

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,现有一些大学和科研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 1 000。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，但没有考虑流体动力学因素。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。