DOI:10.26974/j.cnki.XBGC.2026.03.002

CFRP工字梁四点弯曲数值分析

阴金林, 廖子荣, 钟 逸, 杨文豪, 吴 晔, 崔理纲*
(江西水利电力大学,江西 南昌 330099)

摘 要:基于ABAQUS软件建立了包含3D Hashin失效准则和内聚力(cohesive)单元的数值模型,通过与碳纤维增强塑料(CFRP)工字梁四点弯曲试验对比验证模型有效性;分析了试件在四点弯曲下的失效机理,并进一步研究了铺层顺序和腹板高度对试件力学性能的影响规律。结果表明:模拟与试验的宏观损伤形貌及载荷-位移曲线吻合良好,相对误差仅5.34%,验证了模型的可靠性;在四点弯曲载荷作用下,$[90/45/—45]_{2s}$为最优铺层构型,外层90°铺层在提高压缩和拉伸强度的同时,内层±45°铺层将应力有效分散至整体结构,二者协同作用有效提升了试件的抗弯曲性能,揭示了纤维铺层结构与弯曲载荷下损伤机制间的内在关联;腹板高度增加显著提高了试件的抗弯曲性能,24 mm高度腹板较18 mm高度腹板,最大峰值载荷提高了9.51%,且峰值载荷由结构整体强度与腹板材料强度共同决定。

关键词:有限元分析;复合材料工字梁;失效机理;铺层顺序;腹板高度
中图分类号:TB332 **文献标志码**:A

纤维增强塑料(fiber reinforced plastics,FRP)具有比强度高、比刚度大、耐腐蚀性好等优点,以其制造的常见力学构件(如平板、T形接头、工字梁等)在航空航天、船舶制造、轨道列车等高性能轻量化结构领域具有广阔的应用前景[1-3]。工字梁凭借独特的空腹式结构,相较于实心杆件可显著减重并节约材料,优先应用于对轻量化与强度要求严苛的航空航天领域[4-7]。复合材料工字梁作为关键承载构件,在服役过程中常处于复杂的多向、持续及瞬时交变载荷环境中[8-10],易产生损伤并导致性能退化。因此,探究其破坏机理与力学行为,对提升结构可靠性与工程设计水平至关重要。

在此背景下,众多学者开展了复合材料工字梁力学性能研究。Othman等[11]建立了简洁高效的质量-弹簧分析模型,可精准预测碳纤维增强塑料(CFRP)复合梁在低速冲击(LVI)下的力学响应,有效刻画不同冲击工况下的力-时程曲线、峰值力、冲击位移及能量耗散规律,为LVI响应分析提供了可靠手段。Ding等[12]提出了一种新型钢-竹复合(SBC)工字梁,梁翼缘处钢-竹界面采用胶粘连接并以自攻螺钉加固,以避免梁的脱黏失效和滑移。该研究制备了14根不同参数的试件并开展四点弯曲试验,分析了梁的弯曲行为及参数影响;进而建立了解析模型,分别预测正常使用极限状态(SLS)和梁极限挠度下梁翼缘处的界面剪切应力。结果表明,该连接方式有效限制了梁的脱黏破坏和滑移,显著提升了试件的抗弯承载力、变形能力。Long等[13]采用树脂传递模塑工艺制备工字梁试样,利用泡沫铝弹丸开展冲击试验;基于试验结果建立数值模型,通过挠度与破坏模式对比验证其有效性,经合理构造方法修正后进行参数化分析,确定了最优结构尺寸;进一步在腹板内填充聚氨酯泡沫,实现了工字梁抗冲击性能的优化提升。

上述研究充分表明,复合材料工字梁力学性能研究具有重要意义,但试验方法通常耗时费力。随着计算机技术的发展,数值模拟软件凭借经济高效、可靠性强等优势,已成为复合材料性能研究的有力工具[14-15]。例如,Lalisani等[16]采用LS-DYNA程序包建立显式有限元模型,模拟复合材料加筋板与现有夹芯板的力学行为,基于田口方法和方差分析,研

收稿日期:2025-11-21
基金项目:国家自然科学基金项目(12362016);江西省自然科学基金项目(20252BAC240182)
作者简介:阴金林(2001—),男,硕士研究生,主要从事复合材料力学研究(15907976811@163.com)。
* **通信作者**:崔理纲(1967—),男,副教授,主要从事城乡规划设计与城乡防灾研究(2621752993@qq.com)。
引用格式:阴金林,廖子荣,钟逸,等.CFRP工字梁四点弯曲数值分析[J].西北工程技术学报(中英文),2026,25(3):204-211.

究了冰冲击下加筋板的优化设计,以确定最优设计点。结果表明:加强筋厚度对受冰雹冲击加筋板力学行为的影响最为显著。Paramasivam[17]采用试验与数值相结合的方法,研究了预热对二次成型复合材料在拉伸和弯曲载荷下承载能力的影响;利用 ABAQUS/Explicit 中的 Hashin 准则和内聚力失效准则表征其损伤机制,以捕捉失效过程。试验结果表明:与未预热试件相比,预热试件的拉伸和弯曲性能显著提高;在载荷-位移曲线、强度及损伤形貌方面,数值预测与试验结果吻合良好,表明数值模拟是评估二次成型复合材料性能的有效手段。

综上所述,目前针对复合材料工字梁弯曲性能的研究仍较少。三点弯曲受加载点局部压痕影响较大,破坏形式较为单一;而四点弯曲能更全面地揭示其失效机理、层间性能及抗裂纹扩展能力[18]。因此,本文基于 ABAQUS 软件构建包含 3D Hashin 失效准则及内聚力单元的数值模型,通过与试验对比验证其有效性后,分析 CFRP 工字梁四点弯曲下的失效机理,并进一步探究铺层角度、铺层顺序及腹板高度对其力学性能的影响规律,以期为 CFRP 工字梁的抗弯曲设计与参数优化提供理论支撑。

1　材料与方法

1.1　试件制备

本试验制备 6 层 CFRP 工字梁试件,材料为单向碳纤维编织布(面密度 450 g/m^2,幅宽 50 cm,卷长 10 m),铺层顺序为$[0/90]_{3s}$,采用真空辅助树脂灌注(VARI)工艺成型。参考《纤维增强塑料复合材料 弯曲性能的测定》(ISO 14125:1998)标准加工为工字形试件,如图 1 所示。CFRP 工字梁试件长度 L 为 320 mm,宽度 W 为 40 mm,高度 H 为 16 mm,壁厚 t 为 2 mm。共制备 3 个试件进行重复试验,试验前检查上下翼板与腹板的界面结合质量,以减小试验误差。

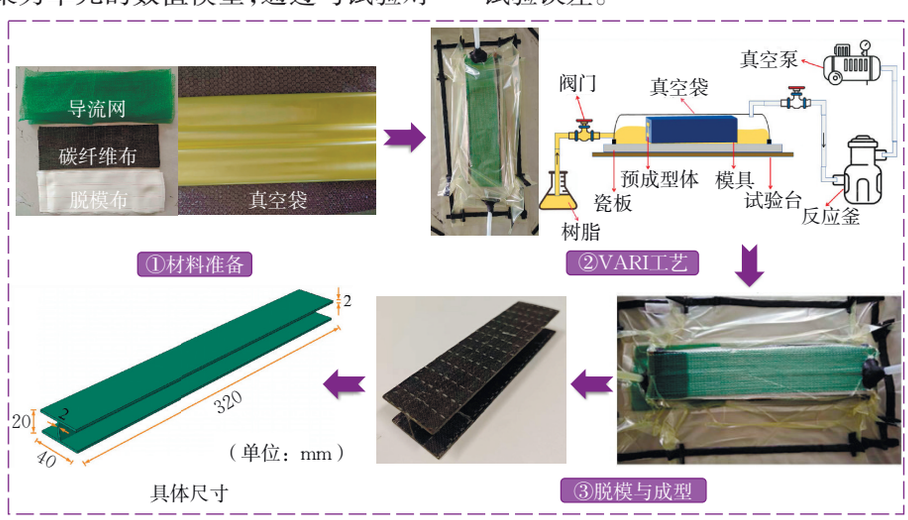


图 1　碳纤维工字梁试件制备流程图

Fig. 1　Preparation process for the CFRP I-beam specimens

1.2　四点弯曲试验

本试验依据《纤维增强塑料复合材料 弯曲性能的测定》(ISO 14125:1998)标准,在长春试验机研究所生产的 CSS-44100 型万能材料试验机上进行。该设备配备高精度加载控制系统、载荷与位移传感系统及计算机数据采集系统,可满足复合材料四点弯曲试验的加载与测量要求。试验步骤如下:首先校准试验机及数据采集系统;随后按加载点间距与支撑跨距之比为 1:3 的比例将试件置于压头和支座间,锁紧压头和支座并复测跨距,在压头下方放置垫片以减小应力集中,再将压头轻触垫片且无预载;设定加载速率为 1 mm/min;启动试验机,同步记录试件宏观变形并采集载荷-位移曲线。试验装置及试件装配如图 2 所示。

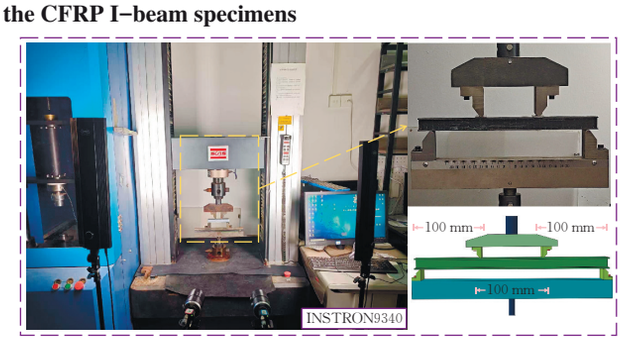


图 2　试验装置及试件装配图

Fig. 2　Experimental setup and specimen configuration

2　有限元模型的建立与验证

2.1　CFRP 工字梁有限元模型的建立

根据 CFRP 工字梁四点弯曲试验实际尺寸建

立三维模型，几何参数为：梁长 320 mm，宽度 40 mm，腹板高度 16 mm，上下翼缘板厚度均为 2 mm，总高度 20 mm，铺层顺序为$[0/90]_{3s}$。载荷沿 y 轴负方向施加于上翼缘长边中点两侧 50 mm 处的压头质点，通过法向硬接触及切向摩擦系数为 0.3 的接触属性传递至试件；约束压头 x、z 方向平动自由度，以保证加载过程中压头对中，避免侧向偏移。下翼缘长边中点两侧 150 mm 处支座约束全部平动自由度($U_1=U_2=U_3=0$)，即完全固定，以确保试验状态稳定。腹板及上下翼缘均采用 SC8R 连续壳单元建模，以定义复合材料铺层顺序与方向，并获取各单层应力分布。压头下方存在显著应力集中现象，六面体单元具有更高阶形函数，在相同网格密度下对应力集中区域的求解精度优于四面体单元，因此模型统一采用六面体拓扑的 SC8R 单元。此外，为满足复合材料铺层方向定义需求，模型网格采用扫掠划分方式生成，以保证网格质量与计算精度。在此基础上，层间采用内聚力(cohesive)单元模拟胶粘层及复合材料层间界面的渐进损伤与最终分离过程。采用 3D Hashin 失效准则模拟纤维与基体的损伤，材料达到失效准则后刚度按规律退化，以模拟损伤扩展。模型示意如图 3 所示。单向复合材料层板的损伤分为纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸和基体压缩四种形式。

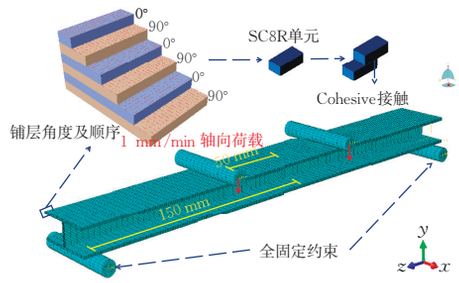


图 3 模型示意图

Fig. 3 Schematic of the model

纤维拉伸失效($\sigma_{11}\geqslant 0$)公式为

$$F_{ft}=(\sigma_{11}/X_t)^2+(\sigma_{12}/S_{12})^2+(\sigma_{13}/S_{13})^2\geqslant 1。\quad(1)$$

纤维压缩失效($\sigma_{11}<0$)公式为

$$F_{fc}=(\sigma_{11}/X_c)^2\geqslant 1。\quad(2)$$

基体拉伸失效($\sigma_{22}+\sigma_{33}\geqslant 0$)公式为

$$F_{mt}=[(\sigma_{22}+\sigma_{33})/Y_t]^2+(\sigma_{12}/S_{12})^2+(\sigma_{13}/S_{13})^2+(\sigma_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33})/S_{23}^2\geqslant 1。\quad(3)$$

基体压缩失效($\sigma_{22}+\sigma_{33}<0$)公式为

$$F_{mc}=[(\sigma_{22}+\sigma_{33})/2S_{23}]^2+(\sigma_{12}/S_{12})^2+(\sigma_{13}/S_{13})^2+(\sigma_{23}^2-\sigma_{22}\sigma_{33})/S_{23}^2+(\sigma_{22}+\sigma_{33})[(Y_c/2S_{23})^2-1]/Y_c\geqslant 1。\quad(4)$$

式中：F_{ft}、F_{fc}、F_{mt} 和 F_{mc} 分别为不同损伤模式对应的损伤变量；$\sigma_{ij}(i,j=1,2,3)$为有效应力张量；X_t、X_c 分别为纤维方向的拉伸强度和压缩强度；Y_t、Y_c 分别为横向的拉伸强度和压缩强度；S_{12}、S_{13} 和 S_{23} 为剪切强度。碳纤维的力学性能如表 1 所示。

表 1 碳纤维的力学性能[14]

Tab. 1 Mechanical properties of carbon fibers[14]

材料参数	数值	材料参数	数值
纵向弹性模量(E_1)/GPa	113.08	纵向拉伸强度(X_t)/MPa	1 505.48
横向弹性模量($E_2=E_3$)/GPa	7.41	纵向压缩强度(X_c)/MPa	751.50
泊松比($\mu_{12}=\mu_{13}$)	0.33	横向拉伸强度(Y_t)/MPa	38.92
泊松比(μ_{23})	0.35	横向压缩强度(Y_c)/MPa	156.76
平面剪切模量($G_{12}=G_{13}$)/GPa	4.47	平面剪切强度($S_{12}=S_{13}$)/MPa	80.40
平面剪切模量(G_{23})/GPa	3.00	平面剪切强度(S_{23})/MPa	60.00
纵向拉伸断裂韧性(G_{It})/(N mm)	80.00	纵向压缩断裂韧性(G_{Ic})/(N mm)	80.00
横向拉伸断裂韧性(G_{IIt})/(N mm)	0.25	横向压缩断裂韧性G_{IIc}/(N mm)	0.80

2.2 模型验证

模型及失效准则确定后，对 CFRP 工字梁四点弯曲过程进行数值模拟，研究其上下翼缘及腹板的渐进损伤过程与破坏模式，并与试验结果对比以验证模拟的准确性。为了研究试件裂纹扩展现象及其对失效载荷的影响，本文对铺层顺序为$[0/90]_{3s}$的试件进行了精细化模拟分析，结果如图 4～图 5 所示。由图 4～图 5 可知，试验与模拟的各阶段破坏形态相似，且试件失效后裂纹扩展路径具有高度一致性。据此，可将 CFRP 工字梁四点弯曲破坏过程大致分为 3 个阶段。第 1 阶段，上翼缘板受压并承担主要载荷，试验中可听见轻微纤维断裂声。在压头集中载荷所引发的局部应力集中效应下，上翼缘板首先萌生细小横向初始裂纹，并随

着载荷的增加持续扩展,直至贯穿翼缘宽度。图 5a 为上翼缘板失效断面的 SEM 微观形貌图。由图 5a 可知,上翼缘板的损伤以纤维脆性断裂为主,断面较为平整且纤维拔出现象不明显,表明应力集中区复合材料翼缘以纤维脆性断裂为主要失效模式。第 2 阶段,随着上翼缘板压溃失效,载荷向腹板-翼缘连接处转移,伴随明显纤维断裂声,该处应力集中加剧。当局部应力超过材料强度极限时,连接处萌生微裂纹并逐渐扩展为可见纵向裂纹。图 5b 为腹板失效断面的 SEM 微观形貌图。由图 5b 可知,该阶段损伤呈基体压溃、纤维断裂与纤维拔出并存的特征,验证了腹板-翼缘交界区在复杂应力状态下的多机制耦合失效特性。第 3 阶段,腹板-翼缘连接处彻底破坏,此时试件损伤累积到一定程度,导致结构的刚度与强度显著下降,试件的承载能力显著下降,不再有纤维断裂声产生。尽管手工制作试件存在个体差异,但均表现出上翼缘压溃、腹板-翼缘连接处纵向开裂及下翼缘无明显破坏的共同特征。5c 为下翼缘板断面的 SEM 微观形貌图。由图 5c 可知,下翼缘内部基体与纤维结合状态良好,仅少量纤维断裂,表明该阶段载荷已难以有效传递至下翼缘。

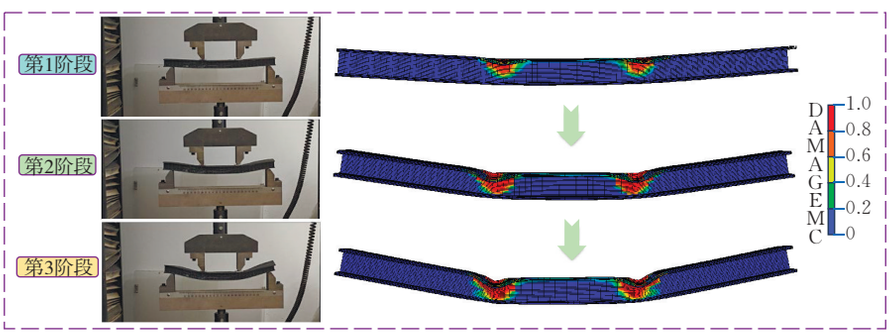
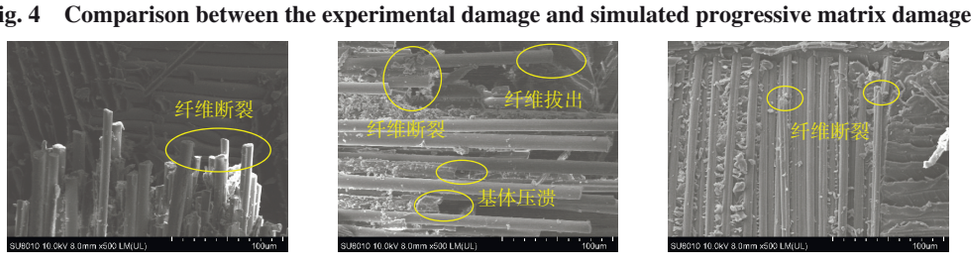
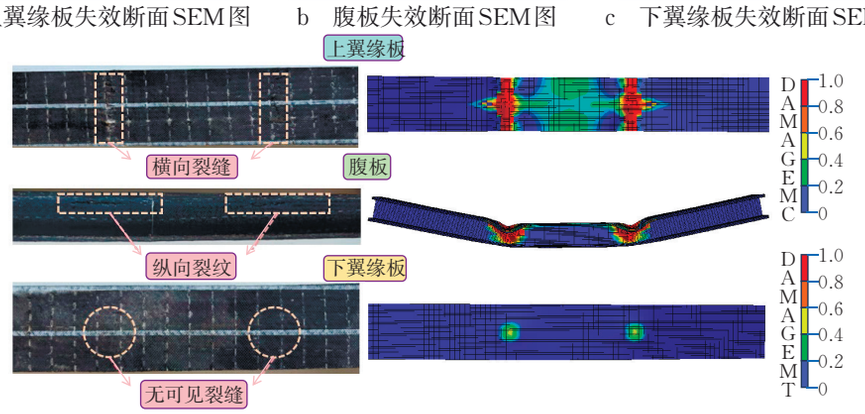


图 4　试验与基体渐进损伤对应图

Fig. 4　Comparison between the experimental damage and simulated progressive matrix damage



a　上翼缘板失效断面SEM图　　b　腹板失效断面SEM图　　c　下翼缘板失效断面SEM图



d　试验与模拟宏观对比图

图 5　试件失效断面 SEM 微观形貌及试验与模拟宏观对比图

Fig. 5　SEM images of the fracture surfaces and macroscopic comparison between the experimental and numerical results

图 6 为试验与模拟载荷-位移曲线对比图。据此可进一步分析试件的损伤模式与失效机理。由图 6 可知,试验与模拟曲线吻合较好,验证了模型的可靠性与准确性。*OA* 段对应第 1 阶段的损伤过程,曲线呈线性增长,试件处于弹性变形状态,纤维与基体(树脂)结合良好,此时载荷主要由上翼缘板承担。随着载荷的增加,上翼缘基体在细微开裂声中压溃,并萌生横向裂纹,最终导致上翼缘板失效。*AB* 段对应第 2 阶段的损伤过程,此时载荷多作用于腹板-翼缘连接处,试件进入损伤破坏阶段。由于腹板截

面惯性矩较翼缘板大,且腹板损伤破坏区域较小,腹板仍可将载荷有效传递至下翼缘,故试件承载能力持续上升,但曲线上升趋势有所放缓。腹板-翼缘连接处应力集中显著,相同位移增量下伴随更多基体开裂与纤维断裂声,并萌生纵向裂纹,随着载荷增加裂纹逐渐扩展。*BC* 段对应第 3 阶段的损伤过程,持续载荷作用下,纤维断裂与基体开裂的累积损伤达到临界程度,腹板不再能有效传递载荷,试件完全丧失承载能力,曲线近乎垂直下降,试件最终失效。由图 6 还可知,模拟所得最大破坏载荷为 1 851.0 N,试验值为 1 757.1 N,两者相对误差为 5.34%。由于试件制备过程中纤维浸润不均,存在孔隙或树脂分布不均匀,试验载荷通常略低于模拟值。

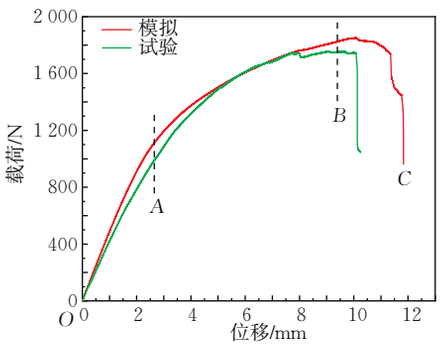
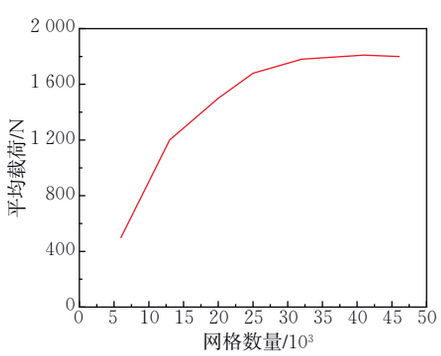


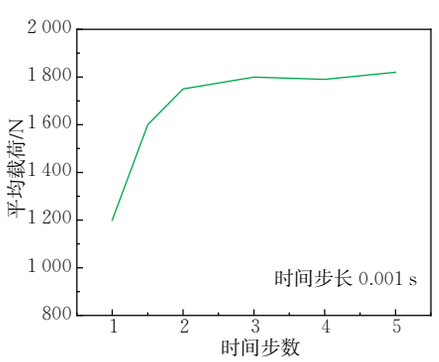
图 6 试验与模拟载荷-位移对比图

Fig. 6 Comparison between the experimental and numerical load-displacement curves

考虑到计算效率,本文以平均载荷为评价指标进行网格无关性验证(图 7)。由图 7a 可知,当网格数量超过 30 000 时,载荷变化趋于平稳,最大偏差仅为 1.66%。因此,最终采用共 35 230 个单元进行建模。此外,图 7b 展示了不同时间步长设置下平均载荷随着时间的变化曲线。综合考虑计算时间与精度,时间步数取 2 较为合适。故设定时间步长为 0.001 s,每个时间步长内最大迭代次数为 100,总时间步数为 2。



a 网格数



b 依赖平均载荷的时间步数

图 7 独立性验证

Fig.7 Independence verification

综上,本模型可有效模拟 CFRP 工字梁在四点弯曲作用下的裂纹扩展及基体与纤维损伤;相较于试验,本模型可全程观察试件各部位损伤演化。因此,本数值模拟方法在预测试件性能方面具有较高的准确度和计算效率。

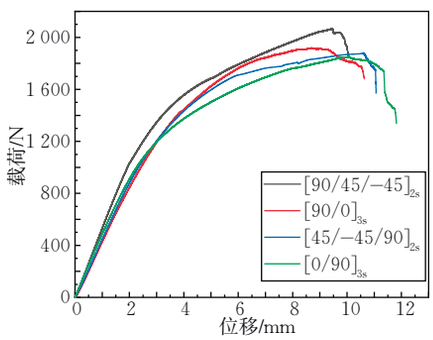
3 铺层角度对试件四点弯曲性能的影响

为研究铺层角度对 CFRP 工字梁弯曲性能的影响,在综合考虑弯曲刚度、承载效率及结构稳定性的基础上,参考 Chen 等[19]和 Shen 等[20]提出的典型铺层方案,设计了铺层顺序分别为$[90/45/-45]_{2s}$、$[90/0]_{3s}$、$[45/-45/90]_{2s}$ 和$[0/90]_{3s}$ 的 4 种 CFRP 工字梁,并开展四点弯曲数值模拟。图 8a 为 4 种铺层顺序下试件的载荷-位移曲线对比图,图 8b 为峰值载荷与失效位移对比图。图 9 为纤维方向示意及不同铺层顺序下试件的损伤云图。

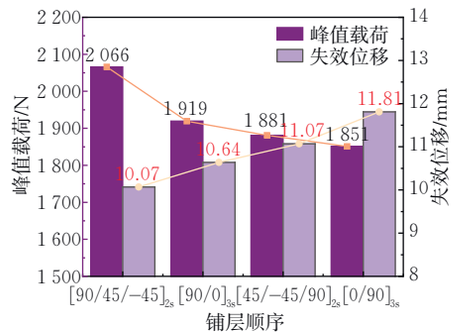
由图 8 可知,铺层顺序为$[0/90]_{3s}$、$[45/-45/90]_{2s}$、$[90/0]_{3s}$和$[90/45/-45]_{2s}$的试件,峰值载荷分别为 1 851、1 881、1 919、2 066 N,失效位移分别为 11.81、11.07、10.64、10.07 mm。以$[0/90]_{3s}$为基准,其余 3 种铺层顺序的峰值载荷分别提高了 1.62%、3.67%、11.62%,失效位移分别降低了 6.27%、9.91%、14.73%。±45°铺层与 0°/90°铺层间产生的剪切耦合效应,可将弯曲载荷作用下的部分正应力转化为层合板的面内剪切变形,有效耗散能量并抑制层间分层,促进载荷向整体结构均匀传递,从而降低应力集中。虽然$[90/45/-45]_{2s}$和$[45/-45/90]_{2s}$均为±45°、0°和 90°混合铺层,但$[90/45/-45]_{2s}$的 90°铺层靠近翼缘板下表面,可为试件提供更大承载

能力,故其抗弯曲性能优于$[45/-45/90]_{2s}$。相较于$[90/0]_{3s}$,$[90/45/-45]_{2s}$中更多 90°铺层的引入为工字梁提供了更高的抗弯曲性能;交替排列的 0°和 90°层形成机械互锁效应,通过纤维桥接提高分层阻力。

由图 9 可知:±45°铺层的引入使载荷更好地向翼缘板整体扩散;相比之下,$[90/0]_{3s}$和$[0/90]_{3s}$的基体压缩损伤区域较为集中。此外,按$[90/0]_{3s}$、$[90/45/-45]_{2s}$、$[45/-45/90]_{2s}$和$[0/90]_{3s}$的顺序,腹板基体压缩损伤区域呈逐渐增大趋势。



a　载荷-位移曲线



b　峰值载荷与失效位移

图 8　4 种铺层顺序下试件的载荷-位移曲线及峰值载荷与失效位移对比

Fig. 8　Load-displacement curves and comparison of the peak loads and failure displacements of specimens with four stacking sequences

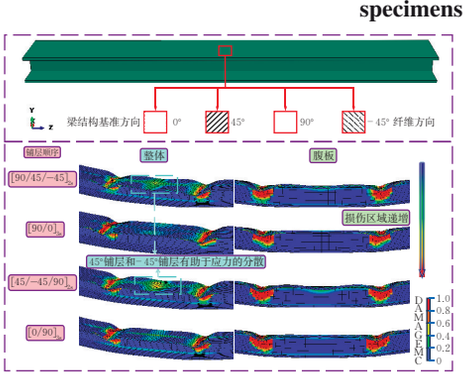
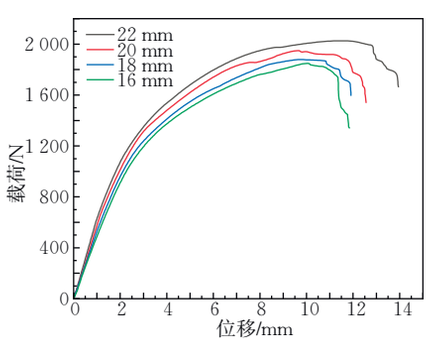


图 9　纤维方向示意及不同铺层顺序下试件的损伤云图

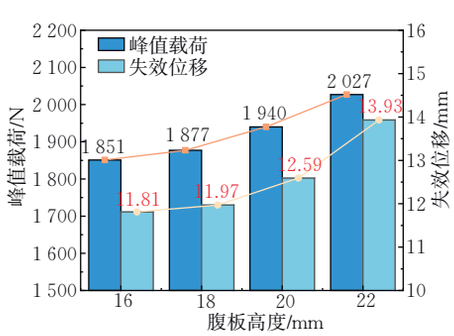
Fig. 9　Schematic of the fiber orientations and damage contours of specimens with different stacking sequences

4　腹板高度对试件四点弯曲性能的影响

为研究腹板高度对 CFRP 工字梁弯曲性能的影响,在保证结构以弯曲失效为主、避免过早发生腹板局部屈曲或剪切破坏的前提下,参考 Deng 等[21]研究中工字梁试件的尺寸比例(腹板高度与梁长之比大于 1∶20),设计了腹板高度分别为 16、18、20、22 mm 的 4 种类型 CFRP 工字梁,并开展四点弯曲数值模拟。图 10 a 为 4 种腹板高度下试件的载荷-位移曲线对比图,图 10b 为峰值载荷与失效位移对比图。图 11 为不同腹板高度下试件的基体压缩损伤云图。



a　载荷-位移曲线



b　峰值载荷与失效位移

图 10　4 种腹板高度下试件的载荷-位移曲线及峰值载荷与失效位移对比

Fig. 10　Load-displacement curves and comparison of the peak loads and failure displacements of specimens with four web heights

由图 10 可知,腹板高度为 16、18、20、22 mm 的试件,峰值载荷分别为 1 851、1 877、1 940、2 027 N,失效位移分别为 11.81、11.97、12.59、13.93 mm。以腹板高度 16 mm 为基准,峰值载荷分别提高了

1.40%、4.81%、9.51%,失效位移分别增加了 1.35%、6.60%、17.95 %。腹板高度增加实质上是拓展了工字梁腹板区域的协同耗能能力。在弯曲载荷作用下,更多的基体材料参与承受压缩与剪切应力,同时激发了更广泛的纤维桥联与断裂过程。这种分布式渐进损伤模式延缓了低矮腹板中常见的局部脆性失效,作为一种固有增韧机制,显著提升了试件的损伤容限与延性,从而有效推迟了最终失效。

由图 11 可知,不同腹板高度下,试件最终破坏形态均为腹板与上翼缘板连接处因局部压溃而失效,但随着腹板高度的增加,损伤区域逐渐向下翼缘板扩展。由此可见,工字梁峰值载荷由结构整体剪切强度与腹板材料剪切强度共同决定。增加腹板高度虽可通过增大惯性矩充分释放工字梁的承载潜力,但腹板材料固有的剪切强度不足,使其仍为结构中最薄弱的环节,最终限制了峰值载荷的进一步提升。

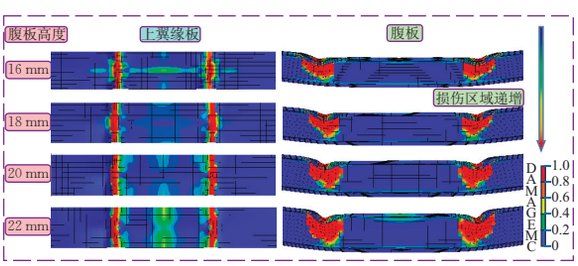


图 11 不同腹板高度下试件的损伤云图

Fig. 11 Damage contours of specimens with different web heights

5 结论

(1)研究揭示了 CFRP 工字梁的三阶段破坏机制:初始线弹性阶段,载荷与位移呈线性增长关系;损伤破坏阶段,载荷增速减缓,主要由腹板承担;最终破坏阶段,纤维断裂和基体开裂的累积损伤达到临界程度后,承载能力骤降,标志着结构失效。

(2)铺层顺序显著影响 CFRP 工字梁的抗弯性能。将 90°铺层布置于翼缘板外表面可沿纤维方向提供更大拉应力;±45°铺层布置于内层可促进载荷向整体结构均匀传递;不同角度铺层交替排列可进一步提升承载能力。

(3)腹板高度增加通过增大截面惯性矩显著提高了 CFRP 工字梁的抗弯性能;相应地,腹板处更多基体参与压缩及纤维断裂耗能,有效抵抗弯曲载荷并延缓工字梁过早失效。但受限于腹板材料自身强度,承载性能难以持续提升。

参考文献:

[1] 刘西振, 苏佳智, 陈旭, 等. 复合材料自动成型工艺进展及其在航空中的应用[J]. 合成纤维, 2025, 54(11): 68-70.

[2] Yildirim C, Ulus H, Sas H S, et al. Evaluating the influence of service conditions on the out-of-plane and in-plane loading performance and damage behavior of unidirectional CF/PEKK composites for aerospace applications[J]. Composites Part B: Engineering, 2025, 304: 112637.

[3] 岳金方. 玻璃纤维增强复合材料在航空领域的应用研究进展[J]. 塑料科技, 2025, 53(7): 202-207.

[4] 赵雨晴. 碳/玻混杂三维五向编织复合材料工字梁弯曲性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2025.

[5] 黄泳桦. 碳纤维复合材料工字梁抗弯曲性能研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2023.

[6] Bouman N, Marques S S L, Sebbe N P V, et al. Advancing sustainability in aerospace: Evaluating the performance of recycled carbon fibre composites in aircraft wing spar design[J]. Journal of Composites Science, 2025, 9(8): 384.

[7] 黄泳桦, 杨艳菲, 王子虎, 等. 复合材料工字梁抗弯曲性能分析[J]. 纤维复合材料, 2022, 39(2): 12-19.

[8] 刘世豪, 于佳. 复合材料工字梁结构设计与分析[C]//中国力学学会. 中国力学大会-2021+1论文集(第二册). 2022: 87-101. DOI:10.26914/c.cnkihy.2022.072049.

[9] Min W, Tao L, Yan Z, et al. Feasibility verification and bending property of web-reinforced foam sandwich composites prepared via thermal expansion molding process[J]. Composite Structures, 2022, 294: 115720.

[10] 陈宇, 樊洋洋, 储浏鹏, 等. 工字梁前桥性能分析及响应面优化[J]. 滨州学院学报, 2023, 39(6): 92-96.

[11] Othman R, Khashaba U. A new analytical model for progressive damage in CFRP composite beams under low-velocity impact[J]. Polymer Composites, 2026, 47(6): 5126-5144.

[12] Ding J S, Tong K T, Zhang J L, et al. Experimental and analytical investigation of the flexural behavior of steel-bamboo composite I-beams with composite connections[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111374.

[13] Long S C, Zong H, Liu T, et al. Soft impact behavior of composite I-beams [J]. Composite Structures, 2023, 304: 116477.

[14] Xu W C, Chen J, Cui X F, et al. Low-velocity impact analysis and multi-objective optimization of hybrid carbon/basalt fibre reinforced composite laminate [J]. Composite Structures, 2024, 343: 118305.

[15] Li D, Xiong J J. Progressive fatigue damage modelling and life prediction of 3D four-directional braided composite I-beam under four-point flexure spectrum loading[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2025, 38(3): 103389.

[16] Lalisani A, Sadighi M, Goudarzi T, et al. Stiffened composite plates as equivalent structures for sandwich panels under low-velocity hail impact[J]. Mechanics Based Design of Structures and Machines, 2025, 53(8): 5485-5512.

[17] Paramasivam A. Investigating the failure behavior of over-molded thermoplastic composites: Experimental testing and numerical modelling[J]. Applied Composite Materials, 2025, 32(4): 1659-1687.

[18] Mertgenç Yoldaş D, Atakök G. A comparison of damages occurring on the bonding surface of carbon and glass fiber-reinforced polymer composite materials used in wind turbine blades and marine vessels via three-point bending and four-point bending tests[J]. Polymers, 2026, 18(4): 481.

[19] Chen G, Liu H, Zhang J Y, et al. Energy dissipation theory performance of different layup patterns CFRP/aluminium alloy hat-shaped hybrid beams under three-point bending conditions[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 187: 110695.

[20] Shen L L, Su S, Zhou X, et al. Interlaminar damage evolution in CF/PPESK composites: Interactive effects of fiber layup angles and temperature[J]. Composites Science and Technology, 2026, 273: 111427.

[21] Deng L X, Shao Y B, Jiang D, et al. Elastic analysis of I-girders with tubular flange and corrugated web[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2024, 213: 108407.

Numerical Analysis of CFRP I-Beams under Four-Point Bending

YIN Jinlin, *LIAO Zirong*, *ZHONG Yi*, *YANG Wenhao*, *WU Ye*, *CUI Ligang**

(Jiangxi University of Water Resources and Electric Power, Nanchang 330099, China)

Abstract: A numerical model incorporating the three-dimensional (3D) Hashin failure criterion and cohesive elements was developed using ABAQUS. After the model was validated against four-point bending tests of carbon-fiber-reinforced polymer (CFRP) I-beams, the failure mechanisms of the specimens under four-point bending were analyzed. The effects of stacking sequence and web height on the mechanical performance of the specimens were further investigated. The results showed that the simulated macroscopic damage patterns and load - displacement curves agreed well with the experimental results, with a relative error of only 5.34%, confirming the reliability of the model. Under four-point bending loading, $[90/45/\overline{45}]_{2s}$ was identified as the optimal stacking configuration. The outer 90° plies enhanced both the compressive and tensile strengths, while the inner ±45° plies effectively redistributed stresses throughout the structure. Their synergistic effect markedly improved the flexural performance of the specimens, revealing the intrinsic relationship between the fiber stacking architecture and the damage mechanisms under bending loads. Increasing the web height significantly improved the flexural performance of the specimens. Compared with the specimen with an 18 mm web height, the specimen with a 24 mm web height exhibited a 9.51% increase in the maximum peak load. Moreover, the peak load was jointly determined by the overall structural strength and the material strength of the web.

Keywords: finite element analysis; composite I-Beam; failure mechanism; stacking sequence; web height

(责任编辑　王德平)