

气辅共注射成型工艺中气道布局影响的 CAE 研究^{*}

匡唐清¹ 柳和生² 周国发² 李桂金³

(1. 华东交通大学机电工程学院,南昌 330013; 2. 上饶师范学院,上饶 334001; 3. 南昌大学环境科学与工程学院,南昌 330029)

摘要 基于气体辅助共注射成型充填过程的控制方程,采用 CAE 方法研究了气道布局对气体辅助共注射成型工艺的影响。通过对几种气道布局的模拟结果对比发现,采用高粘度皮层低粘度芯层时,气道布局对材料分布影响很大,可以通过更换注射顺序来改善材料的分布;沿着浇口到远浇口模壁布置的气道,成型时所需的注塑压力最小,压力分布也较均匀;气体基本上沿着气道在熔体中穿透。

关键词 气辅共注射成型 气道布局 充填过程 CAE

气体辅助共注射成型(简称气辅共注射成型)是在共注射成型和气辅注射成型基础上发展起来的一种新型注射成型工艺^[1]。该工艺将气辅技术应用于共注射成型,因而既保留了共注射成型工艺的可利用回收塑料生产低成本、高质量复合再生塑料件和可综合各种材料独特性能生产多功能复合塑料件等优点^[2,3],又因气辅技术的应用带来了一系列诸如低残余应力、低翘曲变形、低注塑压力、低锁模力、高表面质量、高设计自由度、轻质和空心结构等优点^[4]。因此,气辅共注射成型工艺适应了当今对塑料件多功能、高质量、绿色环保等要求,必将在塑料加工行业得到广泛应用。

气辅共注射成型工艺是气辅注射成型和共注射成型的有机结合,其影响因素多而复杂,包括材料流变性能、工艺参数设置和气道布局等。其中气道布局对该工艺有着重要的影响。鉴于此,笔者基于气辅共注射成型充填过程的控制方程,采用 CAE 方法来研究气道布局对气辅共注射成型工艺的影响规律,以期得到具有指导意义的结论。

1 控制方程

气辅共注射成型中的充填流动实质上是多相共注射式的,其流动方式如图 1 所示。

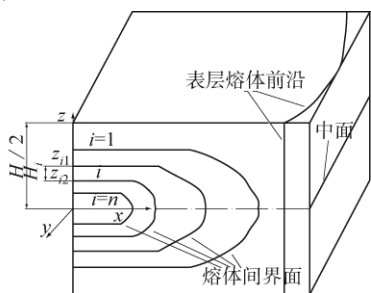


图 1 多相共注射成型流动示意图

图 1 中, z 的第一下标 i 表示第 i 层熔体,第二下标 1、2 表示第 i 层熔体的上、下界面; $i=1$ 表示最

外层, $i=n$ 表示最内层;先注入的熔体($i=1$)紧贴模壁,最后注入的流体($i=n$)在厚度中心处。

气辅共注射成型中熔体在薄壁中的充填控制方程为^[5]:

$$\rho \left(\frac{\partial U_i}{\partial t} + v_x \frac{\partial U_i}{\partial x} + v_y \frac{\partial U_i}{\partial y} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} - \left(\sum_{i=1}^n \int_{z_{i2}}^{z_{i1}} \frac{z^2}{\eta'} dz \right) P = 0 \quad (1)$$

$$\rho U_i = - \frac{\partial P}{\partial z} \int_{z_{i2}}^{z_{i1}} \frac{z}{\eta'} dz + \sum_{i=1}^{i-1} \left(\int_{z_{i2}}^{z_{i1}} \frac{z}{\eta'} dz \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{z_{i1} - z_{i2}}{t} \right) + \left(-S_i - P \right) = 0 \quad (3)$$

$$\rho_p \left(\frac{T}{t} + v_x \frac{T}{x} + v_y \frac{T}{y} \right) = k \frac{T}{z^2} + \tau_{xz} \frac{v_x}{z} + \tau_{yz} \frac{v_y}{z} \quad (4)$$

$$\text{其中: } S_i = \int_{z_{i2}}^{z_{i1}} \frac{z(z - z_{i2})}{\eta'} dz + (z_{i1} - z_{i2}) \sum_{i=1}^{i-1} \left(\int_{z_{i2}}^{z_{i1}} \frac{z}{\eta'} dz \right) \quad (5)$$

$$S_1 = \int_{z_{12}}^{z_{11}} \frac{z^2}{\eta'} dz - z_{12} \int_{z_{12}}^{z_{11}} \frac{z}{\eta'} dz \quad (6)$$

式中: η' 为粘度; P 为压力; $\vec{U}$ 为速度矢量, $\vec{U} = [\mu, v]^T$; t 为时间; ρ 为密度; c_p 为比定压热容; T 为温度; v_x 、 v_y 分别为 x 、 y 向速度。

由式(1)~式(4)可分别求得压力场、速度场、厚度方向分层界面位置和温度场,其中涉及的物性参数(如粘度)均为该处两种熔体物性参数的体积加权平均值。

气辅共注射成型中熔体在一维气道(用柱坐标系 xr 表示)中的充填控制方程为:

* 国家自然科学基金资助项目(20274016)

收稿日期:2005-12-06

$$-\frac{1}{x} \cdot -(\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \int_{r_{i2}}^{r_{i1}} \frac{r^3}{\eta'}) \cdot \frac{p}{x} = 0 \tag{7}$$

$$v = -\frac{1}{2} \frac{p}{x} \sum_{k=1}^{i-1} \int_{r_{k2}}^{r_{k1}} \frac{r}{\eta} dr + \int_{r'}^{r_{i1}} \frac{r}{\eta} dr \tag{8}$$

$$\frac{(r_{i1}^2 - r_{i2}^2)}{t} + \frac{1}{z} - S_i \cdot \frac{p}{z} = 0 \tag{9}$$

$$\rho_p (\frac{T}{t} + v_x \frac{T}{x}) = \frac{k}{r} - (r \frac{T}{r}) + \eta \frac{v_x}{r} \tag{10}$$

其中: $S_i = \frac{1}{2} \int_{r_{i2}}^{r_{i1}} \frac{r^2 - r_{i2}^2}{\eta'} dr + (\frac{r_{i1}^2}{2} - \frac{r_{i2}^2}{2})$

$$\sum_{k=1}^{i-1} \int_{r_{k2}}^{r_{k1}} \frac{r}{\eta} dr \tag{11}$$

$$S_i = \frac{1}{2} \int_{r_{i2}}^{r_{i1}} \frac{r^3}{\eta_1} dr - r_{i2}^2 \int_{r_{i2}}^{r_{i1}} \frac{r}{\eta} dr \tag{12}$$

气体充填的控制方程为:

$$P = P(t), T = T(t) \tag{13}$$

即在气体充填区域的压力、温度与浇口处的压力、温度一致。

粘度可采用广义牛顿时构、七参数 Cross-WLF 粘度模型计算:

$$\eta(\dot{\gamma}, T, P) = \frac{\eta(T, P)}{1 + \frac{\eta(T, P)}{\dot{\tau}} \dot{\gamma}^{1-n}} \tag{14}$$

其中: $\eta(T, P) = D_1 \exp \frac{-A(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \tag{15}$

$$T^* = D_2 + D_3 P, A_2 = \bar{A}_2 + D_3 P \tag{16}$$

式中: η 为零剪切粘度; $\dot{\gamma}$ 为剪切速率; D_1 、 D_2 、 D_3 、 A_1 、 $\bar{A}_2$ 、 $\dot{\tau}^*$ 和 n 为该模型的 7 个参数。

2 数值实现

采用有限元/有限差分/控制体积法^[6]来求解流场。数值方法与传统注射成型充模模拟^[4]相似,只是要注意温度层和材料层无关,一个温度层可能包括几种材料层,物性参数是几种材料的加权平均值。

在充填模拟中的一个关键是对移动界面的追踪。笔者对气辅共注射成型充填过程中存在的凝固层界面、表层熔体前沿、内层熔体前沿及气体穿透前沿进行如下处理:对于温度低于熔体转化温度的凝固层,将其粘度人为增大 10 万倍;忽略表层熔体前沿的“喷泉效应”,采用平面流前模型;将熔体前沿未充填区存在的气体和后注入的气体视为拟流体,其粘度为熔体粘度的 1/1000,熔体前沿未充填区的

气体能自由流出模具边界^[7];对于芯层的穿透,引入厚度分数来表征芯层熔体的充填状况;将气体穿透前沿视为平面流前模型,该平面只贯穿气体穿透的厚度。气体穿透区的压力、温度一致,压力为注气压力,温度为原熔体注射温度。

基于上述气辅共注射成型充填过程控制方程和数值实现方法,利用 FORTRAN 语言编写了气辅共注射成型充填过程的模拟程序,并采用 TEC-PLOT10.0 作后置处理,实现结果的可视化。

3 气道布局的影响

采用上述程序对一带有加强筋的矩形板进行气辅共注射成型充填模拟,将加强筋作为气道,考察不同气道布局对成型效果的影响。

该矩形板的长、宽、厚分别为 200、120 mm 和 3.6 mm,采用中心浇口,气道等效直径为 8 mm。以 Dow 化工厂产的高粘度聚苯乙烯(PS)615APR 为皮层熔体、低粘度 PS 678 为芯层熔体,其物性参数如表 1 所示。气辅共注射成型模拟工艺参数如表 2 所示。

表 1 材料物性参数

项目	PS 615APR	PS 678	项目	PS 615APR	PS 678
n	0.377 5	0.290 3	A_1	25.391	25.973
T_m/Pa	12 726	13 678	A_2/K	51.6	51.6
$c_p/J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$	2100	2100	$K/W \cdot (m \cdot K)^{-1}$	0.15	0.15
$D_1/Pa \cdot s$	7.44×10^{10}	7.44×10^{10}	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	948.15	953.81
D_2/K	373.15	373.15	T_g/K	511	511
$D_3/K \cdot Pa^{-1}$	0	0			

表 2 气辅共注射成型模拟工艺参数

项 目	皮层熔体	芯层熔体
注射量/%	70	22
注射速率/ $cm^3 \cdot s^{-1}$	32	32
熔体注射温度/ $^{\circ}C$	230	230
模具温度/ $^{\circ}C$	50	50
气体注射压力/MPa	4.5	4.5

3.1 “一”字形气道布局

考虑对称性,取一半模型进行分析,其有限元网格划分如图 2 所示(571 个节点,1 052 个三角形单元,20 个一维柱单元)。

模拟过程为:2.201 68 s 时开始注入芯层熔体,2.836 83 s 时开始注入气体,2.920 39 s 时充模结束。图 3 为皮芯层熔体前沿推进过程图。由图 3 可见,由于气道的引流,熔体沿气道流动较快,沿气道率先抵达模壁,而后向两远浇口角落充填。图 4 为充填结束时的芯层熔体分布。图 5 为充填结束时的压力

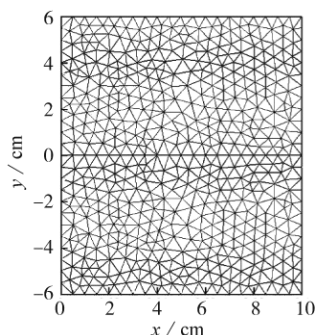
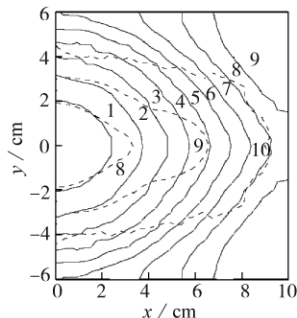


图2 “I”字形气道布局的有限元网格划分

场分布,最大注射压力为 2.36 MPa。



1~9—0.3~2.7 s 时; 10—充填结束时
实线—皮层熔体; 虚线—芯层熔体

图3 皮芯层熔体前沿推进过程图

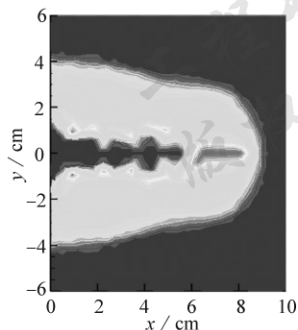
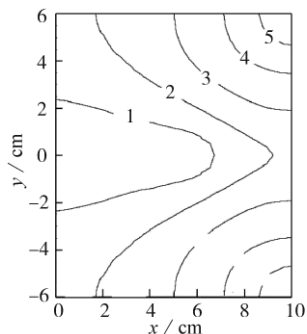


图4 充填结束时的芯层熔体分布



1—2.2 MPa; 2—1.8 MPa; 3—1.4 MPa;
4—1.0 MPa; 5—0.6 MPa

图5 充填结束时的压力场分布

3.2 “斗”字形气道布局

“斗”字形气道布局的模型有限元网格划分如

图6所示(305个节点,544个三角形单元,在 x 、 y 方向的对称轴上有32个一维柱单元)。

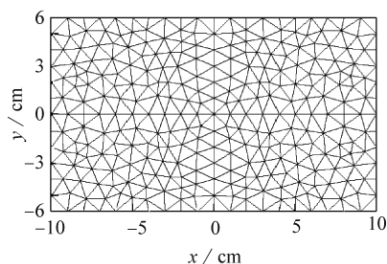
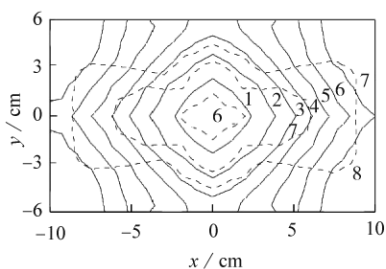


图6 “斗”字形气道布局的有限元网格划分

模拟过程为:2.29528 s 时开始注入芯层熔体,3.00175 s 时开始注入气体,3.27094 s 时充模结束。皮芯层熔体推进过程如图7所示。由图7可见,由于纵横两条气道的引流,使得皮层熔体前沿呈菱形推进,抵达宽度方向的模壁后再呈尖凸状往长度方向继续推进;而芯层熔体开始注入时皮层熔体已经抵达宽度方向的模壁,因而芯层熔体在皮层熔体厚度方向的穿透较小,主要在长度方向穿透。同样,在气道位置芯层熔体呈尖凸状推进,当皮层熔体抵达长度方向的模壁后,芯层熔体前沿的阻力增大,皮芯层熔体都向未充满的角落推进,因而在长度方向的芯层熔体前沿由尖凸状演变为平直线状。图8为充填结束时的芯层熔体分布。由图8可知,气体在芯层熔体中的穿透也主要是在长度方向,而在宽度方向穿透距离很短。图9为3.2536 s 时的压力场分布,最大注射压力为 2.37 MPa。



1~7—0.4~2.8 s 时; 8—充填结束时
实线—皮层熔体; 虚线—芯层熔体

图7 皮芯层熔体前沿推进过程图

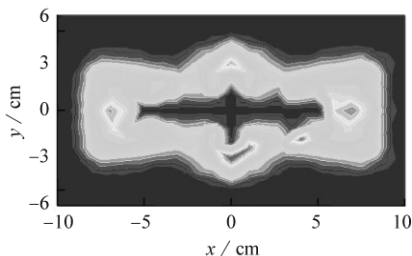


图8 充填结束时的芯层熔体分布

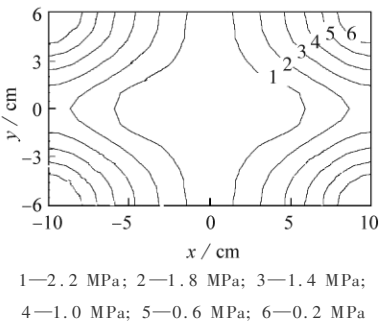


图9 3.2536 s时的压力场分布

3.3 “X”形气道布局

考虑到对称性, 对 “X”形气道布局的模型取其一半进行分析, 有限元网格划分如图 10 所示(581 个节点, 1 072 个三角形单元, 左边界中点为浇口, 从浇口到两个角点共有 42 个一维柱单元)。

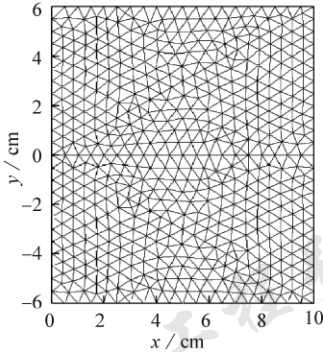


图10 “X”形气道布局有限元网格划分

模拟过程为: 2.405 60 s 时开始注入芯层熔体, 3.135 67 s 时开始注入气体, 3.398 52 s 时充模结束。皮芯层熔体推进过程如图 11 所示。由图 11 可见, 由于两条斜向气道的引流, 使得皮层熔体前沿基本呈方形推进, 最终远浇口的两个角落先充满而后是远浇口模壁中间的邻近区域; 而芯层熔体沿气道方向的流动比沿 x 轴方向的流动要快得多, 结果造

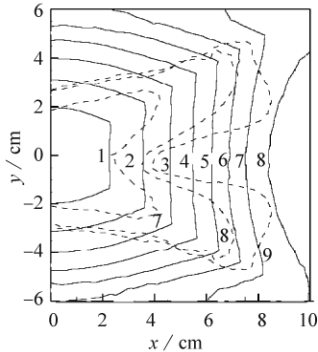


图11 皮芯层熔体前沿推进过程图

成芯层熔体流动的分岔, 远浇口的两个角落先充满, 而后皮芯层熔体向远浇口模壁中心的附近区域推进, 因而此后芯层熔体主要往这个方向推进, 继续沿气道的推进量很小。图 12 为充填结束时的芯层熔体分布。由图 12 可见, 气体基本上沿着两条分岔的气道在熔体中穿透。图 13 为 3.397 7 s 时的压力场分布, 最大注射压力为 2.045 MPa。

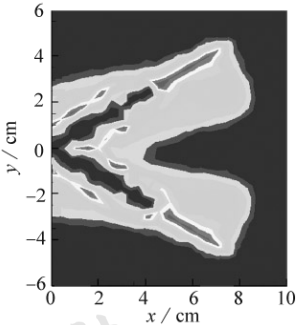


图12 充填结束时的芯层熔体分布

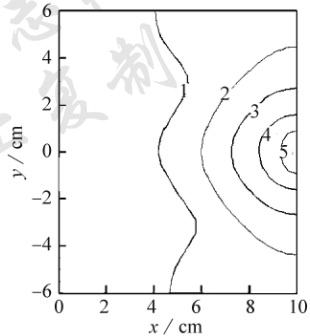


图13 3.397 7 s时的压力场分布

3.4 “Y”形气道布局

考虑到对称性, 对 “Y”形气道布局的模型取其一半进行分析, 有限元网格划分如图 14 所示(573 个节点, 1 056 个三角形单元, 左边界中点为浇口, 气道从浇口开始沿 x 轴到一半长度位置再向两个角落分岔, 共 32 个一维柱单元)。

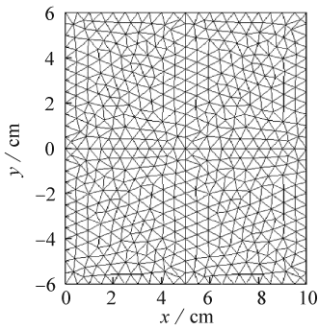
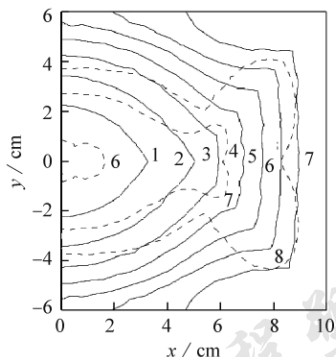


图14 “Y”形气道布局有限元网格划分

模拟过程为:2.334 73 s 时开始注入芯层熔体,3.044 57 s 时开始注入气体,3.212 49 s 时充模结束。皮芯层熔体推进过程如图 15 所示。由图 15 可见,由于水平气道的引流,开始时皮层熔体前沿呈尖凸状推进,到了气道分岔口处,由于两条斜向气道的引流,皮层熔体前沿不再呈尖凸状而是呈块状推进,在水平气道区域芯层熔体前沿也呈尖凸状推进,到气道分岔处芯层熔体前沿沿气道方向的推进比沿 x 轴方向的推进要快,最后芯层熔体呈鱼尾形分布。图 16 为充填结束时的芯层熔体分布。由图 16 可见,气体主要在气道的熔体中穿透,在气道分岔处其穿透也分岔。图 17 为 3.210 3 s 时的压力场分布,最大注射压力为 2.24 MPa。



1~7—0.4~2.8 s 时; 8—充填结束时
实线—皮层熔体; 虚线—芯层熔体

图 15 皮芯层熔体前沿推进过程图

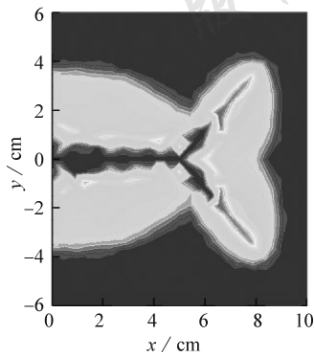
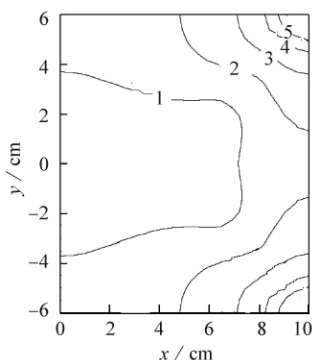


图 16 充填结束时的芯层熔体分布

3.5 比较与分析

对气辅共注射成型而言,在相同工艺条件下,气道的布局不同,其压力需求与分布也可能差别很大。通过比较不同气道布局的压力场分布图可以发现,“X”形气道布局的压力需求最小,其压力分布也最为均匀;其次是“Y”形气道布局,其压力分布也较为均匀;而“十”字形气道布局和“一”字形气道布局的压力需求和压力分布差别不大。这主要是由于气道内熔体温度更高,粘度更低,能更有效地传递压力,



1—2.2 MPa; 2—1.8 MPa; 3—1.4 MPa;
4—1.0 MPa; 5—0.6 MPa

图 17 3.210 3 s 时的压力场分布

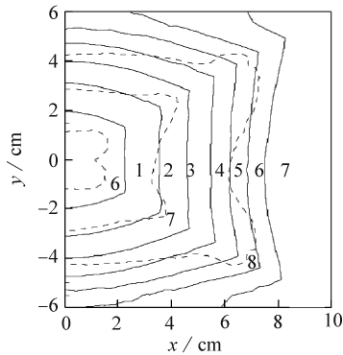
而气体在气道内的穿透显著降低了压力损耗;“X”形气道将浇口与远浇口角落直接连接,因而其压力损耗要小,所需压力就小;“Y”形气道比“X”形气道的压力损耗要大些;而“十”字形气道相对“一”字形气道并没有改变浇口与远浇口角落的压力降,因而效果差不多。因此,单纯从气道布局对压力、应力的影响角度看,“X”形气道布局最好、“Y”形气道布局次之、“十”字形气道布局和“一”字形气道布局一般。

从材料分布来看,由于气道对熔体流动的“引流”作用,气道的不同布局直接影响了材料的流动行为及最终的分布。由皮芯层熔体的前沿推进图可知,熔体前沿在沿气道方向总是呈尖凸状推进;由芯层熔体分布图可见,芯层熔体主要沿气道分布,并偏向于后充填区域方向。因此“X”形气道布局的芯层熔体分布呈“X”形,“Y”形气道布局的芯层熔体分布呈“鱼尾”形,“十”字形气道布局的芯层熔体分布呈“蝶”形。

以上都是以高粘度 PS 615APR 为皮层熔体、低粘度 PS 678 为芯层熔体进行气辅共注射成型的。现针对“X”形气道,以低粘度 PS 678 为皮层熔体、高粘度 PS 615APR 为芯层熔体进行气辅共注射成型,其它工艺参数不变。

模拟过程为:2.222 72 s 时开始注入芯层熔体,3.147 74 s 时开始注入气体,3.315 47 s 时充模结束。皮芯层熔体推进过程如图 18 所示。由图 18 可见,由于两条斜向气道的引流,使得皮层熔体前沿基本呈方形推进,最终远浇口的两个角落先充满而后充填远浇口模壁中间的邻近区域;而芯层熔体沿气道方向的流动比沿 x 轴方向的流动要快些,因而其前沿也基本呈方形推进。充填结束时的芯层熔体分布

如图 19 所示。



1 ~7—0.4 ~2.8 s 时; 8—充填结束时
实线—皮层熔体; 虚线—芯层熔体
图 18 皮芯层熔体前沿推进过程图

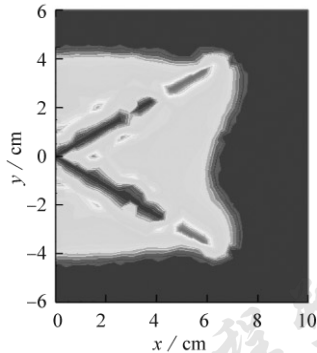


图 19 充填结束时的芯层熔体分布

由图 19 可见, 芯层熔体分布并不呈明显的“X”形。这种熔体分布比共注射成型及反顺序的气辅共注射成型的熔体分布都要好些。

4 结论

以上模拟结果表明, 气体基本上沿着气道在熔体中穿透。气道的布局会直接影响到气辅共注射成型中注塑压力需求、压力分布、材料的分布及气体的穿透。沿着浇口到远浇口模壁布置的气道, 成型时所需的注塑压力最小, 压力分布也更为均匀。低粘度熔体为芯层的气辅共注射成型, 最终芯层熔体的分布受气道布局的影响很大, 基本类似于气道的布局, 分布不均。可以通过采用高粘度熔体作为芯层, 使得最终芯层的分布更为均匀。

参考文献

- 1 周国发. 聚合物多相分层流动成型理论及其数值模拟研究: [博士论文]. 南昌: 南昌大学, 2002.
- 2 匡唐清, 柳和生, 周国发, 等. 气体辅助共注射成型的发展现状. 中国塑料, 2003, 17(9): 1
- 3 Meroskey, Joseph J. Introduction to co-injection molding. Society of Manufacturing Engineers, CM99198, 1999.
- 4 Stevenson J F. Innovation in Polymer Processing Molding. Hanser Publisher, 1996.
- 5 匡唐清, 柳和生, 周国发, 等. 顺序共注射成型充填过程的数值模拟. 塑料, 2005, 34(2): 88
- 6 Hieber C A, Shen S F. A finite-element/finite-difference simulation of the injection-molding filling process. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1980(7): 1
- 7 Ilincă F, Hetu J F. Numerical simulation of multi-material injection molding with application to gas-assisted and co-injection molding. SPE Topical Conference on Emerging Technologies for the New Millennium, Montreal, 2002. 201

CAE INVESTIGATION ON EFFECTS OF GAS CHANNEL LAYOUT IN
GAS-ASSISTED CO-INJECTION MOLDING PROCESS

Kuang Tangqing¹, Liu Hesheng², Zhou Guofa³, Li Guijin³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;

2. Shangrao Normal College, Shangrao 334001, China;

3. School of Environment Science and Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

ABSTRACT The influences of gas channel layout on the gas-assisted co-injection molding (GACIM) process are investigated by CAE technology based upon the governing equations of the filling stage of GACIM process. The analysis of simulation results shows that gas channel layout affects skin/core distribution significantly in the GACIM process involved sequential injection of a high viscosity skin melt and a low viscosity core melt. The distribution of the material can be modified by changing the order of injection sequence. Injection pressure requirement is lowest and pressure distribution is more even in the case of gas channel layouts along the cavity of injection location to the farthest location. Gas penetrates in the core polymer along the gas channel in all of these simulation cases.

KEYWORDS gas-assisted co-injection molding, gas channel layout, filling stage, CAE

乒乓球桌玻璃钢支柱亮相

最近在福建榕城举办的国际乒联巡回赛总决赛上使用的 6 张崭新的乒乓球桌具有“能发光”的透明玻璃钢发光支柱。

据介绍, 此次比赛使用的最新款双鱼牌乒乓球桌, 采用的不是传统四脚支撑型, 而是只有一个透明的环氧树脂玻璃钢支柱, 在粉红色灯光照射下会产生漂亮的光影效果, 增加了比赛的观赏性。

(雄伟)