国际机械工程先进技术译丛

注射模具设计工程

Injection Mold Design Engineering

（美）David O.Kazmer 著

王建 焦志伟 杨卫民 等译

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

国际机械工程先进技术译丛

注射模具设计工程

[美] David O. Kazmer 著
王 建 焦志伟 杨卫民 邵珠娜 戴长军 周 星 刘 斐
肖 勇 肖 鑫 丁玉梅 译

机 械 工 业 出 版 社

本书详细介绍了注射模具的相关内容，包括模具费用评估和模具设计、型腔设计、流道与浇口设计、排气与冷却系统设计、推出系统设计、结构系统设计等相关技术。本书提供了许多重要模具工程概念方面的严谨分析和实例，有针对性地探究了注射模具工程的普遍问题。

本书可供产品设计人员、模具设计人员、从事塑料注射成型的操作人员使用，也可供高等院校相关专业的师生参考。

Injection mold design engineering/By David O. Kazmer/ISBN:
Copyright© 2007
Carl Hanser Verlag, Munich/FRG
All Rights reserved.
Authorized translation from the original German language edition published by Carl
Hanser Verlag,
Munich/FRG.
China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.
北京市版权局著作权合同登记号：01-2009-1323

图书在版编目（CIP）数据

注射模具设计工程/（美）卡兹莫（Kazmer, D. O.）著；王建等译. —北京：机械工业出版社，2013.10
（国际机械工程先进技术译丛）
书名原文：Injection mold design engineering
ISBN 978-7-111-44119-9

Ⅰ.①注… Ⅱ.①卡…②王… Ⅲ.①注射—塑料模具—设计
Ⅳ.①TQ320.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 223329 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：孔 劲 责任编辑：孔 劲 吕 芳
版式设计：霍永明 责任校对：刘怡丹
封面设计：鞠 杨 责任印制：张 楠
涿州市京南印刷厂印刷
2014 年 1 月 1 第 版第 1 次印刷
169mm×239mm · 20.5 印张 · 460 千字
0001—3000 册
标准书号：ISBN 978-7-111-44119-9
定价：69.00 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）88379772

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

译 丛 序

一、机械工程高速发展

机械工程是以自然科学和技术科学为理论基础，结合在生产实践中积累的技术经验，研究和解决机械产品开发、设计、制造、安装、运用、修理及再制造等方面的全部理论和实际应用的学科。机械工程的学科内容包括：机械工程基础理论研究，机械产品开发、设计，机械产品的制造、装备、检验，机械产品的应用与维护，机械制造企业的经营和管理，机械产品的绿色生命周期等问题及技术措施。机械工程先进技术涉及设计、制造、应用、管理等相关环节的机械、电子、信息、材料、能源和管理科学等领域的先进技术。

20 世纪后期，特别是进入 21 世纪，计算机、信息技术在机械工程领域的广泛、深入应用，使机械工程技术高速发展。机械工程技术由线性到非线性、由静态到动态、由二维到三维的研究发展，为现代机械设计方法的研究、应用奠定了工程理论基础；虚拟技术、创新设计、绿色设计、并行工程等，为现代机械设计提供了技术基础；机床数控技术、工业机器人、柔性制造技术、传感技术、集成制造技术、自动检测及信号识别技术等，为机械制造工艺自动化提供了支撑技术；ERP（企业资源计划）、MES（制造管理信息系统）、CIMS（计算机集成制造系统）等，为机械制造企业的经营和管理提供了现代化的支撑平台；PLM（产品全生命周期管理）、IWM（废物管理一体化）、EMS（环境管理体系）等理念、技术的发展，已成为机械工程先进技术的重要组成部分。

机械工程先进技术是实现工业技术现代化重要的技术支撑之一。但是，机械工程先进技术的发展要受到自然条件、经济条件、社会条件、技术基础等的限制，我国作为发展中国家，在机械工程先进技术方面同工业发达国家还有很大差距。为了加快我国机械工程先进技术的发展进程，通过各种方式引进外国机械工程先进技术，是一条切实可行的发展之路。

二、图书交流传播知识

图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式。早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络通信、计算机等信

息传输和储存手段，但图书仍将以严谨性、系统性、广泛性、适应性、持久性和经济性而长期存在。纸质图书有更好的阅读优势，可满足不同层次读者的阅读习惯，同时它具有长期的参考价值和收藏价值。

近年来，国际间的交流与合作对机械工程技术领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，对机械工程技术领域科技人员及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、取得的最新成果及应用情况等，发挥了积极作用。

机械工业出版社希望通过引进、翻译国外机械工程技术领域的先进技术图书，传播国外机械工程领域的先进技术，推动国内学者和技术人员对国外机械工程先进技术的引进、消化、吸收和创新发展，从而提升我国机械工程技术的自主创新能力，提高我国装备制造业的技术水平，加速实现我国工业的现代化。

三、精挑细选精雕细刻

为真正实现翻译国外机械工程技术领域先进技术图书、推动我国机械工程技术发展的战略目标，机械工业出版社将认真执行：

(1) 精挑细选　坚持从机械工程技术比较发达的国家、国外优秀出版社引进优秀技术图书，组成一套《国际机械工程先进技术译丛》。本套译丛将涵盖机械工程的基础理论研究，产品开发、设计、制造、运用、维修、再制造和资源、环保、信息、管理等相关学科。

(2) 精雕细刻　本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员把关，以充分保证图书内容的先进性、适用性和翻译质量。内容翻译力争达到信、达、雅，真正实现传播国际机械工程先进技术，服务于国内机械工程技术的发展。

(3) 精益求精　本套丛书作为我社的精品重点书，将统一封面装帧设计，在版式编排、内容编校、图书印制等方面追求高质量，把“精品”体现到书的整体中去，力求为读者奉献一套高品质的《国际机械工程先进技术译丛》。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢广大积极热心支持出版《国际机械工程先进技术译丛》的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐翻译的知名专家；特别要感谢承担翻译工作的译者所付出的辛勤劳动；同时要感谢从事图书版权贸易的工作人员的辛勤工作。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社《国际机械工程先进技术译丛》编委会

前　言

模具设计与其说是一个工程过程，不如说是一种技术贸易。通常，行业从业者共享标准的加工方法，互相学习加工技巧，制造出来的复杂模具往往超过客户的预期。

然而，在模具设计中，基本工程分析的不足经常导致模具设计失败或者需要大量的返工，生产的模具质量低劣或者成本效益比能实现得低。事实上，据估计，平均50个模具中就有49个在开始阶段就需要进行一些修改。很多时候，模具设计人员和最终的用户可能都不知道还有多少“盈利空间”。

书名中的“工程”一词意味着模具设计是一个有条理的分析过程。了解设计决策和模具性能之间因果关系的工程师，有能力在满足应用要求的基础之上做出更好、更明智的决策。拥有这种决策能力的工程师是竞争的推动者，其设计的定制模具比按标准方法加工的模具性能更优异。熟练的工程师还可避免因将决策委托给未必更能胜任的其他方而花费的成本和时间。

本书主要面向紧密集成供应链中的专业工作人员，包括产品设计者、模具设计者和从事注射成型的操作人员，也可以作为教学用书。与大多数手册相比，本书提供了许多重要模具工程概念方面的严谨分析和详细讨论的实例，并有针对性地探究了注射模具工程普遍和基本的方面。

希望本书对所有读者都是易于理解并且有用的。欢迎您的反馈，以使本书有进一步的提高。

致以诚挚的感谢！

美国注册工程师，博士 David Kazmer
美国马萨诸塞州罗威
2007年6月1日

目　　录

译丛序

前言

第 1 章　绪论 …… 1

1.1　注射成型过程概述 …… 1
1.2　模具功能 …… 3
1.3　模具结构 …… 4
1.3.1　模具的外部视图 …… 4
1.3.2　制品推出时的模具视图 …… 5
1.3.3　模具断面和功能 …… 6
1.4　其他常见的模具类型 …… 8
1.4.1　三板、多腔集成模具 …… 8
1.4.2　热流道、多浇口、单型腔模具 …… 9
1.4.3　比较 …… 10
1.5　模具开发过程 …… 11
1.6　本章小结 …… 12

第 2 章　塑料零件设计 …… 13

2.1　产品开发过程 …… 13
2.1.1　产品的定义 …… 14
2.1.2　产品的设计 …… 14
2.1.3　业务和生产的开发 …… 14
2.1.4　放大和投产 …… 14
2.1.5　模具设计的作用 …… 15
2.2　设计要求 …… 15
2.2.1　应用工程信息 …… 15
2.2.2　生产数据 …… 16
2.2.3　最终使用要求 …… 17
2.2.4　产品设计方法 …… 18
2.2.5　塑料材料特性 …… 19
2.3　注射成型的设计 …… 21
2.3.1　均匀壁厚 …… 21

2.3.2　加强筋的设计 …… 22
2.3.3　凸台的设计 …… 22
2.3.4　拐角的设计 …… 23
2.3.5　表面粗糙度和纹理 …… 24
2.3.6　脱模斜度 …… 25
2.3.7　倒陷 …… 26
2.4　本章小结 …… 27

第 3 章　模具费用评估 …… 28

3.1　模具的报价过程 …… 28
3.2　注射制品的成本驱动因素 …… 29
3.2.1　产量的影响 …… 30
3.2.2　收支平衡分析 …… 31
3.3　模具成本评估 …… 33
3.3.1　型腔成本评估 …… 34
3.3.2　模架成本评估 …… 40
3.3.3　模具定制成本评估 …… 42
3.4　制品成本评估 …… 45
3.4.1　单个制品的模具成本 …… 45
3.4.2　单个制品的材料成本 …… 46
3.4.3　单个制品的加工成本 …… 47
3.4.4　单个制品的缺陷成本 …… 49
3.5　本章小结 …… 49

第 4 章　模具设计 …… 51

4.1　分型面的设计 …… 51
4.1.1　确定开模方向 …… 51
4.1.2　确定分型线 …… 53
4.1.3　分型面 …… 53
4.1.4　流道 …… 55
4.2　型腔和型芯的制造 …… 56
4.2.1　高度尺寸 …… 56
4.2.2　长度、宽度尺寸 …… 57
4.2.3　调整 …… 57
4.3　模具底板的选择 …… 58
4.3.1　型腔的分布 …… 58
4.3.2　模具底板的尺寸 …… 60
4.3.3　注射成型机的兼容性 …… 61

4.3.4 模具底板供应商 …… 62
4.4 模具材料的选择 …… 63
4.4.1 强度与热传递性 …… 63
4.4.2 硬度与机械加工性能 …… 63
4.4.3 模具制造商的成本与注射成型机的成本 …… 65
4.4.4 材料汇总 …… 66
4.5 本章小结 …… 66

第5章 型腔填充分析与设计 …… 68

5.1 概述 …… 68
5.2 型腔填充分析的目的 …… 68
5.2.1 完全填充模具型腔 …… 68
5.2.2 避免不均匀填充或过保压 …… 69
5.2.3 控制熔体流动 …… 70
5.3 黏性流动 …… 70
5.3.1 剪切应力、剪切速率、黏度 …… 70
5.3.2 压力降 …… 71
5.3.3 流变特性 …… 71
5.3.4 牛顿模型 …… 73
5.3.5 幂律模型 …… 74
5.4 验证 …… 75
5.5 型腔填充分析和设计 …… 77
5.5.1 预测工艺条件 …… 77
5.5.2 预测填充压力和最小壁厚 …… 79
5.5.3 预测锁模力 …… 81
5.5.4 预测填充形式 …… 83
5.5.5 设计流动引导 …… 84
5.6 本章小结 …… 87

第6章 浇注系统设计 …… 89

6.1 概述 …… 89
6.2 浇注系统设计的目的 …… 89
6.2.1 把聚合体熔体从机器传到型腔 …… 89
6.2.2 产生最小压力降 …… 90
6.2.3 消耗材料最少 …… 90
6.2.4 控制流动速率 …… 91
6.3 浇注系统的类型 …… 92
6.3.1 两板式模具 …… 92

6.3.2　三板式模具 …… 94
6.3.3　热流道模具 …… 98
6.4　浇注系统分析 …… 100
6.4.1　确定流道系统的类型 …… 101
6.4.2　确定流道系统的布局 …… 101
6.4.3　预测压力降 …… 104
6.4.4　计算流道体积 …… 106
6.4.5　优化流道直径 …… 106
6.4.6　平衡流量 …… 108
6.4.7　预测流道冷却时间 …… 111
6.4.8　预测滞留时间 …… 112
6.5　实际问题 …… 112
6.5.1　流道横截面 …… 113
6.5.2　拉料杆 …… 115
6.5.3　流道开关 …… 116
6.5.4　标准流道尺寸 …… 117
6.5.5　保险设计 …… 117
6.6　本章小结 …… 118

第7章　浇口设计 …… 120

7.1　浇口设计的目的 …… 120
7.1.1　连接流道与型腔 …… 120
7.1.2　提供自断浇口 …… 120
7.1.3　提供美观的断浇口 …… 120
7.1.4　避免额外的剪切或压力降 …… 120
7.1.5　控制保压时间 …… 121
7.2　常见浇口设计 …… 121
7.2.1　直浇口 …… 121
7.2.2　点浇口 …… 122
7.2.3　侧浇口 …… 123
7.2.4　搭接浇口 …… 123
7.2.5　扇形浇口 …… 124
7.2.6　闸式/盘形浇口 …… 125
7.2.7　隧道式/潜伏式浇口 …… 126
7.2.8　热浇口 …… 128
7.2.9　阀式浇口 …… 130
7.3　浇口设计步骤 …… 131
7.3.1　确定浇口类型 …… 131

7.3.2 计算剪切速率 …… 131
7.3.3 计算压力降 …… 133
7.3.4 计算浇口冻结时间 …… 134
7.3.5 调整尺寸 …… 135
7.4 本章小结 …… 136

第 8 章 排气设计 …… 137

8.1 排气设计的目的 …… 137
8.1.1 释放压缩空气 …… 137
8.1.2 避免塑料熔体溢出 …… 137
8.1.3 维修最小化 …… 137
8.2 排气分析 …… 137
8.2.1 估算空气排除速率 …… 138
8.2.2 确定排气孔数目和位置 …… 138
8.2.3 确定排气孔尺寸 …… 140
8.3 排气设计 …… 142
8.3.1 分型面上的排气孔 …… 142
8.3.2 推杆周围的排气孔 …… 143
8.3.3 死角处的排气孔 …… 144
8.4 本章小结 …… 147

第 9 章 冷却系统设计 …… 148

9.1 冷却系统设计的目的 …… 148
9.1.1 最大传热率 …… 148
9.1.2 保持壁温均匀 …… 148
9.1.3 最小模具成本 …… 148
9.1.4 最小体积和复杂性 …… 149
9.1.5 最小应力和腐蚀 …… 149
9.1.6 模具使用设施 …… 149
9.2 冷却系统设计过程 …… 149
9.2.1 计算所需冷却时间 …… 149
9.2.2 预估所需传热速率 …… 153
9.2.3 预估冷却介质的流动速度 …… 154
9.2.4 预估冷却通道直径 …… 155
9.2.5 选择冷却通道深度 …… 157
9.2.6 选择冷却通道间距 …… 158
9.2.7 冷却通道排布 …… 160
9.3 冷却系统设计 …… 163

9.3.1　冷却通道网络 …… 163
9.3.2　冷却镶件 …… 165
9.3.3　随形冷却 …… 166
9.3.4　高热导率镶件 …… 166
9.3.5　长芯的冷却 …… 167
9.3.6　单边热流 …… 170
9.4　本章小结 …… 172

第 10 章　收缩和翘曲变形 …… 174

10.1　收缩分析流程 …… 175
10.1.1　估计工艺条件 …… 175
10.1.2　压缩行为模型 …… 176
10.1.3　估计体积收缩 …… 177
10.1.4　估计各向同性线性收缩 …… 179
10.1.5　估计各向异性收缩 …… 180
10.1.6　评估收缩范围 …… 181
10.1.7　建立最终的收缩推荐 …… 182
10.2　收缩分析和验证 …… 183
10.2.1　数值模拟 …… 183
10.2.2　“保险柜”模具设计 …… 184
10.2.3　工艺关系 …… 186
10.2.4　半结晶塑料 …… 187
10.2.5　填料的影响 …… 187
10.3　翘曲 …… 188
10.3.1　翘曲的原因 …… 188
10.3.2　避免翘曲的措施 …… 190
10.4　本章小结 …… 191

第 11 章　推出系统设计 …… 193

11.1　推出系统设计目标 …… 195
11.1.1　开模 …… 195
11.1.2　传递给制品的推出力 …… 195
11.1.3　制品扭曲最小 …… 196
11.1.4　驱动快速可靠 …… 196
11.1.5　冷却干扰最小 …… 196
11.1.6　制品表面影响最小化 …… 196
11.1.7　复杂性和成本最小化 …… 197
11.2　推出系统设计流程 …… 197

11.2.1 确定模具分型面 …… 197
11.2.2 估算推出力 …… 197
11.2.3 确定推出面积和周长 …… 200
11.2.4 明确推出部件的类型、数量和尺寸 …… 201
11.2.5 推出部件的排布 …… 202
11.2.6 具体的推出部件和相关部件 …… 205
11.3 推出系统分析和设计 …… 206
11.3.1 推杆 …… 206
11.3.2 扁推杆 …… 207
11.3.3 推管 …… 209
11.3.4 推件板 …… 210
11.3.5 围绕倒陷的弹性变形 …… 211
11.3.6 抽芯 …… 213
11.3.7 滑块 …… 216
11.3.8 先行推出回退系统 …… 218
11.3.9 高级推出系统 …… 219
11.4 本章小结 …… 219

第 12 章 结构系统设计 …… 221

12.1 模具设计的目的 …… 221
12.1.1 应力最小化 …… 222
12.1.2 模具变形最小化 …… 225
12.1.3 模具外形尺寸最小化 …… 226
12.2 板的分析与设计 …… 226
12.2.1 板的压缩 …… 226
12.2.2 板的弯曲 …… 228
12.2.3 支承柱 …… 231
12.2.4 侧壁中的剪切应力 …… 234
12.2.5 互锁 …… 236
12.2.6 应力集中 …… 238
12.3 型芯的分析与设计 …… 241
12.3.1 轴向压缩 …… 241
12.3.2 环向应力 …… 242
12.3.3 型芯变形 …… 243
12.4 紧固件 …… 244
12.4.1 配合 …… 245
12.4.2 内六角圆柱头螺钉 …… 247
12.4.3 定位销 …… 249

12.5　本章小结 …… 250

第 13 章　模具技术 …… 252

13.1　引言 …… 252
13.2　共注射成型模具 …… 253
13.2.1　共注射成型工艺 …… 253
13.2.2　共注射成型模具设计 …… 254
13.2.3　气体/水辅助成型 …… 255
13.3　镶件注射成型模具 …… 257
13.3.1　低压力模压成型 …… 257
13.3.2　镶件注射成型模具的壁面温控 …… 258
13.3.3　失芯注射成型 …… 259
13.4　注吹成型模具 …… 261
13.4.1　注吹成型 …… 261
13.4.2　多层注吹成型 …… 262
13.5　多重注射成型模具 …… 264
13.5.1　多次成型 …… 264
13.5.2　退型芯注射成型 …… 265
13.5.3　多工位注射成型模具 …… 267
13.6　浇注系统 …… 268
13.6.1　绝热流道 …… 268
13.6.2　叠层模具 …… 269
13.6.3　分支流道 …… 270
13.6.4　熔体动态控制 …… 272
13.7　模具壁温控制 …… 274
13.7.1　脉冲冷却 …… 274
13.7.2　传导加热 …… 276
13.7.3　电磁感应加热 …… 277
13.7.4　传热管理 …… 278
13.8　模内贴标 …… 279
13.8.1　静电膜 …… 280
13.8.2　牵引膜 …… 281
13.9　推出 …… 282
13.9.1　分瓣型腔模具 …… 282
13.9.2　可拆卸型芯 …… 283
13.9.3　旋转型芯 …… 285
13.9.4　反向推出 …… 287
13.10　本章小结 …… 287

附录 …… 289

附录 A 塑料性能 …… 289
附录 B 模具材料性能 …… 295
附录 C 冷却剂性能 …… 297
附录 D 劳动力统计数据 …… 297
附录 E 单位换算 …… 301
附录 F 高级推导——熔化速率推导 …… 302

术语 …… 304

参考文献 …… 310

第 1 章　绪　　论

注射成型是一个奇妙的过程，可以经济地制造极其复杂的高精度零件。然而，在任何零件成型之前，必须设计、制造和定制一个合适的注射模具。注射模具本身就是一个非常复杂的系统，它由多个组件构成，承受温度和压力的周期性变化。

工程师必须量体裁衣式地设计注射模具，这意味着，应以最低的成本生产质量最好的模具零件，同时使得开发所需的时间和成本也最少。据此，本章将进行如下叙述：首先，概述注射成型的过程，以便模具设计工程师在设计模具时可以估计模具的工作状况；其次，展示几种常见的模具设计的布局和组件，本书假定，模具设计工程师熟悉注射成型工艺及其模具的基本结构和功能；最后，对模具工程设计的方法进行讨论。

1.1　注射成型过程概述

图 1.1 所示为一台正在工作的注射成型机。注射成型被称为近成型制造工艺，因为它迫使聚合物熔体进入一个空的型腔，然后冷却得到最终所需的形状。

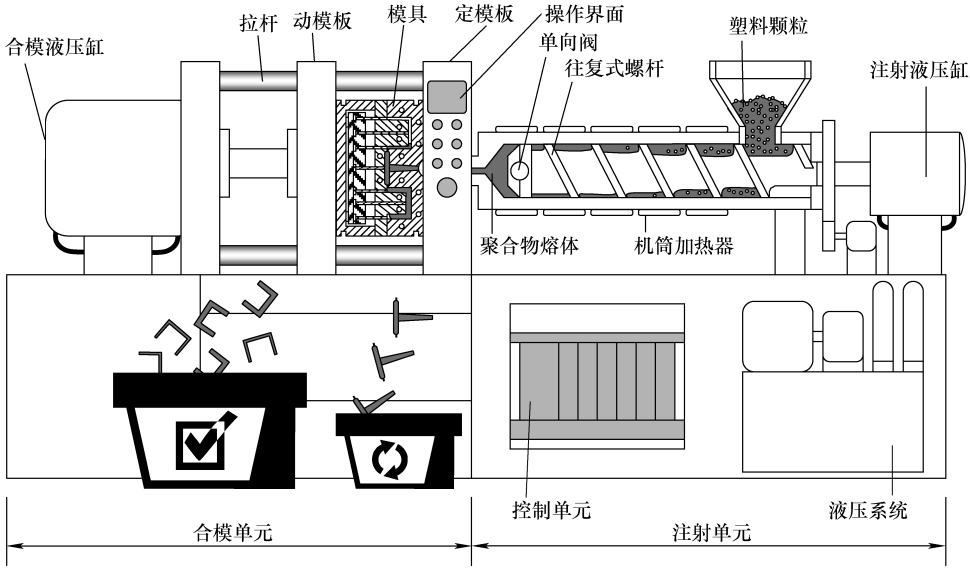


图 1.1　注射成型过程示意图

然而不同的成型工艺在设计和操作上有很大的不同，大多数注射成型工艺一般包括塑化、注射、保压、冷却和模具复位阶段。塑化阶段，在机筒加热和内部螺杆旋转使分子变形引起的内部黏性发热的联合作用下，聚合物由固体颗粒塑化成熔体。填充阶段，聚合物熔体被强制从注射成型机机筒中挤出并注入模具中。树脂熔体通过浇注系统和浇口进入一个或多个型腔，最终形成一个或多个制品。

聚合物熔体充满型腔后，在保压阶段提供额外的材料进入型腔填补由于塑料熔体冷却收缩而产生的空间。塑料的体积收缩率随材料的性质和使用要求的变化而变化，但通常在保压阶段，注塑机强制使得 1% ~10% 的额外熔体进入型腔。聚合物熔体停止流动之后，冷却阶段为型腔中的树脂固化和形成推出所需的足够的刚性提供了额外的时间。然后在模具复位阶段，注射成型机驱动必需的抽芯、滑块和推杆动作以打开模具并取出制品。

图 1. 2 所示为成型约 2mm 厚的零件所需的大致时间。充模时间只占成型周期的一小部分，所以通常通过减小注射压力和模内应力进行优化。保压时间是中等长度的，往往通过对浇口处冻结的聚合物熔体注射量的稳定性研究来缩短。在一般情况下，冷却阶段决定着整个成型周期的时间，这是因为聚合物熔体的热导率低，使得从聚合物熔体到较冷的模具钢的热传导速率受到限制。然而，当需要大的塑化量而塑化速率低时，塑化所需的时间就可能比冷却时间长。模具复位时间也是很重要的，需要最小化，因为它对注射制品也有很小的附加值。为了缩短成型周期和降低成本，模具设计者在使开模和推出行程最小化的同时实现操作过程的全自动化。

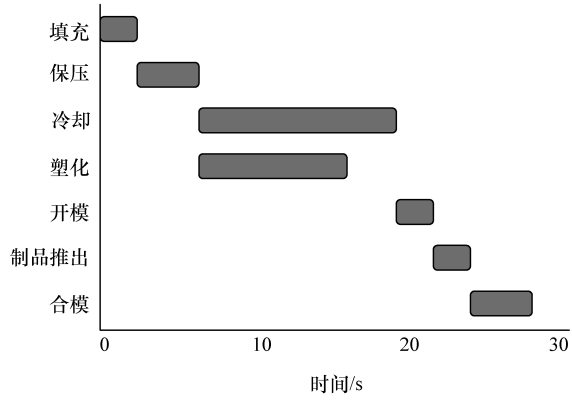


图 1. 2　注射过程的时间顺序

不同的注射成型工艺（如气辅注射成型、水辅注射成型、镶件注射成型、双注射成型、共注射成型、注射挤压成型以及第 13 章中介绍的其他成型工艺）被用于生产具有不同性能的重要产品，但是风险的增加限制了生产商的数量。

无论如何，一般的成型过程是类似的，都包括注射、冷却和制品的推出，这些不同工艺的成本估计和模具设计也很相似。模具设计与成型工艺的显著差异将在稍后讨论。

1.2　模具功能

注射模具是一个复杂的系统，它必须同时满足注射成型过程中的许多要求。模具的首要功能是用模具型腔容纳聚合物熔体，这样型腔就可以被充满从而形成形状与模具型腔一致的塑料制件；其次是有效地将热量从热的聚合物熔体转移到冷的模具钢上，使注射成型制品制造起来尽可能一致和经济；模具的第三个主要功能是以一种快速而可重复的方式将制品从模具中取出，以便后续成型可高效地进行。

这三个主要功能——熔化、热量传递和取出制品——也包括了注射模具的次级要求。图 1.3 提供了注射模具功能的部分层次结构。例如，将熔体包含在模具内的功能要求：

- 模具必须能承受巨大的力，这些力往往会使模具打开或变形。
- 模具要包含有一个浇注系统，用以连接注射成型机的喷嘴与模具的型腔，以便聚合物熔体的转送。

这些次要功能也可能会引起第三层次的功能，它们依赖于特定的模具组件。

应该认识到，图 1.3 并没有完全列出注射模具的所有功能，只列出了一部分主要和次要功能，在注射模具的工程设计中必须要考虑这些功能。即便如此，一个熟练的设计工程师可能会认识到，在模具设计中相互冲突的要求可以通过多样的功能来满足。例如，进行有效地冷却可以由使用多个间隔紧密的符合模具型腔的冷却通道来实现。但是，为了推出制品的需要，在特定位置处可能需要使用多个推杆，而这些位置可能与冷却通道相冲突。此时模具设计工程师要考虑相互矛盾要求之间的相对重要性，以最终完

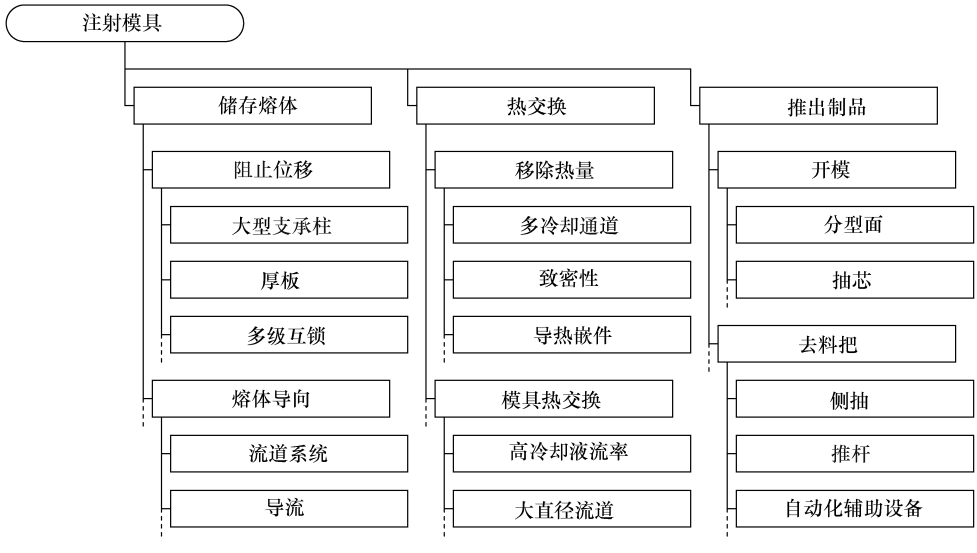


图 1.3　注射模具功能的层次结构

成一个令人满意的模具设计。当有疑问时，新手设计工程师会倾向于冗余设计。应当避免这种倾向，因为它会导致出现大的、昂贵的和低效的模具。

1.3　模具结构

注射成型模具有多种结构可实现注射成型过程中所需的功能，下面首先讨论一个简单的两板式模具的结构。模具设计人员要知道模具部件的名称和功能，后面的章节将阐述这方面的知识，这些组件和更复杂的模具也将在以后的章节中进行分析和设计。

1.3.1　模具的外部视图

图 1.4 提供了两板式模具的一个等轴测图。从图中可以发现模具是由一些板和螺栓用内六角圆柱头螺钉连接在一起组成的。

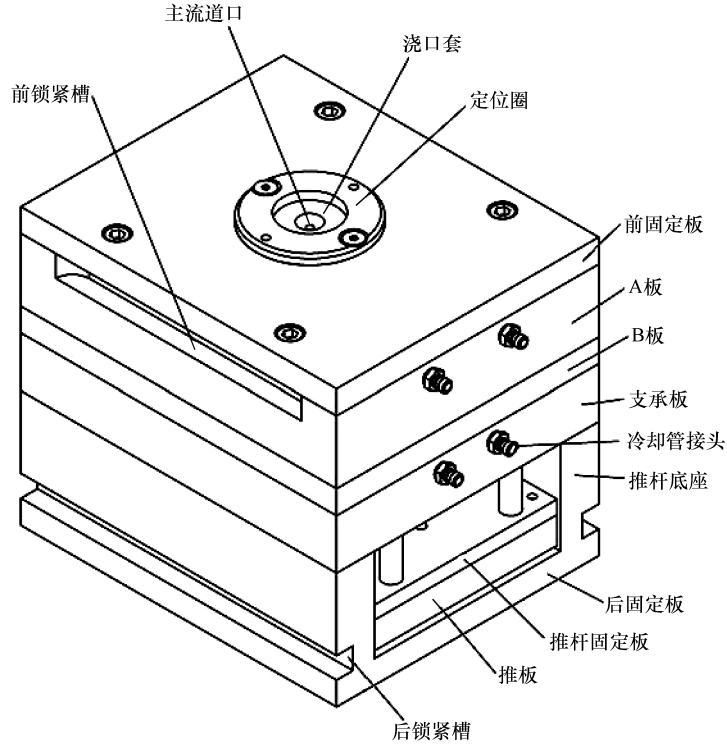


图 1.4　两板式模具闭模视图

这些板通常包括顶部的夹板、型腔镶件夹持板或 A 板、型芯镶件夹持板或 B 板、支承板和一个后夹板或推出支承板。一些模具组件有多个名称，例如，A 板有时称为型腔镶件夹持板，因为该板上包含有型腔镶件；另一个例子，有时称推出支承板为后夹紧板，因为它夹持在位于注射成型机后方的移动板上。

这种类型的模具称为两板式模具，因为它仅使用两块板来包容聚合物熔体。即使执行相同的功能，模具设计也可能会有显著的不同。例如，一些模具设计将 B 板和支承

板集成到一个特别厚的板中。另一个例子，一些模具设计可能分离推出支承板，它具有U 形轮廓，以容纳推出机构和夹紧槽，使其包含在后夹板中。图 1.4 所示为使用一个集成的推出支承板的紧凑型模具设计，这样独立后夹紧板和竖板的使用提供了更大的设计灵活性。

为了将模具紧固在注射成型机上，夹具插入顶部和后部夹紧板的夹槽中，并用螺栓固定在注射成型机的定模板和动模板上。定位圈通常位于模具的中心，与注射成型机中的定模板上的开孔相配合，实现模具的定位。定位环的使用是必要的，至少有两个原因。第一，模具入口处的熔体（浇口套）必须与注射成型机喷嘴出口处的熔体相配合。第二，注射成型机动模板后的推杆必须与模具的推出系统相配合。注射成型机和模具供应商已开发出标准规格的定位环，以使得模具与注射成型机具有兼容性，最常见的定位环的直径为 100mm。

当注射成型机的动模板被驱动时，附着在后夹板上的所有板将一起被移动，使得模具从分型面分离。当模具闭合时，导柱和导套用于准确地定位分型面两侧的 A 板和 B 板，这对模具容纳熔体这一功能至关重要。不当的模具组件构造可能会导致 A 板和 B 板无法对齐，制品的质量较差和加速模具的磨损。

1.3.2　制品推出时的模具视图

图 1.5 显示了模具的另一个等轴测图，以卧式注射成型机的操作为导向，从左至右。

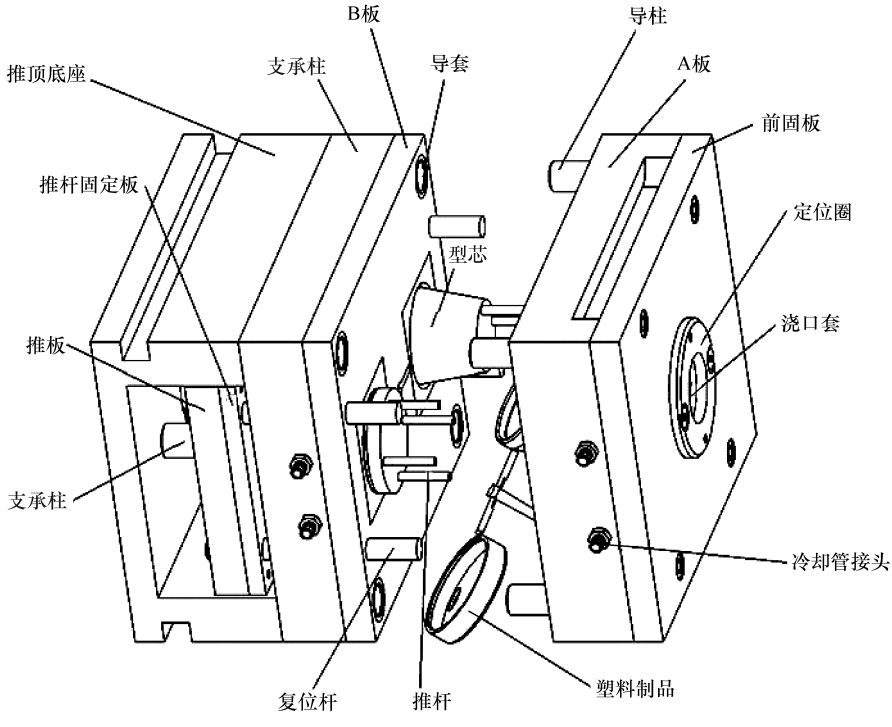


图 1.5　从注射成型模具中推出成型品的视图

塑料熔体被注入模具并在模具中冷却，为推出做好准备。为了实现推出，开模的距离至少应为制品的高度。然后推板和推杆前移，将制品从型腔中推出。从图中可以看出许多模具组件，包括 B 板或型芯镶件保持板、两个不同的型芯镶件、浇注系统、推杆、导柱和导套。

这种模具被称为两板、两腔集成模具。“集成模具”是指有多个组件的模具，在组装的模具中，可以同一时间生产出不同形状和/或尺寸的多个组件。“两腔”是指该模具具有两个型腔，它可以在一个成型周期内生产两种注射制品。这样的多腔模具可用于迅速和经济地生产高质量的模制产品。具有八个或更多个型腔的模具是常见的。型腔的数目是一个关键的设计参数，它影响模具的工艺、成本、尺寸和复杂性。成本估算方法将在第 3 章中阐述，为模具设计提供指导。

在一个多腔模具中，型腔布置在分型面上，这样在型腔之间为浇注系统、冷却通道和其他组件留出空间。通常希望尽可能地把型腔靠拢，同时不牺牲其他的功能，如冷却、推出等，从而能够设计出一个较小的模具，不仅更便宜而且也更容易制造，还可适用于更多的注射成型机。要使模具中的型腔数目显著增加，不仅可以通过使用更大的模具来实现，还可以通过使用不同类型的模具，如热流道模具、三板式模具或如后面所讨论的叠层模具来实现。

1.3.3 模具断面和功能

图 1.6 所示为两板式模具的俯视图和剖视图，其中剖视图是模具沿剖面 *A*—*A* 切断并从箭头方向观察所得到的。不同的组件采用不同的剖面线，以便识别。理解这些组件及它们彼此如何相互作用和整个成型过程是非常重要的。

现在考虑成型过程中模具组件的相对关系。在填充阶段，聚合物熔体通过浇口套上的浇口从注射成型机的喷嘴流到型腔中。熔体流过浇口套，进入位于分型面上的分流道。流体流遍整个分流道后通过小浇口进入型腔。熔体继续流动，直至所有的型腔被填充完全。

聚合物熔体流到型腔末端后，额外的材料在高压下被填充到型腔中，以补偿体积收缩。模板和支柱必须设计有抗变形功能，以抵抗熔体高压。保压时间的长短由浇口的尺寸和凝固时间来控制。在保压和冷却阶段，热量从聚合物熔体转移到在冷却通道内的循环冷却剂上。模具组件的热传导性以及冷却通道的大小和位置决定着传热速率和塑料冷却固化所需的时间。

制品冷却后，注射成型机的动模板被驱动，动模板上的一半（由 B 板、型芯嵌入支承板、推出系统和相关组件组成）与定模板上的一半（由顶部夹紧板、A 板、型腔镶件和其他部件组成）分离。典型的，制品留在动模板的一半上，因为它们已经收缩抱紧在型芯上。

模具打开时，注射成型机推动推板前进。推杆前进，推动制品脱离型芯。制品从模具上掉下来或由操作员或机器人拿走。之后，推板缩回，模具关闭，以接受下一个注射循环期间所需的熔体。

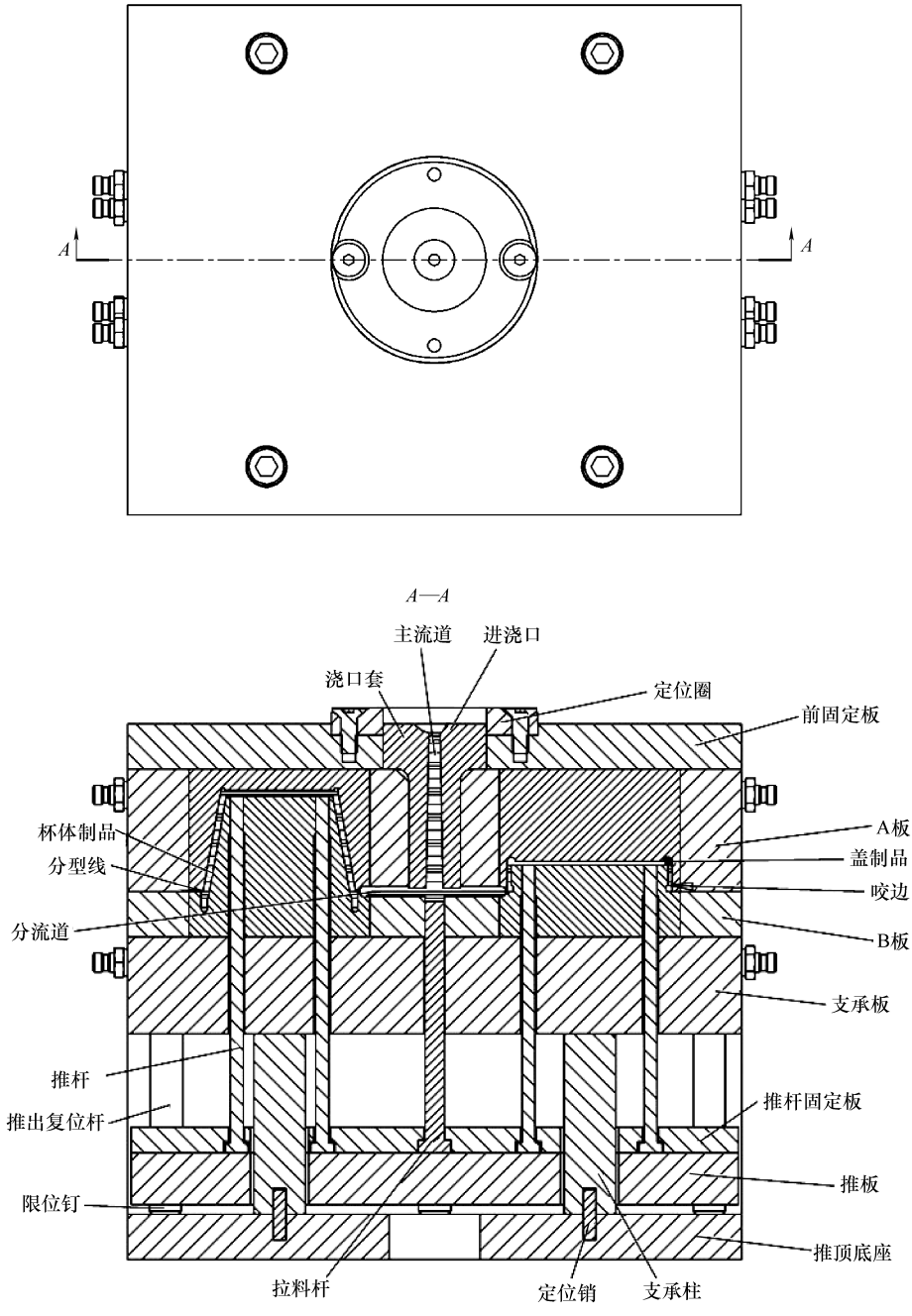


图 1.6　两板式模具的俯视图和剖视图

1.4 其他常见的模具类型

上面以一个简单的两板式模具为例介绍了注射模具的基本组成和功能。约一半的模具与该种两板式模具相似，因为这样的模具容易设计，且制造成本低。然而，两板式模具有许多限制，包括：

- 分型面对浇注系统路径的限制。
- 从浇注系统到型腔的浇口位置选择有限制。
- 型腔紧密间隔有限制。
- 熔体流过浇注系统时施加在模具上的附加力。
- 浇注系统的存在使得材料浪费。
- 浇注系统中熔体的塑化和冷却将延长成型周期。

出于这些原因，产量大的成型制品往往不采用两板式模具设计，取而代之的是利用更复杂的模具设计，以降低模具组件的生产成本。这样的设计包括：三板式模具、热流道模具、叠层模具等。三板式模具和热流道模具是除两板式模具外最常见的类型，接下来将进行介绍。

1.4.1 三板、多腔集成模具

三板式模具这样命名，是因为在型腔和顶部夹紧板之间存在第三板。

图 1.7 展示了一个完全打开、制品还在型芯上的三板式模具的结构图。如图 1.7 所示，额外的第三板在 A 板和顶部夹紧板之间为浇注系统提供了第二个分隔板。在注射过程中，塑料熔体从注射成型机喷嘴中流出，流经浇口套，通过主流道，到达浇口，最终流入型腔中。然后，浇注系统与制品一起冷却。

当模具打开时，在伸入主流道的拉料杆的作用下，冷流道将留在脱料板上。模具继续打开，连接在 B 板上的脱模杆将 A 板组件拉离顶部夹板。然后另一组脱模杆将脱模板拉离顶部夹板，使冷流道从主流道拉料杆上脱离。然后脱料板被拖动，强制制品脱离型芯。

三板式模具消除了两板式模具的两个显著的局限。第一，三板式模具允许将一级和二级分流道设置在型腔上方的板上，这样就可以在型腔的任何位置开浇口。开浇口的灵活性对改善注射制品的成本和质量是非常重要的。第二，三板式模具使浇注系统可以从型腔上自动分离。自动去浇口便于使用有全自动的注射周期的注射成型机以减少循环时间。

但是，三板式模具至少存在三个显著的潜在问题。第一且是最重要的，每个成型周期冷流道都要成型和推出。如果冷流道比制品还大，那么冷流道的成型会增加材料消耗和循环时间，从而增加成本。第二，三板式模具需要额外的板和组件用于冷流道的成型和推出，这就增加了模具的成本。第三，推出冷流道需要较大的开模行程。较大的模具高度（从顶部夹紧板的顶面到后夹紧的背面）可能会引起一定的问题，它需要注射成型机两板之间具有更大的空间，比两板和热流道模具所需的空间大。

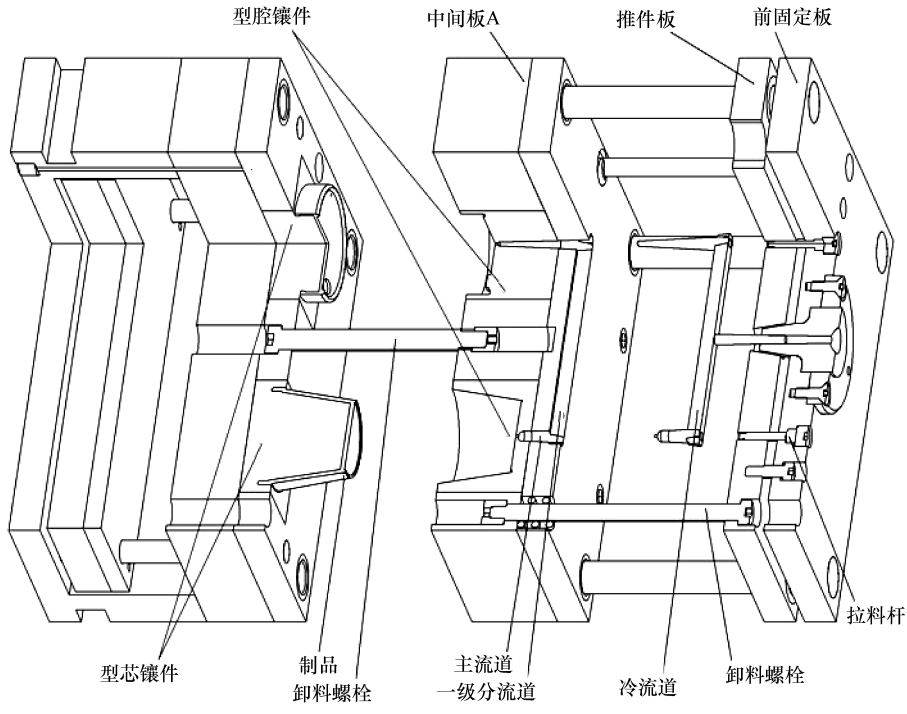


图 1.7　三板式模具开模的结构图

1.4.2　热流道、多浇口、单型腔模具

热流道模具具有三板式模具的长处而没有它们的缺点，但会引起其他的问题。称为“热流道”是因为浇注系统在整个成型周期内都保持在熔融状态下。在将熔体从注射成型机输送到型腔的过程中，热流道不浪费任何材料与成型时间。

图 1.8 所示为多浇口、单型腔模具。这个模具包含单个型腔，被设计用来生产笔记本电脑的前壳或边框。热流道系统包括一个热流道浇口套、一个热歧管以及两个热流道喷嘴加热器、导线和其他与加热相关的组件。热流道系统是经过精心设计的，通过使用空气间隙和最小的接触面积以尽量减少热流道系统和周围模具之间的热传递。类似三板式模具的设计，一级和二级分流道设置在型腔上面的歧管中以实现浇口位置的灵活设置。由于聚合物熔体保持熔融状态，热流道可被设计实现大流量和良好的压力传递能力。因此，热流道系统可以促进更薄制品的成型，且比两板式或三板式模具有更短的成型周期，同时也避免了与冷流道相关的废料。

在成型过程中，熔体通过注射成型机喷嘴注入热浇道中，推动先前储存在热流道中的熔体前进，进入型腔中。当型腔充满时，热浇口固化，以防止热的聚合物熔体在模具打开时从热流道系统泄漏到模具外。热流道系统内的熔体压力会使得这些热浇口在下一个注射循环开始时破裂。

有许多不同的热流道和浇口设计。热流道系统具有许多优势，包括浇口的灵活性，改善了压力传递，降低了材料消耗，提高了注射生产率，但也存在两个显著的缺点。第一，热流道系统需要为提供和控制温度增加投资。增加的投资是模具成本的一个重要部分，且并不是所有的模具制造商都有辅助的设备和专业知识或技能来操作和维护热流道模具。热流道系统的第二个缺点是增加了清除所包含的塑料熔体所需的时间。在短期的具有美观要求的生产应用中，所需的启动时间或改变树脂所需的时间可能是不可接受的。

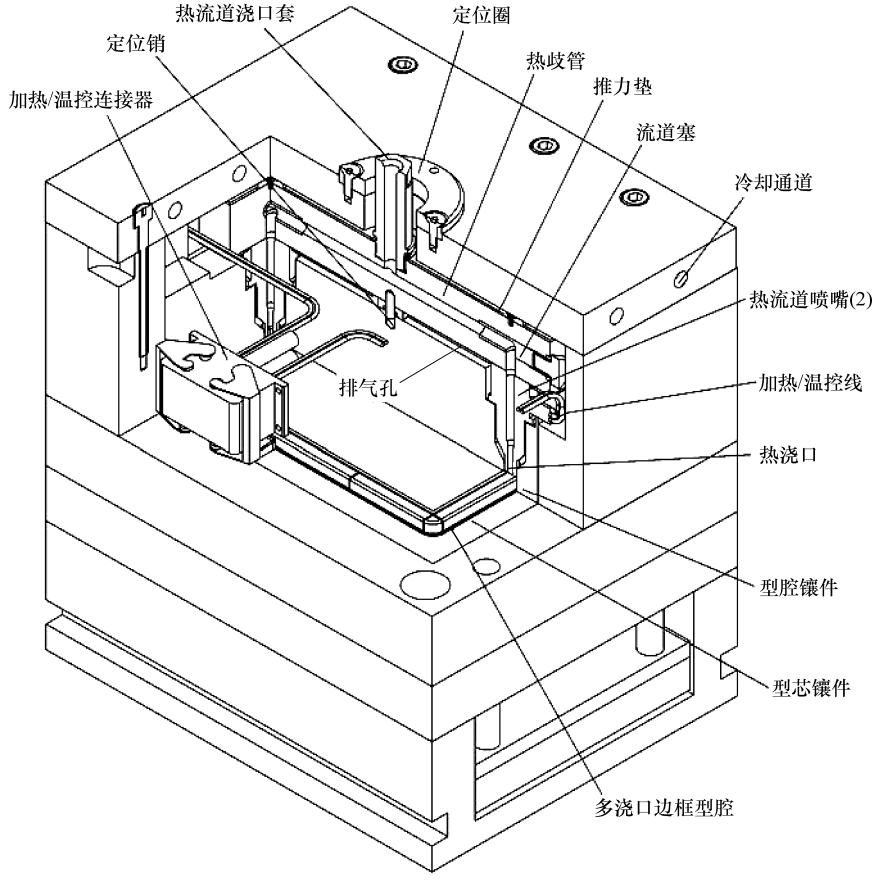


图 1.8　热流道模具的结构图

1.4.3　比较

在模具设计开发的初期，浇注系统类型的选择是一个关键问题。从模具设计工程师的角度来看，浇注系统的选择在模具设计、材料采购、模具制造、装配和测试流程中具有关键的作用。从模具制造商的角度来看，浇注系统的选择在很大程度上决定了模具的采购成本、成型效率和操作成本。

表 1.1 比较了不同类型模具的几个性能。一般来说，热流道模具在注射成型周期方面是很优秀的，但在初始投资、启动时间和持续的维护费用方面较差。相比之下，两板式模具的成本更低，但其成型循环性能有较多的局限。

表 1.1　浇注系统的比较

性能	两板式模具	三板式模具	热流道模具
浇口灵活性	差	优异	优异
材料消耗	好	差	优异
成型周期	好	差	优异
初始投资	优异	好	差
起动时间	优异	好	差
维护费用	优异	好	差

表 1.1 中三板式模具的评估值得进一步讨论。具体的，三板式模具不能提供与热流道模具一样高的成型循环性能，同时具有比两板式模具更高的成本。因为这个原因，随着低成本热流道系统的突破，出现了一种抛弃三板式模具的趋势。

1.5　模具开发过程

鉴于产品设计、模具设计、注射成型工艺之间存在大量的相互作用，模具开发过程是反复进行的过程，如图 1.9 所示。为了缩短产品的开发时间，产品设计与模具设计往往同时进行。事实上，一个产品设计工程师可能会收到一个合理的成本估算用于产品初步设计，其只提供了零件的外形尺寸、厚度、材料及生产数量。根据此信息，模具设计人员开发了一个初步的模具设计方案，并提供了一个初步的报价（这将在第 3 章中讨论）。这个初步报价要求注射制品商和模具制造商不仅要制定一个粗略的模具设计方案，而且要估计重要的变量，如所需的锁模力、机器的运行速度和周期时间。

一旦报价被接受，模具的工程设计将如图 1.9 右边所列出的步骤开始。首先，模具设计工程师将进行模具布局设计，指定模具的类型、型腔的数量和位置、模具的大小及厚度。然后，设计每一个所需的子系统，有时候需要重新设计之前设计的子系统。例如，由于需要设置推出系统，冷却系统就可能需要重新设计。

为了缩短开发时间，当模具设计完成时，可能会采购和定制模架和其他材料。这种同步工程不应该被应用到设计的模糊方面。许多模具制造商在确认订单后定制模架和板。得益于同步工程的实践，模具开发时间一般是几周而不是几个月[1]。客户通常放置一个溢价促使快速交付模具，模具制造商通常收取更多的费用以提供更快的服务。由于竞争的存在，客户正在越来越多地要求保证模具的交货时间和质量，对错过交货时间或质量低劣进行处罚。

模具设计、加工、抛光、组装之后，通常需要对模具进行测试以验证模具的基本功能是否可以实现。如果没有明显的不足之处，将对制品进行抽样，并根据相关规范进行

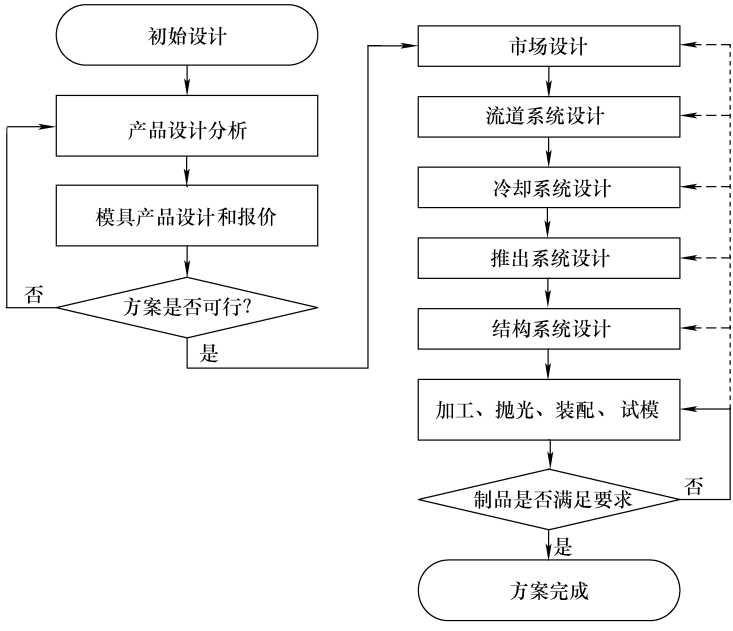


图 1.9　模具开发过程

质量评估。通常情况下，即使模具和成型工艺基本合格，也必须进行调整以提高产品质量，降低产品成本。但是，有时模具会包含不易纠正的致命缺陷，它可能使模具报废而需要重新设计。

1.6　本章小结

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 注射成型过程中的基本步骤。
- 注射成型模具的主要功能。
- 注射模具最常见的类型，包括两板式模具、三板式模具、热流道式模具、单型腔式模具、多型腔式模具和多浇口模具。
- 注射成型模具中的关键组成部分。
- 模具开发过程。

在后续章节中，将介绍成型制品的典型要求与设计准则、模具布局设计和各种系统的详细设计。

第 2 章　塑料零件设计

2.1　产品开发过程

模具设计是大型产品研发过程中的一个重要环节。由于产品和模具设计是相互依存的，因此了解塑料零件的开发过程、模具设计过程及模具制造过程的作用对产品设计工程师和模具设计工程师来说是非常有用的。典型的产品开发过程不同阶段如图 2.1 所示，包括：产品定义、产品设计、经营和产品开发、提升产能、投放市场。

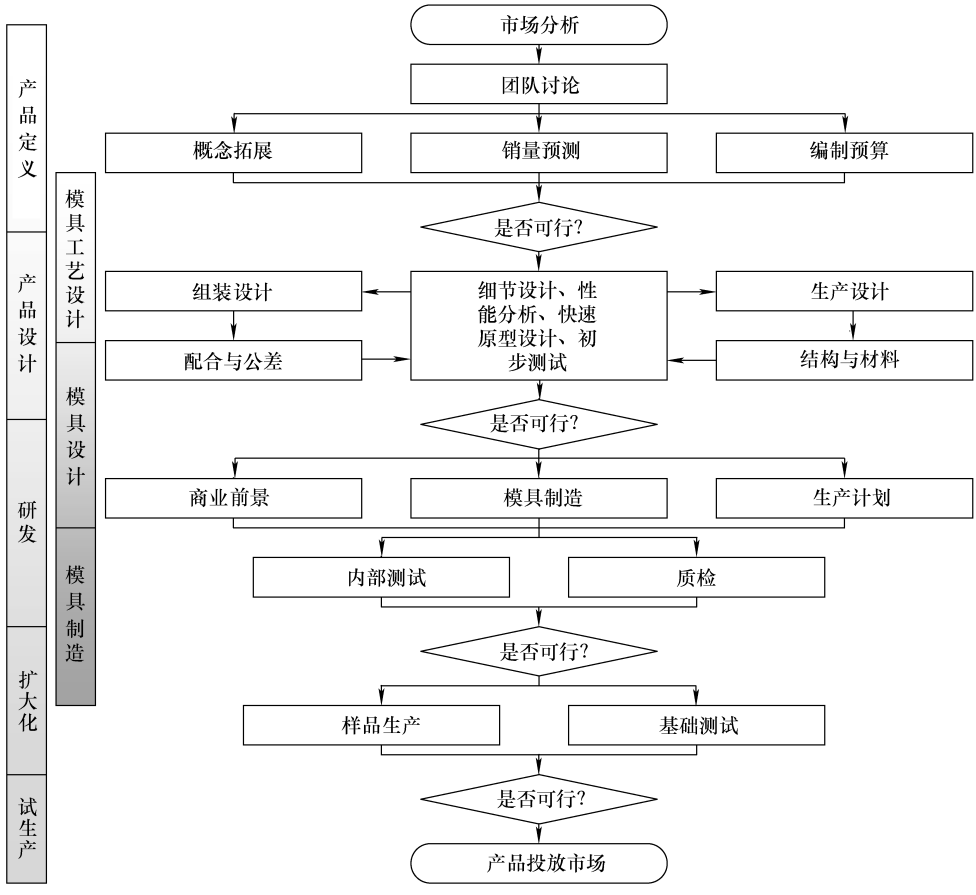


图 2.1　产品的开发过程

尽管产品开发流程复杂，但多数具有以下两个关键属性：

- 建立系统性开发计划以确保设计和制造的完善性。
- 通过在项目的关键处进行有效地评估进行预算分配，以此建立关卡流程以规避风险。

如图 2.1 所示，产品开发过程通过批准费用关卡被分割成多个阶段。下一阶段对上一阶段进行评估。

2.1.1 产品的定义

产品的开发过程始于对市场的分析、对竞争对手产品标准的了解、对产品规格的定义及对潜在盈利的评估。如果管理层同意开发新产品，那么将组成一个适合的团队来进行早期概念设计及业务发展。在第一阶段，需要估计产品的大概尺寸、属性以及成本。同时，可能会对概念草图、实物原型及原型进行讨论并评估其可行性。

在盈利能力方面，市场研究将在产品研发的早期阶段尽力预测不同价格点上潜在的销售情况。同时，将建立开发产品及将产品推向市场所需的人力成本和项目成本的预算。通过不断评估产品开发商业成功的可能性，获得管理层对概念设计、销售预期和预算的评价。所提出的产品开发项目可能会被拒绝、搁置或进行相应的修改。

2.1.2 产品的设计

如果项目得到了批准并分配了预算，这时产品开发过程将继续，通常在提供额外资金后将进行进一步的分析及设计。在第二阶段，产品中的每个组件都会得到详细的设计。塑料部件的设计包括对美观、结构、受热、制造等方面问题的考虑。制造方法的设计将用于确认部件有效制造的问题。组装方法的设计可用来减少部件，确定关键尺寸的公差并确保成品的组装经济性。

初始产品设计阶段的设计结果（如图 2.1 所示，通过第二次管理层建议）是一个详细的并经过验证的产品设计。“详细设计”意味着每个部件都会被指定材料、几何形状、表面粗糙度、公差、供应商和成本。如果需要定制塑料部件，那么在这个阶段需要对这些部件进行报价。为获得批准，将制造成本和详细设计一并提交给管理层。如果产品设计及成本可以接受，那么所需预算得以分配，产品开发主要集中在制造方面。

2.1.3 业务和生产的开发

虽然模具设计和模具制造是塑料行业的焦点，但是这些内容均包含于图 2.1 中的“模具制造”这一活动中。与此同时将进行重要的业务开发及确立生产计划。具体而言，业务开发需要完全定义供应链并建立初始订单以支持该产品的推出。为布局组装线、确定人力资源需求、建立制造技术设施方案，这些均需要建立生产计划。

当模具完成后，将进行“α”（初始）产品生产、测试及组装工作。之后，初始产品经过一系列的测试，以验证其性能水平、执行标准和用户满意度。如果初始产品不尽如人意，那么制造过程、相关工具及详细组件设计应作适当调整。同时，操作人员将会制订详细计划以进行质量控制并对人员进行培训。

2.1.4 放大和投产

经常使用管理评审方法来验证所开发产品的设计和生产计划是否令人满意。如果是

这样，可根据标准制造要求在样品生产过程中制造中等数量的产品。所生产的“β”产品会提供给市场营销部门、销售队伍和主要客户，以确定产品的可接受性。同之前一样，设计及制造的产品可能会被修改，以解决重要问题。当所有利益相关者（市场营销、销售、制造、关键供应商、重要客户）准备好后，以样品生产过程为基础生产产品并建立产品初期库存，之后将产品投放市场。

2.1.5　模具设计的作用

模具报价、模具设计和模具制造支撑着庞大的产品开发过程。需要提供模具和/或零件费用报价时，通常意味着概念设计阶段的结束或详细设计阶段的开始。这时如果模具工程师或模具制造者给出了充分详细的设计，那么是有些不合理的，其原因在于：①前期模具设计的大量工作是与不完善的产品设计同时进行的；②出于制造工艺性或产品性能的考虑，模具设计可能需要进行较大的修改。

模具开发过程（图 1.9），通常始于缺乏细节的初始设计，如果直接使用初始设计可能会导致生产出令人不满意的产品。开始的模具设计所需的关键部分的设计信息包括零件尺寸、壁厚和预期的生产量。根据这些信息，模具设计人员可以开发最初的模具布局，给出成本评估，并给出产品设计的改进。为了加快产品开发过程，可以同时进行模具设计与模具零件的采购和定制。

当产品开发阶段即将结束时，模具制造与调试阶段就开始了。出于此原因，模具制造商和供应商为尽快提供高质量的模具而承受了很大压力。这个任务是非常有挑战性的，因为产品的设计过程中存在潜在错误。因此，模具设计人员可能会被要求重新设计和修改部分的模具并与模具制造商密切合作以确定此模具是否符合生产要求。

2.2　设计要求

在模具设计的过程中，有很多注射部件要求需要考虑。以下各节提供了一些有用以收集所需信息及相关讨论的表格。

出于两方面原因给出了本节中的信息。首先，详细可用的文档将提高模具设计水平并降低模具制造成本。其次，ISO 和其他监管机构通常要求正式文档和产品开发批准。模具设计工程师不应该认为这些工作表是静态的，而应该认为这些表格是动态的，信息和批准穿梭于相关人员之间，与设计决策和决策的制定过程有关。

2.2.1　应用工程信息

模具设计工程师应该理解表 2.1 中列出的整个应用和开发进度。这一信息包括所有项目的项目名称和部分项目数量。应跟踪的关键时间点包括项目启动日期、机加工型腔日期、模具测试日期及批量生产日期。因为这些日期与技术可行性、市场成功、还付款期有关，所以应该经常协商。

对于客户方，为进行技术联系记录表 2.2 中的信息是有用的。理想情况下，记录人应该理解注射制品要求或可以参考模具设计工程师以及其他有相关知识人的意见。或者模具设计工程师先调用一个内部销售人员或应用工程师负责客户支持工作以避免因一些

潜在琐碎问题而反复与客户联系。

表 2.1 应用工程工作表

项目名称	
制品/项目数量	
产品/组件名称	
项目启动日期	
所需型腔确定日期	
所需试模日期	
所需批量生产日期	
单个零件所需材料成本预期	
单个零件所需模具成本预期	
单个零件加工成本预期	
单个零件总成本预期	

表 2.2 联系信息表

用户姓名	
用户技术相关联系人姓名	
用户技术相关信息	
内部销售/应用工程师姓名	
内部销售相关信息	

2.2.2 生产数据

对于选择模具布局和模具技术，表 2.3 中的生产数据是非常重要的。特别是当应用程序生存期及总生产数量与模具材料、处理方法及模具详细设计相关时，这些生产数据就更加重要了。最低和最高的月度生产量，再加上预计周期时间的成型工艺，将有助于确定型腔的数量和模具需求数量。

在模具设计开始时，表 2.3 中所示的循环时间和模具设计数据可能是不可行的，这一点值得注意。事实上，这些数据仅是模具设计过程中的中间结果。一些客户将提供这些细节作为标准，模具设计人员必须满足这些标准。如果这些标准不是由客户指定的，那么模具设计工程师应该进行成本分析迭代设计以为客户提供最高效的模具设计。

表 2.3 生产数据表

应用寿命/年	
寿命期内总生产量	
每台机器每年可成型小时数/（h/年）	
最低产率/（制品数/h）	
最大产率/（制品数/h）	
成型过程中的预期周期时间	
每个模具的型腔数	
成套制品模具（是/否），制品数量	
所需的模具数量	

2.2.3　最终使用要求

一个典型的注射制品可能具有几十甚至上百个技术要求。表 2.4 列举了一些常见最终使用要求。其中的一些需求决定了几何尺寸、材料选择和其他设计细节，这就使得模具设计工程师几乎没有控制权。即便如此，模具设计师一般应了解如何使用成型制品，因为这可能影响模具设计及性能评估中的一些细节。

表 2.4　最终的使用要求工作表

最终使用温度	
最终使用负载	
允许偏差	
要求的屈服强度	
要求的应变失效	
要求的耐冲击性	
吸水率	
耐化学性	

制造商一般都要求使用一定的控制手段，以确保产品设计、制造及销售达到预期效果。在塑料工业的许多领域，如医疗设备制造领域，监管机构建立了广泛的塑料制品设计、制造及测试标准。规范性的详细讨论远远超出了本书的范围。模具设计人员应该了解规范性要求，这可能会影响到模具工程。一些常见的监管机构和他们的规范计划见表 2.5。其中包括美国国家标准协会（ANSI，http：//www. ansi. org/）、美国食品和药物管理局（FDA，http：//www. fda. gov/）、国际电工委员会（IEC，www. iec. chl）、美国国防部军用标准（MIL－SPEC，http：//stinet. dtic. mil/）、国际标准化组织（ISO，http：//www. iso. org/）、美国保险商实验室（UL，http：//www. ul. coml）等。

表 2.5　规则遵循表

ANSI（C1461，D1972，D1975……）	
FDA（级别Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ……）	
IEC（ICS 20，83……）	
MIL－SPEC（M25098，N18352，P46046……）	
ISO（9000，9001，13458……）	
UL（94，696，746……）	

模具设计工程师通常不需要知道这些规范的每个细节，因为它们通常仅涉及注射产品的使用，而不涉及具体的注射模具。但是，模具设计人员应询问可能会影响到模具设计的有关规定。理想的情况下，客户应提供一份规定并突出关于模具设计的具体要求。

尺寸和公差的规范对于模具设计和注射模具商是至关重要的。公差标准应包括指定正常尺寸百分比内的一般相对公差。例如，一个典型的偏差为 ±0.4%，因此 100mm 长度应表示为 100mm ±0.4mm。在紧配合中，偏差为 ±0.1%，所以 10mm 直径应表示为 ϕ10mm ±0.01mm。

满足特定公差的注射产品的能力与模具设计、成型过程和材料特性有关。出于这个原因，鼓励产品设计工程师指定一个通用公差，将这一公差用于大多数尺寸，而仅有少数尺寸应用更严格的公差，这些公差对产品的功能起着很重要的作用，尺寸公差表见表2.6。这些公差是指定的但不意味着是可以实现的。在设计很多尺寸时[2]，设计人员经常过度定义公差。模具设计人员应该与产品设计团队一起讨论严谨的公差范围，并根据原型的成型进行收缩行为分析、模具不同区域收缩率非均匀剖析及模具运输过程中的变形分析等。

产品设计人员往往会提供如表2.7中所举的颜色、多个组件颜色的匹配和光泽度等美观性规范。指定产品表面光泽度和产品表面纹理对产品设计是常见的，但会增加注射模具成本。此外，模具设计工程人员应该意识到关键的表面美观缺陷（如熔接痕、流道口缺陷、下沉和连接点等）应尽量避免。

表2.6　尺寸公差表

通用公差（%）	
极限偏差1	
极限偏差2	
极限偏差3	

表2.7　产品美观表

颜色（感光度、劳尔色卡、梦塞尔色卡、AFNOR、NCS、潘通色卡及其他）	
颜色与组装相匹配?	
光泽程度（%）	
表面抛光度（SPI D－3级到 A－1级）	
模具表面纹理（供应商/数量）	
产品外观表面	

2.2.4　产品设计方法

理想情况下，模具设计人员应该参与从早期概念设计阶段开始的产品设计活动。参与早期产品设计可使得塑料零件具有更多的功能和更高的效率。然而，模具设计人员经常提供相对于注射成型及组装不合格的“成品”产品设计。模具设计人员应该检查塑料零件是否专为注射成型设计，而不是假定产品设计已经完成并不能改变。表2.8[3,4]提供了注射成型零件设计的一些常见的准则，这些准则可以显著改善功能并降低注射制品的成本，因此将在第2.3节中进行讨论。

表2.8　模具注射设计表

均匀/最小壁厚	
避免尖角	
有效的筋板设计	

（续）

有效的凸台设计	
适用的脱模斜度	
避免倒陷	
可以实现的公差	
规定的浇口位置	
要求的流动长度	

表 2.9 提供了一些常见的装配设计[5,6]。模具设计人员应检查已经提供的部件，并检查组装设计的合理性。这个任务有两个目标。第一，通过合并多个组件，以自上而下等装配方式提高整体设计水平是可能的。第二，模具设计人员可以通过证明设计考量减少后期的设计变更，这些设计变更可能带来资金和时间的浪费。

表 2.9　组装设计表

装配零件数量最小化	
自上而下装配实现	
卡扣设计/避免	
统一紧固件类型使用	
对称或明显不对称的零件	
成型零件出口要求	

模具设计人员可能意识到了产品的设计问题，但仍然选择直接为这些设计应用模具。例如，一个模具设计人员可能知道通过稍微改变模具表面上的角度来消除一个切口就可以降低模具成本，但仍未进行改变，理由是需要移出型芯且模具价格较高。虽然不改变模具的策略在短期内会给模具设计人员带来额外的工作和盈利，但却是一个失败的长期战略。相反，最成功的模具供应商通过为客户提供服务的方式来增加价值，如提高产品质量和降低客户的产品成本。

2.2.5　塑料材料特性

塑料材质通常是由客户指定而不是由模具设计人员指定。然而，模具设计人员需要了解表 2.10 中指明的塑料的具体特性，这些具体特性将决定模具的功能。附录 A 提供了一些通用等级塑料的样条数据。这些信息的其他来源包括树脂供应商和数据库供应商（如 http：//www. ides. com 和 http：//www. matweb. com）。

表 2.10　塑料材料的特性表①

材料供应商	
材料的商品名	
材质类型	
成本/（美元/kg）	

（续）

模量/MPa	
屈服强度/MPa	
屈服应变率（%）	
DTUL（C，0.45MPa，ASTM D648）	
无流温度/℃	
熔融温度范围/℃	
冷却剂温度范围/℃	
密度/（kg/m^3）	
比热容/［J/（kg·℃）］	
表面传热系数/［W/（m^2·℃）］	
热扩散率/（m^2/s）	
热膨胀系数/$℃^{-1}$	
收缩率（%）	
最大剪切速率/s^{-1}	
黏度及 *pvt* 系数	

① 使用一致的单位制和材料特性可以使模具设计工程更简单和高效。本书中使用国际单位制。附录 E 给出了国际单位制与其他常用的测量单位制的换算关系。

在模具结构设计过程中，通常是由模具设计人员指定模具材料类型，而不是由客户指定模具材料类型。在第 4 章中，我们将对材料的选择进行讨论；附录 B 提供了一些常用的模具材料。模具设计人员应明确表 2.11 中列出的包括材料供应商在内的各项模具材料性能信息，并证明材料性能对模具性能的影响。

表 2.11 模具材料性能表

材料供应商	
材料的商品名	
材料类型	
材料组成	
成本/（美元/kg）	
密度/（kg/m^3）	
模量/MPa	
屈服强度/MPa	
疲劳极限/MPa	
布氏硬度	
屈服应变（%）	
比热容/［J/（kg·℃）］	

（续）

表面传热系数/［W/（m^2 · ℃）］	
热扩散率/（m^2/s）	
每齿进给量/mm	
切削速度/（m/h）	
体积加工速率/（m^3/h）	
面积加工速率/（m^2/h）	

2.3　注射成型的设计

在注射模具设计和制造之前，应对塑料制品的设计进行详细审查。设计审查应考虑塑料零件设计的基本原则，以及其他模具相关设计要点。这些制品的设计要点将会在接下来进行讨论。

2.3.1　均匀壁厚

由于成本和质量的原因，壁厚不均的零件应尽量避免。最根本的原因是厚壁和薄壁部分会以不同的速度冷却，较厚的部分将比较薄的部分需要更长的冷却时间。注射时，对于壁厚不均的零件而言，较高的温度将表现在厚壁的部分，而较低的温度将表现在薄壁的部分。这种温度的差异和与之相关联的收缩率的不同，会使具有高热膨胀系数的塑料制品产生显著的几何畸变。如果可能，极大的壁厚差异应当避免，因为即使延长保压和冷却时间，过大的收缩仍旧会在制品内形成内部孔隙。

图 2.2 描述的是一个零件在厚度方面的模具设计改进过程。最差的制品设计如左图所示，其使熔体由薄壁区域突然过渡到厚壁区域。熔体由薄壁区域流向厚壁区域的喷射会导致制品的表面质量差，同时，薄壁区域的熔体过早地凝固将会导致厚壁区域的表面

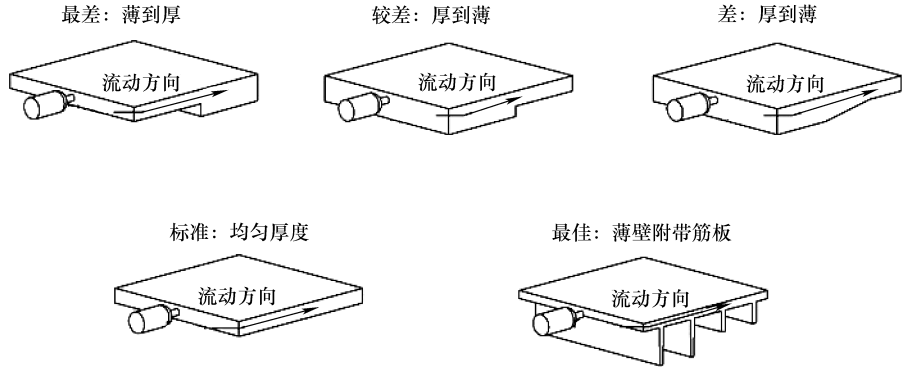


图 2.2　壁厚的设计

复制性和尺寸控制较差。这个设计可以通过颠倒熔体流动的方向来改善，因为熔体的流动方向颠倒后，在薄壁区域填满之前，厚壁区域不会凝固。即便这样，任何有明显的壁厚不均的模具设计，还将会展现出较长的冷却时间和厚薄区域的不同收缩率。

一种常用的方法是增加制品的公称厚度，以满足局部位置对壁厚的要求。增加制品壁厚会减少许多质量问题，但会带来过多的材料消耗和冷却时间的延长。对于这样的设计，最好是使用较薄的壁厚且在需要加强的区域添加垂直的加强筋。通过加强筋高度和密度的改变，可以改变制品的相对刚度。

2.3.2　加强筋的设计

一个典型的加强筋设计如图 2.3 所示。在本设计中，加强筋的基本厚度为制品壁厚的 70%，加强筋的高度是制品壁厚度的 4 倍。加强筋以平板壁厚的 10 倍为间距进行分布。分析表明，这个设计与加厚 30% 且没有加强筋的设计的刚度相同。与带有加强筋的薄壁制品相比，加厚 30% 且没有加强筋的制品多消耗 15% 的材料和增加 6 倍的循环时间。

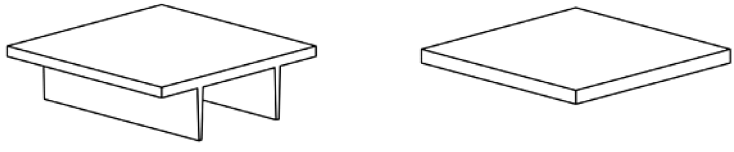


图 2.3　有效的加强筋设计

当加强筋冷却时，壁厚超过制品壁厚 70% 的加强筋将驱使物料远离其相反区域的中心。这个区域的体积收缩会引起与加强筋相反的制品区域出现内部孔隙。在对外观要求不高的应用场合，使用高填充材料具有更低的收缩率，加强筋的厚度可以增加。否则，当使用难填充的材料时，加强筋的厚度应小于零件标称厚度的 70%。

2.3.3　凸台的设计

凸台通常用于和自攻螺钉一起将多个组件紧固连接起来。在图 2.4 中，展示了一些不同的凸台设计。最左边的设计是一个拐角附近的凸台，这个凸台有两个筋板和一个 120°方向的角板。中间的设计是有两个 90°方向角板的筋板上的凸台。最右边的设计是一个独立的含有筋板的凸台，其使得装配面升高。所有凸台设计采用厚度为标称壁厚 70% 的凸台、筋板和角板。

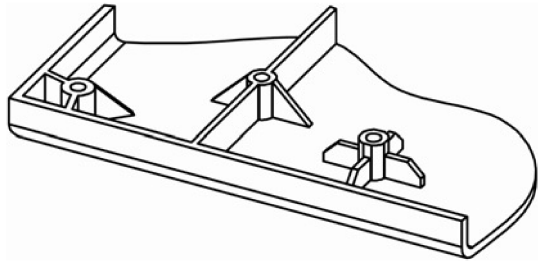


图 2.4　有效的凸台设计

设计的凸台必须能够承受自攻螺钉旋入过程中的扭矩和最终使用过程中潜在的拉伸力。然而，凸台不应该有过厚的区域，因为这会延长循环周期，或影响美观。在图 2.4 所示的设计中，凸台和角板没有任何脱模斜度。这些设计特征相对于整个部分是较小的，但对于制品的结构完整性是至关重要的。因此，对于这些设计特征使用较小的脱模斜度，有助于在不显著增大注射压力的情况下提高成型制品的刚度和强度。

2.3.4　拐角的设计

在零件中设计尖角通常是为了使零件的内部体积最大化、便于组件之间的配合或使制品美观。然而，由于产品性能、模具设计和注射相关原因，注射制品应避免使用尖角：

- 对于产品性能而言，尖角将导致应力集中，继而可能会导致许多（特别是脆性）材料在负载下损坏。而且，一个高的有尖角的盒子比一个矮的有圆角的盒子扭转刚度小。
- 对于模具设计而言，尖角难于生产，需要使用特殊的加工流程或多个小尺寸的切削工具。
- 对于成型工艺而言，尖角大大限制了热从聚合物熔体到型芯镶件（零件的内部）的传递而促进热传递到模具型腔（零件的外面）。结果往往导致制品在拐角附近沿厚度方向不均匀收缩和明显翘曲。

图 2.5 和图 2.6 提供了一些圆角和倒角的通用准则。如图所示，外部角的圆角半径应该是制品壁厚的 150%。为了保持拐角处的厚度相同，内部角的圆角半径设置为壁厚的 50%。目前，基于实体的设计方案，可以很容易地在制品脱落前实现外部边缘的圆角。这些圆角建议仅是参考。事实上，应尽可能使用更大的圆角。此外，模具设计人员应该提出与常用模具加工相适应的圆角半径，从而不需要专门的加工工具。

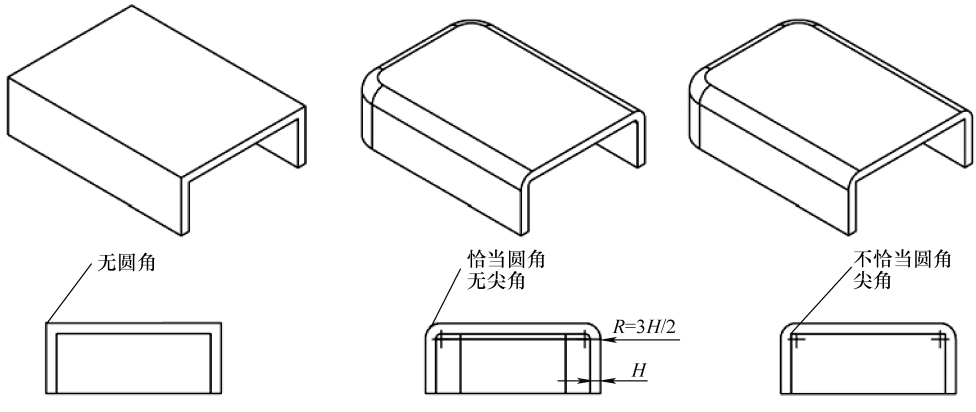


图 2.5　圆角的比较

倒角也常常用于打破尖角，用一个单一的斜面连接外表面，且通常是一个 45°斜角。正如图 2.6 所示，一个是制品壁厚一半的斜角，另一个是内部拐角，用以进行充分缓解，从而避免与熔体流动和制品强度相关的问题。类似于圆角，应尽量设计大的斜角

以便制品脱落前拐角处有良好的刚度和热传递。

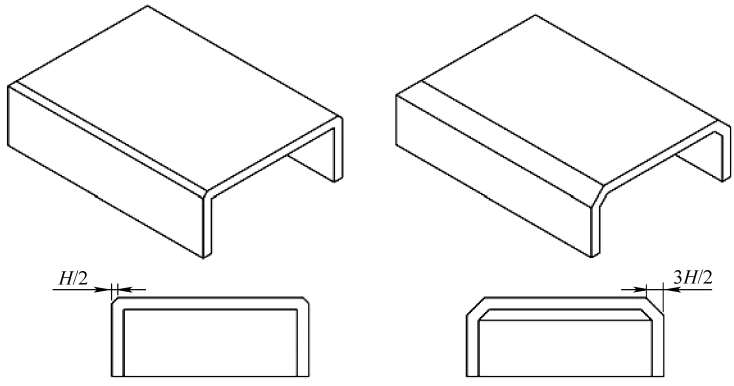


图 2.6　倒角的比较

2.3.5　表面粗糙度和纹理

表面粗糙度和纹理常由产品设计者确定，其对模具的设计和成本有显著的影响。虽然抛光可以外包给低成本公司和国家（由于其高劳动力成本），但是大多数模具制造企业能够提供高品质的表面质量。表面纹理化需要更高水平的技能和技术，因而相对较少的公司占据了模具纹理化的较大的市场份额。

表面质量通常根据塑料工业协会（http：//www. plasticsindustry. org/）的标准加以评估。表面质量从 D－3（喷砂的外观）到 A－1（镜面）分布。表 2.12 提供了一些常见的 SPI 抛光等级、表面处理方法和可测量的表面粗糙度。

表 2.12　SPI 表面抛光与表面粗糙度

SPI 抛光等级	抛光方法	磨削精度/μm	表面粗糙度/μm
A－1	#3 金刚石磨削	≈1	≈0.01
A－3	#15 金刚石磨削	≈2	≈0.04
B－3	#320 砂布	≈6	≈0.12
C－3	#320 磨石	≈12	≈0.3
D－2	#240 氧化物喷砂	≈30	≈0.8
D－3	#24 氧化物喷砂	≈160	≈4

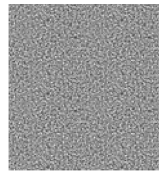
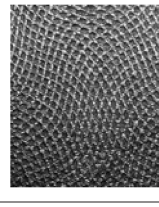
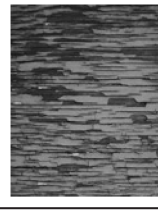
随着表面抛光等级的升高，模制零件的成本也会大大地增加。原因在于为了有效地提供一种确定的表面处理方法，模具制造商必须连续地应用所有较低水平表面处理方法。例如，要得到 SPI C－3 抛光等级，首先用粗砂打磨模具，接着用#320 金刚石抛光。出于这个原因，更高等级的表面质量的成本显著高于较低等级。此外，具有高表面质量的模具生产的制品，一点小的缺陷也将是很明显的，因此增加了注射过程的成本和模具的维护要求。

作为一种提高表面质量的替代方法，许多产品设计了纹理表面。一个常见的原因

是，纹理可以使制品具有类似于木材、皮革或其他材料的外观，见表 2. 13。而且，纹理能增加塑料制品在使用过程中的感官价值[9]。另一个原因是，带纹理的表面能提供一种不均匀的深度，可用于隐藏熔接痕、瑕疵或其他缺陷。此外，纹理可以被用来改善产品的功能，例如，提供一个表面，使之很容易在最终使用期间控制或隐藏划痕。

纹理确实会显著地增加模具制造的成本。为了应用纹理，必须使模具表面质量达到 SPI 的 B 类标准以适于浅纹理（纹理深度约为几微米）或 C 类标准以适于粗纹理。否则，当应用纹理后，差的底层表面质量将十分明显。经过表面处理后，使用化学蚀刻或激光加工工艺将纹理刻在模具表面上。由于需要使用专用加工设备，在模具开发过程中必须为模具纹理化过程提供足够的时间和资金。

表 2. 13　纹理的例子

纹理	图像	纹理深度/μm	SPI 抛光要求
沙状		50	B
皮革状		125	C
网状		150	C
木纹状		250	D

2. 3. 6　脱模斜度

脱模斜度是指塑料制品的竖直表面与模具打开方向之间的夹角。脱模斜度通常用于使制品易于从模具中推出。产品设计人员应避免使用较大的脱模斜度，因为它改变了制品设计的外观形式，减小了成型制品的内部容积。即便如此，脱模斜度常常应用于塑料

模具，以避免难于脱模的问题和极其复杂的模具设计。

加强筋的脱模斜度一定要仔细设计。例如，图2.3中加强筋的设计，施加2°的脱模斜度，以便从模具中脱出注射制件。在产品功能方面，较小的脱模斜度是受欢迎的，因为这允许更高和更厚的加强筋有更大的刚度。遗憾的是，较小的脱模斜度（如0.5°或1°）可能会导致制品粘在模具上，难于脱模。当使用成型时具有低收缩率和高的表面粗糙度值的云母或玻璃复合填充材料时，制品粘在模具上的问题将更加复杂。因此，允许的脱模斜度是与材料的特性、工艺条件和表面粗糙度相关的复杂函数。

最小脱模斜度为0.5°通常是必要的，而材料供应商常建议使用1°～2°。粗糙和有纹理的表面通常需要增大脱模斜度。每增加20μm的表面粗糙度值或纹理深度，就需要增加1°的脱模斜度。表2.14针对一些不同的表面处理和材料提供了推荐脱模斜度。随着表面粗糙度值的增大，脱模斜度的角度也相应地增大。材料特性不同脱模斜度不同，对于玻璃填充或低收缩材料，脱模斜度应增大；但对于高柔性的材料（如软PVC）脱模斜度可以减小。

表2.14　脱模斜度的例子

表面抛光等级	树脂	表面粗糙度/μm	脱模斜度/（°）
A－1	丙烯酸树脂	0.01	0.5
B－3	ABS	12	1.5
沙状纹理	20%（体积分数）GF PC	12	2
皮革纹理	软PVC	125	4
皮革纹理	ABS	125	7.5

2.3.7　倒陷

倒陷是一种产品设计的特征，它对制品的脱模有影响。图2.7所示为四种含有倒陷的设计，包括壁面上的窗口、制品底面上的悬臂、横向凸台和卡扣。很多时候，产品设计工程师没有意识到与这些倒陷相关的困难。

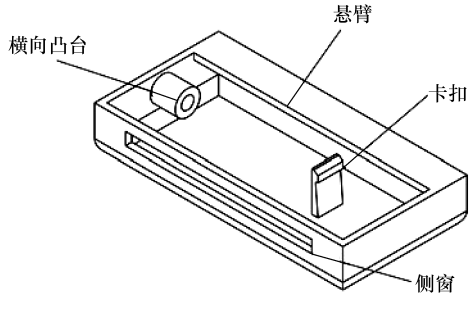


图2.7　一些含有倒陷的常用特征

在可能的情况下，倒陷应当避免。因为为了制品的成型和脱模，必须设计和加工复杂的模具机构。这些额外的模具组件增大了模具的使用困难，如果使用不当，甚至会损

坏模具。由于这些原因，模具设计工程师应确定倒陷和提醒客户，并与产品设计工程师一起去除倒陷。如果倒陷提供的功能对于产品十分重要或除去倒陷会使增加额外的后处理工艺或重新设计会导致由单一制品变为许多零件，则倒陷应该在设计中予以保留。

2.4　本章小结

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 成型制品开发过程的基本阶段，包括管理评审的任务。
- 开始模具设计时所需要的信息。
- 注射制品的常用要求。
- 可以找到与产品和模具设计相关的其他信息的途径。
- 注射成型制品设计的基本指导原则。

在接下来的章节中，针对关键的模具设计决定，对模具成本与制品成本进行分析。这一分析的结果可用于设计模具布局。在后面的章节中，将会叙述模具的各个子系统的设计和分析。

第 3 章　模具费用评估

3.1　模具的报价过程

对模具的购买者和供货商来说，注射制品的报价过程是非常困难的。首先，从购买者的角度来分析。产品开发团队的采购专家对多家模具制造商发出报价请求（RFQs）。等待几天或数周后，报价就会发来，并且采购专家会发现，由于各种原因，各家的模具开发时间和费用会有很大的不同。在这种情况下，模具的买方必须对提供的报价进行详细的询问，并检查是否能通过产品的再设计减少费用。为了减少在定价和产品性能方面的不确定性，很多的购买者都主张有一个能胜任的供货商的名单，这些供货商能够提供更短的周转时间、更统一的产品质量和多种方案的较好价格。具有长期信任关系的合作伙伴可以实现模具的快速开发，因为可以避免整个报价过程及劳动力费用、附加材料费用（指“加价”）基数。

接下来从模具供货商的角度来分析。模具的设计者必须花费大量的时间来制定报价表，而这个报价被接受的机会相对较小。他们有时必须重新设计产品，并进行大量的分析来提供报价。然而，对于购买者可能偏高的报价，就相当于对设计的模具的材料质量和工艺的要求更高，这样就比其他一些低花费的模具能提供更高的生产率和更长的使用寿命，在生产过程中，这种贵一些的模具能够快速地赚回多出的费用。

有时模具制造商根据自己是否想要这宗生意来调整他们的报价。如果制造商特别忙或空闲，这时，估计的用时和计时工资就会被调整得诱使或者阻碍潜在的客户来接受这个报价。这种调整必须避免，因为提供的报价并不能表现出供货商的真正费用，而合理的费用是模具供货商和购买者之间长期互利伙伴关系的基石。

报价中通常提供了模具（可能包括注射部件）的费用和运输条款。一个典型的模具购买协议可能会详述在以后三个阶段将模具的费用付清：

- 第一阶段，在接受报价时（在这之后，通常会购买模架和主要材料）。
- 第二阶段，中途通过模具制造方案时（通常在型腔镶件加工完成时）。
- 第三阶段即最后阶段，在接受注射制品的质量时。

模具购买之后，通常会运往规定的造模者或购买者的场所，制品在这里成型，边际成本也在这里发生。图 3.1 绘出了典型的按月计算的项目支出情况。第 3 月的材料和加工费用与注射检验有关，注射检验主要是为了交易和测试，并批准和提高模具的设计，这期间约会抽取一百个试制品进行检验。随后每月的花费是由生产制品带来的。维修的费用会在生产的过程中间歇性出现，它的目的是保证模具和注射制品的质量。

在制造业，制模商拥有高度集成的供应链已经成为一种趋势，这种制模商能够提供

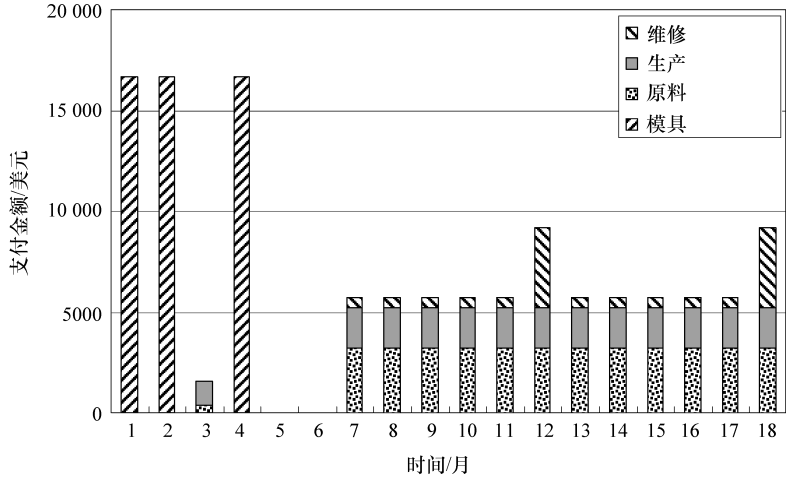


图 3.1　模具和制模花费的示意图

注射部件，甚至是完全装配好的产品。因此，报价表的结构可能会随着交易结构的变化而有很大的变化。高度集成的供货商的报价表，通常会有一个与模具开发有关的预先付款，然后有一个单个注射制品的费用。为了保护供货商，协议上通常会详细地描述生产进度改变引起的折扣或费用。

由于报价表的结构和量级会随供应商有很大变化，因此一个潜在的注射制品购买者会向多个供应商提出报价请求，并会选择制品质量、费用条款、运输条款和服务质量综合条件。

3.2　注射制品的成本驱动因素

一个注射制品的成本有三个主要驱动因素：

- 模具的成本和模具的维修。
- 材料成本。
- 加工成本。

图 3.2 提供了这三个主要因素的分解图，以及它们的组成部分。值得说明的是，这些成本不包括间接成本，比如管理费用和利润。但是，这些间接成本也会通过计时费用和其他费用的清算而被计入。

虽然大部分成型产品的成本驱动因素相同，但各因素所占成本的比例各不相同。图 3.3 所示为一种日用品（一种产量为 1 000 万件的电缆绳结）和一种特殊制品（一种定制的产量为 100 000 件的插座）的成本分解图。可以看出，虽然这两件产品的重量差不多，但它们的成本的数量级和各因素的比例却显著不同。

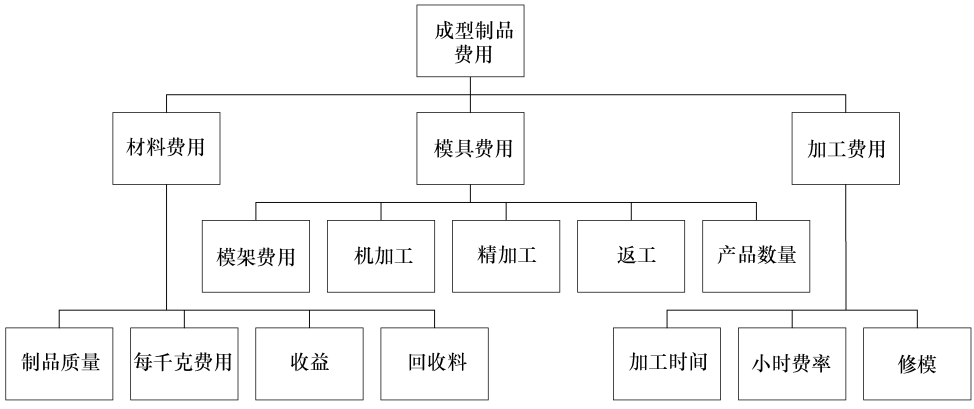


图 3.2　注射制品的成本驱动因素

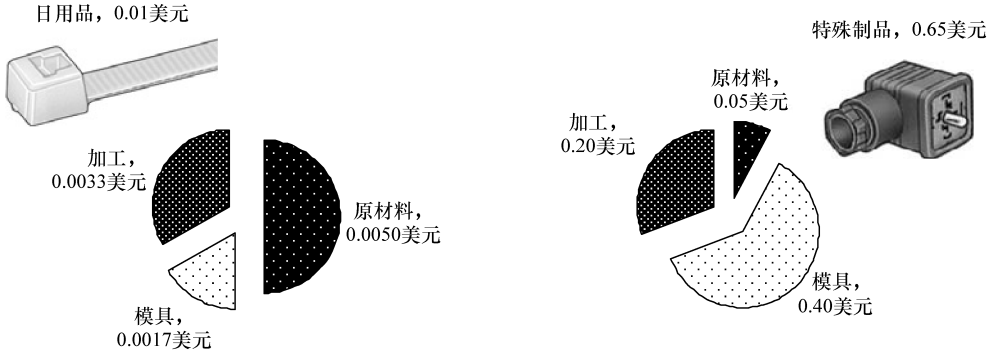


图 3.3　日用品和特殊制品的成本驱动因素

3.2.1　产量的影响

最大限度地降低整个注射制品的成本不是一项简单的任务，注射模具和成型工艺都需要设计得非常理想以适应不同的产量目标。通常，需要在模具提前支付的投入与每件产品的加工和材料费用的潜在节省空间之间有一个权衡。表 3.1 所列出的是一件成型制品在产量分别为 50 000 件和 500 万件时的数据。由表 3.1 可知，低产量适合采用一模两腔、冷流道模具。相比而言，高产量的模具使用 32 腔同时成型的热流道系统，这样就可以减少循环时间和材料损耗。

理论上说，产品的产量应该事先知道，并依此设计一个“理想”的模具来生产确定的数量。而实际上，生产的进度和产品产量不能精确得知，因此制造商和购买者必须仔细地考虑使用过度设计和过少设计的模具的后果。由于这个原因，需要使用收支平衡分析来考虑不同的模具设计对整个注射制品成本的敏感性。

表 3.1　低产量和高产量的制品成本数据

产量	50 000 件	5 000 000 件
型腔数量	2	32
流道系统	冷流道	热流道
模具成本	10 000 美元	250 000 美元
循环周期	30s	20s
每件有效循环周期	15s	0.6s
每件加工成本	0.40 美元	0.04 美元
每件模具成本	0.20 美元	0.05 美元
每件材料成本	0.15 美元	0.12 美元
每件总成本	0.75 美元	0.21 美元

3.2.2　收支平衡分析

收支平衡分析用来确保模具是一个合理的设计。考虑表 3.1 中描述的两种模具情况。在给定产量的情况下，考虑总成本是很有用的。总成本 C_{total} 可以由下式计算出

$$C_{\text{total}} = C_{\text{fixed}} + n_{\text{total}} C_{\text{marg inal}} \tag{3.1}$$

式中，C_{fixed} 是模具的总成本和它的维修费用；n_{total} 是模具的整个使用寿命期间的总产量；$C_{\text{marg inal}}$ 是每件制品的树脂、机器、劳动力和能源的总微利的成本，对于一个确定的设计，每件制品的微利成本会保持一个常数（虽然可能有因排除缺陷和循环周期的缩短等造成的成本减少，也有可能有因材料定价和运输成本而造成的成本增加）。

为了提供最好的设计和报价，需要开发多个模具设计以适应不同的产量目标，然后通过收支平衡分析估算出各种设计的生产成本并进行比较。

例：分析表 3.1 的成本数据，计算出热流道模具比冷流道模具更经济时的产量。

式（3.1）可以用来分别计算冷流道和热流道模具的成本，即

$$C_{\text{total}}^{\text{cold_ runner}} = C_{\text{fixed}}^{\text{cold_ runner}} + n_{\text{total}} C_{\text{m arg inal}}^{\text{cold_ runner}}$$

$$C_{\text{total}}^{\text{hot_ runner}} = C_{\text{fixed}}^{\text{hot_ runner}} + n_{\text{total}} C_{\text{m arg inal}}^{\text{hot_ runner}}$$

令两成本相等，变形得出的产量就是收支平衡时的产量，即

$$n_{\text{total}}^{\text{breakeven}} = \frac{C_{\text{fixed}}^{\text{hot_ runner}} - C_{\text{fixed}}^{\text{cold_ runner}}}{C_{\text{m arg inal}}^{\text{cold_ runner}} - C_{\text{m arg inal}}^{\text{hot_ runner}}}$$

由分析假设可知，每件制品的微利成本主要由加工和材料成本组成。因此，冷流道和热流道制品的微利成本分别为 0.55 美元和 0.16 美元。将它们代入上式，得

$$n_{\text{total}}^{\text{breakeven}} = \frac{250\,000 - 10\,000}{0.55 - 0.16} = \frac{240\,000}{0.39} = 615\,000$$

图 3.4 中展示了冷流道和热流道模具设计的成本。由于式（3.1）的成本函数是线性的，这里运用一个对数值来更好地解决大跨度产量下的总成本问题。在本例中，2 腔冷流道和 32 腔热流道模具的总成本作为“理想”产量（Q）的函数被画了出来。对于本例，在 615 000 件之前，2 腔冷流道模具的总成本更低一些，在这之后，32 腔热流道模具的成本更低。

成本分析通常能够预示不同模具设计在非常低和非常高的产量下的需求。在之前的

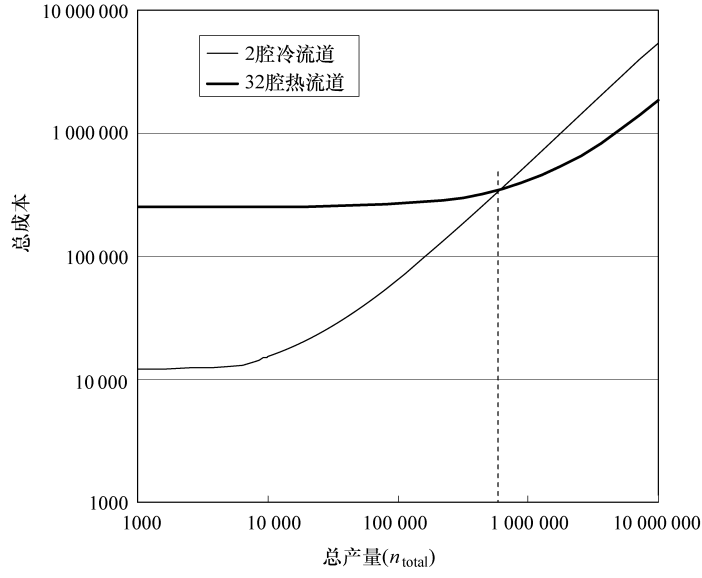


图 3.4　收支平衡分析

例子中，32 腔热流道系统的预先支付成本在低的或中等产量的情况下是不合理的。然而，在高产量的情况下，为了使盈利最大化，热流道系统就是必需的，这是因为开发热流道模具的边际成本大大少于冷流道模具。虽然在非常低和非常高的产量下，我们可以通过收支平衡分析清晰地作出设计决定，但在产量为中等时，模具设计方案就不那么容易确定了。产量在约 5 000 000 件时，最优模具设计就既不是 2 腔也不是 32 腔了，而是 4、8 或 16 这种中等数量的腔，并带有或不带热流道。对于这种情况，需要进行多种设计和成本估算，直到在更高的预先投入和更低的边际成本之间达到一个很好的平衡。如果有必要，可以给购买者多一个设计的选择机会，让他们选择他们认为最好的。

很多制模商和购买者要求有一个快速的投资回收期，所以会考察总的成本曲线，来接受一个具有高灵活性的热流道系统，只有令人满意的短的投资回收期才能被接受。有时，模具设计不仅仅取决于经济方面，还有其他的一些关注点，比如：

- 快速改变颜色的模具需求。热流道系统是不能满足这种需求的。颜色改变的问题将会在第 6.4.8 节再次提到。
- 制模商的能力和强项。如果制模商没有使用热流道系统的经验或辅助设备，那么最好还是使用冷流道模具。
- 制模商的制造战略倾向于减少成本和提高质量。例如，为了使生产灵活性最大化和缩短计划时间。
- 制模商将专用型号和尺寸的模具标准化，这种情况也是常见的。

作为惯例，模具设计必须最大限度地利用制模商的能力，除非应用和成本约束有其他要求。当一个先进的注射制品有专门的要求时，选择一个拥有能满足注射能力和有标准操作工序的专用装备的制模商就成了决定性因素。第 13 章中有一个模具技术的全览，

其中很多都要求制模商有这种专业的能力。

3.3　模具成本评估

对于模塑制品的成本评估，人们开发了许多具有不同精度的方法[10-21]。下面的这个方法用起来相对简单，它被用来记录制品设计和成型工序的主要影响。在使用这个方法时，操作者可以查阅附录 A、附录 B 和附录 D 中的费用数据，如果可以，提供更多的专业数据也是可行的。

模具的总成本（C_{mold}）是所有型腔成本（C_{cavities}）、模架成本（$C_{\text{mold_ base}}$）和模具定制成本（$C_{\text{mold_ customization}}$）的总和，即

$$C_{\text{mold}} = C_{\text{cavities}} + C_{\text{mold_ base}} + C_{\text{mold_ customization}} \tag{3.2}$$

模具的维修费用被记为模具分摊的一部分，并与制品成本一同计算。为了演示这个成本评估方法，分析所有的成本驱动系数都以图 3.5 所示的笔记本电脑边框为对象。它的产量为 1 000 000 件，材料为 ABS，模具为一腔、热流道。执行成本评估所需的相关应用数据见表 3.2。

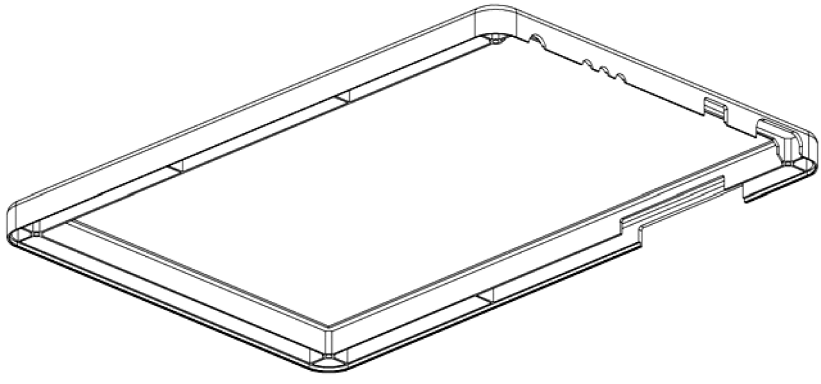


图 3.5　笔记本电脑边框的正轴测图

表 3.2　笔记本电脑设计数据

参量	笔记本电脑边框
材料	ABS
产量	1 000 000 件
L_{part}	240mm
W_{part}	160mm
H_{part}	10mm
A_{part}	45 700mm^2
V_{part}	27 500mm^3
h	1.5mm

例：评估一腔热流道模具生产笔记本电脑边框的总成本。本例与图 1.8 所示的模具设计相一致。

由随后的分析结果可知，型芯和型腔镶件的成本为 27 900 美元，模架的成本为 3 655美元，定制（包括购买所有相关的零件）的成本为 43 050 美元，所以总成本为

$$C_{\text{mold}} = C_{\text{cavities}} + C_{\text{mold_ base}} + C_{\text{mold_ customization}} = (27\,900 + 3\,655 + 43\,050)\text{美元} = 74\,605\text{美元}$$

3.3.1　型腔成本评估

型芯和型腔镶件的成本通常是模具总成本中最重要的一个因素。它们如此昂贵的原因是它们不仅必须包含成型制品的每一个几何细节，必须由硬度很高的材料制成，并且加工的准确度和质量都必须达到很高的程度。

型芯和型腔镶件的成本是由每个型芯和型腔镶件的成本（C_{cavity}）乘以型腔的数量（n_{cavities}）和一个折扣因子（$f_{\text{cavity_ discount}}$）决定的，即

$$C_{\text{cavities}} = C_{\text{cavity}} n_{\text{cavities}} f_{\text{cavity_ discount}} \tag{3.3}$$

例：评估笔记本电脑边框的型芯和型腔镶件的总成本。由于本例中只有一个型腔且没有型腔折扣，所以总成本为

$$C_{\text{cavities}} = 27\,900 \times 1 \times 1\text{美元} = 27\,900\text{美元}$$

1. 型腔成本

每个型腔装置的成本是由材料成本（$C_{\text{cavity_ material}}$）、加工成本（$C_{\text{cavity_ machining}}$）和抛光成本（$C_{\text{cavity_ finishing}}$）之和估算出来的，即

$$C_{\text{cavity}} = C_{\text{cavity_ material}} + C_{\text{cavity_ machining}} + C_{\text{cavity_ finishing}} \tag{3.4}$$

例：评估一套笔记本电脑边框型芯和型腔镶件的成本。

由随后的分析结果可知，材料成本为435 美元，加工成本为25 800 美元，抛光成本为 1700 美元。因此，一套型芯和型腔镶件的总成本为

$$C_{\text{cavity}} = (435 + 25\,800 + 1\,700)\text{美元} = 27\,900\text{美元}$$

2. 型腔材料成本

型腔材料成本是成本估算中最简单和最不重要的一项。型腔材料成本可由型腔总体积（V_{cavities}）乘以材料密度（ρ_{cavity}）和材料每千克的价格（κ_{cavity}）明确计算出，即

$$C_{\text{cavity_ material}} = V_{\text{cavities}} \rho_{\text{cavity}} \kappa_{\text{cavity}} \tag{3.5}$$

一些常见金属的成本数据已在附录 B 中给出。

型腔镶件的体积是型腔长度（L_{cavity}）、宽度（W_{cavity}）和高度（H_{cavity}）的乘积，即

$$V_{\text{cavities}} = L_{\text{cavity}} W_{\text{cavity}} H_{\text{cavity}} \tag{3.6}$$

第 4 章中将讨论，型腔装置的尺寸在模具布局设计的过程中就定了下来。通过后面的分析归纳，这些尺寸可以粗略地由制品尺寸的函数估算出来，即

$$\begin{aligned} L_{\text{cavity}} &= L_{\text{part}} + \max(0.1L_{\text{part}}, H_{\text{part}}) \\ W_{\text{cavity}} &= W_{\text{part}} + \max(0.1W_{\text{part}}, H_{\text{part}}) \\ H_{\text{cavity}} &= \max(0.057, 2H_{\text{part}}) \end{aligned} \tag{3.7}$$

值得注意的是，公式中用到的附录中的数据，全部尺寸必须来用公制单位 m，或者与数据一起转化成其他一种一致的单位。与之前提到的一样，如果可以，应该利用材料属性、制品形状、模具形状和制造工序等专业应用数据来进行分析。

例：评估笔记本电脑边框的型芯和型腔镶件的材料成本。

首先估算型芯和型腔镶件的尺寸。由表 3.2 中提供的尺寸，初步得出尺寸为

$$L_{\text{cavity}} = [0.24 + \max(0.1 \times 0.24, 0.01)]\text{m} = 0.264\text{m}$$

$$W_{\text{cavity}} = [0.16 + \max(0.1 \times 0.16, 0.01)]\text{m} = 0.176\text{m}$$

$$H_{\text{cavity}} = \max(0.057, 2 \times 0.01)\text{m} = 0.057\text{m}$$

再得出体积为

$$V_{\text{cavities}} = 0.264 \times 0.176 \times 0.057\text{m}^3 = 2.65 \times 10^{-3}\text{m}^3$$

为了计算型芯和型腔镶件的材料成本，必须知道材料的种类。由于这是一种对公差要求严格且产量很高的产品，因此选择耐用性和耐磨性较好的工具钢 D2[㊀]。这种材料的密度为 7 670kg/m^3，价格为 21.4 美元/kg。所以型芯和型腔镶件的材料成本为

$$C_{\text{cavity_ material}} = 2.65 \times 10^{-3} \times 7\,670 \times 21.4 \text{ 美元} = 435 \text{ 美元}$$

3. 型腔加工成本

型腔加工成本（$C_{\text{cavity_ machining}}$）是模具总成本中最重要的一个成本。它是多个变量的函数，这些变量包括：

- 成型制品的体积和几何复杂性。
- 型芯和型腔镶件的材料特性。
- 加工工序。
- 劳动力成本。
- 镶件的质量要求。

这里用来评估型腔加工成本的方法是将加工时间（$t_{\text{cavity_ machining}}$）和每小时机加工成本（$R_{\text{machining_ cost}}$）相乘，即

$$C_{\text{cavity_ machining}} = t_{\text{cavity_ machining}} R_{\text{machining_ cost}} \tag{3.8}$$

每小时机加工成本（$R_{\text{machining_ cost}}$）随着制造模具当地生活水平的变化而变化。德国的生活水平高于我国台湾地区，一个在德国的制模商，比在我国台湾地区的制模商会有更高的劳动成本。此外，每小时机加工成本费率也会随着模具制造商的工具、能力和设备使用率的情况而变化。例如，一个使用 5 轴数控铣床的制模者就比使用 3 轴手动操作的制模者拥有更强的能力，但需要更多的费用。附录 D 中给出了一些相近的加工成本和效率的数据以及每小时机加工成本，当然，机械师的成本是可以商量确定的。

型腔加工时间是由型腔的尺寸和复杂性以及加工工序的速度决定的。理论上，可以通过计划制造工序的顺序和时机掌握来精确估算加工时间。但实际上，这种方法是相对困难的，除非整个工作能够自动完成，比如在一台数控铣床上进行加工。[㊁]

㊀ 我国的对应牌号为 Cr12Mo1V1。——译者注

㊁ 事实上，原型模具正越来越多地被高速数控铣床以一种全自动的方式生产出来。由于工序的限制，型芯和型腔镶件通常都是用很小的铣刀在铝上加工，这样能够加工出相对精细的特征。虽然这种制造模具的方法确实能够提供非常精确的成本估算，且成本较低，但这种模具相对较软，不适合用来生产高产量的制品。但是，最近，强度更高和耐磨损的铝合金被开发出来，已经向传统的用钢制造模具的方法发出了挑战。

型腔加工时间由体积加工时间（$t_{\text{cavity_ volume}}$）和面积加工时间（$t_{\text{cavity_ area}}$）之和估算得来。考虑到专业应用要求，乘以一个复杂性因子（$f_{\text{cavity_ complexity}}$），再考虑到几何复杂性也是一个加工因子（$f_{\text{machining}}$），最后除以一个效率因子（$f_{\text{efficiency}}$）得

$$t_{\text{cavity_ machining}} = \left(\frac{t_{\text{cavity_ volume}} + t_{\text{cavity_ area}}}{f_{\text{efficiency}}}\right) f_{\text{cavity_ complexity}} f_{\text{machining}} \tag{3.9}$$

型腔体积加工时间是一个关于去除材料的体积和材料去除速率的函数。为了提供与真实值大概相等且稳妥的评估，假定去除材料的体积与型芯和型腔镶件的体积相等。这虽然看起来非常的稳妥，但实际上型芯镶件的外部和型腔镶件的内部还要被去除很大一部分。

材料去除速率是一个关于工序、表面质量、公差要求以及镶件材料性质的函数。为了简化分析，稍后会用几何复杂性因子得到不同加工工序和公差需求对生产要求的型腔的影响。如此，就得到了去除材料所需要的时间，即

$$t_{\text{cavity_ volume}} = \frac{V_{\text{cavity_ material}}}{R_{\text{material_ volume}}} \tag{3.10}$$

式中，$R_{\text{material_ volume}}$ 是模具材料的体积去除速率，单位为 m^3/h。不同材料的加工数据已在附录 B 中给出，如果已知切削的深度、速度和进给速率，则专业应用材料的切削速率可以替换[22]。

型腔面积加工时间（$t_{\text{cavity_ area}}$）估算加工所有型腔表面所需的时间，可以类似地计算为

$$t_{\text{cavity_ area}} = \frac{A_{\text{part}}}{R_{\text{material_ area}}} \tag{3.11}$$

式中，A_{part} 是制品的总表面积，单位为 m^2；$R_{\text{material_ area}}$ 是模具材料的面积去除速率，单位为 m^2/h。现代计算机的三维辅助设计系统可以对制品的表面积和体积进行精确测量。

型腔复杂性因子（$f_{\text{cavity_ complexity}}$）用来调整型腔加工时间以适应组成模具型腔的多种特征的设计与制造。与该复杂性因子有关的因素包括：

- 将模具型腔分成多个加工任务。
- 加工任务和数控程序的产生，包括电火花加工的电极。
- 加工任务的执行，包括多种机器任务，电火花加工、铣削加工等。
- 检验和再加工以获得精确的形状。

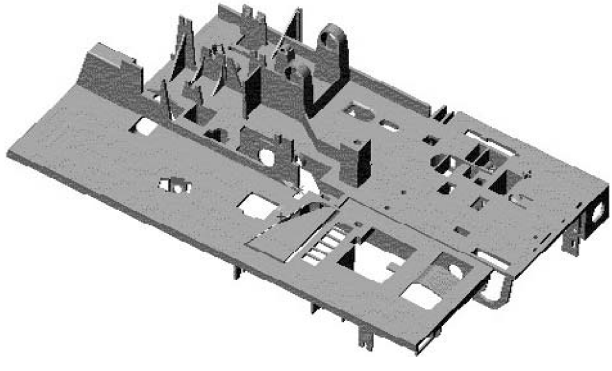
之前的研究[5,23]已经得出型腔的复杂性与成型制品的尺寸和特征的总数量有关。遗憾的是，之前的方法很耗时间，且依赖主观的意见来判断由什么构成一个尺寸或特征。因此，成本分析使用了一个复杂性因子，这个因子基于预期的制品体积（表面积 A_{part} 乘以壁厚 h）与实际的制品体积 V_{part} 之比，即

$$f_{\text{cavity_ complexity}} = \frac{A_{\text{part}} h}{V_{\text{part}}} \tag{3.12}$$

复杂性因子随着特征数量的增加而变大，因为每增加一个特征（比如一个筋板、一个套筒或者一个窗口）就会增加制品的表面积却不会引起制品的实际体积较大的增

加。为了说明不同水平的复杂性，表 3.3 中提供了各种不同制品的复杂性因子。

表 3.3　不同制品设计范例的复杂性因子

制品设计	复杂性因子
	1.02
	1.9
	2.5
	3.1

机加工效率因子（$f_{\text{efficiency}}$）用来解决不同加工种类的材料切削速率不同的矛盾。附录 B 中的体积切削速率指的是在直径为 19.05mm（3/4in）的碳化两槽铣刀、切削深度 3.2mm（0.125in）的情况下的速率；面积切削速率则是直径为 6.35mm（1/4in）的碳化四槽铣刀在一半的名义进给速率下的速率。由于型芯和型腔镶件通常都是经过多步加工操作生产出来的，对于一个确定的应用，它的总加工效率因子是每一个加工效率因子按比例的加权平均数。每一种加工工序的加工效率因子已在表 3.4 中给出。

表 3.4　不同工序的机加工效率因子

加工工序	机加工效率因子
车削加工	0.5
钻孔	0.5
铣削加工	1
磨削加工	4
放电加工（EDM）	4

加工效率因子（$f_{\text{efficiency}}$）用来评估劳动力和机器从事非加工活动上的那部分时间。理论上，一个全自动数控加工单元的效率能达到 100%。事实上，加工效率很少能够超过 50%。因为很大一部分时间用在了开发机器操作、取得和检查切削刀具、实施计划、核实切削路径、建立电极、进行 EDM 加工以及其他一些任务上。因此，在成本评估时，建议使用 25% 的加工效率。

例：计算笔记本电脑边框模具的型芯和型腔镶件的加工成本。

使用表 3.2 中的应用数据和附录 B 中工具钢 D2 的切削速率，可得加工时间为

$$t_{\text{cavity_ volume}} = \frac{2.65 \times 10^{-3}}{7.00 \times 10^{-4}}\text{h} = 3.78\text{h}$$

$$t_{\text{cavity_ area}} = \frac{0.0457}{0.0170}\text{h} = 2.69\text{h}$$

于是可得型腔复杂性因子为

$$f_{\text{cavity_ complexity}} = \frac{45700 \times 1.5}{27500} = 2.5$$

由于笔记本电脑边框包含的很多狭窄的筋板首先要用 EDM 加工生产，因此使用的机加工效率因子为 4。同时加工效率取为 25%。得到加工时间为

$$t_{\text{cavity_ machining}} = \left(\frac{3.78 + 2.69}{25\%}\right) \times 2.5 \times 4\text{h} = 258\text{h}$$

由附录 D 中统计的成本数据可知，一个美国的制模工的平均计时工资为 23.94 美元/h。这些是雇员的直接工资，并不包括附加津贴（比如医疗福利、假期等）、工厂和设备成本（比如土地、建筑、机器等）、供给物费用（比如切削工具、切削液、电力、水等）以及其他一些经常性费用（包括管理费用、红利等）。因此，制模商会要求支付比他们的雇员的直接工资高得多的费用。假设制模商开出一张 100 美元/h 的计时账单，则型腔加工成本可估算为

$$C_{\text{cavity_ machining}} = 258 \times 100 \text{ 美元} = 25\,800 \text{ 美元}$$

4. 型腔的折扣因子

型腔的折扣因子来源于第一个型腔装置的设计和加工产生的固定成本。生产率会随着型腔装置数量的增加而提高。表 3.5 中给出了不同型腔装置数量下折扣因子的值。型腔装置数量的每一次翻倍，折扣因子都会减小 15% 左右。但是，数量达到 16 个以后，生产率也很难进一步提高。表 3.5 基于通用的人为因素调查[24]，因此，如果可以，这

些因子要用专业的应用数据代替。

表 3.5　折扣因子与型腔数量的函数关系

型腔数量	折扣因子
1	1
2	0.85
4	0.72
8	0.61
16 或更多	0.52

例：由于笔记本电脑边框由单型腔模具制造，没有折扣，因此折扣因子设为 1。

5. 型腔抛光成本

型腔抛光成本（$C_{\text{cavity_ finishing}}$）也是一个主要的成本驱动因素，占总成本的 5% ~ 30%[25]。抛光成本是抛光型腔表面所需的时间（$t_{\text{cavity_ finishing}}$）和每小时抛光成本（$R_{\text{finishing_ cost}}$）的乘积，即

$$C_{\text{cavity_ finishing}} = t_{\text{cavity_ finishing}} R_{\text{finishing_ cost}} \tag{3.13}$$

抛光时间由模具每个需要抛光的表面的面积（A^i_{part}）除以该表面的抛光速率（$R^i_{\text{finishing}}$）得到，即

$$t_{\text{cavity_ finishing}} = \sum_i \frac{A^i_{\text{part}}}{R^i_{\text{finishing}}} \tag{3.14}$$

由于抛光速率由抛光的表面质量和纹理决定，式（3.14）中的求和符号表示需要把抛光成不同表面质量的每部分时间加起来。表 3.6 中给出了一些典型的抛光速率，它们是对应不同的质量水平由 Rosato[25] 改编而来的。附录 D 中给出了大概的劳动力费率。由于抛光加工可能完全是劳动密集的，因此型芯和型腔镶件的抛光有时会实行外包。

表 3.6　抛光速率

最终表面效果	抛光方法	抛光速率/（m^2/h）	抛光速率/（in^2/h）
纹理	电化学腐蚀	0.0002	0.3
SPI A－1	#3　金刚石抛光	0.0005	1
SPI A－3	#15　金刚石抛光	0.001	2
SPI B－3	#320　砂布	0.0025	4
SPI C－3	#320　磨石	0.005	8
SPI D－2	#240　氧化物喷砂	0.01	20
SPI D－3	#24　氧化物喷砂	0.02	30

例：评估笔记本电脑边框型腔抛光处理的成本。

假设笔记本电脑边框总共有 0.0457m^2 的表面积，其中大部分表面都达到 SPI B－3 要求，只有一个作为前面的表面达到 SPI A－1 要求，它的面积约为 0.01m^2。可得到抛光的时间为

$$t_{\text{cavity_ finishing}} = \left(\frac{0.0457 - 0.01}{0.0025} + \frac{0.01}{0.0005}\right)\text{h} = 34\text{h}$$

在上面的式子中，前面的面积已经从边框的总面积中扣除，以避免重复计算抛光前面所需的时间。如果每小时抛光成本是 50 美元/h，那么型腔抛光的成本为

$$C_{\text{cavity_ finishing}} = 34 \times 50 \text{ 美元} = 1700 \text{ 美元}$$

3.3.2　模架成本评估

模架指的是需要改造的空的模具或样板。由图 1.8 可知，除了型芯和型腔镶件、热流道以及其他一些相关的组成部分如推杆、支承柱和冷却水管塞以外，模架占了模具的大部分。

模架成本是一个关于模具质量与其单位质量价格的函数。通过模架的统计学成本分析，发现以下模型与其成本相近[㊀]，即

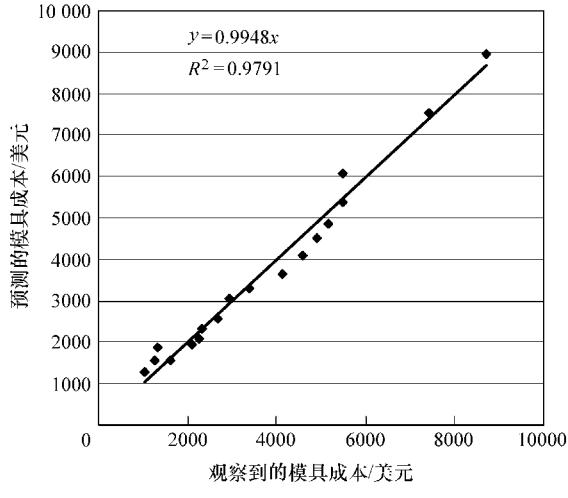
$$C_{\text{mold_ base}} = 830 + M_{\text{mold}}\kappa_{\text{mold}} \tag{3.15}$$

式中，M_{mold}是模架的质量，单位为 kg；κ_{mold}是模具材料每千克的价格，表 3.7 中给出了一些常用材料的价格数据。

表 3.7　模具钢价格[㊁]

编号	材料	模具钢价格/(美元/kg)
1	SAE 1030	3.55
2	AISI 4130	4.40
3	AISI P20	5.25

㊀　对三种标准材料的多种不同尺寸的模架的成本进行了统计学回归分析。下图中，模型中预测的成本与实际成本都画了出来进行对照。对于成本评估的情况，它们配合的结果是令人满意的。



㊁　1030 对应的我国牌号为 30 钢，4130 对应的我国牌号为 30CrMo，P20 对应的我国牌号为 3Cr2Mo。——译者注

考虑到模具的尺寸多种多样，模架的质量可以用统计学方法估算出来㊀，即

$$M_{\text{mold}} = 1330L_{\text{mold}}W_{\text{mold}} + 17200L_{\text{mold}}W_{\text{mold}}H_{\text{mold}} \tag{3.16}$$

模架的尺寸在模具布局设计的过程中就已经确定，可以初估为

$$\begin{aligned} L_{\text{mold}} &= 1.33L_{\text{cavity}}n_{\text{cavity_ length}} \\ W_{\text{mold}} &= 1.33W_{\text{cavity}}n_{\text{cavity_ width}} \\ H_{\text{mold}} &= 0.189 + 2H_{\text{cavity}} \end{aligned} \tag{3.17}$$

式中，$n_{\text{cavity_ length}}$和$n_{\text{cavity_ width}}$分别是长度和宽度方向上型腔的数量。如果它们是未知的，那么可以用下式估算

$$n_{\text{cavity_ length}} = n_{\text{cavity_ width}} = \text{ceiling}\left(\sqrt{n_{\text{cavities}}}\right) \tag{3.18}$$

式中，函数 ceiling（x）是所有非整数进一取整数。这样的评估方法会使计算的模具尺寸偏大，计算出的成本也会比实际卖出价格高，但不管怎么样，至少这种评估是合理的。

例：评估笔记本电脑边框的模架成本。

在评估模架成本之前，有必要先得出模架的尺寸。这是一个单型腔模具，模架尺寸为

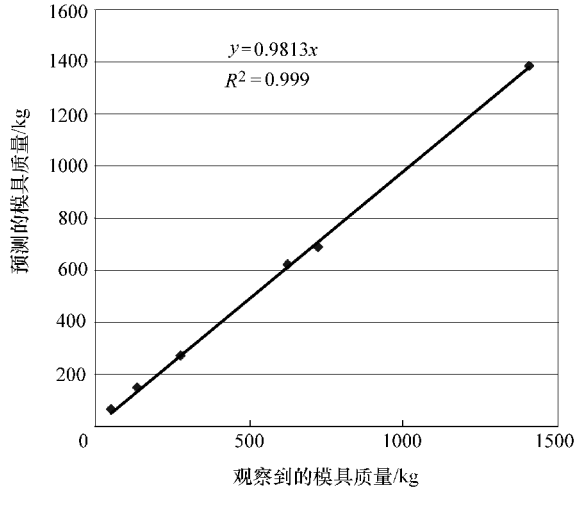
$$\begin{aligned} L_{\text{mold}} &= 0.264 \times 1 \times 1.33\text{m} = 0.351\text{m} \\ W_{\text{mold}} &= 0.176 \times 1 \times 1.33\text{m} = 0.234\text{m} \\ H_{\text{mold}} &= 0.189 + 2 \times 0.057\text{m} = 0.303\text{m} \end{aligned}$$

于是得到模具的质量为

$$M_{\text{mold}} = \ (1330 \times 0.351 \times 0.234 + 17\ 200 \times 0.351 \times 0.234 \times 0.303\text{kg} = 538\text{kg}$$

如果使用 AISI P20 钢制造模架，则模具的价格为 5.25 美元/kg。模架的成本为

㊀ 通过之前的验证数据，本模型有如下的配合情况：



$$C_{\text{mold_ base}} = (830 + 538 \times 5.25) \text{美元} = 3655 \text{美元}$$

3.3.3 模具定制成本评估

模具的定制包含很多的设计、加工和装配步骤。其中一些具体的模具定制步骤如下：

- 在模板上加工凹槽和螺钉孔，来装配型芯和型腔镶件。该成本与型腔的数量和模具的尺寸成比例关系。
- 在模板上铣出冷流道系统，或者购置一个热流道系统和修整模具。该成本与浇注系统类型、浇口数量和模具尺寸有关。
- 钻孔、开孔、堵塞，加工出冷却管道。该成本与冷却管道的数量和布局有关，而冷却管道的数量和布局又与型腔的数量和几何形状有关。
- 在型芯镶件和支承板上钻孔、铰孔，用来装配推杆和在挡板上加工出对应的沉孔。该成本与推杆的数量有关，而推杆的数量又与型腔的数量和它们的几何形状有关。
- 根据需要，在推板和挡板上铣出孔以装配支承柱。该成本与型腔的数量和它们的几何形状有关。
- 设计加工其他一些模具上必需的组成部分，比如推板、导杆、抽芯装置等。这些成本与制品的几何形状和应用要求有关。

鉴于所有的假设和方程式都需要讨论，如果把所有定制成本详细地分析描述出来，就太冗长了。但是通过对上面的定制的回顾，可以知道，定制的成本通常与模架的尺寸、镶件的成本和要求的工艺过程有关。据此，可得到一个合理的模型

$$C_{\text{customization}} = C_{\text{cavities}} \sum_i f^i_{\text{cavity_ customizing}} + C_{\text{mold_ base}} \sum_i f^i_{\text{mold_ customizing}} \tag{3.19}$$

式中，$f_{\text{cavity_ customizing}}$与控制型芯和型腔镶件成本的因素有关；$f_{\text{mold_ customizing}}$与控制修整模架成本的因素有关；求和符号代表每个模具子系统的定制相加，$i \in$［浇注系统、冷却系统、推出系统、结构系统及其他］。值得说明的是，这些定制因素包含了所需零件和系统装配（比如热流道、配件、抽芯装置等）的采购成本。

第6章对浇注系统进行了详细的讨论。表3.8中给出了为了容纳不同种类的浇注系统修整型腔镶件和模架的成本因子。一个简单的两板一腔或四腔的冷流道系统模具的$f_{\text{cavity_ customizing}}$等于0.05，$f_{\text{mold_ customizing}}$等于0.1。对于一个16或更多腔的热封闭的热流道高产模具，$f_{\text{cavity_ customizing}}$等于0.5，$f_{\text{mold_ customizing}}$等于1.0。

冷却系统将在第9章讨论。表3.9给出了不同冷却系统的成本因子。很多模具使用直线形管道，带有O形圈及其配件，这会增加5%的型腔镶件成本和20%的模架成本。当冷却系统更为复杂时，安装的费用也会升高。

推出系统将在第11章中讨论。表3.10中给出了不同推出系统的成本因子。虽然推出要求会随着制品的几何特征和应用要求有很大不同，但大部分模具都混合使用圆形推杆、扁推杆和推管。

表 3.8　浇注系统成本因子

浇注系统设计	型腔成本因子 $f_{\text{cavity_ customizing}}^{\text{feed_ system}}$	模架成本因子 $f_{\text{mold_ customizing}}^{\text{feed_ system}}$
两板式冷却通道	0.05	0.1
三板式冷却通道	0.1	1.0
带热浇口的热流道系统	0.4	2.0
带阀浇口的热流道系统	0.5	4.0
带热浇口的热流道叠层模具	0.5	8.0
带阀浇口的热流道叠层模具	0.9	12.0

表 3.9　冷却系统成本因子

冷却系统设计	型腔成本因子 $f_{\text{cavity_ customizing}}^{\text{cooling_ system}}$	模架成本因子 $f_{\text{mold_ customizing}}^{\text{cooling_ system}}$
带 O 形圈及配件的直线形冷却管道	0.05	0.2
带有扩散器或挡板、密封圈及其配件的直线形冷却管道	0.10	0.2
带有密封圈、塞子及其配件的循环冷却管道	0.15	0.4
带有扩散器或隔板、密封圈、塞子及其配件的循环冷却管道	0.20	0.4
带有热传导或波浪形的冷却镶件的复杂冷却管道布局	0.25	0.8

表 3.10　推出系统成本因子

推出系统设计	型腔成本因子 $f_{\text{cavity_ customizing}}^{\text{ejector_ system}}$	模架成本因子 $f_{\text{mold_ customizing}}^{\text{ejector_ system}}$
圆形推杆	0.1	0.1
圆形推杆、扁推杆和推管混合使用	0.2	0.2
推板	0.2	0.2
外部的滑块或斜顶	0.2	0.4
内部的滑块或斜顶	0.4	0.4
抽芯装置	0.4	0.5
反向弹射系统	0.5	1.0

模具的结构设计将在第 12 章中予以讨论。表 3.11 中给出了各种不同结构系统的成本因子。大部分高产量的模具一般使用支承柱和分型面联动装置。在本成本评估方法中，认为型芯镶件和型腔镶件所形成的密封空间是结构系统的一部分。模具的成本将随着分型面复杂性的提高而提高，分型面的设计将在第 4.1 节中讨论。

除这些以外，还有很多其他的定制可以用在模具上。当这些因素是必要的时，其中的一些成本因子在表 3. 12 中给出了。大多数模具对这些定制都没有要求。

表 3. 11　结构系统的成本因子

结构系统设计	型腔成本因子 $f^{\text{structural_ system}}_{\text{cavity_ customizing}}$	模架成本因子 $f^{\text{structural_ system}}_{\text{mold_ customizing}}$
没有多余的支承结构和平直的模具分型面	0. 0	0. 0
多个阶梯的分型面	0. 2	0. 0
复杂的波浪形分型面	0. 4	0. 2
支承柱	0. 0	0. 1
支承柱和联动装置	0. 1	0. 2
分离腔模具	0. 5	1. 0

表 3. 12　其他定制的成本因子

要求的模具定制	型腔成本因子 $f^{\text{miscellaneous}}_{\text{cavity_ customizing}}$	模架成本因子 $f^{\text{miscellaneous}}_{\text{mold_ customizing}}$
模具温度传感器	0. 05	0. 1
模具压力传感器	0. 05	0. 1
气体辅助成型	0. 2	0. 5
流道开关	0. 0	0. 5
动态熔融控制	0. 2	0. 1
镶件注射	0. 4	0. 4
模内标贴	0. 4	0. 4
两次注射成型	2. 0	4. 0
三次注射成型	3. 0	6. 0

例：评估笔记本电脑边框的模架和镶件的定制成本。

本模具使用的是带热浇口的热流道系统，因此相应的定制因子为

$$f^{\text{feed_ system}}_{\text{cavity_ customizing}} = 0.4$$

$$f^{\text{feed_ system}}_{\text{mold_ customizing}} = 2.0$$

本模具使用的是带有密封圈、塞子的循环冷却管道的冷却系统，因此相应的定制因子为

$$f^{\text{cooling_ system}}_{\text{cavity_ customizing}} = 0.15$$

$$f^{\text{cooling_ system}}_{\text{mold_ customizing}} = 0.4$$

本模具结合使用了圆形推杆、扁推杆和推管的推出系统，因此相应的定制因子为

$$f^{\text{ejector_ system}}_{\text{cavity_ customizing}} = 0.2$$

$$f^{\text{ejector_ system}}_{\text{mold_ customizing}} = 0.2$$

本模具使用的是支承柱和联动装置的结构系统，同时要求有一个阶梯状的分型面来形成图 3. 5 中所示的沿着成型面的那些细节。因此，相应的定制因子为

$$f^{\text{structural_ system}}_{\text{cavity_ customizing}} = 0.1 + 0.2 = 0.3$$

$$f_{\text{mold_ customizing}}^{\text{structural_ system}} = 0.2 + 0.0 = 0.2$$

为了控制成型的过程，在本模具流体的末端，安装了一个热电耦；在接近热浇口的地方安装了一个熔融压力传感器。因此，总的定制因子为

$$f_{\text{cavity_ customizing}}^{\text{miscellaneous}} = 0.05 + 0.05 = 0.1$$

$$f_{\text{mold_ customizing}}^{\text{miscellaneous}} = 0.1 + 0.1 = 0.2$$

于是，总的定制成本为

$$C_{\text{customization}} = [27\,900 \times (0.4 + 0.15 + 0.2 + 0.3 + 0.1) + 3655 \times (2 + 0.4 + 0.2 + 0.2 + 0.2)]\text{美元} = 43\,050\ \text{美元}$$

总结上面的分析，模具的总成本为

$$C_{\text{total_ mold}} = C_{\text{cavities}} + C_{\text{mold_ base}} + C_{\text{customization}} = (27\,900 + 3\,655 + 43\,050)\ \text{美元} = 74\,605\ \text{美元}$$

对于一个在美国生产的模具，本评估方法是合理的，但是评估的结果会比亚洲生产的模具的成本高，尤其是在模具中不包含热流道系统的情况下。因此，对于冷流道模具和附录 D 中不同的劳动力成本的情况，应当重新评估。

3.4　制品成本评估

成型制品的总成本（C_{part}）可由下式计算

$$C_{\text{part}} = \frac{C_{\text{mold/part}} + C_{\text{material/part}} + C_{\text{process/part}}}{f_{\text{yield}}} \tag{3.20}$$

式中，$C_{\text{mold/part}}$是单件制品的模具分摊成本与维护费用；$C_{\text{material/part}}$是单件制品的材料成本；$C_{\text{process/part}}$是单件制品的加工成本；f_{yield}是产品合格率。下面对这四个项目分别进行评估，并给出范例。

例：评估每个制品成型的手提电脑边框的总成本。

在之后的分析中，得出了每件制品的模具成本为 0.22 美元，材料成本为 0.06 美元，加工成本为 0.19 美元。假设f_{yield}为 98%，那么制品总成本为

$$C_{\text{part}} = \frac{0.22 + 0.06 + 0.19}{0.98}\text{美元} = 0.48\ \text{美元}$$

3.4.1　单个制品的模具成本

前面已知模具的总成本（C_{mold}），于是可以得到每个制品的模具成本为

$$C_{\text{mold/part}} = \frac{C_{\text{mold}}}{n_{\text{total}}} f_{\text{maintenance}} \tag{3.21}$$

式中，n_{total}是成型制品的总产量；$f_{\text{maint enance}}$是一个与模具维修相关的因子。大多数的制模商，一般进行数个级别的维修，包括：

- 每次成型加工之后的预防性维修。
- 间歇性检查和小维修。
- 每季或每半年的常规性维修。
- 如果有必要，重新制造模具。

模具保养和维修的需要与成型周期的数量、塑料的性质、模具的材料、加工的状态和模具的质量有关。众所周知，在模具整个可使用期间，模具的维修费用会大大超过购

买模具的费用。树脂相对于模具越耐磨，模具的磨损速度就越快，所需的维修费用也就越多。相反，一个硬化过的、设计得很好的模具与未填充的、低黏度塑料一起使用时，需要的维修费用就较少。表 3.13 给出了一些维修数据。

表 3.13　模具维修因子

模具材料	未填充、低黏度塑料	高黏度或微粒填充塑料	高黏度、纤维填充塑料
软的模具材料，例如铝或低碳钢	3	10	20
标准模具钢，例如 P20	2	5	10
表面硬化的，或者工具钢，例如 H13[⊖]	2	2	3

例：评估单件笔记本电脑边框模架的分摊成本。

ABS 是一种中等黏度、未填充的材料。如果模具是表面硬化了的 D2 工具钢，那么模具的维修因子就在 2～5 之间，这里取 3。鉴于模具要求是一腔和 100 万个成型周期，每成型一个笔记本电脑边框的模具分摊成本（包括最初的购买费用和维修费用）可通过下式得出

$$C_{\text{mold/part}} = \frac{74\ 605}{1\ 000\ 000} \times 3 \text{ 美元/件} = 0.22 \text{ 美元/件}$$

3.4.2　单个制品的材料成本

单个制品的材料成本可通过下式得出

$$C_{\text{material/part}} = V_{\text{part}} \rho_{\text{plastic}} \kappa_{\text{plastic}} f_{\text{feed_ waste}} \tag{3.22}$$

式中，V_{part}是成型制品的体积，ρ_{plastic}是成型塑料的密度；κ_{plastic}是成型塑料每千克的价格；$f_{\text{feed_ waste}}$是浇注系统浪费因子。

表 3.14 中给出了不同种类的浇注系统材料消耗的大概情况。冷流道很简单，价格低，但却导致成型的塑料必须丢弃或者进行循环利用。将废料进行循环利用可以减少浪费，但是会带来劳动力和能源的费用。热流道能够大大地减少材料的费用，但是会在启动阶段消耗大量的材料，运行期短时更明显。

表 3.14　材料浪费因子

浇注系统设计类型	浇注系统浪费因子 $f_{\text{feed_ waste}}$
冷流道	1.25
冷流道，回收料完全利用	1.08
热流道，短期	1.05
热流道，长期	1.02

例：评估成型每件手提电脑边框的塑料材料成本。

本例使用的是热流道系统，产量为 100 万件，假设生产期长，那么浇注系统的浪费因子为 1.02。使用附录 A 中价格和密度，单件制品的塑料材料的费用为

$$C_{\text{material/part}} = 27\ 500 \times 10^{-9} \times 1\ 044 \times 2.16 \times 1.02 \text{ 美元/件} = 0.063 \text{ 美元/件}$$

每件制品的材料费用很低，因为制品的厚度很薄（1.5mm），质量很小（28.7g）。

⊖　对应的我国牌号为 4Cr5MoSiV1。——译者注

3.4.3　单个制品的加工成本

单个制品的加工成本是一个关于型腔数量、循环周期（t_{cycle}）和每小时操作工与机器所需的费用（$R_{\text{molding_cost}}$）的函数，即

$$C_{\text{process/part}} = \frac{t_{\text{cycle}}}{n_{\text{cavities}}} \frac{R_{\text{molding_cost}}}{3600} \tag{3.23}$$

循环周期主要由制品的厚度（h_{wall}）决定，其次制品的尺寸和浇注系统的类型对其也有影响。虽然循环周期在设计冷却系统时计算更为精确，这里还是给出一个合理的估算方法

$$t_{\text{cycle}} = 4h^2 f_{\text{cycle_ efficiency}} \tag{3.24}$$

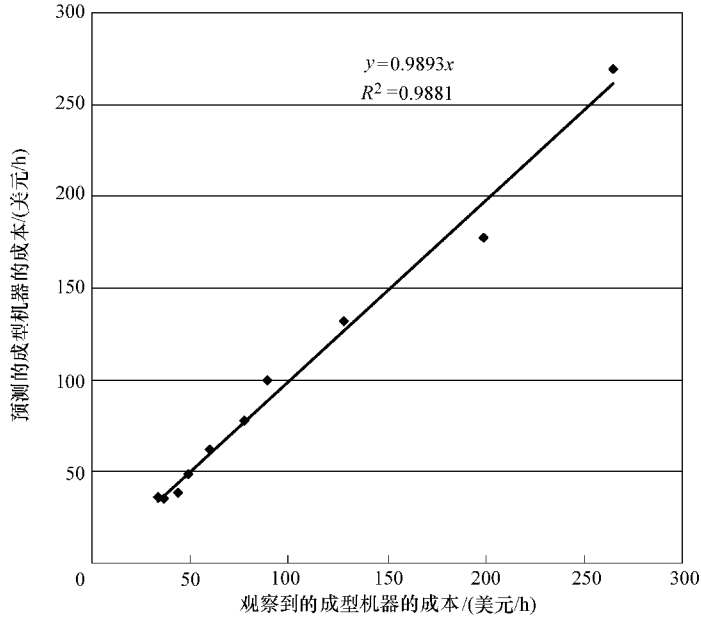
式中，t_{cycle}的单位为 s；h 的单位为 mm；$f_{\text{cycle_ efficiency}}$是循环效率因子，其是一个关于浇注系统类型和操作工艺流程（表 3.15）的函数。虽然热流道全自动模具更令人满意，但很多制模工还是在冷流道半自动的模具上操作。

表 3.15　循环效率因子

浇注系统和模具操作的类型	冷流道循环效率因子 $f_{\text{cycle_ efficiency}}$	热流道循环效率因子 $f_{\text{cycle_ efficiency}}$
半自动成型，操作员移除成型制品	2.5	3.0
半自动成型，重力落下或高速机器人取出	1.5	2.0
全自动成型	1.0	1.5

每小时操作工与机器所需的费用是一个关于锁模力、技术能力和相关的劳务费的函数。下面的这个模型将锁模力和技术能力和每小时操作工与机器所需的费用联系了起来㊀，即

㊀ 使用公布的 12 种不同锁能力（20～3500t）的成型机器的美国成本数据进行了本次分析。模型的配合程度如下图所示：



$$R_{\text{molding_ cost}} = (47.0 + 0.073F_{\text{clamp}} - 4.7\ln F_{\text{clamp}})f_{\text{machine}} \tag{3.25}$$

式中，F_{clamp}是锁模力，单位为 t；f_{machine}是关于机器的能力和相关劳务费的因子。

机器能力因子在表 3.16 中给出。一般来说，拥有先进能力和高锁模力的机器需要花费更多来购买和操作，因此需要对单位时间成本加价。拥有专用能力（比如多个注射装置或者更高的注射压力/速度）的机器购买的价格更贵，因此同样需要对单位时间成本加价。

表 3.16　成型机器的技术能力

成型机器的种类和劳动要求	机器能力因子f_{machine}
老式液压机器（于 1985 年之前购买），没有操作员或利润	0.8
标准液压机器或老式电力机器（1998 年之前），有操作员和利润	1.0
现代电力机器，没有操作员和利润	1.1
模工利润	加 0.1
机器人取出和传送带	加 0.05
热流道温度控制	加 0.05
气体辅助控制	加 0.1
注射压力控制	加 0.1
专用操作员/装配员	加 0.15
两次注射成型机器	加 1.0
三次注射成型机器	加 1.4

辅助设备的成本应当加上适当的机器能力因子。虽然机器和辅助设备的技术增加了成型过程的成本，但是它们都提高了制品质量，减少了加工和材料的成本。

锁模力会在设计充填系统时被分析到。如果假设型腔投影面积上的平均熔融压力为 75MPa，则可以保守估计出锁模力为

$$F_{\text{clamp}} = 75 \times 10^6 n_{\text{cavities}} L_{\text{part}} W_{\text{part}} / 9800 \tag{3.26}$$

式中，L_{part}、W_{part}的单位为 m；F_{clamp}的单位为 t。

例：评估每件笔记本电脑边框的加工成本。

假设该成型是热流道系统、机器人取出的全自动成型过程。对应的循环效率因子为 1.5。循环周期为

$$t_{\text{cycle}} = 4 \times 1.5^2 \times 1.5\text{s} = 13.5\text{s}$$

如果使用的是带有机器人取出、传送带和热流道控制器的现代电力机器，那么机器能力因子为

$$f_{\text{machine}} = 1.1 + 0.05 + 0.05 = 1.2$$

为了计算成型设备的成本，必须先算出锁模力

$$F_{\text{clamp}} = (75 \times 10^6 \times 1 \times 0.24 \times 0.16/9800)\text{t} = 294\text{t}$$

值得说明的是，由于笔记本电脑边框里有一个很大的窗口，实际所需的锁模力是小

于 294t 的，本分析还是比较保守的。

于是，估算出成型设备每小时操作工与机器所费的成本为

$$R_{\text{molding_ cost}} = (47.0 + 0.073 \times 294 - 4.7\ln 294) \times 1.2 \text{ 美元/h} = 50.1 \text{ 美元/h}$$

然后根据式（3.23）得到成型制品的加工成本为

$$C_{\text{process/part}} = \frac{13.5}{1} \times \frac{50.1}{3\,600} \text{美元/h} = 0.19 \text{ 美元/件}$$

3.4.4　单个制品的缺陷成本

有很多原因导致成型制品报废。一些常见的缺陷包括填充不足、飞边、污染、不正常的颜色匹配、表面条痕、翘曲和其他尺寸问题、烧痕及光泽不良等。因为购买者要求高质量的制品，制模商在将制品运给购买者之前，会挑出瑕疵品。这种缺陷成本可以通过评估产量计入到制品的成本中。

通常产量可以在启动时的 50% ~60%（对于有很多质量要求的严格应用）到实际上的 100%（对于成熟的商用产品）之间变化。表 3.17 中给出了相应成型周期次数和质量要求的 f_{yield} 评估。

表 3.17　f_{yield} 评估

成型周期的次数	低质量要求	高质量要求
≤10 000	0.95	0.90
≤100 000	0.98	0.95
≤1 000 000	0.99	0.98

例：评估成型笔记本电脑边框的 f_{yield}。

由于产量约为 100 万件，假设质量要求较高，则 f_{yield} 为

$$f_{\text{yield}} = 0.98$$

总结前面的分析，制品总成本为

$$C_{\text{part}} = \frac{0.22 + 0.06 + 0.19}{0.98} \text{美元} = 0.47 \text{ 美元}$$

模具成本相对于材料成本和加工成本较高，说明模具设计较保守。需要进行更多的成本评估来分析冷流道模具的有效性，这样最初模具成本较低，但却会增加材料成本和加工成本。

3.5　本章小结

本章首先介绍了模具报价的过程，紧接着详述了模具和制品成本的评估方法。这些方法利用了极少的资料却得出了关键性的模具设计决策对模具成本和制品成本的影响。建议进行多个不同模具设计的成本评估，直到建立一个有效的模具规范。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 注射模具成本的主要驱动因素。

- 成型制品的主要成本驱动因素。
- 模具的报价过程，制造和加工一个模具所需的典型付款清单。
- 怎样估算一个注射模具的成本。
- 怎样估算成型制品的成本。
- 怎样运用成本评估方法，通过减少单件制品的模具、材料和加工的总成本，来改善模具设计。

最大限度地减少制品的总成本的责任是由模具设计者、制模商和最终的产品使用者共同承担的。模具设计者必须周密地权衡模具成本、材料成本和加工成本。长期的低效率的模具设计会造成所有当事人的利益损失。

在下一章中，在成本分析的基础上得到模具设计的布局规范。然后，会对注射模具基本系统的设计和分析进行总结。

第 4 章　模 具 设 计

在模具设计阶段，设计者决定模具的类型，并选择型腔、型芯以及模具底板的材料、尺寸。由于模具底板的尺寸只能从离散的尺寸中选择，因此镶件和模具尺寸的选择范围很窄。模具设计的目的是确定镶件和模具的尺寸，以便采购它们的原材料。由于模具材料的性能对模具制造时间、成本、模具结构性能以及热性能起着决定作用，所以模具材料的选择是十分重要的。

进行模具设计前，首先要确定型腔的数量、模具的类型。具体设计时，首先确定开模方向以及分型面的位置，然后确定型芯和型腔长度、宽度、高度三个方向的尺寸，接着选择模具底板，并使镶件尽可能简单紧凑地排布。由于后续的分析都是在所设计模具的基础上进行的，并且一旦模具开始加工制造，再去修改模具尺寸的费用很昂贵，因此设计一个优良的模具十分重要。

4.1　分型面的设计

分型面是动模与定模相接触的表面，它的主要作用是紧紧地密封型腔，以及防止熔体溢漏。密封通过垂直作用在分型面上的锁模力来维持。即使“parting plane”这个词意味着分型面是一个平面，分型面也可以不是平面。模具设计者在设计分型面时必须首先确定模具的开模方向。

4.1.1　确定开模方向

通过对先前所设计模具（图 1.4 ~ 图 1.8）的试验表明，模具的开模方向垂直于模具的分型面。实际上，模具的开模方向与分型面垂直的原因是：注射成型机的动模板是由拉杆或轨道来引导的，它的打开方向与动模板垂直。因此，在分型面上通常会安装导套或者模具联锁装置，以引导模具的开模方向与分型面相垂直。

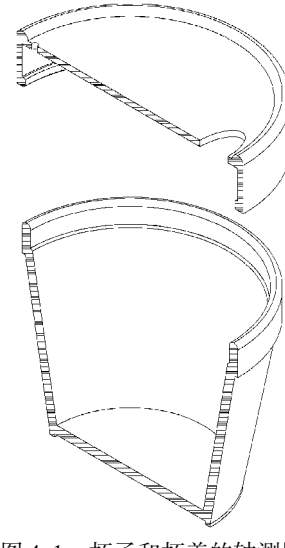


图 4.1　杯子和杯盖的轴测图

除了模具的开模方向与分型面垂直外，似乎没有其他决定开模方向的因素了。然而，相对于型腔来说，开模方向的确定是非常有必要的。以下两个因素影响开模方向：

- 首先，型腔的定位必须确保对注射模具不产生过大的压力。型腔放置时使它的最大面与分型面平行。这样的布局可使模板在锁模力的作用下受压，以此来抵抗型腔表面塑料产生的力。
- 其次，型腔的定位必须确保制品能被从模具中推

出来。比如，一个有五个侧面的开口盒子，它的侧壁、筋、凸起等其他特征都垂直它的最大面，这样，将这个制品取出来的条件依然是模具的开模方向与制品的最大面垂直。

图 4.1 所示是一个杯子和杯盖。它们的型芯、型腔的选择在图 1.6 中已经表达出了。对于这个制品来说，只有两个可能的开模方向，一个是杯子的轴向方向，另一个是杯子的径向方向。

杯子沿轴向开模时的模具剖视图如图 4.2 所示，图中两条加粗的水平线指的是分型面的位置，型腔、型芯以此为界分离开来。

杯子沿径向开模，则模具剖视图如图 4.3 所示，图中 4 条粗线将型腔、型芯划分开来。由于金属的型芯位于制品内部，只能沿着轴向方向将型芯抽出来，这样，型腔会被分割成三部分，使型腔沿两个方向移动。

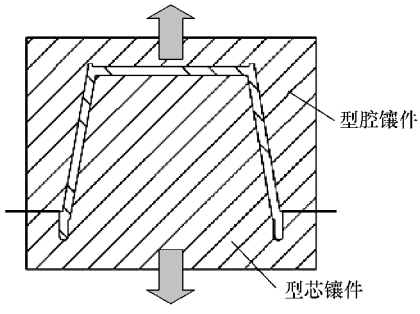


图 4.2　杯子沿轴向开模

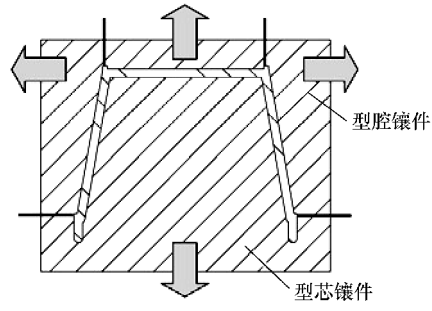


图 4.3　杯子沿径向开模

在上述两种设计方案中，图 4.2 所示沿轴向开模的设计是比较简单的，也是设计者优先考虑的。然而，当要成型更复杂的制品或者对分型面有其他的位置要求时，将会采用第二种设计方案。例如，当杯子需要加一个杯把，或者分型面不放置在杯顶处时。第二种模具设计也被称为分瓣型腔模具，该部分内容将在第 13.9.1 节进行详细的讨论。

再举一个例子，成型图 3.5 所示的笔记本电脑边框的模具，该模具也有两个可能的开模方向，第一种开模方向是沿着屏幕的观看方向，如图 4.4 所示。在这种情况下，整个型腔模板被图中的两条粗线分割成两部分，型腔用来成型笔记本电脑边框的外表面，型芯用来成型边框的内表面及肋。当型芯和型腔沿图中的箭头方向分离开来时，制品很容易被取出来。

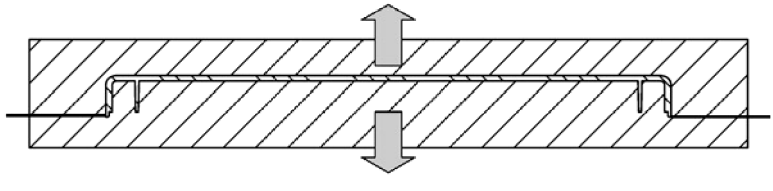


图 4.4　沿笔记本电脑边框的垂直方向开模

另一种开模方向如图 4.5 所示，对于成型 PC 边框的模具来说，它的型腔模板被图中所示的 3 条竖线分割。这样，型腔被分成两部分，也是按分瓣型腔模具设计。为了取出成型制品，这两部分型腔模板必须沿着倾斜的方向移动。采用模具倾斜的开模方向是为了使模具的表面与制品的表面分离开来，以避免对制品产生更多的表面摩擦和剪切。为了更好地控制型腔的移动，需要采用一些额外的模具组件，这样一来，会大大增加模具设计、加工以及操作费用。

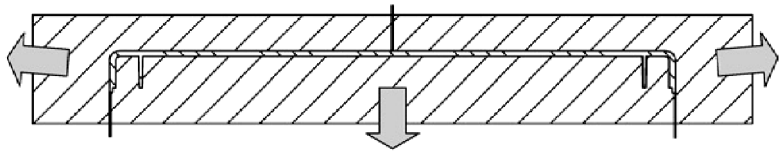


图 4.5　成型复杂边框的模具开模方向

4.1.2　确定分型线

分型线指的是型腔、型芯以及制品相接触的位置。由于型腔和型芯在分型面处接触，只要型腔与型芯有任何显著的偏转，就会导致间隙的出现，使熔体进入间隙中形成一层薄膜，称为飞边。在分型面处任何型腔或者型芯的缺陷（例如磨损、不规范的操作），都会造成间隙使熔体进入其中。即使是新的、良好工艺制造的模具，分型线处通常也会沿其长度方向产生轻微的夹边现象。

因此，分型线应该位于制品的底边，或者不可见的、不起功能作用的制品边缘。例如图 4.1 中的杯子，若将分型线设置在图 4.6 所示的左图虚线位置处，即杯子的唇沿处，会产生夹边或飞边，导致杯子不可使用。若如图 4.2 所示设置分型线（即图 4.6 的右图虚线所示），杯子的成型将更美观。

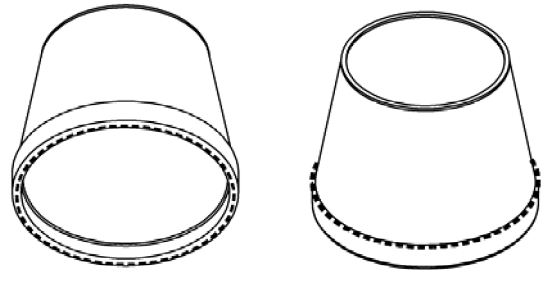


图 4.6　杯子的两种分型线设置方式

对于笔记本电脑边框来说，分型线应该环绕在制品的底部边缘，如图 4.7 所示。从图中可以看出，不同于杯子，笔记本电脑边框的分型线不是简单地在一个平面上，它和制品侧壁的特征轮廓相对应。这种非平面分型线是为了与型芯相对应，而型芯是为了使制品形成与电脑外部连接器相对应的插孔。在下一节会发现这种复杂的分型线会使分型面也变得复杂。

4.1.3　分型面

一旦确定了分型线，就能通过制品确定分型面，以便将型腔与型芯分离开来。对于杯子而言，它的首选分型面如图 4.8 所示，模具的型腔成型出杯子的外表面和外顶面，型芯成型出杯子的边沿和内表面。

对于笔记本电脑的边框来说，它的分型线如图 4.7 所示，因此可以推断出它的分型

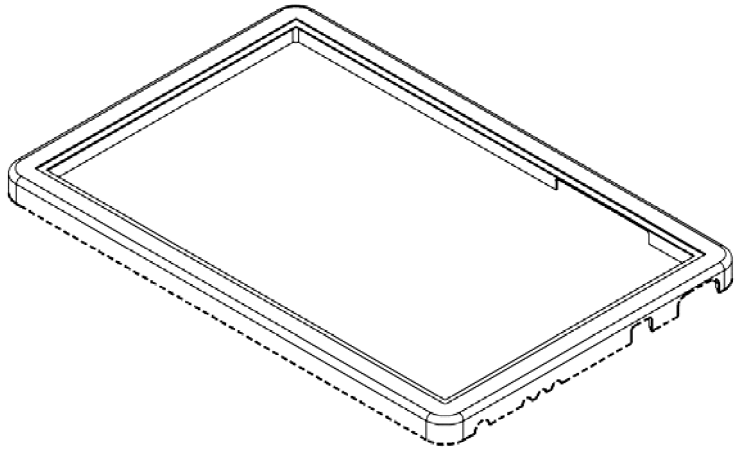


图 4.7　笔记本电脑边框的分型线

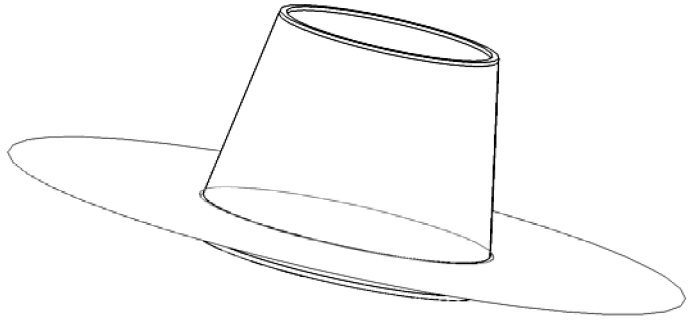


图 4.8　杯子的分型面

面如图 4.9 所示。从图中能看出非平面分型线使分型面由复杂表面组成。在进行模具操

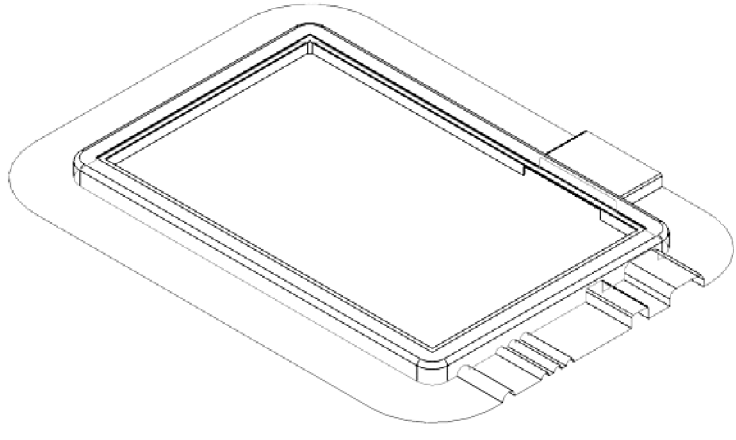


图 4.9　笔记本电脑边框的分型面

作时，这些表面会产生两个严重的问题：首先，型腔和型芯的表面没有完全压紧时，任何型芯与型腔的错位都会导致滑动表面产生磨损；其次，作用在型腔和型芯上的锁模力会使这些表面锁在一起，导致应力过大或者在模具动作时产生潜在的模具变形。

为了避免应力过大，分型面上的这些特征应该与开模方向至少倾斜 5°。如今，设计者通常利用三维计算机辅助软件设计出放样表面来设计分型面，每一个放样表面都由曲线特征沿分型线的宽度方向所组成，因此放样表面由必要的分型线轮廓延伸到分型面上。这些放样表面与分型面形成新的分型面，图 4.10 所示是边框最终的分型面。

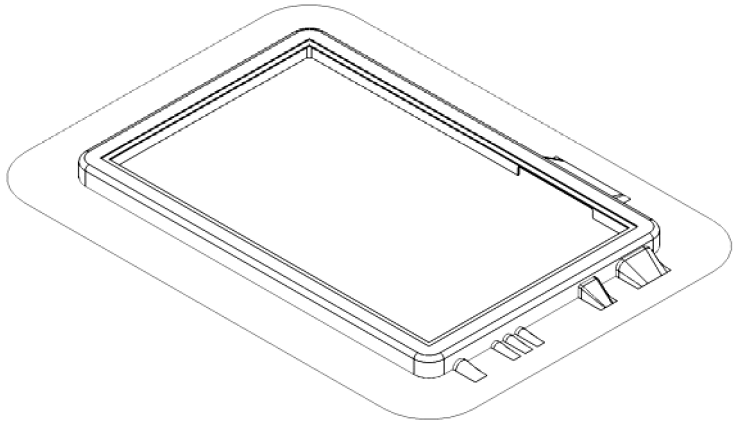


图 4.10　改进后边框的分型面

4.1.4　流道

流道是型腔与型芯相接触的部分，把型腔分离开来。一个流道对应制品上的一个窗口或中空结构，反过来说，如果制品没有窗口，例如杯子，就不需要流道。一条分型线确定一个流道，流道应该位于制品看不见的区域，这样就不会产生边界线或者飞边降低制品的价格。

例如，笔记本电脑边框的分型面上有一个大的窗口，因此需要一个贯穿整个窗口的流道，如图 4.11 所示流道的分型线有两种可能设置的位置，分别是搁板的顶面和底面。

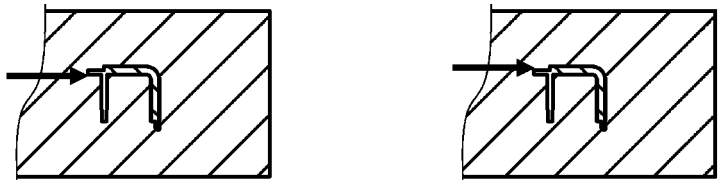


图 4.11　笔记本电脑边框流道的分型线设置

如果整个搁板在视觉之外，那么两种流道设置方式都是可选的。如果分型线设计在搁板的顶部，如图 4.11 的右图所示，那么会得到图 4.12 所示的流道。

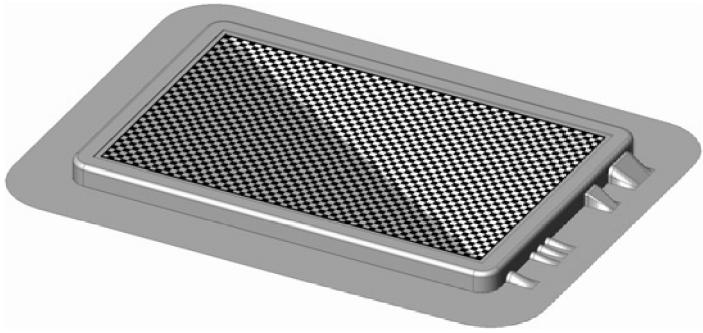


图 4.12　笔记本电脑边框的流道表面

4.2　型腔和型芯的制造

当分型线和流道都确定后，型芯、型腔也就完全分离开来了，为了制造型腔和型芯，它们的长、宽、高都必须确定。

型腔、型芯的长度和宽度都必须足够大以满足下列要求：

- 包围整个需要成型的制品。
- 能抵抗熔体作用在型腔上的力。
- 能布置用于聚合物熔体散热的冷却管道。
- 能布置其他元件，如固定螺钉、推杆等。

以上这些要求都使得型芯和型腔尽可能地大。对于小尺寸制品，增加型芯、型腔的尺寸所增加的费用也许不是很多。但对于多型腔模具或者成型大尺寸制品的模具，增加型芯、型腔的尺寸所增加的费用就会很大。

4.2.1　高度尺寸

型芯和型腔的高度尺寸通常由两个要求确定。首先，型芯和型腔的高度都要足够使冷却管道安全通过。对于小尺寸的模具，冷却管道的直径最小是 4.76mm，大的模具的冷却管道直径最大的是 15.88mm。通常，冷却管道直径越大，冷却越快且更均匀，这会在第 9 章进行分析。冷却管道的设计会在后续章节中讨论，而在 12 章的分析中指出，为了避免产生过大应力，制品与型腔、型芯的最顶或最底表面之间的距离要大于冷却管道直径的 3 倍，型芯和型腔最初的高度如图 4.13 所示。

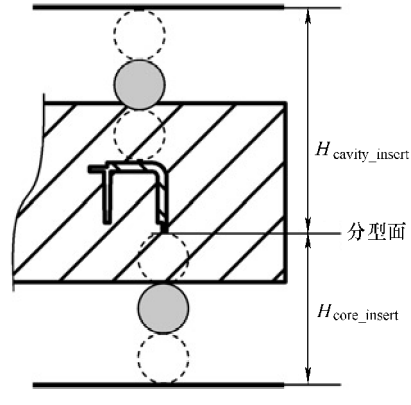


图 4.13　型芯、型腔的高度

其次，型芯、型腔的高度还应包括型芯固

定板、型腔固定板的高度（即 A 板、B 板）。通常，这些固定板是 12.7mm（0.5in）厚，或 10mm 厚。这样，型芯、型腔的高度再加上固定板的厚度后进行调整。注意，图 4.13 中所示的型芯高度并不是它的总高度，而是后表面到分型面之间的高度。为了方便原料采购和费用预算，型芯的总高度应该包括分型面上方的那部分型芯高度。

4.2.2　长度、宽度尺寸

型芯、型腔的长度、宽度也由两方面简单决定。首先，如果冷却管道需要环绕模具型腔的表面，那么型腔、型芯需要足够大以容纳冷却管道。和高度尺寸一样要有余量，型芯、型腔与边的长度、宽度通常也要有 3 倍冷却管道直径的余量。其次，型芯、型腔应该足够厚，能抵抗熔体作用在模具型腔侧壁上的压力。对于深长制品，模具的侧壁较大，这将是影响型腔、型芯长度、宽度的主要因素。相关的结构设计会在第 12.2.4 节进行详细的介绍，安全的设计指导是型腔长、宽侧壁的厚度应与型腔的深度一样。

从图 4.14 可以看出型腔、型芯的长度、宽度需要加上一定的余量。对于成型笔记本电脑边框来说，型芯、型腔的长度、宽度主要由冷却管道来决定。而对于成型杯子来说，型芯、型腔长度和宽度尺寸主要由结构来决定。

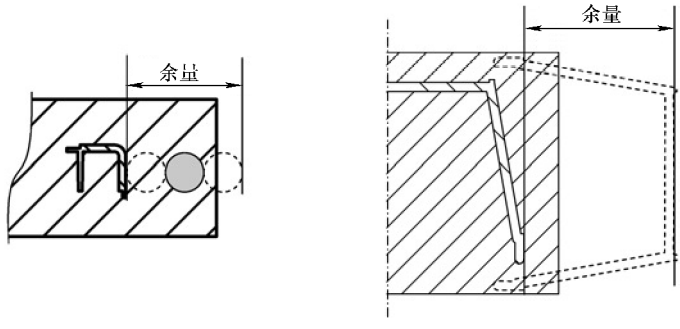


图 4.14　型芯、型腔的长度、宽度余量

4.2.3　调整

可以根据设计好的尺寸来加工制造型腔和型芯。但是，设计者常常需要改变型腔的尺寸来使模具设计得更合理。一般来说，型腔、型芯长度和宽度方向的尺寸比高度方向的尺寸要求更为严格，因为长度和宽度方向的尺寸有以下作用：

- 在多腔的模具中，对模坯的尺寸起着主导作用。
- 在材料费用和加工费用上占更大的比例。

通过有效设计冷却系统和结构，会使这些尺寸减小，这些设计方法会在后续的工程分析中得到验证。

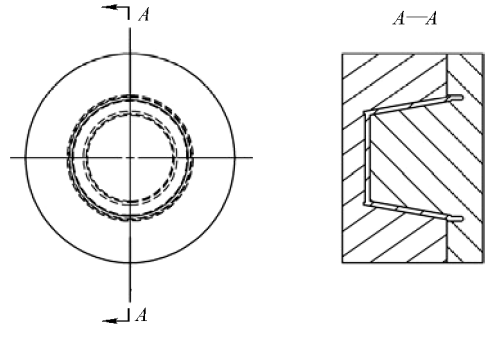


图 4.15　成型杯子的型腔和型芯

图 4.15 所示是成型杯子模具的型芯

与型腔。由于制品是圆形的，因此成型模具的型芯与型腔也可以是圆形的，这样型芯和型腔都能在车床上进行加工，给加工带来便利。当它们沿轴向和径向有足够的空间来布置冷却管道时，也许径向的镶件厚度不足以抵抗熔体对其的压力。

型芯和型腔的外部形状并没有特别的要求。图 4. 15 中型芯和型腔的形状是圆形的，图 1. 4 中就采用的是方形的镶件。此外，带圆角或不带圆角的矩形型腔及型芯镶件也很常见。型芯和型腔的形状是由制品、模具设计的效率、加工难度来共同决定的。

图 4. 16 所示的是成型笔记本电脑模具的型芯与型腔，此处采用的就是矩形的镶件，它们的长度和宽度尺寸设计较紧凑，能满足边框较浅的结构特征，但是可能没有足够的空间在型腔的周围布置其他模具元件和冷却管道。

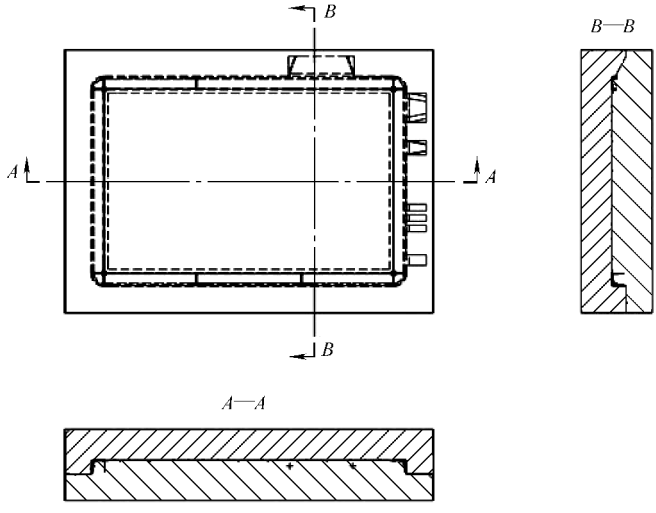


图 4. 16　成型笔记本电脑边框的型腔和型芯

4. 3　模具底板的选择

当型芯和型腔的初始尺寸确定下来后，可以进行下一步的模具设计以及模具底板的选择。采用适当尺寸和材料来制造模具底板是十分重要的，因为模具底板的任何错误都会造成大量的时间及金钱的浪费。为了确定模具底板的尺寸，设计者首先要安排好型腔的分布并设计好冷却系统和浇注系统，然后再从模具底板供应商那里选择标准尺寸的模具底板，并使其与注射成型机相匹配。

4. 3. 1　型腔的分布

型腔的布局设计是为了使模具更紧凑，更好加工，并有更高的生产率。如果是单腔模具，即使有时浇注系统不在模具的中心，型腔也通常位于模具的中心。对于多腔模具，主要有三种型腔分布形式：

- 型腔沿直线分布。

- 型腔按网格分布。
- 型腔沿圆周分布。

如图 4.17 所示，将所有的型腔布置在一条直线上，这是简单却低劣的设计。除非型芯和型腔是又长又浅的，否则会使模具具有很大的长宽比。通常来说，整个模具的长宽比应小于 2∶1。若长宽比过大，就需要大的模具，也许没有与此相匹配的注射成型机；再者，这样的型腔分布会导致浇注系统不平衡，从而不易对熔体进行控制，这些内容会在第 6 章中进行介绍。

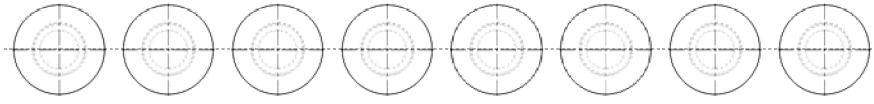


图 4.17　型腔沿直线分布

为了替代线性型腔分布，通常会用如图 4.18 所示的网格分布，这种型腔分布形式常用于大容量且型腔数量为 2、4、6、8、16 及 32 等偶数的情况。这样的分布形式主要有两个好处：第一，模具会很紧凑，长宽比也会在合适的范围；第二，浇注系统会维持平衡，这也会在第 6 章进行介绍。

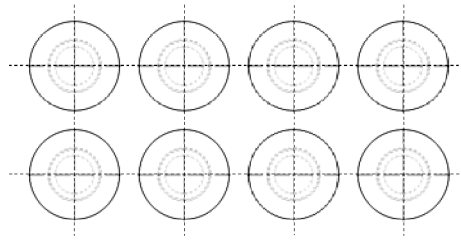


图 4.18　型腔按网格分布

尽管网格式分布的模具十分紧凑且常见，但其浇注系统会有多个分枝。为了简化浇注系统并使熔体充模流动更平衡。当制品比较小或者型腔数量较少（8 个或者更少）时，常将型腔沿圆周分布，如图 4.19 所示，这使得每个型腔到中心的距离相等。这样也会带来一个弊端，即模具的表面积要比前述的网格分布大。

虽然前面所列举的型腔分布形式是最常见的，但是设计者也会设计其他的型腔分布形式。有时候会把将几种形式综合起来应用。例如，图 4.20 所示的就是线性分布与圆

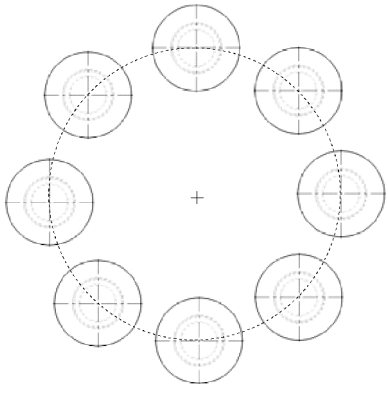


图 4.19　型腔沿圆周分布

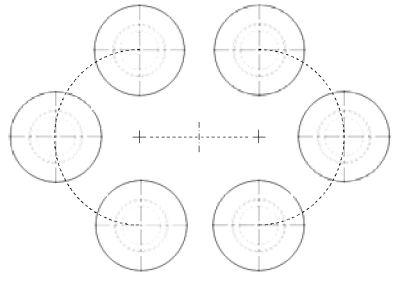


图 4.20　组合的型腔分布形式

周分布的结合，对于六型腔的模具来说，这种分布非常紧凑。设计者们应该设计出更适应制品大小和要求的型腔分布形式。

4.3.2　模具底板的尺寸

模具底板的尺寸主要由型腔分布方式来决定。但是，型腔的布置与其他模具元件（如导柱、导套等）之间的潜在冲突以及型腔支承系统（如冷却管道、推杆、支承柱等）与其他模具元件（如导柱、导套等）之间潜在的冲突，使模具底板的尺寸经常比最初设计的尺寸大。

图 4.21 中阴影部分代表的是分型面的有效面积，型芯和型腔也位于阴影之内，复位杆位于阴影区域的左、右侧，导柱和内六角圆柱头螺钉位于阴影区域的上方。型腔与周围的模具元件之间的间隙至少要等于模具元件直径的一半，以避免模具在操作时产生过大的应力。

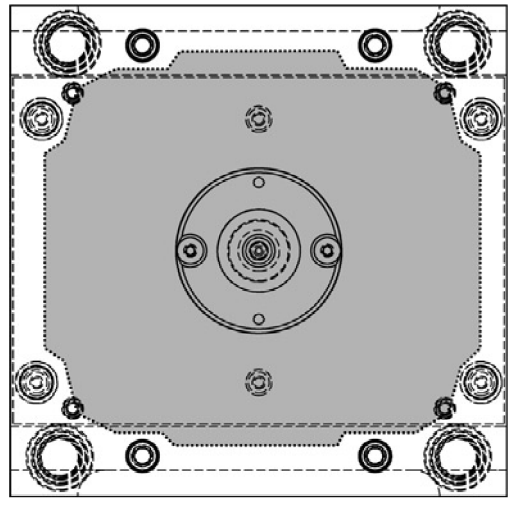


图 4.21　有效分型面区域

当给定了型腔的分布和几何外形后，设计者就可以选取模具底板的可行长度和宽度尺寸。边长为 200 ~ 1000mm 的标准模具均可选，可选范围很广。在确定了模具底板后，图 4.22 中 A 板、B 板、S 板的高度以及推出距离 E 也需要确定。总高度是两块夹紧板的底面到顶面的距离。

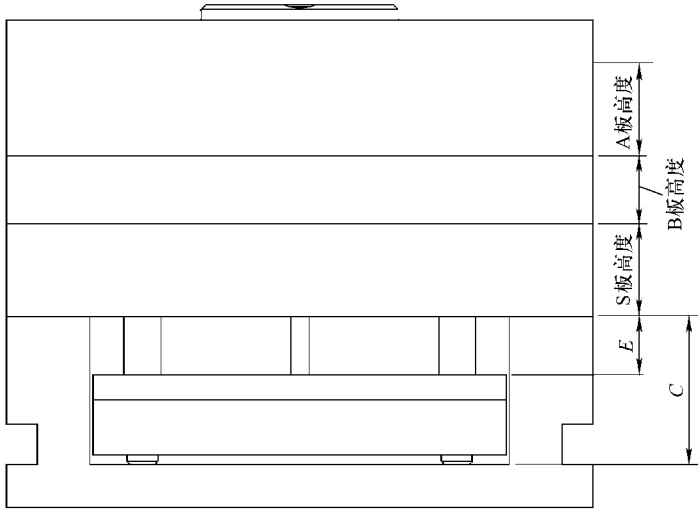


图 4.22　需要确定的高度尺寸

在模具底板的确定过程中，A 板、B 板的高度如前所述应该和型腔、型芯的高度相匹配。虽然支承板（S 板）的高度能被赋予不同的尺寸，但通常是模具供应商在 A 板、B 板高度的基础上确定的。推板的行程是用来推出制品的，通常推板的行程与制品的深度一样。推板的行程、推板的高度、尺寸 *C* 都是由模具供应商来确定的。

在确定了模具底板后，设计者就该确定浇口的口径了，浇口在图 4.22 中未表达出来。由于浇口套是直接放置或加工出来的，或者改变注射成型机的喷嘴来与浇口配合，因此浇口的直径就不那么重要了，这部分内容会在第 6 章进行介绍。

4.3.3　注射成型机的兼容性

当确定好模具底板后，设计者应该确保这个模具能安装在不同的注射成型机上。在注射成型机上安装模具需要考虑很多因素。首先，模具在结构上应该能与注射成型机配合，结构上最大的限制因素应该是模具能否与拉杆相配合。注射成型机的拉杆间距在机器上能很容易地测量出来，或者能在说明书上查找到。例如，图 4.23 显示了的巴顿菲尔 HM320 型注射成型机的拉杆间距和螺栓孔的分布。从图中可知，拉杆的水平间距是 800mm，垂直间距是 630mm，这意味着最大的模具宽度，包括冷却水管塞、热流道连接器等，为 800mm（由于模具与拉杆之间需要有一定间隙以便于模具安装，实际值应该小于 800mm）。

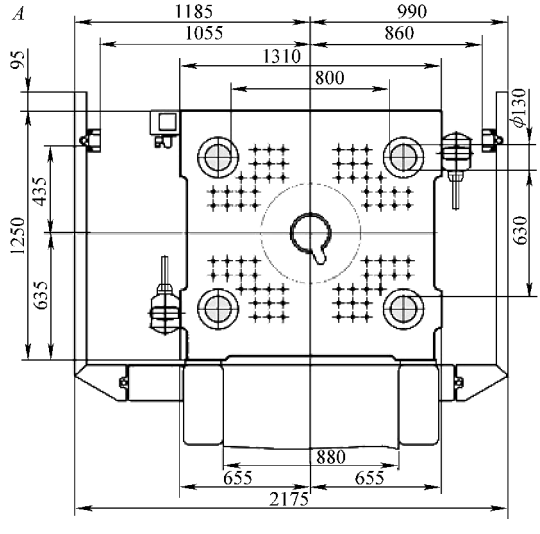


图 4.23　注射成型机拉杆间距和螺栓孔分布

图 4.24 所示是上述注射成型机的剖视图，和图 1.1 的方向相同。在该视图中，喷嘴位于图右侧的定模板上，图左侧是动模板和推出装置。为了在注射成型机上使用模具，模具的高度应该大于图中 A 尺寸并小于 B 尺寸，即在 350 ~ 800mm 之间。如果模具的厚度小于 350mm，注射成型机便不能进行完全合模和锁模；如果模具的厚度大于 800mm，即便动模板处于打开状态，模具也不能装入注射成型机。

即使模具和注射成型机相匹配，模具也不一定能在这台注射成型机上使用。例如，

注射成型机的注射系统必须有足够的注射量能提供足够的压力使熔体填满型腔；另一方面，如果注射系统尺寸过大，在进行注射时，熔体容易发生降解。对于巴顿菲尔 HM320 型注射成型机，其最大注射量为490mL。为了确保熔体在无降解条件下的均匀性，注射成型机的理想注射量为 120 ~ 250mL。

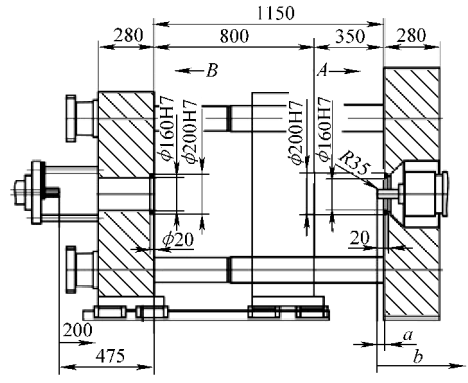


图 4.24　最大和最小开模行程

在对熔体施压时，注射成型机必须有足够大的锁模力使动模板和定模板牢牢不分开。对于这台注射成型机来说，它的锁模力是 3 200kN，相当于 326t，或 360ton，或 720 000lb。如果注射成型机的锁模力不够大，那么在成型过程中，模具会打开，熔体会从分型面和流道处流出来；但是，如果注射成型机对一个小的模具施加过大的锁模力，模具会因过大的压紧力而损坏。

4.3.4　模具底板供应商

模具底板的标准化设计是塑料成型工业上的一个重大进步。美国的大部分模具制造商利用制造标准化的模具底板来缩短制造周期和减少制造费用。再者，如果注射成型机里采用标准化的模具组件，那么模具的维修也得到了简化。

必须指出，由于种种原因，很多模具制造商并不使用标准化模具底板。例如，成型车身面板这样的大型制品时，并没有适合的标准化模具底板，这就需要专门的设计和制造。一些模具制造商认为标准化模具底板的质量并不太好，他们力图通过利用专业设计与合适的组件组合得到高质量、低成本的优质模具。另外一些模具制造商宁愿生产结构简单、花费少、功能齐全的模具，而不直接购买标准化的模具底板。

从许多模具底板供应商处能购买到模具底板和模具组件。在选择模具底板时，模具设计者需要考虑以下问题：

- 模具底板的尺寸和材料可选范围广。供应商不仅能提供不同长、宽、高尺寸的模具底板，还应能提供不同材料的模具底板。
- 能购买到模具组件。供应商能提供不同材料的镶件、推杆、制冷配件等相关组件。
- 模架设计所使用的单位体系和相关图样的质量；如果模具设计者想用美国传统单位或者公制单位，在模具底板的图样上应该能通过整数或分数反应出来，图样也应详细记录不同模具组件的设计，并在合适的条件下，提供有关定制和使用文档。
- 库存和交货期限。供应商应做到快速发货。采用特定尺寸和材料的定制模具底板应该定制生产并且在一星期内发货。每天上午定制的货应该在当天发运，最晚不得迟于第二天。
- 模具底板的质量。所有供贷模具底板应该是经过打磨、热处理、能让模具制造

者直接加工的。导柱、推杆以及其他模具元件应该经过打磨、硬化或者表面处理以减小磨损。

- 和模具底板供应商的早先合作经验。公司或模具设计者与供应商如果有良好的合作经历，那么更换供应商会存在一定风险或需要一个重新建立合作关系的过程。
- 价格应该具有竞争性。模具供应商综合考虑原材料的费用和适当的利润来制定价格。然而，模具设计者还应通过比较不同厂家所提供模具底板的优点和缺点，来决定从一家还是多家供应商购买模具底板。

4.4　模具材料的选择

在模具底板和材料的采购过程中，会涉及各种各样的金属材料。要注射成型不同种类的塑料，就有可能用到多种金属来作为注射模具的材料。

附录 B 是一些常见金属以及它们的性能，在这些金属中，AISI P20 以其优异的综合性能成为最常用的模具材料。但是在一些场合中，P20 并不适合。而一些其他的金属材料能提供更好的性能、更少的模具制造成本或更少的注射成本。在这一部分，讨论了模具材料的重要性能以及性能之间的平衡。

4.4.1　强度与热传递性

材料的强度通常用其能抵抗破坏的极限压力或者其不造成永久变形的屈服压力来表示。但是，对于注射模具来说，不用这些性能表示材料的强度。而是用疲劳极限（或者持久极限）来表示强度，这一性能表示材料反复承受加载、卸载而不失效的能力。材料在达到疲劳极限时常常并没有发生失效。附录 B 里面列出了各种材料的疲劳极限，在后面的结构工程分析中将用到这些数据。

热传递性通常用材料的热导率 κ 来表征，但是当给定了一个瞬态或者循环的热负载时，热扩散率（$a=\frac{\kappa}{\rho c_p}$）更适合来测量热传递性。热扩散率是材料散热与吸热的比值。对于快速热传递，材料必须有高热导率和低密度 ρ 以及低比热容 c_p。不同材料的这些性能参数均在附录 B 列出，并在后面的热工程分析中用到它们。

图 4.25 所示为各种材料的强度和热扩散率的比较。通常来说，材料（A6、D2、H13）的强度越高，热扩散率越低；相反，材料（铝、铜合金如 Cu940）的热扩散率越高，强度越低。没有哪种材料的强度和热扩散率都很高。作为最常见的模具材料，P20 的强度和热扩散率都位于中等数值，因此在一些场合中，可以采用其他的材料来提高模具的性能。

4.4.2　硬度与机械加工性能

为了承受磨损和腐蚀，模具材料应该有很高的硬度。测试材料硬度的方法有很多种，最常用的方法是布氏硬度测试法。具体做法是用 29 500N（6 500lbf）的力将直径 10mm 的硬质合金球压在模具材料上，用显微镜测出凹陷的直径，然后就可以计算出布氏硬度。各种模具材料的布氏硬度记录在附录 B 里面。各种材料的性能存在差异，布氏硬度测试法不一定适合很软或很硬的材料，出于这样原因，附录 B 里一些材料的布

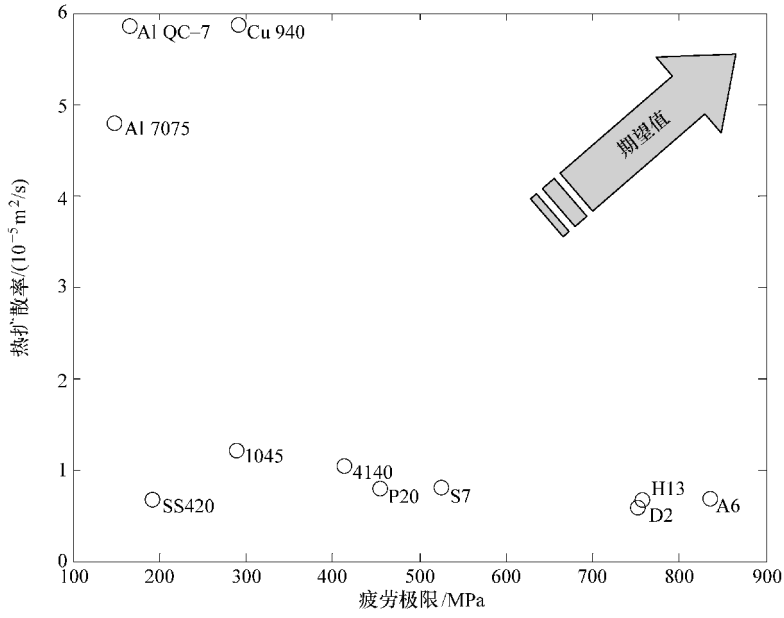


图 4.25　各种材料的强度和热扩散率的比较

氏硬度数值是采用其他合适的方法测出的硬度。

随着材料硬度的提高，材料的机械加工性能变差，因此就需要更硬的刀具、更慢的切削速率、更慢的进给速率。可以通过硬质合金刀具加工的切削速率和进给速率来计算机械加工速率，材料的机械加工速率与布氏硬度之间的关系如图 4.26 所示。

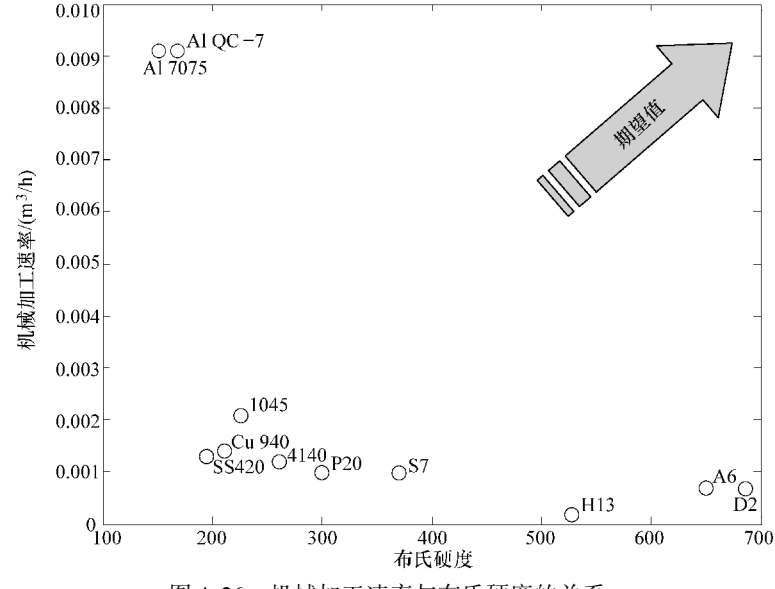


图 4.26　机械加工速率与布氏硬度的关系

从图 4.26 可以看出材料的加工速率与硬度成反比，因此，一些硬度高的材料，如 D2、A6、H13 等，只用于成型腐蚀性塑料的模具，以防较软的模具材料很容易地被腐蚀。由于具有较好的机械加工性能，铝合金常用于快速经济成型制品，但是在中等熔压成型（100MPa 及以上）或者成型稍有腐蚀性的塑料（例如炭填充塑料）时，就要谨慎使用铝合金模具。

4.4.3　模具制造商的成本与注射成型机的成本

在众多性能的平衡取舍中，最重要的是制造模具的费用与使用模具的费用之间的权衡。为了减少模具制造成本，模具材料应该具有好的机械加工性能、低成本、低硬度。模具制造成本因子可以用下式定义（模具制造成本正比于材料成本 × 硬度/加工速率）；为了减小模具使用成本因子，模具材料要有较高的热扩散率和硬度，模具使用成本因子可以用模具使用成本 ∝ 1/（热扩散率 × 硬度）来描述。图 4.27 所示为模具制造成本因子与模具使用成本因子的关系，每个因子都是以 P20 为基准进行了标准化。理论上希望使用模具制造成本因子和使用成本因子都低的模具材料。虽然图 4.27 并不能反映出实际的模具制造成本和模具使用成本（因为它们取决于特定的应用场合），但是这个图给出了一些很重要的信息。

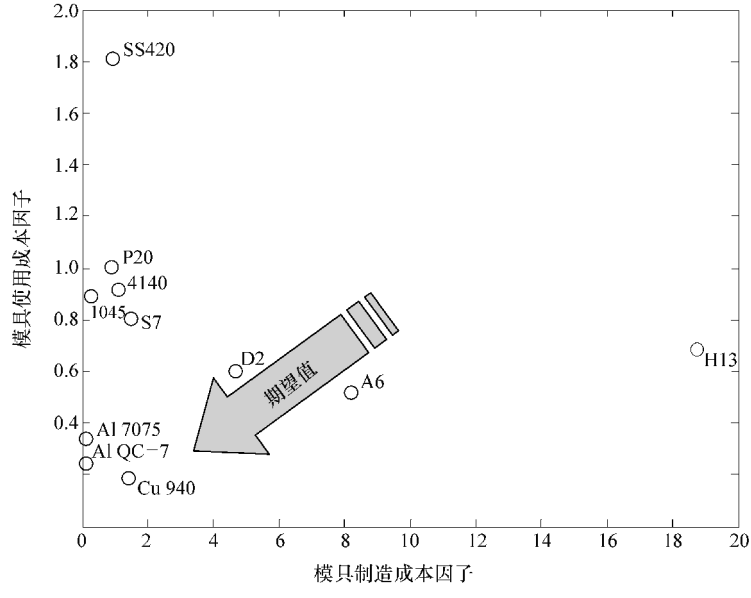


图 4.27　模具制造成本因子与使用成本因子的关系

从图中能看出，铝合金制作模具的制造成本和使用成本都很低，因此，在模具强度和硬度要求不高的情况下，应优先考虑使用铝合金。铜合金，例如 Cu940，由于材料费高，并有中等硬度以及加工速率，所制作的模具使用成本很低，但是制造成本很高。因此，在成型大容积的制品需要高强度、高硬度模具时，铜合金是很好的模具材料。

如果可以不使用较软的非铁金属材料，就应选择图 4.27 中所列的钢铁材料。一般

来说，这些金属材料的模具制造成本低，但使用成本较高。例如，A6 比 P20 硬，二者的热扩散率相差不多，因此 A6 模具的维修费用会降低，但是由于 A6 的机械加工性能以及加工速率较差，因此模具的制造成本会增加。

图 4.27 讨论了三类材料的优缺点。不锈钢 SS420 的热扩散率比 P20 低，因此它的模具使用成本比 P20 高，但当模具有耐蚀性要求时，必须采用 SS420 制作模具；碳素钢 1 045 的机械加工性能比 P20 好，模具制造成本低，它的热扩散率比 P20 高（这意味着可缩短循环时间），硬度比 P20 低（这表明维修成本增加），它的模具使用成本与 P20 相当。H13 的硬度非常高，致使机械加工速率很慢，模具制造费用非常高，但是它仍是有耐蚀性要求的常用模具材料。

4.4.4　材料汇总

附录 B 和前文的图表对一些常用的模具材料进行了定量、定性的比较。模具设计者必须综合考虑模具的应用场合、经济性、结构、热性能以及其他的要求。如果一种材料（例如 P20）制作的模具的使用效果很好，设计者可以尝试用其他的材料来提高模具的性能和利润。

表 4.1 推荐了不同应用场合下的一些常用模具材料。P20 是一种优质材料，适合于很多应用场合，但是在一些场合，其他材料也许是更好的选择。

在表 4.1 中，所有推荐材料均针对型芯和型腔的制造，并不适用于标准化模具底板，模具底板的材料通常是 1 045、4 140 或 P20（在低压及耐蚀性的场合分别使用铝和不锈钢）。碳素钢 1 045 常用于小容积中等熔压制品的成型。在高压大容积制品的成型条件下，常采用合金钢 4 140 或 P20。

表 4.1　不同应用场合下的常用模具材料㊀

成型条件	模具使用次数较少（<10 000）	模具使用次数适中（10 000 < 使用次数 < 1 000 000）	模具使用次数较多（>1 000 000）
低压成型非磨蚀性熔体	铝合金	铝合金或铜合金	铜合金、P20、SS420
微磨蚀熔体或中压成型	铝合金、铜合金、1 045	铜合金、P20、4 140、S7	SS420、S7、D2、A6
高磨蚀性熔体成型	P20、S7	D2、A6、H13	H13
高压成型	1 045、4 140、P20	P20、S7	D2、A6
强腐蚀性熔体成型	P20、SS420	SS420	SS420

4.5　本章小结

模具设计包括对成型制品进行结构分析以及确定分型线、分型面、流道等过程，然后再确定型芯和型腔的尺寸和位置，再选择合适的模具底板以有效支承型芯和型腔，最

㊀ 1045 对应的我国牌号为 45 钢，4140 对应的我国牌号为 42CrMo，SS420 对应的我国牌号为 4Cr13。——译者注

后再确定模具底板、型芯、型腔的原材料，在很多模具制造公司，进行详细的分析和子系统设计后就立刻确定它们的材料。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 如何确定模具的开模方向和分型线。
- 如何设计分型面和流道把型芯和型腔分开。
- 如何确定型芯、型腔的长度、宽度以及高度尺寸。
- 不同型腔分布的优点和缺点。
- 给定型腔的数量时，如何设计它们的分布。
- 确定型腔分布后，如何确定模具底板的尺寸。
- 怎样确定模具是否与注射成型机相匹配。
- 不同模具材料的优点和缺点。

下一章将进行充模过程的分析，以此来确定制品是否在合适的熔压下成型以及估计加载到模具元件上的负载大小。之后，会进行浇注系统的分析与设计。

第 5 章　型腔填充分析与设计

在成型制品过程中，聚合物熔体必须完全充满型腔。因此，为了保证熔体能够从浇口位置充满至型腔边缘，必须确定成型零件的壁厚和浇口位置。型腔填充分析的目的是不仅要确保熔体能够填充模具，而且要以一种理想的方式进行。

5.1　概述

型腔填充分析可以实现不同的目的。在最基本的情况下，型腔填充分析对于保证塑料熔体在注射成型机的给定熔体压力下填充型腔是有效的。通常，填充型腔所需的熔融压力不小于 100MPa（约 15 000psi），目前大多数机器可以提供该数值两倍的压力值。成型所需的熔融压力和注射成型机可以提供的熔融压力之间的安全范围保证了流道系统可以有一定的压力降，并且可以保证在材料性能与成型工艺波动的情况下充满型腔。

既然低的成型压力预示着不良产品设计或者工艺条件选取不当，所以型腔填充分析可以保证填充压力不会太低。例如，制品壁太厚会引起低型腔压力、过多材料浪费和延长循环周期。在这种情况下，需减小制品名义厚度，并且需用加强筋来加强制品刚度。另一个例子，很低的熔体压力预示着填充时间、模具温度或者熔体温度不适当。应该调整这些工艺参数来以较高的熔体压力为代价换取较短的成型时间和较低的制造成本。

从较高层次来看，在模具制造和试验之前，可以用型腔填充分析预测型腔内的熔体前锋推进状态和识别熔接痕、填充末端和其他现象的位置。这些结果可以用来调整浇口位置、浇口类型、型腔壁厚、推出位置、排气口位置和其他设计参数。

尽管现代计算机模拟技术可为具有复杂几何形状的型腔提供详细的结果，但是“平板”型型腔填充分析依然相当有用。这种人工分析方式为模具设计者掌握熔体基本流动行为、指导模具设计和工艺优化或验证计算机模拟结果提供了一种方法。为了进行分析，模具设计工程师必须掌握熔体流变学基本知识和流动基本方程。随后，将提出并验证型腔填充分析方法。

5.2　型腔填充分析的目的

5.2.1　完全填充模具型腔

为了保证在可操作的熔融压力下聚合物熔体能完全填充型腔，必须进行零件和模具设计。鉴于这个原因，可以运用模具型腔填充分析来确定给定材料的零件厚度，并为浇口选择和工艺条件设置提供帮助。

现代注射成型机通常能够提供约 200MPa（30 000psi）的注射压力。然而，对于填

充型腔来说，应该假定较低的熔体压力来实现以下情况：

- 所需的较低锁模力。
- 加料系统合理压力降。
- 假定错误而导致的安全因素。

由于调整低熔体压力的成型过程要比调整高熔体压力的成型过程简单，所以模具设计者应该假定一个保守型腔填充压力。实际中，通常认为 100MPa 的熔体压力值为型腔填充压力的最大极限值。如果已知注射成型机有非常高的注射压力，或者专门设计的模具流道系统以产生较小的压力降（例如热流道系统），那么型腔最大填充压力值可确定得更高。

如果模具难以填充，工艺工程师通常通过提高模具和熔体温度、增大流道直径、尝试降低聚合物黏度和最后改变模具型腔壁厚来进行弥补。反之，如果模具容易填充，工艺工程师通常通过降低模具和熔体温度，同时提高注射速率来缩短循环时间。

5.2.2　避免不均匀填充或过保压

在模具填充过程中，在整个型腔范围内，塑料熔体从注射点开始趋于一种径向流动。一般在模具设计时，应该保证聚合物熔体大致同时从浇口位置流到模具型腔最远边缘。这种均匀填充可以实现在整个模具型腔中更均匀和更低的熔体压力。

如果模具的一部分比其他部分填充得早很多，那么已填充部分的熔体将会存在潜在的严重问题。图 5.1 是笔记本电脑边框的填充分析云图，它有两个注射点。每一等值线代表了在填充时间内不同时刻的熔体前锋位置。从图中可以看出，聚合物熔体从浇口径向流出并受流道侧壁限制。聚合物熔体随后沿侧壁垂直方向流动，充满笔记本电脑边框的上、下壁面。

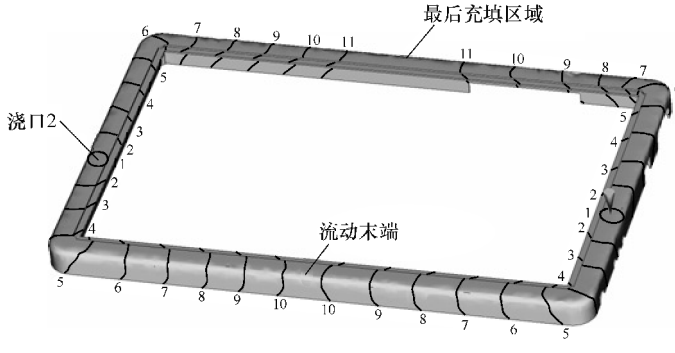


图 5.1　笔记本电脑边框的填充分析云图

在大多数填充过程中，零件上半部分的熔体流量和下半部分的流量是相等的。然而，由于浇口位置稍靠近零件下半部分，因此零件下半部分的填充先于零件上半部分的填充。当两股熔体前锋在底部中心相遇时，一部分非常少的熔体被挤到零件下部。零件底部的流动停滞，从而引起零件上部流体的涌动。可能产生以下缺陷：

- 需要过高的模具型腔填充压力和锁模力，产生飞边。

- 不能充满模具型腔（短射）。
- 高残留应力和翘曲。
- 在充模过程中随着熔体速率的变化引起熔体破裂、喷射、滞留或者外观缺陷。

为了避免和解决这些问题，设计模具时应该考虑到浇口的类型和位置、流道系统的布局和尺寸、模具型腔的名义厚度，并通过微调壁厚有目的地引导模具型腔内的熔体流动。

5.2.3　控制熔体流动

即使熔体流动均匀，流动填充分析也可以达到使制品质量最优的目的。例如，有时就可以通过控制熔体前锋位置，将熔接痕设置在零件不太重要的位置，以保证零件外观和结构完整性。同样的，型腔填充分析可以预测最后填充区域，从而使气体通过气槽和/或推杆从模具中排出。对于各向异性材料（如玻璃填充的材料），可以通过型腔填充分析控制熔体流向来影响制品的取向、强度和收缩率。

5.3　黏性流动

5.3.1　剪切应力、剪切速率、黏度

为了分析聚合物熔体流动，理解剪切应力、剪切速率和黏度之间的关系是非常必要的。剪切应力（τ）是对流体流动时作用在单位面积上的力的度量。剪切速率（$\dot{\gamma}$）反应了熔体速度的变化率。黏度（η）反映了流体的阻力特性。剪切应力、剪切速率和黏度之间的关系为

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \tag{5.1}$$

图 5.2 所示为流体在移动平板和固定平板之间的流动。假设两板之间的流动为充分发展的流动，且在壁面处流体不滑移，此时两板间流动速度呈线性分布，固定平板处流体速度为零，移动平板处流体速度为 v。

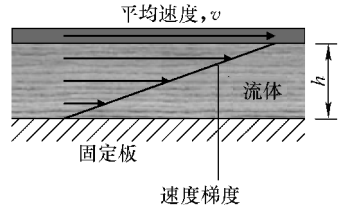


图 5.2　两平行板间的流动

对于这种在固定平板和移动平板间的流动，剪切速率定义为速度沿厚度方向的变化，即

$$\dot{\gamma} = \frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}z} = \frac{v}{h} \tag{5.2}$$

例：两平行板（固定平板和移动平版）间距为 1.5mm，移动平板速度为 100mm/s，计算平行平板间熔体的剪切速率。如果熔体黏度为 100Pa·s，估算相应剪切应力。若板长为 200mm，宽为 100mm，使板继续以 100mm/s 的速度移动所需的横向力为多少？

剪切速率为

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} = \frac{100}{1.5}\mathrm{s}^{-1} = 67\mathrm{s}^{-1}$$

熔体黏度为 100Pa·s 时，熔体剪切应力为

$$\tau = \eta \dot{\gamma} = 100 \times 67\text{Pa} = 6\ 700\text{Pa}$$

如果板长为 0.2m，板宽为 0.1m，则移动平板壁面上受到的横向力为

$$F = \tau A = 6\ 700 \times 0.2 \times 0.1\text{N} = 134\text{N}$$

5.3.2　压力降

聚合物熔体在流道中的压力降可通过分析运动方程得到。对于稳定流动，受力之和为零，即

$$\Sigma F = 0 \tag{5.3}$$

在矩形流道中，压力横向作用在流体上，如图 5.3 所示。流体从左侧流动到右侧，沿着流动方向有压力降，压力 p_1 大于压力 p_2。流道中的压力降是由作用于壁面的剪切力所引起的黏性流动而产生的。

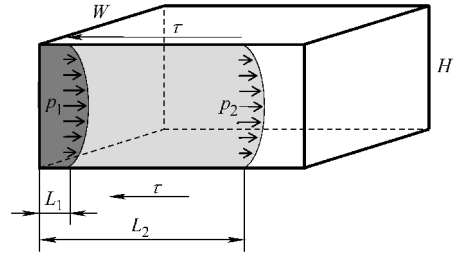


图 5.3　流道中的压力和剪切应力

在熔体上作用有两个相互平衡的力。一是沿着熔体流动长度方向的压力降引起的作用力，即

$$F_{\Delta P} = p_2 WH - p_1 WH = (p_2 - p_1) WH \tag{5.4}$$

二是，沿着长度方向作用在顶面和底面的剪切应力形成的作用力，即

$$F_\tau = 2\tau (L_2 - L_1) W \tag{5.5}$$

压力降引起的作用力和剪切应力引起的作用力相等，则

$$(p_2 - p_1) WH = 2\tau (L_2 - L_1) W \tag{5.6}$$

$\mathrm{d}p/\mathrm{d}L$ 为单位长度压力降。简化得到以下结果

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}L} = \frac{2\tau}{H} \tag{5.7}$$

例：在厚度为 1.5mm 的模具型腔中，聚合物熔体的壁面剪切应力为 13 000Pa。型腔长度为 200mm，估算整个型腔上的压力降。

每单位长度上的压力降为

$$\frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}L} = \frac{2\tau}{H} = \frac{2 \times 13\ 000}{0.0015}\text{Pa/m} = 17.3\text{MPa/m}$$

长度为 200mm 的型腔上的压力降为

$$\Delta p = \frac{\mathrm{d}p}{\mathrm{d}L} L = 17.3 \times 0.2\text{MPa} = 3.5\text{MPa}$$

为了将压力降表示为黏度的函数，有必要将黏度定义为剪切速率和温度的函数从而计算出剪切应力。

5.3.3　流变特性

流变学是一门研究物质变形和流动的科学。黏度是流体在剪切应力作用下抵抗变形的能力。

聚合物熔体的流变行为极其复杂，实践者们苦思冥想才提出用熔体流动指数（MIF，根据 ASTM D1238 的规定，熔体流动指数是指在给定压力和时间下聚合物熔体通

过特定长度和直径的毛细管的质量，较高的熔体流动指数对应较低的黏度和较好的加工性能）来表征其流变特性。事实上，MFI 是对黏度的单点测量，并不能代表加工时较大范围的剪切速率变化、温度变化和压力变化时的材料行为。由于这个原因，很多黏度模型因塑料注射成型而发展起来。

广泛认为，Cross – WLF 模型[26]是很好的熔体黏度模型，熔体黏度 η 是剪切速率 $\dot{\gamma}$、温度 T、压力 p 的函数，即

$$\eta(\dot{\gamma},T,p)=\frac{\eta_0(T,p)}{1+\left(\frac{\eta_0\dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}} \tag{5.8}$$

式中，η_0 是牛顿极限，在低剪切速率下该黏度值接近常数；τ^* 是黏度从牛顿极限转变到幂律状态时的临界应力值；n 是高剪切速率状态下的幂指数。

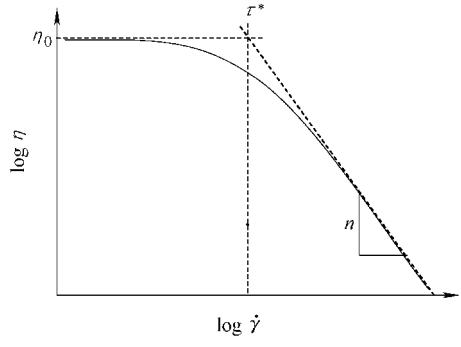


图 5.4　Cross – WLF 黏度模型

Cross – WLF 模型的形式是容易理解的，因为其中的三个参数 η_0、τ^* 和 n 可以直接从黏度 – 剪切速率对数图上直接估读出来。

在式（5.8）中，零剪切黏度 η_0 是温度 T 和压力 p 的函数。温度关系有很多形式，最普遍的模型之一是 Cross – WLF 温度关系，它包括经过玻璃化转变温度 T^* 的压力关系，即

$$\eta_0(T,p)=D_1\exp\left[-\frac{A_1(T-T^*)}{A_2+(T-T^*)}\right]T>T^* \tag{5.9}$$

$$T^*(p)=D_2+D_3p \tag{5.10}$$

$$A_0=A_3+D_3p \tag{5.11}$$

$$\eta_0(T,p)=\infty \quad T<T^* \tag{5.12}$$

通常，模型参数（n、τ^*、D_1、D_2、D_3、A_1和 A_3）是由试验得到的剪切黏度数据拟合曲线决定的，该试验数据由毛细管流变仪测得，剪切速率从 $10s^{-1}$到 $10\ 000s^{-1}$。成千上万种塑料的材料特性已得到表征，并且附录 A 提供了一些代表性材料的 Cross – WLF 模型系数。三种不同温度下中黏度 PC 的 Cross – WLF 黏度和剪切速率的关系如图 5.5 所示。

由图 5.5 可知，剪切速率在 1 ~ $100s^{-1}$时，黏度处于牛顿平台区，剪切速率大于 $100s^{-1}$时黏度转为幂律态。当熔融温度为 280℃时，剪切速率为 $100s^{-1}$时熔体黏度为 350Pa·s，剪切速率升高为 $10\ 000s^{-1}$时熔体黏度降低到 80 Pa·s。由于熔体黏度强烈依赖于剪切速率，所以对于分析预测来说，填充时间、熔体速度和剪切速率是非常重要的。黏度也强烈依赖于温度，零剪切黏度从 290℃时的 250Pa·s 增大到 270℃时的 660Pa·s。因此，对于预测熔体流动和压力来说，掌握工艺温度也是非常重要的。

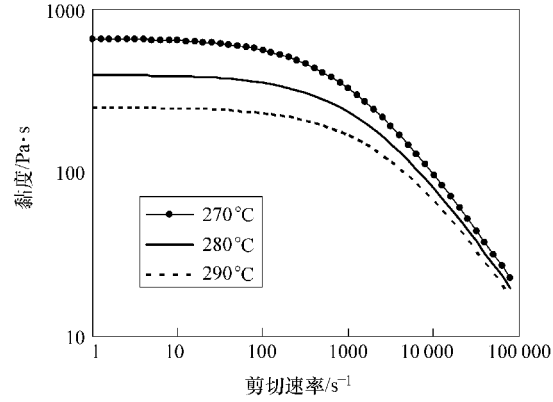


图 5.5　PC 的黏度和剪切速率的关系

Cross – WLF 模型已相当成熟，通常用于数值模拟，但不适用于人工填充分析。原因在于很难进行操作，并且与熔体流量以压力作为自变量时的分析结果不相符。由于这个原因，通常使用其他几个黏度模型，这些黏度模型能得出相对简单的分析结果。

5.3.4　牛顿模型

牛顿内摩擦定律表述为在平行层流动中剪切应力 τ 正比于速度梯度 $\dot{\gamma}$，即

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \tag{5.13}$$

式中，系数 μ 是表观黏度，对于牛顿流体表观黏度假定为常数。

280℃时中黏度 PC 的牛顿模型和 Cross – WLF 模型表征的非牛顿行为比较如图 5.6 所示。如前所述，聚合物熔体为非牛顿流体。由于这个原因，牛顿模型只能准确估算剪切速率为 $7000s^{-1}$时的熔体黏度。牛顿模型在较高的剪切速率下会高估熔体黏度，在较低的剪切速率下会低估熔体黏度。虽然如此，牛顿模型的实用性仍然很强，当使用代表性剪切速率时其可以为工程应用提供合理的预计。

对于牛顿流动，其速度分布是厚度 z 的二次函数，即

$$v(z) = v_{\max}\left[1 - \left(\frac{2z}{H}\right)^2\right] \tag{5.14}$$

式中，$v_{\max}$是中心线处的速度；z 从厚度的 $-1/2$ 到 $+1/2$ 变化。

体积流量是速度在整个厚度上的积分乘以宽 W，即

$$\dot{V} = \int_{-H/2}^{H/2} V_{\max}\left[1 - \left(\frac{2z}{H}\right)^2\right] = \frac{2}{3} v_{\max} WH = \bar{v}WH \tag{5.15}$$

表观剪切速率可以通过平均流动速率或者体积流量计算得到，即

$$\dot{\gamma} = \frac{6\bar{v}}{H} = \frac{6\dot{V}}{WH^2} \tag{5.16}$$

给定剪切速率的估算值，就可以估算表观黏度，并由此来估算熔体的压力降。

可以通过合并式（5.7）、式（5.13）和式（5.16）来估算压力降，压力降是流速或者体积流量的函数，即

$$\Delta p = \frac{12\mu L\,\bar{v}}{H^2} = \frac{12\mu L\,\dot{V}}{WH^3} \tag{5.17}$$

5.3.5　幂律模型

牛顿内摩擦定律假定黏度不是剪切速率的函数。若材料不遵循牛顿黏滞定律，则该材料称为非牛顿流体。最简单且最通用的非牛顿模型是幂律模型，该模型中黏度是剪切速率的指数函数，即

$$\eta = k\,\dot{\gamma}^{1-n} \tag{5.18}$$

式中，k 是剪切速率为 $1s^{-1}$ 时的黏度值；n 是幂指数。

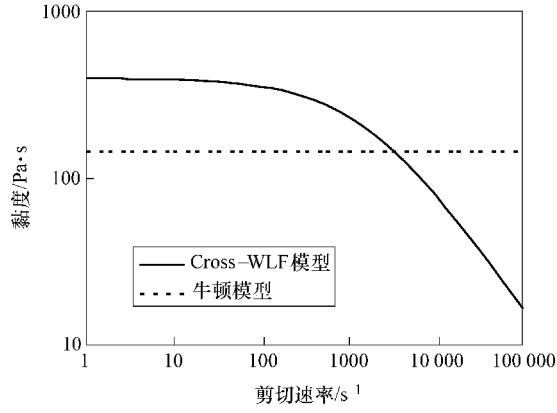


图 5.6　牛顿模型和 Cross – WLF 模型表征的非牛顿行为

280℃时中黏度 PC 的幂律模型和 Cross – WLF 模型表征的非牛顿行为如图 5.7 所示。可以看出，在较高剪切速率下幂律模型可以很好地估算熔体黏度，但是在较低剪切速率下该模型会高估熔体黏度。幂律模型与牛顿模型相比可以提供更准确的黏度估算值。与 Cross – WLF 模型相比，幂律模型会高估压力降，因为在较低剪切速率下它会过高预测熔体黏度值。

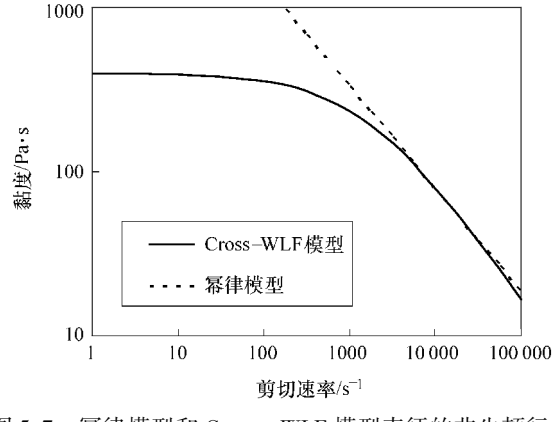


图 5.7　幂律模型和 Cross – WLF 模型表征的非牛顿行为

应该注意的是，一些树脂如某些牌号的聚丙烯在非常低的剪切速率下转变到幂律态。这些类型的材料没有明显的牛顿平台，因此幂律模型可以提供非常好的黏度估算值。对于具有明显牛顿平台区的其他材料，如上面提到的 PC，幂律模型特别适合于在较小剪切速率状态提供更精确的预测值。

对于幂律流动，沿着厚度方向的速度分布是幂指数 n 的函数，即

$$v(z) = v_{\max}\left[1 - \left(\frac{2z}{H}\right)^{1+\frac{1}{n}}\right] \tag{5.19}$$

体积流量是速度在厚度上的积分再乘以宽度 W，即

$$\dot{V} = W\int_{-H/2}^{H/2} v_{\max}\left[1 - \left(\frac{2z}{H}\right)^{1+\frac{1}{n}}\right] = \left(\frac{1+\frac{1}{n}}{2+\frac{1}{n}}\right) v_{\max} WH = \bar{v}WH \tag{5.20}$$

同时注意到当幂指数 $n = 1$ 时，幂律模型为牛顿模型。随着幂指数的减小，黏度的剪切变稀特性会更加显著，如管壁处的熔体流动会加速。当幂指数接近为零时，会形成柱塞流，其中沿着厚度方向熔体速率几乎为一常数。这些行为从图 5.8 中可以看出。随着幂指数的减小，中心线处熔体速度降低，直至维持某一恒定值。

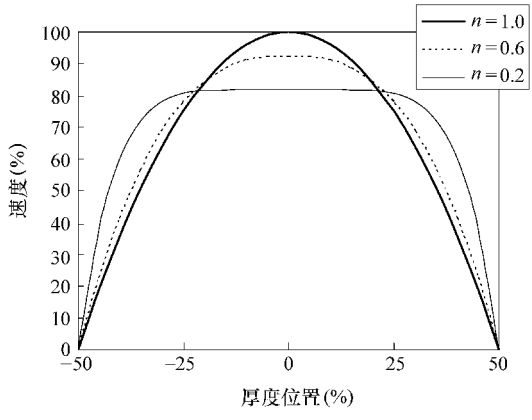


图 5.8　速度与幂指数的关系

对于幂律模型来说，估算压力降时不需要用到壁面处的剪切速率，但是在避免过剪切速率或核算熔体黏度时，壁面剪切速率的计算是有用的。剪切速率可以通过平均流速或者体积流量计算得到，即

$$\dot{\gamma} = \frac{2\left(2+\frac{1}{n}\right)\bar{v}}{H} = \frac{2\left(2+\frac{1}{n}\right)\dot{V}}{WH^2} \tag{5.21}$$

联立式（5.7）、式（5.18）和式（5.21）估算压力降，压力降是流速或者体积流量的函数，即

$$\Delta p = \frac{2kL}{H}\left[\frac{2\left(2+\frac{1}{n}\right)\bar{v}}{H}\right]^n = \frac{2kL}{H}\left[\frac{2\left(2+\frac{1}{n}\right)\dot{V}}{WH^2}\right]^n \tag{5.22}$$

5.4　验证

由多腔的 ASTM 标准模具来进行验证，该模具配置了多个压电型腔压力传感器和热电偶。为了验证分析结果，仅考虑矩形冲击试样中的流动，型腔长为 125mm，宽为

12.6mm，厚度为3.2mm。试验原料为ABS（GEPlastics Cycolac MG47）和PP（Dow Inspire 702）。

模具冷却液的温度设置为材料供应商推荐范围的中间值。零件在推荐熔体温度的上、下限值附近和一系列的速度下成型。对于每次试验，由采集到的数据计算浇口处压力传感器到流动末端热转换所需的时间，并由此计算得到熔体的平均速度和体积流量。可以得到熔体到达热电偶时的型腔压力，并且该压力是接近充模压力的精确预测值。

对于每种材料和运行情况，分别采用牛顿模型、幂律模型和数值模拟（Moldflow MPI5.1）进行模具填充分析。ABS材料的分析结果如图5.9所示，PP材料的分析结果如图5.10所示。

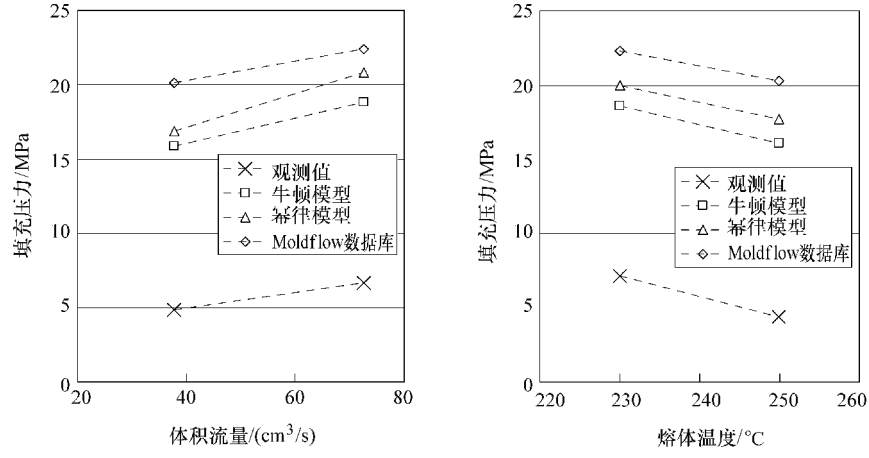


图5.9　ABS材料模型验证

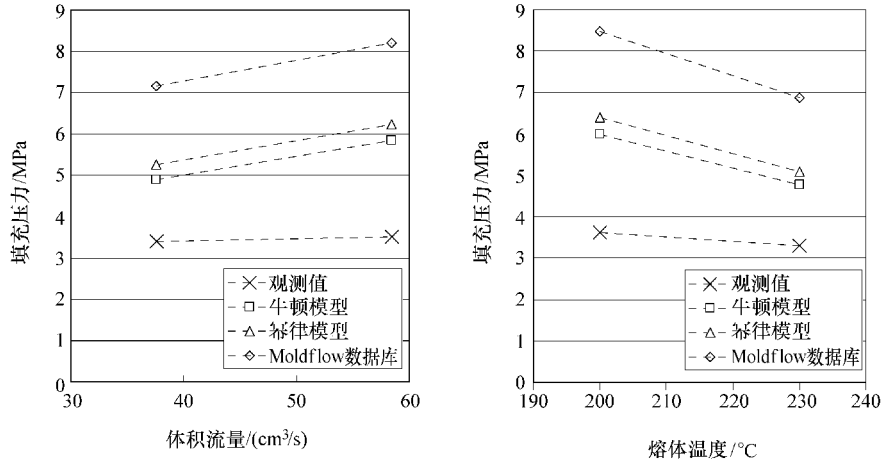


图5.10　PP材料模型验证

试验结果表明所有的模型都高估了模具型腔填充压力。实测填充压力和模型预测值不符，其原因如下：

- 流体穿过流道系统时会产生剪切热，从而熔体温度会急剧升高。
- 型腔压力传感器设计或安装不合理，或者信号获取不当。
- 熔体可能沿着模具壁面滑移，而在模型中假设无壁面滑移。
- 流变特性测试和验证试验所用材料存在差异。
- 毛细管流变仪和 Cross – WLF 流变模型可能不适合于黏度表征。
- 这些因素和其他不可知误差来源相结合引起。

实测压力和预测压力之间的偏差看起来有些大。然而，对于填充分析来说却没有更好的选择。一种情况是不进行分析，而是依赖于过去的经验来估计填充方式和压力。这种选择适用于常规地为相同的材料设计类似的模具的设计者，而对于新的设计和材料，这个方案是不足的。另一个选择是开发具有适当流动长度和厚度的试制模具，并且在拟采用的工艺条件下进行材料测试。这种试制模具的开发提供了最精确的结果，但是投入很大，因此对于很多成型应用不够经济。

虽然有很大的偏差，但结果仍有自洽性且很重要。可以观察到，与牛顿模型相比较，幂律模型预测到更高的压力。这点应该能被预期到，因为牛顿模型中假设沿厚度方向的黏度恒定，可根据式（5.16）由该恒定黏度评估出壁面处的表观剪切速率。

通过比较可知，在较低剪切速率下，幂律模型有过预测熔体黏度的趋势，所以该模型会提供较高压力估算。Moldflow 软件分析结果提供了比牛顿模型或幂律模型更高的估算，其原因可能是它考虑了从热熔体到冷型腔的热损失和凝固层的形成。

一般的，所有的模型均能正确地预测填充压力与流动速率和温度的定性关系。要实现较高的流动速率要求在模具内有较高的压力驱动熔体流动，这点在所有的结果中都能得到验证。高的熔体温度提供较低的熔体黏度和较低的填充压力，这点在所有的结果中也能得到验证。

事实上，模具设计者可以在这些验证结果中得到帮助。所有模型总是过高预测填充压力，这意味着分析结果是保守的，并且如果用于模具设计，应该能提供一个成型用的零件。但是这种分析会使零件设计比实际上可能成型的零件要厚一些。在这种情况下，设计的模具所需的注射压力较低，因此工艺工程师应该通过降低熔体温度和缩短填充时间来缩短循环周期，以提高成型生产率。

5.5　型腔填充分析和设计

有很多填充分析的应用，包括降低成本、工艺优化和质量改进。下面的例子提供了一系列的典型应用，模具设计者应该根据成型应用的具体需求定制或进一步发展这些分析。

5.5.1　预测工艺条件

模具设计者应该验证在给定型腔几何结构和材料特性情况下的模具填充。然而，填

充分析需要的工艺参数包括熔融温度和熔体速度或体积流量。推荐模具设计者设定熔体温度为材料提供者推荐的熔体温度范围的中间值，因为这样可以给工艺工程师提供一定的空间上下调整温度来解决成型问题或者缩短循环时间。

在模具制成和投产之前，实际的熔体流动速率是不可知的。通常，最高流动速率是由注射成型机螺杆的最大速度或高流动速率产生的缺陷，如飞边、喷射或焦痕来确定的。在模具型腔内最小流动速率通常受到熔体过早凝结的限制，该凝结层会导致短射。根据成型应用中的具体情况，熔体通过模具的典型速度在 0.01 ~ 1m/s 内波动。

通常，薄壁成型要求较高的流速，因为：

- 为了避免过早凝结，要求更快的注射速度。
- 注射成型机体积流量相同时，薄壁情况提供更快的流速。

可以通过计算模具型腔和流道的容积并除以估算的填充时间来估算熔体流动速率。这种方法非常适用于有经验的实践者，但是可能不适用于几何构型或材料特性有很大差异的新成型。此外，其他的分析可以给出一个推荐的流动速率，其能平衡剪切产生的热量和从熔体到模具的热损失量。该结果不仅能为熔体流动速率提供合理估算并且提供了更准确的分析，因为随着熔体填充到模具中，将产生均匀的熔体温度。

附录 F 提供了熔体速度的推导。对于牛顿流体，速度推荐为

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{5(T_{\text{melt}} - T_{\text{wall}})k}{3\mu}} \tag{5.23}$$

式中，T_{melt}和 T_{wall}分别是熔体温度和模具壁面温度；k 是塑料熔体传热系数；μ 是牛顿黏度。因为黏度是剪切速率和速度的函数，所以有必要迭代计算剪切速率和黏度直到速度收敛为止。

例：该分析将应用于笔记本电脑边框成型，其壁厚为 1.5mm，并且在熔体温度为 239℃和模具冷却温度为 60℃时由 ABS（Cycolac MG47）充模成型。为了分析，最初假定速度为 0.5m/s。在这个速度下，剪切速率为

$$\dot{\gamma} = \frac{6\bar{v}}{H} = \frac{6 \times 0.5}{0.0015}\text{s}^{-1} = 2000\text{s}^{-1} \tag{5.24}$$

在这个剪切速率下，Cross – WLF 模型提供的熔体黏度为 120Pa · s。利用这个值求出推荐注射速度的新估算值为

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{5 \times (239 - 60) \times 0.19}{3 \times 120}}\text{m/s} = 0.69\text{m/s} \tag{5.25}$$

使用附加的迭代来进一步确定推荐速度。速度为 0.69m/s 时，剪切速率为 2760s^{-1}。此剪切速率下的黏度为 95.4Pa · s，反过来熔体速度为 0.77m/s。进一步的迭代得到剪切速率为 3080s^{-1}，黏度为 88.1Pa · s，熔体速度为 0.80m/s。随着附加迭代的进行，最后速度收敛为 0.82m/s。因为流动长度约为 0.2m，所以填充笔记本电脑边框的模具型腔的时间约在 0.25s 内（不包括流道系统）。型腔体积为 30cm^3，所以这与喷嘴处的体积流量 125cm/s 相对应。

从方程（5.23）的形式可知，推荐速度随着熔体温度、模具壁面温度、熔体传热系数和熔体黏度的变化而变化。熔体温度与壁面温度间的较高差异和聚合物熔体较高的传热系数，都要求较快的熔体速度来维持一致的熔体前锋温度。低黏度的材料要用高的

熔体速度来产生剪切热，该剪切热可以避免熔体过多的热损失。

虽然看起来熔体的速度不随着壁厚的变化而变化，但是壁厚通过剪切速率对其产生影响，因为速度是剪切速率的函数。随着壁厚的减小，不断增大的剪切速率会使黏度降低，因此为了避免熔体冷却，要求较高的熔体速度。如所预期的，随着壁厚的减小，需要较高的熔体速度。图 5.11 所示为通过分析方法给出的 ABS 在不同熔体温度和壁厚时的推荐速度。壁厚为 3mm 和熔体温度为 218℃成型时熔体速度约为 0.4m/s，壁厚为 0.8mm 和熔体温度为 260℃成型时熔体速度约为 1.6m/s，可以观察到，熔体速率从约 0.4m/s 变化到约 1.6m/s。

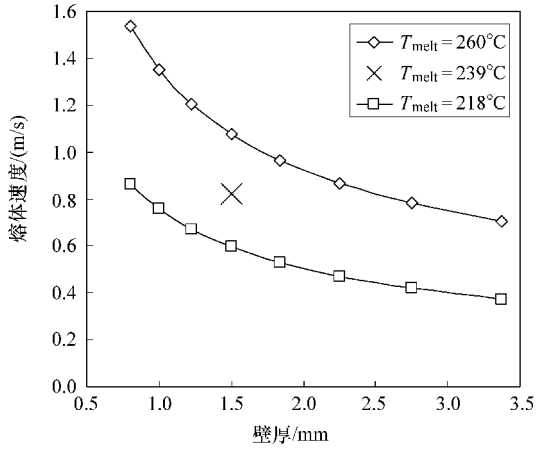


图 5.11　ABS 的推荐熔体速率随壁厚和温度的变化关系

由于熔体速度与成型应用相关，其存在较大的推荐范围，成型过程中实际的熔体速度和流动速率是不确定的，能够意识到这点非常重要。分析的目的是对熔体速度和填充时间提供一合理的估计，并设计一种能在较宽工艺条件下工作的模具。虽然相比于基于经验的填充时间的简单假设，前述的分析似乎不必那么复杂，但是这种分析是客观的，它可以提供一种定量的结果，可以对注射模具的设计和使用产生更加深刻的认识。

5.5.2　预测填充压力和最小壁厚

要预测填充模具所需的压力，模具设计者必须知道填充模具时流动的全部距离。由于这个原因，模具设计者应该选择合理的浇口位置来平衡模具不同部分的流动。这是一维流动分析，忽略类似筋板和凸台的特征。如果这些特征与主流道相比较小，那么它们很易被填充。一旦通过式（5.17）或式（5.22）[㊀]得到熔体的速度，就可以预测出填充压力。

㊀ 预测填充压力时的基本假设是在熔体从浇口位置流到模具末端过程中熔体速度维持为常数值。理论上，这种一致的熔体速度可以通过细致的柱塞速度调节来得到。事实上，几何形状复杂模具很难实现一致的熔体速度，并且很少出于这种目的来进行柱塞速度调节。因此，从浇口处到填充末端熔体速度都是变化的（起初浇口处速度非常高，因为熔体横截面面积很小）。即使如此，对于确保所使用的模具设计和塑料材料能够完成成型过程，填充压力的预测也仍是非常重要的。

预测复杂产品的填充压力时，有必要将几何体解构成一系列简单部分。对于每个部分流动的压力降和流动速率可以分别使用牛顿模型或幂律模型来进行分析。回顾图 5.1 所示的笔记本电脑边框，可以假设左侧流动和右侧流动是对称的。因此，分析时只考虑几何体的一半。分析时，边框将首先如图 5.12 所示那样展直。尽管这一步对于分析不是必要的，但这更侧重于强调熔体流动沿长度方向的压力降。下一步是将边框向外展开，以展示填充模具型腔垂直边所必要的额外流动。

如图 5.12 所示，浇口选择在中心位置附近。笔记本电脑边框的展开几何因此被分成两个流动部分，分别代表是模具上部和下部的流动。同时应该注意到很可能会存在流道宽度的变化，如由于窗口原因出现较窄部分，如图 5.12 右侧的中部平铺图所示。厚度不同的截面应该被分成不同的流动部分。通过分析这些部分中每一部分的流动，可能会得到填充模具过程中熔体流动前沿位置和熔体压力的精确预测。在计算流动速率和填充压力时，选择性地把宽度相同的部分集合在一起运算可以简化计算，如图 5.12 最右边平铺图所示。

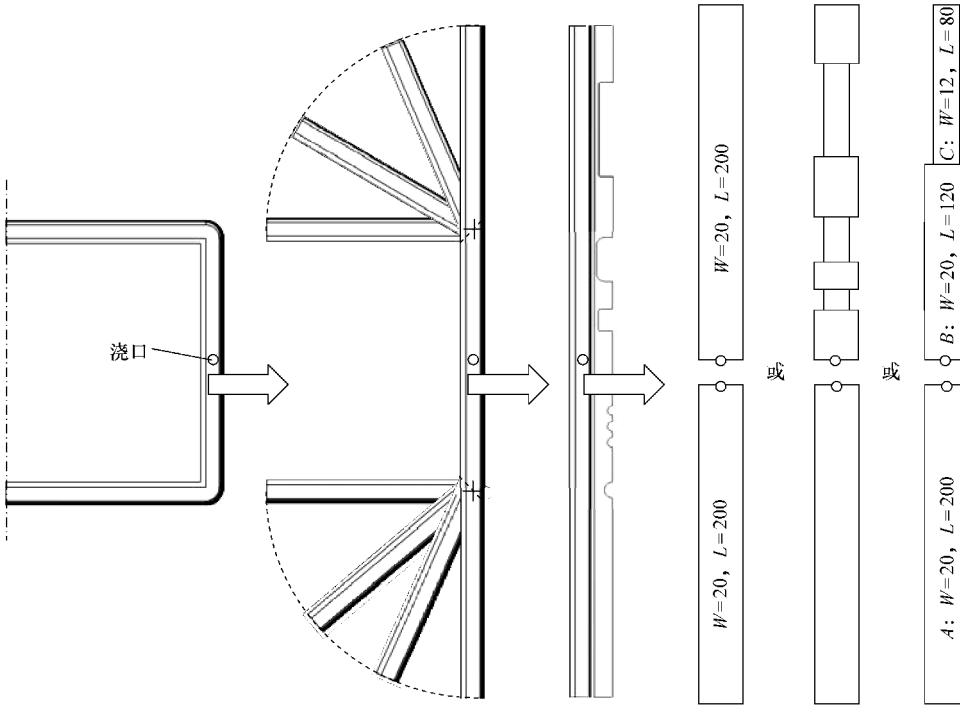


图 5.12　笔记本电脑边框平铺图

例：假定熔体速度为常数 0.82m/s，估算笔记本电脑边框的压力降。

用图 5.12 最左边的平铺图，建立模具型腔四分之一模型，该模型是长、宽、高分别为 200mm、20mm、1.5mm 的矩形。黏度符合幂律模型。ABS 材料在 239℃下的参考黏度 k 为 17 070，幂指数 n 为 0.348。

根据方程（5.22）压力降为

$$\Delta p = \frac{2 \times 17\ 070 \times 0.2}{0.0\ 015}\left[\frac{2 \times \left(2 + \frac{1}{0.348}\right) \times 0.82}{0.0\ 015}\right]^{0.348} \text{Pa} = 90\ 169\ 315\text{Pa} = 90.2\text{MPa} = 13\ 079\text{psi}$$

相对于绝大多数注射成型机能提供的注射压力，这个压力相当大，而这还没有考虑流道系统的压力降。

产品设计者和模具设计者希望考虑在不同壁厚、流速和熔体温度下填充所需要的压力。图 5.13 给出了在材料中等熔融温度下一定壁厚范围内的模具填充所需的填充压力预测值。

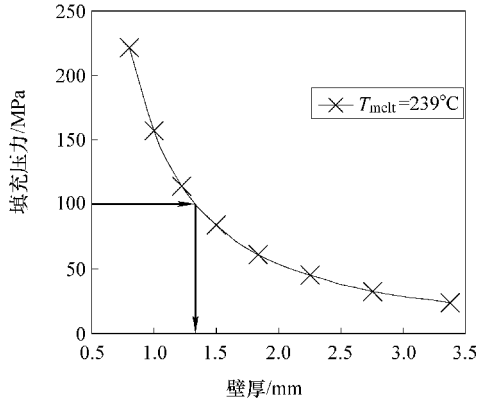


图 5.13　壁厚和填充压力的函数关系

从图 5.13 可以得到在一定注射压力下允许的最小壁厚。特别的，图中表示最大许可压力的横线与压力曲线的相交处代表最小的壁厚值。对于这个例子，分析可知最小壁厚为 1.36mm。

当最小化壁厚时，应该理解两个重要的概念。一是，最小壁厚是熔体温度的函数。建议模具设计者分析时使用中等熔融温度，这样为工艺工程师在必要时通过提高熔体温度来减小填充压力提供了可能性。二是，最小壁厚也是流道系统设计的函数，因为压力从机器传到型腔依赖于经过流道系统的压力降，这将在第 6 章讨论。

5.5.3　预测锁模力

锁模力通常以 t 或 kN 作为单位。锁模力是在操作过程中用来锁紧模具所需的力。锁模力 F_{clamp} 为熔体压力在模具型腔投影面积上的积分，即

$$F_{\text{clamp}} = \int_A p(A)\cos\theta(A)\,\mathrm{d}A \tag{5.26}$$

式中，$p(A)$ 是模具分型面上的熔体压力；$\theta(A)$ 是垂直于模具分型面的方向与模具启闭方向之间的夹角。注意是模具型腔投影面积而不是总面积，因为作用于侧壁上的压力在模具启闭方向上的分量几乎为零。

通常，最大锁模力发生在填充阶段末段，此时填充压力达到峰值，或者在保压阶段开始时，此时保压压力对整个模具型腔加压。在实际成型过程中，很难辨别最大锁模力是由填充压力还是由保压压力导致的。

沿着笔记本电脑边框平铺模型方向的型腔压力分布如图 5.14 所示。左图表示在型腔内，压力从浇口处的 100MPa 线性降低到填充末段的 0MPa。施加到型腔内的平均压力为 50MPa。平铺图的宽度约为 20mm，其投影长度（参考图 5.12）约为 12mm。因此在填充末段所需的锁模力为

$$F_{\text{clamp}} = 50 \times 0.2 \times 0.012 \times 1\ 000\text{kN} = 120\text{kN} = 12.2\text{tf} \tag{5.27}$$

在保压过程中，压力会稍降低，但是型腔内的压力更均匀。通常，保压压力是填充

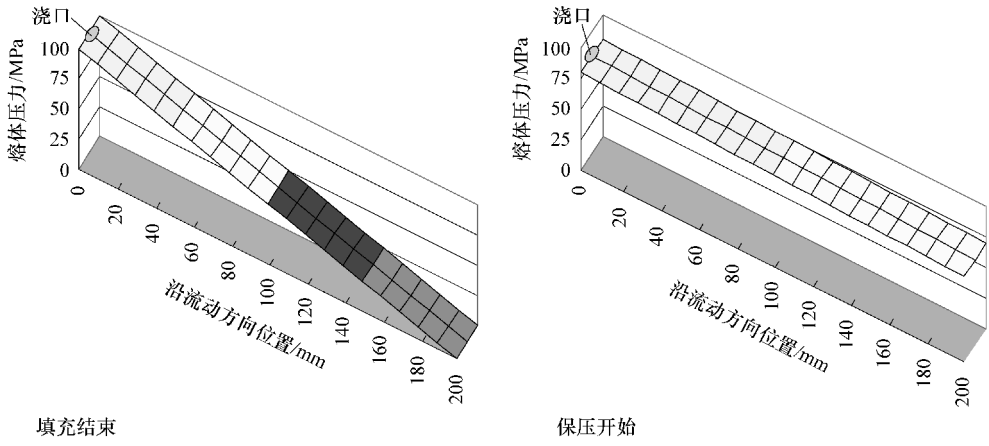


图 5.14　填充和保压阶段的型腔压力

压力的 50% ~90%。如 5.14 右图所示，平均型腔压力约为 75MPa，该压力对应保压开始时所需的锁模力为

$$F_{\text{clamp}} = 75 \times 0.2 \times 0.012 \times 1\ 000\text{kN} = 180\text{kN} = 18.3\text{tf} \tag{5.28}$$

分析表明该例中最大锁模力发生在保压开始阶段，此时型腔内熔体压力平衡。因为保压压力依赖于成型工艺和理想收缩率，因此在模具制造和成型前保压压力的精确值是不确定的。由于这个原因，保守的方法是假定型腔内每一处都存在填充压力。然后，锁模力可以通过下式进行预测

$$F_{\text{clamp}} = P_{\text{cavity}} A_{\text{cavity_ projected}} \tag{5.29}$$

式中，P_{cavity}是假定的型腔内平均压力；$A_{\text{cavity_ projected}}$是型腔的投影面积。

如果填充分析可以得到一个合理的填充压力，那么可以利用这个值来预测锁模力。然而，一些成型应用的填充压力可能非常低并且引起过度收缩。一般的，为了避免这种情况，工艺工程师通常使用 50MPa 左右的保压压力。模具设计者应该向工艺工程师核实预期的型腔压力或者假定最小型腔压力为 50MPa。

例：预测笔记本电脑边框成型需要的最大锁模力。笔记本电脑边框壁厚 1.36mm，设计熔体压力为 100MPa。型腔投影面积为 9724mm^2。如果假设整个模具型腔都是这个压力，则估算的锁模力为

$$F_{\text{clamp}} = 100 \times 10^6 \times 9\ 724 \times 10^{-6}\text{N} = 972\ 400\text{N} = 99\text{tf}$$

为了验证前述三个部分的分析，建立了壁厚为 1.36mm 的笔记本电脑边框模型。两个浇口位于左侧面和右侧面的中心。在熔体温度为 239℃，模具温度为 60℃，填充时间为 0.25s，对应速度为 0.8m/s 的情况下，对 ABS（CycolacMG47）进行模拟（Moldflow5.1）。

分析结果和数值模拟结果的比较见表 5.1。模拟预测压力为 110MPa，与此对应的填充压力是 100MPa。由于模拟考虑了固体层的发展和筋板的填充，因此其预测压力更

高。模拟预测平均熔体温度有 3.4℃的增幅，这证实了分析推导得到的熔体速度预测较好。在填充阶段，分析和商业软件模拟得到的锁模力很接近。在填充阶段模拟预测出的锁模力高出 7%，它与填充阶段预测出的熔体压力高出 10% 的结果相一致。然而，在保压阶段预测出的锁模力变化很大。先前的分析假定注射压力充满整个型腔。这个假设是保守的，因此预测出一个高的锁模力。与之相比，模拟能对型腔内熔体的固化和随之引起的压力衰减进行建模。正是由于这个原因，在进入保压阶段 1.2s 时，模拟预测出较低的锁模力 397kN。这个锁模力可能在这个时刻出现，但并不代表着出现在保压阶段的初始时刻的锁模力峰值，或者是到保压切换位置时注射成型机控制器速度过冲所需的锁模力。

表 5.1　分析结果和数值模拟结果的比较

参数	分析结果	模拟结果
填充压力/MPa	100	110
熔体平均温度的变化/℃	0	+3.4
平均剪切速率/s^{-1}	1760	1290
填充阶段锁模力/kN	486	519
保压阶段锁模力/kN	972	397

5.5.4　预测填充形式

利用平铺分析技术可以很好地预测填充形式，并有助于理解模具填充过程中的熔体行为、确定浇口位置、识别熔接痕位置和辅助模具的其他部分设计。对宽、长和高分别为 100mm、160mm 和 60mm 的五面容器进行分析。容器如图 5.15 所示，脱模斜度 2°，圆角半径为 10mm。假定采用两板式模具结构，该容器的浇口将设在侧壁边缘处。

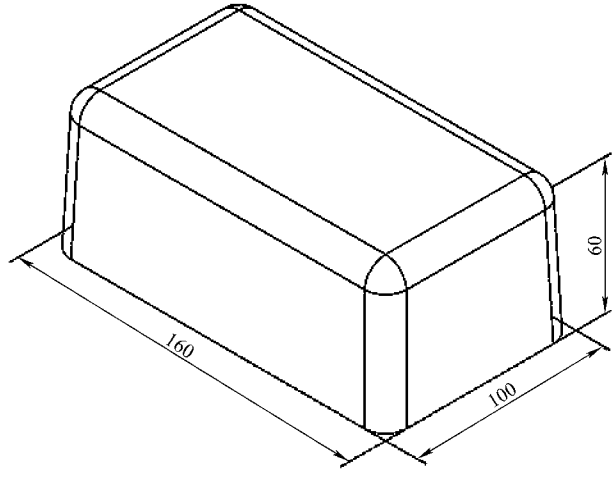


图 5.15　预测填充形式用的容器

为了预测填充形式，将容器的各边从拐角处剪开，并且反折侧壁面做成平铺图。下一步确定浇口位置。流体将从浇口流出产生圆形熔体流动前锋。这样的话，可以从浇口位置绘制出一圆弧，代表给定点某一时间的熔体位置。图 5.6 所示为容器平铺图和初期熔体前沿位置。

图 5.16 中每一圆弧对应着不同时刻熔体前沿的位置，圆弧之间的距离等于熔体速度乘以时间步长。第一时间段的熔体位置是正确的，在第二时间段末熔体会流至相邻壁面。这样的话，为了反映熔体流动在不同时刻的位置，有必要在这些壁面附近也绘制出一些圆弧。为了正确预测流动行为，分析熔体在模具各部分中的流动时，必须维持相同的流动阻力。这可以通过建立一个虚拟浇口并保持从虚拟浇口的流动长度与从真实浇口的流动长度相等来实现。对于每一时间步长，流动长度增加，绘制出相应半径的圆弧。然后，剪切具有相同时间步长的交叉圆弧。根据需要增设更多虚拟浇口，直到流动至整个平铺面。

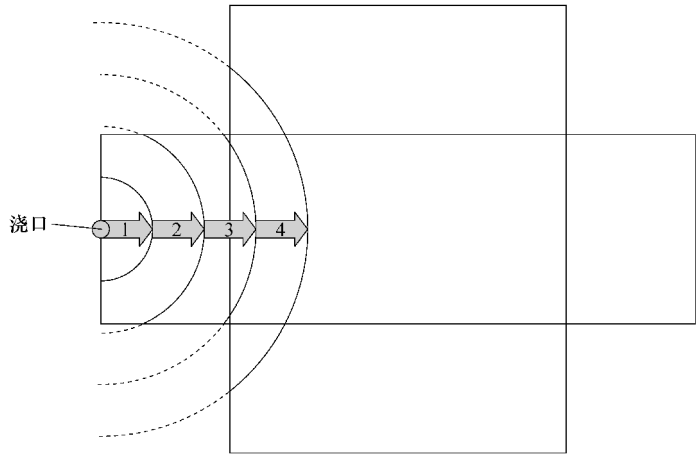


图 5.16　平铺图和初期熔体前沿位置

图 5.17 演示了容器熔体前沿的预测进程和相应的熔体前沿位置。可以观察到各侧壁的竞流情况，并且会在浇口对面的侧壁面上形成熔接痕和气穴。这种称为竞流效应的现象在注射制品中非常普遍，当沿着成型周边的流动长度小于穿过零件中心线的流动长度时会产生这种现象。

在这个例子里，会发生竞流效应是因为因为容器的深度 60mm 比容器的宽度 100mm 的一半要大。熔接痕是不希望出现的，同时图 5.17 所示的壁面上的气穴也是特别有问题的，因为很难进行排气。这样的话，被困气体有可能燃烧，会在该位置出现烧痕。

5.5.5　设计流动引导

在前面的例子中，可以通过把边缘浇口移动到 160mm 长的侧壁中心来避免被困气体的产生，或者使用三板式或热流道模具。然而，有时模具的布局会排除这种设计可能性。这样的话，另一个选择是改变厚度。这种利用较厚的部分控制流动速度的方法被称

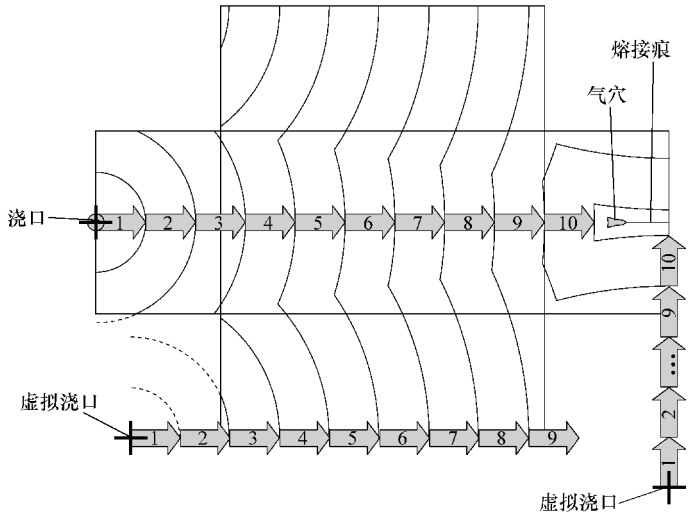


图 5.17　壁厚一致的制品的熔体前沿位置

为流动引导。如 2.3.1 节讨论的，通常成型制品中厚度发生变化不是所期望的。由于这个原因，型腔厚度的变化值应该控制在最低程度。

为了解决竞流问题，利用牛顿流动分析重新设计容器壁厚。式（5.17）与压力降、速度和厚度有关。为了消除竞流现象，中心线处的压力降应该等于沿着周边的压力降，即

$$\Delta p_{\text{centerline}} = \Delta p_{\text{side_ walls}} \tag{5.30}$$

这种条件可确保流动穿过中心线的同时能到达附近侧壁面的最远处，从而消除竞流现象。流动长度如图 5.18 所示。由容器的几何形状可以计算得到中心线处的流动长度和侧壁处的流动长度分别是 280mm 和 210mm。

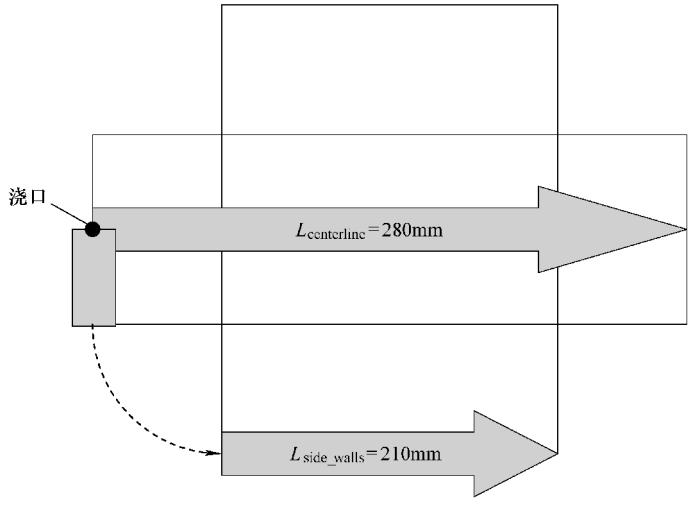


图 5.18　容器的流动长度

根据式（5.17），中心线处和侧壁处的压力降可以联立为

$$\frac{12\mu_{\text{centerline}}L_{\text{centerline}}\bar{v}_{\text{centerline}}}{H^2_{\text{centerline}}}=\frac{12\mu_{\text{side_ walls}}L_{\text{side_ walls}}\bar{v}_{\text{side_ walls}}}{H^2_{\text{side_ walls}}} \tag{5.31}$$

熔体不同截面的速度不同。侧壁处熔体的理想速度为

$$\bar{v}_{\text{side_ walls}}=\bar{v}_{\text{centerline}}\frac{L_{\text{side_ walls}}}{L_{\text{centerline}}} \tag{5.32}$$

这种情况会使熔体到达侧壁面最远处的同时也能沿着中心线到达型腔的对面。将这个方程代入到方程（5.31）并求解侧壁面厚度 $H_{\text{side_ walls}}$，侧壁面厚度为名义厚度 H 的函数，即

$$H_{\text{side_ walls}}=H\frac{L_{\text{side_ walls}}}{L_{\text{centerline}}}\sqrt{\frac{\mu_{\text{side_ walls}}}{\mu_{\text{centerline}}}} \tag{5.33}$$

分析表明，侧壁面厚度和流动长度的比率成比例，对熔体黏度的依赖较小。假定整个型腔的黏度相同，侧壁面厚度估算为

$$H_{\text{side_ walls}}=2\times\frac{210}{280}\text{mm}=1.5\text{mm} \tag{5.34}$$

也可以用平铺分析来预测壁厚变化的零件的填充形式。当壁厚变化时，有必要增加圆弧半径来表示在整个时间步长中熔体流动的距离。对于这个例子，侧壁面厚度已选定，因此壁面上熔体速度为

$$\bar{v}_{\text{side_ walls}}=\bar{v}_{\text{centerline}}\frac{L_{\text{side_ walls}}}{L_{\text{centerline}}}=\bar{v}_{\text{centerline}}\frac{210}{280}=75\%\,\bar{v}_{\text{centerline}} \tag{5.35}$$

在平铺分析中，较薄截面处的每一圆弧的半径应该增加较厚截面处圆弧半径的75%。在重新设计的容器中，仍然使用相同的虚拟浇口，得到的熔体前沿位置如图5.19所示。沿着侧壁面边缘处的箭头表示这个截面在不同的时间步长下熔体前沿增加的位置。分析表明，熔体到达侧壁面末端要早于熔体到达与浇口相对的型腔面。

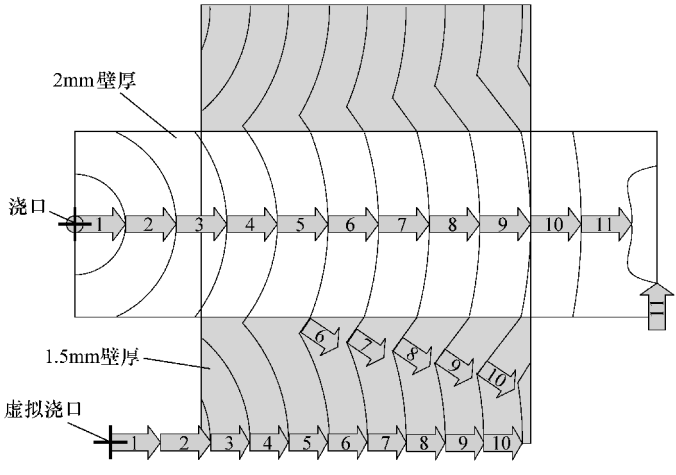


图5.19　有流动引导的制品的熔体前沿位置

为了验证平铺方法，对均匀壁厚为 2mm 的容器进行数值模拟，另一个容器，其侧壁面厚度降到 1.5mm。结果如图 5.20 所示。

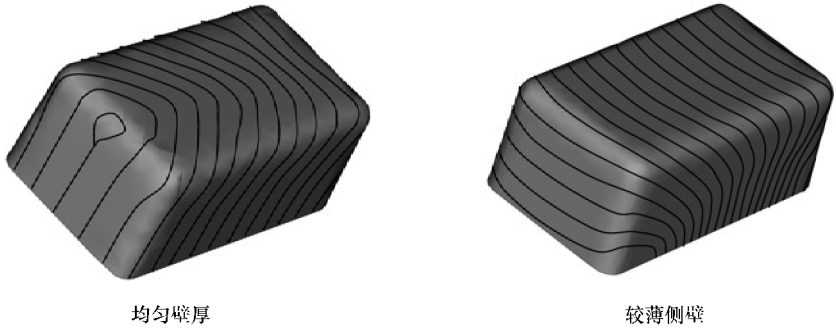


图 5.20　有流动引导和无流动引导的熔体前沿模拟

类似平铺图分析，模拟说明没有流动引导的容器有竞流现象、熔接痕和被困气体。壁厚减小到 1.5mm 后，这种情况消除。供参考，厚度从 2mm 减小到 1.5mm，为了填满较薄的侧壁面，要增加 10% 的注射压力，零件质量也会下降相同的量。

5.6　本章小结

所有模具工程设计都应该考虑整个模具型腔中的黏性聚合物熔体的推进。因为数值模拟能够快速且准确地考虑复杂几何体中的非牛顿流动，因而更受欢迎。然而，牛顿和幂律黏度模型的分析是非常容易的，并且已表明其可以提供精确结果。

填充分析的一个最重要的目的是确保具体的某种塑料材料可以完全填充模具型腔。如果型腔壁厚太薄并且填充型腔所需的熔体压力超过机器性能，那么将会产生不完全成型（称为短射）。工艺工程师会尽力通过提高熔体温度或注射压力，或者使用其他树脂材料来解决这个问题。如果这些尝试不能解决这个问题，那么模具要改变设计，包括增加更多的浇口，增大流道系统的直径，增加模具型腔壁厚，或者进行其他改变。这种模具的物理改造很费钱、费时。

也可以利用填充分析来预测所需的锁模力、优化壁厚、估算工艺条件、预测塑料熔体在整个型腔中的推进过程，并通过定位浇口或设计流动引导解决填充问题。方程（5.17）和方程（5.22）给出的牛顿流体和幂律流体的控制方程看起来很简单，但是要合理应用才能得到有用的结果。在评估黏度时推荐使用中等熔体温度进行填充分析，在使用牛顿模型时要验证黏度对剪切速率的依赖性。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 剪切应力、剪切速率和黏度之间的关系。
- 型腔填充时间、熔体速度和体积流量之间的关系。
- 在牛顿模型和幂律模型建立中的假设，和使用它们存在的潜在问题。

- 在模具型腔中如何估算从浇口位置到流动末端的流动长度。
- 如何利用牛顿模型或者幂律模型计算矩形模具型腔中熔体流动的剪切速率、黏度、填充时间和锁模力。
- 对于已给定材料特性和最大填充压力的成型应用，如何计算它的最小壁厚。

下一章讨论两板式模具、三板式模具和热流道模具的流道系统设计。提出黏性熔体在筒状和管状构件中的流动分析，并将该分析应用到流道系统设计中。随后，将在模具冷却系统和其他元素的设计之前提出浇口的分析和设计。

第 6 章　浇注系统设计

6.1　概述

流道系统的作用是将塑料熔体从注射成型机传到模具型腔。流道系统的设计可以非常简单，也可以非常复杂。增加流道系统设计的投资，可以减少模具使用时的循环时间和材料浪费。然而，有可能超标准设计流道系统，“最好”的浇注系统设计与产品体积、成型压力和允许的投资水平有关。

流道系统的设计按以下三个过程进行。第一，如果流道系统类型未知，则要选择流道系统类型（两板式冷流道、三板式冷流道或热流道）[⊖]。第二，确定模具中流道系统的路线。第三，为了平衡压力降、剪切速率和材料利用率，要详细指定流道系统每一部分的直径。为了有利于流道系统设计，下面讨论流道系统设计的目的。

6.2　浇注系统设计的目的

6.2.1　把聚合体熔体从机器传到型腔

流道系统的主要功能是将聚合物熔体从注射成型机喷嘴（熔体塑化处）传到模具型腔（预期产品成型处）。在大多数成型应用中，聚合物熔体必须穿越模具的高度部分和宽度部分，这可以通过两种不同的流道系统布局设计来实现，如图 6.1 所示。左边的流道系统布局对应着两板式模具设计。可以利用主流道把熔体从注射成型机喷嘴引到分型面。然后，利用分型面处的流道引导聚合物熔体穿过分型面进入一个或多个的模具型腔。

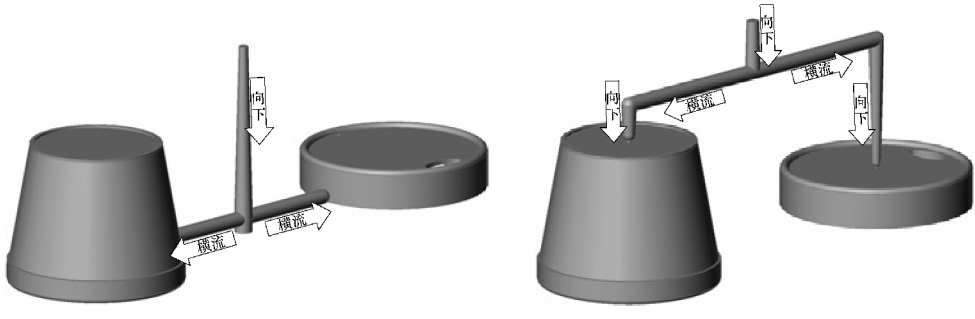


图 6.1　熔体传输用两种流道系统布置方式

⊖　尽管 13.6 节讨论了一些其他流道系统，但还是这三种类型的流道系统最普遍。

第二个布局设计对应着三板式或热流道模具。在这个设计中，聚合物熔体通过流道引导穿越模具的宽度和长度方向，该流道与分型面相对偏置，流道系统的路线和浇口位置有很大的设计自由度。然而，为了使聚合物熔体穿越模具的高度，聚合物熔体需要两组竖流道。首先，需要一组竖流道将聚合物熔体从注射成型机喷嘴引导至横向流道平面。熔体流过横向流道之后，需要第二组竖流道引导熔体穿过模具高度部分直至模具型腔。

6.2.2　产生最小压力降

熔体穿越流道系统和型腔向前推进时，注射成型机中的熔体压力会增大。为了保证有足够的熔体压力驱动聚合物熔体充满模具型腔，必须对流道系统加以设计。如图 6.2 所示，在成型过程中，有很大流动阻力的流道系统会产生显著的压力降。当注射成型机达到最大允许压力值时，聚合物熔体的流动速率开始衰减。如果在填充过程结束之前，流动速率就显著下降的话，就可能会有短射或其他缺陷产生。

为了避免短射、延长成型周期和其他缺陷，必须对流道系统加以设计以保证可接受的压力降。流道系统可接受压力降的大小依赖于成型制品的具体特性，特别是与注射成型机可提供的熔体压力相比，更依赖于填充型腔所需要的熔体压力。

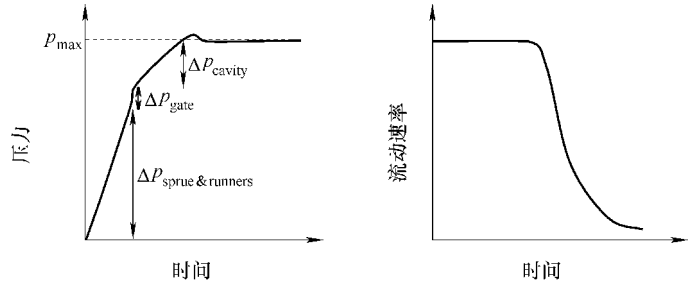


图 6.2　压力和流动速率耦合

例如，薄壁成型需要有效熔体压力约为 200MPa 的注射成型机。如果填充型腔要求的压力为 150MPa，那么通过流道系统的压力降不应超过 50MPa。然而，如果用同一机器生产仅需 100MPa 注射压力的零件，那么设计流道系统时压力降可为 100MPa。

为了精确地确定流道系统设计中可接受的压力降，模具设计者应该向工艺工程师咨询得到注射成型机的最大注射压力。模具设计者也可以通过分析、模拟、样机成型或者原有经验估算填充型腔所需的熔体压力。如果不知道这个信息，模具设计者可以假定流道系统的最大压力降为 50MPa（7200psi）。这个压力降比实际中的要高一些，但是这个规范会使设计很安全，具有更小的流道系统直径和更低的材料利用率。

6.2.3　消耗材料最少

为了获得最好的流道系统设计，模具设计者应该确定流道系统的直径来使压力降和流道系统体积都最小化。流道系统的设计约束条件如图 6.3 所示。随着流道系统中各个部分直径的增大，压力降降低到指定的最大值以下。然而，流道系统直径的增大也会引起流道系统体积的增加，这对于冷流道和热流道来说都是不希望的。

在冷流道设计中，大尺寸的流道系统会延长循环时间，由此也带来材料的过度浪费。一些成型允许在新物料中共混回收物料。典型的回收物料的添加极限为 30%，这也是对流道系统体积的限定。例如，如果成型应用有两个型腔共 $50cm^3$，那么 30% 的粉碎回收物料限制流道系统的体积为 $15cm^3$。

在热流道设计中，大型的流道系统会降低热流道中材料的更迭速度。更迭速度慢是不合理的，原因有两个。第一，在热流道中聚合物熔体的长时间滞留会引起材料降解，它经常引起注射成型制品的黑斑和性能下降。第二，热流道中大量的材料能阻碍成型过程中的颜色变化，这不仅是由物料更迭所需塑料熔体体积大造成的，还是由沿着流道系统壁面相关的剪切应力低造成的。物料更迭过程中的低剪切应力会使材料粘附在热流道壁面，在颜色变化过程中旧材料的移除会减少。

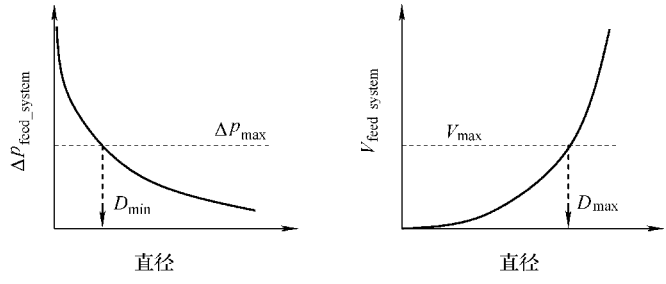


图 6.3　容积和压力降的耦合

很难确定热流道系统中聚合物熔体的最大体积，因为它与成型材料的类型、颜色变化的需要和合理的压力降有关。为了使材料在每一模都能更迭，热流道系统直径设计得越来越小。例如，如果成型应用有两个型腔共 $50cm^3$，每一成型周期有一次更迭的话，那么可以确定流道系统的体积为 $50cm^3$。如果所需压力降非常低，流道系统的容积可设计为 $100cm^3$ 甚至 $200cm^3$，将不可避免地出现降解和颜色变化问题。然而，应该注意的是，与安全设计的钢制冷流道系统不同，热流道系统直径的减小将极大地提高成本。

6.2.4　控制流动速率

由于流道系统的主要功能是把熔体从注射成型机传到模具型腔，因此流道系统就要控制每一模具型腔聚合物熔体的量。最普遍的两个应用是多腔和多浇口模具。

- 如图 6.1 所示，在多腔模具中，为了在同一时间填充满不同的模具型腔，成型应用在不同的分流道中要求不同的压力降。在这个例子中，如果杯体与杯盖相比要求有更高的填充压力，那么模具设计者应使杯体型腔的流道系统中产生较低的压力降。这种模具设计称为人工平衡。

- 在多浇口模具中，流道系统设计的一般目的是通过控制流道系统中聚合物熔体的流动来改变多浇口模具中的熔体推进。例如，通过一个浇口驱动更多的材料把熔接痕移动到不同的位置。其他常见应用包括改变模具填充来消除被困气体或者避免模具型腔一部分的过量填充。

在流道系统中使用不同的直径能控制聚合物熔体的流动，但是这是有条件的。第一，流道系统每一支路的压力降依赖于聚合物熔体的黏度。这样的话，对于不同材料和不同工艺条件，人工平衡流道系统不可以平衡模具填充。第二，在成型过程的保压阶段，不同尺寸的流道系统凝固速率不同，因此在注射成型的填充阶段，其动力学机制也就不同，有较小直径的流道阶段凝固速度快并减少向下流到型腔的保压量。由于这些原因，模具设计者应尽量利用具有相同填充要求的模具型腔。如果一组型腔或其他情况限定了通过每一浇口的流动速率非常不同，那么模具设计者可能希望利用熔体控制技术，如 13.6.4 节讨论的动态流道技术。

6.3 浇注系统的类型

最常见的模具类型在第 1 章中已经介绍。在这部分中，将详细讨论不同类型流道系统的结构和它们的附带结构。

6.3.1 两板式模具

之所以称为两板式模具，是因为它由两个夹固熔体的组装部分组成，每一半模具都由一个或更多模板组成。图 6.4 所示为模具的正等轴测图。在成型过程中，注射成型机的喷嘴和浇口套配合紧密。聚合物熔体沿着浇口套流动，穿过前固定板和 A 板。然后材料通过流道和浇口流过分型面进入一模或多模型腔。

塑料凝固后，模具在分型面处打开，它位于 A 板和 B 板之间。通常，A 侧模具保持静止，而成型制品和流道仍在 B 侧模具中。为了方便推出，在主流道下端设置一个倒锥状的拉料杆以确保主流道和分流道和 B 侧模具不脱离。模具充分打开后，注射成型机驱动推板向前推出制品。流道推杆顶在浇道上，会破坏小的侧向凹陷并从 B 侧模具上推出主流道。为了利于推出流道系统，可以沿着长流道长度方向设置附加的推杆和推出销，这在图 6.4 中没有画出。

由图 6.4 所示的模具设计生产出的成型制品如图 6.5 所示。流道系统设计中，主流道的长度是由前固定板和 A 板的组合高度决定的。分流道的长度是由型腔位置和相关流道的布局决定的。在布局确定的情况下，模具设计者需要确定流道系统的直径。通常，上游流道的直径比下游流道的直径大，因为聚合物熔体在流道交叉处会分流，因此下游流道的流量会较小。

当使用两腔两板式模具来说明模具设计理念时，可以将上述分析应用到复杂的流道系统布局中。例如，图 6.6 所示为一模八腔模具的流道系统，其包括两个一级流道、四个二级流道和八个三级流道。如果通过主流道的流量为 $100cm^3/s$，那么通过一级流道、二级流道和三级流道的流量分别为 $50cm^3/s$、$25cm^3/s$ 和 $12.5cm^3/s$。如果型腔内流动阻力变化显著，那么在模具填充阶段三级流道中的流量会随之显著变化。

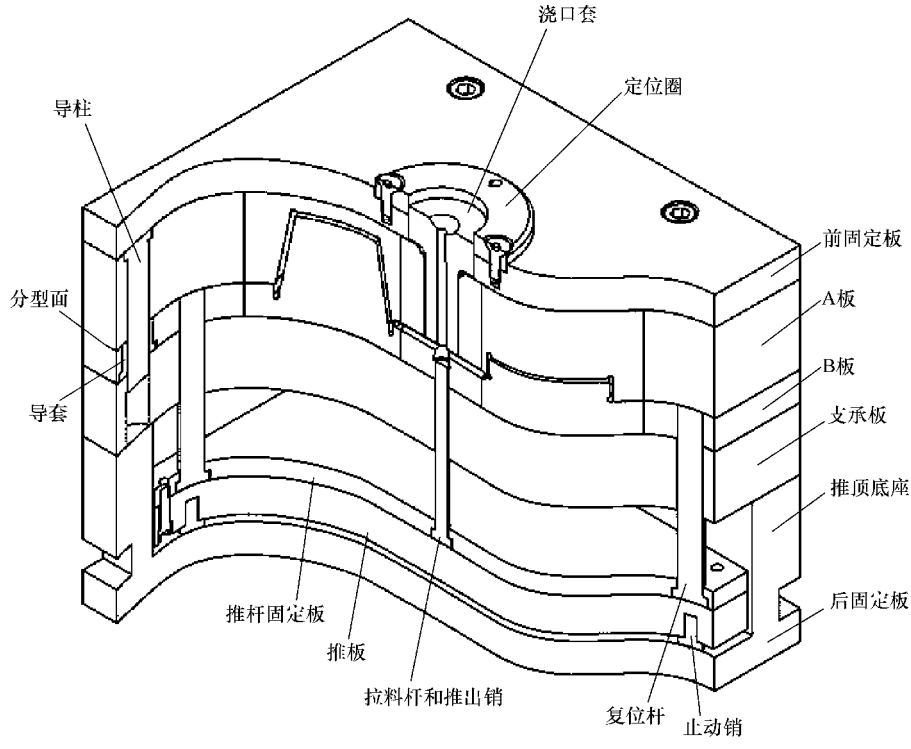


图 6.4　两板式模具的正等轴测图

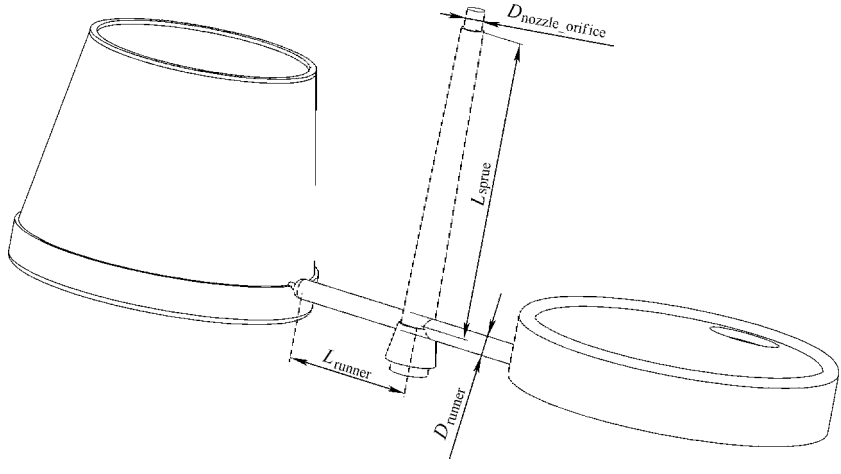


图 6.5　带有主流道和分流道的两腔成型

与图 6.5 所示的流道系统设计相比，图 6.6 所示的每个下游流道的直径较上游流道要小。但这里有一个明显的例外：通常，注射成型机喷嘴孔的直径比主流道进孔直径要小。在注射成型机喷嘴中，较小的喷嘴孔在成型主流道和凝固塞之间提供一个分离点。

如果喷嘴孔直径比主流道进孔直径大，那么浇口套后面喷嘴中的塑料冷却截面可能导致主流道黏附在 A 侧模具上。如果这种黏附经常发生，那么工艺工程师可以进行“断流道”，它是在模具打开和零件推出之前，通过将注射成型机的注射单元从流道处撤回来实现的。这会增加成型周期的复杂性和变数，因此不推荐采用这种方式，模具设计者应该核实或推荐正确的喷嘴孔直径。

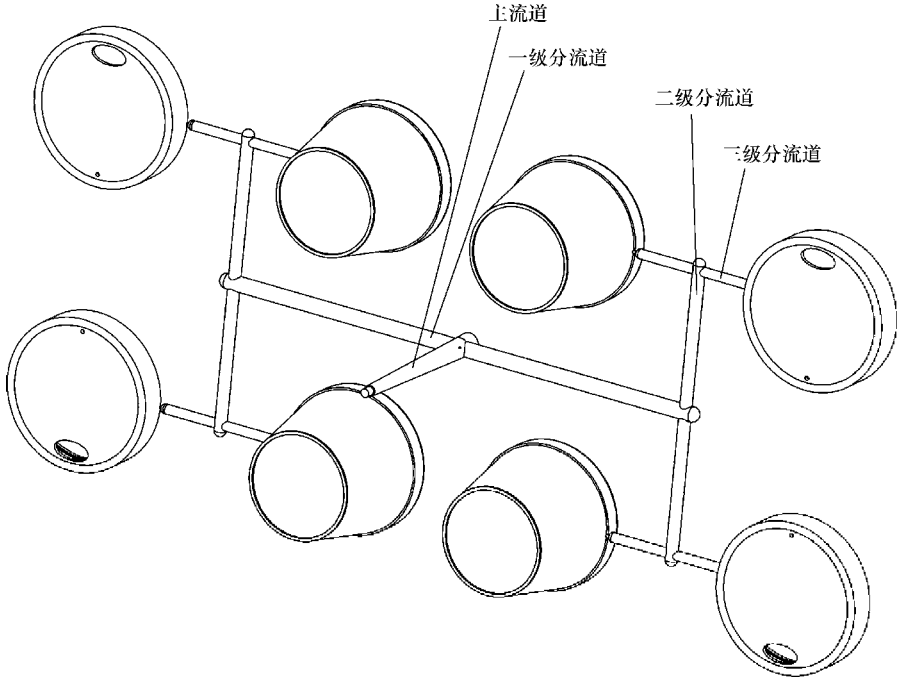


图 6.6　带有主流道和分流道的八腔成型

6.3.2　三板式模具

完全打开的三板式模具的正等轴测图如图 6.7 所示，图中不包含推顶底板和相关的组件，这些不是三板式模具操作的核心零件。三板式模具由三个彼此能够相对移动的截面组成，每一截面由一个或多个板组成。在 A 板和前固定板之间增加的第二分型面允许在模具型腔上面设置流道，并且在与模具型腔不干涉的情况下穿越分型面的宽度和长度。由于这个原因，在浇口位置和流道系统布局方面，三板式模具提供了更大的自由度。另一大好处是三板式模具使成型制品与流道系统自动分离。

图 6.8 所示为完全闭合的三板式模具的全剖视图。在这个设计中，聚合物熔体沿着带浇口套的流道流下，穿过长度为前固定板和卸料板（或 X 板）的厚度。然后，聚合物熔体沿着位于分型面（这里称为 A – X 分型面）上的流道流动，该分型面在 A 板和卸料板之间。然后，熔体通过锥形流道穿过 A 板和型腔镶件支承板的厚度进入到模具型腔内。

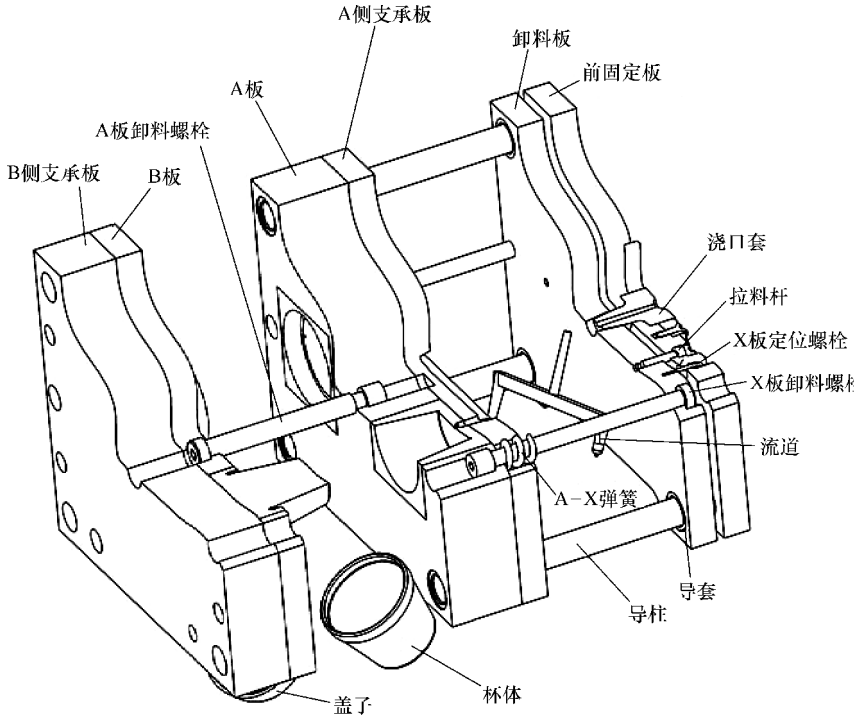


图 6.7　三板式模具的正等轴测图

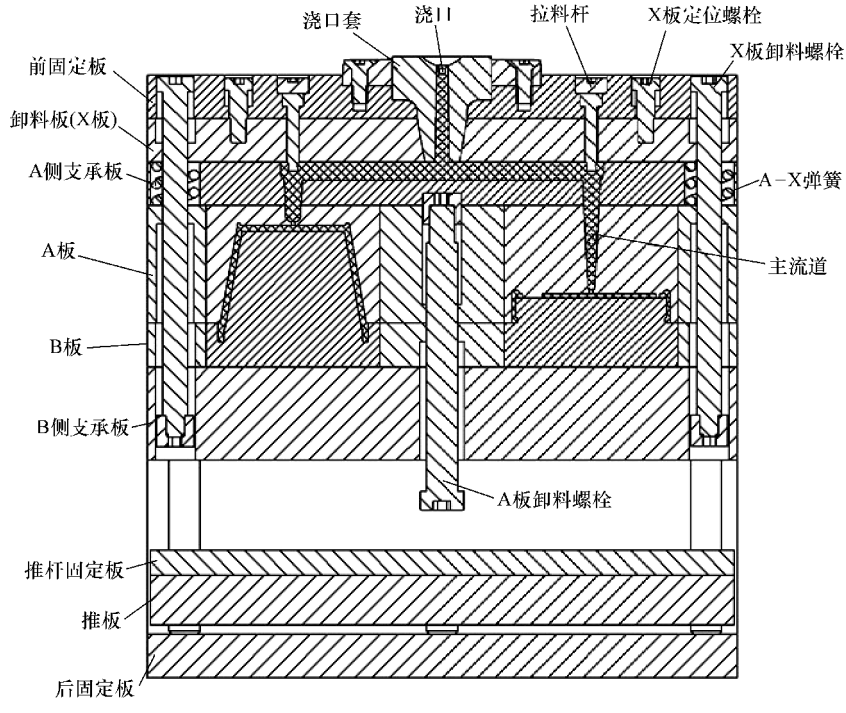


图 6.8　完全闭合的三板式模具的全剖视图

拉料杆用在主流道附近和流道的其他位置来确保流道系统停留在卸料板上。为了不限制流动，模具设计者应对其加以设计。在图 6.8 所示的流道系统设计中，与一级分流道的尺寸相比，拉料杆的直径和深度较小。为了进一步降低流动阻力，应该将它们移动到离浇口套更远处。

图 6.9 所示为部分打开的三板式模具的全剖视图。成型后，B 侧模具与 A 侧模具分离，使 A 板和 B 板之间的分型面打开。图中省略了推出系统、后固定板及其相关组件。可以利用位于 A 板和卸料板之间的弹簧来使 A－X 分型面早期分离。B 侧继续打开，A 板和 B 板之间的距离由连接 A 板和 B 板的 A 板卸料螺栓的长度控制。卸料螺栓的自由长度应该足够长以保证成型制品能顺利推出。通常，模具在 A 板和 B 板间打开的距离等于成型制品高度的 2～3 倍。如图 6.9 所示，即使对于相对短的制品，这个距离也可以很大。

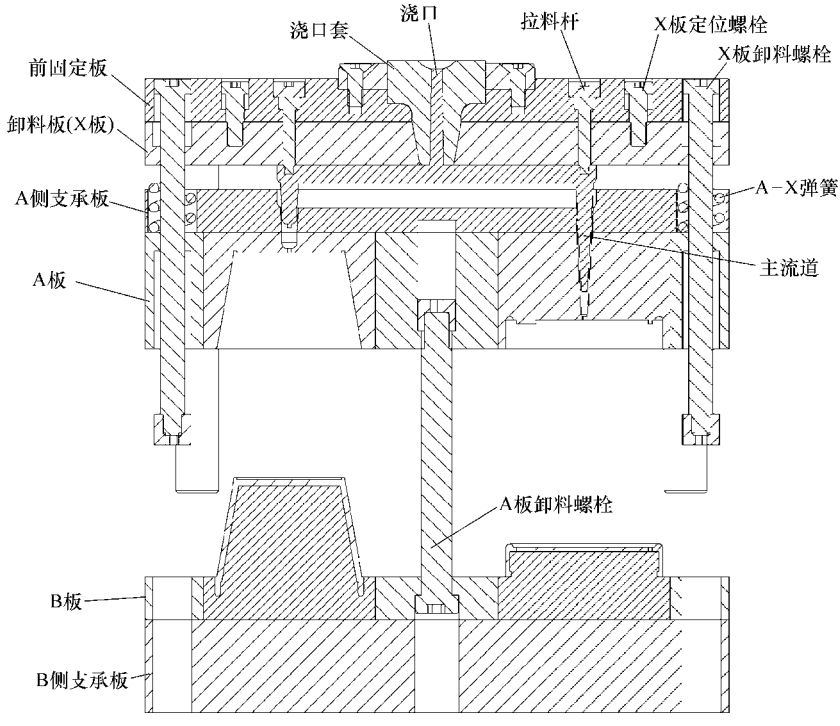


图 6.9　部分打开的三板式模具的全剖视图

一旦达到 A 板卸料螺栓的长度，A 板将会随着 B 板作远离定模板的运动。X 板卸料螺栓的自由长度决定了 A 板和卸料板间模具打开的距离。与 A 板卸料螺栓一样，X 板卸料螺栓也必须足够长来实现流道系统的去除。一旦 A 板的移动距离超过 X 板卸料螺栓的自由长度，卸料板将会沿着 A 截面、B 截面和模具推出系统作远离前固定板的运动。

图 6.10 所示为完全打开的没有推出系统和后固定板的三板式模具的全剖视图。在模具操作过程中，为了得到高效的和完全的自动循环，应该谨慎设定和控制模具打开速度和模具位置。如果成型操作设定得不够谨慎，则会不能可靠地推出流道系统，进而破坏模具。为了优化模具操作，在很多三板式模具中，可以通过改变卸料螺栓上螺母的位置或通过增加板和卸料螺栓末端间的垫片来调整模具打开距离。

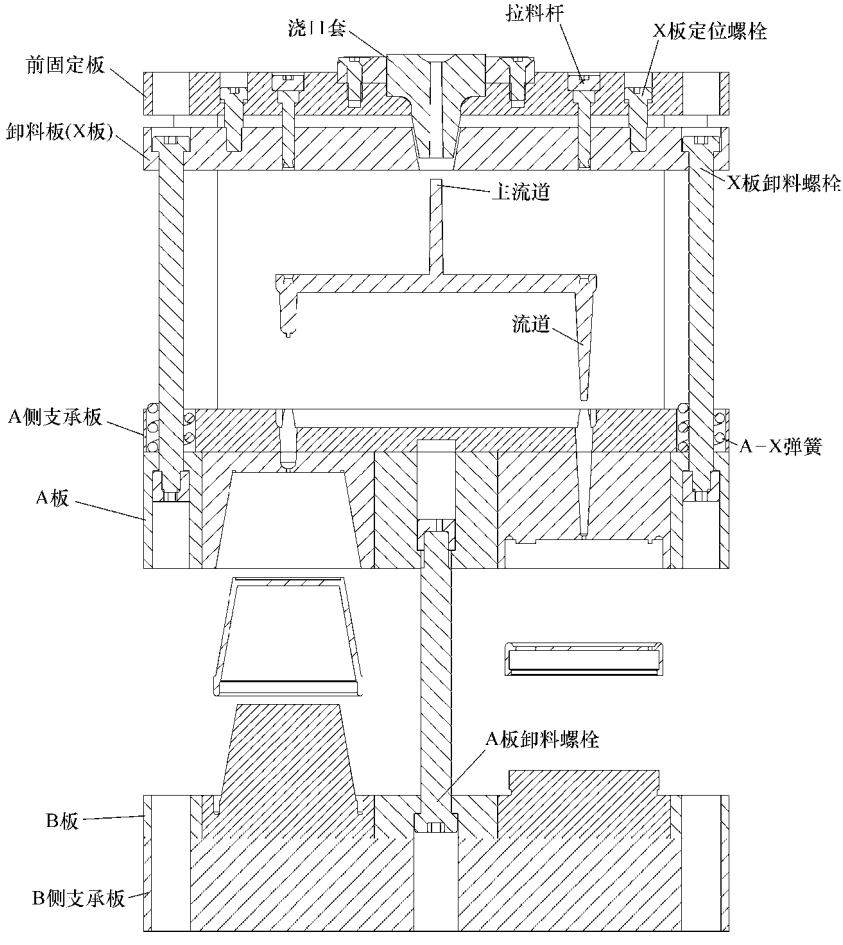


图 6.10　完全打开的三板式模具的全剖视图

应该注意的是，在模具打开距离、模板厚度选择和卸料螺栓的长度方面，三板式模具设计已经足够紧凑了。表 6.1 为三板式模具和两板式模具设计的比较。三板式模具中增加的模板和组件使总高增加了 44mm（1.75in），质量增加了 30kg，增加量相对较小（在 20% 级别上）。然而，三板式模具打开距离为 250mm，远比两板式模具的打开距离 75mm 要大得多。较大的模具打开距离是不合理的，因为这样会增加模具打开和闭合的时间，也可能使得在一些模板开距有限的注射成型机中无法工作。

表 6.1 两板式和三板式流道系统比较

流道系统类型	两板式模具	三板式模具
模具总高/mm	264	308
模具打开距离/mm	75	250
所要求的模板开距/mm	339	558
模具质量/kg	151	181
模具打开时间/s①	0.36	1.2

① 模具打开时间由模具打开距离除以模具打开速度得到的，其中模具打开速度是基于现有商业注射成型机的多元回归由下式计算得到的：$v_{\text{mold-opening}} = 184 + 13 \times \log F_{\text{clamp}}$，其中 $v_{\text{mold-opening}}$ 的单位为 mm/s，F_{clamp} 的单位为 t。对于锁模力为 100t 的模具，通常最大模具打开速度约为 210mm/s。

6.3.3 热流道模具

当浇口灵活性、周期效率和材料利用率都很重要时，应该考虑使用热流道模具。在热流道系统中，流道系统被加热通道包裹，使塑料在成型过程中能保持熔融状态。因为塑料在热流道系统中不会冷却，所以没必要：

- 塑化用来填充流道系统的熔体。
- 注射用于填充流道系统的材料。
- 等待流道系统中的材料冷却。
- 使模具打开距离足够大来去除流道系统。
- 从成型制品上将流道系统去除。

由于这些原因，热流道模具与传统的两板式模具或三板式冷流道模具相比，其循环周期缩短 20%，材料节省 20% 是很正常的。然而，与两板式模具或三板式模具相比，热流道模具确实要求更高的初始投资，并且需要控制器和能源来保持均匀的熔体温度。

图 6.11 所示为热流道系统的正等轴测图。这个热流道设计包括热浇口套、歧管、两个喷嘴、四个热控制区和其他组件。工作过程中，注射成型机喷嘴处的材料进入热浇口套再流入位于歧管内的一级分流道。然后熔体沿着一个或多个流道向下流到热流道喷嘴。喷嘴的长度是由歧管到型腔浇口的距离决定的。

与冷流道设计相比，热流道系统中流道和喷嘴的直径可以非常大，因为最后热流道中所有的材料将被压进入模具型腔。既然不浪费聚合物熔体，热流道系统就可以具有较大的直径以降低流动阻力，并实现型腔中压力的有效传输。然而，热流道中过大的直径会使材料降解并妨碍不同种类树脂和颜色间的快速转换。

热流道模具的全剖视图如图 6.12 所示。这个模具设计保证塑料熔体能够通过有两个喷嘴的自然平衡的热流道系统注射到笔记本电脑边框的左侧和右侧。可以观察到，充满气体的缝隙围绕在热流道系统大部分结构的周围，从而阻止了热的歧管和喷嘴到较冷的模具钢材之间的热传递。成型过程中，加在模具型腔表面和热流道系统的熔体压力将产生力的作用，该力易引起模具型腔镶件和歧管的偏斜。通常，使用由钛合金加工成的推力瓦将这些作用力从热流道系统传递到前固定板，这样可使热量散失最少。热流道模具中，应该在前固定板上使用冷却通路和/或绝缘板来阻止大量的热传递到注射成型机

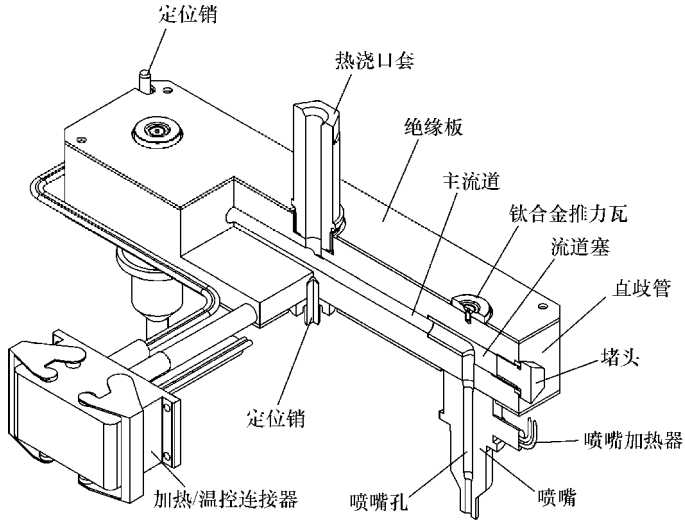


图 6.11　热流道系统的正等轴测图

的模板上。

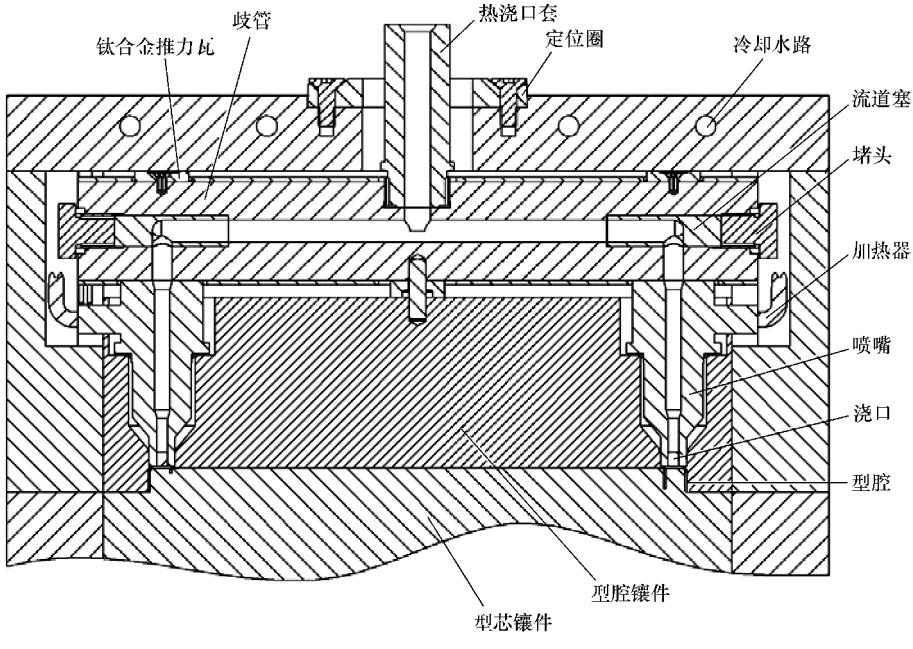


图 6.12　热流道模具的全剖视图

图 6.12 所示的热流道系统是一个相对简单的设计，该设计利用的热浇口，下一章将对其进行详细说明。这个设计中，热流道喷嘴和型腔镶件的浇口切断处同心。因为歧管随着歧管温度的变化而扩张，歧管允许在喷嘴上表面扩张和滑动。为了阻止大量材料

的溢出，要保持歧管和喷嘴的压缩在长度方向进行。

有很多种不同的热流道系统设计，包括螺旋形喷嘴和其他适合于歧管的形式。不同的热流道歧管结构也是很普遍的，直歧管（图6.11）、X形歧管（所有的一级分流道直接从浇口套处的歧管中心分出）、H形歧管（歧管中的多分支能够到达很多浇口，如图6.6所示的设计）、层叠模具（两个或更多热流道系统沿着模具高度方向叠加，使模具型腔增大而不增大锁模力）和特殊模具（热流道的长度和分支都是用户定制的以满足特殊应用要求）。为了掌握热流道系统的优点和不足，模具设计者应该和热流道供应商多进行技术交流。

6.4 浇注系统分析

虽然两板式、三板式和热流道模具的设计在形式上和功能上有着很大的不同，但是，流道系统设计都应该遵循前文讨论的基本原则：

- 压力降最小，通常不大于填充模具型腔所需压力的50%或者50MPa。
- 材料消耗量最小，通常不大于冷流道模具型腔体积的30%或者热流道模具型腔体积的100%。
- 不延长模具冷却时间。

通常很多情况设计流道系统的目的是在熔体通过主流道、一级分流道等时能维持相同的速度。通过设置下游流道直径 $D_{\text{downstream}}$，可以保持分支流道系统中熔体速度，即

$$D_{\text{downstream}} = \frac{D_{\text{upstream}}}{\sqrt{n_{\text{downstream}}}} \tag{6.1}$$

式中，D_{upstream}是上游流道的直径；$n_{\text{downstream}}$是下游流道的数目，它是从上游流道分出来的。

例：以图6.5所示的流道系统为例，如果主流道根部的直径为6mm，计算能保持一致的熔体前沿速度的一级分流道的直径。

根据式（6.1），下游流道的直径应该为

$$D_{\text{downstream}} = \frac{6\text{mm}}{\sqrt{2}} = 4.24\text{mm}$$

为了验证这个结果，可以计算出每一个分支中的熔体速度。假定流量为50cm^3/s，则主流道中的速度为

$$v_{\text{sprue}} = \frac{50 \times 10^{-6}}{\frac{0.006^2\pi}{4}}\text{m/s} = 1.77\text{m/s}$$

因为流动分成两部分，所以一级分流道中的流动速度计算为

$$v_{\text{runner}} = \frac{0.5 \times 50 \times 10^{-6}}{\frac{0.00424^2\pi}{4}}\text{m/s} = 1.77\text{m/s}$$

虽然设计准则很简单并且看起来很直观，但是从产生的压力降和消耗的塑料材料角

度讲，这种设计是不够理想的。下面将基于以上三个目的，提出流道系统设计的工程方法。

6.4.1　确定流道系统的类型

模具流道系统的类型通常作为模具设计者对模具报价的一部分而已经确定，它很容易确定或者已经由客户指定。然而，如果流道系统的类型未确定，那么模具设计者应该考虑成型应用和工艺工程师能力的要求。表 6.2 给出了流道系统类型和特性。

表 6.2　流道系统类型和特性

流道系统类型	预先投资	工艺工程师能力要求	材料利用率	循环效率
两板式冷流道	最低	最低	低	最低
三板式冷流道	低	低	低	低
绝热流道	中等	中等	中等	中等
热流道	高	中等	高	高
层叠模具	最高	高	高	最高

表 6.2 中的一些讨论是有根据的。首先，预先的投资不仅涉及模具设计和相关组件的投资，而且涉及生产和测试模具需要的时间。例如，两腔的两板式模具耗费 20 000 美元，需要几周时间来完成，而一个 64 腔的层叠模具耗费 1 000 000 美元，要用几个月来完成。对于一些快速的产品开发项目，增加时间和增加成本所产生的问题一样重要。物流供应链也是一个问题。例如，客户更偏向于加工 12 副相对简单的模具，每一个模具有 4 个型腔。在欧洲、亚洲和美国，一些模具能单独操作。虽然这种方法的循环时间和效率不如单一的热流道模具那么高，但是这种方法的初始模具开发时间短，模具失效率低，并且可以降低供应链节拍时间，以满足客户需求的波动。

关于流道系统类型的选择，工艺工程师的能力也是个问题。由于所有的工艺工程师都希望操作两板式模具，因此一些工艺工程师可能对三板式模具、绝热流道模具或热流道模具的合理设置、操作和维修不熟悉。层叠模具的操作虽然不比对传统式热流道模具的操作复杂，但是有可能让一些工艺工程师生畏，并且需要辅助的不具备的控制器。由于这些原因，如果还未确定流道系统的类型，模具设计者应该首先确认工艺工程师的能力。

使用更复杂的流道系统的首要条件是材料的利用率和循环效率。既然经济性决定于成型应用的类型，所以应该对每一个流道系统类型进行成本估算来决定最合适的。如先前讨论的，对目标产品体积进行灵敏性分析来确定欠设计或过设计的危险性。

6.4.2　确定流道系统的布局

4.3.1 节给出了模具型腔一些常见的布局。模具流道系统设计必须提供每一型腔在合适的熔体压力下所需的熔体流量。由于这个原因，有大量普通应用的流道系统布局，包括串联式、分支式、放射式、混合式和定制式。下面将对每一种类型的流道系统布局进行讨论。

型腔的串联式布局可以最紧凑地将聚合物熔体通过一个一级分流道传递到一行型

腔，该一级分流道上有很多将熔体引入每个型腔的二级分流道，如图 6.13 所示。但是由于沿着一级分流道长度方向在不同的位置产生二级分流道分支，所以沿着一级分流道长度方向的压力降将引起远离主流道的型腔中较低的流动速率。可以通过减小靠近主流道的二级分流道的直径来减轻不均匀的流动情况，见图 6.13 中远离右边一级分流道的二级分流道。然而，这种人工平衡很难成功，并且不能保证零件质量的均匀性，这和注射成型过程保压阶段的不同动态有关。由于这些原因，在精密成型应用中不经常采用流道系统的串联式布局。

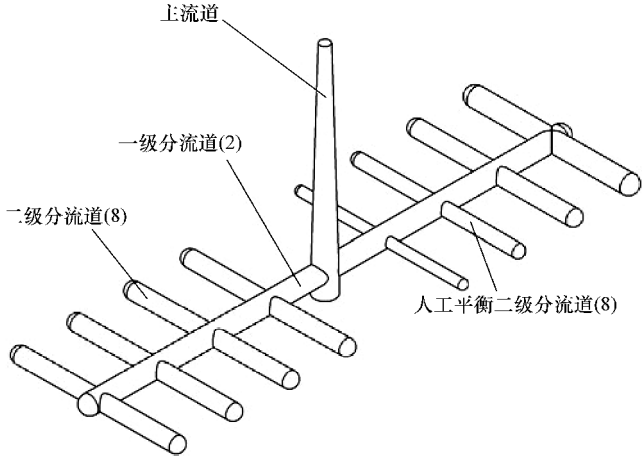


图 6.13　流道系统的串联式布局

通过多次分支流道系统，流入多重型腔的熔体可以自然平衡，如图 6.14 所示。与串联式布局相比，分支式布局消耗更多的材料，同时从主流道到型腔间要施加很高的压力。自然平衡流道系统的另一个问题是熔体温度不平衡，这和熔体穿过多次分支发生翻转有关。文献［27，28］对这个影响进行了很好的证明，并且发明了“MeltFlipper™”技术，该技术能对有多重分支的自然平衡系统流动的非平衡性进行辅助纠正。由于这些原因，具有很多型腔的成型应用正逐渐利用热流道系统来避免过量的材料消耗和压力降。

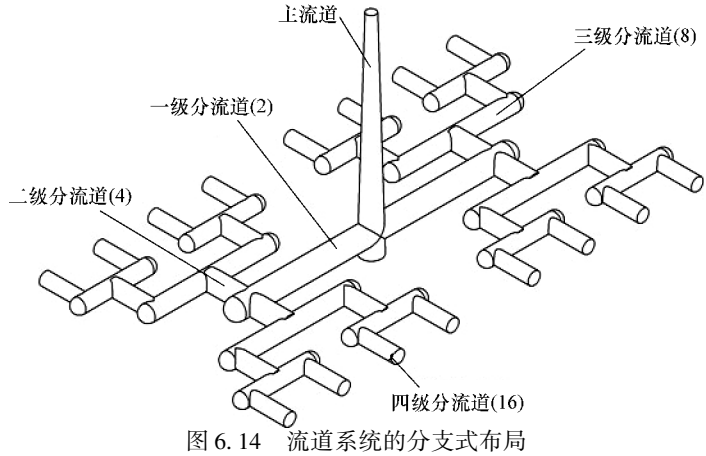


图 6.14　流道系统的分支式布局

流道系统放射式布局也是非常普遍的，该布局中多重一级分流道从主流道发射出来。流道系统放射式布局的主要优点是仅通过中等体积的流道就能实现流动速率和熔体压力的自然平衡。与主流道根部相比一级流道尺寸很大，因此从一个主流道上发射出来的一级分流道的数量受到限制。为了增加一级分流道的数量，可以在主流道根部设置盘腔或盘形浇口。如图 6. 15 所示，可以用盘形浇口布置很多一级分流道。与图 6. 14 所示的分支式布局相比，这种放射式布局有一个较小的流道系统体积并且提供更加平衡的流动。然而，随着型腔尺寸的增加，必须加长一级分流道，同时材料浪费也就增多了。

为了最好地适合成型应用，模具设计者可以自由地设计流道系统。如前文讨论的，主要的目的是在材料消耗最小的同时，提供平衡流动和最小压力降。因此，很多流道系统将分支式布局和放射式布局相结合，图 6. 16 所示即为这种设计，其由一个带有一级分流道和二级分流道的分支式流道系统组成，然后分别填充四个放射式流道系统，每一个流道系统有四个三级流道。与图 6. 14 和图 6. 15 所示的流道系统布局相比，流道系统混合式布局设计在提供自然平衡流动的同时，材料消耗更少。

很多成型应用要求最好由定制的流道系统填充，该系统与前文任何一个流道系统布局都不一致。例如，很多多浇口零件要求流道系统将熔体穿过模具型腔传递到不同的位置。这样的成型应用中，没理由坚持分支式布局或放射式布局或者甚至是自然平衡布局。实际上，模具设计者应该有目的地选择流道系统布局，并确定将适量的聚合物熔体在适当的熔体压力下传递到模具型腔不同部分的流道尺寸。

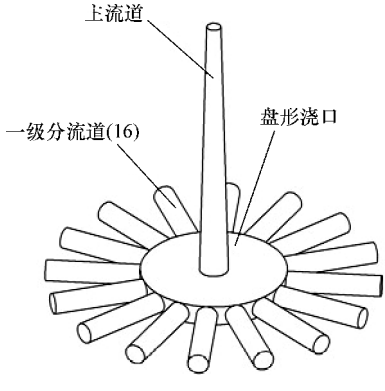


图 6. 15　流道系统的放射式布局

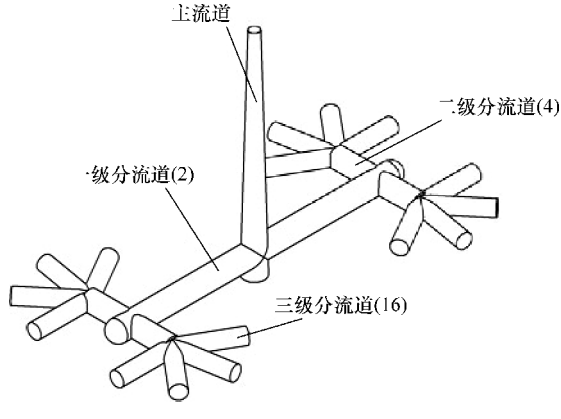


图 6. 16　流道系统的混合式（分支 – 放射）布局

图 6. 17 所示为定制式布局的一个例子。该流道系统由四个一级分流道组成。两个较长的一级分流道通过四个二级分流道将聚合物熔体传递到流道系统周围的相对较大的部分。离主流道较近的两个小一级分流道用于填充更小的模具型腔，其给大型装配成型提供可选择的组件。二级分流道配备可旋转的开关，其可以安装在模具上来改变流道系统的连通性，因此，在注射成型机中有模具时，可以产生不同的成型组合。

根据成型应用的要求，模具设计者的创造性和目的性最终决定了流道系统的性能。设计流道系统时，模具设计者有很大的自由。然而，必须遵循一些常用规则。

- 流道系统总长度应尽量短以使材料耗费量最小化。

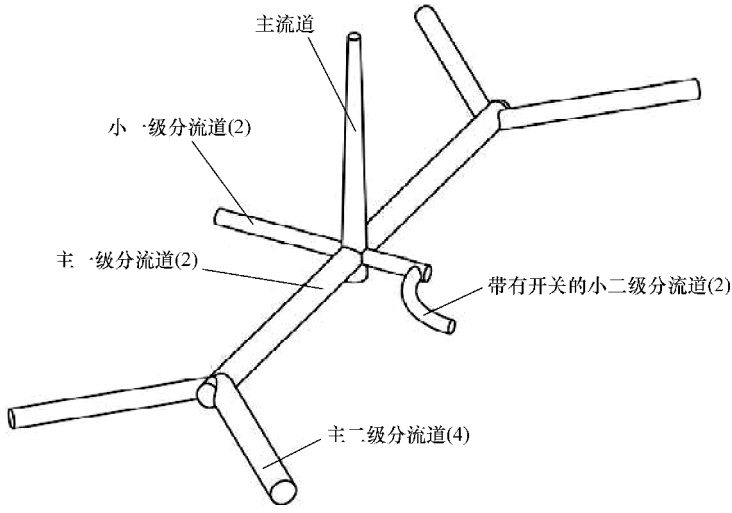


图 6.17　流道系统的定制式布局

• 流道系统总长度应尽量短以使整个流道系统的压力降最小化。

• 关于熔体流动、熔体压力和成型零件质量方面，与人工平衡流道系统相比，自然平衡流道系统能提供更好的型腔连通性。

• 应使流道系统分支总数最小化以避免过大的流道体积和潜在的熔体温度不平衡。

• 为了减小给定流道系统的体积，流道系统的直径通常在浇口处最大，随着流动速率的减小，一级分流道、二级分流道和其他流道变得更小。

• 对于正确决定模具型腔的数量、模具型腔的布局和流道系统的类型来说，经济性分析是非常重要的。

• 当两板式模具的型腔阻碍预期的流道系统布局时，应该考虑热流道模具和三板式模具。

6.4.3　预测压力降

流道系统的布局和长度确定后，根据分析可以确定流道系统每一部分的直径。聚合物熔体通过流道系统的流动状态为层流状态。为了验证层流状态，雷诺数 Re 应该小于 2300，即

$$Re = \frac{4\rho_{melt}\dot{V}_{melt}}{\pi\mu_{melt}D} < 2300 \tag{6.2}$$

式中，$\dot{V}_{melt}$ 是体积流量（通常为 $50\times10^{-6}\mathrm{m}^3/\mathrm{s}$）；$\rho_{melt}$ 是密度（通常为 $1000\mathrm{kg/m}^3$）；μ_{melt} 是表观黏度（通常为 100Pa·s）；D 是流道直径（通常为 0.01m）。

将式（6.2）中变量的常用值代入，计算结果表明雷诺数处于 0.1 的数量级。因此，流动状态为非湍流态，可以忽略惯性作用并且可以使用著名的 hagen – poiseuille 定律估算压力降 Δp，即

$$\Delta p = \frac{8\mu_{\text{melt}} L \dot{V}_{\text{melt}}}{\pi R^4} \tag{6.3}$$

式中，L 和 R 是流道中某部分的长和半径。

为了利用牛顿模型精确预测压力降，应该确定适当剪切速率下的聚合物熔体的表观黏度，即

$$\dot{\gamma} = \frac{4\dot{V}}{\pi R^3} \tag{6.4}$$

对于幂律流体，可以不计算剪切速率而直接预测压力降，即

$$\Delta p = \frac{2kL}{R}\left[\frac{\left(3+\frac{1}{n}\right)\dot{V}_{\text{melt}}}{\pi R^3}\right]^n \tag{6.5}$$

式中，k 和 n 是聚合物熔体温度下的参考黏度和幂指数。

例：在笔记本电脑边框成型过程中，预测图 6.18 所示的热流道系统设计中的压力降。

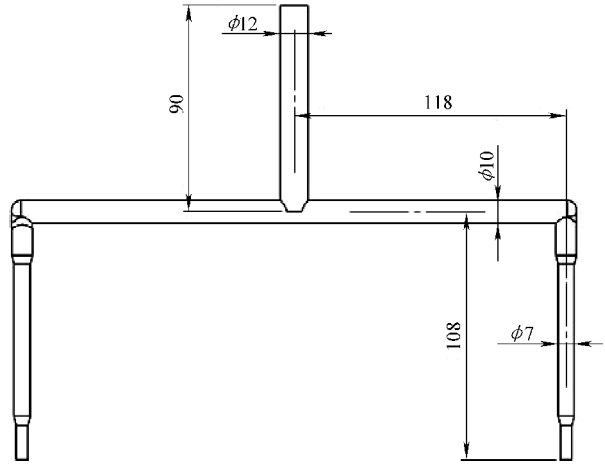


图 6.18　热流道系统尺寸

分析假定 ABS 材料是在进口处体积流量为 125cm³/s 的情况下成型的。为了避免计算流道中每一部分的剪切速率，使用 k 值等于 17 000Pa·s^n 和 n 等于 0.35 的幂律模型。

热浇口套的长度为 90mm，半径为 6mm。通过热浇口套的体积流量为 125cm³/s，所以通过主流道的压力降为

$$\Delta p_{\text{sprue}} = \frac{2\times 17\ 000\times 0.09}{0.006}\times\left[\frac{\left(3+\frac{1}{0.35}\right)\times 125\times 10^{-6}}{0.006^3\pi}\right]^{0.35}\text{Pa} = 5.9\text{MPa}$$

流过热浇口套之后，熔体分成两个流动。因为多浇口笔记本电脑边框几乎对称，所以通过热流道系统每一支路的流量假定为进口流量的 50% 即 62.5cm³/s。歧管每一支路的长度为 118mm，半径为 5mm，所以通过歧管的压力降为

$$\Delta p_{\text{manifold}} = \frac{2 \times 17\ 000 \times 0.118}{0.005} \times \left[\frac{\left(3 + \frac{1}{0.35}\right) \times 62.5 \times 10^{-6}}{0.005^3 \pi} \right]^{0.35} \text{Pa} = 8.8\text{MPa}$$

为了计算经过喷嘴的压力降，通过分析锥形孔的每一部分可以得到最精确估算。然而，考虑到这种特殊的喷嘴锥形几何体，可以通过把锥形孔建模成半径为 3.5mm、长为 108mm 的等截面孔获得合理的估算，那么压力降为

$$\Delta p_{\text{nozzle}} = \frac{2 \times 17\ 000 \times 0.108}{0.0035} \times \left[\frac{\left(3 + \frac{1}{0.35}\right) \times 62.5 \times 10^{-6}}{0.0035^3 \pi} \right]^{0.35} \text{Pa} = 16.7\text{MPa}$$

通过热流道系统的总压力降是通过热流道每一部分的压力降的总和，即

$$\Delta p_{\text{total}} = \Delta p_{\text{sprue}} + \Delta p_{\text{manifold}} + \Delta p_{\text{nozzle}} = (5.9 + 8.8 + 16.7)\text{MPa} = 31.4\text{MPa} \approx 4500\text{psi}$$

与通常的注射压力 150MPa 相比，这个压力降很合理。

6.4.4 计算流道体积

已知流道系统的数量、长度和半径，计算整个流道系统的体积 V_{total} 为

$$V_{\text{total}} = \sum_{j=1}^{m} N_j V_j = \sum_{j=1}^{m} N_j L_j (\pi R_j^2) \tag{6.6}$$

式中，m 是流道系统不同类型节段的数量；j 是各流道节段特殊类型的编号；N_j 是流道节段 j 在流道系统中出现的次数；L_j 是节段 j 的长度；R_j 是节段 j 的半径。

如先前讨论的，模具设计者应该使流道系统的总体积最小化以避免材料过度浪费或者冷流道模具中材料的再回收利用，或热流道模具中材料的长时间滞留。

例：计算图 6.18 所示的热流道系统设计的体积。在这个热流道设计中，有一个半径为 6mm、长为 90mm 的主流道。歧管中的一级分流道由两部分组成，每一部分的半径和长度分别为 5mm 和 118mm。有两个喷嘴，每个喷嘴有长为 108mm、半径约为 3.5mm 的孔。因此，总体积为

$$V_{\text{total}} = \sum_{j=1}^{m} N_j V_j = (9 \times 0.6^2 \pi + 2 \times 11.8 \times 0.5^2 \pi + 2 \times 10.8 \times 0.35^2 \pi)\text{cm}^3 = 37\text{cm}^3$$

体积 37cm^3 比零件体积 27.5cm^3 略大，并且不应该引起停滞时间的延长或降解。事实上，在这个薄壁成型应用中为了降低压力降更偏向于重新设计大直径的热流道。虽然没必要在这个热流道应用中减小流道系统的体积，但是如果应用在三板式冷流道系统中，那么将不可能接受这个大流道直径设计。

6.4.5 优化流道直径

分析流道系统的压力降之后，通过调整流道系统的设计来改善其性能是可能的。可以通过多重迭代设计和分析得到低压力降和耗材少的设计。多重优化是可以同时实现压力降最小化和流道体积最小化的一种方法。然而，这种方法需要时间来实施和验证，同时要忽略设计者的分析细节。

这里推荐的方法是对压力降给定具体约束，利用基于约束的方法直接求解流道系统的最小直径。如果一部分流道的最大压力降指定为 $\Delta p_{\max}$，那么牛顿材料的流道半径可直接求解为

$$R=\sqrt[4]{\frac{8\times\mu_{\text{melt}}L\dot{V}_{\text{melt}}}{\pi\Delta p_{\max}}} \tag{6.7}$$

然而，这种方法存在的困难是，表观黏度μ_{melt}是剪切速率和流道半径的函数。为了避免剪切速率和黏度的迭代估算，可以用幂律模型一步计算得到半径，即

$$R=\left[\left(\frac{2kL}{\Delta p_{\max}}\right)^{\frac{1}{n}}\frac{\left(3+\frac{1}{n}\right)\dot{V}_{\text{melt}}}{\pi}\right]^{\frac{1}{3+\frac{1}{n}}} \tag{6.8}$$

然而，仍有一个问题存在：流道系统每一部分的最大压力降应是多少？知道了从机器喷嘴到型腔的整个压力降，可以制定多种方案来分配通过流道系统每一部分的压力降。最简单的方法是通过喷嘴和型腔间部件的数量划分整个流道系统的压力降。例如，如果聚合物熔体流经主流道、一级分流道和二级分流道并且流道系统的最大压力降为30MPa，那么模具设计者应该选择分配流道系统每一部分的最大压力降为10MPa。

然而，问题是用这种方法不能说明流道系统每一部分的长度。例如，非常短的二级分流道分配的压力降和很长的主流道的压力降相同。该设计的结果不是最优的，对于二级分流道来说直径太小，对于主流道来说直径太大。

另一个简单的方法是，每一流道部分的压力降分布与该部分的长度成比例，即

$$\Delta p_i=\Delta p_{\max}\frac{L_i}{L_{\text{total}}}=\Delta p_{\max}\frac{L_i}{\sum_{j=1}^{m}L_j} \tag{6.9}$$

式中，Δp_i是分配在流道i部分的最大压力降；L_i是流道i部分的长度；m是流道系统进、出口之间流道部分的数量。这样的话，较长的流道部分将分配整个流道系统较大比例的压力降。

例：为了使图6.18中整个流道系统的压力降不超过30MPa，计算热流道系统最小直径。假定用体积流量为125cm^3/s的注射成型机进行ABS成型。

流道系统从进口到出口的整个长度为

$$L_{\text{total}}=\sum_{j=1}^{3}L_j=(90+118+108)\,\text{mm}=316\,\text{mm}$$

主流道的最大压力降分配为

$$\Delta p_{\text{sprue}}=30\times\frac{90}{316}\text{MPa}=8.5\,\text{MPa}$$

给定主流道压力降，由方程（6.8）计算主流道直径为

$$R_{\text{sprue}}=\left[\left(\frac{2\times17\,000\times0.09}{8.5\times10^{6}}\right)^{\frac{1}{0.35}}\times\frac{\left(3+\frac{1}{0.35}\right)\times125\times10^{-6}}{\pi}\right]^{\frac{1}{3+\frac{1}{0.35}}}$$

$$R_{\text{sprue}}=0.005\,\text{m}=5\,\text{mm}$$

相似的，歧管的最大压力降分配为

$$\Delta p_{\text{manifold}}=30\times\frac{118}{316}\text{MPa}=11.2\,\text{MPa}$$

给定歧管压力降，歧管中一级分流道直径由方程（6.8）计算为

$$R_{\text{manifold}}=\left[\left(\frac{2\times 17\ 000\times 0.118}{11.2\times 10^{6}}\right)^{\frac{1}{0.35}}\times\frac{\left(3+\frac{1}{0.35}\right)\times 62.5\times 10^{-6}}{\pi}\right]^{\frac{1}{3+\frac{1}{0.35}}}$$

$$R_{\text{manifold}}=0.0044\text{m}=4.4\text{mm}$$

相似的，喷嘴的最大压力降分配为

$$\Delta p_{\text{nozzle}}=30\times\frac{108}{316}\text{MPa}=10.3\text{MPa}$$

给定喷嘴压力降，喷嘴孔径由方程（6.8）计算为

$$R_{\text{nozzle}}=\left[\left(\frac{2\times 17\ 000\times 0.108}{10.3\times 10^{6}}\right)^{\frac{1}{0.35}}\times\frac{\left(3+\frac{1}{0.35}\right)\times 62.5\times 10^{-6}}{\pi}\right]^{\frac{1}{3+\frac{1}{0.35}}}$$

$$R_{\text{nozzle}}=0.0044\text{m}=4.4\text{mm}$$

通常歧管和喷嘴的直径相同，因为①两个流道部分有相同的熔体流量；②根据方程（6.9）每单位长度有目的性地设有相同的压力降。这种热流道系统的体积为35cm^3，压力降为30MPa，与先前的设计（体积为37cm^3 和压力降为31.4MPa）相比，二者均减小约5%。与此同时，通过保持歧管和喷嘴的流道直径，可以维持更一致的剪切应力，产生死点的可能性更低。

为了进一步减小流道系统体积，有必要指定更小的流道系统直径。这种做法将导致流道系统更大的压力降，除非假定更高的熔体温度、更低黏度的材料或者更低的流量。如果指定穿过流道系统的压力降为50MPa，那么可以应用以上的分析获得以下结果：

$R_{\text{sprue}}=4\text{mm}$

$R_{\text{manifold}}=R_{\text{nozzle}}=3.5\text{mm}$

$V_{\text{total}}=21.3\text{cm}^3$

模具设计者可以重复分析来计算不同压力降时流道系统的体积。图6.19给出了流道系统体积与压力降和流量的函数关系曲线。为了得到低的压力降，有必要设置大的流道直径，其会导致流道系统体积更大。随着允许压力降增大到100MPa，流道系统体积急剧下降，体积为10cm^3 的流道仍必须传递流量为125cm^3/s 的熔体。

在流道系统优化设计中，模具设计者需要了解填充阶段的流量和预期压力降。图6.19所示说明在填充阶段，流道系统设计将会随着体积流量的变化而如何变化。较低的流量会引起较低的压力降，同时也使流道系统的半径和体积减小。因为，模具设计和加工之后，工艺工程师决定实际的流量，所以，工艺工程师应该确定预测的型腔填充时间和计算整个流道系统预期的流量。如果流量不确定，那么模具设计者可以通过方程（5.23）估算型腔内的熔体速度，并假定整个填充阶段的流量是恒定的。

6.4.6 平衡流量

前文的分析和例子说明了自然平衡的分支流道系统。对于多型腔和多浇口零件，也可以在人工平衡流道系统中使用前文的分析方法。在这些成型中，流道系统的每一分支具有不同的流量和压力降。

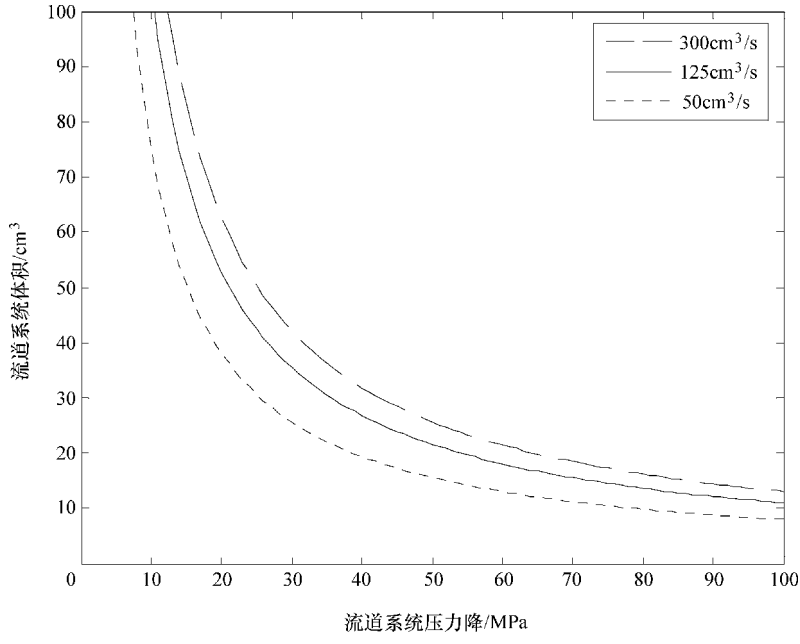


图 6.19　流道系统体积与压力降和流量的函数关系

在有复杂型腔几何体的模具中，为了合理平衡模具中的流量和熔体压力，必须确保聚合物熔体在几乎同一时间完成模具每一部分的填充。这样的话，分析的第一步是计算每一型腔预期的体积流量，或者对于多浇口零件来说计算型腔每一部分的预期体积流量。假定这个流量，然后估算每一浇口的填充压力。知道型腔压力后，就可分配流道系统每一部分的压力降，并且可应用前文所述的分析进行流道系统优化设计和获得预期的型腔压力和流量。

虽然这个分析方法非常简单，但是它不能解释流道系统本身填充时间的差异。因为与冷流道模具型腔相比此时流道系统的体积很小，并且对于热流道模具来说，流道系统已经完成填充，因此经常忽略这个差异。即使如此，应该评估流道系统和模具每一分支的总填充时间和压力来确保真正的平衡设计，需要多重迭代获得合理设计。

模具设计者应该认识到真正的最佳平衡模具设计是极难得到的。因为聚合物熔体是非牛顿流体的并且剪切速率随着流道直径和流量的变化而变化，流道系统的非平衡性是材料特性和工艺条件的函数。进一步讲，不能保证设计的流道系统在填充阶段能平衡流量，但能在保压阶段平衡保压压力。这样的话，模具设计者应该通过确保模具型腔设计的一致性来尽量减少流道系统所需的平衡量，并且注意静态流道系统几何构型性能是有限制的。

例：人工平衡的两板式杯体和杯盖的多腔模具流道系统，假定 ABS 在中等熔体温度和型腔填充时间为 1s 时成型。

首先，估算填充杯体和杯盖型腔需要的压力。对于 1s 的填充时间来说，从杯体型腔浇口到型腔对面（参考图 6.5）的流动长度约为 175mm（等于底部直径加上 2 倍的侧

壁高度）。熔体平均速度将为 175mm/s（等于流动长度除以填充时间），对应流量为 44cm³/s（等于模具型腔体积除以填充时间）。对于 ABS 使用幂律模型，填充杯体型腔需要的压力为

$$\Delta p_{\text{cup}} = \frac{2 \times 17\ 000 \times 0.09}{0.003} \times \left[\frac{2 \times \left(1 + \frac{1}{0.35}\right) \times 0.09}{0.003} \right]^{0.35} \text{Pa} = 16.8\text{MPa}$$

杯盖比杯体浅，所以杯盖的流动长度约为 109mm，假定填充时间同样为 1s，杯盖的熔体速度为 109mm/s，体积流量为 19cm³/s。填充杯盖型腔需要的压力为

$$\Delta p_{\text{lid}} = \frac{2 \times 17\ 000 \times 0.055}{0.002} \times \left[\frac{2 \times \left(1 + \frac{1}{0.35}\right) \times 0.055}{0.003} \right]^{0.35} \text{Pa} = 15.4\text{MPa}$$

这两个填充压力非常相近。然而，流量相差很大。为了获得不同的量，必须设计一级分流道直径来限制熔体流入杯盖型腔。第一个设计可以通过应用方程（6.7）对流道系统的每一分支使用不同的压力降和流量获得。因为填充压力很低，所以假定流入杯体型腔的整个一级分流道的压力降为 30MPa，体积流量为 44cm³/s。流入杯体型腔的流道长度为 38mm，可得半径为

$$R_{\text{runner_to_cup}} = \left[\left(\frac{2 \times 17\ 000 \times 0.038}{30 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{0.35}} \times \frac{\left(3 + \frac{1}{0.35}\right) \times 44 \times 10^{-6}}{\pi} \right]^{\frac{1}{3 + \frac{1}{0.35}}}$$

$$R_{\text{runner_to_cup}} = 0.0015\text{m} = 1.5\text{mm}$$

用同样的方法可计算得到流入杯盖型腔的一级分流道半径，但是压力降和流量不同。对于杯体的分支来说，从杯体型腔边缘到浇口套底部的压力降是 46.8MPa。这样的话，为了确保相同的总压力降，穿过杯盖型腔一级分流道的压力降将设计为 31.4MPa。需要的体积流量为 19cm³/s。流入杯盖型腔的流道半径为

$$R_{\text{runner_to_lid}} = \left[\left(\frac{2 \times 17\ 000 \times 0.038}{31.4 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{0.35}} \times \frac{\left(3 + \frac{1}{0.35}\right) \times 19 \times 10^{-6}}{\pi} \right]^{\frac{1}{3 + \frac{1}{0.35}}}$$

$$R_{\text{runner_to_lid}} = 0.00126\text{m} \approx 1.25\text{mm}$$

下一步，有必要检查通过流道系统两种分支的填充时间。流入杯体和杯盖型腔的一级分流道的体积为 0.3cm³。因为体积很小，所以填充时间为 0.01s。流道填充时间上的任何差异都不会很大程度地影响两模具型腔的填充。

为了完成设计，可以使用方程（6.7）指定主流道直径。主流道的合理压力降可估算为 20MPa。由于质量守恒，要求主流道的流量等于一级分流道的流量之和，共 63cm³/s。主流道长度为 76mm，则主流道半径计算为

$$R_{\text{sprue}} = \left[\left(\frac{2 \times 17\ 000 \times 0.076}{20 \times 10^6} \right)^{\frac{1}{0.35}} \times \frac{\left(3 + \frac{1}{0.35}\right) \times 63 \times 10^{-6}}{\pi} \right]^{\frac{1}{3 + \frac{1}{0.35}}}$$

$$R_{\text{sprue}} = 0.0027\text{m} = 2.7\text{mm}$$

最后，冷流道系统的体积与成型制品的体积相比有

$$p_{\text{regrind}} = \frac{V_{\text{sprue}} + V_{\text{runner_to_cup}} + V_{\text{runner_to_lid}}}{V_{\text{cup}} + V_{\text{lid}}}$$
$$= \frac{1.7 + 0.26 + 0.2}{44 + 19} = 3.5\%$$

其百分比相当低。收集、粉碎和再利用材料的耗费可能会超过购买树脂的费用。然而，应该注意的是，对于三板式模具（图 6.7）或有多型腔的两板式模具（图 6.6），与冷流道系统相关的废料会大幅度增加。模具设计者可以通过流道系统较高的压力降来减小这个百分比，如果需要高产量，模具设计者可向模具终端用户推荐热流道系统来减少树脂耗费。

6.4.7　预测流道冷却时间

对于冷流道模具设计，模具设计者应该估算冷流道凝固需要的时间和型腔凝固需要的时间。第 9 章中讨论了通过一维传热分析来估算凝固时间。表 6.3 给出了长方体和圆柱形几何体的冷却时间方程，其中 h 是型腔壁厚；D 是流道系统某一部分的直径；T_e 是具体的推出温度［通常取受载变形温度（DTUL）］；T_c 是冷却液温度；T_{melt} 是熔体温度。

在成型过程中，冷却时间是由冷却时间最长的一部分决定的。由于这个原因，没有必要计算流道系统每一部分的冷却时间和每一模具型腔的厚度。模具设计者能简单地检测模具型腔最厚部分的冷却时间和流道系统最大直径（通常是主流道底部直径）。如果流道系统冷却时间很大程度地超过模具型腔的冷却时间，那么为了避免延长成型循环时间，模具设计者应该重新设计流道系统。

表 6.3　估算冷却时间的方程

几何体	冷却时间
长方体几何体	$t_c = \frac{h^2}{\pi^2 a}\ln\left(\frac{4}{\pi}\frac{T_{\text{melt}} - T_c}{T_e - T_c}\right)$
圆柱形几何体	$t_c = \frac{D^2}{23.1a}\ln\left(0.692\frac{T_{\text{melt}} - T_c}{T_e - T_c}\right)$

例：验证杯体和杯盖的多腔流道系统设计不会延长循环时间。假定材料是 ABS，熔体温度、冷却液温度和推出温度分别是 239℃、60℃和 96.7℃。

成型循环的冷却时间是由 3mm 杯体的冷却时间或直径为 5.4mm 主流道的冷却时间决定的。这些时间估算为

$$t_c^{\text{cup}} = \frac{0.003^2}{(8.69\times10^{-8}\pi^2)}\ln\left(\frac{4}{\pi}\times\frac{239-60}{97.6-60}\right)\text{s} = 18.9\text{s}$$

$$t_c^{\text{sprue}} = \frac{0.0054^2}{23.1\times8.69\times10^{-8}}\ln\left(0.692\times\frac{239-60}{97.6-60}\right)\text{s} = 26.7\text{s}$$

这个分析说明两个冷却时间很相近，但是主流道的凝固会延长循环时间。流道系统不需要和注射成型零件一样严格。如果模具在主流道凝固程度足够之前打开，那么流道系统很难推出，这是因为主流道已经粘到模具 A 侧或者因为流道系统极软。为了避免

这个问题，可以减小主流道直径，即使会有较高的压力降。

6.4.8　预测滞留时间

对于热流道模具设计，模具设计者应该检测聚合物熔体在热流道中的滞留时间从而确保塑料不会降解。滞留时间和热流道系统中聚合物熔体的更迭次数有直接关系，更迭次数定义为

$$n_{\text{turns}} = \frac{V_{\text{hot_runner}}}{V_{\text{cavities}}} \tag{6.10}$$

如果与模具型腔体积相比，热流道体积很大，那么需要很多成型循环才能使新材料通过流道系统。更迭次数不代表清除热流道中旧树脂所需的成型循环的真实次数，而是大量新树脂传递到模具型腔之前的成型循环的最小次数。

对于树脂的颜色会频繁变化的成型应用，更迭次数多是不理想的。为了有利于颜色频繁的变化，模具设计者应该优化流道系统直径和保持更迭次数最小。如果更迭次数小于或接近 1，那么相对于清洗注射成型机注射单元相关的颜色变化问题，热流道系统不会对颜色变化起到负面影响。如果更迭次数很大，级别为 10 或更多，那么清洗热流道可能就变成一个非常重要的问题，需要数百（或数千）的成型循环来完全清除低黏度树脂。

对于采用许用滞留时间短的树脂的成型应用来说，大的更迭次数也是不理想的。材料在热流道系统中的滞留时间约为

$$t_{\text{residence}} = (1 + n_{\text{turns}})\, t_{\text{cycle}} \tag{6.11}$$

因为材料以不同的速率流过热流道系统，所以滞留时间是个大约值；与方程（6.11）预测的滞留时间相比，靠近热流道壁面和死角处的聚合物熔体有更长的滞留时间。进一步讲，模具设计者应该谨记进入热流道系统的材料已经存在于注射成型机滚筒中很长时间了。因此，模具设计者应该尽量使更迭次数最小化来缩短聚合物熔体的滞留时间和减少潜在降解。

例：计算 6.4.5 节设计的热流道的更迭次数和滞留时间。

许可压力降为 50MPa 时设计的热流道系统的体积是 21.3cm^3。因为笔记本电脑边框型腔的体积是 27.5cm^3，所以更迭次数为

$$n_{\text{turns}} = \frac{21.3}{27.5} = 0.77$$

更迭次数值非常小。随着每一次循环的进行，新材料将会通过热流道系统进入模具型腔系统。在 3.4.3 节中，循环时间预测为 13.5s。因此热流道系统中的滞留时间预测为

$$t_{\text{residence}} = (1 + 0.77) \times 13.5\text{s} = 24\text{s}$$

大多数聚合物的许用滞留时间通常比 15min 长，相比之下，这个滞留时间非常短。

6.5　实际问题

虽然本章已经讨论了流道系统的设计目的、类型和分析，但是在完成流道系统设计

之前，模具设计者应该考虑到以下一些实际问题。

6.5.1　流道横截面

前面的分析将流道横截面形状局限为整圆形，因为在模具设计中这种流道极其普遍，并且这种流道分析很简单。然而，在实际中为了方便流道的机加工，其他流道横截面也非常普遍。特别地，经常将梯形、圆底梯形和半圆形流道仅加工在动模一侧，如图 6.20 所示。这种模具设计不仅可减少加工量，而且可减少设计时间和降低加工难度或者减少整圆两侧面中心线不重合的误差。

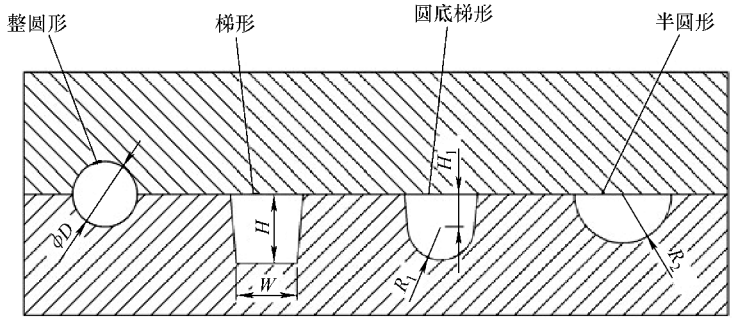


图 6.20　常见流道横截面

这些非圆形流道的主要缺点是，沿着横截面周边产生了非圆形剪切速率和剪切应力。例如，梯形流道容易加工，但是其四角附近的区域沿着流道长度方向的流动非常微弱。可以通过将两个底角倒圆来改善梯形流道的性能。然而，所有这些非圆形流道均需要稍大一些并需要消耗额外的材料来提供和整圆形流道相同的压力降。

前文所述的分析适用于非圆形流道截面，虽然结果不如整圆形截面流道得到的结果那样精确。每一类型的流道形状的水力直径 D_h 计算为

$$D_h = \frac{4A_{section}}{p_{section}} \tag{6.12}$$

式中，$A_{section}$ 是流道的横截面面积；$p_{section}$ 是流道横截面的周长。

为了便于参考，表 6.3 给出了图 6.20 所示的不同截面的具体尺寸和水力直径之间关系的方程。应该注意到的是表 6.3 中各方程是假定脱模斜度为 5°导出的，该角度有利于从模具中推出流道系统。这个假设减少了设计变量的数量。表 6.4 列出的各截面的效率为

$$\text{效率} = \frac{\dfrac{\pi D_h^2}{4}}{A_{section}} \tag{6.13}$$

表 6.4　不同流道截面的水力直径

流道截面（效率）	方　　程
整圆形（100%）	$D_h = \dfrac{4\pi D^2/4}{\pi D} = D$

（续）

流道截面（效率）	方　　程
梯形（78.5%）	$D_h = \dfrac{4WH + 0.09H^2}{2W + 2.01H}$ $R_1 = H_1$ 时，$D_h \approx 2R_1$
圆底梯形（87.9%）	$D_h = \dfrac{4(1.57R_1^2 + 2R_1H_1 + 0.09H_1^2)}{5.14R_1 + 2.087H_1}$ $R_1 = H_1$ 时，$D_h \approx 2R_1$
半圆形（61.2%）	$D_h = \dfrac{0.5\pi R_2^2}{(2+\pi)R_2} = 0.306R_2$

结果表明，整圆形截面流道是效率最高的截面设计，依次是圆底梯形截面、梯形截面和半圆形截面。

例：图 6.7 中三板式模具的一级分流道具有梯形截面。计算穿过长为 120mm、宽为 6mm、深为 8mm 和脱模斜度为 5°的一级分流道的压力降。假定材料为 ABS，流量为 $44cm^3/s$。

首先，水力直径计算为

$$D_h = \frac{4\times6\times8 + 0.09\times8^2}{2\times6 + 2.01\times8}mm = 7.04mm$$

然后，把梯形流道当做圆形流道，利用幂律模型，使用水力直径，计算压力降为

$$\Delta p_{runner} = \frac{2\times17\ 000\times0.12}{0.007\ 04}\left[\frac{\left(3+\frac{1}{0.35}\right)\times44\times10^{-6}}{0.00704^3\pi}\right]^{0.35}Pa = 3.9MPa$$

这个梯形流道的尺寸很大，虽然产生的压力降非常低，但是会消耗过量材料，并且会延长循环时间。应该减小流道深度和宽度。

在热流道系统中，还有另一种流道截面很常见：环形截面。特别地，很多热流道沿着喷嘴长度方向配备阀门来物理地切断浇口，这将在 7.2.9 节讨论。在这个设计中，聚合物熔体在圆柱喷嘴和圆柱阀门之间流动，形成图 6.21 所示的环形。

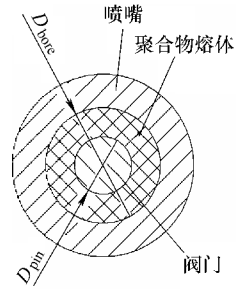


图 6.21　阀式浇口热流道模具的环形截面

可以利用适用于方形流道的黏性流动方程来精确地逼近聚合物熔体流过环形截面的流动。矩形流道的宽度可以通过用环形熔体的平均直径得到的周长来代替，而矩形的厚度可以用阀口和喷嘴孔间的距离代替。在方程（5.17）中进行这些代换，得到环形截面中压力降和流量之间的关系

$$\Delta p = \frac{12\mu L\dot{V}}{0.5\pi(D_{\text{pin}} + D_{\text{bore}})[0.5(D_{\text{bore}} - D_{\text{pin}})]^3} \tag{6.14}$$

式中，D_{pin}是阀口的直径，D_{bore}是喷嘴孔的直径。

幂律模型环形截面的压力降可以简单推导为

$$\Delta p = \frac{2kL}{0.5\pi(D_{\text{bore}} - D_{\text{pin}})}\left[\frac{2(2+\frac{1}{n})\dot{V}}{0.5\pi(D_{\text{bore}} - D_{\text{pin}})[0.5(D_{\text{bore}} - D_{\text{pin}})]^2}\right] \tag{6.15}$$

例：计算穿过长为 150mm、孔径为 10mm 和阀口直径为 5mm 的阀式浇口喷嘴的压力降。假定材料黏度为 100Pa·s，流量为 50cm^3/s。

将这些值代入方程（6.14），压力降估算为

$$\Delta p = \frac{12\times100\times0.15\times50\times10^{-6}}{0.5\pi(0.005+0.010)\times[0.5\times(0.010-0.005)]^3}\text{Pa} = 24.5\text{MPa}$$

6.5.2　拉料杆

如图 6.8 所示，三板式模具设计经常使用拉料杆来保证开模过程中冷流道系统与卸料板不分离。在这个例子中，需要使用拉料杆来沿着主流道提供足够的拉力，以产生足够的拉伸应力来破坏主流道和成型件之间的浇口。如果没有拉料杆，冷流道系统将沿着型腔板移动，并且很难除去，因为：

- 浇口仍附在上面。
- A 板上没有机构来推出流道系统[㊀]。

相似的，在两板式模具设计过程中，模具设计者也应该考虑到拉料杆的必要性。首先关心的是，由于真空吸附到 A 板表面或者塑料熔体凝固在主流道顶部的机器喷嘴处，冷流道系统可能会粘附到 A 侧模具上。如果冷流道系统在定模一侧并且所有的推出机构都在动模一侧，那么流道系统不能自动推出。机器操作者将有可能需要暂停机器，人工清除流道系统。进一步讲，如果机器进行自动循环操作，那么流道系统仍在模具中时，成型机器就有可能尝试关闭模具。

为了避免这些问题和提高成型操作的可靠性，可以沿着流道系统在多个位置设置拉料杆。最重要的拉料杆位于主流道底部，如图 6.4 所示，其最有效的作用是用来从机器喷嘴处卸去主流道并且在动模一侧固定主流道。这个设计中，主流道底部的倒锥形产生一个侧向凹陷，它的作用是可固定主流道。随后在主流道推出销的作用下，侧向凹陷被剪切掉。可以沿着冷流道系统在不同的位置设置拉料杆，并且如果需要的话也要在模具型腔中设置。如图 6.22 所示，D_{sucher}的设计和拉料杆的设计非常相似。在这个设计中，为了避免冷却时间的延长，拉料杆的推荐直径比相关流道直径略小。拉料杆的高度和锥角应该足够保证将流道系统拉离定模一侧，而且不会过量地费用材料，或引起相关推出销向前驱动时的失稳。典型高度和锥角分别是流道直径的一半和 5°。

图 6.22 左侧所示的实施方案值得简要讨论。在这个方案中，推出之前，推出销被

㊀ 一种不同的三板式模具设计可以利用装配在 A 板上的卸料板，沿着前固定板方向推出冷流道系统。然而，这样需要对图 6.8 所示的设计进行很大的改变。

设置在流道下面，并且用倒锥形固定流道。与右侧的实施方案相比较，开槽推杆的使用会使加工更简单，维修更容易。然而，这里有两个普遍的问题，第一，推杆轻微地凸入流道截面。虽然这个凸出不会严重地改变穿过流道的流量和压力降，但是它会引起流动前沿的不良分布或不稳定。由于这个原因，更偏向于将推杆顶部设置于流道底部。第二，如果用多重开槽推杆固定和推出流道系统，那么模具设计者应该考虑到凹槽的相对定位，这将在 11.2.6 节中讨论。如果凹槽的定位不受控制并且呈随机角度，那么流道系统在推出时可以以随机方式黏附在拉料杆上，从而阻止了全自动循环功能的应用。

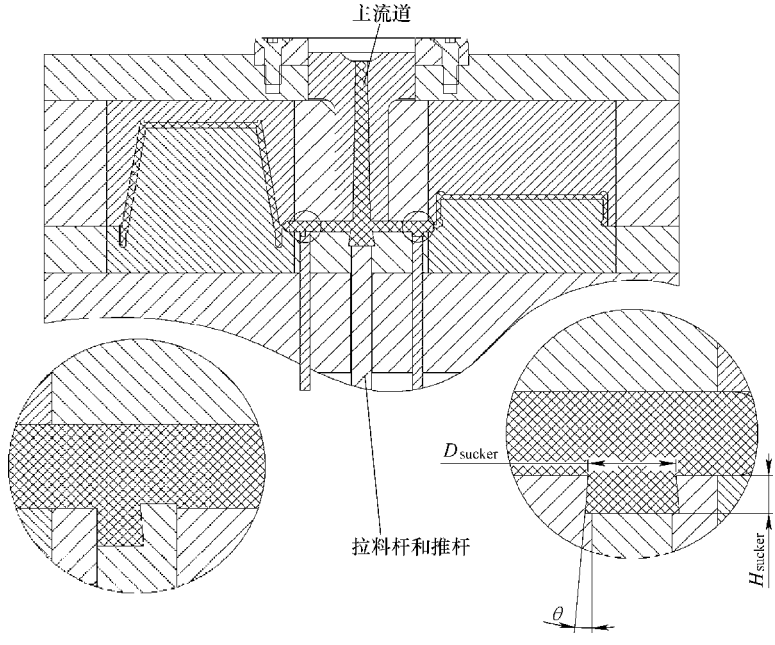


图 6.22　冷流道系统的两个拉料杆设计

6.5.3　流道开关

为了提高工艺工程师制造的灵活性，模具设计者应该考虑到使用流道开关。流道开关的普遍使用包括：

- 对于已损坏的模具，暂时关闭流动，直到进行修复。
- 为满足生产要求，选择不同的模具型腔组合成型不同的产品。
- 改变多浇口制品中的浇口和流动。

这样的话，工艺工程师可以使用流道开关来避免成型缺陷或不良产品，也能在不修模[⊖]的情况下，提高多浇口零件的质量。

⊖ 使用流道开关暂时性地封闭已损坏型腔是争议的，因为①要求注射成型机工艺条件的改变（特别是注射容积和注射速度）；②会不平衡或改变型腔间的流动和热传递。在工业生产中对于高精度的成型应用，不应该使用型腔开关，除非工艺工程师重新设定新腔结构的成型工艺。

图 6.23 所示为流道开关设计的正等轴测装配图。这个设计中，旋转圆筒形镶件 50 位于外缸 40 和限位件 60 在之间，限位件 60 装入模板上的一个圆柱形槽内。圆筒形镶件 50 可以很容易地用黄铜扳手旋动。可以使用弹簧装载的球镶入镶件背面的凹槽 54 来确保在随后的成型周期中镶件不会随意旋转。图 6.23 提供了 T 形分支流道，并且还可以产生更多的流道结构，最普遍的是 T 形、L 形和直线形。对于直径为 2 ~ 9.5mm 的流道，工业上用的开关约为 150 美元。

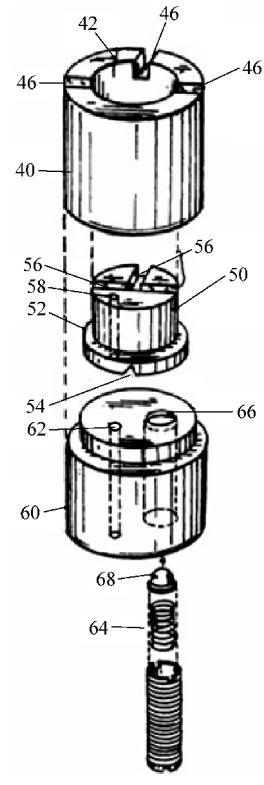


图 6.23　美国专利 5208053 所示的流道开关设计

6.5.4　标准流道尺寸

为冷流道模具设计流道系统时，模具设计者应该指定流道直径，该直径是用易得到的切割工具加工的。锥形、正方形和球头铣刀的最普遍的可用尺寸是 1/32 in（1in = 0.0254m）、1/16 in、1/8 in、3/16 in、1/4 in、5/16 in、3/8 in、7/16 in、1/2 in、2mm、3mm、4mm、4.5mm、5mm、6mm、8mm、10mm 和 12mm。

为了得到最易生产的冷流道设计，有必要把直径圆整到标准尺寸，并用分析方法验证所设计的流道系统性能。然而，如果非标准的尺寸提供更少的材料利用率和更平衡的熔体流动，那么可以并应该指定非标准流道直径。

同样的，热流道系统有一系列标准孔尺寸，通常以 2mm 递增。不同流道供应商的标准直径和设计不同。一些供应商提供的孔径为 5mm、7mm 和 9mm，而另一些供应商提供的孔径为 4mm、6mm、8mm 和 10mm。最具竞争力的供应商将进行流道系统的流动分析并对热流道技术和尺寸提供推荐值。然而，模具设计者应该验证推荐值的适用性。相对于用户定制冷流道直径的规格，很多热流道供应商将增加成本以提供定制尺寸。

6.5.5　保险设计

通常，流道系统的设计是不确定的。一个普遍的问题是注射成型机以流动特性未知的材料填充模具的能力，或者是平衡多型腔模具或复杂的多浇口模具所需的精确熔体流量和压力是不确定的。

在不确定的情况下，模具设计者应该指定流道系统尺寸，该尺寸是“保险”的，其意思是与最终要求相比，设计应该要求去除尽量少的钢材。这样的话，模具设计者希望流道系统向下圆整一个或两个标准尺寸。通过这种做法，模具设计者将得到比分析预测更大的压力降和利用更少材料的流道系统。在这种情况下，这个较小的流道系统仍有可能运行得很不错。进一步讲，如果流道系统需要一个或更多的变化，“保险设计”也就可能很容易地提高模具的性能。

例：如果分析说明冷流道的最佳直径是 4.6mm，给出建议的“保险设计”。

如果流道系统分析得到流道直径为 4.6mm，那么模具设计者可以指定直径为

4.5mm 或者甚至 4mm 作为保险设计。通过比较，如果模具设计者向上圆整到 5mm，那么在整个模具寿命期间，设计将提供更低的压力降但是会消耗掉更多的材料。进而，如果工艺工程师要减小 5mm 的直径，那么模具将需要更多的返工，包括旧流道系统的凹坑铣削、合适尺寸镶件的生产和安装、焊缝和/或紧固件的添加，最后提供新的、更小的流道系统。这个例子侧重的是冷流道的“保险设计”，“保险设计”的概念也应该应用到热流道设计上。

6.6 本章小结

在模具设计中，选择流道系统类型是最关键的决策，因为它决定模具的类型和很大程度上影响模具的购买和运作成本。两板式冷流道模具是最简单的设计，容易生产，并且对于型腔数量不多的模具是非常有效的。三板式模具和热流道模具设计提高了流道系统设计的灵活性，并更适合于更多型腔数量和/或浇口的情况。所以这些设计中，热流道模具可提供最低压力降、最高材料利用率和最短循环时间。然而，热流道系统要求高的前期投资、工艺工程师更多的技能，其不适合于少批量成型制品的生产。

为了提高材料的利用和降低压力降，所有的流道系统都应该使流道系统长度最小化。流道系统直径的优化设计要求权衡流道系统压力降和体积之间的关系。较小的直径可以消耗较少的材料，但是需要较高的压力降。如果整个流道的压力降太高，那么注射成型机在可达到的注射压力下，也许不能填充所有的模具型腔。因此，模具设计者应该进行适合于成型应用的分析，并且提供保险的流道系统设计，以使其在需要时可易于修改。

流道系统设计应尽可能采用放射式、分支式和混合式布局实现自然平衡。例如在多腔模具中或者复杂的多浇口零件中，可以使用不同的直径来有目的地在整个流道系统分支上施加不同的压力降和流量，以完成熔体流量的人工平衡。根据成型应用来看，开关可以设在流道系统的多重连接处来引导流入流道和模具型腔不同组合的流动。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 流道系统设计中考虑的因素包括熔体输送、压力降最小化、材料耗费最小化和熔体流量和/或压力平衡。
- 两板式、三板式和热流道模具设计的形式、功能、优点和缺点。
- 流道系统设计的不同布局，包括串联式、分支式、放射式、混合式和定制式设计。
- 在流道系统中如何使用牛顿模型和幂律模型分析压力降。
- 为了减少材料耗费，在不产生过量压力降的前提下，如何优化流道系统直径。
- 在多浇口或者多型腔模具中，如何人工平衡熔体流量。
- 如何估算冷流道的冷却时间。
- 在热流道中如何估算滞留时间。
- 在有非圆形横截面的流道系统中，如何计算选择流道横截面，计算水力直径和估

算压力降。

- 在两板式和三板式模具设计中，如何使用拉料杆。
- 何时且如何使用流道开关。
- 为了提供标准而保险的流道系统设计，如何调整分析结果。

第 5 章侧重填充分析和模具型腔设计。本章侧重流道系统填充和设计。下一章通过浇口设计和分析将流道系统和模具型腔联系起来。本书是按照从模具浇注系统到模具其他分系统的顺序编排的，例如排气系统、冷却系统、注射系统和其他系统。

第 7 章　浇 口 设 计

浇口的主要作用是连接流道和型腔，并将聚合物熔体引入型腔。浇口有多种不同类型，其中最常见的类型是侧浇口和点浇口。回顾 3.3 节成本估算部分，虽然浇口占整个模具成本比例很小，但对模具的运作至关重要。选择正确的浇口类型，设计合理的浇口尺寸，可极大地降低模具返修的可能性。

7.1　浇口设计的目的

7.1.1　连接流道与型腔

浇口的首要作用就是连接流道和型腔，以便聚合物熔体能够充满型腔成型。虽然作用简单，但通过调整浇口的位置和尺寸可使聚合物熔体更合理地流动。

7.1.2　提供自断浇口

为了更经济地利用注射模具，浇口和流道应在推出时自动与模具脱离。否则，操作人员需要用刀具将成型制品上的浇口及流道把去掉，这样明显增加了操作工的劳动成本。此外，操作人员切断注射成型制品浇口的操作还会延长成型周期并诱发制品缺陷。

现有三种提供自断浇口的常见方法。第一种，利用开模动作使浇注系统与注射成型制品分离。该方法普遍用于采用潜伏式浇口的两板式模具及采用点浇口的三板式模具。第二种，利用带热浇口或阀式浇口的热流道完全消除对切断浇口的需要。第三种，利用带刀具的机器人自动切断浇口并放置注射成型制品。如果采用第三种方法，模具设计者应探讨不同类型的浇口及位置，以方便机器人取出制品并切断浇口。

7.1.3　提供美观的断浇口

因为浇口与制品连在一起，所以移除浇口将在注射成型制品表面留下可见的痕迹。为了使浇口痕迹不明显，一个常用的方法就是采用粗糙结构的小浇口（例如点浇口）。另一个方法就是将浇口的位置设在不可见的表面，例如设在侧壁下面而非侧壁壁面上。如图 7.1 所示，重新设置浇口位置，将其设在不影响美观的表面。应该注意的是，不管怎样都需要小心切除浇口，因为较大的浇口痕迹可能会影响制品装配表面的配合。

7.1.4　避免额外的剪切或压力降

出于制品美观性及断浇口的考虑，都希望浇口尺寸较小，但考虑到聚合物熔体的流动情况，小浇口会产生额外的剪切和压力降，可能会产生以下问题：

- 材料降解。
- 非层流流动和熔体喷射到型腔内。
- 银纹和其他可见缺陷。
- 延长充模时间。

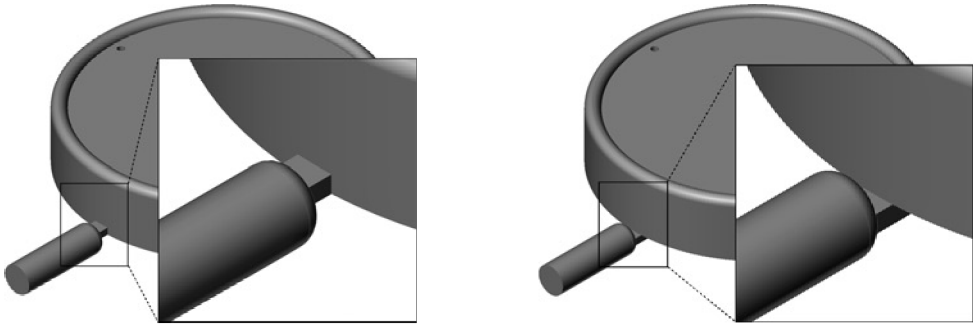


图 7.1　改善制品外观质量的浇口布置方式

- 短射。

基于以上原因，应该计算并且校验剪切速率，使其值不超过最大允许值。虽然附录 A 给出了一些材料的最大剪切速率，但模具设计人员应该与材料供应商讨论确定材料的具体应用数据。如果剪切速率在允许范围内，那么压力降通常也是可以接受的，不过模具设计人员还是应该计算压力降以防止过大。通过浇口的典型压力降一般为 2MPa（300psi），不会超过 6MPa（900psi），这取决于熔体充模时的有效压力。

7.1.5　控制保压时间

浇口的另一个重要作用就是控制熔体型腔充模的后填充时间（通常也称为保压时间）。当模具内充满聚合物熔体后，注射成型机保持较高的压力来使后续熔体进入型腔内以弥补型腔内熔体由于冷却而导致的收缩。实际上是浇口决定了型腔的保压时间。

浇口的设计不能太小或者太大。如果浇口尺寸太小，浇口内的熔体将过早凝固并阻止后续熔体充入型腔，使得型腔内的熔体产生过度的体积收缩，从而导致制品的尺寸精度及美观性能变差。相反，如果浇口尺寸过大，浇口内的熔体将不能及时凝固，从而延长注射成型机的保压时间。如果保压时间短，那么型腔内的熔体将从型腔返流回浇注系统和注射成型机，造成型腔内的熔体重新产生过度的体积收缩，从而导致制品的尺寸精度和美观性能变差。基于以上原因，应该计算浇口的理论最小保压时间并且校验，而不是预设工艺参数。如果保压时间过长或过短，即使剪切速率和压力降都在允许范围内，浇口的尺寸也必须进行调整。

7.2　常见浇口设计

下面将讨论最常见的浇口设计。应该提及的是还有许多其他类型的浇口，这些常见浇口的设计应满足模具应用的需要。

7.2.1　直浇口

直浇口是使熔体从主流道直接进入型腔的浇口，如图 7.2 所示。直浇口通常用在单型腔模具中，模具主流道直接与型腔表面相连。直浇口本身是主流道底部和型腔顶部的

接触面。由于直浇口没有长度，所以没有与之有关的压力降。为了检验剪切速率，应该采用主流道的最小直径。大多数主流道设计尺寸如果较大，压力降及剪切速率则相对较低，那么熔体进入型腔时流动速率就会较高。

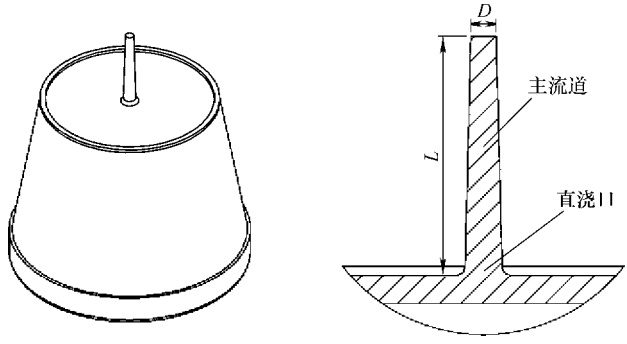


图 7.2　直浇口设计

直浇口一个显著的缺点是由于它的尺寸大而使得断浇口存在难度。操作人员在很多应用中都会用刀具手动切除主流道，尤其是主流道直径较大或采用刚性工程材料时，大多数应用则需要电动刀具。另外，直浇口的切除会在制品上留下较大的痕迹，会对制品的使用产生影响。在图 7.2 给出的设计中，沿杯子底部周长设计一小圈边缘凸起，从而使杯子在直浇口切除后也能放平。如果不想要这样的边缘凸起，可围绕直浇口设计一个凹槽，这样可为浇口痕迹提供空隙，如图 7.3 所示。

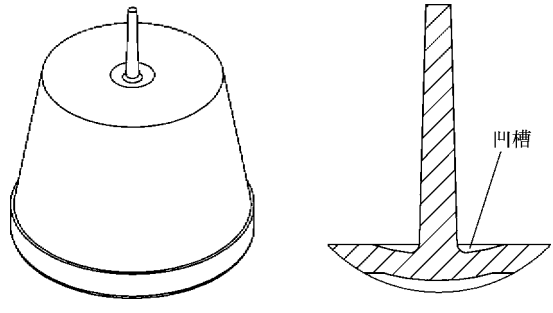


图 7.3　凹槽式直浇口设计

7.2.2　点浇口

点浇口是一种常见类型的浇口，通过一个小圆柱形开口将主流道或分流道与型腔相连接，如图 7.4 所示。由于尺寸小容易断浇口和减小痕迹，因此点浇口得到普通应用。它还常被用作带有倒锥形主流道的三板式模具的浇口，如 6.3.2 节所讨论的，这是由于点浇口尺寸较小，在开模时容易实现断浇口。点浇口常在两板式模具中用来连接流道和型腔侧壁。与其他类型浇口相比，熔体通过点浇口时会产生高的压力降和剪切速率。

点浇口的直径应该详细规定，不能太小以避免过大的剪切速率，也不能太大从而容易断浇口并提高制品的美观性。点浇口的长度通常与其直径接近，且长度只需能与模具

的加工性相匹配即可。合理设计点浇口需使型腔表面和浇口断裂点间呈倒锥形过渡，如图 7.4 所示。如图 7.3 所示，浇口中会设计一个凹槽，断浇口后可为浇口痕迹提供空隙。在浇口和主流道或分流道之间也应该设计平滑过渡区。

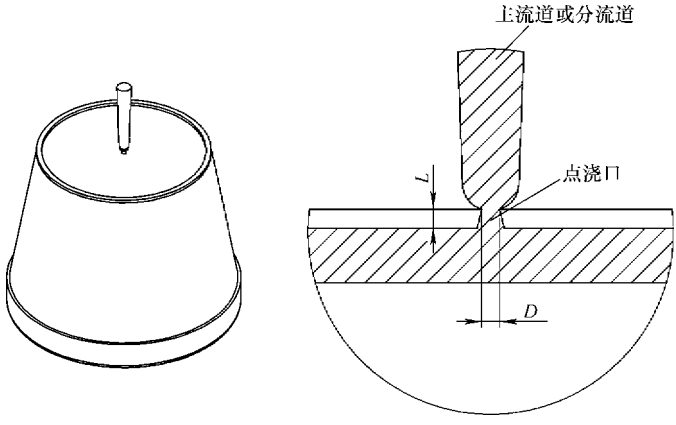


图 7.4　带有倒锥形主浇道的点浇口设计

7.2.3　侧浇口

侧浇口是一种非常普遍的浇口类型，常用于连接冷流道与型腔边缘。杯子侧浇口设计和改型设计都在之前讨论过，参看第 7.1 节。另一种侧浇口设计如图 7.5 所示。在这个设计中，侧浇口连接到屏幕支架的内侧。因为浇口位置处于笔记本电脑组件的内部，客户将看不到浇口切除后的任何残留痕迹。因此，侧浇口能够并且应该利用相邻壁面的整个厚度，并且不需要在框架底表面下设置浇口。

与点浇口相比，侧浇口极大地减小了剪切速率和压力降。模具设计人员可根据应用需要来选择厚度、长度及宽度值。通常侧浇口的厚度应小于模具壁厚，但如果考虑到剪切速率，则可能接近模具壁厚。浇口宽度应小于流道直径，但要足够宽以避免产生过大的剪切速率。侧浇口的长度应保持最小值，但是要足够长以为注射成型机操作者提供用刀具切断浇口的可进入长度。

7.2.4　搭接浇口

搭接浇口被认为是侧浇口的改型，在这种设计中，为了改善浇口，一个搭接被永久附加在成型制品上。例如，图 7.5 所示的侧浇口可能会存在问题，因为熔体从流道流入框架边缘较薄的部分时，在周围厚壁部分容易引起熔体过早凝结和过度体积收缩。为了改善流动，在型腔上附加搭接，筋条或其他结构，都是为得到如图 7.6 所示的浇口。在这种设计中，用一个厚度与制品名义厚度相当的筋来连接流道和内框架外较厚的制品部分。因为搭接浇口的厚度比框架薄处的厚度要大，所以上表面很可能出现下陷。但是这个问题并不重要，因为这个区域会在组装后被掩盖。

搭接浇口对降低成本和提高制品性能都有明显作用。关键是建立潜在的浇口区域，使加工余料不影响制品的功能及美观。一旦建立起这种浇口区域，模具设计人员就可选

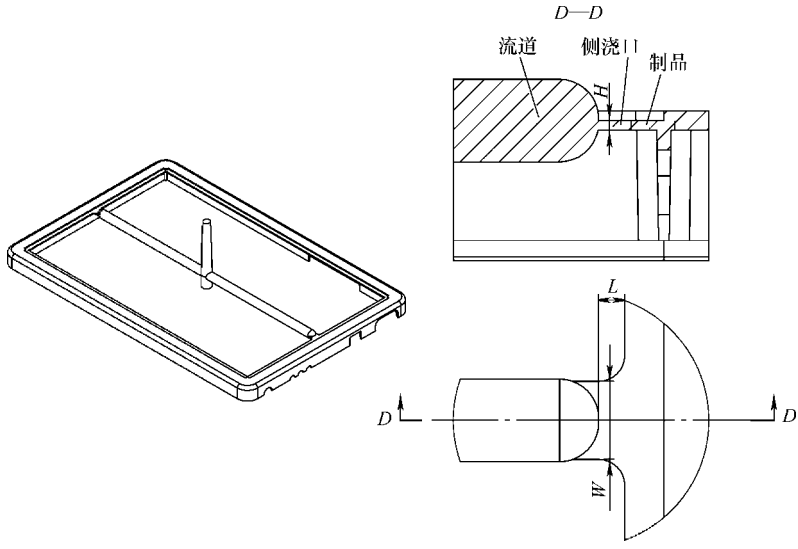


图 7.5　侧浇口设计

择适用的搭接几何结构和尺寸。

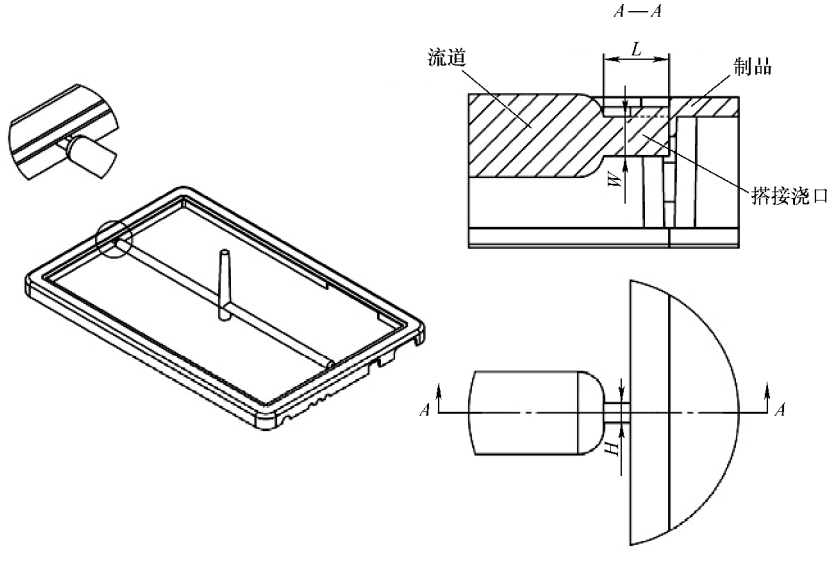


图 7.6　搭接浇口设计

7.2.5　扇形浇口

扇形浇口被认为是侧浇口的另外一种改型，扇形浇口的宽度超过了流道直径大小。扇形浇口的设计如图 7.7 所示。所选扇形浇口的宽度应能避免高体积流量熔体进入型腔时产生过大的剪切速率。绝大多数扇形浇口的宽度都比较大，因此浇注系统的切除都采用电动刀具，如往复锯或刨刨机。

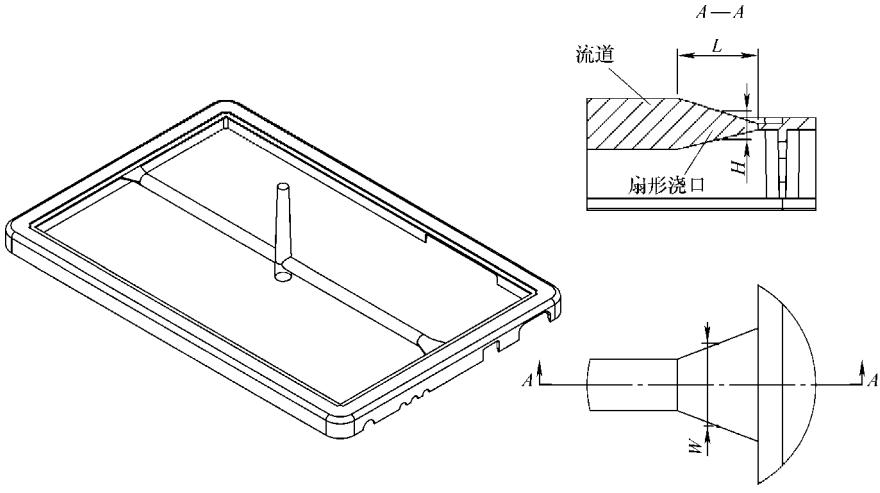


图 7.7　扇形浇口设计

扇形浇口的一个普遍用途就是提供从浇口出来的线形熔体流来取代前文介绍的浇口产生的径向流。图 7.8 所示为扇形浇口在注射成型薄板上的简单应用。为了使这种设计有效，需要满足两个标准。第一，为了满足线形熔体流的要求，扇形浇口的宽度要跨越注射成型制品的宽度。第二，必须忽略熔体流经过扇形浇口宽度时的阻力。扇形浇口可通过采用不同的尺寸来调整聚合物熔体通过浇口进入型腔的流体速率。典型的扇形浇口设计如图 7.8 所示，包括流道圆形截面和型腔矩形截面的倾斜部分。

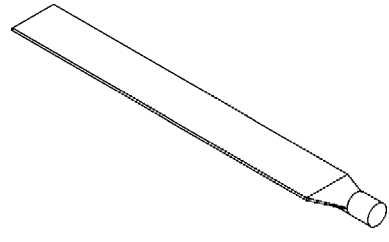


图 7.8　提供线形熔体流的扇形浇口设计

7.2.6　闸式/盘形浇口

选择扇形浇口时也可选择闸式浇口。闸门指的是熔体流过一个非常薄的截面。通常，闸式浇口包括一个厚的圆形截面，并与薄的矩形截面相连，如图 7.9 所示。成型时，熔体从流道进入厚的圆形截面。薄的相邻截面将使填充厚截面的熔体流速减缓并冷却甚至凝固。一旦熔体流到厚截面的末端，熔体压力将明显提高并迫使薄截面处几乎凝固的熔体重新流动。由于熔体通过薄截面的阻力要明显小于经过厚截面的阻力，因此通过闸式浇口流到型腔的熔体流动几乎呈线形。

闸式浇口的概念能扩展到图 7.10 所示的提供无熔接痕线形熔体流的圆柱几何体。在这种设计中，用一个固体厚导流盘将熔体从主流道输送到型腔内。更薄的浇口截面用来保证熔体均匀填充型腔，同时有利于从制品上去掉导流盘。虽然盘形浇口的形状是圆柱形，但将其近似为宽度等于盘形浇口圆周长度的条形浇口来进行分析也是正确的。

通常需要操作人员手动移除闸式浇口，不需要借助电动刀具。由于盘形浇口的特殊几何形状，需要用电动刀具或者压力机切断浇口。闸式浇口和盘形浇口切断后都会有痕

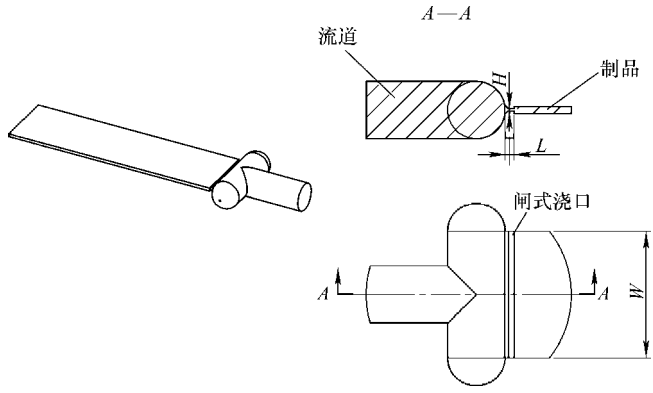


图 7.9 闸式浇口设计

迹，所以浇口的厚度越小越好。浇口尺寸和厚度变小可能会使熔体产生过高的剪切速率和压力降。然而，浇口宽度过大将导致熔体在高体积流量下的线性速率过小。因此，应合理设计浇口来提供合适的剪切速率和压力降。

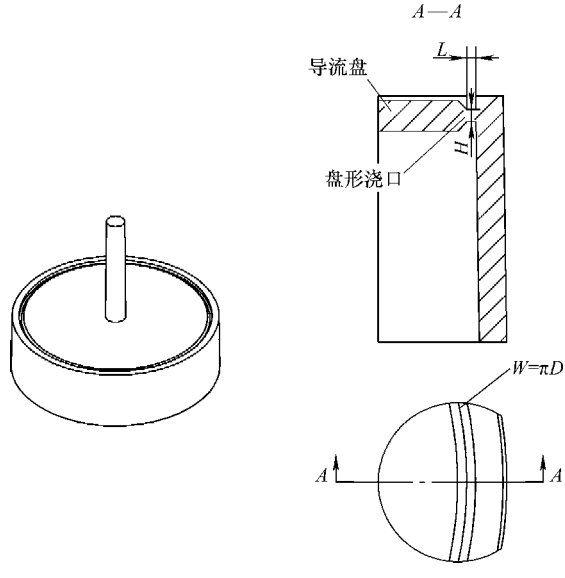


图 7.10 盘形浇口设计

7.2.7 隧道式/潜伏式浇口

除了点浇口被用于三板式模具的情况以外，所有前述的浇口设计中从成型制品上除去浇注系统都需要一些后成型系统（通常是人工的）。隧道式浇口是一种常见的浇口类型，被认为是点浇口的一种改型。它的主要优点是在简单的两板式模具中能够自断浇口。一个用于瓶盖成型的隧道式浇口设计如图 7.11 所示。与点浇口相比，隧道式浇口的改变之处在于美化了有拐角和锥度的部分。考虑到聚合物熔体的流动情况，这些不同

之处可以忽略。因此，隧道式浇口的尺寸设计应该与先前讨论的一样，要保证合适的剪切速率和压力降。

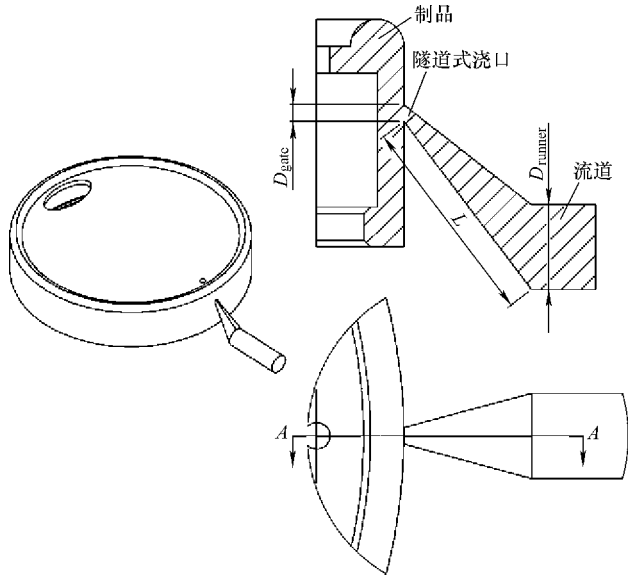


图 7.11　隧道式浇口

隧道式浇口看起来和点浇口很类似，但它们在结构和作用上有很大的区别。隧道式浇口的功能可以通过查看模具设计过程来理解。图 7.12 所示为一个带有隧道式浇口的闭合模具的剖视图，这种设计的关键作用在于隧道式浇口贯穿型腔镶件。如图 7.13 所示，当打开模具时，制品从型腔镶件中移出后仍带有隧道式浇口留在型芯上。同时，开模迫使流道的隧道部分暂时仍和型腔镶件在一起。型芯从型腔镶件中移出可使隧道式浇口与制品连接处受到破坏。

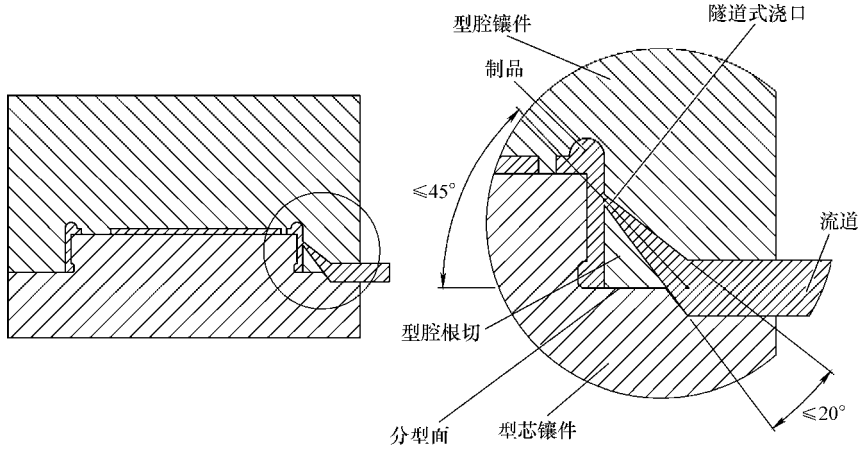


图 7.12　带有隧道式浇口的闭合模具剖视图

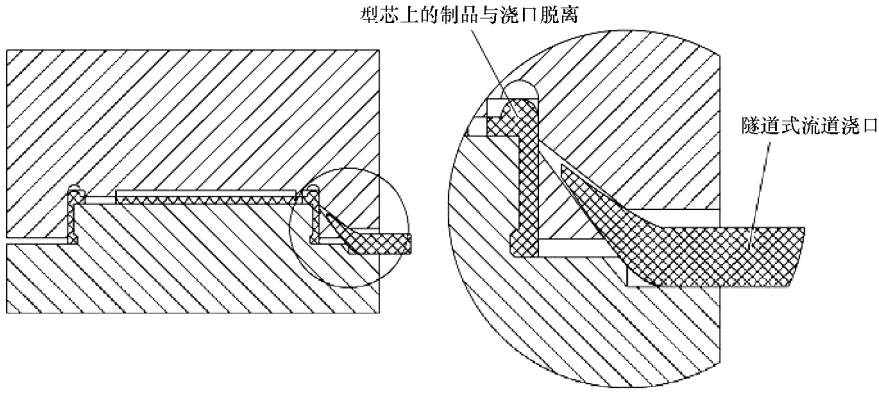


图 7.13　带有隧道式浇口的略打开模具的剖视图

应合理设计型腔上隧道式浇口的直径以避免过大的剪切速率和压力降。为了设计可靠的浇口，有两点需要特别注意。第一，浇口中心线和分型面之间应该保持名义 45°角，以保证剪切应力传输到浇口。第二，隧道式浇口应有至少 20°的锥度以确保浇口不会卡在模具里并且浇口能与成型制品断开。为了确保型腔根切结构的完整性，隧道式浇口应该设置在离分型面至少三个浇口直径的位置。

隧道式浇口的设计很巧妙，因为它很容易自断浇口而不需要其他投入。隧道式浇口在应用中存在的主要问题就是可能会由于设计不合理或者磨损导致流道系统不能从成型制品中彻底断浇。为了辅助隧道式浇口从成型制品上断浇，流道应该设计在拉料杆附近，如图 6.1 所示，以保持流道系统在型芯侧。如果隧道式浇口和流道系统保持在型腔侧，那么就不能通过脱模系统的动力来移除。

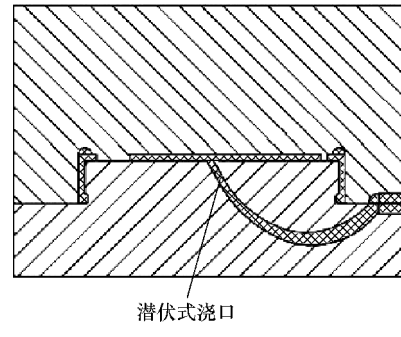


图 7.14　带有延伸潜伏式浇口的模具剖视图

这里有几种隧道式浇口的改型结构。潜伏式浇口是其中之一，就像隧道式浇口连进型腔镶件一样，在这种设计中将浇口连进型芯镶件。推出系统的驱动和型芯对制品的推出作用，能使制品与浇口断开并脱离浇注系统。当两种浇口都存在时，也可以延伸浇口并弯曲，在垂直型腔内壁面周围进浇到制品表面。这种延伸的潜伏式浇口设计，也称为“香蕉式”或者“腰果式”浇口，如图 7.14 所示，该设计对断浇的可靠性有一定的影响。

7.2.8　热浇口

如之前讨论，热流道浇注系统可减少对冷流道成型和冷却的需要。热流道浇口设计与冷流道浇口设计相比变化很大，但在剪切速率、压力降及美观等方面的目标是一致的。热流道中的热浇口设计需要提供固体塞，可在模具打开及近浇口固态塑料从制品上移除时，防止热流道中的塑料熔体流出浇口。

在热流道中，最常用的一种浇口类型就是鱼雷状热点浇口。这种设计如图 7.15 所示。浇口附近的喷嘴插入一个高导电的鱼雷状镶件。这个镶件的作用是传递从喷嘴到浇口的热量并保持塑料的熔融状态。典型的，在鱼雷状镶件中有三个或四个孔用于将浇注系统中的熔体引入型腔。残留的塑料熔体薄层可用来隔离热的鱼雷状镶件及冷的型腔壁。

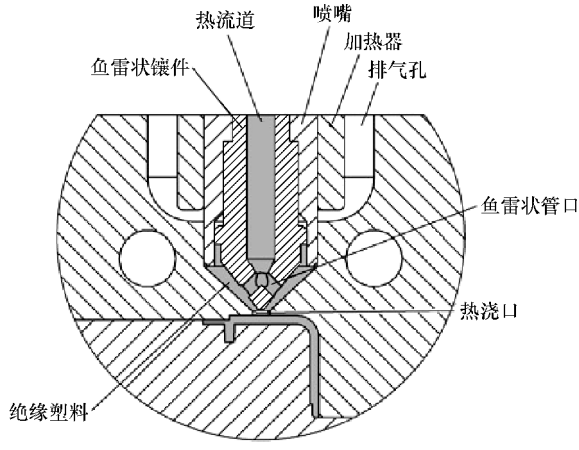


图 7.15　带有热点浇口的模具剖视图

在充模阶段，来自注射成型机的熔体压力会一直增大，直到鱼雷状镶件孔内的压力增大到可使镶件孔和浇口之间的固体塑料进入型腔内。熔体通过小孔进入型腔的过程类似于传统的冷流道浇注系统。当熔体停止流动时，传导到模具的热将使隔热塑料部分固化而鱼雷状镶件顶部的塑料则完全固化。当模具打开时，在鱼雷状镶件顶部，凝固塑料形成的环面将会被破坏。然而，余留的固体薄层仍可阻止熔体从热流道泄漏到周围环境中去。

热点浇口的设计很巧妙，其特点主要在于塑料减少热传递并形成固体密封。但是，它有两个明显的缺点。第一，点浇口是一种典型的小直径浇口。如同传统的冷流道点浇口一样，热浇口的直径和相关联的注孔必须被设计成能提供合适压力降和剪切速率的结构。因为小注孔的存在，这种浇口设计可能不适用于剪敏性或者难填充的材料。第二个缺点就是绝缘塑料的残留。注射时间过长，残留材料将降解并有被拉入熔流中的可能，造成塑料熔体的污染，最典型的例子就是成型制品中出现黑斑。当制品颜色出现变化时，残留材料的存在会引起严重问题，因为即使少量的残留材料也会使色带出现在后续制品上。㊀

㊀ 热浇口也可能出现第三个局限性。特别的是，固化层必须被迫从浇口形成，通过在成型周期开始时增大熔体压力来实现。熔体压力可能出现从浇口到浇口的轻微改变，这取决于浇口容许量、浇口装配和浇口温度分布状态。这在大多数成型应用中并不算问题，但是这些变化在精密成型应用中可能是有问题的。

热流道供应商一直在研究如何解决上述问题，但是收效不大。当注射成型颜色易改变、剪敏性或难填充的材料时，最好能够打开浇口流动孔以降低剪切速率。因此开发了热直浇口设计，如图 7.16 所示。在这种设计中，采用了一个与模具有较长接触面的喷嘴头，使得型腔处的浇口区域能很好地冷却，从而不需要塑料绝热层。塑料熔体通过在喷嘴到喷嘴头的流动能直接进入型腔。在熔体充模后，热浇口下的整个主流道就凝固了。喷嘴头上的合并 – 分散锥度设计显示出了主流道的断点，可产生一个薄固体层密封塑料熔体。

与热点浇口相比，热直浇口能提供开放式流动口用以降低剪切速率和压力降。由于剪切速率降低，热主流道更适用于剪敏性和难填充材料。由于它具有开放的流动口，在颜色或材料改变前，热主流道通常需要更短的成型周期。一个不明显但很重要的优点是它可以通过设计主流道的长度来调节筋板间隙或其他与浇注系统相对的型腔细节，并且能防止热点浇口直接浇注。热主流道也有个显著的缺点，由于主流道与制品一起成型，所以它仍将存在于制品上，作为废料需要通过人工或其他脱模系统脱离。

7.2.9　阀式浇口

热浇口不仅经济性好，而且可用于多数成型方法和材料，但采用点浇口和直浇口都有两个潜在的局限性。第一，它们都依靠一个塑料的固体层来阻止泄漏，但这个固体层在多变的环境中可能是不足够的。第二，热浇口会产生一个较大的熔接痕，这在很多应用中可能是不被接受的。为了解决热浇口的这些局限性，出现了机械驱动阀式浇口，其设计如图 7.17 所示。在操作时，阀针退回以提供型腔入口。在充模和保压之后，阀针提前封闭浇口。

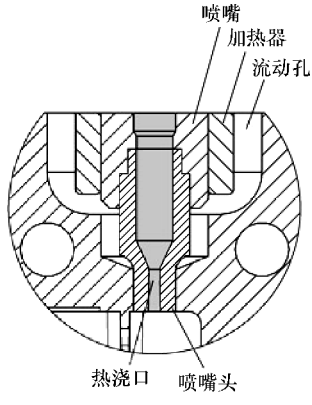


图 7.16　带有热直浇口的模具剖视图

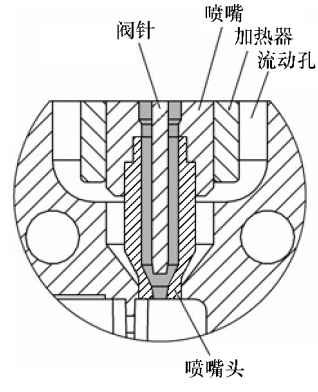


图 7.17　带有阀式浇口的模具剖视图

阀式浇口较其他浇口来说，有两个主要优点。第一，阀式浇口提供一个机械密封，其对于阻止熔体泄漏更有效。第二，当模具关闭时阀针正面作为型腔的切断表面，可在很大程度上减少浇口痕迹。不过，阀式浇口所用机械驱动系统增加了费用和模具的复杂程度。由于阀针的增加，驱动器、用于装驱动器而需要更大的前模固定板、软管、装备

和控制系统都使得成本增加。因此，带有阀式浇口的热流道系统其成本可能是带热浇口热流道系统的两倍。同样，操作的复杂程度也提高了，作为操作者必须正确连接软管和特定定时器以符合注射成型机上的工艺设定。

7.3　浇口设计步骤

7.3.1　确定浇口类型

设计浇口时，模具设计者必须先确定浇口类型。通常浇口类型比较容易确定。需要考虑的主要因素包括如下几个：流道系统的类型，期望的断浇方式，允许通过浇口的剪切速率和期望的流动结果。为了便于选择浇口，表 7.1 给出了不同类型浇口的特性。

以下的注解适用于表 7.1。第一，在多腔模具中通常用热流道系统，在这种系统中每个点可供给多个冷的分流道和相应的浇口以贯穿整个分型面。例如，一个 4 点热流道能与 4 个冷流道一同使用填充 16 个型腔，经济可靠。第二，断浇方式包括利用模具动作断浇，不考虑使用机器人自动断浇。第三，剪切速率不确定，因为它是浇口尺寸和工艺条件的函数。剪切速率可粗略分为低、中、高三级，分别约为 $10s^{-1}$、$40s^{-1}$ 和 $10^4 s^{-1}$。第四，多数浇口会导致熔体喷流出浇口，只有扇形、闸式和盘形浇口设计能使进入型腔的熔体呈线形流动。

表 7.1　浇口类型和特性

浇口类型	流道类型	断浇方式	剪切速率	流动结果
直浇口	冷流道	手动式	中等	放射式
点浇口	冷流道	自动式	高	放射式
侧浇口	冷流道	手动式	中等	放射式
搭接浇口	冷流道	手动式	中等	放射式
闸式/盘形浇口	冷流道	手动式	中等	线形
扇形浇口	冷流道	手动式	低	线形
隧道式/潜伏式浇口	冷流道	自动式	高	放射式
热点浇口	热流道	自动式	高	放射式
热流道式浇口	热流道	自动式	中等	放射式
阀式浇口	热流道	自动式	中等	放射式

7.3.2　计算剪切速率

剪切速率按照之前给出的在条状和圆柱状流道流动的方程计算。作为参考，牛顿公式和幂律公式在表 7.2 中给出。这些公式是基于体积流量建立的而不是熔体速度。原因是注射成型机对熔体流动的控制是有限制的，因此认为通过浇口的体积流量类似于流过

流道系统和型腔的流量。

表 7.2　剪切速率方程

几何体	牛顿型	幂律型
条状	$\dot{\gamma}=\frac{6\dot{V}}{Wh^2}$	$\dot{\gamma}=\frac{2(2+\frac{1}{n})\dot{V}}{Wh^2}$
圆柱状	$\dot{\gamma}=\frac{4\dot{V}}{\pi R^3}$	$\dot{\gamma}=\frac{(3+\frac{1}{n})\dot{V}}{\pi R^3}$

附录 A 给出了材料特性和针对一些材料推荐的最大剪切速率。最大剪切速率只是个大概值，因为大多数情况下这些值取自不同材料的通用准则。事实上，最大剪切速率值不只取决于最大剪切速率本身，还取决于聚合物熔体的整个受热历程和力学历程。很多情况下，可能出现的剪切速率比附录 A 中列出的最大值还要大。针对这种情况及增大浇口尺寸的灵活性，模具设计者可设计一个保险值，且有意采用一个较小浇口用于检验模具。出于避免产生过大的剪切速率和调节流速的考虑，还可以增大浇口尺寸。

模具设计者要计算剪切速率必须详细列出浇口的一些原始尺寸。对于厚壁浇口，有低剪切速率和中剪切速率（包括直浇口，侧浇口、搭接浇口、扇形浇口和阀式浇口），初始厚度可能设置为等于浇口处成型制品壁厚。对于薄壁浇口有中剪切速率和高剪切速率（包括点浇口、闸式浇口、盘形浇口、隧道式浇口、潜伏式浇口和热浇口），初始厚度可能设置为成型制品壁厚的一半。条状浇口也需要规定宽度。对于闸式浇口和盘形浇口，宽度应该设置为线形流的边缘长度。对于其他条状浇口，初始宽度可能设置为两倍的浇口厚度，可以根据需要扩大或缩小以调整剪切速率。

例：计算通过两个侧浇口进入仪表前盖模具型腔的剪切速率（图 7.5）。假设 ABS 在喷嘴处的体积流量为 $125cm^3/s$。

因为指定为侧浇口，通过每个浇口的体积流量将是 $62.5cm^3/s$。分配到每个浇口的厚度和宽度分别为 0.75mm 和 6.0mm，计算的剪切速率为

$$\dot{\gamma}=\frac{6\times\frac{1}{2}\times125\times10^{-6}}{0.006\times0.000\ 75^2}s^{-1}=111\ 000s^{-1}$$

这个剪切速率明显高于最大剪切速率 $50\ 000s^{-1}$。浇口宽度增加到 14mm 可能能使剪切速率在规定的最大剪切速率之内，但需要把浇口类型改为扇形浇口。此时，流量也将从喷嘴的 $125cm^3/s$ 降到 $60cm^3/s$，这个过程需要两倍的充模时间。

例：计算在成型杯子中，通过点浇口的剪切速率（图 7.4）。

假设 1s 的充模时间和 $44cm^3$ 的型腔容积，用 $44cm^3/s$ 的体积流量分析。原始点浇口的直径是 1.5mm（杯子壁厚的一半）。那么剪切速率为

$$\dot{\gamma}=\frac{4\times44\times10^{-6}}{(0.001\ 5/2)^3\pi}=132\ 000s^{-1}$$

如前面的例题一样，剪切速率仍超标。为了得到一个规定浇口处的最大剪切速率，应该直接求解浇口半径，即

$$R=\sqrt[3]{\frac{4\dot{V}}{\pi\dot{\gamma}_{\max}}}=\sqrt[3]{\frac{4\times44\times10^{-6}}{50000\pi}}\text{m}=1.03\text{mm}$$

相当于约 2mm 的直径。这么大的直径会产生较大的浇口残留，且需要较大的断浇口力。初始规定一个较小的 1.5mm 直径可能较合理，这样如果出现计算剪切速率过大的问题，则可增大直径。

7.3.3　计算压力降

如果剪切速率在允许的范围内，那么压力降有可能在可接受的范围内。需要计算通过浇口的压力降，以保证有足够的注射压力可用于充模。压力降按照之前熔体在条状和圆柱状流道中的黏性流动方程计算。表 7.3 给出了牛顿型方程和幂律型方程，作为参考。

表 7.3　压力降方程

几何体	牛顿型	幂律型
条状	$\Delta p=\frac{12\mu L\dot{V}}{Wh^3}$	$\Delta p=\frac{2kL}{H}\left[\frac{2\left(2+\frac{1}{n}\right)\dot{V}}{Wh^2}\right]^n$
圆柱状	$\Delta p=\frac{8\mu L\dot{V}}{\pi R^4}$	$\Delta p=\frac{2kL}{R}\left[\frac{\left(3+\frac{1}{n}\right)\dot{V}}{\pi R^2}\right]^n$

估算熔体通过浇口的压力降时，在选择牛顿模型或者幂律模型方程前，计算适当剪切速率下的黏度很重要。通过浇口的压力降可能从几乎为 0 到几兆帕变化。压力降超过 10MPa 通常表示浇口设计不合理，或者太薄或者太长。

例：计算熔体经过仪表前盖模具扇形浇口的压力降，如图 7.7 所示。假设 ABS 以中等加工温度充模，通过主流道的体积流量为 125cm^3/s。扇形浇口有一个初始直径为 6.35mm 的圆形部分，在与型腔接触部分为一个宽 14mm，高 0.75mm 的矩形。

扇形浇口的分析比较复杂，因为它的横截面尺寸和形状会沿着它的长度而变化。扇形浇口应该被分解为许多小的部分，每部分都有一个不同的截面以正确计算压力降。大致的，该分析将假设一个宽 10mm（从开始直径 6.35mm 到结束宽度 14mm 的中间位置）、厚度 3.5mm（从开始直径 6.35mm 到结束厚度 0.75mm 的中间位置）、长度 10mm 的矩形轮廓。用 ABS 的幂律模型，计算通过扇形浇口的压力降为

$$\Delta p=\frac{2\times17000\times0.01}{0.0035}\times\left[\frac{2\times\left(2+\frac{1}{0.35}\right)\times62.5\times10^{-6}}{0.01\times0.0035^2}\right]^{0.35}\text{Pa}=1.9\text{MPa}=280\text{psi}$$

这个压力降是不可忽略的并且不需要改变浇口设计。

例：在成型杯子制品时，计算通过点浇口的压力降，如图 7.4 所示。假设 ABS 以中等加工温度充模。之前对直径为 1.5mm 的点浇口的分析结果表明，体积流量为 44cm^3/s 时会产生 132 000s^{-1}的剪切速率。在这个剪切速率下熔体黏度能从 5.4Pa·s 时的 Cross－WLF 模型中计算出来。那么压力降如下

$$\Delta p=\frac{8\times5.4\times0.001\times44\times10^{-6}}{0.000\,75^4\pi}\text{Pa}=1.9\text{MPa}$$

尽管熔体通过点浇口的剪切速率非常高，但是熔体通过剪切变稀作用导致黏度降低从而使压力降也在可接受的范围内。对于2mm直径的点浇口，50 000s^{-1}的剪切速率会产生11.2Pa·s的黏度。通过较大浇口的压力降约为

$$\Delta p = \frac{8 \times 11.2 \times 0.001 \times 44 \times 10^{-6}}{0.001^4 \pi} \text{Pa} = 1.3 \text{MPa}$$

同样，这通常也是可接受的。

7.3.4　计算浇口冻结时间

当型腔充满塑料熔体之后，后续熔体需要加压进入型腔以补充熔体冷却时产生的体积收缩。型腔内的熔体冷却时，浇口处熔体也趋于冷却。冷却的表层将从型腔壁扩散到浇口中线。一旦浇口冻结，后续熔体就不能再进入型腔。因此，模具设计人员应该设定注射成型机在浇口冻结前结束保压阶段并开始塑化阶段。

型腔内熔体的冷却和利用相关热方程的内容将在第9章讨论。利用所给的分析，图7.18描绘了直径为2mm的圆柱状浇口中在ABS中等熔体温度和冷却剂温度下，大部分熔体的温度和时间的函数关系。浇口中塑料熔体的温度最初接近规定的熔体温度，在后填充阶段将降低，因为热量传递到了较冷的型腔壁面。

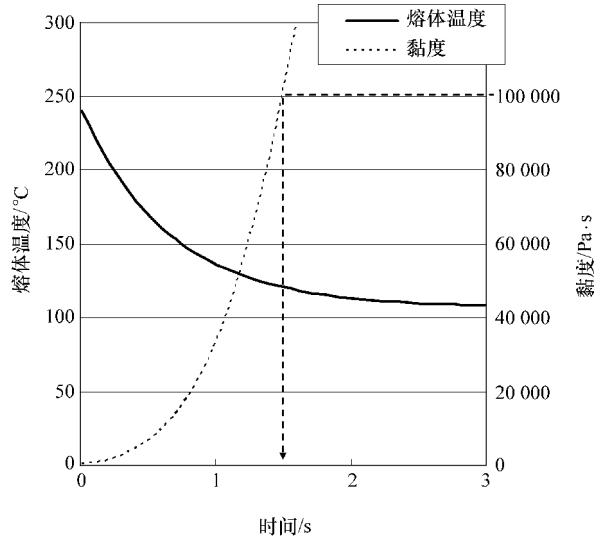


图7.18　浇口温度和黏度变化过程

利用Cross－WLF黏度模型，图7.18描绘了浇口处以10s^{-1}的剪切速率流动的塑料熔体的表观黏度。可以看到，塑料熔体的初始黏度是低的，当温度降低时，开始指数式增大。最后当熔体黏度增大至熔体不能有效通过浇口时，保压阶段就应该结束了。在这种情况下，相对于最后2.2s的保压时间，100 000Pa·s的黏度可作为不流动条件。附录A给出了该方法下估算的各种材料的无流动熔融温度。

作为参考，表7.4中给出了条状和圆柱状几何结构的最小保压时间计算方程。应该提到的是，因为假定了熔体和壁面间的最佳热传导，所以方程给出的是最小保压时间。

另外，这些方程没有考虑熔体通过浇口进入型腔和相应的热传导会有阻止浇口冻结的倾向。由于这些原因，浇口保压时间应该明显长于表 7.4 中方程所计算的结果，但这些方程对浇口固化时间的估什值可在同数量级。

表 7.4　浇口凝固时间方程

几何体	保 压 时 间
条状	$t_s = \frac{h^2}{\pi^2 a}\ln\left(\frac{8}{\pi^2}\frac{T_{melt} - T_{coolant}}{T_{no_flow} - T_{coolant}}\right)$
圆柱状	$t_s = \frac{D^2}{23.1a}\ln\left(0.692\frac{T_{melt} - T_{coolant}}{T_{no_flow} - T_{coolant}}\right)$

例：估计仪表前盖模具中扇形浇口的固化时间，如图 7.7 所示。假设 ABS 以中等工艺温度充模。扇形浇口以一个初始直径为 6.35mm 的圆形截面开始，在型腔中以 14mm 宽和 0.75mm 厚的矩形结束。在扇形浇口端部，0.75mm 厚的矩形截面处的熔体将首先固化，并决定凝固时间，所以有

$$t_s = \frac{0.000\,75^2}{8.69\times10^{-8}\pi^2}\ln\left(\frac{8}{\pi^2}\times\frac{240-60}{132-60}\right)\text{s} = 0.46\text{s}$$

因为成型制品的厚度和浇口的厚度一样，所以增加浇口厚度对保压型腔内的熔体远离浇口是没有效果的。我们注意到侧浇口的设计使浇口进入型腔的薄截面，这是不推荐的。由于这个原因，应该考虑采用三板式模具或热流道模具来提供浇口进入 1.5mm 的较厚截面以有较长的保压时间。

例：计算对于如图 7.4 所示的杯子，直径为 2mm 的点浇口的凝固时间。

凝固时间可按如下估算

$$t_s = \frac{0.002^2}{23.1\times8.69\times10^{-8}}\ln\left(0.692\times\frac{240-60}{132-60}\right)\text{s} = 1.1\text{s}$$

这个浇口的冻结时间可用于和名义壁厚 3mm 杯子的凝固时间作比较，即

$$t_s = \frac{0.003^2}{8.69\times10^{-8}\pi^2}\ln\left(\frac{8}{\pi}\times\frac{240-60}{132-60}\right)\text{s} = 7.4\text{s}$$

浇口可能过早冻结，且杯子可能保压不充分。

7.3.5　调整尺寸

初始设计计算完剪切速率、压力降和浇口冻结时间后，可以对浇口类型和尺寸进一步改进。为了达到美观和断浇口的目的，最好采用较小的浇口尺寸。但如之前的例子所述，剪切速率过大则需采用较大的浇口尺寸。这些剪切速率的计算取决于一个假定流量，该流量直到模具设计人员用模具优化完工艺后才能确定。因此，模具设计人员应该假定一个用于分析的合理流量，选择可以扩大的浇口类型，并规定一个保险的尺寸。通过这种方法，浇口尺寸可以在需要时增大以减小剪切速率。

不同的浇口类型都可以通过调整浇口尺寸来轻微调节压力降和流量。这种微调可以帮助平衡多型腔中的熔体流动，或者在多浇口型腔中调整熔体流速和熔接痕位置。通过

浇口设计达到平衡的范围是很有限的，这是由于浇口尺寸不能过大。为了较大程度地改变流动情况，浇口尺寸必须大幅度变化，这样剪切速率和浇口冻结时间将改变很大，产生意料外的结果。由于这个原因，改变流道尺寸或采用动态流控制技术的内容将在13.6.4节讨论熔体控制时介绍。

通常通过调整浇口尺寸来提高对成型制品尺寸的控制水平。当型腔内熔体需要的保压时间比浇口的固化的时间短很多时，就可能发生过度的体积收缩。有两种常用方法可以减小体积收缩。模具设计人员最常用的方法就是在浇口冻结前强加一个很高的保压压力，这样型腔内熔体的残留压力将在熔体收缩时被消除。但是这种方法将导致过度的飞边和残留压力。基于这个原因，第二个方法是增大浇口直径或者厚度以延长固化时间从而提供合理的熔体保压压力。还有一个较少用的方法是重修模具以减小模具的名义厚度。

7.4 本章小结

浇口设计过程包括浇口类型的选择和详细规定浇口尺寸，其目的是平衡美观、剪切速率、压力降及保压时间的关系。浇口类型的选择将主要由模具类型（两板式，三板式或热流道式）、熔体流经浇口或型腔的流动类型以及对稳定且完全自动的成型周期的期望所决定。浇口尺寸的优化是在小浇口尺寸（这种浇口尺寸美观且易断浇口）和大浇口尺寸（这种浇口尺寸能得到低剪切速率和压力降）之间权衡得到的。如果没有确定的浇口尺寸，那么模具设计人员应该利用较小的浇口尺寸，因为如果需要的话在成型试验之后，它们更容易扩大。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 浇口的多种类型和功能，这些包括直浇口、点浇口、侧浇口、搭接浇口、扇形浇口、闸式浇口、盘形浇口、隧道式浇口、潜伏式浇口、热点浇口、热主流道浇口和阀式浇口。
- 与浇口设计相关的各种需求和权衡。
- 如何根据给定的成型应用选择浇口类型。
- 如何根据给定的浇口设计计算剪切速率。
- 如何根据给定的浇口设计计算压力降。
- 如何根据给定的浇口设计计算浇口的最短凝固时间。
- 如何调整浇口尺寸以使浇口的性能最优化。

现在，我们已经分析和设计了浇口、浇注系统和型腔，那么，下一章我们将讨论如何在型腔填充阶段通过充模熔体排出空气。再接下来，研究模具冷却系统。

第 8 章　排 气 设 计

通常排气是模具设计中的一小部分，直到成型试验表明模具缺陷与排气相关，排气设计才引起注意。了解排气孔的目的和作用能使模具设计人员明确设计排气孔的位置，确保需要时模具可开额外的排气孔。

8.1　排气设计的目的

8.1.1　释放压缩空气

排气的主要作用是释放模具里被高压塑料熔体包围的气体。如果型腔中的气体不能被排除的话，那么会导致以下几种缺陷。

- 首先，在型腔中被围住的气体会形成一个高压空间，熔体流不过该高压区，在制品中形成短射现象。
- 其次，在被塑料熔体包围的情况下，高压、高温气体会燃烧，产生“自燃”现象和烧灼伤痕缺陷。如果烧灼伤痕出现在制品表面影响美观的话，制品只能报废。
- 最后，两股汇流熔体前沿间的气体会降低制品强度，原因是受两股熔体间气体的干扰作用，制品表面形成了 V 形缺口，该缺口会使零件在使用中产生应力集中。

8.1.2　避免塑料熔体溢出

因为排气不充分会引起几个重要缺陷，所以在不同的位置都会有合适的大排气孔。然而，如果排气孔太厚，聚合物熔体会从排气孔溢出，从而会在排气位置产生细且尖锐的飞边。在很多成型应用中，机器操作者要用工具对这种飞边进行修剪。这种飞边是多余的，即使操作者通过增加劳动力耗费来进行修剪，仍不能完全达到制品要求。如果操作人员在有过量飞边的情况下继续操作，那么模具分型面会磨损并需要重新修复。从这些方面看，排气孔的数量越少、尺寸越小越好。

8.1.3　维修最小化

排气孔的使用也涉及模具的维修。很多聚合物在熔融阶段放出气体，释放出的粒子堆积并堵塞排气系统，这种情况在脱模时更容易出现。因此，由于排气不充分，成型过程中会间歇性地产生缺陷。很多操作人员把排气孔清洁作为预防性维修的一部分来解决这个问题。任何情况下，模具设计者都应该努力设计维修最小化且容易维修的排气系统。

8.2　排气分析

建议对排气孔的分析和设计分三步进行。第一，通过熔体流动速率来估算空气排除

速率。第二，必须估计排气孔的数目、类型和位置。第三，必须把每个排气孔的长度、宽度和厚度具体化。关于排气孔厚度的选择，为了确保排气充分，厚度必须比某些最小值大，为了避免产生过多的飞边，厚度必须比某些最大值要小。

8.2.1　估算空气排除速率

空气排除量和注射塑料的体积近似相等。“近似”的意思是指空气与热塑料熔体接触的时候会有所膨胀。然而热空气经过模具表面时也会稍微冷却。由于这些原因，此分析中假定空气的体积流量和熔体的体积流量是相等的。

例：注射边框的熔体体积流量为 125cm^3/s，则假定空气流量为 125cm^3/s。

8.2.2　确定排气孔数目和位置

下一步，有必要确定排气孔的位置。这些位置可能看起来比较明显，但是进一步考虑的话，确定这些位置也是不简单的。通常有三种位置必须排气，如图 8.1 所示。第一种类型的排气孔要求设在模具分型面边缘或者其他插穿面的熔体汇合区。第二种类型的排气孔要求设在熔体汇合产生熔接痕的位置。第三种类型的排气孔要求设在熔体汇合的模具滞流区。每种情况简要介绍如下。

图 8.1 表明在边框分型面和插穿面周边有 12 个潜在排气位置。包括浇口附近的 4 个位置和拐角处的 4 个位置在内的一些排气孔可能不必要，因为熔体流动主要是径向流动。因为流动是径向的，所以熔体能够到达模具边缘而不圈闭空气，从而没有必要在这些位置设置排气孔。然而，熔体前沿会略微改变，熔体在如图 8.2 所示的位置圈闭空气是很常见的。拐角处和浇口附近的排气孔设计可以选择，为了避免以后再改变模具，模具设计者可以在这些位置选择性地指定具体的排气位置。如图 8.2 所示，应该包括流动末端的 4 个排气位置，因为来自型腔的大部分气体可能从这里排出。

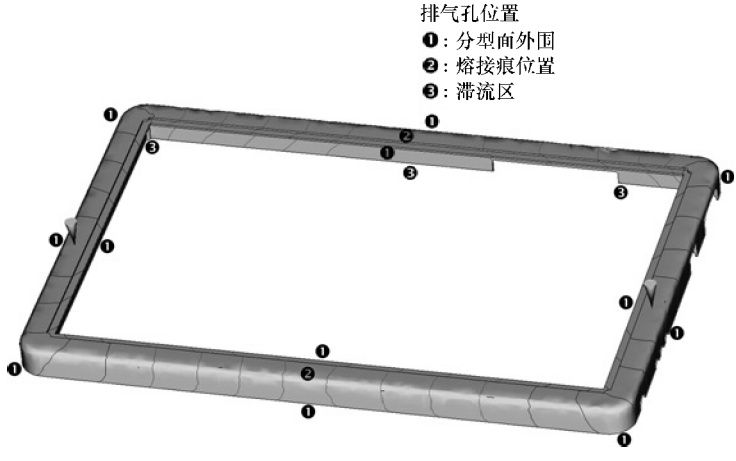


图 8.1　根据类型设置排气位置

第二种类型的排气孔要求设在两股熔体前沿汇合区，如图 8.3 所示。在这种情况下，两股凹形熔体前沿汇合在一起形成封闭圈，空气不能从该封闭圈中排出。因此排气孔要求设在型腔内表面，如图 8.3 所示。通常，在型腔表面设计推杆来提供这种排气

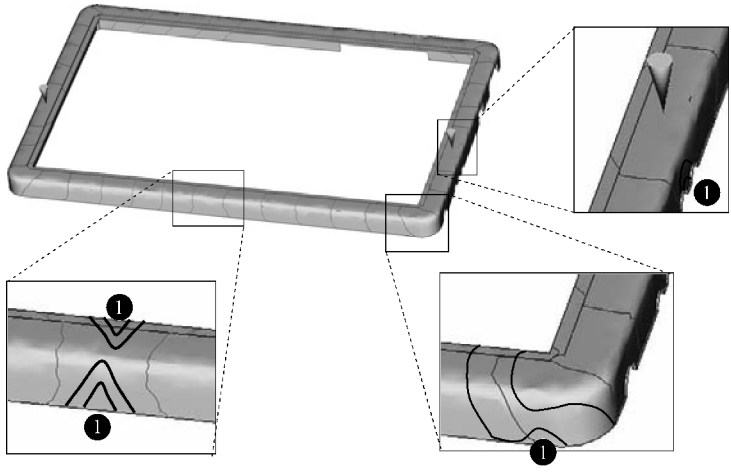


图 8.2　插穿面的排气位置

功能。

第三种类型的排气孔出现在模具滞流区。精确的位置并不总是很明显的，图 8.4 给出了三个例子。在左边的例子中，熔体沿着凸台长度方向流经型腔表面，最终把空气圈闭在凸台顶部。中间例子中，两股熔体前沿在筋板处汇合，把空气推到筋板死点处。在右边的例子中，熔体前沿沿着对角方向穿过筋板。由于筋板中存在分流结构，所以空气被圈闭在型腔的转角处。在边框设计中约有 20 个这种需要排气的滞流区。

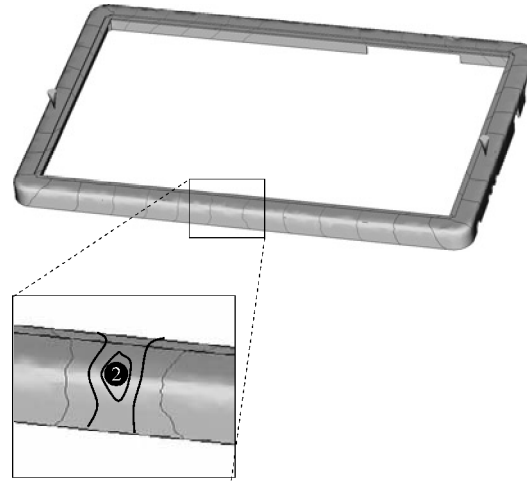


图 8.3　零件内部的排气孔位置

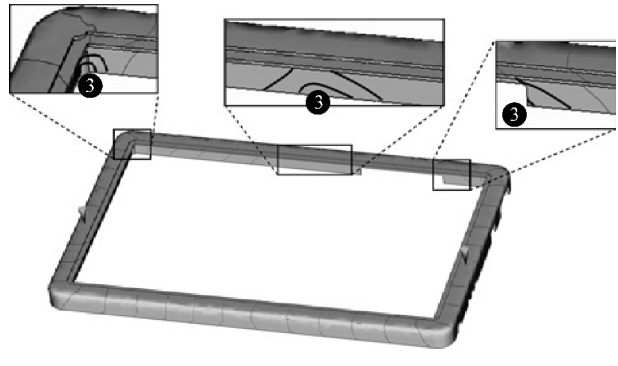


图 8.4　滞流区处的排气位置

以上的讨论表明，模具设计者需要考虑约 36 个排气位置。这些排气位置看起来并非全部都需要。另外有些排气孔的设置通常比较容易操作，可以在模具加工完并试验后进行。因此，对于模具设计者来说，通常需要先具体指定最重要的排气位置。

例：对于边框成型模具，模具设计时应先指定 8 个排气位置，如图 8.5 所示。

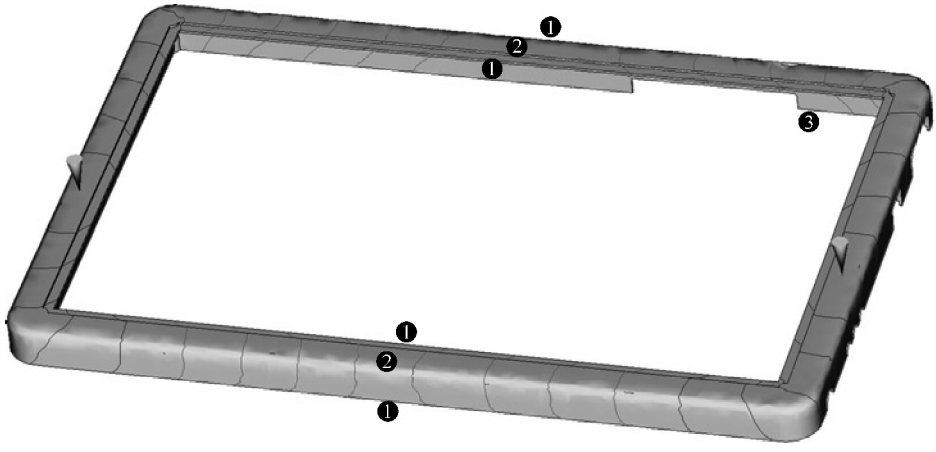


图 8.5　最初排气孔位置

8.2.3　确定排气孔尺寸

一旦排气孔的数目确定下来，就可以计算出经过每一排气孔的空气流动速率。用全部空气体积除以排气孔数目来估算经过每个排气孔的气流的方法看似合理，但是不保守。原因是填充末端的精确位置是未知的，气流很可能会非均衡地偏向制品每个面 4 个位置中的任意一个。另一个更保守的方法是假定所有局部气流可通过每一个有效气孔排除。

例如：假定成型边框时的空气流量为 125cm^3/s。整个流量可看做由两股气流共同作用产生，每股气流流量为 62.5cm^3/s，分别流向排气孔顶部和底部。因为每一个排气孔的精确流速是未知的，所以分析时假定每一排气孔设计的体积流量为 62.5cm^3/s。

一般的，排气孔的长度和宽度由应用的几何结构决定。最小排气孔的厚度与气体经过排气孔的压力降有关。根据先前提到的牛顿模型把空气作为层流、黏性流动来分析可导出最小厚度。把空气流经排气孔时的模型看做可压缩的、紊流流动会更好，以下的分析极其保守。牛顿流体在矩形流道中的压力降为

$$\Delta p_{\text{air}} = \frac{12\mu_{\text{air}}\dot{V}_{\text{air}}L}{Wh_{\text{vent}}^3} \tag{8.1}$$

排气孔厚度的最小值可以由排气孔的宽度和长度估算得到，即

$$h_{\text{vent}}^{\min} = \sqrt[3]{\frac{12\mu_{\text{air}}\dot{V}_{\text{air}}L}{\Delta p_{\text{air}}W}} \tag{8.2}$$

式中，μ_{air}是空气的表观黏度；$\dot{V}$是空气流经排气孔的体积流量；Δp_{air}是空气经过排气孔

时的具体压力降；其他变量是排气孔尺寸。

例：需要在低气压时排出气体，估算典型排气孔的最小厚度。

保守分析假设为：空气经过宽为10mm、长为10mm的排气孔的流量为100cm³/s。为了避免压缩气体和塑料熔体继续增压，穿过排气孔的许用压力降为一个大气压（14.7psi或0.1MPa）。室温下气体黏度为1.8×10^{-5}Pa·s。最小厚度为

$$h_{\text{vent}}^{\min}=\sqrt[3]{\frac{12\times1.8\times10^{-5}\times100\times10^{-6}\times0.01}{0.1\times10^{6}\times0.01}}\text{m}=6\times10^{-5}\text{m}=0.06\text{mm}$$

分析表明，对于这个例子来说，排气孔厚度为0.06mm是足够的。如果排气孔更宽或更短，或者气流更小，或者许用压力降更高，那么排气孔厚度可以进一步减小。

再一次强调了先前的分析和例子是保守的，因为：

- 分析可知，层流比湍流有更高的压力降，需要更厚的排气孔。
- 几何构形和工艺条件应用到单独的小排气孔，该排气孔中有相对高的气流。
- 假定的室温空气黏度比受到聚合物熔体加热或压缩的空气黏度要高。由于这些原因，通常排气孔的最小厚度不受设计约束。

排气孔的最大尺寸和排气孔位置处允许的最大飞边量有关。飞边在很细流道（如排气孔）中的形成是一个比较高级的研究主题，需要用小时间步长来进行瞬态模拟，分析方法一般比较复杂。仅从讨论的目的来说，可考虑采用层流及黏性流动。产生飞边时熔体的平均体积流量为

$$\dot{V}_{\text{flash}}=\frac{WL_{\text{flash}}h_{\text{vent}}}{t_{\text{flashing}}}$$

将这个关系代入牛顿流动模型方程（8.1）并对厚度求解，得出排气孔厚度的上限值，即

$$h_{\text{vent}}^{\max}=\sqrt{\frac{12\mu}{p_{\text{melt}}t_{\text{flashing}}}}L_{\text{flash}} \tag{8.3}$$

式中，p_{melt}是排气孔入口处的熔体压力。

当熔体第一次到达排气孔时，熔体压力为零。为了进行分析，熔体压力被保守地假定为熔体压力升高速率与飞边固化时间的乘积，即

$$p_{\text{melt}}=\frac{\text{d}p_{\text{melt}}}{\text{d}t}t_{\text{flashing}} \tag{8.4}$$

对于大多数注射成型工艺，熔体压力升高速率小于100MPa/s。在排气孔中飞边成形时间和聚合物熔体固化时间相关。

例：用方程（8.3）估算常用排气孔的最大厚度。假定排气孔的厚度为0.06mm，当飞边成形时间为0.003s时，可以用表格7.4中列出的浇口冷却时间方程来估算熔体固化的大致时间。已知这个固化时间，飞边固化时的熔体压力可达到

$$p_{\text{melt}}=100\times0.003\text{MPa}=300\ 000\text{Pa}$$

因为排气孔很细，存在严重的剪切变稀现象，所以假定低黏度为10Pa·s。代入这些数值，排气孔的最大厚度为

$$h_{\text{vent}}^{\max}=\sqrt{\frac{12\times10}{300\ 000\times0.003}}L_{\text{flash}}=0.4L_{\text{flash}}$$

例如，如果允许飞边长度为0.2mm，则排气孔的最大厚度为0.08mm。通过比较可知，为了排除足够的气流，排气孔的最小厚度应为0.06mm。要减小飞边，就应该采用更多、更宽的排气孔来减小气流；当排除的气流足够时，可以通过减小排气孔厚度来减小飞边。

考虑到以上分析很难应用一些必要的假设，因此从各种手册上列举出几个排气孔厚度的推荐值，见表8.1。推荐值间的差异很有趣且可以解释。大部分变化是因为长期以来塑料工业的发展趋向于模具壁更薄、注射速率更快、注射压力更高。随着熔体压力的增大，排气孔最大壁厚减小。同时，原料生产商在改善结构特性的同时，也在寻求降低塑料黏度的方法。因此，随着目前推荐的排气孔越来越薄，排气孔的技术标准也随之发生变化。

表8.1　排气孔厚度推荐值　（单位：mm）

塑料	Glanvill（1965）	Rosato（1986）	Menges（2000）
低黏度材料 PP、PA、POM、PE	0.08	0.1	0.015
中黏度材料 PS、ABS、PC、PMMA	0.2	0.3	0.03

8.3　排气设计

8.3.1　分型面上的排气孔

考虑的第一类排气孔位于分型面上。通常，这些排气孔在流动末端可作为细流道。很多模具在进行加工时，分型面上就带有排气孔，源于分型线边缘向外延伸到更厚的“缓释”孔或“流道”孔。图8.6提供了边框的排气系统设计，其中在型腔镶件的内外表面有两个排气孔。为了使熔体充模的最后区域产生不确定性，排气孔的宽度值 W 有针对性地设置得较大。排气孔的厚度 h_{vent} 设定为0.06mm。排气孔长度为2mm，之后空气穿过2mm厚的流道进入镶件中间和顶部直径为3mm的出口。

虽然排气孔应该设在填充末端的分型面处，但是排气孔周期性地设在型腔的周围也是常见的。对于成型中心进浇的圆柱形零件来说，排气孔可以设在整个型腔的周围，如图8.7所示。这个设计应用于三板式模具或热流道模具中，盖子的型腔采用中心进浇方式，排气孔围绕整个模具型腔的周围设置。考虑到排气孔足够宽，排气孔的尺寸具体指定为厚度0.015mm和长度1mm。排气孔流道将排气环连接到镶件及出口面。

以上设计虽然一定会对圈闭气体的排出有效果，但是应提及的是随着模板的弯曲，容易产生飞边。如在后面第12章将讨论的，熔体压力会在型腔和型芯上作用很大的力。任何一个大的变形都将引起排气孔厚度的增加，也就提高了产生飞边的可能性和数量。

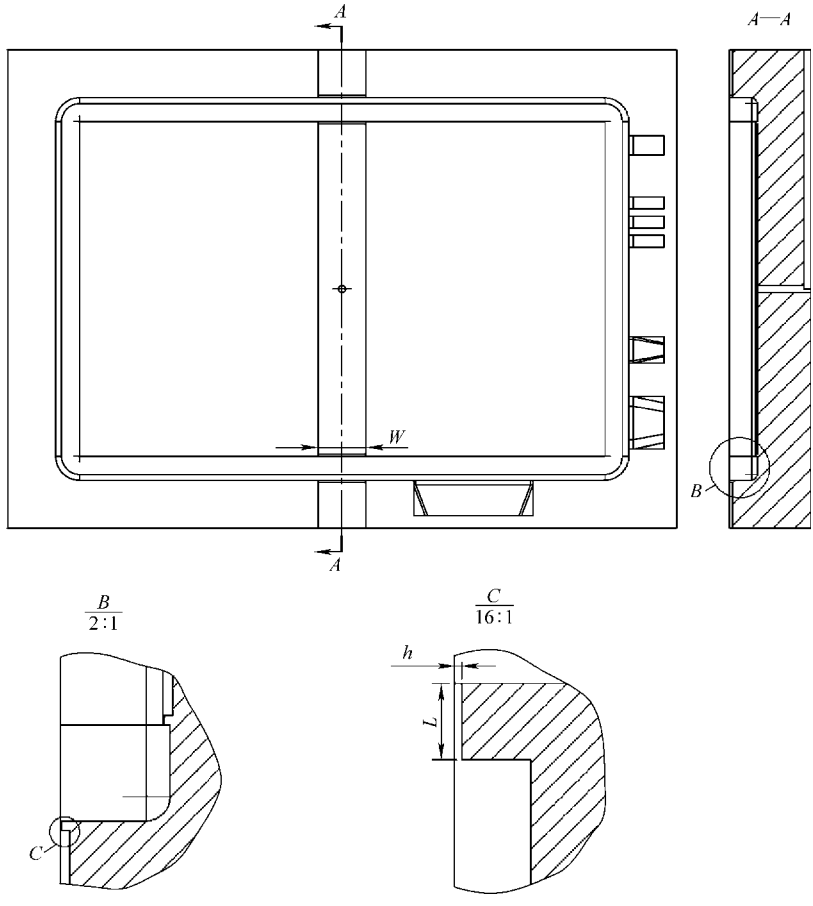


图 8.6 分型面上排气孔的设计

事实上，图 8.7 的设计可能问题很大，因为盖子的外面和底面是用户最终可以看到且能接触的区域。在脱模板周围使用内部排气孔将可解决这个问题，如后续 11.3.4 节中的设计。

为了避免飞边和相关的维修，建议分型面上的排气孔厚度设为 0.02mm。如果之后发现排气不足的话，可以增设额外的排气孔或者增加已存在排气孔的厚度。

8.3.2 推杆周围的排气孔

利用推杆周围的间隙来实现排气是很普遍的方法，这种排气设计有很多优点。首先，推杆的动作至少能部分清理推杆和型芯间的排气孔道。其次，推杆应用广泛并被熟知。为了提供滑动配合，在推杆周围需要具体指定间隙，同时对排气来说也是很经济的。通常，先加工推杆孔再进行铰孔。在模具加工中，推杆和推杆孔间的径向间隙通常为 0.13mm（0.005in），排气孔厚度为 0.065mm（0.0025in）。排气孔厚度比先前的建议值要稍微大一些，根据以下几个原因推荐推杆周围的较大间隙。第一，这个间隙可以避免摩擦力增大和推杆失稳。第二，推杆是由钢加工而成的，因此不太可能产生因分型面

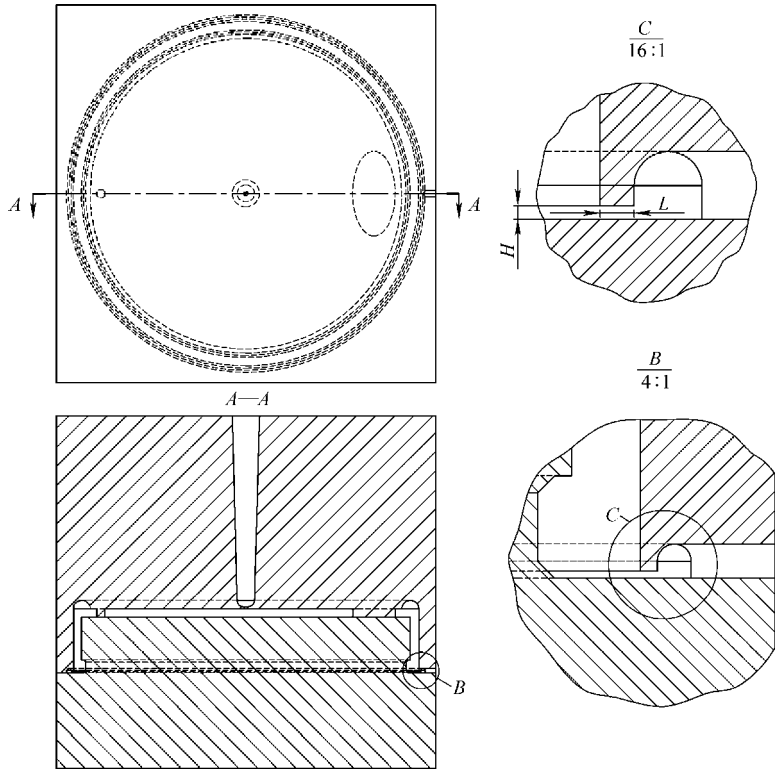


图 8.7　圆柱形零件周围排气孔的设计

缺陷引起的飞边。第三，推杆上与飞边相关的痕迹通常都位于非美学表面。

图 8.8 利用推杆提供了一些典型的排气孔设计细节。详图 *B* 为扁推杆和推杆的排气间隙设计图。对于这两种推杆，排气孔与型腔表面的距离为 3mm，孔道锥度减小到推出孔的公称直径。良好的排气孔设计应该包括两个因素：较大的排气孔道可以降低空气流动阻力，同时有助于推杆与模具的装配；在模具安装过程中，一定的锥度有助于引导推杆顶部。

说明一下，并不强制将排气孔长度 *L* 设定为 3mm。前文用方程（8.2）进行的空气流动分析说明，在推杆和孔之间标准厚度为 0.06mm 的排气孔将提供主要气流。由于这个原因，可将排气孔延长至合适的位置。例如，避免将大的排气孔道设置在冷凝线附近是合理的。另一个例子，穿过大部分型芯镶件的排气孔截面相同，只在型芯镶件与支承板接触的区域尺寸变大。

8.3.3　死角处的排气孔

对于排气死角来说，解决排气问题的方法是使用模具镶件。如图 8.9 所示，型芯镶件加工有矩形凹槽，里面装有排气镶件。如详图 *A* 所示，排气孔仅横跨加强筋的宽度，

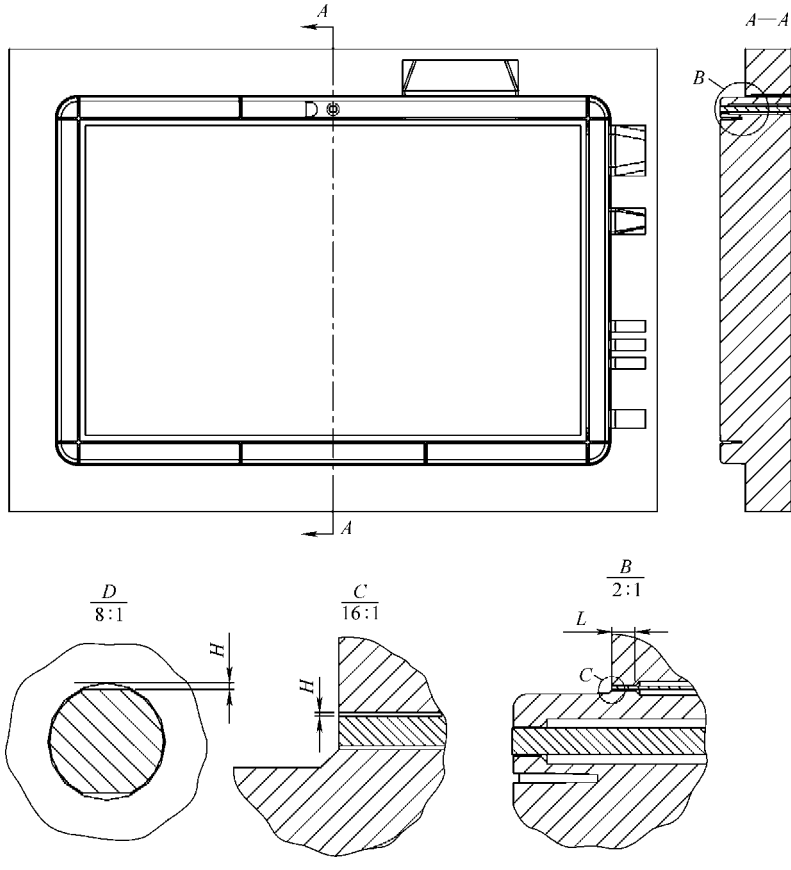


图 8.8 推杆和叶片周围的排气孔设计

预计会有被围气体。如详图 B、C 所示，排气孔厚度 H 为 0.2mm，长度 L 为 0.2mm。排气孔的后面设置了更宽的排气孔道。因为没有推杆，因此排气孔和孔道之间没必要光滑过渡。

应该注意的是，在相同的位置通过使用扁推杆也可以实现图 8.9 所示镶件的排气功能。扁推杆成本更低，同时有利于制品注射成型。如果这样，排气镶件的使用不是特别普遍。

另一种可选择的设计采用烧结排气孔的组合，如图 8.10 所示，它是模具镶件设计的一种，可以用来释放死角处的气体。这些装置尺寸相对较小，直径通常为 2 ~ 12mm，并包括很多小的排气孔，直径尺寸为 0.03 ~ 0.1mm 变化。考虑到小尺寸和不可加工的上表面，烧结排气孔排前面最好与平型腔面齐平。烧结排气孔需要周期性替换或维修来避免微孔道堵塞，因为没有任何简单的方法能解决模内清洗问题。

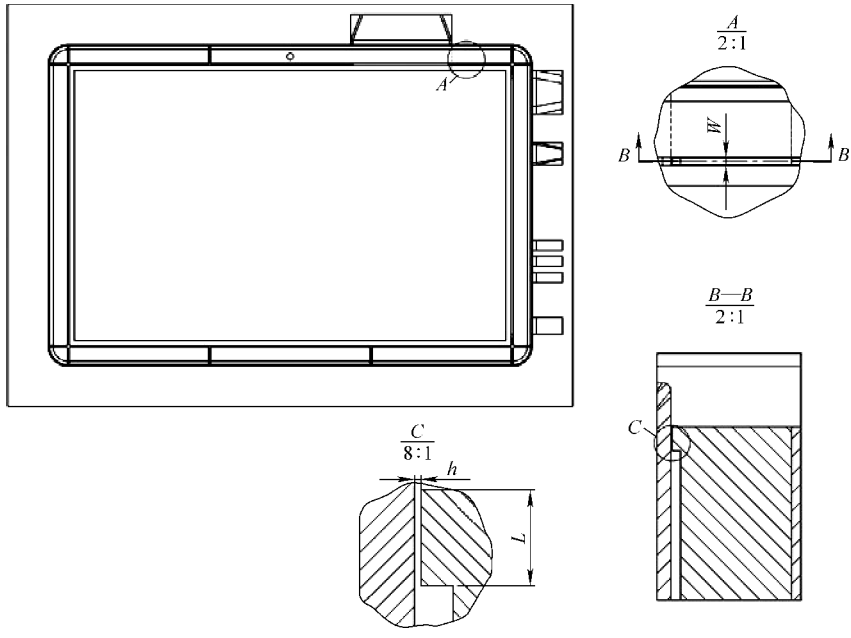


图 8.9 型芯镶件处的排气孔设计

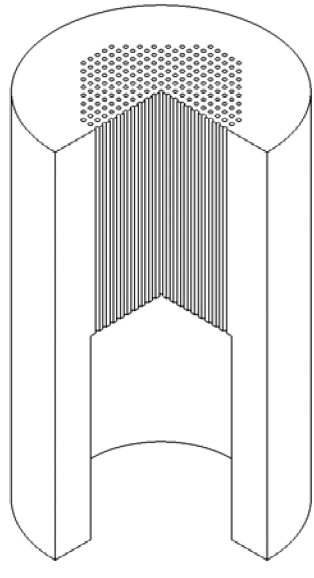


图 8.10 型芯镶件内的排气孔设计

8.4　本章小结

在模具设计中经常忽略排气设计和分析，在模具试验和问题确定之后才设置排气通道。这种方法有一些优点，因为直到模具布局确定之后才能明确排气孔位置。然而，缺乏排气分析和预测会导致重大的模具缺陷，加工模具周期变化，制品生产延迟。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 要求进行排气设计的三种情况包括在分型面处的制品周边；型腔内部，两种或多种熔体前沿可以形成气穴；在死角处气体不能逸出。
- 可以设计不同类型的排气孔，包括分型面上的排气孔、推杆周围的排气孔和沿着型芯镶件的排气孔。
- 在气流不引起飞边的情况下，如何计算排气孔厚度。

下一章介绍模具冷却系统，其主要目的是在热聚合物熔体与模具冷却液之间提供最大且均一的热传递。然后设计和分析模具的推出系统和结构系统。

第 9 章　冷却系统设计

冷却系统对于模具设计的经济性和操作性极为重要，在工程系统中，尤其是在注射模具设计方面保持着非常重要的地位。缺乏工程性的原因或许是在成型过程中的温度分布与流体相关的缺陷相比不明显。

冷却系统的不合理设计通常导致两种不期望的结果。其一，冷却和成型周期比预期的要长。其二，贯穿模具的温度梯度明显升高，会导致成型制品的收缩和翘曲变形。为了能够有效地进行操作，冷却系统必须仔细设计，以在不增加成本或复杂程度的情况下控制贯穿模具的热流。

9.1　冷却系统设计的目的

9.1.1　最大传热率

在稳态热传导中，传热率 $\dot{Q}_{\text{conduction}}$ 正比于热导率 k 和模具温度梯度 $\mathrm{d}T/\mathrm{d}z$，即

$$\dot{Q}_{\text{conduction}} = k\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}z} \tag{9.1}$$

此方程有两层含义。其一，传热率与热导率成正比。高导热材料如 Cu940 或 QC7 比所有钢的热导率高几倍，并应能够在更短的循环周期下工作。其二，温度梯度的存在要求导热，也就是说传热率可以通过设置更接近于型腔表面的冷却通道来得到提高。

9.1.2　保持壁温均匀

注射成型制品推出时的温度与注射制品的设计、冷却通道的设计、材料特性和工艺条件有着复杂的关系。当要求高传热率时，过度侵扰性的冷却系统设计实际上会导致质量问题。因为冷却通道靠近型腔表面时，冷却通道和型腔表面的传热会变得更直接。因此，贯穿型腔表面的温度变化很大，除非冷却通道距离型腔表面很近。

当由于成型过程中温度的变化导致注射制品发生收缩和翘曲变形时，模具操作者经常必须选择长的运行周期，以使模具能够得到完全的冷却。运行更长的循环周期，通常要求更高的模具冷却温度，将模具传热率（及其变化）降低，然后使模具中注射制品的温度达到平衡。结果成型周期比预定的更长，这就需要在不提高成本的条件下设计更好的冷却系统来予以避免。

9.1.3　最小模具成本

式（9.1）说明，通过使用导热性更好的材料与采用接近型腔表面的更多冷却通道可以取得无限高的传热率。然而，需要注意的是对冷却系统的进一步的投资抵消了由此带来的优势。传热率变得不受限制，原因在于热传导贯穿模具，而不是贯穿塑料和模具

冷却剂。因此，通过提高贯穿模具的热传导，由高导热性材料制造的模具可将循环周期缩短 30%，但并不期望所有的这些提高都通过改用高导热性材料来实现。

设计一套成本合理的模具的关键是需要知道应该在哪些方面投资。高导热性材料在一些应用中是极其有效的，而且通常更适用于机器中，但总体上说并不是最好的。冷却通道与其相似，其布置可以非常简单，也可以非常复杂。复杂的冷却通道设计通常要求许多的加工、塞口、密封、装配和固定装置。重要的是模具设计者需要了解设计一套复杂的冷却系统所增加的成本是否合理。

9.1.4　最小体积和复杂性

冷却系统设计中的一个重要问题是冷却系统经常同其他部件的位置发生冲突。设置许多位置紧密的冷却通道可以提供快速一致的冷却，而这种设计也会导致模具中用来设置推出系统、通道、螺栓和其他模具部件的空间很少。因此，模具设计者应该考虑使冷却通道与型腔的几何构型相平行。小直径的冷却通道对附近部件的影响可能较小，且允许使用复杂的线路来获得一致的冷却；但是小直径的冷却通道却会增加加工的难度，而且传输的热量较小。

9.1.5　最小应力和腐蚀

熔体对型腔表面会产生明显的压力。这些力会在模板和镶件之间直接产生明显的应力。模具结构的完整性会因冷却通道而降低，因为每一条冷却通道都需要除去相应的模具材料，这就产生了应力集中问题。

冷却通道对模具结构的影响在应用更高的熔体压力时会更加严重，因为熔体压力循环往复的加载和卸载会产生疲劳失效，因此在大多数的应用中会存在严重的潜在问题。更糟的是，冷却介质对金属材料产生的腐蚀加重了应力集中。贯穿模具到型腔的裂缝、腐蚀和扩散都需要不断地修复。

9.1.6　模具使用设施

注射成型机操作者应该能够利用最少的信息操作注射模具。模具外接的数量应该保持最少，最好是模具动定模各两个（一进一出）。如果需要外接数量多于两个，那么外接应该贴标“进”和“出”以帮助操作者实施，避免误操作而形成死路。为避免冷却系统的损坏，所有额外的零件应该避免直接接触拉杆、工作台或其他设施。

9.2　冷却系统设计过程

假设冷却系统的设计中有许多目标，那么每一项目标不可能同时都得到优化。对于模具设计者来说，目标的优化要达到一个好的折中，比如以成本适中的方式获得快速一致的冷却。以下提供了七步分析来指导制订模具设计的方案。然后，对一些实际的冷却实例及设计进行了分析。

9.2.1　计算所需冷却时间

冷却时间定义为充满型腔的塑料由熔融到变得足够硬以至于可以推出所需的时间。

以下理论为确定最小冷却时间提供了理论支持[㊀]。因为型腔充满之后，熔体流量变得非常小（热量对流也非常小），在塑料和模具之间传递的热量由瞬时热传导方程支配，即

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \tag{9.2}$$

式中，a 是热扩散率，定义为

$$a = \frac{k}{\rho c_p} \tag{9.3}$$

式中，T 是温度；t 是时间；z 是厚度方向的尺寸；k 是热导率；ρ 是密度；c_p 是比热容。热扩散率本质上是测试材料相对于其本身所能储存热量的传热能力。对于更快的热传导，需要具有更高热扩散率的模具材料，这些材料（如铝）相对于钢具有较低的力学性能，如图 4.25 所示。

瞬时热传导方程即式（9.2）是一个二级、抛物线、微分方程。对于盘和棒这种简单几何形状的物体，人们开发了一种瞬时热传导解析法。在型腔中心线处的熔体温度可以通过级数扩展来预估，即

$$T_{z=0}(t) = T_{\text{coolant}} + (T_{\text{melt}} - T_{\text{coolant}})\sum_{m=0}^{\infty}\frac{(-1)^m}{2m+1}\mathrm{e}^{\frac{\pi^2(2m+1)^2 a}{h^2}t} \tag{9.4}$$

公式中考虑了六个参量，模具型腔中心线处的塑料温度是冷却时间的函数，如图 9.1 所示。注射制品中心的塑料温度等于冷却过程中的初始熔体温度。在延迟 2s 后，型腔中心的熔体开始冷却。最后，塑料降温到模具温度。

为了确定冷却时间，需要提供一些标准以说明什么时候制品变得足够硬以适合推出。一个可行的方法是考虑材料的弹性模量，就是对材料抵抗挠度进行测试。材料冷却时的有效弹性模量如图 9.1 右边的纵轴所示。可以发现，当塑料熔体的温度接近模具温度时，弹性模量也接近一个固定值。材料刚度符合要求时的温度称为热变形温度（HDT）或欠载挠曲温度（DTUL），其可以通过标准测试（如 ASTM D648）得到。

式（9.4）是冷却时间同熔体、冷却介质和推出温度之间的函数。模板的理论最短冷却时间为

$$t_c = \frac{h^2}{\pi^2 a}\ln\left(\frac{4}{\pi}\frac{T_{\text{melt}} - T_{\text{coolant}}}{T_{\text{eject}} - T_{\text{coolant}}}\right) \tag{9.5}$$

式中，h 是壁厚；T_{eject}是指定推出温度（通常表示为 DTUL）；T_{coolant}是冷却温度；T_{melt}是熔融温度。对于棒状制品，理论最短冷却时间为

$$t_c = \frac{D^2}{23.1a}\ln\left(1.60\frac{T_{\text{melt}} - T_{\text{coolant}}}{T_{\text{eject}} - T_{\text{coolant}}}\right) \tag{9.6}$$

当计算冷却时间时，模具设计者应该考虑最厚的部分，因为其需要的固化时间最长。

㊀ 实际上，冷却时间可以比分析预测的更加长，主要有两个原因：首先，以下的分析假设塑料和模具之间进行着理想的热传导，而实际上在两种不相似材料之间是存在很大的热交换的，冷却时间会由于成型制品收缩和模具壁之间打开产生的间隙而进一步增加；其次，冷却时间通常不受零件硬度的约束，而是由于质量的要求而需要延长冷却时间。

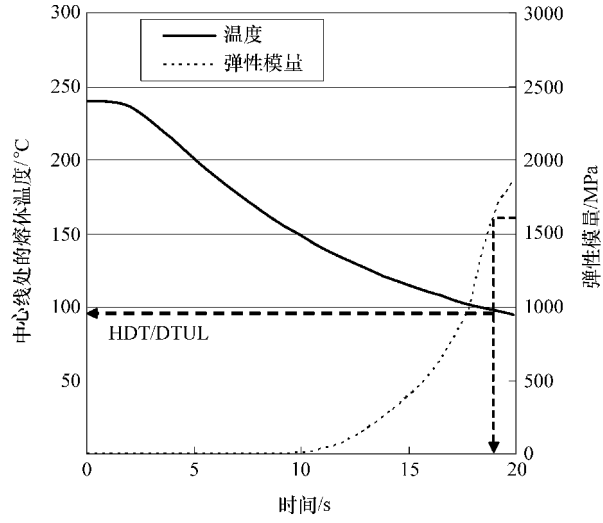


图 9.1　中心线处的熔体温度变化

例：估算用于生产杯子和杯盖的两腔成套制品模具的冷却时间。

杯盖的公称厚度是 2mm，杯子的公称厚度是 3mm，主通道的直径是 6.25mm。假设制品材料是 ABS，熔融、冷却和推出温度分别是 239℃、60℃和 96.7℃，那么模具每一部分的冷却时间为

$$t_c^{\text{lid}} = \frac{0.002^2}{8.69\times10^{-8}\pi^2}\ln\left(\frac{4}{\pi}\times\frac{239-60}{97.6-60}\right)\text{s} = 8.4\text{s}$$

$$t_c^{\text{cup}} = \frac{0.003^2}{8.69\times10^{-8}\pi^2}\ln\left(\frac{4}{\pi}\times\frac{239-60}{97.6-60}\right)\text{s} = 18.9\text{s}$$

$$t_c^{\text{runner}} = \frac{0.0476^2}{23.1\times8.69\times10^{-8}}\ln\left(1.6\times\frac{239-60}{97.6-60}\right)\text{s} = 22.9\text{s}$$

此结果提供了一些重要的信息。首先，因为杯子和杯盖厚度不同，模具中杯子部分需要更长的循环时间。如果不同壁厚的零件需要高质量生产，那么应用两个不同的模具采用不同的循环时间分别进行生产和设计则更加经济。然而，这种模具设计原则放弃了颜色匹配和压制组装，这对设计多腔成套制品模具是十分有利的。

其次，通道的冷却时间比杯子更长。实际上，通道不需要同零件冷却到硬度一样时脱模，因此根据以上计算得到的通道需要的冷却时间可以小于 22.9s。但是，结果说明，循环时间受通道的冷却时间支配，因此缩小通道直径很重要，这不仅可以节省材料而且可以保证生产成型工艺。

为验证以上的冷却分析，对壁厚为 3mm 的成型件的瞬时热传导进行了数字模拟。模拟假设塑料初始在熔融温度，与钢制模具型腔壁接触处的塑料温度总是处在冷却温度。如上所述，假设材料为 ABS，熔融、冷却和推出温度分别为 239℃、60℃和 96.7℃。不同时间下贯穿制品壁厚的塑料温度如图 9.2 所示。在冷却开始时，塑料温度

是熔融温度。根据分析，模具型腔壁处的塑料温度将立即降到冷却温度。热量从塑料传向模具，塑料的温度随之降低，直到模具中心冷却到冷却温度。

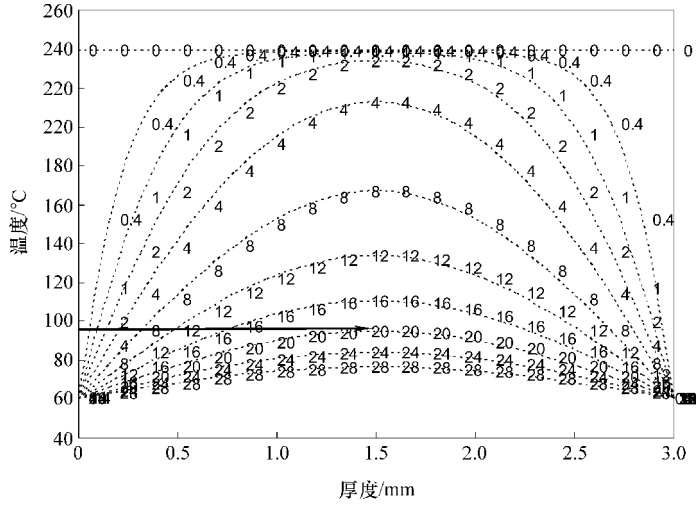


图 9.2　塑料的冷却（等温边界）

在冷却期间，塑料制品必须足够坚硬以能够承受推出力。中心线的温度降到指定推出温度以下所需的时间可以通过图 9.2 预估。㊀图 9.2 所示的模拟结果证实了前面所分析的结果，中心线推出温度为 97℃时，冷却时间将接近 19s。

这些结果是以模具壁等温为边界条件的，意思是模具壁处的塑料立即降到了模具冷却温度。实际上，模具钢不能承受很快的温度变化。因此，模具钢附近温度会提高。这种行为可以用对流边界条件来建模，即

$$h_c(T_{\text{coolant}} - T_{\text{melt}}) = k\frac{\partial T}{\partial z} \tag{9.7}$$

式中，h_c是模具界面的聚合物从熔融至冷却的表面传热系数。之前的研究[29]说明注射制品中的表面传热系数等级为 1000W/（m^2 · ℃）。在对流边界条件下所模拟的温度变化如图 9.3 所示。

根据对流边界条件，模具壁处的塑料需要额外的时间降低到模具冷却温度。较慢的热传导限制了注射制品中心的冷却。如果心部必须达到指定的温度 97℃，那么冷却时间应该更接近 24s，而不是根据假设模具壁温度而预测得到的 19s。

㊀ 用于计算冷却时间的方程有许多不同形式。最普遍的两个假设是中心线的温度和贯穿厚度的平均温度都达到推出温度。本书推荐使用中心线标准。原因有二，其一，其是守恒的，且在模具设计有错误的情况下也能够作出分析。其二，这种方法以混合理论为支撑。特别是，考虑到制件在接触型腔壁面处是硬的，而中心线处则处于半熔化状态。因为中心线处的塑料不能在推出负载条件下将剪切应力从一边传到另一边，因此相比之下，如果中心线处的塑料固化且能够传递应力的话，制品产生翘曲变形的可能性就可以降低。

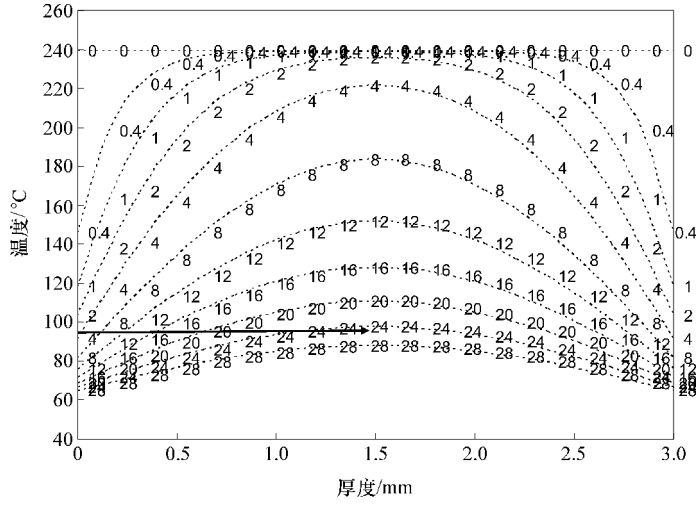


图 9.3　塑料的冷却（对流边界）

另外，在塑料工业中有条通用准则，就是冷却时间可以大致计算为

$$\tilde{t}_c = 2h^2 \tag{9.8}$$

式中，h 是壁厚，单位为 mm。

例：应用式（9.8）估算壁厚为 3mm 的制品的冷却时间。

$$\tilde{t}_c = 2 \times 3^2 \text{s} = 18\text{s}$$

该结果同之前的 19.2s（假设理想传导）和 24s［假设表面传热系数等级为 1000W/（m^2 · ℃）］分析结果形成了很好的比较。

式（9.8）提供了一个很接近的结果，原因是大多数热塑性塑料热扩散率的等级为 $9 \times 10^{-5} m^2/s$，加工温度（$T_{melt} - T_{coolant}$）/（$T_{coolant} - T_{eject}$）在 5 左右。把这些相应值代入式（9.5）中得到

$$t_c = \frac{h^2}{90\pi^2} \ln\left(\frac{4}{\pi} \times 5\right) = 0.0208h^2 \tag{9.9}$$

式（9.8）提出的规则非常好地与式（9.9）的典型热传导分析相匹配。而式（9.8）是一个最优指导，其对于应用式（9.5）和式（9.6）估算冷却时间以明确应用设计、材料特性和加工条件是一个的好方法。同时需要注意的是通过式（9.9）估算的冷却时间约是之前通过式（3.24）估算的循环时间的一半。

9.2.2　预估所需传热速率

一旦冷却时间已知，就能够计算出系统所需要的传热速率即“冷却功率”。需要冷却系统带走的总热量 $Q_{moldings}$ 为

$$Q_{molding} = m_{molding} c_p (T_{melt} - T_{eject}) \tag{9.10}$$

式中，$m_{molding}$ 是注射制品加上相关冷通道的质量，其可以通过常温下的体积乘以密度得到。

冷却功率定义为冷却期间每秒钟移除的总能量，即

$$\dot{Q}_{\text{molding}} = \frac{Q_{\text{molding}}}{t_c} \tag{9.11}$$

通常，一套注射模具有多条冷却通道。假设模具设计得很好，每条冷却通道能带走相同的热量，那么每条冷却通道的冷却功率可以计算为

$$\dot{Q}_{\text{line}} = \frac{\dot{Q}_{\text{molding}}}{n_{\text{lines}}} \tag{9.12}$$

式中，n_{lines}是模具中的冷却通道总数。在这一点上，模具设计者应该认识到需要多种正交设计来分析多条不同冷却通道排布的冷却。

例：分析以杯子和杯盖为制品的模具冷却所需的冷却功率。

两个注射制品的总质量是62.6g。如果ABS材料在推荐温度范围的中间值温度下加工，那么需要移除的热量为

$$Q_{\text{molding}} = 0.0626 \times 2340 \times (239 - 96.7)\text{J} = 20\ 900\text{J}$$

杯子和杯盖的模具设计的冷却时间是20s，因此总的冷却所需的冷却功率为

$$\dot{Q}_{\text{molding}} = \frac{20\ 900}{20}\text{W} = 1050\text{W}$$

假设杯子和盖子模具有4条冷却通道（每边2道），那么

$$\dot{Q}_{\text{line}} = \frac{1050\text{W}}{4} = 260\text{W}$$

因此，模具每边需要的平均冷却功率为500W。

9.2.3　预估冷却介质的流动速度

型腔中聚合物熔体所需移除的热量必须通过冷却介质带走。冷却介质在通过模具时温度会提高。这些温度的提高是不期望有的，因为这会使得冷却介质对模具最后部分的冷却减弱，那么热梯度会沿注射制品升高，这就会导致不均匀收缩和翘曲。

假设冷却介质的体积流量为$\dot{V}_{\text{coolant}}$，冷却介质沿冷却通道所提高的温度为

$$\Delta T_{\text{coolant}} = \frac{\dot{Q}_{\text{line}}}{\dot{V}_{\text{coolant}} \rho_{\text{coolant}} c_{p,\text{coolant}}} \tag{9.13}$$

附录C提供了一些冷却介质的热力学特性。需要的冷却介质流速可以根据容许的冷却温度计算。通常容许提高的温度为1℃。对于精密零件，容许提高的温度可以是0.1℃。冷却介质温度更精确的控制需要更高的流速，型腔表面的温度将会在冷却通道之间改变很多。

例：计算模具冷却所需的冷却介质体积流量，假设杯子、杯盖成套制品模具的容许冷却温度提高量为1℃。

如果以水作冷却介质，那么所需体积流量为

$$\dot{V}_{\text{coolant}} = \frac{260}{1 \times 1000 \times 4200}\text{m}^3/\text{s} = 6.2 \times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s}$$

该值等于每条通道每分钟1gal（$1\text{gal} = 3.785\ 41\text{dm}^3$）流量。应该注意的是如果两条冷却通道串联连接，那么冷却功率也会加倍，两倍的流速需要保持同样的温度分布。

估算所需冷却介质流速后，得到的值的可行性需要根据商业模具温度的控制能力进行检验。

典型冷却介质控制器和油温控制器的规范参见表 9.1。

表 9.1　两种模具温度控制器的规范

参量	Vactherm 冷却介质控制器	IMSelect 油控制器
最低温度/℃	10	32
最高温度/℃	99	304
加热功率/kW	9	16
冷却功率/kW	14.6	16
冷却介质流量/（m^3/s）/［（gal/min）］	1×10^{-3}（15）	3×10^{-3}
冷却介质压力/kPa（psi）	200（29）	30（4.3）

例：估算表 9.1 所列的 Vactherm 控制器对杯子和杯盖两腔模具的冷却能力。

对于杯子、杯盖这种成套制品模具，在工业控制能力范围内需要每分钟 1gal 的体积流量。实际上，一个单独的温度控制器能够提供四条冷却通道所需的流速，即

$$\dot{V}_{\text{coolant}}^{\text{total}}=4\times6.2\times10^{-5}\text{m}^3/\text{s}=2.5\times10^{-4}\text{m}^3/\text{s}$$

但是要注意，如果容许温度提高设定为 0.1℃，或者如果模具中型腔的数量从 2 增加到 8，则需要多个模具温度控制器。

9.2.4　预估冷却通道直径

冷却通道直径的容许范围现在可以基于传热和流体流动约束来确定。为了确保模具钢到冷却介质之间得到足够的传热，需要冷却介质的流动形式为湍流。如果冷却通道直径过大，那么水的速度可能不足以确保湍流的形成。为确保湍流，雷诺数 Re 应该大于 4000，即

$$Re=\frac{4\rho_{\text{coolant}}\dot{V}_{\text{coolant}}}{\pi\mu_{\text{coolant}}D}>4000 \tag{9.14}$$

式中，D 是冷却通道直径；μ_{coolant}是冷却介质黏度。这种湍流需要限定冷却通道的最大直径 $D_{\max}$，即

$$D_{\max}=\frac{4\rho_{\text{coolant}}\dot{V}_{\text{coolant}}}{4000\pi\mu_{\text{coolant}}} \tag{9.15}$$

例：对于杯子、杯盖模具，确定冷却通道直径的最高限来确保湍流的形成。

给定流量为 1gal/min，黏度为 0.001Pa·s，那么根据式（9.15）计算得到最大直径为

$$D_{\max}=\frac{4\times1000\times6.2\times10^{-5}}{0.001\times4000\pi}\text{m}=20\text{mm}$$

这个例子说明，任何直径小于 20mm 的冷却通道可以确保杯子、杯盖模具中的湍流不受到制约。许多成型应用需要高的传热率和高的体积流量，因此湍流几乎都是给定的。

更多的约束支配着最小冷却通道直径，其与在所需体积流量条件下贯穿冷却通道的冷却介质所受的压力降相关。贯穿冷却通道的水的压力降可以根据管流量估算[30]，即

$$\Delta p_{\text{line}} = \frac{\rho_{\text{coolant}} L_{\text{line}} \dot{V}^2_{\text{coolant}}}{10\pi D^5} \tag{9.16}$$

式中，L_{line}是冷却通道长。其所需的压力降说明最小直径为

$$D_{\min} = \sqrt[5]{\frac{\rho_{\text{coolant}} L_{\text{line}} \dot{V}^2_{\text{coolant}}}{10\pi \Delta p}} \tag{9.17}$$

为计算最小冷却通道直径，必须知道冷却通道的长度和通过冷却通道所需要的压力降。此条件实际上是不能确定的，因为其不仅取决于模具中冷却通道的排布，还取决于冷却通道是串联还是并联。

例：对于杯子、杯盖模具，确定冷却通道直径的最低限度，以避免冷却温度控制中的压力降。

分析假设冷却通道横穿模具宽度，每条长 302mm。进一步分析假设两条冷却通道分别在模具两边且串联。容许压力降设定为 100kPa，是 Vactherm 控制器最大额定压力的一半。这最后的假设是为了确保从控制器到模具的贯穿冷却软管的流动，以及相关的在如螺塞等处转向时的压力降。

最小冷却通道直径可估算为

$$D_{\min} = \sqrt[5]{\frac{1000 \times 0.6 \times (6.2 \times 10^{-5})^2}{100 \times 10^3 \times 10\pi}} \text{m} = 3.7\text{mm}$$

结合湍流和压力降的要求，冷却通道直径的容许范围是：$3.7\text{mm} < D < 20\text{mm}$。而这是十分宽广的范围，根据成型应用和制造需求，容许范围可更小一些。

在选择最终的冷却通道直径时，模具设计者应该考虑冷却通道的制造能力和相关冷却螺塞、接头和软管的供应商提供的标准。表 9.2 提供了一些典型冷却螺塞的规范（由模具部件供应商 DME 提供）。从表中可以看出，冷却通道直径为 4.76 ~ 15.9mm。模具设计者应该选择满足以上分析和标准尺寸的冷却通道直径。

表 9.2　典型冷却螺塞规范

DME 螺塞	标准管螺纹公称直径/in	冷却通道直径/mm（in）
JP250	1/16	4.76（3/16）
JP251	1/8	6.35（1/4）
JP352	1/4	9.53（3/8）
JP553	3/8	11.1（7/16）
JP554	1/2	15.9（5/8）

例：确定适合杯子、杯盖模具的冷却通道直径。

之前的例子分析说明，任何在 3.7 ~ 20mm 之间的标准直径是可行的，这说明表 9.2 所列的任何冷却螺塞都是合适的。因此，模具设计者应该选择更容易加工的冷却通道直径和标准冷却螺塞。6.35mm 是合理的冷却通道直径。

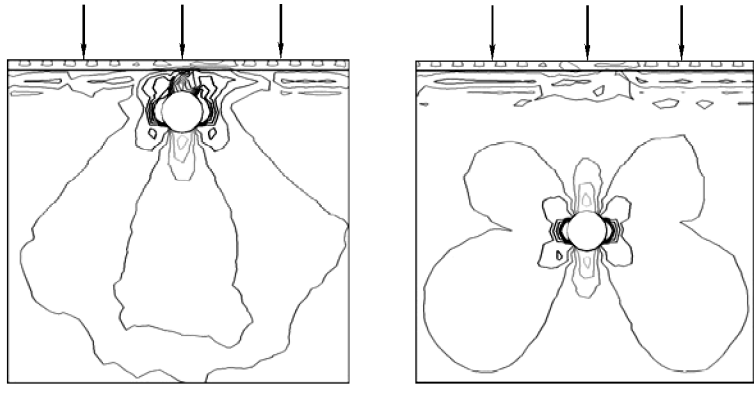
应该注意的是以上分析最适合以水为冷却介质。实际上由于环境和成本问题，以乙二醇和油作为冷却介质不是很普遍。这些冷却介质的黏度也比水大很多，不易形成湍流。对于层流、黏性流体，压力降可以根据附录 C 提供的冷却介质特性通过 Hagen – Poiseuille 法则确定，即

$$\Delta p_{\text{line}} = \frac{128\mu_{\text{coolant}} L_{\text{line}} \dot{V}_{\text{coolant}}}{\pi D^4} \tag{9.18}$$

模具设计者应该选择合适的冷却通道直径来确保通过冷却通道的最大压力降不超过冷却介质温度控制器的能力。

9.2.5　选择冷却通道深度

冷却通道直径确定后，必须选择冷却通道的深度。从结构上看，希望冷却通道能远离型腔表面。深层的位置避免了在接近表面处去除材料后产生相关的应力集中。例如，图 9.4 所示为模具设计的应力分布图，H_{line}是冷却通道深度，分别是冷却通道直径的 1 倍和 4 倍。从图中可发现冷却通道周围有应力集中，而且应力集中随冷却通道接近模具壁而增加。



$H_{\text{line}}=1D$
$\sigma=3.3p_{\text{melt}}$

$H_{\text{line}}=4D$
$\sigma=2.6p_{\text{melt}}$

图 9.4　冷却通道周围的应力集中

许多模具镶件的材料为 P20，其疲劳强度为 456MPa。即使当冷却通道位于其 4 倍直径的位置时，设计的模具所容许的最大熔体压力为

$$p_{\text{melt}}^{\max} = \frac{\sigma_{\text{endurance}}}{2.6} = 175\text{MPa} \tag{9.19}$$

幸运的是，此熔体压力在大多数注射成型机的注射压力极限范围内，且不会完全传到型腔中。

与冷却通道相关的应力集中非常重要，由于存在应力集中，需要将冷却通道设置在远离模具表面的位置。即使将冷却通道设置在远离型腔表面的位置，应力集中的存在仍然会潜在地限制熔体压力。例如，考虑设计一套铝制模具，冷却通道的深度等于其直

径。这种情况下，疲劳强度为166MPa。此应力限制除以应力集中系数3.3，最大容许熔体压力正好是50MPa。此分析不能避免模具设计者或操作人员应用更高的熔体压力，反而可以简单地说明此模具不会在无损伤的情况下有较长的使用寿命。模具中的应力集中在12.2.6节中将有更详细的说明。

冷却通道越接近模具壁面传热率越大，而对于结构的考虑说明冷却通道应该位于远离模具壁面的位置。导热方程说明耐热性同冷却通道与模具壁面间距成正比。有效的传热系数为

$$h_{\text{conduction}} = \frac{k_{\text{mold}}}{H_{\text{line}}} \tag{9.20}$$

根据之前式（9.7）的传热分析讨论，常规瞬时传热系数是1000W/℃。为确保冷却通道深度不会增加冷却时间，最大冷却通道深度可估算为

$$H_{\text{line}} < \frac{k_{\text{mold}}}{1000\text{W}/℃} \tag{9.21}$$

普通用途P20钢的传热系数为32W/（m·℃），说明有效冷却的最大冷却通道深度为32mm。结合常规的直径为6.35mm的冷却通道的结构和传热需要，推荐的冷却通道深度范围为

$$2D < H_{\text{line}} < 5D \tag{9.22}$$

这是模具设计中的常用范围，而模具设计者可在此范围内选择任意一个冷却通道深度，对于在特殊的结构或传热需要中的应用应该进行分析。

例：明确使用P20材料的杯子、杯盖模具的冷却通道深度和最大熔体压力。

冷却通道直径为6.35mm。假设深度设定为4倍冷却通道直径，则冷却通道深度为25.4mm。此深度仍然有2.6的应力集中。如果P20的疲劳强度为456MPa，那么对于无限寿命的最大熔体压力为

$$p_{\text{melt}}^{\max} = \frac{456\text{MPa}}{2.6} = 175\text{MPa}$$

其接近大多数注射成型机的最大注射压力。

9.2.6 选择冷却通道间距

确定冷却通道深度后，需要确定冷却通道间距（常称为间距）。紧密的冷却通道间距W_{line}可提供更快更均匀的冷却。然而，紧密的冷却间距需要更多的冷却通道，并可能产生冷却通道之间或同模具其他部件间的交叉干涉。模具设计者应该通过分析选择合适的冷却通道间距以明确模具的应用。

冷却过程中熔体的温度预测涉及抛物线微分方程。而这是可以由上述的有限元方法解决的，现在还没有合适的分析方法。Menges[31]开发了一个冷却通道间模具中的热通量偏差百分比的估算式，即

$$\Delta \dot{Q} \propto \left(\frac{W_{\text{line}}}{H_{\text{line}}}\right)^{2.8\ln\left(\frac{W_{\text{line}}}{H_{\text{line}}}\right)} \tag{9.23}$$

对于钢和铝模具，根据这个方程作出图9.5。分析说明，冷却通道间距等于冷却通

道深度的两倍时，热流密度的改变小于 5%。随后，热通量变化明显增加，也说明冷却速度更慢，注射制品温度梯度增高。

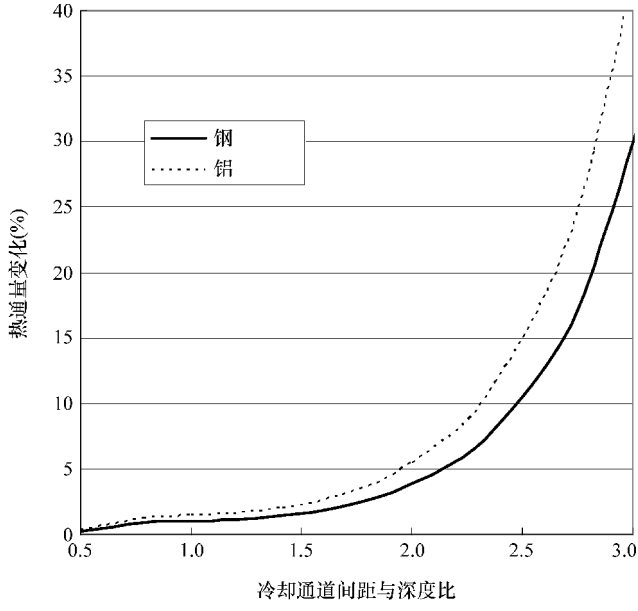


图 9.5　间距对热流密度的影响

为避免冷却通道间的温度梯度，推荐模具设计者使用的冷却通道间距范围为

$$H_{\text{line}} < W_{\text{line}} < 2H_{\text{line}} \tag{9.24}$$

其选用取决于应用的需要。精度要求不高、公差大的商业产品的冷却通道间距为冷却通道深度的 2 或 3 倍为好。对于公差小的或需要更快成型周期或需要更一致冷却的产品，期望冷却通道间距更接近于冷却通道的深度。

图 9.5 说明实际上可以通过使用高导热性材料（如铝或铜）提高冷却通道与型腔表面之间的导热而增加散热中的变化。因此，使用高导热性材料不允许直接应用更宽的间距和减少冷却通道的数量。如果期望使用更少的冷却通道，那么最好选择大的冷却通道深度并设定冷却通道间距是冷却通道深度的两倍。高导热模具材料可以用于提高热导率而获得一致的冷却。

例：对杯子、杯盖模具进行瞬时热仿真，两种模具设计有不同的冷却通道间距。图 9.6 所示为从型腔中心线到冷却通道的热流。图中箭头的长度说明了热流出型腔的相对数量。随着冷却通道间距的增大将出现两种情况。首先，特定的冷却通道传热量是有限的，那么模壁处的热导率的影响就会减小。其次，贯穿型腔表面而升高的热导率改变明显。

此贯穿型腔表面热导率的改变会引起推出时制品中的温度梯度的升高，如图 9.7 所示。如果采用紧密冷却通道间距，制品在推出时不仅伴随更低的温度梯度，而且是在更低的温度条件下。如果采用较宽的冷却通道间距，制品将伴随更高的温度梯度和更高的

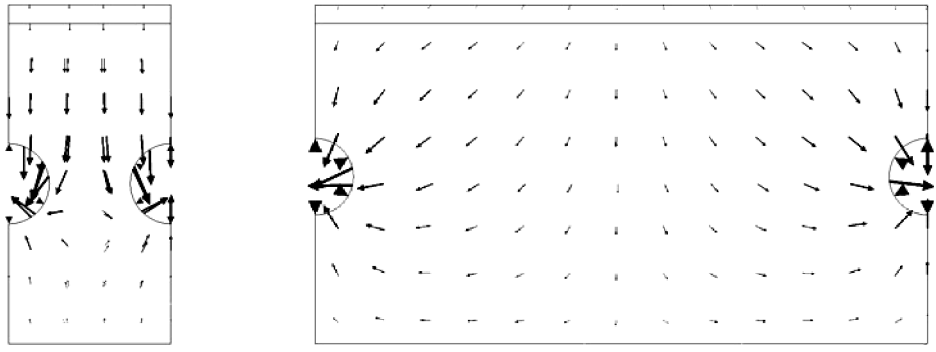


图 9.6　从型腔中心线到冷却通道的热流

温度。有意思的是，只有在整个制品接近冷却温度时，延长采用宽冷却通道间距模具的循环时间才会减小零件的温度梯度。

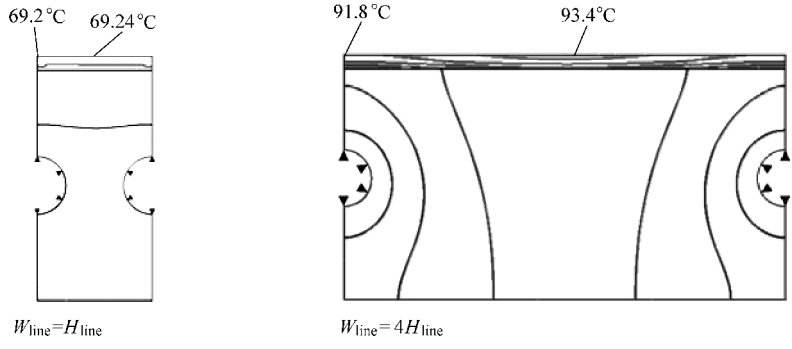


图 9.7　塑料和模具中的温度分布

9.2.7　冷却通道排布

冷却通道直径、深度和间距确定后，冷却通道可以贯穿整个模具。此贯穿线路非常重要，因为其不仅影响成本和制件的质量，而且会限制推杆和推出螺栓等其他模具部件的位置。总体上说，模具设计需要在冷却通道表面和其他模具部件表面提供至少一半冷却直径的距离。这就需要保持模具结构集中，且使得在操作过程中因腐蚀而造成的冷却介质泄漏最小。图 9.8 中的阴影部分表明了模具中可能存在冷却通道的位置，冷却通道可设置在其中。

图 9.8 中的阴影部分占据了模具的一大部分，冷却通道的位置进一步由型腔、型腔镶件、型芯镶件、推出回退销、导向销、浇口套和其他模具部件所限制。之前对杯子、杯盖模具的分析说明冷却系统设计使用了：

- 冷却通道直径 6.35mm。
- 冷却通道深度 12.7mm。
- 冷却通道间距 25.4mm。

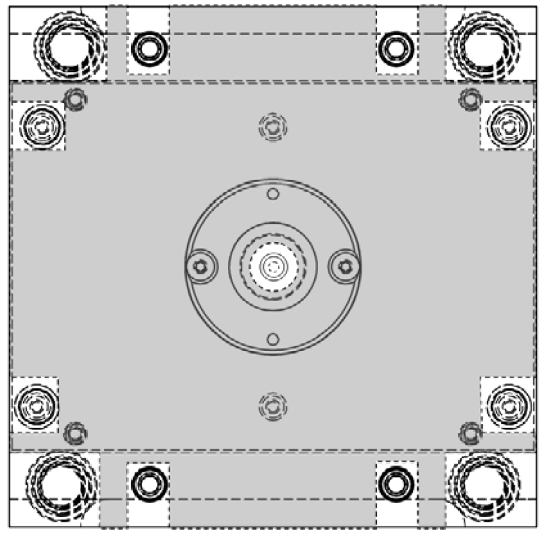


图 9.8　可设置冷却通道的位置

其设计实际上需要根据这些推荐值进行，如图 9.9 所示。这初始的设计是不可行的，原因有许多。设计中最大的缺陷或许是许多冷却通道会同关键模具特征如浇口套或型腔镶件与模板之间的接触面产生交叉干涉。解决此问题有两个不同的策略。一种方法是扩大型腔镶件、型芯镶件和相关模板以在型腔镶件和型芯中设置冷却通道。因为这需要重新设计模具、采购更大的模架和进行更多的加工而会提升成本。然而，这种设计可经济地提供快速均匀的冷却。

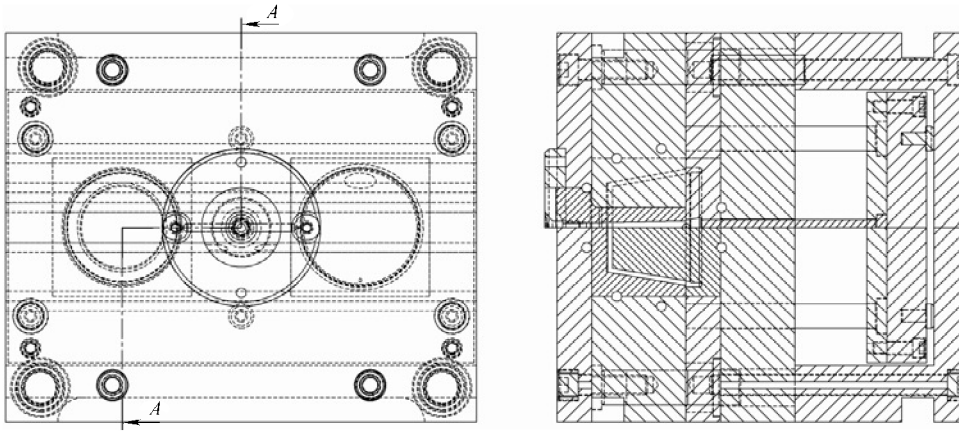


图 9.9　不可行的初始冷却通道排布

一种可代替的方法是：将冷却通道移至离型腔更远处，而保持相同的冷却通道间距与深度比。设计结果如图 9.10 所示。这个设计需要更少的冷却通道，避免了同模具其

他部件的交叉干涉。而此设计提供的冷却效果很普通甚至稍低。其主要优点是所有的冷却通道都不仅是直的，而且每一条冷却通道穿过单独的模板。因此，冷却通道可以单独加工，不需要任何密封或垫圈。然而，冷却通道的位置远离型腔，这会减小传热速率，并需要更长的循环周期。

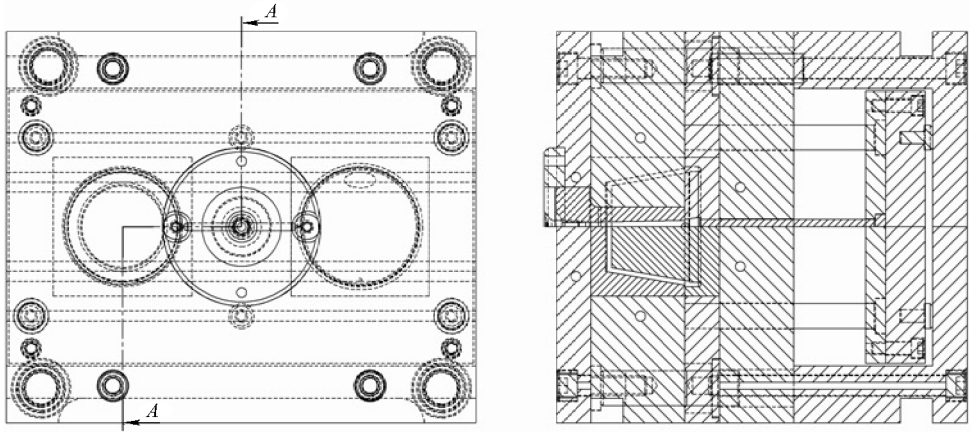


图 9.10　可行但效果不好的冷却通道排布

这种冷却通道排布还有第二个缺点。因为使用直的冷却通道，其距离型芯有相当的距离。冷却源在型芯底端，而塑料热源则在型芯前端。因此，在冷却过程中，贯穿注射制品会有显著的温度改变。在成型周期最后，对杯制件所预测的温度分布可如图 9.11 所示，每条线显示 2℃的温度改变。

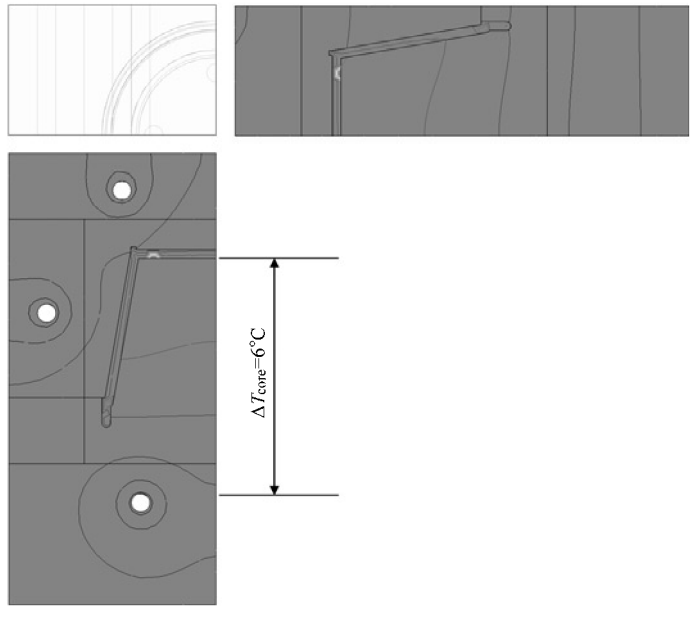


图 9.11　较差设计的温度梯度

由于相对的深层结构，从型芯底端到型芯前端存在 6℃ 的温度梯度。图 9.11 中的温度梯度会造成沿杯轴和注射制品壁厚产生不均匀收缩。原因是型芯顶部的温度不仅比型芯底端高 6℃，也比型腔表面温度高 6℃。修正这种情况有三种选择，包括使用高热导率的型芯、使用折流板或扩散器及设计冷却镶件。

9.3　冷却系统设计

实际中冷却系统设计有许多种不同的形式。通常模具使用直冷却通道，而这些设计通常不是最优的。模具设计者应该寻求使整个型腔表面获得均匀高效冷却的方法。在有限的成本下，需要创新性的设计来得到有效的冷却系统。以下对一些最常见的设计和部件进行分析。

9.3.1　冷却通道网络

当模具有多于一条的冷却通道时，需要解决的一个问题是：模具操作人员如何将模具同模温控制器相连。考虑电脑显示屏框制品的模具，冷却通道的排布如图 9.12 所示。模具使用了 8 条冷却通道贯穿型腔。面对 8 条冷却通道的连接，机器操作人员可使用短的软管（图 9.12）连接冷却通道。这种设置有两个相关问题：其一，流阻贯穿了所有冷却通道的总长度，减小了冷却介质的流速［式（9.16）］；其二，模具冷却温度会沿冷却通道长度中冷却介质流速的减小而提高。因此，冷却介质从进入模具到出来，温差会升高。

鉴于这个问题，许多模具使用者在模温控制器和模具之间的机器上都安装有冷却剂歧管。那么操作者可使用更长的冷却软管分别连接两组冷却通道，以在模具另一边形成短的回路。这种设置如图 9.13 所示。这种排布因为简单且有效而被采用得极其普遍。然而，由于有更多的线路需要连接或断开，模具的安装和拆卸会变得复杂。部件数量和操作步骤的增加也增加了如由于丢失连接软管使冷却系统设置错误的可能性。

图 9.12　电脑显示屏框模具的冷却通道串联排布

在塑料工业中，目前精益生产受到越来越多的关注，其强调了降低工艺复杂度和缩

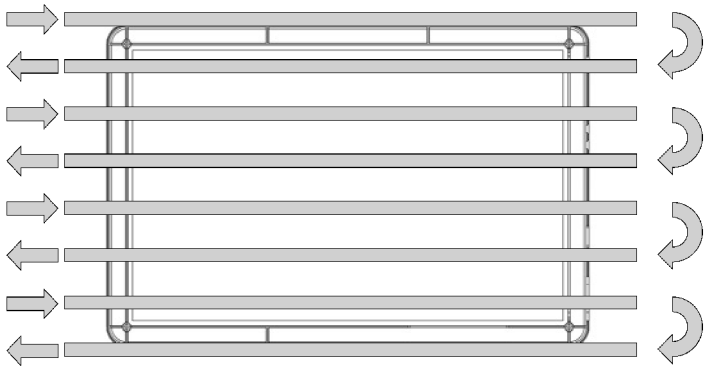


图 9.13 带有 4 条并联冷却回路的电脑显示屏框模具的冷却通道排布

短设置周期的重要意义。通过对注射成型模具更多的投资，缩短模具设计周期、减少潜在的失败模式和提高模具性能是可能的。在图 9.14 中，两条额外的垂直冷却通道在注射模具中同 8 条水平的冷却通道相连接；20 个螺塞装在模具上以在所选位置阻挡冷却介质。结果是在模具内部设计了一个冷却歧管，这仅需要两个连接，同时提高了冷却均匀度。此内部歧管的设计所需要增加的成本微乎其微，却提高了性能和便捷度。

为使更多复杂的冷却通道排布合理，需要在冷却通道排布中考虑使用螺塞。在之前的电脑显示屏框模具的冷却系统设计中，位于框显示面中的冷却通道不能有效地去除热量。(如果图 7.7 中使用了一个冷通道两板式模具，那么这些冷却通道会冷却浇口和流道。但是，对于一个热通道三板式模具，在型腔中心就不会产生热量)。

假设模具中心不需要冷却，为了减少模具制造成本和使模具更容易加工，可以绕零件外围设置冷却通道以提高型腔的冷却能力。图 9.15 显示了另一种冷却系统设计，使用了与图 9.14 中相同成本的不通孔和螺塞。这种设计使得模具应用方便，流阻降低，并且可对整个成型过程提供均匀的冷却。

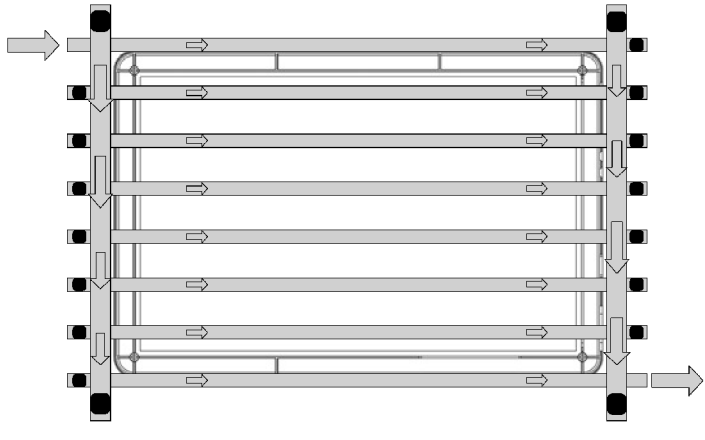


图 9.14 具有内部并联冷却通道排布的电脑显示屏框模具

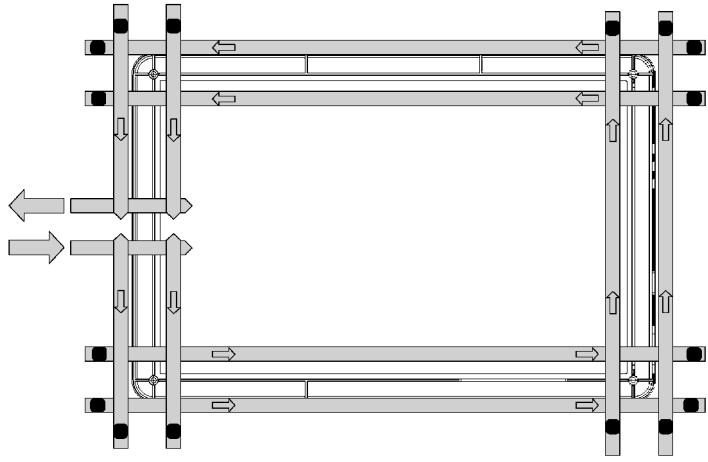


图 9.15　设置有周边冷却通道排布的电脑显示屏框模具

9.3.2　冷却镶件

为替代冷却通道的钻削，可以在型腔和型芯的后端面铣削与型腔形状一致的冷却通道，如图 9.16 所示。在这种情况下，沿型芯底部使用了球头铣刀，之后加工出连接到模具一边的线路。于是，即使轮廓是曲面，冷却通道也可以紧密围绕注射制品轮廓。为平衡回路内外压差，需要选择冷却介质的出入口位置。

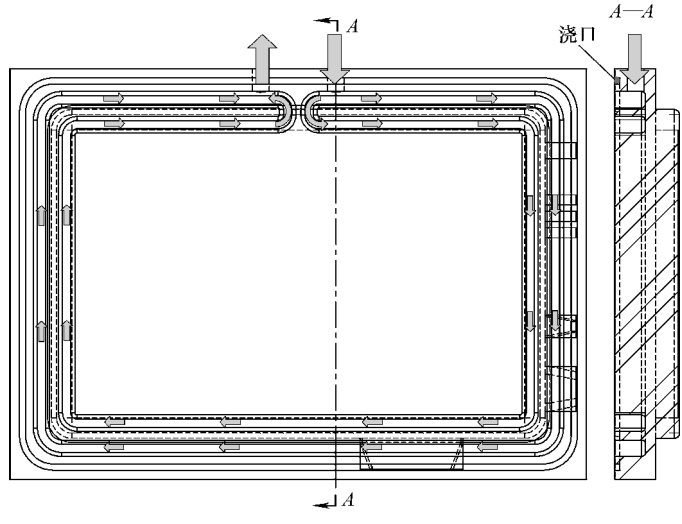


图 9.16　带有铣削冷却通道的显示屏框型芯镶件

虽然图 9.16 所示的冷却镶件设计提供了额外的冷却，但其也存在泄漏问题。在此设计中，使用了槽和垫圈。当将其紧密固定于支承板时，采用垫圈可以防止泄漏。为防止推杆位置的泄漏，每个推杆周围都需要垫圈。在此应用中，可以成功地应用卸料板，相关讨论参见 11.3.4 节。

9.3.3　随形冷却

随着制造技术的发展，出现了一种相对新的模具制造技术——选域激光烧结(SLS)。SLS 的一个好处是可以直接将冷却通道加工在型芯和型腔的任何位置。现在回到杯子模具的型芯镶件，其随形冷却通道设计如图 9.17 所示。因为 SLS 几乎可以制造任何形状，螺旋冷却通道可以加工在型腔周围以提高传热率和均匀性，因此减小了图 9.7 所示的温度梯度。

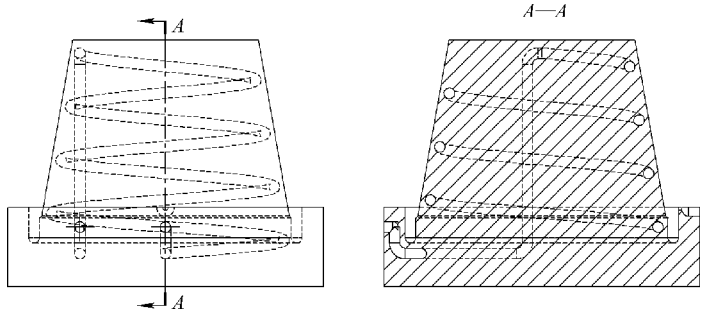


图 9.17　带有随形冷却通道的杯子模具型芯镶件

9.3.4　高热导率镶件

另一个减小温度梯度的方法是使用高热导率的镶件材料（如 Cu 940 或 Al QC7）制作部分或整个型芯镶件。因为这些材料比钢有更高的热导率，将它们应用于其中会减小沿型芯的温度变化。对于采用了 Cu 940 作为型芯镶件的杯子模具，在成型周期后预测的温度分布如图 9.18 所示。如前所述，每一条等温线代表了 2℃的温度改变。结果与图 9.11 比较表明，温度梯度减小了约 60%。

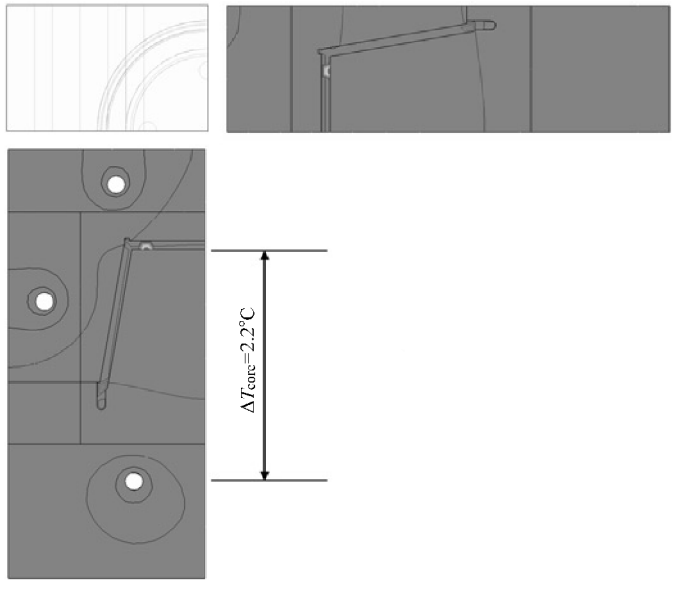


图 9.18　较深高热导率型芯中的温度

导热镶件也可以改善成型内部拐角处的冷却。因为传热是沿三维方向并且受到临近冷却通道至模具壁的限制，型腔镶件会比型芯镶件传导多两倍的热量。使用了同一材料的型芯和型腔的典型模具设计的温度分布如图 9.19a。当型芯和型腔都用 P20 制造时，沿注射制品壁厚有 5℃的温度梯度。但是，当型芯镶件使用 Cu 940 时，沿注射制品壁厚的温度梯度仅有 1℃，如图 9.19b 所示。

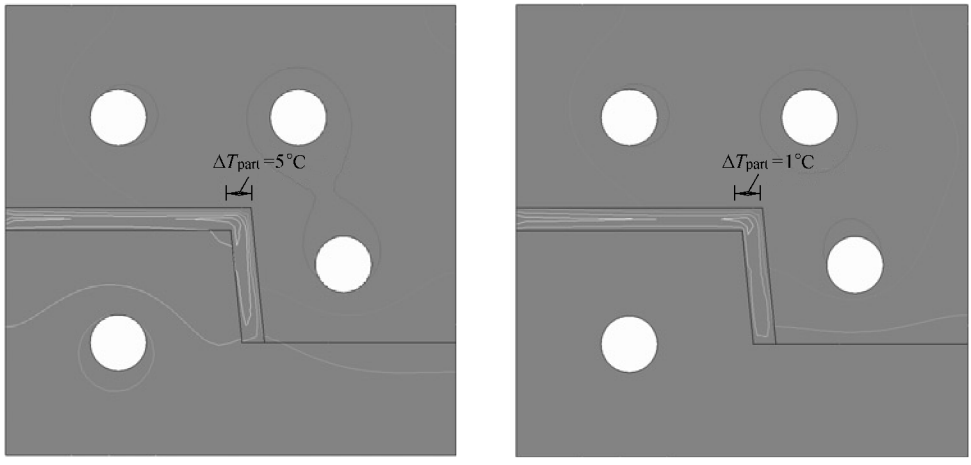


图 9.19　拐角处的温度分布

a）P20 型腔和型芯　b）P20 型腔和 Cu940 型芯

高热导率型芯的主要优点是可以有效地控制热流。这些材料可提高热导率，但它们的性质不适合用于整个模具。主要有两个原因。其一，应该注意的是图 9.19b 中获得的改善的温度分布是对型芯和型腔使用了不同材料而得到的。如果型芯和型腔均采用 Cu 940 制造，这些温度分布将是不一致的。其二，这些高热导率材料的硬度低，且易磨损。因此，高热导率镶件用于高生产量、低至中等注射压力和无磨损材料的情况是最好的。

9.3.5　长芯的冷却

即使使用高热导率材料，高长径比的模具型芯也会阻碍沿型芯长度进行有效的热量传导。因此，期望沿型芯轴有一冷却通道以传导型芯表面至型芯中心的热量。型芯中心更大的冷却通道通常需要更高的冷却介质流速和更高的热导率。但是，更大的冷却通道需要移除更多的材料，且会减小型芯结构的集中度。为了平衡这两者间的关系，人们开发了不同的冷却部件，以用于不同直径的型芯中。表 9.3 列出了一些不同的选择，以下将分别进行讨论。

1. 冷却镶件

对于中等和大直径的长型芯（一般长于 50mm），使用定制的冷却镶件可提供最有效的冷却。这种设计，需要加工去除一部分型芯中的材料。然后设计一个镶件以提供围

绕周边至整个型芯长度的冷却通道。冷却介质沿设计在冷却镶件轴心处的冷却通道返回。可设计成如图 9.20 所示的形式。即使冷却镶件设计得非常复杂，在四轴铣床或车床上还是很容易加工的。

表 9.3　长芯冷却的选择

	型芯直径/mm	孔径/mm	冷却速率
冷却镶件	>50	>25	很高
折流板	12～75	6～25	很高
扩散器	6～30	3～12	高
热管	5～20	3～12	中
导热销	<5	—	低

这种特殊的设计有利于冷却高强度的型芯。由于熔体压力的影响，其在减小它们的宽度的同时可以保证冷却通道远离型腔表面。需要注意的是对型芯顶部垂直方向的熔体压力产生的应力的控制。冷却镶件可以紧密固定于型芯后面，使熔体压力直接传递到模板表面。与型芯相关的结构的分析参见 12.3 节。

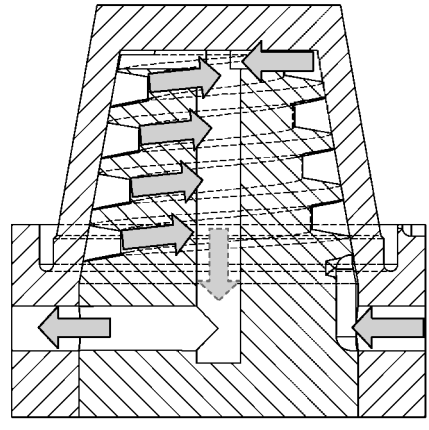


图 9.20　型芯冷却镶件

2. 折流板

折流板可以使冷却介质沿型芯轴向流动，主要用于冷却长的型芯。折流板通常插入型芯内部的孔中。因为这些设备必须输送冷却介质在型芯中上下流动，因此其最小尺寸需要比孔径 6.35mm（1/4in）稍大。螺旋折流板的设计如图 9.21 所示。图中，冷却介质通过主冷却通道上到折流板的直段，沿螺旋通道穿梭，然后返回折流板顶部。此设计的折流板直径为 12mm，型芯直径为 60mm。此设计足够有效，可使用更大的折流板以减小冷却通道与型腔表面的距离。

图 9.21 所示的折流板与图 9.20 所示的冷却镶件的设计与功能相比，本质上相同的两种设计仍有一些重要的不同。折流板不承担轴向载荷，且轴向（尤其是直段折流板）承受载荷的能力有限。因此，型芯的壁厚应当根据 12 章的分析进行适当设计。在应用方面，折流板是标准件，易于从供应商处获取，但是冷却镶件必须专门设计制造。从复杂度、费用和风险度方面分析，折流板总是明显优于定制的冷却镶件的。

3. 扩散器

扩散器是比折流板稍小的替代品，具有与折流板非常相似的冷却效果，此种设计如图 9.22 所示，冷却介质围绕扩散器由外向内返回。扩散器与型芯没有接触，所以不会

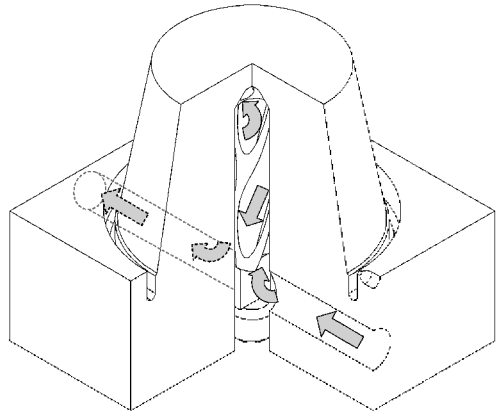


图 9.21　螺旋折流板

承载型芯的载荷。因此，扩散器设计有很小的壁厚，且尺寸小。直径小于 2mm 的扩散器可以用于直径为 3mm 的孔中。扩散器的主要缺陷是需要两条冷却通道——一条提供围绕扩散器的流体，另一条将流体从扩散器内部引返。应用更小孔径的扩散器会产生与其安装相关的更高的费用。

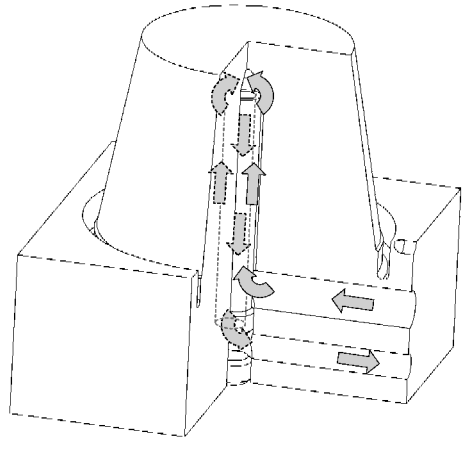


图 9.22　扩散器

4. 热管

热管是一个封闭的装置，有一个内腔，腔中有一种液体，这种液体会在熔体温度和冷却介质温度之间的温度沸腾。毛细管作用使冷却的内部液体爬出热管外壁。当将其设置在如图 9.23 所示的型芯中时，沿热管长度处的温度升高导致液体蒸发，然后气体冷却成液体而返回热管底部。热管中液体这种不间断的压缩和蒸发，可以获得相对高的冷却速率，而且不需要沿模具型芯轴线的冷却介质流动。

热管是一种可以由许多供应商提供的标准模具部件。其主要优点是：尺寸小、传热

速率高、安装方便。但是，其冷却效率却没有扩散器和折流板高。原因是模具冷却介质的整体传递具有很高的热量和比熔体温度更低的温度，能提供比热管更高的热传导效率。热管也有与初始反应（因为它们需要适当的温度梯度以开始有效的压缩－蒸发循环）相关的潜在问题，且在不同冷却介质和熔体温度条件下的效果是不同的（与几何和材料性质相关）。

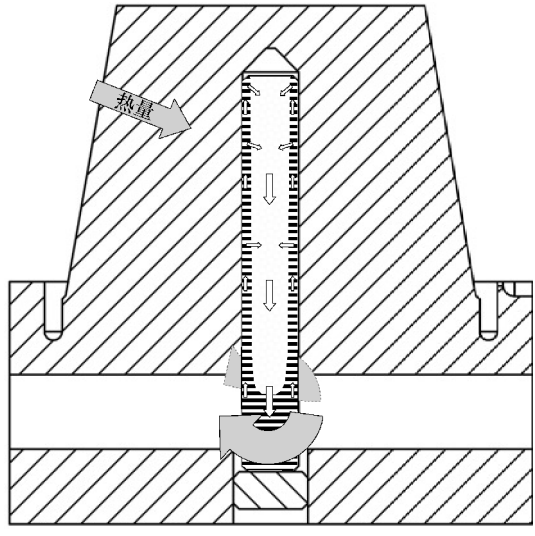


图 9.23　热管

5. 导热销

有非常小的直径的型芯（小于 5mm）不可以利用前述的任何沿型芯轴线传热的设计。因此，唯一的选择是利用导热销实施传热，如图 9.24 所示。模具冷却介质围绕销背部流动，从导热销传递尽可能多的热量。但是，由于长径比高，型芯销阻碍了在长度上的热流，传热不是很有效。

6. 有空气通道的内锁芯

当零件几何形状允许时，具有很小直径的细长的型芯可以同型腔联锁，如图 9.25 所示。这种设计有两个优点。其一，型芯同型腔的联锁为型芯提供了支撑，可减小 12.3.3 所分析的型芯弯曲。其二，联锁提供了一种方法，利用它可使冷却介质从动模一侧穿过型芯到达定模一侧。在这种设计中利用空气作冷却介质，因为这种冷却介质在开时会同制品和环境接触。当空气密度很低时，会降低冷却效果，这种设计可比实心型芯销提供更多的传热。

9.3.6　单边热流

有两种普遍的情况，可忽视来自制品一边的热流。其一是图 9.24 所示的细长型芯单独依靠细长销轴线下的导热从模具内部传热。因为销非常细长，沿销的长度方向下端有很少的传热。因此，主要的传热转到型腔镶件的冷却通道中。

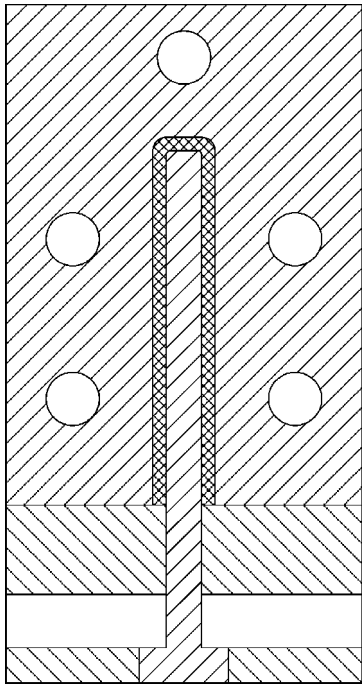


图 9.24　导热销

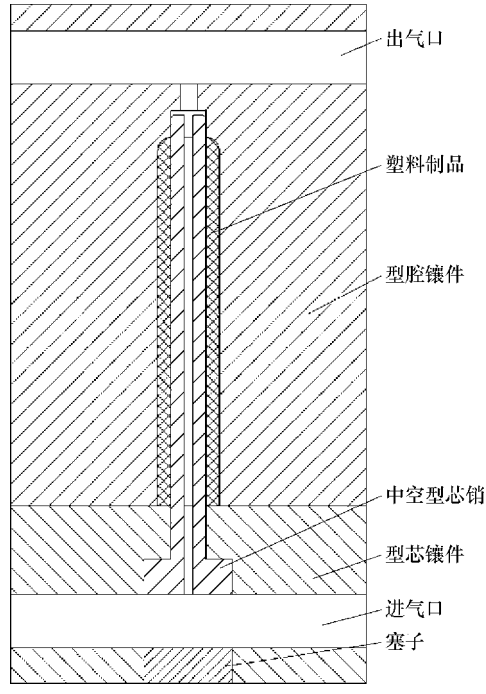


图 9.25　与型腔联锁的细长型芯

图 9.26 所示为具有细长型芯销的模具中的热通量。由图可知围绕型芯销从中心线处到冷却介质底部有相当大的传热。但是，销的横截面面积太小，以至于在销表面热辐射占了主导。换句话说，同型芯接触的热塑性流体必须通过塑料至金属和型腔镶件的冷却通道来传递主要的热量。

关于这些细长型芯的冷却，模具设计者应该明白，由于冷却介质的有限传热，必须延长冷却时间。可通过假设型芯中没有传热而容易地分析出更差的方案。此方案的热通量情况如图 9.27 所示。因为所有的热量必须通过模具的一边传递，正如塑料熔体两层都在彼此上部，其热行为是相同的。此双层厚度是有效的，因为温度分布呈中心线对称，因此没有相关的热通量。

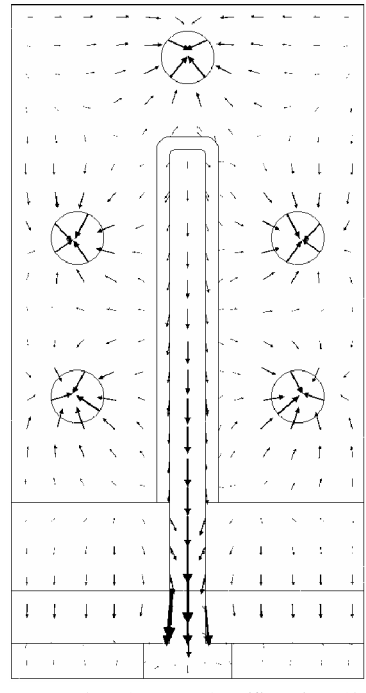


图 9.26　具有细长型芯销的模具中的热通量

为了计算热流一边的冷却通道，可通过用式（9.5）、式（9.6）和式（9.8）替代两倍

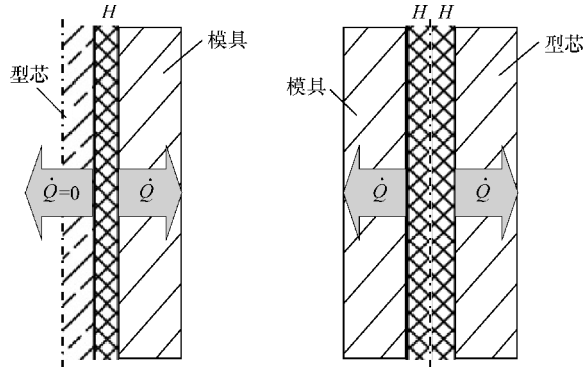


图 9.27　更差的热通量情况

的模具厚度变量 h。结果是任何单边冷却的模具同两边冷却的模具相比，冷却时间会有四倍的增加。

例：估算应用二次成型的冷却时间，模具有 3mm 厚的 ABS 层和 2mm 厚的 PC 层。

PC 层作为绝热层，ABS 会有一边热流。冷却时间计算为

$$t_c^{ABS}=\frac{(2\times 0.003)^2}{8.69\times 10^{-8}\pi^2}\ln\left(\frac{4}{\pi}\times\frac{239-60}{97.6-60}\right)s=75.6s$$

延长冷却时间是不经济的，因为循环时间通常会用于 ABS 和更薄的 PC 层的成型。为了更经济一些，最好二次成型较薄的层。那么第二次成型 PC 层的冷却时间近似为

$$t_c^{PC}=\frac{(2\times 0.002)^2}{1.89\times 10^{-7}\pi^2}\ln\left(\frac{4}{\pi}\times\frac{300-80}{138-80}\right)s=13.5s$$

其比 3mm 厚的 ABS 层少了 18.9s 的冷却时间。因此，二次成型工艺中，在 ABS 上成型薄 PC 层就不需要额外的冷却时间。

9.4　本章小结

虽然使用相对少的额外投资就会得到产量的显著增加，但冷却系统的设计通常在注射模具设计中没有得到应有的重视。冷却系统设计包括计算冷却时间、传热速率和冷却介质流速，接着是确定冷却通道直径、深度和间距。一旦这些都确定了，在不影响其他模具部件的情况下设计可以提供高效均匀传热的冷却通道排布。冷却系统设计也必须明确冷却介质在冷却通道网络中的流动、设计冷却镶件和其他模具部件以使注射制品中的温度均匀。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 冷却系统设计工艺，需要合理地确定冷却系统设计流程。
- 如何估算冷却时间和估计计算中可能存在的错误。
- 如何估算传热速率和检查与模具温度控制器规范相关的值。
- 如何计算所需冷却介质流速并检查与模具温度控制器规范相关的值。

- 如何估算冷却通道的最小和最大尺寸，选择最终的冷却通道直径。
- 如何估算冷却通道的深度和间距以明确在制品成型中的应用。
- 如何排布有效的冷却通道，而不影响其他模具部件，或重新设计模具以提供更有效的冷却。
- 如何辨别和弥补成型应用中冷却相关的问题，如尖角处和深的型芯等。

第 10 章中，讲解了注射制品的收缩和翘曲变形的检测。随后，说明了推出系统设计流程。收缩和制品的推出都是与冷却工艺紧密相关的。

第 10 章　收缩和翘曲变形

注射制品设计者通常使用制造和组装（DFMA）指导进行设计，以减少组装中的产品数量。塑料制品可以设计得非常复杂，带有许多特征和紧密配合公差。完成注射制品的设计任务需要满足尺寸要求，这是模具设计者、生产制造者、材料供应者和产品设计者所负责各项工作的结合。产品设计者应该提供壁厚均匀和详细的可行性规范设计。材料供应者应该提供一致的聚合物树脂和有用的与材料特性相关的指导。生产制造者应该选择合适和一致的工艺条件以操作控制模具。模具设计者应该提供熔体填充和冷却平衡的模具，并且保证型腔尺寸是根据合适的收缩设计制定的。

注射制品的收缩主要取决于塑料的热收缩、保压时的塑料压缩和模具金属的热膨胀。这一系列影响因素决定了最终制品的尺寸，如图 10.1 所示。在成型前，假设模具冷却温度在室温以上，则模具型腔尺寸相对于机加工尺寸会有少许的改变。虚线说明了型腔的热膨胀，其可以根据模具金属的热膨胀系数乘以模具冷却介质和室温的温度差计算得到。对于 P20 模具镶件，热膨胀系数为 $12.8\times10^{-6}℃^{-1}$。如果成型材料为 ABS，模具的操作温度可以是 60℃，比室温高出 40℃，在这种情况下，型腔的热膨胀可能是 0.0005m/m 或 0.05%（$12.8\times10^{-6}℃^{-1}$乘以 40℃）。但与塑料收缩的大小相比，模具尺寸的变化很小，容易推测和应该考虑的是对于应用的配合公差在何时明确以确定最终型腔尺寸。

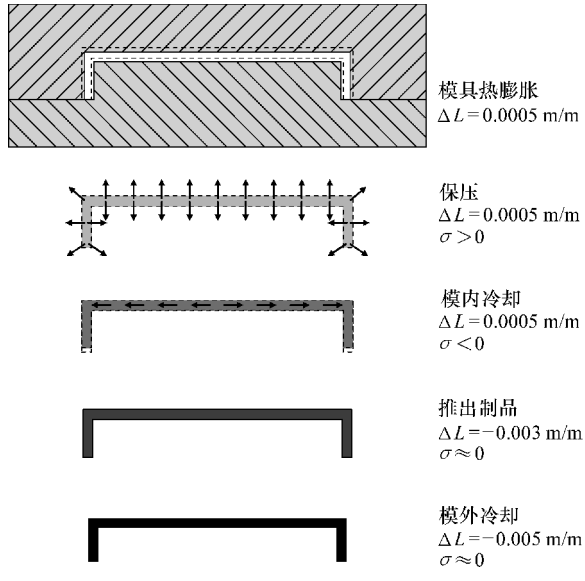


图 10.1　模具和注射制品的收缩行为

在成型工艺的填充和保压阶段，型腔中的熔体受到型腔表面的限制而产生高压。这种压缩会产生膨胀应力，这就意味着型腔中的熔体会膨胀。在模具冷却阶段，熔体温度下降。在大多数成型工艺中，熔体的热收缩导致熔体压力的下降和相关压缩应力的释放。熔体的相继冷却导致显著的热收缩。注射制品会在模具中沿任何不受限制的表面如筋板和边壁等的厚度发生物理收缩。但是，在制品中的一些区域，塑料的收缩受到边壁的限制，在这些区域，塑料不会收缩，而会产生内部的拉伸应力。

在推出时，塑料中大部分的应力得到了释放，注射制品发生瞬时收缩。模外冷却允许制品在室温下均衡成型以及额外的残留应力产生松弛。图 10.1 所示的例子中，总的长度改变 ΔL 是 -0.005m/m。这种零件长度与所设计的模具尺寸的相对减小称为收缩，用 s 表示

$$s = 1 - \frac{L_{\text{molding}}}{L_{\text{cavity}}} \tag{10.1}$$

例：计算型腔长度为 20mm、而制品长度为 19.85mm 的公称收缩。

$$s = 1 - \frac{19.85}{20.00} = 0.0075 = 0.75\%$$

例：计算型腔长度为 300mm、材料收缩为 0.8% 时，注射制品的长度。

$$L_{\text{molding}} = (1 - s)L_{\text{cavity}} = (1 - 0.008) \times 300\text{mm} = 297.6\text{mm}$$

注射制品长度改变的可能性明显取决于成型应用的需要。塑料零件尺寸公差占其公称长度的百分比有特殊的规定。例如，塑料工业协会为大批生产提供了标准公差和紧密配合公差的指导。规定的标准公差是 ±0.4%，而紧密配合的公差是 ±0.1%。另一种情况，0.5% 的收缩率会导致注射制品超出公差范围。正因为如此，模具设计者在设计型腔尺寸时必须考虑塑料收缩。如果模具设计者已知净收缩是 0.5%，那么要得到长 100mm 的制品，型腔尺寸应设为 100.5mm。

10.1　收缩分析流程

收缩分析的主要目的是了解塑料的收缩行为和相关的工艺参数。通过理解塑料的收缩，可以合理地进行同收缩率相关的模具设计。也可以为生产制造者提供帮助以指导他们设定在公差范围内的加工条件。

10.1.1　估计工艺条件

预测收缩的第一步是估计模具中聚合物熔体的压力和温度，以及机器的设定点。因为实际的压力和温度在之前是未知的，模具设计者可以假设熔体温度等于材料供应者提供的温度范围的中间温度。熔体压力很难预测，因为生产者会调整填充和保压压力以满足不同的需要（包括收缩）。但是，常规的成型工艺是将保压初始值设定为充模压力的 80%。

例：对于用 ABS（Cycolac MG47）制成的 Tablet PC Bezel 电脑框架，假设熔体温度为 239℃。填充压力在之前的 5.5.2 节已经分析过了，得到 83MPa 的压力，双浇口进入

型腔，型腔公称壁厚为1.5mm。相应的，假设保压阶段熔体压力为66MPa。模温假设为冷却温度推荐值范围的中间温度60℃。

10.1.2　压缩行为模型

聚合物熔体的压缩（或pvT）行为可以通过双域Tait方程模拟，它描述了比体积v与熔体压力和温度的函数关系。其“双域”是指对比体积在固体和熔体两个阶段分别进行模拟。固态和熔融态之间的转变温度是与压力相关的函数，即

$$T_t(p) = b_5 + b_6 p \tag{10.2}$$

式中，b_5是压力为0时的转变温度；b_6是转变温度与压力有关的变化率。

对于转变温度以下的温度，相关比体积为v_0（T）和压缩系数为β，模型为

$$\begin{aligned} v_0 &= b_{1,s} + b_{2,s}(T - b_5) \\ \beta(T) &= b_{3,s}\exp[-b_{4,s}(T - b_5)] \end{aligned} \tag{10.3}$$

式中，$b_{1\cdots4,s}$是材料在固态时相关特性的材料系数。

对于高于转变温度的温度，相关比体积和压缩系数模型为

$$\begin{aligned} v_0 &= b_{1,m} + b_{2,m}(T - b_5) \\ \beta(T) &= b_{3,m}\exp[-b_{4,m}(T - b_5)] \end{aligned} \tag{10.4}$$

式中，$b_{1\cdots4,m}$是材料在熔融态时相关特性的材料系数。

那么比体积与压力和温度之间的函数关系为

$$v(T, p) = v_0(T)\left\{1 - 0.0894\ln\left[1 + \frac{p}{\beta(T)}\right]\right\} + v_T(T, p) \tag{10.5}$$

式中，v_T是从紧密堆积的半结晶聚合物到更疏松堆积的无定形聚合物转变相关的额外比体积，这个转变比体积模型为

$$v_T(T, p) = b_7\exp\{b_8[T - T_t(p)] - b_9 p\} \tag{10.6}$$

双域Tait方程的系数对于许多聚合物是合理的。附录A提供了一些不同聚合物的模型系数。ABS（Cycolac MG47）的比体积与温度在三种不同压力条件下的关系如图10.2所示。图10.2说明，随着熔融温度的升高，聚合物熔体膨胀，比体积增加。当施加压力时，聚合物熔体被压缩，比体积减小。通过pvT图可以提取许多有用的信息。首先，室温零压条件下的比体积近似为$0.955\text{cm}^3/\text{kg}$。这说明密度$\rho$为

$$\rho = \frac{1000\text{kg/m}^3}{0.955} = 1047\text{kg/m}^3 \tag{10.7}$$

此值与材料提供者给的密度值1044kg/m^3非常相近。体膨胀系数*CVTE*是比体积与温度相关的改变。从图中，*CVTE*可以计算为

$$CVTE = \frac{v(T = 100℃) - v(T = 20℃)}{100 - 20}℃^{-1} = \frac{0.98 - 0.955}{80}℃^{-1} = 3.1 \times 10^{-4}℃^{-1} \tag{10.8}$$

正如要讨论的，*CVTE*直接与线膨胀系数和收缩相关。

材料的压缩系数β也可以通过pvT图计算，比体积的改变率与压力相关，即

$$\beta = \frac{v(p = 200\text{MPa}) - v(p = 0\text{MPa})}{200 - 0}\text{MPa}^{-1} = \frac{0.905 - 0.955}{200}\text{MPa}^{-1} = -2.5 \times 10^{4}\text{MPa}^{-1} \tag{10.9}$$

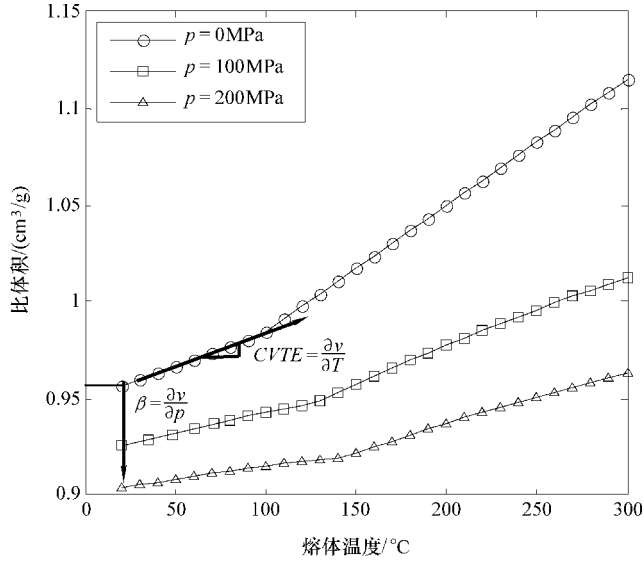


图 10.2　ABS 的 *pvT* 行为

从图 10.2 中发现，与聚合物热膨胀和压缩相关的系数在熔融态比固态时更大。原因是聚合物随着温度的提高在熔融态比固态时有更大的原子能。这其中所提高的能量提供了更多的围绕分子的“自由体积”，并增加了聚合物的热膨胀和压缩。

10.1.3　估计体积收缩

聚合物熔体在型腔中的填充、保压和冷却是在一定范围的熔体压力和温度下进行的。同时，型腔中聚合物熔体的比体积会发生相应的改变。图 10.3 描述了熔体压力、温度和比体积在成型循环中的变化过程。

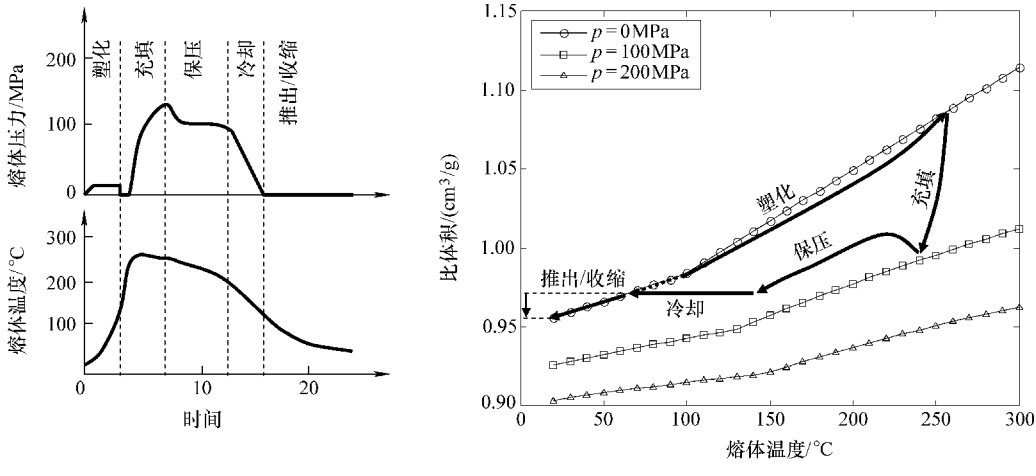


图 10.3　ABS 材料在成型过程中的 *pvT* 循环

图 10.3 说明，在塑化期间，熔体温度升高和比体积增大。在填充期间，熔体温度几乎为常数，但是熔体压力增加会导致比体积的减小。在保压过程中，材料伴随压力和温度的降低而冷却，导致比体积的进一步减小。在保压阶段过后，不再有额外的材料压进型腔，熔体压力随熔体冷却而降低，因此导致比体积增大。在冷却阶段开模，所有的残留压力得到了释放。然后推出零件，冷却至室温。

每个成型阶段结束时塑料比体积如图 10.4 中的立方体所示，立方体的体积是图 10.3 所示数值的 4 倍。每个立方体包含有不同成型阶段后的熔体温度和压力，立方体的大小表示熔体的比体积。

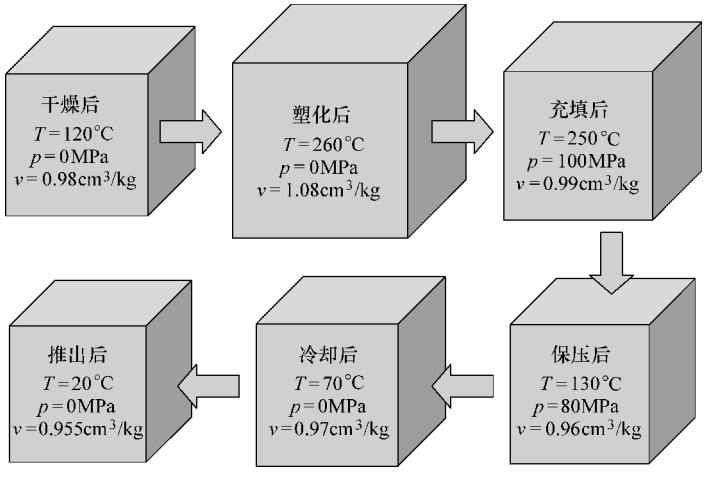


图 10.4　ABS 材料在成型循环中比体积的变化

图 10.3 和图 10.4 说明，冷却后的比体积为 0.97cm^3/kg，推出后（零件冷却至室温）的比体积为 0.955cm^3/kg，塑料的比体积变化为 −0.015cm^3/kg。此比体积的变化会直接导致注射制品的线性收缩。保压阶段后体积收缩的预估是计算体积和线性收缩的关键。

如果保压阶段后的熔体压力和温度已知，合理准确的体积收缩预估可以通过计算得到。正如之前所讨论的，型腔中的熔体压力在保压阶段预估为 66MPa。型腔中的熔体温度是材料特性、模具几何形状和工艺条件的函数。如果保压时间已知，那么熔体的平均温度可以预估，正如第 9 章所讨论的。但是，更简单的方法是假设保压阶段后的熔体温度等于无流动熔体温度，即聚合物高黏度条件下的温度。不同材料的无流动温度可参见附录 A。

比体积的变化可以计算为比体积在保压阶段后和注射制品完成加工后的比体积之差，即

$$\Delta v = v(T_{\text{no_flow}}, p_{\text{pack}}) - v(T_{\text{end_use}}, p_{\text{end_use}}) \tag{10.10}$$

比体积的比率 r_v 计算为

$$r_v = \frac{v(T_{\text{no_flow}}, p_{\text{pack}})}{v(T_{\text{end_use}}, p_{\text{end_use}})} \tag{10.11}$$

例：计算由 ABS 制造的电脑框架的绝对和相对比体积变化。

保压压力假设为 66MPa。保压阶段后的熔体温度假设等于转变温度 132℃即 405K。

ABS 在保压下的转变温度为

$$T_t(p) = (370.6 + 2.3 \times 10^{-7} \times 66 \times 10^6)\,\text{K} = 386\text{K} = 113℃$$

因为无流动温度 405K 在转变温度 386K 之上，应该使用熔融态的系数。保压（66MPa 和 405K）后的比体积可计算为

$$v_0 = [9.83 \times 10^{-4} + 6.51 \times 10^{-7} \times (405 - 370.6)]\,\text{m}^3/\text{kg} = 1.01 \times 10^{-3}\,\text{m}^3/\text{kg}$$

$$B = 1.33 \times 10^8 \exp[-4.38 \times 10^{-3} \times (405 - 370.6)]\,\text{Pa} = 1.16 \times 10^8\,\text{Pa}$$

$$v(132℃, 66\text{MPa}) = \left\{1.01 \times 10^{-3} \times \left[1 - 0.0894 \ln\left(1 + \frac{66 \times 10^6}{1.15 \times 10^8}\right)\right] + 0\right\}\text{m}^3/\text{kg}$$

$$= 9.65 \times 10^{-4}\,\text{m}^3/\text{kg}$$

成型后，假设塑料在室温 20℃下使用。使用固态下的 pvT 模型参数，在 293K 温度和 0MPa 压力条件下的比体积为

$$v_0 = [9.83 \times 10^{-4} + 3.47 \times 10^{-7}(293 - 370.6)]\,\text{m}^3/\text{kg} = 9.56 \times 10^{-3}\,\text{m}^3/\text{kg}$$

$$v(20℃, 0\text{MPa}) = \left\{9.65 \times 10^{-4}\left[1 - 0.0894 \ln\left(1 + \frac{0}{\beta}\right)\right] + 0\right\}\text{m}^3/\text{kg} = 9.56 \times 10^{-4}\,\text{m}^3/\text{kg}$$

那么比体积的绝对变化为

$$\Delta v = (9.65 \times 10^{-4} - 9.56 \times 10^{-4})\,\text{m}^3/\text{kg} = 0.09 \times 10^{-4}\,\text{m}^3/\text{kg}$$

最后，比体积变化率为

$$r_v = \frac{9.56 \times 10^{-4}\,\text{m}^3/\text{kg}}{9.65 \times 10^{-4}\,\text{m}^3/\text{kg}} = 0.9907$$

体积收缩的相对改变为 1%。线性收缩会明显减小，这正是以下要讲的。

10.1.4　估计各向同性线性收缩

体积收缩与注射制品三维空间尺寸的收缩有关。如果在每一方向显示出相同的性质，则称为各向同性。许多填充塑料都呈现出各向同性行为，因此注射制品的性质在厚度上、平行和垂直于流动的方向上都是相同的。

如果材料是各向同性的，那么在所有方向上都应该呈现相同的线性收缩 s。考虑图 10.5 中的单元立方体和收缩立方体，收缩立方体的体积有相对的改变 r_v。收缩立方体的每一边从 L 减小到 $L(1-s)$，s 是线性收缩。

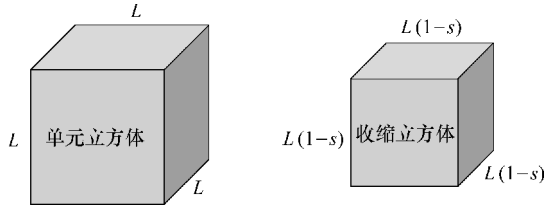


图 10.5　体积和线性收缩

单元立方体的体积为 L^3，收缩立方体的体积为 $L^3 r_v$，为保证质量不变，收缩后的体积必须等于$[L(1-s)]^3$,从而有

$$L^3 r_v = [L(1-s)]^3 \tag{10.12}$$

计算线性收缩 s 的方程为

$$s = 1 - \sqrt[3]{r_v} \tag{10.13}$$

例：计算 ABS 框架注射制品的线性收缩。

假设前边的条件，体积收缩的相对变化是 0.9907。这导致各向同性收缩为

$$s = 1 - \sqrt[3]{0.9907} = 1 - 0.9969 = 0.0031 = 0.31\%$$

此计算的收缩小于材料供应商推荐的收缩率 0.6%。其中的差别并非错误，而可能是由于相对高的保压压力 66MPa（9600psi）和假设用于薄壁制品的原因。

10.1.5　估计各向异性收缩

一些材料如液晶聚合物和玻璃填充聚合物，呈现的材料性质取决于流动方向。对于这些各向异性材料，在填充和保压阶段，分子或纤维可在流动区域定向，如图 10.6 所示。图中通过长径比和椭圆的方向显示说明，贯穿厚度的取向非常复杂。填充和保压阶段的剪切流动会趋于取向于贯穿相当部分厚度的塑料熔体的流动方向。

各向异性材料在各主方向上呈现出不同的性质。例如，一种玻璃填充材料会在原则流动方向上比其他方向呈现更少的收缩。其强度的提高是由于填充了更高强度的玻璃纤维，而玻璃纤维取向于流动方向。因为玻璃有更低的热膨胀系数，因此材料也会在流动方向上比其他方向有更小的收缩。体积和各向异性线性收缩之间的关系如图 10.7 所示，其中变量 a 表示流动方向上与其他两方向相关的各向异性分数。

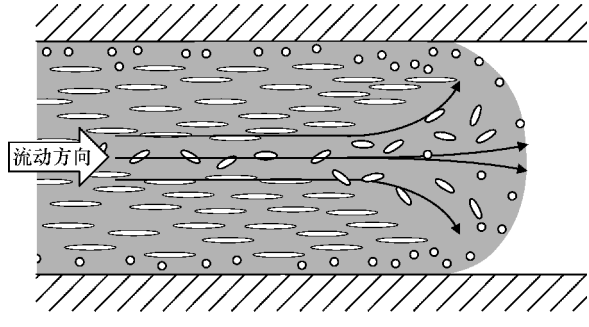


图 10.6　取向导致各向异性

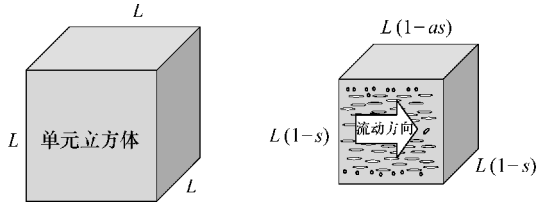


图 10.7　体积和各向异性收缩

按照之前的各向同性材料收缩的推导，各向异性收缩的收缩立方体体积为

$$L^3 r_v = L^3 (1-s)^2 (1-as) \tag{10.14}$$

得到立方方程为

$$as^3 - (2+a)s^2 + (2+a)s - (r_v - 1) = 0 \tag{10.15}$$

这个立方方程可以解析计算，可以通过方程迭代很容易地得到其解为

$$s = -\frac{(r_v - 1) + (2+a)s^2 - as^3}{2+a} \tag{10.16}$$

例：假设 ABS 用于成型框架注射制品，材料中有 15%（体积分数）的玻璃纤维（材料牌号为 Cycolac CRT3370）。如果已知塑料材料在流动方向上的收缩是其他方向收缩的一半，估算其各向异性收缩。

体积分数为 15% 的玻璃纤维会减小体积收缩，因为玻璃比塑料有更低的热膨胀。玻璃的密度为 2600kg/m^3，未填充或“纯” ABS 的密度为 1040kg/m^3，玻璃纤维在 ABS 中的体积为

$$p = 15\% \times \left(\frac{1044 \dfrac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2600 \dfrac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) \approx 6\%$$

这说明填充塑料的 94% 有明显收缩，而塑料的 6% 不会有明显的收缩。此减小的压缩性说明了收缩体积的减小为

$$\Delta v = 94\% \times 0.09 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg} = 0.085 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}$$

因此收缩体积相对变化为

$$r_v = \frac{9.56 \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}}{(9.56 + 0.085) \times 10^{-4} \text{m}^3/\text{kg}} = 0.9912$$

各向异性分数 a 为 0.5。为迭代计算各向异性收缩，需要预估收缩。因为收缩很小，且式（10.16）非常稳定，零收缩的预估计应该是足够的。首先迭代式为

$$s = -\frac{(0.9912 - 1) + (2 + 0.5) \times 0^2 - 0.5 \times 0^3}{2 + 0.5} = 0.00352 = 0.352\%$$

将收缩 0.00352 用于另一迭代式中，即

$$s = -\frac{(0.987 - 1) + (2 + 0.5) \times (0.00352)^2 - 0.5 \times (0.00352)^3}{2 + 0.5} = 0.00351 = 0.351\%$$

两次迭代后，得到解。收缩 s 在厚度方向上等于 0.35%，流动方向的收缩 as 为 0.18%。

10.1.6　评估收缩范围

在作出推荐之前，需要评估收缩估算相关的潜在误差。大多数收缩估算中的明显误差是由于假设的熔体压力和温度导致的。因此，需要估算压力、温度极值以给收缩提供较低和较高的极限范围：

- 收缩的下限与保压阶段长的持续时间和高的熔体压力相关。最长持续时间与塑料熔体停止流动并冷却至非流动温度的时间相关。高保压很难估算，因为其取决于成型

工艺的设定和相关的机器设备。实际的保压的上限是注射压力的120%或100MPa。

- 收缩的上限与保压阶段短的持续时间和低的熔体压力有关。缩短持续时间会使型腔压力在塑料熔体得到足够的冷却前降低，而引起过度的体积收缩。正是如此，最大收缩可以通过评估在低的保压压力（等于注射压力的40%即30MPa）和高的熔体温度（等于介于无流动温度和熔体温度之间的温度）条件下得到。

例：估算笔记本电脑框架的最小和最大收缩。

为计算最小收缩，假设在保压后熔体温度和压力分别是132℃和100MPa。保压后的比体积为$9.50\times10^{-4}\,m^3/kg$，其导致相对体积收缩增加至1.007，线性收缩估算为-0.2%。换句话说，就是大量材料充满了型腔，一旦将制品从模具中推出，材料会发生膨胀，而不是收缩。这是一个有趣的发现和可能发生的问题，模具通常不会以得到零收缩或负收缩的目标而设计。原因是一些收缩是人们所期望的，因为塑料收缩可以使其脱离型腔壁，并附着于型芯上，这样注射制品才可得以推出。负收缩与型腔中塑料的过保压有关。在过保压情况下，材料保持压缩，因此可能会导致零件中的压力受型腔中筋板和凸台影响而不能得到释放。

为计算最大收缩，可假设在保压后熔体温度和压力分别是185℃和30MPa。保压后的比体积为$10.14\times10^{-3}\,m^3/kg$，其导致相对体积收缩减少至0.943，线性收缩估算为1.9%，这比之前估算的收缩0.3%明显更高。在这种情况下，保压阶段提供的材料不足以补充型腔中的体积收缩。模具设计者应该建议更高的保压压力、延长保压阶段以避免额外的收缩。

10.1.7 建立最终的收缩推荐

实际上，精确的收缩在模具设计、制造、试模之前是未知的。建立最终收缩推荐的目的是：

- 提供接近材料收缩的收缩值。
- 提供模具加工时考虑到在一定工艺条件范围内使制品尺寸在要求规格中的收缩值。
- 提供模具加工“保险柜”，即模具在需要时容易修改以使制品仍在要求的规格范围内。

收缩分析应该在给定有效的熔体温度和熔体压力条件下提供合理的收缩估算。但是，基于假设的材料性质和工艺条件而进行的收缩估算可能变化很大。因此，收缩分析应该作为与收缩相关信息的补充资源。收缩分析应该用于潜在误差的排除，应该用于验证根据其他资源所进行的收缩估算。

有几种普遍的收缩数据资源，可以用于（另外分析）辅助建立最终收缩推荐。通常，材料提供商或其他测试实验室可能会设计制造标准模具以估算收缩。典型的测试模具包括2mm或3mm厚的样条块，其是在熔体温度和压力中等范围内成型的。此注射制品在它们尺寸测试和收缩计算前允许一定时间的补偿。此收缩信息如果合理，那么分析结果将是很精确的，因为测试是在精确的材料和接近成型加工条件下进行的。但是，如果壁厚和工艺条件与此测试模具的条件相比有明显改变，那么提供的收缩数据可能会不

够准确。

材料供应者提供的收缩数据可能不是基于实际材料的测试，而是假设材料会按照所假设的之前测试的相似材料行为进行变化。更昂贵而更精确的方法是设计、建立和测试一种原型模具，其流动长度、壁厚和冷却系统与所明确的成型加工条件保持一致。此原型模具成型提供的熔体压力和温度应该与最终产品模具非常接近，那么利用原型模具观察到的收缩应该接近于最终产品模具。原型模具的开发可能很昂贵，但是此精确的收缩测试在紧密配合公差应用中会非常有用。

另一种选择是依靠之前的来自模具设计和成型加工经验而得到的数据。在许多情况下，模具可能已经设计并用于成型加工，其与现行的模具设计应用非常相似。在这种情况下，模具设计者可通过比较注射制品测试尺寸与模具钢尺寸获得最佳的估算。但是在制定最终推荐之前，模具设计者应该询问模具操作员，检查是否模具操作员要在不同熔体温度和压力下操作机器。如果是，则模具设计者应该要求操作员给定相应的成型条件(即使成型超出规范)，然后计算这些成型的收缩再用于模具设计中。

第四种选择是对填充、保压和冷却阶段进行复杂的计算机模拟来估计模具中的线性收缩。但是计算机模拟比这里进行的收缩分析使用了更高级的物理方程和提供了更详细的结果，而且计算机模拟仍然取决于与假设的材料行为和工艺条件相关的相同误差。但是，当人工分析得到不一致的型腔中的收缩估算时，通过数字模拟验证人工收缩分析是有很有用的。

在建立最终收缩推荐的过程中，模具设计者应该进行收缩分析并联系来自材料供应者和前期经验的数据进行结果验证。如果收缩率不确定，那么模具设计者应该将潜在误差和操作者、材料供应者和最终使用者建立联系，以减小不确定性，并评估应用的收缩率导致模具成本改变的可能性。在一些合同中，最终收缩推荐是模具用户的责任，用户最终要支付模具设计费以及发生任何错误所产生的费用。在其他情况下，没有单位愿意对不确定的收缩负责，因此各单位一致认为，原型模具成型是表征收缩和减小风险的必要工程。

10.2　收缩分析和验证

10.2.1　数值模拟

为验证所描述的收缩分析，使用商业化注射成型模拟软件（Moldflow MPI 5.1）对笔记本电脑框架进行了数值模拟。为了进行模拟，使用了 *pvT* 材料模型和基于收缩试验进行收缩观察的专门的收缩模型。因为所需的收缩试验对于 Cycolac MG47 是不合理的，所以数值模拟以 Cycolac 570 代替。

模拟预测的收缩率如图 10.8 所示，假设取推荐范围内的中间熔体温度、中间冷却温度、66MPa 常数保压和 20s 冷却时间。结果表明沿型腔的收缩变化很大。薄壁区域在高压下冷却，收缩率很低（0.3% 等级）。零件大部分区域收缩率适中（0.6% 左右），比之前人工分析所估计的收缩大 0.31%。

在接近填充结束时收缩率估计在1%以上。填充结束时的高收缩率是由于接近浇口的材料冻结并阻止了后边流动聚合物熔体的进入导致的。结果表明了模具设计者和最终使用者的一个明显的困惑：应该使用什么收缩值？如果使用0.6%的收缩，那么零件的宽度可能超出规格范围，由于沿顶端和低端都有过量的不清楚的收缩。

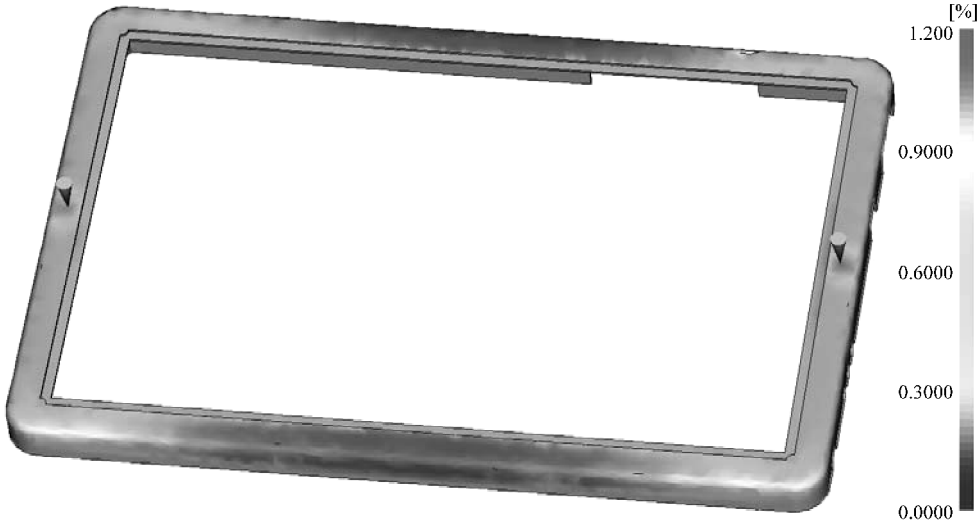


图10.8　ABS成型的电脑框架的收缩率

如果收缩不一致，模具设计者可以采用几种不同的策略。一种是应用日益普遍的方法，需要结合计算机模拟和CNC机，使模具设计者在模具不同的部分使用不同的收缩值。对于图10.8所示的笔记本电脑框架，模具操作者可以选择左右两边为0.6%的收缩值，上下边1%的收缩值。在此例中，此策略相对容易应用，且具有紧密连接的表面，但是应用不一致的收缩值会很复杂且风险大。

获得紧密配合公差的一个更普遍的方法是应用多浇口，以确保型腔中的收缩一致。通过增加笔记本电脑框架浇口的数量（从2增加到4），如图10.9所示，型腔中的保压和收缩更加一致。在此例中，额外的两个浇口将顶端中心处的最大收缩1.1%减小到了边角处的0.9%。而且，型腔中的平均收缩从双浇口模具设计的0.6%减小到四浇口模具设计的0.5%。

在许多情况下，不被采纳的不一致收缩直到模具设计、制造和测试后才得以确认。在一些情况下，增加额外的流道和浇口会相对地简单便宜。但在其他情况下，额外的两个浇口可能会很昂贵。例如，从原来的两个直流道修正为四个H形或X形流道可能需要购买新的歧管、额外的至模具A边的型芯和重新排布冷却通道。在这些情况下，模具设计者和模具使用者会通过调节工艺参数和改变材料来改善收缩行为。

10.2.2　“保险柜”模具设计

因为准确的收缩率是未知的，因此模具设计者最常规的方法就是设计制造所谓的

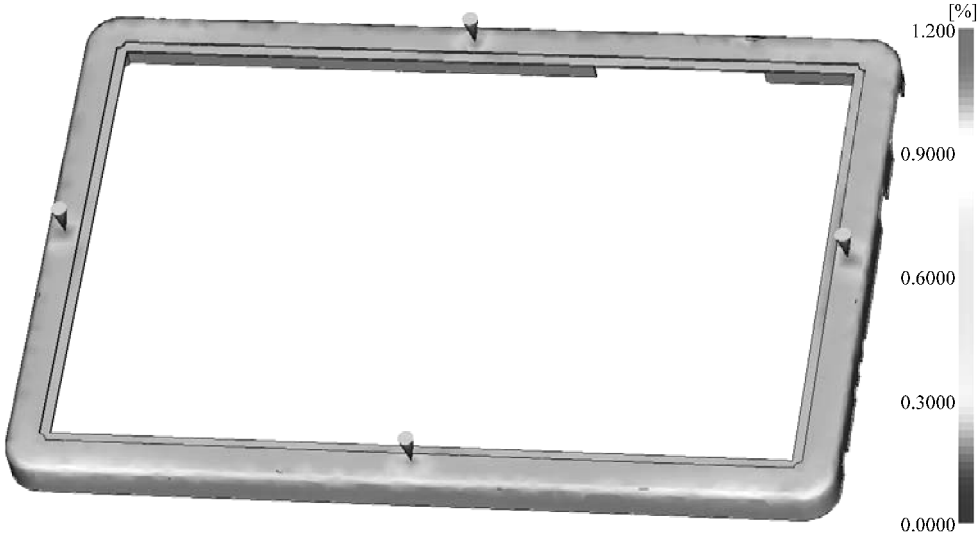


图 10.9　采用多浇口设计后 ABS 成型电脑框架的收缩率

“保险柜”模具。“保险柜”的意思是有目的的设计型芯和型腔镶件，以便在发现产品尺寸过小时，可以通过移除一些模具金属而得到扩大。例如，在模具应用中期望的收缩率可能是 0.5%，“保险柜”模具设计会利用 0.4% 的收缩来设计型腔镶件，0.6% 的收缩来设计型芯镶件。此种模具设计策略如图 10.10 所示。模具设计者通过预期的收缩行为设计的型腔比需要的更小，型芯比需要的更大，从而提供储备的容易加工的金属以便协调模具的尺寸。

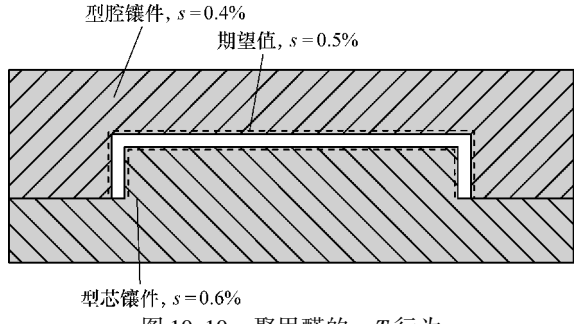


图 10.10　聚甲醛的 pvT 行为

对于“保险柜”模具设计的一种反馈是在一些成型领域中无论遇到什么样的收缩行为都需要机加工。原因是型芯和型腔的设计是使用不同的收缩率进行估算的，注射制品的额定尺寸会超出误差范围。因此，许多模具设计者喜欢使用常数，且取型芯和型腔设计收缩的预估范围内的中间值，希望模具操作者能够通过调节成型工艺来满足质量要求。另一种普遍的“保险柜”模具设计是直到完成模具制造和测试后再实施型腔中的关键细节。模具设计者先不考虑凸台、模块和半成品中的其他型腔表面等特征，完成设计，再在收缩表征后完成这些特征。对这些模具设计中的特征进行分段配置会延长模具

的制造时间，但是在模具开发中却减小了风险，增大了最终制品的公差。

10.2.3　工艺关系

正如以上所分析的，体积和线性收缩取决于熔体温度和压力。因此，模具操作者经常依赖于调节成型条件来控制收缩和优化零件尺寸。影响收缩率的几种关键工艺条件如图 10.11 所示，其主要与型腔中的熔体压力和温度有关。保压时间和冷却时间的影响显著，但当保压时间和冷却时间足够时，其对收缩的影响就小了。冷却介质的温度比机筒温度的影响稍大，因为其更直接地控制着推出前的成型温度。

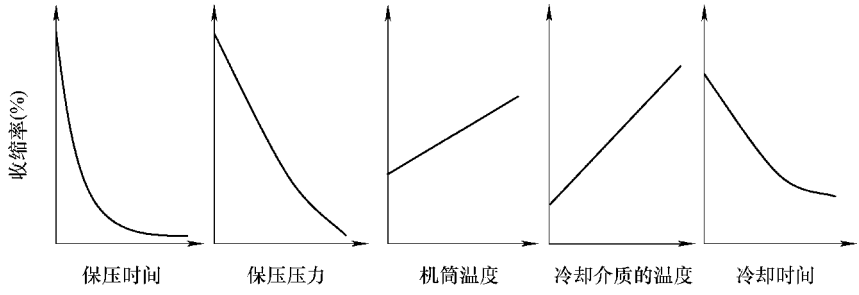


图 10.11　工艺条件对收缩率的影响

成型工艺的调整为修正型腔中的额定收缩率提供了很大的自由度。为了影响收缩分布与型腔位置的关系，可利用保压压力来控制型腔中的熔体压力使熔体在不同位置和时间固化。在保压开始时为了减小远离浇口处的收缩率，需要首先使用更高的保压压力。然后随着材料更接近浇口冻结时转而使用较小的保压压力以避免过保压。为证明这一方法的正确性，对于双浇口的模具设计，在数字模拟中应用了这种保压曲线。图 10.12 所示的线性收缩结果说明使用四浇口的模具设计并没有增加费用。但是很少有模具操作者能够平衡保压压力曲线以得到最大的零件质量。

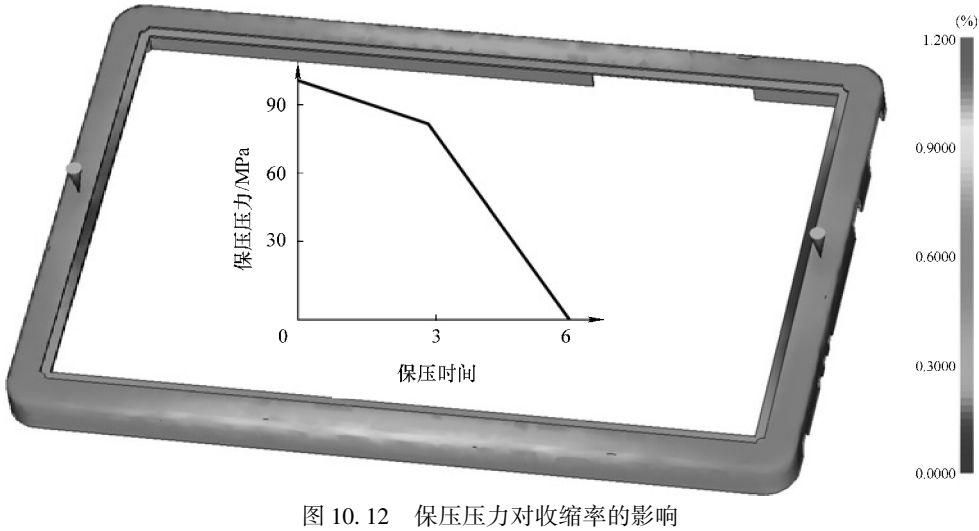


图 10.12　保压压力对收缩率的影响

10.2.4　半结晶塑料

许多无定形塑料的收缩率为 0.5%。半结晶聚合物呈现出更高的收缩率。例如，一种聚甲醛（Delrin 500）的比体积如图 10.13 所示。因为聚甲醛是一种半结晶聚合物，当聚合物从紧密的半结晶固态转变到稀松的无定形熔体时比体积有很明显的变化。比体积的增大会导致明显的体积收缩，收缩率比无定形聚合物的更高。

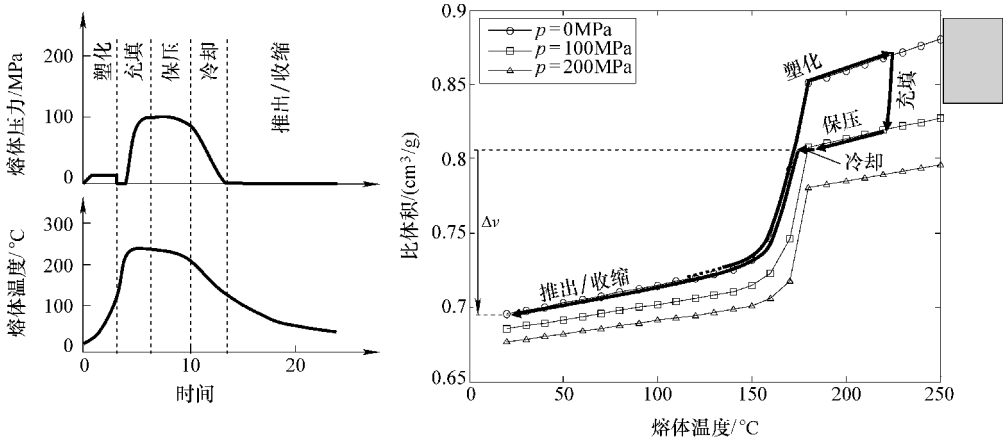


图 10.13　聚甲醛的 *pvT* 行为

图 10.13 说明，保压后的比体积 0.77。然后材料冷却转变为半结晶固态，比体积在常温下是 0.69。体积收缩相对变化了 0.90。其相关线性收缩为 3.5%。如此高收缩率的应用会更难以控制紧密配合公差，因为它们对工艺条件的敏感度提高。

10.2.5　填料的影响

在很大程度上，填料会影响材料的收缩量。最常用的填料是云母、玻璃微珠、玻璃纤维、炭黑和橡胶。表 10.1 提供了这些材料的密度和热膨胀系数。

表 10.1　常用填料的密度和热膨胀系数

填料	密度/（kg/m³）	*CTE*（热膨胀系数）/［μm/（m·℃）］	各向异性是否显著?
炭黑	2000	0.5	否
玻璃微珠	2600	3	否
玻璃纤维	2600	3	是
云母粉	2800	10	否
橡胶颗粒	1500	80	否

从表 10.1 可以看出，除橡胶（作为一种典型的抗冲击改性剂）以外，其他所有的填料的热膨胀系数与塑料（等级在 $100 \times 10^{-6}℃^{-1}$）相比，都很低（等级在 $5 \times 10^{-6}℃^{-1}$）。

因此，一种或更多种填料添加于纯树脂中可以用来减小聚合物的体积收缩和注射制品尺寸的增加。填充树脂的 *pvT* 行为无法获得，可通过 *pvT* 模型对填充树脂的 *pvT* 行为

进行推导获得，分析实例可参见 10.1.5 节。

10.3　翘曲

以上对收缩的分析适用于塑料成型中平面内尺寸的改变。当注射制品扭曲或弯曲时，就会发生翘曲。在一些应用中，翘曲引起的尺寸改变远远大于收缩。更糟的是，翘曲更难以预测和纠正。对翘曲进行详尽的分析超出了本书的范围，以下仅为模具设计提供一些使用指导。

10.3.1　翘曲的原因

所有的翘曲都是由不均匀收缩引起的，而不均匀收缩的原因是变化的。产生不均匀收缩的最直接原因是贯穿成型制品壁厚的温度梯度，图 10.14 说明了此现象。在此模具设计中，冷却系统的设计提供了不一致的冷却。型芯镶件附近的注射制品温度比型腔镶件附近的温度要高。正如图 9.11 所示的冷却分析所说明的，型芯和型腔的镶件表面温差为 5℃是很正常的。

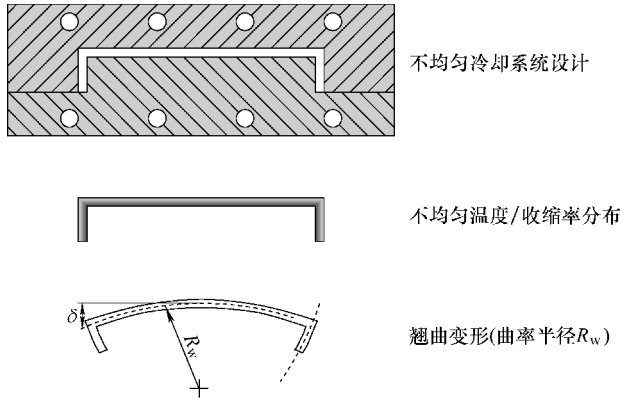


图 10.14　贯穿壁厚的不同收缩引起的翘曲

贯穿注射制品厚度的任何温差都会直接引起不同的收缩率。型芯表面和型腔表面之间的收缩率差值在冷却时会导致应变的产生。例如图 10.14 中，型芯表面更热，因此这边的塑料制品会产生更大的收缩。根据统计，注射制品由翘曲引起的曲率半径 R_w 可根据以下方程计算，即

$$R_w = \frac{2h}{s_{core} - s_{cavity}} \tag{10.17}$$

式中，h 是注射制品壁厚；s_{core} 和 s_{cavity} 分别是关于式（10.2）和式（10.13）的注射制品接近型芯和型腔镶件的收缩率。

已知曲率半径，注射制品外平面变形的最大挠度 δ 可近似估算为

$$\delta = W\sin\left(\frac{W}{R_w}\right) \tag{10.18}$$

式中，W 是从中心到注射制品边缘的距离。

例：如果型腔比型芯冷 2℃，计算笔记本电脑框架的平面变形。

利用 ABS 的 pvT 模型，分析假设 66MPa 压力保压后，注射制品在型腔和型芯表面的温度分别为 132℃ 和 134℃。型腔处比体积和收缩率分别为 $9.65\times10^{-4}\,m^3/kg$ 和 0.31%；型芯处比体积和收缩率分别为 $9.66\times10^{-4}\,m^3/kg$ 和 0.34%。虽然型芯和型腔之间收缩率的差看起来不明显，但翘曲明显。

曲率半径为

$$R_w=\frac{2\times1.5\text{mm}}{0.34\%-0.31\%}=10000\text{mm}$$

因为制品宽 240mm，从制品中心的有效宽度 W 为 120mm。那么从中心至边缘的平面翘曲为

$$\delta=120\sin\left(\frac{120}{10000}\right)\text{mm}=1.4\text{mm}$$

其中有两个有趣的潜在问题。其一，1.4mm 的翘曲比绝对的边对边收缩 0.8mm（估算为 0.31% ×240mm）稍大。其二，预估的翘曲对总的注射制品温度并不敏感，但对贯穿厚度的温度梯度却很敏感。例如，如果在压力为 0MPa、型腔温度为 100℃、型芯温度为 102℃ 条件下估算收缩，那么翘曲结果为 2.1mm，这十分接近之前的估算。因此，对由贯穿注射制品厚度的温度梯度导致的翘曲进行估算分析是有用的。

贯穿注射制品壁厚的温度梯度是产生翘曲的普遍原因。另一种引起翘曲的因素是贯穿制品面积的温度和/或压力梯度导致的收缩差。如图 10.15 所示的一个典型例子。在这种情况下，接近浇口处型腔中的熔体压力比型腔其他处的更高。因此，中心处的体积和线性收缩比注射制品其他处的要小。如果收缩差足够大，那么零件中心将产生翘曲。

图 10.15 所示的收缩差与图 10.8 所示的笔记本电脑框架的收缩差相似。但是，图 10.15 所示的模塑制品会因为收缩差而翘曲，而图 10.8 所示的框架就不会。这是因为笔记本电脑框架的窗口边互不影响，因此每边收缩独立自由。翘曲只有在贯穿制品存在收缩差时才发生，如果左边的收缩率与右边的收缩率有很大的不同，顶部与底部的收缩率也有很大的不同，就会发生翘曲。

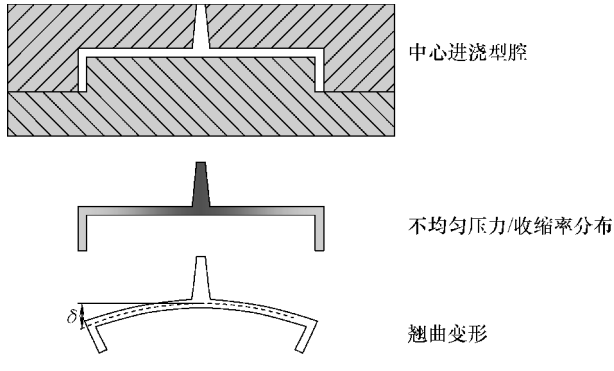


图 10.15　贯穿面积的不同收缩引起的翘曲

当注射制品由一单独的封闭面组成，注射制品中的材料相互连接影响时，任何贯穿制品的不一致的收缩和应力都会导致制品的面扭曲。这种翘曲即制品的面弯曲，在以下条件时会发生㊀：

$$(s_{\text{edge}} - s_{\text{center}}) > 0.44\left(\frac{h}{W}\right)^2 \tag{10.19}$$

式中，h 是注射制品壁厚；s_{center} 和 s_{edge} 分别是制品中心和边缘的收缩率；W 是注射制品从中心至边缘的距离。

如果注射制品弯曲，那么翘曲可保守地估算为

$$\delta = \sqrt{W^2 - \{W[1 - (s_{\text{edge}} - s_{\text{center}})]\}^2} \tag{10.20}$$

例：假设杯盖中心进浇，材料为 ABS，制品中心保压压力为 66MPa，外缘为 0MPa，分析其翘曲情况。

为预估翘曲，首先需要计算收缩率，检验屈曲准则。给定保压压力为 66MPa，温度 132℃，中心线性收缩率为 0.31%。在边缘，压力为 0MPa，温度为 132℃，线性收缩率为 1.66%。给定杯壁厚为 2mm，直径为 81mm，屈曲准则定义为

$$(1.66\% - 0.31\%) > 0.44 \times \left(\frac{2\text{mm}}{0.5 \times 81\text{mm}}\right)^2$$

$$0.0135 > 0.0011$$

此准则说明杯盖中心部分会收缩。估算翘曲为

$$\delta = \sqrt{40.5^2 - \{40.5 \times [1 - (1.66\% - 0.31\%)]\}^2}\ \text{mm} = 6.6\text{mm}$$

在实际成型中，杯盖很可能不会翘曲，且翘曲程度不可能这么大。原因是分析翘曲的假设为杯盖边缘压力为 0MPa，且不会完全保压。因此，所预测的边缘周围的材料收缩比实际中的要大。

正如之前所分析的，翘曲是由于贯穿注射制品壁厚的温度梯度、贯穿注射制品面的压力梯度或贯穿注射制品面的温度梯度引起的不均匀收缩产生的。这些只是翘曲产生的最普遍原因，可进行最简单的可能性分析。但是，还有一些其他的原因，包括取向和残留应力的不均匀收缩等。有兴趣的读者可参考文献[32－39]进行进一步的了解。合理准确的翘曲预测也可通过之前所讨论的计算机模拟获得。

10.3.2　避免翘曲的措施

以下提供几个用于避免翘曲的常规措施。至今，最重要的措施是使贯穿型腔的熔体温度和压力保持一致，而保证注射制品的收缩一致。为了使得收缩的一致性在公差范围内，模具设计者应该：

- 通过应用多浇口避免高的流动长度与壁厚的比值。

㊀ 弯曲分析假设各向同性圆盘受到来自圆盘边缘的应力产生均匀压缩，应力的临界值为

$$\sigma_{\text{buckling}} = K\frac{E}{1-\nu^2}\left(\frac{h}{R}\right)^2$$

式中，K 是与泊松比 ν 有关的常数；E 是材料的模量；h 是圆盘的厚度；R 是圆盘的半径。式（10.19）假设材料的泊松比为 0.4（适用于大部分的塑料）。

- 通过设计低流阻平衡加料系统保证一致的腔体压力。
- 通过紧密的冷却通道间距和所需的高热导率模具镶件使得模具表面温度尽可能达到一致。
- 通过均匀的制品厚度和圆角使注射制品中的熔体压力和温度一致。

一个好的模具设计，会很少发生翘曲问题。在发生翘曲时，模具操作者可以通过以下方法尝试减小翘曲：

- 快速充模缩短固化层的冷却时间。
- 增加保压时间，直到制品重量不再增加为止。
- 增大保压压力以减小材料收缩量。
- 应用保压压力曲线（如图 10.12 中所讨论的）提高贯穿制品的熔体压力和收缩的一致性。
- 对模具不同边或不同部分使用不同的冷却温度，以有目的地控制温度和收缩分布。
- 尝试应用不同型号的材料和填料系统来改变收缩行为，以满足性能要求。

即使应用了所有的这些模具设计和成型工艺，翘曲仍可能产生，这就需要通过改变模具来减小翘曲程度。以下有几种减小翘曲程度的模具设计改变方式。最普遍方法是设置额外的一个或更多个浇口以提高贯穿型腔的收缩一致性。另外一种降低翘曲可能性的普遍方法是通过设置额外的窄的筋板来提高制品的刚度。还有一种方法是改变型腔轮廓形状，使最后成型的制品利用翘曲刚好达到预期的形状。最后一种方法给模具设计者和模具制造者造成不小的负担，其要求非常高的预测能力和优良的表面加工能力。因为取决于翘曲的制品尺寸的变换会超出钢材的安全极限，而且此方法可能造成错误从而导致很高的成本花费。

10.4　本章小结

在本章中，基于聚合物的 *pvT* 行为和熔体压力温度来进行收缩和翘曲的分析，以预测注射制品尺寸的改变。这些分析提供了收缩和翘曲现象的分析，但更多地取决于所假设的温度和压力。因此，许多模具设计者使用材料供应商提供的材料收缩范围的中间值。在紧密配合公差应用中，原型成型和/或“保险柜”式模具设计策略频繁应用于优化型腔尺寸中，以得到期望的制品尺寸。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 收缩、模具尺寸和制品尺寸之间的关系。
- 无定形和半结晶聚合物的 *pvT* 行为。
- 熔体压力、熔体温度和收缩之间的有效关系。
- 如何通过 *pvT* 模型计算体积收缩。
- 如何通过体积收缩计算线性收缩。
- 不均匀收缩的因素。

- 如何通过不均匀收缩计算翘曲。
- 加工条件和填料对收缩和翘曲的影响。
- 控制收缩和翘曲的模具设计措施。

收缩分析对于获得准确的模具尺寸是很有用的。但是，塑料在模具型芯上的收缩也决定了制品推出时所需要的力。推出力的估算可以指导设计推出系统以避免制品在推出时发生变形。推出系统设计之后，对模具的结构系统要进行分析和设计。

第 11 章　推出系统设计

推出系统的作用是在开模后将注射制品从模具中推出。虽然看起来很简单，但实际上推出系统的复杂性取决于成型应用中的需要。其中包括多轴线驱动、推出力的分布和大小等许多需要考虑的问题。在开始分析和设计推出系统前，首先需要了解其功能。

图 11.1 所示为笔记本电脑框架的成型模具推出部分的侧视图。推出部分（包括推板、推杆固定板、复位杆、推杆、限位钉及其他部件）装配在后固定板、支承板和轨道之间。

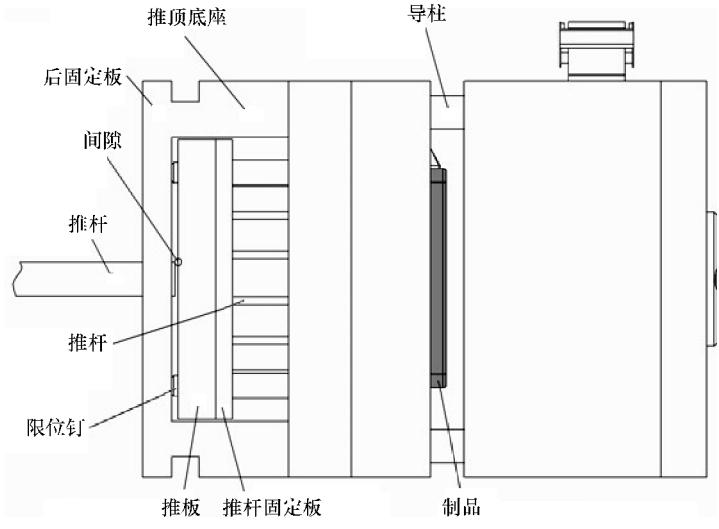


图 11.1　模具开模的侧视图

在成型循环中，注射制品被压制在模具一边的型芯上并随着动模离开定模而被带出型腔。一段时间后，成型机会驱动推杆推动推板同时驱动推出部分将制品推出型芯。但在推杆和推板之间同时需要留有间隙。

图 11.2 所示为推出系统驱动过程中的模具侧视图。在推出前，成型机合模板将模具分开以为制品的推出留有足够的空间。然后机器驱动推杆接触推板后端面。因为机器提供给推杆的力大于注射制品附着于型芯上的力，整个推出系统就被推动向前推进。推杆与注射制品接触并将制件推出型芯。

在推出成型后，如图 11.3 所示，成型机驱动推杆回退。此时，推杆与推板之间有一段间隙，使推出系统可在下一次成型循环时复位。

使推出系统复位的方法有很多种，在以下会进行讨论。但是，一个普遍采用的回退

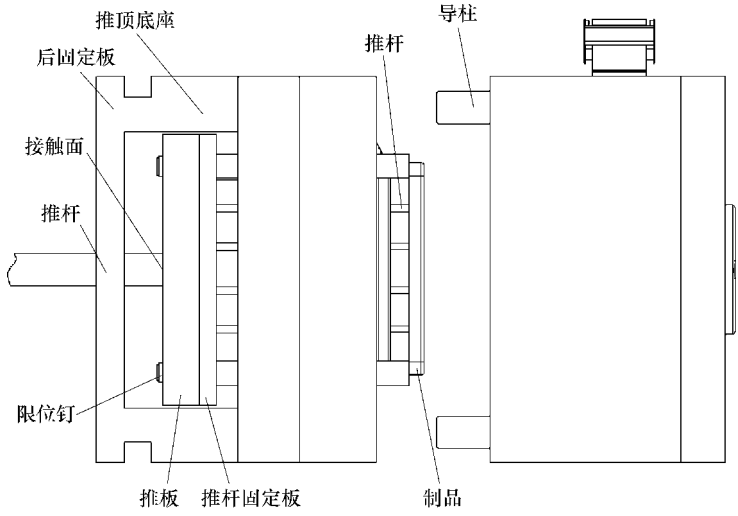


图 11.2　带有驱动推杆的模具侧视图

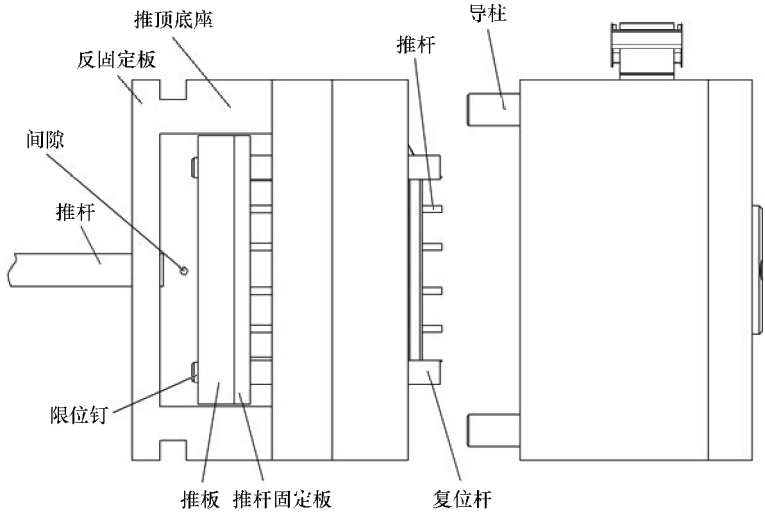


图 11.3　带有复位杆的模具侧视图

方法如图 11.4 所示，通过简单合模即可实现。合模时，复位杆前端会接触到板面，那么随着模具合模，复位杆的后端会驱动推板后移。

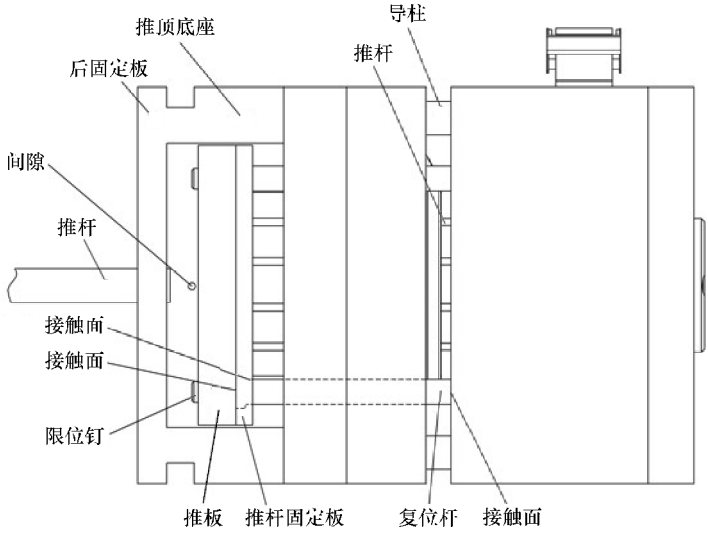


图 11.4　模具合模时的侧视图

11.1　推出系统设计目标

塑料制件在冷却时会收缩，在开模时制品就会留在型芯上。因此需要机械装置将制品推出模具。了解推出系统的主要功能后，还应该满足推出系统设计中的几个目标。

11.1.1　开模

制品推出模具阶段的第一步是在一个或多个分型面开模。模具设计者应该与制品设计者和模具操作者一起工作以确认模具设计合理而稳定。通常应该通过简化制品设计和开发合适的模具设计来使滑芯的数量最小。滑芯的使用应该根据模具开模动作进行设计，而不需要使用额外的驱动和控制系统。

有时，模具零件需求的滑芯设计不能通过开模动作进行驱动。许多现代成型机都可以通过使用数字信号控制的抽芯程序实现滑芯的驱动。在冷却和塑化阶段，当模具准备打开时，成型机可以通过编程提供一个或多个驱动滑芯的信号给驱动器（常规气阀、液压阀、电磁阀或电动机）。驱动器可以驱动相关模具部件回缩，并使用接触式限位开关，完成回缩时限位开关接通。成型机可以通过编程延迟开模，直到所有滑芯的限位开关接通。

11.1.2　传递给制品的推出力

为将制品移出模具，推出力必须用于使制品移出型芯表面。这些推出力通过使用许多不同的模具部件得到，包括推杆、推管、扁推杆、提升装置、卸料板和其他设备。这些部件的数量、位置和设计必须合理地传递从成型机推杆通过推出系统到塑料制品的力。每一次推出，施加在推出系统部件上的剪切和压缩力都很大。如果这些部件设计得不好，推出力会导致过度的剪切、压应力、疲劳、扭曲甚至模具失效。

11.1.3 制品扭曲最小

正是因为推出力会在推出系统部件中引起应力和缺陷，推出力也会在塑料制品中引起应力和缺陷。为避免塑料制件的永久性扭曲，推出部件的数量、位置和设计必须根据贯穿制件的均匀的低应力来设计。如果推出力均匀地分布在型腔中的各个点，那么制品就可均匀地推出模具而无永久性扭曲产生。

11.1.4 驱动快速可靠

推出阶段只占成型过程的几秒钟的时间。因此，推出系统应该尽可能快速有效地推出制品并复位以进行合模和下一次循环。为了提高推出系统的速度，一些模具操作者会使用空气阀门和/或喷气以提高速度、缩短循环时间。

为提高推出系统的合理性，模具设计者设计的模具应该与模具操作者最愿意使用的制件推出系统紧密联系。许多模具依靠制品重力和反馈系统来实现制品输送，模具操作者也逐渐采用流道摘取器和行车式机器人来移除制品。通常这些系统的使用对缩短成型循环时间的作用并不明显，但增加了注射制品移除和为保证美观而进行的位置次序的控制。如果使用流道摘取器和行车式机器人，模具设计者必须适当地定制推出系统。通常，制品必须脱离型芯而通过一些推出系统部件保持在可控制的位置上。而且，模具设计者应该确保和设计型腔和浇注系统的接触几何构型，容易辨别且可重复用于接触配合移除系统的零部件。

11.1.5 冷却干扰最小

在推出系统中有许多零部件，但大多数零部件得不到有效的冷却。因此，推出系统零部件会对从注射制品到冷却介质的传热路径有很大影响。通常会造成两个结果。其一，推出系统零部件的制作材料可以选热导率低于型芯的金属材料，如果推出系统零部件很大，冷却效果会减弱。其二，推出系统零部件装配在模具中，提供滑动配合，结果推出系统零部件和模具边缘之间的每个边界处都存在接触热阻，此接触热阻会导致推出系统中贯穿零部件和周围的传热率降低。

推出系统对于冷却的影响会非常明显。例如，推杆直径大于制品的公称壁厚时，推杆就不会从制件接触表面传递较多的热量，因为：

- 推杆与模具间有接触热阻。
- 推杆相对较大。

因此，推杆上型腔中塑料的冷却会通过推杆周围的模具钢和模具周边的传热进行。而制品有效面积的冷却可能不会明显地受到循环时间的限制，因此大的推杆会引起模具中产生热点且降低推出的连续性。

因此，应该避免使用过大的推杆，可用多而小一些的推杆代替，从而不会干扰模具的冷却。有时，需要应用到许多大的推出系统零部件，包括卸料板、扁推杆、抽芯等。这种大的零部件应该配有冷却通道并进行有效的冷却以使推出温度保持连续。

11.1.6 制品表面影响最小化

通常推出系统设置在模具型芯所在的动模一侧。推杆或其他部件接触注射制品时会在接触表面留下印记，这会造成：

- 降低制品表观质量。
- 影响装配面的配合。
- 降低结构强度。

因此，推杆和其他部件应该设置在对注射制品表面影响最小的位置。

通常将推杆设置在制品不可见的那一面和应力小的位置。或者应用推管、滑块和推件板等更大的部件代替推杆，使其印痕线与制品特征相符。这些专门设计的部件可以提供贯穿制件表面的大面积而有效的推出且不会留下表观印痕。

在一些应用中要求制品在一边完全没有印痕。在此情况下，模具设计的一个方法是将整个推出系统设置在有浇注系统的模具定模一侧。此“反向推出”设计因为浇注系统和推出系统的反向设置，可以使制品表面面对模具动模的一边完全没有印痕。此设计会在 13.9.4 节进行详细的讨论。

11.1.7　复杂性和成本最小化

推出系统的成本或被忽略，或占总模具成本的一大部分。最简单的模具使用了一种直径和长度相同的可更换推杆。但是，大多数模具使用许多不同直径、长度的推杆。当这些推杆所需的成本小于模具成本时，模具设计者和模具制造者应该标记好每一根推杆以方便模具操作者进行维护。

在使用滑块、扁推杆及其他推出部件时会大大地增加推出系统的成本。模具设计者的目标是提供简单、成本合适和可靠的设计，以满足之前所描述的要求。模具设计者不仅应该考虑起始设计和加工成本，也要考虑到操作、维护和排除故障的成本。

11.2　推出系统设计流程

推出系统设计首先由注射制品分型面的位置决定，其次由制品推出所需不同部件的具体设计决定。

11.2.1　确定模具分型面

正如 4.1 节所描述的，模具中的产品构型和取向取决于模具分型面的数量和布置。如果模具没有倒陷（类似挂钩）或特殊需求，那么只需要一个分型面。但是，如果模具有内外倒陷，那么就需要额外的分型面，以驱动滑块和/或滑芯随推出零部件将制品推出，而减小制品在推出时的塌陷区域。这种分瓣型腔模具在第 13.9.1 节中有讨论。

11.2.2　估算推出力

将制品移出型芯所需的推出力 F_{eject} 是制品表面和模具表面之间法向力 F_{normal}、相关脱模斜度 ϕ 和制品与型芯之间的静摩擦因数 μ_{static} 的函数。为计算推出力，首先计算摩擦力 F_{friction} 为

$$F_{\text{friction}} = \mu_{\text{static}} F_{\text{normal}} \tag{11.1}$$

那么推出力根据零部件摩擦力计算，其相对分型面是法向的，即

$$F_{\text{eject}} = F_{\text{friction}} \cos\phi = F_{\text{normal}} \mu_{\text{static}} \cos\phi \tag{11.2}$$

力之间的关系如图 11.5 所示。摩擦因数相近值变化范围为从非常光滑表面（低粗

糙度）的 0.5 到粗糙和/或纹理表面的 1.0[40]。脱模斜度增大，推出力随脱模斜度余弦的减小而减小。

制品与型芯之间的法向力由塑料的内部弹性应力驱动，这会导致塑料制品像弹性圈一样抱在型芯上。法向力的估算通过制品中的残留弹性应力与制品有效面积积分得到，即

$$F_{\text{normal}} = \oint_{A_{\text{eff}}} \sigma(x,y,z)\,\mathrm{d}A_{\text{eff}} \quad (11.3)$$

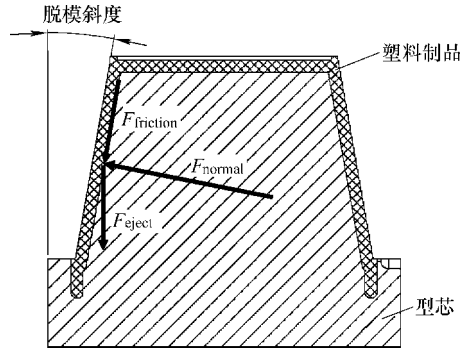


图 11.5　推出力分析

残留拉伸应力是工艺条件、模具构型和材料性质的复杂函数。详细的处理过程本书没有足够的篇幅进行描述。因此，推出力的预估采用了保守简单化的假设。

分析假设制品中的拉伸应力是模具热收缩的结果。此假设会引起对推出力的过度预测，因为实际上，聚合物在热收缩前处在一个复杂的状态，并会松弛。

因为聚合物熔体在液态时不会支持拉伸应力，对固态塑料的热应变 ε 进行估算，其是塑料热膨胀系数 CTE 乘以固态温度 $T_{\text{solidification}}$ 和推出温度 T_{ejection} 的差，即

$$\varepsilon = CTE(T_{\text{solidification}} - T_{\text{ejection}}) \quad (11.4)$$

而随着聚合物熔体变硬，应力松弛，保守假设材料应变在室温模量 E 条件下产生。那么制品内部的拉伸应力可以作为贯穿整个注射制品的常数进行计算，即

$$\sigma = E\varepsilon = E \cdot CTE\ (T_{\text{solidification}} - T_{\text{ejection}}) \quad (11.5)$$

为估算法向推出力，需要计算产生有效应力的横截面积。此有效面积不是制品的投影面积，而是制品在不同方向的横截面积。图 11.6 阐明了将制品分为两半的原则。如之前所解释的，制品像弹性圈一样附着在型芯上。当制品分开时，两半之间的法向力消失。因此，法向力可根据拉伸应力乘以横截面积进行估算得到，即

$$F_{\text{normal}} = \sigma A_{\text{eff}} \quad (11.6)$$

结合之前的相关问题，推出力估算为

$$F_{\text{eject}} = \mu_{\text{static}}\cos(\phi)E \cdot CTE(T_{\text{solidification}} - T_{\text{ejcetion}})A_{\text{eff}} \quad (11.7)$$

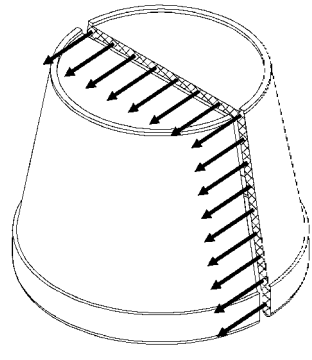


图 11.6　沿有效面积的拉伸应力

例：估算将 ABS 材料的杯制品推出模具型芯的推出力。

根据 CAD 制图，杯子的横截面积如图 11.6 所示为 526mm^2。其应用了摩擦因数为 0.5 的光滑型芯面，脱模斜度为 1°。模量、热膨胀系数、固态温度和推出温度可从附录 A 中查取。那么推出力估算为

$$F_{\text{eject}} = 0.5 \times \cos 1° \times 2.28 \times 10^{9} \times 8.83 \times 10^{-5} \times (132 - 97) \times 526 \times 10^{-6}\,\text{N} \approx 1800\,\text{N} \approx 400\,\text{lb}$$

分析表明需要约 1800N（400lb）的力可使杯制品脱离型芯。

例：估算将 ABS 材料制造的笔记本电脑框架从模具型芯推出的推出力。

笔记本电脑框架形状比杯子要复杂得多，涉及用于计算推出力的有效面积的估算。笔记本电脑的一些不同的横截面如图 11.7 所示。

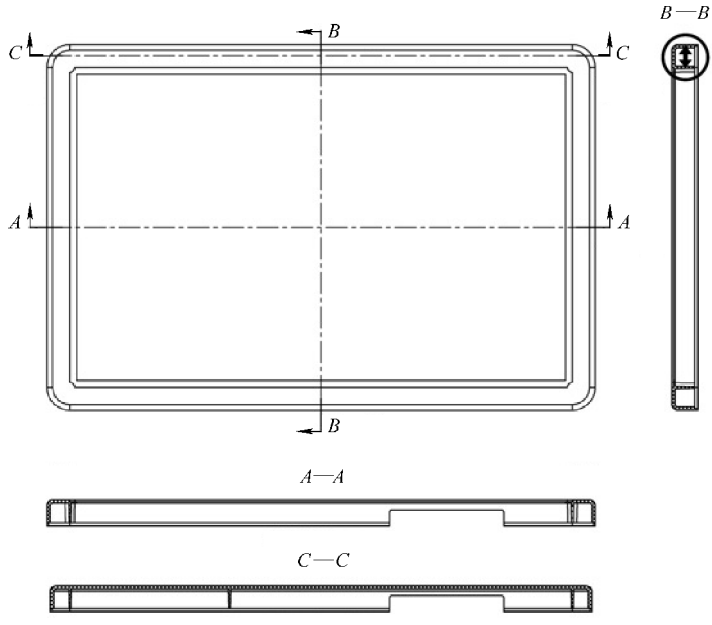


图 11.7　笔记本电脑框架的不同横截面

模具设计者会首先考虑将剖面 *A*—*A* 或 *B*—*B* 作为有效面积。如果抛开这几个部分，那么制品剩下的一部分由于对其他部分的收缩还会留在型芯上。因此，模具设计者会考虑将 *A*—*A* 与 *B*—*B* 相加来估算有效面积。但是，此面积仍不够。

如果制品沿这几个剖面剖开，那么剩下的一部分由于筋板之间的弹力仍会留在型芯上。例如，剖面 *B*—*B* 中的筋板之间的法向力由贯穿剖面 *C*—*C* 的拉伸应力驱使。因此，此有筋板的复杂制品的有效面积可估算为

$$A_{\text{eff}} = h(2L_{\text{part}} + 2W_{\text{part}}) + n_{\text{wall}} h H_{\text{part}} + n_{\text{rib}} h_{\text{rib}} H_{\text{rib}} \tag{11.8}$$

式中，h 是制品壁厚。L_{part}是制品长度；W_{part}是制品宽度；n_{rib}是筋板数量；h_{rib}是筋板平均壁厚；H_{rib}是筋板平均高度；n_{wall}是边壁的数量；H_{part}是边壁的平均高度。

对于笔记本电脑框架，有效面积为

$$A_{\text{eff}} = [0.0015 \times (2 \times 0.24 + 2 \times 0.16) + 4 \times 0.0015 \times 0.01 + 7 \times 0.001 \times 0.01]\text{m}^2 = 1.3 \times 10^{-3}\text{m}^2$$

将此有效面积代入式（11.7），以 1°的脱模斜度来估算推出力为

$$F_{\text{eject}} = 0.5 \times \cos 1° \times 2.28 \times 10^9 \times 8.83 \times 10^{-5} \times (132 - 97) \times 1.3 \times 10^{-3}\text{N} \approx 4700\text{N} \approx 1100\text{lb}$$

关于以上例子的讨论如下。在根据固化温度和材料性质制定的假设条件下的分析是保守的，其估算的推出力应该比实际要高。因为分析是保守的，使用分析计算得到的推

出力应该可得到有效的推出系统设计且无需考虑安全因素。但是，潜在的问题是，何时才允许制品留在模具中冷却至低温。制品的最终温度应该作为推出温度，这样会导致预测的推出力明显增大。

为确保分析有效，可将预测推出力与商业成型机提供的典型的推出力进行比较。对不同机器供应商提供的几种不同尺寸的机器的调查表明，机器提供的推出力是机器锁模力的2%。这意味着如果成型机提供1000kN的锁模力，那么机器可提供20kN的推出力。杯子制品所期望的锁模力为400kN，推出力为1.8kN，而电脑框架所期望的锁模力为1400kN，推出力为4.7kN。在这两个例子中，分析预测推出力为锁模力的0.5%。因为成型机能够提供的推出力比正常所需的要高，因此分析结果适合推出系统的设计。

11.2.3　确定推出面积和周长

估算完制品推出力后，下一步就是确定推杆在制品上总的推出面积。推杆有一个最小推出面积，以避免对推出系统零部件产生压缩应力和对塑料制品产生额外的剪切应力，此两种现象如图11.8所示，其显示了一个推杆推动笔记本电脑框架制品的一部分。

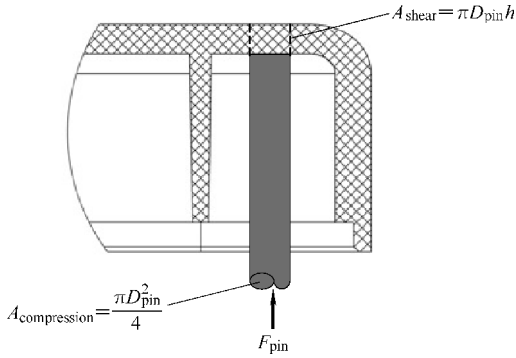


图11.8　推杆的压缩应力和剪切应力

当推杆由推出系统驱动时，在制品推出前，推杆和制品之间会产生反作用力 F_{pin}。此力的大小与需要推出制品的推出力以及推杆的数量、位置和几何构型有关。推杆的压缩应力 σ_{pin} 等于推杆上的力除以推杆的横截面面积，即

$$\sigma_{pin}=\frac{F_{pin}}{A_{compression}}=\frac{4F_{pin}}{\pi D_{pin}^2} \tag{11.9}$$

为避免推出系统零部件的疲劳和/或扭曲，压缩应力必须低于临界应力。此临界应力 $\sigma_{fatigue_limit}$ 取决于推杆的材料和热处理。有许多推杆和推管是由较硬的材料制成的，疲劳极限为800MPa。但是，保守设计模具时，对于材料P20，可假设疲劳极限为450MPa。另一种情况是，为避免产生额外的压缩应力，推杆的总推出面积 $A_{ejectors}$ 必须满足

$$A_{ejectors}>\frac{F_{eject}}{\sigma_{fatigue_limit}} \tag{11.10}$$

例：计算框架制品所需的所有推杆的推出面积，以避免推杆中的压缩应力超过极限。如果20个推杆直径相同，计算其所需的直径。

假设疲劳极限为 450MPa，所需推出面积计算为

$$A_{\text{ejectors}} > \frac{4700\text{N}}{450\text{MPa}} = 1.04 \times 10^{-5}\text{m}^2 = 10.4\text{mm}^2$$

如果用了 20 个推杆，那么每根推杆应该有至少 0.5mm^2 的横截面积，那么最小直径为

$$D_{\text{pin}}^{\min} > \sqrt{\frac{4 \times 10.4/20}{\pi}}\text{mm} = 0.8\text{mm}$$

如果假设采用了高强度钢，为避免推出系统中有应力集中，通常所需的推出面积都非常小。但是，推出系统也必须有足够的面积以避免对制品产生额外的剪切应力。如图 11.8 所示，对注射制品的剪切应力为推杆力除以推杆周围的注射制品面积，即

$$\tau_{\text{part}} = \frac{F_{\text{pin}}}{A_{\text{shear}}} = \frac{F_{\text{pin}}}{\pi D_{\text{pin}} h} = \frac{F_{\text{pin}}}{\Omega_{\text{pin}} h} < \frac{\sigma_{\text{plastic_ material}}}{2} \tag{11.11}$$

式中，Ω_{pin} 是推杆的横截面周长。如果制品中的剪切应力很高，那么在推杆附近的制品很可能会产生扭曲、翘曲甚至裂缝。为避免产生这些缺陷，模具的设计应该注意，推杆周围产生的径向剪切应力要小于材料屈服强度 $\sigma_{\text{plastic_ yield}}$ 的一半。这就需要推出系统的总周长 Ω_{ejectors} 满足以下关系

$$\Omega_{\text{ejectors}} > \frac{2F_{\text{eject}}}{\sigma_{\text{plastic_ yield}} h} \tag{11.12}$$

例：计算框架制品所需推杆的相关周长。如果应用了 20 根相同直径的推杆，为避免 ABS 制品中产生额外的剪切应力计算所需推杆的最小直径。

假设 ABS 的屈服强度为 44MPa，所需的总周长为

$$\Omega_{\text{ejectors}} > \frac{2 \times 4700}{44 \times 10^6 \times 0.0015}\text{m} = 0.14\text{m}$$

如果使用 20 根推杆，那么每根推杆应该具有 0.007m 的横截面周长。那么最小直径为

$$D_{\text{pin}}^{\min} > \frac{\Omega_{\text{ejectors}}}{\pi} = \frac{0.14/20}{\pi}\text{m} = 2.23\text{mm}$$

此例说明对于大多数成型应用，推出系统的设计受到注射制品的屈服强度而不是推杆的压缩应力的限制。但是，压缩应力会导致细长零件如推杆等产生扭曲。因此，对压缩应力进行进一步分析很重要，可用以避免产生推杆弯曲。

11.2.4　明确推出部件的类型、数量和尺寸

当已知所需推出面积和周长后，可以开发不同的推出系统设计。模具设计者针对不同的推杆数量和尺寸应该考虑不同的设计。与数量多而直径小的推杆相比，数量少而直径大的推杆有许多优势，也有许多劣势。在模具和操作成本方面，最好采用更少数量的大推杆，其主要有两个原因：其一，少量的推杆需要加工的模具部件和特征更少，因此模具加工和维护成本较低；其二，大尺寸的推杆应力低而不易弯曲变形。

但是，在设计灵活性和模具操作方面，最好采用大量的小推杆。其主要有以下几个原因。更多数量的推杆需要更多的贯通型腔的位置，更高密度的推杆，有利于排气和推

出。同时，更小尺寸的推杆容许关于推出位置的更高的设计灵活性。正如之前所述，模具包括许多紧密空间和复杂特征，小推杆尺寸允许推杆有效地设置在冷却通道、窄型芯、壁边或筋板等之间。

模具设计者应该记住，以上分析对于设计推杆的数量和尺寸仅提供少许的限制。模具设计者总会增加推杆数量或增加推杆尺寸以提高推出的一致性或减小注射制品中的应力。模具设计者还必须确定推杆的类型以用于不同场合。典型的推出部件包括推杆、扁推杆、推管、推件板、滑块、升降器、斜导柱、抽芯、环形芯、可扩充型腔、分型腔模具等。最佳部件的选取取决于应用的需要和几何结构。这些部件的应用以下将进一步讨论。

例：分析和讨论笔记本电脑框架的推出系统的设计，包括直径分别相同的 10 根和 40 根推杆。

最小推杆直径根据前例结果计算。两种设计提供了围绕推杆相同的总周长，也提供了对注射制品的相同剪切应力。如果仅使用 10 根推杆，那么最小的推杆直径接近 4.5mm。假设推出力分布均匀，每根推杆上的压缩应力接近 30MPa。相比之下，如果使用 40 根推杆，那么最小直径接近 1.125mm。每根推杆上的压缩应力接近 100MPa。

10 根均匀间隔为 4.5mm 的推杆设计如图 11.9 所示。因为浇口设置在壁的左右两边，位于壁面上下面中心位置的推杆可用于流动后的排气。

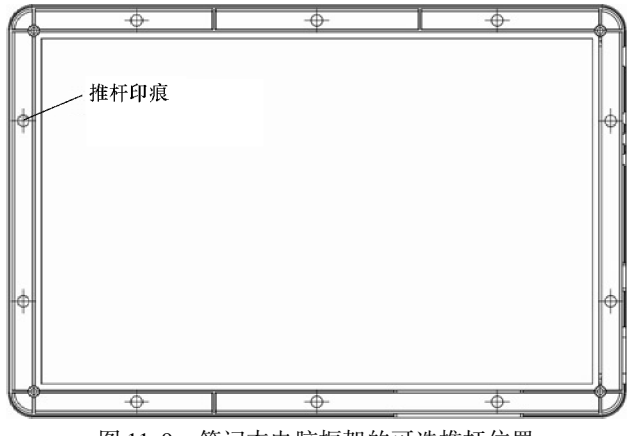


图 11.9　笔记本电脑框架的可选推杆位置

但是，此设计可能是不合适的，原因有二。其一，推杆的数量可能不够，在推杆位置注射制品可能会粘贴在模具上。尤其是筋板和凸台会收缩到型芯上，所以其附近也需要推杆。其二，筋板附近的推杆直径稍大。在此设计中，仅有 1mm 的钢制推杆孔独立出模具型腔表面。随着熔体压力变高，钢中产生的应力会使推杆孔变形。最终，在推杆孔和模具型腔之间会产生裂纹。因此，推杆应制造得更小并有效排布。

11.2.5　推出部件的排布

上述例子说明推杆的有效设置不是简单地与尺寸呈函数关系，也与其位置有关。通常，推杆位于推出力产生的位置附近会更有效。而且，如果推杆所推的面是注射制品的

硬面会更有效。当推杆不均匀地分布于型腔中时，这种布局设计是无效的。在图 11.10 所示的排布设计方法中，推杆远离筋板和注射制品壁边。注射制品会因收缩而附着在型芯上，推出力通过注射制品与筋板及边壁的型芯之间的摩擦力引起。如果在远离这两个粘着点的位置设置推杆，则在注射制品脱离型芯时就会有显著的变形。

可以通过在筋板和边壁附近增加推杆来改进设计，如图 11.11 所示。在这种情况下，增加了三根额外的推杆以提供接近注射制品的推出力。为避免由推杆孔引起的型芯镶件的过应力，在型腔表面和推杆孔表面之间，需要至少有一个推杆的容许直径。但是，这种推杆的排布会导致潜在的冷却问题，因为在型芯中筋板和边壁之间可能没有设置冷却通道的足够空间。因此，推杆直径可以适当减小以设置冷却通道。

另一种可选排布是在筋板或边壁下边设置推杆，如图 11.12 所示。这种设计直接的好处是摩擦力和推出力同线，因此注射制品几乎不会有变形。问题是筋板和边壁相对于更大的推杆直径比较窄。为避免推杆过小在工作时弯曲，可在筋板上设置凸台或推块。当驱动推杆前移时，力由推块传递到筋板以及零件的周围区域。因为推杆直接推动推块，不需要牵引角，所以推块可以设计为最大尺寸。

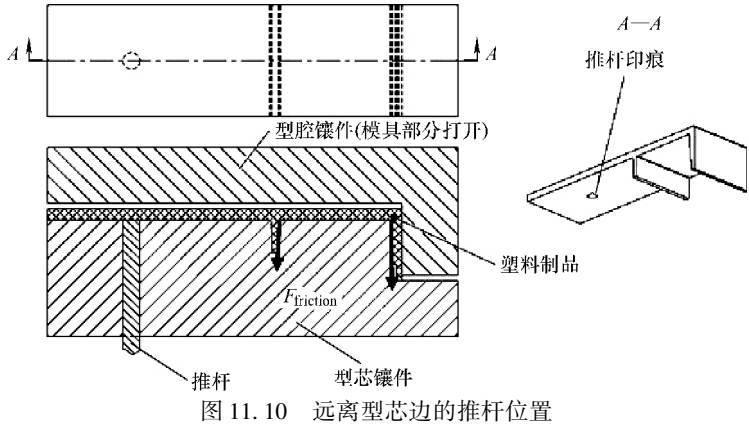


图 11.10　远离型芯边的推杆位置

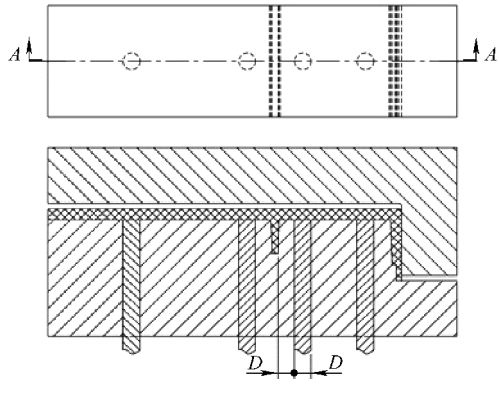


图 11.11　型芯边壁附近的推杆位置

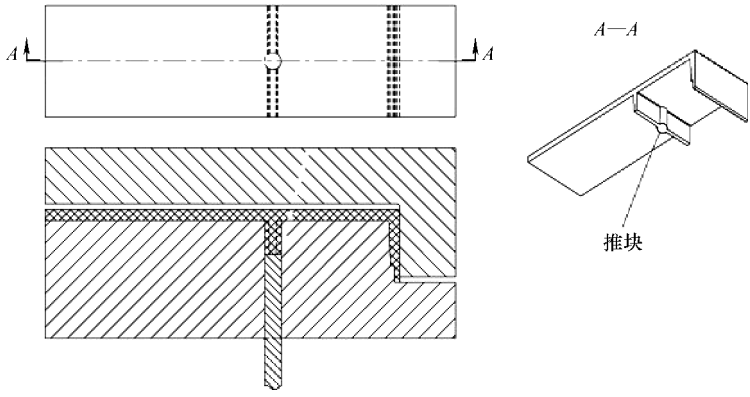


图 11.12　位于带有推块的筋板下的推杆

但是，使用推块时要注意，高的体积收缩率会导致制品表面的缩痕。在型芯外设置推管（稍后有介绍）会得到更好的推出质量，但相应的制造成本也会更高。

通过使用如图 11.13 所示的阶梯状推杆可以减少对推块的需求。在这种情况下，推杆一边与筋板和壁面匹配，利用阶梯部分推动制品顶面。推杆沿特征边延伸至注射制品的一端面，以推出制品。与之前的设计相比，此排布允许有效的推出力传递和足够的空间设置推杆，而不会改变注射制品设计。

最后一种方法需要仔细地设计推杆和相对制品的推杆定位。在使用阶梯状推杆时可能出现一个问题，即如图 11.13 所示，推杆可能会延伸至型腔中制品的外边线以外。而且，如果推杆太短，在推杆顶端和型腔镶件的反面之间会形成间隙。如果间隙比排气间隙要大，那么会出现飞边。同时，如果推杆太长，那么推杆会被压进模具合模处。随着推出循环反复，推杆会因疲劳而弯曲。假设由于模具装配公差的影响，推杆所需的长度难以准确确定，模具设计者会希望使用所谓的“保险柜”方法进行多长度调整。可代替的是，模具设计者可以选择将推杆设置在型腔中和采用如图 11.13 所示的阶梯状推杆。那么，阶梯状推杆的轻微误差只会体现在制品的不可见表面上，而不会影响产品的表观质量。

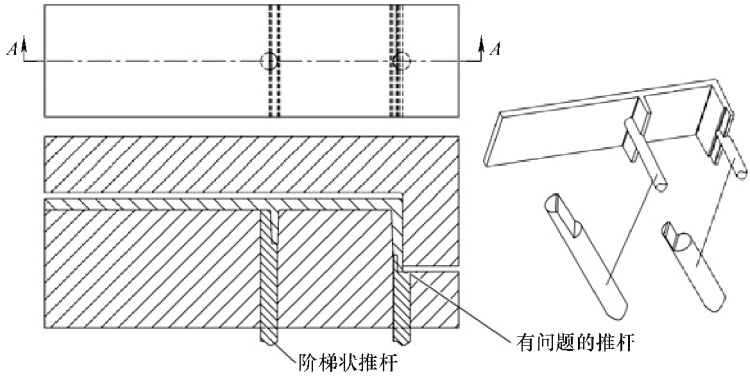


图 11.13　位于边壁处的推杆

11.2.6　具体的推出部件和相关部件

在确定了推杆数量、排布和几何形状后，具体的设计应该保证模具装配和操作稳定。需要强调几项注意事项。模具设计者应该认识到模具装配是很复杂的，因为需要大量的推出系统部件同时匹配型芯镶件。此项通过在模具装配中垫上多层复合板来实现。这样模具装配会消耗相当长的时间，且会导致模具部件的损坏。

为了促进模具装配，无论推出系统与其他部件有多少处接触，都需要更具体详细的设计。图 11.14 所示为圆形推杆（左）和阶梯状推杆（右）的俯视图和剖视图。图 11.14 中的详图 *B* 显示在推杆和推杆孔之间有一定的间隙，以利于在成型过程中排气。具体的有关排气方面的分析在第 8 章中有讲解，对于长径比为 2 ~ 3 的推杆，常规的间隙为 0.02mm（0.001in）。而且，配合之后的推出孔应该大些，以便不会限制推杆的滑动。排气间隙并不是关键问题，而且不只受到与附近部件产生干涉的限制。从更大直径至排气直径应该有倒角。否则，推杆在模具装配过程中会悬在尖角处。

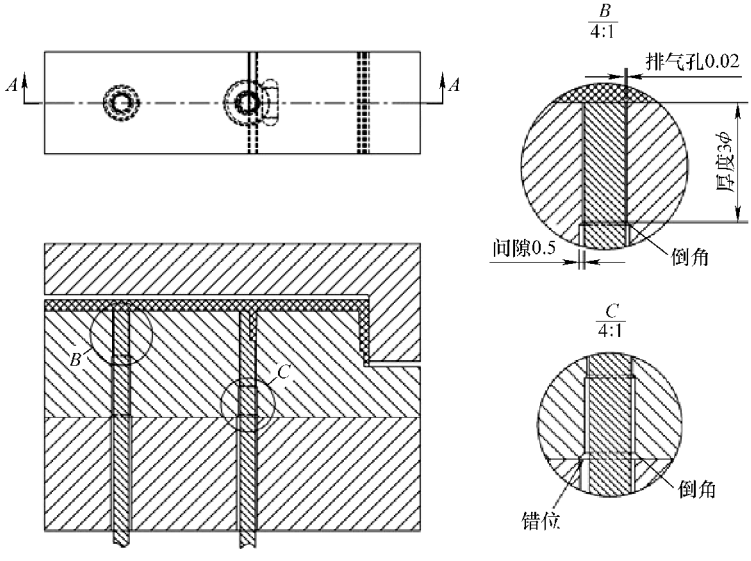


图 11.14　推杆周围的间隙

在推杆和推出孔之间的更大的排气间隙不仅可以减小推杆与板之间的摩擦，而且可提供所需坡度以满足推杆孔轴在不同板中的对中。确切的排气间隙应该超出总的模板中孔的位置公差。

因为典型的钻削公差为 0.25mm，0.5mm 的间隙足以应用于大多数的成型中。而且，在型芯镶件和支承板之间接触处应该设置倒角。如图 11.14 中的详图 *C* 所示，在装配时，倒角可以辅助引导推杆从支承板到型芯。

推杆固定板的详细设计如图 11.15 所示。如图 11.15 中详图 *D* 所示，在固定板中设置了阶梯孔，在推出系统返回时，其可以将推杆拉回。为防止间隙引起推杆孔错位，阶梯孔取定公差以使推杆轴配合型芯镶件的推杆孔。如果使用阶梯状推杆，推杆端部需要平直，如图 11.15 中详图 *E* 所示。设置平衡槽和定位销来保证阶梯状推杆的正确位置。

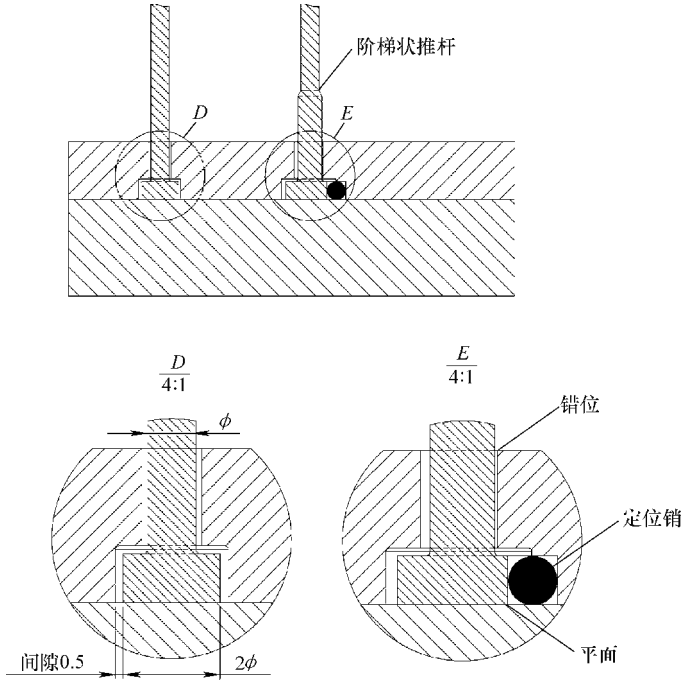


图 11.15 推杆的固定和对准

无论在什么情况下，模具设计者都应该保证推杆的长径比一致以促进模具的装配与稳定。如果在模具设计中使用了不同的推杆，模具设计者和模具制作者应该确定关键连接并对每一根推杆进行标记，以匹配推杆与固定板的位置，方便模具使用。模具设计者应该避免设计尺寸变化很小的推杆，因为相似的推杆很可能会被模具操作者误用。推杆的错误安装会引起推杆和型腔表面的损坏。

11.3 推出系统分析和设计

推出系统设计包括许多不同的部件，最常用的部件讨论如下。

11.3.1 推杆

推杆由钢（如 H13）热锻和磨削而成。然后，经过渗氮和抛光，以提供高硬度和光滑的表面，降低摩擦。推杆取标准直径（1～25mm）和长度（150～500mm）。通常，模具制造者再通过切削和磨削将标准推杆加工至所需长度以及设计所需的形状。也可以通过不同的选择定制推杆，包括不同的材料或表面处理，精确的直径和长度，与推板、平板、导套等的螺纹配合等。

即使推杆的直径和长度在合适的范围内，仍需避免长推杆的直径太小。因为这种推杆容易在负载下弯曲变形。如图 11.16 所示，推杆的负载加载在由推出孔顶端支撑的圆柱上，推杆底端由推杆固定板固定。如果压力变大，推杆就会向一个未知的方向弯曲。

对于此情况，欧拉定理表明此典型负载 F_{buckling} 为

$$F_{\text{buckling}} = \frac{\pi^2 EI}{(0.7L)^2} \tag{11.13}$$

式中，E 是材料的弹性模量；I 是惯性矩；L 是推杆长度。

对于半径为 R 的圆形推杆，惯性矩为 πR^4。因为应力为单位面积的力的大小，典型的弯曲应力 σ_{buckling} 导出为

$$\sigma_{\text{buckling}} = \frac{\pi^2 E}{(0.7L/R)^2} \tag{11.14}$$

为避免弯曲，推杆设计必须满足约束条件

$$\sigma_{\text{pin}} = \frac{F_{\text{pin}}}{A_{\text{compression}}} < \sigma_{\text{buckling}} = \frac{\pi^2 E}{(0.7L/R)^2} \tag{11.15}$$

解推杆半径 R 得

$$R > \left(\frac{F_{\text{pin}} L^2}{63.2E}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{11.16}$$

例：计算 ABS 材料成型笔记本电脑框架时，20 根推杆的最小直径。

之前的例子预估推出力为 4700N，因此每根推杆受力约为 235N。钢的弹性模量为 200GPa。推杆长度约为 0.2m。那么为避免弯曲最小推杆半径为

$$R > \left(\frac{235 \times 0.2^2}{63.2 \times 200 \times 10^9}\right)^{\frac{1}{4}} \text{m} = 0.93\text{mm}$$

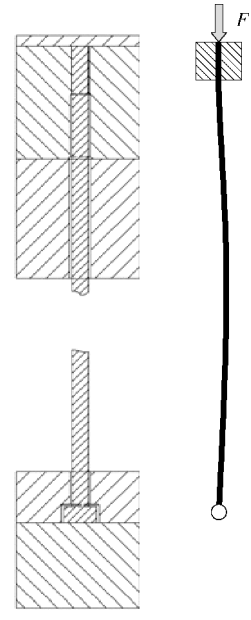


图 11.16　推杆的弯曲模型

因此，给定推杆直径 1.86mm 在理论上是足够的。可以选择标准尺寸 2mm 或 3/32in。

例子中的结果表明，为避免弯曲所需最小的直径与之前例子中所计算的为避免推杆中的残留应力或注射制品中的剪切应力所需的最小直径相比，两者的值是在同一个级别。前述弯曲分析结果和实例取决于推杆的长度；如果推杆更长，那么弯曲约束条件就发挥明显作用。模具设计者应该分析应用条件以证实驱动约束条件并确保推出设计合理。

由于美观或推杆位置的需要，在成型应用中希望使用小直径的推杆。如果为避免弯曲所需的最小推杆直径大于所期望的直径值，那么可以开发大直径台肩的阶梯状推杆。阶梯状推杆的台肩直径通常比推杆端部大 1mm，而且台肩长度通常为 50mm。如果需要，模具设计者可以定制多阶梯和锥形推杆使用。如果使用阶梯状推杆，模具设计者应该确保支承板和型芯镶件中的孔和间隙尺寸合适。

11.3.2　扁推杆

扁推杆就是大直径的推杆通过一个阶梯状转成矩形横截面至型芯镶件中。如图 11.17 所示，扁推杆宽度大，厚度小，允许扁推杆前端的条片直接设置在筋板下。此位置非常有效，因为条片使推出力位于注射制品和模具型芯之间产生摩擦力的位置。而且，在坚硬的筋板和零件附近可以有效地实施推出。因为筋板表面不够美观，所以即使其位置在成型结束后可能会产生应力集中，也不会受到扁推杆留下的痕迹的影响。

扁推杆的具体细节如图 11.17 所示，与前面所讲的推杆相似。在支承板和型芯镶件

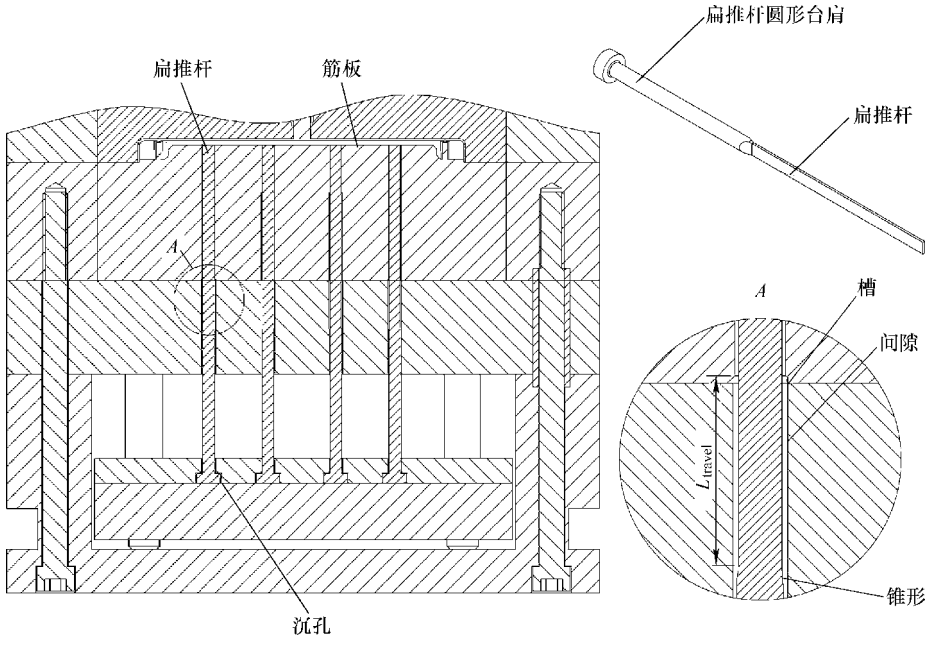


图 11.17　扁推杆设计

之间需要有间隙以使扁推杆能自由伸缩，同时保证推杆前端矩形截面在型芯镶件中紧密配合。为在型芯镶件中设置矩形孔，需要用到线切割或电火花加工。为减少电火花加工的使用，需要明确接近型腔表面的间隙孔尺寸，通常工作条片的长度等于扁推杆宽度的两倍。模具设计者也应该确保模具镶件中的扁推杆锥形环和窄孔之间的行程超出推出系统的最大行程。否则，模具操作者会疏忽扁推杆而导致其损坏。

扁推杆中的压缩应力和扁推杆在注射制品上强加的剪切应力，通常不会限制到扁推杆的设计。但是由于其厚度较小，需要考虑弯曲变形。因此，扁推杆厚度应该设为筋板的总厚度。惯性矩表示为

$$I = \frac{1}{12}WH^3 \tag{11.17}$$

式中，W 和 H 分别是扁推杆的宽度和厚度。

根据式（11.13），扁推杆中的应力和弯曲应力之间的关系为

$$F_{\text{blade}} < F_{\text{buckling}} = \frac{1}{12}\frac{\pi^2 EWH^3}{(0.7L)^2} \tag{11.18}$$

扁推杆的厚度通常设置为制品的筋板和壁的厚度。那么扁推杆截面的最大长度可通过下式验证

$$L < \left(\frac{1.7EWH^3}{F_{\text{blade}}}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{11.19}$$

例：计算 ABS 制造的笔记本电脑框架由 20 根扁推杆推出时的扁推杆最大长度。

前例预估推出力为 4700N，那么每根扁推杆的推出力接近 235N。钢的弹性模量为

200GPa。扁推杆的厚度和宽度初始值分别设置为 1mm 和 6mm。那么，为避免弯曲扁推杆的最大长度为

$$L < \left[\frac{1.7 \times 200 \times 10^9 \times 0.006 \times 0.001^3}{235}\right]^{\frac{1}{2}} \text{m} = 93\text{mm}$$

在成型过程中，最大扁杆长度计算为 93mm。在图 11.17 所示的模具设计中，实际扁推杆长度（从型腔表面至锥形端）为 93.8mm。因此，此设计恰好。模具设计者可以选择增加额外的扁推杆来减小每根扁推杆的推出力，如果需要可以使用更宽和更厚的扁推杆，或沿筋板使用矩形截面恒定的推块以使用更厚的扁推杆。

11.3.3　推管

推管的作用与推杆相似，两者都用于推动注射制品的垂直截面。但是，推管的设计有着明显的不同，因为其是一个圆筒通过沿固定型芯针滑动实现从注射制品凸台底面推出制品的功能。推管对于制品的推出是非常有效的部件，因为其推动制品的位置在注射制品和型芯间产生摩擦力的地方。

常规推管装配设计如图 11.18 所示。设计中，高传导性型芯针设置在后固定板中，并在末端设置有固定螺纹。型芯针穿过后固定板、推板、推杆固定板、支承板和型芯镶件到达型腔，推管通过推杆固定板固定，并穿过支承板和型芯镶件。在图 11.18 所示的详图 *A* 中，推管末端与凸台及其附近的筋板共面。在推出过程中，推板向前移动，驱动推管沿型芯针滑动并推动凸台脱离型芯针。与推杆和扁推杆一样，推杆固定板的回退使推管重新回到型芯镶件中的位置以便进行下一次的循环。

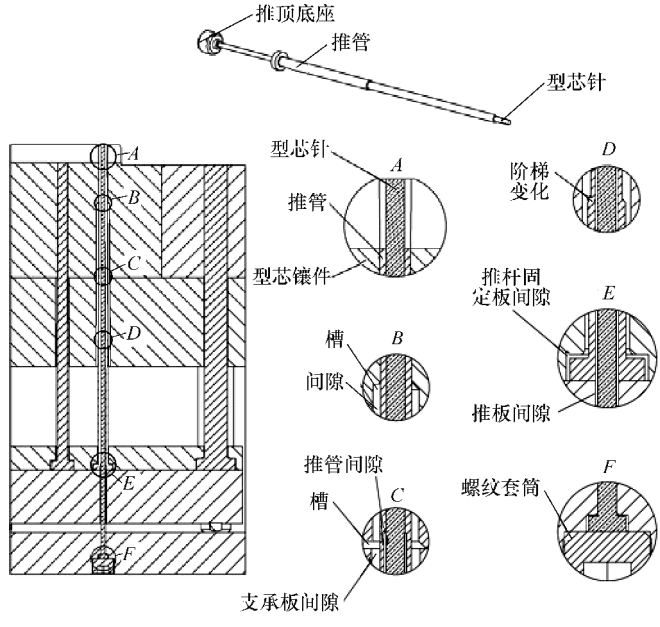


图 11.18　推管装配设计

所给出的推管的几何形状，通常不会有应力和弯曲的问题。但是，推管的细节设计

是很关键的，因为其沿固定的型芯针和固定的型芯镶件之间滑动。推管的轴心通过使推管与型芯镶件中的推杆孔同轴而确定。因为型芯针在推管里边，型芯针周围注射制品的壁厚和同轴度通过推杆孔的总公差确定。为了减少注射制品中的尺寸变化，排气间隙应该减小。图 11.18 中的详图 *B* 至详图 *F* 是不同模板中间隙的例子。模具设计者应该确保型芯针与推板和推杆保持板之间有合适的间隙，否则推管和型芯针之间稍微存在同轴度偏差就会引起推管失效。

11.3.4　推件板

推件板的作用与推管相似，因为其都是常规的用于推动注射制品外围脱模的推出部件。但是，推件板的设计变化明显，因为其通常要推动大部分甚至整个注射制品的外围。因此，推件板的面积明显比单个推管要大，而且结构完全不同。

使用推件板的模具设计如图 11.19 所示。在此设计中，推件板代替 B 板，并同 A 板和支承板之间持平。为设置型芯镶件，通过定位销使型芯镶件的中心与支承板匹配。端头的螺纹（图中未画出）用于保证型芯镶件固定在支承板上。推件板部分设计延伸至注射制品的底面，但不与型芯镶件的外表面接触。

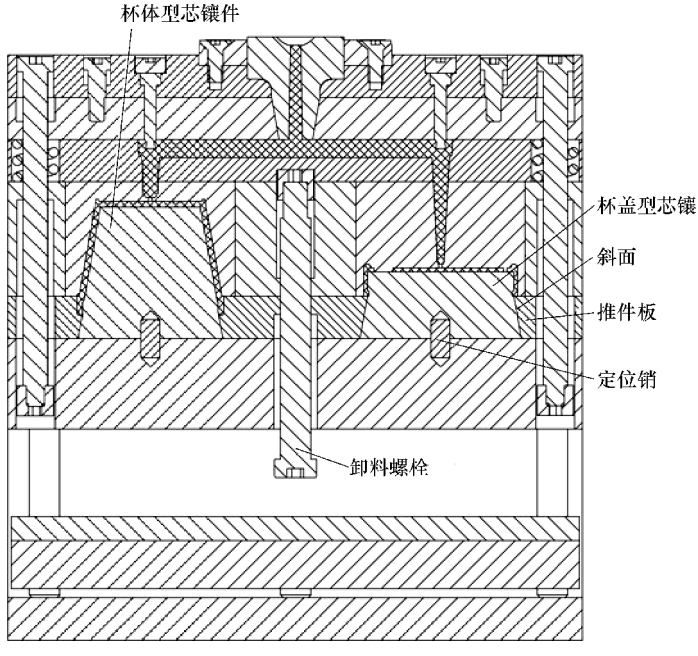


图 11.19　推件板模具设计

如图 11.20 所示，当卸料螺栓驱动推件板并拉动注射制品脱离型芯镶件时，注射制品通过开模推出。因为推件板完全接触制品底面，推出力均匀地分布在注射制品上，因此应力低、无变形、推出可靠。有趣的是，由于推件板的设计而使推杆固定板、推板和导柱失去了实际用途，可以在模具中去除，那么支承板可以用作后固定板。但是更多的常规设计使用推板向前驱动以驱动推件板推出制品。

有几条需要注意的问题是关于细节 *A* 和细节 *B* 的，如图 11.20 和图 11.21 的放大图

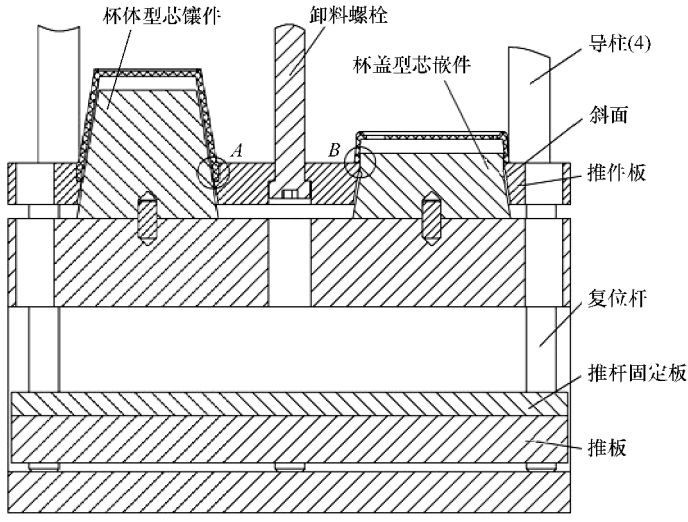


图 11.20　推件板驱动

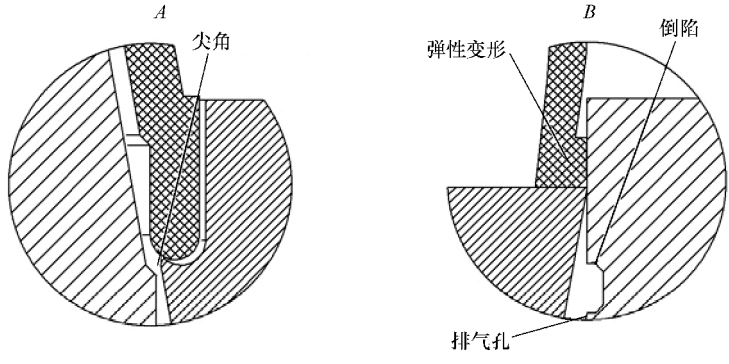


图 11.21　推件板细节设计

所示。在成型应用方面需要明确的注意问题是沿杯顶的分型线的位置。根据模具设计的观点，圆顶中心是配合型芯镶件的推件板的最佳位置，因为其可以提供可靠的滑行面。但是，此匹配位置会导致不期望产生的流痕线。因此，配合位置转移到型芯镶件的内部。推件板的尖角可能会破坏型芯镶件的垂直表面，且可能会加快磨损。因此，模具设计者不希望使用推件板，或要求重新设计杯制品部分，以提供可配合推件板的可推平面。

11.3.5　围绕倒陷的弹性变形

图 11.21 中的详图 B 显示了一个整体脱离带有倒陷的型芯的问题。如图所示，盖制品的边壁必须有所变形，以使盖子边缘可以脱离型芯的倒陷。如果所承受的推出应变在材料的弹性极限范围之内，那么这种倒陷可以顺利可靠地成型并推出模具。实际上，推件板对于这种推出问题是理想的推出部件，因为其可以提供一致的推出力，且几乎与注射制品与型芯之间的摩擦力完全对应。

在推出过程中由倒陷引起的应变 ε 可以容易地估算，为制品需要承受的挠度 δ 除以

长度 L，即

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} \tag{11.20}$$

附录 A 提供了一些不同塑料的材料特性，包括应变极限。据观察，大多数塑料具有的应变极限在 2% 以上才符合模具设计准则。若选择填充量大的材料，则弹性极限更低，因太脆而趋于失效。

在推出过程中制品受推出力而产生的弹性变形也可以估算得到。零件变形部分的应力可以通过外加的应变乘以材料弹性模量 E 得到，即

$$\sigma = E\varepsilon \tag{11.21}$$

制品周边的环应力，与之前所分析的相似，通常可以估算为

$$F_{\text{normal}} = \sigma A_{\text{eff}} \tag{11.22}$$

推出力可以根据法向力、摩擦因数 μ_{static} 和牵引角 ϕ 的方程进行估算，结合以上式子得

$$F_{\text{eject}} = \mu_{\text{static}} \cos(\phi) E \frac{\delta}{L} A_{\text{eff}} \tag{11.23}$$

例：验证是否可以将盖制品从带有倒陷的型芯上弹性推出。估算推出过程中制品上的推出力和应力。

制品几何形状的相关尺寸如图 11.22 所示。

制品应变为

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L} = \frac{1}{77} = 1.3\%$$

应变很明显但并不过量。盖子的倒陷部分高度接近 3mm，应力下的有效面积为 80mm^2。假设摩擦因数为 0.5，牵引角为 0，那么推出力估算为

$$F_{\text{eject}} = 0.5 \times \cos 0 \times 2.3 \times 10^9 \times \frac{1}{77} \times 80 \times 10^{-6}\text{N} = 1\ 200\text{N}$$

此力接近杯制品推出型芯所需要的推出力。因为推出力不平衡会导致模具的不平衡磨损，为了减小磨损，可以增加推件板的厚度和导套的尺寸。另外，推件板应该从两处驱动，与型腔轴同线而不是如图 11.20 所示的中心点位置驱动。

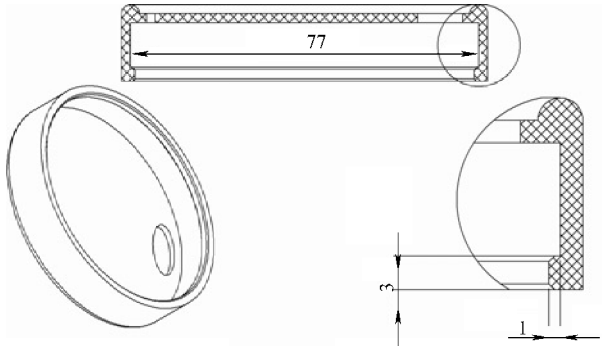


图 11.22　倒陷的弹性推出

倒陷部分的剪切应力约为

$$\tau = \frac{F_{\text{eject}}}{\pi L h} = \frac{1200}{0.077 \times 0.003\pi}\text{Pa} = 1.7\text{MPa}$$

明显比 ABS 的屈服强度 44MPa 低。因此，应用推件板推出具有倒陷的盖制品是可以的。

11.3.6　抽芯

抽芯即侧边驱动，通常是指不在开模方向驱动芯块的设备。抽芯允许注射制品相对大并具有复杂的倒陷部位，否则不能经济合理地生产。

例如，笔记本电脑框架制品需要有如图 11.23 所示的凸台和窗口。为了成型这些特

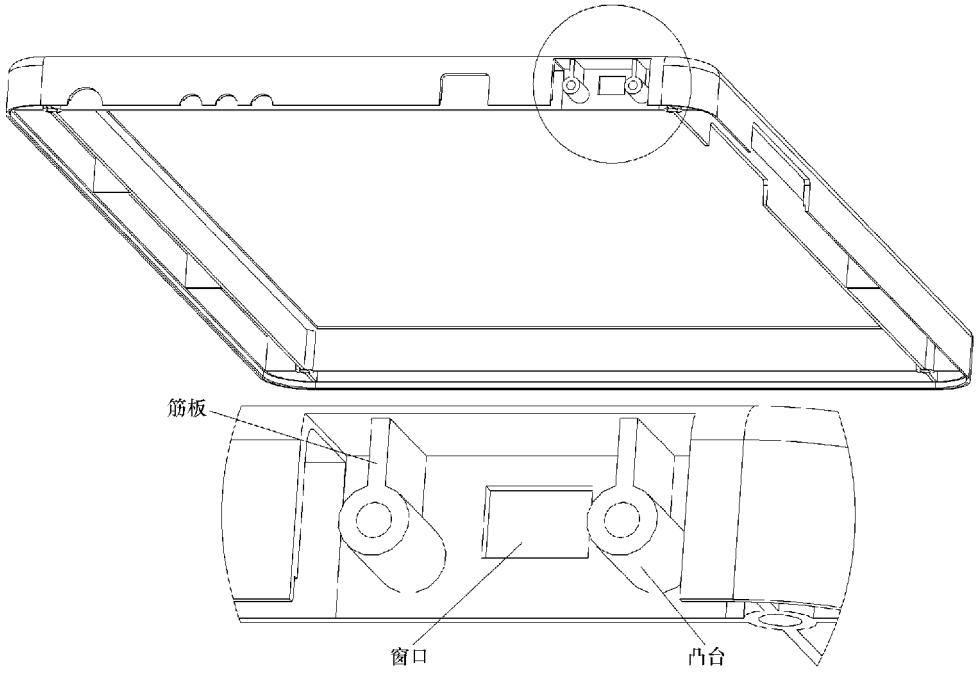


图 11.23　笔记本电脑框架的倒陷特征

征，需要额外的模具镶件来对这些特征提供支撑。此模具镶件必须在开模和推出系统驱动前移除。

为设计抽芯，需要首先排布活动型芯。笔记本电脑框架所需滑芯的一种设计如图 11.24 所示。在设计中，型腔和型芯的特征用于构成凸台、筋板和窗口。以关键轮廓沿型芯镶件的底部嵌入以在 B 板和型芯镶件中提供滑动相匹配的键槽。此键槽会保持活动型芯在模具中垂直，同时在驱动时为滑芯提供导向作用。在活动型芯的滑动边缘设置有

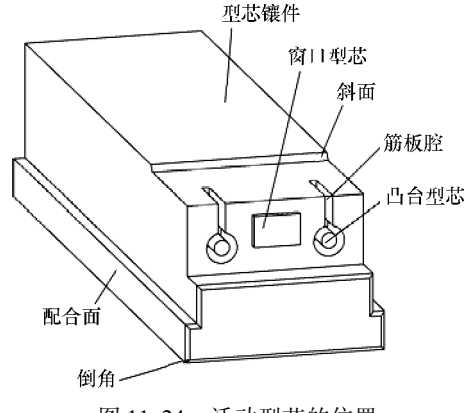


图 11.24　活动型芯的位置

倒角以避免损坏模具匹配表面。

带有活动型芯的模具初始装配如图 11.25 所示。A 板、型腔镶件、B 板和型芯镶件都需要修正以适合活动型芯的移动。任何显著的垂直位移都会导致注射制品顶部或筋板底部的偏移。因此，在活动型芯和型芯镶件之间设置有联锁装置以防止活动型芯由于熔体对型芯的压力而发生转移。活动型芯的滑动会防止沿型芯边的横向位移和偏移。在活动型芯前表面和型芯、型腔镶件之间需要设置间隙，以确保驱动缸的全部锁模力作用于窗口型芯防止窗口偏移。

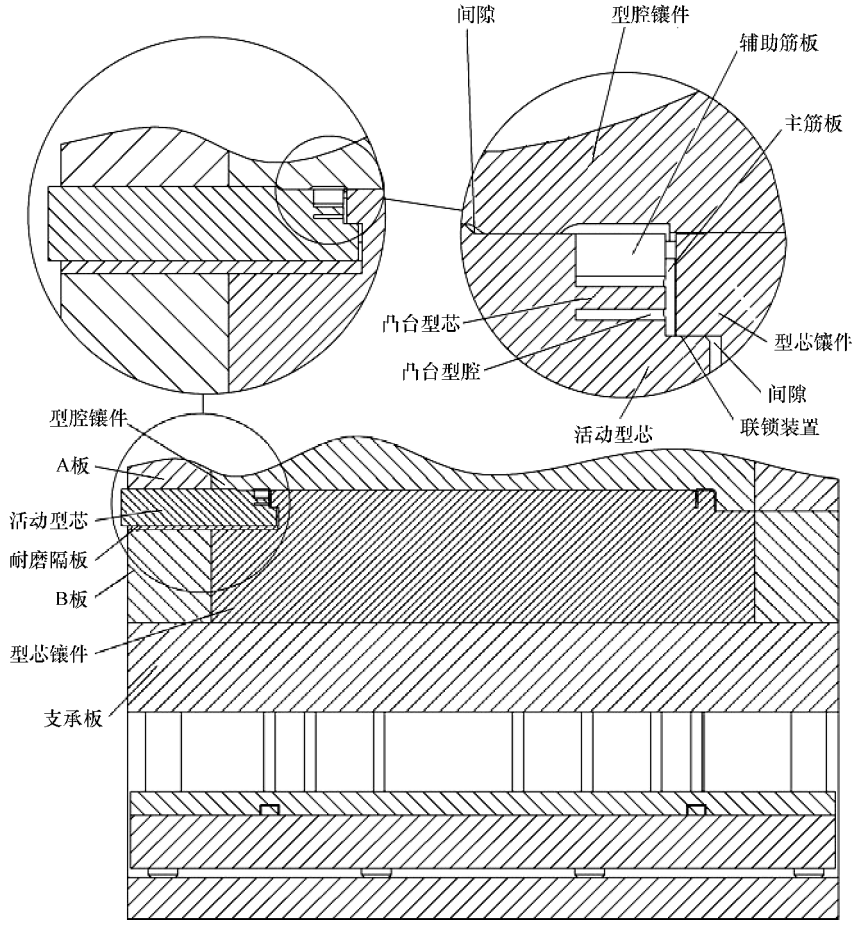


图 11.25　活动型芯模具设计布局

为完成抽芯的设计，需要设计驱动装置。第一步是估算所需驱动力 $F_{\text{core_ pull}}$，其等于熔体压力 p_{melt} 乘以活动型芯的投影面积 $A_{\text{core_ projected}}$。

$$F_{\text{core_pull}} = p_{\text{melt}} A_{\text{core_projected}} \tag{11.24}$$

例：计算在成型过程中保持抽芯在前端位置所需的最大力。

抽芯宽约 22mm、高 10mm。当抽芯前边部分不在熔体压力作用下时，保守分析假

设投影面积为 220mm^2，熔体压力为 200MPa。使用这些假设，所需最大力为

$$F_{\text{core_pull}} = 200 \times 10^6 \times 220 \times 10^{-6}\text{N} = 44\ 000\text{N}$$

计算值接近 4t，这一结果在一开始可能是令人惊讶的，但是模具设计者应该记得活动型芯提供的开模力必须等于生产相似尺寸制品所需的锁模力。更大的活动型芯会需要更大的驱动力。

一旦确定了驱动力，模具设计者必须选择驱动机的类型。有三种常用类型：液压驱动、电动或气动。当然受本章篇幅所限，只对液压驱动的明显优势进行简要的讨论。液压驱动器的功率密度在气动和电动之上。此大的功率密度意味着液压驱动器比其他类型更集中和常用。因此，液压缸由于其低成本和缸径、行程范围非常广而被广泛应用。而且，液压驱动器易于与许多成型机的液压和电系统结合。此外，模具操作者可以经常使用液压驱动活动型芯的模具，不必借助辅助设备。

模具设计者必须选择能够提供合适的驱动力和行程的驱动器。行程必须足以使活动型芯避开注射制品的特征结构。如果使用液压驱动器，那么缸径可以计算为

$$D_{\text{hydraulic_bore}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{core_pull}}}{\pi p_{\text{hydraulic_fluid}}}} \tag{11.25}$$

式中，$P_{\text{hydraulic_ fluid}}$是液压油或压缩气体的压力。

例：计算对于笔记本电脑框架注射制品，用于驱动活动型芯的液压缸的缸径和行程。

为了计算缸径，需要知道液压油的压力。大多数液压系统的设计压力为 20.7MPa（3000psi），许多成型机和辅助系统在 10MPa 压力下操作运行。假设驱动力为 44kN，缸径可以计算为

$$D_{\text{hydraulic_bore}} = \sqrt{\frac{4 \times 44\ 000}{10 \times 10^6 \pi}}\text{m} = 75\text{mm}$$

排布位置的检验如图 11.25 所示，说明所需行程为 15mm。标准缸径为 82.55mm（3.25in），可选行程为 25.4mm（1in）。

带有活动型芯的模具设计完成图如图 11.26 所示。设计需要在液压缸和模具之间嵌入升降器以允许活塞杆随活动型芯运动。升降器强度必须足以避免液压缸相对于模具型芯推动活动型芯时因负载而产生弯曲。升降器的高度可以通过减小活动型芯的高度而降低，并允许活塞杆在模具所限的行程中活动。能缩减其高度是我们所期望的，因为其减少了驱动器、成型机和操作者之间的接触。需要注意的是，液压缸只能设置在模具的一边。

为了使模具尽可能安全有效，模具设计者应该明确限位开关的使用，以确保活动型芯在其前边或回缩位置。机器中使用这些位置信号以确保活动型芯位置合理，而不会在开模推出时损坏注射制品或注射模具。而且，模具设计者应该努力设计即使滑块位置不合适开模推出也不会损坏模具的活动型芯。例如图 11.25 所示的设计，如果模具打开，制品随活动型芯在前边位置推出，塑料制品就很有可能会受附近推管和扁推杆的驱动，在主要筋板处剪坏。这种问题对于正常的成型工艺是不期望也不应该发生的。但是，这种问题确实会发生，模具操作者特别期望一种稳定的模具设计，其可以承受间歇性的错误使用而不必重新修整推杆、扁推杆、推管或活动型芯。

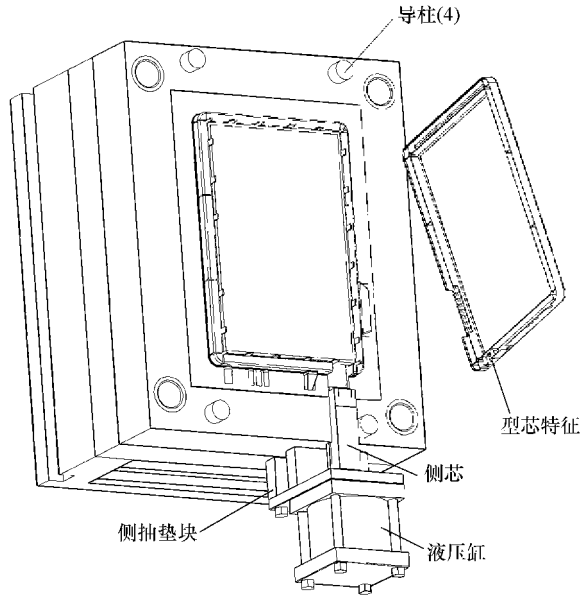


图 11.26　带有驱动推出部件的模具设计

11.3.7　滑块

抽芯是十分普遍的部件，因为其允许活动镶件以不同方向、行程和时间动作。但是，抽芯需要驱动器、辅助控制和占用许多的空间。因此，模具设计者通常更喜欢使用通过斜导柱、驱动的滑块。

一种此类模具的设计如图 11.27 所示。设计中，一铜制夹条设置在 B 板中，以提供

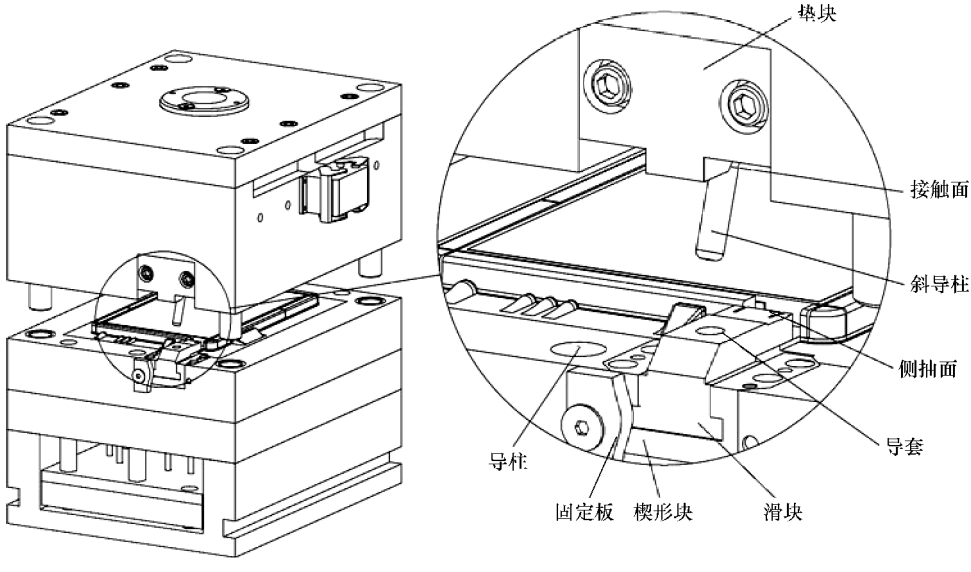


图 11.27　滑块位置图

对活动镶件加润滑油的滑动表面。型芯镶件提供斜导柱匹配的面。随着模具的开合，斜导柱驱动滑块，使型芯移进或移出。B 板上设置固定板防止滑块脱离滑槽。

具体设计如图 11.28 所示，进一步讨论如下。斜导柱的位置通过斜导柱镶件设定，斜导柱镶件有一平面来设置斜导柱使其在滑动方向上。滑块设计方法有许多，设计中，斜导柱镶件通过内六角圆柱头螺栓保持在型芯镶件和垫块之间。关于模具动模部分的设计，铜制夹条通过销钉和螺栓设置在 B 板和型芯中的缺口中。夹条为滑块提供导轨。滑块本身与图 11.24 所示的相似。

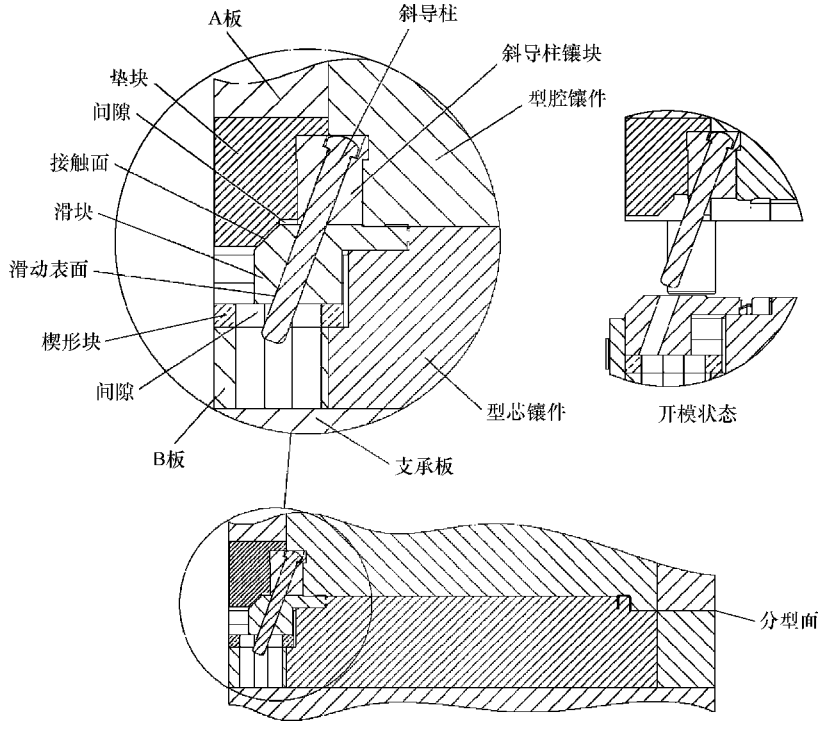


图 11.28　滑块细节图

在操作中，合模引起两个力施加在滑块上。首先，垫块的斜面与滑块的斜面接触使滑块相对于型芯镶件横向受力，此横向力承受了熔体压力并防止筋板、凸台和窗口偏移。其次，型腔镶件与滑块顶面接触，提供向下的锁模力以防止模具分型面周围发生变形和偏移。应该注意的是，设计中斜导柱不会提供横向力且不承受应力作用。间隙、误差和配合适当是保证滑块功能和长使用寿命的设计关键。

滑块的应用受到滑块方向和行程的限制。为了避免额外的摩擦，铜制夹条可以经过磨削并填充润滑油。但是，任何摩擦都会引起滑块在滑动过程中粘贴，所以斜导柱和开模方向之间的斜角 $\phi_{\text{angle_ pin}}$ 限制为 20°。那么，滑块的行程 S_{slide} 是斜导柱长度 $L_{\text{angle_ pin}}$ 的函数，即

$$S_{\text{slide}} = L_{\text{angle_pin}} \sin\phi_{\text{angle_pin}} \tag{11.26}$$

例：计算笔记本电脑框架模具所需斜导柱的长度。

模具设计使用斜导柱镶件倾斜角为20°，所需行程为12mm。那么，斜导柱长度为

$$L_{\text{angle_pin}}=\frac{S_{\text{slide}}}{\sin\phi_{\text{angle_pin}}}=\frac{12\text{mm}}{\sin 20^\circ}=35\text{mm}$$

另外需要25mm使斜导柱和斜导柱镶件匹配。则斜导柱的长度接近60mm，在模具装配过程中会被设置好。图11.24中就使用了此长度。

抽芯动作时需要注意滑块的不当动作。例如，好奇的操作者或访问者可能会对成型机中的模具产生兴趣并移动滑块。如果模具开模时滑块不在其外向位置，那么斜导柱会不当地与滑块顶面接触而不是与斜孔接触，此时即使在开模力低的情况下斜导柱也会发生弯曲变形。为了防止这种情况的发生，模具设计者可以在滑块前端和型芯镶件之间设置一个压缩弹簧以在模具打开时保持滑块处于向外的位置。此外，固定板应该设计一个限位开关，这样可以给型芯一个信号以确定其外在位置。如果采用了多个滑块，则限位开关应该串联连接，其目的是为了保证模具关闭时所有的滑块都在正确的位置。

11.3.8　先行推出回退系统

本节首先回顾以模具复位杆驱动安装在模具上的推出部件缩回的基本模具类型。虽然此设计简单可行，但是一些模具操作者更喜欢推出部件在合模前缩回。有许多先行推出部件回退的方法，最常用的两种是：

- 利用螺纹推出脱模杆进行正向回退。
- 使用压缩弹簧。

下面对上述两种方法进行简单的讨论。应该注意的是，还有许多其他的方法使推出部件先行回退，包括气缸、液压缸、电动机或电磁阀、机械凸轮等。但是，这些系统不很常用，以下不再具体展开。

正向回退需要确保推出系统的复位。如图11.29所示，一种设计是将成型机的推出脱模杆螺纹联接到推板中。成型机推动脱模杆向前以驱动推出部件将注射制品推出，之

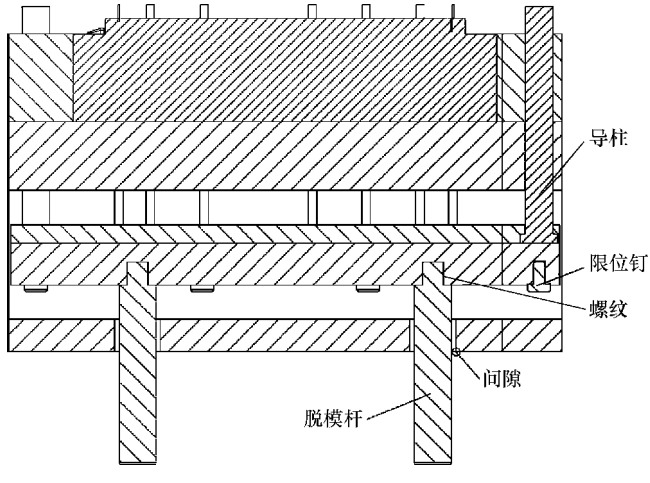


图11.29　利用螺纹推出脱模杆进行正向回退

后，成型机可以拉动脱模杆回退。因为脱模杆通过螺纹连接在推板中，因此整个推出部件在合模前回退。此外成型机的推出回退系统设备配置有位移传感器，根据推出系统在开模前的实际位置为正向回退提供反馈。为了使推出系统不会与成型机发生干涉，模具设计者应该确保复位杆的位置、直径及螺纹正确。

当复位杆的螺纹设计和操作相对简单时，一些模具制造者和模具操作者使用压缩弹簧来在开模前推回推出部件。如图 11.30 所示的设计，使用了几个压缩弹簧，设置在支承板和推杆固定板之间。当复位杆驱动推出部件时，弹簧处于压缩状态。当成型机驱动复位杆回缩时，压缩弹簧提供压力使推出部件复位。压缩弹簧的设计需要保证几点。其一，压缩弹簧中心应该设置支承柱，以避免弹簧在长度超出直径四倍时发生弯曲；支承柱应该通过螺纹连接在支承板上或设置在弹簧的合模板后面。其二，弹簧压缩的范围应该限制在弹簧自由长度的 40%。弹簧的直径和厚度应该根据所需回退力确定，回退力以占推出力的比例（如推出力的 1/4）表示。

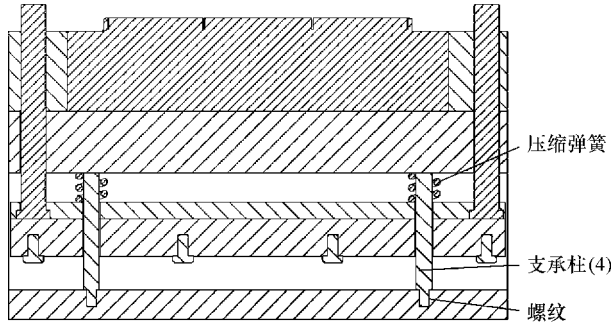


图 11.30　利用压缩弹簧的先行推出部件回退装置

这前两种回退系统非常常见，利用螺纹推出脱模杆进行正向回退有几项优势。其一，正向回退为成型机提供了关于推出系统位置的反馈。其二，正向回退系统几乎不需要改动模具设计。其三，压缩弹簧限制了推出行程，可能会被损坏，或者由于成型机提供的推出力大于压缩弹簧的自由行程范围而引起损坏。其四，在不明确的成型循环之后，带有压缩弹簧的模具会逐渐完全失效而不能使推出系统回退，最终导致压缩弹簧和推出系统发生弯曲变形。另一种情况是，如果先行推出部件回退需要保证在合模前完成，那么模具设计者应该设置限位开关以确保推出系统完全复位。

11.3.9　高级推出系统

本章讲述了最常见的推出系统部件和系统的分析与设计。实际中有许多不同和更高级的设计。详尽的分析不在本书范围之内，但在 13.9 节简要讨论了一些最常见而又高级的推出系统的设计。要获得更多的信息，模具设计者可以咨询推出系统部件供应商。

11.4　本章小结

最典型的推出系统设计包括推板、导柱、推杆和推杆固定板的设计。在操作中，成

型机的脱模杆向前推动推板，从而驱动推杆向前，推杆驱动注射制品脱离型芯。然后脱模杆回缩，以使模具的合模动作能够驱动导柱带动整个推出系统回缩。此推出系统设计的应用是模具的一个优势，实际成型应用对推出系统的设计提出了更多的要求。因此，希望模具设计者可以利用推杆、扁推杆、推件板、抽芯、斜导柱、滑块和弹簧以及其他部件。如果需要，第三供应商或客户可能会提供由模具设计者设计的更高级的推出系统。

推出系统的设计首先取决于模具分型面和所需推出方向。如果需要的推出方向多于一个，那么必须详细设计好抽芯、滑块或其他部件。其次，推出力应该根据制件的几何形状和厚度、脱模斜度、摩擦因数、材料特性和工艺条件的函数进行估算。已知推出力，模具设计者需要确定推出部件的数量、尺寸和位置，以防止推出系统零部件额外的应力和弯曲，以及注射制品上的额外的剪切应力。应用了许多小的推出部件的模具设计需要更多的花费来制造和维护，但与使用少而大的推出部件的模具相比，却可以提供更好的柔性和更均匀的推出。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 认识基本推出系统的设计和功能。
- 认识在好的推出系统设计中必须满足的不同目标。
- 能够根据一个给定的注射制品几何形状辨别分型面和推出方向。
- 了解如何估算在给定成型条件下的推出力。
- 了解如何估算所需所有推出零件的推出面积和周长以避免产生推出部件中的额外压缩应力和注射制品中的残留剪切应力。
- 了解如何确定直推杆、阶梯状推杆、扁推杆和推管等不同推出零件的类型、数量、尺寸和位置。
- 了解如何具体设计不同推出系统零部件以避免模具安装和使用时产生干涉。
- 了解如何设计推杆和扁推杆以避免弯曲变形。
- 认识推件板、抽芯、滑块以及其他更高级推出系统零部件的功能。

随着推出系统设计的完成，模具设计也基本完成了。但是，还需要结构分析和设计以确保模具可以承受多次工作循环中的熔体压力。

第 12 章　结构系统设计

注射成型模具需要承受来自高温熔融高聚物的高压。当这一高压全部作用在型腔内壁上时，将产生几十吨到几千吨的作用力。模具的结构不仅要能承受这一作用力，还要能生产高质量的成型制品。

为了设计高质量的模具结构，模具设计者必须了解注射模具中压力、作用力和应力的关系。图 12.1 所示为模具、模板和拉杆所承受的典型应力。在成型过程中，型腔所有壁面都受到熔体压力。这一压力导致型腔、型芯和支承板都受到挤压应力和剪切应力。这些应力的综合作用状态如图 12.1 斜线箭头所示。注射成型机的各模板也处于明显的弯曲状态以将作用力转移到处于拉伸状态的拉杆。

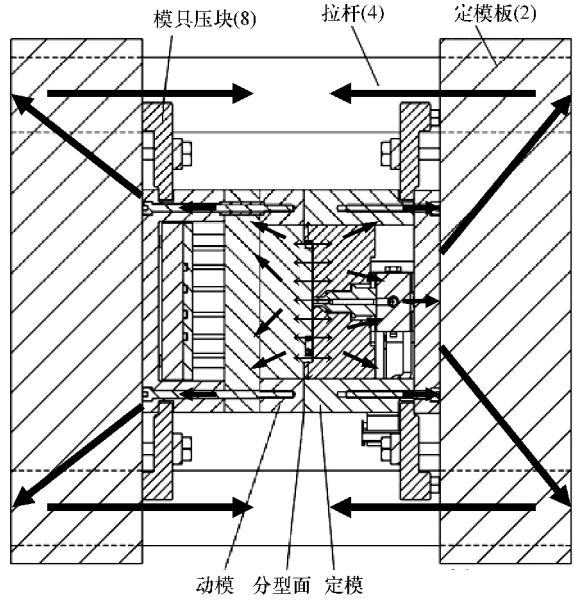


图 12.1　成型过程中的应力分布

12.1　模具设计的目的

模具设计者要为模具设计一种结构，使其在循环成型过程中不会疲劳破坏，要有足够的刚度，体积小而且经济。这些目标概括如下：

- 小应力。
- 小变形。
- 少花费。

在简要讨论所有这些目标之后，介绍模具的详细分析和设计。

12.1.1　应力最小化

动模板侧和定模板侧的应力状态有很大的不同。对于大多数模具，型腔直接由上固定板和定模板支承。这样，型腔一般只受压力，因此很少有弯曲变形发生。然而，在动模板侧，凹处需要安放推出装置，不能提供型芯的支承。因此，型芯和支承板必须通过压缩和剪切来转移作用力，其将使模板发生明显的弯曲。

图 12.2 所示为在型腔承受 150MPa 的熔体压力时，热流道模具所受到的等效应力。等效应力一般用来预测失效，其定义为

$$\sigma_{\text{mises}} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} < \sigma_{\text{limit}} \tag{12.1}$$

式中，σ_1 和 σ_2 分别是第一主应力和第二主应力。为了避免失效，等效应力应该小于指定的极限应力 σ_{limit}。

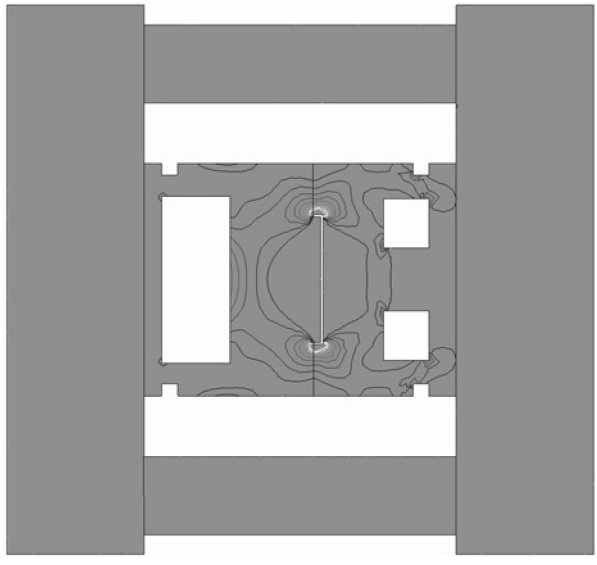


图 12.2　成型过程中的等效（Von Mises）应力

极限应力通常由两个主要因素来确定。第一个因素是应力不能太高以至于使模具发生变形。当材料受到应力时，其会变形或产生应变。对于大多数材料，其应变与应力成正比。这一比例因子与材料的弹性模量 E 相关，即

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{12.2}$$

式中，ε 是应力 σ 所产生的应变。在一定的应力下，弹性模量大的材料产生的应变小。

图 12.3 所示为两种模具常用材料 P20 和铝 QC－7 的应力应变图。P20 的弹性模量比铝 QC－7 大，也就是在相同的应力下其形变较小。图中所示屈服强度为材料发生偏离线性行为的点。屈服强度也是材料产生塑性变形时的应力，如果应力增大，当去掉载荷时，其变形将不能恢复。一旦材料的应力超过其屈服强度，应力可以继续增大到其极限应力，直到完全破坏。

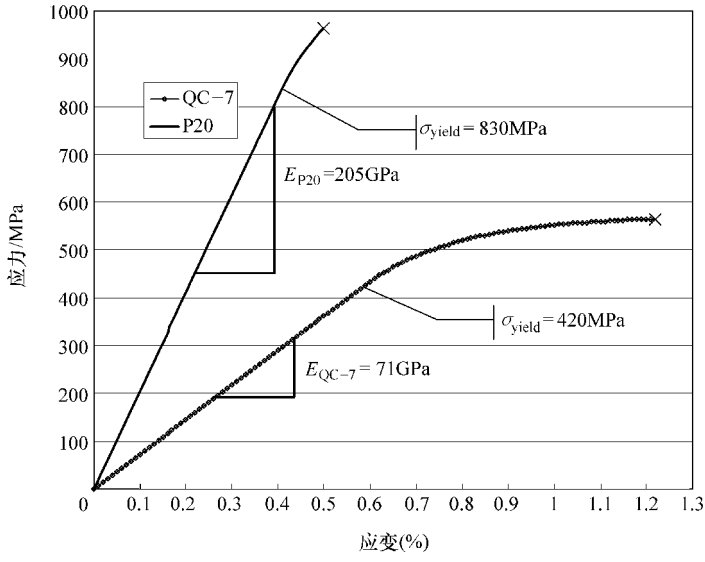


图 12.3　P20 和铝 QC－7 的应力应变行为

模具设计应使工作时的应力小于其屈服强度。关于屈服强度和极限应力的关系，有两种常用表示方法。一种是简单地设定极限应力等于屈服强度，但这要假定为负载最坏的情况。例如，模具设计者可以假定 P20 的极限应力等于屈服强度 830MPa。为了保证在负载下模具不会屈服变形，模具设计者应对假定在最大熔体压力下模具压力有可能达到 200MPa 加以分析。

另一个方法是设定极限应力等于屈服强度除以一个安全因子，即

$$\sigma_{\text{limit}} = \frac{\sigma_{\text{yield}}}{f} \tag{12.3}$$

式中，f 是安全因子，其大小与不确定水平以及失效时的花费有关。一般其范围为 1.5～6.0。当使用安全因子时，模具设计者在设计计算时应使用模具内的可能熔体压力，比如 100MPa。为了避免设计产生较大误差，模具设计者在设计时不能总使用在最坏情形时的安全因子。

模具设计者可能认为对屈服强度使用一个比较保守的安全因子可能会安全些，然而这一做法可能导致模具在很多次成型加工后失效。原因是锁模力和型腔熔体压力的连续循环会产生交变应力，如图 12.4 所示。如果模具在打开和关闭的每一次应力循环中有小裂纹，就会在裂纹尖端产生导致失效的晶体。在千万次成型循环过程中，模具中的裂纹会变大且增多，如同用锤子打楔子。一旦裂纹达到临界尺寸，裂纹处将产生应力集中而使模具失效，甚至使合理设计的模具的极限应力远远小于屈服强度。模具的这种失效通常称为疲劳失效。

疲劳失效性能是一种力学性能，各种材料的疲劳失效行为已通过百万甚至更多次交变应力试验来描述。一般而言，在实际应力作用下模具所能承受的交变应力次数将减

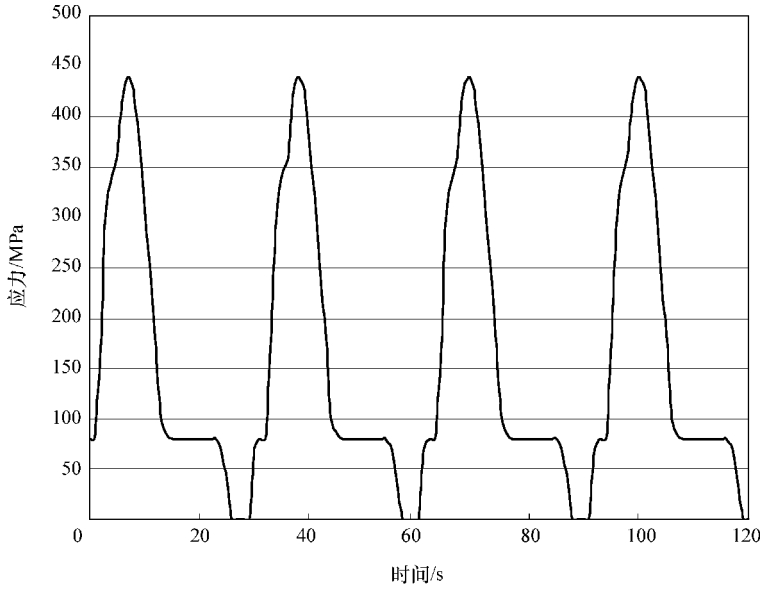


图 12.4　模具中的交变应力

少。图 12.5 标出了 QC－7 和 P20 疲劳失效前所能承受的交变应力作用的次数。这一数据被称为 $s-n$ 曲线，其中 s 是应力，n 是循环作用次数。疲劳极限是材料理论上经过无限次交变应力作用而没有失效的极限应力。对于大多数钢，疲劳极限约为屈服强度的一半。例如 P20，其疲劳极限约为 450MPa。

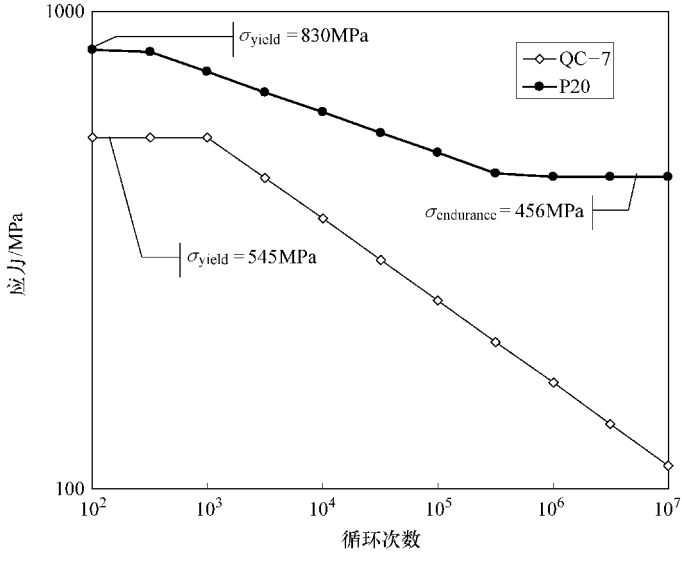


图 12.5　QC－7 和 P20 的应力－失效（$s-n$）曲线

图 12.5 的数据显示了 QC－7 的疲劳极限远远低于 P20 的疲劳极限。QC－7 和 P20

有两个重要的不同性质。第一，QC－7 的 $s-n$ 曲线有一个大的斜坡。第二，QC－7 没有疲劳极限。换句话说，连续的交变应力作用在铝上都会导致铝疲劳失效。基于此，模具设计者用铝作为材料设计模具时，应根据模具所要成型加工的次数仔细选择极限应力。如果模具成型加工的次数少于1000 次，模具设计者应选择其屈服强度 545MPa 作为极限应力。如果模具将要做约 10 000 次成型加工，则允许的极限应力降为 370MPa。如果模具的成型加工次数将达到百万次，则其极限应力应设定在 170MPa。

简而言之，模具的极限应力是根据屈服还是疲劳来确定取决于模具的成型操作，即

$$\sigma_{\text{limit}} = \min\left(\frac{\sigma_{\text{yield}}}{f}, \sigma_{\text{endurance}}\right) \tag{12.4}$$

如果模具的成型加工次数很少，其极限应力可以设定为屈服强度，可以通过用一个安全因子或按最坏情况来设计。如果模具的成型加工次数将会很多，则应使用疲劳极限作为极限应力。附录 B 提供了一些常用模具材料的数据。

12.1.2　模具变形最小化

作用在模具组件上的应力过大会使模具损坏，而在许多成型加工过程中人们更关心模具的变形是否过大。原因是过大的模具变形会使制品在模具的型芯和型腔分型线处产生飞边。对于要求配合紧密的模具，模具变形会使制品尺寸不符合设计要求。因此，模具设计更应重视减小模具变形。

图 12.6 所示为模具和模板在图 12.2 所示应力分布情况下的变形情况。很明显，模具内最大的变形发生在型腔的中部，型芯表面变形向左 0.24mm，型腔变形向右 0.12mm。因此型腔内的熔体压力使它们总共偏离 0.36mm（0.014in）。这一变形使所有分型线处开一个近似宽的口。因为这一开口大于排气缝宽度（一般为 0.02mm），因此

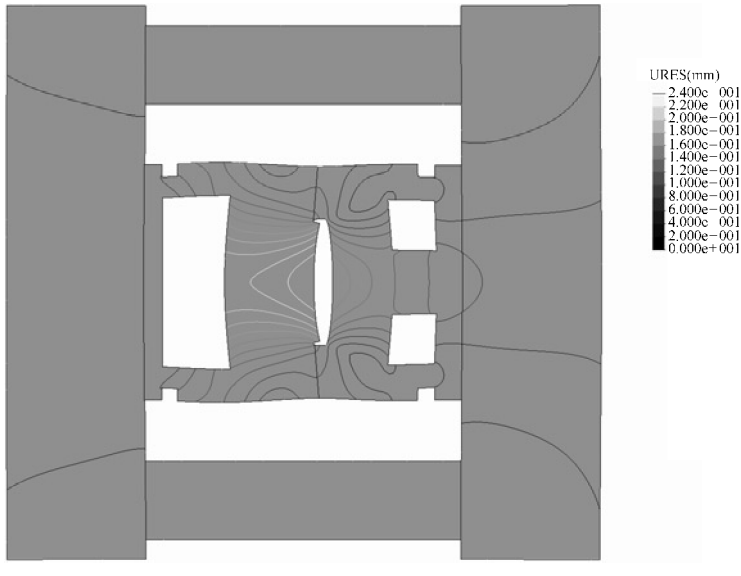


图 12.6　成型过程中的变形情况

成型时就会明显溢料。模具设计必须在减小变形方面进行改进。㊀

12.1.3　模具外形尺寸最小化

模具设计者可以研究出不同的模具材料和外形尺寸来减小模具的应力和变形。附录B给出了这些材料性质的评价，表中硬质材料（如H13）能承受比软质材料（如1045或QC－7）更大的应力。然而，模具设计者应该意识到所有的钢具有相近的弹性模量，都在200GPa左右。因此不能通过选择不同的钢来改变模具的变形，而只能通过改变模具的几何尺寸来实现。

减小模具变形最简易的方法是增加板材的厚度。后面的分析将会显示，这一方法是行之有效的，因为模具板材的刚度与板材厚度的三次方有关。可是，总是使用很大很厚的板材会使模具过重而且花费昂贵，这限制了成型机的实用性。因此，模具设计者应该通过适当的分析和仔细研究板材的厚度规格和支承结构如支承柱和互锁来寻求减小模具尺寸的方法。

12.2　板的分析与设计

在模具设计中，板是指矩形的结构，其长度和宽度比厚度要大。板的面通常是指沿宽度和长度方向的板的上表面和下表面。板的侧表面是指横贯厚度方向的其余四个面。可以用来制作模板的板材尺寸和材料很宽广。提供的板材应比最终尺寸有一定（如1mm）的余量，而加工完成的板可以有±0.02mm的偏差。

模具大部分由板组成，包括上固定板、A板、型腔镶件、型芯镶件、B板、支承板、推板、推杆固定板和后固定板。㊁所有这些板一般都是一个面承受作用力。板的各侧面可能与周围其他板作用，大部分是挤压和剪切应力，因而通过厚度方向传递到整个板。下面来分别分析板所受到的压缩和弯曲作用。

12.2.1　板的压缩

如果一个板完全由其随后的板和模板（一般在模具固定不动的一侧）来支承，则所有板受压而板的弯曲可忽略。值得注意的是模具的夹紧产生的压缩力将使整个板内受到一致的压缩应力。压缩应力σ定义为力F除以受压面积$A_{\text{compression}}$，即

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{compression}}} \tag{12.5}$$

产生的应变ε是应力与弹性模量E的比，即

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \tag{12.6}$$

㊀ 图12.6所示的轮廓指明模板也会存在变形。模具设计者和使用者通常假设模板是平的，且是无限刚性的。模板变形是个显著问题，其讨论超出本书的范围。在图12.6中，定模板的变形约为0.04mm，是动模板变形的两倍。原因是模具的推出系统趋向于安装在动模板上，并将推出力作用到动模板上，因而造成动模板的中心几乎不受力，相比于定模板几乎没有变形。

㊁ 较深型芯的模具设计除外，其有很大不同，在这种情况下，型芯镶件不是板而是一个柱。这类模具设计在12.3节单独涉及其相关问题。

变形量等于应变乘以产生应变的长度，即

$$\delta_{\text{compression}} = \varepsilon L \tag{12.7}$$

压力所产生的变形通常不会造成影响，因为：①它非常小；②它均匀地存在于模板中。因此，它并不会在制品中产生飞边或很大的尺寸改变。下面的例子将说明在较深的型腔中如果对制品厚度的公差要求较严，模具设计者应增加型腔的厚度来抵消板受压变形所产生的影响。

例：计算当夹紧力为 200t 时 Bezel 模具堆叠高度上的变形量。

为了精确计算模具的变形，每个板和导轨上的压缩应力和应变都要计算。沿高度方向的每一部分变形都要计算并相加来计算模具的总变形。然而，通过假定模具为一个均匀受到压力的整块可以快速地近似估算出结果。图 12.7 提供了模具的外形尺寸，一些其他的临界尺寸将在后面讨论。

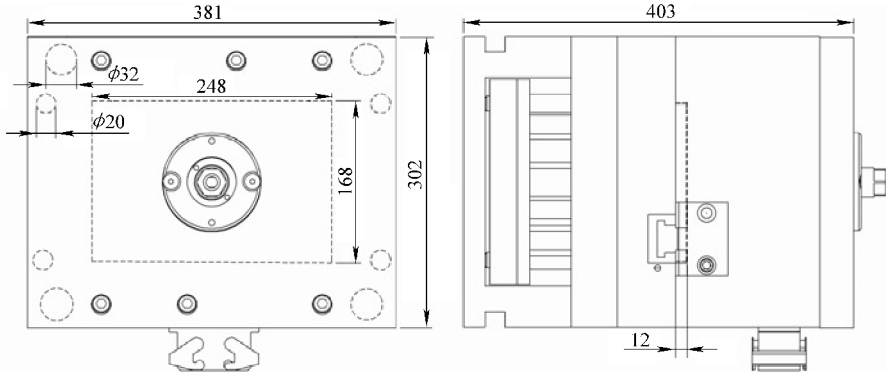


图 12.7　压缩应力分析用的 Bezel 模具尺寸

模具内的压缩应力约为

$$\sigma = \frac{F}{A_{\text{compression}}} = \frac{200 \times 9807}{0.381 \times 0.302}\text{Pa} = 17\text{MPa}$$

这一应力相对的应变为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{17\text{MPa}}{205\text{GPa}} = 8.3 \times 10^{-5}$$

在夹紧力作用下整个模具的变形量为

$$\delta_{\text{mold}} = \varepsilon L = 8.3 \times 10^{-5} \times 403\text{mm} = 0.03\text{mm}$$

在实际成型过程中，模具总的变形量可能是这一数字的两倍，因为推出支架侧的导轨处于高应力状态。然而，上面的分析在正确的数量级下给出了快速估算方法。

例：当作用在前模板上的夹紧力为 200t 时，计算型腔高度方向的变形量。

型腔高度方向的变形由型腔周围板的压缩引起。为了提供一个精确的分析，型腔周围板的压缩应力的计算基于支承区域，如图 12.8 所示。这一区域不包括型腔、导柱、导套，因为这些部分没有从模具的固定侧传递任何力到移动侧。因此，后模板所受到的压缩应力比前面估算的 17MPa 要大。

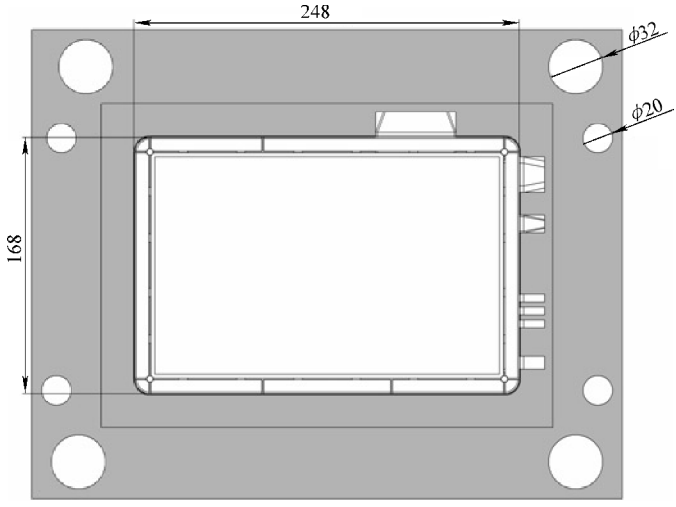


图 12.8　型腔周围的支承区域

型腔固定板的受力面积约为

$$A_{\text{compression}} = \left[0.381 \times 0.302 - 0.248 \times 0.168 - 4\left(\frac{0.032^2\pi}{4} + \frac{0.020^2\pi}{4}\right)\right]\text{m}^2$$
$$= 0.069\text{m}^2$$

对于给定的 200t 夹紧力，这一作用面积使型腔周围板所受到的压缩应力为

$$\sigma_{\text{plate}} = \frac{F}{A} = \frac{200 \times 9807}{0.069}\text{Pa} = 28.5\text{MPa}$$

对应的应变为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{28.5\text{MPa}}{205\text{GPa}} = 1.4 \times 10^{-4}$$

设定高度为 12mm，则型腔沿高度方向的变形量为

$$\delta_{\text{mold}} = \varepsilon L = 1.4 \times 10^{-4} \times 12\text{mm} = 0.002\text{mm}$$

由于模具夹紧力引起的型腔高度方向形变很小。另外，在成型过程中，熔体压力作用在型腔内表面，它将抵消模具夹紧力。因此，在成型过程中，型腔高度方向的变形不需要进一步考虑。

12.2.2　板的弯曲

如果板的背面没有完全被支承，那么剪切应力将会使板发生弯曲变形。在推出支架和动模侧的型腔之间的固定板很容易发生弯曲变形。剪切应力 τ 定义为作用力 F 除以剪切面积 A_{shear}，即

$$\tau = \frac{F}{A_{\text{shear}}} \tag{12.8}$$

图 12.9 所示为部分 Bezel 模具在静力作用时受剪切的示意图。而熔体压力作用在型腔时的实际剪切应力分布有很多不同，假定剪切应力在模具型腔周围均匀分布，则可以得到较为合理的计算。剪切面积为

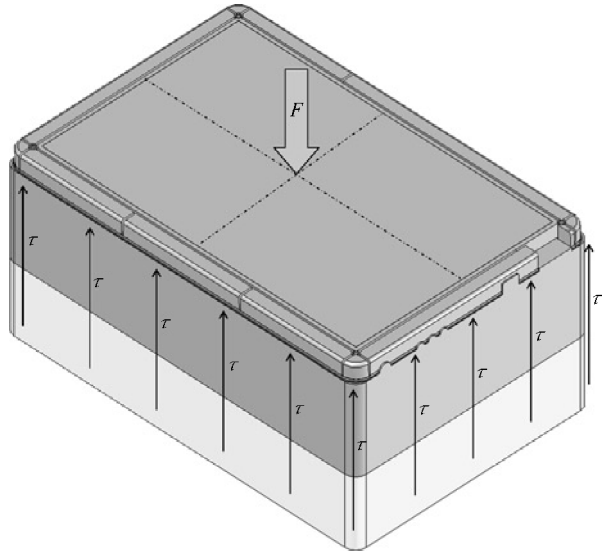


图 12.9　型腔周围的剪切应力

$$A_{\text{shear}} = \text{周长} \times \text{高}$$
$$= (2W_{\text{cavity}} + 2L_{\text{cavity}})(H_{\text{b_plate}} + H_{\text{sup port_plate}}) \tag{12.9}$$

例：如果作用在型腔上的熔体压力为 200t，计算型芯和支承板的剪切应力。图 12.10 给出了模具设计的尺寸。

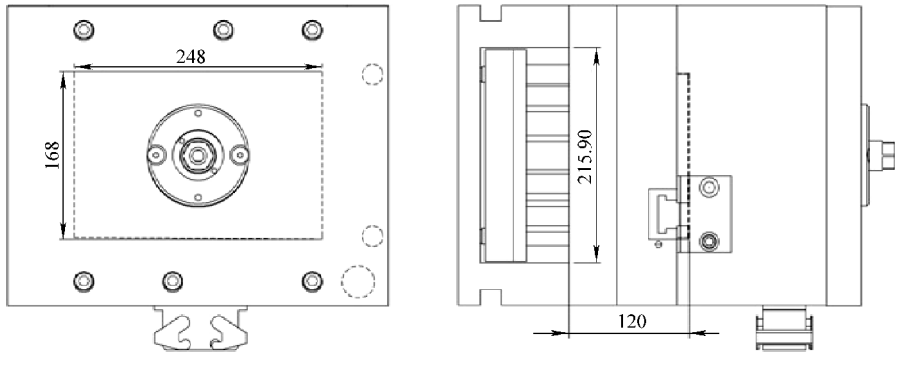


图 12.10　剪切应力分析用的 Bezel 模具尺寸

剪切面积为

$$A_{\text{shear}} = (2 \times 0.248 + 2 \times 0.168) \times (0.12 - 0.012)\,\text{m}^2 = 0.090\,\text{m}^2$$

剪切应力为

$$\tau = \frac{F}{A_{\text{shear}}} = \frac{200 \times 9\ 807}{0.090}\text{Pa} = 21.8\,\text{MPa}$$

对于铝或钢来说这一剪切应力要远远小于其极限应力。

一般在模具设计中，板的弯曲并不使板中存在剪切应力，但是无支承的长跨度板会

产生相当大的变形。许多模具应用移动推出装置，所以推出支架导轨之间的支承板没有完全被支承。模具板的弯曲和梁的弯曲类似。用图 12.11 所示的理想状况来代替板的受力情况，假定作用力 F 集中作用在模具表面的中心处。这一假定是对最大变形的一个保守估算。

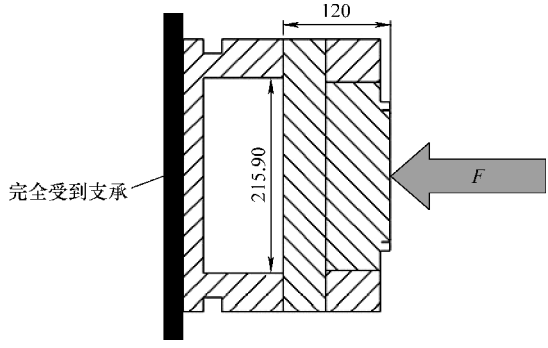


图 12.11　板弯曲模型视为梁的弯曲

通过假定为受集中力的梁的弯曲保守计算板的变形为

$$\delta_{\text{bending}} = \frac{FL^3}{48EI} \tag{12.10}$$

式中，L 是板的跨度；I 是惯性矩。

对于矩形截面，惯性矩为

$$I = \frac{1}{12}WH^3 \tag{12.11}$$

式中，W 是模具板弯曲截面的宽（图 12.11 中截面的法线方向）；H 是型芯和支承板的总厚度。

例：假定作用在 Bezel 模具上的熔体压力为 200t，计算板弯曲的变形量。

受弯曲模具的宽度保守假定为型腔的宽度，如图 12.10 所示为 248mm。型芯和支承板的总高度为 120mm。因此惯性矩为

$$I = \frac{1}{12} \times 0.248 \times 0.120^3 \text{m}^4 = 3.6 \times 10^{-5} \text{m}^4$$

弯曲的自由跨度为推出支架内表面之间的距离，如图 12.11 所示为 215.9mm。弯曲变形量为

$$\delta_{\text{bending}} = \frac{200 \times 9\ 807 \times 0.215\ \text{b}9^3}{48 \times 205 \times 10^9 \times 3.6 \times 10^{-5}} \text{m} = 0.056 \text{mm}$$

这一变形量是图 12.6 所示通过有限元分析计算出的变形量 0.024mm 的两倍还多。原因是有限元分析假定载荷为均匀分布，它比假定单一集中作用力减少了 60% 的变形量。这一分析方法可能过高估计模具的弯曲变形量，但其处于正确范围，而且可以使设计的模具更可靠。

对于多型腔模具，这一分析方法应对每一部分分别进行。图 12.12 所示为一六型腔

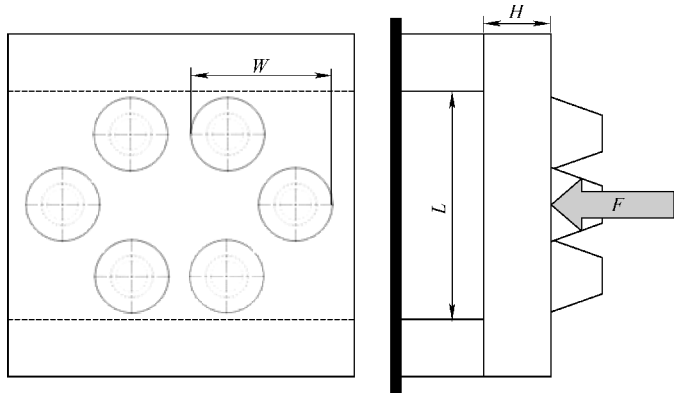


图 12.12　不同弯曲面积的分解图

模具的俯视图和侧视图。一种分析方法是熔体压力作用在三个型腔上来计算作用力 F，其主要作用在有效宽度 W 上。另外也要注意板的有效厚度 H，当型芯不是明显有助于增大模具刚度时，板的厚度不应包括型芯的厚度。

12.2.3　支承柱

可以通过在后固定板和支承板之间使用支承柱来明显减少板的变形。合理直接安放在型腔下部的支承柱可以明显承受作用力。通过直接支承模具板，支承柱近处的剪切应力和弯曲明显减小。

图 12.13 所示为一个典型的设计方法。在这一设计中，推板和推杆固定板之间有一间隙。用销钉固定好支承柱使其中心与后固定板上的孔配合。用内六角圆柱头螺钉将支承板固定在后固定板上，那么支承柱将可以完全牢固地安装在模具上。

然而，支承柱的位置可能与其他的部件如推杆冲突。因此，不同设计布局和尺寸的支承柱应具体分析。如果模具变形影响较大，则应调节推杆的布局腾出空间来在合理的位置布置一些大的支承柱。图 12.14 所示的设计可以布置三个支承柱。左边推板外侧可以布置两个小的支承柱。支承柱应根据 Bezel 跨度合理布置。然而，若没有重新布置推杆，支承柱就不能直接安置在 Bezel 面下面。

另一个设计是在模具中心设计一个大的支承柱从而避免与推杆发生干涉。然而，成型时模具板的弯曲大多是因为模具左侧和右侧的载荷，故这一支承柱并不能很明显地解决模具板的变形问题。另外，这一设计可能会与经常使用的在成型机中间设置的推杆相冲突。另一种选择是在右边布置一个大小合适的支承柱。这一设计需要的支承柱比前一种少，但是在支承柱和推出导轨间有很大的跨度从而会产生更大的变形。

下面将分析使用支承柱的数目、位置和尺寸。分析的一个复杂问题是支承柱是具有有限直径和刚度的结构元件，也就是在压缩力的作用下会发生变形。型芯和支承板也会随之发生变形。另外，支承柱和推出导轨之间的型芯和支承板会发生弯曲。为了计算板的总变形量，要将压缩和弯曲的变形量进行叠加。这一原理如图 12.15 所示。

为了便于分析，模具中的力必须转换成适用于手工分析的一组载荷。图 12.16 所示为作用在型腔壁上的熔体压力转换后的压缩载荷和弯曲载荷情况。总的作用力 F 为作

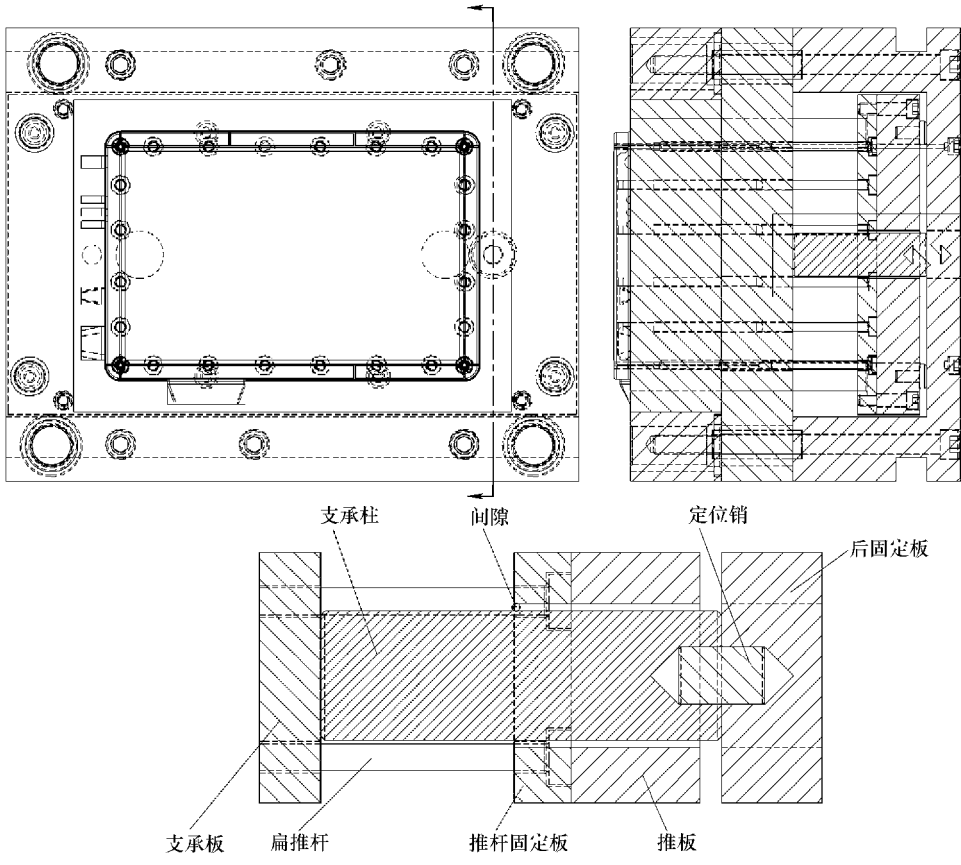


图 12.13　带支承柱的典型模具设计

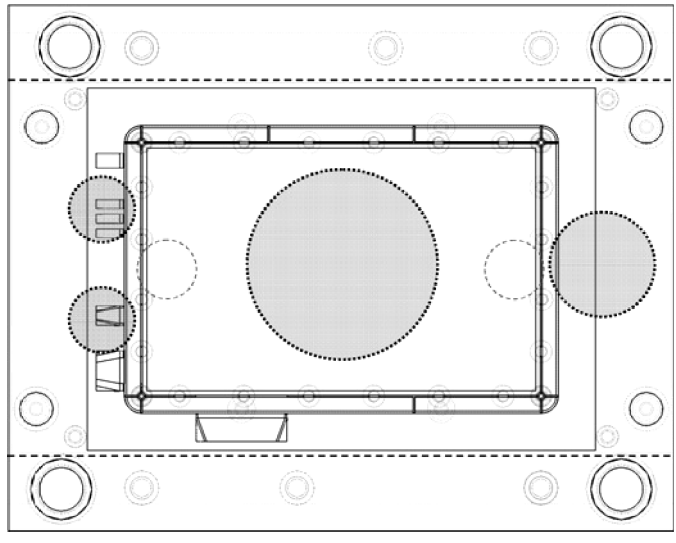


图 12.14　不同的支承柱位置

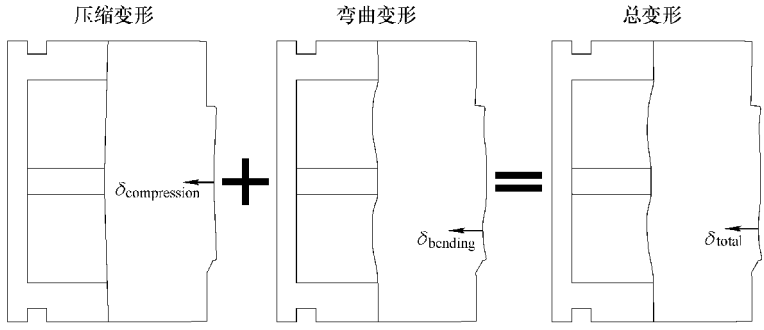


图 12.15　压缩变形量与弯曲变形量的叠加

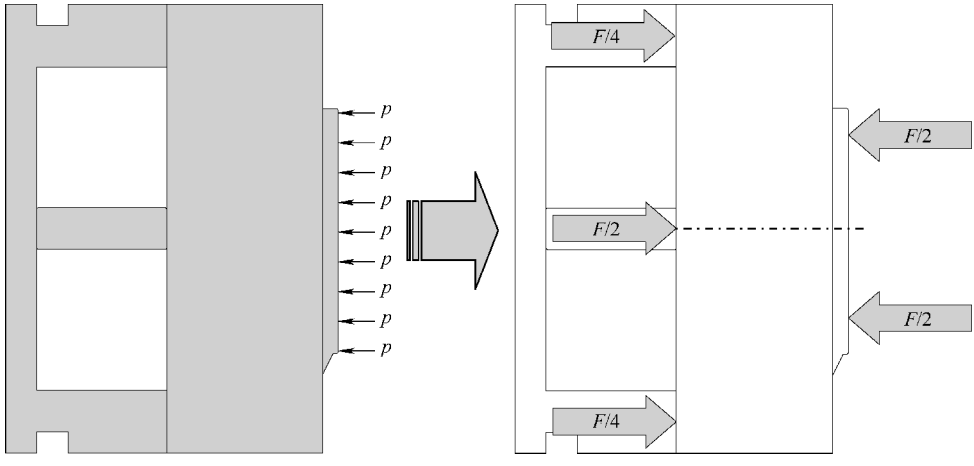


图 12.16　压缩载荷与弯曲载荷情况

用在型腔长度方向和宽度方向上的综合熔体压力。为了计算弯曲变形，力 F 分为两部分作用在支承柱和推出导轨跨度的中间。平衡力由支承柱和推出导轨来提供。

应用叠加法分解作用力之后，就可以用前面介绍的压缩变形和弯曲变形分析来计算支承柱中的应力 σ、压缩变形 $\delta_{\text{compression}}$ 和弯曲变形 δ_{bending} 了。型腔壁的变形量可以用到支承柱中心线的距离 χ 的公式来计算，即

$$\delta_{\text{total}(\chi)} = \delta_{\text{compression}}\left(1 - \frac{\chi}{L}\right) + \delta_{\text{bending}}\left(\frac{3L^2\chi - 4\chi^3}{L^3}\right) \tag{12.12}$$

式中，L 是从支承柱到推出导轨的跨度；χ 的范围是跨度的一半。

模具的最大变形发生在支承柱中心处或支承柱和推出导轨的中间处，其取决于各变形量的数量级。从而压缩和弯曲叠加时的最大变形量计算公式为

$$\delta_{\max} = \max\left(\delta_{\text{compression}}, \frac{\delta_{\text{compression}}}{2} + \delta_{\text{bending}}\right) \tag{12.13}$$

例：为 Bezel 模具设计一支承柱使总变形量小于 0.1mm。分析支承柱中的应力和最终变形量。

支承柱在 Bezel 一侧下面支承型芯和支承板，图 12.17 所示为型腔局部的分析图。Bezel 的顶部和底部接近推出导轨所以没有明显的板的弯曲变形。

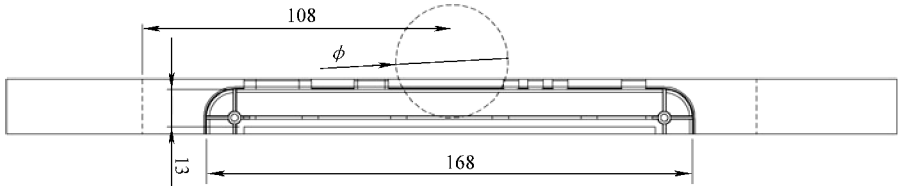


图 12.17　支承柱局部区域的模具型腔面积

假定熔体压力为 150MPa，作用在这一部分模具上的总作用力为

$$F = pA = 150 \times 168 \times 13\text{N} = 327\ 600\text{N} = 33\text{tf}$$

其为一个很大的作用力。先假定支承柱的直径为 37.5mm 来分析。假设支承柱传递一半的作用力，那么支承柱中的应力为

$$\sigma = \frac{F/2}{A} = \frac{327\ 600}{0.0375^2\pi/4}\text{Pa} = 297\text{MPa}$$

如果制作支承柱的材料为 SAE1040 钢㊀，则这一应力接近其疲劳极限。最终应变为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{297\text{MPa}}{205\text{GPa}} = 0.14\%$$

支承柱的长度为 89mm（3.5in），最终变形量为

$$\delta_{\text{compression}} = \varepsilon L = 0.14\% \times 88.9\text{mm} = 0.13\text{mm}$$

其远远大于设定的最大变形量 0.1mm。为了减小变形量，支承柱的直径增大到 50mm。因此应力相应减小到 167MPa 而压缩产生的变形量相应减小到 0.07mm。

弯曲的分析与前一例子非常相似。然而，模板的有效作用宽度保守估计为型腔的宽度（13mm）。其惯性矩为

$$I = \frac{1}{12} \times 0.013 \times 0.120^3\text{m}^4 = 1.9 \times 10^{-6}\text{m}^4$$

因为使用了支承柱，跨度从图 12.11 中的 216mm 减小到图 12.17 中的 108mm。应用弯曲的计算公式计算作用在模具这一部分的作用力为 33t 时的弯曲变形量为

$$\delta_{\text{bending}} = \frac{33 \times 9\ 807 \times 0.108^3}{48 \times 205 \times 10^9 \times 1.9 \times 10^{-6}}\text{m} = 0.02\text{mm}$$

因弯曲产生的变形量很小，由支承柱压缩引起的最大变形将发生在模具的中心处。值得注意的是在满足变形要求情况下，后模板和（或）支承板的厚度可以适当减小。另外，通过先装配支承柱可以大大减小压缩产生的变形。特别的，可以使用长度为 88.97mm 的支承柱（88.9mm 加上 0.07mm）在压缩变形时就回到正常所需的 88.9mm，从而使型腔在成型过程中变浅。

12.2.4　侧壁中的剪切应力

前面的分析主要针对分型面处板的变形。然而模板侧壁中的剪切应力也可能导致过

㊀ 对应我国牌号为 40 钢。——译者注

度变形甚至失效。这一点对于具有较深型腔的模具尤为明显。杯形模具就是一个典型的代表，其受力情况如图 12.18 所示。深的型腔具有一个高的侧壁且受熔体压力 p 的作用。如果型腔很深，侧壁的剪切和弯曲变形就很明显。侧壁的宽度即为从型腔内壁到模具侧面的距离，通常也称这部分为壁板（cheek）。

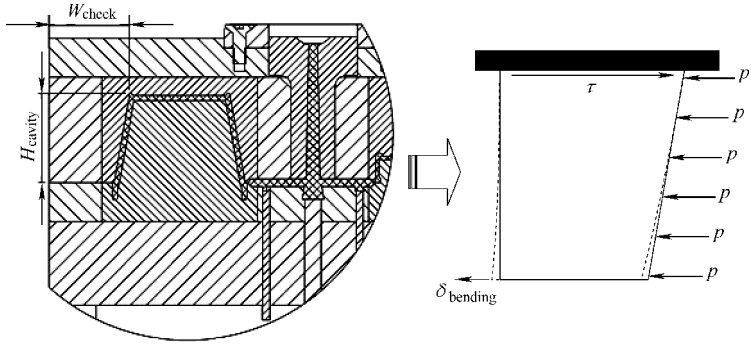


图 12.18　侧壁的剪切变形和弯曲变形

在模具设计中通常设定壁板宽度 W_{cheek} 和型腔高度 H_{cavity} 相等。侧壁中的最大剪切应力可以通过含有型腔高度 H_{cavity}、壁板宽度 W_{cheek} 和成型压力 p 的公式来计算，即

$$\tau = \frac{F}{A} = \frac{pH_{\text{cavity}}W_{\text{cavity}}}{W_{\text{cheek}}W_{\text{cavity}}} < \frac{\sigma_{\text{lim it}}}{2} \tag{12.14}$$

为了避免失效，剪切应力应小于材料极限应力的一半。根据这一限制将公式（12.14）变形，壁板宽度应满足

$$W_{\text{cheek}} > 2H_{\text{cavity}}\frac{p}{\sigma_{\text{lim it}}} \tag{12.15}$$

如果制作模具的材料为 SAE4140，其疲劳极限为 412MPa。一般最大注射压力为 150MPa，那么壁板的宽度应满足

$$W_{\text{cheek}} > 2H_{\text{cavity}}\frac{150\text{MPa}}{412\text{MPa}} = 0.73H_{\text{cavity}} \tag{12.16}$$

根据经验，壁板的宽度应等于在一般假设条件下附以一安全因素的型腔厚度。

尽管剪切应力可能不会超过规定的极限，模具设计者也应核算侧壁在负载下的变形。假设侧壁作为一个均匀负载的简支梁，那么侧壁的弯曲变形可计算为

$$\delta_{\text{bending}} = \frac{3pH^4_{\text{cavity}}}{2EW^3_{\text{cheek}}} \tag{12.17}$$

例：计算杯形模具侧壁中的剪切应力和变形量。

杯形模具壁的厚度为 3mm，假设最大熔体压力为 80MPa。从分型面到杯顶部的型腔高度为 50mm，壁板宽度为 45mm。侧壁中的剪切应力约为

$$\tau = 80 \times \frac{50}{45}\text{MPa} = 89\text{MPa}$$

侧壁的最大变形发生在分型面处，其大小约为

$$\delta_{\text{bending}} = \frac{3 \times 80 \times 10^6 \times 0.05^4}{2 \times 205 \times 10^9 \times 0.045^3}\text{m} = 4 \times 10^{-5}\text{m} = 0.04\text{mm}$$

这一应力和变形并没有很大的影响，所以不需要改变模具的设计。

12.2.5　互锁

在前面的例子中，侧壁的变形对模具设计没有很大的影响。然而，如果熔体压力更高、型腔更深或成型公差要求更小，那么这一影响可能就很明显了。模具设计者可以增加壁板宽度来减小侧壁的变形。然而，这一方法增加了模具的尺寸和成本。另外一种方法是利用模具边缘处分型面的互锁来将部分弯曲负载从定模部分转移到动模部分。

图 12.19 所示为模具中的圆形互锁和矩形互锁。两种形式的互锁都布置在分型面处且尽可能靠近型腔。一般来说，矩形互锁因其尺寸和互锁横截面面积大而能提供很大的变形阻力。然而，圆形互锁尺寸小且容易布置在模具中。

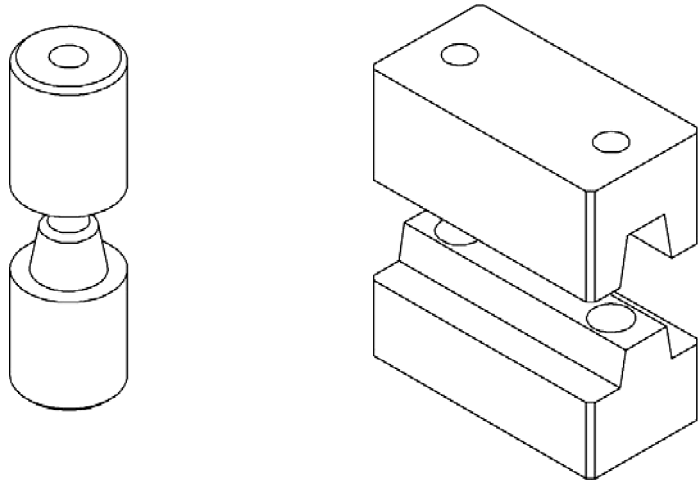


图 12.19　圆形互锁和矩形互锁

图 12.20 所示为模具设计使用圆形互锁的模具设计。在这一设计中，凸互锁安装在模具后模板的一个通孔中，凹互锁安装在比后模板厚的模具前模板的一个不通孔中。它们都与周围的板紧密配合，其高度方向通过内六角圆柱头螺钉来固定。使用互锁时，不能因为去除过量的模具材料而使侧壁结构的完整性受到破坏，这对模具设计者来说很重要。当熔体压力作用在侧壁上时，互锁装置将部分负载从定模部分转移到动模部分。使用互锁装置使侧壁的刚度提高至原来的两倍，从而使侧壁的变形量减小一半。

既然使用越大的互锁装置就能使模具承受越大的负载，那么在模具设计中将使用最大的互锁装置。如果互锁装置承受来自侧壁的侧压力 F_{lateral}，则互锁装置中的剪切应力可计算为

$$\tau_{\text{int erlock}} = \frac{F_{\text{lateral}}}{A_{\text{int erlock}}} \tag{12.18}$$

式中，$A_{\text{int erlock}}$是在分型面处互锁装置的横截面面积。

如果互锁装置用 S7 工具钢制作，那么为了避免失效设计的剪切应力应小于300MPa。

例：计算用于支承杯形型腔、直径为 19mm 的互锁装置中的剪切应力。

在该分析中未确定的主要是计算作用在互锁装置上的侧压力。侧压力的计算很复杂，因为杯形型腔圆形体使导柱间的壁板宽度不一致。然而，有一种计算方法是假定作用在互锁装置上的侧压力直接来自型腔壁。如图 12.21 所示，有效作用面积可通过互锁装置宽度和型腔高度计算得到。

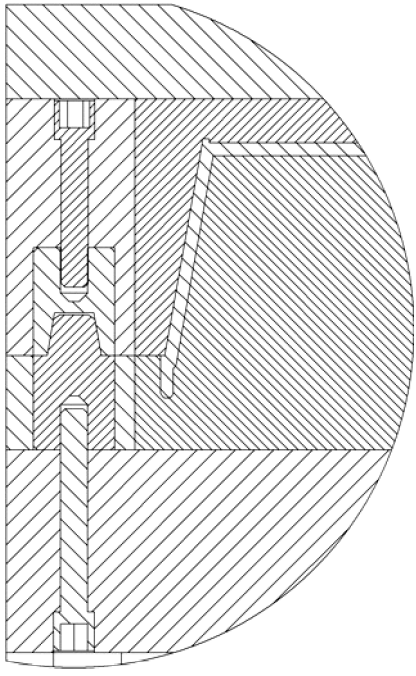


图 12.20　使用圆形互锁的模具设计

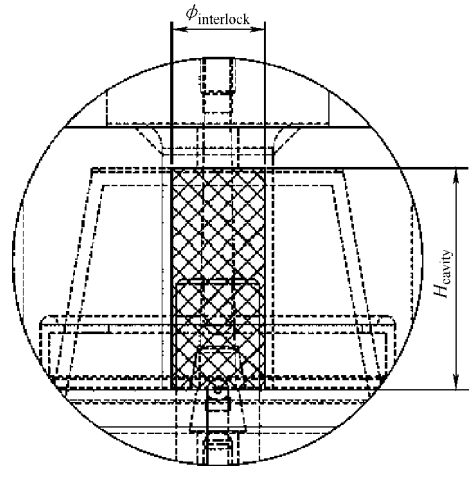


图 12.21　互锁和型腔视图

当然，熔体压力作用在型腔侧壁上形成的侧压力并不是都作用在互锁装置上。保守的计算是有一半的力作用在互锁装置上，所以

$$F_{\text{lateral}} = \frac{1}{2} p_{\text{melt}} \phi_{\text{interlock}} H_{\text{cavity}}$$

$$= \frac{1}{2} \times 40 \times 19.05 \times 50\text{N} = 19\ 050\text{N}$$

互锁装置中的剪切应力可以计算为

$$\tau_{\text{interlock}} = \frac{F_{\text{lateral}}}{A_{\text{interlock}}} = \frac{19\ 050}{0.019^2 \pi / 4}\text{Pa} = 67\text{MPa}$$

这一剪切应力小于极限应力 300MPa，互锁装置足以将负载的一半从型腔壁转移到动模部分。

12.2.6　应力集中

在型腔和支承板间去除物料时模板中将产生应力集中。因为布置有水道和推出孔，故注射模具中一般存在应力集中。孔周围的合成应力分布类似于图 12.22 所示。在这一例子中，孔边缘与板边缘的距离为 1.5 个孔的直径。100MPa 的压力作用在顶面。导致最大等效应力为 340MPa，即应力集中系数为 3.4。

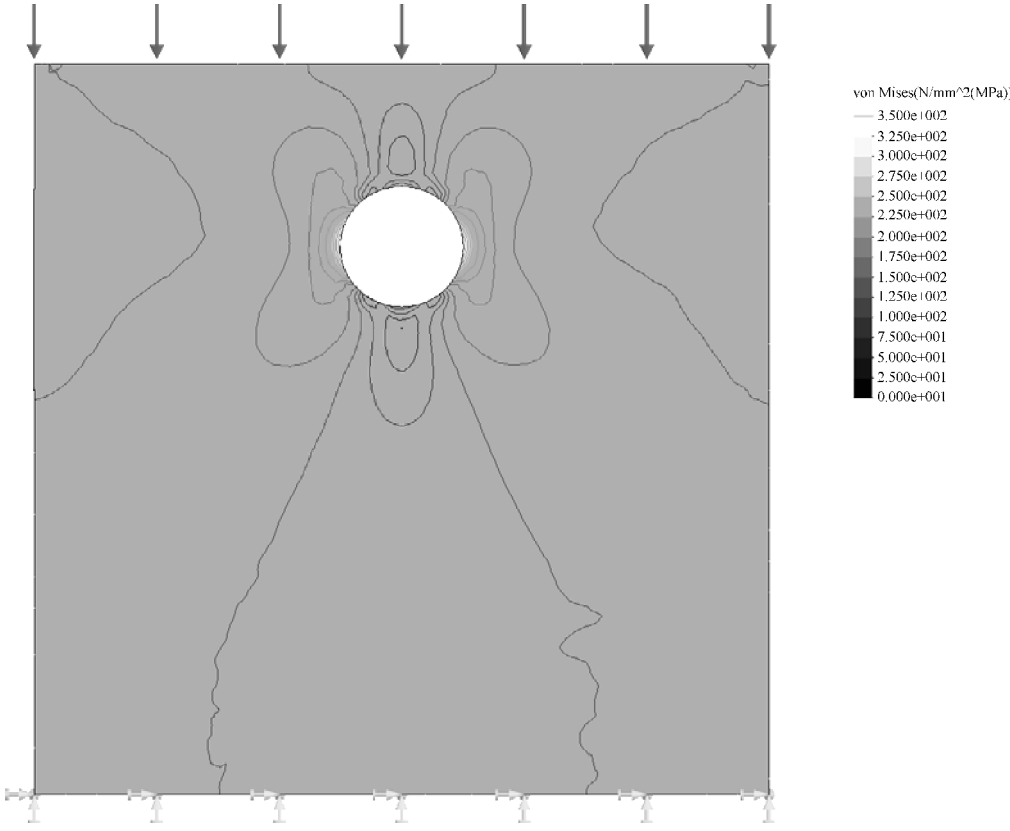


图 12.22　孔周围的应力集中

如果将孔远离型腔，则应力集中也将减少。为了确定应力集中系数，需要对模具的多种几何结构进行有限元分析。图 12.23 所示为应力集中系数与型腔壁面到孔中心线距离的关系。应力集中系数 K 的一个确定方式为

$$K = 3.1 + 0.75\left(\frac{\phi_{\text{hole}}}{H_{\text{hole}}}\right)^{2.29} \tag{12.19}$$

式中，ϕ_{hole}是孔的直径；H_{hole}是型腔壁到孔中心线的距离。

图 12.23 中虚线为该方式所确定的线。处于型腔壁面附近的孔应力集中很显著。然而，即使孔与型腔壁距离很远应力集中系数也不会小于 3。这可以解释为什么在成型过程中熔体压力很高时，即使冷却水通道到型腔壁距离很远，裂纹也是从冷却水通道处扩展的。因此高熔体压力下的成型模具应使用高疲劳极限的材料如 A6、D2 或 H13 制作。

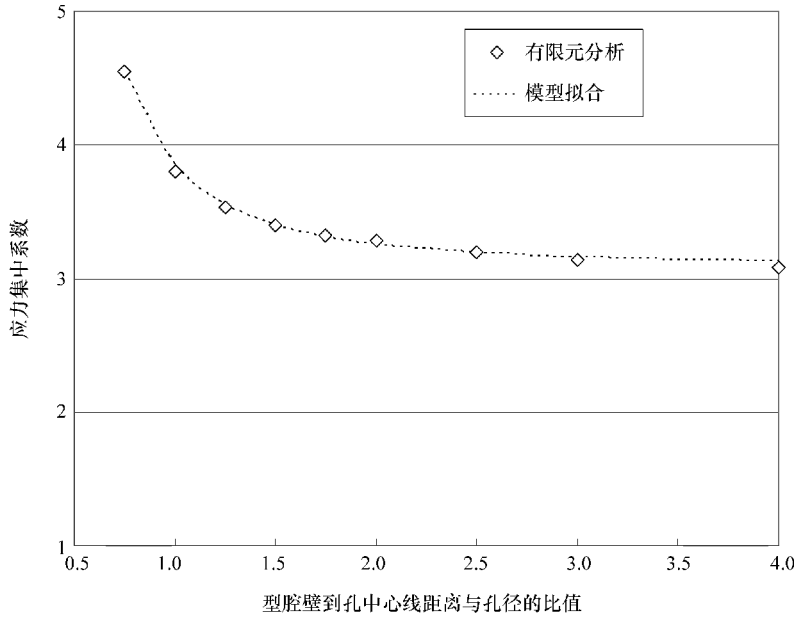


图 12.23　应力集中系数与距离的关系

例：一个薄壁成型充模压力为 200MPa 且型芯材料为 H13。求直径为 9.5mm 的冷却水通道到型芯表面允许的最小距离。

H13 材料的疲劳极限为 760MPa。熔体压力形成的挤压应力为 200MPa，允许的应力集中系数为

$$K=\frac{\sigma_{\text{endurance}}}{\sigma_{\text{nomin al}}}=\frac{760\text{MPa}}{200\text{MPa}}=3.8$$

最小距离可以通过图 12.23 来估算或通过式（12.19）来计算 H_{hole}，即

$$H_{\text{hole}}=\phi_{\text{hole}}\left(\frac{0.75}{K-3.1}\right)^{2.29}=9.5\times\left(\frac{0.75}{3.8-3.1}\right)^{2.29}\text{mm}=11.1\text{mm}$$

实际上冷却水通道比推出孔所引起的应力集中问题更为明显。从冷却水通道扩展的裂纹将最终导致泄漏和引起制品质量问题。相比而言，从推出孔扩展的裂纹不会引起很严重的失效问题。原因是负载作用下推出孔的变形时，推杆可支承孔周围的板，因而减小了孔处的应力。因此，推出孔处的裂纹扩展将达到一个极限长度，在这一点型芯的弹性变形作用在推杆上从而防止了裂纹的进一步扩展。

例：用 QC－7 制作的母模在成型过程中承受的熔体压力为 100MPa。模具设计者打算使用一个直径为 4mm 的推杆且在型腔侧壁和推杆间有 0.5mm 厚的铝层。估算应力水平并计算推出孔的变形。

从型腔侧壁到推杆中心的距离 H_{hole} 为 2.5mm。应力集中系数 K 为

$$K=3.1+0.75\left(\frac{4}{2.5}\right)^{2.29}=5.3$$

给定熔体压力为 100MPa，推杆的等效应力约为 530MPa。这一应力稍低于其屈服强

度 545MPa（见附录 B），所以材料没有立即屈服。然而这一等效应力却远远高于疲劳极限 166MPa，模具成型的疲劳极限是进行一百万次成型时不发生失效的极限应力。图 12.5 所示为疲劳失效曲线图，由其可见这一设计在成型 1 000 次左右时就会失效。

为了计算推出孔的变形，应计算出接近推出孔处的挤压应力。一种方法是假定全部等效应力就为挤压应力。这一方法会使计算的孔的变形值过大，因为等效应力中还有一部分是剪切应力，所以它要大于挤压应力。根据这一假定，在相邻板处的应变为

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{530\text{MPa}}{72.4\text{GPa}} = 0.73\%$$

推出孔处有变形的材料的长度与孔的直径相等，孔的变形量可以计算为

$$\delta_{\text{hole}} = \varepsilon\phi_{\text{hole}} = 0.73\% \times 4\text{mm} = 0.03\text{mm}$$

这一变形量在间隙允许范围内且在推杆处可以用来排气。经过多次成型加工，这个孔将发生塑性变形从而约束推杆。为了证实这一结论，负载情况的有限元分析得出变形量实际上为 0.10mm，如图 12.24 所示。

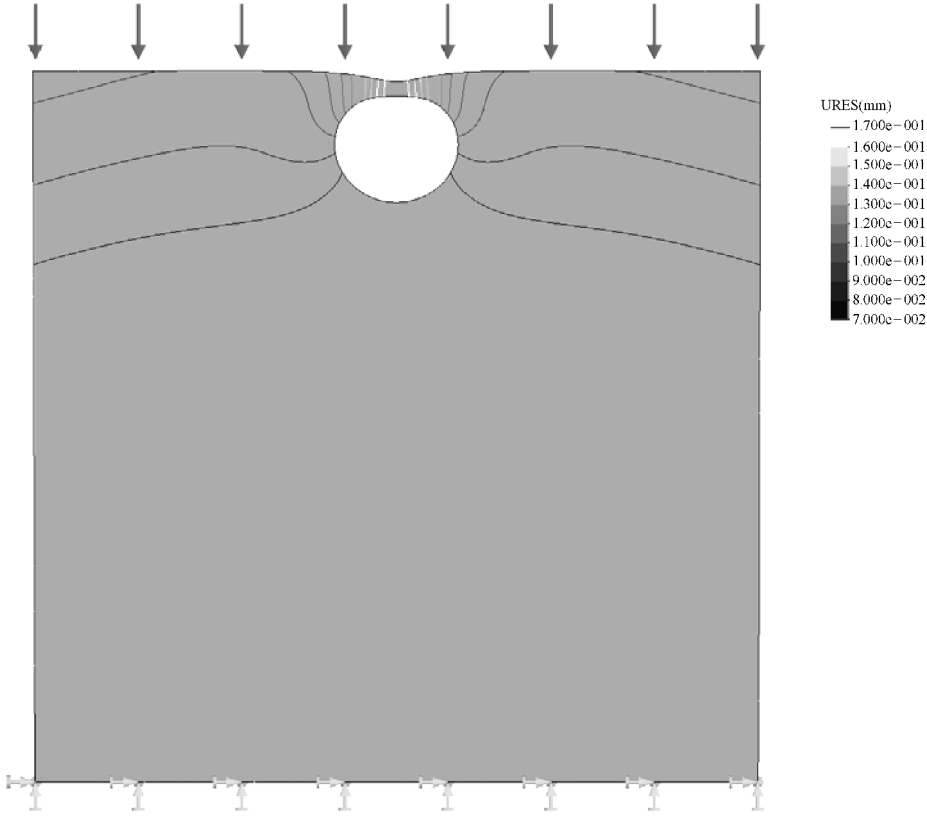


图 12.24　接近型腔壁面处推出孔的变形

分析计算和模拟得出的结果存在较大差距的原因是接近型腔壁面处的孔在孔的上端发生了局部弯曲变形，如图 12.24 所示，这一点在分析计算中并没有考虑。如果加上

0.01mm 的移动线，结果显示孔左侧和右侧模板的垂直变形与前面分析计算得出的 0.03mm 非常接近。

12.3　型芯的分析与设计

为了结构设计，当型芯的高度比宽度和长度小时认为其为矮型芯。矮型芯，如 Bezel 模具，其型芯侧壁不会因受熔体压力而产生过大的应力或发生过大的变形。因此，矮型芯可以按照前面分析模板的方法来设计。

12.3.1　轴向压缩

由熔体挤压引起的型芯在垂直方向的变形可以如前面 12.2.1 节讨论的来建立模型，但要得知型芯受到的挤压作用力和其截面面积。

例：如图 12.25 所示，假定熔体压力为 80MPa，计算型芯垂直方向的变形。

在图 12.25 的设计中，冷却镶件完全支承了型芯。理论上这一设计很合理，然而一个更加牢固的设计应是假设冷却镶件不提供支承。进行这一假设有两个原因。第一，冷却镶件的外表面可能没有和型芯内表面紧密配合，其间隙大于型芯变形从而使冷却镶件不能给予型芯支承。第二，冷却镶件可能用不同于型芯的材料制作，因此，冷却镶件可能不能承受支承型芯形成的应力。

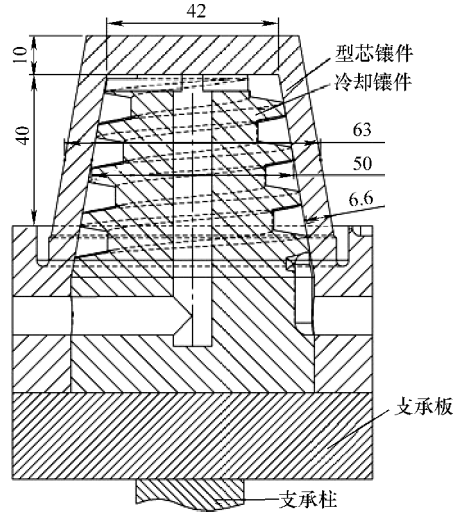


图 12.25　型芯的轴向压缩

型芯顶面的总变形可以通过将侧壁的挤压变形和顶面的弯曲变形叠加来计算。然而型芯侧壁中的挤压应力分布不都是均匀的，平均应力约为

$$\sigma_{\text{side_wall}}=\frac{F_{\text{vertical}}}{A_{\text{side_wall}}}=\frac{80\times63^2\pi/4}{\pi(63^2-50^2)/4}\text{MPa}=216\text{MPa}$$

这一应力相当大，说明当要考虑循环载荷以及可能失效时这一结构就不能用低碳钢和铝制作。假定型芯为钢制的，则其侧壁垂直方向的挤压应变为

$$\varepsilon_{\text{vertical}}=\frac{\sigma_{\text{side_ wall}}}{E}=\frac{216\text{MPa}}{205\text{GPa}}=0.11\%$$

型芯的总高度为 58mm，应变为 0.11%，则侧壁顶部总垂直变形为

$$\delta_{\text{vertical}}=\varepsilon_{\text{vertical}}H_{\text{core}}=0.11\%\times58\text{mm}=0.06\text{mm}$$

从型芯上表面边缘到型芯中心的弯曲可以通过 12.2.2 节应用的梁或板的弯曲公式计算，再加上因挤压产生的偏移量来计算总的垂直变形。

熔体压力作用在型芯侧壁会产生侧压力从而使深型芯产生明显的弯曲，其结构设计

因此也变得更为复杂。当型芯细长且刚度较小时，其弯曲变形可能是一个明显的问题，特别是当型芯内部设计有为冷却剂提供的通道时。型芯的分析和设计必须确保潜在的型芯变形不会过大，并且型芯周围的挤压应力在允许的范围内。这两个方面在下面进行讨论。

12.3.2　环向应力

当型芯有用于冷却水通道或其他目的的空心部分时，侧壁必须承受熔体压力所引起的挤压作用。图 12.26 所示为负载的情况。

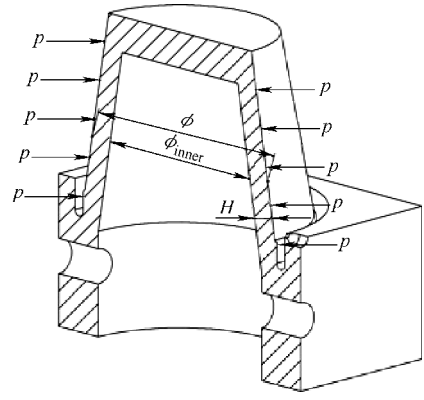


图 12.26　受到熔体压力的型芯

熔体压力引起的挤压应力 σ_{hoop} 计算为

$$\sigma_{\text{hoop}} = \frac{p\phi_{\text{core}}}{2h_{\text{core}}} \tag{12.20}$$

式中，p 是熔体压力；ϕ_{core} 是型芯的外径；h_{core} 是型芯侧壁厚度。

为了避免侧壁中的挤压失效，环向应力必须低于材料的极限应力。这导致了下面的对侧壁厚度的限制，即

$$h_{\text{core}} > \frac{p\phi_{\text{core}}}{2\sigma_{\text{lim it}}} \tag{12.21}$$

这一限制也可以用于确定型芯的最大内径 ϕ_{inner}，即

$$\phi_{\text{inner}} < \phi_{\text{core}}\left(1 - \frac{p}{\sigma_{\text{lim it}}}\right) \tag{12.22}$$

假定熔体压力为 150MPa，可以从 P20 钢制作的型芯得到设计型芯的一个大体准则。P20 钢的疲劳极限约为 450MPa，侧壁的厚度应满足

$$h_{\text{core}} > \frac{150\phi}{2\times 456} \approx \frac{\phi}{6} \tag{12.23}$$

型芯的最大内径为

$$\phi_{\text{inner}} < \phi_{\text{core}}\left(1 - \frac{150}{456}\right) \approx \frac{2}{3}\phi_{\text{core}} \tag{12.24}$$

实际上，模具设计者应根据成型过程中具体应用的最大熔体压力和疲劳极限来进行上面的分析。

例：假定型芯外径 ϕ_{core} 为 60mm，侧壁厚度 h_{core} 为 10mm，熔体压力为 80MPa，计算杯形模具型芯的环向应力。如果型芯材料为铝 QC－7，确定其最大内径。

根据上面的假定，环向应力为

$$\sigma_{\text{hoop}} = \frac{80\times 60}{2\times 10}\text{MPa} = 240\text{MPa}$$

这一应力是一个安全值，但也很大。如果型芯由铝 QC－7 制作，那么有两个负载可能决定型芯内径的允许值。第一，模具设计者应考虑 80MPa 熔体压力的循环作用，其疲劳极限为 166MPa。这一关于疲劳失效的分析说明型芯内径应为

$$\phi_{\text{inner}} < \left(1 - \frac{80}{166}\right)\phi_{\text{core}} = 0.51\phi_{\text{core}} = 31\text{mm}$$

第二，模具设计者应考虑注射成型过程中熔体在最大压力时偶发过载情况。单次循环中过高的压力也能导致型芯的失效。为了检验这一情况，当熔体压力为 200MPa 时型芯应用屈服强度为 545MPa 的 QC－7。这一关于屈服失效的分析说明型芯的内径应为

$$\phi_{\text{inner}} < \left(1 - \frac{200}{545}\right)\phi_{\text{core}} = 0.63\phi_{\text{core}} = 38\text{mm}$$

比较上面两种结果可知在过载情况下循环失效比屈服失效更为严重。当成型循环次数很多时，材料为 QC－7 的型芯的最大内径为 31mm。

12.3.3　型芯变形

型芯的周向存在不同大小的熔体压力，因此型芯中存在过大的变形或者说型芯弯曲也是长型芯常见的另一个问题。熔体压力大小不同一般是侧浇口的原因，如图 12.27 所示。然而，当型芯细长（例如型芯长度是其直径的 10 倍）时，采用中心浇口设计时熔体流动的微小波动就会引起很明显的弯曲变形。这一问题还复合有型芯弯曲作用的自身增强，也就是说型芯的微小弯曲促使更多的熔体流动和压力作用于型腔较厚部分并使型芯进一步弯曲变形。

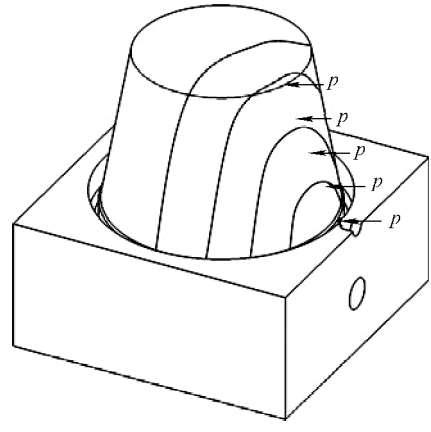


图 12.27　型芯的侧向力

型芯弯曲可以通过适当地应用弯曲公式来分析。一般的，型芯固定在动模部分，型芯上部为自由弯曲。型芯由于熔体压力差 Δp 引起的变形计算为

$$\delta_{\text{bending}} = \frac{\Delta p \phi_{\text{core}} H_{\text{core}}^4}{8EI} \tag{12.25}$$

式中，I 是惯性矩。

中空型芯外径为 ϕ_{core}，内径为 ϕ_{inner}，则惯性矩为

$$I = \frac{\pi}{64}(\phi_{\text{core}}^4 - \phi_{\text{inner}}^4) \tag{12.26}$$

成型的几何参数不同，型芯周围压力差大小也不一样。如图 12.27 所示，较短的型芯其周围的压力差为所需要的填充模具的压力的很大一部分（可能是模具填充压力的 50%）。随着型芯相对其直径更长，型芯周围的压力差相比沿其高度方向的压力差来说很小（可能只有填充压力的 10%）。然而，型芯变形量与其高度的四次方成正比，所以熔体压力很小的不对称能导致很大的变形。

例：假定杯形型芯外径为 60mm，内径为 40mm，高度为 58mm，周围熔体压力差为 40MPa，计算型芯的形变大小。

型芯的惯性矩为

$$I = \frac{\pi}{64}(0.060^4 - 0.040^4)\,\text{m}^4 = 5.1 \times 10^{-7}\,\text{m}^4$$

假定钢制型芯的弹性模量为205GPa，则变形量为

$$\delta_{\text{bending}} = \frac{40 \times 10^6 \times 0.06 \times 0.058^4}{8 \times 205 \times 10^9 \times 5.1 \times 10^{-7}}\text{m} = 0.03\text{mm}$$

这一变形量很小，尽管型芯周围压力差很大，型芯弯曲变形也可能不是一个很严重的问题。

一般的，型芯更细其弯曲变形就更明显。为了减小型芯的弯曲变形，模具设计者应使用刚度更高的型芯并且其长径比应更小。如图12.28所示，如果可能，细长的型芯销应与模具固定部分进行互锁。型芯销的这一互锁使销的侧向变形减小，为销只有一端受支承时变形的10%。当互锁或增大型芯尺寸因成型所需的几何参数而受限制时，模具设计者应优先应用在型芯上端中心处使用一个浇口或在底面两边对称使用浇口的方法来减小作用在型芯上的压力梯度。

图12.29所示为使用导流（型芯上的流道）来减小型芯变形的一种方法。在这一设计中，导流有助于熔体以较低的填充压力流到型腔。同时，熔体将被运输到型腔较窄处而且部分冷凝，尽管在随后的填充过程中压力差很大，但型芯的变形却不明显。图12.29所示的型芯上的流道可能使制品内表面形成凸起。因此，型芯上的流道应根据不同的设计布局来设置在型腔的内表面或型芯的外表面。

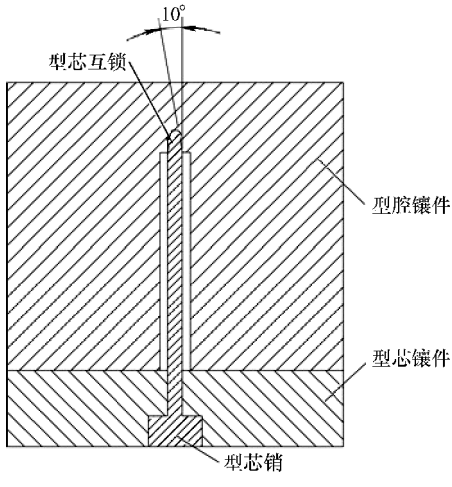


图12.28　细型芯的互锁

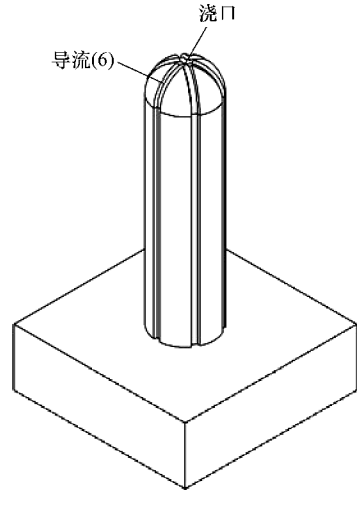


图12.29　使用导流来减小型芯变形

12.4　紧固件

模具设计也必须包括用于牢固地固定模具各部件的紧固件。模具中有三种常用的紧固件。第一，配合通常用于将一个组件紧密地固定在另一个组件中，例如型腔或型芯安装在一个固定板上。第二，定位销用于将一个组件固定在另一个组件上，例如将推出支架固定在支承板上。这两种固定方法只提供从模具长度和宽度方向的固定。第三，为了

将模具组件在高度方向固定在一起，经常使用内六角圆柱头螺钉，其圆柱头部分保留在模板中而螺钉旋入组件来将它们固定。下面来分析各种固定方法。

12.4.1　配合

配合是两个组件的匹配。间隙配合指的是两个组件配合表面间有间隙。尽管间隙配合使安装无插拔力而较为容易，但两个组件间的间隙使固定的精确性不能确定。模具中安装公差应尽量小，过盈配合在固定模具组件中经常使用。

过盈配合用于当轴部件公称尺寸大于孔部件公称尺寸的情况，如图 12.30 所示型芯和固定板的配合。因为金属的弹性模量很大，当过盈量很小，大约为公称尺寸的 0.01% 时，过盈配合会很牢固。两组件过盈量越大其配合越紧密，刚度越大。各组件的机加工尺寸不同使得过盈配合的应用变得困难。因此，需制定配合标准来限制组件的外形尺寸。

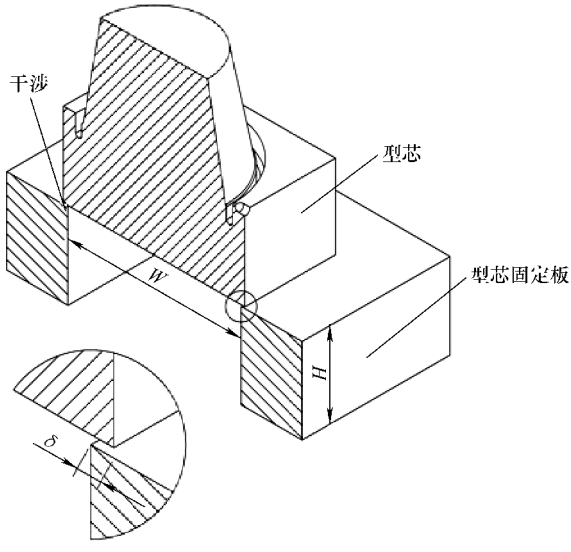


图 12.30　型芯和固定板的定位——过盈配合

下面对配合的分析建立在以侧向孔座为基准且将美国常用的单位转换成米制单位的基础上[⊖]。将一个宽为 W、长为 L 的元件建模成表观直径为 D 的圆形元件，计算方法为

$$D = \sqrt{WL} \tag{12.27}$$

对于给定的尺寸，极限偏差根据下面的公式来计算

$$\lambda = 0.001CD^{\frac{1}{3}} \tag{12.28}$$

式中，C 是国际标准中与孔轴类上、下极限偏差相应的系数。表 12.1 列出了定位过盈配合（LN1 到 LN3）和紧固过盈配合（FN1 到 FN3）的系数。当要求定位精准且组件要

⊖ 有关配合的标准有两个：ANSI B4.1－1967（R1999）《柱形零件的优选极限和配合》和 ANSI B4.2－1978（R1999）《优选米制极限和配合》。ANSI B4.1 由于相对简单而应用广泛，然而模具设计者可能要确认哪个标准更适宜。

有横向刚度时用定位过盈配合。然而，定位过盈配合不能在高度方向提供明显的紧固力，所以组件在高度方向和其他组件的固定需要通过螺钉或其他方法实现。FN1 到 FN3 为增加过盈和插拔力的紧固配合。紧固配合为半永久安装，模具设计通常用螺钉或其他方法在高度方向固定组件。

表 12.1　配合公差过盈系数

配合	$C_{\text{int erference}}$	孔类（板上的孔）极限偏差/mm		轴类（插入零件）极限偏差/mm	
		下极限偏差	上极限偏差	下极限偏差	上极限偏差
LN1	4.89	0.0	4.93	5.67	9.05
LN2	7.14	0.0	7.84	8.59	13.52
LN3	12.22	0.0	7.84	13.67	18.60
FN1	13.57	0.0	4.93	14.34	17.73
FN2	22.02	0.0	7.84	23.47	28.41
FN3	30.85	0.0	7.84	32.30	37.24

例：杯形模具型芯基座的边长为 88.90mm，按 FN1 计算其公差。

型芯表观直径为

$$D = \sqrt{88.90 \times 88.90}\ \text{mm} = 88.90\text{mm}$$

以 C 为 14.34 计算型芯尺寸的下极限偏差为

$$\lambda_{\text{insert}}^{\text{lower}} = 0.001 \times 14.34 \times 88.9^{\frac{1}{3}}\text{mm} = 0.064\text{mm}$$

以 C 为 17.73 计算型芯尺寸的上极限偏差为

$$\lambda_{\text{insert}}^{\text{upper}} = 0.001 \times 17.73 \times 88.9^{\frac{1}{3}}\text{mm} = 0.079\text{mm}$$

固定板上配合孔的下极限偏差为 0，即

$$\lambda_{\text{plate}}^{\text{lower}} = 0.001 \times 0.0 \times 88.9^{\frac{1}{3}}\text{mm} = 0.000\text{mm}$$

以 C 为 4.93 计算固定板上配合孔的上极限偏差为

$$\lambda_{\text{plate}}^{\text{upper}} = 0.001 \times 4.93 \times 88.9^{\frac{1}{3}}\text{mm} = 0.022\text{mm}$$

因此型芯的最小和最大尺寸分别为 88.96mm 和 88.98mm。板上孔的最小和最大尺寸分别为 88.90mm 和 88.92mm。图 12.31 所示为各尺寸。

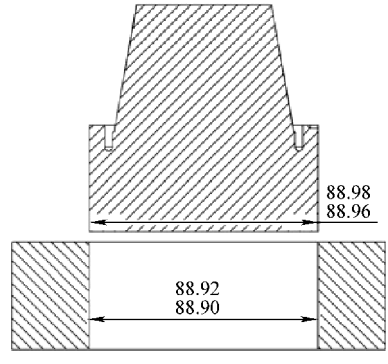


图 12.31　型芯和板的 FN1 配合尺寸

各种过盈配合所需要的插拔力的计算很有意义，其可以避免形成过大的插拔力。插拔力可以通过装配时拉紧组件所需要的挤压应力来计算。预期过盈大小可以通过将轴尺寸平均值减去孔尺寸平均值来计算。另外预期过盈大小也可以通过下面的公式计算，即

$$\lambda_{\text{int erference}} = 0.001 C_{\text{int erference}} D^{\frac{1}{3}} \qquad (12.29)$$

式中，$C_{\text{interference}}$是表 12.1 中提供的过盈系数。假定板远大于型芯，型芯中挤压应力 σ 计算为

$$\sigma = \frac{\lambda_{\text{interference}} E}{2D} \tag{12.30}$$

式中，E 是材料的弹性模量；数 2 是因为型芯中的挤压应力也会在板中引起一个拉伸应力，因此，过盈配合在型芯和板中产生了相等的应变。

插拔力可以用挤压应力乘以接触面积和摩擦因数来计算，即

$$F_{\text{insertion}} = f\sigma\pi DH \tag{12.31}$$

式中。f 是摩擦因数；H 是两组件接触区域的高度。

例：计算杯形模具型芯的插拔力，假定配合按 FN1 且板和型芯接触高度为 42mm。

型芯的预计尺寸为 88.97mm，而固定板上孔的预计尺寸为 88.91mm。预计过盈大小 $\lambda_{\text{interference}}$为 0.06mm。钢组件的应力大小为

$$\sigma = \frac{0.06 \times 205 \times 10^9}{2 \times 88.9}\text{Pa} = 69\text{MPa}$$

假定摩擦因数为 1.0，插拔力大小为

$$F_{\text{insertion}} = 1.0 \times 69 \times 88.9 \times 42\pi\text{N} = 808\text{kN}$$

将型芯装配到固定板中需要的插拔力约为 808kN。如果不能提供这么大的压入力，则模具设计者应使用定位过盈配合。型芯导边应为锥形，这有助于装配时对准。

12.4.2　内六角圆柱头螺钉

图 12.32 所示为典型的内六角圆柱头螺钉。内六角圆柱头螺钉是模具中常使用的紧固件。主要原因是内六角圆柱头螺钉是精心设计的，其圆柱头、螺纹和螺钉的强度都有很好的匹配。内六角圆柱头螺钉为沿螺钉轴向固定多种组件提供了标准而且有效的方法。

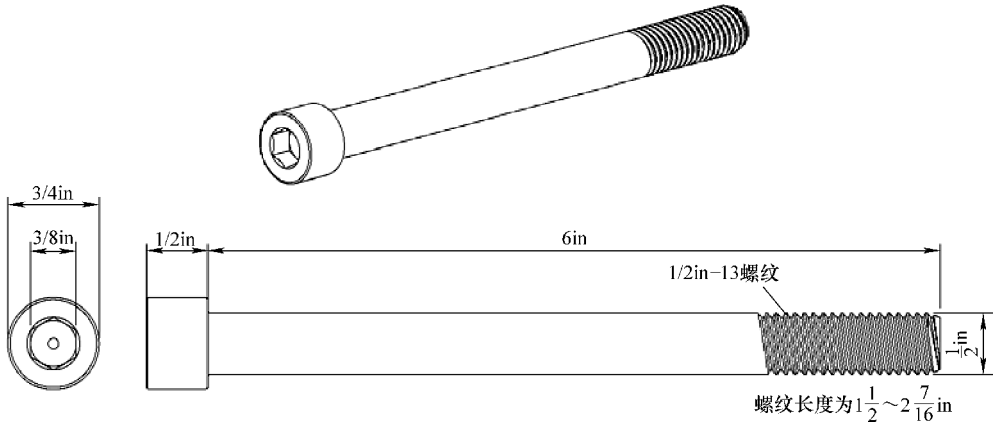


图 12.32　典型的内六角圆柱头螺钉

一定型号、材料和处理方法的内六角圆柱头螺钉其尺寸和承受能力已确定。分析标准内六角圆柱头螺钉可知其圆柱头高度等于其螺纹直径，圆柱头的直径约为螺纹直径的 150%。紧固件的强度因螺距不同而略有区别，DIN/ISO 标准螺钉的拉伸强度可以通过

假定的 800MPa 的极限应力 σ_{ultimate} 乘以螺纹大径截面面积来计算，即

$$F_{\text{tensile}} = \sigma_{\text{ultimate}} \frac{\pi D_{\text{thread}}^2}{4} \tag{12.32}$$

例：如图 12.7 所示，计算用于固定便携式 Bezel 模具的定模板和动模板的内六角圆柱头螺钉的尺寸。

这里的内六角圆柱头螺钉使用要求严格，其失效最坏的情况可能会对装备或生命造成危险。首先，模具的最大质量根据图 12.7 提供的尺寸假定其为一个固体钢块来计算，模具的最大质量为

$$\begin{aligned} M_{\text{mold}} &= \rho_{\text{mold}} H_{\text{mold}} L_{\text{mold}} W_{\text{mold}} \\ &= 7\,800 \times 0.403 \times 0.381 \times 0.302\text{kg} = 362\text{kg} \end{aligned}$$

其次，假定最坏情形。最坏的情形发生在模具只有一侧固定在成型机上而没有动模板支承时，这一情况可能发生在将模具安装在成型机上时。另外，最坏情形也可能是模具的全部质量只靠一个紧固螺钉来支撑，当其他螺钉没有拧紧或是拧得不够紧时就会发生这种情况。最终载荷情况如图 12.33 所示。

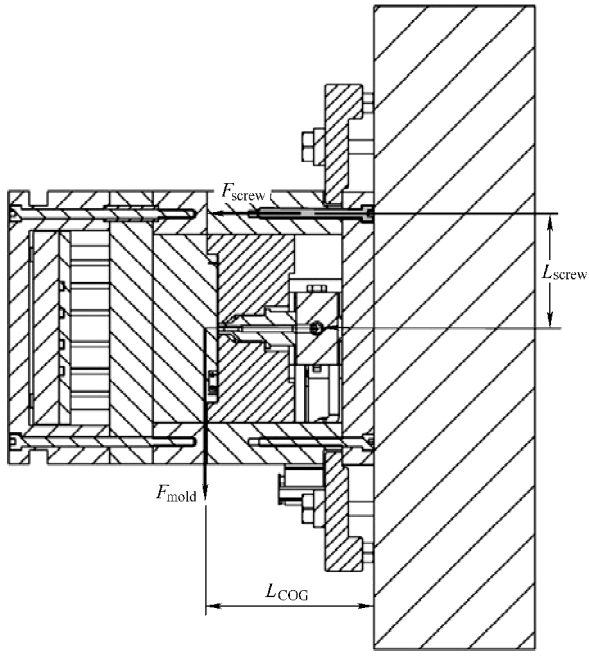


图 12.33　螺钉受力最坏情形分析

模具对螺钉的作用力以定位环几何尺寸已确立时来计算，即

$$F_{\text{screw}} = M_{\text{mold}} n_{\text{g}} g \frac{L_{\text{COG}}}{L_{\text{screw}}}$$

式中，g 是重力加速度（9.8m/s^2）；L_{COG} 是定模板到模具质心的距离；L_{screw} 是定位环到螺钉的距离；系数 n_{g} 与可能作用在模具上的重力大小有关，为了安全通常设定得很大，

因升降机的振动，n_g 设定为 10。由图 12.33 可知螺钉上的作用力约为

$$F_{\text{screw}} = 362 \times 10 \times 9.8 \times \frac{0.2}{0.15}\text{N} = 47\ 000\text{N}$$

根据式（12.32）计算得出的直径为

$$D_{\text{screw}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{screw}}}{\pi\sigma_{\text{ultimate}}}} = \sqrt{\frac{4 \times 47\ 000}{800 \times 10^6 \pi}}\text{m} = 8.65\text{mm} \rightarrow 10\text{mm} \quad 或 \quad \frac{3}{8}\text{in}$$

分析说明 3/8in 或 M10 的内六角圆柱头螺钉足够大。作为参考，上面分析的模具可以选择 1/2in 的内六角圆柱头螺钉。此情况下模具的内六角圆柱头螺钉不会失效。

12.4.3　定位销

具有较大径向间隙的模具组件的定位不能依靠内六角圆柱头螺钉。如前面讨论的，过盈配合用于将一个组件定位于另一个组件里。对于平行的板或组件，应用定位销进行定位，如图 12.34 所示。这一设计中，在具有共面的两个板上加工同中心线的两个孔。通过定位销与两个孔的配合沿定位销轴向定位两组件。

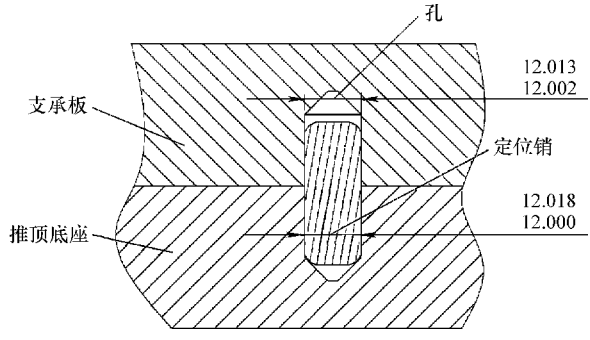


图 12.34　典型的定位销设计

制造的位置、直径、圆度存在差异的孔限制了相对定位的精确性。式（12.28）可以通过根据国际标准使定位销和孔的极限系数 C 不同来应用不同类型的配合。表 12.2 列出了定位间隙配合（LC1）、定位过渡配合（LTI 和 LT3）和较宽松的定位过盈配合（LN1）的系数 C。定位间隙配合一般用于静止部件且能较容易地拆卸和再安装。这种配合的公差等级和螺纹配合一样，所以其不适宜于注射模具，因为其大的间隙会加速固体表面的磨损。定位过渡配合能提供较紧的定位配合，但它可能的过盈使得定位销和孔的安装变得困难。

表 12.2　定位间隙配合、定位过渡配合和定位过盈配合的系数

配合	$C_{\text{interference}}$	孔类（板上的孔）极限偏差/mm		轴类（插入零件）极限偏差/mm	
		下极限偏差	上极限偏差	下极限偏差	上极限偏差
LC1	-4.16	0.0	4.93	-3.39	0.00
LT1	-6.38	0.0	7.84	-2.43	-2.51
LT3	-0.73	0.0	7.84	0.72	5.65
LN1	4.89	0.0	4.93	5.67	9.05

型芯表观直径为

$$D = \sqrt{88.90 \times 88.90}\ \text{mm} = 88.90\text{mm}$$

以 C 等于 0.72 计算定位销直径的下极限偏差为

$$\lambda_{\text{dowel}}^{\text{lower}} = 0.001 \times 0.72 \times 12^{\pm}\text{mm} = 0.002\text{mm}$$

以 C 等于 5.65 计算定位销直径的上极限偏差为

$$\lambda_{\text{dowel}}^{\text{upper}} = 0.001 \times 5.65 \times 12^{\pm}\text{mm} = 0.013\text{mm}$$

固定板上相配合的孔的下极限偏差是 0。上极限偏差以 C 等于 7.84 来计算，即

$$\lambda_{\text{plate}}^{\text{upper}} = 0.001 \times 7.84 \times 12^{\pm}\text{mm} = 0.018\text{mm}$$

计算得定位销的最小和最大尺寸分别是 12.002mm 和 12.013mm。板上孔的最小和最大尺寸分别为 12.000mm 和 12.018mm。这一设计如图 12.34 所示。

两组件的平均间隙是 0.0015mm（或 1.5μm，等于孔的平均直径 12.009mm 减去定位销的平均直径 12.0075mm）。考虑到存在制造差异，当孔和定位销的尺寸为其计算的极限值时，核对定位销的插拔力大小很重要。存在最大过盈时孔的直径为 12.000mm，定位销的直径为 12.013mm。最大过盈 $\lambda_{\text{interference}}$ 为 0.013mm。钢制组件的最终应力为

$$\sigma = \frac{0.013 \times 205 \times 10^9}{2 \times 12}\text{Pa} = 111\text{MPa}$$

假定插拔的长度为 12mm，摩擦因数为 1.0，应用式（12.31）计算的插拔力为

$$F_{\text{insertion}} = 1.0 \times 111 \times 12 \times 12\pi\text{N} = 50\text{kN}$$

如果手动安装和拆卸模板，定位销的这一插拔力明显过大。模具的安装需要通过磨合来减小销的直径以避免过大的插拔力。

12.5　本章小结

模具是机械装置，其必须承受高聚物熔体压力作用产生的很大的应力。一些因素限制了模具结构的设计。第一，模具设计必须避免在高熔体压力下的屈服失效。第二，模具设计必须避免在成千上万次成型加工的循环负载作用下的疲劳失效。第三，模具设计必须避免成型时过大的变形，其会导致制品产生飞边且使模具分型线加速磨损。对于这些因素，疲劳失效和变形最为重要，型腔数量、成型压力、模具几何尺寸和产量也是相对重要的影响因素。

通过建立模型来分析模板、型芯和支承柱的挤压变形，还有板类、侧壁和型芯的弯曲变形。挤压和弯曲变形的叠加可以计算型腔壁的总变形。对模板中的应力集中也进行了分析。总之，所有分析说明增加作用点和支承点处钢的用量可以降低组件的应力和变形。因此，模具设计者必须分析说明可靠设计的经济性。支承柱、互锁和其他设计的使用是为了减小变形。

对常用紧固方法，包括过盈配合、内六角圆柱头螺钉和定位销的间隙和过盈配合，也进行了分析。模具设计者必须提供型腔和型芯与其他组件的紧固方法，以及和其他组件的精确定位。实际中，紧固件可能和其他子系统发生干涉，例如制品推出和冷却系

统。鉴于此，需要进行模具的重复再设计来有效定位模具的所有子系统且不增加模具的尺寸和成本。

阅读本章后，应该掌握以下内容：

- 描述从模具型腔到拉杆的力的方向。
- 确定弹性模量、应力和应变间的关系。
- 确定极限应力、屈服强度和疲劳极限间的关系。
- 根据应用需要计算极限应力和最大变形。
- 估算不同模具组件中的挤压、剪切和环向应力。
- 估算板、型芯或支承柱受挤压的变形。
- 估算板、型芯或侧壁受弯曲的变形。
- 确定板厚度并使用支承柱来避免过大的模具变形。
- 确定壁板，利用模具互锁来避免过大的应力或模具变形。
- 计算设计型芯避免过大的环向应力和型芯弯曲变形。
- 根据材料性质和应用需要计算说明应力集中处（例如推出孔和冷却水通道）到型腔的距离。
- 计算轴组件和孔组件形成的间隙配合、过渡配合、过盈配合和紧固配合的极限尺寸。
- 估计对于特定配合的期望间隙或插拔力。
- 计算如何使用内六角圆柱头螺钉紧固模具组件。

每一个模具子系统的分析和设计已经完成。下一章将通过借助模具技术提供模具成型工艺的严格审核来提高模具设计者的设计意识。

第 13 章　模 具 技 术

13.1　引言

本书一直在介绍模具设计的工程方法，重点是对控制注射模具应用和失效的基本结构的检验以及将其模型化。目的性明确、尽量简明地给出了一些例子，工作者可以将这些设计和分析的方法应用于更为特殊和先进的成型应用中。

有许多先进的成型加工技术和相应的模具设计方法。图 13.1 所示为一些模具技术

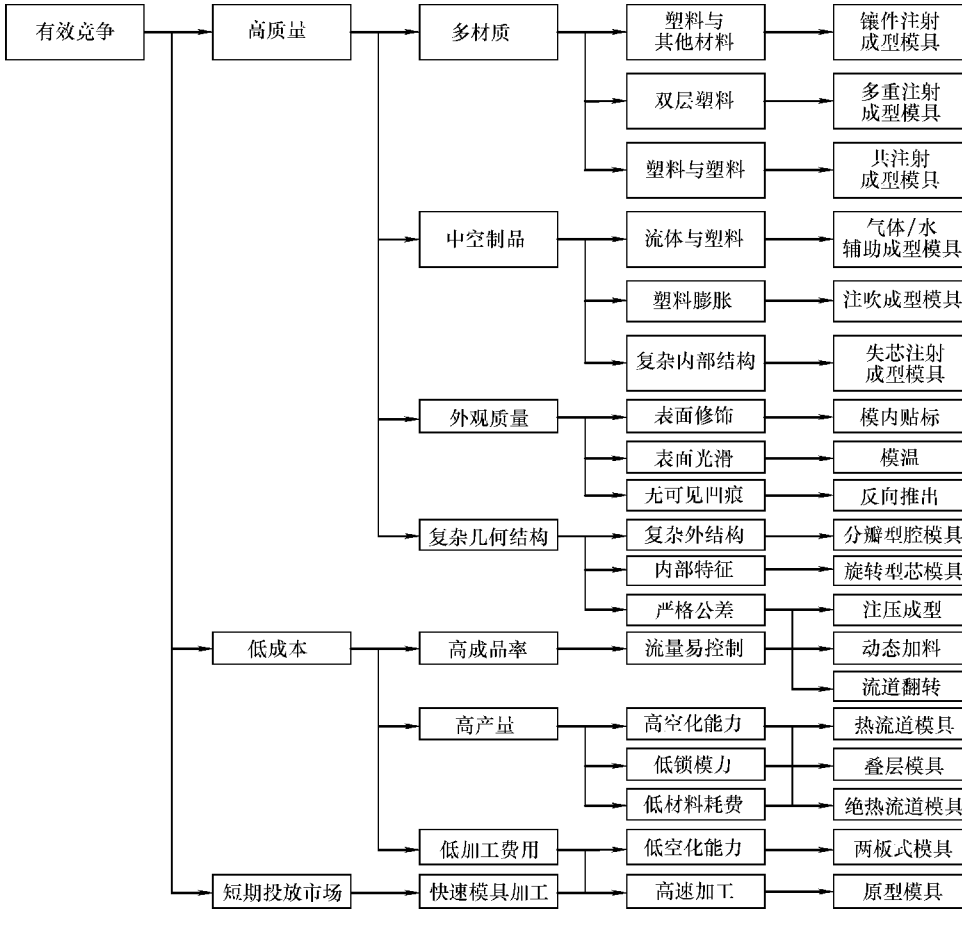


图 13.1　模具技术选择流程图

选择的流程图。这些模具技术可以通过在短时间和低成本下制作高质量的制品来有效应用。这些工艺技术大多数有明确的目的，如生产具有独特性能的制品，或比较经济地进行大批量生产。

许多成型技术相互交叉。例如，多重注射成型法（在这一成型方法中一个制品由两种或多种材料制成）与共注射成型、镶件注射成型、叠模成型，甚至注吹成型相关。不管技术水平如何，前面所应用的物理学和模具设计的基本原理仍然适用。因此，本章是一些成型技术的概述，同时讨论了相关的模具设计问题。列举的一些模具设计的例子来源于美国专利。目的不是为了提供一个关于模具技术详尽的调查，也不是为了介绍模具设计的详细方法，而是为了展示一些有意义的例子从而使模具设计者对一定范围的模具技术有明确的了解而将工作做得更好。

13.2　共注射成型模具

共注射成型是一种将两种材料按顺序通过同一浇口注射到同一个型腔中的加工方法。一种材料形成外皮，另一种材料形成制品的心部，与注射成型相比，共注射成型生产具有独特的美学特征或结构性能的塑料制品的成本可能更低。典型的共注射成型应用包括：

· 用于一种具有极好装饰作用的材料和一种具有不同结构性能或可再利用材料的共注射成型，例如汽车保险杠上的罩板。

· 注射完一种材料后，接着注射另一种密度低的材料，用于制作装饰制品，例如结构发泡的应用。

· 注射完一种材料后，接着注射另一种流体，如空气或水，来生产一种中空制品，例如门的把手。

最后一个应用实例（常称为气体辅助成型或水辅助成型或流体辅助成型）一般不认为是共注射成型工艺，但因其成型工艺和模具设计与共注射成型非常相似而一起讨论。

13.2.1　共注射成型工艺

共注射成型中，两种材料顺序射出，其类似于图 13.2 所示的顺序[42]。如图所示，第一种熔体通过浇口 6 或其他浇注系统部分地注射到模具中。当第一种材料 7 注射到一定体积后，第二种材料 8 从同一浇口注射到模具中。如果注射的第一种材料体积太小，第二种材料可能会“吹透”第一种材料。相反，如果注射的第一种材料体积太大，将使留给注射第二种材料的体积很小。当第一种材料接近模具壁时，可能会部分地凝固，第二种流体将会穿过第一种流体形成的心部。第二种材料注射完后，常常注射少量的第一种材料 9。最后注射的第一种材料是为了清除浇注系统中留有的第二种材料，否则其会污染接下来的成型循环。

从图 13.2 中可以看到，在材料注射到模具的过程中，型芯 2 在型腔 1 中进出移动以调节型腔 3 的壁厚。这一注射压缩至少存在两个目的。第一，在发泡成型中，型腔的收缩和随后的扩张可以用于延迟和随后促进气泡的形成，从而控制注射发泡的分布和密

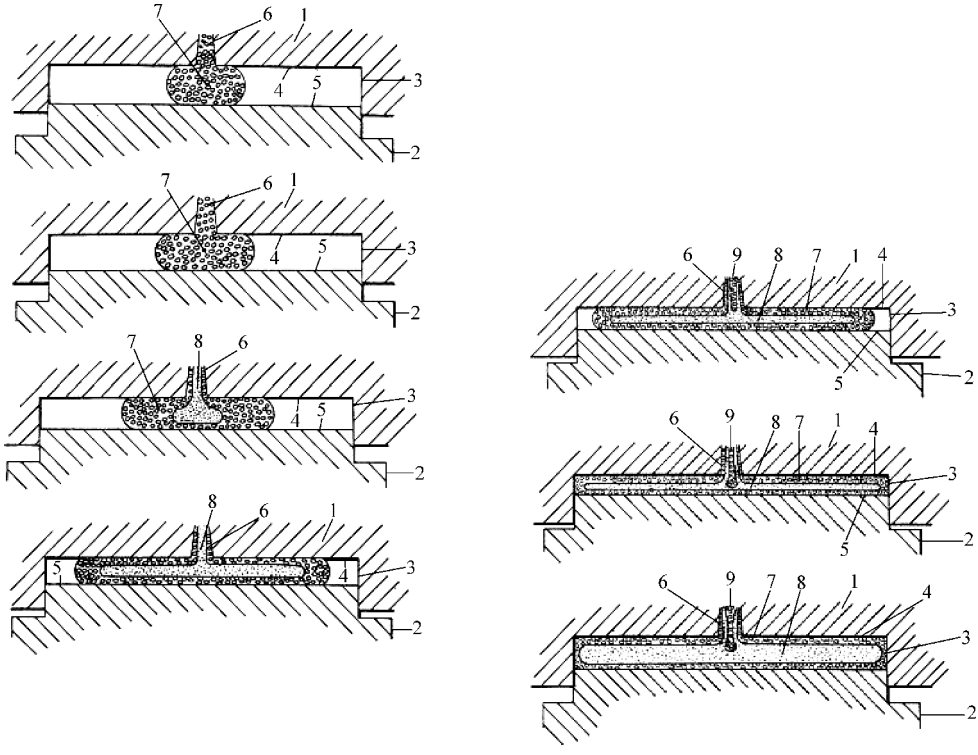


图 13.2　共注射成型工艺

度。第二，在非发泡成型中，型腔的收缩可以控制充填压力，从而控制注射第二种材料时注射第一种材料成型的制品的收缩性能。在填充阶段型腔壁厚的控制可以利用成型机的模板的移动曲线来完成，或通过选择锁模力曲线来实现。

模具用沿垂直方向的滑动配合（12.4.1 节所述）来使型芯与型腔配合。而在参考文献[42]中没有讨论可以通过导柱、互锁或键槽来装配型腔和型芯以辅助滑动配合从而避免滑动表面的加速磨损。

13.2.2　共注射成型模具设计

图 13.3 所示为共注射成型模具和浇注系统示意图[43]。如图所示，原料是从两注射元件 8 和 9 的机筒通过相应的流道 15 和 16 运输到模具 10 的。两流道在浇口 11 之前集中于一个控制阀 17。控制阀有一个带两斜交叉流道的阀销 18。通过旋转阀销，两流道中的一个将与流道 15 或 16 接通，从而使物料从相应的机筒 8 或 9 流到模具，也可防止物料在两机筒间流动。需要一个控制系统来调节阀销 18 的驱动以控制是注射机筒 8 还是机筒 9 的物料。对于这一喂料设计，正如图 13.2 所讨论的一样，开始和最后注射的第一种物料要避免被残留在阀销 18 和浇口 11 之间物料的污染。

对于大多数制品，共注射成型模具的设计与传统模具设计相似。许多传统的模具可以成功应用于共注射成型工艺，因为共注射成型机械大多与成型机结合而不仅是模具本身。然而，模具设计者还是应改进共注射成型模具的设计。至于模具填充，模具设计者应确保

设计的型腔能以合适的压力达到预期填充效果。已经开发了两种不同黏度物料共注射到模具中的分析解法和模拟方法[44,45]。在许多共注射成型应用中，模具都能成功适用，因为模具设计适用于更多不同黏度的物料。冷却、收缩和脱模的分析改进也应考虑熔体温度和两种物料的热学性能。对于多层结构共注射成型，合理的方法是制作一种“可变材料”，其在两种物料层厚不同时具有不同的性能。

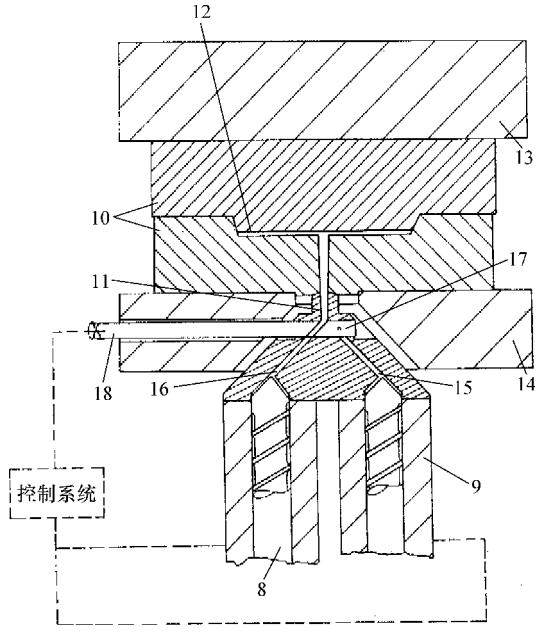


图 13.3　共注射成型模具和浇注系统示意图

13.2.3　气体/水辅助成型

气体和水都是流体，所以认为气体辅助成型和水辅助成型都是流体辅助成型。而这些流体是注射到第一种材料内部的，所以也认为所有流体辅助成型是共注射成型。与传统的高聚物熔体的共注射成型相比，流体辅助成型有两个特点。第一，相对于先注射的高聚物熔体，后注射的流体（例如氮气或水）黏度较小，从而其沿流道流动的压力也较低，这使得填充到先注射到模具中的高聚物熔体中的传送压力较为合适。第二，最后辅助流体将从制品中除去，所以制品是中空的。对于较合理的模具设计，流体辅助成型会提高强度，减小重量，以及与传统的模具或共注射成型模具相比缩短了成型周期。

流体辅助成型是一种较古老的改进的吹塑成型工艺[46]。图 13.4 所示为两种不同的注射解压的现代气体辅助工艺[47]。在第一种方法中，两模具部分 10 和 11 形成型腔 12，高聚物熔体流入其中。成型机的喷嘴 13 有一个带滑阀 19 的内芯 16，阀的驱动是靠从通过三通阀 22 和 23 的气体通道 20 和 21 交替引进的压缩气体。在工艺过程的开始，高聚物熔体 24 通过喷嘴 13 进入到型腔，同时，滑阀 19 阻塞气体进入管 18，压缩气体通过气体通道 21、减压气体通过气体通道 20。当型腔部分填充后，气体通道 20 加压而气体通道 21 减压。这一过程中滑阀位置如图所示以确保气体进入管 18 打开，压缩气体进入到型腔。一旦气体注射进入型腔，滑阀将阻止高聚物流体流入。制品冷却后，开模使浇口打开，一部分压缩气体释放到大气中。

图 13.4 中也表示了第二种方法，其不是注射压缩气体，而是注射减压气体来形成一个具有大腔的中空制品。在这一设计中，高聚物熔体流入模具部分 30 和 32 形成的型腔中。这些模具部分有一些细节图中没有显示，如最初高聚物熔体完全填充型腔形成的凸台。这时压缩气体注射到型腔中较厚的部分。同时，型芯 32 沿模具部分 30 后退以扩大型腔。在这一方法中，制品会具有很大的内部间隙（比如 50mm），从而使制品外表面保留有较好的性能。

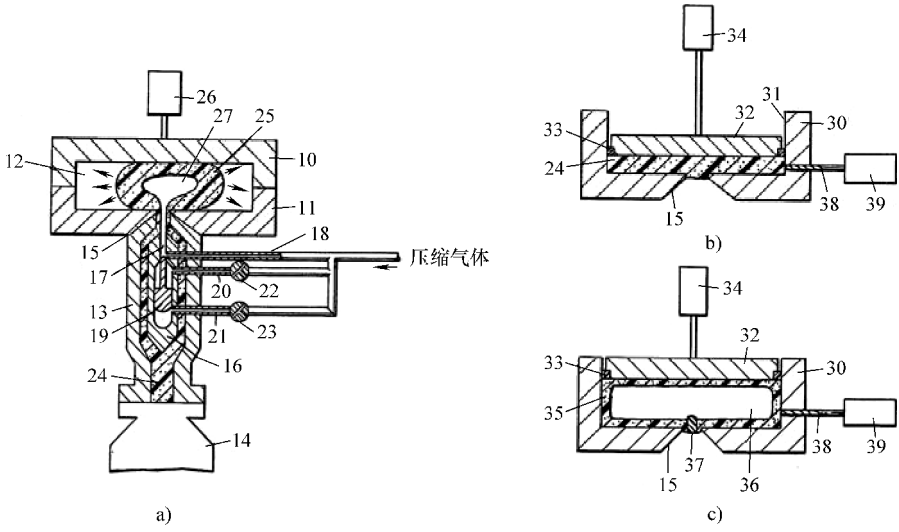


图 13.4 注射减压气体辅助工艺

流体辅助成型模具的设计者需要对注射成型和共注射成型的模具相当熟悉。特别的，模具设计者需要考虑注射气体或水的位置。如图 13.4 所示，喷嘴和型腔是常要考虑的位置。重要的是，模具设计者必须仔细设计模具使其有合理的流道以使气体或水能较顺畅地进入到型腔。在许多模具设计中，型腔壁厚度尽可能均匀从而避免不均匀冷却和收缩。然而，这样的模具设计对流体辅助成型的模具并不是有效的，原因是气体或水在均匀壁厚的型腔中从任意方向渗透，因此减弱了成型能力而没有明显减小制品质量。因此，如图 13.5 所示的厚流道壁常用来辅助引导气体或水通入到型腔中[48]，所有气体通道展现出的渗透程度不一样。总而言之，期望尽量得到使制品壁厚均匀的气体通道，从而得到必要的流体流动和制品刚度。出于这一原因，图 13.5 中右上图所示的结构是最差的。由于其他流道充满流体，冷却和收缩相对均匀而不会延长成型周期。

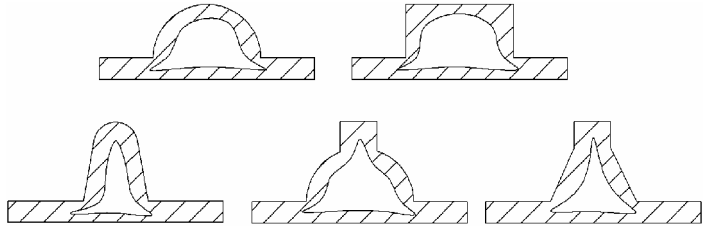


图 13.5 流体辅助成型的流道

最近水辅助成型似乎重新引起人们的兴趣[49,50]。与气体辅助成型相比，水辅助成型至少有三个优点。第一，水具有较高的热容，所以与气体辅助成型相比能缩短成型周期。事实上，在一些水辅助成型中，流道设计成有几个入口和出口，因此水可以在制品中循环从而通过热对流明显地减少热量传递的损失。第二，相对于气体来说，水是不可压缩的，因此可以在型腔中为熔体提供较高的压力而比气体需要的能量少，且比气体安

全。第三，水辅助成型的制品，其内表面更加均匀和光滑。水辅助成型也有两个明显的缺点。第一，水必须从制品内部除去，已经研发了各种各样的方法在开模前就将水从制品中除去[51]。第二，在成型过程中使用水将增大湿度和模具的腐蚀，所以推荐使用耐腐蚀的模具材料 SS420。

13.3　镶件注射成型模具

镶件注射成型是将一个预置元件安置在模具里，然后注射进模具高聚物熔体并至少部分地将其封进内部的一种成型工艺。常见的镶件包括一些电气元件、螺母或其他紧固件、刚性元件和其他塑料组件。在镶件注射成型后，插入元件一般永久留在高聚物制品中。

13.3.1　低压力模压成型

将其他元件封进高聚物熔体中的一种常用方法是如图 13.6 所示的模压成型，其生

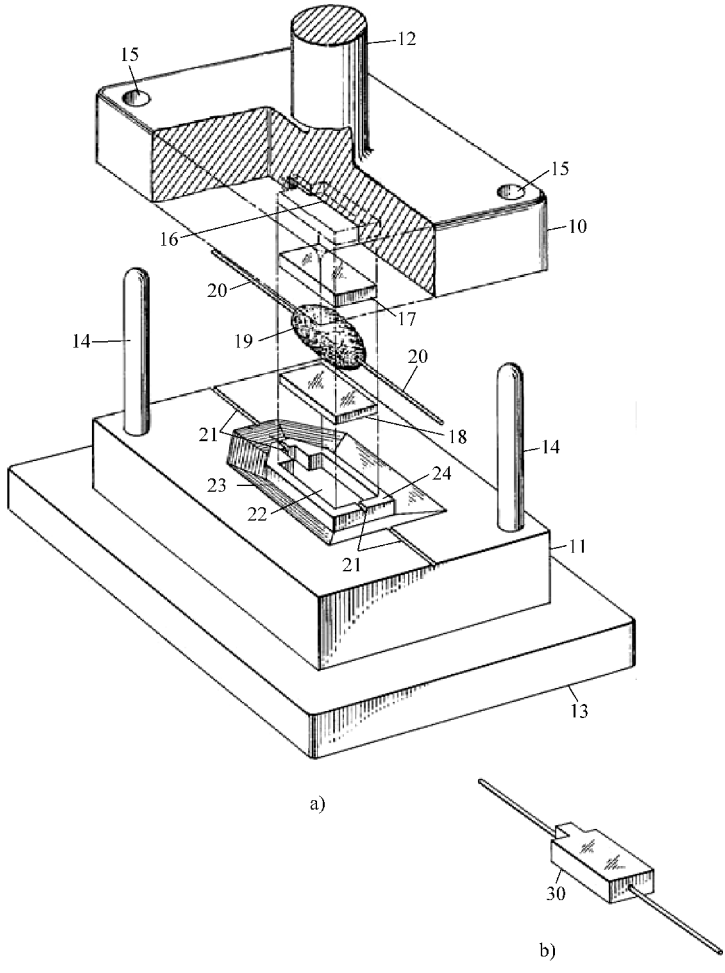


图 13.6　镶件模压成型

产的是钽电容。在这一成型工艺过程中，模具合模前将电容 19 安置在两层高聚物熔体 17 和 18 之间。设计的模具有与 17 和 18 相应的型腔 16 和 22 来填充高聚物，凹槽 21 是为了配合导线 20。在任何成型工艺中，模具设计者都应该详细考虑制品脱模后的处理。在图 13.6 所示的设计中，下面的型腔 22 比上面的型腔 16 要深。另外，下面模具部分 11 有一个溢料井 23 用于收集在模压成型过程中从型腔流出的物料。鉴于这些设计因素，开模时制品将留在下面模具部分。

在这一模压成型过程中，物料层 17 和 18 是从片料切下的，其形状与相应的型腔配合，同时还支承着电容 19 和导线 20。可取的做法是使熔体完全与型腔的内表面接触从而促进热传递和物料成型。合模前，模具两部分 10 和 11 中的筒式加热器使模具和物料层的温度高于物料的玻璃化温度。一旦物料软化，模具在低的力的作用下将慢慢合上。随着模具慢慢合上，流体慢慢流向电容的周围直到其完全被包住——型腔中过量的物料将流出溢料面 24，流进溢料井 23。一旦嵌入元件完全被包住，最大锁模力可以作用于模具两部分以进行收缩补偿从而达到预定的尺寸，随之冷却模具。

这一模具设计具有一些特点。第一，模具中的凹槽固定嵌入元件从而避免在成型过程中模具的移动和物料的流动引起嵌入件的移动。第二，这一工艺是通过控制模具加热和物料软化以及接下来的合模和模具冷却来使作用在镶件上的应力较小的特别设计。对于加热和冷却循环，模具设计者应仔细设计以减小模板的大小和厚度，从而减小能耗和缩短成型周期。第三，这一工艺用一个溢料面和储料槽来控制过量料的溢料，选择合适量的物料来减少溢料量并确保完全充模是合理的。在这一设计中，模具下半模部分上的溢料面 24 与模具上半模上与其配合的面之间需要一个较大的间隙。如果这一间隙太小，流到型腔外面的高聚物熔体可能会限制模压成型工艺的速率。第 5 章和第 9 章的填充和冷却分析可以为设计提供有用的信息。

13.3.2 镶件注射成型模具的壁面温控

图 13.7 所示为另一个镶件注射成型的例子[53]，主要用于生产水龙头所用镶件周围熔接痕的控制与改进。该模具设计中，由组成模具的带凹槽 32 和 33 的两大部分 30 和 31 形成模具的型腔。插入件 35 通过两个反向的销钉 36 来固定。合模后充模前，在嵌入件 35 与模具两半模 30 和 31 之间的型腔壁厚大致均匀。在这一模具设计中，模具壁温通过控制流经流道 40 和 42 的流体的流动来局部控制。不同的流体，例如水、油或蒸汽，以不同的温度提供给模具的不同部分。

在成型过程中，高聚物熔体通过浇口 38 以极小的阻力进入型腔中。在熔体进入型腔的过程中，其会分成两分流 44 和 45 流到镶件周围。在图 13.7 中，控制模具下半模上凹槽 33 处的温度比上半模上凹槽 32 处的温度低。结果是，上面的熔体分流 44 比下面的熔体分流 45 流动速度要快。考虑到在成型应用中美观的重要性，通过指定每个区域模具壁温的不同来调节熔体流速和熔接痕 50。另外，用一个加热元件 46 来局部加热模具壁以使其温度高于物料的玻璃化温度，从而使熔接痕处物料熔化再熔合来确保制品的美观要求和结构性能要求。

这一多重温度控制通道的设计较先进，特别是自 1973 年这一专利应用领域确定之

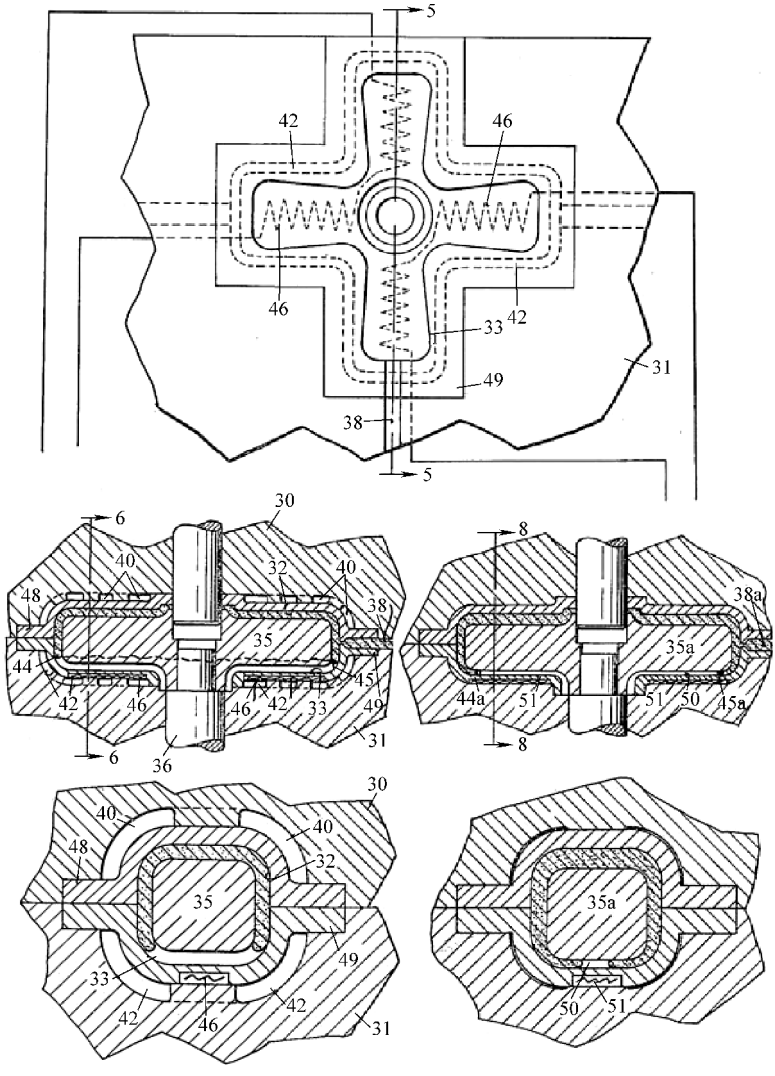


图 13.7　带模温控制的镶件注射成型

后。为了促进冷却通道的应用，凹槽 32 和 33 直接由安置在模具两半模 30 和 31 形成的型腔里的两模板 48 和 49 来形成。这一设计与图 9.16 中挡板的设计相似，其冷却水道设计在型芯的后表面处。第 9 章和第 12 章所述的冷却系统的结构分析可以用来确定冷却水通道的水力直径和分布，以及为了避免产生过大应力所需要板块的数量。局部电阻加热元件 46 将在 13.7.1 节中详细讨论。

13.3.3　失芯注射成型

失芯注射成型是将型芯插入型腔中成型制品内表面的成型方法。成型完成后，插入芯随制品一起推出，制品熔掉插入芯后将具有一个复杂内腔。图 13.8 所示为一种失芯注射成型的应用[54]。其用于成型一个带内螺纹的阀套，且其包含有弹簧和球阀的内腔。

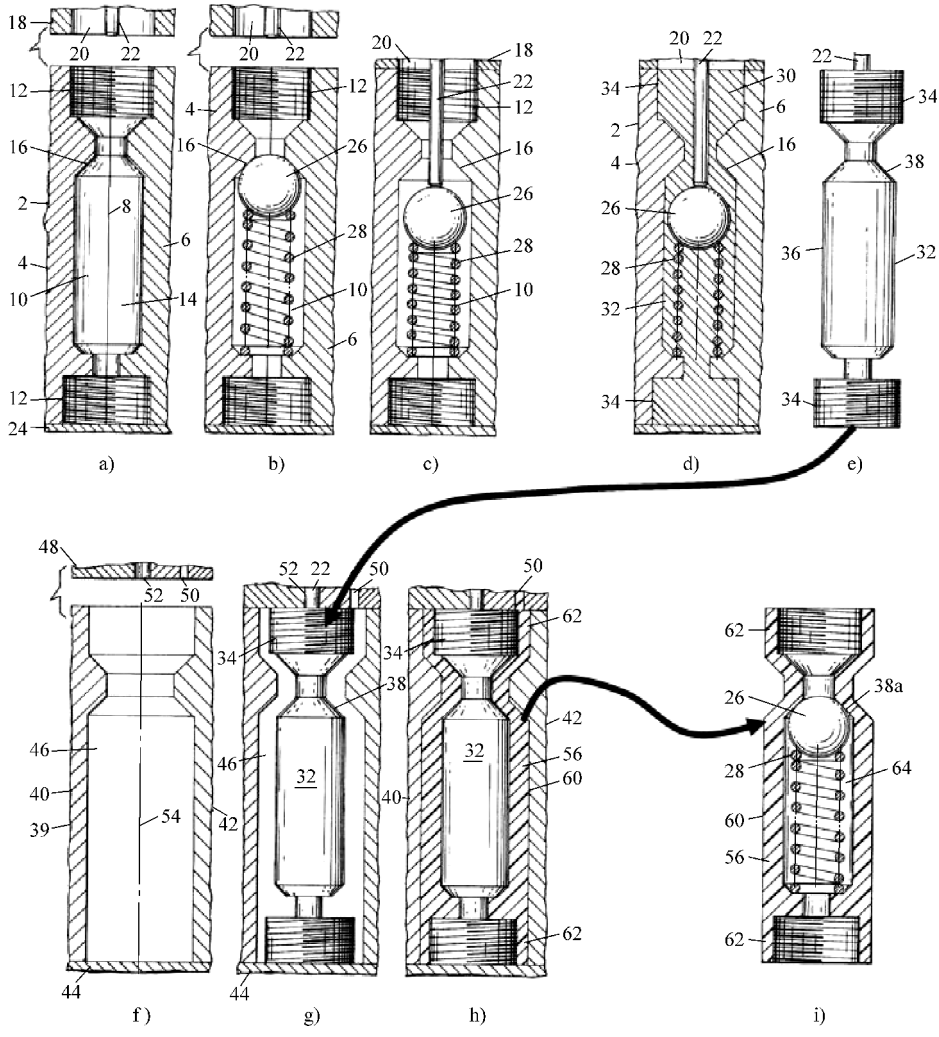


图 13.8　带内置元件的失芯注射成型

失芯注射成型工艺需要两套模具。设计的第一套模具由在分型线 8 处结合的两模具部分 4 和 6 组成。型腔 10 包括螺纹端 12、中心孔 14 和阀座 16。合模前，从分型面处将球阀 26 和压缩弹簧 28 插入型腔 10。这些元件插入型腔后合上模具，将销 22 从与弹簧相反的方向插入型腔将球阀顶至其设定的位置。这时将低熔点物料 30 从开口 20 注射到型腔并完全充满。在冷却固化过程中，低熔点物料将固定球阀和弹簧的位置。冷却完后开模，制品 32 由销 22 推出。

将制品 32 插入第二套模具的型腔 46 中，这一型腔由第二套模具的两半模 40 和 42 形成，制品 32 作为芯块来成型阀套的内表面。从前面的成型工艺来看，插入芯包括外部螺纹端 34 和中心部分 36，中心部分 36 包括装入的球阀 26、弹簧 28 以及圆锥面 38，圆锥面用于成型阀套的阀座的轮廓。销 22 与孔 52 的滑动配合使芯 32 在型腔 46 中较好

地对中。通过浇口 50 注射高聚物 56 到芯 36 周围填充型腔。除去固化成型的低熔点物料，将芯 32 熔融去掉后就得到最终结构 60。阀套 60 有内螺纹端 62 和一个中心腔 64，中心腔包含球阀 26 和弹簧 28。

似乎这种失芯注射成型的可行性较差。从阀套上将芯 32 熔融，则要求制作芯的第一种物料 30 的熔点比第二种物料 56 低，第二种物料为成型阀套的原材料。那么为什么在注射第二种物料时，芯没有熔融呢？原因是第一种物料 30 有足够的量去接受和吸收来自第二种物料 56 的热量而不会熔融。例如，第一种物料为质量分数分别为 58% 和 42% 的铋和锡组成的合金。这种合金的熔点约为 138℃。对于第二种物料，用熔点范围较宽的各种高聚物，包括聚甲醛和聚碳酸酯。如果成型用的第二种物料为温度较高的高聚物，则注射第二种物料时冷却模具和其中的芯以避免芯的熔融。

13.4　注吹成型模具

注吹成型是成型具有较大内腔的复杂薄壁制品的成型方法。在这一部分将介绍两种不同的吹塑成型方法。第一种设计应用传统的有旋转模具的注吹成型机，而第二种设计使用多成型工位的四位置分度系统。

13.4.1　注吹成型

图 13.9 所示为一种注吹成型模具[55]。其设计包括两个注射模具 48 和 50，它们安置在离轴向主浇口等径向距离的位置。每个注射模具都包括浇口 54 和 56、注射成型型腔 58 和 60 以及其他常见模具元件。图示模具还包括两套分离型腔吹塑模具 140a、b 和 142a、b，所以侧向分型的制品膨胀后可以迅速被推出。这两套注吹成型模具在旋转盘直径方向上等半径对称布置，如同注射模具 48 和 50 的布置一样。四个模具相互之间相隔 90°。型芯与型腔一样安放在等半径距离上，所以合模时四个型芯能同时对应四个型腔。

一个歧管将熔体从成型机的喷嘴输送到多个型腔。液压驱动缸 124 驱动歧管旋转装置 18 在两正交位置间摆动，液压驱动缸 124 的一端通过销 126 连接到支承板 78。活塞 128 的连接叉 130 的一端与曲柄 132 枢轴连接，曲柄通过螺钉或其他紧固方法固定于歧管轴 15 的圆周面上。阻件 134 和 136 固定于支承板上，用以防止曲柄臂的夹角超过 90o。这样设计是为了确保型芯 114 和 116 与型腔 58 和 60 对准，而其余两个型芯与注吹型腔 65 和 67 对准。

在成型过程中，机器将型芯和型腔夹紧。成型机的注射单元将高聚物熔体通过主浇口 42 和歧管 14 上的流道 44 和 46 注射到型腔 58 和 60 中，在这里成型出吹塑成型要用的型坯。之后，合模装置运动以使型芯将热型坯带出型腔。然后歧管装置旋转 90°使型坯与注吹模具的型腔对齐。这时机器合模，并将压缩空气通过型坯上的孔注射到型坯中使型坯胀大来成型吹塑制品，而注射单元充模来准备下一组型坯。开模过程中，吹塑模具打开，推出成型的制品。

这种模具设计使用了旋转的型腔和往复运动的型芯。一种改进的方法是应用一套固定的型腔和一套可旋转运动和往复运动的型芯。两种设计方案通过改进传统成型机器，

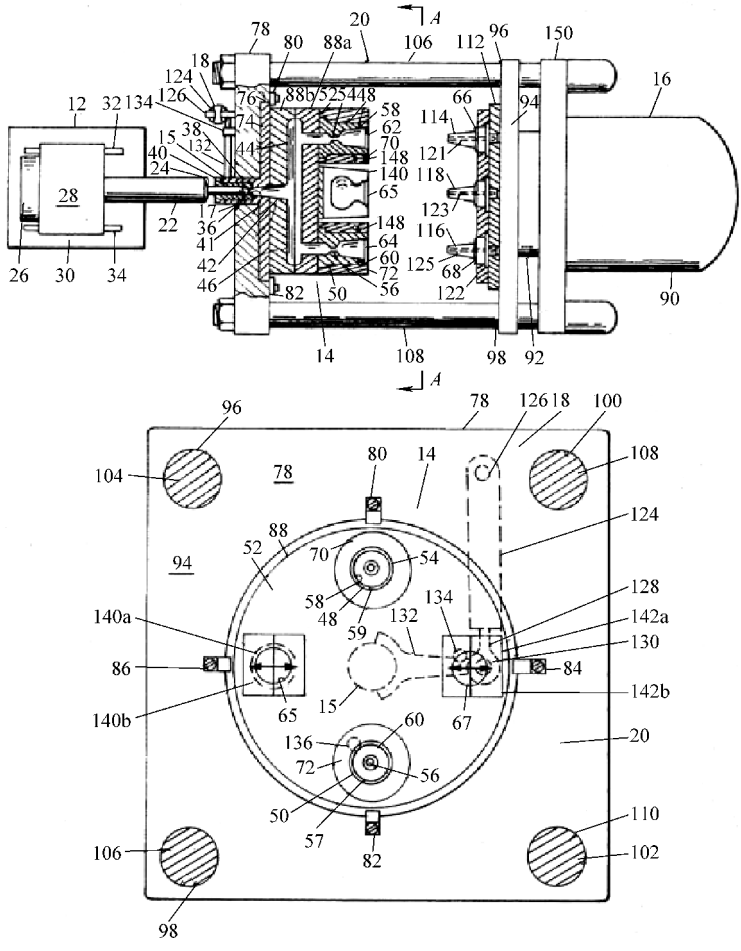


图 13.9　带有旋转型腔和往复型芯的注吹成型模具

都可以提供一种既紧密又经济的注吹成型方法。也可以通过分析填充过程来设计合适的流道系统和型腔，通过对冷却的分析来控制热型坯的温度，通过结构分析来减小注射模具和吹塑模具的尺寸和所受到的应力。

13.4.2　多层注吹成型

图 13.10 所示为两层注吹成型，其用于成型双层制品[56]。根据制品的用途，制品内层和外层可分别选用不同的材料。例如，内层 44 的材料可能是抗化学反应的容器材料，而外层 44′可能是强度比内层材料高的材料。在这一设计中，注射成型系统包括第一注射工位 10、第二注射工位 12、吹塑工位 14 和脱模工位 16。

这个系统有一个具有四个面的分度头 18。一系列芯棒 22 分别从分度头的四个面伸出。分度头围绕中心轴 20 间歇性旋转来顺序分度各组芯棒到不同的工位。根据其构造，这一设计被称为四工位机器。

在第一注射工位 10，高聚物熔体从注射单元 28 通过流道系统 30 注射到模具 26

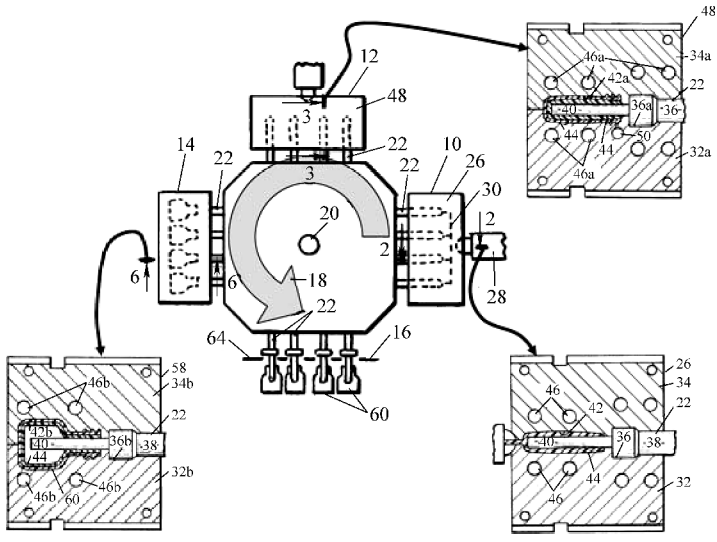


图 13.10　两层注吹成型

中。注射模具的型腔由下端固定部分 32 和上端移动部分 34 构成。当这些模具部分靠近时，各芯棒 22 伸入到型腔中。每个芯棒的颈部 38 由有开口 36 的壁紧固。高聚物熔体从芯棒顶部的开口处注射到型腔中，流到芯棒周围，形成型坯 44。在高聚物熔体流到型腔中时，熔体要散失一部分热到模具 26 和芯棒 22。如 9.3.5.5 节分析，因为芯棒是细长的，且有较大的热阻，因此型坯的最高温度发生在靠近浇口和流道 30 处的芯棒的末端。

在第一工位 10 成型型坯后，模具 26 打开，通过分度头的上升运动使芯棒 22 提升离开下半部分 32 中的型腔。分度头沿逆时针方向旋转 90°，将带有型坯 44 的芯棒插入到第二注射成型工位 12 的注射模具 48 的下端部分。在颈部 38 处第二注射模具关闭以形成型腔 42a，其横截面比第一成型工位相应型腔 42 的横截面大。

正如前面所提到的，前一型坯 40 的端部温度很高，所以非常容易变形。如果型坯的第二层从同一浇口流入，物料直接的冲击和高的流速会将前一型坯部分或全部从芯棒上冲刷下来，从而降低了制品的质量。鉴于此，第二层物料 44 从支管 50 处一个单独的流道来填充型腔 42。高聚物熔体围着第一层流动来形成两层型坯。

然后第二模具打开，通过分度头的运动使芯棒至吹塑模具 58 处从而处于吹塑工位 14。吹塑模具固定住薄片型坯的颈部。型腔 42b 为薄片吹塑成型的预期制品的形状。然后吹塑完全胀大两层型坯 60。吹塑制品 60 下一步进入脱模工位 16，脱模板 64 将制品 60 推下芯棒 22。随着分度头的继续旋转，芯棒进入第一成型工位来开始下一成型周期。

这一模具设计有三个优点。第一，第二层物料的流动冲刷掉了由芯棒顶部浇口形成的熔接痕。第二，通过使第二层物料浇注口远离第一层物料最热部分来成型第一层的设计缩短了成型周期。第三，第一层物料黏度的增大使得第一层可以成型得更薄，从而降低了成本。

13.5 多重注射成型模具

多重注射成型顺序注射不同类型物料，成型制品不同部分。使用多重注射成型有一些优点，这些优点包括：

- 不同注射能力的机器顺序成型非常大的制品。
- 不同颜色的物料成型多颜色制品，例如汽车尾灯。
- 不同结构性能的物料成型的制品改进了制品的铰链连接、触感等。
- 其他。

有许多方法完成多重注射成型。多次成型可能是最古老也是最简单的方法，其可以认为是镶件成型的一种变体。另一种成型方法是退型芯成型，其使得模具设计相当简单。然而，设计多工位模具是当今最常用的方法，因为这种成型工艺能经济地生产几何形状复杂的制品。每种模具设计方案都会在下文进行讨论。

不管采用哪种多重注射成型方法，其模具设计和分析方法大致都要满足一些特殊的条件。第一，多重注射成型模具可能需要延长冷却时间。原因是当注射第二层物料时，第一层物料并不是处于模具冷却液的温度；另外，第一层物料严重地阻碍了热从第二层物料向模具传递。由于这些原因，模具设计者应考虑多重注射成型应用 9.3.5.6 节所讨论的单侧热流分析，第二层应比第一层薄 40% 以避免延长成型周期。第二，多重注射模具为模具设计者提供了通过应用后一次注射高聚物熔体来熔融和除掉前一次注射成型高聚物的缺陷和熔接痕的机会。然而，因为这些影响，模具设计者应避免在第一次成型的一些表面布置一些可能被第二次注射的高聚物熔体降低质量的细节。

13.5.1 多次成型

图 13.11 所示为使用多次成型方法的多重注射成型模具[57]。在这种设计中，一个单独的模具用一个分流道 4 填充两个侧流道 2 和一系列的型腔生产键帽 B。每个键帽在其上表面 6 上成型有一个与键相对应的字符，例如数字“5”。这一特殊的模具设计可以在键帽背面 5 使用溶剂，如丙酮，而使不相容高聚物物料相结合。相应的，分流道 4 将可以作为操作者使用溶剂时的手柄。更为先进的设计是用凸台或台肩辅助制品自动处理系统。

一旦溶剂用于键帽背面 5，就将键帽置于模具 A 下半部分的型腔 1 中。模具的上半部分 C 提供型芯 12，其与模具下半部分上的型腔相配合以成型键。模具合模后，第二种高聚物通过主流道 13 和分流道 14 注射到型腔中。一部分物料将填充键帽的背部 9 和窗口 7 以及与其他部件安装所需要的键的凸起 17。

这种模具设计常用于生产键和需要避免磨损的带标号产品。数字“5”是两种物料成型的，每一种的厚度与窗口 7 的相同。在标号消失前将先磨损键帽的整个上表面 6。从某个方面来说，这种模具设计有两个特性可能在其他多重注射成型中有较大作用。第一，突出部分 11 增加了表面积，从而使两种物料粘合得更牢固；这些突起也将提高制品的侧面强度。第二，筋条 10 置于窗口 7 下面与第二种物料形成倒陷，从而使两部分

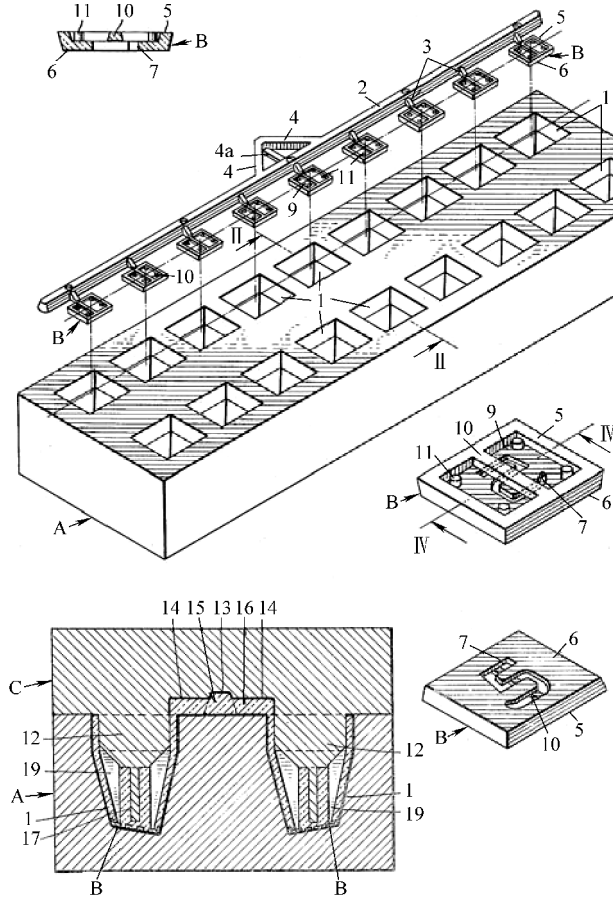


图 13.11　使用多次成型方法的多重注射成型模具

结合得更紧。

13.5.2　退型芯注射成型

退型芯注射成型是一种多重注射成型工艺，在退型芯注射成型中，模具的一部分，一般是型芯，移动以形成另一个型腔从而将另一种高聚物熔体注射进来，与先成型的高聚物相连。图 13.12 和图 13.13 所示分别为一种退型芯模具的俯视图和剖视图，其用于制造车辆前部探照灯或尾部指示灯[58]。这一应用中成型的部分可能有三种颜色，如红色、透明色和琥珀色。模具由上半模部分 4 和下半模部分 5 组成，并由它们形成型腔。型腔由四个叶片 14、15、16 和 17 分成三个不同部分 11、12 和 13，每个叶片各自由分别与圆柱 22、23、24 和 25 构成整体的活塞 18、19、20 和 21 驱动。每个型腔通过流道 7、8 和 9 填充高聚物熔体。

在成型过程中，模具和叶片都闭合以将型腔隔离成不同部分，所以不同的物料可以顺序注射。为了缩短成型周期，同时从喷嘴 1 和 2 通过流道 7 和 8 将高聚物熔体注射到型腔 11 和 12 中较适宜。一旦所有物料充分固化，驱动圆柱使叶片 14、15、16 和 17 退

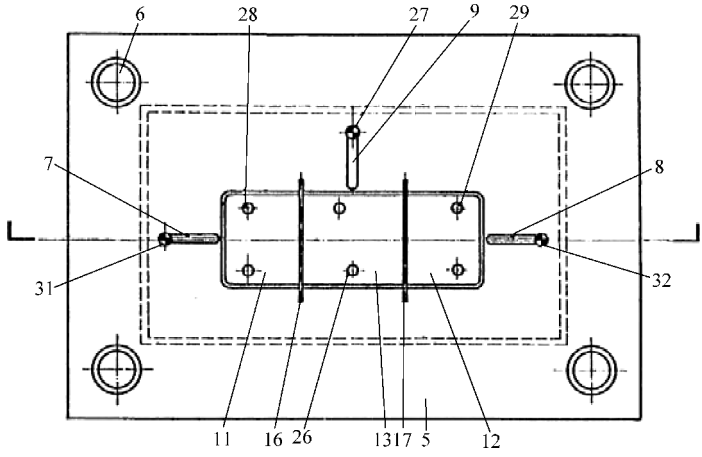


图 13.12 退型芯模具俯视图

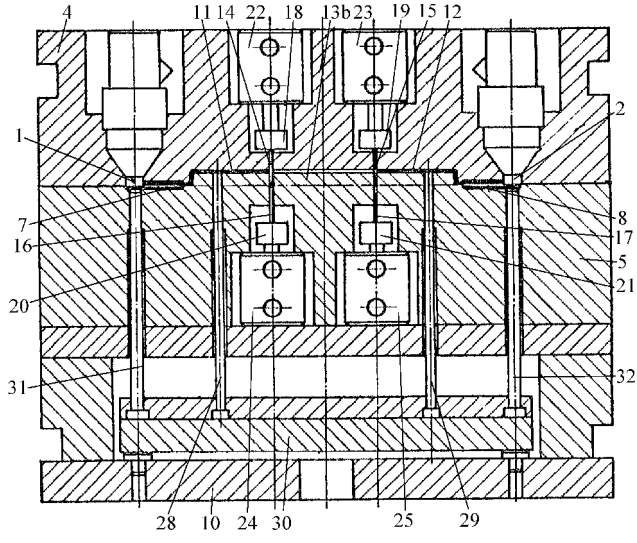


图 13.13 退型芯模具剖视图

回。第三种物料通过流道 9 注射到型腔的第三区域 13。这种成型方法可以生产由多种物料组成的制品而不需要打开模具。

关于退型芯注射成型模具设计需要注意两条。第一，可以设计一个模具，其只利用一侧的叶片 16 和 17，从而减小了模具的尺寸和复杂程度。实际上，考虑强度原因一个较为合理的设计是用一侧的叶片与型腔对面的槽进行互锁。然而，图 13.12 和图 13.13 所示设计的可能原因是模具两侧叶片的后退为在模具的上半部分 4 和下半部分 5 间成型凸出的筋条提供了一种方法。不管怎样，应进行结构分析以确保叶片足够厚，从而避免型腔的厚度和熔体压力在叶片中形成过大的剪切应力和弯曲应力。

第二条应该注意的是单个中心型芯两侧都使用叶片，这样型芯就可以撤回。具有可选择性的模具设计能避免通过使图 13.13 所示的整个中心部分 13b 成为一个单一被驱动

的元件来共同使用所有叶片。在这种具有可选择性的设计中，中心部分 13b 在合模处之上较靠前的位置，关闭图 13. 12 中型腔区域 13 防止熔体进入，同前面的设计一样，由叶片 14、15、16 和 17 提供相同的有效型腔侧壁。在左侧和右侧区域 11 和 12 填充完高聚物后，中心部分 13b 能缩回，型腔区域 13 通过流道 9 填充第三种高聚物。似乎这种具有可选择性的设计需要极其高的驱动力，因为中心部分 13b 的很大的凸起区域上作用有熔体压力。然而，在成型区域 11 和 12 时，中心部分没有受明显的压力，所以情况并不是这样，而且在退回中心部分 13b 时作用的很高的熔体压力可以通过台肩或其他模具组件来承受。

13. 5. 3　多工位注射成型模具

由多种材料组成的制品也常用多工位注射成型。图 13. 14 所示为加拿大国旗的多工位注射成型模具设计[59]。在这一设计中，第一模具由迁移板 47、型腔板 48、流道板 49 组成。型腔板 48 与侧嵌板 52、中间枫叶状部分 53、连接所有部分的桥接段 54 一起构成型腔 51。成型过程中，第一种高聚物熔体从流道 58，经过主浇口 56 和浇口 57 注射到型腔 51 中。一旦第一种高聚物固化，模具打开，迁移板从第一模具移开。这种模具设计中，固化的流道 68 和制品 61 与迁移板一起移动。

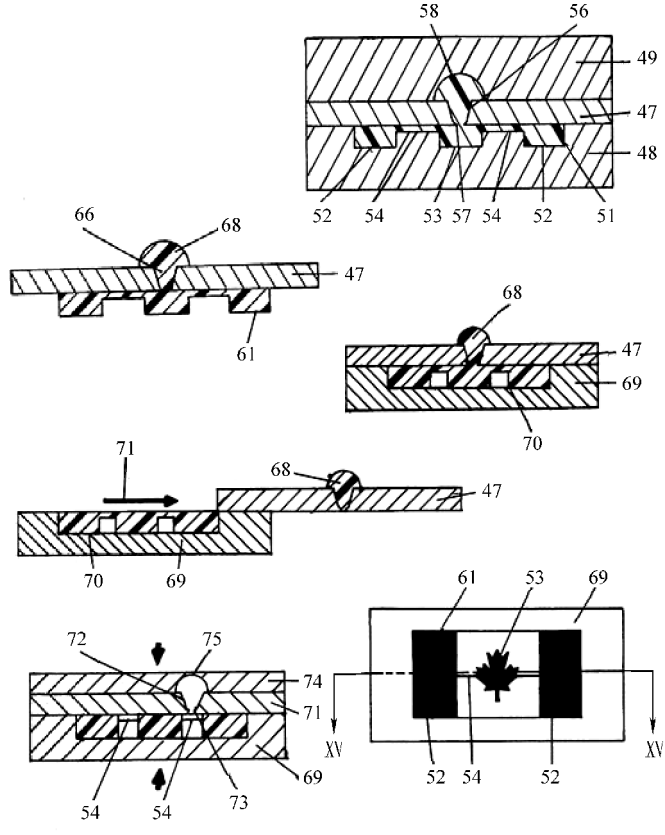


图 13. 14　多工位注射成型模具设计

带有固化的流道 68 和制品 61 的迁移板 47 移动到第二个模具。在这种设计中，迁移板将固化的制品 61 插入到第二个型腔板 69 上的型腔 70 中。迁移板侧移将浇注系统与固化的流道 68 分开。板 71 和 75 与型腔板 69 布置在一起组成第二个模具。注射第二种物料覆盖在第一种物料上，两种物料粘合形成一个制品。

与退型芯注射成型模具设计相比，多工位注射成型为制品的设计提供了更大的灵活性。特别是，多工位注射模具可成型复杂的制品，成型后还可以将制品插入到其他任意复杂的型腔中，以在先前成型的制品的边、上面或周围注射另外的高聚物。因此，为支持多工位注射成型已发展了一些不同的模具和机器设计。类似于图 13.9 和图 13.10 所示的设计，这些设计包括旋转模具来移动制品。

最近，已设计出专用双注射成型机，如图 13.15 所示[60]。在这种设计中，注射单元为两套位于两个相对的模板上的型腔提供物料。因为两模板位置彼此相对，可用一个合模装置为两个型腔提供锁模力，这类似于 13.6.2 节将讨论的叠层模具。已设计出一些不同的传动装置用于牵引型芯，包括图 13.15 所示的锥齿轮传动、齿轮齿条传动[61]等。

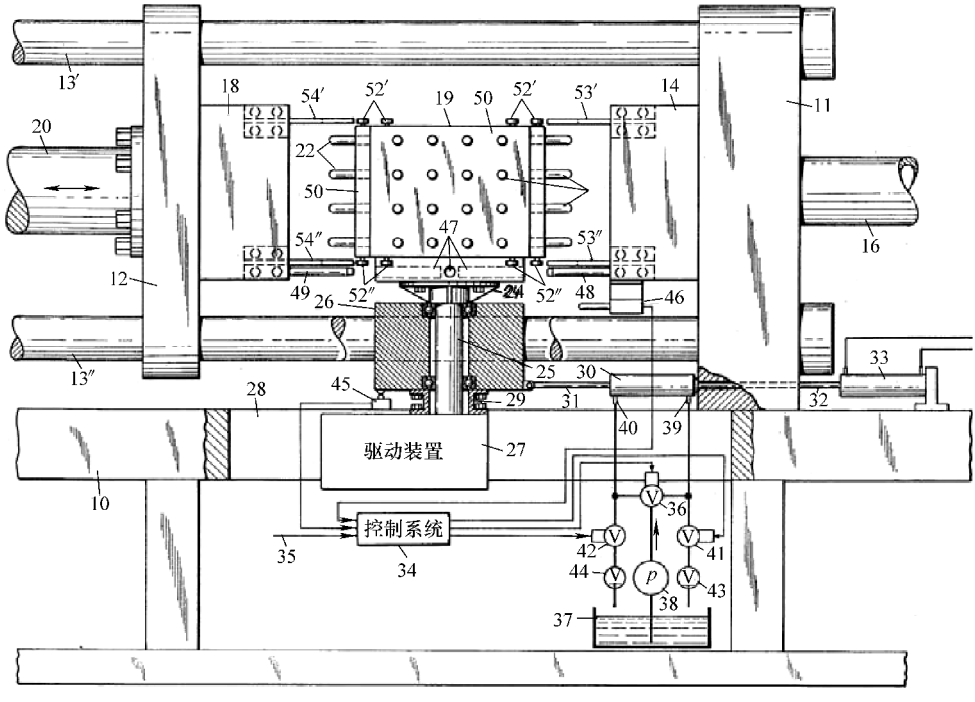


图 13.15　双注射成型机和模具设计

13.6　浇注系统

13.6.1　绝热流道

如第 6 章所述，最流行的浇注系统采用的是冷流道和热流道。两种浇注系统都有缺

点。对于冷流道，浇注系统的构造所引起的原料的浪费比较严重，而且还可能延长成型周期。对于热流道，因需要温度控制系统，所以模具的成本和复杂性都会增加，还可能有温度和物料颜色的改变。

对于可供选择的冷流道和热流道设计，绝热流道的设计试图解决它们所存在的缺陷问题。图 13.16 所示为一种绝热流道设计[62]。其设计布局与一个三板式模具相似，由流道板 15、型腔板 16 和型芯板 17 组成。流道的布置也相似，熔体从浇口 19 通过模板到主流道和分流道 18，再经过分型面到第二系列的浇口 22 和 23，从而将熔体注射到型腔。然而，绝热流道模具与传统的三板式模具相比，浇注系统的各段直径都较大。流道板 15 与型腔板 16 相对固定，在成型过程中一直不能打开。

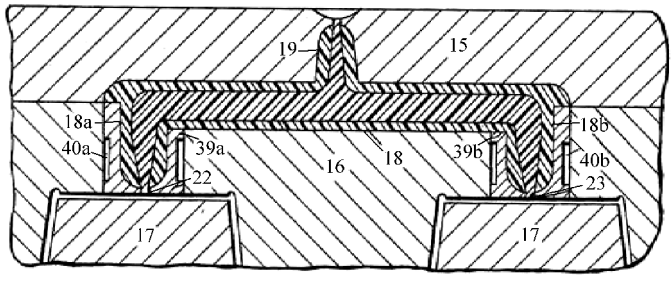


图 13.16　绝热流道设计

在成型过程中，熔体从喷嘴注射出并填满浇注系统。外层 18a 和 18b 在流道内表面立即固化。然而，如果出现下面两种情况，沿流道外层的固化可能不完全：

· 物料的热传导性差。

· 每次成型，从注射机输送的热的高聚物都要经过浇注系统。

结果是，在成型过程中，熔融核心的直径保持几乎一致。在这种成型方式中，尽管没有任何的加热器、热电偶和其他温度控制装置，绝热流道仍可以作为热流道。物料变色的问题可以通过从型腔板 16 上分离流道板 15 来移去完全固化的浇注系统来解决。

图 13.16[62]所示的模具是特别为成型半结晶高聚物，如聚乙烯和聚苯乙烯设计的。根据试验确定流道直径约为 25mm，成型周期接近 60s，外层厚度约为 6mm。当然，流道直径的最佳值取决于物料特性、熔体和模具的温度、熔体流速和成型周期。尽管增加了设计的复杂性，内置加热器和保温层（图 13.16 中围绕浇口套 39a 和 39b 的空隙 40a 和 40b）可以大大提高工艺强度。可能是因为一些工艺条件没有确定，随着热流道的应用，绝热流道系统的使用越来越少。即便如此，绝热流道的性能更好，成本更低。

13.6.2　叠层模具

当高聚物以很高的压力注射到型腔中时，需要很大的锁模力来保持模具关闭以防止熔体流出型腔。因为锁模力与型腔的投影面积成比例，所以随着经过分型面型腔的个数的增加，锁模力也成比例地增大。然而，如果将型腔一个叠在另一个之上，那么用于锁紧一套型腔的锁模力就可以用于锁紧任何套叠布置的型腔。

图 13.17 所示为一种叠层模具设计，其用与一般情况下成型一张乙烯基唱片相同的锁模力和成型周期成型两张乙烯基唱片[63]。在这一设计中，在内模板 12 与两外模板 14 和 16 之间有两套压模。内模板 12 由支座 20 导向。熔体从注射机的喷嘴 54 经过延长的流道 40 流到成型唱片的两个型腔。物料固化后，驱动熔体关闭棒 65，用关闭阀 66 密封浇口进口 51。这一动作也同时将流道 40 与槽管 64 相连接，因此流道 40 的固化物料通过驱动流道敲击棒 75 可以从制品中移去。退回浇口中的流道敲击棒，打开模具，推出成型的唱片。

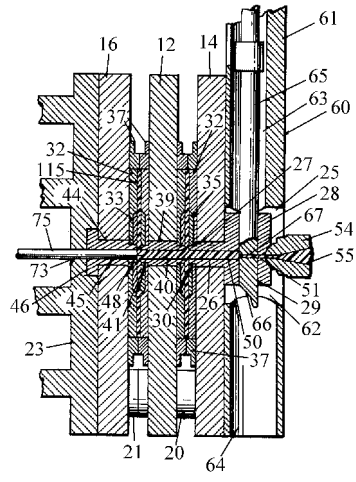


图 13.17　早期的叠层模具设计

图 13.17 所示的模具设计存在两个缺陷。第一，叠层模具成型时也成型延长的流道，其产生很多废料。第二，因为熔体到左侧型腔流道的距离长，所以流到两型腔的熔体不平衡。在现代叠层模具设计中，使用热流道将存在的两个缺陷都解决了，图 13.18 所示就为这样一种模具[64]。这一设计中，在中间移动板 56 所在的两个相对的分型面 62 和 64 上布置有两个型腔 60。热歧管 65 通过流道 70 和随后的分支管将高聚物熔体运送到型腔。该设计利用两个单独的阀式浇口，将熔体从注射机喷嘴 17 穿过分型面 62，运输到热歧管 65。在成型过程的填充阶段，驱动装置 50 和 54 退回阀销 24 以将熔体从喷嘴运输到歧管。而在塑化、冷却和模具准备下一次的成型的过程中，阀销将密封浇注系统。

虽然上述设计增加了模具的尺寸和复杂性，但其能使两套型腔的成型与一套型腔的成型有相同的成型周期和锁模力。另外，流到两个型腔的流体完全一样，而且使用了热流道浇注系统，在此也就没有物料浪费。这种形式的叠层模具设计，能明显降低成本，现在比较常用的叠层模具有两层、三层和四层型腔。显然，需要仔细平衡叠层模具设计潜在的工艺成本节约与投资、维修、制品变色、叠层模高度和注射容积间的关系。

13.6.3　分支流道

如图 13.19 所示[65]，在熔体自然平衡分支流道系统中存在的问题是，熔体流动和剪切所引起的热量的不同导致流动不平衡[27]。尽管将浇注系统的几何尺寸设计成一样，但实际上型腔中成型的制品的大小和重量取决于它所在的分浇注系统的位置。层状塑料熔体流经流道系统时的剪切非对称分布，会导致流动不平衡。特别是，在浇注系统中，沿流道径向存在剪切速率和温度的分布：围绕流道中心的外层高聚物熔体剪切速率更高，因此温度也更高，而黏度则较低。当层状熔体流到流道系统的一个分叉处时，外层低黏度熔体仍在外层位置，而中心黏度较高的熔体则分离开并流向分流道 14 的相对一侧。流向两侧分流道熔体黏度的不同将在下游分支 16 和 22 处引起流动的不均匀分布。

为了解决流动不平衡，必须解决流向两侧的高聚物黏度不同的问题。如图 13.20 所示，在流道分支前加一个水平变化结构就是一种方法[65]。图 13.20 中的上游部分 100 对

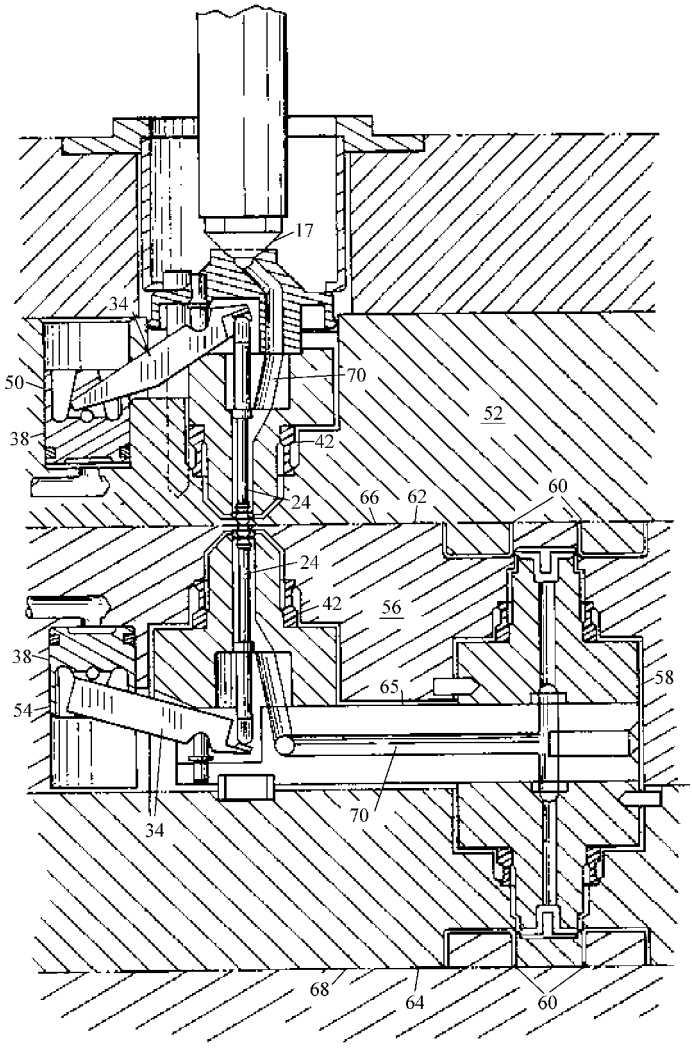


图 13.18　热流道叠层模具设计

应于图 13.19 中的主流道 12，而下游部分 104 对应于图 13.19 中的分流道 14。流道分支前，流体换向器 106 使流体向上流向扩展流道 102。当熔体向下流向流道 104 时，中心内层黏度大的熔体流向流道侧壁。因为熔体黏度的变化沿流道垂直分布，所以当下游流道侧向分支时熔体的流动是平衡的。

图 13.20 提供了一种用嵌入物来实现水平变动的设计。型腔镶件 150 和型芯镶件 156 安装在上游流道和下游流道间任何需要使用的节点处。凹腔 164 和凸起 162 实现熔体流动的水平变动。因为熔体黏度的变化只是调整了方向，并没有消除，所以连续流道分支处使用多个水平变动嵌入物会重新建立流动的不平衡。最近研究表明，流动不平衡

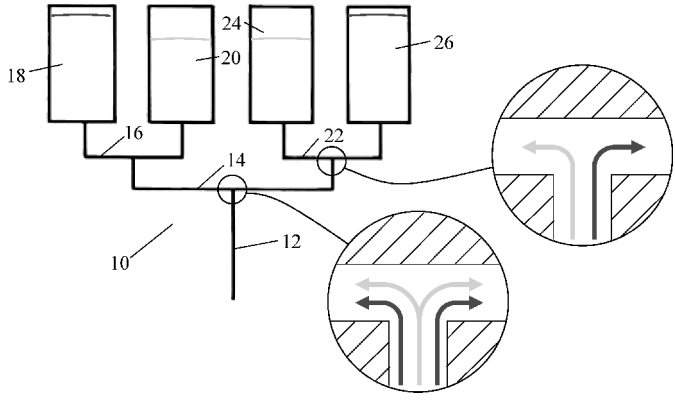


图 13.19　分支流道系统

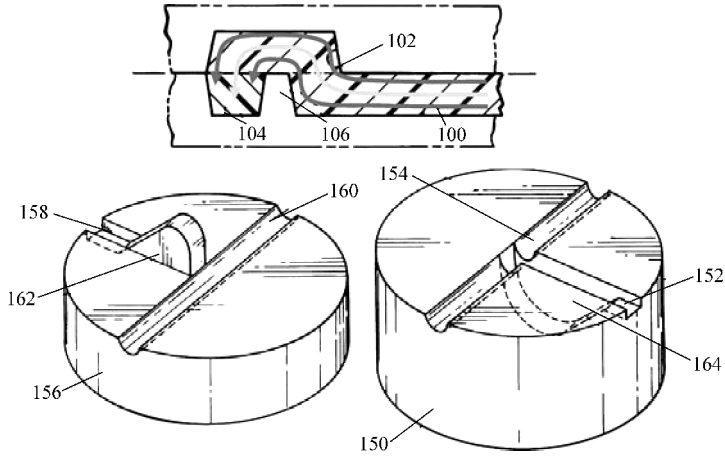


图 13.20　水平变化模具镶件（也称为“熔体 Flipper”）

和控制熔体流动的性能与熔体流变学和工艺条件有关[28]。鉴于此，已有另外一些设计用于调整浇注系统中的黏度分布[66]。

13.6.4　熔体动态控制

注射成型工艺控制的目的是为了指定整个型腔中压力和温度的分布。对于增加必要的自由度，存在一些可能的观点，但一个常用的做法是在流道系统的每个分流道同时变更流动阻力。图 13.21 所示为一个使用快速反应的液压驱动变阻熔体阀的设计[67]。阀在锥形阀杆 45 与内孔 19 锥形面 47 间有一个可调环隙 81。熔体流动阻力取决于阀杆与模具壁间的环隙，轴向移动阀杆可调节通过每个阀的熔体流速和压力。当应用闭环系统时，这种方法可用于同时控制多个型腔的压力。

应用这一系统，在成型过程中引入了三个新的特点[68]。第一，每个阀的单独控制可以用来分别控制型腔多个区域的压力和流动。之前，因为不能单独控制各个工艺条件

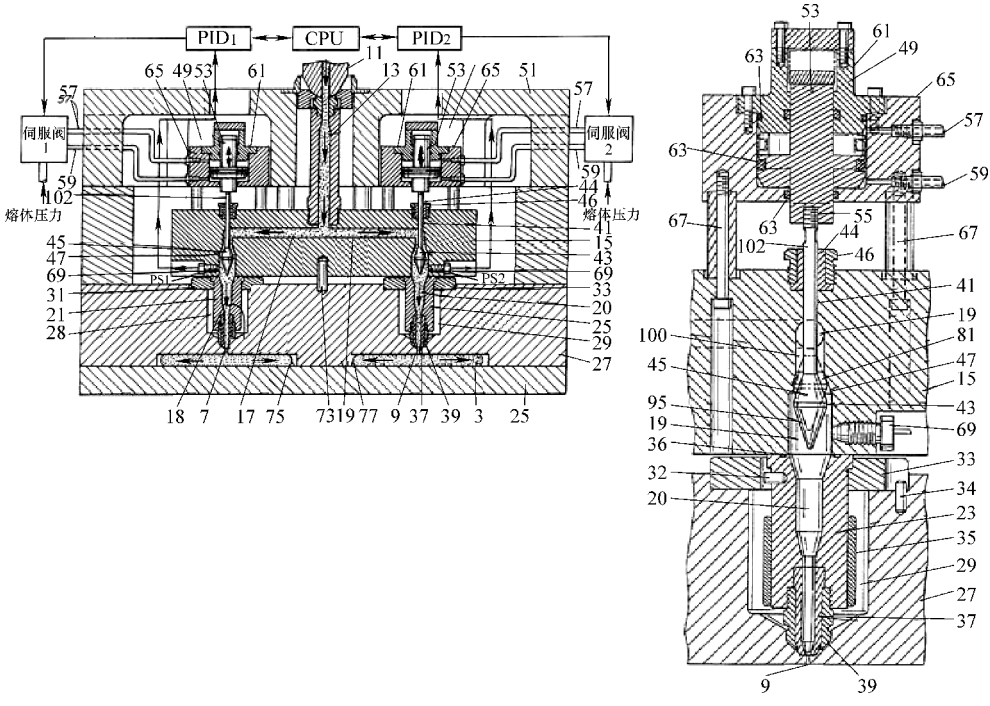


图 13.21　动态浇注控制

的变化，旨在改进制品某个部位的更改会导致对型腔其他部分的不利影响。对于这一工艺，流经每个阀的流体能单独控制，其为成型工艺带来了额外的自由度。第二，在成型周期内，可以通过动态调节阀来达到动态平衡。例如，可以用这一方法来指定一个阀的状态来控制填充阶段流体的流速，后面用一个完全不同状态的阀来控制填充压力。第三，这一工艺的动态性能使阀对由型腔中的传感器反馈的信息作出反应来实现快速控制，因此对直接决定制品性能的型腔状态变化实行闭环控制。注射机输入参数、机器性能和材料特性的变化可动态补偿以生产一致的产品。此外，型腔变量的控制能直接利用压力测量作为产品质量自动监测的工艺控制技术。这可以避免在许多情况下人工监测产品质量。因注射成型机的动态变化与型腔分离，注射成型机的各方面性能对制品影响相对较小。

闭环熔体控制系统的尺寸、复杂性和成本使得其在许多成型中的应用受阻。为了降低这一系统的成本和复杂性，发展了图 13.22 所示的自调节阀设计[69]，其与开环控制系统一起工作，不需要任何压力传感器。熔体进入流道 14，流进孔 20b 并充满阀销头周围以对阀销伸出的部分作用一个动态力 24，其作用趋向于关闭流动熔体，减小熔体压力。同时，一个相反的控制力 26 作用在阀销杆 16 上，其作用趋向于提高熔体流动速度和熔体压力。结果是，阀销移动直至动态力 24 和控制力 26 达到平衡。换句话说，如果控制力 26 和动态力 24 的大小不同，控制元件将移动直至控制力和动态力相等，从而调节了熔体压力。

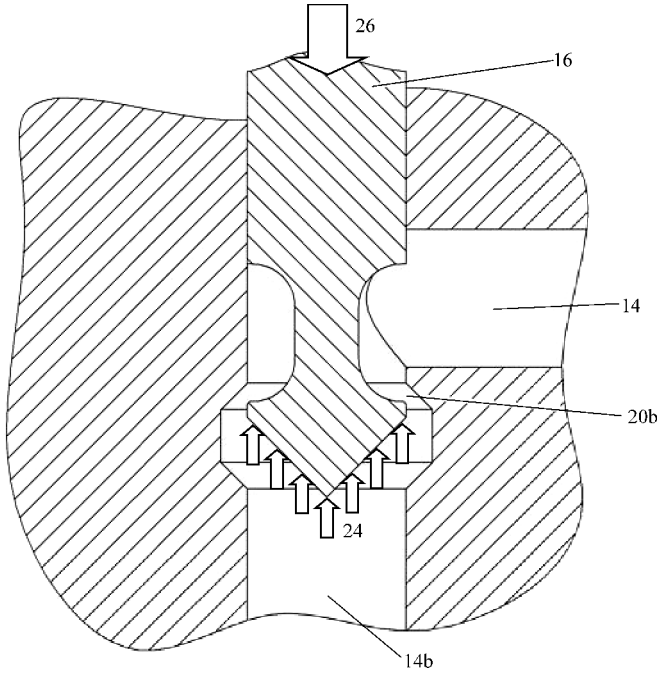


图 13.22　自调节阀设计

出口熔体压力大小约等于控制力除以阀的投影面积。已有研究表明剪切应力和阀销16沿长度方向引起的压力降使输出熔体压力存在一定的误差[70,71]。如果通过液压缸或气缸提供阀杆控制力，那么输出熔体压力等于作用在传动装置上的压力乘以强化系数，一般由传动装置推杆截面积与阀销头截面积的比例决定的强化系数为100∶1。在成型过程中通过控制每个阀缸的传动压力，可以使成型工艺条件与传统注射成型相比更一致、更灵活，而不需要型腔压力传感器和闭环控制系统。

13.7　模具壁温控制

第9章关于冷却系统的分析与设计适合于大多数注射成型应用。然而，也有一些注射成型使用传统的冷却系统设计并不可取。一般，热的高聚物熔体接触到冷的模具壁时就在冷却开始前出现固化外层。在一些成型中，固化外层会导致熔体在型腔中过早固化，制品存在过大的双折射率，或者光泽度不够和其他表面缺陷。在另外一些成型应用中，型腔表面模具壁温度波动可能导致尺寸精度缺陷。因此，一些成型中，比如透镜、飞机座舱盖、光学存储介质和纤维增强材料，通过模具壁温度的动态控制改进成型质量。下面将讨论一些不同的方法。

13.7.1　脉冲冷却

控制模具壁温度的一种方法是用一套或多套冷却水道来迅速加热或冷却模具，图

13.23 所示就为这样一种模具设计，当成型高度敏感的塑料材料或成型的制品壁非常薄时，其可以满足很小的公差要求[72]。在这一设计中，型腔 7 由型腔镶件 10 和型芯镶件 9 构成。型芯镶件应设计得尽量薄，并围绕内型芯 12 以提供通道 14 用于循环温度控制流体。型腔镶件 10 与型腔板 28 和外层镶件 29 配合共同形成通道 24 和 25。

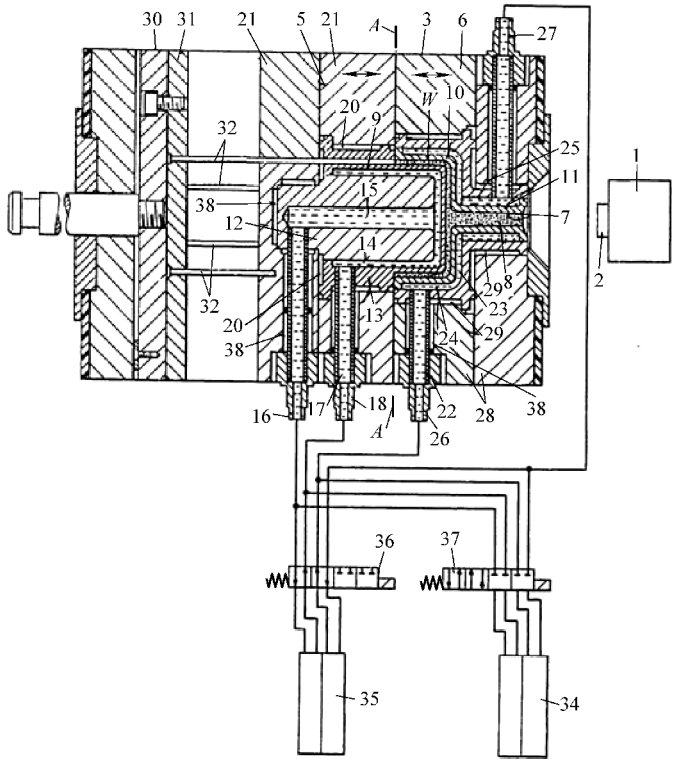


图 13.23　脉冲冷却模具设计

在工作过程中，两分开流体通过一个加热装置 35 和一个冷却装置 34 分别进行温度控制。使用两种分别控制的冷、热流体与单个流体既需要加热又需要冷却相比，节约了成本和时间。注射高聚物熔体前，控制阀 36 和 37 放出热的流体从入口 18 通过通道 14 和 15 经过型芯，然后从出口 16 出来。一个类似的型腔加热回路由元件 26、22、25 和 27 构成。镶件 9 和 10 的温度高于高聚物熔体的固化温度时，将高聚物熔体注射到型腔 7。然后驱动控制阀将冷却流体从冷却装置 34 通过前面用于加热的相同的通道引入。

这一模具设计的成功很大程度上取决于减少模具用钢的量以及用于成型和冷却型腔壁的冷却流体。显然，要满足这些决定因素需要减小模具镶件的厚度、冷却通道的长度和模具元件间的热传递。在图 13.23 所示设计中，空气隙 20、29 和 38 可以减少大量的热传递，所以改进了热效率和模具的动态性能；在合模板上部和背部使用绝热片（不需要很多）可以减少型腔向定模板的热传递。然而，型腔和模具元件所必需的结构使得相关模具元件较大，其需要先加热后冷却，这严重限制了热的动态响应速率。例如，100kg 的 P20 板加热到 100℃，然后冷却，最少需要 10MJ［2 乘以比热容 500J/（kg・℃）

和质量100kg，再乘以温差100℃］或3kW·h的能量。以1kW·h电能0.10美元计算，每个成型周期用于加热和冷却的能量成本就是0.30美元。因此，除了要求苛刻的成型应用外，脉冲冷却并不常用。

13.7.2　传导加热

对于模具所需要的大量热量和所用到的冷却系统，另一种控制模具壁温度的方法是在模具表面或附近利用传导加热。图13.24所示即为这样一种设计，其提供一个光滑的表面发泡成型高聚物制品的一侧[73]。和每个传统的模具设计一样，该模具由型腔镶件镶件12和型芯镶件10组成，这两部分包含有网络状的冷却水道34和36。薄金属片38包裹着型腔镶件12的腔体表面。在金属片和型腔镶件间有一薄层氧化物绝缘层。薄金属片38有一开口40用作从浇口32到型腔14运输高聚物熔体的通道。连接到金属片38的电缆附件46和48与低电压、高电流电缆50和52相连。每次成型，通一段较短时间的高电流，然后断开开关54，电源56的电流激增，因此用由加热管62形成的旁路来减少开关处产生的电弧。相对于金属片38，加热管62的电阻很大，所以在接通开关54后，实际上主要形成的是通过金属片38的回路。合上开关54后，电源56的大部分电流通过金属片38。

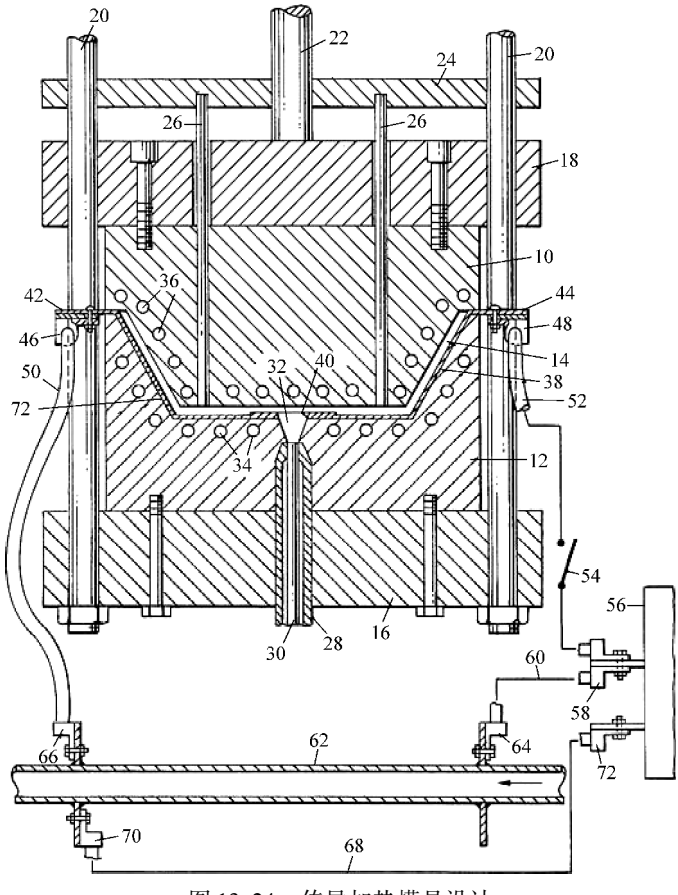


图13.24　传导加热模具设计

即将合上模具时，合上开关 54，一个高电流通过金属片。在这一设计中，金属片（钢板）厚 0.2cm，其长和宽分别是 30cm 和 10cm。钢板电阻率是 30μΩ·cm，电缆 50 和 52 间钢板电阻为 450μΩ。这项设计的专利说明书表明，试验中，通过的电流为 500A 的情况下，0.4s 就可以产生 200℃的高温。对于设定和计算的电流和电阻，如果驱动电压为 0.23V，金属片功耗是 113W。给定加热时间 0.4s，那么每次成型的能耗是 0.013kW·h。相比而言，4.68kg 的钢片需要的最小加热能量是 0.5MJ，或者说是 0.13kW·h。所能提供的和需要的加热能量间存在一个很大的差距。

进一步分析加热所需要的能量，一般典型的注射制品的比热容是 2 000J/(kg·℃)，厚度为 3mm，物料熔融的温度是 240℃，推出时制品的温度是 100℃，成型周期为 30s。在这种情况下，ABS 熔体对模具的传热速率是 28kW/m^2。由于冷却水道布置在模具的两侧，冷却水道的冷却速率约为 1.4W/cm^2。因此，在加热板温度开始显著上升前，30cm×10cm 的加热板需提供比冷却水道带走的能量至少多 420W 的能量。

显然，传导加热要求加热器提供的热能密度超过 250W/cm^2。这样一个加热器，如果布置在型腔表面，可以在 6s 将一个 30cm×10cm×0.2cm 的钢板表面温度升至 200℃。已做过将高功率、薄膜式加热器直接设置在型腔表面的尝试[74]。然而，将传导加热器设置在模具内的努力并没有获得广泛的成功，至少存在下面三个原因。第一，高聚物熔体对加热器作用一个高的循环压力，其将使加热器产生疲劳破坏。第二，合理布置加热器、型腔和冷却水道以满足模具壁温均匀、外形美观、尺寸小，存在一定的困难。第三，加热器位于型腔和冷却水道之间，使得冷却时传热速率低，从而延长了冷却时间。

13.7.3　电磁感应加热

电磁感应加热是另一种在填充模具前对模具壁进行升温的方法。图 13.25 所示就是一种电磁感应加热模具设计，其用于注射成型表面光泽度好、基本无表面缺陷的复合加强改性的热塑性材料[75]。为了降低能量消耗和缩短加热时间，模具表面只有小部分通过高频电磁感应加热。如图 13.25 所示，传统的注射成型机 3 将高聚物熔体运送到由定模部分 4 和动模部分 5 组成的模具。

在合模填充前，高频振荡器 1 产生交变电流，电流通过暂时设置在模具表面或附近的感应线圈（感应器）2。当高频交流电通过感应器 2 时，在感应器周围产生一个交变电磁场，其在金属内产生涡流。模具金属的电阻使涡流在模具表面产生热。图 13.25 所示曲线 A 和 B 为 A 和 B 处由电磁感应加热所引起的模具温度变化曲线；曲线 C 和 D 表明的是，开始 C 和 D 处没有电磁感应加热，但在后面，注射到型腔中的高聚物熔体的热传递使 C 和 D 处的温度升高。

综观前文所讨论的各种模具壁温控制方案，其目的都是寻求一种尽可能快的提升模具表面温度的方法。高频电磁感应加热的加热功率与交流电频率的平方、电流大小的平方和线圈密度的平方成正比，另外还与其他一些因素有关。因此，必须仔细设计感应器以可控的方式局部加热模具表面，避免造成不理想的温度分布。例如，由直径为 5mm 的铜管制作的感应器，其螺距也应是 5mm。而金属模具表面与感应器之间的距离应设定为 1cm。试验显示，400Hz 的振荡频率在模具表面产生的加热功率是 1 000W/cm^2，那

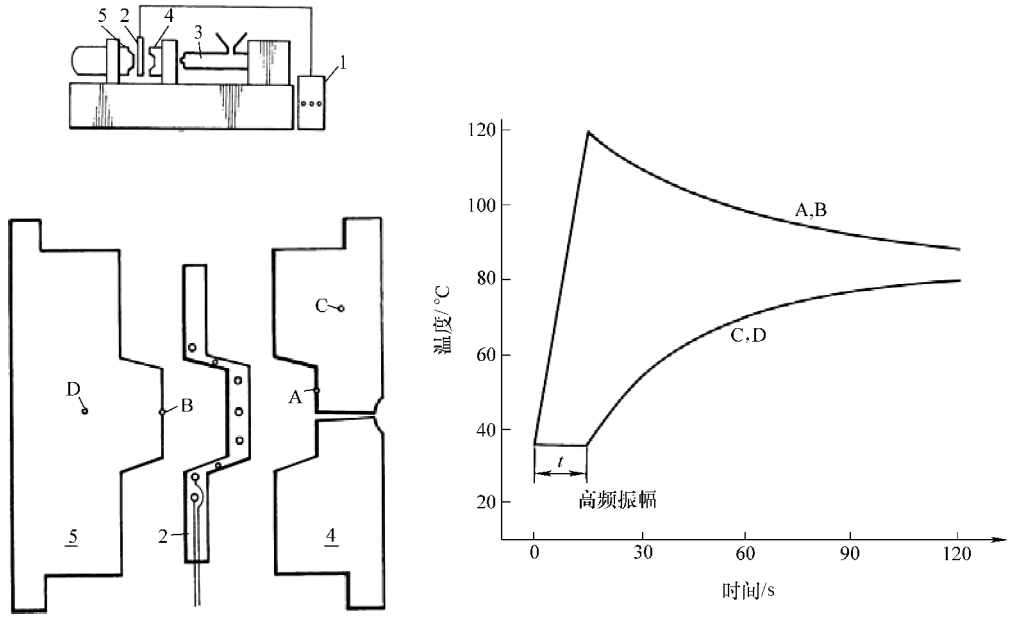


图 13.25　电磁感应加热模具设计

么将模具表面的温度升高 50℃需要的时间是 10s。

与传导加热相比，电磁感应加热提高了加热速率，而且额外增加的模具的复杂性也较小。应用电磁感应加热的主要问题是感应器的设计，特别是感应器的线圈以及它们在模具表面的设置。如果设计不当，加热能力就受到限制。试验[75]表明，加热功率小于 100W/cm^{2}的加热器基本不能提高模具表面的温度，从而最终驱动了过载断路器。另一方面，当加热器输出热功率超过 10 000W/cm^{2}时，模具表面温度因升速太快而难以控制，以致模具表面温度可能分布不均匀，模具表面温差超过 50℃时将会产生光泽度不均一、凹痕等缺陷。

13.7.4　传热管理

对于难以操纵的模具壁温动态控制，提出了一个“被动”的冷却系统设计，“被动”一词是指模具不需要利用任何外部能源来控制模具壁温。图 13.26 所示即为这样一种设计，其主要用于成型光学制品时的模具壁温控制[76]。该模具有两个模板部分 12，它们形成型腔 14。与每个传统模具的设计一样，图中的冷却水道 20 用于冷却高聚物熔体。然而，在两模板 12 与压模装置 31 和 33 之间设置有绝热元件 22。绝热元件 22 由低热导率材料制造，而且最好是耐高温的高聚物，例如聚酰亚胺、聚酰胺亚胺、聚酰胺、聚砜、聚醚砜、聚四氟乙烯、聚醚酮。绝热层一般通过先旋转包覆一层 0.25mm 厚的未固化高聚物、然后固化的方法制作。压模装置 33 一般由镍制造，其以特定的外形来压制成型制品，也使得绝热层在成型过程中保持均匀、光亮的外表面。

成型过程中，设置在压模板 33 后的绝热层 22 减缓了冷却系统对树脂的冷却。因为

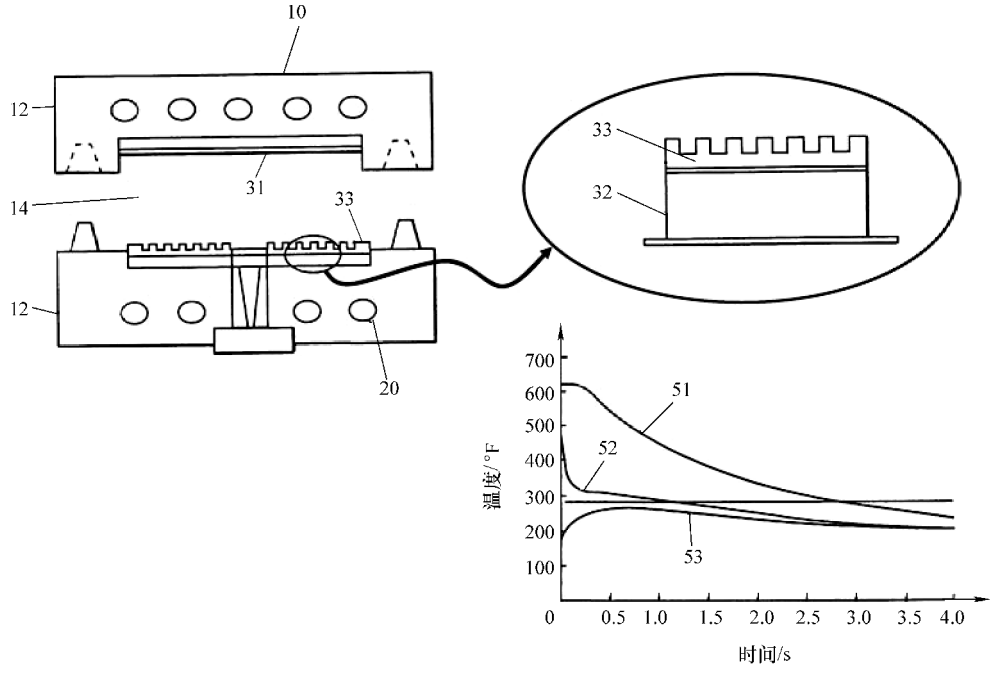


图 13.26　传热管理模具设计

绝热层的存在，压模装置的温度在充模阶段升高并保持一个较高的温度，因此避免了制品表面快速冷却而造成的表面缺陷。压模装置的温度分析：可以通过特定工艺条件、熔体层厚以及物料性能来控制熔接面；单向冷却分析可以解释一些物理现象，也有助于进行设计优化。在所讨论的例子中，可从光盘中心线温度曲线 51 得知将制品冷却到低于高聚物熔体玻璃化温度所需的最短冷却时间。压模装置温度曲线 52 分析：熔接面对光盘表面热应力和形成不良痕迹有一定的影响，并已经过测定。绝热层后面的模具温度曲线 53 说明模具作为热的接收端，其温度保持在一个固定值。

模具设计者和工艺工程师能直观地认识到，附加绝热层将降低熔体向模具的传热速率，因此也将延长冷却时间。为了缓解这一问题，在压模板刚受热时，就可以给冷却水道通以温度更低的冷却流体以提高传热速率。因此，这一设计能提供较为合理的模具壁温控制而不需要额外的能源消耗和控制系统。然而，这种温度控制设计与其他温度动态控制设计相比，存在一些限制。另外，这种模具壁温控制方法可能在复杂三维制品的成型中难以应用。

13.8　模内贴标

注射成型通常能生产经济实用的产品。然而，在许多应用中，注射成型产品需要根据消费者的需要进行美化、详细设计或在制品上贴标。在一些情况下，产品的美化可以

通过后处理成型工艺实现，如热冲压、移印、喷漆、网印等。在另外一些情况下，这些技术并不可行，因为一些高聚物，例如聚丙烯、聚苯乙烯、聚乙烯等本身抗模压、喷墨和喷绘。

为了完成必要的细节设计，一种可行的方法是利用不同类型的高聚物进行双注射成型。然而，双注射成型不能提供所需水平的详细图形或颜色的数量。因此，可以对模具进行设计，在成型中结合印刷标记以获得所需制品。这种模内贴标有几个优点。第一，标记可能是通过网印或胶版印刷生产的，具有多重颜色的图形细节。第二，标记可以通过在印刷表面使用聚丙烯酸酯或聚碳酸酯层状物来提高耐磨性。第三，模内贴标成本中附加的工具成本非常小，只需要一个很小的附加成型工艺，并不需要后处理成型工艺。

13.8.1　静电膜

在这一设计中，贴标方法是在0.15mm厚、与成型物料有相容性的高聚物（如聚丙烯或聚苯乙烯）膜上进行典型的喷绘。当薄膜由软塑料制作时，薄膜可以设置在曲面上。成型过程中，可以用不同的方法固定薄膜，包括粘结法、压缩空气法、真空法和静电法。图13.27所示的模内贴标方法为预先在模内用静电固定膜的位置[77]。在这一设计中，两半模部分17和19形成型腔23。成型前，在膜和模块上利用静电载荷将膜11固定在模具型腔内。通常，通过电极间的高电压电离膜周围的空气使膜带电。膜11的材料与制品25的材料相同，且对着型腔的面有一个印刷区13。

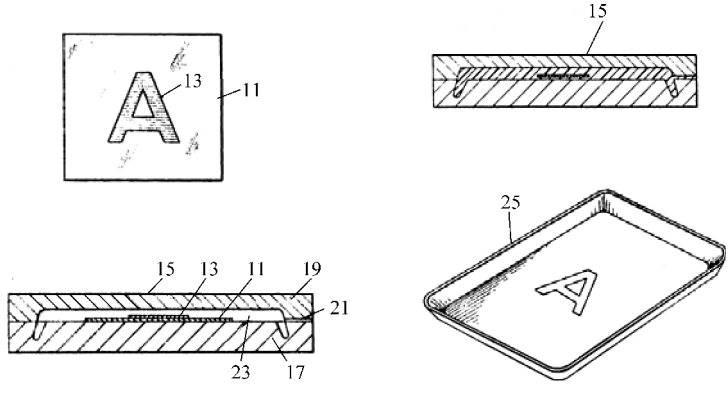


图13.27　静电膜法模内贴标

一旦膜固定于模具内，接下来的成型工艺与一般注射成型一样。高聚物熔体的热量使膜11熔化且与制品25熔合在一起，因此印刷区13呈现出来但看不出膜11的痕迹。尽管印刷区13可能没有与高聚物物料熔合在一起，但这些印刷区可能与周围非印刷区通过熔化粘结在一起。如果有必要，可以施加微小的振动以促进制品与膜的粘结。

下面为保证膜厚和工艺条件的一些说明。模具设计者应该认识到，膜必须能承受热和结构引起的载荷。结构载荷来源于高聚物熔体以一定的速率流过膜产生的剪切应力，与熔体压力大小无关，5.3.1节的分析可以用于评估高聚物性能、制品尺寸和工艺条件对剪切应力的影响。热负荷与高聚物熔体对膜的加热和熔化有关。如果膜太薄，印刷设

计可能因在成型过程中膜完全熔化且流动而损坏。因此，需要理论分析和试验来对膜和工艺进行优化。

13.8.2　牵引膜

静电载荷膜在模内贴标中较常用。然而，通过人工或机械操作将膜设置于模具内存在一个潜在的问题。如果采用人工操作，可能存在的问题是工时长且安全性和可重复性达不到要求。如果使用自动控制装置，将增加工艺成本。如果成型制品的产量较大，可以通过采用在每个成型周期中使用穿过模具的自动牵引印刷膜的模具设计方案来解决上述问题。图 13.28 所示即为这样一个模具设计，其用于生产带扣环的瓶盖[78]。在这一设计中，模具 25 包括上固定板 26、可动型腔板 28 和传统的动模板 30。

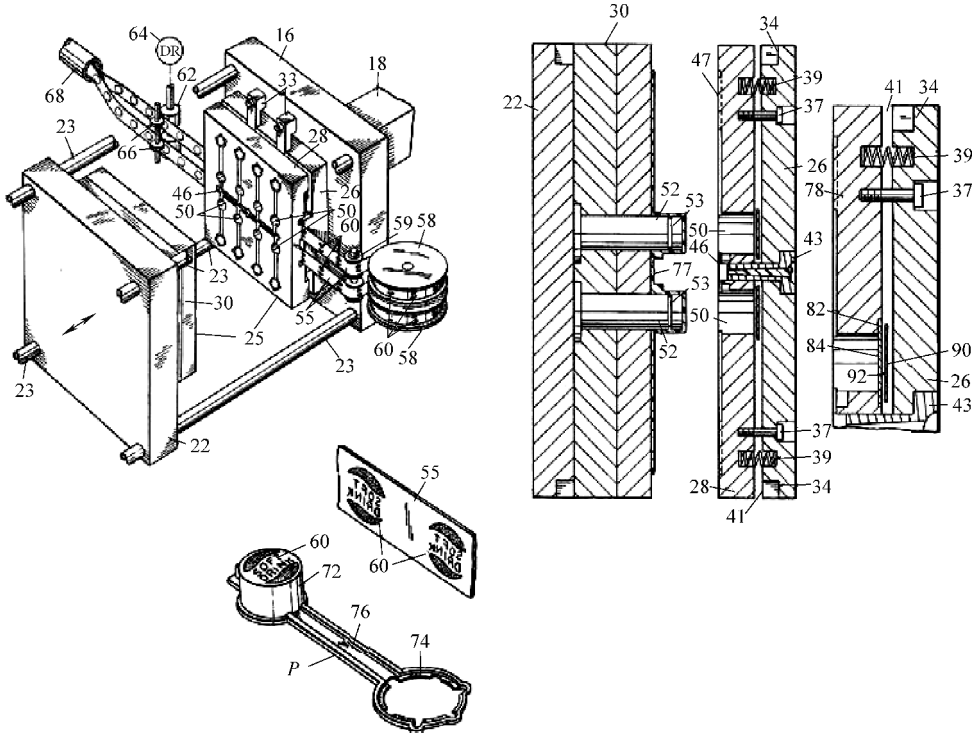


图 13.28　牵引膜法模内贴标

型腔板 28 通过紧固件 37 固定于上固定板 26。然而，上固定板上的沉头孔使得紧固件可以滑动，以至于在开模时可以通过压缩弹簧 39 使型腔板移离上固定板。这样上固定板与型腔板间可以有约 0.5mm 的间隙，使得色带 55 或 90 可以滑移到型腔板与上固定板之间。色带由卷轴 58 提供，绕过导向辊 59，穿过间隙 41，到达型腔 50。

当印刷膜 60 到达合适位置时合模，膜通过在模具型腔板和上固定板之间的色带固定。充模时，印刷设计体从色带转移到随后固化的制品 72 上。开模后，取出制品，用过的色带由驱动电动机 64 和进给辊 62 以及 66 牵引，进入到吸入装置 68，并在此循环利用或处理掉。因此，这种模具设计工作效率较高。

最近，已经研发出一些比较先进的模具设计和工艺设计以适用于较为复杂的模内贴标，其已形成多种设计样式。这些设计有的使用牵引装置连续生产厚印刷片。在这一工序中，每个厚印刷片需要进行热成型以符合复杂型腔表面形状。然后，需要使用一个或多个冲头来冲孔或者修改已成型的印刷片尺寸使其符合型腔形状。最终，将每个完成的贴标设置在与成型制品连在一起的模具内。因此，模内贴标可以用在几乎所有制品（如手机等）上制作几乎所有图案（如花纹、国旗等）。

13.9 推出

目前有许多种推出系统，第11章提供了对大多数常见推出系统类型的分析和设计。除了先前讨论的这些设计方案，许多专用推出系统为成型制品提供较为复杂的外部细节和内部细节设计，具有美观且质优等优点。一些较为常用的推出系统将在下面进行讨论。

13.9.1 分瓣型腔模具

正如11.3.6节和11.3.7节所讨论的，当有一个或多个侧向分型时，常常应用抽芯或滑移型芯块。如果侧向分型时型腔部分过大，或者制品外部需要一个沿开模方向的横向分型面，则经常采用型腔分离的设计。顾名思义，分瓣型腔就是型腔体滑移分开成两块或多块的模具设计，因此在成型中制品推出阶段，型腔壁可以从制品上分离开。

图13.29所示即为一个分瓣型腔成型保龄球瓶的模具设计[79]。模具包括上固定板14、型腔固定板16、支承板12等。分离型腔由两个动型腔组件23和24组成，合模时它们通过型腔固定板16上的圆锥孔21组合在一起。四个细长的斜导柱30定位在上固定板上并伸进两个型腔组件23和24，每个型腔组件由可以沿导轨26滑动的两个导向滑块28定位。

开模时，支承板12从型腔固定板16移开。因斜导柱30固定不动且相对于开模方向倾斜，型腔组件23和24因凸轮作用而分开。最终，在制品66和型腔侧壁44间产生足够的间隙以去除成型制品。

关于这一独特的型腔分离的模具设计，存在一些有意义的问题。第一，在型腔固定板16中有大量的中模。中模的厚度需根据避免型腔侧壁44中产生过大的剪切应力和形变来确定。根据经验，中模厚度约与型腔深度一样，如同12.2.4节的分析。第二，在这一模具设计中，由于组件质量大，移动距离长，成型次数多，磨损可能成为问题。鉴于这一原因，导向滑块应该光滑且必要时易于更换。另外，在支承板12与型腔组件23和24之间应有耐磨板。第三，型芯内部冷却是通过使用带冷却剂入口74和出口76的分散器75来实现的。

分瓣型腔模具已设计较长时间，这一设计因其需与分离型腔设计组合使用而未能单独选择使用。这种设计另一个有意义的特性是，在填充阶段需向前驱动型芯杆50以将注射物料压缩成型。在制品较厚侧壁54固化时，这种驱动需补偿体积的收缩量。因此，模具设计包括支承型芯杆轴肩65的支承座46的设计。如图13.29所示，当制品66向

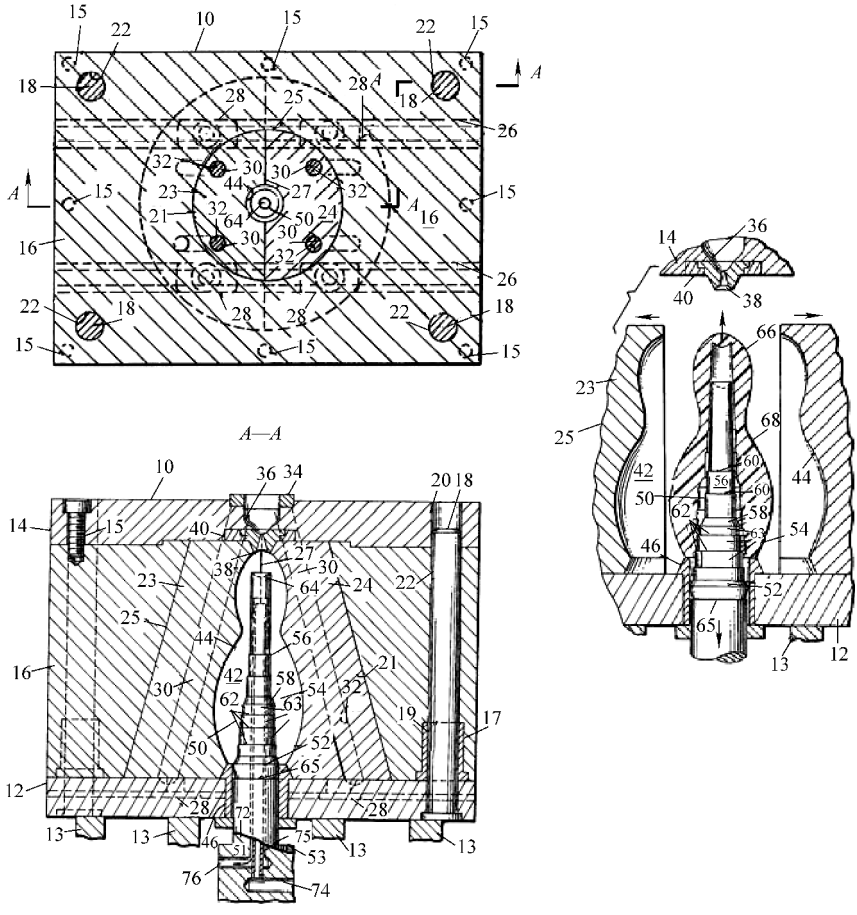


图 13.29　分瓣型腔模具设计

型芯杆 50 收缩时，型芯杆需在开模后缩回以脱离制品。

13.9.2　可拆卸型芯

当设计的制件包括复杂的、侧向分型的外部表面时常采用分瓣型腔模具。当设计的制件内部包括复杂的、侧向分型的表面时常采用可拆卸的型芯。图 13.30 所示是一个使用可拆卸型芯的模具，这个模具用于生产洋娃娃的头部，要求制品的壁厚均匀[80]。型腔（14 和 15 一起）由两个型腔镶件 12 和 13 组成，并且可拆卸的型芯 17 将它们变成中空的。在设计中，可拆卸的型芯由八个部分组成，分别是 18、19、20、21、22、23、24、25。其中的四个部分 18、19、20、21 具有三角形截面，它们安装在四个角，其外轮廓面形成所需要的型芯形状。另外的四个部分 22、23、24、25 具有板状截面，它们分别安装在四个角之间，其外轮廓面形成所需要的型芯形状。芯棒 37 位于型芯的中心位置，其作用是防止可拆卸的型芯在装配的过程中上述八个部分发生径向移动。为了防止可拆卸型芯的轴向位移，上述八个部分都有柄 35，每个柄都带有外螺纹 35a 并和套筒

38 中的内螺纹 39 相啮合。可拆卸型芯的运动是依靠芯棒 37 的螺纹 37b 实现的，螺纹 37b 与套筒 38 中的螺纹通道 41 相互啮合。尤其是在成型之前，芯棒在套筒内旋转充分延伸，直到它的末端（远端）充满上述八个部分的末端以形成固定的型芯 17。然后将带有固定型芯的套筒放置在型腔中，按照常规操作注射成型制品。当制品凝固后，开模取出连同型芯和套筒的成型制品。将芯棒 37 从套筒 38 中拧开，并从型芯 17 的内部除去。因为失去了支承，八个部分可以拆卸并且从成型制品中取出。最后这八个部分、芯棒、套筒重新装配以开始下一个循环过程。

图 13.30 所示的可拆卸型芯模具能够用于成型具有复杂的和侧向分型内部特征的成型制品。但是这个设计的大量时间花费在拆装动型芯上面。为了便于设计和生产可拆卸型芯的模具，已经生产出标准的可拆卸型芯并且可从许多模具和零部件供应商处获得。在典型的设计中，推板推动型芯的八个部分在固定的套筒中滑动，这在推出成型制品的过程中提供了拆卸型芯的凸轮运动。商业上可拆卸型芯的直径普遍为 13～90mm，并且可拆卸尺寸接近于型芯直径的 6%。虽然这些标准组件的可拆卸部分不如图 13.30 中设计得那么多，但这些标准组件支持一些小结构如封闭在制品内部的内螺纹等的全自动成型。

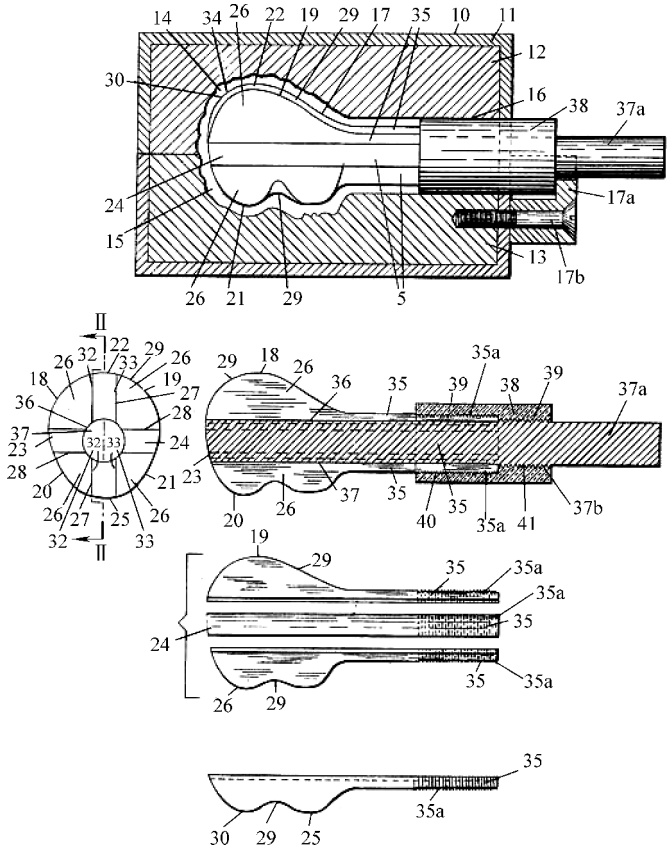


图 13.30　使用可拆卸型芯的模具设计

13.9.3　旋转型芯

当购买装配件时，将可拆卸型芯并入模具设计就相对简单了，其可以成型螺纹、浅凹、窗口和其他内部特征。然而使用可拆卸型芯的一个问题是，在型芯各部分的交界处成型制品内部会形成熔接痕。根据应用的要求，这些熔接痕会阻碍可拆卸型芯的应用。因此，许多模具设计发明了旋转型芯用于内螺纹的成型和脱模。图 13.31 所示的设计是一模 64 腔的模具用于成型螺母[81]。这个模具设计包括型腔 16，它是由型腔镶件 10 和型芯镶件 15 组成的。每个型芯的背面都有一个支承组件 17，其安装在一个从粗螺纹螺杆 19 伸出的轴 18 上。这个螺杆轴向位于后固定板 21 和支承板 23 之间，并且由轴承 20 和 26 径向支承。

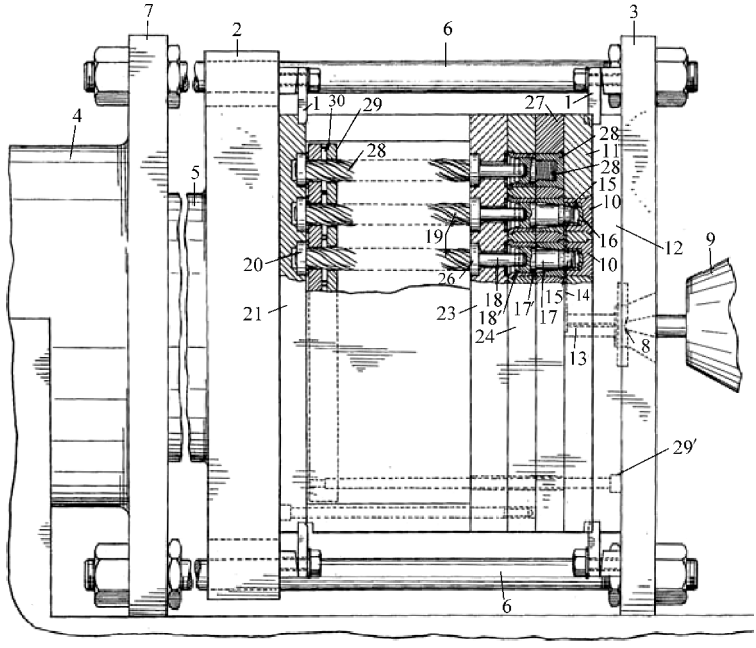


图 13.31　使用粗螺纹旋转型芯的模具设计

从动销 30 安装在驱动板 29 上，并与螺杆 19 的螺纹相啮合。由于这些销不能旋转，因而当驱动驱动板 29 时会带动螺杆 19 旋转，然后带动带螺纹的型芯 15 旋转。粗螺纹螺杆的设计是有必要的，因为当螺距减小的时候，扭矩和磨损会大大增加。因此螺杆的长度取决于螺杆和从动销之间的摩擦以及成型应用过程中旋转的圈数。

图 13.32 所示为旋转型芯的另外一种模具设计[82]。在这个模具设计中，中心齿轮 84 同时驱动多个行星齿轮 86，并依次驱动轴 88。型芯镶件在图 13.32 中并没有显示，其用键通过槽 66 与传动轴联接。存在很多种设计可以使中心齿轮 84 旋转。在这个设计中，一个小齿轮 42 连接到轴 74，轴 74 的一端为锥齿轮 76。这个锥齿轮 76 与另外一个锥齿轮 78 相互啮合，锥齿轮 78 锁定在中心齿轮 84 上。在操作中，模具开模的行程会导致：

- 齿条 44 和小齿轮 42 啮合。
- 小齿轮 42 驱动轴 74 旋转。
- 轴 74 驱动锥齿轮 76 旋转。
- 锥齿轮 76 驱动锥齿轮 78 旋转。
- 锥齿轮 78 驱动中心齿轮 84 旋转。
- 中心齿轮 84 驱动行星齿轮 86 旋转。
- 行星齿轮 86 驱动轴 88 旋转。
- 轴 88 通过槽 66 与键驱动型芯旋转。

这种模具设计与图 13.31 所示的设计相比有许多优点，也有许多缺点。这种模具设计的最大优点就是利用多个齿轮阶段性地将齿条和小齿轮的驱动与型芯的旋转相分离。因此，在开模过程中它可能会延迟或者设计型芯的旋转以避免先前设计中的与粗螺纹螺杆相关的较大的累积高度。这种模具设计的最大缺点就是大量的、复杂的布局以及大量的齿轮传动。并且，使用行星齿轮需要径向布置型腔，因此为了获得大量的型腔需要大型模具。因此对于型腔数目相对较少但需要高扭矩的模具，采用行星齿轮的设计方案是较好的。

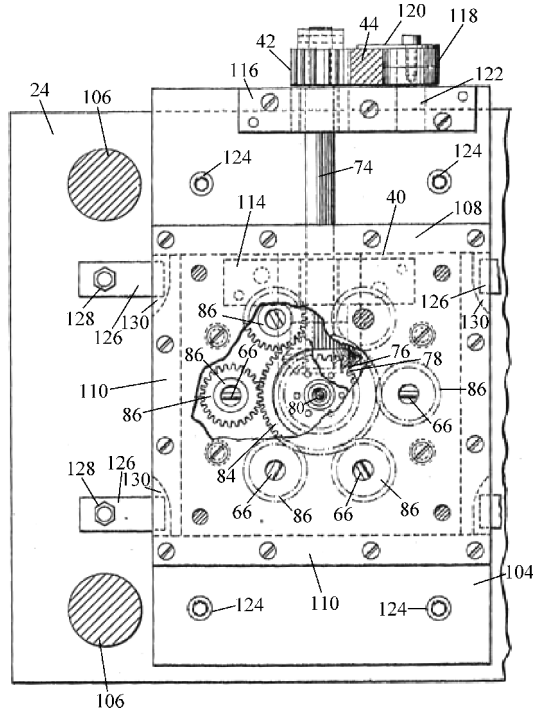


图 13.32 使用行星齿轮啮合旋转型芯的模具设计

无论采用这两种设计方案中的哪一种，模具设计者都要保证制品的几何设计能防止成型制品不随型芯旋转。在某些情况下，流道和浇口可以提供足够的力阻止成型制品的

旋转。然而，在另外一些情况中，这种方法是不够的，因为脱模力随材料特性、工艺条件、表面粗糙度的变化而变化（第 11 章中的分析）。因为这些因素的存在，模具设计过程中会利用凹边和非对称特征防止制品的旋转。

13.9.4　反向推出

在绝大多数的模具中型腔都位于定模板上，型芯都位于动模板上。由于塑料冷却时，成型制品收缩包覆在型芯上，因而在开模的时候成型制品会随型芯留在动模板上。因此，在动模板上会设计支架和推板以便推杆将制品从型芯上推出。但是，传统的设计是有问题的，因为这种脱模方式不能获得光滑、无缺陷的成型制品。推杆推出印痕将会留在制品的型芯边，而浇注系统的熔接痕将会留在制品的型腔边。

为了生产出美观的表面，模具可以设计成反向推出结构，即如图 13.33[83] 所示的一种设计，它包括动模板上的型腔板 68 和定模板 36 上的型芯板 38。通过型芯板 38，浇口 76 将塑料熔体从机器喷嘴 14 注入到型腔 40 和 74 里。因为成型制品趋向于留在型芯上，所以定模板 36 还包括推杆 48 和其他组件，它们工作时和位于两推出导轨 18 之间的推板 30 一起来实现脱模。因为注射成型机的推杆位于机器的动模边，这对于模具的设计是无用的。模具的设计还包括驱动推板运动的液压缸。这种模具设计的结果是，成型制品的整个表面都没有外在瑕疵。

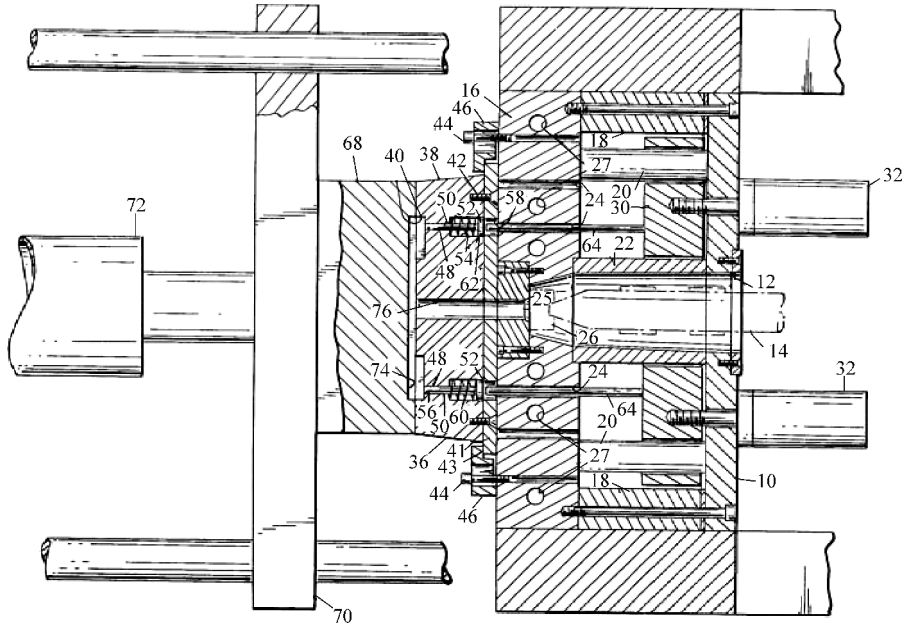


图 13.33　使用反向推出的模具设计

13.10　本章小结

很多技术与模具设计相关，包括：

- 赋予注射制品非常复杂的几何形状。
- 使成型制品包括多种材料。
- 生产具有简单和复杂内在特征的中空制品。
- 使制品美观或带有装饰表面。
- 控制成型制品中熔体的流动。
- 提高成型制品的一致性。
- 通过增加一模多腔来提高成型的生产率。
- 通过减小锁模力来提高成型的生产率。
- 减小注射成型制品时的材料花费。
- 其他目的。

采用先进的模具设计对注射成型过程似乎没有什么限制。然而，对于一些注射成型应用，需要深入考虑的问题不是什么应该做，而是对于特殊应用应该做什么。对于模具设计者而言，如何设计模具取决于其设计必须能够为制模者和最终用户服务。基于以上理由，有关模具设计和相关技术的关键决策应该在所有相关部门之间就费用、收益、风险等达到一致后做出。

附　　录

附录A　塑料性能

表A　塑料性能

塑料	ABS	Acetal	PA6	PA66	PA66－33% GF	PC	PE－LD	PE－HD
商品名	Cycolac	Delrin	Capron	Leona	Leona	Lexan	Lupolen	Alathon
等级	MG47	500	8 202	1 402	14G33	121	1 800H	5 370
提供商	GE	DuPont	BASF	Asahi	Asahi	GE	Basell	Equistar
描述	多用途，注射成型用ABS是一种有较好平衡性的工程塑料	低摩擦，耐磨，高黏度，用作轴衬等工程应用	无冲击性改进，其他性能与PA6一样	未填充PA66，低翘曲，抗老化，成型快	PA66填充33%（体积分数）的玻璃纤维增强，用于制作机动车零部件	中等黏度，具有较好的抗冲击性能	低密度聚乙烯具有低的模量和高的伸长率	高密度聚乙烯有较好的抗冲击性、抗裂性和着色性
大概成本/（美元/kg）	2. 16	2. 65	4. 02	4. 30	5. 92	4. 26	1. 99	1. 72
大概成本/（美元/m^3）	2 011	3 043	3 900	4 149	7 160	4 481	1 490	1 246
模量/MPa	2 280	2 800	970	1 200	4 400	900	110	400
屈服强度/MPa	44	50	36	67	132	62	9	28
屈服应变（%）	2	12	16	35	3	7	15	7
DTUL 0. 45MPa，ASTM D648）/℃	96. 7	160	160	240	250	138	41	72
无流动熔融温度/℃	132	175	216	263	254	143	106	142
最低熔融温度/℃	218	180	230	260	275	280	205	230

（续）

塑料	ABS	Acetal	PA6	PA66	PA66－33% GF	PC	PE－LD	PE－HD
最高熔融温度/℃	260	230	300	300	300	305	245	260
最低冷却温度/℃	49	50	70	40	60	70	20	18
最高冷却温度/℃	71	105	110	80	120	95	60	30
20℃时密度/（kg/m^3）	1 044	1 435	1 153	1 151	1 426	1 192	894	952
熔融时密度/（kg/m^3）	930	1149	971	964	1 210	1 052	750	724
比热容/[J/（kg·℃）]	2 340	2 020	2 630	1 670	3 100	1 260	3 180	2 890
热导率/[W/（m·℃）]	0. 19	0. 23	0. 28	0. 19	0. 31	0. 25	0. 23	0. 33
热扩散率/（m^2/s）	8.73×10^{-8}	9.91×10^{-8}	1.10×10^{-7}	1.18×10^{-7}	8.26×10^{-8}	1.89×10^{-7}	9.64×10^{-8}	1.58×10^{-7}
热膨胀系数/$℃^{-1}$	8.82×10^{-5}	1.00×10^{-4}	7.80×10^{-5}	8.00×10^{-5}	5.60×10^{-5}	6.80×10^{-5}	2.30×10^{-4}	1.50×10^{-4}
最小收缩率（%）	0. 4	1. 4	0. 2	0. 8	0. 3	0. 4	1. 4	1. 2
最大收缩率（%）	0. 8	2. 6	1. 7	1. 6	1. 0	0. 8	3. 0	2. 6
水平收缩率（%）	0. 6	2. 1	0. 9	0. 9	0. 4	0. 6	1. 6	1. 6
垂直收缩率（%）	0. 6	1. 5	0. 9	0. 9	0. 9	0. 6	1. 6	1. 6
最大剪切速率/s^{-1}	50 000	40 000	100 000	60 000	60 000	40 000	40 000	40 000
熔体中心温度/℃	239	205	265	280	288	293	225	245
幂律黏度/$Pa\cdot s^n$	1.71×10^{4}	6.24×10^{3}	1.49×10^{4}	1.51×10^{3}	1.08×10^{4}	4.47×10^{5}	2.06×10^{4}	1.65×10^{4}
幂指数 n	0. 348	0. 538	0. 314	0. 680	0. 434	0. 213	0. 292	0. 378

（续）

塑料	ABS	Acetal	PA6	PA66	PA66－33% GF	PC	PE－LD	PE－HD
WLF：n	0.247	0.122	0.191	0.679	0.400	0.211	0.291	0.360
WLF：τ^*/Pa	9.97×10^{4}	4.43×10^{5}	2.54×10^{5}	3.81	1.19×10^{5}	6.97×10^{5}	2.35×10^{4}	8.85×10^{4}
WLF：D_1（Pa·s）	1.93×10^{13}	1.20×10^{11}	1.43×10^{8}	7.16×10^{19}	1.08×10^{18}	5.06×10^{12}	2.64×10^{19}	3.75×10^{17}
WLF：D_2/K	373.15	263.15	323.15	323.15	323.15	417.15	233.15	153.15
WLF：D_3/（K/Pa）	0	0	0	0	0	0	0	0
WLF：A_1	31.4	24.1	18.025	44.24	43.215	31.41	44.335	38.78
WLF：A_2/K	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6
零剪切速率时黏度，η_0/Pa·s	2 210	745	134	25 600	807	94 400	15 500	1 460
$b_{1,m}$/（m^3/kg）	9.83×10^{-4}	8.49×10^{-4}	1.01×10^{-3}	1.03×10^{-3}	8.12×10^{-4}	8.66×10^{-4}	1.23×10^{-3}	1.27×10^{-3}
$b_{2,m}$/［(m^3/kg·K)］	6.51×10^{-7}	4.21×10^{-7}	5.05×10^{-7}	6.94×10^{-7}	4.14×10^{-7}	5.67×10^{-7}	8.78×10^{-7}	1.03×10^{-6}
$b_{3,m}$/Pa	1.35×10^{8}	1.33×10^{8}	1.78×10^{8}	1.37×10^{8}	1.65×10^{8}	1.69×10^{8}	1.05×10^{8}	9.26×10^{7}
$b_{4,m}$/K^{-1}	4.38×10^{-3}	3.37×10^{-3}	5.09×10^{-3}	3.51×10^{-3}	3.77×10^{-3}	4.23×10^{-3}	4.12×10^{-3}	4.94×10^{-3}
$b_{1,s}$/(m^3/kg)	9.83×10^{-4}	7.33×10^{-4}	9.41×10^{-4}	9.80×10^{-4}	7.58×10^{-4}	8.65×10^{-4}	1.17×10^{-3}	1.08×10^{-3}
$b_{2,s}$/［(m^3/kg·K)］	3.47×10^{-7}	2.41×10^{-7}	3.83×10^{-7}	4.66×10^{-7}	2.49×10^{-7}	2.16×10^{-7}	6.60×10^{-7}	2.08×10^{-7}
$b_{3,s}$/Pa	1.70×10^{8}	3.59×10^{8}	2.47×10^{8}	1.68×10^{8}	2.98×10^{8}	2.58×10^{8}	1.71×10^{8}	3.32×10^{8}
$b_{4,s}K^{-1}$	4.21×10^{-3}	2.75×10^{-3}	3.67×10^{-3}	3.16×10^{-3}	2.57×10^{-3}	3.02×10^{-3}	2.42×10^{-3}	2.46×10^{-6}
b_5/K	370.6	448.15	489.16	535.66	527.15	416.23	379	414.5
b_6/(K/Pa)	2.30×10^{-7}	2.00×10^{-8}	6.05×10^{-8}	6.24×10^{-8}	6.40×10^{-8}	3.34×10^{-7}	2.39×10^{-7}	2.39×10^{-7}
b_7/(m^3/kg)	0	1.16×10^{-4}	6.50×10^{-5}	4.57×10^{-5}	5.41×10^{-5}	0	5.44×10^{-5}	1.87×10^{-4}
b_8/K^{-1}	0	1.24×10^{-1}	5.20×10^{-2}	1.13×10^{-1}	3.32×10^{-2}	0	7.37×10^{-2}	5.16×10^{-2}
b_9/Pa^{-1}	0	4.65×10^{-9}	4.73×10^{-9}	7.96×10^{-9}	4.71×10^{-9}	0	2.28×10^{-8}	1.02×10^{-8}

（续）

塑料	PET	PMMA	PP	PP－30% GF	PS	PS－30% GF	PVC－R	PVC－S
商品名	Eastapak	Plexiglas	Inspire	Nepol	Styron	Questra	Geon	Geon
等级	9921	V052	702	GB303HP	478	WA212	M3 000	C9 000
提供商	Eastman	Atohaas	Dow	Borealis	Dow	Dow	PolyOne	PolyOne
描述	未填充聚酯，用作包装材料	通常用途的丙烯酸类树脂，透光性好和高的热稳定性	非填充PP，具有较好的流动性和抗冲击能力，可用于日用品和机动车零部件	30%（体积分数）长玻璃纤维增强的PP，有较高的强度和抗冲击能力	具有高冲击性能的PS，常用于制作玩具和日用品	间同立构PS，有韧性，耐高温，耐潮湿，耐化学腐蚀	中等流动性的硬质PVC，抗冲击性一般，常用于制作饮用水管件	通常用途，中等光泽度和柔性PVC
大概成本/（美元/kg）	1.99	2.43	1.43	1.97	1.90	2.80	1.54	1.85
大概成本/（美元/m^3）	2 304	2 590	1 120	1 829	1 818	3 086	1 900	1 958
模量/MPa	1 400	2 740	1 740	7 400	2 110	7 600	3 200	570
屈服强度/MPa	55	70	21	150	23	92	51	9
屈服应变（%）	4	2	6	2	1.4	1.2	1.6	350
DTUL（0.45MPa，ASTM D648）/℃	68	98	80	160	87	240	73	55
无流动熔融温度/℃	74	215	176	170	121	248	77	130
最低熔融温度/℃	270	220	200	220	180	290	190	170
最高熔融温度/℃	300	260	240	280	220	330	220	210
最低冷却温度/℃	16	50	20	20	40	50	20	40
最高冷却温度/℃	40	90	50	60	60	80	40	60

（续）

塑料	PET	PMMA	PP	PP－30% GF	PS	PS－30% GF	PVC－R	PVC－S
20℃时密度/（kg/m^3）	1 336	1 186	929	1 127	1 036	1 265	1 350	1 198
熔融时密度/（kg/m^3）	1 160	1 067	781	927	958	1 101	1 230	1 056
比热容/[J/（kg·℃）]	1 980	2 093	2 890	1 969	1 820	2 400	1 630	1 580
热导率/[W/（m·℃）]	0. 23	0. 157	0. 184	0. 13	0. 133	0. 25	0. 185	0. 22
热扩散率/（m^2/s）	1.00×10^{-7}	7.03×10^{-8}	8.15×10^{-8}	7.12×10^{-8}	7.63×10^{-8}	9.46×10^{-8}	9.23×10^{-8}	1.32×10^{-7}
热膨胀系数/℃$^{-1}$	7.50×10^{-5}	7.00×10^{-5}	9.50×10^{-5}	4.40×10^{-5}	9.00×10^{-5}	3.00×10^{-5}	7.50×10^{-5}	2.40×10^{-4}
最小收缩率（%）	0. 5	0. 2	1. 2	0. 4	0. 3	0. 1	0. 2	1. 0
最大收缩率（%）	1. 0	0. 6	2. 2	0. 9	0. 7	1. 1	0. 6	3. 0
水平收缩率（%）	0. 6	0. 4	1. 5	0. 5	0. 5	0. 2	0. 4	1. 7
垂直收缩率（%）	0. 6	0. 4	1. 5	0. 8	0. 5	0. 7	0. 4	1. 7
最大剪切速率/s^{-1}	50 000	40 000	100 000	80 000	40 000	80 000	32 000	32 000
熔体中心温度/℃	285	240	220	250	200	310	205	190
幂律黏度/Pa·s^n	6.989×10^{5}	7.05×10^{4}	5.30×10^{3}	9.52×10^{3}	7.87×10^{4}	1.13×10^{4}	8.32×10^{5}	4.41×10^{4}
幂指数 n	0. 101	0. 237	0. 378	0. 332	0. 346	0. 360	0. 306	0. 291
WLF：n	0. 100	0. 237	0. 377	0. 329	0. 346	0. 358	0. 306	0. 291
WLF：τ^*/Pa	8.46×10^{5}	5.81×10^{4}	3.90×10^{3}	1.69×10^{4}	1.03×10^{4}	1.30×10^{4}	9.20×10^{4}	2.33×10^{4}
WLF：D_1/Pa·s	1.26×10^{16}	3.99×10^{20}	1.99×10^{14}	1.19×10^{15}	1.00×10^{12}	2.20×10^{15}	1.02×10^{19}	2.42×10^{13}
WLF：D_2/K	351	377. 15	263. 15	263. 15	373. 15	373. 15	353. 15	360. 15

（续）

塑料	PET	PMMA	PP	PP－30% GF	PS	PS－30% GF	PVC－R	PVC－S
WLF：D_3/（K/Pa）	0	0	0	0	0	0	0	0
WLF：A_1	39.12	51.858	30.02	33.317	25.29	34.19	49.42	33.79
WLF：A_2/K	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6	51.6
零剪切速率时黏度 η_0/Pa·s	136 000	133 000	9070	3300	3 710 000	9320	1.23×10^{8}	209 000
$b_{1,m}$/（m^3/kg）	7.54×10^{-4}	8.61×10^{-4}	1.24×10^{-3}	1.02×10^{-3}	9.97×10^{-4}	8.78×10^{-4}	7.51×10^{-4}	9.02×10^{-4}
$b_{2,m}$/［m^3/（kg·K）］	5.104×10^{-7}	6.00×10^{-7}	8.72×10^{-7}	7.209×10^{-7}	5.98×10^{-7}	4.98×10^{-7}	4.95×10^{-7}	7.72×10^{-7}
$b_{3,m}$/Pa	2.46×10^{8}	2.07×10^{8}	8.05×10^{7}	8.69×10^{7}	1.56×10^{8}	7.29×10^{7}	2.19×10^{8}	1.15×10^{8}
$b_{4,m}$/K^{-1}	3.80×10^{-3}	5.45×10^{-3}	4.93×10^{-3}	5.45×10^{-3}	4.58×10^{-3}	1.94×10^{-3}	5.05×10^{-3}	5.36×10^{-3}
$b_{1,s}$/（m^3/kg）	7.53×10^{-4}	8.62×10^{-4}	1.17×10^{-3}	9.33×10^{-4}	9.94×10^{-4}	8.17×10^{-4}	7.51×10^{-4}	9.01×10^{-4}
$b_{2,s}$/［m^3/（kg·K）］	1.00×10^{-7}	1.00×10^{-7}	6.14×10^{-7}	3.10×10^{-7}	2.96×10^{-7}	1.18×10^{-7}	2.32×10^{-7}	6.28×10^{-7}
$b_{3,s}$/Pa	3.77×10^{8}	2.77×10^{8}	1.10×10^{8}	1.50×10^{8}	1.92×10^{8}	2.09×10^{8}	2.67×10^{8}	1.15×10^{8}
$b_{4,s}$/K^{-1}	5.87×10^{-4}	4.23×10^{-3}	5.12×10^{-3}	5.93×10^{-3}	4.96×10^{-3}	1.00×10^{-4}	4.96×10^{-3}	5.03×10^{-3}
b_5/K	346.88	386.15	449.15	443.15	394.15	521	350.15	403.15
b_6/（K/Pa）	1.75×10^{-7}	2.00×10^{-7}	6.25×10^{-8}	6.90×10^{-8}	8.10×10^{-8}	2.90×10^{-7}	1.33×10^{-7}	6.56×10^{-8}
b_7/（m^3/kg）	0	0	7.44×10^{-5}	8.15×10^{-5}	0	6.14×10^{-5}	0	0
b_8/K^{-1}	0	0	1.02×10^{-1}	1.42×10^{-1}	0	1.90×10^{-2}	0	0
b_9/Pa^{-1}	0	0	8.67×10^{-9}	1.18×10^{-8}	0	1.22×10^{-8}	0	0

注：数据来源为 Moldflow（Walthan，MA），经允许使用。

附录 B　模具材料性能

B1　非铁金属

表 B.1　非铁金属性能

模具材料	铝合金 Al 7075 – T6	铝合金 Al QC – 7	铜 Cu 940
描述	飞行器用铝合金，具有较高的强度和耐蚀性	模具用铝合金，具有较高的强度、硬度和良好的热传导性	无铍铜合金，具有高强度和热传导性
成本/(美元/kg)	34.9	29.8	43.2
成本/(美元/m^3)	98 000	83 400	375 400
极限应力/MPa	565	579	689
模量/MPa	71 000	72 400	120 000
屈服强度/MPa	421	545	517
疲劳极限/MPa	149	166	290
布氏硬度	150	167	210
每齿进给量/mm	0.076 2	0.076 2	0.076 2
切削速度/(m/h)	23 600	23 600	3 600
体积切削速率/(m^3/h)	0.009 1	0.009 1	0.001 4
面积切削速率/(m^2/h)	0.225	0.225	0.034
热膨胀系数/℃$^{-1}$	24	24	18
热导率/［W/(m·℃)］	130	142	259
比热容/［J/(kg·℃)］	960	864	506
密度/(kg/m^3)	2 810	2 800	8 690
热扩散率/(m^2/s)	4.82×10^{-5}	5.87×10^{-5}	5.89×10^{-5}

B2　常用模具钢

表 B.2　常用模具钢性能

模具材料	1045	4140	P20
描述	高强度碳素钢，低成本但耐蚀性和耐磨性较差	铬合金钢，有较好的疲劳特性、耐磨性和抗冲击性能	常用模具钢，具有较好的疲劳特性、耐磨性和抗冲击性能
成本/(美元/kg)	7.9	24.0	15.1
成本/(美元/m^3)	62 300	188 400	118 200
极限应力/MPa	752	778	965
模量/MPa	207 000	200 000	205 000
屈服强度/MPa	647	669	830
疲劳极限/MPa	291	412	456
布氏硬度	225	259	300

（续）

模具材料	1045	4140	P20
每齿进给量/mm	0.076 2	0.050 8	0.050 8
切削速率/(m/h)	5 600	4 700	3 800
体积切削速率/(m^3/h)	0.002 1	0.001 2	0.001
面积切削速率/(m^2/h)	0.053	0.03	0.024
热膨胀系数/℃$^{-1}$	12.2	12.2	12.8
热导率/［W/(m·℃)］	49.8	42.7	32
比热容［J/(kg·℃)］	515	523	500
密度/(kg/m^3)	7 850	7 850	7 820
热扩散率/(m^2/s)	1.23×10^{-5}	1.04×10^{-5}	8.18×10^{-6}

B3 其他模具钢

表 B.3 其他模具钢性能

模具材料	A6	D2	H13	S7	SS420
描述	通过热处理提高硬度，且具有较好的耐磨性和疲劳寿命	高碳、铬合金钢，具有较好的耐磨性	高合金硬质钢，具有极好的耐高温性和耐磨性	有极好的韧性和较高的强度，但耐磨性较差	有极好的抛性光和耐蚀性，硬度高
成本/(美元/kg)	40.2	21.4	32.2	19.0	29.7
成本/(美元/m^3)	322 600	164 000	251 000	148 400	231 400
极限应力/MPa	2 380	2 200	1 990	1 620	655
模量/MPa	203 000	210 000	210 000	207 000	207 000
屈服强度/MPa)	2 100	1 929	1 650	1 380	345
疲劳极限/MPa	834	755	760	528	190
布氏硬度	650	685	528	369	195
每齿进给量/mm	0.050 8	0.050 8	0.050 8	0.050 8	0.050 8
切削速率/(m/h)	2 900	2 700	700	3 900	5 000
体积切削速率/(m^3/h)	0.000 7	0.000 7	0.000 2	0.001	0.001 3
面积切削速率/(m^2/h)	0.018	0.017	0.004	0.025	0.032
热膨胀系数/℃$^{-1}$	11.8	11.8	11.5	12.1	10.8
热导率/［W/(m·℃)］	27	21	24.3	29	24.9
比热容/[J/(kg·℃)]	460	460	460	460	460
密度/(kg/m^3)	8 030	7 670	7 800	7 810	7 800
热扩散率/(m^2/s)	7.31×10^{-6}	5.95×10^{-6}	6.77×10^{-6}	8.07×10^{-6}	6.94×10^{-6}

B4　注释

用以下方法和假设提供上述模具材料数据：

- 成本数据由 100in³ 长方体的初级商品价格得到。
- 疲劳极限由经验 $S-N$ 曲线在 N 为 1 000 000 时、安全因子为 1.0 时分析得到。
- 体积切削速率是假设一个碳化的、有两凹槽、直径 3/4in 的立铣刀，切削深度为 0.125in 来进行加工得到的。面积切削速率是假设一个碳化的、有四凹槽、直径 1/4in 的立铣刀，进给速度为名义进给速度的一半来进行加工得到的。
- 热性能为室温与 200℃时的平均值，如果 200℃时的数据难以得到，就采用室温时的计算值。

附录 C　冷却剂性能

表 C　冷却剂性能

冷却剂材料	水	乙二醇	油
分子式	100% H_2O	100% $C_2H_6O_2$	$(CH_4)_n$
描述	生产用水，可能有腐蚀性的金属离子	未稀释的乙二醇，有防腐蚀功能	ISO 中等级为 32 的油，黏度小，适合于循环系统
成本/(美元/L)	0.0	3.2	1.9
最低使用温度/℃	1	−56	32
最高使用温度/℃	100	134	288
密度/(kg/m³)	1 000	800	900
比热容［J/(kg·℃)］	4 187	2 261	1 842
热导率/［W/(m·℃)］	0.6	0.18	0.16
热扩散率/(m²/s)	1.43×10^{-7}	9.95×10^{-8}	9.65×10^{-8}
黏度（50℃)/Pa·s	0.001 0	4.8	23.5
黏度（100℃）/Pa·s	0.000 2	3.4	4.6

附录 D　劳动力统计数据

D1　美国劳动力价格

模具设计、模具制造、成型等相关各种职业的平均工资列于表 D.1。这些数据来自美国劳工部，为劳工统计署 2005 年 11 月统计的全国数据。这些数据不包括福利成本、间接成本和利润。为了真实估计小时变化速率，下面的工资都要乘以一个因子 3。

表 D.1 美国工资数据

职位	平均工资/美元
机械工程师	31.88
模具和机头制造工	23.94
精密机械装配工	20.65
机械安装修理工	19.93
模具和机头制造学徒	17.92
车床设置操作工	17.41
数控铣床操作工	16.82
铣床操作工	16.14
车床操作工	15.88
钻孔工	14.21
机械安装修理学徒	13.96
抛磨工	13.52
成型机操作工	13.41

D2 国际劳动力价格

不同国家和地区的平均生产成本列于表 D.2。所列的平均报酬单位为美元，它是根据当地货币按当时汇率换算得到的。数据来源为美国劳工部统计数据库中 2005 年 11 月的统计数据。用表 D.1 中各职业劳动力价格除以国际平均生产价格得到的比例来评估各职业劳动力价格的国际化程度。

表 D.2 国际平均生产成本数据

	平均报酬/美元	汇率	平均报酬/当地货币
美洲			
美国	23.17	1	23.17
巴西	3.03	2.926	8.87
加拿大	21.42	1.302	27.89
墨西哥	2.50	11.29	28.22
亚洲和大洋洲			
澳大利亚	23.09	1.358	31.35
中国香港	5.51	7.789	42.9
以色列	12.18	4.482	54.6
日本	21.90	108.2	2 370
韩国	11.52	1 145	13 190
新西兰	12.89	1.505	19.4
新加坡	7.45	1.69	12.59
中国台湾	5.97	33.37	199.1

（续）

	平均报酬/美元	汇率	平均报酬/当地货币
欧洲			
奥地利	28. 30	0. 804	22. 75
比利时	29. 99	0. 804	24. 11
捷克	5. 43	25. 7	139. 5
丹麦	33. 75	5. 989	202. 1
芬兰	30. 67	0. 804	24. 66
法国	23. 89	0. 804	19. 21
德国	32. 52	0. 804	26. 15
匈牙利	5. 72	202. 7	1160
爱尔兰	21. 94	0. 804	17. 64
意大利	20. 47	0. 804	16. 46
卢森堡	26. 57	0. 804	21. 36
荷兰	30. 76	0. 804	24. 73
挪威	34. 64	6. 74	233. 5
葡萄牙	7. 03	0. 804	5. 65
西班牙	17. 10	0. 804	13. 75
瑞典	28. 42	7. 348	208. 8
瑞士	30. 26	1. 243	37. 61
英国	24. 71	0. 546	13. 49

各国和地区的货币单位如下：美国，美元；巴西，雷亚尔；加拿大，加拿大元；墨西哥，比索；澳大利亚，澳元；中国香港，港币；以色列，新谢克尔；日本，日元；韩国，韩元；新西兰，新西兰元；新加坡，新加坡元；斯里兰卡，卢比；中国台湾，台币；奥地利，欧元；比利时，欧元；捷克，捷克克朗；丹麦，丹麦克朗；芬兰，欧元；法国，欧元；德国，欧元；希腊，欧元；匈牙利，福林；爱尔兰，欧元；意大利，欧元；卢森堡，欧元；荷兰，欧元；挪威，挪威克朗；葡萄牙，欧元；西班牙，欧元；瑞典，瑞典克朗；瑞士，瑞士法郎；英国，英镑。

D3　国际生产成本趋势

平均生产成本与美国生产成本比较的历史发展趋势列于表 D. 3。数据来源为美国劳工部统计数据库中 2005 年 11 月的统计数据。

表 D.3 生产成本历史发展趋势

国家和地区	年份									
	1975	1980	1985	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004
美洲										
美国	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
巴西	—	—	—	—	—	18	14	12	12	13
加拿大	99	92	88	110	96	84	79	78	87	92
墨西哥	24	23	12	11	9	11	12	12	11	11
亚洲和大洋洲										
澳大利亚	91	88	64	88	89	73	65	72	89	100
中国香港	12	16	14	22	28	28	28	26	25	24
以色列	33	35	29	52	55	58	60	52	52	53
日本	48	57	49	84	137	112	94	87	91	95
韩国	5	10	10	25	42	42	37	41	45	50
新西兰	50	53	34	54	57	40	37	40	50	56
新加坡	14	16	20	25	44	37	34	31	32	32
斯里兰卡	5	2	2	2	3	2	2	2	2	—
中国台湾	6	10	12	26	34	131	29	26	26	26
欧洲										
奥地利	73	92	60	121	147	97	93	97	114	122
比利时	94	122	65	120	149	102	96	102	119	129
捷克	—	—	—	—	15	14	15	18	21	23
丹麦	101	112	64	124	147	111	107	113	135	146
芬兰	75	86	65	143	141	99	96	102	122	132
法国	73	92	59	104	112	78	76	80	95	103
前联邦德国	102	126	74	146	182	120	114	118	139	147
德国	—	—	—	—	175	115	109	113	133	140
希腊	27	39	29	46	53	—	—	—	—	—
匈牙利	—	—	—	—	16	14	15	18	22	25
爱尔兰	50	63	47	79	80	65	66	71	86	95
意大利	75	84	60	116	91	70	66	69	81	88
卢森堡	101	120	59	108	136	89	84	87	104	115
荷兰	107	125	69	121	140	98	96	103	123	133
挪威	112	123	82	147	144	115	113	128	142	150
葡萄牙	25	21	12	24	30	23	22	24	28	30
西班牙	41	61	36	76	74	54	52	56	67	74
瑞典	116	129	76	140	126	102	89	95	113	123
瑞士	98	114	75	139	168	107	105	111	125	131
英国	54	78	49	85	80	85	81	85	95	107

附录E　单位换算

本书采用以下单位。

- 温度：摄氏度，℃。
- 长度：米，m。
- 质量：千克，kg。
- 力：牛顿，N。
- 压力：帕斯卡，Pa。
- 流速：立方米每秒，m^3/s。
- 黏度：帕斯卡秒，Pa·s。
- 能量：焦耳，J。

下面将提供由这些单位换算成其他常用单位换算关系。将摄氏度换算成华氏度时，将温度乘以1.8再加上32，即

$$T(°F) = 1.8T(℃) + 32 \tag{E.1}$$

$$T(K) = T(℃) + 273.1$$

E1　长度换算

表E.1　长度换算因子

原单位	换算后单位	换算因子
米，m	毫米，mm	1 000
米，m	厘米，cm	100
米，m	微米，μm	1 000 000
米，m	英寸，in	39.37
米，m	英尺，ft	3.281

E2　质量换算

表E.2　质量换算因子

原单位	换算后单位	换算因子
千克，kg	克，g	1 000
千克，kg	镑，lb	2.205
千克，kg	盎司，oz	35.27
千克，kg	吨，t	0.001
千克，kg	美吨，t	0.0011023
千克，kg	英吨，t	0.000 984 2

E3　压力换算

表 E.3　压力换算因子

原单位	换算后单位	换算因子
兆帕，MPa	达因/平方厘米，dyn/cm^2	10 000 000
兆帕，MPa	帕斯卡，Pa	1 000 000
兆帕，MPa	千帕，kPa	1 000
兆帕，MPa	磅/平方英寸，lb/in^2	145.04
兆帕，MPa	巴，bar	10
兆帕，MPa	标准大气压，atm	9.86

E4　流速换算

表 E.4　流速换算因子

原单位	换算后单位	换算因子
立方米/秒，m^3/s	立方厘米/秒，cm^3/s	1 000 000
立方米/秒，m^3/s	升/分钟，L/min	60 000
立方米/秒，m^3/s	加仑/分钟，gal/min	15840
立方米/秒，m^3/s	加仑/小时，gal/h	950 400

E5　黏度换算

表 E.5　黏度换算因子

原单位	换算后单位	换算因子
帕斯卡秒，Pa·s	泊，P	10
帕斯卡秒，Pa·s	厘泊，cP	1 000
帕斯卡秒，Pa·s	克/厘米秒，g/(cm·s)	10

E6　能量换算

表 E.6　能量换算因子

原单位	换算后单位	换算因子
焦耳，J	瓦特秒，W·s	1
焦耳，J	牛顿米，N·m	1
焦耳，J	英尺磅力，ft·lbf	0.7376
焦耳，J	英热单位，Btu	0.000 948 452
焦耳，J	千瓦小时，kW·h	0.000 000 278
焦耳，J	制冷的吨小时，t·h	0.000 000 079

附录 F　高级推导——熔化速率推导

下面通过分析熔体向模具散热与熔体内部剪切生热的平衡来推导熔化速率。如果供热速率保持一定，则填充的高聚物熔体应保持一个均一的熔体温度。

假设为幂律流体。一维、稳定剪切生热热方程为

$$\frac{\mathrm{d}^2T}{\mathrm{d}z^2}+\frac{q(z)}{\kappa}=0$$

式中，κ 是热导率。

熔体内部的剪切生热 $q(z)$ 为

$$q(z)=\eta[\dot{\gamma}(z)]\dot{\gamma}(z)^2$$

管中幂律流体厚度为 H，剪切速率关于厚度的函数关系式为

$$\dot{\gamma}(z)=\frac{4(1+\frac{1}{n})\bar{v}z}{H^2}$$

将上式代入黏度公式，并将黏度和剪切速率代入剪切热公式中，得剪切热关于厚度的函数关系式为

$$q(z)=k\left[\frac{4(1+\frac{1}{n})\bar{v}z}{H^2}\right]^{3-n}=k\left[\frac{4(1+\frac{1}{n})\bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}z^{3-n}$$

式中，k，n 是幂律模型中的系数。

将上述剪切热代入能量方程并进行一次积分得

$$\frac{\mathrm{d}T(z)}{\mathrm{d}z}=-\frac{k}{\kappa}\left[\frac{4(1+\frac{1}{n})\bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}\frac{z^{4-n}}{(4-n)}+C_1$$

式中，C_1 是积分常数。为了确定这一常数，假设沿厚度方向温度分布关于中心线对称。因此，C_1 为

$$\frac{\mathrm{d}T(z=0)}{\mathrm{d}z}=0=-\frac{k}{\kappa}\left[\frac{4(1+\frac{1}{n})\bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}\frac{0^{4-n}}{(4-n)}+C_1\Rightarrow C_1=0$$

进一步积分得

$$T(z)=-\frac{k}{\kappa}\left[\frac{4(1+\frac{1}{n})\bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}\frac{z^{5-n}}{(4-n)(5-n)}+C_2$$

为了确定 C_2，假设模具壁温度为常数。所以，C_2 为

$$C_2=T_{\mathrm{wall}}+\frac{k}{\kappa}\left[\frac{4\ (1+\frac{1}{n})\ \bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}\frac{(0.5H)^{5-n}}{(4-n)\ (5-n)}$$

因此，沿厚度方向温度分布为

$$T(z)=T_{\mathrm{wall}}+\frac{k}{\kappa}\left[\frac{4(1+\frac{1}{n})\bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}\frac{(0.5H)^{5-n}-z^{5-n}}{(4-n)(5-n)}$$

选择线性熔融速率是为了使填充时大部分熔体温度等于初始熔体温度。可以通过从中心线到模具壁积分熔体温度曲线再除以熔体厚度的一半来计算熔体平均温度，即

$$\bar{T}=\frac{2T_{\text{wall}}z}{H}+\frac{2k}{\kappa H}\left[\frac{4\ (1+\frac{1}{n})\ \bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}\left[\frac{(0.5H)^{5-n}z}{(4-n)\ (5-n)}-\frac{z^{6-n}}{(4-n)\ (5-n)\ (6-n)}\right]_0^{\frac{H}{2}}$$

计算时其被积函数为

$$\bar{T}=T_{\text{wall}}+\frac{k}{\kappa H}\left[\frac{4\ (1+\frac{1}{n})\ \bar{v}}{H^2}\right]^{3-n}\left[\frac{H^{6-n}}{2^{5-n}\ (4-n)\ (6-n)}\right]$$

设定平均温度等于熔体温度，线性熔融速率的求解为

$$\bar{v}=\left[\frac{(T_{\text{melt}}-T_{\text{wall}})\ \kappa 2^{5-n}\ (4-n)\ (6-n)}{kH^{5-n}}\right]^{\frac{1}{3-n}}\frac{H^2}{4\ (1+\frac{1}{n})}$$

对于牛顿流体，$n=1$，则线性熔融速率简化为

$$\bar{v}=\sqrt{\frac{5\ (T_{\text{melt}}-T_{\text{wall}})\ \kappa}{3\mu}}$$

进一步通过量纲来检验结果。对于牛顿流体有

$$\bar{v}=\left(\frac{(\ [℃]\ )\ \left[\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot℃}\right]}{[\text{Pa}\cdot\text{s}]}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\frac{\left[\frac{\text{W}}{\text{m}}\right]}{[\text{Pa}\cdot\text{s}]}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\frac{\frac{\text{N}\cdot\text{m}}{\text{s}\cdot\text{m}}}{\left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\cdot\text{s}\right]}\right)^{\frac{1}{2}}=\left(\left[\frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}\right]\right)^{\frac{1}{2}}=\left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$$

术　语

模具工程涉及许多的分析，所以制定了这样一些使用广泛的术语。如图 0.1 所示，L、W 和 H 分别代表模具的长、宽和高。

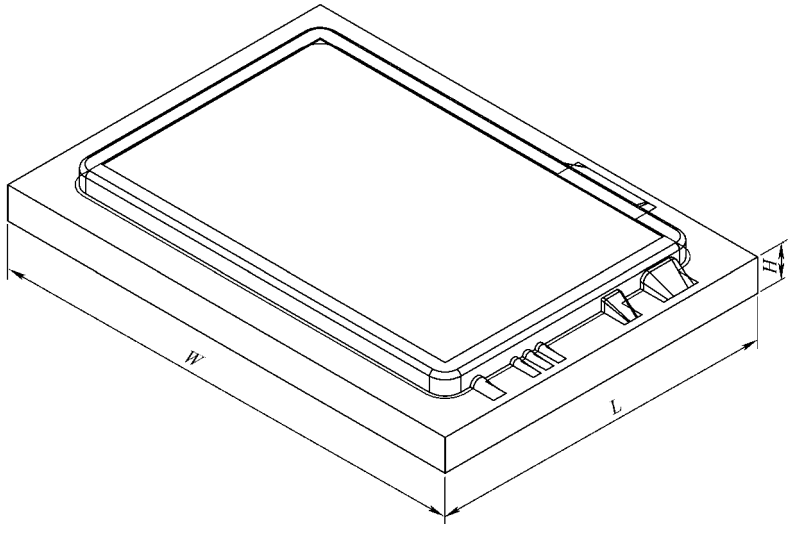


图 0.1　长、宽和高的命名

变量符号通常约定俗成（比如，T 表示温度，C 表示成本，p 表示压力等）。R 指与速率相关的常数（与时间相关），κ 指货币常数（与成本相关）。为了读起来清晰，书中大部分的标记都是缩写。变量符号及其单位如下。

变量	含义（单位）
β	压缩系数（MPa^{-1}）
δ	变形量（m）
$\delta_{bending}$	弯曲变形量（m）
$\delta_{compression}$	压缩变形量（m）
δ_{total}	弯压变形量（m）
ε	应变（m/m）
$\varepsilon_{plastic}$	塑料失效应变（%）
$\dot{\gamma}$	剪切速率（s^{-1}）
$\dot{\gamma}_{max}$	塑料成型熔体许用最大剪切速率（s^{-1}）
η	黏度（Pa·s）
κ	热导率［W/(m·℃)］
$\kappa_{plastic}$	塑料的热导率［W/(m·℃)］
κ_{cavity}	每千克型芯和型腔镶件材料的价格（美元/kg）
κ_{mold}	每千克模具金属的成本（美元/kg）
$\kappa_{plastic}$	每千克塑料的成本（美元/kg）
λ	极限偏差（m）
μ	牛顿模型的表观黏度（Pa·s）
μ_{static}	静摩擦因数
ρ	密度（kg/m^3）
ρ_{cavity}	型芯和型腔镶件材料的密度（kg/m^3）
$\rho_{plastic}$	塑料密度（kg/m^3）
ϕ	脱模斜度（°）
θ	脱模斜度（°）
$\sigma_{buckling}$	圆柱弯曲应力（MPa）
σ_{cyclic}	施加的交变应力（MPa）
$\sigma_{endurance}$	疲劳极限（MPa）
σ_{hoop}	环向应力（MPa）
σ_{limit}	极限应力（MPa）
σ_{yield}	屈服强度（MPa）
τ	剪切应力（Pa）
ν	比体积（m^3/kg）
$\Omega_{ejectors}$	推出区域周长（m）
a	热扩散率（m^2/s）

$A_{\text{cavity_ projected}}$	型腔投影面积（m^2）
$A_{\text{compression}}$	压缩应力的作用面积（m^2）
A_{eff}	力的有效作用面积（m^2）
A_{ejectors}	所有推杆的总推出面积（m^2）
A_{part}	成型制品的总表面积（m^2）
A_{shear}	剪切应力的作用面积（m^2）
C	标准配合的公差系数（$m^{2/3}$）
$C_{\text{auxiliaries}}$	辅助设备总成本（美元）
C_{cavities}	型腔总成本（美元）
$C_{\text{cavity_ finishing}}$	型腔抛光成本（美元）
$C_{\text{cavity_ machining}}$	型腔加工成本（美元）
$C_{\text{cavity_ material}}$	型腔材料成本（美元）
C_{mold}	模具的总成本（美元）
$C_{\text{mold/part}}$	单件制品的模具分摊成本与维护费用（美元）
$C_{\text{mold_ base}}$	模架或模具改装的总成本（美元）
$C_{\text{mold_ customization}}$	定制模架的总成本（美元）
$C_{\text{mold_ steel}}$	初始模架或模具用钢成本（美元）
C_{part}	单件制品的总成本（美元）
$C_{\text{material/part}}$	单件制品的材料成本（美元）
$C_{\text{process/part}}$	单件制品的加工成本（美元）
CP_{plastic}	塑料的比热容［J/（kg·℃）］
CTE	热膨胀系数（$℃^{-1}$）
$CVTE$	体膨胀系数（$℃^{-1}$）
D	直径（m）
$D_{\text{hydraulic}}$	流道部分液体直径（m）
D_{pin}	推杆直径（m）
E	弹性模量（GPa）
f	安全因子
$f_{\text{cavity_ complexity}}$	型腔形状复杂性因子
$f_{\text{cavity_ discount}}$	生产多套型芯和型腔镶件的折扣因子
$f_{\text{cycle_ efficiency}}$	注射成型机循环效率因子
$f_{\text{efficiency}}$	机加工效率因子
$f_{\text{feed_ waste}}$	成型过程中浇注系统的材料浪费因子
$f^{i}_{\text{cavity_ customizing}}$	定制一组型芯和型腔镶件的因子
$f^{i}_{\text{finishing}}$	在成型部件表面区域以 i 方法完成的百分比
$f^{i}_{\text{mold_ customizing}}$	定制模架因子

f_{machine}	操作不同注射成型机及辅助设备的成本因子
$f_{\text{machining}}$	标准铣削工艺过程中平均材料去除率因子
$f_{\text{maintenance}}$	模具终身维护因子
f_{wear}	模具磨损维修保养因子
f_{yield}	产品合格率
F	力（N）
F_{bucking}	圆柱弯曲临界载荷（N）
F_{clamp}	锁模力（t）
F_{eject}	推出力（N）
$F_{\text{insertion}}$	过盈配合的插入力（N）
F_{tensile}	内六角圆柱头螺钉的许用拉力（N）
h	型腔公称壁厚（m）
h_{∞}	表面传热系数［W/(m^2 · ℃)］
H_{cavity}	型腔镶件的高度（m）
H_{core}	型芯的高度（m）
H_{inserts}	型芯和型腔镶件的组合高度（m）
H_{line}	冷却通道中心线到型腔表面的高度（m）
H_{mold}	模具高度（m）
H_{part}	制品的最大高度（m）
I	惯性矩（m^4）
K	应力集中系数
k，n	幂律模型的参考黏度和幂指数（Pa^n，—）
L_{inserts}	型芯和型腔镶件的长度（m）
L_{mold}	模具长度（m）
L_{part}	制品的最大长度（m）
MFI	塑料熔体流动指数（g/min）
M_{mold}	模架的总质量（kg）
n_{cycles}	成型周期数
n，τ^*，D_1，D_2，D_3，A_1，A_3	WTF 模型系数
n_{cavities}	型腔数
$n_{\text{cavities_ length}}$	长度方向型腔数
$n_{\text{cavities_ width}}$	宽度方向型腔数
n_{cycles}	模具操作的周期总数
n_j	型腔中 j 部分的数量
n_{lines}	冷却通道的数量
n_{total}	成型制品的总产量
p	压力（Pa）

p_{inject}	充满模具型腔所需的压力（Pa）
Q_{molding}	成型所需的全部热量（J）
$\dot{Q}_{\text{line}}$	每条冷却通道的冷却功率（W）
$\dot{Q}_{\text{molding}}$	冷却功率（W）
r_v	比体积的相对变化率
R	半径（m）
Re	雷诺数
$R_{\text{finishing_ cost}}$	每小时抛光成本（美元/h）
$R^i_{\text{finishing}}$	以方式 i 抛光制品表面的速率（m^2/h）
$R_{\text{machining_ cost}}$	每小时机加工成本（美元/h）
$R_{\text{machining_ area}}$	每小时机加工面积（m^2/h）
$R_{\text{machining_ volume}}$	每小时机加工体积（m^3/h）
$R_{\text{molding_ cost}}$	每小时操作工与机器所需的费用（美元/h）
R_{w}	曲率半径（m）
s	线性收缩率（m/m）
$s_{\perp}$	垂直于流向收缩率（mm）
$s_{/\!/}$	平行于流向收缩率（mm）
s_{ave}	平均收缩率（mm）
t_{c}	冷却时间（s）
t_{cycle}	注射成型机循环周期（s）
$t_{\text{cavity_ area}}$	型腔面积加工时间（h）
$t_{\text{cavity_ finishing}}$	型腔抛光时间（h）
$t_{\text{cavity_ machining}}$	型腔加工时间（h）
$t_{\text{cavity_ volume}}$	型腔体积加工时间（h）
t_p	浇口凝固前的保压时间（s）
$t_{\text{residence}}$	聚合物熔体的滞留时间（s）
T_{c}	模具冷却液温度（℃）
T_{e}	塑料推出温度（℃）
T_{g}	塑料玻璃化温度（℃）
T_{HDT}	塑料热变形温度（℃）
T_{melt}	熔体温度（℃）
T_{wall}	模具壁面温度（℃）
v	线性熔体速度（m/s）
V_{cavities}	型腔总体积（m^3）
V_j	模具型腔内 j 部分的体积（m^3）
V_{part}	制品体积（m^3）

$\dot{V}$	体积流量（m^3/s）
W_{cavity}	型芯和型腔镶件宽度（m）
W_{cheek}	型腔边到模具侧面的距离（m）
W_{mold}	模具宽度（m）
W_{part}	制品最大宽度（m）
W_{pitch}	两平行冷流道间距离（m）

参考文献

[1] Ulrich, K., et al., *Including the Value of Time in Design-for-manufacturing Decision Making.* Management Science, 1993. **39**(4): p. 429–447.

[2] Suri, R., D. Frey, and K. Otto, *Key Inspection Characteristics.* Journal of Mechanical Design, 2001. **123**: p. 479.

[3] Malloy, R. A., *Plastic part design for injection molding.* 1994: Distributed in the USA and in Canada by Hanser/Gardner Publications Cincinnati.

[4] Chen, Y. M. and J. J. Liu, *Cost-effective design for injection molding.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 1999. **15**(1): p. 1–21.

[5] Boothroyd, G., P. Dewhurst, and W. Knight, *Product design for manufacture and assembly.* 1994, New York, NY: Marcel Dekker, Inc.

[6] Boothroyd, G., *Making It Simple: Design for Assembly.* Mechanical Engineering, 1988: p. 28–31.

[7] Kazmer, D. O., *Wall Thickness Optimization In Molded Product Design.* in *SPE ANTEC.* 2003.

[8] Shi, L. and M. Gupta, *Approximate prediction of sink mark depth in rib-reinforced plastic parts by empirical equations.* Journal of Injection Molding Technology (USA), 1999. **3**(1): p. 1–10.

[9] Kwahk, J. and S. H. Han, *A methodology for evaluating the usability of audiovisual consumer electronic products.* Applied Ergonomics, 2002. **33**(5): p. 419–431.

[10] Banker, R. J., et al., *Cost of product and process complexity.* Measures of Manufacturing Excellence, ed. T. Kaplan. 1990, Cambridge, Massachusetts: Harvard Business School Press.

[11] Beiter, K. A. and K. Ishi, *Incorporating dimensional requirements into material selection and design of injection molded parts.* In *ASME design automation conference.* 1996.

[12] Fernandez, R. L., *The effect of part design on tooling cost in injection molding,* in *Department of Mechanical Engineering.* 1987, University of Massachusetts: Amherst.

[13] Raviwongse, R. and V. Allada, *Artificial neural network based model for computation of injection mould complexity.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1997. **13**(8): p. 577–586.

[14] Xu, T., *Functional feature-based approximate structural analysis for injection molded LFRTP part.* In *ANTEC.* 1994.

[15] Fagade, A. and D. O. Kazmer, *Economic Design Of Injection Molded Parts Using DFM Guidelines – A Review Of Two Methods For Tooling Cost Estimation.* In *Society of Plastics Engineers Annual Technical Conference.* 1998. Atlanta, GA.

[16] Archer, D., *Early cost estimation of injection molded components,* in *Manufacturing Engineering.* 1988, University of Rhode Island: Providence. p. 175.

[17] Beiter, K. A., J. M. Cardinal, and K. Ishi, *Design for Injection Molding: Balancing Mechanical Requirements, Manufacturing Costs, and Material Selection.* In *ASME design automation conference.* 1996.

[18] Butler, M. J., *Mold costs and how to estimate accurately.* Plastic Polymers, 1973 (April 1973): p. 60–61.

[19] Fagade, A. and D. Kazmer, *Economic design of injection molded parts using DFM guidelines – A review of two methods for tooling cost estimation.* In *ANTEC '98.* 1998. Atlanta, Georgia: Society of Plastic Engineers.

[20] Fagade, A. and D. Kazmer, *Effects of complexity on tooling cost and time-to-market of plastic injection molded parts.* In *ANTEC '99.* 1999. New York, New York: Society of Plastic Engineers.

[21] Bush, J. V., et al., *Computer aided part cost analysis for injection molding.* SPE Regional Technical Conference, 1988 (October).

[22] Oberg, E., et al., *Machinery's Handbook.* 24th ed, ed. R. E. Green. 1992.

[23] Fagade, A. K. and D. O. Kazmer, *Optimal Component Consolidation in Molded Product Design.* in *ASME 4th Design for Manufucaturing Conference.* 1999. Las Vegas, NV.

[24] Arimoto, S., et al., *Development of machining-producibility evaluation method.* CIRP Annals – Manufacturing Technology, 1993. **42**(1): p. 119–122.

[25] Rosato, D. V., D. V. Rosato, and M. G. Rosato, *Molds to Products*, in *Injection Molding Handbook.* 2000, Kluwer Academic Publishers. p. 347.

[26] Cross, M. M., Rheological Acta, 1979. **18**: p. 609.

[27] Beaumont, J. P., J. H. Young, and M. J. Jaworski, *Mold Filling Imbalances in Geometrically Balanced Runner Systems.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1999. **18**(6): p. 572.

[28] Takarada, K. R., et al., *The Effect of Primary Runner Length on Fill-Imbalance in a Geometrically Balanced Eight Cavity Polymer Injection Mold.* In *SPE ANTEC.* 2006.

[29] Yu, C. J. and J. E. Sunderland, *Determination of ejection temperature and cooling time in injection molding.* Polymer Engineering and Science, 1992. **32**(3): p. 191.

[30] Moody, L. F., *Friction Factors for Pipe Flow.* ASME Transactions, 1944. **66**(8): p. 671.

[31] Menges, G., W. Michaeli, and P. Mohren, *How to Make Injection Molds.* 2001, Hanser. p. 306.

[32] Zoetelief, W. F., L. F. A. Douven, and A. J. I. Housz, *Residual thermal stresses in injection molded products.* Polymer Engineering and Science, 1996. **36**(14): p. 1886–1896.

[33] Chen, S.-C., et al., *Integrated simulations of structural performance, molding process, and warpage for gas-assisted injection-molded parts. I. Analysis of part structural performance.* Journal of Applied Polymer Science, 1998. **68**(3): p. 417–428.

[34] Chang, R. Y. and B. D. Tsaur, *Experimental and theoretical studies of shrinkage, warpage, and sink marks of crystalline polymer injection molded parts.* Polymer Engineering and Science, 1995. **35**(15): p. 1222.

[35] Heberlein, D. E., Jr., *Warpage scale to evaluate injection molded plastics.* In *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings.* 1994. San Francisco, CA.

[36] Shrock, J. E., *Study of corner cooling as related to warpage analysis.* In *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings.* 1994. San Francisco, CA.

[37] Walsh, S. F., *Shrinkage and warpage prediction for injection molded components.* Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1993. **12**(7): p. 769–777.

[38] Bushko, W. C. and V. K. Stokes, *Dimensional stability of thermoplastic parts: Modeling issues.* In *Annual Technical Conference – ANTEC, Conference Proceedings.* 1996. Indianapolis, IN, USA.

[39] Fan, B., et al., *Warpage Prediction in Optical Media.* Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2003. **41**: p. 859–872.

[40] Menges, G., W. Michaeli, and P. Mohren, *How to Make Injection Molds.* 2001, Hanser. p. 409.

[41] Megson, T. H. G., *Euler Theory for Slender Columns*, in *Structural and Stress Analysis* 1996, Elsevier. p. 608–615.

[42] Barrie, I. T., *Injection moulding apparatus*, in *U.S. Patent No. 3,909,169.* 1975.

[43] Garner, P. J., *Injection Molding Machines*, in *U.S. Patent No. 3,733,156.* 1973.

[44] Himasekhar, K., et al., *Current trends in CAE: Simulations of latest innovations in injection molding.* Advances in Polymer Technology, 1993. **12**(3): p. 233–241.

[45] Li, C. T. and A. I. Isayev, *Interface Evolution and Penetration Behavior During Two-Component Transfer Molding. Part I: Modeling and Formulation.* Polymer Engineering and Science, 2004. **44**(4): p. 687–696.

[46] Hobson, J. R., *Method and Apparatus for Making Hollow Articles of Plastic Material*, in *U.S. Patent No. 2,331,688.* 1943.

[47] Friederich, E., *Method for injection molding of hollow shaped bodies from thermoplastic resins* in *U.S. Patent No. 4,101,617.* 1978.

[48] Chen, S. C., et al., *Investigation of Gas-Assisted Injection Molding. Part III: Effect of Gas Channel Design on Part Bending Strength.* Polymer Engineering and Science, 1998. **38**(7): p. 1085.

[49] Knights, M., *Water injection molding makes hollow parts faster, lighter.* Plastics Technology (USA), 2002. **48**(4): p. 42–47.

[50] Mapleston, P., *Water-assist molding bears fruit, homes in on automotive applications.* Modern Plastics, 2004. **81**(3): p. 38–39.

[51] Kirkland, C., *Let's just call it AIM – assisted injection molding.* Injection Molding (USA), 2002. **10**(5): p. 63–64.

[52] Williams, G. H., *Molding of Thermoplastic Materials*, in *U.S. Patent No. 2,975,487*. 1957.

[53] Reid, J. S., *Method and Means for Molding Thermoplastic Articles*, in *U.S. Patent No. 2,182,389*. 1937.

[54] Ryder, F. E., *Method of molding utilizing meltable core* in *U.S. Patent No. 3,882,220*. 1975.

[55] Manen, D. T. V., *Rotary Paraxial-Cavity Reciprocable-Core Injection Mold/Injection Blow Mold System*, in *U.S. Patent No. 3,752,625*. 1973.

[56] Rainville, D., *Double injection mold with neck gating*, in *U.S. Patent No. 2,975,487*. 1976.

[57] Dofsen, F. J., *Process for Bonding Thermoplastic Materials*, in *U.S. Patent No. 2,492,973*. 1950.

[58] Mares, P., *Injection molding articles of more than one resin component*, in *U.S. Patent No. 4,275,030*. 1981.

[59] Burry, A., *Method of multi-material injection moulding*, in *U.S. Patent No. 4,073,854*. 1978.

[60] Rees, H., P. Brown, and M. Grund, *Turret-type injection-molding machine* in *U.S. Patent No. 4,330,257*. 1982.

[61] Brown, P., *Support for an intermediate platen of a stack mold* in *U.S. Patent No. 4,408,981*. 1983.

[62] Peters, D. L., *Injection molding of plastic materials* in *U.S. Patent No. 3,093,865*. 1963.

[63] Salzman, S., *Automatic stockmold and curing press*, in *U.S. Patent No. 2,992,455*. 1961.

[64] Gellert, J. U., *Stack injection molding melt transfer system*, in *U.S. Patent No. 4,212,626*. 1980.

[65] Beaumont, J. P., *Method and apparatus for balancing the filling of injection molds*, in *U.S. Patent No. 6,077,470*. 2000.

[66] Beaumont, J. P., *Adjustable Melt Rotation Positioning Device and Method*. 2006, WO Patent WO/2006/124,940.

[67] Kazmer, D. O. and M. D. Moss, *Manifold system having flow control*, in *U.S. Patent No. 6,361,300*. 2002.

[68] Kazmer, D. O. and P. Barkan, *Multi-Cavity Pressure Control in the Filling and Packing Stages of the Injection Molding Process.* Polymer Engineering and Science, 1997. **37**(11): p. 1865–1879.

[69] Kazmer, D. O., *Methods and devices for melt pressure regulation*, in *U.S. Patent Application No. 2005/0255187*. 2005.

[70] Kazmer, D., V. Kudchadkar, and R. Nageri, *Validation of moulding consistency with a self-regulating melt pressure valve.* Plastics, Rubbers and Composites, 2005. **33**(9/10): p. 12.

[71] Kazmer, D., V. Kudchadkar, and R. Nageri, *Validation of moulding productivity with two self-regulating melt pressure valves.* Plastics, Rubbers and Composites, 2005. **33**(9/10): p. 20.

[72] Muller, F., *Injection mold apparatus with improved heating and cooling system*, in *U.S. Patent No. 5,055,025*. 1991.

[73] Yang, W.-J., *Method of injection molding a foamed resin product having a smooth surface involving surface heating of the mold by applying high current low voltage electric power*, in *U.S. Patent No. 4,390,485*. 1983.

[74] Abbott, R., et al., *Elimination Of Process Constraints In Plastics Injection Molding.* in *Molding 2003 Executive Technology Conference*. 2003. New Orleans, LA.

[75] Wada, A., et al., *Injection molded articles with improved surface characteristics, production of same and apparatus therefor*, in *U.S. Patent No. 4,340,551*. 1982.

[76] Niemeyer, M. F., et al., *Method for injection molding of optical discs* in *U.S. Patent No. 5,897,814*. 1999.

[77] Jardine, P. R., et al., *Method of using static charge to decorate molded thermoplastic articles*, in *U.S.*

Patent No. 3,270,101. 1966.

[78] Ruhl, G. F., *Production of molded plastic articles with artwork thereon*, in *U.S. Patent No. 4,537,739*. 1985.

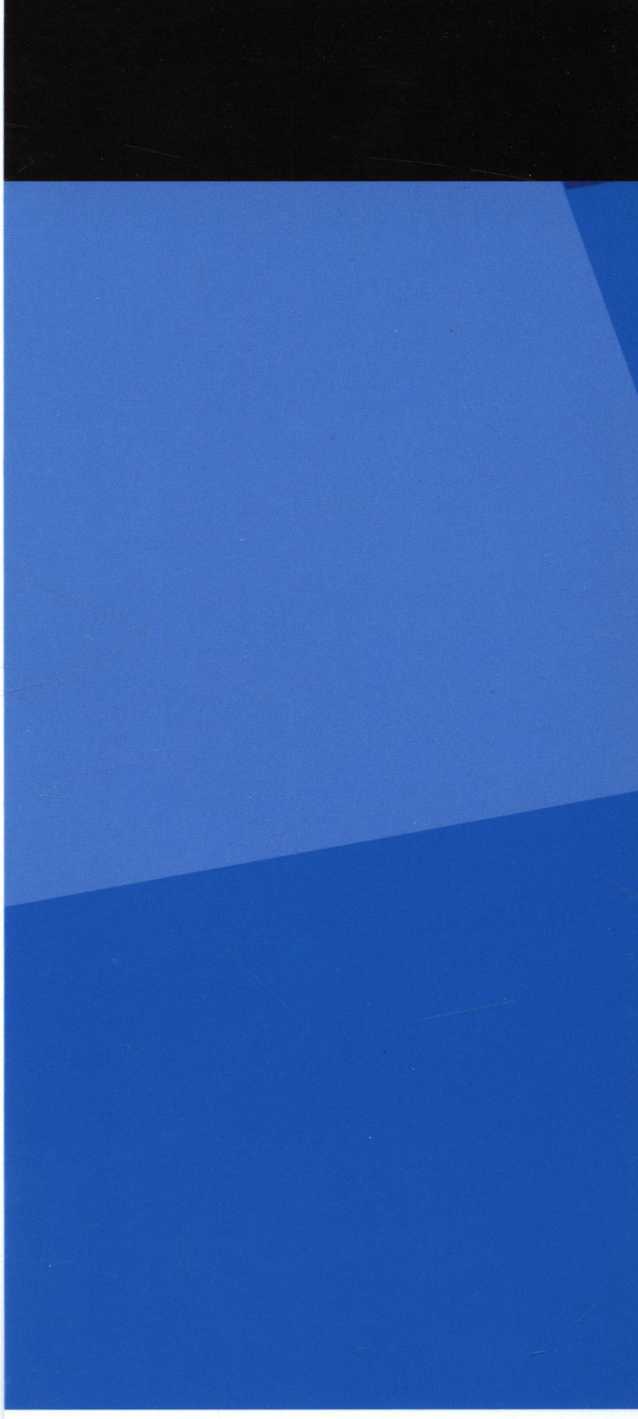
[79] Davis, C. C., *Process for making plastic bowling pins*, in *U.S. Patent No. 4,012,386*. 1977.

[80] Levine, L., *Methods for making hollow articles of plastic material*, in *U.S. Patent No. 1,076,681*. 1913.

[81] Chabotte, A. M., *Molding apparatus*, in *U.S. Patent No. 2,984,862*. 1957.

[82] Sayre, G. B., *Unscrewing device for the molding of threaded articles*, in *U.S. Patent No. 2,984,862*. 1944.

[83] Jesse, E. L., *Ejector apparatus for molding machine*, in *U.S. Patent No. 3,899,282*. 1975.



为中华崛起传播智慧

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

策划编辑◎孔劲 / 封面设计◎鞠杨

国际视野　科技前沿

◎详细介绍了注射模具成型过程中各个环节的相关内容，包括模具费用评估和模具设计、型腔设计、流道与浇口设计、排气与冷却系统设计、推出系统设计、结构系统设计等相关技术。

◎提供了许多重要模具工程概念方面的严谨分析和实例。

◎有针对性地探究了注射模具工程的普遍问题。

上架指导 工业技术／模具／塑料模具

ISBN 978-7-111-44119-9

ISBN 978-7-111-44119-9

定价：69.00元