

基于超声波无损检测技术的侧压竹集成材力学性能试验研究

刘丰禄,赵 扬,吴传宇*,戴俊龙,张鸿江,杨锦添

(福建农林大学 机电工程学院,福建 福州 350108)

摘 要:探究超声波传播速度与侧压竹集成材力学性能(抗弯弹性模量和抗弯强度)之间的关系模型,结合密度计算出的动态弹性模量和抗弯弹性模量之间的关系模型,为超声波无损检测侧压竹集成材的力学性能提供理论依据。以侧压竹集成材为研究对象,利用超声波微秒计测量仪,通过超声波传播测量试验,得到了超声波在侧压竹集成材和竹板小试样中传播速度,并绘制出侧压竹集成材超声波传播速度的等值线分布图。利用密度计测量竹板小试样的密度和超声波波速计算竹板小试样的动态弹性模量。通过三点弯曲试验得到侧压竹集成材小试样的抗弯弹性模量和抗弯强度,回归分析超声波传播速度与抗弯弹性模量和抗弯强度,以及动态弹性模量与抗弯弹性模量之间的关系。结果表明,虽然采用相同的热压工艺参数,但各个侧压竹集成材所得到的超声波波速等值线分布图存在明显差异,说明各个侧压竹集成材的胶合效果存在差别,导致其之间的力学性能也存在一定的差别,超声波传播速度越大,表明侧压竹集成材的胶合效果或者力学性能越好;超声波波速与侧压竹集成材小试样的抗弯弹性模量和抗弯强度之间存在较好的相关性(决定系数 R^2 分别为 0.65 和 0.59),这说明可以通过超声波波速来合理地预测和评价侧压竹集成材小试样的抗弯弹性模量和抗弯强度;侧压竹集成材小试样的动态弹性模量与其抗弯弹性模量之间也存在良好的相关性,两者的决定系数 R^2 为 0.68,这说明也可以通过测量侧压竹集成材小试样的动态弹性模量,来对其抗弯弹性模量进行合理的预测和评价。研究表明,超声波无损检测技术是合理预测和评价侧压竹集成材力学性能的一种潜在的有效手段。

关键词:超声波;无损检测;竹集成材;超声波速;力学性能

中图分类号:S781.29

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2024)01-0200-08

Mechanical Properties of Sidepressed Bamboo laminated lumber Based on Ultrasonic Non-destructive Testing Technology

LIU Feng-lu, ZHAO Yang, WU Chuan-yu*, DAI Jun-long, ZHANG Hong-jiang, YANG Jin-tian

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: The objectives of this study were to investigate the relationship model between the ultrasonic propagation velocity and the mechanical properties (flexural elastic modulus and flexural strength) of sidepressed bamboo laminated lumber (SPBLL), as well as the relationship model between the dynamic elastic modulus and flexural elastic modulus calculated by combining the density to provide a theoretical basis for ultrasonic non-destructive testing of the mechanical properties of SPBLL. Taking SPBLL as the research object, using the ultrasonic microsecond measuring instrument, the ultrasonic propagation velocity in SPBLL and the small bamboo board sample was obtained through the ultrasonic propagation measurement test, and the contour distribution map of ultrasonic propagation speed of SPBLL was drawn. The density of the small sample of bamboo board was measured by a densitometer, and the dynamic elastic modulus of the

收稿日期:2023-08-10 修回日期:2023-09-27

基金项目:福建省自然科学基金(2022J05038);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JAT200098)。

第一作者:刘丰禄,博士,讲师。研究方向:竹木无损检测。E-mail:liufenglu39@fafu.edu.cn

*通信作者:吴传宇,博士,高级工程师。研究方向:农林机械化。E-mail:wcy@fafu.edu.cn

small sample of bamboo board was calculated by using its ultrasonic wave velocity. After that, the flexural elastic modulus and flexural strength of the small SPBLL samples were obtained through the three-point bending test, and the regression analysis was performed on the relationships between the ultrasonic propagation velocity & the flexural modulus, the ultrasonic propagation velocity & flexural strength, between the dynamic elastic modulus & the flexural strength. Although the same hot-pressing process parameters were used, there were significant differences in the contour distributions of ultrasonic wave velocity obtained by each SPBLL sample. This shows that there may be differences in the gluing effect of each SPBLL sample, resulting in a certain difference in the mechanical properties between them. The higher the velocity of ultrasonic wave propagation, the better the gluing effect or mechanical properties of SPBLL. There was a good correlation between the ultrasonic wave velocity and the flexural elastic modulus and flexural strength of the small SPBLL specimen (the determination coefficients R^2 were 0.65 and 0.59, respectively). This shows that the flexural elastic modulus and flexural strength of small SPBLL sample can be reasonably predicted and evaluated by ultrasonic wave velocity. There was also a good correlation between the dynamic elastic modulus and the flexural elastic modulus of the small SPBLL sample, and the coefficient of determination R^2 of the two was 0.68. This shows that it is also possible to reasonably predict and evaluate the flexural elastic modulus by measuring the dynamic elastic modulus of a small SPBLL specimen. It is concluded that ultrasonic nondestructive testing technology is a potentially effective means to reasonably predict and evaluate the mechanical properties of SPBLL.

Key words: ultrasonic; non-destructive testing; bamboo laminated lumber; ultrasonic velocity; mechanical property

在木材资源短缺、木材供需矛盾存在不断加剧的情况下,为解决我国木材供需不平衡的问题,提出了以竹代木的战略发展规划,大力培育优质竹林资源^[1]。竹材和木材都是具有各向异性的天然生物材料,都具有可再生、易降解、力学性能优良等特点。不过,与木材相比,竹材具有更短的生长周期、更强的再生能力以及更优异的力学性能^[2-6],我国丰富的竹资源,使得竹材逐渐成为了新的一种工业用材及工程材料,并在家具、建筑工程、桥梁工程、道路工程以及纤维复合材料等领域得到了广泛的应用^[7-9]。目前在工程领域应用较广的竹材产品主要包括竹材胶合板、竹集成材、竹重组材、竹帘层积材、竹帘胶合板、竹编胶合材、竹缠绕复合材、竹木复合材以及竹塑复合材等。侧压竹集成材作为竹材胶合板的一种,具有较好的抗拉、抗压及抗弯性能,被广泛应用于家具、建筑地板、车厢面板以及集装箱面板等领域^[10-11]。

近些年竹材在建筑工程领域的广泛应用,对于竹材制品的力学性能以及质量的要求更为严格,有关竹材产品的胶合性能以及力学性能,国内外许多学者已经开展了大量的研究,在竹材本身的力学特性^[12-13]、生产工艺与力学性能和胶合性能之间的关系^[14-16]和建筑结构要求用材^[17-19]等方面取得了较好研究成果。但目前大部分有关竹材产品的胶合性能以及力学性能的研究都是在实验室环境下,采用

有损甚至破坏的方式对竹材小试样进行测量,以代替评价竹板的胶合性能和力学性能。而采用无损检测手段对竹板等竹材制品进行整板胶合性能及力学性能进行测量和评价的相关研究却非常少,周先雁等^[20]采用超声波法和冲击回波法测量了竹质工程材的弹性模量,发现超声波法比冲击回波法更能有效检测竹质工程材弹性模量。周年强等^[21]采用超声波对胶合竹的力学性能进行试验研究,发现超声波速与胶合竹的强度、弹性模量具有一定相关性,指出可以基于超声波波速指标对胶合竹试件的强度和弹性模量进行无损检测。许琪^[22]对比了超声波、应力波和微钻阻力在重组竹力学性能检测方面的表现,提出了超声波更具优势的观点,并且论证了间接超声波和直接超声波因趋势的一致性均可对竹材进行无损检测评价。

然而,一方面用于工程结构的用材对质量有更为严格要求,另一方面随着我国人造板产业的迅速发展以及生产规模的不断扩大,对于高精度、智能化的自动无损检测设备的需要更为迫切。虽然我国竹板生产厂家很多,但大部分生产厂质量检验的方法是抽取一定比例的成品板截成小试件进行破坏性试验,而采用自动无损检测的方式对竹板整板的力学性能及质量进行评价则未见报道。

本研究采用超声波无损检测技术对侧压竹集成材的力学性能进行研究,通过超声波传播测量试验以

及三点弯曲测量试验,分析超声波传播速度与抗弯弹性模量和抗弯强度,以及动态弹性模量与抗弯弹性模量之间的关系,验证超声波无损检测技术是预测和评价侧压竹集成材力学性能的一种潜在的有效手段,研究结果可为竹板力学性能在线自动无损检测设备的研发提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 侧压竹集成材超声波传播测量试验

1.1.1 试验材料 试验所用5块侧压竹集成材(统一编号为No.1—No.5)来自福建省南平市建瓯市,由福建双羿竹木发展有限公司提供,取用建瓯市当地的毛竹(*Phyllostachys edulis*)作为基材,去除竹青竹黄后制成竹片,通过侧压胶合工艺制成500 mm×500 mm的竹片胶合板(图1),试验所用侧压竹集成材的数量、尺寸以及热压工艺参数见表1。



图1 侧压竹集成材(1号板)

Fig. 1 Side pressed bamboo laminated lumber (SPBLL) (No. 1)

表1 试验侧压竹集成材的基本参数

Table 1 Basic parameters of SPBLL

参数	类别	数值
尺寸	长度/mm	500
	宽度/mm	500
	厚度/mm	20
	平均胶合层数(layer)	77
物理参数	平均重量/kg	3.12
	平均密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	624.34
	平均含水率(%)	8
热压工艺参数	热压温度/ $^{\circ}\text{C}$	135
	热压时间/min	10
	热压压力/MPa	1
胶黏剂类型	脲醛树脂	
	施胶量/($\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$)	150
测试样品数		5

1.1.2 试验设备 试验所用超声波传播测量装置为匈牙利产的超声波微秒计(fakopp ultrasonic timer),是一种便携的超声波传播测量设备。超声波微秒计由1个信号处理盒和2个压电传感器组成

(图2),该设备的最大分辨率为1 μs 。

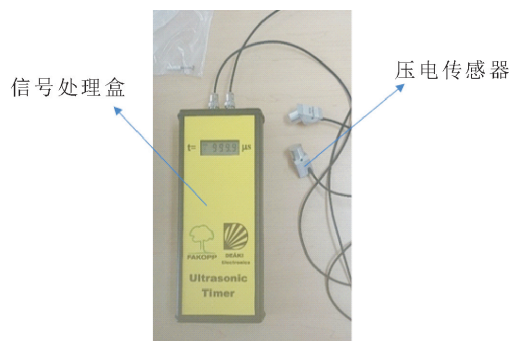


图2 超声波微秒计

Fig. 2 Fakopp ultrasonic timer

1.1.3 试验方法

1.1.3.1 侧压竹集成材整板超声波传播测量方法

考虑到试验所用的侧压竹集成材的胶合方向并非竹板的厚度方向,为了能够获得足够的超声波测量数据,以1号侧压竹集成材为例,先在与胶合方向垂直的2个板边进行50等分标记,形成50个数据测量点(图3)。

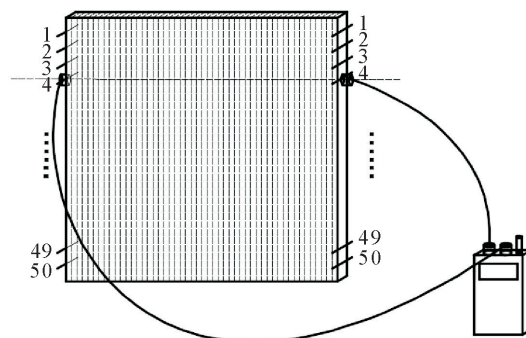


图3 侧压竹集成材超声波测量示意

Fig. 3 Ultrasound testing for SPBLL

首先从第1个测量点开始进行竹板超声波传播时间测量,将超声波微秒计的2个传感器分别放置在试验前已经标记好的第1个测量点位置处,并用力压紧在板边表面,不计第1个读数,待稳定后且连续3次出现同一读数时,则读取该数为本次超声波传播时间的测量值,完成第1个测量点。重复上述步骤,依次完成剩余所有测量点的超声波传播时间测量。

待测量完成后,将竹板依据切割加工方案(图4)的第1条加工线将竹板锯开,形成新的被测板边,再重复上述试验步骤完成Ⅱ级板(图4左侧宽度为400 mm的板)超声波传播时间测量。再次依据竹板上的加工线,将竹板按照顺序锯开,重复上述试验步骤依次完成Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级竹板超声波传播时间测量,至此,完成1号侧压竹集成材的超声波传播时间测量试验,完成该块竹板所有数据点的采集。

1.1.3.2 竹板小试样超声波传播测量方法 将侧压竹集成材整板超声波测量试验经过锯切加工所得到的 V 级大小的竹板再依据小试样加工方案(图 5)加工成横截面尺寸为 20 mm×20 mm,长为 250 mm 的小试样,用于竹板小试样超声波传播时间测量试验和三点弯曲测量试验。每个竹板大板能得到 5 块 V 级

竹板,而每个 V 级竹板能加工 10 个小试样,因此,5 个侧压竹集成材大板总共可以获得小试样的总数为 250 个。

重复上述所有试验步骤,再依次完成 2、3、4 号和 5 号侧压竹集成材的超声波传播时间测量,完成各个竹板所有数据点的采集。

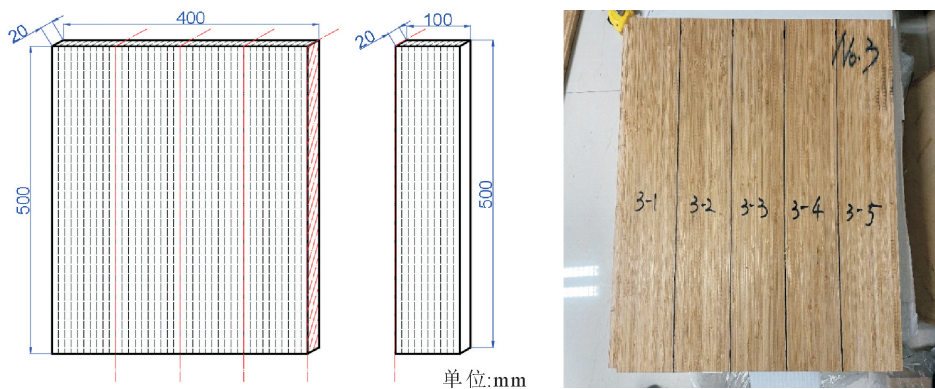


图 4 侧压竹集成材切割加工示意

Fig. 4 Schematic diagram of cutting for SPBLL



图 5 侧压竹集成材小试样切割加工示意

Fig. 5 Schematic diagram of cutting for clear specimens of SPBLL

竹板小试样超声波传播测量试验的测量方法见图 6,竹板小试样的 2 个超声波测量点分别位于试样的 2 个端侧面,分别记为 1 号测量点和 2 号测量点。利用超声波微秒计依次测量竹板小试样 1 号测量点和 2 号测量点的超声波传播时间,取两者的平均值作为该竹板小试样超声波传播时间测量值。重复上述步骤,完成全部 250 个竹板小试样的超声波传播时间测量试验。

1.2 竹板小试样密度测量试验

超声波在材料中的传播速度主要由材料的弹性模量和密度影响,根据式(1)的关系可以简化计算出材料的动态弹性模量(DMOE)。在单独用超声波预测侧压竹集成材力学性能之外,结合密度和动态

弹性模量进行力学性能预测。

试验材料为竹板小试样密度测量试验所用材料取自竹板超声波传播测量试验的 250 个竹板小试样。通过密度计测量小试样的密度。竹板小试样的密度测量试验完成后,利用所测得的小试样的密度值和超声波波速计算出竹板小试样的动态弹性模量。

$$M_{OE_d} = \rho v_u^2 \quad (1)$$

式中: M_{OE_d} 为竹板小试样的动态弹性模量; ρ 为竹板小试样的密度; v_u 为竹板小试样的超声波波速。

1.3 竹板小试样三点弯曲试验

1.3.1 试验材料 试验所用材料为竹板小试样超声波传播测量试验的 250 个小试样,由于竹材物理

力学性质(特别是抗弯弹性模量和抗弯强度)试验的试件尺寸目前并无相关国家标准,因此,用于竹板小试样三点弯曲试验的 250 个竹材小试样的尺寸参考 GB/T 1927.9—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法》(第 9 部分:抗弯强度测定)和 GB/T 1927.10—2021《无疵小试样木材物理力学性质试验方法》(第 10 部分:抗弯弹性模量测定)中规定的试样尺寸大小,三点弯曲试验所用竹板小试样的尺寸为 250 mm×20 mm×20 mm(长×宽×高),跨距设定为 200 mm,因此,试样的跨高比为 10,满足三点弯曲试验的试样跨高比要求(5.5~20)。

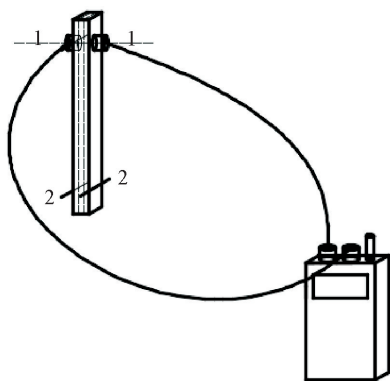


图 6 侧压竹集成材小试样超声波传播测量示意

Fig. 6 Schematic diagram of ultrasound testing for clear specimens of SPBLL

1.3.2 试验设备与方法 三点弯曲试验测量示意图见图 7,试验采用 CMT4104 微机控制电子万能试验机(产自深圳新三思实验设备有限公司)进行,根据竹板试样的长度,将试样跨度设置为 200 mm,每个试样进行 1 次加载试验,加载速度为 10 mm·min⁻¹,在 1 min 内使试样破坏,将试样破坏时的荷载作为最大荷载进行记录。

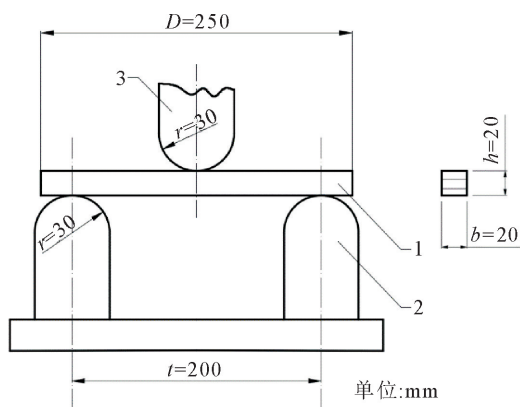


图 7 三点弯曲试验测量示意图

Fig. 7 Sketch map of three-points bending test

三点弯曲法计算抗弯强度的计算公式如下。

$$\sigma_b = \frac{3P_{\max}l}{2bh^2} \quad (2)$$

式中: σ_b 为试样的抗弯强度; P_{\max} 为最大荷载; l 为 2 支座间测试跨距; b 为试样宽度; h 为试样高度。

三点弯曲法计算抗弯弹性模量的计算公式如下。

$$E = \frac{23Pl^3}{108bh^3f} \quad (3)$$

式中: E 为试样的抗弯弹性模量; P 为上限荷载与下限荷载之差; f 为上限荷载、下限荷载对应的试样变形值。

2 结果与分析

2.1 竹板超声波传播测量试验结果与分析

2.1.1 竹板超声波传播速度等值线分布图 将侧压竹集成材超声波传播测量试验所测得超声波传播时间数据经过计算,即将相对应的传播距离除以所测得的传播时间,得到相对应的超声波传播速度,再利用 Surfer 软件对超声波波速数据进行处理,得到 5 块侧压竹集成材超声波传播速度等值线分布图(图 8),图中颜色越红的区域表示该区域的超声波波速值越大,也就是说超声波在该区域的传播速度越快,颜色越紫的区域表示该区域的超声波波速值越小,也就是说超声波在该区域的传播速度越慢。

由图 8 可以看出,5 号侧压竹集成材中红色区域(超声波波速越大区域)所占面积是 5 块竹板中最多的,而蓝紫色区域(超声波波速越小区域)所占面积又是 5 块竹板中最少的,这说明 5 号侧压竹集成材的胶合效果或者力学性能可能是 5 块竹板中最好的,因为超声波传播速度越快,表明该区域竹板的胶合效果或力学性能越好。另外,1、2 号和 4 号侧压竹集成材的蓝紫色区域面积及占比相对较大,表明在蓝紫色区域可能存在施胶不均匀或存在气泡等问题,导致该区域竹板的胶合效果或力学性能相对较差,因此,判断 1、2 号和 4 号侧压竹集成材的胶合效果或力学性能可能比较接近。对于 3 号侧压竹集成材,其红色区域面积占比小于 5 号竹板,而蓝紫色区域占比明显小于 1、2 号和 4 号竹板,因此,3 号竹板的胶合效果或力学性能可能差于 5 号竹板,但可能优于 1、2 号和 4 号竹板。

为进一步分析 5 块侧压竹集成材超声波波速之间的差异,利用所测的竹板超声波波速数据计算超声波在整个竹板上的平均波速值,5 块侧压竹集成材的计算结果见图 9,可以看出,5 号侧压竹集成材的平均超声波波速值是最大的,3 号侧压竹集成材的平均超声波波速值略小于 5 号竹板。1 号和 4 号竹板平均超声波波速值接近,而 2 号竹板平均超声波波速值是最小的。上述分析结果与前述竹板超声波传播速度等值线图的分析结论基本一致,5 号竹

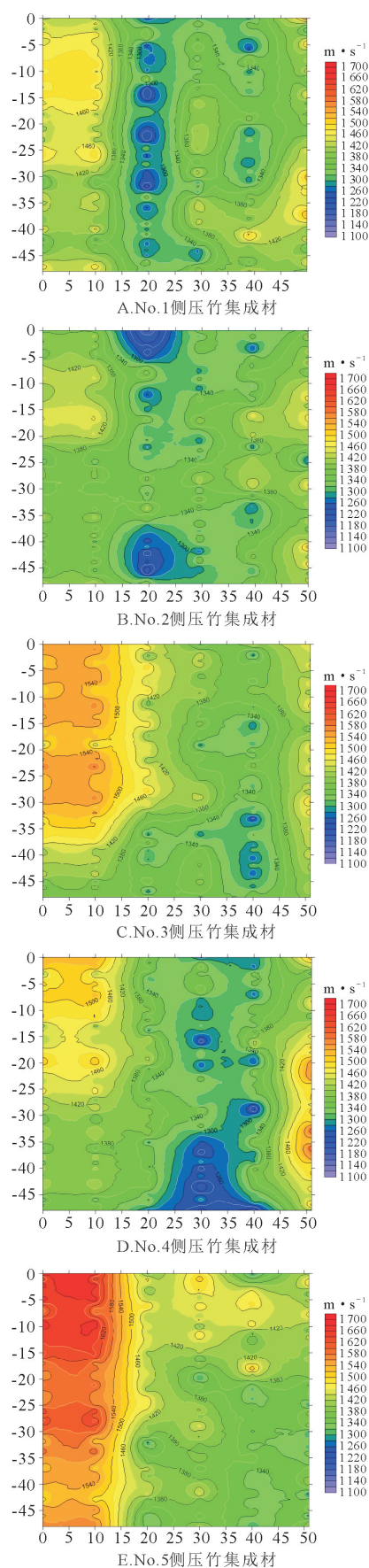


图 8 5 块侧压竹集成材超声波波速等值线分布

Fig. 8 Contour maps of ultrasonic speed for five SPBLL samples

板的平均超声波波速值最大,说明该竹板的胶合效果或力学性能可能是最好的,另外,3 号竹板的平均超声波波速值略低于 5 号竹板,但高于 1、2 号和 4 号竹板,也就是说,3 号竹板的胶合效果或力学性能可能差于 5 号竹板,但可能优于 1、2 号和 4 号竹板。因此,超声波无损检测技术可以作为一种潜在技术手段或方法,用于评价和预测侧压竹集成材的胶合效果或者力学性能,超声波传播速度越大,表明侧压竹集成材的胶合效果或者力学性能越好。

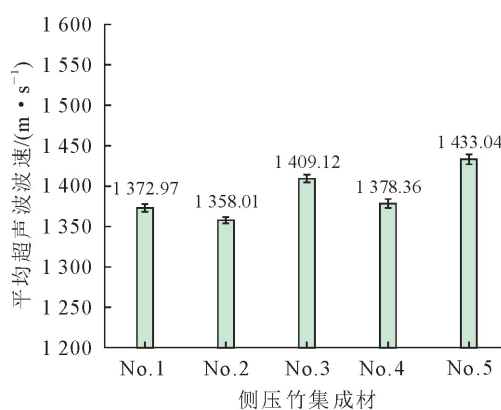


图 9 侧压竹集成材平均超声波波速

Fig. 9 Average ultrasonic speed of SPBLL

2.2 竹板小试样超声波传播测量与三点弯曲试验结果与分析

2.2.1 竹板小试样的抗弯弹性模量和抗弯强度与超声波波速的关系

通过线性回归分析,得到 1~5 号板竹板小试样的抗弯弹性模量和抗弯强度与超声波波速的线性回归模型,结果分别见图 10、图 11。由图 10 可以看出,侧压竹集成材小试样的抗弯弹性模量与其超声波波速之间存在良好的线性相关关系,两者的决定系数(R^2)达到了 0.73,这说明可以通过测量侧压竹集成材小试样的超声波波速来对其抗弯弹性模量进行预测和评价。

另外,由图 11 可以发现,1~5 号板侧压竹集成材小试样的抗弯强度与其超声波波速之间也存在较好的线性相关关系,两者的决定系数(R^2)为 0.63,也就是说,可以通过测量侧压竹集成材小试样的超声波波速来对其抗弯强度进行预测和评价。综上所述,对于侧压竹集成材小试样,超声波无损检测技术是预测和评价其力学性能(特别是抗弯弹性模量和抗弯强度)的一种有效手段。

2.2.2 竹板小试样动态弹性模量与超声波速度的关系

将 1~5 号侧压竹集成材小试样通过密度测量试验计算得到的动态弹性模量与超声波速度进行相关性分析,线性回归分析的结果见图 12,可以看出,竹板小试样的动态弹性模量和超声波速度之间

存在良好的相关性,两者的决定系数(R^2)达到了 0.97,表明动态弹性模量和超声波之间的线性相关性极强,可以通过动态弹性模量来代替超声波速度进行侧压竹集成材力学性能评估。

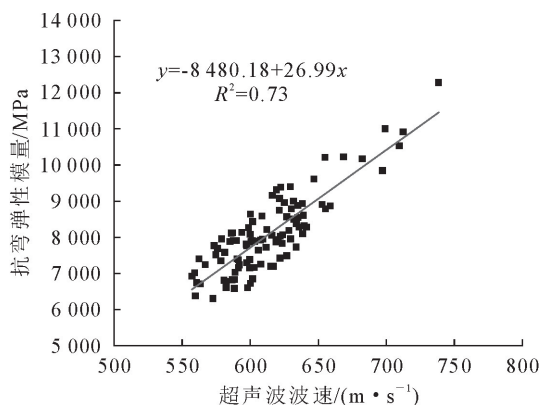


图 10 侧压竹集成材小试样抗弯弹性模量与其超声波波速线性相关分析

Fig. 10 Linear relationship between bending elastic modulus and ultrasonic speed of clear specimens of SPBLL

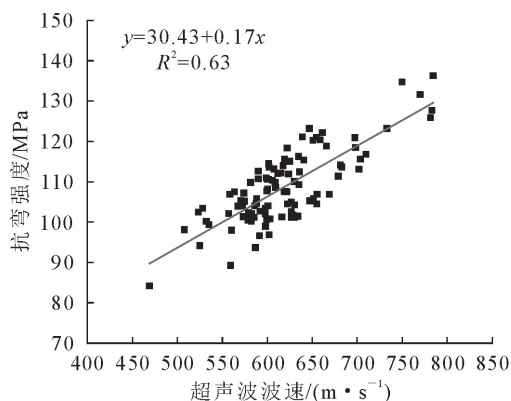


图 11 侧压竹集成材小试样抗弯强度与其超声波波速线性相关分析

Fig. 11 Linear correlation analysis between bending strength and ultrasonic wave velocity of small specimen of SPBLL

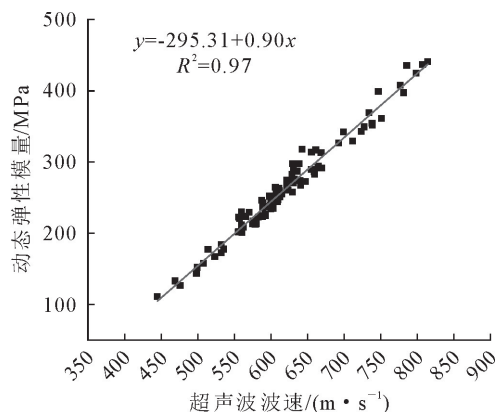


图 12 侧压竹集成材小试样动态弹性模量与超声波速度的相关性分析

Fig. 12 Correlation analysis between dynamic elastic modulus and ultrasonic velocity of small sample of SPBLL

2.2.3 竹板小试样动态弹性模量与抗弯弹性模量的关系 由上文结果,可以使用动态弹性模量进行力学性能评估。因此将 1~5 号侧压竹集成材小试样通过密度测量试验计算得到的动态弹性模量与通过三点弯曲试验测得的抗弯弹性模量进行相关性分析,线性回归分析的结果见图 13,可以看出,竹板小试样的动态弹性模量和抗弯弹性模量之间存在良好的相关性,两者的决定系数(R^2)达到了 0.80,表明可以通过测量侧压竹集成材小试样的动态弹性模量来对其抗弯弹性模量进行预测和评价。

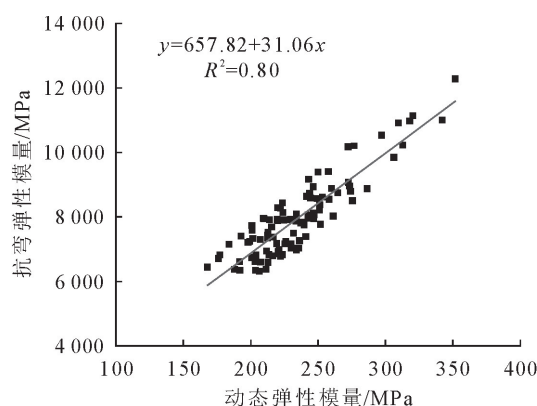


图 13 侧压竹集成材小试样动态弹性模量与抗弯弹性模量的相关性分析

Fig. 13 Correlation analysis on the dynamic elastic modulus and the flexural elastic modulus of a small specimen of SPBLL

3 结论

即使采用相同的热压工艺参数,各个侧压竹集成材所测得的超声波波速分布存在较为明显的差别,也就是说侧压竹集成材的胶合效果以及力学性能之间还是会存在差异,超声波传播速度越大,表明侧压竹集成材的胶合效果或者力学性能越好,超声波无损检测技术可以作为一种潜在技术手段或方法用于评价和预测侧压竹集成材的胶合效果或者力学性能。

侧压竹集成材小试样的抗弯弹性模量和抗弯强度与其超声波波速之间都存在较好的线性相关关系,两者的决定系数(R^2)分别为 0.73 和 0.63,说明可以通过测量侧压竹集成材小试样的超声波波速来对其抗弯弹性模量和抗弯强度进行预测和评价,也就是说超声波无损检测技术是可以用于预测和评价其力学性能(特别是抗弯弹性模量和抗弯强度)的一种有效手段。

动态弹性模量和超声波速度两者的决定系数(R^2)达到 0.97,说明可以通过侧压竹集成材小试样的动态弹性模量来结合超声波速度和密度进行侧压竹集成材力学性能评估。竹板小试样的动态弹性模

量和抗弯弹性模量之间也存在良好的相关性,两者的决定系数(R^2)达到了0.80,表明可以通过测量侧压竹集成材小试样的动态弹性模量来对其抗弯弹性模量进行预测和评价。

参考文献:

- [1] 赵章荣,刘星雨,傅万四,等.竹材胶合力学性能的研究[J].木材加工机械,2016,27(3):5-8.
ZHAO Z R,LIU X Y,FU W S,*et al.* Study on bamboo culm glue mechanics performance[J]. Forestry and Grassland Machinery,2016,27(3):5-8. (in Chinese)
- [2] 关明杰,刘仪,朱越强,等.超声对竹材表面性能和竹层积材胶合性能的影响[J].竹子学报,2018,37(1):8-15.
GUAN M J,LIU Y,ZHU Y Q,*et al.* Effects of ultrasonic treatment on surface characteristics and bonding properties of bamboo laminated lumber[J]. Journal of Bamboo Research, 2018,37(1):8-15. (in Chinese)
- [3] 张秀标,费本华,江泽慧,等.竹展平板胶合性能研究[J].林产工业,2020,57(9):16-19.
ZHANG X B,FEI B H,JIANG Z H,*et al.* Study on bonding performance of flatten bamboo panels[J]. China Forest Products Industry,2020,57(9):16-19. (in Chinese)
- [4] 李启航,范云蕾,苏杰,等.竹木胶合梁受剪性能试验研究[C]//中冶建筑研究总院有限公司.2020年工业建筑学术交流会论文集:下册,2020:1169-1174.
- [5] 张秀标,费本华,江泽慧,等.竹展平板胶合性能研究[J].林产工业,2020,57(9):16-19.
- [6] 苏文会,范少辉,彭颖,等.车筒竹、籐竹和越南巨竹竹材的主要物理性质研究[J].西北林学院学报,2012,27(3):205-209,228.
SUN W H,FAN S H,PENG Y. Study on the main wood physical properties of bambusa sinospinosa,bambusa blumeana and dendrocalamus yunnanicus[J]. Journal of Northwest Forestry University,2012,27(3):205-209,228. (in Chinese)
- [7] 李海涛,宣一伟,许斌,等.竹材在土木工程领域的应用[J].林业工程学报,2020,5(6):1-10.
LI H T,XUAN Y W,XU B,*et al.* Bamboo application in civil engineering field[J]. Journal of Forestry Engineering,2020,5(6):1-10. (in Chinese)
- [8] 赵婷,高明星,赵毕力格,等.竹粉改性沥青高温流变性能研究[J].森林工程,2022,38(3):143-152.
- [9] 梁哨,潘昌仁,岑晓倩,等.涂饰处理对毛竹和炭化毛竹表面视觉性质及防腐性能的影响[J].森林工程,2022,38(1):52-57.
- [10] 魏洋,张齐生,蒋身学,等.现代竹质工程材料的基本性能及其在建筑结构中的应用前景[J].建筑技术,2011,42(5):390-393.
WEI Y,ZHANG Q S,JIANG S X,*et al.* Basic properties and prospects of modern bamboo engineering materials applied in building structures[J]. Architecture Technology,2011,42(5):390-393. (in Chinese)
- [11] 田黎敏,靳贝贝,郝际平.现代竹结构的研究与工程应用[J].工程力学,2019,36(5):1-18,27.
TIAN L M,JIN B B,HAO J P. Research and application of modern bamboo structures[J]. Engineering Mechanics,2019,36(5):1-18,27. (in Chinese)
- [12] 刘鹏程,周期石,田杰夫,等.原竹材料抗弯性能试验研究[J].建筑科学与工程学报,2021,38(4):101-109
- [13] 牛哈,伍希志,任桂芹,等.基于OTSU与CANNY算法的竹片缺陷图像检测[J].森林工程,2022,38(6):75-81.
- [14] 肖岩,杨瑞珍,单波,等.结构用胶合竹力学性能试验研究[J].建筑结构学报,2012,33(11):150-157.
XIAO Y,YANG R Z,SHAN B,*et al.* Experimental research on mechanical properties of glulam[J]. Journal of Building Structures,2012,33(11):150-157. (in Chinese)
- [15] 刘焕荣,杨晓梦,张秀标,等.竹展平板拉伸剪切胶合性能[J].林业工程学报,2021,6(1):68-72.
LIU H R,YANG X M,ZHANG X B,*et al.* The tensile shear bonding property of flattened bamboo sheet[J]. Journal of Forestry Engineering,2021,6(1):68-72. (in Chinese)
- [16] SUMARDI I,SUZUKI S. Dimensional stability and mechanical properties of strandboard made from bamboo[J]. Bio. Resources,2014,9(1):1159-1167.
- [17] 潘金炎,王立,张玉强,等.基于重组竹的结构用胶合竹材力学性能试验研究[J].施工技术,2018,47(21):135-139.
PAN J Y,WANG L,ZHANG Y Q,*et al.* Experimental study on mechanical properties of structural glued bamboo based on recombinant bamboo[J]. Construction Technology,2018,47(21):135-139. (in Chinese)
- [18] TANG G,GAN T,ZHEXIAN Z,*et al.* Experimental research on basical mechanical properties of bamboo plywood[J]. Journal of Physics Conference Series,2020,1637(1):012043.
- [19] 李桥,宋焕,王志强.竹/木销连接组合木梁抗弯性能研究[J].西北林学院学报,2020,35(2):218-222.
LI Q,SONG H,WANG Z Q. Bending performance of timber composite beam fastened with bamboo/wood dowels [J]. Journal of Northwest Forestry University,2020,35(2):218-222. (in Chinese)
- [20] 周先雁,汤威,王智丰.竹质工程材弹性模量检测方法[J].森林工程,2014,30(4):91-93.
ZHOU X Y,TANG W,WANG Z F. Detection methods on modulus of elasticity of bamboo engineering material[J]. Forest Engineering,2014,30(04):91-93. (in Chinese)
- [21] 周年强,陈国,赵龙龙.现代胶合竹的超声波检测与轴压强度的试验研究与分析[J].竹子学报,2020,39(1):46-52.
ZHOU N Q,CHEN G,ZHAO L L. Experimental study on ultrasonic wave velocity and compression performance of small glued bamboo specimens[J]. Journal of Bamboo Research,2020,39(1):46-52. (in Chinese)
- [22] 许琪.重组竹无损检测评价及耐腐蚀性试验研究[D].南京:东南大学,2019.