

孔洞型碳纤维三轴机织物/环氧树脂复合材料的弯曲和拉伸性能

杨晓亚 焦亚男 何业茂 宗香君 陈利

Bending and tensile properties of carbon fiber triaxial woven fabric/epoxy resin composites with holey structure

YANG Xiaoya, JIAO Yanan, HE Yemao, ZONG Xiangjun, CHEN Li

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210831.002>

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>

含孔玻璃纤维/环氧树脂复合材料–铝合金层板的拉伸损伤行为与热暴露响应

Tensile damage behavior and thermal exposure response of glass fiber/epoxy composite–aluminum alloy laminates with an open-hole

复合材料学报. 2020, 37(11): 2798–2806 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200211.001>

芳纶捆绑对纬编双轴向多层衬纱织物增强环氧树脂复合材料层间性能的影响

Effect of aramid bundling yarn types on interlaminar properties of multilayered biaxial weft knitted fabric reinforced epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(5): 1081–1087 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190725.001>

低温暴露对碳纤维/环氧树脂复合材料拉伸力学性能的影响

Effect of low temperature exposure on tensile mechanical properties of carbon fiber/epoxy composites

复合材料学报. 2020, 37(12): 3091–3101 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200629.001>

纳米增韧三维正交玻璃纤维机织物增强环氧树脂复合材料的力学性能

Mechanical properties of 3D orthogonal glass fiber woven fabric reinforced epoxy resin composites with nano clay modification

复合材料学报. 2020, 37(2): 252–259 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190513.001>

三维四向编织碳纤维/环氧树脂复合材料在热环境中的拉压力学性能实验

Experimental investigation on the tensile and compressive properties of 3D 4-directional braided carbon fiber/epoxy resin composites in thermal environment

复合材料学报. 2020, 37(2): 309–317 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20190310.001>

孔洞型碳纤维三轴机织物/环氧树脂复合材料的弯曲和拉伸性能



分享本文

杨晓亚^{1,2}, 焦亚男^{* 1,2}, 何业茂^{1,2,3}, 宗香君^{1,2}, 陈利^{1,2}

(1. 天津工业大学 纺织科学与工程学院, 天津 300387; 2. 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;
3. 北京普诺泰新材料科技有限公司, 北京 102200)

摘要: 以 T300 碳纤维为增强纤维材料, 环氧树脂为树脂基体, 采用树脂膜熔渗 (Resin film infusion, RFI) 工艺制备碳纤维三轴机织物/环氧树脂 (Triaxial woven fabric/epoxy resin, TWF/EP) 复合材料。通过三点弯曲试验和拉伸试验研究了复合材料试样的面内弯曲性能和面内拉伸性能, 采用 3D 轮廓仪观察拉伸试验后试样的损伤形貌, 并分析其损伤机制。研究结果表明: TWF/EP 复合材料的弯曲弹性模量表现为准各向同性, 复合材料的孔洞率、碳纤维束规格与弯曲弹性模量呈现显著正相关性, 与拉伸模量呈现负相关性。在拉伸载荷作用下, TWF/EP 复合材料的主要失效模式包括纤维束断裂、纤维束拔出和交错失效, 拉伸断裂机制主要为纯剪切破坏、扭转剪切破坏、拉剪耦合破坏。此外, 在渐进损伤过程中, 应变集中区发生在纱线交织点处。

关键词: 碳纤维三轴机织复合材料; 准各向同性; 弯曲性能; 拉伸性能; 损伤模式

中图分类号: TB332 文献标志码: A 文章编号: 1000-3851(2022)07-3191-11

Bending and tensile properties of carbon fiber triaxial woven fabric/epoxy resin composites with holey structure

YANG Xiaoya^{1,2}, JIAO Yanan^{*1,2}, HE Yemao^{1,2,3}, ZONG Xiangjun^{1,2}, CHEN Li^{1,2}

(1. School of Textile Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Key Laboratory of Advanced Textile Composite Materials, Ministry of Education, Tiangong University, Tianjin 300387, China;
3. Beijing Protech New Material Science Co. Ltd., Beijing 102200, China)

Abstract: Carbon fiber triaxial woven fabric/epoxy resin (TWF/EP) composite was prepared by resin film infusion (RFI) method, in which T300 carbon fiber was reinforced material, and epoxy resin was matrix. Three-point bending test and tensile test were carried out to study the in-plane bending and in-plane tensile properties. Moreover, 3D profilometer was used to observe the damage morphology of sample after tensile test, and damage mechanism was analyzed. The results show that the bending elastic modulus of TWF/EP composites is quasi-isotropic. The porosity of composite and width of the fiber bundle have significant positive correlation with the bending elastic modulus, and have a negative correlation with the tensile modulus. The primary tensile failure patterns of composites may include tows pull-out, tows fracture and staggered failure. The tensile fracture mechanisms are mainly pure shear failure, torsional shear failure and tensile-shear coupling failure. In addition, the strain concentration region occurs at the interlacing point of the yarn during the progressive damage process.

Keywords: carbon fiber triaxial woven fabric composites; quasi-isotropy; bending properties; tensile properties; damage patterns

收稿日期: 2021-07-07; 修回日期: 2021-08-16; 录用日期: 2021-08-18; 网络首发时间: 2021-08-31 16:58:51

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210831.002>

基金项目: 天津市高等学校创新团队项目 (TD13-5043)

通信作者: 焦亚男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为纺织复合材料结构与性能 E-mail: jiaoyan@tiangong.edu.cn

引用格式: 杨晓亚, 焦亚男, 何业茂, 等. 孔洞型碳纤维三轴机织物/环氧树脂复合材料的弯曲和拉伸性能 [J]. 复合材料学报, 2022, 39(7): 3191-3201.

YANG Xiaoya, JIAO Yanan, HE Yemao, et al. Bending and tensile properties of carbon fiber triaxial woven fabric/epoxy resin composites with holey structure[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2022, 39(7): 3191-3201(in Chinese).

三轴机织物 (Triaxial woven fabric, TWF) 是平面内三组纱线相互之间以特定角度 ($\pm 60^\circ$) 交织而成的一种平面织物^[1]。与传统的双轴机织物相比, 三轴机织物结构稳定, 能够有效传递载荷, 克服了力学性能对载荷方向的依赖, 具有面内准各向同性, 同时具有比重轻、高柔韧性等优点^[2-3]。由于三轴机织物的面内孔洞结构, 其与树脂复合的形式主要有两种: (1) 孔洞型: 树脂仅浸润增强纤维; (2) 无孔型: 在孔洞型基础上, 树脂还完全填充织物面内的孔洞。三轴机织复合材料 (Triaxial woven fabric composites, TWFC) 主要应用于卫星通讯、空间探测等航空航天领域, 如可展开网状反射面天线、可伸缩空间桅杆、飞行器零部件等^[4-6], 其中孔洞型结构能够降低反射面天线热变形, 提高精度, 具有良好的折叠能力和力学性能。此外, 随着这类复合材料性能的探索和提升, 其已逐步应用于生物医药、体育器材等领域^[7-9]。

近年来, 国内外学者对三轴机织复合材料性能的研究主要集中于力学性能, 包括拉伸断裂、拉伸疲劳损伤、压缩弹性等方面^[10-13]。沙迪等^[14]对碳纤维三轴机织/环氧树脂复合材料进行了拉伸试验, 研究表明: 随着纱线间距尺寸的增加, TWF/EP 复合材料的断裂强度逐渐降低。易森^[15]研究了有孔型和无孔型碳纤维 TWF 复合材料在准静态拉伸载荷作用下的损伤模式, 研究结果显示, 其损伤模式主要包含基体开裂、纤维-基体脱粘和纤维断裂。Kueh 等^[16]进行了碳纤维三轴机织复合材料的拉伸、压缩、弯曲、剪切及热性能测试, 探索了有孔型薄板复合材料的压缩及热变形测试方法, 并得到有效测试数据。Aoki 等^[17-18]对碳纤维三轴机织复合材料进行了静态拉伸、循环拉伸以及纯弯曲和三点弯曲试验, 研究表明: 试样宽度影响材料各向同性特征, 所用纤维束的丝束厚度差异影响拉伸试验的疲劳损伤累积率和最终的失效, 材料在拉伸载荷下表现的准各向同性特征没有在弯曲载荷下明显。Zhao 等^[19]采用非接触测量实验方法和有限元模拟对碳/环氧树脂三轴机织复合材料试样进行了单轴拉伸下的渐进破坏测试, 研究表明: 拉伸实验过程中试样会产生边界阻力效应, 应力-应变曲线呈现非线性。Datashvili^[20]对不同宽度的碳纤维增强硅树脂 (CFRS) 和碳纤维增强塑料 (CFRP) TWF 试样进行了拉伸试验及有限元模拟分析, 得到单层 TWF-CFRS 板的力学性能随着试样宽度的增加逐渐满足准各向同性, 单层

TWF-CFRP 板在不同试样宽度下均满足准各向同性, 数值模拟结果与试验结果吻合良好。

国内外已对单层或层合板 TWFC 力学性能的影响因素进行了研究, 而目前对单层 TWFC 的研究主要是在某一个孔洞率下, 关于不同孔洞率下孔洞型 TWFC 面内不同角度力学性能差异的影响因素研究不足。随着 TWFC 应用领域的不断扩展, 更深入的研究是必不可少的, 因此需要对不同孔洞率 TWFC 的力学性能进行研究。

本文采用树脂膜熔渗 (Resin film infusion, RFI) 工艺制备了孔洞型碳纤维三轴机织物增强环氧树脂基复合材料, 选取 0° 到 30° 为代表性角度, 进行了三点弯曲试验、面内拉伸试验和非接触全场应变 (DIC) 试验, 对比讨论了试样偏转角度和织物结构参数对试样力学性能的影响, 分析了拉伸过程中的应变分布规律及试样发生断裂时的破坏模式, 论文实验数据和研究结论对扩大三轴机织复合材料应用领域有一定参考价值。

1 三轴机织物结构

三轴机织物常见的结构形式有基础组织和双平纹组织。在基础组织中, 面内规律性的分布正六边形和三角形孔洞结构, 能够有效降低织物面密度。

图 1 是本研究试验路线示意图, 其中图 1(b) 是三轴机织物基础组织结构示意图。可以看到, 三轴机织物单胞为菱形, 孔洞率 P 定义为孔洞部分的面积和与单胞总面积的比值:

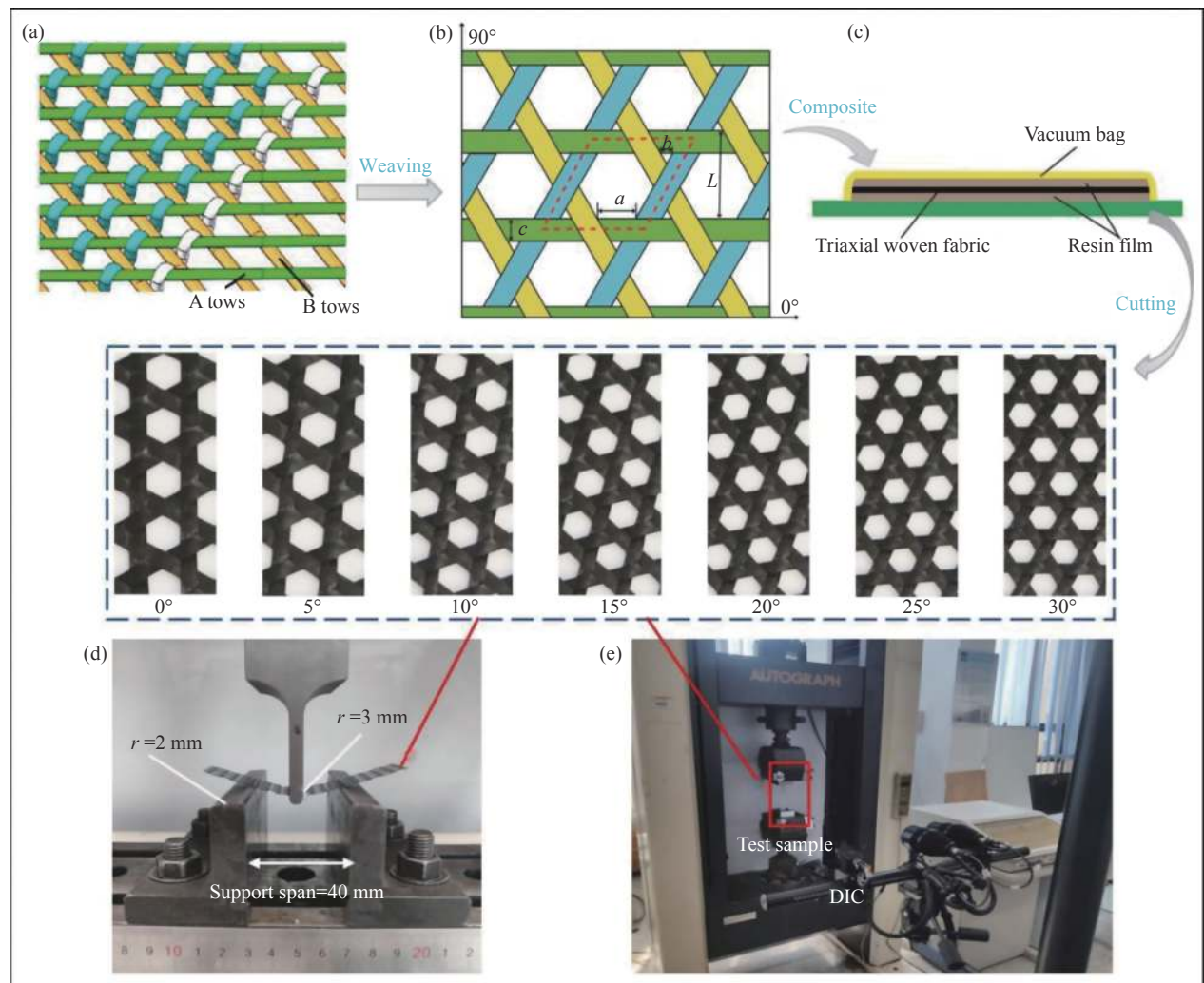
$$P = \frac{9a^2 + 3b^2}{4L^2} \times 100\%$$

式中: a 为正六边形孔洞边长 (mm); b 为三角形孔洞边长 (mm); L 为纱线中心距 (mm)。当 $L = 3c$ 时, $b = 0$, 三角形孔洞消失, 织物孔洞率 P 为 33.3%, c 为纱线编织后宽度 (mm)。此时, 织物具有最低的孔洞率, 纱线之间相互锁紧。

2 实验

2.1 材料及试验方案

T300 碳纤维, 日本东丽公司; 热固型 7901 环氧树脂胶膜, 威海光威复合材料股份有限公司, 单层面密度为 66 g/m^2 。图 1(a) 为三轴机织物的织造, A 组、B 组纱线按一定角度挂入, 两组纱线相互平行, 之后根据交织规律织入第三组纱。碳纤维三轴机织物/环氧树脂复合材料采用树脂膜熔渗工艺制备, 铺层工艺如图 1(c) 所示, 在 80°C 下放置 2 h, 进行预成型; 在 120°C 下放置 1 h, 树



α —Hexagonal hole side length; b — Triangular hole side length; c —Width of yarn after weaving; L —Yarn center distance; DIC—Digital image correlation method

图1 试验路线示意图: (a) 三轴机织物 (TWF) 织造; (b) 基础组织结构示意图; (c) 复合成型铺层; (d) 三点弯曲试验; (e) 面内拉伸试验

Fig. 1 Schematic diagram of experimental route: (a) Triaxial woven fabric (TWF) weaving; (b) Schematic diagram of basic triaxial woven fabric; (c) Composite molding layer; (d) Three-point bending test; (e) In-plane tensile test

脂反应固化，待模具冷却至室温脱模取样。

选择纤维束规格为 T300-3K、T300-6K，纱线中心距为 4.5 mm、5.5 mm、6 mm 进行方案设计，共 4 组试样，材料具体结构设计参数见表 1。试样选取代表性的角度进行裁剪，以碳纤维三轴机织物的 0°纱线为基准，沿逆时针方向裁剪试样，拉伸试样间隔 5°取样，取向角分别为 0°、5°、10°、

15°、20°、25°、30°，弯曲试样间隔 10°取样，取向角分别为 0°、10°、20°、30°，每个方向 5 组有效数据。

2.2 弯曲试验

弯曲试验参考标准 ASTM-D790^[21]，试样尺寸为 100 mm×25 mm(长×宽)。采用万能强力试验机 (AGS-J, 1kN, 日本岛津公司) 进行三点弯曲试验，如图 1(d) 所示。支座半径 2 mm，压头半径 3 mm，

表 1 三轴机织复合材料结构参数

Table 1 Structural parameters of triaxial woven fabric composites

No.	Carbon fiber	Yarn center distance/mm	Porosity/%	Thickness/mm	Area density /(g·m ⁻²)
SK-3-1	T300-3K	4.5	34	0.389	250.0
SK-3-2		5.5	41	0.345	212.2
SK-6-1	T300-6K	5.5	34	0.458	383.3
SK-6-2		6.0	37	0.403	330.3

支座跨距 40 mm，弯曲挠度为 9 mm，加载速度为 2 mm/min。

2.3 拉伸试验

拉伸试验参考标准 ASTM-D3039^[22]，试样尺寸为 250 mm×25 mm (长×宽)，加强片尺寸为 50 mm×25 mm×2 mm，测试前对试样喷涂黑色散斑，保证散斑大小一致，分布均匀。采用万能强力试验机 (AGS-J, 250 kN, 日本岛津公司) 进行面内拉伸试验，如图 1(e) 所示，加载速度为 2 mm/min。并采用非接触全场应变测量系统 (ARAMIS 5M, 德国道姆光学科技有限公司) 记录试样拉伸过程中的应变分布状态。DIC 系统像素为 2 448 pixel×2 050 pixel，帧频为 15 Hz，相机每 1 s 采集一张照片，测试距离为 845 mm，相机间距为 336 mm，相机角度为 25°，对相机标定后进行实验测试。采用 3D 轮廓测量仪 (VR-5200, 日本基恩士公司) 观

察断口的损伤形貌和高度云图。

3 试验结果与分析

3.1 碳纤维 TWF/EP 复合材料三点弯曲性能

三轴机织复合材料的优点之一在于力学性能的面内准各向同性特征，影响材料准各向同性性能的因素主要有织物结构参数、树脂种类、试样尺寸大小等，不同条件下应考虑材料出现各向异性的行为^[20, 23]。准各向同性要求材料在不同方向上力学性能相近，即准各向同性系数 φ 接近 1，其可定义为

$$\varphi = \frac{\phi_{\min}}{\phi_{\max}}$$

式中： $\phi_{\min}$ 为强度或模量的最小值； $\phi_{\max}$ 为强度或模量的最大值。

图 2 是碳纤维 TWF/EP 复合材料弯曲载荷/挠度曲线。由图可知，不同规格、不同角度试样的

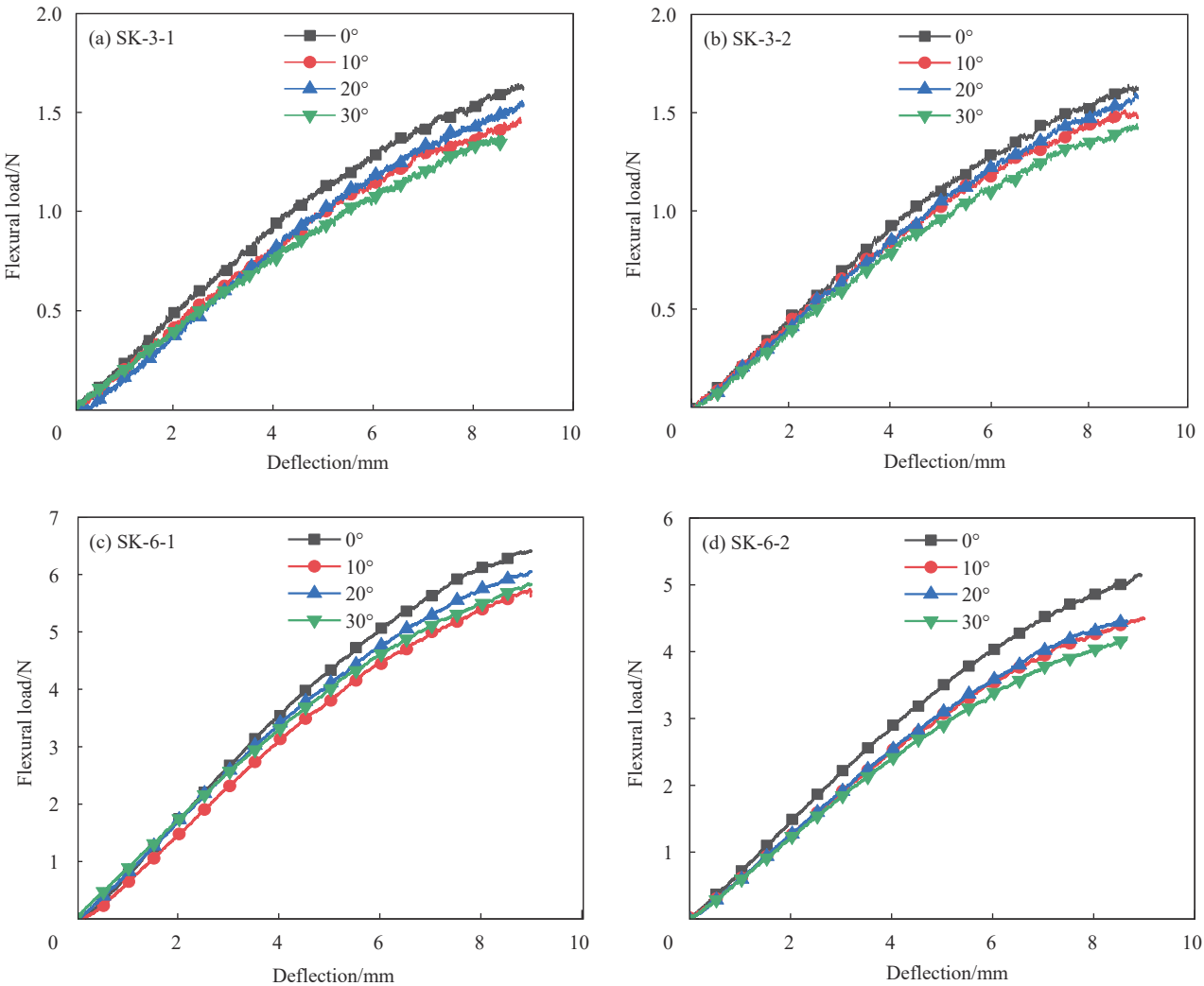


图2 碳纤维三轴机织物/环氧树脂 (TWF/EP) 复合材料弯曲载荷-挠度曲线

Fig. 2 Flexural load-deflection curves of carbon fiber triaxial woven fabric/epoxy resin (TWF/EP) composites

载荷-挠度曲线变化趋势基本一致, 在初始阶段, 挠度为 0~3 mm 时, 曲线直线上升, 同种规格不同角度的试样在该挠度范围内的曲线基本重合; 当挠度为 3~9 mm 时, 载荷上升趋势变缓; 直至最大挠度, 试样表面无破坏迹象, 夹头离开后, 试样恢复至平板状态。

图 3(a) 是碳纤维 TWF/EP 复合材料的面内弯曲弹性模量。由图可知, SK-3-1、SK-3-2、SK-6-1、SK-6-2 弯曲弹性模量最大值为 0° 方向试样, 分别为 2.8 GPa、3.5 GPa、6.2 GPa、6.3 GPa, 最小值为 30° 方向试样, 分别为 2.1 GPa、3.2 GPa、5.4 GPa、6.1 GPa。准各向同性系数分别为 0.76、0.92、0.88、0.96, 不同方向上弯曲弹性模量相近, 变化幅度较小, TWF/EP 复合材料弯曲弹性模量表现为准各向同性。图 3(b) 是碳纤维 TWF/EP 复合材料比弹性模量, 由图可知, SK-3-2 与 SK-3-1 纤维束规格相同, 孔洞率比 SK-3-1 增大 8%, 不同角度的比弹性模量平均增加 32.6%, SK-6-2 比 SK-6-1 孔洞率增大 3%, 比弹性模量平均增加 8.2%; SK-6-1 与 SK-3-1 孔洞率相等, 纤维束宽度增加, SK-6-1 不同角度的比弹性模量平均为 SK-3-1 的 1.86 倍。这是由于, 纤维束规格相同, 织物孔洞率增大, 材料面密度减小, 在织物复合过程中由于真空压缩作用厚度减小, 而 TWF/EP 复合材料树脂含量相同, 材料抵抗变形能力增加, 比弹性模量增大; 孔洞率相同, 纤维束宽度增加, 织物厚度增大, 弯曲载荷显著增加, 比弹性模量增大。可

以得到, 碳纤维 TWF/EP 复合材料的厚度和纤维束规格对比弹性模量具有显著影响, 而孔洞率和面密度的大小对弯曲弹性模量的变化影响较小。

3.2 碳纤维 TWF/EP 复合材料面内拉伸性能

图 4 为碳纤维 TWF/EP 复合材料 0° 和 30° 方向试样载荷-位移曲线, 可以看出, 4 种规格试样变化趋势相同, 载荷-位移曲线表现为非线性特征, 初始阶段曲线呈直线上升, 达到一定值后, 载荷变化减缓, 直至试样破坏, 0° 方向试样变缓趋势更明显。图 5 为碳纤维 TWF/EP 复合材料 SK-6-2 的 0° 和 30° 方向试样应变云图, 可以看出, 不同方向试样应变表现不同, 应变云图分布规律与纱线交织规律和试样偏转角度密切相关。

从图 4(a) 可以看出, 从 I 点到 II 点, 载荷呈线性增大, 应变首先产生在三组纱线相互锁合的交织三角区处 (如图 5(a) 所示), 试样孔洞处局部拉伸应变逐渐集中。在拉伸起始阶段, 载荷变化较平稳, 该状态下发生交织点处纤维束的伸直, 发生应变的程度较小, 随着载荷的增加, 交织三角区处的树脂富集区作为载荷传递突变位置产生应力集中区; 从 II 点到 III 点, 载荷逐渐表现为非线性, 0° 纱线承担主要拉伸载荷, ±60° 纱线不受拉伸作用力, 试样局部树脂开裂, 在该阶段, 应变区域由交织点向 0° 纱线扩散, 试件表面出现斜纹; 从 III 点到 V 点, 随着位移不断增大, 出现载荷突变区域, 此时发生 0° 纱线与 ±60° 纱线之间的相互剪切, 试样表面出现明显裂纹, 伴随着载荷

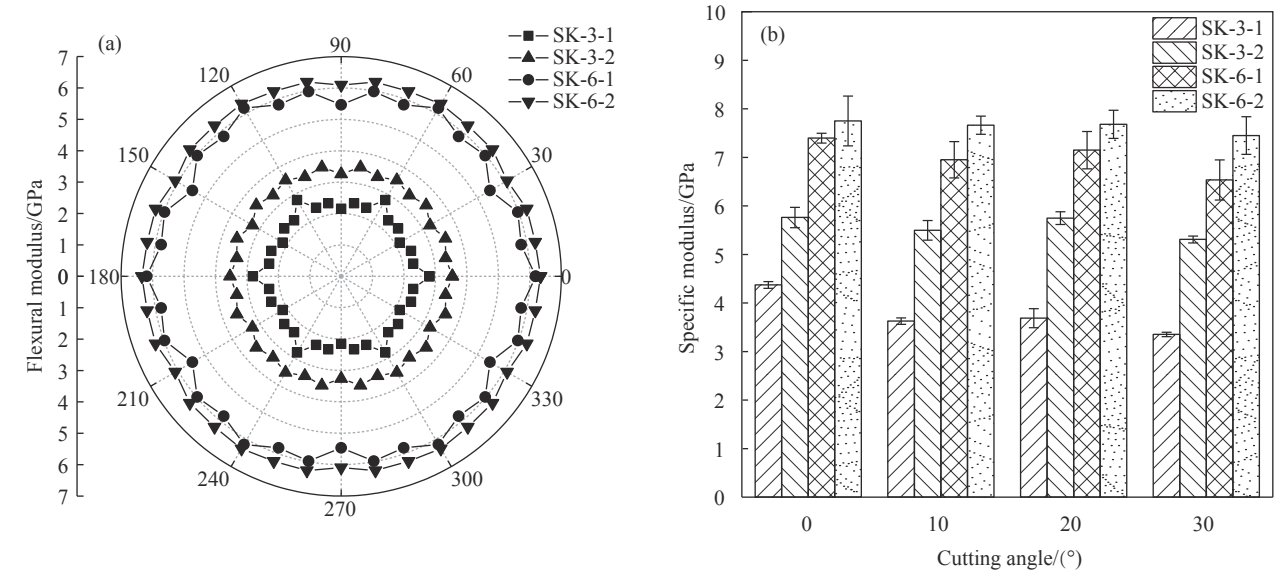


图 3 碳纤维 TWF/EP 复合材料弯曲弹性模量 (a)、比弹性模量 (b)

Fig. 3 Flexural modulus (a) and specific modulus (b) of carbon fiber TWF/EP composites

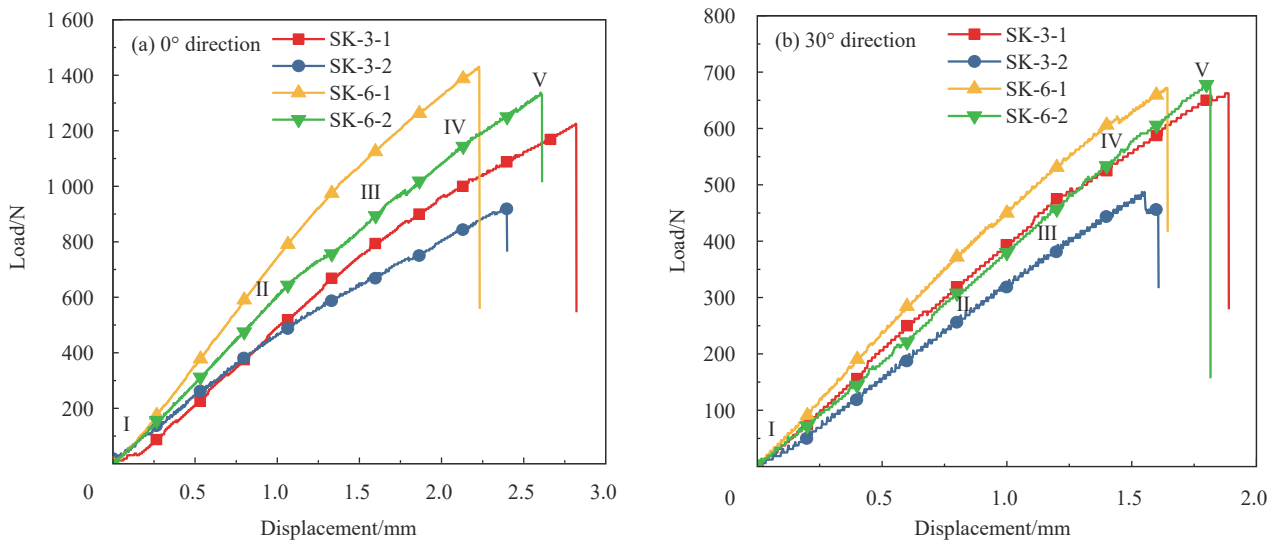


图 4 碳纤维 TWF/EP 复合材料拉伸载荷-位移曲线

Fig. 4 Tensile load-displacement curves of carbon fiber TWF/EP composite

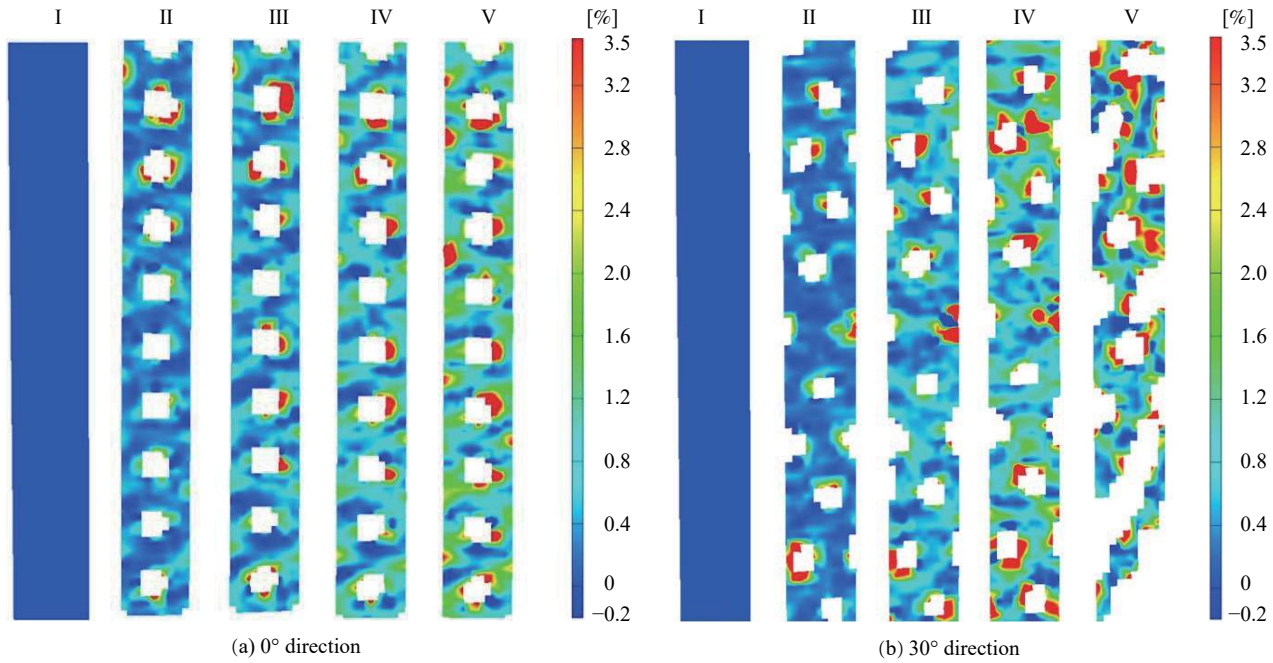


图 5 碳纤维 TWF/EP 复合材料 SK-6-2 全场渐进损伤应变云图

Fig. 5 Progressive damage strain contours of carbon fiber TWF/EP composites SK-6-2

的增加，裂纹沿纤维径向扩展，应变区域蓝色斜纹逐渐分散，应力集中区不断扩大，最后发生纱线交织点处的脆断，材料完全破坏。

从图 4(b) 可以看出，载荷-位移曲线在后半阶段逐渐表现为非线性。在 I 点到 II 点发生线性变化，应变集中分布在孔洞处，由于 30° 方向试样的三组纱线与载荷加载方向均有一定的角度，纱线之间产生相互作用力，应变分布规律不明显 (如图 5(b) 所示)；从 II 点到 III 点，曲线初步表现为非

线性，此时发生纱线之间的扭转与试样的拉伸变形，随着载荷的增大，应变集中区向纱线交织点处扩散；从 III 点到 V 点表现为非线性特征，拉伸过程中出现树脂的开裂，纱线之间相互剪切，应变集中区域快速扩散，最先产生应变的区域发生脆断，材料完全破坏。

图 6 是碳纤维 TWF/EP 复合材料的拉伸强度和拉伸弹性模量。可知，在 0°~30° 范围内，不同规格试样的拉伸断裂强度和拉伸弹性模量整体呈

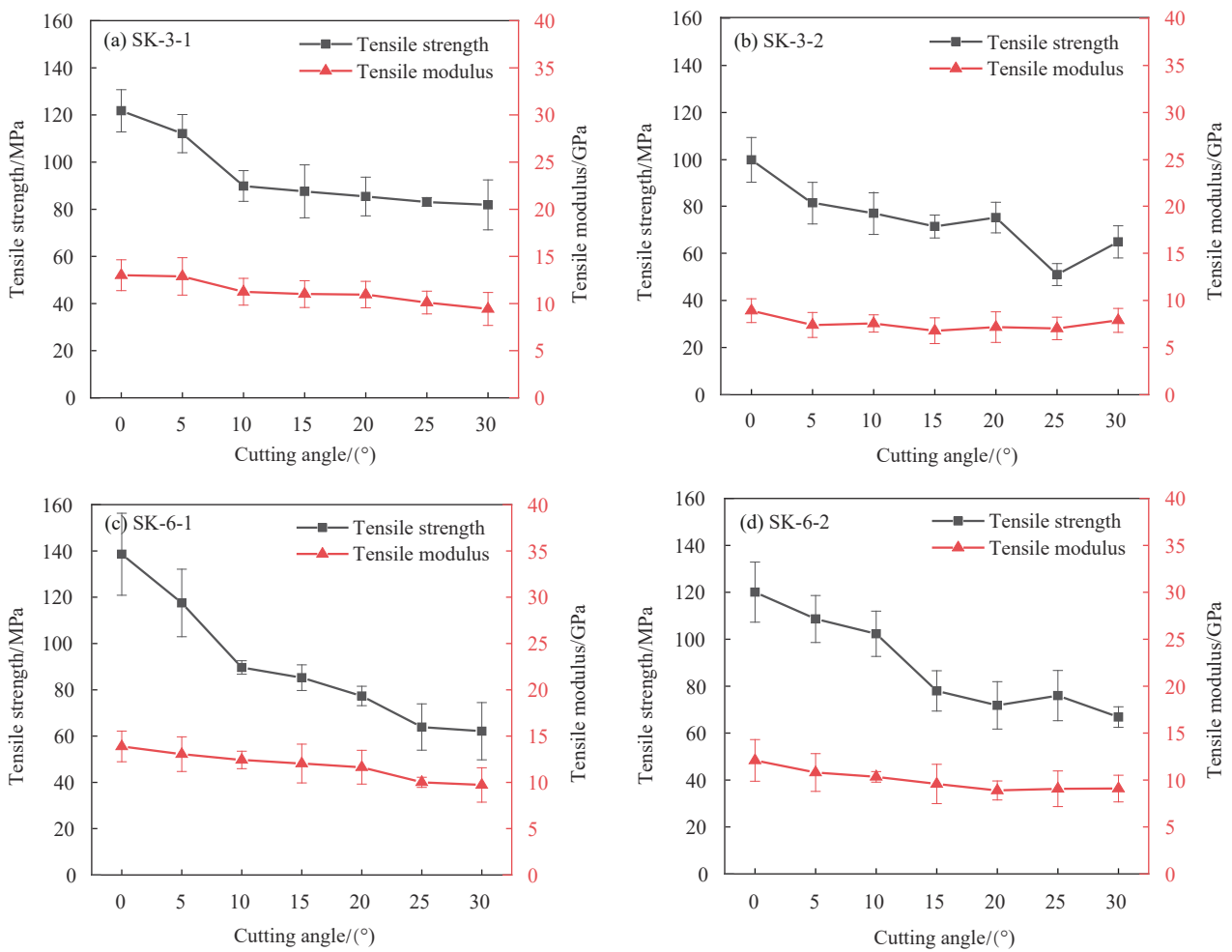


图 6 碳纤维 TWF/EP 复合材料拉伸强度和拉伸弹性模量测试结果
Fig. 6 Tensile strength and elastic modulus of carbon fiber TWF/EP composites

下降趋势，最大值为 0°方向试样，最小值为 30°方向试样，拉伸强度下降幅度为 33%~55%，拉伸弹性模量下降幅度为 24%~30%。由于 SK-3-2 孔洞率较大，面内孔洞对不同方向试样拉伸变形有较显著影响，拉伸弹性模量下降趋势不明显。

拉伸强度随试样角度增加逐渐下降，这是由于拉伸试样受到夹具握持的纱线根数不同。0°方向试样存在平行于载荷加载方向的纱线，该纱线两端被夹具握持，承受较大拉力，抵抗试样破坏变形能力强，拉伸断裂强度较大；随试样角度增加，两端受夹具握持纱线数减少，拉伸强度减小；试样角度为 15°~30°时，被夹具握持纱线数为 0，仅存在纱线与树脂间的剪切力，纱线之间的相互约束力不断降低，拉伸断裂强度整体不断下降。拉伸弹性模量变化幅度较小，试样拉伸变形能力相对稳定。

比较图 6(a) 和图 6(b) 可知，SK-3-1 和 SK-3-2

纱线规格相同，孔洞率增加 8%，不同角度的平均拉伸强度下降 21%，平均拉伸模量下降 32%，比较图 6(c) 和图 6(d) 可知，SK-6-1 和 SK-6-2 纱线规格相同，孔洞率增加 3%，平均拉伸强度下降 2%，平均拉伸模量下降 15%。这是由于孔洞率增大，纤维体积含量降低，受夹具握持纱线根数减少，拉伸力学性能下降。比较图 6(a) 和图 6(c) 可以看出，SK-3-1 与 SK-6-1 孔洞率相同，不同角度平均拉伸强度下降 4%，平均拉伸模量上升 5%。孔洞率相同，纤维体积含量相等时，力学性能差异产生的原因为：纱线越细、编织孔洞越小，试样中平行于拉伸方向上的纱线根数多，有利于均匀分散和传递载荷，承载拉力增大，拉伸断裂强度大。影响拉伸弹性模量大小的主要因素为交织点处屈曲纱线的受力伸直程度，以及试样结构本身由于拉伸引起的变形大小。试样纱线越宽，屈曲变形程度越大，弹性模量越大。此外，SK-6-1 拉伸强

度随试样角度增加下降幅度较大，因为纱线宽，试样偏转角度对试样中的纱线分布影响显著。可以推测，试样的宽度影响碳纤维 TWF/EP 复合材料拉伸强度和拉伸模量的面内准各向同性。

通过比较发现，织物孔洞率对拉伸强度和拉伸模量有较显著影响，纤维束规格对拉伸性能影响较小，SK-3-1 在不同方向上拉伸强度、拉伸弹性模量变化相对稳定。

图 7 是碳纤维 TWF/EP 复合材料 SK-3-1 不同角度拉伸强度和拉伸弹性模量变化趋势。可知，

SK-3-1 拉伸强度最小值和最大值分别为 81.85 MPa、121.78 MPa，准各向同性系数为 0.67；拉伸模量的最小值和最大值分别为 94.29 MPa、130.25 MPa，准各向同性系数为 0.72。相比于双向织造物，拉伸强度和拉伸弹性模量最大值为 0°方向试样，最小值为 30°方向试样，拉伸强度的最小值和最大值之比为 0.04^[14]，试样 SK-3-1 拉伸弹性模量变化相对稳定，材料各个方向上力学性能相近，准各向同性明显。所以，不同规格参数下，应考虑准各向同性材料的各向异性效应。

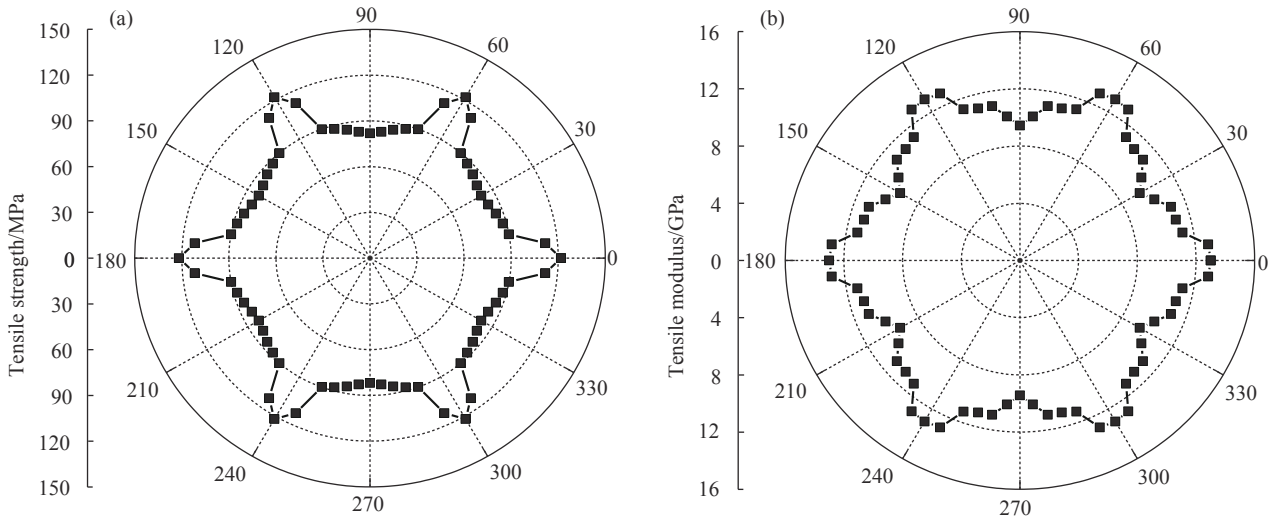


图 7 碳纤维 TWF/EP 复合材料 SK-3-1 拉伸性能变化趋势：(a) 拉伸强度；(b) 拉伸弹性模量

Fig. 7 Variation trend of tensile properties of carbon fiber TWF/EP composite SK-3-1: (a) Tensile strength; (b) Tensile elastic modulus

3.3 碳纤维 TWF/EP 复合材料拉伸损伤机制

试样达到最大断裂强力时，发生沿载荷方向上的失效，根据观察将碳纤维 TWF/EP 复合材料的整个破坏过程归纳为 3 种失效模式：纤维束拔出、纤维束断裂和交错失效^[24-25]。

图 8 为碳纤维 TWF/EP 复合材料拉伸失效模式。图 8(a) 为纤维束的拔出，试样表面的纤维束随着载荷不断增加产生裂纹，由于应力集中产生裂纹扩展，当载荷达到断裂强力时，纤维束从交织点处拔出，试样发生交织点处的抽拔断裂，材料完全破坏。图 8(c) 为纤维束在交织处的断裂，在交织点处由于纤维束之间相互交织重叠产生屈曲，当受到载荷作用时，纤维束克服屈曲状态呈现伸直趋势，交织点处容易产生应力集中区，导致单层纤维束处的薄弱交织截面失去承载能力，发生脆性断裂。图 8(b) 为交错失效，试样断裂时不仅有纤维束的拔出，还有较大范围的剪切破坏，

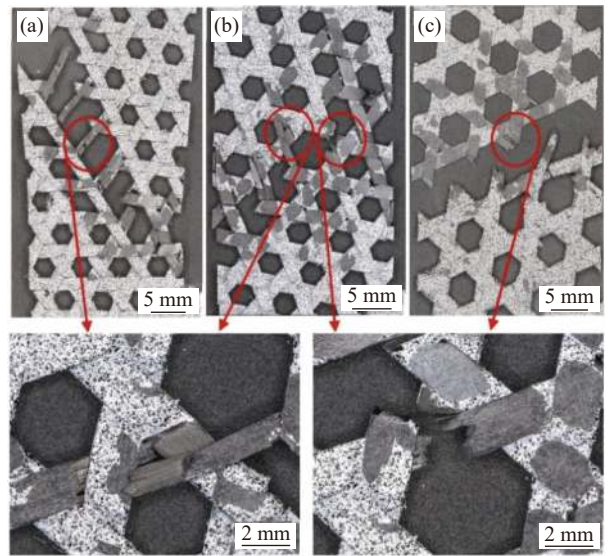


图 8 碳纤维 TWF/EP 复合材料拉伸失效模式：(a) 纤维束拔出；(b) 交错失效；(c) 纤维束断裂

Fig. 8 Tensile failure modes of carbon fiber TWF/EP composites: (a) Tows pull-out; (b) Staggered failure; (c) Tows fracture

呈现为纤维束的断裂和纵向剪切相结合，该破坏过程为上述两种破坏模式的结合。

碳纤维 TWF/EP 复合材料试样的破坏模式大多为纤维束在交织点处的脆断，由于纤维束之间存在夹角，断裂失效模式下的破坏机制包括纯剪切破坏、扭转剪切破坏、拉剪耦合破坏。

图 9 为碳纤维 TWF/EP 复合材料的断口形貌、3D 轮廓和破坏原理。可以看出，图 9(b1) 和 9(c1) 为纯剪切破坏，断口发生在垂直于载荷加载方向的 90°纱线处，断口平齐，无纤维束拔出，因为 90°纱线在拉力作用下仅存在与交织点纱线之间的剪切力，交织点处的上下层纤维束间的树脂容易产生应力集中区，不断向单层纤维束方向传递，发生剪切破坏；图 9(b2) 和 9(c2) 为扭转剪切破坏，断口发生在与载荷加载方向有一定角度的纱线交织点处，断口截面不平齐，在交织点处产生上下分层，纤维束出现一定程度的扭转，断口方向分别垂直于纤维束。因为扭转剪切破坏时，±60°纱线在拉力作用下发生相反方向的扭转，在交织点处发生纤维束与树脂基体之间的剪切破坏；图 9(b3)

和 9(c3) 为拉剪耦合破坏，断口发生在与载荷加载方向平行的 0°纱线处，断口出现分层，下层纤维束由拉力作用发生断裂，截面凹凸不齐，上层纤维束由于剪切作用破坏，截面相对平齐。因为拉剪耦合破坏时，平行于载荷加载方向的纱线不仅承受载荷作用下的拉力，同时存在纤维束扭转过程中与交织纱线之间的剪应力。

图 10 为碳纤维 TWF/EP 复合材料 SK-6-1 不同角度拉伸断裂结果，从实验结果观察，不同方向的试样均可能出现纤维束断裂、纤维束抽拔和交错失效模式。当试样中存在受夹具握持的纱线时，试样断裂机制主要为拉剪耦合破坏；试样中没有受夹具握持的纱线，试样断裂大多为扭转剪切破坏，随试样角度增加，断裂机制为扭转剪切和纯剪切破坏相结合。

而不同角度试样在制备时易发生两种形式的缺陷，进而影响损伤机制。一种为织物在复合时发生纱线交织点孔洞处树脂堆积；另一种为试样裁剪时，边缘出现裂纹。孔洞处树脂堆积容易产生应力集中区域，拉伸载荷增加，导致试样在交

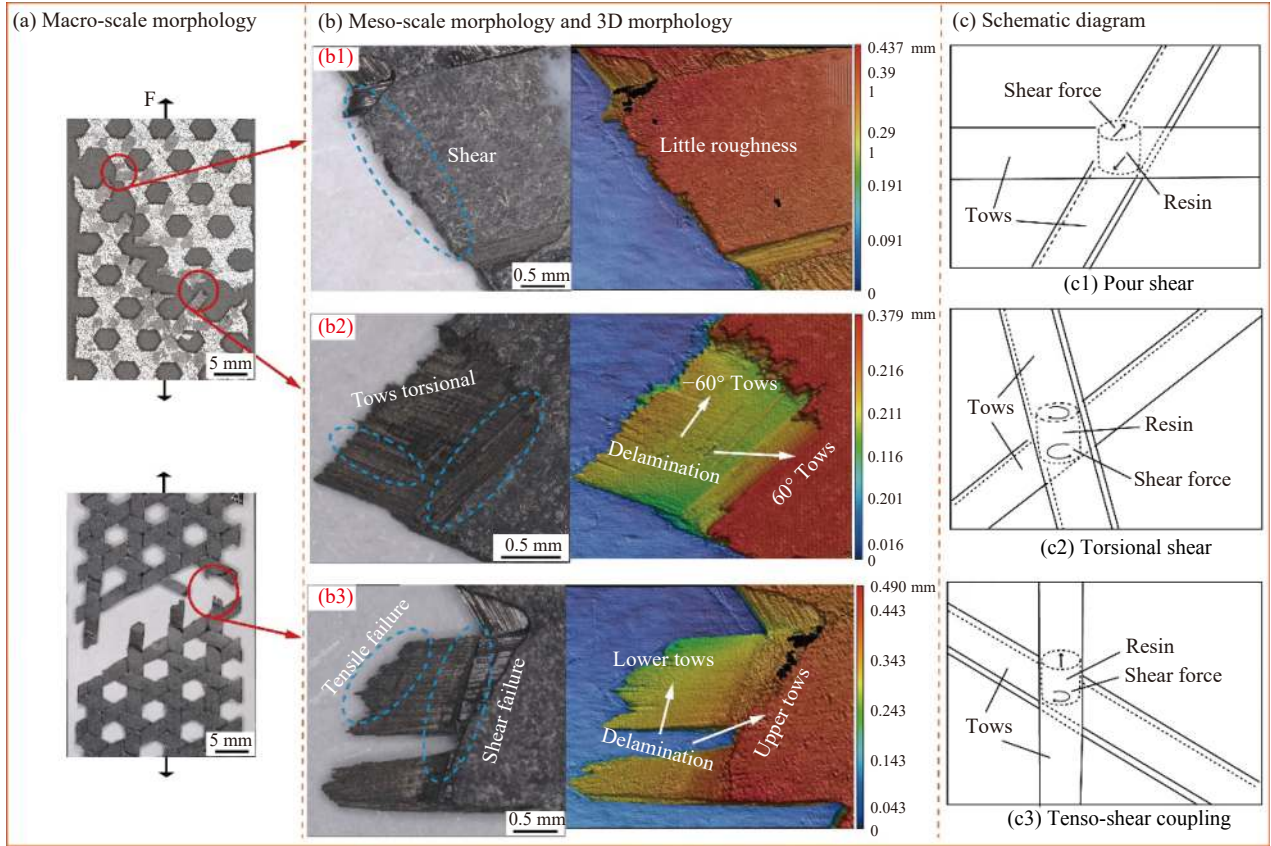


图 9 碳纤维 TWF/EP 复合材料拉伸断裂破坏形貌

Fig. 9 Tensile fracture morphologies of carbon fiber TWF/EP composites

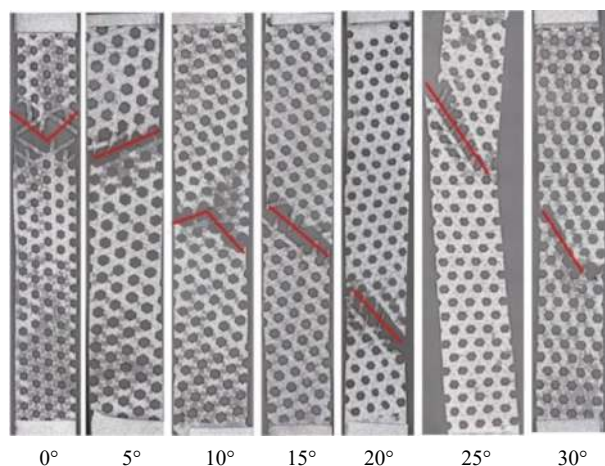


图 10 碳纤维 TWF/EP 复合材料 SK-6-1 不同角度试样拉伸断裂结果

Fig. 10 Tensile fracture results of carbon fiber TWF/EP composites SK-6-1 at different angles

织点处产生扭转剪切破坏。边缘出现裂纹时,试样首先会在此缺陷处发生破坏,导致拉伸载荷降低,影响试样断口走向和破坏模式。

不同角度拉伸试样中纱线与载荷加载方向影响试样断口走向。试样的端口走向可分为 3 种趋势, 0°、10°试样断口呈“V”型平行于±60°纱线,且断口不规则, 5°试样断口平行于-60°纱线, 15°~30°试样断口平行于 60°纱线。呈现这样分布趋势的原因为:随着拉伸载荷增大,承载主要作用力的 0°纱线伸直,载荷不断向-60°和 60°非受力纱线方向上扩展,产生应力集中区,断口分布出现-60°和 60°两种走向。随着施加载荷与 0°纱线的夹角增加, -60°纱线逐渐成为主承力纱线, 60°纱线逐渐变为非承力纱线,断口走向沿 60°纱线方向扩展。因此,大多数断口形态平行于 60°纱线分布。

4 结论

(1) 碳纤维三轴机织物增强环氧树脂复合材料弯曲弹性模量表现为准各向同性,复合材料孔洞率、纤维束规格与弯曲弹性模量显著正相关。

(2) 碳纤维三轴机织物增强环氧树脂复合材料拉伸载荷-位移曲线非线性,应变集中区主要在纱线交织三角区处。

(3) 随着试样角度的增加,拉伸强度和拉伸模量整体逐渐下降,孔洞率增大,强度模量下降。相比其他规格,试样 SK-3-1 拉伸强度、拉伸模量变化稳定,力学性能表现为准各向同性,结构相对稳定。

(4) 碳纤维三轴机织物增强环氧树脂复合材料

的拉伸破坏模式主要有:纤维束断裂、纤维束拔出和交错失效。纤维束断裂机制包括纯剪切破坏、扭转剪切破坏、拉剪耦合破坏。试样大多发生纤维束在交织点处的脆断,断口方向多平行于±60°纱线。

参考文献:

- [1] RAO Y, ZHNAG C, LI W. Structural analysis for triaxial woven fabric composites of carbon fiber[J]. *Composite Structures*, 2019, 219: 42-50.
- [2] TYLER T. Developments in triaxial woven fabrics[M]. UK: Woodhead Publishing, 2011: 141-163.
- [3] 孙洁, 施楣梧, 钱坤. 平面三向织物的结构与性能[J]. *纺织学报*, 2014, 35(6): 154-162.
SUN Jie, SHI Meiwu, QIAN Kun. Structure and properties of planar three-dimensional fabrics[J]. *Journal of Textile Research*, 2014, 35(6): 154-162(in Chinese).
- [4] DATASHVILI L, BAIER H. Active and morphing aerospace structures—A synthesis between advanced materials, structures and mechanisms[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2011, 12(3): 225-240.
- [5] SANTIAGO P J, BAIER H. Advances in deployable structures and surfaces for large apertures in space[J]. *CEAS Space Journal*, 2013, 5(3-4): 89-115.
- [6] ERICSSON A, RUMPLER R, SJOBERG D, et al. A combined electromagnetic and acoustic analysis of a triaxial carbon fiber weave for reflector antenna applications[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2016, 58: 401-417.
- [7] RUDO D N. Triaxial weave for reinforcing dental resins: US Patent, 121063B1[P]. 2009-01-21.
- [8] MESSIRY M E, ELTAHAN E. Stab resistance of triaxial woven fabrics for soft body armor[J]. *Journal of Industrial Textiles*, 2016, 45(5): 1062-1082.
- [9] MATSUMOTO N, WAKABAYASHI M, SANEKAT H. Golf club shaft: US Patent, 20090305811A1[P]. 2009-6-3.
- [10] 白江波, 熊峻江, 高军鹏, 等. 间隙率对三轴向机织复合材料弹性能的影响[J]. *材料工程*, 2014(3): 14-20.
BAI Jiangbo, XIONG Junjiang, GAO Junpeng, et al. Effect of gap ratio on elastic properties of triaxial woven composites[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2014(3): 14-20(in Chinese).
- [11] AOKI T, KOSUGI Y, WATANABE A. Fatigue characteristic and damage accumulation mechanism of triaxially-woven fabric composite[C]//Colorado, USA: 52nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2011: 1-13.
- [12] KUEH A B H. Buckling of sandwich columns reinforced by triaxial weave fabric composite skin-sheets[J]. *Internation-*

- al *Journal of Mechanical Sciences*, 2013, 66: 45-54.
- [13] 周红涛. 平面三向织物增强橡胶复合材料力学性能及损伤行为研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.
- ZHOU Hongtao. Study on mechanical properties and damage behavior of planar three-dimensional fabric reinforced rubber composites [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020(in Chinese).
- [14] 沙迪, 禹旭敏, 赵将, 等. 碳纤维三向织物/环氧树脂复合材料的制备与力学性能[J]. *高等学校化学学报*, 2020, 41(4): 838-845.
- SHA Di, YU Xumin, ZHAO Jiang, et al. Preparation and mechanical properties of carbon fiber triaxial woven fabric/epoxy resin composites[J]. *Chemical Journal of Chinese Universities*, 2020, 41(4): 838-845(in Chinese).
- [15] 易森. 三向织物织造及其复合材料拉伸机理研究[D]. 上海: 东华大学, 2019.
- YI Miao. Study on the tensile mechanism of three-dimensional fabric weaving and its composites [D]. Shanghai: Donghua University, 2019(in Chinese).
- [16] KUEH A, PELLEGRINO S. Triaxial weave fabric composites, D-STRUCT/TR223[R]. Cambridgeshire, UK: European Space Agency Contractor Report, 2007.
- [17] AOKI T, KOSUGIY, WATANABE A, et al. Durability of triaxially woven fabric composites for space applications[C]//Jeiui, Island: 18th International Conference on Composite Materials, 2011: 1-6.
- [18] AOKI T, YOSHIDA K. Mechanical and thermal behaviors of triaxially-woven carbon/epoxy fabric composite[C]//Rhode, Island: 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2006: 1-9.
- [19] ZHAO Q, HOA S V, OUELLETTE P. Progressive failure of triaxial woven fabric (TWF) composites with open holes[J]. *Composite Structures*, 2004, 65(3-4): 419-431.
- [20] DATASHVILI L. Multifunctional and dimensionally stable flexible fiber composites for space applications[J]. *Acta Astronautica*, 2010, 66(7-8): 1081-1086.
- [21] American Society for Testing Materials. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials: ASTM-D790—2017 [S]. United States: American Society for Testing Materials International, 2017.
- [22] American Society for Testing Materials. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials: ASTM-D3039/D3090M—2007[S]. United States: American Society for Testing Materials International, 2007.
- [23] ZHOU X T, MA X F, FAN Y S, et al. Tensile and bending behavior of thin-walled triaxial weave fabric composites[J]. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2019, 14: 1-10.
- [24] 沈观林, 胡更开, 刘彬. 复合材料力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 178-185.
- SHEN Guanlin, HU Gengkai, LIU Bin. Mechanics of composite materials [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 178-185(in Chinese).
- [25] HESLEHURST B R. 复合材料及结构的缺陷与损伤[M]. 张晓军, 张玮, 张有宏, 译. 北京: 国防工业出版社, 2017: 56-63.
- HESLEHURST B R. Defects and damage of composite materials and structures [M]. Translated by ZHANG Xiaojun, ZHANG Wei, ZHANG Youhong. Beijing: National Defense Industry Press, 2017: 56-63(in Chinese)