

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2023198

杉木层状压缩的形成及其密度分布特征

李晓玲¹, 黄荣凤¹, 何啸宇², 王艳伟², 孙龙祥², 卢芸¹, 黎静¹, 冯上环³

(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, 浙江南浔 313009; 3. 国际竹藤中心; 国家林业和草原局竹藤科学与技术重点实验室, 北京 100102)



摘要: 实木层状压缩技术是以实体木材的定向定位压缩为目标, 以最小的材积损耗, 最大限度地提高木材力学性能的一种新型木材压缩方法。通过水分分布调控以及外力加载的协同作用, 在调控压缩层的形成位置、厚度和多层压缩的基础上, 分析压缩木材密度分布特征, 研究层状压缩技术对于人工林杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 的适用性及其层状压缩形成的特点。结果表明: 预热时间控制在0.5~30 min之间时, 获得压缩层位置不同的层状压缩杉木。随着预热时间的增加, 压缩层由表层逐渐向中心(厚度方向)移动, 压缩层密度达到0.583 g/cm³及以上; 通过调控压缩量, 获得压缩层厚度为3.00~8.07 mm的4种厚度的表层压缩杉木, 压缩层密度提高率比木材整体密度提高率平均高28.7%; 将表层压缩和中心层压缩工艺并用, 实现形成3个压缩层的多层压缩。扫描电镜观察结果表明, 无论压缩层形成于表层还是中心层, 压缩层与未压缩层界线出现在早材区域或早晚材交界处, 压缩层的早材细胞发生细胞壁屈曲变形, 至细胞腔几乎完全消失, 而晚材细胞壁及细胞腔仅发生微变形或不变形。依据压缩前后木材密度分布曲线及特征值计算结果, 杉木压缩层部位的早材密度提高率最大值可以达到210.6%。

关键词: 人工林杉木; 层状压缩; 密度分布; 压缩层位置; 压缩层厚度; 早晚材; 细胞壁屈曲变形

中图分类号: S791.27; TS652 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2024) 03-0011-10

Sandwich Compression Formation and Density Distribution in Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) Wood

LI Xiaoling¹, HUANG Rongfeng¹, HE Xiaoyu², WANG Yanwei², SUN Longxiang²,
LU Yun¹, LI Jing¹, FENG Shanghuan³

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry; Key Lab of Wood Science and Technology of National Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Treessun Flooring Co., Ltd, Nanxun 313009, Zhejiang, China;

3. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration; Beijing for Bamboo & Rattan Science and Technology, International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 00102, China)

Abstract: Wood sandwich compression is an advanced technology of compressing wood layers through controlling the position, thickness, and the number of the compressed layers to achieve mechanical property enhancement. By regulating the distribution of temperature and moisture in Chinese fir wood under the desired pressure, the positions and thickness of compressed layers were managed in this study.

收稿日期: 2023-12-10; 修改日期: 2024-04-25

基金项目: 湖州市重点研发计划项目“劣质材增强及表面高质修饰地板关键技术研发”(2022ZD2049); 国家自然科学基金优秀青年基金项目“木材超分子结构解析与优异功能构筑”(32122058)。

作者简介: 李晓玲(1969—), 女, 高级工程师。Email: lixiaol@caf.ac.cn

通讯作者: 黄荣凤, 女, 研究员。Email: huangrf@caf.ac.cn

Furthermore, density distribution in the compressed Chinese fir wood was analyzed to investigate the feasibility of sandwich compression technology to plantation Chinese fir wood and to clearly understand the formation mechanism. The results indicated that when the preheating time ranged from 0.5 to 30 minutes, Chinese fir wood was sandwich compressed with various positions of compressed layers. As the preheating time extended, compressed layers moved from wood surfaces into center and the compressed layer's density exceeded 0.583 g/cm^3 . By changing the compressing rate and thickness of wood specimen, four types of surface compressed wood with a compression layer thicknesses' range between 3.00~8.07 mm were obtained. The average density of the compressed layer was 28.7% higher than that of the original wood. Combining the technologies for surface compression and centre compression, three distinct compressed layers were formed in the sandwich compressed wood. It was also found that the boundary between the compressed layers and uncompressed layers appeared in the earlywood and the boundary between earlywood and latewood, regardless that compression occurred on wood surface or inside wood. Remarkably, the earlywood cells in the compressed layer underwent significant distortion, leading to the disappearance of almost all cell cavities. On the other hand, latewood cells exhibited little deformation or even remained intact. Based on the density profiles and the calculated characteristic values before and after compression, the maximum density of the compressed earlywood was 210.6% higher than that of the corresponding uncompressed earlywood.

Key words: Chinese fir plantation; sandwich compression; density distribution; position of compressed layers; thickness of compressed layers; earlywood and latewood; cell wall distortion

木材压缩密实化是提高软质木材硬度和强度、扩大其应用范围的有效方法^[1-3]。木材压缩技术特别是湿热软化的木材整体压缩技术经过多年研究,在木材软化、塑性变形、压缩变形固定及其机理、压缩方式和工艺、压缩木材的性能变化等方面取得了很多研究成果^[1-9],压缩木材作为家具、地板、建筑用材实现了商业化应用^[2,9]。传统的实木整体压缩技术,是以提高压缩率的方式,使木材整体的密度增大,从而提高木材的硬度和强度等力学性能^[10-12],但压缩率增加的同时,压缩加工过程中原材料的消耗也会随之增加。实木层状压缩技术,是通过水分分布的调控与外力加载的协同作用,对实体木材实施定向定位压缩的一种新型木材压缩方法^[3]。采用层状压缩方法,可以根据木制品加工利用对木材性能的要求,在提高木材力学性能的同时,最大限度地减少木材压缩率,降低原材料消耗^[13-15],对降低压缩木的生产成本具有显著效果。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国重要的人工林速生树种。根据第九次全国森林资源清查结果,杉木人工林面积为990万 hm^2 ,蓄积量为

7.55亿 m^3 ,均在人工林中排名第一,其中商品林蓄积量占比达到85%^[16]。但人工林杉木密度小,硬度和强度等力学性能低,限制了其在实木地板、家具等木制品加工中的应用。

在以往研究中,以速生阔叶树散孔材杨木(*Populus spp.*)为材料,通过加热温度和加热时间的调节,实现了压缩层位置和压缩层厚度的任意调控,形成表层压缩结构、中间层压缩结构和中心层压缩结构的层状压缩木材^[3]。但杉木组织构造及性能与杨木存在很大差异。杉木属于针树叶材,早晚材密度相差非常大,早材密度约为 0.2 g/cm^3 ,晚材密度可以达到 0.7 g/cm^3 及以上;从木材组织构造看,杉木管胞壁纹孔为具缘纹孔,其纹孔膜上的纹孔塞在相邻细胞不均衡压力下呈闭塞状态^[17-18],会限制水分在木材内部的迁移。基于杉木组织构造的特点,本研究采用预热温度、预热时间及外力加载等工艺过程协同调控的方法,探讨杉木压缩层位置和压缩层厚度的可控性,分析层状压缩杉木早晚材的密度分布特征,以解决层状压缩技术应用于人工林杉木时与适用性相关的关键科学与技术问题。

1 材料与方法

1.1 材料

试验用人工林杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 采自广西融安县。选择树干通直、无病虫害、胸径大于 40 cm 树木 5 株, 树龄 30 年, 平均气干密度为 0.369 g/cm^3 。

试件锯解方法如图 1 所示。先将每根原木锯解成 1.2 m 长的木段, 从每个木段中心部位截取宽度为 80 mm 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 mm (L) \times 80 mm (T), 厚度 (R) 为 25、30、35、38 和 40 mm 的试件备用。

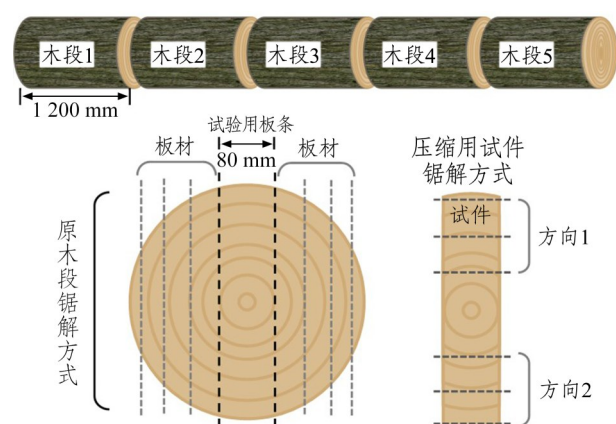


图 1 杉木试件锯解方法示意图

Fig.1 Diagram for processing Chinese fir wood into specimens

1.2 主要设备

热压机、软 X 射线密度测定仪 (DENSE-LAB)、扫描电子显微镜 S4800 SEM (Hitachi)。

1.3 层状压缩方法

采用水热控制下的层状压缩方法实施杉木的层状压缩^[19-21]。层状压缩过程包括 4 个阶段, 即含水率分布调控阶段、预热阶段、压缩阶段和保压阶段。

1.3.1 压缩层位置调控 压缩层位置调控试验使用厚度为 30 mm 的试件。在室温条件下将试件浸泡于水中 2 h 后, 置于密封袋中放置 24 h, 之后在热压机压板的夹持下进行预热处理。预热温度 160°C , 预热处理时间分别为 0.5、2、6、8、11、15、25、30 min, 每个条件下 5 个重复样品。预热结束后, 直接在热压机上进行间歇式压缩, 压缩时间 3 s, 间歇时间 30 s。压缩载荷为 6 MPa, 目标

厚度为 20 mm, 用厚度规控制。压缩过程结束后, 继续在 6 MPa 的载荷下保持 30 min, 之后冷却降温至室温后取出试件。

1.3.2 压缩层厚度调控 使用厚度为 25、30、35 和 40 mm 的试件, 用于压缩量为 5、10、15 和 20 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%。每个条件下 5 个重复样品。预热阶段预热时间均为 0.5 min, 其余 3 个阶段的条件同 1.3.1。

1.3.3 多层压缩调控 多层压缩调控是在板材厚度方向上形成 3 个及以上压缩层的方法。多层压缩调控试验用试件的厚度为 38 mm, 3 个重复样品。目标压缩层数量为 3, 分别位于上表层、下表层和中心层, 压缩后目标厚度为 20 mm, 换算成压缩率为 47.4%。

压缩过程分两个阶段: 采用 1.3.1 的方法进行含水率分布调控后, 在热板加持下预热 0.5 min 后实施第一阶段的间歇式压缩, 用位移传感器控制压缩量至 10 mm 时停止压缩; 在保持加载压力的状态下继续预热 20 min 后实施第二阶段的间歇式压缩, 压缩至目标厚度 20 mm。压缩过程的温度、载荷等条件同 1.3.1。

1.4 性能检测与表征

1.4.1 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 / 压缩前板材的厚度 $\times 100\%$ 。

1.4.2 密度分布测定 从距离压缩材端部 3 cm 处截取 5 mm (L) 的薄片, 与对照材同时放置在 20°C 、相对湿度 65% 条件下平衡处理至恒定含水率后, 测定和分析木材厚度方向 (径向) 的密度分布。测定时设定步长为 $30 \mu\text{m}$ 。

1.4.3 压缩层判定 本研究杉木试材的平均气干密度为 0.369 g/cm^3 , 按照 LY/T 3376—2024 《层状压缩木材》规定^[22], 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到 0.6 g/cm^3 。

1.4.4 微观构造观察 从压缩木材横切面截取完整的厚度方向试样, 表面喷金处理后, 使用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM), 在 50~200 倍数下观察细胞壁结构并拍照。

2 结果与讨论

2.1 层状压缩的形成及其特征

采用软X射线图像解析及密度分布测试方法,对比和分析同一位置的木材压缩前、后的密度分布特征,能够直观地理解杉木层状压缩形成过程中的木材结构变化。图2为杉木压缩前和压缩后横切面的软X射线照片及其厚度方向的密度分布图,软X射线照片中亮度越高表示木材密度越大。

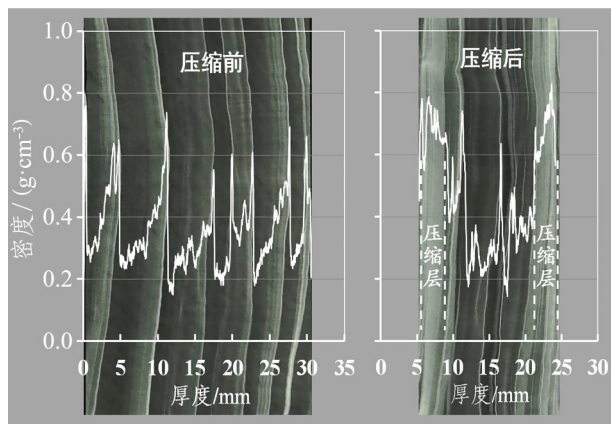


图2 杉木压缩前和压缩后横切面的软X射线照片及其密度分布

Fig.2 Soft X ray images and density distribution profiles in Chinese fir wood before and after compression

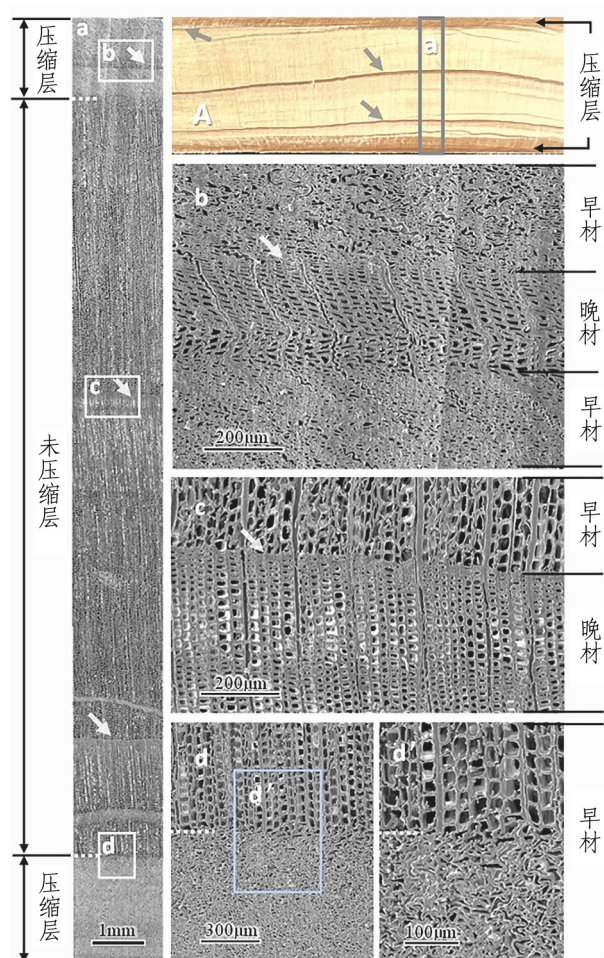
压缩前木材密度分布图中,从密度低值到峰值之间是一个完整年轮,相应的软X射线照片中呈现由暗到亮的变化过程。从图2可以看出,杉木样品的年轮宽度为3~7 mm,每个年轮中晚材的宽度都非常窄,仅0.5~1.5 mm。早材与晚材间的密度差异极大,早材的最小密度为0.181 g/cm³,晚材的最大密度达到0.713 g/cm³,木材的平均密度为0.369 g/cm³。压缩前木材厚度为30 mm,表层压缩10 mm后,在软X射线照片上可以看到板材的上、下表层形成了明显的高亮度层,即压缩层。从表层压缩木材的密度分布图上可以看出,在被压缩的上、下表层,均形成了连续高密度层,厚度约4 mm,密度在0.561~0.832 g/cm³之间,平均值为0.683 g/cm³,与压缩前木材的平均密度相比,密度提高了85.1%。上下表层均有两个年轮被压缩,被压缩部位的早材密度的最小值由压缩前的0.252 g/cm³提高至0.580 g/cm³,提高了130.2%。中间未压缩层部位的早材密度几乎没有变化,说明板材内部没有被压缩。

进一步通过压缩木材横切面的扫描电镜照片,分析杉木层状压缩形成过程中木材细胞壁微观构造的变化,如图3和图4所示。

图3A为表层压缩杉木的横切面照片,3a为3A中a区域的SEM照片。分析图3A、3a可知,在表层压缩的情况下,当压缩层中同时包含早材和晚材时(图3b),早材的细胞壁发生了屈曲变形,而且其变形可以达到细胞腔几乎完全消失的程度;而晚材细胞壁仅发生微变形,细胞腔依然清晰可见。当压缩层全部为早材时(图3d),压缩层部位的细胞发生大变形,至细胞腔几乎完全消失的情况下,未压缩层部位的早材细胞形态几乎没有变化,压缩层与未压缩层之间的界线非常清晰(图3d')。未压缩层部位的早材及晚材细胞壁和细胞腔均没有因为表层压缩而变形(图3c)。

图4A为中心层压缩杉木横切面照片,4a为4A中a区域的SEM照片。由图4A、4a可知,在中心层压缩的情况下,板材表面的早材细胞壁及细胞腔几乎没有变形(图4b);压缩层与未压缩层交界出现在早材区域时,压缩层部位的早材细胞发生了细胞腔几乎完全消失的大变形,未压缩层部位的早材细胞发生了微变形,细胞形态也有变化,但细胞腔没有消失(图4c);压缩层部位的早晚材界限处(图4d),早材细胞壁发生了大变形,细胞腔几乎完全消失,但晚材细胞的形态没有发生变化,细胞腔完好,其形态与图3c中未压缩部位基本一致;压缩层与未压缩层的界线出现在早、晚材交界处,早材细胞壁变形明显,细胞腔几乎消失或明显减小,但晚材细胞壁及细胞腔都没有发生变化。

综合分析层状压缩形成过程中木材细胞形态及密度分布变化,杉木层状压缩的特点表现为:早晚材急变的杉木,经过水热分布调控及外力加载的协同作用,成为疏密相间的层状结构木材;被压缩部位的晚材密度没有发生显著变化,细胞形态也没有因为压缩而改变,但早材密度显著提高,细胞壁发生了细胞腔几乎完全消失的大变形;无论是表层被压缩还是中心部位被压缩,未压缩层区域的木材密度及细胞形态和构造几乎没有变化。



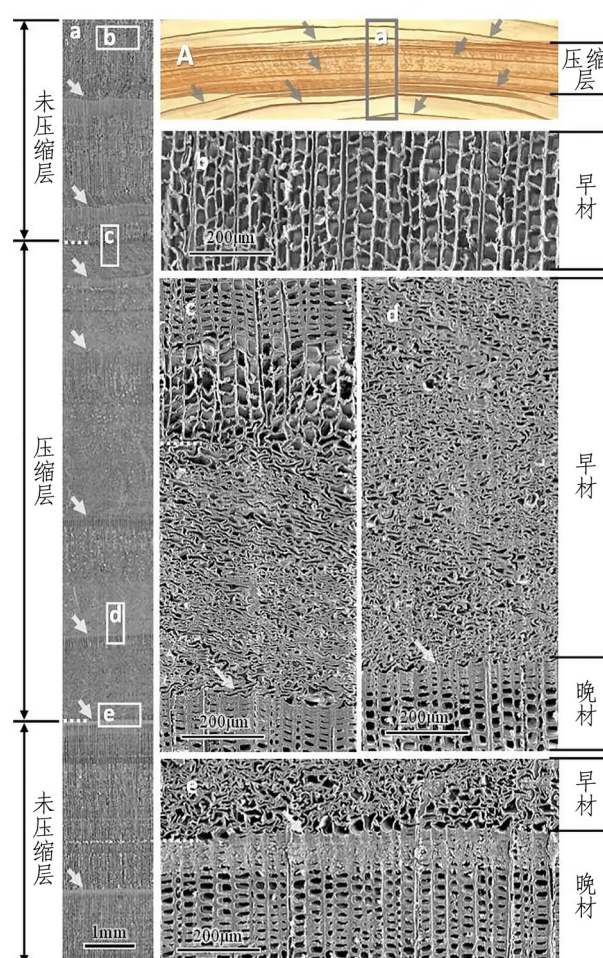
注:A为表层压缩杉木的横切面照片;a为照片A中a区域的SEM照片;b为照片a中含有晚材的压缩层b区域的局部放大照片;c为照片a中未压缩层部位的早晚材交界处c区域的局部放大照片;d为照片a中压缩层与未压缩层间的界限形成于早材部位时的局部放大照片;d'为照片d中d'区域的局部放大照片。照片中白色和灰色箭头所指部位为轮界线,白色虚线表示压缩层与未压缩层间的界线。

图3 表层压缩杉木的横切面照片及扫描电镜照片

Fig.3 The cross-section photo and SEM images of surface layer compressed Chinese fir wood

2.2 压缩层位置的可控性及其密度分布特征

图5为预热处理时间控制在0.5、2、6、8、11、15、25、30 min后压缩10 mm,获得压缩材的横切面照片、软X射线照片及厚度方向的密度分布图。横切面照片中平行于板材表面的连续深色带状层,在软X射线照片中相应位置呈现为高亮度的带状层,是压缩后形成的高密度区域,即压缩层。通过层状压缩板材厚度方向的密度分布,分析压缩层的形成位置,结果表明,随着预热时间的增加,压缩层的形成位置由表层逐渐向板材



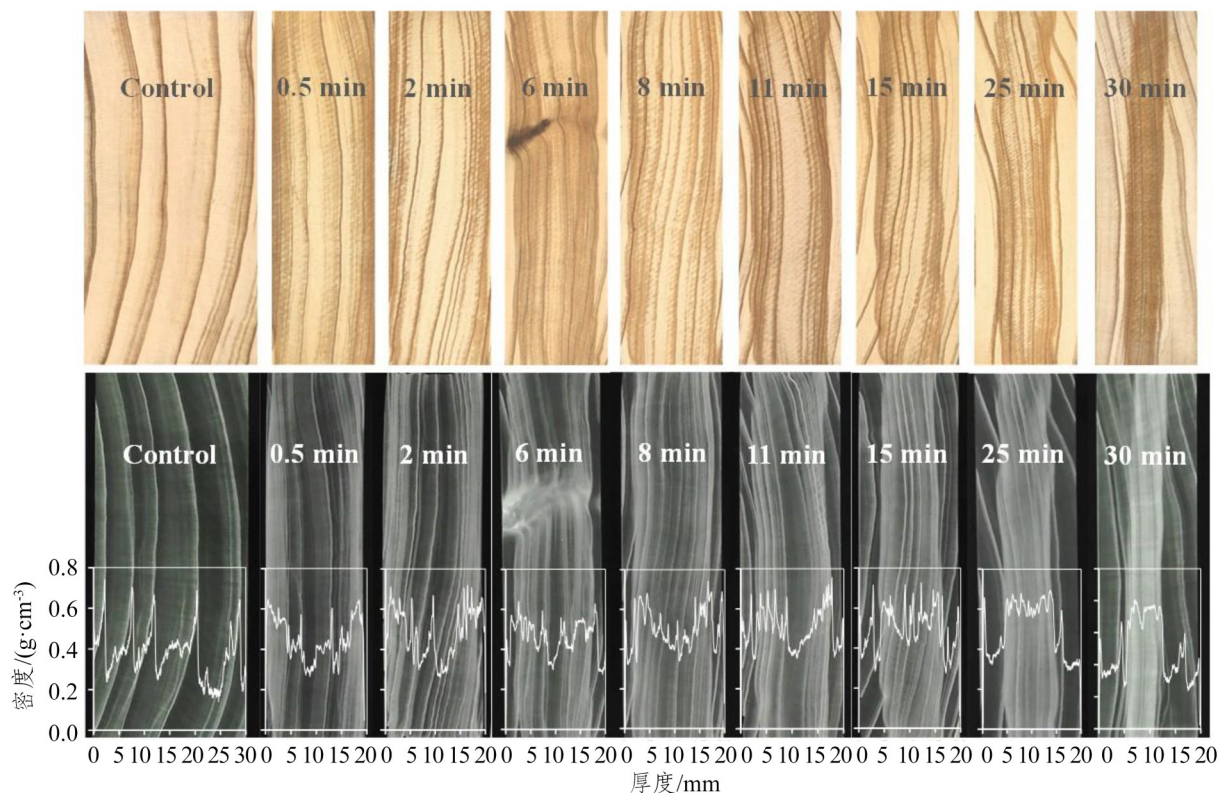
注:A为中心层压缩杉木横切面照片;a为照片A中a区域的照片;b为照片a中表层未压缩的早材部位b区域的局部放大照片;c为照片a中压缩层与未压缩层交界形成于早材部位时c区域的局部放大照片;d为照片a中压缩层部位早晚材界线处的局部放大照片;e为照片a中压缩层与未压缩层交界形成于早晚材界线处时e区域的局部放大照片。

图4 中心层压缩杉木的横切面照片及扫描电镜照片

Fig.4 Cross-section photos and SEM images of central layer compressed Chinese fir wood

厚度方向的中心部位移动。在预热时间调控下,压缩层位置控制在表面,以及距离表面0.5、1.5、2.5、3.0、4.0、5.0、5.5 mm的8个不同位置,而且压缩层的平均密度均大于 0.583 g/cm^3 。从压缩木材的密度分布曲线可以看出,早材密度由原来的 $0.2\sim 0.3 \text{ g/cm}^3$ 之间,可以提高到 0.6 g/cm^3 及以上,但在此压缩量下,早材密度依然小于晚材。

图6a、6b分别为实数坐标轴及对数坐标轴下,压缩层位置随预热时间增加的变化曲线及其函数关系。



注：上图为横切面照片，下图为软X射线照片（图中曲线为密度分布，数值为预热时间）。

图5 杉木压缩层形成位置随预热时间的变化及其密度分布

Fig.5 Density distribution and position changes of the compressed layer(s) in the sandwich compressed Chinese fir wood under various preheated times

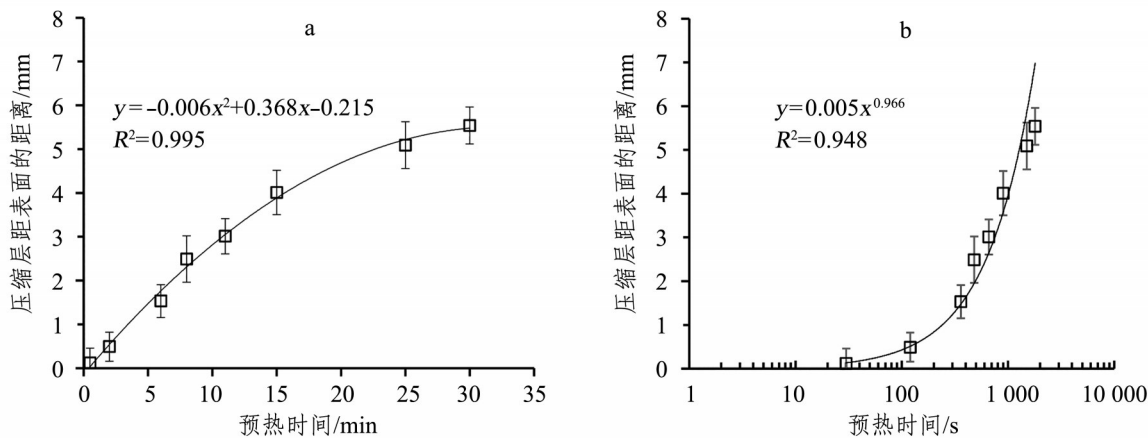


图 6 压缩层位置与预热时间之间的关系

Fig.6 Positions of the compressed layers vs. preheating time

在实数坐标轴下（图6a），压缩层距表面的距离与预热时间呈极显著相关的二次函数关系，决定系数为0.995。当预热时间超过15 min后，压缩层位置向中心移动的速度明显降低，而采用预热时间调控的方式压缩杨木时，两者之间则呈现极显著的线性关系^[3]。这是因为杨木属阔叶树散孔材，

木材内部管孔甚多，其中导管间的单穿孔、木纤维及射线-导管间的单纹孔都可以作为输送水分的通道^[17]，这些管孔的存在减小了木材内部水分迁移时的阻力，而杉木内部作为水分迁移通道的纹孔口闭塞，严重影响水分在木材内部的迁移，因此，杉木中心层压缩时需要更多的预热时间。

对数坐标是表示变量变化强度的方法，也是观察变量长时间尺度变化趋势的手段之一。通常情况下，在对数坐标轴上能够比较直观地看到变量的变化趋势。因此，在对数坐标下，绘制了压缩层形成位置随预热时间增加的变化曲线，并依据趋势线的变化规律，建立了函数模型，结果如图6b所示。在对数坐标轴下可以明显看出，压缩层形成位置与预热时间之间均呈幂函数关系，并非在实数坐标下观察到的线性关系。也就是说，压缩层位置由表层向中心移动的速度会随着预热时间的增加而降低。

2.3 压缩层厚度的可控性及其密度分布特征

通过增加表层压缩量对压缩层厚度进行调控的结果以压缩木材的横切面照片、软X射线照片及厚度方向的密度分布图表征，结果如图7所示。横切面照片中平行于板材表面的连续深色带状层与在软X射线照片中的高亮度层出现的区域一致，为压缩层。从横切面照片、软X射线照片以及密度分布图中均可以看出，表层形成的压缩层厚度随着压缩量的增加而增大。

压缩量调控形成的表层压缩木材的密度分布特征参数列在表1中。图8为表层压缩杉木的压缩率及密度提高率随压缩量增加的变化曲线。压缩量控制在5、10、15和20 mm的表层压缩下，获得了压缩层厚度为3.00、4.04、5.96和8.07 mm的表层压缩木材。压缩层平均密度分别为0.600、0.602、0.615和0.691 g/cm³，与未压缩对照材相比，密度分别提高了62.7%、68.3%、72.0%和93.1%（图8）。压缩量小于15 mm的情况下，不同压缩量下的压缩层密度变化比较小，但压缩量增加至20 mm时，压缩层密度大幅度提高。

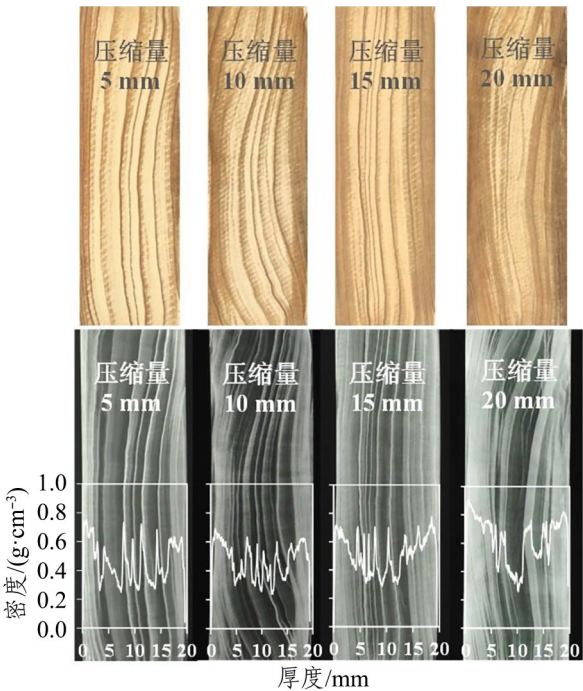


图7 杉木压缩层厚度随压缩量的变化及其密度分布
Fig.7 Compressed layer thickness and density distribution as compression increased in Chinese fir wood

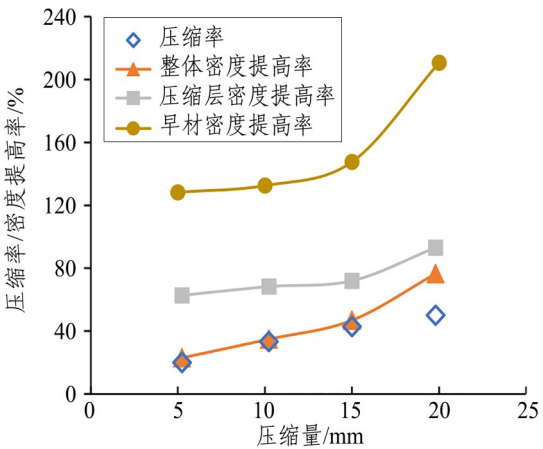


图8 表层压缩杉木的压缩率及密度提高率随压缩量的变化
Fig.8 Surface compressing rates and density increasing rates vs. increased compressed wood

表1 压缩量调控形成的表层压缩杉木的密度分布特征参数
Tab.1 Density distribution in surface compressed Chinese fir wood

压缩量/ mm	压缩层厚度/mm				最大值	压缩层密度/(g·cm ⁻³)			木材平均密度/(g·cm ⁻³)	
	上表层	下表层	平均值	合计		上表层	下表层	平均值	压缩前	压缩后
5	3.24	2.76	3.00	6.00	0.751	0.570	0.636	0.600	0.368	0.464
10	4.17	3.90	4.04	8.07	0.691	0.559	0.648	0.602	0.348	0.473
15	6.33	5.58	5.96	11.91	0.776	0.592	0.641	0.615	0.351	0.516
20	8.58	7.56	8.07	16.14	0.907	0.666	0.720	0.691	0.372	0.632

压缩木材的整体密度随着压缩量的增加而逐渐增大（表 1），但压缩量为 15 mm 时，密度提高率与压缩率曲线重叠（图 8），说明两者之间差异不大；当压缩量达到 20 mm，即压缩量为 50% 时，密度提高率明显高于压缩率，两者相差 26.5%。压缩层密度及早材密度随着压缩量的增加，呈现出与木材整体密度相同的变化规律，但压缩层密度值远高于整体密度。压缩层密度提高率比木材整体密度提高率平均高 28.7%，其中早材部分的密度提高率在 128.2%~210.6% 之间，比木材整体密度提高率平均高 109.4%，此结果进一步说明层状压缩杉木密度增大，主要是早材部分被压缩的结果。

2.4 多层压缩的形成及其密度分布特征

将表层压缩和中心层压缩的工艺参数并用，使用厚度为 38 mm 的木材，分 2 个阶段实施间歇式压缩至厚度 20 mm，获得的多层压缩木材的横切面照片、软 X 射线照片及厚度方向的密度分布如图 9 所示。在压缩量及压缩层位置的协同调控下，杉木的上表层、下表层及中心层 3 个位置形成了高密度压缩层。3 个重复样品（从左至右样品编号 1、2 和 3）压缩层的平均密度分别为 0.631、0.605 和 0.614 g/cm³，与未压缩对照材相比，密度分别提高了 93.4%、86.6% 和 90.1%。3 个样品压缩层的形成位置有较好的重复性，但密度分布也存在个体差异。这种差异主要来源于被压缩木材中早、晚材的密度分布。这种多层压缩的方法进一步提升了层状压缩的可控性范围，可应用于表层及内部同时需要增强的木制品或其部件加工，如家具榫头、地板榫舌以及锁扣地板等。

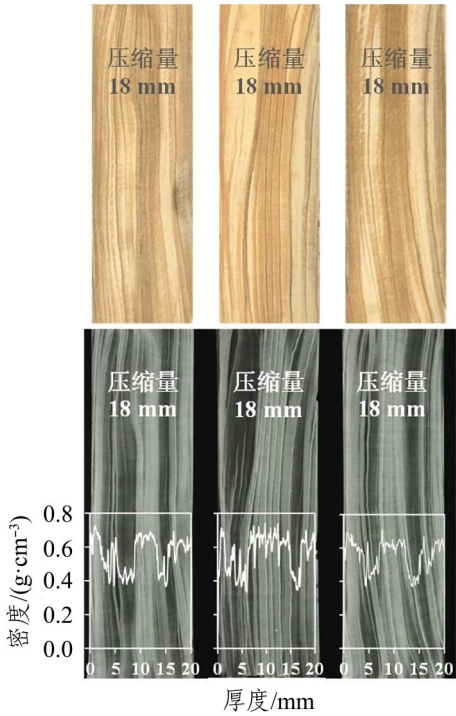


图 9 杉木多层压缩调控及压缩木材的密度分布
Fig.9 Regulation of multi-compressed layers and density distribution in sandwich compressed Chinese fir wood

表 2 列出多层压缩杉木的密度分布特征参数。38 mm 厚杉木实施 3 个压缩层，压缩层位置控制在上表层、下表层及中心层，3 个压缩层厚度合计在 12.39~12.61 mm，平均每个压缩层的厚度为 4.13~4.20 mm，压缩层平均密度为 0.605~0.631 g/cm³。结果表明形成 3 个压缩层时，压缩层的平均厚度及平均密度在 3 个样品中表现较高的一致性，但每个压缩层的厚度及密度差异较大。压缩量为 18 mm，即压缩率为 47.4% 时，3 个样品的整体密度提高率大于 70%，压缩层密度提高率大于 90%。

表 2 多层压缩杉木的密度分布特征参数

压缩量/ mm	压缩层厚度/mm						压缩层密度/(g·cm ⁻³)				木材平均密度/(g·cm ⁻³)	
	上表层	下表层	中心层	平均值	合计	最大值	上表层	下表层	中心层	平均值	压缩前	压缩后
样品 1	4.02	3.10	5.49	4.20	12.61	0.795	0.612	0.601	0.704	0.639	0.326	0.566
样品 2	3.49	2.79	6.30	4.19	12.58	0.779	0.596	0.619	0.639	0.618	0.324	0.562
样品 3	3.99	4.59	3.81	4.13	12.39	0.842	0.598	0.607	0.652	0.619	0.323	0.569

2.5 讨论

实木层状压缩是一种压缩层位置和压缩层厚度可控的实木密实化新技术^[23-26]。木材层状压缩技术与传统的整体压缩相比，最主要的区别是在木材压缩过程中，压缩层可以形成于板材厚度方向

的表层至中心层的任意层面，而且压缩层位置和压缩层厚度可调控。在板材的厚度方向上，高密度的压缩层和低密度的未压缩层同时存在，形成疏密相间的层状结构木材^[3]。层状压缩木材的结构类似于胶合板，与早晚材疏密相间形成环形结构

的天然木材相比, 结构更稳定。但不同树种的木材实施层状压缩后, 层状压缩的形成过程以及密度分布特征具有一定的差异。比较本研究杉木与以往杨木的研究结果, 其差异主要表现在两个方面。

一是层状压缩后形成的压缩层密度分布曲线光滑度不同。杨木压缩层密度分布曲线为光滑的抛物线型曲线^[25], 肉眼很容易识别压缩层的形成部位, 但杉木压缩层部位密度分布曲线受晚材高密度的影响, 几乎不能形成光滑曲线(图2、5、7、9), 只能通过数据分析, 确定压缩层的形成部位。这主要是由于从具有环形结构的原木上锯解出的弦向板材, 在任何层面上都有可能存在部分晚材, 利用这种板材实施层状压缩过程中, 细胞壁的屈曲变形由低密度的薄壁早材细胞逐渐向高密度的厚壁晚材细胞过渡, 只有在压缩层密度大于晚材密度时, 才不会凸显晚材的高密度特征, 形成光滑的密度分布曲线。对于阔叶树散孔材杨木, 其晚材密度平均在 0.5 g/cm^3 左右, 早晚材密度差仅约 0.1 g/cm^3 ; 而早晚材急变树种杉木, 其晚材密度均值大于 0.7 g/cm^3 , 早晚材密度差超过 0.5 g/cm^3 。实施压缩层平均密度为 0.6 g/cm^3 的层状压缩时, 对于杨木而言, 压缩层部位的早材和晚材均被压缩, 形成密度相对均匀的压缩层; 而杉木由于压缩层部位仅早材被压缩, 在压缩层部位会存在若干个晚材密度高于压缩层密度的区域, 形成不光滑的密度分布曲线。

二是层状压缩位置调控过程所需的时间不同。压缩层的形成位置与木材内部水分迁移速度密切相关^[19]。温度、含水率、木材细胞及组织构造是影响木材内部水分迁移的主要因素^[3, 17-18]。杉木细胞壁上的纹孔是木材内部水分迁移的主要通道, 但由于杉木管胞壁纹孔为具缘纹孔, 其纹孔塞呈闭塞状态, 极大地限制了木材内部的水分迁移, 为此本研究采用预热温度及预热时间协同调控的方式, 控制压缩层的形成位置。与杨木相比, 杉木预热温度降低了 20°C , 同时预热时间大幅延长, 杨木的最长预热时间为 600 s ^[26], 杉木则为 $1\,800 \text{ s}$ 。

从杉木和杨木层状压缩形成的研究结果可以看出, 尽管不同树种的木材, 其年轮结构、细胞

组织构造不同, 会影响层状压缩的形成过程以及层状压缩木材的密度分布特征, 但根据层状压缩形成的原理^[19-21], 通过预热温度、预热时间及外力加载等工艺过程的协同调控, 均可以实现压缩层位置、压缩层厚度和压缩层数量的可控性。说明层状压缩技术及其理论在木材科学领域具有广泛的适用性, 特别适用于低密度人工林木材的物理增强, 为人工林木材的高附加值利用, 以及人工林木材替代进口阔叶树材提供一个新途径。

3 结论

1) 以人工林杉木为对象, 采用水热控制的层状压缩技术实施杉木层状压缩, 无论压缩层形成于表层还是中心层, 早材细胞壁发生了细胞腔几乎完全消失的大变形, 晚材细胞壁仅发生微变形或几乎完全不变形, 压缩层部位晚材的细胞腔依然清晰可见; 压缩层与未压缩层的界线出现在早材区域或早晚材交界处时, 在木材横切面上压缩层细胞壁及细胞腔的变形很容易识别。压缩层平均密度提高 85.1% 时, 早材密度提高了 130.2% , 进一步证实了层状压缩过程中早材被大幅度压缩。

2) 通过预热时间调控, 获得了8个压缩层位置不同的杉木层状压缩木材。随着预热时间在 $0.5\sim 30 \text{ min}$ 内延长, 压缩层由表层逐渐向厚度方向的中心移动。在实数坐标轴下, 压缩层距表面的距离与预热时间呈极显著相关的二次函数关系, 决定系数为 0.995 ; 在对数坐标轴下, 压缩层形成位置与预热时间之间呈幂函数关系, 决定系数为 0.948 。说明压缩层位置由表层向中心移动的速度会随着预热时间的增加而降低。压缩层的平均密度达到 0.583 g/cm^3 及以上, 其中早材密度由原来的 $0.2\sim 0.3 \text{ g/cm}^3$, 可以提高到 0.6 g/cm^3 及以上。

3) 通过增加压缩量对表层压缩层厚度进行调控, 获得压缩层厚度为 3.00 、 4.04 、 5.96 和 8.07 mm 的表层压缩木材, 与对照材相比, 压缩层密度分别提高了 62.7% 、 68.3% 、 72.0% 和 93.1% 。压缩层密度提高率比木材整体密度提高率平均高 28.7% 。当压缩量为 20 mm , 即压缩率达到 50% 时, 压缩木材整体的密度提高率较压缩率高 76.0% , 其中早材密度提高率的最大值可达到 210.6% 。

4) 将表层压缩和中心层压缩的工艺参数并用, 在压缩量及压缩层位置的协同调控下实施多层压缩, 在木材上、下表层及中心层3个位置形成了高密度压缩层。压缩层形成位置和压缩层厚度在多层压缩样品间有较好的重复性, 但密度分布存在个体差异。多层压缩木材整体密度提高率均高于70%, 压缩层密度提高率达到90%及以上。

5) 杉木属于早晚材急变树种, 晚材细胞的壁厚明显大于早材, 早材与晚材间密度相差2倍以上。这种木材组织构造直接影响木材压缩时早晚材细胞的形变。尽管杉木管胞壁上的纹孔为具缘纹孔, 其纹孔塞在水分迁移过程中呈闭塞状态, 极大地限制了木材内部的水分迁移, 但通过工艺设计, 水热分布调控及外力加载的协同作用, 依然可以实现压缩层位置、压缩层厚度的调控以及多层压缩, 但杉木压缩层位置调控时, 预热时间需要延长至杨木的3倍。将早晚材急变的杉木压缩成疏密相间的层状结构木材, 有助于减少杉木因结构及密度分布上的各向异性引起的变形, 提高木材的表面性能及整体力学性能。低密度的杉木通过层状压缩方法调控密度分布后, 完全可以用于实木家具、地板等木制品加工。

参考文献:

- [1] NORIMOTO M. Large compressive deformation in wood[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1993, 39(8): 867-874.
- [2] 李坚, 吴玉章, 马岩, 等. 功能性木材[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [3] 黄荣凤. 实木层状压缩技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [4] INOUE M, HAMAGUCHI T, MOROOKA T, et al. Fixation of compressive deformation of wood by wet heating under atmospheric pressure[J]. Mokuzai Gakkaishi, 2000, 46(4): 298-304.
- [5] INOUE M, MOROOKA T, ROWELL R M, et al. Mechanism of partial fixation of compressed wood based on a matrix non-softening method[J]. Wood Material Science and Engineering, 2008, 3(3/4): 126-130.
- [6] UDAKA E, FURUNO T. Heat compression of sugi (*Cryptomeria japonica*)[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1998, 44(3): 218-222.
- [7] UDAKA E, FURUNO T, INOUE M. Relationship between the set recovery of compressive deformation and the moisture in wood specimens using a closed heating system[J]. Mokuzai Gakkaishi, 2000, 46(2): 144-148.
- [8] UDAKA E, FURUNO T. Change of crystalline structure of compressed wood by treatment with a closed heating system [J]. Mokuzai Gakkaishi, 2003, 49(1): 1-6.
- [9] 足立幸司, 井上雅文. 2006. 木材の横圧縮加工技術[J]. 木材工業, 61(11): 510-512.
- [10] KITAMORI A, JUNG K, MORI T, et al. Mechanical properties of compressed wood in accordance with the compression ratio[J]. Mokuzai Gakkaishi, 2010, 56(2): 67-78.
- [11] 李馨然, 林经康, 安听, 等. 热压工艺参数对杉木压缩木回复率与力学性能的影响[J]. 林业工程学报, 2023, 8(5): 37-45.
- LI X R, LIN J K, AN X, et al. Effect of hot-pressing parameters on recovery rate and mechanical properties of Chinese fir compressed wood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2023, 8(5): 37-45.
- [12] 王军锋, 宋恋环, 黄腾华, 等. 密实化工艺对杉木木材力学性能影响规律[J]. 林产工业, 2023, 60(9): 12-17.
- WANG J F, SONG L H, HUANG T H, et al. Effect of densification process on mechanical properties of Chinese fir wood[J]. China Forest Products Industry, 2023, 60(9): 12-17.
- [13] 黄荣凤, 黄琼涛, 黄彦慧, 等. 表层微压缩和加压热处理实木地板基材的剖面密度分布和尺寸稳定性[J]. 木材工业, 2019, 33(2): 6-10.
- HUANG R F, HUANG Q T, HUANG Y H, et al. Density profile and dimensional stability of solid wood floor substrates treated with light compression and pressurized steam[J]. China Wood Industry, 2019, 33(2): 6-10.
- [14] 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 R, HUANG R F, CHANG J M, et al. Mechanical properties of preheated sandwich compressed wood[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2018, 35(5): 935-941.
- [15] 何啸宇, 王艳伟, 黄荣凤, 等. 过热蒸汽压力对表层微压缩桦木地板坯料尺寸稳定性影响[J]. 森林工程, 2020, 36(6): 72-77, 124.
- HE X Y, WANG Y W, HUANG R F, et al. Study on the effect of steam pressure on the dimensional stability of the light surface compression birch flooring blank[J]. Forest Engineering, 2020, 36(6): 72-77, 124.
- [16] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018)[M]. 北京: 中国林业出版社, 2019.
- [17] 成俊卿, 杨家驹, 刘鹏. 中国木材志[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [18] 刘一星, 赵广杰. 木材学[M]. 2版. 北京: 中国林业出版社, 2012.
- [19] HUANG R F, FENG S H, GAO Z Q. Effect of water/moisture migration in wood preheated by hot press on sandwich compression formation[J]. Holzforschung, 2022, 76(11-12): 1003-1012.
- [20] HUANG R F, FENG S H, GAO Z Q, et al. Mechanism elucidation for wood sandwich compression from the perspective of yield stress[J]. Holzforschung, 2023, 77(8): 629-639.
- [21] 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): 40-47.
- HUANG R F, GAO Z Q, FENG S H, 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): 40-47.
- [22] LY/T 3376—2024, 层状压缩木材[S].
- [23] HUANG R F, WANG Y W, ZHAO Y K, et al. Sandwich compression of wood by hygro-thermal control[J]. Mokuzai Gakkaishi, 2012, 58(2): 84-89.
- [24] GAO Z Q, HUANG R F, LU J X, et al. Sandwich compression of wood: control of creating density gradient on lumber thickness and properties of compressed wood[J]. Wood Science and Technology, 2016, 50(4): 833-844.
- [25] LI R, GAO Z Q, FENG S H, 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.
- [26] GAO Z Q, HUANG R F, CHANG J M, et al. Sandwich compression of wood: effects of preheating time and moisture distribution on the formation of compressed layer(s)[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77(2): 219-227.

(本文编校 向 琴)