

塑料模具 计算机辅助工程

河南科学技术出版社

塑料模具 计算机辅助工程

Computer Aided Engineering
for Plastics Mold Die

申长雨 等著

河南科学技术出版社

内 容 提 要

本书结合作者多年科研和教学工作的实际,系统地介绍了塑料模具计算机辅助工程的基本原理、发展及应用状况。全书共 14 章:第一章为绪论;第二章至第四章介绍了塑料注射成型的数值模拟;第五章介绍了气体辅助注射成型的数值模拟;第六章至第九章介绍了塑料挤出成型的数值模拟;第十章至第十二章介绍了模拟软件的数据准备和数据处理以及前后置处理系统;第十三章介绍了模拟结果在塑料注射模具设计中的应用;第十四章介绍了模拟软件 Z-MOLD 系统及应用状况。

本书可供从事设计、制造塑料模具工作的工程技术人员参考,也可作为高等院校塑料加工专业的本科生及研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

塑料模具计算机辅助工程/申长雨等著. - 郑州:河南科学技术出版社,1998.10

ISBN 7-5349-2052-3

I.塑… II.申… III.塑料模具-计算机辅助制造
IV.TQ320.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 13696 号

责任编辑 韩家显

责任校对 申卫娟

河南科学技术出版社出版

郑州市农业路 73 号

邮政编码:450002 电话:(0371)5737028

河南第一新华印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行

开本:787×1092 1/16 印张:27.25 字数:620 千字

1998 年 10 月第 1 版 1998 年 10 月第 1 次印刷

印数:1—2000

ISBN 7-5349-2052-3/T·428

定价:75.00 元

前 言

继计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)之后,计算机辅助工程(CAE)也逐渐成为各行业研究应用的热点。在塑料模具领域,早在 20 世纪 60 年代中期,就有人利用有限差分法对注塑过程进行过数值模拟。到 80 年代初,塑料注射模具及注射过程的计算机模拟技术受到了广泛重视,此技术的应用和推广,促进了塑料模具计算机辅助工程技术的发展。

塑料模具的计算机辅助工程技术,主要是利用高分子物理学、流变学、传热学、计算力学和计算机图形学等基本理论,对塑料成型过程进行数值模拟,在计算机屏幕上动态模拟出实际的成型过程,研究加工条件的变化规律,预测制品设计、模具设计和成型条件对制品结构和性能的影响,使对成型过程的认识建立在科学的定量分析基础上,优化模具设计和成型条件,降低成本,提高生产效率和产品质量。

目前,塑料模具 CAE 技术已作为一种解决塑料成型各类问题的标准工具被广泛使用。我国在塑料模具 CAE 技术的研究和应用方面与先进国家相比还有较大差距,长期以来,塑料模具领域一直是以传统的经验和技巧为主进行生产。人们一直期望能预测塑料成型过程中熔体在模具中的流动、保压及冷却情况,以便在模具制造之前就能发现设计中存在的问题,优化设计方案和工艺条件。CAE 技术在塑料模具领域的应用,使这种愿望变为现实。

应当指出的是,CAE 技术目前还不能代替人的创造性工作,它只是作为一种工具,帮助人们判断设计方案是否正确,为优化设计方案和成型条件提供可靠的依据。

有关塑料模具尤其是注塑模和挤塑模 CAE 技术的文献和资料很多,但主要散见于各类科技期刊中,国内尚缺系统介绍塑料模具 CAE 技术基本原理和应用的论著。为普及塑料模具 CAE 技术的应用,作者在借鉴国内外现有研究成果的基础上,综合自己多年科研和教学的成果及经验,编著了此书。本书重点向读者介绍注塑模和挤塑模 CAE 技术的基本原理及 CAE 技术在塑料模具实际生产中的应用。

本书主要包括以下内容:第一章为绪论;第二章至第四章介绍了塑料注射成型的数值模拟;第五章介绍了气体辅助注射成型的数值模拟;第六章至第九章介绍了塑料挤出成型的数值模拟;第十章至第十二章介绍了模拟软件的数据准备和数据处理以及前后置处理

系统;第十三章介绍了模拟结果在塑料注射模具设计中的应用;第十四章介绍了模拟软件 Z—MOLD 系统及应用情况。

参加本书编写工作的主要人员有:申长雨、陈静波、王国中、李倩、曹伟、刘春太、王利霞、杨晓东、杨广军、翟明、陈旭、董斌斌、韩健、逯晓勤、余晓蓉。

由于作者水平和实际经验有限,书中可能存在纰漏,诚恳欢迎同行专家及广大读者对本书中存在的错误,给予批评指正,以利于塑料模具 CAE 技术在国内的普及。

本书中介绍的部分工作是在国家自然科学基金重点项目资助下完成的。

编 者

1997 年 4 月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 塑料模具计算机辅助工程技术	(1)
1.2 塑料模具 CAE 技术的研究现状与发展趋势	(3)
第二章 塑料注射模充填过程的数值模拟	(5)
2.1 充填过程塑料熔体的流动行为	(5)
2.2 充填流动过程的数学模型	(9)
2.3 数值实现方法	(15)
2.4 流动模拟的数值算例	(24)
2.5 小 结	(28)
第三章 塑料注射模保压过程数值模拟	(30)
3.1 概述	(30)
3.2 保压过程 CAE 技术	(32)
3.3 保压过程数学描述	(33)
3.4 保压过程模拟的有限元/有限差分法的实施	(41)
3.5 保压模拟的数值算例	(49)
第四章 注塑模冷却过程的数值模拟	(56)
4.1 注塑模三维稳态温度场的边界元计算	(57)
4.2 注塑模三维瞬态温度场的边界元分析	(66)
4.3 塑件温度场分布及翘曲系数的计算	(71)
4.4 冷却管网的数值分析	(76)
4.5 注塑模冷却系统灵敏度分析及优化设计	(79)
第五章 气体辅助注射成型过程数值模拟	(90)
5.1 气体辅助注射成型的工艺过程	(90)
5.2 气体辅助注射成型的 CAE 技术	(91)
5.3 气体辅助注射成型充填机理	(92)
5.4 气体辅助注射成型充填流动分析的数学模型	(94)
5.5 气体辅助注射成型充填流动分析的数值实现	(99)
5.6 气体辅助注射成型充填流动模拟的程序实现及算例	(106)
第六章 塑料挤出口模内的流动模拟	(110)
6.1 挤出口模内塑料熔体的流动	(111)

6.2	挤出口模内的一维流动模拟	(115)
6.3	挤出口模内的二维流动模拟	(117)
6.4	挤出口模内的三维流动模拟	(126)
6.5	异型材口模内的流动模拟	(129)
6.6	小结	(136)
第七章	挤出胀大数值模拟	(137)
7.1	概述	(137)
7.2	挤出胀大的机理	(138)
7.3	流体力学基本方程	(143)
7.4	挤出胀大分析的数学模型	(145)
7.5	拟体力迭代法	(151)
7.6	流线有限元和拟体力求解	(155)
7.7	流函数的求解	(159)
7.8	自由界面及网格的重新确定	(164)
7.9	有限元的数值计算方法	(166)
7.10	胀大分析的程序实现及算例	(169)
7.11	总结与展望	(175)
第八章	多层共挤的计算机辅助分析与设计	(180)
8.1	概述	(180)
8.2	润滑近似理论(LAT)	(183)
8.3	求解方法	(186)
8.4	板材的共挤	(188)
8.5	型胚共挤	(191)
8.6	线缆多层包覆	(193)
8.7	多层压延	(196)
8.8	多层辊涂	(200)
8.9	结论及要点	(202)
第九章	塑料挤出成型中的设计计算	(206)
9.1	概述	(206)
9.2	热物理性能和控制方程	(207)
9.3	口模歧管系统设计计算	(208)
9.4	口模歧管系统分析计算	(214)
9.5	芯棒式口模分析计算	(219)
9.6	轴对称流道分析计算	(223)
9.7	多层共挤分析计算	(225)
第十章	模拟软件的数据准备和数据处理	(232)
10.1	塑料材料性能数据的准备和处理	(232)
10.2	工艺及加工条件参数	(235)

第十一章	塑料产品的几何造型	(242)
11.1	窗口系统	(242)
11.2	图形变换	(245)
11.3	线框造型	(259)
11.4	曲面造型	(283)
11.5	产品模型的生成	(295)
11.6	有限元网格自动剖分	(298)
第十二章	模拟结果的可视化	(309)
12.1	彩色等值线图	(309)
12.2	彩色阴影图	(312)
12.3	时间历程图和文本报告	(317)
第十三章	模拟结果的应用	(320)
13.1	注射压力	(320)
13.2	充填模式	(327)
13.3	熔体前锋面速度和熔体前锋面面积	(328)
13.4	流道设计与平衡	(331)
13.5	浇口设计	(335)
13.6	模具冷却系统设计	(341)
13.7	残余应力	(347)
13.8	收缩与翘曲	(351)
13.9	故障的发现和解决	(359)
第十四章	注塑模 CAE 软件 Z—MOLD 简介及应用实例	(367)
14.1	概述	(367)
14.2	Z—MOLD 软件简介	(367)
14.3	Z—MOLD 软件的前置处理系统	(377)
14.4	Z—MOLD 软件的初始设计系统	(403)
14.5	Z—MOLD 软件的模拟分析系统的使用	(410)
14.6	Z—MOLD 软件的后置处理系统	(411)
14.7	应用实例	(416)

第一章 绪 论

1.1 塑料模具计算机辅助工程技术

一、CAE 技术的基本概念

CAE(Computer Aided Engineering)技术即计算机辅助工程技术,它是计算机辅助设计/计算机辅助制造(CAD/CAM)技术向纵深方向发展的要求。尽管 CAE 技术目前还没有一个确切的定义,但一般认为它是一个包含数值计算技术、数据库、计算机图形学、工程分析与仿真等在内的一个综合性软件系统,其核心技术是工程问题的模型化和数值实现方法。CAD/CAM 技术水平和应用水平的提高是 CAE 技术发展的动力;高性能计算机及图形显示设备的推出是 CAE 技术发展的条件;有限元法、边界元法及结构优化设计技术等计算力学方法是 CAE 技术的理论基础。就塑料模具计算机辅助工程技术而言,它主要是利用高分子流变学、传热学、数值计算方法和计算机图形学等基本理论,对塑料成型过程进行数值模拟,在模具制造之前就可以形象、直观地在计算机屏幕上模拟出实际成型过程,预测模具设计和成型条件对产品的影响,发现可能出现的缺陷,为判断模具设计和成型条件是否合理提供科学的依据。随着计算机技术的快速发展,对各种塑料成型过程的模拟成为塑料加工业研究的热点。

以塑料注射模为例,传统的做法为概念设计、产品设计、模具设计、开模、试模依序进行(图 1.1.1),只有在实际试模后或对产品测试后才能发现问题,并根据出现的问题研究、判断原因,决定改进方案是调整成型条件,还是修模,甚至更改设计;如此反复进行,直到试模和产品测试没有问题为止。这一过程既耗资又费时,常常需数十天甚至更长的时间,如果开发新产品,从设计到生产的周期会更长,严重影响新产品的开发和面市。

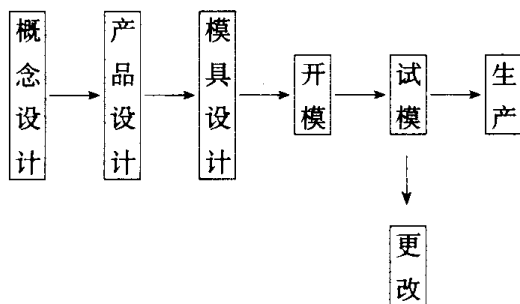


图 1.1.1 塑料注射模的传统做法

利用 CAE 技术,则可以很好地解决上述问题(图 1.1.2)。

在产品开发的任何一个阶段,都可以用 CAE 技术来检验各种想法的可行性,以防患于未然。由于计算机运算迅速,一天之内可以测试好几种甚至几十种设计,较之传统的修模、换模、试模,就人工、时间、经费、材料、能源、场地而言,均可显著节省。

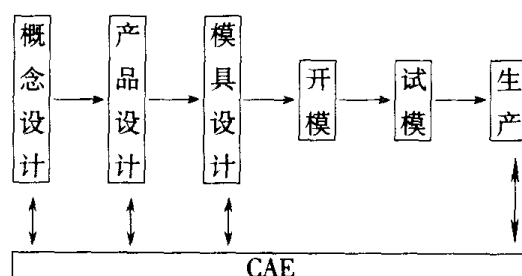


图 1.1.2 塑料注射模的 CAE 做法

随着人们生活水平的提高,对塑料制品品位的要求越来越高,而且不断地求新求变,成功的产品上市要早,质量要好,价钱要合理。在这种要求下,产品的复杂度和精确度常常很高,但可供运用的产品开发时间却愈来愈短。在成千上万种材料、千变万化的几何造型和各有千秋的工艺当中,要想找出理想的组合,传统的方法是很难在短时间内实现的,甚至有可能因此失去市场竞争力。而利用 CAE 技术,则会事半功倍,取得显著的经济效益。

CAE 技术不仅可以保持应用者所要求的市场竞争力,也是培训工程师的最佳工具。初学者可以在计算机上反复测试各种方案,逐渐熟悉塑料流动的习性和规律,以前需几年才能学到的知识,现在只要几个月就可以掌握,并且运用自如。

二、塑料模具 CAE 技术的应用

工程师、CAE 软件和计算机是 CAE 技术应用所必备的条件。

有人把 CAE 技术看成是高不可攀的技术,这是个误解。目前,CAE 软件可以在网络上运行,且多半具有非常容易使用的前后处理程序,输入资料可以依照浅显易懂的图形、表格或问答输入,输出资料也可以凭借彩色图形或一目了然地列表来解读。习惯于以传统方式开发产品的工程师,可以很轻松地掌握并运用 CAE 技术,即使是设计新手,也能够汲取少许的实际经验和认识一些工程名词后,很快地借助 CAE 技术入门。

1. 塑料注射模 CAE 技术

注射模 CAE 技术是利用计算机对塑料注射成型过程各阶段进行定性与定量描述,从而在模具制造前发现并改正设计弊端。目前注塑模 CAE 技术的研究工作主要集中在流动模拟、冷却模拟,以及压实和翘曲等方面。

(1) 注射模流动充填过程模拟分析

流动充填模拟分析一般包括浇道系统分析和型腔充填分析。浇道系统分析的目的是确定合理的流道尺寸、布置以及最佳的浇口数量、位置和形状;型腔充填分析的主要目的是为了得到合理的型腔形状及最佳的注塑压力、注射速率等参数。

(2) 注射模冷却系统模拟分析

注射模冷却系统的设计直接影响着注塑生产率和塑件质量,冷却系统的冷却效果决定着注塑模的冷却时间,而模具的冷却时间约占整个注塑循环周期的 2/3。一个完善的冷却系统能显著地减少冷却时间,从而提高注塑生产效率。塑件的翘曲变形和内部残余热

应力常常是由于冷却不均匀而产生的。利用 CAE 技术进行分析,可获得经济的冷却时间、合理的冷却管道尺寸和布置,使塑件尽可能地均匀冷却。

2. 塑料挤出模 CAE 技术

目前对塑料挤出模 CAE 系统的研究与开发,主要包括以下几个方面的内容:

(1) 口模流动分析

包括模头内流动分析和任意形状流道内的流动分析等。

(2) 挤出胀大分析

包括制品出模胀大分析、制品最终截面形状分析等。

(3) 冷却定型分析

包括挤出制品的温度分布及其残余应力分布等。

3. 气体辅助注射模 CAE 技术

采用气体辅助注射成型可生产出空的、较轻的、韧性好的塑料制品,并避免塑件表面凹痕,减少翘曲变形。利用 CAE 技术可减少气体辅助注射成型中的循环时间,降低锁模力,并使塑件均匀凝固。

4. 其他塑料成型方法中的 CAE 技术

随着塑料成型方法的扩展,CAE 技术也在各种不同工艺方法中开展起来,包括吹塑成型、压铸成型、微电子塑封成型、反应注射成型等。在这些成型工艺中,会产生不同的问题和缺陷,利用 CAE 技术是解决这些问题的有效手段。

1.2 塑料模具 CAE 技术的研究现状与发展趋势

在塑料制品生产中,塑料、模具和加工设备三者密切相关。塑料加工不单纯是物理成型过程,而是控制制品的结构和性能的中心环节。近几年来,发展最快的是利用计算机辅助工程(CAE)对加工过程进行数值模拟,研究加工条件的变化规律,预测制品的结构和性能,选择制品和模具设计以及工艺条件的最佳方案,使加工成型从一项实用技术变为一门应用科学。如果对塑料在加工过程中的流动、传热,以及在力场和热场的作用下所出现的物理变化、化学变化没有深入的科学认识,就不能生产出质地优良的制品。因此,各国对塑料的成型加工的基础研究都非常重视。

注塑成型过程模拟始于 20 世纪 60 年代。英国、美国、加拿大等国的学者在 60 年代完成了一维流动和冷却数值模拟,70 年代完成了二维分析程序,80 年代开展了三维流动与冷却分析并把研究扩展到保压、纤维取向、分子取向以及制品翘曲预测等领域。进入 90 年代后,开展了流动、保压、冷却、应力分析的注塑全过程的集成化研究。美国 K. K. Wang 领导的 Cornell 大学 CIMP 研究小组自 1974 年开始,在美国政府的资助下,在注塑成型模拟研究方面取得了令人瞩目的成就,他们在非牛顿、非等温熔体流动的流变模型,冷却过程的热传导模型,保压和翘曲分析的粘弹性模型以及数值计算方法方面都取得了实质性的成果。美国 AC-Tech. 公司直接利用和推广 Cornell 大学的科研成果而研制开发的 C-MOLD 软件无论是数学模型、程序编制,还是用户界面、软件接口都具有很高的水平,并且在美国和世界各地得到广泛应用。另外,美国的 AT & T. Bell 实验室,美国和意

大利的 Plastics & Computer 公司, 澳大利亚的 MoldFlow 公司, 德国的 Ikv 研究所和 Aachen 大学, 美国的 SDRC 公司和 McDonell Douglass 飞机公司等都在注塑成型模拟和注塑模专家系统方面都进行了深入的研究。目前, 国外注塑成型模拟研究的热点是气体辅助注射成型模拟和真三维的精密注射成型数值模拟以及联机分析成型过程的控制系统。将实际注射成型与计算机模拟结果进行实时比较, 然后利用专家系统自动调整成型工艺参数, 以实现注射成型机的优化控制。我国注塑成型模拟研究始于 80 年代。特别是在“八五”期间, 在国家“八五”科技攻关项目的支持下, 我国在注塑流动模拟、冷却模拟等方面都取得了长足进展, 并在某些方面达到了国际 90 年代初的水平。

挤出成型基本理论研究起步较早, 由于挤出过程复杂的流变形态, 使得挤出成型模拟的研究更富挑战性。R. T. Fenner, M. J. Crochet, R. I. Tanner 等学者在挤出模拟理论研究方面开展了大量的工作, 并取得可喜的成果。在挤出模拟软件开发方面, 美国 Scientific Process & Research 公司开发的 CAE 软件, 可以模拟物料在单螺杆挤出机中的输出情况, 给出沿螺杆轴向各点物料的温度和压力以及熔融区和固态区的分布, 同时模拟模头结构及成型工艺条件对熔体流动状态的影响。加拿大 Advanced Polymer Processing and Design 中心开展了物料在单螺杆挤出机中的流动, 熔体在平缝式模头中的流动, 熔体在鱼尾式和衣架式挤出模头中的流动等的数值模拟研究。Werner & Pfleiderer 公司正在研究双螺杆挤出机挤出成型过程模拟。另外, 美国和意大利的 Plastics & Computer 公司、加拿大的 Rheotek 公司等都在挤出成型模拟研究方面取得了许多应用性成果。挤出成型模拟成为当今世界塑料加工业最关注的问题之一。我国在挤出成型模拟研究方面近年来也开展了大量的工作, 特别是在挤出模头内流动和出模胀大分析等方面已取得了一些成果, 并正在向应用领域拓展。

除注塑和挤出成型外, 对其他成型过程的模拟也在近几年得到充分的重视。例如, 纤维纺丝、吹塑、热成型、线缆包覆等成型模拟研究也都在世界各地普遍开展。如比利时的 Poly Flow 软件可以模拟挤出与共挤出、纤维纺丝、薄膜挤出、吹塑、包覆、热成型等成型过程, 并且可以进行三维非等温、非牛顿、可压缩流动模拟等。

参 考 文 献

- 1 Louis T, Manzione (ed). Applications of Computer Aided Engineering in Injection Molding. New York: Hanser Publishers, 1987
- 2 O'Brien K T. Applications of Computer Modeling for extrusion and other continuous polymer process. Munich: Hanser Publishers, 1992

第二章 塑料注射模充填过程的数值模拟

由于塑料熔体的非牛顿特性及注射成型充模流动过程的非稳态、非等温性,充模过程的数值模拟相当复杂,本章将着重介绍熔体充模过程的机理、流变学行为、数学模型、数值实现技术等,以使对整个充模过程的数值模拟有一个系统的认识。

2.1 充填过程塑料熔体的流动行为

一、塑料熔体充模时的流动特点

在充填过程中,被塑化的高温塑料熔体流出注射装置的喷嘴并且流经主流道、流道系统和浇口而注入模具型腔中。每一个模具的结构元件都将影响到整个充模过程的流动行为。主流道作为熔体进入模具型腔的总入口区,对流动不应产生大的阻力,同时主流道中的熔体在注射完成后应很快地凝固起来。流道系统的性能是把热熔体输送到模腔中,应当在物料和压力降“损失”最少的情况下进行,并尽可能避免过早凝固和“缺料”。浇口控制着塑料熔体向型腔的流动,它的尺寸、形状和位置将直接影响着熔体在型腔内的充填状况。

由于充模过程的复杂性,所以对实际的模具设计和充模过程的数值模拟两个方面来说,充分认识充模过程的流动特点是非常必要的。第一个认识充模流动的重要实验是由 Gilmore 和 Spencer 做出的, Ballman 和他的合作者在 1960 年也开展了充模实验,到了 70 年代认真解决注塑问题的时代开始了,一个新的充模流动流场显示的研究由 Aoba、Kamal、White 和 Dee 所报道。这些研究表明,在适当的流率下的充模状态是一种有序的向前流动(图 2.1.1)。对于等厚矩形模型,根据流动前沿运行特性的不同,这种流动可以分成三个典型阶段。

第一阶段为浇口区,该区在充模开始时占支配地位,流动是径向的,前沿形状

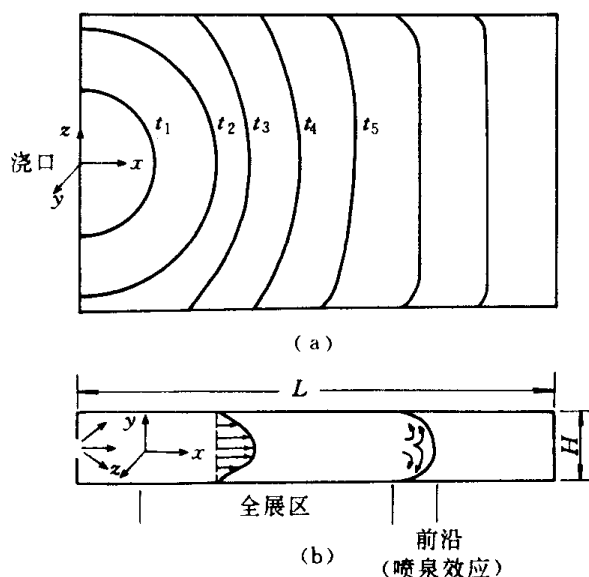


图 2.1.1 宽度大于厚度的终端浇口矩形模腔充模期间流型的示意图

(a) 在不同时间宽度方向流动的前沿;(b) 全展区速度分布和前沿区喷泉效应的示意图

呈圆弧状。当熔体前沿向前推进时,它的作用变小。第二阶段为“全展区”,塑料熔体以几乎完全发展流的形式在薄腔中流动,对于等温充模,流动前沿是平的,而对于非等温充模过程,前沿呈曲线型。这种流动特性决定了充填时间和制件中心部分的取向以及“缺料”的发展。第三阶段为前沿区,在前沿区,熔体前沿呈“喷泉状”,熔体的前缘由于与冷空气接触,形成一个粘度较高的前缘膜。由于前缘膜的存在,使熔体交替发生以下两个过程:一是受到前缘膜的阻止,不能直线向前推进,这将使熔体转向模壁方向,当与模腔壁接触时,熔体很快被冻结而形成冷凝层;二是中心热核冲破前缘膜形成新的前缘膜。在前缘膜和“全展区”之间的熔体,由于受到强烈的剪切作用,剪切热将使其向前流动速度降低,并使速度分布逐渐平坦。

在讨论了充填过程的基本流动形态后,我们讨论的另一个重要问题就是熔接线的形成。熔体在带有芯杆的模腔流动时,熔体流一般要分成两股,然后再汇合在一起,在熔体汇合处将会发现熔接线,而在多浇口注射时,两股熔体交汇到一起也会形成熔接线。图 2.1.2 描述了熔接线形状由一致的聚合物分子构成,因此,它们将相切地相遇。继第一次接触后,一种阻滞型流动充满了邻近两壁面的两个楔形区,它进一步伸长了两个前沿的自由边界,并有一种阻滞型流的趋势。

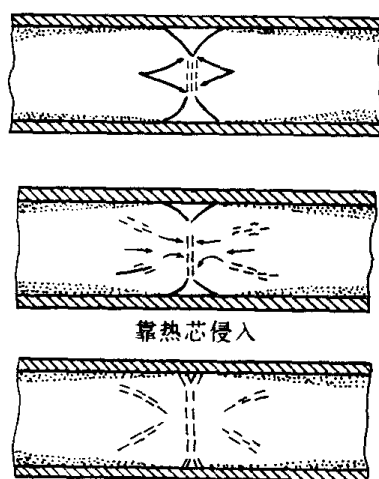


图 2.1.2 接缝区对撞和接着发生的流动的示意图

注塑模具的最大特点是几何形状复杂。在这种模具中熔体的流动是很复杂的,需要预测总的流动图像,它可以提供不同部分充模次序的信息,以及缺料、熔接线位置和取向分布的信息。流动问题边界条件的复杂性,必然导致采用数值方法来预测总的充模状况。

二、熔体充模过程分析

1. 模具温度、熔体温度及充模时间的相互影响

当熔体以一确定的充模时间充入型腔时,一方面与较冷的模壁接触形成冷凝层,并通过冷凝层而散失热量。另一方面,由于冷凝层的存在,使流道面积变小,阻碍了熔体的流动,又将产生巨大的摩擦热,该摩擦热与所散失热量的比较结果,决定了熔体温度的上升或下降。而熔体温度的上升或下降又反过来影响冷凝层的厚度和熔体的粘度。如模温降低,则散失热量增大,熔体的温度将降低,这将导致冷凝层厚度的增加和熔体粘度的增大,两者均使摩擦热增大,当摩擦热与散失的热量达到新的平衡时,这一调节过程才结束。由此,可以得到模具温度、熔体温度和充模时间这三个内在相关的变量,它们在一定的平衡状态下使模具完成充模过程。

2. 充模时间与注射压力的相互影响

当充模时间缩短时,注射速率将提高,较高的注射速率将在熔体内产生较大的剪切速率,从而需要较高的注射压力;充模时间延长时,注射速率将降低,这虽然降低了剪切速

率,但由于热量的大量损失,增加了熔体的粘度和冷凝层的厚度,同样使注射压力提高。

由此可知,充模时间缩短所产生的高压是由于流动速率的影响,而充模时间延长所产生的高压则是由于热量损失而产生的高粘度和冷凝层引起的流通面积减小所造成的。在这两种情况之间,必然存在一最佳的充模时间,使注射压力最低,图 2.1.3 表示出了充模时间对注射压力的影响。

3. 充模过程中产生的各种塑件质量问题分析

前面分析了模具温度对塑件质量的影响,这里将重点分析充模过程中塑料熔体的流动行为对塑件性能和质量的影响。

(1) 翘曲

塑件的翘曲是由于塑件中某一区域相对于另一区域的收缩率不同造成的。在充模过程中,分子取向程度的差异将产生不同的收缩率。

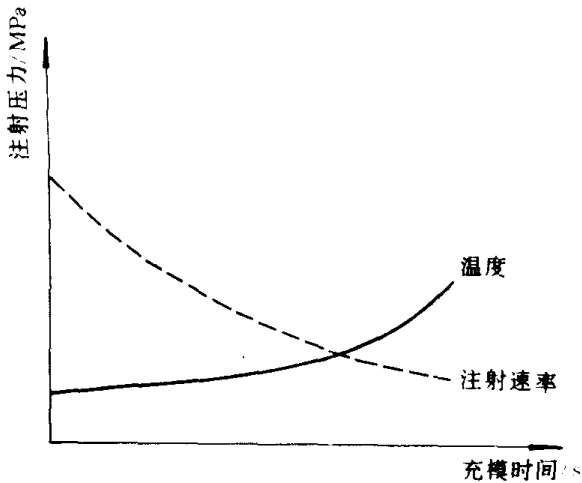


图 2.1.3 充模时间对压力的影响

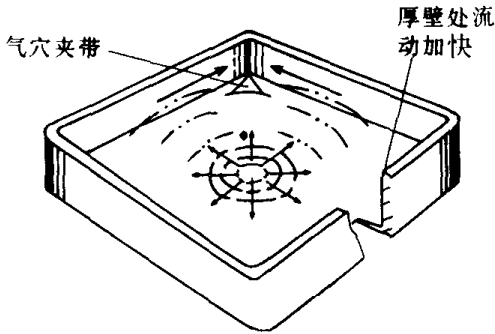


图 2.1.4 跑道效应

在充填时,熔体总是首先充填最易充填的区域,这就产生了不同区域分子取向程度的差异,从而使制件产生翘曲。因而对流动过程进行平衡分析,使各区域同时完成充填是消除塑件翘曲的重要途径。

(2) 气穴

以图 2.1.4 的盒形制件为例,一般将浇口设在盒底中心。在注射时,熔体首先到达离浇口最近的周壁边缘。如果周壁厚度大于底部厚度,则周壁的熔体可能先于底部的熔体而到达角部,这类现象称为充模过程中的跑道效应。塑件的气穴一般是由于跑道效应而产生的。

(3) 表面及内部结构缺陷

对多浇口的情况(图 2.1.5),由两侧浇口注射的熔体与中间浇口注射的熔体相遇后停止前进,并反向流动。由于熔体的反向流动,

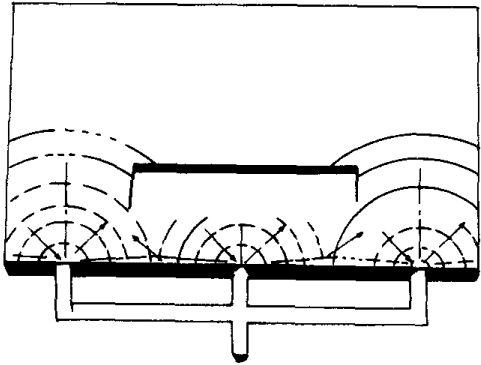


图 2.1.5 逆流效应

使已形成的冷凝层重新被熔解,分子的取向产生紊乱,结果使塑件表面及结构的完整性受到影响,这种现象在充模过程中称为逆流效应。

(4) 滞流效应引起的充填不完整

当塑件具有厚薄不均匀的截面时,熔体总是首先充填较厚的截面,因此已到达较薄截面处的熔体,在厚截面充填期间将驻流不动,并产生冷凝。只有当较厚的截面充填结束后,薄截面区域才得以充填,由于冷凝的存在,可能导致充填不完整,这种现象称为滞流效应。

(5) 熔接线和融合痕

熔接线是由两束熔体前沿相遇形成的,而融合痕则是由两束熔体并行流动时形成的。熔接线和融合痕的位置应处于对塑件的外观和结构不敏感的区域,否则将影响塑件的强度和外观质量。

综上所述,塑料熔体在注塑模型腔中的流动行为直接影响着塑件的性能和质量,而塑料熔体的流动行为又取决于型腔和浇注系统的设计及注塑工艺参数的选择,为保证模具和由模具生产的塑件的质量,必须对流动过程进行分析预测。

三、充模过程塑料熔体的流变学粘度模型

在充模流动过程中,塑料熔体经历了不同的压力、温度和剪切速率的变化过程,要完全描述加工条件的变化对流动性质的影响,就必须知道在各种条件下(温度、压力、剪切速率)的注塑材料的特性。虽然我们能够测量一定条件下的这些数据,但无法测量所有条件下的数据。解决的途径是建立能描述一般条件下材料特性的粘度模型,一旦这类模型建立起来,便可以从有限的实验中确定模型参数,并将它们运用到其他条件中。

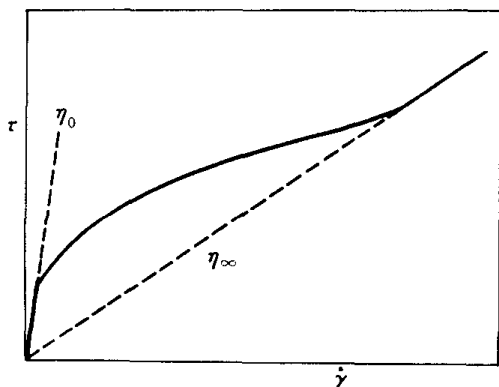


图 2.1.6 高聚物熔体流动曲线($\tau-\dot{\gamma}$ 图)

绝大多数塑料熔体属于非牛顿流体,其特征是剪切粘度随剪切速率的增大而减小,表现出“剪切变稀”的流变特性(图 2.1.6)。高聚物熔体的流动曲线可划分为 3 个区:第一牛顿区;假塑性区;第二牛顿区。第一牛顿区,粘度恒定而且最大,称为最大牛顿粘度,记为 η_0 。确切地说,它是低剪切速率下的粘度向剪切速率为零外推得到的极限值,所以又称为零剪切速率。在假塑性区,粘度随剪切速率呈幂律变化。在第二牛顿区,熔体粘度再次恒定并且具有最小值,称为最小牛顿粘度或无穷剪切粘度,记为 η_∞ 。虽然目前尚无确切反映非牛顿塑料熔体本质的流变学公式,但可以用一些简化模型来表征。目前常用的粘度模型有:

1. 幂律模型

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = m(T) \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.1.1)$$

$$m(T) = A e^{T_a/T} = m_0 g(T) \quad (2.1.2)$$

其中 η 为流动指数, A, T_a 为材料常数。采用对数表示可以得到

$$\ln \eta = \ln m_0 + \ln g(T) + (n-1) \ln \dot{\gamma} \quad (2.1.3)$$

在对数坐标系中, $\ln \eta$ 和 $\ln \dot{\gamma}$ 呈直线关系, 斜率为 $n - 1$, 它可以描述在高剪切速率下熔体的流变行为。它的缺点是无法描述低剪切速率时的熔体粘度, 特别是零剪切速率时的流变行为。尽管如此, 在充模流动分析中它仍被广泛采用, 主要原因是充模阶段熔体通常具有比较高的剪切速率。

2. 二次幂律模型

为改进传统的幂律模型无法描述低剪切速率时的粘度特性, 在幂律模型的基础上引入了二次幂律模型, 它的对数形式如下:

$$\ln(\eta) = C_0 + C_1 \ln(\dot{\gamma}) + C_2 \ln(\dot{\gamma}^2) + C_3 \ln(\dot{\gamma}) T + C_4 T + C_5 T^2 \quad (2.1.4)$$

其中 C_1 反映了“剪切变稀”的特征, C_4 反映了粘度随温度指数衰减效应 ($C_4 < 0$), 在一般情况下它能比较好地反映成型过程的流变行为, 但过多的材料常数单凭流变学实验数据往往是无法得到的。

3. Ellis 模型

Ellis 模型包含了 3 个参数, 它把粘度表示为剪切应力的函数:

$$\frac{1}{\eta} = \frac{1}{\eta_0} \left[1 + \left(\frac{\tau}{\tau_{1/2}} \right)^{\alpha-1} \right] \quad (2.1.5)$$

其中 $\tau_{1/2}$ 为 $\eta = \eta_0/2$ 时的剪切应力, $\alpha - 1$ 为 $\lg[(\eta_0/\eta) - 1] - \lg(\tau/\tau_{1/2})$ 曲线的斜率。在比较低的剪切速率下, Ellis 模型可以预测零剪切粘度 η_0 ; 在比较高的剪切速率时, 它接近于幂律模型。

4. Bird-Carreau 模型

Bird-Carreau 模型也是被广泛采用的一种粘度模型, 它可以表示为

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (2.1.6)$$

其中 η_∞ 为上限牛顿粘度, λ 为时间常数, 它可以描述高剪切速率时的幂律行为。

5. Cross 粘度模型

目前, 最为流行和被广泛用于流动充模分析的粘度模型为 Cross 粘度模型:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*} \right)^{1-n}} \quad (2.1.7)$$

其中 η 为流动指数, τ^* 表示塑料熔体的流变特征由牛顿区过渡到幂律区时的剪切应力水平。在注射充模过程中, 由于塑料熔体温度接近于注射温度, 一般可以采用 Arrhenius 方程来表示零剪切粘度:

$$\eta_0(T, P) = B e^{T_b/T} e^{\beta P} \quad (2.1.8)$$

参数 T_b 和 β 分别描述了温度和压力对零剪切粘度 η_0 的影响。Cross 粘度模型不仅可以描述高剪切速率时的幂律型流变行为, 而且可以描述接近零剪切速率时的流变行为。

2.2 充填流动过程的数学模型

自 1960 年, Toor, Ballman 和 Cooper 首先用数值方法计算了塑料熔体的充模过程。早