2 \sim 10^3 s^{-1}$ 范围内，方为合理。分流道截面尺寸可由流变学公式估算。但计算结果需按现有刀具尺寸圆整。

分流道直径尺寸，由塑料熔体的流动指数 n、剪切速率 $\dot{\gamma}$ 以及注射的体积流量共同决定。此流量 q_i 为分流道注入下游型腔的体积流量，可由该段分流道的注射量和注射时间计算

$$q_i = \frac{V_i}{t} \tag{8-1a}$$

$$V_i = \frac{V}{N} \tag{8-1b}$$

式中　q_i——分流道的体积流量（cm^3/s）；

t——注射机对模具的充模时间（s），参考表 8-1；

V_i——分流道的注射量（cm^3）；

V——注射模型腔的总体积（cm^3）；

N——流道分叉数。

在浇注系统的圆管流道中，各截面的熔体充模时间 t 是相同的。在分流道直径的计

算过程中，模具型腔总体积 V 通过以下注射量和时间的关系确定注射时间。该注射时间 t 是根据注射机螺杆的常规推进速率（注射机中等注射速率），确定的相对应的注射充模时间。表 8-1 是在注射机常规注射速率下，对应的充模时间和公称注射量关系。大量工程计算证明此方法能正确确定浇注系统流道中熔料的充模流量，也能适应注射机操作对充模速率的调节。

表 8-1 注射机公称注射量与注射时间的关系

公称注射量 V/cm^3	注射时间 t/s	公称注射量 V/cm^3	注射时间 t/s
30	0.86	4000	5.0
60	1.0	6000	5.7
125	1.6	8000	6.4
250	2.0	12000	8.0
350	2.2	16000	9.0
500	2.5	24000	10.0
1000	3.1	32000	10.7
2000	4.0	48000	12.6
3000	4.6	64000	12.8

将表 8-1 的数据经多项式拟合，对注射量 $30 \leqslant V(\mathrm{cm}^3) < 2500$ 的注射时间

$$t = 0.8998 + 0.37902 \times 10^{-2} V - 0.17210 \times 10^{-5} V^2 + 0.28900 \times 10^{-9} V^3 \qquad (8\text{-}1c)$$

式中 V——注射量（cm^3）；

t——注射时间（s）。

在已知以上数据的情况下，按剪切速率确定喷嘴内流道直径，可由以下流变学公式计算得

$$d_i = \frac{1.366}{\sqrt[3]{\dot{\gamma}}} \sqrt[3]{\frac{q_i(3n+1)}{n}} \qquad (8\text{-}2)$$

式中 n——塑料熔体的流动指数，参见前表 2-5 或表 2-6；

$\dot{\gamma}$——塑料熔体流经分流道的合理剪切速率，s^{-1}，常以 $5 \times 10^2 \mathrm{s}^{-1}$ 左右代入。

式（8-2）由非牛顿流体在圆管道中的流量 Q 计算式推导而得。它不但能估算分流道直径，也能以熔体流动合适的剪切速率估算主流道、矩形截面浇口和点浇口的直径。各通道适宜的 $\dot{\gamma}$ 见表 8-2。

表 8-2 浇注系统各通道适宜的剪切速率

浇注系统各通道	适宜的剪切速率 $\dot{\gamma}$/s^{-1}	浇注系统各通道	适宜的剪切速率 $\dot{\gamma}$/s^{-1}
主流道	$(0.9 \sim 3.0) \times 10^3$	中等截面的浇口（侧浇口等）	$(3.0 \sim 7.0) \times 10^4$
分流道	$(3.0 \sim 7.0) \times 10^2$	点浇口	$(1.0 \sim 5.0) \times 10^5$

3）流道直径计算式推导。式（8-2）是由非牛顿流体在圆管道中的流量 Q 计算式推导而得。其圆管中流量

$$Q=\left(\frac{n\pi}{3n+1}\right)\left(\frac{\Delta p}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot R^{\frac{3n+1}{n}}$$

式中，Δp 是对于半径 R 长 L 圆管的压力降。K 是塑料熔体在某温度和一定剪切速率 $\dot{\gamma}$ 下的稠度。n 为流动指数，也称非牛顿流动指数。稠度和黏度的单位相同，常用 Pa · s；为运算方便，也有用 N · s/cm^2。

其中，管壁的剪切速率为

$$\dot{\gamma}=\left(\frac{\Delta p\cdot R}{2K\cdot L}\right)^{\frac{1}{n}}$$

将此式代入上式，整理得

$$Q=\left(\frac{n\pi}{3n+1}\right)\left(\frac{\Delta p\cdot R}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}\cdot R^3=\left(\frac{n\pi}{3n+1}\right)\dot{\gamma}\cdot R^3$$

直径 $d=2R$，此式为

$$Q=\frac{\pi}{8}\dot{\gamma}\,\frac{n}{3n+1}d^3$$

用分流道流量 $q_i=Q$，可得喷嘴直径的流变学计算式

$$d_i=\sqrt[3]{\frac{8}{\pi\dot{\gamma}}}\sqrt[3]{\frac{q_i(3n+1)}{n}}$$

式中 $\sqrt[3]{\frac{8}{\pi}}=1.366$，可换算成式（8-2）。

4）流道分叉。在流动分析中，按塑料熔体在各级流道中剪切应力不变的理论，各级流道直径间关系计算式如下。

$$d_{i+1}=\frac{d_i}{N^{\frac{1}{3}}}\tag{8-3}$$

式中　N——流道分叉数；

d_i——上游流道直径（mm）；

d_{i+1}——下游流道直径（mm）。

由此式可知，一分为二的下游流道直径 $d_2=0.79d_1$。一分为三时下游流道直径 $d_2=0.69d_1$。一分为四时下游流道直径 $d_2=0.63d_1$。

5）分流道表面粗糙度。常取 $Ra>0.63\sim1.6\mu m$，以增大外层流动阻力，避免熔体料流表面滑移，使中心层具有较高剪切速率。

6）实例。注射模的总注射量 1000cm^3，查表 8-1 得注射机可行的充模时间 $t=3.1s$。有四个分叉流道，每个流道的射出量为 250cm^3。得流经浇口流量 $q_i=81cm^3/s$。由此塑料品种流变曲线，获知塑料熔体的流动指数 $n=0.32$。在较大流量下应具有合理的剪切速率 $\dot{\gamma}=700s^{-1}$。代入式（8-2）得

$$d_i=\frac{1.366}{\sqrt[3]{700}}\sqrt[3]{\frac{81\times(3\times0.32+1)}{0.32}}=1.22cm$$

考虑到注射生产时，还允许调节注射充模时间和剪切速率，并归整到流道直径的系

列尺寸，故用流道直径为12mm。

塑料熔体流经主流道的合理剪切速率，常以（0.9～3.0）×$10^3 s^{-1}$代入。计算得流经主流道流量 $q_i = 323 cm^3/s$。在较大流量下应具有合理的剪切速率 $\dot{\gamma} = 950 s^{-1}$。代入式（8-2）得

$$d_i = \frac{1.366}{\sqrt[3]{950}} \sqrt[3]{\frac{323 \times (3 \times 0.32 + 1)}{0.32}} = 1.75 cm$$

故取主流道的平均直径为18mm。

若用式（8-3），以各流道直径关系式求主流道直径

$$d_i = d_{i+1} \cdot N^{\frac{1}{3}} = 12 \times 4^{\frac{1}{3}} = 19.1 mm$$

取主流道的平均直径为18～19mm。大量计算获知，现代注射模浇注系统直径通常小于20～22mm。

（3）冷料井及拉料杆　冷料井有两种，一种是单纯为“捕捉”或贮存冷料之用；另一种是还兼有拉脱或顶出浇道凝料功用。

1）冷料井。根据需要，不但在主流道末端，也可在各分流道转向位置，甚至在注塑件型腔末端设置冷料井。冷料井应设置在熔料流动方向的转折位置，见图8-7，并迎着上游的熔流。其长度通常为浇道直径 d 的1.5～2倍。

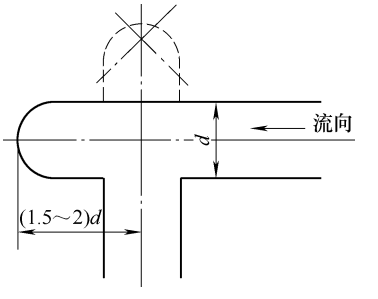


图8-7　设置冷料井位置

2）拉料杆冷料井。顶出杆成型的“拉顶”冷料井如图8-8所示。三种顶出杆的杆脚固定在顶出板中，开模时将主流道凝料从定模边的型腔中拉出，在其后的脱模过程中，再将凝料从动模中顶出。图8-8a为 Z 形头顶出杆，虽有“拉顶”动作可靠的优点，但单方向性的 Z 形面需手工定向取出凝料。需特别注意，在受到注塑件型芯或螺纹芯杆限制时，会无法取出凝料。图8-8b和图8-8c分别为倒锥和圆环槽冷料井，在实现先拉后顶动作后，凝料处于自由状态。但尺寸设计需凭经验。倘若物料塑性差，沟槽过深，脱模顶出时会发生剪切分离。一般取单向沟槽深0.5～1mm。对韧性物料如ABS、POM和PE，可取较大值。但对脆性

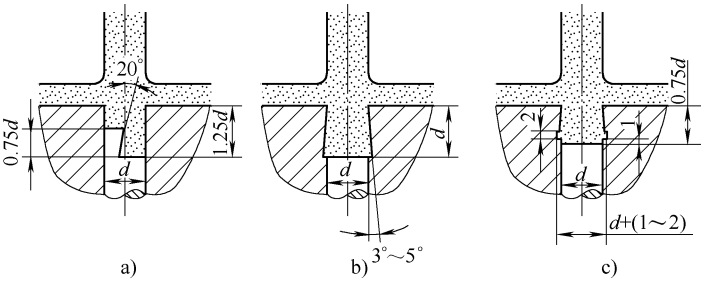
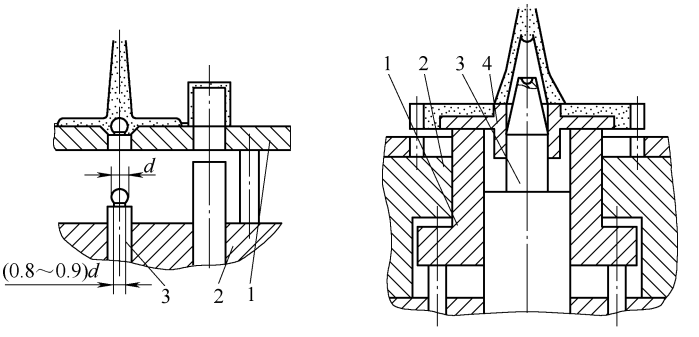


图8-8　顶出杆成型的冷料井

a）Z 形　b）倒锥　c）圆环槽

物料 PC、PMMA 和 PP 等，应取较小值，并割成圆环沟槽，且沟槽部位表面粗糙度应达 $Ra > 3.2 \sim 0.8\mu m$。

另一种，如图 8-9 所示拉料杆成型的“拉料”冷料井。拉料杆的杆脚固定在动模中。开模时将主流道凝料从定模中拉出；其后在脱模过程中，由推杆板将它从拉杆成型头中推出。如图 8-9a 所示，拉料头有多种结构形式，如球头、菌形头等。另一类是利用塑料冷却对成型头的包紧力，达到拉料的目的，如图 8-9b 所示圆锥头，常用在单腔成型齿轮等带中心孔的盘类注塑件上。孔与外圆有较好的同心度。如果注塑件较大，可在锥顶挖出球坑作为冷料井。



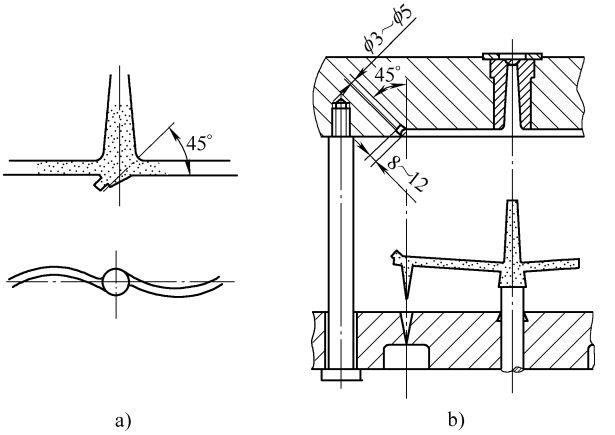
a)　　b)

图 8-9　拉料杆成型的冷料井

a）球头　b）圆锥头

1—推件板　2—动模板　3—拉料杆　4—金属嵌件

3）凹坑拉料冷料井。与开模方向成一定倾角的凹坑中冷料，可产生所需的拉力，用以拉出主流道凝料或拉断点浇口。图 8-10a 所示，在主流道终端的动模上开有锥形凹坑冷料井。此种结构必须用 *S* 形的挠性分流道相匹配，以便冷料头从不通孔中顺利拔



a)　　b)

图 8-10　凹坑拉料冷料井

a）主流道凹坑　b）分流道凹坑

出。图 8-10b 是在定模板的分流道末端，开有斜孔冷料井，开模时会先拉断点浇口，然后在拉出主流道凝料的同时，将分流道与冷料头一起拉出，最后再将凝料从动模中顶出，并自动坠落。

8.2 浇口设计

浇口是塑料熔体进入型腔的阀门，对注塑件质量具有决定性的影响。因而浇口型式与尺寸、浇口位置与数量，便成为浇注系统设计中的关键。

8.2.1 浇口的形式和尺寸

按浇口截面可分为大浇口、中等截面和小浇口三类。前者也称为非限制性浇口，系指直接浇口；后两者也称为限制性浇口或内浇口。中等截面浇口有侧浇口、重叠式浇口、扇形浇口、平缝浇口、圆环形浇口、轮辐式浇口和护耳式浇口等。小浇口有点浇口、潜伏式浇口和爪形浇口等。

1. 侧浇口

侧浇口也称为边缘浇口，如图 8-11 所示。各种中等截面浇口，都从侧浇口演变而来，所以也称它为标准浇口。它开设在主分型面上，截面形状易于加工和调整修正。多型腔模具采用侧浇口，可设计成两板模。它适用于各种塑料，且易切除并对注塑件外观质量影响甚小。

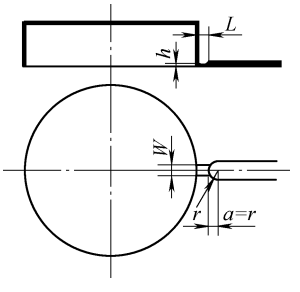


图 8-11 侧浇口

浇口的三个尺寸（h、W、L）中，以深度 h 最为重要。h 控制了浇口畅通开放时间和补缩作用。浇口宽度 W 的大小控制了熔体充模流量。浇口长度 L，只要结构强度允许，以短为好，一般选用 $L=0.5\sim2.0$mm。浇口深度有经验公式

$$h = Ns \tag{8-4a}$$

式中 h——侧浇口深度（mm），约为制品最大壁厚的 0.4～0.8 倍，中小型注塑件常用 $h=0.5\sim2$mm；

s——塑件壁厚（mm）；

N——塑料的材料系数，N 为 0.4～0.8，高黏度熔料（例如 PVC 等）取 0.8，低黏度熔料（例如 PE 等）取 0.4。

侧浇口宽度 W 与分流道直径 d 有关，通常 $W\leqslant0.8d$。

$$A = hW \tag{8-4b}$$

式中 W——浇口宽度（mm）；

A——浇口截面面积（mm^2）。

矩形截面流道中塑料熔体为二维流动，流变学计算式较为复杂，因此常用经验公式计算截面尺寸。对于众多的塑料品种，高黏度物料的材料系数 N 取大值。

最后，须用流经侧浇口熔体适宜的剪切速率 $\dot{\gamma}=(3\sim7)\times10^4\,s^{-1}$ 进行校核或设计，见式（8-5）。限制塑料熔体在浇口内的剪切速率在此范围内，能剪切变稀，顺利充模。可用牛顿流体在矩形截面内的剪切速率进行校核或设计截面尺寸。

$$\dot{\gamma}=\frac{6Q}{Wh^2} \tag{8-5}$$

式中　Q——流经矩形截面浇口的体积流量（cm^3/s）；

W、h——矩形截面的宽度和深度（cm）。

根据注塑件的壁厚 s，先决定侧浇口深度 h。$\dot{\gamma}$ 常以 $5\times10^4\,s^{-1}$ 左右代入式（8-5），可计算确定侧浇口宽度 W。当侧浇口 $W>5mm$ 时可考虑用两个或更多的侧浇口进料。

［例］　有 PS 矩形盒，底平面 150mm × 130mm，高 50mm，壁厚 $s=1.3mm$。试设计矩形侧浇口。

［解］　现取浇口长 $L=0.5mm$。PS 熔体黏度中等，取 $N=0.6$，故 $h=Ns=0.6\times1.3=0.8mm$。

由注塑件体积 $V=475\times0.13\approx61.8cm^3$，参考表 8-1，决定充模注射时间 1.0s，在此

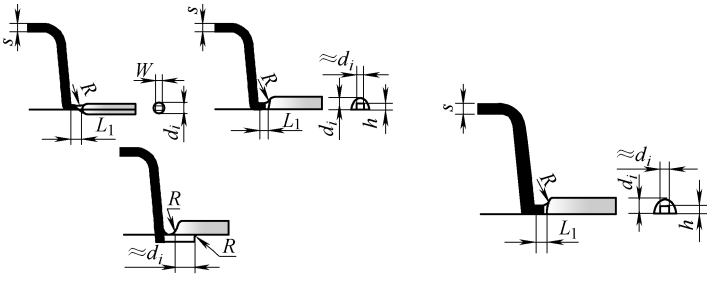
$$Q=\frac{V}{t}=\frac{61.8}{1.0}=61.8cm^3/s$$

用式（8-5），以 $\dot{\gamma}=5\times10^4\,s^{-1}$ 代入，得

$$W=\frac{6Q}{\dot{\gamma}h^2}=\frac{6\times61.8}{5\times10^4\times0.08^2}cm=1.16cm$$

故得矩形侧浇口截面，$W\times h=12\times0.8mm$。或用两个侧浇口，每个 $6\times0.8mm$。

图 8-12 介绍以注塑件的壁厚 s，和分流道 d 决定矩形截面浇口尺寸的方法。



a)　　b)

图 8-12　侧浇口截面的推荐设计

a）壁厚 $s\leqslant4mm$，流道直径 $d_i=1.5s+(0\sim3)mm$；$h=0.8s$，$W=0.8d$；$L=0.5\sim2.0mm$；$R\geqslant0.8mm$

b）壁厚 $s>4mm$，流道直径 $d_i=s+(1\sim2)mm$；$h=0.6s$，$W=0.8d$；$L=0.5\sim2.0mm$；$R\geqslant1.0mm$

2. 重叠式浇口

侧浇口开设在注塑件端面的边缘，如图 8-13 所示。它可避免熔体从浇口射出，在大型腔中产生喷射现象。尤其适用于低黏度物料，使熔体有序推进。浇口深度 h、宽度

W 及长度 L_1 可按侧浇口的确定方法计算。其浇口总长度 $L = L_1 + L_2$

$$L_2 = h + \frac{W}{2} \qquad (8\text{-}6)$$

式中 L_2——重叠长度（mm）；

h——浇口深度，见式（8-4a）；

W——浇口宽度，见式（8-4b）。

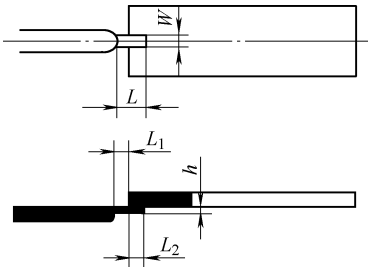


图 8-13 重叠式浇口

3. 扇形浇口

这是侧浇口的一种改进型。扇形浇口从流道起向型腔扩展呈扇形，深度逐步由深至浅。浇口的截面积 S 应视为常数。塑料熔体可在较大范围注入，所以这种浇口适用于大面积薄壁注塑件。扇形浇口呈现扩展形，使注射时流痕很小。注塑件取向变形也小。注射着色塑料时，外观色泽一致。除黏度较高的物料外，一般塑料均适用。

浇口有较长的长度，$L = 0.7 \sim 2.0$mm 或更大。先按式（8-4a）和式（8-4b）决定平均深度 h 和宽度 W，计算浇口的平均截面积 S，然后根据流道直径 d 和最大宽度 W_2，求出它们对应的深度 h_1 和 h_2，见图 8-14，有

$$S = hW, h_1 = \frac{S}{d}, h_2 = \frac{S}{W_2} \qquad (8\text{-}7)$$

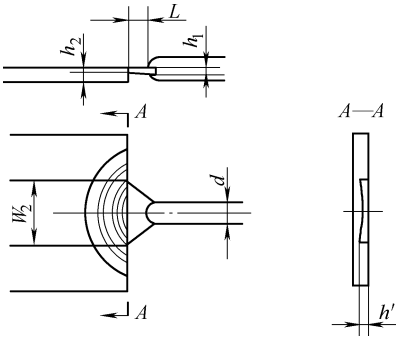


图 8-14 扇形浇口

式中 S——浇口的平均截面积（mm^2）；

h、W——由式（8-4a）和式（8-4b）计算的平均深度和宽度（mm）；

h_1、h_2——浇口的始端和型腔注入端深度（mm）；

d——流道直径、即浇口始端宽（mm）；

W_2——浇口型腔端宽度，常取 40mm 左右。

为补偿扇形扩展时，两侧流程增大所造成的压力损失，浇口深度 h 从中心线起向两侧逐步加深至 h'，常取 h_1 和 h_2 的平均值。

［例］ 尺寸为 300mm × 50mm × 3mm 的 PS 平板，流道直径 $d = 10$mm，设计扇形浇口。

［解］ 参量计算：

平均深度 $$h = Ns = 0.6 \times 3\text{mm} = 1.8\text{mm}$$

浇注体积 $$V = 30\text{cm} \times 5\text{cm} \times 0.3\text{cm} = 45\text{cm}^3$$

参考表（8-1），定充模时间 $t = 0.9$s

体积流量 $$Q = \frac{V}{t} = \frac{30\text{cm} \times 5\text{cm} \times 0.3\text{cm}}{0.9\text{s}} = 50\text{cm}^3/\text{s}$$

由式（8-5），平均宽度

$$W=\frac{6Q}{\dot{\gamma}h^2}=\frac{6\times50}{4\times10^4\times0.18^2}\text{cm}=0.23\text{cm}$$

平均面积　　$S=hW=1.8\text{mm}\times2.3\text{mm}=4.14\text{mm}^2$

起始深度　　$h_1=\frac{S}{d}=\frac{4.14}{10}=0.414\text{ mm}$

型腔端中心深度　　$h_2=h_2=\frac{S}{W_2}=\frac{4.14\text{mm}^2}{20\text{mm}}=0.103\text{mm}$

扇形两侧深度　　$h'=0.315\text{mm}$

4. 平缝形浇口

这种浇口又称薄膜浇口。它由扇形浇口演变而来，充模流动更为均衡。对有透明度和平直度要求、表面不允许有流痕的片状注塑件尤为适宜。

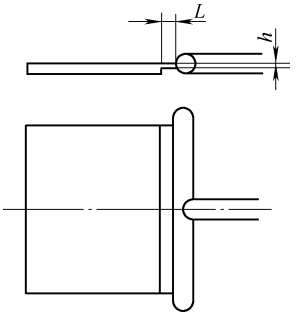


图 8-15　平缝形浇口

平缝形浇口宽度等于或略大于型腔宽度，见图 8-15。流道也随之加长，因而切割困难，耗料较多。浇口长度 $L\geqslant1.3\text{mm}$，以便于割除。浇口深度 h，即使对于低黏度熔体也不能小于 0.25mm，其深度经验公式为

$$h=0.7Ns \qquad (8\text{-}8)$$

式中，h、N 和 s 的含义和单位同式（8-4a）。

图 8-16 介绍壁厚 s 小于 4mm 的两种平缝形浇口的设计。对于宽度 $W>50\text{mm}$ 的平缝形浇口，应采用人字形流道。平缝形浇口也可以是重叠式。浇口长度上可以有两个深度 h_1 和 h_2，$h_1>h_2$，h_1 取决于壁厚 s。流道直径 d 要与壁厚 s 成比例。

5. 圆环形浇口

圆环形浇口主要用于圆筒形制品或中间带有孔的制品，如图 8-17 所示。浇口可置于孔的内侧，也可置于外侧或置于制品的端面上。分流道成圆环布置，其截面为圆形或矩形。浇口为环形缝，一般浇口深度 $h=0.25\sim1.6\text{mm}$。可参照平缝形浇口的式（8-8），$h=0.7Ns$ 计算深度。浇口长度可取 $L=0.75\sim1.0\text{mm}$。h 过小和 L 过长，塑料熔体会产生较大的压力降。这种浇口进料均匀，排气容易，制品质量好。但浇口切除需用冲裁模冲切。

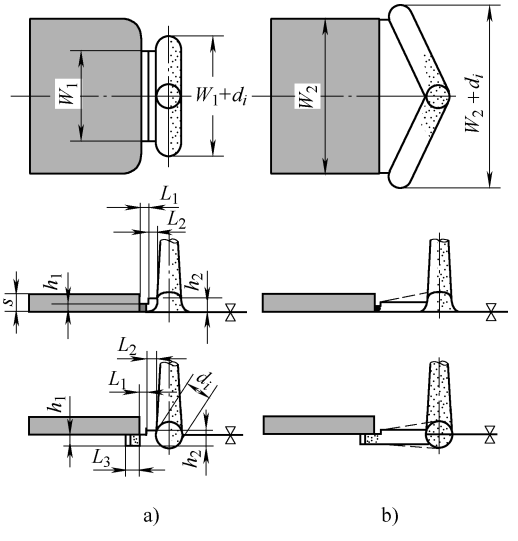


图 8-16　壁厚 s 小于 4mm 的平缝形浇口推荐设计

a）平行流道窄缝浇口　b）人字流道宽缝浇口

流道直径 $d_i=1.5s+(0\sim3)\text{mm}$；$L_1=0.5\sim2.0\text{mm}$；$L_2=0.5\sim3.0\text{mm}$；$h_1=(0.5\sim0.8)s$，或 $h_1=0.5\sim2.0\text{mm}$；$h_1<h_2<s$；$h_1\leqslant L_3<s$；$W\leqslant50\text{mm}$

图 8-17a 为盘形浇口，常用在单型

腔的二板模中；制品中无熔合缝；成型型芯呈现一端固定的悬臂柱体，长径比不小于0.2；浇口也可交叠在端面上；图示交叠长度 $L_1 = Ns$，L 同前。图 8-17b 为外环式浇口，适用于孔径较小的管筒形注塑件；型芯可两端支承，保证了壁厚均匀；在环形分流道的末端也应设置冷料井；这种浇口适合于一模多腔的模具结构。图 8-17c 为轴向缝式环形浇口；它与外环式浇口相似，但熔体压力对型芯冲击力最小，更适用于细长的需两端支承的型芯；浇口长度 L = 35mm；浇口深度 h 不宜过小；从浇道到浇口有圆弧逐次收拢。

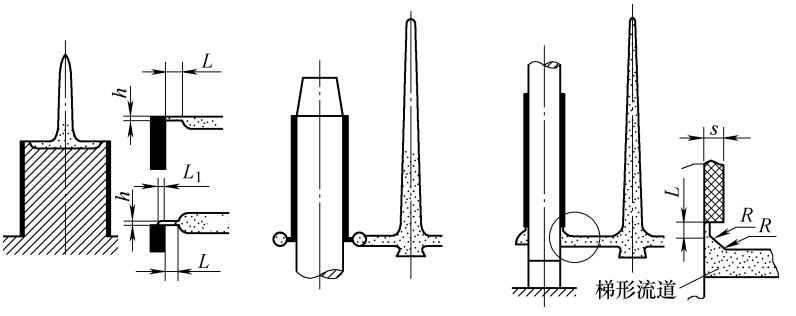


图 8-17　圆环形浇口

a）盘形浇口　b）外环式浇口　c）轴向缝式环形浇口

图 8-18a 为盘形膜片浇口，具有锥角 $\alpha = 90°$ 的圆锥头的型芯，适用于小型的圆筒注塑件。图 8-18b 是浇口置于圆筒里的盘形浇口，适合具有翻边的圆筒注塑件。

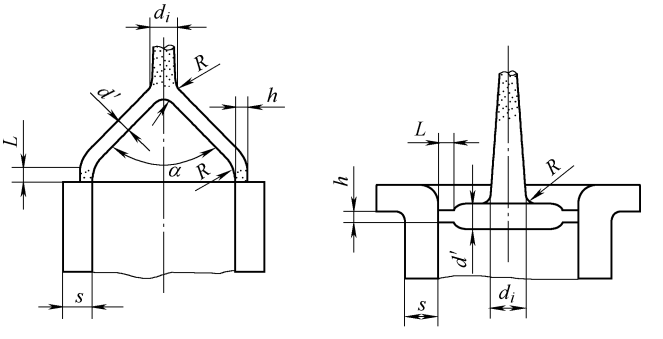


图 8-18　盘形膜片浇口的设计

a）盘形膜片浇口　b）内置的盘形浇口

壁厚 $s \leqslant 4$mm，流道直径 $d_i = 1.5s + 0 \sim 3$mm；壁厚 $s > 4$mm，流道直径 $d_i = 1.5s + 1 \sim 3$mm；$L = 1 \sim 3$mm；$h = (0.5 \sim 0.8)s$；$d' \approx s$；$\alpha \leqslant 90°$；$R \leqslant 0.5$mm

6. 轮辐式浇口

轮辐式浇口的适用范围类同圆环形浇口。它把整个圆环改成了几段小圆弧进料，如图 8-19 所示。这样不但浇口去除方便，浇口凝料减少，而且还由于型芯上部得以定位，增加了型芯的稳定性。缺点是制品上带有若干条熔合缝，影响制品力学性能。浇口长度 $L = 0.8 \sim 1.8$mm，浇口深 h 和宽 W，可参照侧浇口的式（8-4）设计计算。每个浇口宽 $W = 1.6 \sim 6.4$mm，小于分叉流道直径。

7. 护耳浇口

对难于成型的或有光学性能要求的制品，为从制品上除去聚集有残余应力的部分，可采用图 8-20 所示的护耳式浇口。它容许浇口附近产生缩孔；能有效地防止喷射流动，提高制品内在质量。护耳尺寸为：宽 $W=d$，深 $h=(0.8\sim0.9)s$，长 $L=1.5d$（浇口直径）。护耳一般选在注塑件的较厚部位，必要时可有多个护耳。

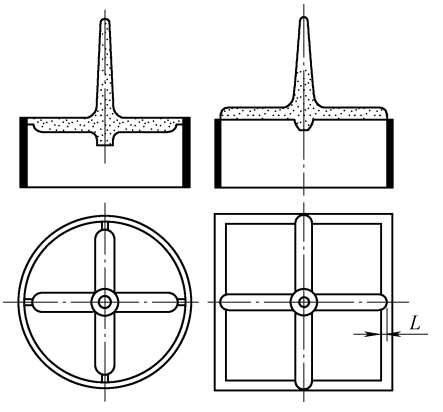


图 8-19　轮辐式浇口

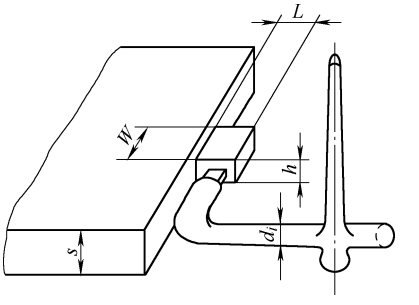


图 8-20　护耳浇口

8. 点浇口

点浇口全称针点式浇口，是典型的限制型浇口，具有许多优点：

1）可大大提高塑料熔体剪切速率，表观黏度降低明显，致使充模容易。这对 PE、PP、PS 和 ABS 等对剪切速率敏感，即非牛顿指数小的熔体更加有效。

2）熔体经过点浇口时因高速摩擦生热，熔体温度升高，黏度再次下降，致使流动性再次提高。

3）能正确控制补料时间，无倒流之虑；有利于降低注塑件特别是浇口附近的残余应力，提高了制品质量。

4）能缩短成型周期，提高生产效率。

5）有利于浇口与制品的自动分离，便于实现注塑件生产过程的自动化。

6）浇口痕迹小，容易修整。

7）在多型腔模中，容易实现各型腔均衡进料，改善了注塑件质量。

8）能较自由地选择浇口位置。

点浇口按使用位置关系可分成两种。一种是与主流道直接接通，整个点浇口如图 8-21a所示，就成了棱形浇口或橄榄形浇口。由于熔体由注射机喷嘴很快就进入型腔，只能用于对温度稳定的物料，如 PE 和 PS 等。使用较多的是经分流道的多点进料的点浇口，如图 8-21b 所示。

每个点浇口注射量小于 $500cm^3$，流量小于 $300cm^3/s$，都用于壁厚小于 3mm 的注塑件。点浇口的孔径 d 常见为 0.5～1.8mm。圆柱孔长 $L=0.5\sim0.75mm$。它可使熔体的流经剪切速率达到 $\dot{\gamma}>10^5s^{-1}$。由于塑料熔体剪切变稀的性能，大多数塑料流经点浇口时，

熔体黏度下降至10Pa·s左右。

点浇口的引导圆锥孔有两种形式。图8-21c是直锥孔，它的阻力小，适合于含玻璃纤维的塑料熔体。图8-21d是带球形底的锥孔。它可延长浇口冻结时间，有利补缩。点浇口引导部分长度一般为15～25mm，有锥角12°～30°，与分流道间用圆弧相连，在点浇口与注塑件表面连接处带有90°～120°锥度，高0.5mm的倒锥，使点浇口在拉断时不损伤注塑件。点浇口附近充模剪切速率高，固化残余应力大。为防止薄壁注塑件开裂，可将浇口对面的壁厚局部适当增加，见图8-21a。

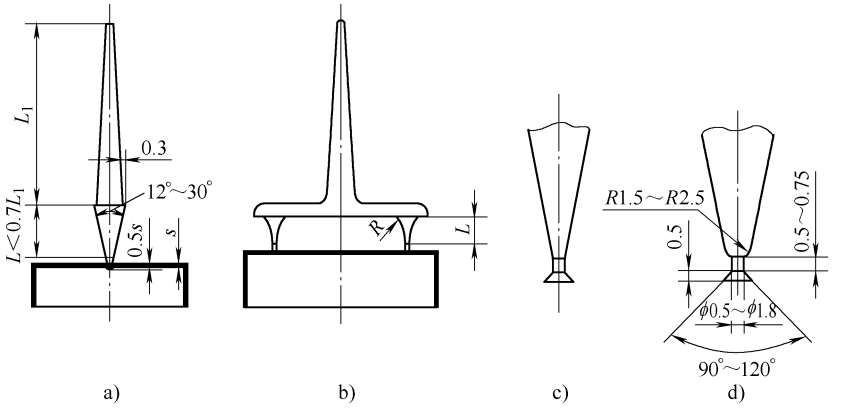


图8-21　点浇口

a）单型腔单个棱形点浇口　b）多点进料注射一个型腔

c）直锥孔引导，与注塑件表面连接处带有倒锥　d）带球形底的引导锥孔，有倒锥

对于单型腔单个点浇口，可用牛顿流体的圆管道的剪切速率计算式。以 $\dot{\gamma}=5\times10^5\,s^{-1}$ 代入后，估算点浇口直径。有

$$d=\sqrt[3]{\frac{32Q}{\pi\dot{\gamma}}}=0.0273\sqrt[3]{Q}=0.273\sqrt[3]{\frac{V}{t}} \tag{8-9}$$

式中　Q——流经点浇口的体积流量（cm^3/s）；

V——单点单型腔的注射量（cm^3）；

t——注射机对模具的注射时间（s），见式（8-1c）或表8-1。

对于一模多腔，或多个点浇口注射一个型腔，可用非牛顿流体的圆管道的剪切速率计算式（8-2）。以 $\dot{\gamma}=(1\sim5)\times10^5\,s^{-1}$ 代入后，估算点浇口直径 d_i。有

$$d_i=\frac{1.366}{\sqrt[3]{\dot{\gamma}}}\sqrt[3]{\frac{q_i(3n+1)}{n}}=(0.0137\sim0.0172)\sqrt[3]{\frac{q_i(3n+1)}{n}} \tag{8-10}$$

式中　q_i——每个点浇口的体积流量（cm^3/s），见式（8-1）；

n——塑料熔体在 $\dot{\gamma}\approx10^5\,s^{-1}$ 时的流动指数，从流变曲线上查找并计算，或近似参照表2-5和表2-6。

图8-22所示，是按照注塑件壁厚s改进设计的点浇口。考虑浇口倒锥，注塑件凹坑和局部加厚，以使点浇口在注塑件表面上痕迹最小，并保证浇口附近区域的成型质量。

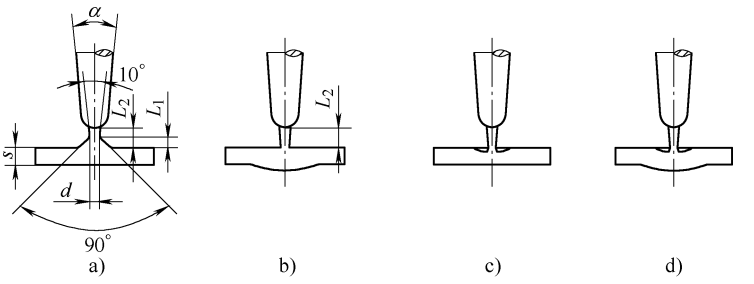


图 8-22　壁厚小于 3mm 时点浇口的改进设计

a）加设浇口倒锥　b）壁厚加厚 0.5s　c）壁厚 s = 2 ~ 3mm 时凹坑中设点浇口
d）壁厚 s < 2mm 时沉坑中设点浇口
浇口直径 d = (0.5 ~ 0.8)s，或 d = 0.8 ~ 2.0mm；倒锥长 L_1 = 0.2 ~ 0.5mm；
浇口长 L_2 = 0.5 ~ 1.0mm；α > 5°

点浇口的缺点有：

1）必须采用双分型面的模具结构；

2）不适合高黏度和对剪切速率不敏感的塑料熔体；

3）不适合厚壁注塑件成型；

4）要求采用较高的注射压力。

9. 潜伏式浇口

潜伏式浇口也称隧道浇口或剪切浇口。它是点浇口在特殊场合下的一种应用形式，具备点浇口的一切优点，因而已获广泛应用。

潜伏式浇口潜入分型面一侧，沿斜向进入型腔。这样在开模时，不仅能自动剪断浇口，而且其位置可设在制品侧面、端面和背面等各隐蔽处，使制品外表面无浇口痕迹。采用潜伏式浇口的模具结构，可将三板式简化成两板式模具。它的浇口尺寸可参照点浇口的计算方法确定。

图 8-23 所示为带引导锥和顶杆里侧的潜伏式浇口。以注塑件壁厚 s 决定浇道和浇

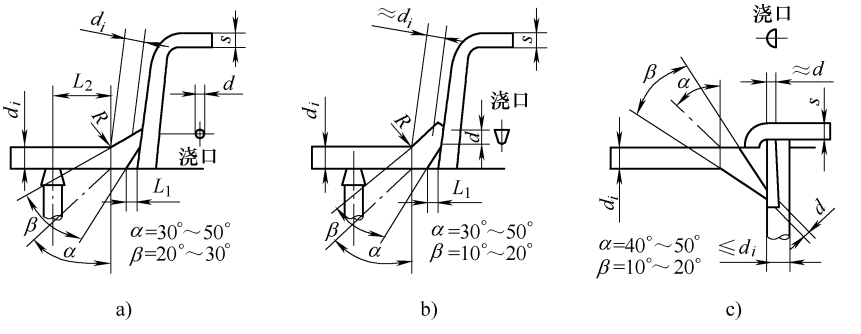


图 8-23　壁厚小于 4mm 时带引导锥和顶杆里侧的潜伏式浇口

a）椭圆浇口头　b）梯形浇口头　c）顶杆里侧
流道直径 d_i = 1.5s + 0 ~ 3mm；浇口直径 d = （0.5 ~ 0.8）s，或 d = 0.8 ~ 2.0mm；
$L_1 \geqslant$ 1.0mm；L_2 = 10 ~ 20mm；$R \geqslant$ 3mm

口位置及浇口尺寸，适宜注射壁厚在 4mm 以下的注塑件。图 8-23a 上浇口注入截面为椭圆形，容易与注塑件剪切分离，浇口痕迹小。图 8-23b 上浇口注入截面为梯形。浇口引导锥有较好强度，避免在锥孔中被拉断。但浇口痕迹大。图 8-23c 是利用顶杆通道的潜伏式浇口，从注塑件里侧的顶杆注入熔料。

引导锥角 β 和引导锥斜角 α，见图 8-23 所示。引导锥角 β 较大时，较粗大的引导锥体可使芯部保持高温，在开模时还具有较好弹性，并承受较大弯曲力。对硬质脆性塑料取较大 β 角。引导锥位置斜角 α 越大，越容易拔出浇口凝料。但是，在注塑件剪断浇口较难。因此，对硬质脆性材料 $\alpha=30°$。黏弹性好的塑料，取 $\alpha=45°$。

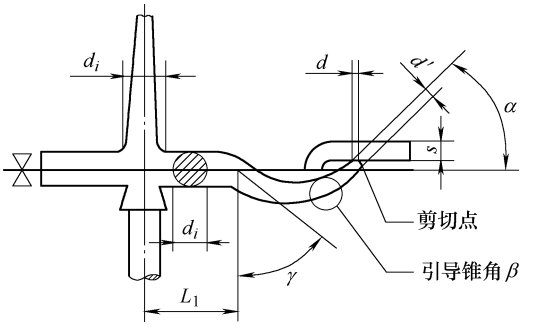


图 8-24　壁厚小于 4mm 时的圆弧形潜伏式浇口

注：流道直径 $d_i=1.5s+0\sim3$mm；浇口直径 $d=(0.5\sim0.8)s$，或 $d=0.8\sim2.0$mm；止端直径 $d'\geqslant d+0.5$mm；$L_1\geqslant30$mm；$\beta=5°\sim8°$；$\gamma=30°\sim50°$；$\alpha=30°\sim50°$

图 8-24 是弯曲圆弧引导的潜伏式浇口。对扁平注塑件，它从内侧进料，仅适用于黏弹性好的塑料。此种浇口的加工较困难。

10. 爪形浇口

爪形浇口是轮辐式浇口和点浇口的一种变异形式。如图 8-25 所示，其分流道和浇口不在一个平面内。它适用于内孔较小的管状制品，及同心度要求高的注塑件。由于型芯的顶端伸入定模，起到定位和支承作用，避免了型芯的偏移和弯曲。它既可设计成点浇口，也可设计成矩形浇口。

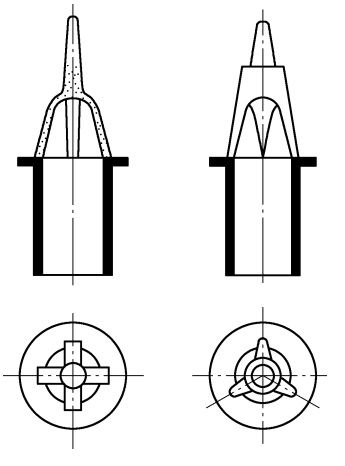


图 8-25　爪形浇口

11. 直浇口

直浇口又称为主流道型浇口或中心浇口。直浇口的优点甚多，注射时以等流程充模，浇注系统流程短，压力损失和热量散失小，且有利于补缩和排气，因此注塑件外表无可见熔合缝，注塑件质量好，而且浇注系统凝料少。所以它常被用来注射大型厚壁长流程制品，及一些高黏度的塑料。

如图 8-26 所示，直浇口的设计可参考前节有关主流道所述。直浇口与注塑件连接处的直径不够大，会使熔体流动摩擦剧增，产生暗斑和暗纹；如果直径太大，则冷却时间过长，流道凝料多，易产生缩孔。

直浇口的缺点是注塑件上残留痕迹较大，切除困难，可将直浇口设计在注塑件的里侧，如图 8-26b 所示。但会使注塑件留在定模边，需设置倒装脱模机构。

除了上述十一种浇口形式外，随着各种新塑料品种和新的模具结构的出现，还会有

更多新型浇口问世。众多形式的无流道凝料模具的热喷嘴浇口将在第 9 章中介绍。

8.2.2　浇口位置

确定了浇口类型后，需慎重决定浇口对模具型腔的位置、数目，有如下方面的要求：

1. 具有合理的充模流程

浇口位置不当或数目不足造成熔体流程过长，会使熔流前锋压力不足和温度过低，从而导致注塑件密度低，收缩率偏大，甚至型腔不能充满。为此，须对熔体流程比进行校核。最大流程比 FLR_{max} 是用挖有阿基米德螺旋槽的注射模实测的结果。螺槽深和宽为 2.5mm。对于有很大型腔宽度的注射成型，实验测到的最大流程比 FLR_{max} 应更小些。

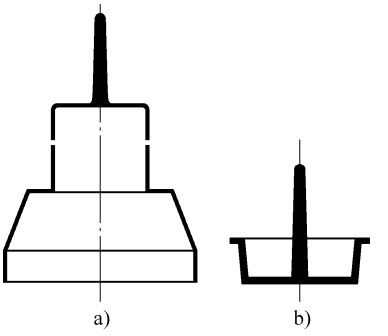


图 8-26　直浇口

a) 直浇口注射深腔壳体

b) 倒装壳体注射

当出现流程比过大难以充满型腔时，改善措施有：改变浇口的位置；增加浇口的数目；改善浇注系统甚至改进该塑件设计。

为了预测熔合缝在注塑件上的位置与走向，以及料流终止位置，可进行熔流前沿等时线校核。此种方法可理解为偶遇多次注不满的注塑制品。如图 8-27 和图 8-28 所示，为具有中心直浇口的矩形盒的注射过程，分别具有不同熔体流前沿线分布。图 8-28 中双点画线为所得熔合缝位置，表明中心直浇口使流程缩短，料流末端在分型面上，排气容易。

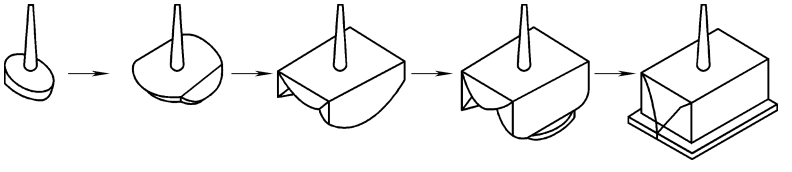


图 8-27　中心直浇口对矩形盒的充模过程

对于壁厚均等的注塑件，具体步骤如下：

1）将注塑件的几个面展开到一个平面上；

2）料流从浇口开始，以同心圆扩展；每段流程 L，压力降 P，对应时间间隔 Δt。

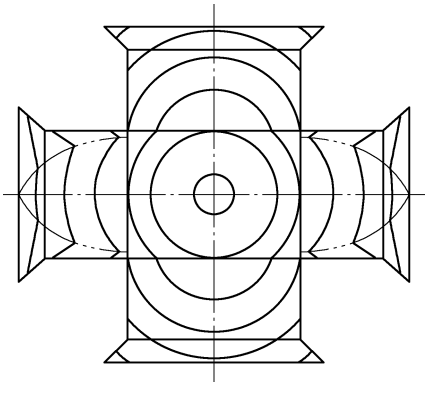


图 8-28　中心直浇口矩形盒的熔体流前沿等时线图

2. 具有良好的充模流动状态

在合理注射工艺条件下，保证塑料熔体具有良好的充模状态，浇口位置选择具有决定性影响。

1）避免喷射和蛇形流动，防止注塑件产生内部缺陷。如图 8-29a 所示，小浇口直射大型腔，熔体会产生喷射和蛇形蠕动，先喷射到型腔底部，折叠堆积后再填满型腔，致使制件

上留有蛇形或波纹状的流痕和接缝等缺陷。改善的方法，一是增大浇口截面，降低剪切速率；二是利用熔体与模腔壁面或型芯冲撞来消耗能量，以形成扩展推进，见图 8-29b。

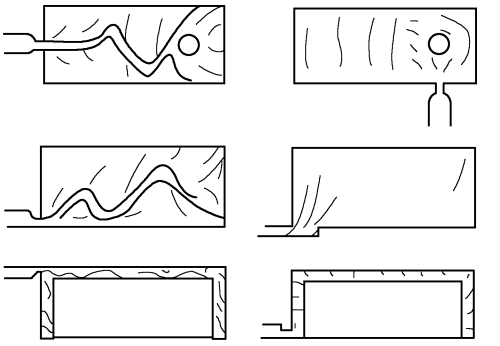


图 8-29　改变浇口位置避免喷射充模

a）熔体喷射和蠕动　b）改善后扩展流动

2）有利于流动、排气和补缩。对于结构不对称和壁厚不均匀注塑件，将浇口安排在壁厚较大部位，以有利于充模流动、排气和补缩。图 8-30a 所示注塑件周边厚度较大，侧浇口会使周壁迅速注满，而在顶部形成气囊，并留下明显的熔合缝或焦痕。图 8-30b 已将顶部改为厚壁，单侧浇口的料流将最后充填到对边的分型面处，但由于流程长，致使注塑件密度分布和收缩不均，补缩不良。图 8-30c 改由顶部中心进料，有利充模流动和补缩，且排气畅通。

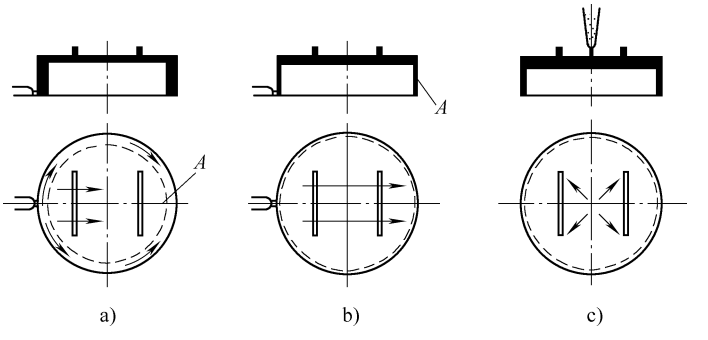


图 8-30　浇口位置对流动、 排气和补缩的影响

a）周边厚度大，顶部有气囊　b）流程长，收缩不均　c）顶部中心进料

A—熔合缝位置

3. 减小塑件翘曲变形

如图 8-31 所示，一个圆筒形注塑件，采用不同浇口时，其端面具有不同圆度特征。

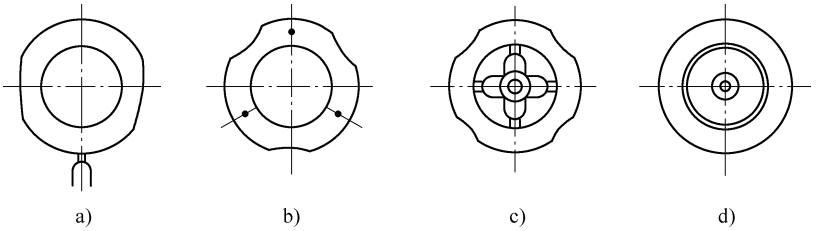


图 8-31　浇口与圆筒注塑件的变形

a）单侧浇口　b）三个点浇口　c）轮辐式浇口　d）盘形浇口

图 8-31a 为单侧浇口；图 8-31b 为端面上布置三个点浇口；图 8-31c 为内孔有四点的轮辐式浇口；图 8-31d 为盘形浇口。其中以采用盘形浇口制品的圆度误差最小。图 8-32 所示为常见的矩形板件的变形和尺寸误差。用平缝形浇口可减少翘曲变形。但注塑件上在浇口越近，密度和取向程度变大；随着流程增大，密度和取向随之减小。

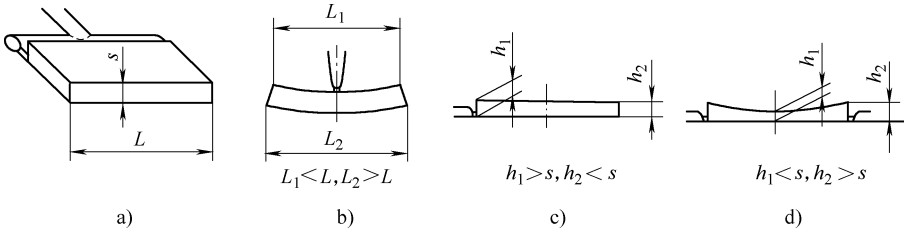


图 8-32　浇口与矩形塑料板的变形

a）平缝形浇口　b）中央点浇口　c）单侧浇口　d）双侧浇口

图 8-33 所示是采用中心浇口的 PP 圆薄片，厚度 1.5mm、直径 100mm，成型后产生翘曲变形的情况。变形后薄片在熔体流动方向，收缩至 49mm，收缩率为 2%。周向方向收缩后为 49.4mm，收缩率为 1.2%。致使圆心角从 60°增至 60°32′，整个薄片必然产生变形。改用扇形浇口或多点浇口，可大大减轻这种变形。

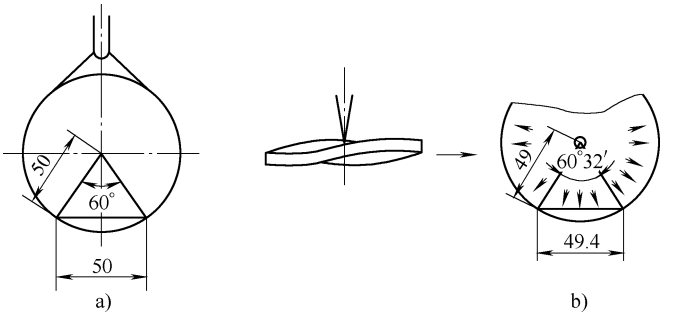


图 8-33　浇口与塑料圆薄片的变形和收缩

a）扇形浇口的圆片变形减轻　b）中心点浇口的圆片变形

通常，注塑件翘曲变形程度与浇口类型、位置和数量选择恰当与否密切相关。这需要综合考虑，具体建议如下：

1）对称盒盖类壳体、圆筒形注塑件，采用中心直浇口、圆环形浇口或轮辐式浇口或爪式浇口较为适宜。

2）对于较大圆盘形壳体若采用多点浇口，以注塑件重心为中心取等边三角形顶点，设置三个点浇口，如图 8-34a 所示。

3）对于较大矩形箱体注塑件，取对角线位置上的四个点浇口，翘曲变形最小，见图 8-34b。

4）对于矩形薄片注塑件，采用平缝形浇口为好；对于圆形薄片注塑件，采用

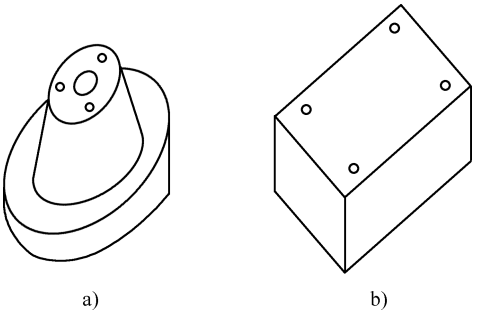


图 8-34　中型圆盘和盒体注塑件与点浇口的位置和数目关系

a）圆盘形壳体的三个点浇口

b）矩形盒体的四个点浇口

扇形浇口较有效。

5）如图 8-35 所示，一端带有内螺纹金属嵌件的罩类注塑件，倘若浇口开设在壳顶 A 处，由于注塑件内轴线方向取向，不能与嵌件有效包紧并粘合。浇口开设在 B 处，由于注塑件内周向取向，较大收缩应力使塑料与嵌件有较高的连接强度，也避免了注塑件的应力开裂。

4. 防止型芯变形

高压熔体会使细长型芯变形和偏移。这与浇口位置有关。如图 8-36a 所示，当浇口对准两个型芯间隔进料时，熔体会对两个型芯产生向外的侧推力。偏斜的型芯会使制品脱模困难，并使注塑件中间隔板厚、两侧壁薄。改成如图 8-36b 所示的冲击型浇口，使三路熔料均匀充模，防止了型芯变形。

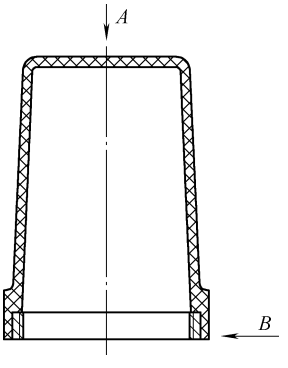


图 8-35　浇口位置提高嵌件连接强度

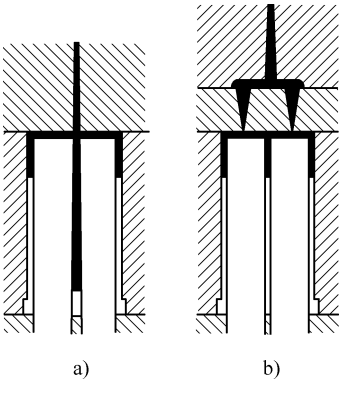


图 8-36　浇口位置对型芯变形的影响

a）不良位置，型芯变形　b）平衡进料的位置

8.3　平衡布置流道尺寸计算

注射模浇注系统的尺寸设计受到浇注系统压力损失和注射机的注射能力的制约。较小的流道截面积能减少浇注系统用料，但会增加流道中的压力损失。注射到型腔的熔料因压力过低而达不到所需的充模速率，将影响制品质量，甚至使型腔不能充满。流道尺寸的理论计算能得到流道的最小尺寸，又保证熔体有适当的剪切速率和恰当的压力损失。平衡布置与非平衡布置的浇注系统流道截面尺寸计算的基本原理相同。

1. 计算原理

整个计算是对初步设计的浇注系统进行反复校核的过程。在此过程中必须遵循以下原则和方法。

（1）适当的剪切速率　在此浇注系统场合，塑料熔体可视为等温流动。根据热塑性塑料熔体流变性质和大量的注射充模计算，适当的剪切速率应为

1）对于主流道，$\dot{\gamma}=(0.9\sim3.0)\times10^{3}s^{-1}$；

2）对于分流道，$\dot{\gamma}=(3\sim7)\times10^{2}s^{-1}$；

3）对于矩形类浇口，$\dot{\gamma}=(3\sim7)\times10^4\,s^{-1}$；

4）对于点浇口，$\dot{\gamma}\geqslant(1\sim5)\times10^5\,s^{-1}$。

对于各流道和浇口中的剪切速率，圆管道用 $\dot{\gamma}=\dfrac{4Q}{\pi R^3}$ 计算。对于非圆截面可用当量半径 R_n 代入。对于矩形浇口或流道用 $\dot{\gamma}=\dfrac{6Q}{Wh^2}$ 计算。其中体积流率 Q（cm^3/s），可用 $Q=\dfrac{V}{t}$ 计算。需注意 V 为该段流道流过起始截面的熔体体积。

注射充模时间 t，应以前述适当的剪切速率 $\dot{\gamma}$，用 Q 和 V 算出。对于一模多腔注射模，可用模具型腔体积 V_1 和注塑件的型腔体积 V_2，计算得到主流道的 t_1 和经浇口的 t_2，然后用 $t=\dfrac{1}{3}t_1+\dfrac{2}{3}t_2$ 得 t。最后用表 8-1，校核计算拟定 t 对于现行注射机是否可行。该表所列是对于注射机公称注射量的常规注射时间。此关系已用多项式（8-1c）拟合。

在浇注系统的圆管流道中，假定各截面的熔体充模时间 t 是相同的。因此，以流道或浇口截面输出塑料体积量，直接用表 8-1 或式（8-1c）决定充模时间 t。在浇注系统塑料用量与制品用量相比，比例较大时，需用适当的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 修正时间 t。

图 8-37 是常用的 $\dot{\gamma}$-Q-R_n 关系曲线图。曲线 Q 为塑料熔体流过各段流道或浇口的体积流率（cm^3/s）。可由适当的 $\dot{\gamma}$ 与 Q 求得当量半径 R_n，也可由 Q 和 R_n，查得实际 $\dot{\gamma}$。速查此图对流道尺寸初步计算很方便。

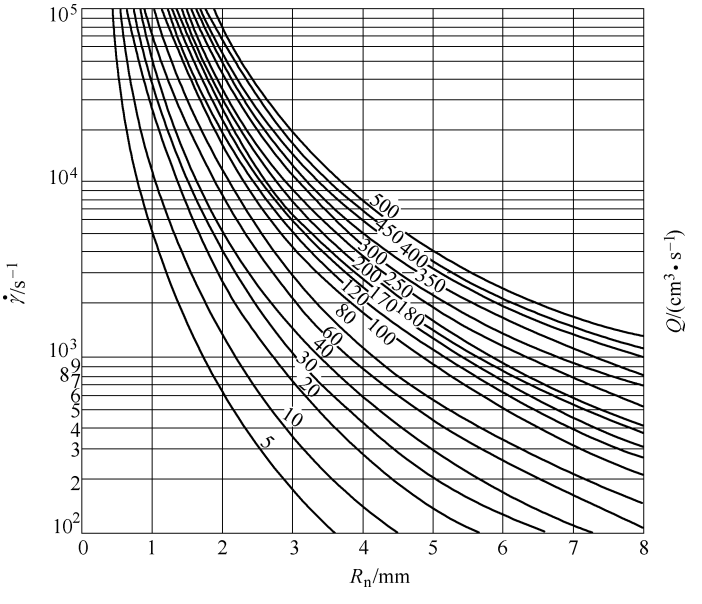


图 8-37　$\dot{\gamma}$-Q-R_n 关系曲线

（2）流道截面当量计算　浇注系统的流道截面形状是多种多样的，可近似地简化成圆截面。主流道是圆锥形浇道，可用长度中间的圆截面直径，作为当量圆管道近似计

算。梯形、半圆形和U形等分流道，所替代的圆形流道的当量半径为

$$R_n = \sqrt[3]{\frac{2F^2}{\pi C}} \tag{8-11}$$

式中 R_n——假想的圆形流道的当量半径（cm）；

F——实际流道的截面面积（cm^2）；

C——实际流道截面的周边长度（cm）。

（3）恰当的压力降 整个浇注系统恰当的压力降［Δp_r］应由下式核算：

$$[\Delta p_r] = p_o - \Delta p_e - \Delta p_c \tag{8-12}$$

式中 p_o——调用的注射压力；

Δp_e——注射压力在注射装置中的损耗压降，螺杆式注射机用式（8-20）计算，柱塞式注射机用式（8-23）计算；

Δp_c——型腔压力，参考表8-3确定。

表8-3 常选用的平均型腔压力 Δp_c（$1MPa = 10^2 N/cm^2$）

易于成型的PE、PP和PS等厚壁注塑件	25MPa
薄壁普通注塑件	30MPa
ABS、PMMA、POM等中等黏度，且制品有精度要求	35MPa
高黏度PC、PSU，或制品有高精度要求	40MPa
高黏度物料、流程比大、形状复杂，并有高精度要求	45MPa

（4）压降计算 浇注系统压降计算有两种方法：

1）工程计算法。若将流经的各种截面视为当量半径 R_n 的圆形通道，则用前述 $\Delta p = \frac{2L\tau}{R_n}$ 计算压降。式中剪切应力 τ，由该段流道或浇口的充模熔体的 $\dot{\gamma}$ 值，直接从该塑料的 $\dot{\gamma}$-τ 流变曲线上查得。也可从表2-5和表2-6，由 $\dot{\gamma}$ 查得熔体非牛顿指数 n 和剪切黏度系数 K'，再由 $\tau = K'\dot{\gamma}^n$ 计算。此方法对非圆流道的处理，及对流道改向和分支的忽略等，造成一定的误差。

2）幂律参数压力降计算法。熔体流经圆截面流道及其分支与转向所产生的压力降

$$\Delta p = \left(\frac{4Q}{\pi}\right)^n \frac{2K'(L + L_s)}{R^{3n+1}} \tag{8-13}$$

圆锥形主流道并考虑转向所产生的压力降

$$\Delta p = \left(\frac{4Q}{\pi}\right)^n \frac{2K'(L + L_s)}{3n(R_1 - R_2)}(R_2^{-3n} - R_1^{-3n}) \tag{8-14}$$

圆锥形主流道或直浇口的压力降

$$\Delta p = \left(\frac{4Q}{\pi}\right)^n \frac{2K'L(R_2^{-3n} - R_1^{-3n})}{3n(R_1 - R_2)} \tag{8-15}$$

圆截面流道或点浇口的压力降

$$\Delta p = \left(\frac{4Q}{\pi}\right)^n \frac{2K'L}{R^{3n+1}} \tag{8-16}$$

矩形截面流道或浇口的压力降

$$\Delta p = \frac{2(6Q)^n K''L}{W^n h^{2n+1}} \tag{8-17}$$

式（8-13）~式（8-17）中

Δp——各计算段的压力降（N/cm^2）；

$K'(K'')$——熔体剪切黏度系数，可查表 2-5 或表 2-6（$N \cdot s/cm^2$）；

n——塑料熔体非牛顿指数，可查表 2-5 或表 2-6；

Q——流经计算段的体积流量（cm^3/s）；

L——计算段的流道长度（cm）；

L_s——流道分支及改向的当量长度，见表 8-4（cm）；

R——流道半径（cm）；

R_1——流道大端半径（cm）；

R_2——流道小端半径（cm）；

W——矩形流道或浇口宽度（cm）；

h——矩形流道或浇口深度（cm）。

表 8-4　流道分支及改向的当量长度 L_s

当量长度	两分支 +90°改向	90°改向	双分支 <45°	四分支 +90°改向
L_s	$6R_n$	$4R_n$	$2R_n$	$10R_n$

注：R_n 为流道当量半径。

（5）型腔内压力分布　型腔压力是注射模设计时各项计算的依据。在浇注系统设计、模腔壁厚和垫板的强度与刚度计算、型芯的偏移和变形计算、所需锁模力校核等运算中，要将型腔压力作为已知条件。型腔压力大小会影响开模力和脱模力，是决定注塑件质量的重要因素。型腔压力的分布和变化与温度一起，将决定固化后注塑件密度和密度分布。借助注射模 CAE 的流动分析有限元分析软件进行型腔压力的计算机模拟；借助模具型腔压力的测定进行注射机参量的自动调节控制，能实现理想的注射成型工艺。但是由于昂贵的设备和技术难度，难以普遍实行。

型腔压力分布链如图 8-38 所示。主流道末端具有最大的分型面上的压力 p_A。浇口处具有注塑件型腔最大压力 p_B。这两处常是压力测定点。喷嘴出口的压力 p_Z，是模具浇注系统压力的源头。在双分型注射模的型腔板上，浇注系统较复杂，且流程长。从 p_Z 至 p_B 有较大浇注系统压力降 Δp_r。熔流末端的压力 p_C 倘若过低则会影响注塑件质量，甚至不能注满，故需熔体末端压力 $p_C \geqslant (10 \sim 25)$ MPa。注塑件型腔的压力从 p_Z 降至 p_C 为模腔压力降 Δp_C。若型腔流程的截面较简单，可用流变学压力降公

式估算。

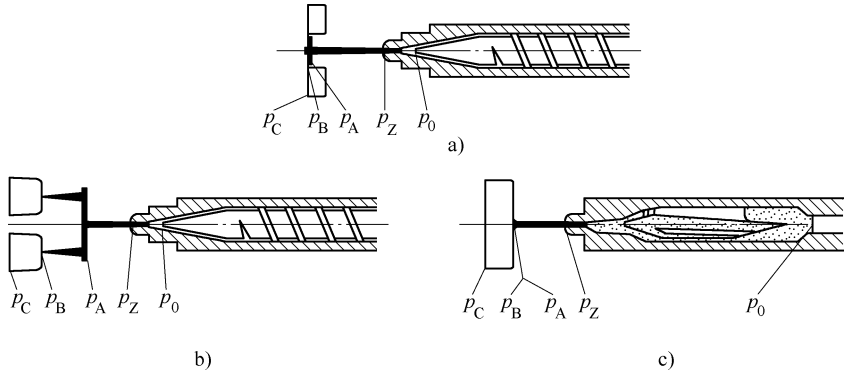


图 8-38　型腔压力分布链示意图

a）单分型面注射模　b）双分型面注射模　c）柱塞式料筒与单分型面注射模

广义的型腔压力是模内塑料熔体流经位置和时间的函数。型腔压力周期图 8-39，将型腔压力变化对注射成型时间进程作图，就得到型腔压力周期图。图 8-39 为对应图 8-38b 双分型面注射模，于浇道、浇口和型腔各位置的压力对时间作变化的一个例子。

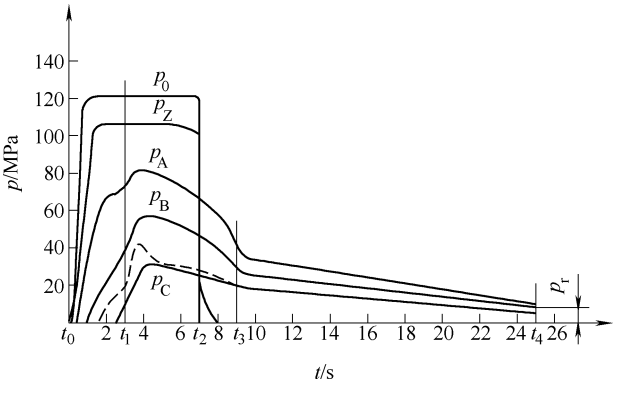


图 8-39　注射成型型腔压力周期

型腔压力的源头是注射压力 p_0，它可由每台注射机的油压表上读出的最大值 p_i 换算得到

$$p_0 = p_i\left(\frac{D}{d_S}\right)^2 = p_i\left(\frac{p_{max}}{p'}\right) \tag{8-18}$$

式中　p_0——调用的注射压力（MPa）；

D——注射液压缸活塞直径（mm）；

d_S——注射螺杆或柱塞直径（mm）；

p_{max}——注射机的最大注射压力（MPa）；

p'——注射机液压泵的额定压力（MPa）；

p_i——注射过程中液压表上的最大值，即表压（MPa）。

由图 8-38a 和 b 可知，螺杆头处 p_0 至喷嘴 p_Z 间存在压力降 Δp_1。喷嘴为圆柱孔道，其非牛顿流变学的压力降计算式为

$$\Delta p_Z = \left(\frac{4}{\pi}\right)^n \frac{2K'Q^nL_Z \times 10^4}{R_Z^{3n+1}} \tag{8-19}$$

式中　Δp_Z——塑料熔体流经注射机喷嘴的压力降（Pa）；

n——塑料熔体非牛顿指数，$n<1$；

K'——熔体剪切黏度系数（N·s/cm^2）；

Q——熔体流经喷嘴的体积流量（cm^3/s）；

L_Z——喷嘴长度（cm）；

R_Z——喷嘴半径（cm）。

［例］　PP 熔体的温度 $T_m=240℃$，注射时计量容积 $V=427\text{cm}^3$，注射时间 $t=2.4\text{s}$。经注射机喷嘴的剪切速率 $\dot{\gamma}=10^4\sim10^5\text{s}^{-1}$。喷嘴内半径 $R_Z=0.275\text{cm}$，长 $L_Z=2.0\text{cm}$。计算 PP 熔体流过喷嘴的压力降 ΔP_Z。

［解］　流经喷嘴的熔体体积流量

$$Q=\frac{V}{t}$$

代入已知条件计算得 $Q=178\text{cm}^3/\text{s}$。又由表 2-5 查得 J340　PP 的 $n=0.13$，$K'=6.04$ N·s/cm^2。代入式（8-19）得熔体流经喷嘴的压力降为

$$\Delta p_Z=\left(\frac{4}{\pi}\right)^{0.13}\frac{2\times6.04\times178^{0.13}\times2\times10^4}{0.275^{3\times0.13+1}}\text{MPa}=2.94\text{MPa}$$

由实验曲线可知，螺杆式注射装置中的压力降为

$$\Delta p_e=p_0-p_Z=(2.0\sim2.5)\Delta p_Z \tag{8-20}$$

此式中的放大系数，系指活塞和螺杆等运动件的摩擦阻抗，以及螺杆头前剩余熔体段的压力降。通常螺杆式注射装置中的压力降 $\Delta p_e=10\sim20\text{MPa}$，但在注射高黏度熔体，或是使用高阻抗喷嘴，例如阀式喷嘴，Δp_e 会更大，需作计算预测或专门的测量。此外，在型腔压力估算时，所使用的注射压力 p_0 必须小于注射机的最大注射压力 p_{max}，为注射车间现场留有充分调节注射压力的余地。

若将非牛顿塑料熔体，视为短时间恒温状态，且在各流程段中处于恒剪切速率，则可用牛顿流体计算式计算压力降。对于圆管道有

$$\tau=K'\dot{\gamma}^n=K'\dot{\gamma}^{n-1}\dot{\gamma}=\eta_a\dot{\gamma} \tag{8-21}$$

且按定义

$$\dot{\gamma}=\frac{4Q}{\pi R^3},\qquad \tau=\frac{R\Delta p}{2L},\quad \Delta p=\frac{2L\tau}{R} \tag{8-22}$$

以上各式中，L（cm）和 R（cm）为圆管长和半径；η_a 是塑料熔体表观黏度（N·s/cm^2）；τ（N/cm^2）为剪切应力；Δp（N/cm^2）是圆管道两端的压力降。注意 $1\text{N/cm}^2=10^4\text{Pa}$。

由式（8-22）计算该段流程中剪切速率 $\dot{\gamma}$。从上例中数据，可得

$$\dot{\gamma}=\frac{4Q}{\pi R^3}=\frac{4\times178}{\pi\times0.275^3}\text{s}^{-1}=10900\text{s}^{-1}$$

再用式（8-21）求得剪切应力 τ，经注射机喷嘴的剪切速率 $\dot{\gamma}=10^4\sim10^5\text{s}^{-1}$，同上例 PP 的 $n=0.13$，$K'=6.04\text{N}\cdot\text{s/cm}^2$。代入

$$\tau=K'\dot{\gamma}^n=6.04\times10900^{0.13}\text{N/cm}^2=20.2\text{Ns/cm}^2=2.02\text{Pa}$$

用式（8-22）得熔体流经喷嘴的压力降为

$$\Delta p_Z = \Delta p = \frac{2L\tau}{R} = \frac{2\times 2\times 2.02\times 10^5}{0.275}\text{MPa} = 2.94\text{MPa}$$

与前例的计算结果相同。也可从在 PP 塑料流动曲线的 $\tau - \dot{\gamma}$ 图上，直接查到对应剪切应力 τ，有相同计算结果。后一种计算方法称之为塑料熔体压力降的工程计算法。式（8-22）中流变参数，在一定剪切速率 $\dot{\gamma}$ 范围内的流动指数 n 和表观稠度 K' 的获取方法，在第 2 章有详细陈述。

柱塞式注射装置有与螺杆式注射装置不同的塑化原理和结构。由于粒料区作用，装置内压力阻抗较大。不过，柱塞式注射装置常见公称注射量均在 60cm^3 以下。经实验测得，柱塞式注射装置中的压力降为

$$\Delta p_e = p_0 - p_r = 30\text{MPa} + (0.1 \sim 0.2)p_0 \tag{8-23}$$

式中，第一项 30MPa 压降是加热室和喷嘴的黏流区的压力损失；第二项是被压缩的粒料区的压力损失，它与柱塞压力 p_0 成正比。其折算系数与注射加工时的注射量有关，当注射量较大时取大值。

（6）流道尺寸初步拟定　在模具结构初步设计后，流道布置及其各段长度也就大致确定，进一步拟定流道及浇口的截面尺寸，对于平衡布置浇注系统的推算方法有两个。

1）根据流经的充模熔体体积流率 q_i 和合适的剪切速率 $\dot{\gamma}$，由式（8-2）计算确定流道当量直径。通常由下游向上游逐段推算。

2）若 Q_u 为上游流道流量，Q_i 为下游 N 个支流流道流率，每分支流道具有相同的体积流率，即 $Q_u = NQ_i$，得截面尺寸关系式

$$R_u = \sqrt[3]{N}R_i \tag{8-24}$$

式中　R_u——上游流道当量半径（cm）；

R_i——下游流道当量半径（cm）；

N——下游流道分叉数。

如上游流道分成两个支道，则有 $R_u = \sqrt[3]{2}R_i = 1.26R_i$ 的关系。

2. 设计步骤及实例

注射模浇注系统的工程设计方法，关系到注塑件质量和经济效益，因而模具设计师和注射成型工艺师必须掌握。设计计算步骤如下：

1）首先确定型腔数目、浇口位置，再确定浇道截面形状及浇口形式。两个型腔间的距离尽可能近些，并尽可能设计成平衡布置的浇注系统；用 2^n 的型腔数，即 2、4、8、32……为佳；在初步拟定了流道的长度和截面尺寸之后，用如图 8-40 所示的树干、树枝和树杈式的线图表达，便于下一步计算。

2）求出各型腔和各段流道的体积。而后计算各段流道注射充模中流过的熔体体积；经计算确定注射充模时间后，即可求得各段流道充模时的熔体体积流率与剪切速率。

3）由各段流道和浇口的剪切速率，在流动曲线上或表上得 K' 和 n 后，获得剪切应

力。然后计算熔体充模时各段流道及浇口的压力降。

也可用 $\dot{\gamma}$-Q-R_n 线图，确定各段流道和浇口的剪切速率和截面尺寸，查表得 K' 和 n 后，用幂律指数求压力降。

4）经反复计算，修正流道尺寸，在充模时间和剪切速率合宜的条件下，使各型腔的压力达到预定要求。

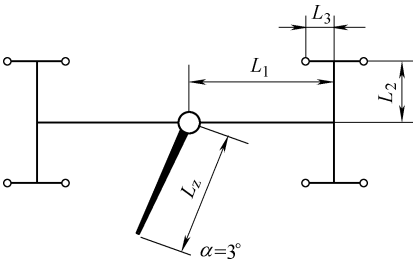


图 8-40　型腔体积 15cm³ 的 8 型腔平衡布置线图

［例］　如图 8-40 所示 8 型腔平衡布置的浇注系统。每个型腔体积 15cm³。注射 PA1010（石井沟联合化工厂），幂律指数见表 2-5。最终计算结果见表 8-5。

表 8-5　各段流道流过熔体的体积计算表

参数及计算式	流道长 L_i/cm	流道半径 R_i/cm	各段总长 nL_i/cm	各段体积 $\pi R_i^2(nL_i)$/cm³	各段流过体积 V/cm³
主流道	5	0.315(0.25～0.38)	5	1.56	147.04
第一流道	13	0.4	26	13.07	72.75
第二流道	7.5	0.3	30	8.48	33.10
第三流道	2.5	0.25	20	3.93	15.49
浇口	0.12	0.04	不计	不计	15

流经主流道的熔体体积　$V_0=[1.56+13.07+8.48+3.93+8\times15]\text{cm}^3=147.04\text{cm}^3$

流过第一流道　$V_1=(147.04-1.56)\times0.5\text{cm}^3=72.75\text{cm}^3$

流过第二流道　$V_2=[(8.48+3.93)\times0.25+2\times15]\text{cm}^3=33.10\text{cm}^3$

流过第三流道　$V_3=[(3.93\times0.125)+15]\text{cm}^3=15.49\text{cm}^3$

经主流道熔体的适当剪切速率 $\dot{\gamma}=5.0\times10^3\text{s}^{-1}$，代入

$$Q_0=\frac{\pi}{4}R_o^3\dot{\gamma}=\frac{\pi}{4}\times0.135^3\times5\times10^3\text{cm}^3/\text{s}=123\text{cm}^3/\text{s}$$

$$t_o=\frac{V_0}{Q_0}=\frac{147.04}{123}\text{s}=1.195\text{s}$$

将点浇口的适当 $\dot{\gamma}=10^5\text{s}^{-1}$ 代入

$$Q_g=\frac{\pi}{4}R_g^3\dot{\gamma}=\frac{\pi}{4}\times0.04^3\times10^5\text{cm}^3/\text{s}=5.03\text{cm}^3/\text{s}$$

$$t_g=\frac{V_g}{Q_g}=\frac{15}{5.03}=3.0\text{s}$$

故初定充模时间　$t=\frac{1}{3}t_o+\frac{2}{3}t_g=\left[\frac{1}{3}\times1.195+\frac{2}{3}\times3.0\right]\text{s}=2.4\text{s}$

查表 8-1，总注射量 147cm³ 时，以注射机螺杆的常规推进速度是 1.8s，确定充模时间 2.2s。

取 PA1010 熔体温度 260℃。

现选用 250cm³ 注射机，其小孔喷嘴 $R_Z = 0.2\text{cm}$，$L_Z = 2\text{cm}$，经喷嘴的体积流率

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{147.04}{2.2}\text{cm}^3/\text{s} = 66.84\text{cm}^3/\text{s}$$

熔体剪切速率

$$\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R_Z^3} = \frac{4 \times 66.84}{\pi 0.2^3}\text{s}^{-1} = 1.06 \times 10^4\text{s}^{-1}$$

由表 2-5 查得 $n = 0.28$，$K' = 2.43\text{N} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 得

$$\tau = K'\dot{\gamma}^n = 2.43 \times (1.06 \times 10^4)^{0.28}\text{N}/\text{cm}^2 = 32.6\text{N}/\text{cm}^2$$

得经喷嘴得熔体压降

$$\Delta p_Z = \frac{2L\tau}{R_Z} = \frac{2 \times 2 \times 32.6}{0.2}\text{N}/\text{cm}^2 = 652\text{N}/\text{cm}^2 = 6.52\text{MPa}$$

由式（8-20），注射装置中的压力损失

$$\Delta p_e = 2.25\Delta p_Z = 2.25 \times 6.52\text{MPa} = 14.7\text{MPa}$$

该注射机最大注射压力 $p_{max} = 120\text{MPa}$，可调用最大注射压力

$$p_0 = 0.7p_{max} = 0.7 \times 120 = 84\text{MPa}$$

由表 8-3 可知型腔所需压力 $\Delta p_c = 30\text{MPa}$，用式（8-12）计算浇注系统恰当的压力降。

$$[\Delta p_r] = p_0 - \Delta p_e - \Delta p_c = (84 - 14.7 - 30)\text{MPa} = 39.3\text{MPa}$$

表 8-6 所列浇注系统总压力损失为 19.4MPa < $[\Delta P_r]$，以上各项数据符合设计要求。

表 8-6　各段流道的压力损失计算表

参数及计算式	各段流率 $Q = \frac{V}{t}$ /(cm³/s)	各段速率 $\dot{\gamma} = \frac{4Q}{\pi R^3}$ /s⁻¹	幂参数		剪切应力 $\tau = K' \cdot \dot{\gamma}^n$ /(N/cm²)	各段压力降 $\Delta P = \frac{2L\tau}{R}$ /(N/cm²)
			n	K' /(N·s/cm²)		
主流道	66.8	2721	0.51	0.29	16.4	520
第一流道	33.1	659	0.72	0.07	7.5	488
第二流道	15.1	712	0.72	0.07	7.9	395
第三流道	7.04	574	0.72	0.07	6.8	136
浇口	6.82	1.36×10^5	0.28	2.43	66.5	399

8.4　非平衡布置流道尺寸计算

非平衡布置时，流道的总长度较短，但是浇口射出的熔料压力不同，影响成型制品的质量。可以通过各流道甚至浇口尺寸的调节，实现浇注系统各输出点的压力相等。浇注系统的平衡处理，在注射模的设计和注射生产中，具有实用意义。非平衡布置的流道尺寸计算原理和步骤与平衡布置相同。其区别和难度在于流道尺寸的初步拟定。

1. 流道平衡计算

如图 8-41 所示的非平衡布置流道系统，为使熔体在分流道输送中就达到平衡流动，

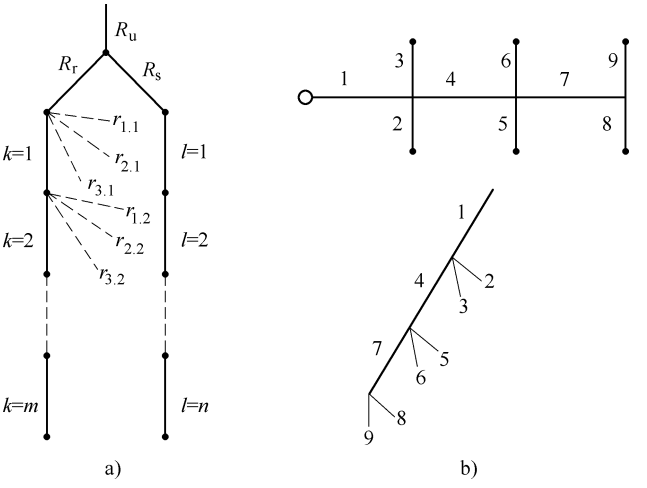


图 8-41　分流道非平衡布置线图

a）流道系统非平衡布置线图　b）一模六腔非平衡布置流道

熔体必须以相同压力降，同时到达各分流道末端。

如图 8-41a 所示，具有公共上游半径 R_u 的两个任意分支分流道半径 R_r 和 R_s，R_r 和 R_s 又分别为下游各分支的半径。其中 R_r 流道以下有 m 级支流道；R_s 流道以下又有 n 级支流道。熔体能同时到达这两条路径末端，两支叉的熔体流动的压力降应相等

$$\frac{\pi R_r^2 L_r}{Q_r}+\sum_{k=1}^{m}\frac{\pi R_k^2 L_k}{Q_k}=\frac{\pi R_s^2 L_s}{Q_s}+\sum_{l=1}^{n}\frac{\pi R_l^2 L_l}{Q_l} \tag{8-25}$$

式中　m、n——分别为 R_r 和 R_s 再分支的流道数；

R_r、Q_r、L_r 和 R_s、Q_s、L_s——分别为两分支流道的半径、流量和长度；

R_k、Q_k、L_k 和 R_l、Q_l、L_l——分别为两分支的再分支流道的半径、流量和长度 $k=1,2\cdots m$；$l=1,2\cdots,n$。

根据熔体在分流道中剪切速率相同原则，有

$$\frac{Q_r}{Q_s}=\frac{R_r^3}{R_s^3}$$

代入上式，化简后得两流道间的半径比

$$\frac{R_r}{R_s}=\frac{L_r+\sum_{k=1}^{m}\frac{Q_r}{Q_k}\left(\frac{R_k}{R_r}\right)^2 L_k}{L_s+\sum_{l=1}^{n}\frac{Q_s}{Q_l}\left(\frac{R_l}{R_s}\right)^2 L_l} \tag{8-26}$$

同理，在熔体流动前沿更新时，各分支流通道内的剪切速率仍应相等。若令 u、d 分别表示上游和下游分流道数，则有下面的关系式

$$\frac{Q_u}{Q_d}=\frac{R_u^3}{R_d^3}=\frac{\sum_{i=1}^{d}R_i^3}{R_d^3}=1+\sum_{i=1}^{d-1}\gamma_i \tag{8-27a}$$

式中　$\gamma_i=\dfrac{R_i^3}{R_d^3}$，$i=1$，2，$\cdots d-1$。

若将$\dfrac{R_d^2}{R_u^2}$用下游分支流道半径比表示，有

$$\frac{R_d^2}{R_u^2}=\left(\frac{R_d^3}{\sum_{i=1}^{d}R_i^3}\right)^{\frac{2}{3}}=\left(1+\sum_{i=1}^{d-1}\gamma_i\right)^{-\frac{2}{3}} \tag{8-27b}$$

将此式与式（8-27a）相乘有

$$\frac{Q_uR_d^2}{Q_dR_u^2}=\left(1+\sum_{i=1}^{d-1}\gamma_i\right)^{\frac{1}{3}} \tag{8-27c}$$

将（8-27c）代入（8-26）式，可得到非平衡布置流道几何关系的比例式

$$\frac{R_{\mathrm{r}}}{R_{\mathrm{s}}}=\frac{L_{\mathrm{r}}+\sum_{k=1}^{m}\left(\prod_{j=1}^{k}\left(1+\sum_{i=1}^{d_j-1}\gamma_{i,j}\right)^{\frac{1}{3}}\right)L_k}{L_{\mathrm{s}}+\sum_{l=1}^{n}\left(\prod_{j=1}^{k}\left(1+\sum_{i=1}^{d_j-1}\gamma_{i,j}\right)^{\frac{1}{3}}\right)L_l} \tag{8-28}$$

此式中j是对于r和s，两支路上的节点编号，含义同k或l。因此d_j是对于第“j”节点下游的分流道数目。即

$$\gamma_{i,j}=\frac{R_i^3}{R_{d_j}^3},(i=1,2,\cdots,d_j-1)$$

显然，L_k与L_l应为与R_{d_j}对应的长度。

式（8-26）和式（8-27）在分流道各段长度已知时，可限定分流道的总体积，来计算各分流道半径。也可根据型腔充模需要，先确定某分流道的半径，再计算其他分流道半径和流道体积。但是，此两式与塑料的流变性质无关。计算结果是否可行，还需与注射工艺和注射机技术参数结合，进行充模速率和压降的多次校核修改。

［例］　一模六腔的流道布置．如图8-41b所示。主分流道长度$L_1=L_4=L_7=2\mathrm{cm}$。支分流道长$L_2=L_3=L_5=L_6=L_8=L_9=1\mathrm{cm}$。根据型腔充模需要，$R_5=R_6=0.25\mathrm{cm}$。求分流道半径及流道系统总体积。

［解］　根据已知条件，在下游无支流时可由式（8-28）得

$$\frac{R_{\mathrm{r}}}{R_{\mathrm{s}}}=\frac{L_{\mathrm{r}}}{L_{\mathrm{s}}}=\frac{R_2}{R_3}=\frac{R_5}{R_6}=\frac{R_8}{R_9}=1$$

而

$$\frac{R_7}{R_5}=\frac{L_7+\left(1+\dfrac{R_8^3}{R_9^3}\right)^{\frac{1}{3}}L_9}{L_5}=\frac{2+(1+1)^{\frac{1}{3}}\times1}{1}=3.26$$

$$\frac{R_4}{R_2}=\frac{L_4+\left(1+\dfrac{R_6^3}{R_5^3}+\dfrac{R_7^3}{R_5^3}\right)^{\frac{1}{3}}L_5}{L_2}=\frac{2+(1+1+3.26^3)^{\frac{1}{3}}\times1}{1}=5.32$$

由上下游流道半径关系式$R_{\mathrm{u}}^3=\sum_{i=1}^{n}R_i^3$，有

$$R_7^3 = R_8^3 + R_9^3 = 2R_8^3,\ 得\ R_7 = 1.26R_8$$

$$R_4^3 = R_5^3 + R_6^3 + R_7^3 = (1 + 1 + 3.26^3)R_5^3 = 36.65R_5^3,\ 得\ R_4 = 3.32R_5$$

$$R_1^3 = R_2^3 + R_3^3 + R_4^3 = (1 + 1 + 5.32^3)R_2^3 = 152.57R_2^3,\ 得\ R_1 = 5.34R_2$$

又由 $R_5 = R_6 = 0.25\text{cm}$ 代入上述半径比，可得

流道号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
长度/cm	2	1	1	2	1	1	2	1	1
半径/cm	0.833	0.156	0.156	0.830	0.250	0.250	0.815	0.647	0.647

流道总体积 $V = \pi \sum_{i=1}^{9} R_i^2 L_i = 16.04\text{cm}^3$

2. 计算示例

现有非平衡布置一模六腔如图 8-42 所示，图中浇口间距离 $L_1 = 6\text{cm}$，$L_2 = L_3 = L_5 = L_6 = L_8 = L_9 = 3\text{cm}$，$L_4 = 2\text{cm}$，$L_2 = 7\text{cm}$。六型腔容积均为 10cm^3。采用圆形流道，矩形侧浇口长 $L = 0.1\text{cm}$，截面边长 $W \cdot h = 0.15 \times 0.07\text{cm}$。用 PC 物料注射，在流道中熔体温度为 300℃。

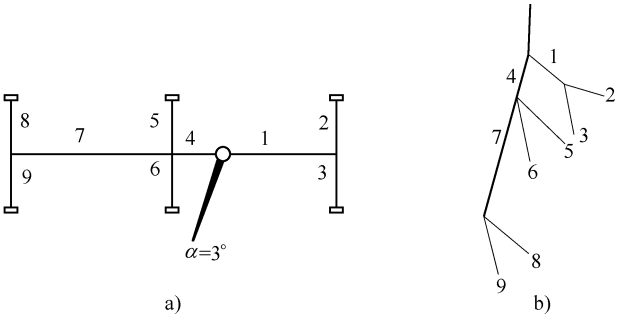


图 8-42　型腔体积 10cm^3 的六腔非平衡布置线图

a）流道布置　b）布置线图

（1）以熔体同时到达各分流道末端，作流道尺寸的初步拟定　由式（8-28），作图 8-42b 的布置线图，列出如下方程

$$\frac{R_2}{R_3} = \frac{R_5}{R_6} = \frac{R_8}{R_9} = 1$$

$$\frac{R_7}{R_5} = \frac{L_7 + \left[1 + \left(\frac{R_8}{R_9}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}} L_9}{L_5} = \frac{8 + (1 + 1^3)^{\frac{1}{3}} \times 3}{3} = 3.927$$

$$\frac{R_4}{R_1} = \frac{L_4 + \left[1 + \left(\frac{R_7}{R_5}\right)^3 + \left(\frac{R_6}{R_5}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}} L_5}{L_1 + \left[1 + + \left(\frac{R_2}{R_3}\right)^3\right]^{\frac{1}{3}} L_3} = \frac{2 + (1 + 3.927^3 + 1)^{\frac{1}{3}} \times 3}{6 + (1 + 1)^{\frac{1}{3}} \times 3} = 1.422$$

$$R_1^3 = R_2^3 + R_3^3 = 2R_2^3,\ 得\ R_1 = 1.260R_2$$

$$R_4^3 = R_5^3 + R_6^3 + R_7^3 = (1 + 1 + 3.927^3)R_5^3,\ 得\ R_4 = 3.970R_5$$

$$R_7^3 = R_8^3 + R_9^3 = 2R_8^3,\ 得\ R_7 = 1.260R_8$$

可确定 $R_2 = 0.3\text{cm}$，由此解出所有流道半径，并将直径圆整到 1mm。

流道号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
长度/cm	6	3	3	2	3	3	8	3	3
计算半径/cm	0.378	0.30	0.30	0.538	0.136	0.136	0.532	0.422	0.422
圆整半径/cm	0.4	0.3	0.3	0.55	0.15	0.15	0.55	0.4	0.4

（2）以熔体的充模速率和压力损失校核流道尺寸　由于塑料熔体的非牛顿性，对上述结果进行修正校核的最终结果见表 8-7。

表 8-7　各段流道流过熔体的体积计算

参数及计算式	流道长 L_i/cm	流道半径 R_i/cm	各段体积 $\pi R_i^2 L_i$/cm³	流过体积 V/cm³
主流道	5	0.43(0.30～0.56)	2.904	81.39
2 或 3 流道	3	0.3	0.848	10.85
1 流道	6	0.45(经修正)	3.817	25.51
5 或 6 流道	3	0.25(经修正)	0.589	10.59
4 流道	2	0.55	1.901	52.98
8 或 9 流道	3	0.35(经修正)	1.155	11.16
7 流道	8	0.55	7.603	29.90
浇口	0.1	0.15×0.07	1.05×10^{-2}(不计)	10.00

由主流道熔流求充模时间

$$Q_o=\frac{\pi}{4}R^3\dot{\gamma}=\frac{\pi}{4}\times0.43^3\times2.5\times10^3=156.11\text{cm}^3/\text{s}$$

$$t_o=\frac{V_o}{Q_o}=\frac{81.39}{156.11}=0.52\text{s}$$

由浇口熔流求充模时间

$$\dot{\gamma}=\frac{6Q_g}{Wh^2}=5\times10^4\text{s}^{-1}$$

$$Q_g=\frac{1}{6}Wh^2\dot{\gamma}=\frac{1}{6}\times0.15\times0.07^2\times5\times10^4=6.13\text{cm}^3/\text{s}$$

$$t_g=\frac{V_g}{Q_g}=\frac{10}{6.13}=1.63\text{s}$$

充模时间

$$t=\frac{1}{3}t_o+\frac{2}{3}t_g=\frac{1}{3}\times0.52+\frac{2}{3}\times1.63=1.3\text{s}$$

查表 2-5 得重庆长风 GF20 的聚碳酸酯在 300℃下的 n 和 K'，计算过程见表 8-8。

表 8-8　各段流道的压力损失计算

参数及计算式	体积流率 $Q=\frac{V}{t}$ /(cm³·s⁻¹)	剪切速率 $\dot{\gamma}=\frac{4Q}{\pi R^3}$/s⁻¹	幂参数		剪切应力 $\tau=K'\dot{\gamma}^n$ /(N·cm⁻²)	各段压力降 $\Delta P=\frac{2L\tau}{R_n}$ /(N·cm⁻²)
			n	K' /(N·s·cm⁻²)		
主流道	62.6	1002	0.49	1.25	36.93	859
2 或 3 流道	8.4	396	0.59	0.63	21.48	430

（续）

参数及计算式	体积流率 $Q=\frac{V}{t}$ /（$cm^3 \cdot s^{-1}$）	剪切速率 $\dot{\gamma}=\frac{4Q}{\pi R^3}/s^{-1}$	幂参数		剪切应力 $\tau=K\dot{\gamma}$ /（$N \cdot cm^{-2}$）	各段压力降 $\Delta P=\frac{2L\tau}{R_n}$ /（$N \cdot cm^{-2}$）
			n	K' /（$N \cdot s \cdot cm^{-2}$）		
1 流道	19.6	274	0.59	0.63	17.28	461
5 或 6 流道	8.2	668	0.59	0.63	29.26	702
4 流道	40.8	312	0.59	0.63	18.66	136
8 或 9 流道	8.6	255	0.59	0.63	16.57	284
7 流道	23.0	176	0.59	0.63	13.31	387
浇口	7.7	6.29×10^4	0.40	3.07	255.03	729

矩形侧浇口的剪切速率

$$\dot{\gamma}=\frac{6Q}{Wh^2}=\frac{6\times7.7}{0.15\times0.07^2}s^{-1}=6.29\times10^4 s^{-1}$$

查得 $n=0.40$，$K'=3.07N \cdot s/cm^2$，得

$$\tau=K'\dot{\gamma}^n=3.07\times(6.29\times10^4)^{0.4}N/cm^3=255.03N/cm^2=2.55MPa$$

熔体流过侧浇口的压力降用式（8-17）求得

$$\Delta P=\frac{2(6Q)^nK''L}{W^nh^{2n+1}}=\frac{2\times(6\times7.7)^{0.4}\times3.07\times0.1}{0.15^{0.4}\times0.07^{2\times0.4+1}}N/cm^2=729N/cm^2=7.29MPa$$

充模熔体于流道和浇口的压降：

经流道 2 或 3 流程：$(8.6+4.6+4.3+7.3)MPa=24.8MPa$；

经流道 5 或 6 流程：$(8.6+1.4+7.0+7.3)MPa=24.3MPa$；

经流道 8 或 9 流程：$(8.6+1.4+3.9+2.8+7.3)MPa=24.0MPa$。

各注射点的输出压力基本相等。

参 考 文 献

[1] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用［M］. 北京：化学工业出版社，2003.

[2] E. 林纳 P. 恩格. 注射模具 130 例［M］. 吴崇峰译. 北京：化学工业出版社，2005.

[3] 徐佩弦. 塑料制品与模具设计［M］. 上海：华东理工大学出版社，2012.

第 9 章　成型零件设计

注射模具闭合时，成型零件构成了成型塑料制品的型腔。成型零件主要包括凹模、凸模、型芯、镶拼件，各种成型杆与成型环。成型零件承受高温、高压塑料熔体的冲击和摩擦，在冷却固化中形成了注塑件的形体、尺寸和表面。在开模和脱模时需克服与注塑件的粘着力。在上万次、甚至几十万次的注射周期，成型零件的形状和尺寸精度、表面质量及其稳定性，决定了塑料制品的相对质量。成型零件在充模保压阶段，承受很高的型腔压力，作为高压容器，它的强度和刚度必须在允许值之内。成型零件的结构、材料和热处理的选择及加工工艺性，是影响模具工作寿命的主要因素。

9.1　成型零件结构设计

成型零件的结构设计，当然是以成型符合质量要求的塑料制品为前提，但必须考虑金属零件的加工性及模具制造成本。成型零件成本高于模架的价格，随着型腔的复杂程度、精度等级和寿命要求的提高而增加。

1. 凹模结构设计

凹模是成型注塑件外表面的成型零件。凹模的基本结构可分为整体式、整体嵌入式和组合式。采用镶拼结构的凹模，对于改善模具加工工艺性有明显好处。

（1）整体式凹模　它在成型模具的凹模板上加工型腔，如图 9-1 所示。很显然，它有较高的强度和刚度，但加工较困难，需用电火花、立式铣床加工，仅适合于形状简单的中小型注塑件。

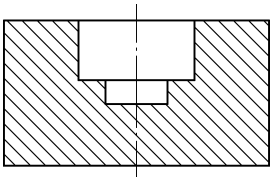


图 9-1　整体式凹模

（2）整体嵌入式凹模　它适用于小型、塑件的多型腔模。将多个一致性好的整体凹模，嵌入到凹模固定板中。嵌入的凹模，可用低碳钢或低碳合金钢，用一个冲模冷挤成多个，再渗碳淬火后抛光。也可用电铸法成型凹模型腔。即使以一般机加工方法加工各凹模，由于容易测量，也能保证一致性。整体嵌入式凹模结构能节约优质模具钢，嵌入模板后有足够强度与刚度，使用可靠且置换方便。

整体嵌入式凹模装在固定模板中，要防止嵌入件松动和旋转，要有防松吊紧螺钉和防转销钉，如图 9-2a 和图 9-2b 所示。带肩的嵌入凹模能有效防止脱出固定板，但需底板压固，如图 9-2b 和图 9-2c 所示。采用过渡紧配合甚至过盈配合，可使嵌入件固定牢靠。

（3）组合式凹模　通孔凹模在加工切削、线切割、磨削、抛光及热处理加工时较为方便。无底型腔加工后装上底板，构成凹模整体型腔，称之为组合式凹模。它是一种

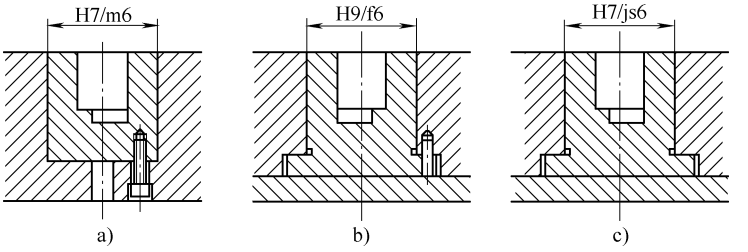


图9-2　整体嵌入式凹模

a）整体嵌入，吊紧螺钉防转　b）带肩嵌入，销钉防转　c）带肩嵌入，底板压固

大面积的镶嵌。其底板面积或大于凹模型腔底面，或者就是凹模板，如图9-3所示。

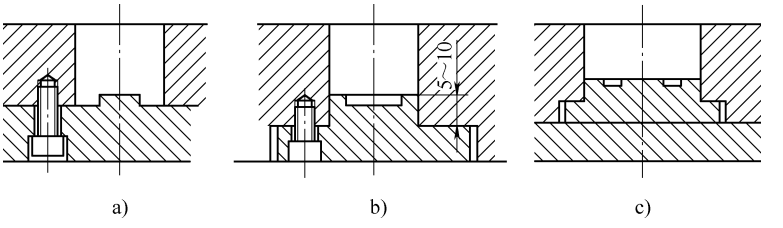


图9-3　组合式凹模

a）大面积凹模板联接　b）凹模板联接　c）底板肩压凹模

组合式凹模的强度和刚度较差。在高压熔体作用下组合底板变形时，熔体趁机侵入连接面，在注塑件上生成飞边，造成脱模困难并损伤棱边。图9-3b和图9-3c，这两种组合结构，制造成本虽高些，但配合面密闭可靠，能防止熔体侵入。

（4）镶拼式凹模　各种结构的凹模，都可用镶件或拼块组成凹模的局部型腔。图9-4为局部镶拼的凹模。镶件可嵌拼在四壁，也可镶嵌在底部。也有凹模型腔全部。由许多镶件拼合的全拼块式的结构，仅用于中小型精密的注射模。也有型腔四壁用拼块套箍在模板中的结构，如图9-5b所示，尤适用于大型模具，但要注意拼缝位置的选择。

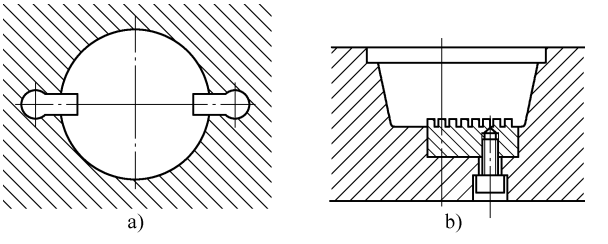


图9-4　局部镶拼的凹模

a）镶拼条成型侧槽　b）底面局部镶拼

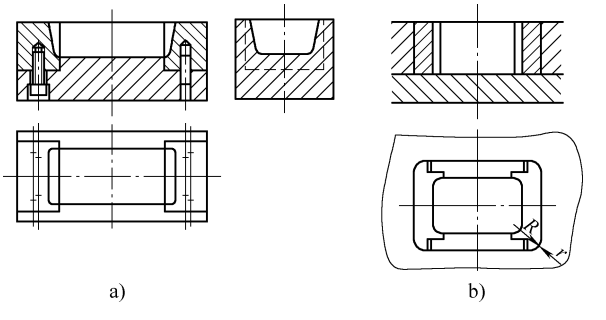


图9-5　侧壁镶拼的凹模

a）中小型模具侧壁镶拼　b）大型模具四壁用拼块套箍

1）在凹模的结构设计中，采用镶拼结构有如下好处：

① 简化凹模型腔加工，将复杂的凹模内形体的加工变成镶件的外形加工，降低了凹模整体的加工难度。

② 镶件用高碳钢或高碳合金钢淬火，淬火后变形较小，可用专用磨床研磨复杂形状和曲面。凹模中使用镶件的局部型腔有较高精度，经久的耐磨性并可置换。

③ 可节约优质模具钢，尤其对于大型模具更是如此。

④ 有利于排气系统和冷却系统通道的设计和加工。

2）尽管如此，在结构设计中应注意以下几点：

① 凹模的强度和刚度因此有所削弱，故模框板应有足够的强度和刚度。

② 镶件之间及其与模框之间尽量采用凹凸槽相互扣锁，以减小整体凹模在高压下的变形和镶件的位移。镶件必须准确定位，并有可靠紧固。

③ 镶拼接缝必须配合紧密。转角和曲面处不能设置拼缝。拼缝线方向应与脱模方向一致。

④ 镶拼件的结构应有利于加工、装配和调换。镶拼件的形状和尺寸精度应有利于凹模总体精度，并确保动模和定模的对中性，还应有避免误差累积的措施。

2. 凸模和型芯结构设计

凸模和型芯都是用来成型塑料制品的内表面的成型零件。凸模也称主型芯，用来成型注塑件整体的内部形状。小型芯也称成型杆，用来成型注塑件的局部孔或槽。

（1）组合式凸模结构　图9-6所示为常用的组合式凸模结构。该结构节省了优质模具钢，便于机加工和热处理，也便于动模与定模对准。图9-6a为轴肩压固，牢固可靠。图9-6b为局部嵌入，用螺钉拉紧，尤其适用于大型注射模凸模结构，有利于凸模冷却和排气。

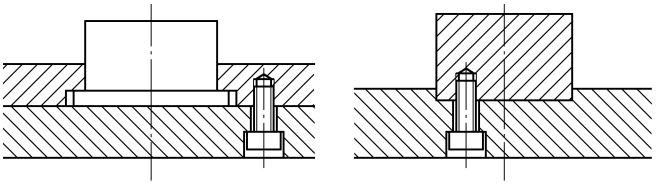


图9-6　组合式凸模结构

a）轴肩压固　b）局部嵌入，螺钉拉紧

（2）圆柱型芯结构

最常见的圆柱型芯结构，如图9-7a所示。它采用轴肩与垫板固定。定位配合部分长度为3～5mm，用小间隙或过渡配合。非配合长度上扩孔后，有利于排气。有多个小型芯时，则以图9-7b或图9-7c所示结构实施。型芯轴肩的高度在嵌入后都必须高出模板装配平面，经研磨成同一平面后再与垫板连接。这种从模板背面压入型芯的方法，称之为反嵌法。

若模板较厚时，可采用图9-8a和图9-8b的结构。倘若模板较薄，则用图9-8c的结构。对于成型3mm以下的不通孔的圆柱小型芯可采用正嵌法，将型芯从型腔表面压入。结构与配合要求如图9-9所示，须注意此方法的可靠性。

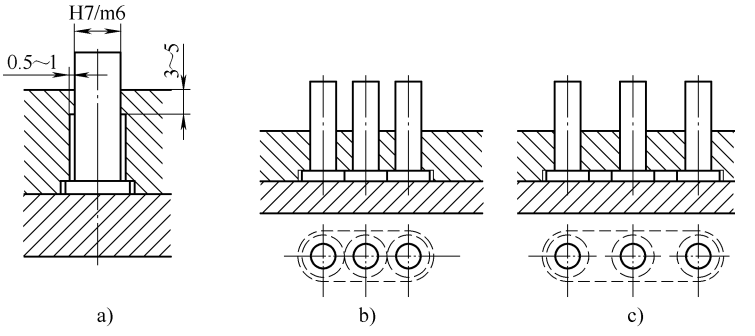


图 9-7　圆柱型芯的常用结构

a）型芯轴肩与垫板固定　b）削肩反嵌型芯　c）反嵌型芯组

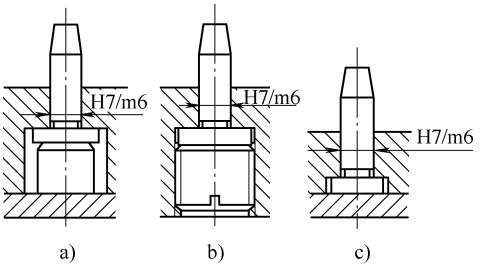


图 9-8　反嵌型芯结构

a）厚模板，垫高型芯　b）厚模板，螺钉紧定

c）薄模板，轴肩固定

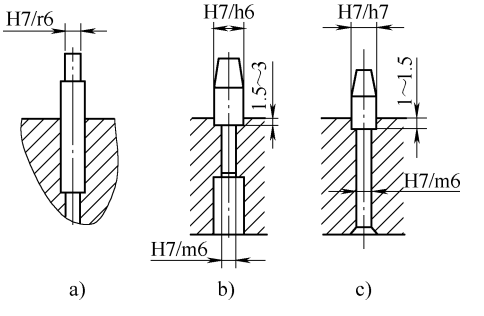


图 9-9　小型芯正嵌法结构

a）外圆紧固　b）台阶紧固　c）正反反铆

（3）异形型芯结构　非圆的异形型芯大都采用反嵌法，如图 9-10a 所示。在型腔板上加工出相配合的异形孔。但支承和轴肩部分均为圆柱体，以便于加工与装配。对径向尺寸较小的异形型芯可用正嵌法的结构，见图 9-10b。实际应用中，反嵌法结构的工作性能比正嵌法可靠。

（4）镶拼型芯结构　形状复杂、精度高又有耐磨要求的型芯，用图 9-11 的镶拼结

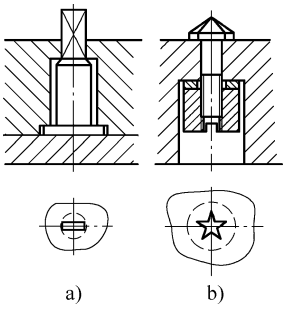


图 9-10　异形型芯的结构

a）反嵌型芯，圆柱轴肩压固

b）正嵌型芯，螺纹紧固

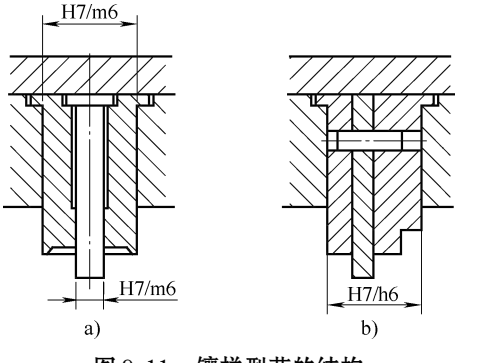


图 9-11　镶拼型芯的结构

a）镶拼圆型芯　b）镶拼片条

构，可大大改善加工和热处理的工艺性。

3. 螺纹成型零件结构设计

螺纹成型零件包括螺纹型芯和型环。前者用于成型注塑件上的内螺纹或安装有内螺纹的嵌件；后者用于成型注塑件上的外螺纹。在成型后，在模外将螺纹成型零件从注塑件上旋出。

（1）螺纹型芯　螺纹型芯结构设计时，首先要考虑螺纹型芯在模具内的定位和固定。

1）用于下模的螺纹型芯。在立式注射机的下模，安装螺纹型芯最为方便。图 9-12 是利用型芯重力安放在下模中的简易结构。图 9-12a 用于成型注塑件上螺纹孔，利用型芯端面定位；图 9-12b 用于安放有内螺纹的金属嵌件。用嵌件端面作轴向方向定位。生产中也有将不通孔螺纹嵌件直接套在型芯杆上，如图 9-12c 所示。

在高压熔体作用下，特别在塑料熔体黏度较低时，为防止熔体的挤入，可利用锥面或圆柱面的配合起密封作用，同时也起到了型芯的轴向定位作用，如图 9-13 所示。

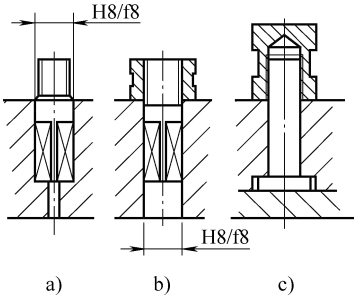


图 9-12　用于下模的简易螺纹型芯

a）成型螺纹孔　b）成型有内螺纹的嵌件　c）螺纹不通孔定位的嵌件

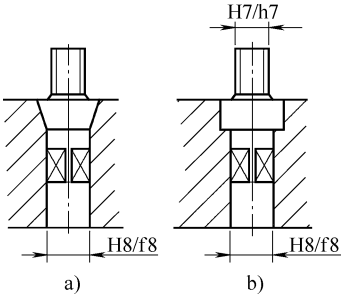


图 9-13　用于防止熔体挤入的螺纹型芯

a）锥面密封　b）圆肩密封

2）弹性联接的螺纹型芯。在卧式注射机的模具上，或在立式注射机的上模上，必须采用弹性联接卡紧型芯，又能快装快卸。图 9-14a，采用豁口柄弹性连接于定位孔

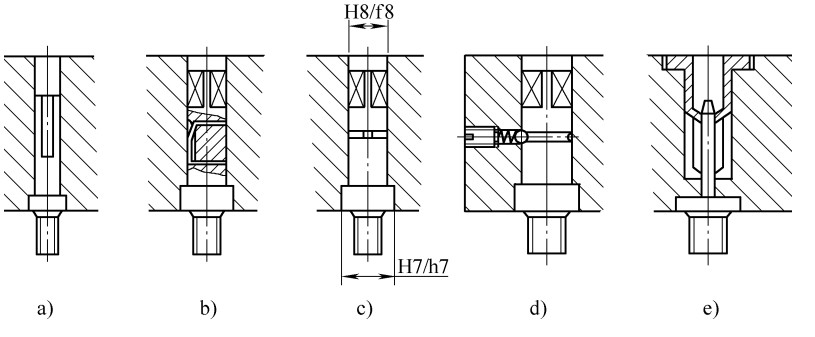


图 9-14　弹性联接的螺纹型芯

a）豁口柄　b）轴向弹簧钢丝　c）周向弹簧钢丝　d）弹簧压钢珠　e）弹性夹头

内，适用于8mm以下的螺纹型芯。图9-14b和图9-14c适用于M3～M12螺纹杆；图9-14b中，利用弹簧钢丝压入孔中所储存的弹性力卡滞型芯；图9-14c中，型芯杆的圆周槽中嵌入0.5mm钢丝，利用C形钢丝的张开力卡在定位孔中。图9-14d和图9-14e适用于更大直径的螺纹型芯。前者用压缩弹簧将钢珠弹压到沟槽内，夹固了型芯杆；后者为弹簧夹头联接的螺纹型芯，使用可靠，但制造复杂。

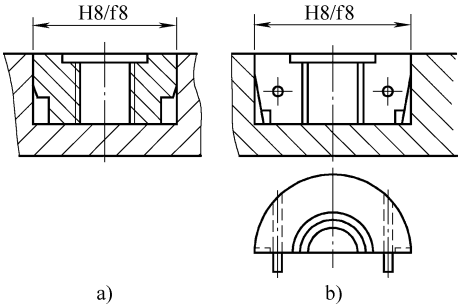


图9-15　螺纹型环结构

a）整体型环　b）剖分式型环

（2）螺纹型环　螺纹型环以小间隙配合装入模板的孔中。配合长度一般不超过5mm，其余部分为3°～5°锥面，便于快装，也便于与注塑件从模具孔中一起脱出。图9-15a为整体型环，环外有扳手平面，可将螺纹型环从注塑件上旋出。图9-15b为剖分式型环，可用楔形槽使其撬开。此螺纹注塑件上会有飞边痕，复位时有两个小导销定位。

9.2　成型零件工作尺寸计算

注射模成型零件工作尺寸，是指这些零件上直接成型注塑件的型腔尺寸。由于注塑件在高压和熔融温度下充模成型，并在模具温度下冷却固化，最终在室温下进行尺寸检测和使用，因此，塑料制品的形状和尺寸精度的获得，必须考虑物料的成型收缩率等众多因素的影响。由于注塑件尺寸类型的多样性，及其成型收缩的方向性和收缩率的不稳定性，以及注塑件和金属模具的制造误差，因此成型零件工作尺寸的计算，一直是注射成型加工中的重大课题。

1. 塑件尺寸和精度

成型零件的每个工作尺寸，都要根据注塑件尺寸和精度要求逐一计算。对注塑件和模具的成型零件，掌握它们的尺寸和公差确定的公式与规则及其影响因素，是十分必要的。

（1）尺寸分类和规定　国家标准GB/T 14486—2008注塑件尺寸公差表，见前表6-2。目前大多数企业仍应用SJ/T 10682—1995的塑料制品公差数值，见表9-1和表9-2。本节中注塑件的精度等级和尺寸公差仍以此标准述及。

表9-1　SJ/T 10682—1995塑料制品尺寸公差数值

基本尺寸/mm	公差等级									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	公差数值/mm									
~3	0.02	0.03	0.04	0.06	0.08	0.12	0.16	0.24	0.32	0.48
>3~6	0.03	0.04	0.05	0.07	0.08	0.14	0.18	0.28	0.36	0.56

（续）

基本尺寸/mm	公差等级									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	公差数值/mm									
>6～10	0.03	0.04	0.06	0.08	0.10	0.06	0.20	0.32	0.40	0.64
>10～14	0.03	0.05	0.06	0.09	0.12	0.18	0.22	0.36	0.44	0.72
>14～18	0.04	0.05	0.07	0.10	0.12	0.20	0.24	0.40	0.48	0.80
>18～24	0.04	0.06	0.08	0.11	0.14	0.22	0.28	0.44	0.56	0.88
>24～30	0.05	0.06	0.09	0.12	0.16	0.24	0.32	0.48	0.64	0.96
>30～40	0.05	0.07	0.10	0.13	0.18	0.26	0.36	0.52	0.72	1.0
>40～50	0.06	0.08	0.11	0.14	0.20	0.28	0.40	0.56	0.80	1.2
>50～65	0.06	0.09	0.12	0.16	0.22	0.32	0.46	0.64	0.92	1.4
>65～80	0.07	0.10	0.14	0.19	0.26	0.38	0.52	0.76	1.0	1.6
>80～100	0.08	0.12	0.16	0.22	0.30	0.44	0.60	0.88	1.2	1.8
>100～120	0.09	0.13	0.18	0.25	0.34	0.50	0.68	1.0	1.4	2.0
>120～140	0.10	0.15	0.20	0.28	0.38	0.56	0.76	1.1	1.5	2.2
>140～160	0.12	0.16	0.22	0.31	0.42	0.62	0.84	1.2	1.7	2.4
>160～180	0.13	0.18	0.24	0.34	0.46	0.68	0.92	1.4	1.8	2.7
>180～200	0.14	0.20	0.26	0.37	0.50	0.74	1.0	1.5	2.0	3.0
>200～225	0.15	0.22	0.28	0.41	0.56	0.82	1.1	1.6	2.2	3.3
>225～250	0.16	0.24	0.30	0.45	0.62	0.90	1.2	1.8	2.4	3.6
>250～280	0.18	0.26	0.34	0.50	0.68	1.0	1.3	2.0	2.6	4.0
>280～315	0.20	0.28	0.38	0.55	0.74	1.1	1.4	2.2	2.8	4.4
>315～355	0.22	0.30	0.42	0.60	0.82	1.2	1.6	2.4	3.2	4.8
>355～400	0.24	0.34	0.46	0.65	0.90	1.3	1.8	2.6	3.6	5.2
>400～450	0.26	0.38	0.52	0.70	1.0	1.4	2.0	2.8	4.0	5.6
>450～500	0.30	0.42	0.60	0.80	1.1	1.6	2.2	3.2	4.4	6.4
>500～560	0.34	0.46	0.64	0.88	1.2	1.8	2.4	3.6	4.8	7.1
>560～630	0.38	0.52	0.72	0.99	1.3	2.0	2.7	3.9	5.4	7.9
>630～710	0.42	0.60	0.80	1.1	1.5	2.2	3.0	4.4	6.0	8.8
>710～800	0.46	0.64	0.90	1.2	1.7	2.5	3.3	4.9	6.7	9.8
>800～900	0.52	0.72	1.0	1.4	1.9	2.8	3.8	5.5	7.5	10.8
>900～1000	0.60	0.80	1.2	1.6	2.2	3.2	4.3	6.0	8.5	12.8
>1000～2000	0.76	1.0	1.4	1.8	2.5	3.5	5	7	10	14
>1200～1400	0.88	1.2	1.6	2.5	3.0	4.0	6	8	11	16
>1400～1600	1.0	1.4	1.8	3.0	3.5	5.0	7	9	13	18

注：1. 表中公差数值用于基准孔或非配合孔时取正（+）号；用于基准轴或非配合轴时取负（-）号，用于非配合长度取半值，冠以正负（±）号。

2. 受模具活动部分影响的尺寸公差，为本标准规定公差值与附加值之和。1、2 级附加值为 0.02mm；3、4 级附加值为 0.04mm；5 至 7 级附加值为 0.1mm；8 至 10 级附加值为 0.2mm。

表 9-2　各类塑料与相应的公差等级的选用

材料			相应的公差等级		
收缩特性值	代号	名称	高精度	一般精度	低精度
0-1	ABS	苯乙烯-丁二烯-丙烯腈共聚物	3	4	5
	AS	丙烯腈-苯乙烯共聚物			
	GRD	30% 玻璃纤维增强塑料			

（续）

材料			相应的公差等级		
收缩特性值	代号	名　称	高精度	一般精度	低精度
0-1	HIPS	高冲击强度聚苯乙烯	3	4	5
	MF	氨基塑料			
	PBTB	聚对苯二甲酸丁二醇酯(增强)			
	PC	聚碳酸酯			
	PETP	聚对苯二甲酸乙二醇酯(增强)			
	PF	酚醛塑料			
	PMMA	聚甲基丙烯酸甲酯			
	PPS	聚苯硫醚(增强)			
	PPO	聚苯醚			
	PES	聚醚砜			
	PS	聚苯乙烯			
	PSU	聚砜			
1-2	PA	聚酰胺 6、66、610、9、1010	4	5	6
	CP	氯化聚醚			
	PVC	聚氯乙烯(硬)			
2-3	PE	聚乙烯(高密度)	6	7	8
	POM	聚甲醛			
	PP	聚丙烯			
4-5	PE	聚乙烯(低密度)	8	9	10
	PVC	聚氯乙烯(软)			

注：1. 其他材料，可按加工尺寸的稳定性，参照本表选取公差等级。

2. 1、2 级为精密级，只有在特殊条件下才采用。

3. 当沿脱模方向两端尺寸均有要求时，应考虑脱模斜度对公差的影响。

4. 其他增强塑料的收缩特性值，应比本表中规定的小，或由试验结果定。

如图 9-16 所示，注塑件尺寸一般分为包容（孔类）尺寸、被包容（轴类）尺寸和中心距尺寸三大类。凸台和孔槽等一些局部结构的中心线到某一型面尺寸，简称单边位置尺寸，属第四类尺寸。该类尺寸也可近似作为中心距尺寸处理。这四类注塑件尺寸的偏差标准有以下三个规定。

1）包容和被包容尺寸采用单向偏差制。

2）注塑件上的包容尺寸均取正偏差，即最小极限尺寸为基本尺寸；注塑件上的被包容尺寸均标以负偏差，即最大极限尺寸为基本尺寸。

3）中心距尺寸和单边位置尺寸均取双向等值偏差。

塑料制品图上凡不符合以上规定的尺寸和偏差，应按极限尺寸不变原则进行改造换算。对于未注偏差的自由尺寸，应按技术条件取低精度的公差值，按以上规定标注偏差。

模具成型零件工作尺寸，应按 GB/T 1800.2—2009 中公差数值，用公差等级IT6 ~ IT10 确定偏差，并作相应规定。

本节所采用的主要代号及其含义如下：

D、d——注塑件的包容、被包容径向尺寸（mm）；

H、h——注塑件的包容、被包容的深度、高度尺寸（mm）；

L、l——注塑件的中心距与单边位置尺寸（mm）；

D_m、d_m——模具的包容、被包容径向尺寸（mm）；

H_m、h_m——模具的包容、被包容的深度、高度尺寸（mm）；

L_m、l_m——模具的中心距、单边位置尺寸（mm）；

Δ——注塑件尺寸公差，按 SJ 1372 或国标选定（mm）；

Δ_m——模具成型零件的制造公差，按 GB 1800 确定（mm）；

S_{max}——注射塑料物料的最大成型收缩率；

S_{min}——注射塑料物料的最小成型收缩率；

S_{cp}——注射塑料物料的平均成型收缩率；

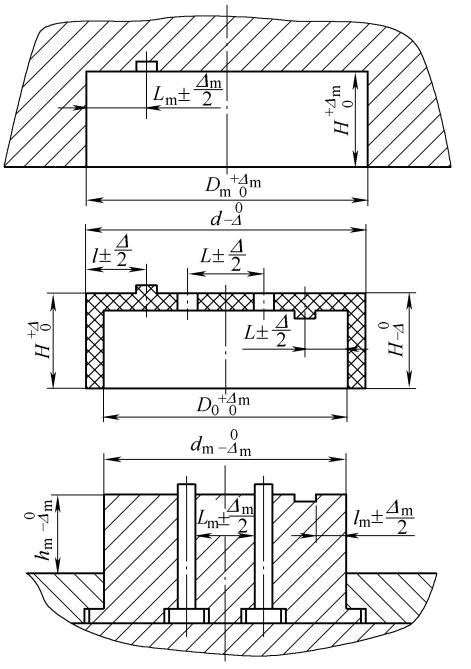


图 9-16　注塑件尺寸和模具成型零件工作尺寸分类

δ_c——模具使用过程中的型腔表面磨损量（mm）。

模具成型零件公差等级应该与塑料制品的尺寸公差相对应，见表 9-3 和表 9-4。

表 9-3　注射模成型零件的制造精度

塑件精度	GB/T 14486			MT1	MT2	MT3	MT4	MT5	MT6	MT7
塑件精度	SJ/T 10682	3	4	5	6	7	8	9	10	
模具精度	GB/T 1800	IT6	IT7	IT8	IT9	IT9	IT10	IT10	IT11	IT12

表 9-4　注射模成型零件的标准公差数值（摘自 GB/T 1800.3）

基本尺寸/mm	公差等级/mm						
	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12
3	6	10	14	25	40	60	100
3 ~ 6	8	12	18	30	48	75	120
6 ~ 10	9	15	22	36	58	90	150
10 ~ 18	11	18	27	43	70	110	180
18 ~ 30	13	21	33	52	84	130	210
30 ~ 50	16	25	39	62	100	160	250
50 ~ 80	19	30	46	74	120	190	300
80 ~ 120	22	35	54	87	140	220	350
120 ~ 180	25	40	63	100	160	250	400
180 ~ 250	29	46	72	115	185	290	460
250 ~ 315	32	52	81	130	210	320	520
315 ~ 400	36	57	89	140	230	360	570

（续）

基本尺寸/mm	公差等级/mm						
	IT6	IT7	IT8	IT9	IT10	IT11	IT12
400～500	40	63	97	155	250	400	630
500～630	44	70	110	175	280	440	700
630～800	50	80	125	200	320	500	800
800～1000	56	90	140	230	360	560	900
1000～1250	66	105	165	260	420	660	1050
1250～1600	78	125	195	310	500	780	1250
1600～2000	92	150	230	370	600	920	1500
2000～2500	110	175	280	440	700	1100	1750
2500～3150	135	210	330	540	860	1350	2100

在确定了注塑件的脱模方向后，成型零件的有关脱模斜度的尺寸，必须作工艺处理，如图9-17所示。在模具厂各有处理这类技术问题的约定规则，例如：电火花加工型腔就有模板上下面装夹位置的工艺规定。

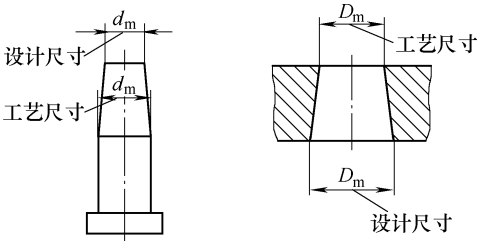


图9-17　脱模斜度对成型零件尺寸及公差标注的要求

（2）影响注塑件尺寸误差的因素　目前国内实际应用的成型收缩率的定义为

$$S=\frac{L-L_m}{L}\times 100\%$$

换算后得

$$L_m=L(1+S) \tag{9-1}$$

式中　S——计算的成型收缩率；

L_m——模具成型零件在室温下的实际尺寸（mm）；

L——注塑件在室温下对应的实际尺寸（mm）。

成型注塑件是批量生产制品。以足够多的注塑件，测出尺寸的实际偏差确定注塑件的尺寸误差。影响注塑件尺寸误差因素是多方面的。注塑件尺寸可能出现的误差δ，主要是四方面因素综合作用的结果。

$$\delta=\delta_m+\delta_s+\delta_c+\delta_j \tag{9-2}$$

1）模具成型零件的制造偏差δ_m的影响。各尺寸的实际偏差由模具制造精度控制在公差范围内，$|\delta_m|\leqslant\Delta_m$。模具尺寸的公差$\Delta_m$，由表9-3和表9-4，以模具精度等级和尺寸分段决定。常用的模具制造精度IT7或IT8，尺寸越大，其公差Δ_m越大，实际偏差$|\delta_m|$也越大。它们与注塑件尺寸公差Δ的关系见表9-5。

表9-5　模具制造公差Δ_m在注塑件公差Δ中所占比例

注塑件基本尺寸L/mm	Δ_m/Δ	注塑件基本尺寸L/mm	Δ_m/Δ
0～50	1/3～1/4	>250～355	1/6～1/7
>50～140	1/4～1/5	>355～500	1/7～1/9
>140～250	1/5～1/6		

2）注塑件的成型收缩引起制品尺寸误差 δ_s 的影响。一方面是设计所用的计算收缩率与制品生产时的实际收缩率之间的误差所致；另一方面是由于成型过程中，收缩率在最大值与最小值之间波动。后者因为注射工艺因素众多，温度、压力、时间参数、物料批号及预处理等条件变动，影响较为明显。δ_s 与注塑件的基本尺寸成正比，有

$$\delta_s = (S_{max} - S_{min})L \tag{9-3}$$

目前注射成型工程要求将成型收缩引起制品尺寸误差限制在 $\delta_s \leqslant D/3$。

3）成型零件的磨损 δ_c 影响制品的尺寸误差。它包括两个方面：一是熔体的冲压磨损和注塑件脱模的刮磨，其中被刮磨的型芯径向表面有最大磨损；二是旧模具的修磨抛光量。δ_c 与注塑件基本尺寸大小无关，而与注塑件尺寸类型有关，也与塑料的物理性能，例如与钢表面的摩擦系数有关。玻璃纤维增强塑料使型腔表面有较快的磨损速率。注射成型工程要求模具在使用期限内，工作尺寸磨损量造成注塑件误差限制在 $\delta_c \leqslant D/6$ 之内。这对于低精度大尺寸注塑件，由于 Δ 值较大而容易达到要求。但对高精度小尺寸注射制品，必须采用镜面钢等耐磨钢种才能达到。生产中实际注射 2.5 万次，型芯径向尺寸磨损量约为 0.02 ~ 0.04mm。

由于计算机辅助注射模设计软件运行时，不能识别包容与被包容尺寸。在成型零件尺寸计算时，不能考虑模具磨损对注塑件尺寸的作用，影响了注射模设计的质量。按 $\delta_c = 0$ 设计计算的成型零件尺寸，在型腔和型芯磨损后，壳体注塑件的壁厚变化没有考虑。注射模的注射寿命有限。对大中型注射模，对注射寿命有要求的注射模，对有配合精度要求的成型尺寸，必须考虑成型零件磨损后注塑件的尺寸误差。

4）模具运动零件配合间隙 δ_j 的影响。运动零件动配合表面间隙变大，而产生塑料制品的尺寸误差。模具导柱与导套间的间隙逐渐变大，会引起注塑件径向尺寸误差增加。模具分型面间隙增大，会引起注塑件深度尺寸误差增大。显然，全新模具 δ_j 应趋于零。

在模具成型零件工作尺寸计算时，应预测到整个注塑期限内保证达到

$$\delta \leqslant \Delta$$

如图 9-18 所示为 δ_s、δ_m、δ_c 与注塑件尺寸 L 的关系曲线。小型注塑件的成型模具的制造误差 δ_m，对注塑件误差影响是主要的。因此小型模具必须有较高的制造精度。影响大型注塑件误差的主要因素是成型收缩误差 δ_s。因此，必须提高大型注塑件的注射成型工艺的控制精度。

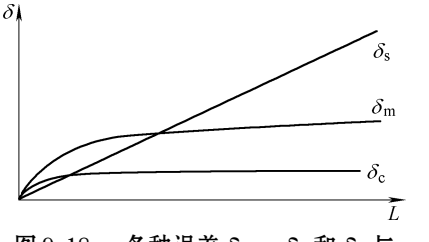


图 9-18 各种误差 δ_s、δ_m 和 δ_c 与注塑件尺寸 L 的关系

2. 按平均收缩率计算

按平均收缩率 S_{cp} 方法可简捷地计算成型零件工作尺寸，是目前国内应用最广泛的方法。具体计算公式见表 9-6。原理型计算公式应用时多有不便，实际采用表 9-6 中式的①～⑤实用计算式。

（1）型腔和型芯的径向尺寸计算　按照模具尺寸的基本关系式（9-1），可写出型腔平均径向尺寸的关系式

表 9-6　按平均收缩率计算模具成型零件工作尺寸的公式　（单位：mm）

尺寸类型	原理计算式	实用计算式	x 值
型腔径向尺寸	$D_m=\left[(1+S_{cp})d-\frac{1}{2}(\Delta+\Delta_m+\delta_c)\right]^{+\Delta_m}$	①$D_m=[(1+S_{cp})d-x\Delta]^{+\Delta_m}$	0.5～0.75
型芯径向尺寸	$d_m=\left[(1+S_{cp})D+\frac{1}{2}(\Delta+\Delta_m+\delta_c)\right]_{-\Delta_m}$	②$d_m=[(1+S_{cp})D+x\Delta]_{-\Delta_m}$	
型腔深度尺寸	$H_m=\left[(1+S_{cp})h-\frac{1}{2}(\Delta+\Delta_m)\right]^{+\Delta_m}$	③$H_m=[(1+S_{cp})h-x\Delta]^{+\Delta_m}$	0.5～0.67
型芯高度尺寸	$h_m=\left[(1+S_{cp})H+\frac{1}{2}(\Delta+\Delta_m)\right]_{-\Delta_m}$	④$h_m=[(1+S_{cp})H+x\Delta]_{-\Delta_m}$	
中心距	$L_m=[(1+S_{cp})L_s]\pm\frac{\Delta_m}{2}$	⑤$L_m=[(1+S_{cp})L]\pm\frac{\Delta_m}{2}$	
型腔内凸台或孔的中心线至侧壁距离	$L_m=\left[(1+S_{cp})l-\frac{\delta_c}{4}\right]\pm\frac{\Delta_m}{2}$		
型芯上凸台或孔的中心线至侧壁距离	$l_m=\left[(1+S_{cp})L+\frac{\delta_c}{4}\right]\pm\frac{\Delta_m}{2}$		

$$\overline{D}_m=(1+S_{cp})\overline{d} \tag{9-4}$$

式中　S_{cp}——注塑件尺寸的平均收缩率；

$\overline{d}$——注塑件上被包容径向尺寸的平均值；

$\overline{D}_m$——模具型腔中包容的径向尺寸的平均值。

按前述的注塑件和模具尺寸及公差的规定，图 9-19a 中注塑件尺寸有

$$\overline{d}=\frac{d_{max}+d_{min}}{2}$$

被包容的注塑件尺寸，其最大极限尺寸 d_{max} 即为基本尺寸

$$d_{max}=d$$

被包容的注塑件尺寸，其最小极限尺寸 d_{min} 等于基本尺寸减去注塑件尺寸的公差值

$$d_{min}=d-\Delta$$

所以　$$\overline{d}=\frac{d+(d-\Delta)}{2}=d-\frac{\Delta}{2} \tag{9-5}$$

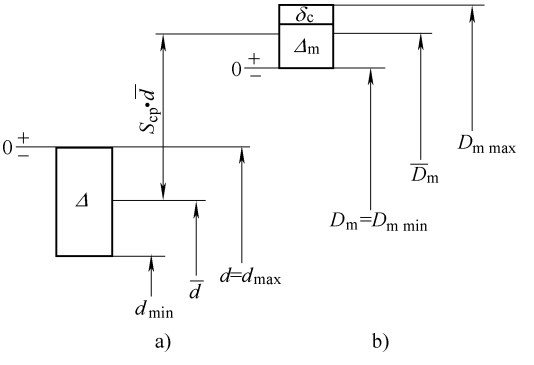


图 9-19　径向型腔尺寸和注塑件尺寸的偏差

a）注塑件被包容径向尺寸　b）模具包容的径向尺寸

图 9-19b 中模具包容尺寸平均值

$$\overline{D}_m=\frac{D_{mmax}+D_{mmin}}{2}$$

模具型腔径向的最大极限尺寸等于基本尺寸加上模具尺寸公差值和型腔表面的磨损量

$$D_{mmax}=D_m+\Delta_m+\delta_c$$

模具型腔径向的最小极限尺寸即为基本尺寸

$$D_{\mathrm{mmin}} = D_{\mathrm{m}}$$

所以

$$\overline{D}_{\mathrm{m}} = \frac{D_{\mathrm{m}} + \Delta_{\mathrm{m}} + \delta_{\mathrm{c}} + D_{\mathrm{m}}}{2} = D_{\mathrm{m}} + \frac{\Delta_{\mathrm{m}}}{2} + \frac{\delta_{\mathrm{c}}}{2} \tag{9-6}$$

将式（9-6）和式（9-5）代入到式（9-4）中，略去 $S_{\mathrm{cp}} \cdot \frac{\Delta}{2}$，可得按平均收缩率计算的模具型腔径向尺寸的算式

$$D_{\mathrm{m}} = \left[(1 + S_{\mathrm{cp}})d - \frac{1}{2}(\Delta + \Delta_{\mathrm{m}} + \delta_{\mathrm{c}}) \right]^{+\Delta_{\mathrm{m}}} \tag{9-7}$$

承前述尺寸及公差的规定，并类同上述方法，可推导，按平均收缩率计算的模具型芯径向尺寸的算式

$$d_{\mathrm{m}} = \left[(1 + S_{\mathrm{cp}})D + \frac{1}{2}(\Delta + \Delta_{\mathrm{m}} + \delta_{\mathrm{c}}) \right]_{-\Delta_{\mathrm{m}}} \tag{9-8}$$

（2）型腔深度和型芯高度尺寸计算　按照模具尺寸的基本关系式（9-1），由平均收缩率 S_{cp} 得型腔深度平均计算式

$$\overline{H}_{\mathrm{m}} = (1 + S_{\mathrm{cp}})\overline{h} \tag{9-9}$$

式中　$\overline{h}$——注塑件上被包容的高度尺寸平均值；

$\overline{H}_{\mathrm{m}}$——模具型腔中包容的深度尺寸平均值。

按前述的注塑件和模具尺寸及公差的规定，图 9-20a 中注塑件尺寸，有

$$\overline{h} = \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2}$$

被包容的注塑件高度尺寸，其最大极限尺寸 $h_{\max}$ 即为基本尺寸

$$h_{\max} = h$$

其最小极限尺寸 $h_{\min}$ 等于基本尺寸减去注塑件尺寸的公差

$$h_{\min} = h - \Delta$$

所以　$\overline{h} = \frac{h + (h - \Delta)}{2} = h - \frac{\Delta}{2}$　（9-10）

图 9-20b 中模具包容的深度尺寸平均值

$$\overline{H}_{\mathrm{m}} = \frac{H_{\mathrm{mmax}} + H_{\mathrm{mmin}}}{2}$$

模具型腔深度的最大极限尺寸等于基本尺寸加模具尺寸公差值。由于深度方向的型腔表面不受脱模时的刮磨作用，磨损量较小 $\delta_{\mathrm{c}} \approx 0$。故

$$H_{\mathrm{mmax}} = H_{\mathrm{m}} + \Delta_{\mathrm{m}}$$

模具包容的型腔深度最小极限尺寸等于基本尺寸

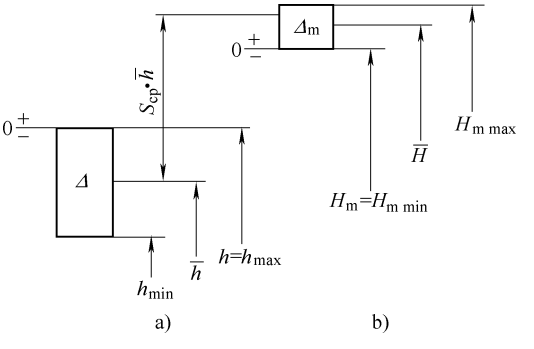


图 9-20　型腔深度尺寸和注塑件尺寸的偏差

a）注塑件上被包容的高度尺寸

b）模具型腔中包容的深度尺寸

$$H_{\text{mmin}} = H_{\text{m}}$$

所以

$$\overline{H} = \frac{H_{\text{m}} + \Delta_{\text{m}} + H_{\text{m}}}{2} = H_{\text{m}} + \frac{\Delta_{\text{m}}}{2} \tag{9-11}$$

将式（9-11）和式（9-10）代入到式（9-9），略去 $S_{\text{cp}} \cdot \frac{\Delta}{2}$，可得按平均收缩率计算的模具型腔深度的算式

$$H_{\text{m}} = \left[(1 + S_{\text{cp}})h - \frac{1}{2}(\Delta + \Delta_{\text{m}}) \right]^{+\Delta_{\text{m}}} \tag{9-12}$$

承前述尺寸及公差的规定，并类同上述方法，可推导按平均收缩计算的模具型芯高度尺寸的算式

$$h_{\text{m}} = \left[(1 + S_{\text{cp}})H + \frac{1}{2}(\Delta + \Delta_{\text{m}}) \right]_{-\Delta_{\text{m}}} \tag{9-13}$$

（3）中心距和单边位置尺寸计算　注塑件上孔间距对应模具上型芯间中心距；注塑件上凸台的间距对应模具上孔的中心距。模具上型芯和孔的磨损不会影响中心距尺寸，故 $\delta_{\text{c}} \approx 0$。承前注塑件和模具尺寸及公差的规定，由于注塑件和模具上的中心距均采用双向等值偏差，注塑件和模具上中心距的基本尺寸就是平均尺寸，有 $L_{\text{s}} = \overline{L}_{\text{s}}$，$L_{\text{m}} = \overline{L}_{\text{m}}$。根据模具尺寸的基本关系式（9-1），由平均收缩率 S_{cp} 直接获得模具中心距尺寸的算式

$$L_{\text{m}} = [\,(1 + S_{\text{cp}})L_{\text{s}}\,] \pm \frac{\Delta_{\text{m}}}{2} \tag{9-14}$$

由图 9-16 可见，模具单边位置尺寸有两种类型，分别为型腔内和型芯上。由于侧壁的磨损量是所定义的径向磨损量 δ_{c} 的一半。注塑件与模具的单边位置尺寸采用双向等值偏差。图 9-21 型腔内凸台或孔至侧壁距离，根据模具尺寸的基本关系式（9-1），有算式

$$\overline{L}_{\text{m}} = (1 + S_{\text{cp}})\overline{l} \tag{9-15}$$

注塑件单边位置尺寸即为它的平均尺寸 $\overline{l} = l$。模具的单边位置的平均尺寸

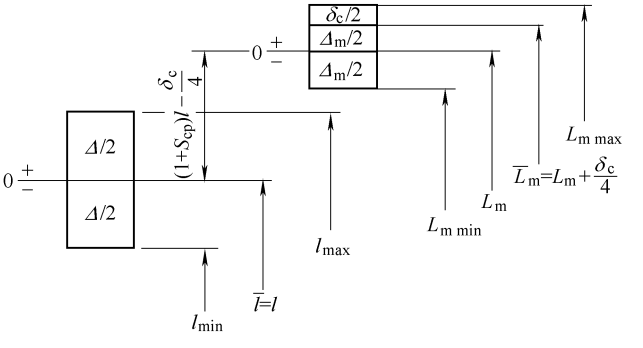


图 9-21　型腔内凸台或孔的中心线至侧壁距离和注塑件尺寸的偏差

$$\overline{L}_{\text{m}} = \frac{L_{\text{mmax}} + L_{\text{mmin}}}{2}$$

其中

$$L_{\text{mmax}} = L_{\text{m}} + \frac{\Delta_{\text{m}}}{2} + \frac{\delta_{\text{c}}}{2}$$

$$L_{\text{mmin}} = L_{\text{m}} - \frac{\Delta_{\text{m}}}{2}$$

因此

$$\overline{L}_{\text{m}} = L_{\text{m}} + \frac{\delta_{\text{c}}}{4} \tag{9-16}$$

将式（9-16）和 $\bar{l}=l$ 代入到式（9-15），可得到模具型腔内凸台或孔的中心线至侧壁距离尺寸的按平均收缩率的算式

$$L_m=\left[(1+S_{cp})l-\frac{\delta_c}{4}\right]\pm\frac{\Delta_m}{2} \tag{9-17}$$

承前述尺寸及公差的规定，并类同上述方法，可推导模具型芯上凸台或孔的中心线至侧壁距离尺寸的按平均收缩率的算式

$$l_m=\left[(1+S_{cp})L+\frac{\delta_c}{4}\right]\pm\frac{\Delta_m}{2} \tag{9-18}$$

表 9-6 中五种实用计算式，是将模具尺寸公差 Δ_m 和型腔磨损 δ_c 视为注塑件尺寸公差 Δ 的函数 $x\Delta$；在型腔和型芯的径向尺寸计算时，$\Delta_m=D/3\sim D/9$，$\delta_c=D/6\sim D/10$，所以 $x=1/2\sim3/4$；在型腔深度和型芯高度尺寸计算时，$\Delta_m=D/3\sim D/9$，$\delta_c=0$，所以 $x=1/2\sim2/3$。

若已知注塑件尺寸的 Δ 值，可根据 SJ/T 10628 得知该 Δ 值所属的公差等级，再由表 9-3 确定对应模具尺寸的经济公差等级。显然 $x=0.5$，为大尺寸时采用。在注塑件精度较高，尺寸 50mm 以下，取 x 为 0.75 或 0.67。但 x 值变化范围相当大，倘若确定不当，会使成型注塑件尺寸超差。表 9-7 是根据注塑件公差 Δ 查取 x 值。该表 x 考虑到一些极端情况，使用方便可靠。

表 9-7　按平均收缩率计算模具尺寸中系数 x 数值表

塑件尺寸公差 Δ/mm	型腔和型芯径向工作尺寸计算的 x 值	型腔深度和型芯高度工作尺寸计算的 x 值
≤0.1	0.80	0.66
>0.1～0.2	0.75	0.63
>0.2～0.3	0.70	0.60
>0.3～0.4	0.65	0.58
>0.4～0.5	0.60	0.56
>0.5～0.7	0.58	0.55
>0.7～1.0	0.56	0.54
>1.0～2.0	0.54	0.53
>2.0	0.53	0.52

模具成型零件尺寸计算是烦琐费时工作。上述计算过程用微型计算机运算则迅速且准确。现以如图 9-22 所示注塑件笔算过程举例。选用 ABS 塑料，其平均成型收缩率 $S_{cp}=0.55\%=0.0055$。计算凹模和型芯的工作尺寸结果见表 9-8。

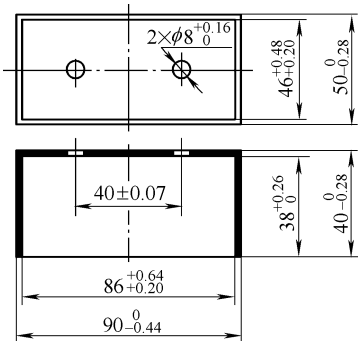


图 9-22　塑料制品图之一

通常，注塑件中心距尺寸精度较高，而注塑件在开模方向尺寸精度比径向尺寸要低 1～2 级。因此，模具各成型零件尺寸精度也有高低。经济精度考虑有利于降低模具成本。注塑件的成型收缩率对各尺寸并非一致，这在高精度注塑件的模具工作尺寸计算时尤需注意。将模具成型尺寸的计算结果进行规范化换算，可便于测量。

表 9-8　注塑件之一的成型零件工作尺寸计算　　（单位：mm）

注塑件尺寸	注塑件尺寸规范化	注塑件尺寸公差 Δ	注塑件等级 SJ/T 10628	模具等级 GB 1800	模具尺寸公差 Δ_m	表 9-6	系数 x 表 9-7	模具尺寸计算结果	模具尺寸规范化
$90^{\ 0}_{-0.44}$	$90^{\ 0}_{-0.44}$	0.44	6	9	0.087	①	0.6	$90.231^{+0.0870}_{\ 0}$	$90.3^{+0.018}_{-0.069}$
$50^{\ 0}_{-0.28}$	$50^{\ 0}_{-0.28}$	0.28	6	9	0.074	①	0.7	$50.079^{+0.074}$	$50.1^{+0.053}_{-0.021}$
$40^{\ 0}_{-0.28}$	$40^{\ 0}_{-0.28}$	0.28	自定	9	0.062	③	0.6	$40.052^{+0.062}_{\ 0}$	$40.1^{+0.014}_{-0.048}$
$86^{+0.64}_{+0.20}$	$86.2^{+0.44}_{\ 0}$	0.44	自定	9	0.087	②	0.6	$86.938^{\ 0}_{-0.087}$	$86.9^{+0.038}_{-0.049}$
$46^{+0.48}_{+0.20}$	$46.2^{+0.28}_{\ 0}$	0.28	自定	9	0.062	②	0.7	$46.650^{\ 0}_{-0.062}$	$46.6^{+0.050}_{-0.012}$
$8^{+0.16}_{\ 0}$	$8^{+0.16}_{\ 0}$	0.16	6	9	0.036	②	0.75	$8.164^{\ 0}_{-0.036}$	$8.1^{+0.064}_{+0.028}$
$38^{+0.26}_{\ 0}$	$38^{+0.26}_{\ 0}$	0.26	6	9	0.062	④	0.6	$38.365^{\ 0}_{-0.062}$	$38.3^{+0.065}_{+0.003}$
40 ± 0.07	40 ± 0.07	0.14	自定	8	0.039	⑤	/	40.22 ± 0.02	40.22 ± 0.02

对于大中型的注塑壳体，按平均成型收缩率计算成型零件尺寸后，还必须对壁厚尺寸进行校核，防止注塑壳体的壁厚超差。

注射模生产车间常用表 9-9 所列的简化经验式计算模具成型零件的尺寸。这组计算式容易记忆、运算方便，但有误差。

表 9-9　按平均收缩率计算模具成型零件工作尺寸的经验算式　　（单位：mm）

尺寸类型	经验计算式	
型腔径向尺寸	① $D_m=\left[(1+S_{cp})d-\frac{3}{4}\Delta\right]^{+\delta}$	S_{cp}——成型零件尺寸的平均收缩率 d、D——注塑件上被包容（轴类）、包容（孔类）尺寸，将置于模具的主分型面方向 h、H——注塑件上被包容（轴类）、包容（孔类）尺寸，将置于模具的开模方向 Δ——注塑件上该尺寸的公差 δ——注射模成型零件的公差，取 $\delta=\frac{1}{3}\sim\frac{1}{6}\Delta$，基本尺寸大取小，反之取大
型芯径向尺寸	② $d_m=\left[(1+S_{cp})D+\frac{3}{4}\Delta\right]_{-\delta}$	
型腔深度尺寸	③ $H_m=\left[(1+S_{cp})h-\frac{2}{3}\Delta\right]^{+\delta}$	
型芯高度尺寸	④ $h_m=\left[(1+S_{cp})H+\frac{2}{3}\Delta\right]_{-\delta}$	
中心距	⑤ $L_m=[(1+S_{cp})L]\pm\frac{\delta}{2}$	

对照表 9-6 中的成型零件工作尺寸计算式，式中的系数 x 数值，在径向尺寸计算时 $x=3/4$；在深度或高度方向尺寸计算时，$x=2/3$。前者是以 $\Delta_m=\frac{\Delta}{3}$，$\delta_c=\frac{\Delta}{6}$ 代入的结果；后者是以 $\Delta_m=\frac{\Delta}{3}$，$\delta_c=0$ 代入的结果。表 9-9 中的经验算式，同样的基本尺寸，注塑件的尺寸公差 Δ 与模具零件制造公差 Δ_m 相差很大，相互无确定的关系。表 9-5 中，在基本尺寸 >50mm 时，Δ_m 为 $\frac{\Delta}{4}\sim\frac{\Delta}{9}$，而 $\delta_c<\frac{\Delta}{6}$。因此在基本尺寸 >50mm 时，经验算式计算结果有较大误差。为确保制品尺寸精度，对注塑件上的配合尺寸，壳板壁厚等必

须用后述的公差带验算。

还有一些“经验算式”，不区分注塑件和模具零件尺寸的包容和被包容性能，不考虑模具成型零件的磨损量和修模余量。注射模的径向型腔间隙经数万或几十万次注射，型芯径向尺寸因磨损和修模变小，型腔径向尺寸变大，制品壁厚变厚，以致超差。

3. 按公差带计算

按公差带方法计算模具成型零件工作尺寸，是用最大和最小成型收缩率 S_{max} 和 S_{min} 计算。其理论推导的过程较严密，计算中可保证注塑件尺寸不超差，也给新模具的成型尺寸留有充分的修磨余地，便于修模并延长了模具的使用寿命。对大型注塑件和收缩率波动大的塑料有很好的实用意义。而且，公差带方法中的校验原理同样适用于按平均收缩率的计算过程，是防止注塑件尺寸超差的手段。在应用公差带计算方法时，同样要遵循前述注塑件和模具尺寸的公差和偏差的规则。特别需要强调的是，确定注塑件尺寸精度等级，必须考虑塑料材料收缩率波动的程度。此种计算方法的八种设计公式及其对应的校核式，见表 9-10。

表 9-10 按公差带计算模具成型零件工作尺寸的公式 （单位：mm）

尺寸类型	设计计算式	校核条件式
型腔径向尺寸	①$D_m=[(1+S_{max})d-\Delta]^{+\Delta_m}$	①$d'_{max}=D_m+\Delta_m+\delta_c-S_{min}\cdot d\leqslant d$
型芯径向尺寸	②$d_m=[(1+S_{min})D+\Delta]_{-\Delta_m}$	②$D'_{min}=d_m-\Delta_m-\delta_c-S_{max}\cdot D\geqslant D$
型腔深度尺寸	③$H_m=[(1+S_{min})h-\Delta_m]^{+\Delta_m}$	③$H'_{min}=H_m-S_{max}\cdot h+\Delta\geqslant h$
易修高的型芯高度尺寸	④$h_m=[(1+S_{max})H+\Delta_m]_{-\Delta_m}$	④$H'_{max}=h_m-S_{min}\cdot H-\Delta\leqslant H$
易修低的型芯高度尺寸	⑤$h_m=[(1+S_{min})H+\Delta]_{-\Delta_m}$	⑤$H'_{max}=h_m-S_{max}\cdot H-\Delta_m\geqslant H$
中心距	⑥$L_m=[(1+S_{cp})L]\pm\frac{\Delta_m}{2}$	⑥$L'_{max}=L_m+\frac{\Delta_m}{2}+\delta_j-S_{min}\cdot L-\frac{\Delta}{2}\leqslant L$
型腔内凸台或孔的中心线至侧壁距离	⑦$L_m=\left[\left(l-\frac{\Delta}{2}\right)+S_{max}\cdot l+\frac{\Delta_m}{2}\right]\pm\frac{\Delta_m}{2}$	⑦$l'_{max}=L_m+\frac{\Delta_m}{2}+\frac{\delta_c}{2}-S_{min}\cdot l\leqslant l$
型芯上凸台或孔的中心线至侧壁距离	⑧$l_m=\left[\left(L+\frac{\Delta}{2}\right)+S_{min}\cdot L-\frac{\Delta_m}{2}\right]\pm\frac{\Delta_m}{2}$	⑧$L'_{min}=l_m-\frac{\Delta_m}{2}-\frac{\delta_c}{2}+\frac{\Delta}{2}-S_{max}\cdot L\geqslant L$

注：d'_{max}、D'_{min}、h'_{min}、H'_{max}、L'_{max}、l'_{max}、L'_{min}均为实际尺寸；δ_j为二个型芯可能发生最大偏移的平均值，$\delta_j=0.5(\delta_{j1}+\delta_{j2})$

公差带按极限尺寸计算成型零件尺寸时，既考虑到可能出现的最大和最小成型收缩率，也考虑到模具制造时可能产生的偏差，以及模具尚未磨损和磨损达到最大值等极端情况，要求在各种情况下所生产制品的尺寸达到精度。

（1）型腔径向尺寸的计算

1）如图 9-23 所示的中间公差带，注塑件的径向尺寸 d 即为外形或轴类尺寸，属于

被包容性质。其基本尺寸就是最大极限尺寸，$d = d_{max}$；制件尺寸的公差为 Δ，可得最小极限尺寸

$$d_{min} = d - \Delta$$

2）图 9-23 所示的右侧公差带，注塑件的最小极限尺寸 d_{min}，经最大成型收缩率 S_{max} 放大。可得到模具型腔的基本尺寸，即最小极限尺寸

$$D_m = D_{min} = S_{max}(d - \Delta)$$

在 d_{min} 的尺寸线上，可以得到注塑件尺寸 d 与模具尺寸 D_m 的关系式

$$d - \Delta = D_m - S_{max}(d - \Delta)$$

整理后得

$$D_m = S_{max}(d - \Delta) + d - \Delta$$

略去式中二阶微小值，标上模具制造公差 Δ_m，得公差带法计算型腔径向尺寸的设计式

$$D_m = [(1 + S_{max})d - \Delta]^{+\Delta_m} \tag{9-19}$$

3）图 9-23 所示的左侧公差带，模具型腔径向尺寸为包容尺寸，制造偏差是单向正偏差。预测型腔径向表面有磨损量 δ_c。则型腔的最大极限尺寸

$$D_{max} = D_m + \Delta_m + \delta_c$$

对于最小成型收缩率 S_{min}，预测制件外形的最大尺寸

$$d'_{max} = D_{max} - S_{min}(d - \Delta + \delta')$$

该 d'_{max} 实际尺寸线应在制件的公差带内，其中 δ' 为此实际尺寸的偏差范围。将以上 D_{max} 式代入后，略去式中二阶微小值，可得公差带法对型腔径向尺寸的校核式

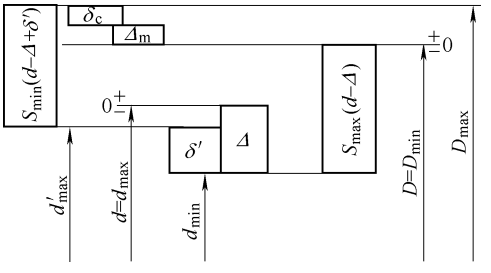


图 9-23　型腔径向尺寸与注塑件径向尺寸公差带示意图

$$d'_{max} = D_m + \Delta_m + \delta_c - S_{min} \cdot d \leqslant d \tag{9-20}$$

（2）型芯径向尺寸的计算

1）如图 9-24 所示的中间公差带，注塑件的径向尺寸 D 即为孔类尺寸，属于包容性质。其基本尺寸就是最小极限尺寸 $D = D_{min}$；制件尺寸的公差为 Δ，可得最大极限尺寸

$$D_{max} = D + \Delta$$

2）图 9-24 所示的左侧公差带，注塑件的最大极限尺寸 D_{max}，经最小成型收缩率 S_{min} 放大，可得到模具型芯的基本尺寸，也即最大极限尺寸

$$d_m = d_{max} = S_{min}(D + \Delta)$$

在 d_{max} 的尺寸线上，可以得到注塑件尺寸 D 与模具尺寸 d_m 的关系式

$$D + \Delta = d_m - S_{min}(D + \Delta)$$

整理后得

$$d_m = S_{min}(D + \Delta) + D + \Delta$$

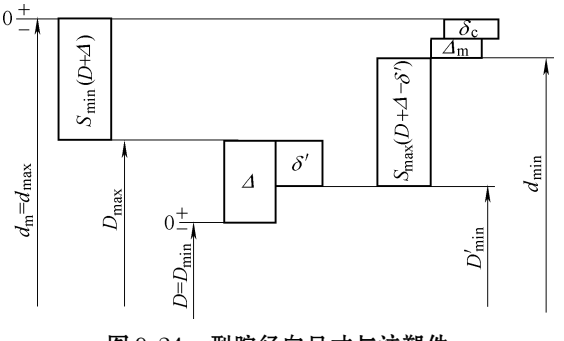


图 9-24　型腔径向尺寸与注塑件孔径向尺寸公差带示意图

略去式中二阶微小值，标上模具制造公差 Δ_m，得公差带法计算型芯径向尺寸的设计式

$$d_m = [(1+S_{min})D+\Delta]_{-\Delta_m} \tag{9-21}$$

3）图 9-24 所示的右侧公差带，模具型芯径向尺寸为被包容尺寸，制造偏差是单向负偏差。预测型芯径向表面有磨损量 δ_c，则型芯的最小极限尺寸

$$d_{min} = d_m - \Delta_m - \delta_c$$

对于最大成型收缩率 S_{max}，预测制件孔类的最大尺寸，从 D 尺寸线算起有

$$D'_{min} = d_{min} - S_{max}(D+\Delta-\delta')$$

该 D'_{min} 实际尺寸线应在制件的公差带内。其中 δ' 为此实际尺寸的偏差范围。将上 d_{min} 式代入后，略去式中二阶微小值，可得公差带法对型芯径向尺寸的校核式

$$D'_{min} = d_m - \Delta_m - \delta_c - S_{max} \cdot D \geqslant D \tag{9-22}$$

（3）型芯深度尺寸的计算　见图 9-25 所示的中间的注塑件的公差带，高度 h 为轴类的被包容尺寸。其基本尺寸就是最大极限尺寸，有 $h = h_{max}$。

图 9-25 所示的两边的型腔深度的公差带，深度 H_m 为孔类的包容尺寸。其基本尺寸就是最小极限尺寸，有 $H_m = H_{min}$。

模具型腔底面磨损量小，不易修磨。因此底面磨损量 $\delta_c = 0$。由于开模方向尺寸受分型面闭合误差影响，深度方向制造公差 Δ_m 要比径向尺寸的公差大。由公差带图可得计算型腔深度尺寸的设计式

$$H_m = [(1+S_{min})h - \Delta_m]^{+\Delta_m} \tag{9-23}$$

图 9-25 所示的 H'_{min} 尺寸线上，此实际尺寸可用偏差范围 δ' 预测，则有

$$H'_{min} = H_m - S_{min}(h-\delta')$$

H'_{min} 必须要大于注塑件的最小高度

$$h_{min} = h - \Delta$$

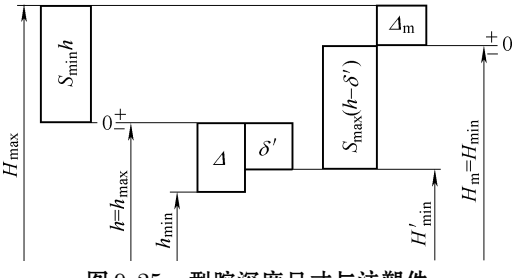


图 9-25　型腔深度尺寸与注塑件高度尺寸公差带示意图

两式联立后略去二阶微小值，可得公差带法对型腔深度尺寸的校核式

$$H'_{min} = H_m - S_{max} \cdot h + \Delta \geqslant h \tag{9-24}$$

（4）型芯高度尺寸的计算　对于最常见的组合式型芯，如图 9-26 所示采用轴肩安装固定。型芯高度的修缮方法有两种。其一是将型芯固定板磨去，称为型芯修高。另一种见图 9-26b，将型芯顶端面磨去修磨量，即型芯修短。这两种情况的公差带法型芯高度尺寸计算式是不同的。

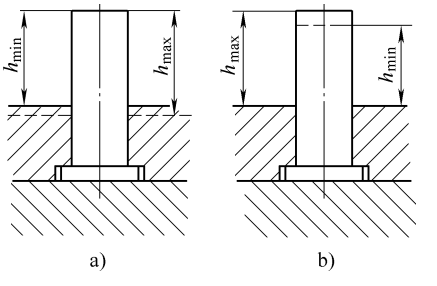


图 9-26　型芯高度的修磨情况

a）型芯修高　b）型芯修短

1）型芯易修高。见图 9-27 所示的中间的注塑件的公差带，孔的深度 H 为孔类的包容尺寸。其基本尺寸就是最小极限尺寸，有 $H = H_{min}$。图 9-27 所示的两边的型芯高度的公差带，高度 h_m 为轴类的被包容尺寸。其基本尺寸就是最大极限尺寸，有 $h_m = h_{max}$。

见图 9-26a 上型芯易修高，修磨余量在高度尺寸的制造公差 Δ_m 之中。修磨至最大极限尺寸 h_{max}。由公差带图 9-27 可得计算型芯高度尺寸的设计式

$$h_m = [(1+S_{max})H+\Delta_m]_{-\Delta_m} \quad (9\text{-}25)$$

图 9-27 所示注塑件实际尺寸 $H'_{max}=h_m-S_{min}(H+\delta')$，应小于孔深的最大极限尺寸 $H_{max}=H+\Delta$。略去二阶微小值，可得型芯易修高时，公差带法对型芯高度尺寸的校核式

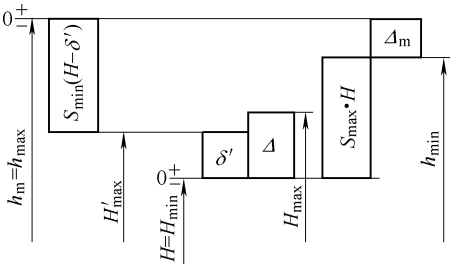


图 9-27　型芯易修高的高度尺寸与注塑件孔深尺寸公差带示意图

$$H'_{max}=h_m-S_{min}\cdot H-\Delta \leqslant H \quad (9\text{-}26)$$

2）型芯易修短。图 9-26b 所示型芯易修低，修磨余量在高度尺寸的制造公差 Δ_m 之中。修磨至最小极限尺寸 h_{min}。由公差带图 9-28，可得计算型芯高度尺寸的设计式

$$h_m = [(1+S_{min})H+\Delta]_{-\Delta_m} \quad (9\text{-}27)$$

图 9-28 所示注塑件实际尺寸 $H'_{max}=h_m-\Delta_m-S_{max}(H+\Delta-\delta')$，应大于孔深的最小极限尺寸 $H_{min}=H$。略去二阶微小值，可得型芯易修低时，公差带法对型芯高度尺寸的校核式

$$H'_{max}=h_m-S_{max}\cdot H-\Delta_m \geqslant H \quad (9\text{-}28)$$

（5）中心距尺寸的计算　图 9-29 中 δ_j 为两型芯可能发生的最大偏移 δ_{j1} 和 δ_{j2} 的平均值。经推导可知：公差带法计算中心距尺寸和按平均收缩率计算中心距的算式相同。式中 S_{cp} 是最大 S_{max} 和最小 S_{min} 的成型收缩率的平均值。有公差带法的中心距设计式

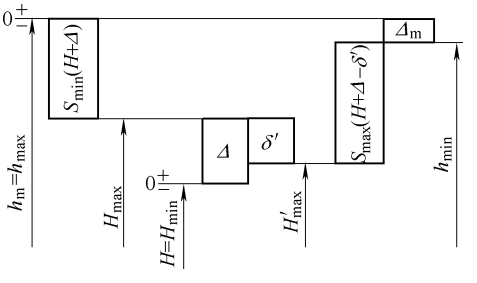


图 9-28　型芯易修低的高度尺寸与注塑件孔深尺寸公差带示意图

$$L_m=[(1+S_{cp})L]\pm\frac{\Delta_m}{2} \quad (9\text{-}29)$$

在图 9-29 中，注塑件可能出现的最大中心距，应该在制品公差范围内。注塑件上实际的最大中心距

$$L'_{max}=L_m+\frac{\Delta_m}{2}+\delta_j-S_{min}\left(L+\frac{\delta'}{2}\right)$$

注塑件上中心距的最大偏差

$$L+\frac{\Delta}{2}$$

两式联立，略去二阶微小值，可得公差带法中心距尺寸的第一校核式

$$L'_{max}=L_m+\frac{\Delta_m}{2}+\delta_j-S_{min}\cdot L-\frac{\Delta}{2}\leqslant L \quad (9\text{-}30)$$

图 9-29 中又有注塑件上实际的最小中心距

$$L'_{\min}=L_{\mathrm{m}}-\frac{\Delta_{\mathrm{m}}}{2}-\delta_{\mathrm{j}}-S_{\max}\left(L-\frac{\delta'}{2}\right)$$

注塑件上中心距的最小偏差

$$L-\frac{\Delta}{2}$$

两式联立，略去二阶微小值，可得公差带法中心距尺寸的第二校核式

$$L'_{\min}=L_{\mathrm{m}}-\frac{\Delta}{2}-\delta_{\mathrm{j}}-S_{\max}\cdot L+\frac{\Delta}{2}\geqslant L \tag{9-31}$$

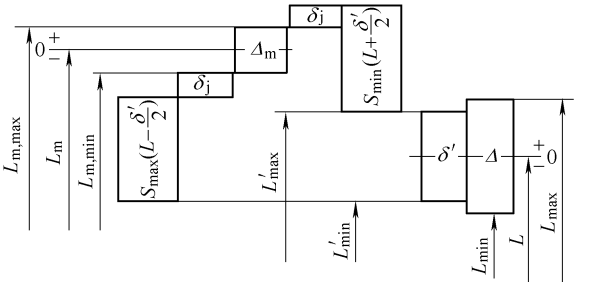


图 9-29　型芯或成型孔中心距与注塑件尺寸的公差带示意图

由于偏差的对称分布，以上两式只需校核其中一次就可确定合格。

在按表 9-10 中校核条件式，校核中出现超差时，通常可提高模具制造精度，减小 Δ_{m} 值；也有缩短预期的模具使用寿命，减小 δ_{c}；甚至改换注射物料，采用 $S_{\max}$ 与 $S_{\min}$ 接近（收缩率波动小的如玻璃纤维增强塑料）；必要和允许时，可降低注塑件尺寸精度即减小 Δ 值。

如果要校核新模具的成型尺寸，判断能否保证注塑件尺寸不至于超差，可用以下通式：

$$L'_{\max}=(1-S_{\min})L_{\mathrm{mmax}}\leqslant L_{\max}$$

和　　$$L'_{\min}=(1-S_{\max})L_{\mathrm{mmin}}\geqslant L_{\min}\quad(9\text{-}32)$$

式中　$L'_{\max}$、$L'_{\min}$——注塑件的实际最大、最小尺寸（mm）；

$L_{\max}$、$L_{\min}$——注塑件的最大、最小极限尺寸（mm）；

L_{mmax}、L_{mmin}——模具成型零件最大、最小极限尺寸（mm）。

满足上式要求，实际上 $L'_{\max}-L'_{\min}=\delta$，$L_{\max}-L_{\min}=\Delta$，故达到 $\delta\leqslant\Delta$，但不考虑磨损量。所以，在 $\delta_{\mathrm{c}}=0$ 或较小时，式（9-32）适用于平均收缩率和公差带两种方法的校核计算。

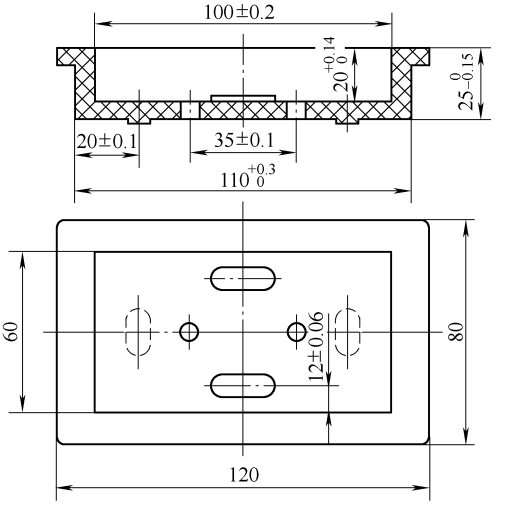


图 9-30　塑料制品图之二

现有如图 9-30 所示 PC 料成型注塑件，其物料 $S_{\max}=0.8\%$、$S_{\min}=0.5\%$，磨损量 $\delta_{\mathrm{c}}=0.02\mathrm{mm}$。用公差带法计算模具成型零件工作尺寸，并用新模具校核式验算是否超差，其结果见表 9-11。

4. 螺纹成型零件的工作尺寸计算

螺纹成型的型芯和型环，一般都采用平均收缩率的工作尺寸计算法。这里陈述的是 60°三角普通螺纹，且假定成型中塑料收缩均匀，牙尖角不变。

表 9-11　示例注塑件之二的成型零件尺寸计算　　（单位：mm）

图 9-30 尺寸	注塑件尺寸			模具尺寸			注塑件尺寸(见式 9-32)				校核结论
	规范化	Δ	SJ/T 10628	GB 1800	Δ_m	表 9-10	结果	L'_{max}	L'_{min}	δ	
$110^{+0.3}_{0}$	$110.3^{0}_{-0.3}$	0.3	自定	8	0.054	①	$110.882^{+0.054}_{0}$	110.381	109.995	0.386	超差
改 $110^{+0.5}_{0}$	$110.5^{0}_{-0.5}$	0.5	6	8	0.054	①	$110.884^{+0.054}_{0}$	110.383	109.997	0.386	合格
100 ± 0.2	$99.8^{+0.4}_{0}$	0.4	自定	8	0.054	②	$100.699^{0}_{-0.054}$	100.196	99.840	0.356	合格
$25^{0}_{-0.15}$	$25^{0}_{-0.15}$	0.15	5	8	0.033	③	$25.092^{+0.033}_{0}$	25.000	24.891	0.109	合格
$20^{+0.14}_{0}$	$20^{+0.14}_{0}$	0.14	5	8	0.033	④	$20.193^{0}_{-0.033}$	20.092	20.000	0.092	合格
35 ± 0.10	35 ± 0.10	0.20	自定	8	0.039	⑥	35.228 ± 0.020	35.072	34.926	0.146	合格
20 ± 0.10	20 ± 0.10	0.20	自定	8	0.033	⑦	20.077 ± 0.017	19.994	19.900	0.094	合格
12 ± 0.06	12 ± 0.06	0.12	5	8	0.027	⑧	12.106 ± 0.014	12.059	11.995	0.064	合格

（1）径向工作尺寸计算　螺纹型芯和型环径向尺寸计算与普通型芯和型环的计算原理相同，但需适当放大螺纹型芯径向尺寸，适当缩小螺纹型环的径向尺寸，以补偿各种成型误差，改善旋入性。

1）螺纹型芯工作尺寸计算式

$$d_{m大} = [D_{大}(1 + S_{cp}) + \Delta_{中}]_{-\Delta_m} \tag{9-33a}$$

$$d_{m中} = [D_{中}(1 + S_{cp}) + \Delta_{中}]_{-\Delta_m} \tag{9-33b}$$

$$d_{m小} = [D_{小}(1 + S_{cp}) + \Delta_{中}]_{-\Delta_m} \tag{9-33c}$$

式中　$d_{m大}$、$d_{m中}$、$d_{m小}$——分别为螺纹型芯的大、中、小径尺寸（mm）；

$D_{大}$、$D_{中}$、$D_{小}$——分别为注塑件内螺纹的大、中、小径尺寸（mm）；

Δ_m——螺纹型芯的制造公差，查表 9-12；

$\Delta_{中}$——注塑件内螺纹的中径公差（mm）。

$\Delta_{中}$可按金属件《普通螺纹公差与配合》GB 197，取 6 ~ 8 级精度，或者查表 9-12 取螺纹型芯中径制造公差 Δ_m 的 5 倍。

2）螺纹型环工作尺寸计算式

$$D_{m大} = [d_{大}(1 + S_{cp}) - \Delta_{中}]^{+\Delta_m} \tag{9-34a}$$

$$D_{m中} = [d_{中}(1 + S_{cp}) - \Delta_{中}]^{+\Delta_m} \tag{9-34b}$$

$$D_{m小} = [d_{小}(1 + S_{cp}) - \Delta_{中}]^{+\Delta_m} \tag{9-34c}$$

式中　$D_{m大}$、$D_{m中}$、$D_{m小}$——分别为螺纹型芯的大、中、小径尺寸（mm）；

$d_{大}$、$d_{中}$、$d_{小}$——分别为注塑件外螺纹的大、中、小径尺寸（mm）；

$\Delta_{中}$——注塑件外螺纹的中径公差（mm）。

这里 $\Delta_{中}$可按金属件螺纹 GB 197，取 7 ~ 9 级精度，或者查表 9-12，取螺纹型环中径制造公差 Δ_m 的 5 倍。

表 9-12　普通螺纹的螺纹型芯和型环的制造公差 Δ_m　　（单位：mm）

	螺纹大径	M3 ~ M12	M14 ~ M33	M36 ~ M45	M48 ~ M68
粗牙螺纹	中径制造公差 Δ_m	0.02	0.03	0.04	0.05
	大、小径制造公差 Δ_m	0.03	0.04	0.05	0.06

（续）

细牙螺纹	螺纹大径	M3 ~ M22	M24 ~ M52	M56 ~ M68
	中径制造公差 Δ_m	0.02	0.03	0.04
	大、小径制造公差 Δ_m	0.03	0.04	0.05

（2）螺距尺寸计算　与注塑件的内外螺纹配旋，两者收缩率相同，一般不考虑螺距的成型收缩。注塑件螺纹与金属螺纹配旋时，注塑件螺纹要考虑螺距的成型收缩。模具上型芯或型环的螺距应加大，是不规则小数，因此加工困难，要在车床上配置特殊齿数的交换齿轮来车制螺纹，或者偏移车床上尾座，并用斜置靠模上的移动车刀来切削。

螺纹型芯或型环上的螺距尺寸计算式

$$p_m = [p(1 + S_{cp})] \pm \frac{\Delta_m}{2} \tag{9-35}$$

式中　p_m——螺纹型芯或型环上的螺距尺寸（mm）；

p——注塑件上螺纹的螺距尺寸（mm）；

Δ_m——螺纹型芯或型环上螺距的制造公差，查表 9-13。

表 9-13　螺纹型芯或型环螺距的制造公差　　（单位：mm）

螺纹公称直径	螺纹旋合长度	螺距制造公差 Δ_m
M3 ~ M10	~12	0.01 ~0.03
M12 ~ M22	>12 ~20	0.02 ~0.04
M24 ~ M68	>20	0.03 ~0.05

在注塑件螺纹与金属螺纹的旋合长度较短时，旋合少于 7 ~8 牙，或旋合长度小于可补偿的极限长度 L_{max}，而且应用式（9-33）或式（9-34），加大了螺纹型芯或缩小了型环的径向尺寸，可不考虑螺距收缩率。螺距为标准系列尺寸。L_{max}用塑料收缩率 S 和注塑件螺纹的 $\Delta_{中}$计算

$$L_{max} = \frac{0.432\Delta_{中}}{S} \tag{9-36}$$

9.3　型腔模板和垫板构件的力学计算

凹模板和动模垫板是构成型腔的主要受力构件。在注射周期中，注射模的工作状态可视为型腔压力高达 100MPa 的耐高压容器。因此，对其进行强度和刚度的设计计算和校核必不可少。对多种式样的、型腔复杂的凹模板和垫板进行强度和刚度的高精度计算，需按模具结构进行力学分析。也需用计算机技术，以有限元和边界元的数值分析方法进行。

9.3.1　中小型模具的力学计算

中小型注射模是指型腔中塑料容量 3000cm^3 以下的模具。它们的力学计算应以强度条件为主。

1. 强度和刚度计算条件

本节介绍用传统的力学方法，解决大量的一般性的型腔强度和刚度计算问题，为此，将多种多样型腔结构形式模型化，归类为圆形型腔和矩形型腔的整体式及组合式，共四种凹模结构，如图 9-31 ~ 图 9-34 所示。简化的主要特征是垫块之间跨距，与型腔或型芯的几何尺寸相近。它们的几何参数规定如下：

R——模板外形半径，即矩形模板的外形最小尺寸（mm）；

r——型腔内半径（mm）；

S——型腔壁厚（mm）；

h——型腔深度（mm）；

H——模板高度（mm）；

T——垫板厚度（mm）；

l——矩形型腔长边长度（mm）；

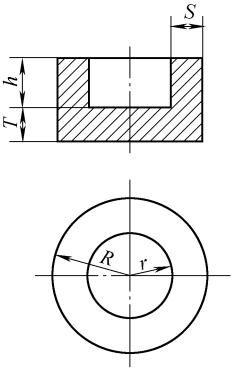


图 9-31　整体式圆筒形型腔

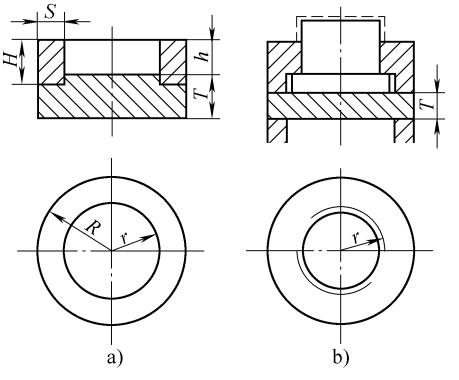


图 9-32　组合式圆筒形型腔

a）型腔底板　b）型芯垫板

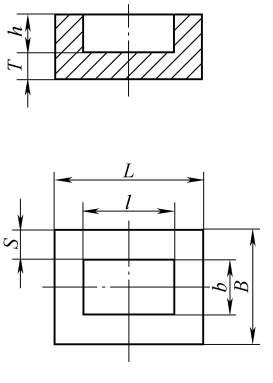


图 9-33　整体式矩形型腔

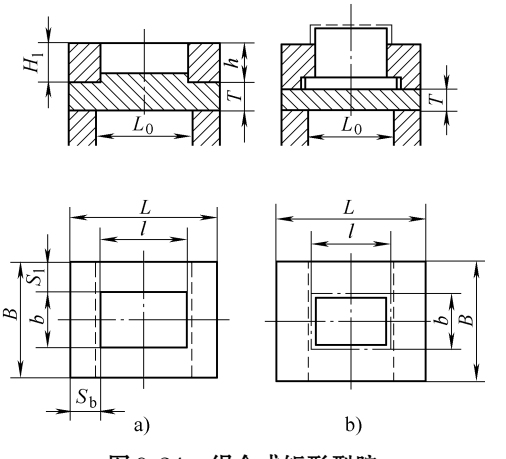


图 9-34　组合式矩形型腔

a）型腔底板　b）型芯垫板

b——矩形型腔短边长度，或与支脚 L_0 方向垂直的型腔边长（mm）；

L——模板的长边长度（mm）；

B——模板的短边长度，或与支脚 L_0 方向垂直的模板边长（mm）；

L_0——支脚间的间距（mm）；

S_1——矩形型腔以长边为计算对象的壁厚（mm）；

S_b——矩形型腔以短边为计算对象的壁厚（mm）。

强度、刚度计算中的力学参量有

p——型腔内最大的熔体压力（N/mm^2），由 8.3 节和表 8-3 型腔压力推算方法确定，一般为 30 ~ 50N/mm^2；

E——模具钢材的弹性模量（N/mm^2），中碳钢 $E = 2.1 \times 10^5 N/mm^2$，预硬化塑料模具钢 $E = 2.2 \times 10^5 N/mm^2$；

$[\sigma]$——模具强度计算的许用应力（N/mm^2），中碳钢 $[\sigma] = 160N/mm^2$，是由屈服极限 $\sigma_s = 300N/mm^2$ 的安全系数 $n = 1.875$ 算出；预硬化塑料模具钢 $[\sigma] = 300N/mm^2$，由表 9-14 的 σ_s 决定。

$[\delta]$——模具刚度计算许用变形量（mm），主要根据表 9-16 计算式确定；

μ——模具钢材的泊松比，$\mu = 0.25$。

表 9-14　常用模具材料的屈服极限

钢　　材	屈服强度 $\sigma_s/(N/mm^2)$	钢　　材	屈服强度 $\sigma_s/(N/mm^2)$
SM45 调质	350 ~ 600	4Cr5MoSiV1(H13)空冷硬化	850 ~ 1000
SM55 调质	380 ~ 660	4Cr13 空冷硬化	800 ~ 900
3CrMo(P20)预硬化	750 ~ 1250	0Cr17NiCu4Nb(PCR,17-PH)固溶时效	725 ~ 1100
4Cr5MoSiV(H11)空冷硬化	800 ~ 900	10Ni3CuAlVS(PMS)时效	1170 ~ 1260

由理论分析和生产实际证实，在塑料熔体的高压作用下，小尺寸模具主要是强度问题。首先要防止模具的塑性变形和断裂破坏，因此，用强度条件式进行凹模壁厚和底板厚度设计计算，再用刚度条件式进行校验。对于大尺寸模具主要存在刚度问题，要防止模具过大的弹性变形，因此，须先确定许用变形量 $[\delta]$，用刚度条件式进行壁厚和底板厚度设计计算，再用强度条件式进行校验。设计最终达到强度和刚度条件都能满足。

图 9-35 是组合式圆筒形型腔（型腔压力 $p = 50N/mm^2$、许用变形量 $[\delta] = 0.05mm$、许用应力 $[\sigma] = 160N/mm^2$），分别按强度、刚度条件计算所得侧壁厚度 s 随着型腔基本尺寸 r 变化的曲线。各种模型的凹模结构，均有类似的厚度变化趋势。

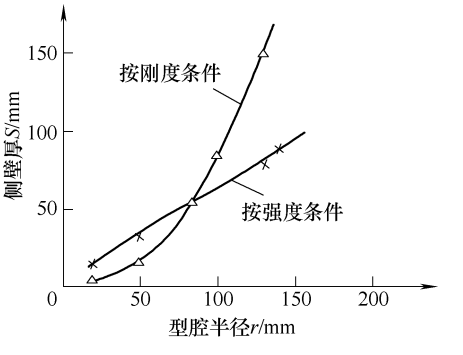


图 9-35　组合式圆筒形型腔侧壁厚度、随型腔 r 的变化

确定型腔许用变形量 $[\delta]$ 通常从以下三

方面考虑：

1）从模具型腔不发生溢料考虑。组合式型腔中的一些配合接触面，当高压塑料熔体注入时会产生足以溢料的间隙，故由不同塑料的黏度特性，决定许用变形量。其刚度条件见表 9-15。

表 9-15　组合式型腔的刚度条件

黏度特性	塑料品种	许用变形量/mm
低黏度塑料	PA、PE、PP、POM	≤0.025 ~ 0.04
中黏度塑料	PS、ABS、PMMA	≤0.05
高黏度塑料	PC、PSU、PPO	≤0.06 ~ 0.08

2）从保证注塑件尺寸精度考虑。模具型腔不能产生过大的、使注塑件超差的变形量。型腔壁厚的许用变形量，应为注塑件尺寸及其公差 Δ 的函数。而模具的尺寸精度又跟注塑件精度有对应关系。对此，表 9-16 提供了方便，直接由尺寸 W 的关系式来计算［δ］值。

表 9-16　注射模刚度计算的许用变形量［δ］计算式

注塑件精度 SJ/T 10628		4 ~ 5 级	6 ~ 10 级
模具制造精度 GB/Tl800		IT7 ~ IT8	IT9 ~ IT10
组合式型腔	低黏度塑料如 PE、PP、PA	$[\delta]=15i_1$	$[\delta]=25i_1$
	中等黏度塑料如 PS、ABS、PMMA	$[\delta]=15i_2$	$[\delta]=25i_2$
	高黏度塑料如 PC、PSF、PPO	$[\delta]=15i_3$	$[\delta]=25i_3$
整体式型腔		$[\delta]15i_2$	$[\delta]25i_2$

注：W 应是影响模具变形的最大尺寸。若圆筒形是 r 或 h，若矩形是 l 或 L_0。W 用 mm 代入，i 单位为 mm；$i_1=0.35W^{\frac{1}{5}}+0.001W$；$i_2=0.45W^{\frac{1}{5}}+0.001W$；$i_3=0.55W^{\frac{1}{5}}+0.001W$

例如有个 ABS 框形容器，要求达到 SJ/T 10628 的 5 级精度，模具为 IT8 级精度，且为组合式型腔结构。注塑件尺寸为 1220mm × 300mm × 50mm，以长边 $W=l=1220$mm 为计算尺寸查表 9-16，代入得

$$[\delta]=15i_2=15[0.45W^{1/5}+0.001W]=15\times[0.45(1220)^{1/5}+0.001\times1220]$$
$$=46\mu m=0.046mm$$

3）从保证塑件顺利脱模考虑。当模腔的弹性变形量超过注塑件的收缩值时，则注塑件的周边将被型腔紧紧包住而难以脱出。因此，型腔的变形量应小于注塑件壁厚的收缩值。一般情况下，符合不溢料和精度要求的［δ］值见表 9-16，也能满足脱模要求。

2. 刚度和强度条件计算公式

对于中小型注射模，支脚间间距 L_0 与动模型腔或型芯尺寸相近时，对照图 9-31 ~ 图 9-34，计算式如式（9-37）~ 式（9-53）。

（1）刚度条件计算式

1）组合式圆筒形型腔侧壁厚度

$$R=r\left[\frac{\frac{[\delta]E}{rp}+1-\mu}{\frac{[\delta]E}{rp}-1-\mu}\right]^{1/2}=r\left(\frac{[\delta]E+0.75rp}{[\delta]E-1.25rp}\right)^{1/2}_{(W=r)} \tag{9-37}$$

（[δ] 的计算尺寸，$W=r$）

2）整体式圆筒形型腔侧壁厚度

$$S=\left(\frac{3ph^4}{2E[\delta]}\right)^{1/3}=1.14h\left(\frac{ph}{E[\delta]}\right)^{1/3}_{(W=h)} \tag{9-38}$$

3）组合式矩形型腔侧壁厚度

$$S=\left(\frac{5pl^4h}{32E[\delta]H}\right)^{1/3}=0.54l\left(\frac{plh}{E[\delta]H}\right)^{1/3}_{(W=l)} \tag{9-39}$$

4）整体式矩形型腔侧壁厚度

$$S=\left(\frac{Cph^4}{\phi_1E[\delta]}\right)^{1/3}=h\left(\frac{Cph}{\phi_1E[\delta]}\right)^{1/3}_{(W=l)} \tag{9-40}$$

其中

$$C=\frac{3(l^4/h^4)}{2(l^4/h^4)+96}$$

$\frac{b}{l}=1$ ， $\phi_1=0.6$；

$\frac{b}{l}=0.6$ ， $\phi_1=0.7$；

$\frac{b}{l}=0.4$ ， $\phi_1=0.8$。

其中 ϕ_1 还可从图 9-40，由 $\alpha=b/l$ 查到。

5）组合式圆筒形型腔底板厚度或动模垫板厚度

$$T=\left(0.74\frac{pr^4}{E[\delta]}\right)^{1/3}=0.91r\left(\frac{pr}{E[\delta]}\right)^{1/3}_{(W=r)} \tag{9-41}$$

6）整体式圆筒形型腔底板厚度

$$T=\left(0.175\frac{pr^4}{E[\delta]}\right)^{1/3}=0.56r\left(\frac{pr}{E[\delta]}\right)^{1/3}_{(W=r)} \tag{9-42}$$

7）组合式矩形型腔底板厚度或动模垫板厚度

$$T=\left(\frac{5pbL_o^4}{32E[\delta]B}\right)^{1/3}=0.54L_o\left(\frac{pbL_o}{E[\delta]B}\right)^{1/3}_{(W=L_o)} \tag{9-43}$$

8）整体式矩形型腔底板厚度

$$T=\left(\frac{C'pb^4}{E[\delta]}\right)^{1/3}=b\left(\frac{C'pb}{E[\delta]}\right)^{1/3}_{(W=l)} \tag{9-44}$$

其中

$$C'=\frac{l^4/b^4}{32[(l^4/b^4)+1]}$$

（2）强度条件计算式

1）组合式圆筒形型腔侧壁厚度

$$S=r\left[\left(\frac{[\sigma]}{[\sigma]-2p}\right)^{1/2}-1\right]\qquad([\sigma]>2p)\tag{9-45}$$

2）整体式圆筒形型腔侧壁厚度

$$S=r\left[\left(\frac{[\sigma]}{[\sigma]-2p}\right)^{1/2}-1\right]\qquad([\sigma]>2p)\tag{9-46}$$

3）组合式矩形型腔侧壁厚度以长边为计算对象

$$\sigma_{\max}=\sigma_{\mathrm{p}}+\sigma_{\mathrm{b}}=\frac{phb}{2HS_1}+\frac{phl^2}{2HS_1^2}\leqslant[\sigma]\tag{9-47}$$

式中，σ_{p} 为拉伸应力；σ_{b} 是弯曲应力。

4）组合式矩形型腔侧壁厚度以短边为计算对象

$$\sigma_{\max}=\sigma_{\mathrm{b}}+\sigma_{\mathrm{p}}=\frac{phb^2}{2HS_{\mathrm{b}}^2}+\frac{phl}{2HS_{\mathrm{b}}}\leqslant[\sigma]\tag{9-48}$$

式中，σ_{p} 为拉伸应力；σ_{b} 是弯曲应力。

5）整体式矩形型腔侧壁厚度

$$\begin{aligned}&\frac{h}{l}\geqslant0.41\qquad S=\left(\frac{pl^2}{2[\sigma]}\right)^{1/2}=0.71l\left(\frac{p}{[\sigma]}\right)^{1/2}\\&\frac{h}{l}<0.41\qquad S=\left(\frac{3ph^2}{[\sigma]}\right)^{1/2}=1.73h\left(\frac{p}{[\sigma]}\right)^{1/2}\end{aligned}\tag{9-49}$$

6）组合式圆筒形型腔底板厚度或动模垫板厚度

$$T=\left(\frac{3(3+\mu)pr^2}{8[\sigma]}\right)^{1/2}=1.10r\left(\frac{p}{[\sigma]}\right)^{1/2}\tag{9-50}$$

7）整体式圆筒形型腔底板厚度

$$T=\left(\frac{3pr^2}{4[\sigma]}\right)^{1/2}=0.87r\left(\frac{p}{[\sigma]}\right)^{1/2}\tag{9-51}$$

8）组合式矩形型腔底板厚度或动模垫板厚度

$$T=\left(\frac{3pbl^2}{4B[\sigma]}\right)^{1/2}=0.87l\left(\frac{pb}{B[\sigma]}\right)^{1/2}\tag{9-52a}$$

$$T=\left(\frac{3pbL_{\mathrm{o}}^2}{4B[\sigma]}\right)^{1/2}=0.87L_{\mathrm{o}}\left(\frac{pb}{B[\sigma]}\right)^{1/2}\tag{9-52b}$$

9）整体式矩形型腔底板厚度

$$T=\left(\frac{pb^2}{2[\sigma]}\right)^{1/2}=0.71b\left(\frac{p}{[\sigma]}\right)^{1/2}\tag{9-53}$$

应用以上计算式，可算得模板结构尺寸 S 和 T，应取刚度和强度计算值中的大值为计算结果。或者将以上各式变换成 $\delta\leqslant[\delta]$ 和 $\sigma\leqslant[\sigma]$ 的校核式，两者均合格的 S 或 T 值，才是计算的正确结果。

［**例**］　聚碳酸酯的圆筒形注塑件，已知型腔深 37mm，内径 84mm。若分别采用组合式和整体式型腔，试求其凹模侧壁厚度。

［**解**］　模具用 45 调质钢；弹性模量 $E=2.1\times10^5\mathrm{N/mm^2}$；强度计算的许用应力 $\sigma=160\mathrm{N/mm^2}$；钢材泊松比 $\mu=0.25$；型腔压力 $p=50\mathrm{N/mm^2}$；代入计算式时型腔半径

$r=42\text{mm}$，深度 $h=37\text{mm}$。

由表 9.3-3，对于高黏度 PC 物料、模具制造精度 IT9 级时，组合式型腔有许用变形量

$[\delta]=25i_3$，　　且 $W=r=42$

$i_3=0.55W^{1/5}+0.001W=(0.55\sqrt[5]{42}+0.001\times42)\mu\text{m}=1.203\mu\text{m}$

$[\delta]=25\times1.203\mu\text{m}=30.1\mu\text{m}=0.030\text{mm}$

又对于整体式的 IT9 级型腔，有许用变形量

$[\delta]=25i_2$，　　且 $W=r=37$

$i_2=0.45W^{1/5}+0.001W=(0.45\sqrt[5]{37}+0.001\times37)\mu\text{m}=0.964\mu\text{m}$

所以　$[\delta]=25\times0.964\mu\text{m}=24.1\mu\text{m}=0.024\text{mm}$

1）组合式圆筒形型腔壁厚

① 按刚度条件计算，由式（9-37）

$$R=r\left[\frac{\frac{[\delta]E}{rp}+1-\mu}{\frac{[\delta]E}{rp}-1-\mu}\right]^{1/2}=42\left[\frac{\frac{0.03\times2.1\times10^5}{42\times50}+1-0.25}{\frac{0.03\times2.1\times10^5}{42\times50}-1-0.25}\right]^{1/2}\text{mm}=61.5\text{mm}$$

其壁厚 $S=R-r=61.5-42=19.5\text{mm}$

② 按强度条件计算，由式（9-45）

$$S=r\left[\left(\frac{[\sigma]}{[\sigma]-2p}\right)^{1/2}-1\right]=42\left[\left(\frac{160}{160-2\times50}\right)^{1/2}-1\right]\text{mm}=26.6\text{mm}$$

其模板最小半径 $R=r+S=42+26.6=68.6\text{mm}$

比较刚度和强度条件计算结果，组合式圆筒形型腔壁厚至少为 27mm。

2）整体式圆筒形型腔壁厚

① 按刚度条件计算，由式（9-38）

$$S=\left(\frac{3ph^4}{2E[\delta]}\right)^{1/3}=\left(\frac{3\times50\times37^4}{2\times2.1\times10^5\times0.024}\right)^{1/3}\text{mm}=30.3\text{mm}$$

②按强度条件计算，由式（9-46）

$$S=r\left[\left(\frac{[\sigma]}{[\sigma]-2p}\right)^{1/2}-1\right]=42\left[\left(\frac{160}{160-2\times50}\right)^{1/2}-1\right]\text{mm}=26.6\text{mm}$$

比较刚度和强度条件计算结果，整体式圆筒形型腔壁厚至少为 31mm。

［例］　ABS 矩形盒及其注射模结构见图 9-36；型腔压力为 50MPa；模具材料选用 45 号；尺寸如图所示；模具制造精度按 GB/T1800 的 IT9 级。计算定模框壁厚 S_1 及型芯垫板厚度 S_2。若改用整体式凹模，定模框侧壁厚 S_1 及底板厚多少？

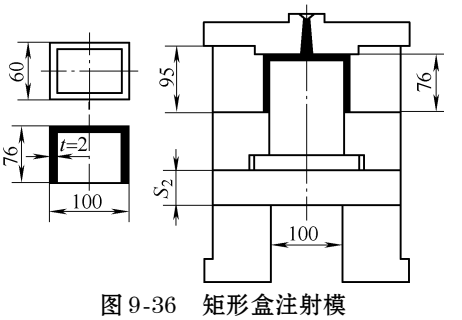


图 9-36　矩形盒注射模

［解］　型腔压力 $p=50\text{MPa}=50\text{N/mm}^2$；弹性模量 $E=2.1\times10^5\text{N/mm}^2$；强度计算的

许用应力 $[\sigma]=160\text{N/mm}^2$；$l=L_o=100\text{mm}$；$H=95\text{mm}$；$h=76\text{mm}$；$b=60\text{mm}$。

（1）组合式矩形型腔

1）计算侧壁厚度

① 按刚度条件计算，ABS 塑料组合式结构 IT9 精度，由表 9-16 得

$$[\delta]=25i_2,\qquad \text{且 } W=l=L_o=100\text{mm}$$

$$i_2=0.45W^{1/5}+0.001W=(0.45\sqrt[5]{100}+0.001\times100)\mu\text{m}=1.23\mu\text{m}$$

$$[\delta]=25\times1.23\mu\text{m}=30.76\mu\text{m}=0.031\text{mm}$$

由式（9-39）组合式矩形型腔侧壁厚度

$$S=\left(\frac{5pl^4h}{32E[\delta]H}\right)^{1/3}=\left(\frac{5\times50\times100^4\times76}{32\times2.1\times10^5\times0.031\times95}\right)^{1/3}\text{mm}=45.79\text{mm}$$

② 按强度条件计算，组合式矩形型腔侧壁厚度以长边为计算对象，由式（9-47）

$$\sigma_{max}=\sigma_p+\sigma_b=\frac{phb}{2HS_1}+\frac{phl^2}{2HS_1^2}=\left(\frac{50\times76\times60}{2\times95\times S_1}+\frac{50\times76\times100^2}{2\times95\times S_1^2}\right)\text{N/mm}^2=160\text{N/mm}^2\leqslant[\sigma]$$

整理得　　$S_1^2-7.5S_1-1250=0$

解得　　$S_1=39.30\text{mm}$

组合式矩形型腔侧壁厚度以短边为计算对象，由式（9-48）

$$\sigma_{max}=\sigma_b+\sigma_p=\frac{phb^2}{2HS_b^2}+\frac{phl}{2HS_b}=\frac{50\times76\times60^2}{2\times95\times S_b^{\ 2}}+\frac{50\times76\times100}{2\times95\times S_b}=160\text{N/mm}^2\leqslant[\sigma]$$

整理得　　$S_b^2-12.5S_b-450=0$

解得　　$S_b=28.40\text{mm}$

组合式矩形型腔侧壁厚度至少为 $S_1=46\text{mm}$

③ 按强度条件的近似算法

ⓘ 组合式矩形型腔侧壁厚度以长边为计算对象

$$C=\left[1+0.5\left(\frac{b}{l}\right)^2\right]^{1/2}=\left[1+0.5\left(\frac{60}{100}\right)^2\right]^{1/2}=1.086$$

$$S_1=Cl\sqrt{\frac{ph}{2H[\sigma]}}=1.086\times100\sqrt{\frac{50\times76}{2\times95\times160}}\text{mm}=38.4\text{mm}$$

ⓘⓘ 组合式矩形型腔侧壁厚度以短边为计算对象

$$C=\left[1+0.5\left(\frac{l}{b}\right)^2\right]^{1/2}=\left[1+0.5\left(\frac{100}{60}\right)^2\right]^{1/2}=1.354$$

$$S_1=Cb\sqrt{\frac{ph}{2H[\sigma]}}=1.354\times60\sqrt{\frac{50\times76}{2\times95\times160}}\text{mm}=28.7\text{mm}$$

2）型芯垫板厚度

① 按刚度条件计算组合式矩形型腔动模垫板厚度，由式（9-43）

$$B=2S_1+b=2\times46+60=152\text{mm}$$

$$T=\left(\frac{5pbL_o^4}{32E[\delta]B}\right)^{1/3}=\left(\frac{5\times50\times60\times100^4}{32\times2.1\times10^5\times0.031\times152}\right)^{1/3}\text{mm}=36.2\text{mm}$$

② 按强度条件计算组合式矩形型腔动模垫板厚度，由式（9-52b）

$$T=\left(\frac{3pbl^2}{4B[\sigma]}\right)^{1/2}=\left(\frac{3\times50\times60\times100^2}{4\times152\times160}\right)^{1/2}\text{mm}=30.4\text{mm}$$

组合式矩形型腔的型芯垫板厚度至少为 $S_2=T=37\text{mm}$

（2）整体式动模型腔

1）计算侧壁厚度

ABS 塑料整体式结构 IT9 精度，由表 9-16 得

$$[\delta]=25i_2,\qquad \text{且 } W=l=L_o=100\text{ mm}$$

$$[\delta]=25\times1.23\mu\text{m}=30.76\mu\text{m}=0.031\text{mm}$$

① 按刚度条件计算整体式矩形型腔侧壁厚度，由式（9-40）

$$C=\frac{3(l^4/h^4)}{2(l^4/h^4)+96}=\frac{3\left(\frac{100}{76}\right)^4}{2\left(\frac{100}{76}\right)^4+96}=0.088$$

$$\frac{b}{l}=\frac{76}{100}=0.76\quad,\quad \phi_1=0.62$$

$$S=\left(\frac{Cph^4}{\phi_1E[\delta]}\right)^{1/3}=\left(\frac{0.088\times50\times76^4}{0.62\times2.1\times10^5\times0.031}\right)^{1/3}\text{mm}=33.1\text{mm}$$

② 按强度条件计算整体式矩形型腔侧壁厚度，由式（9-49）

$$\frac{h}{l}=\frac{76}{100}=0.76\geqslant0.41$$

$$S=\left(\frac{pl^2}{2[\sigma]}\right)^{1/2}=\left(\frac{50\times100^2}{2\times160}\right)^{1/2}\text{mm}=39.5\text{mm}$$

整体式矩形型腔侧壁厚度至少为 $S_1=40\text{mm}$

2）型芯垫板厚度

ABS 塑料整体式结构 IT9 精度，由表 9-16 得

$$[\delta]=25i_2,\qquad \text{且 } W=l=L_o=100\text{ mm}$$

$$[\delta]=25\times1.23\mu\text{m}=30.76\mu\text{m}=0.031\text{mm}$$

① 按刚度条件计算整体式矩形型腔型芯垫板厚度，由式（9-44）

$$C'=\frac{l^4/b^4}{32[(l^4/b^4)+1]}=\frac{\left(\frac{100}{60}\right)^4}{32\times\left[\left(\frac{100}{60}\right)^4+1\right]}=0.028$$

$$T=\left(\frac{C'pb^4}{E[\delta]}\right)^{1/3}=\left(\frac{0.028\times50\times60^4}{2.1\times10^5\times0.031}\right)^{1/3}\text{mm}=14.1\text{mm}$$

② 按强度条件计算整体式矩形型腔型芯垫板厚度，由式（9-53）

$$T=\left(\frac{pb^2}{2[\sigma]}\right)^{1/2}=\left(\frac{50\times60^2}{2\times160}\right)^{1/2}\text{mm}=23.7\text{mm}$$

整体式矩形型腔型芯垫板厚度至少为 $S_2=T=24\text{mm}$

［又例］　有矩形型腔结构尺寸如图9-37所示，成型ABS矩形盒。型腔压力为50MPa；模具材料选用45号钢；模具制造精度按GB/T 1800—1998的IT9级，求型腔侧壁厚度 S_1 和型腔底板厚度 S_2。

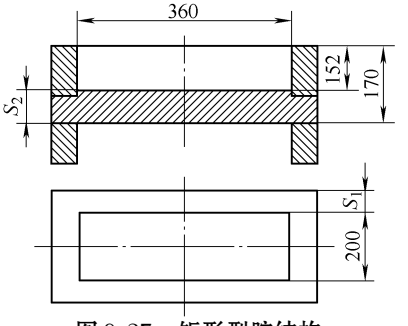


图9-37　矩形型腔结构

［解］　型腔压力 $p=50\text{MPa}=50\text{N/mm}^2$；弹性模量 $E=2.1\times10^5\text{N/mm}^2$；强度计算的许用应力 $[\sigma]=160\text{N/mm}^2$，$l=L_o=360\text{mm}$；$H=170\text{mm}$；$h=152\text{mm}$；$b=200\text{mm}$。

1）组合式矩形型腔侧壁厚度

① 按刚度条件计算，ABS塑料组合式结构IT9精度，由表9-16得

$$[\delta]=25i_2,\qquad \text{且 } W=l=L_o=360\text{mm}$$

$$i_2=0.45W^{1/5}+0.001W=(0.45\sqrt[5]{360}+0.001\times360)\mu\text{m}=1.82\mu\text{m}$$

$$[\delta]=25\times1.82\mu\text{m}=45.5\mu\text{m}=0.046\text{mm}$$

由式（9-29）组合式矩形型腔侧壁厚度

$$S=\left(\frac{5pl^4h}{32E[\delta]H}\right)^{1/3}=\left(\frac{5\times50\times160^4\times152}{32\times2.1\times10^5\times0.046\times170}\right)^{1/3}\text{mm}=77.96\text{mm}$$

② 按强度条件计算，组合式矩形型腔侧壁厚度以长边为计算对象，由式（9-47）

$$\sigma_{\max}=\sigma_p+\sigma_b=\frac{phb}{2HS_1}+\frac{phl^2}{2HS_1^2}=\frac{50\times152\times200}{2\times180\times S_1}+\frac{50\times152\times360^2}{2\times180\times S_1^2}=160\text{N/mm}^2=[\sigma]$$

整理得　　$S_1^2-26.4S_1-17100=0$

解得　　$S_1=118.2\text{mm}$

组合式矩形型腔侧壁厚度至少为 $S_1=119\text{mm}$

2）组合式矩形型腔底板厚度

① 按刚度条件计算组合式矩形型腔动模底板厚度，由式（9-43）

$$B=2S_1+b=(2\times119+200)\text{mm}=438\text{mm}$$

$$T=\left(\frac{5pbL_o^4}{32E[\delta]B}\right)^{1/3}=\left(\frac{5\times50\times200\times360^4}{32\times2.1\times10^5\times0.046\times438}\right)^{1/3}\text{mm}=183.7=184\text{mm}$$

② 按强度条件计算组合式矩形型腔动模垫板厚度，由式（9-52a）

$$T=\left(\frac{3pbl^2}{4B[\sigma]}\right)^{1/2}=\left(\frac{3\times50\times200\times360^2}{4\times438\times160}\right)^{1/2}\text{mm}=117.7=118\text{mm}$$

组合式矩形型腔的底板厚度至少为 $S_2=T=184\text{mm}$

为减小底板厚度，可加支撑矩形板或顶撑圆柱棒来减小跨度。

9.3.2　大中型模具侧壁的刚度计算

前已论及大尺寸模具的刚度十分重要。大型注射模的动模，有用模框镶拼的，有镶底板的，有与定模间用斜面镶条或企口辅助定位的，有许多提高模具刚度的结构设计。为保证大型模具有足够刚性，对于各种结构设计有专门型腔侧壁厚度、刚度

的计算式。

1. 镶底矩形型腔侧壁厚度的计算

镶底矩形型腔结构如图 9-38 所示，可视为内表面受均布载荷的矩形框架模型。按刚度条件考量，得侧壁厚度的计算式

$$S = l_1\left(\frac{pl_1h\beta}{32H\varphi E[\delta]}\right)^{1/3} \tag{9-54}$$

最大应力发生在转角处，强度条件校核式

$$\sigma_{max} = \frac{ph(l_1^2\gamma + l_2S)}{2S^2H} \leqslant [\sigma] \tag{9-55}$$

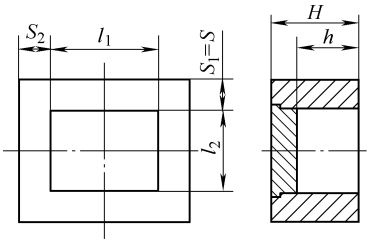


图 9-38 镶底矩形型腔结构

[例] 已知注射模如图 9-38 所示。模板高度 $H=250\text{mm}$；制品 $l_1=350\text{mm}$，$l_2=250\text{mm}$，$h=150\text{mm}$，壁厚 2mm 为简单箱体；要求达到 SJ/T 10628 的 6 级精度；制品材料为聚丙烯；型腔压力 $p=32\text{N/mm}^2$。确定模框壁厚。

[解] 由组合式、低黏度和 6 级精度的条件，查表 9-16，以 $W=l=350\text{mm}$ 代入。根据表 9-17，$\alpha=l_2/l_1=250/350\approx0.7$ 得 $\beta=1.84$，$\gamma=0.79$，$\varphi=0.67$，代入式(9-54)，有模框厚

$$S = l_1\left(\frac{pl_1h\beta}{32H\varphi E[\delta]}\right)^{1/3}$$

$$=350\times\left(\frac{32\times350\times150\times1.84}{32\times250\times0.67\times2.1\times10^5\times0.037}\right)^{1/3}\text{mm}=147\text{mm}$$

代入式（9-55）校核强度，其 $[\sigma]=160\text{N/mm}^2$ 而

$$\sigma_{max}=\frac{ph(l_1^2\gamma+l_2^2S)}{2S^2H}$$

$$=\frac{32\times150\times(350^2\times0.79+250\times147)}{2\times147^2\times250}\text{N/mm}^2=59\text{N/mm}^2\leqslant[\sigma]$$

表 9-17 由矩形型腔边长比 α 确定 β、γ 和 φ 系数

$\alpha=l_2/l_1$	β	γ	φ	$\alpha=l_2/l_1$	β	γ	φ
0.1	1.36	0.91	0.91	0.6	1.96	0.76	0.72
0.2	1.64	0.84	0.87	0.7	1.84	0.79	0.67
0.3	1.84	0.79	0.83	0.8	1.64	0.84	0.61
0.4	1.96	0.76	0.79	0.9	1.36	0.91	0.54
0.5	2.00	0.75	0.76	1.0	1.00	1.00	0.44

以上的计算都是在型腔四壁厚度相等的条件下进行的。如果结构上需要 S_1 不等于 S_2 时，表 9-17 中的数值需要加以修正。当 $S_2=nS_1$ 时，有

$$\gamma_n=\frac{n^3+\alpha^3}{n^3+\alpha} \tag{9-56a}$$

$$\beta_n=5-4\gamma_n \tag{9-56b}$$

$$\varphi_n=\frac{n-1+\varphi}{n} \tag{9-56c}$$

γ_n、β_n 和 ϕ_n 为修正系数。例如，当 $S_2 = 1.5S_1$，$\alpha = 0.5$ 时，$\gamma_n = 0.9$，$\beta_n = 1.4$，$\varphi_n = 0.84$，以修正系数代入式（9-54）和式（9-55）运算。

2. 带模框的镶底矩形型腔侧壁厚度的计算

这种结构更能节约贵重合金钢并便于加工，见图 9-39。在设计这类型结构时，通常先确定型腔镶件的壁厚 S'，然后根据刚性要求计算模框尺寸 S，再进行强度校核。

在型腔压力的作用下，型腔侧壁变形膨胀，并将此压力传递给模框。按刚度条件计算模框壁厚

$$S = L_1\left[\frac{phl_1}{32H\phi_2 E[\delta]} - \frac{1}{\beta}\left(\frac{S'}{l_1}\right)^3\right]^{1/3} \tag{9-57}$$

式中 β 查表 9-17，而 ϕ_2 见图 9-40。

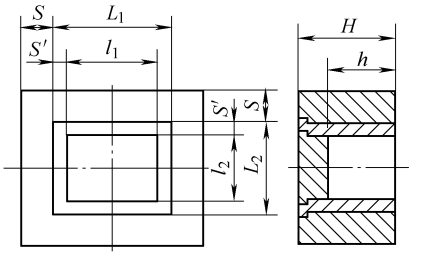


图 9-39　带模框的镶底矩形型腔结构

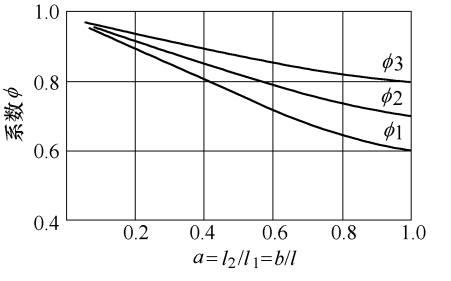


图 9-40　矩形型腔的变形与结构的关系系数

注：图中，ϕ_1 用于式（9-40）整体式矩形型腔的侧壁厚的刚度计算；ϕ_2 用于式（9-57）带模框的镶底矩形型腔的侧壁厚的刚度计算；ϕ_2 用于式（9-60）双面止口的矩形型腔的侧壁厚的刚度计算；ϕ_3 用于式（9-58）带模框的整体式矩形型腔的侧壁厚的刚度计算。

此种结构的型腔侧壁在注射成型时的受力状态与镶底矩形型腔相似，其强度校核可借助于式（9-55）进行。但在该公式中的 l_1 需代以 L_1，S 需代以（$S + S'$）。

［例］　如图 9-39 所示带框的镶底矩形型腔的注射模。用 ABS 成型正方形箱体制件，壁厚 2.5mm，要求以 SJ/T 10628 的 6 级精度成型。模腔边长 $l_1 = l_2 = 225$mm；模板厚 $H = 205$mm；模腔深 $h = 165$mm。现确定型腔镶件的壁厚 $S' = 35$mm，所以模框内孔 $L_1 = L_2 = 225 + 2 \times 35 = 295$mm，估算得型腔压力 $p = 40\text{N/mm}^2$。试求模框壁厚 S。

［解］　由 $\alpha = l_2/l_2 = 1$，从表 9-17 得 $\beta = 1.0$。由 $\alpha = 1$，从图 9-40 得 $\phi_2 = 0.70$。从表 9-16，根据组合式、中等黏度和 6 级精度，又 $W = L_1 = 295$mm，则有

$$[\delta] = 25i_2 = 25 \times [0.45 \times (295)^{1/5} + 0.001 \times 295]\mu\text{m} = 43\mu\text{m} = 0.043\text{mm}$$

将以上数据代入式（9-57）

$$S = L_1\left[\frac{phl_1}{32H\phi_2 E[\delta]} - \frac{1}{\beta}\left(\frac{S'}{l_1}\right)^3\right]^{1/3}$$

$$=395\times\left[\frac{40\times165\times225}{32\times205\times0.7\times2.1\times10^{5}\times0.043}-\frac{1}{1}\times\left(\frac{35}{225}\right)^{3}\right]^{1/3}\text{mm}=94\text{mm}$$

强度校核运用式（9-55）。由 $\alpha=l_2/l_2=1$，从表9-17得 $\gamma=1$，有

$$\sigma_{\max}=\frac{ph(l_1^2\gamma+l_2S)}{2S^2H}=\frac{40\times165\times[295^2\times1.0+295\times(94+35)]}{2\times(94+35)^2\times205}\text{N/mm}^2$$

$$=121\text{N/mm}^2<[\sigma]=160\text{N/mm}^2$$

符合强度条件，取模框壁厚至少为94mm。

3. 带模框的整体式矩形型腔侧壁厚度的计算

图9-41是带模框的整体式矩形型腔结构，视为三边固定，一边自由的矩形板。可用与图9-39带模框的镶底矩形型腔结构相类似的方法予以计算。此类结构按刚度条件的模框厚度设计式

$$S=L_1\left\{\frac{l_1}{32H}\left[\frac{ph}{E\phi_3[\delta]}-\frac{1}{C}\left(\frac{S'}{h}\right)^3\right]\right\}^{1/3}\qquad(9\text{-}58)$$

式中系数 C 查表9-18，而 ϕ_3 见图9-40。

由于此种结构在注射成型时的受力状况与整体式矩形型腔相似，故其强度校核可视 h/l_1 之值不同，有以下两式

当 $h/l_1\geqslant0.41$

$$\sigma_{\max}=\frac{pl_1^2(1+\omega\alpha)}{2(S+S')^2}\leqslant[\sigma]\qquad(9\text{-}59\text{a})$$

当 $h/l_1<0.41$

$$\sigma_{\max}=\frac{3ph^2(1+\omega\alpha)}{2(S+S')^2}\leqslant[\sigma]\qquad(9\text{-}59\text{b})$$

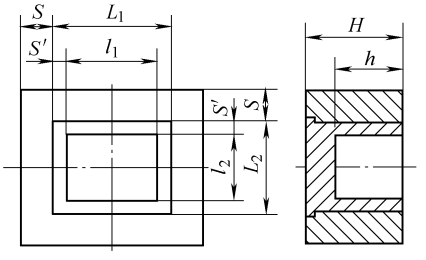


图9-41　带模框的整体式矩形型腔结构

式中 $\alpha=l_2/l_1$，系数 ω 查表9-18，

表9-18　系数 C 和 ω

h/l_1	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.5	2.0
C	0.930	0.570	0.330	0.188	0.117	0.073	0.045	0.031	0.015	0.006	0.002
ω	0.108	0.130	0.148	0.163	0.176	0.187	0.197	0.205	0.219	0.235	0.254

［例］　如图9-41所示带模框的整体式矩形型腔结构的注射模，用ABS成型正方形箱体制件，要求以SJ/T 10628的6级精度成型。模腔边长 $l_1=l_2=225\text{mm}$；模板厚 $H=205\text{mm}$；模腔深 $h=165\text{mm}$。现确定型腔镶件的侧壁厚 $S'=35\text{mm}$，所以模框内孔 $L_1=L_2=225+2\times35=295\text{mm}$。估算得型腔压力 $p=40\text{N/mm}^2$。试求模框壁厚 S。

［解］　由 $\alpha=l_2/l_1=1$，从图9-40得 $\phi_3=0.80$。再由 $h/l_1=0.7$，从表9-18查得 $C=0.117$、$\omega=0.176$。从表9-16，根据组合式、中等黏度和6级精度，又 $W=L_1=295\text{mm}$，则有

$$[\delta]=25i_2=25\times[0.45\times(295)^{1/5}+0.001\times295]\mu\text{m}=43\mu\text{m}=0.043\text{mm}$$

将以上数据代入式（9-58）

$$S = L_1\left\{\frac{l_1}{32H}\left[\frac{ph}{E\phi_3[\delta]} - \frac{1}{C}\left(\frac{S'}{h}\right)^3\right]\right\}^{1/3}$$

$$= 295 \times \left\{\frac{225}{32\times 205}\left[\frac{40\times 165}{2.1\times 10^5 \times 0.8\times 0.043} - \frac{1}{0.117}\left(\frac{35}{165}\right)^3\right]\right\}^{1/3}\text{mm} = 90\text{mm}$$

强度校核运用式（9-59a），其中 $h/L_1 = 165/295 = 0.56 > 0.41$，有

$$\sigma_{\max} = \frac{pl_1^2(1+\omega\alpha)}{2(S+S')^2} = \frac{40\times 295^2\times(1+0.175\times 1)}{2(35+90)^2}\text{N/mm}^2 = 131\text{N/mm}^2 < [\sigma] = 160\text{N/mm}^2$$

符合强度条件，故模框壁厚 $S = 90\text{mm}$ 为所求。

4. 双锥面止口的矩形型腔侧壁厚度计算

图 9-42 是尺寸较大的箱壳制品常用的型腔结构。其特点是设置锥面止口，使型腔侧壁四边均受约束，从而减小变形量。此种结构的型腔壁均布受力状态，可视为两对边简支，另两边固定的矩形板。矩形型腔侧壁厚度的设计式

$$S = h\left(\frac{C_1 ph}{E\phi_2[\delta]}\right)^{1/3} \tag{9-60}$$

图 9-41 所示型腔长边 l_1 的中心有最大应力，其强度校核式

$$\sigma_{\max} = \frac{6C_2 ph^2}{S^2} \leqslant [\sigma] \tag{9-61}$$

式中　ϕ_2　——系数，在线图 9-40 中，以 $\alpha = l_2/l_1$ 值由曲线 ϕ_2 查得；

C_1、C_2——系数，根据 h/l_1 或 l_1/h 比值由表 9-19 查出。

当 $h > l_1$ 时，式（9-60）和式（9-61）中的 h 均应置换成 l_1。

当分型面上具有单锥面止口的矩形型腔，见前 4.3 节图 4-51所示结构。其模板侧壁厚度计算方法可与上述双锥面止口的矩形型腔相同。

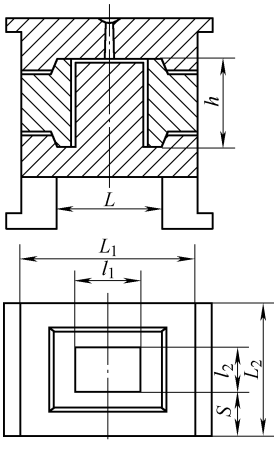


图 9-42　具有双锥面止口的矩形型腔结构

表 9-19　系数 C_1 和 C_2

h/l_1	2.0	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
C_1	0.0284	0.0270	0.0262	0.0255	0.0243	0.0228	0.0214
C_2	0.0842	0.0829	0.0808	0.0793	0.0770	0.0739	0.0698

l_1/h	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	3.0
C_1	0.0276	0.0340	0.0425	0.0504	0.0582	0.0658	0.0730	0.0799	0.0863	0.0987	0.1276
C_2	0.0788	0.0868	0.0938	0.0998	0.1049	0.1090	0.1124	0.1152	0.1173	0.1191	0.1246

［例］　如图 9-42 所示双锥面止口结构注射模注射 PP 箱体。制件的外形边长 $l_1 = 350\text{mm}$，$l_2 = 250\text{mm}$，模板厚 $h = 365\text{mm}$，$h = 165\text{mm}$，壁厚 2.5mm。要求按 SJ/T 10628 的 6 级精度成型，直浇口设在注塑件底部中央。已估算得型腔压力 $p = 50\text{N/mm}^2$。试求其长边 l_1 处的侧壁厚度。

[解] 根据组合式、低黏度和6级精度，由表9-16，取 $W=h=350\text{mm}$，则有

$$[\delta]=25i_2=25\times[0.45\times(350)^{1/5}+0.001\times350]\mu\text{m}=37\mu\text{m}=0.037\text{mm}$$

由 $\alpha=l_2/l_1=250/350=0.7$，从图9-40得 $\phi_2=0.75$。再由 $h/l_1=1.0$，从表9-19查得 $C_1=0.0214$、$C_2=0.0698$。将已知数值代入式（9-60），得其侧壁厚为

$$S=h\left(\frac{C_1ph}{E\phi_2[\delta]}\right)^{1/3}=350\times\left(\frac{0.0214\times50\times350}{2.1\times10^5\times0.75\times0.0375}\right)^{1/3}\text{mm}=140\text{mm}$$

将值代入式（9-61），进行强度校核有

$$\sigma_{\max}=\frac{6C_2ph^2}{S^2}=\frac{6\times0.0698\times50\times350^2}{140^2}\text{N/mm}^2=131\text{N/mm}^2<[\sigma]=160\text{N/mm}^2$$

9.3.3 大中型模具型芯垫板的刚度计算

动模垫板上型芯的形状、尺寸、数量和位置有各种情况，应该根据模具结构，进行受力分析求解。大跨距垫块间距远大于动模垫板上的型腔压力作用面。大跨距垫块间可以设置支撑圆柱或支撑板，提高动模垫板的刚性和强度，从而减小动模垫板的厚度。这需要按多支点静不定梁求解，都需要按各自受力分析求解。

1. 型芯支撑板厚度刚度和强度条件计算公式

如图9-43所示，动模上型芯通过轴肩固定在型芯固定板内。底下的动模垫板被双垫块支撑着。垫块之间间距 L_0 远大于型芯受压的接触距离 A。图示型芯受到的注射压力的面积为 $a\times b$。此动模型芯垫板可简化成简支梁。

该简支梁在注射压力下的最大弯曲变形量

$$\delta_{\max}=\frac{abpL_0^3}{384EJ}(8-4\gamma^2+\gamma^3)\qquad(9\text{-}62)$$

式中 $\gamma=\dfrac{A}{L_0}$，型芯压力接触距 A 与跨距 L_0 之比；

$J=\dfrac{BT^3}{12}$，动模垫板的轴惯性矩；

其余代号见前和图9-43所示。

动模型芯垫板的许用变形量[δ]应不大于0.05mm。垫板厚度设计计算式

$$T=\left[\frac{abp}{32EB[\delta]}(8L_0^3-4A^2L_0+A^3)\right]^{1/3}\qquad(9\text{-}63)$$

当 $A=L_0$ 时，此式与前式（9-43）一致。

动模垫板强度计算时，简支梁的最大弯矩

$$M_{\max}=\frac{abpL_0}{8}(2-\gamma)$$

矩形截面垫板的抗弯截面系数 $W=\dfrac{BT^2}{6}$

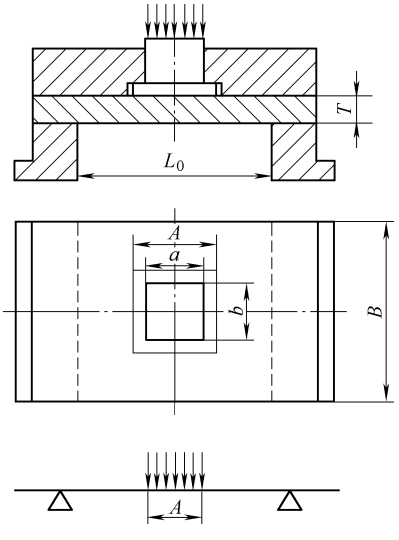


图9-43 大跨距垫块上的动模型芯垫板的受力图

在确定模具强度计算的许用应力［σ］后，得强度条件下的垫板厚度设计式

$$T=\left[\frac{3abp}{4[\sigma]B}(2L_0-A)\right]^{1/2} \tag{9-64}$$

2. 动模型芯垫板的支撑圆柱的刚度计算

大跨距垫块上的动模型芯垫板的均布受力状态简化成集中力如图 9-44 所示，便于得到支撑柱的压力，再得到支撑圆柱的根数和直径。

（1）动模型芯垫板的变形量　图 9-44 所示型芯垫板受力面简化成 $a\times b$，忽略矩形型芯的凸肩作用。而且型芯高度 h 大于动模型芯垫板 T。如图 9-44b所示将均布载荷改造成两个集中力 $Q/2$。在型腔注射压力 p 作用下 $Q=pab$。简支梁动模垫板的下垂变形量

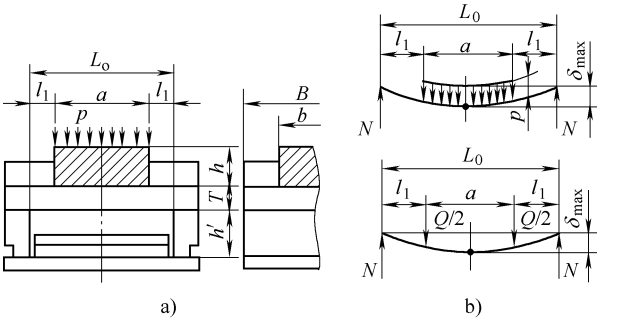


图 9-44　动模型芯垫板结构和受力简化

a）动模型芯垫板结构　b）均布载荷作集中负载

$$\delta_{\max}=\frac{pabl_1(3L_0-4l_1)}{4EBT^3} \tag{9-65}$$

式中的物理参量同前述。将模具刚度计算许用变形量［δ］代入，可得到动模型芯垫板 T 的设计式。

（2）支撑圆柱的设计　常用的单列或双列支撑圆柱在集中负载下的力学状态见图 9-45所示。在载荷 Q 作用下，由简支梁的力矩平衡式可得到支柱承受的载荷 R_1 或 R_2。

单列支柱

$$R_1=\frac{Q(L_0+2l_1)}{2L_0} \tag{9-66a}$$

双列支柱

$$R_2=\frac{Q}{2L_0}\left[\frac{(l_2+l_1)(l_2-l_1)}{l_2}+l_3\right] \tag{9-66b}$$

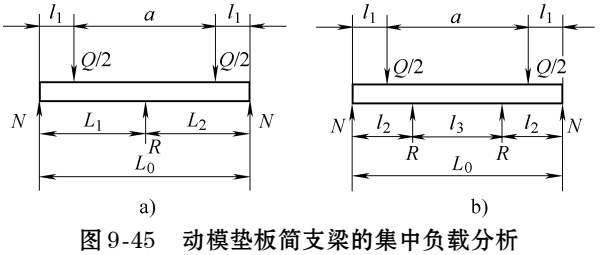


图 9-45　动模垫板简支梁的集中负载分析

a）单列支柱　b）双列支柱

支柱高 h'如图 9-44 所示。支柱的许用压缩变形量［δ］应在 0.02 ~ 0.05mm 范围

内。再用钢柱的压缩弹性模量 E 代入下式，得支承面积

$$A=\frac{Rh'}{E[\delta]} \tag{9-67}$$

支柱根数

$$n=\frac{4Rh'}{\pi D^2E[\delta]} \tag{9-68}$$

支柱直径

$$D=\left(\frac{4Rh'}{\pi nE[\delta]}\right) \tag{9-69}$$

9.4 型芯构件的力学计算

在高压熔体作用下整个型芯长度上存在侧向压力，造成型芯的变形和偏移。致使成型注塑件的内孔与外轮廓偏心，壁厚不均，甚至尺寸超差，也会产生脱模困难。本节介绍的计算式和线图可估测型芯的实际偏移量和作深入力学分析。

1. 实际偏移量组成

在模具型腔的充填过程中，型芯的实际偏移量 f_a 由两部分叠加而成，即型芯在刚性固定下的最大变形量 f_t 与型芯装配部位偏移量 f_e 之和。

$$f_a=f_t+f_e \tag{9-70}$$

其中，装配偏移量 f_e 又可分为刚体型芯整体位移量 f_{es}，和整个型芯的倾侧偏移量 f_{em}。所以实际偏移量由三部分组成，见图 9-46，有

$$f_a=f_t+f_{es}+f_{em} \tag{9-71}$$

(1) 型芯受载类型　在注射成型状态中，型芯受载分布情况可分为三种类型，如图 9-47 所示。图 9-47a 所示为塑料熔体从型芯根部进料的压力分布。图 9-47b 为型芯顶部进料。图 9-47c 上沿型芯长度方向压力保持大致相同，是发生在侧边浇口进料场合。很明显，图 9-47b 的受载情况，会使型芯产生颇大的偏移量。注射模的进料浇口大多在型芯的根部。

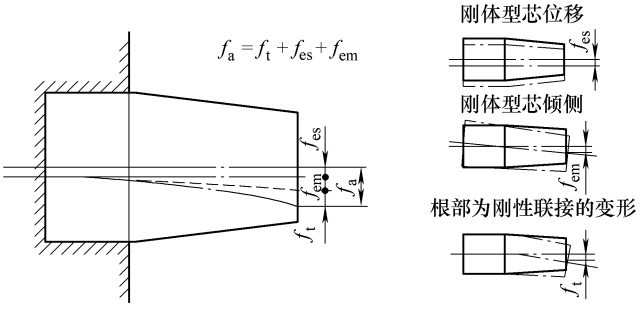


图 9-46　型芯实际偏移量的组成

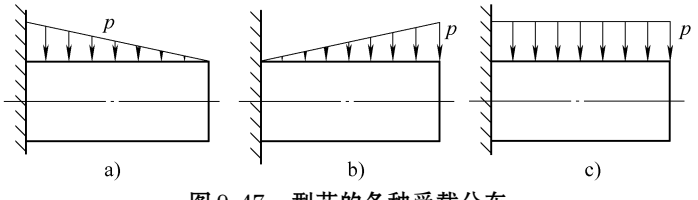


图 9-47　型芯的各种受载分布

a）根部进料　b）顶部进料　c）侧边浇口进料

（2）型芯几何体简化　型芯几何体可简化成圆柱体和矩形柱体两大类。型芯一般有冷却用圆孔通道。矩形截面的型芯有矩形的和圆形的冷却管道，如图 9-48 所示。型芯通常都有脱模斜度，计算时用平均尺寸。

2. 型芯的最大变形量

从安全角度考虑，应计算熔体充模初期单向压力作用下型芯的实际偏移量。若作用型芯上的压力呈线性分布，型腔的计算压力 p 应为三角形压力分布的最大值，并假定型腔间隙在充模前是均匀的。

这里仅介绍，从型芯根部进料时圆孔冷却的圆柱型芯的最大变形量 f_t。它是弯矩引起的变形 f_b，和剪切力引起的变形 f_s 之和。

$$f_t = f_b + f_s$$

由弹性弯曲的微分方程，可得到圆柱型芯的挠曲变形量

$$f_b = \frac{32pdh^4}{15\pi E(d^4 - d_0^4)} \tag{9-72}$$

式中　p——型腔压力，三角形分布的最大值（N/mm²）；

E——型芯材料的弹性模量（N/mm²）；

h——型芯长度（mm）；

d——型芯的平均外径（mm）；

d_0——冷却水孔直径（mm）。

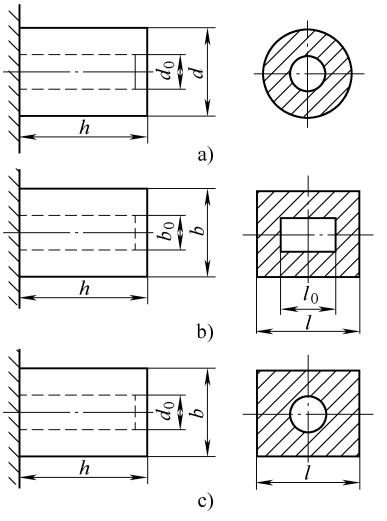


图 9-48　各种不同截面种类的型芯

a）圆柱体型芯　b）矩形柱体型芯矩形冷却管道　c）矩形柱体型芯圆形冷却管道

在型芯顶端，由剪切力引起的最大变形量

$$f_s = C_1 \frac{10.4pdh^2}{3\pi E(d^2 - d_0^2)} \tag{9-73}$$

在 $2 \leqslant W \leqslant 10$ 时

$$C_1 = \frac{\left[\dfrac{2d}{(d - d_0)}\right] + 4.4}{14.4}$$

$W > 10$ 时

$$C_1 = 1$$

型芯厚度比 W 的定义为

$$W = \frac{2d}{d - d_0}$$

这样，可得总变形量

$$f_t = \frac{ph^2 d}{\pi E(d^2 - d_0^2)}\left[\frac{2.1h^2}{(d^2 + d_0^2)} + 3.5C_1\right] \tag{9-74}$$

式（9-72）、式（9-73）和式（9-74）说明了总变形量f_t跟几何与物理参量之间的关系，是基于受一般载荷的横梁推导的。在注射模内高压熔体作用下，型芯的实际总变形量比理论计算值更大些。图 9-49～图 9-53 给出了型芯在型腔压力 $p = 10\text{N/mm}^2$ 作用下，最大实际总变形量f_t的线圈。使用时必须根据实际型腔压力和注塑件壁厚等因素作修正。

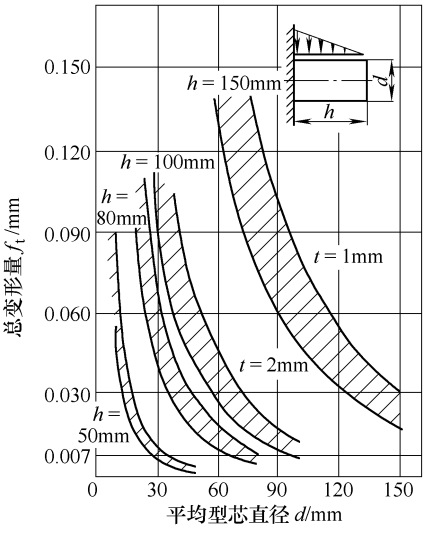


图 9-49　圆柱型芯的变形

注：PS 熔体 236℃；模具温度 40℃；型腔压力 $p = 10\text{MPa}$；速率 $Q = 50\text{cm}^3/\text{s}$；注塑件壁厚 $t = 1 \sim 2\text{mm}$

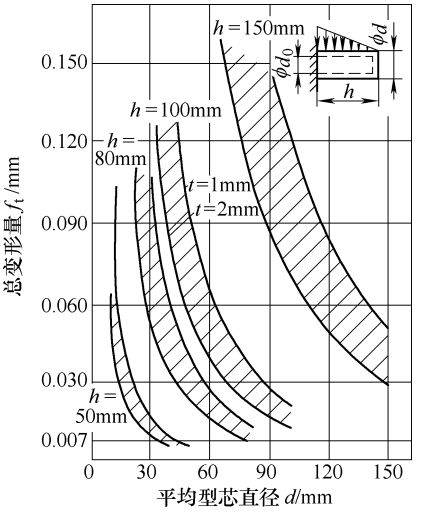


图 9-50　环形截面型芯的变形

注：PS 熔体 236℃；模温 40℃；压力 $p = 10\text{MPa}$；速率 $Q = 50\text{cm}^3/\text{s}$；壁厚 $t = 1 \sim 2\text{mm}$；$d_0 = 0.6d$

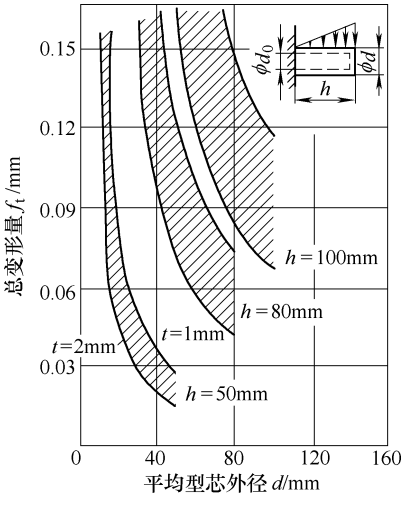


图 9-51　顶部进料环形截面型芯的变形

注：PS 熔体 236℃；模温 40℃；压力 $p = 10\text{MPa}$；速率 $Q = 50\text{cm}^3/\text{s}$；壁厚 $t = 1 \sim 2\text{mm}$；$d_0 = 0.6d$

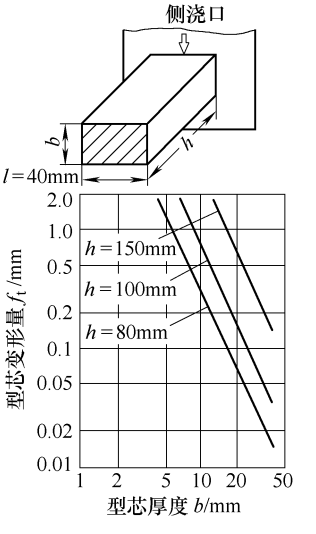


图 9-52　矩形截面型芯的变形

注：PS 熔体 236℃；模温 60℃；压力 $p = 10\text{MPa}$；速率 $Q = 50\text{cm}^3/\text{s}$；壁厚 $t = 2\text{mm}$

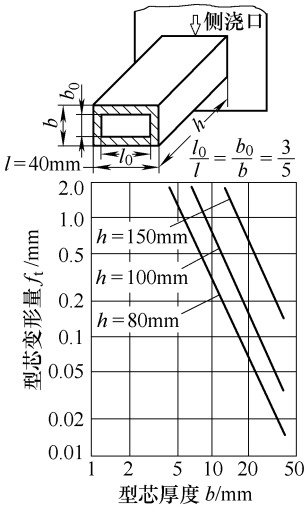


图 9-53　中空矩形截面型芯的变形

注：PS 熔体 236℃；模温 60℃；压力 p = 10MPa；速率 Q = 50cm³/s；壁厚 t = 2mm

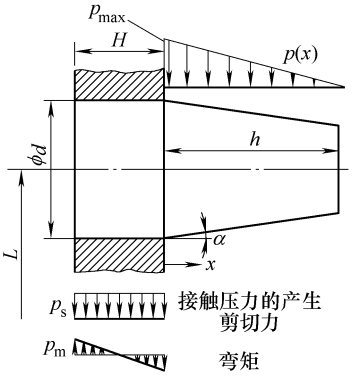


图 9-54　端部固定型芯装配部位的受载状况

3. 型芯装配偏移量

如前所述，装配偏移量 f_e 包括刚体型芯整体位移量 f_{es} 和整个型芯的倾侧偏移量 f_{em}。熔体在型芯根部进料时，在最大压力 p_{max} 作用下，型芯装配部位受到弯矩而产生最大接触压力 p_m，如图 9-54 所示。有

$$p_m=\frac{p_{max}h(2h_x+H)}{2dH}(3d-2h\cdot\mathrm{tg}\alpha) \tag{9-75}$$

其中

$$h_x=\frac{h(d-h\cdot\mathrm{tg}\alpha)}{3d-2h\cdot\mathrm{tg}\alpha}$$

该部位由剪切力产的最大接触压力为

$$p_s=\frac{p_{max}h}{6dH}(3d-2h\cdot\mathrm{tg}\alpha) \tag{9-76}$$

式中　H——型芯固定部分高度；

h——型芯长度；

α——型芯脱模斜度；

d——型芯的平均外径，若是矩形型芯，以矩形截面长边 l 替代 d。

从以上两式的 p_m 和 p_s 可得上述两种偏移量，整个型芯的倾侧偏移量

$$f_{em}=\frac{p_mL(2h+H)}{EH} \tag{9-77}$$

式中　L——型芯安装位置的距离，$L_{max}=3d$。

刚体型芯整体位移量

$$f_{ex}=\frac{p_s L}{E} \tag{9-78}$$

由以上各计算式和线图可知。

1）型芯长径比是决定型芯变形量f_1的主要因素。存在极限长径比$\left(\frac{h}{d}\right)_{lim}$，超过此极限值，型芯变形量急剧上升。因此有

盘形浇口进料　$\left(\frac{h}{d}\right)_{lim}\approx 5$

浇口设置在型芯根部　$\left(\frac{h}{d}\right)_{lim}\approx 2.5$

浇口设置在型芯顶部　$\left(\frac{h}{d}\right)_{lim}\approx 1.6$

2）型芯的装配偏移量f_e取决于固定安装高度H，如图9-55所示。

3）采用盘形浇口替代单浇口，或使用对称的两个或多个浇口，能减少型芯变形量。

4）型芯中冷却孔直径小些。

5）提高型芯固定段的装配精度，可减小偏移量。

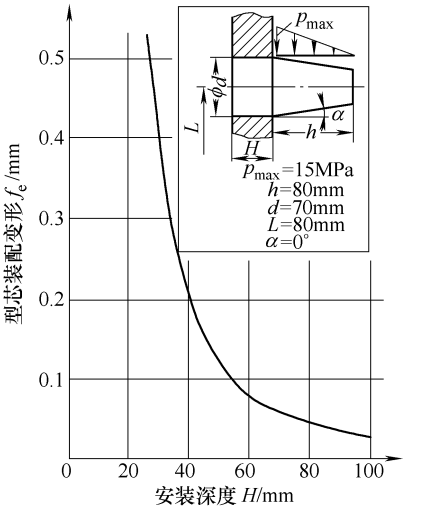


图9-55　型芯固定安装高度H与装配偏移量f_e关系

参 考 文 献

[1]　唐志玉．塑料模具设计师指南［M］．北京：国防工业出版社，1999.

[2]　唐志玉．塑料挤塑模与注塑模优化设计［M］．北京：机械工业出版社，2000.

[3]　申开智．塑料成型模具［M］.2版．北京：中国轻工业出版社，2002.

[4]　申开智．塑料模具设计与制造［M］．北京：化学工业出版社，2006.

第 10 章　脱模和抽芯机构设计

注射成型制品冷却凝固后必须从模具中脱离出来。可靠地脱模，让固化的成型注塑件完好地从模具中顶出，取决于脱模机构合理设计。本章陈述的脱模机构包括开模方向的脱模和侧向分型抽芯机构。在注射模具的设计和制造中，脱模机构的故障比率还是相当高的。注射模 CAD/CAE 应用技术中，脱模机构设计的欠缺，使其成为注射模设计的难点和技术开发的前沿。机械学的机构设计的理论基础是机构的运动和力学分析。脱模力的预测是脱模机构强刚度计算的依据。本章在对注塑件结构分析的基础上，介绍各种简单和复杂的脱模机构、侧向分型抽芯机构和螺纹脱模机构。注射模上各种机构的复合或组合不断发展和创新，阅读各种注射模结构图册是很好的学习和技术交流的途径。

10.1　开模与脱模

在注射模成型过程中，型腔残余压力使注塑件与型腔和型芯之间产生了接触压力，需要足够的开模力和脱模力，才能让注塑件脱离模具。

1. 开模过程和开模力

在开模的瞬时，尽管由开模力引起的故障不多，但为把模具设计得完美无瑕，必须了解开模过程，并进行开模力的估算。

在开模方向，须克服注塑件与型腔壁之间的附着力，称为直接开模力 Q_0。侧向分型开模力和侧向抽拔力，会经斜导柱等零件传递给开模方向，称为间接开模力，也应该计入总开模力中。本节所讨论的开模力是指直接开模力。

在模具的冷却作用下，注塑件在等于或略高于模具温度时开模。注塑件的体积在收缩之中，与型腔表面之间存在的接触压力取决于开模瞬时的残余压力 p_r。在开模前，注塑件处于高压状态，致使注塑件与型腔壁之间存在正压力。如图 10-1所示的闭合型腔内的 *P-V-T* 状态曲线，在降低到 0.1MPa 时开模，再减去大气压 0.1MPa，开模力 $Q_0=0$。由于低刚性模具型腔和型芯的弹性变形，开模瞬时的残余压力 p_r 较大，使开模力 $Q_0>0$，增加了注

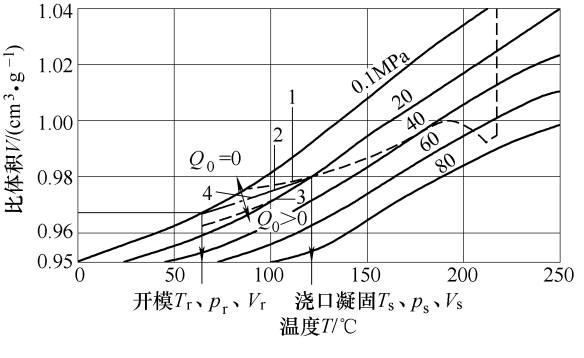


图 10-1　不同刚性模具对型腔中 *P-V-T* 的影响

1—理想刚性模具　2—模具弹性变形下的实际状态曲线

3—刚性差模具　4—开模力 $Q_0>0$ 和 $Q_0=0$ 状态界限线

塑件与模具之间的接触压力。因此，开模力 Q_0 的计算式为

$$Q_0 = fp_r A \tag{10-1}$$

式中 f——注塑件与模具表面间的静摩擦系数；

p_r——开模瞬时注塑件与模具接触表面间的残余压力；

A——注塑件和模壁间的接触面积。

如图 10-2 所示，由 x 方向刚度条件得

$$\Delta X_s = \delta_f + \delta_c \tag{10-2}$$

式中 ΔX_s——浇口凝固时 x 方向模具型腔的变形量；

δ_f——浇口凝固时 x 方向型腔壁的变形量；

δ_c——浇口凝固时 x 方向型芯的变形量。

由型腔中注塑件的相对体积关系

$$\frac{\Delta V}{V_s} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \tag{10-3}$$

式中 V_s——注塑件在浇口凝固时体积；

V_r——注塑件在开模时体积。

如图 10-2 所示，在浇口凝固时，三维薄壳注塑件的体积是

$$V_s = (X_0 + \Delta X_s)(Y_0 + \Delta Y_s)(Z_0 + \Delta Z_s) \tag{10-4}$$

X_0、Y_0 和 Z_0 为开模时大气压下注塑件尺寸。$X_0 + \Delta X_s$、$Y_0 + \Delta Y_s$ 和 $Z_0 + \Delta Z_s$，为浇口凝固注塑件尺寸。对这两个状态，注塑件体积变量为

$$\Delta V = \Delta V_x + \Delta V_y + \Delta V_z$$

如果注塑件为圆筒形。在圆周切向 $\Delta V_z = 0$，在深度 y 方向受到固化表层的摩擦限制 $\Delta V_y < \Delta V_x$。所以 $\Delta V_x > 0.5\Delta V$，从安全考虑 $\Delta V_x = 0.5\Delta V$，由此得

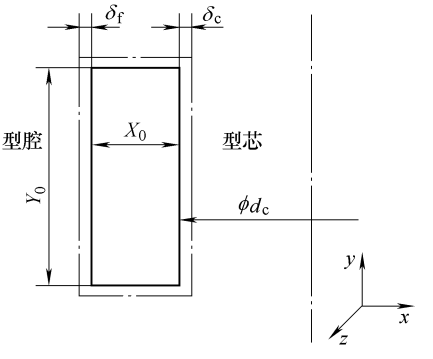


图 10-2 型腔的变形状态

注：虚线—浇口凝固时的注塑件尺寸；
实线—开模时大气压下的注塑件尺寸

$$\Delta V = 2\Delta V_x = 2(\Delta X_s - \Delta X_r)(Y_0 + \Delta Y_s)(Z_0 + \Delta Z_s) \tag{10-5}$$

式中 ΔX_r——开模时 x 方向模具型腔变形量。

将式（10-4）和式（10-5）代入式（10-3）得

$$\frac{2(\Delta X_s - \Delta X_r)}{X_0 + \Delta X_s} = \frac{V_s - V_r}{V_s} \tag{10-6}$$

再由胡克定律

$$\frac{p_r}{p_s} = \frac{\Delta X_r}{\Delta X_s} \tag{10-7}$$

式中 p_s——浇口凝固时模具型腔压力；p_s 值可由压力传感器实测。

将（10-7）式代入（10-6）式，则开模时残余压力

$$p_r = p_s\left(1 - \frac{V_s - V_r}{2V_s} - \frac{(V_s - V_r)X_0}{2V_s\Delta X_s}\right) \tag{10-8}$$

注塑件质量 m 为定值，图 10-1 上比体积 V 与上述各体积成正比。因此对照分析可知，开模力的大小由下述因素决定。

1）浇口冻结时的型腔压力 p_s 和开模时间决定了开模时型腔的残余压力 p_r。因此，过大的保压压力，过早开模会使开模时注塑件与模具间的开模力增大。

2）模具的刚性，包括型腔壁厚和型芯的刚度不足，会使开模力增大。

3）在一定的型腔体积下型腔间隙 X_0（即注塑件壁厚）越大，相比之下开模力较小。

4）开模力 Q_0 随残余压力 p_r、接触面积 A_c 和静摩擦系数 f 的增加而增大。

以上分析不考虑注塑件冷却收缩的方向性。没有考察塑料壳体对型芯的收缩包紧。开模时此包紧力使注塑件粘留在动模的型芯上。脱模机构顶出时壳体与型芯之间的包紧力和摩擦系数很大，脱模力 Q_e 大于开模力 Q_0。

2. 影响脱模力的因素

脱模在开模的后期，常见脱模过程是注塑件滞留在动模边，通过脱模机构的顶出动作，将注塑件从主型芯上脱出。了解影响脱模力大小的因素，有助于让注塑件在模具中有个正确布局，有助于正确设计脱模机构，也有助于合理拟定注射工艺参数。

对薄壁无底的圆筒注塑件，脱模力预测的原理式

$$Q_c = f_c \cdot p_c \cdot A_c \tag{10-9}$$

式中　Q_c——薄壁圆管注塑件的脱模力（N）；

f_c——注塑件与钢型芯表面间在脱模温度下的脱模系数；

p_c——圆筒注塑件与钢型芯表面间的接触应力（N/mm^2，MPa）；

A_c——注塑件包紧型芯的有效面积。圆筒塑件有 $A_c = \pi dh$。

脱模力预计的早期经验公式，假定单位面积脱模力 $f_c \cdot p_c = 2 \sim 4$MPa，乘上型芯的侧面积 A_c，求得所需脱模力偏大，不确定因素太多。

20 世纪 70 年代，德国的恩克斯·凯米斯克对注射过程的脱模力做了大量的基础研究[1]，实测了多种塑料和简单形体注塑件的脱模力。该实验装置是这样的，用单独的液压缸直接脱模，在脱模的顶出底板上装有压力传感器，将压力信号在示波器上显示，接上压力记录器。另外对模具温度，包括定模、动模及型芯的温度用热电偶测得且进行记录；对其他工艺参数如注射压力、料温和注射速度等均进行监测。该试验的缺点是脱模机构及液压缸部件的摩擦力也计算在脱模力之中。图 10-3 是 ABS，PC 和 PA6 三种典型塑料对开式圆筒注塑件的脱模

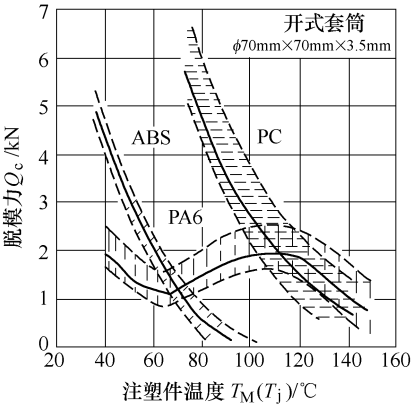


图 10-3　在脱模温度下圆管注塑件脱模力的测量

力测试记录。圆管壁厚 3mm、内径 70mm、高 70mm。图中阴影线区域是在实验中改变模具温度 T_M 和注塑件的脱模温度 T_j 而引起的。

影响影响脱模力大小有塑料制品、注射模具、塑料材料性能和注射工艺四个方面的因素。

1）塑料制品。塑料制品是薄板组合体，大多数是中空壳体，需要型芯成型。开模方向上有主型芯或者众多型芯，其横截面大小与形状及高度决定了所需脱模力大小。动模上型芯的侧表面面积 A_c 与脱模力成正比。注塑件上侧向的凹槽和孔，在侧向分型抽芯时的滑块驱动，克服脱模力。

注塑件的壁厚 t 越大，收缩量越大。但厚壁注塑件有向壁厚中央层的收缩，抵消部分对型芯侧壁的收缩。因此，包紧力并非随壁厚线性增大。

有底的塑料壳体在脱模运动过程中，在型芯顶部空间会产生负气压。大气压作用在型芯的横截面上，也增加了脱模力。

2）注射模具。塑料在注射成型的物理状态变化过程中，对钢型芯表面形成热收缩应力。脱模力 Q_c 作用方向垂直于型芯的包紧力。两种材料界面上的脱模系数 f_c 与脱模力 Q_c 成正比。影响此脱模系数的因素很多，见表 10-1 所示。该表适用于 PE、PP、PS、ABS 和 PC 等塑料。它受到模具成型零件、塑料材料和注射工艺的综合影响，数据离散。界面接触压力、脱模推出速度和熔体温度的影响尚不能确定。

表 10-1　影响注塑件与钢型腔之间脱模系数 f_c 的因素

影响因素	影响程度	影响方向	说　明
型芯表面的粗糙度改善	1～3	减小	详见表 10-4
常态塑料与钢材表面的静摩擦系数较小	1～3	减小	见表 1-19 材料组合的静摩擦系数 f_s
模具型腔壁面温度较低	2～3	减小	
注塑件模内冷却时间较长	(0)1～2	增大	(0)是指使用了脱模剂
保压压力增大	0～1(2,3)	增大	(2,3)是超常规的保压压力和型芯表面粗糙
使用脱模剂	1～3	减小	
界面接触压力	0～1(2)	不确定	
脱模推出速度	0～1(2)	不确定	
熔体温度	0～1(2)	不明确	

注：影响程度分为 4 级。其中 0 是没有影响；1 为轻微影响；2 为中等影响；3 是影响强烈。

在顶出脱模时，塑料件的残余热应力作用于金属模具与塑件的接触面上。在密闭的型腔里，高压注射的塑料熔体与低温的模具壁面，经冷却周期的紧密接触而有粘附作用。此脱膜系数 f_c 是与粘附摩擦系数和脱模温度下的静摩擦系数有关。显然，脱膜系数主要依赖于塑料件与钢型芯的材料，与型芯表面加工状态。第 1 章表 1-19 常态室温下各种塑料与钢表面的静摩擦系数 f_s，可对照后面表 10-3 脱膜系数 f_c。根据后面表 10-4，对于粗糙的型芯表面，$f_c > 1$，是静摩擦系数 f_s 的 2～3 倍。脱膜系数 f_c 与型芯表面质量，粗糙度高低和抛光程度有关。

模具成型零件和脱模机构零件的刚性影响脱模。细长型芯在高压熔体压力作用下弯

曲变形，妨碍制品脱模。模板和顶杆等零件的变形，配合间隙变小，会增大运动零件的脱模阻力。

3）注射工艺。表 10-2 中所列是圆管注塑件型芯上无脱模斜度，测试得到的注射工艺各参量对脱模力的影响。注射工艺各参量既影响脱模系数 f_c，又影响收缩正压力 p_c，因此只能在特定条件下测试。表 10-2 中介绍的改善注射工艺各参量来减小脱模力的方法，仅供参考。

表 10-2　注射工艺各参量减小脱模力的方法

工艺影响因素	影响程度	影响方向	说　　明
缩短注塑件在模内冷却时间	3	减小	
降低型芯温度	3	减小	注塑件脱模温度不变
	3	增加	注塑件在模内冷却时间不变
降低型腔壁温度	3	减小	注塑件脱模温度不变
	3	增加	注塑件在模内冷却时间不变
增加注塑件脱模时的温度	3	减小	
加大注射速率	1～2	减小	注塑件在模内冷却时间不变
增加保压压力	1～2	减小	注塑件脱模温度不变，并且在模内冷却时间不变
增加保压时间	0～1	减小	注塑件脱模温度不变
使用脱模剂	3	减小	随冷却时间增长作用增大
熔体温度	0～1	不确定	
注射压力	1	不明确	

注：影响程度分为 4 级。其中 0 是没有影响；1 为轻微影响；2 为中等影响；3 是影响强烈。

4）塑料材料性能。各种塑料的弹性模量 E 相差很大，刚强的工程塑料的弹性模量越大，对型芯的包紧接触压力 p_c 越大。有胡克定律

$$p_c = E\varepsilon \tag{10-10}$$

接触压力 p_c 是型芯截面轮廓的法向应力。式中，弹性模量 E 对材料的温度有依赖性。常温下的弹性模量比脱模温度下的 E 值要高些。应变 ε 应该是垂直型芯截面轮廓方向的相对收缩。因此，近似计算圆管脱模力的方法有

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} = \frac{d_c - d_i}{d_c} \tag{10-11}$$

式中　d_c——脱模温度下圆柱型芯的直径（mm）；

d_i——脱模后 24h 的圆管注塑件内孔直径（mm）。

由热应力场的微分方程式（5-13），热弹性公式计算为

$$\Delta\sigma_i = \frac{E_i}{1-\nu}(\Delta\varepsilon - \alpha_i \Delta T_i)$$

注塑件上各点在冷却过程和温度分布中存在温度差 ΔT_i。该温度差使各质点产生内应力 $\Delta\sigma_i$。$\Delta\varepsilon$ 为体积收缩率，它取决于密闭模腔内每瞬时的力平衡。型腔内压力在下降，塑料有比体积变化趋势。对于泊松比 ν、弹性模量 E 和线膨胀系数 α，在玻璃态转化温度 T_g 之上和以下取不同数据，有限元方法作数值分析时采用温度的函数值。传统方法在预测脱模力时，接触热应力 $p_c = \sum \Delta\sigma_i$。忽略 $\Delta\varepsilon$ 体积收缩率对冷却收缩正压力

p_c影响，有

$$p_c = \frac{E}{1-\nu} \times \alpha \Delta T \tag{10-12}$$

因此脱模力大小与塑料材料的力学性能泊松比 ν 有关，更取决于热性能线膨胀系数 α。

现代的脱模力计算，应该是依靠塑料材料性能数据库，对注塑件和模具钢之间界面进行有限元数值分析。20 世纪末至 21 世纪之初，加拿大魁北克的工业材料国家研究中心，H. Wang 等人对注射制品的脱模力进行了数值分析和实验研究[2]，并将压力传感器置于每根顶杆的根部，校核预测的脱模力，已经把脱模力的数值分析和计算机模拟功能，添加到注射模注射的计算机辅助工程 CAE 的软件包中。此脱模力的预测功能建筑在原 CAE 软件的注塑件的收缩和残余应力的翘曲分析基础上。同样用有限元的数值分析方法，计入热应力和表面摩擦力，还引入了顶杆的数目、位置和尺寸，能计算注塑件的各被顶出部位的作用应力，并作屏幕显示，可实现顶杆脱模机构设计的优化。

现将报告[2]中的两个实例，对照热应力解析法，计算脱模力结果。此方法在下节 10.2 中详细推演。注射成型工程师应该掌握科学的脱模力预测，保证脱模机构可靠顺利工作。

第一例，见图 10-4a 是 PC 矩形盒，图 10-4b 所示是各顶杆脱模力的实验值。现用报告实验值验证收缩热应力的解析计算方法。

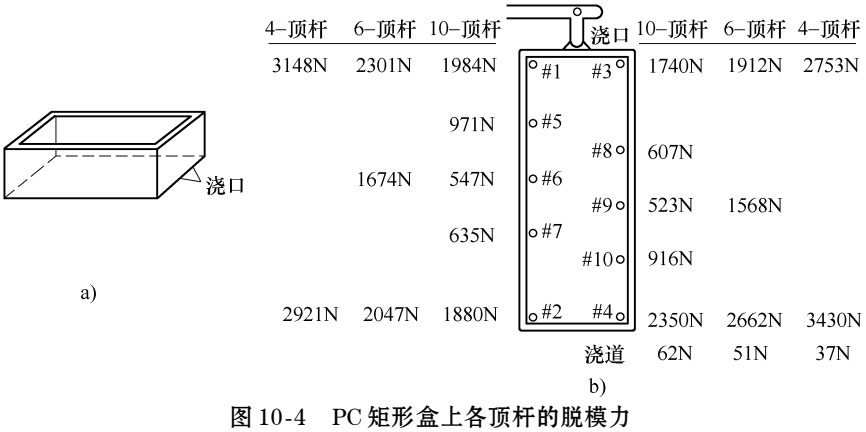


图 10-4　PC 矩形盒上各顶杆的脱模力

a）PC 矩形盒　b）各顶杆位置上的脱模力

PC 矩形盒 122mm × 50mm × 27mm，壁厚 2.2mm。模具温度较低，为 60℃，实测注塑件的脱模温度 $T_j = 67℃$，在此脱模温度下的拉伸弹性模量为 2150MPa，拉伸屈服应力为 47MPa。由于是实验模具，型芯未经抛光，由表 10-4 查得 $f_c = 1.6$。塑料为 GE lexan14 的 PC，软化温度 $T_f = 145℃$。由 $d_k = (122\text{mm} + 50\text{mm})/2 = 86\text{mm}$，$t/d_k = 2.2/86 < 0.05$ 为薄壁注塑件，代入薄壁矩形盒的脱模力计算式（10-30）得到包紧力为

$$\begin{aligned} Q_c &= 12Kf_c\alpha E(T_f - T_j)th \\ &= 12 \times 1 \times 1.6 \times 6 \times 10^{-5} \times 2150 \times (145 - 67) \times 2.2 \times 27\text{N} \\ &= 11480\text{N} \end{aligned}$$

再计算真空吸力

$$Q_b = 0.1\text{MPa} \times A = 0.1 \times 122 \times 50\text{N} = 610\text{N}$$

因此，有计算预测脱模力

$$Q = Q_c + Q_b = 11480\text{N} + 610\text{N} = 12100\text{N}$$

大致与图 10-4b 上各顶杆的脱模力之和 12200N 一致。

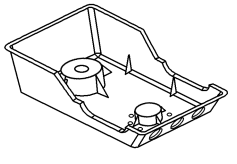
图 10-4b 的实测所示，由于 PC 矩形盒注塑件存在翘曲变形，4 个顶杆的脱模力存在差异。现以脱模力 12100N 预测值的平均作用力 3025N，求出注塑件部位的顶挤压力，以顶杆头直径 7.6mm 计

$$F_J = \frac{F_{cp}}{\frac{\pi}{4}d^2} = \frac{3025}{\frac{\pi}{4}7.6^2}\text{MPa} = 66.7\text{MPa}$$

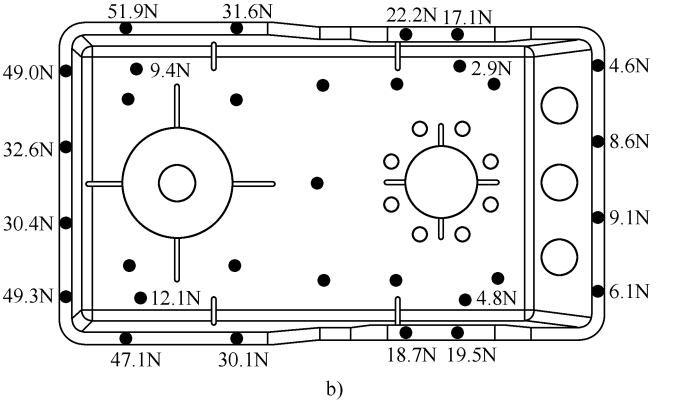
超过了此材料的屈服应力，因此出现被顶接触面的变形损伤。改为 6 个顶杆顶出时，$F_j = 44.5\text{MPa}$，注塑件上仍有微量损伤迹象。只有采用 10 个顶杆时，$F_j = 26.5\text{MPa}$ 才有可靠的脱模质量。此值与表 10-3 上的 PC 塑料件的允许顶出压力 $[\sigma] = 26\text{MPa}$ 符合。

通过此例应注意到各顶杆实际脱模力的差异。对于矩形盒注塑件，四角的顶杆承受的脱模力是其他位置顶杆的 1.4 ~ 3 倍。

第二例，见图 10-5 是 HDPE 的支架壳体的脱模力分布的实测数据。顶杆过多时，一些中间位置的顶杆，测不到脱模力。



a)



b)

图 10-5　HDPE 矩形壳体上各顶杆的脱模力

a）HDPE 矩形壳体　b）各顶杆位置上的脱模力

图 10-5 是 HDPE 的支架壳体制品最大尺寸是 370mm × 200mm × 140mm，壁厚 2mm。按表 10-3 上数据，取 $E = 900\text{MPa}$（$0.9 \times 10^3\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$），$f_c = 0.45$，$T_f = 70℃$，$T_j = 55℃$，$\alpha = 12 \times 10^{-5}/℃$，见图 a 上壳体侧面为斜切面，故 $h = 80\text{mm}$。已知一对侧面的脱模斜度为 3°。代入脱模系数计算式（10-28）得 $K = 0.862$。将此例代入式（10-30）可得

$$\begin{aligned} Q_c &= 12Kf_c\alpha E(T_f - T_j)th \\ &= 12 \times 0.862 \times 0.45 \times 12 \times 10^{-5} \times 900 \times (70 - 55) \times 2 \times 80\text{N} \\ &= 1206\text{N} \end{aligned}$$

图 10-5 的矩形壳体，另一对侧壁有斜度 $\beta > 24.2°$，有自动脱模的趋势，应将此估算脱模力减少 1/2 以上，大致有测算脱模力 500N 左右。与此图上各顶杆实测脱模力总和 460N 相当。

通过此例应注意到，同一几何形状和尺寸的注塑件，当置换不同的塑料材料，由于脱模系数 f_c、膨胀系数 α 和弹性模量 E 的不同，单从 PC 和 HDPE 相比，脱模力相差十倍左右。

3. 脱模机构的设计要求

（1）脱模机构的组成　图 10-6 为典型脱模机构顶出的位置。它主要由八种零件组成。图示顶出零件是顶杆，直接与注塑件接触。顶杆由顶出固定板和顶出板经螺栓联接后被夹固。注射机上顶杆作用在顶出板上，经顶杆传递脱模力将注塑件从型芯上推出。为使顶出平稳，减小顶出零件变形，避免卡滞和过分磨损，应设置导柱与导套机构导向。勾料杆在开模瞬时勾住浇注系统的凝料，使其随同注塑件留在动模中，脱模时再将凝料顶出。在合模时回程杆被定模分型面撞击，使整个脱模机构复位。有的模具装有挡销。调整挡销的厚度可控制顶杆的位置。在立式注射机上，挡销所形成的空隙可避免废杂物影响机构的位置。

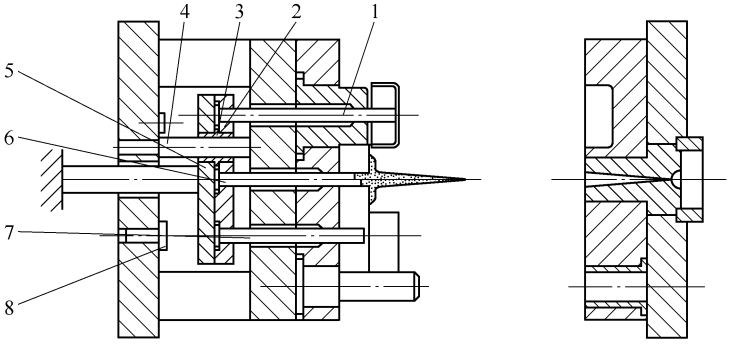


图 10-6　顶出位置的脱模机构

1—顶杆　2—顶出固定板　3—导套　4—导柱　5—顶出板　6—勾料杆　7—回程杆　8—挡销

（2）设计要求

1）尽可能让注塑件留在动模中，使脱模机构易于实现。

2）不损坏注塑件，不因脱模而使注塑件质量不合格。

3）注塑件被顶出位置应尽量在注塑件内侧，以免损伤注塑件外观。

4）脱模零件配合间隙合适，无溢料现象。

5）脱模零件应有足够的强度和刚度。

6）脱模机构要工作可靠，运动灵活，制造容易，配换方便。

为实现注射成型生产的自动化，不但注塑件要实现自动坠落，还要使浇注系统凝料能脱出并自动坠落。优秀的设计还应以简单易行结构达到以上要求。

（3）脱模机构分类

脱模机构一般是利用注射机的开模机械功推出注塑制品。采用液压或气动脱模能简

化机械脱模机构。手工脱模能降低模具的生产成本。脱模按动力来源分类，有以下四种。

1）手工脱模。当模具分型后，用人工操纵脱模，用于产量很少的小型注塑件，或从无脱模机构的定模一边脱模。

2）机动脱模。依靠注射机的开模动作，用固定的顶杆驱动动模边脱模机构。若要在定模边实现机动脱模，需移动的动模经拉杆或链条牵引定模边的脱模机构。

3）液压脱模。专门在模具上设置液压缸，由液压系统控制液压缸的柱塞驱动脱模。液压脱模动力大，传动平稳，在大中型模具上广泛使用。由于液压缸部件已经系列化和标准化，价格不高。从注塑机连接油路很方便。液压缸驱动脱模机构的控制，可以联接到注塑机的控制系统中。液压缸驱动大都用于定模侧脱模机构，或用于侧向分型抽芯。但要注意到驱动液压，不能替代侧向对滑块的锁紧。

4）气动脱模。利用压缩空气将注塑件推出，也有用气缸驱动脱模机构。

按结构分类，由于注塑件的形状结构多样，脱模机构有众多类型。形状简单的注塑件只需一个动作就可脱出，称为简单脱模机构。形状复杂的注塑件需要有两个脱模动作，因此有双向脱模机构、顺序脱模机构、二级脱模机构、浇注系统凝料的脱出和自动坠落机构。对于有内外螺纹的注射制品，必须要有动力驱动螺纹型芯或型环，必须对注塑件有止推措施。

10.2　脱模力计算

将注塑件从型芯上脱出，是注射成型的最后环节。为使脱模可靠，不损坏制件和模具，进而实现自动脱模，就必须计算脱模力作为注塑射脱模机构的设计依据。

脱模力是注塑件通常从动模边的主型芯上分离时所需施加的外力。它包括型芯包紧力、真空吸力、粘附力和脱模机构本身的运动阻力。包紧力是指注塑件在冷却固化中，因体积收缩而产生的对型芯的包紧力。真空吸力是指闭式壳类注塑件，脱模中注塑件与型芯间形成真空腔，与大气压的压差产生的阻力。粘附力是指脱模时，注塑件表面与模具钢材表面的吸附。

脱模力 Q_e，由两部分组成，即

$$Q_e = Q_c + Q_b \tag{10-13}$$

式中　Q_c——克服注塑件对型芯包紧的脱模阻力（N）；

Q_b——一端封闭壳体需克服的真空吸力（N）；

其中　$Q_b = 0.1A_b\text{MPa} = 0.1A_b\text{N/mm}^2$；

式中　A_b——型芯的横断面面积（mm^2）。

在脱模力计算中 $t/d_{cp} \leqslant 1/20$，即 $\lambda = r_{cp}/t \geqslant 10$ 为薄壁注塑件。反之，为厚壁注塑件。如图 10-7 所示，t 为注塑件壁厚；d_{cp}为型芯的平均直径 。

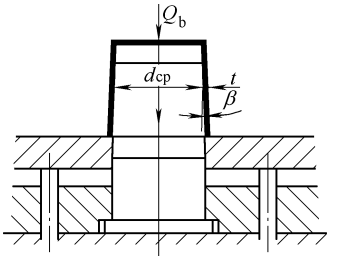


图 10-7　脱模力组成示意图

因为脱模力的计算理论和测量较为复杂，这里分

别阐述简单估算法和热应力解析计算法。简单估算法在国内各注射模设计专著中常用。热应力解析计算法以理论和实测为依据，在国外专著上有介绍[2]。

10.2.1 脱模力的简单估算法

有克服包紧脱模阻力估算计算式如下。

1）薄壁圆筒注塑件

$$Q_c = \frac{2\pi E S_{cp} t h K_f}{1-\nu} \tag{10-14}$$

2）厚壁圆筒注塑件

$$Q_c = \frac{2\pi r_{cp} E S_{cp} h K_f}{(1+\nu+K_\lambda)\cos\beta} \tag{10-15}$$

3）薄壁矩形注塑件

$$Q_c = \frac{8 E S_{cp} t h K_f}{1-\nu} \tag{10-16}$$

4）厚壁矩形注塑件

$$Q_c = \frac{2(l+b) E S_{cp} h K_f}{(1+\nu+K_\lambda)\cos\beta} \tag{10-17}$$

式中 E——塑料的拉伸弹性模量（N/mm^2），参考表 10-3；

S_{cp}——塑料的注射成型平均成型收缩率，参考前表 3-18；

t——注塑件壁厚（mm）；

ν——塑料的泊松比，见表 10-3；

β——型芯的脱模斜度，参考前表 7-5 和表 7-6；

h——型芯脱模方向高度（mm）；

l、b——矩形型芯断面的两边长度（mm）。

计算中，将 $r_{cp}=(l+b)/\pi$ 作为矩形型芯的折算半径。式 10-17 中，K_f 为脱模斜度修正系数。其计算式为

$$K_f = \frac{f\cos\beta - \sin\beta}{1+f\sin\beta\cos\beta} \tag{10-18}$$

式中 f——注塑件与钢表面之间的动摩擦系数，参考前表 1-20。

式（10-15）和式（10-17）中，K_λ 为厚壁注塑件的计算因子

$$K_\lambda = \frac{2\lambda^2}{\cos^2\beta + 2\lambda\cos\beta} \tag{10-19}$$

式中 λ——注塑件壳体的平均半径 r_{cp} 与壁厚 t 之比。

［**例 1**］ ABS 圆管注塑件，内径 10mm，壁厚 2mm，高 35mm，脱模斜度很小。求脱模力。

［**解**］ $r=5mm$，$t=2mm$，$h=35mm$，$\beta=0$。由表 10-3 查得 $E=2\times10^3\ N/mm^2$，$S_{cp}=0.006$。查前表 1-20 的动摩擦系数 $f=f_k=0.38$。$Q_b=0$。$\lambda=r/t=5/2=2.5<10$ 为厚壁圆筒注塑件。

由式（10-18）　$K_f=\dfrac{f\cos\beta-\sin\beta}{1+f\sin\beta\cos\beta}=\dfrac{0.38\times1-0}{1+0.38\times0\times1}=0.38$

由式（10-19）　$K_\lambda=\dfrac{2\lambda^2}{\cos^2\beta+2\lambda\cos\beta}=\dfrac{2\times2.5^2}{1^2+2\times2.5\times1}=2.08$

由式（10-15）

$$Q_e=Q_c=\frac{2\pi r_{cp}ES_{cp}hK_f}{(1+\nu+K_\lambda)\cos\beta}$$

$$=\frac{2\pi\times5\times2\times10^3\times0.006\times35\times0.38}{(1+0.3+2.08)\times1}\text{N}=1484\text{N}$$

简单计算法的特点是借用塑料的注射成型平均收缩率 S_{cp} 计算 Q_c，应用室温下的材料性能数据，这些数据大都容易获得。用注塑件与钢表面之间的动摩擦系数 f_k 计算脱模阻力 Q_c，不符合力学原理。简单计算法不考虑脱模温度下，塑料对钢表面的粘着作用。它属于经验计算，与实验结果比较，预测的脱模力数值均偏大。这些计算公式还没有考虑注射成型工艺条件和注塑件的几何因素。

［**例 2**］　成型 HDPE 口杯。已知模具型芯的锥角为 10°，模具型芯直径为 Φ100mm，口杯壁厚为 2mm，型芯高 180mm，用简单估算法，需多大的脱模力才能使注塑件脱出。

［**解**］　型芯小端直径 $d_1=100\text{mm}$，型芯大端直径 $d_2=100+2\times180\tan5°=131.5\text{mm}$，型芯平均半径 $r=r_{cp}=65.8\text{mm}$，注塑件壁厚 $t=2\text{mm}$，型芯高 $h=180\text{mm}$。型芯的横断面面积 $A_b=\pi r^2=3.14\times65.8^2=13602\ \text{mm}^2$。脱模斜度 $\beta=5°$。由表 10-3 查得 HDPE 的弹性模量 $E=895\text{N/mm}^2$，$\nu=0.38$。根据表 3-18，取室温下塑料的平均成型收缩率 $S_{cp}=0.035$。如果参考表 1-20，按室温下的 HDPE 塑料与钢型芯间动摩擦系数 $f_k=0.11$。又参照表 10-3，脱模温度下的静摩擦系数 $f_c=0.43$。$t/d=2/(2\times65.8)=0.0152<0.05$ 为薄壁圆筒注塑件。

倘若 $f=f_c=0.43$ 求斜度修正系数

$$K_f=\frac{f\cos\beta-\sin\beta}{1+f\sin\beta\cos\beta}=\frac{0.43\cos5°-\sin5°}{1+0.43\sin5°\cos5°}=0.328928$$

用 $K_f=0.328928$ 代入，$Q_c=24166\text{N}$，结果偏大。

用前表 1-20，按室温下的 HDPE 塑料与钢型芯间动摩擦系数 $f=f_k=0.11$ 求斜度修正系数

$$K_f=\frac{f\cos\beta-\sin\beta}{1+f\sin\beta\cos\beta}=\frac{0.11cos5°-\sin5°}{1+0.11\sin5°\cos5°}=0.022214$$

由式（10-14）求薄壁圆筒塑件克服注塑件对型芯包紧的脱模阻力

$$Q_c=\frac{2\pi ES_{cp}thK_f}{1-\nu}=\frac{2\pi\times895\times0.035\times2\times180\times0.022214}{1-0.38}\text{N}=2539\text{N}$$

计入封闭壳体需克服的真空吸力，用式（10-13）求脱模力 Q_e

$$Q_e=Q_c+Q_b=Q_c+0.1A_b=2539\text{N}+0.1\times13602\text{N}=3890\text{N}$$

结果与热应力解析计算值接近。

本例说明简单计算法，只得用常温下的注塑件在钢型芯上的动摩擦系数估算。下例

说明在脱模力估算时，薄壁与厚壁的计算式是不同的。

［例 3］ 若将上例题的 HDPE 口杯注塑件壁厚改为 6mm，已知模具型芯的锥角为 10°，模具型芯直径为 Φ100mm，型芯高 180mm，用简单估算法，需多大的脱模力才能使注塑件脱出。

［解］ 型芯平均半径 $r_{cp}=65.8\text{mm}$，注塑件壁厚 $t=6\text{mm}$，型芯高 $h=180\text{mm}$。型芯的横断面面积 $A_b=\pi r^2=3.14\times65.8^2=13602\text{mm}^2$。脱模斜度 $\beta=5°$。由表 10-3 查得 HDPE 的弹性模量 $E=895\text{N/mm}^2$，$\nu=0.38$。根据表 3-18，取室温下塑料的平均成型收缩率 $S_{cp}=0.035$。$t/d=6/(2\times65.8)=0.04559\geqslant0.05$ 为厚壁圆筒注塑件。$\lambda=r_{cp}/t=65.8/6=10.97$。

由式（10.2-19）求厚壁注塑件的计算因子

$$K_\lambda=\frac{2\lambda^2}{\cos^2\beta+2\lambda\cos\beta}=\frac{2\times10.97^2}{\cos^25°+2\times10.97\cos5°}=10.53$$

按室温下的 HDPE 注塑件与钢型芯间动摩擦系数 $f=f_k=0.11$ 求斜度修正系数，由式（10-18）

$$K_f=\frac{f\cos\beta-\sin\beta}{1+f\sin\beta\cos\beta}=\frac{0.11\cos5°-\sin5°}{1+0.11\sin5°\cos5°}=0.022214$$

由式（10-17）求厚壁圆筒注塑件克服注塑件对型芯包紧的脱模阻力

$$Q_c=\frac{2\pi r_{cp}ES_{cp}hK_f}{(1+\nu+K_\lambda)\cos\beta}$$

$$=\frac{2\pi\times65.8\times1350\times0.035\times180\times0.022214}{(1+0.38+10.53)\cos5°}\text{N}=6583\text{N}$$

对于厚壁圆筒注塑件，壁厚从 2mm 增加到 6mm，脱模阻力 Q_c 并非为原来的 3 倍。

由式（10-3）求脱模力 Q_e

$$Q_e=Q_c+Q_b=Q_c+0.1A_b=(6583+0.1\times13602)\text{N}=7943\text{N}$$

10.2.2 脱模力的热应力解析计算法

本节结合注射工艺过程进行脱模的热应力收缩分析，可以笔算或应用计算机程序计算。

1. 薄壁圆筒注塑件的脱模力计算

应先求出制件包紧型芯的表面正压力，也称为表面接触压力或脱模应力 p_c（N/mm^2），可按两向应力状态，作为薄壁圆筒进行力学分析，可得注塑件壁内周向应力

$$\sigma_\tau=\frac{p_cd}{2t}\tag{10-20}$$

因冷却收缩，圆筒轴线方向所需脱模力为

$$Q_c=f_cp_cA_c\tag{10-21}$$

式中，A_c 为决定脱模力的几何因素，指注塑件包紧型芯的有效面积。圆筒注塑件有 $A_c=\pi d\cdot h$。f_c 是注塑件与钢型芯表面间的脱模系数。它是注塑件在脱模温度下的一种静摩擦系数，受塑料熔体经高压在钢表面固化中粘附的影响。

薄壁圆筒注塑件在模内冷却过程中，存在周向应力 σ_τ，径向薄壁收缩应力可略而不计。注塑件沿脱模方向的轴向应力 σ_z，处于半自由状态，故 $\sigma_z = 0.5\sigma_\tau$。根据广义胡克定律，周向收缩变形会被轴向收缩抵消一部分。因此，总的周向变形是

$$\varepsilon_\tau = \frac{\sigma_\tau}{E} - \nu\frac{\sigma_z}{E} = \frac{\sigma_\tau}{E}(1 - 0.5\nu)$$

式中，E 和 ν 为塑料在脱模温度下的抗拉弹性模量和泊松比。由此得周向应力

$$\sigma_\tau = \frac{E\varepsilon_\tau}{1 - 0.5\nu} \tag{10-22}$$

ε_τ也是周向的单位收缩量，其热收缩计算式

$$\varepsilon_\tau = \alpha(T_{p=1} - T_j)$$

式中，α 是该塑料的线膨胀系数（1/℃）；$T_{p=1}$是假设模腔压力降到大气压时，模内注塑件开始收缩的温度，可理解为最大热应力温度。温度 $T_{p=1}$需专门实验测定，工程计算中可用热变形温度近似替代。施力 0.46 N/mm^2 的热变形温度 T_f 与该温度更为接近。将此 T_f 称为软化温度。T_j 是脱模顶出时的注塑件温度。所以有

$$\varepsilon_\tau = \alpha(T_f - T_j) \tag{10-23}$$

在现代计算机计算时，用型腔的 P-V-T 状态方程求出体积收缩率

$$S_V = \frac{V_{(T_{p=1})} - V_{(T_j)}}{V_{(T_{p=1})}} \tag{10-24}$$

再由

$$k = \frac{\varepsilon_\tau}{S_V}$$

有 ABS 其 $k \approx 0.43$，PS 的 $k \approx 0.7$，PP 的是 $k \approx 0.6$。由周向收缩和体积收缩比值 k 可得周向收缩

$$\varepsilon_\tau = kS_V \tag{10-25}$$

将式（10-23）代入式（10-22），再代入式（10-20）和（10-21），可得薄壁圆筒注塑件的热应力收缩脱模力计算式

$$Q_c = \frac{2\pi Kf_c\alpha E(T_f - T_j)\,th}{1 - 0.5\nu} \tag{10-26}$$

式中，物理参量 f_c、α、E、T_f、T_j 和 ν 可查表 10-3；斜度修正系数 K 见式（10-28）或查图 10-9。

大部分塑料的泊松比 ν 在 0.3 ~ 0.4 之间，现取 $\nu = 0.35$。脱模力还受到注射工艺参数诸因素的影响。据实验资料分析，大致有 10% ~ 40% 的影响程度。因此乘上工艺影响系数 1.25，可得薄圆筒注塑件收缩脱模力实用计算式

$$Q_c = 10Kf_c\alpha E(T_f - T_j)\,th \tag{10-27}$$

2. 型芯具有斜度的脱模力计算

如图 10-8 所示，在脱模斜度 $\beta \neq 0$ 时，有收缩脱模力

$$Q_c = qA_{c\beta}$$

q 为单位面积的抽拔力，与脱模方向相反。$A_{c\beta}$为型芯圆台的表面积

$$A_{c\beta}=\frac{2\pi r_{cp}h}{\cos\beta}=\frac{A_c}{\cos\beta}$$

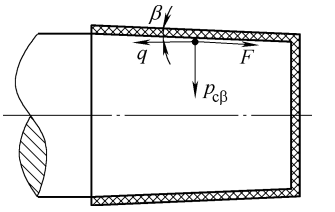


图 10-8　收缩脱模力分析

假定注塑件不动，视型芯为研究对象并抽出脱离。于注塑件平均内径 r_{cp} 处的微小单元上，F 是脱模时的单位摩擦力。$p_{c\beta}$ 是 $\beta\neq0$ 时，注塑件与型芯间表面的接触应力

$$p_{c\beta}=p_c\cos\beta$$

在抽拔时，在 q 作用下，接触应力 $p_{c\beta}$ 降低了 $q\sin\beta$，故有

$$F=f_c(p_{c\beta}-q\sin\beta)$$

由轴线方向列出平衡方程式，$\sum F_x=0$

$$F\cos\beta=q+p_{c\beta}\sin\beta$$

该二式联立后得

$$q=\frac{p_{c\beta}(f_c\cos\beta-\sin\beta)}{1+f_c\sin\beta\cos\beta}$$

由定义

$$K=\frac{q}{f_cp_{c\beta}}$$

得脱模斜度系数

$$K=\frac{f_c\cos\beta-\sin\beta}{f_c(1+f_c\sin\beta\cos\beta)}\qquad(10\text{-}28)$$

若 $\beta=0$，$K=1$；$\beta>0$，$K<1$。K 值不但随 β 增大而减小，而且还随 f_c 的增大而增加，见图 10-9 的估算线。由前关系式，收缩脱模力

$$Q_c=qA_{c\beta}=f_cp_{c\beta}A_{c\beta}K=f_cp_cA_cK$$

式中 A_c 在 $\beta\neq0$ 时，为平均 r_{cp} 所构成的假想圆柱表面积。因此对圆筒注塑件

$$A_c=2\pi r_{cp}h$$

3. 薄壁矩形注塑件盒的脱模力计算

l、b 分别为矩形注塑件内壁长度、宽度，h 为脱模方向型芯高。仍按两向应力状态进行分析。如图 10-10 所示，以矩形断面的对称面作为坐标轴，在包含 x 轴坐标的轴平面截取。

由平衡条件 $\sum y=0$，得

$$2\sigma_{\tau B}th-p_Alh=0$$

可得接触压力

$$p_A=\frac{2t\sigma_{\tau B}}{l}\qquad(10\text{-}29a)$$

再以包含 y 轴坐标的轴平面截取，如图 10-11 所示。由平衡条件 $\sum X=0$，得

$$2\sigma_{\tau A}th-p_Bbh=0$$

有接触压力

$$p_B=\frac{2t\sigma_{\tau B}}{b}\qquad(10\text{-}29b)$$

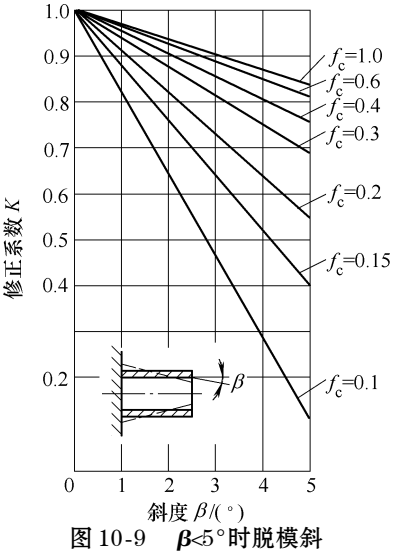


图 10-9　β<5°时脱模斜度修正系数 K 的线图

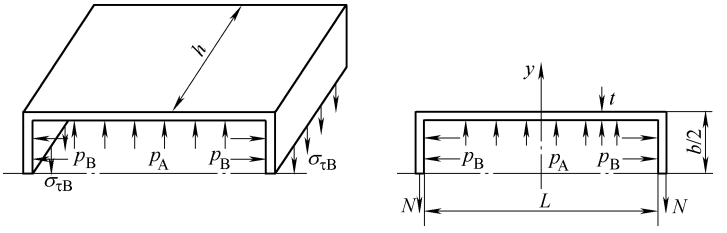


图 10-10　薄壁矩形盒的应力分析之一

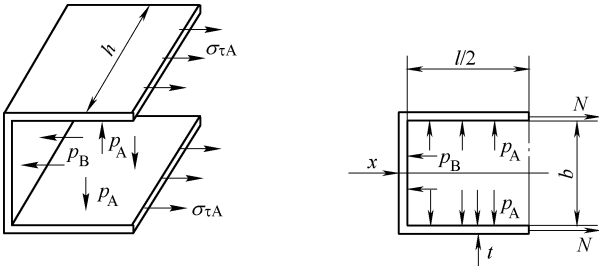


图 10-11　薄壁矩形盒的应力分析之二

假设注塑件壁厚为连续弹性体，壁内周向应力相同，即

$$\sigma_\tau = \sigma_{\tau A} = \sigma_{\tau B}$$

代入式（10-29a）和式（10-29b）后得

$$p_A = \frac{2t\sigma_\tau}{l} \quad 和 \quad p_B = \frac{2t\sigma_\tau}{b}$$

p_A 并不等于 p_B。对于两个长边和短边，分别计算收缩脱模力 Q_A 和 Q_B。对应的侧向接触面积分别为 $A' = 2lh$ 和 $B' = 2bh$。因而可得

$$Q_A = f_c p_A A' = f_c (4t)\sigma_\tau h$$

和

$$Q_B = f_c p_B A' = f_c (4t)\sigma_\tau h$$

所以，可得收缩脱模力是

$$Q_c = Q_A + Q_B = 8 f_c t \sigma_\tau h \tag{10-29c}$$

注塑件在型芯高度方向的轴向应力 σ_z，由于收缩处于半自由状态，$\sigma_z = 0.5\sigma_\tau$。薄壁壳体的径向应力 $\sigma_r = 0$。代入广义胡克定律得

$$\sigma_\tau = \frac{E\varepsilon_\tau}{1 - 0.5\nu}$$

将此代入式（10-29c），并计入脱模斜度，得薄壁矩形盒的收缩脱模力计算式

$$Q_c = \frac{8Kf_c\alpha E(T_f - T_j)\,th}{1 - 0.5\nu} \tag{10-29d}$$

取 $\nu = 0.35$，再乘以工艺系数 1.25，得薄壁矩形盒注塑件脱模力的实用计算式

$$Q_c = 12Kf_c\alpha E(T_f - T_j)\,th \tag{10-30}$$

式中，物理参量 f_c、α、E、T_f、T_j 可查表 10-3；K 见式（10-28）或图 10-9。

将矩形盒的脱模几何因素折算成圆筒注塑件的几何因素，常用来推导矩形盒的脱模

力计算公式，并以折算直径 d_k 来判断矩形盒是否为薄壁。将式（10-20）与式（10-29c）联立，有

$$p_c A_c = \frac{2t\sigma_\tau}{d_k} A_c = 8\sigma_\tau th$$

可得 $\frac{A_c}{d_k} = 4h$，又矩形盒 $A_c = 2(l+b)h$，所以折算直径应为

$$d_k = \frac{l+b}{2} \tag{10-31}$$

4. 确定脱模力计算参量和计算实例

在脱模力计算中，正确确定物理参量是困难的。塑料的抗拉弹性模量 E，随着温度上升而下降；而热膨胀系数却随温度升高而增大。这对聚酰胺类塑料较明显，因此表 10-3 中三种聚酰胺的 E 值为室温时的四分之三。

其中脱模系数 f_c 的确定最为复杂。表 10-3 所列 f_c 大于钢与塑料滑动系数的 2 倍以上。脱模系数与模壁温度、保压压力、冷却时间、开模时型腔压力以及顶杆速度等工艺条件有关。脱模系数还与模具型芯的表面粗糙度有关，其数值有较大离散性，见表 10-4。表 10-3 所列脱模系数 f_c 是型芯表面沿着脱模方向抛光，粗糙度达到 $R_a \leqslant 1\mu m$。

表 10-3 注塑件脱模力计算参量

品种	E/ $10^3 N \cdot mm^{-2}$	f_c	T_f/℃	T_j/℃	$\alpha/10^{-5}℃^{-1}$	$[\sigma]$/ $N \cdot mm^{-2}$	ν
HDPE	0.84 ~ 0.95	0.35 ~ 0.50	65 ~ 82	50 ~ 60	11 ~ 13	7 ~ 13	0.38
PP	1.1 ~ 1.6	0.40 ~ 0.50	102 ~ 115	55 ~ 65	5.8 ~ 10.2	12	0.33
PMMA	3.16	0.44 ~ 0.55	80 ~ 109	50 ~ 70	5 ~ 9	25	
硬 PVC	2.4 ~ 4.2	0.45 ~ 0.60	70 ~ 82	45 ~ 60	5 ~ 18.5	12 ~ 16	
PS	2.2 ~ 3.2	0.40 ~ 0.50	82 ~ 104	50 ~ 70	6 ~ 8	8.2 ~ 18.6	0.32
HIPS	1.8 ~ 2.4	0.45 ~ 0.55	82 ~ 104	50 ~ 70	7 ~ 9	5 ~ 10	
ABS	1.8 ~ 2.6	0.35 ~ 0.55	90 ~ 108	50 ~ 70	7 ~ 10	11.7 ~ 16.7	
PC	2.2	0.50 ~ 0.75	132 ~ 150	90 ~ 110	5 ~ 7	26	0.38
30% 玻璃纤维 PC	10	0.50 ~ 0.75	150 ~ 155	95 ~ 115	2.5 ~ 5	28 ~ 40	
共 POM	2.5 ~ 2.9	0.30 ~ 0.40	158 ~ 174	90 ~ 120	8.5 ~ 10.7	23	
PSF	2.5	0.70 ~ 0.90	182	130 ~ 150	3.1	28	
PPO	2.5	0.65 ~ 0.75	180 ~ 204	110 ~ 150	5.2 ~ 6.6	29	
Nory1	2.1	0.65 ~ 0.75	120 ~ 160	110 ~ 150	2.5 ~ 5.9	27	
PBT	2.2	0.30 ~ 0.40	150 ~ 165	60 ~ 80	4 ~ 7	22	
30% 玻璃纤维 PBT	9.8	0.30 ~ 0.40	225	70 ~ 90	2.5 ~ 4	42	
PA1010	1.2 ~ 1.35	0.30 ~ 0.50	148	40 ~ 60	10 ~ 14	20	0.33
PA6	1.95	0.35 ~ 0.45	140 ~ 176	60 ~ 90	8	23	
PA66	0.98 ~ 2.18	0.35 ~ 0.45	150 ~ 180	60 ~ 90	9	29	

表 10-4 取决于模具表面粗糙度的脱模系数 f_c

材料	$Ra = 1\mu m$ 沿脱模方向抛光	$Ra = 6\mu m$ 垂直于脱模方向抛光	$Ra = 20\mu m$ 电脉冲机床加工
PE	0.38	0.52	0.70
PP	0.47	0.50	0.84
PS	0.37	0.52	1.82
ABS	0.35	0.46	1.33
PC	0.47	0.68	1.60

注塑件被顶接触面上的压力过大，会留下较大内应力而发白，甚至使塑料制品产生塑性变形而损伤开裂。经一些先进模具的脱模机构验算，顶出件作用在注塑件表面上的接触许用压力，大致是该种塑料常温下抗拉屈服应力的1/3，此许用压力[σ]见表10-3。显然，根据许用压力，可计算所需的顶出接触面积、顶杆根数。许多塑料壳体形状虽然复杂，但在型芯上的肋槽、沟坑和桩头等，由于塑料向自身收缩，脱模力可以不计。

[**例 1**]　有个 PC 塑料的闭式套筒，壁厚 $t=3.5\text{mm}$，内径 $d=70\text{mm}$，高度 $h=70\text{mm}$。计算脱模力及估算所需的顶出接触面积。

[**解**]　由表10-3决定有关参数：弹性模量 $E=2.2\times10^3\text{N/mm}^2$；线胀系数 $\alpha=6\times10^{-5}℃^{-1}$；软化温度 $T_f=135℃$；脱模温度 $T_j=100℃$；脱模系数 $f_c=0.65$；顶出注塑件许用压力 $[\sigma]=26\text{N/mm}^2$。

$t/d=3.5/70=1/20$ 属薄壁注塑件；又脱模斜度 $\beta=0$，故修正系数 $K=1$。由式(10-27)

$$Q_c=10Kf_c\alpha E(T_f-T_j)\,th$$
$$=10\times1\times0.65\times6\times10^{-5}\times2.2\times10^3\times(135-100)\times3.5\times70\text{N}=7357\text{N}$$

需克服的真空吸力

$$Q_b=0.1A_b=0.1\times\pi\times70^2\times\frac{1}{4}\text{N}=385\text{N}$$

该闭式圆筒制件的脱模力

$$Q_e=Q_c+Q_b=(7357+385)\text{N}=7742\text{N}$$

注塑件顶出端面为环形接触面积

$$a=\pi(R^2-r^2)=\pi[(35+3.5)^2-35^2]\text{mm}^2=808\text{mm}^2$$

若用套筒顶出，接触面上压力

$$\sigma=\frac{Q_e}{a}=\frac{7742}{808}\text{N/mm}^2=9.58\text{N/mm}^2<[\sigma]=26\text{N/mm}^2$$

若用顶杆，所需接触面积

$$a'=\frac{Q_e}{[\sigma]}=\frac{7742}{26}\text{mm}^2=298\text{mm}^2$$

[**例 2**]　成型 HDPE 口杯。已知模具型芯的锥角为10°，模具型芯直径为 Φ100mm，口杯壁厚为2mm，型芯高度180mm，用热应力解析计算法预测，需多大的脱模力才能使注塑件脱出。

[**解**]　型芯平均半径 $r=65.8\text{mm}$，注塑件壁厚 $t=2\text{mm}$，型芯高度 $h=180\text{mm}$。型芯的横断面面积 $A_b=\pi r^2=3.14\times65.8^2=13602\text{ mm}^2$。脱模斜度 $\beta=5°$。由表10-3决定有关参数：HDPE 的弹性模量 $E=895\text{N/mm}^2$；$\nu=0.38$；线胀系数 $\alpha=12\times10^{-5}℃^{-1}$；软化温度 $T_f=74℃$；脱模温度 $T_j=55℃$；脱模系数 $f_c=0.43$。$t/d=2/(2\times65.8)=0.0152<0.05$ 为薄壁圆筒注塑件。

由式（10-28）求脱模修正系数

$$K=\frac{f_c\cos\beta-\sin\beta}{f_c(1+f_c\sin\beta\cos\beta)}=\frac{0.43\cos5°-\sin5°}{0.43\times(1+0.43\sin5°\cos5°)}=0.7650$$

再用图 10-9 校核，$\beta = 5°$和$f_c = 0.43$ 时查得修正系数 $K = 0.7650$。

由式（10-26）求薄壁圆筒注塑件的收缩脱模力

$$Q_c = \frac{2\pi K f_c \alpha E (T_f - T_j)\, th}{1 - 0.5\nu}$$

$$= \frac{2\pi \times 0.765 \times 0.43 \times 12 \times 10^{-5} \times 895 \times (74 - 55) \times 2 \times 180}{1 - 0.5 \times 0.38}\text{N} = 1875\text{N}$$

由式（10-13）求脱模力 Q_e

$$Q_e = Q_c + Q_b = Q_c + 0.1A_b = (1875 + 0.1 \times 13602)\,\text{N} = 3235\text{N}$$

[**例 3**] 若上例改用 PP 成型口杯，其他条件不变。已知模具型芯的锥角为 10°，模具型芯直径 Φ100mm，口杯壁厚为 2mm，型芯高 180mm，用热应力解析计算法预测，需多大的脱模力才能使注塑件脱出。其脱模力是增大还是减小？

[**解**] 型芯平均半径 $r = 65.8\text{mm}$，注塑件壁厚 $t = 2\text{mm}$，型芯高 $h = 180\text{mm}$。型芯的横断面面积 $A_b = \pi r^2 = 3.14 \times 65.8^2 = 15602\text{mm}^2$。脱模斜度 $\beta = 5°$。由表 10-3 决定有关参数：弹性模量 $E = 1350\text{N/mm}^2$；$\nu = 0.33$；线胀系数 $\alpha = 7.8 \times 10^{-5}\text{℃}^{-1}$；软化温度 $T_f = 109\text{℃}$；脱模温度 $T_j = 60\text{℃}$；脱模系数 $f_c = 0.45$。$t/d = 2/(2 \times 65.8) = 0.0152 < 0.05$ 为薄壁圆筒注塑件。

由式（10-28）求脱模修正系数

$$K = \frac{f_c \cos\beta - \sin\beta}{f_c (1 + f_c \sin\beta \cos\beta)} = \frac{0.45\cos 5° - \sin 5°}{0.45 (1 + 0.45 \sin 5° \cos 5°)} = 0.7723$$

再用图 10-9 校核，$\beta = 5°$和$f_c = 0.45$ 时查得修正系数 $K = 0.7723$。

由式（10-26）求薄壁圆筒注塑件的收缩脱模力

$$Q_c = \frac{2\pi K f_c \alpha E (T_f - T_j)\, th}{1 - 0.5\nu}$$

$$= \frac{2\pi \times 0.7723 \times 0.45 \times 7.8 \times 10^{-5} \times 1350 \times (109 - 60) \times 2 \times 180}{1 - 0.5 \times 0.33}\text{N} = 4857\text{N}$$

由式（10-13）求脱模力 Q_e

$$Q_e = Q_c + Q_b = Q_c + 0.1A_b = (4857 + 0.1 \times 13602)\,\text{N} = 6217\text{N}$$

改用 PP 成型，因材料性能较 HDPE 刚强，注塑件对型芯包紧的脱模阻力 Q_c 大。

[**例 4**] 某收录机中框，内壁大端尺寸 $l'b'h = 372\text{mm} \times 196\text{mm} \times 133\text{mm}$。根据模具结构，布置 ϕ8mm 顶杆 17 根、ϕ6.5mm 顶杆 5 根、ϕ6mm 顶杆 4 根、ϕ5mm 顶杆 7 根。型芯斜度为 1.5°，该塑壳的壁厚 $t = 2\text{mm}$，用 ABS 注射成型。试校核顶杆总顶出面积是否合理。

[**解**] 由表 10-3 确定有关参数：$E = 2.2 \times 10^3\text{N/mm}^2$、$\alpha = 8.5 \times 10^{-5}/\text{℃}$、$T_f = 100\text{℃}$、$T_j = 60\text{℃}$、$f_c = 0.5$、$[\sigma] = 13.5\text{N/mm}^2$。由图 10-9，在 $\beta = 1.5°$时，得 $K = 0.92$。由结构可知 $Q_b = 0$。

矩形边长平均值 $l = l' - h\,\text{tg}\beta = (372 - 133 \times \text{tg}1.5°)\,\text{mm} = 368\text{mm}$

$$b = b' - h\,\text{tg}\beta = (196 - 133 \times \text{tg}1.5°)\,\text{mm} = 192\text{mm}$$

当量折算直径　　$d_k=\frac{1}{2}(l+b)=0.5\times(368+192)\text{mm}=280\text{mm}$

$t/d_k=2/280<1/20$ 属薄壁矩形盒。由式（10-30）

$$Q_e=Q_c=12Kf_c\alpha E(T_f-T_j)\,th$$
$$=12\times0.92\times0.5\times8.5\times10^{-5}\times2.2\times10^3\times(100-60)\times2\times133\text{N}$$
$$=10983\text{N}$$

顶杆接触总面积

$$a'=\frac{\pi}{4}\sum d_i^2n_i=\frac{\pi}{4}(8^2\times17+6.5^2\times5+6^2\times4+5^2\times7)\text{mm}^2=1270\text{mm}^2$$

接触压力校核

$$\sigma=\frac{Q_e}{a'}=\frac{10983}{1270}\text{N/mm}^2=8.65\ \text{N/mm}^2<[\sigma]=13.5\text{N/mm}^2$$

该模具顶杆的顶出总面积是可行的。

5. 厚壁注塑件的脱模力计算

$t>d/20$ 的厚壁注塑件脱模力受到材料向壁厚中性层冷却收缩的影响。可用弹性力学的有关厚壁圆筒的理论进行分析计算。若脱模斜度 $\beta=0$，筒体周向应力为

$$\sigma_\tau=p_c\frac{R^2+r^2}{R^2-r^2}$$

式中　R 与 r——圆筒外圆与内孔的半径；

p_c——注塑件收缩后垂直于轴线的，与型芯间的单位接触压力。

因为是厚壁注塑件，其径向收缩是较大正应力，$\sigma_r=-p_c$。圆筒的轴线方向应力，相比之下是较小的，$\sigma_z=0$。根据广义胡克定律，周向应变为

$$\varepsilon_\tau=\frac{1}{E}[\sigma_\tau-\nu(\sigma_r+\sigma_z)]=\frac{p_c}{E}\left(\frac{R^2+r^2}{R^2-r^2}+\nu\right)$$

从冷却过程的周向线性收缩计算的收缩率为

$$\varepsilon_\tau=\alpha(T_f-T_j)$$

以上两式中，E、μ、α、T_f和 T_j含义如前所述。将此两式联立，乘以工艺系数 1.25 后得

$$p_c=\frac{1.25\alpha E(T_f-T_j)}{\frac{R^2+r^2}{R^2-r^2}+\nu}\tag{10-32}$$

由带有脱模斜度的收缩脱模力 $Q_c=Kf_cp_cA_c$，可得厚壁圆筒和矩形盒的计算通式

$$Q_c=\frac{1.25Kf_c\alpha E(T_f-T_j)A_c}{\frac{(d_k+2t)^2+d_k^2}{(d_k+2t)^2-d_k^2}+\nu}\tag{10-33}$$

式中，对于圆筒注塑件：$d_k=d=2r$，$A_c=2\pi rh$；

对于矩形盒注塑件：$d_k=\frac{l+b}{2}$，$A_c=2(l+b)h$。

［例］　成型 HDPE 口杯。已知模具型芯的锥角为 10°，模具型芯直径为 Φ100mm，

口杯壁厚为6mm，型芯高180mm，用热应力解析计算法预测，需多大的脱模力才能使注塑件脱出。

［解］ 型芯平均半径 $r=65.8\text{mm}$，注塑件壁厚 $t=6\text{mm}$，型芯高 $h=180\text{mm}$。型芯的横断面面积 $A_b=\pi r^2=3.14\times65.8^2=13602\text{mm}^2$。脱模斜度 $\beta=5°$。由表10-3决定有关参数：HDPE的弹性模量 $E=895\text{N/mm}^2$；$\nu=0.38$；线胀系数 $\alpha=12\times10^{-5}℃^{-1}$；软化温度 $T_f=74℃$；脱模温度 $T_j=55℃$；脱模系数 $f_c=0.43$。$t/d=6/(2\times65.8)=0.04559\geqslant0.05$ 为厚壁圆筒注塑件。

由式（10-28）求脱模修正系数

$$K=\frac{f_c\cos\beta-\sin\beta}{f_c(1+f_c\sin\beta\cos\beta)}=\frac{0.43\cos5°-\sin5°}{0.43(1+0.43\sin5°\cos5°)}=0.7650$$

再用图10-9校核，$\beta=5°$ 和 $f_c=0.43$ 时查得修正系数 $K=0.7650$。

对于圆筒注塑件：$d_k=d=2r=2\times65.8\text{mm}=131.6\text{mm}$

$$A_c=2\pi rh=2\pi\times65.8\times180\text{mm}=74418\text{mm}$$

由式（10-33）求厚壁圆筒注塑件的收缩脱模力

$$Q_c=\frac{1.25Kf_c\alpha E(T_f-T_j)A_c}{\dfrac{(d_k+2t)^2+d_k^2}{(d_k+2t)^2-d_k^2}+\nu}$$

$$=\frac{1.25\times0.765\times0.43\times12\times10^{-5}\times895\times(74-55)\times74418}{\dfrac{(131.6+26)^2+131.6^2}{(131.6+26)^2-131.6^2}+0.38}\text{N}=5261\text{N}$$

由式（10-13）求脱模力 Q_e

$$Q_e=Q_c+Q_b=Q_c+0.1A_b=(5261+0.1\times13602)\text{N}=6621\text{N}$$

与前例同样的HDPE口杯，但壁厚为2mm增加到6mm，由于向圆筒注塑件壁厚中性层收缩，使对型芯的收缩脱模力非线性增加。

6. 具有侧凹注塑件的脱模力计算

系指类似图10-12所示线圈骨架注塑件，在侧向滑块进行抽芯或分型时，其侧向抽拔力是估算斜导柱直径的依据。

侧向抽拔阻力来自注塑件收缩对滑块的夹紧力 p。注塑件为薄壁，径向应力很小，可设定 $\sigma_r=0$。注塑件的周向收缩被型芯限制，周向应力为 σ_τ。而侧滑块限制了注塑件的轴线方向收缩，存在轴向应力 σ_z。由广义胡克定律

$$\varepsilon_\tau=\frac{1}{E}[\sigma_\tau-\nu(\sigma_r+\sigma_z)]=\frac{1}{E}(\sigma_\tau-\nu\sigma_z)$$

同理有 $$\varepsilon_z=\frac{1}{E}(\sigma_z-\nu\sigma_z)$$

因为 $$\varepsilon_\tau=\varepsilon_z=\varepsilon$$

所以 $$\sigma_\tau=\sigma_z=\sigma$$

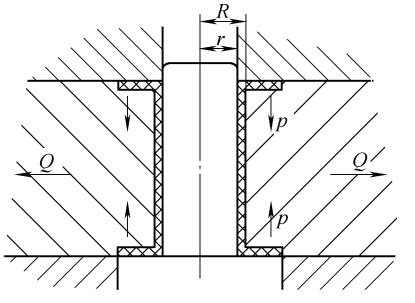


图10-12 侧凹注塑件的收缩夹紧力

由此得注塑件冷却收缩所产生内应力，并取 $\nu=0.35$，再乘 1.25 工艺系数，有

$$\sigma=\frac{E\varepsilon}{1-\nu}=2\alpha E(T_f-T_j) \tag{10-34a}$$

进而得轴向夹紧力

$$p=\sigma A \tag{10-34b}$$

式中，A 为产生轴向收缩包紧的结构部分投影面积。如图 10-12 所示，圆环面积为 $A=\pi(R^2-r^2)$。R 和 r 为骨架柱体的外圆和内孔半径。

如图 10-12 所示的侧向抽拔力 Q，因侧滑块受到注塑件两端隔圈片的成对夹紧力，侧滑块是 n 个，故

$$Q=\frac{f_c(2p)}{n}=\frac{4\pi f_c\alpha E(T_f-T_j)(R^2-r^2)}{n} \tag{10-35}$$

该 Q 是每个侧滑块应克服的抽拔阻力。式中 f_c、E、α、T_f 和 T_j 见表 10-3。

从上述对脱模力的分析和计算，可获知影响脱模力的因素。

1）注塑件与钢型芯之间的脱模系数 f_c，比常温下的塑料与钢表面间的动摩擦系数大许多。高压高温下塑料熔体与钢表面间有黏着过程。脱模系数 f_c 与塑料性能和钢型芯表面的粗糙度有关。聚碳酸酯等塑料与钢型芯间有较大的静摩擦系数，有较大的脱模力。聚酰胺等塑料与钢型芯间的静摩擦系数很小，其注塑件的脱模力也较小。

2）型芯的侧面积与脱模力成正比。同样侧面积，矩形型芯所产生的包紧力比圆筒型芯大些。

3）脱模斜度 β 直接影响脱模力。当 β 角增大到 $\tan\beta\geqslant f_c$ 时，注塑件有自动滑落的趋势。

4）闭式壳体的大气压力增大了脱模力。型芯底面积大时，安装进气锥面顶杆，可克服真空吸力。

5）注塑件材料的弹性模量 E 和线膨胀系数 α，与脱模力成正比。塑料材料的 E 和 α，与脱模温度有关。

6）对于薄壁注塑件，壁厚与脱模力成正比。对厚壁注塑件，由于材料向壁厚中性层收缩，部分抵消对型芯的包紧力。故壁厚增大时，脱模力并非线性增大。薄壁与壁厚注塑件壳体，克服注塑件对型芯包紧的脱模阻力用两种预测计算式，见表 10-5。

表 10-5　热应力收缩的脱模力预测计算式

项目	收缩脱模力计算式	实用计算式
无底薄壁圆筒对型芯包紧的脱模阻力	$Q_c=\dfrac{2\pi Kf_c\alpha E(T_f-T_j)th}{1-0.5\nu}$	$Q_c=10Kf_c\alpha E(T_f-T_j)th$
无底薄壁矩形盒对型芯包紧的脱模阻力	$Q_c=\dfrac{8Kf_c\alpha E(T_f-T_j)th}{1-0.5\nu}$	$Q_c=12Kf_c\alpha E(T_f-T_j)th$
无底厚壁圆筒对型芯包紧的脱模阻力	$d_k=d=2r, A_c=2\pi rh;$	$Q_c=\dfrac{1.25Kf_c\alpha E(T_f-T_j)A_c}{\dfrac{(d_k+2t)^2+d_k^2}{(d_k+2t)^2-d_k^2}+\nu}$
无底厚壁矩形盒对型芯包紧的脱模阻力	$d_k=\dfrac{l+b}{2}, A_c=2(l+b)h$	

（续）

项目	收缩脱模力计算式	实用计算式	
侧向滑块抽拔力，即侧凹注塑件的收缩夹紧力	$Q=\dfrac{f_c(2p)}{n}=\dfrac{4\pi f_c\alpha E(T_f-T_j)(R^2-r^2)}{n}$		
内螺纹注塑件的脱模力矩	$M=f_c(p_1+p_2)r_2$	$p_2=1.5\alpha E(T_f-T_j)(d^2-d_1^2)$	
外螺纹注塑件的脱模力矩	$M=f_c p_2 r_2$	薄壁	$p_1=\dfrac{1.5\alpha E(T_f-T_j)}{r_2}A_c$
		厚壁	$p_1=\dfrac{1.25\alpha E(T_f-T_j)}{\dfrac{R^2+r_2^2}{R^2-r_2^2}+\nu}A_c$

10.3 脱模机构

将注塑件从模具的型芯上和型腔中完好脱离，并能以自重坠落，就要设计动作可靠，强刚度足够的脱模机构，不但要熟悉注塑件从钢模具上脱离的物理过程，并预估脱模力，而且要在运动学和机构力学分析基础上，精心设计脱模机构的零部件。

10.3.1 简单脱模机构

简单脱模机构有推杆机构、推管机构、推板机构及这些机构的组合。

1. 推杆机构

用推杆推顶注塑件是最简单也是应用最广泛的脱模机构。由于推杆位置设置有较大自由度，因而用于推顶箱体等异型制品，以及注塑件局部需较大脱模力的场合。常用推杆为圆形截面，也有半圆和矩形等。圆柱推杆和相配的孔，容易加工到较高精度。且圆柱推杆已有国家标准，更换方便；但是，推杆的作用面积小，注塑件表面有凹坑痕迹，使用不当，会引起推顶发白和裂纹等弊病。推杆与孔的长期过度磨损，会造成溢料。细长推杆的折断，也常见到。

（1）推杆结构

1）直推杆。如图 10-13a 所示，头部带凸肩供安装，全长直径为 d（f6）。这种推杆已有 GB 4169.1 标准，见表 10-6。系列直径从 61mm 至 25mm，长度为 80～800mm。

2）带肩推杆。如图 10-13b 所示，顶杆切削加工成台阶，改善了稳定性。最细的工作段长度，应等于配合长度与脱模行程之和，再附加 5～6mm。这种推杆的相关标准是 GB/T 4169.16—2006。

3）扁推杆。如图 10-13c 所示，支承为圆柱杆，头部的圆柱凸肩供安装用。中央工作断面为 1mm × 3mm ～ 2.5mm × 14mm 矩形。这种推杆的相关标准是 GB/T 4169.15—2006。

4）异形推杆。推杆的工作段断面是非圆形，但安装支承部分仍是圆柱形。图 10-13d 为整体式异形推杆，工作断面为半圆形，可增大与注塑件的接触面积。还有嵌入式台阶推杆，安装支承部分仍是圆柱形，将非圆形工作段插入后用钎焊连接，或插入后铆接。

5）锥形推杆。见图 10-13e，也称阀式推杆。推杆的工作部分为倒锥形。它与型芯或模板以圆锥孔相配合，无间隙地贴合。推顶后无摩擦卡滞，并有引气作用，可降低脱模力。

推杆用 T8A、T10A，也有用 65Mn 和中碳钢制造。整体淬火或工作段局部淬火至 50 ~ 55HRC。推荐采用 4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V，滑动段淬火硬度 50 ~ 55HRC。其中固定端 30mm 长度范围内硬度为 35 ~ 45HRC。淬火后表面可进行渗氮处理。渗氮层深度为 0.08 ~ 0.15mm。芯部硬度为 40 ~ 44HRC，表面硬度≥900HV。淬火长度应是配合长度加上 1.5 倍脱模行程，以防止与孔咬合。

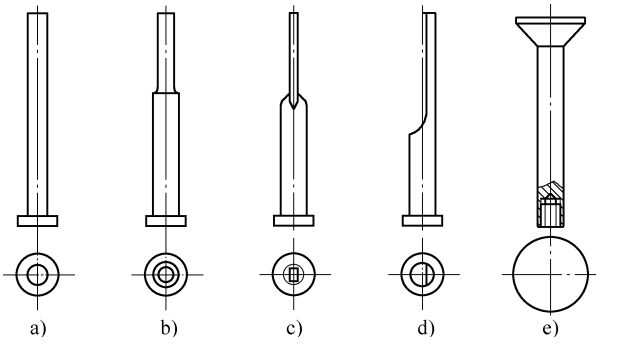


图 10-13　推杆的各种结构

a）直推杆　b）带肩推杆　c）扁推杆
d）整体式异形推杆　e）锥形推杆

表 10-6　推杆（GB/T 4169.1）　　（单位：mm）

标记示例：

D = mm，L = 80mm 的推杆：

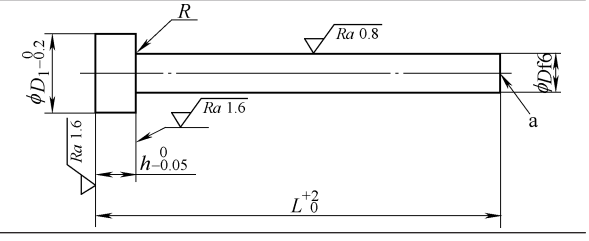
推杆 1 × 80 GB/T 4169.1—2006

技术条件：

1）a 端面不允许留有中心孔

2）棱边不允许倒钝

3）其他按 GB/T 4170



D	D_1	h	R	L												
				80	100	125	150	200	250	300	350	400	500	600	700	800
1	4	2	0.3	√	√	√	√	√								
1.2				√	√	√	√	√								
1.5				√	√	√	√	√								
2				√	√	√	√	√	√	√	√					
2.5	2			√	√	√	√	√	√	√	√	√				
3	6	3	0.5	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√			
4	8			√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
5	10			√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
6	12	5	0.8		√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
7	12				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√		
8	14				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
10	16				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
12	18	7			√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
14					√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
16	22						√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
18	24	8					√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
20	26						√	√	√	√	√	√	√	√	√	√
25	32	10	1				√	√	√	√	√	√	√	√	√	√

（2）推杆的安装和布置　如图 10-14a 所示，通常用凸肩沉压在推出固定板的凹坑和推出板之间。两块板用螺钉紧固。所有推杆（还有回程杆）的凸肩高度均要对沉坑深度放出余量。在固定板上插入推杆与回程杆后，应将它们搁起与该板磨出一个平面。图 b 是用顶出板与固定板的平面夹固顶杆凸肩，避免了沉孔加工。图 c 是用螺钉吊紧顶杆，但有松动的可能。

为防止塑料熔体的渗漏，推杆的工作段有配合要求，常用 H7/f7。对于低黏度熔体和直径较大推杆采用 H7/g6。工作段长度一般不应小于 12mm，或为 1.5～2d。对于非圆推杆则需≥20mm。

推杆的非工作段与孔均要有 0.5～1mm 的双边间隙，以减小摩擦，而且有浮动和自行调整位置的作用。还有，推杆边缘离型芯壁至少有 0.12 mm 间距，以防干涉。

推杆的工作端面与注塑件表面的平齐是难以达到的。允许推杆侵入注塑件表面不超过 0.1mm。一般不允许推杆端面低于注塑件成型表面。

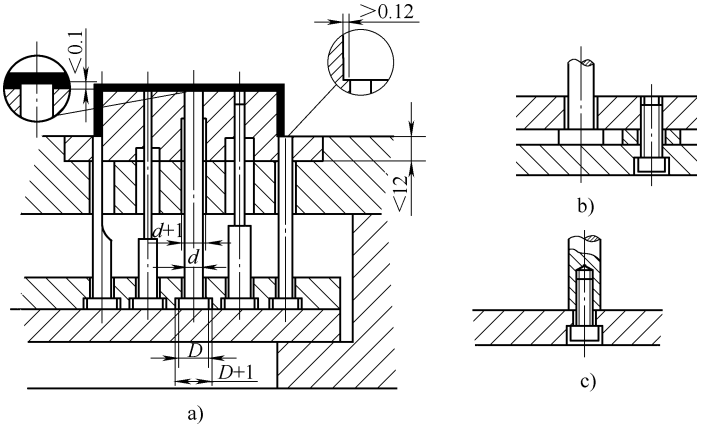


图 10-14　推杆安装

a）两板夹固推杆凸肩　b）平面夹固推杆凸肩　c）螺钉吊紧推杆

在布置推杆时应遵循以下原则：

1）考虑脱模力的平衡，尽量避免产生附加倾侧力矩；在肋、凸台处多设推杆。

2）不要让浇口对准推杆端面。过高压力会损伤推杆。

3）推杆应该设在排气困难的位置。

4）只要不损伤注塑件表观，尽可能地多设顶杆，以减轻注塑件的脱模接触应力。

（3）推杆稳定性计算　注射模细长推杆的破损是常见的事故。除了工作端面的破损直接影响注塑件质量外，推杆柱体的变形甚至弯折断裂还会损伤模具。

生产中出现推杆破损折断现象，是属于细长推杆的稳定性问题。应该用欧拉公式进行校核或计算。影响推杆稳定性因素有：推杆截面形状、推杆长度、约束条件和材料性能。保持推杆顶端稳定的临界压力 P_j（N）计算式为

$$P_j = \frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2} \tag{10-36}$$

式中　E——推杆钢材的弹性模量，$2.1\times10^5\text{N/mm}^2$；

l——推杆的长度（mm）；

J——推杆截面的轴惯性矩（mm^4）；

μ——推杆的长度系数，取决于推杆的约束条件，见表 10-7 和图 10-15。

在推杆稳定性计算中，需校核柔度 λ。有

$$\lambda=\frac{\mu l}{i} \tag{10-37}$$

其中

$$i=\sqrt{\frac{J}{A}}$$

式中　i——推杆截面的最小惯性半径（mm）；

A——推杆截面的面积（mm^2）。

表 10-7　推杆长度系数 μ 与推杆工作状态

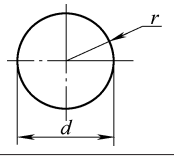
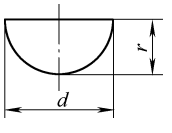
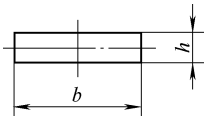
约束条件	推杆工作状态		压杆长度系数
	固定方式	顶出端	μ
两端铰支	圆锥头铆接或浮动	动配合	1
一端固定,另一端自由	凸肩压固	脱模行程大,伸出长度为推杆长 l	2
一端固定,另一端铰支	凸肩压固	动配合,推杆长 l 见图 10-16	0.707
两端固定	凸肩压固	与推板或用推块螺纹联接	0.5

对细长推杆的稳定性计算，首先限制推杆柔度。其计算的极限柔度应为

$$\lambda_j=\sqrt{\frac{\pi^2E}{\sigma_p}}=\sqrt{\frac{\pi^2\times2.1\times10^5}{200}}=100 \tag{10-38}$$

式中，用中碳钢的比例极限 $\sigma_p=200\text{N/mm}^2$，可得极限柔度 $\lambda_j=100$。注射模常见的圆截面、半圆截面和矩形扁截面推杆的 J、i 和 λ 的计算式见表 10-8。

表 10-8　轴惯性矩 J、最小惯性半径 i 和柔度 λ 的计算式

截面	J	i	λ
	$\frac{\pi d^4}{64}=\frac{\pi r^4}{4}$	$\frac{d}{4}=\frac{r}{2}$	$\frac{4\mu l}{d}$
	$\frac{\pi d^4}{128}=\frac{\pi r^4}{8}$	$\frac{d}{5.66}$	$\frac{5.66\mu l}{d}$
	$\frac{bh^3}{12}$	$\frac{h}{\sqrt{12}}=0.289h$	$\frac{3.46\mu l}{h}$

在柔度 λ≤100 的校核中，推杆计算用推杆长度 l，可参考图 10-16 确定。台阶式推杆可减小推杆计算长度 l。见图 10-16c，在推杆中间位置设置与其为动配合的护套，可限制推杆弯曲振晃，计算长度 l 可缩小一半；临界压力 P_j是原来的 4 倍。大型模具的细长推杆大多采用这种护套结构。

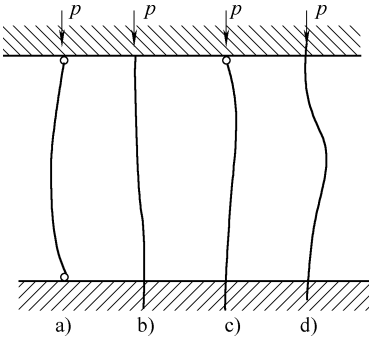


图 10-15　压杆约束类型

a）两端铰支　b）一端固定，另一端自由
c）一端固定，另一端铰支　d）两端固定

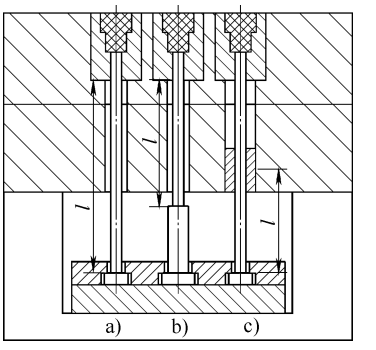


图 10-16　推杆的计算长度 l 和约束条件

a）直推杆　b）带肩推杆　c）有护套推杆

还有一种圆截面推杆直径 d（mm）设计公式

$$d \geqslant K\left(\frac{64Q_e(\mu l)^2}{nE\pi^3}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{10-39}$$

式中　Q_e——前述的脱模力（N）；

n——顶杆数目；

K——安全系数，$K=1.4\sim2$。

2. 推管脱模

推管脱模常用于圆筒状注塑件推出。它提供了均匀脱模力，用于一模多腔成型更为有利。将型腔和型芯均设计在动模，可保证注塑件孔与其外圆的同心度。对小直径筒体和锥形筒体，如图 10-17a 和图 10-17b 所示，只能用推管脱模。

推管脱模机构有三类形式：

1）长型芯。型芯紧固在模具底板上，见图 10-17a，结构可靠，但底板加厚，型芯延长，只用于脱模行程不大的场合。

2）中长型芯。推管用推杆推拉，见图 10-17b。该结构的型芯和推管可较短些，但动模板因容纳脱模行程而增厚。

3）短型芯。这种结构见图 10-17c 使用较多。为避免型芯固定凸肩与运动推管相干涉，型芯凸肩须有缺口，或用键固定，致使型芯固定不可靠且推管必须开窗，或剖切成 2～3 个脚，致使推管被削弱，制造亦困难。

要求推管内外表面都能顺利滑动。其滑动长度等于脱模行程与配合长度之和，再加上 5～6mm 余量，非配合长度均应用 0.5～1mm 的双向间隙，如图 10-18 所示。

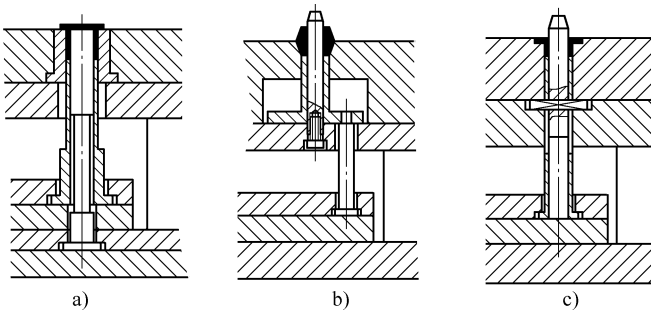


图 10-17　推管脱模的机构类型

a）长型芯　b）中长型芯　c）短型芯

推管材料与推杆相同为 65Mn、60SiMn 或 4Cr5MoSiV1（美 H13），并推荐采用 4Cr5MoSiV1、3Cr2W8V。滑动段淬火硬度 50～55HRC。淬火后表面可进行渗氮处理，渗氮层深度为 0.08～0.15mm；芯部硬度为 40～44HRC，表面硬度≥900HV。如图 10-19 所示，标准推管 GB/T 4169.17—2006 有内孔 $D=2\sim12$mm，长 $L=80\sim250$mm。

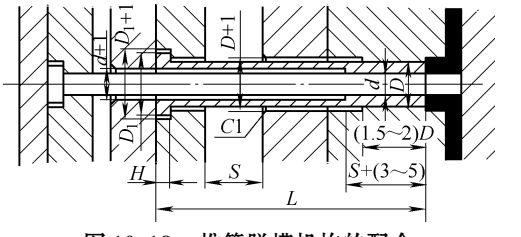


图 10-18　推管脱模机构的配合

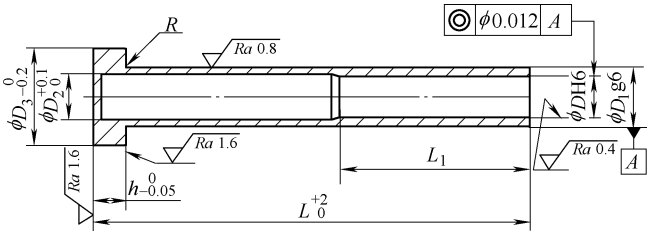


图 10-19　标准推管（GB/T 4169.17—2006）

图 10-17a 所示长型芯推管脱模机构有长芯杆支撑。推管在推出位置与型芯应有 8～10mm 的配合长度；推管壁厚常在 1.5mm 左右，至少 0.75 mm 以上。当推管孔 $D\leqslant2$mm，长 $L\geqslant100$mm，必要时采用阶梯推管和阶梯的长芯杆。

3. 推板脱模

推板也称脱模板或推件板。在分型面处从壳体注塑件的周边推出，推出力大且均匀。对侧壁脱模阻力较大的薄壁箱体或圆筒制品，推出后外观上几乎不留痕迹。这对透明注塑件尤为重要。

（1）推板结构　推板脱模机构不需要回程杆复位。推板应由模具的导柱导向机构导向定位，以防止推板孔与型芯间的过度磨损和偏移。为防止推杆与推板分离、推板滑出导柱，推杆与推板用螺纹联接，见图 10-20a。应注意，该种结构在合模时，顶出板与模具底脚之间应留 $S=2\sim3$mm 的间隙。当导柱足够长时，推杆与推板也可不连接，见图

10-20b。对于有多个圆柱型芯相配的推件板，大多镶上淬火套与型芯相配，便于加工和调换，见图 10-20a。图 10-20c 的结构适用于两侧具有顶出杆的注射机，模具结构可简化，但推板要增大并加厚。

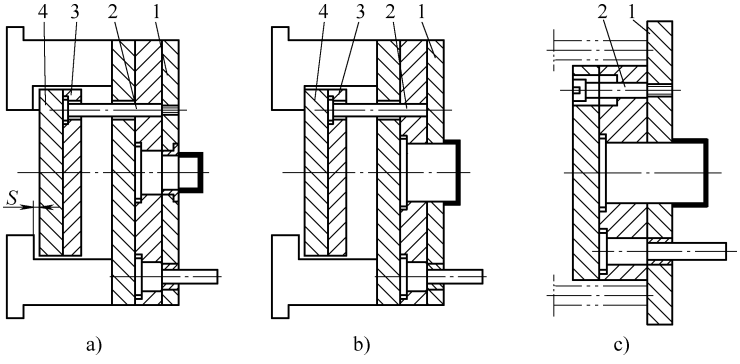


图 10-20　推板脱模机构

a）推板螺纹联接推杆　b）推杆推顶推板　c）注射机上推杆推顶推板

1—推板　2—顶杆　3—顶出固定板　4—顶出板

推板与型芯之间要有高精度的间隙、均匀的动配合。要使推板灵活脱模和回复，又不能有塑料熔体溢料。最大单向间隙应限制在 0.05mm 以下，对低黏度的 PA 等，不超过 0.01mm。为防止过度磨损和咬合发生，推板孔与型芯应淬火处理。推板脱模的分型面应尽可能为简单且无曲折的平面。

在一些场合，如图 10-21 所示，在推板与型芯间留有单边 0.2mm 左右间距，避免两者之间接触，并又有锥形配合面起辅助定位作用，可防止推板孔偏心而引起溢料，其斜度为 10°以上。

对于大型深腔容器，特别是软质塑料，为防止过大脱模力使制品壁面产生皱折，应该给成型时所形成的真空腔引气。图 10-22 就是这种装置。开模时大气克服弹簧力将菌型推杆抬起而进气。当然也可将菌型推杆与顶出板相连，同步推顶进气。

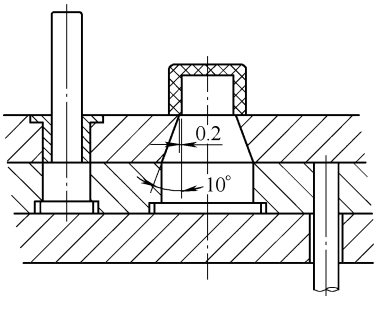


图 10-21　有周边间距和锥形配合面的脱模板

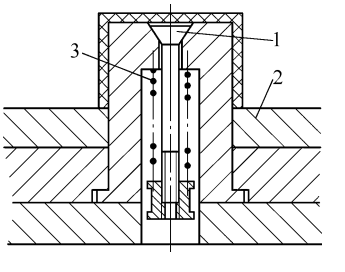


图 10-22　有进气装置的推板脱模

1—推板　2—锥面顶杆　3—压缩弹簧

（2）推板厚度计算　推件板会由于刚度不足引起挠曲变形，影响注塑件尺寸精度。因此，应按刚度条件计算推板厚度。

1）圆筒形注塑件用推板。这种推板一般采用同心圆周分布的数根推杆推动，如图 10-23 所示。脱模时的受力状况，可视为环形板受集中载荷 Q_e 的力学模型，最大挠度 T_s（mm）产生在板的中央。其厚度计算式

$$T_s \geqslant \left(\frac{CQ_eR^2}{E[\delta]}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{10-40}$$

式中　R——推杆轴线到推件板中心距离（mm）；

Q_e——脱模阻力（N）；

E——推板钢材弹性模量，$2.1\times10^5\,\mathrm{N/mm^2}$；

$[\delta]$——推件板允许变形量（mm），可取注射成型制品高度尺寸公差的 0.1～0.2；

C——R/r 比值相关计算系数，从表 10-9 中查取；

r——型芯的半径（mm）。

表 10-9　圆筒注塑件推件板计算系数 C

R/r	1.25	1.50	2.00	3.00	4.00	5.00
C	0.0051	0.0249	0.0877	0.2090	0.2930	0.3500

2）矩形注塑件用推板。该种推件板所用推杆分布如图 10-24 所示。顶出时推板受力情况，可近似看作力受集中载荷的简支梁模型，最大挠度产生在板中央。推件板厚度 T_s（mm）计算式为

$$T_s \geqslant 0.54l\left(\frac{Q_e}{BE[\delta]}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{10-41}$$

式中　B——推件板宽度（mm）；

l——推件板长度方向顶杆之间距离（mm）；

$[\delta]$——推件板允许变形量（mm），可取注射制品高度尺寸公差的 0.1～0.2。

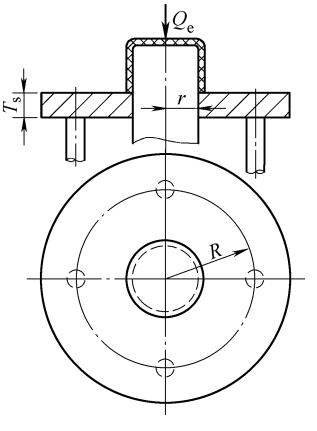


图 10-23　圆筒注塑件推件板推出

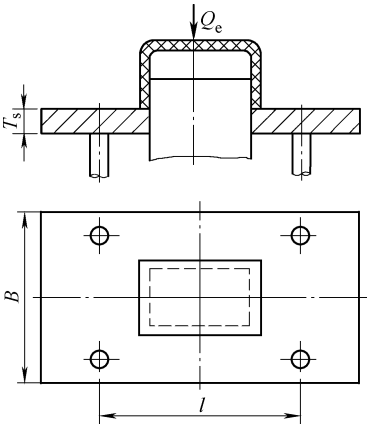


图 10-24　矩形盒注塑件的推件板顶出

4. 推块

如果注射制品表面不允许有推杆的痕迹，制件的精度和表面质量要求较高，又不是圆筒体和薄壳体，不适宜用推管或推板脱模。图 10-25 是两种推块整体脱模。不大的注射制品埋在动模型腔中，脱模行程也不大。推块周边轮廓与注塑件一致。在顶出位置，推块不得脱离与型腔的配合面。

图 10-26 所示注射模成型四件透明扁平的制件。该小型模具，型腔用体积镶块，并采用弹簧复位脱模机构。圆锥推块有斜度 $\alpha = 5° \sim 10°$配合面。推块一般有 30 ~ 40mm 高度，推顶距离大于制品高度，不能脱离配合孔。推块底面与模板之间有 0.5mm 的避碰空隙。在用一支推杆推顶推块时，推杆与推块之间不能转动；它们与模板孔间要有防转措施。在用螺纹联接时，加止转销，甚至用 T 形槽联接推杆与推块。

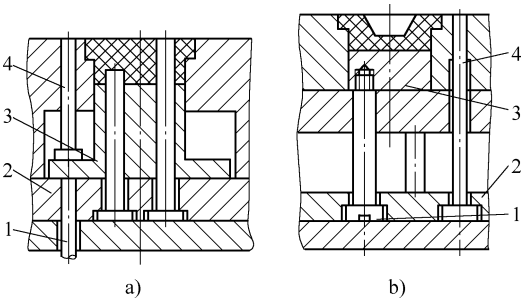


图 10-25　推块整体脱模

a）推块在模板空间中滑动　b）推杆直接顶出推块

1—推杆　2—动模垫板　3—推块　4—回程杆

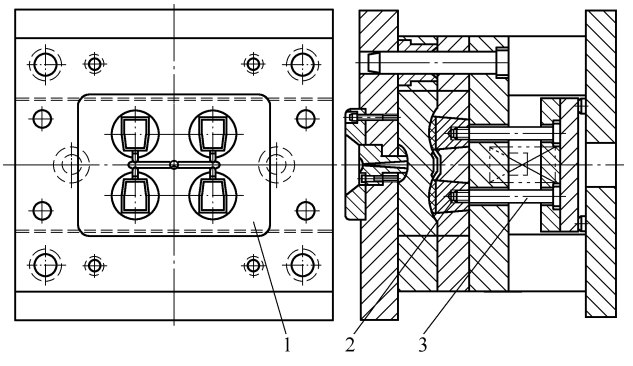


图 10-26　单支推杆推顶推块脱模

1—体积镶块　2—推块　3—推杆

塑料壳体的周边形状不规则，尺寸较大，用推板脱模有较大难度。如图 10-27 所示，可用多个靠边推块脱模。靠边推块大都为长方条，由两支推杆推顶。用螺钉联接推杆。靠边推块三个侧边有 $\alpha = 5°$斜度配合面。一侧与型芯或镶件的平面滑动配合，不能溢料又不能卡滞。

推块用工具合金钢制造，淬火硬度 50 ~ 55HRC 以上。推荐用中碳合金钢制造，渗氮处理 900 ~ 1000HV。

5. 组合、导向和复位

（1）多种元件组合脱模　倘若遇到一些形体复杂的注塑件，如薄壁壳体带有凸台和肋，并与圆筒体组合。这就需要用两种或两种以上的多元件组合的脱模机构。如图 10-28a 所示，以推板脱出壳体，局部深腔处的挂脚用推杆辅助推出，以防止挂脚产生

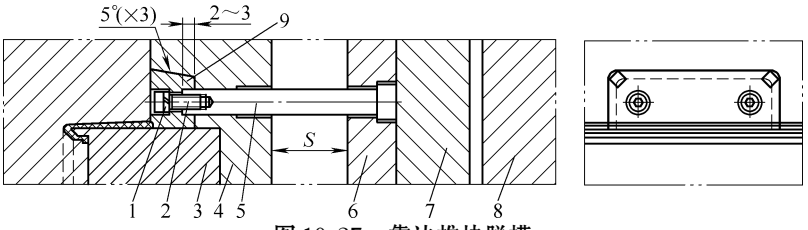


图 10-27　靠边推块脱模

1—防松垫圈　2—内六角螺钉　3—镶件　4—动模垫板　5—推杆
6—推杆固定板　7—顶出板　8—动模底板　9—靠边推块

断裂。图 10-28b 所示的注塑件外周壳体用推板脱模，中心管状结构用推管推出。图 10-28b所示的注塑件，中央用推管，而外周壳体用多根推杆脱模。这种推杆可兼作为回程杆用。多元件组合时，各种推杆、推管、推板，还包括装嵌件的推杆，应该同步动作，如图 10-29 所示。

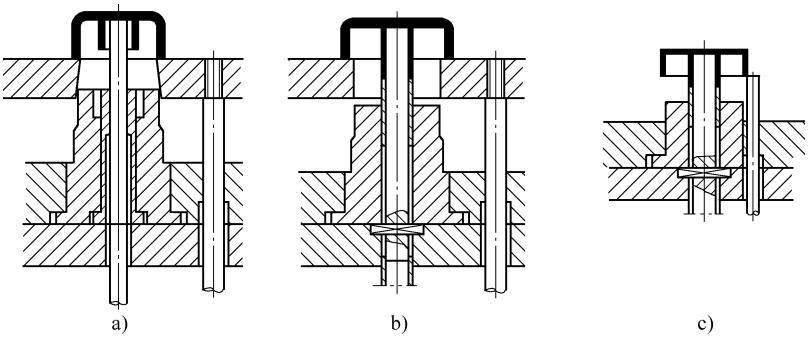


图 10-28　多种元件组合脱模

a）推板和推杆组合　b）推板和推管组合　c）推杆和推管组合

（2）导向和复位　对大尺寸的顶出板，为防止脱模过程中出现歪斜倾侧，须附设导向机构。大中型注射模的此种导柱（也有用滚珠滚动导套），可兼起支承柱作用，以减小动模垫板的挠曲变形，如图 10-30 所示。只有在生产注塑件的批量较少时，才不设导套。用回程杆兼起导向作用，就要加粗回程杆，并加长配合长度。

模具闭合时，整个脱模机构依靠回程杆碰及定模而复位（回程杆与推杆材料相同，且端部淬火），常用 2 ~4 根，并以最大间距均匀布置。其结构与安装见图 10-31。回程杆顶端应与分型面平齐，仅允许稍低 0. 05mm。生产中常有回程杆挤压定模表面而出现凹痕，必要时需对该部位作局部淬火或镶嵌淬火块。有时可用推杆或者推管作辅助复位元件，如图 10-31。小型模具可利用压缩弹簧，并将其套在推杆上。单独用弹簧复位可靠性差，多数场合以采用弹簧与复位杆联合作用为好。

10. 3. 2　定模脱模和双脱模机构

定模脱模机构是将常态的脱模机构倒装。也就是注塑件上浇口的反置。绝大多数注射模的脱模机构设置在动模。在注射成型完成时，在动模后退过程中，利用注射机上的

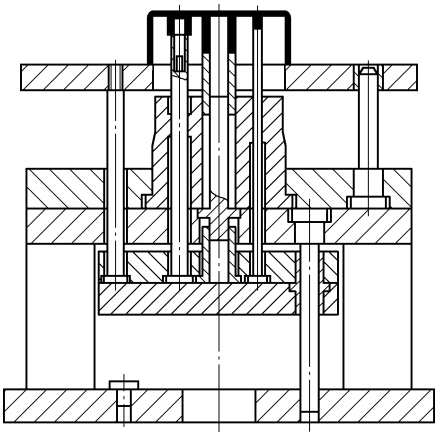


图 10-29　多种元件组合的脱模机构

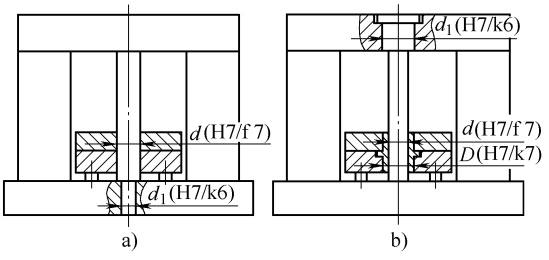


图 10-30　脱模机构的导向并兼起支承的结构

固定顶杆，让脱模机构的板和杆终止注塑件移动；动模型芯或型腔继续后退，注塑件脱模坠落。因此定模脱模不利用标准模架上的脱模机构，而让动模拉动添加在定模上的脱模机构。双脱模机构的注射模，要在定模侧添加脱模机构，让注塑件滞留在动模上，在开模的最后阶段，仍然有动模一侧的脱模过程。

1. 定模脱模机构

有时因注塑件形状特殊，必须将制品滞留在定模型芯上。有些制品不允许外表面有浇口和顶杆痕迹，有意将模具设计成使注塑件留在定模边。定模脱模机构的特点，大都是利用开模运动牵引定模上的脱模机构。因此，有效脱模行程较大，牵引行程也较长。常用牵引机构有拉板、拉杆、拉钩、链条和齿轮齿条等。液压缸驱动的定模脱模机构也有应用。

图 10-32 上的制品为一全塑刷子，注射模分型后刷子留在定模的型芯上。在定模边设推件板，利用定距拉杆拉动推件板，将塑料刷子从型芯上强拉脱下。

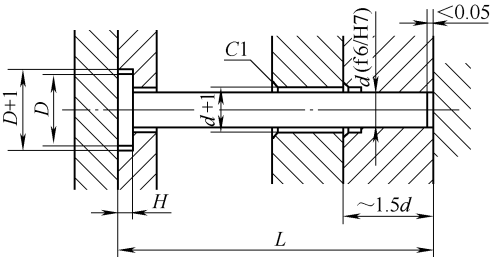


图 10-31　回程杆的结构和安装设计

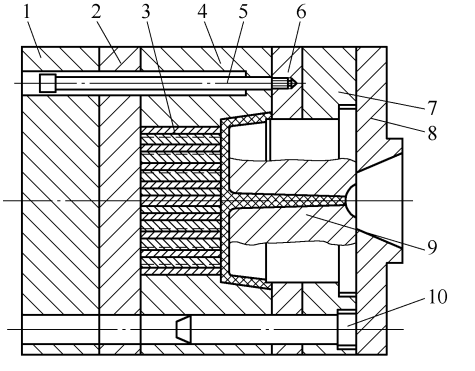


图 10-32　定距拉杆拉动定模推件板脱模

1—动模底板　2—动模垫板　3—成型镶片　4—动模板　5—定距拉杆　6—推件板　7—定模板　8—定模固定板　9—主流道　10—导柱

图 10-33 是在推件板两侧采用定距拉杆与定模相联，当分型到一定距离时，靠开模力拖动推件板，脱出制件。

如图 10-34 所示，为拉钩牵引的定模脱模机构。开模时，动模先分开距离 L。该 L 应略大于所需的脱模高度。而后，动模经拉钩与定模上钩脚接触，牵引定模边的推出板，从定模型芯上脱出注塑件。由于楔形板作用使推出板止动后，拉钩被强制转动，迫使钩脚脱开，而动模继续运动。

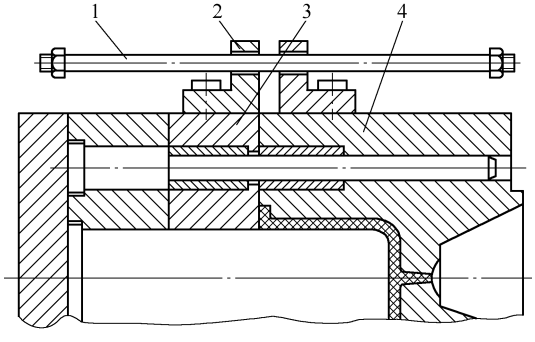


图 10-33　定模拉杆拖动推件板脱模

1—定距拉杆　2—支架　3—推件板　4—定模型腔板

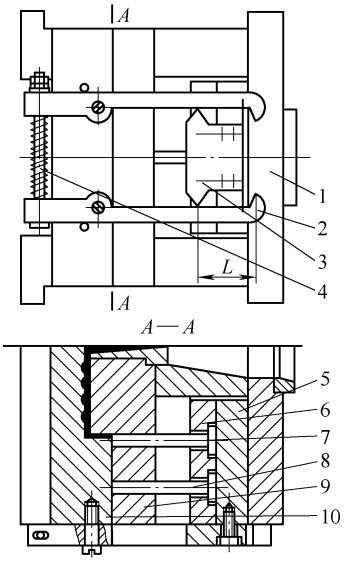


图 10-34　拉钩牵引的定脱模机构

1—定模固定板　2—拉钩　3—钩脚　4—支承杆
5—顶出板　6—顶出固定板　7—顶杆
8—回程杆　9—定模　10—动模

图 10-35 是用链条牵引定模边推板使注塑件脱模的机构。所需链条为两根或 4 根，每根链条受力要均衡。另外，还要设联接座，保证合模时链条不被卡住。开模行程等于 $L_1 + L_3$。考虑到注射机的开模行程误差较大，故脱模行程 $L_2 = L_1 + 10 \sim 20\text{mm}$。

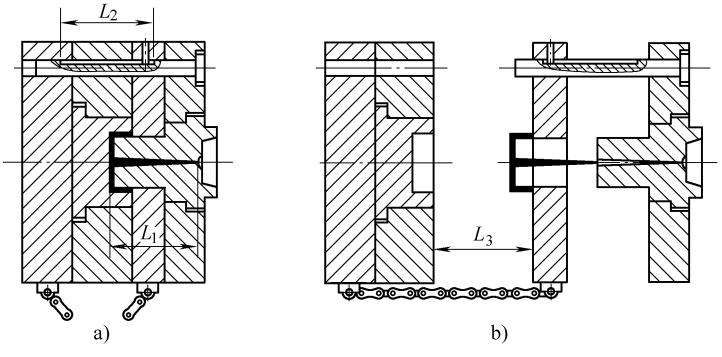


图 10-35　链条牵引的定模脱模机构

a）合模　b）开模和脱模

图 10-36 所示，在定模上设置脱模机构使主流道很长。为避免在浇注系统有过大的压力损失，大都采用单喷嘴热流道浇注。在定模上用液压缸驱动脱模是常用的简便方法。定模型腔块在闭模注射时，液压给力将它锁紧在动模型腔板上。

2. 双脱模机构

注塑件留在定模或动模内，其可能性都存在；或者注塑件留在定模但取件不方便，需定在模上设置脱模机构迫使注塑件滞留在动模一侧，再用动模边的脱模元件使注塑件脱出。如图 10-37 ~ 图 10-40 均为双脱模机构。

（1）局部双脱模机构　双脱模机构有时不需从定模上整块模板分型，只局部实现定模边的推顶动作，如图 10-37 上的两种双脱模机构。采用了弹簧力和杠杆作用力推动顶杆，迫使注塑件在开模时滞留在动模上。考虑注塑件在模具中的位置时，应使定模边的脱模力较小并且脱模行程较短；而动模一侧的脱模力较大且行程长。

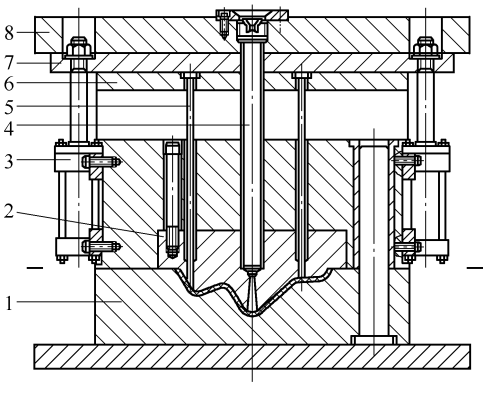


图 10-36　液压缸驱动的定模脱模机构

1—动模型腔板　2—定模型腔块　3—液压缸　4—单喷嘴
5—顶杆　6—顶出固定板　7—顶出板　8—定模固定板

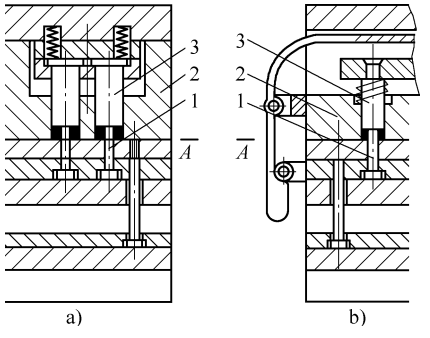


图 10-37　局部双脱模机构

a）利用弹簧力　b）利用杠杆作用力
1—型芯　2—定模型腔　3—顶杆

（2）模板顺序双脱模机构　图 10-38 和图 10-39 所示，定模上注塑件需要脱模行程和脱模力较大。在定模一侧，整块推件板或定模型腔板被首先分型。模板顺序脱模机构应用于双分型面的模具。它让定模先分型，再使动模与定模分型。在定模分型的过程中，将注塑件从定模边的型芯上脱开，迫使其滞留在动模内。而一般的顺序脱模机机构，是为了取出具有点浇口的浇注系统凝料。它们都实现了二次分型。

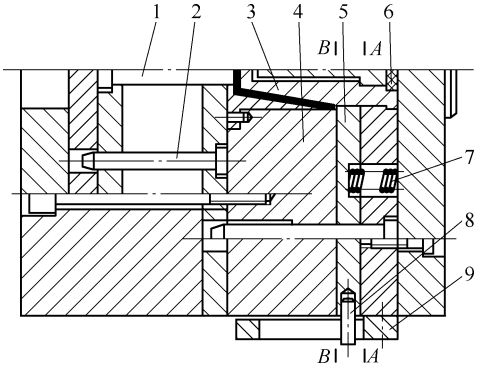


图 10-38　弹簧式顺序双脱模机构

1—顶杆　2—导柱　3—型芯　4—动模　5—推件板
6—密封垫　7—弹簧　8—止动圆柱销　9—定距拉板

图 10-38 所示机构，是利用弹簧推力和拉板定距进行定模边脱模，先让注塑件

滞留在动模型腔内。而后，动模脱模顶杆作长行程推顶，取件颇方便。如果在定模边直接脱模，要求定模上的硬弹簧工作行程很长，设计困难。

如图 10-39 所示，需脱出一塑料盆，其底部有若干加强肋。开模时，注塑件在动、定模两边去留不定。该机构利用拉钩和限位螺钉先进行定模型芯脱模，让塑料盆滞留在定模型腔板内。当拉钩尾端与滚轮接触后，动、定模分型。此时注塑件包紧在动模型芯上。最后，由动模边的推板将塑料盆脱出型芯。这两个机构实现了双脱模的动作要求，又有先后顺序分型过程。

（3）气动双脱模机构　图 10-40 所示为采用压缩空气的双脱模机构。在动、定模两边都设置菌形进气阀。开模时，定模边的电磁阀先开启进气阀。涌入的压缩空气将注塑件从定模型芯上吹离。注塑料件滞留在动模型芯上。开模终止时，在动模一侧设置机械脱模机构推动注塑件。然后，动模一侧的电磁阀控制进气阀。吹入的压缩空气使制品完全脱落。

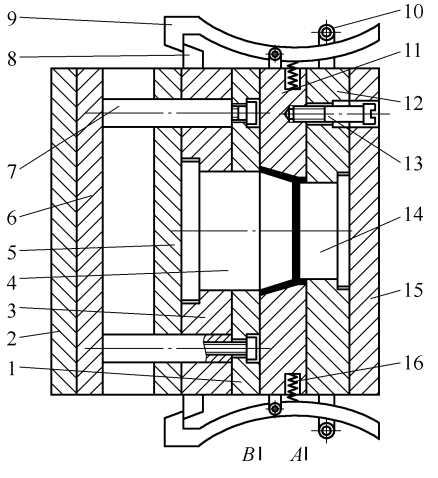


图 10-39　拉钩滚轮式顺序双脱模机构

1—推件板　2—动模座　3—动模型芯固定板　4—动模型芯　5—动模垫板　6—顶出板　7—推杆　8—挡块　9—拉钩　10—滚轮　11—定模型腔板　12—型芯固定板　13—限位螺钉　14—定模型芯　15—定模底板　16—压缩弹簧

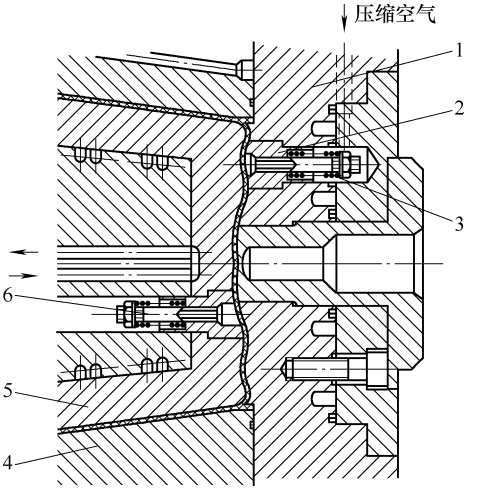


图 10-40　气动双脱模机构

1—定模板　2—阀体　3、6—进气阀杆　4—凹模　5—型芯

10.3.3　顺序脱模和浇道凝料脱模机构

有点浇口浇注系统的注射模，和双脱模机构的注射模，都有先后两次或三次分型的动作过程。第一次分型让浇道凝料有坠落空间；第二次主分型是使注塑件有脱模顶出和坠落空间。为了让复杂浇注系统凝料脱离模板依靠自重降落，出现了四板模，在定模侧增加流道凝料推板，在主分型开模前，定模侧就有二次分型。

1. 顺序脱模机构

图 10-41 所示压杆-摆钩式顺序脱模机构，用侧摆钩 2 拉紧型腔板 8，先打开分型面 A，让橄榄形浇口凝料脱出主流道锥孔。如图 10-41b 所示开模状态，限位定距螺钉 14

止停型腔板 8；侧摆钩 2 脱钩；动模继续开模，B 分型面打开。在设计时，侧摆钩 2 与挡块 1 啮合处应有 1° ~3°的斜度。该机构应对称布置在模具的两侧。

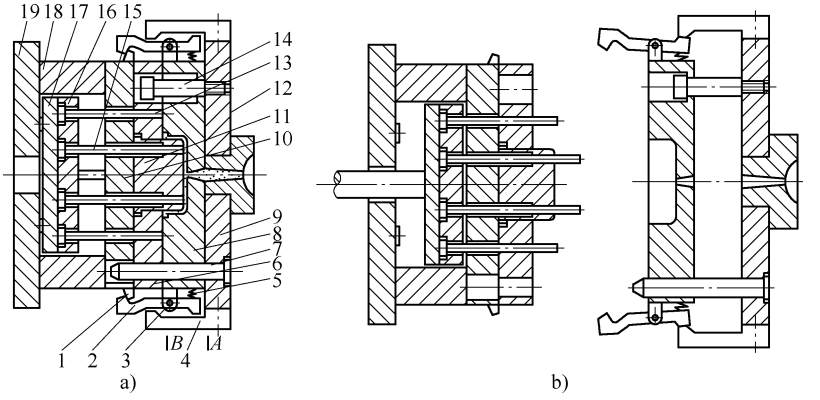


图 10-41　压杆-摆钩式顺序脱模机构

a）合模成型　b）开模顶出

1—挡块　2—侧摆钩　3—销轴　4—压杆　5—弹簧　6—型芯固定板　7—导柱　8—型腔板
9—定模固定板　10—浇口套　11—动模垫板　12—型芯　13—复位杆　14—限位定距螺钉
15—顶杆　16—顶出固定板　17—顶出板　18—垫块　19—动模座板

二次分型的顺序脱模机构可分解成两种零部件。其一是动模拉紧型腔板的夹拉机构，使定模固定板与型腔板分离。第二，定模型腔板分离一定距离后被止动，要有定模固定板拉紧型腔板的定距机构。它们分离的距离大于主流道型点浇口，即橄榄形浇口长度加上 8 ~10mm。下面分别介绍这两种机构（它们已有相关企业按标准系列制造，模具生产企业可直接选用）。

（1）顺序分型的夹拉机构

1）橡胶管套拉紧机构。图 10-42 所示为最简易的橡胶管套拉紧机构。将橡胶管套用螺钉装在动模的上。衬套固定在定模的型腔板上。开模时橡胶管套拉紧型腔板，跟动模一起移动而与定模固定板分型。直到定距机构将其限位停住。早期用聚酰胺做橡胶管套。橡胶管套与钢衬套之间摩擦系数较小，对型腔板的拉紧力不大。用锥面调节螺钉压紧橡胶管套，增大了拉紧力，但橡胶管套磨损加剧。因此，只能用在型腔板重量轻，注射制品批量较少的注射模上。改用聚氨酯橡胶管套后，工作状态改所改善。如图所示，衬套上制有圆角，并改善衬套孔的表面粗糙度，能提高橡胶管套的耐磨性。橡胶管套拉紧器一般用两个或 4 个，装在分型面的最外沿。橡胶管套之间中心距的精度影响它们的磨损。

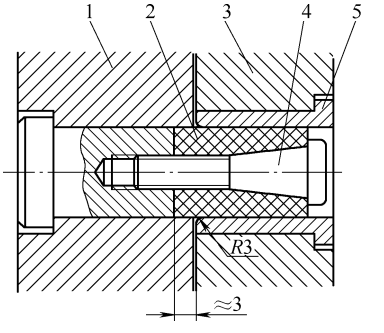


图 10-42　胶管套拉紧机构

1—动模板　2—橡胶管套　3—定模的型腔板
4—调节螺钉　5—衬套

2）弹簧锁块夹拉机构。图 10-43 所示为弹簧锁块分型的夹拉机构。开模时，固定在动模板上的锁

块在弹簧及滚柱的夹持下被锁紧。模具在 *A* 面分型，型腔板与定模固定板分离。型腔板在动模的夹拉下移动，随后在定距机构作用下停止，锁块被强行脱离滚柱。模具从 *B* 面实行第二次分型。常用两个弹簧锁块夹拉装置分别装在模具的对称的外侧壁上。

3）弹簧摆钩夹拉机构。图 10-44 所示夹拉机构的动作过程，与图 10-43 的机构类似，也用了对称的两个弹簧。开模时摆钩在弹簧作用下钩住锁块，使型腔板与定模固定板分型，随后在定距机构作用下停止，锁块破强行脱钩，动模与型腔板分型。

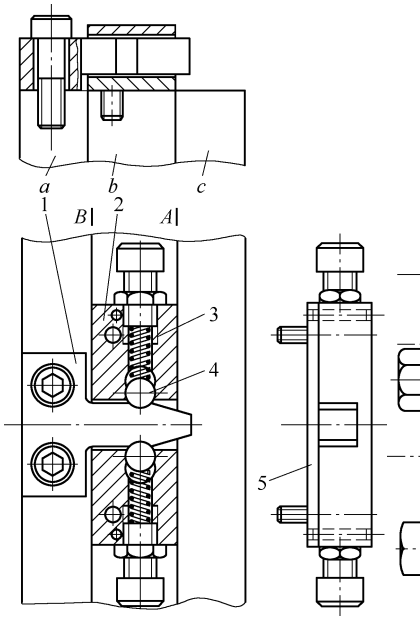


图 10-43　弹簧锁块夹拉机构

1—锁块　2—支座　3—强力弹簧　4—滚柱　5—盖板
a—动模板　*b*—型腔板　*c*—定模固定板

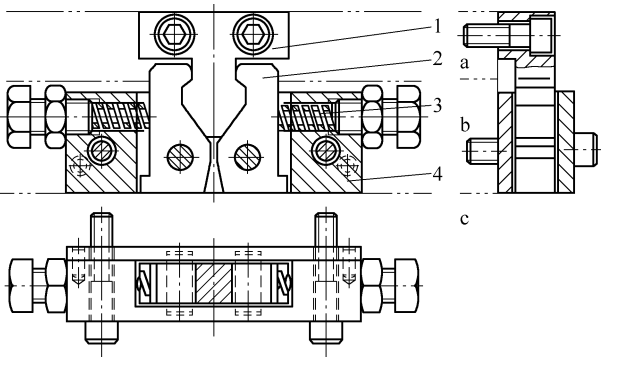


图 10-44　弹簧摆钩夹拉机构

1—锁块　2—摆钩　3—强力弹簧　4—支座
a—定模固定板　b—型腔板　c—动模板

（2）定距机构

1）模内限位定距。注射模具里的定距机构有如图 10-41 上所示的限位定距螺钉。图 10-45 所示的导柱拉杆定距机构，对模板开合模有导向作用。在模内设置 4 套，为标准模架的一种型号，可按模板厚度和拉杆长度系列选用。它们能承受型腔板的重力，保证模板的移位精度。模内限位定距会使模板的面积增大。如果这些限位定距杆上，配套压缩弹簧后将型腔板压向动模，可免去夹拉机构，实现顺序脱模。但实现的定距开模行程是有限的。

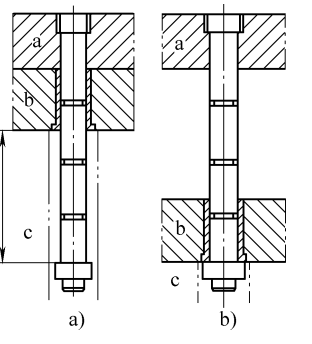


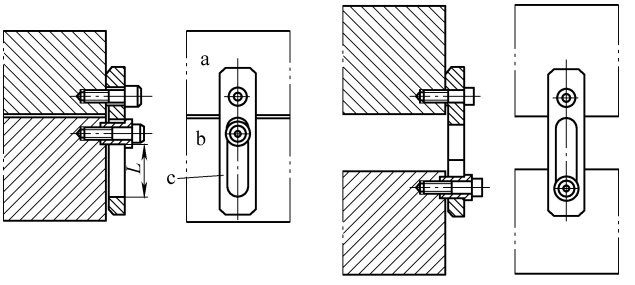
图 10-45　模内导柱拉杆限位定距

a）合模　b）开模
a—定模固定板　b—型腔板
c—动模板

2）模壁限位定距。注射模具侧壁面的限位装置如图 10-46 和图 10-47 所示。限位拉板或拉钩的工作面平行模壁。由于它们在模具外侧，成对设置，装配调整开模行

程 L 较为方便。

图 10-48a 所示注射模的顺序机构，可以实现浇道凝料脱模。利用分流道末端斜孔，在开模瞬时拉断点浇口。浇道凝料被动模边的拉料杆上球头滞留，动模与型腔板在 B 分型时才脱开。图 10-48b 上所示分流道上斜孔的布置和尺寸供参考。

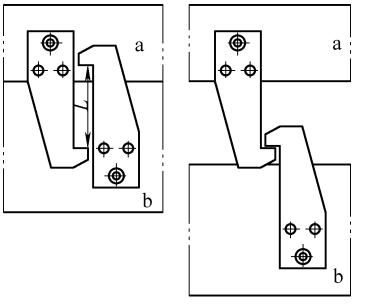


a)　　b)

图 10-46　模壁限位拉板

a）合模　b）开模

a—定模固定板　b—型腔板　c—限位拉板

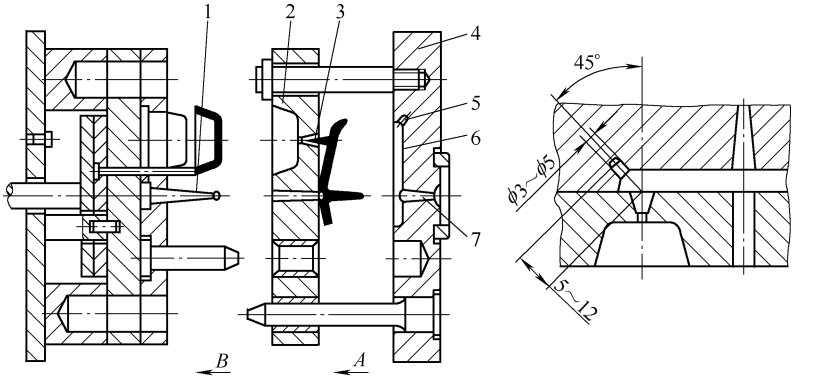


a)　　b)

图 10-47　模壁限位拉钩

a）合模　b）开模

a—定模固定板　b—型腔板



a)　　b)

图 10-48　用分流道斜孔和拉料杆脱卸浇道凝料

a）顺序脱模　b）分流道上斜孔

1—主流道拉料杆　2—型腔板　3—点浇口凝料　4—定模固定板

5—分流道上斜孔　6—分流道　7—主流道

图 10-41 和图 10-48 两种顺序机构脱卸浇道凝料时，由于设计不恰当，浇道凝料的飞边和粘模，往往使料头不能自动坠落。下述的三个分型面的四板模，其结构复杂，但浇道凝料脱模可靠。

2. 浇道凝料脱模机构

浇道凝料脱模机构是在模具内切断浇口并且使凝料能自重坠落的装置，是实现注射成型自动化生产的脱模机构。小截面的针点式和潜伏式浇口在模具内能拉断或剪断，将主流道和分流道凝料与注塑件分离。

（1）流道凝料推出的四板模　图 10-49 所示多型腔注射模，在开模时，由于主流道和分流道凝料的脱模阻力，加上定模底板上设置分流道拉料销 4，使流道凝料被黏留在分流道推板 6 上。在动模后退中，由拉板 7 在拉动型腔板 2 的同时，拉动拉杆 1 让分流道推板在 *A* 分型，迫使凝料脱出主流道孔和拉料销，让其依靠自重坠落。对于聚苯乙烯等一些无定形塑料，其主流道凝料在与注射机喷嘴脱离中，经常有拉丝现象，妨碍凝料坠落。图 10-49 的 *A* 部视图中的弹簧 8、顶销 9，可把细丝拉断。

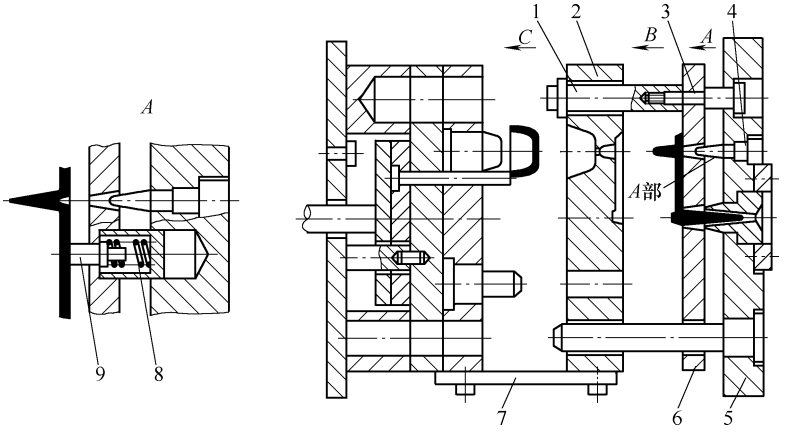
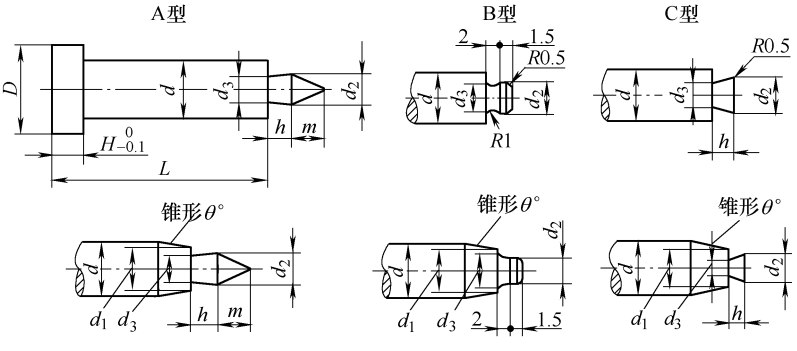


图 10-49　用分流道推板脱卸浇道凝料的多型腔模

1—拉杆　2—型腔板　3—限位螺钉　4—分流道拉料销　5—定模底板
6—分流道推板　7—拉板　8—弹簧　9—顶销

可有若干个分流道拉料销将流道凝料拉附在定模板上。拉料销的结构和尺寸见表 10-10。拉料头的（$d_2 - d_3$）之差为 0.5 ~ 1.0mm。对于脆性塑料尤其要有圆角过渡和低的表面粗糙度（$Ra < 3.2\mu m$）。拉料销的锥形段与分流道推板的孔要密配。

表 10-10　分流道拉料销的结构和尺寸　　（单位：mm）



基本尺寸 d	公差	D	H	d_1	d_2	d_3	h	m	θ°
4.0	+0.012	8.0	6.0	3.0	2.8	2.3	2.5	5.0	10°
5.0	+0.004	9.0		3.5	3.3	2.8	3.0	5.0	
6.0	+0.015	10.0		4.0	3.8	3.0	3.0	7.0	
8.0	+0.006	13.0	8.0	5.0	4.8	4.0	4.0	7.0	20°
10.0	+0.018	15.0		6.0	5.8	4.8	5.0	7.0	
12.0	+0.007	17.0		8.0	7.2	6.2	5.0	7.0	

图 10-50 是单型腔注射模，从型腔板上用分流道推板将主流道凝料自动坠落。图 10-50a 是闭合注射状态，注射机喷嘴压紧在主流道衬套上。图 10-50b 是保压后喷嘴后退，主流道衬套在弹簧作用下与主流道凝料脱离。图 10-50c 是定模上 *A* 和 *B* 二次分型，分流道推板 3 被限位螺钉 4 停住后，推板上的凝料在 *B* 分型时拉断浇口，被弹出坠落。

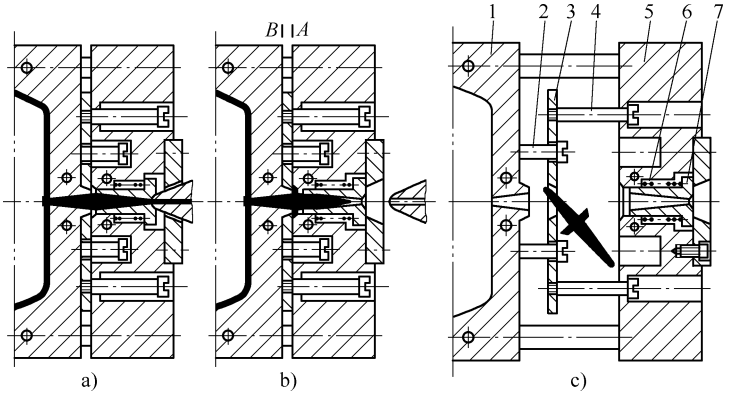


图 10-50　型腔板上用分流道推板将浇道凝料脱出

a）闭合注射　b）主流道凝料脱离　c）*A* 和 *B* 二次分型

1—型腔板　2—限位螺钉　3—分流道推板　4—限位螺钉　5—定模板　6—弹簧　7—主流道衬套

1）二次分型的夹拉机构。图 10-51 和图 10-52 是两种新型插销锁模夹持器。插销固定在固定板上，其侧面对两个支座的孔，有导向定位作用。插销的接触工作面设计成凸轮曲面，开合模时扣锁运动平稳。插销的长度方向按开模行程调整容易。两个支座分别固定在型腔板和动模上，不影响主分型面的闭合和锁紧。因此，这种插销锁模夹持器适用于浇注系统凝料脱模，即适用于有三个分型面的四板注射模。

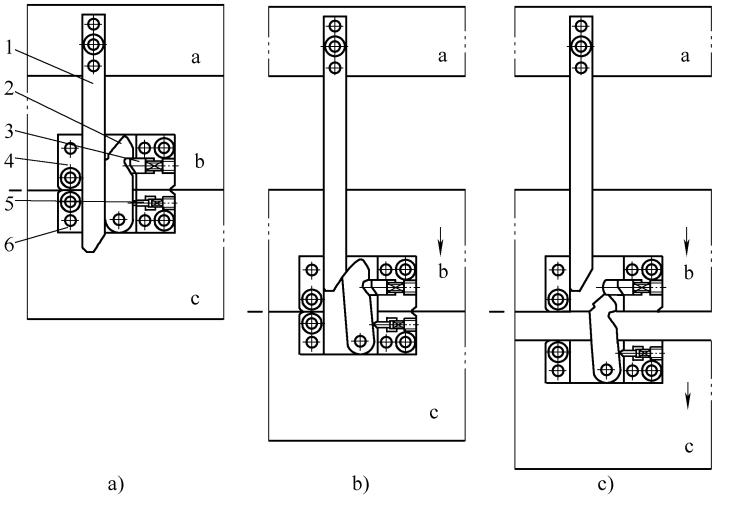


图 10-51　插销摆勾锁模夹持器

a）闭模　b）第一次分型　c）主分型面分型

1—插销　2—摆勾　3—锁块，弹簧　4—锁块座　5—顶销，弹簧　6—摆勾座

a—定模固定板　b—型腔板　c—动模板

图 10-53 所示的加长锁块，可使夹持器利用定模的二次分型。锁块 1 固定处分流道推板在动模的两侧，弹簧夹持座装在定模型腔板上。如果用于二分型的顺序脱模，在分型面 A 处分流道推板与定模座板分离，滚柱 4 在锁块上滚动。型腔板 b 被延时，直到在 L 位置定距，主分型面 B 打开。用于三分型的四板模，分流道推板在分型面 A 与定模座板分离，而后是型腔板在分型面 B 与分流道推板分开。最后是主分型面 C 打开。定模上开模行程 $L = L_1 + L_2$，L_1 为分型面 A 开模行程；L_2 是分型面 B 开模行程。

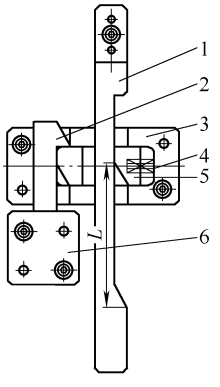


图 10-52　插销锁块锁模夹持器

1—插销（固定在定模板）　2—锁块　3—滑块座（固定在型腔板）　4—弹簧　5—滑块　6—锁块座（固定在动模上）

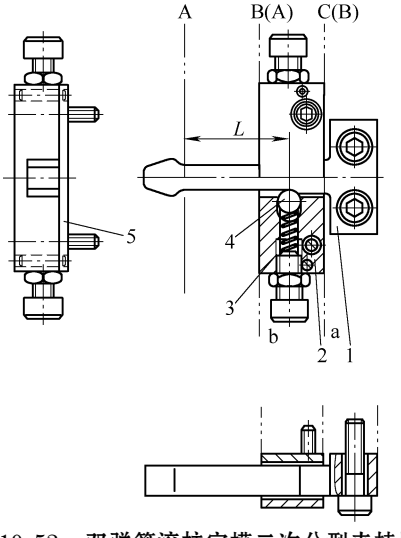


图 10-53　双弹簧滚柱定模二次分型夹持器

1—锁块　2—支座　3—强力弹簧　4—滚柱　5—盖板　a—动模板　b—型腔板

2）限位定距机构。图 10-54 所示牵引拉杆可用于定模分流道推板的限位定距。第一种结构可获得开模距离 $L = L_1 + L_2$。倘若浇道凝料很长，该行程不能满足要求，可用第二种伸缩式拉杆结构，可得到 $L = L_1 + L_2 + L_3$ 的较大行程。但需注意拉杆设置不能妨碍浇道凝料自由坠落。图 10-55 所示用螺纹联接的加长拉杆，也能满足大行程的要求。当然，对定模的分流道推板可添置二级的夹持和定距机构。

将各种夹持器和定距机构组合，可设计种类繁多的四板模，确保浇道凝料自由坠落。图 10-56 和图 10-57 是其中两个组合。

图 10-56 四板注射模用拉板 9 完成 L_1 和 L_2 二次定距，用弹力胶塞 2 和胶管套拉紧器 4 执行二次夹持，是一种简易的流道凝料推出脱模。

图 10-57 同样也是四板注射模，用点浇口注射一模多腔塑料壳体。由于弹簧 2 的作用，A 面先分型。L_1 行程用限位螺钉 1 定距，行程仅 10mm 左右，让分流道拉料销脱出流道凝料。L_2 行程用小拉杆 3 定距，行程 L_2 应大于浇注系统凝料总高度，再加上 20 ~ 30mm 自由坠落空间。动模用弹簧锁块夹拉器 4 夹拉型腔板，导柱拉杆 5 限位总行程 L，其 $L = L_1 + L_2$。

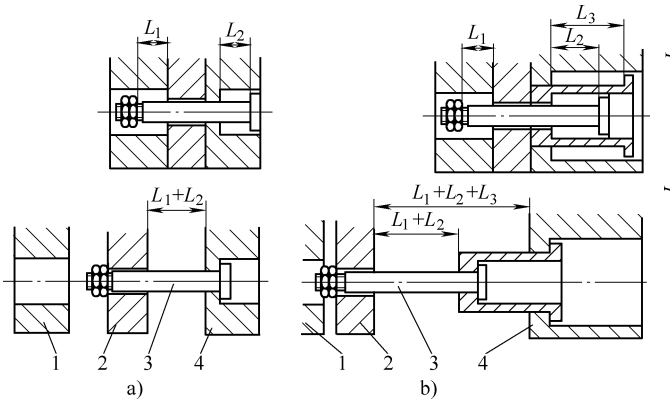


图 10-54　伸缩式拉杆的限位定距

a）单式　b）伸缩式

1—型腔板　2—分流道推板　3—拉杆　4—定模固定板

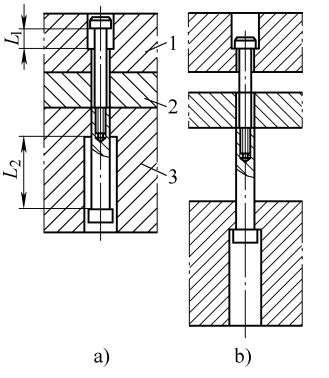


图 10-55　加长型拉杆的限位定距

a）合模　b）开模

1—定模固定板　2—分流道推板　3—型腔板

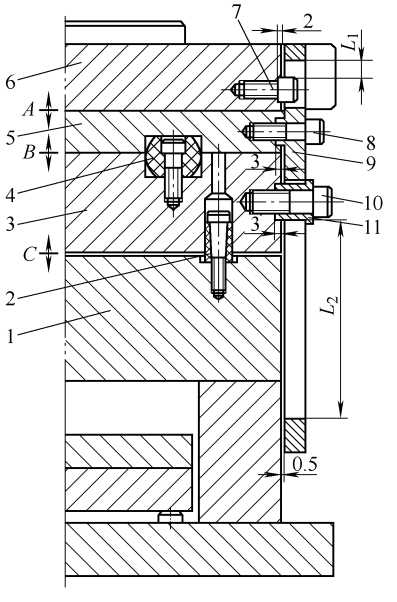


图 10-56　定模两分型拉板定距

1—动模型腔板　2—弹力胶塞　3—定模的型腔板

4—胶管套拉紧器　5—分流道推板　6—定模固定板

7—流道推板的限位螺钉　8—拉板的固定螺钉

9—拉板　10—型腔板的限位螺钉　11—镶套

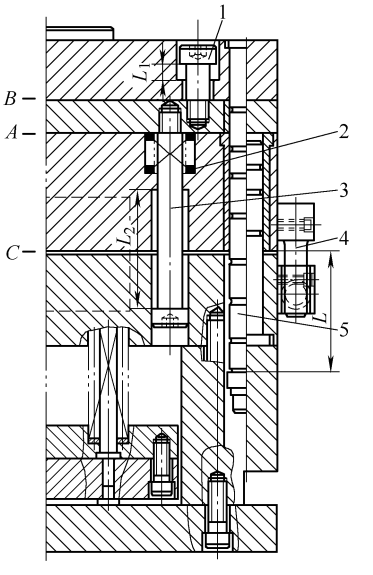


图 10-57　定模两分型拉杆定距

1—限位螺钉　2—弹簧　3—小拉杆

4—弹簧锁块夹拉器　5—导柱拉杆

（2）潜伏式浇口的脱模　具有潜伏式浇口的单分型面的注射模，在开模中，切断浇口后，注塑件与浇道凝料分别脱出。小浇口被剪切和拉伸切断，而浇口的引流圆锥柱必须斜向抽出。按潜伏式浇口的位置，有两类脱模方式。

1）浇口在定模板上的拉切。图 10-58 所示潜伏式浇口在定模板上，设置有拉紧浇道凝料 1 的冷料井 2，在主分型面打开时，小浇口被拉紧剪断。开模后注塑件和浇道凝料滞留在动模上。在脱模时由推料杆 3 顶出。推料杆的位置很重要，应该在潜伏浇口的中心线上。冷料井的凝料拉紧力的作用点在浇口的中心线附近。图示浇口至推杆的距离 l 小于 15 ~ 20mm。

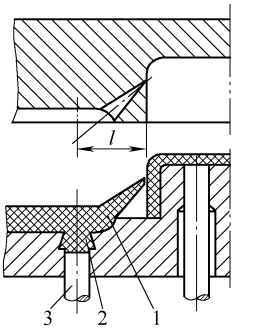


图 10-58　潜伏式浇口在定模板上的拉切

1—浇道凝料　2—冷料井　3—推杆

2）浇口在动模板上的推切。图 10-59 所示潜伏式浇口是设置在动模板上，对制件表面不留浇口疤痕。在推杆 3 上开出附加的进料浇口，开模时定模与动模 4 首先分型，注塑壳体粘留在动模。顶出时推杆 1 ~ 3 分别推动浇口浇道凝料和注塑壳体。借助动模 4 将潜伏浇口与附加浇道剪切推断。注塑件与附加浇口一起与浇道凝料分离，能分别坠落。

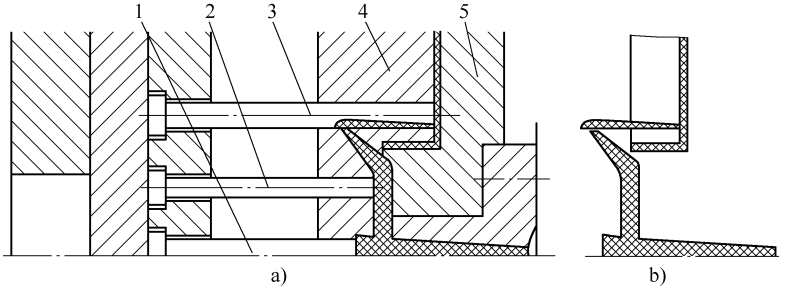


图 10-59　潜伏式浇口在动模的推切

a）合模注射　b）脱模后的注塑件和浇道凝料

1 ~ 3　推杆　4—动模　5—定模

图 10-60 所示潜伏式浇口布置在注塑件的内孔，用各个推杆分别推切浇口。在动模上顶出后，注塑件与中央浇道凝料分离。如果遇到制件内孔较大，浇口切断费力，建议采用图 10-61 所示的二级脱模机构。

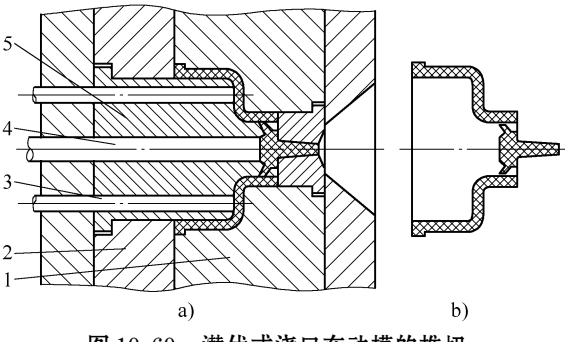


图 10-60　潜伏式浇口在动模的推切

a）合模注射成型　b）脱模后的注塑件和浇道凝料

1—定模型腔板　2—动模型芯固定板　3—推杆　4—中央推杆　5—型芯

图 10-61 所示是二级脱模机构脱出潜伏式浇口的流道凝料。在第一次脱模中，由制品顶杆 2 将注塑件推出，而挡圈 1 与顶出板之间有空档 L，静止不动的潜伏式浇口被剪断。在二次脱模中，顶出固定板 10 与差动顶杆上挡圈 1 接触，整个脱模机构同步动作，差动顶杆推出流道凝料，制品被进一步推出。L 一般取制品总高的三分之一左右。挡圈 1 与差动顶杆 9 用定位销联接。整个脱模机构必须有复位杆。

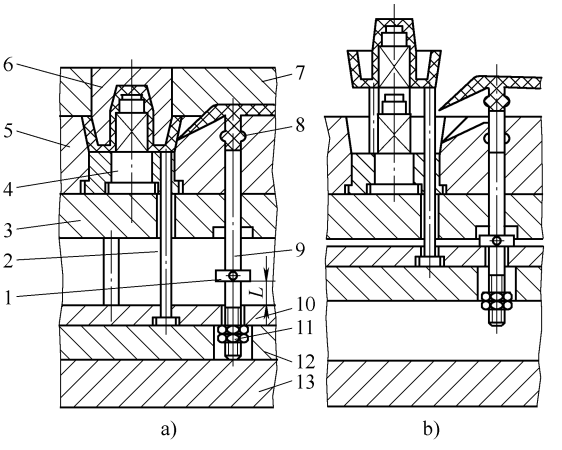


图 10-61　二级脱模机构脱出潜伏式浇口的流道凝料

1—挡圈　2—制品顶杆　3—动模垫板　4—型芯　5—动模板　6—凹模　7—定模板
8—冷料井　9—差动顶杆　10—顶出固定板　11—紧定螺母　12—顶出板　13—动模座

10.3.4　二级脱模机构

二级脱模机构也称为二次脱模机构。如果注塑件的脱模行程较长，经一次顶出后尚不能自动坠落，则需通过第二次推出使制品落下。这就要有一种二级行程的脱模机构。另一类是薄壁深腔或外形复杂的注塑件，与型芯侧壁接触面积大，需很大脱模力。若用顶杆或推管一次推出，易损伤注塑件。两次推出可分散脱模力。这就要有一种二级推力的脱模机构。还有一类情况是注塑件有需强制脱模的结构，用二级机构既能保证制品质量顺利脱模，又能自重坠落。如图 10-62 所示注塑件上有两个弹性卡夹，需强制脱模。塑料卡脚和凸起被型芯和成型套包容。第一次脱模时型芯固定在动模上，成型套和推板一起推顶，为塑料卡脚弹性变形提供空间。第二次脱模时卡脚上的凸边缘被强制脱出。

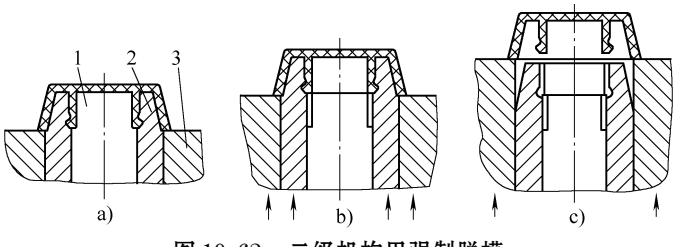


图 10-62　二级机构用强制脱模

a）开模　b）一级脱模　c）第二次脱模
1—型芯　2—成型套　3—动模推板

二级脱模机构一般用两种机构脱模，例如弹簧、凸轮推杆、杠杆或拉杆等机构。机械和压缩空气的二级脱模机构现已较多采用。用推板或推管脱出一段距离后，导入压缩空气使注塑件完全脱出。二级机械的脱模机构形式很多，按动模中顶出板组件数目可分成两类：一类是单顶出板组件的二级脱模机构；另一类是双顶出板的二级脱模机构。

1. 单顶出板组件的二级脱模机构

单顶出板组件先将注塑件从动模的型芯上分离，但留在动模型腔板上，称为第一次脱模。然后用各种机构，将注塑件从动模型腔板上推出，让其自动坠落。机构设计时应掌握：第一次推顶的脱模力大，应不使制品损伤；第二次脱模应有足够的行程，保证制件依靠自重坠落。

如图 10-63 所示为带有斜楔结构的单顶出板组件的二级脱模机构。开模一定距离后，注射机上固定顶柱推顶了顶出板 12，同时驱动顶杆 9 和动模型腔板 7，使制品与型芯 8 脱离，实现第一次推顶动作。在这次顶出中，斜楔 6 推动滑块 4 向模具中央移动。但此时滑块 4 与推杆 2 还存在平面接触，推杆 2 保持与顶杆 9 与型腔板 7 同步运动。一旦一次顶出结束，推杆 2 会坠落在滑块 4 的圆孔中，动模型腔板 7 便停止运动，而顶杆 9 在继续运动，直到把制品从型腔板中脱出，实现第二次顶出。顶出行程 l_1 和 l_2 与制品高度 h_1 和 h_2 的关系为

$$l_1 \geqslant h_1, l_2 \geqslant h_2, L = l_1 + l_2$$

图 10-64 所示的注射模也采用单顶板的二级脱模机构。其特点是利用定模上拉板 1，在开模时实现第一次脱模。定模上装有对称布置的拉板 1 两件，在分型过程中拉板钩动凸轮 8 转动，凸轮顶动推件型腔板 4 使制品脱离型芯 7。限位螺钉 5 限制了型腔板的移动距离。凸轮旋转的角度不能过大，以免合模时发生自锁，以致第一次脱模距离 h_1 较短。凸轮上弹簧的作用是使凸轮与推件型腔板保持接触，合模时压迫凸轮复位。第二级脱模由推杆将注塑件从型腔板中完全推出。因此脱模行程 L 有

$$L \geqslant h_1 + h_2$$

图 10-65 所示的注射模也采用单顶板的二级脱模机构。利用二级推杆 1 上的滚珠 7 带动内衬套 4，让动模型腔板 8 和推杆 2，同时实现第一次脱模。滚珠 7 进入内衬套 4 的凹槽里，动模型腔板 8 停止。而推杆 2 继续推顶，将注塑件推出型腔板，自重坠落。第一次脱模时，要保证注塑件从型芯完全脱离，有

$$l_1 \geqslant h_1$$

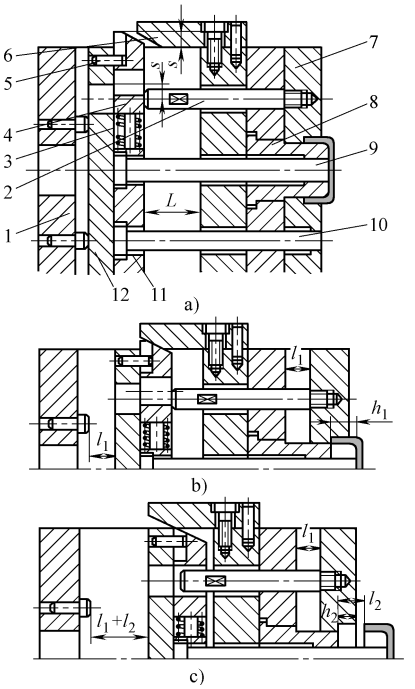


图 10-63　斜楔滑块式单顶板的二级脱模机构

a）开模状态　b）第一次脱模顶出　c）第二次脱模

1—动模座　2—推杆　3—压缩弹簧　4—滑块　5—限位销　6—斜楔　7—动模型腔板　8—型芯　9—顶杆　10—复位杆　11—顶杆固定板　12—顶出板

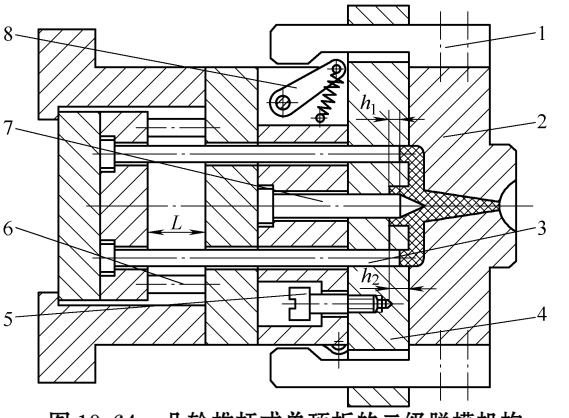


图 10-64　凸轮推杆式单顶板的二级脱模机构

1—拉板　2—定模　3—推杆　4—推件型腔板　5—限位螺钉　6—复位杆　7—型芯　8—凸轮

图 10-65 所示内衬套 4 的槽深应取 $s = d/3$。这种滚珠套筒式二级脱模机构已经作为标准件生产并商品化。标准件用卡紧圈将内衬套与动模型腔板固定在一起。标准件加工精度高，热处理规范，使用寿命长。一般布置 2 ~ 4 套滚珠衬套二级顶杆。

2. 双顶出板组件的二级脱模机构

图 10-66 ~ 图 10-69 所示的注射模都具有两套顶出板组件，被称为双顶出板组件的二级脱模机构。从图 10-66 所示弹簧驱动双顶出的二级脱模可知，它们的动作过程简单，但组成的零部件较多。开模时注塑件首先受型腔推件板 6 作用，脱离主型芯 7。当一级顶出板接触到动模垫板的底面时，停止推进。弹簧 2 在二级顶出板作用下被压缩，将注塑件完全推出。此种模具上弹簧的刚性和轴线方向的压缩变形量必须慎重考虑。所获得的二次顶出行程都较小。

图 10-67 所示为八字摆杆式双顶出板组件的二级脱模机构。它有两个对称的呈八字状的摆杆，并有两套顶出板组件，即一次顶出板 10 和二次顶出板 2。型腔板 7 将制件从型芯 6 上脱出。该型腔板经推杆 9 与一次顶出板 10 相连。顶杆 5 将制品从型腔板推出。该顶杆 5 与二次顶出板 2 相连。两顶出板之

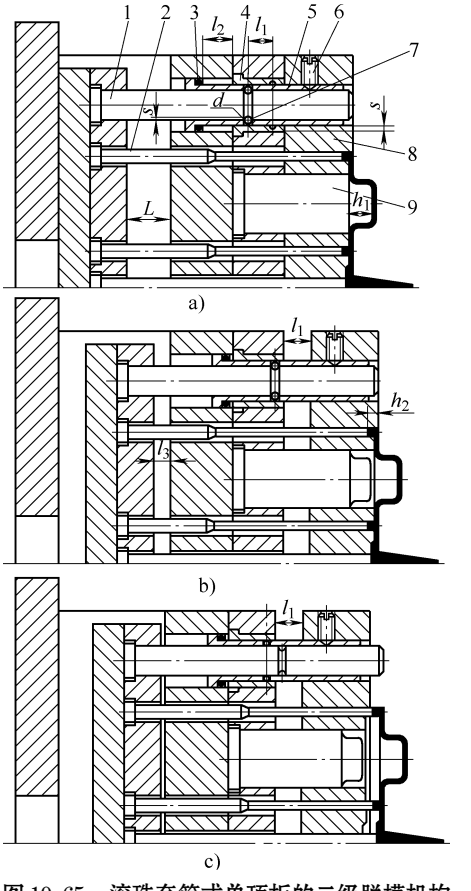


图 10-65　滚珠套筒式单顶板的二级脱模机构

a）开模状态　b）第一次脱模顶出　c）第二次脱模

1—二级推杆　2—推杆　3—聚氨酯橡胶垫　4—内衬套　5—活动外套筒　6—紧定螺钉　7—滚珠　8—动模型腔板　9—型芯

间的定距块 1 使顶杆 5 在一次推出时能与型腔板同步。开模后注射机推顶一次顶出板 10，经推杆 9 带动型腔板移动距离 s_1，实现注塑件在型芯上的一次顶出动作。由定距块 1 的传力，二次顶出板 2 和顶杆 5 均与型腔板同步。一次推出完成后，摆杆 11 在一次顶出板 10 作用下转过一定角度和二次顶出板 2 接触。继续开模时，一次顶出板 10 经摆杆 11 迫使二次顶出板 2 和顶杆 5 产生超前顶出动作，使制品在顶杆 5 作用下从型腔板中脱出 s_4 距离，实现了二次顶出。该机构的顶出行程、制品高度和有关几何要素之间关系如下。

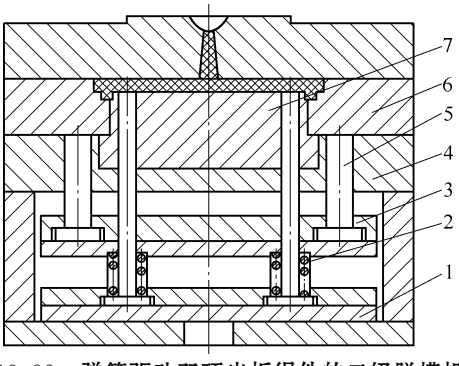


图 10-66　弹簧驱动双顶出板组件的二级脱模机构

1—二级顶出板　2—弹簧　3—一级顶出板　4—动模垫板
5—压力推顶杆　6—型腔推件板　7—主型芯

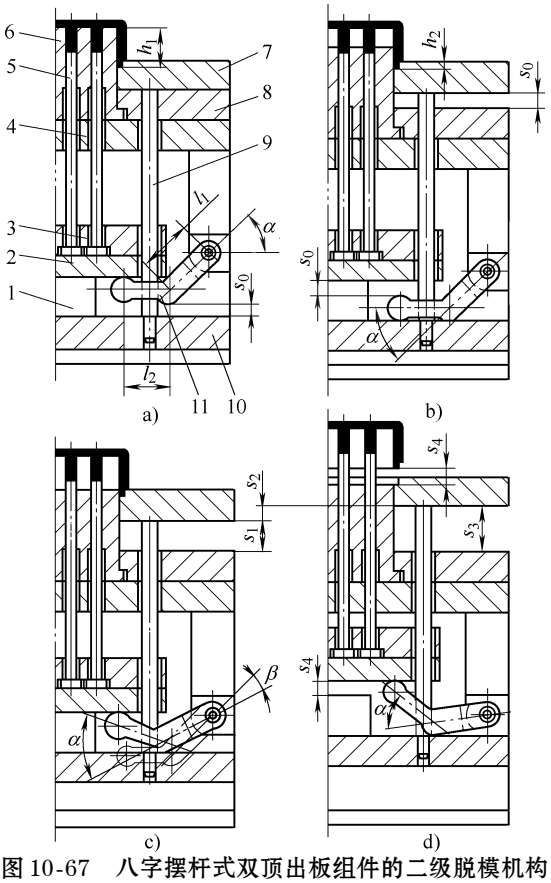


图 10-67　八字摆杆式双顶出板组件的二级脱模机构

a）注射机顶柱与一次顶出板开始接触　b）一次推出工作状态
c）一次推出完成时模具状态　d）二次顶出完成时模具状态
1—定距块　2—二次顶出板　3—顶杆固定板　4—动模垫板　5—顶杆　6—型芯
7—型腔板　8—型芯固定板　9—推杆　10—一次顶出板　11—摆杆

1）摆杆转角 α 一般可取 45°；而且 $s_1+s_2\geqslant h_1$；$s_1+s_2=s_3=l_1\sin\alpha+s_0$，

2）超前量 $s_4\geqslant h_2$；$s_4\approx l_2\sin\alpha-s_0$；$s_0=l_2\sin\beta$；$l_2=\dfrac{s_0+s_4}{\sin\alpha}$。

图 10-68 为斜楔拉钩式双顶出板组件的二级脱模机构。拉钩在合模状态下和二次顶出开始之前，经柱销 7 将二次顶出板 2 和一次顶出板 3 拉合在一起。开模后注射机顶柱推动二次顶出板和顶杆 15 推顶注塑件。与此同时，一次顶出板经推杆 10 驱使型腔板 11 与其同步运动。于是，注塑件在型腔板 11 与顶杆 15 的共同作用下脱离型芯 13，实现第一次脱模。继续开模中，安装在型芯固定板 14 上的斜楔 12 迫使两个拉钩张开，致使一次和二次顶出板相互脱开，再继续开模。一次顶出板 3 和型腔板 11 停止运动。继续前进的二次顶出板 2 和顶杆 15，将制品从型腔板中脱出，完成二次顶出。在合模时回程杆将二次顶出板先行推回，拉伸弹簧 5 使拉钩 6 勾住一次顶出板上的柱销，两者恢复连接。该机构中，顶出行程与注塑件高度的关系为

$$l_1\geqslant h_1;\ l_2\geqslant h_2;\ L=l_1+l_2$$

图 10-69 为斜楔滑块式双顶出板组件的二级脱模机构。模具开模后，由于斜楔滑块卡合作用，注射机顶柱 1 推动一次和二次顶出板组件一起脱模推进。小推杆 5、6 与型腔板的大推杆 7，一起将注塑件从型芯 8 中推出，但滞留在型腔板 10 中。在完成第一次脱模过程中，斜楔杆 11 的斜面相对滑块 13 滑动，迫使滑块缩进滑块座 14。当第一次推出行程 l_1 完成时，滑块完全脱离二次推板 3 组件。一次推板 2 的组件失去顶柱 1 的推顶动力。此后顶柱只能推动二次推板 3 和小推杆 5 及 6，将注塑件从型腔板上脱出，完成第二次脱模，让制品坠落。该机构中，顶出行程与注塑件高度的关系为

$$l_1\geqslant h_1;\ l_2\geqslant h_2;\ \text{总行程}\ L=l_1+l_2$$

图 10-69 所示的斜楔杆和滑块机构中，滑块行程 l 一般取 5mm 左右。它与斜楔杆的斜面有效高度 h 的关系有

$$h=l\tan\alpha+(1.5\sim2)(\text{mm})$$

其中斜角常取 $\alpha=60°$。需核算斜楔

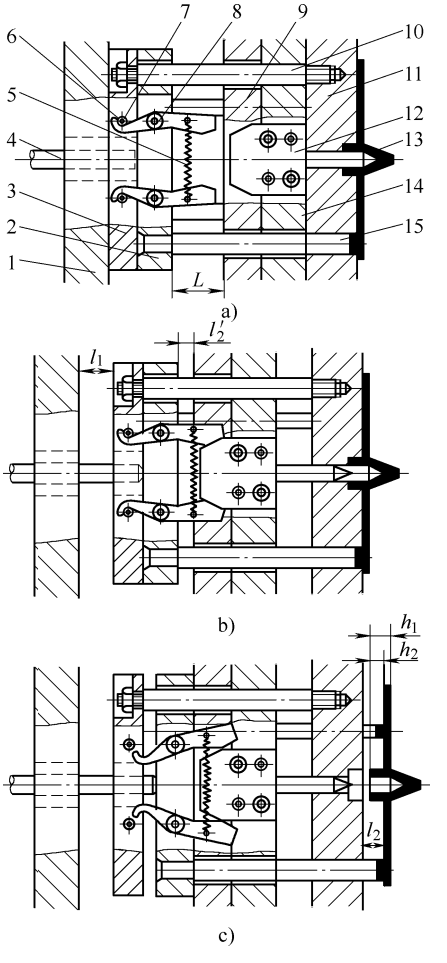
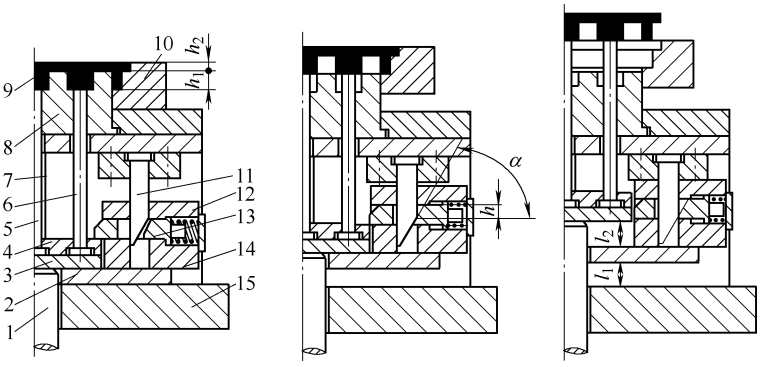


图 10-68　斜楔拉钩式双顶出板组件的二级脱模机构

a）开模状态　b）一次推出完成时状态　c）二次顶出完成时状态
1—动模座板　2—二次顶出板　3—一次顶出板　4—注射机顶柱　5—拉伸弹簧　6—拉钩　7—柱销　8—芯轴　9—动模垫板　10—推杆　11—型腔板　12—斜楔　13—型芯　14—型芯固定板　15—顶杆

杆和滑块机构零件的几何尺寸，保证能协调二级脱模动作。



a)　　b)　　c)

图 10-69　斜楔滑块式双顶出板组件的二级脱模机构

a）顶柱与二次推板开始接触　b）一次推出动作结束时模具状态　c）二次推出动作结束时模具状态
1—注射机顶柱　2—一次推板　3—二次推板　4—推板固定板　5，6—小推杆　7—型腔板的大推杆
8—型芯　9—制件　10—型腔板　11—斜楔杆　12—压板　13—滑块　14—滑块座　15—动模座板

10.4　侧向分型抽芯机构

侧向分型与抽芯机构简称侧抽机构，用来成型具有外侧凸起、凹槽和孔的塑料制品。也成型塑料壳体内侧的局部凸起、凹槽和不通孔。侧抽机构必须在开模方向脱模之前完成侧向抽拔动作。在闭模过程中，为避免顶杆与侧向型芯碰撞，必须让脱模机构复位后，侧抽机构才回复。注射模的侧抽机构的可动零部件多，动作复杂，故设计可靠、灵活和高效的侧抽机构较为困难。侧抽机构的种类很多，按驱动类型可分为手动、弹簧力、开合模的机械力、液压与气动四种类型。手动侧抽机构，生产率很低，已经见不到了。弹簧侧抽机构的结构简单，弹簧的刚性设计和制造质量是成功的关键。齿轮齿条侧抽机构利用固定在定模上的齿条，在开模时带动小齿轮转动，动模齿轮又传动型芯齿条，可实现斜向抽芯。液压缸驱动的侧抽机构，主要用于长管件的注射成型。

本节按机构的特征，陈述斜导柱、弯销、斜顶杆和斜滑块四种侧抽机构。

10.4.1　斜导柱侧抽机构

斜导柱分型抽芯机构结构简单，在中小型注射模上使用普遍。它以注射机的开模力的分力作为滑块侧抽力，所需开模距离较大。而且侧型芯与顶杆有干涉撞击的可能，滑块抽拔距很短。

1. 斜导柱长度和开模距离

图 10-70 所示是典型的斜导柱侧抽机构，也称为斜销抽芯机构。侧型芯或瓣合模滑块装在 T 形导滑槽内，可沿侧向抽拔方向平稳滑移。驱动滑块的斜导柱与开模方向成斜

角 α 安装。斜导柱 2 与滑块 3 上的对应孔为大间隙配合，开模时斜导柱 2 与滑块 3 有相对运动。斜导柱对滑块产生的侧向分力，迫使滑块完成侧抽芯或侧分型动作。图中限位销钉 5 和弹簧 6 的作用是完成侧抽后，对滑块起定位作用，使它停留在与斜导柱脱离时的位置上，以便合模时斜导柱能准确插入斜孔，驱动其复位。楔紧锁模块 1 在闭模时压紧滑块 3，以免注射时受塑料熔体的压力而移位。

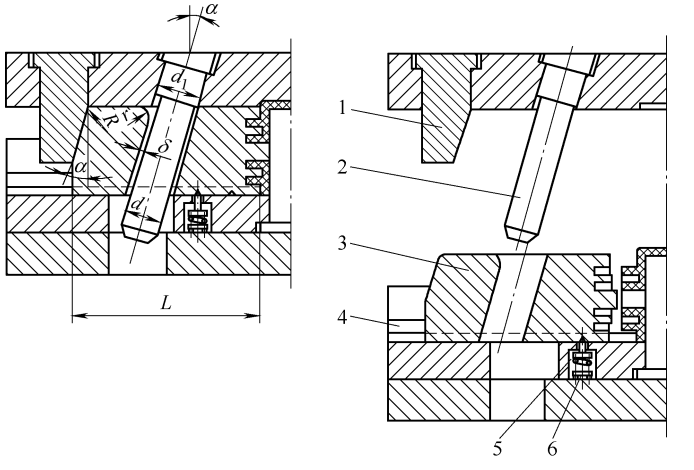


图 10-70　典型的斜导柱侧抽机构

a）合模状态　b）开模侧抽

1—楔紧锁模块　2—斜导柱　3—滑块　4—导滑槽　5—限位销钉　6—弹簧

（1）滑块在动模的主分型面上　侧向滑块在与模具开模方向垂直的动模平面上作分型或抽芯的相对运动，简称平面侧抽。在此情况下，斜导柱总长和开模行程参见图 10-71。

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5$$

$$= \frac{D}{2}\tan\alpha + \frac{h}{\cos\alpha} + \frac{d}{2}\tan\alpha + \frac{S}{\sin\alpha} + (10 \sim 15) \quad (10\text{-}42)$$

式中　D——斜导柱固定段的大端直径（mm）；

S——滑块侧向抽拔距离（mm）；

α——斜导柱的安装倾角（°）；

h——斜导柱固定板厚度（mm）；

d——斜导柱直径（mm）。

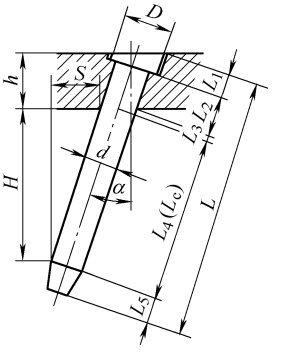


图 10-71　平面侧抽时斜导柱总长和开模行程

完成侧抽所必需的开模行程

$$H = L_c\cos\alpha = S\cot\alpha \quad (10\text{-}43)$$

其中，$L_c = L_4 = \dfrac{S}{\sin\alpha}$是对应侧向抽拔距 S 的有效长度。

由于斜导柱的常用安装倾角 $\alpha = 20^\circ$左右，对应所需滑块侧向抽拔距离 S，需很大开模行程 H。各种型号注射机能实现开模行程有限，因此，一般侧向抽拔距小于 50mm。

图 10-72 所示的滑块工作行程 S 和斜导柱有效长度 L_c，在有间隙 δ 存在时的计算式为

$$S = L_c \sin\alpha - \frac{\delta}{\cos\alpha} \tag{10-44}$$

$$L_c = \frac{S}{\sin\alpha} + \frac{2\delta}{\sin 2\alpha} \tag{10-45}$$

间隙 δ 减少了作用于斜导柱上的注射成型压力，并使开模时滑块的侧向运动滞后。单向间隙 δ 使滑块在开模方向延滞距离为

$$E = \frac{\delta}{\sin\alpha} \tag{10-46}$$

式中　L_c——斜导柱的有效长度（mm）；

δ——斜导柱与滑块上斜孔之间单向间隙（mm）；

E——单向间隙使滑块在开模方向滞后移动的距离（mm）。

单向间隙 δ 一般为 0.25～0.5mm。斜导柱的安装倾角 $\alpha = 12° \sim 25°$。斜导柱前端的引导段的斜角为 $\alpha + 5°$。斜导柱工作段直径 d 在 12mm 以上。锁紧楔角 α' 必须大于安装倾角 $\alpha' = \alpha + (2° \sim 3°)$。

（2）滑块在动模上的倾斜滑块　倾斜侧抽是指注塑件上侧孔或侧凹凸的方向与其主轴线不垂直。侧滑块的相对运动与模具主分型面呈夹角 θ。此状态又可分为滑块的后端斜向动模一侧和斜向定模一侧两种情况，如图 10-73 所示。

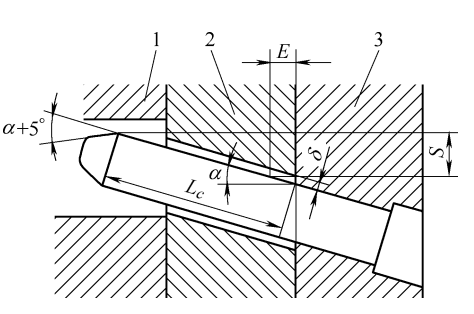


图 10-72　斜导柱侧抽机构主要部位的关系几何关系

1—动模板　2—滑块　3—定模板

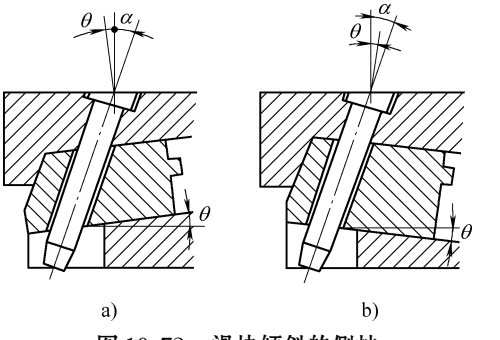


图 10-73　滑块倾斜的侧抽

a）斜向动模一侧　b）斜向定模一侧

1）斜向动模一侧。斜向动模边的几何关系如图 10-74a 所示。在同样开模行程 $H = AD$ 内，完成的抽拔距 $S = AC$，比滑块未倾斜时抽拔距 AB 增大了；对应斜导柱的有效长度 $L_c = CD$，也比平面侧抽时有效长度 BD 增加了。在 $DACD$ 中有

$$\frac{AC}{\sin\alpha} = \frac{CD}{\sin(90° + \theta)} = \frac{AD}{\sin[180° - (90° + \theta) - \alpha]} \tag{10-47}$$

由此可得

$$L_c = \frac{S}{\sin\alpha}\cos\theta \tag{10-48}$$

$$H=\frac{S}{\sin\alpha}\cos(\alpha+\theta) \tag{10-49}$$

事实上，有效的斜导柱安装倾角已由 α 增加为 $(\alpha+\theta)$。

2）斜向定模一侧。斜向定模边的几何关系如图 10-74b 所示。在同样开模行程 $H=AD$ 内，完成的抽拔距 $S=AB$。比滑块未倾斜时抽拔距 AC 小了；对应斜导柱的有效长度 $L_c=BD$，也比平面侧抽时有效长度 CD 小。在 $DACD$ 中有

$$\frac{AB}{\sin\alpha}=\frac{BD}{\sin(90°-\theta)}=\frac{AD}{\sin[180°-\alpha-(90°-\theta)]} \tag{10-50}$$

由此可得

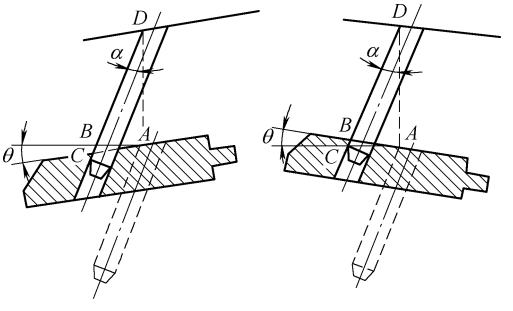
$$L_c=\frac{S}{\sin\alpha}\cos\theta \tag{10-51}$$

$$H=\frac{S}{\sin\alpha}\cos(\alpha-\theta) \tag{10-52}$$

事实上，这时有效的斜导柱安装倾角已由 α 减小为 $(\alpha-\theta)$。

2. 斜导柱机构的受力分析

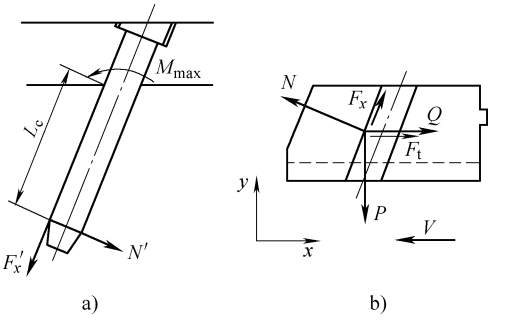
（1）滑块在动模主分型面上的受力分析　图 10-75a 和图 10-75b 分别为斜导柱和滑块的力分析图。侧滑块在开模时受到注射机开模力 P 的作用。它是动模上导滑槽施于滑块的正压力。这时，斜导柱驱动着滑块克服注塑件的抽拔阻力 Q，和导滑槽接触面的摩擦阻力 F_t。



a)　　b)

图 10-74　滑块倾斜侧抽时的几何关系

a）斜向动模一侧　b）斜向定模一侧



a)　　b)

图 10-75　斜导柱机构的受力分析

a）斜导柱　b）滑块

汇交力系在直角坐标系中，$\sum F_x=0$ 得

$$Q+F_t-F_x\sin\alpha-N\cos\alpha=0$$

又有　　$F_t=pf'$ 和 $F_x=Nf'$

式中，f'是滑块孔与斜导柱，和滑块与导滑槽之间的摩擦系数；α 为斜导柱安装倾角。代入后简化成

$$N=\frac{Q+Pf'}{\cos\alpha-\sin\alpha} \tag{10-53}$$

由 $\sum F_y=0$ 得　　$N\sin\alpha+F_x\cos\alpha-P=0$

代入后简化得

$$N=\frac{P}{\sin\alpha+f'\cos\alpha} \tag{10-54}$$

将式（10-53）和式（10-54）联立解得

$$P=\frac{Q(f'+\tan\alpha)}{1-2f'\tan\alpha-f'^2} \tag{10-55}$$

将摩擦系数 f' 用 $\tan\varphi$ 替代，上式可变换成

$$P=\frac{Q\sin(\alpha+\varphi)\cos\varphi}{\cos(\alpha+2\varphi)} \tag{10-56}$$

将 $f'=\tan\varphi$ 和式（10-55）代入式（10-54），可得

$$N=\frac{Q\cos^2\varphi}{\cos(\alpha+2\varphi)} \tag{10-57}$$

由式（10-56）和式（10-57）函数关系可知，随着安装倾角 α 增大，所需开模力 P 和斜导柱受到的法向力 N 随之增加。当 α 增大到 $(90°-2\varphi)$ 时，P 和 N 趋向于无穷大。其结果会使模具无法开启，或斜导柱折断。钢与钢表面间摩擦系数 $f'=0.08\sim0.12$，对摩擦角 φ 约为 4.5°～6.8°。因此，α 角达到 80°左右就出现危险状态。在 $\alpha\geqslant25°$ 时，由于 P 和 N 力较大，侧抽机构的摩擦表面的摩擦力 F_t 和 F_x 过大，磨损过于剧烈。但如果 α 角过小，$\alpha<\varphi$ 时会使机构处于自锁状态，也不能开模。所以注射生产时，α 在 12°～25°范围内比较适宜。

（2）滑块倾斜的受力分析

1）滑块斜向动模一侧。经推导，滑块斜向动模一侧时，斜导柱所受到的法向压力 N 和滑块所需开模力 P 分别为

$$N=\frac{Q\cos^2\varphi}{\cos(\alpha+\theta+2\varphi)} \tag{10-58}$$

$$P=\frac{Q\sin(\alpha+\theta+\varphi)\cos\varphi}{\cos(\alpha+\theta+2\varphi)} \tag{10-59}$$

此两式与式（10-57）和式（10-56）相比，在同样的安装倾角 α 下，N 和 P 都随着滑块斜角 θ，比平面侧抽时增大。

2）滑块斜向定模一侧。对于滑块斜向定模一侧时，斜导柱所受到的法向压力 N 和滑块所需开模力 P 分别为

$$N=\frac{Q\cos^2\varphi}{\cos(\alpha-\theta+2\varphi)} \tag{10-60}$$

$$P=\frac{Q\sin(\alpha-\theta+\varphi)\cos\varphi}{\cos(\alpha-\theta+2\varphi)} \tag{10-61}$$

此两式与式（10-57）和式（10-56）相比，在安装倾角 α 不变情况下，N 和 P 都随着滑块斜角 θ，比平面侧抽时减小。

（3）斜导柱的强度计算　如图 10-75a 所示，斜导柱驱动滑块并从斜孔中抽拔时，法向力 N 使斜导柱受到力臂为 L_c 的弯曲力矩。固定端的最大弯矩 $M_{max}=N\cdot L_c$，在危险截面上的最大弯曲应力

$$\sigma_{max}=\frac{M_{max}}{W_z} \tag{10-62}$$

式中，W_z为斜导柱的抗弯截面系数，对圆截面 $W_z=\frac{\pi d^3}{32}\approx 0.1d^3$。斜导柱的强度条件式

$$\sigma_{max}=\frac{M_{max}}{W_z}=\frac{NL_c}{0.1d^3}\leqslant[\sigma]_b \tag{10-63}$$

得斜导柱直径设计式

$$d=\left(\frac{10NL_c}{[\sigma]_b}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{10-64}$$

式中，$[\sigma]_b$为许用弯曲应力。对于 T8 或 T8A 其为 50～55HRC 时，则 $[\sigma]_b=140N/mm^2$。对于 T10 或 T10A 其为 54～58HRC 时，则 $[\sigma]_b=155N/mm^2$。它们的安全系数是 1.4。

在平面侧抽时，斜导柱的弯矩作用力，可将式（10-55）代入到式（10-57），用对注塑件的抽拔力 Q 直接由下式求得

$$N=\frac{Q}{(1-2f'\tan\alpha-f'^2)\cos\alpha} \tag{10-65}$$

［例］ 侧型芯成型一个小端直径 20mm 的不通孔，孔深 8mm，锥角 $2\beta=2°$，孔壁厚 $t=2mm$，斜导柱安装倾角 $a=20°$，聚丙烯 PP 成型。求所需抽拔力 Q，最小开模行程 H，及斜导柱直径 d 和总长度 L。

［解］ ① 成型不通孔时，侧型芯所需的抽拔力 Q

$$r_2=r_1+h\tan\beta=(10+8\times\tan1°)mm=10.14mm$$

$$r_{cp}=0.5(r_1+r_2)=0.5\times(10+10.14)mm=10.07mm$$

$$A_b=\pi r_{cp}^2=\pi\times10.07^2mm=319mm^2$$

$\lambda=r_{cp}/t=10.07/2=5.035<10$，属厚壁注塑件。由表 10-3 查得 PP 塑料的 $E=1.35\times10^3N/mm^2$，$v=0.33$。由表 1-19，钢材与塑料间的摩擦系数 $f=0.39$。注射成型平均成型收缩率 $S_{cp}=0.02$。由式（10-15）求脱模阻力

$$Q_c=\frac{2\pi r_{cp}ES_{cp}hK_f}{(1+\nu+K_\lambda)\cos\beta}$$

其中脱模斜度修正系数 K_f 由式（10-18），有

$$K_f=\frac{f\cos\beta-\sin\beta}{1+f\sin\beta\cos\beta}=\frac{0.39\times\cos1°-\sin1°}{1+0.39\times\sin1°\times\cos1°}=0.3699$$

其中厚壁注塑件的计算因子 K_λ 由式（10-19），有

$$K_\lambda=\frac{2\lambda^2}{\cos^2\beta+2\lambda\cos\beta}=\frac{2\times5.035^2}{\cos^21°+2\times5.035\times\cos1°}=4.5809$$

所以

$$Q_c=\frac{2\times3.1415\times10.07\times1.35\times10^3\times0.02\times8\times0.3699}{(1+0.33+4.5809)\times\cos1°}N=855N$$

真空吸力 $$Q_b=0.1A_b=0.1\times319N=32N$$

抽拔力 $$Q=Q_c+Q_b=(855+32)N=887N$$

② 最小开模行程 H

$$S = S_c + 2 = (8 + 2)\text{mm} = 10\text{mm}$$

$$H = S\cot\alpha = 10 \times \cot 20°\text{mm} = 28\text{mm}$$

③ 斜导柱直径 d

钢零件间的摩擦系数 $f' = 0.1$。斜导柱用 T8A 制造，其 $[\sigma]_b = 140\text{N/mm}^2$，弯曲作用力由式（10-65）

$$N = \frac{Q}{(1 - 2f'\tan\alpha - f'^2)\cos\alpha} = \frac{887}{(1 - 2 \times 0.1 \times \tan 20° - 0.1^2)\cos 20°}\text{N} = 1029\text{N}$$

有效长度

$$L_c = \frac{S}{\sin\alpha} = \frac{10\text{mm}}{\sin 20°} = 29.2\text{mm}$$

得

$$d = \left(\frac{10NL_c}{[\sigma]_b}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{10 \times 1029 \times 29.2}{140}\right)^{\frac{1}{3}}\text{mm} = 12.9\text{mm}$$

取斜导柱直径 $d = 14\text{mm}$。

④ 斜导柱总长度 L

取固定凸肩 $D = 1.8d$，安装斜导柱的定模板厚 $h = 20\text{mm}$，由式（10-42）

$$L = \frac{D + d}{2}\tan\alpha + \frac{h}{\cos\alpha} + \frac{S}{\sin\alpha} + 12 = \left[\frac{1}{2}(1.8 + 1) \times 14 \times \tan 20° + \frac{20}{\cos 20°} + \frac{10}{\sin 20°} + 12\right]\text{mm}$$

$$= 69.6\text{mm}$$

取斜导柱总长 $L = 70\text{mm}$。

3. 侧抽机构的零部件

侧抽机构的斜导柱、滑块、导滑槽、锁紧楔和定位装置五种零部件的结构和设计作如下分述。滑块是侧抽机构的主体，其他四种零部件辅助和协调了机构的全部功能。

（1）斜导柱　斜导柱多用 T8、T10 淬火或 20 钢渗碳淬火，淬火硬度为 50～55HRC。如图 10-76 所示，斜导柱的滑动段直径 d 为 10～40mm。它与滑块孔之间是大间隙配合，加工成 $d_{-1.0}^{-0.5}$。紧固段直径 $D = d$，它与模板孔的固定配合为 $\frac{H7}{m6}$。斜导柱固定段 $D = d + 5\text{mm}$，它与模板座孔有 0.5mm 的单向间隙。它在安装进模板后，切削除去凸出模板平面的部分。斜导柱头部可做成图 10-76 所示的球头。也可做成台锥形，其斜面角要大于安装倾角 α，让有效长度离开滑块后，头部不会砸碰斜孔。

斜导柱的直径和数量可按滑块的宽度引导决定，见表 10-11 推荐。当滑块宽度大于 100mm 时，其成型面上受到塑料熔体注射压力颇大，要考虑驱动一个滑块用两根斜销。由于存在机械制造的加工和安装误差，两根斜导柱不可能均衡分担法向压力 N。

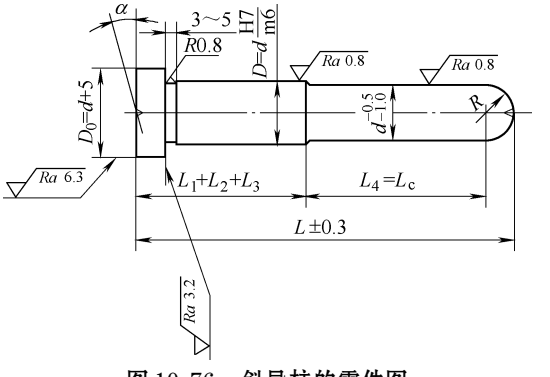


图 10-76　斜导柱的零件图

注：L_1、L_2、L_3、L_4 和 L 的计算见式（10-42）。

表 10-11 斜导柱直径和数量的推荐值

滑块宽度/mm	20 ~ 30	30 ~ 50	60 ~ 100	100 ~ 150	> 150
斜导柱直径/mm	6 ~ 10	10 ~ 15	15 ~ 20	15 ~ 20	20 ~ 25
斜导柱数量	1	1	1	2	2

斜导柱的安装固定方式有两种情况。图 10-77 适宜用在定模板较薄的场合。斜导柱紧固段长度 $L_2 \geqslant 1.5d$，才能稳定固定。图 10-77a 是定模板有压紧的定模固定板。图 10-77b 是定模板与定模固定板，在开模时相互脱开分离，因此要将斜销的固定段用螺钉与压板压住。图 10-78 适宜用在定模板较厚的场合。斜导柱紧固段长度 $L_2 \geqslant$（1.5 ~ 5）d，足以稳固在模板中。图 10-78a 是定模板有压紧的定模固定板，为避免紧固段过长，镶嵌压板来安装斜导柱。图 10-78b 是定模板与定模固定板会脱开分离。因此斜导柱嵌埋在定模板中，已有足够的紧固配合长度，但加工困难。

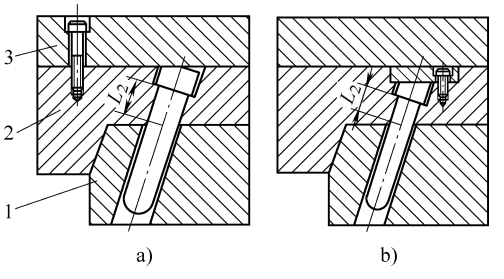


图 10-77 模板较薄时斜导柱固定方式

a）定模板与定模固定板固定联接

b）两板会相互脱开分离

1—滑块 2—定模板 3—定模固定板

L_2—斜导柱紧固段长度

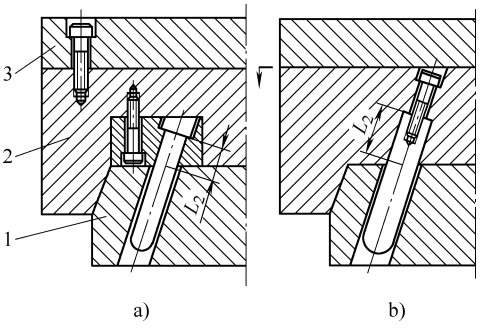


图 10-78 模板较厚时斜导柱固定方式

a）定模板与定模固定板固定联接

b）两板会相互脱开分离

1—滑块 2—定模板 3—定模固定板

L_2—斜导柱紧固段长度

（2）滑块 滑块的结构主要有整体式和组合式两大类。整体式应用在成型面积较大的滑块，常用侧向分型的瓣合滑块，为节约合金钢，过大的滑块也被用两大块不同钢材，或上下或前后以企口镶拼紧固。

滑块的材料有两方面考虑。一方面滑块的塑料注射成型表面，经研磨后达到镜面的要求。大都采用预硬钢 3Cr2Mo（P20）或 3Cr2NiMo（718）。但各个滑块的成型表面对其总表面的比例是不同的，相差还很大。采用镶拼、镶嵌或组合的滑块本体上，可以没有成型表面。另一方面，滑块上有很多的承压滑动表面。滑块与导滑槽之间的配合面有相对的滑动摩擦。滑块与锁紧楔的斜面上有压迫磨损。承压滑动表面应有足够的硬度和经久的耐磨寿命。中碳钢和预硬钢经局部淬火，不能达到表面硬度的质量要求。采用 38CrMoAl 等中碳合金钢的滑块，经渗氮处理，变形小且硬度高。超过 5 ~ 10kg 的大型滑块的表面渗氮处理有困难，常用图 10-79 的耐磨块镶嵌结构。耐磨块厚 H 有 5 ~ 12mm，面积为 50 ~ 200mm^2，也有用 2 ~ 3 块的，摩擦表面上挖有油槽，用 M5 或 M6 的沉头螺钉紧固。用高碳钢油淬硬度为 54 ~ 56HRC；用中碳合金钢渗氮硬度为 52 ~

56HRC。两个零件的相互配磨表面应该有 2 ~ 3 度的硬度差。

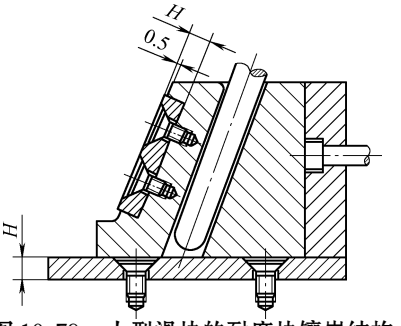


图 10-79　大型滑块的耐磨块镶嵌结构

组合式滑块按侧型芯形状可分为圆柱侧型芯和块状侧型芯两种，见图 10-80 和图 10-81，要求镶拼或镶嵌严密，并有足够的刚性。

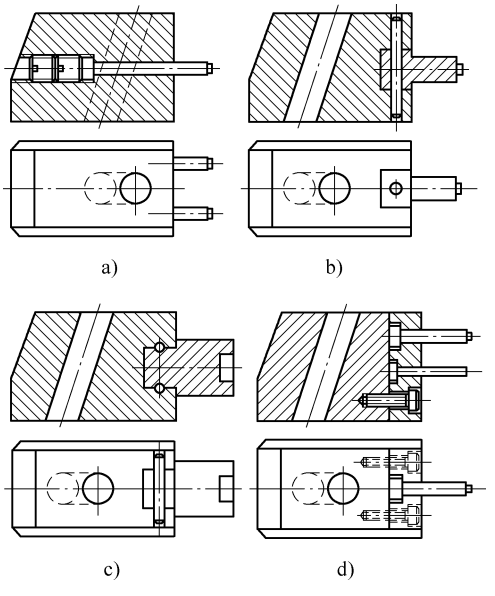


图 10-80　圆柱侧型芯的组合式滑块结构

a）双圆柱型芯，双螺母紧定　b）矩形镶嵌，销钉固定
c）矩形镶嵌，双销钉固定　d）多型芯，螺钉压板固定

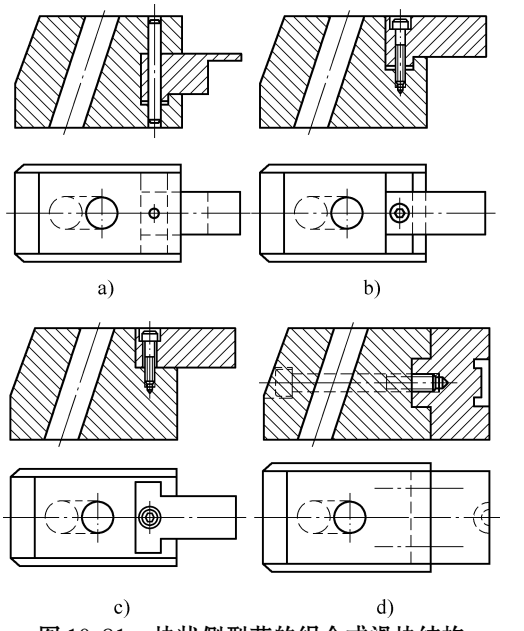


图 10-81　块状侧型芯的组合式滑块结构

a）通槽镶嵌，销钉固定　b）通槽镶嵌，螺钉固定
c）凹槽镶嵌，螺钉固定　d）通槽镶嵌，双螺钉吊紧

（3）导滑槽　与滑块相配的导滑槽大都是加工在动模板上。滑块在导滑槽中往复运动必须顺畅平稳，不能有呆滞或跳动现象。

如图 10-82 所示，滑块长度 L 为高度 H 的 1.5 倍左右为宜。滑块在抽拔位置，延伸出导滑槽的长度不能超过 $0.25L$，否则要在模板外接长导滑槽。

滑块常用 T 形槽导向，其加工方便且刚性好。图 10-83 中有六种 T 形导滑槽结构。导滑槽的滑动面，上下与左右只能有一个动配合尺寸为$\frac{H7}{f7}$，其余相应面间为 0.75mm 左

右的大间隙。图 10-83a 和图 10-83f 是整体式的 T 形导滑槽结构，加工困难，但稳定性好。图10-83b 所示的导滑槽结构用于大型滑块。滑块宽度 *A* 大于 200mm 时采用。宽度 *A* 大于 400mm 时采用两个导轨条。图 10-83c 是滑块宽度 *A* 在 20 ~ 200mm 时常用的导滑槽结构，加工方便，并且已经标准化。这种小压板单块宽度 *C* 相应为 15 ~ 25mm。它与滑块凸肩的滑动面宽度 *D* 有 4 ~ 8mm。摩擦表面应有 42HRC 以上的硬度。

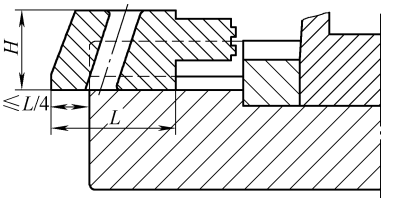


图 10-82　滑块与导滑槽的长度

图 10-83d 采用的 T 形槽装在滑块内，因此用于内侧抽芯受空间限制的场合。图 10-83e 上导滑所用的压板有凹槽，压板厚实强度好。滑块宽度 *A* 小于 200mm 时滑块凸肩高度 *B* 为 5 ~ 10mm；*A* = 200 ~ 450mm 时，*B* = 12 ~ 20mm。注射模装配合模后，在滑块的顶面与定模板腔壁之间应留有间隙，以防在注射压力下零部件弹性变形将滑块卡死。

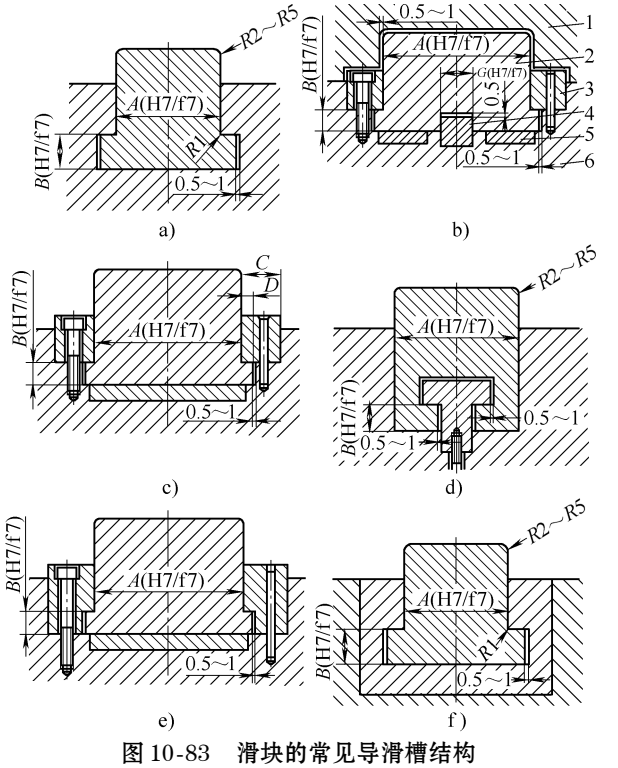


图 10-83　滑块的常见导滑槽结构

a）模板上整体 T 形槽　b）中央导轨、压板和耐磨块　c）压板和耐磨块
d）滑块内 T 形槽　e）凹槽双压板　f）镶块上的整体 T 形槽
1—定模板　2—滑块　3—压板　4—导轨　5—耐磨块　6—动模板

（4）锁紧楔　锁紧楔又称压紧楔。在合模注射过程中它使侧滑块紧密闭合，所以要求有足够的刚度。

1）整体式。如图 10-84 所示，利用定模板直接加工出锁紧楔，锁紧工作面大，能

承受较大侧压力，锁紧可靠刚性好；但需要大面积的模板，切削耗钢多；由于定模板为中碳钢，故要在斜面上镶嵌淬硬垫片，用以减少磨损，也易更换。整体式锁紧楔的布置除常用外侧卡紧外，有的也将压紧斜面置于斜导柱的里侧。

如图 10-84c 所示，锁紧楔角 α' 应大于斜导柱的安装倾角 α，以使在开模瞬时锁紧楔能领先脱离侧滑块。在复位时，因斜导柱与滑块斜孔间为大间隙，侧滑块有滞后现象。为避免闭合时锁紧楔与滑块斜面的干涉撞击，α'应有下面的关系式

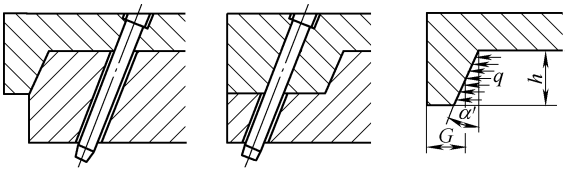


图 10-84　整体式锁紧楔

a）外侧卡压　b）里侧卡紧　c）力学分析

$$\tan\alpha' \geqslant \tan\alpha + \frac{2\delta}{h\cos\alpha}$$

式中，δ 为图 10-70 所示的斜导柱与孔之间的单向间隙；h 是锁紧楔斜面的工作高度。由此式计算，α'应大于倾角 α 倾角约 1°～3°。间隙 δ 大、高度 h 较小时，应取大值。但是楔角 α'过大，将使有效压紧力减小。

整体式锁紧楔经刚度条件推导，得受力中点厚度 G（见图 10-84c,）计算式

$$G \geqslant \left(\frac{3Ph^3}{2EB[\delta]}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{10-66}$$

式中　B——锁紧楔宽度（mm）；

h——锁紧楔工作高度（mm）；

E——钢的弹性模量，$2.1\times10^5\,\mathrm{N/mm^2}$；

$[\delta]$——锁紧楔的允许变形量，常取 0.05mm；

P——锁紧楔所受侧压力（N）；

$$P = qh = P_c A$$

P_c——型腔最高的注射压力（$\mathrm{N/mm^2}$）；

A——塑料熔体对滑块的作用面积（$\mathrm{mm^2}$）。

2）装配式。对于小型模具，模板面积小、侧压力又不大时，可用装配式锁紧楔，如图 10-85 所示，其加工和装配容易，但刚性差易松动。依靠螺钉和定位销固定，螺钉承受很大拉力，为此，有时采用里外双重锁紧来保证刚性。

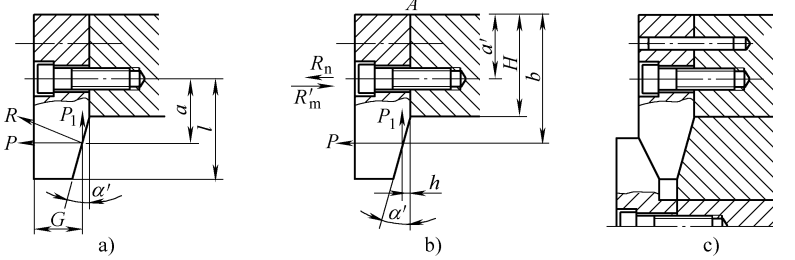


图 10-85　装配式锁紧楔

a）锁紧楔的刚性计算参数　b）螺钉直径计算参数　c）双重锁紧

根据图 10-85a 上定义的几何参数，锁紧楔中点的厚度

$$G \geqslant \left[\frac{2Pa^3}{EB[\delta]}\left(\frac{3l}{a}-1\right)\right]^{\frac{1}{3}} \tag{10-67}$$

式中　l——螺钉中心到锁紧楔底面距离（mm）；

a——螺钉中心到锁紧楔斜面受力中心距离（mm）；

P、E、B 和 $[\delta]$如式（10-66）所述。

根据图 10-85b 上的力分析，求出作用于螺钉的总拉力

$$R_n = \frac{P[b+(b-H)\tan^2\alpha']}{a'} \tag{10-68}$$

此力图是从 A 点为回转支点，图 10-85b 中，a'、b 和 h 为力臂，$h=(b-H)\tan\alpha'$，其中 $a'=2H/3$ 为好。由螺钉数 n，求出其直径

$$d = \sqrt{\frac{4R_n}{\pi[\sigma]_1 n}} \tag{10-69}$$

$[\sigma]_1$是螺钉允许的拉伸应力。常用 35 钢制螺钉时，$[\sigma]_1=150\sim200\text{N/mm}^2$。

3）镶嵌式。如图 10-86a 和图 10-86b 所示，这两种镶嵌式锁紧楔可减少定模板厚度，结构紧凑且牢靠，刚性也好；应该用淬硬钢制造，用电火花线切割加工。图 10-86a 结构用于定模板面积较大时，锁紧楔中间镶嵌进模板。定模板面积较小时，可用 T 形槽镶嵌，见图 10-86b。图 10-86c 是用于定模板较厚，而且在开模中与定模固定板分离时。此锁紧楔中间镶嵌又有双重楔压。

（5）定位装置　开模后斜导柱驱动滑块移动 S 距离，其后又与滑块上斜孔分离。这时滑块必须停留在这个位置。再次合模时，斜导柱才能准确可靠地插入滑块斜孔。定位装置必须根据注射模在注射机上的工作位置和滑块的大小来设计。

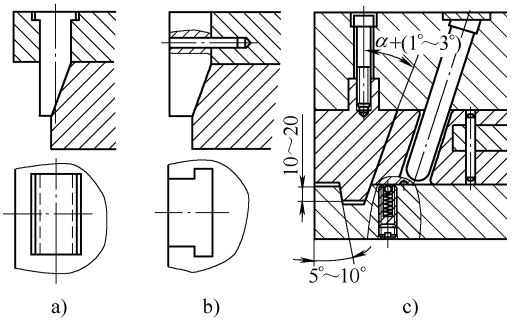


图 10-86　镶嵌式锁紧楔

a）中间镶嵌　b）T 形槽镶嵌　c）双重镶嵌锁紧

图 10-87 所示为四种常见的定位装置。其中图 10-87a 是利用挡块限位，以弹簧的拉力经限位杆拉紧滑块，将侧滑决定位在模具的外侧位置。弹簧的弹力应大于滑块自重的 1.5～2 倍。图 10-87b 是利用滑块的自重让挡板定位。图 10-87c 是用滑块底面的定位柱头限位，依靠模板上、球柱头下的弹簧作用，紧顶滑块底部的 90°凹坑。对于这种方法滑块不能过大，定位没有挡块可靠。图 10-87d 为已经标准化的钢珠套，常用来替代球柱头定位。标准系列钢珠套中的钢球直径为 1.5～9.5mm，套的长度为 7～25mm，用 M3×0.5～M16×2.0 的细牙螺纹旋入模板。尾部有内六角孔座，可再加螺母并紧。钢球外凸护套的高度为 0.5mm。图 10-87e 是在滑块内侧安装弹簧，依靠弹簧推力克服自重，将滑块压向定位螺钉。当然，用附加档块替代螺钉，限位更可靠。

4. 先复位机构

侧向分型抽芯机构斜导柱在定模、滑块在动模时，侧滑块领先复位与顶杆或顶管可能会产生干涉相撞。首先，这种干涉发生在滑块与顶杆同处于同一开模平面。侧型芯与顶杆在分型面上重合的侧向距离 Δl 过大、顶杆端面与侧型芯在开模方向距离 Δh 较小，容易产生干涉。在判断有干涉时，则须采用先复位机构。

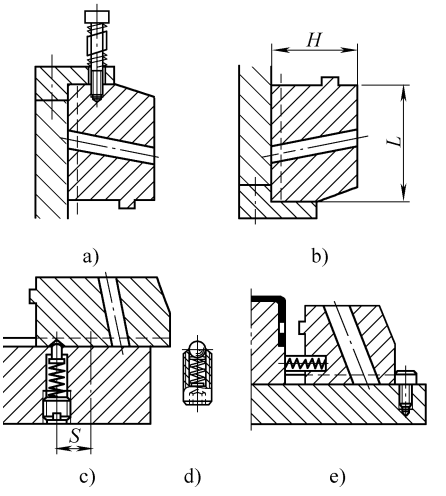


图 10-87　四种定位装置的结构

a）滑块处于向上位置　b）滑块处于向下位置
c）球柱头弹顶滑块　d）标准化的钢珠套
e）弹簧推压滑块

（1）弹簧式先复位机构　将压缩弹簧安装在顶杆固定板和动模垫板底面之间。顶出注塑件时，弹簧受压，一旦合模，在弹簧力作用下，脱模机构立即复位，避免了顶杆与侧向型芯的干涉。当脱模行程较短时，压缩弹簧高度的安装空间有限。2 ~ 4 根弹簧作用力很难平衡。况且弹簧疲劳寿命有限，尽管现有矩形截面强力弹簧已经标准化，因弹簧力有限，可靠性较差，所以多用于中小型注射模。

（2）双连杆先复位机构，双连杆先复位机构又称为铰链式机构，如图 10-88 所示。在闭模开始时，固装在定模的楔板 2 作用于双连杆的中间铰链，迫使双连杆迅速张开伸直，驱使脱模机构复位，避免受到侧型芯干涉。复位行程 ΔL 与连杆长 l 有如下关系

$$\Delta L = L - L_0 = 2\left(\sqrt{l^2 - E^2} - \sqrt{l^2 - G^2}\right) \tag{10-70}$$

其中，模板有效厚度

$$2e = 2(E - G)$$

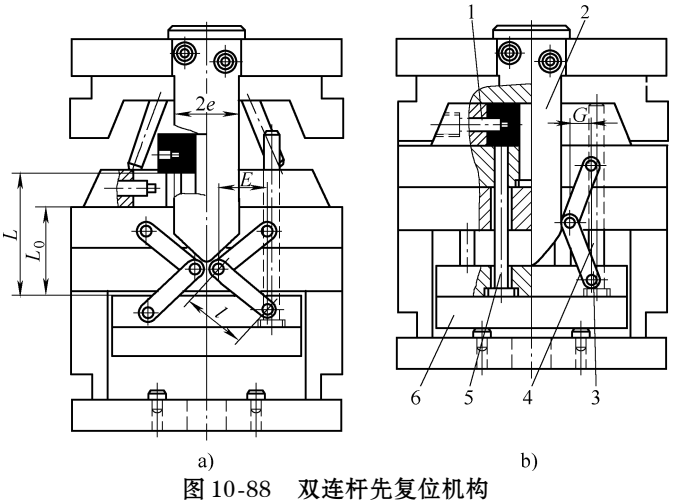


图 10-88　双连杆先复位机构

a）开模顶出状态　b）闭模先复位
1—侧型芯　2—楔板　3—连杆　4—回程杆　5—顶杆　6—顶出板

（3）杠杆式先复位机构　如图 10-89 所示，固定于定模的楔杆 10，在闭模初始就推动杠杆转过有效角度（$\varphi-\varphi_0$）。驱使杠杆的另一端，从动模底面上撑开一个顶杆的回复行程 ΔL。杠杆的转动支承在顶出板上，回复动作超前于侧型芯的复位。其杠杆转角 φ 和力臂 l 与行程 ΔL 关系为

$$\Delta L = l\cos\varphi - l\cos\varphi_0 \tag{10-71}$$

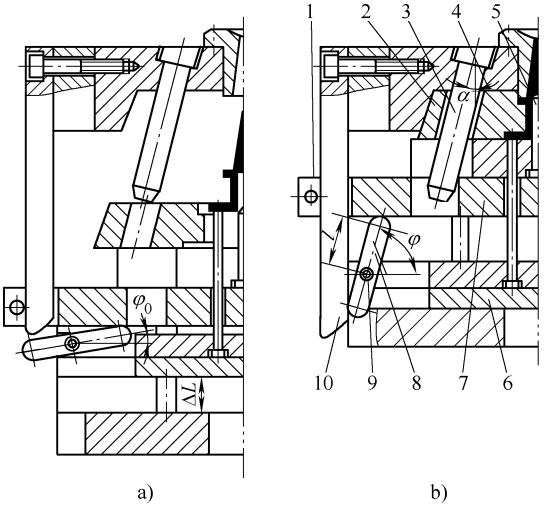


图 10-89　杠杆式先复位机构

a）开模顶出状态　b）闭模先复位

1—导向滚轮　2—滑块　3—斜导柱　4—顶杆　5—型芯

6—顶出板　7—动模垫板　8—杠杆　9—回转支承　10—楔杆

（4）三角滑块式先复位机构　如图 10-90 所示，合模初始顶出板上三角滑块 3 首先与楔杆接触，压迫脱模机构迅速返回，避免了顶管 1 与侧型芯干涉。三角滑块同时在顶出板的导滑槽中向里运动，待下次顶出注塑件时，再由动模板上的斜面反推到工件位置。当图示 $\gamma=\beta=45°$时

$$L = H + H_1 + B + B_1 + s_c - h_c - l \tag{10-72}$$

有多种先复位机构，动作过程相同，启动时存在较大摩擦等阻力，经常加装弹簧辅助复位。但由于机构各运动零件存在磨损和各种间隙，顶杆或顶管的回复误差颇大，故通常又同时使用回程杆。

5. 斜导柱和滑块的组合方式

斜导柱分型抽芯机构，按斜导柱和滑块的不同安装位置，组合成四种结构类型。

（1）斜导柱在定模、滑块在动模、斜导柱在定模、滑块在动模是应用最广泛的组合方式。滑块在动模布置可使注塑件脱模简便，自动坠落容易。它常用于侧向分型的瓣合模，不但用于外侧抽芯，也有用于内侧抽芯，本章节前述的侧抽机构都为此种组合方式，设计时必须注意模具闭合，侧抽机构和脱模机构复位时可能会发生干涉现象。

（2）斜导柱和滑块都在定模　见图 10-91 和图 10-92，滑块设置在定模的型腔板上，

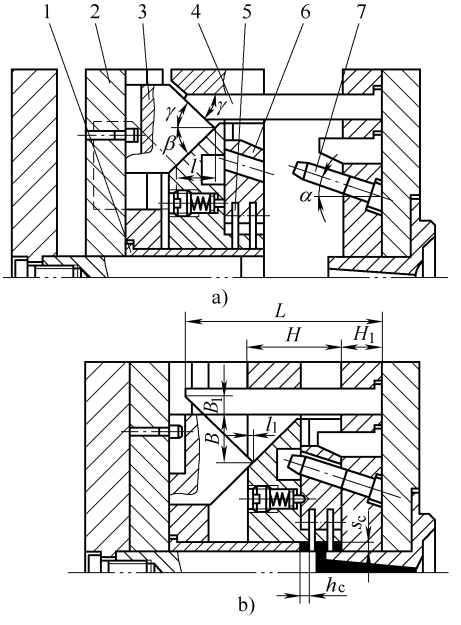


图 10-90　三角滑块式先复位机构

a）开模顶出状态　b）闭模先复位

1—顶管　2—顶管底板　3—三角滑块　4—楔杆

5—侧向滑块　6—侧滑块　7—斜导柱

导滑槽在定模上。因此，型腔板必须与定模板在 *A* 面首先分型。开模力使斜导柱动滑块侧抽。此时动模和定模被锁紧。在侧抽完成后，定模型腔板才与动模分型，然后注塑件从动模主型芯上顶出。倘若这种定距分型拉紧机构，拉紧动模和定模不可靠，则会造成注塑件和侧型芯损伤。

这种组合方式较适合单型腔注射模，注射需要侧向抽芯的深腔壳体。可以采用主流道型点浇口、内轮辐浇口及主流道大浇口的浇注系统成型。

图 10-91 是单腔单浇口的倒装侧滑块的注射模。第一次 *A* 分型时，不但应满足斜导柱侧抽所需开模距离，还须使该距离足以取出浇道凝料。为保证浇道凝料自行坠落，必要时，加设凝料脱落机构。图 10-91 注塑模上，摆钩式定距拉紧机构，用支承在型腔板上的摆钩 2 拉紧动模上的挡块，设计时要保证摆钩一端的弹簧有足够的弹力，要注意摆钩的两侧应有合理的力臂长度。压杆 1 顶压在摆钩后背上，可以防止脱钩。只有在脱钩后定距螺钉 4 才起作用。

图 10-92 所示，第一次 *A* 分型产生侧抽同时，又将主流道凝料脱出，待主分型面 *B* 打开后，注塑件和浇道凝料被一起顶出。图 10-92 注射模上滑板式定距拉紧机构，由于是拉钩 2 与滑板 3 以平面接触勾压，较为有效。*A* 分型后，压杆 1 的作用面将滑板推入。脱钩后定距螺钉 4 将型腔板制动。此刻压杆继续在推压滑板，直至动模上拉钩到

达。有上下两个腔、而浅腔壳体需侧抽的外罩壳制品，多用这种结构的注射模。

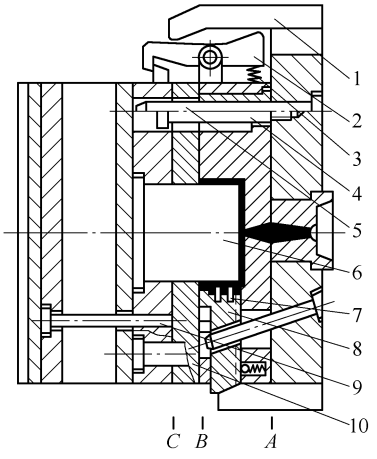


图 10-91　斜导柱和滑块都在定模用摆钩拉紧定距

1—压杆　2—摆钩　3—弹簧　4—定距螺钉　5—导柱　6—主型芯　7—侧型芯　8—侧滑块　9—顶杆　10—推板

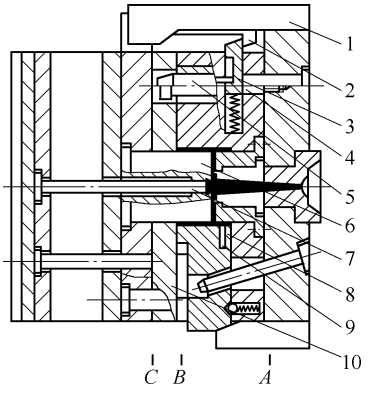


图 10-92　斜导柱和滑块都在定模上用滑板拉紧定距

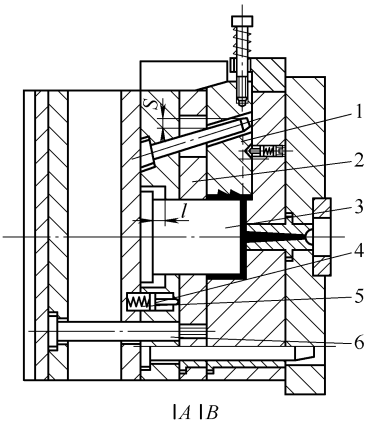
1—压杆　2—拉钩　3—滑板　4—定距螺钉　5—导柱　6—主型芯　7—顶杆　8—侧滑块　9—侧型芯　10—推板

（3）斜导柱在动模、滑块在定模　应用这种侧抽方式的模具结构是有条件的。注塑件对动模上主型芯有足够的包紧力。在初始开模时，主型芯能沿开模轴线方向运动，必须保证推板与动模板在开模时首先分型，故需在推板下装弹簧顶销，而且侧向抽拔距较小。如图 10-93 所示，*A* 面分型时构成型腔的型芯、定模板和侧滑块处于闭合状态。开模力在使侧滑块抽拔的同时，主型芯随推板一起浮动。主型芯的位移足以满足侧抽所需的开模高度。在侧抽完成后，主分型 *B* 面打开时，注塑件留在主型芯上，直至推板将其脱出。

（4）斜导柱和滑块都在动模　这种侧抽方式常用于侧向分型。如图 10-94 所示，瓣合双滑块 5 构成型腔，被定模锁紧楔锁紧。动模与定模首先在 *A* 面分型；待动模带着闭合型腔退至脱模位置时，推板 9 将制品脱离主型芯 7；与此同时，在斜导柱 8 作用下进行侧向分型。滑块始终不脱离斜导柱 8，不需要对其设置定位装置。该脱模机构需同时克服主型芯脱模和侧向分型两方面的阻力。

10.4.2　弯销和斜导槽侧抽机构

弯销侧抽在开模行程较短时，可获得颇大的侧抽距离。与斜导柱侧抽相比，相同截面面积的弯销能承受较大的抽拔力，可用于侧型芯距离分型面较远的场合，也容易得到较大的延时侧抽距离。况且弯销可设置在模具外侧，结构紧凑，并减小模具整体体积。电火花、线切割和铣削技术的发展，弯销及其孔的加工变得方便，使弯销侧抽机构应用越发增多。从弯销侧抽机构演化而来的斜导槽侧抽机构，这里也作介绍。



10-93　斜导柱在动模、 滑块在定模的侧抽机构

1—滑块　2—推板　3—主型芯

4—球柱头　5—弹簧　6—顶杆

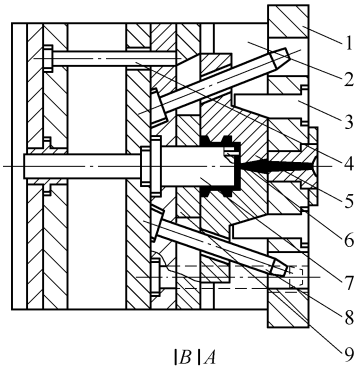


图 10-94　斜导柱和滑块都在动模的侧向分型机构

1—定模固定板　2—定模板　3—锁紧楔

4—顶杆　5—瓣合双滑块　6—小型芯

7—主型芯　8—斜导柱　9—推板

1. 弯销侧抽机构

由斜导柱侧抽机构演化而来的弯销侧抽机构如图 10-95 所示。弯销具有矩形截面，能承受较大弯矩。由于刚性较好，其斜角 α 可大一些，但不宜大于 30°。矩形弯销的抗弯截面模量 $W=\dfrac{b\cdot h^2}{6}$。按常见矩形的宽高比 $b=\dfrac{2h}{3}$，代入后得 $W_z=\dfrac{h^3}{9}$。矩形弯销的强度条件式

$$\sigma_{max}=\frac{M_{max}}{W_z}=\frac{9NL_c}{h^3}\leqslant[\sigma]_b \tag{10-73}$$

得弯销矩形截面的长边

$$h=\left(\frac{9Nl_c}{[\sigma]_b}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{10-74}$$

式中，N 为弯销所受到的法向力；L_c 是法向力 N 对弯销固定端的力臂；$[\sigma]_b$ 为许用弯曲应力。对于使用 T8 或 T8A 材料，其硬度为 50 ~ 55HRC 时，$[\sigma]_b=140\text{N/mm}^2$。对于使用 T10 或 T10A 材料，其硬度为 54 ~ 58HRC 时，$[\sigma]_b=155\text{N/mm}^2$。

矩形弯销断面通常有 $b=\dfrac{2h}{3}$的关系，$b\times h>(12\times18)\text{mm}^2$。滑块上弯销孔与弯销之间存在间隙 $\delta=0.4\sim0.8\text{mm}$。弯销和弯销孔的引导部分应有较大的圆角或倒角。侧抽行程 S 与弯销的工作长度 L_a 有如下几何关系

$$S=L_a\tan\alpha-\delta \tag{10-75a}$$

弯销的工作面相当于机械传动的凸轮轮廓表面。工作斜角 α 可按设计要求，获得所

需的侧向抽拔速度和加速度的运动规律，可实现侧滑块平稳移动，可确保注塑件在侧抽中不受损伤。如果滑块先实现延时 $\alpha=0$，后慢速启动，此时 α 取 10°～20°，滑块慢速小位移时有较大的抽拔力；再快速完成抽拔距，此时 α 取 20°～30°。这种多角度弯销常被应用。

弯销能承受较大弯矩。如果在前端加设楔紧斜面，如图 10-96 所示，直接用它压紧滑块，弯销工作面角度 $\beta=5°\sim10°$，楔紧垂直高度为 15～25mm，此时，楔紧力有限，滑块宽度不宜大于 100mm。

镶嵌式弯销柄的装配长度 $H\geqslant1.5W$，配合精度为 H7/m6。

图 10-96 所示为滑块导滑槽在定模的侧抽方式。滑块被弹簧推向定位螺钉。定模板在 A 分型时，滑块被弯销驱动侧抽。按此弯销结构，侧抽行程 S 与弯销的工作长度 L_a 有如下几何关系

$$S=L_a\tan\alpha-\delta/\cos\alpha \tag{10-75b}$$

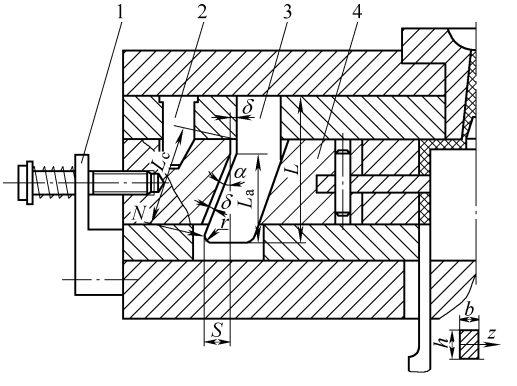


图 10-95　弯销侧抽机构

1—挡块　2—锁紧楔　3—弯销　4—滑块

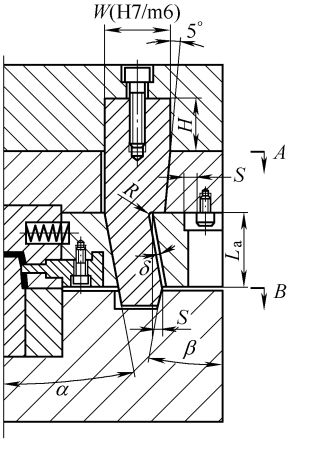


图 10-96　滑块在定模的自锁紧的弯销侧抽机构

图 10-97 所示弯销外侧抽延时机构，用弯销的直线工作面 L_s 实现滑块延时侧抽。侧抽行程 S 和延时距离 E 的几何关系如下

$$S=L_a\tan\alpha-\delta \tag{10-76a}$$

$$L_a=\frac{S+\delta}{\tan\alpha} \tag{10-76b}$$

$$E=(L_s-f)+\frac{\delta}{\tan\alpha} \tag{10-76c}$$

式中　S——滑块的侧向抽拔距离（mm）；

L_a——弯销倾斜工作面沿开模方向的长度（mm）；

L_s——弯销沿开模方向的直线工作面的长度（mm）；

E——滑块在开模方向延时距离（mm）；

f——滑块孔的直线部分长度（mm）；

α——弯销工作面与开模方向的倾斜角（°）；

δ——弯销与滑块孔的直线部分的单向间隙（mm）。

弯销也可用于滑块内侧抽芯，如图 10-98 所示。制品上有内侧凹槽，成型后滑块在主型芯中退出。将弯销固定在定模，滑块安装在动模上的 T 形槽内，动、定模分型时带动滑块。图中滑块无锁紧楔，依靠弯销压紧。为了防止与脱模机构干涉，内侧滑块都较窄小。

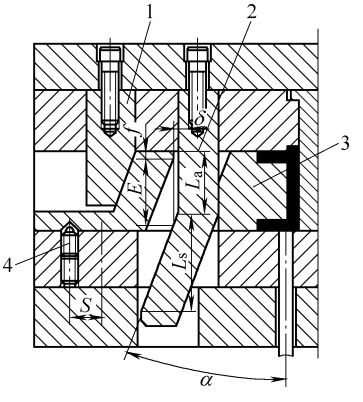


图 10-97　弯销外侧抽延时机构

1—楔紧块　2—弯销　3—滑块　4—钢珠套

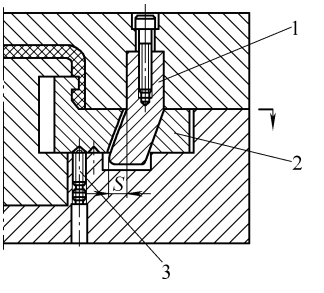


图 10-98　弯销内侧抽芯

1—弯销　2—滑块　3—定位钢珠套

图 10-99 所示制件内侧壁有斜孔，弯销和滑块都在动模。开模时定距分型机构拖动动模板与动模垫板分离 H 间距。A 面首先分型，弯销带动滑块斜向移动，完成抽芯动作。由于在抽拔运动中弯销与滑块不脱离，故无需定位装置，为此分离间距 H 略小于弯销工作长度 L。同时弯销兼有锁紧作用。其弯销在开模方向工作面长度 L 与斜向抽拔距 S 的几何关系

$$S = L\tan\alpha\cos\beta \tag{10-77a}$$

$$L_a = \frac{S+\delta}{\tan\alpha} \tag{10-77b}$$

$$E = (L_s - f) + \frac{\delta}{\tan\alpha} \tag{10-77c}$$

2. 斜导槽侧抽机构

从弯销侧抽机构演化而来的滑块斜导槽板分型机构，如图 10-100 所示。斜导槽板 4 既能使滑块 3 侧向分开又能让它重新合拢。滑块上圆柱销或滚轮在导板的槽内运动。锁紧楔 5 保证瓣合模闭合的刚性和精度。

图 10-101 是滑块斜导槽板分型机构的几何关系分析。图 10-101a 和图 10-101b 说明了各个滑块的侧面有一对圆柱销，使滑块侧向运动平稳。机构的导槽板 4 固定在定模板的侧壁。并有 0.2mm 左右的间隙，避让滑块的侧面。开模时，滑块上圆柱销驱使其按斜导槽板轨迹作侧抽运动。开模时必须让滑块延时侧抽，避免与锁紧斜面干涉。图

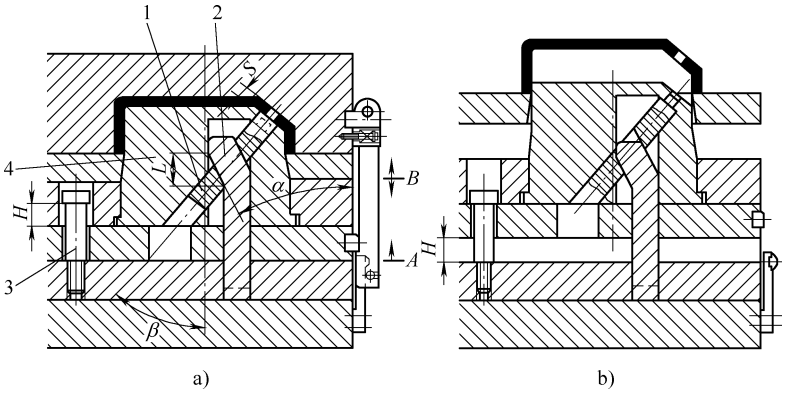


图 10-99　弯销内侧斜抽芯

a）闭模成型　b）开模斜抽

1—滑块　2—弯销　3—限位螺钉　4—动模型芯

10-101c所示滑块斜导槽外侧抽延时机构，用斜导槽的直线工作面 L_s 实现滑块延时侧抽。侧抽行程 S 和延时距离 E 的几何关系如下

$$S = L_a \tan\alpha - \delta \qquad (10\text{-}78a)$$

$$L_a = \frac{S+\delta}{\tan\alpha} \qquad (10\text{-}78b)$$

$$E = L_s + \frac{\delta}{\tan\alpha} + r\left(\frac{1}{\tan\alpha} - \frac{1}{\sin\alpha}\right) \qquad (10\text{-}78c)$$

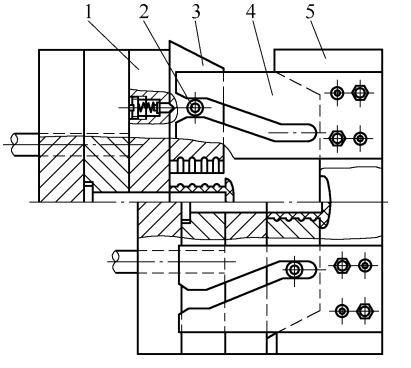


图 10-100　滑块斜导槽板分型机构

1—推件板　2—圆柱销或滚轮　3—滑块

4—斜导槽板　5—锁紧楔

10.4.3　斜顶杆侧抽机构

当注塑件具有内侧向的凹槽或凸起结构时，利用斜向运动的顶杆，成型这些局部的形体。斜顶杆侧抽机构又简称为斜顶机构，主体零件斜顶杆具有成型表面。它在斜侧抽的运动过程被导向和限位。斜顶机构在成型和侧抽的注射周期中，承受塑料熔体的高压，在往复运动中，有强力摩擦并有热膨胀现象。斜顶机构的设计和制造技术要求较高，因此，只适用于壳体内侧，成型较小的面积。

如图 10-102 所示为典型的斜顶杆侧抽机构。该机构在动模上与脱模机构配合，有复杂的动作过程。在开模后，动模上的顶出板 10 被注射机上的柱塞推顶，斜顶杆 3 斜向顶出制件。局部视图 *M*—*M* 所示动模镶块 4 的孔对斜顶杆的成型段有导向作用。局部视图 *K*—*K* 所示导向块 6 对斜顶杆也有导向作用。斜顶杆在开模方向顶出制件的同时，又有向内侧的抽拔。限位螺钉 12 接触顶出固定板 11，制止脱模机构和侧抽机构运动。在合模时脱模机构的复位牵动斜顶杆回复。局部视图 *P*—*P* 所示斜顶杆的底装有回转又移动的滑块 7。滑块与顶出板 10 有小位移的强摩擦，故加装耐磨垫块 9。

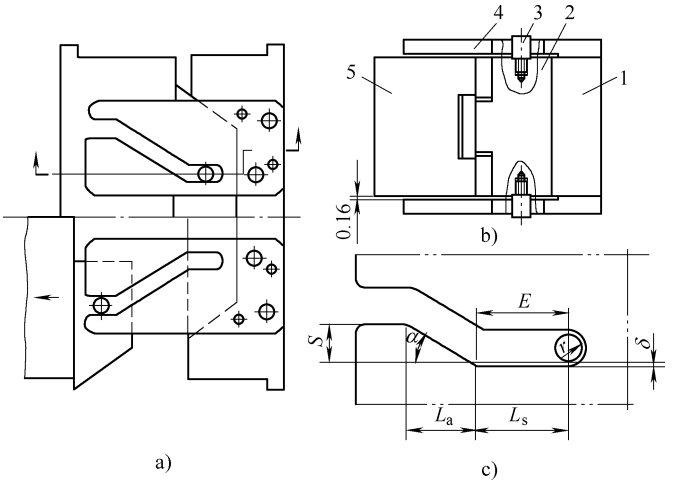


图 10-101　斜导槽板侧抽机构的几何关系

a）合模和开模　b）合模的剖视　c）几何关系

1—定模板　2—滑块　3—圆柱销　4—导槽板　5—动模

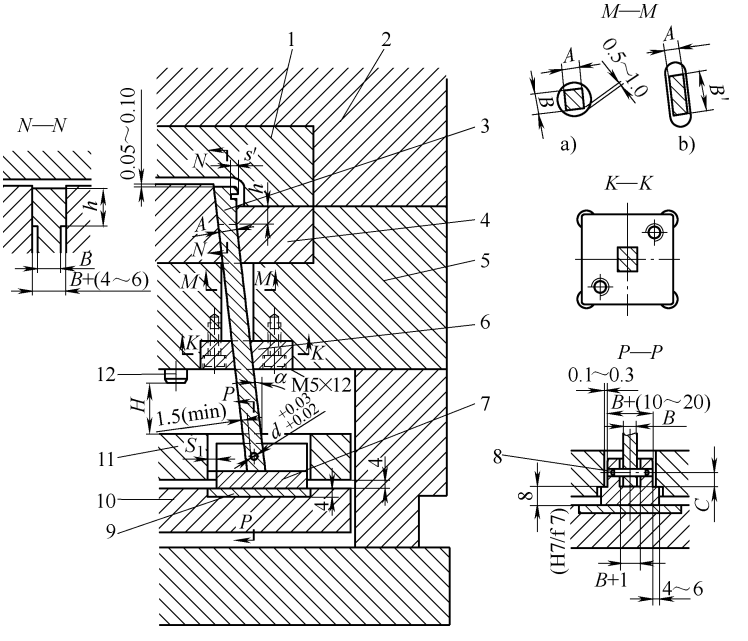


图 10-102　典型的斜顶杆侧抽机构

1—定模镶块　2—定模板　3—斜顶杆　4—动模镶块　5—动模板　6—导向块

7—滑块　8—圆轴　9—耐磨垫块　10—顶出板　11—顶出固定板　12—限位螺钉

如图 10-102 所示，斜顶倾斜角 $\alpha = 5° \sim 12°$，α 值与注塑件倒扣深度 s' 和侧向抽拔距 S 的关系

$$\tan\alpha = \frac{S}{H} \tag{10-79}$$

式中，$S = s' + 2 \sim 3\text{mm}$，$H$ 为斜顶杆在开模方向的推顶距离。又有滑块行程距离 $S_1 = S + (1 \sim 2)$ mm。图 10-102 上的一些结构尺寸见表 10-12。斜顶杆截面上 A 尺寸均一。B 尺寸是台阶变量，在成型段为注塑件上侧凹凸宽度尺寸，也是与型芯孔的高精度的配合尺寸。斜顶杆截面尺寸（$A \times B$）还应满足斜顶的强度要求，长度与截面尺寸成比例。如果斜顶杆长度大于100mm，截面尺寸不能小于 $3 \times 3\text{mm}^2$；长度大于200mm，截面尺寸不能小于 $6 \times 6\text{mm}^2$；长度大于300mm，截面尺寸不能小于 $9 \times 9\text{mm}^2$。h 是成型段的配合长度尺寸。d 为支承座上转轴直径。

表 10-12　斜顶机构有关尺寸推荐　（单位：mm）

A	B	C	h	d	α
5 ~ 8	3 以上	3 ~ 4	6 ~ 8	3.0	5° ~ 10°
8 ~ 12		3 ~ 4	8 ~ 10	4.0	
12 ~ 16		4 ~ 5	10 ~ 15	4.0	
16 ~ 20		6 ~ 8	15 ~ 18	5.0	

斜顶杆的倾斜角 α 常用8°，倾斜角 α 增加，在一定的顶出距离 H 下可成型较大的倒扣深度 s'，但使斜顶杆的工作状态变坏，推力和转动力矩增大。

斜顶杆的成型段相对动模上型芯孔和导向块是斜向的平面滑动。在脱模顶出时相对动模底板，它是滑块座的位移和绕圆轴的转动的复合运动。在推力和转动力矩作用下的斜顶杆表面强摩擦，会使它发热升温并且磨损加剧。斜顶杆承受塑料熔体高压，又在热型芯包围中滑动，且很难对斜顶杆设置冷却液管道。它的温度比周边型芯或动模镶块要高 40 ~ 50℃。60 ~ 110mm 长的斜顶杆，长度方向有 0.03 ~ 0.06mm 的热膨胀量。因此，斜顶杆的成型段要低于型芯表面 0.05 ~ 0.1mm，见图 10-103a，应缩陷在型芯中，以免在顶出运动中擦伤塑料壳体的内表面。斜顶杆用高碳合金钢，表面淬火硬度在 50HRC 以上；或用渗氮钢作渗氮处理；还可以在斜顶杆的摩擦面上，加工贮油槽。

图 10-103 介绍三种斜顶杆成型部位的常见结构及其拆模分型方法。图 10-103a 说明斜顶杆在顶出状态，向内侧方向有可能碰撞侧壁或肋条，因此斜顶杆头部与侧壁应有间距 $W \geqslant S + 2\text{mm}$。图 10-103a 和图 10-103b 上，斜顶杆头部有加宽台阶 $L = 3 \sim 5\text{mm}$，增强了顶杆头。此台阶的分型使加工方便。图 10-103b 上斜顶杆头部台阶 $H = 6 \sim 10\text{mm}$，还有定位作用。图 10-103b 结构倘若塑件肋条很长，如虚线所示，而顶杆头部台阶尺寸不变，会在塑料壳的内壁上有台阶痕，肋条易变形，甚至断裂。图 10-103c 上，顶杆头部外伸台阶悬出 $T = 5 \sim 8\text{mm}$，下沿 $T_1 = 2 \sim 3\text{mm}$，高 $H = 6 \sim 10\text{mm}$。外肩台阶增强了斜顶杆，还能起定位和复位作用。闭合模时，定模板强制斜顶杆精确回复原位。另外，当斜顶杆头部形状为圆弧面时，顶杆前端设计为平面，可使加工方便。

斜顶机构的底座机构有多种形式，图 10-104 介绍其中两种。图 10-104a 的滑块能在 T 形导滑槽中移动。斜顶杆又绕滑块上轴销旋转。滑块座吊嵌在顶出板上。该结构复杂，零件多，加工装配困难，用于斜顶倾斜角 $\alpha \geqslant 8°$的场合。当斜顶杆的倾斜角 α 较小时，可采

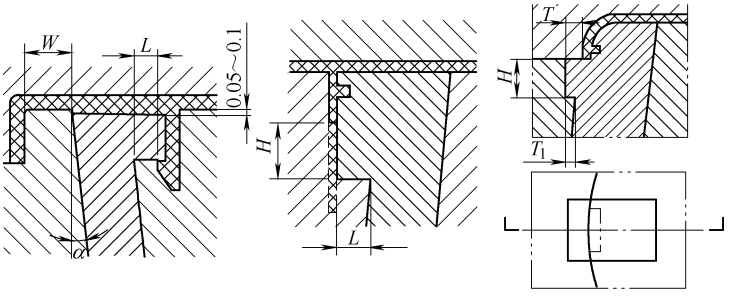


图 10-103　斜顶机构的成型部位

a）防止撞壁　b）内肋条的分型　c）外伸台阶

用图 10-104b 的简化结构。横向 T 形导滑槽加工和装配方便。但没有斜顶杆对滑块的回转运动副。斜顶杆的导滑面上磨损较大。将此导滑槽面设置成小倾斜角，可改善摩擦和磨损。另外，可以将滑块升高，斜顶杆就可短些，动模板上导向块就可以不用。

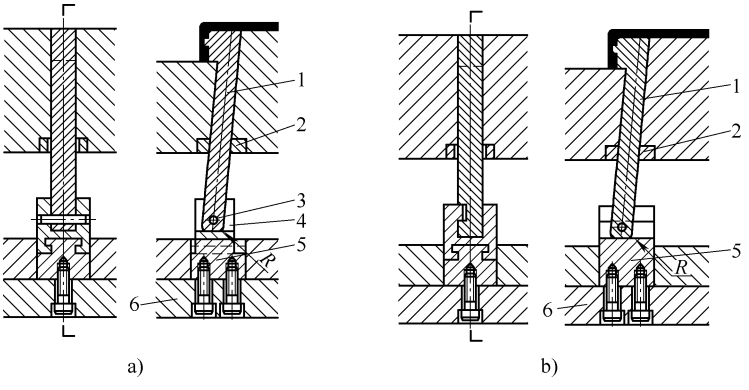


图 10-104　斜顶机构的底座结构

a）有导滑槽又可转动滑块座　b）有导滑槽的滑块座

1—斜顶杆　2—导滑块　3—圆轴销　4—导滑槽　5—顶出板　6—顶出固定板

典型的斜顶杆侧抽机构较为复杂，下面介绍三种修正的斜顶杆侧抽机构。

1）组合式斜顶杆侧抽机构。如果整体式斜顶杆过于细长，图 10-105 所示组合式斜顶杆侧抽机构，可以将它做短，但增加了直顶杆。斜顶杆在型芯中斜向运动。它的底面连接了耐磨垫块。耐磨垫块与直顶杆的端面间有强力的摩擦和磨损。直顶杆直径为 d，直顶杆与孔的配合长度为 $L \approx 2d$。动模垫板下设限位块，间距 $H_2 = H_1 - 0.5\text{mm}$。在斜顶杆一侧设回程杆，在合模时将斜顶杆复位。

2）直推杆平移式内侧抽机构。当斜顶杆的运动空间受到限制，当侧向倒扣 $s' < 3$ mm，即侧向抽拔距较小时，可采用直推杆平移式的简化内侧抽机构。如图 10-106 所示，在顶出过程中，直推式斜顶杆 2 移动 H 距离后，顶杆上斜面 A 脱离动模型芯 4。继续顶出时，斜顶杆上斜面 B 与动模型芯 4 接触，迫使顶杆成型头侧抽移动。在顶出制品

的同时完成内侧抽芯。合模时，顶杆上斜面 A 使其复位。图上的顶出位置 $H > H_1$，侧向抽拔距 $S = t + (1 \sim 2)\text{mm}$，$t$ 为塑料壳体侧壁厚；又有顶杆座移动空间 $S_1 \geqslant S + (2 \sim 3)$ mm，顶杆上斜面 A 和 B 的倾角 $\alpha = 45^\circ$，应留间隙 $\delta = 0.5\text{mm}$。

3）摆杆式内侧抽机构。图 10-107 所示摆杆式内侧抽机构，用于侧向抽拔距 $S < 3$ mm 的较小场合。摆杆式斜顶杆4 用转轴3 固装于顶出固定板2 上的铰链座1 中。顶出过程中，斜顶杆顶出 H 距离时，斜面 A 已脱开动模型芯6。继续顶出时，斜顶杆上斜面 B 与动模型芯接触而摆动，从而完成侧向抽芯。设计时要保证 $H > H_1$，$S > S_1$。合模时，顶杆上斜面 A 使其复位。斜顶杆的成型面是开模方向顶出，和绕转轴摆动，因此 C 面受强压磨损严重，可做成 10° ~ 15°的斜面。斜面 B 的斜角为 30° ~ 45°，斜面 A 的斜角较小。

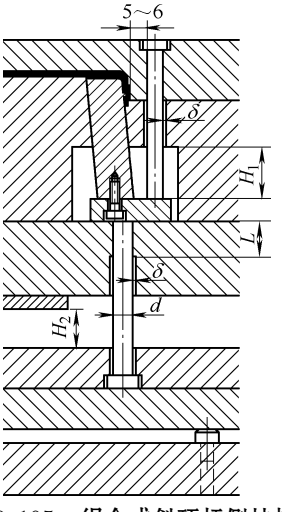


图 10-105　组合式斜顶杆侧抽机构

注：图中 $\delta = 0.5 \sim 0.75$ mm。

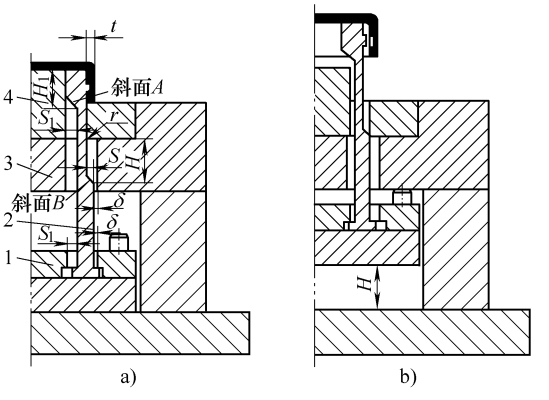


图 10-106　直推杆平移式内侧抽机构

a）闭模成型　b）开模顶出侧抽

1—顶出固定板　2—直推式斜顶杆　3—动模板　4—动模型芯

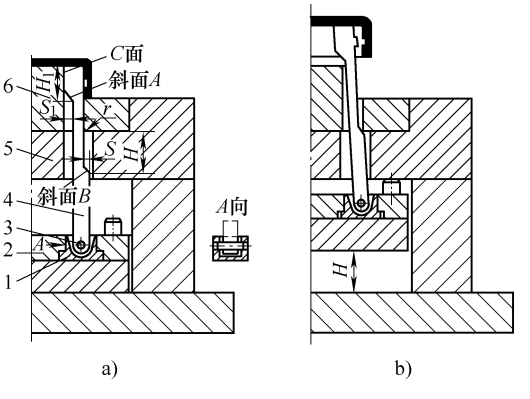


图 10-107　摆杆式内侧抽机构

a）闭模成型　b）开模顶出侧抽

1—铰链座　2—顶出固定板　3—转轴　4—摆杆式斜顶杆　5—动模板　6—动模型芯

10.4.4　斜滑块侧抽机构

斜滑块侧抽机构大多用于抽拔距不大的侧向分型。模具结构简单紧凑，能承受较大的侧压力，避免了注塑件与顶杆接触，但是在设计时有较多限制条件。

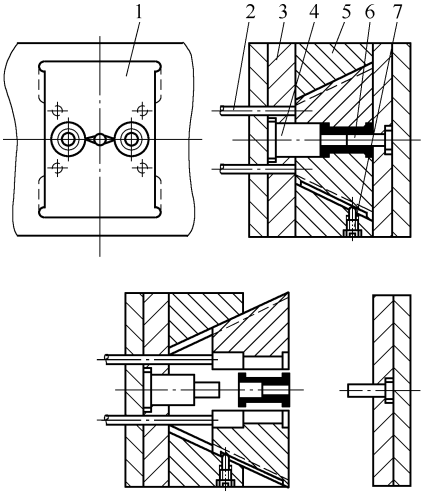


图 10-108　斜滑块外侧分型机构

1—斜滑块　2—顶杆　3—主型芯固定板
4—主型芯　5—模套　6—定模型芯
7—限位螺钉

1. 动作过程和受力分析

图 10-108 是用斜滑块侧向分型成型线圈骨架的注射模。在分型后，动模上的顶杆 2 将一对斜滑块 1 推出模套 5。斜滑块 1 沿着模套 5 上斜向导滑槽滑动过程中，在斜滑块侧 1 向分型的同时，带动制件沿主型芯 4 的轴线脱模。因此，注塑件必须有足够长的中心孔，并要有足够强度的台肩或翼片。合模时定模与斜滑块碰击后，斜滑块 1 与脱模机构一起复位。

图 10-109 所示为单个斜滑块的力分析图。在顶杆作用力 P 的推动下，斜滑块克服对主型芯的脱模力 Q_e 和侧向分型抽拔力。在两瓣块分型时，图示 Q_e 应为整个注塑件孔的脱模力的一半。其 Q_e 按式（10-35）侧凹抽拔力计算。导滑槽与滑块导轨间存在正压力 N 和摩擦阻力 F_t。顶杆与滑块之间存在摩擦力 F_d。滑块导滑倾角为 α 时，可作下述分析。

$$\sum F_y = 0$$

$$N\cos\alpha - F_t\sin\alpha - Q - F_d = 0$$

其中

$$F_t = Nf';\ F_d = Pf'$$

f'是钢与钢零件间的滑动摩擦系数，$f' = 0.08 \sim 0.12$，可得

$$N = \frac{Q + Pf'}{\cos\alpha - f'\sin\alpha} \tag{10-80}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$P - N\sin\alpha - F_t\cos\alpha - Q_e = 0$$

可得

$$P = N(\sin\alpha + f'\cos\alpha) + Q_e \tag{10-81}$$

将式（10-80）代入式（10-81），可近似得到顶出力 P，与脱模力 Q_e 及抽拔力 Q 的关系

$$P = \frac{(\sin\alpha + f'\cos\alpha)}{(\cos\alpha - f'\sin\alpha)}Q + Q_e \approx KQ + Q_e$$

设 $f' = 0.1$，在 $\alpha = 12^\circ$时系数 $K = 0.139$；在 $\alpha = 40^\circ$时系数 $K = 1.025$。由此可知，当 $\alpha > 40^\circ$，$K > 1$，脱模机构承受过大顶出力，摩擦力 F_t 和 F_d 过大，摩擦表面磨损严重。当 $\alpha < 12^\circ$，接近斜面的自锁角，侧抽距离过小。故 $12^\circ < \alpha < 40^\circ$，常用 20°左右。

2. 设计要点

（1）导滑槽设置　模套上的导滑槽常用 T 型，见图 10-110a 和图 10-110b。前者是

整体式，因热处理困难，仅适用于小型模具；后者为镶拼式，各镶块用合金钢制造，分别淬硬磨削，精度和耐磨性好。图 10-110c 是在斜滑块上开斜槽导滑，以模套上四个螺杆销为支点，结构简单，但螺杆销易磨损。图 10-110d 是用淬硬的圆导柱拼成导滑槽。图 10-110e 为四个斜滑块组合的分型，用锥形槽导向，其结构紧凑；不过，众多斜滑块组合时，应考虑使注塑件上少留飞边痕迹。图 10-110f 是用型芯拼块为滑块导向，用在圆筒注塑件的内孔中局部凹凸成型。

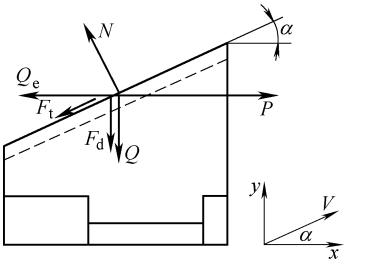


图 10-109　斜滑块的受力分析

斜滑块一般为整体淬火钢，和模套拼合在一起加工。滑块推出模套的高度，立式模具不超过其高度 1/2；卧式模具不大于斜滑块高度 1/3。用于卧式模具时，斜滑块上需要开长槽，模套上有限位螺钉定距止动，如图 10-108 所示；必要时可加长斜滑块导向部分的导轨长度，见图 10-111b。

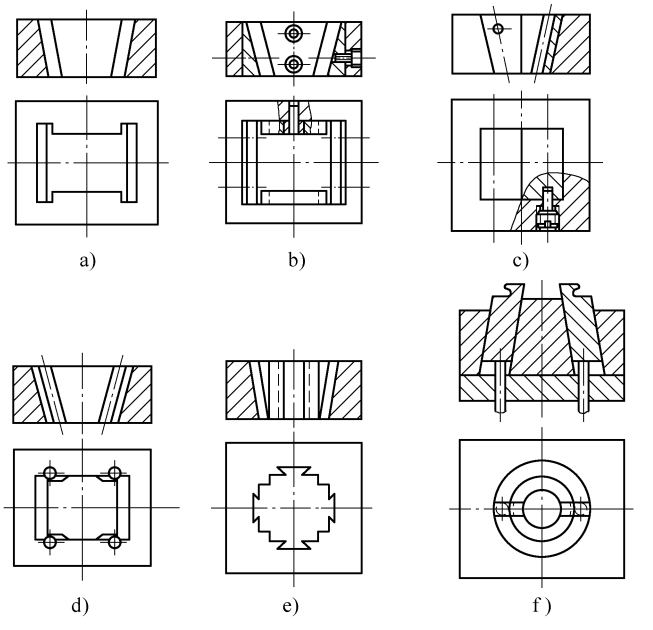


图 10-110　模套上的导滑槽结构

a）整体式模套　b）镶拼式模套　c）导滑槽在斜滑块上
d）圆导柱拼成导滑槽　e）四个斜滑块组合的锥槽　f）内侧抽斜滑块

（2）斜滑块推出　在斜滑块有较大抽拔距时，应避免滑块移出顶杆头的推顶位置。图 10-111 所示有两种防止滑脱的方法：增加一块小推板；用矩形推块替代顶杆。这两种结构也避免了各滑块受到顶杆推力不均匀的现象。

（3）主型芯导向　倘若主型芯设置在定模或主型芯高度不足时，如图 10-112 所示将会使注塑件粘附于某个斜滑块上。

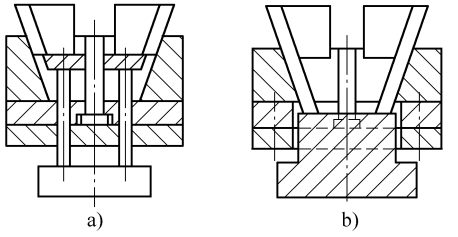


图 10-111　斜滑块推出的形式

a）加装小推板　b）矩形推块替代顶杆

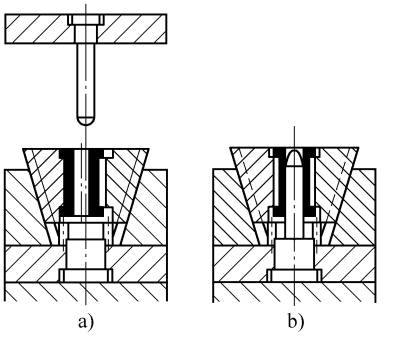


图 10-112　主型芯的导向作用

a）主型芯设置在定模　b）主型芯在动模

（4）斜滑块止动　倘若注塑件对定模型芯包紧，制件和斜滑块一起被定模带出模套。这种情况下动模上顶杆脱离斜滑块，将会引起注塑件损坏，也因滞留在定模上而无法脱模。为此，可设置弹簧止动销于定模，如图 10-113a 所示。也可采用图 10-113b 所示的止动导销。刚开模时，由于导销的约束使斜滑块不能侧向运动，而呆滞在模套内。

（5）斜滑块楔紧　为使斜滑块间的侧向分型面楔紧密合，见图 10-114a，在滑块底面留 0.2 ~ 0.5mm 间隙。又在滑块外端面与模套表面间也留 0.2 ~ 1.0mm 间隙。这样使动模与定模间的锁模力经侧向分型面传递。为此如图 10-114b 那样，滑块底面作分为型面就很少采用。因此，大多采用图 10-114c 的结构，主型芯与斜滑块间的成型面应高于滑块底面。

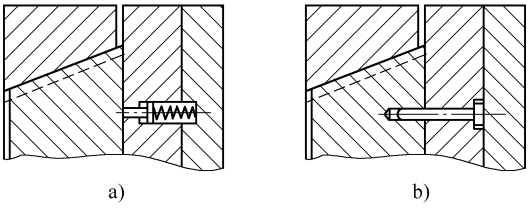


图 10-113　斜滑块的止动措施

a）弹簧止动销　b）止动导销

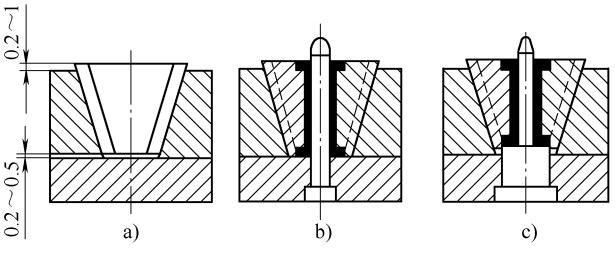


图 10-114　斜滑块的锁紧

a）斜滑块上下留空隙　b）滑块底面不能为分型面

c）主型芯高于滑块底面

10.5 螺纹脱模机构

成型螺纹制品的注射模，可以是非旋转的简单模具。其结构与外侧分型、内侧局部分型注射模有类同之处。大批量生产含螺纹的制品，可以由模具外动力旋转脱模，更多的是利用开模力的机动旋转脱模。这种自动脱螺纹机构，尤其是一模多腔的旋转自动脱模，较为复杂。合理确定模具结构方案的前提是注塑件上螺纹的类型，外螺纹还是内螺纹，螺牙的形状及参数（螺距、直径和头数）等。还有螺纹是否间断，同一制品上是否有多种螺纹，还要考虑对分型飞边的要求，考虑螺牙强度、螺纹精度、生产批量和效率等。

1. 非旋转螺纹脱模

（1）强制脱螺纹　强制脱螺纹用于聚烯烃类的柔性塑料，并且是内螺纹；螺牙多为半圆形的粗牙；螺牙高度 h 小于螺纹大径的 2.5%。制品必须要有足够厚度来吸收弹性变形能。如图 10-115 所示，通常用推板强制推顶。被推顶应是注塑件上的平面；型芯外圆和推板孔应有 3°～5°斜度；单面间隙最大为 0.05mm。

（2）外螺纹侧向分型脱模　外螺纹侧向分型脱模要允许轴线方向有飞边，因此常用于柔性塑料。如图 10-116 所示，用斜导柱侧向分型，也可用斜滑块侧向分型，侧滑块磨损后，溢边条会影响螺纹旋合。倘若采用图 10-116 右图所示的间断外螺纹，出现在小平面上的飞边不影响旋合。

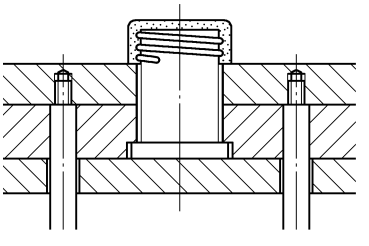


图 10-115　强制脱模螺纹结构

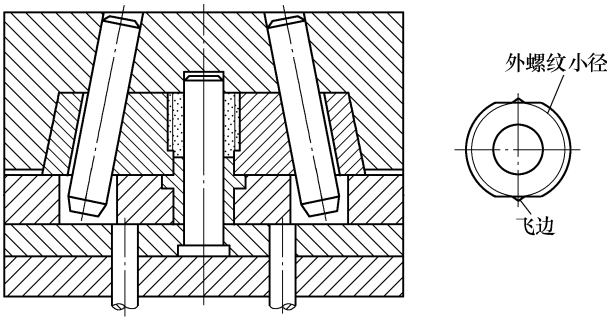


图 10-116　外螺纹侧向分型脱模

（3）间断内螺纹的侧抽脱模　如图 10-117 所示，注塑件的内螺纹在圆周面上是三个局部段，对应在模具上制成三个内侧抽的滑块。图示模具在角式注射机上成型。在动、定模分型后，动模上两块联接的推板在推出注塑件的同时，又迫使三块成型螺纹滑块沿 T 形槽移出，产生向心的收拢运动。这些滑块最终不脱离主型芯。该主型芯要有足够大的直径，以容纳螺纹滑块。

（4）径向张缩螺纹型芯　对连续内螺纹注射成型有两种方法。一种是用径向张缩的螺纹型芯钢套，如图 10-118 所示。螺纹钢套的成型部分被切成纵向条片，富有弹性而能自行收缩。当支承心棒充塞时，张开的钢套成型完整的内螺纹。心棒退出后螺纹钢套

收缩，而后用推板顶出制件及浇注系统凝料。另一种是用硅橡胶制成螺纹型芯套。在注射时，支承心棒顶塞橡胶套的内孔，成型内螺纹后退出支承棒。待硅橡胶芯套收缩后用推板顶出注塑件。这两种方法均需设计成二级脱模机构，将支承棒固定在动模底座上，螺纹芯套固装在顶出板上。

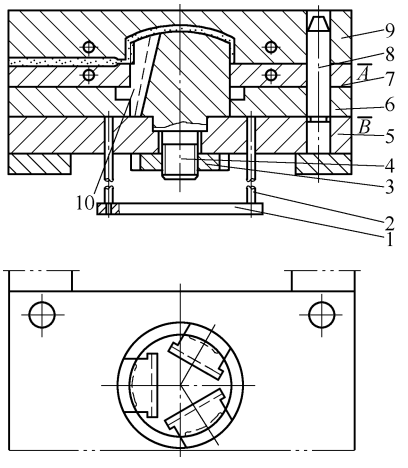


图 10-117　间断内螺纹的侧抽脱模

1—顶出板　2—顶杆　3—并紧螺母　4 主型芯
5—动模垫板　6、7—推件板　8—导柱
9—定模板　10—螺纹滑块

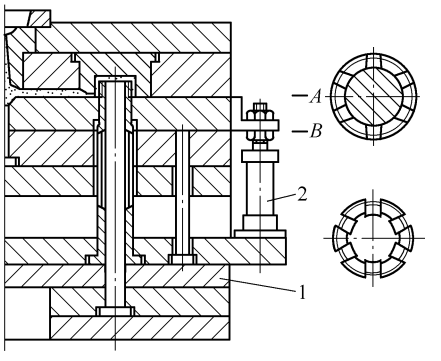


图 10-118　径向张缩的螺纹型芯

1— 一级顶出板　2—二级液压缸顶出

2. 模外动力螺纹脱模

生产中有用模具外的人力或电动机拖动，旋转螺纹型芯或型环，实现螺纹注塑件的脱模。但是螺纹注塑件不能跟随成型零件一起转动，一定要有止转措施。为此在螺纹注塑件的内表面或外表面，或者在端面上，设计凹凸花纹，如图 10-119 所示。

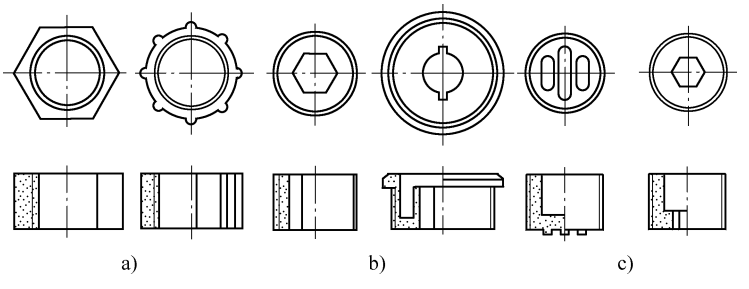


图 10-119　螺纹注塑件上的止转花纹

a）外表面　b）内表面　c）端面

（1）手工旋退脱模　在制品的生产批量较少时可简化模具，用人工旋转并退出螺纹型芯或型环。

1）模具内旋退。见图 10-120 上的螺纹型芯，必须在开模前人工旋退。其传动螺纹必须与成型螺纹的旋向相同且螺距相等。图 10-121 所示模具在角式注射机上成型。当

人工经手柄摇动斜齿轮时，与它啮合的斜齿轮通过键的作用带动螺纹型芯旋转。螺纹型芯在顶出板中后退，从制件螺纹里脱出。当螺纹型芯台肩退至 A 面时，再继续摇动手柄。螺纹型芯的反作用迫使顶板移动，顶脱注塑件，直至被定距螺钉限位。

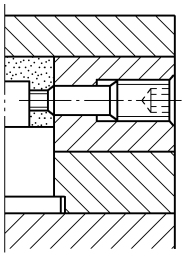


图 10-120　模具内手工旋退螺纹型芯

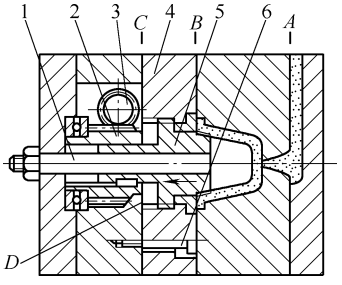


图 10-121　手工旋退内螺纹型芯的传动机构

1—型芯　2—主动斜齿轮　3—斜齿轮套
4—顶出板　5—螺纹型芯　6—定距螺钉

2）模具外旋退。如图 10-122 所示，螺纹型芯或型环制成可装卸的成型零件。开模后它们随注塑件一起脱模取出。在模具外用手工或专门夹具旋退注塑件。因制件收缩包紧螺纹型芯，旋退力矩较大。一般备有数个螺纹型芯供循环使用，必要时还要预热。活动的成型零件装入模内必须有可靠定位。此种方法比模具内旋退，生产效率要高些。

（2）动力旋退脱模　采用电动机动力旋退注塑件螺纹，减小了劳动强度又提高效率，适用于大批量生产。这在角式注射机上实现更为方便。角式注射机上的动模板开闭是由螺杆传动的。它是带有左右旋螺纹的螺杆，在其一端有个方孔，如图 10-123 所示，模具上主动齿轮 2 的一端插入其中。开模时，该螺杆在电机驱动的带轮传动下，经螺母将动模拖动后退。同时又经模具内的齿轮传动，驱动各螺纹型芯 3 转动。由于定模型腔板 5 与定模板之间的弹簧作用，定模的型腔跟随动模移动而止转了注塑件。待限位螺钉 4 止动定模型腔板 5 时，螺纹型芯 3 上恰好还有一个螺距没有脱出，在继续分型中将制品从型腔中带出。

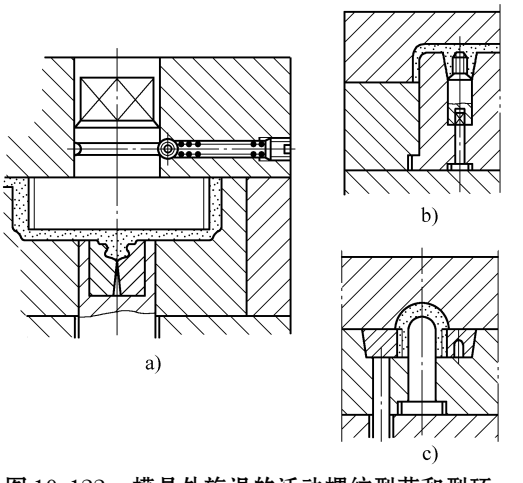


图 10-122　模具外旋退的活动螺纹型芯和型环

a）活动螺纹型芯并有瓣合块　b）活动螺纹型芯
c）活动螺纹成型杆

图 10-124 为一模六腔的电动机拖动旋退螺纹的模具。开模后，蜗杆 3 传动蜗轮 4 再经直齿轮 5 带动各螺纹型芯转动。各注塑件的端面上有四个止转针销 8。它们在弹簧 2 作用下随托板 7 一起移动，直至型芯上螺纹退完为止。合模时回程杆 1 将托板 7 和止

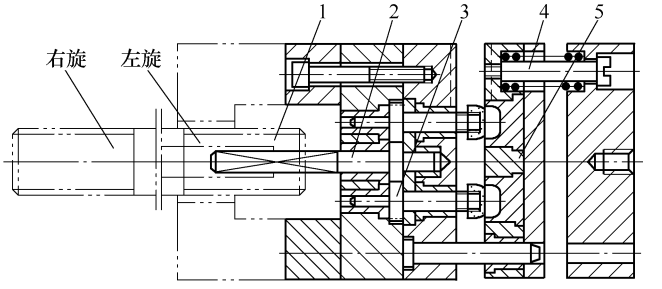


图 10-123　在角式注射机上旋退螺纹的模具

1—注射机上的锁模螺杆　2—主动齿轮　3—螺纹型芯
4—限位螺钉　5—定模型腔板

转针销 8 推回原处。由于端面止转有跟随作用，无需顶出机构。

利用液压缸的直线运动，再通过齿轮传动螺纹型芯旋退内螺纹的模具，如图 10-125 所示。液压缸活塞运动距离 S 根据制件螺纹确定，由两个行程开关保证。塑料螺母的内螺纹为右旋，两个螺纹型芯 5 脱模时为图示顺时针方向。螺母由内端面和浇口凝料止转。螺纹型芯 5 旋转时，在固定的导向螺母套 10 作用下，边旋转边后退。已退出型芯的螺母再由推杆 4 顶出。耐磨含油轴套 3 有 58HRC 硬度。

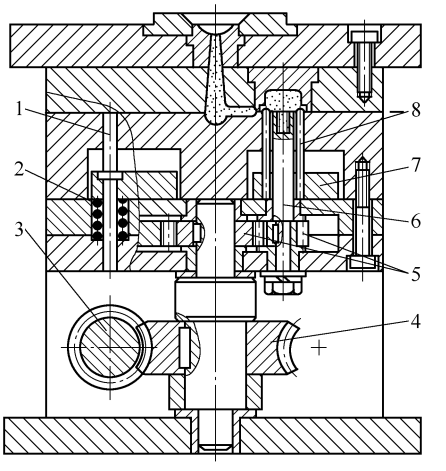


图 10-124　一模六腔的电动机拖动旋退螺纹的模具

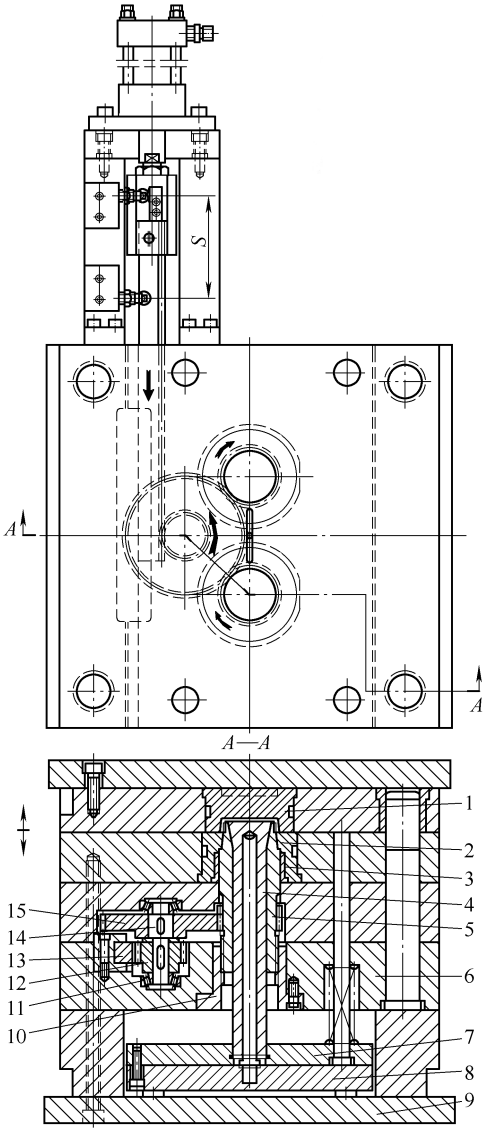
1—回程杆　2—弹簧　3—蜗杆　4—蜗轮
5—直齿轮　6—螺纹型环　7—托板
8—止转针销

3. 开模动力的螺纹脱模

利用开模力和开模方向的直线运动实现螺纹注塑件的旋退，模内结构虽然复杂，但效率高，并可实现自动化生产，应用较普遍。

（1）开模方向齿条导柱驱动　此类脱模都有一根固定在定模上的齿条导柱。如果成型螺纹的旋转轴线垂直开模方向，用有齿轮的螺纹型芯就可实现，如图 10-126 所示。该成型螺纹与另一端的传动螺纹的螺距和旋向相同。型芯轴上齿轮的宽度应保证在其进退的工作行程中，保持与齿条啮合。套筒螺母用来调节螺纹型芯的位置。

如果成型螺纹的轴线与开模方向一致，则要在齿轮齿条传动后，再用圆锥齿轮或螺旋斜齿轮来改变方向。此种模具一般一模多件，由行星齿轮机构驱动各螺纹型芯或型环转动。如图 10-127 所示，它用圆锥齿轮 6、7 传动模具中央有螺纹牙的拉料杆 3。各成型螺纹的旋向与拉料杆上螺纹旋向相反。开模后主流道凝料被螺牙拉至动模上。开模中，由于浇道凝料的止转，各螺纹注塑件和流道凝料都被旋退。



10-125　液压缸与齿轮传动旋退内螺纹的模具

1—型腔镶件　2—动模镶件　3—轴套　4—推杆
5—螺纹型芯　6—动模固定板　7—推杆固定板
8—推杆底板　9—动模垫板　10—导向螺母套
11—滚动轴承　12—小齿轮　13—齿条
14—齿轮轴　15—大齿轮

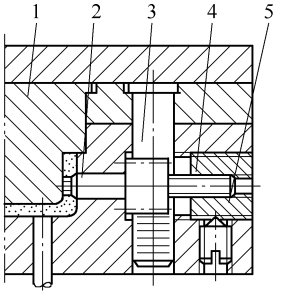


图 10-126　成型侧向螺纹的齿轮旋退机构

1—凸模　2—螺纹型芯齿轮轴
3—齿条导柱　4—套筒
5—紧定螺钉

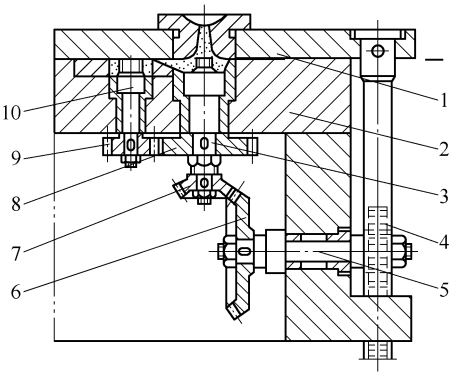


图 10-127　圆锥齿轮的螺纹旋退机构

1—定模板　2—动模板　3—螺纹拉料杆
4—齿条导柱　5—传动轴　6、7—圆锥齿轮
8、9—直齿轮　10—螺纹型芯

以上两例的单分型面的螺纹脱模机构，其旋转机构和止转措施设计在动模一侧。止转花纹长度等于成型螺纹高度。若止转花纹长度大于成型螺纹高度，则有加设顶出机构的必要。反之，若止转花纹长度小于成型螺纹高度，则止转零件必须跟随注塑件运动到旋完螺钉。

图 10-128 所示是双分型面的一模四腔螺纹盖帽注射模。由于止转措施和旋转机构分别在定模与动模两侧。定模型腔板 4 在弹簧作用下跟随动模运动，保证注塑件外表面的止转作用。在定模边 A 分型后，主流道凝料被拉下。此时经一对斜齿轮 13 和 24 将旋转运动轴线转向，常动螺纹型芯 20 转动。动模继续后退。在型腔板 4 被定距螺钉 17 止动时，盖帽退出螺纹型芯。最后，四个盖帽与浇道凝料相互牵制轻黏在动模上。较长的齿条轴必须支承于动模垫板 15 中防止变形。此模具只需更换 16、18 和 20 成型零件可注射同类的不同规格的制品。

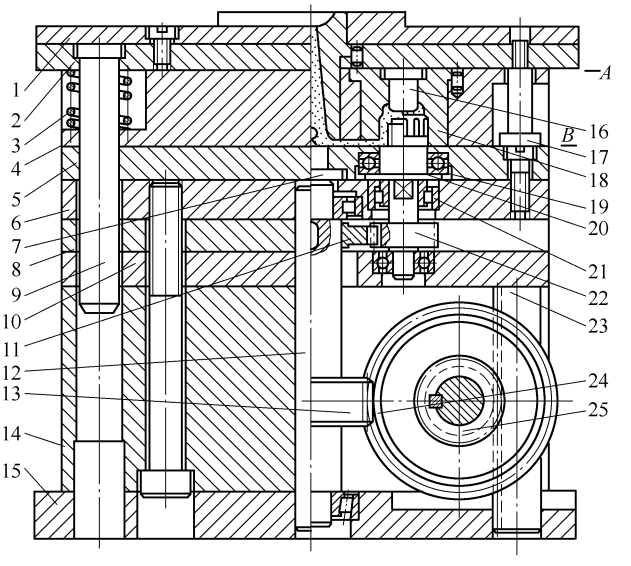


图 10-128　双分型面的一模四腔螺纹盖帽注射模

1—定模垫板　2—定模板　3—压缩弹簧　4—定模型腔板　5—动模型芯固定板
6—动模板　7—拉料杆　8—垫板　9—导柱　10、15—动模垫板　11、22—圆柱齿轮
12—圆柱销　13、24—斜齿轮　14—动模座　16—型芯　17—定距螺钉
18—凹模　19—止退轴承　20—螺纹型芯　21—轴承　23—齿条轴　25—直齿轮

（2）开模方向大升角螺母驱动　如图 10-129 所示，长导程大升角的螺杆固定在定模，在开模力驱动下螺母旋转，带动众行星小齿轮，让螺纹型芯同时旋退。此螺杆与螺母套专门设计制造，已商品化。螺杆直径为 20 ~ 38mm，有右旋或左旋，螺距为 80 ~ 200mm。螺纹升角大，传动力矩大，且螺牙接触压力低些，使用寿命长。但是啮合螺母的传动圆心角较小。为避免内螺纹制品随型芯旋转，推板 7 在 L_1 距离内，在弹簧 5 的作用下顶靠制件，起止转作用。

设计时，长导程的螺杆应安装在模具中央位置，或者靠近中心的位置，以避免或减

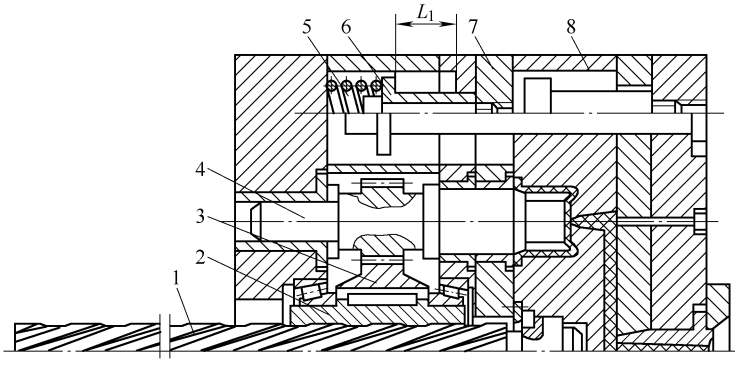


图 10-129　开模方向大升角螺母驱动卸内螺纹制品

1—大升角螺杆　2—螺母套　3—中心齿轮　4—螺纹型芯
5—弹簧　6—推管　7—推板　8—定模型腔板

少螺杆驱动螺母的开模力，产生附加力矩。也有将长导程的螺杆固定安装在注射机的动模板上，模具动模部分后退时，啮合螺母传动螺纹型芯螺杆固定，移动螺母被转动的效率较低。用滚珠螺杆代替普通螺杆可减少螺纹升角，提高传动效率。

4. 螺纹脱模力矩计算

内螺纹注塑件要计算螺纹型芯旋出的力矩，以确定所需动力，作为设计机械传动装置的依据。

如图 10-130 所示，注塑件对螺纹型芯的总包紧力 p_s，假设作用在螺纹中径的圆柱面上，由此可得所需型芯或注塑件旋转的脱模力矩

$$M = f_c p_s r_2 = f_c (p_1 + p_2) r_2 \tag{10-82}$$

式中，r_2为螺纹中径的半径；f_c为注塑件与钢表面间的脱模系数，由表 10-3 查得。

该总包紧力 p_s由两部分组成，$p_s = p_1 + p_2$。其中 p_1是以中径圆筒体作为内表面的厚壁或薄壁注塑件的包紧力。

当圆筒注塑件壁厚 $t \leqslant d_2/20$（d_2为中径），由式（10-20）、式（10-22）和式（10-23），可得

$$p_1 = \frac{1.5\alpha E (T_f - T_j) t}{r_2} \cdot A_c \tag{10-83}$$

当圆筒注塑件壁厚 $t > d_2/20$（d_2为中径），由式（10-20）可得

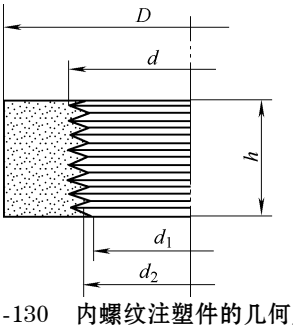


图 10-130　内螺纹注塑件的几何尺寸

$$p_1 = \frac{1.25\alpha E (T_f - T_j) t}{\dfrac{R^2 + r_2^2}{R^2 - r_2^2} + \nu} \cdot A_c \tag{10-84}$$

以上两式中，α、E、T_f、T_j和 υ 的含义见 10.2 节及表 10-3。R 为注塑件外圆半径。包紧有效面积 $A_c = 2\pi r_2 h = \pi d_2 h$。$h$ 为螺纹部分的长度。

p_2是注塑件内螺纹齿形对钢型芯牙形的轴向包紧力，可视为具有凹槽注塑件的夹紧力。由式（10-34）和式（10-35）得

$$p_2 = 1.5\alpha E(T_f - T_j)(d^2 - d_1^2) \tag{10-85}$$

式中，d 为螺纹大径。相邻螺纹牙齿间的夹紧力会相互抵消。螺纹升角影响很小，而牙形一般是对称的。

对于外螺纹注塑件的脱模力矩，建议 $M = f_c p_s r_2 = f_c p_2 r_2$。

[例] 某 PA1010 农药喷雾器筒，其端面有普通公制内螺纹 M20，有效螺纹长度为 20mm，筒体外径为 28mm，求螺纹型芯旋退时的脱模力矩。

[解] 由《机械零件手册》及表 10-3 确定有关参数：M20 普通粗牙螺纹，中径 $d_2 = 18.376\text{mm}$，$r_2 = 9.188\text{mm}$。小径 $d_1 = 17.294\text{mm}$，大径 $d = 20\text{mm}$。PA1010 塑料，$E = 1.35 \times 10^3\ \text{N/mm}^2$，$\alpha = 12 \times 10^{-5}/℃$，$f_c = 0.4$，$T_f = 148℃$，$T_j = 50℃$，$\nu = 0.33$。由已知条件 $R = 14\text{mm}$，$h = 20\text{mm}$，得

$$t = R - r_2 = (14 - 9.188)\text{mm} = 4.812\text{mm}$$

$$\frac{t}{d_2} = \frac{4.812}{18.376} = \frac{1}{3.82} > \frac{1}{20}$$为厚壁，由式(10-84)

$$p_1 = \frac{1.25\alpha \cdot E(T_f - T_j)t}{\dfrac{R^2 + r_2^2}{R^2 - r_2^2} + V} \cdot A_c$$

$$= \frac{1.25 \times 12 \times 10^{-5} \times 1.35 \times 10^3 \times (148 - 50)}{\dfrac{14^2 + 9.188^2}{14^2 - 9.188^2} + 0.33} \times \pi \times 18.376 \times 20\text{N} = 8068\text{N}$$

$$p_2 = 1.5\alpha E(T_f - T_j)(d^2 - d_1^2)$$

$$= 1.5 \times 12 \times 10^{-5} \times 1.35 \times 10^3 \times (145 - 50) \times (20^2 - 17.294^2)\text{N} = 2208\text{N}$$

$$p_s = p_1 + p_2 = (8068 + 2208)\text{N} = 10276\text{N}$$

$$M = f_c p_s r_2 = 0.4 \times 10276 \times 0.009188\text{N} \cdot \text{m} = 37.75\text{N} \cdot \text{m}$$

参 考 文 献

[1] A Kaminski. Measurement and computation of ejection forces of Geometrically simple moulding [J]. German Plastics, (66) 1976, 4.

[2] H. Wang, K K Kalanemi, G Salloum. Numerical and Experimental Studies on the Ejection of Injection-Molded Plastic Products [J]. Polymer Engineering and Science, March 2000, Vol. 40, No. 3.

[3] 唐志玉，李德群，徐佩弦. 塑料模具设计师指南 [M]. 北京：国防工业出版社，1999.

[4] Geory Menges, Walter Michacli, Paul Mohren. 注射模具制造工程 [M]. 闫光荣，许鹤峰，等译. 北京：化学工业出版社，2003.

[5] 徐佩弦. 塑料制品与模具设计 [M]. 上海：华东理工大学出版社，2010.

[6] 付伟，陈碧龙. 注塑模具设计原则、要点及实例解析 [M]. 北京：机械工业出版社，2010.

[7] 张维合. 注塑模具设计实用手册 [M]. 北京：化学工业出版社，2011.

第 11 章　模具温度调节系统设计

注射模不仅是塑料熔体的成型设备，而且还是热交换器。模具温度调节系统直接关系注塑件的质量和生产效率，是注射模设计的核心内容之一。大型注射模具的冷却系统设计尤其重要，计算也较为复杂。对于大多数模具温度较低的塑料注射，仅设置模具冷却系统。但对于模温超过 80℃的塑料以及大型模具，需要设置加热装置。

11.1　冷却系统的简略计算

高温塑料熔体在模腔内凝固时将释放热量，注射模存在一个合适的模具温度。模温调节系统是使整个成型型腔，在整个批量生产中，保持这个合适温度。

1. 温度调节系统的功用

（1）对制品质量的影响　注射模具温度的波动及分布不均匀，和模温的不合适，这两方面会使塑料制品质量变坏。模温直接关系制品的成型收缩率。模温波动会使批量生产制品尺寸不稳定，从而降低制品尺寸精度，甚至出现尺寸误差过大的废品。这对成型收缩率较大的结晶型塑料影响更为明显。

模具型腔温度分布的不均匀，例如模具型芯壁和型腔壁温差过大，会导致注塑件厚度截面上残余应力分布的不均匀，固化后注塑件会出现变形翘曲。注塑件中局部范围残余应力过大会引起裂纹和开裂。这对刚硬的聚碳酸酯等制品尤为重要。

提高模温能改善制品表面的粗糙度，使轮廓清晰，熔合缝不显现。提高模温有利于结晶型塑料的结晶过程，有利于高黏度熔体的充模流动，也有利于减小制品中的残余应力；但是会延长冷却时间和成型周期，也会使脱模温度过高，使注塑件在脱模中受到损伤。

（2）对生产效率的影响　冷却时间在整个成型周期中占 50% ~80% 的时间。在保证注塑件质量的前提下，限制和缩短冷却时间是提高生产效率的关键。让高温熔体尽快降温固化，模温调节系统应有较高的冷却效率。注入模具的塑料熔体所具有的热量，由模具传导、对流和辐射，散失于大气和注射机仅占 5% ~30% 。热量大部分由冷却水携走。缩短冷却时间的途径有三个方面。

1）让冷却水处于湍流状态。模具冷却管道中的冷却水应处于高速湍流状态，流速 v = 0.5 ~1.5 m/s，甚至更高。雷诺数 $Re>6000$，使冷却管道孔壁与冷却介质之间的传热系数 α 提高。资料表明，湍流流体在 $Re>10^4$ 时，其传热能力比层流高 10 ~20 倍。

2）扩大模具与冷却水的温差。在模温一定时，采用低温的冷却水。但倘若设计不当，会加剧模温分布的不均匀。采用低于室温的冷却水时，有可能使型腔表面凝聚大气中的水分。

3）增大冷却介质的传热面积。也就是尽量增大管道孔径和增加孔数。但是受模具

结构（例如脱模零件、镶块接缝）的限制，在型腔压力过大时，要防止冷却管道壁与成型壁面间钢材压塌的现象。

对于大型注射模，为提高制件的合格率，在开机前必须将模具预热到适宜温度。例如要把 5t 重的模具从室温 20℃，升高到合适的模温 60℃。对于碳钢模具，比热容为 0.46kJ/（kg·℃），所需热量

$$Q_m = 0.46 \times 5000 \times (60 - 20)\text{kJ} = 92000\text{kJ}$$

倘若 Q_m 热量不是由预热获得，而是由注射到型腔内的 ABS 熔体传给，由表 11-1，ABS 熔体凝固放热热量 $\Delta_i = 300 \sim 400\text{kJ/kg}$，设该模具每小时注入塑料熔体 60kg，则 ABS 熔体传递给模具的热量

$$Q_p = 60 \times 350\text{kJ} = 21000\text{kJ}$$

这就需要连续注射成型

$$Q_m / Q_p = 92000/21000 = 4.38$$

在此期间的制品，由于模温太低而报废。在达到合适模温后，由于进入型腔的熔融塑料量大，积聚热量增多，为保持模温而需要对模具维持冷却。

2. 冷却系统的简略计算

对于大多数中小型注射模具的水冷却系统，需要计算冷却传热面积，确定冷却水温度和流量。尽管作了一些简略的计算处理，但仍遵循了模具成型过程热平衡和冷却水湍流流动的两大原则。

（1）热平衡计算　进行注射成型过程热平衡计算，就是计算单位时间内熔体固化放出热量等于冷却水所携走的热量

$$Q_{in} = \Delta_i m_p = \Delta_i nG \tag{11-1}$$

式中　Q_{in}——塑料熔体每小时冷却固化所放出的热量（kJ/h）；

Δ_i——每千克塑料熔体凝固时放出的热焓量（kJ/kg），由表 11-1 查得；

n——每小时注射次数；

G——每次注射的塑料用量（kg）；

m_p——每小时注射的塑料量（kg）。

表 11-1　常用塑料熔体凝固时放出热焓量

塑料品种	Δ_i/(kJ·kg^{-1})	塑料品种	Δ_i/(kJ·kg^{-1})	塑料品种	Δ_i/(kJ·kg^{-1})
ABS	300～400	CAB	270	PP	590
AS	335	PA66	650～750	PA6	500～600
POM	420	丙烯酸塑料	290	PS	270
PVAC	290	LDPE	500～690	PTFE	500
PMMA	210	HDPE	550～750	PVC	170～360
CA	290	PC	290	SAN	270～360

$$Q_{out} = m_w C_w (T_{out} - T_{in}) \tag{11-2}$$

式中　Q_{out}——冷却水每小时的从模具携走的热量（kJ/h）；

m_w——冷却水每小时的用量（kg/h）；

C_w——冷却水比热容，4.187kJ/（kg·℃）；

T_{out}——模具的出水温度（℃）；

T_{in}——进入模具的冷却水温度（℃）。

由热平衡条件 $Q_{out} = Q_{in}$ 可得

$$m_w = \frac{\Delta_i m_p}{C_w(T_{out} - T_{in})} = \frac{\Delta_i nG}{C_w(T_{0ut} - T_{in})} \tag{11-3}$$

（2）湍流计算　经计算保证冷却水在管道中处于湍流状态，从而获得冷却水的体积流量 V，并确定相应的管径 d。

由水的密度 $\rho = 1000 kg/m^3$ 和每小时用水量 m_w，可换算得冷却水的体积流量

$$V = \frac{m_w}{60\rho} = 0.398 \times 10^{-5} \frac{\Delta_i nG}{T_{out} - T_{in}} \tag{11-4}$$

圆管中湍流的雷诺数 Re 的计算式

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \geqslant 10^4$$

式中　v——管中的最低流速；

μ——流体黏度。

可由式（11-4）计算得流量 V 后，直接查表 11-2，得温度 10℃时保证雷诺数 $Re = 10^4$ 以上的管道直径 d。

表 11-2　冷却圆管中水的湍流流量 V 和管道直径 d（$Re = 10^4$，10℃）

流量 $V/(m^3 \cdot min^{-1})$	5.0×10^{-3}	6.2×10^{-3}	7.4×10^{-3}	9.2×10^{-3}	12.4×10^{-3}	15.5×10^{-3}	18.7×10^{-3}
流速 $v/(m \cdot s^1)$	1.66	1.32	1.10	0.86	0.66	0.53	0.44
直径 d/m	8×10^{-3}	10×10^{-3}	12×10^{-3}	15×10^{-3}	20×10^{-3}	25×10^{-3}	30×10^{-3}

在确定实际冷却管道的直径后，可求得在 V（m^3/min）和 d（m）下的冷却水流速

$$v = \frac{4V}{60\pi d^2} = 0.0212 \frac{V}{d^2} \tag{11-5}$$

（3）冷却面积计算　进一步确定能保证冷却效率的冷却管道长度和孔数。冷却水从模具中带走的热量

$$Q_{out} = \alpha \Delta T \varphi \tag{11-6}$$

$$\Delta T = T_m - T_{cp} = T_m - 0.5(T_{out} + T_{in})$$

式中　T_m——模具温度（℃）；

T_{cp}——冷却水的平均温度（℃）；

ΔT——模具与冷却水的平均温度差（℃）；

α——冷却水的管壁传热系数［kJ/（$m^2 \cdot h \cdot$℃）］；

φ——管道的有效冷却面积（m^2）。

长径比 $L/d > 50$ 的细长冷却管道，模具管壁对冷却水的传热系数

$$\alpha = 3.6 f_o \frac{(\rho v)^{0.8}}{d^{0.2}} \tag{11-7}$$

式中　ρ——冷却水密度（kg/m^3）；

v——流速（m/s）；

d——管径（m）；

f_o——冷却水物理性质参量的函数。

$$f_o = 0.023\frac{\lambda^{0.6}C_w^{0.4}}{\mu^{0.4}}$$

水的热导率 λ、比热容 C_w及黏度 μ 均是水温的函数。现将模具冷却水的平均温度 T_{cp}下的 λ、C_w及 μ 计算得 f_o，列于表 11-3 中。

表 11-3　f_o与平均水温的关系

平均水温 T_{cp}/℃	0	5	10	15	20	25	30	35
f_o值	5.74	6.18	6.63	7.06	7.51	7.93	8.35	8.79
平均水温 T_{cp}/℃	40	45	50	55	60	65	70	75
f_o值	9.22	9.61	10.02	10.40	10.76	11.15	11.53	11.88

最后，可由下式求出管长 L，或孔数 n

$$\varphi = n\pi dL \tag{11-8}$$

[例] 注射成型 ABS 注塑件，产量为 30kg/h。用 22℃的常温水作为冷却液，模具出口的水温 28℃，要求模具温度 50℃，由结构设计获知冷却水管长度是 200mm，求冷却水管直径及模具上应开设的水管孔数。

[解] 由题意 $m_p = nG = 30\text{kg/h}$，$T_{oup} = 28℃$，$T_{in} = 22℃$得 $T_{cp} = 25℃$。$T_m = 50℃$，得 $\Delta T = T_m - T_{cp} = 50 - 25 = 25℃$

1）计算产生湍流的冷却水流量，相应的管径及水速

查表 11-1 得 ABS 的 $\Delta_i = 350\text{kJ/kg}$。由式（11-4）

$$V = 0.398\times10^{-5}\frac{\Delta_i m_p}{T_{out}-T_{in}} = 0.398\times10^{-5}\frac{350\times30}{28-22}\text{m}^3/\text{min} = 0.00697\ (\text{m}^3/\text{min})$$

查表 11-2 取 $d = 11\times10^{-3}\text{m}$，代入式（11-5）

$$v = 0.0212\frac{V}{d^2} = 0.0212\frac{0.00697}{(11\times10^{-3})^2}\text{m/s} = 1.22\text{m/s}$$

2）计算所需冷却面积及孔数

以 $T_{cp} = 25℃$查表 11-3 得 $f_o = 7.93$。由式（11-7）

$$\alpha = 3.6f_o\frac{(\rho v)^{0.8}}{d^{0.2}} = 3.6\times7.93\frac{(1000\times1.41)^{0.8}}{(11\times10^{-3})^{0.2}}[\text{kJ/(m}^2\cdot\text{h}\cdot℃)] = 23263\text{kJ/(m}^2\cdot\text{h}\cdot℃)$$

用式（11-6）计算所需冷却面积

$$\varphi = \frac{\Delta_i m_p}{\alpha\Delta T} = \frac{350\times30}{23263\times25}\text{m}^2 = 0.01805\text{m}^2$$

由式（11-8）得管道 L = 200mm 的孔数

$$n = \frac{\varphi}{\pi dL} = \frac{0.01805}{3.14\times11\times10^{-3}\times0.2} = 2.61$$

圆整后，取长 200mm 孔径 11mm 的圆管道 3 根。

3. 模具温度控制机

注射生产用的模具温度控制机，简称模温机，是高效和精密注射的重要附属装备。模温机输给模具传热控制介质有水和油两种。水温机可控制模具温度 15 ~ 120℃。油温

机可控制模具温度 25 ~ 200℃，有达到 300℃的机型。模温机还需配有冷冻机，用 3℃ ~ 常温的水作为冷却模温机的传热介质。一台注射机用一台模温机，也有定模和动模用两台模温机分别控制。模温机的输出介质的流量和压力应满足注射模热平衡所需。

高光无痕注射生产要用过热水模温控制机。当注塑件成型脱模后，注入 100 ~ 150℃高温热水到模具，让模具在高温下注射和保压，然后再注入冷却水，使模具温度达到 35 ~ 85℃。另一种是蒸汽模温控制机，用高温蒸汽加热模具，注射和保压后迅速注入冷却水或冷冻水。

11.2 冷却系统设计

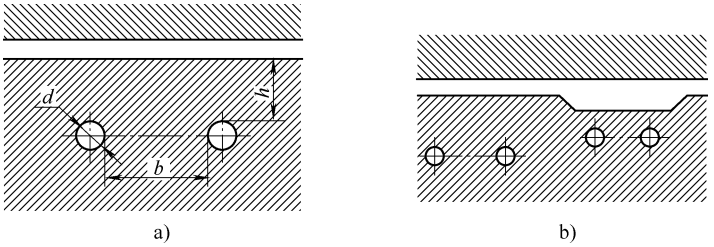
为了提高冷却效率和争取型腔表面温度的均匀与稳定，在系统的综合设计中应遵守生产中的约定准则。在管道回路布置时，还需进一步考虑型腔的形状和尺寸，并使加工方便和密封效果良好。

1. 设计准则

1）优先考虑冷却管道的位置，而后综合处理脱模机构零件布置和镶块结构，并要首先保证型芯的冷却；通常对凹模和型芯采用两条回路；减小型芯壁和型腔壁之间的温度差是很重要的，特别是大型模具，使用模温调节装置，可有效保证模温控制质量。在通常注射成型生产中，模温波动不超过 ±2.5℃；精密注射时模温误差在 ±1℃之内；并采用缓冷方法，保证制品尺寸精度和质量。

2）保证实现管道冷却水湍流状态的流速和流量，还要保证足够的水压。冷却管道总长总在 1.5m 以下；弯头数目不要超过 15 个。出水温度与进水温度相差越大，说明模具内温度越不均匀，精密注射的模具，此两者温度差限制在 5℃之内，一般模具也应在 8℃左右。管道作串联布置，特别是从模具外用管接头和水管连接，加工维修方便。但由于流程长使冷却水的压力降和进出温差大。多路并联冷却，冷却效果好，但需控制好各路的流量和水温的一致性。

3）管道直径经湍流计算确定，一般取 $d = 8 \sim 25\text{mm}$。管道过细，加工和清理困难。水垢和铁锈会使冷却效率变坏一个数量级，因此需定期清理；或用软水也可对孔壁作磷化处理。较大管道孔径和根数能增加有效冷却面积，只要不妨碍模具总体结构，越大越多为好。水管接头孔径应与管道孔径一致。进水和出水接头尽可能在模具一侧，并置于不妨碍注射操作的方向。



a) b)

图 11-1 冷却孔的分布

a）冷却孔径与位置 b）局部强化冷却

4）冷却管道布置应以均匀为前提。如图 11-1 所示，水孔壁与型腔壁通常的间距 $h=1.5\sim3d$，孔之间间距 $b=2.5\sim4d$。均匀布置后，按需要作局部调整。过大间距会使模温不均匀。间距过小，孔壁承受型腔高压后，由于弯曲应力和剪切应力及其综合变形作用，在孔的中央部位会产生型腔壁的压塌现象。如图 11-2 所示，矩形管道孔上壁厚 h 为架空梁，其梁跨度 l 固定端的最大正应力

$$\sigma_{max}=0.5\frac{P_c l^2}{h^2}\leqslant[\sigma]$$

由于梁的跨度很短，在梁的中性层上最大剪切应力

$$\tau_{max}=0.75\frac{P_c l}{h}\leqslant[\tau] \tag{11-9}$$

由于弯曲变形和剪切变形，在两孔间中点处的型腔下陷量

$$f_{max}=\frac{P_c l^2}{h}\left(\frac{l^2}{32Eh^2}+\frac{0.1875}{G}\right)\leqslant[f] \tag{11-10}$$

式中　P_c——型腔压力，视实际注射条件，大致为 20～60N/mm²；

h——冷却孔模具壁厚（mm）；

l——矩形孔的宽度（mm）。

55 钢弹性模量 $E=2.1\times10^5$N/mm²，剪切模量 $G=0.8\times10^5$N/mm²，许用弯曲应力 $[\sigma]=150$N/mm²，许用剪切应力 $[\tau]=95$N/mm²，允许的下陷量 $[f]=0.003$mm。从以上三式可得到图 11-2 的应用曲线。在孔间间距 $b\geqslant0.7l$ 的条件下，从该图曲线可查得中碳钢模具上，矩形孔宽 l 的对应型腔壁厚的最小 h 值。若用圆孔直径代入，直径 $d=l$ 时，计算结果偏安全，应将查得的壁厚 h 乘上 0.8。

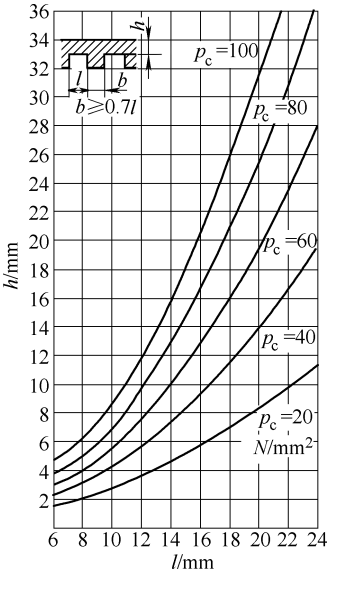


图 11-2　中碳钢模具矩形冷却水孔至型腔壁面的最小距离 h

注：圆孔 $h'=0.8h$。

5）注射模的浇注系统，例如主流道的末端等处，需加强冷却，可利用较冷的进水；塑料制品局部的厚壁及转角等处，需减小间距 h 和 b，采用如图 11-1b 所示的强化冷却；在塑料熔流末端，特别是熔合缝的汇合处，冷却孔道应远离。

6）从冷却效果来选取模具材料。表 11-4 中所列常用模具钢的热导率均较低。含碳量和含铬量越高的钢种导热性越差。不锈钢相比之下可视为绝热材料。普通钢传热性差，且热稳定性不好，还会导致型腔表面硬度下降。铍铜合金导热性和热稳定性好，且可获得较高硬度。例如：国产铍铜 QBe2（铍 1.9%～2.2%，镍 0.2%～0.5%，其余为铜）经固溶时效处理后，硬度可达 49HRC。铍铜比热容是 1.89kJ/（kg·℃）。

表 11-4　一些模具材料的热导率

模具材料	λ /(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)	模具材料	λ /(W·m^{-1}·℃$^{-1}$)
纯铜	386	P20	36.5
铍青铜(20℃)	121～151	碳素钢(C 1.5%)	36
铍青铜(275℃)	109	SKD61	34
铝青铜	81	H13	29.5
纯铝	175	不锈钢(SUS304)	16
硬铝(Al95%,Cu4%,Mg0.5%)	164	不锈钢(Cr 12%)	26
铸铝(Al87%,Cu13%)	164	铬钢(Cr 1%)	60
碳素钢(C 0.5%)	53	锌合金(Al 4%,Cu 3%)	109
碳素钢(C 1%)	43	铸铁(C 4%)	52

注：1 W/(m·℃) = 3.6kJ/(m·h·℃)

2. 管道回路的布置

(1) 凹模管道回路　在型腔模板上的冷却管道加工方便，冷却效率不及型芯管道回路。

1) 外接直通式。图 11-3 是最简单的外部连接的直通管道布置。用水管接头和橡胶管将模内管道连接成单路或多路循环，管道加工方便，适合于浅的矩形型腔。但是外接部分容易损坏。

2) 平面回路式。图 11-4 所示是凹模板的内平面上的管道整体布置。管道加工后必须用孔塞和挡板来控制冷却液流动。它适合各种较浅的，特别是圆形的型腔，见图 11-4a。对长宽比很大的矩形型腔，也可采用如图 11-4b 所示左右两回路的平衡布置。挡板的安装应便于从模外直接拆卸，修理更换方便。

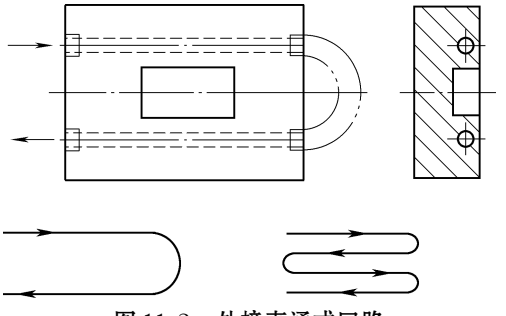


图 11-3　外接直通式回路

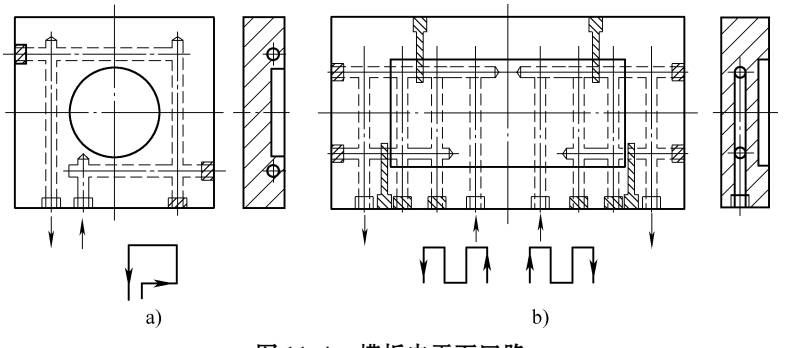


图 11-4　模板内平面回路

a) 单回路　b) 两回路

3) 多层回路式。如图 11-5 所示，对深腔的凹模，冷却管道应采用多层的立体布置。布置成曲折的 Y 形，是为了对主流道和型腔底部进行冷却。型腔四周可采用各平

面的单独整体回路。但这样会使模具外管接头多，各回路冷却参量平衡较难。若将各层回路在深度方向连成一体，对大型模具会造成流程过长而冷却不均匀。还有一种带有密封环的冷却板，板上铣有冷却槽，用四块冷却板紧固于模具侧面，每板均有一对出入口，检修很方便，但成本较高。

4）凹模嵌入式。有矩形块和圆柱嵌入两种。需要注意嵌入凹模与模板间回路的冷却水泄漏和管道加工的难度。

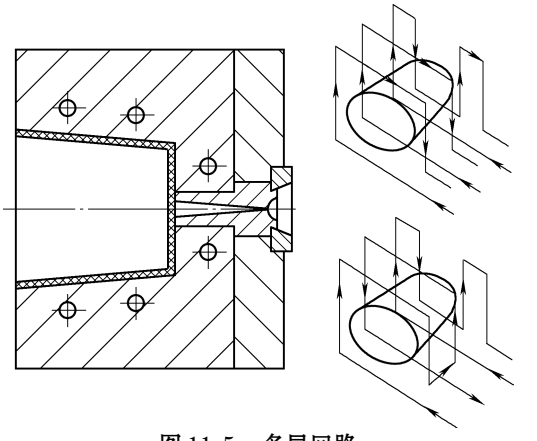


图 11-5　多层回路

矩形块嵌入凹模，先对嵌入凹模作单层或多层回路布置，尽可能只有一对出入口，如图 11-6a 所示。然后设计水源的连接。图 11-6b 是用延伸式管接头，穿过模板直接连接在嵌入凹模上。该嵌入凹模倘若拆卸，会损伤接头。图 11-6c 是在分型面上开沟槽来容纳延伸式接头。注射中如果有溢料，去除较麻烦。图 11-6d 是用冷却孔直接从嵌件底部对接，但必须有 O 形圈密封。也有将圆铜管埋在嵌件与模板之间，为保证嵌件凹模与铜管间有效接触面积，可用低熔点合金把铜管四周空隙填满。

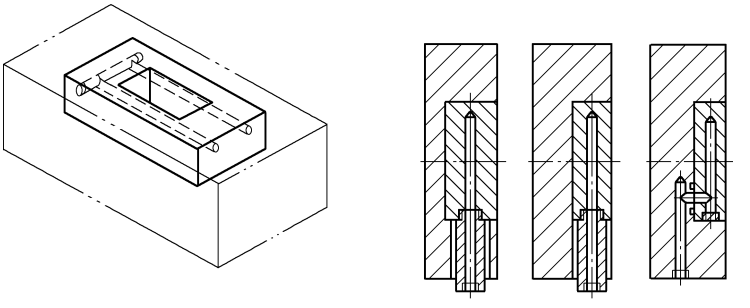


图 11-6　矩形块嵌入凹模的冷却回路

a）单回路嵌入　b）延伸管接头在孔中　c）延伸管接头在槽中　d）底部引入管道

圆柱嵌入凹模，如图 11-7a 所示，可利用圆柱体上开出的环形沟槽，嵌入模板后形成矩形冷却管道，必须在沟槽的上下方装入 O 形圈密封。在一模多腔的模具中，直线布置的型腔可通过设在模板上的孔道相连如图 11-7b 所示，多个嵌件上的冷却槽相连有困难时，可在模板上开沟槽，如图 11-7c 所示，但其冷却效果不如前者。周向串接应注意沟槽之间的连接和间隔 x，见图 11-7d。要在节圆中计入间隔 x，并需加强模板的刚性，必要时在嵌入凹模和模板之间再增设开沟槽的冷却套。

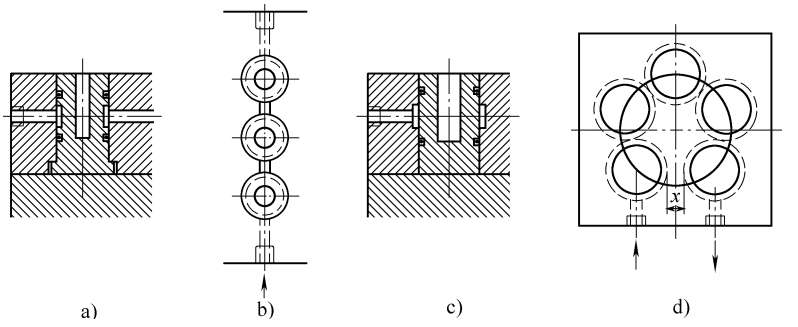


图 11-7　圆柱嵌入凹模的冷却回路

a）嵌件上开环形沟槽　b）单向串接　c）模板上开环形沟槽　d）周向串接

（2）型芯管道回路　对于很浅的型芯，可直接将平面回路开设在型芯下部；对于中等高度型芯，可在型芯的底端面上开设矩形冷却水槽回路如图 11-8 所示；对圆柱型芯回路环形布置，再加工横沟，安上挡板和防漏橡胶圈。对矩形型芯则要铣出相通的矩形布置沟槽。

对于较高的型芯，倘若沿型芯深度方向开设管道，就不得不在型芯的侧表面打孔以相互沟通。虽然用孔塞封住，但型芯侧表面质量难以保证。因此对于高型芯，常用以下三种内循环管道布置方法。

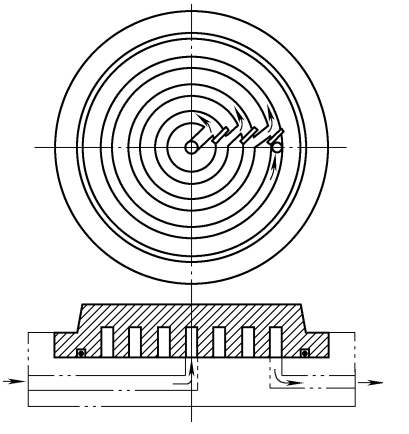


图 11-8　中等高度型芯的冷却水槽回路

1）隔板式。如图 11-9a 所示方法用于单个圆柱高型芯，在型芯的直管道中设置隔板，进水和出水与模内横向管道形成冷却回路；此方法也可用于多个小直径的圆柱型芯，见图 11-9b；串接管路方法，适用于窄长的矩形高型芯，见图 11-9c；也有用于大直径的高型芯，如图 11-9d 所示。

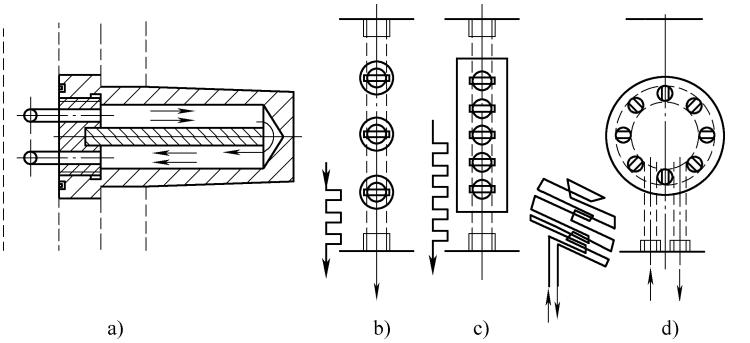


图 11-9　隔板式冷却回路

a）单型芯隔板　b）多型芯串接　c）型芯中串接　d）型芯中周向串接

2）喷流式。在型芯中间装一个喷水管，进水从管中喷出后再向四周冲刷型芯内壁，如图 11-10 所示。低温的进水直接作用于型芯的最高部位。对于位于中心的浇口，冷却效果好。喷流式可用于单个小直径型芯，也可用于多个小直径型芯的并联冷却。此时底部进水和出水管应相互错开。

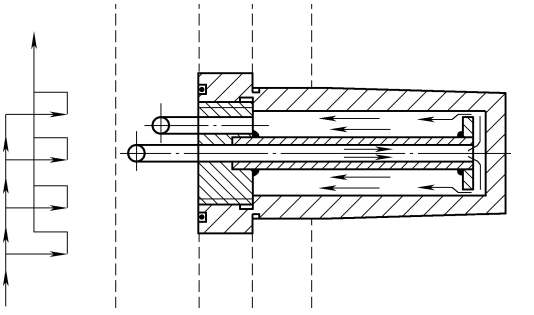


图 11-10　喷流式冷却回路

3）螺旋式。如图 11-11 所示，大直径的圆柱高型芯，在芯柱表面车制螺旋沟槽，压入型芯的内孔中。冷却水从中心孔引向芯柱顶端，经螺旋回路从底部流出。芯柱使型芯有较好刚性；较薄的型芯壁厚改善了冷却效果，只是加工较复杂。

对于直径 5mm 左右的细长型芯，可用紫铜或铍铜芯棒压配在型芯的中央小孔中，用冷却水冲冷导热芯棒的根部。如今，用铍铜制造小型芯改善型芯导热，已经常采用。

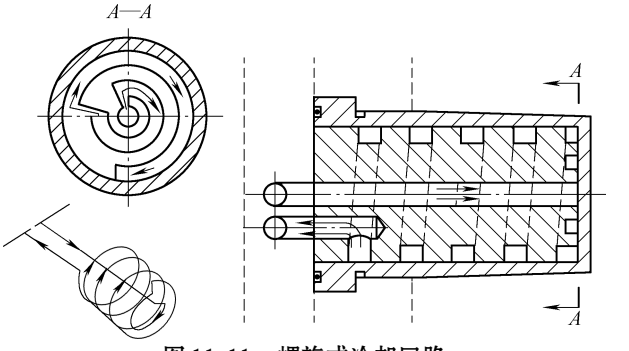


图 11-11　螺旋式冷却回路

11.3　冷却系统计算

传热学的原理与计算公式应用到注射模的冷却系统计算，需了解塑料和金属材料的热性能，需结合注射成型工艺和模具结构，才能获得工程应用所允许的近似计算结果。传统的计算方法，包括注射成型冷却时间计算、模具系统热平衡计算和冷却回路计算三部分。冷却时间计算在前 3.3.3 节“模具的温度和冷却时间”中已有详细陈述。

1. 模具系统热平衡计算

模具系统热平衡计算是单位时间里对模具的热量注入和输出的计算，其目的是获知单位时间里需要冷却剂携走的热量。

（1）被传导进模具的总热量　模具热量是伴随塑料熔体注射而进入，又在固化中释放。少量是注射机的钢喷嘴传导给予的。

1）熔体注入的热量 Q_i

$$Q_i = nG\Delta_i = nG[C_P(T_{1max} - T_{1min}) + l_E] \tag{11-11}$$

式中　n——每小时注射次数；

G——每次注射量（kg）；

Δ_i——每千克塑料熔体凝固时放出的热焓量（kJ/kg），由表 11-1 查得，或由类似图 2-36 上查得，或者由塑料比热容的关系式求得；

C_P——塑料的比热容［kJ/（kg·℃）］，可参考表 11-5；

T_{1max}——塑料熔体进入型腔时的温度（℃）；

T_{1min}——注塑件冷却固化结束时的温度（℃）；

l_E——结晶型塑料的熔化潜热（kJ/kg），可参考表 11-5。

表 11-5 塑料密度、比热容、热导率和潜热（平均值）

材料	密度 ρ/kg·m^{-3}	比热容 C_P/kJ·kg^{-1}·℃$^{-1}$	热导率 λ/W·m^{-1}·℃$^{-1}$	潜热 l_E/kJ·kg^{-1}
ABS	1040	1.47	0.22	
PS	1050	1.40	0.15	
CA	1290	1.51	0.15	
POM	1415	1.47	0.18	163
PMMA	1185	1.44	0.17	
PA66	1140	1.67	0.21	130
PAl2	1015	1.26	0.21	130
PC	1175	1.21	0.17	
LDPE	920	2.09	0.34	130
HDPE	950	2.20	0.35	243
PP	905	1.90	0.18	180
PSF	1240	1.30	0.23	
RPVC	1400	1.18	0.17	
PA66 +30% GF	1380	1.26	0.50	

2）喷嘴传给模具的热量 Q_z（kJ/h）

$$Q_z = 3.6A_o\alpha(T_{1max} - T_{2m})k_c \tag{11-12}$$

式中 T_{2m}——模具的平均温度（℃）；

α——钢的传热系数，$\alpha = 139.56$W/（m^2·℃）；

k_c——加料方式系数。固定加料 $k_c = 1$；前加料 $k_c = 0.6$，后加料 $k_c = 0.4$；

A_o——喷嘴与模具的接触面积（m^2）。建议 2kg 注射机的接触面半径 $r = 4 \times 10^{-2}$m；125g 注射机的 $r = 2 \times 10^{-2}$m，10g 注射机的 $r = 2 \times 10^{-3}$m。

（2）自然冷却散失的热量

1）模具由于空气对流所散发的热量 Q_c（kJ/h）

$$Q_c = 4.1868\left(0.25 + \frac{360}{T_{2m} + 300}\right)(A + A_i\tau)(T_{2m} - T_o)^{\frac{4}{3}} \tag{11-13}$$

式中 T_o——车间室温（℃）；

A——模具的四个侧面积（m^2）；

A_i——模具的两个对合面积（m^2）；

T_{2m}同式（11-12）

τ——开模率。

$$\tau = \frac{t_e - t_{co}}{t_e} \tag{11-14}$$

式中　t_e——注射成型周期（s）；

t_{co}——模具闭合时间，等于前述注塑件冷却时间 θ 和充模时间之和（s）。

2）模具由于热辐射所散发的热量 Q_R（kJ/h）

$$Q_R = 20.767A\varepsilon\left[\left(\frac{273+T_{2m}}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+T_o}{100}\right)^4\right] \tag{11-15}$$

式中　ε——辐射率模具表面磨光 $\varepsilon = 0.04 \sim 0.05$；模具表面为机加工 $\varepsilon = 0.50 \sim 0.80$；表面发黑 $\varepsilon = 0.9$。

A、T_{2m}、T_o 同式（11-14）

3）模具传导给注射机台面的热量 Q_L（kJ/h）

$$Q_L = 3.60\alpha A_1(T_{2m} - T_o) \tag{11-16}$$

式中　A_1——模具与注塑机台面的两个接触底面积（m^2）；

T_o——注射机的台面温度，等于或略高于车间室温（℃）；

α——传热系数［W/（m^2 · ℃）］。普通钢 $\alpha = 140$；合金钢 $\alpha = 105$；铜合金 $\alpha = 163$。

当模具与注射机台面使用隔热垫，则用 α' 代入上式，其

$$\alpha' = \frac{\alpha}{1 + \dfrac{\delta_s\lambda_m}{L_m\lambda_s}} \tag{11-17}$$

式中　α——模具材料传热系数［W/（m^2 · ℃）］；

δ_s——隔热材料厚度（m）；

λ_s——隔热材料的热导率［W/（m · ℃）］。石棉 $\lambda_s = 0.16 \sim 0.9$W/（m · ℃）；硬橡胶 $\lambda_s = 0.15$W/（m · ℃）；

L_m——模具总高度的一半（m）；

λ_m——模具材料的热导率［W/（m · ℃）］，见前表 11-4。

（3）从模具中携走的热量

从以上分析可知，冷却液从模具中携走的热量为

$$Q = (Q_i + Q_z) - (Q_c + Q_R + Q_L) \tag{11-18}$$

根据模具的工作实际，Q 应由凹模冷却系统携走热量 Q_G 和凸模冷却液携走热量 Q_K 所组成

$$Q = Q_G + Q_K$$

至于 Q_G 和 Q_K 的分配，理论上则需以注塑件壁厚的中性面作为凹模和凸模分界面，分别计算凹模和凸模所承担固化的塑料量，从而计算出传导进凹、凸模的热量。又根据注塑件对凹模与凸模的接触面，分别计算自然散失的热量。如果注塑件结构较为复杂，有加强肋或凸起部分，应酌情分配。但此方法较为繁琐。在工程实际中认为，凸模储存热量较多且散热条件差，凸模需强化冷却，因此近似处理为

$$Q_G = 0.4Q \qquad Q_K = 0.6Q \tag{11-19}$$

2. 冷却回路计算

与前述简化计算的区别在于考虑到模具金属材料的热阻、冷却水孔壁的传热系数、

冷却水的流动状态和水压的校核。这对于大型注射模设计计算尤其必要。

（1）模具热阻计算 由于在金属材料中存在有热阻 R，模具型腔壁的平均温度 T_{3m} 高于水孔管壁的平均温度 T_{4m}。对照图 11-12，尺寸 A 和 B 组成的管道有效面积为具有温度 T_{4m} 的冷却面。尺寸 a 和 b 所围的是对应的被冷却的型腔壁面，为具有温度 T_{3m} 的热表面。两表面之间距离为 h。该模型热阻的计算式为

$$R=\frac{1}{\lambda}\left[\frac{2.3h}{(A-a)b-(B-b)a}\right]\lg\left(\frac{A}{a}\right)\left(\frac{b}{B}\right) \qquad (℃/W) \qquad (11\text{-}20)$$

具有 $A/B=a/b$ 或近似有这种位置关系，故有

$$R=\frac{2.3h}{\lambda aB} \qquad (11\text{-}21)$$

对于圆柱高型芯，采用中央孔壁冷却，则有

$$R=\frac{2.3}{2\pi\lambda L_c}\lg\left(\frac{d_2}{d_1}\right) \qquad (11\text{-}22)$$

式中 L_c——型芯长度（m）；

d_1——型芯内径（m）；

d_2——型芯外径（m）；

λ——模具材料的热导率［W/(m·℃)］，可查表 11-4。

对于注射模的实际冷却系统，常用若干个冷却管道与型腔壁相互作用，则由每个冷却孔与对应型腔壁的单个热阻 R_i，按并联原则计算总热阻

$$\frac{1}{R}=\sum\frac{1}{R_i} \qquad (11\text{-}23)$$

已知冷却水应携走热量 Q 和热阻 R，可得冷热表面之间温差。在冷却系统计算中，已知型腔壁 T_{3m} 来获得冷却管壁 T_{4m}，又有 $W=3.6\text{kJ/h}$。故有换算关系

$$T_{4m}=T_{3m}-Q(0.278R) \qquad (11\text{-}24)$$

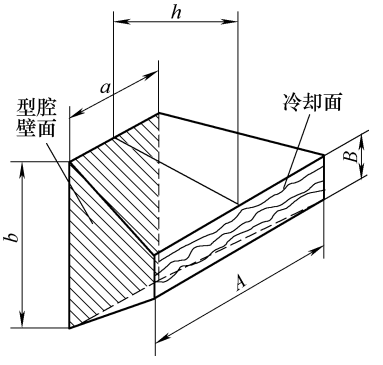


图 11-12 型腔壁面与冷却面间热阻抗示意图

在冷却过程中注塑件温度 T_1 和模具型腔壁的温度 T_3 是变量，这是因为注射过程的周期性。每周期中的各时间 t 的（T_1-T_3）的差值是不相等的，因此必须用（T_1-T_3）$_m$，即这些（T_1-T_3）温度差的平均值来表征注塑件与型腔壁间的温度差的程度。冷却过程中，冷却水携走热量 Q 与这个温差（T_1-T_3）$_m$。有如下关系

$$Q=3.6\alpha' A_f\tau'(T_1-T_3)_m \qquad (11\text{-}25)$$

式中 A_f——注塑件与型腔壁的接触面积，对应上述 Q_C 和 Q_K 有 A_C 和 A_K，分别为成型件与凹模和凸模型腔壁的接触面积（m^2）；

τ'——闭模传热效率；对注射周期 t_e、充模时间 t' 和冷却时间 t 有

$$\tau'=\frac{t'+t}{t_e} \qquad (11\text{-}26)$$

α'——注塑件与模具型腔壁之间的表面传热系数，取 $\alpha'=430\text{W}/(\text{m}^2\cdot℃)$。

据传热学原理，由平均温差 $(T_1-T_3)_m$ 可求得模具型腔壁的平均温度 T_{3m}，见图 11-13。一个高温物体与另一个低温物体进行热交换时，可以应用对应温度平均值求得平均的温度差

$$(T_1-T_3)_m=\frac{0.4343[(T_{1max}-T_{3min})-(T_{1min}-T_{3max})]}{\lg\left(\dfrac{T_{1max}-T_{3min}}{T_{1min}-T_{3max}}\right)} \tag{11-27}$$

冷却系统计算中的各种温度的关系如图 11-14 所示。T_{1max} 和 T_{1min} 为注塑件的最高和最低温度。T_{3max} 和 T_{3min} 为在一个注射成型周期中型腔壁的最高和最低温度。可由图 11-13 中的纵轴 $(T_{1max}-T_{3min})$ 和横轴 $(T_1-T_3)_m$ 的交点，找到差值 $T_{1min}-T_{3max}$。在设定温度时，必须使 $T_{1min}>T_{3max}$。由图 11-13 上获知 T_{3max}，计算得 T_{3m}，代入式（11-24）可得管壁 T_{4m}。

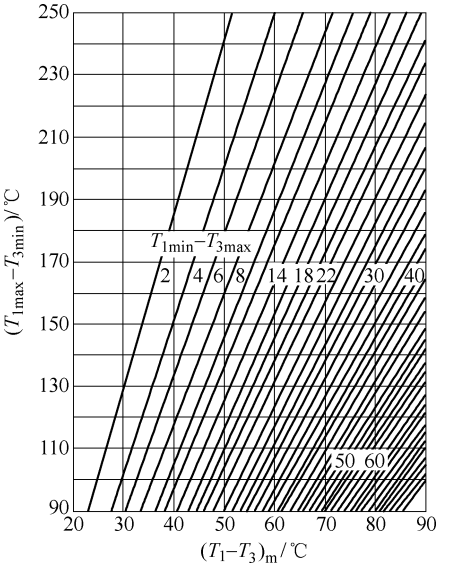


图 11-13　$T_{1max}-T_{3min}$ 与 (T_1-T_3) $(T_{1min}-T_{3max})$ 线图

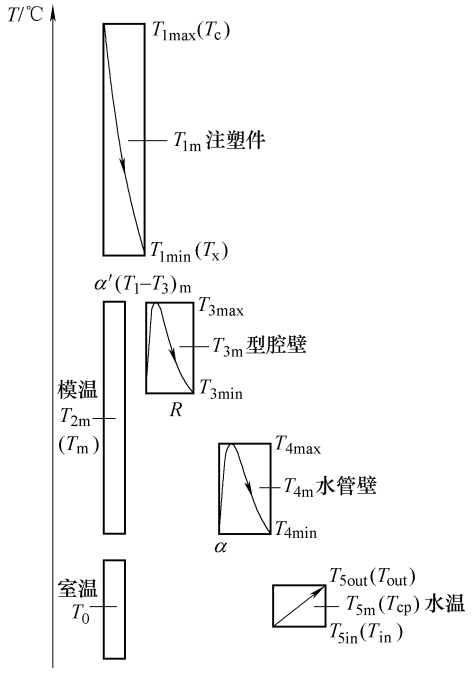


图 11-14　冷却系统计算中各种温度的关系示意图

（2）表面传热系数计算　冷却水孔壁与冷却水界面热对流的表面传热系数 α，可根据化工原理中低黏度流体的强制湍流状态计算

$$\alpha=0.023\frac{\lambda}{d}\left(\frac{v\rho d}{\mu}\right)^{0.8}\left(\frac{C_w\mu}{\lambda}\right)^{0.4}=0.023\frac{\lambda}{d}Re^{0.8}P^{0.4}r \tag{11-28}$$

式中　α——冷却水界面的表面传热系数［$\text{W}/(\text{m}^2\cdot℃)$］；

ρ——冷却水在一定温度下的密度（kg/m^3）；

v——冷却水流速（m/s）；

λ——冷却水在一定温度下的热导率［W/（m·℃）］；

C_w——冷却水在一定温度下的比热容［J/（kg·℃）］；

μ——冷却水在一定温度下的黏度（N·s/m^2）；

Pr——普朗特数，表征物理性能影响；

Re——雷诺数，确定流动状态。

由于ρ、λ、C_w、μ和Pr均为温度的函数，定性温度取冷却液进出口温度的算术平均值，在常温常压下可查表11-6。

表11-6 水的物理性质

温度 T/℃	密度 ρ/kg·m^{-3}	比热容 C_w/J·kg^{-1}·℃$^{-1}$	黏度 μ/N·s·m^{-2}	热导率 λ/W·m^{-1}·℃$^{-1}$	Pr
0	999.9	4225	0.001790	0.558	13.55
5	1000.0	4206	0.001519	0.568	11.25
10	999.7	4194	0.001305	0.577	9.49
15	999.1	4186	0.001140	0.587	8.13
20	998.2	4181	0.001001	0.597	7.01
25	997.1	4178	0.000894	0.606	6.16
30	995.7	4176	0.000801	0.615	5.44
35	994.1	4175	0.000723	0.625	4.83
40	992.2	4175	0.000653	0.633	4.31
45	990.2	4176	0.000599	0.640	3.91
50	998.1	4177	0.000549	0.647	3.54
55	985.7	4178	0.000506	0.652	3.24
60	983.2	4177	0.000471	0.658	2.99
65	980.6	4175	0.000436	0.663	2.75
70	977.8	4186	0.000406	0.668	2.54
75	974.9	4189	0.000380	0.671	2.37

对于非圆形断面水孔，可以当量半径计算

$$d_e = \frac{4S}{C} \quad (\text{m}) \tag{11-29}$$

式中 S——冷却水孔截面积（m^2）；

C——冷却水孔周长（m）。

（3）冷却水孔表面积计算 由牛顿冷却定律可知，单位时间内模具给予冷却水的热量

$$Q = 3.6\alpha\varphi(T_{4m} - T_{5m}) \quad (\text{kJ/h}) \tag{11-30}$$

式中 φ——所需冷却水管表面积，指有效传热面积（m^2）；

T_{4m}——冷却孔壁的平均温度（℃）；

T_{5m}——冷却水的平均温度（℃）；

α——表面传热系数［W/（m^2 · ℃）］。

携走热量 Q 在许多模具中分别对凹模 Q_C 和凸模 Q_K 计算。对多数圆孔管道的传热面积

$$\varphi = \pi dL$$

所以，用式（11-30）所需冷却水管表面积 φ，可求得冷却管道的长度 L（m）。

冷却水的平均温度 T_{5m}，由进水温度 T_{5out} 和出水温度 T_{5out} 确定，$T_{5m} = 0.5(T_{5in} + T_{5out})$。

进水温度由工艺控制要求设定，（$T_{out} - T_{5in}$）值必须作限制，并用来计算所需冷却水流量。因此，由传热学理论

$$Q = 3600\left(\frac{\pi d^2}{4}\right)vC_w\rho(T_{5out} - T_{5in}) \qquad (kJ/h)$$

得到温差

$$T_{5out} - T_{5in} = \frac{Q}{900\pi d^2 C_w \cdot \rho \cdot v} \qquad (11\text{-}31)$$

式中，ρ（kg/m^3）、C_w（kJ/kg · ℃）应根据平均水温 T_{5m}，查表 11-6 代入。v 为管中冷却水流速（m/s），Q 以（kJ/h）单位代入。相对应的体积流量

$$V = \frac{Q}{C_w\rho(T_{5out} - T_{5in})} \qquad (11\text{-}32)$$

（4）冷却参数校核计算

1）湍流校核。

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} \geqslant (6000 \sim 10000)$$

该雷诺数 Re，用平均水温 T_{5m} 查表 11-6，以流速 v（m/s）、管径 d（m）、密度 ρ（kg/m^3）、黏度 μ（N · s/m^2）计算之。尚须分别对凹模和凸模的冷却系统流动状态分别校核。

2）模内冷却水压降校核。工艺控制的进水压力必须保证高于管道内水压降 ΔP。ΔP 可根据流体力学公式计算

$$\Delta P = 32\mu v(L + L')d^{-2} \qquad (Pa) \qquad (11\text{-}33)$$

式中，μ（N · s/m^2）为 T_{5m} 下的黏度，查表 11-6。管长 L（m）和管径 d（m）及流速 v（m/s）为已知。L'是由于冷却回路孔径变化或改向而引起局部阻力的当量长度（m）。其值由表 11-7 中的管径 d 的倍数折算得。

表 11-7　当量长度 L'

湍流状态	45°转弯	90°转弯	180°U 形弯头	三通改向
L'/m	15d	30d	60d	(60 ~ 90)d

［例］有一用 HDPE 生产筐篓的注射模。其制品尺寸与结构如图 11-15 所示。已知制品壁厚为 2mm，且四侧面均有 30% 的网孔。试设计该模具的冷却系统，分别求

出所需冷却孔直径 d，传热面积 φ，冷却回路长度 L；并校验此冷却回路是否处于湍流状态。

［解］该注射模冷却系统设计有以下结果。

1）注塑件质量和注射周期计算。

大侧面积　$2\times42.5\times20=1700\ (\mathrm{cm^2})$

小侧面积　$2\times27.5\times20=1100\ (\mathrm{cm^2})$

底面积　$40\times25=1000\ (\mathrm{cm^2})$

由此得制品质量［$(1-0.3)(1700+1100)+1000$］$\times0.2\times0.96\mathrm{g}=568\mathrm{g}$ 加上浇注系统凝料，每次注射量 $G=0.65\mathrm{kg}$。

所需冷却时间由式（3-23），板件 $H=2\mathrm{mm}$，$T_c=230℃$，$T_m=60℃$。得

$$t=0.7998\times2^2\left(\frac{230+28.9}{185.6-60}\right)\mathrm{s}=6.6\mathrm{s}$$

取冷却时间 $t=10\mathrm{s}$，充模时间 $t'=3\mathrm{s}$，模具闭合时间 $t_{co}=13\mathrm{s}$，注射成型周期 $t_e=20\mathrm{s}$。

由此得每小时注射次数 $n=3600/20=180$ 次。

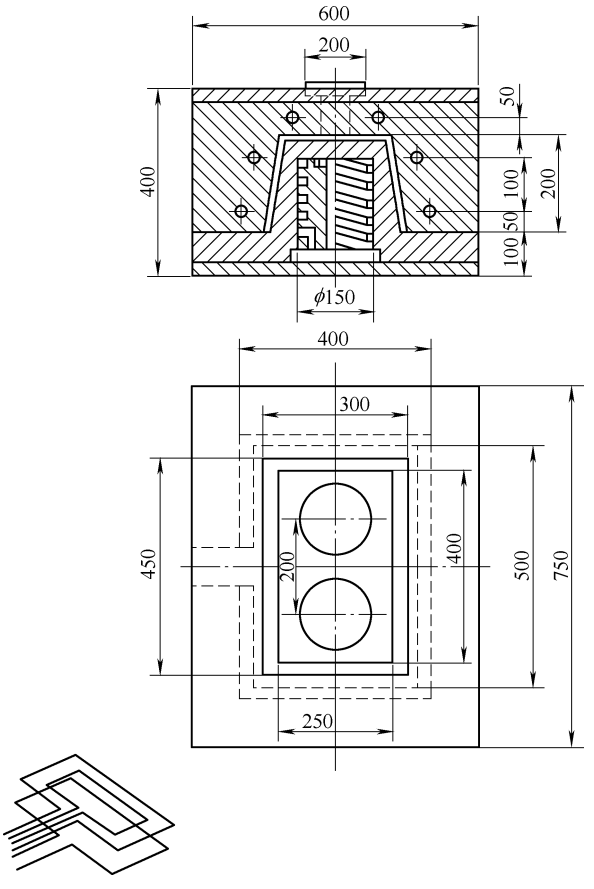


图 11-15　筐篓注射模

2）确定凹模和凸模冷却系统各需携出热量。查表 11-5，$C_P=2.2\mathrm{kJ/(kg\cdot℃)}$，$l_E=243\mathrm{kJ/kg}$。拟定 $T_{1max}=T_c=230℃$，$T_{1min}>T_m$，$T_{1min}=76℃$。由式（11-11）有

$$Q=180\times0.65[2.2(230-76)+243]\mathrm{kJ/h}=68070\ \mathrm{kJ/h}$$

由图 11-15 得模具四侧面积 $A=1.08\mathrm{m^2}$，两对合面积 $A_i=0.9\mathrm{m^2}$。又 $t_e=20\mathrm{s}$，$t_{co}=13\mathrm{s}$，代入式（11-14）得开模率 $\tau=(20-13)/20=0.35$。

由式（11-13），代入模具平均温度 $T_{2m}=T_m=60℃$，室温 $T_0=20℃$。得空气对流散发的热量

$$Q_C=4.1868\left(0.25+\frac{360}{60+300}\right)(1.08+0.9\times0.35)(60-20)^{\frac{4}{3}}\mathrm{kJ/h}=1000\mathrm{kJ/h}$$

由式（11-15），模具表面磨光时 $\varepsilon=0.05$，得模具辐射所散发热量

$$Q_R = 20.767 \times 1.08 \times 0.05\left[\left(\frac{273+60}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+20}{100}\right)^4\right]\text{kJ/h} = 55\text{kJ/h}$$

再由模具两个底面积 $A_i = 0.9\text{m}^2$，钢模具传热系数 $\alpha = 140\text{W/(m·℃)}$，代入式（11-16）得模具向注射机台面的传热量

$$Q_L = 3.60 \times 140 \times 0.9(60-20)\text{kJ/h} = 18144\text{kJ/h}$$

略去喷嘴向模具的传热，由式（11-18）可得冷却液应从模具中携走的热量

$$Q = 68070 - (1000 + 55 + 18144)\text{kJ/h} = 48871\text{kJ/h}$$

由于此注塑件轮廓简单，按式（11-19）近似处理为凹模与凸模所携走热量分别为

$$Q_G = 0.4 \times 48871\text{kJ/h} = 19600\text{kJ/h}$$

$$Q_K = 0.6 \times 48871\text{kJ/h} = 29300\text{kJ/h}$$

3）冷却回路计算。先计算凹模的冷却系统，冷却孔位置和孔径初定后，由式（11-23）得

$$\frac{1}{R_G} = 4\left(\frac{\lambda}{1.15} + \frac{\lambda}{1.44}\right) + 2\left(\frac{\lambda}{0.92}\right) = 8.43\lambda$$

此三项热阻抗分别用式（11-21）计算，其中 $h = 0.05\text{m}$。第一项为大侧面 $B = 0.5\text{m}$，$a = 0.2\text{m}$，得 $R_1 = 1.15℃/\text{W}$。小侧面 $B = 0.4\text{m}$，$a = 0.2\text{m}$，得 $R_2 = 1.44℃/\text{W}$。顶面 $B = 0.5\text{m}$，$a = 0.25\text{m}$，得 $R_3 = 0.92℃/\text{W}$。再将钢的热导率 $\lambda = 48\text{W/(m·℃)}$ 代入，得凹模热阻抗 $R_G = 2.47 \times 10^{-3}℃/\text{W}$。

由式（11-26）得闭模传热效率 $\tau' = (3+10)/20 = 0.65$。用式（11-25）计算注塑件与型腔间温差平均值。注塑件与凹模型腔的接触面积 $A_G = (0.17 + 0.11 + 0.10)\text{m}^2 = 0.38\text{m}^2$。表面传热系数 $\alpha' = 430\text{W/(m}^2\text{·℃)}$。得凹模温差平均值

$$(T_1 - T_3)_{mG} = \frac{Q_G}{3.6\alpha' A_G \tau'} = \frac{19600}{3.6 \times 430 \times 0.38 \times 0.65}℃ = 51℃$$

HDPE 熔体最高温度 $T_{1max} = 230℃$。设模具 $T_{3max} = 70℃$、$T_{3min} = 50℃$。则 $T_{1max} - T_{3min} = 230 - 50 = 180℃$，与上面解得 $(T_1 - T_3)_{mG} = 51℃$，查图 11-13，得到 $T_{1min} - T_{3max} = 6℃$，由此得知 $T_{1min} = 76℃$。由上 T_{3max} 和 T_{3min}，得模具平均温度 $T_{3m} = 0.5(70+50) = 60℃$。

根据 T_{3m} 可求得水孔壁的平均温度，由式（11-24）

$$T_{4m} = T_{3m} - Q_G(0.278R_G) = 60℃ - 19600(0.278 \times 2.47 \times 10^{-3})℃ = 46.5℃$$

按生产时季节和进水的工艺控制条件，设定进水温度 $T_{5in} = 18℃$，温差控制在 5℃ 左右，出水 $T_{out} = 23℃$，则平均水温 $T_{5m} = 20.5℃$。由此温度，查表 11-6 得 $C_w = 4.181\text{kJ/(kg·℃)}$，$\rho = 998.2\text{kg/m}^3$。由式（11-32）得凹模所需冷却水体积流量

$$V_G = \frac{19600}{4.181 \times 998.2(23-18)}\text{m}^3/\text{h} = 0.939\text{m}^3/\text{h} = 0.0157\text{m}^3/\text{min}$$

查表 11-2，由 V_G 得管道直径 $d = 25\text{mm}$。可代入式（11-5）计算得管内冷却水流速

$$v = 0.0202\left(\frac{0.0157}{0.025^2}\right)\text{m/s} = 0.51\text{m/s}$$

计算冷却管壁的表面传热系数，从表 11-6 中查得 $\lambda = 0.597\text{W/(m·℃)}$，$\mu = 0.001001\text{N·s/m}^2$，由式（11-28）得

$$\alpha = 0.023\frac{0.597}{0.025}\left(\frac{0.51\times998.2\times0.025}{0.001001}\right)^{0.8}\left(\frac{4181\times0.001001}{0.597}\right)^{0.4}\text{W/m·℃}$$

$$= 0.5492\,(12714)^{0.8}\,(7.01)^{0.4}\text{W/m·℃} = 2299[\text{W/(m·℃)}]$$

即可由 Q_G 求出所需冷却水孔表面积 φ_G，将式（11-30）变换成

$$\varphi_G = \frac{Q_G}{3.6\alpha(T_{4m}-T_{5m})} = \frac{19600}{3.6\times2299\,(46.5-20.5)}\text{m}^2 = 0.0911\text{m}^2$$

由此得圆管道长度

$$L_G = \frac{\varphi_G}{\pi d} = \frac{0.0911}{3.14\times0.025}\text{m} = 1.161\text{m}$$

见图 11-15 凹模的冷却水管有三层，总长约 4.6m，能满足要求。

4）校核计算。从以上计算，$T_{5m} = 20.5℃$ 的冷却水雷诺数 $Re = 12714 \geqslant 10^4$，属稳定的湍流状态。

由图 11-14 可知，管道有 12 次 90°转弯。从表 11-7 得当量长度 $L' = 12\times30d = 9\text{m}$。再按式（11-33）代入

$$\Delta P = 32\times0.001001\times0.51\,(1.161+9)\times0.025^{-2}\text{Pa} = 265.6\text{Pa}$$

远小于常用自来水压力。

以相同的方法可计算出凸模冷却系统回路。考虑到需从凸模中带走 $Q_K = 29300\text{kJ/h}$，并装有螺旋式冷却回路的情况。当 $\lambda = 48\text{W/(m·℃)}$，$L_c = 0.25\text{m}$，$d_2 = 0.25\text{m}$，$d_1 = 0.15\text{m}$，代入式（11-22）及式（11-23）得凸模热阻抗 $R_K = 3.36℃/\text{W}$。冷却水孔壁 $t_{4m} = (60-29300\times0.278\times3.36\times10^{-3})℃ = 32.6℃$。凸模所需冷却水流量 $V_K = 14.5\times10^{-3}\text{m}^3/\text{min}$。由此得 $d = 25\text{mm}$ 和 $v = 0.53\text{m/s}$。根据式（11-30）算得所需传热面积 $\varphi_K = 0.33\text{m}^2$。由此计算得 $L_K = 4.16\text{m}$，现螺旋长度 4.7m，符合使用要求。校核计算得雷诺数 $Re = 13250 > 10^4$；凸模回路中水压降 $\Delta P = 208\text{Pa}$，均符合要求。

11.4 加热功率计算

1. 加热装置设计

注射模的加热装置通常采用以下两种形式。

（1）热水或过热水加热　其结构和设计原则与冷却水管道设计无异，只不过将冷却水改为热水或过热水。这对于开车前需要加热、正常生产一段时间后又需要冷却的大型注射模来说尤其方便。模温要求在 80℃以上时，最好使用过热水。热水和过热水加热，可使整个模温分布较均匀，有利于制品质量的提高，但模温调节的滞后期较长。

（2）电热棒加热　可在模具上的适当部位钻孔，将电热棒插入，并接入热电偶，可方便地与温度调节器相连，进行温度自动控制。也有与调压变压器相连，进行人工温度

调节。这种加热系统的结构简单，使用方便，且热损失少，使用普遍。但电热棒加热易产生局部过热现象，在加热装置设计时应充分注意。

2. 加热功率

1）电加热模具或流道板所需总功率［kW］，可按下式计算

$$W=\frac{GC_{\mathrm{P}}(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{o}})}{3600\eta\tau} \tag{11-34}$$

式中　G——模具质量（kg）；

C_{P}——模具材料比热容，碳钢为 0.46kJ/（kg·℃）；

T_{m}——所要求的模具温度（℃）；

T_{o}——室温（℃）；

η——加热器效率，$\eta=0.3\sim0.5$；

τ——加热升温时间（h），一般为 20～30min。

2）电加热模具所需总功率（W）的检验式

$$W\geqslant 0.24G(T_{\mathrm{m}}-T_{\mathrm{o}}) \tag{11-35}$$

3）电加热模具所需总功率（W）的经验式

$$W=Gq \tag{11-36}$$

式中，q（W/kg）是加热单位质量模具至所需温度的电功率，其值可由表 11-8 选取。

表 11-8　不同类型模具 q 值

模具类型	q 值 /（W·kg^{-1}）	
	采用加热棒	采用电热圈
小型	25	40
中型	30	50
大型	35	60

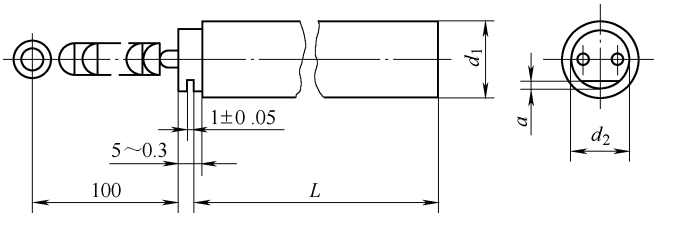
4）所需电热棒根数

$$n=\frac{W}{P_{\mathrm{e}}} \tag{11-37}$$

式中　P_{e}——电热棒额定功率（W）。

电热棒的额定功率及其名义尺寸，可根据模具结构及其所允许的钻孔位置，由表 11-9 选取。

表 11-9　电热棒外形尺寸与功率



（续）

名义直径 d_1/mm	13	16	18	20	25	32	40	50
名义直径允许误差 /mm	±0.1		±0.12			±0.2	±0.3	
盖板 d_2/mm	8	11.5	13.5	14.5	18	26	34	44
槽深 a/mm	1.5	2	3			5		
长度 L/mm	功率 /W							
60^{0}_{-3}	60	80	90	100	120			
80^{0}_{-3}	80	100	110	125	160			
100^{0}_{-3}	100	125	140	160	200	250		
125^{0}_{-4}	125	160	175	200	250	320		
160^{0}_{-4}	160	200	225	250	320	400	500	
200^{0}_{-4}	200	250	280	320	400	500	600	800
250^{0}_{-5}	250	320	350	400	500	600	800	1000
300^{0}_{-5}	300	375	420	480	600	750	1000	1250
400^{0}_{-5}		500	550	630	800	1000	1250	1600
500^{0}_{-5}			700	800	1000	1250	1600	2000
650^{0}_{-6}				900	1250	1600	2000	2500
800^{0}_{-8}					1600	2000	2500	3200
1000^{0}_{-10}					2000	2500	3200	4000
1200^{0}_{-10}						3000	3800	4750

参 考 文 献

[1] 唐志玉．塑料挤塑模与注塑模优化设计［M］．北京：机械工业出版社，2000.

[2] 徐佩弦．塑料制品与模具设计［M］．上海：华东理工大学出版社，2010.

第 12 章　热流道注射模具设计

热流道技术已经是一门成熟注射工艺。热塑性塑料的热流道注射成型，对模具的浇注系统采用加热方法，使塑料熔体始终保持熔融状态，从而避免产生浇注系统凝料。热流道注射模设置电加热器，装备在流道板和喷嘴上，并配有温度控制系统。热流道注射模是无流道凝料注射模中最常见的一种。热固性塑料的无流道凝料注射使用温流道注射模。

12.1　热流道系统和技术

本节初步介绍塑料注射模具中热流道系统的结构和分类；由塑料的流动性和热性能，讨论注射模中采用热流道技术的意义。

12.1.1　典型结构和系统

1. 典型结构

图 12-1 为典型的热流道结构，主要由主流道喷嘴、流道板、分喷嘴、加热和测温元件、安装和紧固零件所组成。图示分喷嘴是开放式的直接喷嘴。

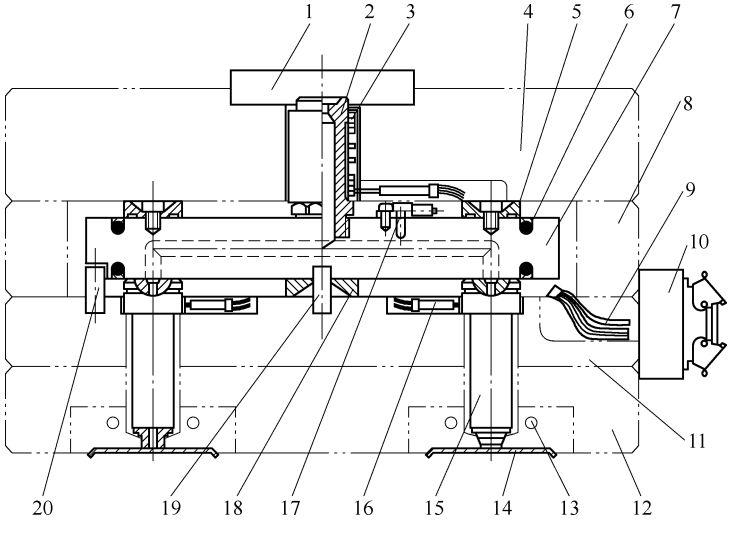


图 12-1　典型的热流道结构

1—中心定位环　2—主流道喷嘴　3—主流道喷嘴的加热器　4—定模固定板　5—承压圈
6—电热弯管　7—流道板（分流板）　8—垫板　9—耐温导线　10—接线盒
11—定模夹板　12—定模板　13—冷却水孔　14—注塑件　15—分喷嘴
16—喷嘴加热器　17—流道板测温热电偶　18—支承垫　19—中心定位销　20—止转销

图 12-1 所示的主流道喷嘴 2 的功能，与冷流道浇注系统主流道的相同。但它有电加热线圈和热电偶测温。中心定位环 1 的外径，与注射机上定模板定位孔相配。定位环内孔与主流道喷嘴的定位轴段紧配。主流道喷嘴入口的凹坑和孔径，必须与注射机喷嘴的凸球和孔径相配。图 12-1 所示主流道喷嘴，用螺纹与流道板 7 联接。热流道喷嘴系统的安装过程，可见图 12-2。图 12-2 上流道板安装有四个分喷嘴。此外，还有一种没有流道板、直接成型注塑件的主流道单喷嘴，如图 12-3 所示。

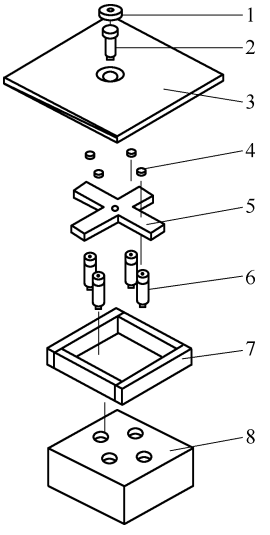


图 12-2　热流道注射模安装示意图

1—中心定位环　2—主流道喷嘴
3—定模固定板　4—承压圈
5—流道板　6—喷嘴
7—垫板　8—定模板

流道板应该具有良好的加热和绝热设施，保证电加热效率和温度控制有效。图 12-1 所示流道板上，在双平面上嵌装了金属管状电热弯管 6。它的热量通过流道板金属间接地传导给流道中的塑料熔体；并安装了测温热电偶 17。流道板悬置于定模板与垫板构成的模框中，利用空气绝热。

热流道板根据浇口数目和位置，可以用一字、H 和 X 等各种外形。它要承受流道高压熔体的作用力和各喷嘴的热膨胀，要求它有足够的刚度。流道常用圆形截面。流道转折处应圆滑过渡，防止熔体滞留。喷嘴与流道板的连接应可靠地防止塑料熔体泄漏。

热流道喷嘴的通道直径，应与流道板上流道直径相配。流道板上的流道直径稍大（1mm）。喷嘴的流道入口有斜角过渡。喷嘴浇口的设置方法有两种，一种是制造在喷嘴壳体的末端，供应商提供的喷嘴上有浇口套，如图 12-1 所示。另一种将浇口孔是做在定模板上，或把浇口套装嵌在定模上。浇口的类型，主要有两类，主流道型的直接浇口，简称直浇口如图 12-1 上所示。另一类是顶针式浇口。与冷流道系统的点浇口相比，进入喷嘴末端点浇口的熔体温度较高。塑料熔体的剪切速率过大，会有降解的危险，对于喷嘴上浇口直径应慎重考虑。所有的喷嘴必须安装有热电偶，每个喷嘴都有加热和温度调节系统。喷嘴里较多用线圈加热器，不但要求元件能等温均衡地加热熔体，而且喷嘴与冷模具之间要绝热。

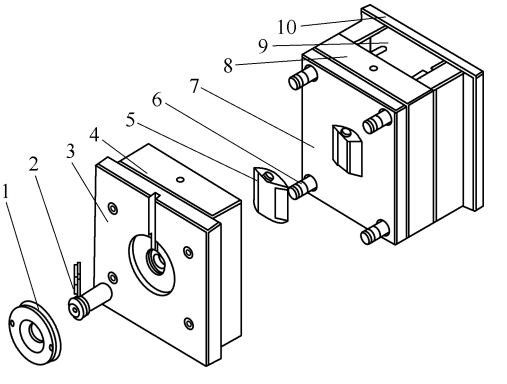


图 12-3　主流道单喷嘴的应用

1—定位环　2—主流道单喷嘴　3—定模固定板
4—定模板注塑件　6—导柱　7—动模板
8—动模垫板　9—脱模机构　10—动模固定板

2. 技术分析

（1）技术优势　热流道系统技术有三方面优势。

1）因为流道凝料不需要脱模，整个注射过程可实现自动化，可以无假日地长时期连续生产。流道中的塑料保持熔融状态，能减少所需的注射和保压时间，缩短注射操作循环中的开模行程，消除为了取出流道凝料耗费的时间。应用热流道注射模的大批量生产，通过缩短注射周期和强化自动化操作，可提高产量。

2）流道中高温熔融的塑料物料有利于压力传递，流道中的压力损失较小，使得长流程流道成为可能；也使得长流程的大尺寸注塑件成型成为可能。对一模多型腔注射模，保证了生产注塑件密度和收缩的一致性，提高了注塑件的精度；保压时间更长且有效，可减小塑料制件的收缩率。

3）减少或消除主流道和分流道废料，降低了材料成本，不但节约了原材料，还节省了对废料处理的工作，削减了废料的回收、分类、粉碎、干燥和贮存工作，可减少粉碎机的数量，节省劳动力，降低能量消耗，节约所需的生产场地；避免了因使用回头料对注塑件质量的影响。对于一模多腔注射小型制品，浇注系统的体积越发达，原材料节约越明显。

热流道系统技术充分发挥节约原材料和改善注射工艺的优势，降低了成本。可抵消热流道注射模等装备的较昂贵投资。发挥热流道生产技术优势，还需要实际生产技术条件的保证。

（2）使用条件分析　决定是否采用热流道，需讨论注射模上使用热流道生产注塑件的可行性。

1）热流道技术的弊端：

① 熔体在长路径的流道中停留时间过长，尤其是在较长注射周期的情况下，给热敏性塑料带来热损害。

②没有精确的温度控制会引起熔体材料的温度差异，从而导致塑料熔体非均匀填充。

热流道注射成型是综合性强、难度较高的技术。要长期稳定地生产，涉及模具设计、制造水平、注射工艺规范和热工仪表自动控制等多方面的因素，不仅对热流道技术装备，而且对从业人员的素质和水平有较高的要求。

热流道技术的装备（流道板、喷嘴和温度调节器等）质量要求高，设计和制造困难，现在都由专门的供应商提供，不再由模具制造企业自行制造。

2）热流道技术的局限性：

① 使用热流道时，对塑料品种有选择和限制。不同的塑料品种必须使用不同的喷嘴。新的塑料品种必须设计制造新的喷嘴，并经过试验。注射生产中着色塑料的更换是困难和费时的，所应用的流道板和喷嘴应有专门的设计。

② 热敏性塑料有更大的烧损危险。在注射料筒中塑化后，必须防止在热流道中过热。一些热流道系统里的“死点”使塑料停滞，并有分解危险。在考虑加工 PVC、高温塑料和添加阻燃剂的塑料时，应多权衡使用热流道的利弊。

③ 原材料的机械杂质会造成浇口堵塞。为防止堵塞，要在主流道喷嘴或主流道杯里装上过滤网。

④ 热流道系统使用结果是模具高度增加，注意它会超过所使用注射机的允许尺寸。

⑤ 充分发挥热流道系统生产优势，先决条件是注射机和模具的自动化连续操作，要求直到维修或休长假时才中断生产，进行所需的热流道清理。

⑥ 操作的员工需要有一定的操作经验，来避免浇口流涎或喷嘴的泄漏。

3. 热流道系统

热流道注射模用于生产塑料制品，需要昂贵的费用和高难度的技术。模具生产企业在启动设计制造前必须进行可行性研究。在给定的生产经营和技术环境条件下，对某个塑料制品是否采用热流道技术的分析判断，不仅需要测算经济成本，权衡生产管理水平，还要考虑制品生产的质量，考虑模具和注射机等的技术条件，考虑注射点、加热方式、流道板、喷嘴和浇口的选择。可行性研究步骤如图 12-4 所示。经济条件和技术条件的分析，应与热流道系统的初步设想相结合，两者相辅相成不可分割。

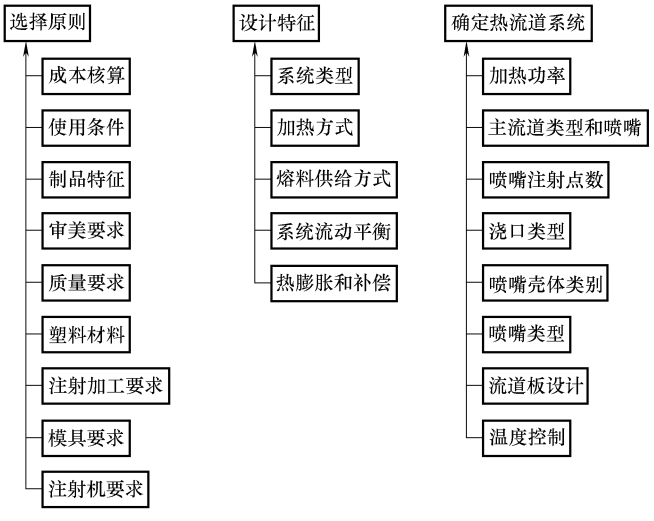


图 12-4　热流道注射模可行性研究的过程

热流道系统的分类方法有两种。一种是按加热方式分为外加热、内加热和绝热。目前，很少见到内加热和绝热，常见的是外加热；另一种是按熔体的传输方式分类。在对热流道系统作经济条件分析之前，要对系统的熔体传输方式有所了解。

按塑料熔体传输方式主要可分为两大类。一类为主流道单喷嘴注射成型，它属于最简单的热流道浇注，没有流道板；另一类为有流道板和分喷嘴的注射成型。

主流道单喷嘴大致有图 12-5 所示的五种熔体浇注方案。

单个主流道喷嘴替代原主流道杯的定位环和主流道衬套的功能。主流道喷嘴可以是直接浇口，也可以是顶针式浇口或针阀式浇口。在冷流道系统里，凝固主流道的塑料，需较长的注射成型周期，且主流道的根部的塑料会有凹陷和气泡。主流道单喷嘴使用顶

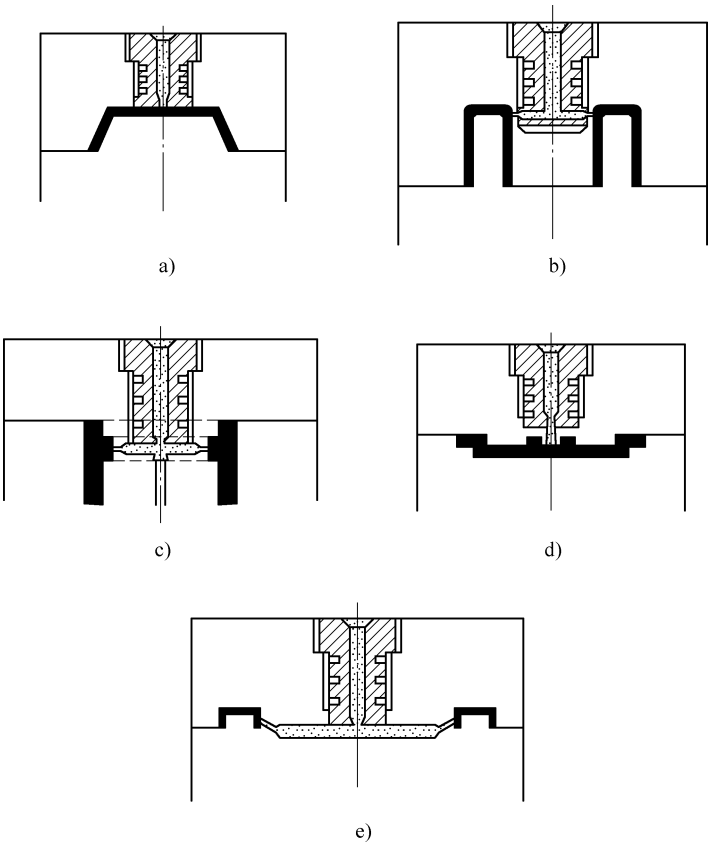


图 12-5　主流道单喷嘴的浇注

a）正面　b）对多型腔的侧面　c）、d）在单型腔中进入冷流道
e）在多型腔模具中进入冷流道

针式浇口或针阀式浇口，可避免浇口凝料的切割。

图 12-5a 所示的主流道单喷嘴的注射点在注塑件的正面。图 12-5b 单喷嘴的多点注射的边缘式浇口，能将塑料熔体传输给几个型腔。但它的应用受到注塑件形状的限制。

图 12-5c 和 12-5d 都是单型腔注射模具，能保证制品外表没有浇口痕迹。这两种情况在位置允许时，都可以用带有直接浇口的主流道喷嘴。图 12-5c 所示的注塑件有个中央孔。塑料熔体从主流道喷嘴的直接浇口射出，再经冷流道和边缘式浇口注入成型型腔。图 12-5d 所示是盘状或平板制件，倒置后用直接浇口浇注。

图 12-5e 是多腔模具中的热流道和冷流道的混合应用。在冷流道分流后用潜伏式的点浇口注射，可自动剪断后脱模，并采用了简单的二板模结构。此图与图 12-5b、图 12-5c 说明在型腔的注射体积或形状不能采用主流道单喷嘴时，应用热流道与冷流道组合方式，可扩大热流道的应用范围。这种组合方式，与热喷嘴浇注相比，冷浇口附近的

注塑件材料质量较好些。

图 12-6 为塑料熔体由主流道喷嘴流经流道板下的分喷嘴，有六种传输方式。可简称为热流道板的喷嘴浇注或间接的喷嘴浇注。主流道喷嘴成为热流道通道的上游部分，已经没有了浇口的功能，但仍有在注射机上定位并与注射机喷嘴匹配的功能。可能时，它只需绝热而不加热，需要时它可加上过滤网。

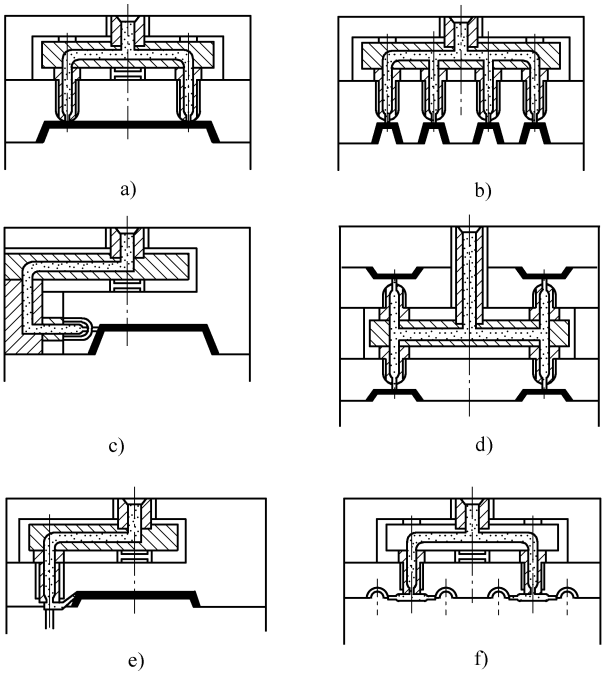


图 12-6　热流道板的喷嘴浇注

a）单型腔模具中多点正面浇注　b）多型腔模具中的正面浇注
c）单型腔模具中的侧面浇注　d）叠层模具的正面浇注
e）单型腔模具中侧面进入冷流道浇注
f）多型腔模具中进入冷流道浇注

图 12-6a 是多点注射的单型腔热流道板的喷嘴浇注，用于大型注塑件。这些注塑件的流程与壁厚之比很大。为了减小充模期间沿程的压力损失，避免增加壁厚，也为了在保压阶段有更好的压力传递，此种热流道系统使模具简化成二板模，缩短了注射周期。

图 12-6b 是多型腔顶端浇注的热流道板和喷嘴传输、注塑件正面布置的顶针式或针阀式浇口，对需中央顶端位置浇注的中小型注塑件，可应用这种塑料熔体的传输方式。因为它避免了冷流道系统所需的双分型面，所以应用越来越多，且首先被系列化和标准化。

图 12-6c 是单型腔模具的侧面浇注，可保证制件表面美观。浇口在开模时侧向剪断，但技术要求严格，模具相对昂贵。

图 12-6d 是在叠层注射模具里，注塑件被正面浇注。图示为该热流道系统的熔体传

输方式。它有两个甚至更多的分型面，应用于成型大批量的浅薄的小制件。它成倍地提高了型腔数，需要较长的开模和闭模时间。生产率提高约 80%，但锁模力只增加 15%。

图 12-6e 是单型腔模具的流道板喷嘴，经冷流道的侧向浇注。塑料熔体经流道板和喷嘴，引入到型腔的侧面，再经冷流道，由边缘式浇口或潜伏式浇口注入，可减小浇口附近的应力集中、流动痕和制件的翘曲。

图 12-6f 是多型腔热流道注射模具，经冷流道的传输，具有多浇口的熔体浇注方式，适用于小型制件，且型腔数更多，较经济地让一个热流道喷嘴传输几个型腔。热流道与冷流道系统混合应用，除经济上降低热流道器件的花费外，还可简化热流道喷嘴浇口区域的温度控制，且能够捕获料流前锋的冷料。

12.1.2　塑料材料的影响

没有一种热流道系统能适用于所有塑料材料和所有种类的注射制品。专用的热流道系统可能对某种热塑性塑料是适合的，但并不一定能适用于另一种塑料。因为热流道系统的操作还进一步取决于众多因素，例如熔料温度、模具温度、注射量、注射速率和流程长度、模具型腔形状和塑料的着色。对热敏性的塑料、对剪切敏感的塑料、具有阻燃添加剂的塑料，有纤维增强的塑料存在某些应用的限制。

1. 加工温度范围

无定形塑料、结晶型塑料、热塑性弹性体的热状态转化的性能不同，所以考虑热流道系统的喷嘴、流道和浇口的加热的准则也有区别。

1）表 12-1 推荐了热流道技术的实际加热温度范围。

表 12-1　热流道技术的实际加热温度范围

	塑料名称	温度/℃			
		代号	喷嘴	模具	状态变化
无定形	聚苯乙烯	PS	160～230	20～60	90
	高抗冲聚苯乙烯	HIPS	160～250	20～60	85
	苯乙烯－丙烯腈共聚物	SAN	200～260	40～80	100
	丙烯腈－丁二烯－苯乙烯共聚物	ABS	180～260	40～85	105
	硬聚氯乙烯	硬 PVC	160～180	20～60	80
	软聚氯乙烯	软 PVC	150～170	20～40	55...75
	乙酸纤维素	CA	185～225	30～60	100
	乙酸丁酸纤维素	CAB	160～190	30～60	125
	丙酸纤维素	CP	160～190	30～60	125
	聚甲基丙烯酸甲酯	PMMA	220～250	60～110	105
	聚苯醚	PPO	245～290	70～120	120...130
	聚碳酸酯	PC	290～320	60～120	150
	聚芳酯	PAR	350～390	120～150	190
	聚砜	PSU	320～390	10...160	200
	聚醚砜	PES	340～390	120～200	260
	聚醚酰亚胺	PEI	340～425	100～175	220...230
	聚酰胺－酰亚胺	PAI	340～360	160～210	275
	无定形聚酰胺	PA	260～300	70～100	150...160

（续）

	塑料名称	温度/℃			
		代号	喷嘴	模具	状态变化
结晶型	低密度聚乙烯	LDPE	210～250	20～40	105...115
	高密度聚乙烯	HDPE	250～300	20～60	125...140
	聚丙烯	PP	220～290	20～60	158...168
	聚酰胺46	PA46	210～330	60～150	295
	聚酰胺6	PA6	230～260	40～100	215...225
	聚酰胺66	PA66	270～295	50～120	250...265
	聚酰胺610	PA610	220～260	40～100	210...225
	聚酰胺11	PA11	200～260	40～100	180...190
	聚酰胺12	PA12	200～250	40～100	175...185
	共聚甲醛	POM	185～215	80～120	165...175
	聚对苯二甲酸乙二醇酯	PET	260～280	50～140	255...258
	聚对苯二甲酸丁二醇酯	PBT	230～270	40～80	220...225
	聚苯硫醚	PPS	300～360	20～200	280...288
	全氟链烃乙烯基乙烯共聚物	PFA	350～420		300...310
	全氟(乙烯-丙烯)共聚物	FEP	340～370	150～200	285...295
	乙烯-四氟乙烯共聚物	PTFE	315～365	80～120	270
	聚偏二氟乙烯	PVDF	220～300	70～90	171
	聚醚酮	PEK	400～430	150～180	365
	液晶聚合物	LCP	280～450	30～160	270...380
热塑性弹性体	热塑性聚酰胺弹性体	TPE-A	220～260	20～50	
	热塑性酯弹性体	TPE-E	200～250	20～50	
	热塑性苯乙烯弹性体	TPE-S	180～240	20～50	
	热塑性聚氨酯弹性体	TPE-U	190～240	20～40	
	热塑性聚烯烃弹性体	TPE-O	110～180	15～40	

注：1. 注射机喷嘴温度等于热流道喷嘴温度。

2. 状态变化温度中，前者是固化或结晶的温度，后者是熔化温度。

对于表12-1的热流道技术的温度范围还需按塑料热状态进一步说明。

① 对于注射无定形塑料应注意到：

ⓘ 除了注射PVC和CA塑料，整个热流道系统允许有较大的温度波动范围。

ⓘⓘ 开放式浇口中塑料冻结，需要浇口区域有较低的温度。如果温度过高，会出现浇口料柄拉丝。浇口区需要强化冷却，并选用对冷却敏感的导热材料制造浇口套。

ⓘⓘⓘ 喷嘴的浇口会将热量传递给模具型腔。如果喷嘴的接触表面太热，会使注塑件表面变形，甚至烧伤。

②对于注射结晶型塑料要求：

ⓘ 保压期间要保持浇口开放。为阻止浇口快速固化，浇口区需要高温，喷嘴的顶端应设置绝热区。

ⓘⓘ 为保持POM和PA等塑料温度在较窄的范围内，热流道喷嘴应有良好的导热性，为此要设计多个区域的温度控制系统。

ⓘⓘⓘ 在这些浇口中都有冷料柱塞头。它将与塑料熔体一起注射到型腔。

热塑性弹性体加热温度在玻璃态转化温度以上。固化是逐渐演变的过程，有较低的

硬度和很高的断裂伸长率。浇口直径应较小，并有锐边，促使浇口凝料破裂分离，也可使用针阀式喷嘴，避免在浇口断开位置上有明显破裂痕迹。

2）表 12-2 可进一步了解塑料加工的温度范围、浇口区的温度特征和塑料熔体的流动性。表上的塑料名称和代号可对照表 12-1。

表 12-2　塑料的温度特征和流动性的比较

形态	塑料	温度 T/℃			温度范围 ΔT/℃	浇注区的特性	塑料流动性
		注射	玻璃态转化	模具	25　60　100　180		差　中等　好
无定形	PPO	300	120	80		较“冷”	
	PEI	370	215	100			
	PMMA	245	100	70			
	ABS	250	110	75			
	ASA	245	105	75			
	SAN	255	115	80			
	PS	225	100	45			
	SB	225	100	70			
	PES	350	230	150			
	PSU	315	200	150		增加温度	
	PVC	195	100	35			
	PC	300	220	90			
	CAB	215	140	55			
	TPU	210	150	35			
结晶型			结晶				
	PE	250	140	25			
	PP	255	165	35			
	LCP	400	330	175			
	PA 11	230	175	60		较“热”	专门的
	PA 12	230	175	60			
	FEP	340	290	150			
	PET	285	245	140			
	PBT	265	225	60			
	PPS	330	290	110			
	PEEK	370	334	160			
	PA 610	250	215	90			
	PA 6	250	220	90			
	PA 66	285	255	90			
	POM	200	181	100			
					25　60　100　180		

表 12-2 中为熔体最高注射温度，倘若进一步升温，会使高分子链分解，塑料被过热破坏。对无定形塑料，在玻璃态转化温度 T_g 以上时逐步软化，处于高弹态时可进行热成型等加工。表 12-2 上的加工温度范围，是从 T_g 开始计算到最高注射温度。例如：ABS 从 110 ~ 250℃，ΔT = 140℃；实际上热流道注射加工时喷嘴和浇口的温度范围为 180 ~ 250℃，ΔT = 70℃。无定形塑料的注射加工温度范围大于结晶型塑料。大多数结晶型塑料的注射加工温度范围 ΔT 小于 60℃。结晶型塑料 PA66 的喷嘴温度范围为 285 ~ 255℃。其最高注射温度与结晶温度之间的加热范围较小。

表 12-2 上排列在前的大部分无定形塑料，注射加工的温度范围较宽，塑料熔体的冷却固化较慢。浇口区域要求有较“冷”温度，以使浇口冻结较快，可缩短注射循环时间。

表 12-2 排列在后的大多数结晶型塑料，注射加工的温度范围较窄。浇口区域要维持较高的温度，才能避免过早冻结。

在热流道浇注中，还要区别两类不同固化速度的结晶型塑料。快速结晶固化有 POM 和 PA 等塑料，排列在表 12-2 的后下部分。其浇口区域要“热”。“热”浇口需保证慢冷，让制品受到充分的保压补缩。另一类是较慢固化的 PE 和 PP 等结晶型塑料，浇口区域要“温”。以上两组塑料之间的 PC 等无定形塑料，浇口区域也需“温”。

2. 塑料熔体的热性能

高温高压下的注射成型，塑料不但有物理状态的变化，而且还有化学作用，会影响注塑件的质量，还会腐蚀热流道注射模的零件。

（1）热敏性塑料　影响热流道注射的塑料熔体的热性能，主要表现在两方面。一方面是熔融温度范围的大小。熔体超过分解温度后，会使塑料过热破坏。另一重要方面是，在注射机料筒和热流道模具的加工过程中，维持塑料热传递的允许时间。

热敏性塑料有 PVC、POM、PBT、CA、CAB、CP、聚苯酰胺 PPA 和聚醚醚酮 PEEK 等，还有所有添加阻燃剂的塑料。热稳定塑料有 PE、PP、PMMA、PC、PS 等。

热敏性塑料在料筒和热流道中度过时间只能为 5 ~ 10min。热稳定塑料可多于 30 ~ 60min。图 12-7 上的曲线，说明了 POM 熔体的加热时间还与塑料熔体的温度有关。熔料温度越高允许停留时间应越短。

当温度下降至 160℃时，PC 在料筒中可停留长达 24h。但是，在注射机关停后，随着料筒冷却固化的 PVC 或 POM 会发生分解。对这些塑料，应该用其他替换塑料（例如 LDPE），将其挤出料筒。PA66、PA46、PBT 和 PET 的加工温度范围较窄，添加了纤维或玻璃珠后，塑料的加热限制更严。

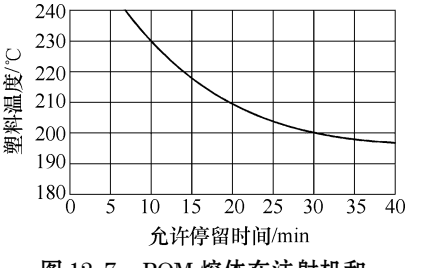


图 12-7　POM 熔体在注射机和热流道模具中的允许停留时间

多次使用的回头料，分子链的降解增多，会使注塑件脆化，并在注射中释放气体。除了分子的热降解外还会有氧化分解。由于注射循环中压力变化，空气会进入热流道。塑料熔体与空气中的氧接触，PA 对此特别敏感。所以要注意减少阻燃添加剂、染料和有机

颜料，以改善塑料的热敏性。

热敏性塑料加工时对热流道系统有附加的要求：

1）限制热流道中存料的体积与注射量的比例，要缩短塑料在流道中度过的时间。模具中塑料制品的型腔总体积小于流道的容量时，更应该这样做。

2）将系统分成更多的温度控制区以减小系统中的温度差。使用的加热器要具有接近线性的温度变化特性。

3）要避免流道板和喷嘴内塑料滞留。

4）在主流道喷嘴、流道板和喷嘴的系统里，要保证无熔料泄漏。

（2）热降解和腐蚀　塑料都是由大分子链构成的。塑料加热温度过高和加热时间过长，热量会造成分子链断裂，结果使塑料的平均相对分子质量降低，塑料熔体的黏度下降，也使注塑件的冲击强度变差，材料变脆。

热降解的特征是在剪切应力作用下分子链的断裂，塑料的平均相对分子质量下降。如果注射加工时空气卷入或排气不畅，会发生氧化降解。PA 和 PBT 等注塑物料含有大于 0.05% 的水分，会有降解速率较快的水解。它们都在塑料的热熔融状态下同时产生的。

热降解时生成或分解的低分子物质，对模具的金属零件有化学腐蚀作用。注射成型聚甲醛 POM 时，高温下熔体接触空气会剪断分子链，生成甲醛，并氧化成甲酸。注射成型聚氯乙烯 PVC 时，热分解生成氯化氢。阻燃剂、化学发泡剂和高湿度塑料，都会腐蚀热流道注射模的金属零件，在零件表面产生锈斑和点蚀，剥蚀零件的尖角和棱边，侵蚀进零件间的间隙在喷嘴和浇口等部位，表面磨损会加剧化学腐蚀。

热流道系统的金属零件，长期处在高温高压的环境中，本身承受较大预应力和热应力，又有化学腐蚀剂作用，会生成环境应力裂纹。慢性裂纹不断扩展，最终导致热流道零件损毁。

铜和铜合金的热流道零件与聚丙烯 PP 和聚甲醛 POM 熔料不相容，有催化分解作用。铜和铜合金零件更容易被腐蚀，并生成疲劳裂纹。

因此，热流道零件表面涂覆很重要。20μm 的镍层被认为是有效防腐层。各种渗氮处理普遍被采用。

3. 塑料熔体的流动性

塑料熔体黏度随温度上升而下降，如图 12-8 上所示为在剪切速率为 $1000s^{-1}$ 时，八种塑料熔体的温度与黏度的变化。各种塑料黏度对温度作用敏感性是不同的。从图 12-8 可知，对 PE 和 PP 等，用升高温度来提高注射成型时流动性的效果有限。而以增高温度来提高 PMMA 和 PC 等物料的流动性是可

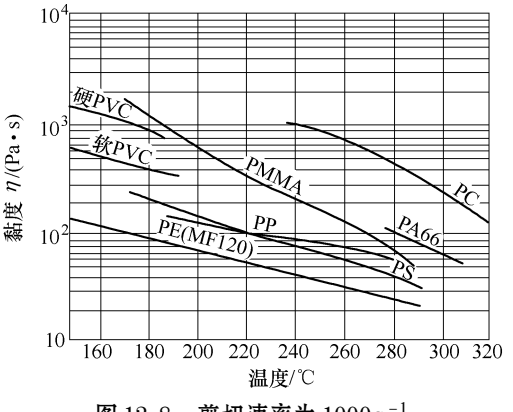


图 12-8　剪切速率为 $1000s^{-1}$ 时，八种塑料黏度与温度的关系曲线

行的。

从塑料熔体的黏度对剪切速率的依赖性来说，不同塑料的敏感性有明显区别。在模内流动 $10^3 \sim 10^4\ s^{-1}$ 的剪切速率范围内，敏感性较明显的有 LDPE、PP、PS、HIPS、ABS、PMMA 和 POM 等。它的黏度会有大于 10 倍的变化。但是 PC、PA6 和 PA66 在剪切速率范围内，黏度只有少量变化。对剪切速率敏感的塑料熔体，适用较小浇口直径；相反，对剪切速率不敏感的塑料，不能发挥点浇口改善流动性的优势。

12.1.3 热流道系统的温度调节

热流道温度控制系统的控制对象是流道板和喷嘴，也涉及浇口区域。热电偶是检测温度的器件，将获得的信号经温度调节器，控制加热电器，执行流道板和喷嘴的升温和热补偿。

1. 热电偶

热电偶的测温原理是基于热电偶的热电效应。热电偶产生的热电势 E 会随被测温度 T 的变化而变化，因此利用热电偶作为测温敏感器件，便可取得它所产生的热电势作为温度测量的信息。

工业上常用的热电偶，以分度号区分金属材料组，有 S、R、B、K、N、E、J 等 16 种。其中测温较高的有 S 分度号，为铂铑-铂两金属，测温 –20 ~ 1300℃，价格较高，并不用于模具的测温。镍铬-镍硅的为 K 分度号，测温 –20 ~ 1260℃，热电势大，且线性好，国内和日本的热流道系统中都采用。J 分度号的为铁-铜镍双金属，使用 –20 ~ 760℃温度，在欧洲和北美常用在注射模热流道系统中。热电偶的分度号不同，给出的热电势不同，反映仪表温度值有几十度的差别，不能混淆接线，必须首先明确分度号，才能输入到相应的温度调节器。其次，热电偶的引出线有极性，必须有线缆着色和标号，对准接线。注意热电偶引线输出的是 mV 弱电势，不能与强电加热器的功率线搞错。此外，热电阻是另一种测温元件，它基于金属导体的电阻值会随温度的变化而变化，日前在热流道技术中极少使用。

通常使用的热电偶的种类，如图 12-9 所示。现今模具上使用的热电偶，已将两金属的工作端焊后，插入不锈钢管铠装，称为针型热电偶。针的外径为 0.5mm，长度为 70mm，型号是 TC05070；外径为 1mm，长为 100mm，型号

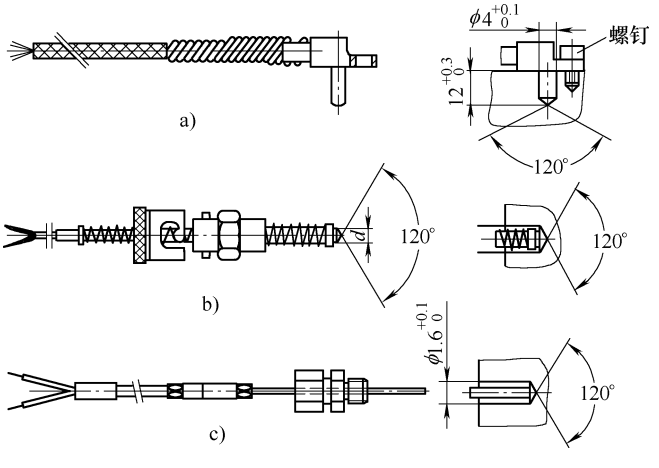


图 12-9 热电偶的种类

a）直角式 b）直线式 c）喷嘴上用的导线式

是 TC10100；还有型号 TC10150 和 TC10200 等。引出线长度通常为 1m。

图 12-9a 所示直角式热电偶，弯曲后安装在流道板前表面的孔中，有 ϕ4mm 小销定位，并用 M4 螺钉紧固。图 12-9b 所示热电偶用于插装在流道板的侧面，插入后有弹簧压到孔径的底部，并用螺母紧固。图 12-9c 所示导线式热电偶可以弯曲，使用在喷嘴中，可用螺纹套紧固。

在外部加热的流道板上，热电偶应该位于加热器与流道之间。热电偶安装在流道板外侧的较冷区域，将会使流道中的塑料熔体过热。在内部加热的流道板上，热电偶通常安装在筒棒式加热器内。

如图 12-10 所示，喷嘴上的热电偶有两种安装位置。一种在喷嘴的前端，在浇口区；另一种在喷嘴的中央。图 12-10a 所示是用于检测浇口区温度，控制浇口熔料的冻结。图 12-10b 是用于校核喷嘴的最高温度，可以防熔体的过热。也有将热电偶安装在其他位置的，故热流道模具操作者要合理地控制喷嘴温度，必须知道热电偶工作端的位置。

测温热电偶的布置，有两个位置很重要。一个是浇口，该处的温度对于熔体的流动性和压力的传递都非常重要；另一个是高温热点。例如：加热器输出量最大的点；加热器与熔体通道之间；或主流道的末端等。此布置是为防止塑料熔体高温过热而分解。

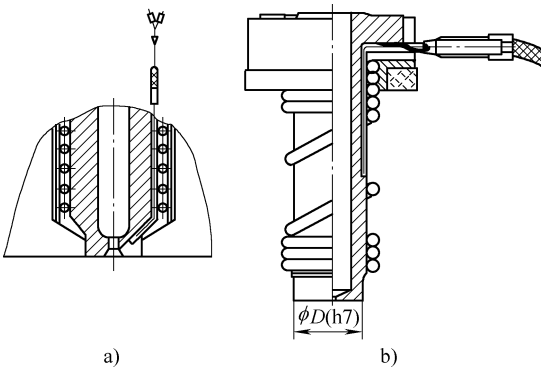


图 12-10　喷嘴上热电偶的位置

a）在浇口区　b）在喷嘴中央

2. 加热区

喷嘴和流道板上加热器的配置，首先考虑加热区的划分，然后是加热器的选用和安置的设计。本节主要讨论流道板上加热区的划分。

各注射点的喷嘴，装有加热器和测温热电偶，是加热区。除少数较短的主流道不加热，独立加热的主流道喷嘴也是加热区。

为了提高温度控制的质量，对于长度超过 150mm 的主流道喷嘴或分喷嘴，考虑一个喷嘴设立两个独立加热区。在喷嘴体上还挖出周向凹槽来分离两个加热器，减少热传导的面积，也减少两个加热区的相互干扰。

将流道板分成若干加热区，实行独立的温度控制，每个加热区对应供料给单个或多个喷嘴，如图 12-11 所示。对于较大的流道板应将流道板分区加热；注射点不对称的流道板更应分区；不容易加工的塑料如 PBT、PET 和 PA66 等也应该分区加热。热流道板分成几个加热区，取决于喷嘴的数目与尺寸。

流道自然平衡的多型腔模具，其流道板的形状对称，加热区的位置和分布也是对称的。多型腔模具的流道板上，加热区数目越少，热流道装备的成本越低，但影响温度的

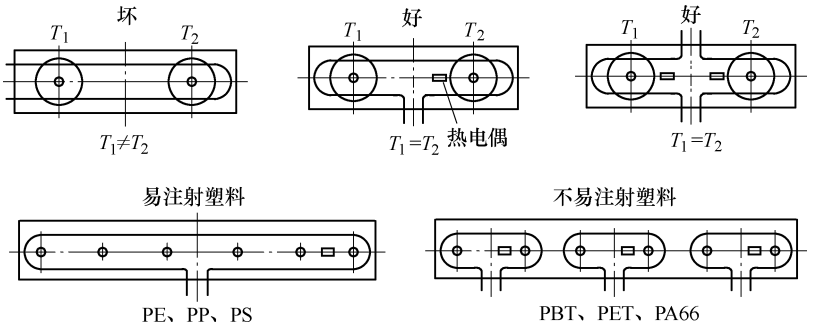


图 12-11　流道板上加热区的划分和加热器的布排

T_1 和 T_2 是流道板的温度。

精确调节。

每个加热区有一个热电偶和单独的加热器。接插件要与测温和加热元件分组正确连接，否则会烧毁元件。每组有热电偶，分正、负两引线，又有电热器两接线，共四对插头与插座，此外，还有公用的接地线。常用的接插件有四芯、16 芯和 24 芯，分别用于单个，4 个和 6 个加热区的温度控制。加热区数目越多，接线成四倍增多，有时要用两个或更多的接插件。

每个加热区有它自己的温度调节器。温度控制箱由各加热区的温度调节器组成。每个温度调节器有各自抽屉式电子器件组装件，可独立拆卸并检测。图 12-12 上有 6 个温度调节器，对热流道系统的主流道喷嘴、注射点喷嘴和流道板各加热区进行温度控制。此接插件至少有 24 芯。每个加热区的加热器的功率，在流道板加热器划分时，必须考虑与温度控制箱的总功率匹配。

加热区的数目与注射点或型腔数相对应，并在模具上加以识别，必须与接插件接线的编号一致，组成一个逻辑线路，防止任何加热器与热电偶，跟温度调节器的错误连接。图 12-13 所示为八个型腔与分喷嘴的模具标记。编码 1-8 给 8 个分喷嘴，从最近的喷嘴开始，以顺时针编排，编码 9 与 10 以类似顺序，定位给流道板上两个加热区。11 为流道板的上游主加热区。12 是主流道喷嘴的加热区。此种编排应该让注射操作工明了，以便于控制各加热区。

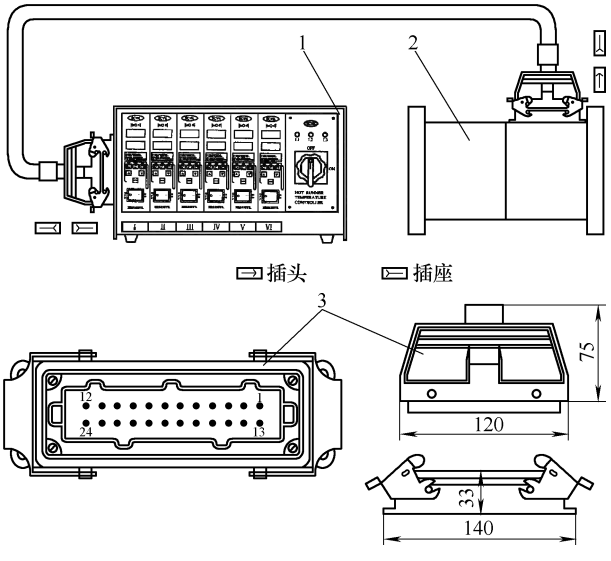


图 12-12　6 个温度控制区的电缆连接和 24 芯接插件

1—温度控制箱　2—注射模　3—接插件

3. 温度调节器

热流道系统需要有个最佳的温度控制系统、“软启动”的加热系统、流道板的区域温度控制、可靠的喷嘴温度控制；还要有熟练员工的合理操作。

（1）温度控制系统

热流道系统的温度调节器的用途，是测量流道板和喷嘴的温度，并保持在给定的温度值。典型的热流道系统某个加热区的温度控制回路如图 12-14 所示。

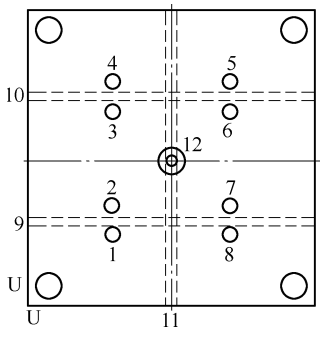


图 12-13　一模八腔模具上加热区的标记

1~8—分喷嘴　9~11—流道板

12—主流道喷嘴

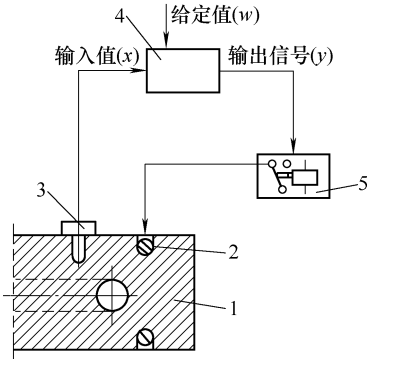


图 12-14　典型的温度控制回路

1—流道板　2—加热器　3—热电偶

4—调节器　5—控制单元

图 12-14 中，从热电偶 3 测得的热电动势的电压，与被测温度呈线性关系，它是控制回路的输入信息作用值 x，在温度调节器 4 中经电子线路与人工设置的温度给定值 w 作比较。调节器 4 的输出信号 y，经它的控制单元 5，由图示的继电器及电路开关，控制加热器 2 执行加热的关停。

自动控制的温度调节器与人工监察控制的区别在于，前者的加热器 2 的温度控制结果反馈给温度调节器 4。图 12-14 上温度控制回路实现了信息反馈，加热器被两位式的开关所控制。它进行着满功率的加热或断开。此控制方法，使流道板 1 有较大的温度起伏，会超出塑料注射加工温度的范围。

热流道系统加热器的交流加热电压，由温度调节器输给。控制加热功率有两种方式：一种是移相触发控制，调节器的微处理单元，有相应的算法，输出某个信号，截取加热电压的正弦交流波后，传输给加热器；另一种是脉冲组触发控制，输出的脉冲信号，以接通-断开的开关方式截得半波的成组脉冲电压，输送给加热器。

软启动功能在冷态开机，或系统从一个状态转变成另一状态并且温度远低于设定温度时，控制输出加热功率由小到大，使热流道系统平缓升温至软启动的设定温度，从而减少由于电压冲击对加热元件的损坏。实现图 12-15 所示的软启动阶段中，软启动设定温度为 124℃；通常设定在 2 ~ 10min。开机时如果控制对象温度小于 100℃，则立即进入软启动模式；如果大于 100℃则直接进入自动控制。在升温时如果超过软启动设定时间，或温度已升至 124℃，系统则由软启动进入自动控制状态，在软启动未结束时，进

入 PID 自动控制。

热流道系统的温度调节器使用得最多的是比例-积分-微分（PID）作用调节特性。它是在 PID 综合调节的基础上，抑制在调节过程中的“超调”现象。对注射中的干扰现象的调节也得到改善。温度调节器从启动开始，就对测量温度进行实时监控，通过对输入值的超前响应，抑制超调，有效地控制加热功率，达到控制区的温度设定值 SV。现代注射模热流道的温度自动控制实现的调节特性，需将热电动势的模拟信号放大后转换成数字电路的脉冲信号，经微处理单元调制。

（2）温度调节器的操作　温度控制箱也称主控箱，见前图 12-12 所示。它根据热流道系统的温度控制区数目组装。每个温度的检测与加热区都有温度调节器；每个调节器有两个加热器的引线，两个热电偶的引线需对应组接；每个温度调节器通过导槽和接插件与主控箱联接并定位；每个温度调节器有独立开关，除保险和报警外，有一套完整的温度控制的操作。每个调节器有两个显示屏：一个 PV 屏显示温度测量值及各类参数，另一个 SV 屏显示温度设定值。

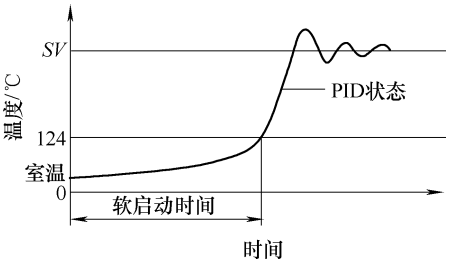


图 12-15　软启动的温度调节特性

SV-控制区的温度设定值

大型注塑件和一模多腔的注射模，有较多的喷嘴，在流道板上有较多的加热区。当有十几个以上的温度调节器时，各调节器上显示的 PV 测量温度，对于真实温度存在误差。SV 屏的给定温度对于所需正确温度存在误差。给定温度离最佳温度或测量值相互之间有时会有高达 30～40℃的相对误差值。也就是说，PV 和 SV 温度的一致、SV 给定温度与塑料注射工艺温度一致，并不说明热流道系统各部位温度一致，也并不一定是各部位所需的合理温度值。有时会使个别注射点的注射失败，成型的注塑件质量达不到要求。

因此，在塑料熔体试射的最后阶段，要以各个浇口处塑料的流动性和注射质量来判断温度调节的结果（例如浇口的流涎和拉丝；浇口料头和浇口附近注射质量）来判别熔体流动性，调节相应注射点及加热区的 SV 给定温度。这项温度调节系统的误差修正工作，需要熟悉热流道系统的设计；需要熟悉注射塑料熔体的流动性；需要丰富的实际经验。

温度调节系统误差的原因有多个方面：

1）温度调节系统的设计和制造的误差、热电偶的参比端的温度补偿问题、热电偶的位置和安装质量、加热器的质量和它的安装质量、加热器功率密度的不均匀、绝热条件差和不均衡、加热和散热条件的变化、电网电压和环境温度变化，都会使得流道壁和浇口区温度不均衡。

图 12-16 所示，热电偶的引线的测量头，必须与被测件的插孔有可靠的接触连接。否则，热电偶测得的温度值较低。为此，如图 12-16a 所示的热电偶的引线测量端，必须有一小段弯曲插入长度。喷嘴体上的测量点也应如此。更有用紫铜钎焊，将测量头封

在插孔里，如图 12-16b 所示。

2）热流道的浇注系统设计和制造误差。有的是塑料熔体的不平衡的浇注系统。流道、喷嘴和浇口中流动时的剪切速率变化，使熔体的黏度变化。有的尽管是平衡的浇注，但由于机械加工的流道壁的表面粗糙度的误差、浇口的几何尺寸和孔径的误差、排气的不均匀等因素，也会造成剪切速率和黏度的变化，都需要调节修正温度，改善熔体的流动性。

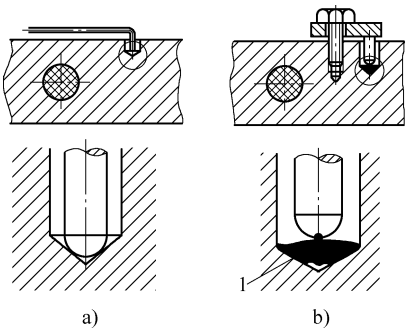


图 12-16　流道板上热电偶的引线的安装

a）弯曲插入　b）钎焊封结

因此，应当根据各注射点和加热区的温度对注射熔体流动性的表现，修正各调节器的设定温度 SV 值，并进一步修正传感器的测定温度和实际温度的误差，设置各调节器的过程偏置值。

12.2　热流道系统的传热学和流变学计算

热流道注射模设计计算时，必须具备传热学的基本知识，同时还要考虑温度升高时热流道系统零部件的热膨胀。塑料熔体流变学的基础知识前面已经介绍，这里讨论热流道系统的流道尺寸和喷嘴浇口的设计计算。

1. 热传递

热传递有传导、对流和辐射三种方式，都影响热流道系统的热平衡。

（1）热传导　固体内部的热传导是由于相邻分子在碰撞时传递振动能的结果。金属的导热能力很强，因内部自由电子转移而发生。图 12-17 所示注射模的热流道系统的传导热流，其热源为流道板和喷嘴的电热功，还有注射生产中周期性输入熔融塑料携带的热量。热量主要从承压圈、喷嘴和联接螺钉等，经定模的接触面耗散。因空气的传热系数很小，定模框与流道板之间空气隙起绝热作用。空气、塑料和陶瓷常作为绝热材料。钢材根据不同的化学成分，其传热系数为 14 ~ 40 W/（m · K），需根据各钢种实际测定。热流道系统零部件不但用各种合金钢制造，还用不锈钢和钛钢阻热，用铍铜导热。在热流道工程计算中，不考虑温度梯度随时间变化，只考虑位置温差的热传导。

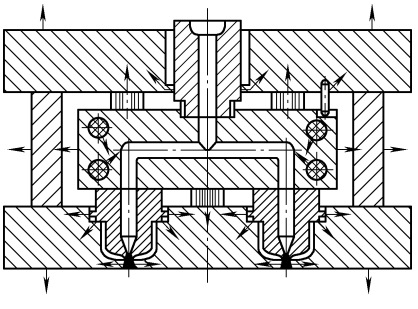


图 12-17　注射模热流道系统的传导热流

根据傅里叶定律，物体存在温度梯度 $\Delta T = T_1 - T_2$，传导热量 Q_c 流过单层的平直模

壁，如图 12-18a 上所示，可描述为

$$Q_c = \frac{\lambda}{\delta} A_c (T_1 - T_2) \tag{12-1}$$

式中　Q_c——物体的传导热量（W）；

λ——材料的传热系数［W/(m·K)］；

δ——物体传热方向的厚度（m）；

A_c——物体传热面积，$A_c = bh$，（m^2）；

T_1——热源温度（℃）；

T_2——被测点的温度（℃）。

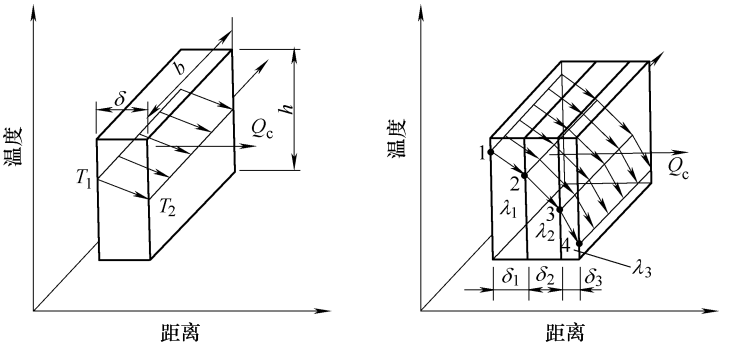


图 12-18　单层和多层平壁的热量传导

a）单层物体　b）多层物体

多层物体的平壁热传导，如图 12-18b 所示可描述为

$$Q_c = \frac{1}{\dfrac{\delta_1}{\lambda_1} + \dfrac{\delta_2}{\lambda_2} + \dfrac{\delta_3}{\lambda_3}} \times A_c (T_1 - T_{i+1}) \tag{12-2}$$

式中　i——物体间壁面的数量。

对喷嘴等圆筒形零部件，传导热量 Q_c 流过单层的圆柱壁，如图 12-19a 所示，可描述为

$$Q_c = \frac{2\pi l\lambda}{\ln\left(\dfrac{r_o}{r_i}\right)} \times (T_i - T_o) \tag{12-3}$$

式中　l——圆柱壁面的长度（m）；

ln——自然对数；

T_i——里筒壁温度（℃）；

T_o——外筒壁温度（℃）；

r_o——圆筒外径（m）；

r_i——圆筒内径（m）。

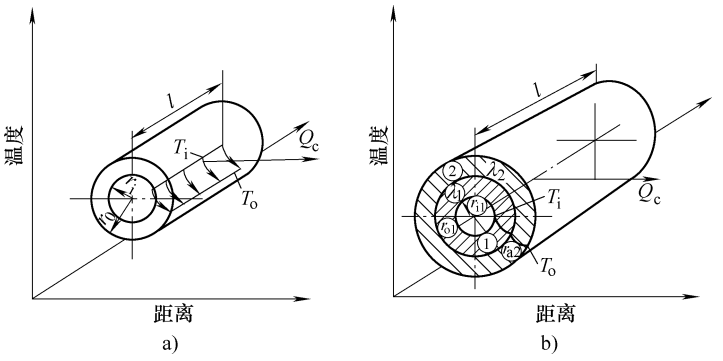


图 12-19　单层和多层的圆筒的热量传导

a）单层圆筒　b）多层圆筒

传导热量 Q_c 流过多层的圆柱壁，如图 12-19b 所示，可描述为

$$Q_c = \frac{2\pi l}{\dfrac{\ln\left(\dfrac{r_{o1}}{r_{i1}}\right)}{\lambda_1} + \dfrac{\ln\left(\dfrac{r_{o2}}{r_{i2}}\right)}{\lambda_2}} \times (T_i - T_o) \tag{12-4}$$

式中　$r_{i2} = r_{o1}$

例如流道板上的承压圈，可用不同材料组成的相关零件。如图 12-20a 所示，串联时的传热系数 λ_s 有

$$\lambda_s = \frac{1}{\dfrac{\varphi_1}{\lambda_1} + \dfrac{\varphi_2}{\lambda_2}} \tag{12-5}$$

图 12-20b 上并联时的传热系数 λ_p 有

$$\lambda_p = \varphi_1\lambda_1 + \varphi_2\lambda_2 \tag{12-6}$$

以上两式中　$\varphi_i = \dfrac{V_i}{V}$　；　$\varphi_1 + \varphi_2 = 1$

其中　φ_i——体积分数；

V_i——单件体积；

V——总体积。

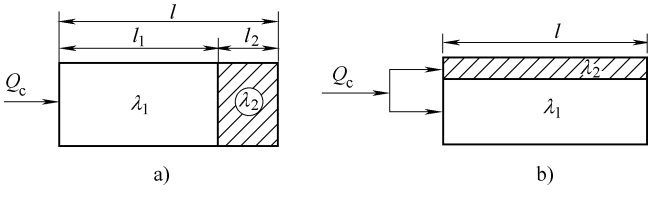


图 12-20　不同材料两相关件的传热系数

a）串联联接的λ_s　b）并联联接的λ_p

例如筒形的喷嘴在线圈外加热时，为多层圆柱壁串联的热传导。如图 12-21 所示的串联的传热系数 λ_r 为

$$\lambda_r = \frac{\ln \frac{r_3}{r_1}}{\frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{\lambda_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{\lambda_2}} \tag{12-7}$$

（2）热对流　在注射成型生产中，会遇到流体在流过固体表面时与该表面发生热量交换。从固体壁面到流体介质的热量传递称对流。图 12-22 所示为热流道注射模系统在注射生产中向空气的热对流。一方面流道板和喷嘴的壁面向周围的空气传递对流热量 Q_f；另一方面，定模框又向环境空气传递对流热量。在热流道工程计算中常用的是对前者的简化算法。加热后的空气变得更轻而向上自然流动。

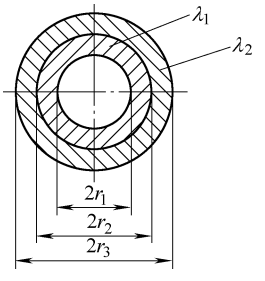


图 12-21　多层圆柱壁串联的传热系数

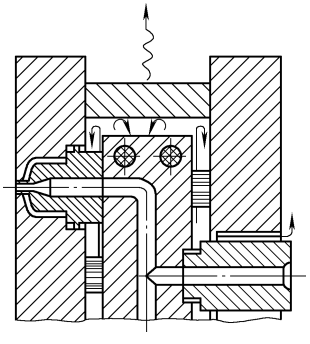


图 12-22　热流道注射模系统向空气的热对流

如图 12-23 所示，平板壁面因空气的对流形成热量传递，这种对流热量

$$Q_f = \alpha_f A_f (T_W - T_g) \tag{12-8}$$

式中　Q_f——对流热量（W）；

α_f——传热系数［W/（m^2 · K）］，空气自然对流 $\alpha_f = 5 \sim 10$W/（m^2 · K）；

A_f——壁表面面积（m^2）；

T_W——壁面的温度（℃）；

T_g——周边环境空气的温度（℃）。

传热系数 α_f 可以通过传热学理论计算，也可由理论指导下实验测得。如果是周边空气被强迫流动，传热系数 $\alpha_f = 10 \sim 100$W/（m^2 · K）；而空气自然流动 $\alpha_f = 5 \sim 10$W/（m^2 · K）。曾有试验得到的 α_f 值更小。先进的热流道板的绝热和反辐射措施很多，相应热传递计算在 12.4 节中进一步陈述。

（3）热辐射　任何物体都会不停地以电磁波形式向外界辐射能量。同时又不断吸收外界其他物体的辐射能。当向外辐射能与吸收能不相等时，产生的热量传递方式称热辐射。黑体的物质称为能吸收所有辐射能。可以假定辐射传递热量与通过的气体、液体和固体等介质无关。图 12-24 所示为热流道系统中热量的辐射传递，例如热流道板和周围

的模板之间发生辐射能量的交换。流道板的保温设计，应让辐射能尽量多地反射回去。避免黑体效应，减少周围的模板吸收辐射能，这就要阻隔热流道系统与周围的模板之间辐射能的传递。

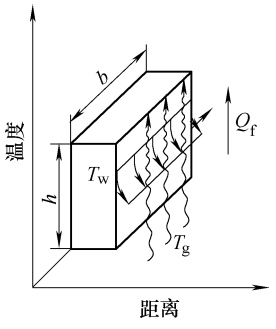


图 12-23　平板壁面与空气的对流热量传递

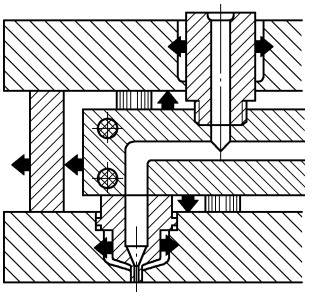


图 12-24　热流道系统中热量的辐射传递

如图 12-25 所示两物体热量的辐射传递，高温平板表面向外界辐射能量 Q_r。这种辐射传热与传热系数 α_r 的关系用下式描述

$$Q_r = \alpha_r \cdot A_r (T_1 - T_2) \tag{12-9}$$

式中　Q_r——传递的辐射热量（W）；

A_r——辐射表面面积（m^2）；

α_r——传热系数［$W/(m^2 \cdot K^4)$］；

$$\alpha_r = C_o \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Delta T} \tag{12-10}$$

式中　$\Delta T = T_1 - T_2$

T_1——高温壁面的热力学温度（K），$K = 273 + ℃$；

T_2——低温壁面的热力学温度（K）；

C_o——热辐射系数［$W/(m^2 \cdot K^4)$］。

表 12-3 提供了热辐射系数 C_o 与材料与物体表面状态之间的关系。为了使由热辐射引起的热损失最小，C_o 的值要小。为此，热流道板表面涂镍，$C_o = 0.12 W/(m^2 \cdot K^4)$。流道板表面覆铝箔，$C_o = 0.18 \sim 0.22 W/(m^2 \cdot K^4)$。详细措施在 12.4 节中介绍。

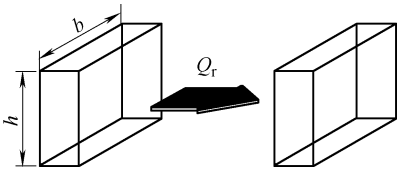


图 12-25　两物体热量的辐射传递

表 12-3　不同表面质量和材料组合下的热辐射系数 C_o

材料/材料组合	表面质量	热辐射系数 C_o/［$W/(m^2 \cdot K^4)$］
“黑体”	—	5.77
银 / 银	抛光	0.09
铜 / 铜	抛光	0.09
	氧化	3.54

（续）

材料/材料组合	表面质量	热辐射系数 C_o/[W/(m² · K⁴)]
镍 / 镍	钝化	0. 12
	光亮	0. 39
钢 / 钢	锈蚀	2. 53
铝 / 铝	滚轧光亮	0. 12
铝 / 钢	铝:光亮 / 钢:光亮	0. 18
	铝:光亮 / 钢:锈蚀	0. 22
镍 / 钢	镍:钝化 / 钢:锈蚀	0. 23

2. 热量和比热容

提高固体、液体和气体的温度要输入热能。所需的热量

$$Q = mC\Delta T \tag{12-11}$$

工程设计时计算单位时间内输入物体的热量

$$P = \frac{mC\Delta T}{t} \tag{12-12}$$

式中 Q——输入热能（kJ）；

P——物体加热功率（kW）；

m——物体的质量（kg）；

C——材料的比热容［kJ/(kg · ℃)］，表 12-4；

t——物体的加热时间（h）；

ΔT——物体温度升高值，$\Delta T = T_1 - T_2$（℃）。

比热容代表了物体材料的吸热能力。它表述 1kg 单位质量的物体，温度升高 1℃所需的热量。还需注意到比热容还与温度有关。

由两种材料组分组成的物体的相当比热容 C_{total}计算如下

$$C_{total} = \varphi_1 C_1 + \varphi_2 C_2 \tag{12-13}$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 1$$

式中

$$\varphi_i = \frac{m_i}{m_{total}} \qquad (i = 1, 2)$$

m_i——单个组分的质量（kg）；

m_{total}——装配体的总质量（kg）。

表 12-4 一些固体、液体和气体的比热容 *C*

材　料	比热容 C/[kJ/(kg · K)]
铝	0. 896
铬镍合金钢	0. 477
紫铜	0. 383
聚丙烯 PP	20℃时为 1. 70；120℃时为 2. 7
聚苯乙烯 PS	20℃时为 1. 20；120℃时为 2. 0
热油	50℃时为 1. 70；100℃时为 1. 83；200℃时为 2. 14；300℃时为 2. 49
水	50℃时为 4. 18；100℃时为 4. 22；200℃时为 4. 50；300℃时为 5. 76
空气	约 1

3. 热膨胀

对于注射模热流道工程，只需要考虑线性热膨胀。物体某个方向在热影响下尺寸的变化，取决于温度梯度 ΔT 和材料的线性热膨胀系数 α。有

$$\Delta L = L_1 - L_o = \alpha L_o \Delta T \tag{12-14}$$

式中　$\Delta T = T_1 - T_o$

α——线性热膨胀系数（1/ K），见表 12-17；

L_o——在参考温度 T_o（ =23℃）时的长度（m）；

L_1——在测量温度 T_1 时的长度（m）。

线性热膨胀系数等于物体沿长度方向上的相对伸缩量与温度梯度的变值

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_o \cdot \Delta T} \tag{12-15}$$

各种材料的线性热膨胀系数随着温度的上升而有所提高。金属和塑料材料的线膨胀系数较大，而且升温时变化较多。因此在金属物体的热膨胀计算时，在介于环境温度和工作温度之间取线膨胀系数值。表 12-17 给出的大都是室温下的线膨胀系数。

受到机械约束的零件，受阻挡的热膨胀会导致热应力

$$\sigma = \varepsilon E \tag{12-16}$$

式中，E 为材料的弹性模量。式中应变

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \tag{12-17}$$

由式（12-14）和式（12-15）至式（12-17），可得到热应力

$$\sigma = \alpha E (T_1 - T_o) \tag{12-18}$$

被约束的受热钢零件，有弹性模量 $E = 2.1 \times 10^5 \text{MPa}$，线膨胀系数 $\alpha = 11 \times 10^{-6}/\text{K}$。$\Delta T = 260\text{K}$。计算得到很大的热应力 $\sigma = 600\text{MPa}$。在热流道板的设计时，必须给出室温下的补偿间隙。以防止破坏相关的零件，详见 12.4 节。

为了改善热流道板和喷嘴的导热性，常在钢构件中嵌入铍铜。这时的热补偿，见图 12-26 所示。要将不同材料物体作为静力系统。作用力 F 按比例作用在两个相同长度 L 的零件上。两零件在 F_1、F_2 约束下的变形量 f_1、f_2 相等，称为变形协调条件，见下式

$$\begin{aligned} F &= F_1 + F_2 \\ f &= f_1 = f_2 \end{aligned} \tag{12-19}$$

如图 12-26a 所示，两种材料物体各有其物理性能 E_1、E_2、α_1、α_2。各有几何参数，其体积 $V_1 = A_1 L$，$V_2 = A_2 L$，A 为物体的截面积。由以下式

$$\sigma = \varepsilon E = \frac{\Delta L}{L_o} E = \alpha \Delta T E$$

和

$$f = \Delta L = \frac{F L_o}{EA}$$

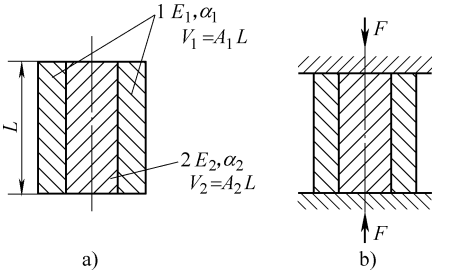


图 12-26　两种材料物体热膨胀时的变形补偿

a）两种材料组合　b）对热膨胀的约束力 F

定义

$$\varphi_i = \frac{A_i}{A_1 + A_2}$$

可得到两种材料组合结构的线膨胀系数

$$\alpha_{total} = \frac{\alpha_1 E_1 \varphi_1 + \alpha_2 E_2 \varphi_2}{E_1 \varphi_1 + E_2 \varphi_2} \tag{12-20}$$

4. 系统的热流道尺寸设计计算

在一模多腔热流道注射模的流道板上，流道的布置和截面尺寸的设计，必须实现注射的塑料熔体对各型腔平衡充模，以保证注射制品的质量和精度的一致性。本节介绍流道系统的分类和设计原理，举例说明流变平衡计算流道截面尺寸的方法。

流道系统包括主流道喷嘴、各分流道、浇口喷嘴。为保证各注射点的熔体充填型腔时的压力，整个系统的熔体流动状态的压力降应控制在 30 ~ 35MPa。本节仅讨论流道部分的设计。

有两种多型腔模具的流道平衡设计。

图 12-27 所示是自然平衡的流道布置。从主流道喷嘴到各浇口喷嘴的流动距离相等。只要对称布置的对应分流道的圆截面半径相同，就可以实现各浇口喷嘴的平衡浇注。

图 12-28 所示是不平衡的流道布置。从主流道喷嘴到各浇口喷嘴的流动距离不相同。不同的流程压力会造成各注射点的熔体充模压力的差异。但经流变平衡计算，调节各分支流道的半径，也可以达到各浇口喷嘴的平衡浇注。

由于流道的流程与塑料制品型腔可分开处理，这两种流道可以人工计算设计，也可以编制计算机程序计算，流道的平衡设计，要在一定的熔体温度下，以最佳的剪切速率和允许的压力损失流动充模。

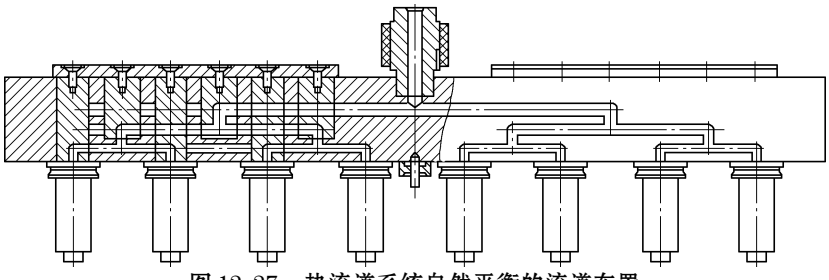


图 12-27　热流道系统自然平衡的流道布置

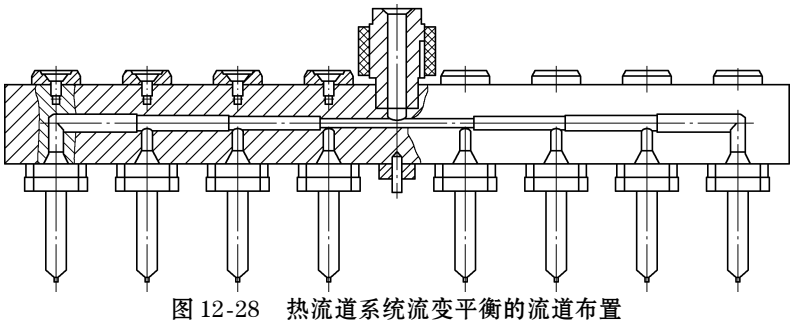


图 12-28　热流道系统流变平衡的流道布置

参照图 12-27 的自然平衡流道布置，与图 12-28 的流变平衡流道布置相比。前者的熔体流动距离长，流道的分叉转折多，流道板厚且结构复杂。后者结构简单，但流变平衡计算较为困难。

此外，对于不同制品的多型腔模具，例如塑料盒和盖两者在一个注射模中成型的流道设计，要求熔体同时充满各个型腔。对于单个大型型腔，例如轿车的保险杠，有多个注射喷嘴浇注。此种流道设计时，要考虑熔体料流前锋的运动状态，要保证熔合缝处于合理位置。这些制品型腔的平衡浇注，须将浇道系统与型腔一起，经电子计算机造型，进行流动模拟分析，经反复修正达到流变平衡充模。

（1）自然平衡布置流道尺寸计算　图 12-27 所示的自然平衡布置的流道截面，同样要以流变原理进行直径大小的计算。在熔料熔融的中间温度下，以适中的螺杆推进速率，计算注射熔料在流道中的剪切速率与剪切应力，预测表观黏度，估算流道全程的压力降。这个计算过程的依据是各种塑料熔体的流变曲线。塑料熔体的非牛顿特性是剪切速率升高时表观黏度下降，流动性改善。过分大的流道直径，使熔体流动的剪切速率较低，表观黏度上升。况且，如果制品型腔很小，而流道的容积较大，会延长熔体在流道中的停留时间。这对于热敏性的物料，例如 PVC 和 POM 及一些添加阻燃剂物料，它们在料筒和热流道中停留时间超过 5 ~ 10min 会产生分解和挥发；反之，过细的流道直径会使压力传递困难，造成熔体充模压力不足。因此需反复计算，调节流道直径，使主流道喷嘴有 $1000s^{-1}$ 以上的剪切速率；各流道中有剪切速率 $\dot{\gamma}=500s^{-1}$ 左右。各种塑料流动熔体的表观黏度大致为 100 ~ 500Pa · s。下游的浇口喷嘴的熔体有更高的剪切速率和更低的表观黏度。

为了使多型腔模具实行平衡浇注，采用图 12-29 所示的注射点的布置方式。一类是 2^n 方式（2、4、8、16 和 32）的型腔对称的等路径布置。另一类是 3 的倍数方式，常用 3、6、9、12 和 24 个型腔的等路径布置。

在多层次的分流道直径计算时，推荐用下式

$$d_{j+1}=\frac{d_j}{N_{j+1}^{\frac{1}{3}}}$$

式中　d_j——上游流道的直径（cm）；

d_{j+1}——下游流道的直径（cm）；

N_{j+1}——下游流道的分支数。

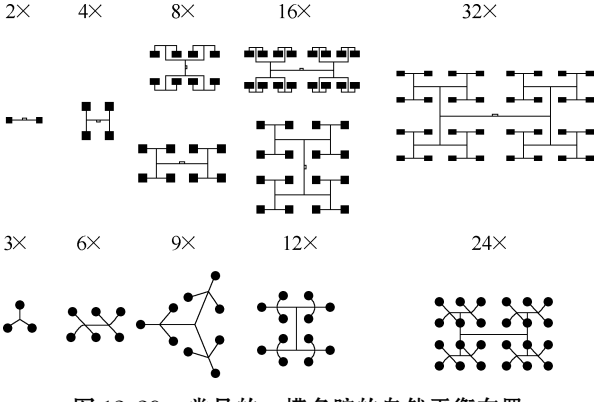


图 12-29　常见的一模多腔的自然平衡布置

参照前第 8 章冷流道尺寸的设计计算方法，如图 12-27 所示流道，经流变计算得第一分流道直径 $d_1=1cm$；则第二分流道直径 $d_2=2^{-\frac{1}{3}}cm=0.79cm$；第三分流道 $d_3=0.79\times2^{-\frac{1}{3}}cm=0.63cm$。根据此直径

分配式的计算结果，各层次的分流道中熔体的剪切速率递减，而剪切应力大致相等。

（2）非平衡布置的流变平衡计算　图 12-28 一模八腔的热流道注射模，注射 POM 每件 3cm³ 手柄制件。熔体的注射温度定为 200℃。按注射工艺常见的螺杆推进速率，确定注射充模时间为 0.5s。对热流道模具的每次注射体积，应不计流道系统的容积，有 $V = 3 \times 8\text{cm}^3 = 24\text{cm}^3$。按合理的剪切速率 $\dot{\gamma} = 478\text{s}^{-1}$，确定第一分流道直径 $d_1 = 0.8\text{cm}$。图 12-30 为流道的布置和流变平衡计算得到的结果。

如图 12-30b 所示，流道系统的一半被分解成四个流程。又将每个流程分成若干个计算段。从计算 0 点起，流程 *D* 仅有一段；流程 *B* 有三段；流程 *A* 是等直径 $d_1 = 0.8\text{cm}$ 的三段。不计流道中熔体的体积，通过 *A* 流程 1 段的熔体体积为 3*V*/8。通过 *A*2 段的体积为 2*V*/8；流过 *A*3 段的体积为 *V*/8。计算各流程各段的压力降见表 12-5。流程 *A* 有 2.3 + 1.7 + 1.7 = 5.7MPa 压力降。流程 *B* 中 *B*1 和 *B*2 段，与 *A*1 和 *A*2 段一致，为 3.6cm。为实现流变平衡，*B*3 段与 *A*3 段应有相同的压力降。也就是 *B*3 段的 2.3cm 长有较细的直径，与 *A*3 段（2.3 + 3.6）= 5.9cm 长，直径 0.8cm 有相同的 1.7MPa 压降。经计算得 *B*3 段直径为 0.6cm 时，可实现平衡浇注。

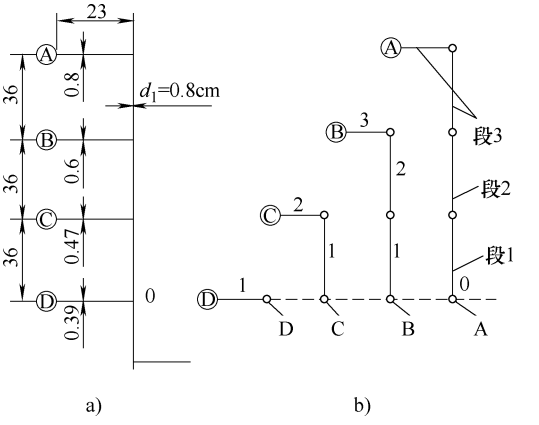


图 12-30　八个型腔的流道的布置和流变平衡计算结果

a）型腔分布和流道直径计算结果　b）流程的计算分段

表 12-5　一模八腔热流道的流变计算结果

段号	流率/(cm³/s)	直径/cm	流道长/cm	剪切速率/s⁻¹	表观黏度/Pa·s	压力降/MPa
*A*1	18	0.8	3.6	360	350	2.3
*A*2	12	0.8	3.6	240	400	1.7
*A*3	6	0.8	5.9	120	480	1.7
					总计	5.7
*B*1	18	0.8	3.6	360	350	2.3
*B*2	12	0.8	3.6	240	400	1.7
*B*3	6	0.6	2.3	280	380	1.6
					总计	5.6
*C*1	18	0.8	3.6	360	350	2.3
*C*2	16	0.47	2.3	590	290	3.3
					总计	5.6
*D*1	6	0.39	2.3	1030	230	5.6
					总计	5.6

现以 *B*3 段为例，说明流变平衡计算的原理。首先计算 *B*3 段的体积流率

$$Q=\frac{V}{t}=\frac{3}{0.5}=6\text{cm}^3/\text{s}$$

式中　V——流过流道的熔体体积（cm^3）；

t——注射时间（s）。

注射 50cm^3 熔体体积的注射时间为 1.5s；注射 50 ~ 250cm^3 需 1.5 ~ 2.5s。又有 $B3$ 段中熔体流动的剪切速率

$$\dot{\gamma}=\frac{32Q}{\pi d^3}=\frac{32\times6}{\pi\times0.6^3}=283\text{s}^{-1}$$

式中 d 为此段流道的直径（cm）。在 POM 的表观黏度 η_a—剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的流变曲线图 12-31 上，在熔体温度 200℃ 曲线上，查得 $\eta_a=380\text{Pa}\cdot\text{s}$。由此得 $B3$ 段的压力降

$$\tau=\eta_a\dot{\gamma}=380\times283=107540\text{Pa}$$

有

$$\Delta P=\frac{4L\tau}{10^6 d}=\frac{4\times2.3\times107540}{10^6\times0.6}=1.65\text{MPa}$$

式中　τ——通过流道的熔体剪切应力（Pa）；

L——该流道的长度（cm）。

较高的熔体温度和较短的充模时间，都能改善塑料熔体的流动性，有利充模压力的传递。在注射生产中，可参考平衡计算中设定的温度与时间进行调节。

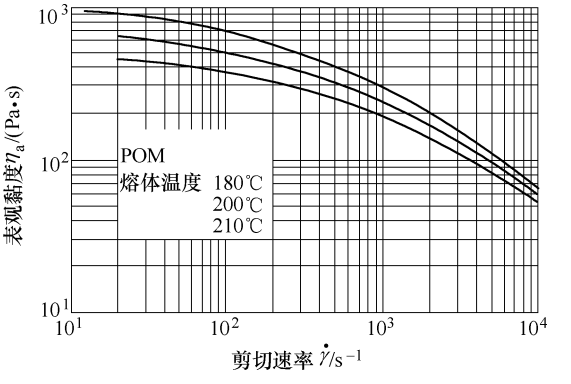


图 12-31　共聚甲醛 POM 的流变曲线

5. 喷嘴流道的设计计算

喷嘴有种类的选择和喷嘴流道直径确定的两方面。喷嘴流道的较小传输截面积，会使流道中的压力损失增大。在一定的注射压力下，使注射到型腔的熔料因充模压力过低，而达不到所需的充模速率，会影响注塑件质量，甚至使型腔不能充满。较大的截面面积将会增加浇注系统用料和能量损耗，增加熔体塑料在高温流道和喷嘴中的渡过时间。这里介绍用流变学原理和方法，计算确定喷嘴流道直径。但是在喷嘴长度超过 100 ~ 200mm 时，还需校核整个热流道浇注系统的压力损失不超过 350MPa，为此有时不得不放大喷嘴流道的直径。

（1）喷嘴流道直径计算式　以合理的剪切速率，又考虑塑料熔体的黏度，计算确定热流道系统的喷嘴流道直径。计算公式源于塑料流变学，依据各种塑料熔体的非牛顿性能，可获得正确的结果。

热流道系统的喷嘴内径尺寸，由材料的流动指数 n、剪切速率 $\dot{\gamma}$ 以及注射的体积流量共同决定。此流量 q_i 为喷嘴注入下游型腔的体积流量，可由该喷嘴射出注射量和注射

时间计算

$$q_i = \frac{V_i}{t}$$

$$V_i = \frac{V}{N}$$

式中 q_i——分流道的体积流量（cm^3/s）；

t——对下游型腔的充模时间（s）；

V_i——单个喷嘴的注射量（cm^3）；

V——注射模型腔的总体积（cm^3）；

N——流道分叉数。

在浇注系统的圆管流道中，各截面的熔体充模时间 t 是相同的。在已知以上数据的情况下，按剪切速率确定喷嘴内流道直径，可由前流变学公式（8-2 ）计算得

$$d_i = \frac{1.366}{\sqrt[3]{\dot{\gamma}}} \sqrt[3]{\frac{q_i(3n+1)}{n}}$$

式中 n ——塑料熔体的流动指数，可参考前表 2-1 或表 2-2；

$\dot{\gamma}$——塑料熔体的合理剪切速率（1/s）。

（2）充模时间的确定 热流道喷嘴是热流道系统的终端，它将熔料输送到模具型腔或附加的冷流道。在喷嘴直径的计算过程中，模具型腔总体积 V 通过以下注射量和时间的关系确定注射时间 t。该注射时间 t 是根据注射机螺杆的常规推进速率。即注射机具有中等注射速率时，相对应的注射充模时间。表 8-1 是注射机常规注射速率下，对应的充模时间和公称注射量关系。大量工程计算证明，此方法能正确确定浇注系统流道中熔料的充模流量。也能适应注射机操作对充模速率的调节。

将表 8-1 的数据经多项式拟合的式（8-1c），在编制计算机程序时分成两段，对注射量 $30 \leqslant V(cm^3) < 2500$

$$t = 0.8998 + 0.37902 \times 10^{-2} V - 0.17210 \times 10^{-5} V^2 + 0.28900 \times 10^{-9} V^3$$

当注射量 $2500 \leqslant V(cm^3) < 64000$ 时

$$t = 0.34115 \times 10 + 0.44075 \times 10^{-3} V - 0.77653 \times 10^{-8} V^2 + 0.49935 \times 10^{-13} V^3$$

式中 V——注射量（cm^3）；

t——注射时间（s）。

（3）合理的剪切速率 大量的注射成型的实验和计算机模拟数据证明，浇注系统各流程，从主流道、各分流道到喷嘴内径，存在合理的剪切速率的范围，见表 12-6 所示。塑料熔体有较高的黏度，较高温度下黏度较低些。塑料熔体另一个特性是非牛顿性，有“剪切变稀”的现象。在圆管中剪切流动时，剪切速率高，熔体的黏度下降明显。而剪切速率主要与流道截面内的体积流量有关。因此，热流道系统上游的主流道喷嘴、中游的各分流道，下游的分喷嘴，有不同的合理的剪切速率范围这有利于降低黏度，减小沿程的压力损失，保证对成型型腔成功充填。

表 12-6　热流道多喷嘴系统各流程合理的剪切速率

流　　程	合理的剪切速率范围 $\dot{\gamma}/s^{-1}$	常用剪切速率 $\dot{\gamma}/s^{-1}$
主流道的单点开放式喷嘴	1100 ~ 1700	1200
主流道的单点针阀式喷嘴	1200 ~ 1800	1400
流道板上的分流道	400 ~ 700	500
开放式分喷嘴	300 ~ 800	500
针阀式分喷嘴	300 ~ 800	600

（4）应用示例　图 12-32 所示贮物箱，箱体面积 540mm × 210mm，高 220mm，壁厚 3 ~ 4mm。箱体用 3640cm³ 的 ABS 塑料注射成型。有四个某型号顶管式的，浇口在模板的喷嘴。喷嘴的总长 102mm，管径 16mm。图 12-32 为浇注系统设置为保温的热流道做的流动分析。6.056s 是塑料熔体总体积充满时的状态。其中热流道中熔体的流动充模时间在 5s 之内。用 Lustran ABS 1146 物料，熔体温度 260℃。

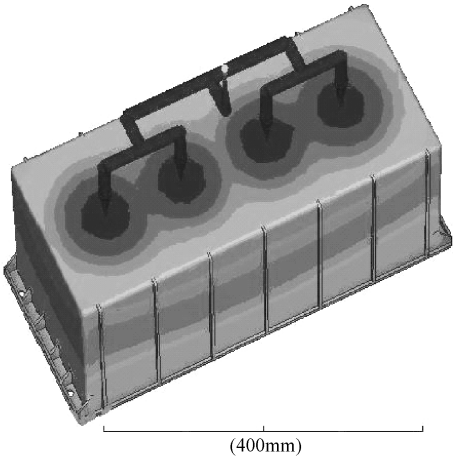


图 12-32　贮物箱

每个喷嘴的射出量为 910cm³。由总注射量 3640cm³，查表 8-1 得可行的充模时间 $t = 4.8s$，得流经喷嘴流量 $q_i = 190cm^3/s$。又按表 12-6，开放式多喷嘴，在较大流量下，应具有合理的剪切速率 $\dot{\gamma} = 700s^{-1}$。查表 2-6，Lustran ABS 1146 物料在 $10^2 \sim 10^3 s^{-1}$下，熔体的流动指数 $n = 0.346$，代入式（8-2）得

$$d_i = \frac{1.366}{\sqrt[3]{\dot{\gamma}}}\sqrt[3]{\frac{q_i(3n+1)}{n}} = \frac{1.366}{\sqrt[3]{700}}\sqrt[3]{\frac{190\times(3\times0.346+1)}{0.346}}cm = 1.60cm$$

考虑到注射生产时，还允许调节注射充模和剪切速率，且归整到喷嘴直径的系列尺寸，故用流道直径为 16mm 的多喷嘴。

6. 以塑料流动性和注射量选定浇口直径

塑料熔体流经喷嘴浇口的剪切速率要比分流道中约高 10 倍，充分利用非牛顿流动特性，改善流动性。表 12-7 列出喷嘴的各种浇口的合理剪切速率。同样用式（8-2）计算浇口直径。以合理的剪切速率，又考虑塑料熔体的黏度，计算确定的喷嘴的浇口直径。但是考虑到顶针式浇口中，鱼雷顶针尖的阻塞和热传导的作用，塑料熔体是在圆环隙管道中剪切流动，流变学计算公式复杂。又根据 PSG Plastic Group GmbH 公司资料，分喷嘴顶针式浇口流经 PP、PA 和 ABS 等黏度较低物料，合理的剪切速率范围为 $\dot{\gamma} = 5\times10^4 \sim 10^5\ s^{-1}$。对 PC、PMMA 和 PVC 等黏度较高物料，合理的剪切速率范围为 $\dot{\gamma} = 1\times10^4 \sim 5\times10^4\ s^{-1}$。

表 12-7 各种喷嘴浇口的合理剪切速率

各种喷嘴	合理的剪切速率范围 $\dot{\gamma}/s^{-1}$	常用剪切速率 $\dot{\gamma}/s^{-1}$
主流道单喷嘴的直接浇口	$5\times10^3\sim5\times10^4$	10000
主流道单喷嘴的针阀式浇口	$5\times10^3\sim5\times10^4$	12000
主流道单喷嘴的顶针式浇口	$1\times10^4\sim5\times10^4$	20000
分喷嘴的直接浇口	$1\times10^4\sim5\times10^4$	10000
分喷嘴的针阀式浇口	$1\times10^4\sim5\times10^4$	20000
分喷嘴的顶针式浇口	$1\times10^4\sim1\times10^5$	50000

[例] 某 PC 塑料制品的质量为 $m=50g$，PC 密度为 $\rho=1.2g/cm^3$，流动指数 $n=0.67$。制件为半径 $r=45mm$、高 $h=40mm$、壁厚为 $s=1mm$ 的圆筒形容器，设计计算分喷嘴顶针式浇口直径。

[解] ① 计算充模流量

型腔体积为 $$V=\frac{m}{\rho}=(50/1.2)cm^3=41.67cm^3$$

按表 8-1 查得注射量 $60cm^3$ 的中等充模时间为 1s，注射量 $30cm^3$ 的充模时间为 0.86s，用线性插值，由下式计算型腔体积 $V=41.67cm^3$ 时的充模时间

$$t=0.86s+\frac{1-0.86}{60-30}\times(40-30)s=0.91s$$

通过浇口的流率为 $$q=\frac{V}{t}=\frac{41.67}{0.91}cm^3/s=45.8cm^3/s$$

② 计算浇口直径

由表 12-7 查得流经分喷嘴顶针式浇口的合理剪切速率 $\dot{\gamma}=40000s^{-1}$，代入式（8-6）得

$$d=\frac{1.366}{\sqrt[3]{\dot{\gamma}}}\times\sqrt[3]{\frac{q(3n+1)}{n}}=\frac{1.366}{\sqrt[3]{40000}}\times\sqrt[3]{\frac{45.8(3\times0.67+1)}{0.67}}cm=0.24cm$$

初步计算得浇口直径为 2.4mm。

12.3 喷嘴

热流道喷嘴是热流道系统的终端。它包括加热线圈和测温热电偶、流道和浇口。它将熔料输送到注射模的型腔或附加的冷流道。热流道喷嘴是热流道系统的购置部件。

12.3.1 浇口设计

浇口是热流道系统里的关键功能区。浇口调节塑料熔体对型腔注射的充模流动。浇口的热力闭合或机械开闭，控制着对型腔内塑料的保压补缩时间。充分认识浇口的结构和浇口区塑料的热力学相变，熟悉浇口凝料与注塑件的分离，是正确选择喷嘴的浇口种类和大小，处理浇口区故障的前提。本节讨论直接式和顶针式浇口的热力闭合和针阀式浇口的机械闭合的原理和过程。

直接式和顶针式浇口都是依靠塑料自身固化闭合的。模具冷却系统的传导，使浇口快速降温，熔体冷却后停止流动。在动模打开时，注塑件被强制移动脱模，使浇口凝料拉断。还有一种侧浇口或称为边缘浇口，这种圆孔浇口被凝固后，在注塑件移动时剪断。

1. 直接式浇口

直接式浇口就是主流道型开放式浇口。它的口径、高度及几何结构，塑料熔体性能和浇口区温度等工艺条件，影响着开放式浇口的热力闭合，如图 12-33 所示。

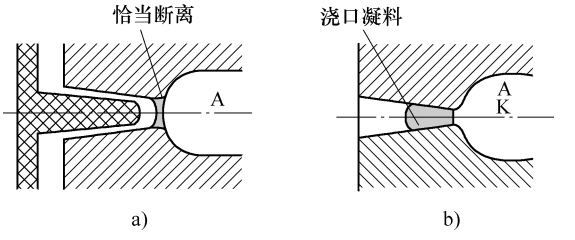


图 12-33　直接式浇口的热力闭合

a）长浇口里的恰当断离　b）凝料头阻塞浇口

A—无定形塑料　K—结晶型塑料

图 12-33a 所示是一种恰当的浇口热力闭合。浇口的凝料头恰当断离，分离在锥形浇口的最窄截面上。在注射循环中应保持这种有效闭合。在下一次注射时又重新开放。这需要有合适的几何结构，相应的浇口凝料头。对无定形塑料成型的浇口凝料头，只要有足够的韧性就能从浇口孔中拉出。对于快速结晶的塑料，需严格控制浇口区的温度和应力解除时间，才会有适当的浇口热闭合。如果浇口区的温度过低，就会出现过厚的冻结层，有太多的冷料，会妨碍下次注射。

如果浇口区温度低而且经历时间很长，就会出现浇口凝料的阻塞堆积，如图 12-33b 所示。下次注射时，这大块冷料会被推到模具型腔里。对于无定形塑料，它可能会被高温熔流熔融。但对于结晶型的工程塑料，如 PA 和 POM 等，会在注塑件表面上黏有冷料团块。因此建议设置冷料井，捕捉和贮存冷料。为避免冷料过多，也建议浇口的高度不要过大。

如果浇口区温度过高，浇口凝料头在高位断离。在与制件一起脱出浇口时，浇口中会有熔料的流涎和拉丝。这是开放式浇口的主要缺点，很难消除。采用顶针式浇口的喷嘴能有效减少这种现象。对于无定形塑料，拉丝结果会在制品的浇口头上，出现尖锥钉。如果很硬的话，会损伤其他塑料制品。对于结晶型塑料，常会出现旋拉长丝。容易出现流涎和拉丝的塑料材料有 PA、PP、HDPE、PET、PS 和 PC，ABS 有时也会有这种情况。

图 12-34 有四种直接式浇口。图 12-34a 和 12-34b 用于主流道单喷嘴，都为整体式的，带有浇口套。前者有系列产品，供选购。料流经冷流道输入型腔，有冷料井捕存塑料冷料。图 12-34c 和 12-34d 的直接式浇口多用于分喷嘴，也用于主流道单喷嘴。它们把塑料的料流直接注入型腔，会在注塑件上留个较大料头。图 12-34c 为浇口在模板上的部分式喷嘴。图 12-34d 是整体式的带有浇口套的喷嘴。浇口套前端能适配注塑件的斜面。

图 12-34 所示的四种直接式浇口的喷嘴头上都是空气间隙绝热。很少见到有塑料绝热仓的喷嘴头。因为绝热仓内塑料皮会降解变色，也使塑料品种更换困难。

图 12-34a 和图 12-34b 所示的直接浇口的整体喷嘴，应用在有冷流道的浇注中。在受热的喷嘴表面与动模表面之间的保证间隙 $\Delta L = 0.5$mm。此间隙在注射时被熔体充满，使喷嘴表面与冷模板绝热，有利于无定形塑料和慢结晶塑料在浇口根部的缓冷。

图 12-34a 上所示的 L_p 为喷嘴头与模具孔的接触配合长度。L_p 的长度决定浇口区的热传导速率。L_p 越长浇口就越容易冻结。对于快速结晶塑料，$L_p = 2 \sim 3$mm 长已经足够了。也有减小轴向热传导截面的结构，在喷嘴头的上部挖出周向凹槽。对于无定形塑料就需要较长的接触长度。特别是浇口直径 6mm 以上，喷嘴头要增强热传导面积，加强对直接浇口的冷却；否则，在加工无定形塑料和聚烯烃 PE 和 PP 期间，在直接浇口根部会出现塑料“溶解”和过大残余压力。

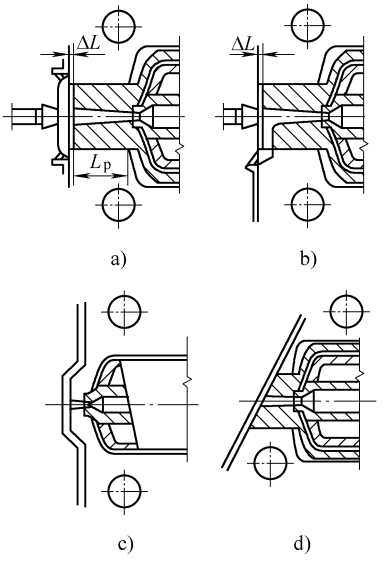


图 12-34　直接浇口的开放式喷嘴的注射

a）、b）和 d）带浇口套的整体式喷嘴

c）不带浇口套的喷嘴

直接浇口的整体式喷嘴，其热流道的标准系列浇口直径为 2.7 ~ 7.9mm，接触长度为 $L_p = 5 \sim 6$mm。可以定购加长型的喷嘴头，可增加长度 15 ~ 30mm。由于脱模时需要倒锥，喷嘴头加长后浇口出口直径达 5.2 ~ 10mm。显然加长的直接浇口并不适用快结晶塑料，但有利于对喷嘴的温度控制。

直接浇口的开放式喷嘴中，熔体并不滞留，也适用于热敏性塑料和着色塑料的更换。因为容易清洗，所以被推荐加工回头料。它容易出现熔体的拉丝和流涎。在操作工艺上，可降低注射和保压压力。更重要的是注意喷嘴头与模具的接触长度，也就是控制配合面积，进一步调节浇口的冷却效率。喷嘴头上较小冷却面积，较短的接触长度，适用于快结晶速率材料，例如 PA、POM 及 PET，和流动缓慢的塑料，例如 PC。相反，有效冷却较大冷却面积的，适用于慢结晶和无定形塑料，例如 PP 和 ABS。

其中图 12-34c 所示的部分式喷嘴，由喷嘴头和模板构成绝热间隙，又有冷模板对浇口的冷却，足以使浇口区冷却灵敏且冻结迅速。因此，减小了拉丝和流涎的可能，更适用于无定形塑料也用于慢结晶塑料，例如 PP、PE 和热塑性弹性体。

2. 顶针式浇口

（1）浇口的热闭合　图 12-35 是顶针式浇口的热闭合状态。热顶针用来提高浇口区熔体的温度，防止了梗塞性的冻结。恰当调节顶针尖的位置，也能防止熔料拉丝。图 12-35a 所示为无定形塑料停止注射后，在浇口壁上形成了皮塞。在临近热顶针上是高弹性的不完整热皮层，属于松弛闭合。在注射压力下，皮塞很容易被涌出和熔融。在正常生产中，不会出现浇口堵塞。图 12-35b 所示为结晶型塑料的节流闭合。停止注射后浇口壁上的皮层和热顶针之间存在缝隙，会滞留黏度较高的熔体。

（2）浇口痕迹　对于顶针式浇口，浇口痕迹如图 12-36 所示，它决定于浇口结构的几何因素。h 为浇口直径 D 的高度。Δh 是顶针尖和浇口端面之间的位置。图 12-36a 和图 12-36b 所示结构，在加工 PP 时，偶尔会出现流涎现象。调整顶针尖的轴向位置使 $\Delta h<0$，可解决流涎问题，但痕迹较高。对于顶针式浇口，浇口直径 D 为常数时，浇口痕迹（如图 12-37a 所示）随高度 h 增加而增高。高度 h 为常数时，浇口痕迹如图 12-37b 所示，随直径 D 增加而扩大。

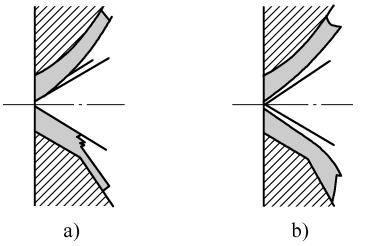


图 12-35　顶针式浇口的热闭合

a）无定形塑料的松弛闭合

b）结晶型塑料的节流闭合

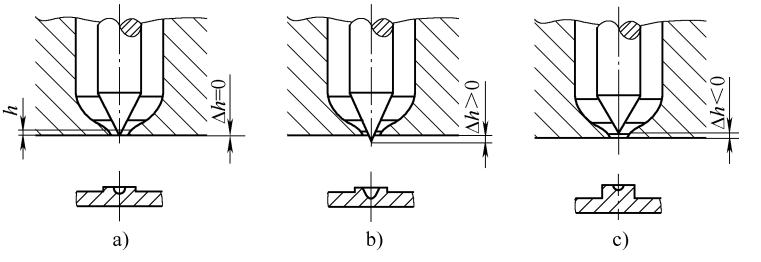


图 12-36　顶针尖在轴向不同位置时浇口痕迹

a）标准位置　b）顶针尖伸出　c）顶针尖缩进

（3）顶针浇口的阻塞　在前 12.2 节中已介绍了流变学的浇口直径的计算方法。在 12.3.1 节的最后还会介绍浇口直径的经验估算方法。这里分析喷嘴顶针尖的结构和定位引起浇口的局部阻塞问题，以保证浇口直径设计计算正确。

在浇口部位，所有通道面积 S 应该相等。但由于顶针锥形头的阻流，通道面积有变化。在图 12-38 所示几何参量的浇口里，熔料注射流动时的流量偏差应尽可能小些。可以推导熔料在浇口洞口流动的阻塞比

$$\beta_s=\frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}}\times 100\%=\frac{d^2}{D^2}\times 100\%$$

又令　　$\tan\varphi=\dfrac{d}{2h}$

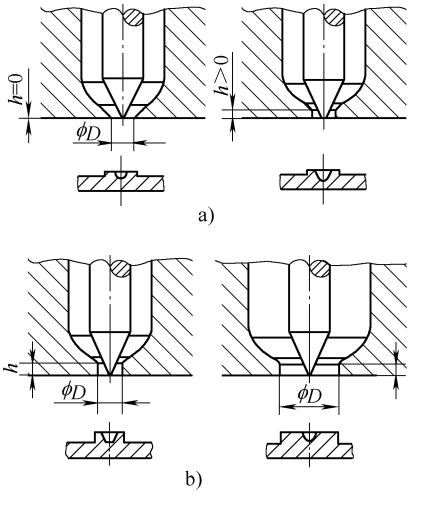


图 12-37　顶针式浇口高度和直径影响浇口痕迹

a）浇口直径 D 为常数时，浇口痕迹随高度 h 增加而增高

b）高度 h 为常数时，浇口痕迹随直径 D 增加而扩大

可得

$$\beta_s = \left(\frac{2h\tan\varphi}{D}\right)^2 \times 100\% \tag{12-21}$$

根据式（12-21），假定 $2\varphi = 50°$，$h = 0.1\text{mm}$、0.2mm、0.3mm，可得到图 12-39 的结果。对于较小的浇口直径 D，有显著的阻塞作用，会减小有效的流动截面。阻塞程度取决于顶针尖伸入到型腔中的距离。当 $h = 0$ 时，阻塞作用很小，但浇口周边为锐角。浇口的强度很差。而且塑料熔体在高剪切速率下会发生热降解。$h = 0.3\text{mm}$ 时，顶尖的阻塞作用太大。因此，浇口洞口高度在 $h = 0.1 \sim 0.2\text{mm}$ 中选取。为促进热传导，顶针尖的锥角 2φ 应大些，但会使顶尖的阻塞作用加大。

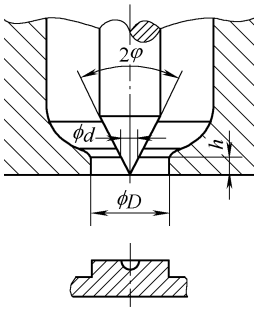


图 12-38　顶针式喷嘴的浇口区的局部阻塞面积

D—浇口直径　h—浇口直径 D 的高度

2φ—顶针尖的锥角　d—阻塞面的直径

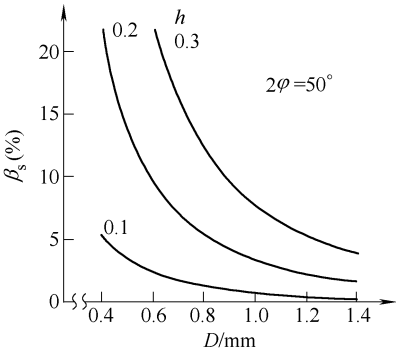


图 12-39　浇口流动的阻塞比与浇口直径 D 及高度 h 的关系曲线

（4）顶针式浇口的测量　喷嘴浇口的精确制造，关系到注射的成败。特别在多喷嘴注射时，各个喷嘴浇口的结构和尺寸形状不一致，使得塑料熔体射出的物理参数不同，最终会影响注塑件的质量。因此，必须高精度等级检测浇口的几何参数。

这里介绍两种测量浇口洞口高度 h 的方法，如图 12-40 所示。图 12-40a 是已知浇口直径 D、钢球直径 $2R_c$ 和洞口锥角 2β，测得图示高度 H，用式（12-22）计算得 h 值。图 12-40b 是已知浇口直径 D 和洞口锥角 2β，测得量规锥角头伸出的图示距离 x，用式（12-23）计算得 h 值。

钢球测量

$$h = H - R_c\left[(1+\sin\beta) + \frac{\cos\beta}{\tan\beta}\right] + \frac{D}{2\tan\beta} \tag{12-22}$$

锥角头测量

$$h = \frac{D}{2\tan\beta} - x \tag{12-23}$$

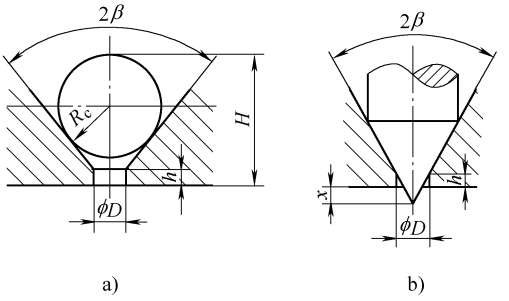
直接式浇口和顶针式浇口都属于热力闭合的浇口。因此相对机械闭合而言，它们同属于开放式浇口。

3. 机械闭合

针阀式喷嘴将可控制移动的阀针柱销头引入浇口孔中，辅助浇口机械闭合，见图 12-41。已标准系列化的针阀式喷嘴的浇口直径为 1 ~ 7mm。也允许有更大的浇口直径。

（1）柱销头　针阀式喷嘴的柱销头有两种类型。

1）圆柱头。图 12-41a 所示柱销头为圆柱体，称圆柱头。在圆柱头作锁紧运动时，将浇口洞口 d_g 中的一段塑料柱体压注到注塑件中，导致浇口附近塑料被过量压缩。此部位会有过大的残余应力，出现发白和裂纹。因此，洞口高度 h 应尽量小些。圆柱头必须有精密的滑动配合，并考虑径向的热膨胀的补偿。建议公差配合为 d6/H6 或 d5/H5。这种长柱销在注射压力下，受到的轴向力较小，轴向位置调节比较容易。一般在注塑件表面上有深 0.1 ~ 0.3mm 的圆坑痕。



a)　　b)

图 12-40　浇口高度 h 的测量方法

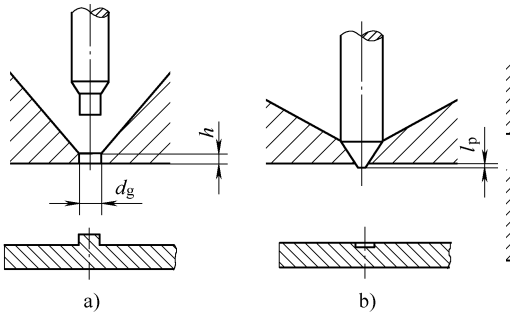
a）钢球测量　b）锥角头测量

H—测得图示高度　x—测得图示高度

$2R_c$—钢球直径　2β—洞口锥角

2）锥销头。图 12-41b 所示的柱销头为圆锥体，称锥销头。在浇口成型面上，锥销头应伸出 $l_p = 0.05$mm。如果浇口洞口和锥销头都是锐边尖角，在注塑件上留下圆凹痕；倘若为圆角，可能在表面上黏出凸起圆柱痕迹。

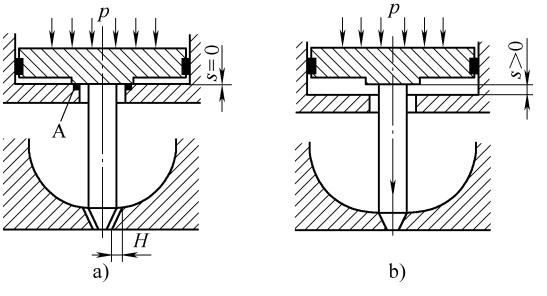
（2）阀针的轴向锁紧　锥销头的整根阀针的锁闭浇口的状态，见图 12-42 所示。图 12-42a 上，驱动力 p 作用在活塞的支撑面上，$s = 0$。图 12-42b 上活塞与支撑面之间有间隙，$s > 0$。驱动力 p 经柱销紧闭在浇口锥孔中。长柱销受到很大的轴向压力，在下一节中将分析此压杆的稳定性。这种喷嘴在装配过程中，先在支撑面上留 0.02mm 的间隙。在驱动压力 p 作用下，活塞支撑面上和浇口锥孔都受到压力。在此超静定的系统中，过大的压力会使长柱销产生弹性弯曲变形。因此，柱销的轴向位置应该可以调节，并可靠锁紧。



a)　　b)

图 12-41　针阀式喷嘴上浇口的机械闭合

a）圆柱头阀针　b）锥销头阀针



a)　　b)

图 12-42　锥销头阀针锁闭浇口的状态

a）支撑面上 $s = 0$　b）支撑面上有间隙 $s > 0$

机械闭合有大孔径的浇口，塑料熔体充填型腔容易，因此适用于高黏度和对剪切敏感的塑料熔体，可以控制获得较长时间的有效的保压压力，因此适宜注射厚壁的大型塑料制品。与热力闭合浇口相比，不受浇口区域的热平衡影响。机械浇口闭合控制准确，

对凝固中塑料补缩可靠，因此改善了注塑件质量和尺寸的精度。瞬时关闭浇口的功能，防止了型腔中高压熔料的倒流，不会产生溢边，也限制了浇口熔料的流涎和拉丝，但会在注塑件表面留下柱销头的压痕，见图 12-41。

（3）锥销头的锥角　图 12-43 对锥销头进行静力分析，可决定锥角 2α。锁紧力 F 作用在锥销头上，有

$$F=\frac{\pi}{4}D^2p$$

如果活塞直径 $D=50\text{mm}$，液压力 $p=6\text{MPa}$。可得轴向锁紧力 $F=11800\text{N}$。由此推导得锥销头的压紧力 S 有如下关系

$$\sin\alpha=\frac{F/2}{S}$$

可得

$$S=\frac{F}{2\sin\alpha}\qquad(12\text{-}24)$$

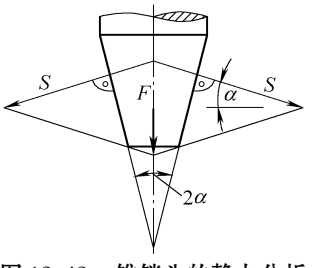


图 12-43　锥销头的静力分析

由前述锁紧力 $F=11800\text{N}$，若锥角 $2\alpha=40°$，得浇口孔承受压紧力 $S=17250\text{N}$。锥孔的斜面使压紧力 $S\approx1.5F$。因此斜角应在 $\alpha=20°\sim30°$，即锥角 $2\alpha=40°\sim60°$。图 12-44 所示压紧力 S 与锁紧力 F 之比在 1.5～1 较为合适。

4. 浇口直径

在热流道系统元件的所有几何参数中，浇口尺寸对制品质量的影响最大。浇口的直径选择受喷嘴的种类、塑料材料、注塑件和加工工艺的影响。前已介绍浇口的直径用流变学的公式计算。这里再介绍经验线图和表格确定方法，选取标准系列的喷嘴-浇口直径，在注射试用后进行调整修正。这里介绍两种热流道专业公司的确定浇口直径的线图和表格，供参考。

1）以塑料流动性和注射量选定浇口直径，见某公司提供的图 12-45。这种线图对流动性的描述比较模糊，因为某种塑料的不同品级会有不同的黏度。

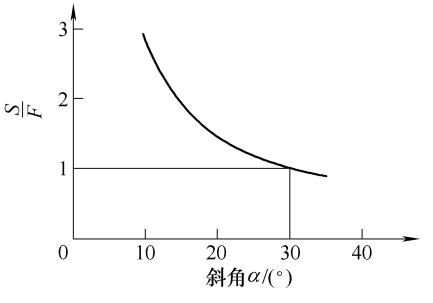


图 12-44　锥销头的锥面压紧力 S 与轴向锁紧力 F 的关系

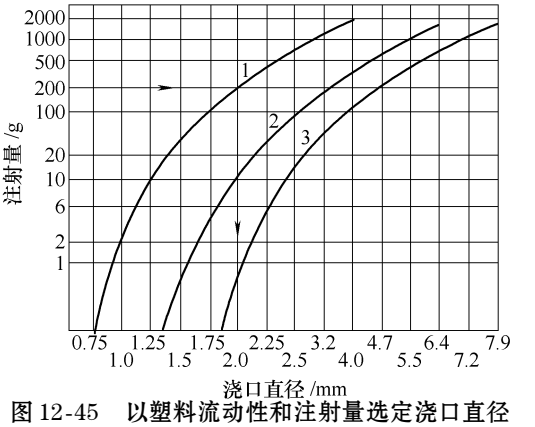


图 12-45　以塑料流动性和注射量选定浇口直径

1—流动性好的塑料（PE、PP、PS）

2—流动性中等的塑料（ABS、PA、POM、SAN）

3—流动性差的塑料（PC、PMMA、PPO、PUR）

2）以注塑件的表面积和壁厚决定浇口直径。表 12-8 为某公司提供，用于流动性较好的 PE、PP 和 PS 塑料熔体；对于其他黏度较高的塑料种类，浇口的直径应给乘上增大系数。

表 12-8　以注塑件的表面积和壁厚决定浇口直径　　（单位：mm）

制品表面积/mm^2	注塑件壁厚/mm									
	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50	3.00	4.00
600	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.95	1.00	1.12	1.27
1200	0.90	0.90	0.90	0.92	1.00	1.05	1.12	1.17	1.32	1.50
1800	0.90	0.90	0.95	1.02	1.10	1.17	1.25	1.30	1.47	1.68
2400	0.90	0.90	1.02	1.10	1.20	1.25	1.35	1.40	1.58	1.78
3000	0.90	0.95	1.07	1.17	1.25	1.32	1.42	1.47	1.65	1.88
6000	1.00	1.12	1.27	1.37	1.50	1.58	1.68	1.76	1.98	2.26
12000	1.17	1.32	1.53	1.63	1.78	1.88	2.00	2.08	2.36	2.67
18000	1.30	1.47	1.68	1.83	1.96	2.06	2.21	2.31	2.62	2.97
24000	1.37	1.58	1.80	1.96	2.10	2.24	2.39	2.49	2.80	3.18
30000	1.45	1.65	1.90	2.06	2.24	2.36	2.51	2.64	2.95	3.35
36000	1.53	1.73	1.98	2.16	2.34	2.46	2.64	2.77	3.10	3.53
42000	1.58	1.80	2.08	2.26	2.41	2.57	2.75	2.87	3.23	3.66
48000	1.65	1.88	2.13	2.34	2.51	2.64	2.82	2.97	3.33	3.97

模具生产企业选定浇口要慎重。浇口直径选定过程与喷嘴类型有关。热流道专业公司供应的整体式喷嘴，已经有了浇口。热流道专业公司供应部分式喷嘴时上面没有浇口，置换和修整浇口很不方便。模具生产企业设计和制造浇口套零件密配在喷嘴上，要尊重热流道供应商的浇口设计的建议。热流道专业公司侧重于提供浇口的最小直径，着眼于塑料材料的流动性能。塑料加工温度范围大，选用小浇口。高结晶度塑料（PA，POM 和 PBT）的浇口直径最小为 2.4mm。而模具的设计者着重于浇口的平均直径，充分注意到制品的壁厚和审美要求，还考虑喷嘴的塑料注射量与注射点的实际注射量和流程比作比较，为提高注射速率而选择较大浇口。由于浇口直径选择优化的复杂性，停产拆卸模具再修正浇口，有时是难免的。表 12-9 提供浇口直径修正的指导性意见。

表 12-9　塑料性能、制品特性和加工参量对浇口直径修正的影响

浇　口	浇口直径		
顶针式、边缘式、针阀式	小	中	大
	←——浇口直径修正方向——→		
塑料材料			
结构	无定形	结晶型	高度结晶
相对分子质量	低	中	高
熔体流动速率	高	中	低
增塑剂和填充剂	—	含量低	含量高
助燃剂	无	—	有
对温度和剪切的敏感性	不适合	允许	合适
冻结	慢	正常	快
注射制品			

（续）

浇　口	浇口直径		
顶针式、边缘式、针阀式	小	中	大
	←——浇口直径修正方向——→		
注射量	小	中	大
壁厚与流程的比率	小	中	大
公差	宽	中等	窄
浇口痕迹	小	中	大
应用	大批量生产	—	工程制件
加工工艺			
注射温度范围	宽	中等	窄
注射速率	低	中	高
产生压力降	大	正常	小
保压作用	次要	—	主要

12.3.2　各类喷嘴设计

热流道喷嘴有主流道单喷嘴或称单喷嘴，有注射点的喷嘴，称分喷嘴。许多场合，购置的注射点的喷嘴，没有浇口套，由模具制造者将浇口制造在定模的分型面上。

1. 要求和分类

（1）喷嘴加热、绝热和注射工作的基本要求

① 喷嘴的加热温度分布特性应该接近直线；浇口区的温度控制合理；浇口的熔体热力闭合稳当或机械闭合可靠。

② 热喷嘴与冷模具之间绝热良好。

③ 熔料从模具的浇口位置分离，要清洁，且重现稳定；浇口是喷嘴或型腔的一部分，布置在热流道系统的重要临界位置；浇口熔料不应该有任何下垂和流涎。

④ 在喷嘴与流道板之间应保持无泄漏；喷嘴与模板间的密封也应无泄漏。

（2）喷嘴分类

1）加热类型。喷嘴有外部或内部加热，或者两者都使用的混合加热，也有用流道板加热。主流道喷嘴还可利用注射机的喷嘴加热。

喷嘴外壳与模板孔之间的大部分面积用空气隙绝热；为防止喷嘴的顶针区对模具的热扩散，用塑料皮层做绝热仓；在喷嘴与模具的接触部位，用不锈钢、钛合金或陶瓷材料绝热；在满足强度和刚度的前提下，使接触面积最小。

2）功能分类。如果主流道喷嘴直接注射塑料进型腔或者冷流道，称为主流道单喷嘴。它有各种输出的浇口。主流道喷嘴与注射机的喷嘴直接作用，并与流道板的流道相通，称为中央喷嘴。流道板下游的注射点喷嘴，称为流道板喷嘴或分喷嘴。

3）浇口的类型区分。热流道行业以浇口的类型来命名喷嘴，有直接式喷嘴、顶针式喷嘴和针阀式喷嘴等。

4）注射点的数目。流道板上有二至八个甚至更多喷嘴。使用多个喷嘴时，随着喷嘴的数目减少和流道板的缩小和免除，能使热流道系统的成本下降。多浇口的喷嘴，例如双

浇口的边缘喷嘴，可方便安置多型腔的小型注塑件的浇注。多个浇口的喷嘴称多点喷嘴。

5）浇口布置和喷嘴的壳体。将带浇口套的喷嘴称作整体式喷嘴，主要用于结晶型塑料注射成型。喷嘴上有完整浇口将物料浇注到模具的型腔。喷嘴的端面是型腔的组成部分，不带浇口的喷嘴被称为部分式喷嘴，主要用于无定形塑料注射成型。

2. 主流道单喷嘴

主流道单喷嘴的相关部件也称为主流道杯。热流道单喷嘴的注射模结构如图 12-46 所示。这类单喷嘴可有多种浇口的形式。图 12-46a 为直接浇口。直接浇口的单喷嘴允许有较长较粗的塑料熔体的通道。在塑料上留有较大直径的料柄。

直接式浇口的单喷嘴，浇口有锥度，便于脱出又长又粗的料柄。它能注射有较长的流程比的大型深腔的壳体，如桶、箱座等。主流道喷嘴通道中，熔体传输的压力损失较小，又没有分流道。此种单个中央的正面浇口，成型的壳体取向良好，又无熔合缝。

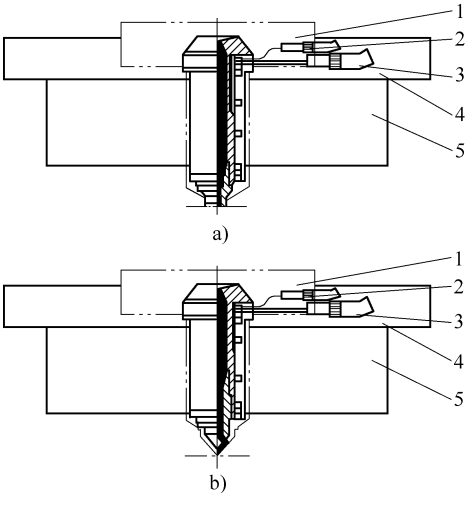


图 12-46　主流道单喷嘴

a）直接浇口的单喷嘴　b）顶针式浇口的单喷嘴

1—定位圈　2—热电偶　3—加热器

4—定模固定板　5—定模板

这种喷嘴有粗大的料柄，且根部塑料有气泡和凹陷，需要机械切割去除，又留下很大的疤痕。由于浇口根部凝料粗大，还须延长冷却时间和注射周期，在成型平板制品时，易产生扭转状的翘曲变形。

为了避免注塑件表面有颇大的痕迹，往往将壳体倒置，从壳体的里侧注射成型；也推荐使用直接浇口的主流道单喷嘴，让其下游是冷流道系统，分叉后注射多个型腔；或再经分流道后，以多点注射成型较大壳体，这样可便于分配熔料和缩短流程。

图 12-46a 所示直接浇口的主流道单喷嘴属于开放式的喷嘴。按塑料熔体的注射量和黏度，选定浇口口径。开放式喷嘴容易清洗，不易堵塞，被推荐加工回头料、高黏度熔料及高充填填料的塑料。

图 12-46b 所示的主流道单喷嘴，属于整体式管道型顶针式喷嘴。塑料熔体从喷嘴流道，经顶锥壳上 2 ~ 3 个小孔中射出。由于顶针尖作用，塑料熔体在环隙截面中射入型腔，有助于防止浇口上产生拉丝。顶针将熔体引入到浇口，浇口温度容易控制，也适用于热敏性的塑料注射在制品上的浇口残留料头少，浇口越小，痕迹越小。标准系列顶针式喷嘴的浇口直径为 1 ~ 2mm。但是顶针的存在，使塑料熔体经历分流并在窄环隙中流动，增加了流动阻力和压力损失。倘若有 1kg 以上的过大注射量；或 0. 3m 以上的过长的喷嘴，容易使熔体过热分解。

还有针阀式主流道单喷嘴。如图 12-47 所示是气动针阀式主流道喷嘴。塑料熔体由注射机喷嘴射入后，经此单喷嘴充填模具型腔。这种喷嘴的浇口痕迹小。独立加热和热电偶保证合理的加热功率和精确的温度控制。气压驱动单喷嘴，安装和操作简单方便。带有锥度的浇口，其孔径为 2.5～8mm。圆柱孔的浇口有 8～20mm 的口径，适合加工大型和深腔的壳体。

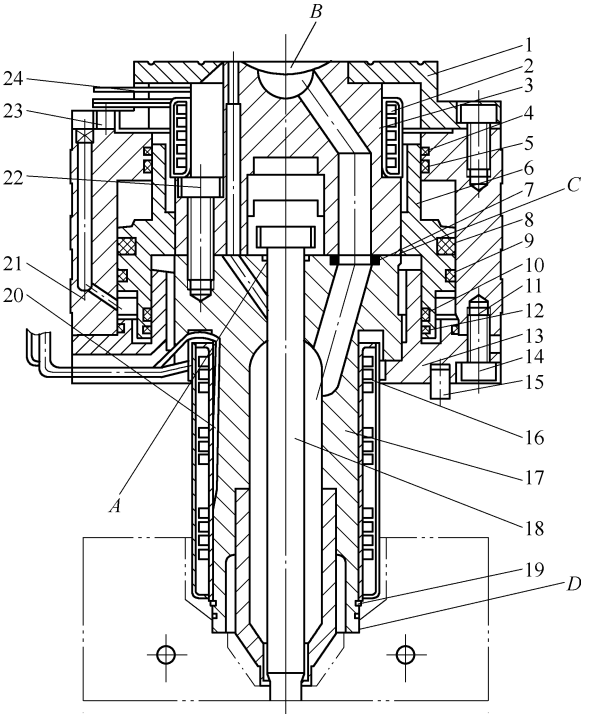


图 12-47　气动针阀式主流道单喷嘴装配图

1—气缸上盖　2—主流道加热器　3—主流道杯
4,8,12—耐磨密封圈　5,9,10,11—橡胶密封圈
6—气缸活塞　7—流道密封圈　13—气缸下盖
14,22,23—内六角螺钉　15—止转销钉
16—喷嘴加热器　17—喷嘴　18—开关柱销
19—弹簧挡圈　20—喷嘴热电偶　21—气缸缸体
24—主流道杯热电偶
A、*B*、*C*、*D*—熔体可能泄漏部位

3. 直接式分喷嘴

图 12-48 所示为直接式分喷嘴，能维持较高的浇口温度和防止过早冻结。直接浇口本身的压力降较小，能较好地传递保压压力，对注塑件有较好的补缩，可用于注射长流程、厚壁和深腔的注塑件。

直接浇口的整体式喷嘴，热流道的浇口直径为 2.7～8.0mm。喷嘴头与模具孔的接触配合接触长度为 5～6mm，也可增加长度 15～30mm。接触配合长度决定浇口区的热传导速率。浇口越长就越容易冻结。对于快速结晶塑料，浇口有 2～3mm 长已经足够了；对于无定形和慢结晶塑料特别是浇口直径为 6mm 以上时，就需要更长的接触长度。喷嘴头要增强热传导面积，加强对直接浇口的冷却。

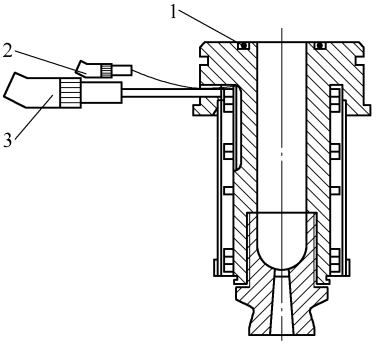


图 12-48　直接式分喷嘴的结构

1—密封圈　2—热电偶　3—加热器

4. 顶针式分喷嘴

此种喷嘴在制品上残留物痕迹很小，而且注射无定形和结晶型塑料都可应用。它由热顶针将塑料熔体引流到浇口。浇口的温度容易控制，便于热敏性塑料的注射。在浇口中央的顶针有助于防止熔料拉丝和流涎。它有较小的浇口直径（0.8～3mm），

对很小的制品，可用约 0.5mm 直径的浇口。

缺口敏感的塑料，像无定形的 PC、PMMA 和 PS 塑料，快结晶的 PA、POM 和 PEEK 及玻璃纤维高含量塑料，浇口的边缘应是锐利的，可选用较大直径（1 ~ 3mm）的浇口，拉断浇口废料时有清晰的断面。对缺口不敏感的塑料像 PE、PP、PVC 及热塑料弹性体 TPE，不会得到齐整的浇口断面。为得到美观的制品外表，浇口直径应尽可能限制在 0.5 ~ 1mm。顶针式喷嘴不推荐注射对剪切速率敏感的塑料，包括含有阻燃剂或有机染料的塑料。浇口里的环形间隙小，有温度上升和物料分解的可能。

顶针可分为两类：管道顶针和鱼雷顶针。

图 12-49 中所示的为管道顶针。塑料熔体经顶针的管道，在顶管的圆锥尖顶上，从几个斜孔中流出。顶管被直接外加热。顶管用铍铜制造，表面可镀铬。顶管圆锥头与浇口间有半圆形凹坑作为绝热仓。图 12-49 所示属于不带浇口套的喷嘴，浇口是在模板上，绝热仓的皮层尚可清除，故应用较多。

顶管的顶针尖伸出较长，顶针尖的伸出长为 9.3 ~ 20mm。浇口制造在模具上能被充分冷却。它属于低温浇口，适合于无定形塑料。顶管头将熔料分流，经浇口进入型腔后重新汇合。对于加工 ABS、热塑性弹性体和添加过金属或珠光颜料的塑料，有可能在制品表面形成可见的熔合缝。

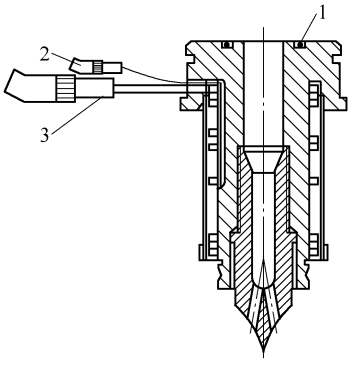


图 12-49　管道顶针式分喷嘴的结构

1—密封圈　2—热电偶　3—加热器

图 12-50 中所示的是热传导的鱼雷顶针。位于流道中央的鱼雷顶针，被塑料熔体传导加热。喷嘴壳体被线圈加热。鱼雷顶针使熔体在窄环隙中流动，增加了阻力和压力损失。倘若注射量超过 1kg，或喷嘴长超过 0.3m，常会出现塑料熔体过热分解和变色。

图 12-50a 所示属于带浇口的整体式喷嘴。顶针尖和浇口孔的位置精度有保证。但常在注塑件表面上留下浇口套的痕迹。热传导鱼雷顶针很短小，便于用肋条固配在绝热套上。喷嘴体用耐热钢 4Cr5MoSiV1、H13（美）制造。绝热套用不锈钢或钛合金制造。顶针用 4Cr13 制造，耐磨耐蚀，顶尖硬度为 50HRC。中空部分嵌入导热铜芯后封上顶尖。绝热套和顶针可以更换。喷嘴与模板之间至少 2mm 的空气间隙用于绝热。

图 12-50b 所示不带浇口的顶针式喷嘴，属于部分式喷嘴，浇口在模具内。由模具制造企业按热流道公司推荐尺寸加工。浇口区域可充分冷却，温度较低，用于注射无定形塑料和慢结晶的 PE 和 PP 塑料。如果浇口孔仓过大，可能有少量滞留皮层，可以拆卸喷嘴，清洗浇口。

5. 针阀式分喷嘴

（1）结构和应用　图 12-51 所示是气动的针阀式喷嘴，也称开关式喷嘴。熔料经流道板分配给各注射点，实现大型注塑件的多点注射，或者一模多腔成型。气缸安装在定模固定板中，阀针柱销穿越流道板。喷嘴有带浇口或不带浇口的。常用浇口直径为 2 ~ 8mm，最大可以达到 20mm。多个针阀式喷嘴适用于时间顺序控制注射，可对各注射点

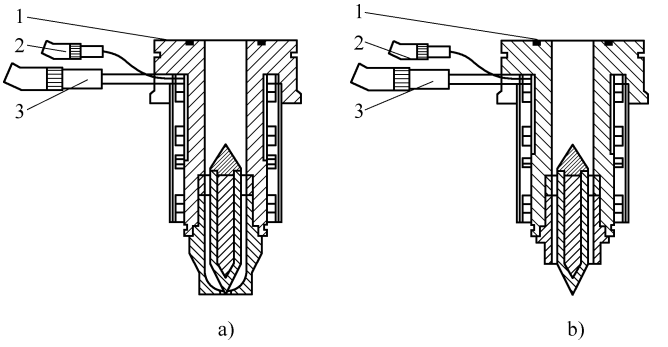


图 12-50　鱼雷顶针式分喷嘴结构

a）整体式喷嘴　b）部分式喷嘴

1—密封圈　2—热电偶　3—加热器

喷嘴分别安排各自的注射保压时间，从而控制各股料流的注射和保压，能控制熔合缝位置或消除熔合缝。

针阀式分喷嘴在热流道系统应用有四个方面的优势：

1）可确保在塑料制品固化中准确控制柱销闭合浇口；可以确保各个喷嘴在保压后有时间一致的浇口闭合；常可使注射循环时间减少；也使一模多腔的各注射点的计量一致。

2）在制品上无废料残留，仅有柱销留下的圆柱标记能满足制品表面高质量的需求；浇口不存在流涎和拉丝。

3）有较大的浇口通道，因此可用于低剪切阻抗或对剪切敏感的塑料注射。

4）适合大型塑料制品的注射，以较低保压压力，获得残余应力较低的制品。

有些因素限制了针阀式分喷嘴的使用。使用液压缸或气动缸，需要额外的安装位置；需要对驱动缸附设控制系统。过长的阀针柱销，曲折的环隙流道，会

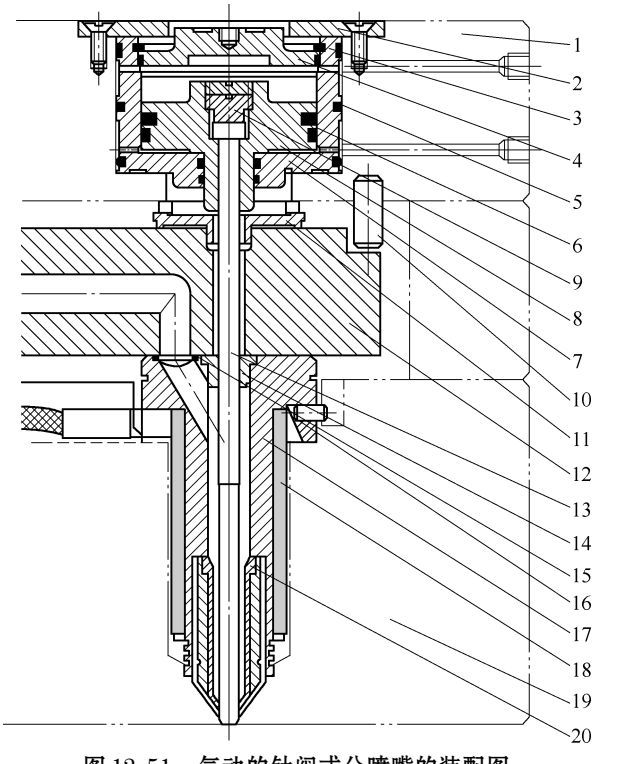


图 12-51　气动的针阀式分喷嘴的装配图

1—定模固定板　2—盖板　3—挡圈　4—缸盖

5、15—密封圈　6—耐磨密封圈　7—压紧螺钉　8—活塞

9—缸体　10—流道板止转销　11—承压圈　12—流道板

13—阀针柱销　14—导套　16—喷嘴止转销

17—喷嘴体　18—加热器　19—定模板　20—浇口导圈

使喷嘴中的流程压力增加。高温下的聚合物分子降解后，产生的污垢会进入间隙，使柱销卡死，流道烧结。因此喷嘴失效时，不能提高温度和增加注射压力，否则会导致各种泄漏等危害。

针阀式喷嘴的浇口结构，有部分式和整体式两大类型。图 12-51 所示的部分壳体式喷嘴，浇口开设在模具上。它的浇口区温度较低，但不至于冻结浇口中的熔料，适用于无定形塑料的注射。如果加工结晶型塑料，浇口里会较早地出现冻结皮层，妨碍阀针插入闭合，还会将浇口凝料推入到注塑件的表面。整体壳体式的喷嘴，其浇口孔座由喷嘴的加热器加热，适用于结晶型塑料的注射。

图 12-52 所示是带浇口套的针阀式分喷嘴。与图 12-51 的结构相比，为提高工作可靠性和使用寿命，有三方面的改进设计。

1）柱销 12 与分流道在同一通道中。喷嘴的入口端面与流道板密合较好，不易漏胶。

2）如图 12-52 所示阀针柱销 12 用引导滑套 15 导向。它增加了阀针滑动支承，减小阀针的弯曲变形，保证了阀针柱销在闭合时对浇口有精确对准，明显提高了浇口的强度和寿命。

3）为了提高喷嘴轴线上阀针 12 与导套 9、引导滑套 15 和浇口套 17 的同轴度，减小由于流道板的横向膨胀造成的阀针弯曲变形，如图所示的承压圈 8，用径向间隙补偿流道板的横向热伸长和浇口中心线的误差，而用导套 9 的紧压端面封胶。

针阀式喷嘴的浇口结构，还分为圆柱筒口和圆锥筒口两种（见前节所述）。阀针柱销有圆柱头和锥销头。圆柱头与浇口孔的配合间隙要求很高，注塑件表面的浇口痕迹较明显，浇口附近制件质量较差。锥销头的轴向位置调节很重要，注塑件表面的痕迹较浅。由于闭合封胶可靠，应用日益增多。

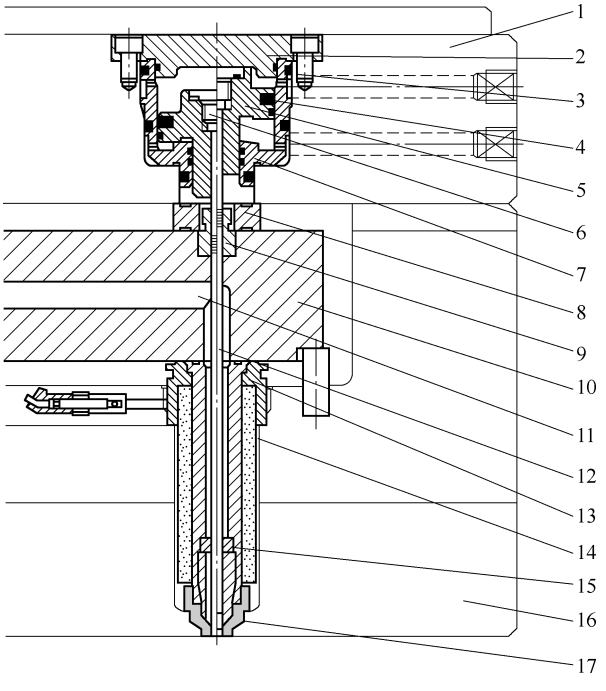


图 12-52　带浇口套的针阀式分喷嘴

1—定模固定板　2—缸盖　3—密封橡胶圈　4—耐磨橡胶圈
5—活塞　6—压紧螺钉　7—缸体　8—承压圈　9—导套
10—流道板　11—分流道　12—阀针柱销　13—喷嘴体
14—加热器　15—引导滑套　16—定模板
17—浇口套

（2）柱销的驱动　阀针柱销的驱动有气动和液压两种。弹簧驱动的阀针已经很少采用。液压或气动喷嘴的阀针，都需独立控制。它们都需要较大空间来安装缸体。通常缸体

设置在定模固定板上。图 12-52 所示为气动的针阀式喷嘴。它比液压驱动简单，通常不需要对气缸冷却。但气缸活塞产生的作用力比液压的要小许多倍。气动和液压传动介质的压力见表 12-10。常用管道气压为 0.6MPa。气动针阀式喷嘴主要用于低压注射的低黏度塑料。它有较清洁的生产环境，没有油雾和漏油。可以有比液压更高的加工温度。

表 12-10 气动和液压驱动针阀式喷嘴柱销的压力值

压力类型	压力 p / MPa
气动	0.4 ~ 1.0
液压	3.0 ~ 6.0（8.0）

液压驱动的针阀式喷嘴，需专门液压泵或注射机的液压油推动液压缸的活塞。油压通常是 3 ~ 6MPa。控制油路由压力阀和流量阀组成。通常利用注射机的控制系统联结液压缸的控制油路。开始注射的信号用来开启浇口里的柱销。保压结束的信息，用来关闭浇口。柱销在流道板的流道里直线运动。温度变化会引起柱销偏移和弯曲。液压缸的温度不能超过 80 ~ 100℃。温度过高会引起漏油。

阀针的导向导套装在喷嘴中，让流道 Z 字形拐弯供料。柱销与导套需高精度研磨，要在 300℃的操作温度下，能保证单边有约 3μm 间隙。阀针应该能运动自如。此间隙能防止一般塑料熔体泄漏。但对一些低黏度的熔料，单边间隙要求为 2μm，单向间隙的三次方与泄漏量成正比。阀针柱销的表面硬度为 54HRC 以上，保证有足够抗磨蚀性能，常用 4Cr5MoSiV1、H13（美）钢制造，与浇口的配合段作表面渗氮处理。注射有无机填料的塑料，需要柱销有更高的抗磨性能。阀针柱销用 DIN（德）1.2343（X38CrMoV51）制造，表面镀 15 ~ 20μm 镍层防腐蚀。再涂 1 ~ 5μm 氮化钛 TiN，提高耐磨性和降低黏附。有高耐磨性要求的阀针用高速钢，例如 SKH51（日）制造，硬度为 59 ~ 63HRC。导套用 Co-Cr-W 硬质合金制造。导套孔内挖 1 ~ 2 个周向凹槽，形成环形密封。

（3）阀针柱销直径

1）对于气压驱动，浇口为圆柱头闭合。气缸活塞直径 $D = 90\text{mm}$，喷嘴内熔体的注射压力 $p_j = 100\text{MPa}$，柱销直径 $d = 4\text{mm}$，试求柱销克服注射压力所需的闭合气压 p。

平衡状态时，活塞闭合力等于熔料注射反力

$$\frac{\pi}{4}d^2 p_j = \frac{\pi}{4}D^2 p$$

求得气动压力

$$p = \left(\frac{d}{D}\right)^2 p_j = \left(\frac{4}{90}\right)^2 \times 100\text{MPa} = 0.197\text{MPa}$$

需要大于 0.2MPa 气压，就能推动柱销闭合。

2）对于气压驱动，浇口为圆锥头闭合。如果气缸活塞直径 $D = 90\text{mm}$，驱动气压 $p = 0.6\text{MPa}$，对于细长的柱销受到浇口锥孔的锁紧力

$$F = \frac{\pi}{4}D^2 p = \frac{\pi}{4} \times 90^2 \times 0.6\text{N} = 3817\text{N}$$

柱销的圆锥头闭合在浇口，作为固定端。浇口至导套的距离 $l = 120\text{mm}$。柱销与导套的动配合，作为铰链支承。柱销压杆的长度系数 $\mu = 0.707$。在锁紧力 F 作用下

$$F=\frac{\pi^2 EJ}{(\mu l)^2}$$

式中钢柱销的弹性模量取 300℃时 $E=186\times10^3$MPa。圆柱柱销的轴惯性矩 J 为

$$J=\frac{\pi d^2}{64}$$

柱销直径 $d=\sqrt[4]{\frac{64(\mu l)^2F}{\pi^3E}}=\sqrt[4]{\frac{64\times(0.707\times120)^2\times3817}{\pi^3\times186\times10^3}}\text{mm}=4.17\text{mm}$

如果出现柱销压杆失稳，弯曲变形使圆锥头与浇口孔产生错位。必须限制浇口至导套的距离 l。

3）对于液压驱动，浇口为销锥头闭合。如果液压缸活塞直径 $D=50$mm，驱动液压 $p=6$MPa，浇口处的锁紧力

$$F=\frac{\pi}{4}D^2p=\frac{\pi}{4}\times50^2\times6\text{N}=11780\text{N}$$

其余参数同上，由压杆稳定性求得该柱销直径

$$d=\sqrt[4]{\frac{64(\mu l)^2F}{\pi^3E}}=\sqrt[4]{\frac{64\times(0.707\times120)^2\times11780}{\pi^3\times186\times10^3}}\text{mm}=5.54\text{mm}$$

6. 多浇口喷嘴

多浇口喷嘴绝大多数是外部加热的，而且温度是可控制的。一个喷嘴有多个浇口可注射各个型腔，适用一模多腔的注射模。多浇口喷嘴有两类，一类是立式多浇口，另一类是边缘式多浇口。它们的浇口多为开放式小浇口，有三种结构：有绝热仓的开放式浇口、开放接触浇口和顶针式浇口。

（1）立式多浇口喷嘴　图 12-53 展示了顶端浇注的立式多浇口喷嘴。一个喷嘴有 2、3、4 或 6 个浇口。图示连接流道板的多浇口喷嘴，其浇口套 4 可以更换。浇口开设在定模板上，浇口温度较低。因此浇口套前有保温的塑料绝热仓。这种浇口适用于无定形和慢结晶塑料。

（2）边缘式多浇口喷嘴　边缘式喷嘴可用在塑料制品侧壁的浇口位置上。浇口设在型芯侧面，在制品的平壁面、圆柱壁面和转角上。浇口直径为 1 ~ 2.5mm。浇口不应该在注塑件的厚壁位置上。因为厚壁部位有过大收缩，会牵引浇口熔料，造成过大的废料。同样理由浇口也不应该在注塑件转角的凹面。对于热塑性弹性体，浇口处对注塑件壁面的斜角不超过 15°，以获得良好浇口剪断断面，并保证模具壁厚强度。

边缘式喷嘴不但用做主流道喷嘴，也用于流道板的喷嘴，而且大都是多个注射点，可以

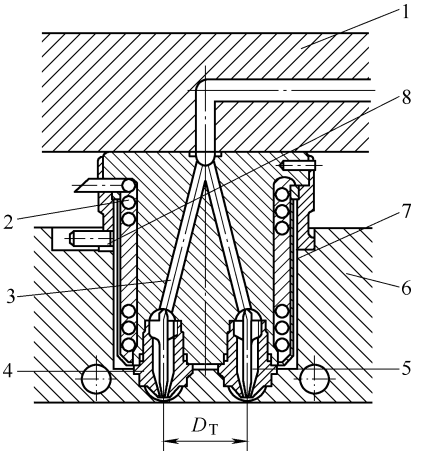


图 12-53　立式多浇口喷嘴

1—流道板　2—铸造加热器
3—喷嘴中流道分叉　4—可更换的浇口套
5—鱼雷顶针　6—定模板　7—绝热气隙
8—止转销　D_T—浇口间直径间距

减少喷嘴数目。这使一模多腔的小制品的注射较为经济。边缘式喷嘴有两种结构：开放式接触浇口和顶针式浇口。

1）开放式接触浇口。图 12-54 所示的这种喷嘴直接接触模板上的浇口，因此在浇口区有较高温度。推荐加工结晶型塑料，可以防止浇口过早冻结。图 12-54b 所示为此种边缘式喷嘴生产浅盆制品。喷嘴的底部有绝热皮层。必须考虑喷嘴的热膨胀，影响喷嘴跟浇口的接触。

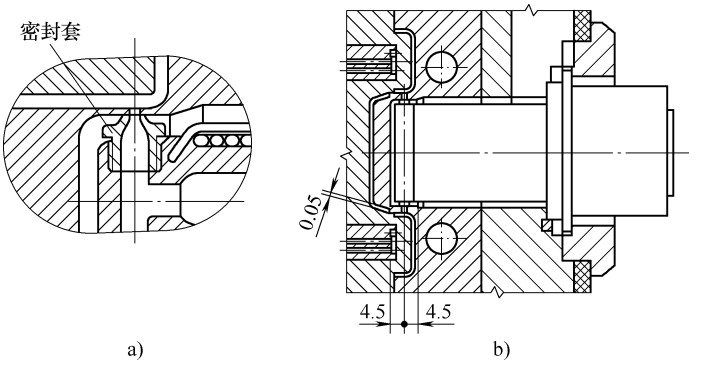


图 12-54　开放式接触浇口的边缘式喷嘴

a）局部视图　b）边缘式喷嘴用于一模两腔成型线盆制品

2）顶针式浇口。顶针式浇口用于边缘式喷嘴是项新技术。它可以消除喷嘴上出口的冷料。模板上的浇口只有 2 ~ 3mm 厚度。这种喷嘴对于顶针的装配，必须有专门的结构设计。

图 12-55a 所示，件 1、2 为专门设计的可镶拼的模块，可向中央推进，让顶针伸入模块，对准浇口。然后用锁紧斜楔 3 从两侧固紧模块。这种喷嘴适用于 PA、PBT 和玻璃纤维增强的 PC。图 12-55b 上的铍铜合金的顶针，先用长螺钉 4 吊在绝热仓里，装好浇口模板后，再吊紧顶针 6 直到它们进入喷嘴 5 的键槽并抵达限位；然后用吊紧螺钉 3 置换安装螺钉 4。

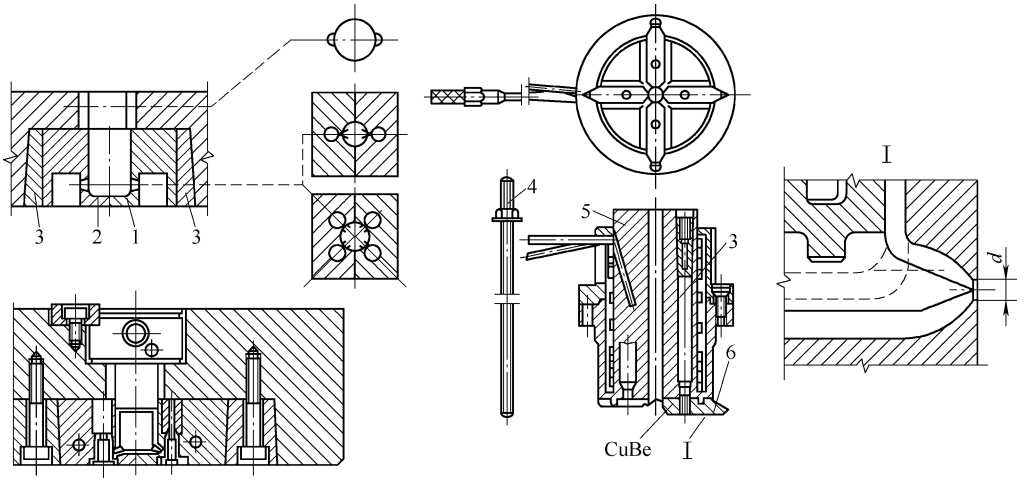


图 12-55　顶针式边缘喷嘴

a）两腔或四腔的拼合模块　b）吊紧顶针的喷嘴

1、2—拼合模块　3—紧锁斜楔　3—吊紧螺钉　4—安装螺钉　5—喷嘴　6—顶针

12.3.3　喷嘴上的加热器

对喷嘴的电加热主要是线圈加热器，如图 12-56 所示，在接近浇口位置，安放测温热电偶。每个喷嘴是独立加热区。喷嘴加热一般只需几分钟。热流道系统的质量事故，有一定次数是由喷嘴上加热器的设计和制造不当所引起，必须给以足够重视。喷嘴的加热器，常见的是电热螺旋线圈加热器和套筒式加热器。

1. 螺旋线圈加热器

图 12-56a 所示的圆截面电加热螺旋线圈，与喷嘴表面之间是螺旋线接触，发生热传递主要是热辐射。因此，加热表面的热流密度较小，仅为 0.3 ~ 6W/cm^2。圆截面电加热器很少用于模具加热。线圈加热器通常设计成两个并排在一起的加热电阻丝的线圈，嵌入到不锈钢管里，并灌氧化镁粉。为提高了热流密度，现已有在喷嘴体的外表面上挖出半圆形的螺纹槽，将螺旋线圈嵌埋其中。

图 12-56b 所示的矩形截面电加热线圈，不锈钢管为矩形或为扁平的椭圆。它与喷嘴有较大的接触面，有部分的热传导，因此有 5 ~ 7.5W/cm^2 的热流密度，是目前采用得最多的喷嘴加热器。有的在卷绕线圈外加装不锈钢罩筒，起防辐射和保护作用。

应该了解线圈加热器沿着喷嘴表面的热性能和温度分布。电加热线圈的开始端是非加热

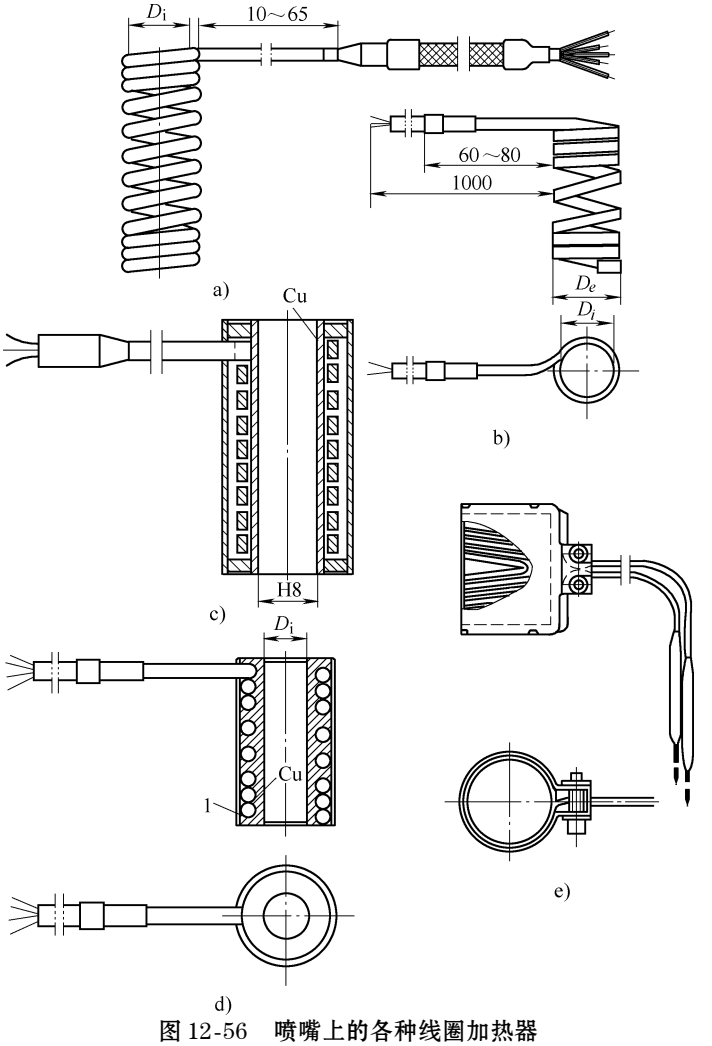


图 12-56　喷嘴上的各种线圈加热器

a）圆截面电加热螺旋线圈　b）矩形截面或扁平的椭圆电加热线圈
c）套筒式电加热线圈　d）铸造式电加热线圈　e）带式电加热线圈
D_e—外径　D_i—内径

区，该联接段的管长至少有 55mm。在线圈末端，近邻浇口位置，安装有热电偶，又有一个较小的非加热区，该段的钢管长有 10 ~ 15mm。已标准化专业生产的矩形截面喷嘴盘条的功率见表 12-11。盘条的规格见表 12-12。

表 12-11　专业生产的矩形截面喷嘴盘条（电压 230V 时）的有效功率

（单位：W）

喷嘴外径 / mm	盘条截面 1.5 ×2mm、2.2 ×4mm、3.5 ×3.5mm，盘条长度 /mm														
	20	30	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280
10	/	200	250	300	350	400	450	500	600	600	700	700	700	800	800
13	225	250	300	400	450	500	500	600	700	800	800	900	900	1000	1000
18	300	350	400	450	500	600	700	800	800	900	900	1000	1000	1250	1250
25	350	400	450	500	600	700	800	900	900	1000	1000	1250	1250	1400	1400
32	400	450	500	600	700	800	900	1000	1000	1250	1250	1400	1400	1600	1600
40	450	500	600	700	900	1100	1250	1250	1250	1400	1400	1600	1800	2000	2000

表 12-12　SQ3 ~ SQ3/TC 喷嘴的加热盘条规格

序号	截面的高 × 宽 × 长度/功率	序号	截面的高 × 宽 × 长度/功率
1	1.8mm ×3.2mm ×300mm/250W	7	3.3mm ×3.3mm ×700mm/500W
2	1.8mm ×3.2mm ×400mm/300W	8	3.3mm ×3.3mm ×800mm/600W
3	3.3mm ×3.3mm ×400mm/250W	9	3.3mm ×3.3mm ×1000mm/800W
4	1.8mm ×3.2mm ×500mm/300W	10	3.3mm ×3.3mm ×1400mm/1000W
5	3.3mm ×3.3mm ×500mm/400W	11	3.3mm ×3.3mm ×1800mm/1250W
6	1.8mm ×3.2mm ×700mm/470W	12	3.3mm ×3.3mm ×2000mm/1400W

增加或减少线圈的卷绕节距，可形成如图 12-57 所示的温度分布曲线。以对数节距卷绕的电加热线圈，在喷嘴与模具接触的浇口部位，在喷嘴与流道板连接部位得到较强的加热。在沿线圈轴线的部分中，两端提供了各 40% 的热量，而在中间部分，以较大的线圈节距，只供约 20% 的热量，如此可获得 40-20-40 的卷绕节距的较均匀的温度分布。为了使整个喷嘴长度达到均衡加热，可采用不同节距的“对数卷绕”。因为热膨胀，线圈加热器有从喷嘴体脱落下来的趋势，尤其在线圈的顶部和底部，卷绕的线圈与喷嘴体之间有气隙，因此用不锈钢薄套筒将电热线圈包装起来。

2. 套筒式加热器

图 12-56c 所示的套筒式电加热圈，用铜管作里环约束，与喷嘴小间隙精密配合。套筒里是矩形截面的电加热线圈，且以 40-20-40 对数节距卷绕。其间灌填以导热性好的氧化镁。套筒的两端面用铜片封装。里壁的铜管足以使对喷嘴的加热传递均匀，也改善了电加热线圈的冷端对喷嘴的加热。套筒外圈用不锈钢铠装，同时也封阻了电热线圈向外的热辐射。此种套筒电加热线

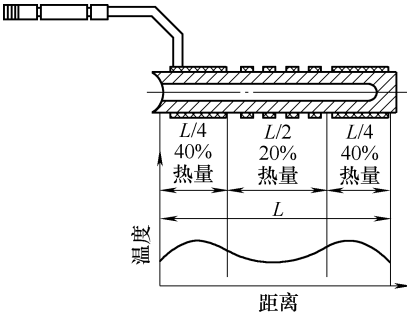


图 12-57　40-20-40 的电加热线圈的温度分布

圈的加热密度达到 12.5W/cm^2，且喷嘴加热温度均匀，适用于高温加热并有良好耐用性。但在喷嘴制造中，有的套筒的里壁用不锈钢制造，套筒孔的制造精度又低，套筒孔与喷嘴体之间存在气隙，特别是超过 150mm 的长套筒。造成传热效率很低，电热丝过热而烧损。近年来，为了提高加热盘条的传导效率，将矩形盘条嵌埋在铜套里，再把铜套压配在喷嘴体上。铜套上的不等距螺旋槽，用四坐标联动的数控铣床编程加工，按对数节距铣削螺旋槽，将线圈盘条嵌套在槽内。

图 12-56d 所示的铸造式电加热线圈，将圆截面的电加热线圈铸造在铜套筒里。它有好的加热性能和最大的耐用性。加热密度达到 15W/cm^2。但因加工工艺复杂，尚很少采用。

图 12-56e 所示带式电加热线圈，很少使用。它以直径 1.8mm 圆截面的电阻丝或以 1.3mm × 2.3mm 扁平的电阻丝以螺旋卷绕在夹套中，只有在喷嘴的径向尺寸较薄，一些空间紧凑的场合采用。

3. 喷嘴的加热功率

与流道板加热类似，喷嘴加热被分成外热式、内热式和混合式。电阻线圈和电热棒两种加热类型，最常用的是 230V AC 线圈加热器。一些公司提供低电压（5V、24V）加热，可让加热器件最小化。低电压加热器能平稳加热，并允许精确的温度控制。

沿着喷嘴内的流道长度方向，要维持恒定的熔体温度，其条件是喷嘴与加热系统两者间有良好的关系。

① 加热器的性能、安装和控制良好；

② 喷嘴设计和材料的选择，应是合适的热导体。

目前，喷嘴的加热器采用盘簧卷绕和电热套筒两种。盘簧加热器用于外径 10 ~ 40mm 的喷嘴。套筒加热器用于喷嘴外径大于 40mm 的大喷嘴。

电加热器应使喷嘴沿轴线方向的温度分布均匀。在喷嘴的两端要密布电热丝，中间部分要少布或不布设电热丝。还须注意，在喷嘴座的一端，要布置引出导线和热电偶合金丝，在 5 ~ 10mm 距离内，不能敷设电热丝。

（1）弹簧加热器的喷嘴功率计算　弹簧加热器是不锈钢铠装电加热丝的盘条。盘条的截面是矩形的，宽边盘贴在喷嘴外圆柱上，保证热传导接触面积。现常用的弹簧截面有 1.8mm × 3.2mm 和 3.3mm × 3.3mm 等多种，见表 12-11 和表 12-12 喷嘴加热盘条规格。圆截面的盘条，有更大的加热功率。但必须在喷嘴外圆柱面上铣挖出螺旋槽，以保证热传导接触面积。

弹簧加热器的喷嘴功率经验计算式为

$$P = \mu\pi DH \tag{12-25}$$

式中　P——喷嘴的升温加热功率（W）；

D——喷嘴的外径（mm）；

H——喷嘴上装加热器的总长（mm）。

μ——修正调节系数。当 $H \leqslant 100$mm 时，取大值 0.15；当 $H > 100$mm 时，取较小值。

（2）套筒加热器的喷嘴功率计算套筒加热器是将电热丝穿绕在氧化镁筒芯上。氧化镁筒每节长有 9.2mm 和 12mm 两种。若干节筒芯组成一段。每节或每段按要求功率穿绕电热丝，再布置在不锈钢的套筒中。套筒加热器的内孔与喷嘴外圆的配合精度，要保证热传导的有效接触面。

用套筒加热器，喷嘴功率经验计算式为

$$P = D(12 + 0.12H) \tag{12-26}$$

式中　P——喷嘴的升温加热功率（W）；

D——喷嘴的外径（mm）；

H——喷嘴上装加热器的总长（mm）。

12.4　流道板设计

流道板将主流道喷嘴传输来的塑料熔体经流道送到各注射点的分喷嘴。流道板中的塑料熔体合理分配到各注射点的原则是平衡充模。本节陈述流道板的加热和绝热设计，加热功率计算和热平衡预测；然后，陈述流道板及相关零部件热膨胀和热补偿计算；最后，介绍流道板的结构设计和装配问题。

12.4.1　流道板的加热和绝热

流道板加热器在一定时间内，将流道板从室温加热升温至塑料熔体注射温度。当流道板达到给定温度时，由温度调节器自动控制补偿热损失，在热流道注射模生产过程中保持热平衡状态。维持热流道温度的恒定，也取决于对流道板的绝热设计。

1. 流道板的加热器

流道板上的加热器的配置，首先考虑加热区的划分，然后是加热器的选用和安置设计。对于较大些的流道板应将流道板分区加热，实行独立的温度控制，每个加热区对应供料给单个或多个喷嘴。注射点不对称的流道板更应分区。不容易加工的塑料，例如 PBT、PET、PPS 和 PA66 等，更应该多分区加热。热流道板划分的加热区数，常取决于喷嘴的数目与尺寸。

常见的流道板都采用外加热的方法。热源在流道熔体外壁的流道板中。早些年流道板用筒棒式加热器。现今它作为简易的加热器尚有使用。流道板上大都已使用可弯曲的管状加热器。流道板的内加热，今后会有使用。

（1）高功率密度电热棒　在注塑模上加热模板的筒棒式加热器，使用得最多的是高功率密度电热棒。如图 12-58 所示，它是圆柱状的加热器。高功率密度电热棒的结构是用镍铬电阻丝绕在氧化镁芯棒上，压装入金属套管内，再充填高纯度

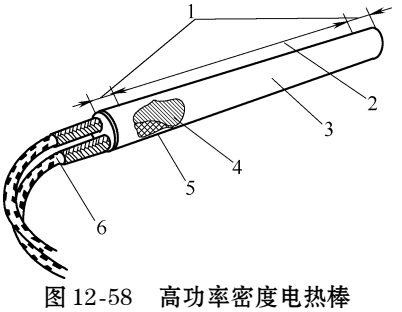


图 12-58　高功率密度电热棒

1—冷端　2—加热长度　3—不锈钢外壳
4—电阻丝　5—氧化镁绝缘粉
6—玻璃纤维套管导线

的氧化镁粉。

此种高功率密度电热棒的最高额定温度可达 600℃。最大功率密度可达 20W/cm^2，一般在 15W/cm^2 内。功率密度是指单位热传递面积的加热功率，即用电热棒的额定功率除以有效的传热表面积。除去电热棒的两头冷端长度 2～5cm，可得有效表面积。

高功率密度电热棒型号的含义

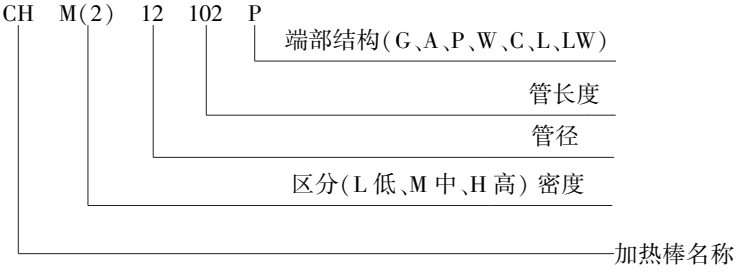


表 12-13　高功率密度电热棒规格和技术参数

型号	外径 d/mm	总长度 L/mm	有效加热长度 L_1/mm	额定电压 /V	额定功率 /W
CHH06. 5077	$6.5^{-0.05}_{-0.15}$	60	36	230	60
CHH06. 5089		80	56		100
CHH06. 5102		100	73		135
CHH06. 5114		130	103		185
CHH06. 5127		160	133		200
CHH08064	$8^{-0.05}_{-0.15}$	60	36	230	150
CHH08077		80	56		200
CHH08089		100	73		250
CHH08102		130	103		350
CHH08114		160	133		400
CHH10064	$10^{-0.05}_{-0.15}$	60	36	230	150
CHH10077		80	56		200
CHH10089		100	73		300
CHH10102		130	103		400
CHH10127		160	133		500
CHH10152		200	160		600
CHH10178		250	210		700
CHH12064	$12^{-0.05}_{-0.15}$	64	30	220	140
CHH12077		77	42		180
CHH12089		89	55		220
CHH12102		102	66		315
CHH12127		127	90		400
CHH12152		152	115		500
CHH12178		178	135		630
CHH12. 7064	$12.5^{-0.05}_{-0.15}$	60	30	230	100
CHH12. 7077		80	45		150
CHH12. 7089		100	65		200

（续）

型号	外径 d/mm	总长度 L/mm	有效加热长度 L_1/mm	额定电压/V	额定功率/W
CHH12.7102	$12.5^{-0.05}_{-0.15}$	130	95	230	250
CHH12.7127		160	125		300
CHH12.7152		180	145		350
CHH12.7178		200	165		400
CHH16064	$16^{-0.05}_{-0.15}$	60	34	230	100
CHH16070		80	54		200
CHH16077		100	74		300
CHH16089		130	104		400
CHH16102		160	135		500
CHH16115		180	155		600
CHH16127		200	175		700
CHH16152		250	225		800
CHH16178		300	275		1000

表 12-13 是模具加热时流行的电热棒的型号，它有寸制和米制两种。使用时工作电压不大于额定电压的 1.1 倍。电热棒效验时冷态的绝缘电阻不低于 1MΩ。若长期放置，绝缘电阻低于 1MΩ 时，可在 200℃ 左右的烘箱中干燥，或降低电压通电加热，直至恢复绝缘电阻。电热棒的引线端结构和型号多种多样，有 G、A、P、W、C、LW 和 L 型。

常数节距加热线圈的加热棒，其加热特性有两个缺陷。其一是加热棒两端各有约 10mm 的绝缘长度，形成两个冷端。这就要改善两端或一端的结构，采用铜制的底端嵌件，使导热和传热良好。其二是沿加热棒长度中央的温度较高。为获得均匀的温度分布，采用对数节距制成的加热棒，其中间的线圈比两端有较大的节距。

电热棒用不锈钢制造。它与钢模具的孔应为小间隙的动配合，一般要求孔精确加工到 ISO 标准的 H_9，孔为 $D^{+0.036}\sim D^{+0.043}$。理论上是热膨胀促使电热棒与孔壁接触。棒的外径 d9 有 $d^{-0.050}_{-0.093}\sim d^{-0.065}_{-0.149}$，可得平均双向间隙 $\Delta=0.128$mm。较大的间隙和误差，会使流道板的热传递变坏，会使加热棒的工作温度升高而过热损伤。先进的孔与棒的配合将精度提高到 H7/d7。相应的间隙误差减小，加热棒和流道的温度降减小，指示温度误差减小，如图 12-59 所示。保证了加热棒的功率密度不超载，加热器的耐用寿命长。多次拆卸后，由于孔的锈蚀和修磨孔径会变大，间隙及其误差就会增大。

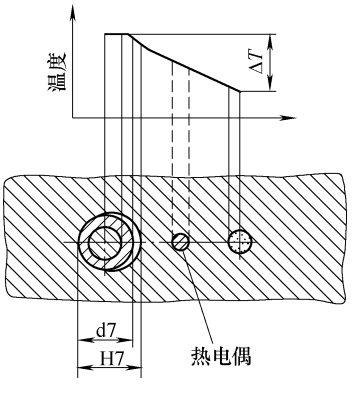


图 12-59 加热棒和流道间的温度降

加热棒安装时可使用导热膏。推荐使用液态的氧化镁溶液，也可再添加防锈助剂。喷涂后被加热器烘干在孔隙中。注意保护电热棒的终端和热电偶，避免黏上导热膏。

高功率密度的电热棒的拆卸很难。在圆柱加热棒外端要有圆锥支承，装有紧固螺纹的套环，拆卸旋转

时，套环将加热棒拖出。有斜度 1∶50 的圆锥形加热棒，拆卸较方便，而且安装到锥孔后没有间隙，但其长度受到大端直径的限制。流道板可以设计成几块，并用螺钉联接，组合成电热棒的安装孔。但此种流道板的刚性较差。

在流道板上设计和钻削加热棒的安装孔时，如图 12-60 所示，原则上要做到：

1）保证与流道相对称；

2）孔与流道板边壁的距离为 A，热棒的直径为 D，如图 12-60 上所示，则应 $A \geqslant D$；

3）加热棒的位置在流道板厚度的中央，以减小热应力和翘曲的危害；

4）热电偶位于两个加热器间的等同距离上。

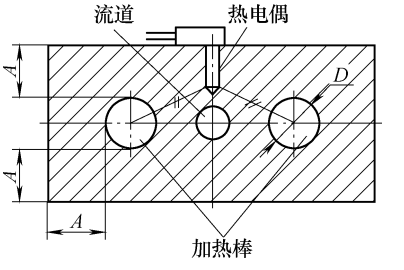


图 12-60　流道板上加热棒的安装孔

建议在加热棒安装孔的终端钻个小孔，帮助加热器在加热期间顺利排气。所有的加热器都会从空气中吸潮。在冷却状态下氧化镁和陶瓷等都会吸湿。加热棒特别容易侵入潮气。在加热期间受潮的氧化镁的绝缘性能下降。电流通过电阻线圈时会破坏电阻丝上的绝缘层，导致加热器的破坏。因此在加热器每次加热到工作温度前，必须在 100℃停留 15min，以除去绝缘体上的潮气，并将加热温度下降到 50℃以后再升温。用温度控制系统的程序确定低温停留的“软启动”过程。

（2）管状电热管　管状加热器可以方便弯曲和嵌装，使用最广泛。俗称的圆管盘条，现已标准化生产。如图 12-61 所示的管状加热器，在金属管内放入镍铬电阻丝线圈，空隙部分紧密地充填了导热绝缘的氧化镁。电阻丝在电热管的两端通过导线与电源相连。它被弯曲成各种形状，镶嵌在流道板的沟槽中。模板介质的最高加热温度为 350℃。流道板的温度过高，电气系统的导线的绝缘层老化，温度控制器也会故障频发。

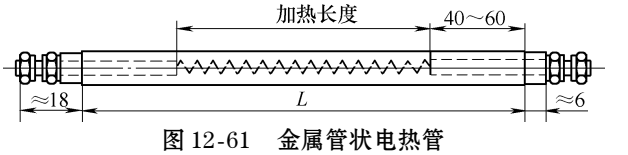


图 12-61　金属管状电热管

金属管状电热管的最高耐压可达 600V，功率密度是 13W/cm^2。管径 d = 6.5 ~ 22mm，公差为 ±0.3mm；长度 L = 300 ~ 6000mm，公差为 ±5mm。金属大都采用不锈钢，最高工作温度可达 600℃；也可用碳钢制造，但最高工作温度仅为 400℃；或者用镍基合金钢，耐温可达 850℃；但铜管或铝管两者的工作温度低于 350℃，不能用于热流道板的加热。

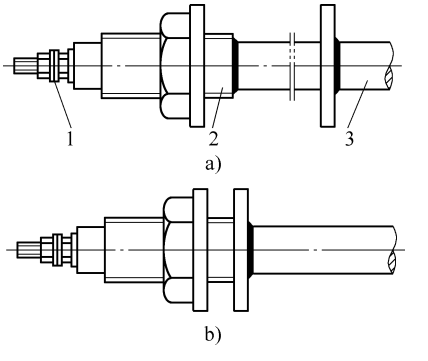


图 12-62　金属管状电热管端部结构

a）Ⅰ型　b）Ⅱ型

1—接线装置　2—紧固装置　3—金属管

金属管状电热管的端部结构见图 12-62。国内常用管径 6.6mm 的电热管的规格见表 12-14（还有 7.2mm、8mm、10mm、12mm 和

16mm 等管径的规格）。大直径电热管的弯曲和嵌装较费力。

表 12-14 管径 6.6mm 电热管的长度和功率 （单位：W/cm²）

长度/mm	常规功率/大功率	常规功率/大功率
300	400/650	4.8/7.6
350	450/350	4.7/7.6
400	500/900	4.4/7.7
450	600/1000	4.6/7.5
500	650/1150	4.5/7.6
550	750/1250	4.6/7.5
600	800/1400	4.5/7.6
650	900/1500	4.6/7.4
700	950/1600	4.5/7.3
750	1050/1700	4.6/7.2
800	1150/1800	4.7/7.1
850	1200/1900	4.6/7.0
900	1300/2000	4.7/7.0
950	1350/2100	4.6/6.9
1000	1400/2200	4.5/6.8
1050	1450/2300	4.4/6.8
1100	1500/2400	4.3/6.7
1150	1550/2500	4.3/6.7
1200	1600/2600	4.2/6.7
1250	1650/2700	4.2/6.6
1300	1700/2800	4.1/6.6
1350	1800/2900	4.2/6.6
1400	1900/3000	4.3/6.5
1450	2000/3100	4.3/6.5
1500	2100/3200	4.4/6.5

注：冷端长度 25mm，伸出流道板长度 15～20mm。

此种经弯曲的电热管，一般安装在流道板的前后两个大平面，平行且对称于流道的两侧，这样，在整个流道的长度和喷嘴的邻近区域，容易获得均衡的温度分布。为了将热量损失减至最小，流道板的支承垫圈用钛合金或陶瓷制造。现今小型流道板有不少是单侧设置电热管。两根导线分别在电热管相对的两端，消除了管内电阻丝绝缘破坏的可能性。注意到电热管的两端各有 25～50mm 长的冷段没有被加热，应该安装在流道板的外面。由于不发热的部分和接线部分在流道板的外面，装配和操作时要予以避让。

电热管应固定在流道板的槽内，如图 12-63 所示。图 12-63a 所示为电热管嵌压在槽中用导热胶或堆焊封埋。图 12-63b 所示是将导热管嵌压在割出倒斜度的槽内。图 12-63c 所示为电热管用铜条嵌埋，然后磨光流道板表面，加工方便且导热可靠，为现今常用。图 12-63d 所示为用铝片将电热管夹紧在槽内。图 12-63e 所示是用铣削有凹槽的铝板有效地夹紧电热管。其中 12-63d 和 12-63e 两种方式，更换电热管方便。

金属管状电热管的弯曲半径与它的管径有关，最小弯曲半径为 5～6mm。电热管的弯曲且压嵌到槽内，应使用弯曲样板，防止电热管与凹槽的间隙过大和不均匀。

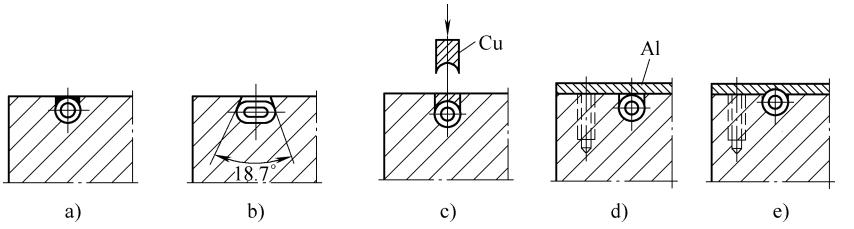


图 12-63　流道板上固装金属管状电热管方法

a）导热胶或堆焊安装　b）压入倒斜度的槽中　c）铜条嵌埋
d）片材夹紧　e）有成型凹槽的铝板夹紧

图 12-64 说明管状加热管布置要符合热力学要求。有四个分喷嘴的流道板，两个平面都布置加热管。图 12-64a 的布置使流道板上 1 和 3 型腔加热不足，会使这两个型腔的注塑件的冲击强度低于另两个型腔的注塑件。图 12-64b 所示是正确的加热管布置。

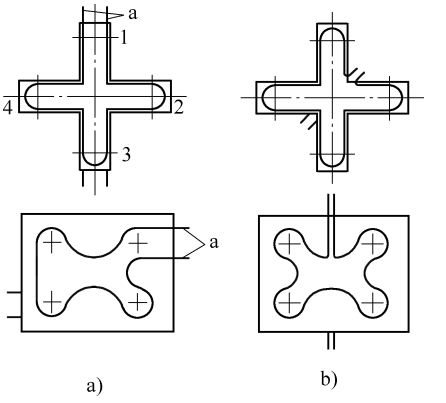


图 12-64　流道板上管状加热管布置

a）不良布置　b）正确布置
a—管状加热器

2. 流道板的内加热

热流道的内加热包括流道板的内加热和喷嘴的内加热，见图 12-65 所示。喷嘴的内加热，能改善浇口区域的温度分布，但技术难度高。内加热的流道板节约电能且成本低，操作方便，但应用尚少。

流道板的内加热是将加热棒作为芯轴置于流道中央，见图 12-65 所示。模板上流道通孔与加热芯轴形成环形流道截面。每次停止注射时可卸下加热芯棒和两端的堵塞，去除冻结的塑料皮层。注射时，塑料会冻结分布在流道外圆的冷板壁上，此皮层有绝热的效果。若为无定形塑料，在冻结层和流动层之间还有高弹性的塑料层。注射加工时，塑料输送有周期性，整个流道截面上的流动层的厚度和冻结层的厚度变化有波动，而高弹性层的推进是较慢的，实际的流道截面不到整个流道截面的 1/4 到 1/2。

内加热流道板的优点有：

① 模具刚性好，流道板就是模板，消除了弯曲变形的可能。

② 加热流道板，平均节约 50% 电功率消耗。

③ 熔体被直接加热，外圆的绝热塑料皮层仅有 40 ~ 60℃，流道板不需要绝热，也无热膨胀之虑。

④ 流道里塑料皮层能起密封作用，无泄漏熔体的缺陷。

⑤ 模具高度降低，起动迅速，维护容易。

在稳定状态下，内加热的流道板与定模各模板的温度相差可达 55℃。而外加热的

流道板与定模各模板的温度相差高达 200℃。因此，流道板与定模之间无需悬空支承，四周无需空隙绝热，有的在流道板与定模固定板之间加上绝热板层。图 12-65 所示是内加热的无绝热层热流道系统。流道板和喷嘴安装精度高，且牢固可靠。

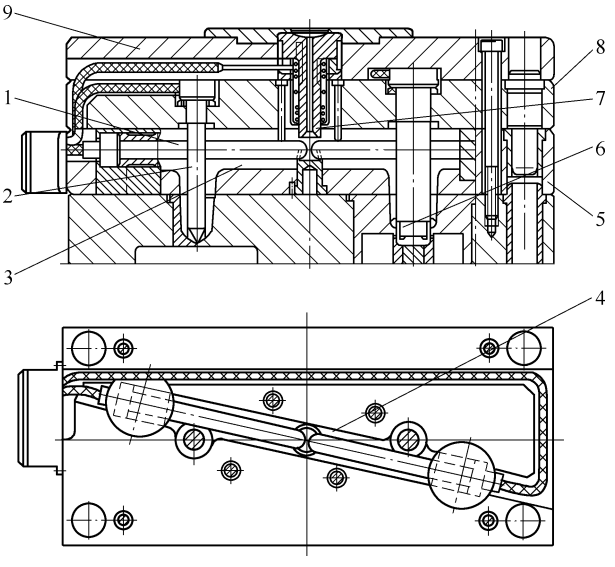


图 12-65　热流道的内加热

1—内加热鱼雷棒　2—加热棒　3,4—流道　5—流道板
6—分喷嘴　7—主流道喷嘴　8—定模板　9—定模固定板

但以下因素限制了流道板的内加热应用：

① 固化的塑料皮层厚度很难确定，很难进行流变学的流动计算，无法进行计算机的流动模拟分析。

② 滞留在流道中的熔料随着时间推延而分解。内加热系统适用于热稳定的塑料，例如 PE，PP 和 PS 及一些工程塑料。流道需清理。

③ 流道板上流道的布排，由于内加热器而受到空间位置的限制，常需设计多层流道。熔体不能自然畅流。

④ 内热式的流道板与内热式喷嘴相匹配，才有较多的技术优势，但系统必须用内热的顶针式喷嘴。

3. 流道板的新型电加热技术

流道板的新型加热方式，进一步提高了电加热器的传热效率，减少热损失，同时保证流道板温度均衡。

1）柔软的电加热盘条。德国 HOTSET 公司推出一种十分柔软的电加热盘条（hot-flex）。这种盘条的中央，是旋绕的合金电热丝，包裹了导热但电绝缘的氧化镁的软套管。外层是导热的金属波纹管。盘条容易弯曲成型。其使用方法是，在分流板上沿流道开槽，将盘条镶嵌在槽内，较好地解决了温度均匀度问题。但由于盘条加热后不能与流道板紧密配合，导致传热效率较低。因此盘条周围还需填充高导热介质，并作绝热封闭。

2）流道板的铸造电加热板。将管状加热器用铜合金或铝合金铸造成十几毫米厚的加热板。如用铜合金铸造，加热板表面必须涂镍。加热板安装在流道板的两个相对平面上，用螺钉联接。热电偶测量点安装在两加热板的对称中心上。

3）流道板的电加热片。流道板电加热片的厚度只有 2mm，也是用螺钉联接在流道板上，保证紧密接触。而且它的轮廓与流道板的几何形状和尺寸一致，从而达到热均衡。电加热片表面必须涂覆镍或铝层，减少热辐射损失。加热片最高能承受 550℃温度。

4）流道板的热管导热。大型的流道板用筒棒式加热器加热时，热均衡性很差。图 12-66 所示的热管能有效地导热，改善流道板上热量均匀分布。对应注射模具的生产注射状况，应将热管安装在水平位置上，才会达到最优的导热效率。

热管的热导率比筒棒高好多倍。热管的夹套内布满了毛细管结构。充填在管中的液态水、苯醚或其他传热介质，在热管的受热端蒸发，流到低温散热区凝结成液体，同时释放热量。流体经毛细管输送，返回高温热区。

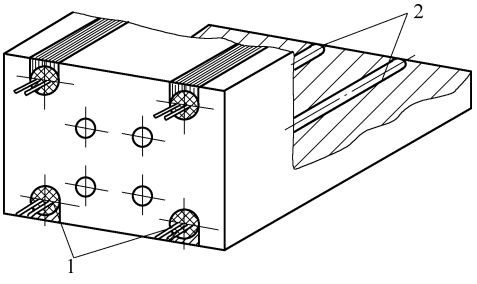


图 12-66　流道板上使用热管导热

1—筒棒式加热器　2—热管

4. 流道板的绝热

流道板悬置于定模框架中，四周留有空气间隙，用不锈钢或钛合金零件支承，传导散热减小，又为了使热流道板对定模各模板的辐射损失最小，常加装反射板和绝热隔板。

用低辐射系数的铝片覆盖流道板的表面。反射片用螺钉与流道板联接。要考虑铝片的热膨胀系教约是钢的 2 倍，应留有热补偿余量。有的反射铝片与流道板之间有空气间隙，有减小热传导的功能。有时为降低成本，用厚度 0.015mm 的铝箔包覆流道板。也有的用波纹状的铝箔充填在周围的空隙中。由于铝箔很薄，它的热传导作用很小。

用绝热隔层降低流道板表面温度，并减少辐射损失；用耐热的无机泡沫做隔热片；再用硅酸盐类的胶黏剂黏在流道板的金属表面。为了具有最高耐热温度，可在隔热层外再覆铝片。

12.4.2　流道板的加热功率和热损失计算

加热器的功率是在一定时间内，流道板从室温加热至塑料熔体注射温度所需功率。当流道板达到给定温度时，由温度调节器自动控制，补偿热损失功率，维持热流道温度的恒定。

1. 流道板升温加热功率

加热流道板所需功率由三部分组成。其一是达到给定注射温度所需电加热功率；其二是补充流道板的传导、对流和辐射热损耗功率；其三是考虑电网电压波动影响和加热器的热效率。

工程设计时计算流道板的加热器功率

$$P = \frac{mC\Delta T}{60t\eta_0} \tag{12-27}$$

式中　P——流道板加热器的电功率（kW）；

m——流道板的质量（kg）；

C——流道板材料的比热容［kJ/(kg·℃)］，对钢材 C =0.48kJ/(kg·℃)；

t——流道板的加热升温时间（min）通常为 20～30min。时间的长短取决于流道板尺寸大小和注射工艺温度；

ΔT——流道板注射工作温度与室温之差（℃）；

η_0——加热流道板的效率系数，流道板的绝热条件良好时，η_0 =0.47～0.56；承压圈和支承垫都能绝热，但无防辐射的铝箔设计时，取 η_0 =0.44～0.50；当流道板系统的绝热条件很差，承压圈和支承垫用碳钢制造，又无防辐射的措施时，则 η_0 =0.33～0.38。

此效率系数 $\eta_0=\eta_d\eta_e$，其中 η_d 为加热器的电热效率；η_e 是流道板热损耗的补充功率系数。

加热器的电热效率 η_d 主要是考虑电网电压的影响

电网正常电压为 220V，在有电压波动时

$$\eta_d=\frac{210^2}{220^2}=0.91$$

又考虑到电热元件的制造质量，电热器在流道板上的安装质量，及维护质量等都会影响电热效率。电热效率 η_d =0.8～0.9。

对于热流道对周边的低温模板的热传递造成的热损失必须予以加热补充。尽管流道板悬挂在模框内，以空气绝热，但存在承压圈和支承垫的热传导，存在间隙中空气的热对流损失，还有流道板外表面的热辐射损失，在有良好的绝热条件下，此三种热损失总和与模板升温加热功率相比为（0.6～0.7)∶1。流道板热损失系数 η_e =0.63～0.59。反之，绝热设计很差时，热损失是升温功率的 1.5 倍左右，η_e =0.42。

2. 热损失的控制

塑料注射模热流道的热损失，包括热传导、热对流和热辐射。

（1）热传导　图 12-67 所示的热传导，主要由流道板上的承压圈、支承垫及固定螺栓或不加热的主流道喷嘴，传热给注射模的定模固定板、垫块和定模板。减小热传导损失的途径有：减小承压圈和支承垫的接触面积，从而减小热流；采用传热系数较低的材料，例如不锈钢，钛合金和烧结陶瓷制造承压圈和支承垫；用不锈钢制造固定螺钉。热流道模具材料的传热系数见表 12-15。

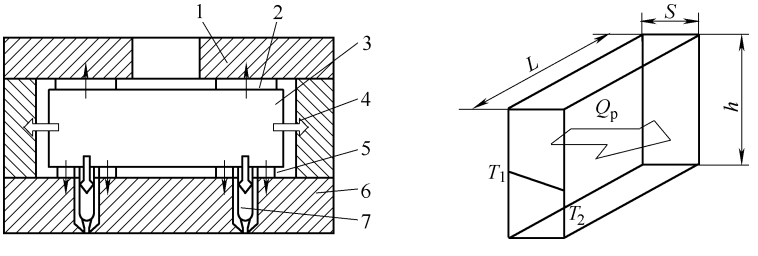


图 12-67　热流道系统的热传导

1—定模固定板　2—承压圈　3—流道板　4—垫块　5—支承垫　6—定模板　7—喷嘴

T_1—热流道板的注射工作温度　T_2—注射模具结构件的温度

热流道系统的固态零部件的热传导由前式（12-1），描述为热流道板

$$Q_c = \frac{\lambda}{\delta} A_c (T_1 - T_2) \tag{12-28}$$

式中　Q_c——热流道板的传热损失（W）；

λ——绝热零件材料的传热系数［W/(m·℃)］；

δ——绝热零件的厚度，m；

A_c——绝热零件的接触面积，m^2；

T_1——热流道板的注射工作温度,℃；

T_2——注射模具结构件的温度,℃。

表 12-15　热流道模具材料的传热系数 λ（单位：W/(m·℃)）

材料	传热系数	材料	传热系数	材料	传热系数	材料	传热系数
工业铜 Cu	~350	CuCoBe	225	CuBe	209	铝合金	130 ~ 170
预硬化钢 P20(3Cr2Mo) 3Cr2NiMo(718) SM1(55CrNiMnVS)	34 ~ 36.5	淬火钢 T8A	30 ~ 36	中碳耐热合金钢 H11 ~ H13(美) DIN1.2343(德) 4Cr5MoSiV1	26 ~ 29.5	中碳锰钢 65Mn 60Si2Mn	52
中碳铬钢 40Cr 35 CrMo 38 CrMoAl	21	烧结陶瓷	<3	不锈钢	16 ~ 26	钛合金	7
		铝	200 ~ 230	石棉板	0.18	层压绝热板	0.2
水	0.6	空气	0.04	LDPE	0.35	PS	0.15

（2）热对流　热流道系统的热对流如图 12-68 所示。与周边模具零件之间间隙中的空气与金属间存在热交换和对流热损失。流道板的对流热损失，不但发生在它与注射模结构零件之间，甚至发生在流道板与注射模外的空气之间。减少对流热损失的常用方法有：封闭流道板周边的间隙空间，限制和阻隔空气的流通；在流道板的大面积的表面上，或在模具结构件里侧加装绝热板。

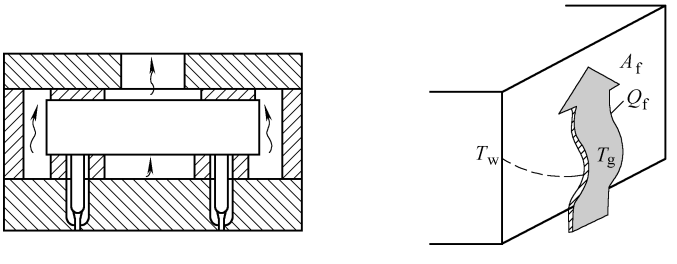


图 12-68　热流道系统的热对流

T_W—流道板壁面的温度　T_g—周边环境空气的温度

流道板与周边模具零件之间。间隙中的空气与金属表面间的热交换，按式(12-8)，对流热损失，按式（12-8）有

$$Q_f = \alpha_f A_f (T_W - T_g) \tag{12-29}$$

式中　Q_f——流道板的对流损失（W）；

α_f——传热系数［W/(m² · ℃)］；空气自然对流的 $\alpha_f = 5 \sim 10$W/(m² · ℃)；

A_f——流道板的壁表面面积（m²）；

T_W——流道板壁面的温度（℃）；

T_g——周边环境空气的温度（℃）。

（3）热辐射　图 12-69 所示，高温的热流道表面向外界辐射能量。这种辐射传热是的热流道系统热损失的组成部分。热辐射交换发生在流道板与定模模架结构件之间。降低热辐射损失途径：流道板表面磨削后抛光，板厚的四周侧面也应该如此；保持流道板周边间隙空间清洁；流道板外表面上安装光亮的大面积铝箔反射片；在流道板的外表面或在模框的里表面上安装大面积的绝热板。从流道板壁面的黑体辐射系数 C_o，可以认识到流道板表面质量和光亮程度的重要性。有光亮的铝箔覆盖时 $C_o = 0.18$W/(m² · K)；经抛光的光亮壁面其 $C_o = 0.40$W/(m² · K)；经发黑处理或锈蚀的灰暗壁面的 $C_o = 2.62$W/(m² · K)。C_o 值越小，热辐射损失越低。

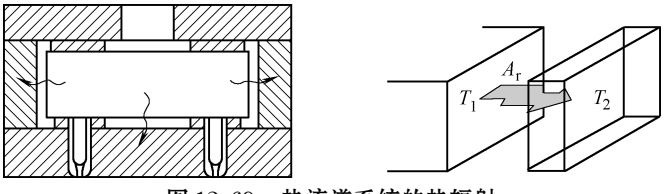


图 12-69　热流道系统的热辐射

T_1—流道板壁面的温度　T_2—定模框壁的温度

如图 12-69 所示，高温的流道板表面向外界辐射能量。这种辐射传热是热流道系统热损失的组成部分。由式（12-9）和（12-10）热辐射描述，对于热流道板用下式描述

$$Q_r = \alpha_r A_r (T_1 - T_2) \tag{12-30}$$

式中　Q_r——流道板的辐射热损失（W）；

A_r——定模框壁的表面面积（m²）；

α_r——热辐射系数［W/(m² · K)］；

$$\alpha_r = C_o \frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Delta T} \tag{12-31}$$

式中　$\Delta T = T_1 - T_2$

T_1——流道板壁面的热力学温度（K）；

T_2——定模框壁的热力学温度（K）；

C_o——热辐射系数［W/(m² · K⁴)］，见表 12-3。

［**例 1**］　图 12-70 所示的热流道系统，有流道板外形为 80mm × 500mm × 46mm，有三个垫圈，其外径为 25mm，内孔直径为 14mm，厚为 5mm。要求流道板的最高工作温度 360℃；注射模的温度 100℃。计算加热功率。

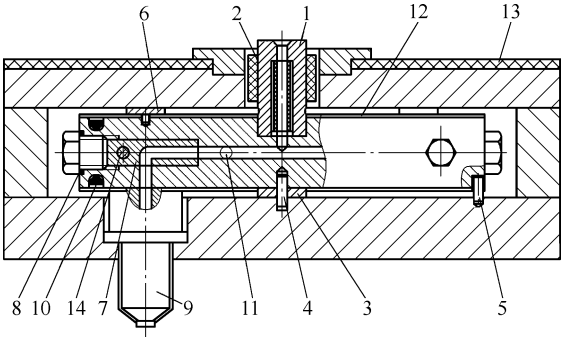


图 12-70　流道板的绝热设计

1—主流道杯　2—过滤网套　3—支承垫圈　4—定位销　5—止转销　6—承压垫圈
7—端面堵塞　8—金属密封圈　9—热流道分喷嘴　10—金属管状电热弯管
11—热电偶　12—反射箔片　13—绝热板　14—销钉

[解]

1）流道板的质量，由钢的密度 7.85kg/dm^3，得

$$m = 0.8 \times 5 \times 0.46 \times 7.85\text{kg} = 14.4\text{kg}$$

2）流道板与定模的温差

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 360\text{K} - 100\text{K} = 260\text{K}$$

3）设流道板的升温时间 20min，板材的比热容 $C = 0.48\text{kJ/(kg·℃)}$，得流道板升温加热功率

$$P_n = \frac{mC\Delta T}{60t} = \frac{14.4 \times 0.48 \times 260}{60 \times 20}\text{kW} = 1.5\text{kW}$$

4）三个垫圈的热传导面积

$$A_c = \frac{\pi}{4}(0.025^2 - 0.014^2) \times 3\text{m}^2 = 0.001\text{m}^2$$

5）垫圈的热传导功率损耗。用 4Cr5MoSiV1 中碳合金钢，查表 12-15 得 $\lambda = 26\text{W/(m·K)}$，代入式（12-28），有

$$Q_c = \frac{\lambda}{\delta}A_c(T_1 - T_2) = \frac{26}{0.005} \times 0.001 \times (360 - 100)\text{W} = 1352\text{W}$$

若用钛合金制造垫圈，由表 12-15 查得 $\lambda = 7\text{W/(m·K)}$，有传导耗热

$$Q_c = \frac{\lambda}{\delta}A_c(T_1 - T_2) = \frac{7}{0.005} \times 0.001 \times (360 - 100)\text{W} = 365\text{W}$$

6）流道板的热对流和热辐射的功率损失。流道板温度 $T_1 = (273 + 360)\text{K} = 633\text{K}$，模具温度 $T_2 = 273 + 100 = 373\text{K}$，得 $\Delta T = T_1 - T_2 = 260\text{K}$。发黑锈蚀暗表面的流道板的辐射系数 $C_0 = 2.62\ \text{W/(m}^2\text{·K)}$；而光亮铝箔覆盖时 $C_0 = 0.18\ \text{W/(m}^2\text{·K)}$。已知流道板辐射表面积 $A_r = 0.134\text{m}^2$。由两种状态计算功率损失。

无绝热设计的流道板，用式（12-31）先计算热辐射系数

$$\alpha_{r1}=C_o\frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Delta T}=2.62\times\frac{\left(\frac{633}{100}\right)^4-\left(\frac{373}{100}\right)^4}{260}\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}=14.2\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

再考虑流道板周边间隙中空气对流热损失。已知对流系数 $\alpha_f=10\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$。用式（12-30）求此流道板的对流和辐射热损失

$$Q_{fr1}=(\alpha_f+\alpha_{r1})A_r\cdot\Delta T=(10+14.2)\times0.134\times260\text{W}=843\text{W}$$

绝热设计的流道板，计算安装反射箔片时的热辐射系数

$$\alpha_{r2}=C_o\frac{\left(\frac{T_1}{100}\right)^4-\left(\frac{T_2}{100}\right)^4}{\Delta T}=0.18\times\frac{\left(\frac{633}{100}\right)^4-\left(\frac{373}{100}\right)^4}{260}\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}=0.98\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

如图 12-70 所示，大面积上安装反射箔片 $A_{r1}=0.08\text{m}^2$，小面积上无反射面 $A_{r2}=0.054\text{m}^2$。由此得对流和辐射热损失

$$Q_{fr2}=[(\alpha_f+\alpha_{r2})A_{r1}+(\alpha_f+\alpha_{r1})A_{r2}]$$

$$\Delta T=[(10+0.98)\times0.08+(10+14.2)\times0.054]\times260\text{W}=568\text{W}$$

7）讨论。若使流道板在 20min 内升温，所需的加热功率为 P_n。根据理论分析计算，热损失功率达到 $1.4P_n$。相反，绝热条件良好时，热损失仅为 $0.6\sim0.7P_n$。可见流道板系统绝热条件对减少热损失的意义。节能是热流道系统的重要质量指标。

表 12-16　本例计算数据总汇　　（单位：W）

计算项目	无绝热设计的流道板	绝热设计的流道板
流道板升温加热功率	1500	1500
热传导损失功率	1352(用普通钢垫圈)	365(用钛合金垫圈)
对流和辐射热损失	843(板表面灰暗)	568(大面积上用反射片)
其他因素的电损耗 10%	364	243
总计	4059	2676

从表 12-16 所列数据可知，承压圈和支承垫采用绝热材料钛合金，是普通钢热传导损失的 27%。如果再加装铝箔反射片，所需总功率为 2676W，为无绝热设计总电功率的 60%，而其中维持热流道生产的电功率仅为 1176W。

12.4.3　热膨胀补偿预测

塑料注射模的热流道结构零件在室温下装配。而流道板、喷嘴和承压圈等被装固在定模的框架里，在注射加工时有热膨胀，在进行热流道系统的定位、紧固和绝热设计时，必须进行以下热补偿计算。

① 喷嘴的热膨胀。如图 12-71 所示的尺寸 L_t 段的热膨胀（从定模板的安装基准面 C 算起的喷嘴长度的热膨胀）。

② 流道板的横向伸长。热流道板被销钉固定，加热后先向四周径向热伸长，如图 12-71 所示的尺寸 L_i 段。

③ 流道板上喷嘴轴线方向的热膨胀。如图 12-71 所示的尺寸 L_0 段的热膨胀。

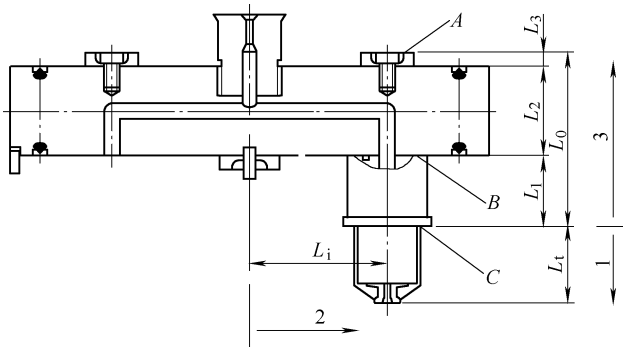


图 12-71　室温下热流道系统的热膨胀趋势

1—喷嘴的热膨胀 L_t　2—流道板横向热膨胀 L_i　3—喷嘴轴线方向热膨胀 L_0

A—间隙面　*B*—熔料泄漏面　*C*—喷嘴安装台肩

1. 喷嘴的热补偿

热流道喷嘴的结构种类繁多，这里分析三种顶针式喷嘴的热补偿。整体式喷嘴带有浇口套时，一种是顶针与喷嘴壳体有相同材料；一种是它们有不同材料；另一种是部分式喷嘴，浇口设在定模板上。

（1）整体式喷嘴热膨胀的补偿　图 12-72所示为整体式喷嘴结构，其中 d 为浇口套直径，C 为定位基准。整体式喷嘴本身设有开放式浇口，浇口区温度高于定模板的温度。浇口套热膨胀伸长后，如果浇口套缩在定模的成型面内，注塑件表面上将会留下凸起的浇口套的痕迹。相反，浇口套伸出成型面，注塑件上会留有浇口套的凹痕。

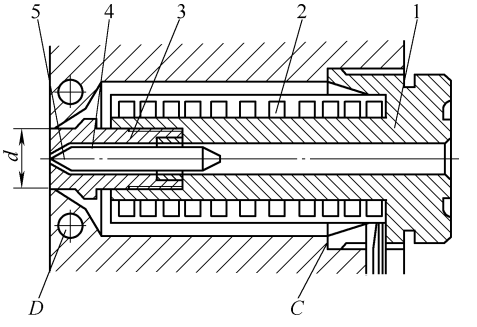


图 12-72　整体式鱼雷顶针分喷嘴结构

1—喷嘴套壳　2—加热线圈　3—浇口套

4—鱼雷顶针　5—浇口

C—分喷嘴的定位基准　*D*—冷却水管

室温下喷嘴的长度为

$$L_t = L_g - \Delta L = L_g[1 - \alpha(T_z - T_m)] \tag{12-32}$$

式中　L_t——考虑热补偿后室温下喷嘴的长度（mm）；

L_g——注射时喷嘴的长度（mm）；

α——喷嘴材料的热膨胀系数，钢材（11 ~ 13）$\times 10^{-6}$/℃，见表 12-17；

T_m——模具的温度（℃）；

T_z——喷嘴的温度（℃）。

定模板在注射生产时也产生热膨胀，常用定模板温度 T_m 代入式（12-32）计算。由于定模板低温的冷却作用，喷嘴套壳温度 T_z 常略低于塑料熔体温度 T_f。

表 12-17 热流道系统中常见材料的线性热膨胀系数 α

（单位：$\times 10^{-6}/℃$）

材料	α	材料	α
铜 Cu	18.5	预硬合金钢 3Cr2Mo	11,(20～100℃)
CuCoBe	17	美 P20、德 DIN 1.2311(40 CrMnMo 7)	13.4,(20～300℃)
CuBe	17	中碳合金钢 4Cr5MoSi	12
不锈钢	<10	美 H11、德 DIN 1.2343(X38 CrMoV5-1)	
烧结陶瓷	9	钛合金 TiA16V4(3.7164)	8.6
石英玻璃	0.5	聚甲醛 POM	110
铝	23	聚乙烯 PE	240

[**例 2**] 对某注射聚丙烯 PP 的热流道模具喷嘴进行热补偿计算。取喷嘴温度 $T_z=240℃$，定模板温度 $T_m=40℃$。定位基准 C 以下喷嘴套壳和浇口套长 $L_g=200mm$。中碳合金钢的热膨胀系数 $\alpha=12\times10^{-6}/℃$。室温下的喷嘴长度为

$$L_t=L_g[1-\alpha(T_z-T_m)]=200\times[1-12\times10^{-6}\times(240-40)]mm=199.52mm$$

（2）顶针与喷嘴套壳不同材料时的热补偿量 图 12-73 上的整体喷嘴带有浇口套，且用导热性较好的铍铜合金顶针鱼雷棒。钢制的喷嘴套壳和顶针用不同材料制造，喷嘴套壳和顶针的材质不同，受热热膨胀量有差异。室温下装配时，顶针制造长度比浇口套长度要短，即 $L_{tCu}<L_{gCu}$，如图 12-73a 所示。需要计算喷嘴套壳和顶针两者各自的热补偿量。室温下喷嘴设计的工作长度 L_g，为喷嘴部分长 L_{gFe} 与顶针鱼雷棒长度 L_{gCu} 之和，即

$$L_g=L_{gFe}+L_{gCu} \tag{12-33}$$

钢喷嘴套壳与铜鱼雷棒两者工作时热膨胀位置应相同，有

$$L_{tCu}=L_{gCu}\frac{1+\alpha_{Fe}(T_z-T_r)}{1+\alpha_{Cu}(T_f-T_r)} \tag{12-34}$$

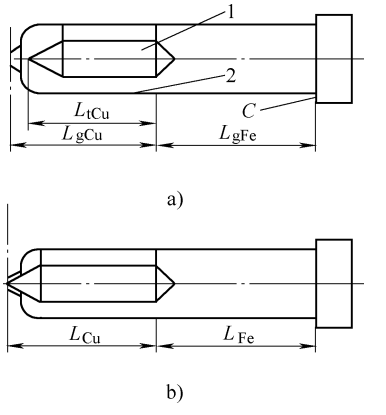


图 12-73 喷嘴与鱼雷顶针的热伸长

a）在室温或装配温度下 b）在工作温度下

1—鱼雷顶针 2—喷嘴套壳

C—定位基准

式中 T_r——室温，20℃；

T_f——塑料熔体的注射温度，即顶针鱼雷的工作温度（℃）；

α_{Cu}——鱼雷棒材料的热膨胀系数（1/℃），见表 12-17；

α_{Fe}——喷嘴套壳材料的热膨胀系数（1/℃），见表 12-17；

L_{tCu}——鱼雷顶针考虑热补偿后室温下的长度（mm）；

L_{gCu}——喷嘴套壳考虑热补偿后室温下的长度（mm）。

[**例 3**] 已知条件同本节的例 2，聚丙烯熔体温度 $T_f=280℃$。参考图 12-73b，喷嘴壳体工作时总长分成两部分，$L_{Cu}=40mm$ 和 $L_{Fe}=160mm$。顶针所在的喷嘴套壳，在室温下的长度为

$$L_{gCu}=L_{Cu}[1-\alpha_{Fe}(T_z-T_m)]=40\times[1-12\times10^{-6}\times(240-40)]\text{mm}=39.904\text{mm}$$

顶针鱼雷棒用铍铜制造，查表 12-17，$\alpha_{Cu}=17\times10^{-6}/℃$。由式（12-34）求得补偿后的顶针制造长度

$$L_{tCu}=L_{gCu}\frac{1+\alpha_{Fe}(T_z-T_r)}{1+\alpha_{Cu}(T_f-T_r)}=39.904\times\frac{1+12\times10^{-6}\times(240-20)}{1+17\times10^{-6}\times(280-20)}\text{mm}=39.83\text{mm}$$

铍青铜鱼雷棒的补偿量较明显。如不补偿，鱼雷棒的尖端可能会与浇口孔产生干涉。没有顶针鱼雷棒的喷嘴套壳部分在室温下的长度为

$$L_{gFe}=L_{Fe}[1-\alpha_{Fe}(T_g-L_m)]=160\times[1-12\times10^{-6}\times(240-40)]\text{mm}=159.616\text{mm}$$

按式（12-33），喷嘴壳体在室温下总长度应为

$$L_g=L_{gFe}+L_{gCu}=159.616+39.904=199.52\text{mm}$$

在室温下装配时，喷嘴套壳的总长度 $L_g=199.52\text{mm}$，比工作温度下的设计长度 200mm 短 0.48mm。若不考虑热补偿，就会在注塑件表面留下浇口套的压痕。此时铍铜顶针尖应从浇口套缩进 $L_{gCu}-L_{tCu}=0.074\text{mm}$。在保证的加工温度下，浇口环隙畅通。

（3）顶针式喷嘴设在定模板上时顶针的热补偿　如图 12-74 所示的喷嘴有顶针，但浇口设在定模板上。顶针的温度达到熔体注射温度。如果顶针的热补偿不合适，会出现顶针尖与模板上浇口端面不一致。影响浇口流通环隙的大小，改变顶针式浇口处的压力损失。也影响到顶针式浇口的热闭合状态。

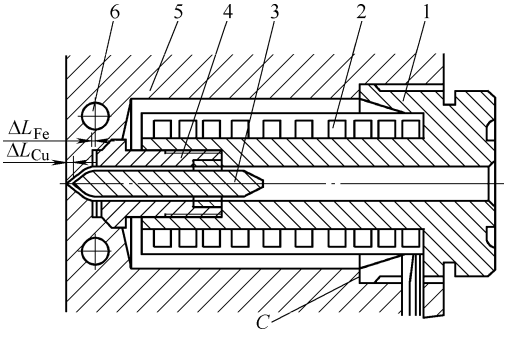


图 12-74　浇口设在定模板上的分喷嘴结构

1—喷嘴套壳　2—加热线圈　3—顶针鱼雷棒
4—顶针螺套　5—定模板　6—冷却水孔
ΔL_{Cu}—顶针的热补偿量　ΔL_{Fe}—喷嘴套壳的热补偿量
C—喷嘴的定位基准面

分别求出喷嘴套壳和顶针的材料不同时的伸长量，有

$$\Delta L=\Delta L_{Cu}+\Delta L_{Fe}\tag{12-35}$$

顶针长度 L_{Cu} 通常比喷嘴套壳长度 L_{Fe} 短，以减小流动阻力。计算顶针热膨胀量时，温度用熔体温度 T_f 代入。喷嘴套壳用钢制造，顶针用铍铜制造，分别求出 ΔL_{Fe} 和 ΔL_{Cu} 的热补偿量

$$\Delta L_{Cu}=L_{Cu}\alpha_{Cu}(T_f-T_m)\tag{12-36}$$

$$\Delta L_{Fe}=L_{Fe}\alpha_{Fe}(T_z-T_m)\tag{12-37}$$

[**例 4**]　已知条件同本节例 2 和例 3。参考图 12-73b 和图 12-74，在注射工作时，顶针鱼雷棒长 $L_{Cu}=40\text{mm}$，喷嘴无顶针部分长 $L_{Fe}=160\text{mm}$。

顶针热补偿量

$$\Delta L_{Cu}=L_{Cu}\alpha_{Cu}(T_f-T_m)=40\times17\times10^{-6}\times(280-40)\text{mm}=0.16\text{mm}$$

喷嘴套壳热补偿量

$$\Delta L_{Fe}=L_{Fe}\alpha_{Fe}(T_z-T_m)=160\times12\times10^{-6}\times(240-40)\text{mm}=0.38\text{mm}$$

总热补偿量

$$\Delta L = \Delta L_{Cu} + \Delta L_{Fe} = 0.16\text{mm} + 0.38\text{mm} = 0.54\text{mm}$$

在图 12-74 所示喷嘴的浇口处，在室温下装配时，顶针尖应从浇口表面上缩进 ΔL 距离。否则，在加热温度下，会影响浇口流通环隙，严重时顶针尖将堵死浇口。

在图 12-74 所示的顶针螺套 4 与定模板 5 之间应留有间隙 ΔL_{Fe}。从 C 面距该间隙长 $L = 190\text{mm}$，经计算

$$\Delta L_{Fe} = L\alpha_{Fe}(T_z - T_m) = 190 \times 12 \times 10^{-6} \times (240 - 40)\text{mm} = 0.456\text{mm}$$

间隙 $\Delta L_{Fe} \geqslant 0.456\text{mm}$。若间隙 ΔL_F 过小，喷嘴套壳 1 热伸长时，会产生很大应力。热应力会使喷嘴套壳弯曲变形，浇口腔中塑料熔料反喷泄漏，甚至会导致加热器受挤压损坏。另外，图 12-74 上的顶针螺套 4，与定模板 5 上的圆柱配合面是防止熔体泄漏的密封面，轴向长度应有 3 ~ 5mm。

2. 热流道板的横向热补偿

（1）流道板受热后横向伸长的热补偿计算　如图 12-75 所示，在室温下流道板上流道出口位置的尺寸为 L_p，工作温度下流道板上流道出口位置的尺寸为 L_g，有

$$L_g = L_p[1 + \alpha_{Fe}(T_f - T_r)] \tag{12-38}$$

$$L_g = L_i[1 + \alpha_{Fe}(T_m - T_r)] \tag{12-39}$$

式中　L_p——室温下流道板上流道出口位置的尺寸（mm）；

L_i——室温下喷嘴注射点位置的尺寸（mm）；

L_g——工作温度下流道板上流道出口位置的尺寸（mm）。

［**例 5**］　对某注射 40% 玻璃纤维增强 PPS 的热流道模具进行热补偿计算，见图 12-75。设计图样上 $L_i = 271.82\text{mm}$。流道板用 4Cr13，其 $\alpha_{Fe} = 11.5 \times 10^{-6}/℃$。定模板用 P20（美），其 $\alpha_{Fe} = 12.8 \times 10^{-6}/℃$。温度 $T_f = 350℃$，$T_m = 160℃$，$T_r = 20℃$。求室温下流道板上流道出口的位置尺寸 L_p。

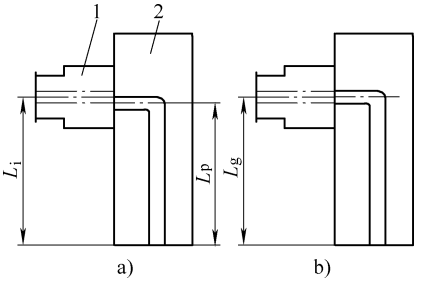


图 12-75　流道板的横向热伸长

a）在室温或装置温度下　b）在工作温度下

1—喷嘴　2—流道板

在高温工作状态下，流道板上喷嘴轴线应与定模板的喷嘴轴线重合，由式（12-38）和式（12-39）。得到

$$L_p = \frac{L_i[1 + \alpha_{Fe}(T_m - T_r)]}{[1 + \alpha_{Fe}(T_f - T_r)]} = \frac{271.82[1 + 12.8 \times 10^{-6}(160 - 20)]}{[1 + 11.5 \times 10^{-6}(350 - 20)]}\text{mm} = 271.28\text{mm}$$

在室温下加工定模板时，喷嘴轴线距模具中央距离应为 $L_i = 271.82\text{mm}$。而在室温下加工流道板，流道板上注射出口轴线距模具中央距离 $L_p = 271.28\text{mm}$。在高温下注射成型时这两条轴线重合，$L_q = 272.31\text{mm}$。

经计算可知，大型模具的流道板上喷嘴的横向位置会有较大的补偿量。如果是开关式喷嘴，关系到阀芯柱销和浇口在工作温度下的直线对准。

（2）流道板喷嘴轴线方向的热补偿计算　在图 12-76 和图 12-77 上，Δ 为室温下承

压圈与定模固定板之间的间隙。基准面 C 与定模固定板的距离为 L_0，受热伸长 ΔL_0，它由喷嘴的安装台肩高度 L_1、流道板厚度 L_2 和承压圈厚度 L_3 的热膨胀之和组成。L_0 的热伸长会顶压定模固定板。在此方向上，不能产生过大的压应力，以防流道板受压变形及把固定板压坏，造成流道板与喷嘴配合面上产生塑料熔料的泄漏。

喷嘴台肩高度 $L_1 \pm 0.01$mm，流道板厚度 $L_2 \pm 0.01$mm，承压圈作为调节补偿量的修正零件，保证承压圈与定模固定板之间的间隙 Δ。

流道板系统在喷嘴轴线方向的零部件有喷嘴、流道板和承压圈，见图 12-76。其中承压圈受热膨胀产生压力，又起绝热作用，常用不锈钢制造，硬度约为 52HRC，热导率为 16～26W/(m·℃)。也有用钛合金或陶瓷材料，钛合金的压缩强度为 1000MPa，热导率为7W/(m·℃)；陶瓷烧结材料的压强为 2100MPa，热导率为 2W/(m·℃) 以下。为达到较好的绝热效果，需减小承压圈与定模固定板的接触面积。如果喷嘴轴线方向热伸长过大，热应力会压坏定模固定板。定模固定板应有较好的强度或用高硬度的嵌件来抵抗压应力。

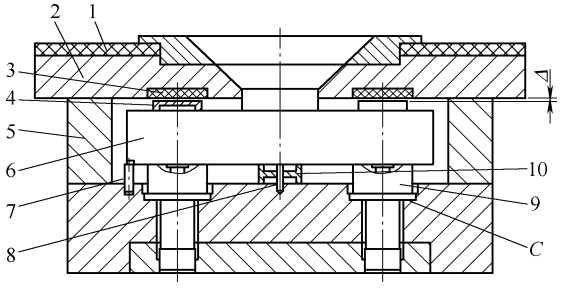


图 12-76　流道板的热补偿结构

1—绝热板　2—定模固定板　3—嵌件　4—承压圈　5—垫块
6—流道板　7—止转销　8—定位销　9—分喷嘴　10—支承垫
Δ—注射点轴线方向应留间隙　C—分喷嘴定位基准面

若承压圈过厚（图 12-77a），与固定板之间间隙过小，或在装配时已有过盈压缩量，在注射时的热膨胀状态下，在喷嘴与流道板的轴线上，会产生弯曲变形。两者的接触面上，熔料易泄漏。若承压圈太薄。（图 12-77b），与定模固定板之间间隙过大，喷嘴的入口端面与流道板在注射压力下有过大间隙，高压熔体也会从此处泄漏。

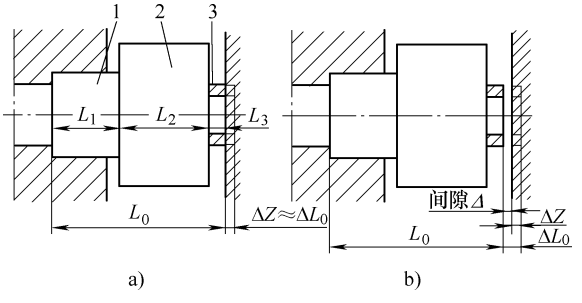


图 12-77　热流道系统喷嘴轴线方向的热伸长

a）$\Delta = 0$ 时　b）$\Delta > 0$ 时

1—喷嘴　2—流道板　3—承压圈

为保证流道板系统安装正确，要对喷嘴轴线方向进行热补偿计算，使承压圈与固定板在装配温度下有合理的间隙。装配时要保证所有喷嘴轴向的定位支承端面 C 是同一平面。各个喷嘴轴线上的间隙不同或过盈不均匀，流道板会产生倾斜，喷嘴产生侧向偏移，也会造成熔体泄漏。

为计算预留间隙，在工作时，流道板系统在轴线方向 L_0 的热膨胀量为

$$\Delta L_0 = \alpha L_0 \Delta T \tag{12-40}$$

式中 ΔL_0——流道板系统喷嘴轴线方向的热伸长量（mm）；

L_0——室温下流道板系统零部件在轴线方向的总长度（mm）。

$$\Delta T = T_g - T_m$$

流道板系统零部件热膨胀产生的热应力为

$$\sigma = \Delta L_0 E / L_0 \tag{12-41}$$

将式（12-40）代入式（12-41），有

$$\sigma = \alpha E \Delta T \tag{12-42}$$

E 是系统零件的弹性模量，对于钢材取 2.1×10^5MPa。计算所得的热应力 σ 应小于定模固定板接触面上的许用压应力 $[\sigma]_p$。系统的喷嘴、流道板和承压圈等零部件有不同的形状和截面积，各种材料的弹性模量和热膨胀系数不同，需要将这些零部件串联起来，用有限元的数值分析方法计算。支承圈与固定板之间预留间隙的精确计算是比较困难的。

［**例 6**］ 注射 PC 物料的热流道模具，对喷嘴轴线方向热补偿进行计算。T_z = 300℃，T_m = 90℃；喷嘴座高 L_1 = 35mm，流道板厚 L_2 = 55mm，承压圈厚 L_3 = 10mm，L_1、L_2、L_3 如图 12-76 和图 12-77 所示。

［**解**］

1）流道板系统零部件轴向热膨胀后，作用在模具固定板上的热应力，由式(12-42)有

$$\sigma = \alpha E(T_z - T_m) = 12\times10^{-6}\times2.1\times10^5\times(300-90)\text{MPa} = 529\text{MPa}$$

2）固定板材料的屈服应力 σ_y = 800MPa，取安全系数 n = 2 得许用压应力为

$$[\sigma]_p = \sigma_y / n = 800\text{MPa}/2 = 400\text{MPa} < \sigma = 529\text{MPa}$$

3）喷嘴轴线方向总长 L_0 及热膨胀伸长量 ΔL_0

$$L_0 = L_1 + L_2 + L_3 = 35\text{mm} + 55\text{mm} + 10\text{mm} = 100\text{mm}$$

$$\Delta L_0 = \alpha L_0 \Delta T = 12\times10^{-6}\times100\times(300-90)\text{mm} = 0.25\text{mm}$$

为使 $[\sigma]_p$ 小于热应力 σ，热流道系统在安装时，注射点的轴线方向应留有间隙量 Δ。当间隙 $\Delta = 0$，$\Delta Z = \Delta L_0 = 0.25$mm 时，会损伤定模固定板的接触表面。所以 Δ 应小于 ΔZ，要保证一定的弹性压力。对于多喷嘴热流道系统，应保证各注射点的间隙量一致。

12.4.4 流道板的结构和装配

流道板的结构首先保证塑料熔体合理输送，不堵塞、不滞留、不泄漏，还要保证在高温工作条件下，有足够的刚度和几何精度。因此，必须深入了解流道板零部件的结构细节和装配过程。

1. 主流道喷嘴、承压圈和旋塞

（1）主流道喷嘴 主流道喷嘴也称为分配器，连接注射机喷嘴和流道板输送塑料熔料。它有两种结构，一种是直接加热，见图 12-78。衬套用电热器加热并有热电偶测温。在主流道喷嘴长度大和注射周期较长时，必须直接加热保温，才能可靠维持主流道

中塑料熔体的温度，为常见常用。第二种是间接加热如图 12-79 所示。它依靠伸入注射模的注射机喷嘴和流道板两者热传导保温。

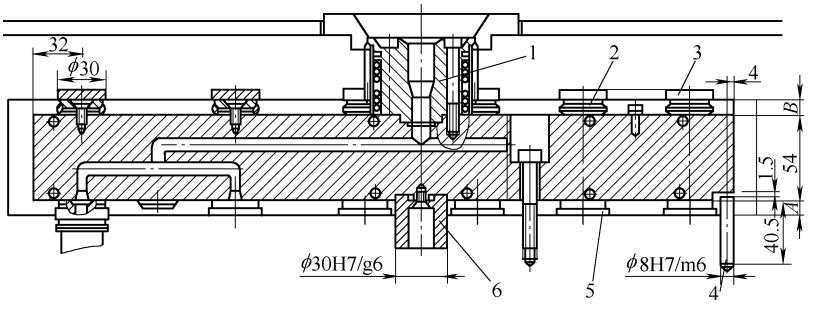


图 12-78　直接加热的主流道喷嘴

1—主流道喷嘴　2—硬嵌件　3—承压圈　4—抗扭止转销
5—分喷嘴　6—中央定位支承垫

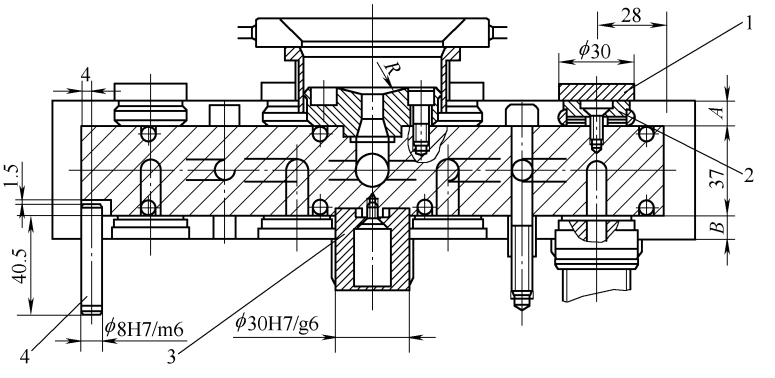


图 12-79　间接加热的主流道喷嘴

1—硬嵌件　2—承压圈　3—中央定位支承垫　4—抗扭止转销

还有一种带有过滤网的主流道喷嘴，在输送塑料熔体中，在过滤时，损耗 200 ~ 400MPa 的压力，需慎重考虑后再使用。

主流道喷嘴的入口凹球坑，会被硬度很高的注射机喷嘴头撞压，要用耐热钢 4Cr5MoSiV 制造（美 H11），并有 53 ~ 55HRC 的硬度。它应防止在注射中产生反喷、流涎和吸入空气，以及它与流道板接触面上熔料泄漏的可能。凹球坑半径大于注射机喷嘴头球半径。主流道喷嘴的入口略大于注射机喷嘴口径 0. 5mm。

（2）承压圈　如图 12-80 所示。承压圈和中央定位支承垫承受螺钉固定预紧力、热膨胀在流道板平面上产生的剪切力、热膨胀在流道板和喷嘴轴向上产生的压力。承压圈的设计和装配应防止在注射时产生流道板和喷嘴的接触面上熔料泄漏。为了防止承压圈压陷定模固定板，在相应位置要镶入硬嵌件，其硬度为 50 ~ 60HRC。

本节例 6 已经涉及了承压圈的热传导计算，这里再作详细分析。如图 12-81 所示，热量以热损耗形式从流道板经过承压圈传递到定模固定板。热损耗 Q_P 以半圈形波形从

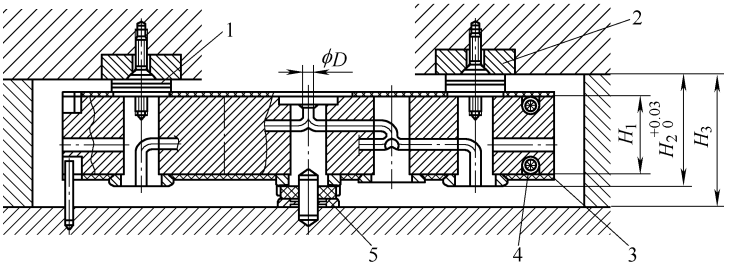


图 12-80　流道板上的承压圈

1—承压圈　2—硬嵌件　3—反射板　4—管状电热管　5—中央支承垫

承压圈向定模板扩散。现设定 T_{HR} 和 T_P 分别为流道板和定模板中央的温度。T_1 和 T_2 是承压圈表面，与热流道板和定模板的接触温度。假定承压圈与周边环境之间无热对流和热辐射，且承压圈为实心圆柱体。

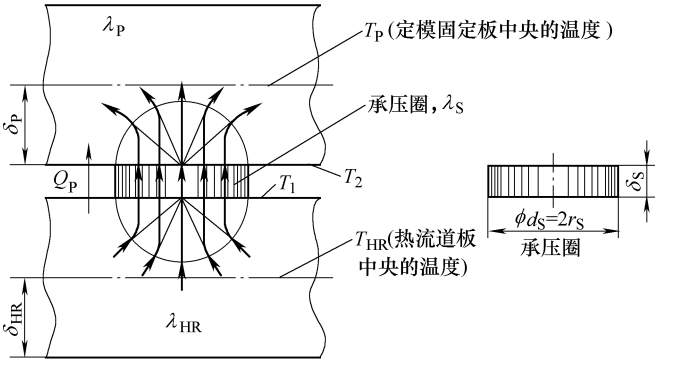


图 12-81　流道板通过承压圈向定模固定板的热量传递

$2\delta_P$—定模固定板厚度　$2\delta_{HR}$—流道板厚度

δ_S—承压圈厚度　d_S—承压圈直径　r_S—承压圈半径

在流道板中热损耗 Q_P 的计算式

$$Q_P = 2\pi r_S \lambda_{HR} \delta_S \frac{T_{HR} - T_1}{\delta_{HR} - r_S} \tag{12-43a}$$

承压圈的传热面积 $A_S = \pi r_s^2$，在承压圈中热损耗 Q_P 的计算式

$$Q_P = A_S \frac{\lambda_S}{\delta_s}(T_1 - T_2) \tag{12-43b}$$

在定模固定板中热损耗 Q_P 的计算式

$$Q_P = 2\pi r_S \lambda_P \delta_P \frac{T_2 - T_P}{\delta_P - r_S} \tag{12-43c}$$

以上三式联立，消去 T_1 和 T_2，得承压圈系统中热损耗 Q_P 的计算式

$$Q_P = \frac{T_{HR} - T_P}{\frac{\delta_{HR} - r_S}{2\pi r_S \lambda_{HR} \delta_{HR}} + \frac{\delta_P - r_S}{2\pi r_S \lambda_P \delta_P} + \frac{\delta_S}{\pi r_S^2 \lambda_S}} \tag{12-44}$$

式（12-44）与式（12-28）计算的热损耗结果相比，前者略小些，但较为精确。

计算钢、钛合金和陶瓷三种材料的承压圈，比较它们的热损耗。它们的传热系数见表 12-18。承压圈的结构尺寸相同，承压圈半径 $r_S = 15\text{mm}$，承压圈厚度 $\delta_S = 5\text{mm}$，定模固定板厚度和流道板厚度 $2\delta_P = 2\delta_{HR} = 40\text{mm}$。流道板温度 $T_{HR} = 250℃$，定模固定板温度 $T_P = 50℃$。代入式（12-44）后计算得钢制承压圈的系统中热损耗 $Q_P = 485\text{W}$；钛合金承压圈 $Q_P = 158\text{W}$，是钢的 0.325；陶瓷承压圈 $Q_P = 79\text{W}$，是钢的 0.163。

表 12-18　三种材料的承压圈的性能和热损耗

序号	材　　料	传热系数 λ/(W/(m·℃))	弹性模量 E/($\times 10^3$MPa)	线膨胀系数 α/($\times 10^{-6}\text{K}^{-1}$)
1	德 DIN 1.2767(X45NiCrMo4)	30	210	13.3
2	德 DIN 3.7165(TiA16V4)	6.5	110	6.5
3	陶瓷	3.0	—	3

承压圈圆柱体在压力 F 下的弹性压缩量为

$$\Delta f = \frac{F\delta_S}{EA} \tag{12-45}$$

同样的承压圈用钢 1 和钛合金 2 制造，可得钛合金的压缩变形量是钢的一半

$$\frac{\Delta f_1}{\Delta f_2} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{110}{210} \approx 0.5$$

说明钛合金承压圈不但线膨胀系数小，而且弹性变形量小。热流道中用钛合金做承压圈已很普遍。

由承压圈热损耗式（12-43b）

$$Q_P = A_S \frac{\lambda_S}{\delta_S} \Delta T$$

对于一定的材料的 λ_S 和温差 ΔT，可减小热损耗

$$Q_P \propto \frac{A_S}{\delta_S}$$

在承压圈的几何形体和尺寸设计时，为减小接触面积 A_S，考虑用管状圈。图12-82b和图 12-82c 有效减小接触面积，但提高了加工成本。图 12-82d 增加承压圈的厚度 δ_S，常用于中央定位支承垫。支承圈直径 $d_S = 30\text{mm}$，厚度 $\delta_S = 50\text{mm}$ 时，$d_S/\delta_S = 0.6$，是厚度 $\delta_S = 5\text{mm}$ 的 0.1。若用耐热阻热钢管两端配合压入到板上的孔中，但这两端的配合加工较难。图 12-82d 上只有一端有配合，另一端只用钢管支撑。另一端嵌入底圈，用弹性销套对中固定在板上。

图 12-82e 是用陶瓷材料做承压圈。由于承压圈在流道板上受到热膨胀后产生的压力和剪切力，易发生脆裂，要用强度低的韧性钢材做它的滑动座板。滑动座板的加工比

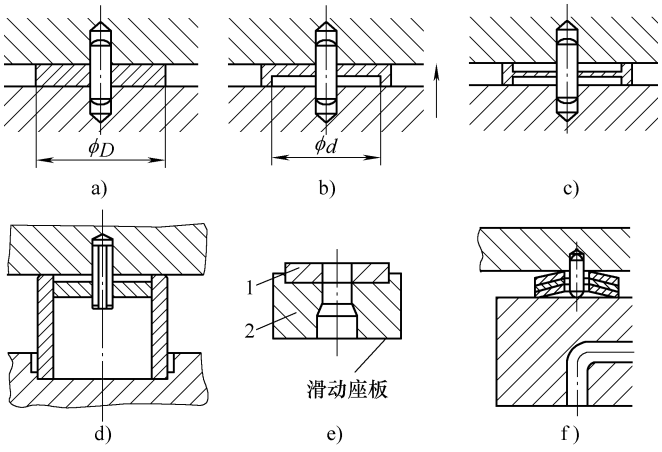


图 12-82　六种承压圈的结构

a）实心　b）一端中空　c）二端中空　d）厚钢管　e）陶瓷与滑动板　f）弹簧板

1—陶瓷　2—钢

陶瓷片方便得多。这种串联两种材料的承压圈，用式（12-5）计算传热系数。图 12-82f 所示用盘簧替代实心承压圈。利用盘簧的弹力防止流道板与喷嘴的接触面之间泄漏塑料熔体。此外，还用端面滚针轴承替代承压圈，接触面积小，热损耗低。

承压圈的安装方法见图 12-83。图 12-83a 和图 12-83b 分别用销钉和沉头螺钉固定，热损耗较大，加工也不方便。图 12-83c 上用弹性销套固定，结构较简单，热损耗较小些。

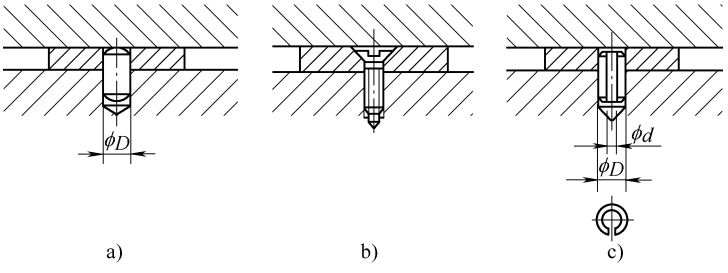


图 12-83　承压圈的三种安装方法

a）销钉固定　b）沉头螺钉固定　c）弹性销套固定

（3）旋塞　旋塞在流道的末端，用来改变塑料熔体的方向，防止泄漏。要求转角处无滞留塑料的死角，因为在滞留区的塑料经历加热时间长，会降解变色。旋塞大多用螺纹联接，可以拆卸更换，有焊接或钎焊固定，但在高压下也会泄漏。

图 12-84 介绍六种旋塞结构。图 12-84a 所示的密封圆柱的前平面，图上箭头所指位置为滞留区。此密封塞的配合是 H7/n6。图 12-84b 所示的密封塞的工作面加工成凹圆球，能使塑料熔体拐转流动畅快，但在箭头所指的尖角位置有熔体滞留。图 12-84c

所示的密封塞作为流道转角的一部分。它与流道的配合接触面上会有塑料滞留。图 12-84d所示的接触面在直流道上。只要制造精良，不会有滞留。从图 12-84a 到图 12-84d的四种密封塞，后面虽有螺纹旋塞固紧，在高压塑料熔体冲刷下的密封塞会有自转。塑料熔体对圆柱密封塞有强力摩擦力矩，必须加装销钉或螺钉止转。图 12-84e 所示的密封塞为圆锥柱体，背面上有螺纹孔供拆卸用。密封塞前端为圆平面，不需要止转。熔体流动速率较低时转角上有环流，阻力较大，也会有滞留。密封塞不能用铜或铜合金制造。图 12-84f 所示为较好的旋塞密封，熔体拐转流动的阻力最小，无滞留，只要装配时对准，不需要止转，但加工零件多，成本高。

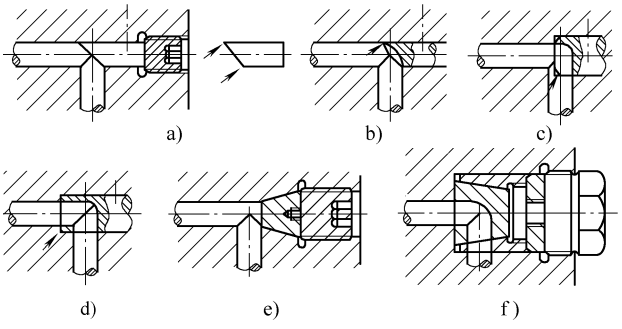


图 12-84　流道转角的六种旋塞结构

a）平面密封塞　b）球面密封塞　c）角球面密封塞
d）流道密封塞　e）锥形密封塞　f）锥形流道密封塞

2. 流道板的装配

流道板零部件装配正确，才能保证密封无泄漏，保证热流道系统长期正常运行。

（1）流道板的密封和紧固　要保证流道板无塑料熔体的泄漏，必须考虑到热膨胀的作用。冷流道系统在注射和保压后，塑料迅速固化。模具始终被冷却在低温状态，熔体泄漏很少发生。而高温的热流道系统维持了熔体的可流动状态，而且不断地受到注射与保压的短时高压冲击。在室温下装配紧固的热流道系统，而后在高温下生产注塑件，流道板的热变形，特别是温度控制的不稳定和热变形的不均匀，都会使流道板中的熔体泄漏。流道板的设计、装配和加工工艺不当，也会引起泄漏。其中注射工艺不当，超高压的注射和过高的温度冲击是其主要原因。低黏度的 PE 和 PP 等塑料熔体更容易发生泄漏。

流道板的熔体泄漏会严重损坏模具，并导致停产，但在模具外面并不容易察觉泄漏，只能在生产操作中留意注塑件的缺料现象。在每次注射量准确的情况下，出现了模具型腔充填不完整，这就是泄漏的迹象。有熔料溢流到流道板周边的间隙里，应立即停止注射，待模具冷却后检查系统。

图 12-85 是典型热流道系统的装配图。流道板发生泄漏部位有两个方向，一是流道的端面；二是流道板、喷嘴与主流道喷嘴之间。

如图 12-85 所示，流道板上的流道通常在板的对称轴线上钻成，钻成后两端加以密

封。先用堵塞止堵引流，堵塞是个弯头两通，应对准流道和喷嘴的分流道，要求流道内壁光滑，配合紧密，无泄漏和无滞料死点。堵塞是圆柱外形，要用定位销钉止转防松，然后用紧定螺钉压紧。螺钉头应压配金属 O 形密封圈。

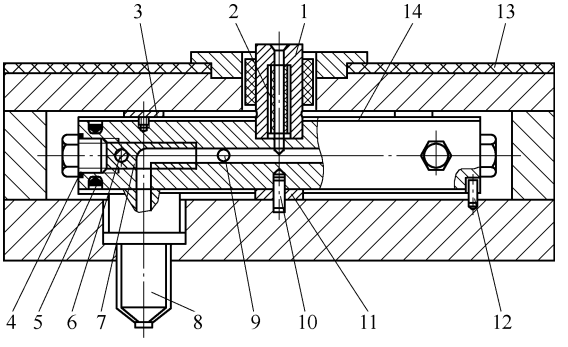


图 12-85　流道板的密封和紧固

1—主流道喷嘴　2—熔体过滤网套　3—承压圈　4—金属 O 形密封圈　5—金属电热管　6—螺钉　7—堵塞　8—分喷嘴　9—热电偶　10—中心定位销　11—支承垫　12—止转定位销　13—绝热板　14—反射铝片

图 12-85 上流道端面密封和与分喷嘴密封中，都采用了金属 O 形密封圈。在流道板与喷嘴之间的防泄漏有两种情况。大多数热流道制造商使用柔性的金属 O 形密封圈。如图 12-86 所示，两者接触的喷嘴表面上开圆环的凹槽，放置密封圈。对于低刚度的模具和和流道板、变形的旧模具和旧的注射机，使用密封圈特别有利。密封圈在喷嘴轴线方向，应该有 20% ~30% 密封圈直径（A）的高度（C）预紧量，来抵御压力熔体的泄漏。在模具被拆卸后，或模具连续工作约六个月后，密封圈应该换新。也有一些热流道制造商不使用密封圈，依靠流道板与喷嘴之间的光滑表面，依靠夹紧力，保证合适的防漏；另外，一旦泄漏时要有控制漏料的空间。

金属 O 形密封圈用钢管或不锈钢管制成，管壁厚 0.254mm，壁上有透气小孔。钢管外镀银厚 0.0254 ~0.0381mm。表 12-19 为标准系列的金属 O 形密封圈的参数。喷嘴端面上容圈的槽必须精确加工，既要保证紧固后有足够的预紧量，又要让环圈在变形后有一定的容让的空间。如图 12-86a 所示，在装配压紧后，密封圈的两个环平面和圈的

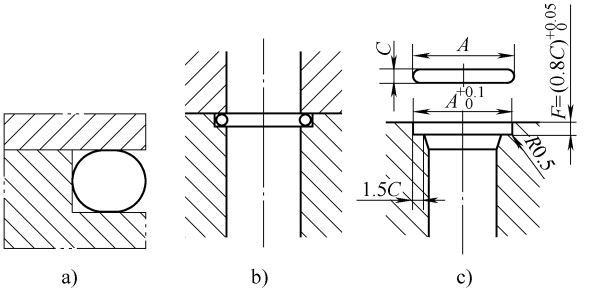


图 12-86　金属 O 形密封圈的密封原理

a）原理　b）装配图　c）密封槽

外径应有恰当的弹性压缩变形。此种金属密封圈价格昂贵。有的制造商用实心铜环替代钢管，装在喷嘴的封闭凹槽内。其弹性较差，密封不可靠。

表 12-19　标准金属 O 形密封圈的技术参数　　（单位：in/mm）

外径 A	高度 C	壁厚 T	外径 A	高度 C	壁厚 T
0.344/ 8.738	0.035/0.889	0.01/0.254	1/25.4	0.062/1.575	0.01/0.254
0.500/12.700	0.062/1.575	0.01/0.254	1.125/28.575	0.062/1.575	0.01/0.254
0.562/14.275	0.062/1.575	0.01/0.254	1.125/28.575	0.062/1.575	0.01/0.254
0.625/15.875	0.062/1.575	0.01/0.254	1.375/34.925	0.062/1.575	0.01/0.254
0.687/17.450	0.062/1.575	0.01/0.254	1.500/38.100	0.062/1.575	0.01/0.254
0.875/22.225	0.062/1.575	0.01/0.254			

注：1in = 25.4mm

空心金属 O 形密封圈适用于高温和高压场合。空心金属 O 形密封圈结构有三种类型。a 型是非自紧 O 形密封圈，用于低压下介质密封；b 型为充气 O 形密封圈，在封闭的 O 形密封圈内充惰性气体，可增加密封圈的回弹能力，用于高温场合。O 形密封圈的充气方法，一般是采用在管子焊接之前，将固态二氧化碳或偶氮二异丁腈放入管内，焊接后再使之汽化，或者直接充高压惰性气体；C 型是自紧 O 形密封圈，在密封圈的内侧钻有若干小孔。由于管内压力随介质压力的增高，而增大密封圈的自紧性能，能用于高压场合。

流道内的塑料熔体注射压力高达 50MPa，有的塑料熔体温度超过 300℃。流道密封属于高压高温密封，应采用 b 型或 c 型的空心金属 O 形密封圈；金属环材料应选用奥氏体不锈钢或因科镍，不用低碳钢。当被密封介质具有活性，或密封圈表面粗糙时，应电镀或喷涂有高延伸性的补偿层。注射塑料的涂层设计温度为 -60 ~ 360℃，因为它与 PP 塑料有化学反应，所以应选用银，不选用铜。

对于高压注射，应用厚壁管的自紧 O 形密封圈。壁厚 T 与管外径 C 之比。T/C = 0.25 ~ 0.167。表 12-19 金属 O 形密封圈的壁厚 T = 0.254mm，管径为 1.575mm，是厚壁管。不锈钢管的弹性回弹量为 0.0762 ~ 0.0508mm，线压 35.6 ~ 267N/cm。图示 12-86 为开口沟槽，金属 O 形密封圈直接与塑料熔体接触；或者用闭口沟槽，埋嵌在喷嘴端面的环槽中。沟槽尺寸都需慎重计算，考虑 O 形密封圈的压扁度，并精确加工。

生产中也尝试过用螺纹联结，在室温下就将所有喷嘴紧固在流道板上，从分流板上吊紧喷嘴。另一种方法是将喷嘴以螺纹旋紧在流道板的螺纹孔中。两者在冷却状态下都提供了可靠的密封功能。但在操作温度时，喷嘴和流道板在轴向和径向都需要有膨胀的空间，需要冷间隙。在过热膨胀时，并无过热保护，流道板膨胀时，喷嘴随之移动。这种设计，适用于注射点少、喷嘴较短、喷嘴之间间距不大的场合。较理想的方法是喷嘴与流道板呈平面接触，但喷嘴在定模板上的安装孔中，是弹性支承，在冷却状态下，由板弹簧提供预紧力，在过热时，可吸收热膨胀，防止系统损坏和泄漏，但因结构复杂很少应用。

如图 12-85 所示，防止分喷嘴与流道板之间的泄漏，是将定模固定板上的压力，

经承压圈压紧流道板对面的喷嘴，又传到定模板的孔中。流道板通常以冷间隙紧固到模具上。此间隙取决于装配高度，取决于流道板与模具间的温差。在某些系统中，需要有高度的盈余量，要预测计算加热后的流道板与喷嘴热膨胀的伸长量。另一方面应校核计算装配零件在热应力作用下的表面允许的压力，以防止泄漏和受压表面产生塑性变形。

（2）装配过程　热流道系统是否泄漏，取决于装配的精度和安装次序，例如应执行图 12-87 所示的安装次序和要求。

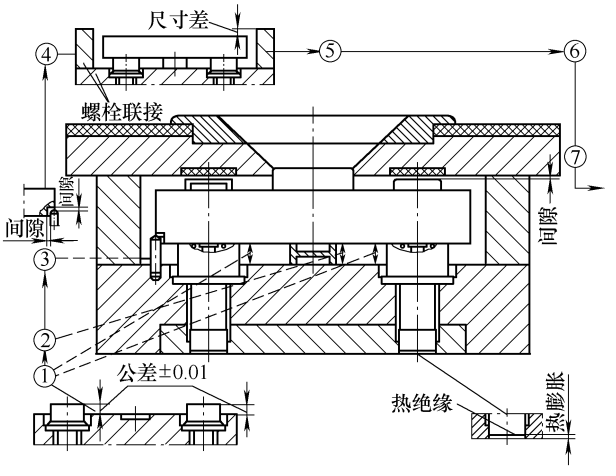


图 12-87　流道板的安装次序

① 将喷嘴安装在定模板中。从定模板的表平面校核所有喷嘴装配平面的高度是否一致，公差为 ±0.01mm。

② 经磨削的支承垫，置于定模板上时，与喷嘴装配平面等高，公差为 ±0.01mm。

③ 在不安放金属密封圈的情况下，试装流道板，校核止转销的轴向和径向是否留有必需的间隙；用螺栓联结将流道板紧固到定模板上。

④ 用螺栓将垫板框紧固到定模板上。

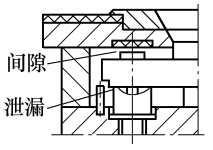
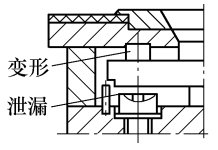
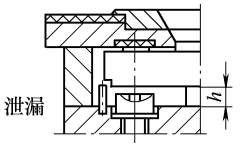
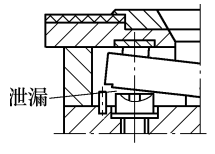
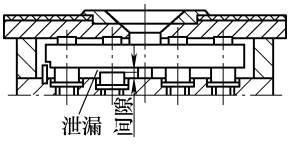
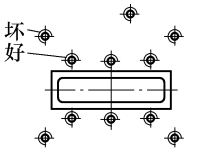
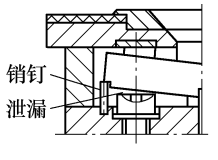
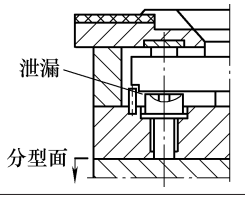
⑤ 配合所有的承压圈，来获得制造商推荐的间隙。若有间隙 0.05mm，系统加热后，喷嘴轴线方向膨胀约 0.1mm，则有干涉量 0.05mm，因此需计算所需间隙或过盈量。

⑥ 拆卸流道板，在喷嘴上放置金属密封圈，所有密封圈应高出喷嘴端平面约 0.3mm；再次安装流道板。如果不安装密封圈，步骤⑥就不执行。

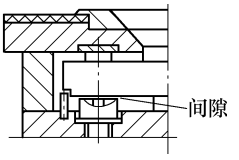
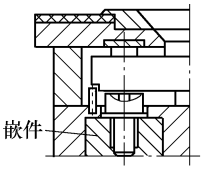
⑦ 紧固定模固定板。

每 100mm 流道板，每 100℃的升温，受热后的线膨胀就有 0.1mm，再加上不正常的装配载荷，很容易产生高压熔料泄漏。在安装和紧固流道板时，一些装配上的错误引起熔体泄漏，见表 12-20 所列。

表 12-20　流道板装配上的错误造成的熔料泄漏

	①由于过量的间隙,在注射压力作用下,喷嘴与流道板脱离,使其间泄漏熔料
	②间隙过小,热伸长超过预期。承压圈陷进了定模固定板,防止了流道沿着喷嘴表面移动。但喷嘴被推到一侧,两者的流道错位,致使熔料泄漏
	③由于支承垫太高,流道板被架空在支承垫上。流道板与喷嘴脱离,使其间泄漏熔料
	④由于支承垫太低,从注射机料筒施加压力将支承垫压塌。流道板弯曲变形引起熔料泄漏
	⑤喷嘴的高度不均匀使最短的喷嘴与流道板间存在间隙,引起熔料泄漏
	⑥定模的模板太薄,刚度差,紧固螺栓与流道板的间距太大。流道板的热膨胀,使开模时的定模产生弯曲变形,熔料从喷嘴上泄漏
	⑦止转定位销太高,流道板的边角被架在此销钉上,喷嘴与流道板间产生间隙,使熔料泄漏
	⑧喷嘴的注射端面重压了动模板,喷嘴没有热膨胀的空间而产生了压力,使此喷嘴上的密封损坏,熔料泄漏

（续）

	⑨密封圈在喷嘴平面之上有约 0.3mm 的预压缩量。如果此密封圈没有预压缩量，或者承压圈被磨得太短，喷嘴轴线方向没有初始压紧力，系统加热后有熔料泄漏
	⑩喷嘴被承压在嵌件上，而不是支承在定模板上。喷嘴受到注射压力和热膨胀时，支承力错误地作用在嵌件上，引起熔料泄漏

（3）高温下的螺纹联接　热流道系统的螺纹联接是项重要的技术项目。所用的螺钉和螺栓的优质钢或合金钢，在 350℃左右的高温下，其屈服强度、抗拉强度和弹性模量随着温度升高而降低。而且，性能等级 12.9 的螺栓在 350℃以上高温中，超过 1000h 后，原有预紧力将会降低 50%。热流道系统联接和密封有松弛现象。聚醚醚酮 PEEK 和聚醚酮 PEK 的熔体温度达到 400℃时，高温对螺纹联接影响更大。因此，热流道系统的联接螺栓和螺钉应该用耐热合金钢制造，达到 10.9 或 12.9 的性能等级。

喷嘴与流道板之间没有足够的夹紧力会导致塑料熔体泄漏。如果夹紧力太大会造流道板等零件变形，造成螺栓等零件破损。尤其是各螺栓联接的夹紧力不均匀，造成流道板弯曲变形产生装配误差，也会引起熔料泄漏。因此，热流道注射模的装配在紧固螺栓时要用指示式扭力扳手严格控制扭矩，按表 12-21 施行。不仅要保证各螺栓施加力矩一致，而且要按图 12-88 所示的顺序拧紧。

表 12-21　具有标准螺纹的螺栓所承受的扭矩 *M*

螺栓直径	性能等级	承压面摩擦系数 f 下的扭矩 M/(N·m)		
		0.10	0.14	0.20
M6	8.8	8.5	10.4	12.5
	10.9	12.5	15.5	18.5
	12.9	14.5	18.0	21.5
M8	8.8	20.5	25	31
	10.9	30	37	45
	12.9	35	43	53
M10	8.8	41	51	62
	10.9	60	75	90
	12.9	71	87	106
M12	8.8	71	87	106
	10.9	104	130	155
	12.9	121	150	180

（续）

螺栓直径	性能等级	承压面摩擦系数 f 下的扭矩 M/（N · m）		
		0.10	0.14	0.20
M14	8.8	113	140	170
	10.9	165	205	250
	12.9	195	240	290
M16	8.8	170	215	260
	10.9	250	310	380
	12.9	300	370	450

注：见 GB 3098.1 “螺栓、螺钉和螺柱的性能等级和材料”。性能等级 8.8，螺栓的抗拉强度 σ_b = 800MPa，中碳钢制造。性能等级 10.9，螺栓的抗拉强度 σ_b = 1000MPa，合金钢制造。性能等级 12.9，螺栓的抗拉强度 σ_b = 1200MPa，合金钢制造。

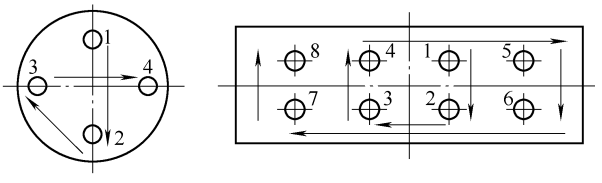


图 12-88　螺栓的紧固顺序

a）喷嘴的紧固　b）流道板的紧固

12.5　先进的热流道注射模

采用热流道技术的注射模日益增多，已经占有注射模总数的五分之二以上。大批量注射生产塑料制品的注射模，普遍应用热流道技术。本节介绍典型热流道注射模的总体结构，展示叠式热流道注射模的设计。

12.5.1　热流道注射模的总体结构

一方面，热流道技术已经进入成熟期，热流道注射模生产的可靠性和制件质量得到保证。热流道系统装备的喷嘴、加热器、热电偶和温度控制箱，已经标准化和系列化。工程技术人员普遍应用 CAE 流动分析软件，进行热流道浇注系统设计。另一方面，热流道技术还在发展和创新，新技术和新专利不断涌现。

1. 热流道技术适用的注射模

大型塑料制品注射模采用热流道，一模多腔注射模生产小注塑件和薄壁管件也在应用热流道技术。热流道和冷流道组合的注射模，能克服热流道浇口痕迹显现，应用于精密注射成型工程。

（1）大中型制品注射模的热流道　电话亭用泡沫 PC 塑料件装配而成。其中最大的注塑件为 60kg，使用的模具为 185t。它用八个可控的针阀式喷嘴。热流道加热功率为

46.5kW。流道板有32个加热区。其中的地板注塑件尺寸为970mm×915mm×70mm。泡沫PC的壁厚为8.5mm，质量达12.8kg。“X”型流道板在480×480mm位置上有四个喷嘴，流道直径为18mm，还采用柱销直径为6.5mm的液压针阀式喷嘴。

用PC/PBT混合物制造汽车保险杠，将以前的壁厚2.5～3.2mm，减少到平均为2.0～2.5mm。降低了注射周期30%。在保险杠的里侧使用了十个喷嘴。各种大型注射模具，为有效提高注射压力传递，采用热流道系统成为发展方向。

图12-89所示是早期的大型周转箱的热流道注射模。它有六个分喷嘴。主流道较短，没有加热。周转箱四侧面上有大面积漏空窗洞，四侧滑块很笨重，又要对侧滑块用动模和定模双向锁紧。四侧滑块由8根斜导柱导向和四个斜置液压缸驱动，实现侧抽动作。

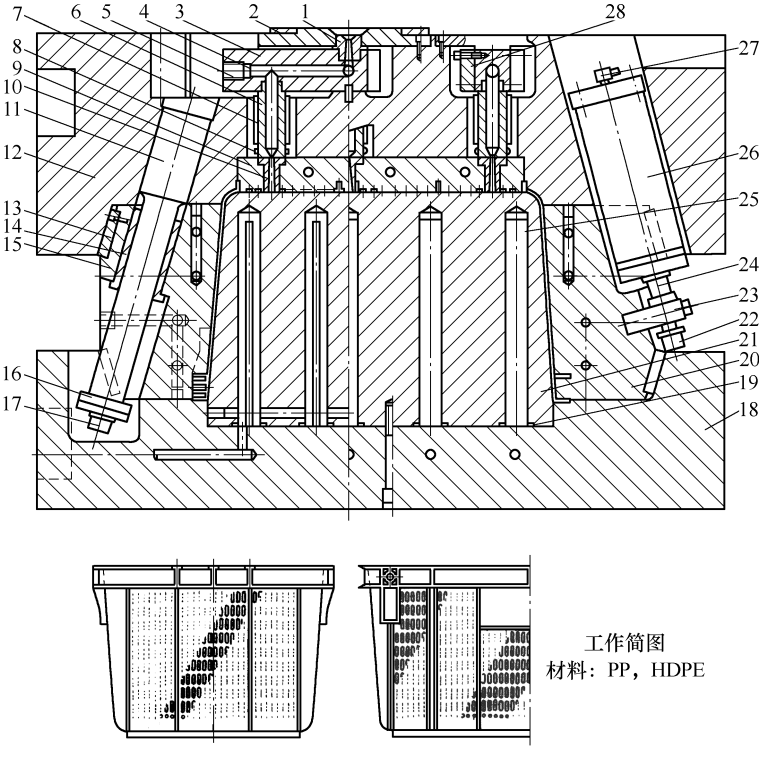


图12-89　大型周转箱的热流道注射模

1—主流道套　2—定位圈　3—热流道板　4—堵塞　5—螺塞　6—分喷嘴　7—加热圈　8—热电偶　9—成型板　10—分喷嘴的浇口套　11—斜导柱　12—定模板　13—锁紧垫块　14—导套　15—大滑块　16—垫圈；17、22—螺钉　18—动模板　19—密封圈　20—短滑块　21—型芯　23—连接板　24—液压缸轴　25—隔水片　26—液压缸组件　27—油管接头　28—加热板

注：模具的导柱和导套在图中被略去

图12-90所示是常见的中型塑料制件反装的热流道注射模。注塑件为408.8mm×307.5mm×63.6mm壳盖，要求制件表面无熔合缝和浇口痕迹，为此采用单个主流道型

热喷嘴，而且是制件反装的模具结构。脱模机构在定模，由两个液压缸驱动。热喷嘴浇口处壁厚采用长方条的曲面凸起，减轻流动痕迹。

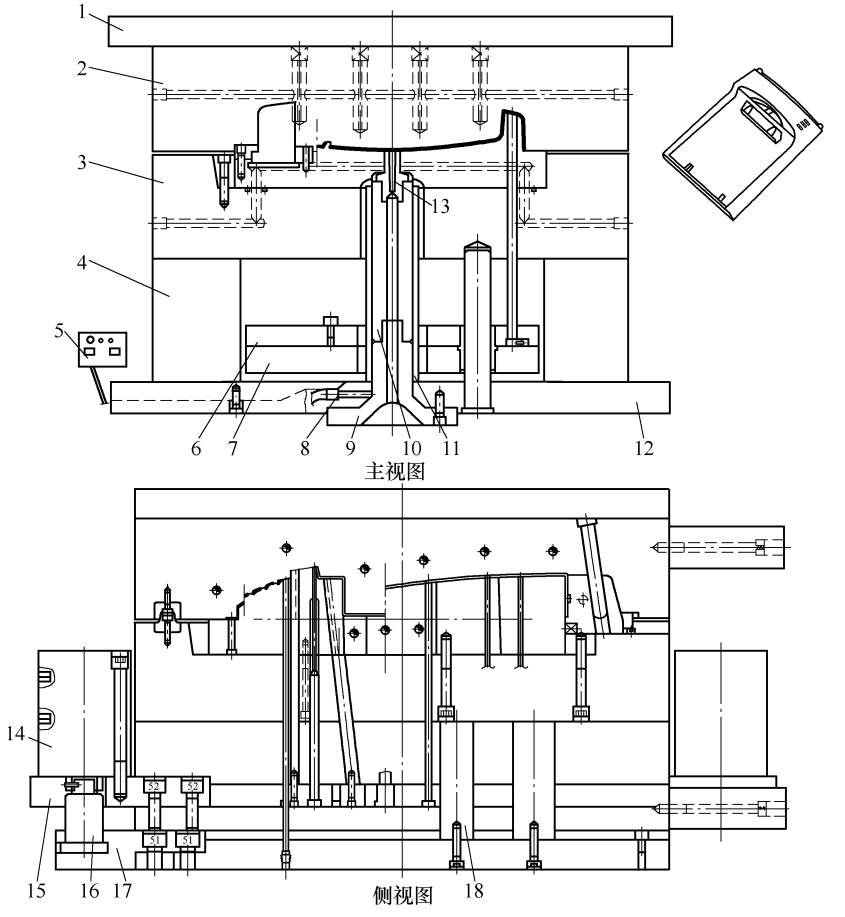


图 12-90　制件反装的热流道注射模

1—动模座板　2—动模板　3—定模板　4—垫块　5—温度控制箱　6—推杆固定板　7—推板
8—热电偶　9—定位环　10—主流道衬套　11—加热圈　12—定模固定板　13—主流道喷嘴
14—液压缸　15—液压缸固定板　16—连接杆　17—液压缸固定板　18—支柱

（2）小注塑件注射模的热流道　质量几克到几百克的注塑件，一模多腔的注射加工，例如聚酯饮料瓶和小瓶口的瓶盖，生产批量很大，注射点之间距离很小，小于喷嘴的安装直径，常用热流道微小型顶针式喷嘴。还有薄壁管件，指文具笔套管、医用滴管和注射管等，须用顶针式的边缘喷嘴。由于型腔数目很多，流道系统的熔体体积接近甚至超过注塑件的总体积。

高密度聚乙烯 HDPE 瓶盖重 2g，体积 2.1cm^3，密度 0.95g/ cm^3。外径 32mm，注塑件高 18mm，最厚处 2mm。内有一圈半圆形的螺牙。如图 12-91a 所示：瓶盖外圆有直纹

滚花；要求瓶盖顶面上的浇口痕迹最小，不显眼；瓶盖的下沿有 4mm 宽的安全保险扣圈，它与瓶盖本体之间有 8 个薄的 45°斜向搭牙，它能顺牙旋入饮料瓶口，但在第一次旋开瓶盖时，搭牙被剪断，保险扣圈留在瓶口上；瓶盖顶部有密封圈边，旋紧时与瓶口端面扣压防漏。由于保险扣圈与盖体之间搭牙有宽和高为 0.65mm × 0.65mm，有最小壁厚为 0.37mm，瓶盖型腔的充模阻力较大。

32 腔 HDPE 瓶盖热流道浇注系统的体积为 178cm^3，是瓶盖型腔总体积的 2.65 倍。一模多腔流道板设计，必须注意塑料熔体在分流道中的停留时间。流道系统对 32 腔的塑料熔料采用平衡传输为保证各型腔充模压力和温度的一致性，必须注意热流道机械加工和装配误差的累积。实际上注入各型腔熔体的压力和温度很难一致。由于瓶盖热流道的 32 个分喷嘴用顶针式浇口，浇口孔之间存在误差，流经的压力降有高低。还必须注意，大批量生产塑料瓶盖必须对瓶口有旋合互换性。流道分叉设计成 4 × 2 × 4，如图 12-91b 所示。先用塑料熔体的流变学计算式初步确定流道直径，整个热流道系统的压力损失大致为 113 × 10^{5}Pa。

如此多的螺纹型芯，倘若用旋转脱模，则机构过于庞大。故用多排侧向分型机构和强制脱模机构。两片分型侧滑块在注射机顶柱推顶过程中，并合成推板，在瓶盖的搭边槽中，将它强行脱出。两片分型侧滑块必须延迟分型。开始侧向分型时，压缩空气从型芯中央吹动瓶盖落下。回程由专门液压缸驱动，两片分型侧滑块按闭模方向先复位，然后再合拢并锁紧，保证两滑块成型面与型芯的密闭。

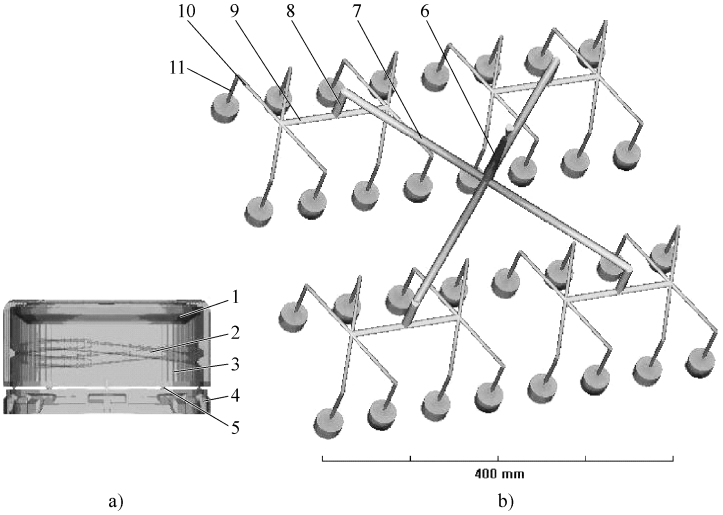


图 12-91　32 腔 HDPE 瓶盖热流道浇注系统的压力分布

a）HDPE 瓶盖的结构　b）瓶盖热流道浇注系统的压力分布

1—密封圈边　2—内螺牙　3—直纹滚花　4—保险扣圈　5—斜搭牙

6—主流道喷嘴，口径 × 长度 = ϕ20mm × 74mm　7—第一分流道，ϕ16mm × 130mm

8—两层分流板间的第一分流道，ϕ16mm × 52mm　9—第二分流道，ϕ12mm × 65mm

10—第三分流道，ϕ8mm × 64mm　11—顶针式喷嘴，ϕ6mm × 64mm，浇口 ϕ1.6mm

（3）热流道和冷流道组合的注射模　有些注塑件有很高的尺寸精度要求，精密注射。此时采用热流道技术受到种种限制。主要是浇口痕迹不能满足要求，而且有冷料进入注塑件。热流道的喷嘴直接浇注制品，在大直径的浇口附近区域制件上往往有流动痕等缺陷。由于该区域在模具冷热的界面上，温度很难精确调节控制，因此用热流道系统时，在下游常设有冷流道和点浇口。

图 12-92 所示注射模是成型聚酰胺 PA6、外径为 110mm、高为 55mm 的机架。注塑件中央有凸台，四周有四个凸台，用四个点浇口在底板上对称位置浇注。热流道注射模有八个型腔，定模上的顺序脱模机构设置有定模脱料板 13 和浇口卸套 14。开模时注塑件在分型面 *C* 空间脱落。点浇口凝料在定模流道板 8 与定模脱料板 13 之间 *A* 空间落下。为确保拉断点浇口，并从分喷嘴的直浇口中拉下凝料，在分喷嘴上设置浇口卸套 14，在 *B* 面打开时被定模脱料板 13 推出。

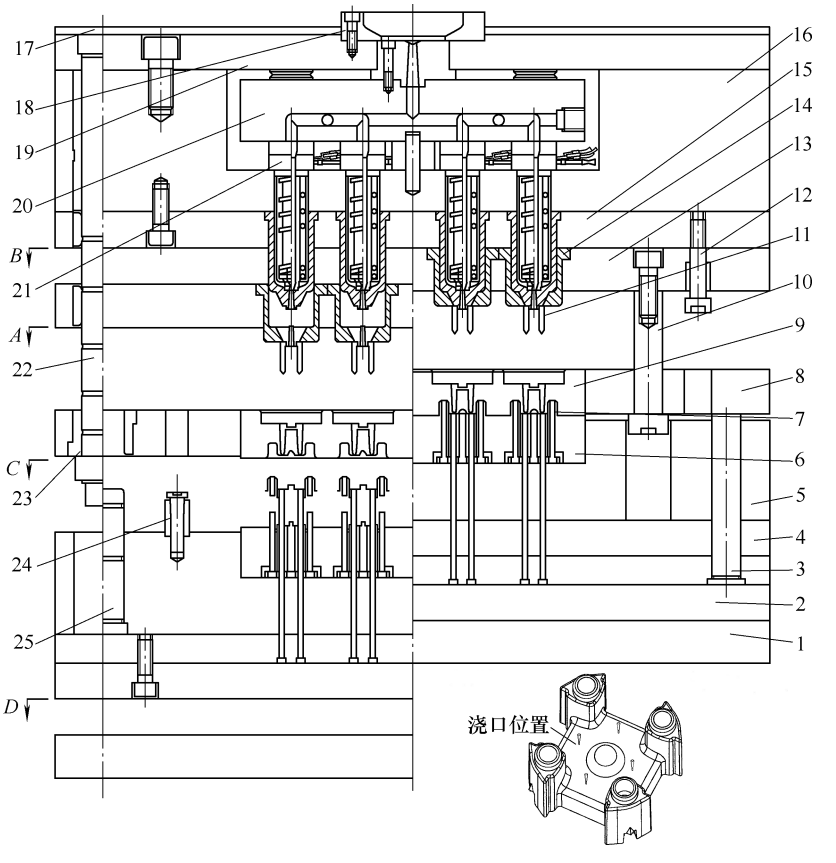
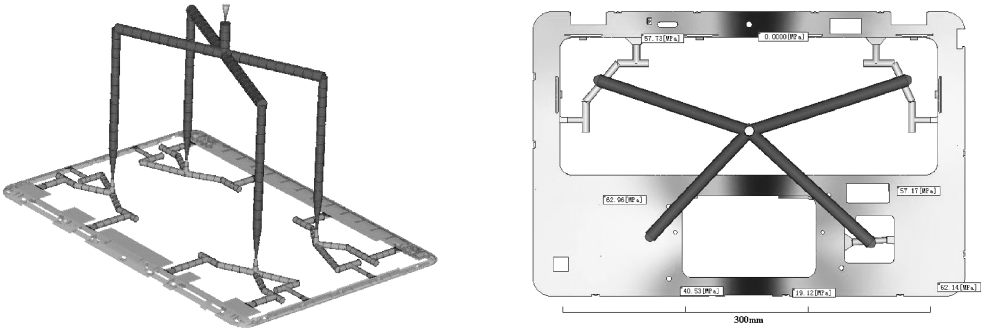


图 12-92　一模八腔热流道和冷流道点浇口组合的注射模

1—动模座板　2—动模推板　3—回程杆　4—推杆固定板　5—动模板　6—动模型腔块
7—注塑件　8—定模流道板　9、15—定模板　10—拉杆　11—冷流道凝料　12—定距螺钉
13—定模脱料板　14—浇口卸套　16—定模框板　17—绝热板　18—定位圈
19—定模固定板　20—热流道板　21—分喷嘴　22—定距导柱　23—导套　24—拉模销　25—导柱

图 12-93 所示是手提电脑上 PC/ABS 的两个注射模塑板件。图 12-93a 是边框板件和浇注系统的网格划分。四周边条注射浇注的流程很长。边条薄板强度对熔合缝很敏感。为此上游为热流道系统，有热流道模分流和 4 个气动针阀式分喷嘴。对于每个分喷嘴，下游都有冷流道和三个侧浇口。

图 12-93b 为另一板件和浇注系统的压力分析。上游为热流道系统，同样有热流道板分流和 4 个气动针阀式分喷嘴。其中三个分喷嘴下游是冷流道和多个矩形侧浇口。流动模拟时，压力分布较合理，并控制了熔合缝的位置，保证了制品质量。将所有气动分喷嘴连接时间控制器，设定各个气动分喷嘴开启顺序时间，在注射生产时就能更好地控制熔合缝的位置。



a)　　b)

图 12-93　热流道和冷流道点浇口组合的浇注系统

a）边框板件和浇注系统的网格划分　b）另一板件和浇注系统的压力分析

2. 特种的热流道注射模

随着塑料加工工业的发展，新的塑料品种和高温熔融塑料也采用热流道注射。一些开拓性热流道注射模成型，必须采用非标准系列的喷嘴等器件，必须设计新的热流道系统和装备。

（1）高温塑料的热流道注射　有些塑料的加工温度达 300 ~ 400℃，而且要求注射时的温度波动限制在摄氏几度之内，有时模具温度高达 300℃左右。此类塑料的价格很高，要求没有浇道废料。

高温塑料对热流道系统有较高的要求。首先，沿着流道与喷嘴流径的温度分布要均匀，要求仔细地确定流道和浇口的直径；其次，流道全程变化要缓慢和无锐角，流道内表面经抛光，防止物料滞留，避免热摩擦升温；最后，必须完全消除熔体的泄漏。

1）氟塑料。具有高黏度和对剪切应力的阻抗，应该用大的流道和浇口直径，建议直径大于 5mm，常使用大直径柱销的针阀式喷嘴。氟塑料熔体对钢有强烈的腐蚀作用，因此需用高的镍含量的合金钢，或至少用镍镀覆。当用导热铍铜时，要压嵌在高镍合金钢中。在喷嘴与流道板之间的密封，采用矩形截面，而不是圆截面的密封圈。

2）聚芳酯。聚芳酯 PAR、聚芳醚 APE 和芳族的聚酯 APE（Aromatic polyester），这些塑料的黏度比 PC 还高，但不随剪切速率的提高而减小。流道应该有较大些直径。最

小浇口直径是 1.2mm。生产注射 PAR 制品时，先注射干燥良好的 PC，然后再升高温度，用 PAR 清除 PC。相反步骤被用来清除 PAR。

3）液晶。液晶聚合物 LCP（Lifuid crystal polymers）的流动熔体和塑化的制品，有明显的分子取向。随着剪切速率升高，熔体黏度大降。适宜用热流道注射模加工。采用热流道板和冷浇口，效果比用热流道的喷嘴好。流道全程的截面应较小，直径可达 3mm，尽可能地避免熔合缝，并用高的流动速率注射，缩短保压和浇口冻结的时间。

手提电脑屏幕盖板上有块铝合金压铸件，边缘用塑料条封包。选择 40% 玻璃纤维充填的聚苯硫醚 PPS 注射成型。玻璃纤维增强 PPS 耐热，且有优异的力学性能。其熔体温度为 295 ~ 335℃，最高温度为 355℃。PPS 是高结晶度的聚合物，要求模具温度达 120 ~ 180℃。GR-PPS 在热流道中剪切流动时，熔体黏度不稳定，在 750 ~ 1000Pa · s 间波动。

图 12-94 为该注射模的流道板和四个气动针阀式分喷嘴。由于是一模两件的注射成型，模具分型面的面积大。热流道系统的流道板长为 580mm，厚为 55mm。高温大尺寸流道板的横向线膨胀量很大，在流道板厚度和分喷嘴轴线上也有很大线膨胀，必须补偿这两个方向的热膨胀。为了保证流道板有 350℃ 的高温，X 型 1 × 4 布置时用五个感温加热区。流道板上加热线圈的总功率达到 10000W。而且热电偶测温点增多，保证流道板温度均衡。

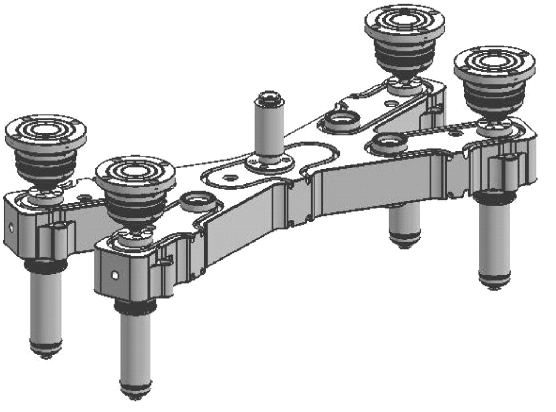


图 12-94　高温注射模的流道板和四个气动针阀式分喷嘴

此热流道系统处于 300℃ 以上高温，所有电气布线的绝缘层会很快老化，需定期更换。玻璃纤维增强的物料对零件磨损严重，喷嘴的阀针也需定期更换。更重要的是注射模具浇注系统的流道不能过长。流道系统总共压力损失不能超过 35MPa。而且物料在料筒、热流道和喷嘴中滞留时间过长，熔料很容易过热灼伤。

（2）多注射点的顺序注射成型　热流道模具有多个针阀式喷嘴，它们按时间顺序控制塑料熔料，先后注射型腔。近年来大型制品壁厚明显减小，更要求避免可见的熔合缝和流动痕迹。对于又长又窄的制品（例如汽车窗户的遮板条、保险杠）的注射成型，要有一系列的针阀式喷嘴，在注射充填型腔时，恰好在料流的前锋打开喷嘴，消除熔合缝。如图 5-61 所示的热流道，注射从中间喷嘴开始，临近的喷嘴只有当熔料前沿流经它们时才打开。中间的喷嘴按需要保持打开或关闭。当最后一对喷嘴将型腔充满后，所有喷嘴必须打开，以实施保压。

采用多注射点的顺序注射成型，需昂贵的针阀式喷嘴。喷嘴应采用圆锥形浇口，能可靠闭合，无泄漏，浇口套要耐用而且强度足够，还要有相应的控制系统。喷嘴的控制

信号，可来自注射螺杆推进启动后的时间控制或控制程序。时间控制器可预设各喷嘴延时开启的时间和关闭时间。这种顺序注射成型，可控制两注射点的对接熔合缝的位置，避免盒与盖间的塑料铰链上出现熔合缝，避免光亮可见表面上显现熔合缝，适用于大面积和多孔的易生成熔合缝的制品。对于一模有不同形体尺寸的多腔注射，顺序注射成型可以实现各型腔的平衡注射，尽管这样会延长注射周期。

（3）预塑制件的热流道复合注射成型

1）装饰片注射成型。将印刷膜片放置到模具里，然后再注射，又称为模内装饰。预制的装饰片，有经剪切的 PP 发泡片、带装饰纹或图案标记的聚酯膜片、各种 0.7mm 厚的热成型护片、转印套色标记的 PC 膜片等。这些膜片覆于注塑件的外层。注塑件熔体要流经膜片表面，只有采用热流道系统注射，才能控制塑料熔体的温度、压力和流动速率，并防止冷料进入，必要时在型腔中装入热电偶和压力传感器，直接监察和控制模具温度和保压压力，严格掌握制品的收缩。

2）织物衬里的注射成型。汽车的内饰件，在织物衬里用 PP、ABS 或 ABS/PC 混合物注射成型。这种织物复合的塑料饰件，也称为模内层叠。顶出脱模机构和热流道系统在定模。开关式喷嘴必须是气动的，可防止机油污染织物。织物被预置在动模，织物本身有绝热作用。要保证织物在塑料熔体的压力流动时，被均匀地附在模壁上，要防止注射成型制品翘曲变形。

（4）多组分塑料的热流道注射模具　多组分模具要采用多个料筒与螺杆的注射单元，注射成型不同塑料品种或不同着色塑料。常将动模置于可循环转动的多工位的工作台上，在已经注射的半成品上，再注射不同的塑料。用热流道系统进行两组分注射成型，要有两个独立的热流道系统，各自接受两个注射装置的不同的塑料熔料，可以将流道板设计成两块，允许各组分的喷嘴进行开关式注射控制。这种注射成型已经用于大型制品（例如车辆内饰板或条）的生产。许多双组分塑料制品用工程塑料构成主体，用热塑性弹性 TPE 等包覆在外层。

12.5.2　叠式的热流道注射模

叠式注射模相当于两副模具叠放组合在一起，如图 12-95 和图 12-96 所示。这种模具需要有较长的主流道输送熔料到模具中央的热流道板。因此，采用热流道系统是叠式注射模的技术关键。叠式注射模的热流道以注射机的额定锁模力作用在两倍相叠的型腔上。叠式注射模有两个分型面，所需锁模力只提高了 5% ~10% 。多型腔的生产，使产量成倍增加。叠式注射模的两个分型面要同时分型，要两套脱模机构。如果采用冷流道注射成型，还要脱出流道凝料，很难实现自动化注射成型生产。采用了热流道技术后，叠式注射模才得到较多的应用。

叠式注射模适用于成型形状扁平的薄壁和大批量的注塑件，现已用于注射较浅的盒、容器、托盘和盘碟等制品。叠式注射模能够发挥注射模的注射量和开模行程的功能，不增加锁模力就能提高制品产量和生产效率。

如何将塑料熔体引流到模具中央的流道板上，现今的叠式注射模有两种结构类型。

一种如图 12-95 所示，主流道由模具中央进入热流道板，再分流经喷嘴射入各型腔。它需要很长的加热主流道。图示的开模状态下，主流道喷嘴管跟随中央流道板一起移动。有各种主流道喷嘴适用于中小型扁平的注塑件。单副的型腔数 $n=2$、4……，整副模具有 $2n$ 个型腔。

另一种如图 12-96 所示，模具中央的空间位置有限。所以采用侧边的主流道进料。主流道由模具一侧绕道进入热分流板，再进入各喷嘴注射。它适用于大型扁平的注射件，不允许从模具中央进料。也有的在主流道长度上有两个对接的热流道喷嘴，其对接面就是分型面。

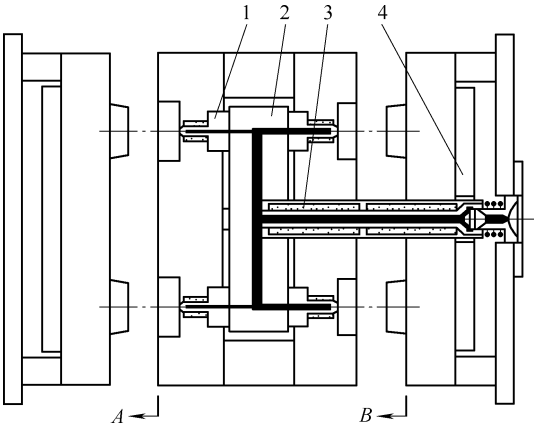


图 12-95　开模状态的中央进料叠式注射模示意图

1—分喷嘴　2—热流道板
3—可移动主流道长喷嘴　4—脱模板

叠式热流道注射模的型腔成倍增加，制品的质量和精度比普通注射模制品的低，因为两个分型面的开启和制品的脱模顶出很难完全同步。各型腔的注射成型的物理条件很难完全均衡。叠式注射模很难成型结构复杂的制品，因为注射加工时不适宜安放嵌件。设计侧向分型或抽芯机构，会使模具结构更加复杂。

叠式注射模的开模机构如图 12-97 所示，有齿轮与齿条式、铰链杠杆式和液压驱动式，应当使各层分型面同时开启。装有流道板和分喷嘴的重大的中间板，必须有强大的导柱引导并支撑，甚至附加横梁。

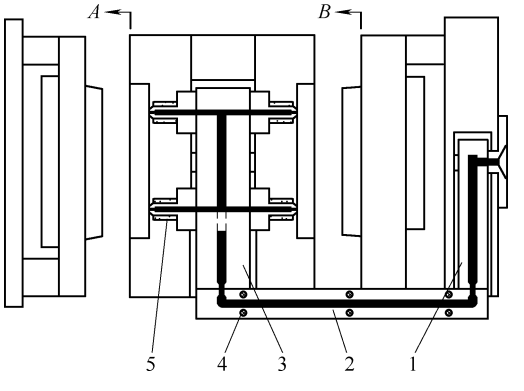


图 12-96　开模状态的侧向进料叠式注射模示意图

1—主流道热流道板　2—侧热流道板　3—热分流板
4—加热棒　5—分喷嘴

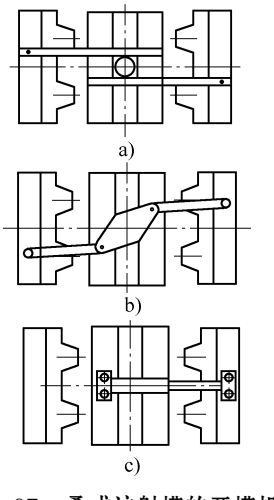


图 12-97　叠式注射模的开模机构

a）齿轮与齿条式　b）铰链杠杆式
c）液压驱动式

（1）中央进料的叠式注射模　图 12-98 所示是 4 + 4 腔的叠式热流道注射模，模具重约 2200kg，闭合高度约 700mm，模板固定板为 540mm × 800mm。注射成型聚丙烯矮脚杯。矮脚杯重 7.5g，平均直径 50mm，杯高 85mm，壁厚 0.55mm。

图 12-98 所示注射成型模具是中央进料主流道。中央热流道板 X 型布置，有 4 + 4 个顶尖式浇口的分喷嘴。在闭模注射时，注射机的喷嘴紧压主流道衬套，滑动阀 18 接通侧向通道，输送塑料熔体。在开模期间，19 进料管被中央板 5 拉动，滑动阀被闭合。

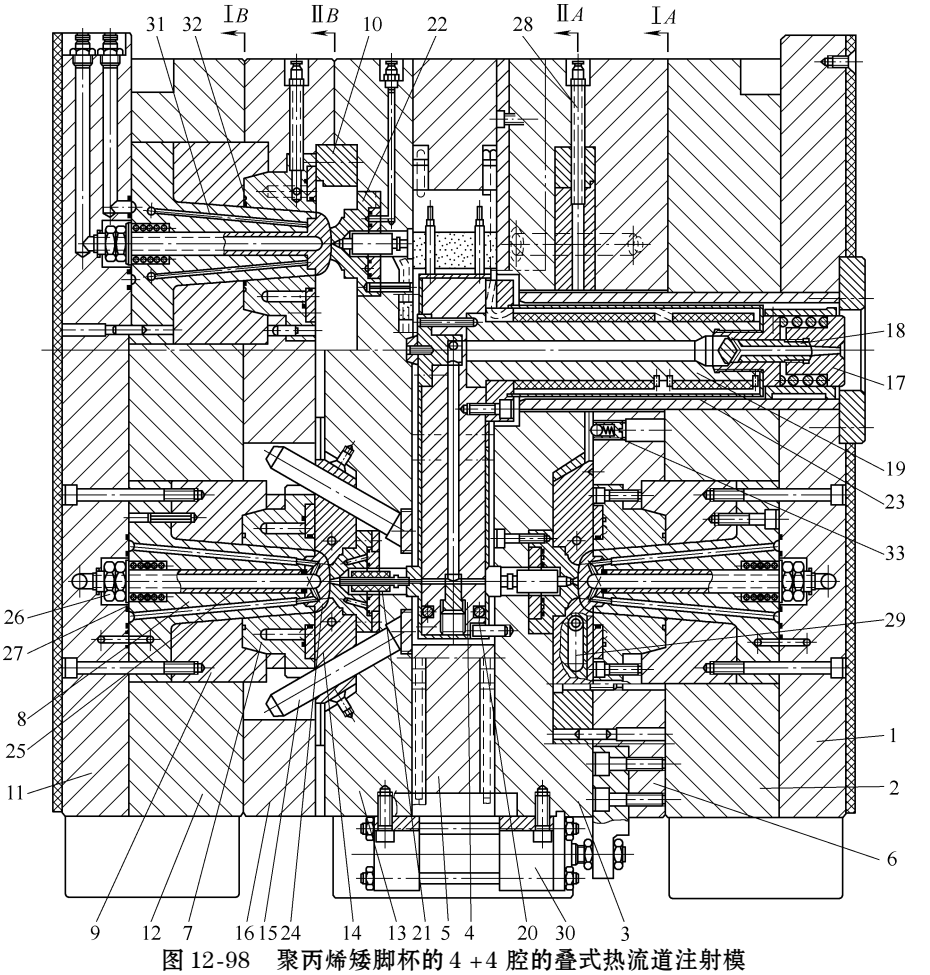


图 12-98　聚丙烯矮脚杯的 4 + 4 腔的叠式热流道注射模

1—定模固定板　2,12—型芯固定板　3,13—型腔板　4—热流道板　5—中央板　6,16—型腔固定板
7—型腔镶件　8—型芯镶件　9—定位环　10—导向板　11—动模垫板　14—滑块　15—斜导柱
17—主流道衬套　18—滑动阀　19—进料管　20—加热盘条　21—分喷嘴　22—杯底镶件　23—外套管
24—型芯头　25—进水冷却管　26—螺母　27—压缩弹簧　28—冷却管　29—导滑槽
30—液压缸　31—吹气槽　32—排气槽　33—滑块定位装置

在开模时，液压缸 30 驱动分型面 Ⅰ A 和 Ⅱ B 首先打开。在 Ⅱ B 打开时，四副侧滑块分型。在液压缸活塞走完全程后，模具便在 Ⅱ A 和 Ⅰ B 打开，另外四副侧滑块分型。

模具中有吹气管 31 将 8 个制品吹落。模具开模行程 2 ×200mm。模具在型芯有中央进水冷却管 25。型腔也有冷却管 28。

（2）侧向进料的叠式注射模　图 12-99 所示是浇注 SAN 苯乙烯-丙烯腈共聚物的 1 +

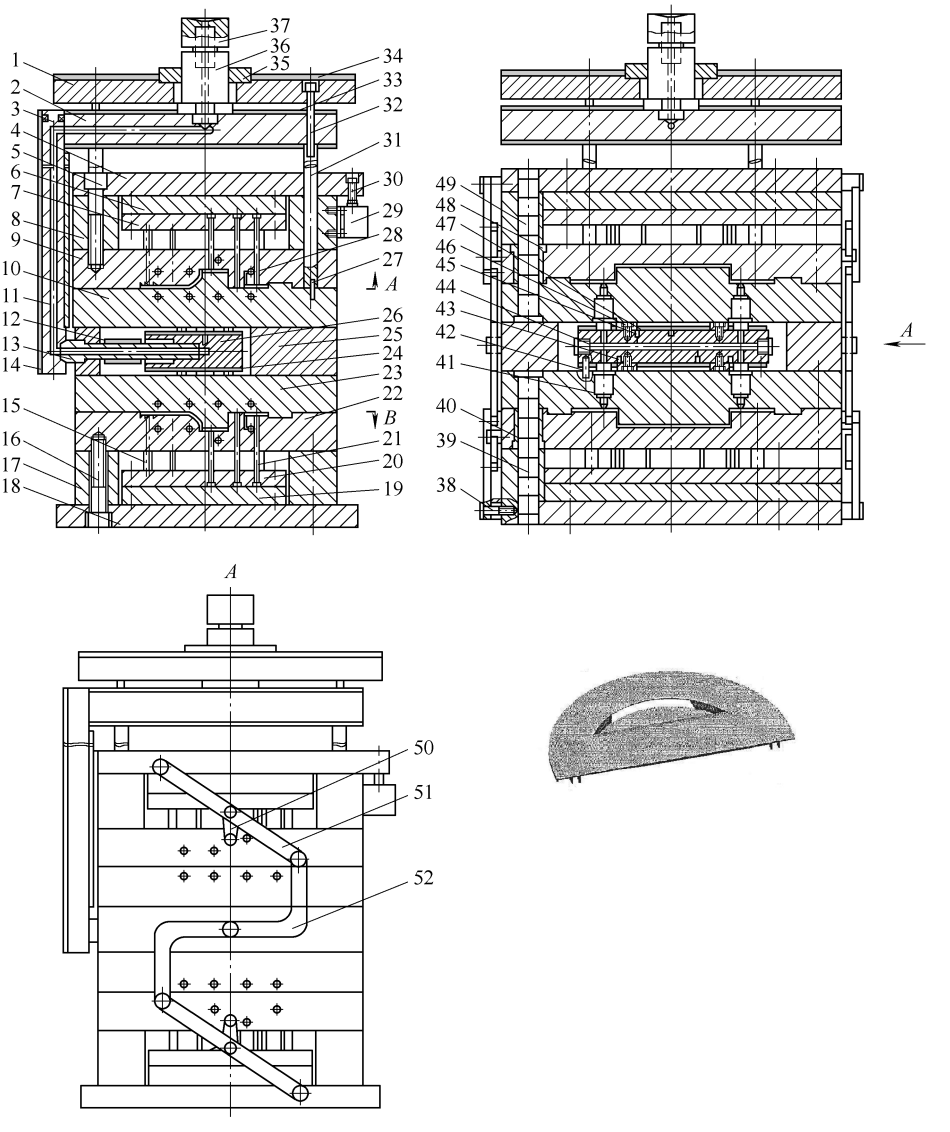


图 12-99　SAN 翻盖的 1 +1 腔的叠式热流道注射模

1—定模固定板　2—前热流道板　3—侧热流道板　4—前动模板　5,16,30,32,38,46—螺钉　6—前推板　7—前顶出固定板　8—前动模支架　9—前动模型芯板　10—前动模型腔板　11—主流道　12—加热圈　13—进料管；14,24,33,34—石棉橡胶板　15—复位杆　17—后动模支架　18—动模座板　19—后推板　20—后顶出固定板　21,28—推杆　22—后动模型芯板　23—后动模型腔板　25—中央垫块　26—中央热流道板　27—圆柱销　29—液压缸　31—支柱　35—定位圈　36—（加热）主流道（板衬套）　37—连接器　39,49—导柱　40,48—导套　41—分喷嘴　42—定位销　43—加热棒　44—螺塞　45—热电偶　47—隔热支承圈　50—导向杠杆　51—连接杠杆　52—角形杠杆

1 腔叠式热流道注射模。翻盖制件高 22mm，所需开模行程 94mm。型腔的一次注射量为 293cm^3，制件有 170mm × 300mm 外形尺寸，不适宜主流道在模具中央进料。分型面投影面积为 413cm^2，需锁模力 1426kN。

前模组件有定模固定板 1 和前热流道板 2 等，固定在注射机上。侧热流道板 3 与前热流道板 2、中央热流道板 26 固定在一起。曲折的主流道将塑料熔体长距离输送到分喷嘴。熔体从主流道 36，经前热流道板 2 再从侧热流道板 3，流入到中央热流道板 26。有四个分喷嘴浇注前后两个注塑件。

液压缸 29 驱动前模的脱模机构。A 和 B 两分型面之间的中央热流道板 26 与前动模型芯板 9 和后动模型腔板 23 等固定在前模组件上。后模组件随注射机的动模板开闭模运动。在后模开模时注射机的推杆顶出脱模后推板 19。

这副叠式注射模的关键是杠杆式的开模机构。它由导向杠杆 50、连接杠杆 51 和角形杠杆 52 组成。开模时 A 和 B 两分型面同时分开。

图 12-100 所示这种结构的叠式热流道注射模，在主流道输送熔料过程中，都要流经一个分型面，必须在分型面的两侧，设置两个针阀式的主流道喷嘴。在开模前，两个针阀式喷嘴的阀针关闭主流道。在模具闭合时，两个阀针收起，主流道畅通。显然，比起侧热流道板的侧向进料的叠式注射模，主流道长度短了，有利压力传递。图 12-101 所示叠式注射模主流道的两个对接喷嘴，需要气动针阀圆锥头柱销控制。在两个对接的针阀式喷嘴浇口面上，每次注射会遗留小片物料，需设法避免或推去。

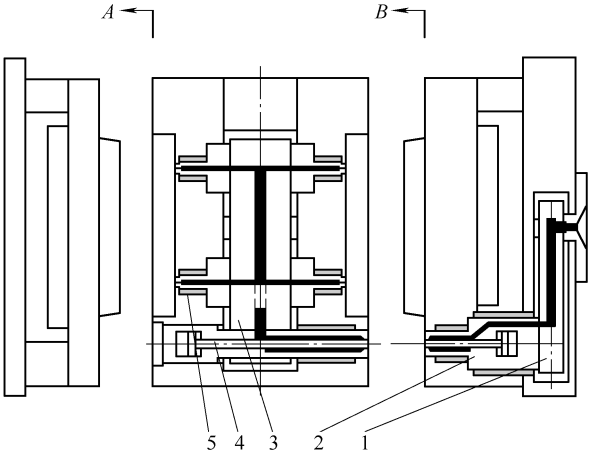


图 12-100　开模状态的侧向分型面进料的叠式注射模示意图

1—主流道热流道板　2—针阀式前喷嘴　3—中央热流道板
4—针阀式后喷嘴　5—分喷嘴

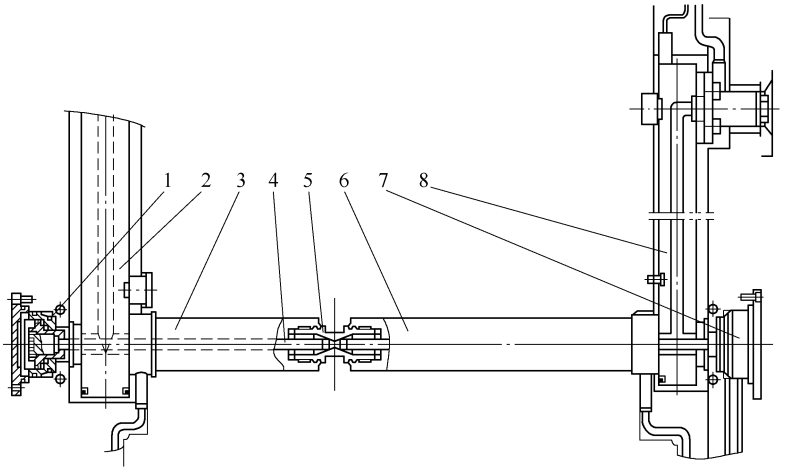


图 12-101　侧向分型面进料的叠式注射模

1—气缸活塞　2—中央热流道板　3—开关式后喷嘴　4—阀针　5—浇口套
6—针阀式前喷嘴　7—前喷嘴的气缸　8—主流道热流道板

参 考 文 献

[1] 丹尼尔. 弗伦克勒，亨里克. 扎维斯托夫斯基. 注射模具的热流道［M］. 罗伯特. 沃克登英译，徐佩弦译. 北京：化学工业出版社，2005.

[2] 王建华，徐佩弦. 注射模的热流道技术［M］. 北京：机械工业出版社，2005.

[3] 彼得. 翁格尔. 热流道技术［M］. 杨卫民，丁玉梅，等译. 北京：化学工业出版社，2008.

第 13 章　特种注射成型与模具设计

本章介绍气体辅助注射、热固性塑料注射和微孔塑料制品注射三种特种注射成型与模具设计。在了解注射的制品、材料、工艺和设备的基础上，就不难掌握这些特种注射成型与模具设计的相关技术。

13.1　气体辅助注射成型与模具设计

气体辅助注射是较新的加工方法。其成型的制品用料少，表面不出现凹痕。成型是在低压下注射的，所需的锁模力低，注塑件中的残余应力小。在注射制品结构设计时，就必须考虑进气位置和气道。制品和模具设计与气体辅助注射成型工艺关系密切。

1. 气体辅助注射成型工艺

气体辅助注射成型能提高注塑件的质量，节约材料又可提高塑料制品的刚性，但是它需要一套供气和控制设备。

（1）气辅原理　气体辅助注射成型是塑料欠注射工艺。当气体通入熔料时，从阻力最小通道进入压力低、温度高的区域。当气体从塑料中穿行时熔料被重新分布，产生中空的且有一定厚度的截面。充满压缩气体后，具有阻止塑料层收缩的保压作用。

由于氮气具有惰性并来源丰富，贮气罐体积小，成本较低，现大多数采用氮气加压充气。图 13-1 是中空手柄的气体辅助注射成型的过程。第一步是熔料经浇道和浇口从

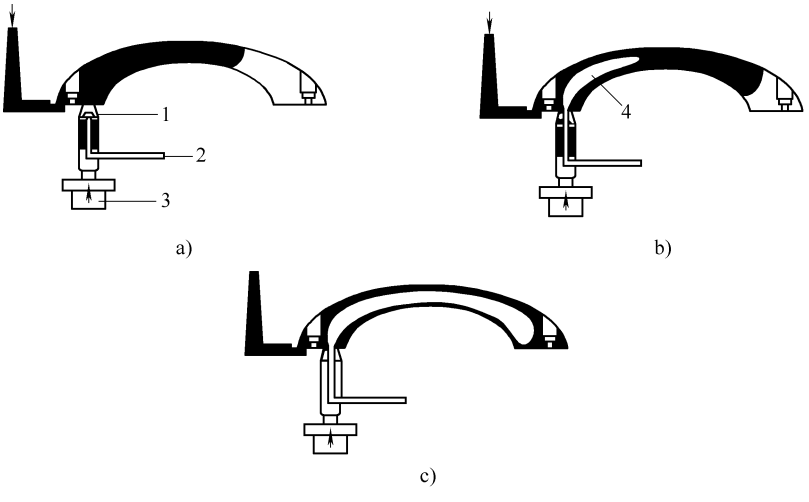


图 13-1　气体辅助注射成型的过程

a）塑料熔体欠注　b）气体注入　c）塑料重新充填型腔

1—止回阀　2—气源　3—液压缸　4—气芯

手柄一端注入，但并不浇满，欠注的空腔体积将是气道的体积。第二步是压缩气体充入熔料中。最终是压缩气体将熔料推进，塑料被布满在型腔与气道之间。气体与塑料熔体在不同位置注入，在注塑件上会留有气孔。

有两种供气方法。常见的是用气体非连续生成系统，恒体积供应。气体被压缩前的体积可控制，每次注射都经增压。在制品冷却时，充气压力下降。另一种是连续的恒压供气系统，在整个注射周期，包括制品冷却期间，保持 30MPa 左右的较高压力。此种设备可用于大平板注塑件的几个注气点充气，也可用于几台注射机的注气。

（2）气体的注入　气体的注入位置，可分为两种情况。

1）气体通过注射机喷嘴注入，如图 13-2 所示。经主流道注入气体是气体与塑料熔体以相同位置，注入制品的成型型腔。注气元件置于注射机喷嘴中央。注射塑料和注气的时间由控制系统分别操作。注射完成后，模具开启前必须退回注射座，让制品内的气体排放。当模具打开时，如果气体未被排出，会导致注塑件有局部隆起，而且气体会渗入塑料，引起气泡。

2）气体通过模具注入型腔，如图 13-3 所示。这种注气方法对壳体或板类制品更为有利。可充分考虑注气孔和气道分布，以有利于提高制品质量；同时考虑注气元件结构和直径，应保证气流通畅，并便于控制气压。

注气元件可以直接安装在定模上，直径为 3 ~ 5mm，有标准系列长度供选用。在注气方向与开模方向一致时，适宜用固定式注气元件。

可伸缩注气元件，在开模前由气缸将其从模具中抽出。周期性的回缩由控制系统调控。图 13-4 所示为伸缩注气阀。

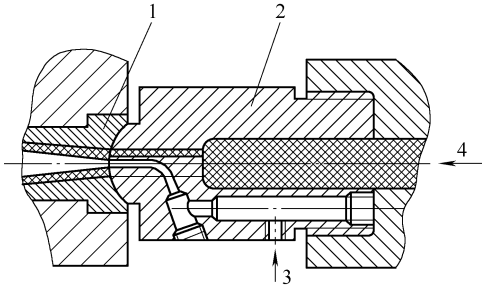


图 13-2　气体通过注射机喷嘴注入

1—主流道衬套　2—注射机喷嘴
3—氮气　4—塑料熔体

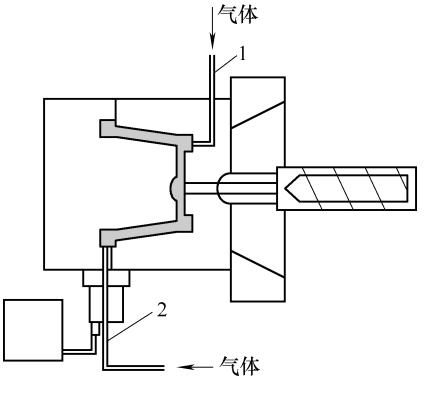


图 13-3　气体经模具注入型腔

1—固定式注气元件　2—可伸缩注气元件

在一个注塑件上可以用多根气针，而且这些气针可以在不同时间以不同压力进气。用多个保压程序作用在同一注塑件上可以产生最佳的效果。在多腔模中，可以对每个型腔分别安置气针，控制注气。

（3）注射成型工艺　与传统的注射成型相比，采用气体辅助注射成型的型腔压力要

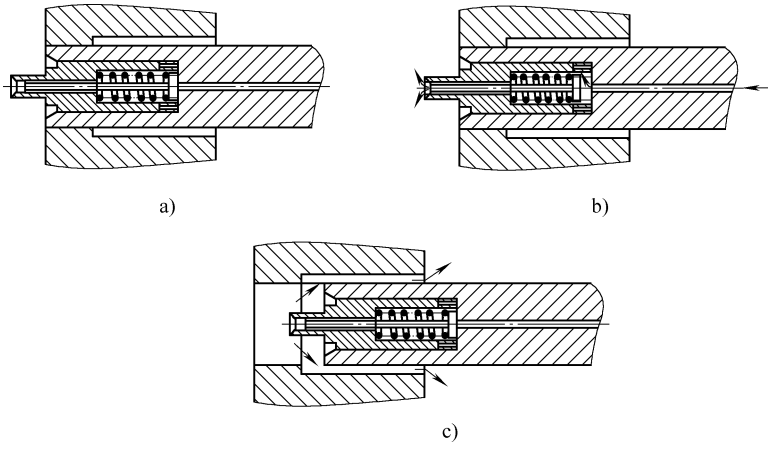


图 13-4　伸缩注气阀

a）注射塑料，注气阀关闭　b）气压下针阀注气　c）注气阀缩回排气

低一些。对于成型中空的杆件，所需型腔压力甚至比结构发泡制品还要低，如图 13-5 所示。在注气前，充入型腔体积 70% ~80% 的塑料熔体，虽然供气设备可提供 48MPa 的气压，但气体辅助注射成型所需的型腔压力仅为 5 ~20MPa。只当塑料熔体流程比大，成型困难时，才高达 30MPa。

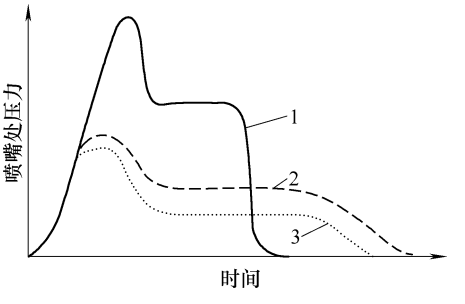


图 13-5　三种注射压力比较

1—传统的注射成型　2—结构泡沫成型注射成型　3—气体辅助注射成型

气体注入时间及气体压力控制是成型工艺中两个最重要的因素。在熔体欠注的型腔内，一旦气体压力大于熔体压力，就会有气体穿入甚至穿透塑料熔体的现象。因此，气压需精确控制。

气道周边的塑料皮层厚度，与物料的类型和品种有关，还与成型时塑料的黏度有关。高黏度的熔体，气道壁要厚些。采用较高的气压和较长保压时间，有利于减小成型收缩。减小气压和延长气体保压时间，可以减少和避免气道周壁的气泡。

气体辅助注射成型可分为短射和满射两种方式。图 13-6 所示为短射，适用于厚壁的充模阻力不大的注塑件。适用把手之类的棒状塑料制品，可节省大量原材料。短射时先向型腔注入部分塑料，一般只注入型腔体积的 50% ~90%，即刻在塑料熔体中央注入气体，靠气体压力推动熔体充满整个型腔，并用气体压力保压，直至注塑件冷却固化，然后排出气体。对于薄壁的、充模阻力较大的注塑件，适宜采用满射成型。满射是塑料熔体完全充满型腔后才注入气体，如图 13-7 所示。由塑料冷却收缩让出通道，气体沿通道二次充填，不但能弥补塑料的收缩，而且靠气体压力进行有效保压。所形成气道尺寸与注塑件体积和塑料的收缩率成一定的比例。

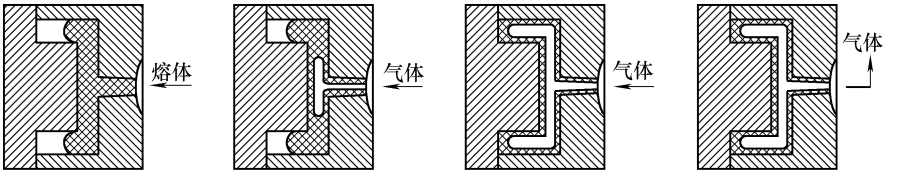


图 13-6　短射气体辅助注射成型

a）注射塑料　b）充气　c）气体保压　d）排气

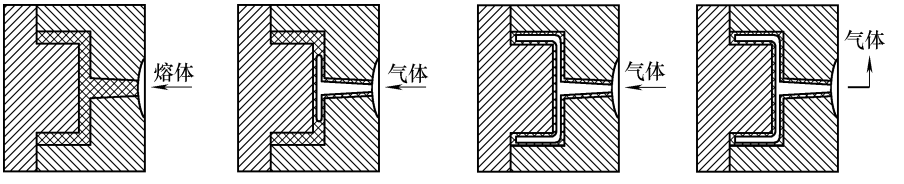


图 13-7　满射气体辅助注射成型

a）注射塑料　b）充气　c）气体保压　d）排气

满射成型时，气体通道是在塑料熔体冷却收缩中形成的。气道长度取决于塑料材料的体积收缩率、型腔体积和气道截面。对于 ABS 和聚苯乙烯 PS 等无定形塑料，其成型收缩率只有 0.5% ~0.8%，但气体辅助注射时熔体的体积收缩率有 10%。对于聚乙烯 PE 和聚丙烯 PP 等结晶型塑料，其注射成型收缩率只有 2% 左右。但气体辅助注射时，熔体体积收缩率有 20%。气体可占 20% 的体积，据此可估算气体通道。

2. 气体辅助注射制品和模具设计

气体辅助注射要提高注塑件的质量，还取决于制品和模具设计中的气道布置。

（1）制品性能　传统注射成型的所有热塑性塑料，包括添加填料和玻璃纤维增强的塑料，都适用于气体辅助注射成型。其中熔体黏度较低、熔融温度范围较大的聚丙烯和聚酰胺等物料，气体辅助注射较为方便，已经有某些热固性塑料应用了气体辅助注射。

气体辅助注射主要适用于杆棒类和大面积板类制品，可使塑料量减少 30% ~40%。把手等杆棒（如图 13-1 所示），气流推进途径清楚，中空的气道明显改善了厚截面杆的注射条件。板类塑料件，有的用含气道的宽肋条替代窄肋，有的在板中央设置长气道，又在板的周边设置宽的凸边，替代板或壳体上翻边的设计，如图 13-8 所示，但四周宽凸边中央的气道不能相通。

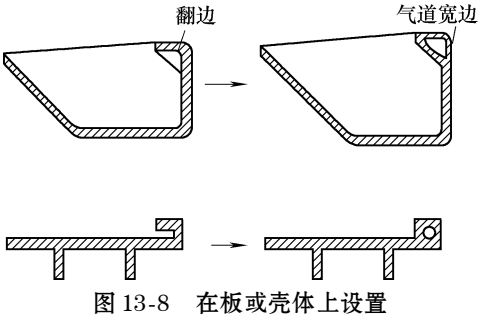


图 13-8　在板或壳体上设置宽凸边替代翻边

气体辅助注射制品的质量提高表现在以下两个方面：

1）尺寸稳定性好。借助气体压力，降低了注塑件的残余应力和收缩，有效减

小了翘曲变形。依靠调节气道方向气压和气体保压时间，可得到平直制品，可消除收缩产生的凹痕。

2）力学性能改善。可少用或不用加强肋来提高制品刚性，能减少用料，可采用中空框式截面来提高惯性矩和刚性。但对某些塑料，特别是玻璃纤维增强的塑料，气道周边塑料材料的弹性模量和拉伸强度有所下降。

（2）制品中的气道设置为适应塑料熔体表面张力的作用，气道截面应接近圆形。通常气道设计必须满足下列条件：

1）对于棒杆类注塑件要避免在熔合缝的位置上设置气道。

2）对于板类注塑件，气泡扩展方向要与塑料熔体的流动方向一致。熔体和气体的注入口设在注塑件的厚壁部位。

3）不同的气体通道，其壁厚可以不同。但气道周边壁厚应大到足以使气体能在塑料气道中通过。

4）整个制品的基体壁厚 t 不可太厚，以免出现如图 13-9 所示的气体穿入注塑件的基体厚壁。制品的基体壁厚不可过薄，以免出现气体被密封，不能沿气道流动。同一气道周边的壁厚应该均匀，如图 13-10 所示，有助于气体推进。气体辅助注射的板类制品的基体壁厚 t 应该为 2.5～3.5mm 为宜，不能超过 4mm。

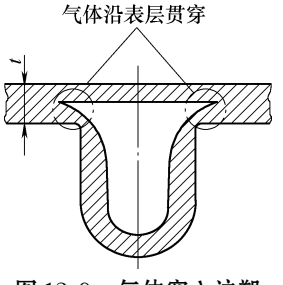


图 13-9　气体穿入注塑件的基体厚壁

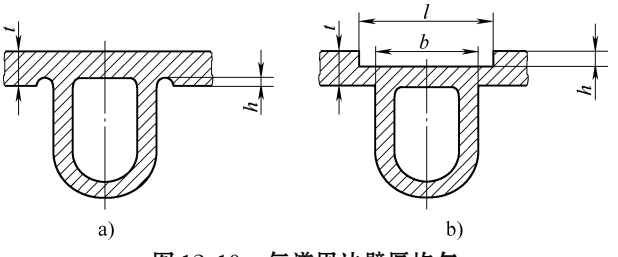


图 13-10　气道周边壁厚均匀

a）$h=0.5t$　b）$l/b=1.5\sim2$，$h=0.5t$

5）加强肋的内置气道如图 13-11 所示，可以防止制品表面的缩痕，通过加强肋，也向塑料板面传递了保压压力。

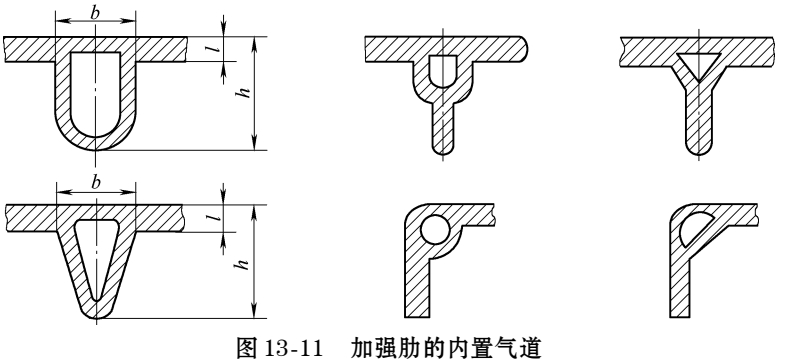


图 13-11　加强肋的内置气道

注：$h/t=2\sim3$，$h/b=1.5\sim3$。

6）塑料板上气道的设计如图 13-12 所示，可提高塑料制品的刚性。

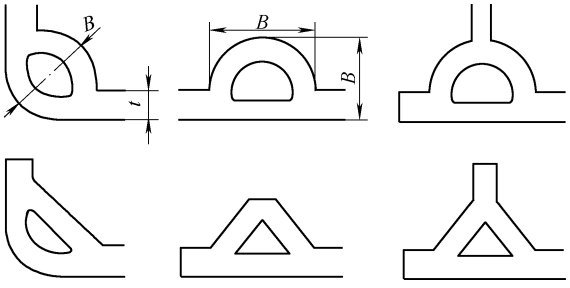


图 13-12　气道的设计

注：气道宽 $B=(2\sim3)t$。

7）制品上有拐角时，应该是圆弧过渡。在型腔截面变化时应该是流线型的，使气道周边的壁厚均匀，如图 13-13 所示。

8）应尽量避免两气道相会交错，否则会造成气体压力不足，流向紊乱。各气道应分离，单独充气，便于控制各气道注气时间和压力，确保塑料完全充满型腔。

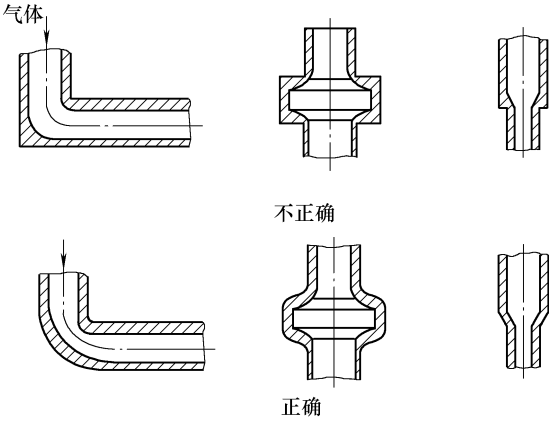


图 13-13　气道拐角和型腔截面变化的设计正误

（3）气道长度的控制　短射前期注入塑料太多，将会使气体通道的长度不够，见图 13-14a；但如果注入塑料量太少，气体迅速穿破塑料熔体的前沿，造成废品，如图 13-14b所示。

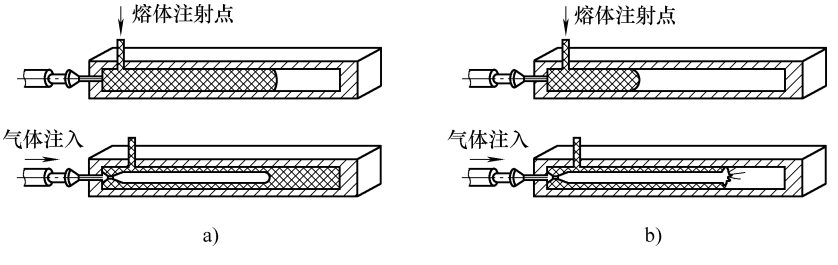


图 13-14　短射时气道长度的控制

a）气体流动长度不足　b）气体穿破熔体的前沿

过溢法气体辅助注射可较正确地控制气体流道长度。气体将过剩的塑料推入溢料腔，在注塑件内形成足够的气道，如图 13-15 所示。短射注气时，迫使熔体流速失常，造成注塑件表面流痕，过溢法改善了注塑件的质量。

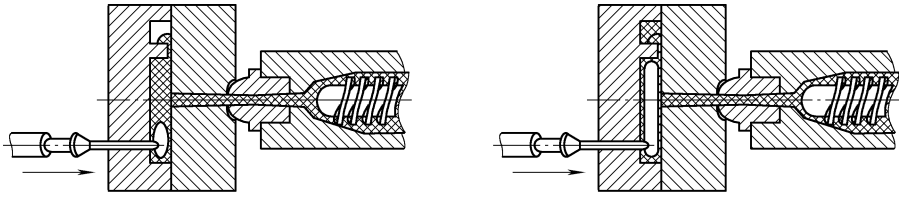


图 13-15　短射时的过溢法气体辅助注射

a）型腔充满后注气　b）用溢料腔引导气道

抽芯法形成气体流道如图 13-16 所示。当塑料熔体充满型腔后，型芯开始退缩，同时注入气体，形成所需气道，然后在气压下，注塑件固化后，气针退出。

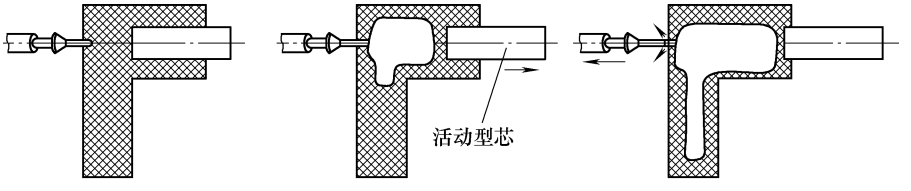


图 13-16　抽芯法形成气体流道

a）型腔充满　b）充气同时型芯退缩　c）气压下固化后气针退出

气体辅助注射的流动分析可以采用 CAE 软件。塑料熔体充模和注气全过程的计算机模拟，可以帮助决定注射浇口和注气点的位置，决定短射的熔体注射量，确定注射和保压时间、料温和压力等工艺参量，并优化制品和模具的设计。

13.2　热固性塑料注射成型与模具设计

热固性塑料可供注射的有酚醛塑料、环氧树脂、脲醛塑料、三聚氰胺甲醛塑料、不饱和聚酯、DAP 塑料、有机硅、聚酰亚胺和聚丁二烯等。它们都是塑料工业的重要材料。与热塑性塑料相比，它们通常有优良的耐热、阻燃、抗蠕变等特性，且价格低廉。它们曾长期采用传统的压缩成型和压注成型方法，手工操作繁重，成型周期又长。用先进的注射成型方法可成倍地提高生产率。今后，大部分热固性塑料制品将用注射成型方法生产。

13.2.1　热固性塑料注射成型工艺

热固性塑料注射成型是一项新技术，还处于发展阶段。其成型模具的设计与注射工艺、注射物料和注射设备密切相关。

热固性塑料注射有别于热塑性塑料注射。热固性塑料的注射料加入料筒，通过螺杆旋转产生剪切热和料筒的外加热，使之在较低温度（55 ~ 105℃）熔融，然后在高压下

将稠胶状的物料注入模具。在加热约达 150 ~ 200℃ 高温作用下，进行化学交联反应，经保压后固化成型，最后开模顶出成型制品。

1. 热固性注射塑料

热固性注射塑料应经改性后制成粒子、粉状或液态等供应。现今大多以粒子供应，仅有环氧注射塑料是液态的。对热固性塑料的注射物料有下列要求。

1）合适的流动性。热固性注射塑料的拉西哥流动性一般大于 200mm。相对分子质量在 1000 以内的线型分子或具有少量支链型的分子，其流动性最好。木粉作填料的注射塑料流动性最好，无机填料的流动性较差，玻璃纤维和纺织填料的塑料流动性最差。添加润滑剂可提高流动性，固化剂过多会降低流动性。

2）塑化温度范围宽。一般要求物料在 70 ~ 90℃ 能够塑化，具有一定流动性，并要求在注射机的料筒中存留 15 ~ 30min，具有热稳定性。添加稳定剂可在较低温度下阻止交联固化，这对温流道注射成型尤其重要。

3）高温下能快速固化。固化速度快能缩短成型周期，提高生产率；但过快固化，会造成局部型腔特别是细小部位充填不满。

4）收缩率要小。比起热固性塑料的压缩和压注成型，注射成型的收缩率最大。因为成型中受到压力最小，且模具温度高，脱模后冷却至室温又再次收缩。另外，热固性注射成型的收缩率与填料的种类和含量有关。木粉等有机填料会使收缩率大增。矿物填料，特别是玻璃纤维充填的注射成型收缩率较小。过大收缩率使制品尺寸变化大，又易产生变形翘曲。模具设计收缩率仍以模具和制品在室温条件下的尺寸计算。由于该收缩率与塑料品种和配方关系很大，通常又含有 40% 以上填料，收缩率应由生产厂的注射成型塑料说明书或试验确定。

2. 热固性塑料注射机

热固性塑料注射应该用专门的注射机。在注射成型过程中，要求不能对热固性塑料产生过大的剪切作用，尽量缩短物料在料筒内的停留时间，还须准确控制注射成型温度，以防止在料筒中发生固化反应。这种注射机与常用的热塑性塑料注射机主要有三个方面的区别。

1）料筒加热方式。热固性塑料的注射成型热量主要来源是螺杆旋转的剪切热；料筒的外加热主要起预热作用，并对料筒温度起调节作用。单一的电热方式易使物料过热固化，因此，常用水或油加热料筒，也有电加热水结构的料筒。另一种是油电加热料筒，电热仅用于预热，注射成型时通过调节油温来控制料筒温度，所以料筒温度控制精度较高，为 ±1℃。

2）塑化螺杆。热塑性注射成型塑料的螺杆压缩比为（0. 8 ~ 1. 4）∶ 1，为等距等深的无压缩比螺杆。长径比由（15 ~ 20）∶1 减小为（12 ~ 15）∶1。螺杆转速较低，在 50r/min之内。以减少对物料的剪切和摩擦作用。螺杆头为 50°锥角的圆锥形，并与喷嘴进口内轮廓相适配，避免物料在料筒内滞留。开放式直喷嘴的直径为 2 ~ 2. 5mm。

3）合模装置。由于模具的加热温度较高，模具有热膨胀力，合模装置用液压系统驱动，有较大的锁模力。其锁模机构应满足型腔排气的要求，能控制锁模力突然下降，

让模具开缝放气。

3. 注射成型工艺

热固性塑料注射成型过程中，物料在料筒中处于黏度最低的熔融状态。塑料熔体的黏度及其流动阻力与填料品种、比例和形状尺寸关系很大，需有相适应的注射压力；必须综合考虑摩擦热的因素，采用适当注射速度获得的摩擦热，有利于固化。热固性塑料在模具中进行固化反应，会产生缩合水和低分子挥发物，模具型腔必须设有畅通的排气系统，否则会在注塑件表面留下气泡和残缺。

1）温度控制。精确控制料筒的温度是热固性塑料注射成型的关键。料筒温度过低会使螺杆的剪切剧烈，摩擦生热过多，致使螺杆槽内物料表层过热，而内层未能塑化。相反，料筒温度过高，会产生固化反应，必须停机排除故障。料筒加料口应处于室温，喷嘴的温度最高，单向逐渐升温。注意防止料筒的射出段在螺杆头前过热。

注射模的温度比传统压制模的要高些，以加速固化，缩短注射成型周期。图 13-17 所示为木粉充填的酚醛塑料注射成型时，模具温度与固化时间的关系。模具温度提高，固化时间缩短。但模具温度过高，注射成型制品会有过大的残余应力。模具温度过低，不但成型周期长，还会使固化反应不充分，造成制品的力学性能和电性能低下。

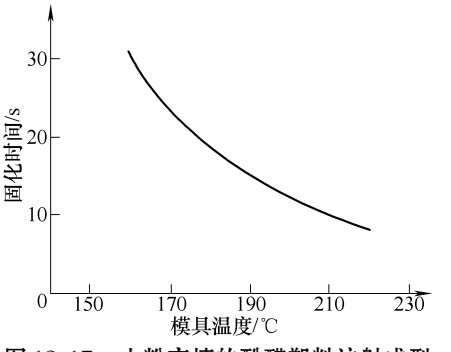


图 13-17 木粉充填的酚醛塑料注射成型模具温度与固化时间的关系

2）螺杆转速和背压。为了避免预塑中物料过热，螺杆用低的转速 40 ~ 60r/min。同时，热固性塑料在料筒中的背压也低，甚至可卸去液压负荷，只利用液压缸活塞和螺杆的摩擦阻力。

3）注射压力和保压。热固性塑料比较热塑性塑料的注射压力高。因为预塑物料中的填料多，黏度较大。相应的螺杆推进速度不高，为 3 ~ 5g/s，以免物料摩擦过热。

热固性塑料注射必须保压补缩，保证注塑件的密度。保压压力比注射压力低一些。保压时间按制品的最大壁厚计算，一般为 12s/mm 左右，快速固化的注射料为 5 ~ 7s/mm。

4）注射座注料方式。热固性塑料注射时多采用前加料方式。在预塑结束后注射喷嘴需随注射座后退，与模具脱离。喷嘴不宜长时间与高温模具接触，防止喷嘴口中物料固化。如果成型周期短、物料稳定，为防止喷嘴口中物料冷却凝固，也可采用固定加料，注射座并不后撤。表 13-1 列出了部分热固性塑料的注射成型条件，供参考。

目前热固性塑料注射品种已有一百多种，但国内生产品种尚少，还需提高材料性能。热固性塑料中的填料（如玻璃纤维）在螺杆剪切作用中会受损；布屑、纸片等大颗粒填料难于进料。不但物料的流动性差，而且对螺杆和模具等磨损作用大，又使注塑件取向较严重，产品易翘曲变形。注塑件中嵌件的安放受到成型速度等限制，不能安放

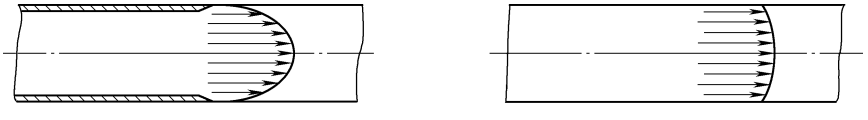
表 13-1　部分热固性塑料的注射成型条件

名称	模具温度/℃	料筒温度/℃		注射压力/MPa	螺杆转速/r·min^{-1}	固化时间/s	背压/MPa	喷嘴温度/℃	注射时间/s	保压时间/s
		前	后							
酚醛塑料(PF)	160～190	75～100	40～50	98～147	40～80	15～50	0～0.49	90～100	2～10	3～15
环氧塑料(EP)	150～200	50～90	30～40	49～118	30～60	60～80	<7.8	80～90		
邻苯二甲酸二烯丙酯(DAP)	160～175	80～90	30～40	49～147	30～80	30～60				
不饱和聚酯(UP)	170～190	70～80	30～40	49～147	30～80	15～30				
聚酰亚胺(PI)	170～200	100～130	30～50	49～147	30～80	60～80		120	20	
三聚氰胺甲醛(MF)	150～190	80～105	45～55	59～78	40～50	20～70	0.2～0.45	85～95	3～12	5～10
脲醛塑料(UF)	140～160	70～95	40～50	60～78	40～50	15～40	0～0.29	75～95	3～8	5～10

过多和安放过慢。应看到热固性塑料的注射设备和模具费用比其他加工工艺方法高几倍，而且耗能也大。模具加热一项就占总耗能的1/4，因此难以成型大型制品。最突出的问题是浇注系统凝料，只能作为废料处理。尤其在注塑一模多腔小制件时，浪费率达15%～25%，甚至更高。因此，采用无浇注系统流道凝料的模具有重大意义。这种模具称为热固性塑料的温流道注射模。此种温流道注射要使流道内物料始终保持熔融状态。为此，对模具的温流道部分单独设置一个低温区，温度大致在90～110℃范围。此温热流道板用热水或热油循环保温，必须有精确的温度检测控制装置。

4. 模内流动和固化

热塑性塑料熔体充模时，模壁温度低于熔体温度，使靠近模壁处的熔体迅速冷却生成冻结皮层。靠近冻结层的熔体黏度高于中心层，流速沿断面呈抛物线分布，如图13-18a所示。热固性塑料熔体充模时，模壁温度高于熔体温度，不会产生冻结层。接触模壁的熔体因受到加热反而使黏度降低。除紧邻模壁薄层因摩擦阻力而流速较低外，整个断面流速分布相近，形成“活塞流”，如图13-18b所示。



a)　　b)

图 13-18　熔体充模流速分布比较

a）热塑性塑料流速分布　b）热固性塑料流速分布

与粉状料压制成型相比，热固性塑料熔体在模腔中充模终止时的塑料熔体温度均匀一致，没有明显的内外层，固化程度不易区别。因此，注塑件在整个断面上有较均匀一

致力学和电绝缘性能。但是，这种充模流动，在模具高温模壁处的流速很高，模壁产生很大的摩擦磨损，特别是，在浇道和型腔的狭窄通道处，壁面磨损更甚。

热固性塑料充模后，固化交链成三维网状结构，不会出现大分子链的取向，也很少产生熔体破裂现象。但是，纤维状的填料在充模流动中会出现流动取向，使制品在流动方向的力学性能和收缩率高于垂直流动方向。

热固性塑料熔体在充模过程中，近模壁处的流速高且速度梯度大，模腔面的传热系数高，又会产生不容忽视的摩擦热。这使充模熔体很快达到固化温度。与其他成型方法比较，同样厚度的制品，其固化反应时间最短。制品越厚，固化时间缩短越明显。这使模具温度控制较为困难。模温偏低会延长固化周期，或使固化不完全，致使注塑件性能下降；模温偏高，低黏度熔体会到处钻模，形成飞边。靠近模壁的熔体黏度迅速越过最低点而过早固化，会使注塑件表层发暗，出现流痕和黏模。局部熔体过早固化，还会使注塑件某些部分缺料。模内熔体受热时，一方面由于分子链活动性增大使黏度降低；但另一方面因固化反应而使黏度大增。如图 13-19 所示，是两个相反的综合影响结果。

综上所述，热固性塑料注射模具的总体结构设计时必须考虑如下特点。

1）制品尚未固化前树脂黏度比热塑性塑料低，对于 0.01 ~ 0.02mm 的缝隙也会溢出。

2）制品成型后硬而脆。其分型面上飞边和钻入缝隙溢料使清理困难。易破碎的小片会磨损模具表面。

3）热固性塑料的摩擦系数和收缩率都较小。注塑件对型芯包紧力较小，开模时易滞留在型腔的一侧。

4）塑料熔体对模具成型表面有较严重的磨蚀、磨损。

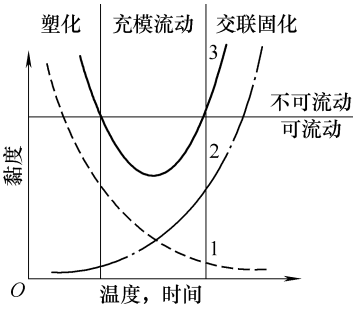


图 13-19 热固性塑料黏度与加热温度和时间关系

1—物料黏度的物理变化 2—化学交联使黏度增加 3—综合黏度曲线

5）模具工作温度远高于室温，使室温下的装配间隙很难控制。室温下过小间隙会使工作时的运动零件产生咬死和拉毛现象。

13.2.2 热固性塑料注射模具设计

许多重要设计步骤，如模具的强度和刚度计算等，与热塑性塑料注射模的设计相同或相似。

1. 总体结构特点

图 13-20 所示是一模八腔的酚醛塑料注射模。因制品太小和飞边过多，采用注射模生产效率较高。现用单分型面的结构和侧浇口。因为过细的浇道容易被顶出杆顶破并碎裂，浇注系统的用料只能多些。

（1）确定型腔数目 应以保证足够大的锁模力防止分型面上出现飞边来确定型

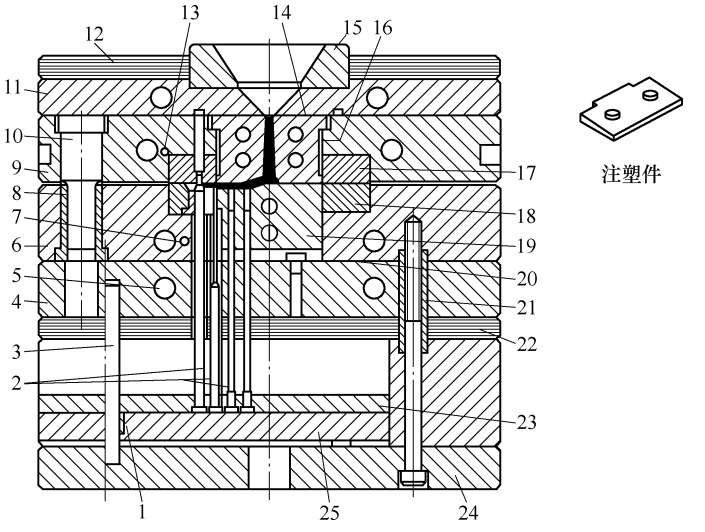


图 13-20　一模八腔酚醛塑料注射模

1,8—导套　2—顶出杆　3,10—导柱　4—动模支承板　5—加热器　6—动模板
7,13—热电偶　9—定模板　11—定模底板　12,22—绝热板　14,19—加热块
15—定位圈　16—绝热空气隙　17—定模镶件　18—动模镶件　20—支承销
21—定位套筒　23—顶出固定板　24—动模底板　25—顶出板

腔数。

$$n=\frac{1}{A}\left[\frac{(0.6\sim0.8)F}{p_c}-B\right] \tag{13-1}$$

其中　n——锁模力决定的型腔数；

F——注射机的锁模力（N）；

p_c——型腔内塑料熔体的压力（MPa）；

B——浇道和浇口在分型面上的投影面积（mm^2）；

A——每个制件在分型面上的投影面积（mm^2）。

根据经验，酚醛塑料成型时的型腔压力 p_c 为 30 ~ 40MPa，氨基塑料的 p_c = 40 ~ 60MPa，不饱和聚酯的 p_c = 10 ~ 20MPa。

还需校核塑料熔体在料筒中的存留时间 θ_b。使 θ_b 不得超过熔体状态的维持时间。目前，该允许维持时间 $[\theta]_b$ = 4 ~ 6min，有

$$\theta_b=\frac{G_b}{G'}\theta<[\theta]_b \tag{13-2}$$

其中　θ_b——熔体在料筒中的存留时间（min）；

θ——注射成型周期（min）；

G_b——塑料在料筒中（包括螺杆槽中）的存料总量（g）；

G'——每次注射用量（g）。

因此，每次实际注射量 G' 为注射后料筒中存料 G_b 的 0.7 ~ 0.8 较为合适。倘若注射

量 G'过少，会造成注塑件上有过早固化硬块，甚至必须经常对空喷射，以防止塑料在料筒中固化。

（2）嵌件和安装　热固性塑料制品中若要安放嵌件，首先要防止熔体钻料，其次要求安装快速。因此，通常在模外将嵌件装在嵌件杆或嵌件套上，然后整体装入。

防止钻料方法，其一是采用台肩式嵌件杆，如图 13-21 所示。该台肩也有制成锥面并与圆柱组合，见图 13-21b。金属嵌件旋入嵌件杆后置于模内，还要防止嵌件杆与嵌件接触端面间被钻料。其二是提高嵌件杆和模具上插孔的配合精度。它们之间的单边间隙在 0.01 ~ 0.02mm 之间。应先加工孔，然后配磨和配研成型杆，再镀铬抛光，并保证多个嵌件杆的互换性。

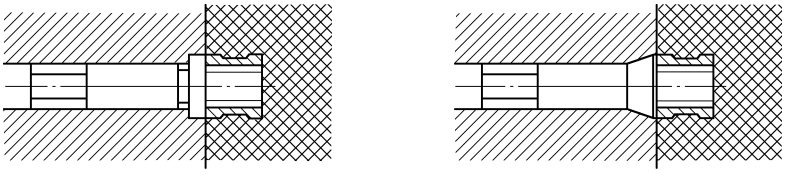


图 13-21　嵌件与嵌件杆

a）圆柱台肩　b）锥面与圆柱组合台肩

（3）分型面设计　为增大锁模力以减薄飞边甚至避免飞边，应减小分型面的实际接触面积。一般在型腔周围的 20 ~ 110mm 之外部分削去 0.5 ~ 1mm。但也需注意到过大锁模力会使型腔塌陷。分型面上作用 40 ~ 70MPa 的锁模压力为好，流动性好的物料应取其大值进行验算。

分型面硬度应在 40HRC 以上，避免飞边碎屑过快损伤分型面。对分型面镀铬处理，可减小飞边的黏附力。

分型面上不允许存在任何孔和凹坑，否则会造成飞边清理困难。应将模板上螺孔等设计成不通孔。若有通孔，也应将其镶填磨平。

（4）成型零件设计　成型零件工作尺寸的计算方法与热塑性塑料注射模具的相同。但在确定成型收缩率时，应注意到热固性塑料注射成型收缩率的离散性较大。例如：酚醛塑料注射成型收缩率为 0.7% ~ 1.2% 。此外，在计算型腔深度尺寸时，要计入分型面上的飞边厚度（0.05 ~ 0.1mm），即将计算得的模具型腔尺寸减去飞边值。

成型零件设计应尽量避免镶拼结构，以免熔体钻模，需要时，常采用整体镶嵌式型腔。型腔的表面粗糙度 Ra 应在 0.20μm 以下。

型腔和型芯一般都应经过热处理淬硬。表面硬度有 40 ~ 45HRC 的析出硬化钢、SM2 和 PMS 用于高精度的中小型模具。为提高耐磨性，也常用合金工具钢 9Mn2V、5CrMnMo、9CrWMn，硬度为 53 ~ 57HRC。含有矿石粉或玻璃纤维等硬质填料时，要求硬度为 58 ~ 62HRC。成型零件常用镀硬铬后抛光来改善表面粗糙度，提高耐磨性和耐蚀性，延长模具使用寿命。镀铬层厚度在 0.03 ~ 0.08mm 之间。

（5）脱模机构设计　由于热固性塑料熔体有 0.02mm 以上单边间隙就会钻模，产生

飞边，给脱模机构设计带来很大难度，所以应尽量避免采用顶管和推板脱模。因为顶管的内外柱面均有间隙配合，推板与型芯的配合间隙有时很难均匀一致，在高温下的实际间隙很难控制。倘若要使用推板，则脱模行程要增大到足以使推板脱出型芯。这样，便于清除飞边及碎片。

采用顶杆比较容易使单边间隙达到 0.01 ~ 0.02mm 的要求。0.03mm 以下间隙会产生极薄半透明的飞边，尚不妨碍相对滑动。但小于 0.005mm 间隙，在约 160℃模温下，易产生配合面的胀咬故障。如图 13-22a 所示，于顶杆的中间滑动段制成三棱带，可减小与高温孔壁的摩擦面。棱带应有足够长度和精度，每棱应有 1.5mm 的支承接触宽度。又如图 13-22b 所示，顶杆在顶出位置，动模底面与顶杆三棱段应留有足够位置 A，以允许碎屑从槽中自由脱落。而上部圆柱段要全部推出注塑件成型面。该种顶杆直径通常大于 5mm。棱带数可视直径增大而增多。

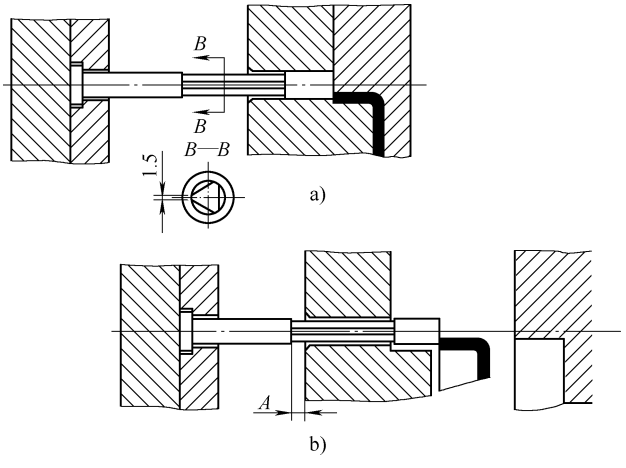


图 13-22　热固性注射模顶杆

a）闭模位置　b）顶出位置

（6）排气系统设计　热固性塑料注射模不但要排出型腔中空气，还要排出固化反应所产生的挥发性气体，因此排气量大，在浇口前的分流道就应该开始排气。排气槽宽度应等于分流道宽度，在分型面上的深度取 0.12mm 左右，一般在型腔四周均应当排气，在料流末端更应保证排气畅通。分型面上的排气槽宽度为 3 ~ 8mm，深度为 0.06 ~ 0.18mm，如图 13-23a 所示。排气槽相互间隔至少 25mm。排气槽允许物料溢出，并有与型腔相同的表面粗糙度和硬度。但遇到小型板件，排气量又不大，则用约 0.06mm 浅的排气槽，使飞边去除容易，也有的在芯柱上开设排气隙，如图 13-23b 所示，在芯柱外圆上磨出 3 ~ 4 个深 0.05 ~ 0.075mm 的平面，然后经中心引气孔导出气体。在大多数场合，顶杆上也磨出类似的几个导气平面。加工时需注意，磨痕应沿着轴线方向；排气面端角上要磨出 0.12mm 左右的倒角。这样在有飞边形成时会粘连在制件上。最后一种有效可靠方法是利用多孔的烧结块排气，如图 13-23c 所示。

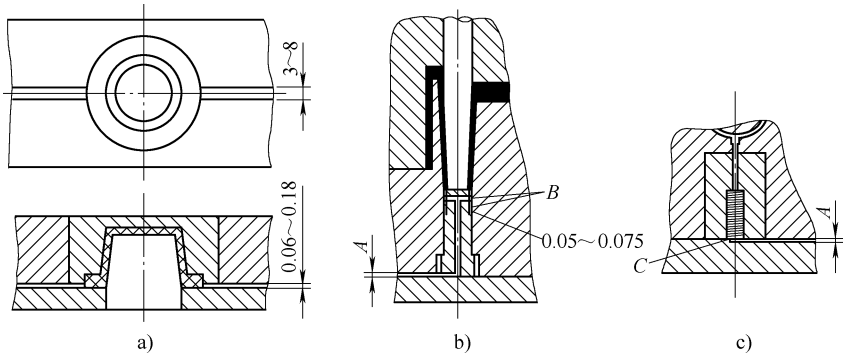


图 13-23　排气系统设计

a）分型面上的排气槽　b）排气芯柱　c）多孔烧结块排气

A—排气槽　*B*—排气孔　*C*—烧结块

（7）加热和绝热考虑　热固性塑料注射模加热系统使用得最多的是电热棒，也有的用电热板，应该用两绝热板之间的模具总质量计算。其计算经验公式：

$$W = 0.2V \tag{13-3}$$

式中　W——加热器功率（W）；

V——被加热模具的体积（cm^3）。

动模和定模分别设置测温热电偶，如图 13-20 所示，以自动控制模具温度，使成型表面温差在 ±2.5℃之内。表 13-1 为部分热固性塑料注射成型模具温度提供参考。有机硅注射模模具温度为 170～216℃；聚丁二烯注射模模温为 230℃。

为防止高温模具向注射机的两块模板传热，需设置两个绝热垫层。其材料常用石棉水泥板或环氧玻璃钢板等。如图 13-20 所示，绝热层设置在动模支承板和垫铁之间，需加设定位套筒。也有的将绝热层设置在动模底板和注射机动模板之间。

2. 浇注系统设计

浇注系统设计应注意采用由热固性塑料注射工艺特点而获得的经验数据。

（1）主流道　热固性塑料注射成型时，物料在料筒内没有加热到足够高温度，因此，要求主流道有较大传热面积；热固性注射机的喷嘴口径较大，所以锥角应为 $\alpha = 1° \sim 2°$；主流道内壁的表面粗糙度 Ra 应不大于 0.8μm。

由于热固性塑料有脆硬特性，因此拉料的“冷料井”应防止物料折断。球形拉料头如图 13-24 所示，$d = d_1 + 2\text{mm}$。d 与 d_1 之差过小则无

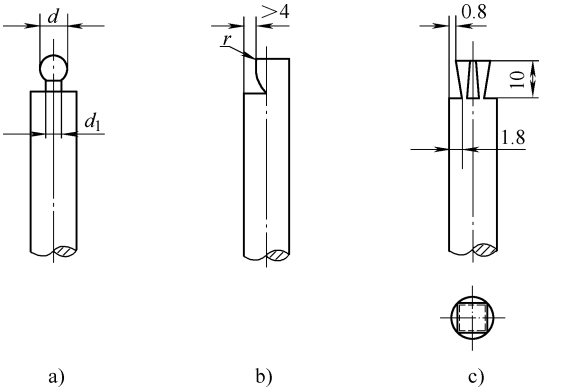


图 13-24　常用拉料头的形式

a）球形拉料头　b）Z 形拉料头　c）薄片式拉料头

拉料作用；若过大会不能脱模或破裂。图 13-24b 所示的 Z 形拉料头，最薄处不得小于 4mm；尖角处应设有 $r=1$mm 的圆角。图 13-24c 所示的薄片式拉料头，在圆柱杆头上铣四条斜边，最薄处不得小于 0.8mm，斜片长约 10mm，使薄片具有弹性。

（2）分流道　分流道圆形截面有利于传热固化，但实际上分流道设计大多采用梯形和半圆形。分流道断面面积与物料流动性、物料温度和分流道长度等因素有关，但主要取决于流经分流道的物料量。对于酚醛类塑料，分流道断面面积可按下式估算：

$$A_r = 0.26G_r + 20\text{mm}^2 \qquad (13\text{-}4)$$

式中　A_r——分流道断面面积（mm^2）；

G_r——流经分流道的塑料量（g）。

也可按图 13-25 的直线 1 估算。生产中梯形断面厚度，对中小型注塑件可取 2～4mm，较大塑件取4～8mm。

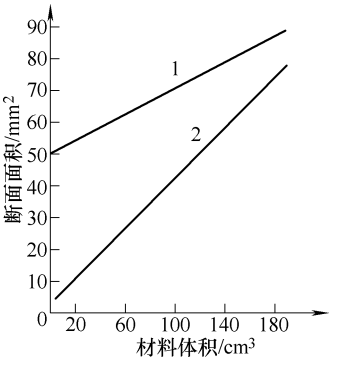


图 13-25　酚醛塑料的分流道和浇口断面面积与分流道断面面积的关系

1—分流道　2—浇口

为减小物料流动阻力，主流道与分流道、各分流道转向处，都应取较大的转角半径。转角半径应不小于分流道直径或宽度。分流道的表面粗糙度 Ra 在 0.4μm 以下，并镀铬。

（3）浇口　如图 13-26 所示，热固性塑料注射模的浇口形式有：直浇口、侧浇口、盘形浇口、外环形浇口、内环形浇口、扇形浇口、平缝形浇口、点浇口和潜伏式浇口等。物料流经浇口时摩擦磨损大，固化了的浇口凝料质脆易断，故与热塑性塑料注射的浇口有所差异。

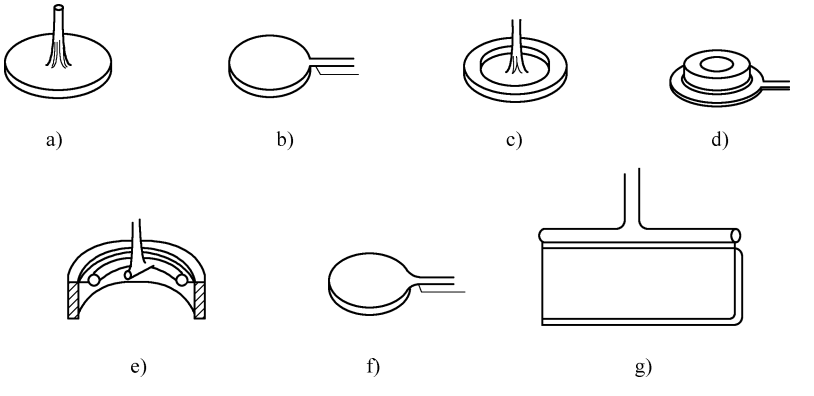


图 13-26　热固性塑料注射模的浇口类型

a）直浇口　b）侧浇口　c）盘形浇口　d）外环形浇口

e）内环形浇口　f）扇形浇口　g）平缝形浇口

1）侧浇口。侧浇口长度为 0.8～1.5mm。宽度应比分流道稍窄，中小制件为 2～4mm，大制件为 4～8mm。其深度是浇口断面面积的修模调节尺寸，根据经验常取

0.5mm 左右。对于纤维填料取 0.8～1.0mm，或取注塑件壁厚的 1/2 左右。酚醛塑料的侧浇口的断面面积，可参考图 13-25 中的线 2。

2）点浇口。填料粒度大的热固性塑料不能用点浇口。点浇口处磨损剧烈。其直径比热塑性塑料模大得多，常取 $d=1.2\sim2.5$mm，可根据注塑件大小和壁厚选取。热固性塑料注射模的点浇口见图 13-27。浇口带有锥度可减小摩擦。

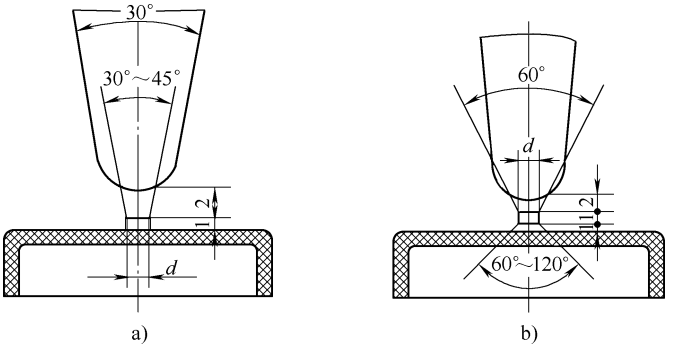


图 13-27　热固性塑料注射模的点浇口

a）直点浇口　b）带倒锥

3）潜伏式浇口。倘若采用点浇口就要用三板模结构，而潜伏式浇口可简化模具。该种浇口成功设计取决于浇口位置、浇口的两个角度、顶杆位置、注塑件在脱模温度下是否具有柔性。如图 13-28 所示，浇口中心线与开模方向的夹角 α 在25°～30°较适宜。浇口本身锥角在 25°～35°为好。顶杆距浇口太近时，顶出时浇口凝料不能产生充分的挠曲，易剪切折断；但顶杆太远时，则固化浇口没有足够的顶出力。顶杆距一般取分流道直径 d 的 1～2 倍。

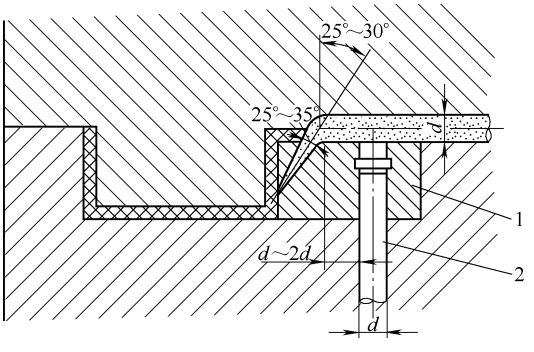


图 13-28　热固性塑料注射模的潜伏式浇口

1—镶块　2—顶杆

浇口部位最好做成可换镶块。特别在大批量生产时，镶件的镀铬层磨去后，可重新镀铬或更新镶件。也可以考虑用硬质合金制造镶块，寿命可提高数倍。

图 13-29 所示为生产石棉短纤维充填的酚醛环刷的注射模。该制品尺寸精度要求高，型腔的脱模斜度很小。采用盘形浇口有利于纤维的充模和分布。在用一模四腔的压制模成型时，成型周期达 2.75min。现为一模二件，采用三板模结构，拉尺被仔细设计，让动模板与中间板首先分离并剪断盘形浇口。第二次分型时，注塑件中心引导流道的固化物不被咬合或破碎。这样可实现自动化生产，注射成型周期为 58s。

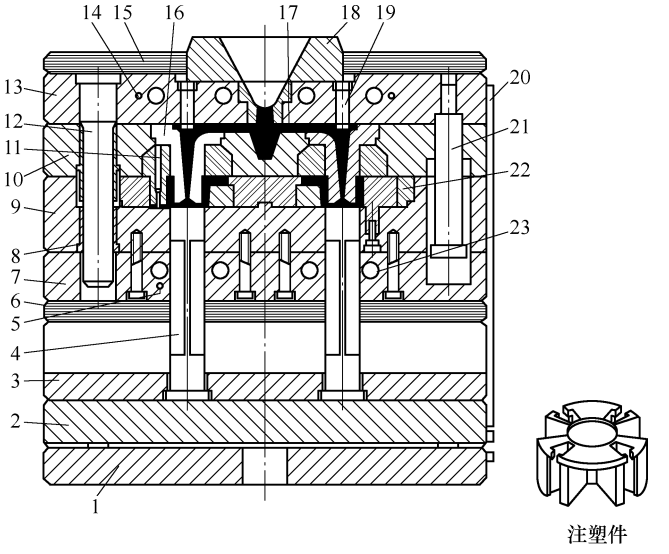


图 13-29　一模二腔石棉短纤维充填酚醛塑料环刷的双分型面注射模

1—动模底板　2—顶出板　3—顶杆固定板　4—顶杆　5,14—热电偶
6,15—绝热层　7—动模垫板　8—导套　9—动模板　10—中间板　11—凸模
12—导柱　13—定模固定板　16—流道浇口套　17—主流道杯　18—定位圈
19—拉料杆　20—拉尺　21—带肩定距螺钉　22—凹模　23—加热器

13.3　微孔塑料注射成型技术

微孔塑料的注射制品性能比传统的泡沫塑料好，能注射成型薄壁的结构件，又具有绝热、隔声和抗振特性。其发泡注射的总成本较低，在现代各种新型注射工艺中有较突出的应用。

13.3.1　微孔塑料的性能和注射原理

1. 微孔塑料的注射

（1）微孔塑料的性能　微孔塑料中，发泡孔的直径在 100μm 以下，大量的泡孔直径为 5 ~ 50μm，而且泡孔大小和分布均匀。微孔塑料的泡孔大小取决于材料并能按制品用途进行控制。而传统的泡沫塑料的泡孔直径在 100μm ~ 1mm 之间，泡孔大小和分布不均匀。微孔塑料比普通塑料中的缺陷和微细裂纹小，对裂缝尖的钝化作用，使微孔塑料的某些力学性能有所改善。微孔发泡注塑件的质量减轻后，大多数的微孔发泡注射塑料件的力学性能下降不多。而化学发泡制品只能成型厚壁制品，物理性能随空隙率提高呈平方指数关系下降。

微孔塑料的性能是以比强度，即单位质量的性能值来衡量的。与无泡沫塑料试样，作下式的相对比较，以无量纲的性能持有率 A 表述。

$$A = \frac{P_m / G_m}{P / G} \tag{13-5}$$

式中 P_m——微孔塑料注射试样的性能；

G_m——微孔塑料注射试样的质量；

P——无泡孔塑料注射试样的性能；

G——无泡孔塑料注射试样的质量。

性能持有率 A 小于 1，说明注射试样的性能降低大于减轻质量的降幅。图 13-30 和图 13-31 是四种聚丙烯 PP 及其改性和增强微孔塑料材料，在各种发泡减轻质量下的性能持有率。前者是对弯曲弹性模量测试；后者是带有缺口试样的冲击强度。从这两图可知，对这四种微孔塑料发泡减轻质量在 10% ~15% 为好。

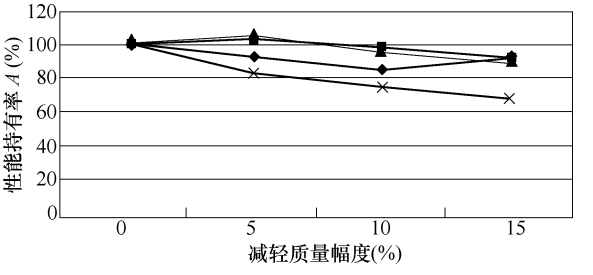


图 13-30 弯曲弹性模量与注塑件试样减轻质量间的关系

◆—未填充 ■—20% 滑石粉填充 ▲—20% 玻璃纤维填充 ×—40% 玻璃纤维填充

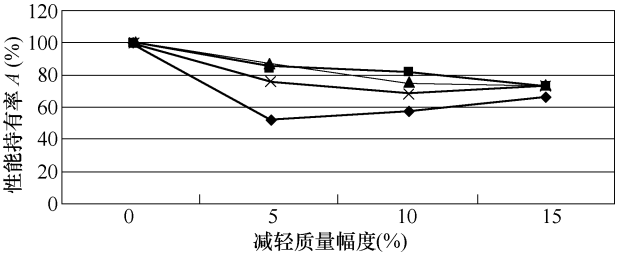


图 13-31 带有缺口试样的冲击强度与注塑件试样减轻质量间的关系

◆—未填充 ■—20% 滑石粉填充 ▲—20% 玻璃纤维填充 ×—40% 玻璃纤维填充

确定发泡减轻质量，需要有微孔塑料的七项力学性能（弯曲弹性模量、弯曲屈服强度、带缺口悬臂式冲击强度、断裂伸长率、拉伸强度、拉伸弹性模量和拉伸屈服强度）测试，分别获得对于塑料的各项性能持有率，分析确定容许的发泡减轻质量。

根据现有的力学性能测试资料，可将微孔塑料分成韧性材料和脆性材料两类。韧性微孔塑料如聚碳酸酯 PC 和聚苯醚/聚苯乙烯混合物 PPO/PS，在 2% ~20% 的发泡减轻质量下，微孔塑料的拉伸与弯曲的弹性模量与屈服强度的性能持有率，与不发泡塑料接近，甚至超过不发泡塑料。但是随着发泡减轻质量增多，冲击强度和拉断裂伸长率的性能持有率有很大下降，微孔塑料的韧性很差。另一类脆性微孔塑料，如玻璃纤维增强聚对苯二甲酸丁二醇酯 33% GF-PBT 和玻璃纤维增强聚酰胺 33% GF-PA，在一定的发泡减

轻质量 4% ~15% 下，微孔塑料的拉伸与弯曲的弹性模量与屈服强度的性能持有率表现良好。而且冲击强度和拉断裂伸长率的性能持有率，与不发泡塑料接近，甚至有超过不发泡塑料。

（2）微孔塑料的注射成型系统　图 13-32 所示是典型的微孔塑料的注射成型系统。塑料粒子原料由料斗加入料筒中。料筒加热和螺杆的剪切塑化使塑料熔融。物理发泡剂二氧化碳或氮气在螺杆头部位置注入。螺杆头配有混合元件，将发泡剂与塑料熔体搅混、分散和均化。在螺杆推动下，混合料进入静态混合器，形成熔体与气相的均相体。如果发泡气体在熔体中析出微孔气泡核，机筒内维持的高压，能防止气泡核长大。

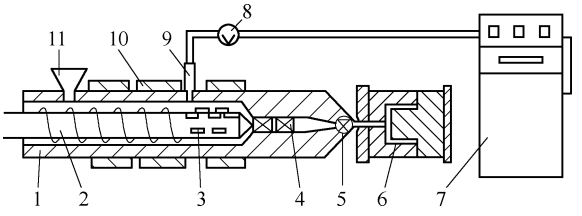


图 13-32　微孔塑料注射成型系统

1—料筒　2—螺杆　3—混合元件　4—静态混合器
5—阀式喷嘴　6—注射模具　7—SCF 输送泵　8—计量阀
9— SCF 注射器　10—加热器　11—料斗

喷嘴阀打开后，螺杆快速推进注射时，聚合物熔料注入模具型腔，熔体中析出大量的微孔气泡核。熔料充满型腔后，在型腔内压的下降中，让塑料中气泡长大。与此同时，模具的冷却作用使微孔塑料制件固化成型。

有各种微孔塑料注射成型系统，如塑化的螺杆料筒与注射的活塞推杆并联配合，用挤出机螺杆连续塑化，在螺杆末端注入发泡剂。注射缸推进到模具型腔前，加热塑料熔体和发泡剂气相的均相体系析出大量的微孔气泡核。此时要维持对熔体的高压，以防止发泡长大。

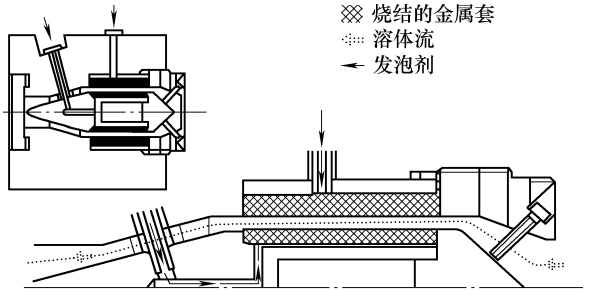


图 13-33　新型的发泡剂注入料筒

德国塑料加工研究所 IKV 研制的微孔塑料注射成型系统，如图 13-33 所示。在通用的注射机前加装一段图示的料筒，注入发泡剂。塑料熔体被推进成圆环截面的料流。透气的金属烧结块，套在环形通道的内外。发泡剂能充分又均衡地溶入熔体中，再经静态混合器加热和扩张，最后由阀式喷嘴注入模具。

2. 微孔塑料注射发泡的原理和特点

（1）微孔塑料注射发泡的原理　微孔发泡是将发泡气体注入螺杆塑化的塑料熔体，在注射成型过程中严格控制物理条件，使溶有气体的熔料快速生成微孔核并长大，而后固化成型。微孔塑料发泡的理论研究，自 20 世纪 80 年代以来与微孔塑料注射成型技术同步发展。

超临界流体（super critical fluid，SCF）的温度和压力均处于它的临界温度 T_c 和压

力 p_c 以上。当物质处于临界 T_c 和 p_c 以上时，如图 13-34 所示，气体和液体的界面消失。原气-液体系的物质均一，不再分为气体和液体，被称为超临界流体。

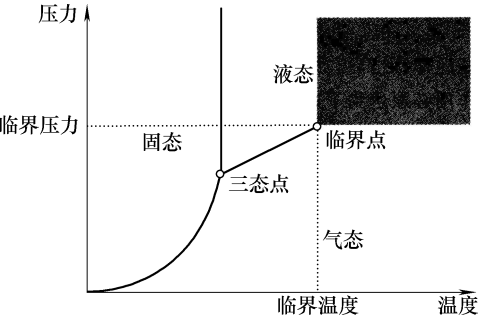


图 13-34　超临界流体的相图

超临界流体具有表 13-2 所列性能，便于气体在塑料熔体中发泡。

1）超临界的流体具有与液体相近的密度，因而有很强的溶剂强度。

2）超临界的流体具有与液体相近的黏度，但流动性比液体好得多。

3）超临界的流体的扩散系数要比液体大近 100 倍，因而在较短的时间内达到平衡浓度，缩短加工时间。

4）超临界的流体的密度、黏度和等溶解性能均可通过压力和温度的变化，方便地进行调节。

表 13-2　二氧化碳和氮气超临界状态下的性能

流体	临界温度 T_c/℃	临界压力 p_c/MPa	气态密度（21℃,0.1MPa）/(g·cm^{-3})	200℃、27.6MPa下,聚合物熔体的最大气体溶解度(%)		200℃气体在聚合物熔体中估计的扩散系数/(cm^2·s^{-1})	
				PE	PS	PE	PS
二氧化碳(CO_2)	31	7.37	0.00183	14	11	2.6×10^{-6}	1.3×10^{-5}
氮气(N_2)	-147	3.40	0.00116	3	2	8.8×10^{-7}	1.5×10^{-5}

二氧化碳和氮气都被用于生产微孔塑料。发泡剂的选择影响到微孔结构。由表13-2可知，二氧化碳在聚合物熔体中的溶解度比氮气高得多，因此可以用来生产密度较低，而减轻质量较大的微孔塑料。

由表 13-2 可知，氮气和二氧化碳在聚合物熔体中的扩散系数是接近的。如果两者在聚合物熔体中的浓度相同，氮气可以生成更多的泡核。又由于两者在聚合物熔体中的扩散系数相同，氮气发泡的微孔泡较小。

下面讨论微孔塑料注射成型的三个阶段。

1）聚合物与气体均相体系的形成。临界气体在聚合物熔体中的扩散是缓慢的。在注射周期里聚合物熔化后，要求几十秒钟内形成均相体系。经实验和理论研究，聚合物熔体与惰性气体的均相形成的时间可近似为

$$T\approx\frac{\pi L}{4D_f}=\frac{\pi D_{av}^2}{12\varphi^2 D_f} \tag{13-6}$$

式中　L——相邻界面间的平均距离；

D_f——气体扩散系数；

D_{av}——气泡平均直径；

φ——微孔塑料的含气率。

为此，在临界气体注入聚合物熔体时，在螺杆头上增设强化混料的元件，增加塑料熔体中惰性气体的含气率；但不能出现气泡，需控制温度和压力，采用对流扩散后再经静态混合。

2）微孔塑料的成核。泡孔成核是指原始微泡，是气体在聚合物熔体中最初的气相聚集。在高温和高压下的聚合物与气体的均相体系，通过快速降压使气体在聚合物熔体中溶解度急剧下降，形成过饱和状态。热力学的不稳定性分析阐明，成核过程是熔体中的气体分子优先向材料中的空穴聚集。

塑料熔体中的空穴存在于聚合物与固态无机填料的界面上，形成在聚合物熔体的晶相与非晶相的界面上，或者在两种不同聚合物的微结构的界面上。为提高微孔塑料的成核量，在塑料中添加一些橡胶粉末作为成核剂。微孔塑料的成核在充模注射时发生，或在料筒中扩散生成。

3）泡孔的长大和控制。一定压力的聚合物熔体注入低压的模具型腔时，成核的泡孔持续长大，直到塑料熔体完全充满型腔。熔体在冷却中建立起足够的刚性，承受气孔中的气压，又在冷却成型中保持泡孔尺寸的大小和均匀性。

细胞模型可用来描述泡孔的长大。理论分析方程的计算结果与试验结果已经基本一致。泡孔的气体密度和聚合物熔体的黏度决定了泡孔的尺寸。考虑聚合物的黏弹性在剪切流变中的变化，考虑泡孔在热力学条件下压力下降中长大，可用流体动力学、气体扩散、能量方程、数值分析计算泡孔的长大。

（2）微孔塑料注射的特点　微孔塑料注射可以获得轻质的薄壁制品。这种薄壁注塑件，用传统的泡沫塑料注射和气体辅助注射无法生产。与传统的注射工艺相比，微孔塑料注射有三方面的优势。

1）适合 3mm 以下壁厚的薄壁制品的注射成型。可以注射壁厚 0.25mm 的注塑件，而且尺寸稳定。注塑件上无凹陷。制品内残余应力小，翘曲变形轻。注塑件质量最大可减轻 30%。

2）使用超临界发泡剂可使塑料熔体的黏度降低达 50%。因此，可降低加工温度；注射压力可降低 50%，缩短甚至不用保压；注射模的锁模力可降低 60%。

3）注射成型总成本平均降低 16% ~ 20%。塑料用量减少。注射周期缩短 10% ~ 50%。模具在低压下注射，可增加型腔数目。注射模可有较薄的型腔壁厚和底板厚度，模具成本较低。

3. 微孔塑料的注射装备

微孔塑料注射是在传统注射工艺基础上发展起来的。它必须添加超临界流体（SCF）的输送系统，必须改装注射机的塑化装置。

（1）超临界流体的输送系统　发泡剂的输送和注入必须添加外围装备。注意到二氧化碳和氮气有不同的装置。对于间歇注射模，超临界流体的输送系统也应有间歇输送发泡剂。超临界流体的输送系统有下述的装置组成。

1）发泡剂发生器。气态发泡剂储存在高压缸中。液态发泡剂储存在真空瓶中。液

态二氧化碳储存在高压缸或真空瓶中。发生器上连接到超临界流体泵上，并有压力控制阀、压力表和液位计。

2）二氧化碳的液体输送系统。二氧化碳能轻易地冷却成液态。系统配备有冷却装置，再用液体泵压缩成超临界流体。采用压力调节器可以控制注入注射机的压力。二氧化碳的液体输送系统的泵、计量和输送等装置较简单，投资比氮气输送系统少。

3）氮气的气体输送系统。氮气发生器无需冷却，直接进入二级高压气体泵。一级泵将气压从 1.4MPa 增压到 14MPa，二级泵增压到 52MPa 左右。系统需要对超临界流体进行计量和控制，还需要压力调节器控制注射器的背压。

4）辅助气体分配装置。注射机上装的注射器会有几个，超临界流体泵有可能有几套。这就要有开关阀、控制阀、输送管道，以及压力和流量的计量仪。

5）超临界流体的注射器。低流量的注射器一般只有一个小孔。注射器头部与注射机料筒的内径轮廓相同。它与料筒安装合适并无泄漏。

微孔塑料的注射器，与用于挤出机上的注射器不同。它的制动阀芯由气动、液压或磁力控制。注射器的启闭经电气线路连接到注射机的控制器，实现周期性的启闭。加装与注射器流体并联的控制阀，将多余的发泡剂引回发生器，非连续地供给超临界流体，适应间歇注射。

（2）注射机的改装　微孔塑料的注射机，基本上是标准设备，但有几处改动。

1）安装阀式喷嘴。可控启闭的阀式喷嘴从注射机供应商购得。阀式喷嘴由气缸或液压缸驱动，如图 13-35 所示。它的控制阀连接注射机的控制器。关闭喷嘴能保证料筒内物料处于高压状态，防止过早发泡。

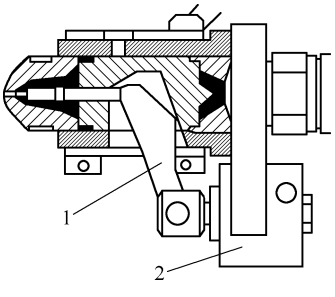


图 13-35　阀式喷嘴

1—操纵杆　2—气缸或液压缸

2）螺杆改造。专门设计的螺杆有超大的长径比（26∶1 或 28∶1），但也采用标准长径比（22∶1）。如图 13-36 所示，在螺杆的计量段上设置滑动止逆环。图 13-36a 为螺杆在旋转塑化时，熔融的塑料熔体被泵到螺杆头前。累积熔料的压力让螺杆同时后退。止逆环滑动到螺槽的一侧。止逆环中的通道，让熔融的塑料被螺旋推力送到螺杆头前。图 13-36b 为螺杆在注射推进时，止逆环推到螺槽的另一侧。螺杆头前累积熔料被阻止返流，保证注射的高压和计量准确。

图 13-37 所示为在螺杆计量段中设置混炼段。混炼段的作用是在聚合物熔体中均匀分散超临界流体，混合生成均相熔体。有的混炼元件在螺棱上轴向开槽，有的混炼元件在螺杆圆柱面上插些销钉。

3）料筒上安装注射器。料筒上必须开孔安装超临界流体注射器，还必须加装压力传感器。要测得注射器注入料入口的压力，还要测得螺杆头前塑料熔体的压力。注射螺杆在料筒中有轴向往复运动。为让螺杆在塑化后退过程中能溶入发泡剂，沿螺杆方向的料筒上装有多个注射器。如果螺杆加长，则要加长料筒并增加加热圈。

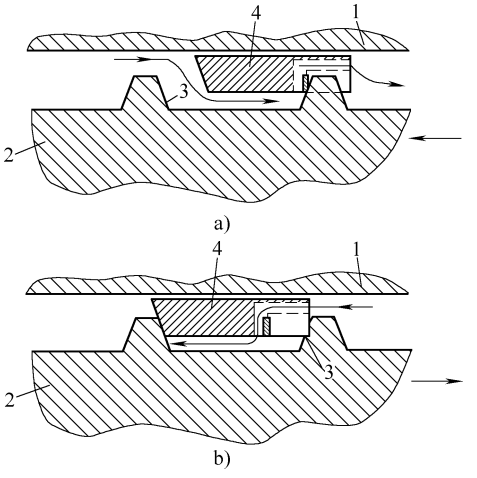


图 13-36　螺杆上装滑动止逆环

a）螺杆旋转塑化后退　b）螺杆注射推进

1—料筒　2—螺杆　3—螺杆槽

4—滑动止逆环

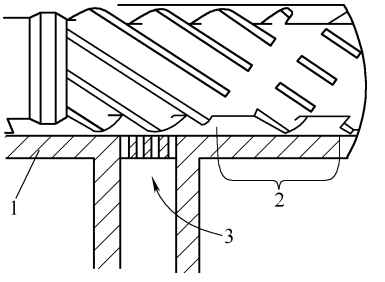


图 13-37　在螺杆计量段中设置混炼段

1—料筒　2—混炼螺杆段

3—超临界流体注射孔

4）控制系统的改进。微机控制的注射机应该有微孔注射工艺的页面，显示超临界流体注射器的开关参数、发泡流体的剂量计算、注射器入口压力、料筒内熔体压力，并能设置微孔注射工艺参数。

13.3.2　微孔塑料的注射工艺和注射模

1. 注射工艺

微孔塑料注射工艺与传统的不发泡塑料的工艺过程有许多不同之处。这里从熔体黏度、超临界流体注入控制和改善注塑件表面质量三个方面进行讨论。

（1）熔体黏度　超临界流体降低了熔体的黏度。图 13-38 所示为 188℃时，二氧化碳对 ABS 熔体在流动剪切速率下的黏度的影响。在较低的剪切速率下，黏度下降更为明显。含氮气或二氧化碳的大多数聚合物熔体黏度都有下降。但是，含有填料的塑料熔体黏度变化不明显，这是因为填料不溶解超临界流体。

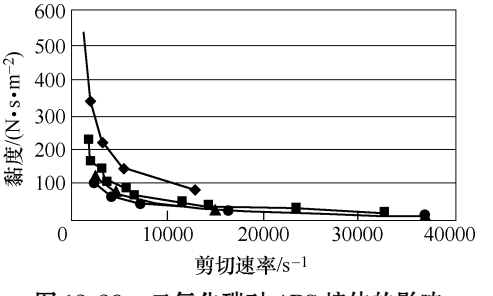


图 13-38　二氧化碳对 ABS 熔体的影响

◆—没有气体　■—3% CO_2

▲—8% CO_2　●—12% CO_2

低黏度物料的流动充模给注射工艺带来重大影响：注射压力可以降低；型腔压力大致在 25MPa 以下，是常规压力的一半，因此锁模力可大幅度下降，以致成型注塑件的残余应力下降，减少了制品的翘曲变形；注塑件的壁厚可以减薄；模具中流道截面可以减小；模具温度一般比不发泡注射还

低些。

（2）超临界流体注入控制　超临界流体的用量、注射器的开启时间和工艺压力控制，是微孔塑料注射的新工艺，需多次测试，确保注塑件的质量。

通常气体能溶于聚合物的超临界流体的最大量：氮气为 1.5% ~2.0%，二氧化碳为 5% ~7%。随着发泡剂浓度的提高，需要增加工艺压力保持气体溶解在聚合物熔体中。氮气所产生的泡孔尺寸比二氧化碳小，而且更均匀。各种塑料的氮气用量见表 13-3。二氧化碳用量是氮气用量的 3 倍左右。

表 13-3　各种塑料的氮气用量

塑　料		氮气(N_2)的用量(质量分数,%)
聚烯烃	HDPE	1.0 ~2.0
	不含填料的 PP	1.0 ~2.0
	滑石粉充填的 PP	0.5 ~0.75
	玻璃纤维增强的 PP	0.5
无定形塑料	PS 和 PC	0.4 ~0.6
	HIPS,ABS	0.6 ~0.8
	玻璃纤维增强的无定形塑料	0.3 ~0.5
结晶型塑料	不含填料的 POM	0.2 ~0.4
	玻璃纤维增强的 POM	0.1 ~0.3
	不含填料的 PA	0.5 ~0.7
	玻璃纤维增强的 PA、PBT、PET	0.2 ~0.4
耐高温塑料	不含填料的 PSF、PEEK 等	0.5 ~0.7
	玻璃纤维增强的 PSF、PEEK 等	0.3 ~0.4

注射器开启时间在螺杆旋转塑化，即计量后退过程的 20% ~70% 之间。至少在塑化开始的 1s 之后。注射器打开的时间段 t 很重要。该时间应能保证超临界发泡剂能充分混合并溶入聚合物熔体。

发泡剂的流率 q 乘上注射器注入的时间 t，就是超临界流体的用量 M_{SCF}(g)。

$$M_{SCF} = 0.278qt \tag{13-7}$$

式中　q——SCF 的流量（kg/h）；

t——注射 SCF 的时间（s）。

超临界流体（SCF）注入熔体的压力在塑化的注入时间段（t），与料筒内熔体压力相等。合适的压力为 14 ~24.5MPa。SCF 注射器开启后，SCF 的压力波动不应超过 1.4MPa。

（3）外观质量的优化　微孔塑料注塑件没有凹陷的缺陷，制件的尺寸稳定。但不能期望有上好的表面质量。微孔塑料注塑件一般不用做外露的装饰件，而用于内置的结构件。为优化微孔塑料注塑件的表面质量，可换用氮气作为发泡剂，也可降低超临界流体的用量，注射速率先慢后快，提高熔体和模具的温度，还可以在塑料中添加填料，更有在模具型腔表面刻蚀纹饰，采用白色或浅灰着色。超临界流体的用量和注射速率是影响外观质量的主要因素。熔体温度和模具温度的影响程度较小。

气体发泡剂的逸出，在模腔壁面冷却作用下，注塑件上会有发白的银纹和流动痕迹。气体在注塑件表层内外夹气，形成大小气泡。下述的内泡气囊、表面气泡和爆胀问题必须克服。

1）内泡气囊。出现在注塑件上的内泡气囊直径为 6 ~ 10mm，有时更大，也有爆裂的可能。气囊的内壁光滑，也有较厚的泡壁。其成因是气体发泡剂没有溶于聚合物熔体。它具有较大的气压使泡壁膨胀。延长冷却时间不能消除内泡。

不含填料的结晶型塑料（如聚烯烃和聚甲醛）的注塑件中，经常会出现内泡气囊，也可见于 ABS 注塑件。提高微孔塑料注射工艺压力和熔体温度会有一定效果。调节超临界流体的用量达到最佳值是最有效的途径。

2）表面气泡。在注塑件的表面产生 1mm 以下的小气泡。它的表皮很薄，一般出现在浇口附近，常见于不含填料的聚烯烃、聚甲醛和聚碳酸酯注塑件中。

产生表面气泡原因是物料流经浇口时剪切速率过高。降低注射速度和改进浇口设计，可避免产生气泡。

注塑件上产生内泡气囊和表面气泡都有可能是由于发泡剂与聚合物的不相溶。如果在用氮气做发泡剂产生表面气泡，可考虑换用二氧化碳。

3）爆胀。当模具不能及时有效地冷却微孔塑料注塑件时，在开模瞬时的局部位置温度过高，微孔中的内压不被塑料刚性约束，以致注塑件上的这些位置上出现爆胀。爆胀在开模后仍有发生。

产生爆胀的原因是成型的注塑件上有热区。因此，改进注塑件和模具冷却系统设计是最根本的措施。在注射生产中可降低模具调节温度，延长冷却时间。

2. 微孔塑料注塑件和注射模设计

微孔塑料注塑件和注射模设计以传统设计为基础，又要注意区别。

（1）注塑件设计

1）减轻质量。微孔塑料制品的减轻质量幅度是用流程比考虑的。如图 13-39 所示，一般流程比为 100∶1 的注塑件，减轻质量不超过 15%。一般流程比为 150∶1 的注塑件，减轻质量不超过 10%。流程比是流程长度 L 与流程厚度 t 之比。在考虑流程比时，应该把注塑件从浇口算起，并将主流道算起的浇注系统的流程比累加在一起。

2）壁厚。微孔注塑件没有壁厚的限制，可以生产无凹陷的厚壁注塑件。常见的壁厚在 4mm 以下。大于壁厚 4mm 的注塑件要延长冷却时间。微孔塑料注射的优势在于能生产薄得多的制件。在注射 0.3mm 壁厚的注塑件时，仍能减轻质量 4% ~ 8%。尽管壁厚的确定有较大的范围，要更多地减轻质量，充模流程必须缩短或者增加壁厚。

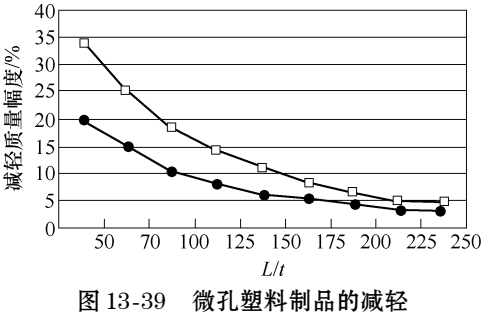


图 13-39　微孔塑料制品的减轻质量与流程比的关系

□—上限　●—下限

3）肋和凸台。微孔注塑件上的肋和

凸台，有良好外观，没有凹痕。肋的高度不应超过公称壁厚的 3 倍。过高的塑料肋会夹气。肋的每侧斜度为 1°，肋的根部半径为 1mm。

凸台的根部和转角处应有 1mm 的圆角半径。小于 2.5mm 壁厚的凸台高度方向应有斜度。台顶的壁厚为根部的 0.8 壁厚，不能过大。凸台孔的型芯应该用传热效率高的金属。型芯要有足够的刚性，安装稳固。凸台部位的排气要畅通。

（2）注射模设计　微孔塑料的注射模设计应遵循以下的原则。其中流动平衡和模具冷却最为重要。

1）热流道技术的应用。微孔塑料的注射模采用热流道技术，必须用针阀式可控制的喷嘴，以保证热流道内的饱和超临界流体的聚合物熔体，能承受 10～17MPa 的压力，防止熔料在热流道中发泡。热流道的阀式喷嘴在 24MPa 下不泄漏。另一个要求是一模多腔的热流道系统，必须实现完全的流变平衡设计，使所有型腔能被均衡注射充填。非均衡充模会使各型腔成型的注塑件的料量有差异。

2）成型收缩率。微孔注塑件依靠泡孔内压补缩。注塑件的收缩率比较均匀。未充填的微孔塑料的成型收缩率与减轻质量的幅度关系很小。与传统的塑料注射成型收缩率相同。玻璃纤维充填的微孔塑料也同样一致。充填颗粒填料如滑石粉的塑料，其微孔塑料成型收缩率随减轻质量增大，有轻微减小。而 PC/ABS 和 PPO/HIPS 等混合塑料，其微孔塑料成型收缩率随减轻质量增加，有稍微提高。

3）冷流道和浇口。主流道、分流道和浇口的设计，要考虑如下因素。

① 溶有超临界流体的聚合物熔体黏度较低。微孔塑料的注射不依靠保压补缩，不需要传递保压压力。因此，与传统的冷流道截面相比，尺寸要小。

② 微孔使塑料的导热性更差。如果流道中物料截面过大会增加冷却时间，以致增长注射周期。

③ 流道中塑料承受泡孔的内压，冷却固化后与流道壁面有较大的粘附力。在浇注系统的设计中要考虑流程比。因为流道截面越大，流程比越小，得到的注塑件减轻质量越大。并与注塑件的流程比累加在一起，受图 13-39 上减轻质量的限制。

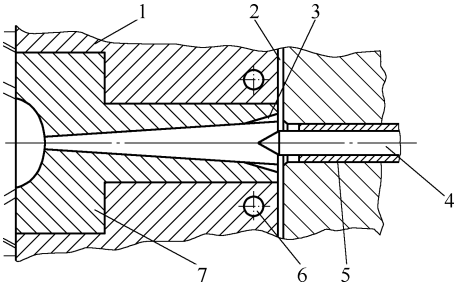


图 13-40　微孔塑料注射模的主流道

1—定模板　2—梯形分流道　3—转角处加扩锥面
4—高导热材料制造的冷却杆　5—推顶套
6—冷却水管　7—主流道杯

④ 微孔塑料的注射模上的主流道如图 13-40 所示，与传统的模具相比，其区别如下：

Ⅰ 主流道长度小于 50mm。

Ⅱ 主流道入口直径稍微大于注射机喷嘴的口径。

Ⅲ 主流道用 2°～6°的斜度。

Ⅳ 主流道与分流道的转角处采用 2～3mm 半径的大圆角；或者如图 13-40 所示，在分流道上方高 5mm，加扩锥面的半径 2～3mm。

Ⅴ 对主流道杯要加强冷却，增设冷却管道。

Ⅵ 在主流道的末端，伸入导热材料制造的冷却杆（图 13-40）可减少转角处的物料，有利冷却固化；添置推顶套，在定模中拉下主流道凝料后，将流道凝料从动模上推出。

所有的浇口类型在注射微孔塑料制品时都能采用，但潜伏式弯曲进料的小浇口很难采用。同流道截面设计一样，因物料黏度较低，浇口的截面比传统注射模可以小些。但过小浇口截面，会造成注射熔体的剪切速率过高，使制件材料烧伤变质。

对于应用点浇口的双分型注射模，点浇口引导圆锥的长度应小于 10mm，有较大的斜度角。这样可便于脱模。在流道的转角或相交处应有较大圆角。而且此流道板必须设置独立的冷却水路，有效冷却流道中的塑料。

选择浇口的位置，应该考虑塑料熔体充填型腔时流动均匀舒展，让注塑件在最低的压力下发泡，得到更大的减轻质量。与传统注射模相反，如果注塑件的壁厚厚薄有差异，则应将浇口设置在薄壁位置。因为微孔塑料的注射，不需要物料在保压时传递压力。这样能得到较大减轻质量的注塑件。此外，微孔塑料制品上的浇口位置，一般不会考虑是否有碍外观。微孔塑料注射制品外观不佳，通常只安装在装备的内部。

4）排气。微孔塑料在低压下注射流动，依靠泡孔的内压充填型腔，很难将型腔中原有气体排除，容易在注塑件中夹气和生成气囊。模具排气不良，会增加注塑件中的内应力，也会使制品的减轻质量最小。更会使塑件的周边和边远部位欠注。纠正排气可使注塑件减轻质量从 5% 增加到 10% 左右。

排气主要利用分型面。微孔塑料注射成型时降低闭合的锁模力，也是促使排气的有效途径。在注射操作时降低锁模力，直到分型面产生溢料。模具设计和制造时，在分型面上开设排气槽，也可利用拉料杆和顶杆头与装配孔之间的间隙排气，并且在型芯或镶块的配合面上设置排气缝隙槽。

与传统的注射模相比，其排气设计有以下特征：

① 分型面上排气槽的宽度可增加到 5 ~ 12. 5mm。

② 排气槽的缝隙深度可取传统数值范围的最大值。

③ 在塑料熔体最后的充填部位，分型面上排气槽的宽度可增加 50% ~75% 。

④ 排气槽的气流方向的长度，不超过 0. 5 ~ 1mm。

⑤ 拉料杆和顶杆的配合段留有 0. 04 ~ 0. 05mm 间隙或细槽，供排气。

⑥ 分流道的每个换向转角处要有排气设置。

⑦ 过高和过厚的凸台和肋，要设置排气口。

⑧ 侧滑块上也应该有排气缝隙通道。

5）冷却系统。微孔塑料注射模的冷却系统有更高的要求。有效均匀地冷却注塑件是注射成型的关键。注塑件的冷却不均匀，不但延长冷却周期，还会在过热位置的表面产生爆胀。因此有如下建议：

① 采用导热性好的铍铜做型芯，或者做型芯中的镶嵌件。在不能设置冷却管道的热区，用铍铜制成导热销，用冷却水直接冷却长销的一端。

② 双分型面的型腔板，还有侧向滑块都设置独立的冷却回路。

③ 保证充足的冷却水流量，使冷却水在管道中处于紊流状态。

参 考 文 献

[1] 唐志玉. 塑料模具设计师指南［M］. 北京：国防工业出版社，1999.

[2] 詹姆士 F，史蒂文森. 聚合物成型加工新技术［M］. 刘廷华，张弓，陈利民，等译. 北京：化学工业出版社，2004.

[3] 凯尔文 T. 奥卡莫特. 微孔塑料成型技术［M］. 张玉霞，译. 北京：化学工业出版社，2004.

第 14 章　注射模具 CAD/CAE

20 世纪 90 年代以来，计算机辅助制造 CAM、计算机辅助设计 CAD，以及以有限元数值分析为基础的计算机辅助工程 CAE，有了很大发展。目前已经被工程技术人员掌握和应用。近年来，高级的三维软件又开发了注射模具智能化设计模块。这种注射模具专家系统，从注射制品的三维造型开始，进行注射充模流动等注射工艺分析，到模具装配体集成、模具零件机械加工的工艺规程优化和数控编程等，都能在计算机辅助下完成。

模具设计工作量占了模具工程所有工作的 20%。CAM 编制程序占了 8%。以高智能的模具设计知识、模具生产和设计信息的数据库、实体三维造型和集成的计算机技术为基础，模具优化设计提高了设计质量。如今网络信息技术发展，支持和延伸了注射模具的 CAD 设计。注射模具的设计和制造又向前迈了一大步。

本章介绍注射模具 CAD/CAE 的相关技术，为掌握高级的三维应用软件提供必要的基础知识。

14.1　注射模具 CAD 的相关技术

注射模具 CAD 是计算机技术发展的结果。下面首先介绍与注射模 CAD 有关的建模技术和基于约束的实体造型技术。

1. 建模技术

CAD 技术的核心是几何形体的构造，称为建模技术。几何建模采用一套合适的数据结构来描述三维物体的几何形状，形成供计算机识别和处理的信息数据模型。该模型包含了三维物体的几何信息和拓扑信息，用数学式加上边界条件描述几何实体的几何元素在欧氏空间中的位置和大小的信息。拓扑信息是几何实体中几何元素的数目和它们的连接关系。建模方法共有下述四种。

（1）线框模型　最早采用顶点和邻边来表示几何形状体。这种线框模型的建模方法简单易行，但一些 CAD 系统难以处理模型的剖切、消隐、渲染和干涉检查。

（2）表面模型　表面模型是用棱边的向量来定义形体的表面，再由这些面的集合来定义形体。它给予模型表面明确的定义，因而 CAD 系统能处理模型的剖切、消隐、渲染和干涉检查，但是对于形体存在于表面的哪一侧无法定义，只能用于物体的外形描述，很难进行物理性能计算。

（3）实体模型　在表面模型的基础上，对实体的存在给予明确的定义，因而能进行物理性能计算。

常用的几何形体生成和表示的方法有三种：构造几何实体（Constructive Solid Geometry，CSG）、边界表示（Boundary Representation，B-Rep）、CSG 和 B-Rep 的混合表示。

构造几何实体（CSG）是将任何复杂形体通过对简单的体素形体，进行正侧集合运算并配以平移、旋转等几何变换来表示。这种方法的数据结构简单，数据量小，且容易管理。每个 CSG 模型是个有效实体，其形体可以修改；但产生和修改形体的功能有限，局部操作较为繁琐，绘制和显示形体的时间较长。

边界表示（B-Rep）详细记录了构成形体的所有几何元素的几何信息和拓扑信息，直接用面、环、边、点来定义形体的形状和位置。这种方法能较快地绘制几何形体，可以使用多种操作和运算；但是数据结构复杂，数据量大，而且修改形体的操作比较困难，有时 B-Rep 有可能表示一个无效的形体。

由于 CSG 和 B-Rep 混合表示方法可以优势互补，现行的 CAD 系统大多采用 CSG 和 B-Rep 的混合表示方法，以 CSG 作为外部模塑，而 B-Rep 作为内部模型。在计算机内将 CSG 表示转换成 B-Rep，并同时保存两种数据。

（4）特征建模　CAD 系统除了满足自身的三维形体的几何信息和拓扑信息外，还必须为 CAE、CAM 和 CAPP（计算机辅助工艺规程系统）等提供产品工程所需的形状、精度、材料和装配等信息。

1）特征是几何形体携带的各种工程意义的性能，不同的应用有不同的特征定义。

① 形状特征：携带某些工程信息的几何形体，又分为体特征、过渡特征和分布特征。

② 精度特征：在工程设计和加工中使用的几何公差、尺寸公差、表面粗糙度和检测等信息。

③ 材料特征：确定物体材料的种类、物理性能、力学性能、热处理方式与条件等的信息。

④ 装配特征：确定装配体中各零件的位置关系、公差配合、功能关系和动力学关系等。

⑤ 分析特征：有关工程分析方面的特征。例如：力学应力的有限元分析中，物体的梁、板、筒和盒等的分类特征。

基于特征的造型方式，通过具有特定应用含义的特征，为用户提供高层次的工程设计的信息，有效地提高了设计效率和质量，还可方便地进行设计特征的可行性和相关性检查，并进一步组织更复杂的特征。

2）基于特征的造型方式实施过程有以下三个步骤。

① 建造一个特征库，库中的特征参量无具体数值。

② 从库中挑选所需特征构造积木式的零件模型，同时输入非几何的特征信息，实现特征实例化。实例化后，特征的参量有了具体的参数。

③ 利用特征的 CSG 和 B-Rep 表示进行布尔运算，得到由特征组成的整体零件模型。

综上所述，在 CAD 几何建模系统的基础上，特征建模技术与基于约束的实体参数化造型技术相结合，构成了基于特征的三维参数化造型系统。

2. 注射模 CAD 的特征建模

传统的 CAD/CAM 系统的本质是实体建模或基于表面的建模，已证明对注射模设计

而言是有缺陷的。下面讨论基于特征的计算机辅助模具设计方法。这将解决基于几何体的注射模 CAD 系统所面对的问题。

（1）特征概念　从工程角度，特征意味着零件或装配体的形状或特性。工程师通过它，可以联系有用知识和属性来构思零件或装配体。因此，特征与零件或装配体的物理和几何方面有关。从一个或更多的工程观点来说，有效且清楚的实体才有意义。特征可以被定义为以下几点。

1）特征是零件的一个物理因素。

2）特征可以被变换成通用的形状。

3）特征具有重要的工程意义。

4）特征具有预定的性质。

（2）特征建模　特征建模是用零件或装配体特征组成的一组数据结合。特征模型中间的每个特征，都是确定实体的直接表述。特征的形状可以表述为一组尺寸参数和几何与拓扑实体及关联的数据。特征的工程意义，在于提供特征或特征生成的格式化的功能。

在简单的讨论了特征的基本概念之后，将转入讨论特征在解决低级实体、设计意图校核和几何体的表面模型等问题。特征的主要优点是基于特征的零件模型能用一些高级的基元，并定义成可分离和再生的形状。特征的开放和闭合的性能，使得它能正确应用在一些范畴。对于加工零件、槽、基座、孔等，能被定义成切削特征。对注射模而言，侧凹槽又能被定义为成型加工特征。随着高级实体的使用，设计师可以将精力集中到功能描述和动作设计上。所以实体设计可以将高级实体和它们的关联迅速综合起来。

设计由应用实体来描述。特征建模比几何建模更加清楚地向设计师提供了一个更好的记录。特征提供了模型和设计推理之间联系的基础，所以它支持变更修改。

基于特征的模型创建技术，可以分为两大类，即特征识别和根据特征的设计。特征识别技术的特点是从几何模型中，提取并识别特征。这种技术分成交互特征识别和自动特征识别。交互特征识别系统中，首先创建几何模型，接着由用户在零件的影像上拾取实体；而自动特征识别系统中，部分几何模型将与预设好的特征模式进行比较。

自动特征识别的次要任务如下：

1）装配来自几何学模型的附加的数据结构，促进特征的搜寻。

2）寻找几何学的模型和几何学的模型相配拓扑。

3）提取来自几何模型的识别特征。

在所有的基于特征的设计技术中，零部件创建时直接使用特征，而且几何模型从特征产生。需要 CAD 系统在特征库中给予特征定义专门的参数和位置参量，可参考特征的定位和各种其他属性。

3. 基于约束的实体造型技术

传统的实体造型技术是属于无约束的自由造型。现代基于约束的实体造型技术有两种指导理论。一种是以 PTC 公司的 Pro/ENGINEER 软件为代表的参数化实体造型理论；另一种是以 SDRC 公司的Ⅰ-DEAS 软件为代表的变量化造型理论。

（1）参数化造型技术　参数化设计是随着约束的概念引入 CAD 技术而出现的，又称为尺寸驱动。对零件上各种特征施加约束的形式，各个特征的几何形状与尺寸大小用变量的方式来表示。这个变量不仅可以是常数，也可是某个代数式。如果定义某个特征的变量发生了变化，则零件的这个特征的几何形状或尺寸大小将随着参数的变化而改变，又随之刷新该特征及其相关联的特征，而不需要再重新画图。参数化设计技术为初始设计、产品模型的修改、系列零件族的生成、多方案比较等提供强大的手段。

参数化造型技术的主要特征如下所述。

1）基于特征。将某些具有代表性的平面几何形状定义为特征，并将其所有尺寸存储为可调参数，进而形成实体，并以此为基础进行更为复杂的几何形体的造型。

2）全尺寸约束。约束包括尺寸约束和几何约束。图形形状的大小、位置坐标、角度等均属于尺寸约束。几何约束包括平行、对称、垂直、相切、水平和铅直等非数值的几何关系的限制。全尺寸约束将图形的形状和尺寸联系起来考虑，通过尺寸约束来实现对几何形状的控制。造型时有完整的尺寸参数是全约束，漏注尺寸为欠约束，过多注尺寸是过约束。

3）尺寸驱动。对初始图形给予一定的约束，通过尺寸的修改，系统自动找出与该尺寸相关的方程组再重新求解，驱动几何图形形状的改变，最终生成新的模型。基于尺寸驱动的方法是较成熟的参数化造型方法。

4）全数据相关。它彻底克服了自由建模的无约束状态。尺寸参数修改使相关模块中的相关尺寸得以全盘更新。几何形状均以尺寸的形式而被控制，要改变零件的形状，只需修改尺寸数值。

（2）变量化造型技术　变量化造型技术是在参数化造型技术基础上，针对参数化造型技术存在的问题进行改进后的设计方法。变量化造型技术保留参数化造型技术的基于特征、尺寸驱动和全数据相关的优点，又对全尺寸约束的缺点做了重大的改造。变量化造型技术有以下五个特点。

1）几何约束。在新产品开发的概念设计阶段，设计者首先考虑的是设计思想在几何形状中予以体现。至于各几何形状和各形体间的位置关系在概念设计阶段还很难完全准确确定。设计师希望在设计初始阶段允许不标注尺寸为欠约束。这样有利于发挥设计人员的想象力和创造力。因此，在变量化造型技术中，将参数化造型技术中的尺寸参数进一步区分为形状约束和尺寸约束，而不是参数化造型技术中只用尺寸来约束全部几何图形。

2）工程关系。在新产品设计时，除需确定几何形状外，还会涉及载荷等一些工程问题。变量化造型技术除了考虑几何约束外，把工程关系也作为约束条件，直接与几何方程联立求解。

3）超变量几何技术。超变量几何（Variation Geometry Extend，VGX）技术充分利用形状约束和尺寸约束分开处理而无需全约束的灵活性。设计者可以针对零件上的任意特征，以拖动方式直观又实时地进行图示化编辑修改。VGX 技术有如下优点。

① 在全尺寸约束及欠约束情况下均可顺利完成造型。

② 模型修改可以在造型历史树上超越，可以在不同“树干”的特征上直接建立约束关系。

③ 可直接编辑 3D 实体特征，无需回到生成该特征的 2D 线框状态。

④ 可用拖动式修改实体模型，尺寸也随之自动更改，而不是只有尺寸驱动一种方式。

⑤ 拖动时显示多种方案，而不是只有一种方案。

⑥ 用拖动式修改 3D 实体模型时，可直观预测该特征与其他特征的关系。而以尺寸驱动一种方式修改实体模型时，很难预测尺寸修改后的结果。

⑦ 模型的修改允许形状及拓扑关系发生变化，而并非限于尺寸数值的变化。

4）动态导航技术。动态导航（Dynamic Navigator）技术是指光标处于某一特征位置时，系统自动显示有关信息，例如空间位置和特征类型等，并自动增加有利约束，预计下一步的操作。因此，动态导航技术是智能化的设计参谋。

5）主模型技术。它以变量化造型技术为基础，完整表达产品的信息。它包括有几何信息、形状特征、变量化尺寸、拓扑关系、几何约束、装配顺序、装配、设计历史树、工程方程、性能描述、尺寸及几何公差、表面粗糙度、应用知识、绘图、加工参数、运动关系、设计规则、仿真结果、数控加工、工艺信息描述等。主模型技术成功地将曲面和实体表达方式融合为一体，给产品的设计和制造的各阶段提供统一的产品模型。

（3）两种造型技术的主要区别　参数化造型技术与变量化造型技术的区别有以下三个方面。

1）对约束的处理方式不同

① 参数化造型技术在设计的全过程中，将形状约束和尺寸约束联合在一起考虑，通过尺寸约束实现形状约束控制；变量化造型技术是将形状约束和尺寸约束分开处理。

② 参数化造型技术在欠约束时，造型系统不允许执行后续操作；变量化造型技术允许欠约束和全约束状态，尺寸是否标注完整，不影响后续操作。

③ 参数化造型技术中工程关系不直接参与约束管理，而由单独的处理器处理工程关系；变量化造型技术中工程关系作为约束，与几何方程耦合，再通过约束解算器直接解算。

④ 参数化造型技术解决的是全约束下的几何图形问题，实现尺寸驱动几何形状的改变；变量化造型技术解决的是任意约束下的产品设计问题，可以尺寸驱动和约束驱动，即由工程关系驱动几何形状的改变。

2）应用领域不同

① 参数化造型技术适用于技术比较成熟，产品种类相对固定的行业。其零件形状基本固定，标准化程度较高，常可以通过已有图样修改设计新产品。参数化造型技术常用于常规设计或革新设计。

② 变量化造型技术的造型过程类似于开拓设计，把满足设计要求的几何形状放在第一位，然后再逐步确定尺寸。变量化造型技术比较适用于创新式设计。

3）特征管理方式不同

① 参数化造型技术在整个造型过程中，将构造形体的所有特征按先后顺序进行串联式排列，并置于关系树中。每个特征与前面的特征存在明确的父子关系。当修改或删除某一特征时，子特征可能失去了存在的基础。这样很容易造成数据混乱，甚至使操作中断或失败。

② 变量化造型技术构造形体的全部特征，不但与前面的特征存在关联，而且与全局的坐标系建立联系。用户对前面的特征修改时，后面的特征会自动更新。当删除某个特征时，与它有联系的特征会自动解除关联。系统对这些特征在全局坐标系中重新定位。变量化造型技术在修改或删除特征时，不会造成数据混乱。

4. CAD/CAM 技术发展趋势

（1）集成化　最初，CAD/CAM 系统的各单元技术几乎是单独发展的。为了充分发挥 CAD 技术和 CAM 技术的潜力，将它们融合在一起，最早实现 CAD/CAM 集成。

CAD/CAM 系统的集成不是两种软件的单纯合并，而是在计算机集成制造理念下（Computer Integrated Manufacturing，CIM），采用多方面的计算机技术。CIM 理念对企业的各种生产作统一的综合考虑，将与制造有关的产品设计、技术和管理的信息采集在一起，包括产品设计、零件制造及检验、零部件装配、原材料供应、零部件及产品的库存等，实现计算机全程控制。CAD/CAM 系统的集成具有以下特征。

1）实现参数化造型和变量化造型特征，建立包括几何形体、工艺规程、制造过程和企业管理等完整信息的产品数据模型。

2）采用标准化的数据交换技术，实现异构环境下的信息集成，且能面向各种 CAD/CAM 系统。

3）采用标准化的计算机图形处理技术，能面向各种图形设备。

4）采用数据库技术，使所有功能模块的信息集中在统一的工程数据库下。

（2）智能化　产品设计过程需要大量知识、经验和技巧，是复杂又富有创造性的工作。设计过程不仅有数值计算，也会有推理型问题，例如方案的设计、选择、优化和决策等。随着人工智能技术、计算机的知识工程和专家系统的发展，非数据和非算法的信息处理日趋成熟。

将人工智能技术、知识工程和专家系统技术引入到 CAD/CAM 领域中，形成智能的 CAD/CAM 系统。专家系统实质上是一种“知识”加“推理”的程序，将知识和经验结合在一起，使它具有逻辑推理和决策判断能力。现在大型 CAD/CAM 系统都有软件智能化的开发。

近年来，注射模具自动化设计技术有较大的发展。有关智能化计算机辅助注射模具设计的研究工作有：注射模具的装配建模、定义注塑件的最佳脱模方向、通过分型自动创建型芯和型腔、多型腔的自动布局等。

（3）标准化　CAD/CAM 标准体系是开发应用 CAD/CAM 软件的基础，也是促进 CAD/CAM 技术应用普及的手段。其中图形标准最为重要，CAD/CAM 软件的标准化是指图形软件标准。

图形标准是一组由基本图案和图形属性构成的通用图形标准系统。图形标准按功能可分成三类。

1）面向用户的图形标准，例如图形核心系统 CKS、程序员交互式图形标准 PHIGS 和基本图形系统 CORE。

2）面向不同 CAD 系统的数据交换标准，例如初始图形交换规范 IGES、产品数据交换规范 PDEP 和产品模型数据交换标准 STEP。

3）面向图形设备的图形标准，例如虚拟设备接口标准 VDI 和计算机图形接口标准 CGI。

近年来，注射模具的标准化有较大发展。注射模具的模架和许多附配件都已进入 CAD 软件的数据库。设计师能方便调用它们的二维或三维图形。

（4）网络化　网络技术是计算机技术与通信技术相互结合的产物。自 20 世纪 90 年代以来，计算机网络技术的发展推动了模具的异地设计和制造。将分散在不同地点的多台计算机连接起来，许多设计人员可以异地共享信息资源。一个项目可以由多家企业在不同地点共同完成。敏捷制造（Agile Manufacturing）模式的理念，就是利用 Internet 网络将各地的人力资源和设备资源组合起来，建立动态联盟以快速响应市场变化。

（5）最优化　传统设计制造的模具可靠性较差，产品设计和工艺过程的最优化始终是追求的目标。目前，大多数模具 CAD/CAM 系统中使用的设计方法与传统设计的方法基本相同。系统采用交互方式运行，当遇到复杂问题时，由设计人员进行判断和选择。因此，设计和制造的模具难以保证一次试模成功。

应用仿真技术和形成过程的计算机模拟技术是解决模具可靠性的重要途径。利用有限元和边界元方法模拟材料的流动，分析材料的成型过程，从而预测所设计模具是否可行；同时检验模具设计方案，获得较优的设计。在数控编程时，用仿真技术模拟加工过程。计算机分析加工状态，判断干涉和碰撞，有助于确定最佳路线，保证机械加工的效率和质量。

14.2　注射模具 CAD

注射模具计算机辅助设计系统 CADIMDS（Computer-Aid Injection Mold Design System）包括塑料注射模具和金属压铸模，经学术界和工程界的长期努力，在 CAD/CAM/CAE 工具在近 30 年来有长足的发展。在塑料注射模具的结构设计、分析和制造等方面能够辅助模具设计师完成大量的工作。

14.2.1　注射模具 CAD 设计方法

无论是专门注射模具 CAD 软件，还是机械 CAD 软件中的注射模具功能模块，都具有下述 CAD 设计过程和分型、浇注系统、模架、冷却、脱模、滑块和斜顶杆设计功能。

1. 注射模具设计过程

注射模具有众多功能和多样的结构，所以设计一副注射模具是个复杂的任务。有经

验的设计师的知识和技术，是设计成功的关键因素。模具设计师不仅能正确设计成型制品的型芯和凹模型腔，还要让塑料熔体经浇注流道系统输送能完全充满型腔。各功能部件的位置和方向要正确，确保它们装配后有良好工作性能。在得到注射制品设计的全部信息之前，设计师首先要决定使用何种注射机，考虑制件质量和模具制造成本的要求，然后布置型腔并设计流道。在最初的设计之后，继续进行最终细节的设计，比如浇口、脱模机构、整体结构、侧滑块和斜顶杆等的设计。

为了设计好模具，在设计过程中常用工程法则和反复试验相结合方法。这往往要较长的周期。但迅速变化和充满竞争的市场，要求在很短的周期中制造出优质的模具。为了解决这个问题，CAD/CAM 被引入到注射模具的设计和制造中来。图 14-1 系统地显示了用 CAD/CAM 系统，进行交互式或半自动的模具设计过程。

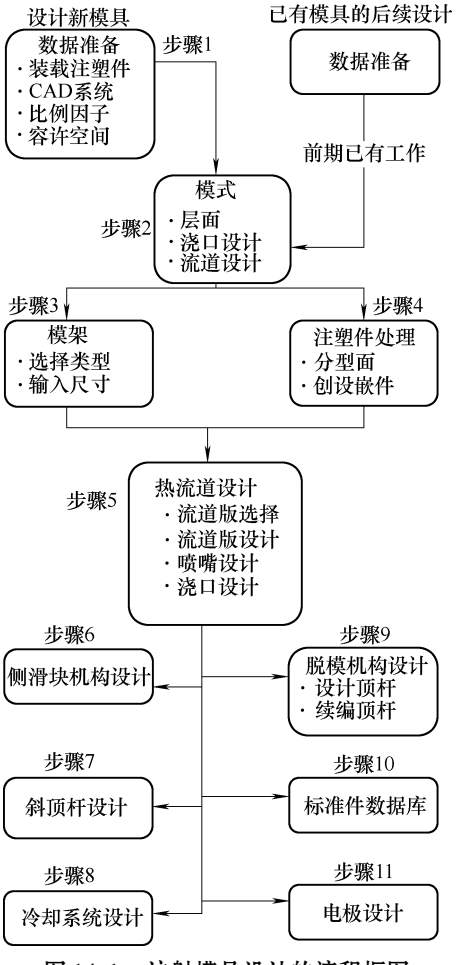


图 14-1　注射模具设计的流程框图

步骤 1：加载注塑件造型。数据的准备工作要求设计师完成下面的工作。

① 加载注射制品模型。

② 制定模具的开模方向和比例因子。

③ 创造三维容许空间。

步骤 2：层面分布、浇口和流道的设计。浇口和流道的层面分布，在流动填充设计中完成。该步骤要求设计师完成下面的工作。

① 定义模具的型腔。

② 在制品模型上设置浇口。

③ 浇口间的流道设计。

步骤 3：装载模架。开始模具设计的时候，设计师要用到模架模块。

① 定义模架的类型。

② 选择模架系列。

③ 确定模架的尺寸和其他必要的说明。

步骤 4：分型面和嵌件的设计。分型面设计中要求设计师完成下面的工作。

① 定义分型面来设计型芯和型腔。

② 设计必要的嵌件。

步骤 5：设计热流道系统。利用热流道模块来设计热流道系统，需要完成下面的工作。

① 定义流道板的类型。

② 设计喷嘴和流道系统。

步骤 6：设计侧滑块。对于注塑件的外侧槽和孔，设计师利用侧滑块模块，设计侧向分型抽芯机构的所有零部件。

步骤 7：斜顶杆的设计。在斜顶杆的设计模块中，设计师将按照内部侧凹部和不通孔要求设计斜顶杆机构的斜顶杆与滑块等零部件。

步骤 8：冷却系统的设计。在冷却系统模块中完成冷却系统的设计，设计师需要完成下面的工作。

① 为型芯、型腔凹模、模板、滑块、斜顶杆等结构设计冷却管道。

② 为冷却系统添加标准的冷却附件。

步骤 9：注塑件脱模机构的设计。这一步在脱模设计模块里完成下面的工作。

① 定义从模具里脱出注塑件所需要的顶杆。

② 按照设计需要选择不同种类和尺寸的顶杆。

步骤 10：添加标准件。这个步骤在标准库模块里完成。设计师需要定义并找出标准零件，如内六角螺钉和定位圈等，来完成模具设计。

步骤 11：用于 CAM 的电极设计。这一步在电极设计模块里面完成下面的工作。

① 定义电极的几何边界。

② 设计装夹电极的固定板。

新模具的设计，要先装载注塑件，然后从步骤 1 开始到步骤 10。后面几个步骤可以插在任何两步之间。

2. 注射模具的设计要点

（1）分型　模具的分型位置由注塑件上型芯和型腔界面决定。模具设计师通常按注塑件和客户的要求来设定分型面，以便简化模具的复杂程度，并降低成本。分型设计毫无疑问是模具设计中的重要的一步。智能化的分型是优化设计型芯和型腔的过程。由注射模 CAD 分析：分型后两半模的成型体积、分型面的投影面积，比较注塑件在开模方向和侧向的凹凸区域，能自动提取最佳分型开模方向，创建分型线和分型表面，也同时抽离出侧型芯和侧型腔。图 14-2 显示了分开的型芯和型腔部分。

（2）浇注系统的主流道、流道和浇口　浇注系统包括主流道、流道、冷料井和浇口。它是模具设计中的一个重要部分。熔化的塑料在流经流道后，浇口是让其注入模具型腔的细小的通道。完成对模具里全部注射，应包括型腔、主流道、流道、冷料井和浇口的空腔。主流道是塑料熔体首先进入的通道。浇口是进入注塑件型腔、调节熔料压力和流量的门口。浇口的位置对决定塑料如何流进模腔十分重要。

在浇口设计的选项中有十几种不同的类型。包括直接浇口、侧浇口、潜伏式浇口、扇形浇口（图 14-3）等。设计师采用常用的浇口类型，很容易从浇口库中间选取。CAD 系统能自动或是半自动地拾取并呈现。

流道是模具里分配和传输熔融塑料的通道，塑料通过浇口流入型腔。流道设计模块给出详细说明，有常用流道的交互式菜单框，并提示布置的场合。这个设计模块提供了一些基本的流道形状，例如圆形、半圆形、U 形、梯形、六边形等，便于造型设计。浇

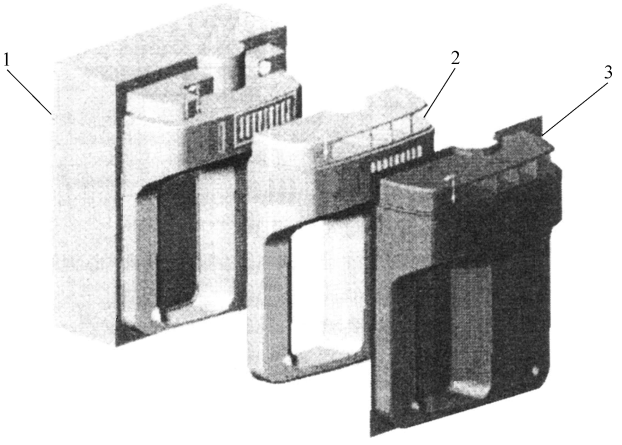


图 14-2　型芯和凹模型腔

1—动模上型芯成型面　2—塑料成型制件　3—定模上凹模成型面

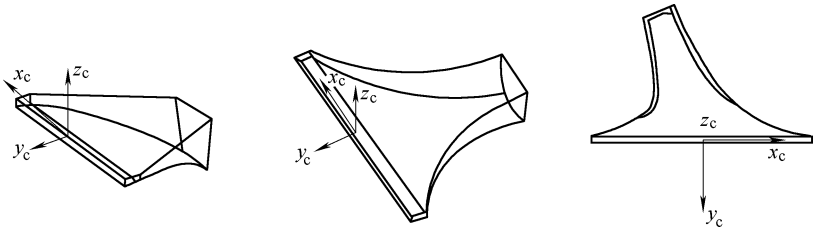


图 14-3　扇形浇口

注系统的表面形状、尺寸、长度和体积，对成型的质量有很大的影响，对熔融的塑料流体应选择最短输送距离、最光滑和最小的弯曲半径；选择散热面小，流通量大的截面形状。

现有注射模 CAD 系统的浇注系统设计，实质上是经验设计，只是辅助主流道、流道、冷料井和浇口的几何造型，而且是塑料制件造型的延展。科学的浇注系统应按照第 8 章的设计理论，依赖塑料熔体流动的非牛顿性，以合理的剪切速率，限制和平衡流道中熔体流动的压力损失，计算出最佳的几何尺寸。还需要在浇注系统和注塑件造型后，用注射流动的 CAE 分析软件校验并进一步优化。图 14-4 所示是一模四腔浇注系统。图 14-5 所示是一模单件和一模多腔的浇注系统。

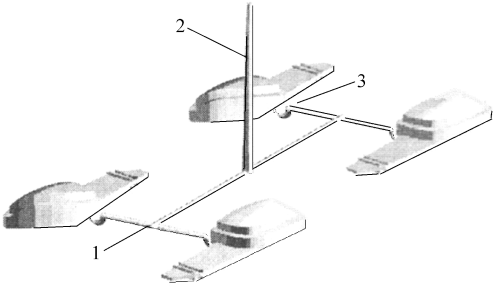


图 14-4　一模四腔浇注系统

1—分流道　2—主流道

3—潜伏式浇口

（3）模架　图 14-6 所示为整副模架的零部件。模架为模具制造者提供的主要的标准零件，并由客户的要求迅速定制。模架

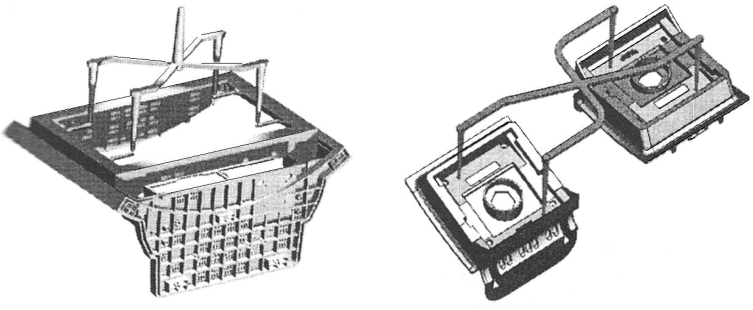


图 14-5　一模单件和一模多腔的浇注系统

尺寸是根据总体布局来确定的。模架尺寸必须标注公差。因为模架的模板和嵌入零件之间有配合精度要求。模具设计师根据这些要求选择最小的模架。系列标准约定的模架大小差值为 100mm。无论米制还是寸制，市场上常用的模架有 HASCO、DME、FUTABA、LKM（图 14-6）、HOPPT、STIEHL 和 NATIONAL 等。模具设计师选择其中能满足要求的模架，保证在模架的选择和销售方之间能很好地协调。

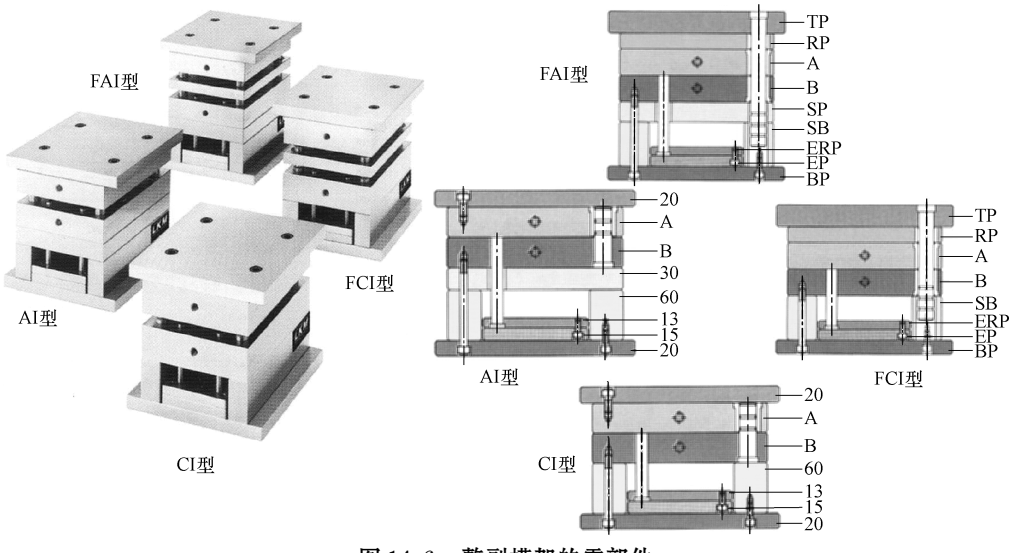
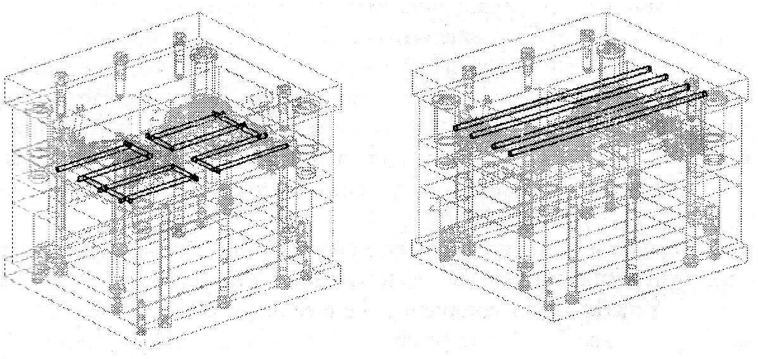


图 14-6　整副模架的零部件

AI 和 CI—直浇口浇注系统模架（二板模）　FAI 和 FCI—简化点浇口浇注系统模架（三板模）

（4）冷却　模具中合理的冷却系统对注射成型的质量至关重要。熔化的塑料充满模腔后，需要经设计好的通水管道来冷却。塑料固化成型时必须通过一定位置的管道里的流水携走热量。冷却效率由模具的热导率、塑料的融化温度和成型件的厚度来决定。为了达到最佳的冷却效果，冷却管道的布置十分重要。动模型芯和定模型腔应该有两个独立的冷却循环回路，见图 14-7。冷却管道必须精确布置，不能和其他零件（如顶杆等）发生干涉。通常使用的冷却系统设计方案包括平面折回式冷却、螺旋式冷却、挡片冒泡式冷却、喷泉式冷却等。



a)　　b)

图 14-7　冷却循环回路

a）在型芯上　b）在型腔上

现有注射模 CAD 系统的冷却系统设计，实质上是经验设计，只是辅助对冷却管道的几何造型，而且是对模具的贯通管道的挖空。科学的冷却系统应按照第 11 章的设计理论，遵照传热学，进行模具注射和固化热平衡计算，保证合理的冷却效率和时间，获得冷却管道的传热面积和冷却液的物理参量，还需要在冷却管和注塑件造型后，用注射成型冷却的 CAE 分析软件校验并进一步优化。图 14-8 所示为平面折回式的冷却系统，用于冷却截面一致的大平板注塑件。



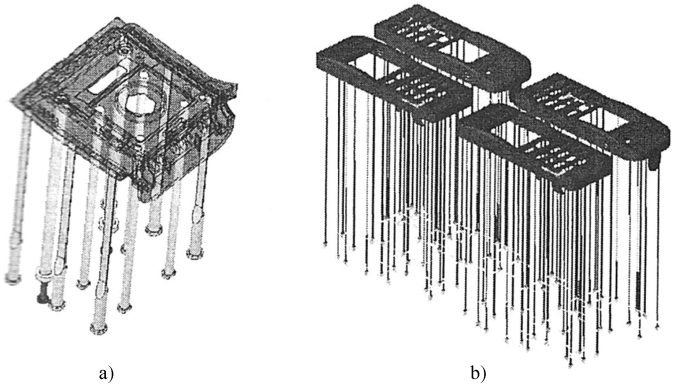
图 14-8　平面折回的冷却系统

（5）脱模　脱模是注射成型中的主要步骤之一。注射成型的最后，从脱模板上面传递过来足够的脱模力，注塑件被脱出。模具设计师经常会忽略注射件受力表面上脱模力的平衡问题。模具设计师应根据经验和简单的计算，获知脱模力和脱模力矩。现有的 CAD/CAE 软件，这方面的功能还是空缺。

在成型制件冷却固化后，要用顶杆和顶管等机构完成脱模。脱模机构通常设在注塑件的边角等位置。每个顶杆接触表面都应受到大于需要的顶出力，并为注塑件的强度和刚度所容许经协调的所需顶出力。否则，会使注塑件粘附在型芯上，或者使注塑件在相应位置上变形或损坏。图 14-9 所示为单型腔和一模四腔的两种脱模机构。

设计师在决定脱模位置时必须考虑到，每个顶杆都会在注射成型制件上留下可见的印迹。不良的位置将导致明显的印痕。完成脱模机构的设计后，必须对底面上的接触压力进行校核，以防止出现过深的印迹或顶杆戳穿薄的注塑件。

另外，还要检查小直径顶杆是否受到冲击。小顶杆的破损是经常发生的，尤其是在顶出金属嵌件时。有关脱模机构的力学分析，详见第 10 章。



a)　　b)

图 14-9　模具的脱模机构

a）单型腔　b）一模四腔

设计脱模机构期间，CAD/CAM 系统会给出执行界面，能半自动地设计顶杆。此系统应用平衡原理，并编入和引导认识注射成型特征，推荐优化解决方案。它有判别功能，能校核顶杆与模具零件，例如校核冷却管道的干涉。但是，由于注塑件从型芯上强制脱模是复杂的物理-机械过程，所需顶出力还是凭经验估测，计算中需较大的安全系数。

（6）侧滑块和斜顶杆　侧滑块和斜顶杆是用来成型制件的外表面和内表面的机构。对于那些不能直接利用凸凹模成型的注塑件，成型外侧的表面要用到斜滑块，成型内部的表面要用到斜顶杆。在开模时，为了避免注塑件与成型零件干涉，并损坏成型零件，滑块和斜顶杆要先撤回。根据成型表面的形状，设计师首先选择滑块和斜顶杆的类型，并设计它们的头部形状，然后，设计者将会设计滑块主体部分和斜导柱的模型，并决定它们的尺寸。这些参数确定之后，在滑块头部选择连接的面。该面要能够让滑块及斜导柱装入模具中，如图 14-10 所示。接着，设计师要为滑块设计诸如定位装置、导滑槽、耐磨压板和锁紧楔等附属零部件。这些组件的类型是依照客户订单来选择的。在 CAD 环境下，模具设计师只需要确定或者变更这些参数的数值，这些零部件会自动地被装配到滑块上。型芯或型腔上面的外形能够自动地产生。斜顶杆头部的形状由注塑件的内表面来确定，而滑块头部却依照注塑件的外表面确定。斜顶杆的设计方法和滑块的设计方法是一样的。

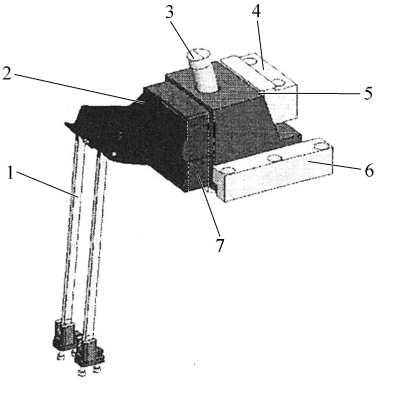


图 14-10　滑块和斜顶杆的装配体

1—斜顶杆　2—塑料制件　3—斜导柱
4—锁紧楔　5—侧滑块　6—压板
7—侧向成型块

（7）热流道　热流道系统常是有流道板的系统，或者认为是流道凝料较少的成型方

法。与冷流道系统相比，在热流道中，塑料保持熔融状态，并不随着成型制件一起脱出。在骤冷的浇口以上，流道中间的塑料都处于熔融状态，有助于减少注射循环时间。没有主流道和流道凝料，能节省塑料，能降低成型后清理和去除浇口的成本。在局部温度变化强烈的熔料输送中，对充模和流动性能的控制较好。

典型热流道系统的主要组件如图 14-11 所示。在市场上有许多种热流道系统，如单喷嘴、带流道板的多喷嘴等。其类型是由模具设计者和热流道装置制造者共同选择确定的。外部加热系统和其他的类型相比，温度控制较好。但它需要考虑模具各零部件的热膨胀。这增加了制造成本和设计的复杂程度。

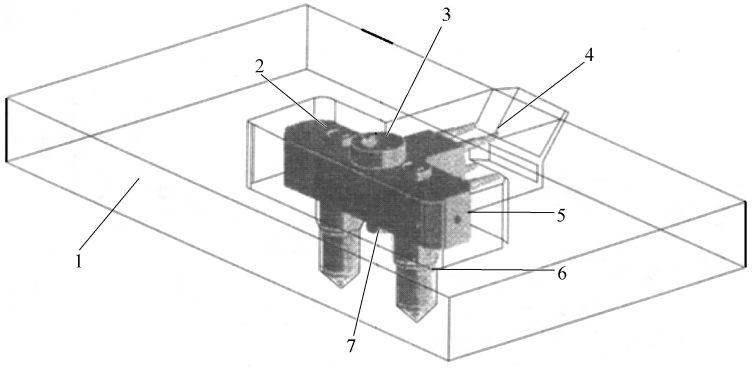


图 14-11　热流道系统的主要组件

1—定模框板　2—承压圈　3—主流道喷嘴　4—热电偶和加热器的接线端
5—热流道板　6—多喷嘴　7—中央定位销

（8）标准件　如图 14-12 所示的标准件，包括各种连接件、水管接头、定位锁块、定位圈、主流道杯、侧挡块和支撑柱等。为模具选定各种零件后，设计师就可以将它们添加到模具装配体中，也很容易添加到预设的模架上。这些标准化组件的模型已经参数



图 14-12　标准件

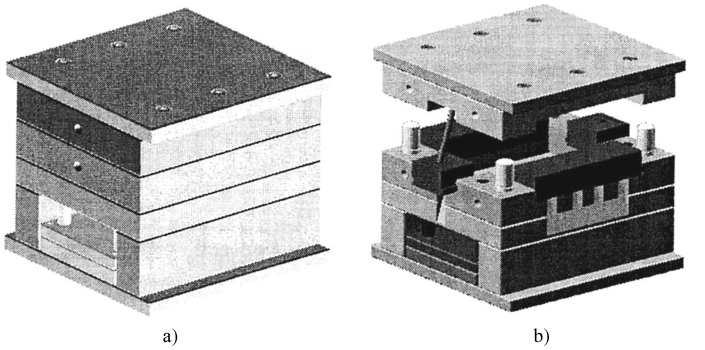
化，只需要变更这些模型的尺寸参数和特征。模具设计师使用供应商的标准件，能缩短模具制造周期，模具的维修更加容易。用标准件制造模具的成本，低于自己设计和制造所有零部件的模具成本。其他辅助系统和机构，如冷却系统、脱模机构、浇注系统、型芯的固定件和附件等，也应该考虑降低成本而采用标准件。

14.2.2　注射模具 CAD 的装配

注射模具是由单独制造的成型零部件和相关联的机构与系统结构装配而成。塑料制件直接决定型腔的几何形状和尺寸。因此，型腔的成型零部件是单件制造的。但是注射模具中输送和分配熔融塑料的浇注系统、注塑件的冷却系统、脱模机构和合模导向机构等，其结构设计和几何形状通常是相似的。尽管尺寸会随着塑料制件变更，但它们的结构和几何形状不随注塑件改变。CAD 交互式和半自动的设计方法，将使任务变得简单。这些方法也可以应用到三维设计系统，进行 CAD 的装配设计。

1. 注射模具的 CAD 开发设计过程

图 14-13 显示了典型的注射模具的闭合状态和打开状态。在模具中有侧滑块和斜顶杆时，在开模和脱模阶段必须确定所有零件和组件都没有互相干涉。过去设计的三维模具，最后的装配和检查十分耗时，且依赖经验。现在，模具行业的大部分设计人员都已经用三维的设计方法。计算机辅助的方法，使模具的装配工作易行，并有利提高注射模具设计的质量。



a)　　b)

图 14-13　三维的注射模具装配体

a）模具闭合　b）模具打开

一副注射模具的传统设计步骤如图 14-1 所示。现今，新注射模具 CAD 开发设计过程可以分为五个主要阶段，如图 14-14 所示。

在第一阶段，一个新塑料制品生产方案被市场和工程经办人商议推出。讨论的焦点是分析市场机遇并制定与之适应的策略。在第二阶段，考虑与设计过程有关的制造信息，得到注塑件的几何造型或计算机造型设计注塑件。设计概念被转化为可制造的几何形体。在第三阶段，设置开模方向和分型面的位置，并用来检验注射成型的可行性。在这个过程中，注塑件形状和尺寸也会加以修正。在第四阶段，由注塑件形体确定型芯和

型腔，并用来设计成型零件。在这时，必须考虑到塑料注射成型收缩量。在注射成型的冷却温度下，得到尺寸和形状精度的注塑件。浇口、流道、排气槽也将加上。在这个阶段，几何数据和成型信息之间的协调将是决定性的。在第五阶段，详细的模具设计，包括注射机和模具的连接结构，将冷却系统和脱模机构集装到模架上。

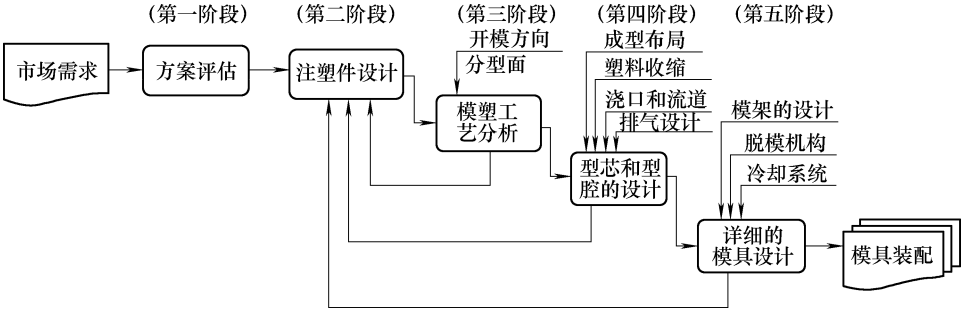


图 14-14　注射模具 CAD 设计过程

一个被整合的 CAD/CAE/CAM 系统首先将塑料制品图交互式地转换成模具型腔图，依照需要，系统可以模拟塑料熔体流动过程，并分析流道的平衡浇注；然后，通过使用注射模具设计专用的功能模块支持注射模具设计，工具模块处理 CAD 实体，而且允许将添加的信息（诸如加工工艺信息等）编入，使用者可以创建或者修改标准件设计，并通过关联数据库把它们联系在一起；最后，为模具零件金属切削，确定数控加工轨迹。整合的 CAD/CAE/CAM 系统称为知识库类型的注射模具设计系统，这个模块结合在 Unigraphics 软件和 Pro/E 系统中。它们包含了模架和标准零配件的设计数据库。

当模具装配或者运行功能系统时，机械装配系统包含了大量的零件。当设计机械装配系统的时候，首先应选择构成系统的零部件，并且描述它们之间的装配关系，然后进行各零部件的详细设计。因此，设计一个机械装配系统通常可以分为概念设计和详细设计两个阶段。在概念设计期间，重点是选择收集组件，并将它们之间的关系描述清楚，以便在它们装配时，能够提供所需要的功能。完美无缺的几何特征描述，是详细设计阶段的焦点。此时设计师的目标是通过受制约的概念设计，得到期望的性能。大量的过程分析、零件的装配和制造可行性分析等方法，能使设计最优化。常用的 CAD 系统，主要关注详细几何数据的产生和利用。因此，使用这些系统，进行详细设计是很方便的。然而它们不能支持抽象的机构运动学和零件的强刚度设计。普通 CAD 系统需要增强支持概念设计的功能，还需要对机构零部件和模具的装配与分解等提供更多的支持。

2. 注射模具装配的概念设计

有两种方法可以实现模具装配的概念设计，如图 14-15、图 14-16 所示。

自上而下的设计是一种装配概念的设计方法，是指主要零部件抽象构思并得到预期的关系。在这种方法里，设计者是从抽象的概念开始，并在设计零件时归结到合理的可装配构件。图 14-15 所示自上而下的装配设计过程，首先是从装配概念上设计侧滑块机构，然后在约束条件下，分解部件和进行零件的详细的几何尺寸等方面的设计。过去传

统设计注射模具时，自然应是自上而下的设计方法，概念设计这种方法能较为自然适用。

由下而上的设计方法，是在设计模具装配体之前，完成所有的构成零件和部件的详细设计，然后将它组合成合理模具装配体，直到零件满足要求的为止，如图 14-16 所示。

然而，有的注射模 CAD 系统只支持装配构件展开的自下而上的设计方法。在设计和布局之前，所需要的结构零件和部件已经有了。大型的 CAD 系统应该支持自上而下的装配设计方法，并以注射模 CAD 设计模块，兼容自下而上的设计方法。

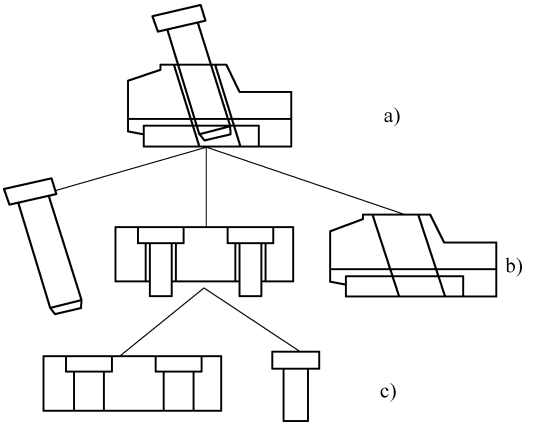


图 14-15　自上而下的装配设计过程

a）装配设计　b）拆解成零件和部件

c）进一步拆解成零件

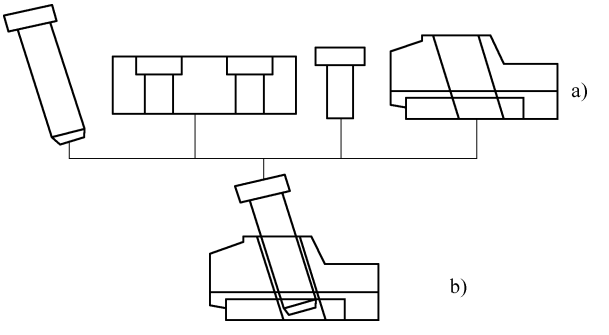


图 14-16　自下而上的装配设计过程

a）零件和部件设计　b）装配设计

关于计算机辅助装配设计的调查显示，实行概念设计时，大多数会采用自上而下的设计方法。因此，用于装配设计的 CAD 系统，应该支持自上而下的方法。在概念设计的初级阶段，焦点在主要零部件的规格和被要求的关系上。这些规格可能由数字参数和公式描述。但是，非数值性质上的描述也是不可缺的。设计的初级阶段之后，从抽象的概念变为有形的实体设计，用几何关系表述所要求的配合。最初的几何模型可能是无尺寸的，专注于主要零部件的几何配置和它们相互的几何关系。因此，支持自上而下的设计过程，CAD 系统需要具备下列各项功能。

1）拥有设计对象进行建模的工具，例如建立模具实体结构，相互配合关系等。

2）拥有支持创建抽象几何体的功能，设计师可以根据任务要求选择细节。

除此之外，支持自上而下的设计方法，用于装配模型的 CAD 系统，也应该提供判断模具装配体中结构零件的工具。在概念设计期间，零部件之间的空间关系被指定为装

配状态。为了得到零件的正确方向和位置，CAD 系统需要考虑该零件在全球坐标系统 WCS 中的数字矩阵。

3. 自上而下的模具装配设计

对于不同的注射模具，有不同的成型零部件，但它们的脱模机构却是相似的，通常都含有顶出板、顶出固定板、许多顶杆等。这种情况对定位导向机构、冷却系统、浇注系统来说也是类似的。这是因为这些系统或机构，虽然尺寸会随着各种要求而变更，但基本的几何形状不随注塑件改变。因此，浇注系统、冷却系统、定位导向机构的装配叫做制品-独立的装配。下面概述独立于注射制品的装配部件和其组成零件的三点重要特征。

1）独立于注射制品的装配结构是可预知的。

2）独立于注射制品的零部件的几何形状是可预知的。

3）独立于注射制品的零部件的尺寸可以在清单中被预先定义。

以 DME 模架为例能够证明上述特性。DME 模架分为 A、B、X、AX 和 T 五种类型。X 型更进一步分为 5 板系列、6 板系列和 7 板系列。对 A 型模架而言，它包含有定模固定板、A 板、B 板、垫板、顶杆固定板、推板、顶杆、导柱、导套和螺栓。A 型模架预先定义了尺寸（mm）系列，如 125 × 125，125 × 156，156 × 156，196 × 246，246 × 296 等。因此，设计一个模架时，只需选择模架的型号和它的尺寸系列。

由独立于注射制品的零部件的特性能建立适合它们的模型，例如模架、侧滑块和斜顶杆机构等，并能描述它们几何形状的各种特征，也能表述它们之间组合的关联性能。三维模型的注射模具的装配建模，自上而下的工作浏览界面已开发运行。独立于制品的机构装配体设计，通过自上而下的工作界面，首先是选择装配体类型和品种，再选择确定的装配体的主要结构，然后对这个主要结构，进一步添加更优化的零件和变更一些参数。程序自动地从数据库构建了合适的零件，并将装配体显示在屏幕上。至此，独立于制品的装配体的概念设计完成。图 14-17 所示为自上而下的模架装配体的设计实例。

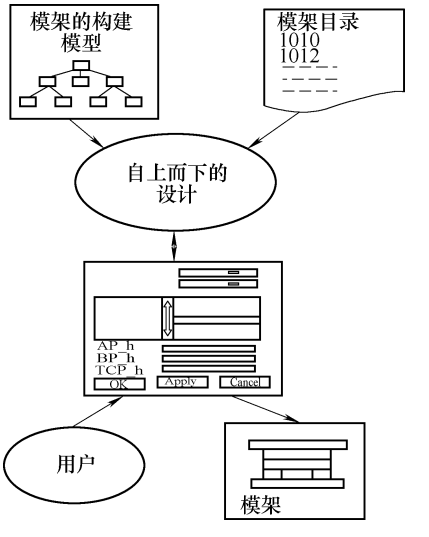


图 14-17　自上而下的模架装配体的设计实例

AP（A plate）—定模板

TCP（top clamp plate）—定模固定板

BP（B plate）—动模板

4. 注射模具的装配模型

注射模具是包含有大量零件的机械装配体。设计注射模具装配体的任务包括选择组件，并确定它们之间的装配关系。另外，对几何建模功能而言，计算机辅助注射模具设计系统，也应该提供有利的设计环境

装配注射模具。这里将讨论注射模具的自上而下的设计装配模型，然后再介绍自动装配注射模具的方法。

装配模型已经成为许多领域的研究课题，例如运动学、人工智能学和几何建模等，常利用图表结构模拟装配布局。在这图解方案中，组件以节点的形式表示，变换矩阵附有弧线。一个支持分级装配数据结构的系统，含有较多的基础装配信息，例如组件间的“特征匹配”等。变换矩阵会自动导出有效的连接，但这仅描迹分层拓扑模型“部分”的关系。

在自上而下的装配零件设计过程中，制品数据结构在一些层中是依据设计阶段来处理的。几何细节特征分为几个层次，用适宜约束机制来描述和更新几何关系。

前已提及，任何注射模具的装配体，都由独立于和取决于注塑件的两类零部件所组成。取决于塑料制品的成型零部件，需精确地按制品的几何尺寸设计。确定成型零部件的方向和位置时，通常要认定在模板上的方向。设计独立于制品的机构零部件，尽管它们的位置有时是直接由设计者指定，但也常按数据库目录选择结构，建立几何学的模型，然后添加到注射模具的装配体中。这个设计过程是耗时和易出差错的。在自动或半自动的装配系统中，根据装配形式和实体的定义，用数据库建起所有的独立制品的零部件。这个数据库不仅包括成型零部件的几何形状和尺寸，还包括了它们之间的空间约束关系。一些常见的功能，例如干涉检查和空间范围也包含在数据库里。因此，模具设计师从界面选择成型零部件的类型，系统将会自动地计算取向和位置矩阵，并把它们添加到装配体中间去。

如图 14-18 所示，独立于注射制品的零部件，可进一步分为模架和机构系统的零部件。模架是一组模板、销、导套、导柱等零件的组合装配体。除成型制品之外，模具必须实现一些辅助功能，例如：两半模的闭合、两瓣模的分开和闭合、冷却、脱模等。大部分的模具都具有相同的辅助功能，结果就造成了相似的结构。一些模具结构适合标准化。模架就是标准化的结果。

5. 装配设计技术

装配信息建模的核心是表达和存储装配体中各组成零部件之间的关系。它包括零部件之间的相互位置关系、配合与联接关系等。

变量装配设计是通过概念设计把用户对模具产品的功能要求、设计意图，转化为各设计阶段都能理解和操作的设计变量和设计变量约束。装配设计和零件设计都在它们的控制和引导下完成。

变量装配设计遵循以下四项原理。

1）映射原理。用设计变量和设计变量约束把产品功能和形状联系起来，通过概念设计实现产品功能向形状映射。

2）功能约束原理。用设计变量和设计变量约束控制产品设计。控制零部件的各个设计变量及约束，形成一个设计变量约束网络。该约束网络控制设计过程，满足零部件的功能要求和设计意图。

3）三维几何约束定位原理。通过三维几何约束，自动确定装配体中零部件的位置。

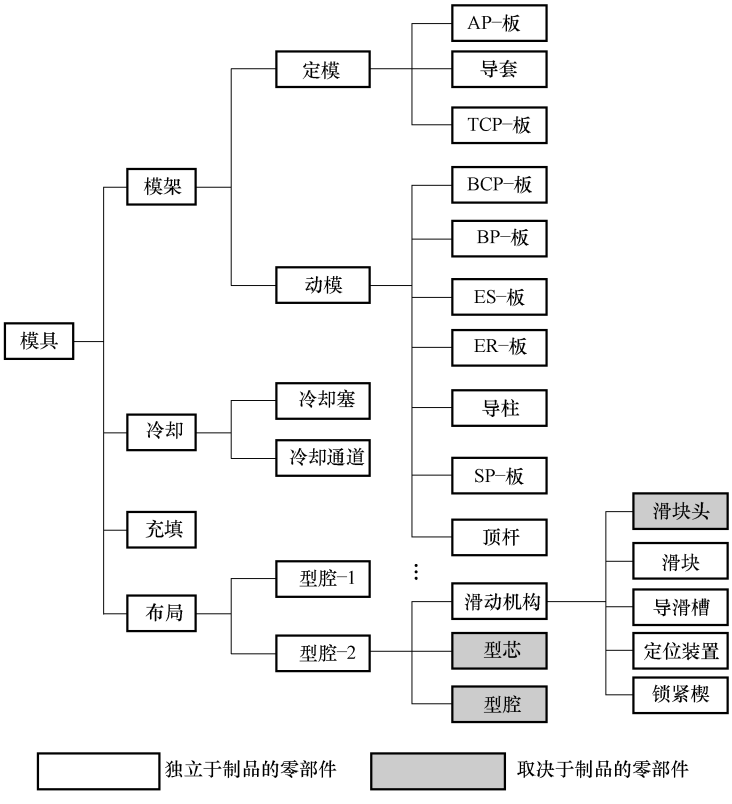


图 14-18　注射模具的装配结构

AP（A plate）—定模板　TCP（top clamp plate）—定模固定板

BCP（bottom clamp plate）—模具底板　BP（B plate）—动模板

ES（ejector support plate）—顶出板　ER（ejector retainer plate）—顶出固定板

SP（spacer bock）—方垫块

三维几何约束表达了零部件之间的配合关系。因此，满足三维几何约束就能得到零部件的正确位置。

4）动态设计原理。在设计变量、设计变量约束和三维几何约束驱动下的产品设计是可变的动态设计。通过修改某些设计变量、设计变量约束和三维几何约束，装配设计将在所有约束的驱动下自动更新和维护，得到与原设计没有概念变化的相似设计。

例如标准模架装配体，它不仅可拾取各个板和杆类零件，还包含模具各零部件的装配关系。当某个零件被修改时，其他相关的零件将会被自动修改更新。如果增加一根脱模顶杆，它经过的所有模板都会自动生成通孔，并有所需的配合间隙。这就是设计变量、设计变量约束和三维几何约束的动态装配设计。

14.2.3　注射模具 CAD 数据库

模架是注射模具中关键的部件。在模架的结构框架上加工和安装所有的零部件，例如成型零件、冷却系统、脱模机构、斜导柱滑块机构等。标准模架一般采用单分型的两板模。这是这行业中最广泛使用的结构。以下概述模架库的建立，以便于应用自动生成模架的设计系统。

1. 模架数据库的应用

（1）模架结构和变量　要使模架设计自动完成模架参量化装配，所有的模板、导柱、导套和螺钉，被预先建模并储存在库中。模架装配可分为两个组件，定模是型腔半模；动模组件是具有主型芯的半模。前者包括定模固定板和定模型腔板，后者包括动模型芯固定板，动模底板、动模固定板。标准模架的动模部分还包括脱模机构的顶出板和顶杆固定板、回程杆等。

模架基本上有三个尺寸，即长度、宽度和整体的高度。它们与模板的面积相等；因为不同的模具有各种各样的型腔，厚度有系列尺寸可选购。脱模机构的顶出板和顶出固定板的大小一致。顶出板与顶杆固定板之间，拉料杆、回程杆与顶杆之间，结构上都相似。它们取决于模架的总体尺寸。一个典型的模板尺寸可以参数化，有的尺寸可直接参数化；有的尺寸可变量参数化。

由于标准模架可以购买，模架的设计就变得更为容易。建立数据库就是把模架目录中所有信息都包含进去，主要包括尺寸列表，板厚，空间参数及螺钉、导柱和导套的尺寸。当选择了某一类型和尺寸的模架以后，数据库中相应的记录就以示例的形式被提取，并传递给参数化装配模型。

（2）模架的自动生成　典型注射模具的模架有几十个零部件。为所有零部件逐一建模是繁琐和费时的。但是模板类零件、定模板和动模板的面积、顶出板和顶出固定板的面积是相同的。模板类零件和杆类零件的相似性，适用模架零件的参数化。为了便于标准模架的自动生成，各种零件和模架装配体应事先在模架库中建模并储存。所有装配的零部件都应是参数可变的模型。它们的尺寸，会随同指定的模架型号和参数而变更。从具有参数的样品目录中自动生成模架，需要一个数据库来支持。因为标准模架都是商品化的，所以很方便建立这样的数据库。还须要有一个用户界面为用户选择所需类型和尺寸系列的模架。用户只需点击界面，系统就会自动选择想要的模架。这种方法的流程图如图 14-19 所示。为减少内存占有，各尺寸系列的模架中相同零件共用一套数据。因此，模架图形库与模架数据库并存。

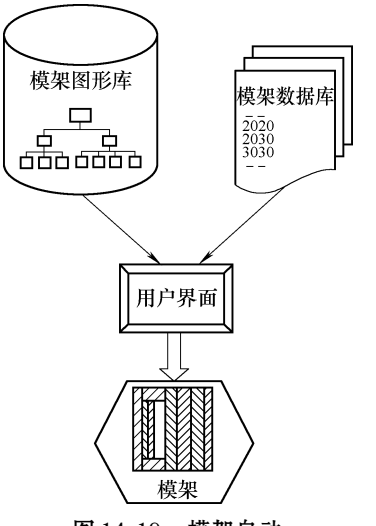


图 14-19　模架自动生成流程框图

为方便设计模架，界面让用户选择类型、主要尺寸及其他相关数据。模架的参数化装配模型，可从数据库及浏览目录中，从相关的实例参量中调出。模架将以下列方法定位和定向。

1）将型腔板和型芯板相合面跟可能的分型表面相配。

2）校准 Z^+ 正半轴到模具开模方向。

3）校准模架中心点到型腔布局中心点。

（3）标准模架的选调　商业化的注射模 CAD 软件存储有美国 DME 和德国 HASCO 等近十种标准模架信息。国内常用的龙记模架也能挂入并调用。国产的注射模 CAD 软件，存储有两个国家标准：模板尺寸 $B \times L \leqslant 560\text{mm} \times 900\text{mm}$ 的中小型模架，GB/T 12556.1；模板尺寸 $B \times L \leqslant 630\text{mm} \times 630\text{mm} \sim 1250\text{mm} \times 2000\text{mm}$ 的大型模架，GB/T 12555.1。设计者可使用能及时购得的模架。

常见的模架结构系列有两大类：用于矩形浇口或主流道型浇口的单分型面模架和用于针点浇口的双分型面模架。

有的结构系列有三分型面、有导柱倒装、有增设推件板等模架。有些特殊注射模，例如热流道注射模等，没有标准模架供选调。

标准模架的模板尺寸 $B \times L \times H$ 按系列编排。因此，常用按两方面考虑选择模板的尺寸。其一，按顶出板的宽与长 $B \times L$，大于型腔的宽与长的尺寸，以便于脱模机构能推顶注塑件。其二，按模板侧壁的强度和刚度计算，用型腔的宽度或长度加上模板侧壁厚作为模板尺寸；用模具底板厚度的强度和刚度计算，得到承压的定模固定板或动模垫板的厚度 H。

2. 模架数据库的建立

（1）模架数据库特征　注射模 CAD 数据库主要是库存图形。注射模的工程数据库与传统领域的数据管理有很大区别。一方面，要求支持复杂对象及其语义关系的描述和处理，支持对文字、图形、图像和动画等多媒体数据管理；另一方面，它应该是动态的数据库，允许对数据修改和补充，也可以实时修改约束。因此，注射模的工程数据库应包括：对象管理器、事务处理器、版本管理器、查询处理器和用户接口。它实现了对象的标识、封装、分类、继承、重载、迟后联编和扩展等。

建立标准模架数据库和标准零件库，除了采用数据库技术外，还必须构造合适的装配模型以满足模架的参数化设计，并运用变量装配技术来实现标准模架装配体和零件的自动生成，还能实现动态的改动和补充，能方便完成注射模具设计。

（2）模架库的建立过程　标准模架库建立过程的具体步骤如下所述。

1）三维造型生成模架上的各个零件的初始图形。

2）为零件图标注尺寸，并设置设计变量。

3）把零件图放入模架图形库中。

4）按变量输入零件的系列尺寸数值到模架数据库中。

5）从模架图形库提取零件，并从模架数据库中查得数据，完成零件的参数化。将零件图的数据结构改造成具有约束和配合关系的元件，也称为实例（Instance）。

6）完成所有零件的参数化，并按照模架装配体的总体结构改造成元件。

7）完成模架装配体后，存入模架库中。

零件库中零件的初始图形按尺寸系列确定，并参数化。在零件参数化的过程中，可以使用任一系列的任一规格。模架零件的图形库与数据库相互独立，又互相依赖，有多种零件共享的数据。每个零件都对应着数据库中的一个或多个数值表。零件的最终图形由拾取数据决定。

（3）模架装配体的总体结构　每一品种的标准模架建立一个装配模型存储在模架库中。如图 14-20 所示，模架装配体中的元件图框表述有零件和子装配的图形实体，也有参数化变量、约束变量和配合关系等。它们是抽象元件，说明各零件的属性。每个元件还应该有元件名、相关联元件的指向、存储路径和修改标记等。元件间关联有父子关系、兄弟关系和无关系。模架装配体与一般的装配体的装配模型的总体结构不同。模架装配体的结构层次分明，元件之间的关系比较简单。而一般装配体结构的元件，相互关系复杂，构成环形的网状结构。

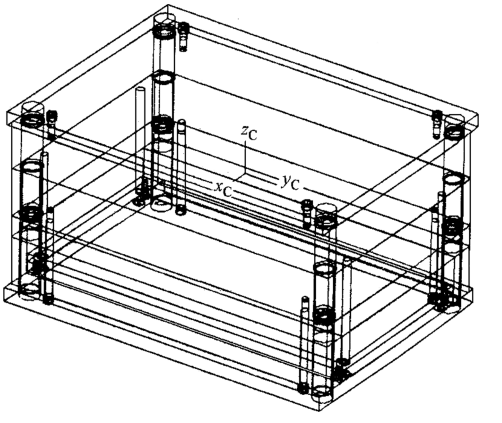


图 14-20　模架装配模型的总体结构

（4）配合关系　在模架装配中，所有的零部件之间都有联系。这些联系都是通过配合约束和尺寸约束来描述的。配合约束是装配中两个不同零部件之间的配合关系。其配合关系有 3 种。

1）一表面与另一个表面重合关系。两个相同形体种类的零件在相配位置上重合。两个零件的平面之间允许有一段偏置距离。

2）表面之间或轴之间并列关系。平面零件在约束位置上使两个零件的平面结合并紧贴，两个平面之间允许有一段偏置距离。调准轴对称零件的轴线，使其同轴或平行。

3）角度定向关系。两个零件之间的定向位置，用转动它们的角度确定，并允许不同几何体的表面和棱边之间的配合。

装配中，零件定位时这些约束类型要结合使用。通常 2 ~ 3 个配合约束就够确定一个零件的位置和方向。例如：定位长方形体，通常要连续用 3 个配合约束：重合（面）= > 并列（面）= > 定向（面）。圆柱用两个约束就可以定位：重合（面）= > 定向（轴）。

为了保持各零部件在装配中的尺寸关联，模架中的各个尺寸约束，以表达式定义在装配的父元件的结点。每个子结点的尺寸变量是连在那些顶层元件结点上的。元件中的指向标记引导相关联元件。在设计过程中，输入值单独交给父元件，此关联会刷新父元件中相连的所有表达式。当父元件的值改变了，则子元件结点的值也会改变。

14.3 注射模具 CAE 的应用

大多数塑料注射工艺和最终制品质量，取决于加工时聚合物的混合、流动和塑化。塑料制品设计、注射模具和注射成型工艺也起重要作用。由于生产不断发展，采用传统的反复试验的方法不适应现代的高效高质生产。随着注射成型工业迅速发展，面对尺寸变化很大的各种制品，以下三方面是不可少的。

1）模具生产周期要缩短。

2）塑料制品整体质量要提高。

3）模具设计要优化。

在生产发展中为实现上述目标，注射模具 CAD/CAM 是首选途经。实现 CAD/CAM 可大大提高模具设计质量，并缩短设计和制造周期。然而，在塑料注射模具效能的优化设计中，考虑分析材料性能数据是困难的。单独应用注射模具 CAD/CAM 技术时，很难确保塑料制品的质量。CAE 技术能填补塑料注射制品生产中的缺口。

有关注射模具 CAE 在塑料流变学和传热学方面的原理，在前面几章中已经介绍。本节说明注射模具 CAE 应用的价值。

14.3.1 注射模具 CAE 分析的功能和作用

早在 1987 年，澳大利亚的 moldflow 公司的塑料熔体注射充填模具型腔的流动分析软件就已经问世。但仅用于二维注塑件的流动充模模拟。注射模具 CAE 分析软件，自 20 世纪 90 年代至今已经进入成熟应用时期，从二维发展到三维，从流动分析和冷却分析发展到注塑件的收缩和翘曲变形的分析。常见各种 CAD 软件造型的注塑件都能导入。CAE 软件在不断增强前置和后置处理能力，开发和改进与 CAD 软件的接口，并逐渐与 CAD/CAM 集成。

1. CAE 分析的功能

（1）辅助注射工程　注射生产前，使用软件能帮助设计者解决注射成型测试和检验，正确优化模具设计。CAE 软件在制品设计者、模具制造者和注射成型工程师之间起桥梁作用。在塑料注射生产中，生产工艺设计师需要许多早期设计阶段的信息。塑料制品的三维几何设计和功能设计，必须同时适应各方面因素。一些关键的影响因素，例如制品结构、壁厚、塑料材料和性能、模具结构和布局、浇口的位置和数目、模塑工艺、收缩和翘曲变形等，都与制品设计相互联系。这些因素影响注射成型制品的质量。为有效发展注射成型生产系统，注射模 CAE 技术能用来完成下述的四方面任务。

1）注射成型制品设计。在制品设计中，必须考虑制品的结构和几何尺寸设计的优化，还有制品注射成型能力分析。塑料制品的设计者在结构布局和几何参数拟定时，会遇到制品注射成型的可行性和检验问题。除此之外，在塑料熔体流动充模分析方面，应用 CAE 也能揭示设计的制品是否有良好的注射成型能力。在制品设计方面，应用 CAE 提供对制品结构和几何参数的修改意见，能改善注射成型性能。

2）注射模设计。在模具设计中，应用 CAE 能帮助模具设计者和制造者分析塑料制品的设计质量。预测模具设计所决定的塑料制件质量信息，并得到解决问题的适当方法。CAE 的辅助处理，能帮助决定模具布局、浇口位置，帮助确定在单型腔、多型腔或成组型腔模具中的流道系统。CAE 也帮助优化注射周期并设计冷却系统。

3）注射成型工艺的拟定。这方面的 CAE 功能可辅助决定工艺和工艺参数，能保证注塑件有良好质量。CAE 提供了数值分析，例如分析夹紧力吨位、注射计量量程、注射速率和塑料熔体的流动性能。

4）保证制品质量。在注射生产中，有效控制注射成型工艺能防止一些常见的制品质量缺陷。这些缺陷是由于设计差错造成的，而且是能够避免和限制的。应用 CAE 能展现制品在质量方面的缺陷，并获知避免缺陷的建议与措施。

塑料模具设计 CAE 技术，应用了数值分析技术并求解。用物理、数学和数值分析的原理和方程，是解决工程问题的实用工具软件。遵循某些物理学理论，概括成物理模型后解决注射成型工程中的系列问题，又应用数学模型用数学方程（例如微分方程）有限元法进行物理模型的数值分析。此外，还用数学模型来处理边界、初始条件和约束。数值分析技术，以有限元法和边界元法的数学模式描述单元类型、网格密度和解题参量。其中解题参量提供了处理计算公差、差错界限、迭代和收敛判别等。

在注射成型 CAD/CAM 过程中应用了图形和数字的反馈回输。它支持 CAE 解决所给的工程问题，确保早期的设计阶段的预测功效。它涉及生产花费成本的 80% 还多。注射成型的 CAE 应用，与注射成型的设计及生产成本一样起决定性作用。应用 CAE 可避免设计过程中出现过多的变更。以往的模具设计过程中存在反复修改，所以模具制造周期长。模具设计中应用 CAE，能推演注射制品、注射模具、注射工艺和制品质量等方面相关联的工程问题规律，帮助寻觅优化的题解。

（2）CAE 分析过程　CAE 分析工具给工程师提供注射成型加工期间，在模具的型腔里塑料熔体流动现象的数值分析的结果。设计者了解塑料材料的注射成型属性，在设计阶段就能认知一些限制的条件，能避免塑料制品的一些质量问题。综合模具 CAD/CAM/CAE 发展过程，CAE 分析工具能直接输入 CAD 模型到 CAE 分析系统，进行结构和注射成型的分析和模拟。随着计算机技术和软件的发展，它又增加了更简明和更方便的塑料制品和模具的设计分析。早期的 CAE 工具使用者需要实行大量的前置工艺操作，还有模型和数据准备和执行后置过程，才获得分析结果并输出。现在大多数的任务能自动完成。而且，最后的结果和输出以图形呈现。CAE 分析结果的界面阅读，主要困难在于需要模具设计和生产的专业知识和经验。下面介绍 CAE 模具设计分析的过程和步骤。

图 14-21 所示为注射模 CAE 的分析过程。进行 CAE 分析，首先要创建注塑件 CAD 模型。它描述所有的形体结构和尺寸。在塑料制品开发中，模型可直接输入到 CAE 分析系统，或者以数据交换技术将注塑件 CAD 模型转换成标准的数据格式 IGES 和 STEP。之后，设计者需要决定物理、数学、数值模型的专业模具设计问题。CAE 分析工具遵照塑料熔体的物理模式，建立起注射过程的物理实体。根据用户设想需求，提供二维、

三维或轴对称图形，选择材料类型，决定专门物理边界条件和约束等。数学模型方面，用户需要考虑单元类型、网格密度、计算参量、迭代次数和收敛准则等。这些信息将支持 CAD 设计数据的前置工艺处理，并进一步生成 CAE 分析模式。在进行分析和模拟之前，用户根据专门需要，处理注射成型信息、成型工艺参数和注射成型条件。在进行分析和模拟之后，计算结果必须加以分析和评估。如果结果和题解不令人满意，建议修改注塑件上相关结构和几何体、模具结构和成型条件，然后进行下一轮计算。经迭代运行过程，直到所有的注射成型功能、生产率和制品质量都满足设计要求，并得到最佳题解。

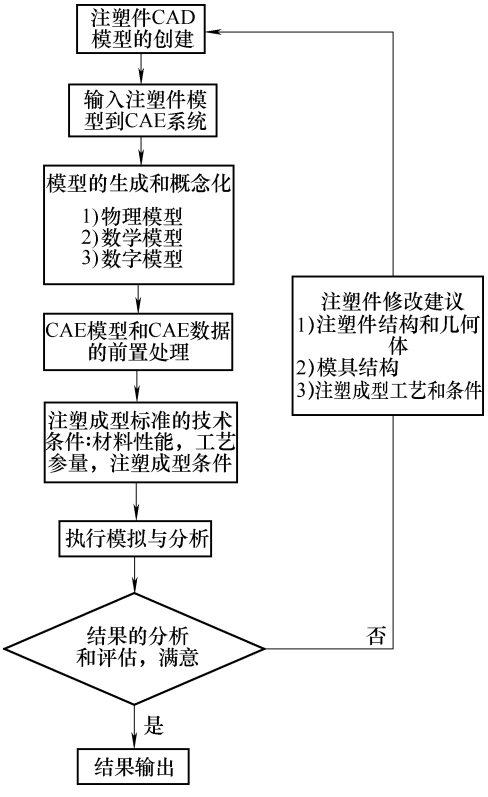


图 14-21　注射模 CAE 的分析过程

（3）CAE 功能　CAE 注射模具设计应用技术，可分为四类分析和模拟的常见功能，有流动模拟、冷却模拟、结构分析和纤维取向预测。大多数 CAE 模具设计工具能够提供这些功能。它们能概括成以下几方面。

1）流动模拟。流动模拟是塑料熔体在模具的流道系统中流动和在型腔中流动充填时的动态分析。从注塑件和模具设计的观点，流动模拟提供了注射成型可行性分析，并预测注塑件能否完整地注射成型。它也能辅助浇口、流道和它们任何组合的优化设计。在工艺优化方面，流程模拟帮助估算注射成型周期、夹紧力吨位等，确定最佳工艺条件和配置。它有助于查明熔合缝、流动痕和气囊等缺陷的起因，并推荐避免这些情况的解决方法。

2）冷却模拟。冷却模拟呈现了注射成型中塑料的熔融和凝固。也进行塑料、模具与冷却管道中冷却剂之间的热传递分析。这帮助了冷却系统的设计，并能获知最佳冷却时间。此外，它也有助于设计者对注射成型中产生的收缩和翘曲进行分析。

3）结构分析。造型结构分析证实注塑件结构和参数在强度和刚度方面是否符合要求，并估算注塑件最后的形状，还揭示模塑中收缩和翘曲的潜在原因，能探索研究成型制品形状与模具在局部冷却过程中的关联。

4）纤维取向预测。纤维取向是塑料熔体流动所造成的，对注塑件的力学性能和结构具有显著影响。塑料材料中纤维取向也对注塑件的最终翘曲程度起着重大作用。纤维取向的预测，能用于估算注塑件质量和力学性能，并揭示翘曲的根本原因。

2. CAE 在模具发展中的地位和作用

（1）CAE 在模具发展中的地位　CAE 塑料注射成型过程的好处之一，是将很复杂的三维注塑件形体构建成“网格化形体”或“近似网格化形体”。注塑件形体的网格化能在较短时间内导入并构建，然后，才能完整地考虑注塑件设计、材料选择、模具设计、加工条件和它们在注射成型能力和制品质量方面的组合效应。使用 CAE 工具，可分析注塑件、模具设计和模拟注射成型过程，在制品生产工程早期就能获得最佳设计。CAE 分析工具在模具发展中起了关键作用。

图 14-22 所示为 CAE 在注射模开发中的作用。开始时，要将创建注射成型制件输入到 CAD 系统中，注塑件模型是实体的、表面的或线框式的。然后将原来的造型格式或标准数据，转换成 IGES 或者 STEP 格式。注塑件模型输入模具设计系统后，由于大多数计算机辅助模具设计是以三维为基础的，需将表面的或线框式的模式转变为实体模型。在模具结构的设想尚未落实前，必须分析注塑件和评估可塑性。从注塑件设计和注射成型可行性评估，到模具概念化是个迭代过程。因为这个模具设计过程，需要进行注

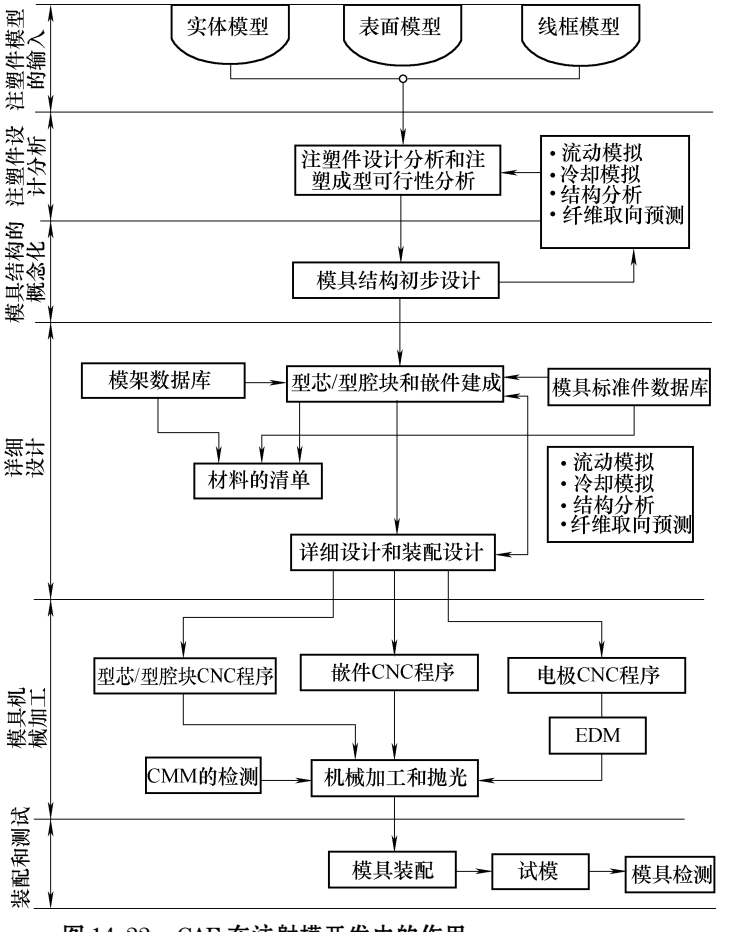


图 14-22　CAE 在注射模开发中的作用

塑件结构分析、塑料流动模拟、冷却仿真、纤维取向预测，CAE 分析起着关键作用。一旦模具结构初步确定，就进入型芯块/型腔块的详细设计。在型芯块/型腔块的创建中，需要设计型腔数目和布局浇口、流道和冷却管道，也要考虑一些模具零部件，包括侧型芯、侧滑块和斜顶杆。在这详细设计阶段，CAE 帮助解决上述四种模拟和分析所涉及的设计问题。完整的模具零部件和装配设计完成后，系统进入 CNC 处理，进行机械切削加工和电火花加工，最终完成模具的装配和注射测试。CAE 对模塑工艺参数和制品的质量也有重大影响。

（2）CAE 在模具发展中的作用　在注射成型生产发展中涉及以下四个领域。

① 塑料材料的选择。

② 注塑件设计。

③ 注射模具设计。

④ 注射工艺的确定。

各个领域设计都同样重要，变更任何一个都会影响其余几个领域。过去，以上各方面的决策，进行前期设计是以经验为基础，并参照一些引导理论，通常要推倒一些方案，并在试验中纠错。上述四个领域间有多样的相互影响，评估、分析和预测是很难的。以往在新模具开发过程中，解决工程实际问题和产生最佳设计是不可能的。用计算机技术和 CAE 工具，才有可能对这些复杂问题进行分析，而且分析时间和成本明显减少。CAE 技术利用注射成型中各种物理现象和变量，帮助解决了这四个领域的技术问题。

3. 注射模具 CAE 的发展

注射模具 CAE 软件工具已在市场上流行超过 30 年，现在广泛使用在模具工业。CAE 技术在模具工业中关键的作用不容置疑。但从有限元网格化的自动化、计算的效率、数值的精确和预测功能来看，现行的 CAE 并不理想。在当前的 CAE 应用中，存在一些限制，并面临一些困难挑战。因此，模具工程师应当有清醒认识，并避免误解或过度相信 CAE 的功能。以下讨论 CAE 的模式问题和面对的复杂工艺。

从模式的角度看，模具被充填的过程是最困难的。在典型的充模过程中呈现以下物理现象。

1）多元的不稳定流动和不混合的流体。典型的充模状态至少存在四种“流体”，它们是模具材料、模具型腔中的气体、充填型腔的塑料熔体和固化的塑料。

2）动态和动力学的结合。在典型的注射成型过程中，上述四种“流体”中的两者界面上，由于流动和界面的物理现象，例如表面张力和相变、不规则的拓扑，存在动态的变化，例如合流、撕裂和细流。

3）动态的热传递。在模具的充填和冷却过程中，存在动态的热传递。从塑料熔体到模具零件，进而到冷却系统的冷却液，不仅有热对流、热扩散和热辐射，还有以上四种“流体”之间界面的和塑料熔体内的运动和摩擦，产生新的热量，并添加到原先的热传递中。

4）复杂的流动现象。在模具型腔里的充填过程中，塑料熔体在不同位置因不均匀

的流速和温度分布，有不同流变特性。塑料熔体的流变特性和材料性能变化，进一步影响流动现象，转而影响其他物理现象。对厚壁注塑件的注射成型，会有一些湍流、涡流和涡旋。CAE 中的所有注射成型参数，是在假设薄小间隙通道中塑料熔体流动的条件下获得的，此假设获得数值分析的结果与厚壁注塑件注射成型状态有矛盾。

5）控制质量的困难。在注射成型过程中，各种物理现象最终会影响制件的质量。注射成型质量对各种物理现象和它们的组合作用很敏感。最终在注塑件上存在许多质量问题，例如残余应力、收缩、翘曲、流痕、熔合缝和气囊等。所有这些质量问题的限制和控制是困难的。

对高度逼真的充模模拟而言，要模拟所有以上同时发生的瞬时现象，并考虑它们各自的影响是极端困难的，或许是不可能的。在这些复杂的物理现象和它们的影响完全搞清之前，仍需进行深入研究。

另一方面，注射成型过程变得愈加复杂。新的注射成型工艺、新的复合塑料、注塑件的形状更复杂和体积更大等，将使模型比以往更加复杂。以采用多组分注射为例，这种注射成型过程的模式和模拟具有挑战性。在第一次注射时以普通注塑件模式作 CAE 分析，第二次塑料注射时必须考虑原先的凝固注射。第一次注塑件被保持在模具里，而此时模具的型腔里注塑件会影响热传导。又如微孔发泡塑料注射成型，熔料溶解了二氧化碳或者氮气，塑料熔体的黏度下降。固化的注塑件中含有大量直径 5 ~ 50μm 的泡孔，预测力学性能有困难。在模具的材料中，有的是良导体，各种合金钢的热传导性有差异，这不是个单纯的传热问题。又诸如注塑件及模具零部件各向同性的假设，否定这些假设，使所有这些模式更加复杂。另一方面，从塑料材料资料的角度，需要描述塑料性能的数据必须准确。通常，这些数据是从供应商那里得到。然而，他们的数据往往不是最好的。此外，在注射成型过程中材料添加剂会大大影响聚合物的属性。注射成型企业是从各个混合料的生产厂商处购得这些添加剂。计算和估测这些添加剂对基体材料物理性能的改性是困难的。如果 CAE 模拟和分析是基于基体材料的性能数据，最终结果将会令人怀疑。以上难题对 CAE 应用的发展提出了挑战。

现代先进的计算机技术和软件技术发展，足以在技术上支持高端领域的模拟，分析注射成型过程中上述的物理现象和后置的注射成型加工。对 CAE 应用也提出了模具设计的实际任务。目前实际问题是模式简单化和过程的复杂化。要简化模式，假设是需要的。现代 CAE 工具提供了数量化处理的结果，将来 CAE 的最终结果应更多地用于质量分析。对注射制品设计师、模具制造者和注射成型工艺师，CAE 模拟技术是极有价值的工具，但是在分析和对待模拟结果时，应该充分认识到 CAE 工具的弱点和限制。

14.3.2　CAE 的注射制品、模具和工艺设计的优化

在注射成型领域中，CAE、CAD 和 CAM 是三项重要的技术。CAD 技术以电子数据表述设计，并使设计自动化。CAM 帮助实现设计的物质化，解决设计中的各种制造问题。本节概述 CAE 在模具设计方面的应用，介绍 CAE 分析是如何优化注射制品、模具和工艺设计的。

1. CAE 的变量

CAE 运用物理和数学原理处理客观工程问题，帮助设计师科学地解决问题。在注射成型过程中，CAE 分析可分为下列几类变量。

（1）物理变量　在注射成型过程中，相关的物理变量很重要。因为它能帮助设计师了解注射成型现象。

1）压力。在 CAE 分析中，注射成型期间塑料熔体压力是作用在单位面积上的法向力，形成可变的区域场。注射成型期间的压力是随时间和位置变化的函数。当充填刚开始时，压力是 0.1MPa。塑料熔体的前锋到达后，压力连续地向后续料流递增。在 CAE 分析时，压力是节点的变量，有限元的单元里的压力，可运用单元的节点上变量内插。

在注射成型时所涉及的一些压力变量概念与流动有关，其中之一是压力梯度。就像水或其他液体，塑料熔体流动总是从高压向低压的方向流动，即它流动的方向与负压力梯度一致。在注射成型中，瞬时压力梯度定律指出，沿着流径的压力梯度越大，流动充填更有效。一些流动现象与压力梯度有密切关系。不稳定的压力梯度会造成一些问题，并影响制品质量。

2）温度。塑料熔体的温度是节点的变量。单元体的值是用此单元的节点温度插值计算。它是冷却分析的直接输出。在成型过程中，塑料熔体的温度随时间和位置变化。从温度分析中获知平均温度和体积温度，这在注射成型过程分析和质量控制中是很重要的。

在充模成型中，不均匀温度分布对制品质量起重要作用。不均匀温度会导致热点。热点温度过高造成焦化，进而在冷却成型中，造成不同程度的收缩和翘曲。

3）剪切速率。塑料熔体的剪切速率也是节点变量，单元体的值也能利用节点剪切速率插值确定。剪切速率定义为流速在厚度方向的微分。在流动通道里，塑料熔体中央层的剪切速率等于零。在塑料熔体与流动通道的界面上达到峰值。

剪切速率为塑料熔体的流动或变形速率。聚合物熔体剪切速率与其黏度密切相关。聚合物熔体随着剪切速率增加，各种物料黏度有不同程度下降。充模流动剪切速率的分布，影响到注射成型过程中塑料熔体的流动性。因此，设计者需要知道剪切速率分布。

4）剪切应力。塑料熔体的剪切应力是单位面积上的剪切力，它也是节点上的变量。单元体上的剪切应力是由节点的值决定。与剪切速率相似，流道中心线或中央层的剪切应力等于零。在流道壁和塑料注射模具的界面上有它的最大值。

剪切应力影响分子链的取向。剪切应力越高，聚合物的取向越严重。由于剪切应力的最大值在塑料熔体与模具型腔的界面上，最高的取向在模腔表面附近。过大的剪切应力也会使得熔体破碎，因而它的值应该控制在某个程度。在注射成型时，应避免裂纹，减小纤维方向取向，以改善注射成型制品整体质量。

5）速度。塑料熔体的流速再次成为节点变量。它表述注射成型流动中瞬间运动方向和该点的速度。有限元单元的速度用它的节点值决定。在 CAE 分析时，平均速度描述塑料熔体流动。平均速度通常用来定义单元体的平均速度。在充模流动中，速度与成型流动模式密切相关。它直接关系到流动的现象，例如熔合、流动痕、滞流和湍流等。

单向流动的原则是指聚合物熔体在一个方向流动，流体前锋应以直线流动贯穿整个阶段。聚合物熔体流速决定了流动形态，并进而帮助设计师有效地设计浇注系统，设计能平衡浇注的流道和浇口。

6）夹紧力。锁模夹紧力可由分型面上的压力、流道和型腔的投影面积推算。它是流动充模进程中的变量和不同时间的函数。充模阶段结束时，夹紧力达到峰值。精确地计算夹紧力是困难的，但运算的估测值很有用。预测的夹紧力能用来选择注射机，并决定型腔数目。

（2）混合变量　在注射成型中，有些现象不能用以上各个物理变量描述。这些物理现象仅能用上述变量的组合来解释。这些组合的变量也称为混合变量。

1）熔体前锋的推进。熔体前锋推进过程是塑料熔体前沿的运动。熔体前沿推进至各节点，熔体前锋推进作为节点的变量。单元内的值是用节点值来决定。它揭示模具内的重要的流动平衡现象。所有模具内流动都要求得到平衡，即以均衡压力在相等时间里充模。如果注射成型过程不平衡，有的区域过早充满，会产生溢料，而较迟充填区域会产生欠注。熔体前锋推进演示是否存在不均衡流动，并确定是否出现一些缺陷，例如熔合缝、流动痕和气囊等。详细的设计方案应该在熔体前锋推进基础上修改，例如浇口位置重新定位、流道和浇口截面的修正、调整注塑件结构参数，以取得均匀和平衡的流动。最重要的注塑件参数是壁厚，壁厚应均匀一致。

2）芯部和皮层的取向。聚合物芯部和皮层的取向是单元体的变量。芯部单元体的取向是充模结束时速度的横切方向。单元体面积上的取向通常是沿着单元的速度方向。这将会是注塑件外表层最可能的纤维取向。

揭示芯部和皮层的纤维取向，这对预测注塑件的力学性能起关键作用。可以确认，皮层取向能导致力学性能（例如冲击和拉伸强度）增强。在此基础上，模具设计者能定位合适的浇口位置，前置设计塑料熔体的流动模式，以保证注塑件在一定方向上有良好的力学性能。

3）质量缺陷。预测注塑件缺陷是 CAE 的主要功能之一。缺陷预测也是 CAE 分析的主要输出变量。通常输出预料中的一些主要缺陷有熔合缝、流动痕和气囊等。熔料分离后，相对方向的两股前锋相遇时形成熔合缝。如果两股熔料前锋相互平行流动，位于它们之间会产生熔合流动痕。气囊是在塑料熔体流动时聚集形成的。CAE 分析也能帮助寻找真空泡的位置。在 CAE 分析基础上，以速度方向和熔体的推进，来获知这些缺陷的发生位置。应当适度改善流动均匀性，避免或限制缺陷和它的位置。通过改变浇口位置、注塑件结构、浇口和流道的尺寸，来减少敏感区。

2. CAE 注射制品的优化

CAE 在注射制品设计方面，帮助设计师研究解决设计中影响制品成型质量的有关问题。一般而言，CAE 在注塑件设计方面的功能可以归纳为以下三个方面。

（1）注射制品结构优化　通常，塑料注射成型制品作为零件直接用于产品装配。在注塑件设计中，通过塑料熔体的流动充模模拟，帮助验证注射成型的可行性，也就验证了熔料的流程比。又通过制品实际工作环境的模拟，帮助优化它们的结构和参数，也

能帮助验证和核实设计中遇到的强度和刚度问题。

1）注塑件的注射成型性能。为了保证注塑件有良好的注射成型性能，在制品设计各阶段，设计者需要考虑的首要问题是制品上浇口的位置。流行的 CAE 工具可以帮助设计者通过塑料流动模拟，确定最佳浇口位置。它能揭示最佳浇注位置和绝对不能接受的位置。在浇口位置决定后，设计者进一步研究注塑件的注射成型性能，分析可能存在压力、温度、剪切应力问题的区域。

2）制品质量。注射成型质量是设计师考虑的重要问题。即使最终的几何形体和参数能满足所有的技术条件，注塑件对于有些内部和表观的缺陷也不能免除。所有缺陷是一些不合理的变量值造成的，诸如剪切应力、剪切速率、冷却时间、料流前锋推进、温度和压力分布等。举例说，过大剪切应力会大大降低注塑件的强度，促使其过早失效，减少了制品的工作寿命。为了保证注塑件有良好质量，CAE 工具能帮助设计者确定注塑件是否存在质量问题，并在早期设计阶段就暴露一些影响质量的变量。当然，在生产实施阶段也能帮助避免和消除质量问题。

通常，CAE 工具允许设计师在设计的早期，搜寻和识别一些关键的质量问题和注射成型性能。此外，设计师也能在 CAE 分析结果的基础上得到一些解决问题的启发，改善制品设计。在模具制造后期的设计修改中，要有正确判断，才能避免和消除这些物理变量和混合变量对质量的重大影响。

（2）模具设计的优化　在模具设计时，设计者需要建立最好的设计策略，要以科学的设计理论和经过验证的设计经验讨论设计方案。利用 CAE 分析工具，能帮助解决模具布局等问题，并获得最佳设计方案。CAE 分析软件给模具设计提供各种工具，在验证注塑件设计基础上优化设计浇注和冷却系统的设计。

1）验证注塑件的设计。模具设计者在模具设计之前，需要验证注塑件质量和制造要求，必须对注塑件进行注射成型可行性和质量分析，从制品设计的角度优化它的设计。从制造的角度，模具设计者也要考虑到制造工艺性能，以确保制品质量，从而考虑模具制造企业的模具制造条件和设备。

2）模具布局。一旦制品设计被接受，就开始模具设计的实际工作。模具布局设计的第一阶段，是决定型腔数目、制品的方向和在模板上的布局。模具的型腔数目基本上根据制品生产批量决定，还要进一步考虑注射机、注射生产成本和制件的精度等情况。模具布局在 CAD 的概念设计中有初拟方案。多型腔模具在详细设计时，需要考虑在单个注塑件方向，确定两个型腔之间距离。在这个过程中，CAE 工具帮助确定模具的布局，是基于塑料熔体流动模拟和平衡分析。最后，模具布局设计应该在浇注系统流动模拟中完成。

3）浇注系统设计。浇注系统又称流道系统或输送系统，由主流道、分流道和浇口组成。通过浇注系统，聚合物熔体流入到各个型腔内。浇注系统对注塑件质量，注射成型生产率和生产成本方面有重大的影响。注塑件要达到良好的表观和内在质量要求，浇注系统不再是单独地依靠经验设计。过去，流道系统设计是试模和纠错的过程。流道系统在多次上注射机试模中进行调整，直到获得良好效果。其流道和浇口参数被逐次扩

大。进行塑料流动和冷却模拟，模具设计者可以反复研究流道的表现，直到设计者满意为止。

在浇注系统设计中，CAE 工具为设计者仅提供支持决策过程的信息。整个设计遵循相关设计理念、公式和用户定义的浇注系统标准。以浇口的设计为例，浇口数目应根据充满型腔的压力和浇口最少数目来选择。模具中浇口位置对注塑件质量有很大影响。浇口位置影响模具的排气、翘曲、收缩、溢流和欠注。因此，浇口位置应该在流动平衡原则上确定。明确给定的设计标准，包括注塑件的翘曲缺陷，关于流动痕和熔合缝的外观要求，聚合物材料的冲击强度等工程特性。CAE 分析工具支持的浇口设计，可用来分析浇口数目，比较位置和参数是否优化，确保满足相关设计要求。同样，在流道设计中保证有良好参数，理想的情况是能确保在同一时间有相同温度，让塑料熔料流动前峰到达流道的终点。此外，流道还要起塑料熔体流动速率平衡的作用，让熔体以相同进度将塑料充满每个型腔。因为塑料熔体在每个流道中的条件和表面阻力是不同的，所以要取得这样效果是很难的。而且，在浇注系统设计中，良好的流动模式应能避免出现任何弊端。CAE 分析是迭代过程，最佳浇注系统经过设计方案修改，它的参数要经过多次流动和冷却的模拟。

4）冷却系统设计。模具的冷却时间在整个注射循环周期中占有大于 75% 的时间。因而，它对减少循环周期有很大潜能。改善冷却设计能提高生产率。换言之，以均匀平衡的冷却为设计的目标，能减少收缩率的差异，降低内应力和翘曲，改善注塑件的质量。因此，冷却系统的设计课题是取得注塑件快速、均匀和平衡的冷却。主要的设计变量，包括冷却管道的尺寸及其位置和连接、冷却流体及其输入温度、在每个管道中的流速。CAE 分析能预测冷却时间和注射周期。预知每次循环中聚合物熔体释放的热量，了解塑料熔体温度和分布，了解每个冷却管道的热传递中携出的热量。在设计冷却系统时，在给定目标函数、变量和约束的数值分析中，得到优化的冷却管道数目、尺寸、位置和冷却液流速。

应用传统方法，进行热传递分析是困难的。热分析涉及塑料熔体、模具、冷却液和模具里的温度分布。要设计冷却管道数目、尺寸、位置，需要研究冷却设计与制品质量及生产率的关系，解决这些问题是困难的。CAE 工具帮助设计者，在冷却系统设计与热传递分析中，获知从塑料制品到模具型腔表面、从模具到冷却液的温度分布。

（3）工艺设计的优化

1）注射成型工艺。注射成型过程由三个主要方面组成：充模流动、熔料保压和制品冷却。注射循环开始，在注射成型温度下塑料熔体充填型腔。在模具所有型腔充填后，一些添加的聚合物熔体在很高的压力下需要补充到型腔里，以补偿注塑件的收缩。模具冷却过程中，聚合物熔体冷却并固化。本质上是从注塑件向模具表面和冷却液传热，直到注塑件有效固化后从型腔中顶出。脱模顶出是注射循环中最后的动作过程。前三个是注射成型过程中的主要过程。

随着对注射成型注塑件质量要求提高，由于注射机种类、模具结构、操作者技能与塑料材料的性能之间关系复杂，相关生产问题使注射成型生产经常有重大的延误和提高

了成本。

在注射成型工艺设计时应用 CAE，帮助设计者确定工艺条件和参量。CAE 应用在工艺设计中，以注塑件的结构和塑料性能为依据，能进一步提供深层次分析，用模拟结果的信息确定最佳工艺条件和参量。对一些宏观的缺陷，如欠注、飞边、焦斑、凹陷、可见的熔合缝和翘曲等，能有效解除其形成倾向。

在注射成型工艺设计中需要进行流动模拟、冷却模拟、注塑件结构和纤维取向的预测。这些分析将引导在注塑件的设计阶段或模具设计的早期，选择确定注射机的加工参量，或者调整工艺。由各种分析和模拟可揭示各自相关信息，建立不同加工工艺方案。综合众多资料，设计者能搞懂在注射成型加工循环中的内在和表观的现象，以设计最好的注射成型工艺。

2）保证制品的工艺质量。较差的注射成型工艺设计和欠缺塑料熔体流动模式，使成型塑料件会有些缺陷和弊端。为了避免缺陷，就要揭示这些质量问题的根源。应用 CAE 分析工具可以实现这个目标。在一定程度上，CAE 分析工具可帮助避免或消除如下缺陷。

① 熔合缝和流动痕。当两股或更多的塑料熔体在模具型腔里相对而遇时，会产生一条很细的熔合缝。流动途径中的塑料熔流绕过障碍分离后，在另一侧聚合成熔合缝。熔合缝是在注射成型加工期间，由于不规则的流动模式而生成的制品缺陷。

流动痕也是注射成型加工中的流动缺陷。它是两股熔体流动前锋在相同方向上相持而形成的。流动痕也是不规则的流动模式造成的。注塑件上熔合缝和流动痕会降低所在区域的力学性能。如果它们不能消除，就应该转移到不敏感的区域。

在注射成型中应用 CAE 软件能挑明这些缺陷的成因，并从根源上找出相应的解决方法。

② 收缩。模具中的聚合物从注射成型温度下降到环境温度时，由于密度变化而造成收缩。聚合物分子链的收缩，即聚合物分子链与相邻分子链排列并缠绕，对于高度结晶的聚合物，由于形成致密的晶体结构，而有更大的收缩。较厚截面的注塑件，由于塑料熔体冷却缓慢，制品上各区域收缩变化很大，一些区域会有凹陷出现。收缩的变化在注塑件中诱发残余应力。如果残余应力超过了制品强度极限，就会产生翘曲或开裂。通常，在更高的熔料温度和模具温度下，由于更大的分子能量和随后的缠绕能力，塑料熔体会有更大的收缩。更高保压压力可以补偿它的收缩。

CAE 收缩分析能预测产生收缩的原因。它首先揭示分子链或纤维取向，分析出最大收缩的方向，给出预测的收缩率，以便采取避免和限制的措施。它也能认知注塑件的不均匀温度分布和不平衡的冷却，将会产生收缩的差异。高的成型压力促使聚合物密度变化，接着使注塑件的收缩更不均匀。为预测和限制收缩率，需要将模具的冷却模拟与注射成型压力和热传递的分析结合在一起。

③ 翘曲。注塑件里分子链的取向会造成形体的翘曲变形。在塑料注射成型中，塑料熔体沿着很小的型腔间隙通道流动。分子链因此沿着流动方向变形延伸。当塑料冷却时，分子链试图松弛成原始的缠绕状态。但是，由于快速冷却，变形延伸的分子链不能

松弛到原始的缠绕状态，大部分处于非卷绕状。注射成型凝固后的分子链试图恢复缠绕，结果造成了注塑件翘曲。另一方面，翘曲被认为是收缩率差异所致。注射成型中聚合物分子和纤维取向，温度的变化、保压变化和压力差异，都会促使收缩率产生差异。

CAE 翘曲分析模拟是基于预测取向、冷却模拟、充模流动和保压分析结果，在注塑件结构分析基础上，分析翘曲原因的。这些分析可以检测翘曲位置和程度，找到限制翘曲的适当措施。注射成型中通过改善流动和冷却均匀性，减少收缩率变化，能解决翘曲问题。

④ 气囊。气囊是在注塑件里的气体积聚。注射成型期间的塑料熔体在流动过程中，熔体里内含的气体跟随运动，当气体不能有效排除时，它积累在注塑件中形成压缩空气泡，即气囊。

CAE 流动模拟能分析气囊的形成过程和位置。它是注射成型中熔料前沿推进的结果。通常，如果气囊在注塑件的表层，用模具设计中的排气槽很容易排出。如果气囊在注塑件的里层，它已进入塑料熔体内占据了空间，并凝固成块。这些气囊在过热的位置，会使注塑件上出现热斑。CAE 分析中能改变浇口位置，以避免产生气囊。

参 考 文 献

[1] Fuh J Y H，Zhang Y F，Nee AY G，et al. 计算机辅助注射模设计和制造［M］. 徐佩弦，译. 北京：机械工业出版社，2009.

[2] 李名尧. 模具 CAD/CAM［M］. 北京：机械工业出版社，2005.

[3] 李德群. 现代塑料注射成型的原理、方法与应用［M］. 上海：上海交通大学出版社，2005.

本书主要内容

- 塑料及注射制品
- 塑料注射成型的基础理论
- 注射成型工艺
- 注射模具的基本结构
- 精密注射成型
- 注射成型精度和成本分析
- 注射制品的结构和模具设计
- 浇注系统的设计
- 成型零件设计
- 脱模和抽芯机构设计
- 模具温度调节系统设计
- 热流道注射模具设计
- 特种注射成型与模具设计
- 注射模具CAD/CAE

地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版

上架指导 工业技术/机械工程/模具
ISBN 978-7-111-43724-6
策划编辑◎陈保华

ISBN 978-7-111-43724-6
9 787111 437246 >
定价：119.00元