

古建筑木结构的无损检测新技术

李华¹, 刘秀英¹, 陈允适¹, 张晓芳², 于子绚²

(1. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091; 2. 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)

摘要: 将三维应力波断层扫描仪和阻力仪应用于古建筑木结构的勘查中。试验室预试验及现场勘查实例证明, 三维应力波断层扫描仪完全适用于木构件的勘查, 与阻力仪结合使用, 可使勘查操作更便捷, 结果更准确。

关键词: 古建筑木结构; 无损检测; 三维应力波断层扫描仪; 阻力仪

中图分类号: TB302.5, TS 611

文献标识码: B

文章编号: 1001-8654(2009)02-0037-03

Effective Non-destructive Testing Techniques for Ancient Wood Buildings

LI Hua¹, LIU Xiu-ying¹, CHEN Yun-shi¹, ZHANG Xiao-fang², YU Zi-xuan²

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China;

2. College of Material and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: Traditional inspection of ancient wood buildings in China was mainly based on visual examination and personal experience with limited instruments. The authors introduced a recently developed resistograph system and 3D impulse tomography as non-destructive testing methods for ancient wood members. A laboratory experiment and a field inspection on an ancient wood structure indicated that the 3D impulse system was very effective for inspecting ancient wood structures. Combined with the resistograph system and visual inspection, the 3D tomography provides reliable inspection results.

Key words: ancient wood building; non-destructive testing; 3D impulse system; resistography

我国古建筑以木结构体系为主, 在世界上享有极高的盛誉。古建筑的损毁大多缘起于木构件的损毁, 因此, 开展古建筑木构件材质状况的勘查工作, 对古建筑的保护意义重大^[1], 不仅可为古建筑维修的施工设计提供依据, 而且可为古建筑的木结构建立健康档案, 使古建筑的保护工作走向科学化、系统化。

历来木构件材质的勘查方式以手工操作为主, 借助简单的工具, 依靠现场肉眼观察、实地测量、敲击辨声、取样分析等手段。手工操作方式虽简便易行, 但勘查结果的准确性很大程度取决于人工经验, 而且难以对木材内部缺陷做出准确的判断。

近年, 随着古建筑保护事业的发展, 在木构件材质的勘查中, 逐步引进了一些国外先进的检测设备, 如阻力仪 (RESISTOGRAPHY) 和三维应力波断层扫描仪 (ARBOTOM), 并已应用于北京故宫、恭王府、天安门和郑王府, 及宁波保国寺等古建筑的维修工程中, 成为当今古建筑木结构材质勘查不可或缺的重要手段之一。

阻力检测技术具有准确、检测范围宽等特点^[2-3], 三维应力波断层扫描技术可一次完成对目标对象多个平面的探测, 特别适用于大径级立柱的现场检测。笔者根据古建筑木结构材质现场勘查的特殊要求, 将两者结合起来应用。本文着重介绍三维应力波断层扫描仪, 及其与阻力仪相结合应用的方法, 旨在为古建筑的维修保护提供技术支持。

收稿日期: 2008-04-11; 修改日期: 2009-01-17

基金项目: 国家文物局项目 (2003022)。

作者简介: 李华 (1955—), 男, 中国林科院木材工业研究所高级工程师。

1 工作原理

三维应力波断层扫描仪为德国 RINNTECH 公司生产,主要由传感器和计算系统组成。该仪器原主要用于树木内部缺陷的检测,引进后用于古建筑木结构材质状况的勘查。

其工作原理:通过敲击安装在被检测木构件上的传感器,使之产生应力波,根据应力波的传播速度,经计算机处理,直接显示木构件内部缺陷的图像,用以判定木材内部质量。

操作方法:以 24 个传感器为例,环绕柱体的一个平面,均匀安装 8 个传感器(柱体直径 50~100 cm);如此安装 3 个平面,示为 3 层,各层相互间隔宜<50 cm。每敲击任一传感器,其他 23 个传感器均接受应力波,使各个传感器之间形成应力波网。系统计算每两个传感器之间应力波的传播速度;所有数据经过计算机比较分析之后,自动根据速度差别,显示木构件被测范围内部纵向(径、弦向)和横向切面的二维图像。截取的图像越多,最终显示的三维图像越精确。

2 试验室预试验

2.1 材料与方法

楠木(*phoebe* spp.)立柱,为某建筑维修工程中更换下来的一段立柱。其直径 40 cm,长度 140 cm,含水率 9%,外观有劈裂,内部有不同程度的腐朽,从端头观察可见明显腐朽空洞,深度约 130 cm。

采用三维应力波断层扫描仪对楠木立柱进行应力波断层扫描。如图 1 所示,24 个传感器分 3 层悬挂,各层编号从下至上依次为 0、1、2 层。传感器编号从 0 层开始,以顺时针方向顺序悬挂。全部传感器安装完毕后,按照悬挂的顺序,依次敲击每一个传感器;同时,计算机开始收集处理信息。待全部传感器敲击完毕后,计算机显示检测结果。



图 1 三维应力波断层扫描仪
检测楠木立柱

Fig. 1 Set-up of three dimensional
impulse tomography scanning system

阻力仪检测是用专用设备向被测木材中打入 $\varphi \leq 0.3$ cm 的探针。探针长度根据被测木构件的直径(或厚度)而定,最长可达 100 cm。根据探针进针过程中所遇阻力的曲线,可以定位地判断被测木材内部的材质状况。

2.2 结果与分析

1) 三维应力波断层扫描图像:图 2 为楠木立柱三维应力波断层扫描平面图。图中从下至上 3 个圆形截面,分别与图 1 中悬挂传感器的 3 个层面对应,其颜色由浅至深反映了立柱由轻至重的腐朽程度。0 层缺陷位于检测平面的中心区域附近,1、2 层缺陷位于检测平面的右上角;左右对称的矩形截面为相关位置的两个纵切面。

移动界面下边框和右边框上的箭头,可以显现检测范围内,任意纵切面及任意高度的横切面缺陷图,以此可了解该柱体内部整体材质状况。

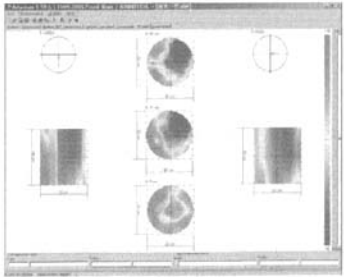


图 2 三维应力波断层扫描平面图

Fig. 2 Typical images of the tomography

2) 阻力仪检测图像:为了验证图 2 中 0 层的缺陷,用阻力仪在 0 层平面上,从传感器 3 号向 7 号方向做检测。如图 3 所示,随着进针的深入,曲线在 10~32 cm 之间的变化形式为重度腐朽与空洞。阻力仪检测结果显示的缺陷位置,与三维应力波断层扫描平面图显示的结果一致。

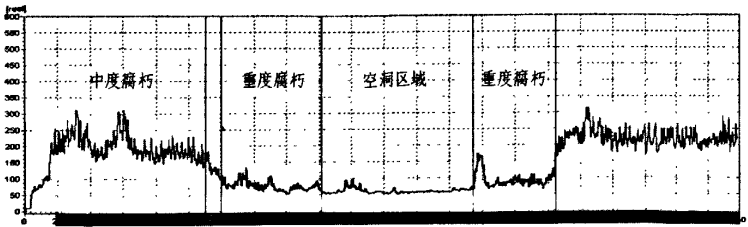


图 3 3~7 号传感器方向的阻力曲线图

Fig. 3 Resistograph profile

3) 两种方法结合应用:在对三维应力波断层扫描图与阻力曲线进行综合分析的基础上,绘制楠木立柱 0 层内部状况平面图(图 4a),与实物(图 4b)对比可见:检测分析所测得缺陷图形,与立柱实际缺陷形状、位置相吻合。应用三维应力波断层扫描仪可迅速获得缺陷区域信息,而阻力仪可对缺陷位置及程度作出精确判定。两者结合应用,可实现对木构件材质状况的准确判断。

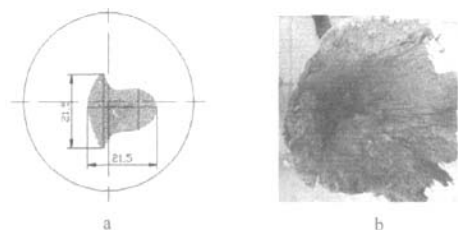


图 4 检测结果与实物对照

Fig. 4 Comparison of the tomography result with actual defects

3 现场勘查应用实例

古建筑木结构的勘查对象,一般以承重的大木构件为主,如柱、梁、檩、枋等。特别是部分枋材及大多数立柱,因带有彩绘或地仗层,木材外观不可见,必须借助于仪器进行勘查。

由于立柱的腐朽大多发生于根部。通常先用阻力仪在立柱根部距地面 20 cm 高处勘查,发现腐朽时逐级向上勘查到一定高度;再用三维应力波断层扫描仪勘查,获得柱体内部缺陷范围图像。

以北京某国保级古建筑群为例,在对某大殿的一根外观完好的金柱进行阻力仪勘查时,发现从立柱根处向上至 2 m 处,存在内部腐朽现象。故对腐朽部位做了三维应力波断层扫描勘查。

图 5 显示距柱根 75~148 cm 范围内,不同高度的横截面以及任意纵切面的二维图像,反映了各截面的腐朽部位和腐朽程度;图 6 为对图 5 各截面测定结果处理后,生成的三维图像,立体地反映了该柱体所测范围内腐朽的情况。由于目前尚没有直接生成三维图像的软件,所以,由计算机处理所得的三维图像的结果只是相对准确。

为使勘查结果更准确,笔者采用了与阻力仪相结合勘查、计算机制图的方法,即:在扫描区域内,对应

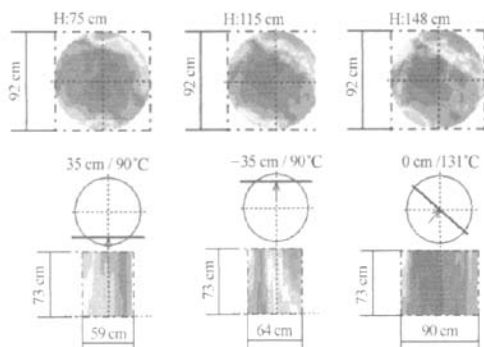


图 5 立柱不同高度横截面和纵切面的扫描平面图

Fig. 5 Tomography images of different cross and longitudinal sections

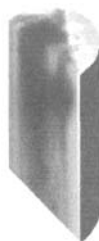
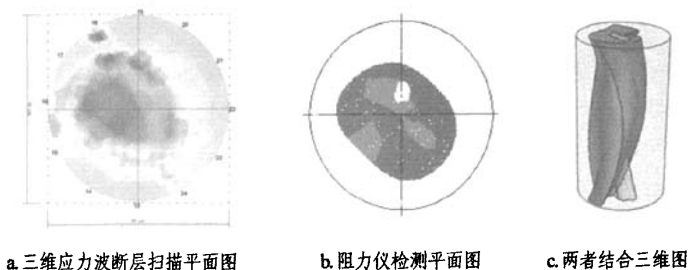


图 6 三维应力波断层扫描处理所得三维图像

Fig. 6 3D computerized image of the decayed pillar

不同的截面部位做阻力仪勘测,计算机处理生成相对准确的二维图像(图 7 b);在多个不同高度图像的基础上,经计算机处理后,制出相对准确的立体示意图(图 7 c)。



a. 三维应力波断层扫描平面图

b. 阻力仪检测平面图

c. 两者结合三维图

图 7 两种方法结合检测结果示意图

Fig. 7 Images obtained from the impulse tomography and resistograph

4 结论与建议

1) 试验室预试验和现场勘查实例证明,三维应力波断层扫描仪同阻力仪一样,完全能适用于古建筑木结构的勘查,操作简单、便捷。

(下转第 42 页)

表 4 不同条件水热处理试件的漂白试验极差分析
Tab. 4 Analysis of variance of the experimental results

水热处理工艺	极差分析	A, $\varphi(\text{H}_2\text{O}_2)$		B, pH 值		C, 温度/℃		D, 时间/h	
		枫木	橡胶木	枫木	橡胶木	枫木	橡胶木	枫木	橡胶木
I	1 水平	51.9	55.6	53.7	54.0	53.0	53.7	53.5	52.8
	2 水平	54.9	53.5	53.3	56.2	55.7	56.9	51.9	55.2
	3 水平	54.4	54.2	54.4	53.1	52.7	52.7	56.0	55.3
	极差	3.0	2.1	1.1	3.1	3.0	4.2	4.1	2.5
	主次顺序	D>A=C>B(枫木)					C>B>D>A(橡胶木)		
II	较佳工艺	$D_3A_2C_2B_3$ (枫木)					$C_2B_2D_3A_1$ (橡胶木)		
	水平	56.3	52.4	53.1	52.9	53.5	53.7	55.1	54.1
	2 水平	54.2	53.1	57.9	53.6	56.3	53.5	57.1	53.6
	3 水平	55.7	54.5	55.2	53.4	56.4	52.7	53.9	52.2
	极差	2.1	2.1	4.8	0.7	2.9	1.0	3.2	1.9
III	主次顺序	B>D>C>A(枫木)					A>D>C>B(橡胶木)		
	较佳工艺	$B_2D_2C_3A_1$ (枫木)					$A_3D_1C_1B_2$ (橡胶木)		
	水平	60.1	58.0	62.4	56.7	62.6	58.6	62.4	57.7
	2 水平	62.1	58.7	59.7	62.3	58.5	58.2	60.1	60.7
	3 水平	59.0	59.3	59.1	57.0	60.1	59.2	58.7	57.5
	极差	3.1	1.3	3.3	5.6	4.1	1.0	3.7	3.2
	主次顺序	C>D>B>A(枫木)					B>D>A>C(橡胶木)		
	较佳工艺	$C_1D_1B_1A_2$ (枫木)					$B_2D_2A_3C_3$ (橡胶木)		

有研究表明,抽提方法和水抽提工艺对木材的白度与色差的影响极显著^[3]。

不同的水热处理条件,对同种木材的抽提效果不同;不同水热处理条件,同种木材的漂白工艺不同。经过 3 种条件水热处理后,枫木试件的白度平均值分别为 53.8%,55.4%和 60.4%,而橡胶木试件的白度平均值分别为 54.4%,53.3%和 58.7%。由此可知,枫木和橡胶木试件均在水热处理工艺Ⅲ的试验中白度值最大。

3 结论

- 1) 水热处理影响木材的漂白工艺,水热处理工艺不同,试件的较佳漂白工艺亦不同。
- 2) 采用水热处理工艺Ⅲ时,2 种木材试件的白度值均高于其他 2 种水热处理工艺。

(上接第 39 页)

- 2) 三维应力波断层扫描仪与阻力仪结合使用,可以优势互补,克服三维应力波断层扫描仪对腐朽、空洞、裂缝等缺陷的区分不够精确的缺点,以及阻力仪图形处理工作量大的不足,更快捷、准确地判定缺陷,避免材料的浪费和木构件的破坏。
- 3) 要推广应用三维应力波断层扫描仪与阻力仪相结合的方法,今后还需开发出可直接生成三维图像的软件,同时加强不同树种缺陷种类和程度的标准图像的研究,使系统能够直接识别木材内部的缺陷种

3) 水热处理工艺条件Ⅲ的较佳漂白工艺为,枫木试件:漂白温度 35~45℃,溶液 pH 值 9~10, $\varphi(\text{H}_2\text{O}_2)$ 为 25%,漂白时间 1 h;橡胶木试件:溶液 pH 值 10~11, $\varphi(\text{H}_2\text{O}_2)$ 为 20%,漂白时间 1.5 h,漂白温度 55~65℃。

志谢:在撰写过程中得到中国林科院傅峰研究员的悉心指导和帮助!

参考文献:

- [1] 曹林,蒋璇. 毛白杨蓝变木材漂白处理技术研究[J]. 林业科学, 2006,42(3):121-124.
- [2] 陈玉和,胡伟华,常德龙. 泡桐木材漂白过程中双氧水分解率的研究[J]. 木材工业,2001,15(6):6-8.
- [3] 范智才,朱同林,彭万喜,等. 抽提对尾巨桉木材漂白性能影响研究[J]. 浙江林业科技, 2007, 27(1): 16-19.

(责任编辑 鲍加芬)

类、腐朽程度及范围,提高勘查工作的效率和自动化程度。这对于古建筑保护事业意义重大。

参考文献:

- [1] 陈允适. 古建筑木结构与木质文物保护[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [2] 张晓芳,李华,刘秀英,等. 木材阻力仪检测技术的应用[J]. 木材工业,2007,21(2):41-43.
- [3] 张晓芳,李华,刘秀英,等. 用阻力仪检测木材阻力时的影响因素[J]. 木材加工机械,2007,18(4):29-31.

(责任编辑 向琴)