

基于数值模拟的气体辅助注射成型工艺控制研究^{*}

张 响 董斌斌 王利霞 李 倩 申长雨

(郑州大学橡塑模具国家工程研究中心, 郑州 450002)

摘要 基于广义 Hele - Shaw 流动模型描述了气体辅助注射成型时气体的穿透过程。采用有限元/有限差分/控制体积法计算充填阶段的压力场、温度场, 确定熔体前沿和气熔界面, 并以实际产品为例分析工艺参数对气体辅助注射成型产品质量的影响。

关键词 气体辅助注射成型 数值模拟 工艺控制

气体辅助注射成型(简称气辅成型) 是在传统注射成型过程中从浇注口或预置的气管路注入可以控制的惰性气体来帮助熔融聚合物成型的技术。这种新的注射成型工艺减少了原料的消耗, 降低了锁模力、残余应力、翘曲变形和收缩变形。和传统注射成型相比降低了注塑压力、使产品设计更灵活、提高了产品质量、降低了生产成本。

气辅成型过程主要分为三个阶段^[1]: 第一个阶段是熔体充填阶段。第二个阶段是气体推动熔体前进至充满整个型腔的阶段, 即一次穿透。第三个阶段是气体保压阶段, 由于熔体温度降低而冷却收缩, 在气体压力的作用下气熔界面继续向前移动, 即二次穿透。

近年来对于气辅成型理论模型和数值模拟的理论及实验研究^[2-5] 取得了一定进展, 尤其是能够预测气体穿透的长度, 气体穿透部位的残余壁厚。气体穿透不仅受制件所用材料和几何形状的影响, 而且受工艺参数(如熔体温度、气体压力、延迟时间等) 的影响更为显著。因此, 控制气辅成型过程中的工艺参数非常关键。笔者采用数值模拟来进一步研究气辅成型工艺参数的控制对实际生产的意义。

1 数学模型

1.1 控制方程和本构方程

将聚合物熔体视为广义牛顿流体, 采用 Hele - Shaw 流动模型进行数值模拟可得到充填过程中描述熔体流动的控制方程(1) ~ (5) 和本构方程(6)、(7):

$$\frac{(bu)}{x} + \frac{(bv)}{y} = 0 \tag{1}$$

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

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

$$\rho_p \left(\frac{T}{t} + u \frac{T}{x} + v \frac{T}{y} \right) = k \frac{\partial^2 T}{z^2} + \eta \dot{\gamma}^2 \tag{4}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{u^2}{z} + \frac{v^2}{z} \tag{5}$$

式中: b ——型腔半壁厚, m;
 x, y ——流动方向长度, m;
 z ——厚度方向长度, m;
 u —— x 方向速度分量, m/s;
 v —— y 方向速度分量, m/s;
 p ——熔体压力, Pa;
 T ——温度, K;
 ρ ——密度, kg/m³;
 η ——粘度, Pa · s;
 t ——时间, s;
 c_p ——比热容, J/(kg · K) ;
 k ——热传导系数;
 $\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s⁻¹。

$$\eta(\dot{\gamma}, T) = \frac{\eta(T, p)}{1 + \frac{\eta \dot{\gamma}^{1-n}}{\tau}} \tag{6}$$

$$\eta(T, p) = B \exp \frac{T_b}{T} \exp(BP) \tag{7}$$

式中: η ——熔体零剪切粘度, Pa · s;
 τ ——熔体的流变特征由牛顿区过渡到幂率区时的剪切应力水平;
 B, T_b, β ——材料常数。

1.2 边界条件

气辅成型充填过程要考虑的边界条件有:
熔体前沿 $p=0$;
浇口处 流动速率或压力已知;

^{*} 国家 863 项目(2002AA336120) ; 国家自然科学基金资助项目(10372095) 。
收稿日期: 2004-02-23

模壁处 法向速度消失、无滑移边界条件、温度等于模壁温度;

气熔界面 $p = p_{gas}$ 。

2 数值模拟

2.1 压力场求解

采用有限单元法求解压力场,在流动方向划分三角形单元,计算节点压力,单元内部压力通过三节点压力进行线性插值。根据方程(1)、(2)、(3)得到沿边界 C 流入某控制体积^[6]的体积流率:

$$q = -2 \int s \frac{p}{n} ds \quad (8)$$

式中: q ——体积净流率;

s ——流通率;

n ——控制体积边界法向矢量。

2.2 温度场求解

熔体温度在流动方向和沿型腔壁厚方向均发生变化,因此采用有限元/有限差分耦合法来求解温度场。即在熔体流动方向划分三角形单元,在节点处计算温度,单元内的温度场采用线性插值处理,厚度方向上采用有限差分法处理。热传导项、热对流项和粘性热项在三角形单元边界不连续,因而采用加权平均处理。首先计算单元重心处的值,然后根据相应层上单元对节点的分层控制体积的体积为权函数进行加权平均。

2.3 移动界面的跟踪算法

在解决熔体充填过程中压力场的分布时,采用有限元/控制体积同时跟踪熔体前沿和气熔边界。通过标准的 Galerkin 有限元方法离散方程(8)得到与控制体积公式相同的离散形式:

$$q_i^{(l)} = s^{(l)} \cdot \sum_{k=1}^{2 \times 3} D_{ik}^{(l)} \cdot P_k^{(l)} \quad (9)$$

式中: $q_i^{(l)}$ 表示单元 l 中节点 i 的体积净流率; i 是控制体积节点编号,对于三角形单元, $i = 1, 2, 3$, 对于一维单元, $i = 1, 2$; k 表示 l 单元的节点编号; $D_{ik}^{(l)}$ 表示节点压力对净流率的影响系数; $P_k^{(l)}$ 表示 l 单元 k 节点的压力。

为了跟踪熔体前沿和气熔界面,沿用 FAN 方法^[7]的基本思想对每个控制体积引入熔体充填因子和外层聚合物厚度因子。熔体充填因子表述某个控制体积熔体的充填状况,外层聚合物厚度因子表述某个控制体积气体穿透情况。

根据以上概念,在每个时间间隔计算压力场,计算从相邻单元进入控制体积的净流率,选取适当的

时间间隔确保每步只有一个熔体前沿节点被充填。确定下一个时间间隔并更新熔体充填因子和外层聚合物厚度因子,由新的熔体充填因子和外层聚合物厚度因子可以定义新的熔体充填和气体充填区域,然后求解能量方程,以获得沿型腔厚度方向上的温度场分布、冷凝层厚度分布、外层聚合物厚度分布和新的有效型腔厚度,如此迭代直到充填结束。

3 案例分析

图1为某品牌冰箱内饰件(成型时中间嵌入玻璃)的几何造型及有限元网格划分示意图。该内饰件用材料为无定形 ABS。原设计方案没有采用气辅成型工艺,为了承受一定的强度,设计制品壁厚为 3 mm。但是试模后发现在两边加强筋部位收缩比较严重,而且存在明显的翘曲。为了满足较高的外观质量并减少收缩和翘曲,笔者采用气辅成型来改进设计。



图1 冰箱内饰件几何造型及有限元网格划分示意图

(1) 气道设计 在起支撑作用处两侧的收缩和翘曲主要是由于制品结构而造成的壁厚不均,较大的壁厚导致收缩严重。笔者在两边起支撑作用的筋和侧壁连接的地方设计气道,这样如果气体可以穿透气道,那么保压补缩的效果就会很好,内部的加强筋在侧壁的收缩也会减少。把壁厚减薄为 2 mm,根据气辅成型设计原则,气道直径为制品壁厚的 2 ~3 倍,应设为 6 mm。

(2) 浇口和进气口的选择 为了保证流动平衡,笔者设计了六个点浇口,具体位置见图 2a 中 1 ~6。根据气道布置设计两个进气口与其中两个浇口位置一致。由于在气道贯穿的区域内熔体来自不同的料流,很可能会有熔接痕发生,如果这样气体很难穿透这个交汇区,还会出现缩痕。通过 CAE 分析,发现设计气道处由于壁较厚熔体流动速度快,在气道上不会产生熔接痕。这样就可以使气体穿透设计气道。同时需要有可控制开关的喷嘴,以防止气体倒流回注塑机^[8]。

(3) 气体注射压力的选取 由于不同聚合物材

料流动性相差很大,因而先采用 CAE 技术模拟传统注射过程,然后得到浇口和气体入口在聚合物熔体充填结束时的压力。选取气体入口压力的最大值为初始气体入射压力。当然通常情况下实际选用的压力要低于这个值,因为在气体注射前有一个延迟时间,在注塑机停止注射后浇口处压力随型腔内的压力的降低而逐渐降低。

熔体充填百分比也是一个很重要的参数,由于 ABS 的流动性不是很好,而且熔体前沿不是在设计气道的末端因而预注射量不能过少,否则会导致制品填充不满。并且本研究的主要目的不是得到中空制品而是希望减少收缩和翘曲,因而选取注射量为 95%。

(4) 延迟时间的确定 对于 ABS 材料,实验证实熔体温度和气体压力是关键的影响因素。通过数值模拟,在气体注射压力 40 MPa、熔体温度 253℃ 时,不同的延迟时间而得到的气体穿透情况及形成气道皮层厚度见图 2。图 2 右侧为充填系数。

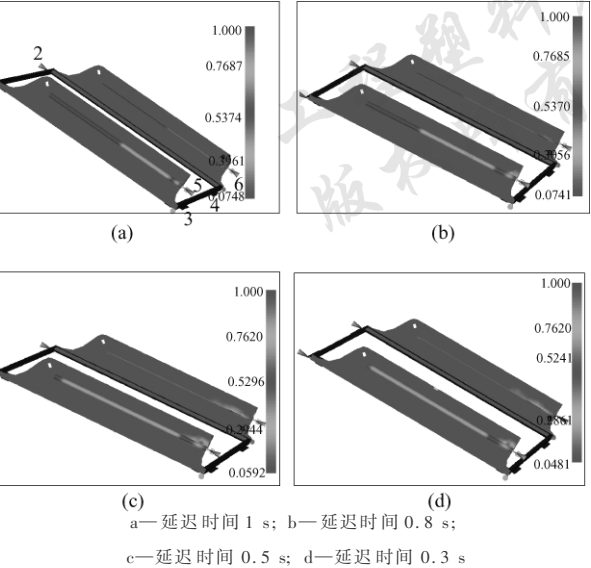


图 2 数值模拟不同延迟时间的气体穿透情况及形成气道皮层厚度

从图 2 可以发现,延迟时间越短,气体越容易穿透,在气道中穿透的距离越长。同时,延迟时间过短会使指痕效应增大甚至吹穿,过长的延迟时间会使制品表面产生滞流痕。因而需要选择合适的延迟时间以达到满意的气体穿透效果同时控制指痕现象。

图 3 和图 4 是在延迟时间 0.5 s、气体注射压力 40 MPa 和熔体温度 246 ~260℃ 工艺条件下沿气道方向一系列节点处气体穿透熔体时体积收缩率和树脂皮层厚度因子曲线图。

由图 3 可以看到,较高的熔体温度会产生较大

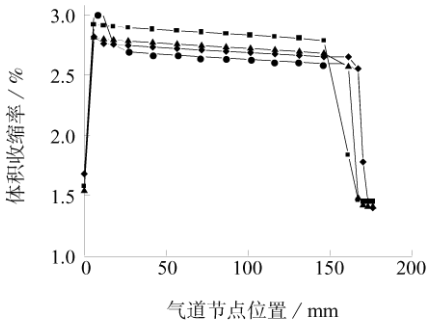


图 3 气道节点位置 - 体积收缩率曲线

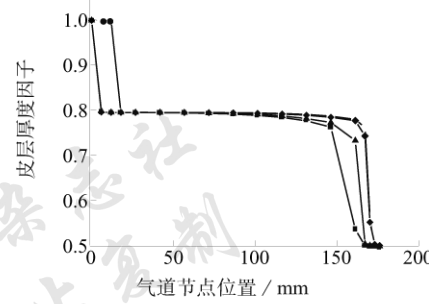


图 4 气道节点位置 - 树脂皮层厚度因子曲线

的体积收缩。由图 3、图 4 可以看到,较高的熔体温度,气体穿透的距离较长,而且在进气口附近的熔体皮层厚度较小。还可以看到稳定穿透区形成的气道熔体皮层厚度基本一致。

图 5 和图 6 为延迟时间 0.5 s、气体注射压力 30 ~45 MPa、熔体温度 253℃ 的工艺条件下沿气道方向一系列节点处气体穿透熔体时体积收缩率和皮层厚度因子曲线图。

由图 5 和图 6 可以看到,较高的气体压力时气体会穿透较长的距离而且得到较小的收缩。但是过高的气体压力会使气体冲破熔体前沿或是产生较大的指痕现象。过小的气体压力会使气体难以穿透。

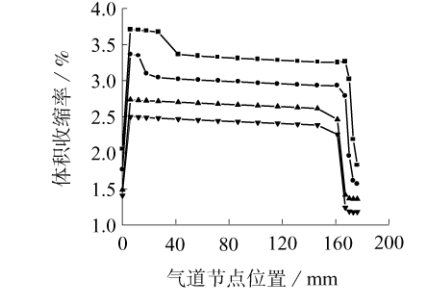


图 5 气道节点位置 - 体积收缩率曲线

4 结语

(1) 成功应用气辅成型技术必须实现如下几

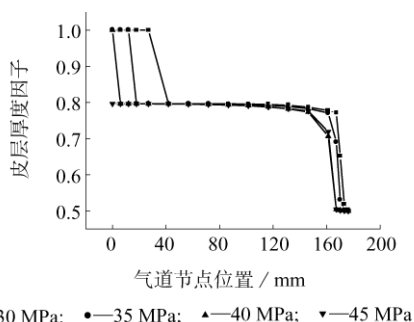


图6 气道节点位置-树脂皮层厚度因子曲线

点:注塑机的参数控制及可重复性;精确控制氮气注射阶段的时间和压力;控制氮气在制品中的穿透。

(2) CAE 技术的应用对于气辅成型有着非常重要的前导性作用。目前气辅成型技术已广泛应用于汽车工业、日用品、家用电器、电子产品。成型管状中空制品相对比较成熟,对于在薄壁制品中的穿透还在不断探索中,这需要对气体穿透更精确地控制。基于数值模拟技术对气辅成型的过程进行模拟,得

到与实际基本一致的结果。

参考文献

- 1 Turng L S. Computer aided-engineering for gas-assisted injection. *Molding Plastics Engineering*, 1993(9): 27
- 2 王利霞,陈静波,刘春太,等.注射成型过程的数值模拟技术. *模具工业*, 1998, 26(5): 15
- 3 李倩,刘春太,申长雨,等.气辅成型保压过程的数值模拟分析. *中国塑料*, 2001, 15(11): 79
- 4 李倩,申长雨,王利霞,等.管状模腔气辅注射成型气体穿透机理的数值模拟分析. *化工学报*, 2003, 54(2): 176
- 5 王利霞,申长雨,李倩,等.气体辅助注射成型工艺及充模过程 CAE 分析. *高分子材料科学与工程*, 2003, 3: 160
- 6 Wang V W, Hieber C A, Wang K K. Dynamic simulation and graphics for the injection molding of three-dimensional thin parts. *Journal of Polymer Engineering*, 1986, 7(1): 21
- 7 Tadmor Z, Broyer E, Gutfinger C. Flow analysis network (FAN)-a method for solving flow problems in polymer processing. *Polym Sci*, 1974(14): 660
- 8 Avery J. *Gas assisted Injection Moulding Principles and Application*. Carl: Hanser, 2001.

RESEARCH ON PROCESS CONTROL OF GAS-ASSISTED INJECTION MOLDING BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Zhang Xiang, Dong Binbin, Wang Lixia, Li Qian, Shen Changyu

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

ABSTRACT The gas penetration in the process of gas-assisted injection molding is presented by generalized Hele-Shaw flow model. Finite element/finite difference/volume-control method is used to calculate the pressure and temperature fields in the stage of filling, and to simulate the melt advanced front and the melt-gas interface. Moreover, a part was used as a sample to analyze how the process parameters influence the quality of part made by gas-assisted injection molding.

KEYWORDS gas-assisted injection molding, numerical simulation, process control

欢迎订阅《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文集》

为推动我国工程塑料加工应用技术进步,中国工程塑料工业协会加工应用专委会与塑料助剂专委会于 2003 年 11 月 4 日~7 日联合在浙江余姚市召开“2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会”。为配合这次会议,《工程塑料应用》杂志社从本次会议征集的众多会议论文中优选了 105 篇优秀论文,编辑出版了本次会议的《论文集》。论文内容涉及有关塑料助剂和工程塑料的合成、改性、生产、加工、应用、测试、模具、加工设备、文献综述、供需市场及预测等。在这些论文中,有新型塑料助剂、国内外塑料助剂进展及市场、塑料加工新工艺、塑料改性新技术、塑料新材料及其应用,以及塑料模具与设备改进、计算机在塑料模具设计制造中的应用等反映塑料助剂及塑料改性、加工、应用等方面最新发展的论文。

该《论文集》内容丰富、技术水平高,集中研讨了当前行业人士关心的“热点”、“难点”问题,给塑料行业今后的发展指出了明确的方向。适于从事塑料助剂、工程塑料的研究、

生产和教学的工程技术人员、大专院校师生阅读。另我社尚有部分 2002 年、2001 年和 2000 年编辑出版的《论文集》,价格优惠,欢迎广大读者同时订阅。

《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文集》 50 元/册;
《2002 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》 40 元/册;
《2001 年中国工程塑料加工及模具技术研讨会论文集》 30 元/册;
《2000 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》 20 元/册。

邮局汇款

收款单位:山东省济南市 108 信箱杂志社
邮政编码:250031
电话:0531-5816706-805, 802 5947355

银行汇款

户名:中国兵器工业第五三研究所
开户银行:济南市工商银行八一一分理处
帐号:1602001209014424079