

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026034

竹/木增强蔗渣复合板的界面-结构协同设计与性能研究

雷春光, 陈川富, 廖玉申, 刘健博, 欧荣贤

(华南农业大学生物物质学院岭南现代农业科学与技术广东省实验室; 生物基材料与能源教育部重点实验室, 广东广州 510642)



摘要: 针对蔗渣刨花板 (sugarcane bagasse particleboard, SBP) 界面结合弱、力学性能与隔热、吸声性能难以兼顾的问题, 提出界面-结构协同设计策略, 制备以毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 竹席 (厚度 1.0 mm) 与毛白杨 (*Populus tomentosa*) 单板 (厚度 1.3 mm) 组合制成的竹/木复合增强层为表层、碱预处理蔗渣刨花为芯层, 厚度为 18 mm 的竹/木增强蔗渣复合板 (bamboo/wood-reinforced sugarcane bagasse particleboard, BWSBP)。考察表层增强、芯层刨花 NaOH 溶液预处理、芯层铺装结构及芯层密度对复合板性能的影响, 并结合扫描电镜观察界面形貌、数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 技术分析弯曲应变场以及剖面密度分布 (vertical density profile, VDP) 表征厚度方向密度梯度, 以阐明协同强化机制。结果表明: NaOH 预处理蔗渣刨花能够改善 SBP 的界面结合和弯曲性能, 但单一 NaOH 预处理蔗渣刨花制备 SBP 的性能指标达不到 GB/T 4897—2015《刨花板》干燥状态下使用的家具型 (P2 型) 要求, 更难以满足干燥状态下使用的重载型 (P4 型) 要求。引入竹/木复合增强表层后, BWSBP 的静曲强度 (modulus of rupture, MOR)、弹性模量 (modulus of elasticity, MOE)、内结合强度 (internal bond, IB) 和 24 h 吸水厚度膨胀率 (thickness swelling rate, TSR) 均显著优于 SBP ($P < 0.001$)。芯层刨花铺装中, 细刨花铺装有利于提高刚度, 粗刨花铺装有利于提高极限承载, 而“表细芯粗”的层配铺装实现强度、刚度与尺寸稳定性的综合优化。VDP 和 DIC 结果表明, BWSBP 形成由高密度表层向低密度芯层梯度过渡的应力传递结构, 表层承担主要弯曲应力并有效延缓芯层破坏, 是性能提升的关键机制。在本试验条件下, 以 NaOH 溶液质量分数 0.25%、温度 50 °C、时间 1.5 h 预处理蔗渣刨花, 并采用“表细芯粗”方式层配铺装芯层刨花, 制备密度为 0.64 g/cm³、厚度 18 mm 的 BWSBP, 其 MOR、MOE 和 IB 分别为 80.2 MPa、8.6 GPa 和 0.97 MPa, 24 h TSR 低至 4.2%, 均达到 GB/T 4897—2015 重载型 (P4 型) 刨花板的要求; 同时, 其导热系数为 0.142 W/(m·K), 在 200~1 600 Hz 频率范围内平均吸声系数为 0.106, 基本保持蔗渣材料的隔热与吸声特性, 具有隔热与吸声应用潜力。研究通过“界面优化-表层增强-芯层调控”协同作用实现 BWSBP 性能提升, 为农林剩余物基承载型板材的开发提供界面-结构协同设计的新思路。

关键词: 蔗渣刨花板; 竹/木复合增强; 刨花碱预处理; 芯层铺装结构; 密度梯度; 力学性能

中图分类号: TS653.5 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 04-0045-14

Interface-Structure Synergistic Design and Performance of Bamboo/Wood-Reinforced Sugarcane Bagasse Composite Panels

Lei Chunguang, Chen Chuanfu, Liao Yushen, Liu Jianbo, Ou Rongxian

(Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, College of Future Biomass; Key Laboratory for Biobased Materials and Energy of Ministry of Education, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, Guangdong, China)

收稿日期: 2026-03-06; 修改日期: 2026-07-14

基金项目: 广州市重点研发计划项目“农林废弃物联产轻质高强复合材料与功能助剂技术开发与应用”(2024B0J380); “智果”行动计划(广西科技成果转化计划)“轻质高强竹材/蔗渣复合材料关键技术开发与应用”(桂科 ZG2600640093)。

作者简介: 雷春光 (2001—), 男, 硕士研究生。Email: 2101314008@qq.com

通讯作者: 欧荣贤, 男, 教授。Email: rongxian_ou@scau.edu.cn

Abstract: Conventional sugarcane bagasse particleboard (SBP), a widely studied and low-cost biomass composite derived from sugar-industry residues, faces two interrelated challenges: weak interfacial bonding and inherent trade-offs among mechanical performance, thermal conductivity, and sound absorption. To overcome these limitations, this study proposed a synergistic interface-structural design for fabricating a novel bamboo/wood-reinforced sugarcane bagasse particleboard (BWSBP). The BWSBP consisted of a core layer of alkali-pretreated sugarcane bagasse particles and bamboo-wood composite reinforcement layers, each comprising a 1.0-mm-thick Moso bamboo mat sandwiched between two 1.3-mm-thick poplar veneers. The effects of face-layer reinforcement, NaOH pretreatment of bagasse particles, core mat structure and core density on BWSBP performance were investigated. The inherent strengthening mechanism was explicitly elucidated via a multi-method characterization framework, including scanning electron microscopy (SEM) for interfacial morphology observation, digital image correlation (DIC) for full-field bending strain distribution analysis, and vertical density profile (VDP) testing for through-thickness density gradient quantification. The results showed that NaOH pretreatment of bagasse particles improved the interfacial bonding strength and flexural properties of SBP. However, the modified SBP still failed to meet the requirements for P2-type particleboard stipulated in GB/T 4897—2015 *Particleboard*. After introducing the bamboo/wood composite reinforcement layers, the modulus of rupture (MOR), modulus of elasticity (MOE), internal bond strength (IB), and 24-h thickness swelling rate (TSR) of BWSBP were all significantly superior to those of SBP ($P < 0.001$). In the core-layer mat, fine-particle furnish was more conducive to enhancing stiffness, whereas coarse-particle furnish was more effective in increasing ultimate load-bearing capacity. A layered configuration featuring fine particles in the outer regions and coarse particles in the core achieved an integrated optimization of strength, stiffness, and dimensional stability. The DIC and VDP results demonstrated that BWSBP formed an interfacial stress-transfer structure with a gradual transition from high-density face layers to a low-density core. The face layers sustained most of the bending stress and effectively delayed the failure progress of the core, constituting the key mechanism underlying the enhanced performance. Under the conditions of this study, sugarcane bagasse was pretreated with 0.25% (mass fraction) NaOH solution at 50 °C for 1.5 h. The mat was then laid in layers, with fine particles in the surface layers and coarse particles in the core layer, to prepare a BWSBP with a density of 0.64 g/cm³ and a thickness of 18 mm. The resulting board exhibited MOR, MOE and IB values of 80.2 MPa, 8.6 GPa and 0.97 MPa, respectively, and a 24-h TSR of 4.2%. These values all exceeded the requirements for heavy-duty P4-type particleboard intended for use under dry conditions, as stipulated in GB/T 4897—2015. Meanwhile, its average thermal conductivity was only 0.142 W/(m·K), and average sound absorption coefficient over the frequency range of 200~1 600 Hz was 0.106, effectively retaining the thermal insulation and sound absorption characteristics of bagasse and demonstrating promising potential for thermal and acoustic insulation applications. The high performance of BWSBP resulted from the synergistic effects of interface-structural optimization, mat-structure configuration, and density distribution, providing a new interface-structural synergistic design approach for developing load-bearing panels from agricultural and forestry residues.

Key words: sugarcane bagasse particleboard; bamboo-wood composite reinforcement layers; alkali pretreatment; core layer mat structure; density gradient; mechanical properties

人造板工业正由传统木材依赖型制造体系,逐步转向兼顾高性能与资源高效利用的绿色制造模式。刨花板因其原料适应性广、制造工艺成熟以及终端应用场景多样,成为室内装饰与家具制造领域重要的人造板产品之一^[1]。然而,随着木材原料供需矛盾日益突出,开发来源广泛、可再生且环境负荷较低的非木材生物质原料,是刨花板产业原料结构转型的重要路径^[2-3]。农业剩余物因其资源总量丰富、区域集聚性强、获取成本低,并兼具显著的减废降碳潜力,被普遍认为是替代部分木材资源的理想原料^[4-5]。

目前,全球年甘蔗产量约20亿t,产生的蔗渣约6亿t^[6-7]。与木材相比,蔗渣兼具纤维网络骨架与低堆积密度、多孔结构等特征,理论上适合作为轻质刨花板原料。然而,蔗渣表面蜡质层、薄壁组织残留以及较高含量糖组分,会削弱胶黏剂对刨花表面的润湿与渗透,降低界面粘结效率,进而导致板材弯曲性能不足、尺寸稳定性较差和防水防霉性能偏弱^[8-10]。国内学者围绕蔗渣人造板展开研究,廖瑞等^[11]以蔗渣(*Saccharum officinarum*)为原料,加入有机酸或糖添加剂和石蜡乳液防水剂制备轻质无胶蔗渣板,当板材的密度为0.35 g/cm³时,其导热系数为0.070 9 W/(m·K);密度为0.4 g/cm³时,导热系数为0.080 8 W/(m·K),属于典型的低热导多孔保温材料。孙涛^[12]等采用芦苇(*Phragmites australis*)与蔗渣混合刨花,在热压时间7 min、脲醛树脂胶施胶量12%、蔗渣混合比为50%的条件下,制备的密度为0.8 g/cm³的芦苇-蔗渣刨花板的性能满足GB/T 4897—2015《刨花板》P2型(干燥状态下使用的家具型)刨花板要求。

近年来,针对非木材刨花板性能受限问题,相关研究主要沿三条路径展开。其一是界面调控策略,即通过碱处理、热处理及其他物理化学改性手段,去除蔗渣、芦苇以及稻麦秸秆表面的蜡质层和硅质层,以提高原料表面润湿性,改善胶合界面质量^[13-14]。其二是组分增强策略,即通过引入木刨花、竹刨花或黄麻纤维等增强相提高板材的强度与刚度,但此类方法易导致板材密度增大、组分分散不均以及界面复杂化等问题^[15-17]。其三是结构优化策略,即通过多层铺装、次表层增

强及密度梯度设计等方式,优化板材厚度方向的应力分布与弯曲承载行为。尽管上述方法在一定程度上改善了非木材刨花板的综合性能,但已有工作仍主要聚焦于单目标优化,对于界面性质、芯层铺装结构与层合受力路径之间的耦合机制尚缺乏系统认知;同时,现有蔗渣刨花板主要应用于隔热、吸声等功能领域,少有承载结构领域的应用。如何在维持轻量化优势的同时兼顾力学性能、尺寸稳定性以及隔热、吸声等性能,仍是制约其向结构材应用拓展的核心瓶颈^[18]。

竹材具有生长周期短、可再生性强、比强度高及弹性模量大等特点,是制备高比强度绿色复合板材的理想生物质增强体^[19]。若引入高强度竹基增强层配置于复合板材表层,并以低密度、多孔蔗渣刨花构筑芯层,则可形成典型的层状复合结构:高强度表层优先承受弯曲主应力,而低密度芯层则提供厚度效应、减重潜力及热/声功能特性,从而有望在较低面密度条件下实现力学性能与吸声隔热性能协同提升。然而,此结构优势的充分发挥依赖于两个关键前提:其一,蔗渣刨花经适当预处理后建立稳定且高效的胶合界面;其二,芯层刨花分布、铺装方式与密度梯度,与表层增强构型实现协同匹配,从而构建完整的厚度方向应力传递路径,并抑制材料早期失效。

鉴于此,本研究提出一种界面-结构协同设计策略,构建以高强度竹/木复合增强层作为表层,软质多孔蔗渣刨花为芯层的层状复合体系,开发兼具轻质、高强及优良吸音隔热潜力的竹/木增强蔗渣复合板(bamboo/wood-reinforced sugarcane bagasse particleboard, BWSBP)。研究重点围绕三个核心问题展开:1)碱预处理调控蔗渣表面化学特征及界面结合能力,提升芯层胶合质量;2)芯层刨花结构与密度梯度特征,揭示复合板在弯曲载荷下的应力传递行为及失效模式;3)表层增强与芯层结构参数的协同设计,实现物理性能(尺寸稳定性、隔热吸音性能)与力学性能(抗弯性能、内结合强度、握钉力)的综合优化。该研究可为农林剩余物基轻质高强复合板的界面调控、层合结构设计及性能协同优化提供理论依据与方法支撑。

1 试验材料与方法

1.1 材料

甘蔗 (*Saccharum officinarum*) 渣, 产自广东省茂名市, 不除髓, 含水率为18.3%。蔗渣经机械粉碎得到未处理刨花, 粒径分布结果如图1所示。蔗渣刨花以10目标准试验筛 (筛孔孔径2.00 mm) 筛分, 分为3种: 留于筛上、未通过筛孔的为粗刨花 (Coarse), 通过筛孔、落至筛下的为细刨花 (Fine), 未经筛分的原始刨花为混合刨花 (Mixed)。

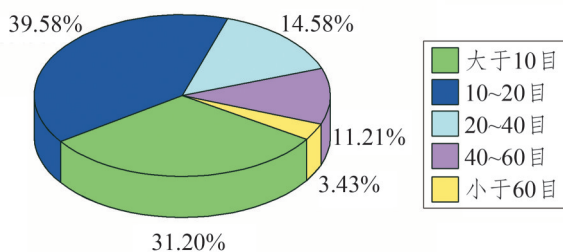


图1 蔗渣刨花粒径分布

Fig.1 Size distribution of sugarcane bagasse particles

竹席, 采用安徽省安庆市产3年生毛竹 (*Phyllostachys edulis*) 加工制备。去竹青后取近青层, 制成厚度0.5 mm、宽度10 mm、长度500 mm的竹篾。竹篾含水率为10.5%, 气干密度为0.85 g/cm³, 按“挑二压二”的形式编织成幅面为500 mm×500 mm的竹席, 厚度为1 mm。

毛白杨 (*Populus tomentosa*) 单板, 旋切加工, 厚度为1.3 mm, 幅面为500 mm×500 mm, 气干密度为0.430 g/cm³, 含水率为12.3%, 产自山东省临沂市。

水性高分子异氰酸酯胶黏剂 (aqueous polymer-isocyanate adhesive, API), 为双组分体系, A、B按质量比6:4混合使用。A组分按 m (羟甲基纤维素): m (碳酸钙): m (面粉): m (去离子水) = 4:5:20:100 配制; B组分为交联剂, 即聚合异氰酸酯 (polymeric methylene diphenyl diisocyanate, pMDI), 产品牌号 WANNATEC W20。羟甲基纤维素与pMDI由万华化学集团股份有限公司提供, 其余填料为市售分析纯级原料。

1.2 主要仪器与设备

粉碎机 (PC-180A)、筛分测试仪 (SYS-31J)、滚筒搅拌机、喷胶枪 (W-77)、热压机 (LE-6170-B)、鼓风电热恒温干燥箱 (DHG-964A3)、恒温水浴箱 (HH-4)、高低温恒温恒湿箱 (PM-80)、万能力学试验机 (E43.504, MTS)、扫描电子显微镜 (SU8020)、数字散斑测试 (XTDIC-12M) 等。

1.3 试验方法

依据本研究提出的界面-结构协同设计策略, 制备以高强度竹/木复合增强层为表层, 软质多孔蔗渣刨花为芯层的竹/木增强蔗渣复合板 (BWSBP), 其结构如图2所示。

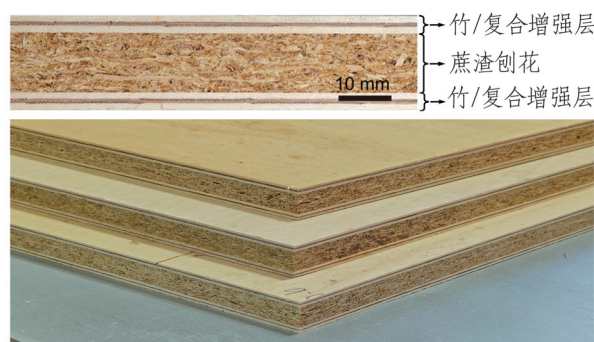


图2 竹/木增强蔗渣复合板实物

Fig.2 Bamboo/wood-reinforced sugarcane bagasse particleboards

1.3.1 蔗渣刨花碱预处理与蔗渣刨花板 (SBP) 的制备 绝干蔗渣与NaOH溶液按质量比1:20混合于容器中, 水浴加热1.5 h, 随后水洗至中性, 105 °C干燥48 h。采用单因素试验分别考察NaOH溶液质量分数和预处理温度对蔗渣刨花板SBP的影响: 固定处理温度为70 °C, 设置NaOH溶液质量分数为0、0.25%、0.50%、1.0%和2.0%五个水平; 固定NaOH溶液质量分数为0.5%, 设置处理温度为30、50和90 °C三个水平。采用混合刨花, 按既定热压工艺 (图3), 将板材厚度压至18 mm, 目标密度为0.5 g/cm³。每组制备2块试样, 共16块。

1.3.2 竹/木复合增强层的制备 以杨木单板为表层, 竹席为芯层制备竹/木复合增强层。竹席表面凹凸不平, 直接与蔗渣芯层胶合易因界面接触不均、应力集中而发生界面失效。杨木单板不仅可提供平整胶合界面, 同时作为模量过渡层, 缓解层间应力突变, 从而提高复合板的界面稳定性与

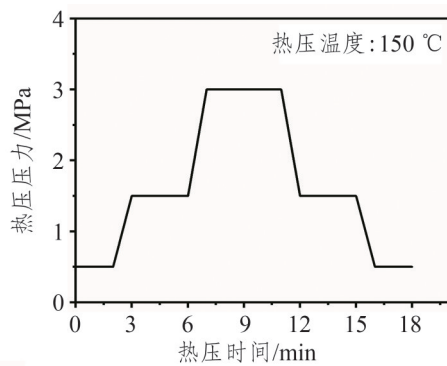


图3 蔗渣板热压工艺曲线

Fig.3 Hot pressing process curve for sugarcane bagasse panels

力学性能。依据预试验结果，以胶合强度和拉伸强度为评价指标确定工艺参数：采用辊涂方式在杨木单板松面施加API胶黏剂，单面施胶量为 120 g/m^2 ；随后将两张涂胶单板分别置于竹席两侧，涂胶面朝向竹席，在 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 、 2 MPa 下热压 1 min ，制得名义厚度为 3 mm 、气干密度为 0.66 g/cm^3 的竹/木复合增强层。

1.3.3 竹/木增强蔗渣复合板(BWSBP)的制备 为探究SBP与表层增强层的协同作用机制，设计细刨花铺装(F)、粗刨花铺装(C)、混合刨花铺装(M)及层配铺装(L)4种芯层结构。其中，层配铺装的上下表层采用细刨花，中间层采用粗刨花。具体方案见表1，每组制备3块试样，共制备30块试样。

表1 不同表、芯层结构复合板的密度与平衡含水率

Tab.1 Density and equilibrium moisture content of the composite panels with different face layers and core structures

编号	表层增强	芯层目标 密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	实测密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	平衡含水率/ %
SBP-F-0.5	无	0.50	0.50 (0.02)	13.90 (0.05)
SBP-C-0.5	无	0.50	0.50 (0.02)	14.38 (0.26)
SBP-M-0.5	无	0.50	0.49 (0.03)	13.53 (0.69)
SBP-L-0.5	无	0.50	0.47 (0.03)	13.01 (0.91)
BWSBP-F-0.5	竹/木增强	0.50	0.54 (0.02)	9.73 (0.23)
BWSBP-C-0.5	竹/木增强	0.50	0.55 (0.01)	13.05 (0.79)
BWSBP-M-0.5	竹/木增强	0.50	0.54 (0.01)	10.74 (0.35)
BWSBP-L-0.5	竹/木增强	0.50	0.56 (0.01)	11.30 (0.27)
BWSBP-L-0.4	竹/木增强	0.40	0.46 (0.02)	14.55 (1.60)
BWSBP-L-0.6	竹/木增强	0.60	0.64 (0.01)	9.58 (0.17)

注：复合板编号由板材类型、芯层结构、芯层目标密度组成；括号内数值为标准差。

称量与施胶：按设计密度计算并称量刨花与胶黏剂用量，pMDI胶黏剂的施胶量为刨花干质量的5%。将刨花置于滚筒搅拌机中，用气动雾化喷胶枪均匀施胶。芯层目标密度通过称取一定质量的施胶刨花进行调控。

铺装：在 $500\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 模具底部先铺设一层竹/木复合增强层，中间芯层均匀铺装施胶蔗渣刨花，顶部再覆一层竹/木复合增强层。

热压与调湿：按既定热压工艺（图3），将板材厚度压至 18 mm ；所得试样置于温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度65%环境中进行平衡处理，直至 24 h 内质量变化 $\leq 0.1\%$ 。

1.4 性能表征

1.4.1 微观结构 使用扫描电子显微镜，在 3 kV 、 $10\text{ }\mu\text{A}$ 条件下观察蔗渣外表皮、内表皮及芯层的微观结构特征。

1.4.2 物理性能

1) 密度和含水率。分别依据GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》第4.2和4.3方法进行测试，样品尺寸为 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ ，平行试验 $n=6$ 。

2) 24 h 吸水厚度膨胀率和吸水率。依据GB/T 17657—2022测试板材 24 h 吸水厚度膨胀率（thickness swelling rate, TSR）和吸水率（water absorption rate, WAR），试件尺寸 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ ，平行试验 $n=8$ 。

3) 导热系数。依据GB/T 10297—2015《非金属材料导热系数的测定 热线法》，采用瞬态热线法，在温度 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度65%条件下测定导热系数。样品尺寸 $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ ；采集模式为慢速，工作电压 0.8 V ；单次采集 10 s ，间隔 3 min 。每个样品于同一点位重复测量3次，平行试验 $n=3$ 。

4) 吸声系数。依据GB/T 18696.1—2004《声学 阻抗管中吸声系数和声阻抗的测量 第1部分：驻波比法》，采用交换通道法在 $26\text{ }^\circ\text{C}$ 、大气压下，测定 200 、 250 、 315 、 400 、 500 、 630 、 800 、 $1\text{ }000$ 、 $1\text{ }250$ 、 $1\text{ }600\text{ Hz}$ 处的平均吸声系数。传声器间距 70 mm ，传声器与材料表面间距 170 mm ，测试管内径 100 mm ；平行试验 $n=3$ 。

5) 密度分布。采用X射线密度分析仪(DPX300-LTE),以0.05 mm扫描分辨率对50 mm×50 mm试样进行剖面密度分布(VDP)测定;平行试验 $n=3$ 。

1.4.3 力学性能 依据GB/T 4897—2015《刨花板》进行测试,并对照18 mm厚重载型刨花板(P4型)理化性能(MOR ≥ 18 MPa、MOE ≥ 2.9 GPa、IB ≥ 0.5 MPa、24 h TSR $\leq 15\%$)进行评价。

1) 弯曲性能。依据GB/T 17657—2022进行三点弯曲试验,测定静曲强度(modulus of rupture, MOR)和弹性模量(modulus of elasticity, MOE)。试样尺寸400 mm×50 mm×18 mm,跨距为360 mm,加载速率20 mm/min;平行试验 $n=6$ 。同步使用新拓三维XTDIC-12M数字图像相关(digital image correlation, DIC)系统获取全场表面应变演化,相机分辨率为1 230万像素,采集间隔为300 ms。为保证相关性追踪,试样标段喷涂白底黑色随机散斑。

2) 内结合强度。依据GB/T 17657—2022进行测试。试件尺寸为50 mm×50 mm×18 mm,加载速率2 mm/min;平行试验 $n=8$ 。

3) 握螺钉力。依据GB/T 17657—2022测定板面和板边的握螺钉力(screw holding capability, SHC),试件尺寸为75 mm×50 mm×18 mm,平行试验 $n=6$ 。

1.5 数据分析

采用SPSS Statistics 26.0软件进行显著性分析。对SBP、BWSBP板材类型与F、C、M、L四种芯层结构进行双因素方差分析,对不同芯层密度进行单因素方差分析。采用Duncan多重比较法进行事后检验,显著性检验水平设为 $\alpha=0.05$ 。图表中同一指标,SBP板材组内用小写字母标注,BWSBP板材组内用大写字母标注;不同字母表示组间差异显著($P<0.05$),相同字母表示组间差异无统计学意义($P>0.05$);当 $P<0.001$ 时,组间差异极显著。

2 结果与分析

2.1 碱预处理对蔗渣刨花板性能的影响

蔗渣原料的表面化学组成、界面特性,是制约蔗渣刨花板性能提升的核心因素之一。由SEM(图4)可见,未处理蔗渣的外表皮纤维表面覆盖致密蜡层,内表皮呈现波纹状纵向纤维结构,芯层蜂窝状细胞富含糖分。蔗渣中残留的可溶性糖分、淀粉及蜡质层,将降低胶黏剂对原料的润湿与渗透能力,导致刨花间难以形成连续稳定的胶合界面,最终劣化板材的内结合强度、弯曲性能及尺寸稳定性^[20]。因此,蔗渣刨花碱预处理的作用并非局限于脱除蜡质与糖分,更关键的作用是调控蔗渣刨花的表面反应活性,提升界面结合强度,为复合板厚度方向完整可靠的应力传递路径的建立提供前提。

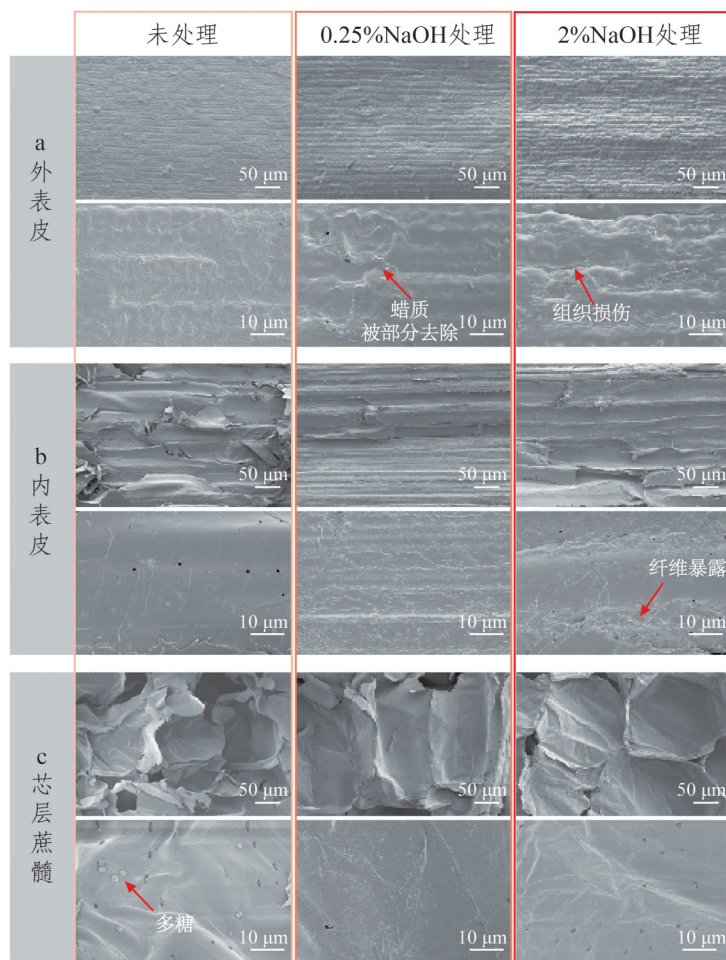


图4 不同条件碱预处理蔗渣的SEM微观形貌

Fig.4 SEM micro-morphology of sugarcane bagasse under different alkali pretreatment conditions

如图 5a、5b 所示，由混合刨花制备的密度 0.5 g/cm^3 的 SBP，其 MOR、MOE 和 IB 随 NaOH 溶液质量分数增加呈先升后降趋势，而 24 h TSR 持续升高。当 NaOH 溶液质量分数在 0~0.25% 范围时，碱预处理主要去除表面蜡质、改善纤维润湿性和界面黏结，从而提升板材力学性能。NaOH 溶液质量分数为 0.25% 时，SBP 的 MOR、MOE 和 IB 达到最大值，分别为 6.6 MPa、0.7 GPa 和 0.45 MPa，24 h TSR 为 11.5%。继续提高 NaOH 溶液质量分数，SBP 的强度显著下降，TSR 进一步增大。结合 SEM 观察（图 4）发现，适度碱处理可有效去

除蜡质并提高纤维表面粗糙度，从而扩大有效接触面积、增强界面结合；过度碱化则会导致纤维开裂、局部溶胀及孔隙增多，为水分侵入提供通道，削弱板材的抗弯性能和尺寸稳定性^[21]。

碱预处理温度与 NaOH 溶液质量分数均显著影响 SBP 的性能。当 NaOH 溶液质量分数为 0.5% 时（图 5c、5d），随预处理温度升高，SBP 的弯曲性能先升后降，而 24 h TSR 持续增大。表明界面化学改性虽然可改善板材的部分宏观性能，但单一改性制备的 SBP 综合性能仍未达到 GB/T 4897—2015《刨花板》P4 型的要求。

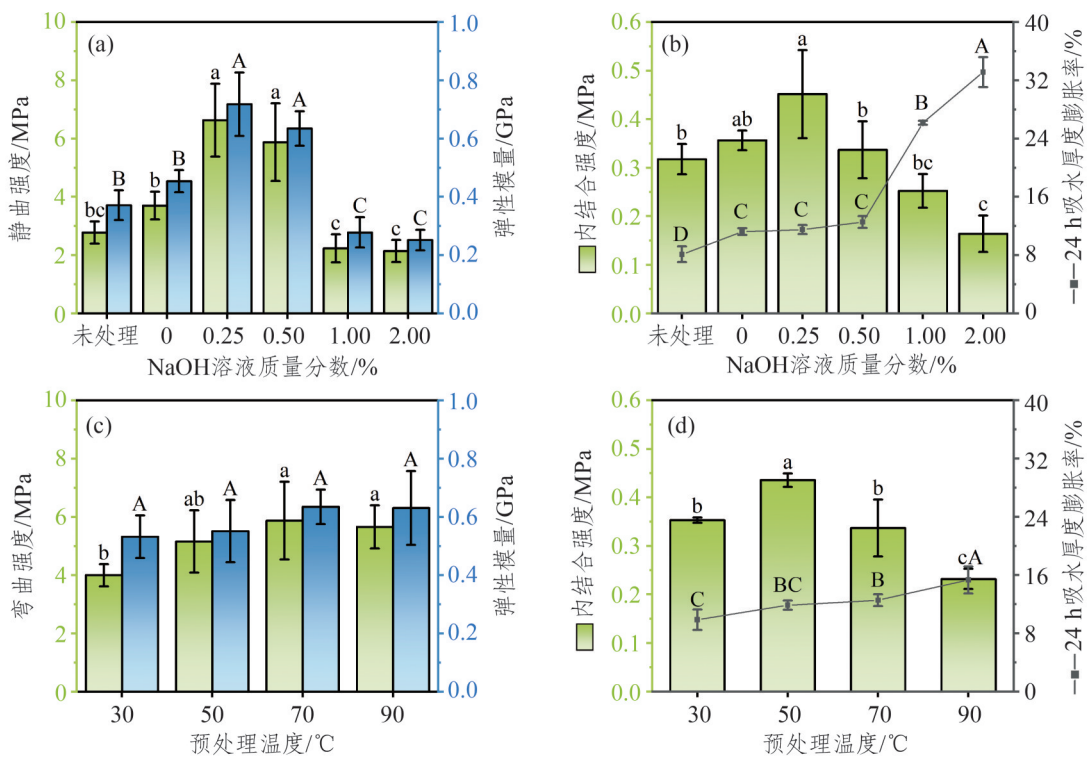


图5 不同条件碱预处理对混合铺装SBP性能的影响

Fig.5 Effect of alkaline pretreatment under different conditions on properties of mixed-formed SBP

2.2 竹/木复合增强层及芯层铺装结构对板材性能的影响

芯层铺装结构决定蔗渣刨花在板材内部的排列方式、密实程度及层间结合状态，是影响载荷传递路径、应力分布和失效模式的关键因素。为明确芯层结构对复合板性能的调控作用，设置不同蔗渣刨花芯层铺装结构，以改变芯层内部的结构连续性和应力传递方式，考察其对板材弯曲性能、内结合强度、尺寸稳定性及破坏行为的影响，筛选与表层增强结构相匹配的芯层铺装方式。

在该结构体系中，竹/木复合增强层与蔗渣刨花芯层分别承担表层承载和芯层支撑功能：竹/木复合增强层主要承受弯曲过程中产生的拉、压应力，提高板材表层刚度与承载能力；芯层则主要承担剪切载荷、维持板材厚度方向的结构稳定性，并将应力传递至增强层。因此，研究在引入竹/木复合增强层的基础上进一步调控芯层铺装结构，旨在通过表层增强与芯层支撑的协同设计，改善层间应力传递和界面匹配，抑制裂纹萌生与扩展，最终实现板材综合性能的提升。

基于前述蔗渣刨花界面改性研究结果,综合考虑改性效果与处理能耗,将蔗渣刨花碱预处理条件确定为:NaOH溶液质量分数0.25%、温度50℃、处理时间1.5 h。在其他工艺条件相同的情况下,制备具有不同芯层刨花结构的BWSBP,分

析表层增强与芯层刨花铺装结构的协同作用。由图6可知,在相同工艺条件下,引入竹/木复合增强层后,不同芯层刨花结构BWSBP的MOR、MOE、IB、TSR、WAR和SHC等性能指标较未增强SBP均极显著改善($P<0.001$)。

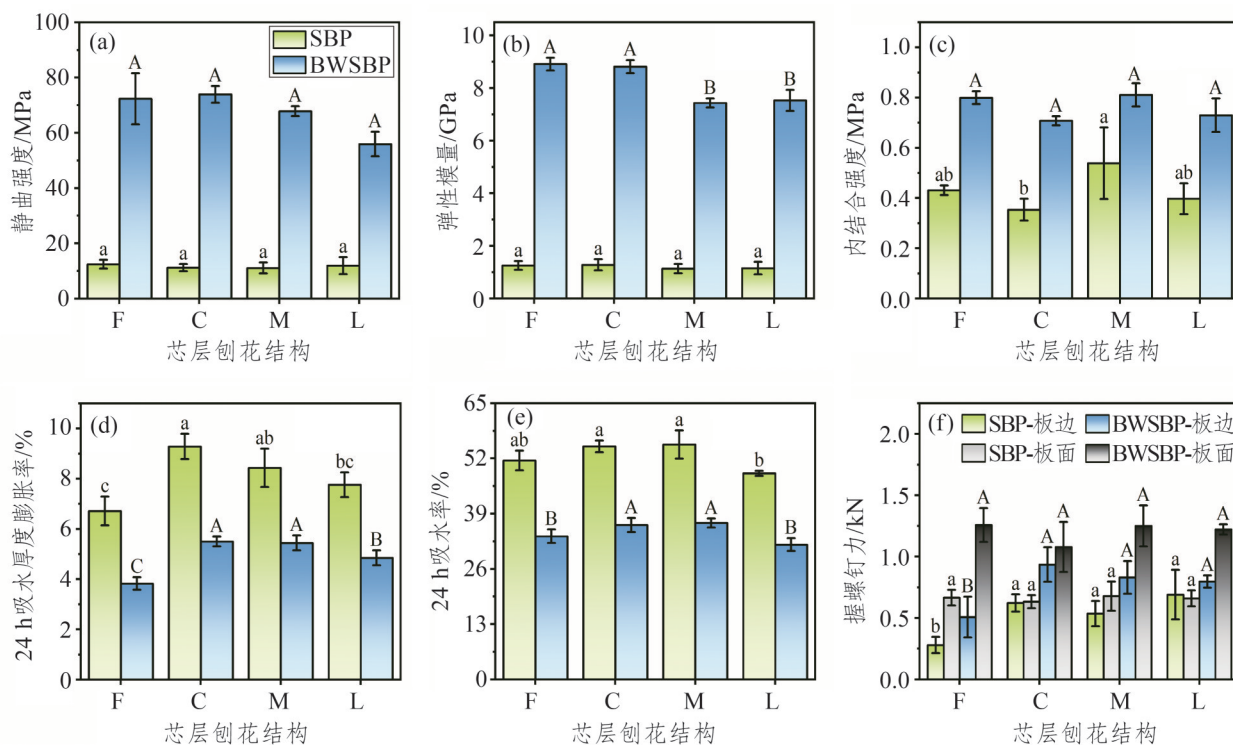


图6 芯层刨花结构对SBP和BWSBP性能的影响

Fig.6 Effects of the particle distributions in the core layer on the key properties of SBPs and BWSBPs

2.2.1 复合板的弯曲性能及破坏模式 如图6a、6b所示,在芯层密度(0.5 g/cm³)相同的条件下,引入竹/木复合增强层后,BWSBP的弯曲性能显著高于SBP ($P<0.001$),F、C、M和L四种芯层结构的MOR分别提高479%、561%、512%和382%,MOE分别提高585%、577%、573%和525%。SBP组内,不同芯层结构的MOR、MOE均无显著差异($P>0.05$);而BWSBP组内,芯层结构的影响则更为明显,其中F和C组的MOE显著高于M和L组($P<0.05$)。

细刨花(F)比表面积大、胶合界面丰富,且可在竹/木复合增强层附近形成致密的界面过渡区,有利于弯矩向芯层均匀、稳定传递,因此MOE增幅最大。在原料、施胶量和板材密度一致的条件

下,弹性阶段的MOE主要取决于胶合界面的连续性;细刨花形成的高密度界面网络可更有效地将表层弯曲应力传递并分散至芯层,从而提高整体刚度。粗刨花(C)则保留了较完整的单元形态,能够在极限载荷下维持芯层的抗剪支撑,并通过裂纹钉扎、偏转或贯穿刨花本体等机制耗散更多断裂能,因而MOR增幅最大。层配铺装(L)采用“表细芯粗”的梯度结构,兼顾细刨花的界面胶合优势与粗刨花的抗剪承载能力,形成分级传力路径^[22],使MOR和MOE得到较为均衡的提升。综上,表层增强是复合板弯曲性能显著提升的主导因素,而芯层铺装结构则调控增强效应在刚度与强度之间的分配。

如图7b所示,仅BWSBP-C在芯层与竹/木复合增强层之间发生界面剥离。粗刨花虽然有利于提高峰值承载能力,但其与增强层直接接触时,

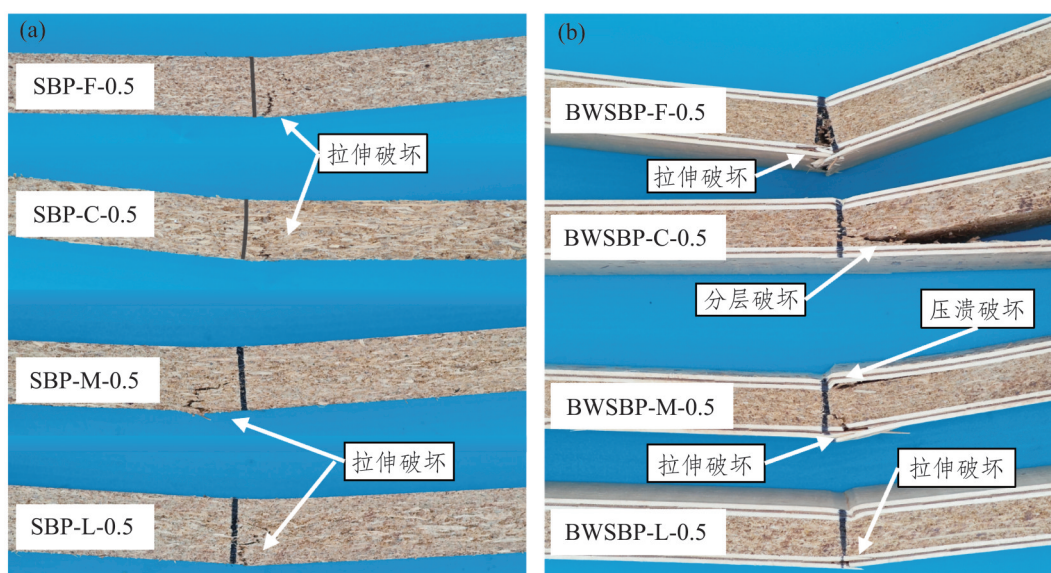


图7 不同结构复合板的三点弯曲主要破坏形式

Fig.7 Main failure modes of SBPs and BWSBPs with different structures under three-point bending

较高的界面孔隙率和不连续接触易造成层间应力集中,进而诱发剥离失效。相比之下,层配铺装中的细刨花可填充界面孔隙,减弱几何不连续性,并提高局部界面剪切强度,从而使破坏模式由界面剥离转变为增强表层拉伸破坏。

VDP与DIC结果分别从内部密度和表面应变场分布两个维度,揭示BWSBP-L梯度结构对弯曲应力传递的优化机制。VDP结果(图8b)显示,BWSBP-L-0.5呈现“两侧高、中间低”的密度分布,竹/木增强层附近的细刨花形成连续的高密度过渡区,有效缓解了高模量表层与低密度蔗渣芯

层之间的性能突变。与之对应,DIC应变场(图9a)表明,其最大纵向应变 ε_{xx} 集中于竹/木增强层,且峰值显著低于SBP-L-0.5,表明高强表层承担了主要弯曲载荷,并通过稳定界面将应力逐级传递至芯层,从而缓解芯层失效。此外,其剪切应变场呈现对称分布(图9b),表明复合板内部形成了规则、稳定的弯曲-剪切协同承载模式。综上,BWSBP-L-0.5的厚度梯度结构有效缓解层间刚度失配,优化应力传递路径,提升复合板的整体承载能力与受力稳定性。

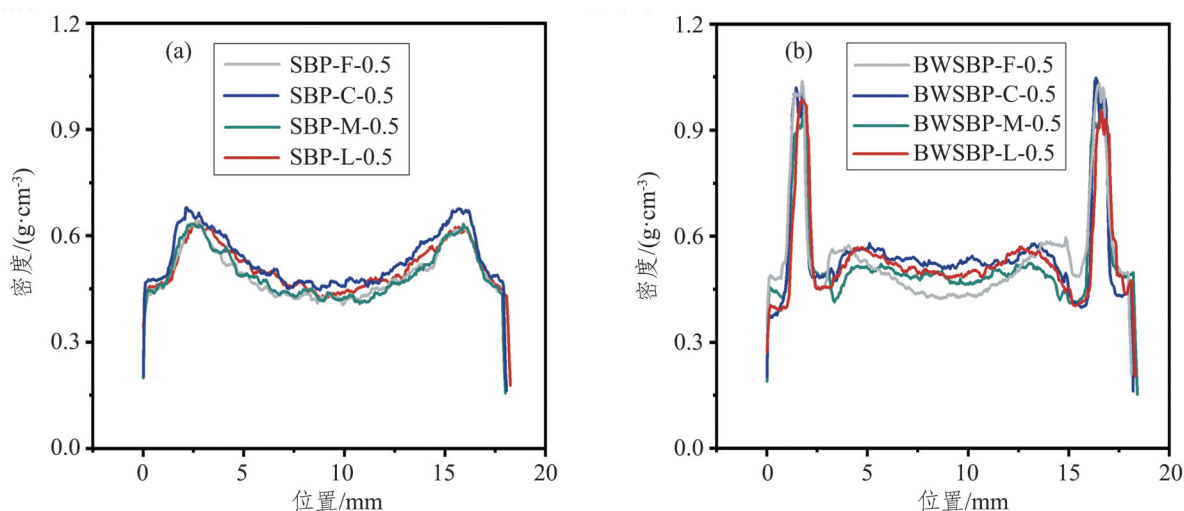


图8 不同结构复合板的VDP

Fig.8 The VDP of SBPs and BWSBPs with different layer structures

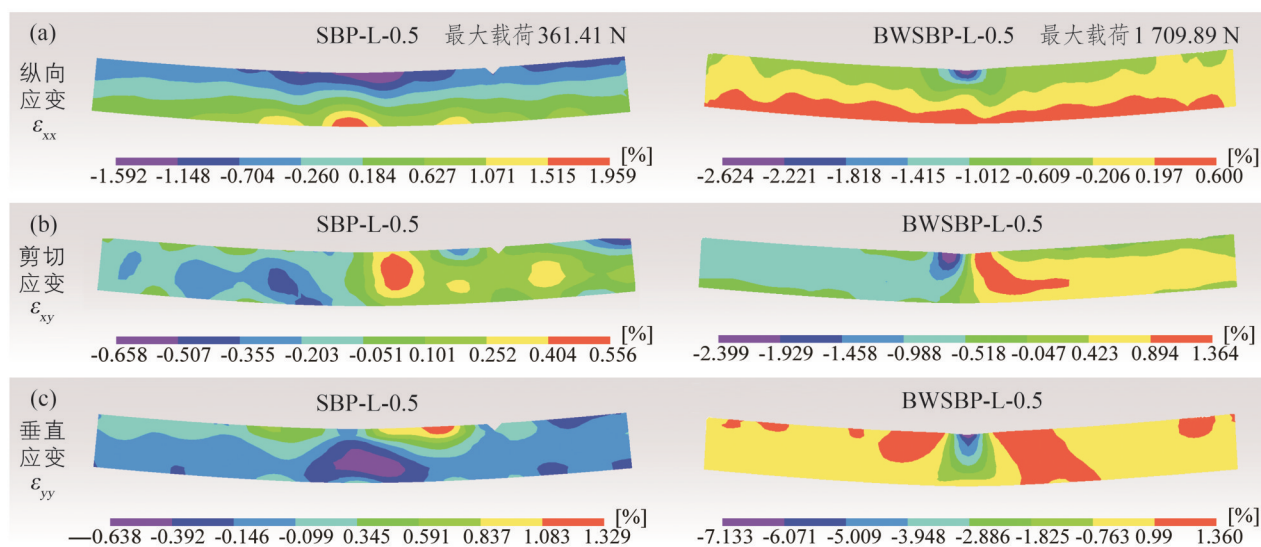


图9 SBP-L-0.5和BWSBP-L-0.5试件在最大载荷下的应变分布

Fig.9 Strain distribution of specimens SBP-L-0.5 and BWSBP-L-0.5 under the peak load

2.2.2 竹/木复合增强层及芯层铺装结构对板材内结合强度的影响 如图6c所示, SBP和BWSBP的IB按芯层刨花结构均呈现混合刨花>细刨花>粗刨花的规律, 且粗刨花SBP组显著低于其他组($P<0.05$)。由图10可见, 两类板材的破坏均主要发生在芯层, 表明IB主要取决于芯层刨花的接触状态及胶合界面的连续性, 而非表层增强作用。竹/木复合增强层主要提升板材的弯曲承载能力, 芯层铺装结构则决定其内部能否形成连续、稳定的胶合网络^[23]。混合刨花制备的板材中, 细刨花可有效填充粗刨花间的孔隙(图10b), 增大刨花间接触面积和有效胶合界面, 同时促进胶黏剂均匀

分布, 从而获得最高的IB。相比之下, 粗刨花虽有利于提高板材的弯曲性能, 但其比表面积较小、刨花间孔隙较大, 难以形成连续致密的胶合界面, 因而IB偏低。

在相同铺装结构下, BWSBP的IB均高于SBP。结合图8可知, 该差异并非由芯层最低密度区域的变化直接导致, 而可能主要源于竹/木复合增强层的约束作用。在IB测试垂直拉伸过程中, 复合表层可抑制芯层刨花的局部横向变形, 改善载荷传递的均匀性, 减缓应力集中及微裂纹扩展; 相比之下, 缺乏表层约束的SBP更易因局部变形不协调而提前失效。

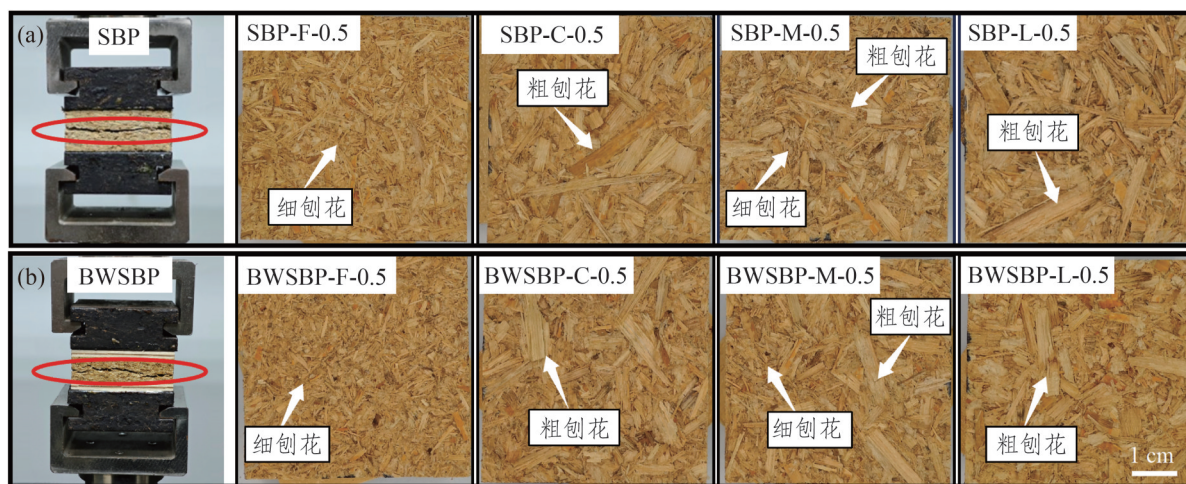


图10 SBP和BWSBP的IB测试破坏表面

Fig.10 Surface failure morphology of SBPs and BWSBPs after IB tests

2.2.3 竹/木复合增强层及芯层结构对板材尺寸稳定性的影响 如图6d、6e所示, BWSBP的24 h TSR和WAR均极显著低于SBP ($P<0.001$)。这主要得益于高密度竹/木复合增强层形成的物理阻隔, 有效抑制了水分渗透及芯层吸湿膨胀。对于BWSBP, F与L型刨花组的24 h TSR与WAR均显著低于C和M型 ($P<0.05$); SBP虽然呈现相同趋势, 但差异未达显著水平。上述结果表明, 芯层刨花结构是影响复合板尺寸稳定性的重要因素, 在复合板设计中应予以重点优化。

综上, 竹/木复合增强层是提升复合板力学性能与尺寸稳定性的主导因素; 芯层刨花则主要影响复合板的弹性模量、吸水性及板边握螺钉力,

而对静曲强度、内结合强度和板面握螺钉力的影响不显著。竹/木复合增强层与芯层刨花结构对复合板性能的差异化影响, 进一步验证了“界面—结构协同设计”策略中表层强化与芯层功能分区的合理性。

2.3 芯层密度对复合板性能的影响

2.3.1 芯层密度对力学性能的影响 在层配铺装结构中, 芯层密度是协调BWSBP轻量化与力学性能的关键参数。如图11所示, 随着芯层密度增加, MOE、MOR和IB整体呈上升趋势, 表明适度提高芯层密度可增强刨花间结合及芯层剪切承载能力, 促进弯曲应力在表层、过渡层与芯层之间有效传递。

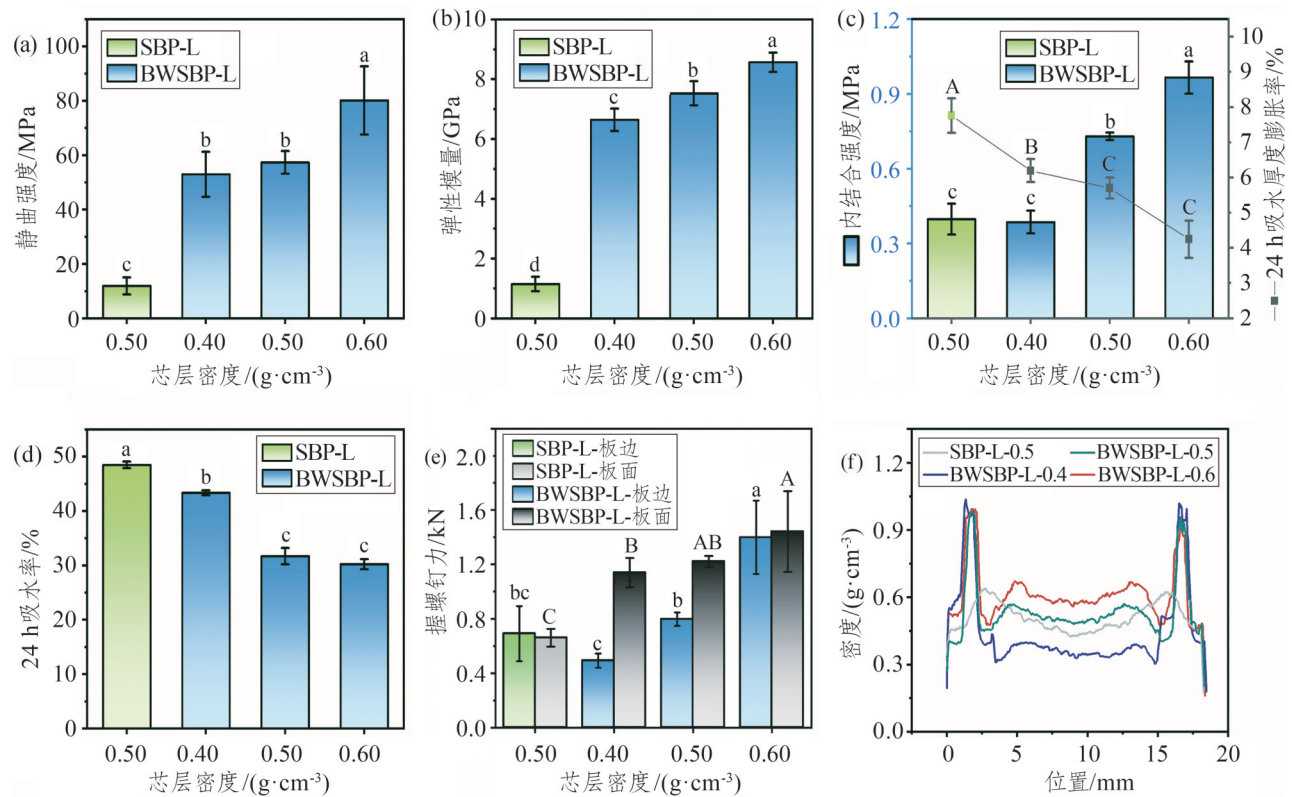


图11 芯层密度对复合板性能的影响

Fig.11 Effect of core density on the key properties of SBPs and BWSBPs

当芯层密度为0.5 g/cm³时, BWSBP-L-0.5的MOR、MOE和IB分别达到57.4 MPa、7.5 GPa和0.73 MPa, 比SBP-L-0.5的11.9 MPa、1.2 GPa和0.4 MPa, 分别提高382%、525%和83%; 板面和侧面SHC分别提高84.9%与15.3%。可见, 在芯层密度为0.5 g/cm³下, 表层增强可显著提高复合板的弯曲性能与内结合强度 ($P<0.05$)。

当芯层密度增至0.6 g/cm³时, 除板面SHC外, BWSBP-L-0.6的其他性能指标均显著高于其他组 ($P<0.05$), 其MOR、MOE和IB分别高达80.2 MPa、8.6 GPa和0.97 MPa, 板面和侧面SHC分别为1 442 N和1 399 N, 均满足GB/T 4897—2015对P4型刨花板的要求。此时, 芯层刨花接触更充分, 剪切承载网络更完整, 表层—过渡层—芯

层的协同传力效应最优。

然而, 芯层密度并非越低越优。由图 11f 和图 12 可见, BWSBP-L-0.4 因芯层过于疏松, 刨花间结合与协同承载能力不足, 在弯曲载荷下更易发生内部剪切破坏, 导致 IB 与侧面 SHC 最低。由此

表明, 过低的芯层密度会破坏应力传递的连续性, 削弱表层增强效应。因此, 芯层密度不仅影响复合板的轻量化水平, 还决定芯层能否作为稳定的剪切桥接层参与整体承载; 综合来看, 0.6 g/cm^3 为本试验范围内较优的芯层密度。

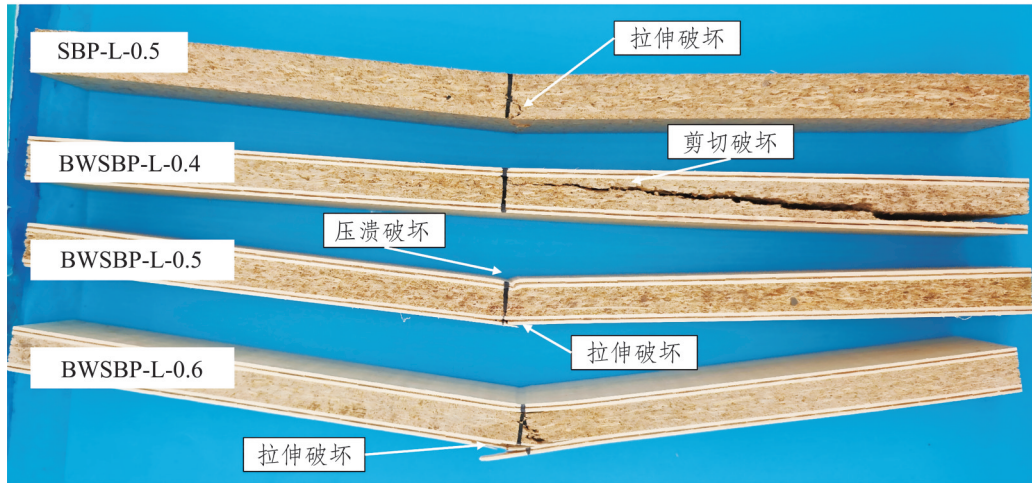


图 12 不同密度芯层复合板的弯曲破坏模式

Fig.12 Failure modes of SBPs and BWSBPs with different core densities under bending

2.3.2 芯层密度对复合板尺寸稳定性的影响 图 11c、11d 表明, 在芯层密度为 $0.4 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$ 时, BWSBP-L 的 24 h TSR 与 WAR 显著低于 SBP-L, 且随着芯层密度增加而显著下降 ($P < 0.05$)。这是由于高密度竹/木复合增强层可形成有效的水分阻隔, 而芯层致密化进一步减少了贯通孔隙和毛细通道, 从而显著提升 BWSBP 的尺寸稳定性。

2.3.3 芯层密度对复合板导热系数和吸声性能的影响 如图 13a 所示, 降低芯层密度可提高复合板

内部孔隙率, 削弱固相热传导, 从而降低导热系数。当芯层密度为 $0.4 \sim 0.5 \text{ g/cm}^3$ 时, BWSBP-L 与 SBP-L 的导热系数差异不显著 ($P > 0.05$), 表明竹/木表层增强层并未明显削弱蔗渣芯层的隔热性能。为综合评价 BWSBP 的性能, 将其关键指标与文献报道的蔗渣刨花板进行对比 (表 2)。可见板材密度为 $0.5 \sim 0.6 \text{ g/cm}^3$ 时, BWSBP 不仅物理力学性能明显更优, 而且导热系数更低, 隔热性能同步提升。

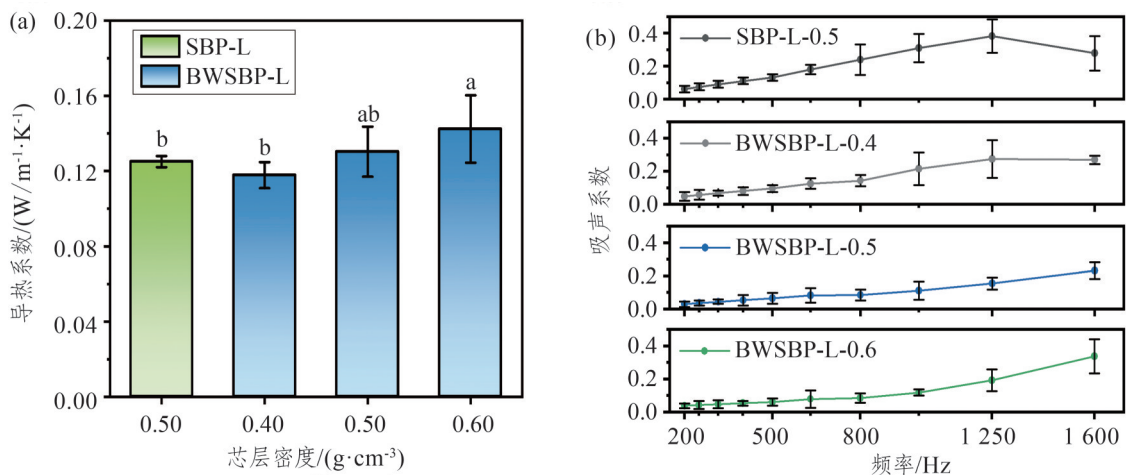


图 13 不同芯层密度对复合板导热系数和吸声系数的影响

Fig.13 Effect of core density on the thermal conductivity and sound absorption coefficient of SBPs and BWSBPs

表 2 本研究与其他蔗渣刨花板主要性能对比

Tab.2 Comparison of key properties of the sugarcane bagasse particleboards developed in this study with other bagasse particleboards

板材	密度/(g·cm ⁻³)	静曲强度/MPa	弹性模量/GPa	内结合强度/MPa	24 h 吸水厚度膨胀率/%	导热系数/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
本研究	0.46~0.64	53~80	7~9	0.39~0.97	4.2~6.2	0.118~0.142
竹/蔗渣刨花板 ^[16]	0.59~0.61	7~12	1	0.15~0.77	10.6~44.8	
多层蔗渣刨花板 ^[17]	0.55	12	1	0.92	4.8(2 h)	0.144

芯层采用层配铺装时，试板的吸声性能测试结果（图 13b）显示，表面粗糙的 SBP 在 200~1 250 Hz 频段具有较高的吸声系数。竹/木复合增强层的覆盖虽然使 BWSBP 的整体吸声性能有所下降，但增强了其在 1 600 Hz 附近的吸声能力。降低芯层密度后，BWSBP-L-0.4 的平均吸声系数接近 SBP-L-0.5，部分频段甚至达到相当水平，这说明吸声性能主要受芯层密度及内部孔隙结构调控。通过芯层密度的梯度设计，可在保持高力学性能的同时，调控 BWSBP 的隔热与吸声性能，为其结构-功能协同优化提供依据。

2.4 界面-结构协同强化复合板性能的机制

综上，竹/木增强蔗渣复合板 BWSBP 优异的力学性能与尺寸稳定性源于界面活化、梯度结构构筑及适度致密化三者的协同作用。蔗渣刨花经过 NaOH 预处理，在有效去除蔗渣表面蜡质的同时，可保持纤维结构完整性，增强刨花间界面胶合，从而显著提升 SBP 的内结合强度。在此基础上引入竹/木复合增强表层，进一步提高复合板的弯曲承载能力。针对高模量增强层与低密度蔗渣刨花层直接复合时，易因模量突变引发界面分层的问题，研究采用“表细芯粗”的层配铺装策略，构建连续的密度梯度与应力传递路径。表层载荷经致密细刨花过渡层均匀扩散至粗刨花芯层，后者依托完整的纤维骨架提供剪切支撑并利于诱导裂纹偏转。

在本试验条件下，当蔗渣刨花芯层密度为 0.6 g/cm³ 时，“表层承载-过渡层扩散-芯层抗剪”机制得到充分发挥，实现 BWSBP 弯曲性能和内结合强度的同步提升；并且，竹/木复合增强层与致密刨花层共同阻滞水分渗透和扩散，明显改善 BWSBP 的尺寸稳定性。

3 结论

针对蔗渣基复合板界面结合弱，以及力学性能与隔热、吸声性能难以协同提升的问题，构建“界面优化-表层增强-芯层调控”一体化设计体系：以碱预处理改善蔗渣界面，以 1.0 mm 厚毛竹竹席与 1.3 mm 厚杨木单板组合制成竹/木复合增强表层，并通过“表细芯粗”铺装与密度梯度设计优化芯层结构。

1) 碱预处理可有效增强蔗渣与胶黏剂的界面结合。NaOH 溶液通过去除纤维表面蜡质和可溶性糖分、增加表面粗糙度，促进胶黏剂浸润与机械咬合。最优预处理条件为：NaOH 溶液质量分数 0.25%、温度 50 ℃、时间 1.5 h；继续提高 NaOH 溶液质量分数或处理温度会引起细胞壁过度溶胀、开裂和孔隙增多，破坏蔗渣结构完整性，进而削弱界面增强效果。

2) 竹/木复合增强表层与芯层分级铺装可协同提升板材力学性能。表层增强并非简单叠加强质材料，而是通过重构板材厚度方向的模量分布和载荷传递路径，提高整体承载效率。芯层分级铺装进一步调控增强效果：细刨花有利于形成致密过渡层、提高刚度，粗刨花有助于提高承载能力；“表细芯粗”构型则实现强度、刚度与尺寸稳定性的协同优化。DIC 与 VDP 结果共同表明，该层配铺装结构形成梯度化、分级式传力路径，可有效缓解界面应力集中并抑制芯层早期失效。

3) 芯层密度优化是实现轻质化与高性能协同的关键。随着芯层密度提高，复合板的 MOR、MOE 和 IB 整体提升，24 h TSR 和 WAR 相应降低。BWSBP-L 在芯层密度为 0.6 g/cm³ 时综合性能最优，MOR、MOE 和 IB 分别为 80.2 MPa、8.6 GPa 和 0.97 MPa，高于 GB/T 4897—2015 干燥状态下重载型刨花板（P4 型）的限值要求，同时兼具蔗渣刨

花板较低的导热系数和良好的吸声性能。

区别于传统研究多单独聚焦界面化学改性或单一铺层结构优化的思路,本研究构建的界面-结构多层次协同增强机制,为高性能、功能化农林剩余物基复合板材的研发提供新路径。未来研究应进一步解析力学承载、隔热与吸声性能间的协同与权衡机制,发展绿色改性关键技术,推动多功能一体化蔗渣复合板材的开发与应用,促进蔗渣高值化利用。

参考文献:

- [1] 郭文静,常亮,高黎,等.中国刨花板产业创新发展近况及展望[J]. 中国人造板, 2024, 31(3): 57-61.
Guo Wenjing, Chang Liang, Gao Li, et al. Current status and prospects of innovation and development of China particleboard industry[J]. China Wood-Based Panels, 2024, 31(3): 57-61.
- [2] Rahla K M, Mateus R, Bragança L. Selection criteria for building materials and components in line with the circular economy principles in the built environment: a review of current trends[J]. Infrastructures, 2021, 6(4): 49.
- [3] Ali Khawaja S, Javed U, Zafar T, et al. Eco-friendly incorporation of sugarcane bagasse ash as partial replacement of sand in foam concrete [J/OL]. Cleaner Engineering and Technology, 2021, 4: 100164. DOI: 10.1016/J.CLET.2021.100164.
- [4] Sampathrajan A, Vijayaraghavan N C, Swaminathan K R. Mechanical and thermal properties of particle boards made from farm residues[J]. Bioresource Technology, 1992, 40(3): 249-251.
- [5] 高伟.人造板生产原料向替代性原料转变[J]. 中国人造板, 2022, 29(9): 41-42.
- [6] 赵培方,吴才文,张跃彬.我国甘蔗种业发展现状及建议[J]. 中国糖料, 2026, 48(2): 79-84.
Zhao Peifang, Wu Caiwen, Zhang Yuebin. Development status and recommendations for sugarcane seed industry in China[J]. Sugar Crops of China, 2026, 48(2): 79-84.
- [7] Bilba K, Arsene M A. Silane treatment of bagasse fiber for reinforcement of cementitious composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008, 39(9): 1488-1495.
- [8] 沈华艳,谢东,刘海露,等.甘蔗渣生物质资源在复合材料领域的研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(7): 52-55.
Shen Huayan, Xie Dong, Liu Hailu, et al. Research progress in utilization of sugarcane bagasse resource in composites materials[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(7): 52-55.
- [9] Lin Zhichao, Liu Qingting, Wu Tao, et al. Effects of cellulose structure of sugarcane stem on mechanical properties of cell wall[J/OL]. Journal of Natural Fibers, 2025, 22(1): 2445573. DOI: 10.1080/15440478.2024.2445573.
- [10] Le D H A, Pham-Bao T. Fabrication and characteristics of binderless cellulosic fiberboard from sugarcane bagasse for sustainable building applications[J]. Cellulose, 2025, 32(7): 4345-4362.
- [11] 廖瑞,徐剑莹,唐忠荣,等.轻质无胶蔗渣板的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2015, 35(2): 109-113, 118.
Liao Rui, Xu Jianying, Tang Zhongrong, et al. Study on ultra-low density bagasse binderless particleboard[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2015, 35(2): 109-113, 118.
- [12] 孙涛,陈安生,程若愚.芦苇-蔗渣刨花板的工艺研究[J]. 林业科技, 2020, 45(6): 39-41.
- [13] Pędzik M, Janiszewska D, Rogoziński T. Alternative lignocellulosic raw materials in particleboard production: a review[J/OL]. Industrial Crops and Products, 2021, 174: 114162. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.114162.
- [14] Lee S H, Lum W C, Boon J G, et al. Particleboard from agricultural biomass and recycled wood waste: a review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 20: 4630-4658.
- [15] 孙萍,张健,刘红光,等. UF/PMDI与PMDI胶黏剂制备轻质刨花板性能对比研究[J]. 林产工业, 2021, 58(6): 7-12.
Sun Ping, Zhang Jian, Liu Hongguang, et al. Study on the performance of UF/PMDI and PMDI adhesives for preparing lightweight particleboards[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(6): 7-12.
- [16] Brito F M S, Bortoletto G Jr, Paes J B, et al. Technological characterization of particleboards made with sugarcane bagasse and bamboo culm particles[J/OL]. Construction and Building Materials, 2020, 262: 120501. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120501.
- [17] Fiorelli J, Galo R G, Castro Junior S L, et al. Multilayer particleboard produced with agroindustrial waste and *Amazonia* vegetable fibres[J]. Waste and Biomass Valorization, 2018, 9(7): 1151-1161.
- [18] 柯婕,王闻,梁翠谊,等.甘蔗渣高性能吸声板材制备的工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2026, 42(6): 380-387.
Ke Jie, Wang Wen, Liang Cuiyi, et al. Optimization of the process parameters for the preparation of high-performance sound absorbing boards from sugarcane bagasse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2026, 42(6): 380-387.
- [19] Wang Yaocheng, Luo Hongfeng, Chen Chuanfu, et al. Hierarchical damage mechanisms and multiscale tensile property prediction of woven bamboo strips and their epoxy-based composites[J/OL]. Composites Part B: Engineering, 2026, 310: 113170. DOI: 10.1016/j.compositesb.2025.113170.
- [20] Prabhu S V, Wilson V H, Anand K T, et al. Water absorption behavior of teff (*Eragrostis tef*) straw fiber-reinforced epoxy composite: RSM-based statistical modeling and kinetic analysis[J]. Advances in Polymer Technology, 2022(1): 1-6.
- [21] Shrivastava R, Christy A, Telang A, et al. Effect of chemical treatment and curing parameters on mechanical properties of natural fiber reinforced polymer matrix composites-a review[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2015, 5(6): 70-75.
- [22] Wang Junfeng, Wang Xuan, Zhan Tianyi, et al. Preparation of hydro-thermal surface-densified plywood inspired by the stiffness difference in “sandwich structure” of wood[J]. Construction and Building Materials, 2018, 177: 83-90.
- [23] 秦理哲,黄腾华,雷福娟,等.松桉轻质刨花板内结合强度及其破坏模式对比[J]. 林业工程学报, 2022, 7(1): 66-71.
Qin Lizhe, Huang Tenghua, Lei Fujuan, et al. Comparative on internal bond strengths and failure modes of lightweight particleboards of pine and *Eucalyptus*[J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(1): 66-71.

(责任编辑 余养伦/编校 向琴)