

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.10.014

黄铜粉末-PLA复合线材的FDM成型精度优化与试验

张巍¹,王振坤²,高相胜³,陈雄²,倪庆双²,阴永强²

(1. 内蒙古科技大学工程训练中心,内蒙古包头 014010; 2. 内蒙古科技大学机械工程学院,内蒙古包头 014010;

3. 北京工业大学先进制造技术北京市重点实验室,北京 100124)

摘要: 针对黄铜粉末-聚乳酸(PLA)复合线材(BPR-W-PLA)熔融沉积成型(FDM)的最佳工艺参数未知的情况,设计了含内孔、外圆、直角边、六方孔、圆台、狭缝形状的非标准测试件,结合单因素试验与响应面法分析FDM成型工艺参数(环境温度、喷嘴温度、挤出头速度、填充率、层高及壁厚)对BPR-W-PLA非标准测试件多形状加权综合收缩率的影响,将6个不同形状的收缩率合理简化为4个并作为最终的优化目标。鉴于各个形状的差异性,根据不同收缩率要求,通过设置不同收缩率权重系数的关系划分了4种情况,在单因素试验结果基础上针对这4种情况选取了综合收缩率最小的工艺参数。然后,利用Box-Behnken设计构建了六因素三水平响应面试验,得到了4个收缩率的回归模型,通过对模型残差的正态性分析、方差分析和显著性检验,验证所建回归模型具有高度的可靠性与预测精度。通过响应面分析,得到了各工艺参数的交互作用对4个收缩率的影响,发现最优成型工艺参数的选取与测试件的主要形状有关。对各形状权重系数相同时的最优工艺参数组合下打印的5个测试件进行t检验分析,验证了优化结果的准确性与可靠性。最后给出了成型不同形状结构时优选或避免的参数组合。研究结果揭示了BPR-W-PLA在不同工艺参数交互影响下的成型精度变化规律,为其他金属-聚合物复合材料依据成型形状选择最佳工艺参数的研究提供了借鉴。

关键词: 黄铜粉末-聚乳酸复合线材; 熔融沉积成型; 响应面法; 加权综合收缩率; 形状; 多工艺参数优化

中图分类号: TH16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)10-0104-12

Optimization and experiment of dimensional accuracy in FDM printing of brass powder-PLA composite filament

ZHANG Wei¹, WANG Zhenkun², GAO Xiangsheng³, CHEN Xiong², NI Qingshuang², YIN Yongqiang²

(1. The Engineering and Training Center, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;

2. School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China;

3. Beijing Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract : In view of the unknown optimal process parameters for fused deposition modeling (FDM) using brass powder-poly (lactic acid) (PLA) composite filament (BPR-W-PLA), non-standard test specimens with internal holes, outer circles, right-angle edges, hexagonal holes, conical frustums, and slit shapes were designed. A combination of single-factor experiments and response surface methodology was applied to analyze the effects of FDM process parameters (environmental temperature, nozzle temperature, printhead speed, infill rate, layer height, and wall thickness) on the weighted comprehensive shrinkage of multi-shaped BPR-W-PLA test specimens. The shrinkage of six different shapes was reasonably simplified into four categories and used as the final optimization objectives. Considering the variability among shapes, four cases were defined according to different shrinkage requirements by assigning the relationship between different weight coefficients. Based on single-factor experimental results, process parameters corresponding to the minimum comprehensive shrinkage were selected for each case. Subsequently, the response surface experiments with six factors and three levels were constructed by Box-Behnken design, with obtaining the regression models of the four shrinkages. The reliability and predictive accuracy of the regression models were validated through residual error normality analysis,

基金项目: 北京工业大学国际科研合作种子基金项目(2021A10), 内蒙古自然科学基金项目(2020MS05042), 内蒙古自治区直属高校基本科研业务费项目(2023QNJS047)

通信作者: 张巍, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为先进制造

收稿日期: 2025-07-18

引用格式: 张巍, 王振坤, 高相胜, 等. 黄铜粉末-PLA复合线材的FDM成型精度优化与试验[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(10): 104-115.

ZHANG Wei, WANG Zhenkun, GAO Xiangsheng, et al. Optimization and experiment of dimensional accuracy in FDM printing of brass powder-PLA composite filament[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(10): 104-115.

analysis of variance, and significance testing. Response surface analysis reveals the interactive effects of process parameters on the four shrinkages, and it is found that the selection of optimal process parameters is related to the dominant shape of the test specimen. Under the optimal parameter combination for equal weight coefficients, five test specimens were printed for t-test analysis, which confirms the accuracy and reliability of the optimization results. Finally, parameter combinations that should be preferred or avoided for forming different shapes were proposed. The findings reveal the variation patterns of forming accuracy of BPR-W-PLA under the interactive influence of process parameters, and provide useful reference for selecting optimal process parameters according to forming shapes in studies of other metal-polymer composites.

Keywords : brass powder-poly(lactic acid) composite filament ; fused deposition modeling ; response surface methodology ; weighted comprehensive shrinkage ; shape ; multi-process parameter optimization

熔融沉积成型(FDM)技术因成本低、成型快及制造复杂产品无附加成本,已成为高分子复合材料增材制造的主流工艺之一^[1-2]。金属-聚合物复合材料因兼具金属的力学性能和高分子聚合物的可加工性和特殊性能,在精密机械、医疗器械领域有广阔应用前景。然而,其FDM成型过程中因多参数耦合作用导致的尺寸收缩大和新型材料成型参数不详的问题,严重制约着新型材料的推广应用^[3]。在寻找最佳成型参数方法上,传统单因素参数优化方法难以全面反映多参数交互作用对收缩率的影响^[4]。由于新型成型材料精准成型参数的缺失,使得成型精度难以满足精密零件需求。建立多参数协同优化模型,探索金属-聚合物复合材料的FDM成型精准参数,对提升复合材料制件精度、拓展复合材料在精密制造领域的应用具有重要意义。

对增材制造成型精度的研究,研究人员做了很多工作。王超等^[5]用逆向数据采集分析了层高、温度、线宽对尺寸误差的作用机制;李科等^[6]优化参数缩短了成型时间,构建了FDM打印聚乳酸(PLA)的效率模型;王燕兰等^[7]用响应面法研究了碳纤维增强丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料的成型参数对成型质量的影响;陈彦君等^[8]优化了连续芳纶纤维增强热塑性聚氨酯复合材料打印参数以提升材料力学性能和制件表面质量;李久振等^[9]揭示了FDM工艺参数对连续玻璃纤维增强聚醚醚酮复合材料翘曲行为的交互作用。在金属-聚合物复合材料方面,Quarto等^[10]发现316L-聚合物复合材料在0.1 mm层高与20 mm/s挤出头速度组合下的密度最高,但其X和Y向收缩率仍达16%。Gong等^[11]分析了316L-聚合物复合材料在FDM打印、去除黏结剂及烧结后成型件的收缩特性。刘斌等^[12]通过正交试验证实喷嘴温度和填充率对金属-聚合物复合材料打印坯件

尺寸精度影响显著,层高是控制表面质量的关键。彭杰^[13]通过优化喷头结构和工艺参数提升了金属复合材料的打印精度。林梓威^[14]指出填充率对FDM制件尺寸精度影响显著,层高对FDM制件的翘曲变形影响最显著。Selvamani等^[15]研究了黄铜粉末-PLA复合材料含铜率和FDM成型填充结构对测试件的力学性能影响。Zhang等^[16]研究了铜纤维增强PLA在不同栅格角下成型样件的力学性能。综上所述,已有研究在不同材料的性能优化及成型参数建模方面取得了一定成果,但在金属/聚合物复合材料及其复杂几何结构的FDM成型收缩机制、系统试验设计、多参数耦合作用及协同优化模型等方面有待进一步研究。

笔者以黄铜粉末-PLA复合线材(BPR-W-PLA)为研究对象,结合单因素试验与响应面法,系统分析了6种工艺参数(环境温度、喷嘴温度、挤出头速度、填充率、层高、壁厚)对具有6类典型几何形状特征(内孔、外圆、直角边、小孔、圆台、狭缝)测试件加权综合收缩率的影响,建立多参数协同优化模型,深入分析测试件形状对收缩率的影响,最终得到含几类形状特征测试件的推荐打印工艺参数组合,为FDM高精度制造金属-PLA复合材料的研究提供了借鉴。

1 测试件设计与精度表征

为了获取BPR-W-PLA高精度成型的工艺参数,设计了包含各种形状特征的非标准测试件。

1.1 试验测试件设计

由于3D打印成型工艺可制造复杂零件。因此,被打印件的形状多为非标准复杂结构特征。将复杂结构特征归类为6种基本形状特征:内孔、外圆、直角边、六方孔、圆台、狭缝。非标准测试件几何形状与尺寸设计如图1所示。

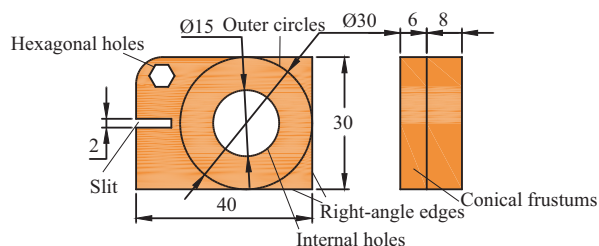


图1 非标准测试件几何形状与尺寸设计

Fig. 1 Design of non-standard test specimen geometries and dimensions

1.2 收缩率与精度

当无视打印过程材料的收缩时,测试件的设计尺寸与成型尺寸就会存在差异,这个差异即衡量了测试件的打印精度。定义几何线性收缩率 S_{α} ,见式(1)。将收缩率作为衡量测试件打印精度的指标。

$$S_{\alpha} = \frac{L_{ds} - L_{ms}}{L_{ds}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: S_{α} 为线性收缩率; L_{ds} 为设计尺寸; L_{ms} 为测试件的测量尺寸。

当测试件存在多种形状特征时,定义综合收缩率为 S_{as} ,见式(2)。

$$S_{as} = aS_{\alpha}^x + bS_{\alpha}^y + cS_{\alpha}^h + dS_{\alpha}^c + eS_{\alpha}^s + fS_{\alpha}^g \quad (2)$$

式中: S_{as} 为综合收缩率; a, b, c, d, e, f 为权重系数,权重系数用来区分测试件各形状的占比或者重要性, $a+b+c+d+e+f=1$; S_{α}^x 为测试件 X 方向收缩率; S_{α}^y 为测试件 Y 方向收缩率; S_{α}^h 为内孔直径收缩率; S_{α}^c 为外圆直径收缩率; S_{α}^s 为六方孔收缩率; S_{α}^g 为狭缝收缩率。

2 试验部分

2.1 试验材料和设备

测试件制作材料选用直径为1.75 mm的BPR-W-PLA(波兰Spectrum Group Sp. z o.o.公司生产)。该线材由质量分数30%的黄铜粉末(粒度40~45 nm)与质量分数70%的PLA均匀混合制成。黄铜粉末在PLA基体中均匀分布,且线材截面与表皮的材料一致性良好。粒度在35~45 nm的金属粉末可使打印成丝过程具备良好的流动性。

测试件由北京太尔时代科技有限公司INSPIRE S250 三维打印机制作(喷嘴直径0.4 mm)。打印机箱体内部环境温度由科隆测量技术(上海)有限

公司的缆式热电阻(RTD)传感器(型号OPTITEMP TRA-W20)实时监控;成型测试件尺寸使用双千分表三坐标测量仪(自制,精度为0.001 mm)检测^[17]。

非标准测试件打印原理如图2所示。双千分表三坐标测量仪的三维精度检测台如图3所示。

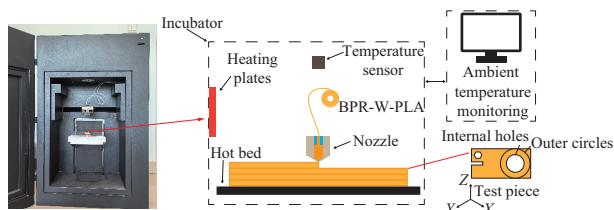


图2 非标准测试件打印原理

Fig. 2 Printing principle of non-standard test specimens

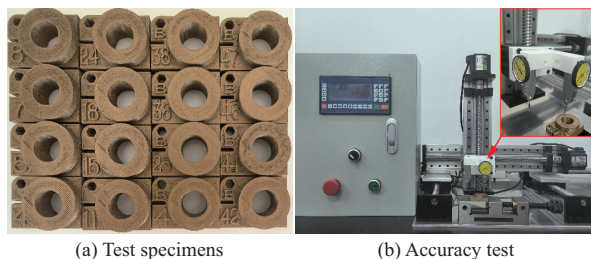


图3 测试件的精度检测

Fig. 3 Accuracy test of test specimens

2.2 试验方法

打印测试件前将线材放置于恒温干燥箱(60 °C)内干燥6 h,以去除线材水分。

为消除线材流动性和膨胀率对成型收缩率的影响,打印前对丝材的挤出成丝收缩率进行验证,并测量不同温度成丝收缩率。测量原理如图4所示。不同喷嘴温度下的成丝收缩率见表1。

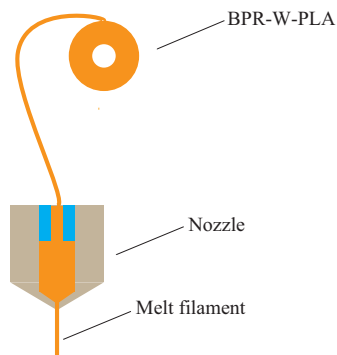


图4 成丝收缩率试验原理

Fig. 4 Theoretical basis of filament shrinkage test

表1 不同喷嘴温度下BPR-W-PLA的成丝收缩率

Tab. 1 Filament shrinkage of BPR-W-PLA at different nozzle temperatures

Items	Nozzle temperature/°C								
	190	195	200	205	210	215	220	225	230
Filament measurements/mm	0.401	0.398	0.398	0.397	0.396	0.397	0.398	0.399	0.403
Average filament shrinkage/%	-0.25	0.5	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0.25	-0.75

由表1可知,喷嘴温度在190~230 °C的范围内,BPR-W-PLA的成丝收缩率波动范围极小(-0.75%~1%),且未呈现随温度变化而明显变化的规律。这表明材料均匀性较好、成丝收缩率低且稳定。因此成丝收缩率被涵盖在 $S_{\alpha s}$ 中。

由于热床温度只对测试件前两层成型几何精度有较大影响,因此试验中固定热床温度为50 °C。

选择环境温度(A)、喷嘴温度(B)、挤出头速度(C)、填充率(D)、层高(E)、壁厚(F)作为研究BPR-W-PLA成型精度的参数变量。

以上述6个典型形状的测试件收缩率为优化目标,先采用单因素试验控制变量法分析各工艺参数对收缩率的独立作用规律。后依据作用规律确定各参数的0水平值。再采用Box-Behnken设计(BBD)响应面法设计六因素三水平的试验组,分析6个变量交互作用对测试件综合收缩率的影响。

3 试验设计与结果分析

3.1 单因素试验

3.1.1 试验方案设计

通过单因素试验确定各参数水平值。并分析

各参数对收缩率的独立作用规律。每次试验仅改变一个因素,固定其他因素为基础水平。根据单因素试验结果中收缩率的变化趋势,确定响应面分析的各因素水平范围。

6个工艺参数的单因素试验水平设计见表2。根据表2选定的水平值对BPR-W-PLA材料进行打印成型。

表2 单因素试验各参数的水平设计

Tab. 2 Design of levels for parameters in single-factor experiments

Items	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	$C/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$D/\%$	E/mm	F/mm
Min	20	190	30	10	0.1	0.4
Max	40	230	80	40	0.3	1.2
Interval	10	10	10	10	0.1	0.4

根据式(1)分别计算成型后测试件的内孔、外圆、直角边、六方孔、圆台、狭缝的收缩率。检测发现,狭缝和直角边的收缩可借用 S_{α}^x 和 S_{α}^y 表征,六方孔的收缩与内孔收缩极为接近,圆台的收缩与外圆收缩极为接近。为合理简化分析过程,最终确定 $S_{\alpha}^x, S_{\alpha}^y, S_{\alpha}^h, S_{\alpha}^c$ 为优化目标。

3.1.2 试验结果与分析

单因素试验结果见表3(去除重复项,即表中标红的一行),并绘制图5。

表3 单因素试验结果

Tab. 3 Single-factor experimental results

Run	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	$C/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$D/\%$	E/mm	F/mm	$S_{\alpha}^x/\%$	$S_{\alpha}^y/\%$	$S_{\alpha}^h/\%$	$S_{\alpha}^c/\%$
1	20	210	50	40	0.2	0.4	0.88	0.80	3.29	1.40
2	30	210	50	40	0.2	0.4	0.18	0.02	2.55	0.58
3	40	210	50	40	0.2	0.4	0.22	0.04	3.42	0.98
4	30	190	50	40	0.2	0.4	0.72	0.42	2.36	0.51
5	30	200	50	40	0.2	0.4	0.12	0.04	2.49	0.42
7	30	220	50	40	0.2	0.4	1.17	0.13	1.82	0.44
8	30	230	50	40	0.2	0.4	0.43	0.11	2.49	1.11
9	30	210	30	40	0.2	0.4	0.38	0.18	2.49	0.73
10	30	210	40	40	0.2	0.4	0.25	0.16	2.71	0.47
12	30	210	60	40	0.2	0.4	0.60	0.36	2.84	2.80
13	30	210	70	40	0.2	0.4	0.68	0.31	2.36	2.16
14	30	210	80	40	0.2	0.4	0.48	0.24	2.62	0.36
15	30	210	50	10	0.2	0.4	0.97	0.56	2.09	1.22
16	30	210	50	20	0.2	0.4	0.62	0.16	2.49	0.78
17	30	210	50	30	0.2	0.4	0.57	0.38	2.58	0.64
19	30	210	50	40	0.1	0.4	0.37	0.29	1.51	0.82
21	30	210	50	40	0.3	0.4	0.27	0.02	2.98	0.04
23	30	210	50	40	0.2	0.8	0.17	0.20	2.58	0.22
24	30	210	50	40	0.2	1.2	0.07	0.07	2.44	0.49

表3中所有收缩率值均大于0,表明在无视材料收缩影响的情况下打印的测试件实际尺寸总会小于设计尺寸。 $S_{\alpha}^x, S_{\alpha}^y, S_{\alpha}^h, S_{\alpha}^c$ 最小值分别为0.07%, 0.02%, 1.51%, 0.04%。

由图5a可见,随 A 升高各收缩率均先降后升,当 $A=30^{\circ}\text{C}$ 时均最小。 S_{α}^h 高于其他收缩率。

由图5b可见,随 B 升高各收缩率均存在一定波动情况。 $B=200^{\circ}\text{C}$ 时 S_{α}^x 和 S_{α}^c 最小,即对横边和外圆

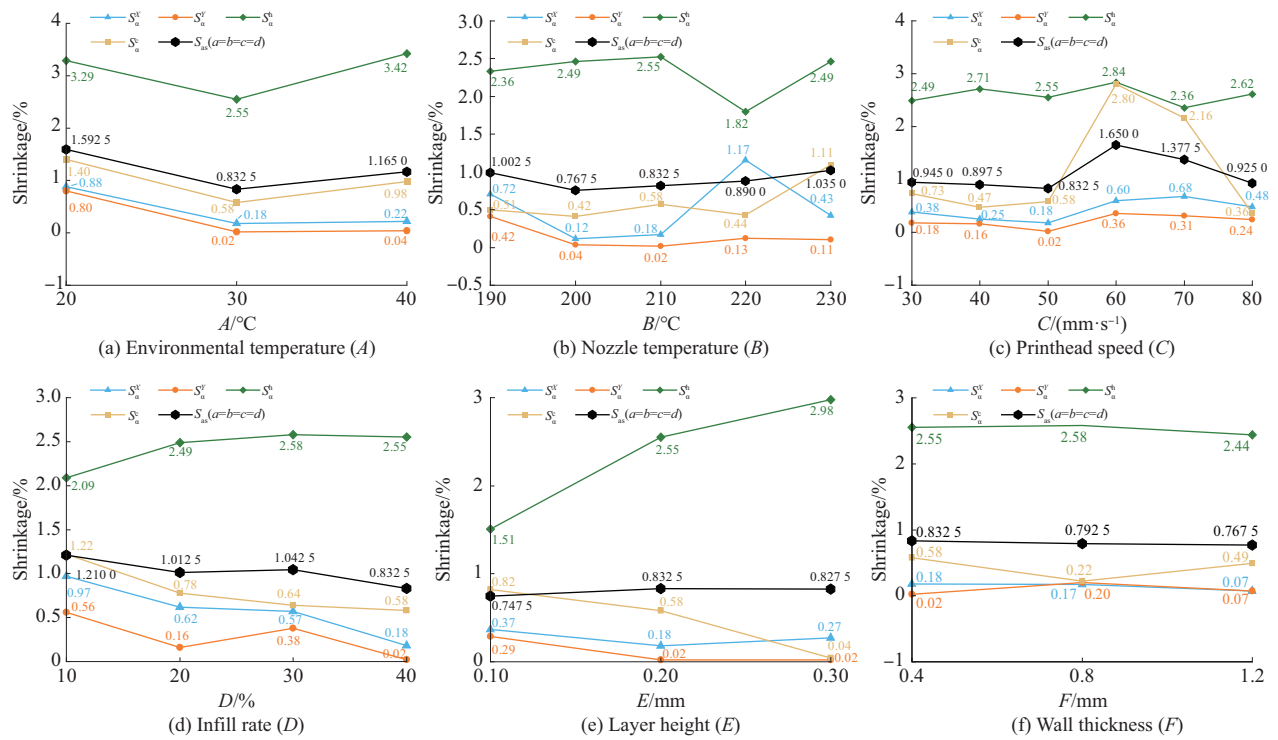


图5 单因素试验中不同参数下的测试件收缩率变化

Fig. 5 Variation of shrinkage of test specimens under different parameters in single-factor experiments

成型友好。 $B=220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 S_{α}^h 最小,即对孔成型友好。 $B>220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时 S_{α}^x 下降明显, S_{α}^y 变化较小,而 S_{α}^h 与 S_{α}^c 上升。

由图5c可见,随 C 升高 S_{α}^x 、 S_{α}^y 、 S_{α}^h 变化平缓而 S_{α}^c 波动大。 $C=40\text{ mm/s}$ 左右时 S_{α}^c 较小且稳定; $C=50\text{ mm/s}$ 时 S_{α}^x 和 S_{α}^y 最小; $C=70\text{ mm/s}$ 时 S_{α}^h 最小; $C=80\text{ mm/s}$ 时 S_{α}^c 最小,但 $C=60\text{ mm/s}$ 时 S_{α}^c 骤增到2.8%。经重复性试验证实, S_{α}^c 出现峰值原因为该特定挤出速度下打印机系统出现共振,导致成型表面产生波浪纹,致使收缩率增大。

由图5d可见,随 D 增加, S_{α}^x 、 S_{α}^y 、 S_{α}^c 总体减小,当 $D=40\%$ 时最小; S_{α}^h 先增后减, $D=10\%$ 时最小。 $D=40\%$ 时有利于降低测试件的综合收缩率。

由图5e可见,随 E 增加, S_{α}^x 先降后升, S_{α}^y 和 S_{α}^c 总体减小, S_{α}^h 递增。 $E=0.1\text{ mm}$ 时 S_{α}^h 最小; $E=0.2\text{ mm}$ 时 S_{α}^x 和 S_{α}^y 最小; $E=0.3\text{ mm}$ 时 S_{α}^c 最小, S_{α}^h 不变。

由图5f可见,随 F 增加, S_{α}^x 递减, S_{α}^y 和 S_{α}^h 先升后降, S_{α}^c 先降后升。 $F=0.4\text{ mm}$ 时 S_{α}^y 最小; $F=0.8\text{ mm}$ 时 S_{α}^c 最小; $F=1.2\text{ mm}$ 时 S_{α}^x 和 S_{α}^h 最小。

3.1.3 综合收缩率分析

根据以上分析,由于形状的差异性,各工艺参数对收缩率影响是不同的,需分情况分析。根据不同的收缩率要求,通过设置不同收缩率权重系数的关系

分了4种情况,对应的典型零件如图6所示,相应的权重系数的关系见表4。对这4种情况的描述如下。

情况1:被测零件中各形状收缩率均衡或者要求收缩效应相同,适用于多形状混合零件,如图6a所示。

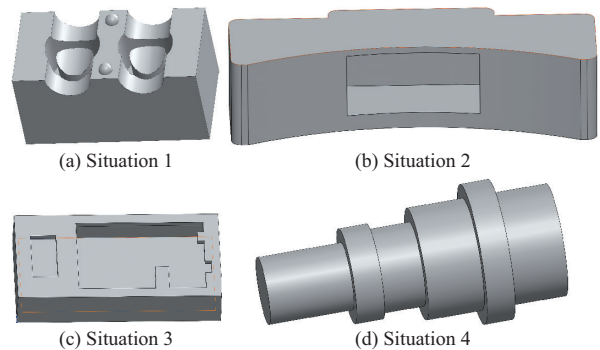


图6 4种情况对应典型零件示例

Fig. 6 Typical example of typical components corresponding to 4 situations

表4 最小 S_{α} 下的工艺参数选取

Situations	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/^{\circ}\text{C}$	$C/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	$D/\%$	E/mm	F/mm	Condition ¹⁾
Situation 1	30	200	50	40	0.1	1.2	$a=b=c=d$
Situation 2	30	200	40	40	0.2	1.2	$c<a=b=d$
Situation 3	30	200	40	40	0.1	1.2	$d<a=b=c$
Situation 4	30	220	80	40	0.1	0.8	$a=b<c=d$

Notes: 1) Condition represents relationship between weight coefficients.

情况2:忽视被测零件中内孔形状收缩率,其他形状收缩效应相同,适用于少孔类零件,如图6b所示。

情况3:忽视被测零件中外圆形状收缩率,其他形状收缩效应相同,适用于方块类零件,如图6c所示。

情况4:忽视被测零件中方块类形状收缩率,内孔类和外圆形状收缩效应相同,适用于圆柱类零件,如图6d所示。

利用公式(2)分别求出4种情况的综合收缩率。其中将情况1的综合收缩率曲线用黑实线绘制在图5。计算发现:4种情况的综合收缩率曲线走势一致,只是在纵坐标的位置存在区别。由于不影响4种情况的综合收缩率最小值的横坐标选取,为减少曲线条数,在图5中只给出情况1的曲线,其他情况曲线走势可参照情况1。将4种情况选取的6个最优工艺参数列入表4。

由表4可知, A 和 D 的取值是相同的。表明在面对不同形状测试件时, A 和 D 对打印精度的适应性较强。表4提供了BPR-W-PLA线材成型参数,但工艺参数选取较为粗糙。需用响应面法分析6个参数对精确成型的交互影响。

3.2 响应交互试验

3.2.1 BBD 试验设计方案及结果

基于单因素试验中6个工艺参数对收缩率的敏感性,确定各自的三水平取值。选取 A (20, 30, 40 °C), B (190, 200, 210 °C), C (30, 40, 50 mm/s), D (20%, 30%, 40%), E (0.1, 0.2, 0.3 mm)及 F (0.4, 0.8, 1.2 mm)作为水平取值。

采用BBD构建六因素三水平响应面试验,设计54组试验。其中包含6个中心点试验。运用Design-Expert软件对54组实测数据进行响应面分析。得到编码因子表示的4个收缩率多项式回归方程见式(3)至式(6)。为验证4个回归方程式的可靠性进行残差正态性分析,如图7所示。

图7中,残差数据点趋近于参考线,表明残差服从正态分布。显然4个多项式回归方程均存在极值,因此可开展参数优化分析。

$$S_{\alpha}^x = 10^{-2}(72.50 - 3.29A + 1.79B + 1.13C - 2.54D - 5.12E + 0.25F - 3.75AB - 2.88AC + 0.75AD - 3AE - 0.12AF + 4.63BC - 0.25BD + 4.06BE - 2.25BF + 2.13CD - 0.37CE - 1.13CF + 2DE + 4.38DF + 0.5EF + 9.36A^2 + 9.78B^2 + 14.32C^2 + 24.86D^2 + 26.628E^2 + 6.94F^2)(3)$$

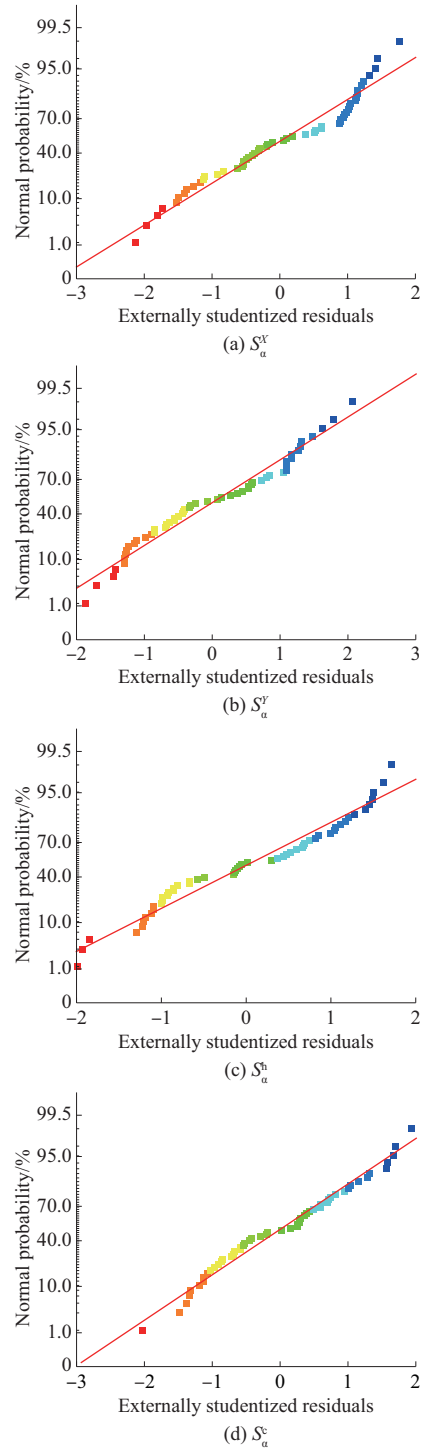


图7 残差正态概率图

Fig. 7 Normal probability plot of residuals

$$S_{\alpha}^y = 10^{-2}(29.33 + 6.46A - 1.79B + 1.5C - 7.42D - 5.37E + 6F + 1.63AB - 2.12AC - 7.75AD - 4.13AE - 3.37AF + 11.13BC + 1.38BD + 7BE - 9.88BF - 4.5CD + 0.12CE - 0.94CF - 1.12DE + 19.25DF - 5.12EF - 17.01A^2 - 2.06B^2 + 11.15C^2 + 13.86D^2 + 8.44E^2 - 3.35F^2)(4)$$

$$S_{\alpha}^h = 10^{-2}(123 + 14.21A - 3.38B - 2.92C - 6.54D + 5.21E - 23.83F - 23.62AB + 6.37AC - 0.5AD + 1.88AE + 2.37AF - 6.5BC - 2.62BD + 18.88BE + 32.75BF - 22.87CD + 4.25CE - 2.63CF + 9.37DE - 16.88DF - 1.5EF + 69.26A^2 + 29.01B^2 + 42.14C^2 + 22.76D^2 + 49.76E^2 + 34.89F^2) \quad (5)$$

$$S_{\alpha}^c = 10^{-2}(61.67 + 17.83A - 1.5B + 1.5C - 7.88D - 8.37E + 2.62F - 2.37AB + 3.13AC - 1.19AD - 0.75AE - 0.12AF - 10.13BC - 0.38BD + 4.06BE + 2.25BF + 5CD - 7.87CE + 0.06CF + 2.75DE + 8DF + 4.5EF + 3.92A^2 + 11.25B^2 + 9.83C^2 + 13.54D^2 + 14.63E^2 - 0.79F^2) \quad (6)$$

为检测二次多项式回归模型的显著性,进行方差分析(ANOVA)和显著性检验。表5至表8分别为 $S_{\alpha}^x, S_{\alpha}^y, S_{\alpha}^h, S_{\alpha}^c$ 的方差分析及显著性检验表。为更清

晰地表达显著性组合,各表去除了不显著方差来源项。

表5至表8中的模型概率 $P=0.0001 < 0.01$,表明二次回归模型极显著;失拟项的 $P > 0.05$,表明 $S_{\alpha}^x, S_{\alpha}^y, S_{\alpha}^h, S_{\alpha}^c$ 影响因素的数据模型合理;模型的决定系数 R^2 均大于0.95,校正决定系数 R_{Adj}^2 均大于0.9,表明该模型可用于BPR-W-PLA的 $S_{\alpha}^x, S_{\alpha}^y, S_{\alpha}^h, S_{\alpha}^c$ 工艺参数的可靠分析与预测。

各工艺参数对 X 向收缩率、 Y 向收缩率、内孔收缩率、外圆收缩率的影响程度不同:对 X 向收缩率影响由高到低为 $E > A > D > B > C > F$;对 Y 向收缩率影响由高到低为 $D > A > F > E > B > C$;对内孔收缩率影响由高到低为 $F > A > D > E > B > C$;对外圆收缩率影响由高到低为 $A > E > D > F > B > C$ 。

3.2.2 响应面分析

为进一步研究 A, B, C, D, E, F 各因素交互作用

表5 S_{α}^x 方差分析及显著性检验表

Tab. 5 ANOVA and tests of significance for S_{α}^x

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	Statistical significance
Model	1.71	27	0.063 5	23.63	< 0.000 1	Significant
A	0.026	1	0.026	9.68	0.004 5	
D	0.015 5	1	0.015 5	5.77	0.023 7	
E	0.063	1	0.063	23.47	< 0.000 1	
BC	0.017 1	1	0.017 1	6.37	0.018	
BE	0.026 4	1	0.026 4	9.83	0.004 2	
DF	0.015 3	1	0.015 3	5.7	0.024 5	
Residual	0.069 8	26	0.002 7			
Lack of fit	0.063 9	21	0.003	2.56	0.150 8	Not significant
Pure error	0.006	5	0.001 2			
Cor total	1.78	53				

Notes: $R^2=0.9609$; $R_{Adj}^2=0.9202$.

表6 S_{α}^y 方差分析及显著性检验表

Tab. 6 ANOVA and tests of significance for S_{α}^y

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	Statistical significance
Model	1.73	27	0.064 1	19.68	< 0.000 1	Significant
A	0.100 1	1	0.100 1	30.76	< 0.000 1	
D	0.132	1	0.132	40.56	< 0.000 1	
E	0.069 3	1	0.069 3	21.3	< 0.000 1	
F	0.086 4	1	0.086 4	26.54	< 0.000 1	
AD	0.096 1	1	0.096 1	29.52	< 0.000 1	
BC	0.099	1	0.099	30.42	< 0.000 1	
BE	0.078 4	1	0.078 4	24.09	< 0.000 1	
BF	0.078	1	0.078	23.97	< 0.000 1	
CD	0.016 2	1	0.016 2	4.98	0.034 5	
DF	0.296 4	1	0.296 4	91.08	< 0.000 1	
EF	0.021	1	0.021	6.46	0.017 4	
Residual	0.084 6	26	0.003 3			
Lack of fit	0.071 3	21	0.003 4	1.27	0.428 4	Not significant
Pure error	0.013 3	5	0.002 7			
Cor total	1.81	53				

Notes: $R^2=0.9534$; $R_{Adj}^2=0.9049$.

表7 S_{α}^h 方差分析及显著性检验表
Tab. 7 ANOVA and tests of significance for S_{α}^h

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	Statistical significance
Model	14.17	27	0.524 8	23.86	< 0.000 1	Significant
A	0.484 5	1	0.484 5	22.03	< 0.000 1	
D	0.102 7	1	0.102 7	4.67	0.040 1	
F	1.36	1	1.36	61.98	< 0.000 1	
AB	0.446 5	1	0.446 5	20.3	0.000 1	
BE	0.57	1	0.57	25.91	< 0.000 1	
BF	0.858 1	1	0.858 1	39.01	< 0.000 1	
CD	0.418 6	1	0.418 6	19.03	0.000 2	
DF	0.227 8	1	0.227 8	10.36	0.003 4	
Residual	0.571 9	26	0.022			
Lack of fit	0.476	21	0.022 7	1.18	0.467 4	Not significant
Pure error	0.095 9	5	0.019 2			
Cor total	14.74	53				

Notes: $R^2=0.961\ 2$; $R_{Adj}^2=0.920\ 9$.

表8 S_{α}^c 方差分析及显著性检验表
Tab. 8 ANOVA and tests of significance for S_{α}^c

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	Statistical significance
Model	2	27	0.074 1	24.19	< 0.000 1	Significant
A	0.763 3	1	0.763 3	249.08	< 0.000 1	
D	0.148 8	1	0.148 8	48.57	< 0.000 1	
E	0.168 3	1	0.168 3	54.93	< 0.000 1	
F	0.016 5	1	0.016 5	5.4	0.028 3	
BC	0.082	1	0.082	26.76	< 0.000 1	
BE	0.026 4	1	0.026 4	8.62	0.006 9	
CD	0.02	1	0.02	6.53	0.016 8	
CE	0.049 6	1	0.049 6	16.19	0.000 4	
DF	0.051 2	1	0.051 2	16.71	0.000 4	
EF	0.016 2	1	0.016 2	5.29	0.029 8	Not significant
Residual	0.079 7	26	0.003 1			
Lack of fit	0.049 9	21	0.002 4	0.399 9	0.936 9	
Pure error	0.029 7	5	0.005 9			
Cor total	2.08	53				

Notes: $R^2=0.961\ 7$; $R_{Adj}^2=0.921\ 9$.

对 $S_{\alpha}^x, S_{\alpha}^y, S_{\alpha}^h, S_{\alpha}^c$ 的影响,将 3.2.1 节结果中显著交互作用关系绘制在图 8 中。

图 8a 表明, $E \in (0.15, 0.25)$, $B \in (195, 205)$ 时, S_{α}^x 较小。 $E=0.1\text{ mm}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^x 较大,显然熔丝在 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时黏度较低,层间结合力弱; $E=0.1\text{ mm}$ 协同 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^x 较大,显然温度较高熔丝流动性增大,过低的层高使挤出丝表面积增加,冷却时温差梯度大,热应力积累导致 X 方向收缩率增大。

图 8b 表明, $A \in (20, 25)$, $D \in (25\%, 35\%)$ 时, S_{α}^y 较小,而 $A=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 协同 $D=20\%$ 或 $D=40\%$ 时, S_{α}^y 较大。显然室温对 Y 方向的打印成型有利。

图 8c 表明, $B \in (200, 210)$, $C \in (30, 40)$ 时, S_{α}^y 较小,而 $C=30\text{ mm/s}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $C=50\text{ mm/s}$ 协同 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^y 较大,说明低温低速时挤出不足和高温高速时热应力累积是导致 S_{α}^y 增大的原因。

图 8d 表明, $E \in (0.2, 0.25)$, $B \in (190, 195)$ 时, S_{α}^y 较小,而 $E=0.1\text{ mm}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^y 较大,与图 8a 中该参数组合下的 S_{α}^x 类似。

图 8e 表明, $F=0.4\text{ mm}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^y 最小, $F=1.2\text{ mm}$ 协同 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^y 较小,说明提高喷嘴温度需要同时增加壁厚以减小 Y 方向的收缩率。

图 8f 表明, $F=0.4\text{ mm}$ 协同 $D=40\%$ 时, S_{α}^y 最小,而 $F=1.2\text{ mm}$ 协同 $D=40\%$ 和 $F=0.4\text{ mm}$ 协同 $D=20\%$ 时, S_{α}^y 较大,表明 D 和 F 保持一定的比例关系时,可降低 Y 方向的收缩率。

图 8g 表明, $A \in (25, 35)$, $B \in (190, 205)$ 时, S_{α}^h 较小,而 $A=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 协同 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $A=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^h 较大。显然环境温度和喷嘴温度不能相差过大,否则易导致内孔的收缩率增大。

图 8h 表明, $E \in (0.15, 0.25)$, $B \in (195, 205)$ 时, S_{α}^h 较

小,而 $E=0.1\text{ mm}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $E=0.3\text{ mm}$ 协同 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^h 较大,说明材料熔融欠佳时层高过低会导致内孔的收缩率增加。而材料过度熔融时,在较高层高下易发生过度铺展,同样会导致内孔的收缩率增加。

图8i表明, $F\in(0.8, 1.0)$, $B\in(195, 200)$ 时, S_{α}^h 较小,而 $F=0.4\text{ mm}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $F=1.2\text{ mm}$ 协同 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^h 较大,说明若要降低内孔的收缩率,壁厚和喷嘴温度的搭配应适宜,避免两者过低或过高。

图8j表明, $C\in(35, 45)$, $D\in(25\%, 35\%)$ 时, S_{α}^h 较小,而 $C=30\text{ mm/s}$ 协同 $D=40\%$ 和 $C=50\text{ mm/s}$ 协同 D

$=20\%$ 时, S_{α}^h 较大,说明低速高填充或高速低填充会增加内孔的收缩率。

图8k表明, $F\in(0.8, 1.2)$, $D\in(25\%, 40\%)$ 时, S_{α}^h 较小,而 $F=0.4\text{ mm}$ 协同 $D=40\%$ 时, S_{α}^h 最大,表明适当提高壁厚并配合较小的填充率可使内孔的收缩率降低。

图8l表明, $B\in(195, 205)$, $C\in(35, 45)$ 时, S_{α}^c 较小,而 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 协同 $C=30\text{ mm/s}$ 和 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 协同 $C=50\text{ mm/s}$ 时, S_{α}^c 较大,表明高温低速和低温高速打印均对外圆的成型精度不利。

图8m表明, $E\in(0.2, 0.3)$, $B\in(195, 205)$ 时, S_{α}^c 较小,而 $E=0.1\text{ mm}$ 协同 $B=190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^c 最大。 $E=0.1$

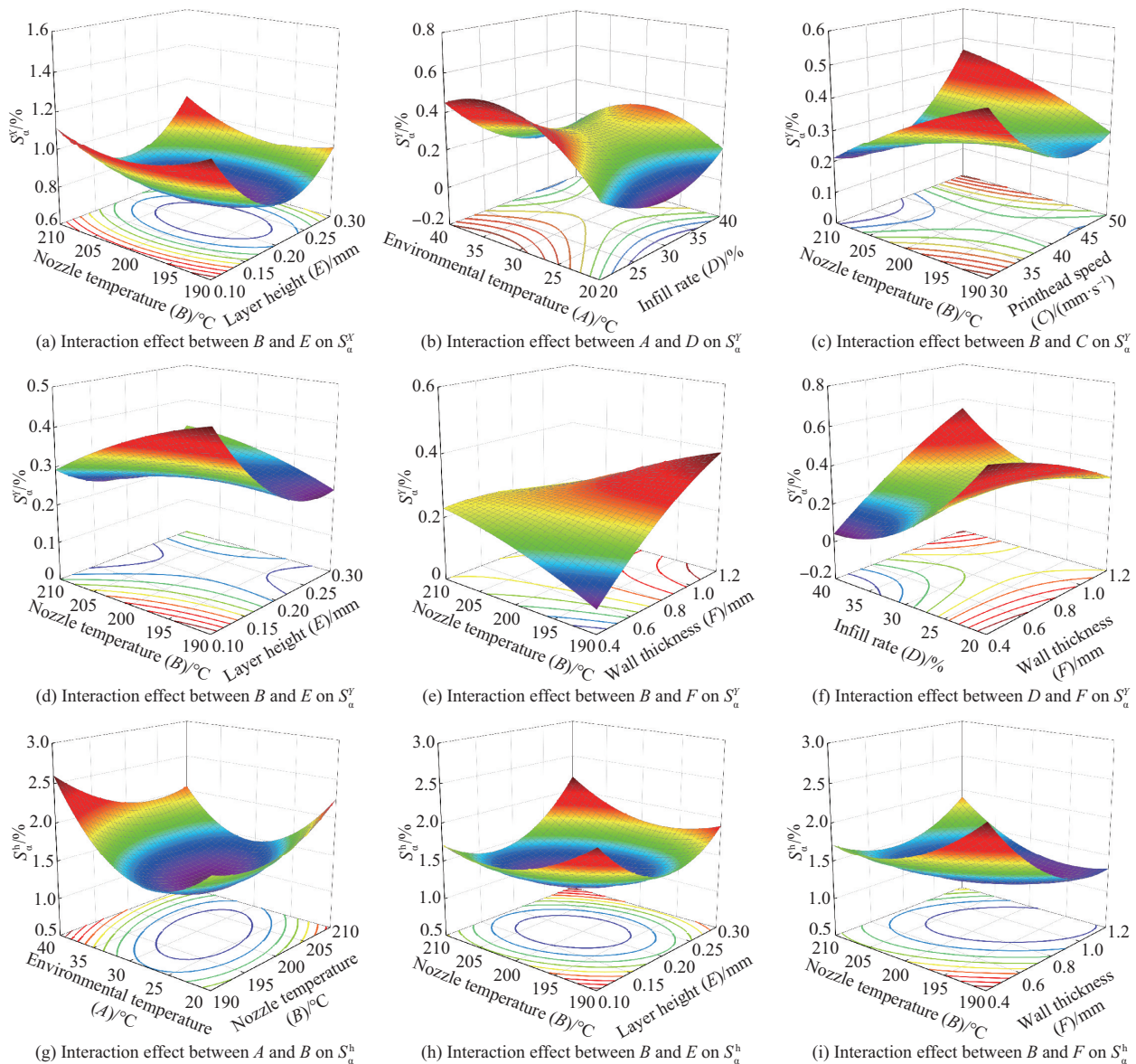


图8 因素间交互作用影响

Fig. 8 Interaction effects between factors

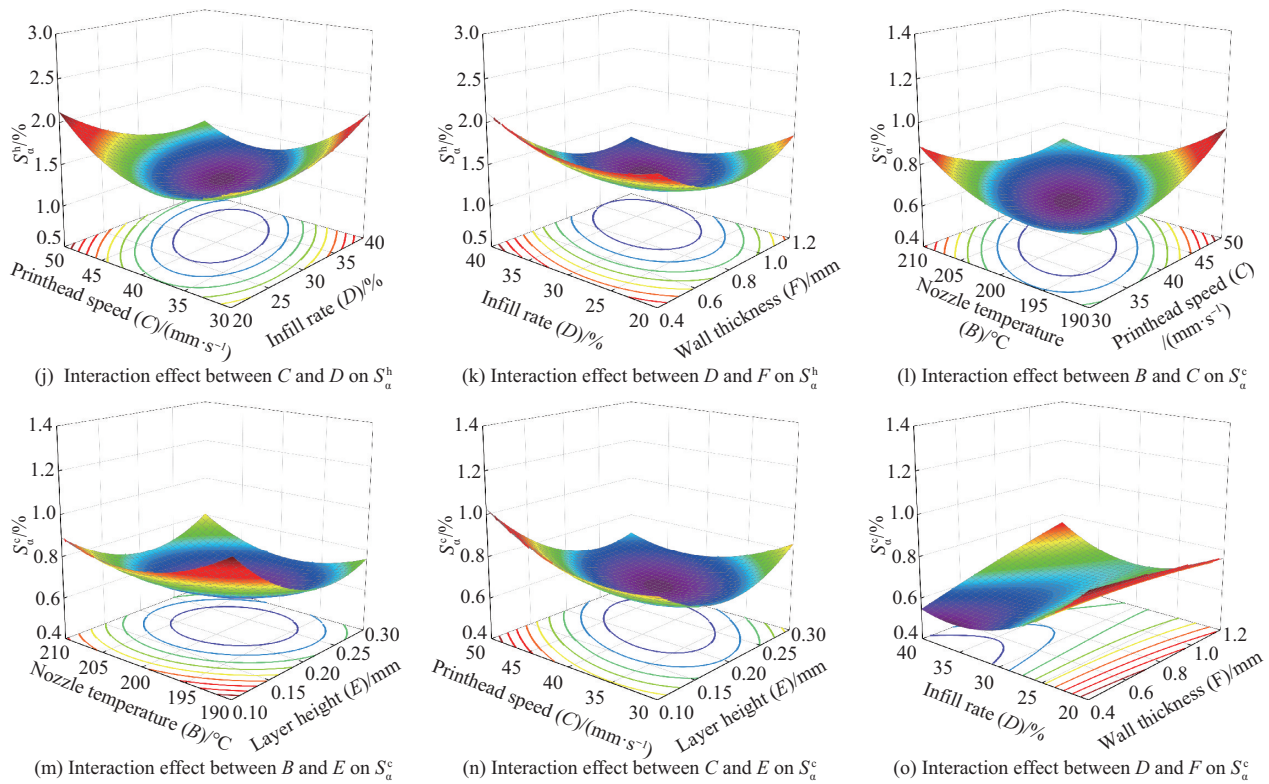


图8 因素间交互作用影响(续)

Fig. 8 Interaction effects between factors (continued)

mm 协同 $B=210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, S_{α}^c 较大, 这与图 8a 的 S_{α}^x 和图 8d 的 S_{α}^y 变化趋势类似。

图 8n 表明, $E \in (0.2, 0.3)$, $C \in (35, 45)$ 时, S_{α}^c 较小, 而 $E=0.1\text{ mm}$ 协同 $C=50\text{ mm/s}$ 时, S_{α}^c 最大, 说明在较小的层高下, 提升打印速度会增大外圆的收缩率。

图 8o 表明, $D=40\%$ 和 $F=0.4\text{ mm}$ 时, S_{α}^c 最小。 $F=0.4\text{ mm}$ 协同 $D=20\%$ 时, S_{α}^c 最大, $F=1.2\text{ mm}$ 协同 $D=40\%$ 和 $F=1.2\text{ mm}$ 协同 $D=20\%$ 时, S_{α}^c 较大, 这表明高填充率协同高壁厚与低填充率协同低壁厚均对外圆的成型精度不利。

3.2.3 最佳工艺参数与试验验证

根据 Design-Expert 软件运行结果, 进一步确定全局最优工艺参数, 优化后的工艺参数和依据切片软件工程化后的工艺参数列入表 9。并得到各理想收缩率: $S_{\alpha}^x=0.768\%$, $S_{\alpha}^y=0.188\%$, $S_{\alpha}^h=1.407\%$, $S_{\alpha}^c=0.512\%$ 。以表 9 中的工程化参数打印 5 个测试件。

由于总体样本较少且总体标准差未知, 因此采

表9 响应面法优化的工艺参数

Tab. 9 Process parameters optimized by response surface methodology

Condition	A/ $^{\circ}\text{C}$	B/ $^{\circ}\text{C}$	C/(mm·s ⁻¹)	D/%	E/mm	F/mm
$a=b=c=d$	24.447	199.842	39.915	31.436	0.21	0.748
Engineering	24.5	200	40	30	0.2	0.8

用单总体 t 检验(置信度 $\alpha=0.05$)验证最佳工艺参数的准确性。

设 t 检验公式为式(7)。

$$S_{\alpha} = \frac{\bar{x} - \mu^*}{\frac{s}{\sqrt{n}}}$$

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i^*}{n} \quad (7)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i^* - \bar{x})^2}{n-1}}$$

式中: $\bar{x}$ 为标准平均数; s 为标准差; $*$ 为上标 X , Y, h, c ; $i=1, 2, 3, 4, 5$; $\mu^x=0.768\%$, $\mu^y=0.188\%$, $\mu^h=1.407\%$, $\mu^c=0.512\%$; $n=5$; x_i^* 为 4 个收缩率对应的 5 个样本实测值。

表 10 为 t 检验结果汇总表。表中, $t_{0.025}(4)=t_{\frac{\alpha}{2}}(n-1)$, 通过 t 分布临界值表查得 $t_{0.025}(4)=2.776$ 。

由表 10 可知, $S_{\alpha}^x, S_{\alpha}^y, S_{\alpha}^h, S_{\alpha}^c$ 的 t 值均满足 $|t| < 2.776$, 表明各形状收缩率的实测值与模型预测值无显著差异。由于综合收缩率 $S_{\alpha s}$ 是各项收缩率的加权组合, 因此有效证明了基于响应面法获取的综合收缩率最优工艺参数是准确可靠的。

表10 t检验结果汇总表

Tab. 10 Summary table of t-test results

Items	$S_{\alpha}^x/\%$	$S_{\alpha}^y/\%$	$S_{\alpha}^h/\%$	$S_{\alpha}^c/\%$
Measured value(x_i^*)	0.77	0.18	1.38	0.55
	0.73	0.19	1.89	0.49
	0.76	0.15	1.74	0.57
	0.78	0.17	1.40	0.53
	0.74	0.19	1.28	0.52
Sample mean ($\bar{x}$)	0.756	0.176	1.538	0.532
Sample standard deviation (s)	0.020 7	0.016 7	0.262 3	0.030 3
t -value	-1.294 0	-0.160 4	1.116 6	1.474 4
$t_{0.025}(4)$	2.776			

4 结论

通过对BPR-W-PLA线材FDM过程中6大工艺参数(环境温度 A 、喷嘴温度 B 、挤出头速度 C 、填充率 D 、层高 E 、壁厚 F)对多形状成型测试件收缩率影响的研究,得到如下结论。

(1)打印多形状测试件时,最佳工艺参数为 $A=24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $B=200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $C=40\text{ mm/s}$ 、 $D=30\%$ 、 $E=0.2\text{ mm}$ 、 $F=0.8\text{ mm}$ 。当考虑零件形状情况时,工艺参数可参考表4。

(2)对各收缩率影响最大的参数分别为:层高 E (X 向),填充率 D (Y 向),壁厚 F (内孔),环境温度 A (外圆)。

(3)针对不同形状的结构选用工艺参数时应遵循以下原则:

①为降低狭缝、直角边等形状结构的 X 方向收缩率,选用精密打印($E=0.1\text{ mm}$)时,应避免喷嘴温度过低或过高。

②为降低狭缝、直角边等形状结构的 Y 方向收缩率,应在室温进行打印($A=22\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$),尽量避免环境温度过大波动。另外,不宜采用低温低速和高温高速进行打印,同时提高喷嘴温度的同时需要增加壁厚,应避免高温打印薄壳零件。再者,避免选用低填充率大壁厚或者高填充率小壁厚的组合。

③为降低内孔形状结构的收缩率,选用精密打印($E=0.1\text{ mm}$)时,应采用较高的喷嘴温度使线材得到充分熔融;同时应避免壁厚和喷嘴温度过低或过高并避免选用低速高填充率和高速低填充率的组合。另外,选用大壁厚和较小的填充率可降低孔的收缩率。

④为降低外圆形状结构的收缩率,应避免采用高温低速或低温高速的打印方式;而选用精密打印($E=0.1\text{ mm}$)时,避免采用较高的打印速度;同时避免采用高填充率高壁厚与低填充率低壁厚的组合。

参考文献

- [1] LV J M, LIANG Y C, XU X, et al. Performance-control-orientated hybrid metal additive manufacturing technologies: State of the art, challenges, and future trends[J]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2024, 6(3). DOI:10.1088/2631-7990/ad3315.
- [2] BHATIA A, SEHGAL A K. Additive manufacturing materials, methods and applications: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 81:1 060–1 067.
- [3] YODO N, DEY A. Multi-objective optimization for FDM process parameters with evolutionary algorithms[M]//Fused Deposition Modeling Based 3D Printing. Cham, Switzerland: Springer Cham, 2021:419–444.
- [4] SAAD M S, NOR A M, BAHARUDIN M E, et al. Optimization of surface roughness in FDM 3D printer using response surface methodology, particle swarm optimization, and symbiotic organism search algorithms[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105(12):5 121–5 137.
- [5] 王超, 岳彩宾, 罗殿宇, 等. FDM多工艺参数对PLA制件尺寸误差的影响[J]. 塑料工业, 2024, 52(6):102–109.
WANG Chao, YUE Caibin, LUO Dianyu, et al. Influences of multiple process parameters of FDM on the dimensional errors of PLA parts[J]. China Plastics Industry, 2024, 52(6):102–109.
- [6] 李科, 宋晋敏, 胡嘉睿, 等. FDM技术打印参数对成型效率的影响研究[J]. 印刷与数字媒体技术研究, 2024(3):252–258.
LI Ke, SONG Jinmin, HU Jiarui, et al. Study on the influence of printing parameters of FDM technology on molding efficiency[J]. Printing and Digital Media Technology Study, 2024(3):252–258.
- [7] 王燕兰, 任翀, 张巍, 等. 响应曲面法FDM碳纤维增强ABS制件精度研究[J]. 现代制造工程, 2021(2):16–20, 42.
WANG Yanlan, REN Chong, ZHANG Wei, et al. Research on precision of FDM carbon fiber reinforced ABS parts by response surface method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(2): 16–20, 42.
- [8] 陈彦君, 赵冬梅, 乌日开西·艾依提. 3D打印CAF/TPU复合材料的工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(1):98–104.
CHEN Yanjun, ZHAO Dongmei, AIYITI Wurikaixi. Optimization of process parameters for 3D printing CAF/TPU composite materials[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(1):98–104.
- [9] 李久振, 战丽, 李莞, 等. FDM成型工艺对PEEK/CGF复合材料翘曲变形的影响[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(1):64–69.
LI Jiuzhen, ZHAN Li, LI Wan, et al. Effect of FDM forming process on warpage deformation of PEEK/CGF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1):64–69.
- [10] QUARTO M, CARMINATI M, D'URSO G. Density and shrinkage evaluation of AISI 316L parts printed via FDM process[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2021, 36(13): 1 535 – 1 543.
- [11] GONG H J, SNELLING D, KARDEL K, et al. Comparison of stainless steel 316L parts made by FDM-and SLM-based additive

- manufacturing processes[J]. JOM, 2019, 71(3):880–885.
- [12] 刘斌,王玉香,林梓威,等. 316L/POM 复合材料FDM成型件成型质量的研究[J]. 塑料科技, 2020, 48(4):32–35.
- LIU Bin, WANG Yuxiang, LIN Ziwei, et al. Research on forming quality of 316L/POM composite parts fabricated by fused deposition modeling[J]. Plastics Science and Technology, 2020, 48(4): 32–35.
- [13] 彭杰. 面向FDM型金属复合材料3D打印的工艺参数和喷头结构的分析与优化[D]. 汕头: 汕头大学, 2021.
- PENG Jie. Analysis and optimization of process parameters and nozzle structure for FDM type metal composite 3D printing[D]. Shantou: Shantou University, 2021.
- [14] 林梓威. 高分子金属复合材料3D打印成型机理及工艺研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
- LIN Ziwei. Study on forming mechanism and process of 3D printing based on polymer metal composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [15] SELVAMANI S K, RAJAN K, SAMYKANO M, et al. Investigation of tensile properties of PLA – brass composite using FDM[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2022, 7(5):839–851.
- [16] ZHANG X Z, CHEN L, MULHOLLAND T, et al. Characterization of mechanical properties and fracture mode of PLA and copper/PLA composite part manufactured by fused deposition modeling[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(6). DOI: 10.1007/s42452-019-0639-5.
- [17] 张巍, 刘海亮, 耿江涛, 等. 一种用于搭载传感器检测的联动底盘: CN220380724U[P]. 2024-01-23.
- ZHANG Wei, LIU Hailiang, GENG Jiangtao, et al. Synchronized chassis system for sensor-integrated detection: CN220380724U[P]. 2024-01-23.
-
- (上接第87页)
- [17] 陈博. 国内外复合材料工艺设备发展述评之七——液体模塑成型[J]. 复合材料科学与工程, 2023(S1):92–120.
- CHEN Bo. A review of the development of composite process equipment at home and abroad—Liquid composite molding[J]. Composites Science and Engineering, 2023(S1):92–120.
- [18] SU F Y, WU X Q. Experimental study on silicone rubber mold design for thermal expansion RTM[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, 29(17):2 698–2 704.
- [19] SCHILLFAHRT C, FAUSTER E, SCHLEDJEWSKI R. Influence of process pressures on filling behavior of tubular fabrics in bladder-assisted resin transfer molding[J]. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science, 2017, 3(4):148–158.
- [20] BERNET N, MICHAUD V, BOURBAN P E, et al. Commingled yarn composites for rapid processing of complex shapes[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2001, 32(11):1 613–1 626.
- [21] BHUDOLIA S K, PERROTEY P, GOHEL G, et al. Optimizing bladder resin transfer molding process to manufacture complex, thin-ply thermoplastic tubular composite structures: An experimental case study[J]. Polymers, 2021, 13(23). DOI: 10.3390/polym13234093.
- [22] SCHILLFAHRT C, FAUSTER E, SCHLEDJEWSKI R. A methodology for determining preform compaction in bladder-assisted resin transfer molding with elastomeric bladders for tubular composite parts[J]. International Journal of Material Forming, 2019, 12(1):1–15.