

基于空气耦合式超声波的锯材节子缺陷检测

蒋昊¹, 蔺陆军¹, 郑红平¹, 周德全¹, 方益明^{2,3}

(1. 浙江农林大学暨阳学院, 浙江绍兴 311800; 2. 浙江农林大学信息工程学院, 浙江杭州 311300;

3. 浙江省林业智能监测与信息技术研究重点实验室, 浙江杭州 311300)

摘要: 针对锯材的节子缺陷, 基于空气耦合式超声波的传输系数与待测样本密度之间的关系, 探索了空气耦合式超声波的节子缺陷检测新方法, 并采用自行研制的空气耦合式超声波检测仪对杉木锯材试样进行检测, 结果表明, 空气耦合式超声波技术不仅能检测出锯材表面可见的节子缺陷, 也可以有效检测不可见的内部节子缺陷。

关键词: 空气耦合式超声波; 木材无损检测; 节子缺陷; C扫描成像

中图分类号: TB559; S781.5

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654 (2019) 01-0046-04

Non-destructive Detection of Knot in Sawn Timber Based on Air-Coupled Ultrasonic

JIANG Hao¹, LIN Lu-jun¹, ZHENG Hong-ping¹, ZHOU De-quan¹, FANG Yi-ming^{2,3}

(1. Jiyang College, Zhejiang A & F University, Shaoxing 311800, Zhejiang, China;

2. School of Information Engineering, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;

3. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Monitoring in Forestry and Information Technology, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

Abstract: Based on relationship between transmission coefficient of air-coupled ultrasonic wave and wood density, a new testing method for knot defect detection was developed. Experiments for detecting defects of Chinese fir specimens were conducted using a self-developed air-coupled ultrasonic imaging instrument. Results showed that the new method could be used in detecting not only visible knots on lumber surfaces, but also invisible segment defects inside lumbers.

Key words: Air-coupled ultrasonic; non-destructive testing of wood; knot defect; C-scan imaging

木材中的节子是常见缺陷, 通常颜色深, 影响木材外观的一致性以及材质均匀性; 节子硬度高, 在加工时对刀具产生很大的冲击, 同时阻力增加,

刀具的温度迅速上升, 易使木材局部炭化。另外, 节子对木材的力学性能产生负面影响, 如在抗弯试验中, 95%的破坏点都发生在节子或节子附近的斜纹处^[1]。因此, 在对木材产品进行分等时, 节子是影响其等级的最主要因素之一。

GB/T 153-2009《针叶树锯材》和 GB/T 4817-2009《阔叶树锯材》规定, 特等锯材、一等锯材和二等锯材中节子的最大尺寸, 分别不能超过材宽的 15%、30%和 40%。早期节子检测, 主要依赖人工肉眼进行观测。随着数字图像处理技术的发展, 基于光学图像的节子检测技术得到了快速发展。如利用提取木

收稿日期: 2018-08-28 修回日期: 2018-12-19

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目“基于空气耦合式超声波的木材缺陷自动识别及定量检测”(LGG18F010006); 浙江省博士后择优资助项目“基于深度卷积神经网络的木材缺陷检测技术研究”(ZJ20180156); 国家级大学生创新创业训练计划项目“基于空气耦合式超声波木材扫描成像系统设计”(201713283004); 浙江省教育厅一般项目“基于超声信号多特征融合的木材内部缺陷识别方法研究”(Y201840496)。

作者简介: 蒋昊 (1997—), 男, 浙江农林大学暨阳学院本科生。

责任作者: 蔺陆军, 男, 浙江农林大学暨阳学院讲师。

材光学图像的灰度特征、纹理特征、统计特征^[2-4]，对节子进行识别。近年来，随着神经网络、支持向量机、压缩感知、深度学习^[5-8]等方法的引入，节子缺陷检测技术日渐成熟，精度不断提高。但基于光学图像的节子检测方法，只能检测出木材表面的节子，无法对内部、不可见的节子进行有效检测。

空气耦合式超声波（Air-coupled ultrasonic）是一种新型非接触式超声波，可以实现木材无损检测，也可以对待测木材进行超声波 C 扫描成像，以图像的形式直观地显示木材物理性能的空间分布^[9]，可用于木材密度、硬度、力学性能、含水率以及多层板的胶合缺陷^[10-14]检测。鉴于此，笔者探索了基于空气耦合式超声波的节子缺陷检测新方法，对木材表面和内部节子缺陷进行检测，旨在为基于空气耦合式超声波的木材无损检测及分等技术提供理论依据。

1 空气耦合式超声波及 C 扫描成像原理

超声波发射器发出的超声波信号，经过空气后直接进入待测木材，穿过待测木材的信号重新进入空气，并被超声波接收器接收。

在空气与木材的交界面上，超声波出现反射与折射现象。设传播介质的密度为 ρ ，超声波在介质中的传播速度为 c ，则介质的声阻抗：

$$Z_n = \rho_n \cdot c_n \quad (1)$$

式中 $n=1,2,3$ ，分别对应空气层、待测木材层和空气层。若超声波的入射角 $\theta_1=0^\circ$ ，则在两个分界面上，总的透射率为：

$$T_{Total} = \frac{4Z_1Z_2}{(Z_1 + Z_2)^2} \quad (2)$$

T_{total} 大小与待测木材的声阻抗 Z_2 密切相关， Z_2 越接近空气的声阻抗 Z_1 ，则 T_{total} 越大。

Z_2 的大小与木材密度 ρ_2 成正比。节子通常树脂含量高，材质紧密，硬度和密度高于其他区域。超声波在节子表面发生折射与反射，导致接收到的超声波 T_{total} 显著小于周围区域；因此，根据接收到的超声波信号幅度，来判断节子是否存在^[15]。

2 材料与设备

2.1 试验材料

杉木（*Cunninghamia lanceolata*）锯材：厚度

10~12 mm，含水率 8%~17%。

试样尺寸分 2 种：① 150 mm×150 mm 试样 8 块，每块样品表面均含有节子缺陷；② 260 mm×197 mm×12 mm 试样 1 块，含有一个没有贯穿的条状节子缺陷。9 块试样的缺陷形态如图 1 所示。

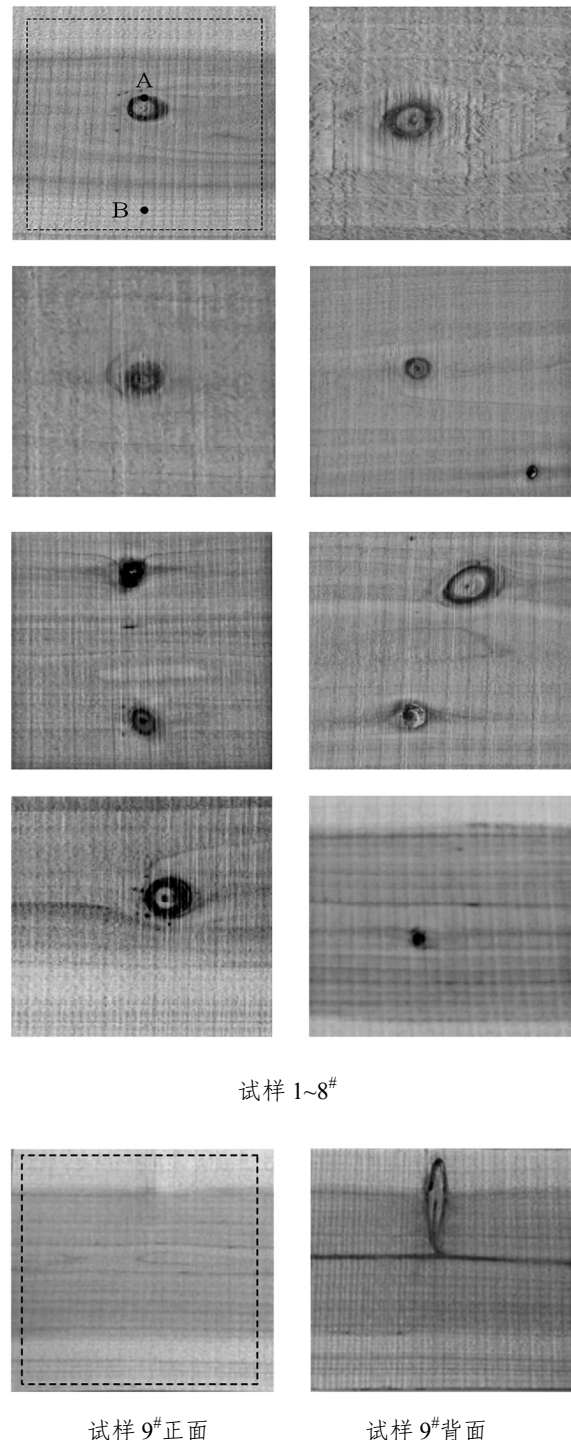


图 1 表面和内部含有节子缺陷的锯材样品

Fig.1 Lumber specimens with visible and invisible knots

2.2 试验设备

自制的空气耦合式超声波木材扫描成像系统，以空气耦合式超声波换能器（Airstar 公司产）为超声波发射器，中心频率为 125 kHz。

空气耦合式超声波发射接收器，实现超声信号的激励与采集；发射接收器由发射卡与接收卡组成，两者电缆连接，双通道直流电源供电；接收卡上配备 USB 接口，完成工控机与超声波发射接收器之间的数据通讯；扫描成像系统采用龙门式扫描机械手，实现发射接收换能器的运动控制；采用步进电机驱动，同步带传动，方便超声波换能器的位置控制^[16]。

2.3 检测方法和过程

在检测过程中，超声波换能器与待测木材之间不接触，也不需要添加耦合剂，采用空气耦合式超声波对木材进行 C 扫描成像。

图 2 所示为空气耦合超声波扫描成像系统的结构图^[16]。将匹配的传感器对固定在龙门式扫描机构上，在待测区域内沿图中虚线，逐点进行检测，将超声波在每个检测点上的传播衰减，转换为图像的灰度值，构建待测木材的二维超声图像。

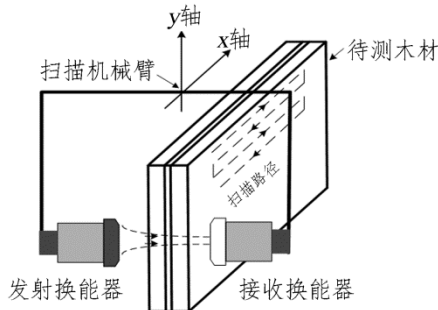


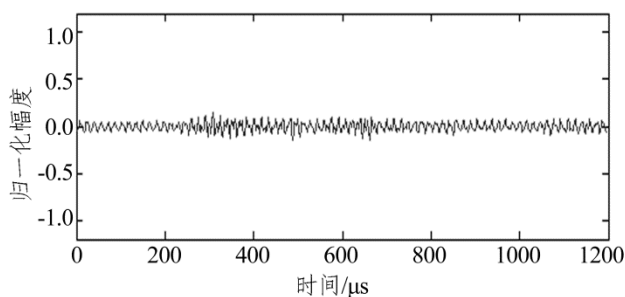
图2 空气耦合超声波 C 扫描成像系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of C-scan imaging system using air-coupled ultrasonic

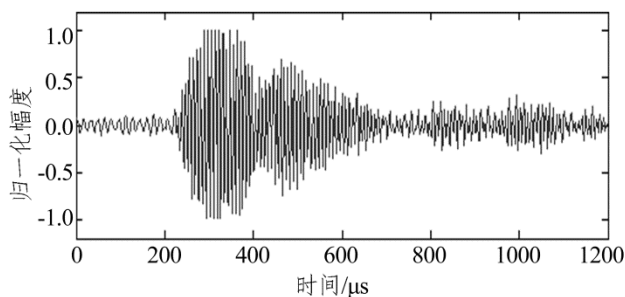
空气耦合式超声波设置参数：扫描步长 0.5 mm，脉冲电压 150~200 V，串内载波频率 50~150 kHz，串内脉冲个数 10，接收信号放大增益 0~255 dB，采样频率 500 kHz。

3 结果与分析

通过手动位置调节器，将超声波换能器分别移至 1#试样的 A、B 两点处，其中 A 点为节子，B 点无节子。采集穿透这两点后的超声波信号，并进行归一化处理，得到超声波波形，如图 3 所示。



a A点（节子处）



b B点（非节子处）

图3 1#试样上 A、B 两点接收到的超声波信号

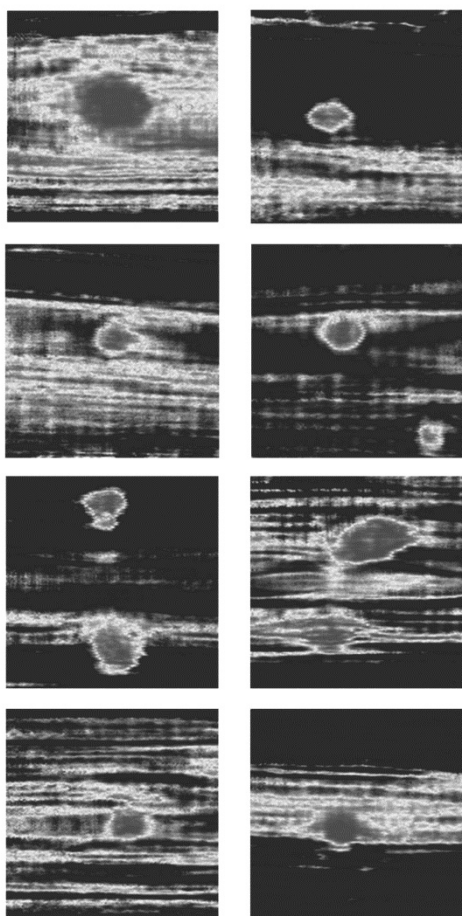
Fig.3 Waves recorded at points A and B of No. 1 lumber specimen

A 点位于节子区域，密度高，超声波穿过时，信号强度衰减大，接收到的超声波信号强度小；B 点位于早材区域，密度低，超声波穿过时，信号强度衰减小，接收到的超声波信号强度大。测试结果表明，利用空气耦合式超声波信号的衰减程度不同，可以有效对节子缺陷进行检测。

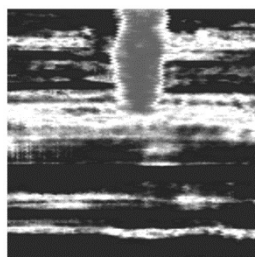
采用空气耦合式超声波扫描成像设备，对图 1 中的锯材试样进行 C 扫描成像，结果如图 4 所示。

图中（1~8#试样）黑色区域表示木材的密度小，超声波信号穿透锯材时，信号强度衰减大，接收到的超声波信号强度大；灰色区域表示木材的密度大，超声波信号穿透锯材时信号强度衰减小，接收到的超声波信号强度小。从图中可以清晰地观察到节子的位置、形状和大小，扫描图像基本符合锯材样本的实际情况，说明空气耦合式超声波对锯材的节子缺陷具有较好的检测效果。

值得注意的是，图中 9#试样为正面（无可见节子面）的扫描图像，仍然可以清晰地检测出节子区域。说明空气耦合式超声波不仅可以检测锯材表面节子缺陷，还可以有效检测内部的节子缺陷。



试样 1~8[#]



试样 9[#]

图4 锯材试样的C扫描成像图

Fig.4 C-scan imaging images of lumber specimens

4 结论

1) 基于空气耦合式超声波C扫描成像的锯材节子缺陷的检测方法,可以有效检测出锯材表面可见的节子缺陷及不可见的节子缺陷,检测结果以图像形式展示,简单直观明了。

2) 由于超声波束在空气中传播时存在波束散射,接收到的超声波信号幅度,本质上反映的是超声波束覆盖范围内的材质属性的平均值,因此,生

成的超声图像中,节子图像的尺寸要比真实节子的尺寸大。针对这一问题,下一步将开展空气耦合式超声波探头点扩展函数(Point spread function)估计、超声图像盲解卷等方面的研究,提高空气耦合式超声波图像的精度。

参考文献:

- [1] 黄素涌,王建和,吕建雄,等.世界节子研究进展[J].林产工业,2011,38(5):3-7.
- [2] 宋小燕,白福忠,武建新,等.应用灰度直方图特征识别木材表面节子缺陷[J].激光与光电子学进展,2015,52(3):199-204.
- [3] Xie Y H, Wang J C. Study on the identification of the wood surface defects based on texture features[J]. Optik-International Journal for Light and Electron Optics, 2015, 126(19): 2231-2235.
- [4] Gu I Y-H, Andersson H, Vican R. Wood defect classification based on image analysis and support vector machines[J]. Wood Science and Technology, 2010, 44(4): 693-704.
- [5] 王泽润,方益明,冯海林,等.木材节子缺陷检测与定位方法[J].激光与光电子学进展,2018,55(5):051501.
- [6] Zhang Y, Xu C, Li C, et al. Wood defect detection method with PCA feature fusion and compressed sensing[J]. Journal of Forestry Research, 2015, 26(3): 745-751.
- [7] Norlander R, Grahn J, Maki A. Wooden knot detection using convnet transfer learning[C]. Scandinavian Conference on Image Analysis, 2015: 263-274.
- [8] 徐姗姗,刘应安,徐昇.基于卷积神经网络的木材缺陷识别[J].山东大学学报(工学版),2013,43(2):23-28.
- [9] Fang Y, Lin L, Feng H, et al. Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 137: 79-87.
- [10] Marchetti B, Munaretto R, Revel G, et al. Non-contact ultrasonic sensor for density measurement and defect detection on wood[C]. 16th World Conference on Non-Destructive Testing, 2004: 14-21.
- [11] Dahmen S, Ketata H, Ben Ghazlen M H, et al. Elastic constants measurement of anisotropic Olivier wood plates using air-coupled transducers generated Lamb wave and ultrasonic bulk wave[J]. Ultrasonics, 2010, 50(4): 502-507.
- [12] Mori M, Hasegawa M, Yoo J-C, et al. Nondestructive evaluation of bending strength of wood with artificial holes by employing air-coupled ultrasonics[J]. Construction and Building Materials, 2016, 110: 24-31.
- [13] Beek J V D, Tiitta M, Tomppo L, et al. Moisture content determination of thermally modified timber by electrical and ultrasound methods[J]. International Wood Products Journal, 2011, 2(2): 60-66.
- [14] Sanabria S J, Furrer R, Neuenschwander J, et al. Analytical modeling, finite-difference simulation and experimental validation of air-coupled ultrasound beam refraction and damping through timber laminates, with application to non-destructive testing[J]. Ultrasonics, 2015, 63: 65-85.
- [15] Gan T, Hutchins D, Green R, et al. Noncontact, high-resolution ultrasonic imaging of wood samples using coded chirp waveforms[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2005, 52(2): 280-288.
- [16] 方益明,蔺陆军,鲁植雄,等.基于空气耦合超声波的木材无损检测系统研制[J].浙江农林大学学报,2017,34(2):355-360.

(责任编辑 孟凡丹、向琴)