



高等职业技术教育“十二五”规划教材
高等职业技术教育校企合作教材

模具结构优化 及CAE应用

MUJU JIEGOU YOUHUA JI CAE YINGYONG

主 编 朱俊杰
副主编 刘军辉 王 晖
主 审 梁 丰



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

高等职业技术教育“十二五”规划教材

高等职业技术教育校企合作教材

模具结构优化及 CAE 应用

主 编 朱俊杰

副主编 刘军辉 王 晖

参 编 刘 毅 沈志军

主 审 梁 丰

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内容提要

本书是关于 CAE (Moldflow) 模流分析方面的专业书籍, 全书主要包括注射成型工艺的成型原理、相关软件功能介绍、模流分析流程、网格划分与修复、浇口位置设计、浇注系统设计、冷却系统设计、流动分析、冷却分析、翘曲分析、工艺参数的调整及模具结构的分析和优化等内容。在讲解相关知识的同时, 全书配合某款手机相关零件的分析实例, 使读者更好地掌握 CAE 模流分析的使用方法和技巧。

本书以 Moldflow6.1 英文版为基础编写, 同时也适用于 Moldflow5.1。本书结构清晰、内容丰富、实用性强, 可供从事模具设计、注塑工艺的专业人员使用, 也可作为高校材料成型及控制工程、模具设计与制造等专业的教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

模具结构优化及 CAE 应用 / 朱俊杰主编. —成都:
西南交通大学出版社, 2014.6
高等职业技术教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5643-3076-7

I. ①模… II. ①朱… III. ①模具—结构设计—高等
职业教育—教材 IV. ①TG76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 112689 号

高等职业技术教育“十二五”规划教材

模具结构优化及 CAE 应用

主编 朱俊杰

*

责任编辑 孟苏成

助理编辑 罗在伟

特邀编辑 李 伟

封面设计 墨创文化

西南交通大学出版社出版发行

(四川省成都市金牛区交大路 146 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川五洲彩印有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 12

字数: 298 千字

2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-3076-7

定价: 24.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

模具乃工业之母,是现代工业生产中重要的工艺装备,是衡量一个国家生产力发展水平的重要标志之一,已成为现代工业生产的重要手段和工艺发展方向。

随着塑料新材料和注塑成型技术的发展,塑料制品的应用范围已从日用品扩大到机械电子、汽车、航空等领域,因而对其成型质量也提出了更高的要求。传统的依靠经验和直觉来设计模具已不能满足生产要求,企业越来越多地利用注塑模流分析技术来辅助塑料模具设计,使得设计人员在模具设计过程中及早发现模具和成型过程中可能存在的问题,从而可以更加快速地做出设计方案,有效地缩短设计生产周期并降低生产成本。Moldflow 软件为模具结构优化、注塑成型设计及生产提供了高效的解决方法。

本书的编写结合常见实例,以实例的方式讲解如何利用 Moldflow 软件进行产品成型分析和设计方案优化的基本过程和方法,主要包括:模流分析基础知识、Moldflow6.1 软件操作介绍、网格划分与修复、浇口位置设计、流动分析、冷却分析、翘曲分析、模具结构优化及工艺参数的调整等几个方面。

本书共分为 6 章,第 1 章简述了注塑成型 CAE 技术的发展状况,并详细介绍了 Moldflow 模流分析的基础知识;第 2 章介绍了 Moldflow6.1 软件的分析模块、操作界面、操作指令和 Moldflow 模流分析流程;第 3 章以翻盖手机中的翻盖前壳为案例,介绍了 MPI (Moldflow Plastic Insight) 软件中浇口位置的相关分析内容;第 4 章以翻盖手机中的翻盖后壳为案例,介绍了 MPI 软件中网格修复工具的使用,并详细介绍了手动创建浇注系统的方法和技巧;第 5 章以翻盖手机中的主机前壳为案例,详细讲述了模型冷却系统的创建思路和方法;第 6 章结合翻盖手机中的电池壳实例,介绍了如何利用 MPI 软件,通过调整注塑工艺参数的方法改善产品的质量缺陷,提高塑件的成型质量。

本书由朱俊杰(河源职业技术学院)任主编,刘军辉(河源职业技术学院)、王晖(河源职业技术学院)任副主编,梁丰(河源职业技术学院)任主审;参编人员还包括刘毅(广州金霸建材有限公司河源东源分公司)、沈志军(广州金霸建材有限公司河源东源分公司)。其中,朱俊杰编写第 1、2、4、6 章;刘军辉编写第 3 章;王晖编写第 5 章。为了方便读者学习,书中配有所有分析案例的源文件,有需要者请到西南交通大学出版社网站下载。

由于编者水平和经验有限,书中难免有欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2014 年 4 月

目 录

1	CAE 模流分析基础	1
1.1	注射成型 CAE 概述	1
1.2	注射成型理论基础	6
1.3	有限元理论知识	11
1.4	注射成型材料	12
1.5	塑件的常见缺陷及其原因和对策	23
	本章小结	32
2	Moldflow6.1 操作介绍	33
2.1	Moldflow 简介	33
2.2	Moldflow6.1 操作界面	36
2.3	Moldflow6.1 模流分析流程	51
	本章小结	52
3	塑件的浇口位置分析	53
3.1	浇口位置设计理论知识	53
3.2	翻盖手机前壳的浇口位置分析	54
	本章小结	72
4	塑件的流动分析	73
4.1	塑料熔体流动行为及设计原则	73
4.2	翻盖手机后壳的流动分析	75
4.3	分析结果的解读	123
	本章小结	129
5	塑件的冷却分析	130
5.1	冷却分析概述	130
5.2	翻盖手机主机前壳的冷却分析	133
5.3	分析结果的解读	145
	本章小结	151

6 塑件的注塑工艺参数优化	152
6.1 注塑工艺参数对塑件成型质量的影响	152
6.2 翻盖手机电池壳的初步成型分析	155
6.3 优化注塑工艺参数后的成型分析	175
本章小结	184
参考文献	185

1 CAE 模流分析基础

【内容提要】

本章简述了注射成型 CAE 技术的发展状况,并详细介绍了 Moldflow 模流分析的基础知识,主要包括:注射成型原理及其工艺特性、有限元理论、注射成型常用塑料及其性能特点、注塑件常见缺陷产生的原因及解决方法等基础知识,使读者能更好地掌握 Moldflow 模流分析的方法和技巧。

【知识目标】

- (1) 了解注塑成型 CAE 技术的发展状况。
- (2) 掌握注射成型原理及工艺特性。
- (3) 了解有限元理论知识。
- (4) 了解常用的注射成型材料。
- (5) 了解注塑件常见缺陷产生的原因及解决方法。

【学习重点】

Moldflow 模流分析所需的基本理论知识。

【知识建构】

1.1 注射成型 CAE 概述

注射成型 CAE 技术是根据塑料加工流变学和传热学的基本理论,建立塑料熔体在模具型腔中流动和传热的物理、数学模型,利用数值计算理论构造其求解方法,实现成型过程的仿真分析,使对注射成型过程的认识从宏观进入微观、从定性进入定量、从静态进入动态,利用计算机图形学技术在计算机屏幕上形象、直观地模拟出实际成型中熔体的动态填充、冷却等过程,定量地给出成型过程中的状态参数(如压力、温度、速度等)的计算机模拟过程。注射成型 CAE 技术可以在模具制造之前对塑料成型过程进行定量模拟,研究加工条件的变化规律,预测塑件设计、模具设计及成型条件对塑件结构和性能的影响,模拟成型缺陷的发生,为设计人员优化模具设计、控制制品成型过程、获得高质量的产品提供科学依据。

注射成型 CAE 技术已成为塑料产品开发、模具设计及成型加工中这些薄弱环节优化设计的最有效的途径。同传统的模具设计相比,近几年,塑料注射成型技术在汽车、家电、电子、

通信、化工和日用品等领域得到了广泛应用，其相关模具及工艺技术已逐步成为模具行业 CAD/CAE 技术研究的热点领域。

注射成型 CAE 软件的作用主要表现在以下几个方面：

(1) 优化塑料制品设计。塑料的壁厚、浇口位置及数量、流道系统的设计等对塑料制品的质量等影响很大。以往全凭设计者的经验，用手工方法实现，费时费力；而现在利用 CAE 技术，可快速设计出最佳的制品。

(2) 优化塑料模具设计。CAE 技术可以对型腔尺寸、浇口位置及数量、流道尺寸和冷却系统等进行优化设计。在计算机上模拟试模、修模和提高模具质量，以减少实际试模次数。

(3) 优化注射工艺参数。CAE 技术可以对注射过程进行模拟，发现可能出现的成型缺陷，确定最佳的注射压力、锁模力、模具温度、熔体温度、注射时间和冷却时间等。

由此可见，注射成型 CAE 技术无论在提高生产效率、缩短模具设计制造周期和保证产品质量方面，还是在降低成本、减轻劳动强度方面，都具有很大的优越性和重大的技术经济意义。

1.1.1 注射成型 CAE 发展历程

早在 20 世纪 50 年代，美国学者就对聚合物过程（尤其是塑化挤出）的数值模拟建模做了一系列工作；同期，瑞士学者给出了有关挤出的重要模型。1959 年，E.C.Bernhardt 在书中总结了成型建模中的许多问题。Mckelevy 在书中首次成功地描述了一个统一的方法，即采用质量守恒以及相变换的原理描述问题。Klein 和 Marshall 出版了有关塑料成型的计算机模拟的第一本专著。Tadmor 和 Klein 在书中首次给出了塑化挤出的完整模型，包括固体输送、塑化和熔体输送等。对于注射成型 CAE 技术而言，德国亚琛工业大学 IKV 塑料工程研究所的 Gilmore 和 Spencer 作为先驱，提出了圆管内保压的最大压力计算公式。

20 世纪 60 年代，Ballman 和 Pearson 等开始了简易 CAE 模型的开发，使得 IKV 的 Menges 的实验研究备受注目。20 世纪 70 年代，人们便能利用程序分析塑料熔体在简单型腔内的流动情况。有关塑化挤出模拟软件 EXTRUD 已商品化，该软件很大程度上是基于 Tadmor 和 Klein 书中所描述的模型。很多大学和企业的研究者都致力于注射、挤出和其他工艺的计算模型的研究。其中，Kamal 和 Keing 的差分模型、Tadmor 和 Broyer 的 FAN(Flow Analysis Network) 方法成为目前 CAE 模拟技术的基础。70 年代中期，实现了流道系统和二维模型相接的流动分析，为开发实用模型奠定了基础。直到 1978 年，C.Austin 推出了首套用于注射成型填充阶段的模拟软件 Moldflow。

进入 20 世纪 80 年代后，有限元分析法、边界元法才真正在注射成型领域得到广泛应用。80 年代初期，人们成功地利用有限元法分析了三维型腔的流动过程，可以根据理论分析结果，结合自身经验，在模具试模之前，对产品设计进行评价，对模具设计方案进行修改。这样，不但减少了制模时间，还提高了模具质量。随着 C-MOLD 软件的问世及其他一些软件广泛用于注射成型过程，模具设计才成为依赖于计算机预测的工程科学，CAE 技术也从试验阶段进

入实用阶段。其中,C-MOLD起源于1974年康奈尔大学 Prof K.K.Wang 领导的 Cornell Injection Molding Program (CIMP) 计划,该软件于1986年作为商业软件进行销售。80年代中期,我国也开始重视注塑模 CAE 技术,经过20余年的研究和开发,现有一些大学和研究院所已推出了一些实用的商品化软件。

20世纪90年代,人们已将研究重点置于材料的黏弹性、复杂三维模拟以及取向、残余应力和固化现象的研究。另外,计算方法在双螺杆挤出、热成型、薄膜吹塑、反应注射成型和气体辅助注射成型的工艺条件设定方面的应用,也成为研究热点。从90年代初到现在,CAE 技术已实现了塑料制品的最终预测:以三维模型代替二维模型,以非线性分析代替线性分析;在同一模型下,完成了填充、保压、冷却、翘曲分析;引入了概率统计,优化方法,使设计加工的方法量化,从而简化了计算,使计算结果更加准确可靠。

为了对各种成型加工过程进行更精确的模拟,目前,各国学者都在研究新模型、新算法及新的成型模拟系统,并将模拟软件与制品设计、模具设计与制造紧密结合,开发一体化的集成技术,与 CAD、CAM、CAPP、PDM、ERP 技术及软件的渗透、协调能力加强,使计算机模拟技术呈现智能化、集成化的趋势。可以预见,注射成型 CAE 技术将被广泛采用,成为解决塑料成型加工和模具设计中各类问题的标准工具和手段。

到目前为止,成熟的商业注射成型 CAE 软件比较多,Moldflow 公司的 Moldflow 软件和 AC-Tech 公司的 C-MOLD 软件(2002年2月,被 Moldflow 公司合并)是其中的优秀代表。

1.1.2 注射成型 CAE 技术研究进展及发展趋势

1. 注射成型 CAE 基本问题的研究进展

(1) 注射级塑料熔体的黏度模型。

在聚合物加工中,非牛顿黏度是塑料熔体最重要的性质,即熔体的黏度会随剪切速率的变化而改变,黏度的变化率可达到10,甚至1000。因此,对于注射成型加工过程的设计和计算来说,这样大幅度的黏度变化是不容忽视的。由于绝大多数塑料熔体属于非牛顿流体,表现出“剪切变稀”的特性,因此,分析计算时对牛顿流体加以推广,将牛顿黏滞定律加以修改,使黏度成为剪切速率的函数。其中,最具代表性的是 Ostwald 和 de Waele 的幂律模型、Carreau 黏度模型、Cross 黏度模型。幂律模型使用方便,计算简单,但其描述的流动范围有限,当剪切速率较低时,由幂律模型计算出的黏度值偏高。Carreau 黏度公式是从经验的非线性黏弹性本构关系得到的材料函数,模型参数在曲线回归意义上是非线性的,在使用上不如幂律模型方便。Cross 黏度模型则是目前在注射成型模拟中主要使用的模型。对于 Cross 模型,当剪切速率较低时,它退化为牛顿零剪切黏度;当剪切速率较高时,它转化为幂律模型;它适合于描述更宽范围的剪切速率变化,并且可以根据各自注射成型流动、保压的特点,分别利用 Arrhenius 方程和 WLF 方程建立五参数和七参数的黏度模型。

(2) 注射成型过程的流动分析。

流动分析是所有注射成型 CAE 软件所具备的最基本功能,主要用于预测熔体进入型腔后的填充过程。通过流动模拟可以帮助设计师确定合理的浇口数量和布置,优化注射成型工艺参数,预测所需的注射压力和锁模力,发现可能出现的成型缺陷。由于塑料熔体的非牛顿特性和流动过程的非等温、非稳定性,需要从连续介质力学一般理论出发建立控制,并借助数值方法(有限元、有限差分、边界元)来求解。

对于熔体充模过程的模拟计算可追溯到 1960 年,Toor 等最先用数值方法计算了塑料熔体的充模过程。随后,许多研究者针对充模流动建立了许多流体力学模型,主要是针对塑料熔体在等直径圆管、中心浇口圆盘以及端部浇口的矩形型腔中等一维等温流动过程。20 世纪 70 年代中期,Kamal、Broyer、Hieber 和 Shen 等基于 Hele-Shaw 流动模型对二维薄壁制作的充模流动进行了详细的理论研究。研究方法主要有分支流动法和网格流动法。分支流动法以一维流动分析为基础,把三维制件从几何上分解成一系列由一维流动单元串联组成的流动路径,在分析过程中,通过迭代计算,在满足各流动路径的流量之和等于总的注射量的条件下,使各流动路径的压力降相等。这种方法计算时间短,但难以分析形状复杂的制件。网格流动法的基本思想是将整个型腔划分为网格,并形成对应于各节点压力为变量的控制方程,并且根据节点体积单元的填充状况更新流动前沿。

运动边界的确定是二维流动的另一难点,即熔体前峰位置的确定。目前,被普遍采用的是 1986 年所建立的有限元/有限差分混合法,这种方法沿用网格流动法的基本思想,采用三角形线性单元定义控制体积,利用控制体积法建立压力场求解的有限元方程,并对时间和沿厚度方向进行差分,建立温度场求解的能量差分方程。在计算时,假定入口点处于充满状态,计算过程保证每一个时间步长只有一个点被充满,而与之相连的空点成为新的前沿点,实现熔体前峰面的自动跟踪和更新,直到整个型腔被完全充满。

(3) 注射成型过程中的保压分析。

塑料熔体冷却凝固后体积变化很大,因此,型腔充满后必须保持压力,使熔体继续进入型腔补偿因冷却所引起的收缩。保压阶段对于提高制品的密度、减少收缩和克服制品表面缺陷有重要的作用。保压模拟能够预测保压过程中型腔内的压力场、温度场、密度分布和剪切应力分布等,帮助设计人员确定合理的保压压力和保压时间等。

保压过程的分析始于 20 世纪 50 年代初,Spencer 和 Gilmore 提出了圆管内保压压力的经验计算公式;Kamal 和 Keing 对中心浇口的半圆盘型腔内的保压过程进行了计算,认为保压过程中流入型腔的熔体和充模时的型腔压力及型腔内的平均压力成正比,但没有考虑流体力学因素。随后,Kamal 等基于 Hele-Shaw 流动模型采用等温幂律流体研究了矩形平板型腔的保压过程,并且认为密度随压力的变化呈线性关系。Chung 和 Ryan 在 Kamal 的研究基础上,考虑到压力对黏度的影响以及非等温效应对沿厚度方向密度分布的影响,采用有限差分法求解了不同初、边值问题的非线性方程。Hieber 同样基于 Hele-Shaw 流动模型,研究了薄壁制件的非等温保压过程,建立了塑料熔体非等温、可压缩非稳态流动的数学模型,在分析中采用了七参数 Cross 黏度模型和 Tait 经典状态方程对液-固界面上的密度不连续性进行了正

确处理,并利用有限元/有限差分混合法求解。Nguyen 和 Kamal 基于 Maxwell 黏弹性本构模型研究了二维制件的等温保压过程,并采用 Galerkin 有限元法进行了数值求解,除压力和速度分布外,得到了平面内的应力分布。

(4) 注塑模冷却系统分析。

冷却过程在整个注射生产周期中几乎占 2/3 以上,因此,注塑模冷却系统的设计直接影响着注射生产效率和制件质量。完善的冷却系统设计既能显著减少冷却时间,还可以消除由于冷却不均匀所引起的翘曲变形和内部残余热应力。

热传导理论是注塑模冷却系统设计和分析的理论基础,综合冷却管道中的冷却介质传热、塑料熔体固体放热、模具与周围介质传热的三维瞬态热传导分析是最一般和严格的方法。Kamal 和 Laffleur 在总结结晶聚合物冷却分析理论的基础上,建立了结晶聚合物塑料熔体的热传导理论模拟。Barone 和 Caulk 首先采用边界元法对注塑模和压铸模传热系统进行了优化设计。Rezayat 和 Button 在对型腔表面和冷却管道作了特殊处理的基础上,采用三维边界元法实现了注塑模冷却过程的数值模拟。Himasekhar 等对各种计算方法的效率和精度进行了详细比较,提出了周期性平均(Cycle-average)理论分析方法。它的基本思路是将模具的传热过程看作三维周期性稳态热传导过程,把塑料熔体的传热过程看作是一维瞬态热传导过程,把冷却管道表面和冷却介质之间、模具表面和空气之间的热交换作为稳态处理,利用三维边界元法计算模具的温度场分布,而采用一维差分方法计算熔体的温度场分布。为了保证熔体和型腔表面之间温度场和热流矢量的匹配,必须耦合迭代计算两个温度场。

2. 注射成型 CAE 技术发展趋势

经过多年的发展,注射成型 CAE 技术从理论上和应用上都取得了长足的进步,未来在以下几个方面仍有待进一步完善和发展。

(1) 注射成型 CAE 数学模型、数值算法逐步完善。

注射成型 CAE 技术的实用性,取决于数学模型的准确性及数值算法的精确性。目前的商品化模拟软件模型没有完全考虑物理量在厚度方向上的影响,为了进一步提高软件的分析精度和使用范围,必须进一步完善目前的数学模型和算法。目前,注射成型模拟软件各模块的开发是基于各自独立的数学模型,这些模型在很大程度上进行了简化,忽略了相互之间的影响。因此,必须有机地结合填充、流动、保压和冷却等分析模块,进行耦合分析,才能综合反映注射成型的真实情况。

(2) 注射成型 CAE 与 CAD/CAM 的集成化。

大多数商用的 CAD/CAM 系统原本是作为通用机械设计平台来开发的,并不针对注射成型。CAE 软件与 CAD/CAM 软件之间的数据传递主要依靠文件的转换,这容易造成数据的丢失和错误。未来将开发注射成型专用的 CAD/CAM/CAE 系统,这些系统不仅将通用的 CAD/CAM 系统的功能进行了进一步扩充,以适应注射成型设计和制造的需要,还增加了流动、冷却分析,标准模架数据库,塑料材料数据库等一系列专用软件。

(3) 智能化分析成型过程。

优化理论及算法，使 CAE 技术“主动”地优化设计。将人工智能技术，如专家系统和神经网络等加入设计计算中，使模拟程序能“智能”地选择注塑工艺参数，提供修正制品尺寸和冷却管道布置方案，减少人工对程序的干涉。

1.2 注射成型理论基础

塑料成型的方法有很多种，包括注射成型、压缩成型、压注成型、挤出成型等。其中，注射成型方法最为常用，其技术已经发展得相当成熟、可靠，它具有成型周期短，能一次成型外形复杂、尺寸精确、带有镶件的塑件制件；对成型各种塑料的适应性强；生产效率高，易于实现全自动化生产的一系列优点。因此，注射成型广泛用于塑料制件的生产中，其产品占目前塑料制件生产的 30% 左右。

1.2.1 注射成型的特点及原理

注塑制品的加工过程主要是在注射机上完成的。注射成型的基本原理为：利用塑料的可挤压性和可模塑性，首先将松散的粒料或粉状成型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高压推动下，以很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。经过一段时间保压、冷却定型后，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。注塑机和模具示意图如图 1.1 所示。

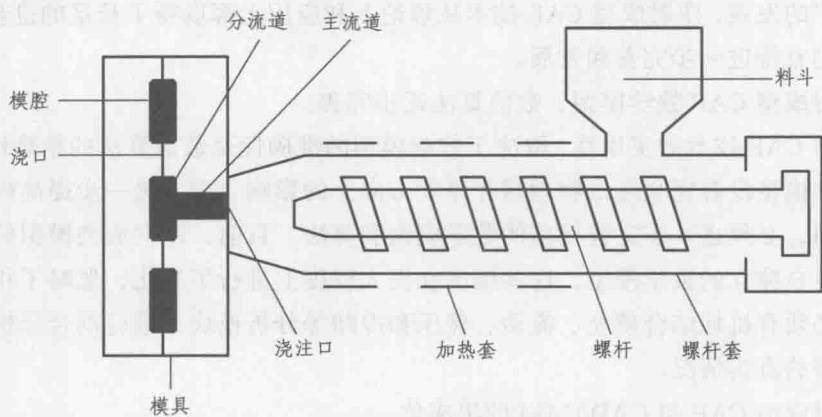


图 1.1 注塑机和模具示意图

1.2.2 注射成型工艺

注射成型工艺过程如图 1.2 所示。完整的注射成型生产过程主要分为预塑计量、注射充模和冷却定型 3 个过程。下面详细分析注射成型生产过程中的各个主要环节。

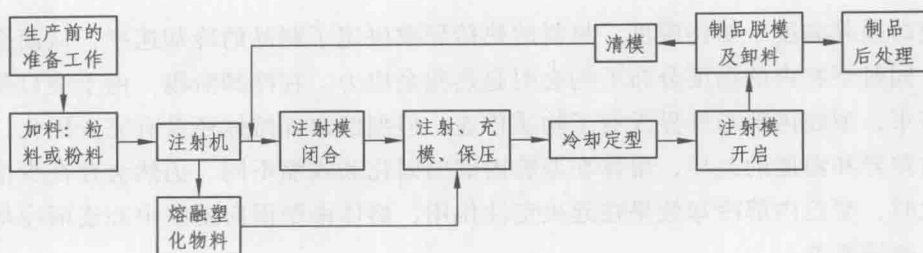


图 1.2 注射成型工艺过程

1. 预塑计量

预塑计量过程是高分子材料在料筒中进行塑化的过程,是把固体的粒料或粉料经过加热、压实、混合,从玻璃态转变为均化的黏流态。所谓“均化”是指聚合物在注塑机热熔管内由固态转为熔融状时,使熔体保证温度、黏度、密度、组成成分一致性的过程。

2. 注射充模

柱塞或螺杆从机筒内的计量位置开始,通过注射油缸和活塞施加高压,将塑化好的塑料熔体经过机筒前端的喷嘴和模具中的浇注系统快速地进入封闭模腔的过程称为注射充模。注射充模又可细分为流动充模、保压补缩两个阶段。

(1) 流动充模。

流动充模指注射机将塑化好的熔体注射进入模腔的过程。在这个阶段模具闭合,熔体在压力的驱动下注入模腔。注射时间、熔体温度、流动速率是影响最终制品质量的重要因素。注射时间直接影响注射压力。注射时间短,熔体需要以较高的体积流率流入型腔,则注射压力就大。而当注射时间过长时,由于熔体在冷模壁的作用下温度降低,黏度增大,使流动阻力变大,则注射压力又变大。熔体温度对最终制品的质量特性也有重要的影响,熔体温度影响熔体的黏度,决定了熔体的流动阻力。温度越低,黏度越高,则熔体流动性越差,充模越困难;反之,温度升高会降低熔体的黏度,使充模容易。

(2) 保压补缩。

保压补缩指从熔体充满模腔至柱塞或螺杆在机筒中开始后撤为止。其中,保压是指注射压力对模腔内的熔体继续进行压实的过程;而补缩则是指在保压过程中,注射机对模腔逐渐开始冷却的熔体因成型收缩而出现的空隙进行补料动作。当模腔被完全充满后,螺杆在原位置保持一定的时间,使得熔体继续充入型腔,在这个阶段,额外的熔体注入型腔以弥补冷却引起的收缩。随着冷却的进行,尺寸较小的浇口凝固,此时模具内的熔体仍然保持很高的压力,当熔体继续冷却和固化,压力逐渐降低。在冷却和固化阶段,型腔内的压力必须足够高,以避免冷却引起的缩痕,但过高的压力又会使熔体从型腔向外倒流。保压时间和保压压力是保压阶段两个重要的工艺参数。

3. 冷却定型

冷却定型是从浇口冻结时间开始,到制品脱模为止。在冷却阶段,制品固化。通常,

冷却阶段的模具温度、熔体温度、材料的热传导率决定了制品的冷却速率，从而会影响内部结晶，同时型腔内的温度分布不均会引起热残余应力。在冷却阶段，由于浇口凝固，型腔补料结束，型腔内部与外界没有了物质传递。但型腔内部熔体还没有完全固化，由于模具结构的差异和温度的差异，熔体在型腔内部的固化和收缩不同，仍然会存在少量熔体的流动。此时，型腔内部冷却效果在起决定性作用，熔体由壁面向型腔中心逐渐冷却固化，直到满足脱模要求。

1.2.3 注塑工艺参数

通常影响注射成型质量的因素很多，但在塑料材料、注射机和模具结构确定之后，注射成型工艺条件的选择与控制，便是决定成型质量的主要因素。一般来讲，注射成型具有三大工艺条件，即温度、压力和时间。与温度有关的条件有：机筒温度，模具温度，因背压及熔体在流道、浇口、型腔中在摩擦、剪切作用下产生的热量而引起的温升。与压力有关的条件有：注射压力、保压压力和塑化压力（又称为背压）。与时间有关的条件有：注射时间、注射速率、保压时间、冷却时间及材料塑化时间等。下面主要从注塑工艺角度理解一些关键的参数。

1. 温 度

注射成型时的温度条件主要指料温和模温。其中，料温影响塑化和注射充模；而模温同时影响充模与冷却定型。

（1）料温：指的是塑化物料的温度和喷嘴注射出的熔体温度。料温主要取决于机筒和喷嘴两部分的温度，影响物料的塑化和熔体的注射充模。注射温度的提高主要有利于改善熔体的流动性，它与制品的很多特性有关。升高熔体温度，可使塑件内应力、流线方向的冲击强度和挠曲度、拉伸强度等机械力学性能降低。而使垂直于流线方向的冲击强度、流动长度、表面粗糙度等性能有所改善，并可降低制品的后收缩。从总体上看，提高熔体温度有利于改善充模状况以及在模腔内的传递，降低取向性等，有利于制品综合性能的提高，但过高的温度也不可取。当熔体温度接近注塑温度范围的上限值时，一方面容易产生较多的气体，使塑件产生气泡、空洞、变色、烧焦等，也因过多地改善流动性而产生飞边，影响制品外观质量；另一方面，过高的温度会使塑料发生降解作用，使塑件强度降低、失去弹性等，影响塑件的使用性能。因此，料温必须很好地控制。

（2）模温：指的是和制品接触的模腔表面的温度，它直接影响熔体的充模流动行为、制品的冷却速度和成型后的制品性能。模温的设定主要取决于熔料的黏度。熔料黏度较低的可以采取低模温注射以缩短冷却时间，提高生产效率。熔料黏度较高的应采用高模温注射成型。一般来说，提高模温可以使制件的冷却速率均匀一致，防止凹痕和裂纹等成型缺陷的产生。结晶型塑料的模温控制直接决定了冷却速率，从而进一步决定结晶的速率。模温高时冷却速率小，结晶速率变大，有利于分子的松弛过程，分子取向效应小。模温太高，会延长成型周

期和使产品发脆。模温低时冷却速率大，熔料的流动与结晶同步进行，由于熔料在结晶温度区间停留的时间缩短，不利于晶体的生长，造成产品的分子结晶程度较低，影响其使用性能。此外，模温过低，塑料熔体的流动阻力很大，流速变缓，甚至在充模中凝固，妨碍后续进料，使得制件短射，强迫取向大，常造成塑件缺料、凹陷、熔接缝等缺陷。因此，要保证制品的成型质量，必须有一个高低适宜的模温范围。

2. 压 力

注射成型时需要选择与控制的压力包括注射压力、保压压力和背压力。注射压力与注射速度相联系，对塑料熔体的流动和充模具有决定作用。保压压力与保压时间密切相关，主要影响模腔压力以及最终的成型质量。背压力的大小影响物料的塑化过程、塑化效果和塑化能力，并与螺杆转速有关。

(1) 注射压力：指螺杆向前移动时，其头部对塑料熔体施加的压力。注射压力在注射成型过程中主要用来克服熔体在整个注射成型系统中的流动阻力，同时还对熔体起一定程度的压实作用。注射压力过低，在注射成型过程中因压力损失过大而导致模腔压力不足，熔体很难充满模腔；但压力过大，却有可能出现胀模、溢料、机器过载等不良现象。若忽略熔体流动阻力，注射压力可用如下公式表示：

$$p_1 = \frac{4F}{\pi D^2} \approx \frac{F}{0.785 D^2} \quad (1-1)$$

式中 p_1 ——注射压力，Pa；

F ——注射机油缸压力，N；

D ——螺杆直径，m。

(2) 保压压力：指在注射成型的保压补缩阶段，为了对模腔内的塑料熔体进行压实，以及为了维持向模腔内进行补料流动所需要的注射压力。保压压力直接影响制品的密度和收缩的大小，其大小取决于模具对熔体的静水压力，并与制品的形状、壁厚有关。保压压力也可以根据制品的质量要求通过试验确定。

(3) 背压力：也称塑化压力，指螺杆在预塑成型物料时，其前端汇集的熔体对它产生的反压力。背压力对注射成型的影响主要体现在螺杆对物料的塑化效果及塑化能力方面。它的控制是通过调节注射油缸的回油节流阀来实现的。背压力太低，螺杆后退过快，流入炮筒前端的熔料密度很小（较松散），夹入空气较多。背压太高，螺杆后退过慢，预塑回料时间较长，会增加周期时间，导致生产效率下降。适当调节背压力可将熔料内的气体“挤出”，减少制品表面的气花、内部气泡，提高光泽均匀性。减慢螺杆后退速度，使炮筒内的熔料充分塑化，增加色粉、色母与熔料的混合均匀度，避免制品出现混色现象。

3. 时 间

注射机完成一次注射成型工艺过程所需要的时间叫作注射成型周期。它包含注射成型过

程中所有的时间问题，直接关系到生产效率的高低。注射成型周期的时间组成如图 1.3 所示，下面主要阐述成型周期中最重要的注射时间和冷却时间。

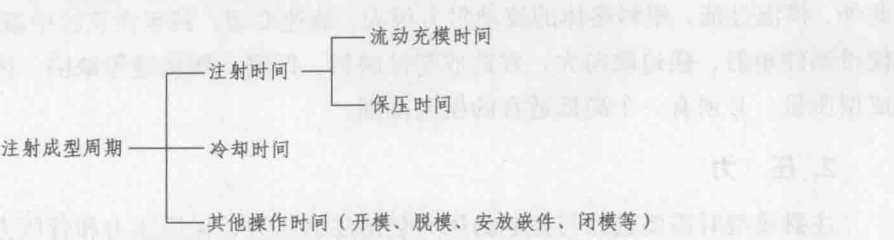


图 1.3 注射成型周期的时间组成

(1) 注射时间：指注射活塞在注射油缸内开始向前运动至保压补缩（活塞后退）为止所经历的全部时间。它的长短与塑料的流动性能、制品的几何形状和尺寸大小、模具浇注系统的形式、注射方式和其他一些工艺条件等许多因素有关。注射时间可由以下公式估算：

$$t_i = \frac{V}{nq_{GV}} \tag{1-2}$$

$$q_{GV} = \frac{1}{6} \gamma b h^2 \tag{1-3}$$

- 式中 t_i ——注射时间，s；
 V ——制品体积， m^3 ；
 n ——模具中的浇口数目；
 q_{GV} ——熔体通过浇口时的体积流量， m^3/s ；
 γ ——熔体经过浇口时的剪切速率， s^{-1} ；
 b ——浇口截面宽度，m；
 h ——浇口截面高度，m。

(2) 冷却时间：指注射结束到开启模具这一阶段所经历的时间。它的长短受模腔中的熔体温度、模具温度、脱模温度和制品厚度等因素的影响。确定闭模冷却时间终点的原则为：制品脱模时应该具有一定的刚度，不得因温度过高而发生翘曲和变形。在保证此原则的条件下，冷却时间应尽量短一些；否则，不仅会延长成型周期、降低生产效率，而且对复杂制件会造成脱模困难。通常，制件最短的冷却时间可按下式估算：

$$t_{c,min} = \frac{h_z^2}{2\pi\alpha} \ln \left[\frac{\pi}{4} \left(\frac{\theta_R - \theta_M}{\theta_H - \theta_M} \right) \right] \tag{1-4}$$

- 式中 $t_{c,min}$ ——最短冷却时间，s；
 h_z ——制品的最大厚度，m；
 α ——塑料的热扩散率， m^2/s ；
 θ_R ——熔体充模温度， $^{\circ}C$ ；
 θ_M ——模具温度， $^{\circ}C$ ；
 θ_H ——制品的脱模温度。

1.3 有限元理论知识

Moldflow 模流分析技术的基本思想是工程领域中常用的有限元法。有限元法的应用从最初的离散性系统发展到进入连续介质力学之中,其广泛应用于工程结构强度、热传导、电磁场、流体力学等领域。经过多年的发展,现代的有限元法还可以用来求解所有的连续介质和场问题,包括静力问题和与时间有关的变化问题以及振动问题。

有限元法是利用假想的线或面将连续的介质的内部和边界分割成有限大小的、有限数量的、离散的单元来研究,这样,就把原来一个连续的整体简化成有限个单元的体系,从而得到真实结构的近似模型,最终的计算就是在这个离散化的模型上进行,其网格模型如图 1.4 所示。



图 1.4 有限元网格模型

1.3.1 有限元法的基本思想

将一个连续系统(包括杆单元、连续体、连续介质)离散化即分割成彼此用节点互相联系的有限的单元,如图 1.5 所示。

有限元法的实质是把具有无限个自由度的连续系统理想化为只有有限个自由度的单元集合体,使问题转化为适合于数值求解的结构性问题。有限元法的基本求解步骤如下:

- (1) 将连续系统离散成有限个自由度的单元集合体;
- (2) 确定单元集合体的场量分布;
- (3) 构建单元集合体内节点的未知量与载荷间的平衡方程;
- (4) 求出以节点为基本未知量的基本方程组;
- (5) 解方程组,求出各节点的未知量。

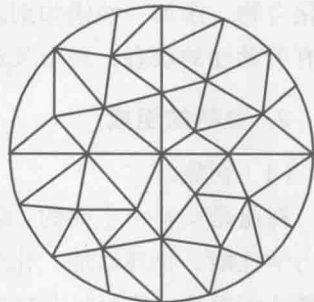


图 1.5 离散化的连续系统

1.3.2 有限元法的特点

1. 原理清晰, 概念明确

有限元法的原理清晰, 概念明确。用户可以在不同的水平上建立起对该方法的理解, 并且根据个人的实际情况来安排学习的计划和进度, 既可以通过直观的物理意义来学习和使用, 也可以从严格的力学概念和数学根据推导。

2. 应用范围广, 适应性强

有限元法可以用来求解工程中许多复杂的问题, 特别是采用其他数值计算方法求解困难