

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2013.06.009

壁面滑移对塑料异型材共挤影响的数值模拟研究^{*}

何建涛¹,柳和生¹,黄兴元¹,邓小珍¹,黄益宾²,周长长¹

(1. 南昌大学机电工程学院聚合物成型实验室,南昌 330031; 2. 上饶师范学院物理与电子信息学院,江西上饶 334001)

摘要:在壁面滑移的边界条件下,利用流体有限元分析软件 Polyflow,采用 Giesekus 本构方程,对 L 型塑料异型材进行了三维等温共挤出数值模拟。分析了滑移系数对共挤出胀大和粘性包围、口模出口面的剪切速率场及共挤出口模压力降的影响。研究表明,随着滑移系数的增大,共挤出胀大和粘性包围、口模出口面的最大剪切速率及口模压力降也逐渐增大,且滑移系数介于 10^5 和 10^8 之间时增速最大;滑移系数越小,共挤出制品质量越好。

关键词:共挤出;壁面滑移;挤出胀大;粘性包围;数值模拟

中图分类号:TQ 320.66

文献标识码:A

文章编号:1001-3539(2013)06-0043-04

Numerical Study on Effects of Wall Slip on Special-Shaped Polymer Co-Extrusion

He Jiantao¹, Liu Hesheng¹, Huang Xingyuan¹, Deng Xiaozhen¹, Huang Yibin², Zhou Changchang¹

(1. Polymer Processing Research Lab, School of Mechanical and Electric Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. School of Physics and Electronic Information, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China)

Abstract: Numerical study of three-dimensional isothermal L-shaped polymer co-extrusion under wall slip boundary condition was performed by using Polyflow and Giesekus constitutive equation. The effects of different wall slip coefficients on die swell and viscous encapsulation, shear-rate field at the die exit and pressure drop in the die were discussed. The simulation results show that die swell and viscous encapsulation, maximum shear-rate at the die exit, pressure drop in the die, increase as the wall slip coefficient increase, and the maximal increasing speed appeared when the wall slip coefficient is between 10^5 and 10^8 . The quality of L-shape co-extrusion product is better with the wall slip coefficient decreasing.

Keywords: co-extrusion; wall slip; die swell; viscous encapsulation; numerical simulation

塑料具有质轻、强度高、耐化学药品性好、加工方便、价格便宜等优点,已广泛应用于建筑、家具、交通运输、电器、机械、航空等行业^[1]。由于单一成分的制品往往不能满足经济性、外观、环保等方面的要求,因此共挤技术近几年得到了很大的发展。共挤技术是一种先进的挤出成型方法,其具有不需粘结或贴合、效率高、成本低等优点,因此已广泛应用于复合薄膜、板材、管材、异型材和电缆的生产^[2]。但在共挤出成型过程中也存在挤出胀大、粘性包围、分层界面不稳定及熔体破裂、“鲨鱼皮”等现象^[3-5],这些现象严重阻碍了共挤技术的发展,增加了共挤模具的加工难度和成本。为了解决这些问题,很多辅助挤出技术被应用到共挤技术中,例如振动挤出、润滑挤出、气体辅助挤出等^[6-7]。

笔者通过对 L 型异型材进行三维等温共挤出数值模拟,分析了壁面滑移对共挤出胀大及粘性包围、共挤出口模出口面剪切速率场、共挤出口模压力降的影响。

1 数学模型

L 型共挤几何模型如图 1 所示,该模型为 L 型截面、双层共挤异型材,两层熔体的厚度相等,为节省计算资源,建模时忽略两熔体汇料前的单独流动区域,只考虑共挤出流道区和共挤出胀大区两个区域。MNPQRO 为共挤出口模入口面, GHIJKL 为共挤出口模出口面。

1.1 有限元网格划分

因本模型结构简单,故模型几何造型和网格划分均采用 GAMBIT 来完成,采用八节点全六面体单元划分网格,坐标原点取在 O 点(如图 1)。在口模出口附近适当加密网格,网格划分如图 2 所示。

1.2 材料特性

数值研究中使用能反映聚合物熔体粘弹特性

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51163011)

联系人:柳和生,教授,博士生导师,主要从事聚合物成型设备和理论研究

收稿日期:2013-03-19

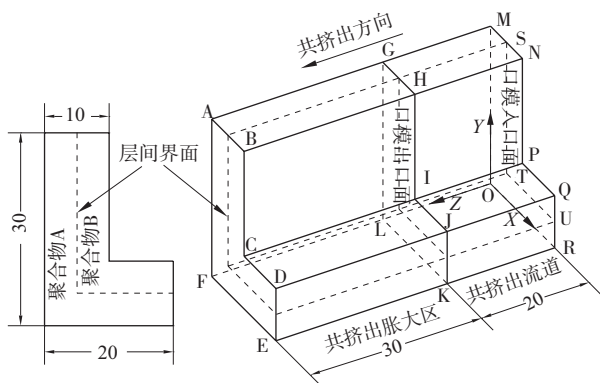


图1 L型共挤几何模型

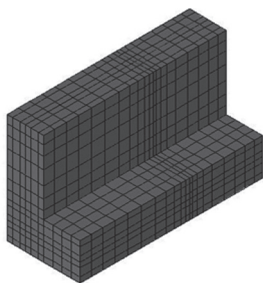


图2 网格划分图

的 Giesekus 本构模型:

$$\tau = \tau_s + \tau_p \quad (1)$$

$$\tau_s = 2\eta_s D \quad (2)$$

$$\tau_p + \lambda \frac{\nabla}{\eta_p} \{\tau_p \cdot \tau_p\} = 2\eta_p D \quad (3)$$

式中: τ ——偏应力张量;

τ_s ——偏应力张量的粘性分量;

τ_p ——偏应力张量的弹性分量, τ_p 上的反三角符号 ∇ 表示上随体导数;

D ——形变速率张量;

λ ——松弛时间;

η_s, η_p ——分别是零切黏度的粘性和弹性分量;

α ——控制第一和第二法向应力差比值的材料参数。

所用材料为陶氏公司生产的聚苯乙烯 (PS), 牌号分别为 Dow Styron 678E (聚合物 A) 和 Dow Styron 472 (聚合物 B), 挤出温度为 220℃。两种聚合物的 Giesekus 本构的具体参数见表 1。

表1 Giesekus 本构参数^[8]

材料	聚合物 A	聚合物 B
$\eta_s / \text{Pa} \cdot \text{s}$	22	56.7
$\eta_p / \text{Pa} \cdot \text{s}$	536	1381.6
λ / s	0.019	0.025
α	0.1	0.3

1.3 边界条件

用 f_n, f_s 分别表示边界面的法向应力和切向应

力, 用 v_n, v_s 分别表示边界面的法向速度和切向速度。

(1) 口模入口处。

MSTURO 和 SNPQUT 分别为聚合物 A 和聚合物 B 的入口, 两种聚合物熔体的体积流率分别为 $Q_A = 1 \text{ cm}^3/\text{s}$, $Q_B = 0.78 \text{ cm}^3/\text{s}$, 此时两熔体入口面单位面积上的体积流率相等。假设入口处的流动为充分发展流。

(2) 口模壁面。

在存在滑移的情况下, 采用简化的 Navier 滑移模型作为壁面的动力学边界条件^[9]。

$$f_s = F_{\text{slip}}(v_{\text{wall}} - v_s) \quad (4)$$

式中: v_{wall} ——壁面切向速度, 取零值;

F_{slip} ——滑移系数。

当口模壁面无滑移时, 采用边界条件 $v_n = 0$, $v_s = 0$ 。

(3) 共挤出自由表面。

自由表面处需要满足速度和应力边界条件, 当不考虑表面张力时, $v_n = 0, f_n = 0, f_s = 0$ 。

(4) 出口条件。

在无外力牵引的情况下, 出口面上熔体的法向应力 $f_n = 0$, 切向速度 $v_s = 0$ 。

(5) 界面条件。

忽略两熔体的表面张力, 不考虑熔体间相对滑移, 界面上的速度场和应力场连续。

2 数值模拟结果及分析

2.1 壁面滑移对共挤出胀大和粘性包围的影响

为了研究壁面滑移对共挤出胀大和粘性包围的影响, 在其它边界条件相同的条件下, 分别模拟了壁面 F_{slip} 为 $0, 10^4, 10^5, 10^6, 10^7, 10^8, 10^9$ 和壁面无滑移共 8 种情况。图 3 为不同 F_{slip} 及无滑移下的共挤出胀大和粘性包围情况, 其中每一 F_{slip} 下对应的左侧视图为口模入口面 (图 1 中 MNPQRO) 和共挤聚合物自由端面 (图 1 中 ABCDEF) 沿 Z 轴视图方向上的截面对比。图 4 为不同 F_{slip} 下共挤出胀大率。无滑移时的挤出胀大率与 F_{slip} 为 10^9 时差不多。由图 3 和图 4 可知, 随着 F_{slip} 的增大, 共挤聚合物的共挤出胀大和粘性包围也逐渐增大。当 $F_{\text{slip}} = 0$ 时, 口模壁面切向应力 $f_s = 0$, 故熔体与口模壁面实现了完全滑移, 此时共挤聚合物没有变形和胀大, 当 F_{slip} 介于 10^5 和 10^8 之间时, 共挤出胀大和粘性包围程度迅速增大, 当 F_{slip} 超过 10^8 时, 共挤出胀大和粘性包

围程度没有明显的增加,并且很接近口模壁面无滑移时的共挤出胀大和粘性包围程度,由此可知,当 F_{slip} 超过 10^8 时,共挤聚合物与口模壁面只有微量的滑移。共挤口模壁面的滑移系数越小,共挤出胀大和粘性包围程度越小,共挤制品的精度越高。

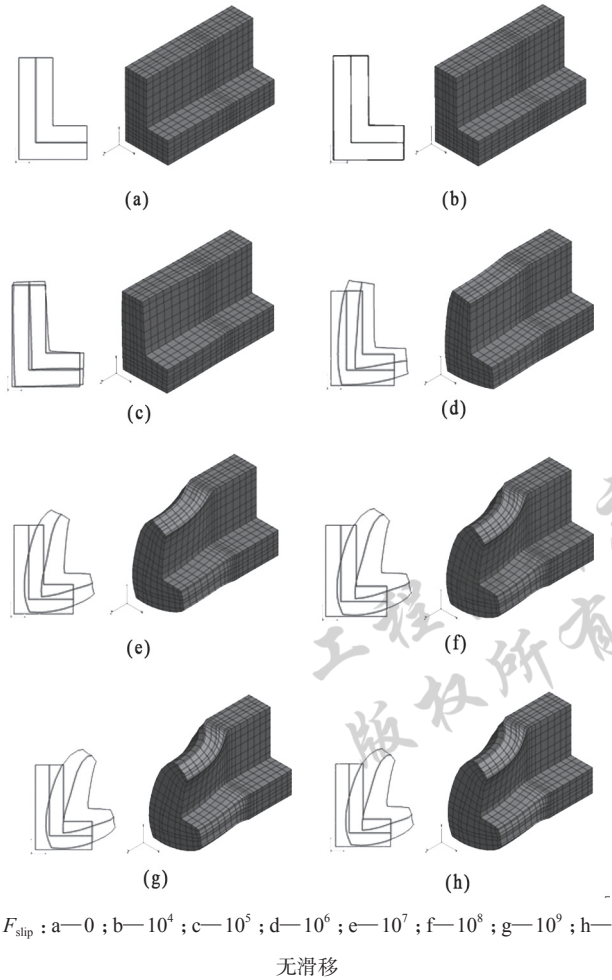


图3 不同 F_{slip} 及无滑移下共挤出胀大和粘性包围

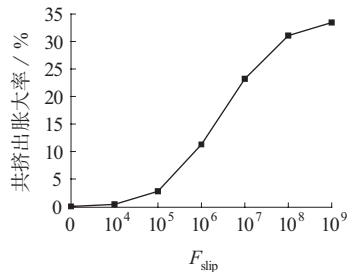


图4 不同 F_{slip} 下共挤出胀大率

2.2 壁面滑移对口模出口面剪切速率场的影响

图5示出不同 F_{slip} 及无滑移下口模出口面(图1中GHIJKL)的剪切速率场,图6为相应的最大剪切速率。由图5可知,口模出口面的剪切速率随着

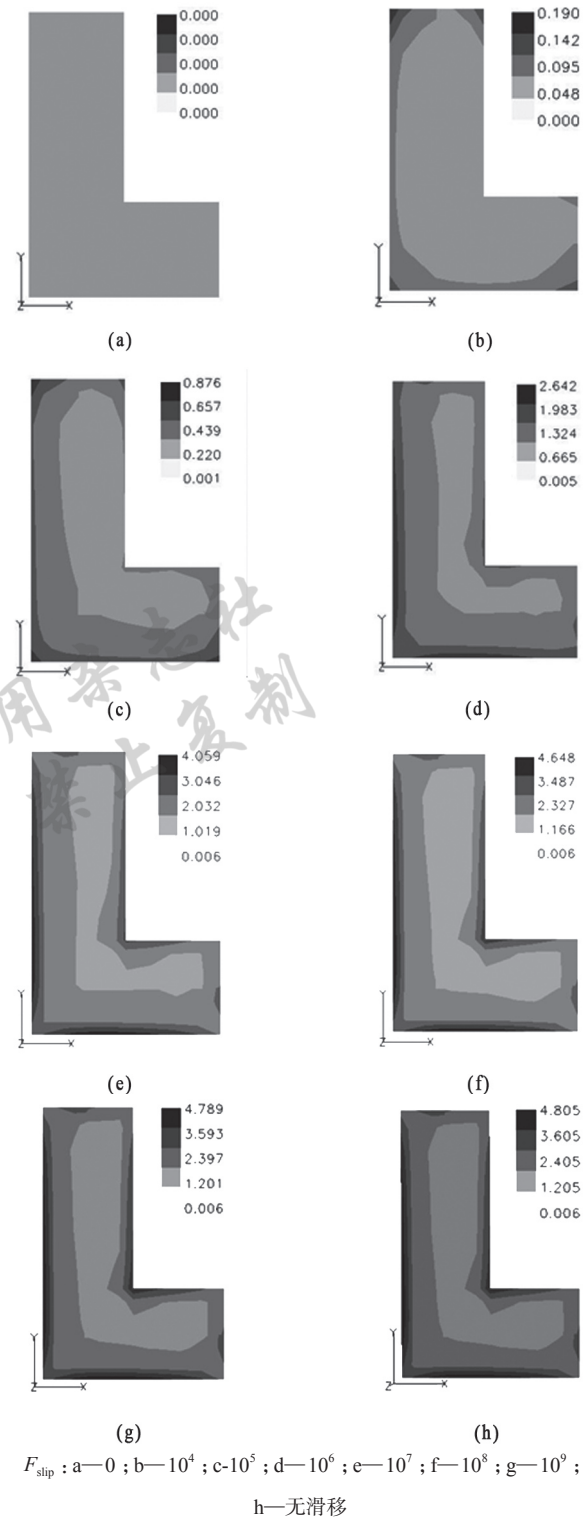


图5 不同 F_{slip} 及无滑移下口模出口面的剪切速率场

F_{slip} 的增加逐渐增大,虽然 F_{slip} 不同,但剪切速率的最大值都是出现在口模壁面附近,因此,在聚合物挤出过程中,若剪切速率超过熔体的临界剪切速率时,会使挤出物表面出现鲨鱼皮、熔体破裂等现象^[10]。当 $F_{\text{slip}}=0$ 时,由于熔体与口模壁面实现了完全滑移,

故口模出口处的剪切速率为零,当 $F_{\text{slip}}=10^4$ 时,口模出口面的剪切速率接近零,此时接近完全滑移状态。由图 6 可看出,当 F_{slip} 介于 10^5 和 10^8 之间时,随着 F_{slip} 的增大,最大剪切速率也迅速增大,当 F_{slip} 超过 10^8 后,最大剪切速率增加幅度很小,且接近无滑移时的最大剪切速率。随着口模壁面滑移系数的减小,口模出口面的最大剪切速率也减小,这将有助于提高共挤出速率,并且能够有效地挤出具有低临界剪切速率的聚合物。对比图 4 和图 6 可以发现其变化规律相同,这是由于剪切速率越大,粘弹性流体的剪切变形越大,在垂直于剪切方向上产生的正应力越大,从而使挤出胀大更严重。

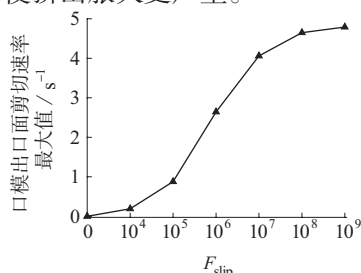


图 6 不同 F_{slip} 下口模出口面的最大剪切速率

2.3 壁面滑移对口模压力降的影响

图 7 为不同 F_{slip} 下共挤出口模压力降曲线图。由图 7 可知,随着 F_{slip} 的增加,压力降也逐渐增加,且 F_{slip} 介于 10^5 和 10^8 之间时增幅最大。 F_{slip} 越大,滑移程度越小,在挤出过程中就需要更大的挤出压力来克服熔体与口模壁面的摩擦阻力。因此,在实际生产中,增加口模内壁的光滑度可以降低挤出压力从而降低能耗。

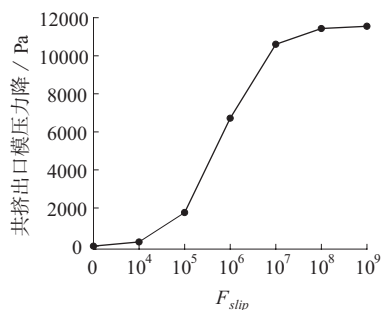


图 7 不同 F_{slip} 下共挤出口模压力降

3 结论

(1) 在口模入口面单位面积上体积流率相同的情况下,黏度低的聚合物会对黏度高的聚合物产生粘性包围现象,从而使共挤异型材的截面发生变形。

(2) 口模出口面的剪切速率最大值出现在口模壁附近,并且随着滑移系数的增加而增大,降低滑移系数可以提高挤出生产率,并能有效地挤出低临界

剪切速率的聚合物。

(3) 在异型材共挤出生产中可以通过提高口模壁面的光滑度和其它辅助挤出技术,如润滑挤出、气辅挤出减小熔体与口模壁面之间的摩擦,从而提高聚合物共挤出的加工精度和节省能耗。

参考文献

- [1] 高峰,李海梅,申长雨. 塑料成型加工实用技术讲座(第七讲)塑料异型材的挤出成型[J]. 工程塑料应用,2003,31(9):58-62.
Gao Feng, Li Haimei, Shen Changyu. Extrusion of plastics profile[J]. Engineering Plastics Application, 2003, 31(9):58-62.
- [2] 周宏志,江波,许澍华. 浅析高聚物共挤出技术[J]. 橡塑技术与装备,2004(9):4-14.
Zhou Hongzhi, Jiang Bo, Xu Shuhua. Simply analyzed high polymer co-extrusion technique[J]. China Rubber / Plastics Technology & Equipment, 2004(9):4-14.
- [3] 黄益宾. 聚合物气体辅助共挤成型的理论和实验研究[D]. 南昌:南昌大学,2011.
Huang Yibin. Theoretical and experimental study on polymer gas-assisted co-extrusion[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [4] Arda D R, Mackley M R. Sharkskin instabilities and the effect of slip from gas-assisted extrusion[J]. Rheol ACTA, 2005, 44(4):352-359.
- [5] Takase M, Kihara S, Funatsu K. Three-dimensional viscoelastic numerical analysis of the encapsulation phenomena in coextrusion[J]. Rheol ACTA, 1998, 37(6):624-634.
- [6] 黄兴元,柳和生,周国发,等. 辅助挤出技术在聚合物挤出加工中的应用[J]. 工程塑料应用,2005,33(3):34-37.
Huang Xingyuan, Liu Hesheng, Zhou Guofa, et al. Application of assisted extrusion technology in polymer extrusion[J]. Engineering Plastics Application, 2005, 33(3):34-37.
- [7] 李跃文. 塑料挤出成型技术研发动态[J]. 塑料科技,2010(11):83-86.
Li Yuewen. Trends of research and development on extrusion moulding technique of plastic[J]. Plastics Science and Technology, 2010(11):83-86.
- [8] Sunwoo K B, Park S J, Lee S J, et al. Three-dimensional viscoelastic simulation of coextrusion process: comparison with experimental data[J]. Rheol Acta, 2002, 41(1-2): 144-153.
- [9] Fluent Inc. Polyflow 3.10 user's guide[M]. Belgium: Fluent Inc, 2003:187-189.
- [10] 徐佩弦. 高聚物流变学及其应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003:78-83.
Xu Peixian. Polymer rheology and its application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 78-83.