

注塑成形中流动与冷却的耦合分析

曹 伟 闵志宇 申长雨

郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州, 450002

摘要:分析了传统模拟方法中温度边界条件的缺陷,提出了用耦合方法确定模具、熔体传热问题的边界条件。用有限元求解模具温度场、有限差分求解塑料熔体温度场,在界面上用超松弛方法更新边界温度,重新计算模具、塑件熔体的传热问题,直到收敛。保存脱模后模具温度状态并作为下一周期模拟的初始条件、边值条件。注塑成形中流动与冷却的耦合分析方法可以模拟瞬态、多周期及更复杂的传热问题。

关键词:有限元法;有限差分法;注塑成形;耦合分析

中图分类号: TQ329.6

文章编号: 1004-132X(2006)19-2002-03

Coupling Filling and Cooling Analysis for Injection Molding

Cao Wei Ming Zhiyu Shen Changyu

National Engineering Research Center on Advanced Polymer Process Technology,
Zhengzhou University, Zhengzhou, 450002

Abstract: This paper analysed the limitations of the conventional simulating method and presented a coupling scheme to determine the boundary conditions of thermal problems for mold and melt. The finite element method was employed to solve the mold thermal problem while the finite difference method was used to solve the melt thermal problem. The temperature at the interface between mold and melt was updated with the two solutions by over relax method. Repeating this process until the temperature was convergent. After ejection, the mold temperatures, inheriting from the last cycle, were saved and used as the initial and boundary conditions for next cycle simulation. The coupling method can simulate the transient, multi-cycle and more complicated thermal problems.

Key words: finite element method; finite different method; injection molding; coupling analysis

0 引言

注射成形是一种广泛使用的热塑性薄壁制品的加工方法,包括充填、保压、冷却三个阶段,传热过程在整个成形周期中都存在,制品的力学性能、机械性能、外观质量都和成形过程中的温度分布有直接关系。迄今为止,在研究和软件开发中都把恒定的模具温度作为边界条件来模拟充填阶段熔体温度场的分布。实际上,模具温度在充填过程中变化很快,并且对熔体的流动有很大的影响。此外,因为它不能够计算出某个成形周期中模具的温度变化,所以这种方法不能模拟瞬态、多周期问题。

本文提出的耦合方法视模具温度在整个成形周期中是变化的,用统一模型计算流动、冷却阶段模具、熔体的温度分布。用四面体单元离散模具,三角形单元离散塑件表面,然后用双面流方法^[1]求解充填过程中的压力场、温度场、速度场、流动前沿,用有限元法求解出充填和冷却阶段的模具温度场,再将温度场在模具与塑件交界面上耦合,重新

计算模具和熔体温度分布。

1 充填和后充填阶段的温度计算

在充填和后充填阶段,粘性熔体的温度变化主要是由热传导、热对流和粘性热的共同作用产生的,熔体的热量通过模具传递给冷却液和空气,热流大小取决于模具材料和厚度。

1.1 模具传热问题

用 Ω 代表三维模具空间,温度控制方程为

$$\rho_s c_{ps} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_s \nabla T_s) + q_s \quad (1)$$

式中, ρ_s 、 c_{ps} 、 λ_s 和 T_s 分别为模具的密度、质量定压热容、热导率和绝对温度; q_s 为热源。

把模具边界分为三种情况: ①与聚合物接触的边界 Γ_m ; ②与冷却液接触的边界 Γ_c ; ③与空气接触的边界 Γ_a 。在整个成形过程中,冷却液和空气的温度变化很小,视为常数,采用第三类边界条件来处理这两部分的模具温度变化。

在边界 Γ_c 上的温度控制方程为

$$-\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial n} = \left(\frac{\partial T_s}{\partial x}, \frac{\partial T_s}{\partial y}, \frac{\partial T_s}{\partial z} \right)_n = h_c (T_s - T_c) \quad (2)$$

在边界 Γ_a 上的温度控制方程为

收稿日期: 2006-06-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10225211)

• 2002 •

- λ_k ∂T_s / ∂n = λ_k (∂T_s / ∂x , ∂T_s / ∂y , ∂T_s / ∂z)_n = h_A (T_s - T_A) (3)

式中, T_C、T_A 分别为边界 Γ_C、Γ_A 上的绝对温度; h_C 为模具和冷却液的热交换系数, 其大小与冷却液的流速、温度和模具温度有关; h_A 为空气和模具的热交换系数。

充填阶段, 与模具接触时熔体温度是未知的, 采用第二边界条件处理这部分边界 (T_m) :

λ_k ∂T_m / ∂n = λ_k (∂T_m / ∂x , ∂T_m / ∂y , ∂T_m / ∂z)_n = q (4)

式中, q 为热流密度。

1.2 熔体传热问题

本文采用广泛使用的 Chiang 方法^[2] 描述粘性可压缩非等温熔体的流动规律, 流动控制方程为

∂ρ_m / ∂t + ∂ / ∂x (ρ_m u) + ∂ / ∂y (ρ_m v) = 0 (5)

∂ / ∂z (η ∂u / ∂z) - ∂p / ∂x = 0 (6)

∂ / ∂z (η ∂v / ∂z) - ∂p / ∂y = 0 (7)

ρ_m C_{pm} (∂T_m / ∂t + u ∂T_m / ∂x + v ∂T_m / ∂y) = λ_m ∂² T_m / ∂z² + η γ̇ (8)

式中, ρ_m 为熔体密度; C_{pm} 为熔体比热; λ_m 为熔体热导率; T_m、p 分别为熔体绝对温度和压力; t 为时间; η (γ̇, T_m, p) 为剪切黏度; γ̇ 为剪切速率。

将 1.1 中计算的绝对温度作为已知的界面绝对温度, 用第三类边界条件描述熔体与模具之间的传热关系:

- λ_m ∂T_m / ∂n = λ_m (∂T_m / ∂x , ∂T_m / ∂y , ∂T_m / ∂z)_n = h_m (T_m - T_w) 在 Γ_w 上 (9)

式中, T_w 为模壁绝对温度, 它在型腔上不同位置具有不同的值; Γ_w 为模具 - 熔体界面。

2 数值求解

用权函数 φ 乘以能量式 (1), 分部积分得

∫_Ω ρ_s C_s ∂T_s / ∂t φ dΩ + ∫_Ω ∇ T_s · ∇ φ dΩ = ∫_{Γ_A} λ_k ∂T_s / ∂n φ dΓ + ∫_{Γ_C} λ_k ∂T_s / ∂n φ dΓ + ∫_{Γ_m} λ_k ∂T_s / ∂n φ dΓ + ∫_Ω q_s φ dΩ (10)

将式 (2) ~ 式 (4) 代入上式, 可得

∫_Ω ρ_s C_s ∂T_s / ∂t φ dΩ + ∫_Ω ∇ T_s · ∇ φ dΩ + ∫_{Γ_A} h_A T_s φ dΓ + ∫_{Γ_C} h_C T_s φ dΓ = ∫_{Γ_A} h_A T_A φ dΓ + ∫_{Γ_C} h_C T_C φ dΓ + ∫_{Γ_m} q φ dΓ + ∫_Ω q_s φ dΩ (11)

离散上述变分方程, 求解代数方程组可得模具温度场分布。

将型腔内的模具温度作为边界条件, 用双面流方法求解熔体的压力场、速度场, 再用有限差分及“上风法”^[3] 离散能量方程求解熔体的温度场并计算熔体界面上的热流。用当前热流更新式 (4) 所示

的边界条件, 重新求解模具温度场, 再用模具温度场更新式 (9) 所示的边界条件求解熔体在充填阶段和后充填阶段的温度场。重复这个过程, 直到模具、熔体温度场都收敛为止。

在冷却阶段, 熔体流动停止, 能量控制方程中的对流和粘性热均为零, 熔体的温度场问题简化为热传导问题, 仍然用有限差分求解。而模具温度场的控制方程及求解方法同充填阶段相同。

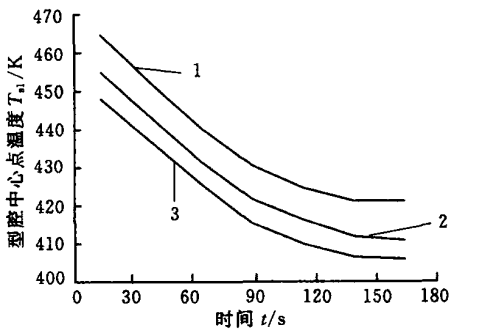
在模具开模阶段, 模具所有表面都与空气接触, 模具传热问题只有两类边界, 仍然采用有限元求解出这个阶段的模具温度场。将模腔和模芯的温度场作为下一次熔体充填的边界条件模拟成形过程。所以本文方法中模具温度场在一个周期的不同时刻是变化的, 不同周期的相同时刻温度场也不相同。

3 实验结果和模拟结果对比

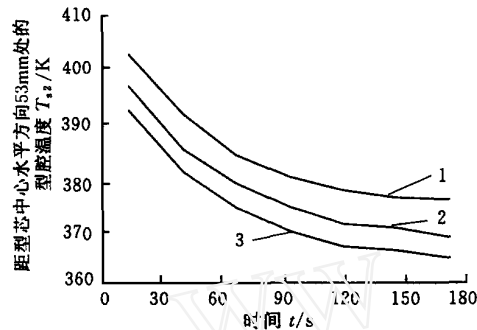
该实验是在台湾中原大学完成的, 制件为树脂镜片, 其厚度由边缘处 7mm 到中心处的 1.5mm 逐渐变化, 材料采用 GE 生产的 PC (Lexan LGK5330)。为了获得均匀一致的充填效果, 在镜片中心上方的模具内嵌入加热器, 补偿由于快速冷却而导致该部分塑料熔体的急剧降温, 减小中心处的熔体流动阻力。采用红外线热成像 (IRTI) 来测量开模时型腔和模芯的温度。

图 1 示出了在型腔中心点的温度 T_{s1} 以及距型芯中心水平方向 53mm 处的温度 T_{s2} 的实验结果、Ansys 模拟结果和本文模拟结果的对比情况。Ansys 将熔体的充填模拟与模具的传热分析分开, 不能自动更新模具 - 制件界面处的温度, 只能使用等效的方法给定界面处的温度并作为充填阶段的边界条件, 所以结果与实验值相差较大。本文耦合了制品和模具的温度计算, 并不断更新不同时刻的温度场边界条件, 所以可以更加精确地模拟模具和制品温度场分布。图 1 表明, 本文模拟结果比 Ansys 分析结果更接近实验结果。

图 2 为不同加工条件及不同成形周期下光学镜片的熔体流动前沿示意图。由图可知, 光学镜片中间薄四周厚, 熔体在制品中心处流动阻力比边缘处大, 导致熔体最后在镜头中心处汇聚产生熔接痕 (图 2a), 影响了光学镜片的折射率、表观质量。为了解决这个问题, 在制品中心上方的模具型腔中嵌入一个加热器, 它给流经中心的熔体加热并使之容易流动, 如图 2b 和图 2c 所示。在初始的几个成形周期中, 制品中心处的模具温度没有升到足够高, 所以熔接痕还是存在。经过 15 个成形周期后即第



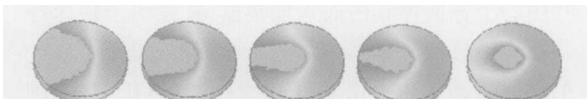
(a) 型腔中心点的温度



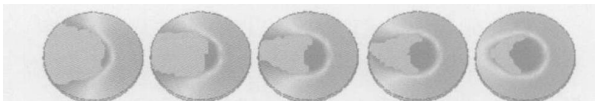
(b) 距型芯中心水平方向 53mm 处的型腔温度

1. 实验 2. 本文方法 3. Ansys

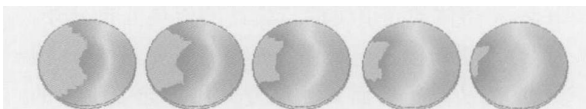
图 1 模拟结果和实验结果的对比



(a) 模具中没有加热装置的情况



(b) 有加热装置的第一个成形周期



(c) 有加热装置的第 16 个成形周期

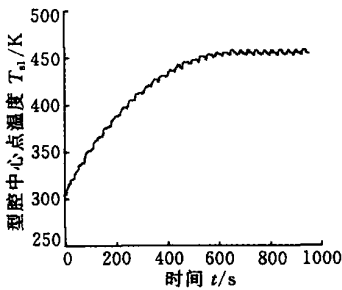
图 2 模拟熔体流动前沿

16 个成形周期中,中心处的模温升高并给流经该处的熔体加热,所以熔接痕消失。

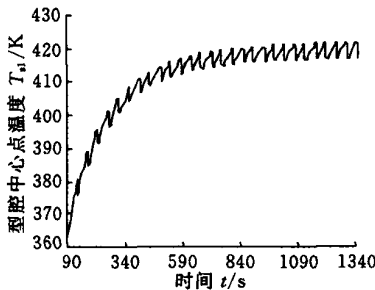
图 3 所示为模拟多个成形周期有加热装置时型腔中心点处模具温度。由图 3a 可以看出,本文方法模拟的模具型腔中心点处的温度在 800s 后出现周期性振荡,亦即该点温度变化与前一周期基本相同。由图 3b 可以看出,Ansys 模拟的模具型腔中心点处的温度在 1090s 后出现了周期性变化,Ansys 分析结果与本文相类似,只是延迟了大约 290s 后才达到稳定。

4 结论

注塑成形的传热过程十分复杂,多种介质的热



(a) 本文方法



(b) Ansys

图 3 模拟多个成形周期有加热装置时型腔中心点处模具温度

交换同时存在。采用耦合方法模拟传热问题不仅可以保持热量平衡,确定更精确的模具 - 制件的界面温度,还可以处理更复杂的传热问题如模具局部加热、冷热冷却液的交替,提供更精确的温度场分布。本文方法保存每个成形周期结束时温度并作为下一成形周期传热问题的初始条件,可以模拟瞬态、多周期的成形问题。

参考文献:

[1] Cao Wei, Wang Rui, Shen Changyu. A Dual Domain Method for 3D Flow Simulation[J]. Polymer - Plastics Technology and Engineering, 2004, 43 (5), 1471 - 1486.

[2] Chiang H H, Hieber C A, Wang K K. A Unified Simulation of the Filling and Postfilling Stages in Injection Molding: Part I[J]. Polymer Engineering and Science, 1991, 31:116-124.

[3] Wang V W, Hieber C A, Wang K K. Dynamic Simulation and Graphics for the Injection Molding of Three-dimensional Thin Parts [J]. Polymer Engineering, 1986, 7:21-45.

(编辑 郭 伟)

作者简介:曹 伟,男,1965 年生。郑州大学橡塑模具国家工程研究中心教授。研究方向为注塑成形计算机模拟。闵志宇,男,1980 年生。郑州大学橡塑模具国家工程研究中心博士研究生。申长雨,男,1963 年生。郑州大学校长、教授、博士研究生导师。