

研究与开发

结构用竹集成材物理力学性能研究

江泽慧¹, 常亮², 王正², 高黎²

(1. 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 2. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 测定结构用竹集成材及其竹指接集成材的主要物理力学性能, 并将测试结果与几种人工林单板层积材以及常见建筑用材种的相关性能进行比较。结果表明: 竹集成材的水平剪切强度、静曲强度以及弹性模量等力学性能非常优越, 浸渍剥离性能较差。

关键词: 竹集成材; 竹层积材; 单板层积材; 建筑结构材

中图分类号: TS653, S795 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2005)04-0022-03

Physical and Mechanical Properties of Glued Structural Laminated Bamboo

JIANG Ze-hui¹, CHANG Liang², WANG Zheng², GAO Li²

(1. International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China;

2. Chinese Academy of Forestry, Research Institute of Wood Industry, Beijing 100091, China)

Abstract: The physical and mechanical properties of structural glued laminated bamboo were studied and compared with LVL made from several kinds of plantation wood, as well as common structural solid wood. The result showed that the glued laminated bamboo exhibited excellent properties on horizontal shear strength, MOR and MOE, but the poor performance in an aging test.

Key words: glued laminated bamboo; laminated bamboo; laminated veneer lumber (LVL); structural lumber

竹材具有生长快, 成材早, 产量高等特点, 是我国重要的可再生资源之一。与木材相比, 竹材强度高, 弹性好, 硬度大, 近年来成为材料科学研究的新热点。但目前, 竹材主要用于家具和地板生产, 用于建筑等结构用材的开发还是处于起步阶段。要实现竹材作为建筑材料, 必须克服原竹径小、材性变异大, 以及提高防虫、防霉能力。目前较为先进的建筑竹材利用技术就是竹材重组技术, 利用该技术可以将原竹重组各种高强度板方材和型材, 用于高档房屋的建造, 提高产品的附加值^[1]。

笔者通过对结构用建筑竹集成材的物理力学性能的初步研究, 为其在建筑领域的应用提供力学指标参考。

1 材料和方法

1.1 材料

1) 竹集成材 为竹层积材集成制备, 由浙江新昌福大竹木有限公司提供。材种为毛竹 (*Phyllostachys heterocycla*), 试件规格 2 000 mm × 40 mm × 40 mm, 其中一半试件经过指接。竹层积材制备工艺如下^[2]:

原竹横截→开片→破篾→剔除竹青、竹篾→编帘→陈化→干燥→浸胶→烘干→顺纹组坯→热压

按上述工艺, 将原竹截成 2 550 mm 长的竹筒, 再剖成 25~30 mm 宽, 1.0~1.2 mm 厚的竹篾。将竹篾紧密编成顺向竹帘, 宽度一般为 1.3 m。竹帘的含水率干燥至 12% 左右, 浸渍酚醛胶, 浸胶量一般为 200 g/m² 左右。组坯层数根据层积材的密度、厚度、压缩比以及竹帘厚度确定。热压工艺参数: 热压温度 140 ℃, 热压时间 1.5 min/mm, 热压压力 3.5 MPa。酚醛胶由该企业自制, 固体含量 ≥ 40%, 黏度为 90 s (涂-4 杯, 20℃; 以下均为同条件测量)。

收稿日期: 2004-12-17; 修改稿: 2005-02-25

基金项目: 林业科技推广项目“竹材高效综合利用技术推广与示范”; 国家十五攻关项目(2001BA506B0203)。

作者简介: 江泽慧(1938—), 女, 国际竹藤网络中心董事会主席、教授。通讯作者: 常亮(1980—), 男, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

竹层积材经过裁边和砂光,将 2 块层积材上下冷压胶合,得到本试验用的竹集成材。竹集成材的冷压压力为 1.5 MPa,加压时间约 4 h。采用间苯二酚树脂胶,固体含量 $\geq 50\%$,黏度约为 93 s。涂胶量 180 g/m²(单面),涂胶后需要闭合陈化约 20 min。

2)竹指接集成材 接长采用指接,指榫长 31.5 mm,斜度 1:9。采用间苯二酚树脂胶,指接压力 5~8 MPa,常温下加压 40 min 左右,指接后养护 48 h。竹层积材指接后拼压成竹指接集成材,工艺同上,拼压时应注意错开指接位置。

1.2 试验方法

目前国内尚无测定竹集成材力学性能的相关标准,因此借鉴国外标准。并与几种人工林单板层积材及常见建筑用木材的物理力学性质进行比较,以对竹集成材作出具体的评价。

1)含水率测定 采用 JAS SE-9 标准^[3],试件尺寸为 100 mm×40 mm×40 mm,6 个试件,窑干称重法。

2)水平剪切强度 采用 JAS-11 标准^[4],试件尺寸为 240 mm×40 mm×40 mm,共 8 个。其中 4 个试件做平行方向测试,另外 4 个做垂直方向测试。试件跨距为 160 mm,以 5 mm/min 的匀速对试件加荷,直至破坏。

3)老化试验

① JAS SE-9 水煮剥离试验。试件尺寸为 75 mm×40 mm×40 mm,3 个试件。以水煮 4 h,再放入室温(约 20℃)水中浸泡 1 h,然后在(70±3)℃温度下干燥 24 h 为一个循环。循环 3 次,循环后测试其剥离率。剥离率=(4 个侧面剥离的长度之和/4 个侧面胶合层的长度的和)×100%。

② ASTM D3434-00 测试^[5]。试件尺寸为 240 mm×40 mm×40 mm,8 个试件。将湿试件在室温(23±2)℃中晾置 4 min,再放入(102±3)℃温度下干燥 57 min,然后放入沸水中煮 10 min,为一个循环。循环 20 次,测其剥离率和剪切强度。ASTM 试验包括 2 组对比试验,一是比较 ASTM 老化试验前后,试件的剪切强度和剥离率;二是将试件放入(23±2)℃水中浸泡 3 d 后,比较浸泡前后的水平剪切强度和剥离率。

③竹指接集成材老化试验,采用 JAS SE-13 中循环水煮^[6]。试件尺寸为 180 mm×40 mm×40 mm,共 6 个。将试件水煮 5 h,再放入室温(约 20℃)的水中浸泡 1 h,然后放入(60±3)℃温度下干燥 18 h,为一个循环。循环 3 次,直至含水率低于 19%

后测剥离率和剪切强度。

4)弹性模量和静曲强度 采用 JAS-11 标准,试件尺寸为 920 mm×40 mm×40 mm。竹集成材为 8 个试件,竹指接集成材为 5 个试件。在力学试验机上采用双加荷头,加载速度为 5 mm/min,跨距为 840 mm。利用百分表测定比例域中试件变形量,计算出弹性模量,再加载至试件破坏,记录试件最大承受载荷,从而测定静曲强度。以作性能对比,2 种试材的测试条件相同。

由于竹集成材属于建筑结构材,因此,笔者还将该材料的力学性能与几种人工林 LVL 进行对比^[7],以便对竹集成材物理力学性能有较全面的评价。对照试验的 LVL 中,桉树的单板厚度为 1.6 mm,其余树种为 2.6 mm。采用辊涂方式,涂胶量根据树种的不同为 200~420 g/m²(双面),选用酚醛树脂胶,固含量 $\geq 50\%$,黏度约为 93 s。单板沿纵向顺纹斜接接长。预压压力为 0.8 MPa,时间为 30 min。热压工艺参数:温度 130℃,时间 35 min,压力 1.13 MPa。单板层积材厚度为 25 mm,含水率约为 10%。

2 结果和讨论

2.1 物理性能

经测定,竹集成材的密度为 1 g/cm³,平均含水率为 12%。

2.2 水平剪切强度试验

竹集成材与 5 种人工林单板层积材的水平剪切强度对比见表 1,几种常见建筑用树种的剪切强度见表 2。

表 1 竹集成材与人工林 LVL 的水平剪切强度对比^[7]
Tab. 1 Horizontal shear strength of glued laminated bamboo and LVL

水平剪切强度	竹集成材	桉树 LVL	马尾松 LVL	落叶松 LVL	杨木 LVL	思茅松 LVL
垂直加载/MPa	10.64	6.96	8.45	8.15	8.09	7.68
平行加载/MPa	17.21	7.28	9.72	9.07	7.33	9.62

表 2 常见建筑用材种的平均剪切强度^[8]
Tab. 2 Shear strength of common structural lumber

针叶树材	剪切强度/MPa	阔叶树材	剪切强度/MPa
杉木	4.7	水曲柳	12.5
红松	5.8	柞木	11.5

从表 1 和表 2 可看出,平行加载水平剪切强度均值为 17.21 MPa,垂直加载水平剪切强度 10.64 MPa。竹集成材的水平剪切强度都明显优于以上 5 种 LVL,并已经超过杉木和红松等针叶树材,其平行加载剪切

强度甚至超过某些硬阔叶树木材的性能指标。

2.3 老化试验

表 3 为竹集成材通过 ASTM 试验得到的结果。经 2 种不同的老化处理方式处理,使竹集成材的水平剪切强度有不同程度的下降,但仍然高于杉木和红松以及 5 种 LVL。另外,竹集成材在 JAS SE-9 老化试验中,经过 1 个循环后,剥离率就达到了 10%,并有细长贯穿剥离,未能达到 JAS 室外用结构集成材的标准。

表 3 竹集成材老化试验对比
Tab. 3 Comparison of glued laminated bamboos with different treatments in aging test

状态	水平剪切强度/MPa		剥离率/%
	垂直加载	平行加载	
未经老化	10.64	17.21	<2
浸泡 3 d	8.77	16.47	5
20 次循环	8.47	13.85	>30

表 4 为竹指接集成材按 JAS SE-9 的老化试验结果。经过一次循环后,竹指接集成材水平剪切强度

明显下降;再次循环后剪切强度几乎没有变化。竹指接竹集成材经过一个循环,剥离率已达 30%左右,远超过 JAS SE-9 标准的要求。二次循环后,剥离率仍进一步上升,但增长幅度已明显降低。虽然竹指接集成材整体剥离率远远高于标准要求,但指接处几乎没有任何剥离现象。说明间苯二酚树脂结构胶的耐候性明显优于酚醛树脂胶,在整个老化试验中基本没有出现胶缝开裂现象。

表 4 竹指接集成材老化试验对比
Tab. 4 Comparison of finger joints with different treatments in aging test

状态	垂直加载剪切强度/MPa	剥离率/%
未经循环	7.3	<2
1 次循环	6.2	30
2 次循环	6.3	41

2.4 力学性能试验

表 5 和表 6 为竹集成材、竹指接集成材的弹性模量和静曲强度;表 7 为常见建筑用材种的弹性模量和静曲强度。

表 5 竹集成材、竹指接集成材和人工林 LVL 弹性模量^[7]
Tab. 5 MOE of glued laminated bamboo, finger jointed bamboo and 5 kinds of LVL

力学性能		竹集成材	竹指接集成材	桉树 LVL	马尾松 LVL	落叶松 LVL	杨木 LVL	思茅松 LVL
垂直加载	MOE/MPa	12708	13045	18608	13625	14420	8120	14557
	MOR/MPa	123.74	55.43	126.34	93.68	86.35	65.77	90.48
平行加载	MOE/MPa	13306	12797	13043	13133	13614	6708	12335
	MOR/MPa	126.72	78.58	87.47	81.07	66.82	52.92	73.29

表 6 常见建筑用材种的弹性模量和静曲强度^[9]
Tab. 6 MOE and MOR of structural lumber

类别	产地	MOE/GPa	MOR/MPa
马尾松	江西	10.6	76.3
杉木	湖南江华	10.2	68.3
蒙古栎	长白山	15.1	124.0
麻栎	安徽肥西	17.1	130.0

从表 5 和 6 可知:竹集成材垂直加载 MOE 低于桉树 LVL,高于杨木 LVL,与另外 3 种 LVL 持平;平行加载 MOE 高于杨木 LVL,与其余 4 种 LVL 持平。竹集成材垂直加载 MOR 与桉树 LVL 持平,明显高于其余 4 种 LVL;平行加载 MOR 明显高于这 5 种 LVL。

与常见建筑用材种比较,竹集成材 MOE 数值明显大于马尾松、杉木等针叶树材,低于栎木等硬阔叶树材;MOR 数值也明显大于马尾松、杉木,但与栎木持平。

竹指接集成材垂直加载 MOE 对比竹集成材略有升高,平行方向略有降低;垂直加载和平行加载的 MOR 有大幅降低,分别下降了 55.6%和 37.8%。

竹指接集成材垂直加载 MOE 明显低于桉树单
• 24 万方数据

板层积材,高于杨木 LVL,与其余 3 种 LVL 持平;平行加载 MOE 高于杨木 LVL,与其余 4 种 LVL 持平;垂直加载 MOR 低于这 5 种 LVL;平行加载 MOR 低于桉树和马尾松,高于其余 3 种 LVL。

比较几种常见建筑用材种,竹指接集成材 MOE 高于马尾松和杉木,MOR 则略小于或与其持平。

3 结论

1)竹集成材的水平剪切强度明显优于桉树、马尾松、落叶松、杨木、思茅松等 5 种 LVL。

2)竹集成材的 MOE 和 MOR 性能非常优良,竹指接集成材 MOE 与竹集成材持平,MOR 有大幅降低。竹集成材的水平剪切强度、MOE 和 MOR 都超过常见建筑用针叶树材的相关性能,用作建筑材料具有可行性。

3)竹集成材的抗老化性能较差,水煮后剥离率较高,未达到 JAS 室外用结构集成材标准和 ASTM 标准,但在水煮后仍能保持很好的水平剪切强度。

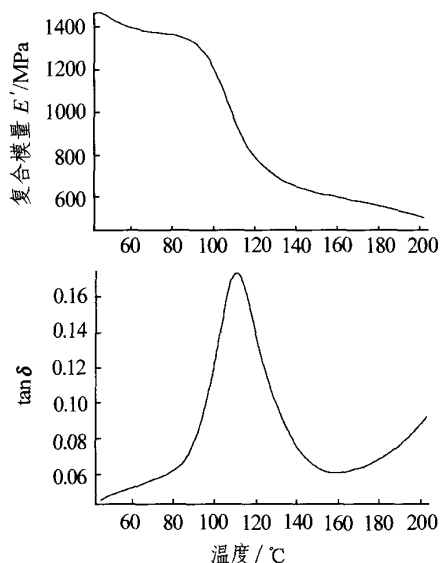


图4 木塑复合材料 E' 和 $\tan\delta$ 随温度变化的曲线

Fig. 4 Curves of storage modulus and mechanical loss factor vs. temperature for wood plastic composites

DMA, 测量储能模量及损耗模量随时间的变化, 可以反映体系黏度(模量)的变化。当发生凝胶时, 体系的 E' 及 E'' 发生突变。因此, 在对热固性胶黏剂的固化过程进行动态研究时, 可以通过测定 E'' 极大值, 来确定该温度下树脂固化的凝胶点^[7]。

2.6 研究胶黏剂固化反应产物的动态力学行为

例如, 利用 DMA 研究固化剂种类对固化产物的动态力学行为的影响。采用二异氰酸酯(TDI)和六亚甲基二异氰酸酯(HDI)作固化剂时, 聚氨酯的 T_g 分别为-5 和 35 °C, 其差别正是由于固化剂的结构不同所致。HDI 是柔性的直键结构, 形成的聚氨酯比较柔软, 所以 T_g 较低; 而 TDI 是芳香族化合物, 对

聚氨酯有补强作用, 形成的聚氨酯较硬, 所以 T_g 升高^[8]。

2.7 评估木质材料的使用性能

实验室中, 一般用动态力学实验来考察木质材料在交变应力下的行为, 试验中所施加的力和所产生的形变都是时间的正弦函数, 因而可以同时测得材料的弹性模量和力学阻尼。但随着木质材料的广泛使用, 由 DMA 直接测得的几个动态力学参数已远远不能适应发展的需要。根据 DMA 的测试结果, 建立动态力学参量与应用性能(如韧性、疲劳损伤和抗压性能等)的关系, 可望利用动态力学性能直接表征材料的使用性能, 为木质材料的广泛使用提供依据。

参考文献:

- [1] 陈文怡. 端胺基聚氨酯/环氧树脂胶黏剂的固化过程与热性能研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003; 53-56.
- [2] 谭亮红, 张友南, 周淑华, 等. 热机械法评估减震橡胶制品的耐老化性能[J]. 橡胶工业, 2002(49): 167-169.
- [3] 王山根, 何铭. 复合材料的动态力学参量和使用性能的关系[J]. 材料工程, 1996(6): 17-19.
- [4] 赵军, 白萍. 动态热机械分析法对环氧树脂固化程度的研究[J]. 中国胶粘剂, 2001, 10(3): 33-34.
- [5] Wolcott M P, Yin S Z, Rials T G. Using Dynamic Mechanical Spectroscopy to Monitor the Crystallization of PP/ MAPP Blends in the Presence of Wood [J]. Composite Interfaces, 2000, 7(1): 3-12.
- [6] 程瑞香. 切削微薄竹和旋切竹单板工艺技术研究[R]. 南京: 南京林业大学博士后科研流动站, 2002; 35-40.
- [7] 殷苏州. 三聚氰胺-尿素-甲醛树脂固化初期胶层粘度变化的热机械分析研究[J]. 木材工业, 1997, 11(3): 3-6.
- [8] 范世霞, 花荣, 韩孝族, 等. 不同异氰酸酯固化的蓖麻油/酚氧树脂聚氨酯的动态力学性能[J]. 高分子材料科学与工程, 1999, 15(4): 170-171.

(责任编辑 向 琴)

(上接第 24 页)

4) 竹指接集成材经老化试验后, 水煮剥离率较高, 但其指接处几乎无剥离。其 MOE 和 MOR 数值虽远低于竹集成材, 但 MOE 值仍高于马尾松和杉木, MOR 值略小于或与之持平。

参考文献:

- [1] 赵仁杰, 陈哲, 张建辉. 中国竹材人造板的科技创新历程与展望[J]. 人造板通讯, 2004, 11(3): 9-11.
- [2] 唐宏辉, 陈鸿斌, 王正. 结构用竹集成材制造工艺技术简介[J]. 人造板通讯, 2004, 11(9): 16-19.
- [3] JAS SE-9. Structural Glued Laminated Timber[S]. Notification NO. 992, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries dated Jul 20, 2000.

- [4] JAS SE-11. Structural Laminated Veneer Lumber[S]. Notification NO. 237, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries dated Feb 27, 2003.
- [5] ASTM D3434-00. Standard Test Method for Multiple-Cycle Accelerated Aging Test (Automatic Boil Test) for Exterior Wet Use Wood Adhesives[S]. 2000, 232.
- [6] JAS SE-13. Finger Jointed Structural Lumber for Wood Frame Platform Construction[S]. Notification NO. 590, Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries dated March 25, 1994.
- [7] 吕斌, 付跃进, 吴盛富, 等. 几种人工林树种单板层积材的生产试验及力学性能研究[J]. 林产工业, 2004, 31(3): 13-17.
- [8] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [9] 中国主要树种的木材物理力学性质. 中国林业科学研究院木材研究所材性研究室[R]. 研究报告, 森(61)56, 1963.

(责任编辑 鲍加芬)