

DOI:10.11918/202310014

3D 打印 CFRP-I 型层间断裂韧性的 断层替换测试法及参数化分析

陈鹏宇¹, 杨冰晨¹, 药天运², 许方舟¹, 赵煜¹, 周勇军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)

摘要: 为实现 3D 打印碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP) I 型层间断裂韧性的测试分析, 并量化评价打印参数对该型断裂韧性的影响规律, 推进 3D 打印 CFRP 技术在桥梁工程中的应用, 分别从试验及仿真角度开展了相关探索。首先, 提出了一种新型的 3D 打印 CFRP 层间预制裂纹制备方法—断层替换法, 利用该方法开展了系统性的试验研究, 分析了两类关键打印参数对 I 型层间断裂韧性的影响规律。其次, 基于内聚区理论及 surface-based cohesive 关系, 构建了各类打印工况下的预制裂纹试件双悬臂梁(double cantilever beam, DCB)试验的仿真模型, 并完成了仿真计算与试验测试的对比分析。结果表明: 3D 打印 CFRP 的 I 型层间断裂韧性随着打印温度及速度的提高而增大, 且打印温度对断裂韧性的影响更显著, 当温度由 245 °C 升至 285 °C 时, 断裂韧性提高了 294.6%; 当速度由 20 mm/s 增至 60 mm/s 时, 断裂韧性提高了 27.6%; 当打印温度与速度提高时, 试件在打印过程中热量散失更小, I 型层间力学性能得到提高; 但当打印速度过大时, 印材在打印过程中无法完全沉积并实现较好的黏结, 反而对 I 型层间力学性能造成负面影响。同时, 仿真结果与试验数据的相对误差均控制在 15% 以内, 表明提出的断层替换法在 I 型层间断裂韧性试验数据获取方面是合理且稳定的。因此, 该方法可为后续量化评价 3D 打印 CFRP 桥梁工程构件的层间力学性能提供试验技术支撑。

关键词: 桥梁工程; 3D 打印 CFRP; I 型层间断裂韧性; 断层替换法; 内聚区理论

中图分类号: TB332

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)11-0088-14

Fracture layer replacement method and parameterized analysis of mode I inter-layer fracture toughness of 3D printing CFRP

CHEN Pengyu¹, YANG Bingchen¹, YAO Tianyun², XU Fangzhou¹, ZHAO Yu¹, ZHOU Yongjun¹

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to test and analyze the mode I inter-layer fracture toughness of 3D printing carbon fiber reinforced polymer (CFRP), and quantitatively evaluate the influence of printing parameters on the mode I fracture toughness, then promote the application of 3D printing CFRP technology in bridge engineering, experimental and simulation methods were used to carry out the relevant explorations, during this study. Firstly, a novel method for preparing inter-layer pre-cracks of 3D printing CFRP was proposed, namely fracture layer replacement method. Systematic experimental research was conducted by this method, and the influence of two types of key printing parameters on the mode I inter-layer fracture toughness was analyzed. Secondly, based on the cohesive zone theory and the surface-based cohesive relationship, simulation models of the double cantilever beam (DCB) test specimens with pre-cracks under various printing conditions were established. Meanwhile, a comparative analysis between simulation and experiment was carried out. The results indicate that the mode I inter-layer fracture toughness of 3D printing CFRP increases with the increase of printing temperature and printing speed, and the effect of printing temperature is more significant. When the temperature increases from 245 °C to 285 °C, the fracture toughness increases by 294.6%. When the printing speed increases from 20 mm/s to 60 mm/s, the fracture toughness increases by 27.6%. When the printing temperature and speed are increased, the heat loss of specimen in the printing process is smaller, and the mode I inter-layer mechanical properties are improved. However, excessive printing speed can hinder complete deposition and optimal bonding, resulting in negative effects on the mode I inter-layer mechanical properties. Moreover, the relative errors between simulation results and experimental data are controlled within 15%, which indicates that the fracture replacement method proposed in this

收稿日期: 2023-10-09; 录用日期: 2023-11-05; 网络首发日期: 2023-12-20

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20231219.1604.004>

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1600302); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102282108); 陕西省自然科学基金(2022JM-275)

作者简介: 陈鹏宇(1998—), 男, 硕士研究生; 赵煜(1974—), 男, 教授, 博士生导师; 周勇军(1978—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 药天运, yao_yao2021@chd.edu.cn

study is reasonable and stable in terms of obtaining test data of type I inter-layer fracture toughness. Therefore, this method can provide experimental technical support for the subsequent quantitative evaluation of inter-layer mechanical properties of 3D printing CFRP bridge engineering components.

Keywords: bridge engineering; 3D printing CFRP; mode I inter-layer fracture toughness; fracture layer replacement method; cohesion zone theory

当前,3D 打印技术^[1-4]与纤维增强树脂基复合材料(fiber reinforced polymer,FRP)^[5-8]在桥梁等土木工程领域的应用备受关注,3D 打印 FRP 技术将上述两项技术的优势相结合,工程应用前景广阔,例如锚具及结构复杂构件的制作等用途。然而,由于其制备工艺的特殊性以及材料自身的结构性,导致 3D 打印 FRP 材料易发生分层损伤失效,使得该种材料所制作构件在受载后容易发生沿材料层间的破坏,严重制约了该项技术的推广^[9]。因此,针对 3D 打印 FRP 材料的层间力学性能,国内外学者展开了相关研究。

文献[10-11]利用纤维施胶及微螺杆原位挤出工艺提高了材料的层间强度,展开了相关研究;文献[12-13]利用调节基体黏度、预浸渍以及等离子体-激光协同辅助等方式显著提高了打印材料的层间强度;文献[14]设计了一种气体辅助喷头,提高了打印件的层间强度;文献[15-16]选取不同打印参数为研究变量,对试件层间性能进行了试验研究;文献[17]将退火与否作为研究变量进行了研究。上述研究仅从 3D 打印的工艺及设备入手进行研究,缺乏细观角度分析。文献[18-19]研究了低压退火参数对于试件层间性能和细观组织的影响;文献[20]通过合成增塑剂提高了试件层间黏结性能,并从细观角度进行分析;文献[21]通过对短碳纤维进行表面改性,研究了对试件层间黏结强度的影响,并分析其细观原因。上述在研究打印工艺影响的基础上增加了细观机理探索,但缺乏参数化细致分析。文献[22]对碳纤维/尼龙打印层压板的层内与层间性能进行研究,并分析了最终成型材料的缺陷对试件横向及层间力学性能的影响;文献[23]通过力学试验,分析层厚对试件 I 型层间断裂韧性的影响通过研究打印温度的影响,提出了最佳打印温度及温度补偿本构模型;文献[24]通过研究打印温度的影响,提出了最佳打印温度及温度补偿本构模型。上述研究虽均进行了 3D 打印 FRP 层间力学性能的分析,但仍存在两点限制:1) 缺少科学合理的层间预制裂纹试件制备方法;2) 尚未对材料层间力学性能的影响因素展开系统的理论分析。本文提出了一种全新的 3D 打印 FRP 材料层间预制裂纹试件制备方法-断层替换法,基于该方法较为系统的量化研究了两类打印参数对 I 型层间断裂韧性的影响趋势;同时,基于内聚区理论及 surface-based cohesive 关系

构建了双悬臂梁(double cantilever beam,DCB)试验的仿真模型,通过试验与仿真相互佐证的方式验证了断层替换法的合理性及稳定性。

1 试验

1.1 打印原材料

本文将研究对象聚焦为 3D 打印碳纤维增强树脂基复合材料(carbon fiber reinforced polymer,CFRP),该材料由增强相短切碳纤维(carbon fiber,CF)及基体相聚酰胺(polyamide 6-PA6)组成。具体型号为 polyamidePA6-CF 印材,横截面直径为 1.75 mm,玻璃态转变温度为 220 °C,该原材料碳纤维表面经过化学处理后层间强度明显提高,其中碳纤维含量为 25% (质量分数)。

1.2 成型材料细观结构

熔丝制造 3D 打印技术的成型原理为将印材送入加热端加热至熔融态并挤出,挤出的印材在层积过程中冷却固化,随着喷头移动与基床下降逐层打印试件,打印技术原理如图 1 所示。打印过程中,印材底部因接触到已固化材料时发生塑性流动而变得扁平,而上部在固化过程中仍然保持圆形轮廓。因此,印材间形成贯通倒三角形空隙,削弱了材料的层间力学性能,试件沿打印方向的断裂面细观结构如图 2 所示,该细观结构通过扫描电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)获得,图 2 坐标中,1 方向为印材打印方向,2 方向为层内垂直于印材的方向,3 方向为试件厚度方向。

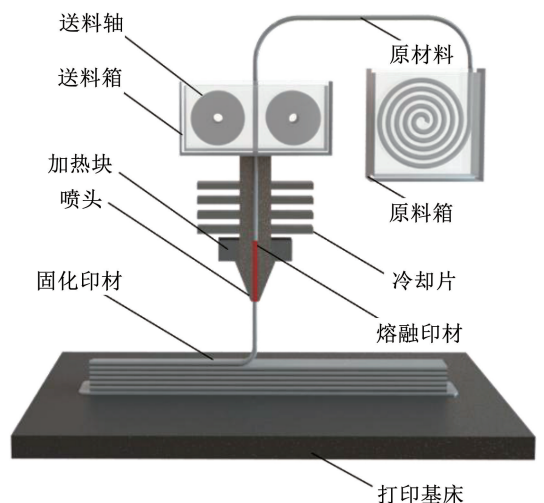


图 1 熔丝制造 3D 打印技术原理

Fig.1 Principles of fused filament fabrication 3D printing technology

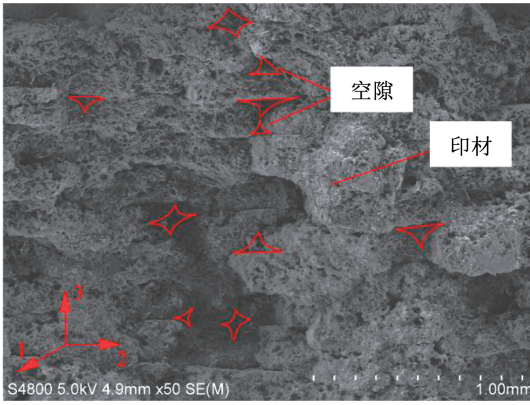


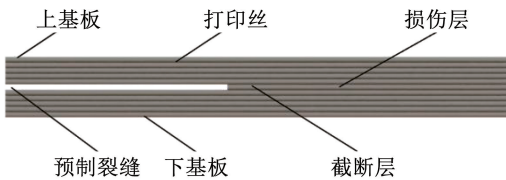
图 2 3D 打印碳纤维增强树脂基复合材料的细观结构

Fig. 2 Meso-structures of 3D printing carbon fiber reinforced polymer (CFRP)

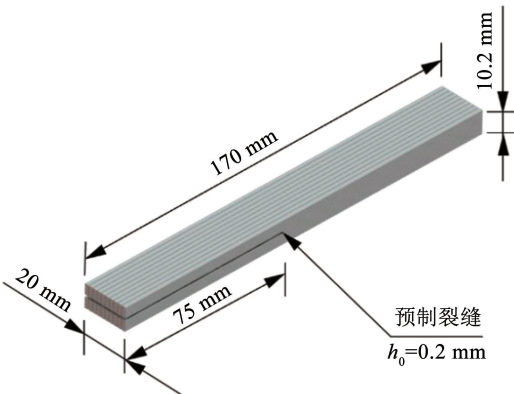
1.3 试件制备

1.3.1 试件几何特征

本文参考 ASTM D5528-13^[25] 完成 I 型层间断裂韧性试验试件的设计及制备,具体试验方法为双悬臂梁(double cantilever beam, DCB)试验。如图 3 所示,3D 打印 DCB 试件分为上基板、损伤层与下基板三部分,其中损伤层包括预制裂纹及截断层。为适应打印技术的特征,试件尺寸在规范给定的基础上进行了微调,具体为 170 mm × 20 mm × 10.2 mm,预制裂纹长度为 75 mm,上、下基板厚度设计为 5 mm,损伤层厚度为 0.2 mm。



(a) 3D 打印双悬臂梁试件的几何特征



(b) 3D 打印 DCB 试件的尺寸

图 3 3D 打印 DCB 试件

Fig. 3 3D printing DCB specimens

1.3.2 参数设置

根据前期预研资料,打印温度及速度对印材层

间力学性能影响较为明显,因此将上述两类参数作为敏感参数进行系统性分析。考虑印材的热力学特征,打印温度的分别选取为 245、255、265、275 ℃ 及 285 ℃。当打印速度过大时,印材被喷头拖拉而产生脱层现象^[26],削弱层间力学性能;当打印速度过小时,已成型印材热量散失过快,影响层间黏结特性,故打印速度的分别选取为 20、30、40、50 mm/s 及 60 mm/s。此外,当研究打印温度的影响时,打印速度固定为 40 mm/s;当研究打印速度的影响时,打印温度固定为 275 ℃。试件共有 9 组不同的参数设置,各组试件的打印温度和速度见表 1。试件其他打印参数:填充率为 99%,喷头直径为 0.6 mm,机床温度为 90 ℃,打印层厚为 0.2 mm。

表 1 试件打印参数

Tab. 1 Printing parameters of specimens

试件编号	打印温度/℃	打印速度/(mm · s ⁻¹)
1	245	40
2	255	40
3	265	40
4	275	40
5	285	40
6	275	20
7	275	30
8	275	50
9	275	60

1.3.3 试件打印

考虑熔丝制造 3D 打印技术的工艺特点,本文提出断层替换法完成预制裂纹试件的制备,打印过程如图 4 所示,具体流程如下:1) 上传模型文件,打印喷头及基床预热,在基床打印位置处涂胶,保证打印过程印材与基床保持黏结状态;2) 采用熔丝制造 3D 打印工艺对试件底板、下基板与损伤层进行打印,损伤层打印完成后打印机自动暂停;3) 利用无黏结非光滑纸代替试件的预制裂纹,为防止上基板变形,与下基板黏结削弱,纸张应放置平整且迅速,纸张放置时间应控制在 10 s 左右,借助磁铁块放置纸张。由于打印机基床温度设为 90 ℃,并在打印过程中恒定,延缓了印材在放置纸张过程中冷却速度,防止印材在纸张放置后固化。纸张宽度控制为 73.5 mm,保证试件前端 1.5 mm 内上、下基板黏结,防止上基板翘曲,该操作及纸张的性质使得试件上、下基板分离的同时防止试件变形,使得预制裂纹尖端的力学性能不受影响;4) 纸张放置完成后,重启打印机,继续打印完成试件剩余部分,试件打印完成后,从基床上移除试件,去除试件底板及纸张多余部分。

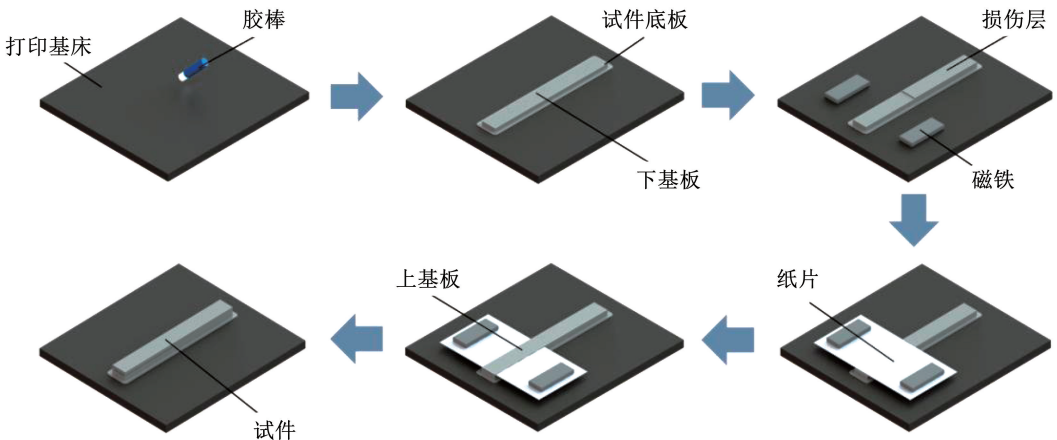


图 4 预制裂纹试件打印方法

Fig. 4 Printing method of pre-crack specimens

1.4 试件处理

根据 ASTM D5528-13^[25], 本文采用铰链传递拉伸荷载使试件发生 I 型分层, 进而完成 DCB 试验。其中, 铰链由贴片、辊轴与夹片构成, 辊轴使得夹片在加载过程中可绕贴片转动, 保证上、下基板自由弯曲, 铰链的具体构造如图 5 所示。

1.5 试验方法

本文采用万能试验机与电子显微镜完成相关试验, 试验具体分两步: 1) 预拉伸; 2) 正式拉伸。首先是预拉伸阶段, 利用试验机夹头固定试件, 采用较快加载速度进行预拉 (5 ~ 10 mm/s), 撕开试件前端黏结部分后立即停止加载。其次为正式加载阶段, 开启电子显微镜并将镜头对准裂纹尖端, 以 1 ~ 2 mm/s 的速度进行位移加载 (准静载)。加载过程中牵引力 - 位移曲线由试验机系统记录, 裂纹扩展长度借助电子显微镜观察, 并根据万能试验机记录不同裂纹长度相应牵引力值, 直至裂纹扩展完整个标注范围。试验设备及测试过程如图 7 所示, 试件裂纹扩展过程如图 8 所示。为避免试验数据的偶然性, 每种工况设置 3 组平行试验进行数据采集, 并将 3 组平行试验的数据进行平均, 作为与仿真分析对比的依据。

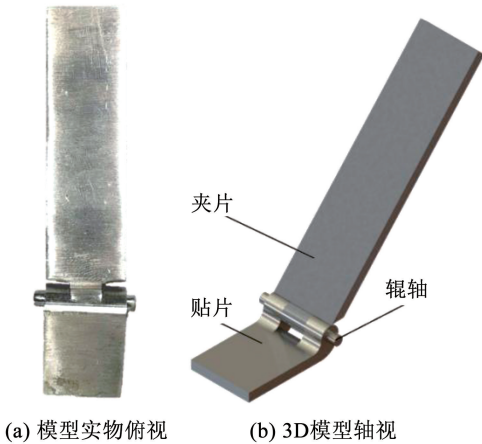


图 5 铰链详细构造

Fig. 5 Details of hinge structure

试件打印完后, 去除多余纸张, 在试件端部粘贴铰链。从预制裂纹末端开始涂白, 并对涂白部位标注刻度线, 共标注 20 mm, 前 5 mm 及后 5 mm 分度为 1 mm, 其余分度为 5 mm, 具体如图 6 所示。

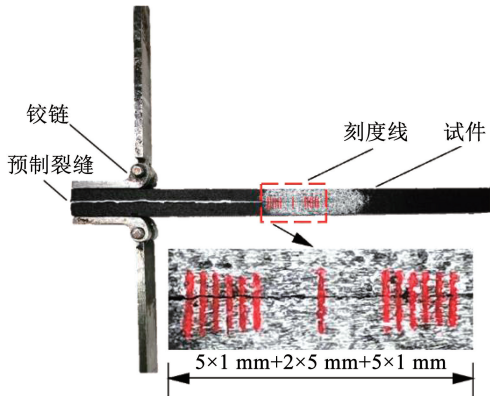


图 6 I 型层间断裂韧性测试试件准备

Fig. 6 Preparation for specimens of mode I fracture toughness

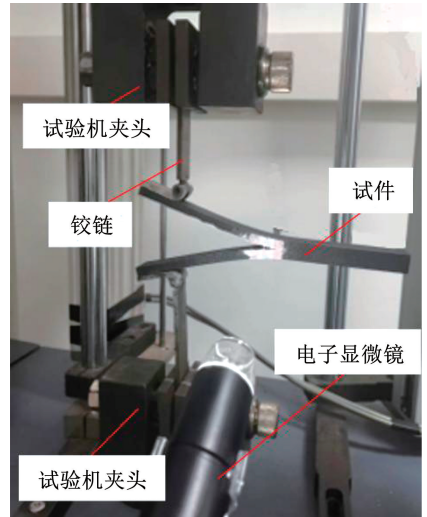


图 7 试验设备及测试过程

Fig. 7 Experimental equipment and testing process

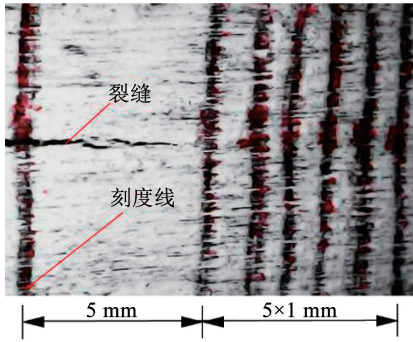


图 8 试件裂纹扩展过程

Fig. 8 Crack propagation process of specimens

1.6 试验数据处理理论

采用柔度校准法完成 I 型层间断裂韧性的计算, 原理根据 ASTM D5528-13^[25] 规定, DCB 试件断裂过程中层间断裂韧性可按式(1)计算:

$$G_{IC} = -\frac{1}{b} \cdot \frac{dU}{da} \quad (1)$$

式中: U 为试件总应变能, $U = -\frac{1}{2}P\delta$, 其中 P 为试样所受荷载, δ 为上、下基板在夹片处的相对张开位移; b 为试件宽度; a 为裂纹长度, 取夹片位置到裂纹尖端的距离。

DCB 试样的柔度 C 采用式(2)计算:

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (2)$$

根据 Berry^[26] 提出的柔度 C 与裂纹长度 a 成比例假设, 柔度的表达式为

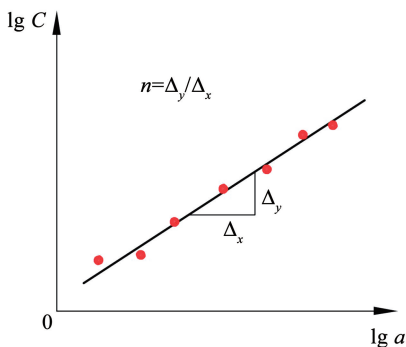
$$C = Za^n \quad (3)$$

式中 Z 、 n 为回归参数。

上述回归参数 Z 、 n 可对式(3)取对数后, 对 $\lg C$ 与 $\lg a$ 的试验数据进行最小二乘拟合得到, 如图 9 所示。将式(1)、(2)、(3)联列, 得到柔度校准法 I 型层间断裂韧性值计算式:

$$G_{IC} = \frac{nP\delta}{2ba} \quad (4)$$

式中 P 、 δ 及 a 均取裂纹开始扩展时的值进行计算。

图 9 $\lg C$ 与 $\lg a$ 线性拟合^[27]Fig. 9 Linear fitting of $\lg C$ and $\lg a$ ^[27]

2 仿真分析

2.1 计算理论

2.1.1 内聚区模型

采用内聚区模型模拟打印材料层间力学行为, 如图 10 所示, 该理论认为复合材料在发生分层过程中, 裂纹分为彻底分离自由面与存在内聚力的裂纹尖端两部分。内聚力在裂纹尖端范围内呈非线性分布, 其内聚力发展情况在分层损伤过程中, 受牵引-分离定律控制。

随着牵引点相对位移增大, 裂纹尖端界面发生相对位移, 界面内聚力随之增大; 当牵引点相对位移达到临界值 δ_m^0 , 材料开始出现不可逆损伤, 内聚力 σ 随牵引点相对位移增大开始减小。当裂纹尖端能量释放率达到材料的层间断裂韧性 G_{IC} 之后, 裂纹尖端完全张开, 内聚力减小为 0, 内聚区黏结失效, 新的裂纹形成并向前扩展, 断裂韧性值 G_{IC} 可由 σ - δ 曲线所围面积求出, 计算式为

$$G_{IC} = \int \sigma d\delta = \int f(\delta) d\delta \quad (5)$$

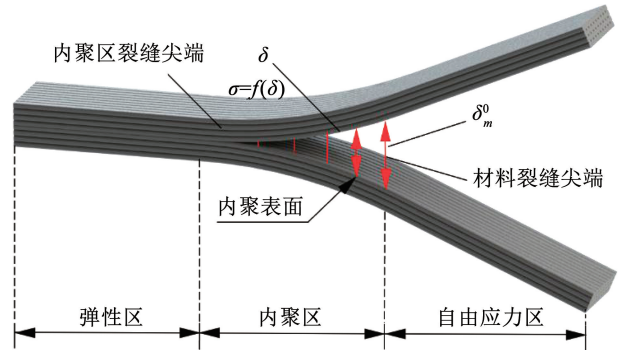


图 10 内聚区裂纹扩展

Fig. 10 Crack propagation of cohesive zone

2.1.2 内聚区本构及其数值实现

在 ABAQUS 模型中, 内聚力本构模型计算分为未损伤阶段、损伤起始及损伤演化阶段, 各个阶段的本构关系不同。未损伤阶段采用如式(6)所示本构关系:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_n \\ \sigma_s \\ \sigma_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{nn} & E_{ns} & E_{nt} \\ E_{sn} & E_{ss} & E_{st} \\ E_{tn} & E_{ts} & E_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \\ \varepsilon_t \end{bmatrix} = \mathbf{E} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{sn} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{tn} & K_{ts} & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{bmatrix} = \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\delta} \quad (6)$$

$$K_{nn} = \frac{E_{nn}}{T_0} \quad (7)$$

$$K_{ss} = \frac{E_{ss}}{T_0} \quad (8)$$

表 3 打印温度为 275 °C 下的不同打印速度的初始界面刚度 K_0 及初始界面强度 σ_0

Tab.3 Initial interface stiffness K_0 and initial interface strength σ_0 with printing speed at 275 °C

打印速度/(mm · s ⁻¹)	K_0 /(kN · mm ⁻³)	σ_0 /MPa
20	1.7	1.7
30	1.3	1.3
50	3.3	3.0
60	2.8	3.0

3 结果与讨论

3.1 试验结果分析

3.1.1 打印温度的影响

不同打印温度下 DCB 试件的牵引力 - 位移曲线在图 13(a) ~ 13(e)中给出,同时将同一打印温度下不同试件的测试数据进行平均,实现不同打印温度下试验测试数据的对比分析,结果如图 13(f)所示。由图 14(f)可知,不同打印温度下牵引力 - 位移曲线上上升段的斜率近似相同,牵引力峰值随着打印温度的增加而增加,表明随打印温度的提高,试件的层间界面强度也会明显提高;且牵引力峰值对应位移,也随温度增加而增加(除 285 °C 外)。基于牵引力 - 位移试验数据,分别计算得到不同打印温度下材料的 I 型层间断裂韧性值,在表 4 中给出。此外,牵引力峰值在表 5 中给出。

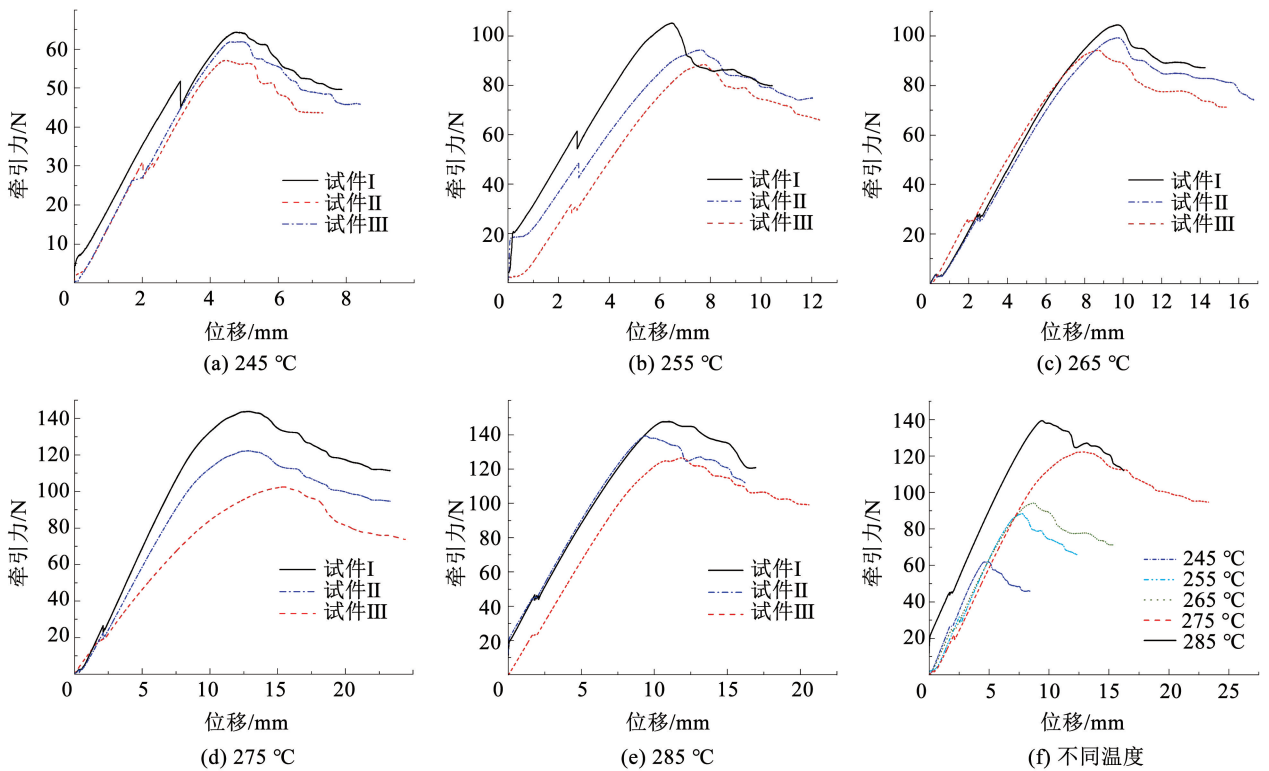


图 13 不同打印温度下的牵引力 - 位移试验曲线

Fig. 13 Experimental traction-separation curves with different printing temperatures

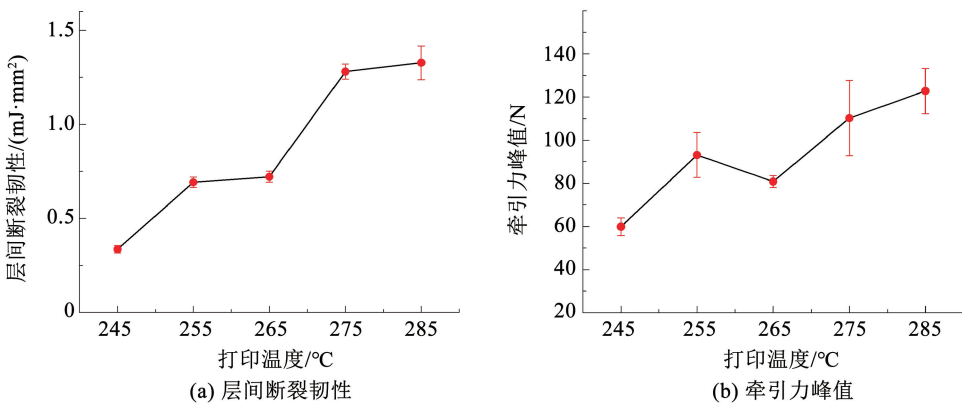


图 14 不同打印温度试件的层间断裂韧性与牵引力峰值

Fig. 14 Inter-layer fracture toughness and traction peak of specimens with different printing temperatures

表 4 不同打印温度下试件的 I 型层间断裂韧性值

Tab. 4 Mode I inter-layer fracture toughness of specimens with different printing temperatures

打印温度/℃	层间断裂韧性/($\text{mJ} \cdot \text{mm}^{-2}$)		
	试件 I	试件 II	试件 III
245	0.316	0.336	0.355
255	0.698	0.661	0.716
265	0.744	0.731	0.688
275	1.244	1.273	1.321
285	1.272	1.278	1.429

表 5 不同打印温度下试件的牵引力峰值

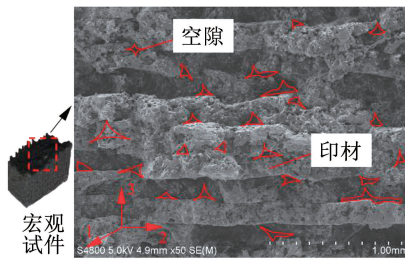
Tab. 5 Traction peak of specimens with different printing temperatures

打印温度/℃	牵引力峰值/N		
	试件 I	试件 II	试件 III
245	64.13	59.30	56.82
255	105.05	87.41	86.85
265	83.91	79.38	79.02
275	127.37	110.61	92.58
285	132.89	123.31	112.05

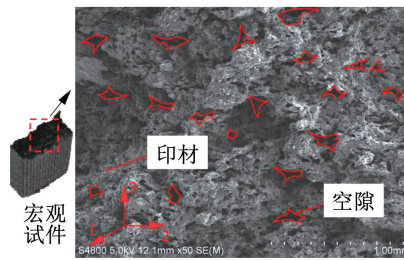
I 型层间断裂韧性及牵引力峰值随打印温度的变化曲线如图 14 所示,由图 14(a)可知,I 型层间断裂韧性随打印温度的升高而增大,当温度由 245 ℃

升至 255 ℃ 时,断裂韧性增加 105.95%,由 265 ℃ 升至 275 ℃ 时,增加 77.39%,此区间内增加速度较快;其余温度区间则增加速度较小,由 255 ℃ 升至 265 ℃ 时,增加 2.89%,由 275 ℃ 升至 285 ℃ 时,增加 3.67%。由图 14(b)可知,牵引力峰值的变化规律总体与层间断裂韧性相同,但在 265 ℃ 为例外情况,该温度下的牵引力峰值较 255 ℃ 下降了 13.24%。

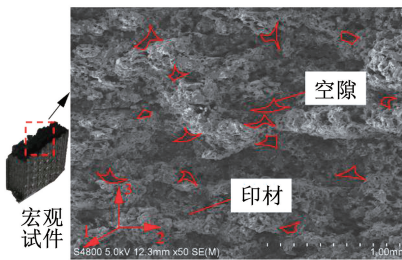
本文通过 SEM 观察不同打印温度下试件微观结构的差异,从微观尺度解释打印温度对层间力学性能的影响机理,不同打印温度下试件横断面微观结构如图 15 所示,图中仅标注较大空隙。图中可见,随着打印温度提高,试件内的空隙面积变小,原因为当打印温度升高时,熔融印材温度更高,使得印材固化时间更长,固化前会充分发生塑性流动,减小了层内及层间空隙;此外,已固化印材的温度也更高,后挤出印材可与其更好黏结。同时,由图 14(a)可知,当打印温度较高时,再增加温度,试件断裂韧性不再显著增加,对于所研究温度范围,275 ℃ 为较合理的打印温度,285 ℃ 时,断裂韧性仅提高 3.67%。其原因为此时试件质量已处于较好状态,其力学性能趋于传统压塑工艺,层间断裂韧性不再显著变化。



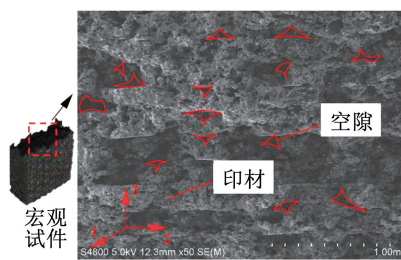
(a) 245 ℃



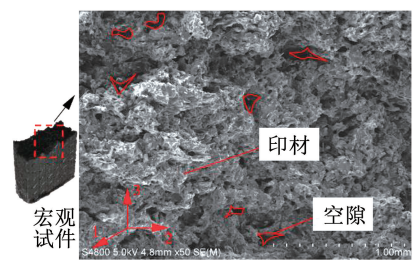
(b) 255 ℃



(c) 265 ℃



(d) 275 ℃



(e) 285 ℃

图 15 不同打印温度下试件的微观结构

Fig. 15 Meso-structures of specimens with different printing temperatures

3.1.2 打印速度的影响

将不同打印速度工况试件测得牵引力-位移曲线绘制如图 16(a)~16(d)所示,打印速度 40 mm/s 时的试验曲线与图 13(d)曲线相同,故不再重复。并对各组试件的牵引力-位移曲线进行平均作为该打印速度下结果,如图 16(e)所示。

由图 16(e)可知,改变打印速度时,牵引力-位移曲线上上升段的斜率也近似相同。各工况下牵引力峰值随打印速度增加而增加(除 60 mm/s、20 mm/s),说明提高打印速度时试件层间界面强度也会提高。基于试验数据,分别计算各组试件的层间断裂韧性在表 6 中给出,牵引力峰值在表 7 中给出。

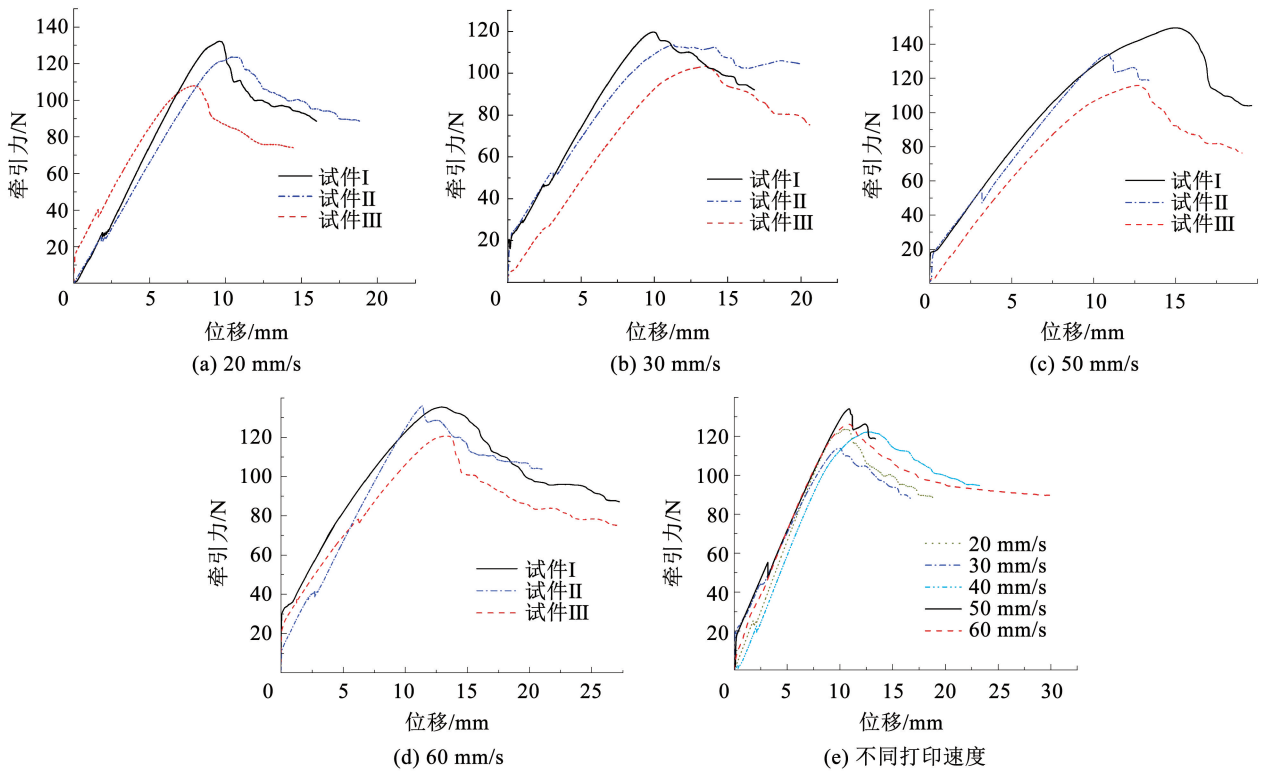


图 16 不同打印速度下的牵引力 - 位移试验曲线

Fig. 16 Experimental traction-separation curves with different printing speeds

表 6 不同打印速度下试件的 I 型层间断裂韧性值

Tab.6 Mode I inter-layer fracture toughness of specimens with different printing speeds

打印速度/(mm · s ⁻¹)	层间断裂韧性/(mJ · mm ⁻²)		
	试件 I	试件 II	试件 III
20	1.138	1.174	0.824
30	1.026	0.986	1.220
40	1.244	1.273	1.321
50	1.144	1.378	1.320
60	1.170	1.422	1.408

表 7 不同打印速度下试件的牵引力峰值

Tab.7 Traction peak of specimens with different printing speeds

打印速度/(mm · s ⁻¹)	牵引力峰值/N		
	试件 I	试件 II	试件 III
20	117.62	109.63	96.35
30	102.39	99.60	82.12
40	127.37	110.61	92.58
50	120.11	113.09	102.89
60	124.24	110.00	106.39

I型层间断裂韧性及牵引力峰值随打印速度变化曲线如图 17 所示,由图 17(a)可知,I型层间断裂

韧性随速度升高而增大,但增加缓慢,打印速度达到 30 mm/s 时仅增加 3.16%;达到 40 mm/s 时增加 18.64%;达到 50 mm/s 时,断裂韧性几乎不变,达到 60 mm/s 时增加 4.06%。由图 17(b)可知,当打印速度改变时,试件的牵引力峰值的变化不明显,只有速度为 30 mm/s 时降低了 12.76%,其余工况下牵引力峰值几乎相等。

本文通过 SEM 观察不同打印速度下试件微观结构的差异,从微观尺度解释打印速度对层间力学性能的影响机理,不同打印速度下试件横断面微观结构如图 18 所示,打印速度为 40 mm/s 时的结果与图 15(d)相同,故不再重复。图 18 中仅标注出较大空隙。由图 18 可见,随着打印速度提高,试件内的空隙面积变小,原因为当打印速度加快时,印材沉积过程中散失的热量更少,已沉积印材与新挤出印材在固化前能发生充分的塑性流动。但由图 17 可知,打印速度较高时,层间 I 型层间断裂韧性改善不显著。其原因为虽然此时印材散失的热量减少且黏结较好,但由于打印速度过快印材发生脱层或不完全沉积的概率增大,两种效应对断裂韧性的影响趋势是负相关的。在所研究打印速度范围内,40 mm/s 为推荐打印速度,60 mm/s 的速度下层间断裂韧性仅提高 4.22%。

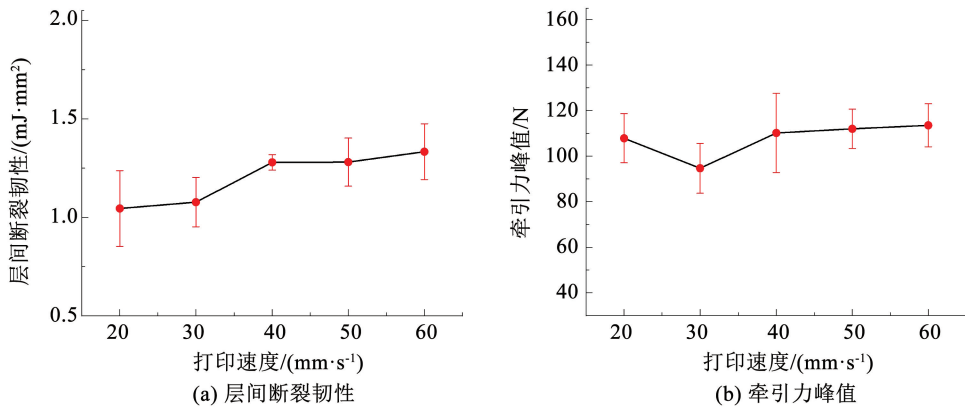


图 17 不同打印速度试件的层间断裂韧性与牵引力峰值

Fig. 17 Inter-layer fracture toughness and traction peak of specimens with different printing speeds

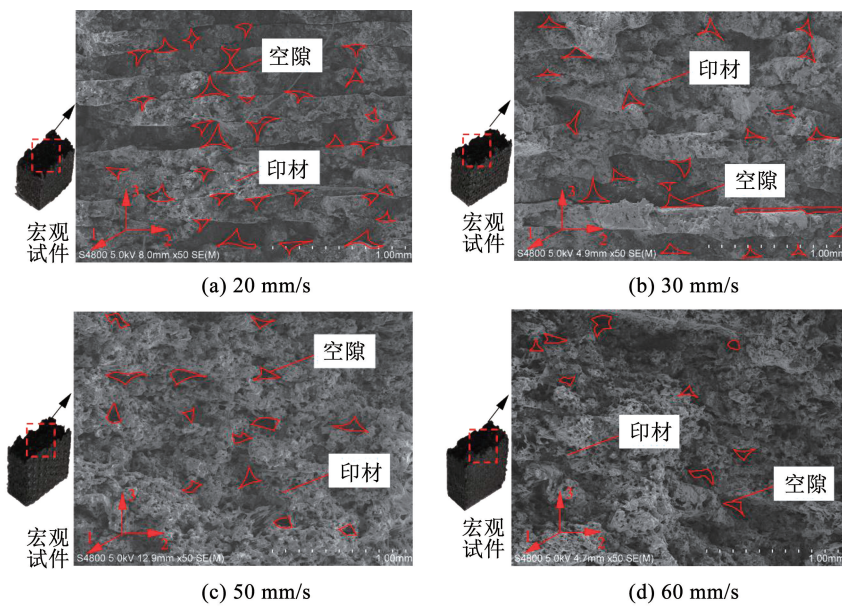


图 18 不同打印速度下试件的微观结构

Fig. 18 Meso-structures of specimens with different printing speeds

3.2 仿真与试验对比分析

3.2.1 收敛性分析

网格尺寸是影响计算时间及精度的重要因素, 应选取适当的网格尺寸进行仿真分析。在分析网格尺寸对收敛性的影响时, 选取打印温度为 $275\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、打印速度为 40 mm/s 的基准工况进行。将网格尺寸选取为 2.5 、 2 、 1.5 、 1 mm 和 0.75 mm 5 种, 分别计算 5 种网格尺寸下基准工况的牵引力 - 位移曲线, 网格尺寸为 2.5 mm 至 0.75 mm 范围时, 牵引力峰值从 120.21 N 变化为 134.42 N , 相应计算结果如图 19 所示。

由图 19 可知, 随着网格的不断加密, 仿真模型的解逐渐趋于收敛, 但网格过密会明显降低计算效率。研究表明, 采用自定义模式进行网格划分及计算, 计算时间可被缩短, 且计算结果精度高。因此, 本文采取自定义网格的方式来对模型进行网格划

分, 模型厚度方向上网格尺寸定为 0.625 mm , 宽度方向上定为 2.5 mm , 长度方向上定为 1.5 mm , 牵引力峰值为 134.48 N 。

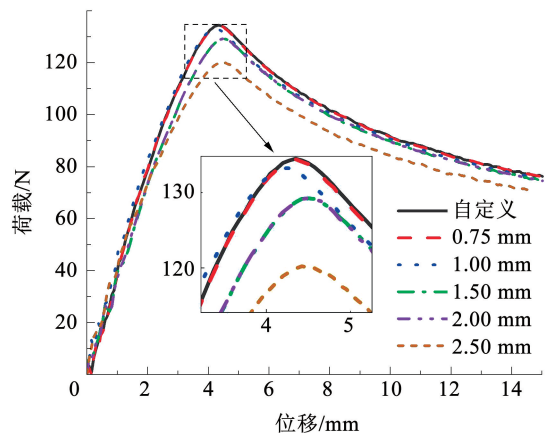


图 19 不同网格尺寸下牵引力 - 位移曲线

Fig. 19 Traction-displacement curves with different mesh sizes

3.2.2 变打印温度工况

图 20 中给出了不同打印温度下,牵引力 - 位移曲线仿真计算结果与试验测试数据的对比分析。在曲线的峰值附近,材料不再处于线弹性阶段,此时试件力学性能不稳定,仅需关注牵引力峰值及峰值对应位移,保证仿真计算结果与试验测试数据间的相对误差在 15% 之内即可。对曲线牵引力峰值及峰值对应位移的相对误差进行计算,计算结果在表 8 中给出。

由表 8 可知,牵引力峰值的相对误差较小,而峰值对应位移的相对误差较大。其原因:1) 试验过程中,牵引力的持续增加引起夹头与铰链之间相对滑移,导致所测量位移值整体偏大;2) 在加载初期铰链容易突然小范围打滑,造成骤然卸载,进一步导致试验所测峰值力对应位移偏大。但仿真计算结果与试验测试数据间的相对误差均保持在 15% 内,表明仿真计算结果与试验测量数据之间可以相互佐证。

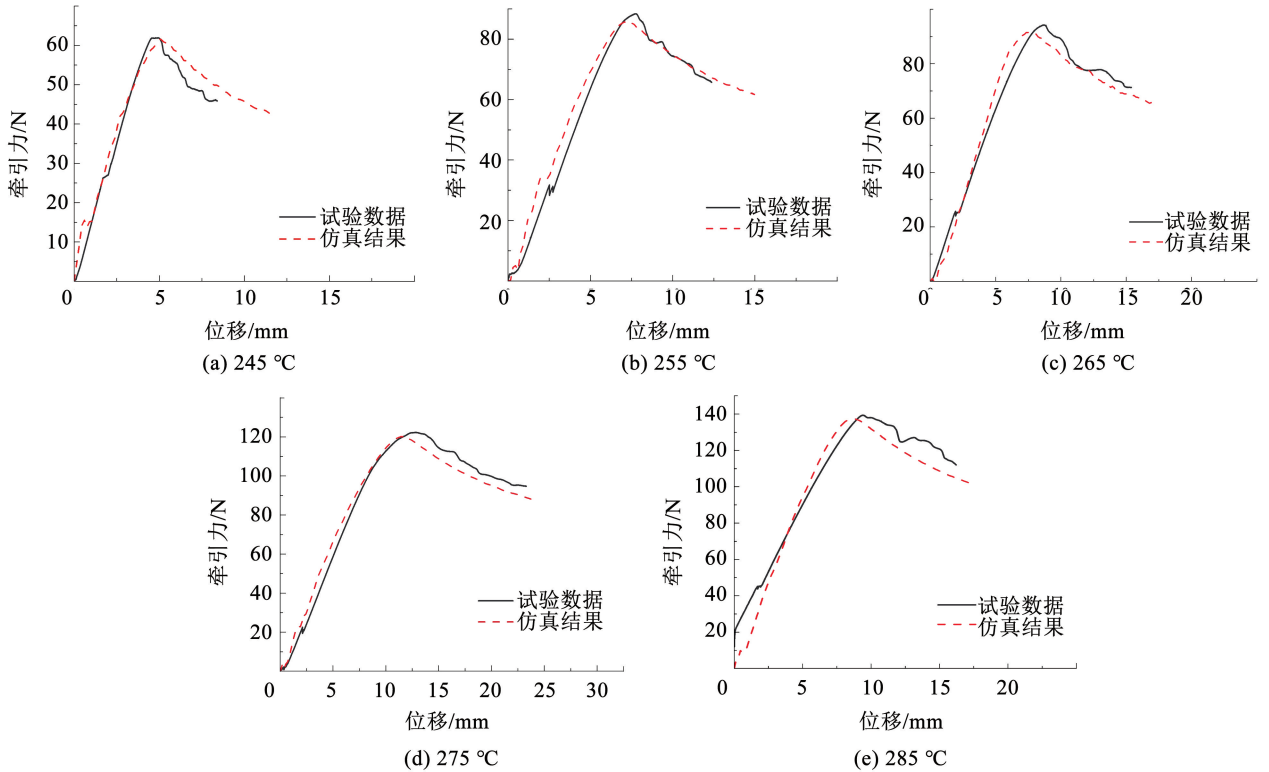


图 20 不同打印温度下仿真计算结果与实验测试数据对比

Fig. 20 Comparison between simulation results and experimental data with different printing temperatures

表 8 不同打印温度下仿真计算结果与试验测试数据间的相对误差

Tab. 8 Relative error between simulation results and experimental data with different printing temperatures

打印温度/°C	牵引力峰值			峰值对应位移		
	试验值/N	理论值/N	误差/%	试验值/mm	理论值/mm	误差/%
245	61.81	61.55	0.40	5.00	5.09	1.82
255	88.35	85.73	2.98	7.76	7.21	7.20
265	94.22	91.49	2.91	8.70	7.51	13.87
275	122.23	120.07	1.76	12.90	11.56	10.34
285	139.36	137.42	1.40	9.41	8.72	7.45

3.2.3 变打印速度工况

图 21 给出了不同打印速度下仿真计算结果与试验测试数据的对比分析,打印速度为 40 mm/s 时的计算曲线与图 20(d) 相同,对牵引力峰值及峰值对应位移的相对误差进行计算,计算结果在表 9 中给出。由表 9 可知,变打印速度工况下仿真计算结

果及试验测试数据之间的相对误差规律与变打印温度工况一致,牵引力峰值的相对误差较小,而峰值对应位移的误差较大,其原因与变打印温度工况下相同,为试验机夹头与铰链相对滑移以及加载初期铰链滑脱等。

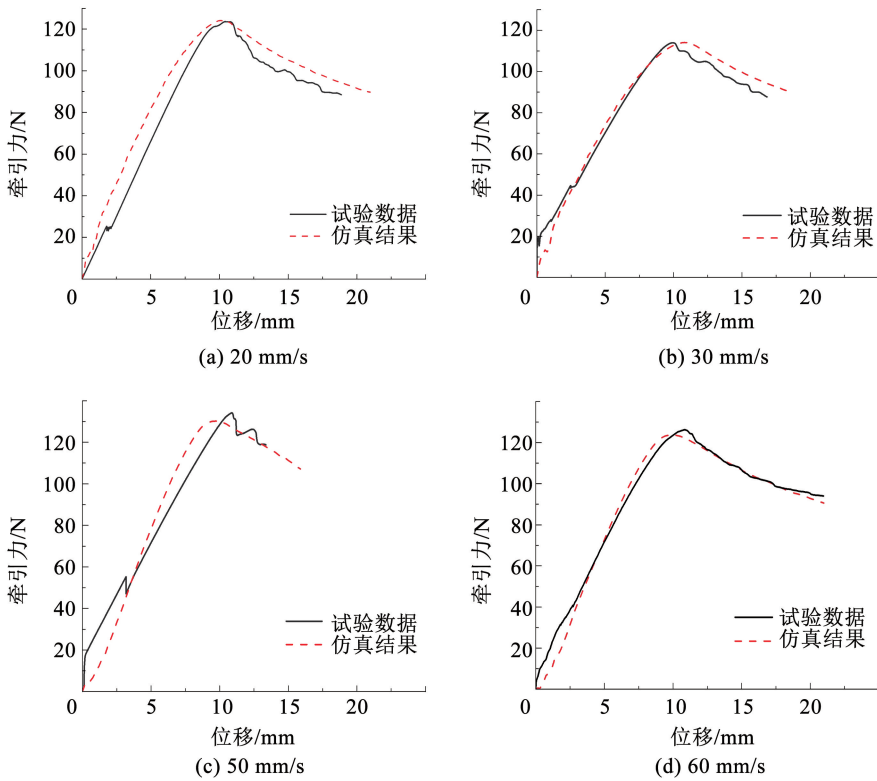


图 21 不同打印速度下仿真计算结果与实验测试数据对比

Fig. 21 Comparison between simulation results and experimental data with different printing speeds

表 9 不同打印速度下仿真计算结果与试验测试数据间的相对误差

Tab. 9 Relative error between simulation results and experimental data with different printing speeds

打印速度/(mm · s ⁻¹)	牵引力峰值			峰值对应位移		
	试验值/N	理论值/N	误差/%	试验值/mm	理论值/mm	误差/%
20	123.51	124.12	0.50	10.41	10.07	3.39
30	113.90	114.07	0.16	9.94	10.78	8.54
40	122.23	120.09	1.76	12.90	11.56	10.34
50	134.18	130.22	2.95	10.89	9.75	10.62
60	126.23	123.78	1.95	10.84	9.91	8.68

4 结 论

本文对 3D 打印 CFRP I 型层间断裂性能进行了系统性研究,设计了新型预制裂纹试件制备方法,将试验测试及仿真分析两种方法相结合,分析了 I 型层间断裂韧性对打印温度及打印速度的敏感性,得到如下结论:

1) 提出的断层替换法可用于层积成型 3D 打印复合材料的层间力学性能分析,该方法具有效率高、操作简单等优势,同时获取的试验数据稳定可靠,采用 surface-based cohesive 关系可以正确描述材料的 I 型层间失效现象。

2) 打印材料的 I 型层间断裂韧性随打印温度及速度的提高而增大,但存在上界,打印温度超过 275 °C 或者打印速度超过 40 mm/s 后,其变化幅度很小,

分别为 3.67% 及 4.22%。此外,峰值牵引力对打印速度不敏感。

3) 材料细观研究表明,随着打印温度及速度的提高,印材在固化前能发生更充分的塑性流动,使得印材间空隙更小,层间力学性能更好,从细观层次对材料的层间力学性能变化机理作了合理解释。

由于篇幅限制,本文仅对 I 型层间断裂韧性进行分析,后期可对 II 型层间断裂韧性进行相应研究。

参考文献

[1] GENG Songyuan, LUO Qiling, LIU Kun, et al. Research status and prospect of machine learning in construction 3D printing[J]. Case Studies in Construction Materials, 2023, 18; e01952. DOI: 10.1016/j.cscm.2023. e01952

[2] 冯鹏, 张汉青, 孟鑫森, 等. 3D 打印技术在工程建设中的应用及前景[J]. 工业建筑, 2019, 49(12): 154

- FENG Peng, ZHANG Hanqing, MENG Xinmiao, et al. The prospects and applications of printing for construction [J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(12): 154. DOI: 10.13204/j.gyjz201912027
- [3] 李施展. 3D 打印技术在香溪长江大桥施工测量中的应用[J]. *测绘通报*, 2021(增刊2): 121
- LI Shizhan. Application of 3D printing technology in construction survey of Xiangxi Yangtze River bridge [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2021(Sup. 2): 121. DOI: 10.13474/j.cnki.11-2246.2021.0601
- [4] 朱彬荣, 潘金龙, 周震鑫, 等. 3D 打印技术应用于大尺度建筑的研究进展[J]. *材料导报*, 2018, 32(23): 4150
- ZHU Binrong, PAN Jinlong, ZHOU Zhenxin, et al. Advances in large-scale three-dimensional printing technology applied in construction industry [J]. *Materials Reports*, 2018, 32(23): 4150. DOI: 10.11896/j.issn.1005-023X.2018.23.017
- [5] 刘志明, 陈静芬, 毛欢, 等. 纤维增强复合材料混合模式分层破坏数值模拟研究[J]. *应用力学学报*, 2023, 40(3): 545
- LIU Zhiming, CHEN Jingfen, MAO Huan, et al. Numerical simulations of mixed-mode delamination in fiber-reinforced composite materials [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2023, 40(3): 545. DOI: 10.11776/j.issn.1000-4939.2023.03.006
- [6] 姜逸群, 彭晖, 兰川云, 等. 端部嵌贴 CFRP 板加固 RC 结构的斜嵌段黏结性能试验[J]. *复合材料学报*, 2024, 41(2): 871
- LOU Yiqun, PENG Hui, LAN Chuanyun, et al. Experiment of bonding performance of inclined embedded section of RC structure reinforced with near-end enhanced embedded CFRP strip [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2024, 41(2): 871. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20230530.001
- [7] 白玉磊, 张玉峰, 梅世杰, 等. 大应变 FRP 加固连续梁桥地震易损性分析[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2023, 55(9): 84
- BAI Yulei, ZHANG Yufeng, MEI Shijie, et al. Seismic fragility of continuous girder bridge reinforced with large rupture strain FRP [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2023, 55(9): 84. DOI: 10.11918/202111054
- [8] 刘昌永, 孙士鹏, 胡清, 等. FRP-钢夹层复合管混凝土桥墩轴压承载力试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2018, 50(12): 31
- LIU Changyong, SUN Shipeng, HU Qing, et al. FRP-interlayer-steel tube concrete column piers under axial compression [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2018, 50(12): 31. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201801162
- [9] 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
- ZHAO Libin, GONG Yu, ZHANG Jianyu. A survey on delamination growth behavior in fiber reinforced composite laminates [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(1): 171. DOI: 10.7527/S1000-6893.2018.22509
- [10] LIU Tengfei, TIAN Xiaoyong, ZHANG Manyu, 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. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.09.001
- [11] LIU Tengfei, TIAN Xiaoyong, ZHANG Yayuan, 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. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105770
- [12] LUO Meng, TIAN Xiaoyong, SHANG Junfan, 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. DOI: 10.1016/j.compositesa.2019.03.020
- [13] LUO Meng, TIAN Xiaoyong, SHANG Junfang, 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. DOI: 10.1016/j.compositesa.2020.105812
- [14] 肖建华, 许煌翔, 刘晓波. 一种 FDM 成形中气体辅助喷头的设计及其对打印件力学性能的影响[J]. *塑性工程学报*, 2023, 30(1): 208
- XIAO Jianhua, XU Huangxiang, LIU Xiaobo. Design of a gas-assisted nozzle in FDM molding and its influence on mechanical properties of printing parts [J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2023, 30(1): 208. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2012.2023.01.027
- [15] 王琛, 任思雨, 张晨赟. 成型参数对 3D 打印柔性聚氨酯制件层间黏结性能的影响[J]. *塑料工业*, 2023, 51(5): 181
- WANG Chen, REN Siyu, ZHANG Chenyun. Effect of molding parameters on interlaminar bonding properties of 3D printed flexible polyurethane parts [J]. *China Plastics Industry*, 2023, 51(5): 181. DOI: 10.3969/j.issn.1005-5770.2023.05.027
- [16] 徐奔, 张守玉, 水锋, 等. 连续碳纤维增强聚苯硫醚复合材料的 3D 打印及力学性能优化[J]. *高分子材料科学与工程*, 2022, 38(7): 84
- XU Ben, ZHANG Shouyu, SHUI Feng, et al. 3D printing and mechanical properties optimization of continuous carbon fiber reinforced polyphenylene sulfide composites [J]. *Polymer Materials Science & Engineering*, 2022, 38(7): 84. DOI: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2022.0148
- [17] 喻红, 杨孟茹, 吴悠, 等. 3D 打印参数对制品层间黏结性能的影响[J]. *中国塑料*, 2018, 32(6): 92
- YU Hong, YANG Mengru, WU You, et al. Effect of 3D printing parameters on interlayer adhesive properties of printed parts [J]. *China Plastics*, 2018, 32(6): 92. DOI: 10.19491/j.issn.1001-9278.2018.06.014
- [18] YU Xiao, SONG Wenzhe, ZHENG Jinghua, et al. Effects of low-pressure annealing on the performance of 3D printed CF/PEEK composites [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 2023, 2(2): 100076. DOI: 10.1016/j.cjmeam.2023.100076
- [19] YILMAZ M, YILMAZ N F, KALLAN M F. Rheology, crystallinity, and mechanical investigation of interlayer adhesion strength by thermal annealing of polyetherimide (PEI/ULTEM 1010) parts produced by 3D printing [J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2022, 31(12): 9900. DOI: 10.1007/S11665-022-07049-Z
- [20] LYU Yang, CHEN Yanlu, LIN L, et al. Architecture of covalent bonds between filament layers to enhance performance of 3D printing biodegradable polymer blends [J]. *Polymer Testing*, 2022, 106: 107456. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2021.107456
- [21] ZHANG Zimeng, LIU Ruochen, LI Wei, et al. Frontal polymerization-assisted 3D printing of short carbon fibers/dicyclopentadiene composites [J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 71: 753. DOI: 10.1016/j.jmapro.2021.10.014
- [22] IRAGI M, PASCUAL-GONZALEZ C, ESNAOLA A, et al. Ply and interlaminar behaviours of 3D printed continuous carbon fibre-reinforced thermoplastic laminates; effects of processing conditions and microstructure [J]. *Additive Manufacturing*, 2019, 30: 100884. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100884
- [23] SOMIREDDY M, SINGH C V, CZEKANSKI A. Mechanical behaviour of 3D printed composite parts with short carbon fiber

- reinforcements [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 107: 104232. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2019.104232
- [24] ZHU Kaiyang, DENG Zichen, DAI Shi, et al. Temperature-compensated constitutive model of fused filament fabrication 3D printed PLA materials with full extrusion temperatures[J]. *Rapid Prototyping Journal*, 2021, 28(1): 41. DOI: 10.1108/RPJ-04-2021-0101
- [25] ASTM International. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites: ASTM D5528-13 [S]. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2013
- [26] BERRY J. Determination of fracture surface energies by the cleavage technique[J]. *Journal of Applied Physics*, 1963, 34(1): 62. DOI: 10.1063/1.1729091
- [27] 贾艳波. 增材制造碳纤维复合材料层间损伤失效试验研究与数值分析[D]. 西安: 长安大学, 2020
- JIA Yanbo. Experimental study and numerical analysis of interlaminar damage failure of additively manufactured carbon fiber reinforced composites[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020
- [28] BORG R, NILSSON L, SIMONSSON K. Modeling of delamination using a discretized cohesive zone and damage formulation [J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62(10): 1299. DOI: 10.1016/S0266-3538(2)00070-2
- [29] WISNOM M, CHANG F. Modelling of splitting and delamination in notched cross-ply laminates[J]. *Composites Science and Technology*, 2000, 60(15): 2849. DOI: 10.1016/S0266-3538(00)00170-6
- [30] HARPER P W, SUN L, HALLETT S R. A study on the influence of cohesive zone interface element strength parameters on mixed mode behavior [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012, 43(4): 722. DOI: 10.1016/j.compositesa.2011.12.016
- [31] 尹世豪, 张建树, 龚愉, 等. 新型三线性本构内聚力模型的界面参数研究[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(2): 91
- YIN Shihao, ZHANG Jianyu, GONG Yu, et al. Studies on the critical interfacial parameters in a novel three-linear cohesive zone model[J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(2): 91. DOI: 10.11835/j.issn.1000-582X.2019.253

(上接第 87 页)

- [20] NADERPOUR H, MIRRASHID M, PARSAP. Failure mode prediction of reinforced concrete columns using machine learning methods [J]. *Engineering Structures*, 2021, 248: 113263. DOI: 10.1016/j.engstruct.2021.113263
- [21] XU Jigang, HONG Wan, ZHANG Jian, et al. Seismic performance assessment of corroded RC columns based on data-driven machine-learning approach [J]. *Engineering Structures*, 2022, 255: 113936. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.113936
- [22] ALI N M, FAROUK A I B, HARUNA S I, et al. Feature selection approach for failure mode detection of reinforced concrete bridge columns [J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2022, 17: e01383. DOI: 10.1016/j.cscm.2022.e01383
- [23] YU Bo, XIE Longlong, YU Zecheng, et al. Classification method for failure modes of RC columns based on class-imbalanced datasets [J]. *Structures*, 2023, 48: 694. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.12.063
- [24] DING Zihao, ZHENG Shixiong, LEI Chuanhe, et al. Machine learning-based prediction for residual bearing capacity and failure modes of rectangular corroded RC columns [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281: 114701. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2023.114701
- [25] MARTINEZ A M, KAK A C. PCA versus LDA [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(2): 228. DOI: 10.1109/34.908974
- [26] DABIRI H, KHEYRODDIN A, FARAMARZI A. Predicting tensile strength of spliced and non-spliced steel bars using machine learning and regression-based methods [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 325: 126835. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126835
- [27] MANGALATHU S, HWANG S H, JEON J S. Failure mode and effects analysis of RC members based on machine-learning-based SHapley Additive exPlanations (SHAP) approach [J]. *Engineering Structures*, 2020, 219: 110927. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110927
- [28] DAI Kuangyu, YU Xiaohui, LU Dagang. Phenomenological hysteretic model for corroded RC columns [J]. *Engineering Structures*, 2020, 210: 110315. DOI: 10.1016/j.engstruct.2020.110315

封面图片说明

封面图片来自本期论文“3D 打印 CFRP-I 型层间断裂韧性的断层替换测试法及参数化分析”, 图片展示了一种制备 3D 打印 CFRP 层间预制裂纹的新型断层替换法的打印原理。借助该方法可打印用于测量 CFRP-I 型层间断裂韧性的试件, 同时采用试验与仿真相结合的方式, 研究了打印温度与打印速度两个参数对 I 型层间断裂韧性的影响。研究表明: 3D 打印 CFRP 的 I 型层间断裂韧性随着打印温度及打印速度的提高而增大, 且打印温度对断裂韧性的影响更显著, 当打印温度由 245 °C 升至 285 °C 时, 断裂韧性提高了 294.6%; 当打印速度由 20 mm/s 增至 60 mm/s 时, 断裂韧性提高了 27.6%。当打印温度与打印速度提高时, 试件在打印过程中热量散失更小, I 型层间力学性能得到提高。但当打印速度过大时, 印材在打印过程中无法完全沉积, 不能实现较好地黏结, 反而对 I 型层间力学性能造成负面影响。同时, 仿真结果与试验数据的相对误差均控制在 15% 以内, 验证了断层替换法的合理性和稳定性。研究结果为量化评价 3D 打印 CFRP 材料的层间性能提供了一种新方法, 同时也为 3D 打印 CFRP 构件的层间力学性能的研究提供了技术支撑。

(图文提供: 陈鹏宇, 杨冰晨, 药天运, 等。长安大学公路学院)