

3种无损检测技术评估足尺规格材的静态弹性模量

江京辉, 吕建雄, 任海青, 骆秀琴, 龙超, 郭伟

(中国林业科学研究院 木材工业研究所 国家林业局 木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 首先利用横向振动、纵向基频振动和超声波3种无损检测法获得天然林樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 足尺规格材(38 mm × 89 mm × 4 000 mm)和人工林杉木 *Cunninghamia lanceolata* 足尺规格材(45 mm × 90 mm × 2 500 mm)动态弹性模量, 同时根据 D198-99 (American Society for Testing and Materials) 标准测试了其静态弹性模量; 进而通过探讨动态与静态弹性模量之间的相互关系。研究表明, 无论对哪种木材的规格材, 利用上述3种无损检测方法获得动态弹性模量(E_{iv} , E_{fr} , E_{usw})与静态弹性模量(E_{tu})平均值之间的关系为: $E_{usw} > E_{fr} > E_{tu} > E_{iv}$; 动态弹性模量与静态弹性模量之间的线性相关极显著, 表明这3种无损检测方法均可以用于评估规格材的静态弹性性质; 从设备的方便、可靠和易操作等方面综合考虑, 利用纵向基频振动法来评估规格材的静态弹性模量, 其预测效果更为理想; 天然林樟子松和人工林杉木比较而言, 动静态弹性模量线性相关决定系数前者大于后者, 即预测天然林樟子松规格材效果更好。图6表1参17

关键词: 林业工程; 横向振动; 纵向基频振动; 超声波; 弹性模量; 规格材

中图分类号: S781.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-5692(2008)03-0277-05

Evaluation of modulus of elasticity for dimension lumber by three nondestructive techniques

JIANG Jing-hui, LÜ Jian-xiong, REN Hai-qing, LUO Xiu-qin, LONG Chao, GUO Wei

(Key Laboratory of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Research Institute of Wood Industry, The Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Dynamic bending modulus of elasticity of Mongolia scotch pine (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) full dimension lumber (38 mm × 89 mm × 4 000 mm) and Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantation dimension lumber (45 mm × 90 mm × 2 500 mm) were tested by three non-destructive techniques, i. e. transverse vibration method, longitudinal fundamental frequency vibration method and ultrasonic wave method. At the same time, the static modulus elasticity of the above specimens were tested according to ASTM D198-99. The results showed that the value of dynamic and static modulus of elasticity followed the sequence as the following, $E_{usw} > E_{fr} > E_{tu} > E_{iv}$, the relationship between dynamic and static modulus of elasticity concerning the three methods was significant at 0.01 level, indicating that all the three nondestructive methods could be used to predict the bending properties of dimension lumber. Furthermore, considering the operation of the equipment, longitudinal fundamental frequency vibration technique was the most accurate, convenient, reliable, easy and practical method. It was also found that the coefficient of determination (R^2) obtained by using the three nondestructive techniques for Chinese fir plantation full dimension lumber was lower than that of Mongolia scotch pine full dimension lumber, estimating the static modulus elasticity of Mongolia scotch pine was more accurate than that of plantation Chinese fir. [Ch, 6 fig. 1 tab. 17 ref.]

Key words: forest engineering; transverse vibration; longitudinal fundamental frequency vibration; ultrasonic

收稿日期: 2007-05-10; 修回日期: 2007-06-26

基金项目: “十一五”国家科技支撑项目(2006BAD18B07); 国家科学技术部林业工程技术标准体系构建子课题(2004DEA70900-1)

作者简介: 江京辉, 助理研究员, 硕士, 从事木材力学研究。E-mail: jiangjh@forestry.ac.cn。通信作者: 吕建雄, 研究员, 博士生导师, 从事木材科学与技术研究。E-mail: jianxiong@forestry.ac.cn

wave; modulus of elasticity; dimension lumber

近年来迅速发展的无损检测技术(nondestructive technique, NDT), 凭借其方便、快速、准确和低成本等优点, 已经广泛地应用于木材性质研究领域^[1]。通常用于检测木材物理力学性质的无损检测方法有射线法、微波法、红外线法、超声波法、机械应力法、振动法、冲击应力波法和声发射法等^[2]。国外越来越重视将无损检测技术应用于对足尺规格材或原木力学性质的预测^[3,4]。按照我国的传统, 在进行木材强度性质研究时, 主要采用无疵小试样的实验数据来确定足尺规格材的强度设计值^[5-9], 但这种方法很难准确地评估树木生长或加工过程中形成的如树节、钝棱和腐朽等自然缺陷以及开裂等加工缺陷对足尺规格材力学性质所产生的影响。文章利用横向振动、纵向基频振动和超声波等3种无损检测方法获得木材的动态弹性模量, 同时测定其静态弹性模量, 通过比较两者之间的相关性以及上述3种方法对于天然林规格材与人工林规格材预测的准确性, 试图选择出一种能够便捷、快速、准确地评估足尺规格材力学性质的无损检测方法。

1 材料与方法

1.1 试件制备

樟子松 *Pinus sylvestris* var. *mongolica* 来自于俄罗斯的天然林, 经过干燥、刨光, 制成规格为 38 mm × 89 mm × 4 000 mm 的规格材, 共计 45 根。人工林杉木 *Cunninghamia lanceolata* 采自于安徽省, 经过干燥、刨光, 制成规格为 45 mm × 90 mm × 2 500 mm 规格材, 共计 54 根。首先将试材在试验室条件下, 调整至气干含水率(12%)。所有试样在进行后续力学强度试验之前, 先测量其实际尺寸, 并用探针式含水率测定仪(ST-85, 上海)测量试样含水率。

1.2 测试设备与试验方法

1.2.1 横向振动测试动态弹性模量 根据木材的振动特性与弹性模量之间的相关关系, 对木材试件加力, 使它们产生横向振动, 通过传感器测得试件的自由振动频率、自由振动的减幅率及试件质量, 经计算机进行数据处理后, 得出试材的动态弹性模量^[10]。本试验使用的横向振动测试设备是根据 ASTM (美国材料与试验协会) 标准 D6874-03 自行设计开发的测试系统。整个系统包括2个支架, 2个压力传感器, 信号放大器, 模拟数字信号转换器以及计算机处理系统。压力传感器固定在横向振动仪的2个支架上^[11]。每块试样测试3次。木材试件的弹性模量的计算公式^[12]为:

$$E_{iv} = F^2 WS^3 / (\pi/2)^2 IG。 \quad (1)$$

式(1)中: F 为基频振动频率(Hz), W 为试材重力(N), S 为2个支架间的跨度(mm), I 为试样的惯性矩(mm⁴), G 为重力加速度(9.807 mm · s⁻¹)。

1.2.2 纵向基频振动测试动态弹性模量 用锤子在一端撞击木材, 使木材内部产生应力波, 在另一端利用麦克风接收应力波, 通过傅立叶快速转换分析仪, 得到基频振动频率, 每块试样测试2次。动态弹性模量与基频振动频率和木材密度之间存在如下关系^[12]:

$$E_{fr} = 4L^2 F^2 \rho。 \quad (2)$$

式(2)中: F 为基频振动频率(Hz), L 为2个支架间的跨度(mm), ρ 为试材密度(g · cm⁻³)。

1.2.3 超声波测试动态弹性模量 本次试验利用 Sylvastest 公司的超声波设备, 每块试样测试2次。其原理是: 利用超声波在木材中传播会发生衰减的现象, 且其纵波声速 C 与介质的密度 ρ 、动态弹性模量 E 的相关关系为^[12]:

$$E_{usw} = C^2 \rho。 \quad (3)$$

式(3)中: C 为纵波声速(m · s⁻¹), ρ 为试材密度(g · cm⁻³)。

1.2.4 静态抗弯弹性模量的测试 按照 ASTM D198-99^[3], 利用国家林业局木材科学与技术重点实验室的 50 t 抗弯强度力学试验机, 以下方压头液压式加载方式, 进行侧向4点弯曲试验。悬挂在 yoke 上的线性电压位移传感器测量弯曲梁中性轴中点处的挠度值。每个试样重复测试3次, 测试时间为 6 ~ 8 min。试样支撑点间跨距与试材高度比均为 18 : 1, 测试樟子松和人工林杉木两载荷压头间距离分别

为 534 mm 和 540 mm, 在 500 ~ 1 500 N 的载荷范围内采集挠度数据, 然后根据载荷与弯曲梁挠度值之间的关系, 分别计算得到静态抗弯弹性模量^[3]:

$$E_{tm} = 23pl^3 / 108bh^3f. \quad (4)$$

式(4)中: E_{tm} 为静态抗弯弹性模量(GPa), p 为上、下限荷载之差(N), l 为 2 个支座间跨距(mm), b 为试样宽度(mm), h 为试样高度(mm), f 为上、下限荷载间的试样变形值(mm)。

2 结果与分析

2.1 3 种无损检测方法的动态弹性模量以及静态弹性模量

横向振动法、纵向基频振动法、超声波法和静态 4 点弯曲试验方法测得的樟子松和人工林杉木规格材弹性性质如表 1 所示。此次试验, 樟子松和杉木试材的含水率平均值分别为 11.26% 和 12.83%, 接近 12%, 所有的测试结果值没有经过含水率修正。由表 1 可以看出, 利用超声波法测试出的平均值最大, 其次是纵向基频振动法, 然后是静态 4 点弯曲法, 最小是横向振动法, 这与前人的研究结果相一致。Dujju 等^[12]利用纵向基频振动法、超声波法和静态 3 点弯曲法测试了 5 种木材规格材(尺寸为 50 mm × 100 mm × 2 000 mm)的弹性模量, 结果发现超声波法测试的值最大, 其次是纵向基频振动法, 最小为静态 3 点弯曲法。樟子松规格材在 12% 含水率条件下, 静态弹性模量平均值为 10.81 GPa, 变异系数为 17.72%; 人工林杉木规格材在此含水率条件下, 静态弹性模量平均值为 10.52 GPa, 变异系数为 13.01%。

表 1 足尺规格材动态和静态弹性模量性质的测试结果

Table 1 Dynamic and static modulus elasticity of dimension lumber

树种	样本/根	E_{tv}		E_{fr}		E_{usw}		E_{tm}		含水率	
		平均值/ GPa	变异系 数/%	平均值/ GPa	变异系 数/%	平均值/ GPa	变异系 数/%	平均值/ GPa	变异系 数/%	平均值/ %	变异系 数/%
樟子松	45	10.58	16.59	11.03	16.36	12.83	13.41	10.81	17.72	11.26	15.93
杉木	54	9.85	11.66	10.87	12.76	12.35	11.60	10.52	13.01	12.38	8.73

2.2 动态弹性模量与静态弹性模量的相互关系

图 1, 图 2 和图 3 分别是樟子松规格材动态弹性模量 E_{tv} , E_{fr} , E_{usw} 与静态弹性模量 E_{tm} 的相互关系, 其决定系数(R^2)分别为 0.874 5, 0.899 5 和 0.856 3, 经检验在 0.01 水平上显著。图 4, 图 5 和图 6 分别是人工林杉木规格材动态弹性模量 E_{tv} , E_{fr} , E_{usw} 与 E_{tm} 的线性关系图, 其决定系数(R^2)分别为 0.779 5, 0.711 0 和 0.638 6, 经检验在 0.01 水平上显著。由此可见, 3 种无损检测法测试的动态弹性模量与静态弹性模量存在极显著的线性相关性。与此同时, 根据线性回归分析结果还可以看出, 利用这 3 种方法预测人工林杉木规格材的决定系数都要低于预测天然林樟子松规格材的决定系数, 这可能与 2 个树种具有不同的生长特性及木材性质有关。鲍甫成等^[13]研究结果表明, 人工林杉木的幼龄材和成熟材的分界线在 18 ~ 20 a, 幼龄材的抗弯弹性模量比成熟材的低 21.20%, 成熟材的弹性模量为 10.54 GPa, 在 0.01 水平上显著。此次研究的人工林杉木规格材幼龄材所占比率较大, 同时人工林杉木节子较多, 节子周围容易产生扭曲纹理, 其生长轮宽度变化大, 从而降低人工林杉木的强度^[14]。而天然林樟子松纹理通直, 节子少, 年轮宽度均匀, 上述几种原因可能加大了人工林杉木规格材之间的变异性, 从而导致了利用纵向基频振动预测人工林杉木规格材静态弹性模量效果稍差。

在以往的研究中, 殷亚方等^[11]曾利用测量试样中点位置振动信号的横向振动设备, 测定了加拿大云杉-松-冷杉类规格材(38 mm × 89 mm × 3 658 mm)的动态弹性模量。测试结果表明, 静态抗弯弹性模量与动态弹性模量之间具有很好的相关关系($R^2 = 0.728 0$)。Dujju 等^[12]利用纵向基频振动法和超声波法测得 5 种木材规格材的动态弹性模量与抗弯强度相关系数(R)都大于 0.8。Oliveira 等^[15]在对火炬松 *Pinus taeda* 锯材(50 mm × 200 mm × 4 400 mm)进行过动态弹性模量与静态抗弯弹性模量相

互关系的研究,应用的超声波设备与本次试验设备一样,结果发现利用超声波方法获得的动态弹性模量与静态3点弯曲弹性模量之间的决定系数(R^2)为0.800 0。嵇伟兵等^[16]利用超声波检测不同厚度人工林杉木板材的静态弹性模量,动态与静态弹性模量的综合相关系数为0.869 0,与本次预测相关系数接近;刘镇波等^[17]利用纵波共振法和横波共振法测试了胡桃楸 *Juglans mandshurica*,水曲柳 *Fraxinus mandshurica* 和红松 *Pinus koraiensis* 的无疵小试样动静态弹性模量研究发现,纵波共振法较为精确与简便。上述研究结果都是采用1~2种无损检测方法,动静态弹性模量之间的相关性与本研究结果接近。本研究创新之处是发现3种无损检测方法对天然林规格材的预测效果更好一些,从设备的方便、可靠、易操作等综合因素考虑,这3种无损检测方法中,纵向基频振动法用来评估规格材的静态弹性模量最佳。

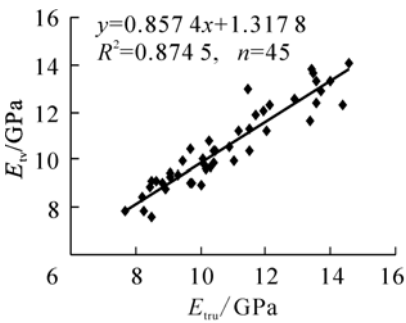


图1 樟子松规格材 E_{iv} 与 E_{tru} 的相互关系

Figure 1 Relationship between E_{iv} and E_{tru} of Mongolia scotch pine dimensionlumber

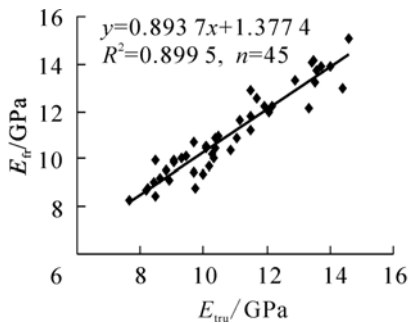


图2 樟子松规格材 E_{fr} 与 E_{tru} 的相互关系

Figure 2 Relationship between E_{fr} and E_{tru} of Mongolia scotch pine dimension lumber

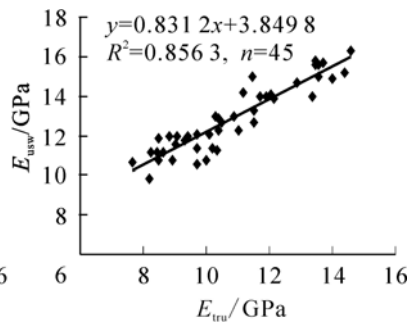


图3 樟子松规格材 E_{usw} 与 E_{tru} 的相互关系

Figure 3 Relationship between E_{usw} and E_{tru} of Mongolia scotch pine dimension lumber

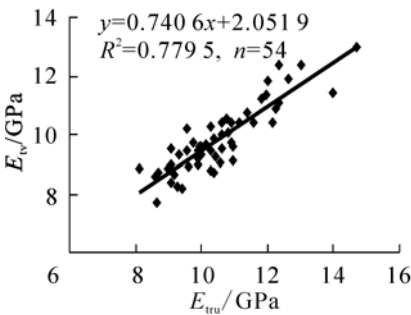


图4 人工林杉木规格材 E_{iv} 与 E_{tru} 的相互关系

Figure 4 Relationship between E_{iv} and E_{tru} of Chinese fir dimension lumber

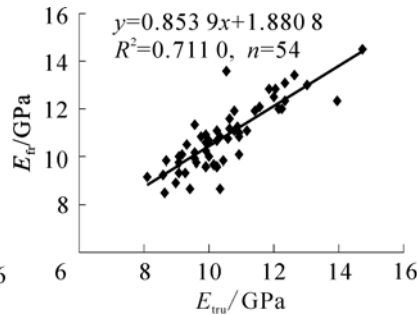


图5 人工林杉木规格材 E_{fr} 与 E_{tru} 的相互关系

Figure 5 Relationship between E_{fr} and E_{tru} of Chinese fir dimension lumber

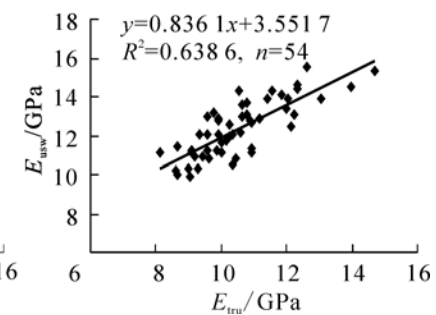


图6 人工林杉木规格材 E_{usw} 与 E_{tru} 的相互关系

Figure 6 Relationship between E_{usw} and E_{tru} of Chinese fir dimension lumber

3 结论

对于樟子松天然林和杉木人工林木材的规格材,利用横向振动、纵向基频振动和超声波等3种无损检测方法获得的动态弹性模量(E_{iv} , E_{fr} , E_{usw})及其静态弹性模量(E_{tru})的数值大小排序为 $E_{usw} > E_{fr} > E_{tru} > E_{iv}$,动态弹性模量与静态弹性模量之间的相关性极强,均在0.01水平上显著性相关,表明3种无损检测方法都可以用于评估规格材的静态弹性模量。从设备的方便、可靠、易操作等综合因素考虑,纵向基频振动法用来评估规格材的静态弹性模量最佳。利用3种方法预测人工林杉木规格材静态弹性模量的决定系数略低于预测天然林樟子松规格材的决定系数,即预测天然林樟子松的抗弯弹性模

量更加准确。

致谢: 中国林业科学研究院副研究员殷亚方、加拿大国家林产品研究院木材工程研究室的 Conroy Lum 研究员对本试验方案提出了宝贵意见。在此一并致谢。

参考文献:

- [1] 孟令联, 赵钟声, 刘一星. 木材无损检测技术及其应用与展望[J]. 林业机械与木工设备, 2001, **29** (9): 4-6.
- [2] 王立海, 杨学春, 徐凯宏. 木材无损检测技术研究现状[J]. 林业科技, 2002, **27** (3): 35-38.
- [3] American Society for Testing and Materials. D 198-98 *Test Method of Static Tests of Timbers in Structural Sizes* [S]. Philadelphia: Annual Book of Standards, 2002: 59-78.
- [4] American Society for Testing and Materials. D 4761-96 *Test Methods for Mechanical Properties of Lumber and Wood-base Structural Material* [S]. Philadelphia: Annual Book of Standards, 2002: 537-546.
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 1927-1991 木材物理力学试材采集方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 1929-1991 木材物理力学试材锯解及试样截取方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 19236.1-1991 木材抗弯强度试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 1936.2-1991 木材抗弯弹性模量测定方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [9] 中华人民共和国建设部, 国家质量监督检验检疫总局. GB 50005-2003 木结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [10] 刘镇波, 刘一星, 于海鹏, 等. 木材弹性模量自动检测的研究进展[J]. 林业科技, 2004, **29** (1): 45-48.
- [11] 殷亚方, 吕建雄, 倪春, 等. 横向振动方法评估大尺寸规格材静态抗弯弹性性质[J]. 北京林业大学学报, 2005, **27** (5): 107-110.
- [12] DUJU A, NAKAI T, NAGAO H, *et al.* Nondestructive evaluation of mechanical strength of sarawak timbers [C]// DIVOS F. *Proceedings of 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. Sopron: University of Western Hungary, 2000: 131-137.
- [13] 鲍甫成, 江泽慧. 中国主要人工林树种木材性质[M]. 北京: 中国林业出版社, 1998.
- [14] 尹思慈. 木材品质和缺陷[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990.
- [15] DEOLIVEIRA F G R, PLETZ E. Assessment of mechanical properties of wood using an ultrasonic technique [C]// Forest Products Society. *Proceedings of the 13th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood*. California: Forest Products Society, 2002: 75-78.
- [16] 嵇伟兵, 马灵飞. 利用超声波检测杉木抗弯弹性模量[J]. 浙江林业科技, 2006, **26** (3): 21-24.
- [17] 刘镇波, 刘一星, 于海鹏, 等. 实木板材的动态弹性模量检测[J]. 林业科学, 2005, **41** (6): 126-131.