

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2024.01.010

FDM成型工艺对PEEK/CGF复合材料翘曲变形的影响

李久振¹, 战丽², 李莞¹, 李云鹏¹, 袁勇超¹

(1. 中国机械总院集团青岛分院有限公司, 山东青岛 266300; 2. 中国机械总院集团北京机电研究所有限公司, 北京 100083)

摘要: 为降低连续玻璃纤维增强聚醚醚酮复合材料增材制造样件的翘曲变形, 优化增材制造基础工艺参数, 通过单因素试验、Plackett-Burman Design 试验与 Box-Behnken Design 试验, 研究了打印过程中的热效应, 即保温舱温度、层厚、成型平台温度、打印速度等工艺参数对连续玻璃纤维增强聚醚醚酮复合材料样件翘曲变形的影响规律, 得出如下结论: 研究发现打印工艺对翘曲度的影响程度是不同的, 影响程度依次为 B (层厚) $> C$ (成型平台温度) $> A$ (保温舱温度)。研究发现打印工艺参数之间是会对翘曲变形产生交互作用的, 并且影响程度也较为显著 (PB 析因试验中大于 t 值), 即 $B > C > A > AB > BC > D$ (打印速度) $> BD$ 。研究发现喷头温度 $440\text{ }^{\circ}\text{C}$, 成型平台温度 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, 保温舱温度 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, 层厚 0.3 mm , 道间距为 0.5 mm , 打印速度 2 mm/s 时, 翘曲度可达到 0.23% 。

关键词: 玻璃纤维; 聚醚醚酮; 增材制造; 工艺优化; 翘曲变形

中图分类号: TH145.4+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2024)01-0064-06

Effect of FDM forming process on warpage deformation of PEEK/CGF composites

LI Jiuzhen¹, ZHAN Li², LI Wan¹, LI Yunpeng¹, YUAN Yongchao¹

(1. China Academy of Machinery Science & Technology Qingdao Branch Co., Ltd., Qingdao 266300, China;

2. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract : In order to reduce the warpage deformation of continuous glass fiber reinforced polyether ether ketone composite additive manufacturing samples and optimize the basic process parameters of additive manufacturing, the thermal effects during the printing process, i.e., the temperature of the holding compartment, the ply thickness, the temperature of the forming platform, the printing speed, have been studied through the one-factor test, the Plackett-Burman Design test and the Box-Behnken Design test. Other process parameters on the warpage and deformation of continuous glass fiber reinforced polyether ether ketone composite samples, and the following conclusions were drawn: It was found that the degree of influence of the printing process on the warpage was different, and the degree of influence was in the order of B (ply thickness) $> C$ (substrate temperature) $> A$ (temperature of the holding compartment). It was found that the printing process parameters interact with each other on the warpage deformation, and the degree of influence was also more significant (greater than t -value in the PB analytical factor test), i.e., $B > C > A > AB > BC > D$ (printing speed) $> BD$. It was found that when printhead temperature was $440\text{ }^{\circ}\text{C}$, forming platform temperature was $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, holding compartment temperature was $90\text{ }^{\circ}\text{C}$, layer thickness was 0.3 mm , lane spacing was 0.5 mm , and printing speed was 2 mm/s , the warpage could reach 0.23% .

Keywords : glass fiber ; polyether ether ketone ; additive manufacturing ; process optimization ; warpage deformation

增材制造技术(AM)是根据分层叠加制造原理, 通过逐层堆积材料, 直接制造出具有复杂几何形状模型部件的技术。熔融沉积成型(FDM)技术是当下最流行也是应用最为广泛的 AM 方法之一, 可用于

制造传统成型方法难以制造的复杂形状、功能结构一体化部件, 对于单件小批量定制化部件的制造具有极大优势^[1-7]。它为三维复杂零件的高效设计和低成本制造提供了可能, 并被广泛应用于汽车制

基金项目: 中国机械总院技术发展基金资助项目

通信作者: 战丽, 博士, 研究员, 主要从事纤维增强复合材料研究方面工作

收稿日期: 2023-10-26

引用格式: 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 Wan, et al. Effect of FDM forming process on warpage deformation of PEEK/CGF composites[J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(1): 64-69.

造、航空航天、生物医学等领域^[8-9]。

FDM技术在热塑性树脂材料成型方面应用广泛,对于需要在极端环境下工作的零部件,又多以特种工程塑料为树脂基体,辅以连续纤维作为增强相,来满足其极端工况下所应具备的力学性能要求。

热塑性特种工程材料又以聚醚醚酮(PEEK)性能优异,其在具有优异的力学性能的同时,还以较高的热稳定性、高比模量、耐腐蚀性被广泛应用于军工航天、汽车制造等领域,因其物理性能与人骨接近,也正逐渐被广泛用于生物医疗领域中^[10-11]。由于PEEK树脂基体的半结晶特性和高熔点,连续纤维增强PEEK复合材料成型中FDM成型工艺参数对增材制造制品的性能指标影响较为显著。此外,纯PEEK的熔点较高(343℃),在打印过程中需要加热到380℃以上,传统打印机也无法达到如此高的温度。与其他材料相比,PEEK打印件也更容易产生较大的热梯度,在打印过程中容易发生翘曲和变形,严重影响产品的性能。因此,连续纤维增强PEEK复合材料的FDM成型工艺面临诸多挑战。

在关于PEEK及PEEK复合材料打印工艺的研究中,非常多的专家学者针对FDM成型工艺,以PEEK及PEEK复合材料增材制造部件的力学性能的提升为目标,着重研究了其拉伸强度、压缩强度、弯曲强度以及层间剪切强度等性能,然而PEEK作为一种半结晶聚合物,其在冷却过程中会结晶并产生分子取向,进而会出现打印件的翘曲变形现象^[12-13]。目前,关于连续纤维增强PEEK复合材料的翘曲变形研究还较少,其中Gao等^[14]在研究PEEK的FDM制造工艺时,在对力学性能探究之余,还对翘曲变形做了研究,该团队以成型过程中的打印路径以及填充密度作为自变量,通过试验分析得出打印路径为0°/90°、填充密度为50%的样品在翘曲变形、拉伸强度和比强度方面的综合性能最好。但是该团队对于翘曲变形的研究没有考虑各影响因素之间是否会存在交互影响,并且翘曲变形属于热效应,且是伴随整个增材过程的,故应该进一步对增材过程中的温度做进一步探究。此外,对于3D打印PEEK及其复合材料部件的翘曲变形的评估还没有统一的标准,有许多研究人员提出了翘曲变形的测量指标^[15-17],但他们都设计了特定形状样品,并提出了各自的定义,不具有普遍性。

针对在高温环境下工作的电路板这一现实需求,在满足其高温环境下连续工作的同时还应具备一定的力学性能,尤其是需要具备一定的抗冲击性能。在连续纤维增强PEEK复合材料体系中,Ding等^[18]在研究了连续碳纤维、连续玻璃纤维(CGF)等作为增强相的复合材料力学性能,发现玻璃纤维对冲击性能的提升较大,而碳纤维的存在反而增加了材料的脆性,故CGF增强PEEK复合材料制作复杂工况下的电路板是较为合适的。

笔者以CGF增强PEEK作为原材料,按照PCB板的翘曲变形测试方法,基于严春晖等^[19]学者对CGF增强PEEK复合材料增材制造中打印温度等工艺对力学性能的研究,参考业内知名专家学者对连续纤维增材制造技术的应用^[20-21],进一步探究增材制造过程中引起工件翘曲变形的热效应,又因为打印速度直接关系到打印件处在高温环境中的时间问题,故笔者着重探究保温舱温度、层厚、成型平台温度、打印速度等工艺参数对CGF增强PEEK复合材料基板翘曲变形的影响,通过试验设计拟合二次多项式回归模型,进而预测最优工艺参数并进行试验验证。

1 试验部分

1.1 主要原材料

CGF增强PEEK预浸丝:徐州航成新材料科技有限公司;该预浸丝直径为0.5 mm,表面光滑,玻璃纤维线密度200 Tex,预浸丝纤维体积分数约为27.1%。

1.2 主要设备

连续纤维增强复合材料高温FDM样机:自制;

该设备喷头温度最高450℃,喷头内置1.0 mm金属管,成型平台最高170℃,保温舱温度最高90℃。

1.3 样件制备及测试标准

复合材料基板翘曲度(弓曲)检测选用IPC-TM-650检测方法,依据IPC-TM-650检测方法制备的样件尺寸为:100.0 mm×100.0 mm×2.0 mm。

样件制备设备为自制连续纤维增强复合材料高温FDM样机,打印工艺中喷头温度440℃^[19]。

依据IPC-TM-650检测方法将样品置于测试平台上,测其最大垂直位移。样品需反复转动以确定测得最大垂直位移,为保证数据准确,样件选取5个一组取平均值,所测样品弓曲度不大于0.75%为合

格,在需要安装复杂元件的PCB板中,翘曲度不大于0.3%为优秀。

翘曲最大百分率=翘曲最大垂直位移/最大垂直位移所在边长度 $\times 100\%$

1.4 响应面试验设计

响应面是一种回归分析数学建模方法,是生产和科学试验中的常用方法。响应面试验设计是通过多因素多水平的一系列试验数据来建立所需数学模型,继而根据所建模型预测出最优工艺参数组合进而指导试验,讨论的工艺参数影响因素为四个,即保温舱温度(A)、层厚(B)、成型平台温度(C)、打印速度(D)。因此,在开启响应面试验设计之前还需要对各影响因素及对应水平值的选取进行试验预处理,响应面试验设计全流程如图1所示。



图1 响应面试验设计流程

Fig. 1 Response surface method design flow

2 试验与分析

运用连续纤维复合材料增材制造技术,基于响应面试验设计方法,依据IPC-TM-650检测方法,制备出不同工艺参数组合下的CGF增强PEEK复合材料样件,探究在现有加工条件下对该复合材料样件翘曲变形影响最小的最优工艺参数组合。

2.1 单因素试验结果及分析

单因素试验的目的是选取一组带有拐点的水平值以保证后续试验的高效准确。对所探究影响因素逐个应用控制变量法得到一系列基础水平值,各选取一组趋势明显且带有峰值拐点的水平值。

单因素试验运用控制变量法,因变量水平值选取依据设备及耗材规格,保温舱温度选取50~90℃,通过实测,在未加保温舱装置时,工作台温度已在40~50℃,实验装置最高保温90℃,故以10℃为一个单位测试翘曲变形随温度变化趋势;层厚选取0.1~0.5 mm,按照板材百分百填充的要求,以连续纤维耗材直径0.5 mm为最大量,以喷头最小挤出分辨率0.1 mm为下限;为尽量保证成型件的表面平整,本着不施加外力黏连的原则,成型平台温度的选取依据其能否在碳纤维成型平台上自行保持黏连;打印温度依据文献^[9]所得最优打印温度440℃,道间距为0.5 mm,在此基础上做进一步验

证探究,其余工艺参数的选取本着经济高效的原则,单因素实验及结果见表1。

表1 单因素试验

Tab. 1 One-way test

No.	$A/^{\circ}\text{C}$	B/mm	$C/^{\circ}\text{C}$	$D/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Warpage/%
1	50	0.5	140	2	0.79
2	60	0.5	140	2	0.73
3	70	0.5	140	2	0.66
4	80	0.5	140	2	0.60
5	90	0.5	140	2	0.55
6	90	0.1	140	2	0.26
7	90	0.2	140	2	0.26
8	90	0.3	140	2	0.25
9	90	0.4	140	2	0.43
10	90	0.5	140	2	0.55
11	90	0.5	100	2	0.40
12	90	0.5	110	2	0.33
13	90	0.5	120	2	0.40
14	90	0.5	130	2	0.47
15	90	0.5	140	2	0.55
16	90	0.5	140	1	0.62
17	90	0.5	140	2	0.55
18	90	0.5	140	3	0.55
19	90	0.5	140	4	0.57
20	90	0.5	140	5	0.59

由单因素试验数据可得,最优工艺参数组合为保温舱温度90℃、层厚0.3 mm、成型平台温度110℃、速度2 mm/s,根据现有最优工艺参数组合进行试验验证,翘曲度为0.26%。

根据以上优选后的工艺参数组合所得翘曲度为0.26%,由上述单因素试验可知最小的翘曲变形为0.25%,而优选后的工艺参数组合所得样件的翘曲度为0.26%,发现其并不是最小翘曲变形度,由此可知,各影响因素之间或许存在相互影响,为进一步探究各工艺参数对翘曲变形的影响程度以及各工艺参数之间对翘曲变形是否有交互影响,需开展PB析因试验。

2.2 PB析因实验结果及分析

PB析因试验又名Plackett-Burman Design试验,该试验是一组四因素两水平的试验,其目的是依据单因素试验提供的各影响因素的高低水平值进行试验设计,从4个影响因素中筛选出对目标性能影响最为显著的3个影响因素,为BBD响应面试验做数据准备。

为探究各工艺参数对翘曲变形的影响程度,PB试验的水平值应在单因素试验所得趋势内选取的范围大一些,以放大工艺参数对翘曲变形的影响程

度,根据单因素试验所得趋势,将表2水平值导入 Plackett-Burman Design 试验设计可得PB析因试验方案,试验方案及结果见表3。

表2 PB析因试验水平值

Tab. 2 Level value of Plackett-Burman design

level	A/°C	B/mm	C/°C	D/(mm·s ⁻¹)
-1	50	0.1	100	1
1	90	0.5	140	5

Note: "1" represents a high level, "-1" a low level.

表3 PB析因试验方案及结果

Tab. 3 Plackett-Burman design and results

No.	A/°C	B/mm	C/°C	D/(mm·s ⁻¹)	Warpage/%
1	50	0.5	140	1	0.79
2	90	0.1	140	5	0.28
3	90	0.5	100	5	0.32
4	90	0.5	140	1	0.52
5	90	0.1	100	1	0.23
6	50	0.1	100	1	0.25
7	50	0.1	100	5	0.25
8	50	0.5	100	5	0.57
9	50	0.5	140	5	0.84
10	90	0.1	140	5	0.28
11	90	0.5	100	1	0.23
12	50	0.1	140	1	0.28

根据PB析因试验结果,通过 origin 软件绘制出描述工艺参数对翘曲变形影响程度的帕累托图,见图2所示。大于 t 值(t 值即为“二八法则”的临界值,即20%的改变贡献80%的响应)的为显著影响因素,根据试验结果可知各影响因素之间是存在相互影响的,但是层厚、成型平台温度、保温舱温度影响最为显著,即依次为 B (层厚) $> C$ (成型平台温度) $> A$ (保温舱温度) $> AB > BC > D$ (打印速度) $> BD$,如图2所示,其中 AB 表示保温舱温度与层厚的

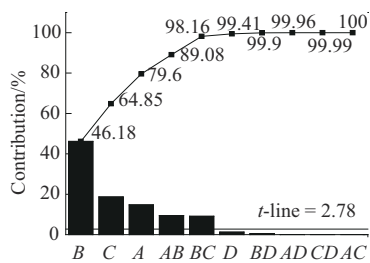


图2 帕累托图

Fig. 2 Pareto chart

交互关系对翘曲度产生的影响、 BC 表示层厚与成型平台温度的交互关系对翘曲度产生的影响、 BD 表示层厚与打印速度的交互关系对翘曲度产生的影响。由PB析因试验结果,现选取对复合材料增材制造样件翘曲变形影响最大的三个因素: B, C, A 进

行BBD响应面实验以确定最优工艺参数。

2.3 BBD响应面试验结果及分析

经过单因素试验获得参数水平值对翘曲变形的影响趋势,PB析因试验获得显著影响因素,下面需根据上述试验数据进一步设计响应面试验,寻求最优工艺参数组合,BBD试验水平值见表4。

表4 BBD试验水平值

Tab. 4 Level value of Box-Behnken design

level	A/°C	B/mm	C/°C
-1	50	0.1	100
1	90	0.5	140

2.3.1 数字模型的建立及分析

为了拟合较为准确的响应面多项式,各参数水平值的选取仍需要在单因素试验所得趋势内较大范围的选取,选取单因素试验所得水平值范围与 Plackett-Burman Design 所得的三个最显著影响因素结合导入 Box-Behnken Design 试验设计中可得翘曲度响应面试验设计方案,经过样件制备及性能测试,其结果见表5。试验数据显示,当喷头温度 440°C ^[19],成型平台温度 100°C ,保温舱温度 90°C ,层厚 0.3 mm ,道间距为 0.5 mm ,打印速度 2 mm/s 时,翘曲度最小为 0.23% 。

表5 BBD试验结果

Tab. 5 Box-Behnken design test results

No.	A/°C	B/mm	C/°C	Warpage/%
1	90	0.3	100	0.23
2	70	0.5	100	0.39
3	70	0.1	100	0.24
4	70	0.3	120	0.25
5	90	0.5	120	0.40
6	50	0.5	120	0.66
7	70	0.3	120	0.25
8	90	0.1	120	0.26
9	70	0.5	140	0.66
10	70	0.3	120	0.25
11	70	0.3	120	0.25
12	90	0.3	140	0.26
13	70	0.1	140	0.26
14	70	0.3	120	0.25
15	50	0.3	100	0.25
16	50	0.1	120	0.28
17	50	0.3	140	0.32

2.3.2 响应面试验方差分析

对试验结果进行多元回归拟合后,获得各工艺参数对PEEK/CGF复合材料翘曲度(Y)影响的二次多项式回归模型如下:

$$Y=0.0025-0.0004A+0.0013B+0.0005C-0.0006AB-0.0001AC+0.0006BC+0.0001A^2+0.0013B^2-2.049\times10^{-7}C^2$$

表 6 为响应面试验方差分析。由表 6 可知,上述所建立的复合材料层合板翘曲度影响因素的二次回归模型显著 ($P<0.01$), 失拟项不显著 ($P>$

0.05), 表明复合材料层合板翘曲度影响因素的数据模型是合理的; 模型的决定系数 $R^2=0.967\ 3$, 校正决定系数 $R^2_{Adj}=0.925\ 2$, 表明该模型与试验结果的拟合度较好, 该模型可用于 PEEK/CGF 复合材料层合板翘曲度工艺参数的可靠分析与预测。

运用 Design-Expert 11 软件, 绘制出 PEEK/CGF

表 6 响应面试验方差分析

Tab. 6 Response surface test ANOVA

Source	Sum of squares	df	Mean square	F value	P value	Significance
Model	0.0000	9	3.174E-06	23.00	0.000 2	significant
A	1.588E-06	1	1.588E-06	11.50	0.011 6	
B	0.0000	1	0.0000	102.47	< 0.000 1	
C	2.011E-06	1	2.011E-06	14.57	0.006 6	
AB	1.452E-06	1	1.452E-06	10.52	0.014 2	
AC	5.419E-08	1	5.419E-08	0.3926	0.550 8	
BC	1.620E-06	1	1.620E-06	11.74	0.011 0	
A ²	5.724E-08	1	5.724E-08	0.4147	0.540 1	
B ²	7.523E-06	1	7.523E-06	54.50	0.000 2	
C ²	1.768E-13	1	1.768E-13	1.281E-06	0.999 1	
Residual	9.663E-07	7	1.380E-07			
Lack of fit	9.663E-07	3	3.221E-07	1.031E-05	0.141	not-significant
Cor total	0.0000	16				

复合材料增材制造工艺参数对翘曲度的响应面和等高线图, 可较好反映各个工艺参数以及他们之间交互作用对翘曲度的影响程度, 响应面曲率越大, 说明 2 个影响因子之间的相互作用就越明显, 见图 3 所示。由图 3 可知, A 与 B 之间的相互作用对复合材料基板翘曲变形的影响, 响应面局部开口向上, 具有最小值, 图中显示层厚与成型平台温度的交互项

为椭圆, 表明其对翘曲变形有较大影响, 与方差分析及 PB 析因试验中的帕累托图相吻合。

2.3.3 最佳工艺参数确定与试验验证

基于 Design-Expert 11 绘制的响应面以及其他图表的数据, 以现有设备的性能指标作为边界条件, 通过研究保温舱温度、层厚、成型平台温度、打印速度四种因素对复合材料翘曲变形的影响, 可以预测出其最佳工艺参数组合为: 成型平台温度 100 °C, 保温舱温度 89.88 °C, 层厚 0.28 mm, 打印速度 2 mm/s 时, 翘曲度最小为 0.21%。

考虑到实际操作性, 综合调整工艺参数为:

成型平台温度 100 °C, 保温舱温度 90 °C, 层厚 0.3 mm, 打印速度 2 mm/s。

根据上述工艺条件制作测试样件, 按照样件测试标准, 测得翘曲度为 0.23%, 试验结果与模型预测结果基本吻合。

3 结论

为减少 CGF 增强 PEEK 复合材料制件的翘曲变形, 通过单因素试验, Plackett-Burman Design 试验与 Box-Behnken Design 试验, 研究了工艺参数对 CGF 增强复合材料样件翘曲变形的影响规律, 寻求最优工艺参数组合并进行试验验证, 得出如下结论:

(1) 打印工艺参数对翘曲度的影响程度是不同

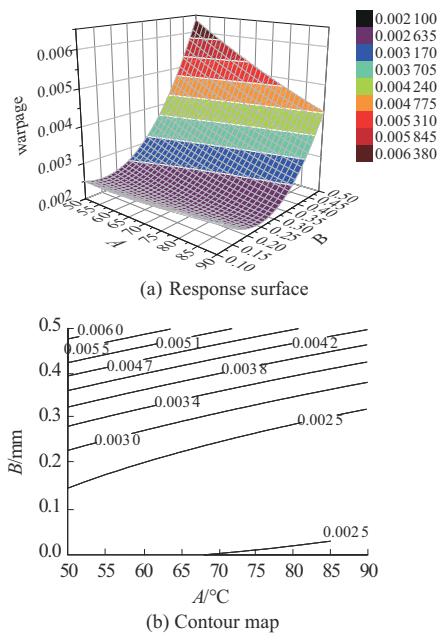


图 3 响应面及等高线图

Fig. 3 Response surface and contours map

的。影响程度依次为层厚>成型平台温度>保温舱温度>打印速度。

(2) 打印工艺参数之间是会对翘曲变形产生交互作用的,并且影响程度也较为显著(PB析因试验中大于 t 值),即 B (层厚)> C (成型平台温度)> A (保温舱温度)> $AB>BC>D$ (打印速度)> BD 。

(3) 成型平台温度 100 °C,保温舱温度 90 °C,层厚 0.3 mm,打印速度 2 mm/s 时,翘曲度可达到 0.23%。

试验仅选取了部分增材制造工艺参数作为自变量,探究了增材制造中多工艺参数对 CGF 增强 PEEK 复合材料基板翘曲变形的影响,希望为复合材料增材制造技术的进一步发展提供一定的数据参考。

参考文献

- [1] BRENKEN B, BAROCIO E, FAVALORO A, et al. Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review[J]. Additive Manufacturing, 2018, 21:1–16.
- [2] TEKINALP H L, KUNC V, Velez-Garcia G M, et al. Highly oriented carbon fiber – polymer composites via additive manufacturing[J]. Composites Science and Technology, 2014, 105:144–150.
- [3] TIAN X, LIU T, WANG Q, 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] Garzon-Hernandez S, Garcia-Gonzalez D, Jérusalem A, et al. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties[J]. Materials & Design, 2020, 188:108–414.
- [5] DUL S, FAMBRI L, PEGORETTI A. Fused deposition modelling with ABS – graphene nanocomposites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 85:181–191.
- [6] MARCHESI T R, LAHUERTA R D, SILVA E C N, et al. Topologically optimized diesel engine support manufactured with additive manufacturing[J]. IFAC-Papers On Line, 2015, 48(3): 2 333–2 338.
- [7] MIRZENDEHDEL A M, SURESH K. Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 2016, 81:1–13.
- [8] NING F, CONG W, QIU J, et al. Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling[J]. Composites Part B: Engineering, 2015, 80:369–378.
- [9] SANATGAR R H, CAMPAGNE C. Investigation of the adhesion properties of direct 3D[J]. Microwaves, 2013, 7:760–767.
- [10] CHACÓN J M, CAMINERO M A, GARCÍA-PLAZA E, et al. Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection[J]. Materials & Design, 2017, 124: 143–157.
- [11] KAVEH M, BADROSSAMAY M, FOROOZMEHR E, et al. Optimization of the printing parameters affecting dimensional accuracy and internal cavity for HIPS material used in fused deposition modeling processes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 226:280–286.
- [12] FITZHARRIS E R, WATANABE N, ROSEN D W, et al. Effects of material properties on warpage in fused deposition modeling parts[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95:2 059–2 070.
- [13] WATANABE N, SHOFNER M L, TREAT N, et al. A model for residual stress and part warpage prediction in material extrusion with application to polypropylene[C]//2016 International Solid Freeform Fabrication Symposium. University of Texas at Austin, 2016.
- [14] GAO R, XIE J, YANG J, et al. Research on the fused deposition modeling of polyether ether ketone[J]. Polymers, 2021, 13(14): 23–44.
- [15] LI J, LI D, GUO Z, et al. Single gate optimization for plastic injection mold[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2007, 8:1 077–1 083.
- [16] SCHMUTZLER C, ZIMMERMANN A, ZAEH M F. Compensating warpage of 3D printed parts using free-form deformation[J]. Procedia Cirp, 2016, 41:1 017–1 022.
- [17] YU N, SUN X, WANG Z, et al. Effects of auxiliary heat on warpage and mechanical properties in carbon fiber/ABS composite manufactured by fused deposition modeling[J]. Materials & Design, 2020, 195. DOI:10.1016/j.matdes.2020.108978.
- [18] DING S, ZOU B, ZHUANG Y, et al. Hybrid layout and additive manufacturing of continuous carbon/glass fibers reinforced composites, and its effect on mechanical properties[J]. Composite Structures, 2023, 319. DOI:10.1016/j.compstruct.2023.117133.
- [19] 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.
- [20] 侯章浩,田小永,朱伟军,等. 连续纤维增强复合材料变刚度结构 3D 打印与性能研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(5):170–177.
- [21] 田小永,张亚园,刘腾飞,等. 连续碳纤维增强尼龙复合材料预浸丝制备与 3D 打印性能研究[J]. 航空制造技术, 2021, 64(15): 24–33.