

引用格式: 赵丽媛, 黄荣凤, 王艳伟, 等. 密度分布对层状压缩杉木横纹抗压强度的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 611–621. ZHAO Liyuan, HUANG Rongfeng, WANG Yanwei, et al. Influence of density distribution on the compressive strength perpendicular to grain of sandwich-compressed *Cunninghamia lanceolata* wood[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 611–621.

## 密度分布对层状压缩杉木横纹抗压强度的影响

赵丽媛<sup>1</sup>, 黄荣凤<sup>1</sup>, 王艳伟<sup>2</sup>, 何啸宇<sup>2</sup>, 孙龙祥<sup>2</sup>, 陈章景<sup>3</sup>

(1. 中国林业科学研究院 木材工业研究所/国家林业和草原局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091; 2. 久盛地板有限公司, 浙江湖州 313009; 3. 弗吉尼亚理工学院, 美国 布莱克斯堡 VA24061)

**摘要:** 【目的】木材横纹抗压强度是木结构建筑材料及楼板和地板等选材的重要依据。研究层状压缩杉木 *Cunninghamia lanceolata* 木材横纹抗压强度, 可为人工林杉木在实木地板、家具等木制品方面的高附加值利用提供参考。【方法】以杉木木材为研究对象, 采用湿热/水热控制下的层状压缩方式, 加工出压缩层位置、厚度不同的层状压缩木材, 研究层状压缩引起的杉木木材结构和管胞构造变化, 分析层状压缩杉木木材密度分布对弦向加载和径向加载下横纹抗压强度的影响。【结果】扫描电镜观察和测量结果表明: 天然杉木早材的平均径向腔径为 45.7  $\mu\text{m}$ , 晚材为 4.6  $\mu\text{m}$ , 且早材管胞壁厚仅为晚材的 1/2; 早材弦径向平均壁腔比为 0.14, 晚材为 3.08。层状压缩后, 压缩层部位的早材细胞壁大变形至细胞腔几乎消失, 但晚材部位细胞形态几乎不发生变化; 压缩层部位的早材密度由 0.200  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  以下, 提高至 0.500  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  以上, 但多数情况下被压缩的早材密度依然低于天然杉木晚材密度, 压缩层部位呈现出带有数个晚材密度峰值的密度分布特征。对照材及层状压缩材, 弦向加载时横纹抗压强度均达到径向加载的 2 倍多。径向加载及弦向加载的横纹抗压强度均与压缩木材的密度呈极显著线性相关 ( $P<0.01$ )。径向加载下的横纹抗压强度与密度的关系比弦向加载更密切。【结论】压缩层部位的早材密度明显增大, 早材密度的微小增加能够大幅度提高压缩木材的横纹抗压强度。图 9 表 1 参 28

关键词: 杉木; 层状压缩; 密度分布; 早晚材; 管胞; 横纹抗压强度

中图分类号: S781 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0611-11

## Influence of density distribution on the compressive strength perpendicular to grain of sandwich-compressed *Cunninghamia lanceolata* wood

ZHAO Liyuan<sup>1</sup>, HUANG Rongfeng<sup>1</sup>, WANG Yanwei<sup>2</sup>, HE Xiaoyu<sup>2</sup>, SUN Longxiang<sup>2</sup>, CHEN Zhangjing<sup>3</sup>

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Wood Science and Technology of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Treessun Flooring Co., Ltd. Huzhou 313009, Zhejiang, China; 3. Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg VA24061, USA)

**Abstract:** [Objective] The compressive strength of wood perpendicular to grain is an important factor for selecting materials used in wood building and flooring. The study aims to investigate the compressive strength perpendicular to grain of sandwich-compressed *Cunninghamia lanceolata* wood, in order to provide reference for its high value-added utilization in wood products such as flooring and furniture. [Method] Taking *C. lanceolata* wood as the research object, a sandwich compression method under hydrothermal control was used to process sandwich-compressed wood with different compression layer locations and thicknesses. The changes in wood structure and tracheid structure caused by sandwich compression were studied, and the impact of

收稿日期: 2024-08-12; 修回日期: 2024-11-28

基金项目: 浙江省湖州市重点研发计划项目(2022ZD2049); 国家自然科学基金资助项目(32071690)

作者简介: 赵丽媛 (ORCID: 0009-0001-0649-0552), 高级工程师, 从事木材及木制品物理力学性能研究。E-mail: [zhao\\_li\\_yuan@126.com](mailto:zhao_li_yuan@126.com)。通信作者: 黄荣凤 (ORCID: 0000-0002-0190-5712), 研究员, 博士, 从事木材物理学及木材物理改性研究。E-mail: [huangrf@caf.ac.cn](mailto:huangrf@caf.ac.cn)

density distribution of sandwich-compressed *C. lanceolata* wood on the compressive strength perpendicular to grain under tangential and radial loading was analyzed. [Result] Scanning electron microscopy observation and measurement results showed that the average radial lumen diameter of the earlywood was 45.7  $\mu\text{m}$ , while that of latewood was only 4.6  $\mu\text{m}$ , and the wall thickness of early wood tracheid was only half of that of latewood. The average ratio of the double wall thickness to the lumen diameter of tracheid in the tangential and radial directions of earlywood was 0.14, while that of latewood was 3.08. After sandwich compression, the cell wall of earlywood in the compressed layer was greatly deformed until the cell lumen almost disappeared, while the cell morphology in the latewood area remained almost unchanged. The earlywood density in the compressed layer significantly increased from below 0.200  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  to above 0.500  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , but in most cases, the density of the compressed earlywood was still lower than the latewood density of natural *C. lanceolata*. The density distribution of compressed layer exhibited several density peaks of latewood. The compressive strength perpendicular to grain of the control samples and sandwich-compressed samples under tangential loading was more than 2 times of that under radial loading. There was a significant linear correlation ( $P<0.01$ ) between the compressive strength perpendicular to grain under radial and tangential loading and the mean and minimum density of compressed wood. The relationship between compressive strength perpendicular to grain and density under radial loading is more closely related than that under tangential loading. [Conclusion] The earlywood density in the compressed layer significantly increases. A slight increase in earlywood density can significantly improve the compressive strength perpendicular to grain of compressed wood. [Ch, 9 fig. 1 tab. 28 ref.]

**Key words:** *Cunninghamia lanceolata*; sandwich compression; density distribution; earlywood and latewood; tracheid; compressive strength perpendicular to grain

木材横纹抗压强度是评价木材在垂直于纹理方向上抵抗压缩变形能力的重要指标。木材是一种具有弹塑性特性的天然高分子材料，其弹性变形范围是有限的。当木材受到超过弹性范围的外力压缩时，会产生永久变形<sup>[1]</sup>。同时，由于木材具有各向异性的微观组织构造特征，木材中管状细胞有规则的纵向排列，形成多孔状微观构造，使木材的力学性能具有横纹方向弱、顺纹方向强的特性，其中，木材横纹方向的抗压强度和抗压弹性模量仅为顺纹方向的 1/11 和 1/50<sup>[2-3]</sup>。

木材作为横向受压材料在生产和生活中使用非常普遍，木材的横纹抗压强度是工程及建筑施工用材、古代及现代木结构建筑材料及楼板和地板等选材的重要依据。影响木材横纹抗压强度的因素有很多，其中木材密度、树种、纹理方向、木材结构和组织构造是最主要的影响因素。木材密度是决定木材强度和刚度的物质基础，木材强度和刚度随着木材密度的增加而增大<sup>[1]</sup>，但两者之间并不是简单的线性关系<sup>[2, 4-5]</sup>。同一树种的木材因产地及生长环境不同引起的木材密度变化范围不超过 0.20  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  时，木材密度与横纹抗压强度间呈显著线性相关，但对木材密度为 0.39~0.92  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的多树种木材进行综合分析的结果表明：两者间呈极显著的二次函数关系。综合分析国产 10 余种阔叶材及针叶材的木材结构和组织构造对横纹抗压强度的影响，研究结果表明：阔叶材中，在散孔材和半散孔材的管孔大小及分布比较均匀的情况下，横纹抗压强度只受木射线的影响，径向横纹抗压强度大于弦向；在环孔材木射线发达程度中等的情况下，横纹抗压强度受早材管孔直径大的影响，径向小于弦向；但具有发达木射线的阔叶材，径向横纹抗压强度大于弦向<sup>[5-6]</sup>。针叶材中，早晚材渐变的木材径向横纹抗压强度大于弦向，早晚材急变的木材弦向横纹抗压强度大于径向<sup>[2, 5-6]</sup>。密度为 0.76~1.00  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的进口阔叶材树种，在密度接近的情况下，具有多列木射线构造的木材横纹抗压强度，比多数为单列或双列木射线构造的木材高；木射线数量多，且多数为多列木射线的情况下，不仅横纹抗压强度更高，而且径向横纹抗压强度大于弦向<sup>[7]</sup>。可见，影响木材横纹抗压强度的因素很多，而且主导因素不确定，影响方式复杂多变。

木材压缩密实化是通过横纹压缩方式，提高低密度速生材密度及力学性能的有效方法<sup>[8-11]</sup>。与传统的木材整体软化、整体压缩方法不同，实木层状压缩技术通过调控木材内部的水热分布，实现分层软

化, 以控制压缩层形成的位置、厚度及数量, 是木材压缩密实化的一种新方法<sup>[11-13]</sup>。杉木 *Cunninghamia lanceolata* 是中国重要的人工林速生树种, 但人工林杉木木材密度小, 平均密度仅为  $0.37 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 杉木木材硬度约  $10 \text{ MPa}$ , 仅为家具用材合格水平的  $1/4$ , 同时, 天然杉木木材抗弯强度仅为  $67.9 \text{ MPa}$ <sup>[14]</sup>, 限制了杉木在实木地板、家具等木制品加工中的应用。本研究采用层状压缩方法, 通过控制预热时间和压缩率获得压缩层位置和厚度不同的层状压缩杉木木材, 测定层状压缩杉木木材的弦向和径向横纹抗压强度, 分析由于压缩层位置和厚度不同形成的层状密度分布对压缩杉木木材横纹抗压强度的影响, 以及层状压缩技术在改善杉木木材横纹抗压强度的适用性, 旨在为人工林杉木在实木地板、家具等木制品方面的高附加值利用提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验用杉木采自广西融安县杉木人工林。选择树干通直、无病虫害、胸径大于  $40 \text{ cm}$  的杉木 5 株, 树龄为  $30 \text{ a}$ , 平均气干密度为  $0.369 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

先将每根原木锯解成  $60 \text{ cm}$  长的木段, 从每个木段上截取中心部位  $8 \text{ cm}$  宽的中心条, 干燥至含水率  $12\%$  以下。从干燥后中心条的边材部分加工出  $550 \text{ mm(长)} \times 80 \text{ mm(宽)}$ , 厚度分别(高)为  $25$ 、 $30$ 、 $35$ 、 $38$  和  $40 \text{ mm}$  的试件备用。长、宽、高分别代表木材的顺纹方向、弦向和径向。

### 1.2 层状压缩方法

采用水热控制下的层状压缩方法实施杉木层状压缩<sup>[15-17]</sup>。层状压缩过程包括 4 个阶段: 含水率分布调控阶段、预热阶段、压缩阶段和保压阶段。

1.2.1 压缩层位置调控 压缩层位置调控试验使用厚度为  $30 \text{ mm}$  的试件。在室温条件下将试件浸泡于水中  $2 \text{ h}$ , 后取出置于密封袋中放置  $24 \text{ h}$ , 之后在热压机压板的夹持下进行预热处理。预热温度为  $160 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , 预热处理时间分别为  $0.5$ 、 $2.0$ 、 $6.0$ 、 $8.0$ 、 $11.0$ 、 $15.0$ 、 $25.0$ 、 $30.0 \text{ min}$ , 每个条件下样品重复 5 次。预热结束后, 直接在热压机上进行间歇式压缩, 压缩时间  $3 \text{ s}$ , 间歇时间  $30 \text{ s}$ 。压缩载荷  $6 \text{ MPa}$ 。目标厚度  $20 \text{ mm}$ , 用厚度规控制。压缩过程结束后, 继续在  $6 \text{ MPa}$  的载荷下保持  $30 \text{ min}$ , 之后冷却至室温后取出。

1.2.2 压缩层厚度调控 压缩层厚度调控试验用试件厚度分别为  $25$ 、 $30$ 、 $35$  和  $40 \text{ mm}$ , 用于压缩量分别为  $5$ 、 $10$ 、 $15$  和  $20 \text{ mm}$  的表层压缩试验, 压缩量换算成压缩率分别为  $20.0\%$ 、 $33.3\%$ 、 $42.9\%$  和  $50.0\%$ 。每个压缩层厚度下样品重复 5 次。预热时间均为  $0.5 \text{ min}$ , 其余 3 个阶段的条件同 1.2.1。

### 1.3 性能检测与表征

1.3.1 压缩量和压缩率计算 压缩量=压缩前板材厚度-压缩后板材厚度。压缩率=压缩量/压缩前板材厚度 $\times 100\%$ 。

1.3.2 密度分布测定 从距离压缩材端部  $3 \text{ cm}$  处截取  $50 \text{ mm(长)} \times 50 \text{ mm(宽)} \times$  板材厚度(高)的试样, 在  $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度  $65\%$  条件下平衡处理至恒定含水率后, 通过 X 射线剖面密度仪 (DENSE-LAB) 对木材厚度方向的密度分布进行测试, 试验步长设定为  $0.02 \text{ mm}$ 。根据密度分布的测试结果计算压缩木材的平均密度、最大密度和最小密度。

1.3.3 压缩层的判定 本研究杉木试材的平均气干密度为  $0.369 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。按照 LY/T 3376—2024《层状压缩木材》规定<sup>[18]</sup>, 将压缩木材中密度高于对照材平均密度  $38\%$  的连续高密度区域判定为压缩层, 以确保压缩层密度可以达  $0.600 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.3.4 扫描电镜观察和管胞测量 从未压缩杉木木材的年轮界附近区域截取包括早材和晚材的横切面试样, 使用场发射环境扫描电镜 (XL-30ESEM FEG, FEI Company, Hillsboro), 在  $45\sim800$  倍下观察其横切面形貌特征并拍照, 在照片上测量杉木早材、晚材及早晚材间管胞壁厚和腔径, 并计算壁腔比。径向(弦向)壁腔比=径向(弦向)单壁厚 $\times 2$ /弦向(径向)腔径。从层状压缩杉木木材的横切面截取包括压缩层和未压缩层试样, 表面喷金处理后, 使用扫描电子显微镜 [S4800 SEM(Hitachi)] 在  $100\sim400$  倍下观察细胞壁结构。

1.3.5 横纹抗压强度测试 横纹抗压强度的测试按照 GB/T 1927.12—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第 12 部分: 横纹抗压强度测定》规定的方法进行。试件尺寸为  $30 \text{ mm(长)} \times 20 \text{ mm(宽)} \times 20 \text{ mm(高)}$ 。使用日本岛津公司 AG-IS 50 KN 万能力学试验机测试。

## 2 结果与分析

### 2.1 压缩前后杉木木材管胞构造变化

2.1.1 天然杉木木材的管胞构造 天然杉木同一年轮内早晚材间密度差异非常大, 早材密度为  $0.200 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 晚材密度可达  $0.700 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  以上<sup>[12]</sup>, 其年轮结构表现为: 早材带较晚材带宽 3~8 倍(有的可达 10 倍以上), 晚材带甚狭窄, 早材至晚材渐变<sup>[19]</sup>。为了分析杉木早材至晚材渐变过程中管胞壁厚和腔径的变化规律, 从天然杉木上截取了包含 1 个年轮界及典型的早材细胞、晚材细胞和早晚材之间细胞形态的横切面, 拍摄扫描电镜照片, 如图 1 所示。管胞多为四边形, 而且以矩形为主, 从早材至晚材管胞径向直径变化非常大, 但弦向直径在同一个年轮内无明显变化(图 1A)。在放大 200 倍下能看出同一个年轮内的管胞壁厚早材至晚材有明显差异, 且年轮界附近的晚材管胞腔径极窄(图 1A)。

将杉木木材横切面的早材区域(图 1B)、早晚材间区域(图 1C)及晚材区域(图 1D)3 个部位放大 500~800 倍, 拍照后测量早材及晚材壁厚和腔径, 结果如图 2。杉木早材及早晚材之间管胞弦向壁厚略大于径向壁厚, 但晚材管胞弦向壁比径向壁厚 50%。杉木木材管胞壁厚以及径向和弦向壁厚差异从早材至晚材逐渐增加, 晚材弦向壁厚为早材的 2 倍。管胞径向腔径从早材至晚材差异非常大, 由  $45.7 \mu\text{m}$  降低至  $4.6 \mu\text{m}$ , 但弦向腔径在同一个年轮内无显著差异。这种管胞腔径的变化规律, 使杉木早材多数管胞呈径向直径大于弦向直径的矩形(图 1B), 晚材管胞则呈弦向直径大于径向直径的矩形(图 1D), 早晚材之间管胞接近正方形(图 1C)。

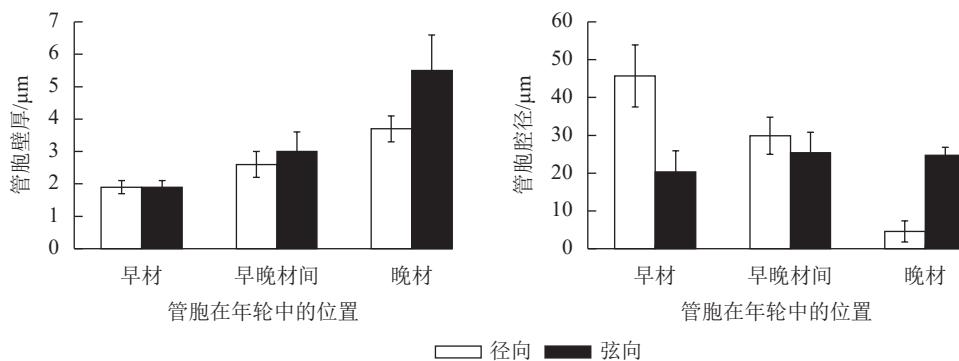
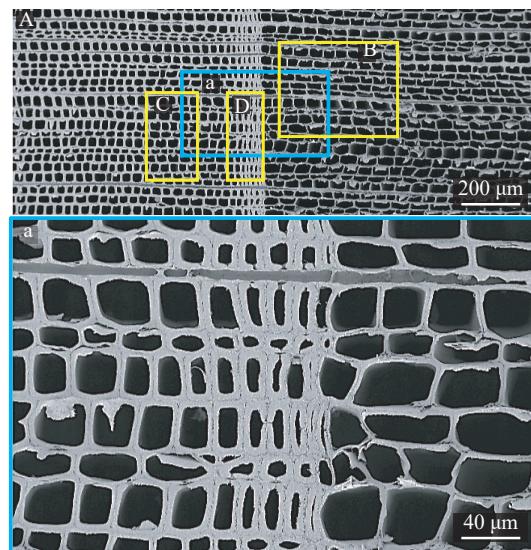


图 2 天然杉木木材管胞壁厚和腔径变化

Figure 2 Variation in the tracheid wall thickness and lumen diameter of *C. lanceolata* wood

使用管胞壁厚和腔径的测量结果计算杉木木材壁腔比(表 1)。杉木早材弦向平均壁腔比最小, 仅为 0.09, 径向壁腔比为 0.20, 两者平均值为 0.14, 即径向直径大于弦向早材管胞, 其弦向的双壁厚仅为管胞腔直径的  $1/12$ , 径向双壁厚为管胞腔径的  $1/5$ , 管胞平均壁厚为腔径的  $1/7$ 。早晚材之间管胞弦向和径向的平均壁腔比无明显差异, 分别为 0.21 和 0.22。晚材弦向平均壁腔比最大, 为 5.87, 即管胞双壁壁厚为腔径的 5.87 倍。本研究测量管胞壁腔比的最大值达 23.00。杉木早晚材管胞壁厚和腔径等构造的差异不仅使杉木早晚材密度差异大, 同时也会影响不同加载方向的木材力学性能, 特别是木材横纹抗压强度。

2.1.2 层状压缩杉木的管胞构造 图 3 为层状压缩杉木木材横切面扫描电镜照片, 示意压缩层与未压缩层的交界出现在早材区域以及早晚材交界(年轮界)区域时, 压缩层部位早材细胞的变形特征。在 100 倍显微镜下观察到压缩层部位早材细胞腔被压缩至几乎完全消失的状态, 已经看不出早材细胞固有的形态, 但晚材部位细胞腔清晰可见, 未压缩层部位近方形管胞形态完好(图 3A、B)。在 400 倍显微镜下观



A. 放大 45 倍拍摄的杉木木材横切面照片; a. 照片 A 中 a 区域放大 200 倍照片; B. 早材管胞壁厚及腔径测量区域; C. 早材与晚材间管胞壁厚及腔径测量区域; D. 晚材管胞壁厚及腔径测量区域。

图 1 天然杉木木材横切面的扫描电镜照片

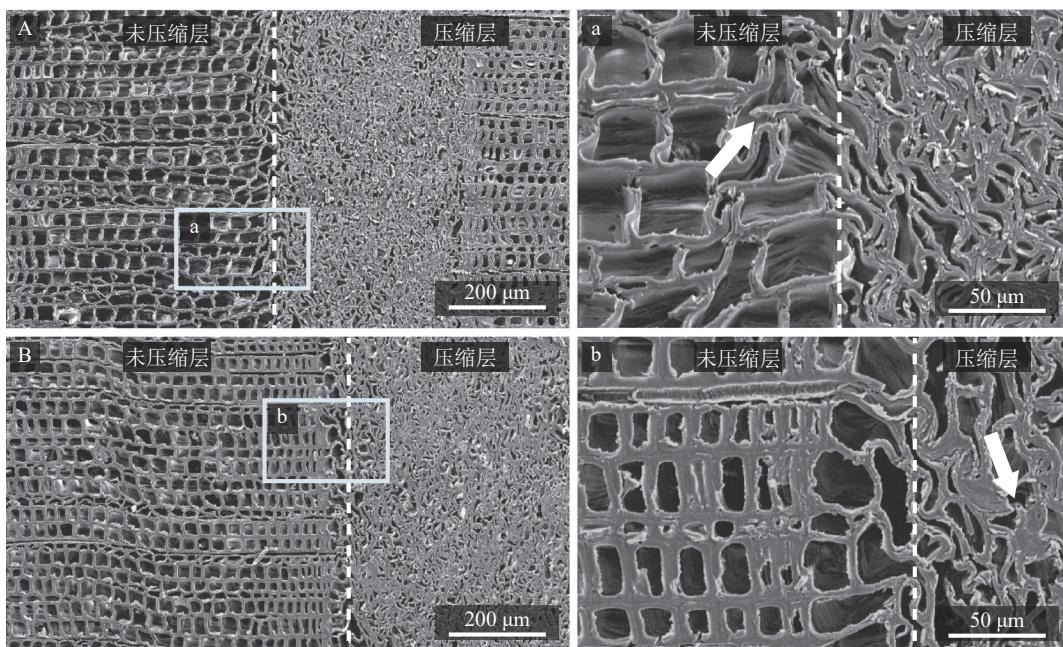
Figure 1 Cross-section SEM images of *C. lanceolata* wood

表1 天然杉木木材管胞的壁腔比

Table 1 Ratio of the double wall thickness to the lumen diameter of tracheids of *C. lanceolata* wood

统计量	早材壁腔比			早晚材间壁腔比			晚材壁腔比		
	径向	弦向	平均	径向	弦向	平均	径向	弦向	平均
平均值	0.20	0.09	0.14	0.22	0.21	0.21	0.30	5.87	3.08
标准偏差	0.05	0.02	0.03	0.05	0.07	0.06	0.03	7.46	3.74
最大值	0.27	0.13	0.20	0.33	0.34	0.33	0.34	23.00	11.67
最小值	0.13	0.07	0.10	0.15	0.12	0.14	0.24	1.17	0.71

察, 早材细胞壁屈曲变形清晰可见, 被压缩后残留部分早材细胞腔呈不规则形态(图3a、b), 晚材细胞完好, 未观察到细胞壁变形(图3b)。当压缩层与未压缩层的交界出现在早材区域时, 未压缩层邻近的早材细胞发生了轻微屈曲变形, 但细胞壁和细胞腔的固有形态基本完好(图3a)。当压缩层与未压缩层的交界出现在早晚材交界区域时, 早材细胞发生了形状不规则大变形, 已经看不出早材细胞的固有形态, 但细胞腔清晰可见(图3b)。压缩层以及压缩层与未压缩层交界处均出现少量早材管胞壁发生断裂的现象(图3a、b)。



A. 压缩层与未压缩层的交界出现在早材区域时的层状压缩杉木木材的横切面照片(100倍); a. 照片A中a区域的局部放大照片(400倍); B. 压缩层与未压缩层的交界出现在早材与晚材交界(年轮界)区域时的层状压缩杉木木材的横切面照片(100倍); b. 照片B中b区域的局部放大照片(400倍)。照片中白色箭头所指部位为早材细胞壁断裂点, 虚线表示压缩层与未压缩层间的界线。

图3 层状压缩杉木木材横切面扫描电镜照片

Figure 3 Cross-section SEM images of sandwich-compressed *C. lanceolata* wood

杉木木材经层状压缩后, 将天然杉木因早晚材间管胞壁厚和腔径差异形成的、晚材带极窄的、以髓心为中心的同心圆形疏密相间的结构, 改变为压缩层和未压缩层构成的、压缩层厚度可控的疏密相间的层状结构, 这种结构变化为定向定位提高杉木板材的密度提供了一种有效方法。

## 2.2 层状压缩杉木木材密度分布变化

2.2.1 压缩层位置改变引起的变化 图4为压缩量控制在10 mm时, 经过压缩层位置调控获得的压缩层距表面距离不同的层状压缩杉木木材剖面密度图, 示意压缩层位置改变引起的密度分布变化。天然杉木每个年轮都呈现出由早材至晚材密度由低到高逐渐变化的分布特征, 而且在同一年轮内密度大于 $0.600 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的高密度晚材区域极窄。采用控制预热时间的方法, 获得了压缩层距表面0、0.5、1.5、2.5、3.0、4.0、5.0、5.5 mm的8个压缩层位置不同的、具有1或2个高密度层的层状压缩杉木木材, 其中压缩层距表面5.0和5.5 mm时, 在压缩板材厚度方向的中心部位形成了1个高密度层。层状压缩后由于高密度层的

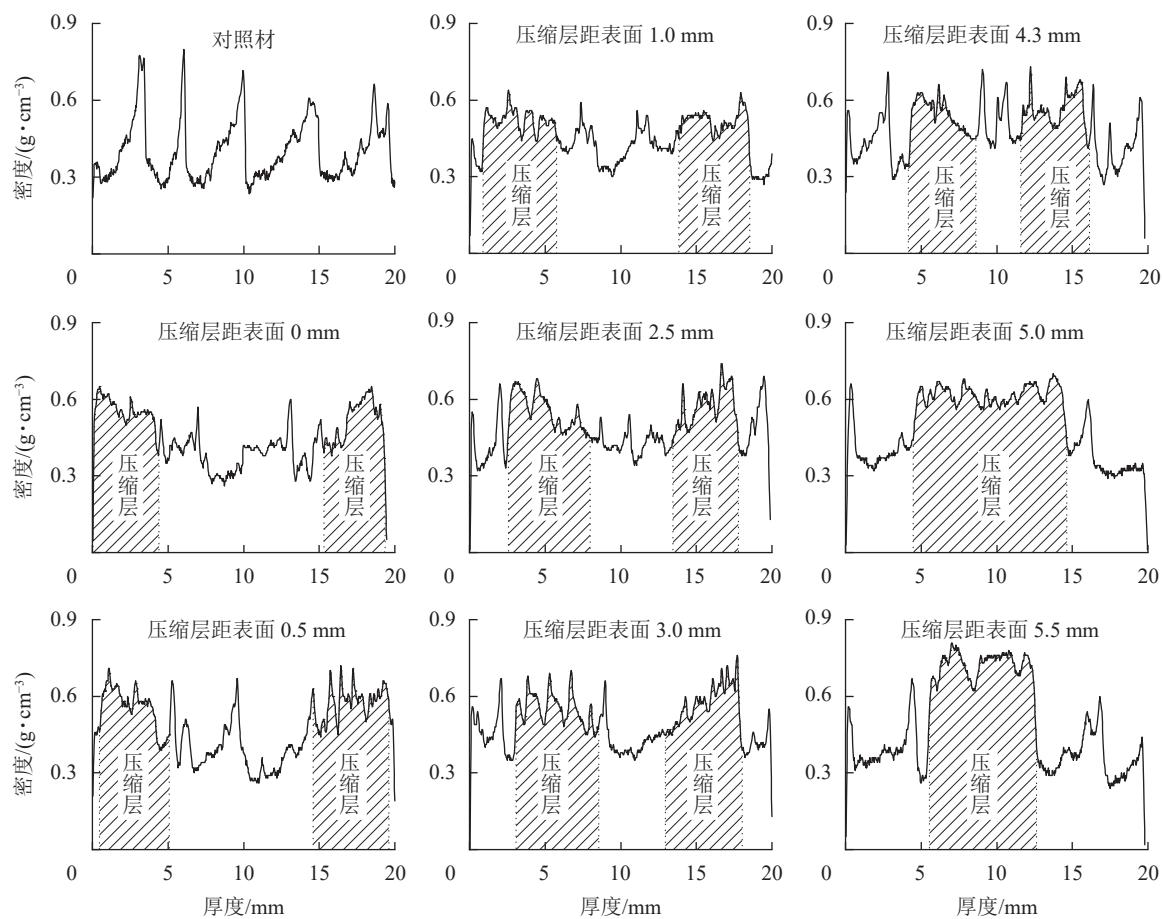


图4 层状压缩杉木木材剖面密度分布随压缩层距表面距离增加的变化

Figure 4 Change in profile density of sandwich-compressed *C. lanceolata* wood with the increase of the compressed layer distance from the surface

形成位置不同,改变了杉木的木材结构,由天然杉木早晚材渐变的环形年轮结构材料,变成高密度区域可控的层状结构材料。这种层状结构木材可以归纳为如图5所示的3种结构模式,即高密度层形成于表层、中心以及表层与中心之间,分别称为表层压缩杉木木材、中心层压缩杉木木材和中间层压缩杉木木材。

杉木木材经层状压缩后,压缩层部位早材细胞腔消失,而晚材细胞依然保持天然杉木木材的固有形态(图3),使其早材部位的密度大幅度提高,晚材部位密度不改变。这种压缩层部位仅早材密度变化的特征从图4中也可以明显看出。天然杉木木材早材密度低于 $0.200\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,层状压缩后早材密度提高至 $0.500\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以上。尽管层状压缩后早材密度显著提高,但多数被压缩早材的密度依然低于天然杉木的晚材密度,因此所有压缩层部位密度分布都带有数个晚材密度峰值,如图4阴影部分所示。表层压缩的情况下,未压缩层部位最小早材密度及其密度分布与对照材基本一致;随着压缩层距表面距离的增加,未压缩层部位最小早材密度逐渐增大,当压缩层形成于近中心部位或中心部位时,未压缩层早材部位最小密度又逐渐降低至与对照材基本一致的水平,但压缩层部位的密度始终保持相同或相近的密度分布特征。层状压缩杉木木材的这种密度分布特征,使层状压缩杉木木材与层状压缩杨木 *Populus* 具有相同的结构模式<sup>[20]</sup>,但两者压缩层密度分布特征不同。

2.2.2 压缩层厚度改变引起的变化 图6为压缩量控制在5、10、15、20 mm时获得的压缩层厚度分别为3.00、4.04、5.96、8.07 mm的表层压缩杉木木材剖面密度图。表层压缩5、10、15 mm时,压缩层部位晚材的高密度峰值都非常明显,其密度分布特征与压缩层位置调控下压缩层部位的密度分布相似。表层压缩20 mm时获得的表层压缩木材,表面附近2~3 mm内的密度值已经超过了 $0.800\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,大于天然杉木的晚材密度,压缩层部位晚材高密度峰值已经不明显,说明在这个压缩量下,杉木晚材已经被压缩了,中心部位仅余3.86 mm的未压缩层,压缩层厚度远远大于未压缩层厚度,压缩层的平均密度达 $0.691\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,与对照材相比提高了87.3%,而此时的压缩率仅为50%。

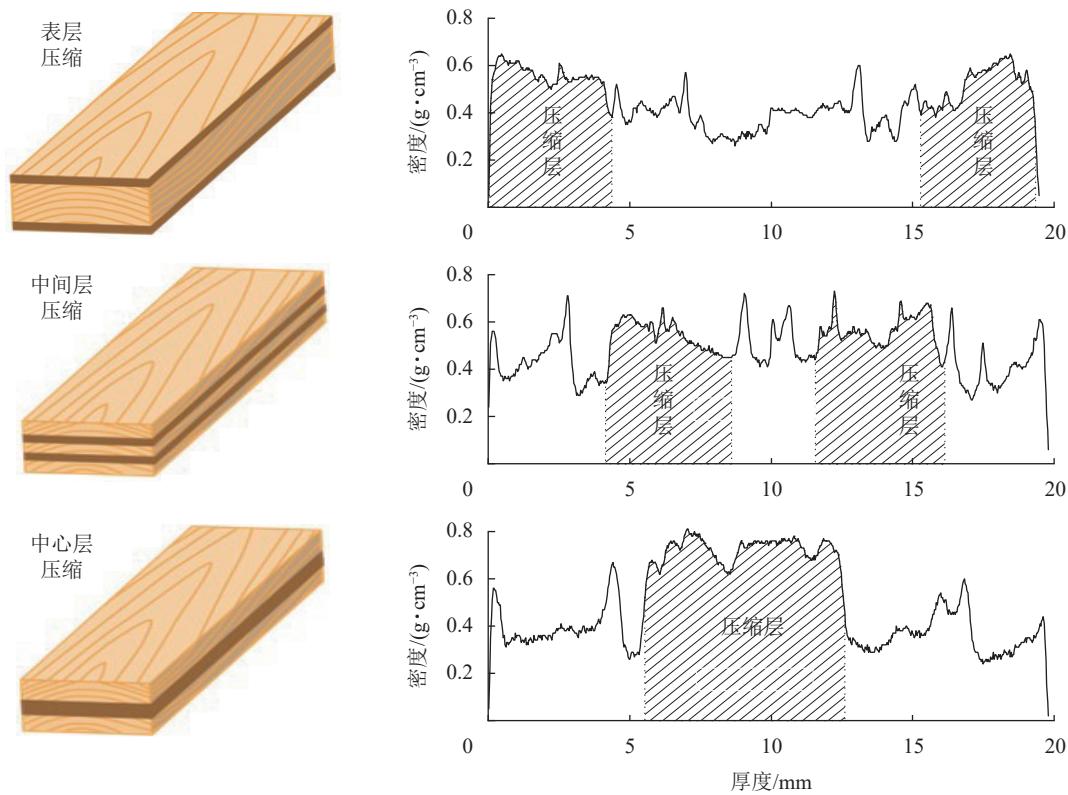


图5 层状压缩杉木木材的3种结构模式图及其密度分布

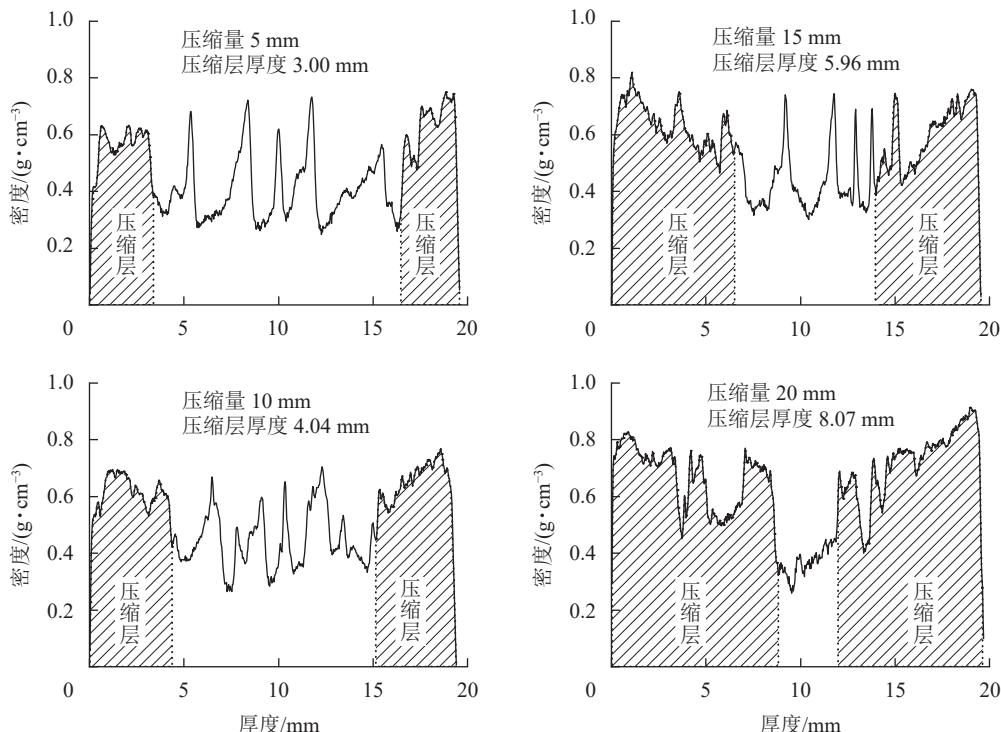
Figure 5 Three structural models and density distribution of the sandwich-compressed *C. lanceolata* wood

图6 表层压缩杉木木材剖面密度分布随压缩层厚度增加的变化

Figure 6 Changes in profile density of surface-compressed *C. lanceolata* wood with the increase of compressed layer thickness

### 2.3 层状压缩杉木木材横纹抗压强度主要影响因素

2.3.1 压缩层位置及加载方向 压缩层位置变化及加载方向对层状压缩杉木木材横纹抗压强度的影响见图7。径向加载下, 随着压缩层距表面距离的增加, 横纹抗压强度无规律性变化。径向加载时最大横纹抗压强度为2.94 MPa, 与对照材相比提高了38.8%, 最小横纹抗压强度为中心层压缩杉木木材, 与对照

材相比,仅提高了23.9%。弦向加载下,随着压缩层距表面距离的增加,横纹抗压强度呈逐渐降低的趋势,弦向加载时最大横纹抗压强度为6.21 MPa,与对照材相比提高了53.8%,最小横纹抗压强度与对照材相比,仅提高了39.9%。无论对照材还是层状压缩材,弦向加载的横纹抗压强度均大于径向加载,以平均值计算,弦向横纹抗压强度是径向的2倍以上。

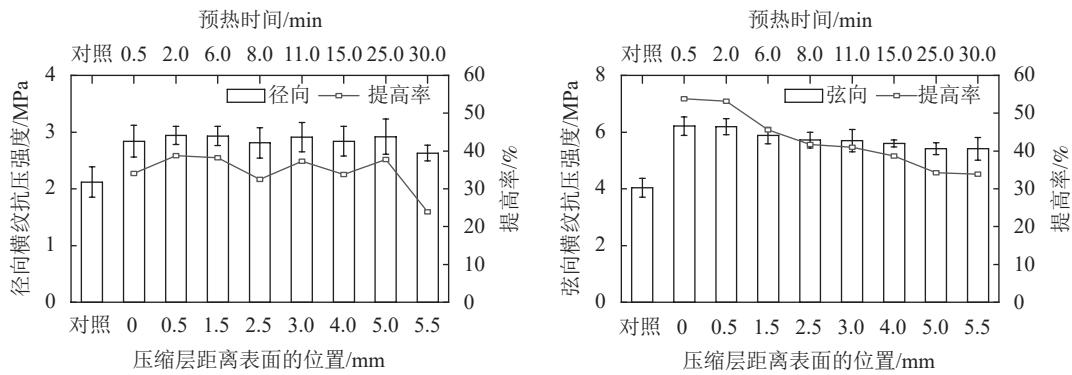


图7 径向及弦向加载下层状压缩杉木木材横纹抗压强度随压缩层距表面距离增加的变化

Figure 7 Dependence of the compressive strength perpendicular to grain of sandwich-compressed *C. lanceolata* wood on the compressed layer locations under different loading directions

2.3.2 压缩层厚度及加载方向 压缩层厚度变化及加载方向对表层压缩杉木木材横纹抗压强度的影响见图8。随着压缩层厚度的增加,径向和弦向横纹抗压强度均逐渐增大,特别是在压缩量达15 mm以上,即压缩层厚度为6 mm时,径向和弦向横纹抗压强度急剧增大至对照材的1.8倍。压缩量为20 mm时,压缩层厚度超过8 mm,中心部位仅有近4 mm的未压缩层,此时径向和弦向横纹抗压强度达到最大值,分别为5.06和8.42 MPa,较对照材分别提高了138.7%和108.3%。从这个结果可以看出:对于径向横纹抗压强度只有2.12 MPa的天然杉木木材,增加压缩层厚度对提高横纹抗压强度效果更明显。在压缩层厚度相同的情况下,弦向横纹抗压强度大于径向。4个压缩层厚度的弦向横纹抗压强度整体平均值比径向高93.0%,接近2倍。

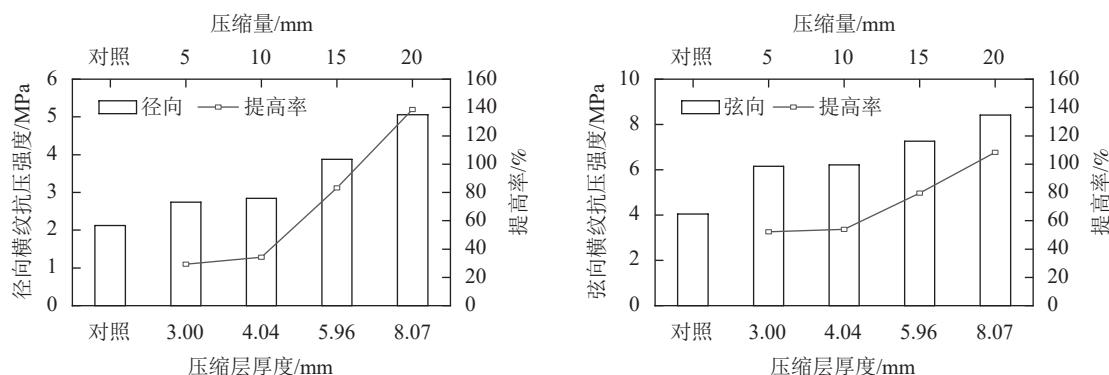


图8 径向及弦向加载下表层压缩杉木木材横纹抗压强度随压缩层厚度增加的变化

Figure 8 Dependence of the compressive strength perpendicular to grain of surface-compressed *C. lanceolata* wood on the compressed layer thickness under different loading directions

树木的生长轮结构、早晚材细胞结构、木射线组织结构等木材宏观构造是使木材弦向与径向间横纹抗压强度产生差异的主要因素<sup>[2-3, 5-7]</sup>。管胞是构成杉木木材的最主要结构单位,也是最重要的承重单元。天然杉木早材管胞壁薄,细胞腔大,管胞壁厚度仅为管胞腔平均直径的1/7(图3和表1)。层状压缩后,压缩层部位早材管胞腔减少,乃至几乎消失,但未压缩层部位的早材仅有部分管胞发生了微变形,管胞形态几乎不发生变化(图3)。杉木晚材管胞壁厚,细胞腔小,管胞壁厚度为管胞腔平均直径的3.08倍(图2)。层状压缩后,压缩层部位晚材管胞的形态几乎与天然杉木相同。早、晚材细胞壁厚度和厚壁细胞的比例是决定横纹压缩木材应力—应变关系的主要因素<sup>[21-24]</sup>。径向加载下,无论是早晚材急变,还是早晚材渐变的针叶材,细胞的屈曲变形或压溃都是从年轮界附近的早材细胞开始<sup>[22, 25-28]</sup>,最后

是晚材细胞; 阔叶树散孔材和环孔材, 都是从薄壁组织和导管开始<sup>[22, 27]</sup>, 最后是厚壁的纤维细胞。也就是说, 径向加载下的细胞变形是从壁薄且直径大的细胞或管孔开始, 逐渐向厚壁且直径小的细胞过渡的。因此, 在实施 10 mm 压缩量的层状压缩后, 无论压缩层的位置形成于表层至中心的任何部位, 由于存在未压缩层, 管胞的屈曲变形都会从薄壁的早材管胞开始, 导致在压缩率 33.3% 的情况下, 层状压缩杉木木材径向横纹抗压强度仅比对照材提高了 23.9%~38.8%。在弦向加载下, 受力面包含了早材、晚材以及压缩层和未压缩层, 其中高密度的晚材及压缩层加载力起到重要的支撑作用, 细胞变形表现为晚材层整体弯曲变形<sup>[22]</sup>, 使木材在气干状态下弦向与径向的屈服应力比达 1.92<sup>[11, 24]</sup>, 也是使弦向加载下层状压缩杉木木材横纹抗压强度为径向加载 2 倍左右的主要原因。随着压缩层厚度的增加, 径向和弦向横纹抗压强度增大(图 8), 主要是由于低密度的早材区域明显减少(图 6)的缘故。

**2.3.3 压缩木材的密度及加载方向** 基于层状压缩杉木木材的横纹抗压强度、密度分布及木材结构和管胞构造变化的分析结果, 采用线性函数分析了层状压缩杉木木材的径向及弦向横纹抗压强度与平均密度、最大密度和最小密度之间的关系(图 9)。径向加载下横纹抗压强度与平均密度、最大密度和最小密度间的相关系数均大于弦向加载。无论是径向加载还是弦向加载, 层状压缩杉木横纹抗压强度与压缩木材平均密度及最小密度之间存在极显著的相关关系( $P<0.01$ ), 且与平均密度的相关系数大于最小密度, 表明通过层状压缩密实化提高杉木密度, 对增加木材横纹抗压强度具有极显著的效果。横纹抗压强度与压缩木材的最大密度间也存在极显著相关关系( $P<0.01$ ), 但相关系数低于平均密度和最小密度。在径向加载下, 横纹抗压强度与密度的关系比弦向加载下更密切, 特别是与最小密度间的相关系数达 0.833 的高值, 而且线性函数方程的斜率为 18.10, 为所有线性函数的最大值, 表明早材密度的微小增加都能够大幅度提高压缩木材的横纹抗压强度, 进一步说明杉木木材压缩时, 提高早材密度对增加木材横纹抗压强度的重要性。

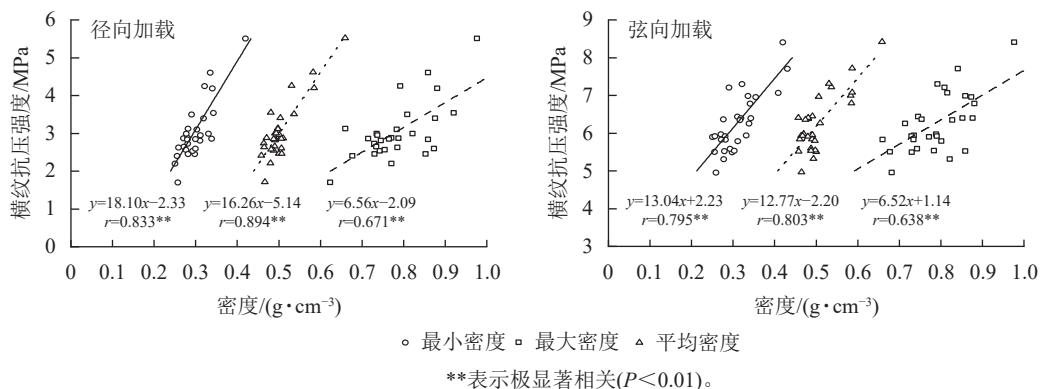


图 9 横纹抗压强度与密度的关系

Figure 9 Relationship between the compressive strength perpendicular to grain and density

在用材树种的基本性质研究中, 木材横纹抗压强度与密度之间关系, 以及不同纹理方向上木材横纹抗压强度差异的研究报道很多, 研究的对象涵盖了大多数国产用材树种以及部分进口材树种<sup>[2, 5]</sup>。不同树种的木材密度变化很大, 即使是同一树种, 产地不同, 密度也存在很大差异<sup>[1]</sup>。早晚材急变的针叶材油松 *Pinus tabuliformis*, 因产地不同, 气干密度为 0.432~0.544 g·cm<sup>-3</sup><sup>[2]</sup>, 密度的变化范围很窄。徐有明<sup>[2]</sup>采用线性函数和幂函数 2 种方法分析发现: 油松气干密度与横纹抗压强度之间均呈现显著相关关系, 但线性函数的相关系数大于幂函数, 而且弦向横纹抗压强度与密度的关系更密切。孟宪杰等<sup>[5]</sup>利用气干密度为 0.388~0.923 g·cm<sup>-3</sup> 的落叶松 *Larix gmelini*、樟子松 *Pinus sylvestris*、塔利 *Erythrophleum fordii* 和菠萝格 *Intsia* spp. 等 5 个树种木材的测试结果, 在不区分树种的情况下, 分析木材气干密度与横纹抗压强度之间的关系, 发现径向、弦径向和弦向加载下, 两者之间均呈现极显著的二次函数关系, 同样获得了弦向横纹抗压强度与密度间相关系数更大的结果。可见, 密度与横纹抗压强度之间的关系也因树种、木材密度值范围及纹理方向的不同存在差异。层状压缩杉木木材横纹抗压强度与密度呈显著线性相关, 函数关系与油松的研究结果一致, 但层状压缩杉木木材两者之间相关关系的密切程度表现为径向加载大于弦向加载, 与徐有明<sup>[2]</sup>和孟宪杰等<sup>[5]</sup>的研究结果相反, 这可能与杉木早材管胞壁薄、腔大, 导致天然杉木木材径向横纹抗压强度远远小于油松、樟子松、落叶松等木材, 即使是层状压缩后, 低压缩率下其横

纹抗压强度也只是比油松略大。因此,对于杉木木材来说,只有增大压缩率,增加压缩层厚度,特别是提高整体的早材密度,才能有效提高其横纹抗压强度。

### 3 结论

在相同压缩量下获得的压缩层距表面距离逐渐增加的层状压缩杉木木材,早材密度明显增大,由 $0.200\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以下,提高至 $0.500\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 以上,但多数情况下被压缩的早材密度依然低于天然杉木晚材密度,因此所有压缩层部位均呈现出带有数个晚材密度峰值的密度分布特征。这种压缩层密度分布特征会随着表层压缩层厚度的增加而减弱。

层状压缩杉木木材密度分布的变化改变了杉木板材结构。杉木木材经层状压缩后,将天然杉木因早材与晚材间管胞壁厚和腔径差异形成的、晚材带极窄的、以髓心为中心的同心圆疏密相间的结构,改变为由压缩层和未压缩层构成的、且压缩层厚度可调控的疏密相间的层状结构。

相同压缩量下改变压缩层位置,对杉木木材的横纹抗压强度无显著影响,但压缩层厚度增加,能显著提高杉木木材横纹抗压强度。压缩层厚度约6 mm时,径向和弦向横纹抗压强度急剧增大至对照材的1.8倍,压缩层厚度超过8 mm时,则分别提高至对照材的近2.4和2.1倍。

杉木从早材至晚材管胞壁厚和腔径变化非常大。早材平均径向腔径为 $45.7\text{ }\mu\text{m}$ ,晚材仅为 $4.6\text{ }\mu\text{m}$ ,而且早材管胞壁厚仅为晚材的 $1/2$ 。早晚材之间管胞弦向和径向的平均壁腔比无明显差异,分别为0.21和0.22。晚材弦向平均壁腔比达5.87。这种木材结构和管胞构成使杉木早材成为径向加载下横纹抗压强度低的决定因素。无论是对照材还是层状压缩材,弦向加载的杉木横纹抗压强度均大于径向加载,以平均值计算,弦向横纹抗压强度是径向的2倍多。

无论是径向加载还是弦向加载,层状压缩杉木木材横纹抗压强度与压缩木材的密度之间存在极显著的线性相关关系,相关系数最大的是压缩木材平均密度,其次是最低密度。在径向加载下,横纹抗压强度与密度的关系比弦向加载更密切,特别是与最低密度的相关系数达0.833,且斜率超过18.10,为所有线性函数的最大值,说明早材密度的微小增加都能够大幅度提高压缩木材的横纹抗压强度。

### 4 参考文献

- [1] 刘一星,赵广杰.木质资源材料学[M].北京:中国林业出版社,2004: 8.  
LIU Yixing, ZHAO Guangjie. *Wood Resource Materials Science* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2004: 8.
- [2] 徐有明.油松木材物理力学性质的研究[J].安徽农学院学报,1989,16(1): 74–82.  
XU Youming. Studies on physico-mechanical properties of the wood of *Pinus tabulaeformis* [J]. *Journal of Anhui Agricultural College*, 1989, 16(1): 74–82.
- [3] 王展光,石昂,王婷婷,等.黔东南州杉木物理力学性能研究[J].福建建筑,2020(6): 87–91.  
WANG Zhanguang, SHI Ang, WANG Tingting, et al. Research on mechanical properties of Chinese fir in Qiandongnan [J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2020(6): 87–91.
- [4] 尹思慈.木材学[M].北京:中国林业出版社,1996: 169–180.  
YIN Sici. *Wood Science* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1996: 169–180.
- [5] 孟宪杰,陈金永,师希望,等.木材横纹全表面受压性能试验研究[J].中国科技论文,2016,11(1): 62–65.  
MENG Xianjie, CHEN Jinyong, SHI Xiwang, et al. An experimental study on the wood performance under whole section compression in the transverse direction [J]. *China Science Paper*, 2016, 11(1): 62–65.
- [6] 孙丽萍,崔永志,刘一星.木材横纹压缩过程中径向、弦向加载差异性分析[J].林业科技,1997,22(3): 38–41.  
SUN Liping, CUI Yongzhi, LIU Yixing. Analysis of the differences in radial and tangential loading during the compression process of wood perpendicular to grain [J]. *Forestry Science & Technology*, 1997, 22(3): 38–41.
- [7] 孙凤亮.6种进口木材横纹抗压强度测试与分析[J].中国木材,2022(3/4): 33–38.  
SUN Fengliang. Testing and analysis of compressive strength perpendicular to grain in 6 types of imported wood [J]. *China Wood*, 2022(3/4): 33–38.
- [8] NORIMOTO M. Large compressive deformation in wood [J]. *Mokuzai Gakkaishi*, 1993, 39(8): 867–874.
- [9] 李坚,吴玉章,马岩,等.功能性木材[M].北京:科学出版社,2011.  
LI Jian, WU Yuzhang, MA Yan, et al. *Functional Wood* [M]. Beijing: Science Press, 2011.

- [10] KITAMORI A, JUNG K, MORI T, *et al*. Mechanical properties of compressed wood in accordance with the compression ratio[J]. *Mokuzai Gakkaisi*, 2010, **56**(2): 67–78.
- [11] 黄荣凤. 实木层状压缩技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- HUANG Rongfeng. *Research on Solid Wood Sandwich Compression Technology*[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [12] 李晓玲, 黄荣凤, 何啸宇, 等. 杉木层状压缩的形成及其密度分布特征[J]. *木材科学与技术*, 2024, **38**(3): 11–20.
- LI Xiaoling, HUANG Rongfeng, HE Xiaoyu, *et al*. Sandwich compression formation and density distribution in Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) wood[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2024, **38**(3): 11–20.
- [13] 李任, 黄荣凤, 常建民, 等. 预热温度对层状压缩木材力学性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(5): 935–941.
- LI Ren, HUANG Rongfeng, CHANG Jianmin, *et al*. Sandwich compression of wood: the effect of preheating temperature on the mechanical properties of sandwich compressed wood[J]. *Journal of Zhejiang A&F university*, 2018, **35**(5): 935–941.
- [14] ZHAO Liyuan, HUANG Rongfeng, WANG Yanwei, *et al*. Effects of compressed layer(s) position and thickness on the physico-mechanical properties of sandwich-compressed Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*)[J/OL]. *Wood Material Science & Engineering*, 2024[2024-07-12]. DOI: [10.1080/17480272.2024.2397487](https://doi.org/10.1080/17480272.2024.2397487).
- [15] HUANG Rongfeng, FENG Shanghuan, GAO Zhiqiang. Effect of water/moisture migration in wood preheated by hot press on sandwich compression formation[J]. *Holzforschung*, 2022, **76**(11/12): 1003–1012.
- [16] HUANG Rongfeng, FENG Shanghuan, GAO Zhiqiang, *et al*. Mechanism elucidation for wood sandwich compression from the perspective of yield stress[J]. *Holzforschung*, 2023, **77**(8): 629–639.
- [17] 黄荣凤, 高志强, 冯上环, 等. 含水率非均匀分布木材在热板加热下温度分布的变化规律[J]. *木材科学与技术*, 2023, **37**(1): 41–48.
- HUANG Rongfeng, GAO Zhiqiang, FENG Shanghuan, *et al*. Temperature distribution in wood with uneven moisture distribution during preheating process by press platens[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2023, **37**(1): 41–48.
- [18] 中国木材标准化技术委员会. 层状压缩木材: LY/T 3376—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- National Technical Committee on Timber of Standardization Administrator of China. *Sandwich Compressed Wood: LY/T 3376—2024*[S]. Beijing: Standards Press of China, 2024.
- [19] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1992.
- CHENG Junqing, YANG Jiaju, LIU Peng. *Timber of China*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1992.
- [20] LI Ren, GAO Zhiqiang, FENG Shanghuan, *et al*. Effects of preheating temperatures on the formation of sandwich compression and density distribution in the compressed wood[J]. *Journal of Wood Science*, 2018, **64**(6): 751–757.
- [21] TABARSA T, CHUI Y H. Stress-strain response of wood under radial compression: Part I test method and influences of cellular properties[J]. *Wood and Fiber Science*, 2000, **32**(2): 144–152.
- [22] TABARSA T, CHUI Y H. Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression. Part II effect of species and loading direction[J]. *Wood and Fiber Science*, 2001, **33**(2): 223–232.
- [23] CHUI Y H. TABARSA T. Stress-strain response of wood under radial compression. Part 3 prediction using cellular theory[J]. *Journal of the Institute of Wood Science*, 2007, **17**(6): 333–342.
- [24] 杨玉山, 沈华杰, 王宪, 等. 人工林速生杨木材水热压弯缺陷的微观构造研究[J]. *林业世界*, 2019, **8**(2): 46–52.
- YANG Yushan, SHEN Huajie, WANG Xian, *et al*. Microscopic investigation of defects in hydrothermal and compression bending artificially prepared Poplar wood[J]. *World Journal of Forestry*, 2019, **8**(2): 46–52.
- [25] ANDO K, ONDA H. Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure I: effect of anatomy on the initial deformation process during radial compression[J]. *Journal of Wood Science*, 1999, **45**(2): 120–126.
- [26] ANDO K, ONDA H. Mechanism for deformation of wood as a honeycomb structure II: first buckling mechanism of cell walls under radial compression using the generalized cell model[J]. *Journal of Wood Science*, 1999, **45**(3): 250–253.
- [27] MÜLLER U, GINDL W, TEISCHINGER A. Effects of cell anatomy on the plastic and elastic behaviour of different wood species loaded perpendicular to grain[J]. *IAWA Journal*, 2003, **24**(2): 117–128.
- [28] 边明明. 连续压缩载荷下木材力学性能及微观结构变化定量表征[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- BIAN Mingming. *Effects of Micro-structure on Wood Mechanical Properties under Continuous Compression*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2011.