

气动载荷下Al-GF/PP面板-三维中空夹层复合材料的强度特性

林艳艳 郭兴豪 吴灿 李华冠 项俊贤 陈熹 陶杰

Strength characterization of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate under aerodynamic load

LIN Yanyan, GUO Xinghao, WU Can, LI Huaguan, XIANG Junxian, CHEN Xi, TAO Jie

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240306.002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

TG800碳纤维/聚酰亚胺树脂复合材料带翻边开口圆柱壳机匣件高温气动载荷下的承载性能

Load-bearing capability of TG800 carbon fiber/polyimide resin composite cylindrical casing with flange and window under high-temperature aerodynamic load

复合材料学报. 2021, 38(7): 2184–2195 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20210326.001>

三维碳/碳复合材料板件拉伸强度预报

Prediction on the tensile strength of 3D carbon/carbon composite plate

复合材料学报. 2017, 34(2): 430–437 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20160606.001>

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>

碳纤维增强树脂基复合材料组分疲劳强度表征

Characterization of the constituent fatigue strength of carbon fiber reinforced polymer composite

复合材料学报. 2018, 35(2): 356–363 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170420.003>

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>

基于剪切非线性三维损伤本构模型的复合材料层合板失效强度预测

Failure strength prediction of composite laminates using 3D damage constitutive model with nonlinear shear effects

复合材料学报. 2020, 37(9): 2207–2222 <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20200110.002>



扫码关注微信公众号，获得更多资讯信息

气动载荷下 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的强度特性



分享本文

林艳艳¹, 郭兴豪¹, 吴灿¹, 李华冠^{*2}, 项俊贤³, 陈熹³, 陶杰³

(1. 南京工程学院 康尼机电产业技术研究院, 南京 211167; 2. 南京工程学院 材料科学与工程学院, 南京 211167;

3. 南京航空航天大学 材料科学与技术学院, 南京 211106)

摘要: 随着高速列车的不断提速, 特别是在通过隧道或会车时, 气动载荷对蒙皮结构的强度特性提出了更高的要求。热塑性铝合金-玻纤/聚丙烯 (Al-GF/PP) 面板-三维中空夹层复合材料是一种以纤维金属层板为面板、三维中空复合复合材料为芯材的三明治夹层材料, 具有轻质高强、隔音隔热等优势, 可用于高速列车车门、裙板等蒙皮结构。通过比较不同高度 (10~25 mm) 的三维中空复合材料在平压、侧压及弯曲性能上的表现发现, 随着厚度增加, 其力学性能呈下降趋势, 较厚的三维中空复合材料芯材弯矩较大, 结构稳定性低。对 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料进行了 4 kPa、5 kPa、6 kPa、7 kPa 的气动载荷测试。结果表明: 当“8”形纤维受到垂直于面板方向的作用力时, 纬向承担了主要载荷, 这有助于减小纤维在加载方向上的位移量。芯材与上面板连接处承受的载荷应力最大, 位移主要出现于结构的受载侧, 最大位移值分别为 1.80 μm 、2.26 μm 、2.72 μm 和 3.19 μm , 该数量级的气动载荷不会导致试样出现宏观的变形失效。

关键词: 纤维金属层板; 三维中空复合材料; 夹层复合材料; 气动载荷; 强度特性

中图分类号: TB332; TQ327.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3851(2024)10-5315-13

Strength characterization of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate under aerodynamic load

LIN Yanyan¹, GUO Xinghao¹, WU Can¹, LI Huaguan^{*2}, XIANG Junxian³, CHEN Xi³, TAO Jie³

(1. Kangni Research Institute of Mechanical & Electrical Industrial Technology, Nanjing Institute of Technology, Nanjing

211167, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

3. College of Materials and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: With the increasing speed of high-speed trains, especially when passing through tunnels or meeting cars, aerodynamic loads place higher demands on the strength characteristics of the skin structure. 3D hollow sandwich composite with thermoplastic aluminum alloy-glass fibre/polypropylene (Al-GF/PP) faceplate is a kind of sandwich material with fiber metal laminates as faceplate and 3D hollow composite as core material, which has the advantages of lightweight and high strength, sound and heat insulation, and can be used in the skin structure of high-speed train doors, skirts and so on. By comparing the performance of 3D hollow composites with different heights (10-25 mm) in flatwise compressive, edgewise compressive and flexural properties, it is found that the mechanical properties show a decreasing trend with the increase of the thickness, and the thicker 3D hollow composites have higher bending moments in the core and low structural stability. Aerodynamic load tests of 4 kPa,

收稿日期: 2023-11-10; 修回日期: 2024-02-20; 录用日期: 2024-02-24; 网络首发时间: 2024-03-20 16:11:18

网络首发地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20240306.002>

基金项目: 国家自然科学基金 (52305374; 52175327); 江苏省高等学校基础科学研究项目 (23KJB430020; 22KJA430006); 南京工程学院校级科研基金项目 (YKJ202226); 中国科协青年人才托举工程 (2021QNRC001)

National Natural Science Foundation of China (52305374; 52175327); Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institution of China (23KJB430020; 22KJA430006); University Research Foundation of Nanjing Institute of Technology (YKJ202226); Young Elite Scientists Sponsorship Program by CAST (2021QNRC001)

通信作者: 李华冠, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为超混杂复合材料及夹层结构设计制造技术 E-mail: lihuaguan@njit.edu.cn

引用格式: 林艳艳, 郭兴豪, 吴灿, 等. 气动载荷下 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的强度特性 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(10): 5315-5327.

LIN Yanyan, GUO Xinghao, WU Can, et al. Strength characterization of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate under aerodynamic load[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10): 5315-5327(in Chinese).

5 kPa, 6 kPa and 7 kPa were carried out on the 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate. The results show that when the "8" fibres are subjected to forces perpendicular to the faceplate, the weft fibres carry the main load, which help to reduce the displacement of the fibres in the loading direction. The highest loading stress is applied at the joint between the core and the upper panel, and the main displacement occurs on the loaded side of the structure, with maximum displacement values of 1.80 μm , 2.26 μm , 2.72 μm , and 3.19 μm , respectively, and the aerodynamic loading of this order of magnitude does not lead to macroscopic deformation and failure of the specimens.

Keywords: fiber metal laminates; 3D hollow composite; sandwich composite; aerodynamic load; strength characterization

高速列车制造业的技术创新对推动我国经济发展和工业现代化具有重要意义。随着高速列车运行速度的不断提高,其车门、裙板等蒙皮结构还需具备优异的抗冲击和耐疲劳性能^[1],并满足列车运行中更为苛刻的空气动力学设计要求^[2]。夹层复合材料因其显著的减重效果和突出的比强度、比刚度、隔热和隔声性能优势,已成为轨道交通领域的重要选材^[3]。其中,以纤维金属层板(FMLs)为面板的夹层复合材料具有耐疲劳、抗冲击特性。FMLs由金属薄板和纤维复合材料交替铺层,兼具金属和纤维两种材料的性能优势^[4-5]。相较于热固性树脂制备的FMLs而言,热塑性的FMLs具有更加优异的热变形性能,加工效率高且绿色可回收^[6-7]。热塑性铝合金-玻纤/聚丙烯(Aluminum/glass fiber/polypropylene, Al-GF/PP)层板具有较好的抗低速冲击性能^[8]。三维中空织物是由表层纵横向的玻璃纤维与Z方向的玻璃纤维整体编织而成,在结合树脂后形成三维中空复合材料。这种材料具有比传统夹层材料更强的抗分层性能和抗冲击性能^[9]。以Al-GF/PP层板为面板、三维中空复合复合材料为芯材的三明治夹层材料的力学性能优于相同面板结构的铝蜂窝材料^[10]。

由于列车与列车、列车与隧道、列车与地面的相对运动,产生了一系列特殊的空气动力效应^[11],如会车引起的压力波^[12]、列车通过隧道引起的空气动力效应^[13]以及连续地面效应所致的气动特性^[14]。列车高速通过隧道时主要承受振动载荷和气动载荷,振动载荷直接作用于车体框架和与其相连的面板上,而气动载荷则直接作用于车体表面。由于振动载荷对车体材料的强度影响不大^[15],本文仅对气动载荷下车体材料强度特性进行研究,高速列车通过隧道时,会引起车隧气动效应,隧道内剧变的压力波作用于车体表面将影响车体结构性能,严重时将危及列车的安全运行^[16]。

高速列车匀速通过隧道引起的空气动力学效

应已经吸引了众多研究者的关注,并进行了大量研究。中南大学轨道交通安全教育部重点实验室Han等^[17]研究了400 km/h和600 km/h的磁悬浮列车表面压力分布情况,发现其值大小与车速呈幂指数关系,列车底部测点的压力介于3.5 kPa和5.8 kPa之间。江苏恒神股份有限公司与青岛四方机车车辆股份有限公司共同研制了高速磁悬浮列车用碳纤维型腔结构裙板,模拟了气动载荷为7 kPa状态下的气密压力性能。有限元仿真及实验结果的应变值误差小于10%^[18]。西南交通大学牵引动力国家重点实验室徐世南等^[19]基于空气动力学理论,建立了列车在通过隧道时的分析模型并研究了不同运行速度下(200~400 km/h)列车车头、中间车和尾车底板的压力幅值。结果表明,在400 km/h下对应列车各部底板的最大压力值分别为4.63 kPa、4.45 kPa和4.51 kPa。兰州交通大学梅元贵教授团队^[20]分析了全时域列车进出隧道时的压力场分布,最高压力为5 kPa。因此,在材料设计过程中需考虑该等级的气动载荷对材料强度特性的影响。

本文根据《客车车体及其零部件的载荷》(UIC-566)^[21]和《铁路应用铁道车辆车体结构要求》(EN12663)^[22]标准中规定的6 kPa载荷工况,结合真空导流工艺及热模压工艺制备了Al-GF/PP面板-三维中空夹层复合材料。通过有限元模拟与实验的方法,分析气动载荷下Al-GF/PP面板-三维中空夹层复合材料的强度特性并揭示其增强机制。

1 三维中空复合材料的制备及力学性能

三维中空复合材料由江苏泰瑞斯新材料科技股份有限公司生产制造,编织厚度分别为10 mm、15 mm、20 mm和25 mm,其制备工艺如图1所示。

称量由玻璃纤维三维编织的中空织物质量,以其与树脂3:4的质量比计算树脂用量,按惠柏

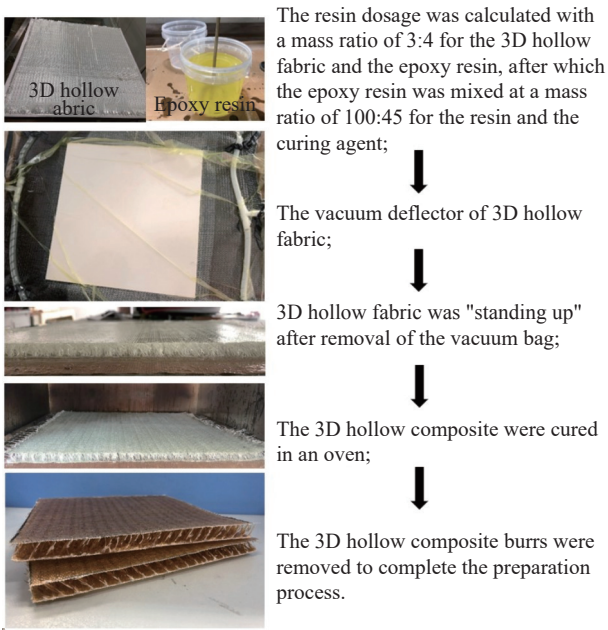


图1 三维中空复合材料的制备工艺流程

Fig. 1 Preparation process of 3D hollow sandwich composite

新材料科技股份有限公司推荐比例混合环氧树脂 (ML-8190)。

三维中空复合材料的真空导流工艺，如图2所示，在玻璃工作台上依次铺上脱模布、三维中空织物、导流网及真空袋膜。将导管铺设好后，用胶带将真空袋膜的四周封边。打开真空泵站系统，观察树脂的流动情况，当树脂遍布三维中空织物后关闭真空泵。

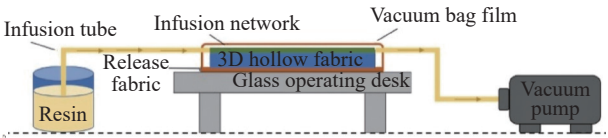


图2 三维中空复合材料真空导流工艺

Fig. 2 Vacuum diversion technology of 3D hollow sandwich composite

拆下真空袋膜和导流网，三维中空复合材料由于毛细作用自然“站立”。

在室温下固化 24 h 后，将试样放入烘箱。依据厂家提供的树脂固化工艺条件设置烘箱温度：一种是 195℃ 固化，随烘箱升温至 195℃ 后保温 3 h；另一种是阶梯固化，随烘箱依次升温至 60℃、100℃、150℃ 时各保温 0.5 h，最后升温至 195℃ 保温 2 h。

去除毛边，制备试样。夹层结构的平压实验依据标准 GB/T 1453—2005^[23]，试样长和宽尺寸为 60 mm，加载速率为 1 mm/min。每组 5 个试样。

夹层结构的平压强度计算如下式所示：

$$\sigma = \frac{P}{S} \tag{1}$$

其中： σ 为强度 (MPa)； P 为峰值载荷 (N)； S 为垂直于加载方向的截面积 (mm²)。

夹层结构侧压实验参照标准 GB/T 1454—2005^[24]，侧压实验试样厚度：宽度：长度比值为 1：4：6，加载速度为 2 mm/min。每组 5 个试样。夹层结构的侧压强度计算如下式所示：

$$\sigma = \frac{P}{bh} \tag{2}$$

其中： b 是试样宽度 (mm)； h 是试样厚度 (mm)。

参照标准 GB/T 1456—2005^[25] 进行夹层结构的弯曲性能实验，试样尺寸为 200 mm×60 mm，支座间跨距 160 mm，加载速度为 2 mm/min，每组 5 个试样。夹层结构的弯曲强度计算如下式所示 (标准 GB/T 8812.2—2007^[26])：

$$\sigma = 1.5P \frac{L}{bh^2} \tag{3}$$

其中， L 为支座间跨距。

图3是通过两种固化工艺制备的三维中空复合材料三点弯曲和平压性能，以编织厚度为 20 mm 三维中空复合材料为例。实验过程中，两种固化工艺下三维中空复合材料的失效形式并无显著区别。而从曲线可知，195℃ 固化试样的曲线比阶梯固化试样的曲线先达到最大载荷并失效。阶梯固化试样的压缩强度和弯曲强度分别比 195℃ 固化试样提高了 17.8% 和 21.3%。这是由于阶梯固化让树脂有预凝胶过程进行，有利于树脂充分反应；若直接 195℃ 固化会造成树脂在一定时间内急剧固化，可能引起树脂收缩甚至剧烈反应，导致树脂内气泡不能及时排除等因素，造致力学性能下降^[27]。

图4是本文制备的不同厚度的三维中空复合材料，由文献 [28] 可知，其纬向的性能优于经向的性能，因此本实验涉及的夹层复合材料矩形试样的长边为纬向铺层。此外，经 CAXA 软件测量，绒经与经纬向面板夹角约为 80°^[29]。

三维中空复合材料的试样厚度及面密度如表1所示。制备的试样厚度约为编织厚度的 80%~90%，三维中空织物经浸润树脂固化后，绒经由于“毛细作用”自动站立，上下面板被撑开而不是被外力拉开，这时的高度为实际厚度。三维中空复合材料的编织厚度为 10 mm 和 15 mm 时，

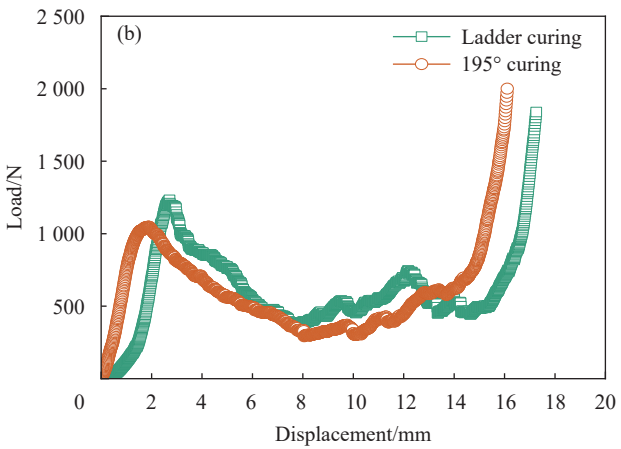
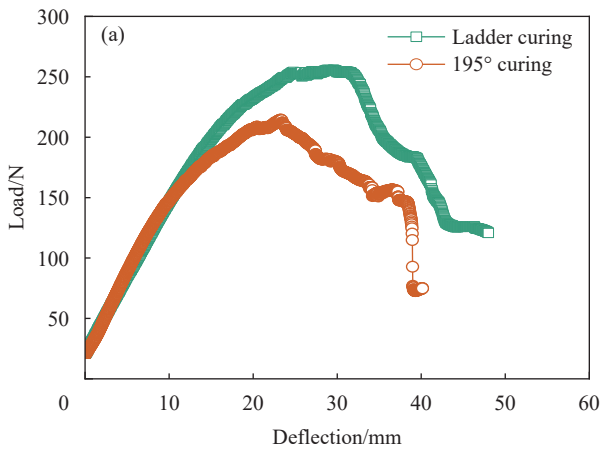


图3 固化工艺对三维中空复合材料力学性能的影响: (a) 弯曲性能; (b) 平压性能

Fig. 3 Effect of curing process on mechanical properties of 3D hollow sandwich composite: (a) Flexural properties; (b) Flatwise compressive properties

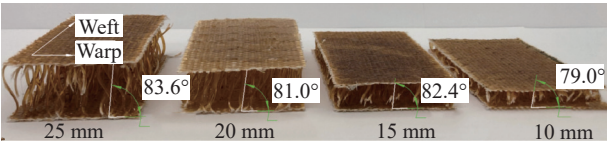


图4 三维中空复合材料试样

Fig. 4 3D hollow sandwich composite specimens

其面密度相近, 分别为 2.1 kg/m^2 和 2.2 kg/m^2 。当编织厚度增大时, 20 mm 和 25 mm 三维中空复合材料的面密度相近, 分别为 2.9 kg/m^2 和 3.0 kg/m^2 。

表1 三维中空复合材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of 3D hollow sandwich composite

Weave thickness/mm	Actual thickness/mm	Surface density/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$)
10	8.5	2.1
15	12.4	2.2
20	17.6	2.9
25	23.3	3.0

在平面压缩载荷下, 不同厚度三维中空复合材料的载荷-位移曲线如图 5(a) 所示, 整体变化趋势相同。以 10 mm 试样为例, 其压缩过程可分三阶段: “站立” 的玻璃纤维仅在拉直并处于张力的情况下才能承受载荷并发生塑性变形, 纤维中的环氧树脂在平面压缩过程中起着主要作用。因此, 三维中空复合材料的屈服实际取决于树脂的屈服性和延展性, 在树脂基体产生裂纹之前试样表现为线弹性, 即弹性变形阶段 (I); 当芯材发生屈服后, 载荷开始下降, “8” 形纤维发生压缩剪切耦合失效 (II)。该过程持续直至芯材完全失效, 当上下面板间距逐渐减小, “8” 形纤维被压实,

载荷最后呈上升趋势, 即密实阶段 (III)。可见, 编织厚度较小的三维中空复合材料具有较高的最大平压载荷, 这归因于较厚的三维中空复合材料中芯材的弯矩较大, 从而导致较低的承载能力^[30]。尽管三维中空复合材料由脆性的玻璃纤维制成, 但整体在受压状态下具有延展性。如图 5(b) 所示, 三维中空复合材料卸载后具有回弹现象^[31], 回弹后试样中的 “8” 形纤维与面板的夹角减小, 其根部出现泛白现象, 这是树脂失效的主要形式。平压失效最终表现为 “8” 形纤维芯材完全压溃失效^[32]。

三维中空复合材料在三点击弯作用下的载荷-位移曲线如图 6(a) 所示, 在达到最大载荷之前, 曲线呈线性增长。当芯材由于剪切力和下压力的作用开始失效后, 曲线开始垂直下降, 随后保持在较低的一个载荷值。结果表明, 随着试样厚度的增大, 试样的刚度呈下降趋势, 最大弯曲载荷呈上升趋势。弯曲失效主要表现为整体结构不对称变形。

三维中空复合材料侧压载荷-位移曲线如图 6(b) 所示, 曲线从平缓上升到线性增加, 当达到最大载荷后, 由于面板的断裂褶皱及芯材与面板之间断裂导致曲线下降。随着厚度的增加, 试样可承受的最大载荷呈下降趋势, 这是由于芯材高度增加后, 结构稳定性降低, “8” 形纤维的根部易出现以面板为支点的塑性转动而导致结构整体失效, 表现为结构的宏观屈曲。

图 7 是厚度对三维中空复合材料力学性能的影响。结果表明, 随着厚度增加, 三维中空复合材料的力学性能呈下降的趋势。当其厚度为 10 mm 时, 最大平压强度、弯曲强度和侧压强度

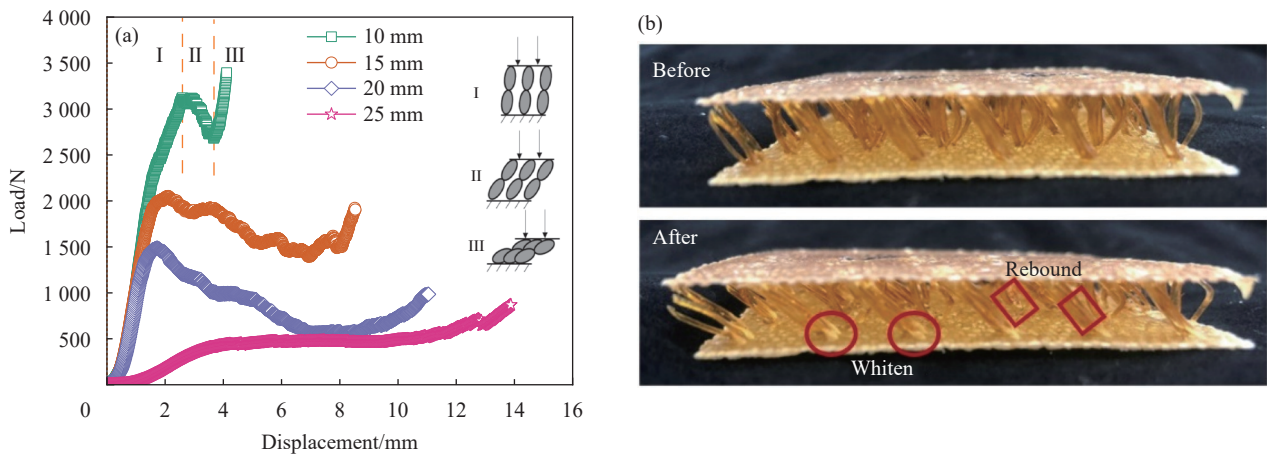


图 5 三维中空复合材料典型平压载荷-位移曲线 (a) 和典型失效形式 (b)

Fig. 5 Typical flatwise compressive load-displacement curves (a) and typical failure modes (b) of 3D hollow sandwich composite

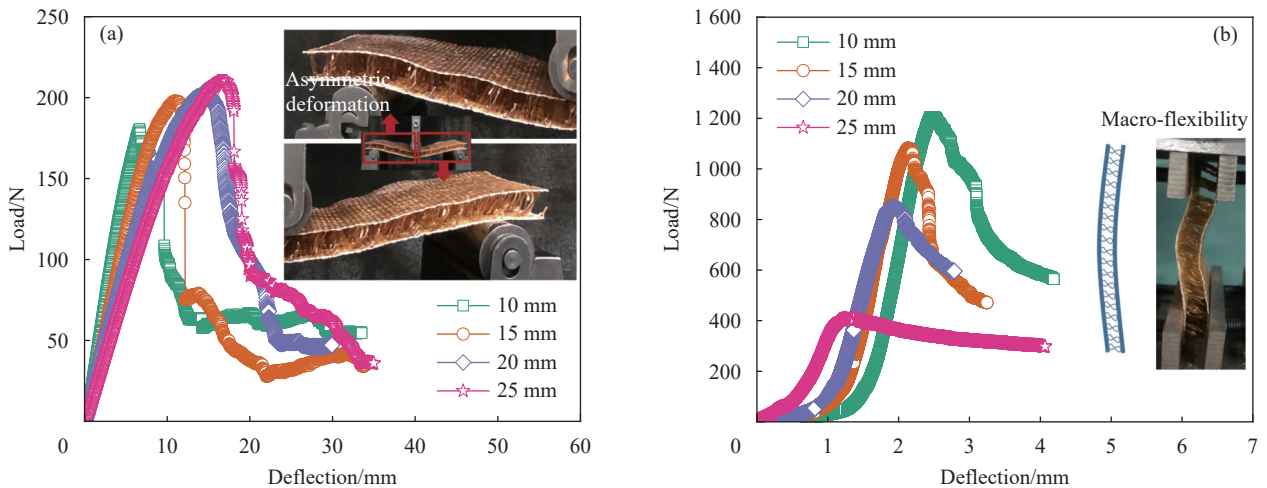


图 6 三维中空复合材料弯曲 (a) 和侧压 (b) 实验结果

Fig. 6 Typical flexural (a) and edgewise compressive (b) results of 3D hollow sandwich composite

分别为 0.84 MPa、11.20 MPa 和 3.40 MPa。

2 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料有限元模拟及分析

Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的全尺寸几何模型为 300 mm×300 mm，为了提高运算效率，故利用该模型的对称性，选取其 1/25 模型作为代表性单元 (60 mm×60 mm) 进行有限元模拟分析 (FEM)，即为三维中空复合材料的平压模型，以简化计算。与实际编织面板结构不同的是，本文采用等效的三维实体模型模拟三维中空复合材料的上下编织面板，故无需增加 Al-GF/PP 层板模型。简化后的有限元仿真模型如图 8 所示。

首先，基于 Grosberg 提出的弹性细杆模型^[33]，通过 Pro-E 和 ABAQUS/Explicit 建立了三维中空复合材料的有限元法模型。依据三维中空复合材料

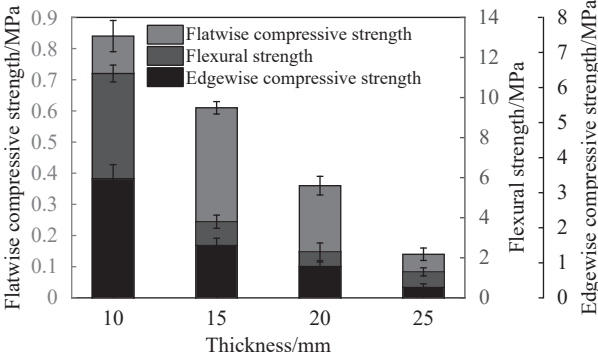


图 7 厚度对三维中空复合材料力学性能的影响

Fig. 7 Effect of thickness on mechanical properties of 3D hollow sandwich composite

的实际测量形状，假设单个“8”形纤维为两条空间正弦曲线构成。其方程为 $x=A\sin(wz)$ ，芯材的振幅 A 由绒经的送经量确定， $w=2\pi/h$ ， h 为芯材高度；纬向的构型为一斜直线段，其方程如下式

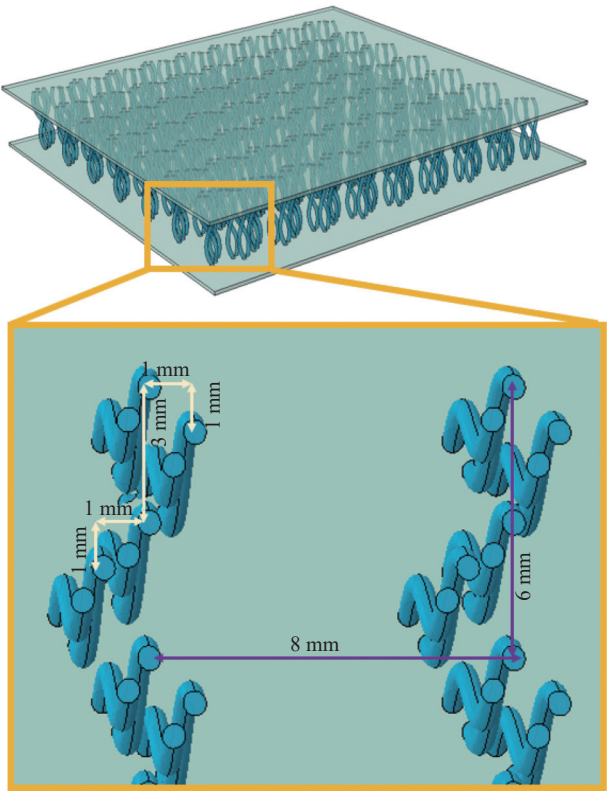


图8 Al-GF/PP 面板-三维中空复合材料模型参数
Fig.8 Model parameters of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate

所示：

$$\frac{y}{h \cot \theta} + \frac{z}{h} = 1 \tag{4}$$

依据其对应单束绒经的参数化方程(表2)建立单根空间正弦曲线。随后，通过坐标变化将两条单束绒经组成“8”形结构。接着，根据实际测量间距将4个“8”形结构组成一个阵列单元，分别在经向、纬向以6 mm和8 mm的间隔阵列。其中，绒经与经纬向面板夹角为80°。最后，在阵列的结构上下表面加上薄面板，假设薄面板为各向同性材料。薄面板与阵列结构均采用SC8R壳单元建模，二者之间采用“Tie”约束，具体材料参数如表3所示^[34]。在试样一侧分别施加4 kPa、5 kPa、6 kPa和7 kPa的压力，另一侧完全固定(U1=U2=U3=UR1=UR2=UR3，U1=U2=U3代表材料在X、Y、Z这3个方向上的位移均为0，即材料不发生位移；UR1=UR2=UR3代表材料在X、Y、Z这3个方向上的转角均为0°，即材料不发生旋转)^[35]。

图9(a)是三维中空复合材料平压后的失效应力云图，可见，“8”形纤维层起主要承载作用，

表2 Al-GF/PP 面板-三维中空复合材料有限元 (FEM) 建模参数

Table 2 Finite element method (FEM) parameters of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate		
Hight <i>h</i> /mm	Faceplate thickness <i>h_f</i> /mm	Curve equation (Bundle diameter of fiber is 0.5 mm)
8.5	0.5	$x = 0.8 \sin(360t)$
		$y = 1.76(1 - t)$
		$z = 10t$

表3 Al-GF/PP 面板-三维中空复合材料 FEM 参数

Table 3 FEM parameters of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate		
Parameter	Faceplate	Core
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	1.4×10^{-9}	2.1×10^{-9}
E_1/MPa	11 230	16 560
E_2/MPa	14 670	4 750
ν_{12}	0.151	0.334
G_{12}/MPa	1 660	1 730
G_{13}/MPa	4 780	2 120
G_{23}/MPa	4 780	2 120

Notes: ρ —Densities; E —Young’s modulus; ν_{12} —Poisson’s ratio; G_{12} , G_{13} , G_{23} —Shear modulus; 1—Fiber direction; 2 and 3—Two normal directions of the fiber.

应力值比面层的大一个数量级。在面层结构中，其与“8”形纤维层相连的部位承受主要载荷，上面层比下面层的应力大。图9(b)为“8”形纤维层的失效过程，“8”形纤维层从“站立”状态逐渐被压弯，直至密实。因此，本文建立的三维中空复合材料力学性能有限元模型对结构失效模式的预测具有可靠性，可用于Al-GF/PP面板-三维中空夹层复合材料的有限元建模中。

加载气动载荷后的模型窗口如图10(a)所示，对于简单的几何外形，ABAQUS将气动载荷通过节点约束法进行几何匹配至各个单元，可满足本文气动载荷下材料层面的分析^[36]。图10(b)是在模型表面分别施加4 kPa、5 kPa、6 kPa和7 kPa的气动载荷后，结构的位移云图。可见，芯材与上面板连接处的载荷应力最大，位移主要是出现于结构靠近受压的一侧，最大位移值分别为1.80 μm、2.26 μm、2.72 μm和3.19 μm。对于结构的整体变形而言，该数量级的气动载荷不会导致试样出现宏观的变形失效。

图11为“8”形纤维在压向的位移情况，均在微米数量级。经网格划分后的纤维如图11(a)所示，从上到下依次标注为点“1”~点“9”。在4种压力下点“1”的压向位移量最大，且随着压力的增加，位移量呈增大趋势(图11(b)~11(e))。点“2”和点“3”的应力变化趋势与点“1”相同，

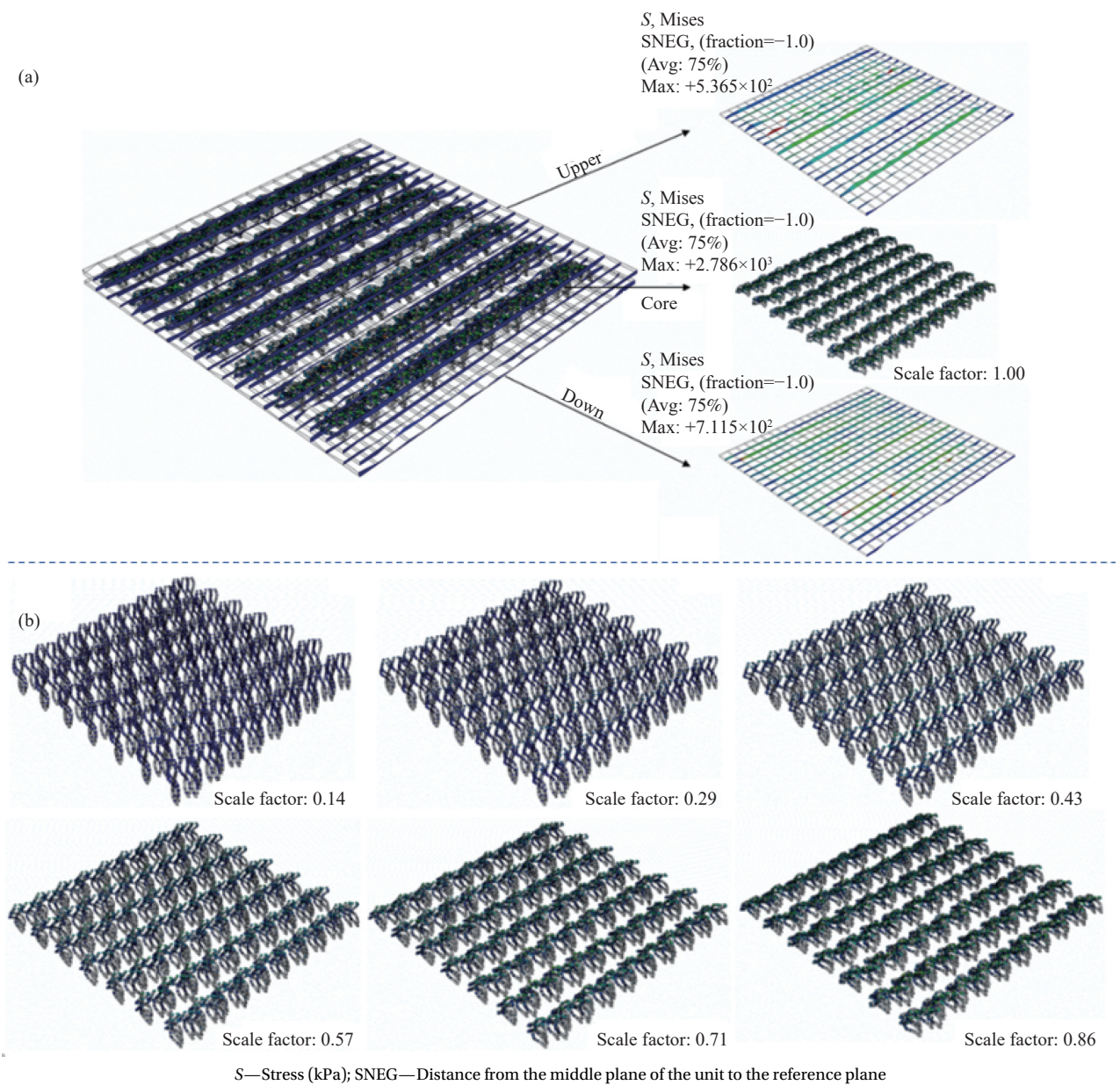


图9 Al-GF/PP 面板-三维中空复合材料平压实验应力云图 (a) 及芯层失效过程 (b)

可见,“8”形纤维靠近受压侧面板(上面板)的变形较大,这与前文结果一致。而自点“4”和点“5”开始,其位移量随压力变化的增长幅度呈现减小趋势。点“6”为“8”形纤维的中间位置,其位移量约为点“1”位移量的1/3。与以上点位的位移量相比,“8”形纤维靠近试样下面板的位移量(点“7”~点“9”)较小。因此,在实际应用中,需重点关注“8”形纤维靠近受载侧的位移量。

图12为“8”形纤维在不同压力下的应力分布情况,包含 S_{11} (纬向)、 S_{22} (压向)和 S_{12} (经向)。

S_{11} 的应力最大,对应于4 kPa、5 kPa、6 kPa和7 kPa的气动载荷,最大应力分别为1.56 N、1.95 N、2.34 N和2.74 N,远小于“8”形纤维的失效载荷。 S_{22} 在不同压力下所对应的最大应力仅为 S_{11} 的0.54倍,可见,“8”形纤维在纬向的应力大于其受加载方向的应力。换言之,“8”形纤维在承受垂直于面板方向的作用力时,纬向承受主要载荷,有利于减小其在加载方向的位移量。可预测,若压力持续增大,达到“8”形纤维的失效载荷,其在纬向将发生变形。而据上文分析可知,“8”形纤维根部(靠近试样下面板)位移量

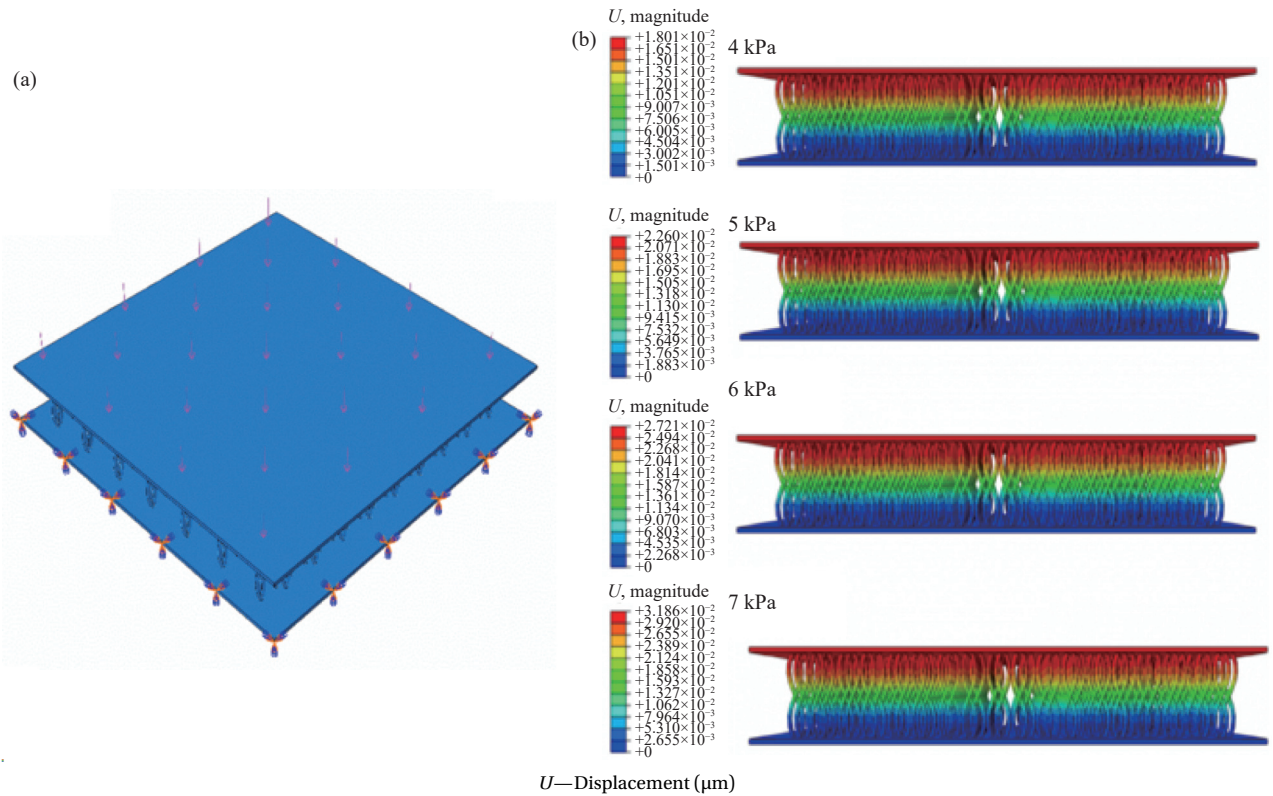


图 10 气动载荷下 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的强度分析: (a) 模型; (b) 在施压后的位移云图

Fig. 10 Strength analysis of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate based on aerodynamic effects: (a) Finite element model; (b) Displacement cloud image after pressure

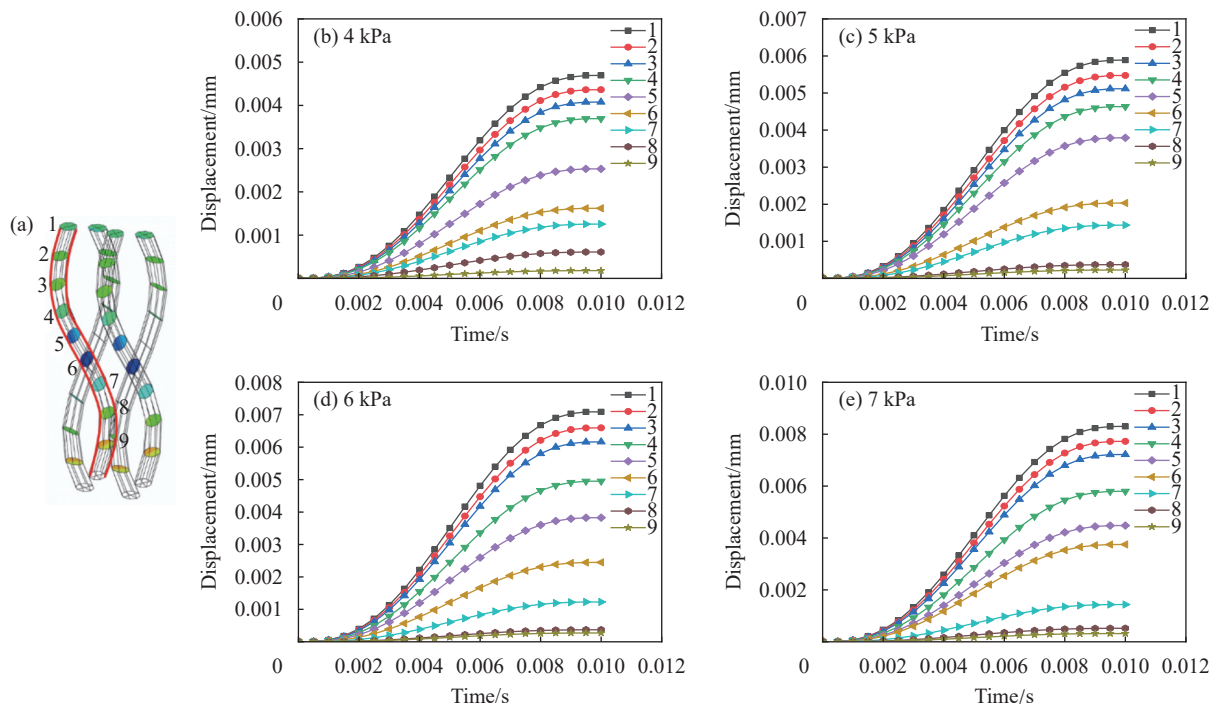


图 11 “8”形纤维在压向的位移情况: (a) “8”形纤维代表点示意图; 4 kPa (b)、5 kPa (c)、6 kPa (d)、7 kPa (e) 的各点压向位移

Fig. 11 Displacement of the "8" shape fiber in the pressure direction: (a) Schematic diagram of "8" shaped fibers representing points; Displacement at each point of 4 kPa (b), 5 kPa (c), 6 kPa (d), 7 kPa (e)

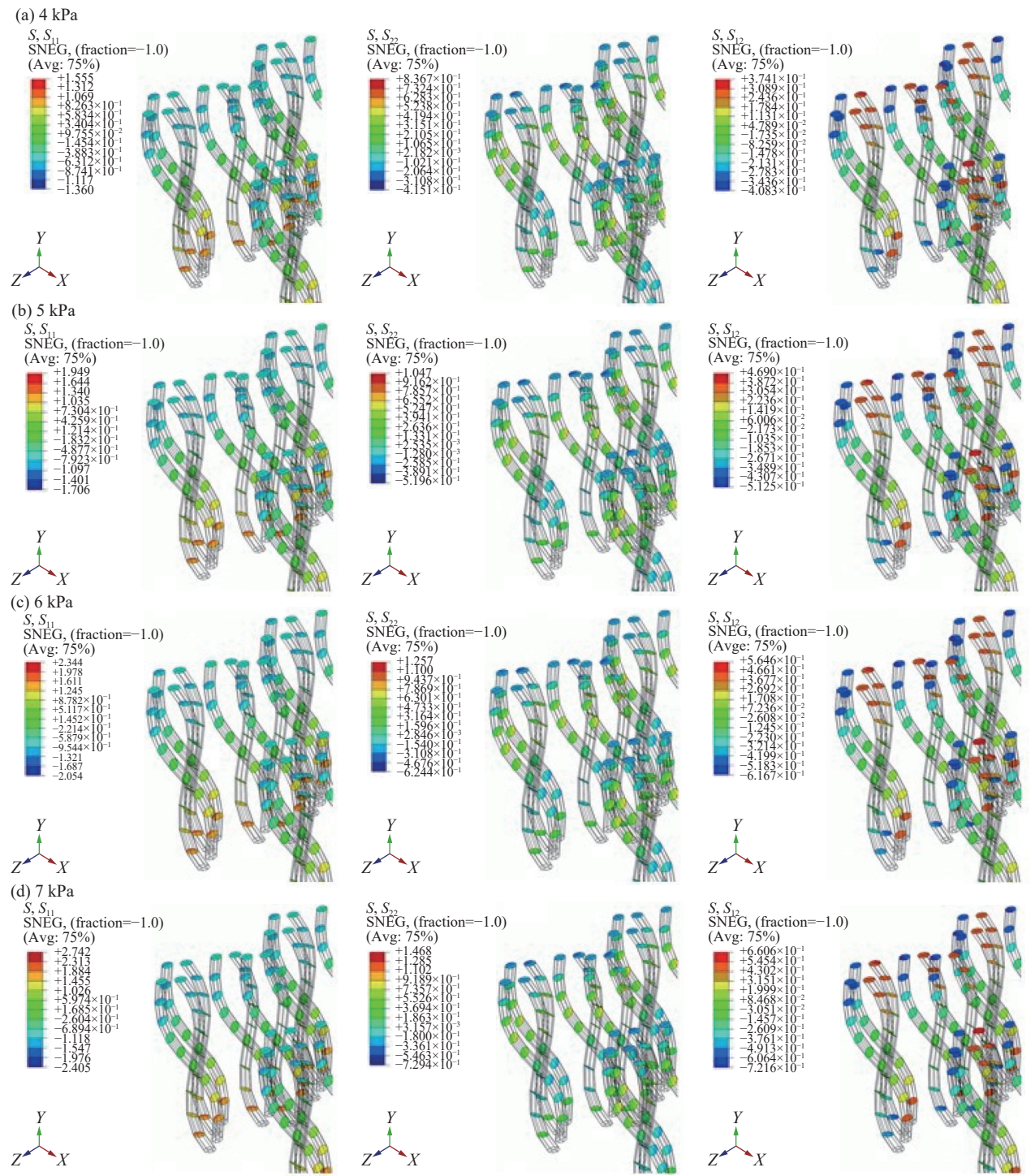


图 12 “8”形纤维在不同压力下的应力

Fig. 12 Stress of "8" shaped fibers under different pressures

非常小，结合三维中空复合材料弯曲性能的失效结果，“8”形纤维将以根部为支点，发生纬向的塑性转动。

综上，对于 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料而言，4 kPa、5 kPa、6 kPa 和 7 kPa 的气动载荷不能引起试样宏观变形失效。下文将结合气

动载荷测试，验证 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的强度特性。

3 气动载荷下 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的强度测试

Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的上下面

板为 Al-GF/PP 层板，芯材为 10 mm 厚的三维中空复合材料。研究表明，面板中的玻璃纤维增强聚丙烯层与三维中空复合材料芯层粘接，其粘接性能优于铝合金和三维中空复合材料芯层粘接的结果^[37]。Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料试样按图 13 所示铺层，制备工艺为热模压法。首先，将脱模布包裹的试样水平置于 XLB-400 平板硫化机（青岛锦九洲橡胶机械有限公司）中，固化温度和固化压力分别为 180℃、0.8 MPa，保温保压 10 min。停止加热后，试样在模具中自然冷却至 80℃。随后，将 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料取出，空气冷却至室温。

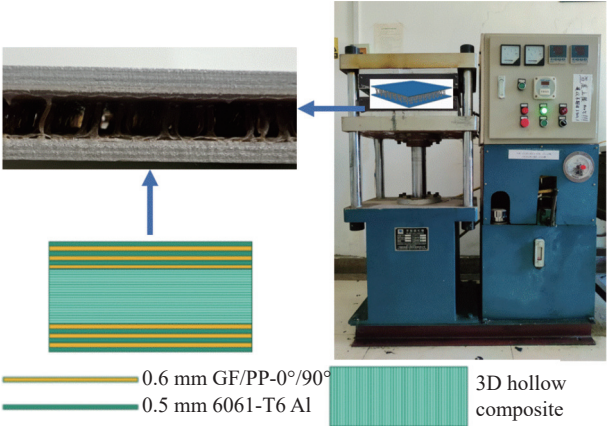


图 13 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的铺层结构及制备工艺
Fig. 13 Layup and preparation process of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate

根据《客车车体及其零部件的载荷》(UIC-566)的要求，对气动载荷下 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的强度特性进行测试评价。试样尺寸为 300 mm×300 mm，分别标记 A、B 两面(图 14(a))，其实验安装示意图如图 14(b)所示，将试样固定在密封工装上，利用工装对试样进行加压，用位移传感器测量结构的变形情况。用气泵分别对 A、B 两面施加 4 kPa 的压力，5 min 后卸载，观察

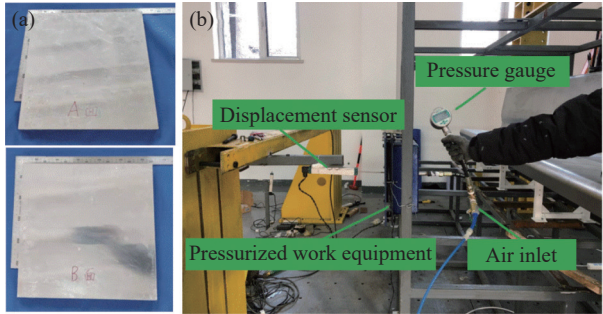


图 14 (a) Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料试样；
(b) 实验安装示意图

Fig. 14 (a) Strength experiment of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate; (b) Experimental installation diagram

位移传感器的数值变化情况。再将压力调至 6 kPa，同样是 5 min 后观察位移传感器的数值变化情况。

位移传感器的值在分别施加 4 kPa 和 6 kPa 后未出现变化。A 面测试时位移传感器的值保持在 104.3 mm (图 15)，B 面测试时位移传感器的值保持在 100.1 mm (图 16)。在加载过程中，未出现明显异响及芯材纤维断裂的声音。

图 17 是经过气动载荷试验后 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料的超声 C 扫结果。可见，

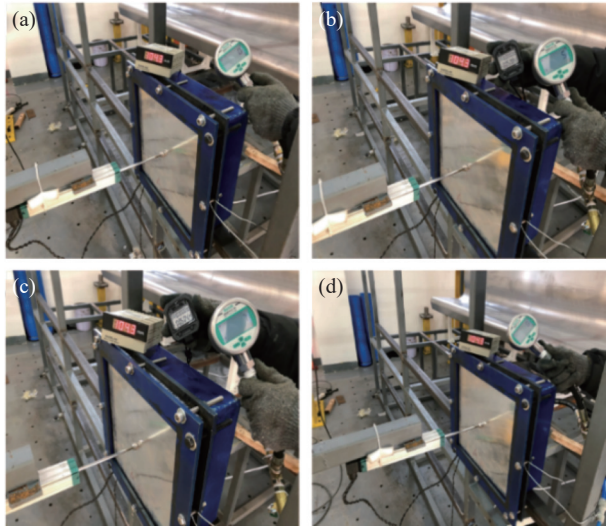


图 15 对 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料 A 面施压前后：
(a) 施加前；(b) 施加 4 kPa；(c) 施加 6 kPa；(d) 施加后
Fig. 15 A side of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate before and after application: (a) Before application; (b) Apply 4 kPa; (c) Apply 6 kPa; (d) After application

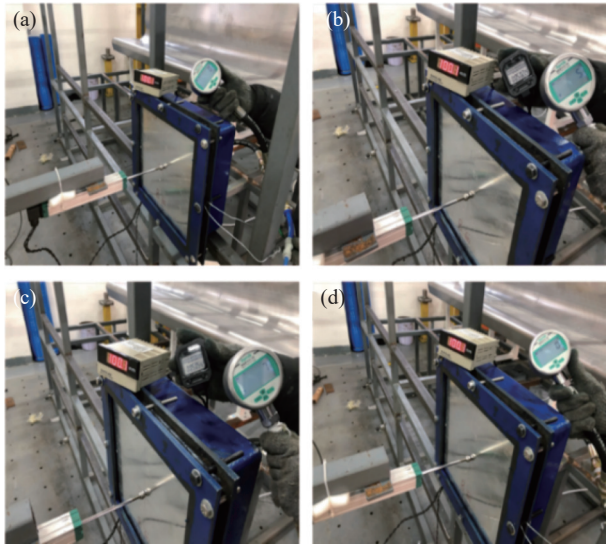


图 16 对 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料 B 面施压前后：
(a) 施加前；(b) 施加 4 kPa；(c) 施加 6 kPa；(d) 施加后
Fig. 16 B side of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate before and after application: (a) Before application; (b) Apply 4 kPa; (c) Apply 6 kPa; (d) After application

信号没有明显的减弱，这表明该夹层结构的 Al-GF/PP 面板及其与芯材的界面没有明显的分层、脱粘等缺陷。Al-GF/PP 面板在测试前后均未出现分层现象，可见经过等离子表面处理后的纤维金属界面层间结合强度高且结构稳定性好^[38]。因此，本文制备的 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料满足 UIC-566 的要求。

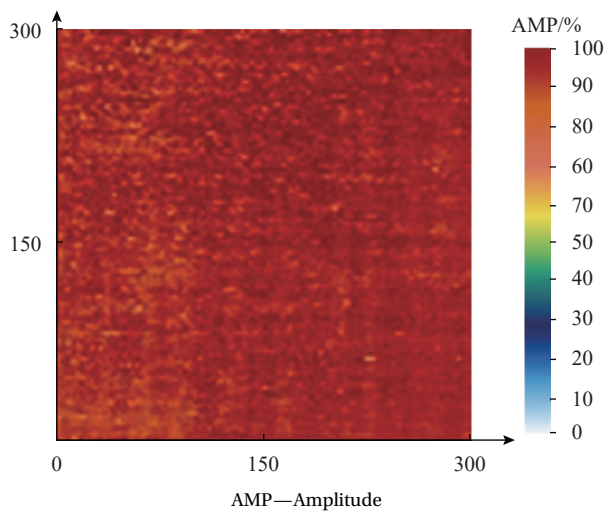


图 17 经过气动载荷试验后 Al-GF/PP 面板-三维中空夹层复合材料超声 C 扫结果

Fig. 17 Ultrasonic C-scan results of 3D hollow sandwich composite with Al-GF/PP faceplate after aerodynamic load

4 结论

(1) 随着厚度 (10~25 mm) 增加，三维中空复合材料的平压、侧压和弯曲性能均呈下降趋势。当厚度为 10 mm 时，最大平压强度、弯曲强度和侧压强度分别为 0.84 MPa、11.20 MPa 和 3.40 MPa。而较厚的三维中空复合材料芯材弯矩较大，结构稳定性低。

(2) 当“8”形纤维在承受垂直于面板方向的作用力时，纬向承担了主要载荷，这有助于减小其在加载方向的位移量。若压力持续增大，达到“8”形纤维的失效载荷，其在纬向将发生变形。“8”形纤维将以根部为支点，发生纬向的塑性转动。

(3) 对铝合金-玻纤/聚丙烯 (Al-GF/PP) 面板-三维中空夹层复合材料进行 4 kPa、5 kPa、6 kPa、7 kPa 的气动载荷测试。芯材与上面板连接处的载荷应力最大，位移主要出现于结构的受载侧，最大位移值分别为 1.80 μm、2.26 μm、2.72 μm 和 3.19 μm，该数量级的气动载荷不会导致试样出现宏观的变形失效。

参考文献：

[1] ÖNDER A, ROBINSON M. Investigating the feasibility of a new testing method for GFRP/polymer foam sandwich composites used in railway passenger vehicles[J]. *Composite Structures*, 2020, 233: 111576.

[2] LI X, WU Z, YANG J, et al. Experimental study on transient pressure induced by high-speed train passing through an underground station with adjoining tunnels[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2022, 224: 104984.

[3] WANG H, SHAO J, ZHANG W, et al. Three-point bending response and energy absorption of novel sandwich beams with combined reentrant double-arrow auxetic honeycomb cores[J]. *Composite Structures*, 2023, 326: 117606.

[4] 陶杰, 李华冠, 潘蕾, 等. 纤维金属层板的研究与发展趋势 [J]. 南京航空航天大学学报, 2015, 7(5): 626-636.

TAO Jie, LI Huaguan, PAN Lei, et al. Research and development trend of fiber metal laminates[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2015, 7(5): 626-636 (in Chinese).

[5] 马威, 管海陆, 张晓琼, 等. 碳纤维/不锈钢极薄带纤维金属层板制备工艺及其弯曲性能 [J]. 复合材料学报, 2024, 41(2): 1047-1057.

MA Wei, GUAN Hailu, ZHANG Xiaoqiong, et al. Preparation process and bending properties of carbon fiber/stainless steel ultra-thin strip fiber metal laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2024, 41(2): 1047-1057(in Chinese).

[6] 亓昌, 付利荣, 刘海涛, 等. 热塑性纤维金属层板抗冲击性能研究与优化 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2023, 37(4): 115-122.

QI Chang, FU Lirong, LIU Haitao, et al. Research and optimization of impact resistance of thermoplastic fiber metal laminates[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2023, 37(4): 115-122(in Chinese).

[7] ZHOU H, ZHENG C, LU A, et al. An experimental study of the effects of degrees of confinement on the response of thermoplastic fibre-metal laminates subjected to blast loading[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 192: 111125.

[8] LIN Y Y, LI H G, ZHANG Z W, et al. Low-velocity impact resistance of Al/GF/PP laminates with different interface performance[J]. *Polymers*, 2021, 13(24): 4416.

[9] PENG J, CAI D, ZHANG N, et al. Experimental investigation on mechanical behavior of 3D integrated woven spacer composites under quasi-static indentation and compression after indentation: Effect of indenter shapes[J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 182: 110213.

[10] LIN Y Y, LI H G, KUANG N, et al. Experimental and

- numerical research on flexural behavior of fiber metal laminate sandwich composite structures with 3D woven hollow integrated core[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2022, 24: 1790-1807.
- [11] TIAN H. Review of research on high-speed railway aerodynamics in China[J]. *Transportation Safety and Environment*, 2019, 1: 1-21.
- [12] CHEN Y, WU Q. Study on unsteady aerodynamic characteristics of two trains passing by each other in the open air[J]. *Journal of Vibro Engineering*, 2018, 20(2): 1161-1178.
- [13] XIONG X, ZHU L, ZHANG J, et al. Field measurements of the interior and exterior aerodynamic pressure induced by a metro train passing through a tunnel[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 53: 101928.
- [14] SAKUMA Y, PAIDOUSSIS M, PRICE S. Effect of boundary layer development on the dynamics of trains and train-like articulated systems travelling in confined fluid[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2014, 126: 38-47.
- [15] 张忆宁. 动车组碳纤维增强复合材料设备舱强度研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
- ZHANG Yining. Research on strength of carbon fiber reinforced composite equipment compartment of EMU[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020(in Chinese).
- [16] 王英学, 高波, 任文强. 高速铁路隧道缓冲结构气动载荷与结构应力特性分析 [J]. *力学学报*, 2017, 49(1): 48-54.
- WANG Yingxue, GAO Bo, REN Wenqiang. Aerodynamic load and structure stress analysis on hood of high-speed railway tunnel[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2017, 49(1): 48-54(in Chinese).
- [17] HAN S, ZHANG J, XIONG X, et al. Influence of high-speed maglev train speed on tunnel aerodynamic effects[J]. *Building and Environment*, 2022, 223: 109460.
- [18] 仇亚萍, 沈真, 陈海军, 等. 高速磁悬浮列车用碳纤维复合材料裙板的设计与分析 [J]. *复合材料科学与工程*, 2021(2): 95-101.
- QIU Yaping, SHEN Zhen, CHEN Haijun, et al. Design and analysis of carbon fiber composite skirt plate for high-speed maglev train[J]. *Composite Science and Engineering*, 2021(2): 95-101(in Chinese).
- [19] 徐世南, 张继业, 李田, 等. 高速列车过隧道时底板压力分析 [J]. *计算机辅助工程*, 2015, 24(4): 28-38.
- XU Shinan, ZHANG Jiye, LI Tian, et al. Analysis of floor pressure of high-speed train passing through tunnel[J]. *Computer Aided Engineering*, 2015, 24(4): 28-38(in Chinese).
- [20] 梅元贵, 李绵辉, 郭瑞. 高速铁路隧道内列车交会压力波气动载荷分布特性 [J]. *中国铁道科学*, 2019, 40(6): 60-67.
- MEI Yuangui, LI Mianhui, GUO Rui. Aerodynamic load distribution characteristics of pressure wave when trains passing each other in high-speed railway tunnel[J]. *China Railway Science*, 2019, 40(6): 60-67(in Chinese).
- [21] International Union of Railways. Loadings of coach bodies and their components: UIC 566—1990[S]. Paris: International Union of Railways, 1990.
- [22] European Committee for Standardization. Railway applications—Structural requirements of railway vehicle bodies: DIN EN 12663: 2000[S]. Berlin: German Institute for Standardization, 2000.
- [23] 中国国家标准化管理委员会. 夹层结构或芯子平压性能试验方法: GB/T 1453—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for flat compressive properties of sandwich structures or cores: GB/T 1453—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005(in Chinese).
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 夹层结构侧压强度试验方法: GB/T 1454—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for edgewise compressive strength of sandwich structures: GB/T 1454—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005(in Chinese).
- [25] 中国国家标准化管理委员会. 夹层结构弯曲性能试验方法: GB/T 1456—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Test method for flexural properties of sandwich structures: GB/T 1456—2005[S]. Beijing: China Standards Press, 2005(in Chinese).
- [26] 中国国家标准化管理委员会. 硬质泡沫塑料弯曲性能的测定 第 2 部分: 弯曲强度和表观弯曲弹性模量的测定: GB/T 8812.2—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of flexural properties of rigid cellular plastics second parts: Determination of flexural strength and apparent flexural modulus of elasticity: GB/T 8812.2—2007[S]. Beijing: China Standards Press, 2007(in Chinese).
- [27] QI Z, TAN Y, LI G, et al. Effects of hyperbranched polyamide functionalized graphene oxide on curing behavior and mechanical properties of epoxy composites[J]. *Polymer Testing*, 2018, 71: 145-155.
- [28] SADIGHI M, HOSSEINI S A. Finite element simulation and experimental study on mechanical behavior of 3D woven glass fiber composite sandwich panels[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 55: 158-166.
- [29] AMOYI DIZAJI R, YAZDANI M, ALIFHOLIZADEH E, et al. Effect of 3D-woven glass fabric and nanoparticles incorporation on impact energy absorption of GLARE compo-

sites[J]. *Polymer Composite*, 2018, 39(10): 3528-3536.

[30] 李华冠, 丁颖, 章月, 等. 玻璃纤维立体织物增强环氧树脂泡沫夹层复合材料的制备及力学性能 [J]. *复合材料学报*, 2023, 40(1): 601-612.

LI Huaguan, DING Yin, ZHANG Yue, et al. Preparation and mechanical properties of glass fiber stereoscopic fabric reinforced epoxy resin foam sandwich composite[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2023, 40(1): 601-612(in Chinese).

[31] CAO Y, QING Y, LI Y, et al. 3D integrated hollow light-weight E-glass fiber reinforced epoxy composites with excellent electromagnetic wave absorption and thermal insulation[J]. *Composites Science and Technology*, 2023, 235: 109967.

[32] 王狄辉, 周光明, 刘畅, 等. 整体中空夹层复合材料平压性能的实验 [J]. *工程塑料应用*, 2016, 44(10): 90-93.

WANG Dihui, ZHOU Guangming, LIU Chang, et al. Experimental study on flat compression properties of monolithic hollow sandwich composites[J]. *Application of Engineering Plastics*, 2016, 44(10): 90-93(in Chinese).

[33] ZHANG J, JIANG G. Parametric modeling of three-dimensional geometry of warp-knitted loop based on variation of process parameters[J]. *The Journal of the Textile Institute*, 2018, 1: 2-5.

[34] 钟志珊. 整体中空夹层复合材料力学性能研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.

ZHONG Zhishan. Investigation on mechanical property of hollow integrated sandwich composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007(in Chinese).

[35] WU T, ZHANG C, GUO X. Dynamic responses of monopile offshore wind turbines in cold sea regions: Ice and aerodynamic loads with soil-structure interaction[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 292: 116536.

[36] TANG J, ZHOU Z, CHEN H, et al. Research on the light-weight design of GFRP fabric pultrusion panels for railway vehicle[J]. *Composite Structures*, 2022, 286: 115221.

[37] LIU C, ZHANG Y, HESLEHURST R. Impact resistance and bonding capability of sandwich panels with fibre-metal laminate skins and aluminium foam core[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2014, 28(24): 2378-2392.

[38] LIN Y Y, LI H G, WANG Q L T, et al. Effect of plasma surface treatment of aluminum alloy sheet on the properties of Al/GF/PP laminates[J]. *Applied Surface Science*, 2020, 507: 145062.