

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.04.013

3D打印参数对SCF/PEEK复合材料翘曲变形与微观结构的影响

苏海亮¹, 周梦凡¹, 韦振校¹, 黄伟龙¹, 贺裕雁²

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西柳州 545006; 2. 广西科技大学经济与管理学院, 广西柳州 545006)

摘要: 短碳纤维增强聚醚醚酮(SCF/PEEK)复合材料因兼具高比强度、耐高温性能,在轻量化结构制造领域具有广泛应用前景。本文聚焦于增材制造过程中翘曲变形与微观结构演变的内在联系,建立了一种基于有限元的工艺仿真框架,并采用逐层单元激活策略对SCF/PEEK复合材料的打印过程进行了数值模拟。通过将数值模拟结果与实验测量及扫描电子显微镜表征相结合,系统对比了不同工艺参数下打印制件的宏观变形行为与微观结构特征。结果表明,喷嘴温度、打印平台温度、打印速度及层厚对翘曲变形均具有显著影响,其中喷嘴温度为400℃、打印平台温度为220℃、打印速度为20 mm/s、层厚为0.2 mm时,构件翘曲变形程度最低。微观结构表征结果显示,该参数组合下材料内部纤维分布较为均匀,纤维与基体界面结合紧密,改善了层间黏结性能,有利于降低成形过程中由热梯度和残余应力引起的翘曲变形。上述结果表明,工艺参数通过调控热历史及微观结构特征,对SCF/PEEK复合材料增材制造构件的翘曲行为具有决定性影响。

关键词: 增材制造; 打印参数; 短碳纤维增强聚醚醚酮; 翘曲变形; 微观结构

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)04-0116-09

Influences of 3D printing parameters on warpage deformation and microstructure of SCF/PEEK composites

SU Hailiang¹, ZHOU Mengfan¹, WEI Zhenxiao¹, HUANG Weilong¹, HE Yuyan²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China;

2. School of Economics and Management, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China)

Abstract : Short carbon fiber-reinforced polyetheretherketone (SCF/PEEK) composites have broad application prospects in lightweight structural manufacturing due to their high specific strength and excellent high-temperature resistance. Focusing on the intrinsic relationship between warpage deformation and microstructural evolution during additive manufacturing, a printing process simulation framework based on the finite element method was established to numerically model the printing process of SCF/PEEK composites using a layer-by-layer element activation strategy. By combining numerical simulation results with experimental measurements and scanning electron microscope characterization, the macroscopic deformation behavior and microstructural features of printed components under different process parameters were systematically compared. The results indicate that nozzle temperature, build platform temperature, printing speed and layer thickness have significant effects on warpage deformation. Among the investigated conditions, the minimum warpage is achieved at a nozzle temperature of 400 °C, a platform temperature of 220 °C, a printing speed of 20 mm/s, and a layer thickness of 0.2 mm. Microstructural observations further reveal that this parameter combination leads to a more uniform fiber distribution in material, enhanced fiber-matrix interfacial bonding and improved interlayer adhesion, which effectively mitigate warpage induced by thermal gradients and residual stresses during the printing process. These results demonstrate that process parameters play a decisive role in controlling the warpage behavior of additively manufactured SCF/PEEK components by regulating the thermal history and microstructural characteristics.

Keywords : additive manufacturing ; printing parameters ; short carbon fiber reinforced polyetheretherketone ; warping deformation ; microstructural

基金项目: 广西科技重大专项(桂科AA24206045), 广西科技大学博士基金资助项目(20Z40)

通信作者: 苏海亮, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为复合材料结构与可靠性分析

收稿日期: 2026-01-28

引用格式: 苏海亮, 周梦凡, 韦振校, 等. 3D打印参数对SCF/PEEK复合材料翘曲变形与微观结构的影响[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(4): 116-124.

SU Hailiang, ZHOU Mengfan, WEI Zhenxiao, et al. Influences of 3D printing parameters on warpage deformation and microstructure of SCF/PEEK composites[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(4): 116-124.

增材制造(AM),通常被称为3D打印技术^[1],采用材料逐层沉积的方式实现复杂结构的制造^[2-3],在材料利用率和结构设计自由度方面具有显著优势^[4],已广泛应用于航空航天、汽车、医疗以及建筑等领域^[5-8]。在众多增材制造技术中,熔融丝材制造(FFF)因其对热塑性材料良好的适配性而被广泛应用于复合材料成形^[9-10]。

聚醚醚酮(PEEK)因其优异的力学性能、耐高温性能及耐化学腐蚀性能,被认为是高性能复合材料增材制造中极具潜力的基体材料^[11-12]。将短碳纤维(SCF)引入热塑性树脂中,不仅能够显著增强复合材料的力学性能,还可通过纤维取向及界面相互作用改善其宏观服役行为。然而,PEEK本身较高的熔体黏度和熔融温度,以及其与增强纤维之间有限的界面相容性,使得SCF/PEEK复合丝材的制备及其在FFF过程中的稳定成形面临较大挑战^[13]。

在FFF成形中,构件质量受工艺参数、材料特性与结构设计的共同影响。已有研究探讨了工艺参数对性能的影响,但仍存在明显局限。Wang等^[4]研究了喷嘴温度、平台温度、打印速度和层厚对纤维含量为5%的SCF/PEEK复合材料拉伸、弯曲和冲击性能的影响,但其研究重点主要集中在力学性能提升方面,对翘曲变形抑制的定量分析相对有限。Hasanzadeh等^[14]虽指出喷嘴温度的主导作用,但其研究对象并非半结晶性的PEEK,未能考虑结晶行为对翘曲的影响。Burnett等^[15]研究了填充路径和填充密度对力学性能的影响,为轻量化设计提供了指导,但并未涉及PEEK成形过程中普遍存在的高热应力问题。Liu等^[16]通过仿真预测翘曲,但缺乏多参数耦合影响的系统性分析。

在微观结构层面,Fu等^[17]分析了纤维取向、孔隙与长度的关系,但未与翘曲控制进行多目标结合;Han等^[18]通过数值模拟发现,在纯PEEK材料中,提高打印速度和挤出丝宽度有助于改善温度均匀性,而较高的喷嘴温度会加剧翘曲变形,但该模型并未考虑纤维增强效应。Samy等^[19]和Alzyod等^[20]指出参数可降低残余应力,但其结论受材料体系限制,难以适用于CF/PEEK中热-结晶-应力的耦合机制;Li等^[21]通过后处理调控冷却速率以抑制翘曲,但该方法不直接适用于打印过程优化。

本文提出了一种数值仿真与实验相结合的研究方法,对SCF/PEEK复合材料FFF打印过程中的

工艺参数进行系统优化。首先,通过热-力耦合有限元仿真对喷嘴温度、平台温度、打印速度、打印层厚等因素对样件翘曲变形的敏感性进行分析;随后,基于响应面法开展实验设计与多目标优化,获得最小化翘曲变形的最优工艺参数组合;最后,通过场发射扫描电子显微镜(FESEM)对优化样品的界面形貌和孔隙特征进行表征。本研究为抑制SCF/PEEK构件翘曲变形、提升FFF成形可靠性提供了系统的工艺框架。

1 翘曲变形实验

1.1 主要原材料

SCF/PEEK线材:黑色,直径1.75 mm,SCF质量分数为15%左右,南京特塑有限公司。

1.2 主要仪器和设备

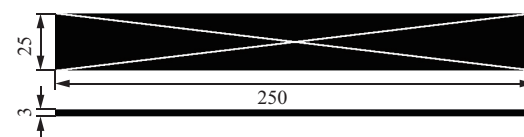
3D打印机:FUNMAT PRO 410,南京特塑有限公司;

千分尺:ES-1,精度为0.001 mm,量程为0~100 mm,德国Nscing Es公司;

FESEM:ZEISS Sigma 300,精度 $\leq \pm 0.015$ mm,德国Carl Zeiss AG公司。

1.3 响应面实验设计及试样制备

试验所采用的试件制备按照ASTM D3039-2017制备。利用三维软件Solid Works绘制250 mm×25 mm×3 mm的长方体试样模型,尺寸如图1a所示。将模型保存为STL文档后,导入3D打印机中,逐层打印,得到试样,如图1b所示。



(a) Dimensional drawing of 3D-printed sample



(b) Photograph of 3D-printed sample

图1 3D打印样件尺寸和实物图

Fig. 1 Dimensions and physical images of 3D printed samples

为了系统地研究工艺参数对打印构件翘曲变形的影响,本文采用Box-Behnken Design的响应面法进行实验设计。选取喷嘴温度(A)、平台温度(B)、打印速度(C)、打印层厚(D)作为自变量,具体的因素与水平编码见表1。

1.4 尺寸测量与评价

采用图1所示试样的尺寸误差来评价其尺寸精

表1 Box-Behnken Design 因素与水平设置

Tab. 1 Box-Behnken Design factors and level settings

Level	Factor			
	A/°C	B/°C	C/(mm·s ⁻¹)	D/mm
1	400	180	15	0.2
2	420	200	20	0.25
3	440	220	25	0.3

度,误差越小代表尺寸精度越高。采用千分尺对厚度的五个点进行测量,每个地方均测量三次,求其平均值后计算该平均值与对应方向理论值之差的绝对值,得构件的翘曲变形量,见式(1)。

$$\eta_{\text{wde}} = \sum_{i=0}^4 \frac{|H - H_i|}{5} \quad (1)$$

式中: H 为模型的理论高度; η_{wde} 为整体翘曲变形量; H 、 H_1 、 H_2 、 H_3 和 H_4 分别为试样中心及四个角部位置的实测高度值。

1.5 打印过程仿真

CF/PEEK 复合材料3D打印过程的数值模拟采用 ANSYS Mechanical APDL 参数化语言,并结合单元生死技术进行实现。通过 APDL 脚本进行二次开发,编制了能够循环施加热载荷并实现单元激活与失效控制的命令流,从而实现 SCF/PEEK 打印过程的热-力耦合有限元模拟。

本文选用尺寸为 20 mm×4 mm×1.5 mm 的矩形试样模型,对 SCF/PEEK 打印过程进行热-力耦合仿真。为尽可能真实地模拟实际打印条件,在有限元模型中显式引入尺寸为 30 mm×8 mm×0.1 mm 的打印平台。为兼顾计算精度与计算效率,本文在仿真中对模型几何尺寸进行了适当缩小。直接对实际尺寸构件进行模拟会导致单元数量急剧增加,计算成本难以承受。

在仿真过程中,采用 ANSYS 的单元生死技术模拟增材制造过程中材料逐层沉积的动态特征。图2给出了数值打印流程的示意图。本文在整个研究中采用交错式栅格沉积路径,该打印路径形式具有良好的代表性和可控性。

1.6 热模型与力学本构关系

1.6.1 热分析

在3D打印过程中,温度场的演化采用瞬态热分析方法进行描述,其控制方程见式(2)。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k_1 \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(k_2 \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(k_3 \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \rho Q = 0 \quad (2)$$

式中: ρ 为材料密度; C_p 为比热容; k_1 、 k_2 、 k_3 表示

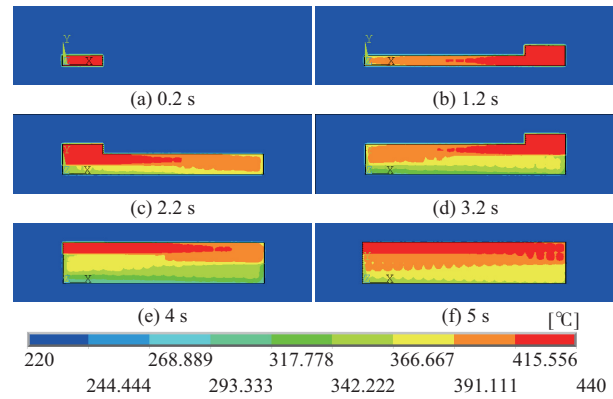


图2 3D打印过程形貌图

Fig. 2 Morphology of 3D printing process

材料分别沿 x 、 y 、 z 方向的导热系数; $\frac{\partial T}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial y}$ 、 $\frac{\partial T}{\partial z}$ 分别为温度沿 x 、 y 、 z 方向的温度梯度; Q 为打印构件内部的热源项; T 为温度。

打印过程中,当单元被激活后,其节点温度不再受到约束。打印构件温度变化主要来源于构件与周围环境之间的热交换,边界换热条件见式(3)。

$$k_1 \frac{\partial T}{\partial x} n_x + k_2 \frac{\partial T}{\partial y} n_y + k_3 \frac{\partial T}{\partial z} n_z = h(T_w - T) \quad (3)$$

式中: h 为对流换热系数; T 为构件瞬态温度; T_w 为打印过程中的环境温度; n_x 、 n_y 、 n_z 分别为打印构件在三个坐标方向上的边界方向余弦, $n_x = \cos(n, x)$ 、 $n_y = \cos(n, y)$ 、 $n_z = \cos(n, z)$ 。

1.6.2 变形分析

在本研究中不考虑结晶和黏弹性理论。根据弹性动力学理论,打印中的总应变增量 $d\{\varepsilon\}$ 是弹性应变增量 $d\{\varepsilon_e\}$ 和热应变增量 $d\{\varepsilon_T\}$ 之和,见式(4)。

$$d\{\varepsilon\} = d\{\varepsilon_e\} + d\{\varepsilon_T\} \quad (4)$$

根据广义胡可定律,弹性应力和弹性应变之间的关系见式(5)。

$$d\{\sigma\} = [D]d\{\varepsilon_e\} \quad (5)$$

式中: $d\{\sigma\}$ 为总应力增量; $[D]$ 为材料的刚度矩阵。

当材料因温度变化而发生热膨胀时,热应变增量的计算公式见式(6)。

$$d\{\varepsilon_T\} = \{\alpha\}dT \quad (6)$$

式中: $\{\alpha\}$ 为热膨胀系数; dT 为温度变化。因此,总应力增量 $d\{\sigma\}$ 的计算公式见式(7)。

$$d\{\sigma\} = [D]d\{\varepsilon\} - [D]\{\varepsilon\}dT \quad (7)$$

这些方程为模拟打印部件中的温度引起的变形提供了基础。

2 结果与讨论

2.1 有限元仿真分析

本仿真采用表2中材料的热物性参数,旨在阐明各工艺参数对打印构件内部温度分布与应力演

化的影响规律。仿真中环境温度统一设定为25℃。通过对不同参数组合下仿真结果的对比分析,可清晰揭示打印参数对SCF/PEEK构件热-力学行为的作用机制,从而为后续工艺优化提供理论依据。

表2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

Material category	Specific heat capacity/[J·(kg·K) ⁻¹]	Density/(kg·m ⁻³)	Thermal conductivity coefficient/[W·(m·K) ⁻¹]	Tensile modulus/MPa	Poisson's ratio	Coefficient of thermal expansion/K ⁻¹
SCF	712	1 760	10.5	230 000	0.33	7.1×10 ⁻⁶
PEEK	2 200	1 300	0.29	3 500	0.4	5.5×10 ⁻⁵
Printing platform	500	980	0.55	—	—	—

仿真重点模拟在不同喷嘴温度、平台温度、打印速度和层厚条件下的3D打印过程。模型几何尺寸设定为20 mm×4 mm×1.5 mm。为考察层厚对应力场分布的影响,在不同层厚条件下均保持相同打印层数。网格尺寸设置为1 mm×1 mm×D mm,并选取模型中的特征节点2作为后续分析的代表性位置。

2.1.1 不同喷嘴温度的影响

在该组仿真中,平台温度、打印速度以及打印层厚分别固定为200℃、20 mm/s和0.25 mm,重点分析喷嘴温度变化对SCF/PEEK构件在打印过程中的热应力和变形行为的影响。

如图3a和图3c所示,当喷嘴温度分别为400℃和440℃时,打印完成后的最大等效应力分别为167 MPa和192 MPa。较高的喷嘴温度使模型底部区域的应力分布更加均匀。这主要是由于较高喷嘴温度有助于形成更加均匀的温度场,并降低打印过程中的温度梯度,从而使构件在冷却过程中以较缓慢且一致的方式收缩,进而减小局部应力集中。从图3b和图3d可以看出,随着喷嘴温度的升高,构件的翘曲变形程度反而增大。进一步由图3e可知,高喷嘴温度条件下等效应力的波动范围明显扩大。在成形过程中,不同喷嘴温度条件下的最小应力峰值差异较小,但最大应力峰值存在显著差别。过大的应力波动幅值可能诱发层间剥离或微裂纹等缺陷,从而降低打印构件的整体质量。

2.1.2 不同打印平台温度的影响

在该组仿真中,喷嘴温度、打印速度以及打印层厚分别固定为420℃、20 mm/s和0.2 mm,平台温度分别设定为180℃和220℃,以分析其对PEEK构件打印过程中温度场和应力场的影响。

由图4a和图4c可知,当平台温度分别设定为180℃和220℃时对应构件的最大等效应力分别

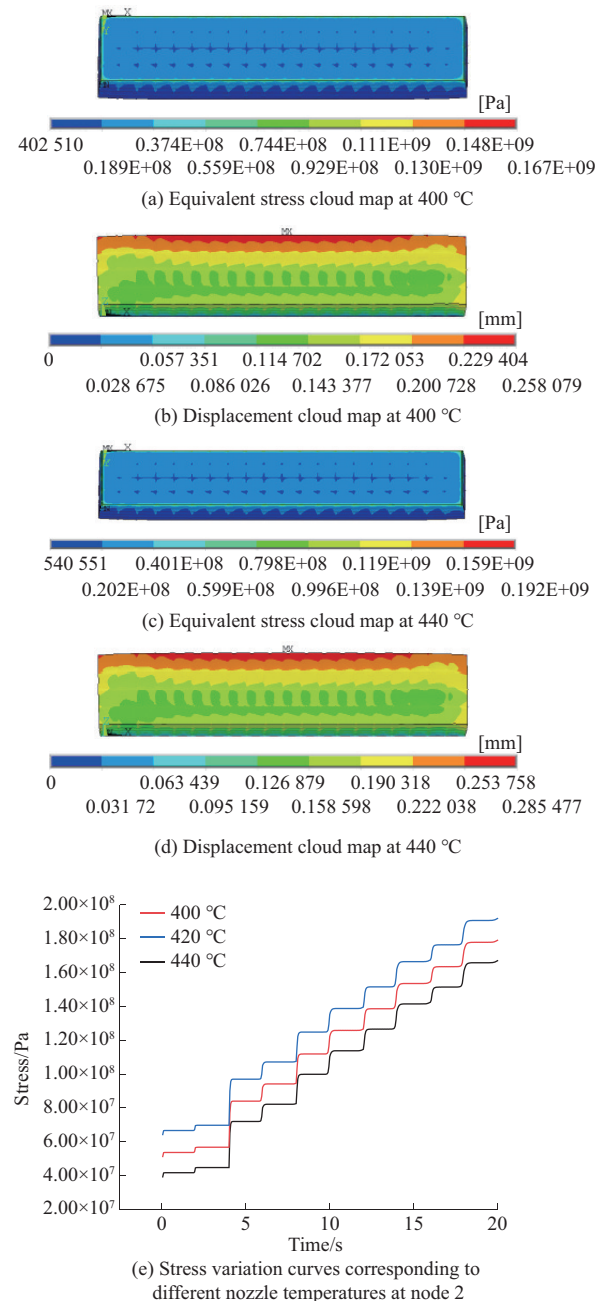


图3 不同喷嘴温度的影响

Fig. 3 Effect of different nozzle temperatures

为181 MPa和178 MPa。图4b和图4d表明,随着平台温度的升高,构件的翘曲变形程度略有增加,但整体变化幅度较小。不同平台温度条件下的应力与变形分布较为接近,说明材料对平台温度变化的响应较为稳定。由此可以推断,相较于平台温度的绝对值,其温度梯度对打印过程的影响更为有限。因此,在本研究参数范围内,平台温度对热场分布的影响相对较弱。该结论也得到了图4e中特征节点2处应力变化曲线高度重合的验证。

2.1.3 不同打印速度的影响

在该组仿真中,喷嘴温度、平台温度和打印层

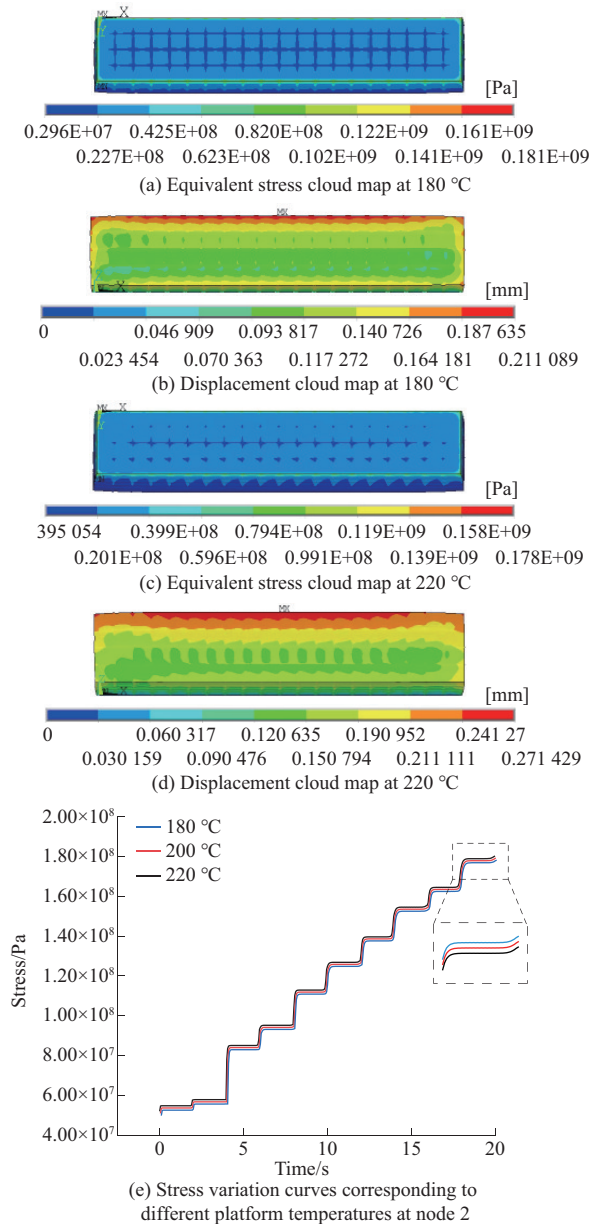


图4 不同打印平台温度的影响

Fig. 4 Effect of different printing platforms temperature

厚分别设定为420 °C、180 °C和0.25 mm,打印速度分别选取15 mm/s和25 mm/s,以研究其对打印过程温度场和应力场的影响。

如图5a和图5c所示,在空气冷却条件下,模型顶部中部区域出现明显的应力集中现象。这是由于模型顶部边缘区域约束较小,而顶部中心区域受到周围材料的牵制,无法自由收缩,从而在冷却过程中形成应力集中。若打印速度过高且在相同环境温度下快速冷却,将导致顶部中部区域形成高应力集中区,进而影响构件成形质量。

从图5b和图5d可见,不同打印速度对翘曲变

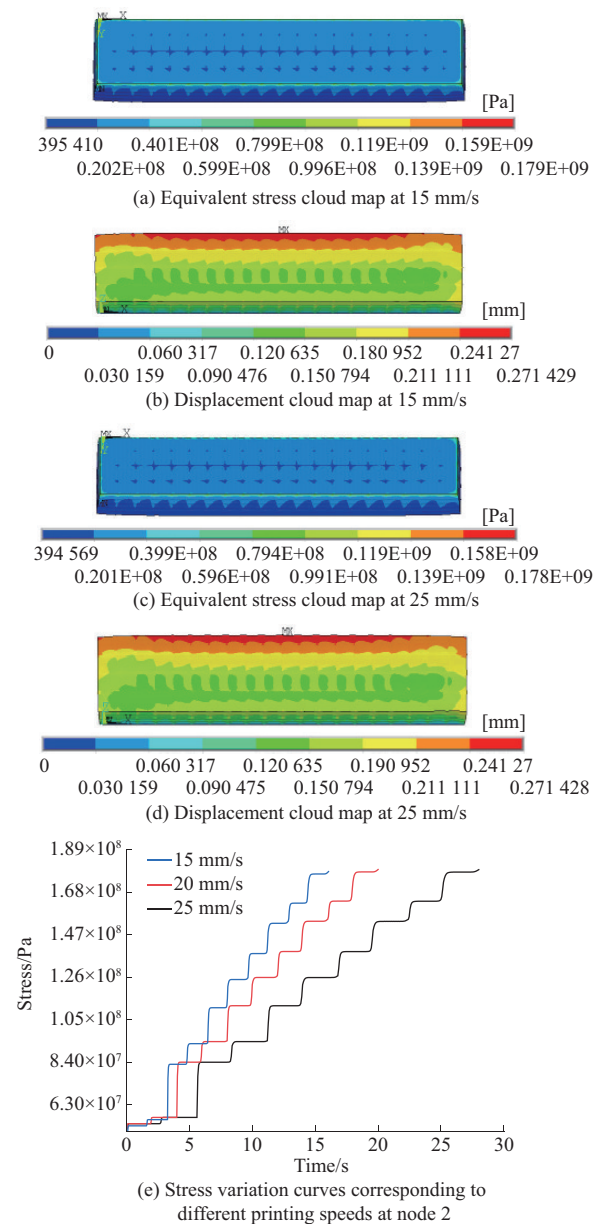


图5 不同打印速度的影响

Fig. 5 Effect of different printing speeds

形的影响差异相对较小。进一步由图5e可知,较高的打印速度有助于使模型底部应力分布更加均匀,并降低最大等效应力值及其波动幅度。这是因为提高打印速度可缩短构件的整体冷却时间,从而使打印过程中形成的温度场更加均匀,减小温度梯度,促使不同区域在成形过程中的热膨胀与收缩更加一致。但需要注意的是,在打印完成后若立即在环境空气中冷却,高打印速度会使构件初始温度较高,从而导致构件内外冷却不均,加剧局部热应力的形成,反而不利于翘曲抑制。

2.1.4 不同层厚的影响

在该组仿真中,喷嘴温度、平台温度以及打印速度分别固定为400℃、200℃和20 mm/s,通过调整有限元模型中生死单元的尺寸,分别模拟了打印层厚为0.2 mm和0.3 mm的打印过程,以分析层厚对SCF/PEEK构件温度场和应力场的影响。

如图6a和图6c所示,较大的层厚会在成形过程中产生更高的最大等效应力。层厚分别为0.2 mm和0.3 mm时,对应的最大等效应力分别为118 MPa和167 MPa。图6b和图6d表明,随着层厚的增加,构件的翘曲变形程度明显增大。进一步由图6e可知,在保持打印层数相同的条件下,打印时间基本一致,但层厚对翘曲变形的影响十分显著。

综上所述,本节通过热-力耦合有限元仿真系统分析了SCF/PEEK构件3D打印过程中各关键工艺参数对成形行为的影响。结果表明,平台温度对构件应力场的影响相对较小,而喷嘴温度、打印速度以及层厚对成形过程的影响更为显著。适当提高打印速度和层厚有助于改善打印过程中温度场和应力场的均匀性,但过高的打印速度或过大的层厚可能在模型顶部区域引发较大的应力集中,从而降低构件成形质量。为有效降低打印完成后的翘曲变形,建议在打印结束后将构件在平台温度下保持一定时间,并采用缓慢冷却方式,以减小温度梯度和残余应力的积累。

2.2 实验分析

2.2.1 响应面法实验设计

Box-Behnken实验设计为4因素3水平,详情可见表1,共计产生27组实验方案,具体安排见表3。方案中包含3组中心点的重复实验,其目的在于更精确地评估实验过程的随机误差,确保所建立的响应曲面模型的可靠性。方差分析是一种稳健高效

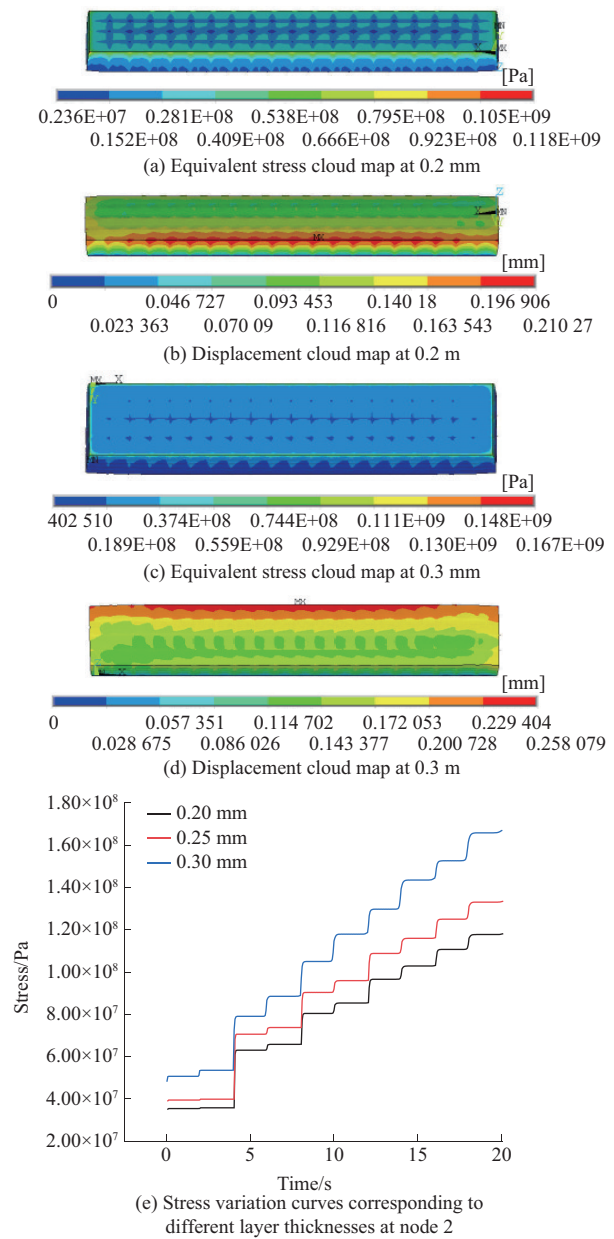


图6 不同层厚的影响

Fig. 6 Effect of different layer thicknesses

的统计技术,用于评估三个或更多总体均值之间是否存在显著差异,见表4。响应面模型的拟合精度通过样品测定系数 R^2 和样品校正系数 R_{adj}^2 来评估。 R^2 和 R_{adj}^2 的值越接近1,构造模型的拟合越好。结果显示值 R^2 为0.9910, R_{adj}^2 为0.9805, F 统计量为94.45。模型中的响应值 y 代表3D打印构件的翘曲变形量(η_{wde})。为了简化模型只取 p 值小于0.1,得到二次多项式回归方程见式(8)。

$$y = 7.2496 - 0.02443A - 0.011B - 12.1868D + 0.02278BD + 0.000045B^2 + 10.62D^2 \quad (8)$$

本研究以翘曲变形量为最小化标准。各因素

表3 响应面实验设计与结果

Tab. 3 Response surface experimental design and results

Run	A/°C	B/°C	C/(mm·s ⁻¹)	D/mm	η _{avg} /mm
1	400	180	20	0.25	0.309 0
2	440	180	20	0.25	0.451 2
3	400	220	20	0.25	0.284 2
4	440	220	20	0.25	0.376 3
5	420	200	15	0.2	0.203 5
6	420	200	25	0.2	0.182 3
7	420	200	15	0.3	0.498 0
8	420	200	25	0.3	0.515 4
9	400	200	20	0.2	0.124 0
10	440	200	20	0.2	0.248 2
11	400	200	20	0.3	0.446 6
12	440	200	20	0.3	0.618 2
13	420	180	15	0.25	0.363 2
14	420	220	15	0.25	0.335 2
15	420	180	25	0.25	0.347 2
16	420	220	25	0.25	0.302 1
17	400	200	15	0.25	0.297 0
18	440	200	15	0.25	0.403 0
19	400	200	25	0.25	0.282 4
20	440	200	25	0.25	0.395 4
21	420	180	20	0.2	0.247 3
22	420	220	20	0.2	0.132 4
23	420	180	20	0.3	0.569 8
24	420	220	20	0.3	0.546 0
25	420	200	20	0.25	0.315 2
26	420	200	20	0.25	0.321 8
27	420	200	20	0.25	0.333 0

的最佳水平确定如下:喷嘴温度 400 °C;建造平台温度 220 °C;打印速度 20 mm/s;层厚 0.20 mm。随后根据方程(9)计算了预测误差 ε。

表4 翘曲实验的方差分析表

Tab. 4 Variance analysis table of warping experiment

Source	Sum of squares	Free degree	Mean square	F-value	p-value	Significance evaluation
Model	0.416 6	14	0.029 8	94.45	< 0.000 1	Significant
A-A	0.046 8	1	0.046 8	148.44	< 0.000 1	
B-B	0.008 1	1	0.008 1	25.67	0.000 3	
C-C	0.000 5	1	0.000 5	1.49	0.245 4	
D-D	0.352 4	1	0.352 4	1 118.52	< 0.000 1	
AB	0.000 6	1	0.000 6	1.99	0.183 5	
AC	0.000 0	1	0.000 0	0.038 9	0.847 0	
AD	0.000 6	1	0.000 6	1.78	0.206 6	
BC	0.000 1	1	0.000 1	0.232 1	0.638 7	
BD	0.002 1	1	0.002 1	6.59	0.024 7	
CD	0.000 4	1	0.000 4	1.18	0.298 2	
A ²	0.001 1	1	0.001 1	3.57	0.083 2	
B ²	0.001 7	1	0.001 7	5.53	0.036 6	
C ²	2.430E-06	1	2.430E-06	0.007 7	0.931 5	
D ²	0.003 8	1	0.003 8	11.93	0.004 8	
Residual	0.003 8	12	0.000 3			Not significant R ² = 0.991 0 R ² _{adj} = 0.980 5
Lack of fit	0.003 6	10	0.000 4	4.47	0.196 6	
Pure error	0.000 2	2	0.000 1			
Cor total	0.420 4	26				

$$\varepsilon = \frac{|\eta_a - \eta_p|}{\eta_a} \times 100\% \quad (9)$$

式中:η_a表示实验测量的变形误差;η_p表示预测值;ε表示误差值。打印最优模型的整体变形误差为 0.124 0 mm,而预期值为 0.121 2 mm。计算出的预测误差为 2.25%,表明实际结果与预测结果高度一致。

2.2.2 优化结果分析

通过对最优参数条件下打印的试样进行观察,可以发现其翘曲程度相较于其他参数组合有所降低。然而,仅凭肉眼难以对不同试样之间的变形差异进行精确区分。因此,本文进一步从微观结构层面对最优参数条件下打印的试样以及表3整体变形误差最大的试样 12 分别进行了拉伸试验,打印试样的拉伸强度见表 5。通过拉伸测试获得适用于 SEM 观察的断口形貌,从而深入分析不同工艺参数对材料成形质量的影响机理。

2.3 扫描电子显微镜分析

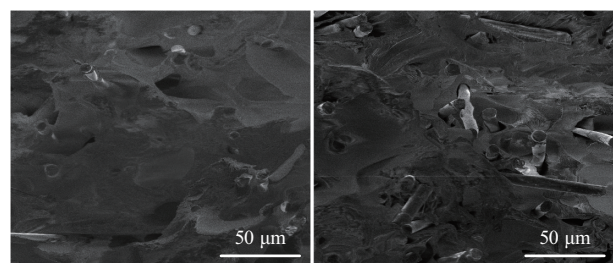
为表征 SCF/PEEK 复合材料的微观结构特征,采用 FESEM 对试样表面进行观察,SEM 分析在样品抛光前后均进行,以全面揭示其微观结构特征。对试样喷金处理并在高真空环境下进行测试。

从表 3 中选取具有代表性的翘曲试样 12 与最优试样进行 SEM 对比分析。如图 7a 所示,SCF 在打印路径方向上呈现出一定程度的取向排列。这种

表5 试样的拉伸性能

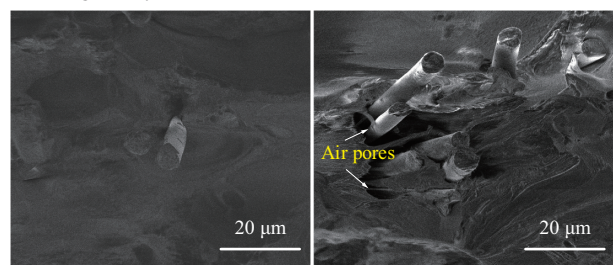
Tab. 5 Tensile properties of specimen

Sample	A/°C	B/°C	C/(mm·s ⁻¹)	D/mm	Tensile strength/MPa
Best	400	220	20	0.2	87.47
12	440	200	20	0.3	82.83



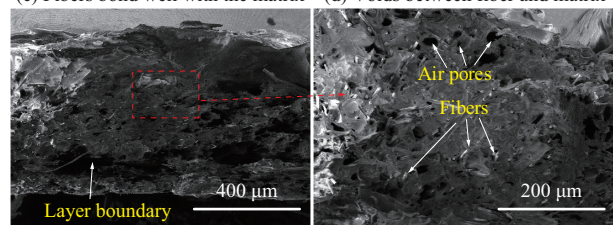
(a) Fiber orientation is generally consistent

(b) Disordered fiber orientation



(c) Fibers bond well with the matrix

(d) Voids between fiber and matrix



(e) Interlayer bonding

(f) Internal defects

图7 SCF/PEEK材料试验件断裂面SEM照片

Fig. 7 SEM images of fracture surface of SCF/PEEK specimen

各向异性的纤维分布导致材料热物理性能呈现方向依赖性。冷却过程中基体在不同方向的收缩差异,诱发残余应力并引起翘曲变形。在纤维取向杂乱或发生团聚的区域,如图7b所示,局部热应力显著集中,进一步加剧了构件的变形趋势。

界面结合状态对约束基体收缩至关重要。如图7c所示,最优工艺下试样界面结合紧密,纤维表面润湿良好,能有效传递应力、抑制收缩。如图7d所示,而翘曲严重试样中可见明显纤维拔出痕迹与光滑纤维表面,表明界面结合较弱,削弱了对收缩的约束。如图7e所示,从翘曲区域截面可观察到层间未熔合间隙与孔洞,多由打印温度或速度不当所致。此类缺陷会形成应力集中点,促进层间剥离。如图7f所示,内部孔隙也会降低材料刚度,使其在

残余应力下更易变形。

综上,纤维取向引起的收缩各向异性是翘曲的根本原因之一。良好的界面结合与致密层间结构能有效抑制变形,而界面弱化与结构缺陷则会放大翘曲。此外,打印中形成的结晶梯度会引入附加收缩应力,与热应力、界面效应共同决定最终变形行为。因此,需系统优化打印与冷却工艺,以实现纤维分布均匀、界面结合牢固、层间熔合充分,从而控制翘曲。

3 结论

(1)围绕SCF/PEEK复合材料在FFF成形过程中的翘曲变形问题,结合数值模拟、响应面实验及微观表征方法,系统分析了工艺参数对构件变形行为的影响机制。

(2)建立了基于单元生死技术的热-力耦合有限元模型,实现了对SCF/PEEK打印过程中温度场与残余应力演化的动态模拟。结果表明,喷嘴温度、打印速度及层厚对温度梯度和应力分布影响显著,其中层厚增大会明显提高应力水平并加剧翘曲变形。

(3)基于Box-Behnken Design的响应面法实验结果表明,层厚与喷嘴温度对翘曲变形的影响最为显著。优化得到抑制翘曲的最优工艺参数组合为:喷嘴温度400 °C、平台温度220 °C、打印速度20 mm/s、层厚0.2 mm。

(4)SEM分析表明,短碳纤维沿打印方向取向分布引起材料收缩各向异性,是残余应力与翘曲形成的重要机制。良好的纤维-基体界面结合与致密层间结构可有效抑制收缩变形,而界面弱化、孔隙及层间未熔合等缺陷则会加剧应力集中与宏观变形。

(5)通过构建“仿真-实验-微观表征”的多尺度耦合分析框架,揭示了工艺参数通过调控热历史与微观结构协同影响SCF/PEEK复合材料翘曲变形的内在机制。

参考文献

- [1] 刘梦梦,朱晓冬. 3D打印成型工艺及材料应用研究进展[J]. 机械研究与应用,2021,34(4):197-202.
LIU Mengmeng, ZHU Xiaodong. Recent research progress on 3D printing molding technology and materials[J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(4):197-202.
- [2] 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.
- [3] 白鹤,赵明侠,王核心,等. FDM 3D打印翘曲变形成因分析及解决对策[J]. 塑料工业, 2019, 47(1):60–63, 68.
BAI He, ZHAO Mingxia, WANG Hexin, et al. Analysis and countermeasures of warpage deformation in FDM 3D printing process[J]. China Plastics Industry, 2019, 47(1):60–63, 68.
- [4] 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.
- [5] LI Y G, SHI Y X, LU Y C, et al. Additive manufacturing of vascular stents[J]. Acta Biomaterialia, 2023, 167:16–37.
- [6] 董传贺,孙晓宇,李旺鑫,等. 3D打印连续碳纤维复合材料冷却模型及变形研究[J]. 复合材料科学与工程, 2025(3):79–86.
DONG Chuanhe, SUN Xiaoyu, LI Wangxin, et al. Cooling model and deformation study of 3D printing continuous carbon fiber composites[J]. Composites Science and Engineering, 2025(3): 79–86.
- [7] HEGAB H, KHANNA N, MONIB N, et al. Design for sustainable additive manufacturing: A review[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, 35. DOI:10.1016/j.susmat.2023.e00576.
- [8] 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.
- [9] NGO T D, KASHANI A, IMBALZANO G, et al. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges[J]. Composites Part B:Engineering, 2018, 143: 172–196.
- [10] 闫存富,乔雪涛,郭晓红,等. 基于熔融沉积成型3D打印翘曲变形的工艺参数优化[J]. 工程塑料应用, 2021, 49(12):77–80.
YAN Cunfu, QIAO Xuetao, GUO Xiaohong, et al. Optimization of process parameters for 3D printing warpage deformation based on FDM[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12):77–80.
- [11] 苏蕴华. 碳纤维增强聚醚醚酮复合材料的研究及应用[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(9):7–10, 17.
SU Yunhua. Research and application of CF/PEEK composites[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2024, 60(9): 7–10, 17.
- [12] 李博澜,张凤,焦梦晓,等. PEEK/CF复合材料中PEEK结晶行为研究进展[J]. 合成树脂及塑料, 2024, 41(1):68–74.
LI Bolan, ZHANG Feng, JIAO Mengxiao, et al. Research progress of crystallization behavior of PEEK in PEEK/CF composites[J]. China Synthetic Resin and Plastics, 2024, 41(1):68–74.
- [13] AIMON A H, SINGH S, PEDERSEN D B, et al. Integration of soft tooling by additive manufacturing in polymer profile extrusion process chain[J]. Materials & Design, 2024, 243. DOI: 10.1016/j.matdes.2024.113065.
- [14] HASANZADEH R. Optimization of energy absorption of additively manufactured polyamide/microcarbon fiber polymeric composites in 3D printing using Taguchi method[J]. Polymer Engineering & Science, 2025, 65(7):3 639–3 649.
- [15] BURNETT C, GRANINGER G, EREN Z, et al. Tensile performance of carbon fibre-reinforced 3D-printed polymers: Effect of printing parameters[J]. Engineering Failure Analysis, 2025, 175. DOI:10.1016/j.engfailanal.2025.109577.
- [16] LIU B S, DONG B X, LI H M, et al. 3D printing finite element analysis of continuous fiber reinforced composite materials considering printing pressure[J]. Composites Part B:Engineering, 2024, 277. DOI:10.1016/j.compositesb.2024.111397.
- [17] FU Y T, LI J, GUO F L, et al. Systematical mechanical analyses of 3D printed short carbon fiber reinforced polyetheretherketone composites[J]. Composites Part A:Applied Science and Manufacturing, 2024, 185. DOI:10.1016/j.compositesa.2024.108328.
- [18] HAN J, TONG J, TIAN X Q, et al. Thermal simulation and warping deformation experimental study of PEEK in material extrusion[J]. Macromolecular Theory and Simulations, 2021, 30(2). DOI:10.1002/mats.202000055.
- [19] SAMY A A, GOLBANG A, HARKIN-JONES E, et al. Finite element analysis of residual stress and warpage in a 3D printed semi-crystalline polymer: Effect of ambient temperature and nozzle speed[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 389–399.
- [20] ALZYOD H, FICZERE P. Material-dependent effect of common printing parameters on residual stress and warpage deformation in 3D printing: A comprehensive finite element analysis study[J]. Polymers, 2023, 15(13). DOI:10.3390/polym15132893.
- [21] LI Y, YANG A S, LIU Y T, et al. Analysis of warping defect formation mechanisms in hot molding of CF/PEEK thin-wall structures and their influence on mechanical properties[J]. Thin-Walled Structures, 2025, 207. DOI:10.1016/j.tws.2024.112740.