

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.12.014

三层共挤成型界面偏移和挤出胀大的影响因素

张广冬, 王林峰, 宋树权

(盐城工学院机械工程学院, 江苏盐城 224051)

摘要: 共挤成型方法在聚合物加工领域有着广泛的应用, 主要用于复合板材、管材、薄膜和异型材的成型。共挤制品层厚的准确性和均匀性对复合材料的性能尤为重要, 其主要影响因素包括复合界面偏移和挤出胀大。针对三层板材共挤成型, 笔者采用有限元分析软件Polyflow对两种聚合物熔体的等温三层共挤成型进行了数值模拟, 其中内层材料为聚乙烯(PE), 外层材料均为热塑性聚氨酯弹性体(TPU)。分析了内外层入口流率比(Q_r)、内外层熔体零剪切黏度比(η_r)以及流道压缩角对界面偏移和挤出胀大的影响规律。结果表明, 在三层共挤成型中, 随着 Q_r 的增大, 成型段和自由射流段的共挤界面向共挤制品的外侧移动, 自由射流段的挤出胀大也随之增大。当 Q_r 为1时, 挤出成型后三层熔体的层厚基本相同, 此时层厚的均匀性最佳。随着 η_r 的增大, 界面偏移和挤出胀大均随之减小。流道压缩角对自由射流段的界面偏移和挤出胀大的影响较小。由于压缩角的存在, 与单材料挤出成型相比, 三层共挤模具的成型段长度应相应的增大, 以保证复合界面的结合强度。

关键词: 共挤成型; 数值模拟; 界面偏移; 挤出胀大; 压缩角

中图分类号: TQ320.5+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)12-0086-06

Influencing Factors of Interface Offset and Die Swell in Three-Layer Co-extrusion

Zhang Guangdong, Wang Linfeng, Song Shuquan

(School of Mechanical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China)

Abstract : The co-extrusion forming method is extensively employed in polymer processing, such as primarily for shaping composite sheets, pipes, films, and specialized profiles. The precision and uniformity of layer thickness in co-extruded products are crucial for composite material performance, the main influencing factors include composite interface offset and extrusion swell. This study focuses on the finite element analysis of isothermal three-layer co-extrusion using Polyflow software. In this simulation, the material of inner layer is polyethylene (PE), and the material of outer layer is thermoplastic polyurethane elastomer (TPU). Several factors affecting the coextrusion process were analyzed, including the inlet volume flow rate of the inner and outer layers (Q_r), zero-shear viscosity ratio of the melt in these layers (η_r), and the compression angle of the flow channel. The results show that, the co-extrusion interface of the molding section and the free jet section moves to the outer side of the co-extruded product with the increase of Q_r in the three-layer co-extrusion molding, and the extrusion swell of the free jet section also increases. Optimal layer thickness uniformity is achieved when the Q_r is 1. Moreover, an increase in the η_r between the inner and outer melts leads to a reduction in interface offset and die swell. The flow channel compression angle minimally influences the interface deflection and die swell in the free jet section. However, due to the compression angle, the length of the die land in the three-layer co-extrusion die should be increased compared to single material extrusion. This adjustment ensures the bonding strength of the composite interface.

Keywords : co-extrusion ; numerical simulation ; interface offset ; die swell ; compression angular

挤出成型作为主要的聚合物成型工艺之一, 广泛应用于板材、管材、薄膜和异型材的制造^[1]。挤出成型是将一种或多种塑料树脂在挤出机中塑化熔融, 将塑料熔体输送至挤出模具中成型, 经过冷却、

定型和切割后得到所需的挤出制品。根据所用材料数量的不同, 挤出成型可以分为单挤成型和共挤成型。单挤成型是将单一种类的材料挤出成所需的形状。这类挤出制品在功能性、外观、物理性能

通信作者: 张广冬, 副教授, 博士, 主要从事高分子成型领域的研究

收稿日期: 2023-10-12

引用格式: 张广冬, 王林峰, 宋树权. 三层共挤成型界面偏移和挤出胀大的影响因素[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(12): 86-91.

Zhang Guangdong, Wang Linfeng, Song Shuquan. Influencing factors of interface offset and die swell in three-layer Co-extrusion[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(12): 86-91.

和成本方面可能存在一些不足。为了克服上述问题,共挤成型通过在挤出过程中将不同的材料组合在一起,从而获得了更广泛的功能性、外观选择和性能调整能力,并一定程度上降低了材料成本^[2]。

共挤成型可用于制造具有复合结构、不同功能区域或多色的产品。然而,共挤成型的工艺控制、材料选择和模具设计也更为复杂。在共挤成型过程中,界面偏移^[3]和挤出胀大^[4]问题对产品的形状、尺寸和精度影响较大^[5],引起了国内外学者的广泛关注。

界面偏移是由于不同聚合物材料流动性的差异性引起的^[6],会对多层共挤制品层厚的准确性和均匀性产生不良影响。界面偏移通常发生于流道内不同熔体交汇处以及模具出口位置^[7]。挤出胀大是指聚合物熔体从模具出口流出后其截面面积或直径有增大的现象,主要是由于高分子材料的弹性记忆效应造成的^[8]。研究发现,在共挤成型中,导致界面偏移和挤出胀大的主要影响因素包括不同聚合物材料的速度比和黏度比^[9-10]、成型段长度、压缩角的大小^[11-12]和工艺参数^[13]。

共挤成型中界面偏移和挤出胀大的影响因素研究具有重要的理论和实际价值。虽然国内外学者对界面偏移和挤出胀大进行了广泛的研究,但大多是针对界面偏移或者挤出胀大单一问题的影响因素进行研究。然而在共挤成型中,界面偏移和挤出胀大问题不是孤立存在,是同时发生且存在相互作用。基于此,笔者采用数值模拟方法,对三层共挤板材成型过程进行仿真,分析入口流率、材料参数和流道压缩角对界面偏移和挤出胀大的影响。

1 三层共挤板材成型数值模拟

1.1 流道几何和网格模型

三层共挤板材成型的流道几何模型如图1所示。流道内层熔体为聚乙烯(PE),具有良好的柔韧性和耐化学腐蚀性。外层两侧熔体为热塑性聚氨酯弹性体(TPU),具有优异的耐磨损性。三层熔体汇合后进入模具成型段,在成型段内初步形成制品的形状,从模具出口离开后发生挤出胀大。

由于流道几何模型的对称性,为了适当减少计算量,采用1/2流道模型建立有限元模型并对其进行网格划分。该模型由1 255个节点和1 080个单元组成,如图2所示。

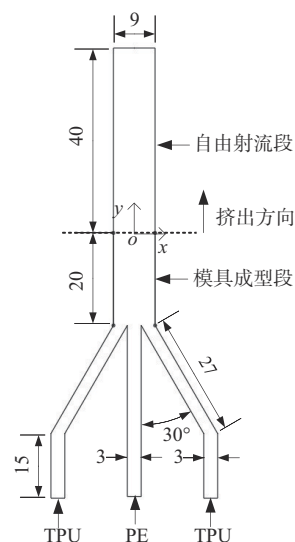


图1 三层共挤板材成型的流道几何模型(单位:mm)

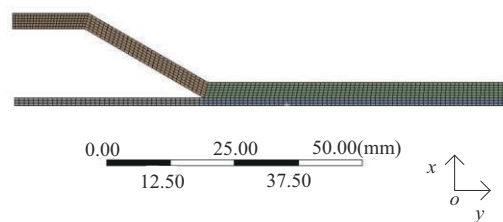


图2 三层共挤板材成型的网格模型

1.2 本构方程

根据熔体流动特点,选择Bird-Carreau黏度模型,如式(1)所示,对熔体的流变性能进行表征。Bird-Carreau本构方程^[14]中剪切黏度(η)和剪切速率($\dot{\gamma}$)的关系为

$$\eta = \eta_0 [1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}} \quad (1)$$

式中: η_0 为零剪切黏度,单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; λ 为松弛时间,单位 s ; n 为非牛顿指数; $\dot{\gamma}$ 为熔体剪切速率,单位 s^{-1} 。

本研究使用的PE和TPU熔体的Bird-Carreau模型参数见表1^[15]。

表1 材料参数

材料	$\eta_0/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	λ/s	n
PE	2 100	0.7	0.54
TPU	3 300	0.05	0.373

1.3 边界条件设置

有限元模型的边界条件如图3所示,其中包括入口、出口、壁面、运动界面、自由面 and 对称面边界条件^[16-17]。边界条件中用 v_s 、 v_n 、 f_s 和 f_n 分别表示边界条件中的切向速度、法向速度、切向应力和法向应力。

(1)壁面边界条件。流道壁面采用壁面无滑移

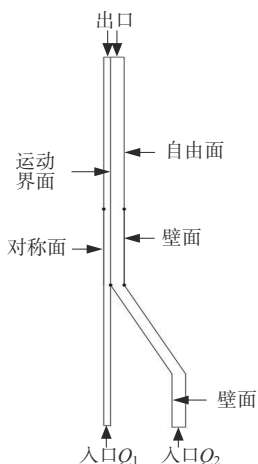


图3 有限元模型的边界条件

假设,即 $v_n = v_s = 0$ 。

(2)入口边界条件。内层入口流率 Q_1 和外层入口流率 Q_2 均为 $7\,000\text{ mm}^3/\text{s}$ 。在分析时采用了1/2几何模型,内层入口流率输入值为 Q_1 的1/2。

(3)出口边界条件。无牵引力作用,即 $f_n = f_s = 0$ 。

(4)运动界面。采用Polyflow设置中的“interface”边界条件,位置未知。

(5)自由面边界条件。自由面上法向力为零,法向速度为零,即 $f_n = 0, v_n = 0$ 。

(6)对称面边界条件。对称面上切向力为零,法向速度为零,即 $f_s = 0, v_n = 0$ 。

1.4 三层共挤成型分析结果

三层共挤成型中,模具出口处外层熔体发生了挤出胀大,材料汇合区域和模具出口处发生了材料界面产生偏移,如图4所示。内、外层熔体均以 186.65 mm/s 的平均速度流入模具成型段中,当内、外层熔体交汇时,共挤界面向内侧偏移。此时,内层熔体的最大速度增大至 362.89 mm/s ,而外层熔体

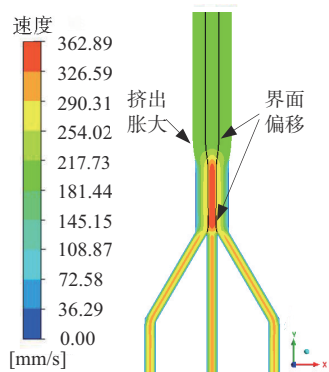


图4 三层共挤成型速度分布云图

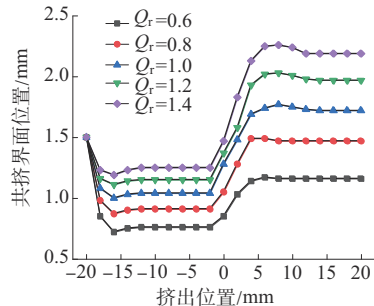
的速度则有所降低。当熔体从模具出口离开后,共挤界面向外侧偏移,同时外层熔体发生了挤出胀大。此时,内、外层熔体的平均速度均逐渐降低至 202.88 mm/s 。

为了更好地描述共挤界面偏移和挤出胀大情况,界面位置的初始值为 1.5 mm ,三层熔体通过各自的流道流入模具成型段时,界面位置可能发生偏移。当共挤界面位置小于 1.5 mm 时表示共挤界面向内层熔体偏移,当共挤界面位置大于 1.5 mm 时表示向外层偏移。同样的,将挤出胀大(外层熔体的外表面)初始位置为 4.5 mm ,外层熔体从模具成型段挤出到自由射流段时,外层熔体发生挤出胀大。

2 结果与讨论

2.1 入口流率比对界面偏移和挤出胀大的影响

入口流率比 Q_r 为内、外层入口流率之比,即 $Q_r = Q_1/Q_2$,其中 Q_1 为内层入口流率, Q_2 为外层入口流率。将外层入口流率 Q_2 设置为定值($7\,000\text{ mm}^3/\text{s}$),入口流率比 Q_r 分别取 $1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6$,分析入口流率比对界面偏移的影响,结果如图5所示。模具出口位置处,挤出位置取值为 0 mm 。

图5 入口流率比 Q_r 对共挤界面的影响

由图5可知,当内、外层熔体汇入模具成型段中,共挤界面向内侧偏移。随着入口流率比 Q_r 的增大,成型段的共挤界面的偏移量逐渐减小。当入口流率比 Q_r 取最大值(1.4)时,共挤界面由 1.5 mm 向内侧偏移至 1.25 mm ,偏移量为 -0.25 mm ,共挤界面仍向内侧偏移,其原因是流道压缩角的存在。

当共挤熔体从模具出口离开后,自由射流段的共挤界面向外侧偏移,在距离模具出口 10 mm 左右时共挤界面均不再发生偏移。随着 Q_r 的增大,自由射流段的共挤界面的偏移量逐渐增大。当 Q_r 为 0.8 时,共挤界面的界面偏移量为 0 。当 $Q_r > 0.8$ 时,界面偏移量为正值,反之为负值。

Q_r 分别取 $1.4, 1.2, 1.0, 0.8, 0.6$ 时, Q_r 对挤出胀

大的影响曲线如图6所示。

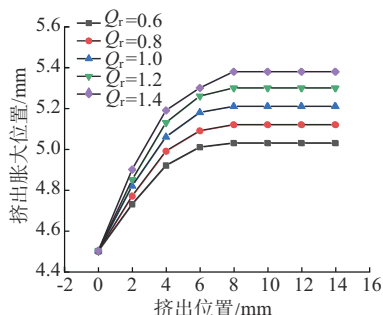


图6 入口流率比 Q_r 对挤出胀大的影响

由图6可知,外层熔体从模具出口离开后发生了挤出胀大。在距离模具出口8 mm左右时,外层熔体均不再发生胀大,直至出口40 mm处外层熔体的胀大量保持不变。当 $Q_r = 0.6$ 时,熔体挤出后由4.5 mm胀大至5.03 mm,胀大量为0.53 mm。当 $Q_r = 1.4$ 时,熔体挤出后由4.5 mm胀大至5.38 mm,胀大量为0.88 mm。由此可见,随着 Q_r 的增大,挤出胀大也随之增大。

在多层共挤成型中,界面偏移和挤出胀大对各层材料厚度的准确性和均匀性有着一定的影响。层厚的准确性可以通过后续的牵引拉伸予以调整,而层厚的均匀性则需要在成型过程中加以保证。本研究中,层厚比 X_r 定义为外、内层厚度之比,即 $X_r = X_2/X_1$,其中 X_2 为外层厚度, X_1 为内层厚度。由于有限元模型取1/2几何模型,当层厚比 X_r 为2时,内外层厚度相同,层厚的均匀性最佳。 Q_r 分别取1.4,1.2,1.0,0.8,0.6时,分析了 Q_r 对层厚比的影响,如图7所示。

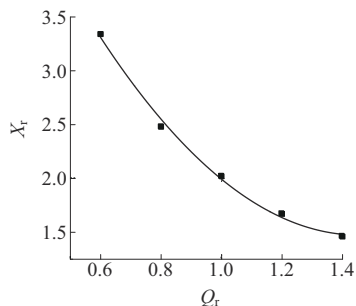


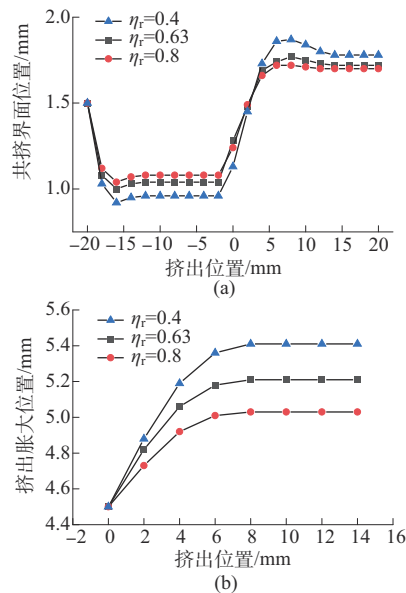
图7 流率比 Q_r 对层厚比 X_r 的影响

由图7可知, X_r 随着 Q_r 的增大而逐渐减小。当 Q_r 为1时, X_r 约为2,此时层厚的均匀性最佳。也就是说,对于三层共挤成型,当内、外层的入口流率相等时,挤出制品的层厚最为均匀。

2.2 零剪切黏度比对界面偏移和挤出胀大的影响

零剪切黏度是指在剪切速率非常低(接近零)时

的流体黏度。它表示在没有剪切应力作用下,流体内部的阻力或黏性。零剪切黏度比 η_r 为内、外层熔体零剪切黏度之比,即 $\eta_r = \eta_1/\eta_2$,其中 η_1 为内层熔体(PE)的零剪切黏度, η_2 为外层熔体(TPU)的零剪切黏度。将 η_2 设置为定值(3 300 Pa·s), η_r 分别取0.4,0.63,0.8,分析零剪切黏度比对界面偏移和挤出胀大的影响,结果如图8所示。两种材料的初始 η_r 为0.63。



a— η_r 对界面偏移的影响;b— η_r 对挤出胀大的影响

图8 η_r 对界面偏移和挤出胀大的影响

由图8a可知,当内、外层熔体汇入模具成型段中,成型段的共挤界面向内侧偏移。当共挤熔体从模具出口离开后,自由射流段的共挤界面向外侧偏移。随着 η_r 的增大,成型段和自由射流段的共挤界面的偏移量均逐渐减小。产生该现象的主要原因是共挤成型中的黏性包围^[18]。内外层熔体的黏度比对于共挤界面有着重要的影响。当黏度比较高时,内层熔体更加黏稠,会将共挤界面推向共挤结构的中心。相反,较低的黏度比会导致共挤界面更靠近共挤制品的表面。

由图8b可知,外层熔体从模具出口离开后发生了挤出胀大。随着 η_r 的增大,挤出胀大随之减小。产生该现象的主要原因仍然是共挤成型中的黏性包围。当黏度比较高时,内层熔体更加黏稠,其流动性变差从而抑制了挤出制品的胀大。反之,较低的黏度比会导致更为显著的挤出胀大。

在三层共挤板材成型中, η_r 取定值0.63,内、外层熔体零剪切黏度同比增大或减小,界面偏移和挤

出胀大的变化较为轻微,可以忽略其影响。

2.3 流道压缩角对界面偏移和挤出胀大的影响

三层共挤成型过程中, Q_r 设为1,流道压缩角 θ 分别取 30° 、 60° 和 80° ,分析流道压缩角对界面偏移和挤出胀大的影响,如图9所示。

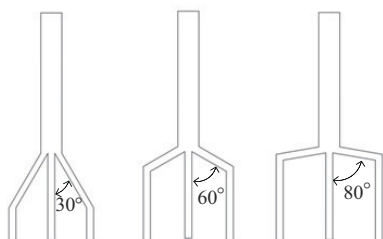


图9 不同压缩角的流道模型

流道压缩角对界面偏移的影响曲线如图10所示。由图10可知,当内、外层熔体汇入模具成型段中,成型段的共挤界面向内侧偏移至1.04 mm。当共挤熔体从模具出口离开后,自由射流段的共挤界面向外侧偏移至1.73 mm。在成型段入口汇流区(-20, -12.5 mm),共挤界面的偏移量先增大后减小。产生该现象的主要原因是,外层熔体汇入成型段时具有和挤出方向垂直的速度分量,从而推动共挤界面产生偏移。流道压缩角越大,偏移量也越大。然而,后续在模具成型段中内、外层熔体的流动逐渐趋于一致,偏移量随之减小。由于压缩角的存在,相比单挤成型,三层共挤模具的成型段长度应相应的增大,以保证汇流区域的长度足够,从而获得良好的界面结合强度。

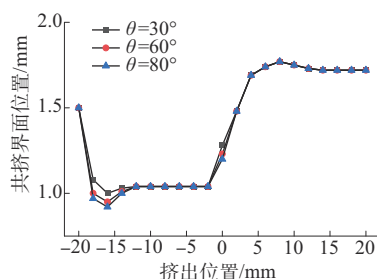


图10 压缩角 θ 对界面偏移的影响

流道压缩角对挤出胀大的影响曲线如图11所示。外层熔体从模具出口离开后发生了挤出胀大,熔体挤出后由初始值4.5 mm胀大至5.19 mm,胀大量为0.69 mm。随着 θ 的增大,外层熔体的挤出胀大未发生显著变化。

3 结论

采用Polyflow软件对PE和TPU两种熔体的等温三层共挤成型进行了数值模拟,分析了入口流率

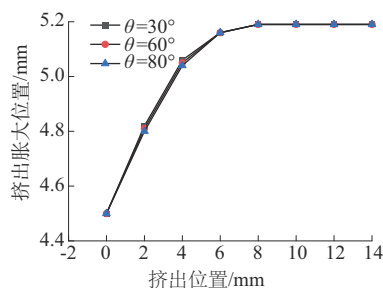


图11 压缩角 θ 对挤出胀大的影响

比 Q_r 、熔体零剪切黏度比 η_r 以及流道压缩角 θ 对界面偏移和挤出胀大的影响。

(1)在三层共挤成型中,随着 Q_r 的增大,成型段和自由射流段的共挤界面向共挤制品的外侧移动,自由射流段的挤出胀大也随之增大。当 Q_r 为1时, X_r 约为2,此时层厚的均匀性最佳。

(2)在三层共挤成型中,随着 η_r 的增大,界面偏移和挤出胀大均随之减小。增大内层零剪切黏度或减小外层零剪切黏度,均会有助于界面偏移和挤出胀大的减小。

(3)流道压缩角对界面偏移和挤出胀大的影响较小。当压缩角为 30° 时,共挤界面最为稳定。由于压缩角的存在,相比单挤成型,三层共挤模具的成型段长度应相应的增大,以保证汇流区域的长度足够,从而获得良好的界面结合强度。

参考文献

- [1] Hyvärinen M, Jabeen R, Kärki T. The modelling of extrusion processes for polymers—A review[J]. *Polymers*, 2020, 12(6). DOI: 10.3390/polym12061306.
- [2] 颜录科,刘荣,周健,等.绿色生态中空塑料建筑模板开发与应用[J]. *工程塑料应用*, 2020, 48(8):56–60.
Yan Luke, Liu Rong, Zhou Jian, et al. Development and application of green ecological hollow plastic building template[J]. *Engineering Plastics Application*, 2020, 48(8):56–60.
- [3] Wang L, Yu G, Zhu Y, et al. Fabrication of polylactide with high-content, ordered, and continuous transcrystallinity via multilayered two-dimensional interface[J]. *Materials & Design*, 2021, 204. DOI: 10.1016/j.matdes.2021.109687.
- [4] 潘建武,罗璇,敬波,等.双层微管挤出胀大的数值分析[J]. *塑料工业*, 2021, 49(5):65–68, 100.
Pan Jianwu, Luo Xuan, Jing Bo, et al. Numerical analysis of extrusion swell of double-layer microtubule[J]. *China Plastics Industry*, 2021, 49(5):65–68, 100.
- [5] Hao X Y, Zhang G D, Deng T. Improved optimization of a coextrusion die with a complex geometry using the coupling inverse design method[J]. *Polymers*, 2023, 15(15). DOI : 10.3390/polym15153310.

- [6] 焦志伟,王立胜,张义成,等. 三层共挤吹膜机头流道流场的数值模拟[J]. 塑料, 2020, 49(5):116–120.
Jiao Zhiwei, Wang Lisheng, Zhang Yicheng, et al. Numerical simulation of three-layer coextrusion blown film[J]. *Plastics*, 2020, 49(5):116–120.
- [7] Lu B, Zhang H, Maazouz A, et al. Interfacial phenomena in multi-micro-/nanolayered polymer coextrusion: A review of fundamental and engineering aspects[J]. *Polymers*, 2021, 13(3). DOI: 10.3390/polym13030417.
- [8] Sharma S, Goswami M, Deb A, et al. Structural deformation/instability of the co-extrudate rubber profiles due to die swell: Experimental and CFD studies with 3D models[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 424. DOI:10.1016/j.cej.2021.130504.
- [9] Agassant J F, Demay Y. Investigation of the polymer coextrusion process: A review[J]. *Polymers*, 2022, 14(7). DOI: 10.3390/polym14071309.
- [10] Deng X Z, Xiao B, Ren Z, et al. Effects of gas-assisted technology on polymer micro coextrusion[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2022, 42(10):986–994.
- [11] 王立胜. 三层共挤吹膜机头流道流场的数值分析与研究[D]. 北京:北京化工大学, 2020.
Wang Lisheng. Numerical analysis and research on flow field of three-layer coextrusion film blown die[D]. Beijing:Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [12] Wang C, Lei M. Numerical simulation of rheological behavior of polymer in three layer co-extrusion process[J]. *AIP Advances*, 2020, 10(7). DOI:10.1063/5.0013373.
- [13] Tang D, Marchesini F H, Cardon L, et al. State of the-art for extrudate swell of molten polymers: From fundamental understanding at molecular scale toward optimal die design at final product scale [J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2020, 305(11). DOI:10.1002/mame.202000340.
- [14] 邓小珍,肖兵,唐刚,等. 定型段长度对聚合物微管精密挤出成型的影响[J]. 塑料, 2018, 47(1):118–121.
Ding Xiaozhen, Xiao Bing, Tang Gang, et al. Effect of shaping length on polymer precision extrusion for micro tube[J]. *Plastics*, 2018, 47(1):118–121.
- [15] 陈智勇. 聚合物三腔微管的挤出机头设计及成型工艺条件研究[D]. 北京:北京化工大学, 2015.
Chen Zhiyong. The design of extrusion die for polymer three-lumen microtubules and the research of molding process conditions[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [16] Luo H, Delshad M, Li Z, et al. Numerical simulation of the impact of polymer rheology on polymer injectivity using a multilevel local grid refinement method[J]. *Petroleum Science*, 2016, 13: 110–125.
- [17] Voeltzel N, Vergne P, Fillot N, et al. Rheology of an ionic liquid with variable Carreau exponent: A full picture by molecular simulation with experimental contribution[J]. *Tribology Letters*, 2016, 64(2). DOI:10.1007/s11249-016-0762-z.
- [18] 黄雪梅,邓小珍. 聚合物熔体层厚对黏性包围影响的数值分析[J]. 塑料工业, 2016, 44(8):37–40, 57.
Huang Xuemei, Deng Xiaozhen. Numerical analysis for effect of polymer melt thickness on encapsulation phenomena[J]. *China Plastics Industry*, 2016, 44(8):37–40, 57.