

用 PSM 模型模拟聚合物熔体的长口模挤出胀大¹⁾

黄树新 江体乾 金 浩

(华东理工大学化工学院, 上海 200237)

摘要 以作者提出的模拟黏弹流体挤出胀大流动的方法为基础, 计算了 IUPAC-LDPE 熔体经过长圆形口模的挤出胀大. 计算结果同文献的报道基本一致, 表明作者提出的方法适于黏弹聚合物熔体的挤出胀大模拟.

关键词 黏弹聚合物熔体, PSM 模型, 挤出胀大, 数值模拟

高分子的结构特点和运动特点赋予聚合物熔体具有复杂的黏弹特性, 聚合物熔体在挤出加工中的胀大现象是熔体具有弹性的表现, 预测聚合物熔体挤出胀大的本构方程要能够准确地反映聚合物熔体的流变特性. PSM 模型能够较准确地描述聚合物熔体的流变特性, Luo 等^[1]和 Barakous 等^[2]曾用该模型模拟过 IUPAC-LDPE 熔体的长圆形口模挤出胀大. 本文采用作者提出的模拟黏弹流体挤出胀大流动的方法^[3]和 PSM 模型同样计算了 IUPAC-LDPE 熔体的挤出胀大, 验证了用作者提出的方法模拟聚合物熔体的挤出胀大现象是可行的.

1 聚合物熔体挤出胀大的数学描述

对聚合物熔体的不可压缩、等温、稳定、蠕动流动, 忽略体积力的影响, 在流动区域 Ω 上, 用 PSM 模型表征的聚合物熔体的挤出胀大流动满足下列控制方程

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$-\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau} = - \int_{-\infty}^t \sum_i \frac{g_i}{\lambda_i} \cdot \exp\left(-\frac{t-t'}{\lambda_i}\right) \cdot \left[a + [b_i I_1 + (1-b_i)I_2 - 3] C^{-1}(t, t') \right] dt' \quad (3)$$

式中 \mathbf{v} 为速度矢量, p 为压力, $\boldsymbol{\tau}$ 为偏应力张量, (g_i, λ_i) 为材料的松弛时间谱, a 、 b_i 为参数, C^{-1} 为 Finger 应变张量, I_1 和 I_2 分别为 Finger 张量和 Cauchy 张量的第一不变量.

2001-07-16 收到第 1 稿, 2001-09-20 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金重点项目 (19632004) 资助.

聚合物熔体经过长毛细管口模挤出的边界条件为: 流道壁面上, 径向速度 v 和轴向速度 u 都为零; 对称轴上, 切向应力为零和 $v = 0$; 达到胀大平衡时的截面上, 法向应力为零和 $v = 0$; 胀大表面上, 法向速度、法向应力和切向应力为零; 入口处是充分发展的 Poiseuille 流动, $v = 0$, 沿轴向的速度分布 $u(r)$ 用数值方法求解.

2 数值计算方法

文献 [3] 中模拟积分型 Maxwell 黏弹流体挤出胀大流动的数值方法在本文中都可以应用, 包括控制方程组的 Galerkin 法离散、速度场和应力场交替求解的 Picard 迭代法、质点轨迹跟踪和应变历史的确定、自由表面的形成以及处理壁面与自由面交点上应力与应变历史的计算方法.

文中采用流率增加格式^[4]计算聚合物熔体的挤出胀大流动, 即先计算低流率下的解, 然后将低流率下的解作为初值计算高流率下的解, 直到计算出设定流率值下的收敛解.

3 数值计算实施

IUPAC-LDPE 的松弛时间谱和拉伸系数谱^[2]列于表 1. PSM 模型中的参数 a 等于 14.38.

表 1 IUPAC-LDPE 熔体 ($T = 150^\circ\text{C}$) 的松弛时间谱和拉伸系数谱

i	λ_i/s	g_i/Pa	b_i
1	10^3	1.29×10^5	0.018
2	10^2	9.48×10^4	0.018
3	10^1	5.86×10^4	0.018
4	10^0	2.67×10^4	0.12
5	10^{-1}	9.8×10^3	0.12
6	10^{-2}	1.89×10^3	0.16
7	10^{-3}	1.80×10^2	0.03
8	10^{-4}	1.00×10^0	0.002

有限元计算区域为: 毛细管流道长度为 $6R$ (R 为流道半径), 出口后挤出物长度为 $16R$. 共 360 个单元, 1213 个节点, 2853 个自由度. 局部网格如图 1 所示.

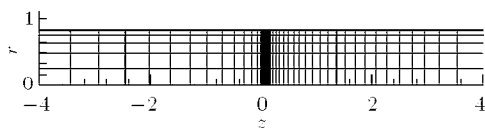


图1 计算区域及网格(局部)

本文计算聚合物熔体挤出胀大的收敛判据为: 当 $\max\{E_{sf}^n\} < 0.005$, 就判定计算结果已经收敛, E_{sf}^n 为自由面上第 n 个节点两次迭代的自由表面位置的相对误差。

4 计算结果及分析

图2画出了本文计算的 IUPAC-LDPE 熔体经过长口模挤出胀大流动的胀大比 ($B = D/D_0$) 随表观剪切速率的变化, 图中同时画出了 Luo^[1] 和 Barakos^[2] 的计算结果。由图可见, Luo 计算的胀大结果比 Barakos 和本文计算的结果低, 这主要在于 Luo 采用的出口后挤出物长度只有半径的4倍, 他计算的挤出胀大结果还没有达到平衡。本文的计算结果同 Barakous 的结果较接近。图3、图4分别为本文计算的在表观剪切率 $10s^{-1}$ 下的等 τ_{rz} 图和等 τ_{zz} 图。

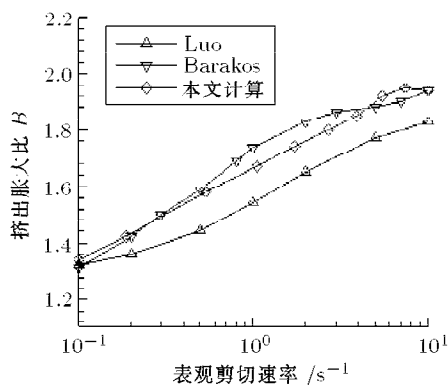
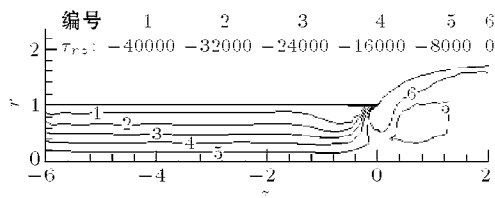
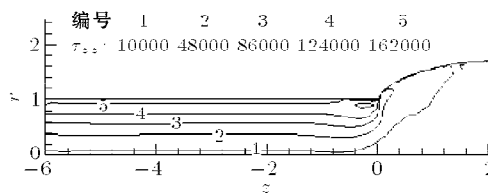


图2 挤出胀大比随表观剪切速率的变化

图3 表观剪切速率 $10s^{-1}$ 下的等 τ_{rz} 图
(τ_{rz} 的单位为 Pa)图4 表观剪切速率 $10s^{-1}$ 下的等 τ_{zz} 图
(τ_{zz} 的单位为 Pa)

5 结论

本文用 PSM 模型计算了 IUPAC-LDPE 熔体经过长圆形口模的挤出胀大, 采用作者提出的方法模拟该聚合物熔体挤出胀大的结果同文献的报道基本一致, 表明本文采用的数值方法适合黏弹聚合物熔体的挤出胀大模拟。

参考文献

- 1 Luo XL, Tanner RI. A streamline element scheme for solving viscoelastic flow problems. Part II—integral constitutive models. *J Non-Newtonian Fluid Mech*, 1986, 22: 61~89
- 2 Barakos G, Mitsoulis E. Numerical simulation of extrusion through orifice dies and prediction of Bagley correction for an IUPAC-LDPE melt. *J Rheol*, 1995, 39(1): 193~209
- 3 黄树新, 江体乾. 积分型 Maxwell 流体挤出胀大的数值模拟. *力学与实践*, 2001, 23(6): 18~21
- 4 Luo XL, Mitsoulis E. An efficient algorithm for strain history tracking in finite element computation of Non-Newtonian fluids with integral constitutive equations. *Int J Numer Meth Fluids*, 1990, 11: 1015~1031

SIMULATION OF LONG DIE SWELL FOR POLYMER MELT USING PSM MODEL

HUANG Shuxin JIANG Tiqian JIN Hao
(East China University of Science and Technology,
Shanghai 200237, China)

Abstract Based on the numerical method for die swell of viscoelastic fluid proposed by the author, a simulation of the long circular die swell for polymer melt with the PSM model is presented in this paper. The results obtained are in good agreement with those reported in the references. It is shown

that the method provides is a suitable tool for calculating the die swell problem for viscoelastic polymer melt.

Key words viscoelastic polymer melt, PSM model, die swell, numerical simulation