

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026040

组坯结构和单板等级对辐射松厚单板正交层压材弯曲和轴向抗压性能的影响

胡娟¹, 宁文正², 宁新广², 张亚慧¹, 于文吉¹, 黄宇翔¹

(1. 中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 蓬莱正泰木业有限公司, 山东烟台 265600)



摘要: 为提高速生材在结构用工程木产品中的利用水平, 以7.5 mm厚度辐射松 (*Pinus radiata*) 单板为原料, 通过动态弹性模量将其分为A级单板 (大于9 GPa) 和B级单板 (4~9 GPa)。采用3种组坯结构: I 最外层和外层两层顺纹、内部顺横纹单层交替, II 双层成组顺横纹交替, III 单层连续正交, 通过湿热应力去除、四侧槽榫机械互锁接长和冷压胶合等工艺, 制备CLTV-A-I、CLTV-A-II、CLTV-A-III和CLTV-B-I共4组15层大规格厚单板正交层压材 (cross-laminated-thick veneer, CLTV), 试样尺寸为12 000 mm (长) × 3 250 mm (宽) × 105 mm (厚), 比较单板等级、组坯结构对CLTV弯曲性能和轴向抗压强度的影响, 并评价优化CLTV的基本物理性能、浸渍剥离性能和甲醛释放量。结果表明, 组坯结构和单板等级均显著影响CLTV的弯曲性能 ($P < 0.05$)。在相同组坯结构下, CLTV-A-I的抗弯强度 (modulus of rupture, MOR) 和弹性模量 (modulus of elasticity, MOE) 显著高于另外3组CLTV-A-II、CLTV-A-III和CLTV-B-I ($P < 0.05$), 但CLTV-A-I与CLTV-B-I的轴向抗压强度差异不显著, 分别为25.91 MPa和25.27 MPa。各组弯曲试件均从跨中下缘受拉侧起裂并呈脆性破坏, CLTV-A-I的裂纹扩展路径较集中、层间分离较轻, 而CLTV-A-II、CLTV-A-III和CLTV-B-I的分层与撕裂更明显。CLTV-A-I和CLTV-B-I轴压试件均以渐进式局部压溃为主, 伴有表层开裂和轻微层间损伤, 未发生贯通性断裂。CLTV-A-I的气干密度为0.439 g/cm³, 含水率为11%时, MOR和MOE分别为40.38 MPa和7.71 GPa; 总剥离率和最大剥离率分别为1.5%和15.5%, 满足GB/T 26899—2022《结构用集成材》规定的浸渍剥离性能要求; 甲醛释放量为0.014 mg/m³, 达到GB/T 39600—2021《人造板及其制品甲醛释放量分级》的E_{NEF}级≤0.025 mg/m³的限值要求。保持表层顺纹连续性、优化内部顺纹层与横纹层的交替方式, 并采用高等级厚单板, 可提高大规格CLTV的弯曲性能和受力整体性。

关键词: 厚单板正交层压材; 组坯结构; 单板等级; 弯曲性能; 轴向抗压性能

中图分类号: TS653; S781.2 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 04-0059-09

Effects of Layup Configuration and Veneer Grade on the Flexural and Axial Compressive Properties of Cross-Laminated-Thick Veneer Made from Radiata Pine

Hu Juan¹, Ning Wenzheng², Ning Xinguang², Zhang Yahui¹, Yu Wenji¹, Huang Yuxiang¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. Penglai Zhengtai Wood Industry Co., Ltd., Yantai 265600, Shandong, China)

收稿日期: 2026-03-29; 修改日期: 2026-07-15

基金项目: “十四五”国家重点研发计划课题任务“超厚旋切单板集成材制造技术”(2021YFD2200605-04)。

作者简介: 胡娟 (1999—), 女, 博士研究生。Email: hjyhxxl@163.com

通讯作者: 黄宇翔, 男, 副研究员。Email: yxhuang@caf.ac.cn

Abstract: To promote the use of fast-growing wood in structural engineered wood products, 7.5 mm thick radiata pine (*Pinus radiata*) veneers were, according to their dynamic modulus of elasticity, classified according to their dynamic modulus of elasticity into two grades: grade A (>9 GPa) and grade B (4~9 GPa). Fifteen 15-layer cross-laminated thick veneer (CLTV) panels were fabricated using three lay-up configurations: Structure I, with two longitudinal outer layers and alternating single longitudinal and transverse layers in the core; Structure II, with alternating two-layer groups oriented longitudinally and transversely; and Structure III, with continuously alternating single longitudinal and transverse layers. After hygrothermal stress relief, the veneers were longitudinally joined using four-sided tongue-and-groove mechanically interlocking joints and then cold-pressed bonded to produce full-scale CLTV panels measuring 12 000 mm (length) $\times$ 3 250 mm (width) $\times$ 105 mm (thickness). The effects of lay-up configuration on flexural properties and veneer grade on flexural properties and axial compressive strength were investigated. The basic physical properties, soak-delamination resistance, and formaldehyde emission of the optimized CLTV panels were also evaluated. It was found that both lay-up configuration and veneer grade significantly affected the flexural properties of CLTV ($P < 0.05$). CLTV-A-I, consisting of two longitudinal outer layers on each face and alternating single longitudinal and transverse layers in the core, exhibited superior flexural properties, with its modulus of rupture (MOR) and modulus of elasticity (MOE) being 40.38 MPa and 7.71 GPa, respectively, both of which were significantly higher than those of CLTV-A-II and CLTV-A-III ($P < 0.05$). With the same lay-up configuration, the MOR and MOE of group A-I were 74% and 40% higher, respectively, than those of CLTV-B-I, whereas their axial compressive strengths did not differ significantly, with values of 25.91 MPa and 25.27 MPa, respectively ($P > 0.05$). All flexural specimens exhibited brittle failure, with cracks initiating on the tensile side at the bottom of the midspan. CLTV-A-I showed a more localized crack propagation path and less interlayer separation, whereas more pronounced delamination and tearing were observed in CLTV-A-II, CLTV-A-III, and CLTV-B-I. Under axial compression, both CLTV-A-I and CLTV-B-I specimens exhibited predominantly progressive localized crushing, accompanied by surface cracking and minor interlayer damage, without through-thickness fracture. The average air-dry density and moisture content of CLTV-A-I were 0.439 g/cm³ and 11%, respectively. Its total and maximum delamination percentages were 1.5% and 15.5%, respectively, which were both meeting the soak-delamination performance requirements specified in GB/T 26899—2022 “*Structural Glued Laminated Timber*”, and its formaldehyde emission was 0.014 mg/m³, which was below the E_{NEF}-class limit specified in GB/T 39600—2021 “*Classification of Formaldehyde Emission from Wood-based Panels and Their Products*”. Within the scope of this study, maintaining continuous longitudinal outer layers, optimizing the alternation of longitudinal and transverse core layers, and using higher-grade thick veneers could improve the flexural properties and structural integrity of large-scale CLTV.

Key words: cross-laminated thick veneer; layup configuration; veneer grade; flexural properties; axial compressive properties

随着全球森林资源供需矛盾日益突出,大径级优质原木的稳定供应受到限制,传统实木锯材在大规格建筑结构构件中的应用面临原料利用率

较低、产品尺寸受原木径级制约等问题^[1-2]。因此,充分利用速生木材开发高性能工程木产品,是拓展速生材结构用途、提高木材资源利用效率和促

进现代木结构发展的重要途径^[3-5]。

正交胶合木(cross-laminated timber, CLT)因其相邻层实木板正交组坯, 具有较好的双向力学性能、尺寸稳定性与设计灵活性, 已广泛应用于多层和高层木结构建筑中^[6-7]。然而, 传统CLT主要以规格锯材为基本单元^[8-9], 对力学性能较好的分等锯材具有一定需求, 这在一定程度上限制了材质较差或力学性能波动较大的速生材的直接利用, 也增加了原材料筛选成本^[10]。因此, 利用速生材开发具有正交层压特征的新型板式工程木产品, 对于现代木结构建筑具有工程价值。

笔者团队以厚度约7~10 mm的旋切厚单板为基本单元, 开发了厚单板正交层压材(cross-laminated thick veneer, CLTV)^[11-12]。CLTV在构型上包含明显的顺横纹交替层, 属于具有正交层压特征的板式工程木产品。与传统锯材型CLT相比, 采用旋切厚单板可在一定程度上提高小径材利用率, 并为板材的连续化制造和大幅面成型提供新的技术途径。前期研究建立了旋切厚单板湿热定型、正交组坯和冷压胶合工艺, 制备了厚度为105 mm的15层CLTV, 并对其弯曲、压缩和甲醛释放等性能进行了初步评价, 验证了旋切厚单板制备结构用正交层压板材的可行性^[11]。在此基础上, 后续研究同样以落叶松(*Larix*)为原料, 采用槽榫机械互锁技术实现厚单板的连续接长与拼宽, 制备了尺寸为12 000 mm×3 250 mm×105 mm的大规格CLTV板材, 并分析了拼接位置、顺横纹层配置和单板等级组合对力学性能的影响^[12]。然而, 已有研究对大规格板材的评价主要集中于成型工艺验证, 相关组坯参数的力学效应主要由小尺寸试验获得, 其研究结论能否适用于辐射松及足尺CLTV试件, 仍需进一步验证。特别是对于速生材CLTV, 表层顺纹层配置、内部顺横纹层组合和单板等级对其抗弯及轴向受压性能、破坏行为和胶合耐久性的影响尚不明确。

本研究以厚度为7.5 mm的速生辐射松(*Pinus radiata*)单板为原料, 采用厚单板连续拼接和大规格成型工艺, 制备15层、厚度为105 mm的CLTV, 首先比较不同组坯结构板材的弯曲性能; 在此基础上, 选取弯曲性能较优的组坯结构, 进

一步考察两种单板等级对CLTV抗弯及轴向受压性能的影响, 并结合裂纹扩展、层间损伤和局部压溃形貌分析其破坏特征, 对较优组坯试件的基本物理性能、浸渍剥离性能和甲醛释放量进行评价, 以期为大规格CLTV的结构设计与应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

辐射松原木, 树龄25年, 胸径约为450 mm, 气干密度为0.42~0.44 g/cm³, 产自新西兰坎特伯雷; 单组分湿固化聚氨酯胶黏剂, 外观为液态, 黏度为4 500 mPa·s (25 °C), pH值为5~6, 外购。

1.2 试验设备

无卡轴旋切机(定制)、横向振动无损检测设备(自主研制)、湿热定型装置(自主研制)、双轴联动喷胶系统(自主研制)、冷压机(定制)、万能力学试验机(Instron 5582)等。

1.3 试验方法

1.3.1 CLTV单元的制备 基于前期试验研究结果, 将辐射松原木经无卡轴旋切机制备厚度为7.5 mm、宽度为1.2 m, 初始含水率约20%的单板。单板厚度的选择综合考虑了旋切厚单板背面裂隙度、表面粗糙度、湿热定型后的平整性以及CLTV组坯和胶合成型要求^[11]。

采用湿热定型工艺对单板进行去应力处理, 以降低卷曲和回弹、改善平整度, 满足后续组坯要求。湿热定型工艺参数设定为: 热压温度175 °C, 单位压力0.33 MPa, 热压时间8 min。

定型后厚单板裁切为3 250 mm×1 200 mm的基本单元, 随后采用横向振动无损检测设备测定其动态弹性模量。参照GB/T 29895—2013《横向振动法测试木质材料动态弯曲弹性模量方法》, 并结合大幅面单板的自由振动特征进行测试。单板沿长度方向水平放置, 在距单板一端728 mm和2 522 mm处设置柔性支承线, 使单板近似处于自由-自由支承状态, 两支点间距为1 794 mm。最终测得的动态弹性模量的分布范围为4~14 GPa。根据弹性模量分布特征, 以9 GPa为分级界限, 4~9 GPa范围内的单板分为B级, 大于9 GPa的单板分为A级。

在裁切分级后的厚单板侧边加工槽榫结构,以实现单板沿垂直于纹理的方向大尺度拼接。完成拼接后,将横纹拼接材按幅面尺寸 $3\,250\text{ mm}\times 3\,250\text{ mm}$ 进一步裁切,并在新裁切的板边再次加工槽榫结构,以实现沿平行于纹理方向的大尺度拼接,制备顺纹拼接材(图1①~⑧)。

1.3.2 CLTV的制备 在横/顺纹拼接材表面采用双轴联动喷胶系统均匀涂布聚氨酯胶黏剂,单面涂

胶量为 300 g/m^2 ,胶网大小为 $20\text{ mm}\times 20\text{ mm}$ 。按不同排列方式进行组坯,如图2所示:以A级厚单板为主,设计3种组坯结构,I为最外层和外层两层顺纹、内部顺横纹单层交替(A-I);II为双层成组顺横纹交替(A-II);III为单层连续正交布置(A-III);B级厚单板按结构I制备了另一组试件(B-I)。所有组坯结构中,槽榫拼接位置均为随机分布。

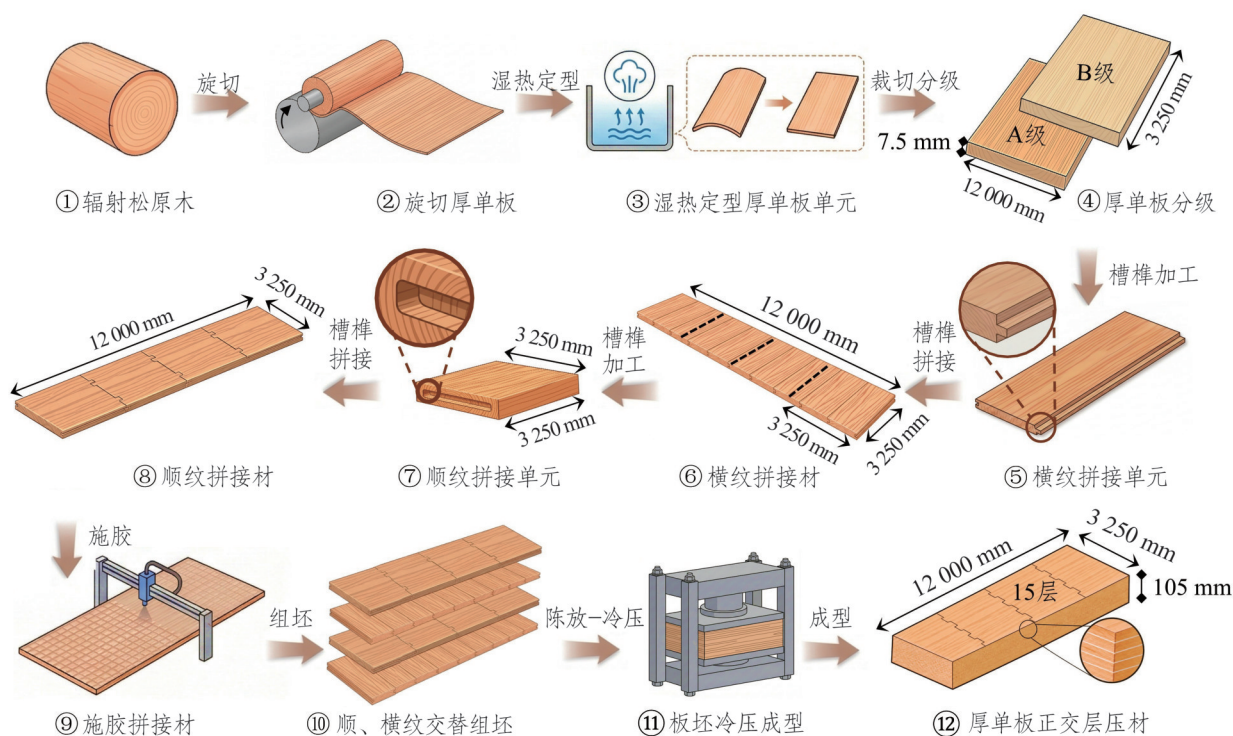


图1 厚单板正交层压材制备工序

Fig. 1 Process flowchart of manufacturing cross-laminated thick veneer (CLTV)

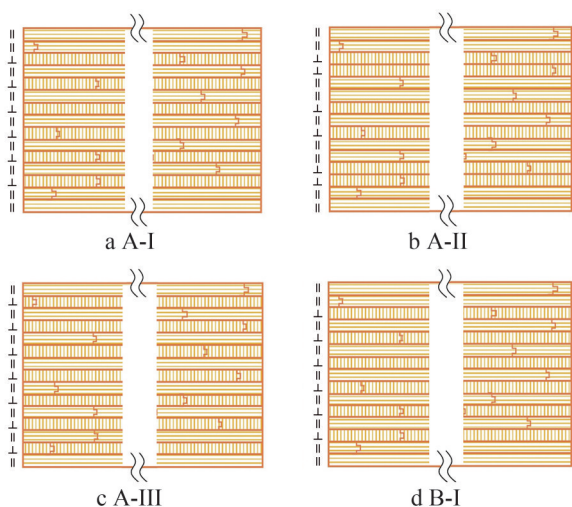


图2 厚单板正交层压材组坯结构示意

Fig. 2 CLTV layup configurations

组坯后先陈放40~50 min, 再在1 MPa压力下冷压3 h。在冷压过程中, 网格状胶条在压力作用下流动并形成胶合界面, 胶层的厚度为0.15~0.20 mm。最终制得CLTV的尺寸为 $12\,000\text{ mm}$ (长) $\times 3\,250\text{ mm}$ (宽) $\times 105\text{ mm}$ (厚), 压缩率为6.67%, 如图1⑨~⑫所示。

需要说明的是, 前期课题组已对高等级表层-低等级芯层的梯度组坯结构进行了探索, 研究发现表层单板等级对CLTV的弯曲性能具有重要影响, 而芯层单板等级的影响相对有限。因此, 本研究重点比较组坯结构及单板等级整体差异对CLTV物理力学性能的影响, 未重复设置A-B-A组合结构^[12]。

1.4 性能测试

1.4.1 弯曲和轴向抗压性能 参照 LY/T 3039—2018《正交胶合木》、GB/T 26899—2022《结构用集成材》和 GB/T 50329—2012《木结构试验方法标准》等相关标准, 测试 CLTV 试样的抗弯强度 (modulus of rupture, MOR)、抗弯弹性模量 (modulus of elasticity, MOE) 和轴向抗压强度。弯曲试件尺寸为 105 mm×200 mm×2 500 mm, 加载速率为 8 mm/min, 跨距为 2 205 mm; 压缩试件尺寸为 105 mm×100 mm×400 mm, 加载速率均为 2 mm/min, 每组设置 6 个重复试件。

1.4.2 基本物理性能 参照 GB/T 1927.5—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法 第5部分: 密度测定》和 GB/T 26899—2022, 测定 CLTV 试件的气干密度和含水率, 每组 3 个重复试件。

1.4.3 浸渍剥离性能 参照 GB/T 26899—2022, 对 CLTV 试件的胶合性能进行测试, 每组 3 个重复试件。

1.4.4 甲醛释放量 参照 GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》1 m³气候箱法对 CLTV 试件的甲醛释放量进行测定, 并依据

GB/T 39600—2021《人造板及其制品甲醛释放量分级》进行等级评价, 重复 3 个试件。

1.5 数据处理

使用 SPSS 软件进行数据分析。采用单因素方差分析 (analysis of variance, ANOVA) 判定不同组 CLTV 试件测试性能的显著性差异, 数据统计分析设定 95% 置信水平。

2 结果与分析

2.1 组坯结构对 CLTV 弯曲性能的影响

图 3 是不同组坯结构 CLTV 的弯曲性能测试结果。3 组试样的应力-应变曲线变化规律基本一致, 加载初期近似线性上升, 达到峰值后迅速下降, 呈现较明显的脆性破坏特征。CLTV-A-I 与 CLTV-A-II 相比, 曲线斜率和峰值应力总体下降, 其中 CLTV-A-I 表现出较高的弯曲刚度和承载能力, 而 CLTV-A-III 的峰值应变相对较大, 表现出较强的变形能力。由图 3b 可见, 同样采用 A 级单板, 组坯结构由 I 向 II、III 变化时, CLTV 的 MOR 和 MOE 呈下降趋势。方差分析表明, 组坯结构对 CLTV 的 MOR 和 MOE 均具有显著影响 ($P<0.05$)。

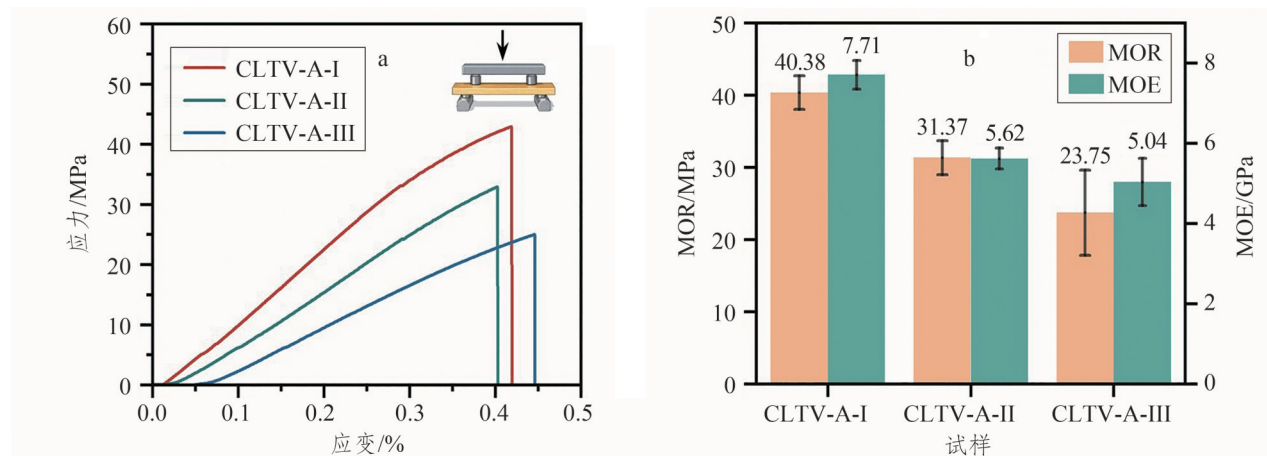


图3 不同组坯结构厚单板正交层压材的弯曲性能

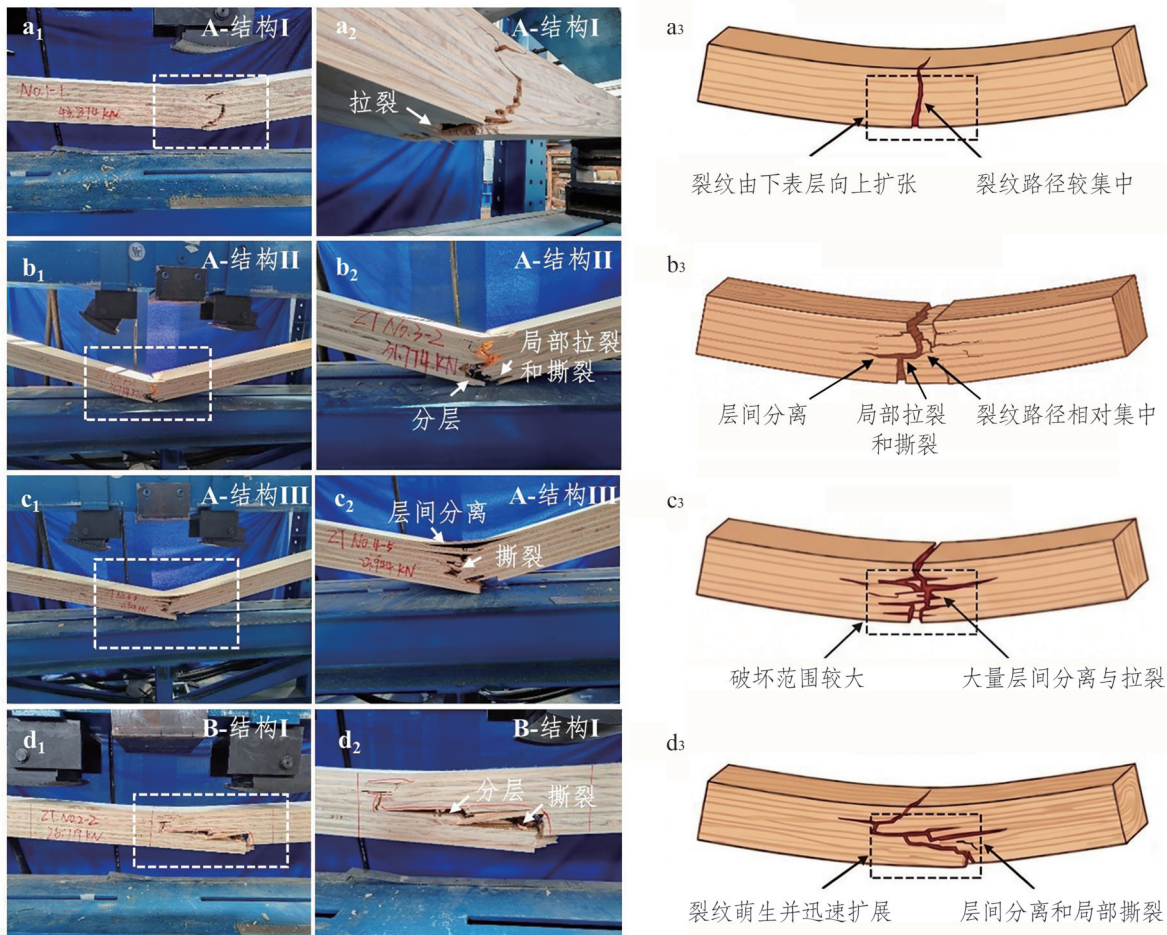
Fig. 3 Flexural properties of CLTV with different layup configurations

结合破坏形貌可知, 3 组 A 级单板制备的 CLTV 试件均表现出典型受弯破坏特征, 破坏首先发生于跨中下缘受拉侧, 说明下缘顺纹层是弯曲加载下的主要承载层和初始失效部位。CLTV-A-I 试件 (图 4a) 裂纹主要由下表层受拉区萌生, 并沿厚度方向向上扩展, 破坏区域相对集中, 层间

分离较轻, 表明其整体协同受力状态较好。相比之下, CLTV-A-II (图 4b) 因局部双横纹或双顺纹成组布置, 层间支撑均匀性减弱, 受弯时更易出现局部拉裂、撕裂和层间张开; CLTV-A-III (图 4c) 则由于表层顺纹连续性较弱、顺纹层数量较少, 裂纹更易沿层间界面扩展, 表现出更明显的下缘

开裂、分层和撕裂,表层顺纹连续性和内部横-顺纹层的均匀交替是影响CLTV弯曲性能的关键因素。弯曲加载下,表层顺纹层主要承担拉/压主应力,其连续性决定主应力传递效率;内部横纹层则通过提供侧向约束,改善层间剪应力分布并抑制局部失稳。CLTV-A-I中双表层顺纹与内部单层

交错正交布置形成较好的协同作用,因此表现出较优的弯曲承载能力和稳定性;而CLTV-A-II和CLTV-A-III因内部成组配置或表层顺纹连续性不足,导致应力传递和层间支撑效果减弱,进而造成强度和刚度下降。



注: a、b、c、d试件分别为CLTV-A-I、CLTV-A-II、CLTV-A-III、CLTV-B-I。

图4 厚单板正交层压材弯曲破坏的实物图及示意图

Fig. 4 Photographs and illustrations of the flexural failure modes of CLTV

2.2 单板等级对CLTV抗弯、轴向抗压性能的影响

采用结构I组坯,比较A、B两种等级单板对CLTV抗弯和轴向抗压性能的影响。图5a、5b表明,CLTV-A-I试件的MOR和MOE比CLTV-B-I分别高74%和40% ($P < 0.05$),表明单板等级对大尺寸CLTV的弯曲性能具有显著影响。A、B级单板自身变形与承载能力存在固有差异,单板单元性能差异会直接传递至成品构件宏观力学表现^[13-14]。根据层压截面有效弯曲刚度理论,在截面积条件

相近时,各层对整体弯曲刚度的贡献主要取决于其MOE及该层形心(几何中心)至中性轴的距离,且随该距离平方的增大而提高^[15]。A级单板的动态弹性模量高于B级单板,当其布置于距中性轴较远的表层时,可对截面有效弯曲刚度产生较大贡献,这可能是结构I试件MOE较高的原因。

由图4可知,不同等级单板制备CLTV试样在静曲荷载作用下均表现出典型的受弯破坏特征。CLTV-B-I试件的破坏首先发生于跨中下缘受拉侧,

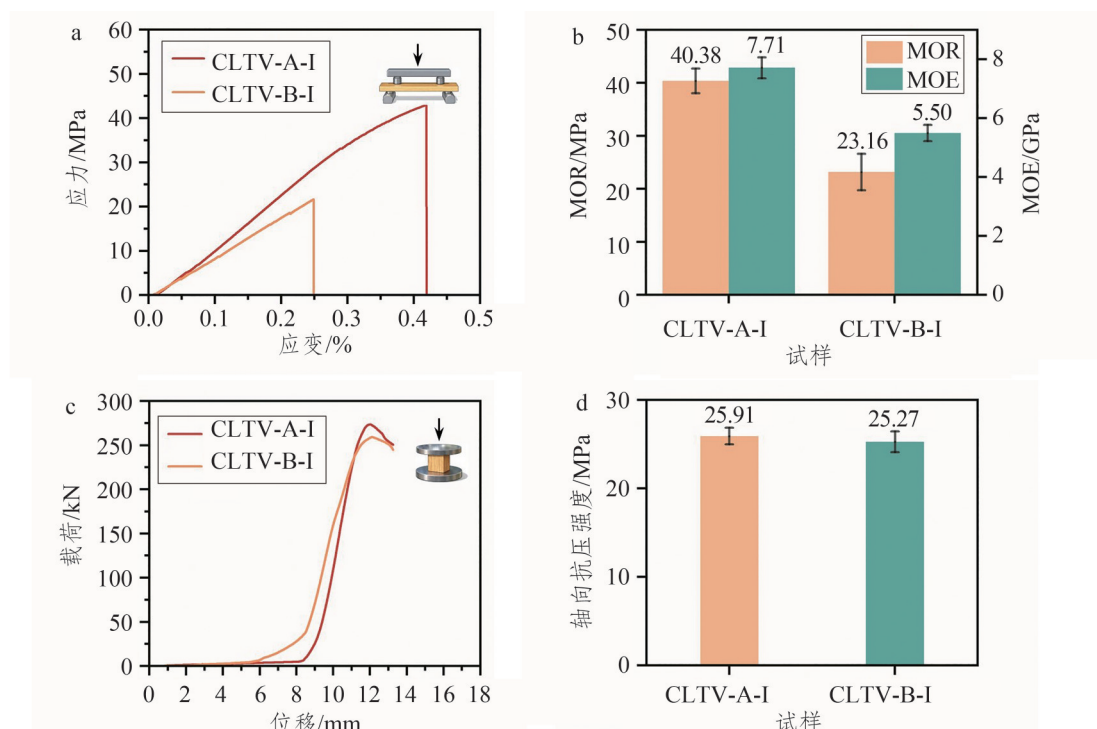


图5 不同单板等级厚单板正交层压材的弯曲性能和轴向抗压强度

Fig. 5 Load-deformation responses and mechanical properties of CLTV under flexural and axial compressive loading

裂纹沿下表层单板纹理方向萌生并迅速扩展,同时伴随明显的层间分层和局部撕裂现象。由其放大图可见,下部多层单板之间出现较明显的界面开裂和翘起现象,裂纹扩展路径较为复杂,局部伴随纤维拔出和撕裂。该破坏模式可能与B级单板较低的弹性模量及材质均匀性差异有关。已有研究表明,层板中的节疤、旋切裂隙、局部纹理偏斜等缺陷可改变受弯状态下的局部应力分布,并可能形成应力集中区域,从而促进受拉侧裂纹萌生与扩展;当裂纹进一步向相邻层及胶合界面传播时,可能诱发层间剪切、分层及纤维撕裂等复合破坏^[16-17]。相比之下,CLTV-A-I试件同样起裂于跨中下缘受拉区,裂纹主要由下表层向上扩展,破坏区域相对集中,裂口较清晰(图4a)。放大图可见,下部单板虽然发生明显拉裂,但分层范围相对有限,这可能是由于A级单板材性均匀、缺陷较少,在受弯过程中能够维持较好的协同受力能力,使破坏更多体现为受拉区木材本体开裂,而非大范围界面失效。

总体来看,两组试件的弯曲破坏均以跨中下缘受拉区开裂为主要特征,表明下缘顺纹层是受弯过程的主要受力部位,也是裂纹首先萌生的区

域。同时,破坏过程中伴随一定程度的层间分层,表明胶层界面及相邻单板之间的应力传递状态对构件弯曲性能具有重要影响。相较而言,CLTV-B-I试件的分层和撕裂现象更明显,破坏形态更复杂且离散性更大;CLTV-A-I试件裂纹扩展路径相对集中,整体性更好,这与其较高的MOR一致。

图5c、5d表明,CLTV-A-I与CLTV-B-I的轴向抗压强度无显著差异($P>0.05$)。这表明在当前15层结构I条件下,单板等级对CLTV轴向抗压强度平均值的影响相对有限,轴压承载行为可能更多与顺横纹层的协同受力及整体层压构型有关。从离散性来看,CLTV-A-I和CLTV-B-I的轴向抗压强度变异系数分别为3.61%和4.64%,均处于较低水平,表明两组试件在轴压作用下均具有较好的力学稳定性和重复性。综合来看,CLTV-A-I在强度、刚度及稳定性方面均表现较优,说明采用高等级单板并优化组坯结构,有利于提高CLTV的抗弯承载能力和力学一致性。

由图6可知,不同等级单板制备的CLTV试样在轴压作用下均表现出局部压溃为主、伴随表层开裂和轻微层间损伤的受压破坏特征,但两者在损伤分布和破坏集中程度上存在一定的差异。

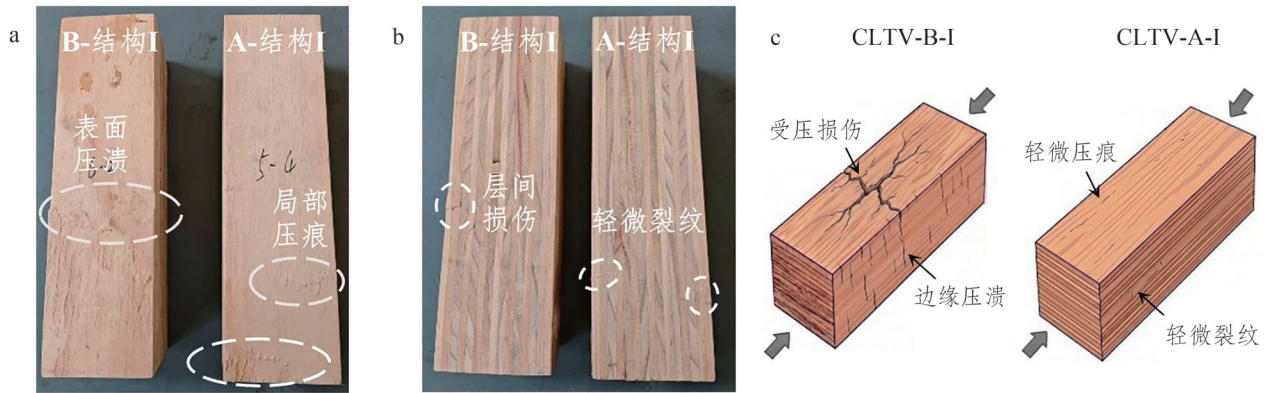


图6 不同单板等级厚单板正交层压材压缩破坏形貌的正视图、侧视图及示意图

Fig. 6 Front and side views, and schematic illustrations of the failure modes of CLTV under axial compressive loading

CLTV-B-I 试件的破坏主要集中于中部局部区域, 表现为表面压溃、边缘开裂及局部层间损伤, 局部破坏程度相对较重, 这可能与B级单板弹性模量较低、材质均匀性相对较差及局部薄弱区域在受力过程中更易产生应力集中有关, 从而诱发表层局部失稳和损伤集中。相比之下, CLTV-A-I 试件的损伤分布相对分散, 主要表现为局部压痕和轻微裂纹, 整体完整性较好, 未出现明显的大范围压溃破坏, 表明A级单板材质均匀性较好, 在轴压作用下能够维持更稳定的协同受力状态。总体来看, 两组试件均未发生贯通性断裂, 说明15层CLTV在轴向受压时具有较好的整体稳定性, 其破坏形式以渐进式局部压溃为主。需要指出的是, 基于当前试验结果, 仅可认为单板等级对轴向抗压强度平均值的影响较小, 但其对受压损伤演化过程仍有一定影响。

已有研究表明, 树龄20年的(径级460 mm)辐射松木材的MOR、MOE和顺纹抗压强度分别为93.2 MPa、9.3 GPa和34.1 MPa^[18]; 而本研究CLTV-A-I相应指标为40.38 MPa、7.71 GPa和25.91 MPa。这是由于CLTV沿主方向受力时主要依靠纵向单板承载, 而横向层因纹理方向与主受力方向垂直, 对纵向刚度和强度的贡献相对有限, 并可能在弯曲过程中产生滚动剪切变形。胶合界面、槽榫拼接及单板局部非均质性也会影响层间应力传递和极限破坏。但CLTV可通过正交组坯实现大尺寸板式构件成型, 在保持一定承载能力的同时提高速生材的利用效率。

2.3 CLTV的基本物理性能、浸渍剥离性能及甲醛释放量评价

为验证优化组坯结构CLTV在工程应用中的可行性, 选取A级单板与结构I制备CLTV试样, 并对试样的密度、含水率等基本物理性能、浸渍剥离性能和甲醛释放量进行测试, 其气干密度为0.439 g/cm³, 含水率为11%。该密度水平表明, 大尺寸CLTV整体延续了辐射松速生材轻质化利用的材料特征, 有利于减轻构件自重; 含水率处于木质结构材料常用的适宜范围内, 说明制备的板材水分状态较为稳定。

浸渍剥离试验结果表明, CLTV-A-I试样的总剥离率为1.5%, 最大剥离率为15.5%, 均低于GB/T 26899—2022《结构用集成材》规定的5% (总剥离率)、任一胶层的最大剥离长度不大于该胶层长度的1/4 (最大剥离率) 的限值要求。该结果说明其胶合界面具有良好的耐水稳定性, 冷压胶合工艺与四侧槽榫机械互锁接长技术能形成较稳定的厚单板胶合界面。湿热应力去除工艺可改善厚单板的平整度和贴合性, 并降低内应力释放引起的界面开裂风险。

依据GB/T 17657—2022, 采用1 m³气候箱法进行甲醛释放量测试, CLTV-A-I试样的甲醛释放量为0.014 mg/m³, 低于E_{NEF}级限值0.025 mg/m³, 表明该材料具有较好的环保性能。由于本研究文采用聚氨酯无醛胶黏剂, 试样较低的甲醛释放量与胶黏剂体系本身不含甲醛有关。

3 结论

1) 以7.5 mm厚度辐射松单板为原料, 采用湿热应力调控、槽榫互锁接长和冷压胶合技术, 制备尺寸为12 000 mm×3 250 mm×105 mm的15层辐射松厚单板正交层压材 (CLTV), 验证了厚单板连续拼接与大幅面成型的可行性。

2) 组坯结构显著影响 CLTV 的弯曲性能 ($P<0.05$)。采用A级单板, 最外层和外层两层顺纹、内部顺横纹单层交替组坯, CLTV-A-I试样的性能最优, 其MOR和MOE分别为40.38 MPa和7.71 GPa。表层顺纹连续及内部顺、横纹层均匀交替有利于应力传递和层间协同受力。

3) 单板等级显著影响 CLTV 的弯曲性能 ($P<0.05$), A级单板 (动态弹性模量大于9 GPa) 制备的CLTV-A-I试件的MOR和MOE, 较B级单板 (动态弹性模量为4~9 GPa) 制备的CLTV-B-I试件分别高74%和40%; 但二者轴向抗压强度差异不显著 (分别为25.91和25.27 MPa, $P>0.05$)。说明单板等级主要影响抗弯承载能力, 对轴向抗压强度平均值影响较小, 但会改变受压损伤的分布。

4) CLTV-A-I试样的总剥离率和最大剥离率分别为1.5%和15.5%, 低于GB/T 26899—2022《结构用集成材》相应限值要求; 甲醛释放量按GB/T 17657—2022《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》中的1 m³气候箱法测定, 为0.014 mg/m³, 低于E₁级限值0.025 mg/m³, 表明其具有较好的胶合耐水性和较低的甲醛释放水平。

参考文献:

- [1] 曾伟生, 杨学云. 我国用材林资源状况及木材安全分析[J]. 林业资源管理, 2023(1): 17-24.
Zeng Weisheng, Yang Xueyun. Analysis of timber forest resources status and timber safety analysis in China[J]. Forest Resources Management, 2023(1): 17-24.
- [2] 朱光前, 申伟. 世界木材资源及中国木材市场前景[J]. 中国人造板, 2022, 29(7): 36-40.
Zhu Guangqian, Shen Wei. World wood resources and China wood market prospect[J]. China Wood-Based Panels, 2022, 29(7): 36-40.
- [3] 张苏俊. 国产速生材在轻质木结构中的应用研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.
- [4] 徐晨. 新型快装板式轻型木结构设计[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [5] 龚迎春, 姜万里, 李明月, 等. 我国木结构产业发展展望[J]. 木材工业, 2019, 33(5): 20-24.
- [6] Gong Yingchun Lou Wanli, Li Mingyue, et al. Prospects for timber structure industry in China[J]. China Wood Industry, 2019, 33(5): 20-24.
- [7] 杨世玉, 钟永, 任海青, 等. 考虑滚动剪切的杉木正交胶合木抗弯性能数值模拟[J]. 木材科学与技术, 2026, 40(3): 65-75.
Yang Shiyu, Zhong Yong, Ren Haiqing, et al. Numerical Simulation of bending performance of cross-laminated timber made of Chinese Fir by considering rolling shear component[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2026, 40(3): 65-75.
- [8] Syahirah Y A, Anwar U, Sh L, et al. The properties of cross laminated timber (CLT): a review[J/OL]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2025, 138: 103924. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2024.103924.
- [9] 陈艳华, 丛郁钺, 杜官本, 等. 正交胶合木生产工艺研究进展[J]. 四川林业科技, 2022, 43(4): 141-148.
Chen Yanhua, Cong Yutan, Du Guanben, et al. Development of cross laminated timber[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2022, 43(4): 141-148.
- [10] Fredriksson M, Bomark P, Broman O, et al. Using small diameter logs for cross-laminated timber production[J]. BioResources, 2014, 10(1): 1477-1486.
- [11] Bayramoglu M M, Demir A, Birinci A U, et al. Effect of lumber quality grade on the mechanical properties and product costs of cross-laminated timber panels[J]. BioResources, 2025, 20(2): 3519-3533.
- [12] Huang Y X, Hu J, Peng H F, et al. A new type of engineered wood product: Cross-laminated-thick veneers[J/OL]. Case Studies in Construction Materials, 2024, 20: e02753. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e02753.
- [13] Yang Y X, Hu J, Ning X G, et al. Structure effects on mechanical properties of a novel engineered wood product: cross-laminated-thick veneers based on infinite splicing technology[J/OL]. Forests, 2025, 16(1): 181. DOI: 10.3390/f16010181.
- [14] Purba C Y C, Pot G, Viguier J, et al. The influence of veneer thickness and knot proportion on the mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made from secondary quality hardwood[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2019, 77(3): 393-404.
- [15] Zhang X, Sun H B, Xu G B, et al. Understanding the effect of knots on mechanical properties of Chinese fir under bending test by using X-ray computed tomography and digital image correlation[J/OL]. Forests, 2024, 15(1): 174. DOI: 10.3390/f15010174.
- [16] Christovasilis I P, Brunetti M, Follasa M, et al. Evaluation of the mechanical properties of cross laminated timber with elementary beam theories[J]. Construction and Building Materials, 2016, 122: 202-213.
- [17] Pang S J, Shim K B, Kim K H. Effects of knot area ratio on the bending properties of cross-laminated timber made from Korean pine [J]. Wood Science and Technology, 2021, 55(2): 489-503.
- [18] Darmawan W, Nandika D, Massijaya Y, et al. Lathe check characteristics of fast growing sengon veneers and their effect on LVL glue-bond and bending strength[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215: 181-188.
- [19] 吴艳华, 孙海燕, 任海青, 等. 进口辐射松木材物理与力学性能评价[J]. 木材工业, 2019, 33(2): 48-50.
Wu Yanhua, Sun Haiyan, Ren Haiqing, et al. Physical and mechanical properties of imported Pinus radiata wood[J]. China Wood Industry, 2019, 33(2): 48-50.

(责任编辑 余养伦/编校 曹惠敏、向琴)