

检测技术

# 大钟寺博物馆钟架的超声波无损检测

李华, 刘秀英

(中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:** 利用超声波技术现场测定北京大钟寺博物馆永乐大钟大型木结构钟架的弹性模量, 并对其力学强度的变化做出了评估, 找出相关规律, 为超声波用于古建筑木结构的无损检测提供科学依据。

**关键词:** 永乐大钟; 木架; 超声波; 无损检测

中图分类号: TS66, TH878 文献标识码: B 文章编号: 1001-8654(2003)02-0033-04

## Ultrasonic Non-destructive Evaluation of the Wood Frame for the Great Bell

LI Hua, LIU Xiu-ying

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** The modulus of elasticity (*MOE*) of the wood frame structure in the Beijing Yongle Great Bell Museum was determined, on site, by using ultrasonic non-destructive techniques. This paper can be used as a good reference for future studies applying the ultrasonic non-destructive evaluation method in ancient wood-structure buildings.

**Key words:** Yongle great bell; Wood frame structure; Ultrasonic; Non-destructive evaluation

建于清代的大钟寺至今已有近 300 年的历史。寺内的明永乐大钟重达 46 t, 钟身刻有汉、梵文的经文。钟架由 4 根圆柱、4 根方柱和 15 根大小不一的三层纵横重叠的木梁搭建而成(东西方向取单数, 编号 1~13, 南北方向取双数, 编号 2~16), 贴金攀龙柱及部分横梁的油漆地仗(即木架外的表面保护层, 由桐油、石灰及麻纤维类材料混合而成)大部分保存较好, 大钟悬挂在最上面的横梁中央, 现为国家重点保护的文物。经过几百年的沧桑, 钟架木材的材质已开始发生变化, 使大钟的安全受到影响。为此, 中国林科院木材工业研究所受大钟寺博物馆的委托, 依据文物专家组审定的检测方案, 对木钟架进行了超声波无损检测。

### 1 概况

利用超声波对木材进行无损检测的研究始于 20 世纪 60 年代, 如 1965 年美国入伯梅斯特报道了超声波的纵向传播速度与不同种类木材的物理学、形态学及力学性质之间的关系; 同年 I. D. G. 李报道了木材

超声脉冲传播速度对木材强度具有某些相关; 1978 年美国林产品研究所报道了超声波平均波速的测定与弹性模量的计算<sup>[1~4]</sup>。

我国从 80 年代开始木材的超声波检测技术的研究, 对部分木材用超声技术测得的弹性模量与强度性质的关系进行了比较, 导出了木材纵向超声波传播速度与弦向、径向传播速度的关系; 木材用超声波测定的弹性模量与机械法测定的弹性模量的关系(已证明这种关系十分密切)以及波在木材的纵向和横向中传播速度的比较等工作, 并得出了两者之间的回归关系。因此, 可以应用超声波无损检测预测木材的抗压、抗弯弹性模量等力学性能<sup>[1,5]</sup>。

本次检测目的是利用超声波测定钟架木材弹性模量, 并与同种木材按国家标准测定的弹性模量对比, 对钟架木结构力学强度的变化作出评估。同时, 将目测法腐朽勘查结果与超声波法测得的弹性模量结果对比, 以找出相关规律, 为超声波用于古建筑木结构的无损检测提供科学依据。

### 2 检测仪器与方法

#### 2.1 仪器设备

收稿日期: 2002-08-14

作者简介: 李华(1953—), 男, 中国林科院木材工业研究所工程师。

为北京市康科瑞公司 NM-4A 非金属超声波检测仪, 50kHz 和 12.5kHz 平面检测仪; 北京安利电子公司 AD-100 型电磁式含水率测定仪, 该仪器为接触式, 不破坏木架表面地仗和彩绘。耦合剂为橡皮泥。

## 2.2 检测方法

以超声波仪器的无损检测为主, 同时目测结构的虫蛀、腐朽情况。检测从钟架最上面的横梁开始, 先梁后柱。

超声波检测主要有 2 种方法: ①平测法 顺着木材纤维方向测定。②对测法 在木材弦向径向的相对方向检测。对钟架木结构基本情况用敲击、刺探取样检查内部腐朽及放大镜观察等方法, 诊断并确定木结构腐朽部位及等级<sup>[5,7]</sup>, 根据国家标准(GB/T 13942.2)评定腐朽等级。腐朽等级定为 4 级, 从轻至重依次为初期腐朽、轻腐、中腐和重腐, 其相应符号为 +、++、+++、++++, 健康材等级为 0。虫蛀等级(国家标准 GB/T 18260-2000)亦如是。

在检测的同时还进行了木架梁、柱含水率的测定、木材树种鉴定及密度测定。

## 2.3 检测结果计算

利用超声波检测仪测出声波在木材中传播的速度, 按下式<sup>[1,6]</sup>换算出木材的弹性模量, 即:

$$E = \rho V^2$$

式中:  $E$ —木材的弹性模量, GPa;

$V$ —超声波声速, m/s;

$\rho$ —木材密度, g/cm<sup>3</sup>

再以同树种的健康材的弹性模量为标准与现场实测数据比较, 得出弹性模量变化率, 并据此对钟架木材的耐久性做出评估。

## 3 结果与讨论

### 3.1 木架树种鉴定及其密度与含水率测定

经鉴定及测定木架梁柱的树种、密度见下表:

| 木架梁柱编号                                                                | 树种                              | 密度 / (g · cm <sup>-3</sup> ) |
|-----------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| 1 <sup>#</sup> 梁                                                      | 润楠( <i>Machilus</i> spp.)       | 0.397                        |
| 2 <sup>#</sup> ~4 <sup>#</sup> 梁                                      | 麦吊云杉( <i>Picea brachytyla</i> ) | 0.343                        |
| 5 <sup>#</sup> ~16 <sup>#</sup> 梁<br>1 <sup>#</sup> ~8 <sup>#</sup> 柱 | 马尾松( <i>Pinus massoniana</i> )  | 0.381                        |

含水率测定结果为: 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、6<sup>#</sup> 梁为 6%~8%; 4<sup>#</sup> 梁为 5%~10%; 其余梁、柱平均为 8%~10%, 差异不大。

### 3.2 木钟架腐朽与虫蛀情况勘查

检查结果: 1<sup>#</sup> 梁南侧西部有局部腐朽(++), 地仗大部分较好, 但有细小裂缝和部分脱落; 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>

梁的部分位置有重腐(++++)或中腐(+++), 地仗部分脱落; 2<sup>#</sup> 梁裂缝贯通梁身, 最宽处达 100 mm, 最深达 250 mm。南北端拼接处腐朽深度 250 mm 以上, 为严重腐朽(++++)+, 面积约 100 mm × 250 mm, 大部分地仗脱落; 3<sup>#</sup> 梁南北端均为中腐(+++), 北侧西端 1 500~2 500 mm 有轻腐(++); 南侧有轻腐(++), 中间靠上有中腐(+++); 北侧地仗部分脱落; 4<sup>#</sup> 梁距南端 1 450~2 050 mm, 高约 100 mm 有重腐(++++)+, 深 300 mm。西侧北距南端面 2 300~2 600 mm 有重腐(++++)+, 从南至北端腐朽逐渐延伸, 梁身小开裂较多。

其他梁虽未发现有严重腐朽, 但有些已有轻腐(+++)或初腐(+)及不同程度的开裂。有的梁结构较为特殊如: 12<sup>#</sup>、16<sup>#</sup> 横梁分为三段小横梁, 13<sup>#</sup> 梁的中间部位在楼梯内。梁的地仗有些部分保持较好; 局部有脱落、裂缝情况较严重。

柱的开裂现象较多, 方柱的开裂更为普遍, 有些开裂贯通柱身, 如 6<sup>#</sup> 柱北侧有开裂贯通柱身, 缝宽 3 mm, 深 100 mm; 7<sup>#</sup> 柱西侧有开裂贯通柱身, 宽 10~20 mm, 深 150 mm。有的柱身在裂缝中有轻腐(+++)或初腐(+), 如: 2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 柱。柱的地仗彩绘保持较完整, 个别部位有地仗局部脱落或松脱、裂缝现象。勘查中, 梁、柱未发现虫蛀。

## 3.3 木架的弹性模量

3.3.1 钟架梁、柱的弹性模量测定 检测结果表明: 钟架梁、柱的弹性模量值与健康材的标准值对比都有不同程度的降低。降低率在 10% 的有: 1<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>、10<sup>#</sup>、14<sup>#</sup> 梁; 降低率 20% 左右的有: 3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>、11<sup>#</sup> 梁及 4<sup>#</sup>、6<sup>#</sup>~8<sup>#</sup> 柱; 降低达到 30% 左右的有: 2<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>、12<sup>#</sup> 梁和 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup> 柱、5<sup>#</sup> 柱。其中 4<sup>#</sup> 梁在一些测点的降低范围达 46.06%~50.51%; 木柱中 7<sup>#</sup> 柱降低幅度最低, 为 18.70%, 5<sup>#</sup> 柱下降幅度最高, 达 35.61% 左右。具体变化情况见图 1 和图 2。

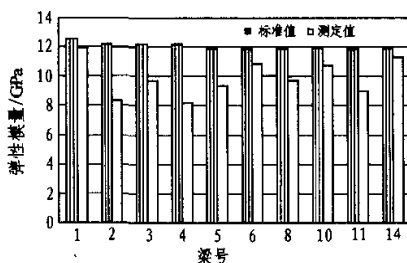


图 1 钟架木梁的弹性模量与标准值对比(纵向)

Fig. 1 Comparisons of tested MOE values of wood beams with a standard value

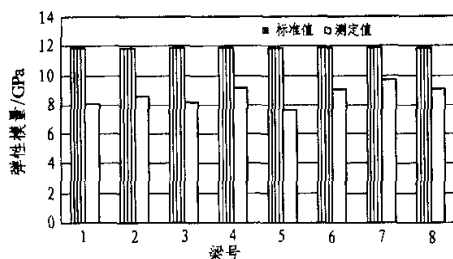


图 2 钟架木柱的弹性模量与标准值对比(纵向)

Fig. 2 Comparisons of tested MOE values of wood poles with a standard value

**3.3.2 弹性模量与木材材质的相关性** 古钟木架涉及的 3 种树种木材的天然耐腐程度依次为:润楠、马尾松、麦吊云杉<sup>[5]</sup>,这一顺序与其弹性模量值的变化相吻合:1# 梁的 MOE 降低最少,2#、4# 梁降低较大。但与 2#、4# 梁同树种的 3# 梁也有部分腐朽,而其弹性模量值则降低较小,原因有待进一步分析。马尾松木材梁的弹性模量值降低均较小,8 根柱的材质亦保持较好,但有开裂,影响了超声波的传播速度,使弹性模量值降低。如 5# 柱的材质现场勘查结果较好,但弹性模量值偏低。

钟架木材的实测密度与相关资料<sup>[4]</sup>上的标准密度值有明显的降低,使其弹性模量也降低。

**3.3.3 木材弹性模量的各向异性** 纵向平测法与径向对测法所测得的弹性模量值差异较大,但两者之间的线性相关程度显著至紧密,与有关报道中木材纵向超声弹性模量是径向的 5.50~7.04 倍的结果基本一致<sup>[1,3]</sup>。

**3.4 木架含水率、纤维方向及腐朽对检测结果的影响**

**3.4.1 木架含水率对超声波传播速度的影响** 当木材含水率达饱和时,如马尾松生材,其纤维方向声速最大,超过 5 800 m/s;当含水率降低到一定程度后,含水率对超声波的传播速度影响就很小。现场木架实测值与干燥的同种木材标本对比的结果表明,二者超声波的声速非常接近。

**3.4.2 木材纤维方向对声速的影响** 统计结果表明,沿木材纵向(纤维方向)超声波的传播速度最快,一般在 4 800~6 500 m/s 之间;沿木材的径向和弦向超声波的传播速度,一般只有在 1 200~2 300 m/s 之间,径向的传播速度略大于弦向。

本次检测中,马尾松木材的纵向声速与径向的声速之比基本恒定,约在 2.4~2.8 之间,平均比率为 2.5 左右,与有关资料报道的针叶树材纵向超声速度

为径向的 2.42~2.72 倍结果基本一致<sup>[6]</sup>。

**3.4.3 木材腐朽与超声波波形衰减** 声速随着木材内部腐朽程度的增大而降低,遇有腐朽时超声信号将发生明显的衰减。图 3、图 4 所示有缺陷木材与正常木材超声波形的明显区别,因此可通过超声波形分析来判断缺陷的类别和性质,并配合所接受的超声波的波幅、声速可确定缺陷的大小和位置以及损害程度。

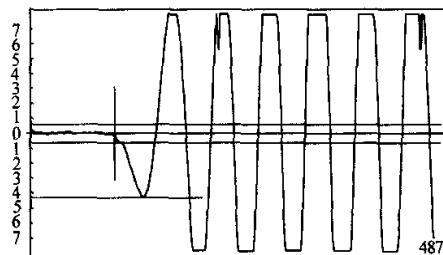


图 3 无缺陷木材的波形图

Fig. 3 Ultrasonic wave shape of wood without lacuna

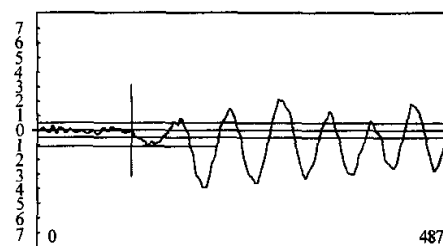


图 4 内部存在缺陷时的波形图

Fig. 4 Ultrasonic wave shape of beams or poles with lacuna

## 4 结论

1)古钟木架构件的弹性模量比同种木材标准值降低 10%~20%;个别降低达到 30%。弹性模量降低 20%左右时木材无明显腐朽,下降达 30%左右时建议加强监测。木柱弹性模量降低的影响因素较为复杂,还需要结合结构力学的计算,在大量实测的基础上,找出规律或确定相关关系式。

2)钟架 2#、4# 梁的某些腐朽部位的弹性模量值降低达 50%左右,4# 梁腐朽的深度约为 150~300 mm,并向内深入到 2# 梁以下,同时 3# 梁局部也有严重腐朽,2#、3# 柱的开裂较严重并有腐朽。在木架的空洞、腐朽、垂直于声波传播方向的裂缝等缺陷处,超声波的传播速度降低,波幅衰减,波形也发生变化。

本次测定只是初步工作,下一步的工作重点应该是开发木材专用的超声波检测仪器,并在此基础上建立数据库,储存大量的不同树种的声速、波形与波幅

的标准数据,供未来现场检测的参照依据。另外,在新旧木材以及在受力与自由状态的超声波数据对比等方面还需进一步探讨。

陈允适先生、罗文士先生指导和参加本项工作,龙玲副研究员给予帮助,谨此致谢。

#### 参考文献:

- [1] 李坚. 木材科学新编[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1992.
- [2] 吴云龙. 无损检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973.

- [3] [日] 无损检测协会. 无损检测概论[M]. 上海: 上海科学出版社, 1980.
- [4] Beall F C. Acoustic Emission and Acousto-ultrasonics for Application to Wood Products [C]. Proc. 6th Nondestructive Testing of Wood Symp., WSU, Pullman, Washington, 1987.
- [5] 陈嘉宝. 木材超声传播速度与强度的关系及一些影响因子的研究[R]. 中国林科院木材工业研究所研究报告, 木工(1987)1号.
- [6] 成俊卿. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1985.
- [7] 陈允适, 李武. 古建筑与木质文物保护指南[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.

### 学会简讯

## 第九次全国木材干燥学术讨论会 征集论文

中国林学会木工分会木材干燥研究会和中国林产工业协会木材干燥专业委员会初步商定,于今年第三季度在哈尔滨市(具体地点和日期另定)联合召开第九次全国木材干燥学术讨论会。讨论会将重点研讨入世后木材干燥产业如何继续开来,与时俱进,科技创新,提高管理水平,缩短与国际先进水平的差距;研究如何保障形成研究会和专业委员会共同发展的运行体制,为促进木材干燥产业的快速发展,迎接挑战,商讨对策。现面向全国木材干燥科技工作者征集论文,希望业内人士踊跃投稿。为了节省费用,论文不再重排,由会议胶印成册。因此,务请作者按:题目3号黑体字,正文5号宋体字, B5纸规格打印提交论文。

截稿时间:2003年7月底前邮寄或电子邮件发送:朱政贤会长或王德斌理事长。

地址:哈尔滨市和兴路26号东北林业大学233信箱(150040)

电话:0451-2190022, 13703635138(王德斌),  
13694506260(艾沐野)

传真:0451-2190945

电子邮件:

mymlyxga@mail.hrb.hl.cninfo.net

欢迎生产厂家和个人赞助论文印刷,并直接与朱政贤先生联系,论文集中将刊登赞助者名单以示

感谢支持和合作。赞助费在2000元以上者,可免费刊登广告,并赠送论文集。

中国林学会木材工业分会木材干燥研究会  
中国林产工业协会木材干燥专业委员会

## 木材胶粘剂技术交流

为加快木材胶粘剂的绿色化,促进环保型人造板的发展,中国林学会木材工业分会木材胶粘剂及人造板表面加工研究会拟举办木材胶粘剂技术交流会,进行技术交流、成果转让、技术合作洽谈,欢迎有关企业、大专院校、科研单位参加。届时,将组织专题讨论会,技术发布会,介绍国内外有关信息,并编辑论文集(最好有英文摘要)。

时间:2003年11月上旬(具体待定) 地点:上海  
内容:1. 低醛脲醛胶(用于任意种人造板);

2. 高耐磨浸渍纸及强化木地板的制造;

3. 耐候胶粘剂,如酚醛树脂胶等;

4. 非甲醛系胶粘剂(不以甲醛作原料);

5. 其它相关技术信息。

论文请于2003年7月底前Email发至:

mgxh@forestry.ac.cn

或寄:100091,北京颐和园后中国林科院57信箱,潘海丽或丁芙蓉转颜镇

电话:010-62889408,传真:010-62889018

中国林学会木材工业分会  
木材胶粘剂研究会