综 述

北美木材无损检测技术的研究与应用

梁善庆[1]，蔡智勇[2]，王喜平[2]，Robert J. ROSS[2]，傅 峰[1]
(1. 中国林科院木材工业研究所，北京 100091；2. USDA，Forest Products Laboratory，Madison 53726-2398，WI，USA)

摘要： 对北美木材无损检测技术的研究与应用进行了阐述，并对应力波、超声波和声发射技术的应用情况、现存问题进行简要分析，为今后在我国推广木材无损检测技术提供了参考。

关键词： 无损检测；木材；应力波；振动法；超声波
中图分类号：TS6 · **文献标识码：**A **文章编号：**1001-8654(2008)03-0005-04

Developments and Applications of Nondestructive Tests for Wood in North America

LIANG Shan-qing[1]，CAI Zhi-yong[2]，WANG Xi-ping[2]，Robert J. ROSS[2]，FU Feng[1]
(1. Research Institute of Wood Industry，Chinese Academy of Forestry，Beijing 100091，China；
2. USDA，Forest Products Laboratory，Madison 53726-2398，WI，USA)

Abstract: Current developments and applications of nondestructive testing (NDT) on wood and wood products in North America，from a literature search，are presented. Advantages and disadvantages of most commonly-used NDT techniques，such as visual inspection，stress wave，vibration，computer tomography，and acoustic emission，are discussed. This paper is expected to provide useful guidance to the application and practice for using advanced NDT technology in China's wood industry.

Key words: nondestructive test(NDT)；wood；stress wave；vibration；ultrasonic wave

无损检测是指采用适当的测量手段，在不破坏被测物体原有的形状和物理、化学、力学性质的前提下，对其性能指标进行快速、有效的检测和评价。

早在20世纪50年代初期，随着美国、加拿大和墨西哥等国木材工业的迅速发展，北美就开始了无损检测技术的研究和使用。1959年提出了使用无损检测方法检测木质材料的基本假设；1963年在美国Wisconsin州举办的第一届木材无损检测研讨会，标志着无损检测在北美木材研究领域中开始受到广泛地关注。

早期的无损检测主要采用目测法和振动法，对板材及木制品进行分等与评价，经过50多年的发展，现可根据检测要求的不同，使用各种技术进行检测，且无损检测已涉及木材领域的各个方面。如活立木性质检测与评价，原木分等与锯解，板材性质评价与分等，人造板及新型木基复合材料性质评价，古树名木诊断，古建筑评价等。

在当今木材资源严重短缺形势下，利用无损的方法和手段，不仅能够对林产品的各种性能指标进行快速评价，提高生产效率和产品质量，同时，对木材原材料性质的早期预测，可使木材各尽其用，扬长避短，有效地提高木材资源的利用率。

1 北美木材无损检测方法的研究进展

1.1 目视观测法

目视观测法是使用最早、最简单的无损检测方法，主要通过观测木材开裂、机械损坏、腐朽、虫蛀破坏和弯曲等缺陷情况，进而对木材进行评价与分等。其中一种方式是，通过对活立木外部情况的观测，来评价其内部缺陷。在美国，该方法也被用来对立木性

收稿日期：2007-06-15；修改日期：2008-04-18
基金项目：引进国际先进林业科学技术创新项目"948"专题(2006-4-C03)；"十一五"国家科技支撑计划课题(2006BAD18B07)。
作者简介：梁善庆(1977—)，男，中国林科院木材工业研究所博士研究生。

万方数据

质进行评价和分等，以判断其是否适于作结构用材。

目视观测法的最后结果，通常是可用或不可用两类，或属于某一等级的范围。该方法需要操作人员有丰富的经验，得出的结论亦具有主观性。

此外，由于木材内部的情况无法直接做出判断，必须与其他无损检测方法结合使用，但是目视观测法仍然是目前不可缺少、最常用的一种无损检测方法。

1.2 振动法

振动无损技术主要是通过测量木材的振动特征来判定木材的性质，多用于板材和原木分等，具有简单、快速、便捷的优点。在北美，该方法的研究与应用已取得一定进展。通过敲击原木端部，引起振动，并记录振频情况来检测原木的强度，再根据强度的大小对原木进行分等。有关学者采用振动法，建立了振动与弹性模量、抗弯强度、硬度的相关关系，并探讨了采用振动法对针叶树材原木分等的机理[1]。

人工敲击的操作方式存在人为主观因素影响，检测结果的可靠性和灵敏度较差。为了减少边缘条件的影响，提高自然频率检测的准确性，振动检测手段已经向仪器化、智能化方向发展。

有学者采用自动振动检测方式[2]，使用非敲击式应力振动检测系统，来评价建筑木地板的性能，发展了振动检测方式，并将此方法应用于木制桥梁的检测与评价。

1.3 应力波

不同的声波被使用到木材的无损检测中，声波范围为从音频（接近 20kHz）到低超声频率（500kHz）。敲击产生的应力波属于低音频范围（1～5 kHz），在木材中具有较好的传播信号，且开发的检测仪器价格低廉、实用性强，因而得到了广泛应用。

有学者研究了应力波在木材中的传播行为和波参数与木材性质之间的相关性，发现通过测量木材的应力波传播速度，能够有效地预测木材的强度，并揭示了波速与木材性质间的密切相关关系。正是这种相关性，使应力波检测技术对木材性质的预测与评价得以实现[3]。

在木材中传播的应力波参数（波速、衰减）大小，均与木材性质有关，但波速是最容易测量和处理的检测参数。根据波速，可以预测木材的硬度和强度，从而达到原木分等的目的[4]。Xiping W 等[5]总结了应力波检测活立木腐朽的方法、原理及现有设备的检测性能和准确性，提出在阔叶树材中，应力波沿木材径向单位长度（m）的传播时间为 1000 μs；在针叶树材中为 670 μs，并给出了相关的传播时间计算公式：

阔叶树材：$T_0=1000\ D$

针叶树材：$T_0=670\ D$

式中：T_0—应力波沿径向传播的时间，μs；D—原木直径，m。检测时，如果传播时间低于相应材种的判定值，可认定为健全材，反之为腐朽材或不健全材。

Brashaw 等[6]使用 4 种应力波设备 Metriguard 239A，Sylvatest Duo，Fakopp Microsecond Timer 和 IML Electronic Hammer 对木制桥梁状况进行评价。发现 4 种设备所检测出的腐朽值及变异程度有所差别，特别是采用表面直接接触方式检测时，Sylvatest Duo 和 Metriguard 239A 的变异性大，无法对腐朽情况做出有效判断；如果采用钻孔接触方式，Sylvatest Duo 与 Fakopp 一样，也能作出有效判断。

新的检测设备也在不断地开发和应用，如 T300，能够对立木性质进行有效检测；而应力波断层成像技术（Stress Wave Tomography）是近年新发展起来、用于活立木内部诊断的无损检测方法。通过测量木材断面不同方向应力波的传播速度，再通过矩阵变换重构后，可以二维或三维图像方式，表示木材内部的情况。

Gilber 等[7]采用此法进行立木腐朽检测，发现应力波断层成像技术能够很好地反应木材内部腐朽情况，通过图像，能观测到腐朽发生的部位、面积和大小。其缺点是，容易把细小开裂指示为小面积腐朽；另外，显示严重腐朽和空洞的颜色区别不大，还需要借助其它检测方法来进一步确认。

1.4 超声波

超声波技术在 20 世纪 70 年代末得到发展，80 年代中期应用于木材检测。超声波产生声脉冲进入被检测材料中，经过穿透、反射、衰减，再被另一端的传感器收集，通过提取不同信号参数并进行处理，进行材料性质预测。不同的超声波参数（传播时间、传播速度、能量峰值、频率），可用来检测板材的表面缺陷、结构材腐朽、木制桥梁老化、干燥后木材表面开裂与蜂窝缺陷，也可用于评价木制品的开裂和老化。

超声波的研究主要集中在影响因子和信号处理两方面。对于影响因子，Olivito[8]发现，在纤维饱和点以下，波速随木材含水率的增加而减小；在纤维饱和点以上，波速在平行纹理方向的变化不大。当含水率<18%时，声波衰减无变化；高于此值，衰减则随含水率增加而增大。

木材生长轮角度和纹理方向对超声波传播也有影响，不同树种对波速和衰减影响程度亦不同。阔叶

万方数据

树材生长轮角度对波速和衰减的影响，比针叶树材更具线性相关，即随纹理角度的增加，波速减小，衰减增加。Wang 等[9]通过波速和衰减，检测胶合板节子和开裂情况，认为垂直纹理方向的传播方式，能有效地检测节子和裂纹宽度，但裂纹的数量无法检测；在平行纹理方向，仅对节子的检测有效。

在信号处理上，Tiitta 等[10]采用贝叶斯（Bayes）理论，K-近邻方法（K-nearest Neighbor）和神经网络方法（Neural Network），对超声波检测腐朽进行研究，收集了腐朽材检测中波速、衰减、波型、频率信号，并对采样单一信号和采样多信号进行了比较。分析结果发现，3种方法都能很好地检测腐朽情况，其中神经网络检测小面积腐朽的有效性达到79%，Bayes 理论和 K-近邻法也分别为79%和75%。

超声波检测技术易受外界的干扰，且如何将传感器与被测材料更好地连接是常见问题，特别是应用于在线检测时，如何实现既不影响生产效率，又能有效进行检测，还需要更深入的研究。

1.5 声发射

声发射是材料或结构的某个局部区域或整体，受外力或内应力作用，发生塑性变形或破坏之际，将其内部所储蓄的应变能，以瞬态弹性波的形式而迅速释放出的一种物理现象。现代声发射技术的开始，以20世纪50年代初 Kaiser 在德国的研究为标志，60年代开始应用于木材和木基复合材检的测料。所涉及的领域有：干燥过程的监测与控制、老化预测、强度评价、开裂检测与分析和机械性能控制。

研究者采用开放模型（Opening mode）和混合模型（Mixed mode）测试木材干燥时的开裂情况，通过对声发射信号的收集和分析，发现混合模型是以时间和频率作为特征参数，其识别分析方法具有良好前景，特别适用于检测板材干燥过程中的开裂情况。但是，通过分析发射频率来确定木材细胞的破坏情况尚未取得成功。也有学者认为，干燥过程中的声发射检测，与木材水分流动有关，但在检测中，很难判断自由水的流动与检测结果直接相关。

在人造板研究方面，Vun 等[11]将其用于定向刨花板蠕变破裂的研究，发现开裂出现在板材密度最低区域的薄弱部位，采用声发射技术观测低密度区域断裂，能够实现板材水平面密度的在线监控。

近几年，声发射技术有了很大改进，特别是信号的处理方法，使检测的准确率有了较大提高。为更好地解决信号处理问题，应引入更多的分析方法，如基于波形分析上的模态分析、经典谱分析、现代谱分析、小波分析和人工神经网络模式识别。对声发射信号参数，应采用模式识别、灰色关联分析和模糊分析等技术。

1.6 计算机断层成像技术

用计算机断层成像技术(CT)扫描原木内部缺陷的研究已经历了约30年，此项技术被认为是检测木材内部缺陷最有前景的技术之一。过去10年进行的大量 CT 技术检测木材内部缺陷研究，取得了较为满意的结果。然而 CT 技术在木材领域广泛普及，尚有技术和经济问题有待解决。

降低检测成本是近期关注的问题。Thawornwong 等[12]在检测大径级原木时发现，减少扫描参数收集，如降低扫描频率、减小底片尺寸和扫描厚度等，不但能够提高扫描速度，缩短扫描时间，节省电能，且扫描结果依然满足原木的合理锯解要求，出材率没有受到明显影响。

Erol 等[13]为提高 CT 检测原木缺陷的能力，研究了 IntelliPost 模型系统。该系统由2个模型组成：学习模型：先由工作人员操作仪器识别原木缺陷，然后系统建立缺陷识别图像规则；操作模型：根据第一阶段建立的识别规则，自动识别原木缺陷。该系统能够应用于不同树种、不同等级的原木检测。

1.7 其它无损检测方法

近红外光谱检测技术（NIR）是最新的木材无损检测方法，此技术能够对木材化学成分、物理性能、含水率及加工处理后的木材性质进行评价。Schimleck 等[14]对火炬松木材物理性质的预测取得了成功；Kelley 等[15]对火炬松不同树干高度位置的材性进行研究，用建立的模型成功地预测了木材的化学成分和力学性质。

在北美，无损检测近几年还应用于 MDF 性质的预测，有效预测了其抗弯弹性模量、抗弯强度和内结合强度。加拿大的 ARC(Alberta Research Council)，在研究利用红外线进行人造板产品在线检测方面，处于领先地位，现正在致力于实现在生产中的应用。

其他无损检测技术还有：微波检测、热成像检测、密度阻抗图谱仪等，均得到一定程度的研究与应用。

2 无损检测技术现存的问题与发展方向

2.1 北美近期关注的无损检测技术问题

1)检测参数的准确收集、分析和处理，是研究者所关注的重点，尤其是超声波和声发射信号的收集与处理，正在引入更先进的识别模式和分析手段，以提

万方数据

高数据采集的准确性和检测精度。

2)成像技术使得木材缺陷可通过彩色图像的方式表现,而不再局限于数据表达方式,直观地显示检测结果是研究的热点。除了计算机层析技术外,在近几年,超声波和应力波层析成像技术研究的进展,使其成为活立木和木结构检测与评价的关键技术。

3)对于CT技术,除了需要解决图像清晰度、扫描速度及安全性外,降低检测成本依旧是关键问题。

4)新的无损检测方法,特别是近红外光谱技术在木材领域中的开发和应用,为木材无损检测研究开辟了新的方向,也是无损检测技术快速发展的关键。

2.2 无损检测技术的发展方向

在北美,声发射检测技术早已应用在木材及其制品的非破坏检测,及干燥应力的监测等方面,在现阶段,着重研究声发射信号的采集、处理以及设备的进一步研发;同时,结合生产需要,提高检测速度和准确性。美国已进行了声发射检测技术用于木材切削方面的一系列研究,并逐步在生产中应用。

基于超声波和应力波原理的层析成像检测技术将进一步开发和应用,多方向、多路径的检测方式被采用,设备逐步向小型化、实用性发展。

继续探寻林产品无损检测的新原理和新方法,特别是射线和光谱的应用研究。通过借鉴其它材料领域的先进检测技术,提高林产品无损检测技术的先进性和实用性。

3 结语

我国在原木检测方面仍然处于视觉评价的初级阶段。因此,应加强原木分等无损方法的研究,引进原木材质性能检测技术、标准,包括振动检测、应力波和超声波检测,及各种原木检测评价技术的应用和评价标准,形成适合我国原木分等技术的检测体系。

在线无损检测技术的研究,我国亦还处于实验室阶段,有待加大在人造板生产线上的应用,动态地无损检测板坯和产品质量,即时分析质量缺陷的原因,及时反馈、调节生产工序的参数,最大程度地挖掘生产线的潜力和提高产品质量。

志谢:中国林科院木材工业研究所姜笑梅研究员和殷亚方副研究员提出宝贵修改建议,在此衷心感谢!

参考文献:

[1] Green W D, Gorman M T, Evans W J, et al. Mechanical grading of round timber beams[J]. Journal of Materials Civil Engineering, 2006(1): 1-10.

[2] Zhiyong C, Hunt O M, Ross J R, et al. Pilot study to examine use of transverse vibration nondestructive evaluation for assessing floor system[J]. Forest Product J, 2002, 52(1): 89-93.

[3] Pellerin F R, Ross J R. Nondestructive evaluation of wood[M]. Forest Products Society, 2002:135-149.

[4] Wolfe R, Moseley C. Small-diameter log evaluation for value-added structural applications[J]. Forest Products J, 2000, 50(10): 48-58.

[5] Xingping W, Divos F, Pilon C, et al. Assessment of decay in standing timber using stress wave timing nondestructive evaluation tools, A guide for use and interpretation[R]. FPL-GTR-147. Madison, WI: USDA, Forest Products Lab, 2004: 1-11.

[6] Brashaw K B, Vatalaro J R, Wacker P J. Condition Assessment of Timber Bridges, 2. Evaluation of Several Stress-Wave Tools [R]. FPL-GTR-160. Madison, WI: USDA, Forest Products Lab, 2005: 1-11.

[7] Gilbert A E, Smiley E T. Picus Sonic Tomography for the quantification of decay in white oak (*Quercus* Alba) and Hickory (*Carya* spp.) [J]. Journal of Arboriculture, 2004, 30(5): 277-280.

[8] Olivito R S. Ultrasonic measurements in wood[J]. Materials Evaluation, 1996(54): 514-517.

[9] Wang J, Biernacke J W, Lam F. Nondestructive evaluation of veneer quality using acoustic wave measurements[J]. Wood Science and Technology, 2001(34): 505-516.

[10] Tiitta M E, Beall F C, Biernacki J M. Classification study for using acoustic-ultrasonics to detect inernal decay in glu-lam beams [J]. Wood Science and Technology, 2001(35): 85-96.

[11] Vun Y R, Dehoop C, Beall C F. Monitoring critical defects of creep rupture in oriented strandboard using acoustic emission: incorporation of EN300 standard [J]. Wood Science Technology, 2005(39): 199-214.

[12] Thawornwong S, Occeña G L, Schmoldt L D. Lumber value differences from reduced CT spatial resolution and simulated log sawing[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2003(41): 23-43.

[13] Erol S A, Lynn A, Schmoldt D L, et al. An interactive maxhine-learning approach for defect detection in computed tomography (CT) images of hardwood logs[C]. Proceedings of Scan Technique 2005 International Conference, Las Vegas, Nevada, US, 2005: 15-27.

[14] Schimleck L R, Mora C, Daniels R F. Estimation of the physical wood properties of green Pinus taeda radial sample by near infrared spectroscopy[J]. Canadian J of Forest Research, 2003, 33(12): 2297-2305.

[15] Kelley S S, Rials T G, Snell R, et al. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood[J]. Wood Science and Technology, 2004, 38(4): 257-276.

(责任编辑 姜 征)

万方数据