

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2022.05.011

连续纤维增强 PEEK 增材制造力学性能与成型质量优化

陈意伟^{1,2}, 单忠德^{2,3}, 杨旭静¹, 张丽娇⁴, 李明高⁴

(1. 湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082; 2. 机械科学研究总院先进成形技术与装备国家重点实验室, 北京 100044; 3. 南京航空航天大学, 南京 210016; 4. 中车工业研究院有限公司, 北京 100070)

摘要: 针对连续纤维增强聚醚醚酮 (PEEK) 复合材料增材制造中的界面结合差、制件精度不高等技术瓶颈, 基于多热力学耦合作用下的连续纤维增材制造成型工艺, 实现了典型样件的 3D 打印制备。基于正交实验设计, 并通过微观形貌表征和力学性能测试, 探究了喷头温度、打印速度和分层厚度对打印制件的表面粗糙度和弯曲性能的影响规律, 获得连续纤维增强 PEEK 复合材料增材制造成型优化工艺参数。结果表明, 分层厚度对表面粗糙度、弯曲强度和弯曲弹性模量具有显著影响, 而打印速度和分层厚度对力学性能和成型精度影响较小。分层厚度越小, 打印道间结合质量越好, 成型制件表面粗糙度越小, 弯曲弹性模量和弯曲强度越高。最优工艺参数为喷头温度 390℃、打印速度 2 mm/s 和分层厚度 0.4 mm。经试验验证, 最优工艺参数下表面粗糙度达到最小为 24.99 μm , 弯曲弹性模量和弯曲强度分别达到最大为 57.05 GPa 和 355.07 MPa。

关键词: 连续纤维; 聚醚醚酮; 增材制造; 弯曲性能; 表面粗糙度; 工艺优化

中图分类号: TH145.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2022)05-0061-07

Parameter Optimization of Mechanical Properties and Forming Accuracy for Continuous Fiber Reinforced PEEK Additive Manufacturing

Chen Yiwei^{1,2}, Shan Zhongde^{2,3}, Yang Xujing¹, Zhang Lijiao⁴, Li Minggao⁴

(1. State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China; 3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 4. CRRC Academy Corporation Limited, Beijing 100070, China)

Abstract : Aiming at solving the technical bottleneck of poor interface bonding and low precision in the additive manufacture of continuous fiber reinforced polyetheretherketone (PEEK) composites, the 3D printing preparation of typical samples was realized using the continuous fiber additive manufacturing process under the multiple thermo-mechanical coupling effects. On the basis of orthogonal experimental design, the effects of nozzle temperature, printing speed and delamination thickness on the surface roughness and bending properties of printed parts were explored through the micro morphology characterization and mechanical properties test, and the optimized process parameters of continuous fiber reinforced PEEK composite additive manufacturing were obtained. The results show that the delamination thickness presents a significant effect on the surface roughness, bending strength and bending modulus, while the printing speed and delamination thickness show little effects on the mechanical properties and forming accuracy. With the decrease of layer thickness, the bonding quality between single printing paths becomes better, the surface roughness is decreased, the bending modulus and bending strength are improved. The optimum process parameters are gained with nozzle temperature of 390℃, printing speed of 2 mm/s and delamination thickness of 0.4 mm. Under the optimal process parameters, the minimum surface roughness is 24.99 μm , and the maximum bending modulus and bending strength are 57.05 GPa and 355.07 MPa respectively.

Keywords : continuous fiber ; polyetheretherketone ; additive manufacturing ; flexural property ; surface roughness ; parameter optimization

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51875188)

通信作者: 单忠德, 研究员, 主要研究方向为数字化机械装备与先进成形制造技术

收稿日期: 2022-02-25

引用格式: 陈意伟, 单忠德, 杨旭静, 等. 连续纤维增强 PEEK 增材制造力学性能与成型质量优化 [J]. 工程塑料应用, 2022, 50(5):61–67.

Chen Yiwei, Shan Zhongde, Yang Xujing, et al. Parameter optimization of mechanical properties and forming accuracy for continuous fiber reinforced PEEK additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2022, 50(5):61–67.

连续纤维增强树脂基复合材料具有高比强度、高比模量、可设计性强等优势,广泛应用于航空航天、军工船舶、汽车电子等领域^[1-2]。相比于热固性树脂基复合材料,热塑性树脂基复合材料具有韧性好、抗冲击、损伤容限大和可回收等优点,因此更加具有竞争优势^[3-4]。传统的热塑性复合材料成型工艺如模压成型、拉挤成型、缠绕成型等成型工艺复杂、模具依赖度高、成型周期长、制造成本高且无法实现复杂零部件一体化成型,严重制约了其应用范围^[5-7]。增材制造(又称3D打印)技术是一种基于离散-堆积原理的三维实体自由成型制造新技术,可由三维模型数据驱动直接制造零部件,具有设计自由度高、材料利用率高、加工周期短,且可实现复杂零部件一体化成型等优势^[8-11]。将增材制造技术应用于热塑性复合材料的制备,可充分发挥复合材料的性能优势和3D打印的制造优势,可实现复合材料制件短周期、高性能、一体化制造,进一步拓展热塑性复合材料的应用范围^[12-13]。

常用的连续纤维增材制造热塑性树脂包括聚乳酸(PLA)^[14-15]、丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)^[16]、聚酰胺(PA)^[17-18]等。随着航空航天发展及对材料需求的不断提高,高性能热塑性树脂聚醚醚酮(PEEK)逐渐成为研究热点。采用PEEK作为基体材料,可使复合材料具有良好的韧性、耐腐蚀性和耐高温性,在航空航天等高科技领域展现了广阔的应用前景^[19]。但由于PEEK分子链呈刚性且非极性,熔融态黏度高,且碳纤维的类石墨结构使其表面呈现化学惰性,不易被树脂浸润和发生化学反应,与树脂界面结合力较弱^[20]。此外,基于层层堆积成型的复合材料,层间结合较弱,层间强度有限,成为限制其应用的主要技术瓶颈^[21]。

截至目前,关于连续纤维增强PEEK复合材料的增材制造相关文献报道较少。Luo等^[22]实现了连续纤维增强PEEK复合材料的增材制造,并通过激光辅助预热层间剪切强度达到了35 MPa,弯曲强度达到了480 MPa。为进一步改善界面结合,Luo等^[23]揭示了多尺度弱界面结合机理,并采用了等离子-激光双重界面优化工艺,使得成型制件层间强度达到了39.05 MPa。但是,目前缺乏关于连续纤维增强PEEK复合材料增材制造的基础工艺优化研究的文献报道。

笔者采用了多热力场耦合作用下的连续纤维增材制造成型工艺,并基于正交实验设计,探究了喷

头温度、打印速度和分层厚度等工艺参数对连续纤维增强PEEK复合材料弯曲性能和成型精度的影响规律,通过主效应图与方差分析确定不同工艺参数的影响程度,获得最优的工艺参数,为连续纤维增强PEEK的增材制造及应用提供一定的理论依据和数据基础。

1 实验部分

1.1 主要原材料

PEEK: ZYPEEK-310G, 吉林省中研高分子材料股份有限公司;

碳纤维: T300-3K, 日本东丽公司。

1.2 主要仪器及设备

激光共聚焦显微镜: KEYENCE VK-X250 型, 日本基恩士公司;

万能材料试验机: INSTRON5567 型, 美国英斯特朗公司;

预浸丝材成型设备、连续纤维增材制造设备: 自制。

1.3 样件制备

笔者采用了基于多热力场耦合作用下的连续纤维增材制造成型工艺。图1为热力耦合作用下的预浸丝材成型工艺示意图,图2为热力耦合作用下的连续纤维增材制造成型工艺示意图。如图1所示,热塑性树脂PEEK粒料经双螺杆加热熔融挤出至弯曲流道浸渍模具,连续纤维在收卷辊的牵引作用下,经过充满熔融树脂的弯曲流道。由于熔融树脂的流

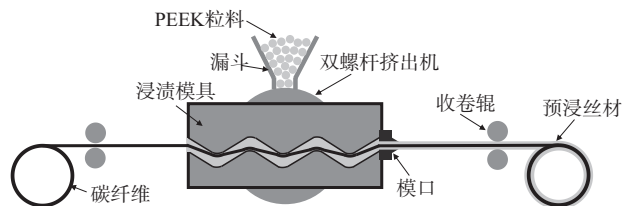


图1 热力耦合作用预浸丝材成型示意图

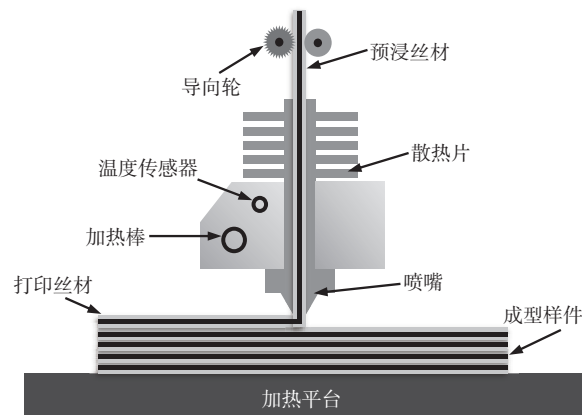


图2 连续纤维增材制造成型示意图

动性和熔体压力的作用,促使树脂进入纤维束内部,实现连续纤维的浸渍。在浸渍过程中,模具温度决定了树脂的黏度和流动性,而牵引速度严重影响着熔体压力及浸渍时间。通过工艺参数优化,选取模具温度 390°C ,牵引速度 7 mm/s 的成型参数制备丝材。最终,丝材通过模口形成直径一定的连续纤维增强 PEEK 预浸丝材。如图 2 所示,成型后的预浸丝材经打印喷头的加热熔融,并在打印喷头的压力作用下,按照特定的扫描路径逐层打印,层层堆积成型打印制件。

1.4 正交实验设计

为探究不同工艺参数对复合材料制件弯曲性能和成型精度的影响规律,将喷头温度 (A)、打印速度 (B) 和层间厚度 (C) 三个工艺参数作为设计变量,并且设置一个空列作为实验误差用来衡量实验的可靠性。实验因素水平选取见表 1,采用 $L_9(3^4)$ 正交

表 1 正交实验因素水平表

水平	因素		
	$A/^{\circ}\text{C}$	$B/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	C/mm
1	350	2	0.4
2	370	4	0.5
3	390	6	0.6

实验设计来探究工艺参数对实验结果的影响,每组实验重复 3 组。

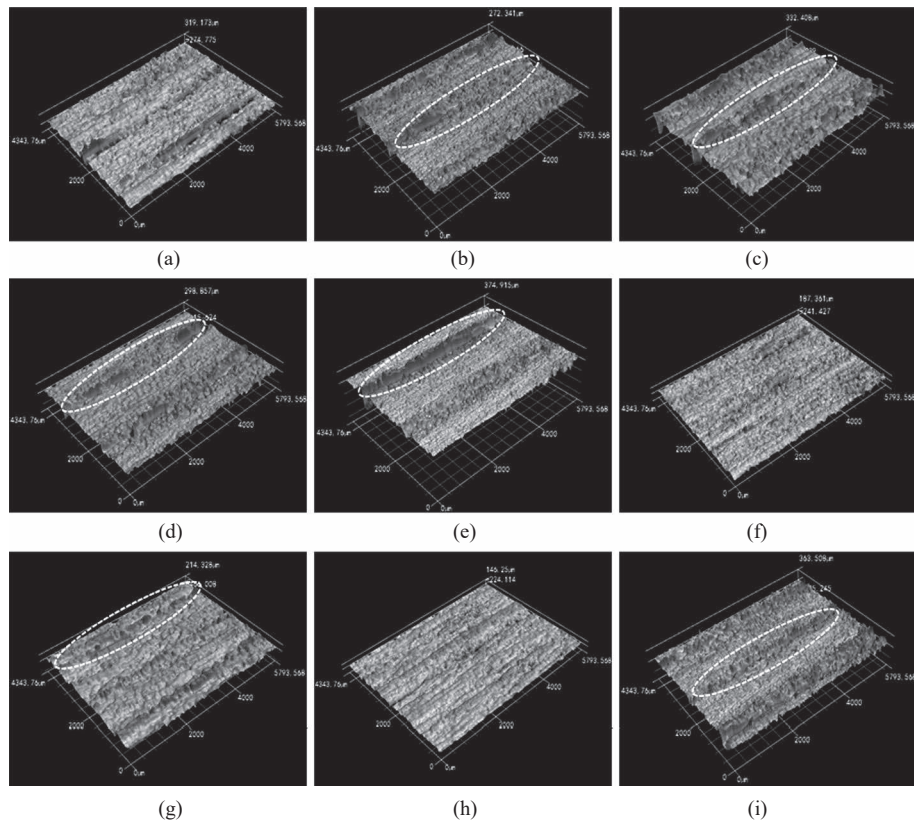
1.5 精度表征与性能测试

基于开发的工艺和装置,并依据标准 ISO 14125:1998,打印制备了标准弯曲样件。为表征工艺参数对成型精度的影响规律,扫描样件表面获得打印制件表面形貌和表面粗糙度;为评估不同工艺参数对弯曲性能的影响,基于力学测试平台,开展打印制件弯曲性能测试,加载速率为 5 mm/s ,经计算获得不同参数下的弯曲强度和弯曲弹性模量。

2 结果与讨论

2.1 成型精度分析

连续纤维增材制造是基于分层打印层层堆积成型原理,而在单层成型过程中,则是通过单道打印实现,因此打印道间的粘接质量对成型性能和精度有着重要的影响。图 3 为不同工艺参数组合下成型制件表面形貌图。通过观察图 3 发现,打印道间存在不同尺寸的孔隙,这主要是由于增材制造过程中打印丝材与成型制件间的粘接质量差导致的,进而影响成型质量的表面粗糙度。通过进一步比较发现,工艺参数对道间粘接质量有着重要影响。当分



a— 350°C , 2 mm/s , 0.4 mm ; b— 350°C , 4 mm/s , 0.5 mm ; c— 350°C , 6 mm/s , 0.6 mm ; d— 370°C , 2 mm/s , 0.5 mm ;

e— 370°C , 4 mm/s , 0.6 mm ; f— 370°C , 6 mm/s , 0.4 mm ; g— 390°C , 2 mm/s , 0.6 mm ; h— 390°C , 4 mm/s , 0.4 mm ; i— 390°C , 6 mm/s , 0.5 mm

图 3 不同喷头温度、打印速度和层间厚度组合下的成型制件表面形貌图

层厚度为 0.4 mm (如图 3a、图 3f 和图 3h 所示) 时,道间粘接质量较好,孔隙尺寸较小,而当分层厚度为 0.5 mm 和 0.6 mm 时,道间粘接质量较差,孔隙尺寸变大,即分层厚度的大小对道间粘接质量和孔隙形成具有重要影响。

为进一步评估工艺参数对成型精度的影响,根据正交实验设计方案统计了不同工艺参数下成型制件的表面粗糙度,结果见表 2。由表 2 可以发现,当喷头温度为 350℃、打印速度为 6 mm/s、层间厚度为 0.6 mm 时,打印样件表面粗糙度最大,为 65.04 μm 。而当喷头温度为 390℃、打印速度为 4 mm/s、层间厚度为 0.4 mm 时,打印样件表面粗糙度最小,为 25.41 μm 。

表 2 不同工艺参数下打印样件表面粗糙度 μm

样件 编号	因素水平			表面粗糙度
	A	B	C	
1 [#]	1(350)	1(2)	1(0.4)	39.90
2 [#]	1(350)	2(4)	2(0.5)	46.06
3 [#]	1(350)	3(6)	3(0.6)	65.04
4 [#]	2(370)	1(2)	2(0.5)	41.78
5 [#]	2(370)	2(4)	3(0.6)	60.72
6 [#]	2(370)	3(6)	1(0.4)	31.64
7 [#]	3(390)	1(2)	3(0.6)	39.46
8 [#]	3(390)	2(4)	1(0.4)	25.41
9 [#]	3(390)	3(6)	2(0.5)	59.72

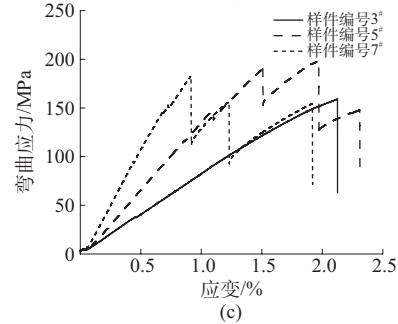
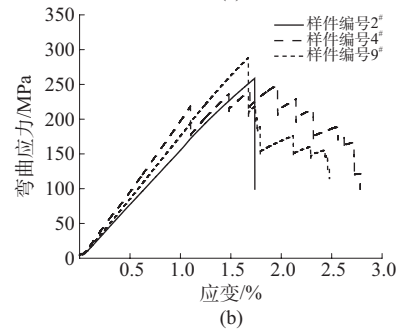
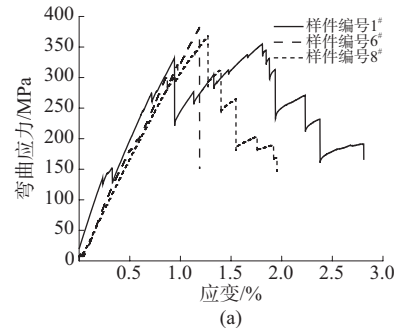
2.2 弯曲性能分析

图 4 为正交实验不同工艺参数下的打印样件弯曲应力 - 应变曲线。可以发现,在达到最大弯曲应力以前,所有曲线对应的应力随应变线性增加。在此过程中,部分曲线出现小的波动,这主要是在加载过程中弯曲样件层间断裂所致。当达到最大强度后,样件发生弯曲断裂,应力急剧下降。通过比较可以发现,不同工艺参数对打印制件的弯曲性能影响较大。

表 3 为根据正交实验设计方案统计的不同工艺参数下成型制件的弯曲性能结果。从表 3 数据可知,不同工艺参数下的弯曲强度和弯曲弹性模量具有较

表 3 不同工艺参数下打印样件弯曲性能

样件 编号	因素水平			弯曲强度 / MPa	弯曲弹性 模量 /GPa
	A	B	C		
1 [#]	1(350)	1(2)	1(0.4)	309.54	46.41
2 [#]	1(350)	2(4)	2(0.5)	245.15	19.85
3 [#]	1(350)	3(6)	3(0.6)	153.91	8.83
4 [#]	2(370)	1(2)	2(0.5)	271.69	26.15
5 [#]	2(370)	2(4)	3(0.6)	200.06	14.15
6 [#]	2(370)	3(6)	1(0.4)	282.19	49.23
7 [#]	3(390)	1(2)	3(0.6)	235.26	25.22
8 [#]	3(390)	2(4)	1(0.4)	330.97	54.50
9 [#]	3(390)	3(6)	2(0.5)	238.68	19.14



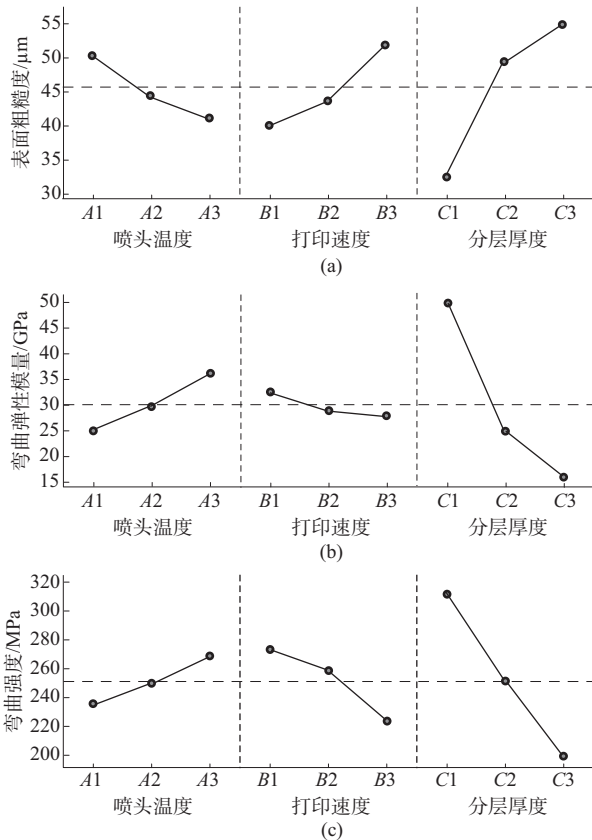
分层厚度: a—0.4 mm; b—0.5 mm; c—0.6 mm

图 4 不同工艺参数下打印样件弯曲应力 - 应变曲线

大差异。当喷头温度为 350℃、打印速度为 6 mm/s、层间厚度为 0.6 mm 时,打印样件弯曲强度和弯曲弹性模量最小,分别为 153.91 MPa 和 8.83 GPa。而当喷头温度为 390℃、打印速度为 4 mm/s、层间厚度为 0.4 mm 时,打印样件弯曲强度和弯曲弹性模量最大,分别为 330.97 MPa 和 54.50 GPa。

2.3 正交实验结果分析

图 5 为表面粗糙度、弯曲弹性模量和弯曲强度的主效应图,该图是由各因素水平的响应均值连线绘制而成。从图 5 可以得到各因素对实验结果的影响规律和影响大小,且不同水平下的均值相差越大表明该因素的变动对结果影响越大。对于表面粗糙度,主效应图结果表明三个因素影响大小的排序为: $C > B > A$,即分层厚度的变化对样件表面粗糙度影响最大,其次是打印速度,而喷头温度影响最小。最佳工艺参数组合是 A3B1C1,即喷头温度为 390℃,打印速度为 2 mm/s,层间厚度为 0.4 mm 时,样件的



a—表面粗糙度; b—弯曲弹性模量; c—弯曲强度

图5 表面粗糙度、弯曲弹性模量和弯曲强度主效应图

表面粗糙度最小。

针对弯曲弹性模量,统计结果表明三个因素影响大小的排序为: $C>A>B$,即分层厚度的变化对样件弯曲弹性模量影响最大,其次是喷头温度和打印速度。此外,由主效应图可确定最佳工艺参数组合是A3B1C1,即喷头温度为390℃,打印速度为2 mm/s,分层厚度为0.4 mm时,样件的弯曲弹性模量最高。

弯曲强度的主效应结果表明三个因素影响大小的排序为: $C>B>A$,即分层厚度的变化对样件弯曲强度影响最大,其次是打印速度,而喷头温度影响最小。此外,最佳工艺参数组合是A3B1C1,即喷头温度为390℃,打印速度为2 mm/s,层间厚度为0.4 mm时,样件的弯曲强度最高。

表4为各因素对表面粗糙度方差分析结果。根据表4方差分析的数据结果可以计算得到 P 值。当 P 值 ≤ 0.01 时,表明该因素对结果有极显著影响,当 $0.01 < P$ 值 ≤ 0.05 时,表明该因素对结果影响显著,当 P 值 > 0.05 时,表明该因素对结果影响不显著。由表4可见,方差分析结果表明各因素在选定参数范围内对表面粗糙度影响不显著。

表4 表面粗糙度方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	方差	F 值	P 值
A	119.2	2	59.61	0.37	0.729
B	216.8	2	108.42	0.68	0.596
C	837.1	2	418.56	2.61	0.277
误差	320.2	2	160.10		
总和	1493.4	8			

弯曲弹性模量的方差分析结果见表5。由表5可以看出,喷头温度(P 值=0.022)和打印速度(P 值=0.010)对弯曲弹性模量有显著影响,而分层厚度(P 值=0.002)对弯曲弹性模量有极显著影响。

表5 弯曲弹性模量方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	方差	F 值	P 值
A	1547.7	2	773.85	44.91	0.022
B	3554.3	2	1777.14	103.14	0.010
C	18533.8	2	9266.88	537.82	0.002
误差	34.5	2	17.23		
总和	23670.2	8			

弯曲强度方差分析结果见表6。由表6可以看出,喷头温度(P 值=0.025)对弯曲强度影响显著,打印速度(P 值=0.182)对弯曲强度影响不显著,而分层厚度(P 值=0.003)对弯曲强度有极显著影响。

表6 弯曲强度方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	方差	F 值	P 值
A	191.40	2	95.699	38.76	0.025
B	22.19	2	11.097	4.49	0.182
C	1860.28	2	930.140	376.74	0.003
误差	4.94	2	2.469		
总和	2078.81	8			

2.4 试验验证

将最佳工艺参数A3B1C1(喷头温度390℃,打印速度2 mm/s,分层厚度0.4 mm)用于连续纤维增材制造,并对成型制件进行表面粗糙度和弯曲性能表征。经验证试验,得到弯曲弹性模量为57.05 GPa,弯曲强度为355.07 MPa,高于正交实验中的最大弯曲弹性模量(54.50 GPa)和弯曲强度(330.97 MPa),表面粗糙度为24.99 μm ,低于正交实验中的最小表面粗糙度(25.41 μm)。

3 结论

(1) 分层厚度越小,道间结合质量越好,成型制件表面粗糙度越小,弯曲弹性模量和弯曲强度越高。而随着分层厚度增大,打印道间孔隙增大,表面粗糙度逐渐增大,而弯曲强度和弯曲模量逐渐减小。

(2) 分层厚度对表面粗糙度、弯曲弹性模量和弯曲强度的影响最大。主效应分析表明最优工艺参数为喷头温度390℃,打印速度2 mm/s,分层厚度0.4 mm。经验证,弯曲弹性模量为57.05 GPa,弯曲强度为355.07 MPa,表面粗糙度为24.99 μm 。

(3) 方差分析表明各因素在选定参数范围内对表面粗糙度影响不显著。分层厚度对弯曲弹性模量和弯曲强度具有极显著影响,喷头温度对弯曲弹性模量和弯曲强度具有显著影响,打印速度对弯曲弹性模量具有显著影响,而对弯曲强度影响不显著。

参考文献

- [1] 杜善义. 先进复合材料与航空航天[J]. 复合材料学报, 2007, 24(1):1-12.
Du Shanyi. Advanced composite materials and aerospace engineering [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1):1-12.
- [2] Yu T Y, Zhang Z Y, Song S T, et al. Tensile and flexural behaviors of additively manufactured continuous carbon fiber-reinforced polymer composites[J]. Composite Structures, 2019, 225. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.111147.
- [3] Tian X Y, Liu T F, Wang Q R, et al. Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 142:1 609-1 618.
- [4] Fan C Z, Shan Z D, Zou G S, et al. Interfacial bonding mechanism and mechanical performance of continuous fiber reinforced composites in additive manufacturing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2021, 34(1). DOI:10.1186/s10033-021-00538-7.
- [5] Kim B, Weaver P, Potter K. Manufacturing characteristics of the continuous tow shearing method for manufacturing of variable angle tow composites[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2014, 61:141-151.
- [6] Qureshi Z, Swait T, Scaife R, et al. In situ consolidation of thermoplastic prepreg tape using automated tape placement technology:Potential and possibilities[J]. Composites Part B:Engineering, 2014, 66:255-267.
- [7] Schneider C, Velea M, Kazemahvazi S, et al. Compression properties of novel thermoplastic carbon fibre and poly-ethylene terephthalate fibre composite lattice structures[J]. Materials & Design, 2015, 65:1 110-1 120.
- [8] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4):1-4.
Lu Bingheng, Li Dichen. Development of the Additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2013, 42(4):1-4.
- [9] Parandoush P, Lin D. A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites[J]. Composite Structures, 2017, 182:36-53.
- [10] Brenken B, Barocio E, Favaloro A, et al. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers:A review[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21:1-16.
- [11] Kabir S, Mathur K, Seyam A. A critical review on 3D printed continuous fiber-reinforced composites:History, mechanism, materials and properties [J]. Composite Structures, 2020, 232. DOI:10.1016/j.compstruct.2019.111476.
- [12] 陈向明, 姚辽军, 果立成, 等. 3D打印连续纤维增强复合材料研究现状综述[J]. 航空学报, 2021, 42(10):174-198.
Chen Xiangming, Yao Liaojun, Guo Licheng, et al. 3D printed continuous fiber-reinforced composites:State of art and perspective[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(10):174-198.
- [13] 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(15):26-31.
Tian Xiaoyong, Liu Tengfei, Yang Chuncheng, et al. 3D printing for high performance fiber reinforced polymer composites and exploration on its applications[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016(15):26-31.
- [14] Tian X Y, Liu T F, Yang C C, et al. Interface and performance of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2016, 88:198-205.
- [15] 刘腾飞, 田小永, 朱伟军, 等. 连续碳纤维增强聚乳酸复合材料3D打印及回收再利用机理与性能[J]. 机械工程学报, 2019, 55(7):128-134.
Liu Tengfei, Tian Xiaoyong, Zhu Weijun, et al. Mechanism and performance of 3D printing and recycling for continuous carbon fiber reinforced PLA composites[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(7):128-134.
- [16] Caminero M, Chacón J, García-Moreno I, et al. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling[J]. Composites Part B:Engineering, 2018, 148:93-103.
- [17] Chabaud G, Castro M, Denoual C, et al. Hygromechanical properties of 3D printed continuous carbon and glass fibre reinforced polyamide composite for outdoor structural applications[J]. Additive Manufacturing, 2019, 26:94-105.
- [18] Naranjo-Lozada J, Ahuett-Garza H, Orta-Castañón P, et al. Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2019, 26:227-241.
- [19] 李欣. 碳纤维/聚醚醚酮编织复合材料的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
Li Xin. Preparation and properties of carbon fiber/polyetheretherketone knitted composites[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2017.
- [20] 熊超. 连续碳纤维/聚醚醚酮复合材料制备及其性能研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2018.
Xiong Chao. Preparation and properties of CCF/PEEK composites [D]. Nanchang :Nanchang University, 2018.
- [21] 毕向军, 田小永, 张帅, 等. 连续纤维增强热塑性复合材料3D打

- 印的研究进展[J]. 工程塑料应用, 2019, 47(2):138–142.
- Bi Xiangjun, Tian Xiaoyong, Zhang Shuai, et al. Research progress in 3D printing technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(2):138–142.
- [22] Luo M, Tian X Y, Shang J F, et al. Impregnation and interlayer bonding behaviours of 3D-printed continuous carbon-fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composites[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2019, 121:130–138.
- [23] Luo M, Tian X Y, Shang J F, et al. Bi-scale interfacial bond behaviors of CCF/PEEK composites by plasma-laser cooperatively assisted 3D printing process[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2020, 131. DOI:10.1016/j.compositesa.2020.105812.

投稿须知

1 稿件内容

稿件应注重科学性、实用性及时效性,要求技术新颖,论点明确,论据可靠,数据准确,文字通顺、简练。稿件内容必须真实,避免抄袭,请作者文责自负。引用他人成果时,请按《著作权法》有关规定说明出处。内容应未曾发表过或被其他出版物刊载过,且无一稿多投。

2 稿件要求

凡属于重大科技获奖的论文和重点项目资助的论文,请在来稿第一页注明名称及批准号,本刊将优先刊登。

(1) 题目、作者署名及单位。题目力求简明、醒目,反映出文章的主题,一般不超过 20 个汉字。作者姓名在题目下按序排列,不同工作单位的作者,应在姓名右上角加注阿拉伯数字序号。作者单位须写全称并注明省份、城市和邮政编码。通讯作者信息(包括姓名,学历或职称,主要研究方向,电子邮箱)注在第一页下方。

(2) 摘要及关键词。论文需要同时提供中文和英文摘要,摘要以提供论文的内容梗概为目的,不加评论和补充解释,应简明、确切地论述研究目的、原理和结论,具有相对独立性。中文和英文摘要均要求采用报道性摘要类型。具体要求:中英文摘要均为一段式,内容比较具体,一般需要列举关键数据。中英文摘要内容基本一致,中文摘要以 200~300 字为宜,英文摘要可略详。关键词要求 3~8 个。

(3) 正文。正文各部分都应简洁明了。层次标题一律用阿拉伯数字连续编号,尽量减少层次;不同层次的数字之间用小圆点相隔,末位数字不加标点符号。如“1”,“1.1”等。文中量、单位及符号的使用应符合国际标准和国家标准。

(4) 图表。图表要设计合理,简单自明。每一幅图都应有图序和简短确切的图名,纵横坐标均要注明物理量及其单位,线条图要用矢量格式的图,或将 *.opg, *.dwg, *.eps 等格式的图打包压缩随投稿一起上传。表格请使用三线表,每一表格都应有表序和简短确切的表题。图表标题一律用中文表达。

(5) 参考文献。以作者亲自阅读过的主要原始文献为限,不可引用非公开出版或发表的文献,不能引用其他文章中引用的但未经核对原文的文献,要注意引用最新的文献。参考文献要有一定的数量,研究性论文至少 16 篇。参考文献的著录按文章中引用的顺序依次排列,中文参考文献要有对照英文部分(英文部分不编号)。无论中外文的作者,一律采用姓前名后的形式著录;作者不超过 3 人时可全部著录,超过 3 人时,只著录前 3 位,其后加“等”或“et al”。综述类论文的参考文献著录项目适当简化,可参见本刊相关栏目文章样式。作者对所引文献的准确性和完整性负责。

3 投稿方式

请作者登陆杂志社网站 <http://www.epa1973.net>, 点击“作者投稿”后投稿。来稿请注明详细地址、电话、邮箱等信息,便于通知联系。一般半个月左右可以查询稿件审理意见,超过 1 个月未收到修改意见或回复的可自行处理。

4 注意事项

为适应我国信息化建设需要,扩大学术交流渠道,本刊已编入国内外著名数据库。稿件一经录用,将同时被数据库收录,作者著作权使用费与本刊稿酬一次性给付。如作者不同意收录,请在投稿时声明,否则将视为同意。