

马鞍型异型材挤出成型过程三维等温粘弹性的数值模拟^{*}

周国发 纪占国

(南昌大学环境科学与工程学院,南昌 330031)

摘要 基于 PTT 粘弹性本构模型,通过马鞍型异型材挤出成型过程的全三维稳态等温有限元数值模拟,系统研究了聚合物粘弹性流变性能参数和成型工艺参数对异型材口模挤出成型过程的影响规律,并揭示了其影响机理。研究表明,聚合物异型材口模挤出离模膨胀是由口模出口处的二次流动引起,离模膨胀比随着口模出口处的二次流动强度增加而增大。聚合物异型材口模挤出离模膨胀随着进口流量和聚合物熔体松弛时间的增加而增加,而随着聚合物熔体材料常数和粘度比的增大而减小。

关键词 聚合物异型材 挤出成型 数值模拟 离模膨胀 机理

在挤出成型中,聚合物粘弹特性与过程参数波动的耦合作用会在挤出成型过程中产生波动的挤出离模膨胀,使得要求生产尺寸精确且形状复杂的聚合物型材在工程上仍是一项技术挑战^[1-2],而揭示聚合物粘弹特性与过程参数波动的耦合作用对粘弹性聚合物熔体离模膨胀的影响机理是解决这一工程技术难题的前提。复杂的异型口模几何形状和聚合物熔体的粘弹特性,使得异型材挤出成型过程的数值模拟成为一个高度非线性问题,这使异型材挤出成型过程的数值模拟仍是一个急待解决的工程技术难题,有关异型材挤出成型过程三维粘弹性的数值模拟研究报道极为罕见。由于缺乏对异型材挤出离模膨胀机理的系统研究,使得目前聚合物异型材挤出口模的设计仍停留在经验试差法的阶段,这将耗费大量的时间、资金和人力。由此可见,聚合物异型材挤出成型过程数值模拟研究具有重要的工程应用价值和理论研究意义。为此,笔者基于 PTT 粘弹熔体的三维等温粘弹性流动,经合理假设,建立了描述聚合物异型材挤出成型过程机理的理论模型和与该模型相适应的高效稳态的数值算法,实现了异型材挤出成型过程的三维粘弹性数值模拟,系统研究了聚合物熔体粘弹性流变性能参数和工艺参数对异型材挤出成型过程的离模膨胀的影响规律和影响机理,为聚合物异型材挤出口模的设计提供理论依据。

1 控制方程和边界条件

1.1 控制方程

由聚合物的成型加工过程遵循三大守恒定理,即质量守恒、动量守恒和能量守恒定理,得到其控制方程为:

(1) 连续性方程:

$$u = 0 \quad (1)$$

式中: u ——速度矢量。

(2) 运动方程:

$$\sigma = 0 \quad (2)$$

其中 $\sigma = -pI + T$

式中: σ ——应力张量;

p ——压力;

I ——单位矩阵;

T ——偏应力张量。

(3) PTT 粘弹性本构模型:

$$\exp \frac{\varepsilon \lambda}{(1-\eta) \eta} \text{tr}(\tau) \tau + \lambda \left(1 - \frac{\xi}{2} \tau + \frac{\xi}{2} \Delta \tau \right) = 2(1-\eta) \eta D \quad (3)$$

式中: τ 和 $\Delta \tau$ 分别为应力偏量的上、下随体导数,定义为:

$$\tau = \frac{D \tau}{Dt} - \tau \cdot u - u^T \cdot \tau,$$

$$\Delta \tau = \frac{D \tau}{Dt} + \tau \cdot u^T + u \cdot \tau$$

式中: λ ——松弛时间, s;

ε, ξ ——无量纲材料参数,反映拉伸特性和控制熔体剪切粘度的材料参数;

τ ——聚合物粘弹偏应力张量, MPa;

η ——粘度比, η/η

η, η ——聚合物熔体的总粘度和溶剂的牛顿粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

D ——应变速率张量。

1.2 边界条件

由型材挤出成型特点可知其边界条件为:

^{*} 国家自然科学基金资助项目(20274016)、江西省教育厅科技攻关项目(s00123)

收稿日期:2008-05-20

(1) 进口边界条件

$$q = q_0(x) \qquad x \in \Gamma_{inlet} \qquad (4)$$

式中: q ——进口处的熔体流率。

(2) 模腔内壁边界条件

挤出成型, 由于熔体与模壁是粘着无滑移, 则:

$$u = 0 \qquad x \in \Gamma_{wall} \qquad (5)$$

(3) 出口边界条件

$$(T \cdot n) \cdot n = 0, (T \cdot n) \cdot \tau = 0$$
$$x \in \Gamma_{outlet} \qquad (6)$$

(4) 自由膨胀表面边界条件

$$u \cdot n = 0, (T \cdot n) \cdot n = 0, (T \cdot n) \cdot \tau = 0$$
$$x \in \Gamma_{free} \qquad (7)$$

式中: Γ_{inlet} 、 Γ_{outlet} 、 Γ_{wall} 、 Γ_{free} ——口模进口、出口、模壁和自由膨胀边界。

采用 DEVSS/SUPG 技术建立三维等温粘弹性异型材挤出成型过程理论模型的有限元数值算法。采用三维数值模拟的流线法用于异型材离模膨胀自由表面的追踪, 具体有限元离散模型见文献[3]。

2 异型材口模挤出离模膨胀的数值分析

2.1 模拟条件

笔者采用的是厚 3 mm, 外尺寸宽 20 mm, 高 17 mm, 总长 60 mm 的马鞍型异型口模, 离模膨胀区长 60 mm。采用正六面体最小有限单元进行网格划分, 如图 1 所示。

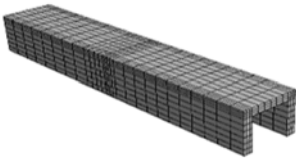


图 1 挤出口模有限元模型

材料采用低密度聚乙烯 (LDPE), 材料性能参数见表 1。笔者采用的离模膨胀率 B 定义为:

$$B = \frac{S - S_0}{S_0}$$

式中: S ——挤出后胀大截面面积;

S_0 ——模型原来截面面积。

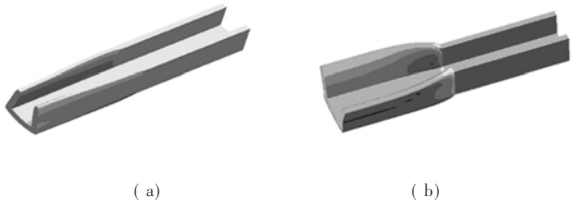
表 1 PTT 模型材料参数表

粘度 $\eta/\text{Pa} \cdot \text{s}$	松弛时间 λ/s	材料常数 α	材料常数 ξ	粘度比 η
10 000	1	0.1	0.005	0.03

2.2 进口流量对异型材离模膨胀和翘曲变形的影响及影响机理

笔者通过不断增加进口流量, 研究进口流量对

异型材离模膨胀和翘曲变形的影响规律, 其进口流量对异型材挤出离模膨胀和翘曲变形的三维形貌的影响如图 2 所示, 其离模膨胀率 B 与进口流量的关系如图 3 所示。



a— $Q_{inlet} = 1 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{s}$; b— $Q_{inlet} = 1.3 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$

图 2 进口流量对异型材挤出胀大和翘曲变形的三维形貌的影响

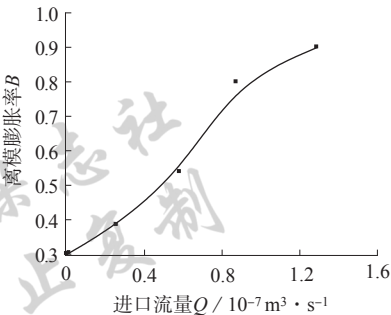


图 3 离模膨胀率 B 与进口流量的关系曲线

由图 2、图 3 可知, 当进口流量小的时候, 两侧壁向内翘曲变形, 而随着进口流量的增加, 两侧壁变形由向内翘曲转为向外翘曲变形, 而马鞍型异型材的离模膨胀率 B 随着进口流量的增加而增大。

为了揭示离模膨胀产生的流变学机理, 笔者认为粘弹性熔体离模膨胀从变形角度来讲是口模出口处聚合物熔体横向变形的增大, 但从流体动力学的角度来讲, 这一变形过程可以看作为横向的流动过程, 由于横向的流动过程与挤出的主流动方向垂直, 所以称这种流动为二次流动。由此可见, 粘弹性聚合物熔体离模膨胀程度应与口模出口处这种二次流动的强弱有关, 向外的二次流动越强, 则粘弹性聚合物熔体离模膨胀应越大。而粘弹性熔体的二次流动是由其法向应力差驱动产生的, 研究表明粘弹性熔体的法向应力差越大, 则其二次流动越强^[3-4]。由此可见, 粘弹性熔体离模膨胀随口模进口流量增加而增大的机理可能是由于口模进口流量增加导致其法向应力差增大, 从而引起口模出口处熔体的二次流动增强, 最终导致粘弹性熔体离模膨胀随口模进口流量的增加而增大。为了验证这一推论的正确性, 笔者就口模进口流量对法向应力差和口模出口处熔体的二次流动强度的影响进行了研究, 结果如图 4(图中的“Z 坐标”代表挤出方向, 以模具出口端

面中心点为原点,以挤出方向为正向)、图5所示。由图4、图5可知,法向应力差和口模出口处熔体的二次流动强度均随口模进口流量的增加而增大。由此可见,粘弹性聚合物熔体离模膨胀是由口模出口处二次流动引起的,且随着口模出口处二次流动强度的增加而增加。

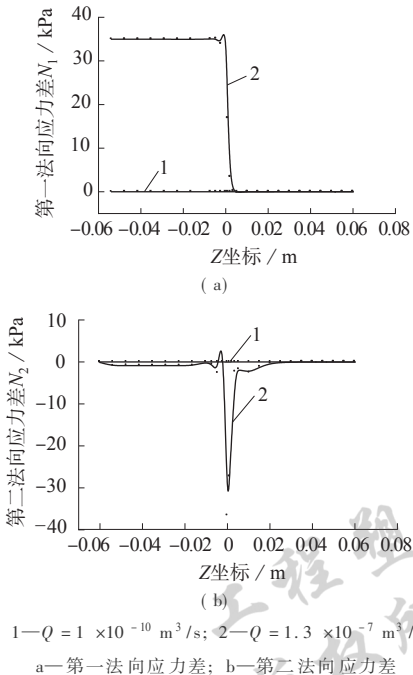


图4 口模进口流量对法向应力差的影响

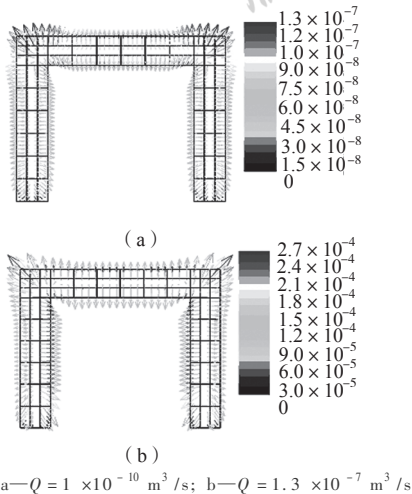


图5 口模进口流量对口模出口处熔体的二次流动强度的影响

2.3 聚合物熔体松弛时间 λ 对异型材离模膨胀和翘曲变形的影响

在进口流量为 $2 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,聚合物熔体松弛时间 λ 对异型材挤出离模膨胀和翘曲变形的三维形貌的影响如图6所示。其离模膨胀率 B 与松弛时间 λ 的关系曲线如图7所示。

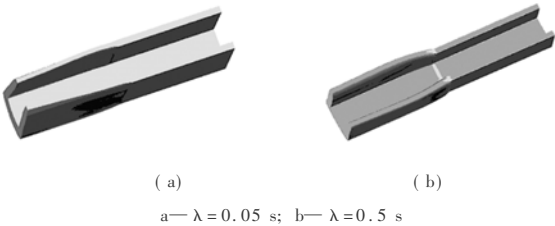


图6 聚合物熔体松弛时间对异型材挤出离模膨胀和翘曲变形的三维形貌的影响

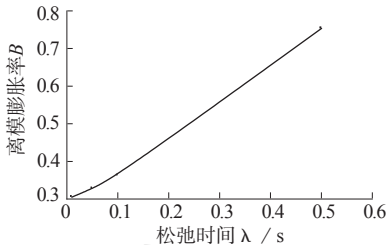


图7 离模膨胀率 B 与松弛时间 λ 的关系曲线

由图6、图7可知,当松弛时间 λ 较小时,两侧壁向内翘曲变形,而随着松弛时间的增加,两侧壁翘曲变形由向内翘曲转为向外翘曲变形,而马鞍型异型材的离模膨胀率 B 随着松弛时间 λ 的增加而增大。

2.4 材料常数 ξ 对异型材离模膨胀和翘曲变形的影响

当进口流量为 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 时,材料常数 ξ 对异型材挤出离模膨胀和翘曲变形的三维形貌的影响如图8所示。其离模膨胀率 B 与材料常数 ξ 的关系曲线如图9所示。

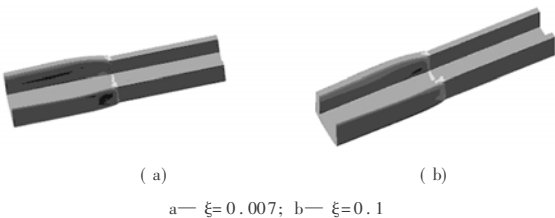


图8 材料常数 ξ 对异型材挤出离模膨胀和翘曲变形的三维形貌的影响

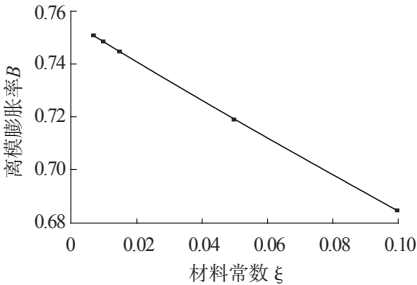


图9 离模膨胀率 B 与材料常数 ξ 的关系曲线

由图8、图9可知,材料常数 ξ 对马鞍型异型材的离模膨胀影响很大,随着材料常数 ξ 的增大,马鞍型异型材的离模膨胀率 B 减小,向内的翘曲变形也

减小。

2.5 粘度比 η 对异型材离模膨胀和翘曲变形的影响

进口流量为 $1 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 其聚合物熔体的粘度比 η 对异型材挤出离模膨胀和翘曲变形的三维形貌的影响如图 10 所示。其离模膨胀率 B 与粘度比 η 的关系曲线如图 11 所示。

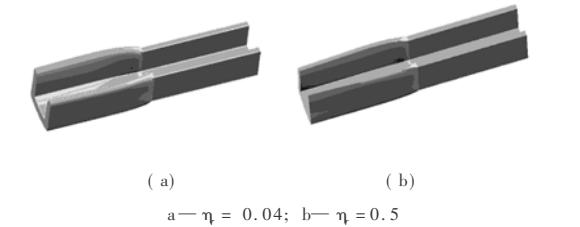


图 10 粘度比 η 对异型材挤出离模膨胀和翘曲变形的三维形貌的影响

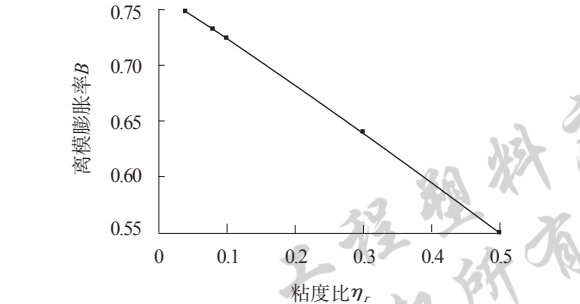


图 11 离模膨胀率 B 与粘度比 η 的关系曲线

由图 10、图 11 可知, 聚合物熔体的粘度比 η 对马鞍型异型材的离模膨胀和翘曲变形影响很大, 随着聚合物熔体的粘度比 η 的增加, 马鞍型异型材的离模膨胀率 B 减小, 向内的翘曲变形却增大。

综上所述, 工艺参数与流变性能参数对马鞍型异型材的离模膨胀和翘曲变形影响规律见表 2。

3 结论

基于 PTT 粘弹性本构模型, 系统对全三维稳态

表 2 工艺参数对马鞍型异型材的离模膨胀和翘曲变形的影响

项 目	进口流量 增大	松弛时间 λ 增大	材料常数 ξ 增大	粘度比 η 增大
离模膨胀	增加	增加	减小	减小
翘曲变形	向外增加	向外增加	向内减小	向内增加

等温马鞍型异型材的挤出成型过程进行了模拟研究。研究表明, 在异型材的挤出成型中, 不但会出现离模膨胀, 而且会出现翘曲变形现象。工艺参数和聚合物粘弹流变性能参数对马鞍型异型材口模挤出成型过程的影响规律为:

- (1) 随着进口流量和聚合物熔体松弛时间 λ 的增加, 马鞍型异型材挤出口模的离模膨胀增大, 而翘曲变形由内向外增加。
- (2) 随着聚合物熔体材料常数 ξ 的增加, 马鞍型异型材挤出口模的离模膨胀减小, 向内的翘曲变形也减小。
- (3) 随着聚合物熔体粘度比 η 的增大, 马鞍型异型材挤出口模的离模膨胀减小, 而向内翘曲变形增大。

参考文献

[1] Gifford W A. Compensating for die swell in the design of profile dies[J]. Polymer Engineering and Science, 2003, 43(10) : 1 557 - 1 665.

[2] Nobrega J M, Camejo O S, Covas J A, et al. Design of calibrators for extruded profiles. part I: modeling the thermal interchanges [J]. Polymer Engineering and Science, 2004, 44(12) : 2 216 - 2 228.

[3] Yue P T, Dooley J, Feng J J. A general criterion for viscoelastic secondary flow in pipes of noncircular cross section[J]. Journal of Rheology, 2008, 52(1) : 315 - 332.

[4] Hashemabadi S H, Etemad S G. Effect of rounded corners on the secondary flow of viscoelastic fluids through non-circular ducts [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2006, 49 (11/12) : 1986 - 1 990.

THREE DIMENSIONAL ISOTHERMAL VISCOELASTIC NUMERICAL SIMULATION
ON THE EXTRUSION MOLDING OF POLYMERIC SADDLE PROFILE

Zhou Guofa, Ji Zhanguo

(School of Environmental Science & Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

ABSTRACT Based on viscoelastic PTT constitutive equation, by means of the full three dimensional isothermal viscoelastic numerical simulation on the extrusion molding process of polymeric saddle profile, the influencing rule of polymeric melt viscoelastic rheological parameters and process parameters on polymeric profile molding process were systematically studied and the influencing mechanism was disclosed. The research results showed that the die swell of polymeric profile was resulted from the secondary flow in the exit of the die, the die swell ratio of polymeric profile increased with the increasing of the secondary flow strength. The die swell of polymeric profile increased with the increasing of inlet volumetric flow rate and relaxation time, but decreased with the increasing of material parameter and viscosity ratio.

KEYWORDS polymeric profile, extrusion process, numerical simulation, die swell, mechanism