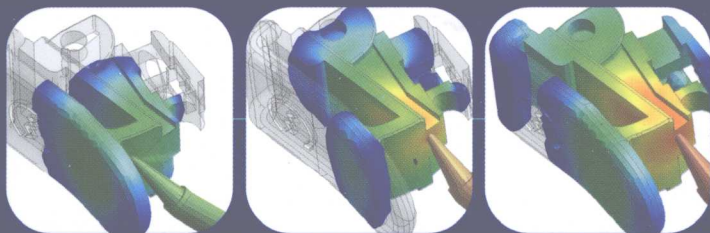


# 注塑成型模拟及模具优化设计 理论与方法

申长雨 著



科学出版社

[www.sciencep.com](http://www.sciencep.com)

内容简介

# 注塑成型模拟及模具优化设计 理论与方法

申长雨 著

机械工业出版社

内容简介：本书系统地介绍了注塑成型模拟及模具优化设计的理论与方法。全书共分5章，第1章介绍注塑成型的基本概念、分类及特点；第2章介绍注塑成型模具的结构、类型及设计要点；第3章介绍注塑成型过程的物理模型及数学模型；第4章介绍注塑成型过程的数值模拟方法；第5章介绍注塑成型模具的优化设计方法。本书可作为高等院校机械类、材料类专业及相关工程技术人员的学习和参考。

中国标准书号：155186.0101

ISBN 7-111-11111-1  
定价：15.00元

科学出版社

北京

100071

电话：(010) 64015000

网址：http://www.cip.com.cn

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了塑料注射成型数值模拟及模具优化设计的理论与方法。全书共 16 章:第 1 章为绪言;第 2~8 章介绍注塑成型数值模拟方法,重点介绍基于中面模型、表面模型和实体模型的注塑流动数值模拟以及熔体充填模式的快速预测、注塑模冷却过程数值模拟、注塑件内应力及翘曲变形模拟以及气体辅助注射成型数值模拟;第 9~12 章分别从模具浇注系统优化、塑件厚度优化以及成型工艺优化几个方面介绍注塑成型优化设计方法;第 13 章介绍注塑制品质量闭环控制系统设计方法;第 14~16 章介绍注塑成型模拟用有限元网格的剖分、中面模型的生成以及数值模拟结果的可视化方法。

本书可供高等院校材料科学与工程学科的研究生以及从事高分子材料加工和模具设计的科研人员和工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

注塑成型模拟及模具优化设计理论与方法/申长雨著. —北京:科学出版社,2009

ISBN 978-7-03-023338-7

I. 注… II. 申… III. ①塑料成型-数值模拟②注塑-塑料模具-最优设计 IV. TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 171643 号

责任编辑:胡华强 杨向萍 陈雅娴 / 责任校对:朱光光  
责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2009 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 3 月第一次印刷 印张:25 3/4

印数:1—2 000 字数:563 000

定价:98.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈科印〉)

## 前 言

以塑料、橡胶为代表的聚合物材料具有优良的加工性能和使用性能,在汽车、家电、仪器仪表等多个领域得到了广泛的应用,并呈现出以塑代钢、以塑代木的趋势。注射成型是塑料制品的主要加工方法之一,在塑料制品生产中占有非常重要的地位。注塑模具是利用装配形成的空腔成型具有一定形状和尺寸塑料制品的装置,其设计与制造水平直接关系到塑料制品的质量。长期以来,塑料注射成型工艺及模具设计大多依赖有限的经验和简单的公式,设计是否合理只能通过试模验证,致使塑料产品制造周期长、成本高、质量难以保证。

注塑成型数值模拟技术为改变这种状况提供了新的手段。该技术通过建立塑料成型过程的物理模型和数学模型,构造有效的数值计算方法,利用计算机对设计方案进行分析和模拟,研究加工条件的变化规律,预测制品的结构和性能,使设计人员在实际加工前就发现设计中存在的问题,及时修改成型工艺和模具设计方案,避免设计中的盲目性,为优化制品及模具设计、控制产品成型过程以获得理想的最终产品提供科学依据,使成型加工从一项实用技术变为一门应用科学。注塑成型数值模拟技术的运用是塑料成型加工及模具设计发展过程中的一个重要里程碑。

优化设计是以数学规划理论为基础,以计算机为辅助工具的一种设计方法。注塑成型优化设计基于最优化理论,通过建立反映设计者主要设计要求的优化模型,并构建有效算法对模型进行求解,可以得到优化的模具结构及成型工艺参数,显著提高设计质量及效率。近年来,将注塑成型数值模拟技术与优化设计理论有机结合起来,优化和控制成型过程和制品质量的注塑成型优化设计研究受到了普遍重视。

本书较为系统地介绍了塑料注射成型数值模拟及模具优化设计的理论与方法,重点介绍了基于中面模型、表面模型和实体模型的注塑流动数值模拟方法、注射模冷却模拟方法、注塑件内应力及翘曲变形模拟方法,相关的几何模型构建、网格剖分和数值模拟结果的可视化方法;并从模具浇注系统优化、塑件厚度优化以及成型工艺优化几个方面介绍了注塑成型优化设计方法。

本书可作为研究生教材,也可作为从事高分子材料加工及模具设计的科研人员及工程技术人员的参考书。

由于作者水平及时间有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者指正。

作 者

2008年12月

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪言	(1)
1.1 注塑成型	(3)
1.1.1 注塑成型要素	(3)
1.1.2 注塑制品常见缺陷	(5)
1.1.3 注塑成型设计准则	(8)
1.2 注塑成型数值模拟	(8)
1.2.1 流动模拟	(9)
1.2.2 冷却模拟	(13)
1.2.3 内应力分析及制品翘曲模拟	(13)
1.3 注塑成型工艺及模具优化设计	(18)
1.3.1 优化设计方法	(18)
1.3.2 注塑成型工艺及模具优化设计	(20)
1.4 注塑成型质量控制	(22)
1.5 注塑成型数值模拟软件	(23)
第 2 章 基于中面模型的注塑流动模拟	(25)
2.1 注塑充填/后充填过程数学模型的建立	(25)
2.1.1 黏性流体力学的基本方程	(25)
2.1.2 薄壁型腔内熔体流动的控制方程	(27)
2.1.3 圆管内熔体流动的控制方程	(30)
2.1.4 聚合物材料模型	(32)
2.2 注塑充填/后充填过程模拟的数值实现	(36)
2.2.1 几何模型离散	(36)
2.2.2 温度场的求解	(36)
2.2.3 压力场的求解	(41)
2.2.4 熔体流动前沿的跟踪及时间步长的确定	(45)
2.2.5 数值求解步骤	(49)
2.2.6 模拟中的几个问题	(51)
2.2.7 算法稳定性分析	(51)
2.3 算例	(52)
第 3 章 基于表面模型的注塑流动模拟	(63)
3.1 表面流技术原理	(64)
3.2 网格预处理	(64)

3.3	控制方程及数值算法	(65)
3.3.1	控制方程	(65)
3.3.2	数值算法	(67)
3.4	算例	(71)
<b>第4章</b>	<b>基于实体模型的注塑三维流动模拟</b>	<b>(75)</b>
4.1	数学模型	(75)
4.2	变分方程	(76)
4.3	数值求解	(78)
4.3.1	不考虑惯性效应的三维注塑充填模拟问题	(79)
4.3.2	考虑惯性效应的三维注塑充填模拟问题	(82)
4.3.3	算例	(84)
4.4	区域分解算法的应用	(89)
4.4.1	不重叠型区域分解算法	(89)
4.4.2	Stokes 问题的区域分解及界面条件	(93)
4.4.3	注塑成型流动模拟的不重叠型区域分解算法	(95)
<b>第5章</b>	<b>注塑充填模式的快速预测</b>	<b>(98)</b>
5.1	前沿熔体流动长度与型腔厚度关系的建立	(98)
5.1.1	型腔内前沿熔体流动长度与型腔厚度关系	(98)
5.1.2	浇注系统内前沿熔体流动长度与流道半径关系	(100)
5.1.3	等效流动长度	(101)
5.2	近似最短路径算法	(102)
5.2.1	近似最短路径求解的基本思路	(102)
5.2.2	单源最短路径算法	(102)
5.2.3	带权图上近似最短路径算法	(103)
5.3	熔体前沿快速预测算法	(105)
5.4	熔接线和气穴的自动识别	(106)
5.5	算例	(107)
<b>第6章</b>	<b>注塑模冷却过程数值模拟</b>	<b>(112)</b>
6.1	注塑模温度场分析	(112)
6.1.1	模具与塑件之间的热传导	(114)
6.1.2	模具与冷却系统之间的对流换热	(114)
6.1.3	模具与周围环境之间的热交换	(116)
6.2	边界积分方程	(117)
6.2.1	热平衡方程及其简化	(119)
6.2.2	域内温度场边界积分方程	(120)
6.2.3	边界积分方程的形成	(121)
6.2.4	边界积分方程的修正	(122)

6.2.5	边界积分方程的组合	(124)
6.2.6	模具外边界条件的简化	(125)
6.3	边界积分方程的处理	(126)
6.3.1	边界积分方程的离散	(126)
6.3.2	塑件表面热流的解析计算	(127)
6.3.3	系数矩阵中积分项的计算	(132)
6.4	数值实现	(138)
6.4.1	残向量亚松弛迭代方程的形成	(139)
6.4.2	系数矩阵的存储	(142)
6.4.3	温度初值的确定	(142)
6.4.4	快速算法	(143)
6.4.5	算例	(147)
6.5	冷却管网分析	(151)
6.5.1	流体力学基本定律	(151)
6.5.2	管道流动基本参数计算	(152)
6.5.3	管网分析基本方程	(153)
6.5.4	图论的基本概念及算法	(154)
6.5.5	基本圈的优化	(157)
6.5.6	管网分析步骤	(157)
<b>第7章</b>	<b>注塑制品内应力及翘曲变形模拟</b>	<b>(159)</b>
7.1	注塑制品内应力	(160)
7.1.1	流动诱导内应力	(160)
7.1.2	热应力	(161)
7.1.3	影响注塑制品内应力的主要因素	(162)
7.2	模内蠕变实验研究	(164)
7.3	无定形聚合物注塑内应力模拟	(172)
7.3.1	力学模型	(172)
7.3.2	数学模型	(175)
7.3.3	物性参数计算	(176)
7.3.4	内应力计算过程	(179)
7.3.5	算例	(182)
7.4	结晶聚合物注塑内应力模拟	(185)
7.4.1	温度场的修正	(185)
7.4.2	注塑聚合物的结晶形态及结构模型	(186)
7.4.3	注塑结晶聚合物热应力模拟	(188)
7.4.4	算例	(190)
7.5	纤维增强塑料注塑内应力模拟	(191)
7.5.1	注塑成型纤维取向分析	(192)

7.5.2	内应力计算	(193)
7.5.3	算例	(196)
7.6	注塑制品翘曲变形模拟	(197)
7.6.1	离散 Kirchhoff 单元	(199)
7.6.2	带转动自由度的膜单元	(202)
<b>第 8 章</b>	<b>气体辅助注射成型数值模拟</b>	<b>(206)</b>
8.1	气体辅助注射成型工艺过程	(206)
8.2	充填/后充填过程的数学描述	(209)
8.2.1	薄壁型腔充填/后充填阶段的控制方程	(209)
8.2.2	圆管流道内充填/后充填阶段的控制方程	(213)
8.3	熔体前沿位置与熔体-气体边界的确定	(214)
8.4	算例	(215)
8.4.1	实验验证	(215)
8.4.2	工艺参数对气体穿透的影响分析	(219)
<b>第 9 章</b>	<b>注塑模浇口位置优化设计</b>	<b>(230)</b>
9.1	浇口位置对制件性能的影响	(230)
9.2	浇口位置优化设计模型与算法	(231)
9.2.1	优化模型的建立	(231)
9.2.2	优化算法	(233)
9.2.3	算例	(234)
9.3	基于流动平衡的浇口位置优化算法	(236)
9.3.1	优化模型的建立	(236)
9.3.2	单浇口位置优化	(237)
9.3.3	多浇口位置优化	(237)
9.3.4	算例	(240)
<b>第 10 章</b>	<b>注塑模流道尺寸优化设计</b>	<b>(245)</b>
10.1	注塑模浇注系统	(245)
10.2	多型腔非自然平衡浇注系统优化设计	(247)
10.2.1	优化模型的建立	(247)
10.2.2	优化算法	(247)
10.3	单型腔多浇口模具浇注系统优化设计	(250)
10.3.1	优化模型的建立	(251)
10.3.2	优化算法	(252)
10.4	算例	(254)
10.4.1	多型腔非自然平衡流道系统优化	(254)
10.4.2	单型腔多浇口模具浇注系统优化	(257)
<b>第 11 章</b>	<b>注塑制品壁厚优化设计</b>	<b>(260)</b>
11.1	制品壁厚初步优化	(260)



11.1.1	优化模型的建立	(260)
11.1.2	优化算法	(261)
11.2	制品壁厚分区优化	(264)
11.2.1	优化模型的建立	(264)
11.2.2	优化算法	(265)
11.3	算例	(267)
<b>第 12 章</b>	<b>注塑成型工艺优化</b>	<b>(270)</b>
12.1	注塑成型工艺优化问题定义	(270)
12.2	设计变量的确定	(272)
12.3	目标函数的建立	(274)
12.3.1	神经网络	(274)
12.3.2	基于神经网络模型的目标函数的建立	(280)
12.4	优化算法	(281)
12.4.1	混合遗传算法	(281)
12.4.2	注塑成型工艺优化的混合遗传算法实施	(282)
12.4.3	注塑成型工艺多目标优化	(285)
12.5	算例	(286)
12.5.1	工艺参数对制品质量影响研究	(286)
12.5.2	工艺参数和制品质量指标之间关系模型的建立	(301)
12.5.3	工艺参数优化	(309)
<b>第 13 章</b>	<b>注塑制品质量闭环控制</b>	<b>(315)</b>
13.1	注塑制品质量控制系统设计	(315)
13.1.1	注塑控制系统	(315)
13.1.2	注塑成型质量控制系统设计	(317)
13.2	注塑制品质量闭环控制策略及实现	(318)
13.2.1	注塑制品质量闭环控制算法	(318)
13.2.2	神经网络控制器设计	(320)
13.2.3	制品质量控制的在线仿真	(321)
13.3	注射制品重量控制	(323)
13.3.1	制品重量控制的理论基础	(323)
13.3.2	控制系统中各个神经网络的结构	(323)
13.3.3	系统性能测试	(324)
<b>第 14 章</b>	<b>注塑成型模拟中的有限元网格剖分</b>	<b>(330)</b>
14.1	中面模型的网格剖分	(330)
14.1.1	任意平面区域的变密度三角形网格划分	(330)
14.1.2	平面域的变密度四边形网格划分	(338)
14.1.3	曲面的三角形网格划分	(341)
14.2	实体表面有限元网格剖分	(345)

14.2.1	STL 模型拓扑信息的建立	(345)
14.2.2	STL 模型的 B-Rep 表示	(349)
14.2.3	有限元网格生成	(352)
14.3	有限元网格模型的简化	(354)
<b>第 15 章</b>	<b>注塑成型模拟用中面模型的生成</b>	<b>(363)</b>
15.1	中面模型的特征造型	(363)
15.1.1	特征造型的基本理论	(363)
15.1.2	中面模型的特征分类	(366)
15.1.3	中面模型特征的设计方法	(368)
15.2	基于实体表面网格的中面模型生成	(373)
15.2.1	网格预处理	(373)
15.2.2	实体模型转换为中面模型的算法	(373)
15.2.3	单元厚度的确定	(375)
15.2.4	中面模型的生成	(379)
<b>第 16 章</b>	<b>注塑成型数值模拟结果的可视化</b>	<b>(383)</b>
16.1	基本算法	(383)
16.2	注塑成型数值模拟结果的显示方法	(386)
16.3	OpenGL 的应用	(389)
<b>参考文献</b>		<b>(391)</b>

## 第1章 绪 言

塑料是由聚合物和某些助剂结合而成的高分子化合物,是高分子材料中最大的一类。它在一定的温度和压力下具有流动性,可以被成型为具有一定几何形状和尺寸的制品。塑料的机械性能和加工性能优良,而且具有重量<sup>1)</sup>轻、耐腐蚀、电绝缘性能好、比强度高等优点,在汽车、家电、仪器仪表、建筑装饰等领域得到了广泛的应用,并有以塑代钢、以塑代木的趋势。

塑料注射成型(简称“注塑成型”)是根据金属压铸成型原理发展而来的塑料加工方法,使用注塑机和注射模具把塑料原材料转变成塑料制品。注塑成型的基本原理是利用塑料的可挤压性与可模塑性,将松散的粒状或粉状物料从注射机的料斗送入高温的机筒内加热熔融塑化,使之成为黏流态熔体,然后在柱塞或螺杆的推动下,以较大的流速通过机筒前端的喷嘴注射进入温度较低的闭合模具中,经过保压、冷却后,开启模具便可从模腔中脱出具有一定形状和尺寸的塑料制品。

注塑成型在整个塑料制品生产行业占有非常重要的地位。早期的注塑成型方法主要用于生产热塑性塑料制品。随着塑料工业的迅速发展以及塑料制品应用范围的不断扩大,注塑成型方法已经推广应用到热固性塑料制品和一些塑料复合材料制品的生产中。目前,除了少数几种塑料外,其他的塑料都可以采用注塑成型。据统计,注塑制品约占整个塑料制品总产量的30%,是空间三维塑料制品的主要成型方法,全世界每年生产的注射模数量约占所有塑料成型模具数量的50%。

模具在注塑成型过程中处于核心地位,作为塑料成型的重要工艺装备,其设计与制造水平直接关系到产品的质量、品种及更新速度。模具工业是国民经济的基础工业,塑料模具是塑料工业发展的“瓶颈”。在塑料制品加工中,非牛顿假塑性的高温塑料熔体在压力驱动下通过浇注系统流向低温的模具型腔,熔体一方面由于模具传热而快速冷却,另一方面因剪切而产生热量,同时伴随体积收缩、分子取向和结晶过程。由于问题的复杂性,长期以来,高聚物成型加工过程的控制和模具设计与制造主要依赖于工艺人员和设计人员的经验和技巧,设计的合理性只能通过试模才能了解,制造的缺陷主要靠修模来纠正,致使模具及塑料产品的设计与制造周期长、成本高、档次低。随着新材料和新成型方法的不断出现,问题更加突出。我国模具技术水平大约落后于国外20年。现在模具生产只能满足需要的60%左右,每年进口精密复杂模具的费用高达数亿美元<sup>[1]</sup>。

随着计算机技术的发展和人们对计算力学、流体力学、聚合物加工流变学、传热学等学科的深入研究,以有限元、边界元和有限差分为代表的数值模拟方法为改变这种状况提供了新的手段。注塑成型数值模拟技术通过建立高聚物成型过程的物理和数学模型,构造有效的算法,研究加工条件的变化规律,预测制品的结构和性能,使成型工艺及模具设

<sup>1)</sup> 应为质量(mass),为避免与质量(quality)混淆,仍保留“重量”一词,全书同。

计建立在科学分析的基础上,为优化模具设计和控制产品成型过程以获得理想的制品质量提供科学依据。

注塑成型数值模拟技术的运用是塑料成型加工及模具设计发展过程中的一个重要里程碑。它可使设计人员避免设计中的盲目性,在模具加工前在计算机上完成“试模”工作,也可使生产操作人员预测工艺参数对制品外观和性能的影响。总之,设计人员和生产人员可利用数值模拟技术有目的地修正设计方案和工艺条件,克服因经验少、工作疏漏而造成的不良后果,以适应日益激烈的竞争环境。

但是,注塑成型数值模拟技术仅仅相当于数值实验,即把试模过程放在计算机上进行,校核模具及工艺设计方案的合理性,无法提供设计方案的修改方向和尺度。模具设计和工艺确定本质上仍然靠尝试法完成,设计方案修改仍然依赖于设计人员的经验。修改注塑成型设计绝不是一件简单的工作。由于注塑成型加工是一个多变量、非线性、时变且具有周期性的非稳态过程,工艺参数之间密切联系,相互影响,设计人员很难对该过程进行全面的分析,常凭自己的经验和直觉对模具设计或工艺参数进行修正,再对修改后的方案进行数值分析,如此反复,才能得到合理设计方案。另外,最后得到的方案虽然能够生产无明显质量缺陷的制品,但未必是最佳方案。

随着塑料工业的发展,广大设计人员希望能够拥有一种技术,这项技术能把他们从复杂的模具和工艺设计中解脱出来,从而使他们不必反复调整相互影响的工艺参数以得到合理的结果,使模具设计和工艺设计不再困难。最优化理论在注射成型领域的应用为这一问题的解决提供了新的手段。

近几年,将优化技术和数值模拟技术相结合的注塑成型优化设计研究受到了普遍重视。注塑成型优化设计基于最优化理论,通过建立反映设计者主要设计要求的优化模型,并构建有效算法对模型进行求解,可以得到最优的模具结构及成型工艺参数。例如,系统可以自动确定最优成型工艺参数(如注射速率、保压压力、保压时间、模具温度等),也可以自动确定最优浇口位置,大大降低了注塑成型设计对设计人员经验的要求,提高了设计质量。

可以看出,计算机辅助设计技术在注射成型设计中的应用有三个层次:第一层次是计算机辅助画图,即模具设计人员把自己的设计方案在计算机上画出来,计算机相当于设计图版;第二层次是计算机辅助分析,即设计人员利用数值模拟技术对自己的设计方案进行评估;第三层次是计算机辅助优化,利用优化技术,设计人员不必对成型过程错综复杂的各种因素进行分析,便可得到最优的注塑成型设计方案,大量复杂的工作由计算机完成。注塑成型优化设计技术具有的很高使用价值,对我国塑料工业的发展具有重要意义。

对注塑成型过程进行模拟和优化可以得到能获得高质量制品的成型工艺,但是,在系统扰动较大的情况下,预先得到的成型条件很有可能与实际的最佳成型条件之间存在很大的误差。因此,在得到优化工艺条件之后,应利用自动控制技术,设计控制器在线监测控制成型过程的实时状态,根据采集到的信息,及时调节成型工艺条件使成型过程在最佳工艺条件下进行,保证成型制品的质量。近年来微电子技术 with 计算机控制技术的发展为注塑成型过程的质量控制提供了技术保证。

虽然注塑成型技术已经是一项比较成熟的技术,但随着注塑制品在航空、航天等高科技领域的应用,对制品的质量、性能及产品更新换代提出了更高的要求。如何提高注塑制

品的质量和性能成为该领域的重要研究课题。将成型模拟技术、优化设计理论和自动控制理论结合起来控制制品质量具有重要意义。

## 1.1 注塑成型

### 1.1.1 注塑成型要素

注塑成型理论主要研究塑料材料在转变成制品的过程中,其性能的变化和所表现的变形流动行为与各种加工条件之间的关系。注塑成型加工包括原料、设备和成型工艺等要素。这几个要素相互联系,共同制约着注塑制品的质量。下面对这几个要素进行介绍。

#### 1. 聚合物

研究注塑成型,首先应对聚合物的性能及其流动变形行为有深入的了解。

聚合物的结构决定其性能。聚合物大分子是由单体分子聚合而成的,基本上有线型大分子、支链型大分子和体型大分子等三种类型长链结构。热塑性塑料由线型大分子构成,可以被反复加热和冷却;热固性塑料由体型大分子构成,只能在交联时进行一次加热,交联之后便永远固化,即使再进行高温加热也不会软化,直到在很高的温度下被烧焦炭化为止。由支链型大分子构成的塑料,一般也可以进行反复加热和冷却。

聚合物的热物理性能,如比热容、热传导率、密度等,对注塑成型过程影响很大。聚合物熔体的热传导率和热扩散率都很低,因此,为了使聚合物在成型过程中得到较好的冷却,塑料制品一般很薄(厚度小于5mm)。另外,由于聚合物的密度随温度变化较大,因此在型腔充满后,仍需继续注料以弥补聚合物熔体因冷却所造成的体积收缩<sup>[2]</sup>。

聚合物熔体在运动时,对相邻两层流体间的相对运动是有抵抗力的。流体所具有的这种抵抗相对滑动速度或相对变形的性质称为黏性。聚合物熔体是非牛顿流体,其黏度除受温度和压力影响外,在中等剪切速率区域,熔体的表观黏度随剪切速率的变化而发生变化,并呈指数规律减小,呈现“剪切变稀”效应。生产中必须根据聚合物的结构性能,选择最佳的注射温度、注射压力、注射速率以及模具结构等,以保证成型过程中聚合物熔体黏度在合理的范围内。

聚合物熔体的形变与时间有关,其应变的发生对于应力作用的响应有所滞后,必须经过松弛过程。聚合物变形时的滞后效应和松弛过程对塑件的质量有很大的影响。例如,注塑成型过程中,聚合物大分子在模壁的冷却作用下没有充分的时间进行变形和重排,其变形还未与注射压力或保压压力达到平衡便被固定下来,脱模后制品中存在较大的残余应力,大分子还将随时间的发展继续进行重排,以便和成型时的应力作用结果相适应(消除残余应力),这常常会使制品发生翘曲变形。

不同聚合物材料的热物理性能和流变性能不同,即使对于同样的成型条件,在型腔中的流动和取向也不同,成型的制品质量常有较大的差别。材料的选择通常要考虑制品的用途、原材料的价格和成型加工难易程度等。

#### 2. 注塑成型设备

注塑成型设备包括注射成型机械和注射成型模具两部分<sup>[3]</sup>。注射成型机械主要将塑

料颗粒或粉末转变为黏流态熔体,并将其注入模腔中。模具是将塑料熔体成型为所需制品的设备。熔体被注射机注入模腔后,在模具冷却系统的作用下,冷却固化定形,最终得到所需形状的制品。一个典型的注塑模具包括成型零部件(由型腔和型芯或成型杆、镶块等构成)、浇注系统、脱模系统、控温系统、导向系统和排气系统等。注塑制品的质量好坏和生产率的高低在一定程度上取决于注塑模的结构类型和工作特性,如浇口位置设计的合理性直接影响了制品的成型性、流动取向和翘曲。

### 3. 注射成型工艺过程

注射成型是塑料制品的一种成型加工方法,其使用注塑机和注射模具把塑料原材料转变成塑料制品。整个注射成型工艺过程包括塑料在注塑机中的塑化计量过程和塑料熔体在注射模腔中的成型过程<sup>[4]</sup>。

在塑化计量阶段,成型物料在注射机筒内经过加热、压实以及混和等作用以后,由松散的粉状或粒状固态转变成连续的具有均匀密度的熔体。在该阶段,塑料颗粒在转动螺杆的输送作用下不断沿螺槽方向向前运动,同时转动的螺杆把机械能转化为热能,在螺杆剪切热与料筒外部热源的作用下塑料材料很快塑化并熔融,转变成黏流体并存储在料筒前端的区域(存料区)。与此同时,存料区中的熔体具有一定的压力,当熔体压力大于螺杆后退所要克服的阻力时,螺杆开始一边转动一边向后移动,直到螺杆碰到行程开关为止。

塑料熔体在模腔中的成型过程是指熔体在冷的模具和注射压力的作用下,在模具中流动、冷却从而得到所需制品的过程,包括注射充填、保压补料和冷却定型三个阶段。

注射充填是指合模后,塑料熔体从注塑机的注塑部位注入温度较低模腔的过程。整个阶段从柱塞或螺杆向前移动将已被塑化的塑料熔体注入模具型腔开始,到模腔被塑料熔体充满为止,塑料熔体的轴向移动由螺杆注射速度控制。熔体在模腔中的流动状态一般为稳态层流(熔体流动时受到的惯性力与黏滞力相比很小),从浇口到模腔终端逐渐扩展。熔体在模腔内流动时会受到一系列的流动阻力,这些阻力一部分来源于注塑机筒、喷嘴、浇注系统和模腔壁对熔体的外摩擦,另一部分则来源于熔体内部产生的黏性内摩擦。为了克服流动阻力,注塑机必须通过螺杆或柱塞向熔体施加很大的注射压力。充模阶段对聚合物大分子的取向有很大影响,该阶段进行得不好有可能引发短射、飞边、流痕、熔接线、气穴等缺陷,对制品质量有很大影响。

保压补料过程从熔体充满模腔开始,到柱塞或螺杆在机筒中开始后撤为止。在该阶段,熔体在一定压力的作用下继续向型腔内注料以弥补熔体因温度、压力变化造成的体积收缩。可压缩性是塑料材料在该阶段表现出的最重要的性质。

保压阶段对制品尺寸、表面和材料性能都有影响。例如,如果保压时间过短,保压不足,会出现过量收缩,使得制品尺寸误差增大,还可能引起缩痕和内部空洞等缺陷。然而,如果过保压,制品内应力会增大,影响到制品的强度。保压阶段的熔体温度变化速率和保压时间还影响到冷凝层内塑料的结晶性能,从而影响制品内部形态。保压压力决定了在固定的保压时间内补料的多少。如果保压压力过低,在浇口凝固前难以补充足够的熔体到型腔,而如果保压压力过大,又会出现过保压。可见,保压时间和保压压力的选择对最终制品的尺寸、重量和内应力有重要的影响。

冷却定型是从浇口固化开始,到制品脱模为止。冷却定型结束时的模腔压力和模腔温度对制品质量非常重要。若脱模温度太高,制品在脱模后不仅会产生较大的收缩,而且容易发生热变形。若脱模时模腔的压力太高,容易使制品在脱模后产生较大的残余应力,导致制品在以后使用中发生形状尺寸的变化或产生其他缺陷。

成型工艺设计主要是确定与上面几个阶段有关的温度、压力及时间的各项参数,即料筒温度、喷嘴温度、模具温度、塑化压力、注射压力、保压压力、合模力、注射速率、充填时间、保压时间、冷却时间等。

需要指出的是,除了上面几个方面外,注塑件的结构设计也对成型过程有重要影响。注塑件设计的主要内容包括制品的形状、尺寸、壁厚以及制品上加强筋、嵌件等的设置。其中制品厚度是影响制件质量的一个重要因素,不合理的厚度分布可能会使熔体出现流动停滞、流动不平衡、冷却不均匀等严重问题,是导致制品翘曲变形的原因之一。

### 1.1.2 注塑制品常见缺陷

注塑过程中塑料要经过受热软化、熔融、注塑、保压、冷却定型等五个阶段的物理变化过程,塑料内部将会产生大分子取向、结晶以及残余应力等。由于制品或模具本身问题、塑料材料和成型工艺(如注射压力、塑化压力、注射速率、注射量、锁模力、料筒温度、模具温度等)的选择不当,会使注塑制品出现许多不良现象和缺陷。下面分析几种主要不良现象和缺陷的产生原因并提出改进方法<sup>[5~7]</sup>。

#### 1. 填充不足

填充不足是指料流末端出现部分不完整现象或成型制品整体有塌瘪现象或一模多腔中一部分填充不满。形成的原因可能有:供料不足;熔体的流程过长;塑料流动性差;模具排气不良,尤其在远离浇口且壁厚的地方容易出现;成型温度或注射压力过低;注射速率太低;对于多腔模,各个型腔的流动不平衡。一般可以通过选择流动性好的树脂、调整浇注系统设计(如改变浇口位置、浇口尺寸、流道尺寸)、改变成型条件(如提高注射温度、注射压力、注射速率、保压压力、模具温度)来改善。

#### 2. 凹痕及缩孔

当塑件厚度不均时,在冷却过程中有些部分就会因收缩过大而产生凹痕。但如果在冷却过程中表面已足够硬,则发生在塑件内部的收缩往往会使塑件产生结构缺陷。凹痕是指制品表面下凹、边缘平滑,容易出现在远离浇口位置以及制品壁厚、肋、凸台及内嵌件处。凹痕的发生主要是由于材料的收缩没有被补偿而引起的,因此收缩性较大的结晶性塑料容易产生凹痕。保压压力、保压时间、熔体温度、冷却速率等都对凹痕有较大的影响,其中保压不充分是最重要的原因。改变浇口设计(位置或尺寸)、流道尺寸和制品设计(如减小壁厚、将凹痕表面设计成花纹进行掩饰等)都可以改善凹痕情况。

#### 3. 龟裂

龟裂是塑料制品较常见的一种缺陷。有些塑料对应力作用很敏感,成型后不仅容易

在制品中产生内应力,而且在较大外力作用下容易脆化断裂而产生裂缝。塑料熔体在模具中的充填过程受到了流动剪切应力和拉伸应力作用,使聚合物大分子发生取向,在冷凝过程中来不及松弛,被凝固下来而形成内应力,从而降低塑件承受外荷载的能力。流动方向不一致往往产生非均匀取向,取向差越大,产生的内应力就越大。改进的措施一般为降低注射压力、保压压力或延长冷却时间,改进浇口尺寸和位置。

#### 4. 熔接线/熔合线

在充模过程中,两股相向或平行的熔体前沿相遇,就会形成熔接线或熔合线(图 1.1)。通常两股汇合熔体前端的夹角(熔接角)越小,产生的熔接线就越显著,制品品质也就越差。当熔接角达到  $120^{\circ}\sim 150^{\circ}$  时,熔接线消失。

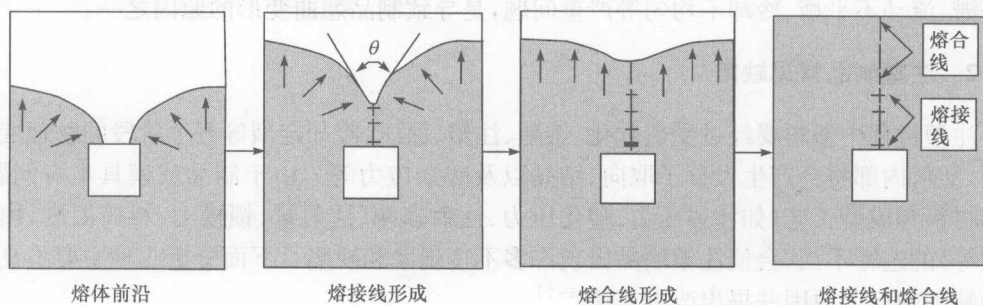


图 1.1 熔接线和熔合线

熔接线是常见的塑件缺陷,其存在不仅影响制品的外观质量,而且对制品的力学性能影响很大,特别是对于纤维增强材料、多相共混聚合物等的影响更为明显。由于制品结构的复杂性,熔接线很难避免,但可以从以下几方面入手进行改善:通过改变浇口位置、浇口尺寸、型腔的壁厚以及流道系统的设计等改变熔接线的位置,尽量将其置于制品中不醒目而且强度要求不高的地方;通过调整熔体交汇时的温度,提高熔接线的抗拉/抗压强度,并尽量使痕迹不明显;通过调整浇口位置、数目等减少熔接线条数。温度对熔接线的影响非常大,若熔体交汇时的温度与注射温度相差不到  $20^{\circ}\text{C}$ ,一般熔接线的质量都可以接受(最理想的情况是熔体交汇时的温度等于注射温度)。

#### 5. 翘曲变形

不合适的成型条件和模具设计会使塑件在脱模后收缩不均匀,在制品内部产生内应力,这样的塑件在使用过程中常会产生翘曲变形(图 1.2),导致制品失效或引起尺寸误差和装配困难。翘曲变形是塑件最严重的质量缺陷之一,主要应从制品和模具设计方面着手解决,而依靠成型工艺调整的效果是非常有限的。

翘曲变形的原因及解决方法如下:①由成型条件引起残余应力造成变形时,可通过降低注射压力、调整冷却方法使模具温度均匀及提高塑料熔体温度等方法加以解决。②脱模不良引起应力变形时,可通过增加推杆数量或面积、设置脱模斜度等方法加以解决。③对于成型收缩所引起的变形,必须修正模具设计。其中,最重要的是使制品壁厚一致。



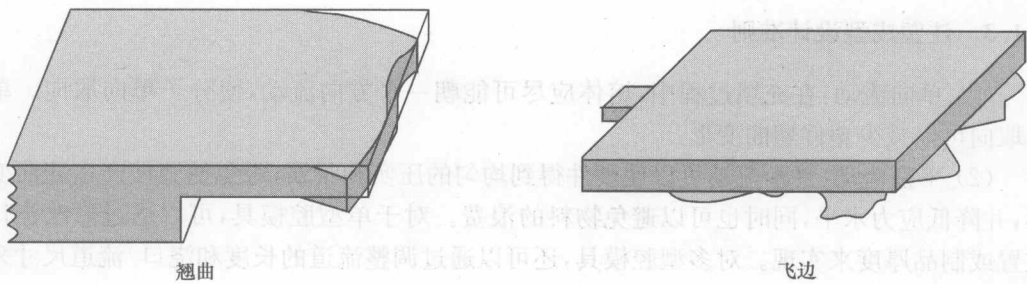


图 1.2 制件的翘曲变形和飞边

有时,在不得已的情况下,只能通过测量制品的变形,按相反的方向修正模具加以校正。

### 6. 气穴

由于型腔中不可避免地存在气体,因此熔体在流动过程中会将气体聚集在型腔内的某些部分。若这些气体不能顺利排出,则型腔的这些部分无法得到充填而形成气穴。即使熔体能够充填这些区域,熔体也常因为周围气体温度过高产生焦痕,从而影响制品的表面质量。因此,应通过调整浇注系统设计或注塑工艺消除气穴现象。

### 7. 飞边

当型腔内的压力过高,模具无法完全闭合时,模具分型面上出现溢料而导致飞边(图 1.2)。导致飞边的因素有很多,锁模力太低、模具设计不合理或成型工艺不合理造成的型腔内的压力过高等都是很重要的原因。对于飞边的处理重点应放在模具设计的改善方面,而在成型条件上,可从降低流动性方面着手。

### 8. 喷流痕

喷流痕是从浇口沿着流动方向,弯曲如蛇行一样的痕迹(图 1.3),是由于注射速率过高导致的。因此,扩大浇口横截面或调低注射速率都是可选择的措施。另外,提高模具温度,也能减缓与型腔表面接触的树脂的冷却速率,防止在充填初期形成表面硬化皮。

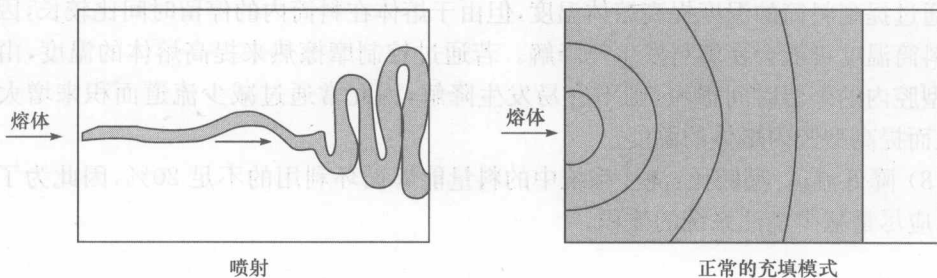


图 1.3 喷射和正常的充填模式