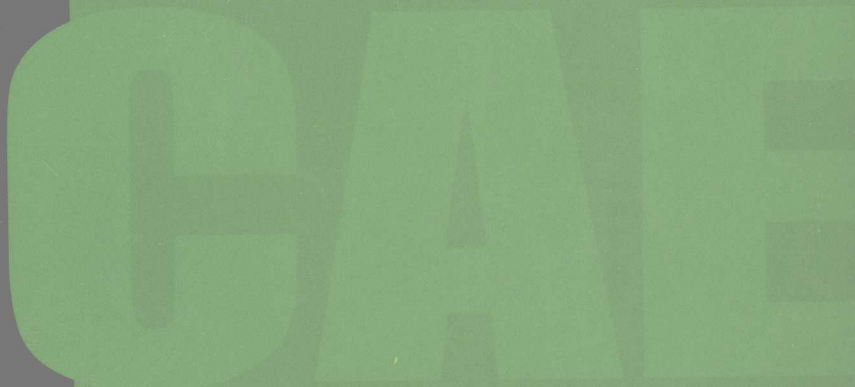
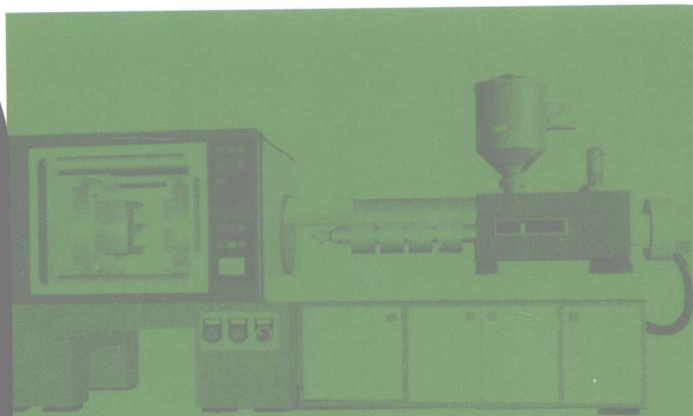
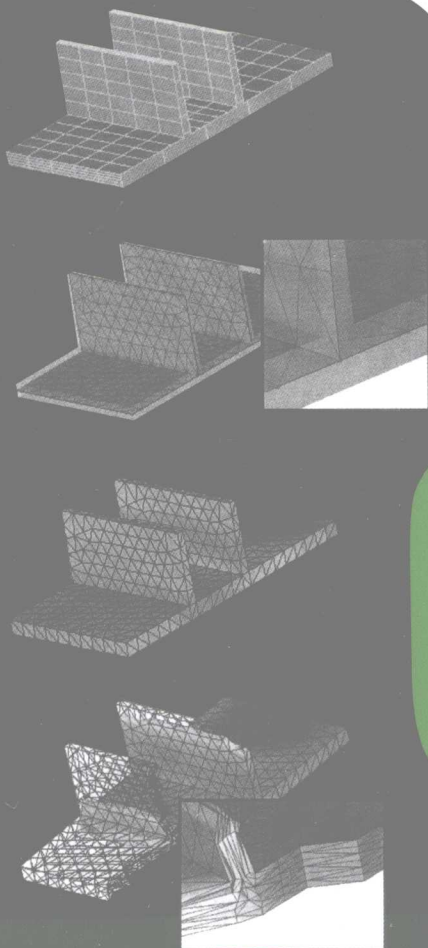




高分子材料注射成型 CAE 理论及应用

谢鹏程
多田和美(日) 等编著
杨卫民



化学工业出版社



高分子材料注射成型 CAE 理论及应用

谢鹏程
多田和美(日) 等编著
杨卫民

CAE



化学工业出版社

· 北京 ·

本书的出发点是传授高分子材料注射成型加工 CAE 技术。要成功地应用 CAE 技术不仅要求熟练掌握 CAE 软件,还需要了解注射成型技术基本原理及 CAE 技术的相关基本理论。本书除对上述基本原理和理论进行全面介绍之外,还结合了大量的成功应用实例,力求使读者能够通过本书的学习掌握注射成型 CAE 技术以及进行成功应用的思路和能力。

本书可供注射成型行业模塑分析工程师、研究人员参考,也可作为大专院校高分子材料注射成型加工相关专业的入门教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

高分子材料注射成型 CAE 理论及应用/谢鹏程等编著. —北京:
化学工业出版社, 2008. 8
ISBN 978-7-122-03442-7

I. 高… II. 谢… III. 高分子材料-注塑-计算机辅助技术
IV. TQ320.66-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 115105 号

责任编辑: 王苏平
责任校对: 李 军

文字编辑: 王 琪
装帧设计: 关 飞

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: 化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张 13 字数 331 千字 2009 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: 38.00 元

版权所有 违者必究

前 言

近年来,在计算机技术和数值分析方法的支持下,计算机辅助工程(computer aided engineering, CAE)技术已经被广泛应用于现代制造业的方方面面,包括高分子材料成型加工领域。注射成型是高分子材料最重要的成型加工工艺。目前,有超过 1/3 的热塑性材料采用注射成型加工,注射成型加工设备则占到高分子材料成型加工设备的半数以上。

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、传热的物理、数学模型,利用数值计算理论构建其求解方法,进行成型过程的仿真分析。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。CAE 技术从根本上改变了传统注射成型产品的设计、生产与组织的模式,并在产品研发中显示出无与伦比的优越性,使其成为现代企业在日趋激烈的竞争中取胜的一个重要条件,因而越来越受到工程界的重视。

《高分子材料注射成型 CAE 理论及应用》可供注射成型行业模塑分析工程师、研究人员参考,也可作为大专院校高分子材料注射成型加工相关专业的入门教材。出版本书的出发点是传授高分子材料注射成型加工 CAE 技术。要成功地应用 CAE 技术不仅要求熟练掌握 CAE 软件,还需要了解注射成型技术基本原理及 CAE 技术的相关基本理论。本书除对上述基本原理和理论进行全面介绍之外,还结合了大量的成功应用实例,力求使读者能够通过本书的学习掌握注射成型 CAE 技术以及进行成功应用的思路和能力。

本书第 1 章为概述,全面介绍了 CAE 技术的发展历程及其在高分子材料注射成型领域的发展应用。第 2 章介绍了注射成型技术,包括注射成型设备、材料、模具及成型工艺特点,同时还包括注射成型领域的一些新兴技术。第 3 章介绍了注射成型基础理论,包括连续体力学基本概念,高分子材料在成型加工中的行为与特性,以及 CAE 技术中运用的基本方程、模型和数值方法。第 4 章介绍了注射成型 CAE 系统,并详细介绍了市面上主要的几款商业软件。第 5 章介绍了注射成型 CAE 软件应用实例,包括 CAE 系统的基本应用流程及思路。

本书的内容参阅了近年来部分国内外主要期刊的研究论文和技术资料,并将所参考和引用的文献列于全书正文之后。日本 PLAMEDIA 株式会社的多田和美先生为书中基本理论部分提供了大量的资料;Moldex3D 科盛科技股份有限公司的蔡铭宏和杨文贤, Moldflow 技术论坛的李昭敏和吴凤智等 in 应用案例的编写工作中给予了大力的协助和支持,在此一并向他们以及其他给予帮助的朋友表示衷心的感谢。

本书由谢鹏程、多田和美(日)、杨卫民共同编写,丁玉梅、王建、焦志伟、李琳等完成了其中部分章节的编写任务。我们力求比较全面地介绍高分子材料注射成型 CAE 的基本理论和应用技巧,由于水平有限,不足之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者
2008 年 8 月

目 录

第 1 章 概述	1	2.5.4 共注射成型	48
1.1 计算机辅助工程 CAE	1	2.5.5 注压成型	49
1.1.1 CAE 技术概述	1	2.5.6 反应注射成型	50
1.1.2 CAE 商业软件	1	2.5.7 模内装饰成型	50
1.1.3 CAE 技术的发展历程	2	第 3 章 注射成型 CAE 理论基础	52
1.1.4 CAE 技术的现状	4	3.1 连续体力学	52
1.1.5 CAE 技术的应用	6	3.2 基本概念	53
1.1.6 CAE 技术的发展趋势	7	3.2.1 应力	53
1.2 高分子材料注射成型 CAE	9	3.2.2 应变	56
1.2.1 注射成型技术及注射成型 CAE	9	3.2.3 位移、形变速率、加速度	57
1.2.2 注射成型 CAE 发展历程	11	3.2.4 应变速率	58
1.2.3 注射成型 CAE 技术研究进展及发展 趋势	12	3.2.5 变化率	58
第 2 章 注射成型技术	15	3.2.6 泰勒展开	59
2.1 注射成型机	15	3.2.7 流场中的加速度	60
2.1.1 注射系统	15	3.2.8 传热分类	61
2.1.2 合模系统	20	3.3 高聚物的行为与特性	62
2.1.3 驱动系统	22	3.3.1 高聚物物性	62
2.1.4 控制系统	23	3.3.2 聚合物加工中的物理和化学 变化	63
2.2 注射成型材料	24	3.3.3 聚合物流变学	63
2.2.1 塑料分类	25	3.3.4 弹性、黏性、黏弹性模型	65
2.2.2 注塑常用塑料	26	3.3.5 组合黏弹性模型	68
2.2.3 常用助剂	29	3.3.6 塑料的特性	71
2.3 模具	30	3.3.7 流体的分类	72
2.3.1 流道设计	32	3.4 基本方程	73
2.3.2 浇口设计	33	3.4.1 连续性方程——质量守恒定律	74
2.3.3 冷却系统设计	34	3.4.2 运动方程——动量定理	74
2.3.4 顶出系统设计	35	3.4.3 能量方程——能量守恒定律	76
2.3.5 排气系统	37	3.4.4 本构方程	78
2.3.6 精密注射成型模具特点	38	3.4.5 状态方程	80
2.4 注射成型工艺	39	3.5 注射成型过程的模型化	81
2.4.1 压力	39	3.5.1 物理现象的模型化	81
2.4.2 温度	41	3.5.2 注射成型充填过程的物理现象	81
2.4.3 速度	42	3.5.3 注射成型充填过程模型化	81
2.4.4 常用材料的注射成型工艺参数	43	3.5.4 注射成型热流动解析模型化	84
2.5 注射成型新技术	43	3.5.5 注射成型状态量的分布	85
2.5.1 气体辅助注射成型	43	3.5.6 注射成型中的无量纲数	85
2.5.2 嵌件成型	46	3.6 数值方法	86
2.5.3 微孔发泡注射成型	46	3.6.1 离散化方法	86

3.6.2	有限差分法	88	4.7.3	热特性	131
3.6.3	有限元法	90	4.7.4	力学特性	132
3.6.4	数值计算过程	105	4.7.5	推荐的工艺参数	133
第4章	注射成型 CAE 系统	107	4.7.6	其他信息	133
4.1	概述	107	第5章	注射成型 CAE 软件应用	
4.2	注射成型 CAE 系统的基本构成	108	实例	134	
4.3	注射成型 CAE 软件用户界面	109	5.1	注射成型 CAE 系统应用	134
4.4	注射成型 CAE 软件模拟技术	109	5.1.1	CAE 系统基本操作流程	134
4.4.1	中面模型技术	110	5.1.2	CAE 系统的有效利用	136
4.4.2	表面模型技术	111	5.2	注射成型 CAE 系统应用实例	142
4.4.3	实体模型技术	111	5.2.1	案例 1 基于 CAE 软件的塑料制品 优化设计	142
4.5	注射成型 CAE 软件功能	112	5.2.2	案例 2 基于 CAE 软件的模具 优化设计	143
4.5.1	充填、冷却、保压分析	112	5.2.3	案例 3 基于 CAE 软件的注射成型 工艺参数优化	145
4.5.2	注射压缩分析	113	5.2.4	案例 4 CAE 软件在连接件中 的应用	149
4.5.3	气体辅助注射成型分析	114	5.2.5	案例 5 CAE 软件在 IC 封装中 的应用	160
4.5.4	结晶化分析	114	5.2.6	案例 6 CAE 软件在嵌件成型中 的应用	166
4.5.5	多层、多色成型分析	115	5.2.7	案例 7 CAE 软件在 PC 工业中 的应用	174
4.5.6	反应注射成型分析	116	5.2.8	案例 8 CAE 软件在光学数码产 品中的应用	187
4.5.7	模具冷却分析	117	5.2.9	案例 9 CAE 软件在汽车工业中 的应用	192
4.5.8	翘曲分析	118	参考文献	201	
4.5.9	纤维取向分析	119			
4.5.10	残余应力分析	119			
4.5.11	制品结构分析	120			
4.6	注射成型 CAE 商业软件	121			
4.6.1	Moldflow	122			
4.6.2	Moldex3D	124			
4.6.3	PLANETS-“MoldStudio3D”	127			
4.7	CAE 软件的材料库	128			
4.7.1	流变特性	128			
4.7.2	PVT 特性	130			

第 1 章 概 述

1.1 计算机辅助工程 CAE

1.1.1 CAE 技术概述

CAE(computer aided engineering)是指计算机辅助工程,泛指包括分析、计算和仿真在内的一切研发活动。其概念很广,是迅速发展中的计算力学、计算数学、结构动力学、数字仿真技术、工程管理学、相关的工程科学和现代计算机技术相结合而形成的一种综合性、知识密集型的科学。从字面上讲它可以包括工程和制造业信息化的所有方面,但是传统的 CAE 主要是指用计算机对工程和产品的运行性能与安全可靠性分析,对其未来的状态和运行状态进行模拟,及早地发现设计计算中的缺陷,并证实未来工程、产品功能和性能的可用性和可靠性。

准确地说,CAE 是指工程设计中的分析计算与分析仿真,具体包括工程数值分析、结构与过程优化设计、结构强度与寿命评估、运动/动力学仿真。工程数值分析用来分析确定产品的性能;结构与过程优化设计用来在保证产品功能、工艺过程的基础上,使产品、工艺过程的性能最优;结构强度与寿命评估用来评估产品的精度设计是否可行,可靠性如何以及使用寿命为多少;运动/动力学仿真用来对 CAD 建模完成的虚拟样机进行运动学仿真和动力学仿真。从过程化、实用化技术发展的角度看,CAE 的核心技术为有限元分析技术与虚拟样机的运动/动力学仿真技术。

在近 20 年来市场需求的推动下,CAE 技术有了长足的发展,它作为一项跨学科的数值模拟分析技术,越来越受到科技界和工程界的重视。在日趋全球化的市场氛围中,企业间的竞争将表现为产品性能和制造成本的竞争。CAE 在产品研发及创新设计中所显示出的无与伦比的优越性,使其成为现代化工业企业在日趋激烈的市场竞争中取胜的重要条件。利用 CAE 软件,可以对工程和产品进行性能与安全可靠性分析,并对其未来的工作状态和运行行为进行虚拟运行模拟,及早发现设计缺陷,实现优化设计;在实现创新的同时,提高设计质量,降低研究开发成本,缩短研究开发周期。它们与 CAD/CAM/CAPP/PDM/ERP 等一起,已经成为支持工程行业和制造企业信息化的主要信息技术之一。

21 世纪是信息和网络的时代,随着计算机技术向更高速和更小型化发展,分析软件的不开发和完善,以及网络通信的普及,CAE 技术的应用将愈来愈广泛并成为衡量一个国家科学技术水平和工业现代化程度的重要标志。大力推进我国计算机辅助工程技术的科学研究和工业化应用势在必行。

1.1.2 CAE 商业软件

计算机辅助工程分析起始于 20 世纪 50 年代中期,而真正的 CAE 软件诞生于 70 年代初期,直到 80 年代中期的十多年间,CAE 软件还是处在独立成长阶段,主要是扩充和完善基本功能、算法和软件结构,到 80 年代中期,逐步形成了商品化的通用和专用 CAE 软件。近些年来,CAE 技术结合迅速发展中的计算力学、计算数学、相关的工程科学、工程管理学

与现代计算技术，从低效检验到高效仿真，从线性静力求解到非线性、动力仿真分析、多物理场耦合，取得了巨大的发展与成就。随着计算机技术的高速发展，极大地推动了相关学科研究和产业的进步。CAE 作为一项跨学科的数值模拟分析技术，越来越受到科技界和工程界的重视。1985 年前后，在可用性、可靠性和计算效率上已经基本成熟的、国际上知名的 CAE 软件有 MSC-NASTRAN、ANSYS、MSC-MARC、MSC-DYTRAN、ABAQUS、FLUENT、MSC-FATIGUE、SAP、ASKA、ADINA、MODULEF、Moldflow 等。

当今的主流 CAE 软件从功能上来区别，可分为通用型与专用型两大类：可以对多种类型的工程或产品的物理、力学性能进行分析、模拟、评价和优化，以实现产品技术创新的软件，称为通用 CAE 软件；针对特定类型的工程或产品所开发的用于产品性能分析、预测和优化的软件，称为专用 CAE 软件。

通用 CAE 软件以覆盖的应用范围广而著称，NASTRAN、ANSYS、MARC 等为其代表。专用 CAE 软件则以在某个领域中的应用深入而见长，如美国 ETA 公司的汽车专用 CAE 软件 LS/DYNA3D 及 ETA/FEMB，美国 Moldflow 公司开发的注射成型领域的专用 CAE 软件 Moldflow 等。

通用 CAE 软件最大的优点是为用户提供了广泛的选择可能性和扩展应用范围的余地，使不同规模与应用层次的用户都能在其中找到自己所适用的模块。但随之而来的问题是系统庞大、耗费大量资源；没有针对性，使用难度比较大。同时，不同的通用 CAE 软件又都有各自的优势和特点，如 MSC/NASTRAN 在大型系统的结构强度和动力响应分析方面、MARC 在高度非线性分析、ANSYS 在多场耦合（温度场、应力场、电磁场、流场等）的解算方面都有自己的独到之处。专用 CAE 软件的最大优点是为用户提供了某些领域最专业的成果，系统小，耗费的资源少，使用与维护比较简单，但扩展时要不断购买所需软件，因而不同版本软件的数据交换是否畅通成为用户最关心的问题。

CAE 软件的主体是有限元分析（finite element analysis, FEA）软件。有限元法的基本思想是将结构离散化，用有限个容易分析的单元来表示复杂的对象，单元之间通过有限个节点相互连接，然后根据变形协调条件综合求解。由于单元的数目是有限的，节点的数目也是有限的，所以称为有限元法。这种方法灵活性很大，只要改变单元的数目，就可以使解的精确度改变，得到与真实情况无限接近的解。基于有限元法的 CAE 系统，其核心思想是结构的离散化。根据经验，CAE 各阶段所用的时间为：40%~45% 用于模型的建立和数据输入，50%~55% 用于分析结果的判断和评定，而真正的分析计算时间只占 5% 左右。

采用 CAD 技术来建立的几何模型和物理模型，完成分析数据的输入，通常称此过程为 CAE 的前处理。同样，CAE 的结果也需要用技术生成形象的图形输出，如生成位移图、应力、温度、压力分布的等值线图，表示应力、温度、压力分布的彩色明暗图，以及随机机械载荷和温度载荷变化生成位移、应力、温度、压力等分布的动态显示图。我们称这一过程为 CAE 的后处理。针对不同的应用，也可用 CAE 仿真模拟零件、部件、装置（整机）乃至生产线、工厂的运动和运行状态。

1.1.3 CAE 技术的发展历程

CAE 的理论基础起源于 20 世纪 40 年代，有限元法作为 CAE 的核心，是 CAE 应用中最广泛、最成熟的方法。其基本思想的提出可以追溯到 1943 年，数学家 Courant 第一次应用定义在三角区域上的分片连续函数的最小位能原理来求解 St. Venant 扭转问题，提出了有限元（FEA）的概念。

在 20 世纪 50 年代末、60 年代初时期内,国际上投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。现代有限元法的第一个成功尝试是在 1956 年,Turner、Clough 等人在分析飞机结构时,将钢架位移法推广应用于弹性力学平面问题,第一次给出了用三角形单元求解平面应力问题的正确答案。1960 年,Clough 进一步处理了平面弹性问题,并第一次提出了“有限元法”,使人们认识到它的功效。到了 60 年代以后,随着计算机技术的广泛应用和发展,有限元技术依靠数值计算方法,才迅速发展起来。

20 世纪 60~70 年代,有限元的理论处于发展阶段,有限元技术主要针对结构分析进行发展,分析的对象主要是航空航天设备结构的强度、刚度以及模态实验和分析问题,又由于当时的计算机的硬件内存少、磁盘空间小、计算速度慢等特点,CAE 软件处于探索时期。而在这种技术及商业需求的推动下,世界上三大 CAE 软件公司 MSC、SDRC 和 ANSYS 先后成立,致力于大型商用 CAE 软件的研究与开发。1963~1964 年 Besseling、Melos 和 Jones 等证明了有限元法是基于变分原理的里兹法的另一种形式,从而使得里兹法的所有理论基础都适应于有限元法,确认了有限元法是处理连续介质问题的一种普遍方法。以此为理论指导,有限元法的应用已由弹性力学的平面问题扩展到空间问题、板壳问题,由静力平衡问题扩展到稳定性问题、动力学问题和波动问题;分析对象从弹性材料扩展到塑性、黏塑性和复合材料,从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域。将有限元分析技术逐渐由传统的分析和校核扩展到优化设计,并与计算机辅助设计和辅助制造紧密结合,形成了现在 CAE 技术的框架。

1963 年由 Dr. Richard MacNeal 和 Mr. Robert Schwendle 成立了 MSC,开发了第一个结构分析软件。开发称为 SADSAM(structural analysis by digital simulation of analog methods)结构分析软件。1965 年 MSC 参与美国国家航空及宇航局(NASA)发起的计算结构分析方法研究,其程序 SADSAM 更名为 MSC/Nastran。1967 年在 NASA 的支持下 Structural Dynamics Research Corporation(SDRC)公司成立,并于 1968 年发布了世界上第一个动力学测试及模态分析软件包,1971 年推出商业用有限元分析软件 Supertab(后并入 I-DEAS)。1970 年 Dr. John A. Swanson 成立 Swanson Analysis System, Inc. (SASI)公司,后来重组改称 ANSYS 公司,开发了 ANSYS 软件。至此世界上的三大公司先后完成了组建工作,致力于大型商用 CAE 软件的研究与开发。时至今日,这三大巨头主导 CAE 市场的格局基本保持下来。只是在发展方向上, MSC 和 ANSYS 比较专注于非线性分析市场, SDRC 则是更偏向于线性分析市场,同时 SDRC 发展起来了自己的 CAD/CAE/PDM 技术。

20 世纪 70~80 年代是 CAE 技术的蓬勃发展时期,一方面 SDRC、MSC、ANSYS 等在技术和应用上继续创新,许多新的 CAE 软件公司相继成立。1971 年 MARC 公司成立,致力于发展用于高级工程分析的通用有限元程序,而 Marc 程序重点处理非线性结构和热应力问题。1977 年 Mechanical Dynamics, Inc. (MDI)公司成立,致力于发展机械系统仿真软件。其软件 ADAMS 应用于机械系统运动学、动力学仿真分析。1978 年 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc. 公司成立,其 ABAQUS 软件主要应用于结构非线性分析。1983 年 CSAR 成立,其 CSA/NASTRAN 主要针对大结构、流固耦合、热及噪声分析。1983 年 AAC 成立,其程序 COMET 主要用于噪声及结构噪声优化等领域。Computer Aided Design Software, Inc. 公司的 PolyFEM 软件包提供线性静态、动态及热分析。1986 年 ADINA 公司致力于发展结构、流体及流体-结构耦合的有限元分析软件。1987 年 Livermore Software Technology Corporation 公司成立,其产品 LS-DYNA 及 LS-NIKE30 用隐式算法求解低高速动态特征问题。1988 年 Flomerics 公司成立,提供用于电脑系统内部空气流及热传递的分

析程序。1989 年 Engineering Software Kessemochand Development 公司成立, 致力于发展 P 法有限元程序。同时期还有多家专业性软件公司投入专业 CAE 程序的开发。这一时期的 CAE 发展的特点: 软件的开发主要集中在计算精度、速度及硬件平台的匹配, 使用者多数为专家且集中在航空、航天、军事等几个领域。有限元分析技术在结构分析和场分析领域获得了很大的成功, 从力学模型开始拓展到各类物理场(如温度场、磁场、声波场)的分析; 从线性分析向非线性分析(如材料为非线性、几何大变形导致的非线性、接触行为引起的边界条件非线性等)发展; 从单一场的分析向几个场的耦合分析发展。出现了许多著名的分析软件如 Nastran、I-DEAS、ANSYS、ADINA、SAP 系列、DYNA3D、ABAQUS 等。

20 世纪 90 年代是 CAE 技术的成熟壮大时期。CAE 软件开发商为满足市场需求和适应计算机硬、软件技术的迅速发展, 对软件的功能、性能, 特别是用户界面和前后处理能力进行了大幅度扩充, 对软件的内部结构和部分模块, 特别是数据管理和图形处理部分, 进行了重大改造, 使得 CAE 软件在功能、性能、可用性和可靠性以及对运行环境的适应性方面基本满足了用户的需要, 它们可以在超级并行机, 分布式微机群, 大、中、小、微各类计算机和各种操作系统平台上运行。CAD 经过 30 年的发展, 经历了从线框 CAD 技术到曲面 CAD 技术, 再到参数化技术, 直到目前的变量化技术, 为 CAE 技术的推广应用打下了坚实的基础。这期间各 CAD 软件开发商一方面大力发展自身 CAD 软件的功能, 还增加了基本的 CAE 前后处理及一般的线性、模态分析功能, 另一方面通过并购另外的 CAE 软件来增加其软件的 CAE 功能。在 CAD 软件开发商大力增强其软件 CAE 功能的同时, CAE 分析软件也在向 CAD 靠拢。CAE 软件开发商积极发展与各 CAD 软件的专用接口, 并增强软件的前后处理能力。

近 10 年来, 有限元法的应用范围有了大幅度提高, 已由简单的弹性力学的平面问题扩展到空间问题、板壳问题, 由静力问题扩展到稳定性问题、动力学问题和波动问题; 分析对象从弹性材料扩展到塑性、黏塑性和复合材料, 从固体力学扩展到流体力学、传热学、电磁学等连续介质力学领域。将有限元分析技术逐渐由传统的分析和校核扩展到优化设计, 并与计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)密切结合, 形成了现代 CAE 技术的框架。

1.1.4 CAE 技术的现状

1.1.4.1 国外 CAE 技术概况

CAE 这一新兴的数值模拟分析技术在国外得到了迅猛发展, 技术的发展又推动了许多相关的基础学科和应用科学的进步。在影响计算机辅助工程技术发展的诸多因素中, 人才、计算机硬件和分析软件是三个最主要的方面。现代计算机技术的飞速发展, 已经为 CAE 技术奠定了良好的硬件基础。多年来, 发达国家重视 CAE 技术人才的培养和分析软件的开发和推广应用, 不仅在科技界而且在工程界已经拥有一支较强的掌握 CAE 技术的人才队伍, 同时在分析软件的开发和应用方面也达到了较高水平。

国外对 CAE 技术的开发和应用真正得到高速发展和普遍应用则是近年来的事。这一方面主要得益于计算机在高速化和小型化方面取得的成就, 另一方面有赖于通用分析软件的推出和完善。早期的 CAX 分析软件一般都是基于大型计算机和 workstation 开发的, 近年来 PC 机性能的提高, 使采用 PC 机进行分析成为可能, 促使许多 CAE 软件被移植到 PC 机上应用。这显然对 CAE 技术的推广应用极为有利。

衡量 CAE 技术水平的重要标志之一是分析软件的开发和应用。目前, 一些发达国家在

这方面已达到了较高的水平, 仅以有限元分析软件为例, 国际上不少先进的大型通用有限元计算分析软件的开发已达到较成熟的阶段并已商品化, 如 ABAQUS、ANSYS 和 NASTRAN 等。这些软件具有良好的前后处理界面、静态和动态过程分析以及线性 and 非线性分析等多种强大的功能, 都通过了各种不同行业的大量实际算例的反复验证, 其解决复杂问题的能力 and 效率, 已得到学术界 and 工程界的公认。在北美、欧洲 and 亚洲一些国家的机械、化工、土木、水利、材料、航空、船舶、冶金、汽车 and 电气工业设计等许多领域中得到了广泛的应用。通过 CAE 与 CAD、CAM 等技术的结合, 使企业能对现代市场产品的多样性、复杂性、可靠性和经济性等做出迅速反应, 增强了企业的市场竞争能力。在许多行业中, 计算机辅助分析已经作为产品设计与制造流程中不可逾越的一种强制性的工艺规范加以实施。

CAE 软件对工程 and 产品的分析模拟能力, 主要取决于单元库 and 材料库的丰富 and 完善程度, 单元库所包含的类型越多, 材料所包含的材料特性种类越全, 其 CAE 软件对工程 or 产品的分析、仿真能力就越强。而 CAE 软件的计算效率 and 计算结果的精度, 则主要决定于解法库, 先进高效的求解算法可能对计算效率造成几倍、几十倍甚至几百倍的提高。近几年来国际上先进的 CAE 软件在单元库、材料库、前后处理, 特别是用户界面 and 数据管理技术等方面都有了巨大发展, 已经可以对工程 and 产品进行静力和拟静力的线性 and 非线性分析; 线性 with 非线性动力分析; 稳态 with 瞬态热分析; 静态 and 交变态的电磁场 and 电流分析; 流体计算; 声场 with 波的传播计算等。前后处理是近十多年发展最快的 CAE 软件成分, 它们是 CAE 软件满足用户要求, 使通用软件专业化, 并实现 CAD、CAM、CAPP、PDM 等软件集成的关键性软件成分。

1.1.4.2 我国 CAE 技术现状

随着我国科学技术现代化水平的提高, 计算机辅助工程技术在我国蓬勃发展起来。工业及政府的主管部门已经认识到计算机辅助工程技术对提高我国科技水平、增强我国企业的市场竞争能力乃至整个国家的经济建设都具有重要意义。1979 年美国的 SAP5 线性结构静、动力分析程序向国内引进移植成功, 掀起了应用通用有限元程序来分析计算工程问题的高潮。目前, ABAQUS、ANSYS、NASTRAN 等大型通用有限元分析软件已经引进我国, 在汽车、航空、机械、材料等许多行业得到了应用。

近年来, 我国的 CAE 技术研究开发和推广应用在许多行业和领域已取得了一定的成绩。我国已经拥有一批科技人员在从事 CAE 技术的研究 and 应用, 取得了不少研究成果 and 应用经验, 使我们在 CAE 技术方面紧跟现代科学技术的发展。但从总体来看, 研究 and 应用的水平还不能说很高, 某些方面与发达国家相比仍存在不小的差距。从行业 and 地区分布方面来看, 发展也还很不平衡。这些研究 and 应用的领域以及分布的行业 and 地区还很有限, 现在还主要局限于少数具有较强经济实力的大型企业、部分大学 and 研究机构。

在具有自主知识产权的大型通用分析软件的开发 and CAE 技术的工业化应用方面, 我国的 CAE 技术与发达国家相比仍存在一定的差距。我国的计算机分析软件开发是一个薄弱环节, 严重地制约了 CAE 技术的发展。计算机软件是高科技和高附加值的商品, 目前的国际市场为美国等发达国家所垄断。在 CAE 技术的应用方面, 我国与发达国家相比水平还比较低。大多数的工业企业对 CAE 技术还处于初步的认同阶段, CAE 技术的工业化应用还有相当的难度。这一方面是因为我们缺少自己开发的具有自主知识产权的计算机分析软件, 另一方面还大量缺乏掌握 CAE 技术的科技人员。

中国加入 WTO 后, 工业界必须对市场需求做出迅速反应, 缩短工程设计周期, 优化产品 and 节省造价, 保证产品质量, 才能赢得市场。因此, 在产品的设计制造过程中应用 CAD、

CAE 和 CAM 等技术已经成为国际上科技界和工业界的共识。我国工业界要想在激烈的国际市场竞争中占有一席之地,就必须跟上现代科学技术的发展,对 CAE 技术予以足够的重视。作为世界上发展速度最快的一个发展中国家,CAE 技术水平的提高将对增强我国工业界的市场竞争能力、发展国民经济发挥着重要作用。

21 世纪是信息和网络的时代。随着计算机技术向更高速和更小型化发展以及分析软件的不开发和完善,CAE 技术的应用将愈来愈广泛并成为衡量一个国家科学技术水平和工业现代化程度的重要标志。大力推进我国计算机辅助工程技术的科学研究和工业化应用势在必行。

1.1.5 CAE 技术的应用

计算机辅助工程作为一项跨学科的数值模拟分析技术,目前已经成为现代设计方法的主要手段和工具。计算机辅助工程分析方法和软件是关键的技术要素之一。许多大型的 CAE 分析软件已相当成熟并已商品化,计算机模拟分析不仅在科学研究中普遍采用,而且在工程上也已达到了实用化阶段。借助 CAE 技术,一家汽车业咨询公司短时间内(15 周)就完成了一个紧凑型家庭轿车全尺寸模型的设计、验证和制造。通过使用非线性仿真软件 MSC. Dytran 和 MSC. Marc 重现世贸大楼倒塌全过程,美国政府的研究人员们找到了为什么世贸大楼在仅仅一个小时之内就坍塌了的原因。事实证明,在设计过程中的早期引入 CAE 来指导设计决策,能避免因在下游发现问题时需重新设计而造成的时间和费用的浪费,设计人员能将主要精力投身如何优化设计,提高工程和产品品质,从而产生巨大的经济效益。在现代设计流程中,CAE 是创造价值的中心环节。事实上,CAE 技术是企业实现创新设计的最主要的保障。企业要在激烈的市场竞争中立于不败之地,就必须不断保持产品的创新。

CAE 软件技术的发展,促使 CAE 在各行各业得到了极为广泛的应用。从对产品性能的简单校核,逐步发展到对产品性能的优化和准确预测,再到产品运行过程的精确模拟,CAE 发挥着越来越重要的作用。计算机辅助工程在汽车工程领域产品开发中的应用可以追溯到 20 世纪 50 年代计算机发展的初期阶段,当时联邦德国 BBC 公司利用工业部门的第一代计算机,采用机器语言对发动机准稳态换气方程进行解算。80 年代后期开始,世界范围内各大型制造集团相继采用计算机辅助工程提高产品开发的能力。计算机辅助工程的广泛应用已经证实它具有支撑产品发展关键领域的工程价值,并从根本上改变传统产品开发与设计的方法和模式。

1.1.5.1 汽车制造业中的应用

CAE 在汽车设计行业中应用是最多的。在发动机方面可进行其性能的计算机估计,燃烧过程的计算机模拟,冷却、传热的有限元分析,缸体等结构的有限元强度分析;在车身方面,可进行车身结构动态、静态有限元分析,车身外形空气动力学计算机模拟,车身噪声分析;在底盘方面,可进行车架有限元分析,悬架机构有限元分析,变速器、传动轴及车桥等结构强度的有限元分析;整车方面,可进行汽车平顺性、操纵稳定性的计算机模拟及撞车的有限元模拟。通过采用 CAE 技术,极大地缩短了产品的研制周期,减少了开发费用,而且也有利于通过优化等手段开发出性能更为优越的汽车整车和零部件。例如,国外著名轿车生产厂商在豪华轿车的产品设计中,以前通过经验设计时需要制造 200 多辆样车才能完成汽车的安全碰撞设计,现在有 80 多辆就足够了,大部分的设计内容都是通过有限元分析软件在电脑中模拟实现的。这样可以节约 2/3 的资金和大量研制时间。

1.1.5.2 飞机制造业中的应用

传统的飞机手工设计方法在结构设计方面几乎都是应用 CAD 系统直接进行平面图的绘制,在工程力学分析中基本都是采用简化的结构和力学模型。由于设计过程不直观,很难在设计阶段就发现设计中存在的问题。在投入最后的研制生产之前,还需要通过样件试验进行校验,如进行风洞试验。在飞机制造行业,以前通过做风洞试验检测飞机的各项性能,采用 CAE 技术以后,可以在设计阶段就通过仿真系统模拟飞机的性能,从而在设计阶段就可以对方案进行优化,其计算数据也可以用来指导试验,大大节约了研发的周期和成本。

1.1.5.3 板材加工成形中的应用

板材成形从力学角度而言,是一个包括几何、材料、边界等强非线性问题的、非常复杂的力学过程,以往人们求解多以解析法实现其误差甚大。近年来,随着计算机的应用和发展以及有限元技术的成熟,使板材成形的计算机模拟和分析在产品设计制造中发挥着越来越重要的作用。其中主要涉及:单元技术及网格划分、算法的选择、本构关系、接触缺陷处理等关键技术以及仿真与集成等应用方法。

1.1.5.4 模具制造行业中的应用

在模具设计工序中进行 CAE 是为了寻求在冲压加工中常常发生的不良变形、开裂、起皱等的解决对策,同时通过 CAE 的有限元法,分析模具工作面周围的结构,减轻模具结构的总重量,增加刚性分析冲压过程中模具各部位的发热情况,以便于模架结构设计时合理分布冷却水管,延长模具耐用度。分析注塑模的注射过程的材料流动情况,使材料流动更合理,更好地解决材料收缩的问题,分析三维图形数据是否正确,核对图形,分析曲面形状的曲率变化情况,把分析的结果反馈给 CAD 阶段,使之外观更好看,工件更容易成型。

1.1.5.5 其他行业中的应用

随着 CAE 技术的不断成熟和 CAE 软件向高性能方面的发展,CAE 技术的应用范围不断扩大,不仅在机械制造业得到了广泛的使用,在其他领域,如生物医学、建筑桥梁、冶金、电子产品制造中都得到了应用。在国外的日用消费品设计中,CAE 软件应用也很广泛。

1.1.6 CAE 技术的发展趋势

随着计算机技术、CAE 软件和网络技术的进步,CAE 将得到极大的发展。硬件方面,计算机将在高速化、小型化和大容量方面取得更大进步。可以预见,不久的将来 PC 机将在运行速度和存储容量方面得到大幅度的提高,使许多 CAE 分析软件都能在 PC 机上运行。这将为 CAE 技术的普及创造更好的硬件基础,促进 CAE 技术的工业化应用。软件方面,现有的计算机仿真分析软件将得到进一步的完善。

总体来说,计算机辅助设计的发展趋势有以下几点。

(1) 功能进一步扩充 大型通用分析软件的功能将愈来愈强大,CAE 功能进一步扩充。任何一个复杂的工程和产品大都是处在多物理场耦合,甚至是多相多态介质耦合状态下工作,其运行行为绝非是多个单一物理场问题,部分可能属于强非线性耦合。对于这些问题,目前尚没有成熟可靠的理论,还处于基础性前沿研究阶段,但由于其强烈的行业背景,它们已经成为国内外科学家研究的主要目标。此外,CAE 还将具备实现多结构耦合分析、多尺度耦合分析,以及结构、构件及其材料的一体化设计计算与模拟仿真等功能。

未来的产品设计将由产品功能主导产品外形、材料和加工工艺过程,涵盖的工程领域将愈来愈普遍。设计人员必须考虑应力和振动、运动学、流体力学、装配建模、可靠性分析、人的因素和加工工艺及成本等。工程师必须能够真实地模拟产品的所有性能,结合贯穿产品

生命周期的各种因素,获得对各种设计的模拟结果。CAE 软件也将由单一零件的虚拟样机朝着整机虚拟样机的方向发展。CAE 软件向专业应用方向发展,适用于某些专门用途的专用分析软件也将受到重视并被逐步开发完善起来。CAE 用户开始在通用软件平台上进行二次开发,建立企业级的 CAE 分析软件,简化分析方法,提高 CAE 应用效益,以此来建立和提升企业开发和研制的能力。各行各业都将会具有适于各自领域的计算机仿真分析软件。

(2) 集成化 高度集成化——包括两方面的含义。狭义上的信息集成,即实现 CAE 与 CAD、CAM、CAPP、ERP 等各单元信息的集成,减少它们之间的数据传输与转换。这主要依靠相同平台的软件、开发一定的数据转换接口程序、基于数据库的信息处理等方式实现。广义上的“多集成”,即信息集成、智能集成、串并行工作机制集成及人员集成。未来的趋势应该是实现技术、人和管理的集成。在技术创新上,近年来变量化技术突飞猛进,取得了一系列理论成果,如变量化造型、变量化分析、变量化装配、变量化模架库等,并已在 CAD 领域取得了成功应用。将来,必然会扩展到分析领域。届时,实时的、随意的多方案分析过程将使 CAE 应用更加轻松自如。对于横向的集成还有待于发展。国际标准化组织(ISO)正在推行新的数据传输国际标准 STEP。这必将加快 CAD、CAE 和 CAM 集成化的步伐。

(3) 智能化 未来的大型通用 CAD/CAE/CAM 软件是一个多学科交叉的、综合性知识密集型产品,如何使用户更方便地使用软件,同时结合多学科、多领域的知识经验来促进设计分析过程是一个不容回避的问题。智能化将是 CAE 发展的一个必然趋势。同时,软件的工作环境应该尽可能解放使用者的头脑,开拓使用者的思路,让使用者集中精力于设计创作,这使得软件趋向于人性化,除了具备智能化的自动运算、推理判断、协助思考等功能外,还要以符合人们思维习惯的方式去判断、思考、表达与操作,以更强的用户界面提供更强的直观、直感、直觉性,更智能化地适应用户的要求。

(4) 网络化 网络化时代的到来也将对 CAE 技术的发展带来不可估量的促进作用。现在许多的软件公司已经采用互联网对用户在其分析过程中遇到的困难提供技术支持。随着互联网技术的不断发展和普及、宽带通信技术的突破,网络正改变着人们获取信息、共享数据和商品交易的方式,也改变着工程设计人员完成模拟仿真分析的传统方式。通过网络信息传递,不仅对某些技术难题,甚至对于全面的 CAE 分析过程都有可能得到专家的技术支持,这必将在 CAE 技术的推广应用方面发挥极为重要的作用。随着计算机网络和图形技术的发展,未来的 CAE 软件的用户界面具有更强的直觉性。同时,使用户能够实现多专业、异地、协同、综合的设计与分析。多媒体用户界面与智能化、网络化将成为 CAE 发展的必然趋势。基于 Internet 的面向对象的工程数据库管理系统及工程数据库将会出现在新一代的 CAE 软件中。

软件供应商们已经认识到,是否提供电子网络销售将决定他们今后的竞争力。所以软件用户将从现在的购买和安装软件逐步过渡到直接租用放在网上服务器的软件。如 MSC Software 公司已实现网上购买仿真分析软件,还与网络服务商和硬件商合作,通过服务器端提供的 MSC Software 软件使用许可与客户端的用户环境,提供有偿的软件租用服务。同时,基于网络的远程计算与分析设计将得到进一步发展,异地协同设计、分析、制造将成为现实。企业的创新需求为 CAE 技术的发展提供了强大的动力。可以预见,随着科学技术的迅速发展和全球信息化,CAE 必将取得更为巨大的成就并继续对国民经济的发展做出重要贡献。

现代计算机技术和 CAE 应用软件技术的发展,决定了 CAE 应用应当以显著提高设计

质量和设计效率，明显降低设计成本，充分缩短设计、生产准备周期，浓缩和提高优秀的设计经验，提高整个设计技术的管理水平为目的。CAE 直接面向工程应用，对各种复杂物理现象实现本质表征。CAE 是计算力学、控制、信息等技术在应用领域的综合集成。各学科的协同发展，有力地推动了 CAE 技术的普及和提高。从部件级的分析走向系统集成，从结构优化到多学科优化，从产品为核心的仿真到人、环境、计算全面融汇的虚拟现实，为制造业的柔性发展带来前所未有的机遇。伴随着 CAE 的全面进步和人工智能、敏捷制造、并行工程、计算机集成制造系统（CIMS）等项目的实施，现代企业将进入崭新的发展阶段。

作为世界上发展速度最快的一个发展中国家，CAE 技术水平的提高将对增强我国工业界的市场竞争能力，发展国民经济发挥重要作用。因此，我们必须加大对 CAE 技术的投入，加快开发自己的计算机分析软件，培养一批掌握 CAE 技术的人才。针对我国工业界，特别是中小企业的 CAE 技术还较为落后，缺乏专门人才的实际情况，如何利用飞速发展的互联网技术将我们的人才和技术资源充分发挥出来为企业服务，是在 CAE 技术的发展中值得重视的一个问题。我国科技界、教育界和工业界应该携起手来为 CAE 技术的研究开发、人才培养和工业化应用而共同努力。

1.2 高分子材料注射成型 CAE

1.2.1 注射成型技术及注射成型 CAE

1.2.1.1 注射成型概述

当今世界，塑料越来越多的成为金属的替代品，成为工业原料的重要支柱。目前，世界工程塑料每年以 10% 的速度增长，而工程塑料有 80% 以上的制品是采用注射成型加工的。可见注射成型在塑料加工工业中有着极其重要的地位。迄今，注射成型设备则占到所有塑料机械总量的一半以上。随着家电行业、电子工业、汽车制造业等对于注塑制品需求的日益增大，更进一步地推动了注射成型技术的发展。注射成型已经成为塑料制品成型加工中最重要的工艺过程之一。

注射过程包括预塑、计量、注射、增密、保压、冷却定型等过程。从模具闭合熔体开始推入流道系统和型腔到模具打开，取出制品，模具再次闭合进行下一次注射成型的过程称为一个注射成型周期，图 1-1 为注射成型周期示意。在一个注射成型周期中，注射时间主要指从起点 1 到点 4 这段时间，即从注射开始到热态下型腔完全填满为止。注射时间是影响注射工艺的重要参数之一，过长和过短的注射时间都将使注射压力增大。后注射阶段（又称冷却阶段）指从型腔完全填充完毕的点 4 到型腔内制品充分冷却，模具打开瞬间为止（点 7）的这段时间。后注射阶段实际上也包括两个过程，即保压阶段（点 4~点 5）和卸压后冷却阶段。在保压阶段，由于型腔内熔体持续冷凝，熔体的

密度变大，造成体积收缩，塑料从熔融态转变为固态时体积变化率高达 25%，因此，在充模阶段结束后若停止向型腔内注料，则无法得到合格的制品。所以，在填充结束后仍需较高的压力作用下向型腔内继续注料以弥补由于冷却所造成的体积收缩，直至浇口凝固为

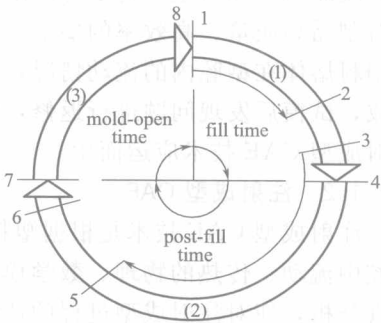


图 1-1 注射周期示意

- (1) 注射阶段（filling stage）；
- (2) 后注射阶段（post-filling stage）；
- (3) 模具打开阶段（mold-opening stage）

止。点 5~点 6 阶段保压压力释放,型腔内制件持续冷却直到温度为顶出临界温度。从点 7 开始模具打开,点 7~点 8 为开模阶段。保压过程对制品的内部结构、性能、变形和尺寸稳定性等都有很大影响,保压不足,即保压力不够或保压时间太短,易形成缩孔等缺陷;反之,则易形成飞边和翘曲变形。

注射成型能一次成型形状复杂、尺寸精确的制品,适合高效率、大批量的生产方式,已发展成为热塑性塑料和部分热固性塑料最主要的成型加工方法。注射成型是一个相当复杂的物理过程,非牛顿塑料熔体在压力驱动下通过流道、浇口向较低温度的型腔填充,熔体一方面由于模具传热而冷却,另一方面因高速剪切产生热量,同时伴随有熔体固化、体积收缩、分子取向和可能的结晶过程。因此要全面深入地理解注射成型过程需要高分子物理学、流变学、传热学等多方面的知识。在生产实际中,模具设计人员还需要处理大量的与技术、经济有关的因素,仅凭经验难以全面考虑这些因素,早期的纯数学方法和实验研究都无法解决这一难题。

注射成型生产中,注射工艺的合理性对于制品的质量起着重要的作用,注射工艺参数的合理配置必须将特定的模具结构和工艺参数结合起来考虑。在注射成型这一主要塑料加工手段中,工艺参数的选择和注射模具的好坏,对提高塑料制品的质量、降低生产成本、加快新产品的开发起关键性作用。我国大部分厂家,以多年积累的经验和大胆尝试相结合,进行模具设计和塑料制品生产,但同时也带来如下问题:

- ① 模具的设计、制造时间长;
- ② 模具的废品率高,返工工作量大;
- ③ 不能对材料、设计方案选择过程进行全面分析、评价,产品质量无法达到最优;
- ④ 不能指出成型过程中哪些地方可以改进,无法找出最优工艺参数,影响了技术进步。

模具是生产各种工业产品的重要工艺装备,随着塑料工业的迅速发展以及塑料制品在航空、航天、电子、机械、船舶和汽车等工业部门的推广应用,产品对模具的要求越来越高,传统的模具设计方法已无法适应产品更新换代和提高质量的要求。在注射成型中,如果模具设计不合理,则容易造成在塑件表面出现熔接线、填充不足、表面烧伤、收缩、残余应力和翘曲等缺陷。目前广泛采用的经验加试模确定工艺的方法,由于缺乏量化指标指导,经常会出现废品率高和质量不稳定等缺陷,特别是对于精密注射成型,这种方法显然不适应现代生产对制品高质量、高效率的要求。对于模具设计者来讲,如果能在设计方案构思阶段,预测出塑料熔体在型腔内的流动情况,以便尽早发现问题,修改设计图样,而不是等待模具制造完成,试模后发现问题进行返修,将极大地提高模具的设计水平和一次试模成功率。于是,注射成型 CAE 技术应运而生。

1.2.1.2 注射成型 CAE

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、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,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于塑料制品的质量等影响重大。以往全凭设计者的经验,用手工方法实现,费时费力,而利用 CAE 技术,可快速设计出最佳的制品。

② 优化塑料模具设计 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,减少实际试模次数。

③ 优化注射工艺参数 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,注塑模 CAE 技术无论在生产率、缩短模具设计制造周期和保证产品质量,还是在降低成本、减轻劳动强度等方面,都具有很大的优越性和重大的技术经济意义。

1.2.2 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,瑞士的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。Mc Kelvey 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 的书是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。70 年代以来,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们都致力于注射、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 方法(flow analysis network)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三维型腔的流动过程,这样,人们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。不但减少制模时间,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,于 1986 年作为商业软件进行销售。20 世纪 80 年代中期以来,国内也开始重视注塑模 CAE 技术,经过 10 余年的研究和开发,现有一些大学和研究院所已推出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,