

增材制造CFRP-II型层间断裂韧性的缺层置换测试法及其参数化分析

赵煜 熊家豪 药天运 贾梦怡 胡海洋 杨冰晨

Missing layer replacement method and parameterized analysis of mode II inter-layer fracture toughness of additive manufacturing CFRP

ZHAO Yu, XIONG Jiahao, YAO Tianyun, JIA Mengyi, HU Haiyang, YANG Bingchen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240527.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

低温环境下测试复合材料 I 型层间断裂韧性的简易方法

A simple method for determining mode I interlaminar fracture toughness of composite at low temperature

复合材料学报. 2019, 36(5): 1210–1215 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20180725.004>

圆弧形单向纤维增强树脂复合材料的I型层间断裂韧性测试及分析

Test and analysis of the mode I delamination toughness of arc unidirectional fiber-reinforced resin composites

复合材料学报. 2021, 38(9): 2904–2913 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210312.004>

CFRP层间碳纳米管定向喷涂工艺及断裂韧性研究

Interlaminar aligned carbon nanotubes spraying process and fracture toughness of CFRP

复合材料学报. 2021, 38(2): 496–505 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200824.004>

FeOOH纳米粒子协同聚偏氟乙烯电纺纤维膜插层增强碳纤维复合材料层间断裂韧性

Enhancing interlaminar fracture toughness of carbon fiber composite with interleaved polyvinylidene fluoride electrospun fiber veils cooperating FeOOH nanoparticles

复合材料学报. 2022, 39(4): 1582–1591 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210518.001>

PBO纤维增强环氧树脂复合材料层间I型断裂韧性的DIC技术测量

Mode I interlaminar fracture toughness measurement of PBO fiber reinforced epoxy composites by DIC technology

复合材料学报. 2023, 40(1): 72–82 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20220112.002>

超高分子量聚乙烯纤维增强复合材料层合板层间断裂韧性

Interlaminar fracture toughness of ultra-high molecular weight polyethylene fiber reinforced composite laminates

复合材料学报. 2023, 40(11): 6087–6097 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20230407.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20240527.002

增材制造 CFRP-II 型层间断裂韧性的 缺层置换测试法及其参数化分析



分享本文

赵煜¹, 熊家豪¹, 药天运^{*2,3}, 贾梦怡¹, 胡海洋¹, 杨冰晨¹

(1. 长安大学 公路学院, 西安 710064; 2. 长安大学 建筑工程学院, 西安 710061; 3. 西安桥邦工程检测有限公司, 西安 710086)

摘要: 为实现增材制造碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP)-II 型层间断裂韧性的测试分析, 并量化打印参数对 II 型层间断裂韧性的影响规律, 推进增材制造 CFRP 技术在桥梁结构中的应用, 本文分别从试验及仿真分析两方面展开了相关研究。首先, 对打印工艺进行优化并提出了一种新型层间预制裂纹制备方法, 即缺层置换法, 并利用该方法探索了两类关键打印参数 (打印温度、打印速度) 对增材制造 CFRP-II 型层间断裂韧性的影响规律。其次, 基于内聚区理论建立了不同打印工况下预制裂纹试件端部缺口梁三点弯曲 (End notched flexure, ENF) 试验的仿真模型, 并完成了仿真结果与试验数据的对比分析。结果表明: 两类关键打印参数对增材制造 CFRP-II 型层间断裂韧性的影响明显, 且打印温度的影响更强。当打印温度从 245℃ 提升至 285℃, 试验荷载峰值的变化幅度范围为 18%~27%, 层间断裂韧性的变化幅度范围为 14%~32%; 当打印速度从 20 mm/s 提升至 60 mm/s, 试验荷载峰值的变化幅度范围为 4%~31%, 层间断裂韧性的变化幅度范围为 4%~16%。同时, 仿真结果与试验数据的相对误差均控制在 10% 以内, 表明本次所获试验数据合理且稳定, 故缺层置换法可用于制备增材制造 CFRP 预制裂纹试件, 且传统工艺复合材料仿真方法同样适用于增材制造 CFRP 的仿真分析。因此, 本文可为后续增材制造 CFRP 桥梁结构层间力学性能的量化分析提供技术支撑。

关键词: 桥梁结构; 增材制造 CFRP; II 型层间断裂韧性; 缺层置换法; 内聚区理论

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2025)02-0757-16

Missing layer replacement method and parameterized analysis of mode II inter-layer fracture toughness of additive manufacturing CFRP

ZHAO Yu¹, XIONG Jiahao¹, YAO Tianyun^{*2,3}, JIA Mengyi¹, HU Haiyang¹, YANG Bingchen¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China; 3. Xi'an Qiao Bang Engineering Testing Co., Ltd., Xi'an 710086, China)

Abstract: In order to test and analyze the mode II inter-layer fracture toughness of additive manufacturing carbon fiber reinforced polymer (CFRP), and quantitatively evaluate the influence of printing parameters on the mode II fracture toughness, then promote the application of additive manufacturing CFRP technology in bridge structure, experimental and simulation methods were used to carry out the relevant explorations, during this study. Firstly, the printing process was optimized and a novel method for preparing inter-layer pre-cracks was proposed, namely missing layer replacement method. Meanwhile, the influence of two types of key printing parameters (Printing temperature and printing speed) on the mode II inter-layer fracture toughness of additive manufacturing CFRP was studied. Secondly, based on the cohesive zone theory, simulation models of the end notched flexure (ENF) test

收稿日期: 2024-03-19; 修回日期: 2024-05-07; 录用日期: 2024-05-17; 网络首发时间: 2024-05-28 17:27:24

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240527.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2021 YFB1600302); 陕西省自然科学基金项目 (2024 JC-YBQN-0387)

National Key Research and Development Program of China (2021 YFB1600302); Natural Science Foundation Research Program of Shaanxi Province (2024 JC-YBQN-0387)

通信作者: 药天运, 博士, 讲师, 研究方向为 3D 打印 FRP 技术在桥梁工程中的应用、混凝土桥梁损伤分析及服役状态评估、桥梁检/监测装备及平台开发
E-mail: yao_yao2021@chd.edu.cn

引用格式: 赵煜, 熊家豪, 药天运, 等. 增材制造 CFRP-II 型层间断裂韧性的缺层置换测试法及其参数化分析 [J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 757-772.
ZHAO Yu, XIONG Jiahao, YAO Tianyun, et al. Missing layer replacement method and parameterized analysis of mode II inter-layer fracture toughness of additive manufacturing CFRP[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42(2): 757-772(in Chinese).

specimens with pre-cracks under various printing conditions were established. In addition, a comparative analysis between simulation results and test data was carried out. The results indicate that the influence of two key printing parameters on the mode II inter-layer fracture toughness of additive manufacturing CFRP are significant, and the influence of printing temperature is stronger. When the printing temperature increases from 245°C to 285°C, the variation range of peak force test data is 18%-27%, and the variation range of inter-layer fracture toughness is 14%-32%. When the speed increases from 20 mm/s to 60 mm/s, the variation range of peak force test data is 4%-31%, and the variation range of inter-layer fracture toughness is 4%-16%. Moreover, the relative errors between simulation results and test data are controlled within 10%, which indicates that the test data in this study is reasonable and stable, so the missing layer replacement method has strong practicality for preparing additive manufacturing CFRP specimens with pre-cracks. In addition, the simulation method of traditional process composites is also suitable for the simulation analysis of additive manufacturing CFRP. Therefore, this method can provide technical support for the subsequent quantitative evaluation of inter-layer mechanical properties of additive manufacturing CFRP bridge structures.

Keywords: bridge structures; additive manufacturing CFRP; mode II inter-layer fracture toughness; missing layer replacement method; cohesive zone theory

碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 具有高比强度/刚度、耐腐蚀及抗疲劳等优势, 已被广泛应用于土木工程、航空航天及轨道交通等领域^[1-5]。然而, 传统设计制造工艺灵活性较低, 导致该技术的大范围推广受限。增材制造 CFRP 技术的出现为解决上述设计制造问题提供了全新思路。然而, 由于层积成型工艺的特殊性及材料自身的结构性, 导致增材制造 CFRP 材料易发生分层损伤, 对该项技术的推广有较大影响^[6]。为探明增材制造 CFRP 的层间力学性能, 国内外学者展开了系列研究。

Liu 等^[7-8] 通过改变碳纤维束外层环氧树脂施胶层及在增材制造工艺中采用上浆工艺, 系统地研究了上浆与打印工艺对界面性能及断裂模式的影响, 同时采用微螺杆原位挤压法制备了增材制造连续碳纤维增强尼龙基复合材料, 实现了复合材料制备-成型一体化, 且具有较高的纤维含量及良好的力学性能; Tian 等^[9] 通过将连续碳纤维与聚乳酸混合, 实现了碳纤维增强热塑性复合材料的一体化制备及成型, 通过改变工艺参数分析了增材制造复合材料的界面性能; Luo 等^[10-11] 通过调节基体材料黏度及实施预浸渍, 对不同激光预热温度下的层间键合行为进行了研究, 并有效实现了连续碳纤维增强聚醚醚酮复合材料充分浸渍和层间键合的改善, 同时, 利用等离子体-激光协同辅助增材制造工艺改善双尺度界面, 通过对失效模式和双尺度界面键合机制的分析, 发现激光主要改善层间键合和结晶度, 而等离子体则有效提高了碳纤维的力学模量; 上述学者仅从增材制

造工艺及设备优化方面进行研究, 缺乏细观角度及参数化的界面力学性能分析。Iragi 等^[12] 对增材制造 CFRP 层合板进行了层内及层间力学性能的研究, 确定了层内弹性、强度性能及界面强度和断裂特性, 并分析了层积成型工艺缺陷对这些特性的影响规律; Caminero 等^[13] 通过改变打印层厚及纤维体含量, 探明了这两类参数对增材制造连续碳纤维、玻璃纤维及凯夫拉纤维增强尼龙基复合材料层间粘合性能的影响; Yavas 等^[14] 通过短梁剪切试验, 量化评价了连续碳纤维及短碳纤维两种增强材料对增材制造 CFRP 层间剪切性能的影响; Somireddy 等^[15] 对不同层厚及打印方向增材制造层合板的力学性能进行了测试分析, 表明薄层打印件的层内拉伸性能优于厚层打印件, 但厚层打印件的层间性能优于薄层打印件, 并准确地预测了薄层双向打印部件的力学行为; Kong 等^[16] 从纯 I、II 模式下的层间断裂特征及混合模式下的界面破坏机制两方面对增材制造 CFRP 的界面质量进行研究, 结果表明不同纤维取向的界面特征完全不同; Cai 等^[17] 研究了打印参数 (挤出流速、打印温度、打印层厚及打印速度) 对增材制造连续苧麻纤维增强聚丙烯复合材料界面性能的影响, 表明界面强度较弱的打印试样在弯曲载荷作用下会发生脱层破坏, 大大削弱了复合材料的综合力学性能; Touchard 等^[18] 通过拉伸试验与双悬臂梁试验从层内与层间两个方面研究了增材制造 CFRP 的界面力学性能, 并最终给出了不同铺设角度材料的界面力学性能; Dang 等^[19] 研究了碳纤维及凯夫拉纤维两种不同增强材料的增材制

造层合板层间断裂韧性,表明增材制造产生的孔洞缺陷严重影响了碳纤维层合板的层间断裂韧性,而凯夫拉纤维层合板的层间结合更好,可以显著提高层间断裂韧性;上述学者仅从定性试验角度研究了制备参数对增材制造树脂基复合材料层间力学性能的影响规律,未形成量化结论。

综上所述,针对增材制造 CFRP 层间力学性能的相关研究已经广泛展开,但基本还停留在定性分析各类打印参数对材料层间力学性能的影响趋势方面。具体存在以下两点不足:①针对增材制造 CFRP 材料,缺少适用的层间预制裂纹制备方法,传统工艺复合材料制备预制裂纹法由于薄膜有一定厚度会阻挡打印喷头路径,不适用于增材制造 CFRP 技术;②尚未对层间力学性能的影响因素展开较系统的量化分析。

本文提出了一种新方法,能高效制备增材制造 CFRP (短切碳纤维含量为 25wt%) 层间预制裂纹试件,即缺层置换法。通过此方法量化分析了两类关键打印参数 (打印温度、打印速度) 对 II 型层间力学性能 (荷载峰值、峰值力位移、II 型层间断裂韧性) 的影响规律,并基于内聚区理论建立了预制裂纹试件端部缺口梁三点弯曲 (End notched flexure, ENF) 试验仿真模型,该模型参考了传统工艺复合材料的建模思路,将试验得到的 II 型层间断裂韧性作为关键仿真参数,所获荷载-位移仿真曲线与试验曲线对比误差不超过 10%。表明了缺层置换法在层间预制裂纹试件制备与试验数据获取方面的合理性及有效性,同时证明了传统工艺复合材料仿真方法可用于增材制造 CFRP 的仿真分析,为增材制造 CFRP 的仿真方法做出了探索性工作。

1 增材制造 CFRP 试验及数据处理

1.1 增材制造 CFRP 材料性能及试件制备过程

1.1.1 材料物理性能

本文采用的材料为碳纤维增强尼龙基复合材料 (CF/PA6),其组分材料尼龙及碳纤维均为工程领域力学性能优异的材料,其中碳纤维的含量为 25wt%,打印原材料相关物理性能见表 1^[20-22]。

1.1.2 试件几何特征

本次基于美国规范 ASTM D7905^[23] 的 ENF 试验测定增材制造 CFRP 的 II 型层间断裂韧性,所用试件为具有预制裂纹的立方体薄板。如图 1 所示,试件在厚度方向分为三部分,从上至下分别

表 1 增材制造碳纤维增强树脂基复合材料 (CFRP) 的物理性能

Table 1 Physical properties of additive manufacturing carbon fiber reinforced polymer (CFRP)

Test condition	Property	Value
ASTM D792 ^[20]	Density/(g·cm ⁻³)	1.17
DSC ^[21] , 10℃/min	Vitrification temperature/℃	56.6
300℃, 2.16 kg	Melt index/(g·min ⁻¹)	205
DSC ^[21] , 10℃/min	Melting point/℃	220
DSC ^[21] , 10℃/min	Crystallization temperature/℃	186.6
ISO 75 ^[22] , 1.8 MPa	Thermal deformation/℃	196

Note: DSC—Differential scanning calorimetry.

为上基板、损伤层及下基板。按构造分为上基板、缺失层 (替代纸)、被截层 (有粘结段) 及下基板四部分,其中损伤层由替代纸与被截层组成且紧密结合,预制裂纹位于上基板与替代纸结合处,尖端裂纹位于上基板与被截层结合处,层间裂纹位于上基板与被截层相互结合位置及裂纹沿此处扩展。试件尺寸为 170 mm×20 mm×10.2 mm,预制裂纹长度为 75 mm,上基板与下基板厚度均为 5 mm,损伤层厚度为 0.2 mm,如图 2 所示。

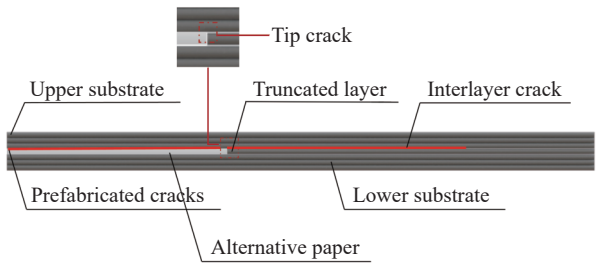


图 1 增材制造 CFRP 试件的几何特征

Fig. 1 Geometric characteristics of additive manufacturing CFRP

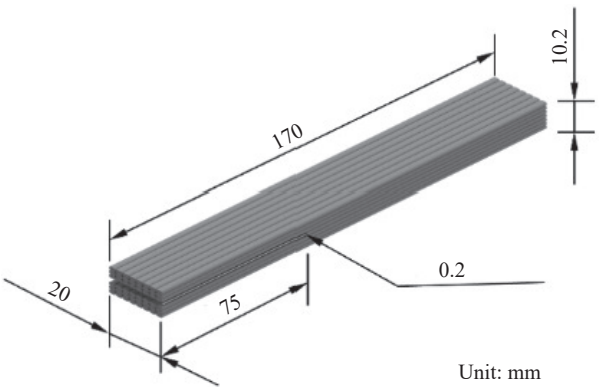


图 2 增材制造 CFRP 试件尺寸

Fig. 2 Size of additive manufacturing CFRP specimen

1.1.3 试件制备方法

试件长度方向为增材制造 CFRP 丝材铺设方向,宽度方向由若干丝材按一定的重叠率并排铺设组成,厚度方向由铺层按一定的层厚堆叠而成。

本次所用 3D 打印机由 RAISE 3D 提供，试件打印参数在表 2 及表 3 中给出，每种打印工况制备 3 个试件。

表 2 增材制造 CFRP 固定打印参数

Table 2 Fixed printing parameters of additive manufacturing CFRP	
Parameter	Value
Layer height/mm	0.2
Heated build platform temperature/℃	90
Filling rate/%	99
Filling shape	Linear
Filling overlap rate/%	5
Nozzle diameter/mm	0.4

表 3 增材制造 CFRP 变量打印参数

Table 3 Variable printing parameters of additive manufacturing CFRP	
Temperature/℃	Speed/(mm·s ⁻¹)
245, 255, 265, 275, 285	20, 30, 40, 50, 60

本次提出的新型预制裂纹试件制备方法为缺层置换法，具体流程如下：

①首先，设置打印参数并将试件的三维模型按照打印路径规划生成切片模型，将切片模型对应的机器控制代码输入至 3D 打印机平台，同时设置打印进程至被截层打印完成后自动暂停；

②其次，打印前在底板材料附着区域涂胶。当底板、下基板、被截层打印完成后打印暂定，并在缺失层处铺设无粘结非光滑替代纸，铺设时间控制在 10 s 内。替代纸宽为 73.5 mm (替代纸宽度应略小于预制裂纹长度，以 1~3 mm 为宜)，厚度为 0.2 mm (替代纸厚度应与被截层厚度一致以保证裂纹前缘不会出现钝的尖端裂纹)；

③最后，替代纸铺设完成后立刻恢复打印进程继续打印上基板至全部打印结束。打印完成后，将试件与底板分离，再将多余的替代纸去除，整个试件即完成打印。试件打印原理如图 3 所示。

1.1.4 材料细观结构

本次通过扫描电子显微镜 (SEM, Sigma360, ZEISS 公司) 获取了增材制造 CFRP 试件横截面的细观结构，包括垂直于打印丝方向的面 1 及平行于打印丝方向的面 2，CFRP 的细观结构在图 4 中给出。进一步，材料细观结构的三维几何模型在图 5 中给出。

增材制造 CFRP 技术的原理是将高温熔融材料通过圆形喷嘴挤出，打印丝按照一定路径铺设

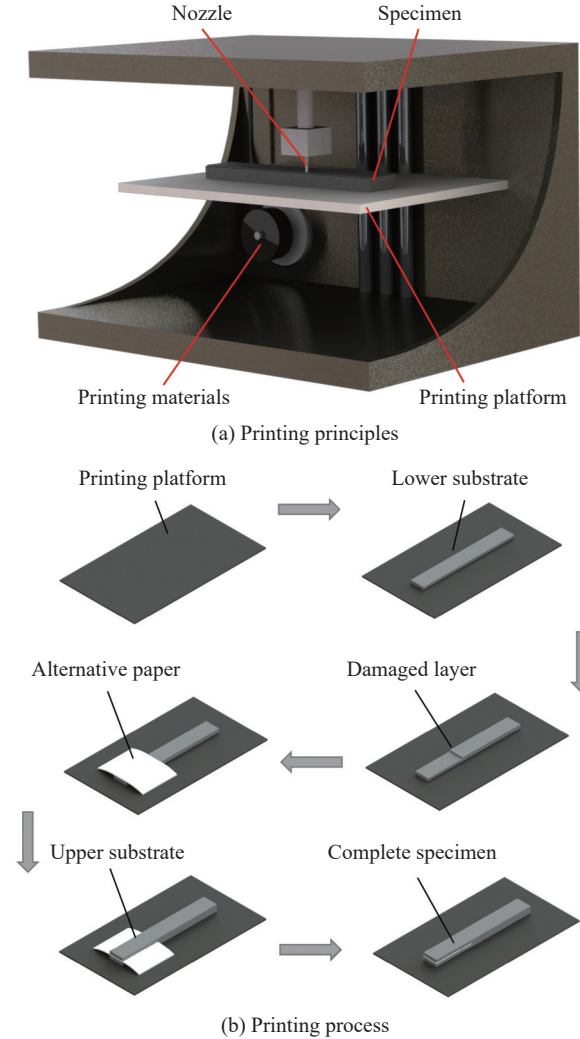


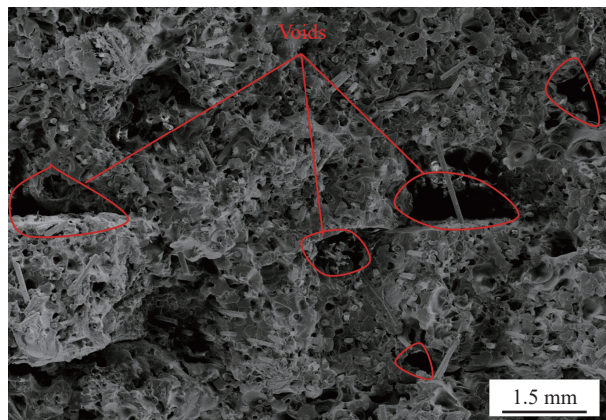
图 3 增材制造 CFRP 预制裂纹试件打印原理
Fig. 3 Printing principles of additive manufacturing CFRP pre-crack specimen

从而完成打印。在铺设过程中打印丝底部因接触到已固化材料时发生塑性流动而变得扁平。同时，受打印速度、打印温度等参数的影响，无论是层间还是层内，打印丝之间都无法完全融合，垂直于打印丝方向的断面会出现形状不规则的孔洞，平行于打印丝方向的断面会出现明显的分层界限，如图 4 所示。因此，增材制造 CFRP 试件的层间力学性能较薄弱。

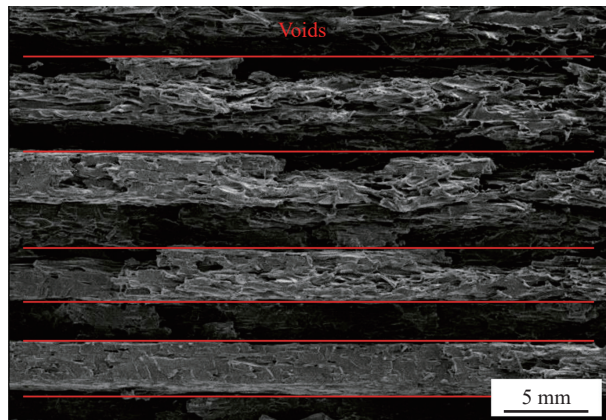
1.2 增材制造 CFRP 试验过程

1.2.1 测试设备

本次采用的测试设备包括：电子万能试验机 (三思纵横 UTM-6503)、配套三点弯曲夹具 (夹具的加载辊半径为 5 mm，硬度满足 HRC 55) 及电子显微镜。本次试验加载速率 2 mm/s，万能试验机加载速率为 0.025~2.6 mm/s，采样频率为 5 Hz。



(a) Surface 1



(b) Surface 2

图 4 增材制造 CFRP 细观结构

Fig. 4 Meso-structures of additive manufacturing CFRP

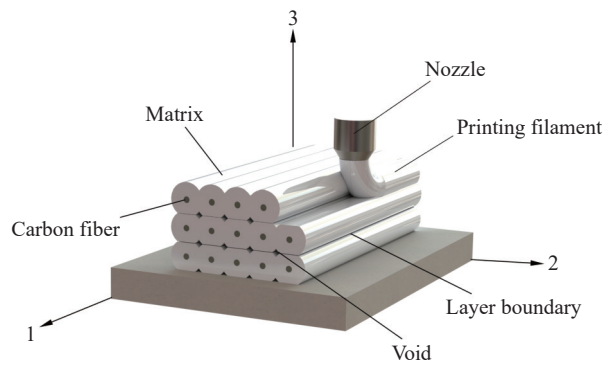


图 5 增材制造 CFRP 细观结构几何模型

Fig. 5 Meso-structures geometric model of additive manufacturing CFRP

1.2.2 试验准备阶段

加载前用白色喷漆在试件侧边预制裂纹处进行喷涂, 喷漆凝固后从预制裂纹内侧端部开始以 20 mm、30 mm、40 mm 的距离用 0.5 mm 机械铅笔绘成垂直铅笔线标记 3 个符合性校准位置, 如图 6 所示。

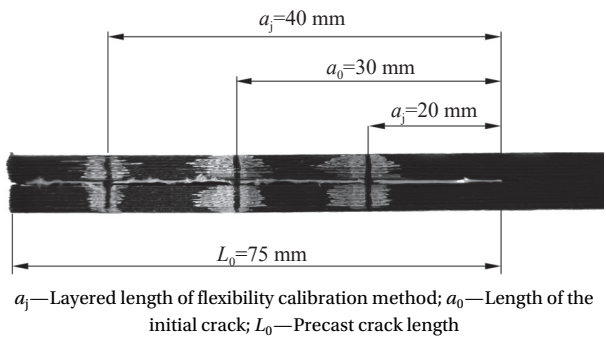


图 6 增材制造 CFRP 试件校准位置

Fig. 6 Calibration locations of additive manufacturing CFRP specimen

1.2.3 试验加载阶段

首先, II 型层间断裂试验开始前需要完成两次柔度校准, 分别取分层长度为 20 mm、40 mm 的两点进行三点弯曲柔度校准试验^[23], 得到两组载荷-位移曲线并计算出两组柔度 C 。为保证柔度校准时试件内部不产生微裂纹, 加载力需要控制在一定范围内。柔度校准力根据下式确定:

$$P_j = \frac{2B}{3a_j} \sqrt{G_{IIC} E_{If} h^3} \tag{1}$$

其中: P_j 为柔度校准力; B 为试样宽度; G_{IIC} 为层间断裂韧性的经验预估值; a_j 为柔度校准法的分层长度; E_{If} 为试件弯曲模量; h 为试件厚度的 1/2。

其次, 将试件重新定位至初始裂纹长度 $a_0 = 30$ mm 处进行 II 型层间断裂韧性测试, 并记录相关数据, 试件加载示意图见 图 7, 试验过程见 图 8 及 图 9。

1.3 评价指标

本次采用的 II 型层间断裂韧性作为评价指标, 数据处理方法为基于柔度标定的 CC1 方法^[24], 其理论来源为能量释放率:

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \tag{2}$$

其中: P 为 ENF 试验中的载荷; a 为分层长度。

基于材料力学理论确定柔度 C 的表示形式为

$$C = \frac{2L^3 + 3a^3}{8E_{If} B h^3} \tag{3}$$

其中, L 为试件长度。

根据式 (3) 可知柔度 C 为 a^3 的线性函数, 因此柔度 C 与分层长度 a 之间的关系可表示为^[25]

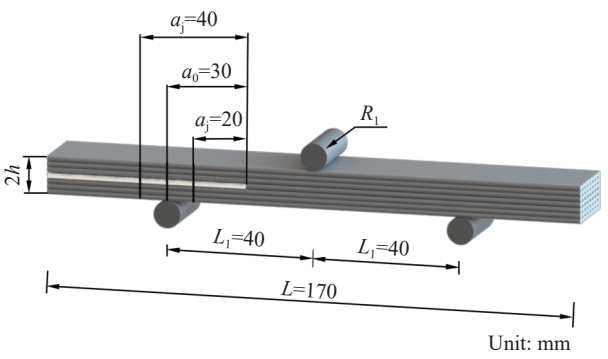
$$C = A + m a^3 \tag{4}$$

其中, A 与 m 为拟合参数。

将式 (4) 带入式 (2) 得 G_{II} 的计算式如下:

$$G_{II} = \frac{3ma^2p^2}{2B} \tag{5}$$

其中，当 p 取为Ⅱ型分层扩展对应的载荷 p_0 时，计算得到的 G_{II} 值即为Ⅱ型层间断裂韧性 G_{IIC} ， G_{IIC} 为剪切应力作用下单位界面破坏时的能量释放量。



h —Half of the thickness of the specimen; R_1 —Fixture radius; L_1 —Axis distance between lower fixture and upper fixture; L —Length of specimen

图7 增材制造CFRP试件加载特征

Fig. 7 Loading characteristics of additive manufacturing CFRP specimen

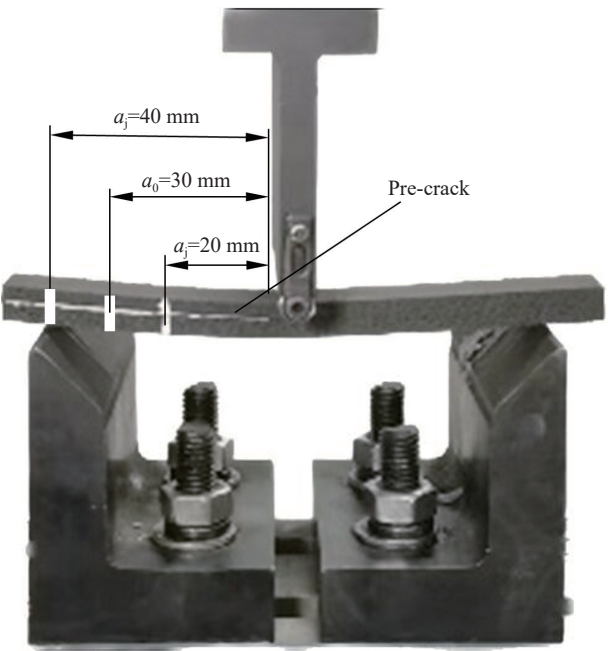


图8 增材制造CFRP试件柔度校准试验

Fig. 8 Compliance calibration test of additive manufacturing CFRP specimen

2 增材制造CFRP-Ⅱ型分层失效的仿真分析

2.1 分析理论

2.1.1 内聚区模型

内聚区模型 (Cohesive zone model, CZM) 广泛应用于各类界面失效分析中，是研究复合材料

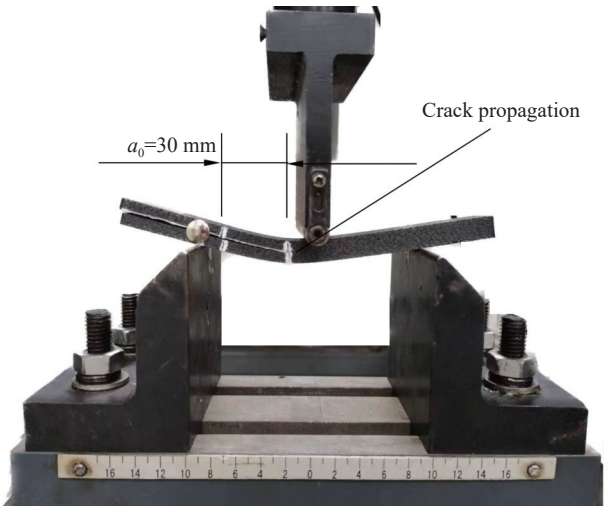


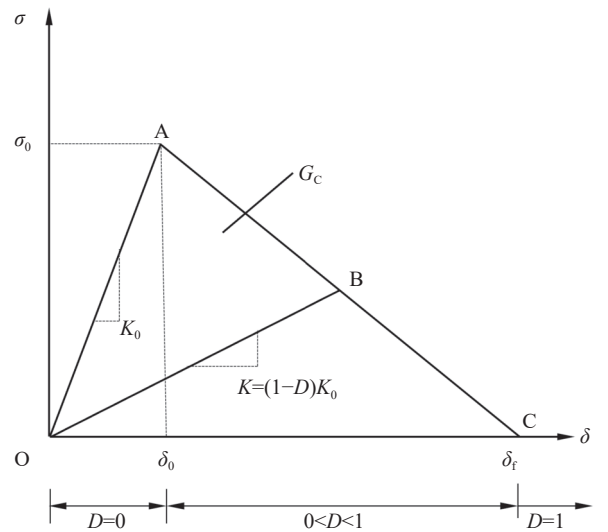
图9 增材制造CFRP-Ⅱ型层间断裂加载过程

Fig. 9 Mode II inter-layer fracture loading process of additive manufacturing CFRP

分层问题的一种重要方法^[26-27]。双线性本构关系是内聚区模型中最常用的本构关系，具体形式如图10所示。

双线性本构模型以分层损伤起始位移 δ_0 为界限分为两段，第一段为材料层间力学性能的线弹性阶段，此时界面刚度 K_0 保持不变。第二段为层间界面损伤阶段，当界面应力达到分层损伤起始应力 σ_0 时，通过损伤变量 D 的增加来实现界面刚度退化。

双线性内聚力本构关系：



σ —Stress; δ —Displacement; σ_0 —Layered damage initiation stress; δ_0 —Initial displacement of delamination damage; δ_f —Displacement corresponding to complete layering of materials; K_0 —Initial interface stiffness; K —Damage interface stiffness; D —Damage variable; G_c —Fracture toughness

图10 内聚区双线性本构模型

Fig. 10 Bilinear constitutive model of cohesive zone

$$\sigma_i = \begin{cases} K_0\delta_i & (\delta_i \leq \delta_0) \\ (1-D)K_0\delta_i & (\delta_0 < \delta_i < \delta_f) \\ 0 & (\delta_i \geq \delta_f) \end{cases} \quad (6)$$

其中， δ_f 为材料完全分层时对应的位移。

2.1.2 损伤起始判据与演化准则

本次使用的损伤起始判据是最大名义应力准则^[26]，该判据如下所示：

$$\begin{cases} \max\left(\frac{\langle\sigma_n\rangle}{\sigma_n^{\max}}, \frac{\sigma_s}{\sigma_s^{\max}}, \frac{\sigma_t}{\sigma_t^{\max}}\right) = 1 \\ \langle\sigma_n\rangle = \begin{cases} \sigma_n, & \sigma_n \geq 0 \\ 0, & \sigma_n < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

其中， σ_n 、 σ_s 、 σ_t 为层间界面上的 3 个应力分量，下标取 s 时为 II 型层间断裂工况，为方便表示后文符号下标取 II 来代替。

当式 (7) 中判据等于 1 时，假定损伤起始。本次损伤演化采用线性模式^[27]，对于线性软化，损伤变量 D 可表示为

$$D = \frac{\delta_{II}^f(\delta_{II}^{\max} - \delta_{II}^0)}{\delta_{II}^{\max}(\delta_{II}^f - \delta_{II}^0)} \quad (8)$$

其中： $\delta_{II}^{\max}$ 表示层间界面损伤演化过程中的有效位移最大值； δ_{II}^0 表示层间界面损伤起始时的有效位移； δ_{II}^f 表示层间界面完全失效时的有效位移。

该规律描述了内聚区模型刚度退化的过程。 $D=0$ ，表示层间界面没有发生损伤，仍处于弹性状态。损伤开始后，刚度损伤因子 D 增加，直到 $D=1$ 时层间界面完全失效。

2.2 仿真模型

2.2.1 ENF 试验建模参数

本次基于 ABAQUS/Explicit 完成增材制造 CFRP 预制裂纹试件 ENF 试验的相关仿真分析，模型如图 11 所示。模型由上基板、损伤层与下基板三部分构成，尺寸为 170 mm×20 mm×10.2 mm。模型中的三点弯曲夹具采用刚体建模，半径为 5 mm，长度为 20 mm，模型中设置一个加载点及两个支点，加载点位于试件的中心点，支点位于

距离试件中心 40 mm 处。
本文对大量文献进行总结^[28-31]，文献给出了复合材料界面刚度及强度的参考范围。同时，结合预试验与仿真分析，最终确定各工况下界面刚度 K_0 及界面强度 σ_0 的值并在表 4 中给出，界面能量为试验测得断裂韧性值。

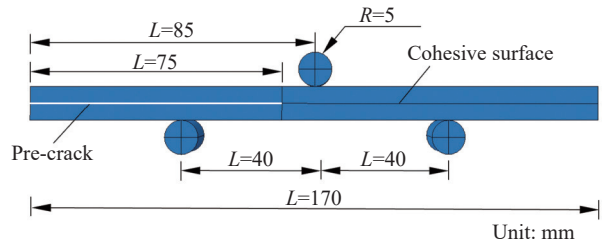


图 11 增材制造 CFRP 预制裂纹试件端部缺口梁三点弯曲 (ENF) 试验仿真模型
Fig. 11 End notched flexure (ENF) experiment simulation model of additive manufacturing CFRP pre-crack specimen

2.2.2 接触属性

考虑到试验中夹具与试件之间的摩擦及加载点的位置变化，本文将夹具及试件分别设置为刚性体及变形体，两者间的接触属性为面面接触。同时，预制裂纹上、下基板间界面也设置为面面接触。该接触垂直方向设置为硬接触，水平方向设置为摩擦接触，摩擦系数设为 0.3。在试件的被截层设置通用接触，同时设置粘结行为与损伤特征。

2.2.3 边界条件与加载方式

关于仿真模型边界条件的设置，ENF 试验模型的加载及边界条件只设置在刚性体夹具上，两个支点夹具设置为固结，即 $U_1 = U_2 = U_3 = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3} = 0$ ，其中 U 为方向位移， U_R 为方向角。加载点夹具除 y 方向平动不为 0，其他均设为固结，即 $U_1 = U_3 = U_{R1} = U_{R2} = U_{R3} = 0$ ， y 方向存在加载位移，因此 $U_2 \neq 0$ 。

2.2.4 网格敏感性分析

仿真中，单元尺寸直接影响到数值计算精度及计算时长。通常，当单元尺寸减小，计算精度

表 4 不同工况下的界面刚度 K_0 及界面强度 σ_0

Table 4 Interface stiffness K_0 and interface strength σ_0 with different working conditions			
Printing temperature/℃	Printing speed/(mm·s ⁻¹)	K_0 /(MPa·mm ⁻¹)	σ_0 /MPa
245	40	1.8×10^3	16
255		2.6×10^3	19
265		2.7×10^3	22
275		3.0×10^3	24
285		3.3×10^3	28
Printing temperature/℃	Printing speed/(mm·s ⁻¹)	K_0 /(MPa·mm ⁻¹)	σ_0 /MPa
275	20	1.7×10^3	17
	30	2.4×10^3	21
	50	3.3×10^3	26
	60	3.7×10^3	28

会相应提高,但同时计算时长也会增加,因此在确定网格尺寸时应综合考虑精度及时长。本次以打印温度 275℃、打印速度 40 mm/s 的 ENF 试验构件为例,将该实体模型全局单元尺寸分别划分为长度 (L)=宽度 (B)=4、3 及 2 mm,高度 (H)=1.25 mm,如图 12 所示,并对比这 3 种单元尺寸下的模拟荷载-位移曲线。

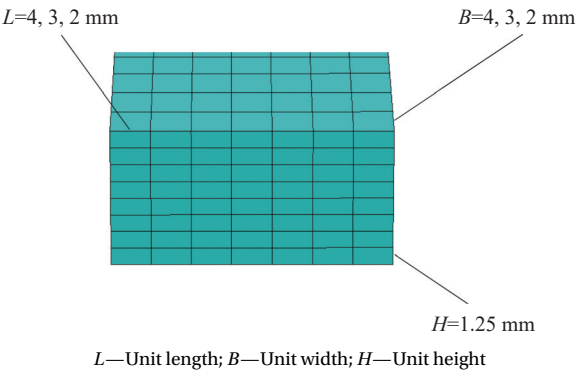


图 12 网格尺寸
Fig. 12 Mesh size

由图 13、表 5 可知,随着网格尺寸减小,最大荷载趋于稳定,但网格尺寸为 2 mm 时所用计算时间是网格尺寸为 3 mm 时的 2 倍左右。因此,选择网格尺寸为 3 mm 时,既可保证计算精度又可保证计算效率。

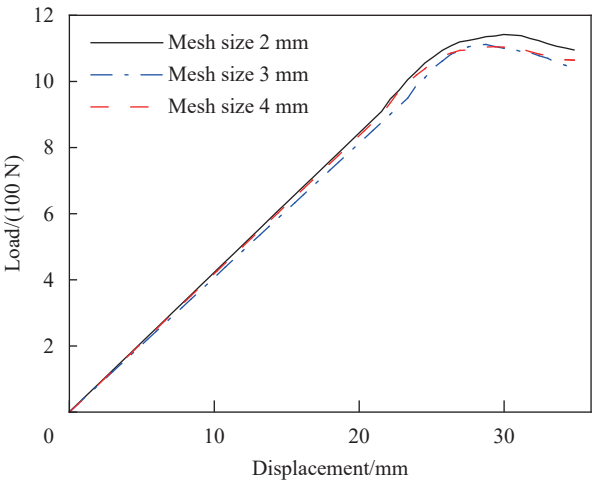


图 13 不同网格尺寸的计算结果对比

Fig. 13 Comparison of calculation results with different mesh sizes

3 结果与讨论

3.1 试验结果与分析

3.1.1 打印温度对层间力学性能的影响

不同打印温度下 ENF 试件的荷载-位移曲线在图 14 中给出。基于试验数据,分别获得各组试件

表 5 不同网格尺寸下的计算用时及最大荷载对比

Table 5 Comparisons of calculation time and maximum load with different mesh sizes

Mesh size/mm	Number of units	CPU calculation time/s	Maximum load/N
4	3 472	1 218	1 105.031
3	3 640	1 390	1 111.864
2	7 680	2 334	1 116.225

Note: CPU—Computer processor.

的层间力学性能值,如表 6、表 7 及表 8 所示。并绘制出平均荷载峰值及平均断裂韧性变化曲线,如图 15 所示。

(1) 打印温度对荷载峰值及峰值力位移的影响规律

当打印速度为 40 mm/s 时,打印温度由 245℃ 升至 255℃,荷载峰值增加 25%,由 265℃ 升至 275℃,荷载峰值增加 27%,此两个区间内荷载峰值增速较快;由 255℃ 升至 265℃,荷载峰值增加 20%,由 275℃ 升至 285℃,荷载峰值增加 18%,此区间荷载峰值增速较慢;上述规律表明随着打印温度的升高,试件层间界面的抗剪切能力得到提升。打印温度由 245℃ 升至 255℃,峰值力位移增加 5%,由 255℃ 升至 265℃,峰值力位移降低 3%,由 265℃ 升至 285℃ 的两个区间内,峰值力位移分别增加 12% 和 8%,在 255℃ 的工况下,峰值力位移偏大,其原因是在加载过程中试件下方两个支撑点发生轻微不协调滑移。

(2) 打印温度对断裂韧性的影响规律

打印速度为 40 mm/s 时,打印温度由 245℃ 升至 255℃,断裂韧性增加 31%,由 255℃ 升至 265℃,断裂韧性增加 26%,由 265℃ 升至 275℃,断裂韧性增加 32%,此 3 个区间内断裂韧性增速较快;当打印温度由 275℃ 升至 285℃,断裂韧性增加 14%,在此区间内断裂韧性增速较慢;上述规律表明随着打印温度的升高,试件层间延性得到提升,且当打印温度为 285℃ 时,试件具有与传统工艺(热压法、层压法)复合材料相近的断裂韧性。

(3) 层间力学性能变化的细观机制

图 16 给出了不同打印温度下增材制造 CFRP 不同断面的细观结构 SEM 图像,包括面 1 及面 2。图中可见,当打印速度恒定时打印温度越高,丝材固化时间越长,固化前会发生充分的塑性流动,减小了打印丝内部及打印丝之间的空隙。

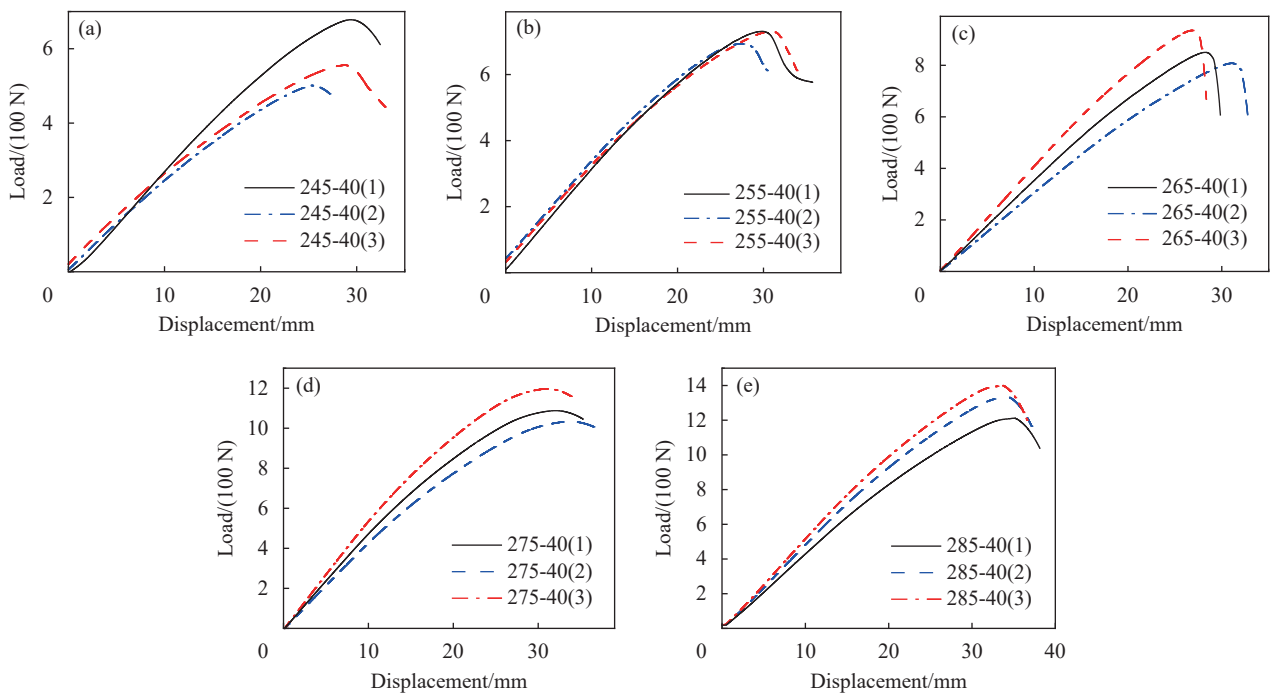


图 14 打印速度 40 mm/s 下不同打印温度时增材制造 CFRP 荷载-位移曲线: (a) 245℃; (b) 255℃; (c) 265℃; (d) 275℃; (e) 285℃

Fig. 14 Load-displacement curves of additive manufacturing CFRP with printing speed of 40 mm/s under different printing temperatures: (a) 245℃; (b) 255℃; (c) 265℃; (d) 275℃; (e) 285℃

表 6 不同打印温度下试件荷载峰值

Table 6 Peak loads of specimens with different printing temperatures

	Peak load/N				
	245℃	255℃	265℃	275℃	285℃
Specimen I	674.043	736.153	853.720	1 083.141	1 211.012
Specimen II	504.145	696.142	809.258	1 044.133	1 324.143
Specimen III	557.234	736.214	933.317	1 207.024	1 406.043
Average value	578.474	722.836	865.432	1 111.433	1 313.733
Standard deviation	70.968	18.876	50.220	69.444	79.961

表 7 不同打印温度下试件峰值力位移

Table 7 Peak load displacements of specimens with different printing temperatures

	Peak load displacement/mm				
	245℃	255℃	265℃	275℃	285℃
Specimen I	29.365	29.988	27.953	31.683	35.158
Specimen II	25.232	27.474	30.841	33.293	34.436
Specimen III	28.773	30.695	26.279	30.136	33.596
Average value	27.790	29.284	28.358	31.704	34.397
Standard deviation	1.825	1.429	1.675	1.289	0.638

表 8 不同打印温度下试件断裂韧性值

Table 8 Fracture toughness of specimens with different printing temperatures

	Fracture toughness/(mJ·mm ⁻²)				
	245℃	255℃	265℃	275℃	285℃
Specimen I	0.983	1.086	1.459	1.850	2.098
Specimen II	0.814	1.041	1.287	1.876	2.138
Specimen III	0.772	1.250	1.518	1.905	2.231
Average value	0.856	1.126	1.421	1.877	2.156
Standard deviation	0.091	0.090	0.098	0.022	0.056

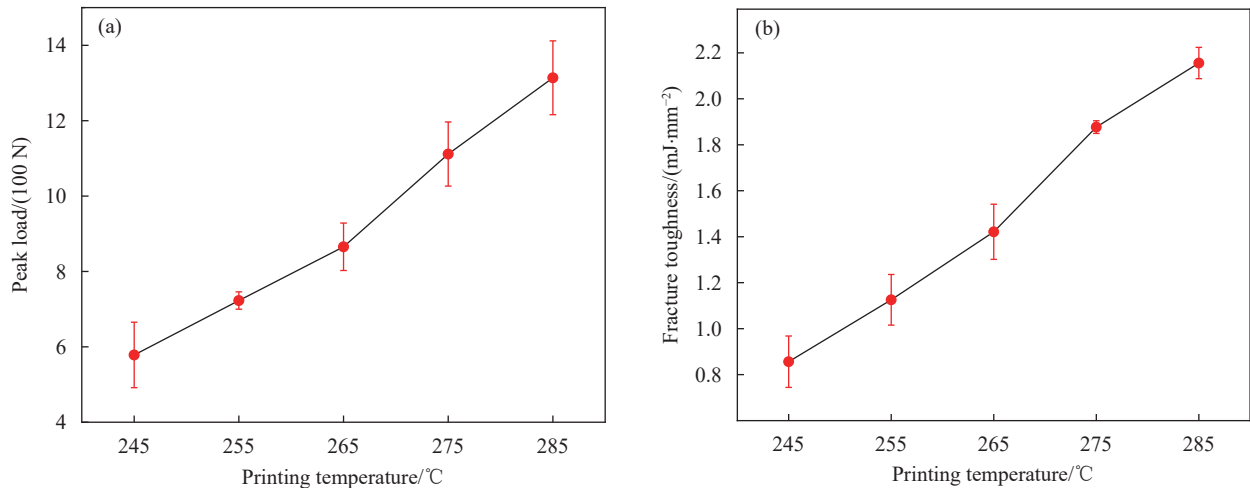


图 15 打印速度 40 mm/s 下增材制造 CFRP 层间力学性能变化规律: (a) 荷载峰值; (b) 断裂韧性值

Fig. 15 Variations of inter-layer mechanical properties of additive manufacturing CFRP with printing speed of 40 mm/s: (a) Peak load; (b) Fracture toughness

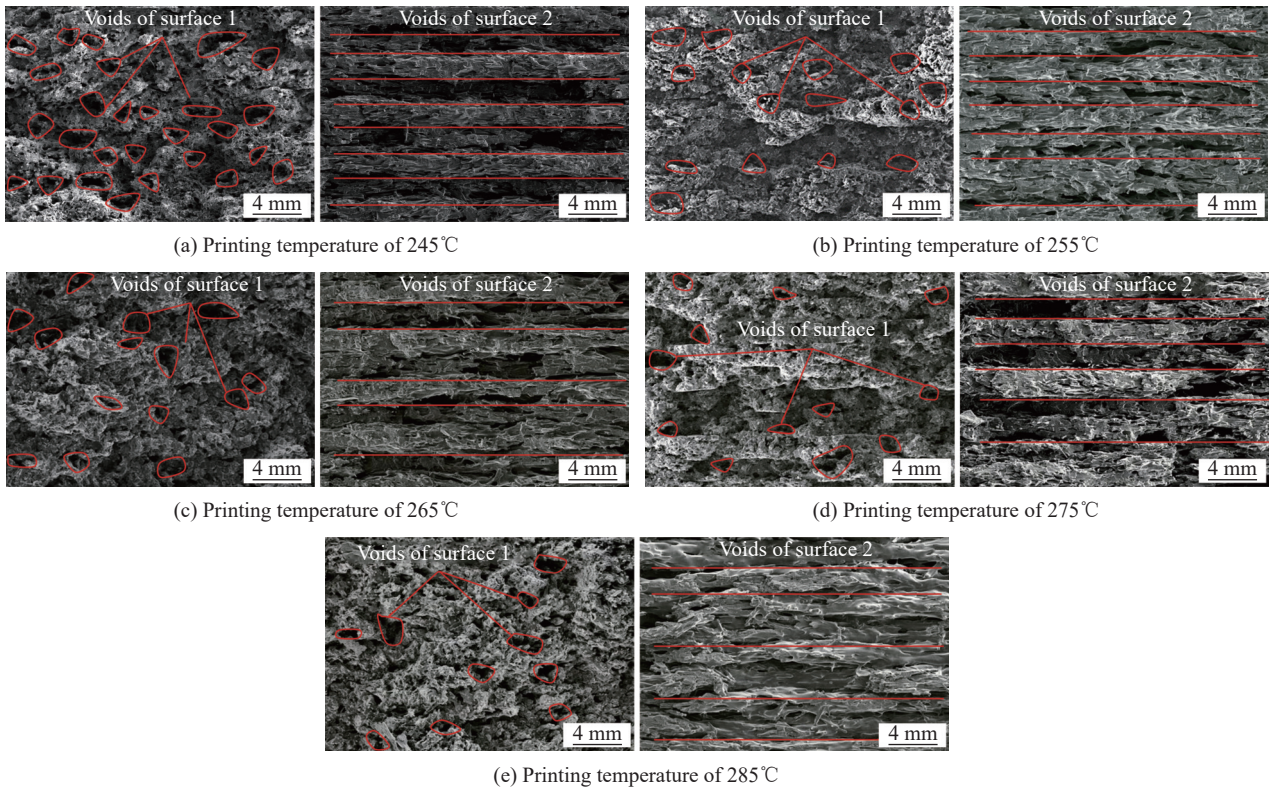


图 16 打印速度 40 mm/s 下增材制造 CFRP 的微观结构

Fig. 16 Meso-structures of additive manufacturing CFRP with printing speed of 40 mm/s

同时, 铺设下一层打印丝时, 上一层打印丝温度越高, 层与层之间材料的分子间作用效果越明显, 表现为层间粘结性能增强。由此可得, 当打印速度不变时材料的层间力学性能会随着打印温度的升高而增强。

3.1.2 打印速度对层间力学性能的影响

不同打印速度下 ENF 试件的荷载-位移曲线在

图 17 中给出。基于试验数据, 分别获得各组试件的层间力学性能值, 如表 9、表 10 及表 11 所示。并绘制出平均荷载峰值及平均断裂韧性变化曲线, 如图 18 所示。

(1) 打印速度对荷载峰值及峰值力位移的影响规律
当打印温度为 275°C 时, 打印速度由 20 mm/s 升至 30 mm/s, 荷载峰值降低 6%, 由 30 mm/s 升

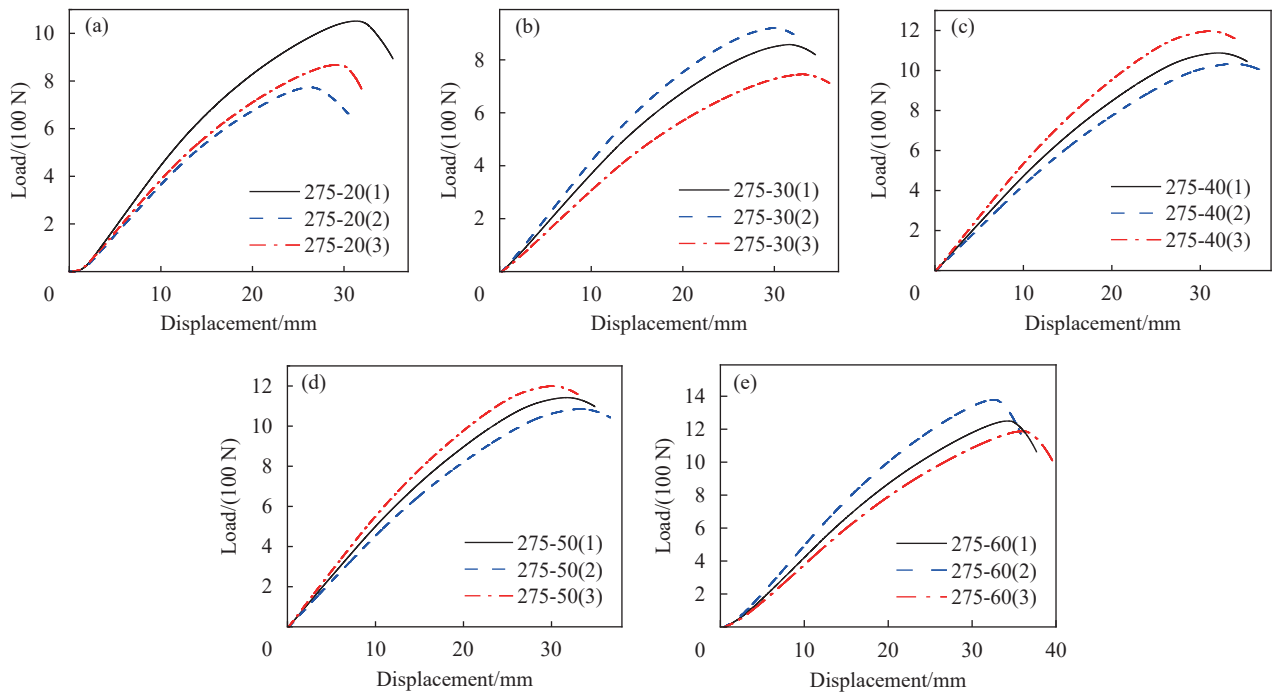


图 17 打印温度 275℃ 下不同打印速度时增材制造 CFRP 荷载-位移曲线: (a) 20 mm/s; (b) 30 mm/s; (c) 40 mm/s; (d) 50 mm/s; (e) 60 mm/s

Fig. 17 Load-displacement curves of additive manufacturing CFRP with printing temperature of 275℃ under different printing speeds: (a) 20 mm/s; (b) 30 mm/s; (c) 40 mm/s; (d) 50 mm/s; (e) 60 mm/s

表 9 不同打印速度下试件荷载峰值

Table 9 Peak loads of specimens with different printing speeds

	Peak load/N				
	20 mm/s	30 mm/s	40 mm/s	50 mm/s	60 mm/s
Specimen I	1 045.134	868.359	1 083.021	1 167.156	1 271.056
Specimen II	880.102	919.665	1 044.359	1 101.876	1 378.168
Specimen III	784.413	751.864	1 207.189	1 206.341	1 189.058
Average value	903.216	846.629	1 111.523	1 158.458	1 279.427
Standard deviation	107.687	70.806	69.463	43.089	77.430

表 10 不同打印速度下试件峰值力位移

Table 10 Peak load displacements of specimens with different printing speeds

	Peak load displacement/mm				
	20 mm/s	30 mm/s	40 mm/s	50 mm/s	60 mm/s
Specimen I	31.302	31.711	31.683	31.899	34.281
Specimen II	26.290	30.126	33.293	33.451	32.507
Specimen III	29.075	32.883	30.136	30.541	35.929
Average value	28.889	31.573	31.704	31.964	34.239
Standard deviation	2.050	1.130	1.289	1.189	1.397

表 11 不同打印速度下试件断裂韧性值

Table 11 Fracture toughness of specimens with different printing speeds

	Fracture toughness/(mJ·mm ⁻²)				
	20 mm/s	30 mm/s	40 mm/s	50 mm/s	60 mm/s
Specimen I	1.473	1.727	1.850	1.920	2.018
Specimen II	1.491	1.678	1.876	2.155	2.038
Specimen III	1.555	1.826	1.905	1.905	2.258
Average value	1.506	1.744	1.877	1.993	2.105
Standard deviation	0.035	0.062	0.022	0.114	0.109

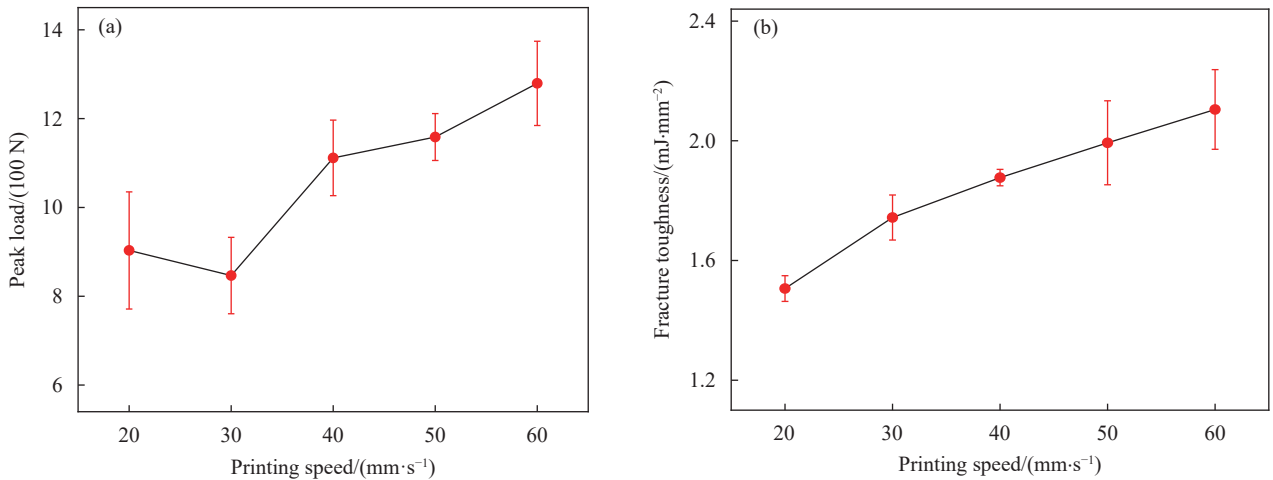


图 18 打印温度 275℃ 下增材制造 CFRP 层间力学性能变化规律: (a) 荷载峰值; (b) 断裂韧性值

Fig. 18 Variation of inter-layer mechanical properties for additive manufacturing CFRP with printing temperature of 275°C:

(a) Peak load; (b) Fracture toughness

至 40 mm/s, 荷载峰值增加 31%, 由 40 mm/s 升至 50 mm/s, 荷载峰值增加 4%, 由 50 mm/s 升至 60 mm/s, 荷载峰值增加 10%, 上述规律表明随着打印速度的提高, 试件层间抗剪切能力也提高, 增幅较大, 在 20~30 mm/s 区间, 荷载峰值略有降低, 其原因为: ①打印速度较低时, 增材制造工艺稳定性较低, 打印时材料受热不均匀, 材料内部有轻微缺陷, 层间力学性能受到不利影响, 故与材料力学性能整体发展趋势不符; ②支撑点处轻微非对称滑移。打印速度由 20 mm/s 升至 30 mm/s, 峰值力位移增加 9%, 由 30 mm/s 升至 40 mm/s, 峰值力位移增加 0.4%, 由 40 mm/s 升至 50 mm/s, 峰值力位移增加 0.8%, 由 50 mm/s 升至 60 mm/s, 峰值力位移增加 7%。

(2) 打印速度对断裂韧性的影响规律

当打印温度为 275℃, 打印速度由 20 mm/s 升至 30 mm/s, 断裂韧性增加 16%, 由 30 mm/s 升至 40 mm/s, 断裂韧性增加 8%, 由 40 mm/s 升至 50 mm/s, 断裂韧性增加 4%, 由 50 mm/s 升至 60 mm/s, 断裂韧性增加 11%, 上述规律表明随着打印速度的提高, 试件层间断裂韧性得到提升, 且当打印速度为 60 mm/s 时, 试件具有与传统工艺复合材料相近的断裂韧性。

(3) 层间力学性能变化的细观机制

图 19 中给出了不同打印速度下增材制造 CFRP 不同断面的细观结构 SEM 图, 包括面 1 及面 2。图中可见, 当打印温度恒定时, 打印速度越快, 丝材沉积过程中散失的热量越少, 已沉积丝材与新挤出丝材在固化前能充分地发生塑性流动, 打

印丝之间的粘结性能越强。此外, 铺设下一层打印丝时, 上一层打印丝温度散失较少, 层与层之间材料的分子间作用效果越明显, 表现为层间粘结能力增强。由此可得, 当打印温度不变时材料的层间力学性能会随着打印速度的升高而增强。

3.2 仿真结果与试验数据的对比分析

3.2.1 打印温度改变工况

图 20 给出了不同打印温度下, 仿真结果与试验数据的对比分析。图中可见, 曲线峰值附近材料不再保持线性, 表明此时材料层间已经出现损伤, 力学性能处于不稳定状态, 故仅需关注荷载峰值及峰值力位移, 保证仿真结果与试验数据的相对误差较小即可。对曲线荷载峰值及峰值力位移的相对误差进行计算, 相关结果在表 12 中给出。

由表 12 可见, 变温度工况下, 仿真结果与试验数据对比, 荷载峰值相对误差范围为 0.626%~3.745%, 峰值力位移相对误差范围为 3.645%~9.245%, 两者误差均控制在 10% 以内, 证明了本次试验所测得断裂韧性的准确性; 通过数据分析发现, 荷载峰值相对误差较小, 峰值力位移相对误差较大, 其原因为: ①试件制备完成至试验结束过程中, 试件易受潮, 导致刚度下降, 使所测位移整体偏大; ②在试验过程中, 随着试件挠度逐渐增大, 试件下方支撑点处发生非对称滑移, 进一步导致峰值力位移偏大。

3.2.2 打印速度改变工况

图 21 给出了不同打印速度下, 仿真结果与试验数据的对比分析。对曲线荷载峰值及峰值力位移的相对误差进行计算, 相关结果在表 13 中给出。

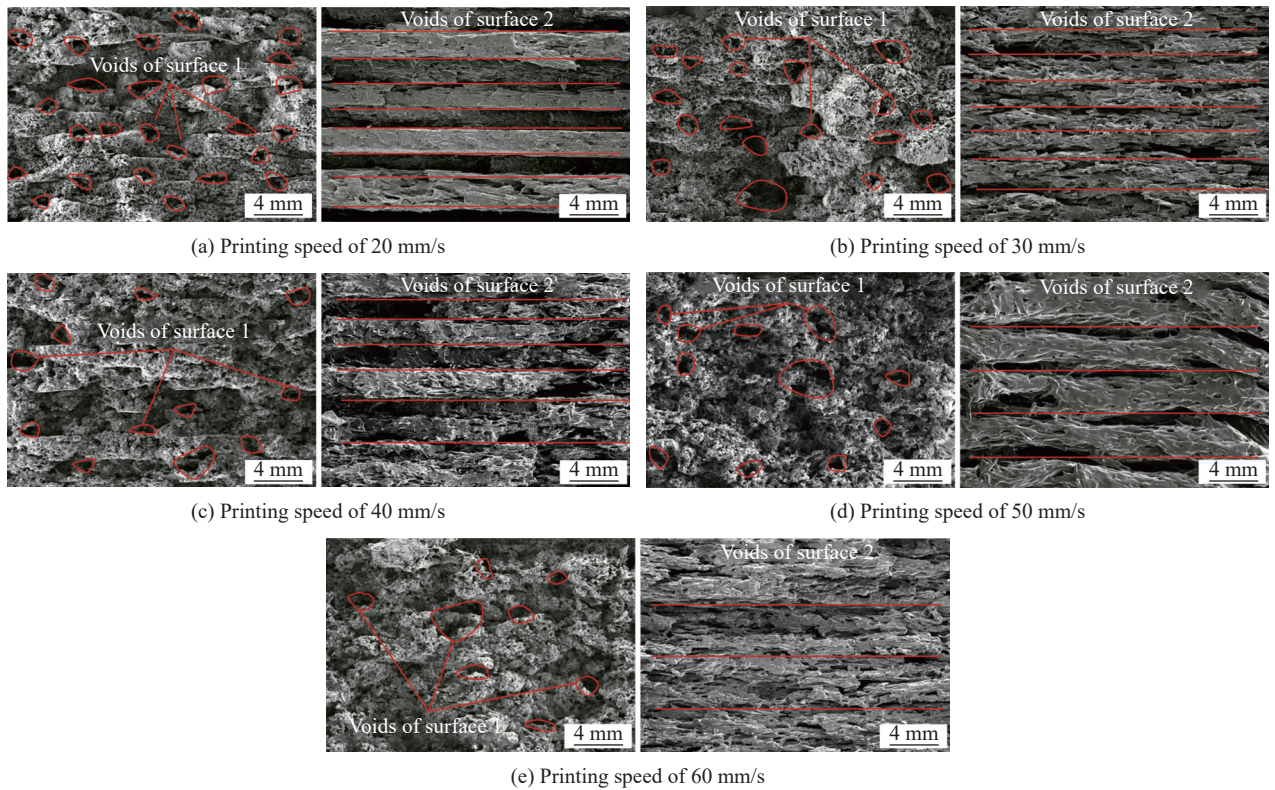


图 19 打印温度 275℃ 下增材制造 CFRP 的微观结构

Fig. 19 Meso-structures of additive manufacturing CFRP with printing temperature of 275℃

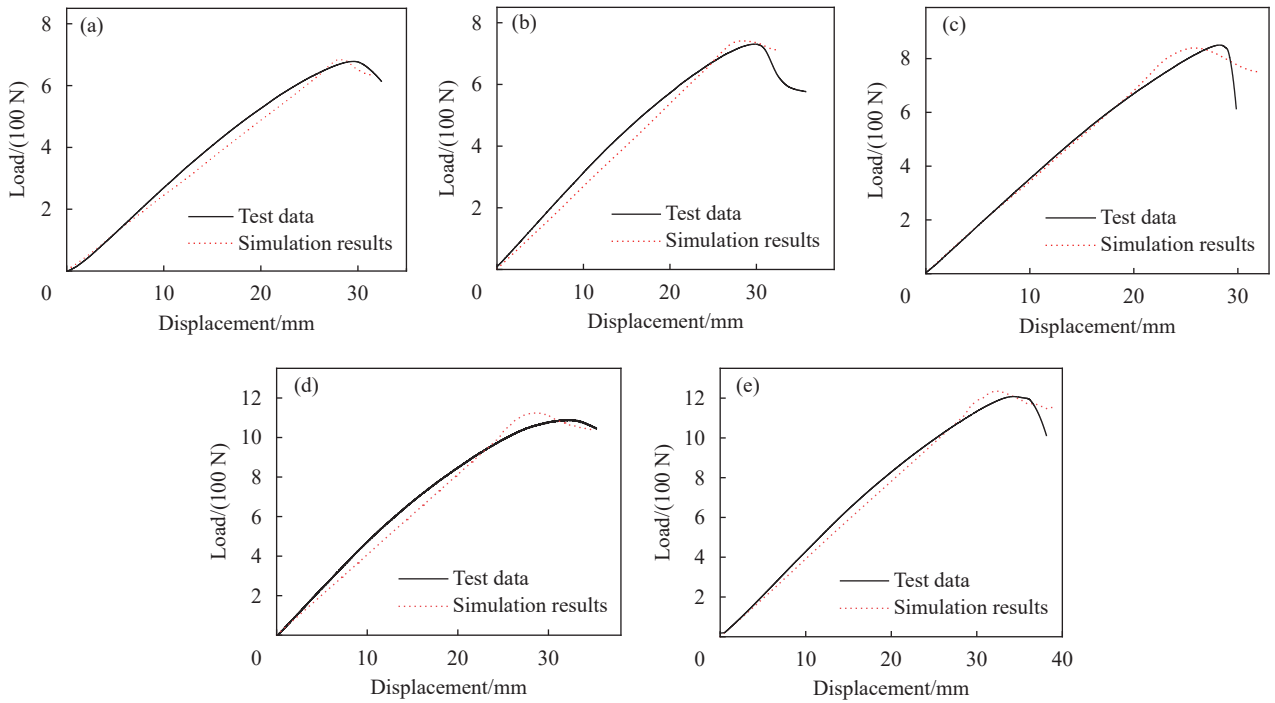


图 20 打印速度 40 mm/s 下不同打印温度时增材制造 CFRP 荷载-位移曲线仿真结果与试验数据对比：

(a) 245℃；(b) 255℃；(c) 265℃；(d) 275℃；(e) 285℃

Fig. 20 Comparison between simulation results and test data of load-displacement curves of additive manufacturing CFRP with printing speed of 40 mm/s under different printing temperatures: (a) 245℃; (b) 255℃; (c) 265℃; (d) 275℃; (e) 285℃

表 12 变温度工况下增材制造 CFRP 力学性能仿真结果与试验数据的对比分析

Table 12 Comparison between simulation results and test data of additive manufacturing CFRP mechanical properties with variable temperature conditions

Working conditions and parameters/(°C·mm·s ⁻¹)		Peak load/N	Relative error/%	Peak load displacement/mm	Relative error/%
245-40	Test date	674.043	1.1730	29.365	4.734
	Simulation result	685.920		27.975	
255-40	Test date	736.214	0.6260	29.988	3.645
	Simulation result	740.854		28.895	
265-40	Test date	853.720	1.7145	27.953	8.664
	Simulation result	839.083		25.531	
275-40	Test date	1 083.141	3.7450	31.683	9.245
	Simulation result	1 125.282		28.754	
285-40	Test date	1 211.012	2.0570	35.158	8.283
	Simulation result	1 236.447		32.246	

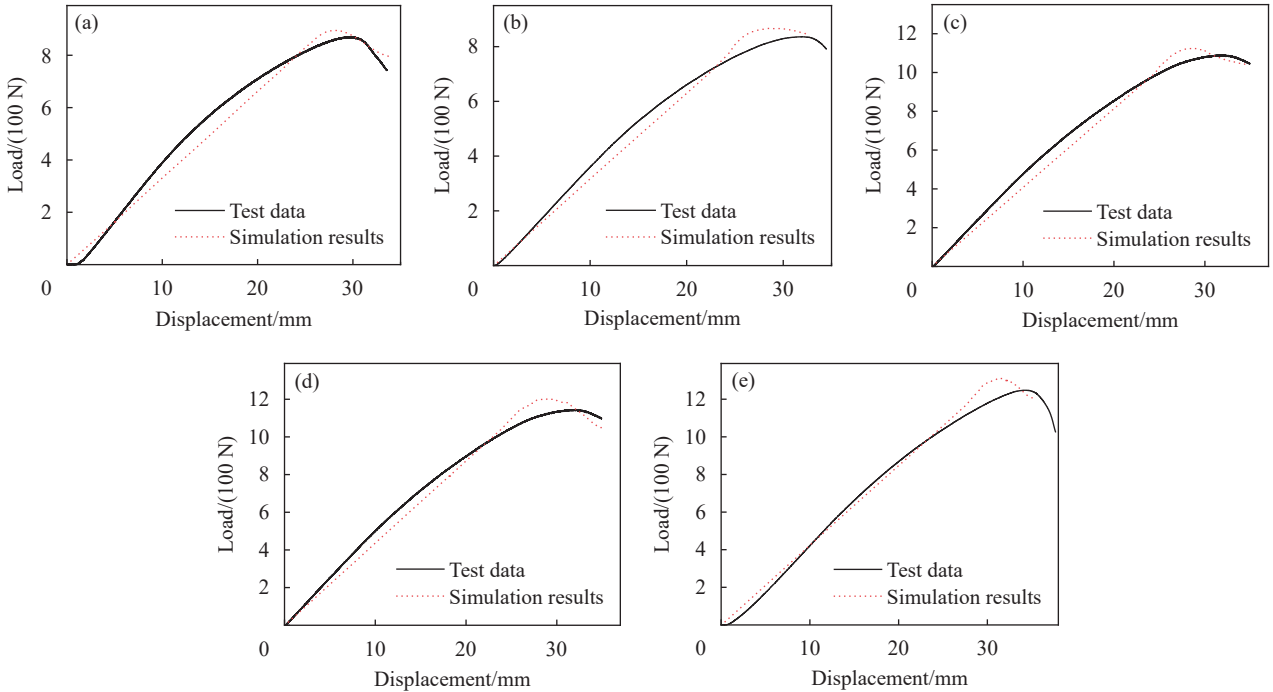


图 21 打印温度 275℃ 下不同打印速度时增材制造 CFRP 荷载-位移曲线仿真结果与试验数据对比:

(a) 20 mm/s; (b) 30 mm/s; (c) 40 mm/s; (d) 50 mm/s; (e) 60 mm/s

Fig. 21 Comparison between simulation results and test data of load displacement curves of additive manufacturing CFRP with printing temperature of 275°C under different printing speeds: (a) 20 mm/s; (b) 30 mm/s; (c) 40 mm/s; (d) 50 mm/s; (e) 60 mm/s

表 13 变速度工况下增材制造 CFRP 力学性能仿真结果与试验数据的对比分析

Table 13 Comparison between simulation results and test data of additive manufacturing CFRP mechanical properties with variable speed conditions

Working conditions and parameters/(°C·mm·s ⁻¹)		Peak load/N	Relative error/%	Peak load displacement/mm	Relative error/%
275-20	Test date	880.102	1.477	29.075	2.102
	Simulation result	893.294		28.464	
275-30	Test date	868.359	0.678	31.711	4.055
	Simulation result	874.284		30.425	
275-40	Test date	1 083.141	3.745	31.683	9.245
	Simulation result	1 125.282		28.754	
275-50	Test date	1 167.156	2.895	31.899	8.483
	Simulation result	1 201.949		29.193	
275-60	Test date	1 271.056	3.095	34.281	6.677
	Simulation result	1 311.648		31.992	

在表 13 中可见, 变速度工况下, 仿真结果与试验数据对比, 荷载峰值相对误差范围为 0.678%~3.745%, 峰值力位移相对误差范围为 2.102%~9.245%, 两者误差均控制在 10% 以内。分析数据发现, 荷载峰值相对误差较小, 峰值力位移误差较大, 其原因与 3.2.1 一致, 故不再叙述。

4 结 论

(1) 本文提出的缺层置换法可用于增材制造碳纤维增强树脂基复合材料 (Carbon fiber reinforced polymer, CFRP) 层间预制裂纹试件制备中, 该方法获取的试验数据稳定可靠。同时, 具有效率高、操作简单等优势。

(2) 打印温度对增材制造 CFRP-II 型层间力学性能的影响显著, 当打印温度从 245℃ 提升至 285℃ 时, 荷载峰值的增幅范围为 18%~27%, 层间断裂韧性的增幅范围为 14%~32%。打印速度对增材制造 CFRP-II 型层间力学性能的影响较明显, 打印速度从 20 mm/s 提升至 60 mm/s 时, 荷载峰值的变化幅度范围为 4%~31%, 层间断裂韧性的变化幅度范围为 4%~16%。

(3) 本文将试验测得断裂韧性作为界面能量参数, 最终仿真得到的荷载-位移曲线与试验测得曲线相比误差不超过 10%, 表明了本次试验所测得断裂韧性的准确性, 进一步表明本文提出的缺层置换法是稳定且可靠的; 同时, 表明传统工艺复合材料仿真方法可以用于增材制造 CFRP 仿真分析, 且采用内聚区理论可以正确描述增材制造 CFRP 的 II 型层间失效行为, 并揭示相关失效机制。

(4) 材料细观尺度分析表明, 随着打印温度及速度的提高, 已沉积材料与新挤出材料在固化前能发生更充分的塑性流动, 孔洞等缺陷的数量更少, 因此可以获得更好的层间力学性能。

参考文献:

[1] 龙昱, 李岩, 付昆昆. 3D 打印纤维增强复合材料工艺和力学性能研究进展 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(9): 4196-4212.
LONG Yu, LI Yan, FU Kunkun. Research progress in the process and mechanical properties of 3D printed fiber reinforced composite materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(9): 4196-4212(in Chinese).
[2] 曹丰, 曾志勇, 黄建, 等. 连续纤维增强复合材料的 3D 打印工艺及应用进展 [J]. 中国科学: 技术科学, 2023, 50(11): 1815-1833.
CAO Feng, ZENG Zhiyong, HUANG Jian, et al. Printing pro-

cess and application progress of 3D printing continuous fiber reinforced composites [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 50(11): 1815-1833(in Chinese).
[3] 张聘, 王奉晨, 李玥萱, 等. 连续纤维增强复合材料 3D 打印技术现状及展望 [J]. 航空制造技术, 2023, 66(16): 76-87.
ZHANG Pin, WANG Fengchen, LI Yuexuan, et al. Status and prospects of 3D printing for continuous fiber reinforced composites [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2023, 66(16): 76-87(in Chinese).
[4] 刘强, 马小康, 宗志坚. 斜纹机织碳纤维/环氧树脂复合材料性能及其在电动汽车轻量化设计中的应用 [J]. 复合材料学报, 2011, 28(5): 83-88.
LIU Qiang, MA Xiaokang, ZONG Zhijian. Performance of twill woven carbon fiber/epoxy resin composite material and its application in lightweight design of electric vehicles [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2011, 28(5): 83-88(in Chinese).
[5] 车士俊, 张明睿. 复合材料在轨道交通中的应用综述 [J]. 纤维复合材料, 2022, 39(2): 100-104.
CHE Shijun, ZHANG Mingrui. Overview of the application of composite materials in rail transit [J]. Fiber Composite Materials, 2022, 39(2): 100-104(in Chinese).
[6] 赵丽滨, 龚愉, 张建宇. 纤维增强复合材料层合板分层扩展行为研究进展 [J]. 航空学报, 2019, 40(1): 171-199.
ZHAO Libin, GONG Yu, ZHANG Jianyu. Research progress on delamination propagation behavior of fiber reinforced composite laminates [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2019, 40(1): 171-199(in Chinese).
[7] LIU T F, TIAN X Y, ZHANG M Y, et al. Interfacial performance and fracture patterns of 3D printed continuous carbon fiber with sizing reinforced PA6 composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2018, 114: 368-376.
[8] LIU T F, TIAN X Y, ZHANG Y Y, et al. High-pressure interfacial impregnation by micro-screw in-situ extrusion for 3D printed continuous carbon fiber reinforced nylon composites [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2020, 130: 105770.
[9] 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.
[10] 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.
[11] 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: 105812.
- [12] IRAGI M, PASCUAL-GONZALEZ C, ESNAOLA A, et al. Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fiber-reinforced thermoplastic laminates: Effects of processing conditions and microstructure[J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100884.
- [13] CAMINERO M A, CHACON J M, GARCIA MOERNO I, et al. Interlaminar bonding performance of 3D printed continuous fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling[J]. *Polymer Testing*, 2018, 68: 415-423.
- [14] YAVAS D, ZHANG Z, LIU Q, et al. Interlaminar shear behavior of continuous and short carbon fiber reinforced polymer composites fabricated by additive manufacturing[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 204: 108460.
- [15] SOMIREDDY M, SINGH C V, CZEKANSKI A. Mechanical behaviour of 3D printed composite parts with short carbon fiber reinforcements[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 107: 104232.
- [16] KONG X, LUO J, LUO Q, et al. Experimental study on interface failure behavior of 3D printed continuous fiber reinforced composites[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59: 103077.
- [17] CAI R, WEN W, WANG K, et al. Tailoring interfacial properties of 3D-printed continuous natural fiber reinforced polypropylene composites through parameter optimization using machine learning methods[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 32: 103985.
- [18] TOUCHARD F, CHOCINSKI-ARNAULT L, FOURNIER T, et al. Interfacial adhesion quality in 3D printed continuous CF/PA6 composites at filament/matrix and interlaminar scales[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 218: 108891.
- [19] DANG Z, CAO J, PAGANI A, et al. Fracture toughness determination and mechanism for mode-I interlaminar failure of 3D-printed carbon-Kevlar composites[J]. *Composites Communications*, 2023, 39: 101532.
- [20] ASTM International. Standard test methods for density and specific gravity (relative density) of plastics by displacement: ASTM D792—2008[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2008.
- [21] 中华人民共和国标准化管理局, 国家质量监督检验检疫总局. 塑料差示扫描量热法 (DSC) 第 3 部分: 温度、熔化和结晶熔的测定: GB/T 19466.3—2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- Standardization Administration of the People's Republic of China, State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Plastic—Differential scanning calorimetry (DSC)—Part 3: Determination of temperature and enthalpy of melting and crystallization: GB/T 19466.3—2004[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004(in Chinese).
- [22] International Organization for Standardization. Plastics—Determination of temperature of deflection under load—Part 2: Plastics, ebonite and long-fibre-reinforced composite: ISO 75-2—2013[S]. Geneva: ISO Copyright Office, 2013.
- [23] ASTM International. Standard test method for mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites: ASTM D7905—19[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- [24] 王雅娜, 赵魏. 复合材料 II 型分层 ENF 试验数据处理方法对比分析[J]. *复合材料科学与工程*, 2022(7): 81-92.
- WANG Yana, ZHAO Wei. Comparative analysis of data processing methods for type II layered ENF testing of composite materials[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2022(7): 81-92(in Chinese).
- [25] BLACKMAN B R K, BRUNNER A J, WILLIAMS J G. Mode II fracture testing of composites: A new look at an old problem[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2006, 73(16): 2443-2455.
- [26] QIU Y, CRISFIELD M A, ALFANO G. An interface element formulation for the simulation of delamination with buckling[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001, 68(16): 1755-1776.
- [27] CAMANHO P, DÁVILA C. Mixed-mode decohesion finite elements for the simulation of delamination in composite materials[R]. Hanover: NASA, 2002, 6: 211737.
- [28] TURON A, DAVILA C G, CAMANHO P P, et al. An engineering solution for using coarse meshes in the simulation of delamination with cohesive zone models[R]. Washington: NASA, 2005, 3: 213547.
- [29] BORG R, NILSSON L, SIMONSSON K. Simulation of low velocity impact on fiber laminates using a cohesive zone based delamination model[J]. *Composites Science & Technology*, 2004, 64(2): 279-288.
- [30] ALFANO G. On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models[J]. *Composites Science and Technology*, 2006, 66(6): 723-730.
- [31] ZHAO L B, GONG Y, QIN T L, et al. Failure prediction of out-of-plane woven composite joints using cohesive element[J]. *Composite Structures*, 2013, 106: 407-416.