

开孔位置对三维机织复合材料连接性能的影响

张一帆 史志伟 张茜 刘燕峰 张代军 陈利

Effect of opening position on the connection performance of 3D woven composite materials

ZHANG Yifan, SHI Zhiwei, ZHANG Qian, LIU Yanfeng, ZHANG Daijun, CHEN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231219.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多层多向层联三维机织复合材料的拉伸性能

Tensile properties of multilayer multiaxial interlock 3D woven composites

复合材料学报. 2020, 37(10): 2409–2417 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200110.001>

三维角联锁机织铝基复合材料面内拉伸力学行为与失效机制

Mechanical behavior and failure mechanism of the 3D angle interlocking woven reinforced aluminum matrix composites under in-plane tensile loading

复合材料学报. 2021, 38(9): 2997–3007 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201116.007>

三维机织复合材料在拉压循环载荷下的疲劳性能

Fatigue behaviors of 3D woven composites under tension–compression cyclic loading

复合材料学报. 2018, 35(10): 2706–2714 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20171228.002>

三维机织复合材料残余应力/应变多尺度分析及工艺参数优化

Multiscale analysis and process parameters optimization of residual stress/strain of 3D woven composite

复合材料学报. 2021, 38(4): 1167–1176 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200720.002>

一种改进的基于两单胞模型的三维角联锁机织复合材料弹性性能数值预测方法及实验验证

An improved numerical prediction method of elastic properties based on two unit–cells models for 3D angle–interlock woven composites and experimental verification

复合材料学报. 2021, 38(11): 3704–3713 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210122.003>

连续石墨纤维增强铝基复合材料准静态拉伸损伤演化与断裂力学行为

Damage evolution and fracture behaviors of continuous graphite fiber reinforced aluminium matrix composites subjected to quasi-static tensile loading

复合材料学报. 2020, 37(4): 907–918 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190726.001>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

开孔位置对三维机织复合材料连接性能的影响



分享本文

张一帆^{1,2}, 史志伟^{1,2}, 张茜^{1,2}, 刘燕峰³, 张代军³, 陈利^{*1,2}

(1. 天津工业大学 先进纺织复合材料教育部重点实验室, 天津 300387; 2. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387;

3. 中国航发北京航空材料研究院 先进复合材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

摘要: 为了揭示织物结构和开孔位置对三维机织复合材料开孔连接性能与失效机制的影响, 设计并制备了 3 种不同结构的三维机织复合材料, 对不同开孔位置连接结构的承载性能和损伤模式进行了研究。研究表明, 端径比 (E/D) 对不同结构参数的复合材料的影响存在差异, 当 E/D 从 3 减小到 2 时, 3 种结构复合材料极限挤压强度分别下降 5.3%、9.9% 和 5.9%; E/D 从 2 减小到 1 时, 极限挤压强度分别下降 73.3%、68.9% 和 69.8%。 E/D 从 3 减小到 1 时, 复合材料的损伤模式由挤压损伤转变为界面脱粘及试样端部纱线脱粘, 结构中各纱线层的损伤演化呈现明显角度特征。

关键词: 三维机织复合材料; 多轴向; 开孔位置; 力学性能; 失效机制

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2024)09-4888-09

Effect of opening position on the connection performance of 3D woven composite materials

ZHANG Yifan^{1,2}, SHI Zhiwei^{1,2}, ZHANG Qian^{1,2}, LIU Yanfeng³, ZHANG Daijun³, CHEN Li^{*1,2}

(1. Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 3. National Key Laboratory of Advanced Composites, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract: To reveal the effect of opening position on pinned-joints mechanical properties and failure mechanism of 3D woven composites, three different 3D woven composite structures were designed and prepared, and the load-bearing performance and damage modes of these composites with different opening positions was discussed. The results show that there are differences in the effect of end-diameter ratio (E/D) on composites with different structural parameters. When the E/D decreases from 3 to 2, the ultimate compressive strength of three structural composites decreases by 5.3%, 9.9%, and 5.9%, respectively. When the E/D decreases from 2 to 1, the ultimate compressive strength decreases by 73.3%, 68.9%, and 69.8%, respectively. When the E/D changes from 3 to 1, the damage mode of the composites changes from extrusion damage to interfacial debonding, and the damage propagation of each yarn layer presents obvious angle features.

Keywords: 3D woven composites; multiaxial; opening position; mechanical properties; failure mechanism

三维机织复合材料 (3D woven composites, 3DWCs) 因其抗损伤冲击性能优良、比强度和刚度高等优势, 广泛应用于航空航天和国防等高新技术领域^[1-3]。机械连接是复合材料结构构成的一

收稿日期: 2023-10-31; 修回日期: 2023-12-08; 录用日期: 2023-12-11; 网络首发时间: 2023-12-20 11:15:16

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20231219.001>

基金项目: 国家科技重大专项项目 (2017-VII-0011-0177); 航空发动机及燃气轮机基础科学中心项目 (P2022-B-IV-014-001); 天津市海河实验室项目 (22HHXCJC00007); 先进功能复合材料重点实验室基金 (6142906210406) National Science and Technology Major Project (2017-VII-0011-0177); Science Center for Gas Turbine Project (P2022-B-IV-014-001); Tianjin Haihe Laboratory Scientific Research Program (22HHXCJC00007); Science and Technology Foundation of Key Laboratory of Advanced Functional Composites (6142906210406)

通信作者: 陈利, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为先进纺织复合材料 E-mail: chenli@tiangong.edu.cn

引用格式: 张一帆, 史志伟, 张茜, 等. 开孔位置对三维机织复合材料连接性能的影响[J]. 复合材料学报, 2024, 41(9): 4888-4896.

ZHANG Yifan, SHI Zhiwei, ZHANG Qian, et al. Effect of opening position on the connection performance of 3D woven composite materials[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(9): 4888-4896(in Chinese).

种重要方式，通常需要在复合材料结构上机械钻孔，并通过螺栓和销钉连接，机械开孔会导致孔边应力集中，直接影响复合材料结构的承载能力^[4-6]。螺栓连接是复合材料结构的薄弱环节，有显著的不确定性，给复合材料连接结构安全使用带来威胁^[7-8]。因此，通过调控纱线的排列方式和交织结构，合理分布开孔位置，提升复合材料开孔连接结构的承载能力并准确揭示其失效机制对复合材料结构设计是至关重要的^[9-11]。

近年来，国内外研究人员对层合复合材料的开孔连接性能开展了大量的研究工作，主要包括研究铺层角度、铺层顺序等工艺参数对复合材料开孔连接性能的影响规律等^[12-15]。Ascione 等^[16]研究了纤维铺层角度对复合材料螺栓接头承载失效载荷的影响，研究表明，承载能力主要取决于层板中纤维与载荷方向的夹角。Aktas 和 Dirikolu^[17]利用单钉双剪试验方法研究了层合板铺层顺序对开孔连接结构承载强度的影响，研究得到铺层顺序为 [90/45/-45/0]_s 层合板比铺层顺序为 [0/45/-45/90]_s 层合板的承载强度高 20%，证明连接结构的承载能力与铺层顺序有密切关系。Pakdil^[18]对比了 4 种铺层顺序的层合复合材料承载强度和破坏模式，得出铺层为 [0/0/45/45]_s 是最佳取向。Park^[19]对比了 5 种铺层结构层合板的销钉挤压试验，发现 3 种包含 45°铺层复合材料的最大承载强度明显高于只包含 0°和 90°层合复合材料，说明 45°层可以提高层合复合材料的连接承载能力。在三维纺织复合材料开孔连接方面，孙晓伦等^[20]对比了不同孔径三维机织复合材料的拉伸性能，试验结果表明，孔径对三维机织复合材料拉伸模量没有影响，与未开孔试样相比，净截面拉伸强度下降约 22.4%。Warren 等^[21]利用单剪和双剪试验方法研究了 3 种三维机织复合材料的挤压强度和刚度，研究发现，3DWCs 结构参数对挤压强度和刚度的影响较大，由于结构中仅包含 0°和 90°纱线，导致材料挤压强度整体较低，并且其主要失效模式表现为挤压破坏和剪切破坏。

综上可知，3DWCs 连接结构最主要的破坏模

式是挤压伴随剪切破坏^[22-24]，为了提升 3DWCs 连接结构的承载能力，本文提出一种多轴向三维机织结构，该结构在传统机织结构中引入斜向纱层，形成一种多取向纱线分布的三维机织结构，能够有效提高材料的抗剪切能力。为了厘清所述含斜向纱 3DWCs 连接结构的力学性能与失效机制，本文设计了 3 种不同结构的多轴向机织复合材料，制备了 3 种不同开孔位置的连接试样，并利用单钉双剪试验研究织物结构及连接结构端径比对其宏观力学性能的影响，结合显微扫描技术获得开孔连接结构的微细观损伤状态，重点讨论了不同结构、不同开孔位置多轴向三维机织复合材料整体和各纱层的损伤模式及连接结构的失效机制，为三维机织复合材料连接结构设计奠定基础。

1 实验材料及方法

1.1 原材料及试样制备

试验所用的增强纤维选用山西钢科碳材料有限公司生产的 TG800 HX 碳纤维，基体选用天津晶东化学复合材料有限公司生产的 TDE-86 环氧树脂。碳纤维和环氧树脂的规格及性能如表 1 所示。为了研究织物结构和开孔位置对多轴向三维机织复合材料开孔连接性能的影响，设计并制备了 3 种不同织物结构、3 种不同开孔位置的复合材料试样。3 种三维机织物的纱线排列分别为 [90/0/90/0/90/0/90/0/90]、[90/45/-45/90/-45/45/90] 和 [90/45/0/-45/90/-45/0/45/90]，记为 MW3D-Ⅰ、MW3D-Ⅱ和 MW3D-Ⅲ。MW3D-Ⅰ结构中面内仅包含 0°纱线和 90°纱线，MW3D-Ⅱ结构中将 0°纱线替换为±45°纱线，面内中包含±45°纱线和 90°纱线，MW3D-Ⅲ在 MW3D-Ⅰ的基础上引入±45°纱，形成面内准各向同性结构。采用树脂传递模塑成型 (Resin transfer moulding, RTM) 工艺制备了复合材料试样，预制体结构与 RTM 工艺流程示意图如图 1 所示。织物结构参数及制备的复合材料参数如表 2 所示。

将制得的复合材料板按照试验标准 ASTM D5961/D5961M-17《聚合物基复合材料承载响应的标准试验方法》^[25]沿着经向裁切试样，试样的

表 1 材料性能参数
Table 1 Parameters of material properties

Yarn specification	Density/(g·cm ⁻³)	Yarn linear density/tex	Tensile strength/MPa	Tensile modulus/GPa	Breakage elongation/%
TG800 HX-12K	1.8	500	5 678	290	2.32
TG800 HX-6K	1.8	250	5 678	290	2.32
TDE86	1.2	-	80	3.5	-

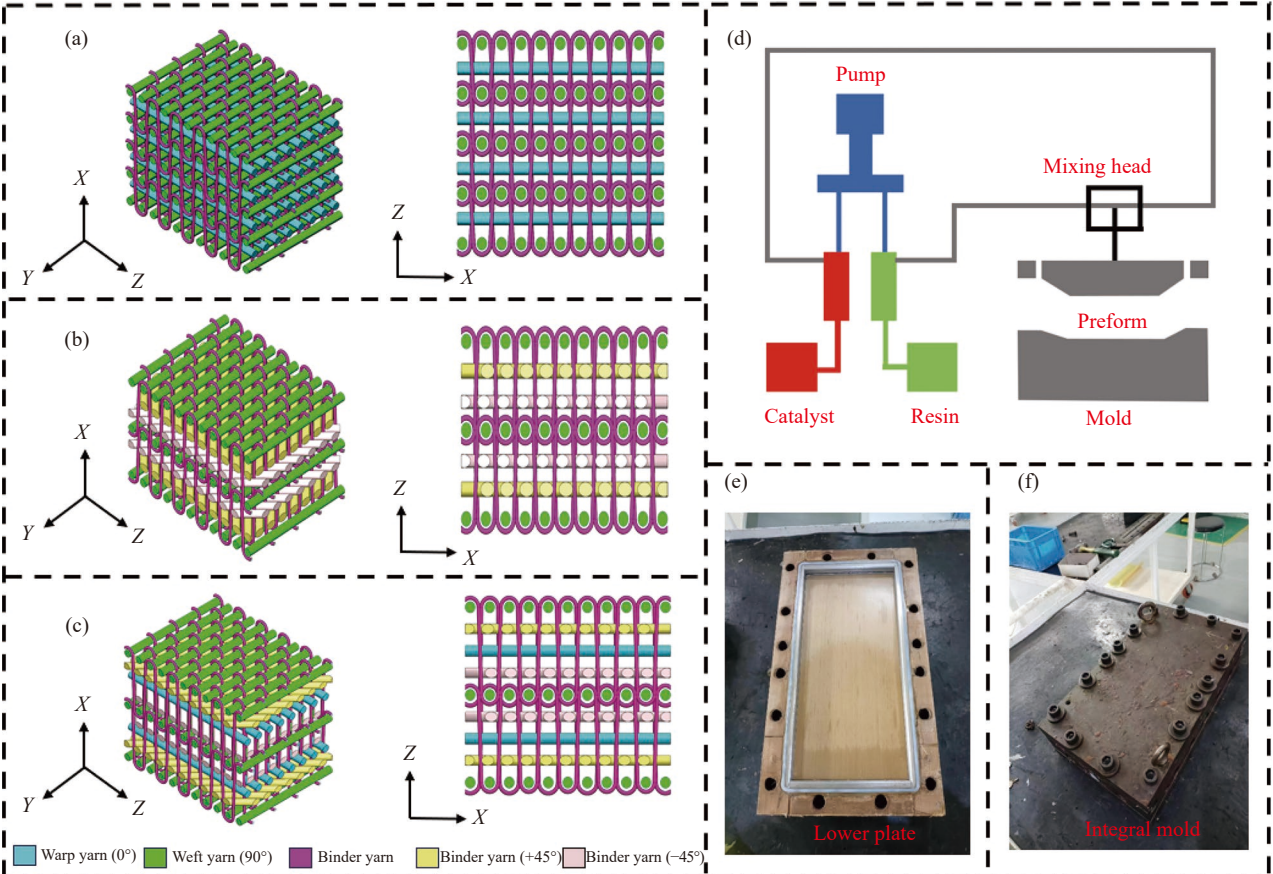


图1 三维机织预制体结构及树脂传递模塑成型(RTM)示意图: (a) MW3D-I; (b) MW3D-II; (c) MW3D-III; (d) RTM 工艺流程; (e) 下模; (f) 整体模具

Fig. 1 Schematic diagram of 3D woven preforms and resin transfer moulding (RTM) process: (a) MW3D-I; (b) MW3D-II; (c) MW3D-III; (d) RTM process flow; (e) Lower plate; (f) RTM mold

表2 三维机织复合材料结构参数

Table 2 Structural parameter of 3D woven composites

No.	Fabric structure	Yarn linear density/tex			Fabric density/(tows·cm ⁻¹)			Thickness/ mm	Fiber volume fraction/vol%
		Warp/ Bias yarn	Weft	Binder yarn	Warp	Weft	Bias yarn		
MW3D-I	[90°/0°/90°/0°/90°/ 0°/90°/0°/90°]	1 000	1 000	250	4	4	4	4.27	54.63
MW3D-II	[90°/45°/-45°/90°/ -45°/45°/90°]	1 000	1 000	250	4	4	4	3.85	54.73
MW3D-III	[90°/45°/0°/-45°/90°/ -45°/0°/45°/90°]	1 000	1 000	250	4	4	4	4.73	54.20

尺寸为 135 mm×36 mm×*h* (*h* 为试样厚度), 开孔孔径为 6 mm。为了研究开孔位置对开孔连接结构承载性能的影响, 设计了 3 种不同开孔位置(不同端径比, 采用 *E*/*D* 表示端径比, *W*/*D* 表示宽径比)的试样(图 2), 孔中心距离试样边缘的距离分别为 18 mm、12 mm 和 6 mm, 每种规格 5 个试样, 具体的试样尺寸如表 3 所示。

1.2 实验设备及实验夹具

开孔连接试验所用的实验设备主要包括力试

(上海)科学仪器有限公司 LE5305 型号的电子万能试验机、日本 KEYENCE 公司的 VR-5200 3D 轮廓测量仪。试验夹具由 2 块夹板、1 件垫片和 1 根销钉组成, 如图 3 所示。不同厚度的试样选用与试样厚度相同的垫片。

1.3 开孔连接试验

参照 ASTM D5961/D5961M-17 开展三维机织复合材料的开孔连接试验(图 4), 加载速度为 2 mm/min。

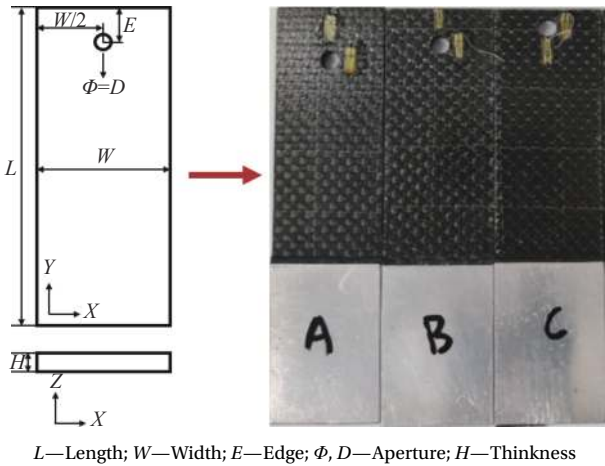


图2 开孔试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of open-hole specimen

表 3 开孔连接试样尺寸

Table 3 Dimensions of composites joints

No.	Length L/mm	Width W/mm	E/mm	Aperture D/mm	W/D	E/D
A	135	36	18	6	6	3
B	135	36	12	6	6	2
C	135	36	6	6	6	1

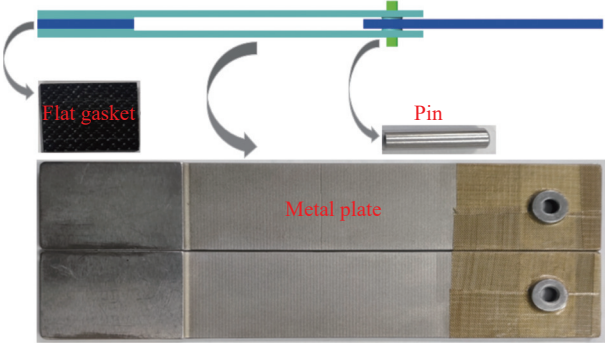


图3 开孔连接试验夹具示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the test fixture for composites joints

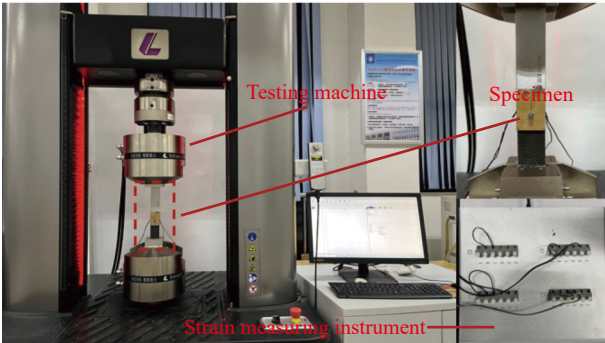


图4 三维机织复合材料 (3DWC) 连接试验过程

Fig. 4 Experimental process of 3D woven composites (3DWC) joints

2 结果与讨论

2.1 结构参数对三维机织复合材料连接性能的影响

表 4 给出了 3 种结构复合材料的平均最大载

荷和标准偏差。可以看出，3 种结构在 $E/D=3$ 和 $E/D=2$ 时的平均极限载荷是相近的，但当 $E/D=1$ 时，平均极限载荷会大幅度下降。3 种结构试样的最大标准差为 ± 1.30 ，这也证明了试验结果的有效性。

表 4 三维机织复合材料开孔连接极限载荷

Table 4 Maximum loads of the 3D woven composites opening joint

No.	Load/kN		
	A($E/D=3$)/kN	B($E/D=2$)/kN	C($E/D=1$)/kN
MW3D-I	12.59(± 0.87)	11.19(± 0.44)	3.89(± 0.23)
MW3D-II	11.23(± 1.30)	10.84(± 1.18)	4.33(± 0.29)
MW3D-III	15.61(± 0.56)	15.24(± 0.48)	5.38(± 0.27)

图 5 为 3 种结构机织复合材料端径比为 3 时开孔连接试样的载荷-位移曲线。可以看出，3 种试样的载荷-位移曲线变化趋势基本一致，在加载初始阶段，载荷快速上升，当拉伸位移达到某一位置后，载荷增加的趋势变缓，随着位移继续增大，载荷不再继续增加，载荷-位移曲线呈现波浪状。

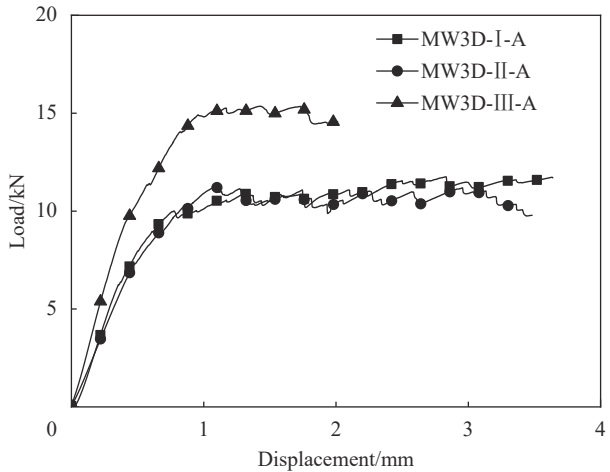


图5 不同结构三维机织复合材料连接结构载荷-位移曲线

Fig. 5 Load-displacement curves of 3DWCs joints with different fabric structures

MW3D-I 结构中仅有 0° 和 90° 方向纱线，连接位置的拉伸承载能力较强，但孔边的挤压承载较弱，容易发生孔边的挤压破坏。从曲线来看，初始阶段载荷迅速增加，载荷达到约 11 kN 时，孔边开始发生挤压渐进破坏，曲线表现为波浪状。MW3D-II 结构中仅有 $\pm 45^\circ$ 纱线，轴向承载能力较弱，但是 $\pm 45^\circ$ 纱线能改善孔边的应力集中，极限强度为 497.84 MPa，高于 MW3D-I 试样。MW3D-III 结构中，包含 0° 、 90° 和 $\pm 45^\circ$ 纱线，整个结构的

承载能力明显提升, 曲线的斜率明显较大, 载荷达到初始峰值后平缓的升高, 极限挤压强度为 550.52 MPa, 是 MW3D- I 极限强度的 1.15 倍。从曲线可以得出, 当三维机织复合材料中增加 $\pm 45^\circ$ 纱后, 连接结构承载能力可得到提升。

利用 3D 轮廓测量仪对试验后 3 种结构复合材料试样的表面状态进行了测量, 如图 6 所示。从图中试样表面的高度分布可以看出, 开孔连接结构的承载主要表现为开孔两端连接位置的拉伸载荷和孔与销钉挤压载荷, 同时也可以得出, 结构中不同的纱线取向和分布会导致宏观失效行为差异。

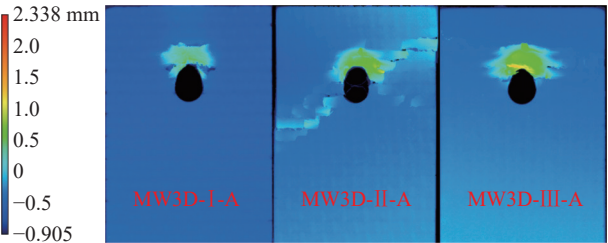


图 6 三维机织复合材料连接结构试样表面高度分布状态
Fig. 6 Surface height distribution of 3DWCs joint specimens

2.2 端径比对三维机织复合材料连接性能的影响

图 7 为 3 种三维机织复合材料开孔连接的载荷-位移曲线, 每种结构试样的 A、B 和 C 尺寸对应的 E/D 分别为 3、2 和 1。从曲线可以看出, 初始阶段, 曲线基本呈线性特征, 相同结构不同 E/D 试样载荷-位移的斜率基本相同, 这是由于只有开孔区域可以抵抗销钉的挤压载荷, 并将载荷传递到复合材料, 表现为线性增加; 随着位移增加, 试样孔边区域逐渐产生损伤, 载荷继续增加, 载荷达到第一次峰值之后, 孔边损伤扩展并逐渐失去抵抗载荷的能力, 载荷呈现波动, 直至试样失效。

对比 3 种不同 E/D 试样的曲线可以发现, 不同结构试样的曲线都表现出相同的规律。从曲线中可以得出, 当 $E/D=3$ 变为 $E/D=2$ 时, 试样承受的极限载荷略有减小; 但当 $E/D=1$ 时, 试样强度大幅下降。这是由于开孔位置靠近试样端部时, 端部对结构中纱线的约束作用减小, 更容易在端部发生纱线脱粘。对于 MW3D-III 来说, 当 E/D 从 2 变为 1 时, 试样承载能力下降最明显, 这也证明了当结构中包含斜向纱时, 开孔结构的承载性能会得到提升。

图 8 为 3 种三维机织复合材料开孔连接连接

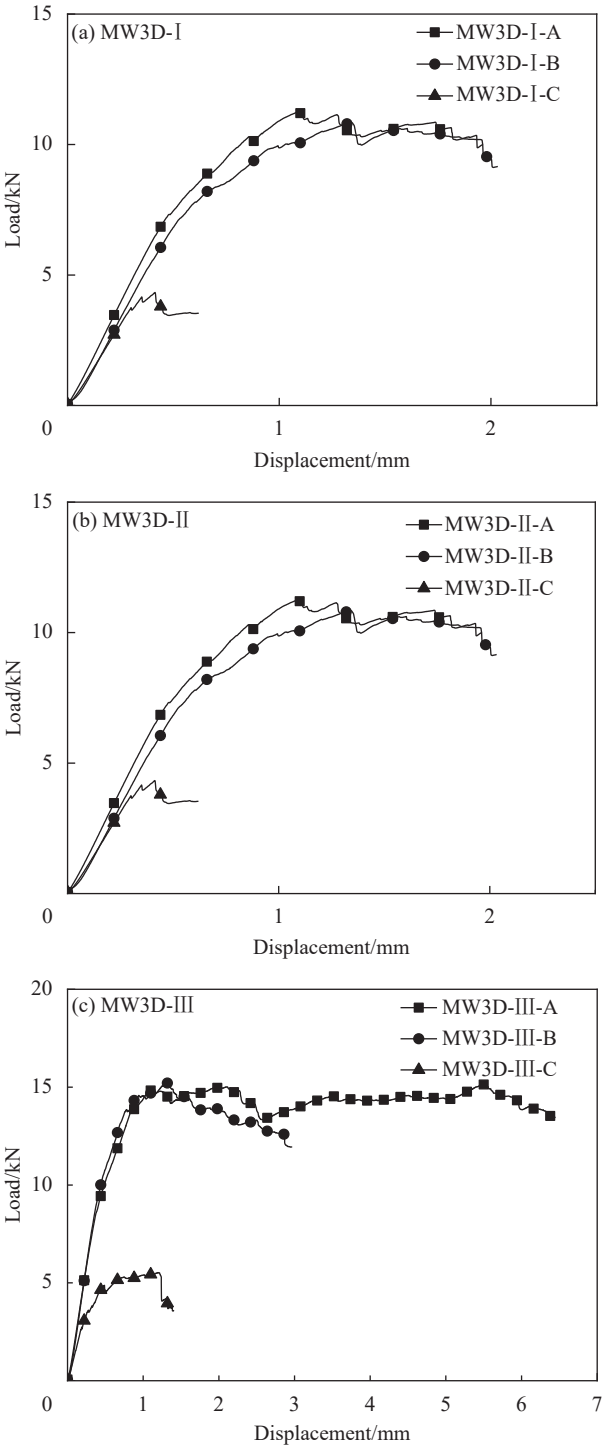


图 7 不同端径比三维机织复合材料连接结构载荷-位移曲线
Fig. 7 Load-displacement curves of 3DWCs joints with different edge/diameter ratios

强度。比较相同结构 3 种 E/D 试样的试验结果, 可以看出, 相同结构复合材料的极限挤压强度随着 E/D 的减小逐渐下降, 但下降程度是逐渐增加的。MW3D- I 结构 A 试样、B 试样和 C 试样的平均强度分别为 484.1 MPa、458.5 MPa 和 147.9 MPa,

与试样 A 相比，试样 B 和试样 C 的极限强度分别下降了 5.3% 和 73.3%；MW3D-Ⅱ 结构的 3 种试样的强度分别为 516.6 MPa、465.6 MPa 和 195.9 MPa，强度分别下降了 9.9% 和 68.9%；MW3D-Ⅲ 的平均极限挤压强度分别为 550.4 MPa、517.7 MPa 和 188.5 MPa，强度分别下降了 5.9% 和 69.8%。可见，当 $E/D=1$ 三维机织复合材料连接结构极限强度下降幅度均超过了 60%，这证明孔边距离试样端部为 3 mm 时，三维复合材料连接结构的承载能力大幅度下降。

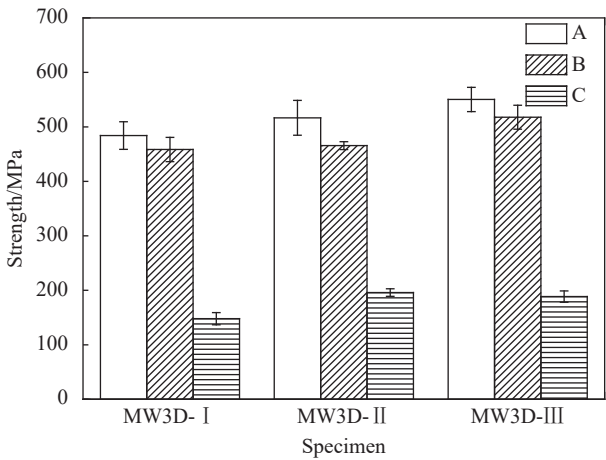


图 8 三维机织复合材料开孔连接强度
Fig. 8 Strength of 3DWC joints

2.3 三维机织复合材料连接结构失效机制

图 9 为 3 种结构试样宏观损伤形貌。从宏观损伤形貌来看，不同结构试样的失效状态不同， E/D 对试样的损伤模式影响较大。

图 9(a) 为 MW3D-Ⅰ 结构 3 种试样的宏观损伤形貌。从图中可以看出，试样 A 发生挤压破坏，挤压作用下经纱发生了屈曲，被压缩的纬纱发生弯曲变形，在开孔上端边缘形成挤压堆积区。随着 E/D 的减小，开始出现除挤压之外的损伤。试样 B 中经纱和斜向纱在挤压的作用下，部分纱线未发生屈曲，而是从试样端部拔出，这是由于 E/D 减小，结构及界面对试样端部纱线约束减小，会发生脱粘和纱线压出的现象。由于 MW3D-Ⅰ 结构中纱线层数较多，试样端部厚度方向上表现为基体隆起并且伴随有纬纱分层的出现。试样 C 由于 E/D 较小，宏观破坏模式主要表现为基体裂纹和端部纱线抽拔，试样发生断裂损伤。图 9(b) 为 MW3D-Ⅱ 宏观损伤形貌，表现出挤压破坏和拉伸破坏组合失效模式，由于结构中不包含 0° 和 90° 纱

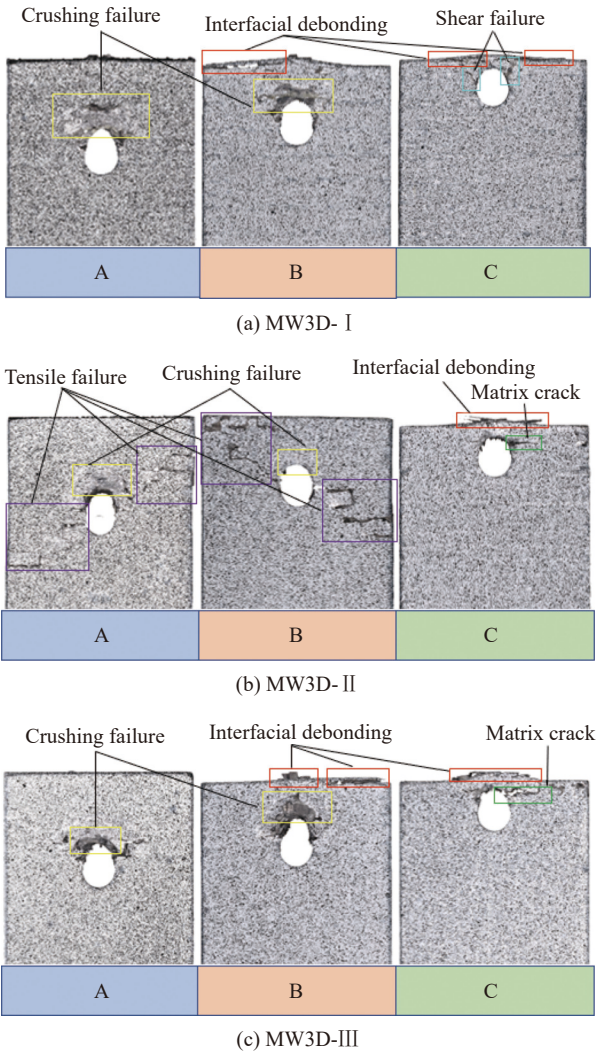


图 9 三维机织复合材料连接结构损伤形貌
Fig. 9 Damage morphology of 3DWC joints

线，试样裂纹沿 45° 方向发展，宏观表现为剪切破坏。当几何尺寸为 C 时，端部的斜向纱被拔出，并伴随有纬纱的脱粘，没有产生纵向的剪切破坏。图 9(c) 为 MW3D-Ⅲ 宏观损伤形貌，结构 MW3D-Ⅲ 兼具有结构 MW3D-Ⅰ 和结构 MW3D-Ⅱ 的纱线分布特征，由于开孔与试样端部间距离较大，试样 A 和试样 B 与结构 MW3D-Ⅰ 的破坏模式接近，而试样 C 的破坏模式与结构 MW3D-Ⅱ 相同。

综上所述，三维机织复合材料的开孔位置对其损伤模式有较大影响。在 E/D 为 3 和 2 时，MW3D-Ⅰ 和 MW3D-Ⅲ 的失效模式主要是挤压损伤；当 E/D 为 1 时，MW3D-Ⅰ 产生界面脱粘和剪切破坏，而 MW3D-Ⅲ 中含有 $\pm 45^\circ$ 斜向纱，能够避免发生剪切破坏。MW3D-Ⅱ 在 E/D 为 3 和 2 时，出现挤压损伤、基体还会出现裂纹，当 E/D 为

1 时, 挤压损伤消失, 出现端部纱线脱粘。

为了能够揭示三维机织结构中不同组分纱线的失效机制, 对结构 MW3D-III 试样开展了 CT 扫描重构。图 10 为 MW3D-III 的 3 种试样 CT 扫描结果, 图中标注的红色区域为压缩区域, 黄色区域为拉伸区域。

图 10(a) 为试样 A 的内部损伤形貌。从经纱截面可以看到, 经纱截面中存在较多挤压失效的经纱, 经纱在拉应力作用下, 呈现向 $\pm 45^\circ$ 延伸的失效。由于纬纱的取向垂直于加载方向, 纬纱主要发生扭曲和压缩区域的堆积, 并且有部分纬纱发生断裂, 导致孔周围基体横向开裂。开孔两端受到拉伸作用, 发生基体开裂。斜向纱的损伤呈对称分布, 斜向纱的压缩区域直接受到销钉垂直于其取向的分力, 分别在孔的左上端和右上端形成纱线的挤压拱起, 而拉伸区域及孔附近区域沿纱线取向方向出现基体开裂。从图中可以看出, 当 $E/D=3$ 时, 在孔左右两端接结经纱发生拉伸破坏, 部分纱线在试样上下表面断裂和抽拔, 接结经纱的损伤仅发生在孔的直径范围内。由于开孔位置距离端部较远, 试样 A 和销钉直接接触的挤压区域仅发生轻微的压缩损伤。

图 10(b) 为试样 B 内部损伤形态。从图中可以看出, 由于 E/D 减小, 经纱和斜向纱压缩损伤扩展到了试样端部, 表现为端部界面破坏和纱线脱粘、拔出。这是由于外在作用可影响到端部结构变化, 斜向纱和经纱在挤压张力作用下容易在端部发生脱离。经纱和斜向纱在拉应力的作用下发生拉伸破坏, 在拉伸区域及孔边出现了更多纱线断裂现象。纬纱发生严重的屈曲, 压缩区域出现更多纱线挤压拱起, 导致试样端部界面破坏, 纬纱脱粘。另外, 受拉伸作用, 孔两端大量的纬纱被拉断, 出现基体开裂。相比试样 A, 试样 B 的接结经纱的拉伸损伤不仅发生在孔的直径范围内, 而是扩展到试样的端部, 试样 B 开孔与销钉接触的部位产生较严重的压缩损伤, 造成部分纱线断裂和基体开裂。

图 10(c) 为试样 C 的内部损伤形态。由于开孔位置比较靠近试样端部, 在销钉挤压力作用下, 经纱基本没有发生压缩失效, 而是随着界面的破坏被挤压出试样端部。在拉应力作用下, 孔边出现纬纱的断裂和基体的横向撕裂, 试样端部的纬纱脱粘程度较大。斜向纱在孔附近位置断裂的现

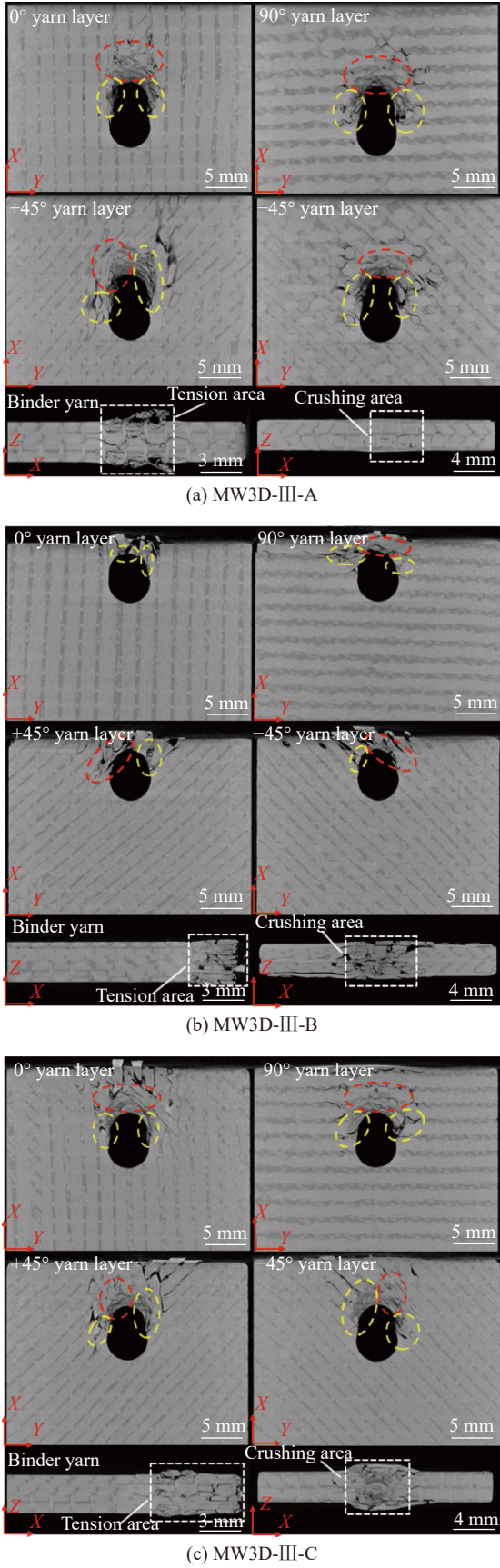


图 10 MW3D-III 开孔损伤形态 CT 扫描图

Fig. 10 CT scan of open hole damage morphology of MW3D-III

象严重,并沿取向方向被顶出试样端部。试样 C 的接结经纱拉伸损伤状态与试样 B 相似,损伤同样扩展到试样的端部。由于试样 C 开孔距离试样端部最小,试样与销钉接触的部位发生压缩破坏最严重,纱线断裂和基体开裂程度最严重。图 10(c) 为试样 C 的内部损伤形态。由于开孔位置比较靠近试样端部,在销钉挤压力作用下,经纱基本没有发生压缩失效,而是随着界面的破坏被挤压出试样端部。在拉应力作用下,孔边出现纬纱的断裂和基体的横向撕裂,试样端部的纬纱脱粘程度较大。斜向纱在孔附近位置断裂的现象严重,并沿取向方向被顶出试样端部。试样 C 的接结经纱拉伸损伤状态与试样 B 相似,损伤同样扩展到试样的端部。由于试样 C 开孔距离试样端部最小,试样与销钉接触的部位发生压缩破坏最严重,纱线断裂和基体开裂程度最严重。

对比 MW3D-Ⅲ 的 3 种试样可以发现,多轴向复合材料在挤压破坏过程中,各层纱线损伤的传播与纱线取向密切相关。不同开孔位置改变了三维机织复合材料开孔连接结构的失效机制。试样 B 损伤形式与试样 A 相似,但是由于 E/D 较小,经纱和斜向纱在挤压力作用下产生张力,试样端部的界面被破坏,纱线出现脱粘和拔出。当 $E/D=1$ 时,产生的挤压损伤和横向的拉伸损伤,致使试样在较短的拉伸位移内发生孔附近纱线的断裂、脱粘和基体的开裂,造成开孔连接结构的失效。

3 结论

通过研究 3 种不同结构三维机织复合材料 (3DWCs) 的开孔连接性能,分析了结构参数和端径比 (E/D) 对三维机织复合材料开孔连接力学性能的影响,讨论了不同结构、不同开孔位置复合材料的宏观损伤形貌和各纱线层的细观损伤模式,揭示了三维机织复合材料开孔连接结构的失效机制。

(1) 当 E/D 从 3 变为 2 时,3DWCs 的极限挤压强度下降均不明显;当 E/D 从 2 变为 1 时,3 种结构复合材料的极限载荷、失效位移都会大幅下降。其中,MW3D-Ⅲ 的承载能力的下降程度最大,这也证明 E/D 对三维机织复合材料连接性能的影响与预制体结构密切相关。

(2) MW3D-Ⅰ 和 MW3D-Ⅲ 在 E/D 为 3 和 2 时,损伤模式主要表现为孔边的挤压损伤;当 E/D 为 1 时,MW3D-Ⅰ 产生界面脱粘和剪切破坏,而

MW3D-Ⅲ 中含有 $\pm 45^\circ$ 斜向纱,能够有效避免发生剪切破坏。MW3D-Ⅱ 在 E/D 为 3 和 2 时,出现挤压损伤、基体会出现裂纹,当 E/D 为 1 时,挤压损伤消失,主要表现为端部纱线脱粘。

(3) 对于多轴向机织复合材料 MW3D-Ⅲ 而言,当 E/D 为 3 和 2 时,经纱呈现沿 $\pm 45^\circ$ 方向延伸失效,纬纱发生压缩堆积和断裂,斜向纱损伤呈对称分布。当 E/D 为 1 时,经纱和斜向纱基本没有发生压缩失效,而是随着界面的破坏被挤压出试样端部,纬纱发生严重屈曲,试样整体发生较严重的压缩失效,纱线断裂和基体开裂最明显。

参考文献:

[1] GUO Q W, ZHANG Y F, GUO R Q, et al. Influences of weave parameters on the mechanical behavior and fracture mechanisms of multidirectional angle-interlock 3D woven composites[J]. *Materials Today Communications*, 2020, 23: 100886.

[2] 郭瑞卿, 张一帆, 吕庆涛, 等. 多层多向层联三维机织复合材料的拉伸性能 [J]. *复合材料学报*, 2020, 37(10): 2409-2417. GUO Ruiqing, ZHANG Yifan, LYU Qingtao, et al. Tensile properties of multilayer multiaxial interlock 3D woven composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(10): 2409-2417(in Chinese).

[3] ZHANG Y F, TONG J, GUO Q W, et al. Hierarchical multiscale analysis for 3D woven composite leaf spring landing gear[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 189: 110913.

[4] LIU X, YANG Y, WANG Y, et al. Effects of hole perpendicularity error on mechanical performance of single-lap double-bolt composite joints[J]. *International Journal of Polymer Science*, 2017, 2017: 2790198.

[5] MARA V, HAGHANI R, AL-EMRANI M. Improving the performance of bolted joints in composite structures using metal inserts[J]. *Journal of Composite Materials*, 2016, 50(21): 3001-3018.

[6] LOPEZ-CRUZ P, LALIBERTE J, LESSARD L. Investigation of bolted/bonded composite joint behaviour using design of experiments[J]. *Composite Structures*, 2017, 170: 192-201.

[7] 山美娟, 赵丽滨. CFRP 复合材料螺栓连接失效载荷不确定性的评估方法 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(5): 1468-1475. SHAN Meijuan, ZHAO Libin. An evaluation method for uncertainty in failure load of CFRP composite bolted joints[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(5): 1468-1475(in Chinese).

[8] 山美娟, 赵丽滨. 基于可靠性的 CFRP 螺栓连接优化设计方法 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(11): 2249-2255. SHAN Meijuan, ZHAO Libin. Reliability-based design

- optimization method of CFRP bolted joints[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(11): 2249-2255(in Chinese).
- [9] LIU Y, ZHU J, CHEN Z, et al. Mechanical behavior of 2.5D (shallow bend-joint) and 3D orthogonal quartzf/silica composites by silicasol-infiltration-sintering[J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2012, 532: 230-235.
- [10] ZHANG Y F, LI M H, GUO Q W, et al. Tensile failure of multiaxial 3D woven composites with an open-hole: An experimental and numerical study[J]. *Composite Structures*, 2022, 279: 114746.
- [11] ABDULLAH M S, ABDULLAH A B, SAMAD Z. Structural integrity assessment of a composite joint: A review[J]. *Hole-Making and Drilling Technology for Composites*, 2019: 31-46.
- [12] 戴迪, 张威, 张俊杰, 等. 三维角联锁机织复合材料螺栓连接结构的拉伸性能及失效损伤 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2020(4): 521-528.
- DAI Di, ZHANG Wei, ZHANG Junjie, et al. Tensile properties and failure damage of three-dimensional angle-interlock woven composites bolted joint structures[J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2020(4): 521-528(in Chinese).
- [13] 梁双强, 张成龙, 陈革, 等. 开孔三维编织复合材料强度预测及应力分析 [J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(4): 889-896.
- LIANG Shuangqiang, ZHANG Chenglong, CHEN Ge, et al. Open-hole 3D braided composites strength prediction and stress analysis[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(4): 889-896(in Chinese).
- [14] PALWANKAR M P. Evaluation of a modified fixture for testing composite bolted joints with countersunk fasteners under bearing loads[D]. San Diego, CA: San Diego State University, 2016.
- [15] ZHANG Y, ZHOU Z, PAN S, et al. Experimental characterization of failure behavior for three-dimensional woven carbon/carbon composites under pin-loading[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(7): 9462-9470.
- [16] ASCIONE F, FEO L, MACERI F. An experimental investigation on the bearing failure load of glass fibre/epoxy laminates[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2009, 40(3): 197-205.
- [17] AKTAS A, DIRIKOLU M H. The effect of stacking sequence of carbon epoxy composite laminates on pinned-joint strength[J]. *Composite Structures*, 2003, 62(1): 107-111.
- [18] PAKDIL M. Failure analysis of composite single bolted-joints subjected to bolt pretension[J]. *Indian Journal of Engineering and Materials Sciences*, 2009, 16(2): 79-85.
- [19] PARK H J. Effects of stacking sequence and clamping force on the bearing strengths of mechanically fastened joints in composite laminates[J]. *Composite Structures*, 2001, 53(2): 213-221.
- [20] 孙晓伦, 陈利, 张一帆, 等. 开孔三维机织复合材料的拉伸性能 [J]. *纺织学报*, 2022, 43(8): 74-79.
- SUN Xiaolun, CHEN Li, ZHANG Yifan, et al. Tensile properties of 3D woven composites with holes[J]. *Journal of Textile Research*, 2022, 43(8): 74-79(in Chinese).
- [21] WARREN K C, LOPEZ-ANIDO R A, GOERING J. Behavior of three-dimensional woven carbon composites in single-bolt bearing[J]. *Composite Structures*, 2015, 127: 175-184.
- [22] HU J, ZHANG K, XU Y, et al. Modeling on bearing behavior and damage evolution of single-lap bolted composite interference-fit joints[J]. *Composite Structures*, 2019, 212: 452-464.
- [23] LIU F R, YAO W T, ZHAO L B, et al. An improved 2D finite element model for bolt load distribution analysis of composite multi-bolt single-lap joints[J]. *Composite Structures*, 2020, 253: 112770.
- [24] GUO Q, ZHANG Y, LI D, et al. Experimental characterization of the compressive properties and failure mechanism of novel multiaxial 3D woven composites[J]. *Composites Communications*, 2021, 28: 100905.
- [25] American Society for Testing Materials. Standard test method for bearing response of polymer matrix composite laminates: ASTM D5961/D5961M-17 [S]. West Conshohocken: American Society for Testing Materials International, 2017.