

SULIAO ZHUSHE ZHIPIN QUEXIAN
YU **CAE** FENXI

钱欣 金杨福 编著

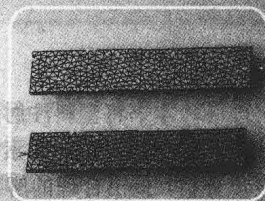
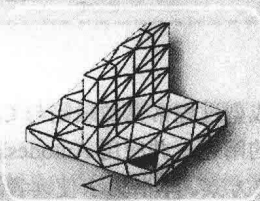
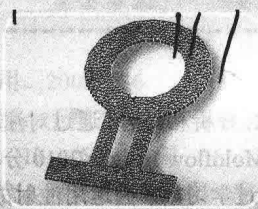
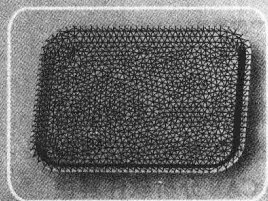
塑料注射制品缺陷与

CAE

分析



化学工业出版社



SULIAO ZHUSHE ZHIPIN QUEXIAN
YU CAE FENXI

钱欣 金杨福 编著

塑料注射制品缺陷与

CAE

分析



化学工业出版社

·北京·

本书将塑料注射成型过程常见的缺陷与 CAE 分析相结合,通过对注射成型过程常见的缺陷产生原因及影响因素的阐述,并应用 Autodesk Moldflow Insight 2010 分析技术对缺陷加以模拟分析,提出合理的解决方案。本书力求使读者通过学习,掌握运用注射成型 CAE 分析软件解决问题的能力。

本书可供注射成型行业技术人员参考,也可作为大专院校高分子材料、塑料成型与模具等相关专业的教材及相关培训资料。

图书在版编目(CIP)数据

塑料注射制品缺陷与 CAE 分析 / 钱欣, 金杨福编著.
北京: 化学工业出版社, 2010.1
ISBN 978-7-122-07146-0

I. 塑… II. ①钱… ②金… III. 注塑-缺陷-计算机辅助分析 IV. TQ320.66-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 212292 号

责任编辑: 白艳云

文字编辑: 冯国庆

责任校对: 郑捷

装帧设计: 周遥

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印装: 大厂聚鑫印刷有限责任公司

720mm×1000mm 1/16 印张 12½ 字数 239 千字 2010 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 36.00 元

版权所有 违者必究

前 言

塑料注射成型是一个复杂的过程,一个合格产品的生产需要制品设计、模具设计、原料选择和成型工艺控制等多方面的协调一致。传统的生产方法是依据经验进行模具设计和制造,在试模过程出现的制品缺陷通过反复修模和工艺调试加以解决。随着产品开发周期的缩短和品质要求的提高,传统的生产方式已不能适应现代发展的需求。CAE技术的应用使人们可以对注射成型过程塑料熔体在模具型腔中的流动及冷却、固化过程进行模拟分析和预测,以便在模具制造之前发现制品设计和模具设计中存在的问题,修改设计而不是返修模具。

Moldflow Insight 作为技术领先的注射成型 CAE 软件,源于 1978 年澳大利亚皇家墨尔本技术学院 Colin Austin 开发的流动分析软件,2000 年 Moldflow 公司与美国 Advanced CAE Technology Inc.进行了战略性合并,成为领先全球的注射成型 CAE 软件公司,在技术上将美国 Advanced CAE Technology Inc.的 C-Mold 软件与 Moldflow 软件全面融合,在 2001 年推出 Moldflow Plastics Insight 3.0 版本,使 Moldflow Insight 在全球注塑 CAE 软件市场占有率大于 80%。2008 年 Moldflow 公司并入全球最大的 PC 设计软件公司 Autodesk,并于 2009 年 7 月发行了在 Moldflow Plastics Insight 6.2 版本基础上开发出 Autodesk Moldflow Insight 2010。

本书是我们编写的以 Moldflow Insight 2010 版本为对象的两册教材之一,第一册为《Moldflow Insight 2010 注射成型分析基础》,主要介绍 Moldflow Insight 2010 软件的基本操作和应用;本册《塑料注射制品缺陷与 CAE 分析》是在掌握了 Moldflow Insight 2010 软件操作的基础上,介绍如何运用该软件分析塑料注射成型过程常见的缺陷,本书还对导致制品常见缺陷的典型影响因素进行大量的实例分析,力求使读者能够通过本书的学习掌握运用 Moldflow Insight 2010 软件的技术分析注射成型过程产生的问题并加以解决的能力。

由于本书的编写较为匆忙,加之我们对软件的理解有限,书中难免存在不足之处,热忱希望读者提出宝贵意见,帮助我们不断完善。同时感谢在本书立项和出版过程中给予我们的支持和帮助同仁,在本书的编写过程中得到了研究生孙佳楠、陈志和黄俊东在前期资料准备和建模等方面给予的帮助。

编 者

2009 年 10 月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 注射成型制品生产过程	1
1.1.1 注射成型过程	1
1.1.2 注射成型工艺条件控制	2
1.1.3 注射成型设备	4
1.2 注射成型的 CAE 分析技术	6
1.2.1 注射过程的 CAE 技术	6
1.2.2 注射成型 CAE 技术的发展历史	7
1.2.3 注射成型 CAE 技术的作用	8
1.2.4 主要注射成型 CAE 软件介绍	10
第 2 章 Moldflow Insight 2010 软件介绍	18
2.1 Moldflow Insight 2010 用户界面	18
2.2 Moldflow Insight 2010 模型分析技术	20
2.2.1 中面模型分析技术	20
2.2.2 双域模型分析技术	21
2.2.3 三维实体分析技术	23
2.3 Moldflow Insight 软件分析流程	24
2.3.1 新建工程项目	24
2.3.2 导入或新建 CAD 模型	24
2.3.3 划分网格	25
2.3.4 网格质量检查与修正	25
2.3.5 选择分析类型	26
2.3.6 选择成型材料	26
2.3.7 工艺参数	28
2.3.8 分析	28
2.3.9 查看分析结果	28
2.3.10 复制分析案例	29
2.3.11 设置分析类型	29
2.3.12 设置浇口位置	29

2.3.13	工艺参数设置	29
2.3.14	分析	30
2.3.15	结果查看	30
第 3 章	制品的收缩与 CAE 分析	34
3.1	注射制品收缩的过程和产生原因	34
3.1.1	注射制品的收缩过程	34
3.1.2	注射制品收缩产生的原因	37
3.2	影响注射制品收缩的因素	37
3.2.1	产品的结构设计因素	38
3.2.2	模具设计因素	39
3.2.3	材料因素	42
3.2.4	加工工艺参数因素	51
3.2.5	环境因素	56
3.3	注射制品收缩的 CAE 分析	58
3.3.1	制品收缩的 CAE 分析方法	58
3.3.2	浇口位置对收缩的影响	63
3.3.3	制品壁厚对收缩的影响	66
3.3.4	材料改变对收缩的影响	70
3.3.5	收缩的方向性	73
3.3.6	工艺参数改变对收缩的影响	75
第 4 章	制品翘曲变形与 CAE 分析	79
4.1	注射制品产生翘曲变形原因	79
4.2	翘曲变形的研究概况	81
4.2.1	实验法研究现状	81
4.2.2	理论分析法研究现状	82
4.3	影响制品翘曲变形的因素	84
4.3.1	材料因素	84
4.3.2	制品的结构设计因素	84
4.3.3	模具设计因素	86
4.3.4	注射加工工艺条件	88
4.4	制品翘曲变形的 CAE 分析	89
4.4.1	Moldflow 翘曲变形的分析方法	89
4.4.2	浇口位置对翘曲变形的影响	94
4.4.3	浇口数目对翘曲变形的影响	98
4.4.4	材料种类对翘曲变形的影响	101

4.4.5	保压压力改变对翘曲变形的影响	105
第 5 章	制品残余应力与 CAE 分析	110
5.1	注射制品残余应力种类及其分布规律	110
5.1.1	流动取向应力	110
5.1.2	热应力	111
5.1.3	顶出应力	113
5.1.4	残余应力在制品中的分布规律	114
5.2	制品残余应力的测试方法	116
5.2.1	逐层剥离法	116
5.2.2	钻孔法	117
5.2.3	应力松弛法	120
5.2.4	超声波法	121
5.2.5	X 射线和中子射线衍射法	122
5.2.6	光学双折射法	122
5.3	影响制品残余应力的因素	123
5.3.1	制品结构设计因素	124
5.3.2	模具设计的因素	125
5.3.3	材料因素	125
5.3.4	成型工艺因素	126
5.4	降低制品残余应力的方法	128
5.5	制品残余应力的 CAE 分析	130
5.5.1	Moldflow Insight 制品残余应力的分析方法	130
5.5.2	影响残余应力的因素分析	132
第 6 章	制品的熔接痕与 CAE 分析	141
6.1	概述	141
6.1.1	熔接痕的类型	141
6.1.2	熔接痕的形成条件及熔接痕的特征	143
6.2	熔接痕的形成机理	144
6.3	影响制品产生熔接痕的因素	147
6.3.1	材料的影响	147
6.3.2	成型工艺条件的影响	151
6.3.3	制件结构的影响	153
6.3.4	模具结构的影响	156
6.4	克服熔接痕的基本方法	157
6.4.1	材料的选择	157

6.4.2	制件结构的设计	159
6.4.3	模具结构的设计	159
6.4.4	工艺条件的控制	160
6.4.5	采用注射新工艺消除熔接痕	160
6.5	通过 CAE 分析预测和改变熔接痕的位置和性能	163
6.5.1	制品熔接痕的 CAE 分析方法	164
6.5.2	通过浇口位置改善熔接痕的质量	166
6.5.3	通过熔接痕的位置判断对制品性能的影响	168
第 7 章	其他缺陷的 CAE 分析	170
7.1	制品缺料分析	170
7.1.1	制品缺料产生原因及处理	170
7.1.2	滞流导致缺料的 CAE 分析	171
7.2	多型腔浇注系统不平衡流动分析	177
7.2.1	相同制品的浇注体系平衡分析	179
7.2.2	不同制品的浇注体系平衡分析	183
参考文献		188

第1章

概述

1.1 注射成型制品生产过程

1.1.1 注射成型过程

注射成型是把塑料原料加入注射机料筒中，经过螺杆的旋转使塑料向前输送，同时机筒加热使其熔化成为熔体，贮存在注射机机筒的前端，当螺杆作为加压工具快速向前推进时，塑料熔体以高压通过喷嘴注入模具型腔中，经过冷却、凝固后从模具中脱出，成为塑料制品。如图 1-1 所示为注射成型的各个过程的框图。

注射成型过程可以分为如下几个阶段。

① 塑化阶段 原材料加入料斗以定容方式送入料筒，通过料筒外的电加热装置和料筒内螺杆旋转的摩擦热使塑料由固态变为高黏度熔融液态，达到一定的温度后转入注射充模阶段。

② 注射充模阶段 目前注射机上通常是采用螺杆式的塑化装置。注射充模工作是由螺杆的推进完成的，熔体自注射机的喷嘴喷出后，进入模具的型腔，把型腔内的空气排出，并充满型腔，然后升高到一定的压力，使熔体的密度增加，充实型腔的各部位，完成注射充模阶段。注射充模过程是注射成型中最重要的过程，由于塑料熔体是非牛顿流体且黏度很大，所以在充模过程中的压力损耗、黏度变化、多股汇流等现象影响着塑件的质量。

③ 冷却凝固阶段 热塑性塑料的注射成型过程是热交换的过程。热交换效果的优劣，决定塑件的质量，也是模具设计时所考虑的一个重要因素。

④ 脱模阶段 塑件在型腔内固化后，必须用机械方法把它从型腔中取出。这个动作要由脱模机构来完成。不合理的脱模机构对塑件的质量有很大影响，但塑件的几何形状是千变万化的，所以必然采用最有效和最适当的脱模方式。

在注射成型周期中，各个阶段占整个周期时间的比例如图 1-2 所示，可以发现保压时间和冷却时间占整个成型时间的比例较大，两者之和约为 80%。

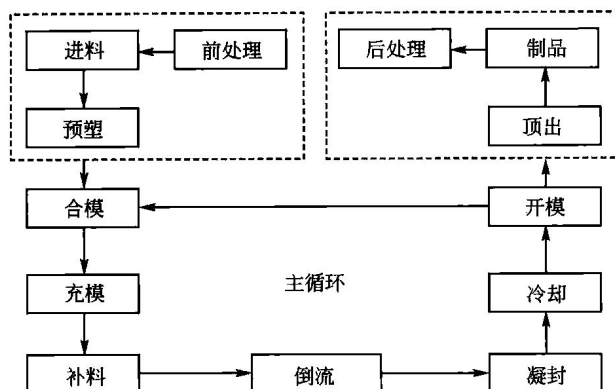


图 1-1 塑料注射成型的各个过程的框图

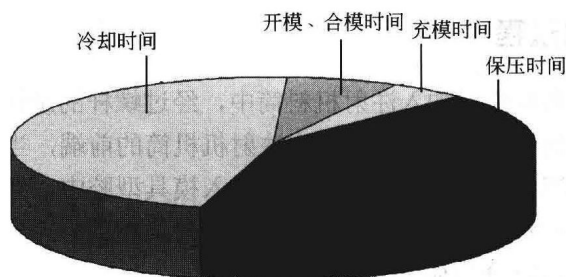


图 1-2 注射成型中各个阶段所占时间

1.1.2 注射成型工艺条件控制

注射成型工艺的核心问题是要求得到塑化良好的塑料熔体并把它顺利注射到模具中去，在控制的条件下冷却定型，最终得到合乎质量要求的制品。因此，注射最重要的工艺条件是影响塑化流动和冷却的温度、压力及相应的各个作用的时间。

1.1.2.1 温度

注射成型过程需要控制的温度包括注射机机筒温度、喷嘴温度和模具温度。前两者关系到塑料的塑化和流动，后者关系到塑料在模具中的流动与成型。

(1) 机筒温度 机筒温度的控制决定了料温的高低，而料温主要决定于塑料的性质，必须把塑料加热到黏流温度 (T_f) 或熔点 (T_m) 以上，但必须低于其分解温度 (T_d)。

料温对注射成型工艺过程及制品的物理力学性能有密切关系。随着料温升高，熔体黏度下降，料筒、喷嘴、模具的浇注系统的压力降减小，塑料在模具中流程就

长;但若料温太高,易引起塑料热降解,制品物理力学性能降低;而料温太低,则容易造成制品缺料,表面无光,有熔接痕等,且生产周期长,劳动生产率降低。

在决定料温时,必须考虑塑料在料筒内的停留时间,这对热敏性塑料尤其重要,随着温度升高物料在料筒内的停留时间缩短。

注射机机筒温度通常从料斗起至喷嘴分段控制,由低到高,以利于塑料逐步塑化。各段之间的温差为 $30\sim 50^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 喷嘴温度 塑料在注射时是以高速度通过喷嘴的细孔的,有一定的摩擦热产生,为了防止塑料熔体在喷嘴处可能发生“流延现象”,通常喷嘴温度略低于料筒的最高温度。

(3) 模具温度 模具温度不但影响塑料充模时的流动行为,而且影响制品的物理机械性能和表观质量。

结晶型塑料注射充模后,会发生冷却结晶,冷却速率将影响塑料的结晶速率。模温控制较高(缓冷),结晶速率大,有利结晶,能提高制品的密度和结晶度,制品成型收缩性较大,刚度大,力学性能较高,但伸长率和冲击强度下降。相反,模温控制较低(骤冷),所得制品的结晶度下降,韧性较好。但骤冷不利于大分子的松弛过程,分子取向作用和内应力较大。中速冷却塑料的结晶和取向较适中,是常用的条件。

无定形塑料注射充模时,不发生结晶过程,模温的高低主要影响熔体的黏度和充模速率。在顺利充模的情况下,较低的模温可以缩短冷却时间,提高成型效率。所以对于熔融黏度较低的塑料,一般选择较低的模温;反之,必须选择较高模温。选用低模温,虽然可加快冷却,有利提高生产效率,但过低的模温使浇口过早凝封,引起缺料和充模不满。

1.1.2.2 压力

注射过程中的压力包括塑化压力(背压)、注射压力和保压压力,是塑料塑化、充模和成型的重要因素。

(1) 塑化压力(背压) 预塑化时,塑料随螺杆旋转,塑化后堆积在料筒的前部,在螺杆的端部塑料熔体产生一定的压力,称为塑化压力,或称螺杆的背压,其大小可通过注射机油缸的回油背压阀来调整。

螺杆的背压影响预塑化效果。提高背压,物料受到剪切作用增加,熔体温度升高,塑化均匀性好,但塑化量降低;螺杆转速低则延长预塑化时间。

螺杆在较低背压和转速下塑化时,螺杆输送计量的精确度提高。对于热稳定性差或熔融黏度高的塑料应选择较低的转速;对于热稳定性差或熔体黏度低的塑料则选择较低的背压。螺杆的背压一般为注射压力的 $5\%\sim 20\%$ 。

(2) 注射压力 注射压力的作用是克服塑料在料筒、喷嘴及浇注系统和型腔中

流动时的阻力, 给予塑料熔体足够的充模速率, 能对熔体进行压实, 以确保注射制品的质量。注射压力的大小取决于模具和制件的结构、塑料的品种以及注射工艺条件等。

塑料注射过程中的流动阻力决定于制品的结构和塑料的熔融黏度两方面: 制品结构方面, 壁厚越小, 流动长度越大、结构越复杂, 所要求的注射压力越高; 塑料熔体方面, 黏度越大所需的推动压力也就越大。而塑料熔体黏度在注射充模过程中是随机筒温度和模具温度而变动的, 所以在注射过程中注射压力与塑料机筒温度实际上是相互制约的。料温高时注射压力减小; 反之, 所需注射压力加大。

(3) 保压压力 保压压力的作用主要是对熔体进行压实和在浇口未凝封前对模内的收缩进行补料。保压压力的大小对制品的收缩有较大影响, 同时也对制品的内应力和翘曲变形产生影响。

1.1.2.3 时间

完成一次注射成型所需的全部时间称为注射成型周期, 它包括注射充模时间、保压时间、冷却时间、预塑时间及其他辅助时间(开模、脱模、嵌件安放、闭模)。

① 充模时间主要与充模速率有关。

② 保压时间依赖于料温、模温以及浇口的大小, 对制品尺寸的准确性有较大影响, 保压时间不够, 浇口未凝封, 熔料会倒流, 使模内压力下降, 会使制品出现凹陷、缩孔等现象; 保压时间过长, 增加能耗, 降低成型效率。

③ 冷却时间取决于制品的厚度、塑料的热性能、结晶性能以及模具温度等。冷却时间以保证制品脱模时不变形挠曲, 而时间又较短为原则。成型过程中应尽可能地缩短其他辅助时间, 以提高生产效率。

1.1.3 注射成型设备

典型的注射机的结构如图 1-3 所示, 其主要包括了注射系统、模具系统、锁模系统、液压系统和控制系统五个单元。

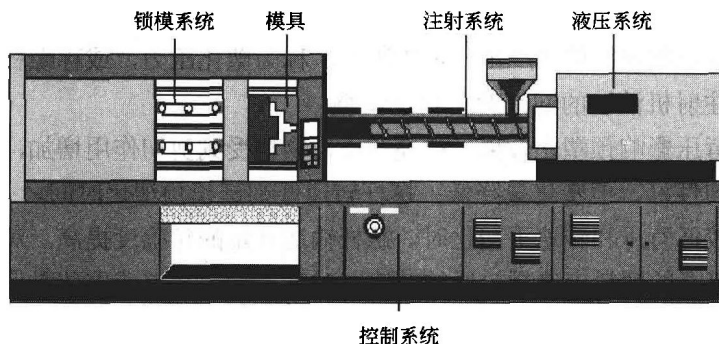


图 1-3 注射机结构

(1) 注射系统 注射系统由料斗、机筒、螺杆和喷嘴组成,如图 1-4 所示。注射系统的功能是输送塑料、加热塑料使其熔化流动,贮存熔体并提供注射压力,使塑料完成充模及保压过程。

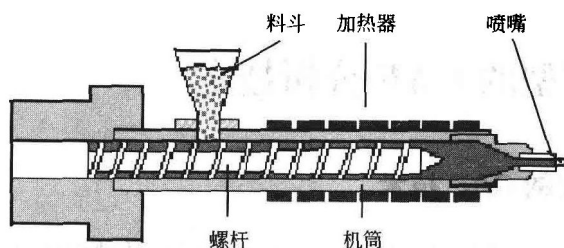


图 1-4 注射系统的结构

(2) 模具系统 模具是制品成型的设备,它使塑料熔体在模腔内流动充模,并通过冷却凝固成需要的形状及尺寸的制品。模具系统包括定模板、动模板、浇注系统、型腔、导向系统、顶出系统、冷却系统,如图 1-5 所示。

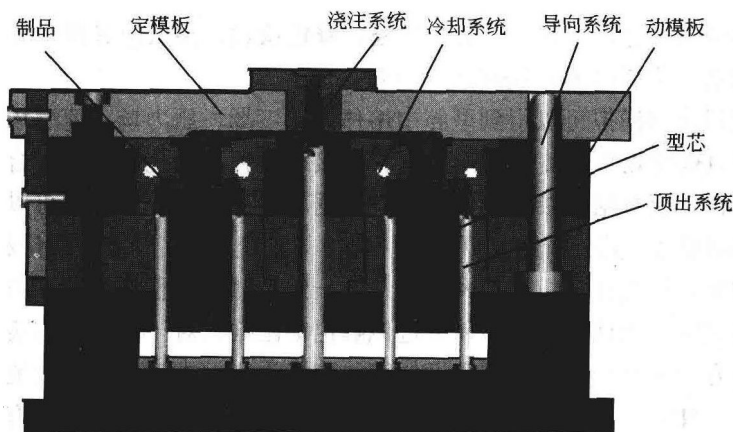


图 1-5 模具系统的结构

(3) 锁模系统 锁模系统用来开启/关闭模具,支撑与移动模具组件,产生足够的力量以防止模具被射出压力推开。锁模机构有曲肘式锁模机构、液压式锁模机构和曲肘式-液压组合锁模机构三种结构。

(4) 液压系统 注射机的液压系统是提供模具开启与关闭的动力,维持模具闭合过程的锁模力,提供螺杆旋转预塑与注射推进的动力,提供顶出制品的动力。液压系统的组件包括油泵、阀、液压马达、液压管件、液压接头和液压油罐等。

(5) 控制系统 控制系统提供注射机完成一些重复操作, 并且监控注射温度、注射压力、注射速度、螺杆转速与位置和油压等工艺参数。控制系统直接影响到注射制品的生产质量和生产效率。控制系统包括从简单的继电器控制到复杂的微电脑处理器闭回路控制器。

1.2 注射成型的 CAE 分析技术

1.2.1 注射过程的 CAE 技术

注射成型 CAE 技术就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的流动、传热的数学物理模型, 利用数值计算理论构造其求解方法, 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充填、冷却过程, 定量地给出成型过程中如压力、温度、速度等状态参数。利用注射成型 CAE 技术可在模具制造之前, 在计算机上对模具设计方案进行分析和模拟, 以代替实际试模过程, 预测设计中潜在的缺陷, 突破了传统的在注射机上反复试模、修模的约束, 为设计人员修改设计提供科学的依据。CAE 技术在模具设计中应用的直接效益是省时省力, 减少试模、修模次数, 降低模具报废率, 缩短模具设计制造周期, 降低成本, 提高产品质量。

通过塑料流动模拟可以得到型腔中熔体的温度场、压力场、速度场、应力应变场, 继而可以确定熔体的流动前沿位置、熔接线位置、缩孔位置, 为合理选择成型工艺参数和设计模具结构参数提供了科学依据。通过模具冷却模拟可以得到模具的温度场及热流量场, 其分析结果可用来优化冷却系统, 提高制品的质量和生产效率。

塑料成型过程的计算机模拟最终归结为一组偏微分方程组求解, 由于问题的复杂性, 一般无法求出精确解, 即使求近似解也很困难。对一般的工程实际问题, 只能采用数值方法借助于计算机求出近似解。迄今为止, 求近似解的数值方法主要有有限差分法 (FDM)、有限元法 (FEW) 和边界元法 (BEM)。这些方法的基本思想都是通过对计算区域或边界的离散以及数学上的近似处理, 将求解偏微分方程的问题转化为求解关于节点未知量的代数方程组。有限差分法是最早采用的数值方法, 它直接从微分方程出发, 将求解函数离散为区域中若干节点的函数值, 再用差商代替微商, 从而建立代数方程形式的差分方程, 该方法简单, 适合于一维问题和时间域的离散处理, 但对复杂边界的适应性差。有限元法是根据变分原理或方程余量与权函数正交化原理所建立起的积分表达式为出发点, 将整个积分区域中求解函数离散为若干单元区域的连续函数, 再通过单元积分、总体合成为代数方程形式的有限元方程。与有限差分法相比, 有限元法适合于复杂区域和边界条件的离散, 对每个区域, 近似解是连续的, 这不同于有限差分法完全用离散的节点值来近似表示

连续函数,此外,有限元法便于编写通用的程序。边界元法是20世纪70年代才发展起来的一种新的数值方法,其基本思想是通过格林公式,借助于基本解,将求解域上的偏微分方程转化为边界上的积分方程,吸收有限元的离散技术,把边界积分方程离散为代数方程,求得边界上的未知参数后,可以计算域内任一点的物理量,它与有限元法和有限差分法相比,由于降低了维数,节点数明显减少,所需的计算存储量和计算工作量较小,而同时只对边界离散,误差来源于边界,计算精度高,但存在奇异积分和离散后代数方程组系数矩阵的非稀疏性的弱点。

1.2.2 注射成型 CAE 技术的发展历史

因为注射成型 CAE 分析对数字化制造技术具有重要的实际意义,很多国家的科研机构、高等院校和企业集团投入大量人力、物力进行研究,近四十年注射成型模拟技术发展经历了二维的中面模型流动分析(Midplane)、2.5 维的双域模型流动分析(Dual-Domain)和三维实体模型流动实体分析(3D)等过程,从时间上大致经历了四个阶段。

在20世纪70年代以前,由于计算机条件的限制,对充模过程和冷却过程都是采用一维模拟,早在1960年,Toor, Ballman 和 Copper 最先用数值方法计算了塑料熔体的充模过程,随后,许多研究者对一维流动进行了大量研究,主要是计算塑料熔体在等直径圆管、中心浇口的圆盘以及端部浇口的矩形等简单、规则制品的流动过程。

20世纪70年代中期至80年代中期,充模流动模拟和冷却模拟开始采用二维模拟技术,在二维流动分析中,除数值方法本身的难点外,另一个新的难点是对移动边界的处理,即如何确定新时刻的熔体流动前沿位置。Broyer, Gutfinger 和 Tadmor 运用流动网格分析法(Flow Analysis Network)对二维等温流动进行了计算,并对保压、固化及分子取向问题进行了有益探索。Takahashi 和 Matsuoka 基于 Fan 法,考虑熔体温度的变化,将三维制件展平为二维平面,实现了对三维制件的非等温流动分析。Hieber 和 Shen 将 Hele-Shaw 流动推广到非牛顿流体的非等温流动情况,得到了描述二维充模流动的数学模型,并分别采用有限元差分法和有限元与有限元差分混合法求解。Shen 还尝试了用边界元法求解上述问题。两位学者采用网格扩展法(Mesh Expansion Scheme)确定流动前沿位置,并对其中的计算稳定性进行了研究。此阶段冷却模拟也集中在二维问题,最早采用的方法是直接将一维热传导方程扩展到二维情形。此时,有限差分是主要的分析方法,Schaefer, Singh 及 Chen 用有限差分法将模具划分大的网格,制品划分较小的网格,冷却装置以一维单元近似,同时进行分析计算,给出制品和模具的二维温度场。

20世纪80年代后期,开展了三维流动和冷却模拟研究,三维流动模拟主要采用两种方法:其一,Hieber 采用流动路径法(Flow Path Scheme)实现了对三维制件

的流动分析；其二，V.W.Wang 及 Hieber 用有限元与有限差分混合法，沿用 Hieber 和 Shen 提出的数学模型，求解压力场、速度场和温度场，针对三角形线性单元，定义了控制体积，并沿用 Fan 法的基本思想，提出用控制体积法（Control Volume Scheme）来确定熔体流动前沿位置。在这一阶段，采用边界元法对冷却过程进行了三维模拟。

进入 20 世纪 90 年代后，开展了注射成型过程流动、保压、冷却、应力-应变及翘曲的全过程模拟，将各独立模块有机地结合起来，考虑它们之间的相互影响，以提高模拟软件的分析精度和扩大适用范围。同时，为提高 CAE 系统的实用化程度，提高系统几何模型的生成速度，开展了 CAE 与 CAD/CAM 集成化研究，这一阶段，人工智能在 CAE 中的应用也取得了一系列进展。

1.2.3 注射成型 CAE 技术的作用

利用 CAE 技术可以在模具加工前，在计算机上对整个注射成型过程进行模拟分析，准确预测熔体的填充、保压、冷却情况，以及制品中的应力分布、分子和纤维取向分布、制品的收缩和翘曲变形等情况，以便设计者能尽早发现问题，及时修改制件和模具设计，而不是等到试模以后再返修模具。这不仅是对传统模具设计方法的一次突破，而且对减少甚至避免模具返修报废、提高制品质量和降低成本等，都有着重大的技术经济意义。塑料模具的设计不但要采用 CAD 技术，而且还采用 CAE 技术，这是发展的必然趋势。

注射成型产品制造分两个阶段，即开发/设计阶段（包括产品设计、模具设计和模具制造）和产品生产阶段（包括购买材料、试模和成型）。传统注射成型产品制造过程步骤如图 1-6 所示，如图 1-7 所示为基于 CAE 技术的产品制造过程步骤。传统的注射方法是在正式生产前，由设计人员凭经验与直觉进行产品设计和模具设计，产品设计和模具设计中存在的问题需要在模具制造装配完成后，通过试模来发现，发现问题后，不仅需要重新调整工艺参数，甚至还需要修改塑料制品和模具，这势必增加生产成本，延长产品开发周期。采用 CAE 技术，可以完全代替试模，CAE 技术提供了从制品设计到生产的完整解决方案，在模具制造之前，通过分析预测在整个成型过程可能发生的问题，通过修改制品设计及模具设计有效地防止问题发生，大大缩短了开发周期，降低了生产成本。

现代注射成型 CAE 技术的作用在于以下几个方面。

（1）优化塑料制品设计 塑件的壁厚、浇口数量、浇口位置及浇注系统设计等对于成型塑料制品的成败和质量关系重大。以往全凭制品设计人员的经验既费力又费时，设计出的制品也不尽合理。利用 CAE 技术，制品设计者能用流动分析解决下列问题。

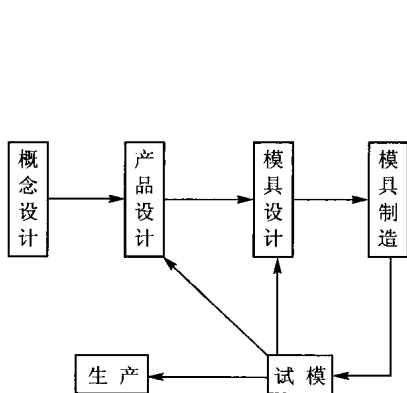


图 1-6 传统注射成型产品制造过程

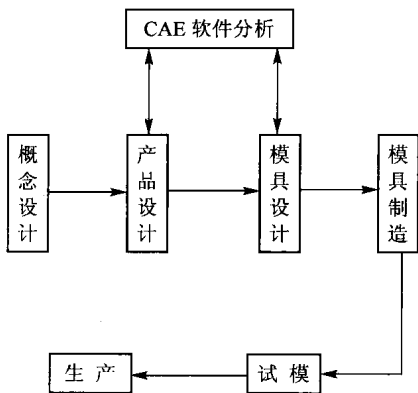


图 1-7 基于 CAE 分析的产品制造过程

① 制品成型的可行性问题仍为许多制品设计人员所注重，尤其是大型制件，如盖子、容器和家具等。

② 制件的最小壁厚在满足产品使用要求的前提下，如能成型薄壁制件，就能大大降低制件的材料成本。减小壁厚还可大大降低制件的循环时间，从而提高生产效率，降低塑件成本。

③ 浇口的位置采用 CAE 分析可使产品设计者在设计时具有充分的选择浇口位置的余地，确保设计的审美特性。

(2) 优化塑料模具设计 由于塑料制品的多样性、复杂性和设计人员经验的局限性，传统的模具设计往往要经过反复试模、修模才能成功。利用 CAE 技术，可以对型腔尺寸、浇口位置及尺寸、浇注系统尺寸和温控系统等进行优化设计，在计算机上进行试模、修模，可大大提高模具质量，减少试模次数。CAE 分析可在以下诸方面辅助设计者和制造者，以得到良好的模具设计。

① 良好的充填形式。对于任何的注射成型来说，最重要的是控制充填的方式，以使塑件的成型可靠、经济。有助于避免因不同的分子取向所导致的翘曲变形。

② 最佳浇口位置与浇口数量。为了对充填方式进行控制，模具设计者必须选择能够实现这种控制的浇口位置和数量，CAE 分析可使设计者有多种浇口位置的选择方案并对其影响作出评价。

③ 浇注系统的优化设计。实际的模具设计往往要反复权衡各种因素，尽量使设计方案尽善尽美。通过流动分析，可以帮助设计者设计出压力平衡、温度平衡或者压力、温度均平衡的流道系统，还可对流道内剪切速率和摩擦热进行评估，如此，便可避免材料的降解和型腔内过高的熔体温度。

④ 温控系统的优化设计。通过分析温控系统对流动过程的影响，优化冷却管路的布局和工作条件，从而产生均匀的冷却，并由此缩短成型周期，减少产品成型后的内应力。