

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.03.009

微孔塑料连续挤出成型快速降压口模的数值模拟^{*}

陈昕,柳和生,黄兴元

(南昌大学机电工程学院聚合物成型研究室,南昌 330031)

摘要:利用 Polyflow 有限元软件对聚苯乙烯 (PS)/CO₂ 均相体系在连续挤出成型圆形快速降压口模中的流动进行数值模拟,考察快速降压口模入口角、长径比及口模温度对 PS 微孔塑料熔体沿轴线方向的压力降速率和剪切速率的影响。结果表明,当入口角大于 30° 时,改变入口角对压力降速率和剪切速率无明显影响,即对微孔塑料的气泡成核影响微小,但当入口角为 0° 时,与其它各入口角相比,其熔体压力降速率最大,气泡成核时间最早;在毛细管段口模直径不变的情况下,改变其长径比对熔体气泡成核亦无明显影响,但压力降随口模长度缩短而变小;口模温度对剪切速率影响不大,但降低口模温度,压力降速率明显提高,从而有利于微孔塑料的气泡成核。

关键词:微孔塑料;连续挤出成型;剪切成核;快速降压口模;数值模拟

中图分类号:TQ328.06 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-3539(2013)03-0042-05

Numerical Simulation of Microcellular Plastic in Rapid Decompressive Die of Continuous Extrusion Molding

Chen Xin, Liu Hesheng, Huang Xingyuan

(Polymer Processing Research Lab, School of Mechanical and Electrical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Numerical simulation of polystyrene (PS)/CO₂ homogeneous phase system flowing in circular rapid decompressive die of continuous extrusion molding was done through finite element analysis software Polyflow, moreover, effects of inlet angle and aspect ratio (L/D) of the rapid decompressive die and die temperature on pressure drop rate and shearing rate of the PS microcellular plastic melt along the direction of axis were analyzed. The results show that when the inlet angle is more than 30°, changing inlet angle has no obvious effect on the pressure drop rate and shearing rate, in other words, it has little influence on bubble nucleation of microcellular plastic, but when the inlet angle is 0°, the pressure drop rate is highest and the bubble nucleation time is earliest comparing with other inlet angles. Changing L/D has also no obvious influence on bubble nucleation of microcellular plastic under the conditions of die diameter in capillary section being constant, but pressure drop decreases with the die length shortening. The effect of die temperature on shearing rate is slight, but the die temperature decreases, the pressure drop rate increases obviously, which is benefit for bubble nucleation of microcellular plastic.

Keywords: microcellular plastic ; continuous extrusion molding ; shear nucleation ; rapid decompressive die ; numerical simulation

微孔塑料作为一种新型泡沫塑料,由于具有良好的性能而得到广泛的应用。目前微孔塑料通用的制备方法有 2 种:连续成型法和间歇成型法。间歇成型法是最早应用于微孔塑料成型的方法,但因其具有产量低、成型周期长、效率低等缺点,不适合工业化生产。连续成型法包括挤出成型技术和注射成型技术,其中注射成型技术最早是由美国 Trexel 公司和麻省理工学院合作开发并进行了商业化的应用^[1];另外德国和瑞士的公司也开发了各自的商业化注射成型技术,并申请了专利^[2]。连续挤出成型作为另一种高效的技术,由于其泡孔直径、结构和塑料制品的尺寸难以精确控制,因此技术尚未完全成熟。

不论哪一种微孔塑料成型技术,其微孔发泡的

基本原理是相同的。首先在高压下,使气体大量溶解于熔融状态的聚合物中,形成饱和状态的均相体系;然后利用提高温度或降低压力的方法使其成为过饱和态的非均相体系;最后两相分离,气体在熔体内大量成核,形成气泡并长大定型。在连续挤出成型中,齿轮泵和快速降压口模是常用的成型设备。较于齿轮泵,后者结构更简单,成本更低,稳定性能更好。利用快速降压口模进行微孔塑料连续挤出成

^{*} 江西省科技攻关计划项目 [塑料微孔发泡挤出新技术研究 (2007)]

联系人:柳和生,教授,博导,主要从事聚合物成型设备和理论研究

收稿日期:2012-12-13

型时,熔体压力的释放在口模进行,并且最终制品的定型也在口模内完成。因此快速降压口模是气泡成核、长大、定型及制品成型关键的步骤,研究快速降压口模对微孔塑料连续挤出成型实验有较强指导意义。

熔体内气泡成核的动力主要来自于熔体内热力学不稳定。当熔体通过口模时,由于熔体压力或者温度的变化,使熔体由均相体系中的饱和状态转化为过饱和状态,在这种状态下熔体内气体从均相体系中分离,并大量成核。经典成核理论能较为准确地描述静态成核过程,例如间歇成型法,但对于连续挤出成型存在一定的局限性。由于挤出成型中气泡成核是在熔体流场中产生的,所以流场中剪切拉伸效应、熔体压力降都会影响微孔塑料成核。S.T.Lee^[3-4]最早在研究熔体去除可挥发性成分时提出了剪切成核理论,其在研究氟氯烃微孔发泡时发现,在改变挤出产量和口模尺寸来提高剪切速率的过程中,气泡成核率相应得到提高。M.C.Guo^[5]在连续挤出成型研究中发现,剪切作用是泡孔成核的主要动力,而非仅仅促进了熔体均相体系形成过饱和状态。Xu Xiang^[6]通过研究发现,口模的几何结构对成核有很大的影响,其影响来源于几何尺寸变化带来的挤出端压力降及压力降速率的变化,由此影响气泡成核。L.Chen^[7-8]在对聚氯乙烯连续挤出时发现,制品表面泡孔密度要比中心部分高,且泡孔直径更小,由此认为壁面强烈的剪切效应促进熔体表面先与中心部分成核,在此基础上提出了剪切能向泡孔界面自由能转化的思想。综上所述,在连续挤出成型中,口模内熔体的剪切速率和压力降速率是微孔塑料气泡成核的关键因素。

1 快速降压口模的数值模拟

1.1 快速降压口模的设计与几何模型的建立

由快速降压口模对微孔塑料气泡成核的影响因素可知,口模是微孔塑料连续挤出成型中一个重要的环节,其优劣将直接影响微孔塑料宏观表面及形状和微观泡孔密度及分布。因此在设计中应当考虑以下几个方面的问题^[9]:首先,应当保证足够的压力降,以确保气泡大量成核;其次,要保证一定的压力,防止气泡过分长大、合并,同时能够确保制品密实;最后,口模内壁和节点过渡要光滑,没有滞料,流速平稳,出料均匀。C.B.Park^[10-12]最早设计的快速降压口模结构简单,降压效果也较好,是目前比较常用的一种口模。根据此模型,笔者设计了一个以

螺栓连接单螺杆挤出机的快速降压口模,包括熔体入口收敛段和毛细管段2段,如图1所示。其中,熔体入口收敛段与单螺杆挤出机相连,而毛细管段主要起快速降低熔体压力的作用。

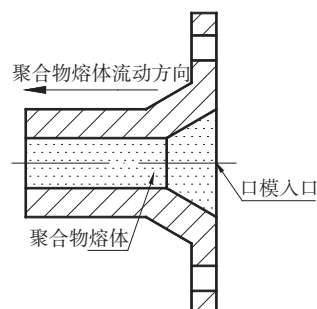


图1 快速降压口模

在进行快速降压口模的设计时,需要先对微孔塑料熔体流动情况进行数值模拟,据此分析快速降压口模结构对微孔塑料成核的影响。以图1为蓝本,设计不同入口角和长径比(L/D)的轴对称圆形口模几何模型,如图2所示。其中在改变入口角时固定入口收敛段的轴向长度,改变 L/D 时仅改变毛细管口模的长度而不改变毛细管口模直径。

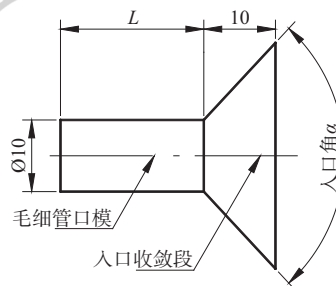


图2 圆形口模结构几何模型

1.2 本构方程和材料参数

以聚苯乙烯(PS)/CO₂均相熔体为研究对象,选用Bird-Carreau为本构方程,如式(1)所示。该方程是描述流体在低剪切速率下的流变行为,而聚合物熔体与CO₂共混的过程中,黏度存在剪切变稀的现象,因此其能较好地反应聚合物熔体的特征。体积流量设为2 cm³/s, CO₂质量分数设为3.5%。

$$\frac{\eta - \eta_{\infty}}{\eta_0 - \eta_{\infty}} = \frac{1}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{1-n}{2}}} \quad (1)$$

式中: η ——黏度, Pa·s;

η_{∞} ——极限剪切黏度, Pa·s, 其值取零;

η_0 ——零剪切黏度, Pa·s;

λ ——松弛时间, s;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s⁻¹;

n ——非牛顿指数。

表1摘录了C.Kwag等^[13]在研究PS与超临界

CO₂ 流变行为得到的一些基本参数,这些数据为当 CO₂ 质量分数为 3.5% 时, PS/CO₂ 熔体中在 2 种不同温度下的参数。

表 1 Bird-Carreau 参数

参 数	温度 / °C	
	150	175
$\eta_0 / (\text{Pa} \cdot \text{s})$	3149.5	614.2
λ / s	0.07490	0.02292
n	0.3972	0.4271

1.3 网格划分和边界条件设定

利用前处理软件 Gambit 进行几何建模和网格划分。由于口模是轴对称的,故取其轴向截面的 1/2 进行网格划分,研究二维流动,选取八节点四边形为有限单元,在口模壁面边界和转角结点处密化网格,如图 3 所示。

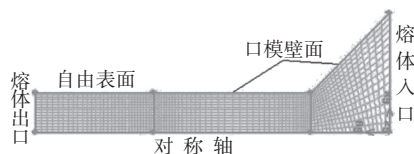


图 3 圆形口模网格图

图 3 从右至左依次设置边界条件为:

- (1) 假设熔体入口流动充分发展, 体积流量 $Q=2 \text{ cm}^3/\text{s}$;
- (2) 口模壁面边界无滑移, 法向速度 $v_n=0$ 、切向速度 $v_s=0$;
- (3) 自由表面边界法向应力 $f_n=0$ 、切向应力 $f_s=0$ 、法向速度 $v_n=0$;
- (4) 熔体出口边界压力轴向应力 $f_n=0$ 、法向应力 $f_s=0$;
- (5) 对称轴边界法向速度 $v_n=0$ 、切向应力 $f_s=0$ 。

进行模拟分析前, 做如下设定:

- (1) 聚合物熔体在口模中是稳态层流;
- (2) 熔体为非牛顿流体;
- (3) 熔体在口模中是不可压缩的, 并完全充满;
- (4) 由于熔体本身的黏度很大, 忽略惯性力和重力。

2 结果与讨论

2.1 入口角度对微孔塑料气泡成核的影响

固定口模温度为 150 °C, 改变入口角 (0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 150°), 研究了其对熔体轴线方向上压力降速率和剪切速率的影响, 结果如图 4、图 5 和图 6 所示。

从图 4 可以看出, 入口角为 0° 时压力降最大, 30° 次之, 其余入口角的压力降曲线基本重合。压

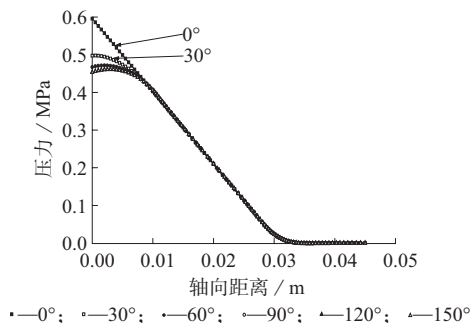
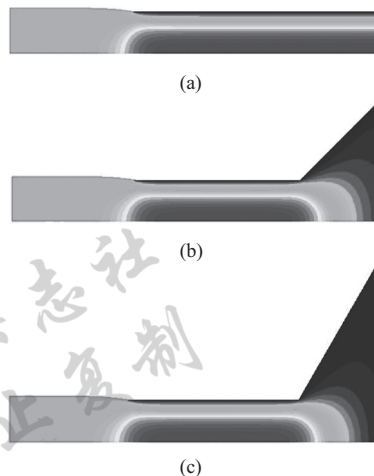


图 4 不同入口角下熔体轴线方向的压力降



a—0°; b—90°; c—120°

图 5 3 种入口角下熔体的轴线方向速度场分布

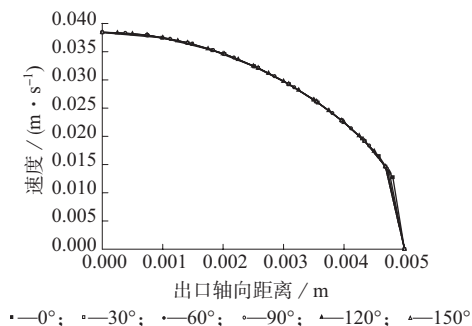


图 6 不同入口角口模出口处轴线方向速度

力降是熔体所克服的壁面摩擦力, 在入口角为 0° 时, 从图 5a 可以看出, 入口收敛段相当于另一个毛细管, 即其毛细管长度最长, 因此熔体所需克服的摩擦力也就最大, 压力降最高; 而在入口角不为 0° 时, 收敛段入口直径较大, 相对毛细管来说, 流速较小, 摩擦力也较小, 因此熔体压力损失较小, 并且随着入口收敛段的直径逐渐减小, 壁面对熔体的挤压作用使熔体保持一定的压力, 因此在进入毛细管前没有产生明显压力降。进入毛细管后, 由于壁面对熔体持续的摩擦作用, 熔体压力开始下降, 产生稳定的压力降和压力降速率。因此在入口角不为 0° 的口模

中,压力降主要发生在毛细管段。

限于篇幅,图5只截取入口角为 0° 、 90° 和 120° 时熔体内轴线方向速度场分布图,但是无碍对各个入口角的速度场的分析。从毛细管段来看,图6中截取的各个入口角的口模出口处轴线方向的速度曲线基本完全重合,同时结合图5可以发现,在各个入口角下,毛细管段处熔体的速度场分布是一致的,并且由于熔体流动的径向速度(v_r)比轴向速度(v_z)小一个数量级,可以忽略不计,因此可只考虑熔体轴向的速度。由于口模入口角的变化对熔体在毛细管段轴向速度无影响,因此对熔体轴向剪切速率(dv_z/dx)无影响。从入口收敛段来看,在图5b和图5c中熔体轴向速度变化的数量级要远小于毛细管段,这是由于熔体在入口收敛段流动的直径远大于毛细管处直径,熔体流速缓慢,因此入口收敛段的剪切速率可以忽略不计,而只考虑毛细管段熔体剪切速率对成核的影响。

由于不同入口角下熔体各点轴向速度一致,因此熔体流过毛细管的时间也一致。在毛细管压力降基本不变的情况下,压力降速率也保持一致。综合剪切成核理论中的压力降和剪切速率对熔体成核的影响可以判断,入口角大于 30° 时,改变口模入口角对口模压力降速率和剪切速率无明显影响,即改变口模入口角不能影响微孔塑料的气泡成核率。而在入口角为 0° 时,由于熔体的压力降要明显大于其它各入口角,且开始形成稳定的压力降和轴向剪切速率时间都要早于其它各入口角,因此能够促进微孔塑料气泡成核,且成核时间会先于其它各入口角;同理,入口角为 30° 时,成核时间晚于 0° ,但早于其它各入口角。

2.2 L/D 比对微孔塑料气泡成核的影响

固定口模温度为 150°C ,入口角为 90° ,改变口模的 L/D (1/1, 2/1, 3/1, 4/1),研究了其对熔体轴线方向上压力降速率和剪切速率的影响,如图7、图8和图9所示。

从图7可以看出,随着 L/D 的增加,熔体压力降增加,这是因为压力降与熔体和口模壁面的摩擦有关,而毛细管长度越长,熔体所需克服口模壁面的摩擦力也越大。但是从图8、图9和图5b中也可以发现,由于流量一定,熔体通过毛细管的速度场基本一致,仅仅是在毛细管处“拉长”了,轴线上的剪切速率基本不变。并且当速度一定时熔体流过毛细管的时间与毛细管长度成正比,因此,虽然压力降也增

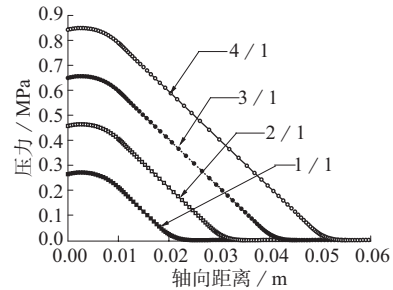


图7 不同 L/D 下熔体轴线方向的压力降



图8 L/D 为 4/1 时熔体轴线方向速度场分布

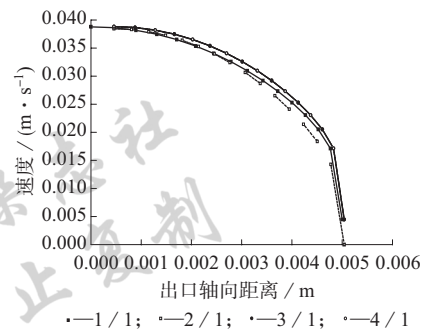


图9 不同 L/D 口模出口处轴线方向速度

加,但是随毛细管长度增加所消耗的时间也相应增加,在压力降和时间都与毛细管长度成正比情况下,不同 L/D 的熔体压力降速率没有变化。综上所述,可以得出在口模直径和熔体流量不变的情况下增加毛细管长度并不能改变压力降速率和剪切速率,而根据剪切成核理论,不能促进微孔塑料气泡成核。但是当毛细管长度不变,减小毛细管直径(增加长径比),则会使微孔塑料的气泡成核率增加^[10]。这是因为在毛细管直径减小的情况下,同样流量的熔体,其挤出速度增加,相应的轴向剪切速率和压力降速率也增加,在这种情况下,根据剪切成核理论,是可以促进微孔塑料气泡成核的。

2.3 口模温度对微孔塑料气泡成核的影响

固定口模入口角为 90° , L/D 为2/1,改变口模温度(150和 175°C),研究了其对熔体轴线方向上压力降速率和剪切速率的影响,如图10~图12所示。

从图10可以看出,低温时的熔体压力降要远高于高温时,这是由于在低温时熔体的黏度更高,熔体所需克服的口模壁面的摩擦力越大,所以熔体压力降也就越大。对比图11、图12和图5b可以发现,温度对熔体轴线方向的剪切速率影响很小,从数量

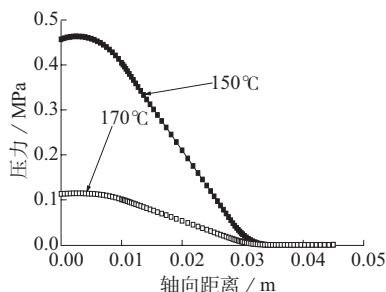


图10 不同口模温度下熔体轴线方向的压力降



图11 口模温度为175℃时熔体轴线方向速度场分布

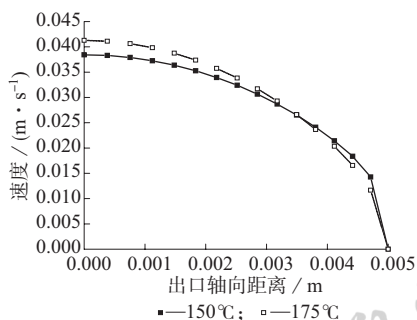


图12 不同口模温度下口模出口处轴线方向速度

级上相对压力降速率的影响可以忽略不计。由于温度的改变对熔体轴向速度影响很小,所以在熔体速度场不变的情况下,其在口模中停留的时间也就不变,而相同的时间内,高的压力降就相当于高的压力降速率。根据剪切成核理论,压力降速率越高则越有利于微孔塑料的气泡成核,并且温度低时,熔体黏度大,表面张力高,气泡不容易过分长大,不会从熔体内逸出,这样也更有利于体内形成细小致密的微孔结构,得到更好的微孔塑料制品。

3 结论

(1) 当入口角大于 30° 时,改变口模入口角对熔体毛细管中的压力降速率和剪切速率无明显影响,即对微孔塑料的气泡成核无明显影响。但与其它各入口角相比,当入口角为 0° 时熔体压力降速率最大, 30° 次之,因此成核时间 0° 最早, 30° 次之。

(2) 在毛细管直径不变的情况下,单纯提高毛细管长度用以改变口模长径比对微孔塑料的气泡成核无明显影响,但压力降随毛细管长度增加而增加。所以在保证口模强度的基础上,适当缩短口模长度,有利于降低口模压力降和挤出机能量消耗。

(3) 口模温度对微孔塑料的气泡成核影响较大,

降低温度可增加熔体的压力降及压力降速率,故有利于微孔塑料的气泡成核。适当降低口模温度,可有效阻止泡孔过分长大,利于形成细密的泡孔结构。

参考文献

- [1] Suh N P. Impact of microcellular plastics on industrial practice and academic research[J]. Macromolecular Symposia, 2003, 201(1):187-202.
- [2] 余坚, 何嘉松. 超临界 CO_2 技术制备微孔聚合物中的基本问题[J]. 中国科学, 2010, 40(1):1-15.
Yu Jian, He Jiasong. Fundamental issues for microfoaming polymers with supercritical CO_2 technology[J]. Science China, 2010, 40(1):1-15.
- [3] Lee S T, Biesenberger J A. A fundamental study of polymer melt devolatilization. IV: Some theories and models for foam-enhanced devolatilization[J]. Polymer Eng Sci, 1989, 29(12):782-790.
- [4] Lee S T. Shear effects on thermoplastic foam nucleation[J]. Polymer Eng Sci, 1993, 33(7):418-422.
- [5] Guo M C, Peng Y C. Study of shear nucleation theory in continuous microcellular foam extrusion[J]. Polymer Testing, 2003, 22(6):705-709.
- [6] Xu Xiang, Park C B, Xu Donglai. Effects of die geometry on cell nucleation of PS foams blown with CO_2 [J]. Polymer Eng Sci, 2003, 43(7): 1378-1390.
- [7] Chen L, Wang Xiang, Straff R, et al. Shear stress nucleation in microcellular foaming process[J]. Polymer Eng Sci, 2002, 42(6): 1151-1158.
- [8] Chen L, Sheth H, Wang Xiang. Effects of shear stress and pressure drop rate on microcellular foaming process[J]. Journal of Cellular Plastics, 2001, 37(4):353-363.
- [9] 吴晓丹. CO_2 微孔发泡挤出机头的流变学设计[J]. 广东技术师范学院学报, 2011, 2(2):1-4.
Wu Xiaodan. Rheology design of extrusion mold of microcellular foaming bubble[J]. Journal of Guangdong Polytechnic Normal University, 2011, 2(2):1-4.
- [10] Park C B, Baldwin D F, Suh N P. Effect of the pressure drop rate on cell nucleation in continuous processing of microcellular polymers [J]. Polym Eng Sci, 1995, 35(5):432-440.
- [11] Park C B, Cheung L K. A study of cell nucleation in the extrusion of polypropylene foams [J]. Polym Eng Sci, 1997, 37(1):1-10.
- [12] Park C B, Suh N P. Filamentary Extrusion of microcellular polymers using a rapid decompressive element [J]. Polym Eng Sci, 1996, 36:34-48.
- [13] Kwag C, Manke C W, Gulari E. Rheology of molten polystyrene with dissolved supercritical and near-critical gases[J]. Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics, 1999, 37(19):1911-1978.