

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第10期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.10.020

论文标题： 竹集成材格栅夹芯板面外受压性能

作　　者： 王智丰，耿琳莉，李贤军，等

收稿日期： 2026-06-24

引文格式： 王智丰,耿琳莉,李贤军,等.竹集成材格栅夹芯板面外受压性能[J].中南林业科技大学学报,2026,46(10):220-230.

Wang Z F, Geng L L, Li X J, et al. Out-of-plane compressive performance of laminated bamboo grid sandwich panels[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026, 46(10):220-230.

相关论文推荐

Recommended articles

“双碳”战略目标下木竹基先进功能材料研究进展

Advanced functional materials derived from natural wood and bamboo resources under the double carbon strategy in China

“以竹代塑”科技创新与基础科学问题

Technological innovation and fundamental science for bamboo as a substitute for plastic

竹集成材-H型钢-竹集成材组合梁受弯性能

Bending performance of bamboo laminated veneer lumber- H-shaped steel-bamboo laminated veneer lumber composite beams

不同芯质竹木复合板的弹性模量和静曲强度

Study on MOE and MOR of bamboo-wood composite panels with different core materials

竹集成材-竹胶板钉节点力学性能

Mechanical performance of laminated bamboo lumber-bamboo plywood nailed connections loaded monotonically

竹集成材激光雕刻模拟仿真与参数优化

Simulation and parameter optimization of laser engraving of laminated bamboo lumber

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.10.020
http: //qks.csuft.edu.cn

竹集成材格栅夹芯板面外受压性能

王智丰[a, d]，耿琳莉[a]，李贤军[b, d]，谢力生[a, d]，汤舒畅[a]，陈建英[c]，王　达[a, d]

（中南林业科技大学 a. 材料与能源学院；b. 化学与化工学院；c. 园林与建筑学院；
d. 现代木结构工程材制造及应用技术湖南省工程实验室，湖南 长沙 410004）

摘　要：【目的】探究竹集成材格栅夹芯板在不同荷载工况下的面外受压性能，为其在现代绿色装配式建筑中的轻量化应用提供理论依据和试验支撑。【方法】以湖南省桃江县楠竹制备的平压竹集成材格栅夹芯板为研究对象，设计了轴向顺纹与轴向横纹 2 种芯体类型的竹集成材格栅夹芯板试件，在集中荷载、线荷载、面荷载 3 种工况下开展了面外受压试验，每组各制备 3 块平行试件，共计 18 块试件，系统探究其破坏机理与力学性能。【结果】竹集成材格栅夹芯板在不同荷载工况下的破坏模式存在显著差异，在集中荷载工况下其破坏模式主要表现为面板局部断裂；线荷载工况下，以面板断裂为主；面荷载工况下，则主要表现为腹板屈曲和断裂；轴向顺纹芯体试件在 3 种荷载工况下的力学性能均优于轴向横纹芯体试件，压缩强度分别提升了 33.3%、130.3% 和 178.0%，压缩模量分别提升了 36.4%、16.6% 和 25.2%，吸能能力分别提升了 14.3%、72.5% 和 186.6%。荷载 - 位移曲线呈典型非线性特征，轴向顺纹芯体试件表现为刚度高但延性较低，轴向横纹芯体试件表现则相反。【结论】不同荷载工况（集中荷载、线荷载、面荷载）下试件的破坏模式存在较大差异。同时，芯体类型对试件的面外受压性能影响显著，具体表现为轴向顺纹芯体试件在压缩强度、压缩模量及吸能能力上明显优于轴向横纹芯体试件。

关键词：竹集成材；格栅夹芯板；面外受压；破坏模式；能量吸收
中图分类号：S781.9；TU366　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)10-0220-11

Out-of-plane compressive performance of laminated bamboo grid sandwich panels

Wang Zhifeng[a,d], Geng Linli[a], Li Xianjun[b,d], Xie Lisheng[a,d], Tang Shuchang[a], Chen Jianying[c], Wang Da[a,d]

(a. School of Materials and Energy; b. School of Chemistry and Chemical Engineering; c. School of Landscape Architecture and Architecture; d. Hunan Provincial Engineering Laboratory of Engineering Material of Modern Wood Structure Manufacturing and Application Technology, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract:【Objective】To investigate the out-of-plane compressive performance of laminated bamboo grid sandwich panels under different loading conditions, and to provide both theoretical foundations and experimental support for their lightweight applications in modern green prefabricated buildings.【Method】This study focused on flat-pressed laminated bamboo grid sandwich panels fabricated from *Phyllostachys edulis* sourced from Taojiang County, Hunan Province. Two core configurations were designed: axial parallel-to-grain and axial perpendicular-to-grain. A total of 18 specimens were prepared (3 parallel specimens for each of the 2 core types under 3 loading conditions). Out-of-plane compression tests were conducted under concentrated, linear, and planar loads to systematically investigate their failure mechanism and mechanical properties.【Result】The laminated bamboo grid sandwich panels exhibited significantly distinct failure modes under different loading conditions. Under concentrated load, failure primarily manifested as localized face-sheet fracture; under linear load, face-sheet fracture dominated; while under planar load, the predominant failure modes were web buckling and fracture. Axial parallel-to-grain core specimens demonstrated superior mechanical performance across all three loading conditions compared to axial perpendicular-to-grain specimens, with compressive strength increasing by 33.3%, 130.3% and 178.0%, compressive modulus increasing by 36.4%, 16.6%, and 25.2%, and energy absorption capacity increasing by 14.3%, 72.5% and 186.6%,

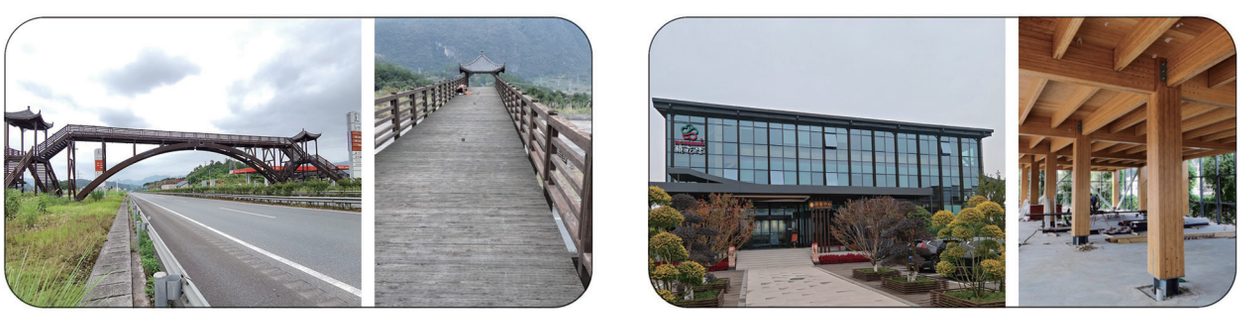
收稿日期（Received）：2025-06-24　　**修订日期**（Revised）：2025-09-15
基金项目：国家自然科学基金面上项目（32471984）；湖南省林业生态保护修复及发展资金项目（2025ZCY002）；湖南省重点研发计划项目（2024JK2048）；湖南省自然科学基金面上项目（2024JJ5631）；湖南省教育厅优青项目（25B0305）。
第一作者：王智丰（wangzhifeng_1984@163.com），副教授，博士，硕士研究生导师。
通信作者：王达（yxwang2006@yeah.net），教授，博士，博士研究生导师。
引文格式：王智丰 , 耿琳莉 , 李贤军 , 等 . 竹集成材格栅夹芯板面外受压性能 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(10):220-230.
Wang Z F, Geng L L, Li X J, et al. Out-of-plane compressive performance of laminated bamboo grid sandwich panels[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(10):220-230.

respectively. As shown in the results, the load-displacement curves exhibited typical nonlinear characteristics, with axial parallel-to-grain specimens showing higher stiffness but lower ductility, while axial perpendicular-to-grain specimens displayed the opposite behavior. 【Conclusion】The failure modes of specimens showed significant differences under different loading conditions (concentrated load, linear load, planar load). Meanwhile, the core type significantly affected the out-of-plane compressive performance of specimens, specifically showing that axial parallel-to-grain core specimens exhibited notably higher compressive strength, compressive modulus and energy absorption capacity than axial perpendicular-to-grain core specimens.

Keywords: laminated bamboo; grid sandwich panels; out-of-plane compression; failure modes; energy absorption

随着工程应用对结构轻量化与材料可持续性要求的不断提高，传统建筑结构面临双重挑战：一方面需满足绿色可持续发展要求，另一方面亟需轻质高效的结构形式 [1-2]。夹芯板结构是一种具有代表性的轻质高强结构，由高强度、高模量的面板与低密度芯材组成 [3-6]。格栅夹芯结构作为夹芯板结构的特殊形式，其芯体由基本的结构单元（即胞元）按一定规律在平面的 2 个特征方向上进行周期性拓展而成；胞元则由结点及连接结点的杆单元构成 [7-8]。凭借高孔隙率特性带来的高结构承载效率及低成本优势，格栅夹芯结构已在工程领域广泛应用，但日益复杂的应用场景要求其具备更优异的压缩性能与吸能能力。而竹材作为一种传统的绿色环保材料，具有可塑性好、韧性好、分布广和生长快等优势 [9]。由原竹加工而成的工程竹材——竹集成材作为可再生生物基材料，兼具环境友好、轻质高强和设计灵活等特性，与格栅夹芯结构高度适配。基于材料特性与拓扑构型的匹配关系，竹集成材格栅夹芯板实现了新型材料高承载性能和结构轻量化的协同优化设计，可应用于桥面板、楼面板等需兼具这两方面特性的实际工程（图 1），为土木建筑业绿色转型提供创新路径 [10-11]。

近年来，研究者通过芯体结构优化、材料复合及工艺创新等手段提升夹芯板结构的综合性能。结构优化方面，主要聚焦于调整格栅构型来增强夹芯板面外压缩性能 [12-16]。Taghizadeh 等 [17] 对比了 3 种不同截面形状的格构增强泡沫夹芯板在准静态面外压缩下的力学性能，证实格构可显著提升结构效率，不同形状泡沫填充夹芯板的比吸能能力与压缩强度从高到低依次为矩形、梯形、三角形。石昌等 [18] 设计了一种梯形格栅增强泡沫夹芯板，通过平面压缩试验分析试样尺寸、格构腹板角度及厚度对比压缩强度、比压缩模量与比吸能的影响，发现夹芯板主要破坏模式为格构板断裂与屈曲，且泡沫芯材与格构板存在协同增强效应。60° 夹角格构增强夹芯板较无格构试件，比压缩强度、比压缩模量和比吸能分别提高了 89.4%、137.9%、45.2%。此外，试件的压缩性能随格构板角度和厚度增加显著提升。Sun 等 [19] 创新性地提出了一种新型混合波纹夹芯板（融合 V 形波纹与 I 形支柱），通过理论 - 模拟 - 试验多方法验证，其承载能力与散热性能均优于传统波纹芯 / 腹板芯结构。材料复合是通过特定的方式将性能互补的材料整合成协同增效体系的技术，克服了单一材料的局限性，可满足工程应用中的综合需求。李旌豪 [20] 开发了一种轻质高强、绿色环保的三轴格栅夹芯板，采用碳纤维 / 玻璃纤维复合面板提升强度与稳定性，并填充聚氨酯发泡材料改善芯层保温隔热性能。通过对比基础型、碳纤维复合型、玻璃纤维复合型及发泡填充型试件的受压性能，发现夹芯层承担主要荷载。纤维增强表面对其面外



（a）木（竹）结构桥梁及桥面板
Glulam (Glubam) bridge & Bridge deck

（b）竹结构建筑及楼面板
Glubam building & Floor board

图 1　竹材在工程领域应用示范
Fig. 1　Engineering application demonstration of bamboo materials

压缩性能无显著影响。聚氨酯发泡材料可有效限制格栅肋板屈曲变形，从而提升结构的平压性能。杨冬霞等 [21] 设计了基于落叶松和桦木研制的木质金字塔形格栅夹芯胞元结构，揭示了芯子直径与承载能力正相关，与比强度负相关；当芯子直径等于面板厚度时综合性能最优，且所有胞元比强度均高于单一材料。工艺创新方面，魏凯耀等 [22] 采用真空导入模塑（VIMP）与多股纱线非交叉缝合工艺，证实了缝合纱线数量增加可提升压缩强度与压缩模量，但高含量纱线会降低比压缩强度。李静雯等 [23] 通过自主设计的滚压法制备 GF/PP 复合材料波纹夹芯板，发现 0°/90° 交替铺层面板的平压模量最高（59.55 MPa），而单纯增加面板厚度对平压性能的提升有限。

尽管现有关于夹芯板结构性能优化的研究取得了一定的进展，但在成本控制和工艺加工方面仍存在一定的局限性。竹集成材作为典型的各向异性材料，顺纹抗压强度显著高于横纹抗压强度，该特性为结构优化提供了新的设计思路。然而，目前针对竹集成材格栅夹芯板面外受压性能的研究相对较少，本课题组前期已开展了竹集成材格栅夹芯板的弯曲 [24] 和面内轴心受压试验 [25] 研究。因此，本文通过面外受压试验，系统研究轴向顺纹和轴向横纹 2 种芯体类型试件在集中荷载、线荷载、面荷载 3 种工况下的破坏机理与力学性能。本研究对于确定竹集成材格栅夹芯板的关键结构参数，拓展其在工程中的应用具有重要的理论和实践价值。

1 材料与方法

1.1 试件设计

本研究设计的四边形竹集成材格栅夹芯板主要包括 2 部分：面板和格栅芯体。基于本课题组前期已取得的竹集成材格栅夹芯板抗弯性能研究成果，相较于嵌锁法加工的三角形、四边形和 Kagome 形构型，采用隔断法制备的四边形竹集成材格栅夹芯板具有更高的承载力和比强度，加工工艺更为简便高效，且相比于竹集成材实心板而言，四边形格栅夹芯板结构具有更好的比强度和比刚度 [24,26]。综合加工成本和材料用量，4 种竹集成材格栅夹芯板（嵌锁式三角形、嵌锁式四边形、嵌锁式 Kagome 形和隔断式四边形）每平方米造价分别为实心板的 50.0%、42.9%、48.3% 和 40.5%。基于格栅构型和芯体加工方式对夹芯板力学性能及制备成本的影响分析，本研究选取四边形隔断式格栅作为夹芯板芯体，采用隔断法加工而成的竹集成材格栅夹芯板对材料的利用率更高，符合结构轻量化设计的要求（图 2）。

1.2 材料选择

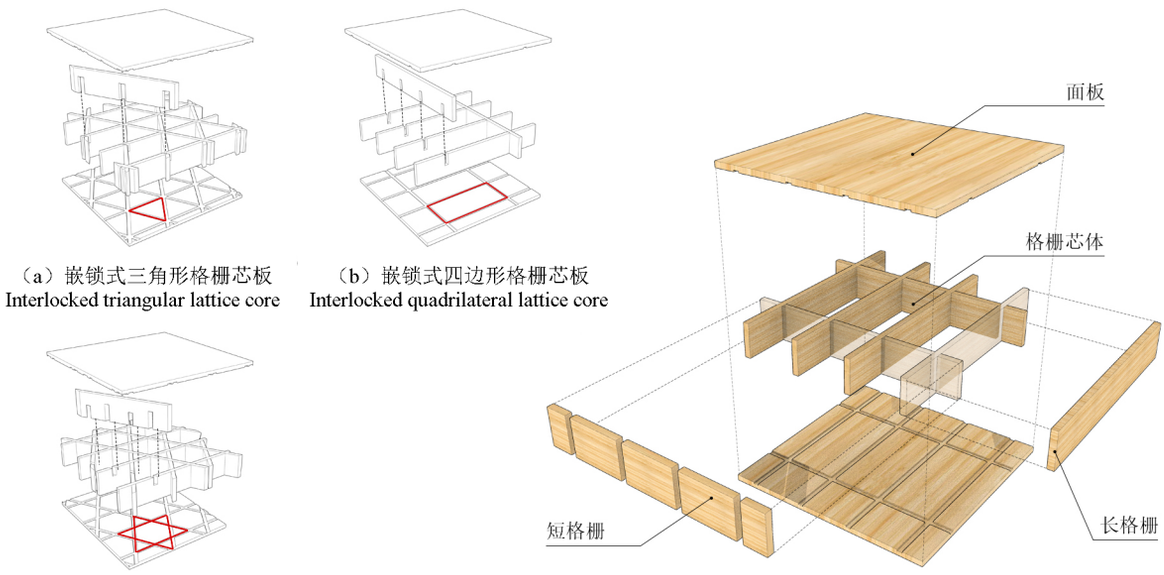
竹集成材格栅夹芯板选用湖南桃花江竹材科技股份有限公司生产的平压竹集成材作为面板与芯体材料，原材料为楠竹，材料环保等级为 E0 级，厚度为 8 mm。连接面板和芯体的胶黏剂为上海市致翊新材料科技有限公司自日本进口的间苯二酚改性树脂系胶黏剂，黏度为 15 Pa·s，固含量为 65%。竹集成材材料性能参考课题组周李承 [24] 的研究成果（同一批次材料和工艺加工的试件），测得竹集成材顺纹抗压强度 59.7 MPa，横纹抗压强度 26.5 MPa。

1.3 试件制备及测试

将平压竹集成材单板按设计要求裁切成格栅夹芯板的面板与芯体组件，确保尺寸精确匹配。采用数控铣床结合 CNC 加工技术，在上下面板铣削出 3 mm 深的特定凹槽，形成芯体装配基准。将短格栅肋板沿垂直方向与长格栅正交拼接，形成格栅芯体后向面板凹槽均匀涂布间苯二酚胶黏剂（涂胶量 260 g/m^2），将格栅芯体置于上下面板之间，并精准嵌入对应凹槽内完成预组装。冷压固化阶段在 30 ℃恒温环境中施加 1 MPa 压力持续 4 h 以上，确保胶黏剂充分固化。将成型夹芯板裁切为标准试件后，经砂光机精细打磨，确保表面光滑，最终完成竹集成材格栅夹芯板试件的制备（图 3）。

基于《夹层结构或芯子平压性能试验方法》（GB/T 1453—2022）[27] 以及国内外对不同材料的格栅夹芯板面外受压性能研究 [17,28] 进行试验设计，本研究制备的竹集成材四边形格栅夹芯板胞元尺寸为 164 mm×78 mm，在制备试样时，确保核心区域包含完整的胞元，并模拟实际工程受力工况。试验共制备了 6 组 18 块 300 mm×300 mm×64 mm 的竹集成材格栅夹芯板作为试件用于面外受压试验，通过改变芯体类型（轴向顺纹、轴向横纹）和荷载工况（集中荷载、线荷载、面荷载）研究其对受压性能的影响。试件几何参数如表 1 所示。

试件编号规则为：BSP-XY，其中 BSP 为竹集成材格栅夹芯板；X 对应的 S 代表芯体类型为轴向（与荷载平行方向）顺纹，H 代表芯体类型为轴向横纹；Y 对应的 C、L、P 指荷载工况，分别代表集中荷载、线荷载、面荷载。



（a）嵌锁式三角形格栅芯板
Interlocked triangular lattice core

（b）嵌锁式四边形格栅芯板
Interlocked quadrilateral lattice core

（c）嵌锁式Kagome格栅芯板
Interlocked Kagome lattice core

（d）隔断式四边形格栅夹芯板
Partitioned quadrilateral grid sandwich panel

图 2　竹集成材格栅夹芯板加工制备示意

Fig. 2　Schematic diagram of fabrication process for laminated bamboo grid sandwich panels

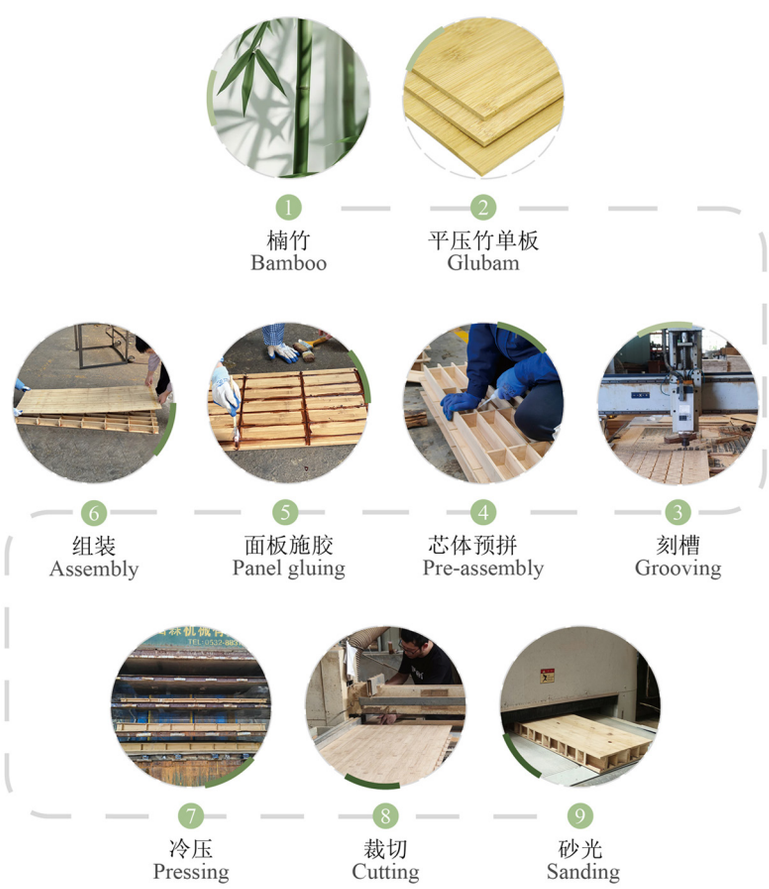


图 3　竹集成材格栅夹芯板制备工艺流程

Fig. 3　Fabrication process flow of laminated bamboo grid sandwich panels

试验使用 2 000 kN 微机控制压力试验机进行加载，图 4 展示了 2 种芯体类型的竹集成材格栅夹芯板试件。在试验过程中，试件被放置在试验机的上下压板之间，采用 3 种不同形状的压头（集中型、线型和平面型）对试件中心位置施加准静态压缩荷载，用以研究不同荷载工况对试件力学性能的影响，具体加载装置详见图 5。整个试验过程采用位移控制，保持 2 mm/min 的恒定加载速率，

表 1 面外受压竹集成材格栅夹芯板试件几何尺寸

Table 1 Geometric dimensions of out-of-plane compression laminated bamboo grid sandwich panel specimens

试验组号 Test group No.	试件编号 Specimen number	试件尺寸 Specimen size			面板厚度 Panel thickness / mm	芯体厚度 Core thickness / mm	芯体类型 Core type	荷载类型 Load type	试件数量 Number of test specimens
		长度 Length / mm	宽度 Width / mm	厚度 Thickness / mm					
1	BSP-SC	300	300	64	8	48	轴向顺纹	集中荷载	3
2	BSP-SL	300	300	64	8	48	轴向顺纹	线荷载	3
3	BSP-SP	300	300	64	8	48	轴向顺纹	面荷载	3
4	BSP-HC	300	300	64	8	48	轴向横纹	集中荷载	3
5	BSP-HL	300	300	64	8	48	轴向横纹	线荷载	3
6	BSP-HP	300	300	64	8	48	轴向横纹	面荷载	3

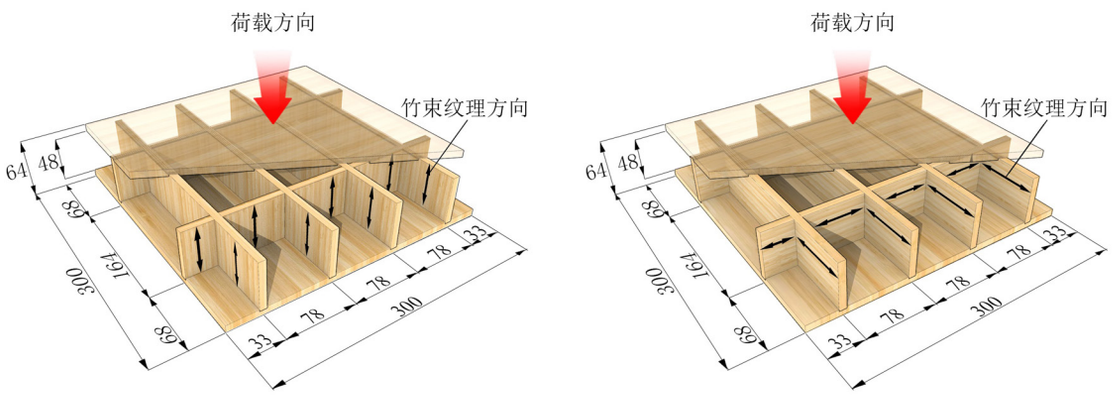


图 4 不同芯体类型竹集成材格栅夹芯板 (单位 : mm)

Fig. 4 Laminated bamboo grid sandwich panels with different core types (Unit: mm)

以保证测试结果的可靠性。试验期间记录荷载 - 位移曲线，直到试件发生完全破坏。基于试验数据的系统分析，揭示竹集成材格栅夹芯板的失效机制及力学性能特性，并得到承载力、纵向位移等试验结果。

2 结果与分析

2.1 压缩破坏模式

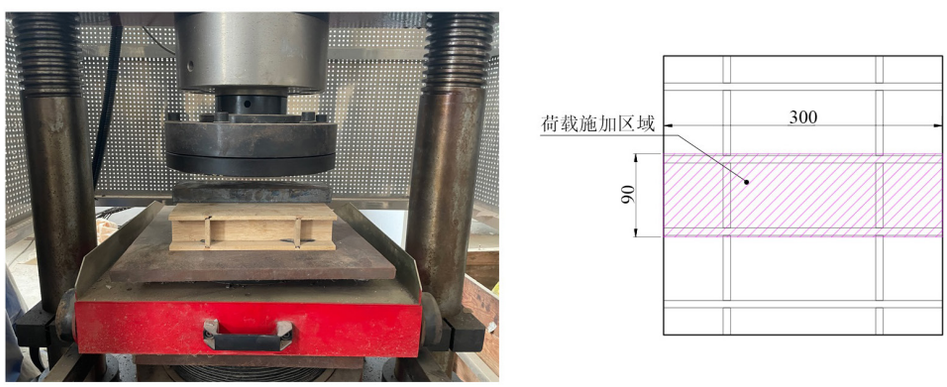
竹集成材格栅夹芯板在不同荷载工况下的面外受压破坏形态如图 6 所示。试验观察发现，试件在集中荷载、线荷载和面荷载 3 种工况下表现出明显不同的破坏模式，但轴向顺纹和轴向横纹 2 种芯体的格栅夹芯板压缩破坏模式基本一致。其破坏模式主要可分为以下 3 种类型：面板断裂、腹板屈曲和腹板断裂。

在集中荷载工况下，格栅夹芯板试件主要呈现面板断裂的破坏模式。试验过程中观察到，由于荷载集中作用于局部区域，2 种芯体类型的试件均较早出现局部变形，具体表现为面板中心区域出现凹陷变形，同时伴有频繁的竹材撕裂声。随着荷载的持续增加，裂缝逐步扩展直至面板完全断裂，最终导致试件发生破坏。需要特别指出的是，在整个破坏过程中，2 种芯体试件的腹板结构整体均保持完好（图 6a、d）。集中荷载作用于面板时，中心部位产生强烈的纵向压应力，导致受压区域向下凹陷变形，同时边缘产生剪应力，面板沿竹纤维方向出现裂缝，随着荷载的持续增加，裂缝逐步扩展直至面板完全断裂，最终导致试件发生破坏。面板发生破坏时的荷载远低于腹板破坏的临界值，腹板始终处于弹性阶段。

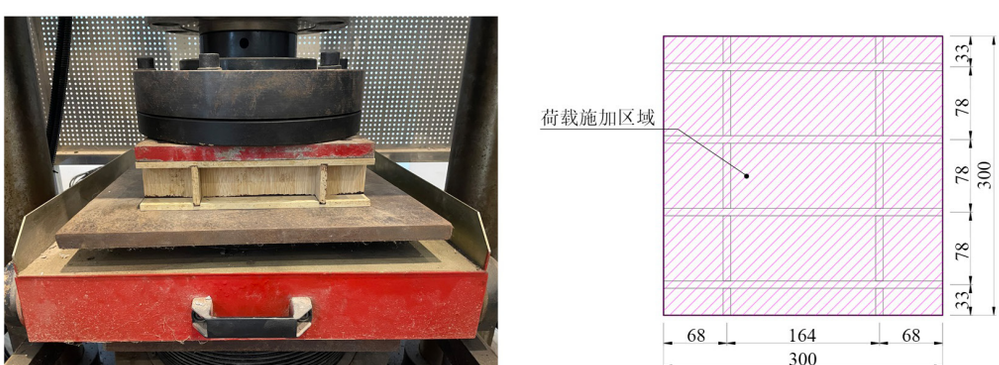
在线荷载工况下，格栅夹芯板试件主要表现出面板断裂、腹板屈曲和腹板断裂 3 种破坏模式。加载初期，2 种芯体类型的试件均未出现明显变形。随着荷载的增加，轴向横纹芯体试件先出现竹材的撕裂声，面板产生显著纵向变形，同时腹板发生屈曲并伴有轻微侧向变形。随着荷载进一步增大，面板断裂声逐渐频繁，并形成明显的横向裂纹，当荷载达到最大值后，腹板最终断裂导致试件完全破坏。轴向顺纹芯体试件凭借腹板较高的抗压强度，破坏时仅出现面板断裂，腹板未产生明显的破坏变形（图 6b、e）。线荷载作用于面板时，面板受压区域受到纵向压应力，导致受压区域边缘的竹纤维受剪，使面板沿顺纹方向出现裂缝，随着荷载的持续增加，裂缝逐步扩展直至面板断裂。腹板上下端由面板开槽固定约束，承受较大



（a）集中荷载 Concentrated load



（b）线荷载 Linear load



（c）面荷载 Planar load

图 5　面外受压加载装置图（单位：mm）
Fig. 5　Out-of-plane compression loading device diagram (Unit: mm)

纵向压力时，由于轴向横纹芯体的竹材抗压能力弱，其腹板在压应力作用下易产生屈曲，随后腹板应力状态发生改变，屈曲内侧受压，外侧受拉产生裂缝，随着荷载增加，最终导致腹板沿竹纤维方向发生断裂。而轴向顺纹芯体由于抗压强度高，有效抑制了腹板变形与断裂，破坏时仅面板发生断裂。

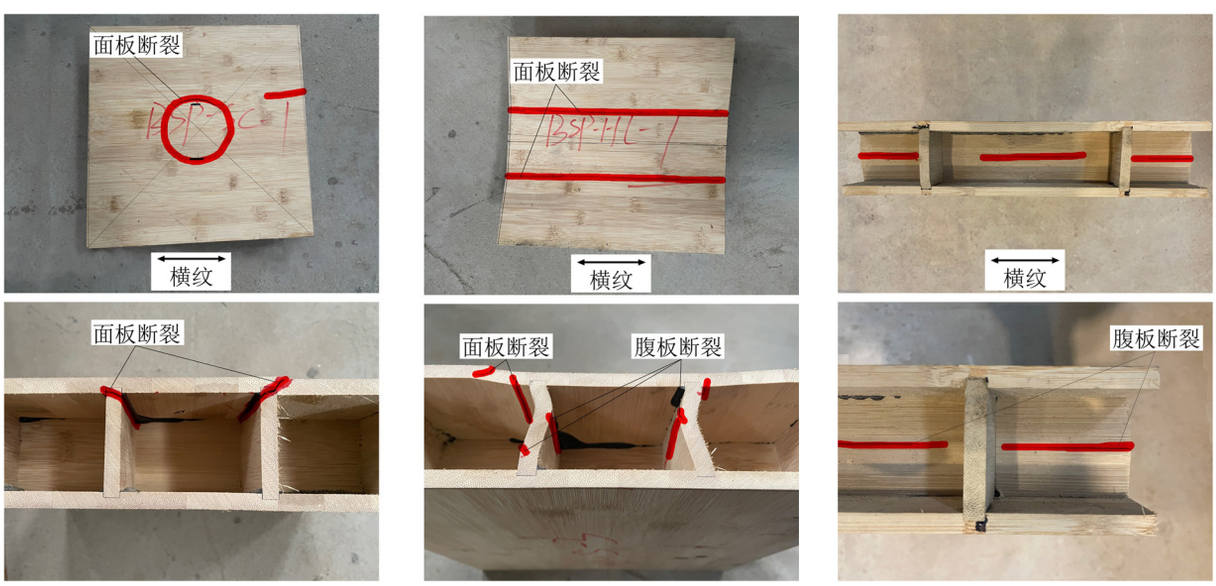
在面荷载工况下，格栅夹芯板试件主要表现为腹板屈曲和断裂 2 种破坏模式。试验加载初期的现象与线荷载工况相似。随着荷载增大，轴向横纹芯体试件先出现腹板屈曲现象，具体表现为腹板产生轻微侧向变形，同时伴有清晰的破裂声。当荷载增至最大值时，腹板发生断裂并形成明显的横向裂纹，最终造成试件破坏。轴向顺纹芯体试件因竹集成材顺纹方向具有更高的抗压强度，其腹板屈曲出现的时间相对较晚。腹板屈曲时，发生侧向变形，当荷载达到极限值后，腹板形成明显的纵向裂纹，导致试件破坏（图 6c、f）。面荷载作用于面板时，上下面板整体受压未产生剪应力，因此面板在整个试验过程中未发生破坏。腹板在压应力作用下产生屈曲，腹板应力状态发生改变，受拉侧产生裂缝，随着荷载增加，最终导致沿竹纤维方向发生断裂。而轴向顺纹芯体试件因竹纤维轴向排列紧密，更有效地抵抗了屈曲变形，延缓了破坏。因此，轴向顺纹芯体试件极限荷载远大于轴向横纹芯体试件。



（a）BSP-S（顺纹）C（集中荷载）
BSP-S (Parallel to grain)
C (Concentrated load)

（b）BSP-S（顺纹）L（线荷载）
BSP-S (Parallel to grain)
L (Linear load)

（c）BSP-S（顺纹）P（面荷载）
BSP-S (Parallel to grain)
P (Planar load)



（d）BSP-H（横纹）C（集中荷载）
BSP-H (Perpendicular to grain)
C (Concentrated load)

（e）BSP-H（横纹）L（线荷载）
BSP-H (Perpendicular to grain)
L (Linear load)

（f）BSP-H（横纹）P（面荷载）
BSP-H (Perpendicular to grain)
P (Planar load)

图 6　竹集成材格栅夹芯板面外压缩破坏形态
Fig. 6　Failure mode of laminated bamboo grid sandwich panels under out-of-plane compression

2.2　荷载 - 位移关系

图 7 为 6 组试件的面外受压荷载 - 位移曲线。为直观呈现 2 种芯体类型在 3 种荷载工况下的受压性能差异，将试件的荷载 - 位移曲线按荷载工况分成 3 组，分别为集中荷载、线荷载和面荷载。

如图 7 所示，2 种芯体试件的荷载 - 位移曲线均呈现典型的非线性特征，完整记录了材料从弹性变形到塑性变形直至最终破坏的全过程。在初始加载阶段，所有试件的荷载 - 位移关系均保持近似线性增长，表明材料处于弹性变形阶段。轴向顺纹芯体试件表现出更高的初始刚度，其曲线斜率明显大于轴向横纹芯体试件，这主要源于竹集成材顺纹方向更优异的抗压性能。随着位移持续增大，曲线逐渐呈现非线性特征，进入塑性变形阶段。在此阶段，试件内部开始产生面板微裂纹或腹板屈曲等局部损伤。值得注意的是，轴向顺纹试件不仅具有更高的承载能力，其对应的位移也相对较大。当荷载达到峰值后，2 种试件的承载能力均开始下降，表明试件进入破坏阶段，此时试件内部损伤加剧，最终导致面板断裂或腹板断裂。

竹集成材格栅夹芯板在集中荷载、线荷载和面荷载 3 种工况下的面外受压荷载 - 位移曲线分析表明：在集中荷载工况下，试件显示出最低的承载能力（BSP-SC 峰值荷载约 40 kN，BSP-HC 约 30 kN），其破坏模式以面板断裂为主，腹板基本保持完好，表明荷载局部集中效应显著加速了面板的局部破坏。在线荷载工况下，试件呈现中等水平的承载能力（BSP-SL 峰值荷载约 230 kN，BSP-HL 约 100 kN），破坏模式以面板断裂和腹板断裂为主，说明线性荷载分布使面板成为主要受力部位。而在面荷载工况下，试件展示了最高的承载能力（BSP-SP 峰值荷载约 500 kN，BSP-HP 约 180 kN），破坏模式主要表现为腹板屈曲和腹板断裂，表明均匀荷载分布有助于保持结构的整体稳定性。此外，轴向顺纹芯体试件在所有工况下都显示出更高的承载力和刚度，但延性相对较差；相反，轴向横纹芯体试件则表现出更好的延展性，但承载能力相对较低。

2.3　压缩强度与压缩模量

为全面评估竹集成材格栅夹芯板在面外荷载作用下的力学性能，根据其荷载 - 位移曲线计算夹芯板压缩强度与压缩模量，试验所测得的格栅夹芯板面外受压破坏荷载及轴向变形如表 2 所示。

压缩强度 σ_z 按公式（1）计算：

$$\sigma_z = \frac{P}{A} \tag{1}$$

式中：P 为压缩破坏荷载（kN）；A 为夹芯板受压横截面面积（mm^2）。

压缩模量 E_z 按公式（2）计算：

$$E_z = \frac{\Delta P h}{\Delta h A} \tag{2}$$

式中：ΔP 为荷载 - 位移曲线上线性段荷载增量（kN）；Δh 为对应于 ΔP 的压缩变形增量（mm）；h 为夹芯板总厚度（mm）。

竹集成材格栅夹芯板的压缩强度与压缩模量计算结果如图 8 所示。由图 8 可以看出，芯体类型对夹芯板试件的力学性能具有显著影响。在 3 种荷载工况下，轴向顺纹芯体试件均表现出较高的压缩强度和压缩模量。与轴向横纹芯体试件相比，轴向顺纹芯体试件压缩强度分别提升了 33.3%、130.3% 和 178.0%，压缩模量分别提升了 36.4%、16.6% 和 25.2%。

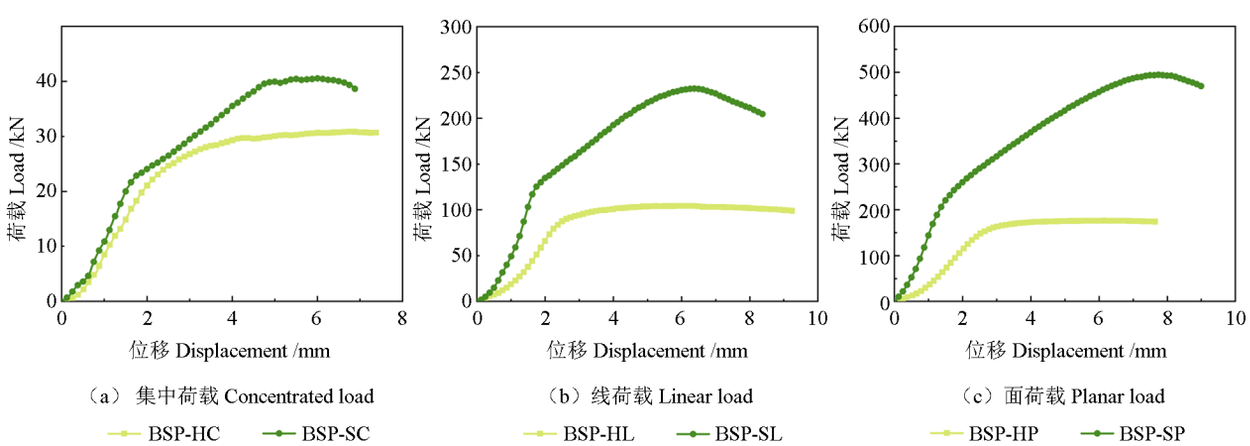


图 7　不同荷载工况下竹集成材格栅夹芯板面外受压荷载 - 位移曲线

Fig. 7　Out-of-plane compressive load-displacement curves of laminated bamboo grid sandwich panels under different loading conditions

表 2　竹集成材格栅夹芯板压缩强度与压缩模量试验结果

Table 2　Test results of compressive strength and compressive modulus for laminated bamboo grid sandwich panel

试验组号 Test group No.	试件编号 Specimen number	受压面积 A Compression area /mm^2	厚度 h Thickness / mm	破坏荷载 P Failure load / kN	荷载增量 ΔP Load increment /kN	变形增量 Δh Deformation increment /mm	压缩强度 σ_z Compressive strength /MPa	压缩模量 E_z Compressive modulus /MPa
1	BSP-SC	6 358.5	64	39.972	38.536	4.502	6.29	86.20
2	BSP-SL	27 000	64	230.043	226.156	5.568	8.52	96.30
3	BSP-SP	90 000	64	500.420	476.887	6.496	5.56	52.20
4	BSP-HC	6 358.5	64	30.030	29.738	4.734	4.72	63.20
5	BSP-HL	27 000	64	99.937	80.424	2.307	3.70	82.60
6	BSP-HP	90 000	64	179.663	148.252	2.528	2.00	41.70

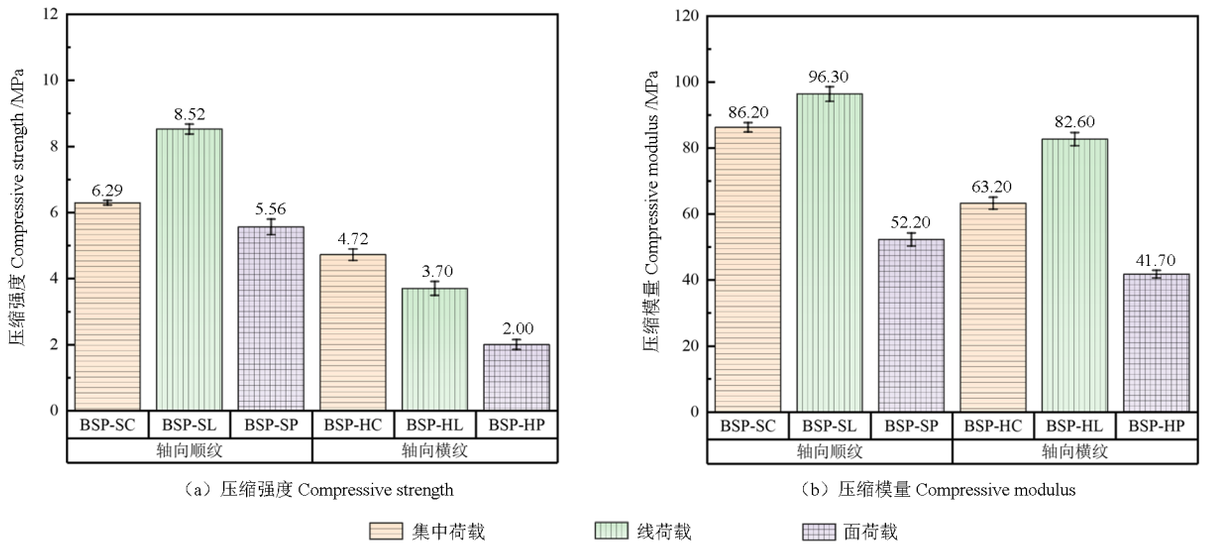


图 8 竹集成材格栅夹芯板面外压缩强度和压缩模量

Fig. 8 Out-of-plane compression strength and modulus of laminated bamboo grid sandwich panels

2.4 吸能能力

为进一步评估竹集成材格栅夹芯板在面外压缩荷载作用下的能量吸收特性，优化其抗冲击性能与结构安全性，本节系统分析其吸能能力，可为格栅夹芯板构件材料选择与结构设计提供重要的理论依据。吸能能力按公式（3）计算：

$$W=\int_0^x P_c \mathrm{d}x \tag{3}$$

式中：W 为吸能值（J）；P_c 为施加的压缩荷载（kN）；x 为试件压缩变形值（mm），取积分上限 x=5 mm。

吸能能力计算结果如图 9 所示，在 3 种荷载工况下，集中荷载工况下的吸能能力最低，线荷载处于中等水平，面荷载最高。这表明荷载作用面积越大，试件吸收能量的能力越强。轴向顺纹芯体试件表现出较高的吸能能力。与轴向横纹芯体试件相比，轴向顺纹芯体试件吸能能力分别提升了 14.3%、72.5% 和 186.6%。

通过对竹集成材格栅夹芯板面外受压试验的系统研究，揭示了其在不同荷载工况下的破坏模式、力学性能及能量吸收特性。试验结果表明，荷载工况对试件的破坏模式具有显著影响：集中荷载下以面板局部断裂为主，承载能力最低（峰值荷载约 40 kN）；线荷载下以面板断裂为主，承载能力处于中等水平（峰值荷载约 230 kN）；面荷载下试件以腹板屈曲和断裂为主，表现出最高承载能力（峰值荷载约 500 kN）。本研究还发现，轴向顺纹芯体试件在压缩强度、压缩模量及吸能能力上均明显优于轴向横纹芯体试件，特别是在面荷载工况下，其压缩强度提升 178.0%，吸能能力提升 186.6%。试验记录的荷载 - 位移曲线均表现出明显的非线性特征。值得注意的是，随着荷载作用面积的增大，试件的能量吸收能力也随之提高，其中面荷载工况下的竹集成材格栅夹芯板的吸能值表现最为突出。

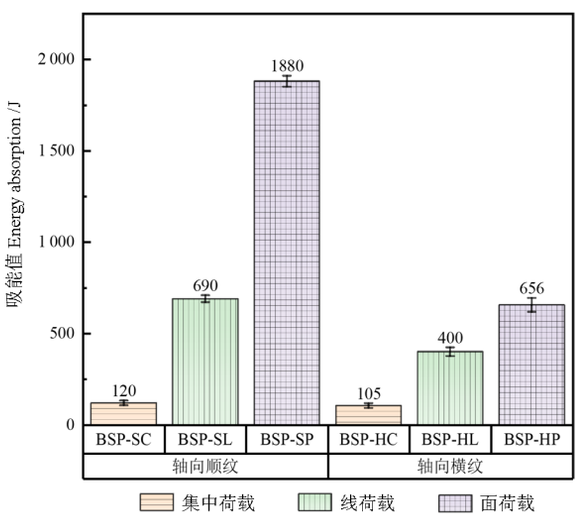


图 9 竹集成材格栅夹芯板面外压缩吸能值

Fig. 9 Energy absorption of laminated bamboo grid sandwich panels under out-of-plane compression

3 结论与展望

通过开展竹集成材格栅夹芯板的面外受压试验，系统研究了荷载工况与芯体类型对试件破坏模式及力学性能的影响规律，可为该结构在桥面板和楼面板等工程中的应用提供理论与试验依据。课题组前期研究主要集中于验证格栅夹芯板的整体抗弯承载能力，而本研究进一步探讨了其在面外受压下的局部承载性能，确保了结构在满足抗弯要求的同时能够避免局部破坏。本研究结果为

后续通过结构参数优化实现更轻质、更高强的设计目标提供了直接依据。在此基础上，未来将进一步开展竹集成材格栅夹芯板的疲劳性能试验，完善其动力性能研究，从而为实际工程应用提供更全面的理论指导。

1）在集中荷载、线荷载和面荷载 3 种工况下，竹集成材格栅夹芯板的面外压缩破坏模式存在较大差异，但不同芯体类型的破坏模式基本一致。在集中荷载工况下，试件破坏则主要表现为面板断裂；在线荷载工况下，试件破坏模式以面板断裂为主，并伴随腹板屈曲和腹板断裂；在面荷载工况下，试件破坏主要呈现腹板屈曲和腹板断裂。

2）芯体类型对试件的面外受压性能具有显著影响，轴向顺纹芯体试件在 3 种荷载工况下均表现出较高的压缩强度、压缩模量和吸能能力。与轴向横纹芯体试件相比，轴向顺纹芯体试件的压缩强度分别提升了 33.3%、130.3% 和 178.0%，压缩模量分别提升了 36.4%、16.6% 和 25.2%，吸能能力分别提升了 14.3%、72.5% 和 186.6%。

3）竹集成材格栅夹芯板通过优化芯体类型，实现了轻量化与高承载效率的协同设计。在材料用量仅为实心板 40% 的条件下，该结构于 3 种荷载工况下均展现出优异的面外受压性能，从而为其在绿色装配式建筑中的轻量化应用提供了理论基础。

参考文献：

[1] 郑青 . 新型格栅结构设计及力学性能研究 [D]. 长沙 : 国防科技大学 ,2017:1-3.
Zheng Q. Design and mechanical properties of novel lattice structures[D]. Changsha: National University of Defense Technology,2017:1-3.

[2] 王智丰 , 尹翚 , 曹磊 , 等 . 现代胶合木拱桥结构性能评价 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2019,39(4):107-111.
Wang Z F, Yin J, Cao L, et al. Structural performance assessment of a glulam arch bridge[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2019,39(4):107-111.

[3] Chen L M, Zhang J, Du B, et al. Dynamic crushing behavior and energy absorption of graded lattice cylindrical structure under axial impact load[J]. Thin-Walled Structures,2018,127:333-343.

[4] Turner A J, Al Rifaie M, Mian A, et al. Low-velocity impact behavior of sandwich structures with additively manufactured polymer lattice cores[J]. Journal of Materials Engineering and Performance,2018,27(5):2505-2512.

[5] Yin S, Chen H Y, Wu Y B, et al. Introducing composite lattice core sandwich structure as an alternative proposal for engine hood[J]. Composite Structures,2018,201:131-140.

[6] Lurie S A, Solyaev Y O, Koshurina A A, et al. Design of the corrugated-core sandwich panel with external active cooling system[J]. Composite Structures,2018,188:278-286.

[7] 范华林 , 杨卫 . 轻质高强点阵材料及其力学性能研究进展 [J]. 力学进展 ,2007,37(1):99-112.
Fan H L, Yang W. Development of lattice materials with high specific stiffness and strength[J]. Advances in Mechanics,2007,37(1):99-112.

[8] 范华林 , 金丰年 , 方岱宁 . 格栅结构力学性能研究进展 [J]. 力学进展 ,2008,38(1):35-52.
Fan H L, Jin F N, Fang D N. Structural mechanics of lattice grids[J]. Advances in Mechanics,2008,38(1):35-52.

[9] 毛林海 , 苏丽君 , 赵磊 , 等 . 竹复合材料在建筑中的应用 [J]. 世界竹藤通讯 ,2024,22(1):109-112,124.
Mao L H, Su L J, Zhao L, et al. Application of bamboo composite material in buildings[J]. World Bamboo and Rattan,2024,22(1):109-112,124.

[10] 李海涛 , 张齐生 , 吴刚 , 等 . 竹集成材研究进展 [J]. 林业工程学报 ,2016,1(6):10-16.
Li H T, Zhang Q S, Wu G, et al. A review on development of laminated bamboo lumber[J]. Journal of Forestry Engineering,2016,1(6):10-16.

[11] 冷予冰 , 陈玲珠 , 王明谦 , 等 . 工程竹结构建筑 : 从传统走向现代 [J]. 世界科学 ,2022(11):38-41.
Leng Y B, Chen L Z, Wang M Q, et al. Engineered bamboo structures: from tradition to modernity[J]. World Science,2022(11):38-41.

[12] Niu B, Wang B. Directional mechanical properties and wave propagation directionality of Kagome honeycomb structures[J]. European Journal of Mechanics A/Solids,2016,57:45-58.

[13] 仇艳慧 , 徐庆林 , 尹昌平 , 等 . 缝合增强泡沫夹芯结构复合材料力学性能研究 [J]. 玻璃钢 / 复合材料 ,2017(10):46-52.
Qiu Y H, Xu Q L, Yin C P, et al. Mechanical performance of stitched foam core sandwich composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2017(10):46-52.

[14] 樊子砚 , 方海 , 庄勇 , 等 . 格构腹板增强泡沫夹芯复合材料准静态压缩吸能试验 [J]. 玻璃钢 / 复合材料 ,2017(1):5-10.
Fan Z Y, Fang H, Zhuang Y, et al. Experimental study on energy absorption of the foam sandwich composite enhanced lattice web under quasi-static compression[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites,2017(1):5-10.

[15] 郑吉良 , 彭明军 , 孙勇 . 等腰梯形蜂窝芯玻璃钢夹芯板的面外压缩性能 [J]. 材料工程 ,2017,45(2):72-79.
Zheng J L, Peng M J, Sun Y. Out-plane compressive properties for isosceles trapezoid honeycomb core of FRP sandwich panel[J]. Journal of Materials Engineering,2017,45(2):72-79.

[16] 陈领 , 刘佳桐 , 刘瑞越 , 等 . 偏心距对胶合木空心柱受压性能的影响 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2023,43(2):166-179.
Chen L, Liu J T, Liu R Y, et al. Influences of eccentricity on the compressive performance of glulam hollow columns[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2023,43(2):166-179.

[17] Taghizadeh S A, Farrokhabadi A, Liaghat G, et al. Characterization of compressive behavior of PVC foam infilled composite sandwich panels with different corrugated core shapes[J]. Thin-Walled Structures,2019,135:160-172.

[18] 石昌 , 王继辉 , 朱俊 , 等 . 梯形格栅结构增强泡沫夹芯复合材料平压性能 [J]. 复合材料学报 ,2022,39(2):590-600.
Shi C, Wang J H, Zhu J, et al. Flatwise compression properties of trapezoidal lattice-web reinforced foam core sandwich composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2022,39(2): 590-600.

[19] Sun S Y M, Liu D, Sheng Y L, et al. Out-of-plane compression of a novel hybrid corrugated core sandwich panel[J]. Composite Structures,2021,272:114222.

[20] 李旌豪 . 三轴格栅夹芯板结构性能试验研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2012:43-45.
Li J H. Experimental researches on structural performance of tri-axial grids sandwich panels[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2012:43-45.

[21] 杨冬霞 , 胡英成 , 范长胜 . 木质格栅夹芯胞元结构的平压力学性能 [J]. 林业工程学报 ,2018,3(5):34-40.
Yang D X, Hu Y C, Fan C S. Compression mechanical properties of woody grid sandwich unit cell structure[J]. Journal of Forestry Engineering,2018,3(5):34-40.

[22] 魏凯耀 , 曾竟成 , 杜刚 , 等 . 整体缝合夹芯结构复合材料压缩性能 [J]. 复合材料学报 ,2016,33(6):1234-1241.
Wei K Y, Zeng J C, Du G, et al. Compression performance of integrated stitched sandwich structure composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica,2016,33(6):1234-1241.

[23] 李静雯 , 张博明 , 孙义亮 , 等 . 不同铺层方式下连续玻璃纤维 / 聚丙烯复合材料波纹夹芯板的力学性能 [J]. 复合材料学报 , 2019,36(5):1074-1082.
Li J W, Zhang B M, Sun Y L, et al. Mechanical properties of continuous glass fiber/polypropylene corrugated sandwich boards under different laminates[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019,36(5):1074-1082.

[24] 周李承 . 新型竹质集成材格栅夹芯板抗弯性能研究 [D]. 长沙 : 中南林业科技大学 ,2024:58-60.
Zhou L C. Research on bending performance of laminated bamboo sandwich panels with lattice core[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology,2024:58-60.

[25] 王智丰 , 汤舒畅 , 彭熙之 , 等 . 竹集成材格栅夹芯板轴心受压性能 [J]. 林业科学 ,2025,61(9):173-183.
Wang Z F, Tang S C, Peng X Z, et al. Axial compression performance of laminated bamboo grid sandwich panels[J]. Scientia Silvae Sinicae,2025,61(9):173-183.

[26] Wang Z F, Zhou L C, Zhang Z F, et al. Study on bending performance of laminated bamboo sandwich panels with different lattice core layers: cleaner production of green material[J]. Case Studies in Construction Materials,2024,20:e03379.

[27] GB/T 1453—2022 夹层结构或芯子平压性能试验方法 [S].
GB/T 1453-2022 Test method for flatwise compression properties of sandwich constructions or cores[S].

[28] 庄勇 , 王健 , 方海 , 等 . 空间格构腹板增强泡沫夹芯复合材料试件准静态压缩吸能试验 [J]. 建筑科学与工程学报 , 2018,35(5):70-77.
Zhuang Y, Wang J, Fang H, et al. Experiment on energy absorption of foam sandwich composite specimens with spatial reinforced lattice web under quasi-static compression[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2018,35(5):70-77.

[本文编校：吴　彬]