浙 江 农 林 大 学 学 报, 2016, **33**(5): 875-880 Journal of Zhejiang A & F University doi:10.11833/j.issn.2095-0756.2016.05.021

Sylvatest-Duo 装置的探针触式与计示压强对木材 超声波测量精度的影响

高 珊, 王立海, 杨冬辉, 徐文豪

(东北林业大学 工程技术学院, 黑龙江 哈尔滨 150040)

摘要:为了提高应用 Sylvatest-Duo 超声波测量装置进行木材质量和缺陷检测的精度,研究了该装置的探针与木材接触方式(探针触式)及其计示压强对木材中超声波传播速度和信号能量衰减幅度的影响,确定了测量过程中宜采用的最佳探针触式和最佳计示压强。以美国红松 Pinus resinosa 的小规格试样材(25.4 mm × 25.4 mm × 407.0 mm)为研究对象,采用单因素重复试验,经 SPSS 统计分析中多元检验的研究结果表明:不同的探针触式对超声波测量结果影响显著(P值为 0.000),探针-木材的"持续性接触"比"非持续性接触"测量偏差小,检测效果稳定;在探针"持续性接触"方式下,超声波的传播速度和信号能量衰减幅度随着计示压强增大而增加,在计示压强为 275.8 kPa (40 psi)时,两者趋于稳定。因此,建议在应用 Slyvatest-Duo 进行木材超声波测量过程中,宜保持探针与木材持续性接触,同时采用 275.8 kPa 的计示压强,可达到最优检测精度。图 4 表 4 参 13 关键词:木材科学与技术;Sylvatest-Duo;超声波速度;能量衰减;探针触式;计示压强;美国红松中图分类号: S781 文献标志码:A 文章编号: 2095-0756(2016)05-0875-06

Probe-wood contact and gauge pressure with Sylvatest-Duo for precision ultrasonic measurements of wood

GAO Shan, WANG Lihai, YANG Donghui, XU Wenhao

(College of Engineering & Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

Abstract: To improve precision testing for wood quality and defects when applying the Sylvatest-Duo ultrasound device, the effects of probe-wood contacts and gauge pressure on ultrasonic wave velocity and energy loss with wood were tested. The most optimal mode for probe-wood contact and gauge pressure was determined for wood ultrasonic measurements. A small clean wood sample $(25.4 \text{ mm} \times 25.4 \text{ mm} \times 407.0 \text{ mm})$ of American red pine, *Pinus resinosa* was used as the research object. The effects of different probe-wood contacts and gauge pressures on wood testing performance were examined by employing single factor repeated tests. Multivariate Tests results from SPSS statistical analysis showed that the effect of differences in probe-wood contacts on ultrasonic measurements is significant (*P*=0.000). The experimental results using sustainable probe-wood contact was more stable-than the continuous probe-wood mode. With sustainable probe-wood contact, ultrasonic wave velocity and energy loss increased as gauge pressure increased, but stabilized at a gauge pressure of 40 psi (275.8 kPa) meaning it was the optimal gauge pressure. Therefore, 40 psi (275.8 kPa) gauge pressure for sustainable probe-wood contact should be used for optimal measurement precision when applying the Sylvatest-Duo device to conduct ultrasonic measurements on wood. [Ch, 4 fig. 4 tab. 13 ref.]

Key words: wood science and technology; Sylvatest-Duo; ultrasonic wave velocity; energy loss; probe-wood contact; gauge pressure; *Pinus resinosas*

收稿日期: 2015-11-02; 修回日期: 2016-03-29

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2572015CA02);黑龙江省自然科学基金面上项目 (C201403)

作者简介: 高珊, 讲师, 博士, 从事木材质量无损检测与评估等研究。E-mail: gaoshan_2000@126.com

超声波技术是当前国际上较为认可的进行木材质量无损检测与评估的技术之一[1-2],尤其是在木材 空洞和缺陷检测方面,其研究和应用已经取得一定的进展[3-5]。美国、日本、新西兰以及一些欧洲发达 国家率先将超声波理论与技术应用到传统木材加工过程的质量监控中^[6-7],随后逐步扩展到原木和人工 林的材质预测与评估^[8-10]。在应用超声波技术进行木质材料的检测来验证理论或应用的科研试验中, Sylvatest-Duo(CBS-CBT, Les Ecorces)设备具有一定的优势。Sylvatest-Duo测量2种物理参数,一是超声 波的传播速度,二是木材中超声波传播信号的能量峰值。在实际生产应用中,应用 Sylvatest-Duo 测量木 材中超声波速度,可预测木材的质量等级,实现木材分检,应用其对原木分拣精确率可达到80%以上, 对板材分拣的精确率达90%~95%。在科学研究中,应用该设备测量木材的超声波传播速度和传递能量 衰减幅度的变化,可反映木材应力性能的变化和检测缺陷、裂纹等情况;超声波信号传递过程中,如遇 上木材节点或痞点,则致使超声波能量会被大量吸收,导致能量衰减,形成能量井,该指标可用来检测 木材的节疤等。张训亚等^[11]通过应用 Sylvatest-Duo 设备进行木材中超声波速度的测量,建立落叶松 Larix gmelinii 规格材的动态弹性模量(DMOE),预测了落叶松规格材的抗弯性能;高珊等^[12]应用 Sylvatest-Duo 设备构建了温度控制测试装置,利用该装置完成了温度尤其是低温及含水率的变化对木材中超声波 速度的影响的研究,揭示了温度及水分状态变化对木材力学性能影响的规律;张甜等^[13]利用 Sylvatest-Duo 设备实现了对健康杉木 Cunninghamia lanceolata 材和含有不同孔洞缺陷尺寸的检测,获得超声波传 播速度与不同孔洞直径的关系。应用 Sylvatest-Duo 设备在野外和实验室内进行超声波测量时,所采用的 脉冲波发射压强一般为137.9~275.8 kPa(20~40 psi),这个计示压强范围虽为常用范围,但用于木材的 测量的最佳计示压强值还未见报道。本研究的主要目的是通过单因素重复试验,在实验室内研究 Sylvatest-Duo的2个探针与木材端部接触方式(探针触式)以及不同的计示压强条件下木材中的超声波传播 速度及能量衰减幅度变化,确定最佳探针触式和最佳计示压强。希望通过本研究为同行们在利用 Svlvatest-Duo 超声波测量设备进行木材质量等级和缺陷检测时提供参考,以便获得最优检测精度和最佳科 研结果。值得说明的是,该试验研究为"温度对活立木及原木声波传播速度影响研究第一部分"的前期 试验部分[12],不足之处是试验规模有限,树种单一,样本的数量少,但笔者考虑到本研究的结果具有一 定的代表性和参考价值,故整理发表,以供同仁们参考。

1 试验的材料与方法

1.1 试验材料

根据该研究的试验目的,试验采用单因素重复试验,因此不涉及木材含水率变化、水分分布、材质 纹理(径、弦向)、取材位置和有无节子等缺陷对超声波速度的影响。试验树种为单一树种美国红松 Pinus resinosa,取自位于美国威斯康辛州 Arena (43°9′57″N, 89°54′26″W)威斯康辛-麦迪逊大学 45 年生美 国红松试验林场。试样为鲜原木段的边材部分,制取尺寸规格为 24.5 mm × 24.5 mm × 407.0 mm(1.0 inch × 1.0 inch × 16.0 inch,长度为顺纹方向),测试完成后获得的烘干含水率约为 34%。

1.2 Sylvatest-Duo 工作原理及测试方法

1.2.1 工作原理 Sylvatest-Duo(CBS-CBT, Les Ecorces) 超声波测量装置(图 1),是由法国的木结构中心和瑞 士木结构技术公司联合生产,工作发射波频率为 20~ 30 kHz。该仪器由超声脉冲信号发射端(transmitter) (发射探针)、接收端(receiver,接收探针)、读数器和 启动装置组成。该装置 2 个探针与材料端面的接触, 启动装置通过发射探针发射超声脉冲信号,由接收探 针接收,读数器可读取平均波传播时间(turr)和声波信 号的能量吸收峰值。超声波传播平均速度(v)可由试样 长度(L)和 turr 计算出来: v=L/turr(m·s⁻¹)。通过木材中 的超声波传播速度的测量,结合木材质量密度可得出 相应的木材弹性模量一动态弹性模量,进而预测其力





学强度指标;通过超声波信号的峰值能量(mV)的测量,检测超声波信号的能量衰减或损耗(energy loss, EL), 以表示木材有无节点或痞点。

1.2.2 测试方法 该研究的主要内容是测试 Sylvatest-Duo 装置的探针触式和计示压强对其超声波传播速 度及能量衰减的影响,目的在于提高 Sylvatest-Duo 装置的木材质量检测精度,属于系统因素影响研究, 因此采用单因素重复性试验。①探针-木材接触方式。如图1所示:应用 Sylvatest-Duo 测量木材中超声 波速度的过程中,其装置的探针与木材试样端部的接触方式可分为"持续性接触"和"非持续性接触" 2种。通过采用不同探针触式,观察超声波传播的时间及能量衰减幅度的变化,研究其对超声波测量精 度的影响,从中确定最佳接触方式。"持续性接触"的测量方式是指将 Sylvatest-Duo 的探针与木材试样 端面的接触,进行超声波的脉冲信号的发射,待该次超声波指标测量完成后,依旧保持探针与木材试样 端面的接触,同时开启下一次超声波的脉冲信号的发射,进行超声波测量,直至完成所有既定条件下的 测量后,才断开探针与木材试样端面的接触,即在整个测量过程中,始终保持探针与木材试样端面的持 续性接触。"非持续性接触"的测量方式是指将 Sylvatest-Duo 的探针与木材试样的端面接触同时发送超 声波脉冲信号,待该次超声波指标测量完成后,断开探针与木材试样端面的接触,待进行下一个既定条 件下的超声波测量时,重新使探针与木材再次接触,开启并发送超声波脉冲信号。②计示压强的设定。 Sylvatest-Duo 的计示压强(gauge pressure, GP)是发射超声波脉冲信号的量表压力,这里称"计示压强", 单位为 "psi, lbs. ·inch⁻¹ (1.0 psi=6.894 757 kPa)"。通过设定不同的量表压力发射超声波脉冲,观察超 声波传播的时间及能量衰减幅度的变化,研究其对超声波测量精度的影响,从而确定最佳计示压强。应 用 Sylvatest-Duo 装置进行超声波测量时,所采用的计示压强范围一般为 137.9~275.8 kPa(20.0~40.0 psi), 通常不会超过 275.8 kPa(40.0 psi)。本试验中曾尝试采用 310.3 kPa(45.0 psi)的计示压强发送脉冲波,但 其测量值极不稳定。经过几次的前期预测量和木材试样的尺寸规格,本实验最终选择 137.9 kPa(20.0 psi), 172.4 kPa(25.0 psi), 206.9 kPa(30.0 psi)和 275.8 kPa(40.0 psi)这 4 个等级作为衡量计示压强影响 的指标。在外界环境条件相同时,试验分别在这4个等级的计示压强下,交替采用探针-木材"持续接 触"和"非持续接触"的方式,测量超声波在木材中的传播速度和能量衰减幅度。

结果与讨论 2

2.1 试验基本数据集

2.1.1 试样端面负载与计示压强关系 根据设定的4个 等级的计示压强 137.9 kPa(20.0 psi), 172.4 kPa(25.0 psi), 206.9 kPa(30.0 psi)和 275.8 kPa(40.0 psi), 试验 中探针施加于木材试样端面的载荷分别为 1.724 kg(3.8 lbs.), 2.767 kg(6.1 lbs.), 3.583 kg(7.9 lbs.)和 5.670 kg (12.5 lbs.),整理获得对应的实际计示压强分别为137.9 kPa(20.0 psi), 172.4 kPa(25.0 psi), 206.9 kPa(30.0 psi) 和 275.8 kPa (40.0 psi),满足试验要求的等级条件。两 者之间关系如图2所示。

2.1.2 初步测量结果 本试验分别在探针与木材"持续 性接触"和"非持续性接触"2种方式和4个实测计示 Figure 2 Relationship between gauge pressure and load 压强下,对木材中超声波传播速度和能量衰减进行10





次重复性测量,共获得试验数据80组,其中40组为在各计示压强下、探针与木材"持续性接触"时的 测量数据集:另40 组为在各计示压强下、探针与木材"非持续性接触"时的测量数据集。通过对80 组 测量结果进行整理后,可获得不同探针触式的各计示压强下的平均超声波传播时间和传播速度结果(表 1)和平均超声波信号能量衰减结果(表 2)。

2.2 探针触式和计示压强对超声波传播速度的影响

2.2.1 探针触式影响分析 首先,由于本研究属于单因素重复试验,因此,采用统计分析中的 GLM 检 验重复性方差分析(repeated measures),来进行不同探针触式下超声波传播速度的差异性检验。应用

表 1 不同探针触式和计示压强条件下的超声波传 播时间和传播速度

 Table 1
 Mean UPT and velocity of ultrasonic wave at each gauge pressure scale under both probe-wood contacts

计示压强/		持续	性接触	非持续性接触		
kPa	(psi)	平均传播	平均传播速	平均传播	平均传播速	
		时间/μs	度/($m \cdot s^{-1}$)	时间/μs	度/(m·s ⁻¹)	
137.9	(20.0)	111.0	3 684.0	112.0	3 631.0	
172.4	(25.0)	109.0	3 738.0	111.0	3 684.0	
206.9	(30.0)	108.0	3 766.0	110.0	3 711.0	
275.8	(40.0)	109.0	3 738.0	109.0	3 738.0	
平均值			3 131.5		3 691.0	
标准差			34.3		45.7	

表 2 不同探针触式和计示压强条件下超声波 信号能量衰减

Table 2
 Mean EL of ultrasonic wave at each gauge pressure

 scale under both probe-wood contacts

P						
计示压强/		持续性接触平均能	非持续性接触平均			
kPa	(psi)	量衰减或损耗/mV	能量衰减或损耗/mV			
137.9	(20.0)	141.0	102.8			
172.4	(25.0)	181.3	129.7			
206.9	(30.0)	200.6	168.8			
275.8	(40.0)	244.8	228.5			
平均值		191.9	157.5			
标准差		43.1	54.6			

SPSS 软件对 2 种探针触式的 40 组超声波传播速度试验数据的进行统计检验,其输出结果见表 3。由表 3 可见:4 种统计方法的 F 检验概率 P 值(显著性概率 P= 0.000)均小于 0.001,说明不同的探针触式对超 声波传播速度的影响显著。其次,从表 1 中可以看出:在"非持续性接触"的测量方式下,装置所测得 的平均超声波传播速度为 3 691.0 m·s⁻¹,比"持续性接触"的测量方式下所测得的平均超声波传播速度 (3 132.0 m·s⁻¹),平均高为 560.0 m·s⁻¹ 左右 (约提高 17.8%)。在"持续性接触"的测量方式下,超声波 传播速度的标准偏差较小,为 34.4 m·s⁻¹,说明测量值受计示压强影响其偏移平均值程度较小;在"非持续性接触"测量方式,超声波速度受计示压强变化的影响相对较大,标准差为 45.7 m·s⁻¹,超声波传播速度测量的稳定性相对较差。因此,在应用 Slyvatest-Duo 进行木材超声波传播速度测量,预测木材质量等级时,可确定"持续性接触"为探针与木材的最佳接触方式,使检测精度达到最优。

表 3 不同探针触	式的超声波传播速度	医多元检验结果
-----------	-----------	---------

Table 3	Multivariate te	ests results of	ultrasonic	velocity at	different p	probe-wood	contacts	

检验方法	统计值	F 值	假设自由度	误差自由度	显著性概率 P 值
Pillai's Trace	0.718	99.164	1.000	39.000	0.000
Wilks' lambda	0.282	99.164	1.000	39.000	0.000
Hoteling's Trace	2.543	99.164	1.000	39.000	0.000
Roy's Largest Root	2.543	99.164	1.000	39.000	0.000

2.2.2 计示压强影响分析 图 3 显示:在探针与木材保持 "持续性接触"的测量方式下,超声波传播速度随着计示 压强的增加呈现先增大后减小的趋势,在计示压强为 206.9 kPa(30.0 psi)时,达到最大为 3 766.0 m·s⁻¹(表 1); 在探针与木材保持"非持续性接触"的测量方式下,超声 波传播速度随着计示压强的增加而逐渐增大,在 275.8 kPa (40.0 psi)时超声波的传播速度为 3 738.0 m·s⁻¹,与"非持 续性接触"方式的获得的超声波速度值相同。该结果说 明:即在应用 Slyvatest-Duo 进行木材超声波速度测量过程 中,无论是探针在与木材保持"持续性接触"还是"非持 续性接触",在计示压强为 275.8 kPa(40.0 psi)时,超声波 的传播速度最为稳定。因此,在应用 Slyvatest-Duo 进行木





材超声波传播速度测量,预测木材质量等级时,可确定 275.8 kPa(40.0 psi)的计示压强为最佳计示压强, 以达到最优检测精度。

2.3 探针触式和计示压强对超声波信号能量衰减的影响

2.3.1 探针触式影响分析 首先,采用统计分析中的 GLM 检验重复性方差分析,来进行不同探针触式

下超声信号能量衰减差异性检验。应用 SPSS 软件对 2 种探针触式的 40 组超声波信号能量衰减幅度试验 数据的进行统计检验,其输出结果见表 4。

Table 4	Table 4 Multivariate Tests results of energy loss of ultrasonic wave at different of probe-wood contacts						
检验方法	统计值	F 值	假设自由度	误差自由度	显著性概率 P 值		
Pillai's Trace	0.803	158.606	1.000	39.000	0.000		
Wilks' lambda	0.197	158.606	1.000	39.000	0.000		
Hoteling's Trace	4.067	158.606	1.000	39.000	0.000		
Roy's Largest Root	4.067	158.606	1.000	39.000	0.000		

表 4 不同探针触式的超声波能量衰减多元检验结果

由表4可见:4种统计方法(Pillai's Trace, Wilks' lambda, Hoteling's Trace和 Roy's Largest Root)的 F 检验的概率 P 值(显著性概率 P=0.000)均小于 0.001,说明不同的探针触式对超声波能量衰减幅度的影响显著。其次,从表1中可以看出:在"持续性接触"的测量方式下,装置所测得的超声波信号的能量 衰减幅值为 192.0 mV,比"非持续性接触"的测量方式下所测得的能量衰减幅值(157.0 mV)平均高 35.0 mV(约提高 22.3%)。在"持续性接触"的测量方式下,超声波信号能量衰减幅度的标准偏差较小, 为 43.1 mV,说明测量值受计示压强影响其偏移平均值程度较小;在"非持续性接触"测量方式,超声 波速度受计示压强变化的影响相对较大,标准偏差为 54.6 mV,超声波传播速度测量的稳定性相对较 差,该结果与 2.2 中超声波速度测量结果变化趋势一致。因此,在应用 Slyvatest-Duo 进行木材超声波信 号能量衰减幅度测量,预测木材内部节点和缺陷时,可确定"持续性接触"为探针与木材的最佳接触方 式,以达到最优检测精度。

2.3.2 计示压强影响分析 图4显示了2种不同的探 针触式下的超声波信号能量衰减随计示压强的变化趋 势。同样,计示压强及探针触式对超声波传播速度的影响 能量衰减幅度的影响趋势与对超声波传播速度的影响 类同:在2种探针触式下,超声波信号能量的衰减幅 值均随着计示压强的增加而增大;在275.8 kPa(40.0 psi)时,2种探针触式的信号能量衰减幅度形成重叠。 该结果说明:在应用 Slyvatest-Duo 进行木材超声波信 号能量检测的过程中,无论是探针与木材保持"持续 性接触"还是"非持续性接触",在计示压强为275.8 kPa(40.0 psi)时,超声波的信号能量衰减幅度最为稳 定。因此,在应用 Slyvatest-Duo 进行木材超声波信号 能量衰减幅度的测量,预测木材内部节点和缺陷时, 可确定 275.8 kPa(40.0 psi)的计云压强为是估计云压强



可确定 275.8 kPa(40.0 psi)的计示压强为最佳计示压强, 使检测精度达到最优。

3 结论

本试验研究了 Sylvates-Duo 超声波测量装置的探针与木材接触方式及其计示压强对超声波传播速度 和信号能量衰减幅度的影响,确定了应用该装置进行木材质量检测时的最佳探针触式和最佳计示压强。 研究所得主要结论如下:①不同探针触式对木材超声波传播速度和能量衰减幅度影响显著。②超声波测 量过程中,宜采用探针与木材的"持续性接触"作为最佳探针触式。在"持续性接触"的测量方式下, 超声波传播速度和传递信号能量衰减幅度的标准偏差较小,稳定性较好。③超声波测量过程中,宜采用 275.8 kPa(40.0 psi)的计示压强作为最佳计示压强。在2种探针-木材接触方式下,超声波传播速度和传 递信号能量衰减幅度均随着计示压强的增大而呈现增大的趋势,在计示压强为275.8 kPa(40.0 psi)时,两 者的变化趋于稳定。因此,在应用 Slyvatest-Duo 进行木材超声波测量过程中,宜保持探针与木材持续性 接触,同时采用 275.8 kPa(40.0 psi)的计示压强,可使检测精度达到最优。

- 4 参考文献
- WANG Xiping, ROSS R J, CARTER P. Acoustic evaluation of wood quality in standing trees (part I) acoustic wave behavior [J]. Wood Fiber Sci, 2007, 39(1): 28 38.
- [2] ROSS R J, WILLITS S W, von SEGEN W, et al. A stress wave based approach to NDE of logs for assessing potential veneer quality (part 1) small diameter ponderosa pine [J]. For Prod J, 1999, 49(11/12): 60 – 62.
- [3] 杨慧敏,王立海.超声波功率谱技术在木材空洞缺陷无损检测中应用[J].森林工程,2005,21(2):8-9. YANG Huimin, WANG Lihai. Application of ultrasonic power spectrums in non-destructive testing hole defects in wood [J]. For Eng, 2005, 21(2):8-9.
- [4] 于文勇,王立海,杨慧敏,等. 超声波木材缺陷检测若干问题的探讨[J]. 森林工程,2006,22(6):7-9.
 YU Wenyong, WANG Lihai, YANG Huimin, *et al.* The study of wood defects detection based on ultrasonic techniques
 [J]. For Eng, 2006, 22(6):7-9.
- [5] AKIAN M, GAUBERT S, NINOVE L. Application of an ultrasonic wave propagation field in the quantitative identification of cavity defect of log disc [J]. Comput Electron Agric, 2014, 108(108): 123 – 129.
- [6] BODIG J, GOODMAN J R. Prediction of elastic parameters for wood [J]. Wood Sci, 1973, 5(4): 249 264.
- [7] HARRIS P D, PETHERICK R J, ANDREWS M K. Acoustic resonance tools [C]//Proceedings of the13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Berkely: University of California, 2002: 195 – 201.
- [8] MORA C R, SCHIMLECK L R, ISIK F, et al. Relationship between acoustic variables and different measures of stiffness in standing *Pinus taeda* trees [J]. Can J For Res, 2009, 39(8): 1421 1429.
- [9] GRABIANOWSKI M, MANLEY B, WALKER J C F. Acoustic measurements on standing trees, logs and green lumber [J]. *Wood Sci Technol*, 2006, **40**(3): 205 216.
- [10] ZHANG Houjiang, WANG Xiaoping, SU Juan. Experimental investigation of stress wave propagation in standing trees
 [J]. Holzforschung, 2009, 65(5): 743 748.
- [11] 张训亚,殷亚方,罗彬,等. 超声波预测落叶松规格材的抗弯性能[J]. 木材工业,2010,24(3):1-3. ZHANG Xunya, YIN Yafang, LUO Bin, *et al.* Predicting bending performance of larch dimensional lumber by an ultrasonic technique [J]. *China Wood Ind*, 2010, 24(3):1-3.
- [12] GAO Shan, WANG Xiping, WANG Lihai, et al. Effect of temperature on acoustic evaluation of standing trees and logs (part 1) laboratory investigation [J]. Wood Fiber Sci, 2012, 44(3): 286 - 297.
- [13] 张甜,程小武, 陆伟东,等. 超声波法检测木材内部孔洞缺陷的研究[J]. 西南林业大学学报, 2016, 36(1): 121-125.

ZHANG Tian, CHENG Xiaowu, LU Weidong, *et al.* Experimental study on testing internal hole defects of wood by ultrasonic method [J]. *J Southwest For Univ*, 2016, **36**(1): 121 – 125.