

丝束规格、织物铺层角度和拉伸方向对碳纤维双轴向复合材料拉伸及损伤行为的影响

关钰茜^{a,b} 肖遥^{a,b} 谷安琪^{a,b} 杨敏慧^{a,b} 邵光伟^{a,b} 邵慧奇^{a,c} 毕思伊^{a,b}
付少举^{a,b} 杜薇^d 张吴妍^d 程子旻^d 张辉^d 蒋金华^{a,b} 陈南梁^{a,b} 俞建勇^{a,c}
东华大学 a. 产业用纺织品教育部工程研究中心, b. 纺织学院, c. 纺织科技创新中心,
d. 材料科学与工程学院, 上海 201620

摘要: 系统研究了碳纤维双轴向复合材料的力学行为与失效机制。通过选取 3 种丝束规格即 12K、24K、48K 的碳纤维双轴向织物, 制备单一铺层及混杂铺层复合材料, 并进行 0° 与 45° 方向拉伸试验, 利用 3D-DIC 技术监测应变演化。结果表明: 丝束规格对纤维-树脂界面结合强度有显著影响。织物铺层角度对试样的载荷传递路径与失效机制影响显著。混杂铺层能提高复合材料拉伸强度, 但会引发显著的层间分层。拉伸方向决定纤维的受力机制。当拉伸方向与纤维轴向平行时, 纤维强度能得到充分发挥, 复合材料失效表现为突发性的脆性断裂。而偏轴拉伸时, 复合材料表现为韧性断裂, 过程渐进且应变分布复杂。研究结果可为双轴向复合材料的设计和应用提供参考, 即依据主承载方向优化铺层构型, 可实现力学性能与损伤行为的协同调控。

关键词: 碳纤维双轴向织物; 复合材料; 拉伸性能; 丝束规格; 织物铺层角度; 拉伸方向; 失效机制

中图分类号: TB 332

文献标志码: A

文章编号: 1004-7093(2026)03-0011-11

Effects of tow specification, fabric ply angle, and loading direction on tensile and damage behavior of carbon fiber biaxial composites

Guan Yuxi^{a,b}, Xiao Yao^{a,b}, Gu Anqi^{a,b}, Yang Minhui^{a,b}, Shao Guangwei^{a,b}, Shao Huiqi^{a,c},
Bi Siyi^{a,b}, Fu Shaoju^{a,b}, Du Wei^d, Zhang Wuyan^d, Cheng Zimin^d, Zhang Hui^d,
Jiang Jinhua^{a,b}, Chen Nangliang^{a,b}, Yu Jianyong^{a,c}

a. Engineering Research Center of Technical Textiles, Ministry of Education, b. College of Textiles, c. Innovation Center for Textile Science and Technology, d. College of Materials Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

Abstract: A systematic investigation was conducted on the mechanical behavior and failure mechanisms of carbon fiber biaxial composites. Single-ply and hybrid-ply composites were fabricated by selecting carbon fiber biaxial fabrics with three tow specifications, namely 12K, 24K, and 48K. Tensile tests were conducted at 0° and 45° loading directions, and strain evolution was monitored using 3D-DIC technology. The results indicated that the tow specification had a significant impact on the fiber-resin interfacial bonding strength. The fabric ply angle notably influenced the load transfer

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3704500); 中央高校基本科研业务项目(2232023G-06)

收稿日期: 2025-10-15

作者简介: 关钰茜, 女, 2002 年生, 在读硕士研究生, 主要研究方向为纺织复合材料, gyxguanyuxi@163.com

通信作者: 陈南梁, 教授, 主要研究方向为针织技术、产业用纺织品及纺织复合材料, nlch@dhu.edu.cn

path and failure mechanism of the specimens. Hybrid-ply could enhance the tensile strength of the composites but induce significant interlaminar delamination. The loading direction determined the stress mechanism of the fibers. When the load direction was parallel to the fiber axis, the fiber strength was fully utilized, and the composite failure was characterized by sudden brittle fracture. In contrast, under off-axis loading, the composites exhibited ductile fracture with a gradual process and complex strain distribution. The research findings can provide references for the design and application of biaxial composites, suggesting that optimizing the ply configuration based on the primary load-bearing direction could achieve synergistic regulation of mechanical properties and damage behavior.

Keywords: carbon fiber biaxial fabric; composite; tensile property; tow specification; fabric ply angle; loading direction; failure mechanism

碳纤维复合材料凭借质量轻、模量高及耐磨损等^[1]优势在航空航天^[2]、建筑交通^[3]等领域得到较广泛的应用^[4]。依据丝束中的单丝数量,碳纤维可分为大丝束($\geq 24K$,即每束单丝不少于 24 000 根)和小丝束($< 24K$,即每束单丝低于 24 000 根)两类^[5]。其中,大丝束碳纤维凭借生产成本较低、生产效率较高、工艺流程较简单等特点^[6],在风电叶片^[7]制造和汽车轻量化^[8]等领域更具性价比。双轴向经编技术是发挥碳纤维力学性能的有效途径,碳纤维在其中可不参与针织成圈^[9],而是以连续伸直的状态按照设计的角度平行铺设。相较于其他纺织结构,双轴向经编结构能有效消除因纤维弯曲和交织而产生的应力集中,使碳纤维的强度和模量得到充分利用^[10],故碳纤维双轴向复合材料具备广阔的应用前景^[11]。在双轴向织物中,铺层角度和铺设层数是调节织物力学性能的重要参数^[12]。

当前,已有诸多学者就铺层角度、铺层顺序等因素对碳纤维增强复合材料(carbon fiber reinforced polymer, CFRP)层合板及其他纤维(如小丝束碳纤维、芳纶、玻璃纤维等)双轴向织物复合材料力学性能的影响展开深入探讨。例如:王婷等^[13]沿 45° 、 -45° 、 0° 和 90° 方向对纯玻璃纤维复合材料及芳纶/玻璃纤维混杂复合材料进行了拉伸测试。结果表明,沿 -45° 和 45° 方向拉伸时试样的拉伸性能最优。其中,芳纶/玻璃纤维混杂复合材料在沿纱线方向加载载荷时,其拉伸强度较纯玻璃纤维复合材料提高了约 20%,表现出其在特定应用领域替代单一玻璃纤维复合材料的潜力。Pang^[14]通过分析 6 种铺层方式的 CFRP 层合板的拉伸过程,系统比较了其核

心拉伸性能参数,发现铺层角度与铺层顺序对材料拉伸性能有显著影响。研究指出,在总层数不变的前提下,将 0° 铺层置于层合板外侧并适当提高其比例,可有效提升材料的纵向拉伸强度。Ren 等^[15]聚焦铺层角度与单层厚度对 CFRP 拉伸性能的影响机制,通过选用厚度分别为 24、55、75 和 100 μm 的预浸料,制备了交叉铺层与准各向同性层合板,并进行了拉伸试验。结果显示:层厚对准各向同性层合板的断裂模式影响显著,且对准各向同性层合板力学性能的影响大于对交叉铺层层合板的影响。Yu 等^[16]比较了 3 种铺层角度(0° 、 45° 与 -45°)的碳纤维单向层合板在拉伸疲劳过程中裂纹扩展行为,发现不同铺层角度对裂纹扩展路径及应力分布具有明显的调控作用。Gao 等^[17]基于不同铺层构型下的静态与动态拉伸试验,进一步研究了铺层角度与铺层顺序对 CFRP 动态拉伸性能的影响。结果表明,CFRP 的抗拉强度对应变速率较为敏感,但杨氏模量受其影响较小。这种应变速率导致的强度和模量的变化,受铺层顺序与铺层角度的共同影响。Swolfs 等^[18]为提升 CFRP 的韧性,尝试将单向碳纤维预浸料与高取向聚丙烯薄膜进行混杂铺层,发现引入聚丙烯薄膜虽导致材料的刚度与强度有所下降,但材料在拉伸过程中塑性变形能力更优。Li 等^[19]在室温与液氮温度下系统研究了 4 种铺层角度的多轴向织物增强复合材料的拉伸性能。结果表明,无论是在室温还是在低温条件下,铺层角度对材料的拉伸性能均有重大影响,即随着纤维方向与拉伸方向夹角的增大,材料拉伸性能显著下降。但以大丝束碳纤维双轴向织物为研究对象,系统探究其复合材料

力学性能影响因素的研究还较少。

本研究选取 3 种丝束规格即 12K、24K 与 48K 的碳纤维双轴向织物,分别制备单一铺层试样,并进一步地通过调整铺层角度制备混杂铺层试样,然后沿 0°与 45°方向进行拉伸测试,系统研究丝束规格、织物铺层角度及拉伸方向对碳纤维双轴向复合材料拉伸及损伤行为的影响,对比并分析其失效机制,以期对碳纤维双轴向复合材料的设计和应用提供参考。

1 试验部分

1.1 试验材料

复合材料增强体:12K 和 48K 碳纤维双轴向织物(常州市宏发纵横新材料科技股份有限公司生产),以及 24K 碳纤维双轴向织物(海宁安捷复合材料有限公司生产),具体参数如表 1 所示。图 1 为典型的碳纤维双轴向织物照片,其中 0°为捆绑线方向。

表 1 碳纤维双轴向织物的具体参数

Tab. 1 Specific parameters of carbon fiber biaxial fabrics

织物名称	丝束规格	面密度/ ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)	织物中纤维 铺设角度/(°)
12K 碳纤维双轴向织物	12K	200	± 45
24K 碳纤维双轴向织物	24K	300	± 45
48K 碳纤维双轴向织物	48K	300	± 45

树脂:YT-CC302S 型慢干型树脂(易拓复合材料有限公司生产),其由 YT-CC302S-A 环氧树脂主剂和 YT-CC302S-B 固化剂组成,主剂和固化剂质量比为 3:1。

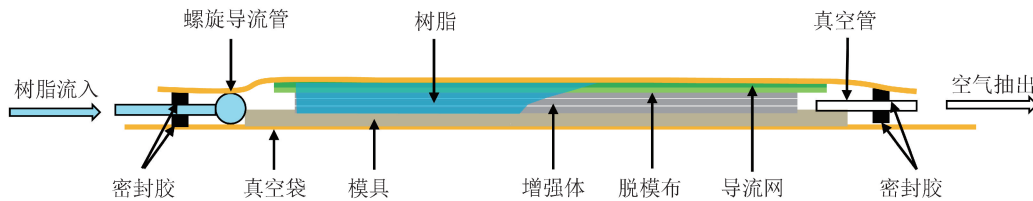


图 2 复合材料 VARTM 工艺示意

Fig. 2 Schematic illustration of VARTM process for composites

拉伸测试时,拉伸角度也以表层碳纤维双轴向织物中捆绑线方向作为参考方向,针对单一铺层复合材料设置了 2 种拉伸方向即 0°和 45°,针对混杂铺层复合材料设置了 1 种拉伸方向即 0°。下文复合材料试样代号前的角度即表示拉伸方向,如 0°-

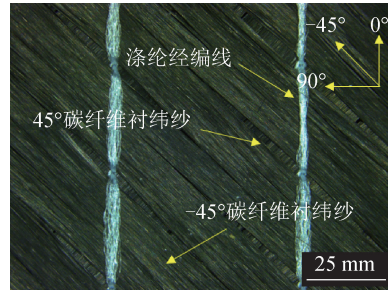


图 1 碳纤维双轴向织物照片

Fig. 1 Photo of carbon fiber biaxial fabric

1.2 复合材料的制备及拉伸方向的设置

利用上述 3 种碳纤维双轴向织物,以表层碳纤维双轴向织物中捆绑线方向作为织物铺层角度参考方向,调整织物铺层角度制备复合材料。其中,织物铺层角度皆为 0°的为单一铺层复合材料(简记为 D),织物铺层角度含 0°与 45°的为混杂铺层复合材料(简记为 H)。此外,为尽量保证复合材料面密度一致,面密度为 200 g/m^2 的 12K 碳纤维双轴向织物在复合材料中的铺设层数为 3,面密度为 300 g/m^2 的 24K 和 48K 碳纤维双轴向织物在复合材料中的铺设层数为 2。

采用真空辅助树脂传递模塑成型(vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)工艺制备复合材料。VARTM 成型示意如图 2 所示,即用真空袋包覆增强体,抽真空以与外界形成气压差,树脂在气压差的作用下从一端灌入,渗透模具内的增强体后流出,完成树脂灌注。之后,整体置于 80 °C 烘箱中固化 120 min,得到的复合材料试样代号及相关参数如表 2 所示。

12-D 即表示沿 0°方向拉伸 12-D 试样。

1.3 试验设备

采用 MTS-30KN 型万能试验机开展拉伸试验,控制拉伸速度为 2 mm/min ,并利用 Correlated Solutions 公司的 3D-DIC 非接触式全场应变测量系

表 2 复合材料试样规格

试样代号	碳纤维丝束规格	织物铺层角度
12-D	12K	0°+0°+0°
12-H	12K	0°+45°+0°
24-D	24K	0°+0°
24-H	24K	0°+45°
48-D	48K	0°+0°
48-H	48K	0°+45°

统对拉伸过程中试样的应变进行监测。该系统包含三脚架、云台、照明光源和型号为 XENOPLAN 2.8/50 的 CCD 工业相机等装置。拉伸试验现场照片如图 3 所示。

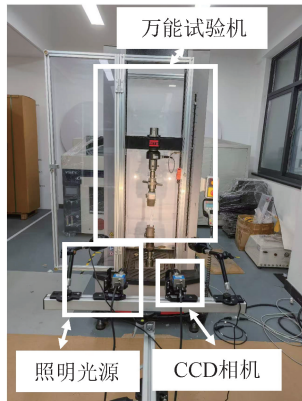


图 3 拉伸试验现场照片
Fig. 3 Photo of tensile test site

按照拉伸性能测试标准 ASTM D3039 制备 250.0 mm×25.0 mm 的碳纤维双轴向复合材料拉伸试样,加强片采用 50.0 mm×25.0 mm×1.5 mm 的铝片。此外,为在拉伸的同时对应变进行监测,对部分试样表面均匀喷涂哑光白漆,晾干后再喷涂黑漆,以在试样表面形成密集的黑色散斑。喷涂后的试样外观如图 4 所示。

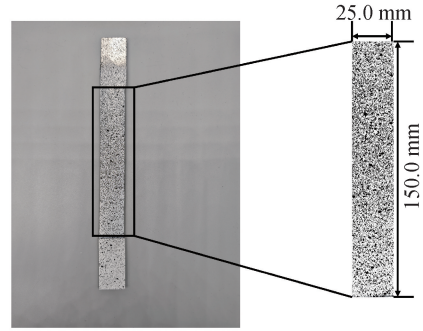


图 4 拉伸试样表面散斑照片
Fig. 4 Photo of speckle pattern on the surface of tensile specimen

2 试验结果及讨论

2.1 复合材料拉伸试验结果与分析

2.1.1 丝束规格对拉伸性能的影响

为系统探究丝束规格对复合材料拉伸性能的影响,选取单一铺层复合材料作为研究对象,设置拉伸方向为 45°。12-D、24-D 与 48-D 试样的纤维体积分数分别为 29.95%、49.21%与 44.87%,其存在差异的原因与碳纤维双轴向织物铺设层数不同导致复合材料厚度不同有关。为排除纤维体积分数差异的影响,本研究针对纤维体积分数进行了归一化处理,得到了体积分数归一化拉伸强度(σ_1)、体积分数归一化最大载荷(P_1)及体积分数归一化弹性模量(E_1) (图 5):

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_t}{V_f} \quad (1)$$

$$P_1 = \frac{P_{\max}}{V_f} \quad (2)$$

$$E_1 = \frac{E}{V_f} \quad (3)$$

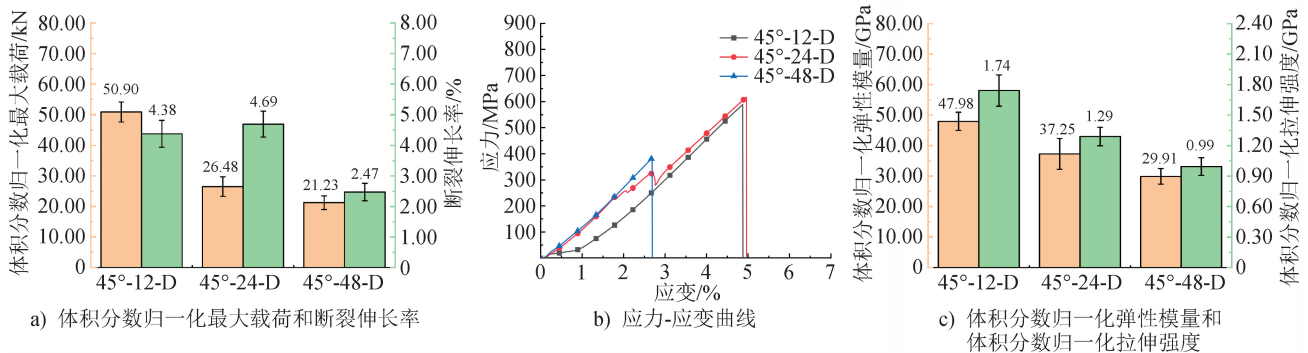


图 5 单一铺层试样 45°方向拉伸性能

Fig. 5 Tensile properties of single-ply specimens in 45° loading directions

式中： σ_l 为拉伸强度； V_f 为纤维体积分数； P_{\max} 为拉伸测试中的最大载荷； E 为弹性模量。

图 5a) 显示：45°-12-D 试样的体积分数归一化最大载荷达到 50.90 kN；断裂伸长率方面，45°-12-D 试样与 45°-24-D 试样表现接近，分别为 4.38% 与 4.69%，而 45°-48-D 试样为 2.47%。图 5b) 显示，三者应力-应变曲线形态基本一致，均表现为典型的脆性断裂特征。弹性模量与拉伸强度的体积分数归一化处理结果如图 5c) 所示，45°-12-D 试样最佳，分别为 47.98 GPa 和 1.74 GPa。可见，12K 试样的最大载荷和拉伸强度优于另外 2 种试样，这是由于小丝

束碳纤维织物制备的复合材料，其纤维与树脂的结合相对较均匀^[20]。而 48K 碳纤维因丝束根数较多、内部结构复杂、纤维之间排列更紧密^[21] 而不利于树脂渗入并与丝束结合^[22]，故而形成了树脂富集区和孔隙区^[23]，纤维与基体界面结合性能较弱，导致材料在较低的应变水平下即发生破坏，且裂纹会迅速扩展。

2.1.2 拉伸方向对拉伸性能的影响

以单一铺层试样为研究对象，设置拉伸方向为 0° 和 45°，研究拉伸方向对单一铺层试样拉伸性能的影响，结果如图 6 所示。

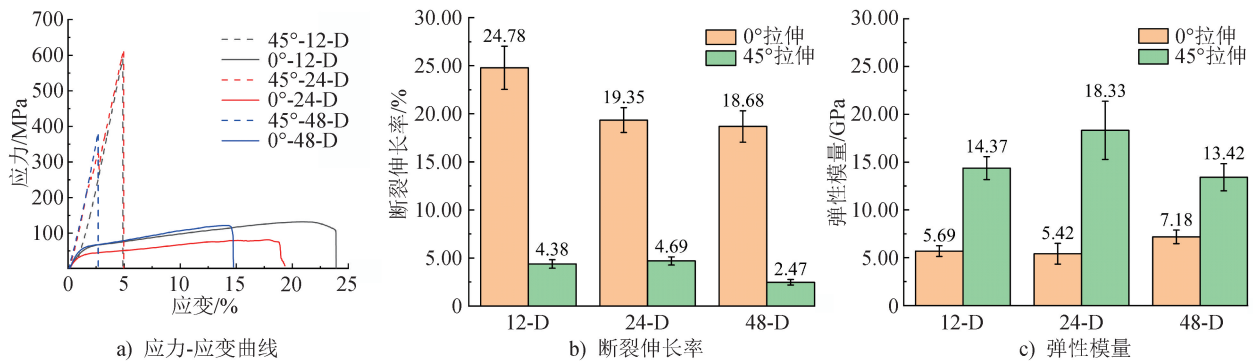


图 6 单一铺层试样 0° 与 45° 方向拉伸性能

Fig. 6 Tensile properties of single-ply specimens in 0° and 45° loading directions

图 6a) 显示，单一铺层试样沿 0° 与 45° 方向的拉伸曲线分别呈典型的韧性断裂与脆性断裂特征。这一差异源于拉伸方向变化引起的纤维受力机制的改变。0° 方向拉伸时，复合材料中碳纤维主要承受偏轴载荷，应力-应变曲线呈现显著的非线性特征，即在出现初始的弹性阶段之后，曲线斜率因材料屈服而下降并伴随波动，原因与纤维从基体中逐步抽拔及纤维-基体界面的损伤累积密切相关。其失效模式以纤维抽拔与层间开裂为主，属于典型的拉剪混合型破坏。此外，试样在变形过程中出现了明显的泊松效应，试样横向收窄，边缘纱线随应变增大而逐渐断裂。45° 方向拉伸时，复合材料中沿拉伸方向排列的碳纤维充分发挥其力学性能，并在达到临界断裂应变时发生脆性断裂，这显著抑制了其宏观塑性变形，断裂伸长率较小，试样宏观应变显著低于 0° 方向拉伸的试样，失效模式以拉伸断裂为主，无明显的泊松效应。

图 6b) 显示，45° 方向拉伸单一铺层试样的断裂伸长率整体明显小于 0° 方向拉伸的单一铺层试样，

原因在于：0° 方向拉伸时，碳纤维通过发生面内旋转以减小与拉伸方向的夹角，实现应力再分配，宏观上表现为明显的应变；而 45° 方向拉伸时，载荷由轴向碳纤维直接承担，无法通过纤维旋转实现应力重新分布，试样应变较小，失效模式表现为突发性的脆性断裂。

图 6c) 显示，弹性模量表现与断裂伸长率相反，即 45° 方向拉伸单一铺层试样的弹性模量显著高于 0° 方向拉伸的单一铺层试样，其中以 24-D 试样的增幅最大，45° 方向拉伸时弹性模量较 0° 方向拉伸时提高了 238.19%，这也与拉伸方向改变使得复合材料中碳纤维从偏轴拉伸转变为轴向拉伸，强力得到充分利用有关。

2.1.3 织物铺层角度对拉伸性能的影响

选取 0° 方向拉伸单一铺层试样和混杂铺层试样，研究织物铺层角度对试样拉伸性能的影响，结果如图 7 所示。

图 7a) 显示 0° 方向拉伸单一铺层试样和混杂铺层试样时，2 种试样的拉伸性能差异显著。单一铺

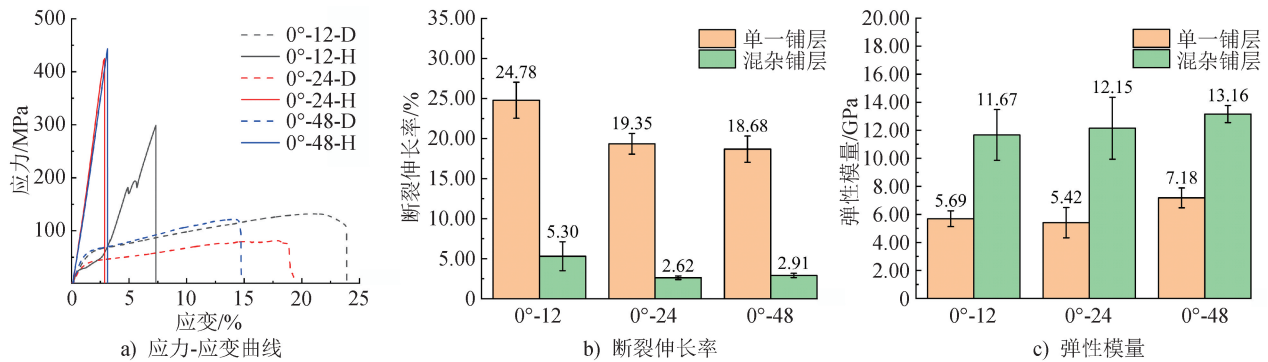


图7 单一铺层试样与混杂铺层试样0°方向拉伸性能

Fig. 7 Tensile properties in 0° loading direction for single-ply and hybrid-ply specimens

层试样0°方向拉伸时,应力-应变曲线呈现出典型的韧性变形特征,具体表现为3个阶段:初始为弹性变形阶段;之后进入屈服阶段,曲线斜率下降,表现为非线性力学性能,该过程中试样中段横向收缩,表现出明显的泊松效应,过程中伴随轻微的基体开裂声;达到峰值载荷后曲线下下降较为平缓,试样具备更为优异的损伤容限,其所含±45°方向纤维在拉伸作用下以面内剪切为主导,最终失效由碳纤维与基体界面脱黏,以及纤维抽拔机制主导。相比之下,混杂铺层试样通过在复合材料中引入0°方向和90°方向的纤维,改变了复合材料拉伸时碳纤维的载荷承载机制。0°-24-H与0°-48-H试样表现为典型的脆性断裂,即应力-应变曲线在达到峰值后急剧跌落,这与拉伸时平行于拉伸方向的纤维充分发挥了力学性能,并主导了最终失效有关。两者断裂过程瞬间完成,且整体应变较小。0°-12-H试样的拉伸性能介于0°拉伸单一铺层试样和0°-24-H、0°-48-H试样之间,这与12-H试样中±45°方向纤维含量因0°+45°+0°的织物铺放角度而高于24-H试样与48-H试样有关。0°-12-H试样应力-应变曲线具有过渡性特征,即初始弹性变形阶段模量较高;随后曲线斜率显著降低,原因与此时载荷以偏轴拉伸方式承担,而与拉伸方向一致的纤维的力学性能未充分发挥有关;随着拉伸载荷进一步上升,纤维沿轴向承载拉力,力学性能得以充分发挥,曲线斜率再次升高。此外,0°方向拉伸时,±45°方向纤维的失效模式以纤维抽拔和界面脱黏为主,而非纤维断裂,其先于0°方向纤维失效,导致曲线出现了2次阶梯状跌落。

断裂伸长率方面,图7b)显示0°方向拉伸12-H、24-H和48-H试样的断裂伸长率分别为0°拉伸

同规格单一铺层试样的21.39%、13.54%与15.58%,这主要归因于拉伸时轴向纤维的主导作用,前三者脆性断裂机制严格限制了材料的宏观变形。此外,0°-12-H试样也因含有较多的±45°方向纤维而表现出优于0°-24-H、0°-48-H试样的断裂伸长率。

与断裂伸长率表现相反的是,混杂铺层设计显著提升了材料的刚度。图7c)显示,0°-24-H试样的弹性模量为12.15 GPa,提升最大(较0°-24-D试样提升了124.17%),这也主要源于试样中0°方向纤维的贡献,纤维轴向断裂的承载极限远高于±45°方向纤维,故材料在弹性阶段的抗变形能力显著提高。

2.2 复合材料失效过程分析

2.2.1 应变场分析

借助VIC-Snap系统采集0°和45°方向拉伸单一铺层试样的表面散斑图像,并采用VIC-3D软件对应变场进行全场量化分析,结果如图8所示,可以看出拉伸方向和丝束规格对试样的应变演化行为影响显著。

拉伸方向影响方面,0°与45°方向拉伸单一铺层试样的应变场分布呈截然不同的特征。0°方向拉伸时,试样在纵向即拉伸方向表现出较大的应变,同时伴随明显的横向收缩[图8a)],表现为典型的泊松效应。应变在弹性阶段之后逐渐局部化,并沿±45°方向形成应变集中带,最终导致断裂。该现象源于偏轴拉伸作用下,纤维方向与拉伸方向间的夹角促使基体与纤维界面承担剪切应力,进而提高了材料的应变容限,延缓了断裂的突发性。而45°方向拉伸时,整体应变较小,应变分布呈多源性与离散性特征。横向应变场在试样边缘呈杂乱分布,纵向应变

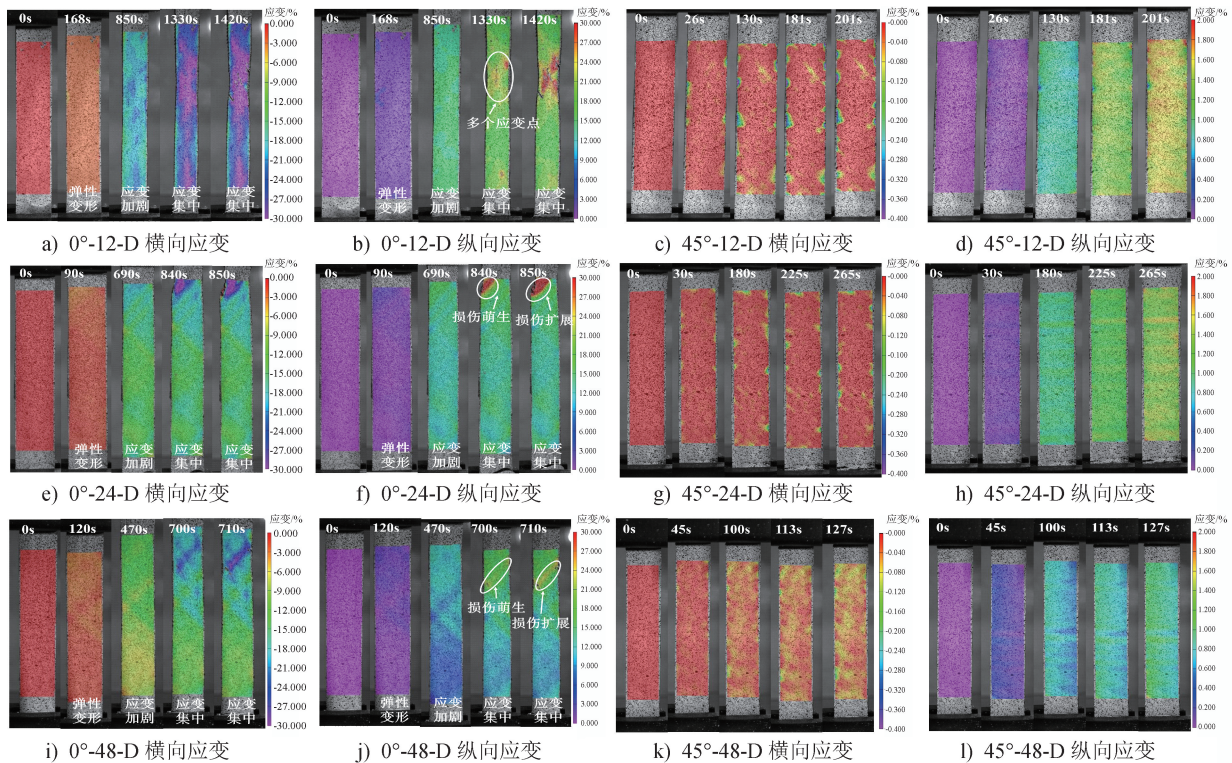


图 8 单一铺层试样 0° 和 45° 方向拉伸应变云图

Fig. 8 Contour plot of strain for single-ply specimens in 0° and 45° loading directions

场则呈现与织物结构匹配的横向条纹特征,这与分布于横向丝束间的树脂和复合材料主体在应变行为方面存在差异有关。

丝束规格影响方面,如图 8 中的标注所示,0° 方向拉伸不同丝束规格的单一铺层试样,虽都经历了弹性变形、应变加剧与应变集中 3 个阶段,但损伤演化路径存在明显差异。0°-12-D 试样的应变呈现多中心的特征,形成了多个分散的应变集中点,并逐步扩展汇聚;而 0°-24-D 与 0°-48-D 试样则表现为单一应变带的快速形成与扩展,其损伤高度局域化。该表现差异可归因于丝束-树脂界面特性的尺度效应。含 12K 碳纤维的试样中,小丝束易被树脂渗透,形成均匀且连续的界面相,这使得应力能在较大范围内重新分布,从而抑制了局部损伤的急剧扩展。但含 48K 碳纤维的试样中,大丝束纤维排列紧密,树脂难以充分渗入,导致丝束内部存在弱结合区,其界面成为应力集中的敏感区域。此时一旦损伤萌生,裂纹便沿弱界面快速扩展,促使应变集中并迅速累积,试样在较短应变历程中发生断裂。含 24K 碳纤维的试样其应变表现则介于上述二者之间,这体现出丝束增大对界面性能及损伤模式的渐进影响。

图 9 展示了 0° 方向拉伸混杂铺层试样的应变云图。总体而言,混杂铺层试样的应变表现介于上述 0° 方向拉伸单一铺层试样和 45° 方向拉伸单一铺层试样之间,这是由于 0° 方向拉伸混杂铺层试样时,试样中 0° 和 90° 方向的轴向纤维对整体变形有约束作用,其宏观应变普遍较低。应变云图还显示,0° 方向拉伸混杂试样的应变场沿着试样边缘呈点状分布特征。以 0°-24-H 试样为例,如图 9c) 和 d) 所示:其横向应变场在初始弹性阶段即前 43 s 分布较均匀,随后逐渐向试样中部聚集,表现为典型的应变局域化;其纵向应变场则呈现出横向条纹与 45° 斜向条纹交织的复合模式,原因与试样中轴向纤维与偏轴向纤维的协同承载机制直接相关,这也反映了不同方向铺层在拉伸过程中可起到应力重分布与变形协调的作用。

丝束规格影响方面:0°-12-H 试样得益于小丝束与树脂良好的界面结合,应变分布较为均匀,具备更为一致的载荷传递路径与更高的结构整体性;相比之下,0°-24-H 试样的横向应变集中分布于试样中段,纵向应变呈现前述的混合模式,体现了其内部不同方向纤维的耦合作用;0°-48-H 试样受限于大

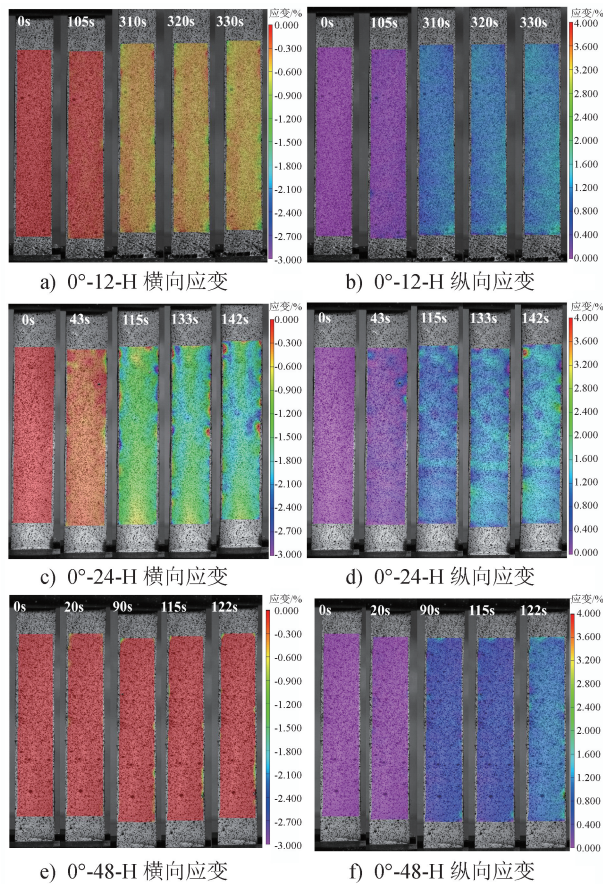


图9 混杂铺层试样0°方向拉伸应变云图
Fig. 9 Contour plot of strain for hybrid-ply specimens in 0° loading direction

丝束固有的浸润不足及与界面的弱结合^[24],应变分布散乱且整体应变程度较低,这进一步验证了丝束规格对复合材料变形能力的影响。

2.2.2 应变曲线分析

使用 VIC-3D 软件在应变场中设置虚拟引伸计,监测试样断裂前后关键区域的横向应变(ϵ_0)与纵向应变(ϵ_1)。由于0°方向拉伸单一铺层试样的应变发展更为充分、时间更长,故选取0°方向拉伸单一铺层试样为研究对象,比较不同丝束规格(12K、24K、48K)对应变累积过程与失效模式的影响。然后,对比0°-12-D与45°-12-D试样的应变-时间曲线,揭示拉伸角度的影响。图10展示了以上试样拉伸断裂前后关键区域的纵横向应变-时间曲线,可以看出,所有试样在拉伸过程中均表现为横向压缩与纵向伸长。应变随时间近似线性增长,其中横向应变幅值普遍略高于纵向应变,这归因于试样中 $\pm 45^\circ$ 纤维在拉伸过程中发生的面内旋转,促使材料

在横向产生更显著的泊松收缩。丝束规格影响方面,0°-12-D试样的最终应变程度显著高于0°-24-D和0°-48-D试样,原因与小丝束碳纤维优异的界面结合性能使得其能以整体协同的方式承担载荷,延缓应变局域化与最终断裂的发生有关。对比0°-12-D与45°-12-D试样的应变-时间曲线可见,后者应变水平显著较低。此结果符合碳纤维本身断裂伸长率低的材料特性,其变形能力受纤维本征刚度严格限制。此外,观察图10还可发现,虚拟引伸计得到的纵向应变数据与图6中的数值吻合度较高。

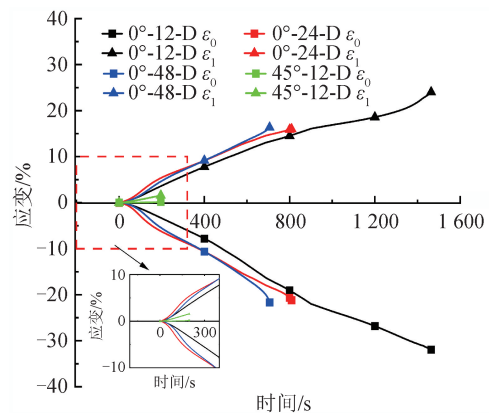


图10 0°方向拉伸单一铺层试样与45°-12-D试样应变-时间曲线

Fig. 10 Strain-time curves for single-ply specimens in 0° loading direction and 45°-12-D specimens

为探究铺层方式对应变的影响,选取具有代表性的12-D试样(其应变过程充分、特征显著)与混杂铺层试样进行对比分析,设置拉伸角度为0°。图11展示了这些试样的应变-时间曲线。由图11可以看出,相较于单一铺层试样,混杂铺层试样的应变显著较

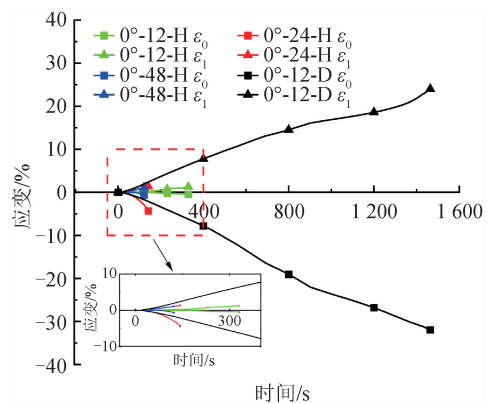


图11 0°方向拉伸混杂铺层试样与0°-12-D试样应变-时间曲线

Fig. 11 Strain-time curves for hybrid-ply specimens in 0° loading direction and 0°-12-D specimens

低,但也表现为横向压缩与纵向伸长。 0° -12-H 与 0° -12-D 试样在应变上存在显著差异,原因主要在于混杂铺层中平行于拉伸方向的纤维承担了大部分载荷,从而有效抑制了 $\pm 45^{\circ}$ 纤维的面内旋转与变形。这一机制与现有研究中关于铺层角度对复合材料失效模式影响的结论一致,即纤维方向与拉伸方向的匹配程度直接决定了材料的力学性能能否充分发挥,更决定了材料的变形行为。此外, 0° 拉伸混杂铺层试样

时,不同方向纤维的刚度差异易引起层间应力集中,这会进一步约束整体结构的变形能力。图 11 所呈现的应变响应与图 7a) 中呈现的宏观力学行为相互印证,说明混杂铺层在设计上通过调整复合材料中纤维取向分布,实现了对材料变形模式的改变。

2.3 破坏形貌分析

图 12 展示了显微镜下不同丝束规格试样的拉伸破坏形貌,可以看出:复合材料拉伸过程中的失效

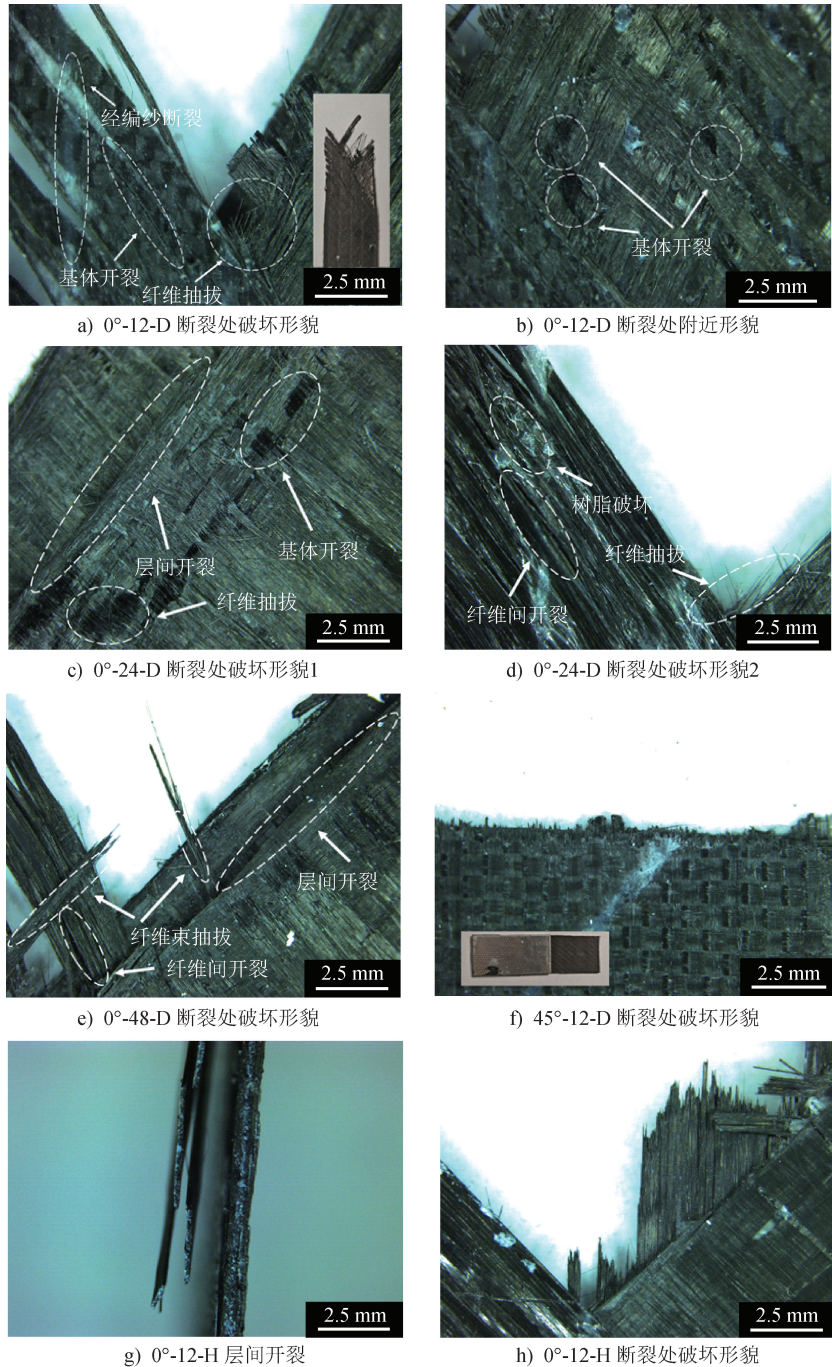


图 12 试样拉伸断裂形貌照片

Fig. 12 Morphology photograph of tensile fracture of specimens

行为受丝束规格、拉伸方向与铺层角度的共同调控,其损伤模式呈现以拉-剪耦合为主导、多种机制并存的特征。

比较 0° 拉伸不同丝束规格的单一铺层试样发现,不同丝束规格的复合材料其断裂形貌差异明显,这与丝束规格影响界面浸润质量,进而影响损伤演化路径有关。 0° -12-D与 0° -24-D试样因其中的碳纤维丝束被树脂充分渗透且界面结合完整,故应力可有效传递至单根纤维,其失效形式表现为单根纤维的抽拔,断口处有稀疏的纤维毛流,如图12a)和d)所示。

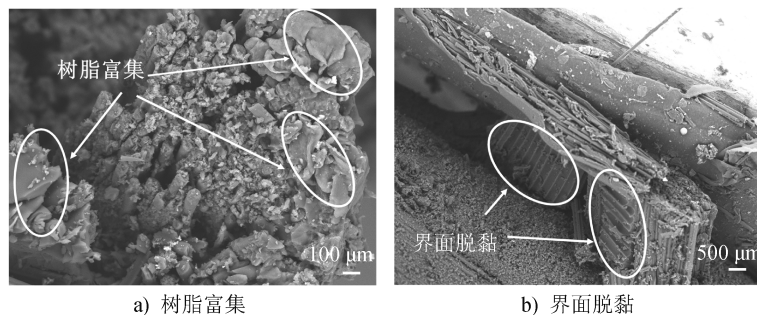


图13 0° -48-D试样断裂截面照片

Fig. 13 Photograph of fracture cross-section for 0° -48-D specimen

比较 0° 和 45° 方向拉伸相同丝束规格的单一铺层试样发现,拉伸方向直接决定纤维的承载机制,宏观上表现为韧性变形与脆性断裂的显著差异。当拉伸方向为 0° 时,试样中 $\pm 45^\circ$ 的纤维处于偏轴拉伸状态,应力-应变曲线呈非线性,试样断口呈“V”字形,如图12a)所示,其屈服后的斜率波动与纤维抽拔及界面脱黏的渐进式损伤相对应,断口与拉伸方向呈一定夹角,表现为典型的拉-剪混合破坏特征,整体呈韧性变形特征。而当拉伸方向为 45° 时,纤维沿轴向承载拉伸载荷,应力-应变曲线在达到峰值后急剧跌落,表现为典型的脆性断裂,断口平整且垂直于拉伸方向,如图12f)所示,失效模式由纤维轴向断裂主导,材料应变能力显著降低,弹性模量因纤维刚度的充分发挥而大幅提升。

铺层时,改变铺层角度可改变复合材料中纤维方向,进而调控纤维协同承载机制,最终影响复合材料的失效路径与损伤容限。单一铺层试样中纤维方向一致性较高,试样拉伸时承受的载荷由单一机制(偏轴拉伸或轴向拉伸)主导,故断裂分层并不显著。但在混杂铺层试样拉伸试验中,断裂分层十分明显,如图12g)所示,这是因为轴向纤维层和偏轴

同织物在拉伸破坏过程中出现纱线滑移、结构松散,交织点附近孔洞增大的现象一样,拉伸破坏后的试样伴随多个应变点的出现,试样断裂处附近也出现了多个孔洞,如图12b)和c)所示。相比之下, 0° -48-D试样因内部存在树脂匮乏的弱结合区,故其在载荷作用下,损伤易沿弱结合区快速扩展,进而引发纤维束级别的簇状抽拔,如图12e)所示,织物宏观形貌崩塌,断口呈杂乱纤维束堆叠状。图13则进一步展示了 0° -48-D试样在丝束与树脂界面结合较弱处发生了界面脱黏。

向纤维层的刚度与变形能力不匹配,拉伸载荷作用下层间应力集中显著,进而诱发了界面分层,并成为混杂铺层试样的关键失效模式之一。图12h)所示的断口形貌进一步说明了混杂铺层体系的承载能力与损伤演化区别于单一铺层体系。

3 结束语

本研究采用12K、24K与48K丝束规格的双轴向碳纤维织物,制备了单一铺层与混杂铺层的复合材料试样。通过开展 0° 与 45° 方向的拉伸试验,并借助3D-DIC技术实时监测全场应变演化,系统研究了丝束规格、织物铺层角度及拉伸方向对复合材料拉伸及损伤行为的影响,结果归纳如下:

(1) 丝束规格对纤维-树脂界面结合强度有显著影响。12K的小丝束树脂浸润充分,界面结合强度高,其复合材料试样拉伸时会出现多处应变集中点,破坏时伴随应力重分布,断口处纤维抽拔多为单根抽拔;48K的大丝束树脂浸润不充分,界面结合强度低,应变沿单一方向迅速扩展,断口处主要表现为纤维束整体被抽拔的特征。

(2) 织物铺层角度对试样的载荷传递路径与失效机制影响显著。单一铺层试样 0° 方向拉伸时呈韧性变形, 表现为典型的三阶段非线性响应与高损伤容限; 混杂铺层试样通过引入轴向纤维提升了复合材料的刚度与强度, 但也会因铺层刚度失配而引发层间应力, 产生界面分层。实际应用中, 可依据主承载方向优化织物铺层角度, 实现力学性能与损伤行为的协同调控。

(3) 拉伸方向决定了纤维的受力机制。当拉伸方向与纤维轴向平行时, 纤维强度能得到充分发挥, 失效表现为突发性的脆性断裂, 其断口平整且垂直于拉伸方向, 符合 Hashin 失效准则对复合材料性能的假设, 故可以考虑使用 Hashin 失效准则模拟其失效过程。而在偏轴拉伸条件下, 试样表现为韧性断裂, 过程渐进且应变分布复杂, 表现出更高的应变容限。因此实际应用中, 需根据主承载方向设计铺层, 使其匹配预期的服役载荷工况。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

- [1] YAN B, ZHU S H, TONG M B, et al. Experimental study on the mechanical properties of laminates made of thin carbon fiber plies[J]. *Composite Structures*, 2020, 245: 112336.
- [2] 何志明, 张雪乐, 李茂, 等. 碳纤维复合材料格栅端框连接结构拉伸承载性能预测与试验验证[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(4): 90-96.
- [3] 马明磊, 桂强, 白洁, 等. 碳纤维增强防辐射混凝土的制备与力学性能研究[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(1): 113-118.
- [4] 赵烁, 居浙海, 姜亚明. 纤维增强复合材料拉挤成型工艺研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2025, 43(5): 24-32.
- [5] 高心玥, 蒋金华, 陈南梁. 大丝束碳纤维展纱技术研究进展[J]. *产业用纺织品*, 2024, 42(8): 17-27.
- [6] 高心玥, 肖遥, 蒋金华, 等. 大丝束碳纤维展纱工艺参数对展纱宽度和纤维断裂率的影响[J]. *产业用纺织品*, 2025, 43(11): 30-39.
- [7] 付东升, 黄翔宇. 大丝束碳纤维复合材料在风电叶
- 片的应用[J]. *高科技纤维与应用*, 2024, 49(1): 48-54.
- [8] 武娟娟, 管全梅, 郭金城. 国产大丝束碳纤维在轨道交通车辆部件中的应用研究[J]. *产业用纺织品*, 2025, 43(4): 30-34.
- [9] HIREMATH N, YOUNG S, GHOSSEIN H, et al. Low cost textile-grade carbon-fiber epoxy composites for automotive and wind energy applications [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2020, 198: 108156.
- [10] ZUO H M, LI D S, HUI D, et al. The multiscale enhancement of mechanical properties of 3D MWK composites via poly (oxypropylene) diamines and GO nanoparticles [J]. *Nanotechnology Reviews*, 2019, 8(1): 587-599.
- [11] 肖遥, 蒋金华, 陈南梁. 碳纤维多轴向经编织物的应用及其制备工艺研究进展[J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(2): 16-25.
- [12] 马彩霞, 张诚, 游弋义, 等. 多轴向经编玻璃纤维织物增强复合材料的蠕变特性研究[J]. *产业用纺织品*, 2023, 41(12): 20-26.
- [13] 王婷, 蒋高明, 杨美玲, 等. 芳纶/玻纤经编复合材料的力学性能研究[J]. *棉纺织技术*, 2024, 52(6): 84-89.
- [14] PANG A W. Study on the influence of fiber layering on the tensile properties of carbon fiber composites[J]. *Advances in Engineering Technology Research*, 2023, 6(1): 203.
- [15] REN M F, LIU Y P, HAN Y Z, et al. Study on tensile properties of ultra-thin-ply carbon fiber-reinforced composite laminates under static load [J]. *Polymer Composites*, 2024, 45(10): 9079-9087.
- [16] YU S J, GAI D, ZHANG L, et al. Simulation of tensile fatigue crack propagation in carbon fiber unidirectional laminates under progressive fatigue damage model [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2783(1): 012052.
- [17] GAO D L, BAO Z G, HAN W J, et al. Effect of strain rate on tensile properties of carbon fiber-reinforced epoxy laminates with different stacking sequences and ply orientations[J]. *Polymers*, 2023, 15(12): 2711.
- [18] SWOLFS Y, CRAUWELS L, VAN BREDA E, et al. Tensile behaviour of intralayer hybrid composites of carbon fibre and self-reinforced polypropylene [J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2014, 59: 78-84.

(下转第 58 页)