

基于应力波的意杨原木、单板及 LVL 弹性模量相关性研究

周志茹¹, 赵茂程^{1*}, 王 正², 管 珣¹

(1. 南京林业大学 机械电子工程学院, 江苏 南京 210037; 2. 南京林业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037)

摘 要: 评估原木制成的单板、单板层积材(LVL)制品的品质, 为原木进行适时最佳分等提供方法, 以提高其利用价值。采用应力波无损检测法测定意杨原木、及其单板和 LVL 制品的动态弹性模量(MOE)值, 并研究三者之间的相关性, 同时, 对 LVL 进行抗弯力学性能试验, 检测其静态 MOE 值, 与其动态 MOE 进行对比验证。结果表明: 用应力波无损检测方法测定意杨原木的动态 MOE 值与其单板和 LVL 的动态 MOE 值之间均有较高的相关性(相关系数 $R > 0.80$), 且 LVL 动、静态 MOE 之间呈显著相关($R > 0.90$)。

关键词: 意杨; 原木; 单板; 单板层积材; 应力波; 弹性模量

中图分类号: S781.21

文献标志码: A

文章编号: 1001-7461(2014)03-0188-06

Correlations of the Modulus of Elasticity among Poplar Log, Veneer and LVL Based on the Stress Wave Method

ZHOU Zhi-ru¹, ZHAO Mao-cheng^{1*}, WANG Zheng², GUAN Xun¹

(1. Institute of Mechatronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China;

2. Institute of Material Science and Engineering Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: The stress wave method was employed to measure the dynamic modulus of elasticity (MOE) of a group of poplar logs, corresponding veneers, and laminated veneer lumber (LVL) products to assess the quality of the veneer and LVL. LVL dynamic MOE values were in good agreement with static MOE values measured by bending test ($R > 0.90$). The correlations among log, corresponding veneer and LVL products were also researched. Experimental results indicated that the stress MOE of the poplar logs had a strong correlation with the dynamic MOE of veneer and LVL products ($R > 0.80$).

Key words: poplar; log; veneers; laminated veneer lumber; stress wave; modulus of elasticity

目前, 世界各国为保护地球环境而减少对原始森林砍伐, 大径级原木资源日益紧张, 以速生人工林取代天然林已经成为目前林业发展的主要趋势。我国是世界上速生林的蓄积量最大的国家, 其中, 杨树的蓄积量最大^[1]。因此, 无损检测杨树木材力学性能, 并对其品质进行有效分等以提高其利用率^[2], 对充分利用和节约使用速生林资源具有重要的价值。

木材无损检测技术^[3]是在不破坏木材使用价值的基础上充分地、对木材的使用性能进行评价。自 20 世纪 50 年代发展至今, 其应用范围越来越广, 从

立木到锯材^[4-5]、人造板^[6-7]以及古建筑木构件^[8]等, 从外观缺陷到内部质量的检测等, 其检测方法也逐渐增多, 有超声波、射线、机械应力无损检测、振动法、应力波、FFT 分析无损检测等方法^[8]。其中, 木材弹性模量(MOE)是实现木材无损检测的重要参数^[10-11]和实现木材强度在线实时自动分级的基本依据。R. J. Ross^[12-13]等先后采用应力波、横向振动、超声波等无损检测技术, 对 95 根香脂冷杉和 98 根东方云杉原木和其锯材的弹性模量以及 22 根美国黄松和其旋切单板的品质进行了研究, 结果表明: 原

收稿日期: 2013-08-30 修回日期: 2013-10-17

基金项目: 2012 年度包装行业高新技术研发资金项目(财企[2012]192 号); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2013006-01); 引进国际先进林业科学技术项目(948.2010-04-08); 江苏省科技支撑计划(BE2011396); 江苏省 2011 年度普通高校研究生科研创新计划项目(CXLX11_0520)。

作者简介: 周志茹, 女, 在读博士, 研究方向: 传感器技术与自动检测系统。E-mail: zrz0801@sina.com

* 通信作者: 赵茂程, 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向: 传感器技术与自动检测系统。E-mail: mczhao@njfu.com.cn

木的弹性模量与其锯材的弹性模量以及其单板中的应力波传播时间均具有显著的相关关系。采用纵向应力波、横向振动和静态弯曲试验法,测定了159根小径级红松和北美短叶松原木的抗弯刚度和弹性模量,结果表明:从每种试验中获得弹性模量和刚度值具有较强的相关性,证明了纵向应力波和横向振动技术均可用来对小直径原木进行精确分等^[14]。利用应力波对原木或单板进行应力波检测技术在北美趋于成熟,已拥有较完善的木材机械应力标准,且其开发的精确且便携的应力波测试仪能与木材机械应力标准相结合对木材材质进行测试与分等^[15]。相比之下在我国,应力波检测方法研究尽管起步较晚,但应用应力波技术到木材加工领域仍取得一些成果^[16]。在人造板方面,研究了应力波无损检测技术检测中密度纤维板弹性模量的方法。2001年,胡英成^[19-22]等利用弯曲振动法、纵波传播法和纵波共振法,对胶合板和刨花板的动态抗弯弹性模量进行了无损检测,同时分析比较了不同试验方法所得结果之间的相关性等。

应力波测试法是通过声音技术提供一个很直接的方式,来无损、快速地检测原木或单板及LVL产品的内部品质的一种现代仪器测试法^[23-26],具有成本低、携带方便,传感器和被测木材之间不用任何耦合剂等优势^[27]。国外已研究证明该方法可在生产企业内的原木场中实时地对原木进行检测,以便为其最终木材产品的质量分等提供依据^[2,28]。由于原木及其单板、LVL制品受其含水率、密度、节子、虫眼、腐朽、开裂和钝棱等综合因素的影响,使应力波在其内部传播的速度各异,传输过程也有差异,据此来评定其弹性模量等力学性能的优劣性,可以避免“大材小用,劣材优用”现象的发生,对制造方和使用方均有利,并有助于仪器检测技术的进步。选取我国苏北典型的速生意杨树种为研究对象,对同一批原木开展应力波无损检测,评价其应力波动态弹性模量与其单板和LVL的动态弹性模量之间的相关性,并对评估单板、LVL的等级出材率,有效实施对原木品质的最佳分等,提高原木利用的环保水平与应用价值具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

苏北意杨(*Populus euramevicana*)原木55根,长度2.5~2.6 m、小头直径200~320 mm,取样,采用烘干法测得含水率为65%~78%。单板样本规格为1 270.0 mm×260.0 mm×2.1 mm,含水率为3%~5%(由Metriguard Veneer Tester单板测试

仪直接测得)。其LVL制品规格为1 210.0 mm×181.0 mm×21.3 mm,烘干法测得其含水率为8%~10%,其中,胶黏剂为E1级脲醛树脂(UF),固体含量51.4%、黏度180.5 mPa·s、pH7.3,使用时加入重量份为25%面粉和0.2%~0.3%氯化氨。

单板和LVL制品试件的制备过程:从应力波无损检测后的55根原木中随机抽取13根原木,每根原木制一块LVL,每块LVL板坯均由11张单板按顺纹方向组坯制成。制备时,先将原木剥皮、截段,经BQ1513/7型单边液压双轴旋切机旋切成单板。由于同一根木材心边材的性能存在差异^[27],所以为平均木材品质,对每根原木所旋切的单板按照从其边材至心材旋切的顺序选6~10张,编号后进行自然晾晒和烘干压平,最后经整形加工制成规格约为1 250.0 mm×400.0 mm×2.6 mm的共103单板样本以进行超声波无损检测。对上述每根原木的单板截取出11张单板样本分别进行涂胶、组坯、预压(压力0.8 MPa,时间7~8 h)和热压(温度110~120℃、压力1.3 MPa,时间40 min),最后,经过养生与裁边工序制成13块规格为1 210.0 mm×181.0 mm×21.3 mm的LVL试件用以应力波无损检测试验,随后再对13块LVL试件的每块截取2条规格500.0 mm×21.0 mm×21.3 mm的小试件用以进行三点弯曲静力学试验。

1.2 方法

1.2.1 应力波法对原木波速及弹性模量值的测算

测量原理是:原木试材一端经锤击作用,其内部产生应力波(共振声波—resonance acoustic wave)传播,通过测量公式(1)计算应力波的传播速度^[2,28],根据应力波传播速度确定木材的弹性模量,最终估算出木质材料的力学强度优劣。

$$v = \frac{2f_n L}{n} \quad (1)$$

式中: f_n 为第 n 阶谐波的固有频率(Hz); L 为原木的长度(m)。

测试时,采用新西兰产HM200型便携式原木应力波速度检测仪(Fibre-gen, Christchurch, New Zealand),对55根长度为2.5~2.6 m的原木一端逐一敲击3次,得其每次测量的应力波速度值数据(图1)。随后,从上述原木中随机抽取13根原木,分别进行称重和尺寸测量以求密度。根据原木中的应力波传播速度值($\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$)与其密度值($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$),由声学动态弹性模量公式^[29-30](2)计算得到原木的动态弹性模量值(GPa)。

$$E_1 = \rho v^2 \quad (2)$$

1.2.2 应力法对单板弹性模量值的测算 Metri-

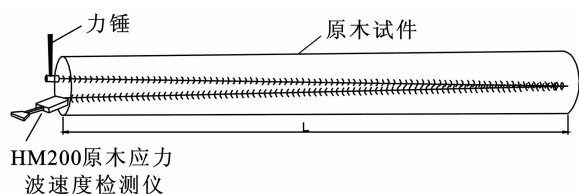


图1 HM200 实测原木应力波速度的系统示意图

Fig. 1 Diagram of log resonance acoustic velocity test with Director HM 200™

guard Veneer Tester 检测的基本原理是利用应力波产生声脉冲从一端进入被检测材料,经过穿透、反射、衰减,再被另一端的接收传感器收集,通过提取不同信号参数并进行处理,实现对材料性质的预测。不同的超声波参数,如传播时间、传播速度、能量峰值和频率,可用来检测板材的表面缺陷、结构材腐朽以及弹性模量等,也可用于评价木制品的力学性能、开裂和老化^[10,28]。

试验时,对 Metriguard Veneer Tester 单板测试仪进行参数设置并调试,然后将选取的 103 张单板直接送入 Metriguard Veneer Tester 单板测试仪中进行检测。该测试仪内含发送接收传感器、光电传感器、红外温度计、编码器及谐振器等组成,可以直接从监视器上读取所测单板的宽度、密度、温度、含水率、斜纹角、超声波传播时间(UPT)及弹性模量 E_2 等。

1.2.3 应力波法对 LVL 制品波速及弹性模量值的测算 测试原理是选用冲击应力波法,利用 Fakopp 2D 应力波计时器(Fakopp Enterprise, Agfalva, Hungary),其测试原理为飞行时间法/TOF^[26] Acoustic Method,测得应力波在 LVL 试件一定距离间传播时的时间和传播速度 v ;根据测得 LVL 的密度 ρ ,通过公式(2)计算得到 LVL 的动态弹性模量值 E_3 (图 2)。

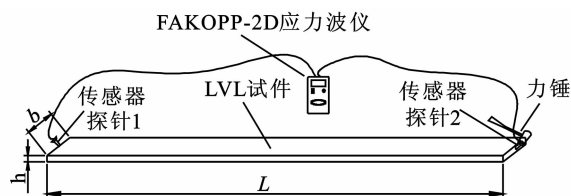


图2 Fakopp 2D 实测 LVL 弹性模量系统示意图

Fig. 2 Diagram of LVL MOE measurement with Fakopp 2D

测试时,首先在 LVL 试件两端钉上探针(钢钉),并在探针上挂上传感器,通过用小锤敲击传感器,在其内部产生应力波。其次,经设置相应参数后,在选定位置固定好探针,此探针的作用是固定传感器并将应力波传递给 LVL。再次,将传感器 1 和传感器 2 放到试件的两端,并使传感器和探针之间紧密连接,且保持垂直,同时测量出两个探针之间的

距离。最后,打开应力波测试按钮,用小锤分别轻敲传感器探针 1 与探针 2 上的小棒,获得波速值 v ;并将传感器和探针取下,更换试件,重复试验完毕。其中,为减少人为误差,每只传感器用力锤轻敲 6~8 次,记录每次数据。

1.2.4 三点弯曲法对 LVL 制品进行静态抗弯弹性模量测算 从上述 13 根 LVL 试件上分别截取用于三点弯曲试验的无疵小试样(500.0 mm×21.0 mm×21.3 mm)各 2 个,对其取平均以减少误差。在南京林业大学“国家林业局人造板及其制品质量检验检测中心”,采用静态三点弯曲法,在岛津 AG-IC 10KN 型万能力学测试机上对 26 块 LVL 小试件进行抗弯力学性能测试。试件跨距 420 mm,试验机根据试件的尺寸和形状选用合适的夹头和压头尺寸,根据相关标准和技术要求的规定调节加载速度,重复 3 次,取平均值,计算得到的 13 根 LVL 试件的静态弹性模量值 E_4 。

2 结果与分析

2.1 原木弹性模量

用 HM200 原木品质测量仪测得的 55 根原木的应力波速度(图 3)可知,意杨原木的应力波速度值范围在 2.2~3.5 km·s⁻¹之间,多数集中在 3.0 km·s⁻¹附近。

应力波法实测 13 根原木弹性模量试验的参数结果数据见表 1。原木动态弹性模量值和应力波速度值进行线性回归分析(图 4)表明,原木动态弹性模量 E_1 与应力波速度 v 之间有较强的相关性,可用一元线性方程 $y=5.1255x-6.8412$ 表示,其相关系数 $R=0.90$ 。

表1 13根原木密度、应力波波速和动态 MOE 的测试结果

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
密度 $\rho_1/(g \cdot cm^{-3})$	0.774	1.054	0.935	0.089	9.5
应力波速 $v_1/(km \cdot s^{-1})$	2.260	3.470	3.038	0.371	12.2
动态弹性模量 E_1/GPa	4.912	11.772	8.732	2.106	24.1

2.2 原木弹性模量 (E_1) 与单板弹性模量 (E_2) 的相关性

对应力波法实测的原木动态弹性模量(E_1)与超声波法实测的其旋切单板动态弹性模量(E_2)之间的相关性进行线性回归分析 F 检验,结果表明:二者之间的关系可用线性方程 $y=0.8969x-0.283$ 表示,其相关系数 $R=0.84$ (图 5),在 0.001 水平上呈显著相关。

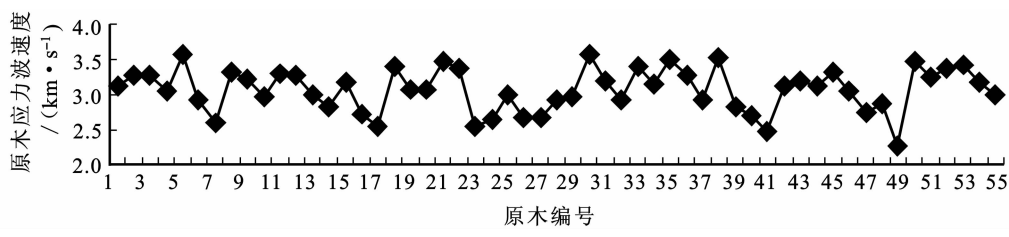


图 3 55 根原木应力波速度值的折线图

Fig. 3 Line chart of resonance acoustic velocity of 55 logs

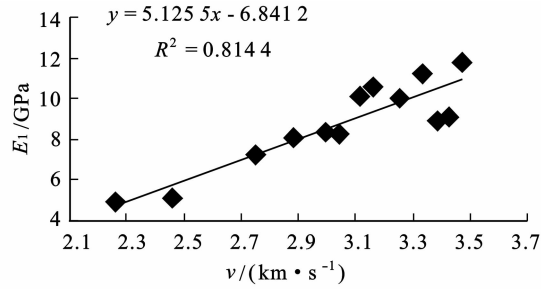


图 4 原木动态弹性模量 E_1 与 v 之间的相关性

Fig. 4 Relationship between dynamic MOE and resonance acoustic velocity of logs.

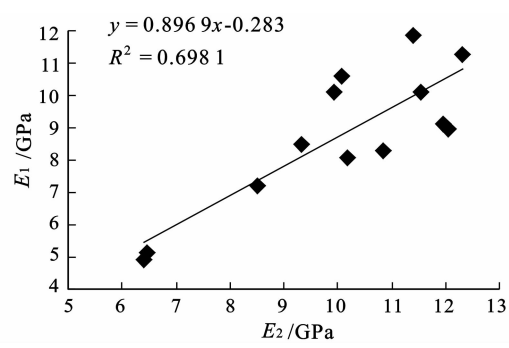


图 5 原木与其单板的动态 MOE 间的相关性

Fig. 5 Relationship between dynamic MOE of log and veneer

2.3 LVL 动、静弹性模量

无损应力波检测法和传统力学抗弯试验(三点弯曲法)获得的 LVL 产品的动、静态弹性模量(E_3 和 E_4)的测试结果(表 2)可以看出,意杨 LVL 产品的动态 MOE 平均值(12.175 GPa)比静态 MOE 平均值(10.712 GPa)高 13.66%。

表 2 LVL 密度及其应力波波速、动态 MOE 值测试结果

Table 2 Test results of LVL density, TOF velocity and dynamic MOE

项目	最小值	最大值	平均值	标准差	变异系数/%
密度 $\rho_2/(g \cdot cm^{-3})$	0.478	0.625	0.573	0.055	9.6
应力波速度 $v_2/(km \cdot s^{-1})$	3.730	4.886	4.417	0.300	6.8
动态弹性模量 $E_3/(GPa)$	7.643	15.097	12.175	2.355	19.3
静态弹性模量 $E_4/(GPa)$	5.238	14.311	10.712	2.989	27.9

线性回归分析结果表明: E_3 和 E_4 之间具有很高的相关性,二者的相互关系可用线性方程 $y = 1.204 3x - 3.950 6$ 表示,相关系数 $R = 0.95$ (图

6),在 0.001 水平上呈显著相关。说明传统的抗弯力学性能试验比较验证了无损应力波检测法的可靠性和可行性,而且应力波检测法具有对试件尺寸适用性强,检测试件无破坏、快速、便捷等优势。

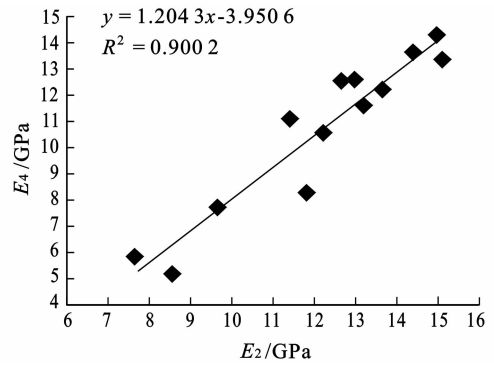


图 6 LVL 制品的动、静态 MOE 间的相关性

Fig. 6 Relationship between LVL dynamic and static MOE

应力波法实测的 LVL 动态弹性模量值 E_3 与超声波法实测原单板动态弹性模量值 E_2 之间相关关系可用线性方程 $y = 0.801 1x + 0.298 4$ 表示,其相关系数 $R = 0.96$ (图 7),回归分析表明, E_3 与 E_2 在 0.001 水平上呈显著相关。同时对均采用应力波法检测的原木与其 LVL 产品的动态弹性模量值之间的相关性进行分析,可得二者之间线性方程 $y = 0.723 3x - 0.073 7$,其相关系数 $R = 0.81$ (图 8),也在 0.001 水平上呈显著相关。

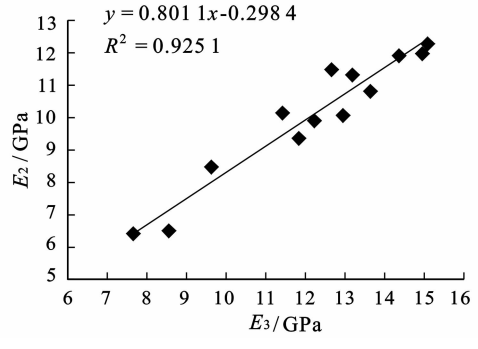


图 7 单板与其 LVL 的动态 MOE 间的相关性

Fig. 7 Relationship between dynamic MOE of veneer and LVL

13 根意杨原木及其单板和 LVL 制品的动态 MOE 值的试验结果数据进行统计分析(表 3)可以看出,从原木到单板,再到 LVL 产品,其动态弹性

模量值呈逐渐增大趋势(其中,原木弹性模量平均值 $\bar{E}_1 = 8.732$ GPa, 单板弹性模量的平均值 $\bar{E}_2 = 10.052$ GPa, LVL 弹性模量的平均值 $\bar{E}_3 = 12.157$ GPa), 分析其原因为:一方面,原木中的缺陷(节子、裂纹、腐朽等)是不均匀分布的,当原木旋切成单板再制成 LVL 产品之后,其中的一些缺陷已被剔除,另一些缺陷则均匀分布于 LVL 中,从而使 LVL 制品的强度更均衡,这样就减弱了缺陷对木材整体强度所造成的影响。另一方面,在原木旋切成单板的过程中,单板收到压缩,其密度大于木材,在单板制成 LVL 时又产生一定的压缩率,单板密度再一次增加,从而弹性模量增大。同时表 3 中显示, E_1 、 E_2 和 E_3 的标准差和变异系数均较小,其中,应力波法检测的单板的 MOE 值的标准差最小($S_2 = 1.961$ GPa),测得的 LVL 的动态 MOE 值的变异系数最小为 19.3%。综合上述试验结果分析可以说明:应力波无损检测方法对意杨原木的品质进行检测和评估是准确可靠的。

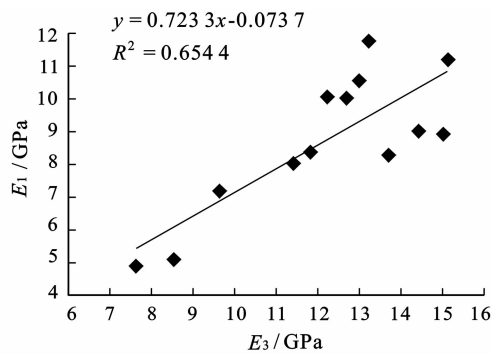


图 8 原木与其 LVL 制品的动态 MOE 值之间的相关性

Fig. 8 Relationship between dynamic MOE of log and LVL

表 3 13 根原木及其单板和 LVL 的动态 MOE 值的测试结果

Table 3 Test results of log, the corresponding veneer and LVL dynamic MOE

弹性模量参数	最小值 /GPa	最大值 /GPa	平均值 /GPa	标准差 /GPa	变异系数 /%
E_1	4.912	11.772	8.732	2.106	24.1
E_2	6.395	12.296	10.052	1.961	19.5
E_3	7.643	15.097	12.175	2.355	19.3

3 结论与讨论

用应力波仪器法无损检测的原木动弹模 E_1 与其单板动弹模 E_2 和 LVL 动弹模 E_3 之间的相关显著,相关系数分别为 0.84 和 0.81,且 $E_1 < E_2 < E_3$;同时,应力波法检测的 LVL 动态 MOE 值和三点弯曲法测得的 LVL 静态 MOE 值之间显著相关,相关系数高达 0.95。说明应力波仪器法对检测原木质量及预测其单板和 LVL 品质具有准确、可靠、便捷

及试件无破坏等优点。

由先进的 Metriguard Veneer Tester 单板测试仪得到的同根原木的单板 MOE 值基本相同,且所测的单板动态模 E_2 与 LVL 的动弹模 E_3 呈强相关,相关系数 $R=0.96$ 。由于试验难度较大,本试验采集样本不够多,下一步将加大试验样本数,以达到采用 HM200 仪器对终端产品为 LVL 的意杨原木进行快速准确无损分等的目标。

基于应力波法的 HM200 仪器能够很好地测量意杨原木的弹性模量。该法操作方便、快速、准确,能够实现对原木的分等,并能够判断出其单板及 LVL 产品的性能。从而对提高原木的出材等级率,减少我国对短缺的木材资源的浪费,以及保护环境具有重要意义。

参考文献:

- [1] 张冬梅,杨亮庆.速生杨木改性研究进展[J].林业机械与木工设备,2012,40(3):16-20.
ZHANG D M, YANG L Q. Research progress in modified fast growing poplar wood[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2012, 40(3): 16-20. (in Chinese)
- [2] AMISHEV D, MURPHY G E. Estimating breakeven prices for Douglas-fir veneer quality logs from stiffness graded stands using acoustic tools[J]. Forest Products Journal, 2009, 59(4): 45-52.
- [3] WANG Z, LI L, MENG G. Measurement of dynamic modulus of elasticity and damping ratio of wood-based composites using the cantilever beam vibration technique[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 831-834.
- [4] BRASHAW B K, WANG X P, ROSS R J, *et al.* Relationship between stress wave velocities of green and dry veneer[J]. Forest Products Journal, 2004, 54(6): 85-89.
- [5] LINDSTR M H, HARRIS P, NAKADA R. Methods for measuring stiffness of young trees[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2002, 60(3): 165-174.
- [6] ROSS R J, PELLERIN R F. NDE of wood-based composites with longitudinal stress wave[J]. Forest Products Journal, 1988, 38(5): 39-45.
- [7] ROSS R J, WARD J C, TENWOLDE A. Identifying bacterially infected oak by stress wave nondestructive evaluation, Res. Pap. FPL-RP-52[R]. Madison: U. S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1992.
- [8] 段新芳,王平,周冠武,等.应力波技术检测古建筑木构件残余弹性模量的初步研究[J].西北林学院学报,2007,22(1):112-114.
DUAN X F, WANG P, ZHOU G W, *et al.* Nondestructive evaluation of dynamic MOE of ancient wooden structure members by stress wave method[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2007, 22(1): 112-114. (in Chinese)
- [9] 李坚,葛明裕.木材科学研究[M].北京:科学出版社,2009.
- [10] AMISHEV D, MURPHY G E. In-forest assessment of veneer grade Douglas-fir logs based on acoustic measurement of wood

- stiffness[J]. *Forest Products Journal*, 2008, 58(11): 42-47.
- [11] 王正. 两种木质复合材料弹性模量与阻尼比的动态测量[J]. *南京林业大学学报: 自然科学版*, 2007, 31(3): 147-149.
WANG Z. Dynamic measures of elasticity model and damp ratio to HDF and OSB[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2007, 31(3): 147-149. (in Chinese)
- [12] ROSS R J, MCDONALD K A, GREEN D W, *et al.* Relationship between log and lumber modulus of elasticity[J]. *Forest Products Journal*, 1997, 47(2): 89-92.
- [13] ROSS R J, WILLITS S W, SEGEN W V, *et al.* A stress wave based approach to NDE of logs for assessing potential veneer quality. part 1. Small-diameter ponderosa pine [J]. *Forest Products Journal*, 1999, 49(11/12): 60-62.
- [14] WANG X P, ROSS R J, MATTSON J A, *et al.* Nondestructive evaluation techniques for assessing modulus of elasticity and stiffness of small-diameter logs [J]. *Forest Products Journal*, 2002, 52(2): 79-85.
- [15] 管珣, 赵茂程. 北美基于应力波技术的木材测试及应力分等的研究进展[J]. *西北林学院学报*, 2013, 28(2): 178-181.
GUAN X, ZHAO M C. Advances in the researches of the wood quality testing and stress grading based on the acoustic technology in North America[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2013, 28(2): 178-181. (in Chinese)
- [16] 李坚. 木材科学新篇[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1991.
- [17] 王志同, 曹志强, 袁卫国. 用应力波非破损检测技术检测中密度纤维板弹性模量的研究[J]. *木材工业*, 1995, 9(5): 17-21.
- [18] 王志同, 曹志强, 袁卫国. 用应力波非破损检测技术检测中密度纤维板弹性模量的研究(续)[J]. *木材工业*, 1995, 9(6): 21-25.
- [19] 胡英成, 王逢瑚, 刘一星, 等. 利用振动法检测胶合板的抗弯弹性模量[J]. *木材工业*, 2001, 15(2): 3-5, 8.
HU Y C, WANG F H, LIU Y X, *et al.* Study on modulus of elasticity in bending of plywood by vibration method[J]. *China Wood Industry*, 2001, 15(2): 3-5, 8. (in Chinese)
- [20] 胡英成, 王逢瑚, 刘一星, 等. 利用振动法检测胶合板的剪切弹性模量[J]. *木材工业*, 2001, 15(4): 12-14.
HU Y C, WANG F H, LIU Y X, *et al.* Study on shear modulus of elasticity of plywood by vibration method[J]. *China Wood Industry*, 2001, 15(4): 12-14. (in Chinese)
- [21] 胡英成, 王逢瑚, 刘一星, 等. 刨花板动态抗弯弹性模量的无损检测[J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(1): 9-11.
HU Y C, WANG F H, LIU Y X, *et al.* Nondestructive test of the dynamic deflection modulus of elasticity for particleboard [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(1): 9-11. (in Chinese)
- [22] 胡英成, 王逢瑚, 刘一星, 等. 刨花板动态剪切弹性模量的无损检测[J]. *东北林业大学学报*, 2001, 29(2): 17-20.
HU Y C, WANG F H, LIU Y X, *et al.* Nondestructive testing of the dynamic shear modulus of elasticity for particleboard [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2001, 29(2): 17-20. (in Chinese)
- [23] 孟瑞华, 胡勤龙, 刘毅. 应力波时间仪的研制和应用[J]. *南京化工大学学报*, 2000, 22(6): 55-57.
MENG R H, HU Q L, LIU Y. Research and design of stress wave time instrument and its applications [J]. *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, 2000, 22(6): 55-57. (in Chinese)
- [24] 林文树, 杨慧敏, 王立海. 超声波与应力波在木材内部缺陷检测中的对比研究[J]. *林业科技*, 2005, 30(2): 39-41.
- [25] 梁善庆, 赵广杰, 傅峰. 应力波断层成像诊断木材内部缺陷[J]. *木材工业*, 2010, 24(5): 11-13.
LIANG S Q, ZHAO G J, FU F. Diagnosis of internal defects of wood with stress wave tomography [J]. *China Wood Industry*, 2010, 24(5): 11-13. (in Chinese)
- [26] GRABIANOWSKI M, MANLEY B, WALKER J C F. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber [J]. *Wood Science and Technology*, 2006, 40(3): 205-216.
- [27] 杨学春, 王立海. 木材应力波无损检测研究[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [28] ACHIM A, PARADIS N, CARTER P, *et al.* Using acoustic sensors to improve the efficiency of the forest value chain in Canada: a case study with laminated veneer lumber [J]. *Sensors*, 2011, 11(6): 5716-5728.
- [29] MORA C R, SCHIMLECK L R, ISIK, F, *et al.* Relationships between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees [J]. *Can. J. For. Res.*, 2009, 39(8): 1421-1429.
- [30] TEIXEIRA D E, MOSLEMI A. Assessing modulus of elasticity of wood-fiber cement (WFC) sheets using nondestructive evaluation (NDE) [J]. *Bioresource Technology*, 2001, 79(2): 193-198.