

以铝蜂窝为夹芯的玻璃纤维增强复合材料 夹层结构弯曲性能研究

刘成伟¹ 高晓平^{1,2} 王曦远³ 杜培健¹ 韩子安¹ 高铭泽¹ 张佳润¹ 杨金伟¹

1. 内蒙古工业大学 轻工与纺织学院, 内蒙古 呼和浩特 010080;

2. 包头轻工职业技术学院, 内蒙古 包头 014000;

3. 鄂尔多斯市公安局交通管理支队, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要:针对汽车结构的轻量化,探究夹层复合材料的三点弯曲失效行为、载荷-位移特性及能量吸收特性。该夹层结构由2层玻璃纤维增强树脂复合材料面板与1层铝蜂窝芯层构成,研究铝蜂窝边长、壁厚和芯层高度对材料弯曲峰值载荷与能量吸收性能的影响,进而明确材料在铝蜂窝纵向(L)和横向(W)能量吸收特性的差异。研究表明:随着铝蜂窝芯层高度的增加,试样的弯曲峰值载荷和总能量吸收能力均有所提升,芯层高度由5 mm提高到15 mm时,试样沿纵向和横向弯曲峰值载荷分别提高60.55%和88.77%,但芯层过高易引发材料的局部屈曲;铝蜂窝边长减小可提高芯体支撑刚度,增强抗弯性能与能量吸收效率;在相同参数下,纵向试样的能量吸收总量和峰值载荷均优于横向成型试样,其破坏过程表现为更稳定的渐进压溃,而横向试样易发生剪切失效。

关键词: 夹层结构;玻璃纤维增强复合材料;三点弯曲;弯曲刚度

中图分类号:TB332

文献标志码:A

文章编号:1004-7093(2025)08-0025-10

Research on bending behavior of glass fibers reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb core

Liu Chengwei¹, Gao Xiaoping^{1,2}, Wang Xiyuan³, Du Peijian¹, Han Zian¹, Gao Mingze¹,
Zhang Jiarun¹, Yang Jinwei¹

1. College of Light Industry & Textiles, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, Inner Mongolia, China;

2. Baotou Light Industry Vocational Technical College, Baotou 014000, Inner Mongolia, China;

3. Ordos Public Security Bureau Traffic Management Detachment, Ordos 017000, Inner Mongolia, China

Abstract: The lightweight design of automotive structures has been investigated by examining the three-point bending failure behavior, load-displacement characteristics, and energy absorption properties of sandwich composite. The sandwich structure consists of two glass fiber reinforced epoxy composite panels and an aluminum honeycomb core. By studying the effects of aluminum honeycomb side lengths, wall thickness and core thickness on the bending peak load and energy absorption performance of the material were analyzed. Furthermore, the differences in energy absorption

基金项目:国家自然科学基金项目(12362012);内蒙古自治区高校创新科研团队计划(NMGIRT2402);内蒙古高等学校基础 Research 计划基金(JY20230103)

收稿日期:2025-04-20

作者简介:刘成伟,男,1998年生,在读硕士研究生,主要研究方向为蜂窝夹层复合材料制备与力学性能研究,20221800485@imut.edu.cn

通信作者:高晓平,教授,gaoxp@imut.edu.cn

characteristics between the longitudinal (L) and transverse (W) directions of the honeycomb were clarified. The study revealed that increasing the aluminum honeycomb core thicknesses enhances both the bending peak load and total energy absorption capacity of the specimens. When the core thicknesses was raised from 5 mm to 15 mm, the peak bending loads in the longitudinal and transverse directions increased by 60.55% and 88.77%, respectively. However, excessively high core thicknesses are prone to induce local buckling. Reducing the aluminum honeycomb side lengths improves the core support stiffness, thereby enhancing both bending resistance and energy absorption efficiency. Under identical parameters, specimens fabricated in the longitudinal exhibited superior total energy absorption and peak load compared to those in the transverse, and its failure process shows a more stable progressive crushing, while the transverse sample is prone to shear failure.

Keywords: sandwich structures; glass fiber reinforced composite; three-point bending; bending stiffness

在当前全球能源危机和环境问题日益严峻的背景下,发展轻量化且节能环保的新能源汽车,已成为汽车工业转型升级的必然趋势。我国积极稳妥推进碳达峰碳中和重大战略决策,新能源汽车行业将迎来新的发展机遇,汽车产业的节能环保标准也将同步提升。此外,新能源汽车的续航里程是消费者关注的关键指标之一,研究表明,汽车的质量每减少10%,其续航里程可增加6%~8%^[1]。汽车轻量化是实现节能减排、提升性能的重要手段,对延长续航里程、优化动力性能具有重要意义。

目前,新能源汽车的电池箱体、车架及附件等部件主要由金属材料构成,这些部件在全车质量占比中高达47.7%,有巨大的轻量化潜力。蜂窝夹层结构复合材料作为轻量化的常用材料,具有质量轻、比强度高、比刚度大、隔声隔热性能优异等优势^[2],其结构可靠且安全稳定,在航空航天、船舶等领域被广泛应用^[3-4]。蜂窝芯层增加了结构的惯性矩,提高了材料的承载能力^[5],其力学响应和极限强度取决于自身的结构参数。Wang等^[6]以铝蜂窝结构为芯层材料,成功制备了碳纤维夹层复合材料,并通过三点弯曲试验和面板剥离试验探究了芯层厚度对材料强度和刚度的影响,结果表明,材料刚度随芯层厚度的变化而改变。Liu等^[7]利用铝蜂窝芯和玻璃纤维面板,成功制备了夹层复合材料,随后对材料的拉伸性能和弯曲性能进行研究,并成功构建了蜂窝夹层复合材料整体非线性本构模型。Xia等^[8]对三角波纹板、蜂窝板、泡沫铝板、锥体桁架等多种芯层结构的弯曲力学性能进行表征与分析,随后使用

ABAQUS软件对参数进行研究,最终确定了材料的弯曲变形模式。Lin等^[9]研究了现有各向同性材料蜂窝夹层结构,通过有限元模拟,检验了其力学性能理论计算式对连续碳纤维复合材料蜂窝的适用性。Sun等^[10]对铝蜂窝夹层板进行了三点弯曲试验和面内压缩试验,并探讨了蜂窝参数对结构耐撞性能的影响。Shi等^[11]通过在夹层结构中加入正交网格结构来提高蜂窝的刚度,采用三点弯曲试验,对不同芯材类型的碳纤维夹层材料的临界载荷、比强度和吸能能力进行比较。Xiong等^[12]对碳纤维复合蛋形和锥体蜂窝梁的弯曲力学性能和破坏模式进行研究,考虑了面起皱、面压碎、芯材压碎和脱黏,并提出了在三点弯曲载荷下与每种模式相关的失效载荷理论关系。Du等^[13]制备了各种具有复合材料面板和芳纶蜂窝芯的夹芯板,研究了蜂窝芯尺寸对夹层板抗弯性能的影响,结果表明,蒙皮/蜂窝芯复合材料夹层板的弯曲刚度与某些商业化汽车产品相当,同时拥有较低的质量。Zhang等^[14]对玻璃纤维增强环氧/铝面板铝蜂窝夹层梁,在三点弯曲作用下的破坏行为和吸能性能进行了试验和数值研究,测试了芯层高度和压头形状对弯曲破坏行为的影响。Zhang等^[15]采用理论分析、试验表征和数值预测相结合的方法,对方形蜂窝-波纹复合芯结构进行三点弯曲试验,量化了蜂窝尺寸对弯曲性能的影响。Russell等^[16]制备了由碳纤维复合材料面板和方形蜂窝芯组成的夹芯梁,并推导出三点弯曲夹层梁破坏机制的解析表达式。Anandan等^[17]建立了夹芯复合材料三点弯曲试验的数值模

型,并使用碳纤维面板和铝蜂窝夹芯进行试验验证。

本研究以玻璃纤维平纹织物作为增强体,环氧树脂与固化剂的混合胶液为基体,利用真空辅助树脂传递模塑成型(vacuum assisted resin infusion, VARI)工艺,制备玻璃纤维增强树脂复合材料,然后以玻璃纤维增强树脂复合材料为上下面板、铝蜂窝为芯层制备夹层结构玻璃纤维增强复合材料(简称夹层复合材料)。探究铝蜂窝边长、壁厚和芯层高度对夹层复合材料弯曲力学性能的影响规律。

1 试验部分

1.1 试样材料

本研究所使用的玻璃纤维平纹织物由安庆卡维科技有限公司提供,结构参数如表 1 所示;环氧树脂和固化剂均由郎博万公司提供;环氧胶膜由成都鲁晨新材料科技有限公司提供,型号为 N6292N0-20,中温固化环氧结构胶膜;铝蜂窝由佛山市顺德区汇裕蜂窝材料有限公司提供,型号为 3003H18,铝蜂窝结构参数如表 2 所示。

1.2 蜂窝夹层复合材料的制备

通过 VARI 工艺制备玻璃纤维增强树脂复合材

表 1 玻璃纤维平纹织物结构参数

Tab.1 Structure parameters of glass fiber plain weave fabric

| 结构 | 类别 | 线密度/ tex | 幅宽/ mm | 面密度/ ($g \cdot m^{-2}$) | 厚度/ mm |
|----|------|-------------|-----------|------------------------------|-----------|
| 平纹 | 玻璃纤维 | 133.3 | 100 | 196 | 0.2 |

表 2 铝蜂窝结构参数

Tab.2 Structural parameters of aluminum honeycomb

| 试样名称 | 蜂窝边长 l /mm | 壁厚 t /mm | 高度 h_c /mm |
|--------------|--------------|------------|--------------|
| L2-T0.06-H10 | 2 | 0.06 | 10 |
| L4-T0.06-H10 | 4 | 0.06 | 10 |
| L6-T0.06-H10 | 6 | 0.06 | 10 |
| L4-T0.04-H10 | 4 | 0.04 | 10 |
| L4-T0.08-H10 | 4 | 0.08 | 10 |
| L4-T0.06-H5 | 4 | 0.06 | 5 |
| L4-T0.06-H15 | 4 | 0.06 | 15 |

料面板。在模具上铺设 6 层玻璃纤维平纹织物,铺层角度不变,并依次铺设脱模布、导流网、导流管、密封膜。将环氧树脂和固化剂按质量比 100:30 的比例进行混合,搅拌均匀后将混合液置于连接真空泵的收集罐中,调节收集罐压力至 -0.1 MPa,静置 5 min,清除树脂混合液中的气泡。随后将铺层好的材料抽至真空,树脂混合液从模具一侧注入。注入完毕后,真空常温条件下固化 48 h。制备流程如图 1 所示。

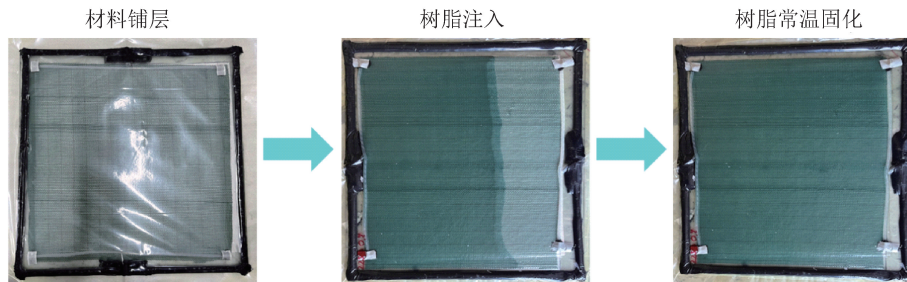


图 1 玻璃纤维增强复合材料面板制备流程

Fig.1 Preparation process of glass fiber reinforced composite panels

以玻璃纤维增强树脂复合材料为面板,铝蜂窝为芯层,通过环氧胶膜将两者复合。烘箱中的真空度达到 -0.1 MPa 后,将复合后的面板与芯层置于烘箱内,以 $1 \sim 3$ $^{\circ}C/min$ 的升温速率升温至 130 $^{\circ}C$ 后保温 60 min;随后,以 $1 \sim 3$ $^{\circ}C/min$ 速率将温度降至室温,脱模。最后,利用数控切割机沿纵向(L)和横向(W)切割制备好的夹层复合材料按照不同的切割角度进行切割,试样示意如图 2 所示。

1.3 三点弯曲试验

三点弯曲试验符合 ASTM C393/C939M-20 标准,所有试验均在标准大气压、室温及常规湿度条件下进行。试样规格为 250 mm \times 75 mm,平均高度 $H=12.5$ mm。测试仪器使用岛津 AGS-X 万能强力试验机,如图 3a)所示。图 3b)为试验所用夹具,其中加载杆和 2 个支撑杆直径均为 10 mm,加载杆放置于 2 个支撑杆中间。跨距为 150 mm,试验加载速度为

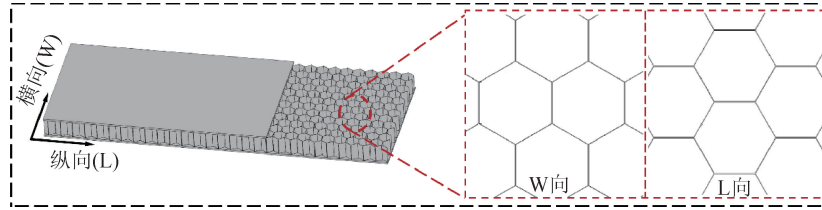


图2 纵向和横向夹层复合材料试样示意
Fig. 2 Schematic of longitudinal and transverse sandwich composite specimens

2 mm/min。每种规格至少进行5次试验,以确保结果可靠。

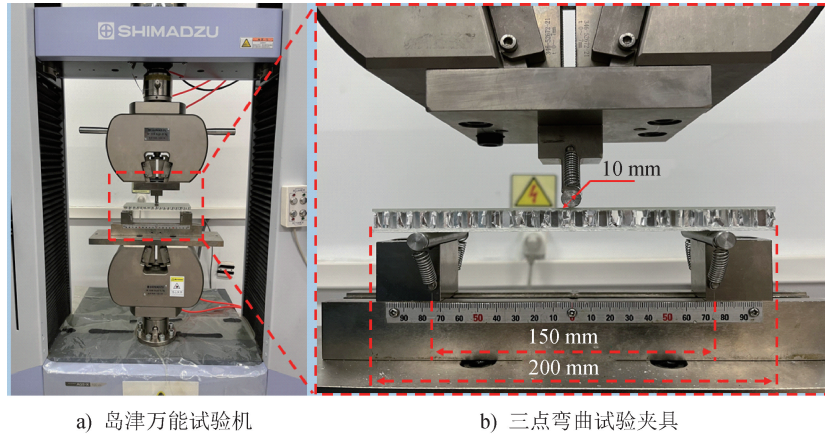


图3 三点弯曲试验装备
Fig. 3 Three-point bending test equipment

1.4 夹层复合材料的弯曲力学性能

夹层复合材料的弯曲刚度可以从平行轴定理^[18]中获得,其弯曲刚度 E_1 :

$$E_1 = b \left[\frac{E_{X,c} h_c^3}{12} + E_{X,f} \left(\frac{h_f^3}{6} + \frac{h_f d^2}{6} \right) \right] \quad (1)$$

式中: E 为铝蜂窝的弹性模量; ν 为铝蜂窝的泊松比; θ 为铝蜂窝特征角。本研究中铝蜂窝 $E = 69 \text{ GPa}$, $\nu = 0.3$, $\theta = 120^\circ$ 。

夹层复合材料三点弯曲试验过程中的峰值力 F_{\max} 可直接从载荷位移曲线中得到,用于表征材料的失效强度。材料的吸能 E_a 通过对载荷-位移曲线在一定距离内积分得到:

$$E_a = \int_0^d F(x) dx \quad (4)$$

式中: $F(x)$ 为载荷关于位移 x 的函数。

夹层复合材料的吸能效率可用材料的比吸能

式中: $E_{X,c}$ 为芯层在 X 方向上的弹性模量; $E_{X,f}$ 为面板在 X 方向上的弹性模量; h_c 为芯层的高度; h_f 为面板的厚度; b 为试样的宽度; d 为上下面板中性轴的距离。

铝蜂窝的等效面内弹性模量计算式如下:

$$E_L = \frac{t^3 E (1 - \cos \theta)}{l^3 \sin \theta \{ \sin^2 \theta + t^2 [2(1 + \nu) \sin^2 \theta + (1 + \cos^2 \theta)] / l^2 \}} \quad (2)$$

$$E_W = \frac{t^3 E \sin \theta}{l^3 (1 - \cos \theta) \{ \cos^2 \theta + t^2 [2(1 + \nu) \cos^2 \theta + \sin^2 \theta] / l^2 \}} \quad (3)$$

(E_{SEA})表征:

$$E_{SEA} = \frac{E_a}{m} \quad (5)$$

式中: m 为夹层复合材料试样的质量。

2 结果和讨论

2.1 铝蜂窝边长的影响

2.1.1 载荷-位移曲线

图4a)为L2-T0.06-H10、L4-T0.06-H10和L6-T0.06-H10纵横向载荷-位移曲线,其中L2-L和

L2-W 表示 L2-T0.06-H10 的纵向和横向, L4-L 和 L4-W 表示 L4-T0.06-H10 的纵向和横向, L6-L 和 L6-W 表示 L6-T0.06-H10 的纵向和横向。再结合图 4b) 三点弯曲峰值载荷情况可以得出: 相同铝蜂窝边长条件下, 纵向试样的峰值载荷均高于横向试样; 相同方向上, 随着铝蜂窝边长的减小, 峰值载荷呈明显升高趋势。图 4c) 为纵向试样的载荷-位移曲线, 可以看出在初始弹性阶段 3 条曲线斜率相近, 随后, 更高相对密度的 L2 试样在铝蜂窝压缩屈曲阶段表现出更显著的载荷下降趋势, 后续阶段出现的载荷回升可能与铝蜂窝结构被压实有关。当铝蜂窝边长从 6 mm 下降至 4 mm 或者从 4 mm 下降至

2 mm 时, 试样的纵向峰值载荷分别提升 82.79% 和 67.74%, 其中 L2-L 试样的载荷最高可达 3 263.89 N。图 4d) 展示了横向试样的载荷-位移曲线, 可以看出, 3 种试样的弹性阶段曲线基本重合; 随着铝蜂窝边长从 6 mm 下降至 4 mm 或者从 4 mm 下降至 2 mm, 横向试样峰值载荷分别增长 63.88% 和 130.78%。L6-W 试样因面板与铝蜂窝芯体的接触面积较小, 更易达到胶层失效强度, 导致更显著的脱黏现象。L2-W 与 L2-L 曲线形态相近, 极限载荷差值最小(2.7%), 说明减小铝蜂窝边长可显著降低试样在纵向以及横向上的性能差异。

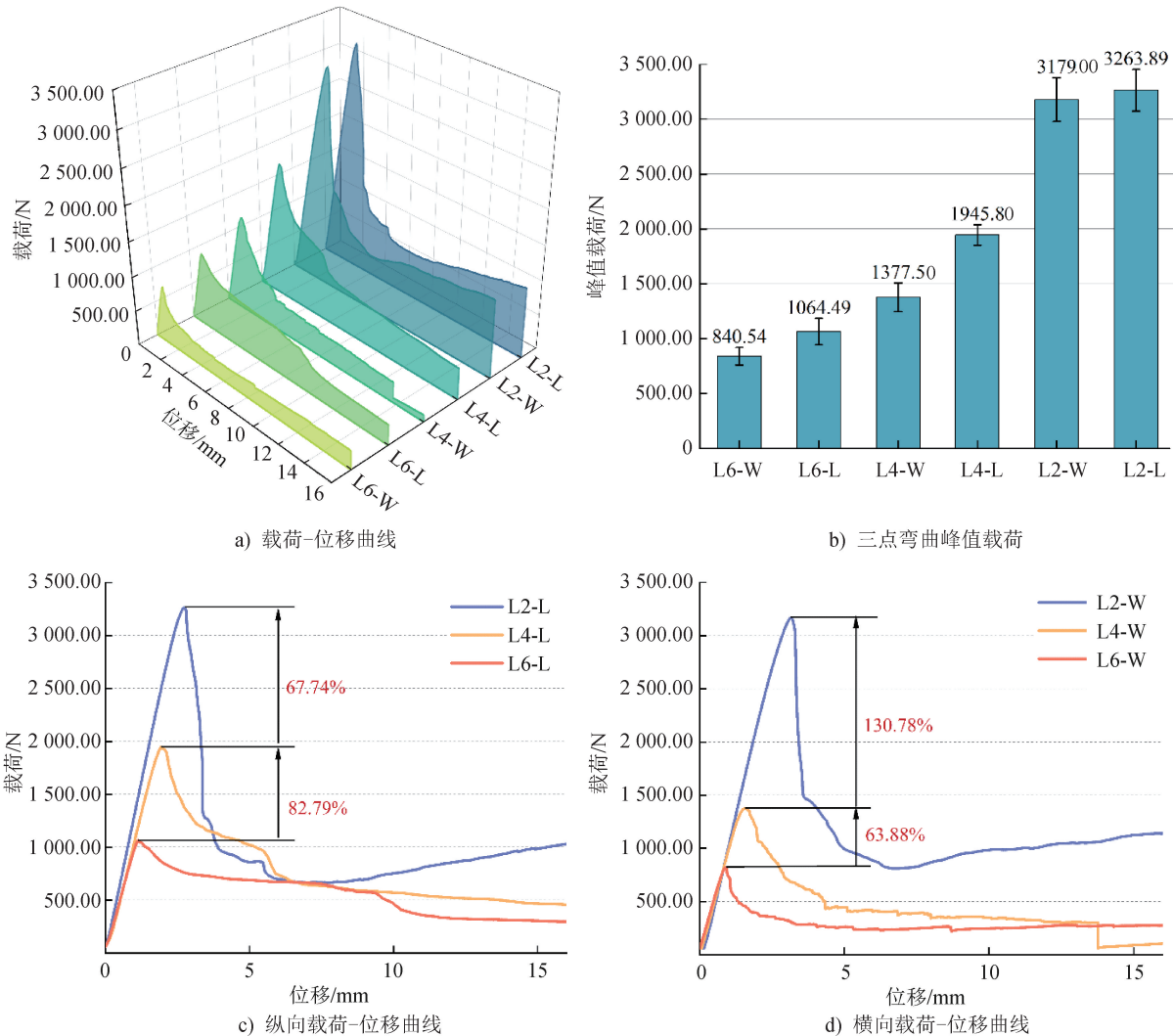


图 4 铝蜂窝边长为 2、4、6 mm 的夹层复合材料三点弯曲性能

Fig. 4 Three-point bending performance of sandwich composites with aluminum honeycomb side lengths of 2, 4, and 6 mm

2.1.2 吸能与比吸能

试样吸能情况如图 5 所示。图 5a) 中, 当纵向

试样铝蜂窝边长从 6 mm 减至 2 mm 时, E_a 从 87.98 J 增至 170.38 J (提升 93.66%), E_{SEA} 从 1.35 J/g 提

升至 2.29 J/g (提升 69.63%)。图 5b) 横向试样结果显示: 铝蜂窝边长为 2 mm 时, E_a 达 188.55 J, E_{SEA} 增至 2.53 J/g。当铝蜂窝边长为 4 mm 和 6 mm 时, 纵向试样的吸能和比吸能均显著优于横向试样, 原因在于按照横向对铝蜂窝进行切割时, 铝蜂窝剪切极限应力较低, 峰值载荷有所下降, 且铝蜂窝在屈曲压缩阶段不易形成致密结构抵抗压力, 从而造成面板和铝蜂窝之间的胶层被严重破坏, 承载能力迅速

下降。L2-W 试样的吸能和比吸能略优于 L2-L 试样, 两者差异不明显。在试验过程中, 夹层复合材料因结构复杂而使得试验结果的随机性显著升高^[19]。总体来说, 铝蜂窝芯层的剪切失稳现象, 导致试样在铝蜂窝屈曲压缩阶段整体高度下降, 一方面导致了横向试样的弯曲峰值载荷小于纵向试样; 另一方面剪切失稳现象为铝蜂窝带来了更高的致密化程度。

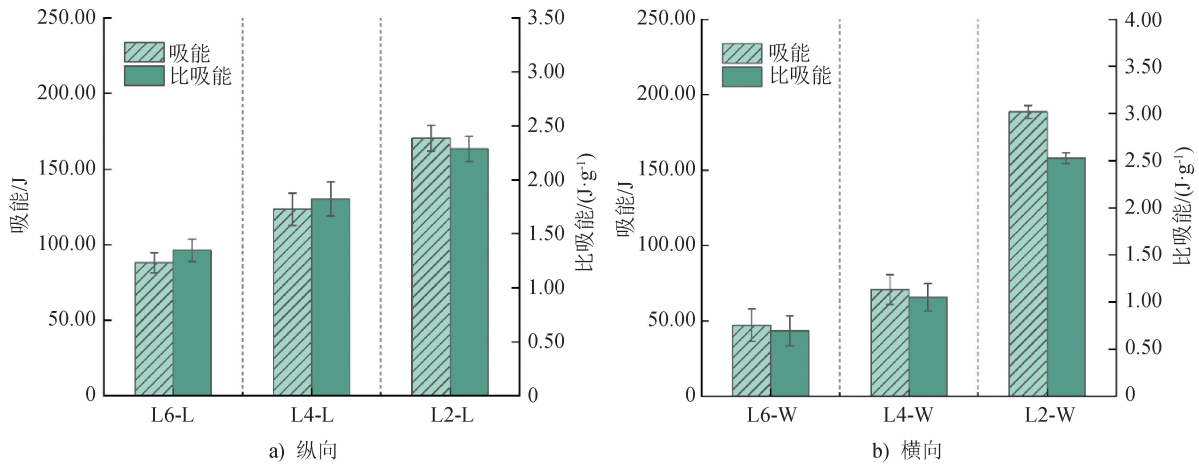


图 5 铝蜂窝边长对试样弯曲吸能和比吸能的影响

Fig. 5 Effect of aluminum honeycomb side lengths on specimen bending energy absorption and specific energy absorption

2.2 铝蜂窝壁厚的影响

2.2.1 载荷-位移曲线

分别对铝蜂窝壁厚为 0.04、0.06 和 0.08 mm 的夹层复合材料进行三点弯曲试验, 试样分别为 L4-T0.04-H10、L4-T0.06-H10 和 L4-T0.08-H10, 其中 T0.04-L 和 T0.04-W 表示 L4-T0.04-H10 的纵向和横向, T0.06-L 和 T0.06-W 表示 L4-T0.06-H10 的纵向和横向, T0.08-L 和 T0.08-W 表示 L4-T0.08-H10 的纵向和横向, 测试结果如图 6a) 所示。结果表明, 2 个方向的峰值载荷都随铝蜂窝壁厚的增加而增大; 在铝蜂窝壁厚相同的条件下, 纵向试样的峰值载荷均高于横向试样的峰值载荷, 如图 6b) 所示。从图 6c) 可以观察到, 纵向试样的初始弹性阶段曲线斜率基本重合, 表明不同铝蜂窝壁厚条件下试样的弯曲刚度基本保持一致。T0.08-L 试样的载荷-位移曲线在铝蜂窝压实阶段出现载荷回升趋势。当壁厚从 0.04 mm 增至 0.06 mm 时, 纵向试样峰值载荷提升了 84.41%; 当壁厚从 0.06 mm 增至 0.08 mm 时, 纵向试样峰值载荷增幅为 31.23%, 呈现明显的增益递减趋势。图 6d) 中不同铝蜂窝壁厚

的横向试样初始弹性阶段弯曲刚度差异极小, 当铝蜂窝壁厚从 0.04 mm 增至 0.06 mm 时, 横向试样峰值载荷提升了 87.61%; 当铝蜂窝壁厚从 0.06 mm 增至 0.08 mm 时, 横向试样峰值载荷提升了 52.23%。且 T0.06-W 与 T0.08-W 均出现脱胶现象。T0.04-W 试样在达到峰值后载荷-位移曲线趋于平缓, 表现为芯层横向剪切失效。

2.2.2 吸能与比吸能

图 7a) 展示了不同铝蜂窝壁厚条件下, 纵向试样的能量吸收特性。结果表明, 相较于 T0.06-L 试样 ($E_a = 123.44$ J; $E_{SEA} = 1.82$ J/g), T0.08-L 试样 ($E_a = 120.96$ J; $E_{SEA} = 1.73$ J/g) 的吸能与比吸能值略有下降, 这可能是由于铝蜂窝壁厚的增加, 增强了芯层横向剪切强度, 使得芯层中心区域应力集中, 从而导致铝蜂窝屈曲损伤面积减小。图 7b) 所示, T0.04-W 试样 ($E_a = 90.43$ J; $E_{SEA} = 1.36$ J/g) 的吸能与比吸能值均高于 T0.06-W 试样 ($E_a = 70.79$ J; $E_{SEA} = 1.05$ J/g), 这可能与芯层发生大范围横向剪切变形, 使芯层整体更致密有关。芯层主要通过结构屈曲与断裂吸收能量。试样的横向变形增大了芯

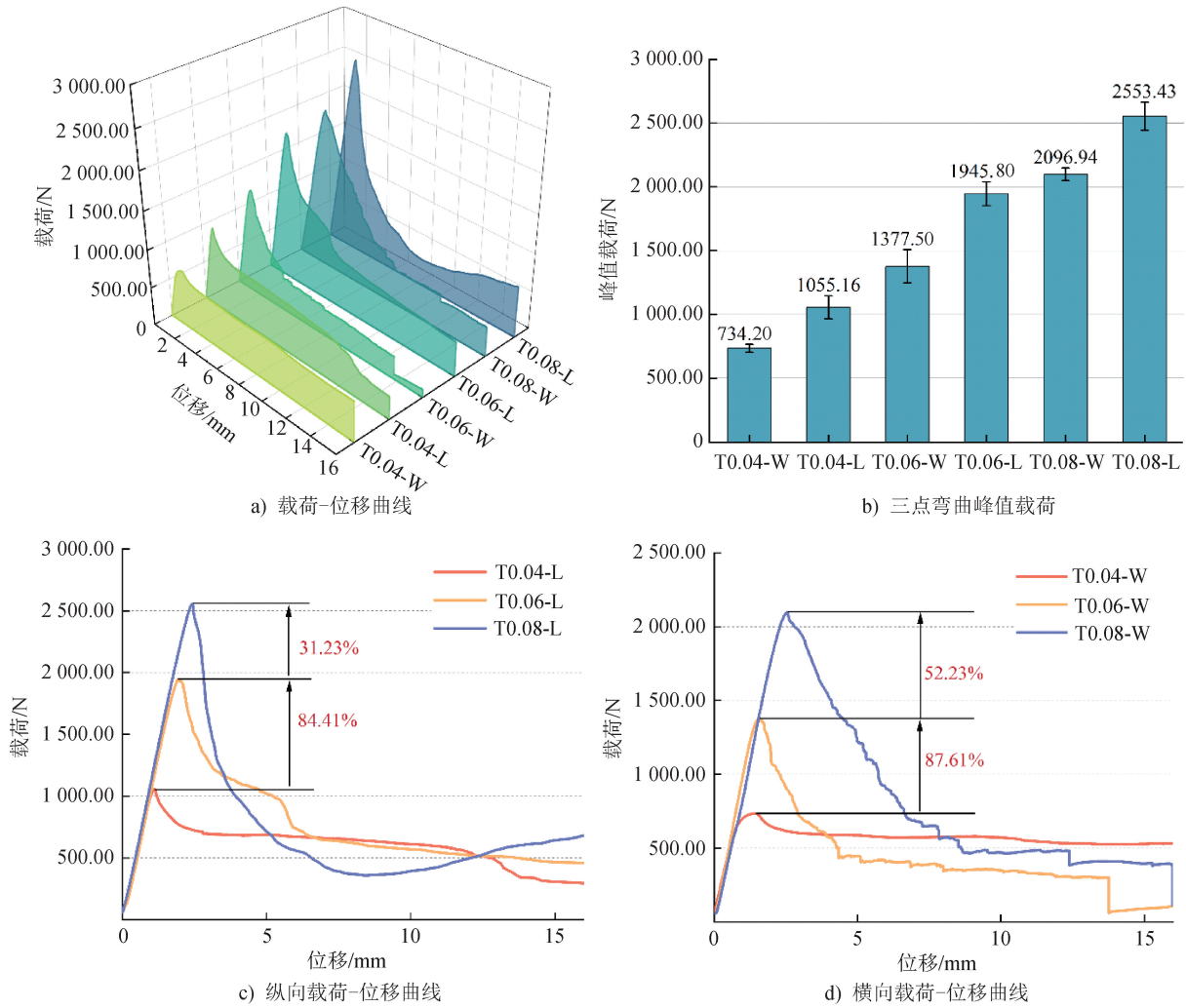


图 6 铝蜂窝壁厚为 0.04、0.06、0.08mm 的夹层复合材料三点弯曲性能

Fig. 6 Three-point bending performance of sandwich composites with aluminum honeycomb wall thicknesses of 0.04, 0.06, and 0.08 mm

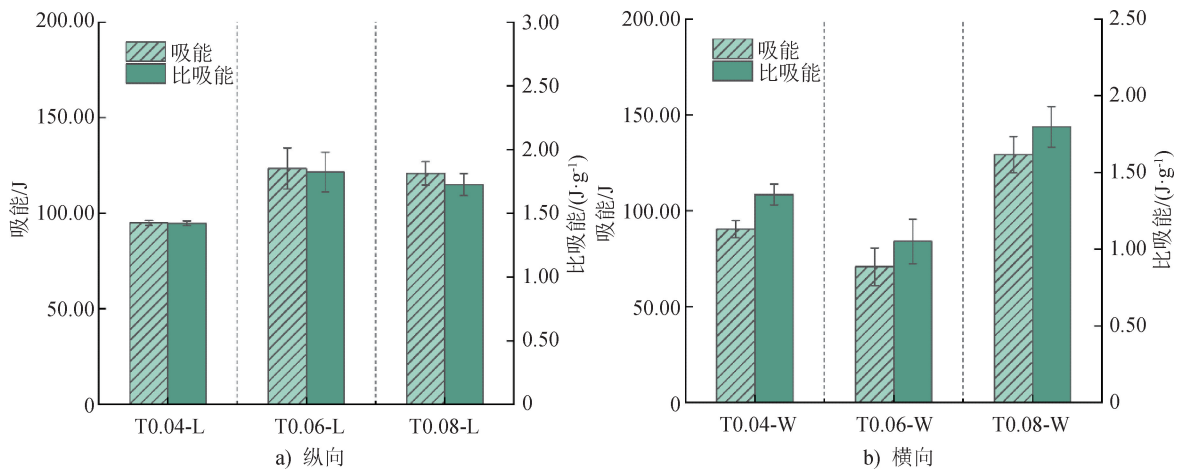


图 7 铝蜂窝壁厚对试样弯曲吸能和比吸能的影响

Fig. 7 Effect of aluminum honeycomb wall thicknesses on specimen bending energy absorption and specific energy absorption

层承载面积,导致夹层结构发生大规模屈曲损伤,从而吸收更多能量。

2.3 芯层高度的影响

2.3.1 载荷-位移曲线

对芯层高度为 5、10 和 15 mm 的试样进行三点弯曲试验,试样分别为 L4-T0.06-H5、L4-T0.06-H10 和 L4-T0.06-H15,其中 H5-L 和 H5-W 表示 L4-T0.06-H5 的纵向和横向,H10-L 和 H10-W 表示 L4-T0.06-H10 的纵向和横向,H15-L 和 H15-W 表示 L4-T0.06-H15 的纵向和横向,弯曲载荷-位移曲线如图 8a) 所示。随着芯层高度的增加,弯曲峰值荷

载持续增大。同一芯层高度下,纵向试样的峰值载荷高于横向试样,如图 8b) 所示。试样的芯层高度越大越易出现脱胶现象,芯层高度过大会加剧界面应力集中效应。从图 8c) 和 8d) 可知,不同试样间弹性阶段曲线斜率不同,弯曲刚度随芯层高度增大而增加。当试样的芯层高度从 5 mm 升至 10 mm 或升至 15 mm 时,纵向试样的峰值载荷分别增长 48.87% 和 60.55%,横向试样的峰值荷载分别提高了 41.76% 和 88.77%。芯层高度为 15 mm 的试样,其失效的主要方式为上面板的断裂破坏。

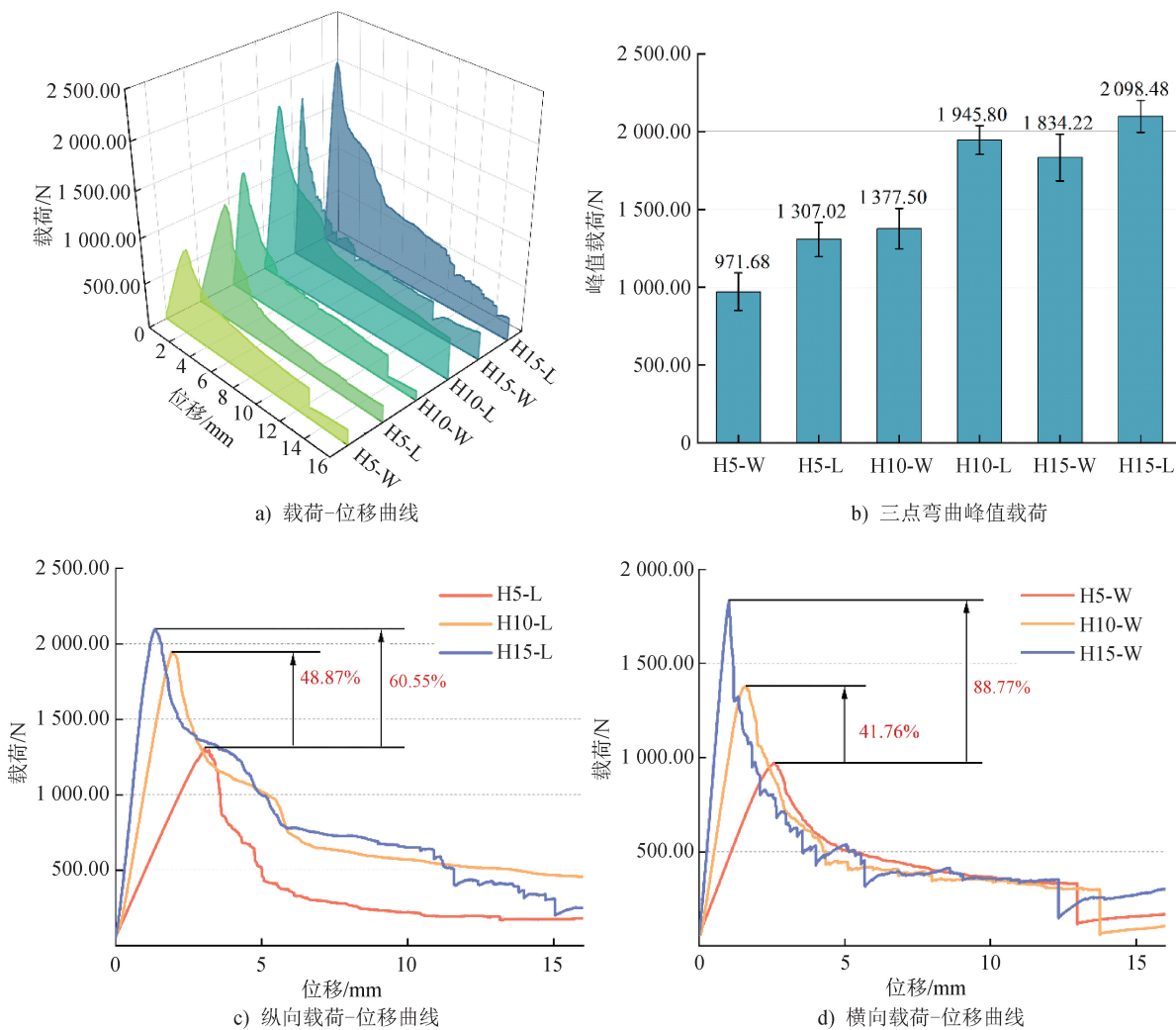


图 8 铝蜂窝高度为 5、10、15mm 的夹层复合材料三点弯曲性能

Fig. 8 Three-point bending performance of sandwich composites with aluminum honeycomb core thicknesses of 5, 10, and 15 mm

2.3.2 吸能与比吸能

图 9a) 展示了 3 种芯层高度的纵向试样吸能与比吸能值。结果表明,随着芯层高度增加,纵向试样

的能量吸收能力呈现上升趋势;当芯层高度自 5 mm 增至 10 mm 时,吸能值从 64.40 J 增加到 123.44 J,但 H15-L 吸能值仅比 H10-L 增长 7.01 J,即纵向试样呈现

出吸能饱和趋势。图 9b) 显示 3 种芯层高度的横向试样吸能与比吸能值。结果表明,不同试样在吸能与比

吸能值上差异较小,即横向试样的能量吸收特性不因芯层高度变化而产生剧烈变化,具有良好的稳定性。

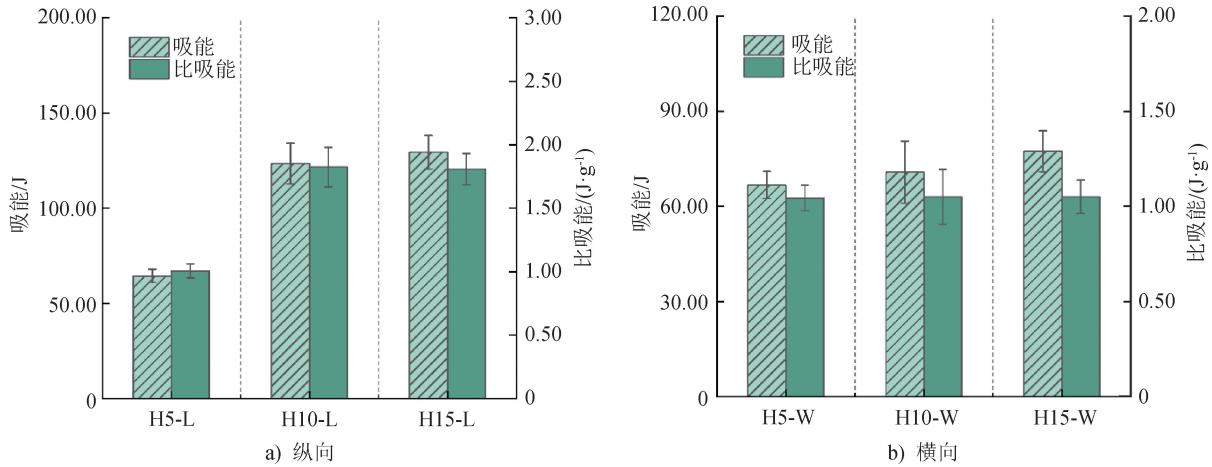


图 9 铝蜂窝芯层高度对试样弯曲吸能和吸比能的影响

Fig. 9 Effect of aluminum honeycomb core thicknesses on specimen bending energy absorption and specific energy absorption

2.4 弯曲刚度

结合式(1)、式(2)和式(3)计算纵向试样和横向试样的等效弹性模量 (E_L, E_W) 及其弯曲刚度 ($E_{1,L}, E_{1,W}$), 结果如表 3 所示。当铝蜂窝边长与铝蜂窝壁厚在合理范围内变化时,二者对试样整体抗弯性能的贡献权重较低。相比之下,芯层高度参数对试样弯曲刚度的影响更为显著,试样弯曲刚度随芯层高度变化的规律为:随着芯层高度的增加,结构整体的截面惯性矩呈平方关系增大,材料的抗弯能力显著提升。提升试样弯曲刚度的有效途径主要基于夹层结构特有的力学响应机制,通过协同优化面板与芯层的几何参数及材料参数实现性能跃升。通过试验结果与表 3 的计算结果可以验证:当芯层与面板模量比极低(约 0.000 02)且面板厚度远小于

芯层高度时,面板模量与上下层面板间距成为影响弯曲刚度的主导因素,芯层对弯曲刚度影响甚微。从面板强化技术角度考虑,选用高弹性模量材料可显著提升面板的抗拉压承载效率^[20],采用纤维复合材料替代传统铝合金面板,夹层复合材料的弹性模量提升幅度可达 3~5 倍^[21],实现相同应变条件下储存更多弹性变形能;同时,增加面板厚度可同步提升夹层复合材料的截面惯性矩与中性轴偏移量,增强整体抗弯能力,但需注意避免因面板过厚导致的质量过大而与界面剥离的现象。在芯层规格方面,适度增加芯层高度能够大幅提升截面惯性矩,然而,芯层高度增加量需与稳定性设计相平衡,芯层高度过大时可能诱发剪切失稳或局部屈曲,此时可通过优化芯层拓扑构型提升材料的抗剪能力。

表 3 夹层复合材料等效弹性模量和试样弯曲刚度

Tab. 3 The equivalent elastic modulus and bending stiffness of sandwich composite

| 试样名称 | 纵向等效弹性模量 $E_L/(MPa)$ | 横向等效弹性模量 $E_W/(MPa)$ | 纵向弯曲刚度 $E_{1,L}/(N \cdot m^2)$ | 纵向试样刚度/ $(N \cdot mm^{-1})$ | 横向弯曲刚度 $E_{1,W}/(N \cdot m^2)$ | 横向试样刚度/ $(N \cdot mm^{-1})$ |
|--------------|----------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| L2-T0.06-H10 | 4.286 | 4.281 | 122.146 | 1 076.243 | 122.146 | 1 185.623 |
| L4-T0.06-H10 | 0.537 | 0.537 | 122.122 | 1 052.145 | 122.122 | 989.070 |
| L6-T0.06-H10 | 0.159 | 0.159 | 122.120 | 1 002.190 | 122.120 | 900.049 |
| L4-T0.04-H10 | 0.159 | 0.159 | 122.120 | 1 072.662 | 122.120 | 922.940 |
| L4-T0.08-H10 | 1.273 | 1.272 | 122.127 | 1 129.954 | 122.127 | 990.475 |
| L4-T0.06-H5 | 0.537 | 0.537 | 38.038 | 453.153 | 38.038 | 449.652 |
| L4-T0.06-H15 | 0.537 | 0.537 | 254.259 | 1 794.765 | 254.259 | 1 630.474 |

3 结论

本研究对夹层复合材料进行三点弯曲试验,分析了铝蜂窝边长、壁厚及芯层高度对弯曲性能的影响,研究了2种方向的铝蜂窝结构的屈曲模式,并揭示了失效机理。主要结论如下:

减小铝蜂窝边长能显著改善夹层复合材料弯曲性能。当铝蜂窝边长从6 mm减至2 mm时,纵向试样弯曲峰值载荷从1 064.49 N提升至3 263.89 N, E_{SEA} 值从1.35 J/g提升至2.29 J/g;横向试样 E_{SEA} 值从0.69 J/g增至2.53 J/g。铝蜂窝壁厚影响蜂窝屈曲模式,增加铝蜂窝壁厚可强化承载能力。当铝蜂窝壁厚从0.06 mm增至0.08 mm时,纵向试样的峰值载荷提升31.23%, E_{SEA} 值受影响较小。薄壁试样芯层更易发生整体剪切变形,当芯层高度从5 mm提升至15 mm时,试样沿纵向和横向弯曲峰值载荷分别提高60.55%和88.77%,同时,增大芯层高度可提升试样的弯曲刚度。

总体而言,纵向试样具有更高的峰值载荷和更优的弯曲性能,而横向试样因蜂窝整体屈曲表现为更平缓的能量吸收过程。



期刊采编平台

中国知网下载

参考文献

- [1] CACERES C H. Economical and environmental factors in light alloys automotive applications[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2007, 38(7): 1649-1662.
- [2] 王皓辉,徐洋,盛晓伟. 蜂窝夹层结构材料在簇绒地毯织机主轴空间降噪中的应用[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2021, 47(3): 105-111.
- [3] STEEVES C A, FLECK N A. Collapse mechanisms of sandwich beams with composite faces and a foam core, loaded in three-point bending. Part I: analytical models and minimum weight design[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2004, 46(4): 561-583.
- [4] VITALE J P, FRANCUCCI G, XIONG J, et al. Failure mode maps of natural and synthetic fiber reinforced composite sandwich panels [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 94: 217-225.
- [5] MEI Z K, PEI Z L, CHENG L L, et. al. Impact behavior analysis and failure mode comparison of glass fiber (GF)/polydicyclopentadiene (PDCPD) thermosetting composite for automobile bottom protection plate [J]. Journal of Donghua University (English Edition), 2024, 41(6): 595-606.
- [6] WANG J F, SHI C Y, YANG N, et al. Strength, stiffness, and panel peeling strength of carbon fiber-reinforced composite sandwich structures with aluminum honeycomb cores for vehicle body [J]. Composite Structures, 2018, 184: 1189-1196.
- [7] LIU Q, HUANG Z M. Investigation on nonlinear constitutive relationship for a honeycomb sandwich composite [J]. Advanced Materials Research, 2011, 291/292/293/294: 1025-1038.
- [8] XIA F K, DURANDET Y, TAN P J, et al. Three-point bending performance of sandwich panels with various types of cores [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 179: 109723.
- [9] LIN Y, YANG Z Y, WANG X D, et al. The design of continuous carbon fiber composite honeycombs and study on its properties [J]. Journal of Composite Materials, 2022, 56(24): 3729-3747.
- [10] SUN G Y, HUO X T, CHEN D D, et al. Experimental and numerical study on honeycomb sandwich panels under bending and in-panel compression [J]. Materials & Design, 2017, 133: 154-168.
- [11] SHI S S, SUN Z, HU X Z, et al. Flexural strength and energy absorption of carbon-fiber-aluminum-honeycomb composite sandwich reinforced by aluminum grid [J]. Thin-Walled Structures, 2014, 84: 416-422.
- [12] XIONG J, MA L, STOCCHI A, et al. Bending response of carbon fiber composite sandwich beams with three dimensional honeycomb cores [J]. Composite Structures, 2014, 108: 234-242.
- [13] DU Y C, YAN N, KORTSCHOT M T. Light-weight honeycomb core sandwich panels containing biofiber-reinforced thermoset polymer composite skins: fabrication and evaluation [J]. Composites Part B: Engineering, 2012, 43(7): 2875-2882.
- [14] ZHANG J X, ZHU Y Q, YUAN H, et al. Failure behavior of sandwich beams with glass fiber-reinforced epoxy/aluminum laminates face-sheets and aluminum honeycomb core under three-point bending [J]. Thin-Walled Structures, 2022, 177: 109476.

(下转第53页)