

文章编号:1671-6833(2005)01-0009-04

模腔表面平均温度边界对注塑仿真的影响

申长雨, 郭恒亚, 赵振峰, 黄 明

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 河南 郑州 450002)

摘 要:应用一维有限元方法进行注塑成型过程中温度场的计算机模拟, 讨论采用模腔表面平均温度边界条件对传热分析造成的误差. 结果显示, 当对模具的精度要求不高时, 误差是可以接受的; 但对于精密注塑件, 或者制件很薄, 这种误差则会对数值分析产生影响. 针对这种情况, 根据实际的瞬态温度分布, 提出一种用平均温度构造近似的瞬态温度场方法, 以提高注塑数值模拟的精度.

关键词: 注塑仿真; 温度场; 有限元方法; 模腔表面温度

中图分类号: TQ 320

文献标识码: A

0 引言

塑料注塑成型是热塑性塑料和一部分热固性塑料最主要的加工成型方法. 它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. 传统的注塑模具的设计主要依靠模具设计人员的直觉和经验. 因此, 模具往往要经过反复的调试和修正才能正式投入使用, 使用数值模拟的方法就可以模拟注塑成型过程、优化成型工艺参数、提高模具质量、降低生产成本、缩短模具设计制造周期等.

在注塑加工数值模拟过程中, 模腔的表面温度直接影响塑料熔体的流动和固化过程, 所以模腔表面温度的计算对注塑数值模拟的结果起着极为重要的作用. 最为理想的方法, 就是能够直接算出模腔表面的瞬态温度分布, 从而使用此瞬态温度场作为边界条件进行数值模拟. 然而, 由于模具冷却分析计算非常耗时, 给出模腔表面的瞬时温度分布极其困难. 为了解决这个难题, 目前广泛采用稳态分析, 即计算模腔表面的平均温度, 然后, 直接使用这个平均温度来作为边界条件进行流动和保压分析^[1]. 不过, 使用平均温度作为边界条件进行计算, 结果会有一定的偏差. 比起使用瞬态温度场作为边界条件的计算结果, 其具体的偏差值是多少, 这个偏差值对流动和保压分析产生多大的影响, 在整个的注塑数值模拟过程中, 可否保证最终计算结果的精度, 这是要解决的第一个问题.

要讨论的第二个问题, 是为了使最终计算结果的精度更高, 可以根据平均温度人为模拟出一个瞬态温度场, 再用这个模拟出的瞬态温度场作为边界条件进行分析计算. 算例表明, 本文作者提出的拟瞬态温度场对于提高注塑加工数值模拟的精度, 是切实可行的.

1 计算模型

注塑过程的传热现象很复杂, 包括制品内的热交换、制品与模具之间的热交换、模具与冷却介质的热交换、模具外表面与外界环境的热交换, 等等^[3]. 在建立数学模型时, 考虑到塑料的导热率远远低于金属模具的导热率, 可以忽略制品在平面内的传热, 而假设制品只沿厚度方向传热^[3]. 因此, 我们用一维热传导方程讨论提出的问题.

当热传导过程无热源时, 一维热传导方程简化为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

及边界和初值条件:

$$\begin{cases} T = T_1(t), & \text{当 } x = x_1 \\ T = T_2(t), & \text{当 } x = x_2 \\ T = T(x), & \text{当 } t = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: T 为温度; λ 为导热系数; C_p 为比热; ρ 为密度; t 为注塑时间.

本文作者采用空间有限元离散, 时间有限差

收稿日期: 2004-09-06; 修订日期: 2005-01-17

基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目(10225211)

作者简介: 申长雨(1963-), 男, 河南省南阳市人, 郑州大学教授, 博士生导师, 主要从事高分子材料成型模拟方面的研究.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

分离散的混合法对公式(1)进行求解. 首先用伽辽金方法, 对式(1)加权积分, 有

$$\int_{x_1}^{x_2} \delta T \left[\rho_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) \right] dx = 0 \quad (3)$$

分部积分, 并考虑到在边界上 T 已知, 故 $\delta T = 0$, 可得

$$\int_{x_1}^{x_2} \left[\rho_p \delta T \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda \frac{\partial (\delta T)}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx = 0 \quad (4)$$

在区间 $x_1 \sim x_2$ 对 T 进行离散, 即在该区间划分 n 个单元, 设 T 为分片连续函数, 记单元 i 两端的坐标为 x^i, x^{i+1} , 方程式(4)可改写为

$$\sum_i \int_{x^i}^{x^{i+1}} \left[\rho_p \delta T \frac{\partial T}{\partial t} + \lambda \frac{\partial (\delta T)}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} \right] dx = 0 \quad (5)$$

在 i 单元内, 设

$$T^i = [N_1 \quad N_2] \begin{Bmatrix} T_i \\ T_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} N_1 = \frac{x^{i+1} - x}{l_i} \\ N_2 = \frac{x - x^i}{l_i} \\ l_i = x^{i+1} - x^i \end{cases} \quad (7)$$

而 T_i, T_{i+1} 为单元节点上的温度值. 进一步, 令

$$\delta T^i = [N_1 \quad N_2] \begin{Bmatrix} \delta T_i \\ \delta T_{i+1} \end{Bmatrix} \quad (8)$$

将式(6)~(8)代入式(5), 并记

$$M = \int_{x^i}^{x^{i+1}} \rho_p [N_1 \quad N_2] dx;$$
$$K_i = \int_{x^i}^{x^{i+1}} \lambda \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} \\ \frac{\partial N_2}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} \end{bmatrix} dx,$$

上式合并可化作:

$$\sum_i \begin{Bmatrix} \delta T_i \\ \delta T_{i+1} \end{Bmatrix}^T \left[M \begin{Bmatrix} T_i \\ T_{i+1} \end{Bmatrix} + K_i \begin{Bmatrix} T_i \\ T_{i+1} \end{Bmatrix} \right] = 0 \quad (9)$$

将各单元拼装在一起, 有

$$\delta T^T (MT + KT) = 0 \quad (10)$$

由于 δT 可以为任意值, 故有

$$MT + KT = 0 \quad (11)$$

在时间域, 采用后差分:

$$\begin{cases} T = \frac{1}{\Delta t} (T^{n+1} - T^n) \\ T = T^{n+1} \end{cases} \quad (12)$$

代入式(11), 有

$$\left(\frac{1}{\Delta t} M + K \right) T^{n+1} = \frac{1}{\Delta t} M T^n \quad (13)$$

式(13)就是求解一维瞬态热传导方程的有限元—有限差分方程^[4,9].

2 平均温度边界产生的计算误差

在本文计算所采用的一维模型中, 以模腔内熔体中心为坐标原点, 以垂直于熔体流动方向为坐标轴(x 轴)方向. 取熔体厚度为 3.0 mm , 即 $x = 0$ 为熔体的中心, $x = 1.5\text{ mm}$ 为熔体与模具的接合处, 而距接合处 30 mm 为冷却管道, 作为计算模型的外边界. 在对熔体进行单元划分过程中, 为了计算所需, 划分为 10 个单元, 并且从熔体中心到接合处逐渐增密, 即单元长度逐渐减小. 对模具的单元划分采用同样的方法, 从模具边界到与熔体接合处单元逐渐增密, 划分为 20 个单元. 下面选取熔体材料 (Cycloc 28818E; ABS) 和模具材料 (Tool steel P-20) 进行注塑数值模拟.

在本计算模型中, 由于外边界上为冷却管道, 温度变化甚微, 故认为其温度是常数, 在此处给定一个常温边界 ($35\text{ }^\circ\text{C}$). 经过计算, 在熔体和模具接合处得到一瞬态温度分布, 此温度被认为是模腔表面的真实温度, 而熔体的温度变化, 被认为是瞬态模腔温度下的解, 亦即真实的解. 由此边界瞬态温度场, 可得一平均值. 用此平均值作为模腔表面温度 (对应于 CAE 冷却分析中的模腔单元平均温度), 应用上面的有限元计算, 可得又一熔体温度场, 用作本文平均模腔温度边界的解. 比较两温度场的差异, 即可知通常 CAE 冷却分析中取单元平均温度对熔体冷却计算带来的误差.

表 1 给出在 $x = 0, 0.846\ 4, 1.258\ 6, 1.459\ 4$ 处, 使用瞬态温度 T_1 和平均温度 T_0 作为边界条件时, 熔体温度在不同时刻的比较, 熔体的初始温度为 $250\text{ }^\circ\text{C}$. 表 2 表示使用瞬态温度 T_1 和平均温度 T_0 作为边界条件时, 在不同节点熔体凝固时刻的比较.

表 1 分别使用 T_1 和 T_0 作为边界条件时
熔体在不同时刻的温度值

Tab. 1 The temperature taking T_1 or T_0 as the boundary condition at different time $^\circ\text{C}$									
时间 t/s		$x = 0$		$x = 0.8464$		$x = 1.2586$		$x = 1.4594$	
		T_1	T_0	T_1	T_0	T_1	T_0	T_1	T_0
1	250.00	250.00	233.62	233.12	155.82	152.84	79.36	73.87	
6	208.47	207.22	156.08	153.50	98.83	95.03	66.97	62.66	
12	151.35	148.96	117.57	114.98	81.88	79.38	62.25	59.98	
18	115.01	112.76	93.64	92.00	70.96	70.26	58.41	58.43	
24	91.89	90.65	78.13	77.98	63.41	64.71	55.22	57.48	
30	76.89	77.15	67.82	69.42	58.05	61.31	52.56	56.90	

表 2 使用 T_1 和 T_0 时不同节点的凝固时刻

Tab.2 The freezing time at different nodes		
坐标值 l/mm	T_1	T_0
0	20.50	20.00
0.846 4	15.00	14.50
1.258 6	4.75	4.00
1.459 4	0.50	0.25

为对误差有一个更直观的印象,我们根据表 1,以平均温度边界条件下的熔体温度为基准,计算出两种边界条件下的温度偏差值,由这个偏差值作为纵坐标所绘出的曲线如图 1 所示.

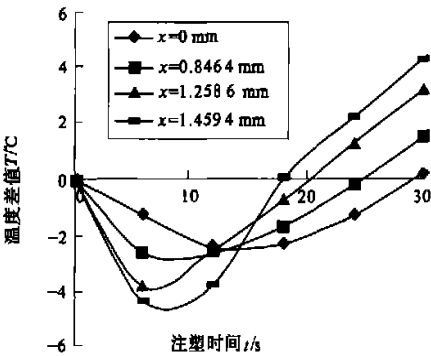


图 1 平均温度边界引起的熔体温度偏差
Fig.1 Error of average temperature boundary

可以看出,从熔体中心到熔体边缘,在所划分的各个节点处,这个差值最高也没有超过 6°C , 相对是很小的.如果制件比较厚,而且并非精密产品,这个误差在注塑数值模拟分析时还是可以接受的.也就是说,在一般的注塑数值模拟过程中,为了简化计算,在精度要求不是很高的情况下,是可以 用平均温度代替瞬态温度作为边界条件的.特别要注意到,在熔体中心($x=0$) 二者的差异很小,因此用平均温度边界计算的冷却时间基本是正确的.

另一方面,在靠近模腔的地方,二者还是有一定的差异.使用平均温度边界,开始时计算的熔体温度偏低,从而预测的冷凝时间提前.如果制件比较薄,将导致流动分析中阻力增大,从而高估注塑压力.在注塑快结束时,预测的制件温度又偏高,会对保压过程的模拟产生一定的偏差.

3 近似瞬态温度场

由上分析,结论当然是最好使用瞬态温度边界条件.然而,这在目前是不现实的.但我们可以退而求其次,寻求是否能够根据边界的平均温度

人为的模拟出一个瞬态温度场,并以此作为边界条件进行数值模拟计算,以提高数值模拟计算精度.下面,我们将就 ABS 材料进行一点探讨.

由上一节的分析知道,当注塑加工周期为 30s 时,实际瞬态温度场如图 2 所示,为一条近似三角折线的带弧曲线,由此曲线算出的平均温度约为 56°C ,而达到最高温度所在的时刻是 0.75s ,最高温度和最低温度之间的差值大约为 10°C .大量的计算表明,当改变计算参数时,如注塑时间、边界温度或熔体初温等,这个差值并不会产生太大的变化.

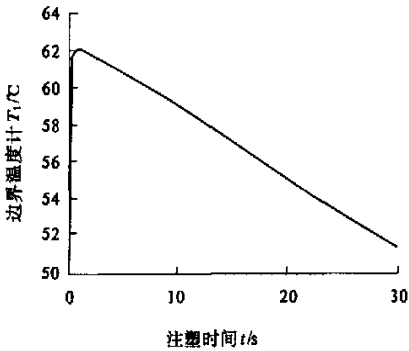


图 2 熔体边界实际瞬态温度场
Fig.2 The real instantaneous temperature

因此,对于此类材料,若我们仅仅知道边界平均温度 T_0 和加工周期 τ 时,可以构造出一个模拟的瞬态温度场 T_2 ,即两条直线组成的三角折线,如图 3 所示示.

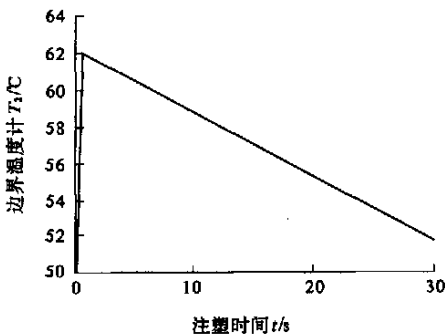


图 3 熔体边界模拟瞬态温度场
Fig.3 Simulating instantaneous temperature

设最低温度为 T_{\min} ,则在具体的构造过程中,有

$$\begin{cases} T_{\max} = T_0 + 5; \\ T_{\min} = T_0 - 5, \end{cases}$$

从而拟瞬态温度场为

$$\begin{cases} T = k t + T_{\min} & (0 \leq t \leq 0.75) \\ T = k(t - \tau) + T_{\min} & (0.75 < t \leq \tau) \end{cases} \quad (14)$$

其中,

$$\begin{cases} k_1 = \frac{10}{0.75} = \frac{40}{3} \\ k_2 = \frac{10}{0.75 - \tau} \end{cases} \quad (15)$$

其温度变化曲线如图 3 所示.

用式(14) 作为模腔边界条件,重新计算上一节的热传导问题,表 3 给出了不同时刻熔体不同位置的温度值,并同时给出真实瞬态温度边界 T_1 对应的解.可以看出,二者的解几乎是一样的.因此,用两条直线模拟真实的瞬态温度边界条件,是完全可行的.

当然,随注塑参数的变化,边界温度的最大差值和发生的时间也会变化.如果能发现其变化规律,我们将会得到式(15) 更为准确的描述,这是一个需要进一步深入研究的课题^[9].

表 3 分别使用 T_1 和 T_2 作为边界条件时
熔体在不同时刻的温度值

Tab.3 The temperature taking T_1 or T_2 as the
boundary condition at different time $^{\circ}\text{C}$

时间 t/s	$x = 0$		$x = 0.8464$		$x = 1.2586$		$x = 1.4594$	
	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2	T_1	T_2
1	250.00	250.00	233.62	233.30	155.82	154.94	79.36	78.99
6	208.47	208.28	156.08	155.86	98.83	98.57	66.97	66.69
12	151.35	151.12	117.57	117.33	81.88	81.63	62.25	62.01
18	115.01	114.79	93.64	93.47	70.96	70.87	58.41	58.39
24	91.89	91.76	78.13	78.08	63.41	63.47	55.22	55.34
30	76.89	76.86	67.82	67.84	58.05	58.11	52.56	52.64

4 结束语

笔者通过计算比较了分别采用瞬态温度和平

均温度作为边界条件时熔体的冷却过程.可以发现,两者熔体温度曲线大体上是一致的.因此在精度要求不高的情况下,用平均温度代替瞬态温度作为边界条件进行流动分析可以接受.然而,若精度要求高,或制件很薄,则用平均温度作为边界条件可能会产生较大误差.由于目前不太可能得到瞬态模腔温度,可以考虑采用本文方法,利用平均模腔温度构造一个近似瞬态温度场.诚然,本文模型还略嫌粗糙,有待于进一步改进,但其对分析精度的提高是显而易见的.对此问题的深入研究,无疑将有助于推动注塑CAE 技术的发展,具有一定的应用价值.

参考文献:

[1] 申长雨.塑料模具计算机辅助工程[M]. 郑州:河南科学技术出版社, 1998.56~76.

[2] 张洪济.热传导[M]. 北京:高等教育出版社, 1992.171~257.

[3] 郭志英,李德群,胡俊翹.注塑冷却的数值模拟[J]. 中国塑料, 1999,13(10):81~86.

[4] 王勖成,邵 敏.有限单元法基本原理和数值方法[J]. 北京:清华大学出版社, 1997. 421~441.

[5] 孔祥谦.有限单元法在传热学中的应用[M]. 北京:科学出版社, 1986,169~219.

[6] 陈静波,张世勋,何领好,等.注塑模三维温度场的数值分析[J]. 郑州大学学报(工学版),2003,24(2):9~14.

Influence of the Average Temperature Boundary Condition on Mold
Cavity Surface to Injection Molding Simulation

SHEN Chang -yu , GUO Heng -ya , ZHAO Zhen -feng , HUANG Ming

(National Engineering Research Center for Advanced Polymer Processing Technology , Zhengzhou University , Zhengzhou 450002,China)

Abstract : In this paper , we use one dimension finite element method which simulates the temperature field in the course of injection molding , and discuss the error in the process of heat transit analysis when the average temperature of the mold cavity acts the boundary condition . It is found that the error is acceptable if the requirement to mold accuracy is not very high . However , the error does affect the simulation for the precise or very thin injection -molded parts . Then , the paper advances another method which simulates an instantaneous temperature on the basis of the average temperature to improve the precision degree of numerical simulation in the injection molding .

Key words : injection molding simulation ; temperature field ; finite element method ; mold cavity temperature