

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.09.014

特征尺寸对塑料双腔导管气辅挤出成型的影响

林顺平¹, 纪海波^{1,2}, 刘强^{1,2}, 单义杰¹, 邓小珍^{1,2}, 肖兵^{1,2}, 夏非³

(1. 江西水利电力大学机械工程学院, 南昌 330099;

2. 江西水利电力大学精密驱动与装备江西省重点实验室, 南昌 330099;

3. 江西水利电力大学电气工程学院, 南昌 330099)

摘要: 双腔导管是拥有两个独立通道的中空导管, 可同时运输两种不同物质, 其制造成本高, 生产过程复杂、效率低, 且传统的成型方法难以保证双腔导管的尺寸和形状精度。为研究塑料双腔导管气体辅助挤出成型过程中, 因型腔直径变化引起的结构尺寸变化(特征尺寸)对导管椭圆度和挤出胀大的影响, 采用有限元方法, 建立了双腔导管三维黏弹挤出流动模型, 实现了稳定的数值求解; 分析了传统和气体辅助挤出两种工艺条件下塑料熔体的速度场、压力场、剪切速率和第一法向应力分布。研究结果表明, 传统挤出成型时, 特征尺寸对双腔导管内型腔和外轮廓椭圆度影响较大, 但对导管挤出胀大率影响不明显, 当导管型腔直径从0.20 mm增至0.80 mm时, 外轮廓椭圆度从9.40%下降至0.50%, 型腔椭圆度从5.50%增大至68.30%, 导管挤出胀大率则维持在30.60%~32.29%范围内; 气体辅助挤出成型时, 特征尺寸对双腔导管内型腔和外轮廓椭圆度、挤出胀大率均无明显影响, 始终接近零值, 说明气体辅助技术能有效改善塑料双腔导管形状和尺寸精度, 提高制品质量。

关键词: 特征尺寸; 塑料双腔导管; 气辅挤出; 椭圆度; 有限元方法

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)09-0105-06

Effect of feature size on gas-assisted extrusion process of plastics double-lumen catheter

LIN Shunping¹, JI Haibo^{1,2}, LIU Qiang^{1,2}, SHAN Yijie¹, DENG Xiaozhen^{1,2}, XIAO Bing^{1,2}, XIA Fei³

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China;

2. Jianxi Provincial Key Laboratory of Precision Drive and Equipment, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099,

China; 3. School of Electrical Engineering, Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China)

Abstract : The double-lumen catheter is a hollow catheter with two independent channels that can transport two different substances simultaneously. It has high manufacturing costs, complex production processes, low efficiency, and the traditional extrusion process is difficult to ensure the size and shape accuracy of the double-lumen catheter. To investigate the impact of the structural size changes (the feature size) caused by variations in cavity diameter on the ellipticity and extrusion swelling of the plastics double-lumen catheter in the gas-assisted extrusion process, a three-dimensional viscoelastic extrusion flow model of the double-lumen catheter was established using finite element method, and stable numerical solution was achieved. The velocity field, pressure field, shear rate, and first normal stress distribution of the plastics melt were analyzed in the traditional and gas-assisted extrusion processes. The research results show that in the traditional extrusion process, the feature size has a significant impact on the ellipticity of the double-lumen catheter cavity and outer contour, but has little effect on the catheter extrusion swelling rate. When the catheter cavity diameter d increases from 0.20 mm to 0.80 mm, the ellipticity of the outer contour decreases from 9.40% to 0.50%, the ellipticity of the cavity increases from 5.50% to 68.30%, and the catheter extrusion swelling rate remains between 30.60% and 32.29%. In the gas-assisted extrusion process, the feature size has no significant effect on the ellipticity of the double-lumen catheter cavity and outer contour, as well as the extrusion swelling rate, which always approaches zero. It indicates that the gas-assisted technology can effectively improve the shape and dimensional accuracy of the plastics double-lumen catheters and enhance product quality.

Keywords : feature size; plastics double-lumen catheter ; gas-assisted extrusion ; ellipticity ; finite element method

基金项目: 江西水利电力大学国家级大学生创新创业训练计划项目(202411319009), 江西水利电力大学省级大学生创新创业训练计划项目(S202411319014), 江西省重点研发计划项目(20243BBI91011)

通信作者: 邓小珍, 副教授, 研究方向为高分子材料加工与成型

收稿日期: 2025-08-06

引用格式: 林顺平, 纪海波, 刘强, 等. 特征尺寸对塑料双腔导管气辅挤出成型的影响[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(9): 105-110.

LIN Shunping, JI Haibo, LIU Qiang, et al. Effect of feature size on gas-assisted extrusion process of plastics double-lumen catheter[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(9): 105-110.

塑料双腔导管具有两个独立通道,可同时运输不同物质,如液体和液体、液体和气体、液体和固体等,广泛应用于医疗、电子信息、精细化工、智能机器人等诸多领域。然而,在传统挤出成型时,因塑料熔体的黏弹特性,易产生挤出胀大、截面变形、椭圆度大、“鲨鱼皮”等问题^[1-4]。为解决上述问题,研究人员提出了具有广泛应用前景的气体辅助挤出成型新技术,并进行了大量研究。Chen等^[5]研究了气体入口狭缝尺寸对单腔微管外形尺寸的影响,结果表明,气体入口狭缝宽度增加,熔体出口速度增加,壁厚收缩增大,内径胀大增大。Jiang等^[6]研究了材料黏度对单腔圆管气辅挤出成型的影响,结果表明,熔体各向速度分量、压降和剪切速率等均随熔体黏度的变化而变化,黏度过大或过小均不利于单腔导管的稳定气辅挤出成型。Zhang等^[7-8]研究了跨尺度几何构型和不同本构模型对单腔微管气辅挤出成型的影响,结果表明,微尺度条件下挤出物变形行为比宏观尺度更为明显,采用PTT本构模型的数值模拟结果准确性更高。Liu等^[9-10]研究了塑料微管双层气体辅助挤出过程中,气垫层压差和气室分配(结构)对微管外部尺寸的影响,结果表明,外气垫层压力增加,微管收缩率增加,使用双气室模具可有效提高气垫层的稳定性和微管的壁厚均匀性。Ren等^[11]研究了气体辅助方式对塑料单腔微管挤出成型的影响,结果表明,内外双侧气辅挤出方式可使微管成型效果较好,但随着熔体流率增大,管壁厚度和直径增大,直至破坏辅助气体层的稳定性。蔡圳南等^[12]对塑料单腔微管气辅挤出成型进行了数值模拟研究,进一步从理论层面分析了气体辅助挤出成型的动态机制,为参数优化提供了理论依据。Huang等的研究结果验证了气体辅助技术对多腔导管挤出成型的适应性,适用于目前广泛使用的增材制造技术,不仅能改善挤出制品宏观质量,还可改善熔体结晶性和均匀性^[13-16]。综上所述,现有塑料导管气辅挤出成型的研究主要集中于单腔圆管的整体胀大消除、宏观成型质量改善及工艺参数调控等方面,有关塑料多腔导管气辅挤出成型及各结构尺寸的研究较少。笔者拟以因型腔直径变化引起的结构尺寸变化(特征尺寸)为核心变量,探究塑料双腔导管气辅挤出成型时,特征尺寸对型腔椭圆度、外轮廓椭圆度和挤出胀大等的影响机制,为塑料双腔导管气辅挤出成型生产提供理论依据。

1 数值模型

1.1 几何结构及网格划分

图1为双腔导管几何结构及尺寸,其中导管两型腔直径 d 相等,分别取0.20,0.40,0.60,0.80 mm,对应的导管外径分别为2.00,2.20,2.40,2.60 mm。该模型分为口模段和自由胀大段两部分,其长度分别为5 mm和10 mm。模型采用六面体网格方法进行划分,如图2所示,由于双腔塑料导管的轴对称性,为节省计算工作量,模拟计算取1/4区域。

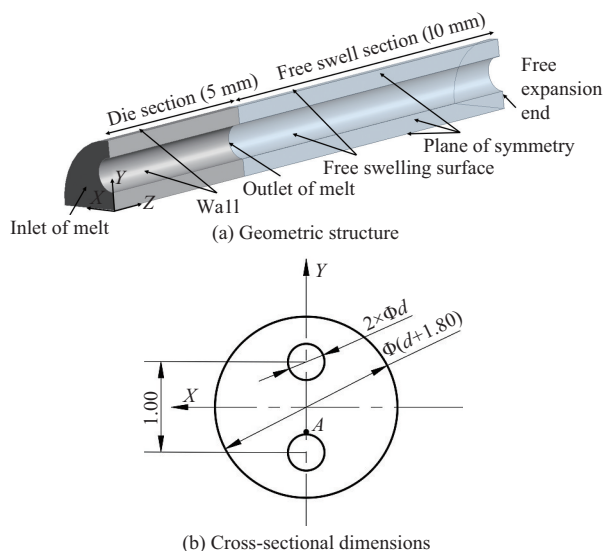


图1 导管几何结构及截面尺寸

Fig. 1 Geometric structure and cross-sectional dimensions of catheter

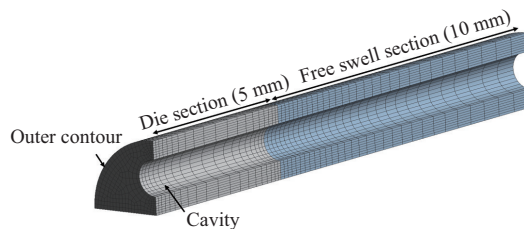


图2 导管有限元网格

Fig. 2 Finite element meshes of catheter

1.2 模型方程和边界条件

基于熔体挤出流动特点,可将熔体视为等温不可压缩非牛顿流体层流状态,忽略重力、惯性力和表面张力的影响。控制方程、本构模型和边界条件见参考文献[14]。

材料选用聚丙烯(PP),本构模型参数见表1^[5],表中, η_0 为熔体零剪切黏度, λ 为松弛时间, ε 为与熔体拉伸特性有关的材料参数, ξ 为与熔体剪切黏度有关的材料参数, η_r 为黏度比。熔体入口流率设为 $Q=0.04 \text{ mm}^3/\text{s}$,因数值模型取塑料导管几何结构的1/4,故数值模拟入口流率取 $1/4 \times Q=0.01 \text{ mm}^3/\text{s}$ 。

表1 材料物性参数

Tab. 1 Physical property parameters of material

$\eta_0/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	λ/s	ε	ξ	η_i
8 823	0.10	0.15	0.44	0.12

2 结果与讨论

2.1 特征尺寸对双腔导管形貌的影响

2.1.1 对导管椭圆度的影响

图3为传统与气辅两种挤出方式下导管胀大末端形貌。从图3a可知,在传统挤出方式下,导管存在胀大变形,且型腔直径较大时,外轮廓圆度保持良好,但内型腔变形严重,这是由于导管型腔直径增大,两型腔间熔体厚度变薄,熔体流动不均匀性增加,厚壁熔体向薄壁熔体的挤压作用增强,造成导管内型腔沿 X 方向向内收缩;由图3b可知,在气辅挤出条件下,导管外轮廓及两个型腔圆度均保持良好,几乎没有发生变形。由此可知,气体辅助技术可以有效解决双腔导管形变的问题,提高塑料双腔导管成型质量。

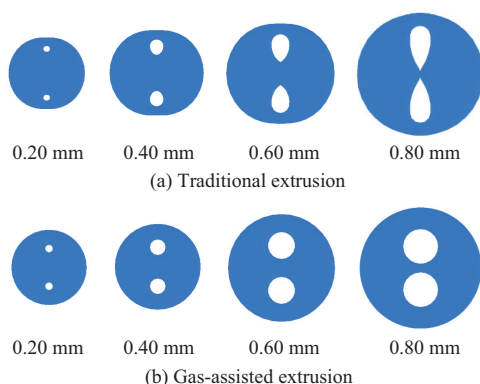


图3 不同挤出方式下导管胀大末端形貌

Fig. 3 Morphology of catheter expanded end under different extrusion methods

图4为不同特征尺寸下,导管外轮廓和型腔椭圆度的变化曲线。为描述导管圆度,引入椭圆度 T , T 值越大表示导管形变越严重,其表达式见式(1)。

$$T = [(D_{\max} - D_{\min})/D_0] \times 100\% \quad (1)$$

式中: $D_{\max}$ 为最大径向尺寸; $D_{\min}$ 为最小径向尺寸; D_0 为标称直径(本文外轮廓标称直径为图1b中的 $1.8+d$,型腔标称直径为 d)。

由图4可知,传统挤出时,特征尺寸对内型腔圆度影响较大,对外轮廓椭圆度影响整体较小,当型腔直径 d 从0.20 mm增大到0.80 mm时,导管内型腔椭圆度从5.50%增大至68.30%,外轮廓的椭圆度在 d 从0.20 mm增至0.60 mm时变化不大,椭圆度从9.40%下降至8.20%, d 从0.60 mm至0.80 mm时变

化相对较大,从8.20%下降至0.50%;气辅挤出时,双腔导管的型腔和外轮廓的圆度均不受特征尺寸变化的影响,始终接近零值,即导管外轮廓和型腔均保持良好圆度,不存在明显变形。

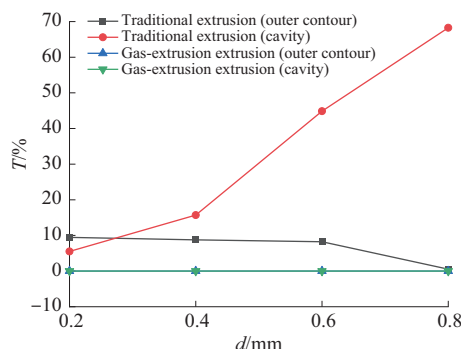


图4 特征尺寸对导管椭圆度的影响

Fig. 4 Influence of feature size on catheter ellipticity

2.1.2 对导管挤出胀大的影响

图5为特征尺寸对导管挤出胀大的影响,由挤出胀大率计算公式(2)可得,传统挤出时,双腔导管型腔直径 d 为0.20,0.40,0.60,0.80 mm时的挤出胀大率在30.60%~32.29%范围内波动;气辅挤出时,双腔导管的型腔和外轮廓的尺寸均不受特征尺寸变化的影响,不存在明显胀大变形,这是由于气垫层的润滑作用,减小了熔体表面与口模壁面间的黏附作用,改善了口模内熔体的流动状态。

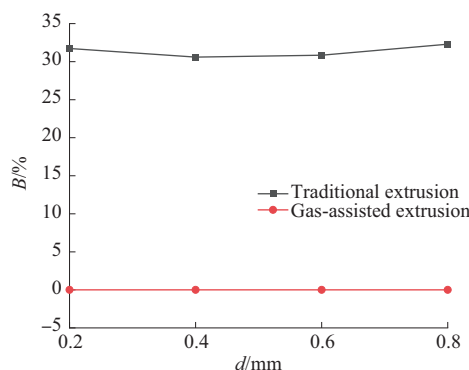


图5 特征尺寸对导管挤出胀大的影响

Fig. 5 Influence of feature size on catheter extrusion swelling

$$B = \frac{S - S_0}{S_0} \times 100\% \quad (2)$$

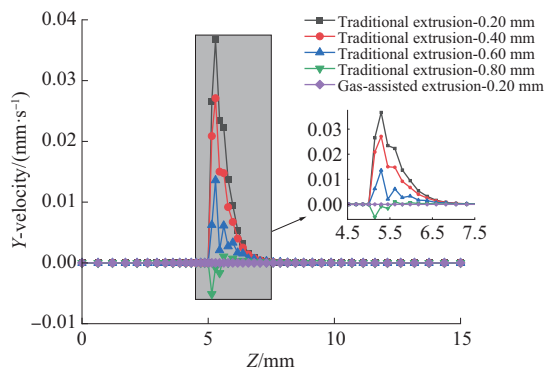
式中: B 为挤出胀大率,单位%; S 为导管自由胀大末端横截面面积,单位 mm^2 ; S_0 为导管挤出口模横截面面积,单位 mm^2 。

2.2 速度分析

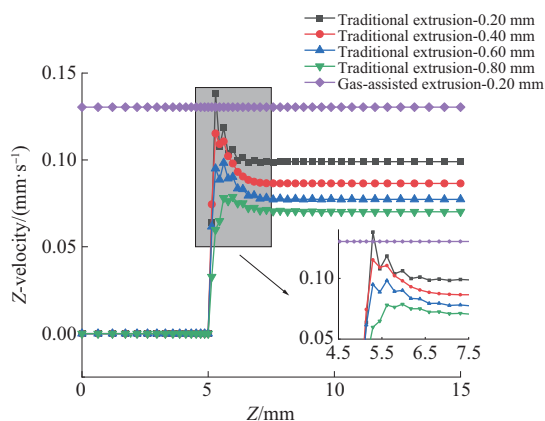
图6为在熔体型腔内表面沿挤出方向(Z 轴方向)的 Y 向和 Z 向速度分布曲线,气辅挤出过程中,因

不同特征尺寸时,熔体 Y 向速度大小和分布均相同, Z 向速度大小不等但分布亦相同,故图6中仅呈现型腔直径 d 为0.20 mm时的速度曲线。

从图6a可以看出,在传统挤出过程中,熔体在口模出口处产生了垂直于挤出方向的 Y 向径向速度,当型腔直径 d 为0.20, 0.40, 0.60 mm时,其值为正,当型腔直径 d 为0.80 mm时,其值为负,使得熔体离开口模后型腔在 Y 方向产生收缩,这是导管内型腔椭圆度明显增大的主要原因;而在气辅挤出过程中,由于气垫层的润滑作用,熔体在口模内的流动更加均匀,不存在 Y 方向径向速度,导管型腔形状不受特征尺寸的影响。由图6b可知,双腔导管传统挤出过程中,熔体流速(Z 向速度)存在速度重排,且随着特征尺寸的增大, Z 向速度值减小,这是由于入口流率不变时,导管型腔直径增大,挤出通道截面积增大,单位面积内流率减小,即熔体轴向速度减小;在气辅挤出过程中,熔体沿挤出方向无明显速度重排,原因是气体的润滑作用使得壁面对熔体的吸附作用减小,熔体没有积累弹性势能的条件。



(a) Y -velocity distribution



(b) Z -velocity distribution

图6 熔体型腔内表面沿挤出方向速度分布

Fig. 6 Melt velocity distribution on inner surface of catheter along extrusion direction

2.3 压力分析

图7为导管内表面沿挤出方向的压力分布。由图7可知,在传统挤出中,口模入口处存在超过90 000 Pa的压力,沿挤出方向压力呈线性快速减小,且在入口流率相同的条件下,特征尺寸变化对导管内表面压力的影响不大,这是因为导管壁厚不变,单位面积流率不变,熔体的黏度也无明显变化。在气辅挤出中,由于在口模壁面和熔体表面之间存在气垫层的润滑作用,使得熔体的整个流动过程没有明显压力变化,始终接近零值,这意味着双腔导管气辅挤出成型时,几乎不存在黏性能量的损耗,从而有效降低了能量消耗。

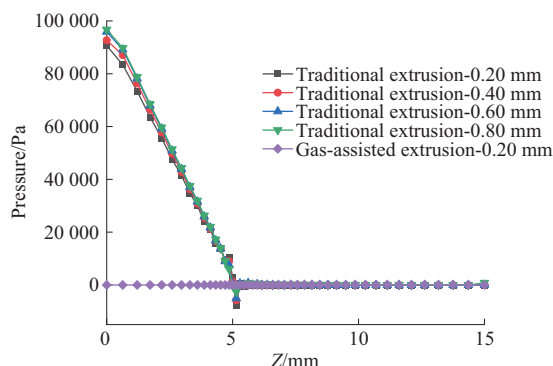


图7 导管内表面沿挤出方向压力分布

Fig. 7 Pressure distribution on inner surface of catheter along extrusion direction

2.4 剪切速率分析

图8为导管内表面(图1b中A点)沿挤出方向的剪切速率分布。由图8可知,传统挤出时,因熔体与芯棒间的黏滞作用,导管内表面剪切速率在挤出初始阶段较高(最大值超过 1.50 s^{-1}),但随着型腔直径增大显著降低至较小值,这是因为型腔直径增大,A点处熔体厚度减小,使得单位距离内相邻熔体层在流动方向上的速度变化量减小,即剪切速率减小。型腔直径 d 为0.20, 0.40, 0.60, 0.80 mm时的剪切速率分别为 $1.52, 1.19, 0.82, 0.33 \text{ s}^{-1}$,而在口模出口($Z=5 \text{ mm}$)附近,剪切速率又发生明显突变,且突变幅度随着特征尺寸的增大而增大,这是导致传统挤出导管内型腔椭圆度随特征尺寸增大而增大的主要原因,因为高剪切速率梯度会引发熔体弹性胀大的不均匀性;气辅挤出时,整个挤出过程中,因气垫层的润滑作用,导管内表面的剪切速率极低,始终接近零值。因此,熔体离开口模后,不存在因剪切速率梯度引起的弹性回复(胀大变形)现象,有效保障了导管内型腔的尺寸稳定性。

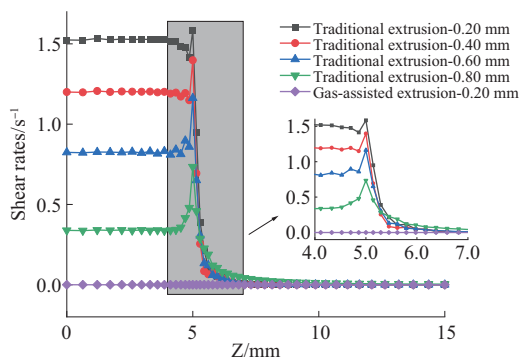
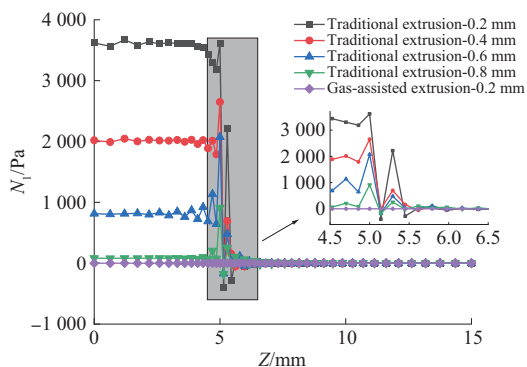


图8 导管内表面沿挤出方向剪切速率分布

Fig. 8 Shear rate distribution on inner surface of catheter along extrusion direction

2.5 第一法向应力差分析

图9为导管内表面(图1b中A点)沿挤出方向的第一法向应力差(N_1)分布。由图9可知,与剪切速率类似,传统挤出时, N_1 随型腔直径的增大快速减小,型腔直径 d 为0.20,0.40,0.60,0.80 mm时的 N_1 分别为3 618,2 019,813,83 Pa,且在口模出口处发生突变,这将使得挤出物离开口模后发生变形;气辅挤出时,不同特征尺寸条件下, N_1 始终接近零值(图9仅呈现型腔直径 d 为0.20 mm时的 N_1 分布),这是由于气垫膜层的润滑作用,使熔体与口模壁面间的黏滞阻力消失,挤出过程中没有法向应力的产生,说明气辅挤出能够有效消除法向应力,提高导管成型质量。

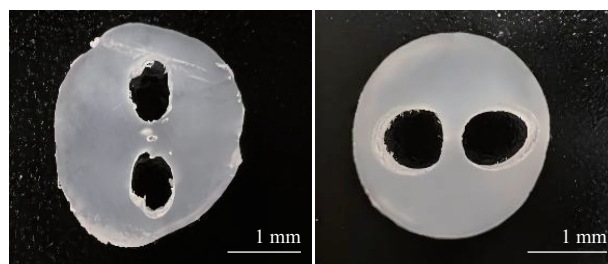
图9 导管内表面沿挤出方向的 N_1 分布Fig. 9 N_1 distribution on inner surface of catheter along extrusion direction

3 塑料双腔导管挤出试验

图10为塑料双腔导管型腔直径 d 为0.60 mm时挤出试验结果。由图10a可知,在传统挤出条件下,双腔导管外轮廓和内型腔均发生严重变形,甚至出现两型腔大小不一致现象,测得其外轮廓最大径向尺寸为2.62 mm,最小径向尺寸为2.39 mm,两内型

腔最大径向尺寸分别为0.79 mm和0.38 mm,最小径向尺寸分别为0.56 mm和0.29 mm,导管末端面积(S)为4.87 mm²,计算出外轮廓椭圆度 $T_1=9.58\%$,两型腔椭圆度 T_2 分别为38.33%和15%,挤出胀大率 $B=23.09\%$ 。如图10b中,在气辅挤出条件下,双腔导管的外轮廓和内型腔亦存在变形,但变形程度远小于传统挤出条件,且两型腔形状基本一致,测得外轮廓最大和最小径向尺寸分别为2.32 mm和2.30 mm,内型腔最大和最小径向尺寸分别为0.74 mm和0.69 mm, $S=3.58$ mm²,计算出外轮廓椭圆度 $T_1=0.33\%$,型腔椭圆度 $T_2=8.33\%$,挤出胀大率 $B=-9.59\%$, B 为负值,说明导管存在收缩现象。

对比数值研究结果(图4和图5),试验结果存在一定偏差,主要原因是试验过程中,口模加工和安装存在误差,口模温度、气体压力和流率等对导管轮廓形貌均有影响,而导管离开口模后的牵引和水冷则使得传统挤出胀大率小于数值计算结果,气辅挤出制品则出现收缩现象。



(a) Traditional extrusion (b) Gas-assisted extrusion

图10 塑料双腔导管试验结果

Fig. 10 Experiment results of plastics double-lumen catheter

4 结论

(1)塑料双腔导管制品采用传统挤出时,因型腔直径变化引起的特征尺寸变化对外轮廓和内型腔椭圆度影响较大,对挤出胀大率影响较小。当型腔直径从0.20 mm增大到0.80 mm时,外轮廓椭圆度由9.40%降至0.50%,内型腔椭圆度从5.50%增大至68.30%,挤出胀大率则在30.60%~32.29%范围内波动。由此可知,若两型腔中心距保持不变,增大型腔直径有利于改善导管外轮廓圆度,但不利于内型腔成型。

(2)采用气辅挤出时,导管外轮廓和内型腔椭圆度以及挤出胀大率均不受特征尺寸变化的影响,始终接近零值。由此可知,气辅挤出技术可有效解决传统挤出过程因径向速度、剪切速率和第一法向应力差等因素所带来的导管形变问题。

(3)塑料双腔导管挤出制品的成型质量,直接受制于熔体在模内的流动状态以及模外的胀大变形情况。在传统挤出过程中,熔体流动呈现出不平衡状态,且存在径向流动,易致使制品出现胀大变形。熔体在口模出口处的径向速度突变使得导管外轮廓和型腔产生径向偏移,严重影响塑料导管的产品质量。而在气辅挤出过程中,因气垫层的润滑作用,熔体流动状态得到有效的改善,可显著提升双腔导管制品质量。

参考文献

- [1] RABHI F, DE LAROCHELAMBERT T, BARRIERE T, et al. Experimentation, identification, and simulation of polymer swelling at extrusion die outlets[J]. *Polymer Engineering & Science*, 2024, 64(8): 3 817–3 833.
- [2] TÜRKİSTANLI T, ERTUNÇ Ö. Swelling phenomenon in rubber weatherstrip manufacturing under real process conditions imposed in a commercial extrusion line[J]. *Journal of Polymer Research*, 2023, 30(2). DOI:10.1007/s10965-022-03433-4.
- [3] 周晓鹏,晏亮,袁航,等. 聚丙烯五腔管制品微挤出成型工艺参数优化[J]. *工程塑料应用*, 2025, 53(4): 84–88, 115.
ZHOU Xiaopeng, YAN Liang, YUAN Hang, et al. Optimization of microextrusion molding process parameters for polypropylene five-lumen products[J]. *Engineering Plastics Application*, 2025, 53(4): 84–88, 115.
- [4] 李福成,周国发. 异形医用双腔导管挤出离模膨胀变形机理与调控[J]. *中国塑料*, 2020, 34(6): 52–59.
LI Fucheng, ZHOU Guofa. Extrusion die swell deformation mechanism and control of medical heteromorphosis double-cavity catheter[J]. *China Plastics*, 2020, 34(6): 52–59.
- [5] CHEN S Q, HUANG X Y, LIU B, et al. Influence of gas inlet slit width on gas-assisted plastic micro-tube extrusion[J]. *Processes*, 2023, 11(7). DOI:10.3390/pr11072025.
- [6] JIANG S Y, YU Y M, WANG S T, et al. Research on gas-assisted extrusion of elastic material round-tube for flexible robot body[J]. *ACS Omega*, 2024, 9(24): 25 996–26 003.
- [7] ZHANG X H, HUANG X Y, LIU B, et al. Study on the melt rheological characterization of micro-tube gas-assisted extrusion based on the cross-scale viscoelastic model[J]. *Polymers*, 2024, 16(7). DOI:10.3390/polym16070973.
- [8] ZHANG X H, HUANG X Y, CHEN S Q. Three-dimensional numerical simulations and experimental studies on the viscoelastic rheological and deformation behavior of polymer catheter in gas-assisted extrusion[J]. *Physics of Fluids*, 2024, 36(9). DOI:10.1063/5.0229146.
- [9] LIU B, HUANG X Y, REN S Y, et al. Effect of pressure difference between inner and outer gas layer on micro-tube deformation during gas-assisted extrusion[J]. *Polymers*, 2022, 14(17). DOI:10.3390/polym14173559.
- [10] LIU B, HUANG X Y, ZHANG X H, et al. Numerical and experimental studies on the improvement of gas chamber structure during gas-assisted extrusion[J]. *Polymers*, 2022, 14(23). DOI:10.3390/polym14235272.
- [11] REN Z, DENG X Z, JI H B. Influences and failure analysis of the interaction between melt and gas on double-layer gas-assisted extrusion molding of polymer micro-catheters[J]. *Polymers*, 2025, 17(4). DOI:10.3390/polym17040504.
- [12] 蔡圳南,黄兴元,刘同科,等. 微尺度下塑料微管气辅挤出成型的模拟及分析[J]. *工程塑料应用*, 2022, 50(2): 83–90, 105.
CAI Zhennan, HUANG Xingyuan, LIU Tongke, et al. Simulation and analysis of gas-assisted extrusion molding of plastic microtubules at micro-scale[J]. *Engineering Plastics Application*, 2022, 50(2): 83–90, 105.
- [13] HUANG X M, LIU H S, HUANG X Y, et al. Comparative analysis of flow factors and crystallinity in conventional extrusion and gas-assisted extrusion[J]. *e-Polymers*, 2024, 24(1). DOI:10.1515/epoly-2023-0076.
- [14] 邓小珍,陈天荣,刘彪,等. 多腔微管气体辅助挤出成型的影响机制[J]. *高分子材料科学与工程*, 2024, 40(11): 79–86.
DENG Xiaozhen, CHEN Tianrong, LIU Biao, et al. Influence mechanism of gas-assisted extrusion molding for multi-lumen microtube[J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2024, 40(11): 79–86.
- [15] ZHANG X J, HONG X Y, XIAO J H, et al. Gas assisted fused deposition modeling: Effects of assist gas parameters on print quality and properties[J]. *Journal of Polymer Engineering*, 2025, 45(1): 92–101.
- [16] YANG R, XIAO J H, LIU Y L, et al. The die swell eliminating mechanism of hot air assisted 3D printing of GF/PP and its influence on the product performance[J]. *e-Polymers*, 2024, 24(1). DOI:10.1515/epoly-2024-0008.