

# 基于声学的木材无损检测技术研究进展

张晴晖<sup>1</sup>, 戴杨<sup>1</sup>, 李俊菽<sup>1</sup>, 钟丽辉<sup>1</sup>, 蓝增全<sup>2</sup>

1. 西南林业大学大数据与智能工程学院, 昆明 650224

2. 西南林业大学生态茶学(森林茶)研究中心, 昆明 650224

**摘要** 声学的无损检测方法具有成本低、易于携带、无辐射、检测速度快等优点, 在木材领域内广泛应用。阐述了基于声学的常见6种无损检测方法, 包括冲击应力波法、超声波速法、共振法、声发射、声-超声和层析成像技术的基本原理, 并对其特点进行了分析与比较。介绍了这些方法在木材工业中的应用, 包括对木材的物理力学特性的评估、木材内部缺陷的检测。综述了提高检测精度的研究现状, 分析了基于声学的木材无损检测研究中存在的困难。展望了木材无损检测设备在信号源、信号传输机理、信号分析与处理、便携性与实时性等方面的发展趋势。

**关键词** 无损检测; 木材; 声学方法; 超声波; 应力波; 声发射; 声-超声

木材作为一种具有高度生态和工业价值的可再生自然资源, 在生态环境、经济和社会生活各方面的重要性日益突出。无损检测技术能在不损害或不影响木材内部和外观结构与特性的前提下, 对木材内部状态进行检查, 从而最大限度地提高木材的使用率, 以缓解中国木材资源极度匮乏的不足。目前, 常用的木材无损检测方法主要有X射线摄影法、核磁共振法、微波法、红外线法、机械应力法, 以及基于声学的冲击应力波法、超声波法、共振法、声发射(AE)法、声-超声法以及层析成像等。与其他

无损检测方法比较, 基于声学的检测方法具有成本低、易于携带和野外作业、无辐射、检测速度快等优点, 因而在木材的无损检测领域得到广泛应用<sup>[1]</sup>。

以下首先根据实现原理的不同, 对目前常见基于声学的木材无损检测方法的原理进行简介, 分析和比较各自的特点。然后, 归纳分析这些方法的应用及研究状况。最后, 分析现阶段检测技术中存在的困难, 展望基于声学的木材无损检测设备的研究趋势。

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2020-04-13

基金项目: 云南省科技厅生物资源数字化开发应用项目(202002AA10007), 云南省教育厅科学研究基金项目(2020J0402), 云南省农业联合项目(2018FG001-108), 云南省教育厅科学研究基金项目(2020J0400)

作者简介: 张晴晖, 副教授, 研究方向为微弱信号检测与信号处理, 电子信箱: huizq@163.com

引用格式: 张晴晖, 戴杨, 李俊菽, 等. 基于声学的木材无损检测技术研究进展[J]. 科技导报, 2020, 38(22): 95-103; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.22.011

## 1 基于声学的木材无损检测方法

应力波是应力和应变扰动的传播形式。当可变形固体的部分介质点受到外载荷作用时,会与相邻介质间发生相对运动(变形),并会受到相邻介质点所给予的作用力(应力);同时也给相邻介质点反作用力,使它们离开初始平衡位置而运动起来。这样应力、应变状态的变化以波的方式传播,称为应力波<sup>[2]</sup>。声波与超声波分别指频率在 0.02~20 kHz 以及 20 kHz 以上的信号,它们在木材中均主要以应力波的形式传播。本论文中提及超声波部分,多是强调信号的频率高于 20 kHz。

根据检测实现原理的不同,可以将声学方法对木材的无损检测分为冲击应力波、超声波速、共振、声发射、声-超声、层析成像等检测方法。

### 1.1 冲击应力波法

该检测方法基于应力波的传播速度与木材的物理和力学特性的关系而实现,如式(1)所示。

$$E = C^2 \rho \quad (1)$$

式中, $C$ 为应力波波速, $\rho$ 为密度, $E$ 为木材的弹性模量,其反映了木材的力学特性。

当木材内部出现腐烂、空洞等缺陷情况时,应力波将绕过缺陷,从而导致传播时间增加、传播速度降低。因此,通过应力波在木材中的传播时间(time of flight, TOF),不仅可以对木材的力学性能进行评估,还可以对其内部缺陷进行检测。

该方法通过应力锤敲击激励生成应力波,其优点是操作简单,成本低,信号传输距离远,适合粗大的木材,应用范围广。缺点是激励生成的应力波的频率、波速等均是未知的;所记录的传输时间是一个平均值,容易受到密度、含水率等变化的影响;同时由于敲击的力度很难一致,测试的重复性较差。

### 1.2 超声波速法

该方法的检测原理与冲击应力波检测方法类似,主要不同之处在于:应力波检测方法中生成的应力波包含了多种不同频率和速度。而超声波检测方法采用压电陶瓷换能器激励超声波生成,因而其频率与波速是单一的、已知的,并且频率高于冲

击应力波,能检测到更加微小的异常。根据超声波发射器和接收器的位置不同,超声波速法可分为反射和透射 2 大类;而根据超声波入射角度又可分为垂直和斜射 2 大类。

由于超声波的频率高,其信号衰减严重,传输距离短,因此多用于测试对象尺寸较小的场合。另外,换能器与被测木材之间需要耦合剂确保超声波信号传递到木材中,并对木材的表面光滑程度有一定要求<sup>[3]</sup>。不过,信号源编码激励技术和空气耦合技术的发展,能在一定程度上解决上述不足。

### 1.3 共振法

共振检测法是一种成熟的木材无损评估方法。与前 2 种方法不同的是该方法测量信号的频率,然后通过式(2)求得信号的传播速度。

$$C = 2fL \quad (2)$$

式中, $C$ 为波速, $f$ 为共振频率, $L$ 为被测木材长度。

该方法采集木材 2 个端面之间反射的混叠声波,通过傅里叶变换以及加权平均等处理分析方法,获取到信号的固有频率。同时,也可以获取信号的固有振型、阻尼等特性参数。这些特性参数与待测木材的内部结构紧密相关,因而通过这些特性参数可实现待测木材的评估。该方法具有较好的精度和可重复性。不过,由于该方法要通过木材的 2 个端面激励和采集信号,因此该方法多用于原木和锯材。

### 1.4 声发射

声发射(acoustic emission, AE)是指由被检测材料内的能量快速释放产生的瞬态弹性波的现象。研究发现,木材在生长和加工过程中均会产生声发射现象,信号的频率可能低至声波范围,也可高达 2 MHz,进入超声波范围。声发射检测方法通过压电换能器将材料的机械振动转换成电压-时间波形,从而获取发射源的位置及其他特征等信息。

由于该方法可分析检测信号的波形、频谱、振幅大小与分布、速率等不同特征,具有及时、主动地发现待测材料的变化,对材料的几何形状不敏感等优点。不足之处是声发射信号是由待测材料加载过程中激活的内部源激励生成,其发生时间与位置

不确定,波形的特征也是未知的。因而,如何从木材的正常结构导致的声发射信号中识别出与材料质量相关的声发射信号就尤为重要。

### 1.5 声-超声

声-超声(acousto-ultrasonics, AU)最早来源于 Vary 等为评估高衰减复合材料提出的超声应力波模拟方法,将其作为声发射技术的补充<sup>[4]</sup>。其信号的采集和分析的方法与原理与声发射技术相同,主要区别在于信号的激励源不同。声-超声技术中声波信号是由外部的超声脉冲源主动激励产生,因此,其声源的位置与波形特征是确定的。同时,该方法可以根据需要设置或改变声源信号的幅度、功率、波形、频率、发射频率等参数。因此,检测试验的重复性好,结合新的信号分析处理技术,能够更好地提取到有关木材的质量特征。

### 1.6 层析成像技术

声学层析成像技术可分为应力波和超声波成像 2 个类别<sup>[5]</sup>。应力波方法一般是通过透射波成像,而超声波方法一般是通过衍射或反射波成像。成像方法通过测量信号在不同检测路径的传输参数的差异,通过反演算法对差异进行二维图像的重建,从而实现木材内部异常的可视化表征。主要的测量参数有传播速度、衰减幅度、频谱峰值等。目前,木材的声学成像技术大多基于各项同性、直线传输的假设,存在成像精度不高的不足。

### 1.7 不同方法的比较

由于声-超声技术在激励源与信号处理方面的优势,其具有很好的发展前景。但其也具有成本高、不易操作等不足。对上述各种方法的特点进行了比较见表 1。

表1 基于声学的木材无损检测方法的比较

检测方法	频率范围/kHz	能量来源	信号源重复性	检测参数	成本	可操作性
冲击应力波法	<20	外部机械冲击	可重复,重复性差	传输时间	低	简单
超声波速法	500~2000	外部换能器激励	可重复,重复性好	传输时间	较低	较简单
共振法	<20	外部机械冲击	可重复	频率	低	简单
声发射法	20~2000	内部能量释放	不可重复	传输时间、幅度衰减、各种波形频率特征	较高	较复杂
声-超声法	20~2000	外部换能器激励	可重复,重复性好	传输时间、幅度衰减、各种波形频率特征	高	复杂
层析成像法	50~1000	外部机械冲击或换能器激励	可重复	传输时间、衰减等	高	复杂

## 2 声学无损检测木材的应用研究

木材一般是指伐下并经过初步加工后的木质化植物组织,通常包括原木、锯材、板材、立木等类别。对于原木、锯材、板材来说,无损检测的目的是对其强度进行评估,从而实现材料的分级。对于立木来说,无损检测的目的是对其生长状态进行监测,保证其成材质量。另外,还需要对其内部的缺陷进行检测,以保证安全与可靠。

这部分研究内容是通过声学特征对木材的质量进行定性或者定量的评估。主要包括 2 个方面:第一,对木材的物理力学特性的评估;第二,对木材

内部缺陷的检测。

### 2.1 对木材的物理力学特性的评估

对木材的物理力学特性的评估应用主要是通过声学特征对木材的密度、弹性模量、破裂模量等与木材质量密切相关的特性进行评估。

1978年, Paschalis 等<sup>[6]</sup>在用超声波法与共振法验证了松木的强度与其内部结构特性之间的关系。Bucur 等<sup>[7]</sup>于 1984 年采用超声波设备对 6 个北美树种制成的圆柱型试件的弹性性能进行了估计。2002 年, Hasegawa 等<sup>[8]</sup>研究了在木材上施加不同载荷的应力时超声波剪切波速度的变化。2007 年, Dzbeńsk 等<sup>[9]</sup>对超声波在针叶型(松树、云杉)树木

的树干的传输速度与其生成的锯材的弹性模量、弯曲强度和抗压强度等机械特性之间的相关性进行了研究。2007年, Yin等<sup>[10]</sup>分别通过应力波和超声波速度法对中国杉木原木的静态弯曲弹性模量(MOE)、破裂模量(MOR)和抗压强度进行了研究。2011年, 张训亚等<sup>[11]</sup>基于声-超声技术对兴安落叶松的密度、含水率、抗弯性等性质进行了预测和评估。2012年, Kohlhauser等<sup>[12]</sup>通过超声波对云杉的泊松比进行了估计, 其结果与直接测量的结果吻合。2018年, Ruy等<sup>[13]</sup>通过超声波速度对3种桉树共54个原木样本进行了分级评估, 并指出超声波速度会受到原木的直径和含水率的影响。

## 2.2 木材内部缺陷的检测

当木材内部存在缺陷时, 因为声阻的不连续, 会对声波或者超声波的速度、幅度、频率、能量峰值构成影响。研究者们正是通过这些不连续导致的声学变化对木材内部的腐朽、节疤、树脂、夹皮、孔洞等缺陷进行检测。

1969年, McDonald等<sup>[14]</sup>就通过超声对木材中的节进行了检测。1981年, Dunlop等<sup>[15]</sup>采用超声脉冲法, 根据声阻的变化对电杆的腐朽劣化进行检测。1991年, Bucur等<sup>[16]</sup>通过超声波速度测量技术估计白腐和褐腐对山毛榉和松木的腐烂情况。Bütler等<sup>[17]</sup>和 Kazemi-Najafi等<sup>[18]</sup>分别于2007年和2009年根据超声波速度的变化对欧洲云杉以及伊朗山毛榉的腐朽程度进行了评估。2016年, 张甜等<sup>[19]</sup>采用 Sylvania-Duo 超声波检测仪对健康杉木和含有不同孔洞缺陷尺寸的杉木进行测试, 得到超声波传播速度与不同孔洞直径的定量关系。2017年, El-Hadad<sup>[20]</sup>利用声发射技术对使用中的木材中的白蚁进行了监测。

成像技术也主要应用于木材的缺陷检测, 以求能够以可视化的形式对木材的内部缺陷进行表征。1986年, Tomikawa等<sup>[21]</sup>通过超声波的传输时间重建了木柱的电子计算机断层扫描(CT)图像, 对木柱的腐朽和芯材的情况进行了显示。2003年, Sambuelli 研究组<sup>[22]</sup>采用 PiCUS 设备对云杉进行了断层扫描, 通过慢度和衰减重建了其CT图像, 并将其与通过电阻和地探雷达的成像结果做了比较。

2010年, Brazeo等<sup>[23]</sup>等采用超声CT成像技术和电阻CT成像技术相结合的方法对北美的3种树木的腐烂进行了评估。刘铁男<sup>[24]</sup>、王娜<sup>[25]</sup>分别于2010和2012年将超声波衰减成像技术应用于原木横断面缺陷检测。

这些应用研究证明, 当声与超声波经过木材传输后, 其信号参数上的变化与木材的机械力学性质、内部的缺陷具有较强的相关性, 这也使得这些基于声学的无损检测方法的应用成为可能。但相应研究也表现出在实际应用中该类检测方法还存在检测结果精度差、可靠性低、设备不易操作等不足。

## 3 提高木材声学无损检测精度的研究

为了能够更加准确地对木材的物理特性和内部缺陷进行评估, 研究者们还在以下3个方面进行了大量的研究: 调查影响声与超声信号检测精度的各种因素; 建立模型研究声与超声波在木材中的传播机理; 尝试新的信号分析与人工智能方法对采集信号进行处理。

### 3.1 影响因素的研究

声与超声信号的特性不仅仅是材料特性(密度、超声速度、衰减系数、刚度)的直接反映, 同时还可能受到材料的几何特性(尺寸、缺陷、微观结构尺寸)、环境条件(温度、湿度、含水量、加载历史)和实验条件(传感器、耦合介质、电子设备、过滤器、放大器、电缆的特性)等因素的影响。研究者们在这方面也进行了大量相关研究。

2005年, de Oliveira等<sup>[26]</sup>对巴西硬木中含水量对超声波速度的影响进行了研究, 得出了超声波速度对木材的含水量变化非常敏感的结论。王立海等<sup>[27-31]</sup>分别于2007、2011、2014年通过RSM-SY5超声波设备研究了树木中腐烂的尺寸大小、位置以及超声波传感器的数量对测量精度的影响。2012年, 高珊<sup>[32]</sup>对美国红松活立木及原木声波传播及力学特性的影响进行了研究。2016年, 高珊等<sup>[33]</sup>研究了 Sylvania-Duo 的探针与木材接触方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。2017年,Gonçalves等<sup>[34]</sup>利用平衡含水量和饱和含水量的超声波速度计算含水量调节因子,以对不同含水量调节下的超声波速度进行调节,从而为基于超声传播的木材无损分级标准化提供依据。2018年,EI-Hadad等<sup>[35]</sup>研究了木材类型、木材含水率(MC)、输入信号频率、信号传输距离和木材状况(有无裂缝的木材)等因素对声发射信号的影响。

### 3.2 信号传输模型研究

声与超声信号在木材中的影响因素的研究更多的是通过实验的方法。而信号在木材内部的传输的建模研究将为实验研究奠定理论基础,吸引了众多研究者的兴趣。

2009年,冯海林等<sup>[36]</sup>把原木看作正交各向异性的材料,给出在圆柱极坐标下的微分方程,引入Kelvin-Christoffel张量,得到应力波在木材中传播的微分方程模型,并以云杉和松木为应用实例对应力波的传播进行了仿真。2014年,余斌等<sup>[37]</sup>将原木看作正交各向异性材料,结合弹性波在固体介质中的传播理论以及声学理论,得出了超声波在原木内部传播过程中的位移方程和速度方程。2018年,Liu等<sup>[38]</sup>提出了一种基于混合波传播模型(HWPM)的层析成像方法,该方法首先利用直线反演得到应力波初始的速度分布,再利用曲线反演对初始速度分布进行修正,从而获取到更加准确的层析图像。2019年,Sarnaghi等<sup>[39]</sup>根据木材表面节点的视觉表现和弹性模量与密度的比值,建立了云杉和花旗松板强度预测模型,对与强度相关的应力集中因子进行了计算。

### 3.3 信号分析与处理研究

随着传感器、信号采集技术的发展,研究者们可以获取更加真实的、数量与种类更多的采集信号。如何对信号进行分析,进而从中提取到需要的特征信息,以及通过人工智能的方法对这些信息进行识别、分类、评价是近年来的研究热点。

2009年,Esteban等<sup>[40]</sup>采用人工神经网络,通过松柏板材的密度、宽度、厚度、含水率、超声波传播速度和视觉分级等参数,对其弹性模量进行了预

测,成功率达到了75.0%。2009年,Wang等<sup>[41]</sup>利用小波变换对榆树的透射超声信号进行分解,计算各节点在第5层的能量变化,然后训练BP神经网络进行木材缺陷识别,识别率达到80%以上。2011年,Saadat-Nia等<sup>[42]</sup>在超声波对杨树和云杉的应力木检测中,采用Morlet小波变换对信号进行处理,增加了检测精度。2012年,Brancheriau等<sup>[43]</sup>采用Morlet小波对信号进行了滤波处理,提高了渡越时间的估计精度,从而重建了更加精确的CT图像。2015年,Moreno等<sup>[44]</sup>通过逻辑回归模型拟合得到声波速度值的阈值,再根据阈值对层析图像进行分割,从而实现了树木内部腐朽的自动识别。Metwally等<sup>[45]</sup>于2016年采用基于Jaffard-Meyer算法的小波分析方法对信号进行处理,提高了树木密度与厚度的检测精度。2018年,Miguel等<sup>[46]</sup>通过多层感知器神经网络(3个输出层神经元)使用木材的密度、超声波传播速度和动态弹性模量作为输入,对木材机械性能的硬度、弹性模量和断裂模量进行了评估。结果表明,该方法能够对木材的性能进行有效、无损的预测。

综上所述,相应研究证明了无损检测过程中影响测量精度的因素较多,通过信号模型和信号处理方法的研究,能够在一定程度上提高检测精度,但相关研究大多还处于理论研究阶段。

### 3.4 提高精度的困难分析

木材的自然特征以及使用环境的特殊性,使得检测精度的提高存在较大难度。首先,由于木材是一种各向异性、不均匀的生物物质材料,其微观结构的不均匀性将导致高频的超声波信号产生散射和强烈的衰减<sup>[1,43,47]</sup>,使得无法获取到透射或是反射的高频信号;而低频的声波信号又无法提供需要的空间分辨率。第二,现有的木材无损检测设备由于成本和便携性等原因,大多基于木材是各向同性和线性声场的假设,与木材的各向异性和非线性声场的事实不符。第三,粗糙的树皮将进一步恶化信噪比,有效信号将淹没在高幅度的噪声之中,信号的检测和提取异常困难。这些原因均将影响评估精度,这导致无论是对木材物理机械参数的检测,还是对各种缺陷的图形化显示,都很难做到定量与准

确,更无法检测出一些在尺度和物理性质上较小的变化<sup>[48-49]</sup>。第四,由于检测对象大多在户外、甚至是偏僻的野外,现有的仪器设备无法满足低成本、实时、便携的要求,更无法贯通木材育种、生长、生产、加工各个环节。

## 4 检测设备研发展望

木材的无损检测的设备的研发是理论与实践的结合,下面针对前述困难并结合文献,就信号源、信号传输机理、信号分析与处理、便携性与实时性几个方面对木材无损检测设备的研发进行展望。

### 4.1 信号源

声-超声技术使研究者能够通过编码激励等信号源预处理技术在一定程度上解决轴向分辨率和信噪比之间的矛盾。编码激励技术对发射信号进行编码,在不提高发射信号的峰值功率下提高平均功率,从而提高系统的信噪比。该技术特别适合于空气耦合等高衰减的超声检测方法。编码激励技术已经在医学领域得到成功的应用<sup>[50-51]</sup>,但在木材领域的应用较少。研究新的编码方法,充分利用信号源的频率、时间、相位等局部信息将能更大幅度地提高信号获取的精度。

### 4.2 信号传输机理

由于木材结构的复杂性,信号传输的机理一直是木材无损检测研究的难点与热点。将木材作为各向异性材料,在模型中充分考虑具体树种内部的细胞壁、管胞尺寸、年轮结构、晚材率、微纤丝角等微结构,这将是木材中信号传输机理的研究方向。进一步,把信号发生器、耦合方式、信号接收器纳入到信号传输模型中,建立统一的模型,将能够模拟更加真实的声或超声波信号的传输。

还有,非线性声学技术已被证明是一种最有前途的无损评估技术。虽然,目前其在木材领域的应用还存在着很多困难,但非线性信号在木材中的传播机理将吸引研究者的关注。

### 4.3 信号分析与处理

经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)算法以及其衍生的各种算法,近年来在超声

波微弱信号的提取方面得到广泛的应用。这些新的自适应时频分析算法将对低信噪比的声波信号的噪声抑制提供有力的帮助。

另外,随着计算机技术和人工智能技术的发展,以数据驱动为基础的处理方法日益得到重视<sup>[52]</sup>。人工神经网络、模糊逻辑、高斯过程、支持向量机、隐马尔可夫模型等数据驱动方法在木材领域中的应用,将推动木材分级与评估向自动化、智能化方向发展。

### 4.4 便携性与实时性

传感器、数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)、嵌入式等电子技术的发展,使得便携式的信号激励设备、采集设备的实现成为可能。同时,无线传感器网络、边缘计算等技术的发展,使得对采集数据的实时传输和处理成为可能。从而使得构建一个贯通木材的育种、生长、生产、加工各个环节的实时监控系統,实现木材质量的实时评估和预测将成为可能。

## 5 结论

基于声学的无损检测方法具有成本低、易于携带和野外作业、无辐射、检测速度快等优点,在木材检测领域内得到广泛应用。但由于木材微观结构的不均匀性,导致其存在着精度差、可靠性低、设备不易操作等不足。科研工作者针对上述不足进行了大量研究,取得了很多成果。相信随着新的理论和技术的出现及发展,通过科研人员与木材行业的共同努力,必将大力推进木材无损检测的发展。

### 参考文献(References)

- [1] Bucur V. Acoustics of wood[M]. Second Edition. New York: Springer Science & Business Media, 2006: 217-240.
- [2] 王礼立. 应力波基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 1-4.
- [3] 杨洋, 申世杰. 木材无损检测技术研究历史、现状和展望[J]. 科技导报, 2010, 28(14): 113-117.

- [4] Vary A. The acousto-ultrasonic approach[M]//Duke J C ed. Acousto-Ultrasonics. Boston: Springer, 1988: 1-21.
- [5] Bucur V. Nondestructive characterization and imaging of wood[M]. New York: Springer Science & Business Media, 2003: 181-214.
- [6] Paschalis P. Bestimmung der korrelation zwischen ausgewählten festigkeitseigenschaften und strukturmerkmalen von holz mit anwendung des resonanz und ultraschallverfahrens[J]. Holztechnologie, 1978: 14-17.
- [7] Bucur V, Archer R R. Elastic constants for wood by an ultrasonic method[J]. Wood Science & Technology, 1984, 18(4): 255-265.
- [8] Hasegawa M, Sasaki Y. Acoustoelastic birefringence effect in wood I: Effect of applied stresses on the velocities of ultrasonic shear waves propagating transversely to the stress direction[J]. Journal of Wood Science, 2004, 50(1): 47-52.
- [9] Dzbeński W, Wiktorski T. Ultrasonic evaluation of mechanical properties of wood in standing trees[C]//COST E 53 Conference—Quality Control for Wood and Wood Products, Warsaw 15-17 Oct, 2007: 15-17.
- [10] Yin Y, Nagao H, Liu X, et al. Mechanical properties assessment of Cunninghamia lanceolata plantation wood with three acoustic-based nondestructive methods[J]. Journal of Wood Science, 2009, 56(1): 33-40.
- [11] 张训亚. 兴安落叶松木材性质的声-超声技术预测[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2011.
- [12] Kohlhauser C, Hellmich C. Determination of Poisson's ratios in isotropic, transversely isotropic, and orthotropic materials by means of combined ultrasonic-mechanical testing of normal stiffnesses: Application to metals and wood[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2012 (33): 82-98.
- [13] Ruy M, Gonçalves R, Pereira D M, et al. Ultrasound grading of round Eucalyptus timber using the Brazilian standard[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2018, 76(3): 889-898.
- [14] McDonald K, Cox R, Bulgrin E. Locating lumber defects by ultrasonics[M]. Wisconsin: US Forest Products Laboratory, 1969.
- [15] Dunlop J I. Testing of poles by using acoustic pulse method[J]. Wood Science & Technology, 1981, 15(4): 301-310.
- [16] Bucur V. Technique ultrasonore de caractérisation du degré d'altération des bois de hêtre et de pin Soumis à l'Attaque de différents champignons: Holzforschung[J]. Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 1991, 45 (1): 41-46.
- [17] Büttler R, Patty L, Le Bayon R C, et al. Log decay of *Picea abies* in the Swiss Jura Mountains of central Europe [J]. Forest Ecology and Management, 2007, 242(2/3): 791-799.
- [18] Kazemi-Najafi S, Shalbfafan A, Ebrahimi G. Internal decay assessment in standing beech trees using ultrasonic velocity measurement[J]. European Journal of Forest Research, 2009, 128(4): 345-350.
- [19] 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.
- [20] El-Hadad A. Using acoustic emission technique with Matlab® analysis to detect termites in timber-in-service [D]. Melbourne: The University of Melbourne, 2017.
- [21] Tomikawa Y, Iwase Y, Arita K, et al. Nondestructive inspection of a wooden pole using ultrasonic computed tomography[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 1986, 33(4): 354-8.
- [22] Nicolotti G, Socco L, Martinis R, et al. Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees[J]. Journal of Arboriculture, 2003, 29(2): 66-78.
- [23] Brazee N J, Marra R E, Gocke L, et al. Non-destructive assessment of internal decay in three hardwood species of northeastern North America using sonic and electrical impedance tomography[J]. Forestry, 2010, 84(1): 33-39.
- [24] 刘铁男. 基于超声波活立木内部腐朽衰减成像的研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2010.
- [25] 王娜. 基于超声波传播场的原木及板材空洞缺陷定量检测[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [26] de Oliveira F G R, Candian M, Lucchette F F, et al. A technical note on the relationship between ultrasonic velocity and moisture content of Brazilian hardwood (*Goupia glabra*) [J]. Building and Environment, 2005, 40(2): 297-300.
- [27] Wang L H, Xu H D, Zhou C L, et al. Effect of sensor quantity on measurement accuracy of log inner defects by using stress wave[J]. Journal of Forestry Research, 2007, 18(3): 221-225.
- [28] Wang N, Wang L H. Response of ultrasonic wave velocity to wood structure defect of Korean Pine[C]//Advanced

- Materials Research. Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2011, 311: 1609–1613.
- [29] Wang N, Wang L H, Xu H D. Effect of emission points on ultrasonic testing accuracy of log internal decay[J]. *Advanced Materials Research*, 2011(337): 682–685.
- [30] Wang N, Wang L H, Xu H D. The prediction on the size and location of internal defects of standing trees using ultrasonic technology[C]//*Key Engineering Materials*. Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2011(467): 1838–1845.
- [31] Gao S, Wang N, Wang L H, et al. Application of an ultrasonic wave propagation field in the quantitative identification of cavity defect of log disc[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014(108): 123–129.
- [32] 高珊. 环境温度对美国红松活立木及原木声波传播及力学特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [33] 高珊, 王立海, 杨冬辉, 等. 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[J]. *浙江农林大学学报*, 2016(5): 875–880.
- [34] Gonçalves R, Lorensani R G M, Negreiros T O, et al. Moisture-related adjustment factor to obtain a reference ultrasonic velocity in structural lumber of plantation hardwood[J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2017, 13(5): 254–261.
- [35] El-Hadad A, Brodie G I, Ahmed B S. The Effect of wood condition on sound wave propagation[J]. *Open Journal of Acoustics*, 2018, 8(3): 37–51.
- [36] 冯海林, 李光辉. 木材无损检测中的应力波传播建模和仿真[J]. *系统仿真学报*, 2009(8): 258–261.
- [37] 余斌, 高珊, 王立海, 等. 超声波在原木内部传播理论研究[J]. *森林工程*, 2014, 30(1): 92–95.
- [38] Liu L, Li G H. Acoustic tomography based on hybrid wave propagation model for tree decay detection[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018(151): 276–285.
- [39] Sarnaghi A K, van de Kuilen J W G. Strength prediction of timber boards using 3D FE-analysis[J]. *Construction and Building Materials*, 2019(202): 563–573.
- [40] Esteban L G, Fernández F G, Palacios P D. MOE prediction in *Abies pinsapo* Boiss. timber: Application of an artificial neural network using non-destructive testing[J]. *Computers & Structures*, 2009, 87(21/22): 1360–1365.
- [41] Wang L, Li L, Qi W, et al. Pattern recognition and size determination of internal wood defects based on wavelet neural networks[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2009, 69(2): 142–148.
- [42] Saadat-Nia M, Brancheriau L, Gallet P, et al. Ultrasonic wave parameter changes during propagation through poplar and spruce reaction wood[J]. *BioResources*, 2011, 6(2): 1172–1185.
- [43] Brancheriau L, Ghodrati A, Gallet P, et al. Application of ultrasonic tomography to characterize the mechanical state of standing trees(*Picea abies*)[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2012, 353(1): 012007.
- [44] Moreno L F E, Arciniegas A, Prieto F A, et al. Standing tree decay detection by using acoustic tomography images[C]//*Twelfth International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2015*. Le Creusot: International Society for Optics and Photonics, 2015(9534): 4.
- [45] Metwally K, Lefevre E, Baron C, et al. Measuring mass density and ultrasonic wave velocity: A wavelet-based method applied in ultrasonic reflection mode[J]. *Ultrasonics*, 2016(65): 10–17.
- [46] Miguel E P, Melo R R, Serenini Junior L, et al. Using artificial neural networks in estimating wood resistance [J]. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 2018, 20(4): 531–543.
- [47] Berndt H. Propagation of elastic waves in wood: Modeling and measurement [D]. California: University of California at Berkeley, 1998.
- [48] Berndt H, Johnson G C. Examination of wave propagation in wood from a microstructural perspective[M]//Thompson DO, Chimenti DE, eds. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Boston: Springer, 1995: 1661–1668.
- [49] Berndt H, Schniewind A, Johnson G. High-resolution ultrasonic imaging of wood[J]. *Wood Science and Technology*, 1999, 33(3): 185–198.
- [50] Ramalli A, Guidi F, Boni E, et al. A real-time chirp-coded imaging system with tissue attenuation compensation[J]. *Ultrasonics*, 2015(60): 65–75.
- [51] Rouyer J, Mensah S, Vasseur C, et al. The benefits of compression methods in acoustic coherence tomography [J]. *Ultrasonic Imaging*, 2015, 37(3): 205–223.
- [52] Lim H J, Sohn H, Kim Y. Data-driven fatigue crack quantification and prognosis using nonlinear ultrasonic modulation[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018(109): 185–195.

## A review of the nondestructive testing of wood based on acoustics

ZHANG Qinghui<sup>1</sup>, DAI Yang<sup>1</sup>, LI Junqiu<sup>1</sup>, ZHONG Lihui<sup>1</sup>, LAN Zengquan<sup>2</sup>

1. College of Big Data and Intelligent Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

2. Ecological Tea (Forest Tea) Research Center, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China

**Abstract** Due to its advantages of low cost, portability and easy field operation, no radiation, and fast detection speed, the acoustic-based non-destructive testing method has been widely applied in the area of wood materials. In this paper, we present first the basic principles of common acoustic-based nondestructive testing methods, including the impact stress wave method, the ultrasonic method, the resonance method, the acoustic emission, the acousto-ultrasonics, and the tomography technology, and analyze and compare their characteristics. Then, we review the applications of these methods in the wood industry, such as the evaluation of physical and mechanical properties of wood and the detection of wood internal defects, and the studies of improving the detection accuracy, and analyze the difficulties in the acoustic-based wood non-destructive testing. Finally, we discuss the development trend of the wood non-destructive testing equipment in terms of signal source, signal transmission mechanism, signal analysis and processing, portability and real-time performance, and point out that the emergence of new theories and technologies will greatly promote the development of non-destructive detection for wood.

**Keywords** nondestructive testing; wood; acoustic method; ultrasound; stress wave; acoustic emission; acousto-ultrasonics ●



(责任编辑 徐丽娇)