

聚合物粘弹流变性能参数对口模挤出胀大的影响^{*}

周国发 黄 潇 胡晨章

(南昌大学环境科学与工程学院,南昌 330031)

摘要 针对聚合物口模挤出成型过程的特点,基于流变学和流体动力学理论,建立了描述其成型过程的三维等温粘弹性理论模型,并通过有限元数值模拟,系统研究了粘弹流变性能参数(松弛时间、粘度和材料常数 α)对口模挤出胀大的影响规律。结果表明,当进口压力一定时,挤出胀大随着粘度的增大而减小,然而当进口流量一定时,粘度对胀大的影响不明显,而挤出胀大随松弛时间的延长而增大;并通过理论分析,揭示了其挤出胀大机理;该数值模拟研究结果与传统的挤出实验研究结论相吻合。

关键词 挤出成型 数值模拟 挤出胀大 粘弹性

热塑性聚合物所用的主要加工方法包括挤出、注射、吹塑、压延成型等。挤出成型过程是强制熔融的聚合物通过口模使其成型的一种方法。当聚合物熔体经过挤出口模在未受到足够的拉伸时,一般表现为挤出物的截面面积大于挤出口模的出口截面面积,这种现象称为挤出胀大^[1-2]。挤出胀大比为挤出物最终膨胀截面面积和口模截面面积之差与口模截面面积的比值。挤出胀大现象是聚合物熔体挤出成型共有的特性,由于缺乏对挤出成型挤出胀大规律和预测方法的研究,人们不能直接根据挤出制品的形状设计相应的挤出口模,目前主要采用传统经验试差方法^[3]设计挤出口模。而采用经验试差方法设计挤出口模则会耗费大量的时间和资金。笔者基于粘弹性流体动力学理论和流变学理论,建立了聚合物口模挤出成型的三维等温粘弹性理论模型及其相适应的高效有限元数值算法,并通过数值模拟,系统研究了聚合物粘弹流变性能参数(松弛时间、粘度和材料常数 α)对挤出成型挤出胀大的影响规律,并通过理论分析,揭示了其影响机理。

1 理论模型的建立

1.1 理论模型

根据异型材挤出成型过程的特点,可对粘弹性熔体的挤出成型作如下基本假设:①挤出成型过程为粘弹性聚合物熔体的三维等温稳定流动过程;②成型过程中熔体不可压缩,忽略成型过程中熔体的重力;③熔体在口模中的流动为层流,且无滑移,忽略界面张力;④熔体与模壁之间粘着无滑移;⑤熔体满足 Giesekus 粘弹性本构模型^[4]。基于上述假设,得到聚合物成型加工的控制方程。

(1) 连续性方程:

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

式中: u ——速度矢量。

(2) 运动方程(动量方程):

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

$$\sigma = -pI + T$$

式中: σ ——应力张量;

p ——压力;

I ——单位矩阵;

T ——偏应力张量。

(3) 本构方程(Giesekus 粘弹性本构模型):

$$(I + \alpha \lambda \pi / \eta) \cdot \pi + \lambda \pi = 2 \eta D \quad (3)$$

式中: α ——表示稳态拉伸粘性流动的材料常数;

λ ——松弛时间, s;

π ——聚合物粘弹偏应力张量;

η ——聚合物熔体的非牛顿粘度, Pa · s;

π ——聚合物粘弹性偏应力张量上随体导数;

D ——应变张量。

1.2 边界条件

由异型材挤出成型特点可知其边界条件为:

(1) 进口边界条件

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

式中: q ——进口处的熔体流动速率;

x ——某计算点。

(2) 模腔内壁边界条件

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

(3) 出口边界条件

$$(T \cdot n) \cdot n = 0, (T \cdot n) \cdot \tau = 0$$

$$x \in \Gamma_{outlet} \quad (6)$$

^{*} 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

收稿日期:2008-02-10

(4) 自由膨胀表面

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

上述各式中, Γ_{inlet} 、 Γ_{wall} 、 Γ_{outlet} 、 Γ_{free} 分别表示模具进口、模壁、模具出口和自由膨胀面边界; n 、 τ 分别表示单位法向矢量和切向矢量。

2 粘弹流变性能参数对口模挤出胀大的影响

采用 60 mm×30 mm×30 mm(长×宽×高)的长方体挤出口模对挤出熔体的胀大情况进行模拟分析。为了减少计算工作量,根据对称性,取其 1/4 进行有限元网格划分,有限元几何离散模型如图 1 所示。整个模型采用正六面体有限元单元进行网格划分。模拟材料采用低密度聚乙烯(LDPE),进口流量为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$,出口压力为大气压。材料性能参数见表 1。

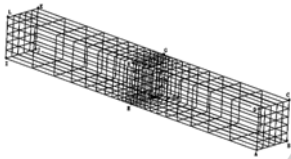


图 1 挤出口模有限元网格模型

表 1 LDPE 材料性能参数表

粘度 $\eta/\text{kPa} \cdot \text{s}$	松弛时间 λ/s	材料常数 α	两种粘度比例系数 η
26	0.16	0.08	0

2.1 粘度对口模挤出胀大的影响

2.1.1 进口流量恒定

粘度是材料的一个重要的物性参数,它反映了材料的流变性能。当采用流量控制(流量为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$)模拟时,发现改变 LDPE 的粘度对挤出胀大的影响不是很明显。当粘度为 $39 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 时,其三维挤出胀大形貌如图 2 所示。图 3 是粘度对口模挤出胀大的影响模拟研究结果。

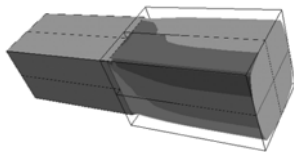


图 2 粘度为 $39 \text{ kPa} \cdot \text{s}$ 时的三维挤出胀大形貌

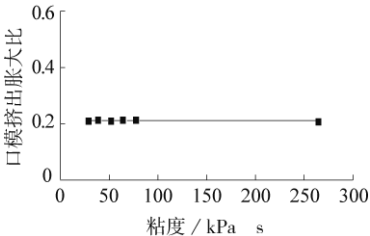
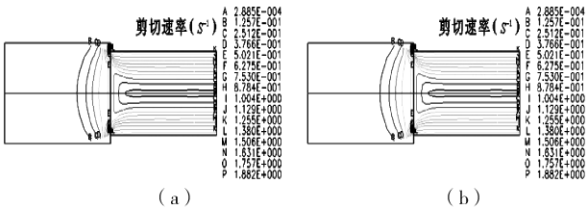


图 3 流量控制下粘度对口模挤出胀大的影响

由图 3 可知,在进口流量恒定时,随着熔体粘度的增大($26 \sim 260 \text{ kPa} \cdot \text{s}$),胀大比却保持一个恒定值。这说明粘度不是影响挤出胀大的本质原因,即使粘度对挤出胀大有影响,那也是通过改变过程中其它的属性而达到的。

图 4 为不同粘度时的剪切速率等值线分布图。由图 4 可知,不同粘度下的剪切速率分布没有变化,从而反映粘度对剪切速率的分布没有影响。



a—粘度为 $26 \text{ kPa} \cdot \text{s}$; b—粘度为 $260 \text{ kPa} \cdot \text{s}$

图 4 流量控制下不同粘度对剪切速率分布的影响

在挤出成型过程中,法向应力差是个非常重要的概念。研究表明,法向应力差的存在是造成口模挤出胀大的主要原因之一。在进口流量恒定情况下,粘度对法向应力差沿口模挤出方向的分布影响规律如图 5 所示(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,下同)。由图 5 可知,随着粘度的增大,法向应力差不断增大。按传统观点,法向应力差是造成口模挤出胀大的主要原因,挤出胀大程度应随着法向应力差的增大而增加。在挤出速率恒定的条件下,这一传统观点与笔者的研究结果相矛盾,法向应力差是否为口模挤出胀大的主要原因还有待于进一步研究。

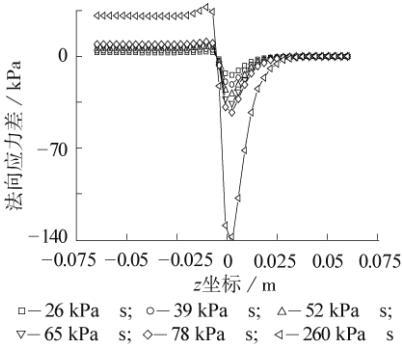


图 5 流量控制下粘度对沿挤出方向的法向应力差分布的影响

2.1.2 进口压力恒定

保持进口压力恒定为 1.01 MPa ,人为改变 LDPE 的粘度,而其它条件与表 1 相同,研究在进口压力恒定条件下 LDPE 熔体粘度变化对口模挤出胀大、剪切速率及法向应力差的影响,模拟结果见图 6~图 8。由图 6 可知,在进口压力恒定的条件下,口

模挤出胀大随粘度的增大而减小。从图 7、图 8 可以看出, 剪切速率和法向应力差均随粘度的增大而减小。这与其它研究者得出的结果是一致的^[5-6]。这是由于进口压力不变时, 因粘度增大使阻力增加、速度下降, 从而导致剪切速率下降, 法向应力差也随之下降, 口模挤出胀大减小。

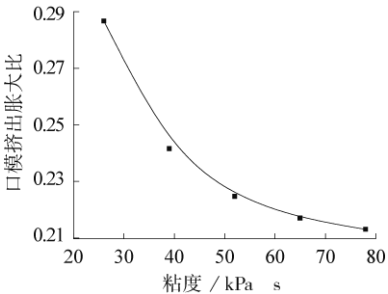


图 6 压力恒定时粘度对口模挤出胀大的影响

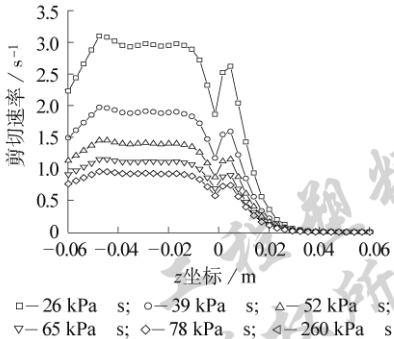


图 7 压力恒定时不同粘度对剪切速率分布的影响

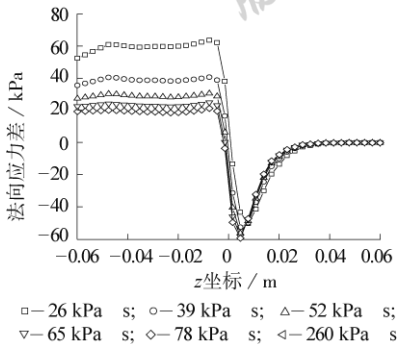


图 8 压力恒定时不同粘度对沿挤出方向法向应力差分布的影响

2.2 松弛时间对口模挤出胀大的影响

松弛时间是表征聚合物弹性强弱的一个性能参数。图 9 ~图 11 示出松弛时间对口模挤出胀大的影响。由图 9 ~图 11 可知, 随着松弛时间的延长, 口模挤出胀大和法向应力差增大, 剪切速率减小。这是由于在其它成型条件不变时, 松弛时间越长, LDPE 的弹性就越强, 成型时其内应力会越大所致。

2.3 材料常数 α 对口模挤出胀大的影响

材料常数 α 与口模挤出胀大、法向应力差、剪切速率的关系曲线见图 12 ~图 14。

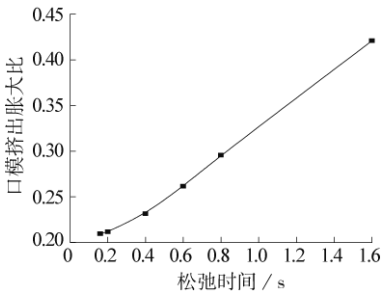


图 9 松弛时间与口模挤出胀大比的关系曲线

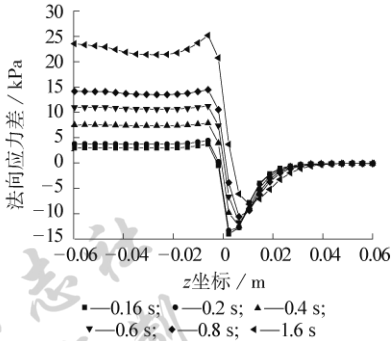


图 10 松弛时间与法向应力差分布的关系曲线

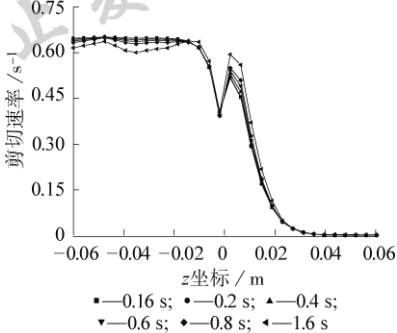


图 11 松弛时间与剪切速率分布的关系曲线

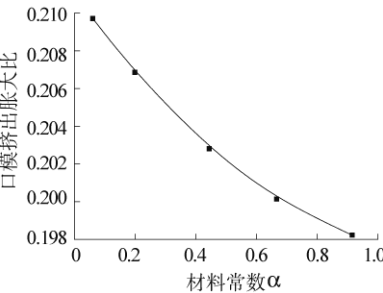


图 12 材料常数 α 与口模挤出胀大比的关系曲线

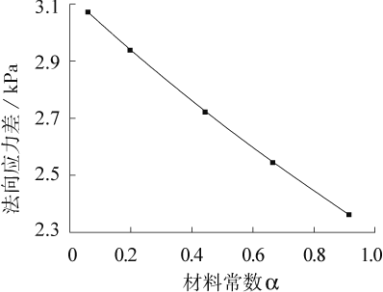
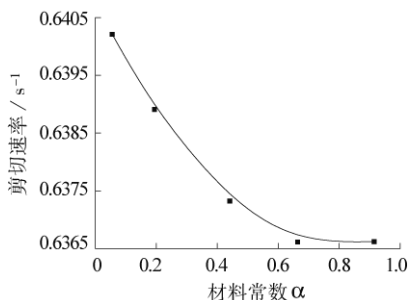


图 13 材料常数 α 与法向应力差的关系曲线

图14 材料常数 α 与剪切速率分布的关系曲线

由图12~图14可知,挤出胀大、法向应力差和剪切速率均随材料常数 α 的增大而减小。因此选择材料常数 α 大的材料有利于减小挤出胀大。

3 结论

(1) 挤出过程中存在的剪切速率和法向应力差是产生口模挤出胀大的重要因素,一般来讲,法向应力差越大,则口模挤出胀大就越大。在进口流量保持恒定时,尽管法向应力差随着粘度的增加而增大,然而粘度对挤出胀大的影响不明显,其机理有待于进一步研究。

(2) 进口压力保持恒定时,法向应力差随着粘度的增加而减小,导致挤出胀大随着粘度的增大而

减小。

(3) 流量不变的情况下,法向应力差随着粘度的增加而增大,导致挤出胀大随松弛时间的延长而增大。

(4) 法向应力差随着材料常数 α 的增大而减小,导致挤出胀大随着材料常数 α 的增大而减小。

参考文献

- [1] 许佩弦.高聚物流变学及其应用[M].北京:化学工业出版社出版,2003:63-77.
- [2] Bin Yang. Flow modeling and stability analysis of viscoelastic flows using the finite element method[D]. American: Washington University, 2001.
- [3] 胡晨章,周国发,谭志洪,等.气辅口模完全滑移挤出成型过程的三维等温粘弹性数值模拟研究[J].中国塑料,2005,19(1):48-52.
- [4] 张效迅.聚合物多相分层流动成型界面不稳定的机理研究[D].南昌:南昌大学,2005.
- [5] Henchen M., Zünger H C. Detailed comparison of various FENE dumbbell models[J]. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1997, 68: 17-42.
- [6] Van Heel A P G, Hulsen M A, Van Denbrule B H A A. On the selection of parameters in the FENE-P model[J]. J Non-Newtonian Fluid Mech, 1998, 75: 253-271.

INFLUENCE OF THE POLYMER VISCOELASTIC PROPERTY PARAMETERS ON THE EXTRUSION DIE SWELL

Zhou Guofa, Huang Xiao, Hu Chenzhang

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

ABSTRACT Based on the characteristic of the die extrusion process and the theories of rheology and hydrokinetics, the three dimension isothermal viscoelastic theoretical model of describing die extrusion process was formulated, and based on the finite element numerical simulation, the influencing rules of viscoelastic property parameters (relaxation time, viscosity and parameter α) on the die swell of polymer die extrusion were systematically studied. Research results showed that when inlet pressure was invariant, die swell decreased with polymer viscosity increasing, but when inlet volumetric flow rate was invariant, the influence of polymer viscosity on die swell was inconspicuous, and die swell increased with relaxation time increasing. Moreover, the influencing mechanism of the polymer die swell was disclosed by theoretical analysis and the numerical simulation results were in accordance with conclusions of the traditional extrusion experimental research.

KEYWORDS extrusion process, numerical simulation, die swell, viscoelasticity

欢迎查询有关广告

对于在我刊刊登的所有广告,如读者需要查询更详细的资料或了解情况,请填好《读者查询广告资料服务卡》后寄回或来函。本杂志社将为您提供或转请有关单位提供资料,以满足您的要求。如需购买任何广告单位的材料、设备、仪器及配件等产品,我社将帮助您联系,以保证产品质量,争取优惠价格。欢迎各单位在我刊刊登广告。刊登办法函索即寄。

《工程塑料应用》读者查询广告资料服务卡

No. _____

读者姓名_____单位_____

通讯地址_____电话_____邮政编码_____

欲获得《工程塑料应用》_____年第_____期第_____页_____

广告中有关_____的详细资料。

如空位不够,请另附纸。填好后请寄回。

山东省济南市108信箱杂志社

邮政编码:250031