

曲面结构经编多轴向玻璃纤维复合材料制备及弯曲性能

徐海南 刘策 杨金伟 高晓平

Preparation and bending properties of curved structure composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric

XU Hainan, LIU Ce, YANG Jinwei, GAO Xiaoping

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221104.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

玻璃纤维增强树脂基复合材料夹芯板-钢板连接接头的弯曲性能

Flexural behavior of hybrid joints of glass fiber reinforced composite sandwich panel-steel plate

复合材料学报. 2018, 35(6): 1443-1451 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.001>

叠层缝合结构碳纤维/Al复合材料微观特征与高温弯曲性能

Microscopic feature and high temperature bending properties of carbon fiber/Al composites with laminated stitch structure

复合材料学报. 2021, 38(9): 2979-2988 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20201124.001>

面外载荷下含孔复合材料点阵夹层结构弯曲强度数值计算方法

Numerical method for bending strength of composite lattice sandwich structure containing hole under external load

复合材料学报. 2017, 34(10): 2263-2270 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170222.007>

高温对钢纤维-聚乙烯醇纤维-CaCO₃晶须多尺度纤维/水泥复合材料弯曲性能和微观结构的影响

Influence of high temperature on flexural properties and micro structure of steel fiber-polyvinyl alcohol fiber-CaCO₃ whisker multi-scale fibers/cement composite

复合材料学报. 2021, 38(7): 2326-2335 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200907.001>

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

Electrothermal and interlaminar shear properties of weft knitted biaxial fabric/epoxy resin electrically heated composites

复合材料学报. 2020, 37(8): 1997-2004 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20191129.001>

纳米SiO₂-端羧基丁腈橡胶改性水性环氧树脂复合材料的制备及性能

Preparation and properties of nano SiO₂-carboxyl carboxyl nitrile rubber modified water-based epoxy resin composite

复合材料学报. 2018, 35(6): 1395-1401 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170825.004>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20221104.001

曲面结构经编多轴向玻璃纤维复合材料 制备及弯曲性能



徐海南, 刘策, 杨金伟, 高晓平*
(内蒙古工业大学 轻工与纺织学院, 呼和浩特 010080)

摘 要: 分别以双轴向和四轴向经编玻璃纤维织物为增强体, 基于真空辅助树脂传递模塑成型工艺制备平板和曲面结构复合材料试样。实验测试复合材料弯曲性能和准静态压痕特性, 实验测试不同铺层结构试样沿不同方向(0°和90°)的弯曲性能。在此基础上, 分析增强体铺层结构、曲率半径对曲面结构复合材料准静态压痕特性的影响。结果表明: 双轴向经编玻璃纤维复合材料试样沿 0°和 90°方向当量弯曲强度分别比四轴向经编玻璃纤维复合材料增加 94.74%、98.37%, 四轴向经编玻璃纤维复合材料试样沿 0°和 90°方向的最大断裂应变分别是双轴向经编玻璃纤维复合材料试样的 1.9 倍和 2.4 倍。当双轴向复合材料曲率半径为 260 mm、四轴向复合材料曲率半径为 150 mm 时, 承载能力最优; 当双轴向复合材料曲率半径为 150 mm、四轴向复合材料曲率半径为 80 mm 时, 应变特性最优。实验结果为曲面结构玻璃纤维复合材料在各类室外建筑穹顶构件的应用提供借鉴。

关键词: 多轴向经编复合材料; 曲面结构; 真空辅助成型工艺; 弯曲强度; 应变特性

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2023)08-4506-11

Preparation and bending properties of curved structure composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric

XU Hainan, LIU Ce, YANG Jinwei, GAO Xiaoping*
(College of Light Industry and Textiles, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

Abstract: Biaxial warp-knitted glass fabric and quadriaxial warp-knitted glass fabric were used as reinforcement, respectively. The flat and curved structure samples were prepared by applying the vacuum assisted resin transfer molding process. The bending behavior and quasi-static indentation characteristics of composite specimen were experimentally tested, and the influence of the reinforcement structure on the bending behavior of the composite in 0° and 90° directions was analyzed. On this basis, the influences of the reinforcement structure and the radius of curvature of the sample on the quasi-static indentation characteristics were also analyzed. Results show that the equivalent bending strength of the composite reinforced with biaxial warp-knitted fabric in 0° and 90° directions increase by 94.74% and 98.37%, respectively in comparison with that of the quadriaxial warp-knitted fabric, and the maximum fracture strain of the quadriaxial warp-knitted fabric in 0° and 90° directions are 1.9 times and 2.4 times than that of the biaxial warp-knitted fabric. When the curvature radius of biaxial composite is 260 mm and the curvature radius of quadriaxial composite is 150 mm, the bending strength of the two materials are optimal. When the curvature radius of biaxial composite is 150 mm and the curvature radius of quadriaxial composite is 80 mm, the fracture strain of the two composites are optimal. The experimental results will provide guidance for application of curved structure composite in various large outdoor building domes.

收稿日期: 2022-08-25; 修回日期: 2022-10-17; 录用日期: 2022-10-28; 网络首发时间: 2022-11-07 10:14:51
网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20221104.001>
基金项目: 国家自然科学基金(51765051); 内蒙古自然科学基金(2021 MS01010)
National Natural Science Foundation of China(51765051); Natural Science Foundation of Inner Mongolia(2021 MS01010)
通信作者: 高晓平, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料改性及力学性能研究、复合材料工程应用 E-mail: gaoxp@imut.edu.cn
引用格式: 徐海南, 刘策, 杨金伟, 等. 曲面结构经编多轴向玻璃纤维复合材料制备及弯曲性能 [J]. 复合材料学报, 2023, 40(8): 4506-4516.
XU Hainan, LIU Ce, YANG Jinwei, et al. Preparation and bending properties of curved structure composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(8): 4506-4516(in Chinese).

Keywords: multi-axial warp-knitted composite; curved structures; vacuum assisted resin transform molding process; bending strength; strain characteristics

随着社会经济和科学技术的不断发展,具有轻质、高强的曲面复合材料构件在大型体育场、飞机场、文化艺术展馆等跨度巨大的曲面空间结构中得到广泛使用^[1-2]。近年曲面结构复合材料一直是研究热点,研究内容更加符合工程结构的轻质高强、造型与功能的多样化、快速施工建造等实际应用的多种需求。

由于各种大型室外建筑物需要常年承受较大的风雨雪等荷载和结构自重,对其力学性能提出较高要求,故提高大型曲面结构复合材料的力学性能及使用寿命显得尤为重要。增强体作为复合材料的主要承力载体,其本身特性会对力学性能产生重要影响,而多轴向经编玻璃纤维织物可以通过选择不同的铺层方式提升其力学性能^[3],适合制备结构简单、曲率平缓的大型结构件,已在航空航天、能源环境、交通运输等领域得到广泛应用^[4-7]。此外,3D打印技术由于具有可直接从计算机图形数据中生成零件,无需其他机械加工,既快速又高效,且可根据实际需求,制造精度高、形状复杂、重复使用的物体而不增加成本,已在各领域得到广泛应用^[8-9]。

近年来,国内外学者对曲面结构复合材料的研究主要集中在曲面结构制备、冲击性能研究(实验、理论和模拟)等方面。Jeon等^[10]研究了城市地铁列车转向架用曲面玻璃纤维增强复合材料的强度和疲劳特性。结果表明,与应用SM490A的传统金属转向架相比,玻璃纤维增强树脂复合材料(GFRP)转向架具有良好的疲劳性能。张霓等^[11]设计了一套针对GFRP管钢筋/混凝土空心构件抗弯性能的计算程序。Kassegne等^[12]开发了一种可抑制屈曲载荷的椭圆截面复合材料层板平面壳单元。在曲面结构制备方面,孟鑫淼^[13]采用真空辅助树脂传递模塑(Vacuum assisted resin transfer molding, VARTM)技术制备玻璃纤维/聚氨酯(Polyurethane, PUR)等厚度圆柱曲面复合材料,研究了复合材料曲面夹芯板破坏模式。李晓英^[14]、汪浩等^[15]采用不同组织结构增强体,制备了不同曲率的复合材料,研究复合材料的压缩、冲击等性能。郭绍华等^[16]探究了真空辅助成型工艺(Vacuum assisted resin infusion, VARI)在制备大型曲面复合材料时影响复合材料试件质量的关键

因素。在冲击性能研究方面,李帅等^[17]开展GFRP组合柱准静态轴压试验,并与静态试验结果进行对比,研究了不同加载速率对构件受压性能的影响规律。高哲^[18]对不同曲率和不同铺层结构的多轴向经编曲面复合材料进行准静态冲击和低速冲击实验,研究复合材料的破坏形式和损伤演化。Muscat-Fenech等^[19]、李鹤等^[20]、Seifoori等^[21]分析了曲面结构复合材料结构件的抗冲击性能,并有效检测和识别复合材料中损伤位置、面积和形状。董云龙等^[22]利用有限元仿真方法研究曲壳特性,探寻曲率、厚度和曲壳弯曲刚度对曲壳受力回复特性的影响。高哲等^[23]模拟分析多轴向经编曲面复合材料车门的低速碰撞性能。

综上所述,国内外研究人员多集中于改变曲面复合材料增强体结构和成型方法,研究对象较单一,且采用费时且昂贵、试验结果分散性大的落锤冲击方式^[24-26]表征复合材料冲击特性。本文分别以双轴向和四轴向经编玻璃纤维织物为增强体,以环氧树脂与固化剂的混合胶液为基体,基于VARTM成型工艺分别制备平板结构、曲面结构复合材料试样。首先,实验测试双轴向、四轴向经编玻璃纤维复合材料沿0°和90°方向弯曲性能。其次,分析曲面结构复合材料受力机制、增强体铺层结构及曲率半径对曲面结构复合材料准静态压缩性能的影响。应用高倍显微镜观察断裂处形貌,分析复合材料的破坏形式和损伤演化。

1 试验

1.1 原材料

双轴向经编玻璃纤维织物(0°/90°)和四轴向经编玻璃纤维织物(0°/+45°/90°/-45°),由山东泰山玻璃纤维有限公司提供,基本参数见表1,实物图如图1所示。基体材料为No.1-692-2A型环氧树脂和No.1-692-2B型固化剂,由深圳市郎搏万先进材料有限公司提供,混合物质量比为100:30。

1.2 复合材料试样制备

以光敏树脂为原料,使用Anycubic光固化3D打印机制备3种曲率(80 mm、150 mm、260 mm)复合材料模具。用无水乙醇清理模具表面,将脱模蜡均匀涂抹在曲面模具上,静置风干5 min后,擦去表面多余的蜡,曲面模具如图2所示。

制备平板结构和曲面结构试样时,将玻璃纤

表 1 多轴向玻璃纤维经编织物基本参数

Table 1 Basic parameters of multi-axial warp-knitted fabric

Fabric structure	Axial/(°)	Linear density/tex	Layer number	Weaving density/(yarn·10 cm ⁻¹)	Surface density/(g·m ⁻²)	Thickness/mm
Biaxial	0°	2 400	2	27	1 200	1.0
	90°	1 500		22		
Quadriaxial	0°	600	3	39	800	0.7
	45°	300		55		
	90°	300		55		
	-45°	300		40		

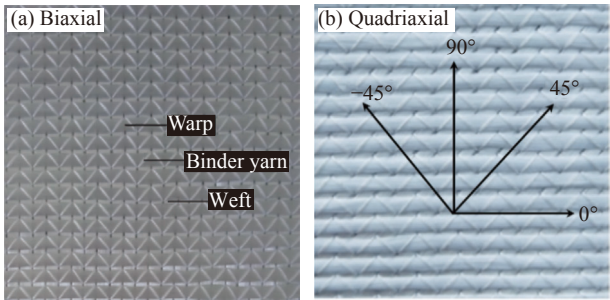


图 1 多轴向经编玻璃纤维织物
Fig. 1 Multi-axial warp-knitted fabric

维布按一定尺寸裁剪，双轴向和四轴向纤维布的铺层数分别为 2 层和 3 层。将质量比为 100 : 30 的树脂和固化剂混合液搅拌均匀后，静置 10 min 去除气泡，采用 VARTM 工艺制备复合材料试样，试样及各性能测试见表 2。

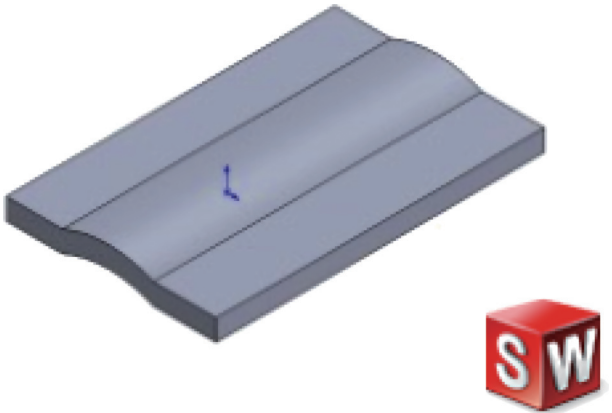


图 2 曲面模具示意图
Fig. 2 Schematic diagram of curved-surface mould

参照 ASTM D790—2015^[27] 标准，制备沿试样 0°和 90°方向试样各 10 个，几何尺寸见表 3。

表 2 复合材料试样及性能测试

Table 2 Composite material specimens and performance tests

Specimen structure	Fabric structure	Test direction	Type of test
Flat	Biaxial	0°/90°	Bending property
	Quadriaxial	0°/90°	
Curved	Biaxial	—	Quasi-static indentation
	Quadriaxial	—	

表 3 弯曲试样实际尺寸
Table 3 Actual size of bending sample

Specimen	Test direction	Average width/mm	Average thickness/mm	Average span/mm
Biaxial	0°	12.79	3.20	51.20
	90°	12.63	3.17	50.72
Quadriaxial	0°	12.85	2.98	47.68
	90°	12.71	3.06	48.96

参照 ASTM D6264/D6264M-17^[28] 标准，分别制备两种增强体结构、3 种曲率 (80 mm、150 mm、260 mm) 共 6 种规格准静态压痕实验试样，每种规格试样制备 5 块。压痕测试试样见图 3，试样参数见表 4。

1.3 纤维体积分数试验

参照 ASTM D3171—2015^[29]，采用煅烧法测定复合材料试样的纤维体积分数。具体公式如下：

纤维体积分数 V_f ：

$$V_f = \frac{\rho_m W_f}{\rho_f W_m + \rho_m W_f} \times 100\% \tag{1}$$

式中： W_f 为灼烧后试样质量 (g)； W_m 为基体质量 (g)； ρ_f 为玻璃纤维密度 (g/cm³)； ρ_m 为基体密度 (g/cm³)。

1.4 弯曲性能测试

应用 AGS-X 电子式万能测试机 (日本岛津公司) 测试复合材料弯曲性能，上压头下降速率 2 mm/min，预加压力 5 N。测试复合材料弯曲载

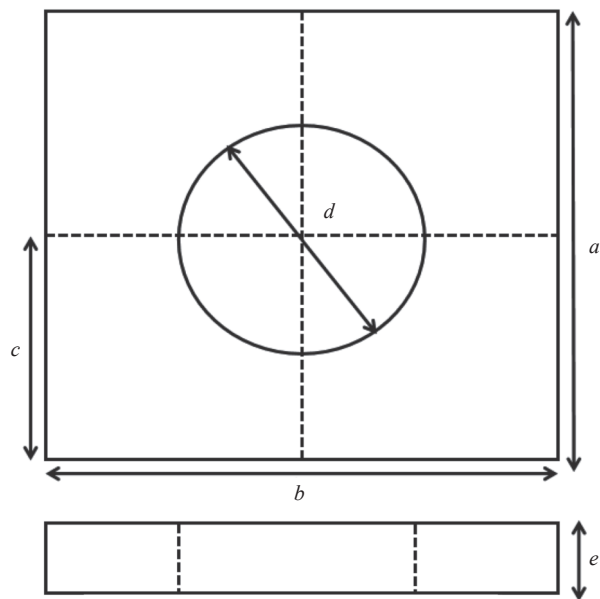


图3 准静态压痕测试试样
Fig.3 Quasi-static indentation test specimen

表 4 准静态压痕测试试件参数

Designation	Value/mm
Length <i>a</i>	75±1
Width <i>b</i>	75±1
Half length <i>c</i>	40±0.5
Diameter <i>d</i>	50±1
Thickness <i>e</i>	15±1

荷、挠度，计算应力、应变和弹性模量。试样三点弯曲示意图及试验如图 4 所示。

由于复合材料的强度和刚度主要取决于纤维体积分数^[30]。为比较不同增强体结构复合材料性能，本文引入当量弯曲强度和当量弯曲模量概念，即将两种复合材料试样纤维体积分数统一为 45vol%，如下式所示：

$$F_{\text{normal}}(45\%) = \frac{G \times 45\%}{V_f}$$

(2)

式中，*G*为弯曲强度(MPa)。同样可以计算试样当量弯曲模量。

1.5 准静态压痕实验

应用 AG-250 kNE 冲击测试机 (Instron 公司)

表 5 经编多轴向玻璃纤维复合材料试样灼烧前后的质量、体积和纤维体积分数

Specimen	Specimen volume/cm ³	Specimen mass/g	Mass after burning/g	Matrix mass/g	Fiber volume fraction/%
Biaxial	1.482	3.217	2.402	0.815	56.68
Quadriaxial	1.468	3.196	2.235	0.961	50.80

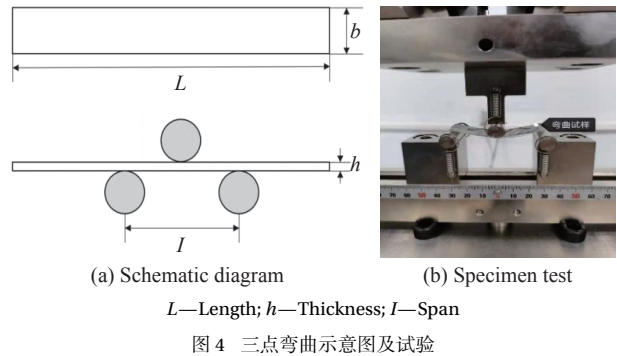


图 4 Three point bending diagram and test

对试样进行准静态压痕测试。试样尺寸 75 mm×75 mm；冲头从曲面最高点垂直向下冲击，冲击速度 1.25 mm/s；预加载荷 5 N；标距 100 mm。记录实验最大载荷和最大位移等数据。准静态压痕测试设备及准静态压痕试样如图 5 所示。

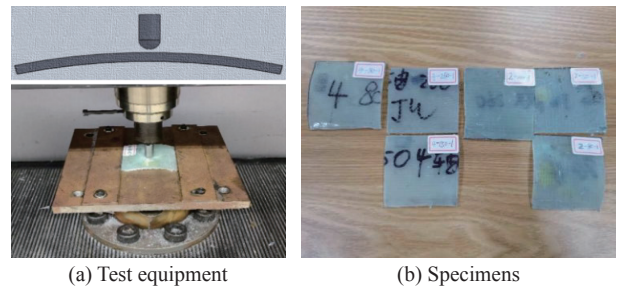


图 5 准静态压痕测试设备及试样
Fig.5 Quasi-static indentation test equipment and specimens

2 试验结果与分析

2.1 纤维体积分数

复合材料试样燃烧前后的质量与体积、纤维体积分数如表 5 所示。

可知，双轴向和四轴向复合材料的纤维体积分数分别为 56.68vol% 和 50.80vol%。体积分数差异主要源于复合材料内增强体织物铺层分别为双轴向织物 2 层、四轴向织物 3 层，且双轴向织物纱线的细度要高于四轴向织物。

2.2 经编多轴向玻璃纤维复合材料弯曲性能

2.2.1 弯曲计算

根据实验结果计算双轴向、四轴向复合材料

试样弯曲加载中应力、应变、弯曲强度、弯曲模量。弯曲应力 σ 、应变 ε 和模量 E 计算公式如下：

$$\sigma = \frac{3Fl}{2bh^2} \tag{3}$$

$$\varepsilon = \frac{6\delta h}{l^2} \tag{4}$$

$$E = \frac{l^3 \Delta F}{4bh^3 \Delta \delta} \tag{5}$$

式中： F 为施加的载荷(N)； δ 为弯曲挠度(mm)； ΔF 为载荷差值(N)； $\Delta \delta$ 为载荷差值对应的挠度差值(mm)； b 、 h 、 l 分别对应表3中的平均宽度、平均厚度、平均跨距。

双轴向复合材料和四轴向复合材料沿不同方向的弯曲性能如表6所示。由表可知，双轴向复合材料试样沿0°方向当量弯曲强度和当量弯曲模量分别比90°方向增加72.10%、9.71%；四轴向复合材料试样沿0°方向当量弯曲强度和当量弯曲模量分别比90°方向增加75.31%、69.86%，主要由于两种增强体材料(双轴向织物和四轴向织物)的经

纱线密度均远大于纬纱线密度。双轴向复合材料在0°方向的各力学性能最大，主要原因是两种复合材料在面密度相同、厚度相同的情况下，双轴向复合材料的线密度最大，故该试样在0°方向承载的弯曲载荷最多。双轴向复合材料沿0°和90°方向当量弯曲强度分别比四轴向复合材料增加94.74%、98.37%。同时，双轴向复合材料沿0°和90°方向当量弯曲模量分别是四轴向复合材料的3.13倍、4.85倍。

双轴向复合材料试样沿0°和90°方向最大载荷分别为1255.59N和729.58N，是四轴向复合材料试样的2.3倍和2.2倍，主要由于增强体内双轴向织物同向铺放2层，而四轴向织物同向铺放4层，织物层数越多，织物中纱线的载荷传递性能越差，导致二者弯曲强度相差较大。四轴向复合材料试样沿0°和90°方向的最大应变分别为5.27%和4.99%，是双轴向复合材料试样的1.9倍和2.4倍。由此可知，双轴向复合材料抗弯刚度和承载力均优于四轴向复合材料，但四轴向复合材料应变范围大，断裂应变优于双轴向复合材料。

表6 经编多轴向玻璃纤维复合材料弯曲性能参数

Table 6 Parameters of bending performance of composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric

Specimen	Direction/(°)	Maximum load/N	Maximum strain/%	Bending strength/MPa	Bending modulus/GPa	Equivalent strength/MPa	Equivalent modulus/GPa
Biaxial	0	1255.59	2.78	741.49	32.89	588.69	26.11
	90	729.58	2.10	430.85	29.98	342.07	23.80
Quadriaxial	0	541.75	5.27	341.26	9.42	302.30	8.34
	90	329.64	4.99	194.67	5.54	172.44	4.91

2.2.2 应力-应变曲线

双轴向和四轴向复合材料沿0°和90°方向的弯曲应力-应变曲线，如图6所示。可知，双轴向和四轴向复合材料试样的弯曲应力-应变曲线总体变化趋势相似，结合表1可知，由于两种织物的经、纬纱总体线密度不相等，故二者的弯曲应力相差较大，双轴向复合材料失效应力远大于四轴向复合材料。同时，两种材料的失效应变也不相同，沿90°方向应变大于0°方向。

在初始阶段，曲线呈线性增长，主要由增强体和基体共同承担载荷。随着弯曲载荷的增加，试件弯曲应变也逐渐增大，此时基体出现损伤，同时还伴随着基体与增强体界面脱粘。随着弯曲载荷的进一步增加，增强体承担主要载荷，由于增强体为多层织物，最先发生失效的是试样上表面和下表面纱线，当外层纱线断裂失效而失去承

载能力后，载荷向里层传递，由临近的内层纱线承担主要载荷，直至试样失效。

2.2.3 失效形态

应用BC1000高倍显微镜(东莞市博骋电子科技有限公司)观察两种复合材料断裂截面形貌特征，如图7所示。弯曲性能测试中，复合材料的损伤主要集中在加压区域，且试样上表面主要承受压缩力，下表面主要承受拉伸力。根据压缩表面和拉伸表面的破坏形态，从宏观角度分析复合材料失效机制。由弯曲试样失效形态可知，损伤大多集中在上压头压缩位置，同时下表面也有不同程度损伤。

双轴向复合材料试样沿0°和90°方向，其上、下表面均出现大面积白色受损区域，同时出现不同程度的纤维脱粘、分层现象。从侧面观察，试样侧面出现纤维分层、开裂、断裂、抽拔等现象，

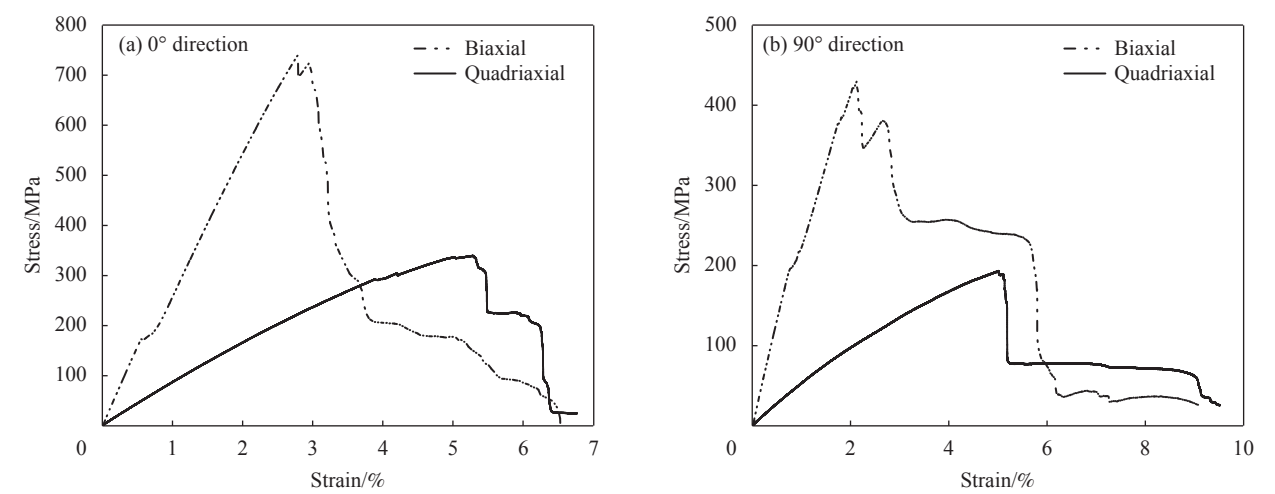


图6 经编多轴向玻璃纤维复合材料沿不同方向弯曲应力-应变曲线

Fig. 6 Bending stress-strain curves of composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric in different direction

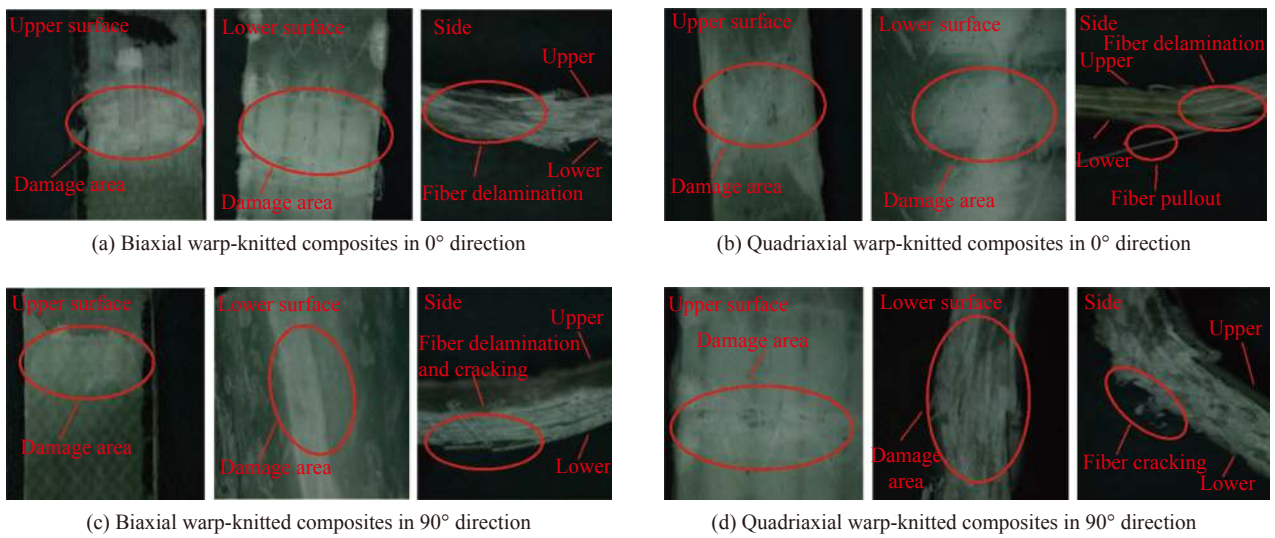


图7 经编多轴向玻璃纤维复合材料弯曲失效示意图

Fig. 7 Bending failure diagram of composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric

双轴向复合材料基体与织物结合力较强，纤维断裂处较整齐且断裂处纤维分层现象明显。对双轴向复合材料弯曲试样分析，其增强体上、下表层纱线方向分别为90°和0°，与上压头圆柱体长度相同时，纱线间的脱粘现象严重，源于此时主要承载部件为树脂基体；当其增强体上、下表层纱线方向(90°和0°)与上压头圆柱体长度垂直时，则纱线容易发生断裂，源于此时承担主要载荷的部件为增强体纱线。在弯曲加载过程中，由于试样下表面受到载荷时所产生的位移比上表面大，导致下表面的分层区域也比上表面大。

四轴向复合材料试样沿0°和90°方向，其上、下表面同样出现大面积白色受损区域和较严重的

纱线脱粘、断裂、分层现象。尤其是沿0°方向，试样下表面部分翘起，纱线分层严重，可清晰观察到内层纱线断裂情况。从侧面观察，四轴向复合材料断裂处层次不齐且断裂处出现的纤维断裂、分层、抽拔等现象较严重，说明基体未发生塑性断裂^[31]。分析四轴向复合材料弯曲试样发现，其增强体上、下表层纱线方向分别为0°和45°，与上压头圆柱体长度相同和垂直时，纱线间的脱粘和断裂情况与四轴向复合材料弯曲试样大致相同；与上压头圆柱体长度方向为45°、-45°时，在纱线方向，表层出现翘起、分层现象。当内层邻近纱线方向与上压头圆柱体长度方向垂直时，表层纱线出现严重分层现象，伴随着纱线断裂。随着上

压头和下压位移的逐渐增加，双轴向和四轴向复合材料试样上表面的应力集中区域出现凸起褶皱，实验中应力集中区域的基体、纤维最先断裂。同时下表面基体发生轻微破裂，随着载荷的不断增加，下表面的纤维束逐渐断裂并从基体中抽拔。

2.3 曲面结构经编多轴向玻璃纤维复合材料准静态压痕压痕

两种结构复合材料准静态压痕结果见表7。可知，增强体铺层结构和试样曲率半径对复合材料准静态压痕有显著影响，实验不同阶段产生损伤程度和损伤演化情况均有不同。

双轴向复合材料试样随着曲率半径的增大，能承受最大载荷逐渐增大，最大位移先增大后减小。当曲率半径为260 mm时，试样的最大载荷达10.59 kN，分别是曲率半径为80 mm、150 mm时的4.4倍、1.3倍；当曲率半径为150 mm时，试样的最大位移为7.61 mm，分别比曲率半径为80 mm、260 mm时增加32.3%、15.5%。

四轴向复合材料试样随着曲率半径的增大，所能承受最大载荷先增大后略微减小，最大位移逐渐减小。当曲率半径为150 mm时，四轴向复合材料试样的最大载荷为5.25 kN，分别比曲率半径为80 mm、260 mm时提高了57.3%、1.9%。当曲率半径为80 mm时，试样的最大位移为9.81 mm，分别比曲率半径为150 mm、260 mm时增加26.9%、108.7%。由此可知：双轴向和四轴向复合材料曲率半径分别为260 mm和150 mm时承载能力最大；双轴向和四轴向复合材料曲率半径

表7 曲面结构经编多轴向玻璃纤维复合材料准静态压痕实验结果

Table 7 Results of quasi-static indentation experiment of curved structure composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric

Specimen	Curvature radius/mm	Maximum displacement/mm	Maximum load/N
Biaxial	80	5.75	2 431.3
	150	7.61	8 462.5
	260	6.59	10 587.5
Quadriaxial	80	9.81	3 337.5
	150	7.73	5 250.0
	260	4.70	5 150.0

分别为150 mm和80 mm时的应变特性最佳。大曲率下，双轴向复合材料的承载能力和应变特性均优于四轴向复合材料。

2.3.1 载荷-位移曲线

曲面结构双轴向和四轴向复合材料试样的载荷-位移曲线如图8所示。在复合材料试样准静态压痕测试中，双轴向和四轴向复合材料试样的载荷-位移曲线变化趋势基本相同，试样曲率半径越大，试样承受载荷也越大，当试样曲率半径为150 mm和260 mm时具有良好的承载效果。相反地，试样曲率半径越大，冲头的最大位移越小，试样曲率半径为80 mm时具有更高的应变，小曲率下四轴向复合材料的应变更优于双轴向复合材料。曲面结构复合材料试样载荷-位移曲线呈现明显的三段式：初始阶段(0—A、0—D、0—G)、损伤阶段(A—B、D—E、G—H)和卸载阶段(B—C、E—F、H—I)，其中，每个阶段包含的三段分别对

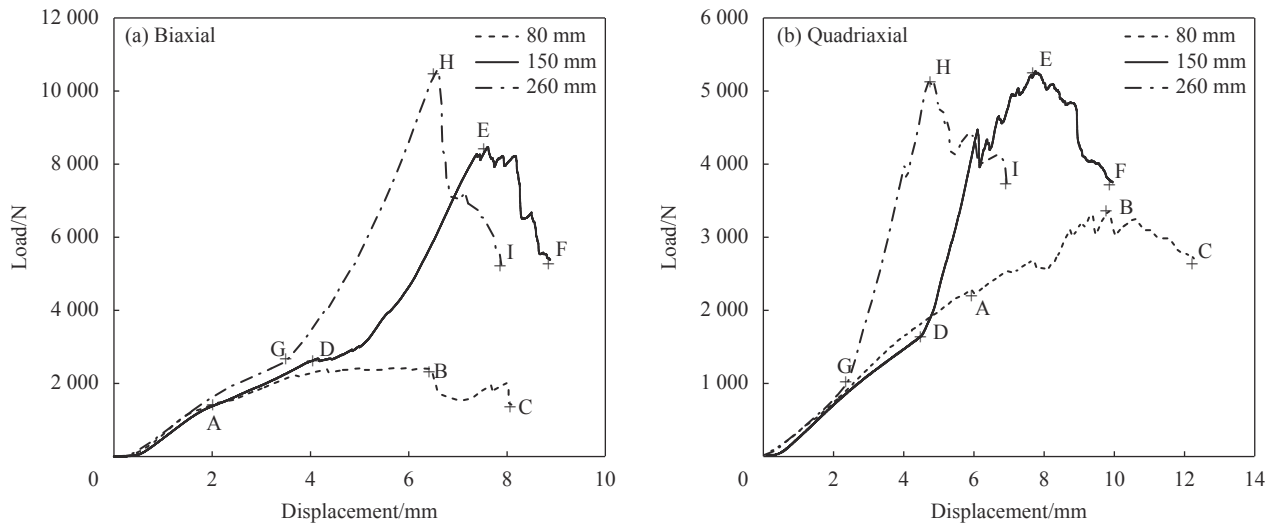


图8 不同曲率经编多轴向玻璃纤维复合材料载荷-位移曲线

Fig. 8 Load-displacement curves of composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric with different curvature

应复合材料试样的 3 种曲率 (80 mm、150 mm、260 mm)。

在初始阶段, 双轴向复合材料在 0—A、0—D、0—G 段的载荷-位移曲线走势呈线性关系且上升趋势较平缓, 试样的载荷峰值随着曲率的增大而增大, 但在 3 种曲率下的冲头位移差别不大。同样, 四轴向复合材料在 0—A、0—D、0—G 段的载荷-位移曲线上升趋势同样较平缓, 试样的载荷峰值随着曲率的增大呈先增大后减小趋势, 冲头位移随着曲率的增大逐渐减小, 且 3 种曲率下冲头位移差别较大, 曲率为 80 mm 时的冲头位移分别是曲率为 150 mm 和 260 mm 下的近 1.2 倍和 1.8 倍。双轴向和四轴向复合材料在该阶段主要由基体承受载荷, 树脂基体呈现各向同性, 载荷分布均匀, 复合材料表现出弯曲、变形等弹性形变。

随着冲头位移的增加, 复合材料出现损伤。双轴向复合材料在曲率为 80 mm 时, A—B 段曲线的增长较缓慢, 当曲率为 150 mm 和 260 mm 时, D—E、G—H 段的载荷-位移曲线呈现急剧上升趋势并在冲头位移较短的情况下迅速达到载荷峰值。同样的, 四轴向复合材料在 A—B、D—E、G—H 段的载荷-位移曲线均出现急剧上升趋势并在冲头位移较小时迅速达到载荷峰值, 原因在于试样发生形变后基体开裂。

随着冲头下压位移的继续增加, 复合材料进入卸载阶段。在这一阶段中, 各曲率 (80 mm、150 mm、260 mm) 下的双轴向和四轴向复合材料在 B—C、E—F、H—I 段中达到最大载荷后出现多次卸载的情况, 源于玻璃纤维织物表层最先受到冲击, 随后载荷向内部传递, 由内外层织物共

同承载, 直至试样失效。与双轴向复合材料相比, 四轴向复合材料的载荷-位移曲线存在多个峰值, 这是由于四轴向复合材料铺层结构较双轴向复合材料更复杂, 导致试样吸收能量的途径和失效形式变得更加多元化。

2.3.2 失效形态

曲面结构复合材料准静态压痕失效形式包括基体脆裂、压痕或凹陷、劈裂与分层组合失效、大裂纹与纤维凹坑、分层等。双轴向和四轴向复合材料试样失效实物图如图 9 所示。

观察复合材料试样失效实物表面可知, 试样的正面失效面积大于反面, 且正面失效痕迹比反面更加明显, 由此可知在准静态压痕试验中, 受压痕力作用的试样面失效情况更严重。

应用 BC1000 高清显微镜观察曲面结构复合材料试样准静态压痕损伤形貌特征, 如图 10 所示。由图可知, 双轴向和四轴向复合材料试样正面的损伤形式相似, 但受损面积不同。当试样受压痕作用时, 受损区域主要集中在压头中心位置, 且

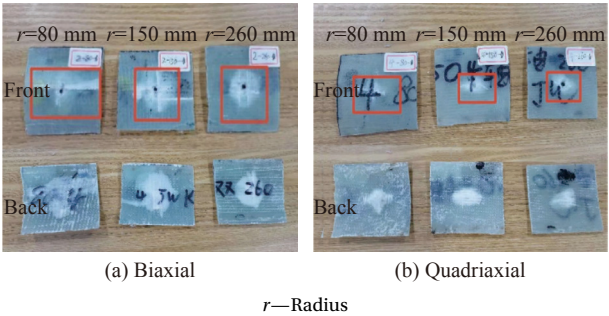


图 9 曲面结构经编多轴向玻璃纤维复合材料失效实物图

Fig. 9 Physical failure diagram of curved structure composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric

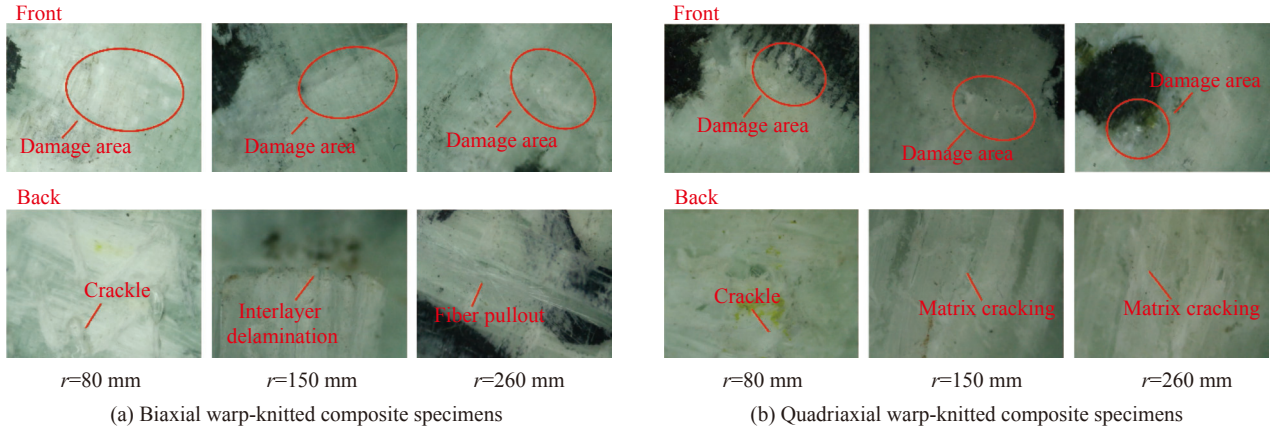


图 10 曲面结构经编多轴向玻璃纤维复合材料压痕损伤示意图

Fig. 10 Indentation damage of curved structure composite reinforced with multi-axial warp-knitted glass fabric

应力由中心向周围逐渐减小,试样周围损伤程度也逐渐减弱^[32]。当曲面结构曲率半径为 80 mm 时,试样仅正面出现轻度损伤,反面只出现轻微裂纹。结合载荷-位移曲线知,曲率半径为 80 mm 时,双轴向复合材料最大载荷明显低于四轴向复合材料,且在加载初期试样发生失效,这表明双轴向复合材料在较低载荷下虽表现出一定的刚度但更容易失效,这是由于四轴向复合材料试样的铺层结构更加复杂,应力在试样中的传播路径更长,可通过多层结构中多种失效形式吸收和消散能量。随着曲率半径的逐渐增大,试样正面的受损情况越来越严重,反面出现基体开裂、层间分层和纤维抽拔等现象,这是由于曲率的存在,试样首先出现“趋平”过程,在“趋平”后,继续沿冲击方向产生形变,这一过程伴随压缩、冲击-剪切作用,从而使试样出现面内损伤。

结合载荷-位移曲线知,曲率半径为 150 mm、260 mm 时,双轴向复合材料最大载荷分别是四轴向复合材料的 1.6 倍、2.1 倍,这表明大曲率双轴向复合材料具有更高的强度,四轴向复合材料则应变特性更优。由此可知,复合材料试样曲率越大,形变程度越大,应力传播范围越广,损伤面积也越大,而小曲率复合材料试样可有效抑制裂纹传播。

3 结论

分别以双轴向和四轴向织物为增强体,环氧树脂与固化剂混合胶液为基体,采用真空辅助树脂传递模塑成型工艺制备平板和曲面结构复合材料试样。实验研究了不同增强体结构复合材料沿 0°和 90°方向的弯曲性能,增强体结构及曲率半径对复合材料准静态压痕特性的影响,得到如下结论:

(1) 双轴向复合材料沿 0°和 90°方向的当量弯曲强度比四轴向复合材料分别增加 94.74%、98.37%,四轴向复合材料沿 0°和 90°方向的最大应变分别是双轴向复合材料的 1.9 倍和 2.4 倍。双轴向复合材料的抗弯刚度和承载力均优于四轴向复合材料,但四轴向复合材料断裂应变大,变形特性优于双轴向复合材料。双轴向和四轴向复合材料良好的弯曲性能可用于曲面结构复合材料的进一步研究;

(2) 双轴向和四轴向曲面结构复合材料在低载荷阶段,载荷与位移呈正相关,高载荷阶段载荷-位移曲线变得复杂,双轴向和四轴向复合材料曲

率半径分别为 260 mm、150 mm 时承载能力最优。试样受到压痕作用时,大曲率双轴向复合材料呈现出更高的强度和优异的应变特性;

(3) 弯曲损伤中,双轴向复合材料失效时纤维分层现象明显,四轴向复合材料失效时基体未发生塑性断裂。在准静态压痕力下,复合材料曲率越大,形变越大,应力传播范围越广,损伤面积越大,而小曲率复合材料可有效抑制裂纹传播。

参考文献:

- [1] BLONDER A, GROBMAN Y J. Design and fabrication with fibre-reinforced polymers in architecture: A case for complex geometry[J]. *Architectural Science Review*, 2016, 59(4): 257-268.
- [2] 摩西·萨夫迪, 相南. 准则、秩序与复杂性[J]. *世界建筑*, 2011(8): 19-31.
MOSHE Safdie, XIANG Nan. On ethics, order and complexity[J]. *World Architecture*, 2011(8): 19-31(in Chinese).
- [3] 徐进, 张伟. 多轴向经编复合材料在风电叶片制造中的应用[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2010(5): 78-80.
XU Jin, ZHANG Wei. Application of multi-axial warp-kitted technology in wind turbing blade design[J]. *Composites Science and Engineering*, 2010(5): 78-80(in Chinese).
- [4] 姜永恺. 高性能纤维的现状及应用[J]. *棉纺织技术*, 2000(6): 6-9.
JIANG Yongkai. The status-quo and application of high-performance fibers[J]. *Cotton Textile Technology*, 2000(6): 6-9(in Chinese).
- [5] GURUNATHAN T, MOHANTY S, NAYAK S K. A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives[J]. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015, 77: 1-25.
- [6] 钟文鑫, 马丕波. 风电叶片用多轴向经编织物发展现状[J]. *玻璃纤维*, 2015(6): 35-39.
ZHONG Wenxin, MA Pibo. Development of multi-axial warp-knitted fabrics for wind turbine blades[J]. *Fiber Glass*, 2015(6): 35-39(in Chinese).
- [7] 沈军, 谢怀勤. 航空用复合材料的研究与应用进展[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2006(5): 48-54.
SHEN Jun, XIE Huaiqin. Recent progress in study and application of composite materials for aeronautical engineering[J]. *Composites Science and Engineering*, 2006(5): 48-54(in Chinese).
- [8] 党乐, 张梦雨, 成艳娜, 等. 3D打印技术在复合材料中的应用与发展[J]. *科技创新与应用*, 2022, 12(24): 166-169.
DANG Le, ZHANG Mengyu, CHENG Yanna, et al. Applica-

- tion and development of 3D printing technology in composite materials[J]. *Technology Innovation and Application*, 2022, 12(24): 166-169(in Chinese).
- [9] 陈晓明, 陆承麟, 龚明, 等. 超大尺度高分子复合材料3D打印技术研发与应用[J]. *施工技术*, 2021, 50(21): 41-45.
- CHEN Xiaoming, LU Chenglin, GONG Ming, et al. Research and application of 3D printing technology for super large-scale polymer composite material[J]. *Construction Technology*, 2021, 50(21): 41-45(in Chinese).
- [10] JEON K W, SHIN K B, KIM J S. A study on fatigue life and strength of a GFRP composite bogie frame for urban subway trains[J]. *Procedia Engineering*, 2011, 10: 2405-2410.
- [11] 张霓, 郑晨阳, 姜丽娜, 等. 玻璃纤维增强树脂复合材料管-钢筋/混凝土空心构件抗弯性能[J]. *复合材料学报*, 2020, 37(12): 3052-3063.
- ZHANG Ni, ZHENG Chenyang, XIAN Lina, et al. Flexural behavior of glass fiber reinforced polymer tube filled with steel bars/concrete hollow members[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2020, 37(12): 3052-3063(in Chinese).
- [12] KASSEGNE S K, CHUN K. Erratum to: Buckling characteristic of multi-laminated composite elliptical cylindrical shells[J]. *International Journal of Advanced Structural Engineering*, 2015, 7(4): 1-10.
- [13] 孟鑫森. 复合材料曲面夹芯板受力性能及应用技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2017.
- MENG Xinmiao. Mechanical behavior and application technology of FRP curved sandwich panels[D]. Beijing: Tsinghua University, 2017(in Chinese).
- [14] 李晓英. 三维横编间隔结构曲面复合材料制备及低速冲击性能[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- LI Xiaoying. Preparation of three-dimensional curved flat-knitted spacer fabric composites and its low-velocity impact property[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019(in Chinese).
- [15] 汪浩, 徐珍珍, 阮芳涛, 等. 增强体织物组织结构对曲面复合材料力学性能的影响[J]. *中国塑料*, 2019, 33(3): 22-27.
- WANG Hao, XU Zhenzhen, RUAN Fangtao, et al. Effect of reinforced fabrics structure on mechanical properties of curved composites[J]. *China Plastics*, 2019, 33(3): 22-27(in Chinese).
- [16] 郭绍华, 张东致, 冉安国, 等. VARI工艺在大型曲面复合材料件上的工程化应用研究[J]. *粘接*, 2017, 38(8): 64-67.
- GUO Shaohua, ZHANG Dongzhi, RAN Anguo, et al. Engineering application of VARI process in manufacturing of large curve-surface composite parts[J]. *Adhesion*, 2017, 38(8): 64-67(in Chinese).
- [17] 李帅, 姚盛杰, 何文涛, 等. GFRP约束微珠泡沫柱准静态受压性能[J]. *材料科学与工程学报*, 2022, 40(1): 129-134.
- LI Shuai, YAO Shengjie, HE Wentao, et al. Compressive behavior of GFRP confined syntactic foam columns under quasi-static loads[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2022, 40(1): 129-134(in Chinese).
- [18] 高哲. 多轴向经编曲面复合材料低速冲击性能研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- GAO Zhe. Research on low-velocity impact mechanism of curved multi-axial warp-knitted composites[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017(in Chinese).
- [19] MUSCAT-FENECH C D M, CORTIS J, CASSAR C. Characterizing QSLVII damage of composite sandwich hulls[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 88: 141-148.
- [20] 李鹤, 张超, 季宏丽, 等. 基于导波检测的带曲率复合材料板损伤识别技术研究[J]. *国外电子测量技术*, 2019, 38(5): 75-80.
- LI He, ZHANG Chao, JI Hongli, et al. Damage identification technology of composite plate with curvature based on guided wave detection[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2019, 38(5): 75-80(in Chinese).
- [21] SEIFOORI S, MAHDIAN P A, MIRZARAHMANI S. Impact damage detection in CFRP and GFRP curved composite laminates subjected to low-velocity impacts[J]. *Composite Structures*, 2021, 261: 113278.
- [22] 董云龙, 梅志远, 张二, 等. 大曲率复合材料壳板弯曲试验及仿真[J]. *舰船科学技术*, 2020, 42(13): 40-44.
- DONG Yunlong, MEI Zhiyuan, ZHANG Er, et al. Research on bending test and simulation study of large curvature composite shell plate[J]. *Ship Science and Technology*, 2020, 42(13): 40-44(in Chinese).
- [23] 高哲, 蒋高明. 多轴向经编曲面复合材料汽车门低速碰撞数值模拟[J]. *纺织学报*, 2018, 39(2): 43-48.
- GAO Zhe, JIANG Gaoming. Finite element analysis of curved multi-axial warp-knitted composite car door under low-velocity impact[J]. *Journal of Textile Research*, 2018, 39(2): 43-48(in Chinese).
- [24] 郑晓霞, 郑锡涛, 沈真, 等. 低速冲击与准静态压痕力下复合材料层合板的损伤等效性[J]. *航空学报*, 2010, 31(5): 928-933.
- ZHENG Xiaoxia, ZHENG Xitao, SHEN Zhen, et al. Damage equivalent of composite laminates subjected to drop-weight impact and quasi-static indentation force[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(5): 928-933(in Chinese).
- [25] 沈真, 杨胜春, 陈普会. 复合材料抗冲击性能和结构压缩: 设计许用值[J]. *航空学报*, 2007, 28(3): 561-566.
- SHEN Zhen, YANG Shengchun, CHEN Puhui. Behaviors of composite materials to withstand impact and structural compressive design allowablence[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(3): 561-566(in Chinese).
- [26] XU S, CHEN P H. Prediction of low velocity impact damage

in carbon/epoxy laminates[J]. [Procedia Engineering](#), 2013, 67: 489-496.

[27] ASTM. Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials: ASTM D790—2015[S]. West Conshohocken: ASTM, 2015.

[28] ASTM. Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer-matrix composite to a concentrated quasi-static indentation force: ASTM D6264/D6264 M-17[S]. West Conshohocken: ASTM, 2017.

[29] ASTM. Standard test methods for constituent content of composite materials: ASTM D3171—2015[S]. West Conshohocken: ASTM, 2015.

[30] CARLSSON L A, ADAMS D F, PIPES R B. Experimental characterization of advanced composite materials[M]. Boca Raton: CRC Press, 2014.

[31] 杨晓日. 多轴向玻璃纤维复合材料力学性能的温度效应研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2019.

YANG Xiaori. Research of temperature effect on mechanical properties of multi-axial glass fiber composites[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Technology, 2019(in Chinese).

[32] 黄光启, 程鹏飞, 杨胜春, 等. 准静态压痕力作用下复合材料层压板损伤分析方法[J]. [纤维复合材料](#), 2018, 35(3): 48-52.

HUANG Guangqi, CHENG Pengfei, YANG Shengchun, et al. The analysis method of quasi-static indentation force damage of composite laminate[J]. [Fiber Composites](#), 2018, 35(3): 48-52(in Chinese).