

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.01.014

3D打印CAF/TPU复合材料的工艺参数优化

陈彦君,赵冬梅,乌日开西·艾依提

(新疆大学机械工程学院,乌鲁木齐 830017)

摘要: 为了提升连续芳纶纤维(CAF)增强热塑性聚氨酯(TPU)复合材料3D打印样件的综合力学性能及表面质量,通过单因素试验和响应面法进行工艺参数优化,对打印试样的拉伸强度、弯曲强度和表面粗糙度进行测试,研究打印速度、打印层高和单道宽度等工艺参数对综合力学性能和表面质量的影响规律。研究结果显示,各工艺参数对力学性能和表面质量的影响程度存在差异,影响大小依次为:打印层高>单道宽度>打印速度;最佳的打印参数组合为:打印速度4 mm/s,层高0.2 mm,单道宽度0.4 mm。优化后的拉伸强度最高达到183.51 MPa,拉伸性能提升30.45%;弯曲强度达到48.33 MPa,弯曲性能提升31.08%;表面粗糙度最低可达9.54 μm ,表面质量提升54.82%。因此通过响应面法对CAF/TPU复合材料进行工艺参数优化,可以得到综合力学性能理想同时具有良好表面质量的打印试样。

关键词: 连续芳纶纤维;热塑性聚氨酯;3D打印;力学性能;响应面法

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)01-0098-07

Optimization of process parameters for 3D printing CAF/TPU composite materials

CHEN Yanjun, ZHAO Dongmei, AIYITI Wurikaixi

(School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

Abstract : In order to enhance the comprehensive mechanical properties and surface quality of 3D printing samples made from continuous aramid fiber (CAF) reinforced thermoplastic polyurethane (TPU) composite materials, process parameter optimization was carried out through single-factor experiments and response surface methodology. The tensile performance, flexural performance, and surface roughness of the printed samples were tested to investigate the influence of process parameters such as printing speed, layer height, and path width on the comprehensive mechanical properties and surface quality. The study reveals that the degree of influence of each process parameter on mechanical properties and surface quality vary, with the order of influence being: layer height > single path width > printing speed. The optimal combination of printing parameters is found to be: a printing speed of 4 mm/s, a layer height of 0.2 mm, and a single path width of 0.4 mm. After optimization, the tensile strength reaches a maximum of 183.51 MPa, representing a 30.45% increase in tensile performance; the flexural strength reaches 48.33 MPa, indicating a 31.08% increase in flexural performance; and the surface roughness is minimized to 9.54 μm , resulting in a 54.82% improvement in surface quality. Therefore, through the optimization of process parameters using response surface methodology, CAF/TPU composite materials can yield printed samples with both desirable comprehensive mechanical properties and excellent surface quality.

Keywords : continuous aramid fiber ; thermoplastic polyurethane ; 3D printing ; mechanical property ; response surface methodology

随着5G时代集成电子设备的快速发展,对具有轻质和柔性可穿戴特性的多功能材料的需求不断增长,引起了全球的广泛关注。热塑性聚氨酯(TPU)具有优异的弹性回弹性和拉伸性能,现已广

泛应用于医疗防护装置、体育用品、柔性电子设备和其他防振装置等。TPU因其易于加工和出色的弹性特性在减震和密封应用方面的效果显著,但是TPU具有力学强度较低和抗腐蚀性能较差等特点,

基金项目: 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022DO1C393)

通信作者: 乌日开西·艾依提,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为增材制造(3D打印)技术、生物力学等

收稿日期: 2024-10-21

引用格式: 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.

可能会限制其作为承重部件和恶劣工作环境的应用^[1-2]。

为了克服这一局限,采用连续纤维增强复合材料(CFRP)作为解决方案,CFRP通过将热塑性材料作为基体,连续纤维作为增强材料,来满足极端工况下应具备的力学性能要求。CFRP技术已经在3D打印领域取得了突破^[3-4],然而其层间黏合不足、层间存在微小间隙等问题影响了最终打印件的力学性能和表面质量^[5-6]。因此,工艺参数优化成为提升打印效果的关键,当前的研究主要采用响应面法(RSM)对打印参数进行优化,以提高打印样品的力学性能和表面质量^[7-10]。Salo等^[11]通过在TPU基体中加入不同厚度的连续碳纤维织物,研制出了具有改善力学、电气和热性能的3D打印结构。Hao等^[12]采用连续碳纤维增强的TPU进行打印力学试验,讨论了影响打印试样力学性能的工艺参数。

针对在恶劣环境下使用柔性防护装置这一现实需求,所用材料在满足耐腐蚀和绝缘工作的同时还应具备一定的力学性能,尤其是抗冲击性。连续芳纶纤维(CAF)因具有质量轻、绝缘性能优异、拉伸和冲击强度高等优点,在安全防护设备和高压电力设备等领域得到了越来越多的应用^[13-14]。相较于碳纤维,芳纶纤维具有更理想的绝缘性能和耐腐蚀性能,因此选择CAF增强TPU复合材料制作具有优异力学性能的柔性绝缘设备是较为合适的。

笔者以CAF为增强相,TPU为打印的基体,采用了喷嘴内浸渍方法,较传统的外浸渍技术不仅节省了生产时间,还简化了预浸渍纤维制造步骤^[15-16],在单因素试验基础上借助中心复合设计(CCD)响应面法设计方案,基于实验结果定量分析了CAF/TPU复合材料的不同打印工艺参数与力学性能之间的关系,工艺参数选取打印速度、打印层高和单道宽度进行优化,研究打印工艺参数对拉伸强度、弯曲强度和表面粗糙度的影响规律,为连续纤维增强TPU复合材料的3D打印工艺优化提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CAF:泰普龙 529R,线密度 1 140 dtex,捻度 120 tpm,烟台泰和新材料股份有限公司;

TPU:95A 丝状耗材,透明色,直径 1.75 mm,珠海市三绿实业有限公司。

1.2 主要仪器与设备

3D 打印机:HORI-Z300,江苏汇天威科技有限公司;

万能力学试验机:E43.504,美国美特斯工业系统公司;

超景深显微镜:VHX-6000,日本基恩士公司。

1.3 样件制备

通过图1喷嘴内浸渍连续纤维的打印方法制备CAF/TPU复合材料力学试样。打印机喷嘴直径为0.8 mm,打印温度为230 °C,打印方向为0°往复式,打印试样填充度为100%。

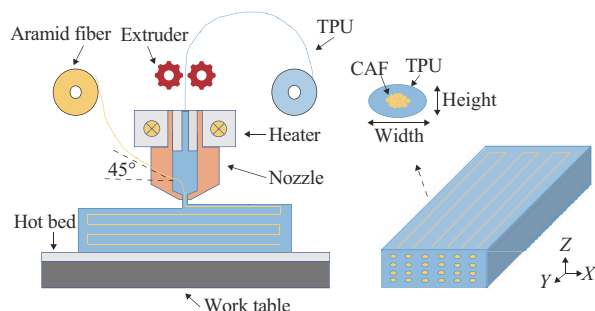


图1 实验装置和打印原理

Fig. 1 Experimental setup and printing principle.

1.4 试验设计

以拉伸强度、弯曲强度和表面粗糙度为优化目标,研究打印速度、打印层高以及单道宽度对CAF/TPU复合材料打印性能的影响。通过单因素试验控制变量法分析各工艺参数对性能的独立作用,并确定打印参数的适当区间。在此基础上,结合响应面法进行三因素三水平的优化设计,使用CCD试验拟合二次回归模型,预测最优工艺参数组合,最终通过试验验证得出最佳参数。

1.5 性能测试

拉伸性能按ISO 527:2012测试,制备I型试样,尺寸为150 mm×15 mm×3.2 mm,标距为50 mm,加载速度为2 mm/min,五个试样为一组并取平均值。

弯曲性能按ISO 178:2010测试,尺寸为80 mm×10 mm×4 mm,跨距为64 mm,加载速度为2 mm/min,五个试样为一组并取平均值。

表面粗糙度(S_a)按ISO 25178:2016测试,通过超景深显微镜扫描打印试样表面三维表面形貌,每个试样测量3个区域,并对结果 S_a 取平均值。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

单因素试验采用控制变量法,探究单个打印工

艺参数的取值对目标性能的影响规律,笔者研究的工艺参数包括打印速度(A)、打印层高(B)、单道宽度(C)。通过预实验,剔除了可能导致纤维断裂、喷嘴堵塞、成型质量极差的工艺参数,得到了可以实现连续纤维增强打印的工艺参数范围,单因素试验方案及结果见表1。未涉及打印参数均依据文献[12]所得最优工艺选取,在此基础上做进一步验证探究,其余工艺参数则按照性能最优的原则选取。

表1 单因素试验方案及结果

Tab. 1 Single factor experimental plan and results

Run	$A/$ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	$B/$ mm	$C/$ mm	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	$S_a/\mu\text{m}$
1	2	0.5	0.55	92.24	28.27	22.57
2	4	0.5	0.55	101.64	24.64	28.74
3	6	0.5	0.55	109.47	32.47	33.50
4	8	0.5	0.55	82.85	26.41	33.52
5	10	0.5	0.55	81.39	24.02	43.69
6	6	0.2	0.55	140.67	36.87	21.12
7	6	0.35	0.55	125.04	32.44	24.18
8	6	0.5	0.55	109.47	32.47	33.50
9	6	0.65	0.55	60.91	22.81	34.38
10	6	0.8	0.55	56.33	16.72	40.23
11	6	0.5	0.4	117.84	22.25	22.88
12	6	0.5	0.55	109.47	32.47	33.50
13	6	0.5	0.7	71.97	27.03	39.91
14	6	0.5	0.85	64.12	26.48	79.29
15	6	0.5	1	59.46	18.11	109.16

2.1.1 单因素试验设计方案及结果

由表1单因素试验数据可得,针对增强力学性能提高(拉伸、弯曲强度)和改善成型质量(减小表面粗糙度),得到工艺参数组合分别如下:打印速度为6 mm/s、打印层高为0.2 mm、单道宽度为0.55 mm。在此打印参数下,拉伸强度为140.67 MPa,弯曲强度为36.87 MPa,表面粗糙度为21.12 μm 。

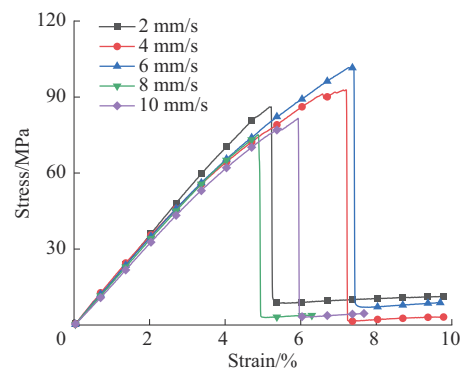
2.1.2 工艺参数对力学性能及表面质量的影响

(1)打印速度的影响分析。

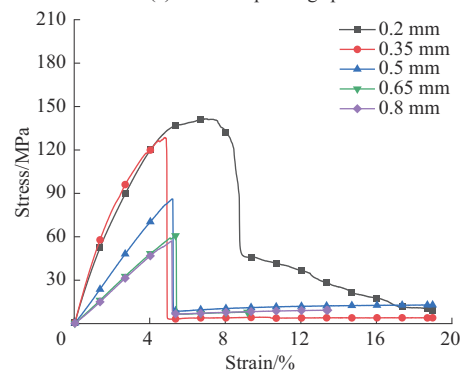
图2和图3分别为CAF/TPU试样的拉伸应力-应变曲线和弯曲应力-应变曲线。如图2和图3所示,较高的打印速度会降低熔融材料的挤出体积,导致沉积线的截面宽度减小,层间结合较差,容易形成孔隙缺陷,从而导致试样力学性能下降。打印速度适当降低,使得材料挤出稳定有更多时间向两边铺展,纤维与基体结合更均匀使得相邻层间结合面平整,从而使表面粗糙度降低。

(2)打印层高的影响分析。

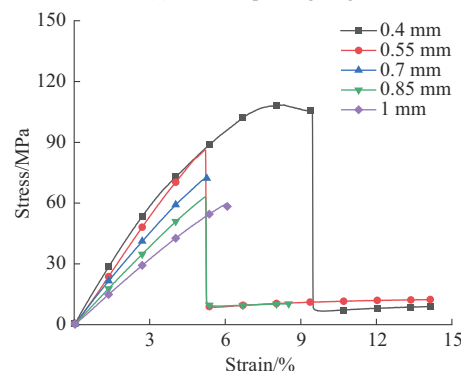
如图2和图3所示,当层厚减小,CAF/TPU试样的纤维含量增加,复合材料的力学性能与纤维含量



(a) Different printing speeds



(b) Different printing heights



(c) Different printing widths

图2 CAF/TPU试样的拉伸应力-应变曲线

Fig. 2 Tensile stress-strain curves of CAF/TPU

呈正相关,同时喷头与已沉积层之间的距离变小,更有利于丝材与沉积层之间的黏结,减小样品层间、道间的孔隙,使得CAF/TPU样件整体的力学性能提升。当层厚增大后,试样在高度方向的累加时,截面宽度减小,使得相邻层间材料结合面积减小,填充丝束层间结合部位的沟壑增多,从而使表面粗糙度增大。

(3)单道宽度的影响分析。

如图2和图3所示,当单道宽度减小,CAF/TPU试样的纤维含量增加,复合材料的力学性能与纤维含量呈正相关,使得CAF/TPU样件整体的力学性能提升。当单道宽度增大后,挤出材料沉积不均匀,

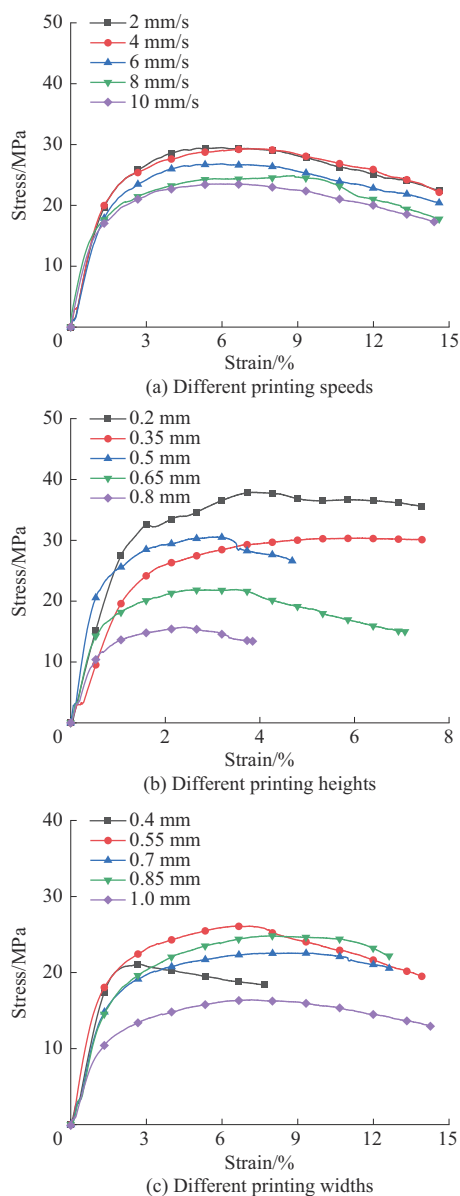


图3 CAF/TPU试样的弯曲应力-应变曲线

Fig. 3 Bending stress-strain curves of CAF/TPU

导致纤维的分布不均,使得相邻层间结合面不平整,填充纤维层间结合部位的沟壑增多,从而使表面粗糙度增大。图4为不同单道宽度的三维形貌图及其表面粗糙度。

2.2 CCD响应面试验

2.2.1 CCD试验设计方案及结果

通过分析单因素试验获得打印工艺参数的影响趋势,根据拐点附近“小中取大”的原则,选取设计的响应面试验的因素水平范围和确定 $\alpha=1$,最终确立三水平三因素的CCD响应面试验方案,试验水平见表2,将其导入Design-Expert软件中可得拉伸强度、弯曲强度、表面粗糙度的CCD试验设计方

案及结果,见表3。

根据表3试验数据显示,打印速度为4 mm/s、打印层厚为0.2 mm、单道宽度为0.4 mm时,拉伸强度达到最大值为183.51 MPa,弯曲强度达到最大值为48.33 MPa,表面粗糙度 S_a 达到最小值为9.54 μm 。优化后的拉伸性能提升30.45%,弯曲性能提升31.08%,表面质量提升54.82%。

2.2.2 CCD试验方差分析

将CCD试验结果导入Design-Expert软件进行多元回归拟合,得到表征各工艺参数的CCD试验方差分析表,见表4、表5和表6;得到各工艺参数CAF/TPU复合材料拉伸强度、弯曲强度和表面粗糙度影响的二次回归模型,见式(1)、式(2)和式(3)。

$$Y_1 = 113.39 - 4.67A - 40.11B - 16.02C + 0.295AB + 0.015AC - 4.75BC + 2.92A^2 + 15.2B^2 - 6.46C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 23.03 - 2.19A - 9.94B - 5.93C + 0.8725AB + 1.22AC + 3BC - 1.35A^2 + 3.59B^2 - 0.2495C^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 36.25 + 3.41A + 16.39B + 6.05C + 0.1937AB - 2.56AC + 0.9587BC + 11.44A^2 - 4.27B^2 - 6.31C^2 \quad (3)$$

式中: Y_1 为拉伸强度, Y_2 为弯曲强度, Y_3 为表面粗糙度。

拉伸强度模型的決定系数 $R^2 = 0.9579$,校正決定系数 $R_{\text{adj}}^2 = 0.9201$;弯曲强度決定系数 $R^2 = 0.981$,校正決定系数 $R_{\text{adj}}^2 = 0.9639$;表面粗糙度模型的決定系数 $R^2 = 0.9515$,校正決定系数 $R_{\text{adj}}^2 = 0.8396$ 。由表4、表5和表6得,二次回归模型与试验结果拟合度较好。各试验因素的系数也反映了该试验因素对响应值的显著度,各工艺参数对力学性能和表面质量的影响程度存在差异,影响大小依次为:打印层高>单道宽度>打印速度。综上所述,二次回归模型可用于CAF/TPU复合材料力学性能和成型质量对应工艺参数的分析与预测。

2.2.3 最佳工艺参数确定与试验验证

为了获得最佳力学性能和成型质量的打印工艺参数,采用CCD响应面优化对三个最佳目标进行优化预测,综合考虑打印速度、打印层高和单道宽度的影响,通过以拉伸强度、弯曲强度和表面粗糙度为优化目标,借助Design-Expert软件对打印工艺参数进行了优化分析。

最终得出的最佳打印参数为:打印速度4 mm/s、打印层高0.2 mm、单道宽度0.4 mm。对比试验数据

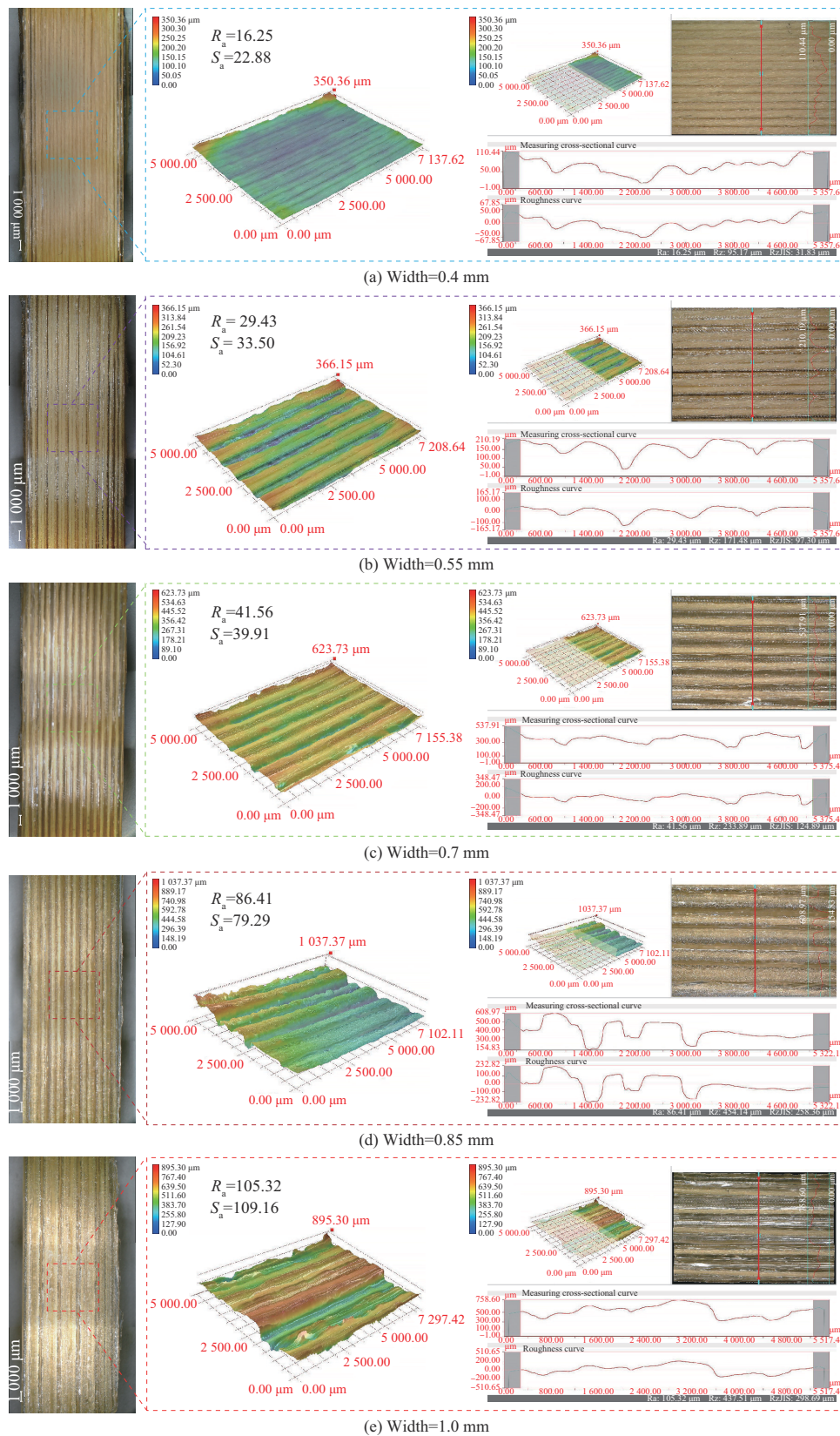


图4 不同单道宽度的CAF/TPU试样的三维形貌图及其表面粗糙度

Fig. 4 Three dimensional morphology and surface roughness of CAF/TPU with different single path width

表2 CCD试验水平值

Tab. 2 CCD test level values

Level	$A/(mm \cdot s^{-1})$	B/mm	C/mm
-1	4	0.2	0.4
0	6	0.35	0.55
+1	8	0.5	0.7

表3 CCD试验设计方案及试验结果

Tab. 3 CCD test design scheme and test results

Run	$A/(mm \cdot s^{-1})$	B/mm	C/mm	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	$S_g/\mu m$
1	6	0.35	0.55	127.61	19.56	42.99
2	6	0.35	0.55	118.73	25.08	30.97
3	8	0.5	0.7	58.03	11.79	60.71
4	6	0.2	0.55	165.22	35.88	17.86
5	8	0.35	0.55	104.17	18.88	54.92
6	4	0.2	0.4	183.51	48.33	9.54
7	4	0.2	0.7	155.04	27.65	25.08
8	6	0.35	0.55	123.11	22.51	37.31
9	8	0.5	0.4	105.43	15.62	51.57
10	6	0.35	0.7	90.51	18.67	40.78
11	6	0.35	0.55	112.01	24.24	31.02
12	6	0.35	0.4	122.06	27.27	23.75
13	8	0.2	0.7	154.32	23.96	24.18
14	6	0.35	0.55	104.37	22.44	32.6
15	6	0.5	0.55	90.67	17.73	50.75
16	8	0.2	0.4	171.21	40.59	21.8
17	4	0.5	0.4	105.03	20.69	41.46
18	6	0.35	0.55	97.11	23.64	33.31
19	4	0.5	0.7	69.09	11.17	57.91
20	4	0.35	0.55	127.17	24.86	45.11

表4 拉伸强度的CCD试验方差分析

Tab. 4 Variance analysis of CCD test for tensile strength

Source	Sum of squares	df	Mean square	F -value	p -value	Statistical significance
Model	20 020.85	9	2 224.54	25.3	< 0.000 1	Significant
A	217.9	1	217.9	2.48	0.146 5	
B	16 084.11	1	16 084.11	182.9	< 0.000 1	
C	2 568.01	1	2 568.01	29.2	0.000 3	
AB	0.696 2	1	0.696 2	0.007 9	0.930 9	
AC	0.001 8	1	0.001 8	0	0.996 5	
BC	180.31	1	180.31	2.05	0.182 7	
A^2	23.46	1	23.46	0.266 8	0.616 7	
B^2	635.02	1	635.02	7.22	0.022 8	
C^2	114.91	1	114.91	1.31	0.279 6	
Residual	879.41	10	87.94			
Lack of fit	207.03	5	41.41	0.307 9	0.889	Not significant
Pure error	672.38	5	134.48			
Cor total	20 900.26	19				

Note: df is degrees of freedom.

与表7中的预测模型结果显示,两者基本一致,验证了模型的可靠性。图5为力学试样截面形貌以及纤

表5 弯曲强度的CCD试验方差分析

Tab. 5 Variance analysis of CCD test for bending strength

Source	Sum of squares	df	Mean square	F -value	p -value	Statistical significance
Model	1 518.22	9	168.69	57.45	< 0.000 1	Significant
A	47.79	1	47.79	16.27	0.002 4	
B	988.23	1	988.23	336.55	< 0.000 1	
C	351.17	1	351.17	119.59	< 0.000 1	
AB	6.09	1	6.09	2.07	0.180 4	
AC	11.86	1	11.86	4.04	0.072 2	
BC	71.76	1	71.76	24.44	0.000 6	
A^2	5.01	1	5.01	1.71	0.220 8	
B^2	35.35	1	35.35	12.04	0.006	
C^2	0.171 3	1	0.171 3	0.058 3	0.814 1	
Residual	29.36	10	2.94			
Lack of fit	10.75	5	2.15	0.577 5	0.719 3	Not significant
Pure error	18.61	5	3.72			
Cor total	1 547.58	19				

表6 表面粗糙度的CCD试验方差分析

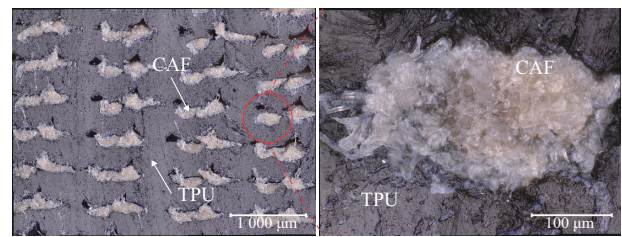
Tab. 6 Variance analysis of CCD test for surface roughness

Source	Sum of squares	df	Mean Square	F -value	p -value	Statistical significance
Model	3 610.4	9	401.16	21.81	< 0.000 1	Significant
A	116.14	1	116.14	6.32	0.030 7	
B	2 687.63	1	2 687.63	146.15	< 0.000 1	
C	366.51	1	366.51	19.93	0.001 2	
AB	0.300 3	1	0.300 3	0.016 3	0.900 8	
AC	52.38	1	52.38	2.85	0.122 4	
BC	7.35	1	7.35	0.399 9	0.541 3	
A^2	359.96	1	359.96	19.57	0.001 3	
B^2	50.12	1	50.12	2.73	0.129 8	
C^2	109.46	1	109.46	5.95	0.034 9	
Residual	183.89	10	18.39			
Lack of fit	74.56	5	14.91	0.681 9	0.657 7	Not significant
Pure error	109.33	5	21.87			
Cor total	3 794.29	19				

表7 CCD响应面优化预测结果

Tab. 7 CCD response surface optimization prediction results

$A/(mm \cdot s^{-1})$	B/mm	C/mm	Tensile strength/MPa	Bending strength/MPa	$S_g/\mu m$
4	0.2	0.4	181.40	48.159	9.85



(a) Cross-sectional morphology (b) Fiber morphology

图5 CAF/TPU试样的截面形貌及纤维排布

Fig. 5 Cross-sectional morphology and fiber arrangement of CAF/TPU

维排布情况,从试样断面可以看出内部纤维排布整齐,纤维与TPU基体结合良好。

3 结论

为提升CAF/TPU复合材料FDM打印样件的力学性能,通过设计响应面试验,探究了打印速度、打印层高、单道宽度等工艺参数对复合材料样件综合力学性能的影响规律,得到了最优工艺参数组合并进行试验验证,得出如下结论。

(1)各工艺参数对力学性能和表面质量的影响程度存在差异,影响大小依次为:打印层高>单道宽度>打印速度。

(2)打印试样的力学性能大小与其表面质量存在一定关联,力学性能理想的打印试样同时具有良好的表面质量,经过CCD优化后,最优打印参数为打印速度4 mm/s、打印层高0.2 mm、单道宽度0.4 mm。

(3)通过优化打印速度、打印层厚、单道宽度等工艺参数的组合,最终优化后的拉伸强度最高达到183.51 MPa,拉伸性能提升30.45%;弯曲强度达到48.33 MPa,弯曲性能提升31.08%;表面粗糙度最低可达9.54 μm ,表面质量提升54.82%。

参考文献

- [1] TAO Y B, LI P, ZHANG J F, et al. A review of fused filament fabrication of continuous natural fiber reinforced thermoplastic composites: Techniques and materials[J]. *Polymer Composites*, 2023, 44(12):8 200–8 222.
- [2] KABIR F M S, MATHUR K, SEYAM M A. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites: History, mechanism, materials and properties[J]. *Composite Structures*, 2020, 232(1):111 476.1–111 476.24.
- [3] 於琳涛, 聂祥樊, 罗楚养. 基于熔融沉积成型的连续纤维增强复合材料3D打印研究进展[J]. *航空兵器*, 2023, 30(2):42–52.
YU Lintao, NIE Xiangfan, LUO Chuyang. Progress in 3D printing of continuous fiber reinforced composites based on fused deposition modeling[J]. *Aero Weaponry*, 2023, 30(2):42–52.
- [4] MATSUZAKI R, UEDA M, NAMIKI M, et al. Three-dimensional printing of continuous-fiber composites by in-nozzle impregnation[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6(1). DOI:10.1038/srep23058.
- [5] ZHUO P, LI S, ASHCROFT I A, et al. Continuous fibre composite 3D printing with pultruded carbon/PA6 commingled fibres: Processing and mechanical properties[J]. *Composites Science and Technology*, 2022, 221. DOI:10.1016/j.compscitech.2022.109341.
- [6] MARABELLO G, BORSELLINO C, DI BELLA G. Carbon fiber 3D printing: Technologies and performance—a brief review[J]. *Materials*, 2023, 16(23). DOI:10.3390/ma16237311.
- [7] 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 Guan, et al. Effect of FDM forming process on warpage deformation of PEEK/CGF composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(1):64–69.
- [8] 李久振, 战丽, 李莞, 等. 基于FDM的PEEK/CGF复合材料综合力学性能优化[J]. *工程塑料应用*, 2024, 52(2):75–81.
LI Jiuzhen, ZHAN Li, LI Guan, et al. Optimization of integrated mechanical properties of PEEK/CGF composites based on FDM[J]. *Engineering Plastics Application*, 2024, 52(2):75–81.
- [9] MUSHTAQ R T, WANG Y, BAO C, et al. Maximizing performance and efficiency in 3D printing of polylactic acid biomaterials: Unveiling of microstructural morphology, and implications of process parameters and modeling of the mechanical strength, surface roughness, print time, and print energy for fused filament fabricated (FFF) bioparts[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 259. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2024.129201.
- [10] SHIRMOHAMMADI M, GOUSHCHI S J, KESHTIBAN P M. Optimization of 3D printing process parameters to minimize surface roughness with hybrid artificial neural network model and particle swarm algorithm[J]. *Progress in Additive Manufacturing*, 2021, 6(2):199–215.
- [11] SALO T, DI VITO D, HALME A, et al. Electromechanical properties of 3D-printed stretchable carbon fiber composites[J]. *Micro-machines*, 2022, 13(10). DOI:10.3390/mi13101732.
- [12] HAO M, WANG J, WANG R, et al. Mechanical dependence of 3D-printed thermoplastic polyurethane reinforced with minor continuous carbon fibres[J]. *Virtual and Physical Prototyping*, 2023, 18(1). DOI:10.1080/17452759.2023.2224304.
- [13] WANG Y F, DU B X, CHEN Y, et al. Electrical insulation and dielectric properties of aramid fiber reinforced epoxy composites under mechanical stress[J]. *Composites Science and Technology*, 2024, 255. DOI:10.1016/j.compscitech.2024.110733.
- [14] 邹爱玲, 单忠德, 陈意伟, 等. 增材制造工艺参数对PLA/AF复合材料层间剪切强度影响[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(7):82–86.
ZOU Ailing, SHAN Zhongde, CHEN Yiwei, et al. Effects of additive manufacturing process parameters on interlaminar shear strength of PLA/AF composites[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(7):82–86.
- [15] AIHEMAITI P, JIA R, AIYITI W, et al. Study on 3D printing process of continuous polyglycolic acid fiber-reinforced polylactic acid degradable composites[J]. *International Journal of Bioprinting*, 2023, 9(4). DOI:10.18063/ijb.734.
- [16] MISHRA V, ROR C K, NEGI S, et al. On mechanical characterization and damage analysis of additively manufactured continuous fiber/poly-lactic acid bio-composite using in-nozzle technique[J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(6):5 017–5 027.