

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.04.012

聚丙烯五腔管制品微挤出成型工艺参数优化

周晓鹏^{1,2}, 晏亮^{1,2}, 袁航^{1,2}, 姜勇^{1,2}

(1. 中国船舶集团有限公司第七一三研究所, 郑州 450015; 2. 河南省水下智能装备重点实验室, 郑州 450015)

摘要: 随着微型多腔管在生物医疗、光纤通信等领域的广泛应用, 对多腔管制品的成型精度提出更高要求。针对聚丙烯五腔微管在挤出成型中存在的跨腔室尺寸耦合偏差、截面椭圆度失稳等技术瓶颈, 通过挤出成型实验、数值模拟与多目标优化相结合的方式, 探讨了成型工艺参数对五腔微管制品成型精度与性能的影响, 并建立了成型工艺参数与五腔微管制品质量之间的映射关系。结果表明, 基于Kriging代理模型的多目标优化方法可有效解决多腔微管制品成型过程中的参数优化难题, 突破了传统试错法效率低、寻优能力差的局限, 优化后的工艺参数显著提高了成型精度。通过调整工艺参数并进行微挤出实验, 最终成型的五腔微管制品在尺寸和形状精度上均符合设计要求, 与初始结果相比, 五腔微管制品的尺寸偏差降低了74.4%, 椭圆度降低了39.9%。优化结果验证了多目标优化方法的有效性。

关键词: 聚丙烯; 五腔制品; 挤出成型; 工艺参数; 多目标优化

中图分类号: TQ322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)04-0084-05

Optimization of microextrusion molding process parameters for polypropylene five-lumen products

ZHOU Xiaopeng^{1,2}, YAN Liang^{1,2}, YUAN Hang^{1,2}, JIANG Yong^{1,2}

(1. 713th Research Institute of China State Shipbuilding Corporation Limited, Zhengzhou 450015, China;

2. Henan Key Laboratory of Underwater Intelligence Equipment, Zhengzhou 450015, China)

Abstract : With the wide application of micro multi-lumen tubes in biomedical and fiber-optic communication fields, higher requirements are placed on the molding accuracy of multi-lumen products. Aiming at the technical bottlenecks of polypropylene five-lumen microtubes in extrusion molding, such as cross-lumen dimensional coupling deviation and cross-section ellipticity instability, the influence of molding process parameters on the molding accuracy and performance of five-lumen microtubes through the combination of extrusion molding experiments, numerical simulation and multi-objective optimization were explored, and the mapping relationship between the molding process parameters and five-lumen microtubes' quality was established. The results show that the multi-objective optimization method based on Kriging surrogate model can effectively solve the problems of parameter optimization in the forming process of multi-cavity microtube products, and break through the limitations of low efficiency and poor optimization ability of traditional trial-and-error method. The optimized process parameters significantly improve the forming accuracy. By adjusting the process parameters for micro extrusion experiment, the final five-cavity micro-tube products meet the design requirements in terms of size and shape accuracy. Compared with the initial results, the size deviation of the five-lumen products is reduced by 74.4%, and the ovality is reduced by 39.9%. The optimization results verify the effectiveness of the multi-objective optimization method.

Keywords : polypropylene ; five-lumen product ; extrusion moulding ; process parameter ; multi-objective optimization

在聚合物微挤出过程中, 微挤出成型工艺参数调试会对成型精度以及制品性能产生重要的影响^[1-3]。挤出成型工艺参数主要包括机筒温度、螺杆转速、注气压力、模具温度、牵引速度等^[4-5]。微挤出

制品往往具有微细壁薄、截面复杂、精度要求高等特征, 使得微挤出成型工艺调试的复杂性大大提高。关于挤出成型工艺的研究与调试, 主要包括单因素法^[6-8]、响应面法^[9]、优化方法^[10-13]等。如Cho等^[6]

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075076)

通信作者: 周晓鹏, 硕士, 高级工程师, 主要从事非金属材料成型及应用技术等方面的研究

收稿日期: 2025-02-08

引用格式: 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.

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.

采用微挤出工艺成型医用导管时,发现随着模具与冷却水间距离的增加,微管内外径变化显著增大,椭圆度逐渐降低。Huang等^[7]在采用微挤出工艺成型柔性矩形微管时,发现矩形微管纵横比与拉伸速度无关,与熔体流量和内腔空气流量的比值呈线性关系。Liu等^[8]研究了聚合物挤出成型中工艺参数对单腔微管厚度和直径的影响,结果表明牵引速度和熔体流量的比值,是影响导管横截面形状的最重要因素。Lebaal等^[9]通过RSM响应面法和SQP序列二次规划算法对设计变量进行优化,实现了以非均匀方式优化衣架型挤出模具壁温分布以及熔体黏度的局部控制。Zhang等^[10]采用单因素法并结合神经网络粒子群优化算法,以4个不同权重的评价指标分析了螺杆转速、模具温度、模具入口和出口间距离、定型模真空度和牵引速度对塑料齿轮挤出成型精度的影响,优化后的工艺参数值提高了成型效率与精度。Mu等^[12]提出一种基于有限元模拟、反向传播神经网络和遗传算法的塑料型材挤出过程的优化方法,实现了熔体体积流量和嵌件移动速度两个工艺参数的优化。综上,聚合物微挤出成型工艺研究表明,单独依赖单因素试验或数值模拟方法在工艺参数调试效率方面存在一定局限性。相比之下,优化方法由于能够综合考虑多个工艺变量,具备更高的效率和更准确的调控特性,能够显著提升工艺调试精度与生产效率。

为了进一步提高微挤出成型技术的应用水平,笔者运用基于Kriging代理模型的自适应多目标优化方法,结合数值模拟、优化算法及成型实验,提高了微挤出成型五腔微管制品的工艺参数调试效率与成型质量。

1 五腔微管制品设计要求

聚丙烯五腔微管微挤出制品的直径与壁厚尺寸设计要求,如图1所示。由图1可见,制品具有不同直径的圆形内腔,内筋壁厚 h_{3i} 与外环壁厚 h_{3o} 之比为3,典型特征是型坯截面不同局部区域具有非均匀壁厚。图1中标记点 $O_1 \sim O_4$ 与 $i_1 \sim i_4$ 作为五腔制品 h_{3o} 与 h_{3i} 的测量点。成型后的制品尺寸偏差要求为 ± 0.035 mm,椭圆度要求为20%。微挤出实验系统如图2所示。

2 制品成型工艺参数范围

结合设备稳定性、制品设计要求及成型效率,挤出五腔制品的质量流量为0.26 kg/h,对应的体积流

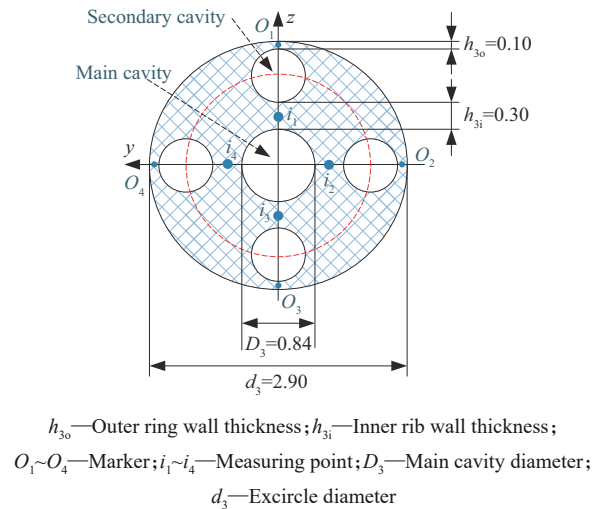


图1 五腔微管制品的设计要求

Fig. 1 Design requirements of five-lumen microtubule product



图2 微挤出实验系统

Fig. 2 Experimental system for micro-extrusion

量与螺杆转速 N_3 分别为79.36 mm³/s与4.6 r/min。根据经验及预实验结果,将工艺参数的初始范围与后续优化过程的设计区间列于表1。其中, $P_{3,1}$, $P_{3,2}$, V_3 分别为五腔制品的主腔压力、次腔压力、牵引速度。

表1 五腔微管制品成型工艺参数范围

Tab. 1 Molding process parameter range of five-lumen product

Range	$N_3/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$P_{3,1}/\text{Pa}$	$P_{3,2}/\text{Pa}$	$V_3/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
Initial range	4.6	100~900	100~900	8~24
Design range	4.6	100~200	200~400	14~18

Notes: N_3 is screw speed; $P_{3,1}$ is main cavity pressure; $P_{3,2}$ is subcavity pressure; V_3 is traction speed.

3 工艺参数多目标优化

3.1 多目标优化问题

微挤出工艺参数对多腔制品尺寸大小和截面形状的影响明显,成型过程中的目标是获得更接近设计要求的截面尺寸和更小的轮廓椭圆度。因此,以螺杆转速 N_3 、主腔压力 P_1 、次腔压力 P_2 、牵引速度 V 这4个工艺参数作为设计变量,以多腔微管的尺寸偏差、椭圆度这两个评价指标作为目标变量,则微挤出过程的工艺参数多目标优化问题可以定义为在设计变量约束条件内获得最小的截面尺寸偏差与轮廓椭圆度,见式(1)。

$$\min D, O \quad \text{s. t.} \quad x_1 \leq x \leq x_2 \quad (1)$$

式中: D 表示制品尺寸偏差, 即实际尺寸减去设计尺寸所得的代数差; O 表示制品外轮廓及各型腔的椭圆度; x 为设计变量, x_1 与 x_2 为设计变量的下限与上限。

优化设计中要求同时最小化尺寸偏差 D 和椭圆度 O , 利用加权系数求和方法, 将多目标优化问题转化成单目标优化问题, 见式(2)。

$$\omega_1 \cdot D + \omega_2 \cdot O \quad (2)$$

式中: ω_1 和 ω_2 为权重系数。

由图1可知, 多腔微管截面含若干个核心尺寸设计要求, 尺寸偏差 D 定义为式(3)。

$$D = \sum_{i=1}^n \max(|d_{i, \max} - d_{i, 0}|, |d_{i, \min} - d_{i, 0}|) \quad (3)$$

式中: $d_{i, 0}$ 表示多腔微管制品截面上第 i 个核心尺寸要素的设计要求; $d_{i, \max}$ 表示第 i 个核心要素的实际尺寸最大值; $d_{i, \min}$ 表示第 i 个核心要素的实际尺寸最小值。

同理, 多腔微管截面含若干个核心轮廓要素的椭圆度设计要求, 椭圆度 O 定义为式(4)。

$$O = \sum_{i=1}^n \frac{2(d_{i, \max} - d_{i, \min})}{(d_{i, \max} + d_{i, \min})} \quad (4)$$

根据式(3)中的定义, 针对五腔制品的设计要求和功能需求, 分别取4个核心尺寸要素: 五腔制品取外圆直径 d_3 、主腔直径 D_3 、次腔与外圆之间壁厚 h_{30} 以及次腔与主腔之间的壁厚 h_{3i} 。则多腔制品尺寸偏差 D 的表达式见式(5)。

$$D_j = \max(|d_{j, \max} - d_{j, 0}|, |d_{j, \min} - d_{j, 0}|) + \max(|D_{j, \max} - D_{j, 0}|, |D_{j, \min} - D_{j, 0}|) + |h_{j0} - h_{j0, 0}| + |h_{ji} - h_{ji, 0}| \quad (j = 3) \quad (5)$$

式中: 下脚标 j 的取值为3, D_3 代表五腔微管制品的尺寸偏差表达式; $d_{j, \max}$ 表示第 j 个核心要素的外圆直径最大值; $d_{j, \min}$ 表示第 j 个核心要素的外圆直径最小值; $D_{j, \max}$ 表示第 j 个核心要素的主腔直径最大值; $D_{j, \min}$ 表示第 j 个核心要素的主腔直径最小值; $d_{j, 0}$ 表示多腔微管制品截面上第 j 个核心外圆直径要素的设计要求; $D_{j, 0}$ 表示多腔微管制品截面上第 j 个核心主腔直径要素的设计要求; h_{j0} 表示多腔微管制品截面上第 j 个次腔与外圆之间壁厚; $h_{j0, 0}$ 表示多腔微管制品截面上第 j 个核心次腔与外圆之间壁厚要素的设计要求; h_{ji} 表示多腔微管制品截面上第 i 个次腔与主腔之间的壁厚; $h_{ji, 0}$ 表示多腔微管制品截面上第

i 个核心次腔与主腔之间的壁厚要素的设计要求。

根据式(4)的定义, 针对五腔制品的设计要求和功能需求, 分别取3个核心轮廓形状要素: 五腔制品取外圆轮廓椭圆度、主腔轮廓椭圆度以及次腔椭圆度。则多腔微管制品椭圆度 O 的表达式见式(6)。

$$O_j = \frac{2(d_{j, \max} - d_{j, \min})}{(d_{j, \max} + d_{j, \min})} + \frac{2(D_{j, \max} - D_{j, \min})}{(D_{j, \max} + D_{j, \min})} + \frac{2(\Phi_{j, \max} - \Phi_{j, \min})}{(\Phi_{j, \max} + \Phi_{j, \min})} \quad (j = 3) \quad (6)$$

式中: O_3 代表五腔制品轮廓椭圆度表达式; Φ_3 为五腔制品次腔直径(0.63 mm)。

由于 D_j 和 O_j 是两个不同性质的指标, 计算结果相差较大, 难以准确选择式(2)中权重系数 ω_1 和 ω_2 的取值。可以将 D_j 和 O_j 均映射到一个相同的区间[0, 1], 便于合理选择 ω_1 和 ω_2 的取值。本实验取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$, 则优化目标函数式(1)可进行进一步改进。故多腔微管制品成型的工艺参数多目标优化问题, 最终可定义成式(7)。

$$\min f(x) = \omega_1 \left(\frac{D_j - D_{j, \min}}{D_{j, \max} - D_{j, \min}} \right) + \omega_2 \left(\frac{O_j - O_{j, \min}}{O_{j, \max} - O_{j, \min}} \right) \quad (j = 3) \quad (7)$$

$$\text{s. t.} \quad x = [N_j, P_{j, 1}, P_{j, 2}, V_j]^T$$

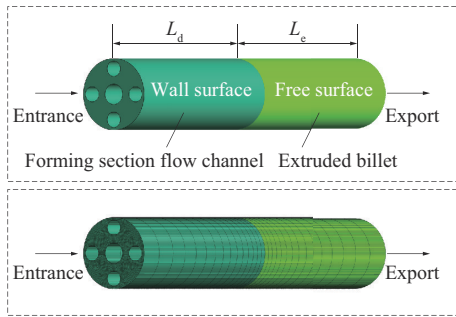
$$\begin{aligned} N_j &= N_{j, 0} \\ P_{j, 1L} &\leq P_{j, 1} \leq P_{j, 1U} \\ P_{j, 2L} &\leq P_{j, 2} \leq P_{j, 2U} \\ V_{jL} &\leq V \leq V_{jU} \end{aligned}$$

式中: $D_{j, \max}$ 和 $D_{j, \min}$ 分别为样本点中 D_j 的最大值和最小值; $O_{j, \max}$ 和 $O_{j, \min}$ 分别为样本点中 O_j 的最大值和最小值; 设计变量 x 包括螺杆转速 N_j 、主腔压力 $P_{j, 1}$ 、次腔压力 $P_{j, 2}$ 、牵引速度 V_j , 设计区间见表1; $N_j = N_{j, 0}$ 表示固定螺杆转速, 是为了加快后续优化迭代过程的收敛速度; $P_{j, 1L}$ 为第 j 个核心要素的主腔压力最小值; $P_{j, 1U}$ 为第 j 个核心要素的主腔压力最大值; $P_{j, 2L}$ 为第 j 个核心要素的次腔压力最小值; $P_{j, 2U}$ 为第 j 个核心要素的次腔压力最大值; V_{jL} 为第 j 个核心要素的牵引速度最小值; V_{jU} 为第 j 个核心要素的牵引速度最大值。

3.2 多目标优化算法

基于Kriging代理模型优化过程的完整步骤如下^[14-16]: ①定义优化问题; ②在设计空间采用Optimal LHS方法选取 n_s 个样本点; ③运用有限元分析软件Polyflow计算每个样本点的响应值 $y(x)$; ④

使用Kriging代理模型建立目标函数与设计变量之间的近似关系;⑤基于函数 $f(x)$ 计算期望提高 $EI(x)$;⑥选取对应最小目标函数值 $f(x_i)$ 的一个样本点作为优化初始点;⑦基于最大 EI 选择序列二次规划优化算法执行优化设计并获得修改的设计变量 x_k ;⑧利用Kriging模型得到 x_k 对应的预测值 $\hat{y}_k$;⑨运用有限元软件Polyflow计算响应值 $f(x_k)$;⑩如果收敛,则结束;如果不收敛,则将 x_k 添加到样本集中重新从第③步开始。Polyflow模拟过程中的流域模型、边界条件和网格划分,如图3所示。其中, L_d 为成型段流道长度, L_e 为挤出型坯长度。



L_d —Molding section flow channel length; L_e —Extrusion billet length

图3 五腔制品的微挤出边界条件与网格划分

Fig. 3 Micro-extrusion boundary conditions and mesh division of five-lumen product

3.3 多目标优化结果分析

通过数值模拟获得的五腔制品工艺参数的初始结果、LHS抽样结果和优化结果列于表2。其中,初始结果是将表1中4个设计变量分别取初始范围边界值的中间值,计算出对应的尺寸偏差 D 和椭圆度 O 。LHS抽样结果是指计算出40个初始样本点对应的目标函数值,取其中目标函数值最小的样本点所对应的工艺参数组合。优化结果是指优化迭代过程中目标函数值最小时所对应的工艺参数组合。从表2中五腔制品工艺参数的不同方法结果比较可知,与初始结果相比较,LHS抽样结果对应的尺寸偏差 D_3 与椭圆度 O_3 分别降低了70.7%与39.3%,优化结果对应的尺寸偏差 D_3 与椭圆度 O_3 分别降低了74.4%与39.9%。表明基于Kriging代理模型的优化方法明显降低了五腔制品的尺寸偏差与椭圆度,提高了五腔制品的成型质量。

根据表2中优化结果所对应的工艺参数组合,开展了五腔制品的微挤出成型试验,并采用工具显微镜等光学检验方法,测量了在标准温度和湿度状态下放置24小时后的五腔制品的成型精度,以验证

表2 五腔制品工艺参数的不同方法结果比较

Tab. 2 Comparison results of different methods for process parameters of five-lumen product

Methods	$N_3/$ ($r \cdot \min^{-1}$)	$P_{3,1}/$ Pa	$P_{3,2}/$ Pa	$V_3/$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$D_3/$ mm	$O_3/^\circ$
Initial result	4.6	500	500	16	0.625	19.8
LHS sampling result	4.6	30.4	346.0	16.3	0.183	12.0
Optimal result	4.6	50.7	387.4	16.6	0.160	11.9

优化方法与结果的可行性及有效性。模拟和试验优化结果分别如图4和5所示。可以看出,试验方法成型出的制品截面几何形状和尺寸与模拟方法所对应的优化结果定性一致。接下来,将进一步测量五腔制品的轮廓与壁厚参数,定量评价制品的成型质量。

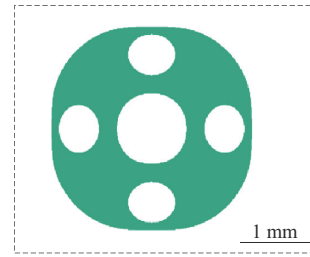


图4 五腔制品模拟优化结果

Fig. 4 Simulation optimal result of five-lumen product

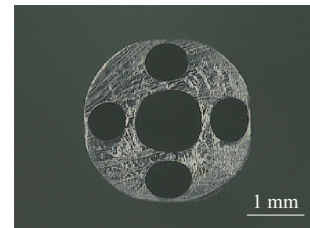


图5 五腔制品试验优化结果

Fig. 5 Experiment optimal result of five-lumen product

将图5的五腔制品截面在工具显微镜上进行测量,制品截面几何尺寸的测量位置如图1所示。针对五腔制品,分别测量 y, z 方向以及 y, z 方向成 45° 夹角的四个方向,得到外圆直径 d_3 、主腔直径 D_3 ;分别测量 $O_1 \sim O_4$ 四个位置,得到次腔与外圆之间壁厚 h_{3i} ;分别测量 $i_1 \sim i_4$ 四个位置,得到次腔与主腔之间壁厚 h_{3i} ,从而得到各核心尺寸测量要素的尺寸最大值与尺寸最小值,并计算出对应的最大尺寸偏差以及椭圆度。

根据图1所示测量位置,获得五腔制品的截面极限尺寸与偏差,列于表3。从表3数据可以看出,对于五腔制品截面,4个截面测量要素的最大尺寸偏差的范围为: $(-0.027 \sim +0.035) \text{ mm}$ 。其中,外圆直径与内筋壁厚均在设计值附近波动,而主腔直径与

表3 五腔制品的截面极限尺寸与偏差

Tab. 3 Ultimate size and demensional deviation of five-lumen products

Measurement element	Ultimate cross-sectional dimension/mm	Five-lumen product size/mm
Outer diameter	Maximum diameter $d_{\max}$	2.925
	Minimum diameter $d_{\min}$	2.873
	Maximum size deviation	-0.027
Main cavity diameter/ Subcavity diameter	Maximum diameter $D_{\max}$	0.875
	Minimum diameter $D_{\min}$	0.861
	Maximum size deviation	+0.035
Outer ring wall thickness	Maximum wall thickness $h_{o,\max}$	0.117
	Minimum wall thickness $h_{o,\min}$	0.106
	Maximum size deviation	+0.017
Inner reinforcement wall thickness	Maximum wall thickness $h_{i,\max}$	0.313
	Minimum wall thickness $h_{i,\min}$	0.277
	Maximum size deviation	-0.023

外环壁厚整体上均略大于设计值。其中,外圆直径、次腔直径、外环壁厚均在设计值附近波动,而内筋壁厚整体上略大于设计值。

总结以上结果可知,五腔制品各截面测量要素的尺寸偏差小于 $\pm 0.035\text{ mm}$,并且截面外环轮廓与各腔椭圆度均小于 5.1% ,两种制品尺寸偏差与椭圆度均满足了设计要求。此外,参考塑料模塑件尺寸公差的相关标准,如SJ/T 10628-1995塑料件尺寸公差、GB/T 14486-2008塑料模塑件尺寸公差,表明根据多目标优化方法获得的优化结果所对应的工艺参数,通过微挤出实验成型出的五腔制品,达到了较高的成型精度,满足制品设计要求。如果需要进一步提高制品成型精度,可以继续进行工艺参数的局部微调,并考虑成型设备控制精度、微挤出模具加工精度与工作状态对成型过程的影响。上述结果验证了针对复杂截面形状制品建立的工艺参数多目标优化方法的可行性与有效性,该方法有效提高了工艺参数调试效率与成型质量。

4 结论

通过多目标优化方法与微挤出成型实验相结合的方式,深入研究了成型工艺参数对聚丙烯五腔微管制品成型精度与性能的影响规律,并得出了以下结论。

(1)基于Kriging代理模型并结合多目标优化方法对成型工艺参数进行优化,显著降低了聚丙烯五腔微管制品的尺寸偏差与椭圆度。

(2)优化后的工艺参数组合能够有效改善制品的成型精度与形状一致性。与初始结果相比,五腔微管制品的尺寸偏差降低了 74.4% ,椭圆度降低了

39.9% 。

(3)根据多目标优化方法得出的工艺参数进行微挤出实验,成型后的五腔微管制品在尺寸和形状精度上均达到较高水平,满足制品的设计要求。这不仅验证了多目标优化方法的有效性,也为五腔微管制品的高效精密成型提供了可靠技术支持。

参考文献

- [1] 胡伟康,刘焕牢,何优.医用TPU薄壁微管的挤出工艺参数优化[J].塑料工业,2024,52(11):78-84,158.
HU Weikang, LIU Huanlao, HE You. Optimization of extrusion process parameters for medical TPU thin-walled microtubes[J]. Plastics Industry, 2024, 52(11):78-84, 158.
- [2] 史佳伟,徐秉恒,史宏斌,等.喷嘴结构及工艺参数对固体推进剂3D打印挤出成型的影响分析[J].固体火箭技术,2023,46(5):740-746.
SHI Jiawei, XU Bingheng, SHI Hongbin, et al. Analysis of nozzle structure and process parameters on 3D printing extrusion forming of solid propellant[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2023, 46(5):740-746.
- [3] 毛欣然,刘淑梅,胡祚麻,等.基于响应面法的血液透析继手挤出吹塑壁厚优化[J].塑料,2022,51(3):122-127.
MAO Xinran, LIU Shumei, HU Zuoxiu, et al. Optimization of wall thickness of hemodialysis joint based on response surface method[J]. Plastics, 2022, 51(3):122-127.
- [4] 陈慧明,周建平,许燕,等.挤出沉积成型工艺参数优化研究[J].机械设计与研究,2020,36(3):129-132.
CHEN Huiming, ZHOU Jianping, XU Yan, et al. Study on optimization of extrusion deposition process parameters[J]. Machine Design & Research, 2020, 36(3):129-132.
- [5] 邓小珍,刘彪,肖兵,等.聚合物双层微管单双侧气体辅助微挤出成型差异性研究[J].中国塑料,2023,37(8):55-60.
DENG Xiaozhen, LIU Biao, XIAO Bing, et al. Study on difference of single-side and double-side gas-assisted technology in polymer microtubule co-extrusion molding[J]. China Plastics, 2023, 37(8): 55-60.
- [6] CHO S, LEE E, JO S, et al. Extrusion characteristics of thin walled tubes for catheters using thermoplastic elastomer[J]. Polymers, 2020, 12(8). DOI:10.3390/polym12081628.
- [7] HUANG X, WANG L, ZHAO J X, et al. Fabrication and application of flexible rectangular microtubes[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2020, 59(9):959-965.
- [8] LIU W K, KIM W, PARK J M. Numerical study on the optimization of polymer extrusion process for a single-lumen micro catheter[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers-A, 2018, 42(12):1 059-1 065.
- [9] LEBAL N, PUISSANT S, SCHMIDT F. Application of a response surface method to the optimal design of the wall temperature profiles in extrusion die[J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1):47-58.