

气辅挤出成型中挤出物直径的理论预测和实验研究^{*}

肖建华

(南昌航空大学材料科学与工程学院,南昌 330063)

摘要 应用 Polyflow 软件对粘弹性聚合物熔体在气辅挤出口模内的流动进行了研究,得到了挤出物直径的挤出胀大比方程。模拟结果表明,熔体在滑移段的平均停留时间与材料松弛时间之比同挤出胀大比之间存在指数衰减关系。通过 HDPE 的气辅挤出成型实验,发现不同螺杆转速及挤出温度下挤出物直径的实验值与计算值达到很好的吻合,该计算方法可用于指导气辅口模设计。

关键词 气辅挤出 直径 挤出胀大比 滑移段 停留时间

传统挤出成型存在由于挤出胀大而引起制品的尺寸精确性问题,是一种低附加值的成型方法^[1]。而气辅挤出成型的最大优点是可以降低或消除挤出胀大^[2],获得精确的制品外形尺寸,因此在医用管道、光导纤维等领域具有广泛的应用。

气辅挤出成型的实质是在传统挤出机的基础上安装气辅口模,因此气辅口模的设计是整个技术的核心,而气辅段长度又是气辅口模最重要的指标,其设计的合理性是决定制品形状、尺寸及质量的关键因素。到目前为止,在气辅挤出及纤维纺丝、纤维加捻、中空纤维、微孔薄膜^[3-6]等相关气辅技术研究中尚未发现任何有关气辅段长度设计原则的相关资料。

相同实验条件下,气辅段长度不同,挤出物的直径也不同。笔者通过数值模拟与实验相结合的方法研究了聚合物熔体在气辅口模滑移段(气辅段)的平均停留时间与材料松弛时间之比同挤出物直径挤出胀大比的关系,用于预测挤出物的理论直径。

1 气辅挤出物直径的数值模拟研究

1.1 数学模型

挤出口模选择图 1 所示的圆棒口模,口模的网格模型分为粘附段、滑移段、挤出后的自由表面 3 部分,气体的注入点在粘附段和滑移段的交点处,网格数为 1500 左右,在边界条件突变处进行局部加密。

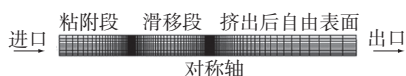


图 1 1/2 轴对称挤出模的形状和边界条件

1.2 控制方程

根据等温、稳态层流、不可压缩、忽略重力和惯性力等简化与假设,可得如下连续性方程和动量方程:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla \cdot P + \nabla \cdot T = 0 \quad (2)$$

式中: v ——速度向量;

P ——压力;

T ——粘弹性熔体的偏应力张量。

流变学基本方程采用如下粘弹性 PTT 模型:

$$\exp\left(\frac{\varepsilon \lambda}{\eta} T_1\right) T_1 + \lambda \left[\left(1 - \frac{\zeta}{2}\right) T_1 + \frac{\zeta}{2} T_1\right] = 2 \eta D \quad (3)$$

式中: ε ——和材料拉伸行为相关的参数;

λ ——材料松弛时间;

η ——粘弹流体中纯弹性部分的粘度;

T_1 ——应力张量中的粘弹部分;

ζ ——和材料剪切粘度相关的参数;

D ——形变速率张量。

1.3 边界条件

在气辅挤出成型过程中,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。因此,口模内的流动分析仅以熔体内部、熔体-气体边界为研究对象。

边界条件为:粘附段 $v_s = 0, v_n = 0$;滑移段 $v_n = 0, f_s = 0$;自由表面 $f_n = 0, v_n = 0$;出口 $f_s = 0, f_n = 0$;对称轴 $v_n = 0, f_s = 0$ 。其中 n 和 s 分别代表法向方向和剪切方向; f 为作用力。

模拟研究中聚合物的粘度为 $5 \times 10^4 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,粘度比为 $1/9$, $\zeta = 0.2$, $\varepsilon = 0.01$ 。

1.4 数值模拟结果

应用 Polyflow 软件对粘弹性聚合物熔体在气辅口模内的流道进行模拟,得到了熔体流经气辅口模

* 国家自然科学基金项目(50273012)

收稿日期:2009-02-10

滑移段的平均停留时间与材料松弛时间的比值 (t/λ) 和离开口模后挤出物直径的挤出胀大比 (B), 利用 Origin 软件对模拟所得数据进行曲线拟合, 结果如图 2 所示。

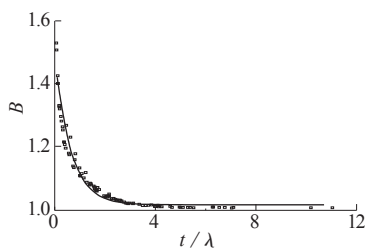


图 2 B 与 t/λ 对应数据的曲线拟合

由图 2 得到如下气辅挤出胀大比方程:

$$B = 1 + Ae^{-t/\lambda}$$
 (4)

式中: A ——指数衰减曲线与 $t = 0$ 的交点在纵坐标上的截距,其物理意义为相同条件下常规挤出物直径的变形率。

2 气辅挤出实验研究

实验原料为韩国大林公司产 LH-6070 高密度聚乙烯 (HDPE)。气辅挤出实验装置如图 3 所示。气辅口模直径 20 mm,气辅段长度 35 mm。

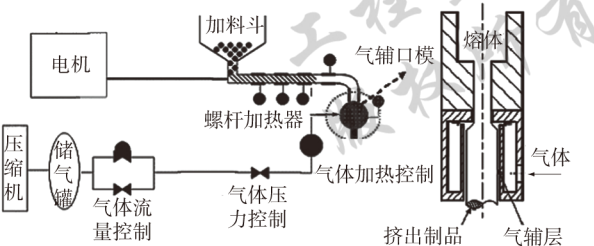


图 3 气辅挤出实验装置示意图

2.1 实验结果

表 1 列出不同螺杆转速和熔体温度下气辅挤出物的直径大小。其中各温度下材料的松弛时间通过动态热机械分析仪测得。

表 1 不同工艺条件下挤出物直径的实验值				
螺杆转速 / r · min ⁻¹	熔体流量 / g · s ⁻¹	熔体温度 / ℃	松弛时间 / s	挤出物直径 / mm
2	0.79	185	3.08	20.1
2	0.97	195	3.20	20.0
2	1.01	205	1.55	20.1
7	3.17	185	3.08	21.8
7	3.33	195	3.20	21.4
7	3.70	205	1.55	20.6
12	5.00	185	3.08	23.3
12	5.76	195	3.20	22.8
12	5.95	205	1.55	22.6

2.2 计算值与实验值的比较

将相关的实验参数带入到式 (4) 中, 计算气辅

挤出条件下挤出物的直径, 并将计算值与气辅挤出的实验值进行比较, 结果如图 4 所示。

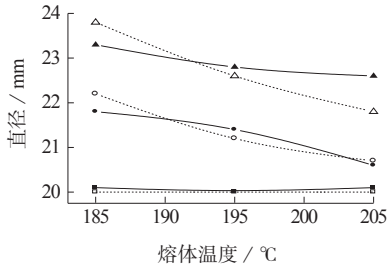


图 4 气辅挤出物直径的实验值和计算值

□—螺杆转速 2 r/min, 计算值; ■—螺杆转速 2 r/min, 实验值;
△—螺杆转速 7 r/min, 计算值; ▲—螺杆转速 7 r/min, 实验值;
○—螺杆转速 12 r/min, 计算值; ●—螺杆转速 12 r/min, 实验值

从图 4 可以看出, 在相同螺杆转速和熔体温度下, 气辅挤出物直径的计算值与实验值间的误差一般限制在 0 ~0.5 mm, 应用模拟所得到的挤出胀大比公式来计算挤出物的直径还是相当精确的。

产生误差的原因有: 实际聚合物运动具有高度的复杂性和结构单元的多重性, 其力学松弛过程不止一个松弛时间, 而是一个分布较宽的连续谱; 聚合物的粘弹性并非单一松弛时间的指数形式的响应^[7]。

2.3 其它实验验证

(1) 实例一

文献 [8] 研究了不同口模滑移段长度和螺杆转速下气辅挤出物的半径并进行了排序。现假定熔体从滑移段 (长度 35 mm) 口模以螺杆转速 4 r/min 下挤出时, 熔体在滑移段的停留时间为单位 1; 当螺杆转速分别增加到 8 r/min 和 12 r/min 时, 熔体在滑移段的停留时间相应可写为 0.50、0.33; 当滑移段长度从 35 mm 增加到 96 mm 时, 熔体在滑移段的停留时间相应可分别写为 96/35 = 2.74, 96/35 × 0.50 = 1.37, 96/35 × 0.33 = 0.91。气辅挤出物半径与熔体在滑移段的停留时间 t 成指数衰减关系, 因此 t 越大则挤出物半径越小。气辅挤出物半径的实验值和计算值对比如表 2 所示。

表 2 气辅挤出物半径的实验值和计算值					
滑移段长度 /mm	螺杆转速 / r · min ⁻¹	实验半径 / mm	实验值 排序	停留 时间	计算值 排序
35	4	9.50	3	1.00	3
35	8	9.75	5	0.50	5
35	12	9.98	6	0.33	6
96	4	8.60	1	2.74	1
96	8	8.80	2	1.37	2
96	12	9.65	4	0.91	4

由表 2 可看出, 气辅挤出物半径的实验值与计

算值排序一致,说明气辅挤出胀大比方程可以对不同条件下的挤出物径向尺寸进行排序。

(2) 实例二

文献中[2] 中 GAE 圆棒口模滑移段长度为 25 mm, 直径为 9.7 mm, 180℃ 下材料的松弛时间为 13.5 s。其挤出物直径的挤出胀大比实验值和计算值见表 3。从表 3 可以明显看出, 气辅挤出物直径的挤出胀大比计算值与实验值比较吻合。同时计算值与实验值之间还存在误差, 这个误差主要从实验中产生, 实验中随着螺杆转速的提高熔体的质量流量相应提高, 但挤出胀大比的变化很小。

表 3 气辅挤出物直径挤出胀大比的实验值与计算值比较

螺杆转速 / r · min ⁻¹	熔体流量 / g · s ⁻¹	挤出胀大比	
		实验值	计算值
0.1	0.034	1.03	1.01
0.2	0.054	1.03	1.03
0.4	0.092	1.08	1.08
0.8	0.160	1.13	1.17
1.0	0.193	1.13	1.19

3 结论

数值模拟认为聚合物熔体在气辅挤出口模内滑移段部位的停留时间与挤出胀大比成指数衰减关系。HDPE 在不同螺杆转速和挤出温度下的气辅挤出实验表明, 气辅挤出制品直径的计算值与实验值

误差一般在 0 ~0.5 mm, 因此可以利用笔者提出的气辅挤出胀大比公式预测某一条件下挤出物的直径或指导气辅挤出口模滑移段长度的设计。

参考文献

[1] 吴大鸣. 精密挤出技术的开发和应用展望[J] . 塑料工业, 2007 (2) : 34 - 41.

[2] Liang R F, Mackley M R. The gas-assisted extrusion of molten polyethylene[J] . J Rheol, 2001, 45 (1) : 211 - 226.

[3] Kohler W H, McHugh A J. Sensitivity analysis of low-speed melt spinning of isotactic polypropylene[J] . Chemical Engineering Science, 2007, 62: 2690 - 2697.

[4] Zeng Y C, Yang J P, Yu C W. Mixed euler lagrange approach to modeling fiber motion in high speed air flow[J] . Applied Mathematical Modelling, 2005, 29: 253 - 261.

[5] Peng Na, Chung Tai Shung. The effects of spinneret dimension and hollow fiber dimension on gas separation performance of ultra-thin defect-free Torlon hollow fiber membranes[J] . Journal of Membrane Science, 2008, 310: 455 - 465.

[6] Hallmark B, Mackley M R, Gadala-Maria F. The melt processing of polymer microcapillary film (MCF) [J] . J Non-Newton Fluid, 2005, 128: 83 - 98.

[7] 何曼君, 陈维孝. 高分子物理[M] . 上海: 复旦大学出版社, 1998: 359.

[8] 黄兴元. 聚合物气体辅助挤出成型的理论与实验研究[D] . 南昌: 南昌大学, 2006.

THEORETIAL PREDICT AND EXPERIMENTAL RESEARCH OF PRODUCT DIAMETER
IN GAS-ASSISTED EXTRUSION

Xiao Jianhua

(School of Material Science and Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

ABSTRACT The flow of the viscoelastic polymer melt in gas-assisted extrusion die was investigated by using Polyflow software, and the equation to propose the extrusive swell ratio of product diameter was obtained. The simulation results showed that the relation of the ratio of the average residence time that polymer melt settled in the slippage stage to material relaxation time with the extrusive swell ratio was decayed exponentially. By the experiment of gas-assisted extrusion HDPE, the experimental diameter agreed well with the calculated value in different screw rotate speed and extrusion temperature. The high degree of consistency among the numerical simulation and experimental verification showed that the proposed equation was reasonable and reliable to guide the design of gas-assisted extrusion die.

KEYWORDS gas-assisted extrusion, diameter, extrusive swell ratio, slippage stage, residence time

用于飞机的低放热 PC

SABIC 公司的一种新型热成型 Lexan XHR6000 PC 片材能满足 OSU 65/65 标准和阻燃/烟雾/毒性 (FST) 规则的要求。Lexan XHR6000 具有极低的放热量, 密度为 1.34 g/cm³, 比通常用于座椅、驾驶舱内衬、外窗、门罩和其它内饰部件的聚氯乙烯/丙烯酸片材轻。该片材同时具有优异的着色性和改进的纹饰保持性及比聚苯砜片材更低的低温成型性, 这使得其能低成本加工和除去油漆。(塑工)

三菱瓦斯特特种 PC 可替代光学玻璃

三菱瓦斯化学公司近日透露, 即将投资建设特种聚碳酸酯(PC) 树脂装置。这种新材料可用于替代光学透镜中的玻璃。此前, 树脂的光学变形妨碍了其应用于高质量摄影机。特种 PC 树脂具有极低的双折射性, 可避免引起光学变形。产品的高流动性还使其适用于带有摄影功能的手机和数字摄影机, 以及运载工具摄影机和监视摄影机。(中化)