

## 3种无损检测方法评估巨尾桉木材抗弯和抗压强度性质

罗彬<sup>1,2</sup> 殷亚方<sup>1</sup> 姜笑梅<sup>1</sup> 骆秀琴<sup>1</sup> 刘波<sup>1,3</sup> 郭起荣<sup>2,3</sup>

(1 中国林业科学研究院木材工业研究所 2 江西农业大学园林与艺术学院 3 国际竹藤网络中心)

**摘要:**为探讨不同无损检测方法评估木材强度性质的可行性及可靠性,该文分别运用纵向基频振动、超声波和应力波3种无损检测方法,对由广西东门林场采集的34株14年生巨尾桉人工林加工的191个无疵小试样进行了抗弯和抗压强度性质预测。首先采用3种无损检测设备获得无疵小试样的动态弹性模量,然后进行抗弯弹性模量(MOE)、抗弯强度(MOR)和顺纹抗压强度( $\sigma_c$ )的测定,并分析3种无损检测结果与木材强度性质的关系。结果表明:纵向基频振动法、超声波法和应力波法获得的动态弹性模量 $E_{fr}$ 、 $E_{us}$ 和 $E_{sw}$ 与静态MOE的相关系数分别为0.816 6、0.788 9和0.634 7,均在0.001水平上显著相关;与MOR的相关系数分别为0.694 0、0.683 0和0.567 3,均在0.001水平上显著相关;与 $\sigma_c$ 的相关系数分别为0.810 3、0.809 3和0.648 9,均在0.001水平上显著相关;其中应力波法测得的动态弹性模量 $E_{sw}$ 与木材强度性质的相关系数均为最低。可见,纵向基频振动法和超声波法能够比较精准地预测国标无疵小试样的MOE、MOR和 $\sigma_c$ ,但应力波方法对无疵小试样进行测定时具有一定局限性。

**关键词:**巨尾桉;人工林;无损检测;抗弯弹性模量;抗弯强度;顺纹抗压强度

**中图分类号:**S718.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1522(2008)06-0137-04

LUO Bin<sup>1,2</sup>; YIN Ya-fang<sup>1</sup>; JIANG Xiao-mei<sup>1</sup>; LUO Xiu-qin<sup>1</sup>; LIU Bo<sup>1,3</sup>; GUO Qi-rong<sup>2,3</sup>. **Evaluating bending and compressive strength properties of *Eucalyptus grandia* × *E. urophylla* plantation wood with three nondestructive methods.** *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(6) 137-140 [Ch, 9 ref.]

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

2 College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, 330045, P. R. China;

3 International Centre for Bamboo and Rattan, Beijing, 100102, P. R. China.

The objective of this study is to compare three nondestructive methods for evaluating the bending modulus of elasticity (MOE), modulus of rupture (MOR) and compressive strength parallel to grain ( $\sigma_c$ ) of *Eucalyptus grandia* × *E. urophylla* plantation wood. Thirty-four *Eucalyptus* plantation trees at 14 years old were selected in Dongmen Forest Farm, Guangxi Zhuang Autonomous Region, southern China. All the sample trees were cut into 191 small clear specimens, for which three dynamic modulus of elasticity, ie longitudinal vibration ( $E_{fr}$ ), ultrasonic wave ( $E_{us}$ ) and stress wave ( $E_{sw}$ ), were measured in the air-dry condition. Static bending and compressive strength tests were then performed to determine the MOE, MOR and  $\sigma_c$ . The correlation coefficients obtained in this study were 0.816 6, 0.788 9 and 0.634 7 respectively between dynamic MOE ( $E_{fr}$ ,  $E_{us}$  and  $E_{sw}$ ) and static MOE ( $P < 0.001$ ). Meanwhile, the correlation coefficients were 0.694 0, 0.683 0 and 0.567 3 between dynamic MOE ( $E_{fr}$ ,  $E_{us}$  and  $E_{sw}$ ) and MOR ( $P < 0.001$ ). The correlation coefficient between dynamic MOE ( $E_{fr}$ ,  $E_{us}$  and  $E_{sw}$ ) and  $\sigma_c$  were 0.810 3, 0.809 3 and 0.648 9 ( $P < 0.001$ ). The results showed that the correlations between  $E_{sw}$  based on stress wave method and wood strength properties was the lowest in comparison with longitudinal vibration and ultrasonic wave method. This study also indicates that the longitudinal vibration and ultrasonic wave could provide accurate predictions of the bending properties and compressive strength of small clear specimens prepared in accordance with Chinese

收稿日期:2007-12-20

http://www.bjfujournal.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:“948”国家林业局引进项目(2005-4-73)、中澳 ACIRA 合作项目(FST/1999/095)。

第一作者:罗彬。主要研究方向:木材构造与利用。电话:010-62889468 Email:luobin@caf.ac.cn 地址:100091 北京中国林业科学研究院木材工业研究所。

责任作者:殷亚方,博士,副研究员。主要研究方向:木材构造与利用。电话:010-62889468 Email:yafang@caf.ac.cn 地址:同上。

national standard. On the other hand, stress wave method has more limitation for anticipation on the mechanical properties of small clear specimens.

**Key words** *Eucalyptus grandia* × *E. urophylla*; plantation; nondestructive testing; modulus of elasticity; modulus of rupture; compressive strength parallel to grain

无损检测是根据材料不同的物理性质或化学性质,在不破坏目标物体内部及外观结构与特性的前提下,对物体相关特性(如形状、位移、应力、光学特性、流体性质、力学性质等)进行检测与检验<sup>[1]</sup>。它是一种非破坏性的检测手段,具有应用范围广泛(如应用于活立木、古建筑木结构等)、可靠性高、设备方便携带、操作简便、时间经济、对人体无伤害等特点。

目前,美国、英国和日本等发达国家已在无损检测技术领域开展了大量研究工作,并且取得了一些成果。如 Park 等<sup>[2]</sup>指出弯曲振动法测得指接材的动态 MOE 与静态 MOE、MOR 具有较高的相关性;日本学者 Takada 等<sup>[3]</sup>在研究中采用纵向振动法来测定动态 MOE,结果与静态 MOE 同样具有较好的相关性。我国经过多年的摸索与探讨,无损检测技术也有了较大的发展,尤其是纵向基频振动检测法和超声波检测法,涉及包括建筑业、采掘业、冶金业以及林业等多个领域。近年来,各种无损检测技术在从立木、原木到锯材和小试样的强度评估等木材工业领域中,得到了广泛的研究和应用<sup>[4-7]</sup>。

本文分别运用纵向基频振动、超声波和应力波 3 种无损检测方法,分别对由广西壮族自治区东门林场采集的巨尾桉 (*Eucalyptus grandia* × *E. urophylla*) 人工林加工的 191 个无疵小试样进行了抗弯和抗压强度性质预测,以探讨不同无损检测方法评估木材强度性质的可行性及可靠性。

1 材料与方法

1.1 材 料

34 株巨尾桉人工林来自于广西壮族自治区东门林场,林龄近 14 年,胸径在 10~40 cm 之间。试材首先经过解锯,气干至平衡含水率;然后刨光成规格为 500 mm × 20 mm × 20 mm 的试件。按照 GB 1927~1943—1991<sup>[8]</sup>,在同一试件上分别截取用于抗弯强度性质测试的无疵小试样(300 mm × 20 mm × 20 mm)和顺纹抗压强度测试的无疵小试样(30 mm × 20 mm × 20 mm)各 1 个,抗弯强度性质和顺纹抗压强度测试试件各 191 个。所有试件在进行后续无损检测和强度性质测试前,先在恒温恒湿箱中将含水率调节至 12%,并测量其实际尺寸。

1.2 方 法

1.2.1 动态弹性模量测试

分别采用 FFT 分析仪、PUNDIT 分析仪和 Fakopp

分析仪对抗弯强度性质测试的无疵小试样进行动态弹性模量测定。纵向基频振动方法是使试件呈自由振动状态,用锤子敲击其一端,沿纵向方向产生振动,在试件另一端用麦克风拾取音频信号,连接 FFT 分析仪(AD-3542,日本 A&D 公司)进行瞬间频谱分析,得到一阶振动频率。每个试样重复测试 3 次,最后根据 Timoshenko 理论,应用式(1)计算得出动态弹性模量  $E_{fr}$  :

$$E_{fr} = 4L^2 F^2 \rho \tag{1}$$

式中,  $F$  为一阶振动频率(Hz),  $L$  为试材长度(cm),  $\rho$  为试材密度( $g/cm^3$ )。

超声波方法是通过测定超声波在试样中的传播速度来计算动态弹性模量的。测试前先对 PUNDIT 分析仪(PUNDIT 6,英国 CNS·ELECTRONICS 公司)进行系统校准,然后将 2 个传感器分别置于试件两端,并同时压紧,记录屏幕显示的传播时间。重复测试 2 次,按式(2)计算得出动态弹性模量  $E_{us}$  :

$$E_{us} = (L/t)^2 \rho \tag{2}$$

式中,  $t$  为平均传播时间(s)。

应力波测试方法的工作原理是:试材一端受冲击波作用,在其内部产生应力波的传播,通过测定应力波传播速度来确定试材性质。采用六通道 Fakopp (FRS-06/00,匈牙利),将两个传感器探针以 45°角沿纵向分别钉入试件两端,深度约为 5 mm,随后用专用锤敲击其中一个传感器,记录传播时间。参照式(2)可计算动态弹性模量  $E_{sw}$ 。

1.2.2 静态抗弯弹性模量测试

按照 GB 1927~1943—1991<sup>[8]</sup>,采用 3 点弯曲方法,跨距 240 mm,以 300 N 为测量试样变形的下限荷载,700 N 为上限荷载。重复 3 次,计算得到静态 MOE。

1.2.3 静态抗弯强度测试

按照 GB 1927~1943—1991<sup>[8]</sup>,使用万能力学试验机(NBAL-50K,日本)进行抗弯强度测试,加载速度为 7 mm/min。试验结束后立即取样测定试件的实际含水率。

1.2.4 顺纹抗压强度的测试

按照 GB 1927~1943—1991<sup>[8]</sup>,使用万能力学试验机(NBAL-50K,日本)进行顺纹抗压强度测试,加载速度为 6 mm/min。试验结束后立即取样测定实际含水率。

2 结果与分析

2.1 强度性质测试结果

3 种无损检测方法获得巨尾桉无疵小试样的动态弹性性质和万能力学试验机获得的静态弹性性质测试结果如表 1 所示。由纵向基频振动方法得到的动态弹性模量  $E_{fr}$  平均值为 19 335 MPa, 比静态  $MOE$  要高 32%, 而超声波方法得到的  $E_{us}$  和应力波方法得到的  $E_{sw}$  则比静态  $MOE$  要分别高 50% 和 82%。 $E_{fr}$  的范围为 11 926~24 530 MPa, 在三者中与静态  $MOE$  的变化范围最接近。而  $E_{us}$  和  $E_{sw}$  的变化范围与静态  $MOE$  则存在较大差距。远远大于对樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)<sup>[4]</sup> 及落叶松 (*Larix dahurica*)<sup>[5]</sup> 试材动态弹性模量和静态弹性模量的比较结果(前者为 16%, 后者为 15%)。本研究中  $\sigma_c$  的变异系数最小(11%), 而  $MOR$  的变异系数最大(19%)。

表 1 动态弹性模量、静态弹性模量、抗弯强度和顺纹抗压强度的测试结果

TABLE 1 Results of dynamic MOE, static MOE, MOR and $\sigma_c$					
弹性性质	平均值/ MPa	最小值/ MPa	最大值/ MPa	标准差	变异系数/ %
$E_{fr}$	19 335	11 926	24 530	2 458	13
$E_{us}$	21 991	14 737	27 922	2 694	12
$E_{sw}$	26 552	18 023	36 493	3 632	14
$MOE$	14 629	9 535	19 922	1 814	12
$MOR$	119	46	168	22	19
$\sigma_c$	63	45	80	7	11

2.2 动态和静态弹性模量的相关关系

巨尾桉无疵小试样的动态弹性模量和静态弹性模量之间的相关关系可用线性方程  $y = ax + b$  表示(表 2)。回归分析结果表明:纵向基频振动法、超声波法和应力波法测得的动态弹性模量  $E_{fr}$ 、 $E_{us}$  和  $E_{sw}$  与静态  $MOE$  均具有较好的相关性, 相关系数  $R$  分别为 0.816 6、0.788 9 和 0.634 7, 均在 0.001 水平上呈显著相关。

表 2 不同检测方法得到的无疵小试样弹性模量之间的回归分析结果

TABLE 2 Results of regression analyses of MOE by different techniques of small clear specimens						
$y$	$x$	$a$	$b$	$R^2$	$R$	显著性
$MOE$	$E_{fr}$	0.602 6	2.977 8	0.666 9	0.816 6	***
$MOE$	$E_{us}$	0.531 3	2.945 1	0.622 4	0.788 9	***
$MOE$	$E_{sw}$	0.317 0	6.210 7	0.402 8	0.634 7	***

注:\*\*\*为 0.001 水平显著相关。下同。

$E_{fr}$ 、 $E_{us}$  和静态  $MOE$  之间存在较高的相关性和一致性, 而  $E_{sw}$  与静态  $MOE$  之间的相关性要低于其

他两种方法。国内外许多学者也做过类似的研究, Takada<sup>[3]</sup> 曾采用纵向振动法对 2 个不同产地的共 21 个日本落叶松 (*Larix kaempferi*) 试材进行动态弹性模量和静态弹性模量测定, 结果显示两者具有较高的相关性; Liu 等<sup>[7]</sup> 采用纵波共振法测定水曲柳 (*Fraxinus mandshurica*)、红松 (*Pinus koraiensis*) 和核桃楸 (*Juglans mandshurica*) 锯材(1 000~2 000 mm×132~230 mm×20~31 mm)的动态弹性模量(样本总数为 34), 3 种试材测定结果与实际静态  $MOE$  具有较高的相关性( $R=0.844\ 3$ ), 在 0.01 水平上呈显著相关。本试验的结果与已有的研究结论基本一致。

但值得注意的是, 笔者在 2005 年对杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林开展的研究中, 分别对 60 段原木的动态弹性模量与后续制得无疵小试样的静态弹性模量测试结果进行比较分析, 发现应力波方法获得的  $E_{sw}$  与静态  $MOE$  之间的相关关系( $R=0.57$ ) 优于超声波方法获得的  $E_{us}$  与静态  $MOE$  之间的相关关系( $R=0.45$ )。这与本文的研究结果不一致, 说明:应力波方法可能在小规格尺寸试样的动态弹性模量测试中存在一定局限性; 试材尺寸规格、含水率以及传感器与木材接触面的加工精度等方面存在的差异, 可能会影响无损检测方法评估的结果。

2.3 动态弹性模量与抗弯强度的相关关系

巨尾桉无疵小试样的动态弹性模量  $E_{fr}$ 、 $E_{us}$  和  $E_{sw}$  与抗弯强度的相互关系, 可用  $y = ax + b$  表示, 经回归分析后的结果如表 3 所示。

表 3 不同检测方法得到动态弹性模量与抗弯强度之间的回归分析结果

TABLE 3 Results of regression analyses between dynamic MOE and MOR by different techniques of small clear specimens						
$y$	$x$	$a$	$b$	$R^2$	$R$	显著性
$MOR$	$E_{fr}$	0.006 3	-0.002 7	0.481 6	0.694 0	***
$MOR$	$E_{us}$	0.005 6	-0.005 4	0.466 5	0.683 0	***
$MOR$	$E_{sw}$	0.003 5	0.026 4	0.321 8	0.567 3	***

表 3 表明, 纵向基频振动法、超声波法和应力波法测得的动态弹性模量与  $MOR$ , 均在 0.001 水平上呈显著相关, 但均比与静态  $MOE$  之间的相关性低。在已有的研究中, Park 等<sup>[2]</sup> 用弯曲振动法对 90 个规格为 320 mm×20 mm×20 mm 的云杉 (*Picea asperata*) 和红松指接材试样进行了动态弹性模量测定, 并用动态弹性模量预测  $MOR$ 。结果显示:动态弹性模量与  $MOR$  的相关性显著, 但两者之间的相关系数比动态弹性模量与静态  $MOE$  的要低; 红松的动态弹性模量与  $MOR$  的相关系数高于云杉的结果。其结论与本试验一致。

2.4 动态弹性模量与顺纹抗压强度的相关关系

巨尾桉无疵小试样动态弹性模量  $E_{fr}$ 、 $E_{us}$  和  $E_{sw}$  与  $\sigma_c$  的相互关系可用  $y = ax + b$  表示,经回归分析后结果如表 4 所示。

表 4 不同检测方法得到动态弹性模量与顺纹抗压强度之间的回归分析结果

TABLE 4 Results of regression analyses between dynamic MOE and  $\sigma_c$  by different techniques of small clear specimens

$y$	$x$	$a$	$b$	$R^2$	$R$	显著性
$\sigma_c$	$E_{fr}$	2.312 9	17.882 0	0.656 6	0.810 3	***
$\sigma_c$	$E_{us}$	2.108 1	16.243 0	0.654 9	0.809 3	***
$\sigma_c$	$E_{sw}$	1.253 8	29.312 0	0.421 1	0.648 9	***

3 种无损检测方法获得的动态弹性模量与  $\sigma_c$  均在 0.001 水平上呈显著相关。 $E_{fr}$ 、 $E_{us}$ 、 $E_{sw}$  与  $\sigma_c$  之间的相关系数接近它们与静态 MOE 之间的相关系数,高于它们与 MOR 之间的相关系数。其中  $E_{sw}$  与  $\sigma_c$  的相关系数仍然为最低(0.648 9),这说明与应力波方法相比,其他两种无损检测方法在评估无疵小试样的  $\sigma_c$  时具有更高的精度。Lin 等<sup>[9]</sup>对 7 种针叶树种原木试材进行了研究,结果显示利用超声波技术得到的动态弹性模量与顺纹抗压强度具有良好的相关性,相关系数在 0.77~0.86 之间,与本试验的结果(0.809 3)接近。而本研究采用的试验材料巨尾桉为阔叶树种,这说明在使用超声波方法预测木材强度性质时,可以考虑忽略树种因子对结果的影响。

3 结论与讨论

- 1)动态弹性模量  $E_{fr}$ 、 $E_{us}$  和  $E_{sw}$  比静态 MOE 分别大 32%、50%和 82%,高于以往对原木或大规格试材研究得出的比值。这说明试材的形状及规格尺寸会影响无损检测技术的测试结果。
- 2)纵向基频振动法和超声波法获得的动态弹性模量  $E_{fr}$  和  $E_{us}$ ,与静态 MOE、MOR、 $\sigma_c$  表现出较高的相关性,相关系数均超过 0.683 0,且均在 0.001 水平上显著相关,其中  $E_{fr}$  与静态 MOE 的相关系数最高( $R=0.816\ 6$ ),两种无损检测方法所建立的木材强度预测模型也基本一致。
- 3)尽管应力波方法获得的动态弹性模量  $E_{sw}$  与静态 MOE、MOR、 $\sigma_c$  之间相关系数在 0.001 水平上

显著相关,但与其他两种方法相比,应力波方法在对无疵小试样进行测定时仍具有一定局限性。

致谢 广西壮族自治区林科院和东门林场以及澳大利亚新南威尔士林务局帮助完成了本研究的试材采集工作,中国林业科学研究院木材工业研究所许明坤实验师对实验室的测试工作提供了许多帮助,本文作者深表谢意。

参 考 文 献

[ 1 ] 段新芳,李玉栋.无损检测技术在木材保护中的应用[J].木材工业,2002,16(5):14-16.  
DUAN X F,LI Y D. Review of NDE technology as applied to wood preservation[J]. *China Wood Industry*,2002,16(5):14-16.

[ 2 ] PARK H M,BYEON H S. Nondestructive evaluation of strength performance for finger-jointed wood using flexural vibration techniques[J]. *Forest Products Journal*,2005,55(10):37-42.

[ 3 ] TAKADA K,HIRAKAWA Y. Variation of the dynamic MOE in Japanese larch log by barking[J]. *Wood Industry*,2000,55(8):352-356.

[ 4 ] 崔英颖,张厚江.基于横向振动法对樟子松木材进行应力分等的研究[J].林业机械与木工设备,2005,33(10):24-28.  
CUI Y Y,ZHANG H J. The study on stress grading for *Pinus sylvestris* var. *mogolica* based on transverse vibration method [J]. *Forestry Machinery & Woodworking Equipment*,2005,33(10):24-28.

[ 5 ] 鹿振友.落叶松材静、动弹性模量测试分析[J].北京林业大学学报,1989,11(4):107-112.  
LU Z Y. Investigation of the static and dynamic modulus of elasticities of the wood of *Larix dahurica* [J]. *Journal of Beijing Forestry University*,1989,11(4):107-112.

[ 6 ] YIN Y F,NAKAI T,NAGAO H. *et al.* Non-destructive evaluation of Chinese fir plantation wood strength[C]// *The Proceeding of the 8th World Conference on Timber Engineering WCTE 2004*. Lahti,Finland: WCTE,2004:681-684.

[ 7 ] LIU Z B,LIU Y X. Measurement of the dynamic modulus of elasticity of wood panels[J]. *Frontiers of Forestry in China*,2006,1(4):425-430.

[ 8 ] 国家技术监督局. GB 1927~1943-1991 木材物理力学性质试验方法[S].北京:中国标准出版社,1991.  
Administration of Technical Supervision of the People's Republic of China. *GB 1927~1943-1991 Testing methods for physical and mechanical properties of wood*[S]. Beijing:Standards Press of China,1991.

[ 9 ] LIN C J,TSA M J. Effects of ring characteristics on the compressive strength and dynamic modulus of elasticity of seven softwood species [J]. *Holzforchung*,2007,61(4):414-418.

(责任编辑 李文军)