

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.03.002

## 2.5D 机织复合材料双剪连接力学行为与损伤机制

钱坤, 江昊, 张典堂

(江南大学生态纺织教育部重点实验室, 江苏无锡 214122)

**摘要:** 为研究装配参数对 2.5D 机织复合材料连接性能的影响, 制备了具有不同宽径比  $w/D$  与边径比  $e/D$  的 2.5D 机织复合材料试样, 通过双搭接拉伸实验, 分析了在连接载荷下材料的力学行为与失效模式, 并借助微计算机断层扫描技术 (Micro-CT) 观察试样内部损伤情况, 阐明其损伤机制。结果表明: 试样在  $w/D$  和  $e/D$  分别取 6 和 3 时, 表现出较高的力学性能, 但适当减少  $w/D$  或  $e/D$  依旧能保有相当强度, 当  $w/D$  下降为 4 时, 刚度减少 3.18%, 极限挤压强度减少 2.77%; 当  $e/D$  下降为 2.5 时, 刚度与强度分别减少 1.62% 和 7.19%; 螺栓孔的位置参数对材料的失效模式影响显著, 减小  $w/D$  使经纱承受更多载荷, 失效模式向净张力失效演变; 减小  $e/D$  使纬纱承受更多载荷, 失效模式向撕裂失效演变。

**关键词:** 2.5D 机织复合材料; 螺栓连接; 微计算机断层扫描技术 (Micro-CT); 复合材料失效; 损伤机制

中图分类号: TS105.11; TB334

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)03-0009-07

## Tensile mechanical behavior and damage mechanism of 2.5D woven composite with double-shear connection

QIAN Kun, JIANG Hao, ZHANG Diantang

(School of Textile Science and Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu Province, China)

**Abstract:** In order to clarify the influence of assembly parameters on the connection performance of 2.5D woven composite materials, specimens with different width-to-diameter ratios ( $w/D$ ) and edge-to-diameter ratios ( $e/D$ ) were prepared. The mechanical behavior and failure modes of the materials under double-lap tensile loads were analyzed, and the internal damage of the specimens was visualized using Micro-CT technology to elucidate the damage mechanism. The results showed that the composites could obtain higher mechanical properties when the hole was made with  $w/D$  of 6 and  $e/D$  of 3. However, reducing  $w/D$  or  $e/D$  appropriately could still maintain comparable strength. When  $w/D$  decreased to 4, the material decreased of 3.18% in stiffness and 2.77% in ultimate compressive strength. And the material decreased of 1.62% in stiffness and 7.19% in strength when  $e/D$  decreased to 2.5. The location parameters of the bolt hole would affect the failure mode of the material. Reducing  $w/D$  made the warp yarn bear more load and the failure mode evolved towards net-tension failure, while reducing  $e/D$  made the weft yarn bear more load and the failure mode evolved towards tearing failure.

**Key words:** 2.5D woven composites; bolted connection; Micro-CT; composite failure; damage mechanism

2.5D 机织预制体具有空间角联的纤维束交织特性<sup>[1-2]</sup>, 由其增强的复合材料较好地克服了传统层合复合材料层间性能低、抗冲击性能差和断裂韧性弱等缺点<sup>[3-4]</sup>, 在发动机叶片、机匣、喷管等航空航天关键部件上得到广泛应用<sup>[5-7]</sup>。虽然通过净成型设计和制造,

2.5D 机织复合材料已经有效地减少了零部件的数量<sup>[8]</sup>, 但在服役过程材料开孔并进行螺栓连接仍是典型的装配形式<sup>[9-10]</sup>。尽管采用 2.5D 机织结构能够有效降低复合材料的缺口敏感性<sup>[11-13]</sup>, 但是零件之间的装配依旧使构件在加工连接处的承载效率面临巨大挑

收稿日期: 2023-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (12072131); 江苏省优秀青年基金资助项目 (BK20211583)

第一作者: 钱坤 (1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为结构功能一体化纺织复合材料、预制件及生产设备的设计与开发。

E-mail: qiankun@163.com

通信作者: 张典堂 (1986—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为先进纺织复合材料制备。E-mail: zhangdiantang@jiangnan.edu.cn

战<sup>[4]</sup>。因此,开展 2.5D 机织复合材料连接结构的力学性能表征,明确连接孔几何参数与损伤机制映射关系,量化连接损伤区域面积,进而提升 2.5D 机织复合材料连接构件可靠性和稳定性具有重要的工程应用价值。

近年来,国内外研究人员对三维纺织复合材料在连接载荷下的力学行为和破坏机制开展了多方面的试验研究。在碳纤维树脂基复合材料方面,郑锡涛等<sup>[16]</sup>针对三维编织结构,考察了不同三维编织结构、构件几何参数以及是否使用预制孔对单耳构件承载性能的影响,结果显示,采用三维六向结构、增加孔端距以及使用编织预留孔的制备方式均能有效提升单耳构件的载荷。Saleh 等<sup>[17]</sup>和 Warren 等<sup>[18]</sup>对比了不同三维机织结构下连接形式与偏轴角度对载荷的影响,结果显示,正交机织结构具有较强抵抗应变和损伤延伸的能力,双搭连接接头的强度约为单搭接的 2 倍,45°偏轴载荷下各结构刚度最低,仅达到经向加载的 24.7%~32.7%。Mounien 等<sup>[19]</sup>和 Garcia 等<sup>[20]</sup>分别设计了特殊的夹具,用于表征三维机织半孔试样与单耳构件挤压区域的损伤过程,结果显示,45°偏轴加载能提供较高的失效载荷,单耳构件失效模式以剪切为主。在碳纤维增强碳基复合材料方面,Zhang 等<sup>[21]</sup>总结了孔的几何参数对正交机织失效模式的影响,并分析了各失效模式的损伤机制。上述研究考察了不同三维纺织结构以及不同连接方式对复合材料连接性能的影响,但是在 2.5D 机织复合材料方面,连接孔几何参数与材料连接性能间的映射关系尚不明确。

2.5D 机织复合材料细观结构复杂,加之制孔加工使材料产生缺口,增加了连接体系的复杂程度,阻碍了材料的进一步应用。因此深入探讨复合材料在连接载荷下的力学行为、阐明装配参数对材料细观损伤的影响具有重大意义。本文旨在研究孔几何参数对 2.5D 机织复合材料连接性能及失效模式的影响。利用双搭接夹具,对制备的 2.5D 机织复合材料试样施加拉伸载荷,记录力-位移曲线,通过表观损伤情况分析材料失效模式,并基于微计算机断层扫描技术(Micro-CT)观察材料内部损伤,分析损伤机理,进而探讨材料损伤机制与孔几何参数的映射关系,以期对 2.5D 机织复合材料构件连接结构设计提供指导,拓展其应用领域。

## 1 实验材料及方法

### 1.1 实验原材料及制备

本文选用日本东丽(Toray) T700-12K 碳纤维,采

用多层角联织机织造 2.5D 机织碳纤维预制体。其中,预制体经纱密度和纬纱密度分别为 5 根/cm 和 2 根/cm,共计 6 层。基体材料由 E-51 型环氧树脂与 5023 型固化剂按 3:1 质量比配制而成,树脂与固化剂生产厂家分别为南通星辰合成材料有限公司与无锡仁泽化工产品有限公司。之后,采用树脂传递模塑成型(RTM)工艺制成复合材料。其中,注塑压力为 0.4 MPa,固化温度为 60 °C,固化时间为 6 h。最终制得 2.5D 机织复合材料尺寸为 300.0 mm × 300.0 mm × 4.4 mm,纤维体积分数为(45 ± 1)%。

### 1.2 测试装置与方法

#### 1.2.1 双搭接拉伸实验

本文制备双搭接连接试样,重点研究宽径比  $w/D$  和边径比  $e/D$  对 2.5D 机织复合材料连接性能的影响。试样孔径  $D$  统一设置为 6 mm,通过改变试样宽度  $w$  与孔边距  $e$ ,获得不同  $w/D$  和  $e/D$  的试样。

为考察孔几何参数对 2.5D 机织复合材料连接性能的影响,本研究将试样分为 2 组,每种样品进行 3 次测试,具体参数如表 1 所示,样品试样与安装示意如图 1 所示。

表 1 试样尺寸与孔几何参数

Tab.1 Sample size and hole geometric parameters

试样	试样宽 $w/\text{mm}$	孔中心边距 $e/\text{mm}$	宽径比 $w/D$	边径比 $e/D$	数量
Br-W15	15	18	2.5	3.0	3
Br-W24	24		4.0		3
Br-W36E18	36		6.0		3
Br-E15		15		2.5	3
Br-E9		9		1.5	3

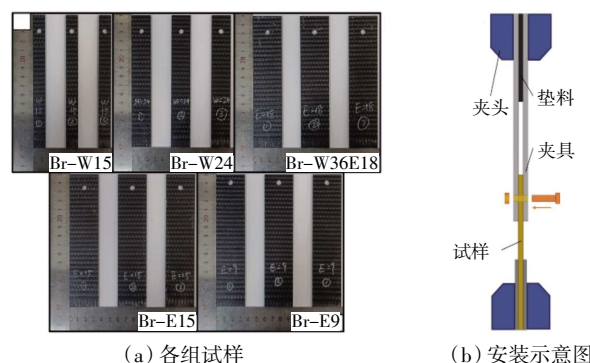


图 1 各组试样与安装示意图

Fig.1 Each group of samples and schematic diagram of samples installation

除试样尺寸参数外,实验参照 ASTM D5961/D5961M-17, Procedure A 进行。实验仪器为深圳三思纵横科技 UTM5305X 万能试验机。为确保试样夹持力度,在试样夹持区域粘贴了加强片。试样与夹具的装配如图 1(b)

所示。螺栓预紧力取  $3 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 实验加载速率取  $0.5 \text{ mm}/\text{min}$ 。紧固件采用半牙螺栓, 以避免螺纹的挤压对试样造成额外损伤。实验夹具与紧固件均采用不锈钢材质, 硬度高于复合材料试样, 因此可以忽略夹具与紧固件变形。

连接拉伸实验中, 挤压应力  $\sigma_i$  与应变  $\varepsilon_i$  计算公式分别为:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{k \times D \times h} \quad (1)$$

$$\varepsilon_i = \frac{s_i}{k \times D} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_i$  为  $i$  时刻试样所受挤压应力 (MPa);  $F_i$  为  $i$  时刻载荷 (N);  $k$  为螺栓数量, 本实验中均取 1;  $D$  为试样孔径 (mm);  $h$  为试样厚度 (mm);  $\varepsilon_i$  为  $i$  时刻应变;  $s_i$  为  $i$  时刻位移 (mm);  $K$  为系数, 双搭接时取 1.0。

试样挤压刚度  $E$  计算公式为:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3)$$

式中:  $E$  为材料挤压刚度 (MPa);  $\Delta\sigma$  为应力-应变曲线中初始线性段挤压应力增量 (MPa);  $\Delta\varepsilon$  为应力-应变曲线中初始线性段挤压应变增量。

### 1.2.2 基于 Micro-CT 的连接拉伸损伤细观表征

利用 Micro-CT 对 2.5D 机织碳纤维/环氧树脂复合材料试样进行扫描成像, 观察试样在连接拉伸实验中产生的损伤。所用器材为 diondo-d2 微纳米焦点 CT 检测系统。X 射线电压为 90 kV, 电流为 90  $\mu\text{A}$ 。数据采集时间为 2 000 ms, 采样幅数为 1 860 幅, 分辨率为 12  $\mu\text{m}$ 。采样完成后, 利用 VGSTUDIO MAX 3.4 对损伤进行分区域可视化处理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 力学行为

图 2 和图 3 分别为变宽径比和变边径比组挤压应力-应变曲线。图中, 依照曲线特征, 将试样载荷位移曲线分为 3 个阶段: 阶段 1 为初始线性阶段, 从开始加载直至曲线出现第 1 个拐点, 所有试样的拐点均出现在 10% 应变附近, 阶段 1 内挤压应力与应变的增量用于计算试样的刚度  $E$ ; 阶段 2 由初始线性段结束至试样到达极限挤压强度, 除 Br-W24 外, 试样在达到最大载荷前, 曲线有明显波动; 阶段 3 由最大载荷至加载结束, 期间包括载荷的震荡与试样的失效。

对于变宽径比组而言, 阶段 2 中 Br-W15 和 Br-W36E18 的载荷存在若干峰值, Br-W24 在该段较为平滑。阶段 3 中 Br-W15 表现为在达到最大载荷后立即

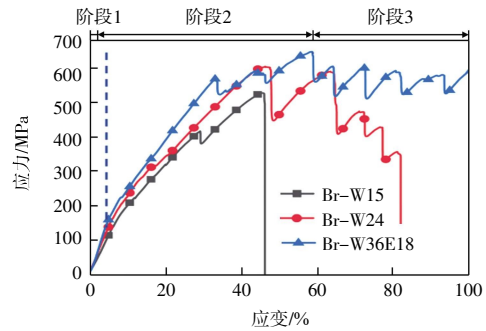


图 2 变宽径比组挤压应力-应变曲线

Fig.2 Bearing stress-strain curves of samples in group of variable  $w/D$  ratios

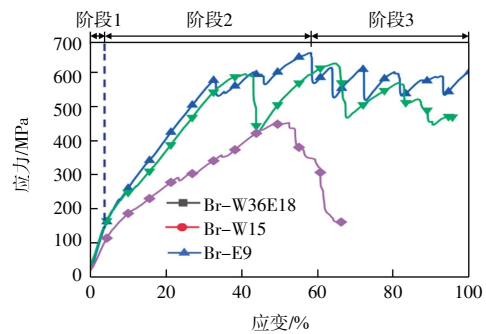


图 3 变边径比组挤压应力-应变曲线

Fig.3 Bearing stress-strain curves of samples in group of variable  $e/D$  ratios

失效, 随宽度增加, Br-W24 与 Br-W36E18 在达到最大载荷后, 曲线出现震荡。其中, Br-W24 在极限强度后, 载荷大幅度下降, 随应变增加, 载荷重新升高至 609.52 MPa, 达到极限强度的 96.81%, 之后在震荡中载荷逐渐降低直至失效。而 Br-W36E18 的载荷持续震荡直至 100% 应变, 期间载荷维持在 528.72~625.23 MPa 之间, 没有出现大幅度下降。

在变边径比组中, Br-E15 出现极限挤压强度前, 载荷波动幅度相较 Br-W36E18 更大、周期更长。Br-E15 的第 1 个峰值应力为 606.47 MPa, 随后波谷应力仅 434.27 MPa, 此时应变为 44.91%, 随后在 65.16% 应变时达到最大载荷。Br-E9 在 52.99% 应变时达到最大载荷, 随后载荷分段逐级下降。推测原因为, 随边径比减少, 孔附近经纱产生损伤, 载荷转为主要由纬纱承担, 结构能够提供的强度逐级减少。

表 2 示出样品的刚度与极限挤压强度平均值。将试样刚度与极限挤压强度以 Br-W36E18 为标准归一化, 得到图 4。

由图 4 可以看出, 宽度由 36 mm (Br-W36E18) 减少至 24 mm (Br-W24), 材料刚度与极限挤压强度分别下降 3.18% 和 2.77%, 但当宽度减少至 15 mm (Br-W15) 后 2 者下降幅度均增加, 分别减少 27.97% 和 20.45%。

表 2 试样刚度平均值与极限挤压强度平均值

Tab.2 Average stiffness and average maximum strength of samples

试样	刚度平均值 $E/\text{GPa}$	极限挤压强度平均值 $\sigma_{\text{max}}/\text{MPa}$
Br-W15	$1.99 \pm 0.06$	$515.07 \pm 28.90$
Br-W24	$2.68 \pm 0.12$	$629.62 \pm 12.50$
Br-W36E18	$2.77 \pm 0.14$	$647.52 \pm 21.30$
Br-E15	$2.72 \pm 0.03$	$600.99 \pm 24.88$
Br-E9	$1.98 \pm 0.14$	$456.23 \pm 28.44$

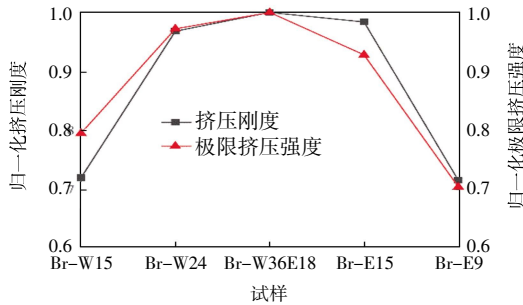


图 4 试样挤压刚度与极限挤压强度归一化

Fig.4 Normalized bearing stiffness and maximum strength of samples

在变边径比组中也存在类似情况,边距由 18 mm(Br-W36E18)降至 15 mm(Br-E15),刚度与极限挤压强度分别下降 1.62%和 7.19%,当宽度下降至 9 mm (Br-E9),二者减幅则分别达到 28.41%和 29.54%。其中,极限挤压强度下降接近线性,而刚度变化斜率增加。综上所述,当试样的  $w/D$  和  $e/D$  适当减少时,材料的刚度与极限挤压强度变化并不明显。但是,结合应力-应变曲线可以看出,减少宽径比能够使材料在达到极限强度前有较稳定的表现。

2.2 宏观损伤与失效模式分析

在先前的研究中,Thoppul 等<sup>[2]</sup>将复合材料连接的单一失效形式归纳为净张力失效、剪切失效、挤压失效、撕裂失效、劈裂失效 5 种失效形式。变宽径比组与变边径比组试样的表面损伤情况与失效模式分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可见,在变宽径比组中,随宽度增加,试样的失效模式由净张力失效向挤压损伤转变,最大载荷也随之增加。在 Br-W15 与 Br-W24 中,试样一侧断裂导致失效,断口处可以观察到大量损伤,包括纤维束的断裂、抽拔以及基体开裂。其中,纤维抽拔长度随宽度增加而增加。此外,在 Br-W15 中没有观察到明显的纬纱变形,但在挤压区域表面有基体损伤。宽度增加后,Br-W24 与 Br-W36E18 的纬纱变形加剧。可以推断,随宽度增加纬纱承受的载荷逐渐增加。Br-W36E18 的失效模式为挤压失效,试样加载边缘有明显的突出。损伤区域的边缘呈折线,试样表面沿损伤

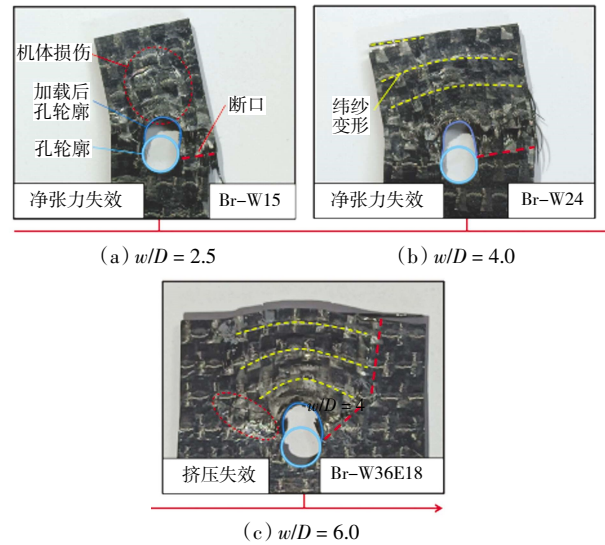


图 5 变宽径比组宏观损伤与失效模式

Fig.5 Macroscopic damage and failure mode of group with variable  $w/D$  ratio

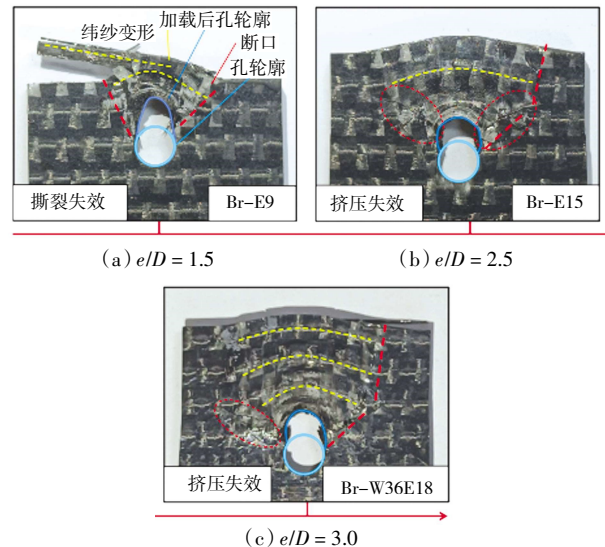


图 6 变边径比组宏观损伤与失效模式

Fig.6 Macroscopic damage and failure mode of group with variable  $e/D$  ratio

区域边缘有基体裂纹,由孔至试样边缘的基体开裂减弱。在孔周围观察到大量纱线断裂,且孔边缘产生面外方向的隆起。

由图 6 可见,在变边径比组中,Br-E9 表现为撕裂失效,由孔至试样边缘损伤宽度逐渐增大,损伤区域大致呈扇形。损伤区域内纬纱变形严重,并伴有基体损伤。在试样边缘有因弯曲变形而被整束顶出的纬纱。边距增加至 15 mm 后,Br-E15 的损伤模式转变为挤压损伤,损伤区域边缘呈折线,在损伤的中心区域仅观察到纬纱的弯曲,与 Br-W36E18 相似,但孔周围的基体裂纹较 Br-W36E18 更大,在挤压区域相较 Br-W36E18 更为平整。

2.3 基于 Micro-CT 的细观损伤表征

样加载后的损伤分别如图 7 和图 8 所示。

基于 Micro-CT 扫描结果,通过孔隙提取,观察试

为更好地观察试样内部损伤情况,分别获取了试

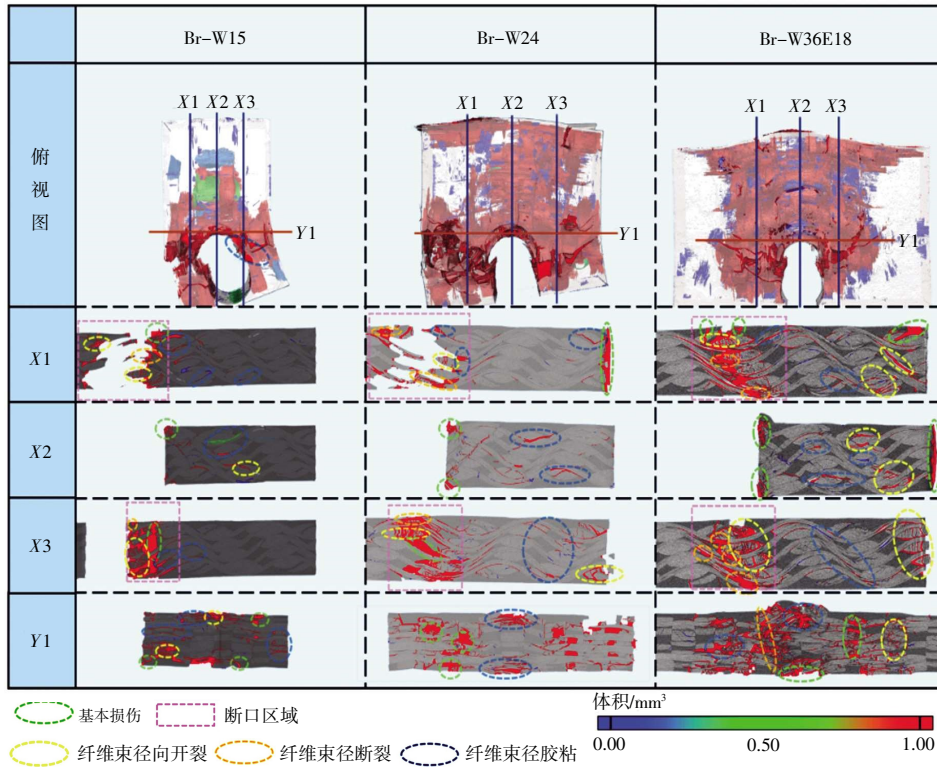


图 7 变宽径比组试样剖面图

Fig.7 Profile of samples in group of variable  $w/D$  ratios

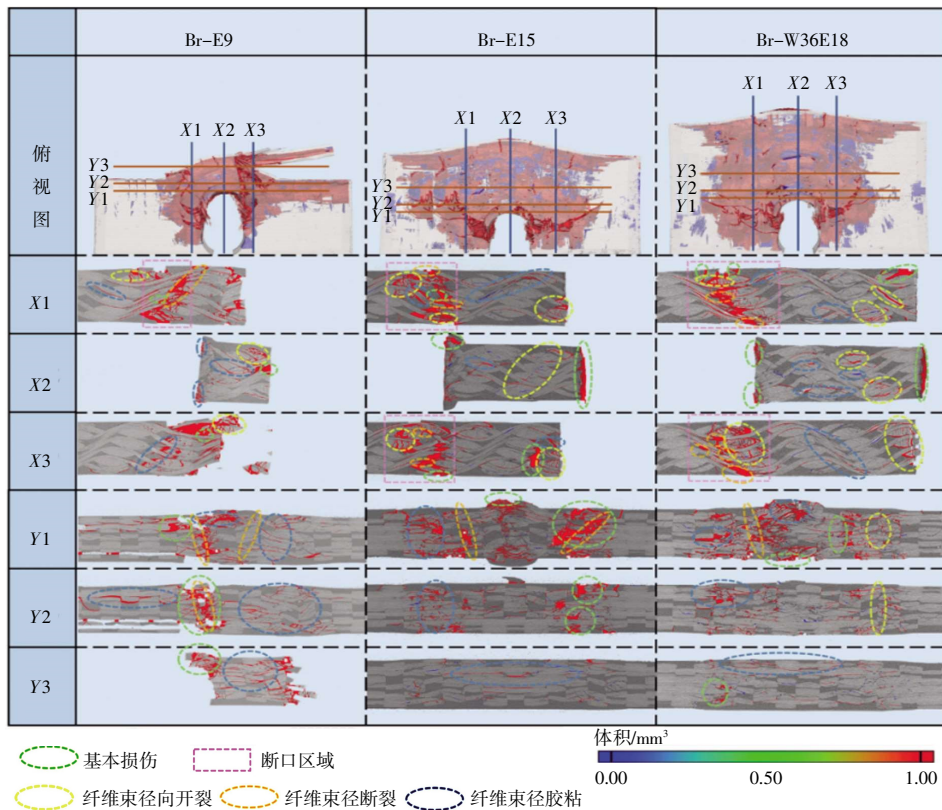


图 8 变边径比组试样剖面图

Fig.8 Profile of samples in group of variable  $e/D$  ratios

样沿垂直纬纱方向与垂直于加载方向剖面。垂直纬向共取 3 组：由样品中心至损伤区域两侧边缘分别取 0 (X2)、50%(X1、X3)处剖面；垂直于加载方向于孔切面取剖面(Y1)。此外,为了观察变边径比组中挤压损伤情况,在距离孔切面 1 mm(Y2)和 3 mm(Y3)处提取两处剖面。

在剖面 X 中,可以观察到损伤主要集中在断口处和挤压区域,其中断口处有大量经纱断裂、抽拔,并伴有基体损伤;挤压区域损伤多为纤维束脱黏和纤维束径向开裂。在剖面 Y 中,孔的切面主要存在的损伤为基体损伤、纤维束脱黏、径向开裂和纬纱断裂等。

由图 7 可知,在变宽径比组中,Br-W24 和 Br-W15 的失效模式为净张力失效,试样未断裂侧损伤区域相较断裂侧更广,损伤形式主要为经纱断裂引起的纤维抽拔和脱黏,其中,Br-W24 断口处纤维抽拔长度较 Br-W15 更长。当试样宽度  $w$  增加至 36 时,Br-W36E18 表现为挤压失效,断口与纬纱方向夹角增加倾斜,挤压区域损伤主要表现为纤维束脱黏。总体而言, $w$  增加对试样影响表现为:挤压区域内损伤更加密集;孔壁与螺栓接触部分基体挤压变形逐渐加剧;试样边缘发生纬纱的脱黏与径向开裂;断口处损伤加剧,且纤维抽拔长度增加。

由图 8 可知,变边径比组试样断口处主要损伤包括纤维束断裂、脱黏以及径向开裂。Br-E9 至 Br-W36E18 试样边距  $e$  增加,断口与纬纱方向夹角减少,且断口宽度增加,断口内损伤加剧。挤压区域内损伤以纤维束脱黏为主,随着  $e$  增加,损伤增多。此外,在试样边缘存在受到挤压被顶出的纱线,顶出部分损伤表现为纤维束脱黏与径向开裂。与挤压区域相反, $e$  较小时,试样边缘损伤加剧,在 Br-E9 中可以观察到纱线被整根顶出,在材料内形成空腔。对比 Y 方向切面,发现在孔切面附近损伤较密集,存在纤维束断裂、脱黏、径向开裂以及基体损伤。剖面 Y1 观察到的损伤最密集,Y2 与 Y3 损伤程度减轻,多为纤维束脱黏与基体损伤。其中,在 Br-E9 的 Y2 剖面观察到纬纱断裂,表明随  $e$  减少,载荷逐渐转为由纬纱承担。

图 9 为试样损伤分布。图 9 中,分别以断口和孔垂直纬纱方向切面为界,将试样划分为 A、B、C 以及断口 4 个区域。其中,A 和 B 为挤压区域,区域 A 为试样直接受紧固件挤压的部分,区域 B 为挤压区域剩余部分,区域 C 为断口另一侧的区域, $\alpha$  为断口与纬纱方向夹角。当  $w/D$  较小时,孔两侧经纱强度较低,难以将载荷沿经向传递,断口沿纬向扩展, $\alpha$  约等于  $0^\circ$ ,试样表现为净张力失效。断口区域内观察到由经纱断裂主导

的损伤。区域 A 与区域 B 受到的挤压损伤很小,主要表现为纤维束脱黏,与紧固件接触产生少量基体损伤,在区域 C 中观察到由断口处经纱断裂所导致的纤维束抽拔和脱黏。随  $w/D$  增大,纬纱承受的载荷增多,挤压区域的纬纱发生变形,由两侧向中间抽拔,导致区域 B 出现损伤。同时,试样加载方向边缘出现纤维束脱黏以及纬纱的径向开裂。当  $e/D$  较小时,挤压区域内纬纱少,载荷沿着纬向传导能力下降, $\alpha$  接近  $90^\circ$ 。此时承受载荷的经纱数量减少,表现为断口内断裂的经纱列数减少,载荷主要由纬纱承担。断口与区域 A 交界处纬纱由于大幅度变形而断裂,同时,试样边缘的纬纱被顶出,不再具有承载能力。在传递载荷能力下降与承担载荷纬纱数量不足双方面作用下,试样的力学性能大幅下降,试样表现为撕裂失效。随  $e/D$  增加,载荷开始沿纬向传递,当试样  $w/D$  与  $e/D$  分别为 6 和 3 时,经纱和纬纱均能良好的传递载荷,损伤区域大。孔附近的经纱和纬纱均产生损伤,裂口沿斜向扩展,此时试样表现为挤压失效。

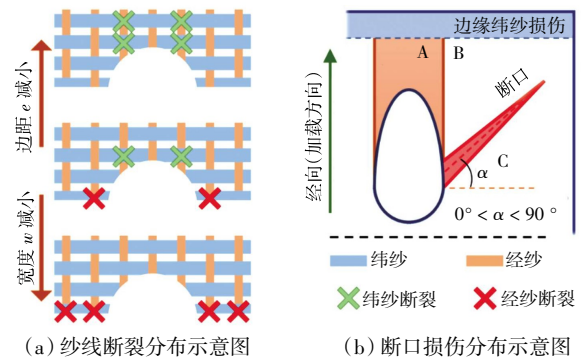


图 9 试样损伤分布

Fig.9 Damage distribution of samples

### 3 结 论

本文制备了 2.5D 机织碳纤维树脂基复合材料,通过双搭接拉伸实验,研究了材料在不同几何参数下的力学行为,并通过 Micro-CT 获得了测试后试样内部形貌,进而表征试样损伤,得到以下主要结论。

(1) 2.5D 机织碳纤维树脂基复合材料在连接拉伸实验中,采用  $w/D$  为 6.0、 $e/D$  为 3.0 的参数制孔,可以获得较高的力学性能(刚度 2.77 GPa,极限挤压强度 647.52 MPa)。适当减少宽径比与边径比,材料仍能保有相当的力学性能:当  $w/D$  下降为 4.0 时,刚度减少 3.18%,极限挤压强度减少 2.77%;当  $e/D$  下降为 2.5 时,刚度与强度分别减少 1.62%和 7.19%。

(2) 试样失效模式表现为净张力失效、挤压失效

和撕裂失效3种,Br-W15、Br-W24表现为净张力失效;Br-W36E18、Br-E15表现为发生挤压失效;Br-E9表现为撕裂失效。细观层面的损伤形式包括基体损伤、纤维束脱黏、断裂以及径向开裂。

(3) 2.5D机织复合材料的失效受到孔的几何参数影响,当 $w/D$ 减少至4.0和2.5时,孔附近经纱承受大部分载荷,断口沿纬向拓展,进而形成净张力失效;当 $e/D$ 减少至1.5时,纬纱承受大部分载荷,断口大致沿径向拓展,形成撕裂失效。当 $w/D$ 为6.0、 $e/D$ 取值为3.0或2.5时,经纱和纬纱均承受载荷,裂口沿斜向扩展,试样表现为挤压失效。

### 参考文献:

- [1] 陈利,赵世博,王心淼. 三维纺织增强材料及其在航空航天领域的应用[J]. 纺织导报,2018(S1): 80-87.  
CHEN L, ZHAO S B, WANG X M. Three-dimensional textile reinforcement and its application in aerospace field[J]. China Textile Leader, 2018(S1): 80-87 (in Chinese).
- [2] 焦亚男,仇普霞,纪高宁,等. 经纬向纤维体积比例对2.5D机织复合材料力学性能的影响[J]. 天津工业大学学报,2015, 34(3): 1-5.  
JIAO Y N, QIU P X, JI G N, et al. Mechanical properties of 2.5D woven composites with different volume rates in warp and weft directions[J]. Journal of Tianjin Polytechnic University, 2015, 34(3): 1-5 (in Chinese).
- [3] LIANG Q, LIU J Y, WANG X X, et al. Flexural progressive failure mechanism of hybrid 3D woven composites: Combination of X-ray tomography, acoustic emission and digital image correlation[J]. Composite Structures, 2022, 280: 114894.
- [4] ZHANG J J, ZHANG W, HUANG S W, et al. An experimental-numerical study on 3D angle-interlock woven composite under transverse impact at subzero temperatures[J]. Composite Structures, 2021, 268: 113936.
- [5] TAKASHI T, TAKESHI N, KOOUN T, et al. Research of CMC application to turbine components[J]. Engineering Review, 2005, 38(2): 58-62.
- [6] 左平,何爱杰,李万福,等. 连续纤维增韧陶瓷基复合材料的发展及在航空发动机上的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2019, 32(5): 47-52.  
ZUO P, HE A J, LI W F, et al. Application of continuous fiber reinforced ceramic matrix composites on aero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2019, 32(5): 47-52 (in Chinese).
- [7] 关留祥,李嘉禄,焦亚男,等. 航空发动机复合材料叶片用3D机织预制体研究进展[J]. 复合材料学报,2018, 35(4): 748-759.  
GUAN L X, LI J L, JIAO Y N, et al. Review of 3D woven pre-
- forms for the composite blades of aero engine[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(4): 748-759(in Chinese).
- [8] 陆慧中,孙颖,焦亚男,等. 典型多向2.5D机织预制体近净形编织结构设计[J]. 复合材料学报,2021, 38(9): 3101-3109.  
LU H Z, SUN Y, JIAO Y N, et al. Near net-shaped design on the architecture of typical multi-directional 2.5D woven preform[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(9): 3101-3109 (in Chinese).
- [9] MOHAMMAD S, MOHAMMAD H. A review on stress distribution, strength and failure of bolted composite joints[J]. Journal of Computational Applied Mechanics, 2018, 49(2): 415-429.
- [10] MORGADO M A, CARBAS R J C, MARQUES E A S, et al. Reinforcement of CFRP single lap joints using metal laminates[J]. Composite Structures, 2019, 230: 111492.
- [11] GUO Q W, ZHANG Y F, LI D S, et al. Experimental and numerical investigation of open-hole tensile properties and damage mechanisms of 3D woven composites under weft-loading[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 161: 107455.
- [12] GUO J H, WEN W D, ZHANG H J, et al. Warp-loaded mechanical performance of 3D orthogonal layer-to-layer woven composite perforated structures with different apertures[J]. Composite Structures, 2021, 278: 114720.
- [13] GUO Q W, ZHANG Y F, LI D S, et al. Tensile properties and failure mechanism of 3D woven composites containing holes of different geometries[J]. Thin-Walled Structures, 2021, 166: 108115.
- [14] ZHANG H Y, ZHANG L, LIU Z, et al. Numerical analysis of hybrid (bonded/bolted) FRP composite joints: A review[J]. Composite Structures, 2021, 262: 113606.
- [15] 孙梦尧,于颂,刘景艳,等. 三维五向编织复合材料纤维束真实形态观测[J]. 纺织高校基础科学学报,2022, 35(1): 7-13.  
SUN M Y, YU S, LIU J Y, et al. Observation on the real shape of fiber bundles in three-dimensional five-directional braided composites[J]. Basic Sciences Journal of Textile Universities, 2022, 35(1): 7-13(in Chinese).
- [16] 郑锡涛,卢智先,柴亚南,等. 三维多向编织复合材料承力接头破坏模态[J]. 机械科学与技术,2007, 26(6): 728-732.  
ZHENG X T, LU Z X, CHAI Y N, et al. Failure mode of load-bearing joints in three-dimensional braided composites[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2007, 26(6): 728-732(in Chinese).
- [17] SALEH M N, YUDHANTO A, POTLURI P, et al. Characterising the loading direction sensitivity of 3D woven composites: Effect of Z-binder architecture[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2016, 90: 577-588.

- 除冰技术实验研究[J]. 航空学报, 2012, 33(1): 54-61.
- MA L Y, XIONG L Y, LIU L Q, et al. Experimental study on electro-thermal deicing technique for carbon fiber composite [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(1): 54-61 (in Chinese).
- [12] IBRAHIM Y, KEMPERS R, AMIRFAZLI A. 3D printed electro-thermal anti- or de-icing system for composite panels[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 166: 102844.
- [13] 湛广昌, 纪双英, 赵文明, 等. 直升机旋翼除冰系统加热垫试验研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 201-205, 211.
- CHEN G C, JI S Y, ZHAO W M, et al. Experimental study on heating pad of helicopter rotor deicing system[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 201-205, 211 (in Chinese).
- [14] 戴海军. 基于纬编轴向织物的电加热复合材料性能研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
- DAI H J. Study on properties of electric heating composites based on weft knitted axial fabric[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019 (in Chinese).
- [15] 戴海军, 李嘉禄, 孙颖, 等. 纬编双轴向织物/环氧树脂电加热复合材料电热及层间剪切性能[J]. 复合材料学报, 2020, 37(8): 1997-2004.
- DAI H J, LI J L, SUN Y, et al. Electrothermal and interlaminar shear properties of weft knitted biaxial fabric/epoxy resin electrically heated composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2020, 37(8): 1997-2004 (in Chinese).
- [16] LEE J S, JO H, CHOE H S, et al. Electro-thermal heating element with a nickel-plated carbon fabric for the leading edge of a wing-shaped composite application[J]. Composite Structures, 2022, 289: 115510.
- [17] ZHANG M C, WANG C Y, LIANG X P, et al. Weft-knitted fabric for a highly stretchable and low-voltage wearable heater [J]. Advanced Electronic Materials, 2017, 3(9): 1700193.
- [18] 项赫, 姜亚明, 吴宇珂, 等. 基于线圈面积的罗纹织物半球成形研究[J]. 针织工业, 2020(4): 16-18.
- XIANG H, JIANG Y M, WU Y K, et al. Hemisphere Forming of 1+1 rib fabric based on loop area analysis[J]. Knitting Industries, 2020(4): 16-18 (in Chinese).
- [19] 郭梦惟, 孙颖, 王昆, 等. 聚酰亚胺纤维纬编织物增强橡胶基复合材料冲击性能[J]. 复合材料学报, 2022, 39(10): 4572-4579.
- GUO M W, SUN Y, WANG K, et al. Impact properties of polyimide fiber weft knitted fabric reinforced rubber composites [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(10): 4572-4579 (in Chinese).
- [20] 冯亚, 刘梁森, 孙颖, 等. 一种镍铬合金丝纬编电热元件及其制备方法: CN115334702A[P]. 2022-11-11.
- FENG Y, LIU L S, SUN Y, et al. A weft knitted electric heating element with nickel chromium alloy wire and its preparation method: CN115334702A[P]. 2022-11-11 (in Chinese).
- [21] 中国国家标准化管理委员会. 纤维增强塑料拉伸性能试验方法: GB/T 1447—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Fiber-reinforced plastics composites—determination of tensile properties: GB/T 1447—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005 (in Chinese).

#### 本文引文格式:

孙颖, 冯亚, 刘梁森, 等. 含镍铬合金丝纬编电热层复合材料的拉伸性能[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(3): 16-22.

SUN Y, FENG Y, LIU L S, et al. Tensile property of composites with Ni-Cr alloy wire weft knitted electrothermal layer [J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(3): 16-22 (in Chinese).

(上接第 15 页)

- [18] 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.
- [19] MOUNIEN R, FAGIANO C, PAULMIER P, et al. Experimental characterization of the bearing behavior of 3D woven composites[J]. Composites Part B: Engineering, 2017, 116: 369-376.
- [20] GARCIA C, HURMANE A, IRISARRI F X, et al. Experimental analysis and damage modeling of the shear-out failure mode of a 3D woven composite lug[J]. Composite Structures, 2021, 261: 113522.
- [21] ZHANG Y F, ZHOU Z G, ZU S M, et al. Multiscale numerical investigation on failure behaviour of three-dimensional orthogonal woven carbon/carbon composites subjected to pin-loading[J]. Ceramics International, 2021, 47(22): 31099-31113.
- [22] THOPPUL S D, FINEGAN J, GIBSON R F. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer-matrix composite structures: A review[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(3/4): 301-329.

#### 本文引文格式:

钱坤, 江昊, 张典堂. 2.5D 机织复合材料双剪连接力学行为与损伤机制[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(3): 9-15, 22.

QIAN K, JIANG H, ZHANG D T. Tensile mechanical behavior and damage mechanism of 2.5D woven composite with double-shear connection[J]. Journal of Tiangong University, 2024, 43(3): 9-15, 22 (in Chinese).