

竹木复合材料胶合界面的研究进展

杨广荣^{1,2}, 钮越², 杨华珍², 卫佩行^{2,3}

(1. 南京林业大学 家居与工业设计学院, 江苏 南京 210037; 2. 江苏农林职业技术学院 风景园林学院, 江苏 句容 212400;
3. 江苏彩叶林木育种与培育国家长期科研基地, 江苏 句容 212400)

摘要:胶合界面性能好坏直接关系到木质或竹质复合材料的整体宏观性能,关系到材料的使用安全和使用寿命。从竹木单元表面润湿性能、竹木单元表面化学成分分析、竹木胶合界面结构表征、竹木胶合界面力学特性表征以及竹木胶合性能改善方法等方面对木质复合材料、竹质复合材料和竹木复合材料的相关研究进行了简要总结与回顾。这些研究方法和经验对于改善结构用竹木复合材料胶合性能有重要的借鉴价值。

关键词:竹木胶合; 界面性能; 胶合强度; 表面性能

中图分类号:S781.9 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2021)03-0244-08

Research Progress on Bonding Properties of Bamboo-Wood Composite Interface

YANG Guang-rong^{1,2}, NIU Yue², YANG Hua-zhen², WEI Pei-xing^{2,3}

(1. College of Furniture and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. School of Landscape Architecture, Jiangsu Vocational College of Agriculture and Forestry, Jurong 212400, Jiangsu, China;
3. Jiangsu Breeding and Cultivation of Colored Leaf Trees National Permanent Scientific Research Base, Jurong 212400, Jiangsu, China)

Abstract: Bonding interface performance is directly related to the overall macro performance of wood or bamboo composites, and to the safety and service life of materials. In this paper, the related studies on wood composite, bamboo composite and bamboo-wood composite were briefly summarized and reviewed covering wettability, chemical composition analysis of bamboo or wood surface, structure characterization of bamboo or wood bonding interface, mechanical properties of bamboo or wood bonding interface and improvement of bamboo or wood bonding performance. These research methods and experiences have important reference values for the improvement of the bonding performance of structural bamboo-wood composite.

Key words: bamboo-wood bonding; interface performance; bonding strength; surface performance

木材和竹材是植物中能够用作结构材料的 2 种天然材料^[1]。作为可再生、可降解的天然生物质复合材料^[2-3],木材和竹材是真正的低碳环保材料^[4]。随着中国经济的高速发展和人们环保意识的增强,高档舒适、低碳环保的木(竹)结构建筑日益受到市场青睐。利用我国丰富的速生木材和竹材资源制造高性能的工程木(竹)质材料一直是国内外学者关注的热点^[5-6]。

我国木材资源相对稀缺,但竹材资源极其丰富。早在 1995 年,张齐生等^[7]就撰文指出“竹木复合结

构是充分发挥竹材特性、科学合理地开发利用竹材资源的有效途径”。关明杰等^[8]对重组竹和重组木抗弯性能进行了比较研究,结果发现,密度较大($0.85\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)时,重组竹的抗弯性能明显优于重组木;当密度在 $0.7\sim0.8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,重组竹在抗弯弹性模量方面的表现好于重组木,但静曲强度较差。因此,将竹材和木材单元材料通过科学的结构设计,完全能够实现复合材料更高强重比的目标。

基于木材和竹材人造板的研究经验,我国开发了大量的竹木复合材料,根据使用用途可以分为结

构用竹木复合材料和非结构用竹木复合材料(或功能性竹木复合材料^[9])。结构用竹木复合材料包括竹木层积材^[10]、竹木胶合板^[11]等,主要用于车厢或集装箱底板、建筑模板、建筑构件等承重领域;而非结构用竹木复合材料包括竹木复合碎料板^[12]、纤维板^[13]、复合地板^[14]、家具构件等非承重领域。比起非结构用竹木复合材料,结构用竹木复合材料具有更高的使用安全要求。因而,务必要保证竹木胶合良好以避免胶层突然破坏造成构件失效,同时竹木单元应进行优化重组以减少产品变异性^[15]。我国早期研究主要集中在非结构用竹木复合材料,且多为制备工艺参数等研究^[16]。近年来,由于木结构建筑在国内的兴起,结构用竹木复合材料开始受到关注^[17-18]。受资源分布的制约,国外竹材加工及竹木复合材料的研究主要集中在竹材资源丰富的印度、印尼、日本等亚洲国家。此外,美国、加拿大、英国等国学者近年来也开始涉足这一领域的研究^[19-20]。

正交胶合木的出现,使木结构建筑不断突破层高限制^[21]——目前世界最高的木结构建筑位于挪威,已达18层、80 m高。因而,CLT被视为可替代传统建材的新型建材^[22]。目前,CLT产品多采用实木锯材或结构复合木材(SCL)。我国学者也尝试利用国产树种制备CLT^[23],比较典型的有落叶松(*Larix kaempferi*)^[24]、桉木(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)^[25]、杨木(*Populus euramericana* cv. 1—214)^[26]等树种。P. X. Wei *et al*^[27]提出了竹木复合正交胶合木的概念并开展了初步研究,结果发现竹木胶合界面破坏是引起整个结构构件失效的关键因素。因而,深入研究竹木界面胶合性能是高性能结构用竹木复合材料开发的关键。

对于复合材料而言,界面很薄且复杂。在竹木复合材料制备过程中,胶粘剂与竹木单元表面形成完全不同的界面结构,再加上热应力、界面化学效应等问题,会直接影响复合材料的宏观性能^[28]。通过复合,竹木复合结构在力学性能方面存在一定的优势。然而,尽管竹材和木材的主要化学成分相同,但是表面结构和纤维排列方式差距很大,使得两者难以协同工作,从而影响构件的尺寸稳定性和使用安全性。木质复合材料出现较早,其胶合性能也得到了大量的研究;而竹质复合材料胶合性能近年来也受到了学者们的广泛关注^[29],但是关于竹木复合材料胶合性能的研究仍然十分有限^[30]。因此,本研究对竹质或木质复合材料及竹木复合材料胶合界面性能的研究情况进行总结与分析,以期为新型结构用竹木复合材料的开发提供借鉴。

2 竹木胶合界面性能研究

目前,国内外学者对木质复合材料界面特性进行了大量的研究,形成了较完善的测试方法。木质复合材料界面的形成是胶粘剂在材料表面铺展、渗透、固化的过程。A. Marra^[31]描述了木材胶接过程(图1a),并提出了一个经典的链接模型来表示胶粘剂和木材的胶合界面(图1b)。其中,链环1代表纯胶相,不受木材影响。链环2和3代表胶粘剂边界层,此层中的胶粘剂受木材影响可能已经固化。链环4和5代表边界层和木材之间的界面,可提供胶合强度。链环6和7代表由于胶接过程自身发生改变的细胞壁。另外,链环8和9代表不受胶粘剂影响的木材。胶合界面中破坏主要有木材自身破坏、胶粘剂破坏、木材和胶粘剂形成的界面破坏以及混合破坏4种形式。若木质复合材料胶合良好,界面破坏应发生在8、9区域。竹材和木材由于表面结构及表面化学成分差距较大,因而同一种胶粘剂与竹、木单元会形成各自独特的胶合界面结构,从而影响竹木复合材料的胶合性能和其他结构性能。

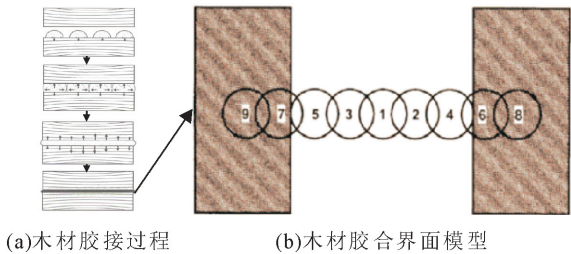


图1 木材胶接过程与胶合界面模型^[31]

Fig. 1 Development and interface model of wood bonding^[31]

2.1 竹木单元表面润湿性能

良好的润湿性是材料获得优良胶合强度的基本保证。固体材料表面润湿性能通常可用液体在固体表面的接触角来表征(图2a),然后通过计算来确定表面自由能,进而判断材料表面润湿性好坏。学者们对各种木质材料、非木质材料、竹质材料的表面润湿性能开展了卓有成效的研究^[32-34]。秦志永等^[35]对木材表面润湿特性的研究进行系统总结与回顾。文章指出,木材的种类、表面粗糙度、表面化学成分、表面处理方法、加工工艺及不同部位、浸润物质等因素^[36-38],都会影响到木材表面润湿性能。

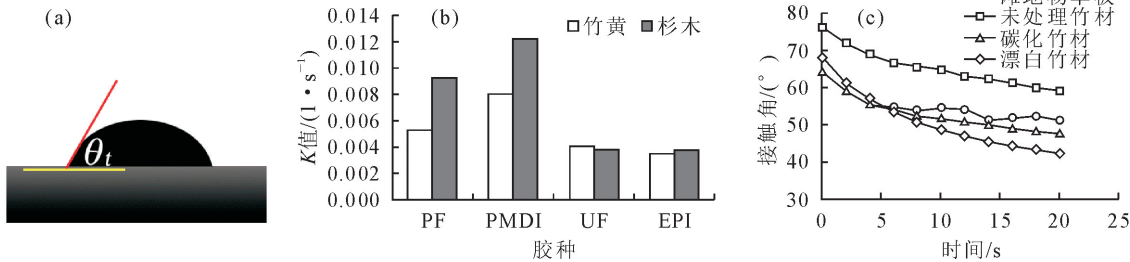
尽管竹材和木材的主要化学成分相同,但竹材表面微观结构与木材完全不同。最大的不同是,竹材表面具有竹青面和竹黄面之分,其表面润湿性能存在差异。根据X. B. Li *et al*^[39]的研究,竹青面的接触角最大,竹黄面次之,竹肉最小。我国学者江泽慧等^[40]也得到了相似的研究结论。这种现象与竹

材表面的物理状态、组织结构和化学成分密切相关。从结构上看,竹青处材质致密,粗糙度小,而竹黄处材质相对疏松,粗糙度大,这是竹黄润湿性好于竹青的一个原因。

竹木复合材料胶接过程中,材料表面润湿性至关重要。根据中国知网数据统计,王戈^[41]最早研究竹木复合材料胶合界面问题,迄今有近 10 位学者研究过此类问题。在这些研究中,材料表面润湿性能是非常重要的研究内容。不同的浸润物质在同一被浸润物质表面表现出不同的润湿效果。王戈等^[42]研究了双组分异氰酸酯乳液型胶粘剂(EPI)、聚异氰酸酯(PMDI)、酚醛树脂(PF)和脲醛树脂(UF)胶粘剂在毛竹(*Phyllostachys pubescens*)和杉木

(*Cunninghamia lanceolata*)表面的润湿性(图 2b), K 越大,表示润湿性越好(K 为胶黏剂的渗透扩散系数)。结果表明,4 种胶粘剂在毛竹表面的润湿性均<杉木,且竹青润湿性<竹黄;对于同一毛竹或杉木表面,PMDI 胶的润湿性最好,而 EPI 胶最差。

马红霞^[9]研究了水在杨木(*P. deltoides* Bartr. CL. ‘zhonghan 17’)单板、未处理竹材、炭化竹材、漂白竹材 4 种试样表面的动态接触角(图 2c),发现杨木单板和未处理竹材的表面润湿性能差异较大,而竹材表面改性处理后和杨木单板的润湿性能接近。姚利宏^[43]测试了酚醛树脂胶粘剂在杉木单板和毛竹表面的铺张渗透系数并得出了酚醛树脂胶粘剂在杉木单板表面的铺张渗透系数远大于毛竹的结论。



注:(a)接触角;(b)不同胶粘剂在毛竹和杉木表面接触角的 K 值对比^[41];(c)蒸馏水在材料表面的动态接触角^[9]。

图 2 材料表面润湿性能

Fig. 2 Surface wettability of materials

2.2 竹木单元表面化学成分分析

表面光电子能谱(XPS)是木材、竹材或秸秆等生物质材料表面化学成分分析的常用手段^[44]。生物质材料主要元素除 H 外,C 和 O 元素均可由 XPS 测得。国内外学者采用 XPS 分析技术对木材或木质纤维、竹材、秸秆等生物质材料进行了大量的研究并取得了一定的成果。加拿大的 G. M. Dorris *et al*^[45]对纸张表面进行了 XPS 分析,对 C_{1s} 峰进行了解释,同时定量分析了碳/氧比。采用 XPS 分析木材表面化学组成,进而比较不同树种之间的胶合性能,是 XPS 技术在木材科学领域的一个重要应用^[46]。同样,XPS 也适用于竹材表面化学成分分析,周晓芸^[47]利用 XPS 技术研究了竹青面和竹黄面的表面化学成分。结果发现,竹青面和竹黄面化学成分存在较大差异,即竹青面含有 N 和 Si,而竹黄面没有。江泽慧等^[48]通过对竹材表面 C_{1s} 进行分峰处理,发现竹材表面化学成分以木质素和抽提物为主,竹青面的氧原子比例>竹黄面。根据马红霞^[9]的研究,杨木的 O/C 比为 0.397,而竹材的 O/C 比为 0.295,说明杨木的表面润湿性要优于竹材(图 3)。

傅里叶红外光谱(FTIR)也是一种常用的生物

质材料表面化学成分分析的方法。江泽慧等^[48]采用 FTIR 技术研究了竹青面和竹黄面,结果发现竹青面的羟基振动强于竹黄面,且竹青面活性自由羟基高于竹黄面。马红霞^[9]对杨木和未处理竹材的表面物质化学成分进行了 FTIR 分析,结果发现杨木高聚糖类吸收峰强度低于未处理竹材。

2.3 竹木胶合界面结构表征

无论是木材还是竹材或者是竹木复合材料,其胶合界面的表征手段主要有光学显微镜、荧光显微镜、透射电镜(TEM)和扫描电子显微镜(SEM)等,其中荧光显微镜和扫描电镜应用最为广泛。

荧光显微技术的原理是:试样染色后会激发胶粘剂或木材、竹材的荧光反应,当木材、竹材与胶粘剂形成对比度后,即可获得胶粘剂在木材、竹材中的渗透深度以及渗透面积等信息。M. Sernek *et al*^[49]采用双重染色的方法对影响脲醛树脂(UF)胶粘剂在榉木(*Fagus sylvatica*)单板中的渗透性能因素进行了研究。结果表明,含水率对榉木中 UF 的渗透影响很大;当榉木含水率为 9%时,UF 在木材中的渗透最深。关明杰等^[50]采用甲苯胺蓝荧光染色剂对酚醛树脂(PF)胶合的炭化竹材和漂白竹材进行染色处理,然后用荧光显微镜表征竹材胶合界面处

胶粘剂的渗透情况。M. Ahmad^[51]同样采用荧光显微技术对胶粘剂在竹材表面的有效渗透深度、平均渗透深度和最大渗透深度进行了测定(图 4)。

早在 20 世纪 60 年代, H. Harada *et al*^[52]使用扫描电镜观察了以酚醛树脂(PF)为胶粘剂的胶合板界面,发现了界面中存在孔隙的现象。通过在胶粘剂中添加椰子壳颗粒填充界面孔隙,从而有效提升了胶合板胶合性能。H. Saiki^[53]采用扫描电镜观测了酚醛树脂(PF)和环氧树脂渗入木材的情况,结果发现这 2 种胶粘剂都可以渗入木材细胞壁的 S_2 与 S_3 层之间,而且树脂的浓度峰值出现在 S_2 与 S_3 层之间的界面层。W. Gindl^[54]通过扫描电镜研究了胶粘剂在木材毛细管中的渗透路径。王新洲^[55]采用纳米红外分析技术对木材胶合界面结构进行了表征,研究表明:酚醛树脂胶粘剂(PF)经由大毛细管系统进入木材细胞并填充细胞腔,固化后形成了宏观的啮合结构;此外,酚醛树脂分子可以通过小毛细管系统渗透扩散至木材细胞壁的 S_2 层,与胞壁物质发生化学反应,形成木-胶界面。可见,纳米红外分析技术对木质复合材料胶合界面的表征更加细微,更为先进。于文吉^[56]使用扫描电镜研究脲醛树脂胶粘剂(UF)与竹材的胶合界面,发现 UF 主要存在于加工过程中破损的细胞腔,而且 UF 的渗透深度与竹材表面细胞腔直径密切相关。Y. X. Huang *et al*^[57]采用超景深显微镜和扫描电子显微/能量色散谱技术研究了酚醛树脂(PF)在竹材表面的渗透深度。竹材和木材是两种典型的生物质材料,主要有 C、H、O 等元素组成。因而,采用同步辐射光源 X 射线相衬显微成像技术,可以观察到竹木复合材料中三聚氰胺改性脲醛树脂胶粘剂(MUF)和双组分聚异氰酸酯乳液胶粘剂(EPI)的胶合界面状况和胶粘剂渗透深度^[30]。竹木复合材料胶合界面基本在微米甚至是纳米尺度,研究竹-胶-木的界面结构,探明胶粘剂在竹和木表面的渗透性能,据此可以判断竹木复合材料的胶合性能^[9]。

2.4 竹木胶合界面力学特性

界面力学特性决定木质或竹质复合材料宏观力学性质,对材料变形、强度退化乃至破坏失效有重要影响。因此,研究材料胶合界面力学特性是研究复合材料的重要方面,一般采用的是微观力学测试技术。微观力学测试技术主要用于表征复合材料胶合界面各点的结合强度。常用于表征木质或竹质复合材料胶合界面性能的微观力学测试技术有纳米压痕技术和动态模量成像技术等。

1997 年, R. Wimmer *et al*^[59]首次采用纳米压痕技术研究木材细胞壁微观力学特性。此后,国内

外学者纷纷采用准静态和动态纳米压技术对不同树种木材、不同改性处理的木材细胞壁的硬度、弹性模量、蠕变特性与粘弹性等力学性能进行了研究^[62-64](图 5)。随着纳米压痕技术的不断成熟,这一技术逐渐被应用到木质复合材料界面力学特性的研究上^[62-63]。然而,使用纳米压痕技术研究竹材胶合界面的报道较少。从有限的报道来看,陈红燕^[64]采用纳米压痕技术并结合原子力显微镜(AFM)中的轻敲模式,观察了竹材/胶粘剂的界面形貌,并测试了其力学性能。雍宸等^[65]采用电子散斑干涉技术(ESPI)研究了碳化竹材胶合界面的微观应变分布和复合材料整体强度。结果表明,使用 PVA 改性酚醛树脂,提高了碳化竹材胶合界面最大应变。和纳米压痕和原子力显微镜相比,ESPI 技术能够胶合体现胶合界面的几何特性以及承载时的应力传递与分布。采用微观力学测试技术同时研究竹木胶合界面力学特性的差异尚未见报道。

3 竹木胶合性能的改善方法

竹木复合材料是指以竹材和木材为主要原料,通过组合、胶接等加工工艺制成的一种复合板材。尽管竹木复合能够充分发挥二者优势,但是由于竹材和木材表面特性差异较大导致竹木复合材料的界面破坏经常发生,使得竹木复合材料的承载性能难以充分发挥。为了提升竹木胶合性能,应对竹木材料表面进行改性或对胶粘剂进行改性。而竹木材料表面改性更加稳定,可控性更好,且同一种胶粘剂难以苛求其对竹材和木材都有良好的润湿性。所以,竹木胶合性能的改善大多考虑竹材表面的改性。常用的竹材表面改性的方法可以分为化学处理和物理处理,其中化学处理包括:碱处理、酸处理、 H_2O_2 处理、硼酸处理、偶联剂处理、酶处理、乙酰化处理等;而物理处理包括:高温干燥处理、油热处理、微波处理、等离子体处理、超声波处理等。

3.1 化学处理

张晓冬等^[67]利用 NaOH 对竹青和竹黄进行了处理,通过力学性能和胶合性能测试发现:碱处理后竹材单元之间的胶合强度得到了改善,进而有助于提高材料整体的弹性模量和静曲强度,而这种材料整体力学性能的提高大于竹材单元由于化学处理造成的强度损失。高伟等^[68]比较了 HCl 溶液和 NaOH 溶液改性毛竹的效果,通过接触角表征竹材界面润湿性的处理效果。经过综合分析发现,酸处理效果优于碱处理。根据张巧玲等^[69]的研究,经 H_2O_2 溶液处理后的毛竹对水和脲醛树脂胶粘剂的润湿性增加,因而胶合强度有较大的提高;而对酚醛

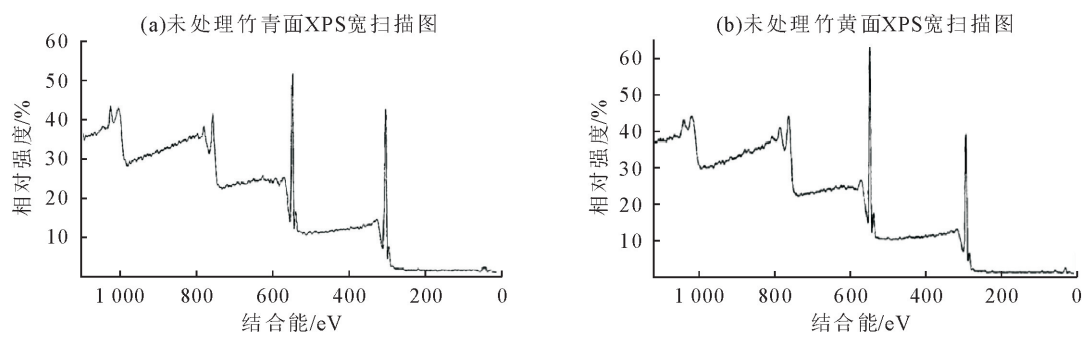
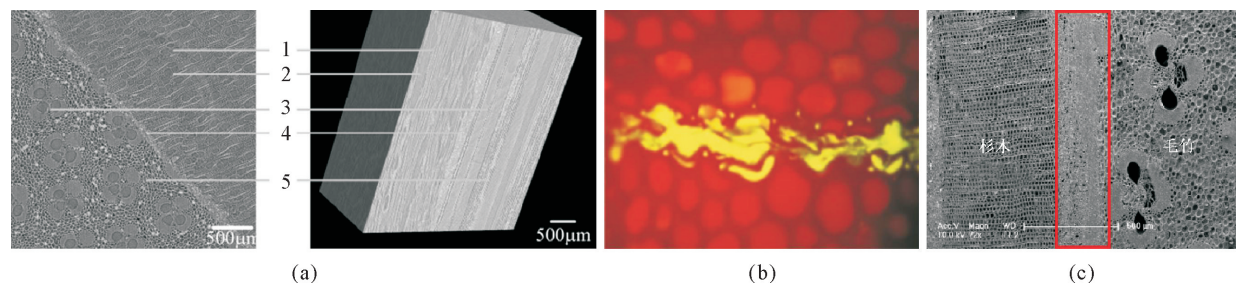


图 3 竹青和竹黄表面 XPS 宽扫描图^[47]

Fig. 3 XPS wide scanning of untreated outer and inner surfaces of bamboo^[47]



注:(a)采用同步辐射光源 X 射线相衬显微成像技术表征 EPI 胶黏剂在热处理竹材和杨木单板中的渗透^[29];1. 杨木单板;2. 杨木导管;3. 竹材维管束;4. EPI 胶黏剂;5. 热处理竹材。(b)竹材/酚醛树脂胶合界面的荧光跟踪表征^[57]。(c)SEM 技术表征毛竹/杉木胶合界面^[42]。

图 4 竹/木胶合界面结构表征方法^[30,43,58]

Fig. 4 Characterization methods of bonding interface of bamboo/wood

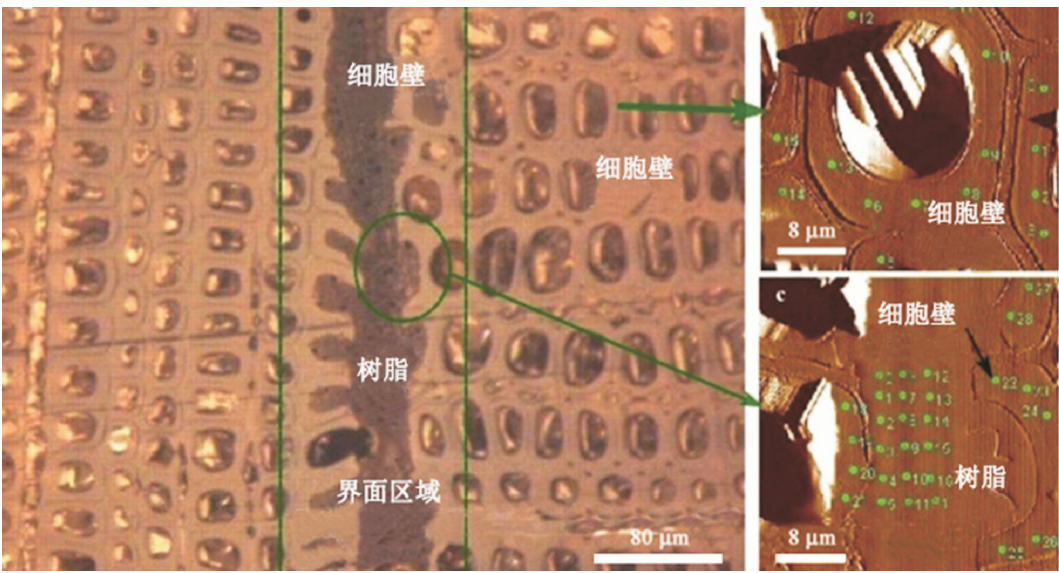


图 5 纳米压痕测试木材胶合界面观察^[66]

Fig. 5 Observation of wood bonding interface using nanoindentation^[66]

树脂胶粘剂的润湿性起反作用,导致胶合强度略有下降。对竹材进行硼酸处理,可以提升酚醛树脂胶粘剂和脲醛树脂胶粘剂竹材表面的润湿性,但硼酸溶液的浓度、处理温度和处理时间等工艺条件对处理效果具有显著影响^[70]。任一萍等^[71]采用偶联剂对竹材表面进行了预处理,有效提高了竹材表面的自由能,因而提高了竹篾层积材的胶合强度。王永

波^[72]选用能够降解木聚糖的半纤维素酶和降解木质素的漆酶对竹材刨花进行了水浴和喷涂处理,形成活性官能团,实现自生胶合。

3.2 物理处理

不同处理手段、不同处理工艺会产生不同的处理效果。如干燥处理以后竹青面氧原子比例下降^[73];油热处理后竹材表面润湿性会下降^[74],但高

温炭化处理会提高竹材表面润湿性能。经过微波处理,竹材表面接触角变小,自由基浓度增加,亲水性羟基增加^[75]。周晓燕等^[76]总结了国内外学者对农林生物质材料表面等离子体改性技术的研究进展,并指出了应用这一技术的局限性,如高含水率木材容易出现炭化点和非连续单元(如刨花、纤维等)飞散与灼烧等。而在高伟等^[68]的研究中,化学处理效果明显优于等离子体处理。黄志伟^[77]对漂白竹材和碳化竹材表面进行超声波处理,分析了超声波处理前后竹材表面特性的变化。结果表明,超声处理能够提高竹材表面的粗糙度,增大竹材表面的表面自由能,降低酚醛树脂在竹材表面的接触角。进一步采用扫描电镜和荧光显微镜观察发现,超声处理的破壁效应可以提升胶粘剂的渗透,从而显著提升了竹材的胶合强度。

4 结论与讨论

木与木、竹与竹、竹与木的界面粘接作用是保证复合材料整体工作和共同受力的基础。木质材料或竹质材料的界面粘接问题已得到了大量的研究,然而对于竹-胶-木形成的界面问题尚未得到充分研究。而深入了解竹木胶合界面对于充分利用竹材和木材资源制备工程材料至关重要。鉴于此,本研究回顾了竹木界面胶合研究领域的进展,从竹木单元表面润湿性能、竹木单元表面化学成分分析、竹木胶合界面结构表征、竹木胶合界面力学特征等 4 个方面进行了概括总结,同时也总结了常用的竹木胶合性能的改善方法,将为结构用竹木复合材料的开发提供借鉴。

动态接触角是表征竹木单元表面润湿性能的重要指标。由于竹材表面微观结构与木材差异很大,因而同一液体在竹木表面甚至在竹材的不同表面(竹青面和竹黄面)会产生不同的接触角。可以采用竹木表面改性的方法,对竹材表面进行改性处理,提高竹材表面润湿性能,使竹材表面接触角趋近于木材表面接触角,可以提升竹木复合材料的胶合性能。

表面光电子能谱(XPS)和傅里叶红外光谱(FTIR)是 2 种常用的测试竹木表面化学成分的方法。前者可得到竹木表面的元素信息,后者可得到竹木表面主要官能团信息。通过对这些信息的分析,可以对竹木复合材料的胶粘剂选用等提供重要参考。

竹木胶合界面结构表征手段有很多,目的是探明胶粘剂在竹木表面的渗透情况和分布情况,以便判断是否能够形成“胶钉”形成机械连接或者渗透到细胞壁结构中的胶粘剂和细胞壁物质发生化学反应

形成化学结合,这对于判断竹木复合材料宏观胶合性能具有重要意义。

通过深入研究胶粘剂渗透竹木以后形成的“木-胶”或“竹-胶”界面微观力学特性,可以了解界面区域竹木细胞壁在和胶粘剂发生化学反应以后产生的力学性能变化,从而更好地揭示竹木复合材料的胶接机理。

竹木复合材料用作结构构件时,应基于竹木材料更好发挥协同效应的考量,并不苛求竹材强度优势得到充分发挥,或者说,只要实现竹木胶合界面不发生破坏而胶合破坏发生在木材区域,则可认为竹木胶合良好。应强调的是竹木界面胶合改善的关键在于竹木表面改性。竹木复合材料的制备时,应该根据使用用途、性能要求、制备工艺、胶粘剂类型等条件综合评估选用合适的表面处理方法。

参考文献:

[1] 邵卓平. 植物纤维(木、竹)断裂力学[M]. 北京:科学出版社, 2012.

[2] 柳菁,张家亮,郭军,等. 现代竹结构建筑的发展现状[J]. 森林工程, 2013, 29(5): 126-130.

[3] VOGTLANDER J., VELDEN N, LUGT P. Carbon sequestration in LCA, a proposal for a new approach based on the global carbon cycle: cases on wood and on bamboo[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(1): 13-23.

[4] ROBERTSON A, LAM F, COLE R. A comparative cradle-to-gate life cycle assessment of mid-rise office building construction alternatives: laminated timber or reinforced concrete[J]. Buildings, 2012, 2: 245-270

[5] HE M J, ZHANG J, LI Z, *et al.* Production and mechanical performance of scrimber composite manufactured from poplar wood for structural applications[J]. Journal of Wood Science, 2016, 62(5): 429-444.

[6] CHEN Z X, LEI Q, HE R L, *et al.* Review on antibacterial bio-composites of structural laminated veneer lumber[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2016, 23: 142-147.

[7] 张齐生,孙丰文. 竹木复合结构是科学合理利用竹材资源的有效途径[J]. 林产工业, 1995, 6: 4-6.

[8] 关明杰,朱一辛,张心安. 重组木与重组竹抗弯性能的比较[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(4): 59-61.

[9] 马红霞. 毛竹/杨木复合材料界面胶合性能及其影响因素研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2009.

[10] 田昭鹏,王朝晖,张忠利等. 结构用竹木复合层积材的制备及其力学性能评价[J]. 安徽农业大学学报, 2017, 44(3): 404-408.

[11] 范诒杰,申士杰,陈暑冰. 不同胶黏剂对玄武岩纤维增强竹木胶合板胶合性能的影响[J]. 林产工业, 2016, 44(1): 25-28.

[12] 吴新风,徐剑莹,刘文金,等. 竹碎料含水率对无胶竹木复合夹层板性能的影响[J]. 林产工业, 2015, 42(4): 44-46.

[13] 吴治超,杨渊. 竹木复合中密度纤维板的研究[J]. 中国人造板, 2018, 25(8): 31-33.

[14] 黄成建,包永洁,李能,等.不同胶黏剂竹木复合电热地板的基本特性[J].浙江农林大学学报,2017,34(2):369-373.
HUANG C J,BAO Y J,LI N,*et al.* Adhesives used to make bamboo/wood composite electro-thermal plywood[J]. Journal of Zhejiang A&F University,2017,34(2):369-373. (in Chinese)

[15] 张文福,王戈,于子绚,等.竹材单元形态对竹木复合层积材性能的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2012,36(5):167-169.
ZHANG W F,WANG G,YU Z X,*et al.* Effect of bamboo shape on properties of bamboo/wood LVL[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition,2012,36(5):167-169. (in Chinese)

[16] 江泽慧,王戈,费本华,等.竹木复合材料的研究及发展[J].林业科学研究,2002,15(6):712-718.

[17] GUO N,CHEN H.,ZHANG P.,*et al.* The research of parallel to the grain compression performance of laminated glued bamboo-wood composites[J]. Tehnicki vjesnik / Technical Gazette,2016,23(1):129-135.

[18] 刘秀侠.不同预应力状态下胶合竹木梁短期受弯性能研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2016.

[19] GOTTRON J,HARRIES K A,XU Q F. Creep behavior of bamboo[J]. Construction & Building Materials,2014,66:79-83.

[20] SHARMA B,GATOO A,BOCK M,*et al.* Engineered bamboo for structural applications[J]. Construction & Building Materials,2015,81:66-73.

[21] HE M,ZHANG J,LI Z,*et al.* Production and mechanical performance of scrimber composite manufactured from poplar wood for structural applications[J]. Journal of Wood Science,2016,62(5):429-444.

[22] 阚泽利,李哲瑞,王菲彬,等.中高层木结构用正交胶合木(CLT)在欧洲的研究与发展现状[J].建筑结构,2017,47(2):75-80(27).

[23] 李昊,王立彬,卫佩行,等.我国正交胶合木及竹木复合正交胶合木发展现状[J].西北林学院学报,2019,34(5):240-246.
LI H,WANG L B,WEI P X,*et al.* Development status of cross-laminated timber and bamboo-wood composite cross-laminated timber in China[J]. Journal of Northwest Forestry University,2019,34(5):240-246. (in Chinese)

[24] GONG Y C,WU G,REN H Q. Block shear strength and delamination of cross-laminated timber fabricated with Japanese larch[J]. BioResources,2016,11(4):10240-10250.

[25] LIAO Y C,TU D Y,ZHOU J H,*et al.* Feasibility of manufacturing cross-laminated timber using fast-grown small diameter eucalyptus lumbers[J]. Construction and Building Materials,2017,132:508-515.

[26] 王志强,付红梅,罗欢,等.速生杨木横向层正交胶合木滚动剪切性能[J].南京工业大学:自然科学版,2016,38(5):116-120.

[27] WEI P X,WANG B J,WANG L B,*et al.* An exploratory study of composite cross-laminated timber (CCLT) made from bamboo and hemlock-for mix[J]. Bio Resources,2019,14(1):2160-2170.

[28] 连海兰,潘明珠.生物质复合材料的表界面[M].北京:中国林业出版社,2012.

[29] SHAH D U,SHARMA B,RAMAGE M H. Processing bamboo for structural composites;Influence of preservative treatments on surface and interface properties[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives,2018,85:15-22.

[30] 彭冠云,王玉荣,任海青,等.基于同步辐射X射线相衬显微CT技术的竹木复合材料胶合界面特性研究[J].光谱学与光谱分析,2013,33(3):829-833.

[31] MARRA A. Technology of wood bonding:Principles in practice[M]. New York:Van Nostrand Reinhold,1992.

[32] 张洋,华毓坤.秸秆表面的润湿性能[J].木材工业,2001,15(2):6-8.

[33] LI T,CHENG D L,WALINDER M E P,*et al.* Wettability of oil heat-treated bamboo and bonding strength of laminated bamboo board[J]. Industrial Crops and Products,2015,69:15-20.

[34] 韦鹏练,秦志永,符韵林,等.桉木阻燃胶合板胶合强度及润湿性研究[J].西北林学院学报,2017,32(4):244-247.
WEI P L,QIN Z Y,FU Y L,*et al.* Bonding strength and wettability of eucalyptus flame-retardant plywood[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(4):244-247. (in Chinese)

[35] 秦志永,廖木荣,张一甫,等.基于接触角的木材表界面润湿特性研究现状及问题分析[J].北华大学学报:自然科学版,2019,20(2):249-255.

[36] 彭晓瑞,张占宽.等离子体处理对6种木材表面润湿性能的影响[J].林业科学,2018,54(1):90-98.
PENG X R,ZHANG Z K. Influence of plasma treatment on six kinds of wood surface wettability[J]. Scientia Silvae Sinicae,2018,54(1):90-98. (in Chinese)

[37] BUYUKSARI U,TURGAY A,CENGIZ G,*et al.* Wettability and surface roughness of natural and plantation-grown narrow-leaved ash (*Fraxinus angustifolia* Vahl.) wood[J]. Bioresources,2011,6(4):4721-4730.

[38] QIN Z Y,QIANG G,ZHANG S F,*et al.* Wettability of sanded and aged fast-growing poplar wood surfaces: I. Surface free energy[J]. Bioresources,2015,10(1):1008-1023.

[39] LI X B,SHUPE T F,HSE C Y. Wettability of three *Honduran bamboo* species[J]. Journal of Bamboo and Rattan,2004,3(2):159-167.

[40] 江泽慧,于文吉,余养伦.竹材表面润湿性研究[J].竹子研究汇刊,2005,24(4):31-38.

[41] 王戈.毛竹/杉木层积复合材料及其性能[D].北京:中国林业科学研究院,2003.

[42] 王戈,揭二龙,郭起荣,等.不同胶粘剂在毛竹和杉木表面的润湿性[J].中南林学院学报,2006,26(6):155-159.

[43] 姚利宏.毛竹/杉木复合材料胶合界面理化性质研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.

[44] 杜官本.表面光电子能谱(XPS)及其在木材科学与技术领域的应用[J].木材工业,1999,13(3):17-20(29).

[45] DORRIS G M,GRAY D C. The surface analysis of paper and wood fiber by ESCA (1). surface composition of mechanical pulps[J]. Cellulose Chemistry and Technology,1978,12:9-23.

[46] JAIC M,ZIVANOVIC R,STEVANOVIC J T,*et al.* Compar-

ison of surface properties of beech and oakwood as determined by ESCA method [J]. Holz Roh-Werkstoff, 1996, 54(1): 37-41.

[47] 周晓芸. 低温等离子体改性后竹材表界面特性的研究[D]. 南京:南京林业大学, 2008.

[48] 江泽慧, 于文吉, 余养伦. 竹材化学成分分析和表面性能表征[J]. 东北林业大学学报, 2006, 34(2): 1-2.

[49] SERNEK M, RESNIK J, KAMKE F A. Penetration of liquid urea-formaldehyde adhesives into beech wood [J]. Wood and Fiber Science, 1999, 31(1): 41-48.

[50] 关明杰, 雍成, 赵佳. 竹材胶合界面的荧光跟踪法表征[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(5): 125-128.

GUAN M J, YONG C, ZHAO J. Characterization on bamboo bonding interface by fluorescent track[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 36(5): 125-128. (in Chinese)

[51] AHMAD M. Analysis of *Calcutta bamboo* for structural composite materials[D]. Blacksburg, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.

[52] HARADA H, DAVIES G W, PLOMLEY Y K F. Preliminary microscopic studies of wood structure and adhesion in plywood[J]. Forest Products Journal, 1968, 18(2): 86-90.

[53] SAIKI H. The effect of the penetration of adhesives into cell walls on the failure of wood bonding[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1984, 30(1): 88-92.

[54] GINDL W. SEM and UV-microscopic investigation of glue lines in *Parallam* PSL [J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2001, 59(3): 211-214.

[55] 王新洲. 基于纳米尺度的木材胶合界面性能及改性机制研究[D]. 南京:南京林业大学, 2016.

[56] 于文吉. 竹材表面性能及力学性能变异规律的研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2001.

[57] HUANG Y X, LIN Q Q, YANG C, *et al.* Multi-scale characterization of bamboo bonding interfaces with phenol-formaldehyde resin of different molecular weight to study the bonding mechanism [J]. Journal of the Royal Society Interface, 2020, 17: 2019055.

[58] 关明杰, 雍成, 赵佳. 竹材/酚醛树脂胶合界面的荧光跟踪定位表征[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2012, 34(9): 118-121.

[59] WIMMER R, LUCAS B N, TSUI T Y, *et al.* Longitudinal hardness and Young's modulus of spruce tracheid secondary walls using nanoindentation technique[J]. Wood Science and Technology, 1997, 31(2): 131-141.

[60] GINDL W, GUPTA A H S. Lignification of spruce tracheid's secondary cell wall related to longitudinal hardness and modulus of elasticity using nano-indentation[J]. Canadian Journal of Botany, 2002, 80: 1029-1033.

[61] WU Y, WANG S, ZHOU D G. Use of nanoindentation and silviscan to determine the mechanical properties of 10 hardwood species[J]. Wood and Fiber Science, 2009, 41(1): 64-73.

[62] KONNERTH J, GINDL W. Mechanical characterization of wood-adhesive interphase cell walls by nanoindentation[J]. Holzforschung, 2006, 60(4): 429-433.

[63] KONNERTH J, VALLA A, GINDL W. Nanoindentation mapping of a wood-adhesive bond[J]. Applied Physics A, 2007, 88(2): 371-375.

[64] 陈红燕. 竹条/乙烯基酯复合材料的界面吸湿性能及界面性能的 AFM 表征[D]. 上海: 东华大学, 2010.

[65] 雍成, 关明杰. 聚乙烯醇改性酚醛树脂/竹材胶合界面力学性能[J]. 木材加工机械, 2014, 25(4): 38-40.

[66] 王新洲, 谢序勤, 王思群, 等. 基于纳米压痕技术的木材胶合界面力学行为[J]. 林业科学, 2019, 55(7): 128-136.

WANG X Z, XIE X Q, WANG S Q, *et al.* Investigation of the mechanical behavior of wood-adhesive interphase by using nanoindentation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 128-136. (in Chinese)

[67] 张晓冬, 程秀才, 林龙生, 等. 化学处理对竹青、竹黄胶合性能的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2013, 37(4): 171-174.

ZHANG X D, CHENG X C, LIN L S, *et al.* Effect on bonding performance of bamboo skin and bamboo pith through chemical processing[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2013, 37(4): 171-174. (in Chinese)

[68] 高伟, 罗艳丽, 甘卫星, 等. 竹材表面润湿性能研究[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(35): 17322-17326.

[69] 张巧玲, 曾钦志, 李清芸, 等. H₂O₂ 溶液处理对毛竹材润湿与胶合性能的影响[J]. 福建林学院学报, 2014, 34(2): 184-188.

[70] 张巧玲. 竹片处理工艺对其润湿性能及胶合性能的影响[D]. 福州: 福建农林大学, 2014.

[71] 任一萍, 王正, 王志玲. 竹材表面处理对胶合性能的影响[J]. 粘接, 2009, 2: 33-37.

[72] 王永波. 半纤维素酶/漆酶处理竹材及自生胶合刨花板制备[D]. 北京: 北京林业大学, 2011.

[73] 于文吉, 余养伦, 江泽慧. 竹材表面胶合性能[J]. 竹子研究汇刊, 2006, 25(1): 30-36.

[74] 侯玲艳, 赵荣军, 任海青, 等. 不同竹龄毛竹材表面颜色、润湿性及化学成分分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2012, 36(2): 159-162.

HOU L Y, ZHAO R J, REN H Q, *et al.* Analysis of surface color and wettability and chemical composition of different age *Phyllostachys pubescens* [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2012, 36(2): 159-162. (in Chinese)

[75] 陈卫民, 李新功, 陈茂, 等. 预处理对竹束及竹木重组材性能影响[J]. 功能材料, 2014, 45(15): 15114-15117.

[76] 周晓燕, 陈敏智, 杜官本. 农林生物质材料表面等离子体改性技术研究进展[J]. 林业工程学报, 2017, 2(1): 1-7.

ZHOU X Y, CHEN M Z, DU G B. Research progress on surface modification of agriculture and forestry biomass materials by plasma treatment[J]. Journal of Forestry Engineering, 2017, 2(1): 1-7. (in Chinese)

[77] 黄志伟. 超声处理对竹材表面特性及胶合性能的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2017.