

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240088

## 不同构型集成竹格栅夹芯板抗弯性能

王智丰<sup>1,2</sup> 周李承<sup>1</sup>

(1. 中南林业科技大学土木工程学院, 湖南长沙 410004; 2. 中南林业科技大学现代木结构工程材料制造及应用技术湖南省工程实验室, 湖南长沙 410004)

**摘要:**【目的】针对集成竹利用效率不高, 使用形式较为单一的问题, 探索其轻质、高效特性的先进结构形式, 这对推动竹材在工程领域的应用方面具有重要意义。本研究旨在探究不同构型格栅芯体对集成竹格栅夹芯板弯曲性能的影响, 选出不同格栅构型中抗弯性能最优的结构, 为其在实际工程的应用提供理论依据。【方法】以集成竹为原材料, 通过嵌锁法分别设计加工 3 种具有不同构型(三角形格栅、方形格栅和 Kagome 形格栅)的集成竹格栅夹芯板。对不同格栅芯体的集成竹格栅夹芯板进行四点弯曲试验, 探讨夹芯板结构的受弯性能, 分析夹芯板结构在受弯荷载下的破坏机理、跨中挠度、抗弯刚度和极限承载力的变化规律, 并对 3 种不同芯体集成竹格栅夹芯板结构的比强度和比刚度进行对比。同时, 采用有限元方法建立集成竹格栅夹芯板四点弯曲试验模型, 并进行数值模拟分析。【结果】3 种不同构型格栅芯体的集成竹格栅夹芯板结构在受弯加载过程中均表现为剪切破坏。三角形集成竹格栅夹芯板的承载能力最好, 三角形和 Kagome 形格栅极限承载力分别为 38.7 和 27.5 kN, 较极限承载力 22.5 kN 的方形格栅增加了 71.9% 和 22.2%; 同时三角形集成竹格栅夹芯板的比强度为 133.5 kN·m/kg, 较方形(94.6 kN·m/kg)和 Kagome 形(96.7 kN·m/kg)分别提高了 41.2% 和 38.1%。有限元模型的模拟结果与试验结果较一致, 能有效预测集成竹格栅夹芯板的弯曲性能。【结论】3 种格栅构型中三角形集成竹夹芯板弯曲性能最优, 能够更好地发挥集成竹轻质高强的性能优势。研究结果可为竹材在工程领域的应用提供一种高效的结构形式及理论依据。

**关键词:** 结构板材; 有限元法; 失效模式; 弯曲强度; 集成竹夹芯板; 格栅构型

**中图分类号:** S781.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2025)01-0147-09

**引文格式:** 王智丰, 周李承. 不同构型集成竹格栅夹芯板抗弯性能 [J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(1): 147-155. Wang Zhifeng, Zhou Licheng. Bending performance of laminated bamboo sandwich panels with different lattice configurations [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(1): 147-155.

## Bending performance of laminated bamboo sandwich panels with different lattice configurations

Wang Zhifeng<sup>1,2</sup> Zhou Licheng<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China;

2. Hunan Engineering Laboratory for Manufacturing and Application Technology of Modern Timber Structure Engineering Material, Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** [Objective] Integrated bamboo has low utilization efficiency and is used in a rather limited variety of forms in engineering applications. So exploring advanced structural forms that integrate the lightweight and high-efficiency characteristics of bamboo is of great significance in promoting the application of bamboo in the field of engineering. This study aims to investigate the impact of different lattice configurations on bending performance of laminated bamboo sandwich panels, select the structure with the best bending resistance among various lattice configurations, and provide a theoretical basis for its application in practical engineering. [Method] Three kinds of laminated bamboo sandwich panels with

收稿日期: 2024-03-25 修回日期: 2024-09-30

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(32471984), 湖南省自然科学基金面上项目(2024JJ5631), 湖南省教育厅优青项目(23B0236), 湖南省研究生科研创新项目(QL20230192), 中南林业科技大学引进人才项目(2019YJ048)。

**第一作者:** 王智丰, 博士, 副教授。主要研究方向: 现代竹木结构理论及应用基础研究。Email: wangzhifeng\_1984@163.com 地址: 410004 湖南省长沙市韶山南路 498 号中南林业科技大学。

**本刊网址:** <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

different lattice cores, namely triangular lattice, square lattice and Kagome lattice, were designed and processed with laminated bamboo as raw material by interlocking method in this study. A four-point bending test was carried out on laminated bamboo sandwich panels with different lattice cores, and the bending performance of sandwich panels was discussed. The failure mechanism of sandwich panels under bending load, as well as the variation law of mid-span deflection, bending stiffness and ultimate bearing capacity, were analyzed, and the specific strength and specific stiffness of laminated bamboo sandwich panels with three different core layers were compared. At the same time, a four-point bending test model of laminated bamboo sandwich panels was established by finite element method, and numerical simulation was carried out. [Result] Three kinds of sandwich panels with different lattice cores all showed shear failure during the bending loading, among which the triangular lattice sandwich panel had the best bearing capacity. Compared with square lattice sandwich panel with ultimate bearing capacity of 22.5 kN, the ultimate bearing capacity of sandwich panels with triangular lattice and Kagome lattice was 38.7 and 27.5 kN, increased by 71.9% and 22.2%, respectively. The specific strength of laminated bamboo sandwich panel with triangular lattice was 133.5 kN·m/kg, which was 41.2% and 38.1% higher than that of square lattice and Kagome lattice with specific strength of 94.6 and 96.7 kN·m/kg, respectively. The finite element model was in good agreement with the test results, which can effectively predict bending performance of laminated bamboo sandwich panels. [Conclusion] Among three kinds of lattice cores, the laminated bamboo triangular lattice sandwich panel has the best bending performance, which can better present the lightweight and high-strength advantages of laminated bamboo. The research results can provide an effective structural form and theoretical basis for the application of bamboo in the engineering field.

**Key words:** structural panels; finite element method; failure modes; bending strength; laminated bamboo sandwich panel; lattice configuration

竹材作为一种传统建筑材料,具有轻质高强、出色的力学性能、可塑性和韧性好等优点,同时还拥有出色的生态性能,成为现代绿色建筑的首选材料<sup>[1]</sup>。它被认为是一种重要的非木材产品,具有卓越的社会效益和生态适应性且生长周期短,同时在生长过程中能固碳改善环境<sup>[2]</sup>。从建筑的整个生命周期来看,竹材是一种绿色环保的优质材料,具有广泛的应用前景,更能满足我国的“双碳”战略要求<sup>[3]</sup>。竹材具有细密的纤维结构,良好的物理力学性能和加工性能,因此被视为钢材和混凝土材料的有益补充<sup>[4]</sup>。为了更好地实现建筑领域的可持续发展,并推动竹材在建筑领域中的应用,不仅需要选用绿色环保的竹材作为建筑材料,还需要探索轻质、高效的先进结构形式,以更好地利用和发展竹材。夹芯板结构是一种具有高刚度—重量比的结构,同时由于其轻质高强的潜力,现在已被广泛应用于航空航天、船舶海事和建筑工程等领域<sup>[5-6]</sup>。

夹芯板结构的强度主要取决于面层材料、芯体材料<sup>[7]</sup>、芯体几何构型<sup>[8]</sup>和粘结条件<sup>[9]</sup>等因素。通过改变面层和芯体的厚度、芯体的几何结构,采用不同类型的材料等可满足不同的功能需求,开发具有更高刚度、强度和能量吸收等特性的轻质结构。越来越多的研究聚焦于开发理想的轻质芯体几何构型和材料种类<sup>[10]</sup>。

二维周期细胞结构作为一种经典的格栅芯体形状,指的是在二维空间中以重复出现的胞元形状和排列方式设计的结构<sup>[11]</sup>。这些形状包括三角形、蜂窝形、方形、Kagome形等。吴启凡等<sup>[12]</sup>以复合材料格栅板为研究对象,对按不同方式设置面层的格栅板进行系统的受弯试验研究和数值分析,研究其受弯承载力和破坏形态。王亚楠等<sup>[13]</sup>研究了纤维增强复合材料格栅夹芯板,通过有限元仿真软件 Abaqus 分析面层纤维铺层角度以及格栅排布密度与夹芯板弯曲刚度的关系,并通过试验结果与仿真结果对比分析表明所用仿真方法的准确性较高。Li 等<sup>[14]</sup>通过四点弯曲试验,研究了木纤维基三角形夹芯板结构的静态弯曲性能和疲劳弯曲性能,静态弯曲试验中,结构失效发生于纯弯区的面层,而疲劳弯曲试验时发生在剪切区的面层和芯体的界面处。Wang 等<sup>[15]</sup>通过三点弯曲试验,研究了采用瓷砖作为面层的蜂窝芯夹芯板结构的抗弯性能,陶瓷蜂窝夹芯结构在弯曲荷载下与传统的铝蜂窝夹芯结构具有不同的力学行为,其在两个支撑区域首先产生压痕,随着荷载的增加,上面层的中间区域首先发生破坏,最后瓷砖开裂,蜂窝芯产生严重的屈曲破坏,对于传统的夹芯结构,加载压头下的铝面层有明显的压痕,下面层的中间区域也发生了破坏,而其他区域的蜂窝芯完好,没有发生巨大的变形。Fan 等<sup>[16]</sup>采用碳纤维材料制

作成 Kagome 形格栅夹芯板,进行了面内受压、面外受压和三点弯曲加载试验,通过试验结果和理论公式对夹芯板结构的力学性能进行分析研究。现有研究通过试验和数值分析表明,不同材料和格栅构型对夹芯板结构的力学性质有显著影响。目前针对集成竹格栅夹芯板的研究相对较少,特别是其抗弯性能和破坏机理尚不明确。

为探索集成竹应用的先进结构形式,本研究拟采用集成竹设计制造具有不同格栅芯体的集成竹格栅夹芯板;并通过四点弯曲试验和有限元分析研究夹芯板结构的抗弯性能,以探明其失效机理,进而为集成竹格栅夹芯板在实际工程中的应用提供理论支撑。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材 料

采用湖南省桃花江竹材科技股份有限公司生产的平压集成竹作为夹芯板结构的面层和芯体材料。参考 GB/T 1927.2—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 2 部分:取样方法和一般要求》<sup>[17]</sup>对集成竹的密度、顺纹抗拉强度、顺纹抗压强度和顺纹剪切强度各设计 1 组试验进行测试,每组试验重复 16 次,试验结果见表 1。

试验中使用的胶黏剂为上海市致翔新材料科技有限公司的间苯二酚改性树脂系胶黏剂,胶黏剂黏度为 15 Pa·s,固含量为 65%。为了确保结构良好的

黏合性,将面层和芯体的表面均打磨抛光。经过处理后,面板和芯体可以高质有效地黏在一起。黏接后在适当的压力下养护一天,以确保面层和芯体之间的高质量黏附,使结构具有良好的整体性。

### 1.2 集成竹格栅夹芯板设计与制备

通过 CNC(computer numerical control)技术加工设计了三角形格栅、方形格栅、Kagome 形格栅 3 种格栅芯体(图 1)。采用嵌锁法制备这 3 种不同构型芯体的夹芯板试件。

集成竹格栅夹芯板结构尺寸考虑了加工条件和实际工程需求,根据某胶合木结构示范桥梁的桥面板尺寸按 1:1 足尺模型设计,在满足 GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》<sup>[18]</sup>构造要求的基础上,选用 8 mm 厚的集成竹进行加工,结构长 1 200 mm,宽 384 mm,厚 64 mm,每组构件重复数 3 个,夹芯板结构的具体几何参数如表 2 所示。

使用数控铣床将 8 mm 厚的集成竹单板面层和芯体分别按编程路径铣出特定凹槽,通过嵌锁方式拼装成格栅芯体;将面层凹槽涂布间苯二酚胶黏剂,涂胶量为 260 g/m<sup>2</sup>;施胶完成后将格栅芯体安置于上面层和下面层之间,送至液压式冷压机铺设,铺设完成后进行冷压处理,压力值为 1 MPa,在 30 ℃ 加压 4 h 以上;冷压完成后使用切割机进行裁切,制备成长 1 200 mm,宽 384 mm,厚 64 mm 的集成竹格栅夹芯板(图 2)。加工流程如图 3 所示。

表 1 集成竹的密度和主要力学性能

Tab. 1 Density and main mechanical properties of laminated bamboo

材料	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	顺纹抗拉强度/MPa	顺纹抗压强度/MPa	顺纹剪切强度/MPa
集成竹	0.64 ± 0.02	114.5 ± 6.7	59.7 ± 4.0	18.9 ± 1.1
变异系数/%	2.5	5.8	6.7	6.0

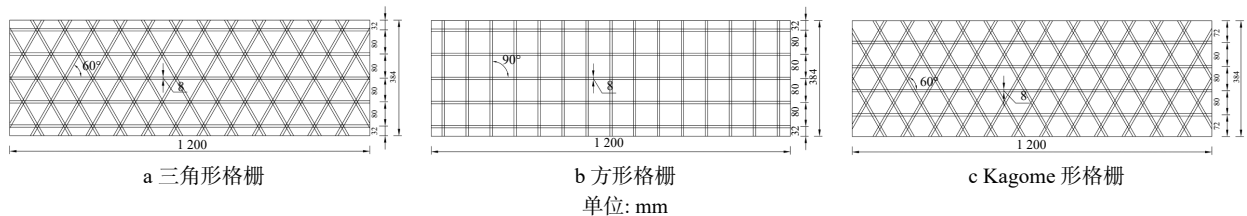


图 1 格栅夹芯板芯体构型

Fig. 1 Lattice core of laminated bamboo sandwich panel

表 2 集成竹格栅夹芯板结构的几何参数

Tab. 2 Geometric parameters of laminated bamboo sandwich panel

试件构型	试件数量	夹芯板			竹板厚度/mm	芯体厚度/mm	面层厚度/mm	长格栅数量	短格栅数量
		长度/mm	宽度/mm	厚度/mm					
三角形格栅	3	1 200	384	64	8	48	8	5	
方形格栅	3	1 200	384	64	8	48	8	5	15
Kagome形格栅	3	1 200	384	64	8	48	8	4	

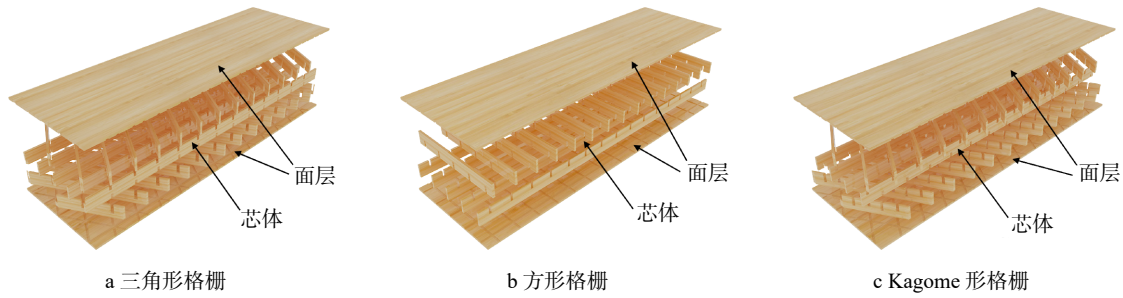


图2 嵌锁法加工集成竹格栅夹芯板示意图

Fig. 2 Schematic diagram of laminated bamboo sandwich panel processed by interlocking method

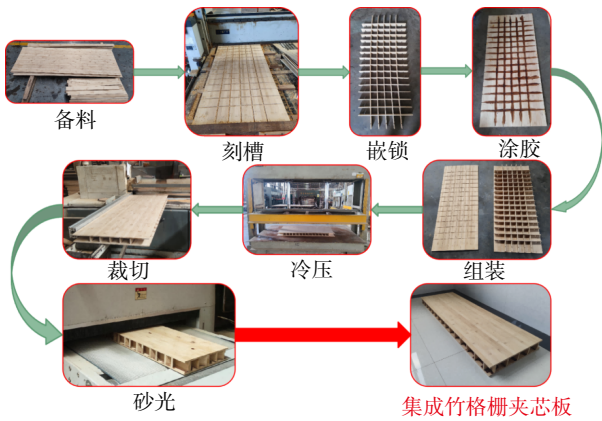


图3 嵌锁法加工集成竹格栅夹芯板加工流程图

Fig. 3 Process flowchart of laminated bamboo sandwich panel processed by interlocking method

### 1.3 四点弯曲试验

本试验参考 GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》<sup>[18]</sup>, 采用液压式千斤顶对试件进行加载,

荷载由千斤顶加压至分配梁, 通过支座传递至试件, 两个加载支座间距 380 mm, 两个支撑支座间距 1 140 mm。试验过程采用东华 DH3818Y 静态应变测试仪采集试验数据, 使用位移计测量夹芯板结构跨中、1/3、2/3 以及支撑支座处的竖向位移, 采用电阻应变片测量夹芯板结构的上面层及下面层跨中截面的应变, 试验荷载采用分级加载的方式, 每级加载后持续 3 min, 示数稳定后记录读数, 直至试件破坏。试验加载装置见图 4a, 位移计及应变片布置见图 4b。

为了定量分析不同构型芯体对夹芯板结构的抗弯性能的影响, 计算各组夹芯板结构的比刚度及比强度。结构抗弯刚度计算公式如式(1)所示<sup>[18]</sup>。

$$D = \frac{a\Delta P}{48f_1}(3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$

式中:  $D$  为夹芯板结构弯曲刚度(N·mm<sup>2</sup>),  $a$  为从支撑点到加载点的距离(mm),  $\Delta P$  为弹性变形阶段的

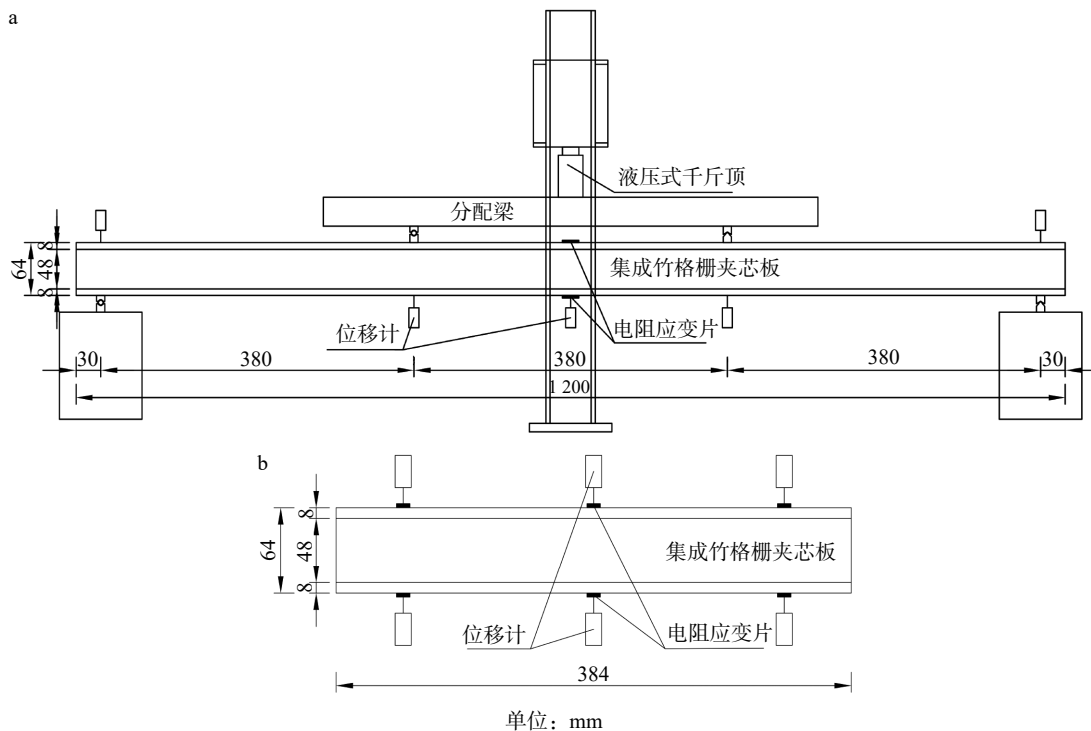


图4 集成竹格栅夹芯板弯曲试验加载示意(a)与测点布置(b)

Fig. 4 Loading diagram (a) and measuring point arrangement (b) of bending test for laminated bamboo sandwich panel

弯曲荷载增量(N),  $l$ 为结构跨度长度(mm),  $f_1$ 为  $\Delta P$  对应的跨中偏转值(mm),  $\Delta P/f_1$  为荷载-位移曲线线性部分(N/mm)。

1.4 有限元分析

基于有限元软件建立 3 种不同构型芯体集成竹格栅夹芯板数值模型, 分析结构在四点弯曲试验过程中的位移和应力变化。结构的面层和芯体均采用

集成竹制作, 在模型中采用实体单元进行模拟, 集成竹简化为正交各向异性材料, 具有  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  三个方向的弹性模量( $E$ )、泊松比( $\mu$ )和剪切模量( $G$ )共计 9 个参数, 参考相关文献 [19] 获得材料参数(表 3)。集成竹本构模型根据材性试验测得的数据简化为三折线模型, 以对集成竹格栅夹芯板在四点弯曲荷载下的力学行为进行分析(图 5)。

表 3 集成竹材料参数

Tab. 3 Material parameters of laminated bamboo

弹性模量/MPa			泊松比			剪切模量/MPa		
$E_{11}$	$E_{22}$	$E_{33}$	$\mu_{12}$	$\mu_{13}$	$\mu_{23}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
9 200	920	460	0.36	0.30	0.29	690	552	158

注: 1、2、3 分别表示试件跨度方向、试件截面宽度方向、试件截面高度方向。数据引自参考文献[19]。

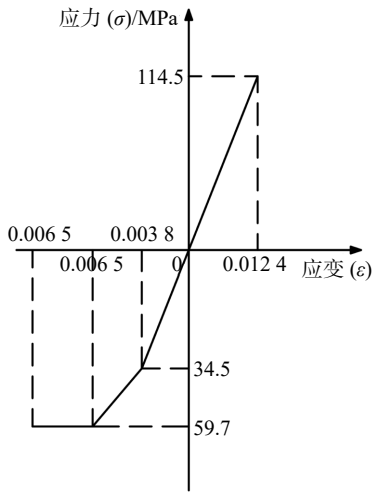


图 5 集成竹本构模型

Fig. 5 Constitutive model of laminated bamboo

在试件加工过程中采用胶黏剂将面层和芯体黏接成整体结构, 最终破坏形态显示面层与芯体之间未出现脱胶现象, 因此有限元模型中没有考虑胶合层, 假设面层和芯体间的界面胶合是完好的, 在界面之间应用了绑定约束。有限元模型如图 6 所示, 该模型的尺寸与弯曲试验试件尺寸一致。

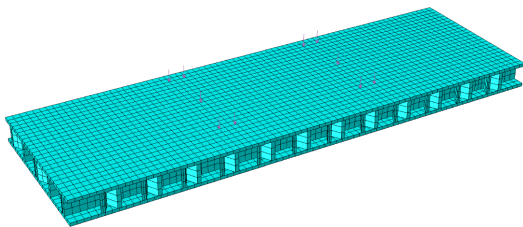


图 6 四点弯曲的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of four-point bending test

采用 Von-Mises 应力和主应力对夹芯板结构面上的应力分布进行表示, 根据 Von-Mises 屈服准则采用式(2)判断结构是否进入屈服阶段<sup>[20]</sup>。

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_e$  为 Von-Mises 应力(MPa),  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  分别为第一主应力、第二主应力、第三主应力(MPa)。

2 结果和分析

2.1 四点弯曲试验破坏形态

试验中 3 种夹芯板结构工作情况相似, 四点弯曲试验加载破坏模式如图 7 所示, 当承受弯曲荷载时, 上面层承受压缩应力, 芯体主要承受横向剪切, 下面层承受拉伸应力。加载初期, 3 种结构均无明显破坏现象, 随着荷载增大至极限荷载的 65% 左右, 结构在持续加载的过程中发出脆响, 表面未见明显裂缝, 随着荷载继续增大, 达到极限荷载时, 夹芯板结构突然发出一声巨响, 弯剪段出现剪切裂缝且迅速展开, 结构由于芯体剪切破坏而失效。

2.2 荷载-跨中位移和荷载-应变曲线

集成竹格栅夹芯板结构四点抗弯试验中每组试件试验结果重复性较好, 为了使结果表示得更加清晰明了, 选用其中一次试验结果作为代表。图 8 显示: 在四点弯曲试验中, 3 种不同构型芯体的集成竹夹芯板呈现出明显的性能差异; 在承载能力方面, 方形格栅夹芯板表现最弱, 当荷载增加到约 23 kN 发生破坏, Kagome 形格栅夹芯板的抗弯能力优于方形格栅, 破坏荷载约为 28 kN 左右, 而三角形格栅夹芯板的承载能力最强, 破坏荷载达到约 39 kN。

3 种夹芯板结构均在芯体达到剪切强度时发生破坏, 破坏前无显著预兆, 属于脆性破坏。3 种夹芯板结构的荷载-位移曲线斜率接近, 说明其抗弯刚度基本相近。方形格栅与 Kagome 形格栅集成竹夹芯板在加载过程中, 荷载-位移曲线呈线性关系, 处于弹性变形阶段。最后由于芯体开槽部位承受较大剪切力, 在达到极限强度时发生剪切破坏。

相比之下, 三角形格栅夹芯板在加载至破坏过

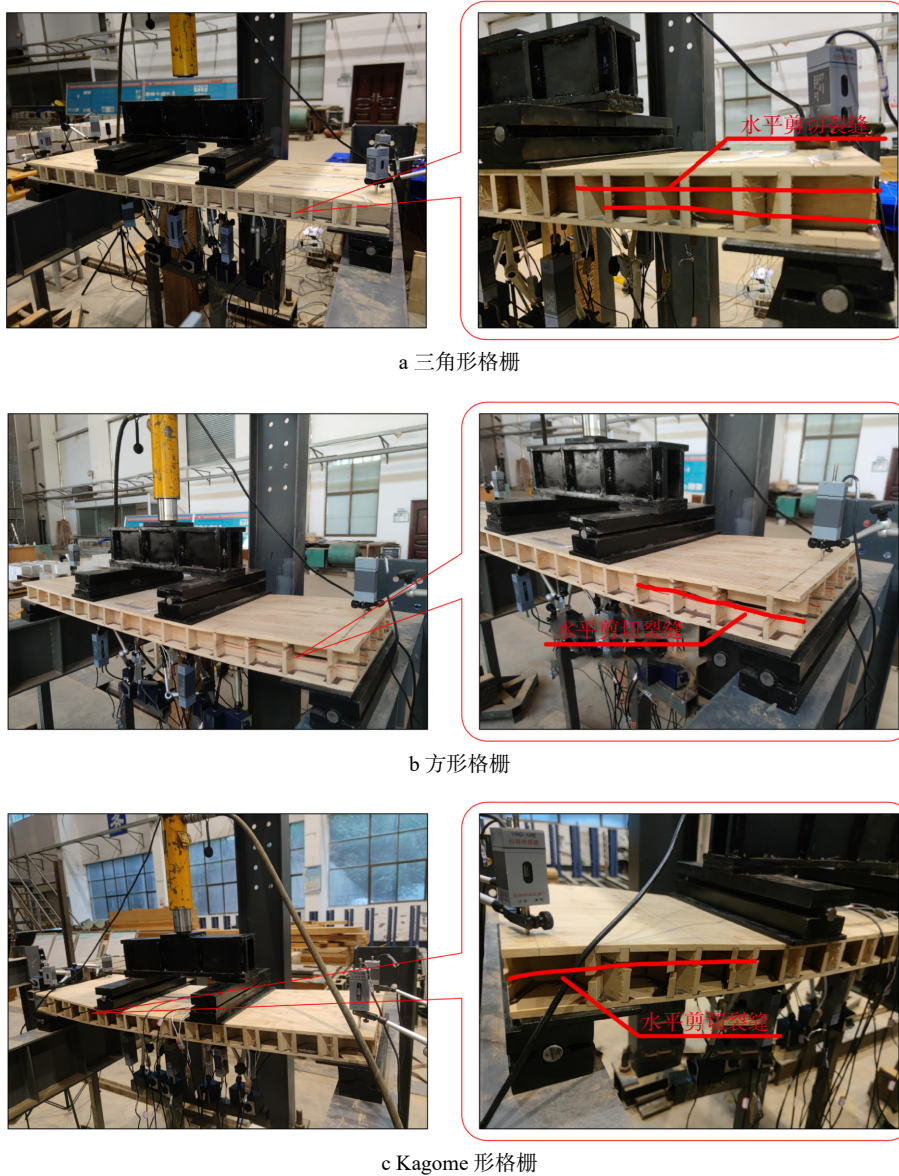


图7 集成竹格栅夹芯板的四点抗弯试验破坏形态

Fig. 7 Failure mode of four-point bending test for laminated bamboo sandwich panel

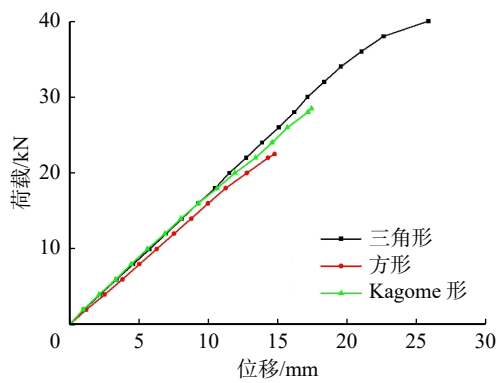


图8 荷载-跨中位移曲线

Fig. 8 Load-mid span displacement curve

程中可分为两个变形阶段。第一阶段为线弹性变形,荷载与位移呈线性增长,与另两种夹芯板相同。第二阶段为非线性变形,此时芯体尚未达到剪切破

坏强度。随着荷载增加,夹芯板结构的上面层集成竹达到受压屈服强度,进入塑性阶段。结构荷载-位移曲线斜率随荷载增大而减小,整个试件进入非线性变形阶段。随着荷载的继续增加,跨中位移迅速增大,最终结构因芯体达到剪切强度而破坏。

集成竹格栅夹芯板上、下面层跨中截面沿横向布置3个应变测点(图4),应变值均为同一横截面所测应变数据的平均值,在3组试件中分别选取代表试件以验证平截面假定。试件荷载-应变曲线见图9,其中负号表示受压,正号表示受拉。

图9显示:集成竹格栅夹芯板弹性阶段荷载-应变曲线为线性关系,且上面层的受压应变和下面层的受拉应变相对于中性轴对称分布,基本符合平截面假定。三角形格栅夹芯板承载能力较方形和Kagome形格栅夹芯板更强,随着荷载增大,结构进

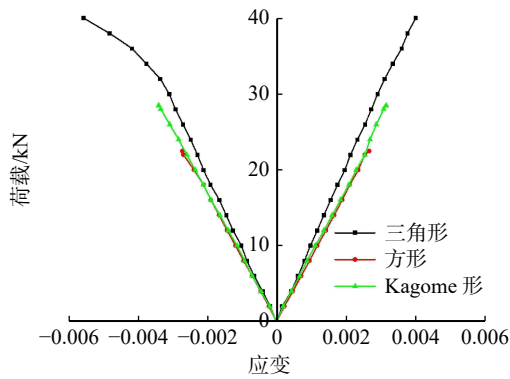


图 9 荷载-应变曲线  
Fig. 9 Load-strain curve

入塑性阶段,处于受压侧的上面层集成竹达到受压屈服强度,压应变增长快于应力增长,而处于受拉侧的下面层集成竹应变仍为线性关系。

试验结果表明:芯体几何构型的改变对结构的极限承载能力有明显的影响;3种结构中三角形格栅的极限荷载最大,且结构的抗弯刚度最大,其次是 Kagome 形格栅、方形格栅;较方形格栅而言,三角形和 Kagome 形格栅最大荷载分别增加了 71.9%、22.2%,抗弯刚度分别提高了 12.5%、6.0%。

### 2.3 有限元模拟与分析

图 10 显示了在分别加载至 38.5、23.5 和 27.0 kN 时 3 组试件上的应力分布。在弯曲荷载作用下,3 种

夹芯板结构的应力分布相似。图 10 显示:应力集中位于上面层和下面层的跨中区域,试件上面层的最大应力分别为 37.2、25.9 和 30.0 MPa,下面层的最大应力分别为 40.7、24.4 和 28.5 MPa。对于本次试验的集成竹格栅夹芯板结构,当芯体由于剪应力达到极限应力时,该结构受到剪切破坏而不能继续承受荷载,此时的结构强度为夹芯板结构的抗弯强度。

试验值与模拟结果(表 4)存在误差的原因可能是:夹芯板结构在四点弯曲试验受到复杂的应力状态,包括张拉、压缩和弯曲,当前有限元模型采用简化的本构模型描述集成竹材料的力学行为不能完全捕捉应力变化,从而导致有限元与试验结果之间的差异;材料的开槽处理一定程度上影响材料的力学性能。

试验值与有限元模拟值的比较中,极限荷载、跨中最大位移以及应变之间的相对误差分别小于 4.4%、4.0% 和 4.3%,这表明有限元模拟值与试验值较一致,有限元模拟的结果能够很好地反映集成竹格栅夹芯板的弯曲性能。

表 5 显示:在 3 种构型芯体的夹芯板结构中,方形格栅夹芯板的比刚度最大,三角形格栅夹芯板和 Kagome 形格栅夹芯板的比刚度相差不大,分别为方形格栅夹芯板的 95.2% 和 92.8%。在相同的质量下,这种方形格栅夹芯板结构能够以更轻的质量来提供相同的刚度以及性能。对于竹木结构而言,其结构

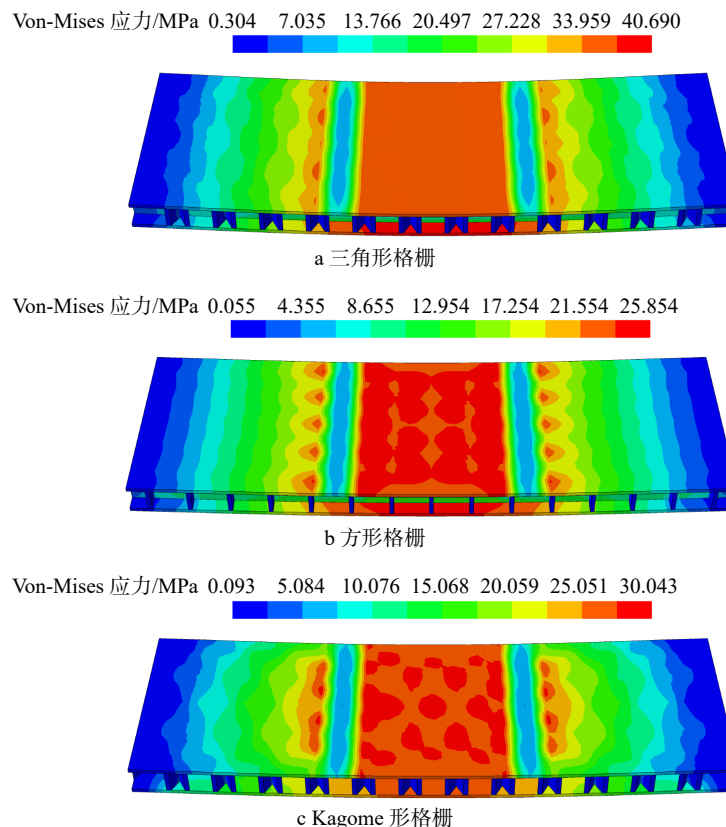


图 10 集成竹格栅夹芯板应力分布

Fig. 10 Stress distribution of laminated bamboo sandwich panel

表4 极限荷载、跨中最大位移以及应变的试验和有限元模拟结果对比

Tab. 4 Comparison of experimental and finite element simulation results for ultimate load, maximum displacement at midspan and strain

试件构型	试验值				模拟值				相对误差/%			
	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\epsilon_c \times 10^6$	$\epsilon_t \times 10^6$	$P_u/\text{kN}$	$\Delta_u/\text{mm}$	$\epsilon_c \times 10^6$	$\epsilon_t \times 10^6$	$P_u$	$\Delta_u$	$\epsilon_c$	$\epsilon_t$
三角形格栅	38.7	25.1	-5 693.8	4 424.9	38.5	25.2	-5 865.7	4 235.3	0.5	0.4	-3.0	4.3
方形格栅	22.5	14.7	-2 575.8	2 580.3	23.5	15.3	-2 558.2	2 549.8	4.4	4.0	-0.7	1.2
Kagome形格栅	27.5	16.8	-3 142.4	3 124.5	27.0	17.0	-3 049.4	3 004.5	1.9	1.0	-3.0	3.8

注: 试验值为同组试件弯曲试验下的平均值;  $P_u$ 为极限荷载,  $\Delta_u$ 为跨中最大位移,  $\epsilon_c$ 为压应变,  $\epsilon_t$ 为拉应变。

表5 集成竹格栅夹芯板刚度、强度性能

Tab. 5 Stiffness and strength properties of laminated bamboo sandwich panel

试件构型	相对密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	抗弯刚度/( $\text{kN}\cdot\text{m}^2$ )	抗弯强度/MPa	比刚度 $\times 10^3$ /( $\text{kN}\cdot\text{m}^5\cdot\text{kg}^{-1}$ )	比强度/( $\text{kN}\cdot\text{m}\cdot\text{kg}^{-1}$ )
三角形格栅	0.30	$45.7 \pm 0.2$	40.7	$149.9 \pm 5.0$	133.5
方形格栅	0.26	$40.6 \pm 0.1$	24.4	$157.5 \pm 2.1$	94.6
Kagome形格栅	0.29	$43.1 \pm 0.2$	28.5	$146.1 \pm 5.1$	96.7

注: 比刚度为结构的抗弯刚度与其相对密度的比值, 比强度为结构的抗弯强度与其相对密度的比值。

的基频较低(一般为 1.5 ~ 2.0 Hz), 极易引发显著的人致振动, 严重影响结构使用舒适性; 较大的比刚度可以允许工程项目结构总质量减少的同时仍然维持所需的刚度, 能够提高结构基频, 提升竹木结构建筑物的舒适性和适用性<sup>[21]</sup>。

此外, 三角形格栅夹芯板的比强度最大, 较方形格栅夹芯板和 Kagome 形格栅夹芯板分别提高了 41.2% 和 38.1%。这说明三角形格栅夹芯板对于材料的利用率更好, 符合对于轻量化设计的需求, 对于提高结构的性能和可持续性是非常有益的。此外, 比强度高的结构可以承受更大的外部负荷, 如风荷载、雪荷载、地震力等, 这使得建筑结构更加安全, 能够应对不同的环境条件; 同时, 比强度高的结构可以使用较少的材料达到相同的强度, 也就是降低了建筑项目的材料成本。

### 3 结 论

本研究以集成竹为原材料, 采用嵌锁法设计并加工了 3 种不同构型的集成竹格栅夹芯板。通过对夹芯板结构进行四点弯曲加载试验, 并结合理论分析和数值模拟方法深入分析夹芯板结构的受弯性能, 可得出以下结论。

(1) 嵌锁式集成竹格栅夹芯板受弯破坏均为芯体剪切破坏, 破坏前无明显征兆, 均属脆性破坏。集成竹格栅夹芯板在受弯荷载加载过程中受拉侧表现为线弹性, 而受压侧随着荷载增大表现为弹塑性, 结构基本符合平截面假定, 中性轴处剪应力最大, 剪切破坏裂缝发生在弯剪段靠中性轴附近。

(2) 芯体的几何构型对集成竹格栅夹芯板的

抗弯性能影响显著。3 种不同构型芯体的夹芯板试件中, 三角形格栅夹芯板结构的弯曲能力最好, 方形格栅夹芯板结构的承载能力最低, Kagome 形格栅夹芯板则介于两者之间; 较方形格栅而言, 三角形和 Kagome 形格栅极限荷载分别增加了 71.9%、22.2%; 三角形格栅夹芯板的比强度最大, 较方形和 Kagome 形分别提高了 41.2% 和 38.1%, 显示出三角形格栅夹芯板能更充分地发挥集成竹的力学性能。

(3) 基于有限元的仿真模拟结果与试验结果吻合较好。集成竹格栅夹芯板的极限荷载、跨中最大位移和面层拉/压峰值应变计算值与试验值基本一致, 相对误差小于 4.4%, 说明集成竹格栅夹芯板有限元模型参数取值正确, 计算结果可靠。

本研究成功制备了一种具有轻质高强且低碳环保的集成竹格栅夹芯板, 通过对于具有 3 种不同芯体构型的夹芯板进行抗弯性能的深入分析, 结果表明三角形格栅夹芯板在力学性能方面具有显著优势。本研究克服了传统竹结构的应用限制, 拓宽了竹材在工程领域的应用前景, 为新型竹质结构的推广提供了坚实的理论支持。后续将在此基础上进一步探讨集成竹格栅夹芯板的结构参数对抗弯性能的影响, 以优化设计并提升性能, 为实际工程应用提供明确指导。

### 参 考 文 献

- [1] Flander K D, Rovers R. One laminated bamboo-frame house per hectare per year[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 210-218.
- [2] 卿彦. “双碳”战略目标下木竹基先进功能材料研究进展 [J]. 中南林业科技大学学报, 2022, 42(12): 13-25.  
Qing Y. Advanced functional materials derived from natural wood

- and bamboo resources under the double carbon strategy in China[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2022, 42(12): 13–25.
- [ 3 ] 黄东梅, 周培国, 张齐生. 竹结构民宅的生命周期评价 [J]. *北京林业大学学报*, 2012, 34(5): 148–152.  
Huang D M, Zhou P G, Zhang Q S. Life cycle assessment of bamboo-constructed house[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2012, 34(5): 148–152.
- [ 4 ] Li Z H, Chen C J, Mi R Y, et al. A strong, tough, and scalable structural material from fast-growing bamboo[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(10): 1906308.
- [ 5 ] Lurie S A, Solyaev Y O, Volkov-Bogorodskiy D B, et al. Design of the corrugated-core sandwich panel for the arctic rescue vehicle[J]. *Composite Structures*, 2017, 160: 1007–1019.
- [ 6 ] Hopkins P M, Norris T, Chen A. Creep behavior of insulated concrete sandwich panels with fiber-reinforced polymer shear connectors[J]. *Composite Structures*, 2017, 172: 137–146.
- [ 7 ] 罗熠民, 郑毅, 李荣. 纤维增强复材混合芯层夹芯板受弯性能试验研究 [J]. *工业建筑*, 2020, 50(3): 167–171.  
Luo Y M, Zheng Y, Li R. Experimental research on flexural behavior of FRP sandwich panels with hybrid core[J]. *Industrial Construction*, 2020, 50(3): 167–171.
- [ 8 ] Wang Z, Yang X L, Lai W G, et al. A VAM-based equivalent model for triangular honeycomb sandwich panels: comparison with numerical and experimental data[J]. *Materials*, 2022, 15(14): 4766.
- [ 9 ] Manalo A C, Aravinthan T, Karunasena W. Flexural behaviour of glue-laminated fibre composite sandwich beams[J]. *Composite Structures*, 2010, 92(11): 2703–2711.
- [10] Ashby M F. The properties of foams and lattices[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2006, 364(1838): 15–30.
- [11] 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(1): 35–52.  
Fan H L, Jin F N, Fang D N. Structural mechanics of lattice grids[J]. *Advances in Mechanics*, 2008(1): 35–52.
- [12] 吴启凡, 方海, 高峰, 等. 复合材料格栅板受弯性能试验研究与数值分析 [J]. *复合材料科学与工程*, 2020(1): 12–20.  
Wu Q F, Fang H, Gao F, et al. Experimental testing and numerical simulation on flexural behavior of composite grid panels[J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(1): 12–20.
- [13] 王亚楠, 梅志远, 李华东, 等. 格栅增强夹芯板弯曲刚度影响因素及规律研究 [J]. *复合材料科学与工程*, 2018(2): 47–51.  
Wang Y N, Mei Z Y, Li H D, et al. Research on the influencing factors and laws about bending stiffness of grille reinforced sandwich panel[J]. *Composites Science and Engineering*, 2018(2): 47–51.
- [14] Li J H, Hunt J F, Gong S Q, et al. Fatigue behavior of wood-fiber-based tri-axial engineered sandwich composite panels (ESCP)[J]. *Holzforschung*, 2016, 70(6): 567–575.
- [15] Wang Z G, Li Z D, Xiong W. Experimental investigation on bending behavior of honeycomb sandwich panel with ceramic tile face-sheet[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2019, 164: 280–286.
- [16] Fan H L, Meng F H, Yang W. Sandwich panels with Kagome lattice cores reinforced by carbon fibers[J]. *Composite Structures*, 2007, 81(4): 533–539.
- [17] 国家标准化管理委员会. 无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 2 部分 取样方法和一般要求: GB/T 1927.2—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.  
Standardization Administration. Test methods for physical and mechanical properties of small clear wood specimens (part 2): sampling methods and general requirements: GB/T 1927.2—2021 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构试验方法标准: GB/T 50329—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for test methods of timber structures: GB/T 50329—2012[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [19] 朱其伟. 竹木复合梁层间剪切与弯剪性能试验研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2023.  
Zhu Q W. Experimental study on Interlaminar shear and bending shear properties of bamboo-wood composite beams[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2023.
- [20] 徐秉业, 刘信声, 沈新普. 应用弹塑性力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.  
Xu B Y, Liu X S, Shen X P. Applied elastoplastic mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2017.
- [21] 王智丰, 李贤军, 易锦, 等. 大跨胶合木拱桥人致振动及其优化控制 [J]. *土木工程学报*, 2021, 54(4): 79–94.  
Wang Z F, Li X J, Yi J, et al. Human-induced vibration and optimal control of long-span glulam arch bridges[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(4): 79–94.

(责任编辑 吴娟  
责任编辑 于志明)