

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2023.04.010

PEEK/CGF 复合材料增材制造综合力学性能优化

严春晖^{1,2}, 战丽³, 任永新^{1,2}, 刘晓军^{1,2}, 邹东明^{1,2}

(1. 机械科学研究总院先进成型技术与装备国家重点实验室, 北京 100044; 2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司, 北京 100083;
3. 北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为提升连续玻璃纤维(CGF)增强聚醚醚酮(PEEK)复合材料增材制造样件综合力学性能, 优化增材制造基础工艺参数, 基于正交试验与单因素试验设计, 通过力学性能测试, 探究了喷头温度、平台温度、打印速度、层厚等工艺参数对综合样件力学性能的影响, 获得PEEK/CGF增材制造成型工艺优化参数, 进一步探究了重点工艺参数对PEEK/CGF样件力学性能的影响规律。结果表明, 层厚与喷头温度对样件的综合力学性能具有显著影响, 最优工艺参数组合为喷头温度440℃, 平台温度160℃, 打印速度2 mm/s, 层厚0.35 mm。随喷头温度的增加, 样件的综合力学性能先增大后减小, 在440℃达到最大值; 随层厚的减小, 样件的力学性能逐渐增大, 层厚为0.35 mm时样件的力学性能达到最大值。经试验验证, 在最优工艺参数组合下样件综合力学性能达到最优, 样件弯曲强度为351.59 MPa, 层间剪切强度为34.96 MPa, 拉伸强度为383.75 MPa。

关键词: 玻璃纤维; 聚醚醚酮; 增材制造; 工艺优化; 力学性能

中图分类号: TH145.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2023)04-0063-07

Comprehensive Mechanical Property Optimization of PEEK/CGF Composites by Additive Manufacturing

Yan Chunhui^{1,2}, Zhan Li³, Ren Yongxin^{1,2}, Liu Xiaojun^{1,2}, Zou Dongming^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment of China Academy of Machinery Science and Technology, Beijing 100044, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Co., Ltd., Beijing 100083, China;
3. Beijing Research Institute of Mechanical & Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract : In order to improve the comprehensive mechanical properties of continuous glass fiber (CGF) reinforced polyetheretherketone (PEEK) composites by additive manufacturing and optimize the basic process parameters, on the basis of orthogonal experimental design and single factor experiment, the effects of nozzle temperature, bottom platform temperature, printing speed and layer thickness on the comprehensive mechanical properties of PEEK/CGF composites were investigated through mechanical properties test. The optimized process parameters of PEEK/CGF composite additive manufacturing were obtained and the influence of key process parameters on the mechanical properties of PEEK/CGF samples was further explored. The results show that the layer thickness and nozzle temperature have significant impact on the comprehensive mechanical properties of PEEK/CGF samples. The optimum process parameters are gained with nozzle temperature of 440 °C, bottom platform temperature of 160 °C, printing speed of 2 mm/s and layer thickness of 0.35 mm. With the increase of nozzle temperature, the mechanical property of PEEK/CGF samples first increase and then decrease, reaching the maximum at 440 °C. With the decrease of layer thickness, the mechanical property of PEEK/CGF samples increase gradually. When the layer thickness is 0.35 mm, the mechanical property of the sample reaches the maximum value. The comprehensive mechanical property of PEEK/CGF samples are the best under the optimal process parameters. The bending strength is 351.59 MPa, the interlaminar shear strength is 34.96 MPa and the tensile strength is 383.75 MPa.

Keywords : glass fiber ; polyether ether ketone ; additive manufacturing ; process optimization ; mechanical property

基金项目: 中国机械总院技术发展基金项目(332201Q9, 332202Q9)

通信作者: 战丽, 研究员, 研究方向为纤维增强复合材料

收稿日期: 2023-03-03

引用格式: 严春晖, 战丽, 任永新, 等. PEEK/CGF 复合材料增材制造综合力学性能优化[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(4): 63-69.

Yan Chunhui, Zhan Li, Ren Yongxin, et al. Comprehensive mechanical property optimization of PEEK/CGF composites by additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(4): 63-69.

增材制造(又称3D打印)是一种自下而上、逐层累积的快速成型技术,能够实现三维结构的快速和自由制造。与传统成型工艺相比,增材制造具有复杂零件一体化制造的优点,能够大幅缩短制造周期,同时减少原材料和能源的浪费^[1]。

熔融沉积成型(FDM)是应用最为广泛的增材制造技术之一,在热塑性树脂成型方面具有显著优势^[2]。采用纤维作为增强相,与热塑性树脂结合形成复合丝材,经增材制造后得到的复合材料样件与纯热塑性树脂样件相比,表现出更优秀的力学性能。近年来,许多学者对纤维增强复合材料FDM技术开展相关的研究工作。Zhong等^[3]解决了FDM中短纤维增强复合材料的材料性能问题,通过对丙烯腈-丁二烯-苯乙烯塑料(ABS)树脂加入短玻璃纤维,可以显著提高零件的拉伸强度和表面刚度。Weng等^[4]研究了FDM-3D打印短碳纤维(CF)和玻璃纤维(GF)增强高性能聚醚醚酮(PEEK)复合材料的潜能,通过显微表征观察和热性能测试等方法来评估CF/GF-PEEK打印件的微观结构、表面质量、孔隙率和力学性能。然而,在热塑性树脂基复合材料增材成型中,采用短切纤维作为材料增强相对样件力学性能的提升非常有限,难以满足工业应用需求,为此研究人员提出了连续纤维增强复合材料增材制造工艺。在热塑性树脂材料中引入连续纤维作为增强相,可明显提高打印制件的力学性能,材料的部分性能达到或甚至超过了航空铝的级别。Dickson等^[5]采用CF、GF及凯夫拉纤维作为复合丝材的增强相进行3D打印,研究了纤维取向、纤维类型和纤维体积分数对打印件力学性能的影响。Caminero等^[6]研究了3D打印中工艺参数和纤维体积含量对连续纤维增强复合材料层间剪切性能的影响,通过短梁剪切法测试得到打印件的层间剪切强度。

在FDM中常用的树脂材料多为低熔点塑料或普通工程塑料如聚乳酸(PLA)、ABS和聚酰胺(PA)等^[7-9],这使得打印件的强度、刚度、耐热性及应用范围有很大的局限性。PEEK是一种半结晶类的热塑性特种工程材料,其负载热变形温度可以达到316℃,能够在260℃的高温环境下连续使用。与低熔点热塑性材料相比,PEEK具有优异的力学性能、热物理性能、绝缘性能和良好的生物相容性,在一些领域能够代替陶瓷和金属等材料^[10-12]。PEEK的高熔点特性使其在增材制造成型方面面临许多

挑战,对增材制造设备与工艺参数提出了更高的标准与要求。Zhao等^[13]研究了PEEK打印过程中热处理条件(喷头温度、环境温度、打印方向)与后处理温度对PEEK样件拉伸性能的影响,揭示了其断裂机制。Geng等^[14]研究了打印过程中挤出速度和打印速度对PEEK细丝微观结构和尺寸的影响,对PEEK打印中的挤压力和挤压阻力进行表征。为解决打印过程中出现的翘曲变形问题,Gao等^[15]通过正交试验分析了打印速度、喷嘴温度、平台温度、打印方向、层厚对打印件翘曲度的影响,优化后打印件的翘曲变形减少到零。

上述研究工作均表明了PEEK及其复合材料增材制造成型的可行性,材料多采用纯PEEK树脂或短纤维增强树脂基复合材料^[16-18],关于连续纤维增强PEEK复合材料增材制造基础工艺及工艺优化方面的研究较少。

为了进一步探究成型工艺参数对连续玻璃纤维增强聚醚醚酮复合丝材(PEEK/CGF)增材制造样件力学性能的影响,选取了PEEK/CGF作为增材制造材料,结合树脂基复合材料增材制造零件应用场景,采用拉伸强度、弯曲强度和层间剪切强度综合评价PEEK/CGF样件力学性能,设计多因素正交试验与单因素试验,研究打印喷头温度、平台温度、打印速度、层厚等工艺参数对样件力学性能的影响,通过主效应图与方差分析比较不同参数的显著性影响,选取最优的工艺参数组合,优化连续纤维增强复合材料增材制造基础工艺。通过单因素试验,进一步分析工艺参数对PEEK/CGF增材制造综合力学性能的影响。

1 试验部分

1.1 主要原材料

PEEK: ZYPEEK-310G, 吉林中研高分子材料股份有限公司;

CF: SE-1200, 线密度 300 tex, 欧文斯科宁复合材料(北京)公司。

1.2 主要仪器与设备

万能材料试验机: INSTRON5567型, 美国英斯特朗公司;

连续纤维增强PEEK树脂复合丝材成型机: 自制;

连续纤维FDM增材制造原理样机: 自制。

1.3 样件制备

PEEK/CGF 复合材料弯曲样品尺寸为 40 mm×15 mm×2 mm,剪切样品尺寸为 20 mm×10 mm×2 mm,拉伸样品尺寸为 180 mm×12.5 mm×1 mm。PEEK/CGF 增材制造样件均在室温(25 °C)环境下制备,喷头直径为 1.0 mm,纤维取向为单向 0°。自制复合丝材的直径为 0.8 mm,CF 的体积分数为 23.1%。

1.4 正交试验设计

正交试验设计是研究多因素多水平的一种试验方法,能够客观代表试验的整体情况。为探究不同工艺参数对 PEEK/CGF 增材制造样件综合力学性能的影响,选择喷头温度(*A*)、平台温度(*B*)、打印速度(*C*)、层厚(*D*)四个工艺参数作为因素变量,每个因素下有 5 个水平,采用 $L_{25}(4^3)$ 形式的正交表安排试验,正交表中剩余的两列为空白列,空白列中没有因素,用来积累误差。正交试验因素水平表见表 1。

表 1 正交试验设计表

水平	因素			
	<i>A</i> /°C	<i>B</i> /°C	<i>C</i> /(mm·s ⁻¹)	<i>D</i> /mm
1	400	120	2	0.35
2	410	130	3	0.40
3	420	140	4	0.45
4	430	150	5	0.50
5	440	160	6	0.55

1.5 性能测试

弯曲强度按 ISO 14125:1998 测试,跨距为 40 mm,加载速度为 2 mm/min,五个试样为一组并取平均值;

层间剪切强度按 ISO 14130:1997 测试,跨距为 10 mm,加载速度为 2 mm/min,五个试样为一组并取平均值;

拉伸强度按 GB/T 1447-2005 测试,加载速度为 2 mm/min,五个试样为一组并取平均值。

2 结果与讨论

采用连续纤维增材制造技术,基于正交试验,制备不同成型工艺参数组合下的 PEEK/CGF 复合材料测试样品,探究打印喷头温度、平台温度、打印速度、层厚等工艺参数对 PEEK/CGF 复合材料弯曲强度、层间剪切强度、拉伸强度的影响程度与影响规律。

2.1 正交结果试验分析

表 2 为根据正交试验表设计的不同工艺参数组

合下 PEEK/CGF 增材制造样件的力学性能结果。从试验结果可知,不同成型工艺参数组合对样件的弯曲强度、层间剪切强度与拉伸强度有较大的影响差异。当喷头温度为 430 °C,平台温度为 160 °C,打印速度为 2 mm/s,层厚为 0.35 mm 时,成型样件的弯曲强度、层间剪切强度、拉伸强度最大,分别为 348.41 MPa,29.88 MPa,380.71 MPa。

表 2 正交试验结果

编号	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>	弯曲强度/MPa	剪切强度/MPa	拉伸强度/MPa
1	1	1	1	5	96.1	13.29	284.54
2	1	2	3	3	174.89	16.01	294.28
3	1	3	5	1	292.03	18.07	306.43
4	1	4	2	4	175.01	15.65	290.51
5	1	5	4	2	225.24	18.34	307.92
6	2	1	5	3	142.14	14.99	290.93
7	2	2	2	1	243.46	17.44	312.63
8	2	3	4	4	202.48	19.11	304.04
9	2	4	1	2	234.00	18.60	334.46
10	2	5	3	5	155.84	12.84	284.75
11	3	1	4	1	253.01	17.71	324.44
12	3	2	1	3	171.09	19.34	314.07
13	3	3	3	2	233.57	16.68	367.69
14	3	4	5	5	117.39	12.13	296.42
15	3	5	2	3	170.22	23.56	304.48
16	4	1	3	4	171.13	27.47	307.59
17	4	2	5	2	319.17	21.18	330.43
18	4	3	2	5	153.23	19.26	286.49
19	4	4	4	3	215.91	24.35	310.94
20	4	5	1	1	348.41	29.88	380.71
21	5	1	2	2	213.21	24.72	315.07
22	5	2	4	5	164.77	24.17	326.87
23	5	3	1	3	194.17	27.11	310.82
24	5	4	3	1	333.19	28.08	365.28
25	5	5	5	4	308.72	22.02	370.23

(1) 极差分析。

在正交试验中,极差分析用于研究各因素之间的主次关系,选取最佳水平组合。结合极差,可以对比各因素之间的优劣程度,判断各因素的主导地位以及重要性。表 3 为弯曲强度极差分析表,不同因素下各水平均值的极差越大,代表该因素对试验结果影响越大。对于 PEEK/CGF 增材制造成型件的弯曲强度,层厚是最主要的影响因素。各因素的影响顺序为:层厚>平台温度>喷头温度>打印速度。在 FDM 成型工艺参数中,打印速度对于打印件弯曲强度的影响并不显著。根据极差分析,可得工艺参数的最佳组合为 *A4B5C5D1*,即喷嘴温度为 430 °C,平台温度为 160 °C,打印速度为 6 mm/s,打

印层厚为0.35 mm。

表3 PEEK/CGF弯曲强度极差分析表

参数	A	B	C	D
k1	192.654	175.118	223.754	309.020
k2	195.584	214.676	191.026	245.038
k3	189.056	215.096	213.724	179.466
k4	256.570	215.100	212.282	215.686
k5	252.812	266.686	245.890	137.466
R	67.514	91.568	54.864	171.554
最佳水平	4	5	5	1

注:表中k1-k5为该水平下对应因素试验结果总和的均值;R为极差。

表4为层间剪切强度极差分析表,根据极差值

表4 PEEK/CGF弯曲强度极差分析表

参数	A	B	C	D
k1	16.272	19.636	21.644	22.236
k2	16.596	19.628	20.126	19.904
k3	17.884	20.046	20.216	21.204
k4	24.428	19.762	20.736	20.718
k5	25.220	21.328	17.678	16.338
R	8.948	1.700	3.966	5.898
最佳水平	5	5	1	1

进行判断,对于PEEK/CGF增材制造成型件的层间剪切强度,喷头温度是最主要的影响因素。各因素对层间剪切强度的影响顺序为:喷头温度>层厚>打印速度>平台温度。工艺参数组合为A5B5C1D1时,可以获得最佳的层间剪切强度,即喷头温度440℃,平台温度160℃,打印速度2 mm/s,层厚0.35 mm。

表5为拉伸强度的极差分析表,根据极差值进行判断,对于PEEK/CGF增材制造成型件的拉伸强度,层厚是最主要的影响因素。各因素对拉伸强度的影响顺序为:层厚>喷头温度>平台温度>打印速度。最佳工艺参数组合为A5B5C1D1,即喷头温度440℃,平台温度160℃,打印速度2 mm/s,层厚0.35 mm时,成型件可以获得最大的拉伸强度。

表5 PEEK/CGF拉伸强度极差分析表

参数	A	B	C	D
k1	296.736	304.514	324.920	337.898
k2	305.362	315.656	301.836	331.114
k3	321.420	315.094	323.918	302.290
k4	323.232	319.522	314.842	317.288
k5	337.654	329.618	318.888	295.814
R	40.918	25.104	23.084	42.084
最佳水平	5	5	1	1

(2)方差分析。

极差分析简单明了,计算工作量少,但不能区分因素各水平所对应的试验结果间的差异,试验数

据的波动由试验条件的改变引起,也有可能由试验误差引起。为了弥补极差分析的不足,可以采用方差分析对试验结果进行计算分析,对因素水平引起的差异与误差引起的差异进行区分。将计算得到的方差(F值)与F分布中的临界值进行比较来判断一个因素是否显著,当F值大于临界值时,可以判定该因素对试验结果有显著影响。

在本试验中,采用的F分布表临界值 $F_{0.05}(4,8)=3.84$ 。表6为PEEK/CGF增材制造样件弯曲强度方差分析结果,由表6可以看出,A(喷头温度),B(平台温度),D(层厚)的F值均大于 $F_{0.05}(4,8)$,表明上述因素对样件弯曲强度有显著影响,层厚对样件弯曲强度的影响最为显著。各因素的影响顺序为:层厚>喷头温度>平台温度>打印速度,与极差分析得到的结果略有不同。

表6 弯曲强度方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值
A	14 966.91	4	3 741.728	6.090 596	0.014 978 624
B	11 336.67	4	2 834.169	4.613 317	0.031 704 320
C	5 118.34	4	1 279.584	2.082 842	0.175 075 775
D	72 359.36	4	18 089.840	29.445 730	0.000 765 400
误差	4 914.76	8	614.345		

注:P值表示相应F值下的概率值,每个F值对应一个P值,F值越大,P值越小,用来检验相关性

表7为PEEK/CGF增材制造样件层间剪切强度方差分析结果,因素B与因素C的离差平方和小于误差项的离差平方和,需合并误差并重新计算。合并后,采用的F临界值为 $F_{0.05}(4,16)=3.01$ 。去掉因素B,C后,A,D为影响试验结果的主要因素。观察方差分析表可知,喷头温度为影响样件层间剪切强度的最主要因素,其次是层厚,平台温度与打印速度对层间剪切强度影响并不显著,与极差分析结果基本保持一致。

表7 层间剪切强度方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值
A	383.931 20	4	95.982 8	13.307 11	0.001 305
B	10.306 12	4	2.576 53	0.357 212	0.832 366
C	43.333 24	4	10.833 31	1.501 936	0.288 898
D	101.761 50	4	25.440 37	3.527 068	0.060 909
误差	57.703 16	8	7.212 90		
合并误差	111.342 50	16	6.958 90		

表8为PEEK/CGF增材制造样件拉伸强度方差分析结果,因素A,B,C的离差平方和小于误差项的离差平方和,需合并误差并重新计算。合并后,采

用的F临界值为 $F_{0.05}(4,20)=2.87$ 。观察方差分析表可知,层厚为影响样件拉伸强度的最主要因素,其它因素在选定的参数范围内对拉伸强度的影响并不显著。

表8 拉伸强度方差分析结果

方差来源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值
A	2 067.451	4	516.862 6	1.518 420	0.284 639 531
B	1 453.154	4	363.288 5	1.067 256	0.432 360 375
C	1 343.955	4	335.988 8	0.987 056	0.466 624 245
D	3 418.502	4	854.625 6	2.510 688	0.124 701 524
误差	2 723.160	8	340.395 0		
合并误差	7 587.720	20	379.386 0		

2.2 工艺参数对力学性能影响分析

通过正交试验确定了各工艺参数对PEEK/CGF增材制造样件力学性能的影响程度以及最优的工艺参数组合,方差分析结果表明,喷头温度与层厚是影响样件力学性能最为显著的因素,因此重点分析喷头温度与层厚对样件综合力学性能的影响规律。

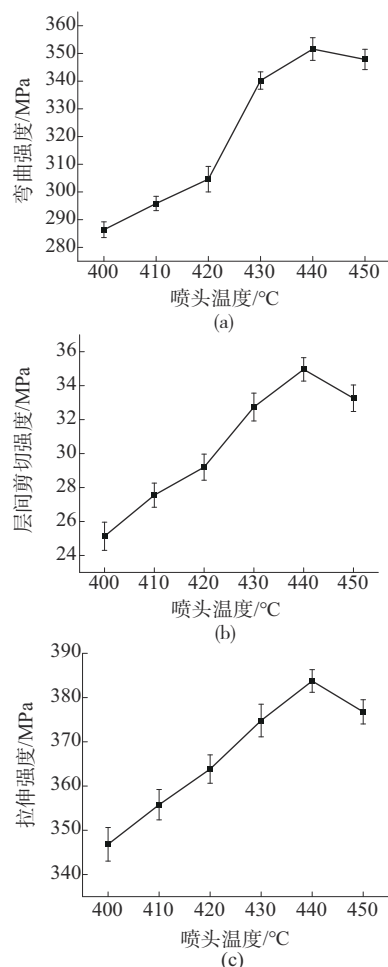
(1)喷头温度对PEEK/CGF样件力学性能影响分析。

选取最优工艺参数组合为试验条件,利用控制变量法,在400~450℃温度区间内打印样件并测试其力学性能,其它试验参数为平台温度160℃、打印速度2 mm/s、层厚0.35 mm。喷头温度对PEEK/CGF样件力学性能影响如图1所示。

由图1可以看出,在400~440℃之间,随着喷头温度的提升,打印件的综合力学性能均有所提升。在较高的温度下,PEEK树脂能够更加充分地熔化,熔体的流动性能增强,提高了打印件层间与道间的黏接性能;同时当温度升高时,PEEK树脂与GF之间的二次浸渍也会更加充分,良好的浸渍有利于树脂和纤维之间载荷的传递,使连续纤维能够发挥出高强度、高模量的优势特点。

PEEK属于半结晶性热塑性树脂,其结晶度会对力学性能产生影响,结晶度越高,材料的拉伸强度、弯曲强度越好,在较高的温度下打印成型,可以提升PEEK/CGF样件的结晶度,获得综合力学性能更佳的增材制造样件。当喷头温度为450℃时,样件的弯曲强度、层间剪切强度与拉伸强度均有所降低,过高的温度会破坏PEEK分子链结构,引起PEEK降解,导致其力学性能下降。

(2)层厚对PEEK/CGF样件力学性能影响分析。



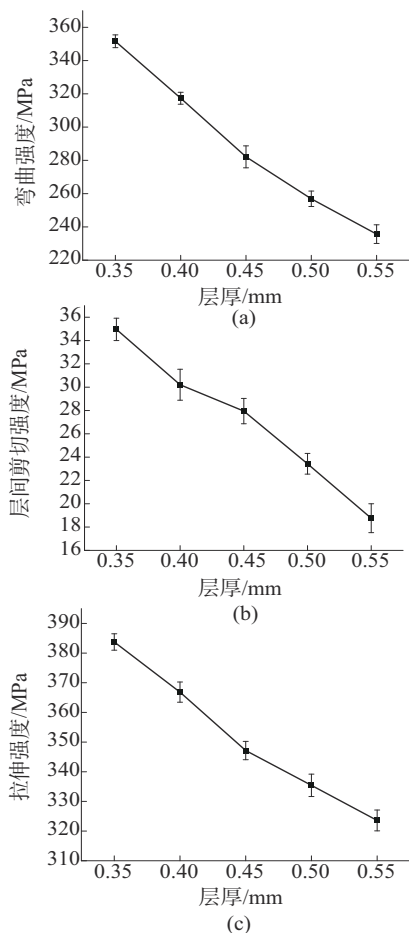
a—对弯曲强度的影响;b—对层间剪切强度的影响;
c—对拉伸强度的影响

图1 喷头温度对PEEK/CGF样件力学性能影响

研究层厚对PEEK/CGF样件力学性能影响规律,试验参数为层厚0.35~0.55 mm、喷头温度440℃、平台温度160℃、打印速度2 mm/s。层厚对PEEK/CGF样件力学性能影响如图2所示,由图2看出,随层厚增加,PEEK/CGF增材制造样件的力学性能逐渐减小,层厚为0.35 mm时,样件的力学性能最佳。当层厚较大时,复合丝材在沉积过程中变形较小;当层厚较小时,复合丝材在底板上被碾压成扁平细条,成型时受到压力增大。层厚减小时,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,提升PEEK/CGF样件整体的力学性能。

分层厚度对样品层间剪切强度与弯曲强度的影响更为显著,当层厚从0.55 mm减小至0.35 mm时,样品的层间剪切强度和弯曲强度分别提升86.35%和49.19%,拉伸强度提升18.59%。尽管减小层厚可以提升样件的力学性能,但样品的表面粗

糙度会增大,复合丝材与已沉积表面易受到打印喷头的磨损,成型过程中出现断丝现象,造成 PEEK/CGF 增材制造样件表面成型精度较低。



a—对弯曲强度的影响;b—对层间剪切强度的影响;
c—对拉伸强度的影响

图2 层厚对 PEEK/CGF 样件力学性能影响

2.3 试验验证

将最佳工艺参数组合 A5B5C1D1,即喷头温度 440 °C,平台温度 160 °C,打印速度 2 mm/s,层厚 0.35 mm 用于 PEEK/CGF 增材制造,测试成型件的综合力学性能并对成型样件的力学性能进行表征。得到样件的弯曲强度为 351.59 MPa,层间剪切强度为 34.96 MPa,拉伸强度为 383.75 MPa,均高于正交试验中的最大值(弯曲强度 348.41 MPa,层间剪切强度 29.88 MPa,拉伸强度 380.71 MPa),在该工艺参数组合下成型 PEEK/CGF 打印样件将获得最优的综合力学性能。

3 结论

针对连续纤维增材制造技术成型 PEEK/CGF 复合材料,通过正交试验与单因素试验,研究了不

同工艺参数对增材制造样件综合力学性能的影响并进行试验验证,得出如下结论:

(1)设计正交试验,研究喷头温度、平台温度、打印速度、层厚对 PEEK/CGF 增材制造样件综合力学性能的影响,最优工艺参数组合为喷头温度 440 °C,平台温度 160 °C,打印速度 2 mm/s,层厚 0.35 mm,选择适当的工艺参数组合可提高样件综合力学性能。

(2)各工艺参数对试验结果的影响程度不同。方差分析表明,对于 PEEK/CGF 样件的弯曲强度与拉伸强度,影响最为显著的是层厚;对于层间剪切强度,影响最为显著的是喷头温度;在选定参数范围内,打印速度对各力学性能的影响均不明显。

(3)在平台温度为 160 °C,打印速度为 2 mm/s 工艺参数下,随喷头温度的增加,PEEK/CGF 样件的力学性能先增大后减小,当喷头温度为 440 °C 时,样件可以获得最优力学性能。随层厚的增加,样件的力学性能逐渐降低,当层厚为 0.35 mm 时,样件的各力学性能达到最大值。经试验优化后,得到的样件弯曲强度为 351.59 MPa,层间剪切强度为 34.96 MPa,拉伸强度为 383.75 MPa。通过正交试验与单因素试验分析各工艺参数的影响程度与规律,为连续纤维增材制造成型提供一定的参考与数据基础。

参考文献

- [1] Ahn S H, And S R, Wright P K, et al. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS[J]. Rapid Prototyping Journal, 2002, 8(4):248-257.
- [2] Anna B, Seluk G. Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling[J]. Rapid Prototyping Journal, 2003, 9(4):252-264.
- [3] Zhong W H, Fan L, Zhang Z G, et al. Short fiber reinforced composites for fused deposition modeling[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 301(2):125-130.
- [4] Wang P, Zou B, Ding S L, et al. Preparation of short CF/GF reinforced PEEK composite filaments and their comprehensive properties evaluation for FDM-3D printing[J]. Composites Part B Engineering, 2020. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108175.
- [5] Dickson A N, Barry J N, McDonnell K A, et al. Fabrication of continuous carbon, glass and kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing[J]. Additive Manufacturing, 2017, 16:146-152. DOI:10.1016/j.addma.2017.06.004.
- [6] Caminero M A, Chacon J M, Reverte J M, et al. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fiber reinforced

- thermoplastic composites using fused deposition modelling[J]. *Polymer Testing*, 2018, 68: 415–423. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2018.04.038.
- [7] 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.
- [8] Chabaud G, Castro M, Denoual C, et al. Hygromechanical properties of 3D printed continuous carbon and glass fiber reinforced polyamide composite for outdoor structural applications[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 26: 94–105.
- [9] 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.
- [10] Garcia-Gonzalez D, Rusinek A, Jankowiak T, et al. Mechanical impact behavior of polyether-ether-ketone (PEEK)[J]. *Composite Structures*, 2015, 124: 88–99.
- [11] Mclauchlin A R, Ghita O R, Savage L. Studies on the reprocessability of poly(ether ether ketone)(PEEK)[J]. *Journal of Materials Processing Tech*, 2014, 214(1): 75–80.
- [12] Apeldorn T, Keilholz C, Wolff-Fabris F, et al. Dielectric properties of highly filled thermoplastics for printed circuit boards[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2013, 128(6): 3 758–3 770.
- [13] Zhao Y C, Zhao K, Li Y C, et al. Mechanical characterization of biocompatible PEEK by FDM[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 56: 28–42. DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.04.063.
- [14] Geng P, Zhao J, Wu W Z, et al. Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2019, 37: 266–273.
- [15] Gao R, Xie, J, Yang, J, et al. Research on the fused deposition modeling of polyether ether ketone[J]. *Polymers* 2021, 13. DOI: 10.3390/polym13142344.
- [16] Zhu J J, Chew D, Lv S N, et al. Optimization method for building envelope design to minimize carbon emissions of building operational energy consumption using orthogonal experimental design (OED) [J]. *Habitat International*, 2013, 37. DOI: 10.1016/j.habitatint.2011.12.006.
- [17] Wang W, Yun C. Orthogonal experimental design to synthesize the accuracy of robotic mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(11): 18–24.
- [18] Magri A E, Mabrouk K E, Vaudreuil S, et al. Optimization of printing parameters for improvement of mechanical and thermal performances of 3D printed poly(ether ether ketone) parts[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(37). DOI: 10.1002/app.49087.