

玄武岩纤维落叶松集成材胶合工艺

申士杰, 张鹏翼, 张莉

北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083

摘要 中国木结构建筑业的复苏面临很大的压力, 其中一个重要难题就是中国缺乏天然优质大径级木材资源。如何利用中国现有劣质材资源, 通过一定的技术手段对其进行改进是当前工作的重中之重。本文对聚氨酯胶黏剂制造落叶松集成材/玄武岩纤维增强树脂(BFRP)的胶合工艺技术进行了研究。试验采用竹材作为木材和BFRP的过渡层, 同时引入硅烷偶联剂KH550对竹材进行处理, 并在偶联剂HMR对竹材和BFRP的处理工艺上进行了进一步的完善。结果表明, 径向横拼竹板材两面材性相同, 同时成功避免竹节对胶合性能的影响, 因此径向横拼竹板材与BFRP和木材的胶合性能最佳; 硅烷偶联剂KH550对竹材处理工艺的引入, 极大地增强了竹-BFRP的胶合性能。

关键词 落叶松; BFRP; 剪切强度; 剥离率

中图分类号 TS612

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.26.010

Bonding Technology of Larch Glulam Reinforced by Basalt Fiber Reinforced Polymer

SHEN Shijie, ZHANG Pengyi, ZHANG Li

College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Wood structure is the main form of the traditional Chinese architecture. As is known, many magnificent palaces, such as temples, and kiosks, are all wood constructions, which represent the essence of ancient Chinese architecture and the wisdom of Chinese civilization. However, in modern times, the recovery of Chinese wood-frame construction industry is under a lot of pressure. A critical problem is lack of large-diameter high-grade natural wood resources, therefore, how to use existing low-quality material resources and how to find a certain technical means to enhance them are the most important tasks. The study on continuous basalt fiber reinforced structural timber has been conducted for the last several years. A large number of experiments shows that the bonding performance of wood and BFRP is poor. Because both sides of bamboo plate material is different, the bamboo plates could be used to the transition layer between wood and BFRP. The bonding technology of Chinese larch glulam/BFRP with Polyurethane adhesive is focused on. Based on the glue process of the previous studies, the treatment process that bamboo or BFRP had been treated by Silane coupling agent KH550 is added in the experiments. The results show that because of the treatment of silane coupling agent KH550, the bonding performance of bamboo-BFRP has made a great progress regardless of the delamination rate or the shear strength.

Keywords larch; BFRP; shear strength; delamination rate

0 引言

集成材(Glued Laminated Timber, Glulam), 又叫胶合木, 是一种沿板材或方材平行纤维方向, 用胶黏剂沿其长度、宽度或厚度方向胶合而成的木材制品。它是实现木材高效利用的一种有效手段, 在此基础上, 复合轻质高强的纤维复合材料(FRP), 形成纤维增强集成材结构材料, 可进一步提高集成

材的结构性能, 且材料利用率较高。用FRP增强后的集成材, 其强度得到明显的提高, 刚度也有一定的提高。根据使用的FRP增强体的材料和用量不同, 集成材的静曲强度(MOR)和弹性模量(MOE)均可以提高20%^[1]。

纤维增强集成材的研究最早可以追溯到1964—1965年, Wangaard和Biblis^[2-3]用环氧树脂胶将单向玻璃纤维胶合在木

收稿日期: 2011-08-22; 修回日期: 2012-03-07

作者简介: 申士杰, 教授, 研究方向为工程木制复合材料, 电子信箱: shijies@263.net

材的受压和受拉侧进行研究,Theakston^[4]研究了利用玻璃纤维增强实木和集成材的可行性。

20世纪90年代,对FRP增强木梁和集成材的研究越来越多。Plevris等^[5]对碳纤维增强冷杉进行了相关的研究。Triantafillou^[6]做了关于提高FRP增强集成材剪切强度的实验,Tingley等^[7]研究了关于FRP增强集成材的强度测试方法。

到了21世纪,更多更好的FRP材料逐渐地被开发出来,Fiorelli等^[8]分析了碳纤维和玻璃纤维增强集成材的强度和硬度。2006年,Cassidy等^[9]研究了利用FRP增强的定向刨花板作为剪力墙的可行性,并在同年发表了关于多种宽度碳纤维增强集成材的试验性研究。

近年来,使用纤维增强树脂对集成材进行增强取得了重大进展,但增强材料比较集中于玻璃纤维和碳纤维。玄武岩纤维的使用是一项尝试,其优异的物理、化学性能,适宜的性价比将使得此研究颇具价值。对于一般领域而言,玄武岩纤维基本可取代玻璃纤维。对于强度要求较高、碳纤维普遍使用的场合,也可使部分用玄武岩纤维,降低成本,从而更全面地推广复合材料的使用,这样就要求玄武岩纤维和木材胶合必须达到足够的强度。

胶合界面在设计和产品的使用寿命上都是至关重要的,国外对FRP/木材界面的胶接性能做了一定的研究。英国威尔士大学 Alexander等^[10]通过化学动力学对木材-FRP胶合界面性能进行了研究,美国缅因大学 Hong等^[11]对木材-FRP界面的耐疲劳性能、断裂性能进行了研究,结果表明木材-FRP工程复合材料的性能在很大程度上取决于胶合界面的胶接强度。

本研究参照结构用集成材日本农林标准^[12],以落叶松为研究对象,使用玄武岩纤维树脂(BFRP)为增强材料,研究其胶合工艺,希望为BFRP/集成材的胶合生产提供参考依据,进一步扩宽集成材的应用范围。

1 材料和方法

1.1 材料与设备

试材:兴安落叶松(*Larix gmelini* Rupr)板材,四面刨光,加工尺寸为800mm×50mm×25mm。竹材:毛竹,产于福建省光泽县,用脲醛胶拼接成竹拼板材。分别有弦向横拼竹板材、径向横拼竹板材、展开竹板材3种形态,含水率为8%—14%。胶黏剂:聚氨酯胶黏剂,由天津赫英木结构制造有限公司提供。BFRP单板:尺寸规格为800mm×50mm×1.4mm,由南京海拓纤维复合材料有限公司提供。表面处理剂:为羟甲基间苯二酚(HMR),自行配置,成分为蒸馏水、间苯二酚(水晶状)、甲醛、氢氧化钠。硅烷偶联剂KH550:北京中美园化学药剂店购买。拼板鼓风干燥箱:DHG-9145A,上海一恒科技有限公司。万能力学试验机:岛津AG-100KN-MO,日本岛津。

1.2 胶合试验

落叶松集成材/BFRP板的制造流程如下:

(1) 层板、竹材→干燥→横截→优选→刨光→(HMR处

理、KH550处理)→干燥→备用层板;

(2) BFRP单板→横截→单板优选→砂光→(HMR处理)→BFRP单板;

(3) 备用BFRP
备用层板 } 涂胶→胶合→养生→加工。
备用竹材 }

试验温度为20—22℃,相对湿度为70%—80%。根据前期试验得出的最佳工艺路线,选择优化的加压时间(60min)和胶合压力(1.0MPa),以KH550和HMR处理方式以及竹材板类型为因素进行正交试验,如表1所示。(竹材类型中,a代表展开竹板材;b代表弦向横拼竹板材;c代表径向横拼竹板材)。

表1 正交试验表

Table 1 List of orthogonal experiment

试验号	KH550处理	HMR处理	竹材板类型
1	A1(竹材)	B1(竹材)	C1 ^a
2	A1	B2(BFRP)	C2 ^b
3	A1	B3(竹材和BFRP)	C3 ^c
4	A2(BFRP)	B1	C2
5	A2	B2	C3
6	A2	B3	C1
7	A3(竹材和BFRP)	B1	C3
8	A3	B2	C1
9	A3	B3	C2

1.3 性能检测

1.3.1 剪切强度

按照正交试验中规定的不同工艺条件,每组试验取12个剪切试件(干态剪切、湿态剪切各取6个),按照结构用集成材标准(GB/T 26899-2011)中的规定制作剪切试件^[12],如图1所示。

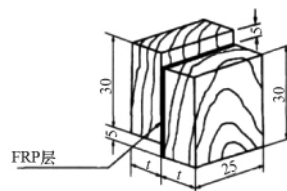


图1 剪切试件(单位:mm)

Fig. 1 Specimen of shear test

1.3.2 剥离试验

按照正交试验中规定的不同工艺条件,每组试验取8个剥离试件(浸渍剥离、煮沸剥离各取4个)。结构用集成材标准(GB/T 26899-2011)其中规定了集成材剥离试验的浸渍剥离和煮沸剥离试验方法^[12]。剥离试验依据此标准进行。

2 试验结果与分析

2.1 浸渍剥离试验

竹-木胶层的浸渍剥离率除了P3、P6和P8组外,均能满

足 JAS1152 号的要求,煮沸剥离率则有 P6、P8 和 P9 组不能满足要求;竹-BFRP 胶层浸渍剥离率只有 P1 和 P3 组能够达到标准的规定,煮沸剥离率则只有 P1 组能满足标准要求。如图 2 所示。

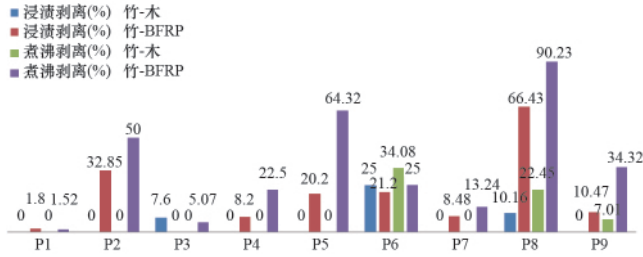


图 2 试件平均剥离率

Fig. 2 Average delamination rate of specimen

2.2 剪切强度

根据剪切数据,就干剪强度来说,竹-木胶层除了 P1 和 P6 组外,其他各组剪切强度均能达到 GB/T 26899-2011 中对于干态剪切强度的最低要求 (5.9MPa); 竹-BFRP 胶层除了 P2、P5 和 P8 组外,其他各组剪切强度均能达到 GB/T 26899-2011 中对于干态剪切强度的最低要求。

对于湿剪强度:竹-木胶层除了 P1、P5 和 P8 组外,其他各组剪切强度均能达到 GB/T 26899-2011 中对于湿态剪切强度的最低要求 (3.9MPa); 竹-BFRP 层则有 P2、P5、P7 和 P8 四组不能达到要求。

从材料破坏率来看,竹-木层干剪状态下只有 P5、P6 和 P8 不能达到 GB/T 26899-2011 对破坏率最低 60% 的要求,湿剪条件下只有 P9 的材料破坏率都不能达到要求; 竹-BFRP 层的干剪只有 P1、P3、P4 和 P9 4 组能到达到要求,湿剪条件下只有 P1、P3、P4 和 P6 4 组能到达到要求,见图 3、图 4。

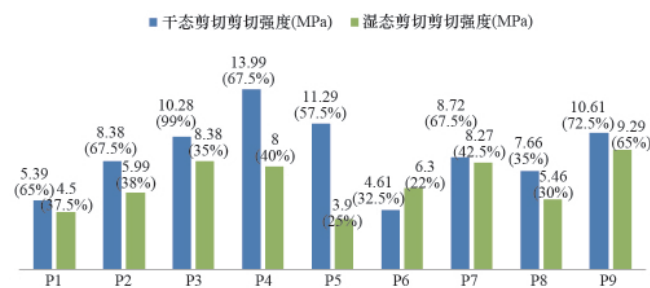


图 3 竹-木胶合面剪切强度及材料破坏率

Fig. 3 Average shear strength and material failure glueline between wood and bamboo

2.3 竹-BFRP 胶层胶合优化工艺分析

从试验条件来看,浸渍和湿态剪切(24h 浸渍)更多的是在考察试件的耐久性,而煮沸和干态剪切是在测试材料界面的短期胶合性能。表 2 中因素主次的排序,浸渍和干剪结果一致,而煮沸和湿剪结果一致,可以得以解释。

从表 2 可以看出浸渍剥离和煮沸剥离试验得出的结果

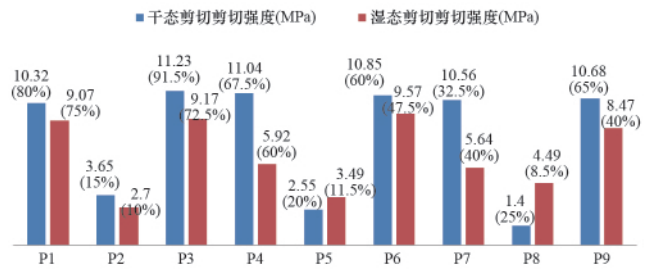


图 4 竹-BFRP 胶合面剪切强度及材料破坏率

Fig. 4 Average shear strength and material failure of the glueline between bamboo and BFRP

表 2 剥离和剪切试验影响因素分析

Table 2 Statistics for the influencing factors of delamination and shear strength

序号	试验名称	因素主次	优化方案
1	竹-BFRP 层浸渍剥离	B>C>A	A1B1C3
2	竹-BFRP 层煮沸剥离	B>A>C	A1B1C3
3	竹-BFRP 层干态剪切	B>A>C	A2B3C2
4	竹-BFRP 层湿态剪切	B>C>A	A1B3C1

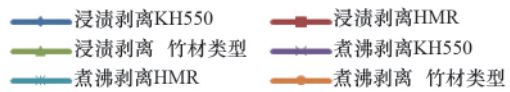


图 5 竹-BFRP 胶层剥离试验结果极差分析(单位:MPa)

Fig. 5 Range analysis of the delamination test between bamboo and BFRP

较为一致,都为 A1B1C3,即仅对竹材进行 KH550 处理和 HMR 处理,竹材板类型为径向横拼竹板材。而干湿态剪切试验得出的优化方案却不尽相同。图 6 中干剪的 C1 和 C2 的差别微乎其微,因此可以用 C1 来代替 C2,而不同的 A1 和 A2 则可以通过剥离数据来判断,可以分析得出 A1 的剥离率低,胶合性能好。因此可以得出剪切试验的优化方案为 A1B3C2。对比剥离试验和剪切试验的优化方案不同主要在于 B1 和 B3、C2 和 C3,即是否使用 HMR 处理竹材,竹材类型选择径向横拼竹板材还是弦向横拼竹板材。以此来缩小工艺条件的可变范围,进而得出最佳的优化工艺路线。

从表 3 中可以看出,无论是剥离试验还是剪切试验,HMR 都是影响试验结果的一个至关重要的因素。从图 5 和图 6 中可以看出,B2(仅使用 HMR 处理 BFRP)的试验值无论是

表 3 竹-BFRP 胶层剪切强度方差分析

Table 3 Variance analysis of the shear strength for the glueline between bamboo and BFRP

方差来源	自由度	干态剪切				湿态剪切			
		离差平方和	均方	F	显著性	离差平方和	均方	F	显著性
A KH550 处理	2	3.86	1.93	< 1		1.05	0.52	0.65	
B HMR 处理	2	155.54	77.77	35.35	★★	46.13	23.07	28.77	★★
C 竹材板类型	2	0.29	0.15	< 1		6.82	3.41	4.25	★
误差	2	4.4	2.2			1.6	0.8		
总和	8	164.08				55.61			

注: $F_{0.25}(2,2)=3, F_{0.1}(2,2)=9, F>F_{0.25}$ 表示为 ★, $F>F_{0.1}$ 表示为 ★★

Notes: $F_{0.25}(2,2) = 3, F_{0.1}(2,2) = 9, F > F_{0.25}$ for ★, $F > F_{0.1}$ for ★★

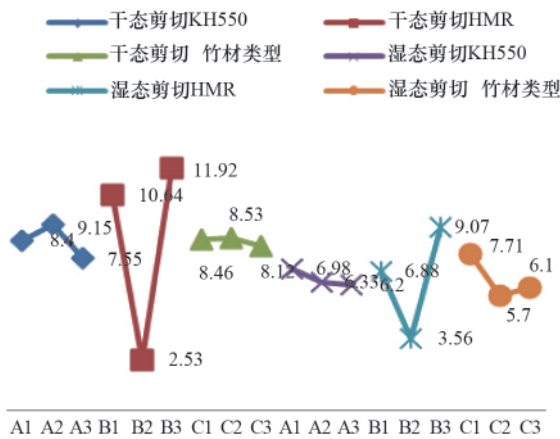


图 6 竹-BFRP 胶层剪切强度试验结果极差分析 (单位:MPa)

Fig. 6 Range analysis of the shear strength test for the glueline between bamboo and BFRP

剥离还是剪切都很差,因此可以得出使用 HMR 处理 BFRP 的工艺条件今后可以避免。对比使用 KH550 处理和不使用 KH550 处理的木(竹)、BFRP,其界面胶合性能都得到很大提高,使用 KH550 处理后的平均干态剪切强度提升 46.9%,其木破率提高 25%,平均湿态剪切强度提高 186.4%,其木破率提高 69%,从剥离试验来看,浸渍平均剥离率降低了 51.6%,煮沸平均剥离率降低了 26.6%,由此可见硅烷偶联剂 KH550 的使用大大提升了竹木和 BFRP 的界面胶合性能。

3 结论

(1) 3 种竹材板类型中,只有径向横拼竹板材两边的性质一致,都是竹青面和竹黄面间杂,与其他 2 种竹材两侧的性质差异较大相比,有利于竹材与 BFRP 更好地胶合,增大剪切强度。

(2) 硅烷偶联剂分子中既有亲有机材料的有机基团,能与聚合物发生化学反应,生成化学键;又有亲无机材料的可水解基团,容易和无机物表面起化学反应,生成跨越界面的

化学键,从而提高界面的黏结强度。

(3) 木材、竹材和玄武岩纤维毕竟是两种极性不同的材料,要使他们能更好地胶合,后续的试验既要进一步完善处理技术,也要从树脂板的树脂种类出发选择更加合适的胶黏剂,考虑更多的试验因子及水平,逐步接近或达到相关标准的要求。

参考文献 (References)

- [1] Plevris N, Triantafillou T. Creep behavior of FRP-reinforce wood member [J]. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 1995, 12(2): 174-186.
- [2] Wangaard F. Elastic deflection of wood-fiberglass composite beams[J]. *Forest Product Journal*, 1964, 14(6): 256-260.
- [3] Biblis E J. Analysis of wood-fiberglass composite beams within and beyond the elastic region[J]. *Forest Product Journal*, 1965, 15(2): 81-88.
- [4] Theakston F H. A feasibility study for strengthening timber beams with fiberglass [J]. *Canadian Agricultural Engineering Journal*, 1965, 31(4): 17-19.
- [5] Plevris N, Triantafillou T C. FRP-reinforced wood as structural material [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering-ASCE*, 1992, 4(3): 300-317.
- [6] Triantafillou T. Shear reinforcement of wood using FRP materials[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering-ASCE*, 1997, 9(2): 65-69.
- [7] Tingley D A, Gai C, Giltner E E. Testing methods to determine properties of fiber reinforced plastic panels used for reinforcing glulams [J]. *Journal of Composites for Construction-ASCE*, 1997, 1(4): 160-167.
- [8] Fiorelli J, Dias A A. Analysis of the strength and stiffness of timber beams reinforced with carbon fiber and glass fiber[J]. *Materials Research*, 2003, 6(2): 193-202.
- [9] Cassidy E D, Davids W G, Dagher H J. Performance of wood shear walls sheathed with FRP-reinforced OSB panels [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2006, 132(1): 153-163.
- [10] Alexander J P. Evaluating the durability of wood/FRP bonds through chemical kinetics using range of mechanical test methods[J]. *University of Wales*, 1998, 44(2): 123-145.
- [11] Hong Y. Fatigue and fracture of the FRP-wood interface: Experimental characterization and performance limits [J]. *University of Maine May*, 2003, 10(8): 201-205.
- [12] GB/T 26899-2011. 结构用集成材[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011. GB/T 26899-2011. Structural glued laminated timber [S]. Beijing: Standards Press of China, 2011. (责任编辑 张军, 岳臣)