

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.04.011

U型件开口臂尺寸和熔体入口流率对其拐角处挤出成型的影响

黄雪梅¹, 柳和生^{1,2}, 黄兴元¹, 黄益宾³, 余忠³, 江诗雨¹(1. 南昌大学先进制造学院, 南昌 330031; 2. 华东交通大学机电与车辆工程学院, 南昌 330013;
3. 上饶师范学院物理与电子信息学院, 江西省塑料制备成型重点实验室, 江西上饶 334001)

摘要:应用 Polyflow 软件构建模型; 截取口模内 30 mm、口模外 50 mm 的熔体, 模拟不同入口流率和不同开口臂长对 U 型挤出件拐角处剪切速率和 X 、 Y 、 Z 向流动速度的影响, 应用 Origin 后处理软件对相关数据进行分析。研究表明, U 型件挤出时, U 型件拐角处靠近口模壁的剪切速率远大于中心位置的剪切速率, 入口流率越大或臂长越短, 其对应的剪切速率越大, 在口模内同一流线上的剪切速率基本是定值, 但在口模出口接近 5 mm 处会迅速降低; U 型件靠近口模壁处的 X 、 Y 、 Z 向流动速度和靠近中心线位置的 X 、 Y 向速度, 在口模内起始 25 mm 的距离内为 0, 但在口模出口接近 5 mm 左右, 速度会剧变, 入口流率越大和开口臂长越短, 变化越剧烈, 其中靠近口模壁的最后 5 mm 的 X 向流动速度指向负方向, Y 向流动速度指向正方向; 而靠近截面中心线处最后 5 mm 的速度方向先正后负, 入口流率越大或臂长越短, Y 向流动速度在出口处的变化越剧烈; 靠近 U 型截面中心线的熔体的 Z 向流动速度在口模内起始 25 mm 段距离内较均匀, 在最后 5 mm 开始慢慢降低。

关键词:挤出成型; 开口臂尺寸; U 型件; 拐角

中图分类号: TQ320.66, TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)04-0058-07

Effects of Opening Arm Length of U-Shaped Part and Melt Inlet Flow Rate on Extrusion Molding at Its Corner

Huang Xuemei¹, Liu Hesheng^{1,2}, Huang Xingyuan¹, Huang Yibin³, Yu Zhong³, Jiang Shiyu¹(1. Advanced Manufacturing School, Nanchang University, Nanchang 330031, China;
2. School of Mechatronics and Vehicle Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
3. School of Physics and Electronic Information, Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China)

Abstract: The model was built by using Polyflow software, the melt of 30 mm in the die and 50 mm out of the die was cut off, the effects of different inlet flow rate and different opening arm length on the shear rate and the flow velocity in X , Y and Z directions at the corner of the U-shaped part were simulated. The related data were analyzed by using Origin post-processing software. The results show that the shear rate near the die wall is much higher than that at the center of the die at the corner. The greater the inlet flow rate or the shorter the opening arm length, the greater the corresponding shear rate. The shear rate is constant at the same streamline in the die, but it decreases rapidly at the exit of the die near 5 mm. The flow velocities in X , Y and Z directions of the U-shaped part near the die wall and the velocities in X and Y direction near the center line at the corner are 0 at the beginning starting distance of 25 mm, while at the die exit close to 5 mm, the flow velocity change dramatically. The greater the flow velocity and the shorter the opening arm length, the more dramatic the change. At the last 5 mm near the die wall, the flow velocity in the X direction is negative direction and the flow velocity in the Y direction is positive. While at the last 5 mm near the center line, the flow velocity direction is positive first and then negative, and the larger the flow velocity or the shorter the opening arm length, the more intense the flow velocity change in the Y direction at the exit. The flow velocity in the Z direction near center line is relatively uniform at the beginning starting distance of 25 mm, then it starts to drop off at the back of the 5 mm.

Keywords: extrusion molding; opening arm dimension; U-shaped part; corner

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21664002, 51863014), 江西省重点研发项目 (20203BBE53065)

通信作者: 柳和生, 教授, 主要从事材料成型和加工机电一体化方面的研究

收稿日期: 2022-01-18

引用格式: 黄雪梅, 柳和生, 黄兴元, 等. U 型件开口臂尺寸和熔体入口流率对其拐角处挤出成型的影响 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(4):58-64.

Huang Xuemei, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, et al. Effects of opening arm length of U-shaped part and melt inlet flow rate on extrusion molding at its corner[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(4):58-64.

随着社会的飞速发展,工业用型材的需求越来越多,在人们的生产、生活及科研应用中,各类塑料异型挤出制品的应用也越来越多。但异型材的挤出成型过程比较复杂,难于得到理想的形状和尺寸,近年来,不断有专家学者对异型材挤出开展了不同的研究^[1-6]。柳和生等^[7]基于流率平衡提出了橡胶材质的异型材挤出口模的设计方法。张广冬等^[8]对传统的聚合物挤出成型的模流系数进行了修正,并进行了数值验证,蒋标等^[9]根据硬质聚氯乙烯(PVC-U)熔体特性,引入了拉比诺维茨修正的哈根-伯肃叶公式计算公式,对模头内熔体压力影响因素进行了分析和检测对比。郭凯^[10]针对异型材挤出口模设计效率、自动化程度低,结合UG/Open二次开发、UDO关联技术及MFC技术开发了塑料异型材挤出定型模系统并进行了验证。柳和生等^[11]采用PPT黏弹模型对T异型材挤出口模内黏弹流动进行研究,模拟发现,在口模出口处流动速度、剪切速率、压力、应力分布剧变,应力易集中发生在口模截面的拐角处。杨佳黎等^[12]运用Polyflow逆向挤出功能对T型材变形倾向进行预测,在此基础上对T型材挤出口模进行了设计。Rutgers等^[13]采用线型低密度聚乙烯研究了不同通道几何形状及壁面条件对挤出制品表面不稳定性的影响。Sienz等^[14]利用有限元程序中的微分法进行敏感度分析,并尝试以压力降、平均切向流动速度及热传导等参数为性能指标并进行了模具设计。

综上所述,异型材难于成型在于其形状复杂,有很多拐角,其流动速度很不均匀,受型材拐角处的影响很大。笔者从熔体入口流率和U型件的开口臂尺寸两个方面来探讨其对拐角处挤出成型过程的影响。

1 理论模型

1.1 几何模型和有限元模型

以一种U形件为研究对象,该U型件截面如图1所示,相应的U型件截面参数见表1,其中 B 为U型件宽度, H 为开口臂长, t 为壁厚, Y 为重心距下底面的距离。应用Polyflow软件,以U型件开口方向中轴线为 Y 轴正向,U型件底部最下边缘线指向右为 X 轴正向,以右手笛卡尔直角坐标系确定 Z 轴正向,构建模型,截取口模内30 mm、口模外50 mm的熔体来进行研究。U型件的三维图及网格划分和边界设置如图2所示,各模型对应的网格数见表1。

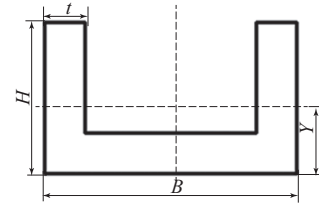
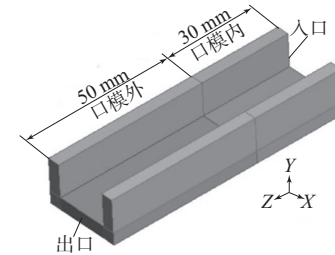
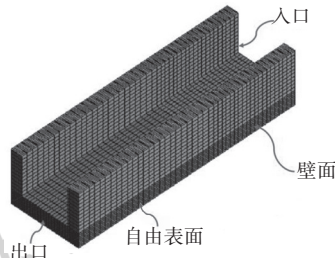


图1 U型件截面



(a)



(b)

a—三维图;b—网格划分

图2 口模内外所截取熔体的三维图及其网格划分

表1 U型件截面参数及其模型对应的网格数

B/mm	H/mm	t/mm	S/mm^2	Y/mm	网格数/个
25	10	4	148	3.6216	16 200
25	15	4	188	5.5106	19 800
25	20	4	228	7.6140	23 400
25	25	4	268	9.8358	27 000

1.2 基本假设和基本方程

假设熔体都是不可压缩的,视整个流动过程为层流,在流动过程中忽略惯性力和质量力的作用。熔体为黏性流体。在假设成立的情况下,聚合物挤出成型过程中的流动满足聚合物流变学中的连续方程、动量方程及能量方程^[15-16],微分黏弹本构模型选用Phan-Thien-Tanner (PTT)本构模型^[17],方程如式(1)所示:

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{(1-\eta_r)\eta_0}\text{tr}(T_1)\right]T_1 + \lambda\left[\left(1-\frac{\varepsilon}{2}\right)\dot{T}_1 + \frac{\varepsilon}{2}\dot{T}_1\right] = \frac{2(1-\eta_r)\eta_0 D}{\lambda} \quad (1)$$

式中: ε ——与熔体拉伸特性有关的材料参数;

λ ——熔体松弛时间;

η_r ——黏度比, $\eta_r=\eta_1/\eta_0$,其中, η_1 为熔体零剪切黏度中的黏性分量;

η_0 ——熔体的零剪切黏度;

T_1 ——偏应力张量;

ζ ——与熔体剪切黏度有关的材料参数;
 T_1^{∇} ——偏应力张量上熔体的上随体导数;
 T_1^{Δ} ——偏应力张量上熔体的下随体导数;
 D ——形变速率张量。

1.3 材料物性参数

在数值模拟中,采用的聚合物是熔体密度为 973 kg/m^3 的聚丙烯 (PP),其它物性参数见表 2。

表 2 PP 物性参数

材料	λ/s	$\eta_0/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	ε	ζ	η_t
PP	0.1	1 500	0.16	0.25	0.111 1

1.4 边界条件设置

熔体入口流率分别为 5×10^{-5} , 5×10^{-4} , 1×10^{-3} , $5\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$ 。

熔体与口模壁采用的是无滑移边界条件,此处与口模壁相邻边界表面上熔体的法向速度和切向速

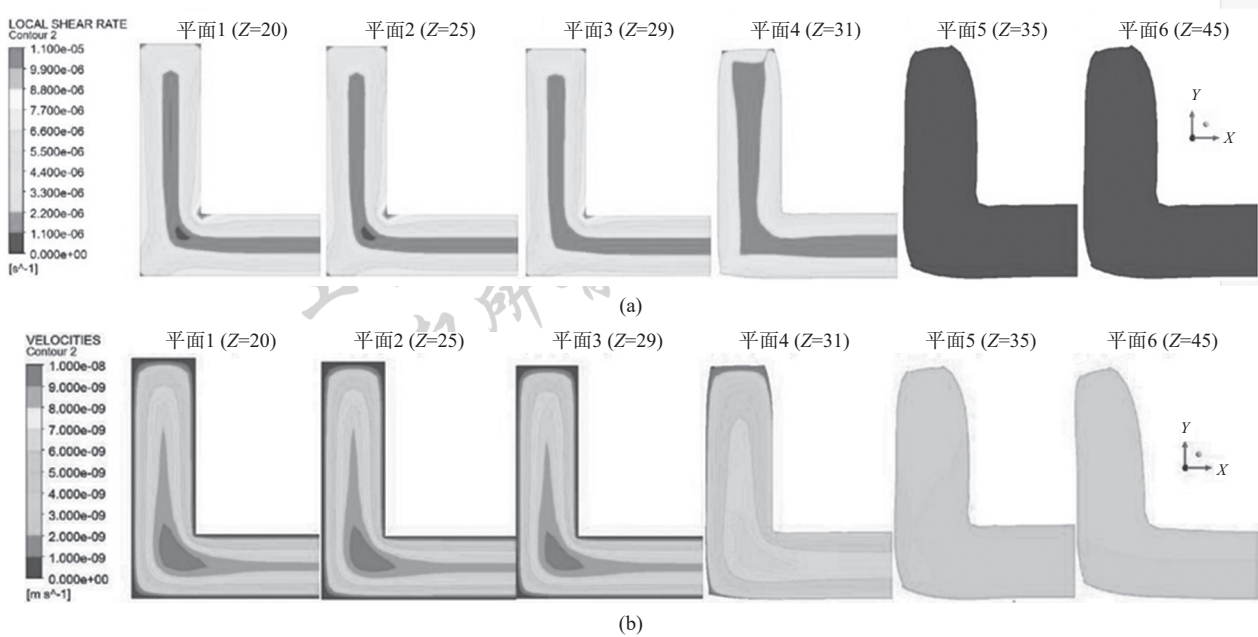
度都为 0。

自由表面设置为 free surface,指定自由表面的入口和出口,采用迎风面算法保持其计算的收敛。

在出口位置,熔体末端未施加任何牵引力,此处与口模壁相邻熔体边界上熔体的法向应力和切向速度都为 0。

2 结果与讨论

先构造 6 个平面,坐标分布为 $Z=20,25,29,31,35,45\text{ mm}$ 。平面 1 在口模内离口模出口 10 mm,平面 2 在口模内离口模出口 5 mm,平面 3 在口模内离口模出口 1 mm,平面 4 在口模外离口模出口 1 mm,平面 5 在口模外离口模出口 5 mm,平面 6 在口模外离口模出口 15 mm,通过模拟得到入口流率为 $1\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$ 时,6 个平面上熔体的剪切速率和流动速度如图 3 所示。



a—剪切速率; b—流动速度

图 3 入口流率为 $1\times 10^{-3}\text{ m}^3$ 时 6 个平面上熔体的剪切速率和流动流动速度

从图 3 可以发现:

(1) 口模出口外凸点拐角处熔体的剪切速率无变化,均为 0。

(2) 在内拐角处熔体的剪切速率变化较大,故建立直线 L_1 ,其坐标为 $(0.008\ 5,0.004,0)$ 和 $(0.008\ 5,0.004,0.03)$,如图 4 所示。

(3) 同样,发现在两个拐角的中间熔体的流动速度最大,故在此位置也设置一条直线 L_2 ,其坐标为 $(0.010\ 5,0.002,0)$ 和 $(0.010\ 5,0.002,0.03)$,如图 4 所示。

为了研究不同入口流率、不同开口臂长对熔体

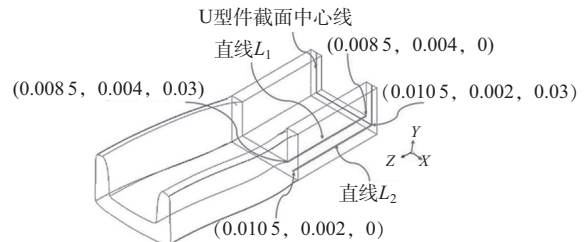


图 4 构建的直线 L_1 和 L_2

流动中剪切速率和流动速度的影响,选用 4 种不同入口流率 (5×10^{-5} , 5×10^{-4} , 1×10^{-3} , $5\times 10^{-3}\text{ m}^3/\text{s}$) 和 4 种不同开口臂长 (见表 1) 分别对 U 型件进行模拟,然后应用 Origin 后处理软件对相关数据进行

分析。

2.1 剪切速率分析

在开口臂长为 15 mm 条件下,入口流率不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率如图 5 所示。从图 5 可以看出,入口流率越大,直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率越大,并且在口模内起始 25 mm 的一段距离内,同一流线上熔体的剪切速率基本是定值,仅在出口前大概 5 mm 后,熔体的剪切速率急剧变小。对比图 5a 和图 5b 可以发现, U 型槽拐角处靠近口模壁的剪切速率远大于中心位置的剪切速率。

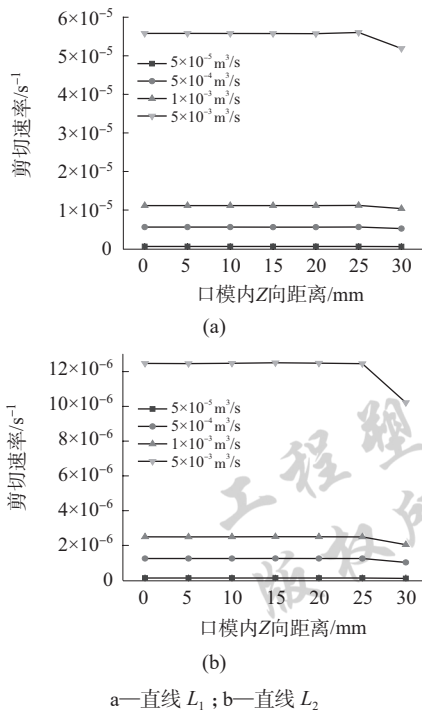


图 5 不同入口流率时直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率 (开口臂长为 15 mm)

在入口流率分别为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 和 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,开口臂长不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率如图 6、图 7 所示。从图 6、图 7 可以看出,在入口流率相同条件下,开口臂长越短,直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率越大。入口流率不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率的变化曲线接近。

2.2 X向流动速度分析

在开口臂长为 15 mm 条件下,入口流率不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的 X 向流动速度如图 8 所示。从图 8a 可看出,直线 L_1 上熔体的 X 向流动速度绝对值在口模出口前约 5 mm 后急剧加大,方向为 X 轴负向,入口流率越大,熔体的 X 向流动速度绝对值也越大,但是入口流率过大时,熔体的 X 向流动速度绝对值不增反降。从图 8b 可看出,在口模内起

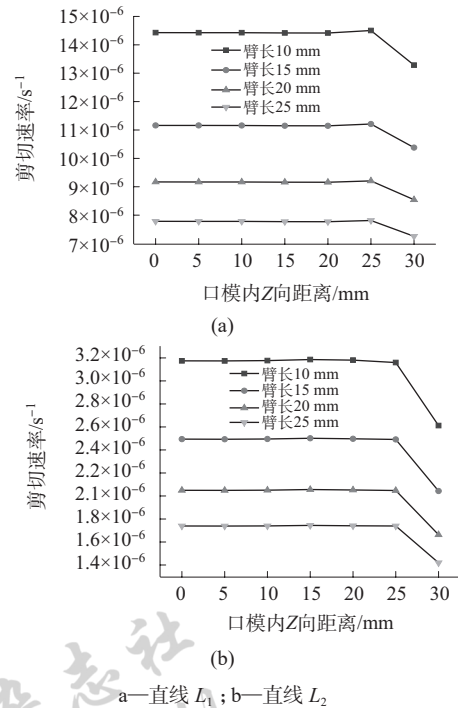


图 6 开口臂长不同时直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率 (入口流率为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

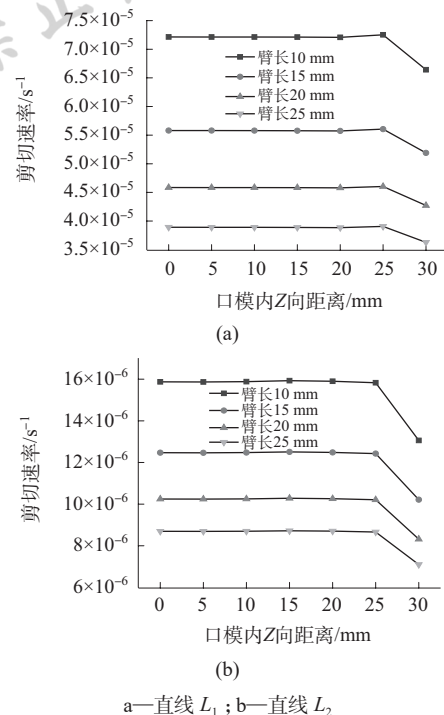


图 7 开口臂长不同时直线 L_1 和 L_2 上熔体的剪切速率 (入口流率为 $5 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

始约 25 mm 一段距离内,熔体的 X 向流动速度为 0,在口模出口前约 5 mm 左右,熔体的 X 向流动速度方向急剧发生变化,速度方向换向,在出口处熔体的 X 向流动速度达到最大值。截面尺寸一致时,入口流率越大,熔体的 X 向流动速度绝对值越大。

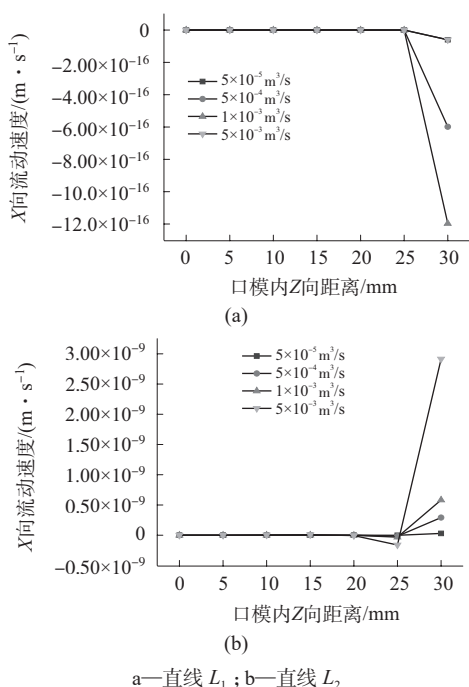


图8 不同入口流率时直线 L_1 和 L_2 上熔体的
X向流动速度(开口臂长为15 mm)

在入口流率为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,开口臂长不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的X向流动速度如图9所示。从图9a可看出,开口臂长不同时,直线 L_1 上熔体的X向流动速度与图8中同一截面不同入口流率时熔体的X向流动速度的变化规律接近。开口臂长越短,熔体的X向流动速度绝对值越大,随

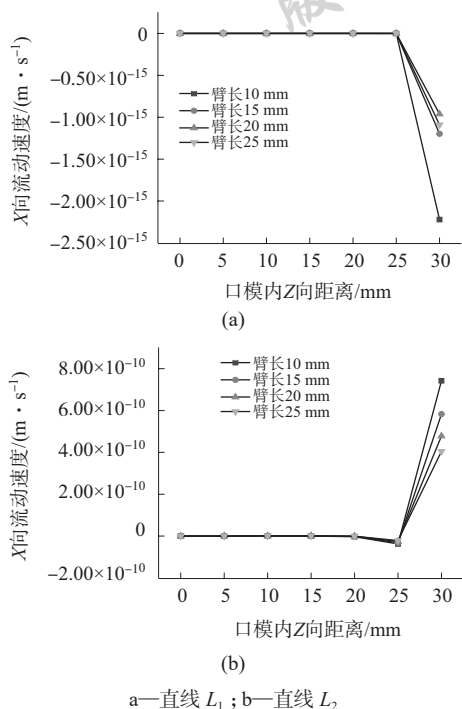


图9 开口臂长不同时直线 L_1 和 L_2 上熔体的
X向流动速度(入口流率为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

着开口臂长逐渐增加,熔体的X向流动速度越来越接近,当开口臂长增加到一定程度后,熔体的X向流动速度不增反降,方向为X轴负向。从图9b可看出,开口臂长不同时,直线 L_2 上熔体的X向流动速度在出口前约5 mm方向发生急剧变化,速度方向换向,在出口处熔体的X向流动速度达到最大值,开口臂长越短,出口处熔体的X向流动速度越大。

2.3 Y向流动速度分析

在开口臂长为15 mm条件下,入口流率不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的Y向流动速度如图10所示。从图10a可知,入口流率不同时,在口模内起始约25 mm的一段距离内,直线 L_1 上熔体的Y向流动速度为0,在离口模出口处约5 mm后,熔体的Y向流动速度急剧加大,入口流率越大,熔体的Y向流动速度越大。从图10b可以看出,直线 L_2 上熔体的Y向流动速度在出口前5 mm左右方向急剧变化,速度方向先正后负,熔体的Y向流动速度绝对值也在出口处达到最大值,入口流率越大,出口处熔体的Y向流动速度绝对值越大,方向为Y轴负向。

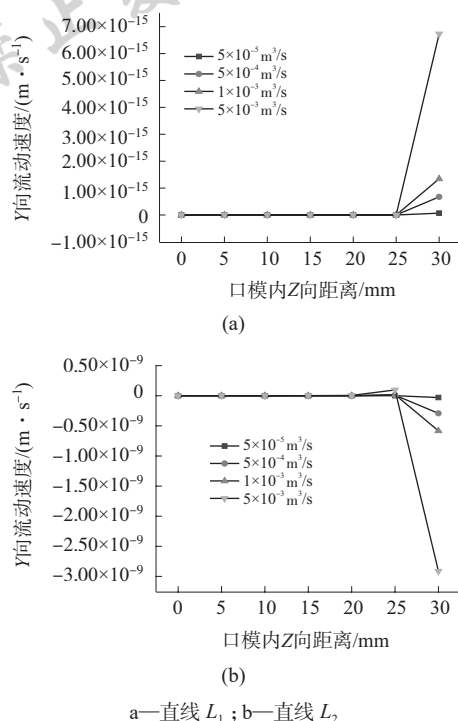


图10 入口流率不同时直线 L_1 和 L_2 上熔体的
流动速度(开口臂长为15 mm)

在入口流率为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,开口臂长不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的Y向流动速度如图11所示。从图11a可看出,直线 L_1 上熔体的Y向流动速度在离口模出口处约5 mm位置时,熔体的Y向流动速度急剧加大,开口臂长越短,熔体的Y向流

动速度越大,流动速度方向为 Y 轴正向。从图11b可以看出,直线 L_2 上熔体的 Y 向熔体的流动速度绝对值在离口模出口处大概5 mm位置发生急剧变化,流动速度方向换向,先正向后负向,开口臂越短,熔体的 Y 向流动速度绝对值越大,方向为 Y 轴负向。

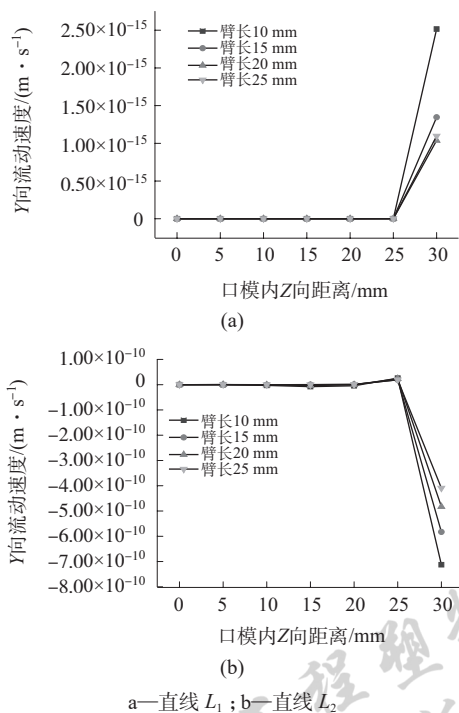


图11 开口臂长不同时直线 L_1 和 L_2 上熔体的 Y 向流动速度(入口流率为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

2.4 Z向流动速度分析

在开口臂长为15 mm条件下,入口流率不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的 Z 向流动速度如图12所示。从图12a可看出,入口流率不同时,在口模内起始25 mm的一段距离内,直线 L_1 上熔体的 Z 向流动速度为0,在离口模出口处约5 mm位置,熔体的 Z 向流动速度急剧增大,入口流率越大,出口熔体的 Z 向流动速度越大,方向为 Z 轴正向。从图12b可看出,在口模内起始25 mm的一段距离内,直线 L_2 上熔体的 Z 向流动速度较均匀,仅在出口前约5 mm时,熔体的 Z 向流动速度缓慢下降。入口流率越大,出口熔体的 Z 向流动速度越大。

在入口流率为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 条件下,开口臂长不同时,直线 L_1 和 L_2 上熔体的 Z 向流动速度如图13所示。从图13a可知,在口模内起始约25 mm的一段距离内,直线 L_1 上熔体的 Z 向流动速度为0,仅在离口模出口处约5 mm时熔体的 Z 向流动速度急剧增大,开口臂长越短,出口熔体的 Z 向速度越大,方向为 Z 轴正向。开口臂长过长时,熔体的 Z 向出口流动速度也会增大。从图13b可知,直线 L_2

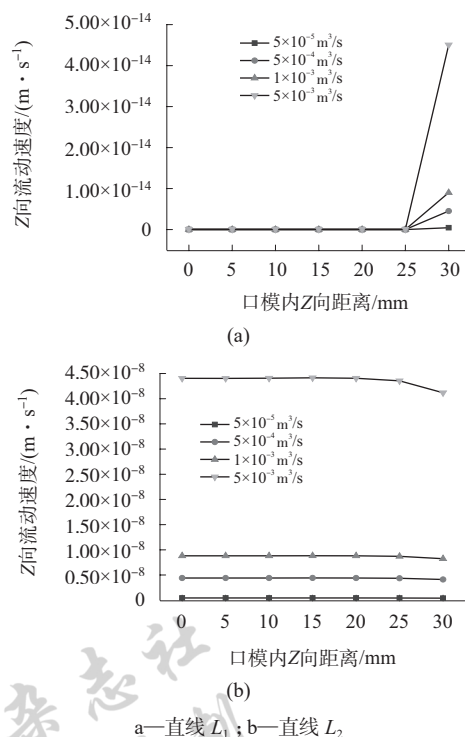


图12 入口流率不同时直线 L_1 和 L_2 上熔体的 Z 向流动速度(开口臂长为15 mm)

上熔体的 Z 向流动速度在口模内起始25 mm的一段距离内比较均匀,仅在出口前约5 mm位置,熔体的 Z 向流动速度有缓慢下降趋势。入口流率相同时,开口臂长越短,熔体的 Z 向流动速度越大。

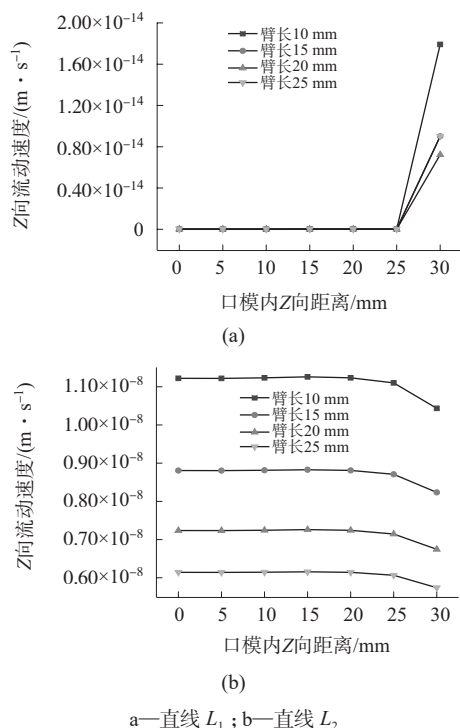


图13 开口臂长不同时 L_1 和 L_2 上熔体的 Z 向流动速度(入口流率为 $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$)

3 结论

通过模拟分析发现,入口流率与U型件开口臂长对刚进入口模内的一大段熔体的流动规律没有太大的影响,在该段的流速比较稳定,但在靠近出口前5 mm左右,拐角处外缘及中心线位置熔体的剪切速率及X向、Y向和Z向的流动速度都会发生很大的变化。拐角中心线附近熔体的X向、Y向流动速度还会急剧反向。在此过程中,入口流率越大或开口臂长越短,其剪切速率及各个方向的流动速度变化越大。另外,在计算过程中假设壁面摩擦足够大,假设熔体与壁面接触处熔体的流动速度均为0,而实际实验过程中,如果能改变摩擦条件,特别是从出口前5 mm左右开始改变摩擦条件,或许会对后续的熔体流动状况大有改善。

参考文献

- [1] 万仕成. PVC-U异型材挤出成型过程中的变形问题[J]. 化学建材, 2009, 25(4): 8-10.
Wan Shicheng. Deformation in the process of PVC-U profile extrusion[J]. Chemical Materials For Construction, 2009, 25(4): 8-10.
- [2] Dai Y K, Zhou C X, Yu W. Inverse designing simulation of extrusion die of auto rubber seal and verifications[J]. Plastics Rubber and Composites, 2007, 36(4): 141-148.
- [3] Dai Yuankan, Zheng Hong, Zhou Chixing, et al. Quick profile die balancing of automotive rubber seal extrusion by CAE technology[J]. Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry, 2008, 45(12): 1 028-1 036.
- [4] 胡延平, 魏聪, 程哲, 等. 基于UG的塑料异型材挤出模数字化系统设计[J]. 模具工业, 2018, 44(6): 13-17, 26.
Hu Yanping, Wei Cong, Cheng Zhe, et al. Design of numerical system for extrusion mould for plastic profiled bar based on UG[J]. Die & Mould Industry, 2018, 44(6): 13-17, 26.
- [5] Pauli L, Behr M, Elgeti S. Towards shape optimization of profile extrusion dies with respect to homogeneous die swell[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2012, 200(12): 79-87.
- [6] 孙乃旭, 田廷科, 李冰. 基于计算机辅助的塑料异型材挤出成型工艺优化[J]. 塑料科技, 2020, 48(5): 103-106.
Sun Naixu, Tian Tingke, Li Bing. Computer aided optimization of plastic profile extrusion process[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(5): 103-106.
- [7] 柳和生, 涂志刚, 熊洪槐. 基于流率平衡的橡塑异型材挤出口模设计[J]. 塑性工程学报, 2000, 7(1): 76-78.
Liu Hesheng, Tu Zhigang, Xiong Honghuai. Design of rubber and plastics profile extrusion dies according to the uniformity of flow rate[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2000, 7(1): 76-78.
- [8] 张广冬, 林建平, 葛友华, 等. 聚合物挤出成型模流平衡系数修正[J]. 机械工程学报, 2012, 48(12): 75-80.
Zhuang Guangdong, Lin Jianping, Ge Youhua, et al. Mold-flow equilibrium coefficient correction of polymer extrusion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(12): 75-80.
- [9] 蒋标, 杨卫发, 张钢. 塑料异型材挤出模模头熔体压力分析[J]. 模具工业, 2019, 45(8): 54-58.
Jiang Biao, Yang Weifa, Zhang Gang. Analysis on melt pressure of plastic profile in die head of extrusion die[J]. Die & Mould Industry, 2019, 45(8): 54-58.
- [10] 郭凯. 基于特征识别的塑料异型材挤出定型模CAD系统设计与开发[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
Guo Kai. Design and development of CAD system for plastic profile extrusion calibrator based on feature recognitions[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [11] 柳和生, 卢臣, 黄兴元, 等. PTT熔体在塑料异型材挤出口模内黏弹流动的数值模拟[J]. 塑料, 2009, 38(5): 98-102, 4.
Liu Hesheng, Lu Chen, Huang Xingyuan, et al. Numerical simulation of viscoelastic flow of PTT melt through the die for extrusion of the plastic profile[J]. Plastics, 2009, 38(5): 98-102, 4.
- [12] 杨佳黎, 柳和生, 黄兴元, 等. Polyflow逆向挤出功能在T型材口模设计中的应用[J]. 塑料, 2011, 40(1): 114-117, 17.
Yang Jiali, Liu Hesheng, Huang Xingyuan, et al. Applications of polyflow inverse extrusion method in the design of T-shaped plastics profile extrusion die[J]. Plastics, 2011, 40(1): 114-117, 17.
- [13] Rutgers R P G, Mackley M R. The effect of channel geometry and wall boundary conditions on the formation of extrusion surface instabilities for LLDPE[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2001, 98(2-3): 185-199.
- [14] Sienz J, Goublomme A, Luege M. Sensitivity analysis for the design of profile extrusion dies[J]. Computers and Structures, 2010, 88(9-10): 610-624.
- [15] 梁基照. 聚合物拉伸流变学[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2015.
Liang Jizhao. Elongation rheology of polymer fluids[M]. Guangzhou: East China University of Science and Technology Press, 2015.
- [16] Ferrás L L, Afonso A M, Alves M A, et al. Annular flow of viscoelastic fluids: Analytical and numerical solutions[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2014, 212: 80-91.
- [17] 邓小珍. 塑料异型材气体辅助共挤出成型的实验和理论研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014.
Deng Xiaozhen. Experimental and theoretical study on gas-assisted co-extrusion of plastic profile with an irregular cross-section[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014.