

结构用竹木复合层积材的制备及其力学性能评价

田昭鹏, 王朝晖*, 张忠利, 任海青

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 利用竹木复合的方法来提高杨木单板层积材的力学性能, 从而使其满足结构用单板层积材的等级要求。分别利用竹束单板和竹席单板与杨木单板浸胶复合制成竹木复合层积材, 并测试其力学性能以及单板间的胶合性能。研究表明, 竹束杨木复合和竹席杨木复合的层积材强度等级均大大超过杨木单板层积材, 分别可达 140E 优等品、110E 优等品。

关键词: 杨木单板层积材; 竹木复合; 力学性能; 胶合性能

中图分类号: S781.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)03-0404-05

Research on preparation and mechanical properties of structural bamboo-wood composite LVL

TIAN Zhaopeng, WANG Zhaohui, ZHANG Zhongli, REN Haiqing

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091)

Abstract: The method of bamboo-wood composited is used to improve the mechanical and properties of poplar LVL, enable it to meet the grade requirements for structural laminated veneer lumber. In this paper, the gum dipped bamboo bundles and woven bamboo were used to preparation the bamboo-wood composite LVL, and the mechanical bonding properties were tested. The research show that both of the bamboo bundles and the woven bamboo can increase the mechanical of polpar LVL, and their grade is 140E premium and 160E premium.

Key words: poplar LVL; bamboo-wood composite; mechanical properties; bonding properties

单板层积材 (laminated veneer lumber, LVL) 是用旋切的厚单板, 经施胶、顺纹组坯和热压胶合而得到的一种结构材料^[1]。单板层积材作为一种重要的木质工程材料, 由于其具有强度高, 尺寸稳定性好以及良好的加工性能、较高的弯曲性能^[2], 广泛应用于民用和商业木结构建筑领域。

高强度等级的结构用单板层积材的制造需要使用优质高强的木材。但我国木材资源匮乏, 供需矛盾突出, 优质大径级木材资源严重短缺, 开发利用速生人工林能够在一定程度上缓解优质木材缺乏的问题。速生杨木是我国的主要人工林, 速生杨木密度低、材质松软且强度较小^[3], 采用杨木制作的单板层积材抗弯强度 (约为 65.9 MPa^[2]) 小于松木类木材制作的单板层积材, 通过木材功能性改良和材料复合技术提高木材的性能, 实现速生人工林木材

的性能优化, 对推动杨木在木结构中应用具有重要意义^[4]。

竹材是一种绿色、生态且环保材料^[5], 具有生长速度快、力学性能好等优点, 尤其是具有很强的拉伸强度, 如毛竹、麻竹、淡竹和刚竹, 拉伸强度分别可达 188.8、199.1、185.9 和 289.1 MPa^[4]。竹材是一种轻质高强, 物理力学性能优良的材料, 以竹材为原料生产的竹席胶合板、竹材层积材、竹材集成材及竹材复合板等竹质工程和装饰材料, 广泛应用在车辆、建筑、造船及装饰等领域, 充分显示了竹材人造板作为结构用材优良特性^[6-7]。

张心安等^[8-9]和朱一辛^[10]研究了竹材增强杨木单板层积材力学性能。王长钟^[11]采用碳纤维布增强杨木 LVL 梁, 发现竖向碳纤维布使竖向 LVL 木梁刚度和破坏荷载均大幅提高, 其受力性能得到较大

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: “十二五” 国家科技支撑课题“竹质工程材料标准与建筑规范研究”(2012BAD23B0101) 资助。

作者简介: 田昭鹏, 硕士研究生。E-mail: tianzhaopeng1991@hotmail.com

* 通信作者: 王朝晖, 副研究员。E-mail: zhwang@caf.ac.cn

程度的改善。赵俊石^[12]通过玻璃纤维增强杨木单板层积材,发现将玻璃纤维布铺放在层板外侧弹性模量 MOE 增加幅度更明显。本研究将竹束单板、竹席单板放于外侧并和杨木单板复合制备结构用竹木复合层积材,从而提高杨木单板层积材的力学性能。

1 材料与方法

1.1 材料

采用速生杨木旋切制成的厚度为 2 mm、含水率为 8%~12%的杨木单板;将慈竹制作成竹束后,用棉线将竹束横向缝合制成厚度为 2~2.5 mm、含水率为 5%~9%的竹束单板;毛竹剖箴后,将其编织成纵横交错厚度为 2~2.5 mm 的竹编单板。胶黏剂采用酚醛树脂胶黏剂,由北京太尔公司生产,粘度 32 cps (20℃)、固体含量 46%、pH 值 11 及水溶倍数 6 倍。

1.2 试样制备

试样制备的工艺流程如下:单元制备→胶前干燥→浸胶→胶后干燥→组坯→热压→养护→裁边→试件制作。

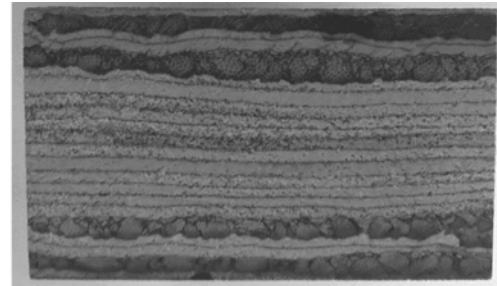
试样制备单元 3 种:杨木单板、竹束单板和竹席单板,浸胶前分别将各单板干燥到含水率为 6%~8%。其后将干燥好的单板放入经过加水稀释后的酚醛树脂胶黏剂(稀释后固含量为 30%)中进行浸胶处理,浸胶 30 min 将其取出淋干后对其进行干燥使其含水率为 8%~10%,浸胶前后称重并分别计算杨木单板、竹束单板和竹席单板的浸胶量,其浸胶量分别为 9.8%、7%和 11.5%。



图 1 竹木复合层积材的组坯方式

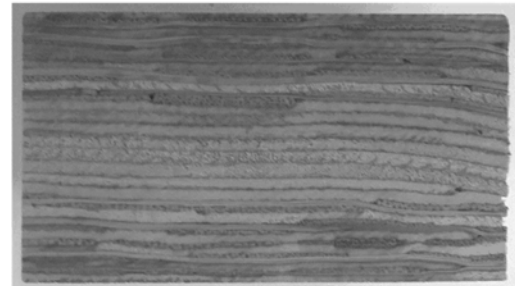
Figure 1 Assembly patterns for bamboo curtain and polar veneer

根据复合材料力学层合板理论^[13],将浸胶后的杨木单板与竹束单板或竹席单板顺纹组坯制成 350 mm×350 mm×40 mm 的板材,组坯方式为中间芯层为杨木单板,上下表面为竹束和杨木单板混合或者竹席和杨木单板混合(图 1 和图 2)通过控制竹木的比例使最终试样的气干密度控制在 0.75 g·cm⁻³左右,制备竹木复合层积材,同时利用相同的工艺制备杨木单板层积材。



A. 竹束杨木复合材

A. Bamboo mat and poplar veneer composite board



B. 竹席杨木单板复合层积材

B. Bamboo bundle and poplar veneer composite board

图 2 竹木复合层积材试样

Figure 2 Samples of bamboo-polar LVL

将组坯后的板材放入热压机中进行热压,热压压力为 1.2 MPa,温度为 140℃,时间为 1 min·mm⁻¹,其中升压时间 5 min,保压时间 35 min。热压完成后将其冷却至 40℃后将其卸压后将其取出,压制后的成品如图 2 所示。

1.3 测试方法

将竹木复合层积材陈放一定时间后参照《单板层积材》国家标准 GB/T 20241-2006^[14]以及《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》国家标准 GB/T 17657-2013^[15]将试样锯切成所需大小,并测试竹木复合层积材的气干密度、24 h 吸水率和吸水厚度膨胀率,同时测量其 II 类浸渍剥离,以及气干和水煮后的水平剪切强度、静曲强度和弹性模量(水煮条件是沸水中浸渍 2 h,冷却 1 h 后测量),测试气干和水煮后的内结合强度(水煮条件是沸水中浸渍 2 h,冷却 1 h 后测量)。

2 结果与分析

2.1 吸水率和吸水厚度膨胀率

依据《单板层积材》国家标准 GB/T 20241-2006^[14]分别测试 2 种竹木复合层积材的 24 h 吸水率和吸水厚度膨胀率, 求平均值并计算其标准偏差, 结果如表 1 所示。从测试结果可以看出竹席

杨木复合制备的竹木复合层积材的试样标准差小于竹束杨木单板复合层积材, 说明竹席杨木复合层积材的材性一致性好于竹束杨木复合层积材。从测试结果还发现, 竹束杨木复合试样的吸水率小但其吸水厚度膨胀率却更大, 说明竹束比竹席更容易在厚度方向膨胀, 原因是竹束在在碾压时, 由于纤维的分离导致其更容易在吸水是厚度膨胀。

表 1 吸水率和吸水厚度膨胀率测试结果
Table 1 Test results of water absorption and thickness swelling

样品 Sample	气干密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Air-dry density	24 h 吸水后 密度/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ Density after water absorption of 24	24 h 吸水率/% Water absorption of 24 h	24h 吸水厚度 膨胀率/% TS for 24 h	数量 Number of samples
竹束杨木单板复合 Bamboo mat and poplar veneer composite board	0.75 ± 0.016	0.96 ± 0.013	45.6 ± 2.27	9.4 ± 1.19	4
竹席杨木单板复合 Bamboo bundle and poplar veneer composite board	0.71 ± 0.007	0.92 ± 0.012	48.0 ± 1.35	8.8 ± 0.62	4

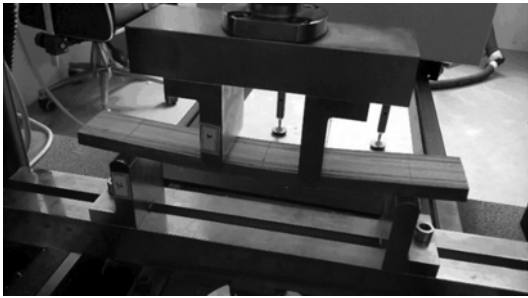


图 3 竹木复合层积材平行加载静曲强度测试

Figure 3 A MOR load in parallel test of bamboo-polar LVL

2.2 II类浸渍剥离

依据《单板层积材》国家标准 GB/T 20241-2006^[14] II类浸渍剥离的方法进行试验。浸渍剥离试验时将试件放置在热水中浸渍 3 h, 取出后置于 $(63\pm 3)^\circ\text{C}$ 的干燥箱中干燥 3 h。试样的大小都为 $75\text{ mm}\times 75\text{ mm}\times 40\text{ mm}$ 。浸渍干燥后仔细观察胶层开裂情况, 发现 2 种竹木复合层积材的各个胶层都没有发现开裂的情况, 说明酚醛树脂胶黏剂的耐水性能较好, 竹木复合层积材浸胶热压后具有较好的耐水能力。

2.3 静曲强度和弹性模量

试验测试竹木复合层积材气干及水煮后的垂直加载和平行加载弹性模量和静曲强度(见图 3)。测试过程参考《单板层积材》国家标准 GB/T 20241-2006^[14], 采用 4 点加载, 支座跨距为厚度的 21 倍, 加载速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ 。试验测试结果如表 2 所示, 对测试结果按照《单板层积材》进行分等, 杨木单板层积材、竹束杨木复合层积材和竹席杨木

复合层积材的弹性模量级别分别为 110E 优等品、140E 优等品和 110E 优等品。比较测试数据发现竹席杨木复合后的层积材弹性模量和静曲强度都大于杨木单板层积材。相比杨木单板层积材, 竹束、竹席复合后层积材垂直加载弯曲强度分别提高了 36%、19%, 平行加载强度分别提高了 50%、17%。分别计算强重比发现, 竹束杨木复合层积、竹席杨木复合层积材的垂直加载气干强重比分别为 206.9 和 191.6 $\text{MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 平行加载气干强中比分别为 194.1 和 159.4 $\text{MPa}\cdot\text{cm}^3\cdot\text{g}^{-1}$ 说明竹束复合后的强中比更好, 有利于其在木结构建筑中的使用。同时分析发现水煮后 3 种竹木复合层积材其等级分别为 70E 优等品、90E 优等品和 80E 优等品。

分析 2 种复合层积材的弯曲性能差异, 发现竹束复合层积材力学性能明显大于竹席复合层积材。分析原因, 竹束是纵向单板而竹席是纵横交错的单板, 导致受力时竹席纵向强度小, 但竹束的缺点横向没有强度, 而竹席可以在增大纵向强度的同时增大杨木层积材的横向强度。

2.4 水平剪切强度

层积材的垂直加载水平剪切强度测试结果如表 3 所示。对垂直加载剪切强度按照《单板层积材》国家标准 GB/T 20241-2006^[14]进行分等可知竹束杨木复合层积材和竹席杨木复合层积材的垂直加载剪切强度都可达到 65V-55H 的等级, 水煮后垂直加载剪切强度能达到 55V-47H、60V-51H 的等级要求。从测试结果可以看出 2 种竹木复合层积材的剪切强度都处于较高的等级, 但竹木复合层积材的垂直加

载剪切强度比杨木单板层积材的垂直加载剪切强度分别小 1% 和 3%。分析原因是随着竹束和竹席单板的加入, 导致复合层积材材质不均一, 竹木复合胶层相比杨木层积容易发生剪切破坏。与竹席复合层积材相比竹束复合层积材的垂直加载剪切强度更

大, 说明竹束和杨木单板间的胶合性能更好, 可能是竹席纵横交错的原因导致与竹片间以及杨木和竹片间的胶合性能下降, 从而导致其剪切强度较小, 而竹束和杨木单板都是顺纹方向, 胶合性能更好。

表 2 竹木复合层积材平行加载静曲强度和弹性模量测试结果

Table 2 MOE and MOR of bamboo-poplar LVL

样品 Sample	平均密度 /g·cm ⁻³ Mean density	平均弹性模量/GPa Mean value of MOE		平均静曲强度/MPa Mean value of MOR		数量 Number of samples		
		垂直加载 Load in vertical	平行加载 Load in parallel	垂直加载 Load in vertical	平行加载 Load in parallel			
		杨木单板层积材 Poplar LVL	I	0.59±0.017	13.83±0.72		11.75±0.67	115.46±4.08
竹束杨木单板复合 Bamboo bundle and poplar veneer composite board	I	0.76±0.016	17.27±1.46	15.26±1.18	167.31±10.56	145.63±10.29	6	
竹席杨木单板复合 Bamboo mat and poplar veneer composite board	I	0.71±0.008	14.02±0.98	11.97±0.79	137.80±9.54	113.16±8.84	6	
		II	0.86±0.011	9.78±0.94	8.25±0.98	69.64±6.94	57.76±6.45	6

I. 气干 Air-dry; II. 水煮 Boiling water dipping.

表 3 竹木复合层积材垂直加载剪切强度测试结果

Table 3 The shear strength load in vertical of bamboo-poplar LVL

样品 Sample	平均剪切强度/MPa Mean value of shear strength		数量 Number of samples
	气干 Air-dry	水煮 Boiling water dipping	
杨木单板层积材 Poplar LVL	9.71 ± 1.03	6.48 ± 0.63	6
竹束杨木单板复合 Bamboo bundle and poplar veneer composite board	9.69 ± 1.08	5.55 ± 0.69	6
竹席杨木单板复合 Bamboo mat and poplar veneer composite board	9.42 ± 1.11	6.43 ± 0.65	6

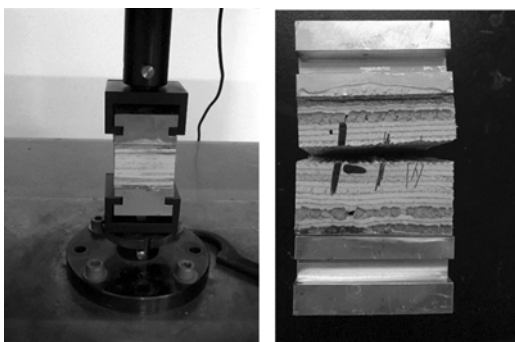


图 4 竹木复合层积材内结合强度测试

Figure 4 Bonding strength test of bamboo-poplar LV

分析水煮后 2 种复合层积材的力学性能可以发现, 水煮前竹束杨木复合层积材的水平剪切性能好, 但水煮后竹席杨木复合层积材的水平剪切性能好, 联系竹束复合单板的吸水厚度膨胀率大于竹席复合

单板, 说明经疏解后的竹束内部纤维空隙多更容易吸水导致胶合性能下降。

2.5 内结合强度

为进一步研究竹木复合层积材的胶合性能, 本研究参考《单板层积材》国家标准 GB/T 20241-2006^[14]和《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》GB/T 17657-2013 中内结合强度的测试方法分别测试 2 种竹木复合层积材的气干和 2 h 水煮后试样的内结合强度(测试如图 4 所示), 测试时记录最大拉力以及出现破坏时破坏胶层的位置, 测试结果如表 4 所示。

从测试结果中可以看出, 2 种竹木复合层积材中, 竹束复合层积材胶层的气干抗拉强度更大, 平均比竹席杨木复合层积材的内结合强度大 28.54%, 其破坏多出现在杨木单板间的胶层。而竹席复合层

积材的胶层破坏多出现在竹木复合胶层。说明竹束和杨木间的胶合性能比较好,胶层受拉时杨木单板间的胶层容易出现破坏。竹席复合层积材由于竹片竹纵横交错的导致竹片间的胶合性能以及竹片和杨

木单板间的胶合性能差。因此,为增强层积材的胶合性能组坯时最好全部采用顺纹方式组坯,减小竹木因纵横胶合导致的胶合性能不良。

表 4 竹木复合层积材内结合强度测试结果
Table 4 The bonding strength of bamboo-poplar LVL

样品 Sample	内结合强度/MPa Bond strength	胶层破坏数量 Number of the glue line failure location			数量 Number of samples	
		杨木间 Between poplar veneers	竹杨间 Between bamboo and poplar	竹层内部 In tra-bamboo veneer		
		竹束杨木单板复合 Bamboo bundle and poplar veneer composite board	I	2.05±0.19		5
竹席杨木单板复合 Bamboo mat and poplar veneer composite board	I	1.61±0.14	1	4	1	6
	II	0.88±0.12	0	4	2	6

I.气干 Air-dry; II.水煮 Boiling water dipping.

水煮后试样胶层破坏和气干状态不一样,对于竹束复合层积材来说,出现竹束内部的破坏,而竹席杨木复合层积材的破坏更多还在竹木单板间胶层。由此可见,水煮对于竹束内部的胶合性能的影响更加明显,导致竹束杨木复合层积材的水煮后内结合度比竹席更差。原因还是竹束碾压过程导致竹子内部纤维互相分离,导致水分容易进入竹束的内部,导致胶合性能变差。由于竹席是由竹片编成的,竹片间的纵横交错导致竹片间和杨木单板间的胶合性能不良。

3 结论

在实验室制备竹束杨木和竹席杨木 2 种竹木复合层积材,2 种竹木复合层积材都具有较高的静曲强度,与杨木单板层积材相比其平行加载静曲强度分别提高了 50%、17%,垂直加载静曲强度分别提高了 36%、19%,其弯曲强度大大超过杨木单板层积材。

竹束复合能够增大杨木单板层积材的弯曲弹性模量,但竹席复合后杨木单板层积材的弹性模量变化不明显。

气干状态下竹束杨木复合单板层积材的各项性能大于竹席复合层积材,但耐水性竹席复合层积材好于竹束复合层积材,水煮处理后竹席复合层积材的垂直加载剪切强度和胶层内接合强度大于竹束复合层积材。

竹木复合层积材的竹木间胶层胶合性能稍低于杨木单板间胶层胶合性能。

参考文献:

- [1] 李继业, 初艳鲲, 法炜, 等. 建筑材料质量要求简明手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 490-491.
- [2] 刘一星, 王逢瑚. 木质建材手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 339-340.
- [3] 王卫东, 王志强, 路孝君, 等. 金属网增强型杨木单板层积材的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2003, 27(6): 9-10.
- [4] 张宏健, 费本华. 木结构建筑材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2001.
- [5] 肖岩, 单波. 现代竹结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013: 23-24.
- [6] 张叶田, 岳慧. 竹材人造板——一种理想的工程结构材料[J]. 建筑知识, 2004(3): 17-18.
- [7] 李坚, 吴玉章, 马岩, 等. 功能性木材[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 361.
- [8] 张心安, 朱一辛. 单板层积材的研究与发展现状[J]. 中国林业产业, 2005(4): 26-28.
- [9] 张心安, 朱一辛, 程丽美, 等. 竹材增强单板层积材的动态与静态弯曲性能[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2006, 30(1): 69-71.
- [10] 朱一辛. 竹木复合脚手板的研制与开发[J]. 林产工业, 2006, 33(5): 42-45.
- [11] 王长钟. 碳纤维布增强杨木 LVL 梁结构构件技术研究[D]. 南京: 东南大学, 2010.
- [12] 赵俊石. 玻璃纤维增强杨木单板复合层板结构与工艺研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- [13] 蒋身学, 朱一辛, 张齐生. 竹木复合层积材结构及其性能[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, 26(6): 10-12.
- [14] 国家林业局. 单板层积材:GB/T 20241-2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [15] 国家林业局. 人造板及饰面人造板理化性能试验方法:GB/T 17657-2013 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.