

数值模拟技术在气体辅助注射成型过程中的应用^{*}

陈 旭 王利霞 申长雨 陈静波 王国中

(郑州工业大学橡塑模具国家工程研究中心)

摘 要 基于粘性流体力学基本方程,针对气体辅助注射成型的特点,提出合理的假设并进行必要的简化,建立描述气体辅助注射成型充模流动过程的数学模型,进而采用有限元/有限差分混合算法进行数值求解。在对移动边界的处理采用控制体积法对充模过程中的两类移动边界:熔体前沿、熔体—气体边界进行跟踪,从而实现气体辅助注射成型充模过程的数值模拟。

关键词 气体辅助注射成型;充模流动模拟;有限元法;有限差分法;控制体积法

中图分类号 TP614

0 引言

气体辅助注射成型(以下简称气辅)是在传统的注射成型基础上发展起来的一种新的聚合物加工方法。与传统的注射成型不同,它在向型腔内注入一定量的熔体后,用气体取代熔体继续注入型腔,气体在预先注入的熔体中形成中空并推动熔体运动直至将型腔充满。

由于气辅成型的充模流动行为对气辅成型制件、最终的质量和性能都有较大的影响,本文利用流变学、热力学、计算力学等知识,对气辅成型的充填过程进行了分析和研究,并实现了对该过程的数值模拟。

1 数学模型的建立

工程实际中,利用气体辅助注射成型的制件,需要设计专门的气道引导气体的注入。除气道外的型腔其他区域,一般其在厚度方向的尺寸远小于其他两个方向,因此视熔体在这些区域中的流动为扁平型腔中的流动。对于

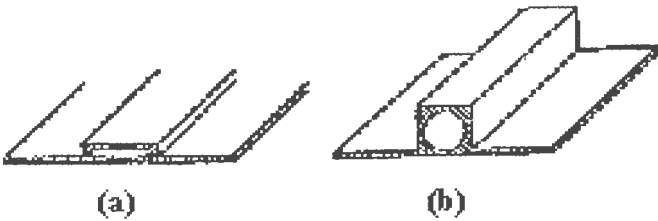


图 1 两种典型气道示意图

^{*} 国家自然科学基金资助项目(9632004)

收稿日期:1997-08-21

气道,根据其宽度方向和厚度方向尺寸的比值,分两种情况考虑,如图 1 所示。

图 1(a)所示气道的宽度与厚度尺寸之比大于 4,将熔体在其中的流动也视为扁平型腔中的流动,对于气道的宽度与厚度尺寸之比小于 4 的情况,则认为熔体在其中的流动为圆管中的流动。

1.1 基本假设和简化

首先对气体辅助注射成型在扁平型腔中的充填过程做出如下假设和简化:

(1)型腔中的流动仅以熔体区域内部以及熔体—气体边界及熔体前沿界面为研究对象,气体对熔体的作用通过施加在熔体—气体边界上的边界条件来体现。这是因为在充填流动过程中,气体的性质虽然随着加工条件和气体状态的变化而变化,但这种变化与熔体和气体性质之间的差异比较起来很小,可以忽略不计。

(2)由于扁平型腔厚度方向的尺寸远小于其他两个方向的尺寸,且熔体粘度大,于是厚度方向的速度分量可忽略,且厚度方向压力梯度为零。

(3)假定熔体不可压缩,即 $\nabla \cdot \vec{V} = 0$ 。

(4)熔体在充模流动过程中雷诺数很小,一般 $Re < 10^{-2}$,可忽略惯性力和质量力。

(5)忽略熔体的弹性效应。

(6)忽略熔体流动方向上的热传导,这是因为熔体在流动过程中佩克莱特数 Pe 很大,一般 $Pe > 10^2$,认为热传导仅沿着壁厚方向,熔体中不含热源。

(7)在充模流动过程中,熔体温度变化不大,因此可认为熔体的比热及热传导率为常数。

(8)忽略熔体前沿膜作用而在壁厚方向产生的压力梯度。

1.2 熔体流动的控制方程

由粘性流体力学基本方程,利用以上假设和简化,可推导出气体辅助注射充填过程中熔体流动的控制方程:

(1)连续性方程

$$\frac{\partial(\overline{bu})}{\partial x} + \frac{\partial(\overline{bv})}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

式中, b 为型腔厚度的一半, \overline{u} , \overline{v} 分别为 x , y 方向的平均流速。

(2)运动方程

$$\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial u}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial P}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\eta \frac{\partial v}{\partial z} \right) = 0 \quad (3)$$

(3)能量方程

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P \left(\overline{u} \frac{\partial T}{\partial x} + \overline{v} \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \eta \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, ρ 为熔体密度, C_P 、 k 、 η 分别为熔体比热、热传导率及粘度。

(4)流变本构方程

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} \quad (5)$$

图 ,对

$$\varphi = \left[\left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right)^2 \right]^{1/2} \tag{6}$$

(5)边界条件

首先考虑型腔厚度方向上的边界条件。

一般均假定熔体在型腔厚度方向呈对称流动,熔体温度沿厚度方向呈对称分布,有:

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{对 } z = 0 \tag{7}$$

$$u = v = 0; \quad T = T^W \quad z = \pm b \tag{8}$$

其中 T_W 为模壁温度。

接着考虑流动平面($X-Y$ 平面)上的边界条件。

气辅助成型充模流动的两个阶段,即熔体注射阶段和气体注射阶段所考虑的边界条件是不同的。在熔体注射阶段,主要考虑以下三类边界:

在入口边界 C_e 处,对于给定注射流率 Q ,则入口边界条件可简化为

$$\text{,熔} \quad \int_{C_e} \left[-s \frac{\partial P}{\partial n} \right] ds = Q \tag{9}$$

在熔体前沿 $C_m(t)$ 处,若排气良好且以大气压力为基点,则有

$$P = 0 \quad \text{在 } C_m(t) \text{ 上} \tag{10}$$

在型腔边界 C_0 上满足无渗透边界条件有

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad \text{在 } C_0 \text{ 上} \tag{11}$$

在气体注射阶段,主要考虑以下三种边界:

在型腔边界 C_0 处以及在熔体前沿 $C_m(t)$ 处的边界条件和熔体注射阶段相同。

对于熔体—气体边界 $C_i(t)$ 处,由于气体内部是单一介质,也即未掺杂有熔体。且忽略气体传递压力过程中的压力损失,因此,可以认为熔体—气体边界 $C_i(t)$ 处压力分布均匀,对于气体压力常压控制方式下,有

$$P = P_e; \quad \text{在 } C_i(t) \text{ 处} \tag{12}$$

P_e 为气体注射压力。

对于宽度和厚度比小于 4 的气道,熔体在其中的流动视为圆管内的流动,同时,根据浇注系统的特点,也假定流道内熔体的流动为圆管内的流动。基于合理假设和必要简化,得到圆管气道和流道内熔体流动的控制方程

$$2\pi \int_0^R r u dr = Q \tag{13}$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \eta \frac{\partial u}{\partial r} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \tag{14}$$

$$\rho C_P \left[\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial T}{\partial r} \right] \eta \left(g u \frac{\partial u}{\partial r} \right)^2 \tag{15}$$

式中, z, r 分别表示圆管气道和流道的轴向和径向坐标, R 为圆管气道和流道的半径。

其相应边界条件与扁平型腔中流动做类似处理。

2 数值实现

在进行数值求解之前,需先对型腔中面进行有限元网格划分,除对浇注系统及型腔具有圆形截面部分划分为一维柱单元外,沿型腔中面划分一系列三角形线性单元。另外,在模拟中,采用均匀差分网格,对于每个三角形单元和柱单元,均采用相同数目的差分增量,见图 2。

当气辅制件被划分为三角形单元和一维柱单元后,连接三角形单元的重心及三个边中点将其划分为三个子部分,柱单元分为两个子部分,定义与一个结点 N 相接的所有子部分的集合为该结点的控制体积(简称为控制体积 N),如图 3 所示,其中虚线为单元边界、实线为控制体积边界。阴影部分表示结点 N 的控制体积。

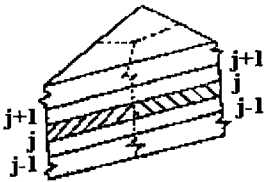


图 2 差分网格定义

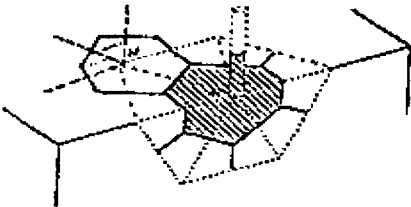


图 3 控制体积

在气辅成型充模流动过程中,熔体在型腔中流动,其温度除沿流动方向变化外,熔体的温度在沿型腔厚度方向也存在着差异。因此,为求解温度场,还需沿厚度方向引入差分网格。目前在 z 方向采用均匀差分网格,即 $z_j=(j-1)\Delta z$ ($j=1,2,3\cdots,N3P1+1$)同时采用可变时间增量 $t_1=0, t_{k+1}=t_k+\Delta t_k$ ($k\geq 1$),做如下定义: $T_{i,j,k}=T_i(z_j,t_k)$ 。在以上基础上,能量方程各项的处理分述如下:

(1)瞬态项:瞬态项采用向前差分近似有:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} = \rho C_P \frac{T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}}{\Delta t}$$

(16)

(2)热传导项:热传导项采用隐式向前差分。

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{k}{\Delta z_j^2} (T_{i,j+1,k+1} - 2T_{i,j,k+1} + T_{i,j-1,k+1})$$

(17)

(3)热对流项:采用加权平均处理,同时为保证数值解稳定,采用一种类似于向后差分的方法“上风法”来处理热对流项。

$$\rho C_P \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\rho C_P}{\sum_l \hat{V}_{i,j}^{(l)}} \sum_l \hat{V}_{i,j}^{(l)} \int_{z_j}^{z_{j+1}} \frac{\tilde{z}^{(l)}}{\eta} \frac{d}{dz} \tilde{z}^{(l)} dz$$

(

$$\cdot \sum_{m=1}^3 [(\Lambda_x^{(l)})_k b_2^{(l)} + (\Lambda_y^{(l)})_k b_3^{(l)}] \cdot T_{i',j,k}$$

(18)

(4)粘性热项:其处理与热对流项类似,

$$\eta \nabla^2 = \frac{1}{\sum_l \hat{V}_{i,j}^{(l)}} \sum_l \hat{V}_{i,j}^{(l)} \cdot \frac{[\Lambda^{(l)} z_j]^2}{\eta^{(l)}} \tag{19}$$

对于一维柱单元,采用与三角形单元类似处理。

对每个结点写出以上诸式,代入能量方程,可得以结点温度为未知量的方程组。在每个顶点结点求解能量方程获得温度场,单元内的温度分布采用线性插值。

温度场和计算区域确定后,应用质量守恒定律求解压力场。

由于流动过程中熔体的不可压缩性,控制体积(如图 3 所示)的质量守恒关系可由通过控制体积边界的总体积来导出,在某一给定时间,如果温度场和计算区域已知,某一单元 l 内的压力可以用三个顶点压力的线性插值表示,且由于单元很小,其流通率 S 在一个单元内可取为常数,其值为单元中心的值,此时,流入每个单元的平均体积流率为常数且流入每一个控制体积的流量可由沿其边界的线积分求得。

从而流入结点 i 的控制体积的净流率为:

$$Q_i = \sum_{l'} s^{(l')} \sum_{m=1}^3 D_{im}^{(l')} P_{N'} + \sum_{l''} s^{(l'')} \sum_{m=1}^2 R_{im}^{(l'')} P_{N'} \tag{20}$$

式中, l' 是结点 i 周围的所有三角形单元, l'' 为结点 i 周围的所有一维单元。

$D_{im}^{(l')}$ 和 $R_{im}^{(l'')}$ 分别为三角形单元和柱单元内结点压力对净流率的影响系数。

式(20)即为压力场有限元方程,因为 s 依赖于压力场,所以式(20)是一非线性方程。

型腔充填过程是一个瞬态过程,熔体—气体边界和熔体前沿随时间向前推进,在当前的模拟中,采用控制体积法同时跟踪熔体—气体边界和熔体前沿面。对每个控制体积引入无量纲系数,充填因子 f 和厚度比因子 f_s , 定义充填因子 $f = \frac{v_m}{v}$, 这里 v 和 v_m 分别表示结点的控制体积和该控制体积已被熔体充填部分的体积。因而 f 的大小反映了控制体积的熔体充满程度。厚度比因子 $f_s = \frac{a}{b}$, 其中 a 为结点控制体积中除气体外熔体所占的体积, b 为结点的控制体积, f_s 的大小反映了控制体积的气体充填程度。 f_s 的取值范围为 $0 \leq f_s \leq 1$, 对 $f_s = 0$ 表示结点的控制体积已经完全被气体充填, 对于 $0 < f_s < 1$, 表示相应结点的控制体积已部分被气体充填, 对 $f_s = 1$ 表示相应结点的控制体积还未进入气体。

在某一给定时刻,假设熔体前沿结点满足 $P_i = 0$, 且所有内点满足质量守恒方程 $Q_i = 0$, 熔体—气体边界结点满足 $P_i = P_e$, 当压力场求解后,由方程(20)计算流入每个熔体前沿结点控制体积的净流率和流出每个熔体—气体边界结点控制体积的净流率,确定下一个时间步长并更新下一时刻的 f 值和 f_s 值。时间步长的选取是使刚好有一个控制体积被熔体充满或刚好有一个控制体积中的熔体被气体吹空, 与其相邻的所有空结点成为新的前沿结点或与其相邻的所有熔体内部结点成为新的熔体—气体边界结点。这样推进熔体前沿和熔体—气体边界,直至整个型腔充满。

气辅成型充模流动分析程序的流程图如图 4 所示。

输入数据,假设充填开始时,入口结点的控制体积已被熔体充满,此时,可近似认为熔体仍处于等温状态,这样便获得了初始时刻的熔体前沿位置和温度场,由此可计算出此时刻的剪切粘度 η , 流通率 S , 然后用迭代法求解压力,在获得压力场数据后,计算下一时间步长和

新的熔体前沿位置,并计算下一时间温度场,然后判断熔体、气体是否切换,若熔体、气体发生切换,则确定初始熔体气体边界位置,用迭代法求解压力,并计算下一时间步长和新的熔体前沿位置以及新的熔体-气体边界位置,以便计算下一时刻温度场,然后返回计算新时间的压力场,如此循环,直至将整个型腔充满。

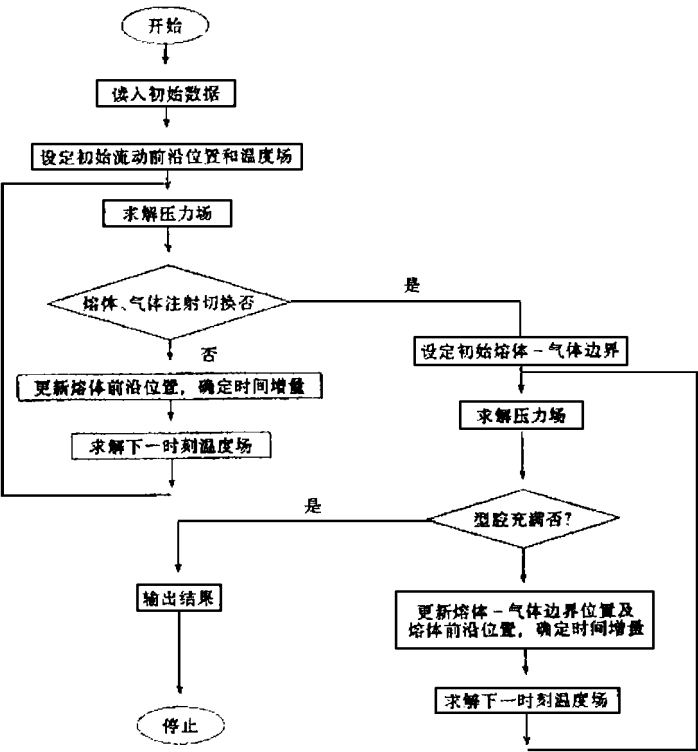


图 4 气体辅助注射充填流动分析流程图

利用气辅成型充模流动模拟可实现以下功能：

- * 动态模拟模具充填过程
- * 预测在所选时间步长上的压力、温度、速度、厚度比分布
- * 预测在所选结点上的压力、温度、厚度比分布
- * 预测在所选单元上的速度

3 数值算例

为了验证所开发的气辅成型充模流动模拟软件所采用的数学模型和算法的正确性及有效性,本文选择了几个典型算例进行了分析和比较。

分析制件是平板结构并带一厚筋。所选材料的各项热力学性能指标为：

密度 $\rho=1020\text{ kg}/\text{m}^3$ 热传导系数 $K=0.18\text{ W}/\text{m}\cdot\text{k}$ 比热 $C_p=2400\text{ J}/\text{kg}\cdot\text{k}$

采用 *Cross-exp* 粘度模型,其对应参数为

$n=0.3456$
 $\tau=13160 Pa$

$T_b=45140$
 $\beta=0$

$B=30125 E-08$
 $1/Pa$

$Pa\cdot s$

3.1 算例 1

这里,将熔体充填时间分别设定为 $t_{melt}=1.0$ 秒, $t_{melt}=1.4$ 秒,而其他各项工艺条件和参数都相同,利用气体辅助注射成型充模流动模拟进行分析。充填结束时表示型腔内壁厚分布的等值线图分别示于图 5(a)、(b)。

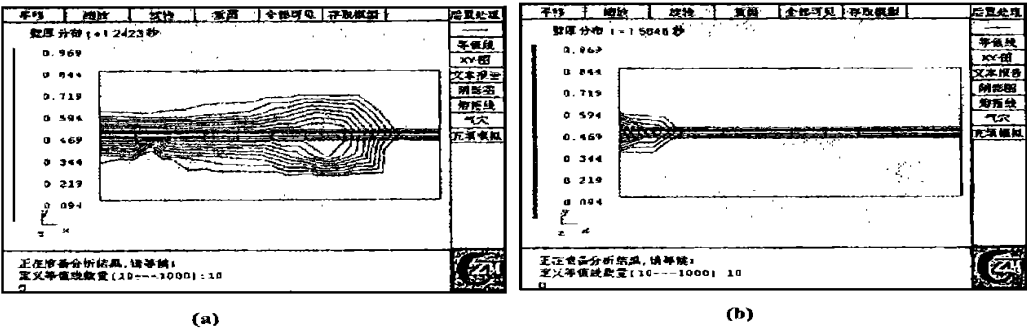


图 5 填充时间不同时型腔内壁厚分布等值线图

气体辅助注射成型中,气体注射前熔体的注射量是影响制件最终质量的一个关键参数。若熔体注射时间较短,也即气体注入前型腔中熔体的注射量较少,会引起气体大量注入制件薄壁部分的情形,见图 5(a)。反之,若气体注射前熔体注射量太多,会因为型腔中没有足够空间给气体充填,从而导致气体只能沿气道注入一小部分,使气体辅助注射的优越性不能发挥,从图(b)可以看出。

3.2 算例 2

现将气道尺寸分别设定为直径 12 mm 和直径 6 mm,其它工艺条件和参数相同,利用气体辅助注射成型充模流动模拟进行分析,充填结束时表示型腔内壁厚分布的等值线图分别示于图 7(a)、(b)。

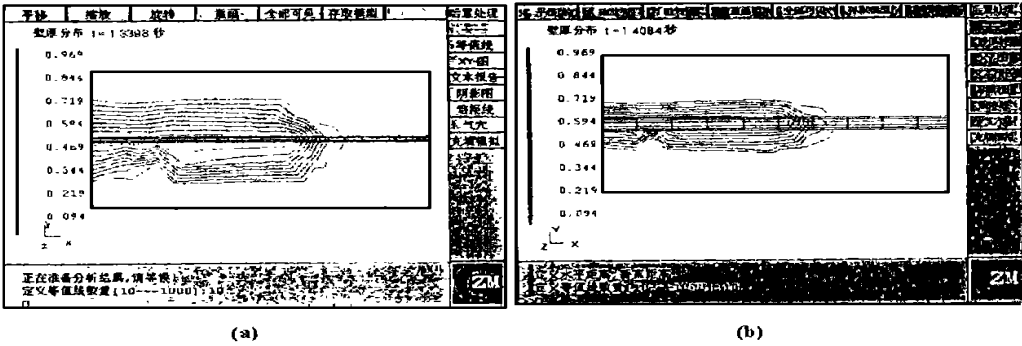


图 6 气道尺寸不同时型腔内壁厚分布等值线图

在进行气体辅助注射成型的模具设计时,气道的尺寸是至关重要的,因为它直接影响着制件最终的质量和性能。同样形状的制件,虽然气道直径都显著大于薄壁部分厚度,但对于气道尺寸较大者,见图 6(a),气体将集中沿着气道充填,较少出现充入薄壁的现象。因为气道尺寸相对较大,则气道中熔体的温度也相对较高,对气体充填产生的阻力较周围薄壁部分更小,因而气体就集中沿气道充填,较气道尺寸小者(见图 6(b))充入薄壁处要少。

4 结论

本文从粘性流体力学的基本理论出发,针对气辅成型充填过程的特点,提出了合理的假设,并进行了必要的简化,从而建立了描述气辅成型充填过程的数学模型,采用有限元/有限差分/控制体积混合数值算法求解,进而开发了气辅充填过程数值模拟软件,并通过对选择的典型算例进行数值模拟,以其结果验证了本文给出的理论、算法及软件的有效性。

参考文献

- 1 V. W. Wang, C. A. Hieber, and K. K. Wang, Dynamic Simulation and Graphics for the Injection Molding of Three-Dimensional Thin Parts, J. Polym. Eng., 7, 21—45(1986)
- 2 Fallon M., Why They're Talking About Gas Injection Molding. Plastics Technology, PP. 77—75. (June 1989)
- 3 Perter L. Medina, Lih-Sheng Turng. Ven-Woei Wang "Understanding and Evaluating Gas-Assisted Injection Molding Applications via Computer Simulation." Structural Plastics Division. The Society of the Plastics Industry. Structural Plastics 19th Annual Conference, Atlanta, Georgia.
- 4 Bernhardt, E. C., ed., Computer Aided Engineering for Polymer Processing, Hanser, New York, (1987)
- 5 Tucker III, C. L., Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing, Hanser, New York (1989)
- 6 D. M. Gao, K. T. Nguyen and G. Salloum, "A Numerical Model for Cavity Filling During Gas Assisted Injection Molding." Submitted to NUMIFORM '95, Ithaca, May 1995

A Numerical Simulation for Cavity Filling during Gas-assisted Injection Molding

Chen Xu Wang Lixia Shen Changyu Chen Jingbo Wang Guozhong
(National Engineering Research Center of Rubber & Plastic Mold)

Abstract Based on the fundamental equations of the hydromechanics, the paper presents the mathematical model by means of reasonable assumptions and necessary simplifications to describe the flow behavior in cavity during gas-assisted injection molding. A hybrid finite element finite difference numerical scheme is employed to carry out the numerical simulation of the filling stage. A control volume approach is applied here to trace the moving boundaries, one for melt front, the other for gas-melt interface.

Keywords gas-assisted injection molding ; cavity filling simulation; finite-element ; finite-difference ; control-volume