

增强型单板层积材研究进展

饶鑫¹, 杨静¹, 卫佩行^{1,2*}, 周定国²

(1. 江苏农林职业技术学院 风景园林系, 江苏 句容 212400; 2. 南京林业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:用人工林木材制造增强型单板层积材替代优质木材,具有良好的应用前景。分别从制造工艺、单板性能、增强方式等方面对国内外增强型单板层积材的研究进展进行了综述。结果表明,制造工艺朝着自动化、连续化方向发展;单板性能与产品性能息息相关;增强方式有单板改性增强、树脂浸渍单板增强、竹材增强、不同树种组合增强、纤维复合材料增强。并针对我国现状,提出若干建议。

关键词:单板层积材;增强技术;研究进展

中图分类号:TS653.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2015)01-0222-05

Progress on Reinforced Laminated Veneer Lumber

RAO Xin¹, YANG Jing¹, WEI Pei-xing^{1,2*}, ZHOU Ding-guo²

(1. Department of Landscape Architecture, Jiangsu Polytechnic College of Agriculture and Forestry, Jurong, Jiangsu 212400, China;
2. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: The increasing shortage of forest resources results in the lack of wood supply in China. Thus, reinforced laminated veneer lumber (LVL) made from fast-growing wood, in place of natural wood, has broad application prospects. In this paper, the manufacturing, veneer properties, and techniques of reinforced LVL were reviewed. It was concluded that the manufacture of LVL is developing towards continuum and automatization. The properties of LVL are closely related to the mechanical performance of the final products. The techniques of making LVL include veneer modification, resin impregnation, bamboo reinforcement and fiber reinforcement. Finally some suggestions were proposed.

Key words: laminated veneer lumber (LVL); reinforced technique; progress

随着经济发展,木材供需矛盾日益突出。虽然我国天然林资源匮乏,但人工林面积居世界首位。充分利用人工林,增加其附加值是解决木材供需矛盾的途径之一。

单板层积材(LVL),是数层至数十层单板按木材顺纹方向(也可加入若干横纹单板)平行组坯压制成板^[1]。它不仅保留了木材理想的天然特性,而且缺陷分散,力学性能优于实木,是实木的理想替代产品^[2]。单板层积材按其用途可分为非结构用和结构用2种。非结构用单板层积材主要用于家具制造。结构用单板层积材又分为小规格结构材和大规格结

构材,小规格材主要用作门窗框架、楼梯等建筑部件;大规格结构材可广泛用于建筑或包装承重构件。

由于单板层积材的性能优良,可提高木制品的承载能力,因此可以替代实木在家具制造、机电包装行业及建筑中应用^[2-3]。目前,我国单板层积材原料来源为人工林木材,因而力学性能较差,既制约了单板层积材的使用,又造成了大量浪费。

如何提高速生林木材制造的单板层积材性能,是实现节材代木、小材大用的现实选择。笔者对国内外增强型单板层积材的研究进行了总结,以期为后续研究提供参考。

收稿日期:2014-03-15 修回日期:2014-05-12
基金项目:江苏农林职业技术学院科技项目(2013kj001);国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAD24B010205)。
作者简介:饶鑫,男,讲师,硕士,研究方向:家具设计与制造。E-mail:raoxin_1983@163.com
*通信作者:卫佩行,男,讲师,博士,研究方向:木材科学与技术。E-mail:wayne0448123@163.com

1 单板层积材增强技术的研究

1.1 单板改性增强单板层积材的研究

单板改性能明显改善单板性能,从而提高单板层积材的性能。顾东兰^[4]等对杨木单板冷冻预处理,制得的 LVL 的吸水厚度膨胀率降低,而保持原有的力学性能不降低。朱一辛^[5]等对单板进行湿热处理,结果发现湿热处理可以提高单板密度,降低吸水厚度膨胀率,另外减小板材断面密度变异性,提高静曲强度有和水平剪切强度。Inoue M^[6]等, Yi X^[7]等在密闭系统中压缩层积材或湿单板,使之获得更高的尺寸稳定性。Kamke A^[8]也提出在密闭环境中高温饱和蒸汽软化和横向压缩来增强层状木质复合材料的力学性能。李文定^[9]等对杨木单板进行先压缩,赋予单板一定量的压缩率,以减小空隙率,并利用木材的弹性恢复形成泵吸效应,促进胶液的渗透。陈琛^[10]等研究了含水率,压力,温度等因素对木质单板压缩效果的影响,得到了回弹率最小的压缩单板。宋明鑫^[11]等综合研究了单板压缩率与密度、热压因素和单板初始含水率之间的关系,建立了单板压缩模型。Wang B J^[12]在研究中发现,单板层积材压缩率越大,其力学性能越高。但是压缩率过大,会导致单板细胞壁压溃,其力学性能下降^[13]。许斌^[14]等通过对不同厚度的杨木单板进行热压处理,发现单板压缩率(密度)与弹性模量和静曲强度有明显的正相关关系。刘红玲^[15]等在其文章中完整总结了密闭环境下的高温饱和蒸汽软化和横向压缩处理低密度速生材单板的改性技术。

1.2 树脂浸渍单板增强单板层积材的研究

低分子量树脂浸渍单板可以有效增加单板层积材的物理力学性能^[16],但是通过硼酸等浸渍,则会降低木材的力学性能^[17-18]。通过树脂浸渍,单板层积材耐久性提高,可在室外使用^[19]。

早在 1958 年, Lloyd R A 和 Stamm A J^[19]利用水溶性酚醛树脂浸渍单板,经过干燥、压缩后,其耐候性能得到明显提高。徐咏兰^[20]等用浸胶单板制造单板层积材,单板层积材的力学性能(静曲强度、弹性模量、剪切强度)有明显改善。Colakoglu G^[21]等用硼酸浸泡山毛榉单板,制成单板层积材,发现顺纹压缩强度、布氏硬度和握钉力增加。Chui Y H^[22]等设计了两种单板层积材,一种全部来自水溶性酚醛树脂浸泡过的单板,另一种仅有外层单板经过浸泡。结果发现两种单板层积材的力学性能和尺寸稳定性都有所提高。张占宽^[23]等采用对杨木单板进行 PF 浸渍的处理方式,测试发现 MOE(弹性模量)

和 MOR(静曲强度)显著提高。Wang B J^[24-25]等进一步研究单板浸渍技术,采用特制低分子量浸渍木材单板可部分浸渍到木材细胞壁而无需真空负压,制得的单板层积材性能优越。刘焕荣^[26]等采用低分子量酚醛树脂浸渍处理杨木单板制备单板层积材,探讨了常压和加压对单板树脂浸渍量和 LVL 性能的影响。结果表明:加压可促进浸渍量的增加,浸渍量增大, LVL 性能提高。H'ng P^[27]等用脲醛树脂浸渍油棕榈树干,将其作为 3 层板的芯层,板材静曲强度和剪切强度增加,但是弹性模量下降。

1.3 竹材增强单板层积材的研究

竹材生长迅速,且具有刚度好、强度大等优点,是一种良好的工程材料。竹木复合材是用竹帘或薄竹片和木材单板以一定的方式组坯后热压得到的新型复合材料。合理的组坯方式可以使竹木复合材拥有高密度、高耐磨和高机械性能的优良品质^[28-29]。

早在 1993 年,印度林业研究所的 Jain A D^[30]等研究了竹木复合板的抗弯性能及吸音性能,其组坯结构是以胶合板为面层,竹材为芯层。测试结果表明:此结构竹木复合板具有质轻高强并具有优良的吸音性能。根据材料力学理论,梁在受弯破坏时,强度由面层决定,所以,蒋身学^[31]等以高密度竹帘胶合板为强化面层,马尾松板材为芯层,采用特殊的二次热压生产工艺,研制出高强度竹木复合层积材。朱一辛^[32]等在杨木单板层积材中加入竹材作为增强材料,明显改善了杨木单板层积材的冲击韧性。

竹材和木单板组坯结构对竹木复合材力学性能影响较大。对此,刘焕荣^[33]等采用 8 种不同组坯方式对竹木复合单板层积材进行了研究,结果表明:竹帘位置愈靠近表层竹木复合强化单板层积材力学强度愈大;随着竹帘层数增多,产品密度增大,而 MOE、MOR 和 TS 有所下降。张心安^[34]以竹帘为增强材料,分别在杨木单板层积材的上下次表层和中间层加入竹帘,结果表明竹材对次表层加入竹帘的单板层积材静曲强度、冲击韧性的贡献率大于中间层加入竹帘的单板层积材。

王小青^[35]等对杨木单板和竹帘进行 PF 浸渍处理,制备竹木复合 LVL,测试结果表明:其竹木复合 LVL 的弹性模量和静曲强度均有大幅提高。

1.4 不同树种组合增强单板层积材的研究

众所周知,不同树种木材具有不同的力学性能,合理组合将产生良好的增强效果。Wang X P^[36]等指出低等级杨木旋切单板可以生产高性能的单板层积材产品,其主要途径就是加入高等级树种木材,其思路可用图 1 表示。

通常,低等级木材一般配置在板坯芯层,而高等级木配置在表层。Krestschmann D E^[37] 等和 Wang X P^[36] 等在研究报告中提到,将高等级木材单板加入低等级单板层积材可以显著提高制品的刚度和强度。H'ng P S^[38] 等设计了低等级木材 (*Pulai, Sendok, KekabuHutan*) 单板和高等级木材 (*Keruing*) 单板的多种组坯方案,结果发现在 11 层单板层积材中,随着表层高等级木材单板数量增加,MOR 和 MOE 增加。Ding W E^[39] 等研究了用 *Acacia magnium* 木材单板增强 *Rubberwood* 单板层积材,发现混合树种制造的单板层积材吸水率下降 40%~58%,吸水厚度膨胀率下降 19%~35%,同时 MOE 和 MOR 均有显著改善。

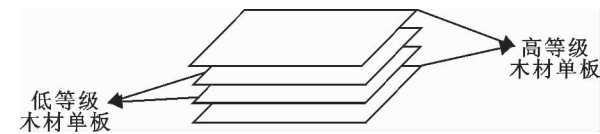


图 1 不同树种组合增强单板层积材

Fig. 1 Modified laminated veneer lumber with different wood species

1.5 纤维复合材料增强单板层积材的研究

目前使用纤维复合材料(FRP)增强木质材料在国内外的研究主要集中在胶合木梁,或实木梁,其目的是提高木梁的抗剪或抗弯性能^[40]。

2000 年以前,很少有玻璃纤维复合材料(GFRP)增强单板层积材或胶合板的报道。1996 年,王国超^[41]采用 GFRP 增强杨木水泥模板,增强后模板耐腐蚀性提高,脱模难问题得以改善,模板使用次数显著增加。

进入新世纪后,玻璃纤维制造成本的下降,为其扩大应用范围提供了机遇,相关研究逐渐增多。魏延霞^[42]在其硕士论文中,对 GFRP 增强圆筒形单板层积材的性能进行了研究,发现随着 GFRP 添加层数的增多,24 h 吸水厚度膨胀率、吸水率明显呈下降趋势;此外,随着 GFRP 层数的增加,层积材的抗弯强度总体上呈增大趋势。贺微粒^[43]等采用浸胶玻璃纤维布增强杨木胶合板,胶合板横向静曲强度提高最大,次之为横向弹性模量,然后为纵向静曲强度,最后为纵向弹性模量。程丽美^[44]等尝试用 GFRP 改善杨木单板层积材弯曲性能。结果表明:玻璃纤维可以提高杨木单板层积材的纵横向静曲强度和弹性模量,尤其是横向力学性能的增强幅度更大。梅长彤、周定国^[45]以 GFRP 为增强材料,酚醛树脂为胶黏剂,研究了浸胶玻璃纤维布的配置层数和放置位置对杨木混凝土模板用胶合板静曲强度和

弹性模量的影响,结果表明:将玻璃纤维布靠近表层配置可以更好地发挥增强效果。

近年来,GFRP 增强单板层积材或胶合板成为研究热点。陈小辉^[46]、徐正东^[47]、赵俊石^[48]、张真真^[49]分别在其学位论文中从不同角度研究了 GFRP 增强单板层积材工艺及增强机理,并研究了胶合界面,得出了许多有价值的结论。如经过偶联剂处理的单板表面润湿性改善;经过偶联剂处理的 GFRP 的添加可以大幅提高复合板的力学强度,且 GFRP 的添加对 MOR 的增强效果优于 MOE;玻璃纤维布越靠近表层,增强作用越大,且 GFRP 靠近表层对 MOR 的增强效果优于 MOE 等。

比起 GFRP,碳纤维复合材料(CFRP)性能更加优越,但价格更高。目前,CFRP 增强单板层积材的研究鲜见报道。李世宏^[50]等采用碳纤维布对杨木 LVL 梁、柱进行增强,试验结果表明碳纤维布增强杨木 LVL 梁、柱的承载力明显提高,而其他受力性能也得到显著改善。Wei P X^[51]等将碳纤维配置在单板层积材中不同部位,测试其力学性能发现,单板层积材弹性模量和弯曲强度有很大提高。可以预见,伴随着碳纤维制造成本的降低,必然赢得木材工程领域研究人员的青睐。

2 结论

我国的森林现状决定了优质木材供应的短缺,因此寻求提高速生人工林木材的高附加值利用是现实选择。然而,人工林木材生长周期短,缺陷难以克服,即使制造单板层积材也仅多局限于非结构承重场合使用,极大地限制了单板层积材的使用范围。本文对国内外增强型单板层积材研究进展进行了总结,并提出一些建议。

- 1)我国人工林木材材质差,制造的单板层积材仍然难以满足构件承载要求,必须进行增强处理,目前单板层积材的增强方式主要有单板改性增强、树脂浸渍增强、竹材增强、不同树种组合增强、纤维复合材料增强等。
- 2)这几种增强方式各有优点,亦有缺点。在实际生产过程中,应综合考虑生产工艺、成本、增强效果及使用场合,以实现较高的性价比。
- 3)单板层积材的刚度是整体性能,强度是局部性能,因此增强方式的选择应考虑两者之间的平衡。
- 4)结构用单板层积材要满足承载,需要较厚的板材厚度,这对于常规接触式热压方式是一个挑战,因此很有必要探索一种快速热压方式,缩短热压周期,例如高频热压等。

参考文献:

[1] 谭守侠,周定国. 木材工业手册[M]. 北京:中国林业出版社, 2007.

[2] 孙静,吴智慧,黄秋陆,等. 层积材家具造型设计初探[J]. 西北林学院学报,2012,27(1):251-254.

SUN J, WU Z H, HUANG Q L, *et al.* Modeling design of laminated veneer lumber furniture [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(1): 251-254. (in Chinese)

[3] 卢杰. 家具产业集群竞争力比较研究[D]. 南昌,南昌大学, 2009.

[4] 顾东兰,张毕蒙,朱一辛. 单板冷冻预处理对杨木 LVL 性能的影响[J]. 林业科技开发,2007,21(1):56-58.

GU D L, ZHANG B M, ZHU Y X. The influence of pre-freezing of veneer on properties of poplar LVL [J]. China Forestry Science and Technology, 2007, 21(1): 56-58. (in Chinese)

[5] 朱一辛,关明杰,李燕文,等. 杨木单板的湿热处理对单板层积材性能的影响[J]. 林业科技,2008, 33(1):40-43.

[6] INOUE M, KAWAIS, WALINDER M, *et al.* Dimensional stabilization of compressed laminated veneer lumber by hot pressing in an airtight frame [J]. Wood Material Science and Engineering, 2008(3/4): 119-125.

[7] YI X, KINOSHITA N, YOSHINOBU M, *et al.* Sugi rotary veneers compressed by hygro-thermal treatment with an airtight device using moisture in the veneers [J]. Materials Science, 2004, 53(6): 686-691.

[8] KAMKE F A. Densified radiate pine for structural composites [J]. Maderas: Cienc. Tecnol., 2006, 8(2): 83-92.

[9] 李文定,张洋,阮重坚,等. 杨木单板的压缩与树脂浸渍处理对胶合板性能的影响[J]. 林产工业,2010,37(6):10-13.

LI W D, ZHANG Y, RUAN C J, *et al.* Influence of poplar veneer compression and impregnation on properties of poplar plywood [J]. China Forest Products Industry, 2010, 37(6): 10-13. (in Chinese)

[10] 陈琛,范祥林,邓玉和,等. 密实化杨木单板的研究[J]. 浙江农林大学学报, 2013,30(4):536-542.

CHEN C, FAN X L, DENG Y H, *et al.* Densification of poplar veneer [J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2013, 30(4): 536-542. (In Chinese)

[11] 宋明鑫,王石建,高婧,等. 单板热压后密度模型研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2012, 36(4):112-114.

SONG M X, WANG S J, GAO J. Research on the density model of the pressed veneer [J]. Journal of Nanjing Forestry University:Natural Science Edition, 2012, 36(4): 112-114. (in Chinese)

[12] WANG B J, DAI C. Hot-pressing stress graded aspen veneer for laminated veneer lumber (LVL) [J]. Holzforchung, 2005, 59(1): 10-17.

[13] 卢晓宁,陈宇聪,陈颖. 速生杨木单板顺纹弹性模量预测模型[J]. 南京林业大学学报,2002,26(3):9-13.

LU X N, CHEN X C, CHEN Y. The prediction of elastic modulus along the grain of poplar veneer [J]. Journal of Nanjing Forestry University, 2002, 26(3): 9-13. (in Chinese)

[14] 许斌,张齐生,蒋身学,等. 改性单板力学性能研究[J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2010,34(4):37-41.

XU B, ZHANG Q S, JIANG S X, *et al.* Study on mechanical properties of modified veneer [J]. Journal of Nanjing Forestry University :Natural Science Edition, 2010, 34(4): 37-41. (in Chinese)

[15] 刘红玲,郭康权,FREDERICK A,等. 一种新型速生材单板改性技术——密闭环境下的高温饱和蒸汽软化和横向压缩处理[J]. 林业科学,2014,50(1): 149-155.

LIU H L, GUO K Q, KAMKE F A, *et al.* A novel modification technology of fast-growing wood veneers: softening at high temperature with saturated steam and transverse compression in a sealed environment [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(1): 149-155. (in Chinese)

[16] KAMKE F A, LEE J N. Adhesive penetration in wood—a review [J]. Wood Fiber Sci., 2007 39(2): 205-220.

[17] SIMSEK H, BAYSAL E, YILMAZ M, *et al.* Some mechanical properties of wood impregnated with environmentally-friendly boron and copper based chemicals [J]. Wood Research, 2013,58(3): 495-504.

[18] 卫佩行,黄思维,周定国. 马尾松单板脱脂处理前后性能的变化[J]. 西南林业大学学报,2012,32(4):86-89.

WEI P X, HUANG S W, ZHOU D G. Study on property change of *Pinus massoniana* veneer before and after degreasing treatment [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2012, 32(4): 86-89. (in Chinese)

[19] LLOYD R A, STAMM A J. Effect of resin treatment and compression upon the weathering properties of veneer laminates [J]. Forest Product. J., 1985, 8 (8): 230-235.

[20] 徐咏兰,华毓坤. 不同结构杨木单板层积材的蠕变和抗弯性能[J]. 木材工业,2002,16(6):10-12.

XU Y L, HUA Y K. Creep behavior and bending properties of poplar LVL in different assembly types [J]. China Wood Industry, 2002, 16(6): 10-12. (in Chinese)

[21] COLAKOGLU G, SEMRA C, AYDIN I, *et al.* Effect of boric acid treatment on mechanical properties of laminated beech veneer lumber [J]. Silva Fennica, 2003, 37(4): 505-510.

[22] CHUI Y H, SCHNEIDER M H, ZHANG H J. Effects of resin impregnation and process parameters on some of poplar LVL[J]. Forest Product. J., 1994, 44(7): 74-78.

[23] 张占宽,刘君良. 密实型杨木强化单板层积材的制造工艺及应用前景分析[J]. 林业机械与木工设备,2005,33(7):15-17.

ZHANG Z K, LIU J L. A study on the manufacturing technology of poplar compressed strengthened LVL and the analysis of its application prospect [J]. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2005, 33(7): 15-17. (in Chinese)

[24] WANG B J, CHUI Y. Performanceevaluation of PF resin impregnated veneer and LVL[J]. Wood Fiber Sci., 2012, 44 (1):1-9.

[25] WANG B J, CHUI Y. Manufacturing of LVL using cost-effective resin impregnation and lay up technologies[J]. Wood Scienceand Technology, 2012,46(6):1043-1059.

[26] 刘焕荣,刘君良,柴宇博. 树脂浸渍量对杨木单板层积材性能的影响[J]. 木材工业,2007,21(3):11-13.

LIU H R, LIU J L, CHAI Y B. Effect of the amount of resin

impregnation of the properties of poplar LVL [J]. China Wood Industry, 2007, 21(3): 11-13. (in Chinese)

[27] H’NG P, CHAI K, CHIN P, *et al.* Urea formaldehyde impregnated oil palm trunk as the core layer for three-layered board [J]. Materials and Design, 2013, 50: 457-462.

[28] 吴盛富. 浅析单板层积材在我国的应用和发展[J]. 人造板通讯, 2003, 10(2): 6-9.

[29] 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.

[30] JAIN J D, SANYAL S N, DANGWAL M N. A note on sandwich constructions from forest based materials [J]. Journal of the Indian Academy of Wood Science, 1993, 24(1): 25-30.

[31] 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.

JIANG S X, ZHU Y X, ZHANG Q S. The structure and properties of laminated bamboo-wood composite lumber [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2002, 26(6): 10-12. (in Chinese)

[32] 朱一辛, 关明杰, 张晓冬. 竹材增强杨木单板层积材冲击性能的研究[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 99-102.

ZHU Y X, GUAN M J, ZHANG X D. Studies on impact performance of bamboo strengthened laminated veneer lumber of poplar [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2005, 29(6): 99-102. (in Chinese)

[33] 刘焕荣. 浸渍法生产竹木复合强化单板层积材工艺研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2007.

[34] 张心安. 湿热条件下竹材增强单板层积材力学性能的研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.

[35] 王小青, 刘君良, 张双保, 等. 竹木复合单板层积材制备工艺[J]. 木材工业, 2005, 19(5): 7-9.

WANG X Q, LIU J L, ZHANG S B, *et al.* Processing technology of strengthened bamboo/wood composite LVL [J]. China Wood Industry, 2005, 19(5): 7-9. (in Chinese)

[36] WANG X P, ROSS R J, BRASHAW B K, *et al.* Flexural properties of laminated veneer lumber manufactured from ultrasonically rated red maple veneer: a pilot study[R]. Res Pap. FPL-RN-0288. Madison, W I. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2003: 5.

[37] KRETSCHMANN D E, MOODY RC, PELLERIN RF, *et al.* Effect of Various Proportions of Juvenile Wood on Laminated Veneer Lumber[R]. Res Pap. FPL-RN-521. Madison, W I. U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1993: 30.

[38] H’NG P S, PARIDAH M T, CHIN K L. Bending properties of laminated veneer lumber produced from *Keruing* (*Dipterocarpus* sp.) reinforced with low density wood species [J]. Asian Journal of Scientific Research, 2010, 3(2): 118-125.

[39] DING W E, ABDUL-KADER R, KAWAI S. Properties of rubberwood LVL reinforced with Acacia veneers [J]. Wood Research, 1996, 83: 8-16.

[40] 沙洲, 朱晓冬. FRP 材料增强木结构研究综述[J]. 森林工程, 2012, 28(3): 57-60.

SHA Z, ZHU X D. Literature review of the research on wood structure strengthened by FRP [J]. Forest Engineering, 2012, 28(3): 57-60. (in Chinese)

[41] 王国超. 玻璃纤维增强水泥模板的研究[J]. 林产工业, 1996, 23(3): 5-7.

[42] 魏延霞. 玻璃纤维增强圆筒形单板层积材的性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2005.

[43] 贺微粒, 焦健, 彭立民, 等. 玻璃纤维布强化杨木胶合板模板研究[J]. 木材工业, 2007, 2: 13-15.

HE W L, JIAO J, PENG L M, *et al.* A study on glass-fiber cloth reinforced poplar plywood for concrete forms [J]. China Wood Industry, 2007, 2: 13-15. (in Chinese)

[44] 程丽美, 黄慧, 朱一辛. 玻璃纤维增强杨木单板层积材弯曲性能的初步研究[J]. 江西林业科技, 2008(6): 54-62.

CHENG L M, HUANG H, ZHU Y X. Study on bending of poplar LVL enhanced with glass mat [J]. Jiangxi Forestry Science and Technology, 2008(6): 54-62. (in Chinese)

[45] 梅长彤, 周定国. 玻璃纤维增强杨木混凝土模板用胶合板研究[J]. 林业科技开发, 2009, 23(6): 79-82.

MEI C T, ZHOU D G. Study on glass fiber reinforced poplar plywood used for concrete form [J]. China Forestry Science and Technology, 2009, 23(6): 79-82. (in Chinese)

[46] 陈小辉. 玻璃纤维增强竹材胶合板的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.

[47] 徐正东. 玻璃纤维增强杨木工程材料复合层板工艺研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012.

[48] 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.

[49] 张真真. 玻璃纤维增强树脂/木质复合材料界面胶合性能[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.

[50] 李世宏, 徐永红, 李宝华. 碳纤维布增强杨木 LVL 梁、柱试验研究[J]. 江苏建筑, 2007(6): 13-17.

LI S H, XU Y H, LI B H. Experimental study on poplar LVL beam and column reinforced with CFRP sheets [J]. Jiangsu Construction, 2007(6): 13-17. (in Chinese)

[51] WEI P X, WANG B J, ZHOU D G, *et al.* Mechanical properties of polar laminated veneer lumber modified by carbon fiber reinforced polymer [J]. BioResources, 2013, 8(4): 4883-4898.