

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.06.015

工艺参数对FDM成型PLA与TPU点阵结构压缩性能的影响

刘淑芬, 夏雨, 范泽涛

(辽宁工业大学机械与自动化学院, 辽宁锦州 121001)

摘要:以聚乳酸(PLA)和热塑性聚氨酯弹性体(TPU)为研究材料,选取体心立方(BCC)点阵结构,研究熔融沉积成型(FDM)条件下不同工艺参数对点阵结构的压缩性能的影响规律。PLA和TPU在熔融流动、冷却固化及层间结合方式存在显著差异,选取流量比、冷却速度和打印温度作为主要工艺参数。打印温度主要影响分子链扩散与层间熔合质量,冷却速度调控结晶行为及残余应力分布,流量比改变结构致密程度及杆件尺寸,从微观结构层面共同作用于宏观压缩性能。采用Box-Behnken试验设计方法建立响应面模型并分析各参数及其交互作用对点阵结构压缩性能的影响规律。结果表明,三种工艺参数均对PLA与TPU点阵结构的等效压缩模量产生影响,且随工艺参数变化呈现非线性趋势。PLA点阵结构在流量比为99.64%、冷却速度为80.86%、打印温度为227.45℃时,等效压缩模量为17.63 MPa;TPU点阵结构在流量比为98.69%、冷却速度为14.69%、打印温度为233.14℃时,等效压缩模量为37.87 MPa。通过验证试验对优化结果检验,PLA和TPU点阵结构等效压缩模量的实测值与预测值的相对误差分别为2.74%和2.55%。综上所述,通过合理调整FDM工艺参数,可以在一定程度上改善PLA与TPU点阵结构的压缩性能,研究结果为工程塑料点阵结构工艺参数选择提供参考。

关键词: 熔融沉积成型;PLA;TPU;点阵结构;工艺优化

中图分类号: TQ320.66 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)06-0129-08

Influences of FDM molding process parameters on the compressive performance of PLA and TPU lattice structures

LIU Shufen, XIA Yu, FAN Zetao

(School of Mechanical Engineering and Automation, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: Polylactic acid (PLA) and thermoplastic polyurethane (TPU) were selected as the materials in this study, and body-centered cubic (BCC) lattice structures were used to investigate the effects of process parameters on the compressive properties under fused deposition modeling (FDM). Considering that PLA and TPU show obvious differences in melt flow behavior, cooling solidification, as well as interlayer bonding, flow rate, cooling speed, and printing temperature were chosen as the main process parameters. The printing temperature governs molecular chain diffusion and interlayer fusion quality, while the cooling rate modulates crystallization behavior and residual stress distribution. The flow ratio alters structural compactness and strut dimensions. Together, these factors dictate the macroscopic compressive properties through their microstructural influences. A response surface model was established by the Box-Behnken design to analyze the influence laws of each parameter and their interactions on the compressive performance of the lattice structure. The results show that all three process parameters have a nonlinear trend effect on the equivalent compressive modulus of the PLA and TPU lattice structures. For PLA lattice structures, the equivalent compressive modulus reaches 17.63 MPa at a flow rate of 99.64%, a cooling speed of 80.86%, and a printing temperature of 227.45 °C. For TPU lattice structures, the equivalent compressive modulus reaches 37.87 MPa at a flow rate of 98.69%, a cooling speed of 14.69%, and a

基金项目: 辽宁省科技重点专项项目(2022JH1/1080022),校企合作项目(20250257)

通信作者: 刘淑芬, 硕士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为机械CAD/CAM/CAE

收稿日期: 2026-03-22

引用格式: 刘淑芬, 夏雨, 范泽涛. 工艺参数对FDM成型PLA与TPU点阵结构压缩性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(6): 129-136.

LIU Shufen, XIA Yu, FAN Zetao. Influences of FDM molding process parameters on the compressive performance of PLA and TPU lattice structures[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(6): 129-136.

printing temperature of 233.14 °C. Verification experiments were conducted, and the relative errors equivalent compressive modulus of lattice structure between the measured and predicted values are 2.74% for PLA and 2.55% for TPU. The results indicate that the compressive properties of PLA and TPU lattice structures can be improved by reasonably adjusting FDM process parameters, providing a reference for process parameter selection of engineering plastic lattice structures.

Keywords: fused deposition modeling; PLA; TPU; lattice structure; process optimization

近年来,熔融沉积成型(FDM)因成型过程简单且可制造复杂结构,在结构轻量化和缓冲吸能等领域受到了广泛的关注^[1-4]。该技术采用逐层沉积的成型原理对复杂几何结构尤其是点阵结构的制造提供了可行的技术途径。点阵结构具有低密度和良好的结构可设计性等特点,在轻量化领域展现出广泛的应用前景。然而在实际成型过程中,由于不同材料在熔体流动性、冷却行为及层间结合方式等方面存在差异,这使得工艺参数对点阵结构的成型质量和力学性能带来了不同的影响。具体而言,冷却速度通过调控熔体固化历程与结晶行为,影响层间结合强度及残余应力分布。而流量比则直接改变挤出丝材的截面形貌与填充致密性,进而决定杆件尺寸精度与结构整体刚度。

以聚乳酸(PLA)为代表的刚性材料成型稳定,但其点阵结构在受载过程中易发生脆性失效;相对而言,热塑性聚氨酯弹性体(TPU)等柔性材料虽具有较好的变形能力,但在FDM成型时易出现结构塌陷等问题,从而影响整体承载能力。已有研究表明,打印温度、分层厚度和打印速度等参数会对PLA与TPU试样的力学性能产生影响^[5-7]。此外,流量比表示实际挤出材料量与理论设定量的比值,用于表示打印过程中材料供给的相对多少。其变化会直接影响层间结合强度及结构致密性,进而影响试样的力学性能。冷却速度影响材料固化速度和层间粘结。打印温度控制熔融材料的流动性和沉积稳定性。现有研究多围绕FDM工艺参数对PLA制件力学性能的影响展开。白鹤等^[8]采用五因素四水平正交试验,系统考察了打印层厚、填充密度、打印温度、填充速度及外壳厚度对PLA制件力学性能的影响。张林初等^[9]同样探讨了FDM工艺参数与PLA制件力学性能之间的关联。王宏坤等^[10]基于正交试验方法进一步验证了多参数耦合条件下工艺优化的重要性。任致立^[11]引入田口法,从信噪比角度分析了FDM打印PLA材料力学性能的主要影响因素。李华雄等^[12]采用响应面法对PLA打印件力学性能进行优化建模,提高了参数-性能映射关系的

预测精度。李彬等^[13]将研究对象拓展至体心立方点阵结构,揭示了FDM成型点阵结构压缩性能的各向异性特征。现有研究多集中于单一材料或实体试样,对多材料点阵结构在统一工艺参数体系下的对比研究较少,尤其缺乏对工艺参数交互作用机制的系统分析。因此有必要开展针对PLA与TPU点阵结构的对比研究,以揭示不同材料体系下工艺参数对压缩性能的作用规律。

基于上述研究现状,为分析PLA与TPU在FDM成型中的性能差异,本文对两种材料的点阵结构压缩性能进行对比研究。在轻量化和缓冲吸能应用中,压缩刚度和整体稳定性是评价结构承载能力的关键指标,同时也有助于分析FDM工艺参数对性能的影响。具体方法包括测定等效压缩模量并分析不同工艺参数对相同结构性能的敏感性,从而对比刚性PLA与柔性TPU在相同工艺条件下的力学响应的差异。采用响应面法建立工艺参数与压缩性能的关系模型并比较两种材料的优化条件。与现有研究多集中于单一材料或实体试样不同,本文以点阵结构为对象对不同材料在相同工艺参数体系下的响应规律进行对比分析,更贴近工程应用中多材料选择与结构设计的实际需求。研究结果对点阵结构材料的选择和FDM工艺参数设计具有一定的参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PLA:丝状耗材,直径1.75 mm,深圳光华伟业股份有限公司;

TPU90A:丝状耗材,直径1.75 mm,深圳拓竹科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

3D打印机:Bambu LabA1桌面级,设备成型精度为 ± 0.1 mm,层厚调节范围为0.1~0.3 mm,喷嘴直径为0.4 mm,深圳拓竹科技有限公司;

微机控制电子万能试验机:CMT5305,最大试验力为5kN,力值测量精度为 $\pm 0.5\%$,位移分辨率为0.01 mm,美特斯工业系统(中国)有限公司。

1.3 试样制备

利用三维设计软件nTop绘制试样,压缩试验采用体心立方(BCC),其几何结构如图1所示。试样整体为立方体,外形尺寸为30 mm×30 mm×30 mm,点阵结构中杆件直径为0.8 mm。为保证压缩加载过程中载荷的均匀传递并减小端部效应,在点阵结构的上下表面分别设计并一体成型了厚度为1 mm的实心端板。制得的三维模型导出.stl格式文件,使用Bambu Studio软件进行切片和打印参数设置,最后使用3D打印机制备试样。FDM打印样品的实物照片如图2所示。

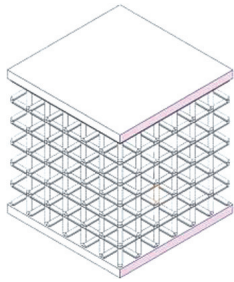


图1 BCC点阵压缩试样的结构示意图

Fig. 1 Geometry of the BCC lattice compression specimen

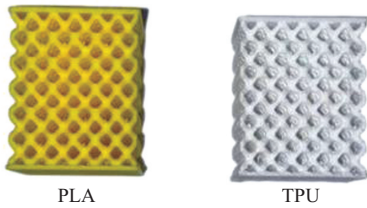


图2 FDM打印试样的实物照片

Fig. 2 Physical photograph of FDM printed specimens

1.4 性能测试

压缩试验采用电子万能试验机按照GB/T 31930-2015标准进行准静态压缩,加载方向沿BCC点阵试样高度方向,采用位移控制方式加载,压头以2 mm/min的速度加载,记录力-位移曲线。每组工艺参数下制备3个有效试样,压缩试验结果取平均值。所有试验均在室温[(23±2)°C]、相对湿度(50%±10%)的标准环境下进行,试样在测试前于该环境下放置24 h以上以消除内应力。

2 结果与讨论

2.1 响应面试验设计与结果分析

2.1.1 Box-Behnken设计(BBD)矩阵的构建

基于文献调研的结果,在响应面试验中选取对点阵结构成形质量和压缩性能影响比较明显的因素,流量比(*A*)、冷却速度(*B*)和打印温度(*C*)^[7-13]。打印温度主要影响材料熔融后的流动性及每一层中

间的融合效果。冷却速度决定打印过程中热梯度的分布与残余应力的分布。而流量比通过控制实际挤出材料的量来影响点阵杆件的直径和结构密实程度。流量比与冷却速度均为切片软件中设定的相对参数,以默认参数为基准进行百分比调整。冷却速度为风扇转速的相对值,100%表示最大冷却强度,0%表示关闭冷却风扇。本文以软件默认冷却参数为基准并在此基础上进行范围调节,不同材料的默认冷却参数存在差异其中PLA默认冷却速度约为100%,TPU默认冷却速度较低为0%。为系统分析各工艺参数及其交互作用对点阵结构压缩性能的影响规律,并在保证模型拟合精度的同时减少试验次数,采用BBD构建三因素三水平响应面试验矩阵。PLA和TPU的因素水平设计见表1。由于PLA与TPU在成型过程中的表现存在明显差异,针对不同材料分别设定参数范围,以更符合实际成型情况。PLA材料成型过程中冷却较快并且结构稳定性较好,因此冷却速度设置为50%~100%,打印温度范围为210~230 °C。而TPU为弹性体材料,冷却过快容易影响层间结合甚至导致结构成型质量下降,因此其冷却速度控制在0%~50%。同时为保证材料能够充分熔融并稳定沉积,打印温度相应提高至230~250 °C。

表1 PLA和TPU响应面试验因素水平设计

Tab. 1 Factors and levels for response surface design of PLA and TPU

Items	Level	Factor		
		<i>A</i> /%	<i>B</i> /%	<i>C</i> /°C
PLA	-1	95	50	210
	0	100	75	220
	1	105	100	230
TPU	-1	95	0	230
	0	100	25	240
	1	105	50	250

Notes: *A* is flow rate; *B* is cooling speed; *C* is printing temperature.

PLA与TPU这两种材料在受压过程中存在很大的不同,所以第二阶段响应面试验中选择等效压缩模量作为响应变量。等效压缩模量通过力-位移曲线线性响应阶段的斜率计算获得,其表达式见式(1)。

$$E_{eq} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta F/A_0}{\Delta\delta/H_0} = \frac{\Delta F \cdot H_0}{A_0 \cdot \Delta\delta} \quad (1)$$

式中: E_{eq} 为点阵结构的等效压缩模量,单位MPa; ΔF 为选定线性区间内的载荷增量,单位N; $\Delta\sigma$ 为线性响应区间内的应力增量,单位MPa; $\Delta\varepsilon$ 为对

应的应变增量,无量纲; $\Delta\delta$ 为对应位移增量,单位 mm; A_0 为试样初始受压截面积,单位 mm^2 ; H_0 为试样初始高度,单位 mm。

在具体计算过程中,采用线性区间内力-位移数据进行线性拟合,其斜率(k)表达式见式(2)。则等效压缩模量的计算式见式(3)。这样可以有效消除试样尺寸差异的影响,得到反映点阵结构整体力学性能的等效模量参数。

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \tag{2}$$

$$E_{\text{eq}} = \frac{k \cdot H_0}{A_0} \tag{3}$$

等效压缩模量由力-位移曲线线性弹性阶段(应变 5%~10%)拟合获得。为准确获取材料在线性阶段的响应数据,针对 PLA 和 TPU 的不同力学特性分别选取不同的位移区间计算等效压缩模量。PLA 选取力-位移曲线中位移为 18~22 mm 的线性平稳区间。而 TPU 材料弹性变形能力较强,其线性响应区间相对靠后,所以选取位移为 22~25 mm 的区间进行计算。这样做主要是为保证等效压缩模量计算的线性可靠性,因此分别选取力-位移曲线中材料稳定线性响应区间进行拟合。在这个基础上设计了包含 17 组试验点的 BBD 矩阵,其中中心点重复设置 5 次主要是用于估计试验误差并检验回归模型的显著性与稳定性。PLA、TPU 的试验结果分别见表 2、表 3。

表 2 PLA 点阵结构等效压缩模量计算结果

Tab. 2 Calculation results of equivalent compressive modulus of PLA lattice structures

No.	Factor			Equivalent compressive modulus/MPa
	A	B	C	
1	-1	-1	0	10.21
2	1	-1	0	13.93
3	-1	1	0	11.88
4	1	1	0	16.18
5	-1	0	-1	9.88
6	1	0	-1	13.62
7	-1	0	1	11.02
8	1	0	1	15.31
9	0	-1	-1	13.83
10	0	1	-1	14.20
11	0	-1	1	14.04
12	0	1	1	16.70
13	0	0	0	16.80
14	0	0	0	17.20
15	0	0	0	18.30
16	0	0	0	17.80
17	0	0	0	17.50

表 3 TPU 点阵结构等效压缩模量计算结果

Tab. 3 Calculation results of equivalent compressive modulus of TPU lattice structures

No.	Factor			Equivalent compressive modulus/MPa
	A	B	C	
1	0	-1	1	32.4
2	0	0	0	39.6
3	1	0	-1	32.3
4	-1	0	-1	32.9
5	0	0	0	40.7
6	1	1	0	34.6
7	1	0	1	36.7
8	-1	-1	0	31.2
9	0	0	0	39.1
10	0	1	-1	32.1
11	0	0	0	39.8
12	0	1	1	37.2
13	0	0	0	38.8
14	0	-1	-1	33.6
15	-1	0	1	32.3
16	-1	1	0	33.9
17	1	-1	0	33.7

运用 Design-Expert 软件对表 2 和表 3 中的试验数据进行曲面响应分析,得出了 3 个因素对 PLA、TPU 压缩等效模量影响的二次多项式回归方程(以编码制表示),分别见式(4)、式(5)。

$$Y_1 = 17.52 + 2.01A + 0.8688B + 0.6925C + 0.1450AB + 0.1375AC + 0.5725BC - 3.35A^2 - 1.12B^2 - 1.71C^2 \tag{4}$$

$$Y_2 = 39.6 + 0.875A + 0.8625B + 0.9625C - 0.45AB + 1.25AC + 1.58BC - 3.26A^2 - 2.99B^2 - 2.79C^2 \tag{5}$$

从多项式回归方程能够发现方程存在极值,因此可以进行参数优化。为检验二次多项式回归模型的显著性,对其进行方差分析与显著性检验。表 4 和表 5 分别为 PLA 和 TPU 模型回归方差分析结果。

从表 4 的数据可以看出,PLA 点阵结构等效压缩模量的回归模型 F 值为 63.04, p 值 <0.0001 ,表明模型在统计学上非常显著。各因素对响应值的影响程度大小依次是 $A > B > C$,其中流量比 A 的影响最为显著(p 值 <0.0001)。在工艺参数的交互作用中,BC 影响比较明显(p 值 <0.05),而 AB 和 AC 的影响并不显著,说明风扇冷却速度与打印温度之间存在一定的交互影响。此外各二次项也都显著,表明等效压缩模量与工艺参数之间存在明显非线性关系。失拟项 p 值为 0.9542,说明模型不存在显著失拟。模型的决定系数(R^2)和矫正 R^2 分别为 0.9878 和

表4 PLA点阵结构等效压缩模量回归模型方差分析结果

Tab. 4 ANOVA results for the regression model of the equivalent compressive modulus of PLA lattice structures

Source	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F-statistic	p-value
Model	114.18	9	12.69	63.04	< 0.000 1
<i>A</i>	32.2	1	32.2	159.99	< 0.000 1
<i>B</i>	6.04	1	6.04	30	0.000 9
<i>C</i>	3.84	1	3.84	19.06	0.003 3
<i>AB</i>	0.084 1	1	0.084 1	0.417 9	0.538 6
<i>AC</i>	0.075 6	1	0.075 6	0.375 8	0.559 3
<i>BC</i>	1.31	1	1.31	6.51	0.038
<i>A</i> ²	47.32	1	47.32	235.13	< 0.000 1
<i>B</i> ²	5.26	1	5.26	26.13	0.001 4
<i>C</i> ²	12.31	1	12.31	61.17	0.000 1
Residual	1.41	7	0.201 3		
Lack of fit	0.100 8	3	0.033 6	0.102 8	0.954 2
Pure error	1.31	4	0.327		

Notes: The model has a coefficient of determination $R^2=0.987\ 8$ and adjusted $R^2=0.972\ 1$, indicating a good model fit.

表5 TPU点阵结构等效压缩模量回归模型方差分析结果

Tab. 5 ANOVA results for the regression model of the equivalent compressive modulus of TPU lattice structures

Source	Sum of squares	Degrees of freedom	Mean square	F-statistic	p-value
Model	165.04	9	18.34	58.42	< 0.000 1
<i>A</i>	6.13	1	6.13	19.51	0.003 1
<i>B</i>	5.95	1	5.95	18.96	0.003 3
<i>C</i>	7.41	1	7.41	23.61	0.001 8
<i>AB</i>	0.81	1	0.81	2.58	0.152 2
<i>AC</i>	6.25	1	6.25	19.91	0.002 9
<i>BC</i>	9.92	1	9.92	31.61	0.000 8
<i>A</i> ²	44.82	1	44.82	142.76	< 0.000 1
<i>B</i> ²	37.58	1	37.58	119.71	< 0.000 1
<i>C</i> ²	32.72	1	32.72	104.22	< 0.000 1
Residual	2.2	7	0.313 9		
Lack of fit	0.057 5	3	0.019 2	0.035 8	0.989 6
Pure error	2.14	4	0.535		

Notes: The model has a coefficient of determination $R^2=0.983\ 9$ and adjusted $R^2=0.970\ 0$, indicating a good model fit.

0.972 1,拟合效果良好,可用于工艺参数优化分析。

从表5的数据可以看出,TPU点阵结构等效压缩模量回归模型的 F 值为58.42, p 值<0.000 1,说明这个模型在统计学上非常显著。由表可知三个因素均对等效压缩模量产生显著影响(p 值<0.01),其中打印温度的影响程度相对较大。在工艺参数的交互作用中, AB 的交互作用影响不明显,而 BC 与 AC 的交互作用显著(p 值<0.05)。各二次项也都显著(p 值<0.000 1),说明等效压缩模量与工艺参数之间存在明显的非线性关系。失拟项的 p 值为0.989 6说明模型不存在显著失拟现象。模型的 R^2 和矫正

R^2 分别为0.983 9和0.970 0,说明模型拟合效果良好,可用于后续工艺参数优化与响应面分析。

2.1.2 响应面结果分析

根据二次回归模型和方差分析结果,分析了工艺参数之间的相互作用对PLA和TPU点阵结构等效压缩模量的影响,响应面结果如图3所示。从图3a可以看出,在冷却速度保持在中等水平时,等效压缩模量随打印温度和流量比的变化呈现先升后降的趋势。当流量比由95%增加至100%、打印温度从210℃提升至220℃时,等效压缩模量显著增大。但当流量比或温度继续升高时,等效压缩模量反而下降。如图3b所示,在打印温度保持不变时,等效压缩模量随冷却速度增加会先升高后下降。而流量比接近100%时,该趋势更为明显。说明在冷却条件适中时,将挤出量控制在合适的水平有利于杆件成型稳定。如图3c所示,在流量比和冷却速度适中时,提高打印温度可以提高等效压缩模量。当冷却速度较高时,温度变化对等效压缩模量的影响变小,响应曲面也趋于平缓。这是因为冷却速度较大会抑制PLA材料层间的相互融合,从而使打印温度对压缩性能的影响变小。PLA为半结晶聚合物,分子链刚性较强,本征模量较高,但在FDM成型过程中由于层间界面和孔隙缺陷的存在,使得点阵结构的等效压缩模量明显低于材料本征值,因此其性能对工艺参数变化的响应相对平缓。

如图3d所示,在冷却速度适中时,等效压缩模量随流量比和打印温度的变化先上升后下降。这说明适中的挤出量和打印温度有利于提高TPU杆件的成型质量和层间结合强度,但参数太高会使结构稳定性下降。如图3e所示,在打印温度保持不变时等效压缩模量随冷却速度增加也是先上升后下降,这个趋势在流量比接近100%时更明显。这说明在合理的冷却条件下稳定挤出有助于提升压缩刚度。由图3f可知,流量比和冷却速度适中时提高打印温度可以提高等效压缩模量。但是在高冷却速度下温度的影响会变小,响应面趋于平缓。这是因为高冷却速度会抑制TPU材料层与层之间的融合,从而降低了打印温度对压缩性能的影响。TPU为弹性体,其熔体粘度对温度敏感且固化过程依靠分子链松弛。当冷却速度相对较低时,分子链有更多时间扩散和缠结从而增强了打印层间的融合和粘结,避免了因为快速冷却导致结构坍塌。

在PLA和TPU这两种材料的点阵结构中,工艺参数对压缩模量的影响存在明显不同,该结论与李彬等^[14]的研究结果基本一致。PLA点阵结构受工艺参数的影响相对平缓,参数之间的交互作用不明显。其中,PLA点阵结构的主要影响因素为打印温度和冷却速度,这是因为两者会直接影响材料层间的熔融结合及结晶行为。当冷却速度较高时,分子链扩散与重排受到限制,层间结合质量降低,使得打印温度和流量比变化对压缩性能的影响减弱,响应曲面趋于平缓。此外,PLA为半结晶聚合物,分子链刚性较强,本征模量较高,在FDM成型过程中由于层间界面及孔隙缺陷的存在,其等效压缩模量低于本征值,因此整体表现出对工艺参数变化不敏感的特征。相比之下,TPU点阵结构对工艺参数组合更为敏感,打印温度、冷却速度和流量比之间存

在较明显的交互作用。这是因为TPU为热塑性弹性体,分子链柔顺性较高,熔融后具有较好的流动性,其力学性能主要依赖于层间分子链的扩散与缠结。在适当的打印温度和冷却条件下,调节流量比有助于提高材料沉积稳定性和结构致密程度,从而提升点阵结构的承载能力。而不合理的参数组合则容易导致层间结合不足或结构不稳定,使压缩性能下降。从材料本征特性来看,PLA为半结晶聚合物,分子链刚性较强,其本征模量较高。TPU为典型热塑性弹性体,分子链柔顺性较好,具有明显的粘弹性特征。因此在FDM成型过程中,PLA对层间缺陷更为敏感而TPU更依赖于分子链扩散与缠结形成有效结合。这种分子层面的差异是导致两种材料在相同工艺参数条件下表现出不同压缩模量的重要原因。

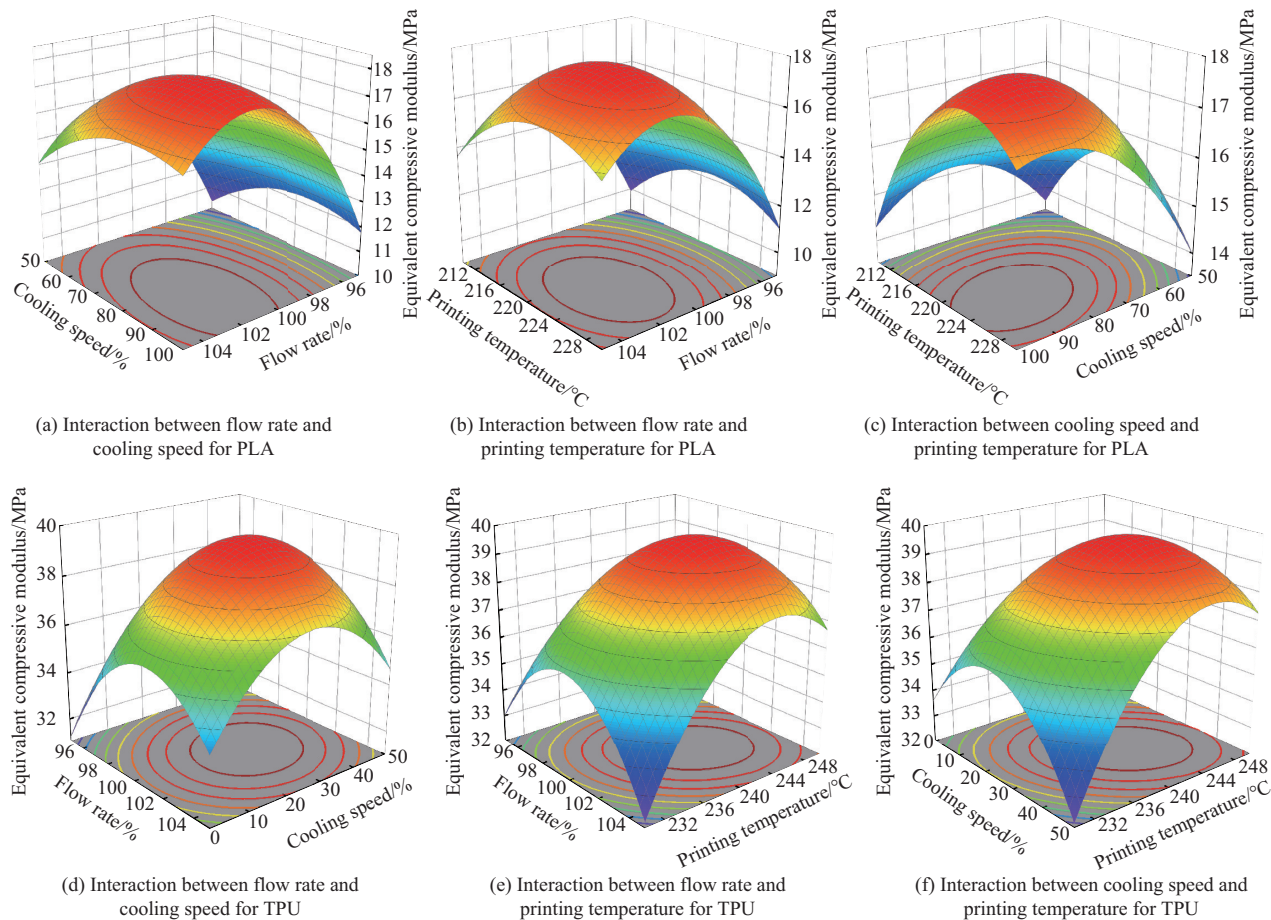


图3 因素交互作用对等效压缩模量的响应面分析图

Fig. 3 Response surface plot of factor interactions on equivalent compressive modulus

2.2 工艺参数优化与验证

2.2.1 PLA点阵结构工艺参数优化与验证

通过已有研究可知统计优化方法可以有效预测PLA点阵结构的压缩性能变化趋势^[15]。在工艺

参数优化中,以PLA点阵结构的等效压缩模量作为响应变量,根据响应面试验结果建立二次回归模型,并用方差分析了模型的有效性。然后用Design-Expert软件对模型进行数值优化获得使等效压缩模

量最高的工艺参数组合。优化结果见表6,当流量比为99.64%、冷却速度为80.86%、打印温度为227.45℃时,PLA点阵结构的等效压缩模量达到最优,预测值为17.16 MPa。说明此时点阵杆件的成型质量和整体承载能力最好。需要说明的是响应面模型预测的最优等效压缩模量17.16 MPa,而表3中实验结果的最大值18.30 MPa,二者之间不存在矛盾。表3中的结果来源于有限试验点,其中中心点重复试验结果存在一定离散性,18.30 MPa属于相对偏高值。此外响应面模型是基于整体试验数据进行拟合得到的,其预测结果反映的是各因素综合作用下的最优趋势,而非单一试验点的极值。因此模型预测值与实验最大值存在一定差异是合理的。考虑实际打印过程中参数调节精度,将优化参数进行适当调整并进行验证试验。其中验证试验的工艺参数为流量比100%、冷却速度81%、打印温度227℃,共打印并测试3个重复样本。实测等效压缩模量分别为17.55、17.63、17.70 MPa,平均值为17.63 MPa,标准差0.08 MPa。得到的等效压缩模量17.63 MPa,与预测值的相对误差为2.74%。实验与预测结果比较吻合,表明响应面模型预测精度较高,可用于PLA点阵结构的工艺参数优化。

2.2.2 TPU点阵结构工艺参数优化与验证

用同样的方法对TPU点阵结构进行分析来获得等效压缩模量最大的工艺参数组合。优化结果见表6,当流量比为98.69%、冷却速度为14.69%、打印温度为233.14℃时,TPU点阵结构的等效压缩模量达到最优,预测值为36.93 MPa。这表明较低的冷却速度与较高的打印温度有助于TPU材料充分熔融与层间结合,从而提升整体的承载与变形协调能力。考虑到实际打印中参数调节的可行性,对优化参数进行适当调整后进行验证试验。验证试验的工艺参数为流量比99%、冷却速度15%、打印温度233℃,同样进行3个重复样本的测试。实测等效压缩模量分别为37.80、37.87、37.95 MPa,平均值为37.87 MPa,标准差0.08 MPa。与模型预测值37.00 MPa相比,误差为2.55%,验证了优化工艺参数在实际打印中的有效性。实验结果与预测值高度吻合,说明该模型对TPU点阵结构具有较好的预测精度和工程适用性。点阵结构的力学性能还受结构和环境等因素影响^[6],后续研究可进一步综合考虑多因素的作用。

以上结果表明响应面模型对PLA和TPU点阵结构的压缩性能预测具有较高的可靠性,同时说明通过合理调整FDM工艺参数可以有效改善点阵结构的压缩性能,为工程塑料点阵结构的工艺参数选择提供参考。

表6 PLA和TPU点阵结构等效压缩模量的预测与验证结果

Tab. 6 Predicted and experimental equivalent compressive modulus of PLA and TPU lattice structures

Material	A/%	B/%	C/℃	Predicted/ MPa	Experimental/ MPa	Relative error/%
PLA	99.64	80.86	227.45	17.16	17.63	2.74
TPU	98.69	14.69	233.14	36.93	37.87	2.55%

3 结论

(1)通过响应面试验结果的分析可知,流量比、冷却速度和打印温度均对FDM成型PLA与TPU点阵结构的等效压缩模量产生影响,且不同材料对工艺参数的响应存在差异。

(2)试验结果表明,PLA点阵结构在较高流量比条件下,其等效压缩模量相对较大。TPU点阵结构,在较低冷却速度和较高打印温度条件下有利于提高等效压缩模量。

(3)响应面模型的优化结果表明,PLA点阵结构的最优工艺参数组合为流量比99.64%、冷却速度80.86%、打印温度227.45℃,等效压缩模量为17.63 MPa。TPU点阵结构的最优工艺参数组合为流量比98.69%、冷却速度14.69%、打印温度233.14℃,等效压缩模量为37.87 MPa。

(4)基于响应面法建立了FDM成型PLA与TPU点阵结构等效压缩模量与工艺参数之间的回归模型。模型预测值与实测值之间的相对误差均小于3%,说明所建立的模型具有较好的重复性和可靠性。

参考文献

- [1] LAYEB N, BARHOUMI N, OLDAL I, et al. Effect of FDM process parameters on flexural strength and surface roughness characteristics of PLA prints[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2026, 142(5):2 275–2 286.
- [2] 徐田秋,符瑞,罗龙溪,等.大型点阵结构增材制造技术与进展[J].机械工程学报,2026,62(3):10–22.
XU Tianqiu, FU Rui, LUO Longxi, et al. Additive manufacturing technologies and research progress for large-scale lattice structures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2026, 62(3):10–22.
- [3] 陶斯嘉,王小锋,曾婧,等.点阵材料及其3D打印[J].中国有色金属学报,2022,32(2):416–444.
TAO Sijia, WANG Xiaofeng, ZENG Jing, et al. Lattice materials

- and its fabrication by 3D printing: A review[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(2):416–444.
- [4] 魏彬, 丁逸昊, 刘晓鹏, 等. 3D打印工艺参数对制品力学性能影响实验研究[J]. 机械强度, 2022, 44(3):594–599.
WEI Bin, DING Yihao, LIU Xiaopeng, et al. Experimental research on the influence of 3 d printing process parameters on mechanical properties of products[J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(3):594–599.
- [5] 谢仁古丽·麦提图尔荪, 乌日开西·艾依提, 贾儒. 3D打印TPU点阵结构的力学性能分析[J]. 塑料, 2023, 52(6):147–151, 158.
MAITITUERSUN xierenguli, AIYITI wurikaixi, JIA Ru. Mechanical properties analysis of 3D printed TPU lattice structure[J]. Plastics, 2023, 52(6):147–151, 158.
- [6] DE LA ROSA S, MAYUET P F, SILVA C S, et al. Design and characterization of 3D-printed TPU-based lattice structures. Application to methodology for the design of personalized therapeutic products [J]. Rapid Prototyping Journal, 2024, 30(11):72–86.
- [7] 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.
- [8] 白鹤, 苏亚辉, 王核心, 等. FDM 3D打印工艺参数对PLA制件力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2020, 48(1):68–71.
BAI He, SU Yahui, WANG Hexin, et al. Influence of FDM 3D-printing process parameters on mechanical property of PLA sample [J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(1):68–71.
- [9] 张林初, 王宇, 陈侠. 熔融沉积成型工艺参数对聚乳酸制件力学性能的影响[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(7):71–76.
ZHANG Linchu, WANG Yu, CHEN Xia. Influences of FDM process parameters on mechanical properties of PLA parts[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(7):71–76.
- [10] 王宏坤, 丁慧芳, 成丽娟, 等. 基于正交试验的FDM 3D打印工艺参数研究[J]. 宇航材料工艺, 2025, 55(增刊1):98–105.
WANG Hongkun, DING Huifang, CHENG Lijuan, et al. Research on FDM 3D printing process parameters based on orthogonal experiments[J]. Aerospace Materials & Technology, 2025, 55(Suppl 1):98–105.
- [11] 任致立. 基于田口法的FDM技术3D打印PLA材料力学性能分析[J]. 网印工业, 2025(2):81–83.
REN Zhili. Analysis of mechanical properties of 3D printed PLA materials with FDM technology based on taguchi method[J]. Screen Printing Industry, 2025(2):81–83.
- [12] 李华雄, 王晖, 刘璇. 响应面法优化PLA材料3D打印试件力学性能[J]. 塑料科技, 2024, 52(10):130–135.
LI Huaxiong, WANG Hui, LIU Xuan. Response surface methodology to optimize mechanical properties of 3D printed specimens made of PLA materials[J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(10):130–135.
- [13] PODDAR M K, KUMAR R, SARANGI S K. Optimizing FDM 3D printing parameters for enhanced compressive strength in PLA fluorite lattice structures: A Taguchi design and finite element analysis approach[J]. Engineering Research Express, 2025, 7(4). DOI:10.1088/2631-8695/AE1658.
- [14] 李彬, 顾海, 张捷, 等. 熔融沉积成型体心立方点阵结构的压缩性能各向异性[J]. 塑料科技, 2024, 52(11):111–116.
LI Bin, GU Hai, ZHANG Jie, et al. Compressive properties anisotropy of BCC lattice structure formed by fused deposition modeling [J]. Plastics Science and Technology, 2024, 52(11):111–116.
- [15] IACOLINO G, MANTEGNA G, GONZÁLEZ E V, et al. Low-velocity impact behavior of PLA BCC lattice structures: Experimental and numerical investigation with a novel dimensionless index[J]. Materials, 2025, 18(19). DOI:10.3390/MA18194574.
- [16] HASHEMI S J, SADOOGHI A, RAHMANI F, et al. The effect of marine environment and carbon fibers reinforcement on compressive strength of the various design of PLA 3D-printed porous lattice structures[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2025, 10(10):8 419–8 444.