

注射成型 CAE 技术的研究 进展和发展趋势*

刘春太 陈静波 王利霞 申长雨

(国家橡塑模具工程研究中心 郑州 450002)

摘 要: 本文从注射成型CAE技术的工程背景和研究特点出发, 简要介绍了此技术的主要内容和重点。主要评述了国内外学者所关注的一些基本理论问题和研究方法, 讨论了该领域今后可能的发展趋势。

关键词: 注射成型 CAE 技术 成型模拟 注塑模具

中图分类号: TP391.9

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。传统的注塑产品开发是以尝试法完成的, 注塑模的设计与制造主要依靠模具设计师的直觉和经验及制模工人的技艺, 因此模具往往要经过反复调试和修正才能正式投入生产。解决这一问题的关键在于注塑模的设计与制造、注射成型工艺以科学分析为基础, 突破经验束缚。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充填, 熔体一方面由于模具传热而快速冷却, 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也无法解决这一难题。

注射成型 CAE (Computer Aided Engineering) 技术是利用聚合物加工流变学、传热学、计算力学和计算机图形学等基本理论, 对注射成型流动、保压、冷却等过程进行数值模拟, 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, 使加工成型从一项实用技术变为一门应用科学。

1 注射成型 CAE 技术几个基本问题的研究进展

1.1 注塑级塑料熔体的粘度模型

对于聚合物加工来讲, 塑料熔体最重要的性质就是非牛顿粘度, 即熔体的粘度随剪切速率的变化而改变, 粘度的变化倍率可达 10^1 , 10^2 甚至 10^4 。这样大幅度的粘度变化对注射成型加工过程的设计和计算是不容忽视的。最早的经验处理就是将牛顿粘滞定律加以修改, 使粘度成为剪切速率的函数。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, 因此在实验观测的基础

* 收稿日期: 1995-5-8

上,对牛顿流体加以推广,得到了几个常用的经验非牛顿粘度函数。其中最著名的是 Ostwald 和 de Waele 的幂律模型⁽¹⁾、Carreau 粘度模型⁽¹⁾、Cross 粘度模型⁽²⁾。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粘度值偏高,Carreau 粘度公式是从经验的非线性粘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。目前在注射成型模拟中主要使用的是 Cross 粘度模型:

$$\eta(\dot{\gamma}, T, P) = \frac{\eta_0(T, P)}{1 + ((\eta_0 \dot{\gamma} / \tau^*)^{1-n})}$$

其中 η_0 是零剪切粘度, n 是流动指数, τ^* 表示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。对于 Cross 模型,当剪切速率较低时,它退化为牛顿零剪切粘度,对高剪切速率它转化为幂律模型。它适合于描述更宽范围的剪切速率变化,并且可以根据注射流动,保压各自的特点,分别利用 Arrhenius 方程和 WLF 方程建立起五参数和七参数的粘度模型。

1.2 注射成型过程的流动分析

流动分析的目的是预测熔体流经流道,浇口填充型腔的过程。通过流动模拟,可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、非稳态性,导致熔体充模流动过程模拟相当困难,需要从连续介质力学一般理论出发建立控制方程,借助于数值方法(有限元,有限差分,边界元)来求解。

1960 年,Toor⁽³⁾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⁽⁴⁾⁻⁽⁶⁾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。对二维充模流动分析的研究始于七十年代中期,Kamal⁽⁷⁾、Broyer⁽⁸⁾、Hieber 和 Shen⁽⁹⁾等基于 Hele-Shaw 流动模型对二维薄壁制件的充模流动进行了详细的理论研究。研究方法主要有两种:一是分支流动法,一是网络流动法。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。网络流动法的基本思想是将整个型腔划分为网格,并形成相应于各节点的体积单元,建立节点压力和流入节点体积单元流量之间的关系,得到一组以各节点压力为变量的控制方程,并且根据节点体积单元的充填状况更新流动前沿。

二维流动的另一难点是运动边界的确定,即熔体前峰面位置的确定。目前被普遍采用的是 Wang 和 Hieber⁽¹⁰⁾1986 年所建立的有限元/有限差分混合法。它沿用流动网络法的基本思想,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。

1.3 注射成型过程中的保压分析

由于塑料熔体从熔融态冷却到固态时体积变化很大,因此型腔充满后必须有一部分熔体在高压下被继续注入型腔,以补充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作用。保压模拟的目的是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五十年代初,Spencer 和 Gilmore 提出了圆管内保压压力的经验计算公式,Kamal 和 Kenig⁽⁴⁾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⁽⁵⁾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^[11] 在 Kamal 的研究基础上, 考虑到压力对粘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^[12] 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 粘度模型和 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/有限差分法混合求解。Nguyen 和 Kamal^[13] 基于 Maxwell 粘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。

2.4 注塑模冷却系统分析

由于冷却时间在整个注塑生产周期中几乎占 2/3 以上, 注塑模冷却系统的设计直接影响着注塑生产率和制件质量, 一个完善的冷却系统设计能显著减少冷却时间, 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、塑料熔体固化放热, 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, 然而由于实际问题的复杂性, 这样的分析是十分困难的。Kamal 和 Lafleur^[14] 综述了结晶聚合物冷却分析理论, 建立了结晶聚合物塑料熔体的热传导理论模型。Barone 和 Caulk^[15] 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^[16] 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^[17] 等对各种计算方法的效率和精度作了详细的比较, 提出了周期性平均(Cycle-average) 理论分析方法。它的基本思想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 塑料注射成型 CAE 技术的发展趋势

2.1 注射成型全过程分析

注射成型全过程分析是对塑料熔体在注射成型的流动、保压及冷却阶段的流变行为和热平衡进行综合分析, 并最终计算出制品的内应力和翘曲变形。目前, 注射成型的流动、保压、冷却及翘曲分析软件都是独立开发的。一方面, 这些分析软件的数学模型还有待进一步完善并扩大其适用范围, 计算速度应进一步提高; 另一方面, 这些独立的分析软件还应该有机地结合起来, 才能获得更为符合实际的分析结果。这是因为在注射成型过程中, 熔体的流动与保压, 保压与冷却都是交织在一起相互影响的, 不应将它们隔离开来。

2.2 注塑模 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, 并不针对注塑模。目前的趋势是愈来愈多的注射成型专用 CAD/CAM/CAE 系统得以开发, 这些系统不仅将通用的 CAD/CAM 系统的功能作了进一步扩充以适应注塑模设计和制造的需要, 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。如美国的 SDRC 公司、MD 公司、CV 公司等都推出了这样的集成系统。

2.3 联机分析成型过程的控制系统

联机分析就是将实际注射成型与计算机数值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, 实现注射成型机的优化控制。联机分析是 CAE 技术发展的最新趋势。澳大利亚 MoldFlow 公司在这方面作了一些开创性工作。

3 结束语

近年来,在国家“八五”科技攻关、国家自然科学基金等项目的资助下,国家橡塑模具工程研究中心在注塑模 CAE 技术领域开展了广泛的研究工作,建立了一套完整的注塑模 CAE 分析理论,并独立开发出集成化的 CAE 分析软件 Z-MOLD 系统。该系统吸收了注塑模实际设计经验,采用有限元/有限差分法进行流动和保压分析,采用边界元法进行冷却分析,同时将灵敏度分析理论和序列线性规划法用于注塑模的优化设计。整个系统包括六个子系统,并已用于数十套精密复杂模具的分析的设计。取得了良好的效果。

参 考 文 献

- 1 R.I.Tanner, Engineering Rheology, CLARENDON PRESS, OXFORD (1985)
- 2 M.M.Cross, J.Appl. Polym. Sci. Vol. 13(1969)
- 3 H.L. Toor et al, Mod. Plast. Vol. 39(1960)
- 4 M.R.Kamal and S.Kenig, Polym. Eng. Sci. Vol. 12(1972)
- 5 J.F.Stevenson, Polym. Eng. Sci. Vol. 18(1978)
- 6 H.A.Lord and G.Williams, Polym. Eng. sci, Vol. 15(1975)
- 7 M.R.Kamal et al, Polym. Eng.Sci, Vol. 15(1975)
- 8 E.Broyer et al, Trans. Soc. Rheol, Vol. 19(1975)
- 9 C.A.Hieber and S.F.Shen, J.Non-Newton. Fluid.Mech, Vo. 17(1980)
- 10 V.W.Wang et al, J.Polym. Eng. Vol. 21(1986)
- 11 T.S.Chung and M.E.Ryan, Polym. Eng. Sci, Vol. 21(1981)
- 12 C.A.Hieber, Chapter 1 in Injection and Compression Molding Fundamentals, A.I.Isayev ed., Marcel Dekker New York (1987)
- 13 K.T.Nguyen and M.R.Kamal, Polym. Eng. Sci, Vol. 33(1993)
- 14 M.R.Kamal and P.G.Laffleur, Polym. Eng.Sci, Vol. 24(1984)
- 15 M.R.Barone and D.A.Caulk, Polym. Eng. Sci, Vol. 25(1985)
- 16 M.Rezayat and T.Button, Symposium of Advanced BEM: Application In Solid and Fluid T.A.Cruse ed. Springer. Verlag New York(1987)
- 17 K.Himasekhar et al, J.Eng. for . Industry Vol. 114(1992)

Recent Development and Trends of CAE

Technology In Injection Molding

Liu Chuntai Chen Jinpo Wang Lixia Shen Changyu

(National Engineering Research Center of Mold & Die)

Abstract: Beginning with the background of engineering applications and the research characteristics of CAE in injection molding, this article outlines recent developments in the topic. Several fundamental theoretical problems and research methods of current interest on CAE in injection molding are reviewed, some trends of development on this domain are discussed.

Keywords: Injection molding; CAE technology; molding simulation; injection mold.