

# 增材制造工艺参数对连续碳纤维增强 尼龙复合材料力学性能的影响

杨东<sup>1</sup>, 王宇轩<sup>2</sup>, 李晓军<sup>1</sup>, 丁学军<sup>3</sup>, 何泰君<sup>1</sup>, 范聪泽<sup>4\*</sup>

(1. 成都飞机工业(集团)有限责任公司, 四川 成都 610073; 2. 南京航空航天大学材料科学与技术学院, 江苏 南京 210006;  
3. 南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210006; 4. 四川大学材料科学与工程学院, 四川 成都 610040)

**摘要:** 连续碳纤维增强尼龙(CCF/PA)复合材料在增材制造过程中易因工艺参数不当导致层间孔隙缺陷和界面结合不良, 影响其力学性能。为优化其成型工艺, 研究设计正交试验, 系统考察层厚、道间距和打印温度等关键工艺参数对CCF/PA复合材料拉伸、压缩、弯曲和层间剪切性能的影响。结果表明: 打印温度对试样的拉伸和压缩强度影响最大, 层厚对试样的弯曲和剪切性能影响最大, 试样各自在其最优参数组合下分别达到拉伸强度、压缩强度、弯曲强度和剪切强度的最大值, 分别为632.41、173.83、336.67、26.27 MPa。此外, 较高的打印温度可增强树脂流动性与界面结合, 适度减小层厚和道间距可减少孔隙缺陷。研究结果为CCF/PA复合材料增材制造工艺优化提供依据, 对其在航空航天等高端领域的应用具有重要参考价值。

**关键词:** 连续纤维; 尼龙; 复合材料; 增材制造; 工艺参数; 正交试验; 力学性能

中图分类号: TB332; TQ320.52

文献标志码: A

文章编号: 1005-3360(2026)01-0153-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.01.029

## Effect of Additive Manufacturing Process Parameters on Mechanical Properties of Continuous Carbon Fiber Reinforced Nylon Composites

YANG Dong<sup>1</sup>, WANG Yuxuan<sup>2</sup>, LI Xiaojun<sup>1</sup>, DING Xuejun<sup>3</sup>, HE Taijun<sup>1</sup>, FAN Congze<sup>4\*</sup>

(1. Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu 610073, China; 2. College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210006, China; 3. College of Mechanical & Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210006, China; 4. College of Materials Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610040, China)

**Abstract:** Continuous carbon fiber-reinforced nylon (CCF/PA) composites are prone to interlayer porosity defects and poor interfacial bonding during additive manufacturing due to improper process parameters, which affects their mechanical properties. To optimize the forming process, orthogonal experiments were designed to systematically investigate the effects of key process parameters such as layer thickness, track spacing, and printing temperature on the tensile, compressive, flexural, and interlaminar shear properties of CCF/PA composites. The results indicated that printing temperature had the greatest impact on the tensile and compressive strength of the specimens, while layer thickness had the most significant effect on the flexural and shear properties. The specimens achieved maximum tensile strengths, compressive strengths, flexural strengths, and shear strengths under their respective optimal parameter combinations, with the values of 632.41, 173.83, 336.67, 26.27 MPa, respectively. Moreover, higher printing temperatures enhanced the resin flow and interfacial bonding, and moderately reducing layer thickness and track spacing could reduce porosity defects. The research findings provided a basis for the optimization of additive manufacturing processes for CCF/PA composites

收稿日期 Submitted date 2025-03-24; 修回日期 Revised date 2025-04-27; 录用日期 Accepted date 2025-06-01

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4605300); 航空国创科学基金项目(010601012501); 四川省科技计划项目(2024YFCY0026)

\*联系人, fancongze@nuaa.edu.cn

引用本文: 杨东, 王宇轩, 李晓军, 等. 增材制造工艺参数对连续碳纤维增强尼龙复合材料力学性能的影响[J]. 塑料科技, 2026, 54(1): 153-158.

Citation: YANG D, WANG Y X, LI X J, et al. Effect of additive manufacturing process parameters on mechanical properties of continuous carbon fiber reinforced nylon composites[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(1): 153-158.

and had significant reference value for their application in high-end fields such as aerospace.

**Keywords:** Continuous fibers; Nylon; Composites; Additive manufacturing; Process parameters; Orthogonal tests; Mechanical properties

碳纤维增强复合材料具有高比强度、高比刚度、可设计性强、疲劳性能好、耐腐蚀及可整体成型等优点<sup>[1]</sup>,因而在航空航天、国防军工等高端装备领域获得大量的工程应用<sup>[2]</sup>。复合材料应用的不断拓展使其对结构形式、质量等方面的要求也日益严格,传统的手工铺叠及热压罐成型方法已难以满足零件制造需求<sup>[3]</sup>。增材制造技术能够实现复合材料复杂构件的一体化快速制造<sup>[4]</sup>,既能缩短传统复合材料的加工周期,降低制造成本,实现复合材料构件的快速迭代升级<sup>[5]</sup>,又能将传统工艺难以加工的先进复合材料用于替换金属等材料的构件,提高复合材料用量比例,进一步实现减重<sup>[6]</sup>。其在无人机等装备的低成本、大规模制造方面具有巨大应用潜力<sup>[7]</sup>。

增材制造的层层堆积成型方式易导致成型层间出现大量孔隙缺陷<sup>[8-10]</sup>,从而使成型构件的层间性能下降。因此,应该研究连续纤维尼龙基复合材料增材制造的层间形成过程,揭示空间温度场、熔体压力场等对成型层间性能的影响规律<sup>[11]</sup>,同时研究材料参数、结构参数、工艺参数<sup>[12]</sup>等多因素耦合作用机理,建立复合材料构件成型制造过程的成型性调控方法,构建成型工艺与材料性能的映射关系,掌握基于多参数耦合调控的增材制造层间黏合强化方法<sup>[13]</sup>。

为实现复合材料的设计理念,可通过调控增材制造工艺实现对打印纤维的有序、定量控制以及对复合材料各部分结构造型的调整,进而实现连续纤维复合材料的轻量化、高效率、高性能成型制造<sup>[14-15]</sup>。田小永等<sup>[16]</sup>对连续纤维复合材料增材制造工艺进行系统研究,探究打印温度、打印层厚、打印速度、扫描间距等工艺参数对打印构件力学性能的影响,分析各工艺参数与纤维-树脂之间多重界面性能的关系,建立增材制造工艺参数与界面性能、力学性能的内在联系。单忠德等<sup>[17]</sup>研究发现,随着打印温度的提高,连续纤维增强复合材料的力学性能会显著提升。当打印温度从180℃升高至220℃时,复合材料拉伸强度从188 MPa提高至225 MPa,弯曲强度从274 MPa提高至296 MPa。夏正付<sup>[18]</sup>基于熔融沉积技术成型连续纤维复合材料构件,研究工艺参数对连续纤维复合材料3D打印构件表面形貌和力学性能的影响,并利用光敏树脂对连续纤维进行改性处理。

针对增材制造复合材料界面结合较差的问题,许多研究通过对连续纤维表面进行预处理,改善复合材料界面结合质量,进而提升构件力学性能。李慧斌等<sup>[19]</sup>对连续碳纤维进行上浆预处理,提高了碳纤维与树脂的界面强度,使预处理后的连续碳纤维复合材料打印制件弯曲强度从

170 MPa提高至197 MPa,拉伸强度从177 MPa提高至338 MPa。张曼玉等<sup>[20]</sup>采用上浆剂处理碳纤维并用于打印碳纤维增强尼龙6试样,处理后试样的层间剪切强度提高42%。CAMINERO等<sup>[21]</sup>研究表明,纤维与基体之间的界面结合质量会影响打印制件的层间性能;尼龙在Kevlar纤维表面浸润不良会导致界面区域出现气孔,从而使成型的复合材料构件层间剪切强度明显低于浸润性良好的碳纤维增强尼龙复合材料。

由于成型工艺的影响,纤维复合材料增材制造制件内部易产生孔隙缺陷和界面黏结较差等问题,而优化成型工艺参数可降低缺陷产生,综合提高复合材料力学性能。因此,本文针对影响较大的层厚、道间距和打印温度等工艺参数,研究多工艺参数耦合对复合材料力学性能的影响规律,以确定最优成型工艺参数。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原料

连续碳纤维增强尼龙(CCF), Tenax-EHTS45, 江苏东邦科技有限公司; 尼龙6(PA6), J2400, 杭州聚合顺新材料股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

双喷头式增材制造设备, 自研; 电子万能试验机, CMT, 济南联工测试技术有限公司。

### 1.3 样品制备

以CCF和PA6为丝材原料, 采用自研的双喷头式增材制造设备制备样品。该设备具备主动送丝功能, 避免了被动送丝过程中打印喷嘴与丝材之间的磨损, 提高成型样件的力学性能。基于“逐道逐层”熔融沉积后冷却成型工艺, 采用最优成型工艺参数制备直径为0.8 mm的连续碳纤维增强尼龙(CCF/PA)复合材料丝材(去浆温度350℃、模具温度260℃、牵引速度5 mm/s、展纤包覆角160°)。

### 1.4 试验方案设计

基于预试验的工艺参考, 本研究将层厚(A)、道间距(B)和打印温度(C) 3个影响因素作为试验变量, 设计 $L_9(3^4)$  3因素3水平的正交试验, 探究3D打印过程中多工艺参数耦合对CCF/PA复合材料弯曲性能的影响规律。表1为 $L_9(3^4)$ 正交试验因素水平设计。

表1  $L_9(3^4)$ 正交试验因素水平设计

Tab.1  $L_9(3^4)$  orthogonal test factor and level design

水平	A/mm	B/mm	C/°C
1	0.40	1.1	260
2	0.45	1.2	280
3	0.50	1.3	300

针对CCF/PA复合材料,根据相关标准要求,绘制样件尺寸三维模型,导入自研切片软件,形成打印路径。当打印过程中实际成型宽度与模型总宽度超过0.5倍的道间距时,打印增加一道。根据试验设计相应层厚、道间距、打印速度和打印温度,打印方向为 $0^\circ$ 方向,生成Gcode,导入3D打印机。执行打印样件的Gcode,制备相应样件,每组参数5个平行样件,保证数据的可靠性和有效性。

## 1.5 性能测试与表征

### 1.5.1 试验依据和标准

根据正交试验方案,采用电子万能试验机开展CCF/PA复合材料增材制造工艺参数探索力学试验,进行打印样件的拉压弯剪力学性能测试,获取相关设计数据。

试验件按试验类型-样件类型-样件序号规则编号,要求将试验件编号标注在试验件上,其中试验类型:拉伸LS、压缩YS、弯曲WQ、层剪CJ;样件类型:1~9;样件序号:01~05。

拉伸试验:根据GB/T 1447—2005<sup>[22]</sup>要求,成型尺寸为 $250\text{ mm}\times 25\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 。

压缩试验:根据GB/T 3856—2005<sup>[23]</sup>要求,成型尺寸为 $140\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 。

弯曲试验:根据GB/T 3356—2014<sup>[24]</sup>要求,成型尺寸为 $80.0\text{ mm}\times 12.5\text{ mm}\times 2.0\text{ mm}$ 。

层间剪切试验:根据GB/T 30969—2014<sup>[25]</sup>要求,成型尺寸为 $20\text{ mm}\times 6\text{ mm}\times 3\text{ mm}$ 。

### 1.5.2 测试步骤

每个类型试验件数目共45件。在进行试验前,测量其试验段的真实尺寸,包括试验段的宽度、厚度等。最后把检验情况填写在试验记录卡上。正式试验前做好预试工作,消除间隙、拉紧样件,检查加载系统等是否处于良好状态,预试载荷不超过30%试验载荷。试验过程中,记录加载过程和环境的温度、湿度等数据;对样件的变形情况、试验件跨度中点处的挠度进行跟踪、记录;记录样件的失效模式;对完成试验的样件以及样件发生的损伤进行照相记录;对试验结果进行分析,对加载过程中反馈施加载荷( $F$ )进行记录,最终给出载荷位移曲线。

## 2 结果与讨论

### 2.1 CCF/PA复合材料拉伸性能分析

表2为CCF/PA拉伸强度、模量正交试验测试结果及极差分析。其中, $K$ 表示强度, $k$ 表示模量, $R_1$ 和 $R_2$ 分别代表强度和模量的极差(下表同)。从表2可以看出,根据 $R_1$ 的大小得出3个试验因素对样件拉伸强度的影响主次顺序,依次为:打印温度>道间距>层厚,得出最优工艺参数组合为 $A_2B_2C_3$ 。根据 $R_2$ 的大小得出3个试验因素对样件拉伸模量的影响主次顺序,依次为:打印温度>层厚>道间距,得出最优工艺参数组合为 $A_2B_3C_3$ 。

随着打印温度的升高,拉伸强度和模量逐渐提高。在树脂玻璃化转变温度到热分解温度之间,打印温度越高,

树脂流动性越好,连续纤维与树脂的浸渍效果越佳,界面、层间和道间孔隙缺陷越少;热量传递效果也越显著,可实现已成型冷却层的再加热,进而提高多界面的结合性能,综合提升层间黏结强度。随着层厚的减小,拉伸强度和模量先升高后降低。当层厚减小时,沉积空间变小,打印喷嘴对挤出材料的压力增大,层间和道间孔隙缺陷减少,黏结效果得到提升,因此弯曲强度和模量提高。当层厚下降至 $0.40\text{ mm}$ 时,层厚过小,打印过程中较易出现纤维磨损起毛的现象,导致力学性能下降。打印过程中加热状态的喷嘴使树脂呈熔融态,移动喷嘴的牵引和挤压作用导致树脂流动至打印喷嘴两侧、纤维聚集于挤出材料的中上方,甚至裸露。打印下一层时,上一层已经冷却固化,裸露的纤维易与上层材料产生较大摩擦。随着道间距的减小,拉伸强度先提高后降低,拉伸模量略微提高,几乎不变。主要原因是道间距减小,打印过程中道间树脂挤压作用越显著,道间黏结强度和模量提高;“颈部”孔隙更易被树脂填充,样件孔隙缺陷减少,从而综合提高样件拉伸性能。但道间距过小会导致实际打印厚度增大,喷头与样件间距减小,进而摩擦损伤丝材。

表2 CCF/PA拉伸强度、模量正交试验测试结果及极差分析

Tab.2 Orthogonal test results and range analysis of tensile strength and modulus of CCF/PA

试验号	A	B	C	拉伸强度/ MPa	拉伸模量/ GPa
1	1	1	1	558.48	43.94
2	1	2	2	498.77	42.71
3	1	3	3	496.19	46.31
4	2	1	3	524.97	45.28
5	2	2	1	489.76	42.72
6	2	3	2	585.92	50.56
7	3	1	2	516.91	43.65
8	3	2	3	616.10	47.48
9	3	3	1	460.15	36.10
$K_1$	517.81	533.45	502.80		
$K_2$	533.55	534.88	533.87		
$K_3$	531.05	514.08	545.75		
$R_1$	15.74	20.79	42.95		
$k_1$	44.32	44.29	40.92		
$k_2$	46.18	44.30	45.64		
$k_3$	42.41	44.32	46.36		
$R_2$	3.77	0.03	5.44		

由于道间距的增加对拉伸强度的影响明显大于对模量的影响,当道间距由 $1.2\text{ mm}$ 增加至 $1.3\text{ mm}$ 时,模量的增

加相对强度的损失可忽略不计。因此,综合上述结果,得出增材制造 CCF/PA 复合材料拉伸性能的最优工艺参数:层厚 0.45 mm、道间距 1.2 mm、打印温度 300 °C。对该组参数进行验证试验,得到 CCF/PA 的拉伸强度和模量分别为 632.41 MPa、52.98 GPa,满足试验规律。

## 2.2 CCF/PA 复合材料压缩性能分析

表 3 为 CCF/PA 压缩强度、模量正交试验测试结果及极差分析。从表 3 可以看出,根据  $R_1$  的大小得出 3 个试验因素对样件压缩强度的影响主次顺序,依次为:打印温度>道间距>层厚,得出最优工艺参数组合为  $A_2B_1C_3$ 。根据  $R_2$  的大小得出 3 个试验因素对样件压缩模量的影响主次顺序,依次为:道间距>层厚>打印温度,得出最优工艺参数组合为  $A_2B_1C_3$ 。

表 3 CCF/PA 压缩强度、模量正交试验测试结果及极差分析

Tab.3 Orthogonal test results and range analysis of compressive strength and modulus of CCF/PA

试验号	A	B	C	压缩强度/ MPa	压缩模量/ GPa
1	1	1	1	148.93	31.69
2	1	2	2	157.73	37.05
3	1	3	3	125.27	27.42
4	2	1	3	173.83	42.38
5	2	2	1	120.26	30.25
6	2	3	2	160.61	30.51
7	3	1	2	137.11	30.02
8	3	2	3	163.25	29.85
9	3	3	1	134.32	30.48
$K_1$	143.97	153.29	134.50		
$K_2$	151.57	147.08	151.82		
$K_3$	144.89	140.06	154.11		
$R_1$	7.59	13.22	19.61		
$k_1$	32.05	34.70	30.81		
$k_2$	34.38	32.38	32.53		
$k_3$	30.12	29.47	33.22		
$R_2$	4.26	5.23	2.41		

随着层厚的减小,压缩强度和模量先升高后降低。层厚减小,沉积空间变小,打印喷嘴对挤出材料的压力增大,层间和道间孔隙缺陷减少、黏结效果得到提升,故压缩强度和模量提高。当层厚下降至 0.40 mm 时,层厚过小,打印过程中较易出现纤维磨损起毛的现象,导致力学性能下降。由于打印过程中加热状态的喷嘴使树脂呈熔融态,移动喷嘴的牵引和挤压作用导致树脂流动至打印喷嘴两侧、纤维聚集于挤出材料的中上方,甚至裸露。打印下一层

时,上一层已经冷却固化,裸露的纤维易与上层材料产生较大摩擦。随着道间距的减小,压缩强度和模量逐渐提高。主要原因是道间距减小,打印过程中道间树脂挤压作用越显著,道间黏结强度和模量提高;“颈部”孔隙更易被树脂填充,样件孔隙缺陷减少,综合提高样件压缩性能。随着打印温度的升高,压缩强度和模量逐渐提高。在树脂玻璃化转变温度到热分解温度之间,打印温度越高,树脂流动性越高,连续纤维与树脂的浸渍效果越好,使界面、层间和道间孔隙缺陷越少;热量传递效果越显著,实现已成型冷却层的再加热,提高多界面的结合性能,综合提高层间黏结强度。

综合上述结果,得出增材制造 CCF/PA 复合材料压缩力学性能的最优工艺参数:层厚 0.45 mm、道间距 1.1 mm、打印温度 300 °C。在该组参数下得到的 CCF/PA 的最大压缩强度为 173.83 MPa,压缩模量为 42.38 GPa,满足试验规律。

## 2.3 CCF/PA 复合材料弯曲性能分析

表 4 为 CCF/PA 弯曲强度、模量正交试验测试结果及极差分析。从表 4 可以看出,根据  $R_1$  的大小得出 3 个试验因素对样件弯曲强度的影响主次顺序,依次为:层厚>道间距>打印温度,得出最优工艺参数组合为  $A_2B_1C_3$ 。根据  $R_2$  的大小得出 3 个试验因素对样件弯曲模量的影响主次顺序,依次为:层厚>道间距>打印温度,得出最优工艺参数组合为  $A_2B_1C_3$ 。

随着层厚的减小,弯曲强度和模量先升高后降低。层厚减小,沉积空间变小,打印喷嘴对挤出材料的压力增大,层间和道间孔隙缺陷减少、黏结效果得到提升,故弯曲强度和模量提高。当层厚下降至 0.40 mm 时,层厚过小,打印过程中较易出现纤维磨损起毛的现象,导致力学性能下降。由于打印过程中加热状态的喷嘴使树脂呈熔融态,移动喷嘴的牵引和挤压作用导致树脂流动至打印喷嘴两侧、纤维聚集于挤出材料的中上方,甚至裸露。打印下一层时,上一层已经冷却固化,裸露的纤维易与上层材料产生较大摩擦。随着道间距的减小,弯曲强度和模量逐渐提高。主要原因是道间距减小,打印过程中道间树脂挤压作用越显著,道间黏结强度和模量提高;“颈部”孔隙更易被树脂填充,样件孔隙缺陷减少,综合提高样件弯曲性能。随着打印温度的升高,弯曲强度和模量逐渐提高。在树脂玻璃化转变温度到热分解温度之间,打印温度越高,树脂流动性越高,连续纤维与树脂的浸渍效果越好,使得界面、层间和道间孔隙缺陷越少;热量传递效果越显著,实现已成型冷却层的再加热,提高多界面的结合性能,综合提高层间黏结强度。

综合上述结果,得出增材制造 CCF/PA 复合材料力学性能的最优工艺参数:层厚 0.45 mm、道间距 1.1 mm、打印温度 300 °C。在该组参数下得到的 CCF/PA 的最大弯曲强度为 336.67 MPa,弯曲模量为 36.76 GPa,满足试验规律。

表4 CCF/PA 弯曲强度、模量正交试验测试结果及极差分析  
Tab.4 Orthogonal test results and range analysis  
of flexural strength and modulus of CCF/PA

试验号	A	B	C	弯曲强度/ 弯曲模量/	
				MPa	GPa
1	1	1	1	299.76	30.17
2	1	2	2	264.90	28.51
3	1	3	3	332.76	35.18
4	2	1	3	336.67	36.76
5	2	2	1	324.34	36.54
6	2	3	2	269.78	29.07
7	3	1	2	300.15	30.00
8	3	2	3	224.62	23.44
9	3	3	1	195.75	20.37
$K_1$	299.1	312.2	273.3		
$K_2$	310.3	271.3	278.3		
$K_3$	240.2	266.1	298.0		
$R_1$	70.1	46.1	24.7		
$k_1$	31.29	32.31	29.03		
$k_2$	34.12	29.50	29.19		
$k_3$	24.60	28.21	31.79		
$R_2$	9.52	4.10	2.77		

## 2.4 CCF/PA 复合材料剪切性能分析

表5为CCF/PA剪切强度正交试验测试结果及极差分析。从表5可以看出,根据极差 $R$ 的大小得出3个试验因素对样件强度的影响主次顺序,依次为:层厚>道间距>打印温度,得出最优工艺参数组合为 $A_1B_1C_3$ 。

随着层厚的减小,层间剪切强度升高。层厚减小,沉积空间变小,打印喷嘴对挤出材料的压力增大,层间和道间孔隙缺陷减少,黏结效果得到提升,故剪切强度提高。由于打印过程中加热状态的喷嘴使树脂呈熔融态,移动喷嘴的牵引和挤压作用导致树脂流动至打印喷嘴两侧、纤维聚集于挤出材料的中上方,甚至裸露。打印下一层时,上一层已经冷却固化,裸露的纤维易与上层材料产生较大摩擦。随着道间距的减小,层间剪切强度逐渐提高。主要原因是道间距减小,打印过程中道间树脂挤压作用越显著,道间黏结强度和模量提高;“颈部”孔隙更易被树脂填充,样件孔隙缺陷减少,综合提高样件剪切强度。随着打印温度的升高,层间剪切强度逐渐提高。在树脂玻璃化转变温度到热分解温度之间,打印温度越高,树脂流动性越高,连续纤维与树脂的浸渍效果越好,使界面、层间和道间孔隙缺陷越少;热量传递效果越显著,实现已成型冷却层的再加热,提高多界面的结合性能,综合提高层

间黏结强度。

表5 CCF/PA 剪切强度正交试验测试结果及极差分析  
Tab.5 Orthogonal test results and range analysis  
of shear strength of CCF/PA

试验号	A	B	C	剪切强度/MPa	
1	1	1	1	24.95	
2	1	2	2	20.48	
3	1	3	3	19.07	
4	2	1	3	20.33	
5	2	2	1	15.19	
6	2	3	2	15.80	
7	3	1	2	13.64	
8	3	2	3	12.11	
9	3	3	1	9.71	
$K_1$	21.50	19.64	16.61		
$K_2$	17.11	15.93	16.64		
$K_3$	11.82	14.86	17.17		
$R$	9.68	4.78	0.56		

综合上述结果,得出增材制造CCF/PA复合材料力学性能的最优工艺参数:层厚0.40 mm、道间距1.1 mm、打印温度300 °C。对该组参数进行验证试验,得到CCF/PA的剪切强度为26.27 MPa,满足试验规律。

## 3 结论

本文开展增材制造多工艺参数对CCF/PA性能的影响规律,研究成型工艺参数对其拉压弯剪机械性能的影响,得出最优成型工艺参数。

CCF/PA复合材料样件的拉伸强度随着层厚的减小而先升高后降低;随着道间距的减小而先升高后降低;随着打印温度的增加而逐渐升高。最优成型工艺参数为:层厚0.45 mm、道间距1.2 mm、打印温度300 °C,最大拉伸强度为632.41 MPa。

CCF/PA复合材料样件的压缩强度随着层厚的减小而先升高后降低;随着道间距的减小而逐渐升高;随着打印温度的增加而逐渐升高。最优成型工艺参数为:层厚0.45 mm、道间距1.1 mm、打印温度300 °C,最大压缩强度为173.83 MPa。

CCF/PA复合材料样件的弯曲强度随着层厚的减小而先升高后降低;随着道间距的减小而逐渐升高;随着打印温度的增加而逐渐升高。最优成型工艺参数为:层厚0.45 mm、道间距1.1 mm、打印温度300 °C,最大弯曲强度为336.67 MPa。

CCF/PA复合材料样件的层间剪切强度随着层厚的减小而升高,随着道间距的减小而逐渐升高;随着打印温度的增加而逐渐升高。最优成型工艺参数为:层厚0.40 mm、

道间距 1.1 mm、打印温度 300 °C,最大剪切强度为 26.27 MPa。

### 参考文献

- [1] 李进卫. 碳纤维增强复合材料性能特点及其应用领域[J]. 化学工业, 2015, 33(8): 13-18.
- [2] 韩文彬, 严刚, 葛孚宇, 等. 添加碳纤维/碳纳米管复合填料的橡胶厚制品硫化过程中温度场和硫化程度模拟[J]. 橡胶工业, 2025, 72(5): 323-332.
- [3] 熊晓晨, 秦训鹏, 华林, 等. 复合式增材制造技术研究现状及发展[J]. 中国机械工程, 2022(17): 2087-2097.
- [4] 刘小龙, 王文宇, 赵阳, 等. 增材制造连续纤维增强树脂基复合材料研究进展[J]. 中国表面工程, 2025, 38(3): 1-18.
- [5] MAQSOOD N, RIMAŠAUSKAS M, GHOBAKHLOO M, et al. Additive manufacturing of continuous carbon fiber reinforced polymer composites using materials extrusion process. Mechanical properties, process parameters, fracture analysis, challenges, and future prospect. A review[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2024, 7(6): 202.
- [6] 王冰. 增材制造技术在工业设计中的应用研究[J]. 科技资讯, 2024, 22(13): 91-93.
- [7] 葛增如, 刘建光, 彭俊阳, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料增材制造现状及应用前瞻[J]. 航空制造技术, 2024, 6(20): 148-161.
- [8] 王旭康. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料构件层间性能增强方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2024.
- [9] 林刚. 国产碳纤维何以突围: 2022全球碳纤维复合材料市场报告[J]. 纺织科学研究, 2023, 34(5): 16-35.
- [10] BARİŞ VATANDAŞ B, UŞUN A, YİLDİZ N, et al. Additive manufacturing of PEEK-based continuous fiber reinforced thermoplastic composites with high mechanical properties[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2023, 167: 107434.
- [11] ZHANG M H, ZHANG J M, YANG D M, et al. Improved interlayer performance of short carbon fiber reinforced composites with bio-inspired structured interfaces[J]. *Additive Manufacturing*, 2024, 79: 103936.
- [12] 彭宣智. 3D打印碳纤维增强PA66的工艺参数与晶格构型的研究[D]. 太原: 中北大学, 2024.
- [13] 张明, 孙中刚, 郭艳华, 等. 3D打印连续纤维增强树脂基复合材料的研究进展[J]. 材料工程, 2025, 53(2): 50-70.
- [14] 张聘, 王奉晨, 李玥莹, 等. 连续纤维增强复合材料3D打印技术现状及展望[J]. 航空制造技术, 2023, 66(16): 76-87.
- [15] CHENG P, PENG Y, LI S X, et al. 3D printed continuous fiber reinforced composite lightweight structures: A review and outlook[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2023, 250: 110450.
- [16] 田小永, 刘腾飞, 杨春成, 等. 高性能纤维增强树脂基复合材料3D打印及其应用探索[J]. 航空制造技术, 2016, 56(15): 26-31.
- [17] 单忠德, 范聪泽, 孙启利, 等. 纤维增强树脂基复合材料增材制造技术与装备研究[J]. 中国机械工程, 2020, 31(2): 221-226.
- [18] 夏正付. 纤维增强复合材料增材制造技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [19] 李慧斌, 刘玉君, 汪骥, 等. 3D打印连续碳纤维预浸丝制备及性能分析[J]. 中国材料进展, 2023, 42(3): 260-265.
- [20] 张曼玉, 刘腾飞, 田小永, 等. 面向3D打印的连续碳纤维上浆工艺及其对复合材料性能的影响[J]. 中国材料进展, 2020, 39(5): 349-355.
- [21] CAMINERO M A, CHACÓN J M, GARCÍA-MORENO I, et al. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling[J]. *Polymer Testing*, 2018, 68: 415-423.
- [22] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [23] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会. 单向纤维增强塑料平板压缩性能试验方法: GB/T 3856—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [24] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会, 全国航空器标准化技术委员会(SAC/TC 435). 定向纤维增强聚合物基复合材料弯曲性能试验方法: GB/T 3356—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [25] 全国纤维增强塑料标准化技术委员会, 全国航空器标准化技术委员会(SAC/TC 435). 聚合物基复合材料短梁剪切强度试验方法: GB/T 30969—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.