

薄型刨花板的动静态弹性模量检测

闫海成, 张厚江, 朱磊, 孙燕良, 刘祥熙

(北京林业大学 工学院, 北京 100083)

摘要: 传统的薄型刨花板弹性模量测定方法都是对试件进行3点或4点静态弯曲变形试验, 测定过程复杂, 消耗时间长, 并且对试件造成破坏。利用自行研制开发的基于悬臂自由振动和悬臂弯曲原理的薄板类木质材料力学快速测量仪, 对3种规格的薄型刨花板的动态弹性模量和静态弯曲弹性模量进行检测, 并对测量结果进行相关性分析, 同时利用3点弯曲法测量了相同试件的3点弯曲弹性模量加以对比验证。结果表明: 悬臂振动动态弹性模量均值大于悬臂弯曲静态弹性模量, 且两者之间总体相关系数达到0.98, 在0.01水平上呈显著相关; 悬臂振动动态弹性模量与3点弯曲弹性模量间的总体相关系数达到0.75, 在0.01水平上呈显著相关, 说明可以利用薄板类木质材料力学快速测量仪快速测量薄型刨花板的弹性模量。图6表3参10

关键词: 林业工程; 薄型刨花板; 悬臂振动; 悬臂弯曲; 动态弹性模量; 静态弯曲弹性模量

中图分类号: TS653; S781.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2012)01-0083-05

Dynamic and static modulus measurements for thin particleboard

YAN Hai-cheng, ZHANG Hou-jiang, ZHU Lei, SUN Yan-liang, LIU Xiang-xi

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: To provide a means of dynamic and static bending evaluation for modulus of elasticity with small samples of thin wood composites, a cantilever-beam testing apparatus was developed based on the principle of cantilever-beam bending and vibration. Three sizes of thin particleboard, thickness of 3 mm, 5 mm and 8 mm, were tested and compared using a correlation analysis by Statistical Package for the Social Science (SPSS) software and the three-point bending method. Testing results showed a highly significant correlation ($P < 0.01$) for dynamic modulus (E_d) and static bending modulus (E_s) with three sizes of thin particleboard. Results also showed a highly significant correlation ($P < 0.01$) between E_d and the three-point bending modulus (E_b) for three sizes of thin particleboards. So for thin particleboards, E_d and E_s as well as E_d and E_b were strongly related, and it would be effective to measure the cantilever dynamic modulus and the static bending modulus with this cantilever-beam testing apparatus. [Ch, 6 fig. 3 tab. 10 ref.]

Key words: forest engineering; thin particleboard; cantilever-beam vibration; cantilever-beam bending; dynamic modulus (E_d); static bending modulus (E_s)

薄型刨花板是指厚度在8 mm以下的刨花板, 是整个刨花板产品的重要组成部分, 广泛用于家具制造业、汽车工业、建筑装修业中。为合理有效地利用薄型刨花板, 应采用科学的测试技术和检测手段对其力学性能进行测量, 掌握其力学性能的特点, 以方便在最适合的条件和环境发挥最大的使用价值。薄型刨花板的弹性模量是表征其力学性能的重要指标之一。传统的测定方法都是简支静曲测试方法, 测试过程繁琐, 消耗时间长^[1-2]。依据振动法测定木质材料的力学性能, 在过去的几十年中已经被证明是一种成功的方法^[3-4]。测定结果显示振动法测得的力学性能与传统静态弯曲法测得的弹性模量间有非常好的一

收稿日期: 2011-04-12; 修回日期: 2011-06-14

基金项目: 国家林业局引进国际先进农业科学技术计划(“948计划”)项目(2008-4-69)

作者简介: 闫海成, 从事无损检测技术研究。E-mail: abamice@126.com。通信作者: 张厚江, 教授, 博士, 从事无损检测技术研究。E-mail: hjzhang6@bjfu.edu.cn

致关系。国内外进行的大量利用振动原理测定结构用木材力学性能的研究绝大多数针对的是大尺寸结构用木材,采用的试件支撑方法基本是简支梁式支撑^[5-8]。但对于薄板类木质材料,由于其质量轻,在振动过程中不能与支撑很好接触,使得振动信号不能很好地传感出来,因而采用简支梁横向振动的方法是不可行的。本研究基于悬臂振动和悬臂弯曲理论,利用自行研制的薄板类木质材料力学性能快速测量仪,检测了3种规格薄型刨花板的动态弹性模量和静态弹性模量。通过测量结果,分析讨论悬臂振动动态弹性模量与悬臂弯曲静态弹性模量的相关关系,并且通过万能力学试验机,利用3点弯曲法,测量出薄型刨花板的3点弯曲弹性模量。将利用悬臂振动和弯曲原理获得的弹性模量与3点弯曲弹性模量进行对比分析,发现基于悬臂自由振动和悬臂弯曲原理的薄型刨花板弹性模量快速检测方法,是可行的。

1 理论基础

1.1 基于悬臂弯曲理论测量薄型刨花板静态弯曲弹性模量的基本原理

如图1所示,悬臂梁夹持状态下,试件在端部受载荷 P 后,会发生变形。且存在着如下关系式:

$$y = \frac{Pl^3}{3E_s I} \quad (1)$$

式(1)中: P 为初始静态载荷(N), y 为加载点位移量(m), l 为悬臂梁悬出(非被装夹)部分长度(m), I 为悬臂梁横断面惯性矩(m⁴), E_s 为试件静态弹性模量(Pa)。式(1)可以转化为:

$$E_s = \frac{Pl^3}{3yI} = \frac{4Pl^3}{ybt^3} \quad (2)$$

式(2)中: b 为试件宽度(m), t 为试件厚度(m)。也就是说,由于试件基本尺寸(l, b, t)为已知量,在测量到初始静态载荷 P 和加载点位移量 y 后,就可以根据式(2)计算出被测试件的静态弹性模量 E_s 。这就是基于悬臂弯曲理论测量薄型刨花板静态弯曲弹性模量的基本原理。

1.2 基于悬臂自由振动理论测量薄型刨花板动态弹性模量的基本原理

如图2所示,悬臂梁自由振动第1阶固有圆频率可由下面方程给出^[9]:

$$\omega_{n1} = 2\pi f = \left(\frac{1.875}{l} \right)^2 \sqrt{\frac{E_d I}{M_u}} \quad (3)$$

式(3)中: ω_{n1} 为振动第1阶固有圆频率(radians·s⁻¹), f 为

振动第1阶固有频率(Hz), l 为悬臂梁悬出(非被装夹)部分长度(m), E_d 为动态弯曲弹性模量(Pa), I 为悬臂梁横断面惯性矩(m⁴), m_u 为梁单位长度上的质量(kg·m⁻¹)。式(3)可以转化为:

$$E_d = \frac{m_u}{I} (2\pi f)^2 \left(\frac{l}{1.875} \right)^4 = \frac{M}{L} \frac{12}{bt^3} (2\pi f)^2 \left(\frac{l}{1.875} \right)^4 \quad (4)$$

式(4)中: M 为试件的质量(kg), L 为试件的全长(m), b 为试件的宽度(m), t 为试件的厚度(m)。也就是说,由于试件基本参数 M, L, l, b, t 等已知,只要检测得到振动第1阶固有频率 f ,就可以由式(4)计算出动态弹性模量 E_d 。式(4)是一个理想化的方程式,根据Timoshenko挠性振动理论,在悬臂长度与试件厚度之比 $l/h > 58$ 时,试件内部剪切力和截面转角运动的作用可以忽略。这就是基于悬臂自由振动理论测量薄型刨花板动态弹性模量的基本原理。

2 试验方法

2.1 试验设备与测试过程

图3是课题组自行研制的薄板类木质材料力学性能快速测量仪。测量仪由以下几部分组成:底座、立柱、试件夹具、激光传感器、调整机构、初始位移施加机构等。其中试件夹具部分能调节高度,起到定位和夹紧不同长度试件的作用;初始位移施加机构上安装了力传感器,用来检测初始载荷 P ;另外,初始位移施加机构在释放试件端部后,能引起自由振动,通过激光传感器,在振动状态下,传感试件的

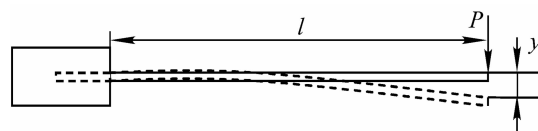


图1 悬臂梁夹持静态弯曲

Figure 1 Static bending of a cantilever beam

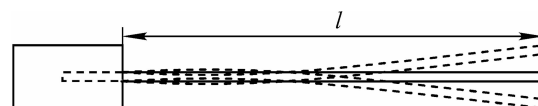


图2 悬臂梁自由振动

Figure 2 Vibration of a cantilever beam

振动信号。

测试过程中首先根据不同系列尺寸的试件调整夹头的高度，把被测试件装夹在试件夹具上。根据实验要求调整好激光传感器和测力传感器与试件的距离后，扳动试件到拉钩上，如图 4 中所示。运行电脑中的实验程序，首先力传感器检测出初始载荷 P 信号；然后按下拉钩使试件自由振动起来，此时激光传感器检测出试件端部的振动信号；最后力传感器和激光传感器产生的电压信号通过数据采集卡，将采集到的数字信号导入到计算机进行频域分析和公式计算，从而得到试件的动态弹性模量和静态弯曲弹性模量。

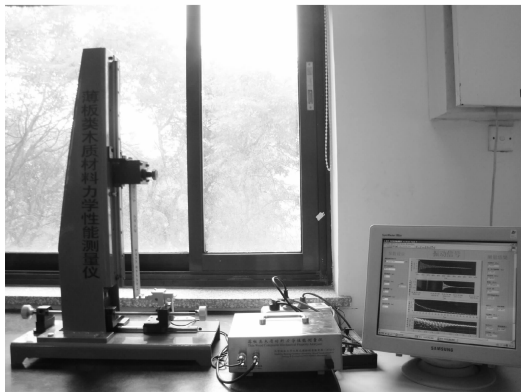


图 3 薄板类木质材料力学性能快速测量仪
Figure 3 Cantilever beam tester for thin wood composite

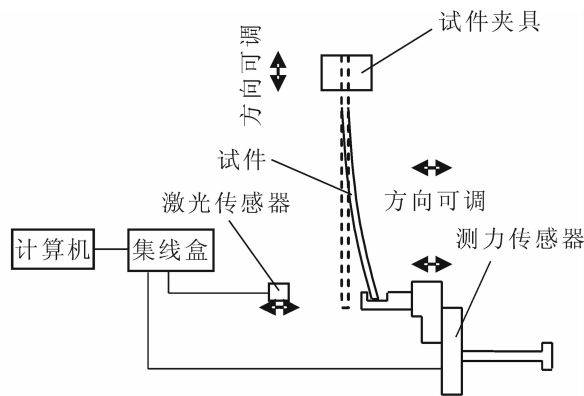


图 4 测量仪悬臂弯曲和振动试验示意图
Figure 4 Static bending and vibration of a cantilever beam test

起对比作用的 3 点弯曲试验，在瑞格尔 RGW-3010 型电子万能力学试验机上进行。该力学试验机最大可测载荷为 10 kN，载荷误差小于示值的 $\pm 1\%$ 。试验按照美国标准 ASTM D1037-2006 进行^[10]。

2.2 试验材料

选择 3 种不同厚度的薄型刨花板作为试验材料，试验材料皆是从市场上购买。根据厚度不同，薄型刨花板被加工成一定尺寸的试件(厚 $\times$ 宽 $\times$ 长)：3 mm $\times$ 50 mm $\times$ 230 mm, 5 mm $\times$ 50 mm $\times$ 340 mm, 8 mm $\times$ 50 mm $\times$ 550 mm, 分别为 100, 100, 86 件。试验过程中，所有试件的夹持长度均为 50 mm。试验前，要对所有试件进行编号。编号规则如下：①PB 代表薄型刨花板；②字母后面紧跟的数字代表“厚度 $\times$ 长度”(所有试件宽度均为 50 mm，故省略)；③尾数代表试件的序号。例如，编号 PB3 $\times$ 230-10，代表该试件材质为薄型刨花板，尺寸为 3 mm $\times$ 50 mm $\times$ 230 mm(厚 $\times$ 宽 $\times$ 长)，为该系列共 100 个试件中的第 10 个试件。

3 结果与分析

3.1 总体测量结果

3 种规格共 286 个试件，总体测量结果如表 1 所示，悬臂静态弯曲测得的静态弹性模量 E_s 要低于悬臂梁振动法测得的动态弹性模量 E_d 。平均弹性模量指标 E_s/E_d 为 0.90~0.94。

3.2 动态弹性模量 E_d 与静态弯曲弹性模量 E_s 的相关关系

利用自行研制的薄板类木质材料力学性能快速测量仪，测得的 3 种试件动态弹性模量 E_d 与静态弯曲弹性模量 E_s 的关系如图 5 所示。通过多元统计分析软件 SPSS(statistical program for social sciences)，采用一元线性回归分析方法对每种薄板试件试验数据及综合试验数据进行回归分析，并对它们进行 Pearson 相关性的显著性验证得到的有关参数值及相关系数见表 2。

从图 5 及表 2 中的相关数据可以看出，3 种薄板以及所有薄板中的 E_d 与 E_s 之间都在 0.01 水平上显著相关，显然薄型刨花板试件的悬臂振动动态弹性模量与悬臂弯曲静态弹性模量之间是高度相关的。

3.3 动态弹性模量 E_d 与 3 点弯曲弹性模量 E_b 的相关关系

通过快速测量仪测得的 3 种试件动态弹性模量 E_d 与利用万能力学试验机测得的 3 点弯曲弹性模量 E_b 的关系如图 6 所示。通过多元统计分析软件 SPSS(statistical program for social sciences)，采用一元线性回归分析方法对每种薄板试件试验数据及综合试验数据进行回归分析，并对其进行 Pearson 相关性的显

表 1 3 种薄板试件的弹性模量测量值
Table 1 Modulus tested of three kinds of thin wood composite

编号	试件数	弹性模量代号	弹性模量值/GPa			标准偏差	平均弹性模量之比(E_s/E_d)
			平均	最小	最大		
PB3×230	100	E_s	2.921	2.108	3.566	0.359	0.91
		E_d	3.214	2.324	3.973	0.390	
		E_b	2.502	1.794	3.206	0.323	
PB5×340	100	E_s	3.027	2.021	3.743	0.631	0.90
		E_d	3.371	2.141	4.265	0.480	
		E_b	2.237	1.203	2.973	0.539	
PB8×550	86	E_s	2.879	2.501	3.465	0.205	0.94
		E_d	3.055	2.611	3.797	0.235	
		E_b	2.423	1.968	3.130	0.214	

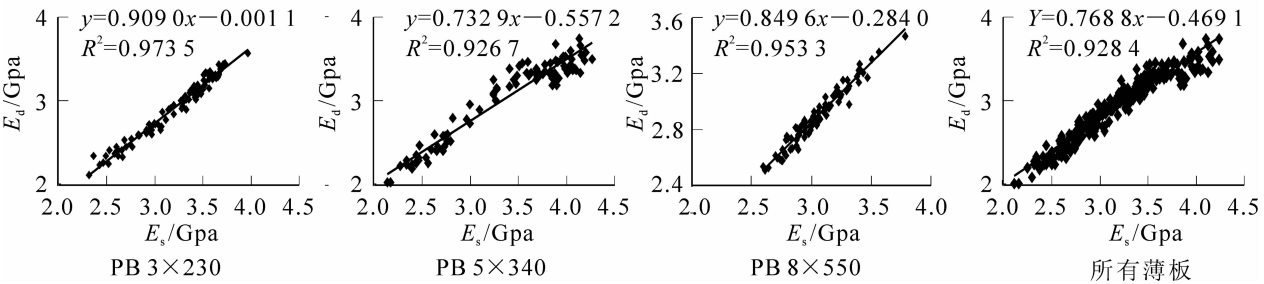


图 5 薄板动态/静态弯曲弹性模量的关系曲线
Figure 5 Relationship of dynamic and static bending modulus

表 2 3 种薄板试件 E_d 和 E_s 之间的线性回归方程
Table 2 Correlation equation between of E_d and E_s

编号	试件数	线性回归方程: $y = ax + b$				相关系数(R)	F 值	P	显著性
		y	x	a	b				
PB 3×230	100	E_d	E_s	0.909 0	-0.001 1	0.993	3 602.455	0.000	极显著
PB 5×340	100	E_d	E_s	0.732 9	0.557 2	0.981	1 213.992	0.000	极显著
PB 8×550	86	E_d	E_s	0.849 6	0.284 0	0.988	1 716.091	0.000	极显著
总数据	286	E_d	E_s	0.768 8	0.469 1	0.981	3 470.029	0.000	极显著

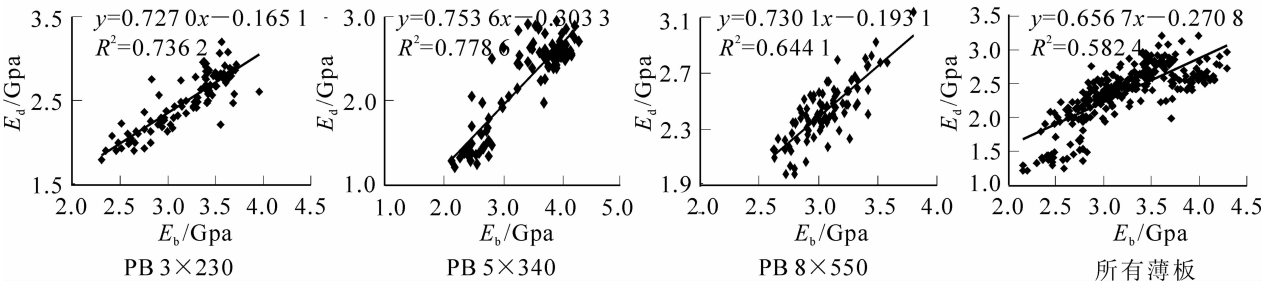


图 6 薄板动态/3 点弯曲弹性模量的关系曲线
Figure 6 Relationship of dynamic and 3-point bending modulus

著性验证得到的有关参数值及相关系数见表 3。

表 3 3 种薄板试件 E_d 和 E_b 之间的线性回归方程

Table 3 Correlation equation between of E_d and E_b

编号	试件数	线性回归方程: $y = ax + b$				相关系数(R)	F 值	P	显著性
		y	x	a	b				
PB 3×230	100	E_d	E_s	0.727 0	0.165 1	0.858	273.479	0.000	极显著
PB 5×340	100	E_d	E_s	0.753 6	-0.303 3	0.882	337.562	0.000	极显著
PB 8×550	86	E_d	E_s	0.730 1	0.193 1	0.803	152.015	0.000	极显著
总数据	286	E_d	E_s	0.656 7	0.270 8	0.753	368.370	0.000	极显著

从图 6 及表 3 中的相关数据可以看出，3 种薄板以及所有薄板中的 E_d 与 E_b 之间都在 0.01 水平上显著相关，显然薄型刨花板试件的悬臂振动动态弹性模量与 3 点弯曲弹性模量之间是高度相关的。说明利用悬臂振动原理测量薄型刨花板的弹性模量是可行的。

4 结论

对试验得到的数据进行分析可以看出：利用悬臂梁的自由振动和弯曲原理可以对薄型刨花板静态和动态弹性模量做出快速测量。

薄型刨花板悬臂静态弯曲弹性模量值要低于悬臂振动动态弹性模量值，且皆要高于 3 点弯曲弹性模量值；薄型刨花板的静态弯曲弹性模量与动态弹性模量平均比为 0.90~0.94。

3 种规格的薄型刨花板的悬臂振动动态弹性模量与悬臂静态弯曲弹性模量之间有显著的线性正相关性，且均在 0.01 水平上显著相关。3 种规格的薄型刨花板的悬臂振动动态弹性模量与 3 点弯曲弹性模量之间有显著的线性正相关性，且均在 0.01 水平上显著相关。

参考文献：

[1] 赵仁杰, 喻云水. 木质材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2003: 94 – 99.

[2] ROSS R J, BRASHAW B K, PELLERIN R F. Nondestructive evaluation of wood [J]. *For Prod J*, 1998, **48** (1): 14 – 19.

[3] MOSLEMI A A. Dynamic viscoelasticity in hardboard [J]. *For Prod J*, 1967, **17** (1): 25 – 33.

[4] ROSS R J, PELLERIN R F. *Nondestructive Testing for Assessing Wood Members in Structures: A Review (Gen Tech Pap FPL-GTR-70)* [R]. Madison: USDA Forest Products Laboratory, 1994.

[5] ROSS R J, GESKE E A, LARSON G L, et al. *Transverse Vibration Nondestructive Testing Using a Personal Computer (Res Pap FPL-RP-502)* [R]. Madison: USDA Forest Products Laboratory, 1991.

[6] SCHAD K C, KRETSCHMANN D E, MCDONALD K A, et al. *Stress Wave Techniques for Determining Quality of Dimensional Lumber from Switch Ties (Res Note FPL-RN-0265)* [R]. Madison: USDA Forest Products Laboratory, 1995.

[7] 张厚江, 申世杰, 崔英颖, 等. 振动方式测定木材弹性模量[J]. 北京林业大学学报, 2005, **27** (6): 91 – 94.
ZHANG Houjiang, SHEN Shijie, CUI Yingying, et al. Measuring elasticity modulus of wood using vibration method [J]. *J Beijing For Univ*, 2005, **27** (6): 91 – 94

[8] ROSS R J, ZERBE J I, WANG Xiping, et al. Stress wave nondestructive evaluation of Douglas-fir peeler cores [J]. *For Prod J*, 2005, **55** (3): 90 – 94.

[9] HARRIS C M. *Harris' Shock and Vibration Handbook* [M]. 5th ed. New York: McGraw Hill, 2002.

[10] American Society for Testing and Materials. *ASTM D1037–2006 Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials* [S]. Philadelphia: ASTM, 2006.