

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.03.012

响应面法优化 CGF/PEEK 增材制造试样冲击性能

战丽¹, 李莞², 李久振², 魏伟²

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

摘要: 以提升熔融沉积成型(FDM)增材制造连续玻璃纤维增强聚醚醚酮(CGF/PEEK)复合材料的冲击性能为目的,设计了系统的响应面试验,试验过程包括单因素试验、Plackett-Burman (PB)析因试验、Box-Behnken Design (BBD)响应面试验,研究了道间距、保温舱温度、打印温度、打印层厚等工艺参数对 CGF/PEEK 复合材料 FDM 成型试样冲击性能的影响规律。通过单因素试验,界定各影响因素的取值范围,以确保后续试验的高效性和准确性;通过 PB 析因试验,筛选出对 CGF/PEEK 复合材料冲击性能有显著影响的工艺参数,明确各工艺参数之间的相互作用;采用 BBD 响应面试验设计,构建了多因素与响应变量之间的数学模型,探究最优工艺参数组合,并进行试验验证。结果表明,各工艺参数对试样冲击性能影响程度大小排序为打印层厚>打印温度>道间距>保温舱温度;选择合适的工艺参数组合可以提高 CGF/PEEK 试样的冲击性能,并预测出最优工艺参数组合,即道间距为 0.55 mm、保温舱温度为 90 °C、打印温度为 438 °C、打印层厚 0.57 mm 时,模型所预测的最大冲击强度为 265 kJ/m²。为验证模型预测的准确性,进行了试验验证。结果表明在最优工艺参数组合下,CGF/PEEK 试样最大冲击强度达到 266 kJ/m²,与模型预测值吻合,验证了模型的可靠性。

关键词: 连续玻璃纤维;聚醚醚酮;熔融沉积成型;复合材料;工艺优化;冲击性能

中图分类号: TH145.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)03-0089-07

Optimization of impact performance of CGF/PEEK additive manufactured samples using response surface methodology

ZHAN Li¹, LI Wan², LI Jiuzhen², WEI Wei²

(1. China Academy of Machinery Beijing Research Institute of Mechanical and Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;

2. China Academy of Machinery Science & Technology Qingdao Branch Co., Ltd., Qingdao 266300, China)

Abstract : Aiming to improve the impact performance of continuous glass fiber reinforced polyether ether ketone (CGF/PEEK) composites made through fused deposition modeling (FDM) additive manufacturing, a systematic response surface methodology experiment was designed, encompassing single-factor experiments, Plackett-Burman (PB) factorial experiments, and Box-Behnken Design (BBD) response surface experiments. The influence patterns of process parameters such as channel spacing, insulation chamber temperature, printing temperature, and layer thickness on the impact performance of CGF/PEEK composite samples formed by FDM were investigated. Through single-factor experiments, the range of values for each influencing factor was defined to ensure the efficiency and accuracy of subsequent experiments. PB factorial experiments were conducted to screen out the process parameters that significantly affected the impact performance of CGF/PEEK samples and to clarify the interactions among these parameters. Using BBD response surface experimental design, a mathematical model was constructed between multiple factors and the response variable to explore the optimal combination of process parameters, which was then experimentally validated. The results indicate that the degree of influence of each process parameter on the impact performance of CGF/PEEK samples is ranked as follows: layer thickness>printing temperature>channel spacing>insulation chamber temperature. By selecting an appropriate combination of process parameters, the impact performance of CGF/PEEK samples can be improved. The optimal combination of

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB4605302)

通信作者: 战丽, 硕士, 研究员, 研究方向为纤维增强复合材料

收稿日期: 2025-01-26

引用格式: 战丽, 李莞, 李久振, 等. 响应面法优化 CGF/PEEK 增材制造试样冲击性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(3): 89-95.

ZHAN Li, LI Wan, LI Jiuzhen, et al. Optimization of impact performance of CGF/PEEK additive manufactured samples using response surface methodology[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(3): 89-95.

process parameters is predicted by the model is as follows: channel spacing of 0.55 mm, insulation chamber temperature of 90 °C, printing temperature of 438 °C, and layer thickness of 0.57 mm, yielding a predicted maximum impact strength of 265 kJ/m². To verify the accuracy of the model's predictions, experimental validation was conducted. The results show that, under the optimal combination of process parameters, the maximum impact strength of the CGF/PEEK sample reaches 266 kJ/m², which is close to the predicted value, thereby validating the reliability of the model.

Keywords : continuous glass fiber ; polyether ether ketone ; fused deposition modeling ; composite ; process optimization ; impact performance

随着军事航天技术的飞速发展,近年来对于某些需要在高温、高压等极端环境下工作的复杂异形构件的应用需求日益趋向复杂化、轻量化与个性化^[1]。尤其在前沿军工领域,对复杂异形构件的单件、小批量生产提出了更高要求,而玻璃纤维(GF)增强聚醚醚酮(PEEK)复合材料,因具有轻质、易于设计与纤维体积分数可调整的优异特性,加之良好的介电性能、力学性能及耐候性,成为该领域的优选材料之一^[2]。

然而,当前复合材料成型工艺仍主要依赖于材制造或减材制造的传统模式^[3],这些传统模式存在成本高、效率低、生产周期长等局限。相比之下,增材制造技术凭借其一体化成型、组装环节简化、对操作人员技能要求低、产品质量稳定可靠、材料利用率高及成型周期短等诸多优势,为复杂异形构件的制备提供了一条全新的解决路径。特别是熔融沉积成型(FDM)技术,作为增材制造技术的重要分支,已在复合材料的一体化快速成型领域得到了广泛的应用,并在复杂结构零件制造、验证件快速测试制备及复杂模具与工装制造等方面展现出巨大应用潜力。FDM技术不仅能够实现复杂异形构件的个性化定制与高效快速制备,还能有效保障其力学性能,从而实现整体性能的提升^[4-5]。

基于此,部分学者针对PEEK材料和PEEK/GF复合材料增材制造的领域开展了研究。Gao等^[6]采用单因素试验,确定了当使用0°/90°的打印路径和50%的填充量时,通过FDM生产的PEEK试样在翘曲变形、拉伸强度和比强度方面表现出最佳的综合性能。通过正交试验对打印速度、打印温度、底板温度、打印层厚进行分析,发现底板温度是影响翘曲变形最为关键的工艺参数,打印速度和打印温度对拉伸强度的影响更明显。Liaw等^[7]设计了正交试验来研究FDM打印PEEK试样中各工艺参数对层间强度的影响。结果表明,打印过程中的热力过程决定了层间强度,其中喷嘴温度的影响最为显著。

於天鹏等^[8]基于FDM打印工艺研究了PEEK试样中打印层厚、打印速度、底板温度对拉伸强度的影响,当打印层厚为0.10 mm、打印速度为30 mm/s、底板温度为160 °C时,试样有最大拉伸强度82 MPa。Wang等^[9]研究了喷头温度、底板温度、打印速度、打印层厚对短切GF增强PEEK力学性能的影响,实验表明短切GF增强PEEK具有良好的拉伸性能和弯曲性能,其拉伸强度和弯曲强度随着喷嘴和底板温度的升高而增加,打印速度和打印层厚的增加对打印短切GF增强PEEK复合材料的各项力学性能均有负面影响。Wang等^[10]进一步研究了增材制造工艺参数对PEEK/GF复合材料的力学性能和微观组织性能的影响,发现试样的拉伸强度和弯曲强度随打印喷头温度的增加而提升,试样的冲击性能不会受到喷头温度明显的影响,相对更高的温度会使树脂具有更好的熔化流动性和可成型性。当打印速度和层厚分别为5 mm/s和0.1 mm时,PEEK/GF试样具有最佳的综合性能。Liu等^[11]研究了打印速度、纤维含量等工艺参数对连续GF (CGF)增强PEEK (CGF/PEEK)复合材料强度的影响。并通过工艺优化,使试样的拉伸强度、弯曲强度、层间剪切强度分别提升到524.33, 598.57, 46.28 MPa。严春晖等^[12-13]通过正交试验对打印温度、成型平台温度、打印速度进行工艺优化,在喷头温度440 °C、成型平台温度160 °C、打印速度2 mm/s的条件下,试样弯曲强度可达351.59 MPa,拉伸强度可达383.75 MPa。李久振等^[14]从保温舱温度、打印路径、层厚、道间距4个工艺参数方面对拉伸强度、弯曲强度及样件翘曲变形进行优化,优化后拉伸强度提升至383.75 MPa,弯曲强度提升至510.13 MPa,翘曲度可减少至0.23%。

在探索PEEK及其复合材料,特别是CGF/PEEK在FDM增材制造领域的研究进展中,众多学者已深入剖析了该类材料在拉伸、压缩、弯曲及层间剪切等力学性能方面的优化策略。尽管如此,但针对CGF/PEEK复合材料的冲击性能,相关研究仍显不

足。鉴于冲击性能在航空航天、军工、汽车制造等多个领域的不可或缺性,需要系统性地研究增材制造工艺参数对CGF/PEEK复合材料冲击性能的影响规律,拓展相关领域基础研究工作。考虑到冲击性能在特定应用场景下具有更为关键的作用^[15-16],因此笔者专注于工艺参数对CGF/PEEK复合材料的冲击性能的影响规律探究及优化。

综上所述,笔者以CGF/PEEK作为原材料,基于严春晖等^[12-13]、李久振等^[14]关于CGF/PEEK复合材料增材制造中关键工艺参数(成型平台温度、打印速度、打印路径等)对力学性能影响的研究成果,参考业内知名专家学者对连续纤维增材制造技术的应用^[17-19],选择响应面法,通过Design-Expert软件进行试验设计,构建数学模型来揭示多因素与响应变量之间的复杂关系,基于Design-Expert软件所构建的二次回归模型,并结合当前生产设备的技术规格作为约束条件,系统地探究道间距、保温舱温度、打印温度以及打印层厚这4个关键工艺参数对CGF/PEEK复合材料冲击性能的影响规律。通过分析与计算,预测出能够实现复合材料最大冲击强度的最优工艺参数组合,并通过试验验证了该最优工艺参数组合的预测准确性。

1 实验部分

1.1 主要原材料

CGF/PEEK预浸丝:直径为1.0 mm,纤维体积分数约为29.3%,滨州艾克新材料科技有限公司。

1.2 主要仪器及设备

连续纤维增强复合材料高温FDM打印机:喷嘴温度0~440℃可调,喷嘴直径1.75 mm,成型平台温度0~100℃可调,保温舱温度20~90℃可调,最大成型尺寸为300 mm×300 mm,自制;

冲击试验机:XJJ-50,最大冲击能量25 J,济南新试金试验机有限责任公司。

1.3 试样制备

CGF/PEEK冲击试样由连续纤维增强复合材料高温FDM打印机直接打印成型,打印速度2 mm/s,成型平台温度100℃,喷嘴直径1.75 mm,纤维取向为单向。试样尺寸按照GB/T 1043.1-2008中2型无缺口试样的尺寸选择,其长度 $L=33.0$ mm,跨距 $L_1=18$ mm,宽度 $b=10.0$ mm,厚度 $h=3.0$ mm,且试样应无扭曲,并具有相互垂直的平行表面。

1.4 测试与表征

冲击强度按照GB/T 1043.1-2008测试,环境温度为23℃,空气相对湿度为50%,10个试样一组取平均值。

2 结果与讨论

2.1 单因素试验

单因素试验的主要目标是界定各影响因素的取值范围,以确保后续试验的高效性和准确性。这一界定过程主要依据两个原则:一是选取拐点处的水平值,即那些能够显著影响响应变量变化的关键点;二是以最佳数据为基础,通过缩小取值范围来进一步精炼试验条件。在本研究中,针对所探究的4个影响因素——道间距(A)、保温舱温度(B)、打印温度(C)和打印层厚(D),逐一采用控制变量法来获取一系列基础水平值,并在此基础上进一步明确各自的取值范围。

对于道间距(A),根据设备及耗材规格,确定0.50~0.70 mm的取值范围。其中,0.70 mm为最大道间距,以确保百分百填充率;而0.50 mm为最小道间距,以避免纤维堵塞喷嘴并确保连续打印的可能性。在此基础上,以0.05 mm为步长,设置5组数据。

保温舱温度(B)的取值范围则选定为50~90℃。这一范围的选择是基于实测数据,即未加保温舱装置时工作舱温度已为40~50℃,而自制打印机的最高保温温度为90℃。因此,以10℃为一个单位,测试样件冲击性能随温度的变化趋势。

在打印温度(C)的选择上,根据预先测试的结果,确定400~440℃的取值范围。当打印温度超过440℃时,会发生PEEK降解的问题;而当打印温度低于400℃时,则会导致树脂熔融不完全。因此,在这一区间内每10℃取一个值,共设置5组数据,以探究打印温度对冲击性能的影响。

对于打印层厚(D),根据丝材规格1.00 mm,确定0.50~0.70 mm的取值范围。在保证填充率100%的情况下,打印层厚最高选取0.70 mm;而在纤维不堵塞喷嘴且能完成连续打印的情况下,打印层厚最低选取0.50 mm。因此,以0.05 mm为步长,设置5组试验。其余未涉及的打印参数则依据已有文献所得的最优工艺^[12-14]进行选取,整个单因素试验的设计见表1。

单因素试验结果如图1所示,图中横坐标1~5表示每个单因素试验由小到大的5个水平取值。由

表 1 单因素试验设计
Tab. 1 Univariate trial design

Run	A/mm	B/°C	C/°C	D/mm
1	0.50	90	440	0.70
2	0.55	90	440	0.70
3	0.60	90	440	0.70
4	0.65	90	440	0.70
5	0.70	90	440	0.70
6	0.70	50	440	0.50
7	0.70	60	440	0.50
8	0.70	70	440	0.50
9	0.70	80	440	0.50
10	0.70	90	440	0.50
11	0.70	90	400	0.50
12	0.70	90	410	0.50
13	0.70	90	420	0.50
14	0.70	90	430	0.50
15	0.70	90	440	0.50
16	0.70	90	440	0.50
17	0.70	90	440	0.55
18	0.70	90	440	0.60
19	0.70	90	440	0.65
20	0.70	90	440	0.70

Notes: A is channel spacing; B is insulation chamber temperature; C is printing temperature; D is layer thickness. The following table is the same as.

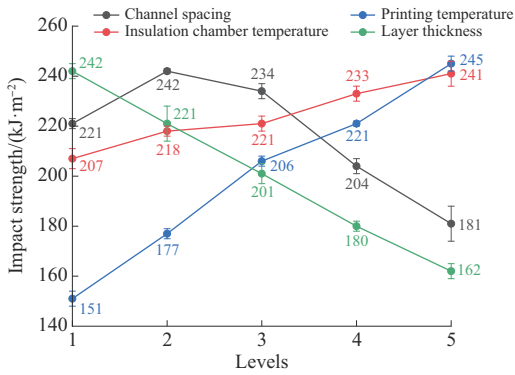


图 1 单因素试验结果
Fig. 1 Univariate trial results

图 1 可知,在选定水平值内,随着道间距的增大,复合材料的冲击强度先增大后减小;随着保温舱温度和打印温度的上升,复合材料的冲击强度逐渐增大;当打印层厚增大时,复合材料的冲击强度降低。当道间距为 0.70 mm、保温舱温度为 90 °C、打印温度为 440 °C、打印层厚为 0.50 mm 时,复合材料冲击强度达到最大,为 245 kJ/m²。为了更深入地理解各工艺参数对冲击强度的具体影响程度,并探究参数间可能存在的交互效应,有必要进一步开展 Plackett-Burman (PB) 析因试验。

2.2 PB 析因试验

PB 析因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数据进行试验设计,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。这一步骤对于后续构建 BBD 响应面试验模型而言,是至关重要的数据准备阶段。

为了深入探究并量化各工艺参数对冲击强度的具体影响程度,PB 析因试验的水平值设定需紧密依据单因素试验的结果进行精心挑选。当单因素试验结果显示存在明显的拐点时,应选择拐点两侧的水平值,以便更准确地捕捉该因素对冲击强度的非线性影响;而当拐点不存在时,则需依据单因素试验的结果,排除那些导致冲击强度明显偏低的参数设置,从而进一步缩小并优化参数的取值范围。

基于单因素试验所揭示的趋势,选定的具体因素水平值见表 2,并将这些值导入 Design-Expert 软件中,以生成详尽的 PB 析因试验方案。试验方案汇总于表 3。

表 2 PB 析因试验的因素水平值

Tab. 2 Factors and level values of PB factorial experiment

Levels	A/mm	B/°C	C/°C	D/mm
1	0.50	50	420	0.50
-1	0.60	90	440	0.70

Notes: "1" represents a high level, "-1" represents a low level. The following table is the same as.

表 3 PB 析因试验方案

Tab. 3 PB factorial experiment schemes

Run	A/mm	B/°C	C/°C	D/mm
1	0.50	50	440	0.50
2	0.60	50	440	0.70
3	0.50	90	440	0.50
4	0.50	50	420	0.50
5	0.50	90	420	0.70
6	0.60	50	420	0.50
7	0.60	50	440	0.70
8	0.60	90	420	0.50
9	0.50	90	440	0.70
10	0.60	90	440	0.50
11	0.60	90	420	0.70
12	0.50	50	420	0.70

PB 析因试验结果如图 2 所示。由图 2 可得,当道间距为 0.60 mm、保温舱温度为 90 °C、打印温度为 440 °C、打印层厚为 0.50 mm 时,复合材料冲击强度达到最大,为 258 kJ/m²。

根据 PB 析因试验的结果,使用 Design-Expert 软件生成了帕累托图,如图 3 所示,利用帕累托图可直观地描绘各工艺参数对冲击强度影响程度的排序。图 3 不仅清晰地揭示了各因素之间的相互作用,

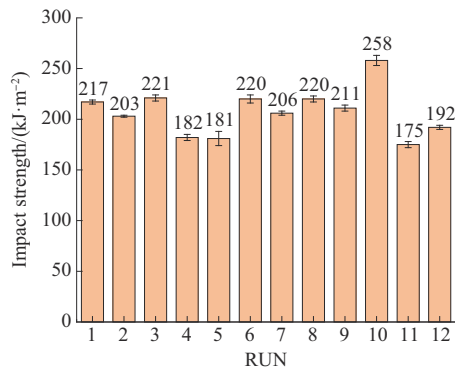


图2 PB析因试验结果

Fig. 2 PB factorial experiment results

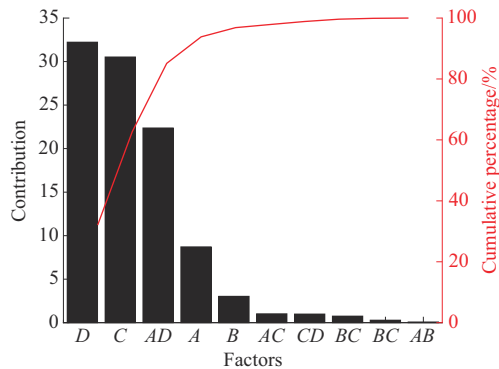


图3 帕累托图

Fig. 3 Pareto chart

而且明确指出打印层厚(D)和打印温度(C)是对冲击强度影响最为显著的两个因素,其影响程度依次高于其他因素组合及单一因素,具体排序为 D (打印层厚) $>C$ (打印温度) $>AD$ (道间距与打印层厚的交互作用) $>A$ (道间距) $>B$ (保温舱温度) $>AC$ (道间距与打印温度的交互作用) $>CD$ (打印温度与打印层厚的交互作用) $>BC$ (保温舱温度与打印温度的交互作用)。

PB析因试验的设计旨在高效筛选出对冲击强度有显著影响的工艺参数,为后续研究提供关键信息。在此基础上,进一步设计Box-Behnken Design (BBD)响应面试验,该试验方案能够系统地评估各参数在不同水平组合下的效应,从而更为精确地定位到最优的工艺参数组合,实现冲击强度的最大化提升。PB析因试验的高效筛选机制为后续研究提供宝贵的方向性指导,具体而言,选取PB析因试验中确定的3个最具影响力的因素: D (打印层厚)、 C (打印温度)和 A (道间距),作为BBD试验的核心考察对象。

2.3 BBD响应面试验

在完成单因素试验对参数水平值与冲击强度影响趋势的初步探索,以及PB析因试验对显著影

响因素的精准筛选之后,需依据上述试验数据,进一步设计BBD响应面试验,以期寻求最优化的工艺参数组合。

为了确保所拟合的响应面多项式具有较高的准确性,各参数水平值的选取需遵循以下原则:在单因素试验结果的基础上,排除那些与整体趋势明显偏离的数据点,同时在趋势内选择较大的取值范围,以充分捕捉各参数对冲击强度的潜在影响。将单因素试验所得的水平值范围与PB析因试验确定的3个最显著影响因素(即打印层厚、打印温度和道间距)相结合,共同构成BBD响应面试验的设计基础。PB析因试验的结果表明,相较于其他工艺参数,保温舱温度对冲击强度的影响相对较小。因此,在构建BBD试验方案时,固定保温舱温度为单因素试验所得的最优参数 90°C ,以简化试验设计,同时聚焦于那些对冲击强度具有显著影响的参数,以提高试验效率与准确性,得BBD响应面试验因素水平值,见表4。

表4 BBD响应面试验因素水平值

Tab. 4 Factors and level values of BBD response surface experiment

Levels	A/mm	$C/^{\circ}\text{C}$	D/mm
1	0.50	420	0.50
-1	0.60	440	0.70

将相关数据导入Design-Expert软件中,可得冲击强度BBD响应面试验的具体设计方案,见表5。

表5 BBD响应面试验方案

Tab. 5 BBD response surface experiment schemes

RUN	A/mm	$B/^{\circ}\text{C}$	$C/^{\circ}\text{C}$	D/mm
1	0.50	90	430	0.50
2	0.60	90	430	0.60
3	0.60	90	440	0.60
4	0.50	90	430	0.70
5	0.55	90	440	0.50
6	0.60	50	430	0.50
7	0.55	60	430	0.60
8	0.60	70	420	0.60
9	0.50	80	420	0.50
10	0.55	90	440	0.70
11	0.55	90	430	0.60
12	0.55	90	430	0.60
13	0.55	90	420	0.60
14	0.55	90	430	0.60
15	0.50	90	440	0.60
16	0.55	90	430	0.70
17	0.55	90	420	0.70

经过样件制备流程与性能测试,获得如图4所示的试验结果。通过分析这些数据,揭示各参数之

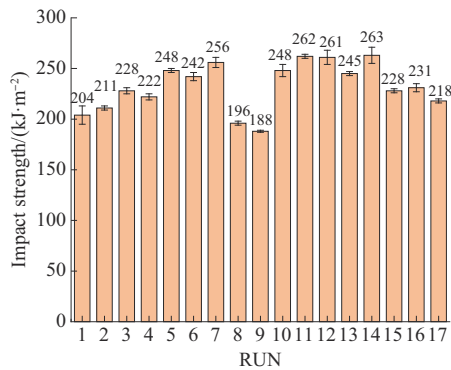


图4 BBD响应面试验结果

Fig. 4 BBD response surface experiment results

间的复杂关系,进而找到最优化的工艺参数组合,以实现冲击强度的最大化提升。

2.4 BBD响应面试验结果分析

对试验结果进行多元回归拟合后,获得各工艺参数对CGF/PEEK复合材料冲击强度影响的二次多项式回归模型,见式(1)。

$$R = 259.84 - 4.36A + 10.14C - 10.54D + 3.33AC - 23.87AD + 6.16CD - 38.45A^2 - 5.68B^2 - 14.16C^2 \quad (1)$$

式中: R 为冲击强度。

表6为BBD响应面试验结果方差分析。由表6可知,上述所建立的复合材料冲击强度影响因素的二次回归模型显著($P < 0.01$),失拟项不显著($P > 0.05$),表明复合材料冲击强度影响因素的数据模型是合理的;模型的决定系数 $R^2 = 0.9442 > 0.9$,表明该模型与试验结果的拟合度较好,该模型可用于CGF/PEEK复合材料冲击强度工艺参数的可靠分析与预测。

表6 BBD响应面试验结果方差分析

Tab. 6 Analysis of variance for BBD response surface experiment results

Source	Sum of squares	df	Mean square	F-value	P-value	Statistical significance
Model	8 591.86	9	954.65	26.70	0.000 1	Significant
A	102.42	1	102.42	2.86	0.134 4	
C	778.04	1	778.04	21.76	0.002 3	
D	597.80	1	597.80	16.72	0.004 6	
AC	34.02	1	34.02	0.95	0.361 8	
AD	1 237.91	1	1 237.91	34.63	0.000 6	
CD	116.06	1	116.06	3.25	0.114 6	
A ²	4 711.65	1	4 711.65	131.79	< 0.000 1	
C ²	120.38	1	120.38	3.37	0.109 1	
D ²	638.82	1	638.82	17.87	0.003 9	
Residual	250.26	7	35.75			
Lack of fit	221.26	4	55.31	5.72	0.091 8	Not-significant
Cor total	8 842.12	16				

基于Design-Expert软件所构建的二次回归模型,并结合当前生产设备的技术规格作为约束条件,通过分析与计算,预测出能够实现复合材料最大冲击强度的最优工艺参数组合,具体为:道间距0.55 mm、保温舱温度90℃、打印温度438℃、打印层厚0.57 mm。在此最优参数组合下,模型预测的最大冲击强度值高达265 kJ/m²。

为了验证这一预测结果的准确性,按照复合材料冲击样件的测试标准,利用上述预测的最优工艺参数组合制作冲击样件,并进行相应的冲击强度测试。测试结果显示,实际测得的冲击强度为266 kJ/m²,与模型预测值之间的偏差为0.37%。鉴于实际操作过程中难以避免会存在一定的误差,可以认为这一试验结果与模型预测结果基本保持一致。

3 结论

为深入探究CGF/PEEK复合材料试样冲击强度的最优工艺参数组合,通过一系列科学试验设计,包括单因素试验、PB析因试验以及BBD响应面试验,系统地研究了各工艺参数对复合材料试样冲击强度的影响规律。在此基础上,进一步寻求并验证最优工艺参数组合,得出以下结论。

(1)不同打印工艺参数对CGF/PEEK复合材料冲击强度的影响程度存在显著差异。具体而言,各参数的影响程度从高到低依次为:打印层厚、打印温度、道间距以及保温舱温度。值得注意的是,保温舱温度相较于其他参数,其影响程度相对较小,表现为相对不显著因素。这一发现为后续优化工艺参数提供重要的参考。

(2)各打印工艺参数之间的交互作用对冲击强度的影响程度同样显著,且存在一定的优先级顺序。具体而言,各工艺参数及其之间的交互作用影响程度从高到低依次为:打印层厚、打印温度、道间距与打印层厚的交互作用、道间距、保温舱温度、道间距与打印温度的交互作用、打印温度与打印层厚的交互作用、保温舱温度与打印温度的交互作用,这些发现为深入理解工艺参数间的复杂关系提供了依据。

(3)通过BBD响应面试验及模型预测,得出当道间距为0.55 mm、保温舱温度为90℃、打印温度为438℃、打印层厚0.57 mm时,模型预测的最大冲击强度为265 kJ/m²。通过实际制备样件并进行冲

击强度测试,验证该预测结果的准确性,进一步证明预测模型的可靠性和实用性。

参考文献

- [1] 贾占林. 石英纤维布增强磷酸盐陶瓷基复合材料的组织结构与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
JIA Zhanlin. Microstructure and properties of quartz fiber reinforced phosphate ceramic composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [2] 胡艳志. 环氧树脂基透波复合材料制备与性能研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2014.
HU Yanzhi. Study on preparation and properties of epoxy-matrix wave-transparent composite[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014.
- [3] 王顺顺. 基于3D打印的结构型吸波材料制备及性能研究[D]. 泉州:华侨大学, 2022.
WANG Shunshun. Preparation and properties of structural absorbing materials based on 3D printing[D]. Quanzhou: Huaqiao University, 2022.
- [4] 杨贞, 梁庆宣, 段玉冰, 等. 多层级异质异构吸波超材料功能化设计及熔融沉积3D打印[J]. 机械工程学报, 2024, 60(3):319-327.
YANG Zhen, LIANG Qingxuan, DUAN Yubing, et al. Functionalized design and fused deposition 3D-printing of hierarchical heterogeneous isomeric wave-absorbing metamaterial[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2024, 60(3):319-327.
- [5] 王鹏. 纤维/耐热树脂复合材料FDM增材制造关键技术研究[D]. 济南:山东大学, 2023.
WANG Peng. Study on key technology of FDM additive manufacturing for fiber reinforced heat resistant resin composites[D]. Jinan: Shandong University, 2023.
- [6] GAO R X, XIE J, YANG J H, et al. Research on the fused deposition modeling of polyether ether ketone[J]. Polymers, 2021, 13(14). DOI:10.3390/polym13142344.
- [7] LIAW CY, TOLBERT JW, CHOW LW, et al. Interlayer bonding strength of 3D printed PEEK specimens[J]. Soft Matter, 2021, 17(18):4 775-4 789.
- [8] 於天鹏, 江晓泽. 聚醚醚酮的FDM工艺参数与结晶行为研究[J]. 现代塑料加工应用, 2020, 32(3):23-25.
YU Tianpeng, JIANG Xiaozhe. Study on process parameters and crystallization behavior of polyetheretherketone in FDM printing [J]. Modern Plastics Processing and Applications, 2020, 32(3): 23-25.
- [9] WANG P, ZOU B, DING S L, et al. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(9):236-246.
- [10] 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, 198. DOI:10.1016/j.compositesb.2020.108175.
- [11] LIU X J, SHAN Z D, LIU J H, et al. Mechanical and electrical properties of additive manufactured high-performance continuous glass fiber reinforced PEEK composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 247. DOI: 10.1016/j.compositesb.2022.110292.
- [12] 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.
- [13] 严春晖, 战丽, 任永新, 等. 热处理工艺对增材制造 PEEK/CGF 力学性能影响[J]. 工程塑料应用, 2023, 51(3):52-57.
YAN Chunhui, ZHAN Li, REN Yongxin, et al. Effect of heat treatment process on mechanical properties of PEEK/CGF by additive manufacturing[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(3): 52-57.
- [14] 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 Wan, et al. Optimization of integrated mechanical properties of PEEK/CGF composites based on FDM [J]. Engineering Plastics Application, 2024, 52(2):75-81.
- [15] 俞建. 混杂复合材料低速冲击性能研究综述[J]. 中国水运, 2024, 24(18):70-72.
YU Jian. Review on low-speed impact properties of hybrid composites[J]. China Water Transport, 2024, 24(18):70-72.
- [16] 杨方鸿, 付韞辰, 钟佳明, 等. 3D打印仿生多重管状吸能结构碳纤维复合材料及其力学性能[J/OL]. 复合材料学报:2025:1-14 [2025-01-13]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250108.003>.
YANG Fanghong, FU Yunchen, ZHONG Jiaming, et al. Structure and mechanical properties of 3D printed biomimetic multi-tubular carbon fiber composites. [J/OL]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025: 1-14[2025-01-13]. <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20250108.003>.
- [17] DING S L, ZOU B, ZHUANG Y X, 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.
- [18] 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.
HOU Zhanghao, TIAN Xiaoyong, ZHU Weijun, et al. 3D printing and performance of continuous fiber reinforced variable stiffness composite structures[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(5):170-177.
- [19] 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.
TIAN Xiaoyong, ZHANG Yayuan, LIU Tengfei, et al. Prepreg preparation and 3D printing of continuous carbon fiber reinforced nylon composite[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(15):24-33.