

文章编号: 1000-5692(2007)02-0125-05

龙竹和绿竹竹材壁厚度方向的梯度力学性能

嵇伟兵, 姚文斌, 马灵飞

(浙江林学院 工程学院, 浙江 临安 311300)

摘要: 为探究竹材壁厚度方向的梯度特性, 以产于云南的龙竹 *Dendrocalamus giganteus* 和产于浙江的绿竹 *Dendrocalamopsis oldhami* 为研究对象, 将它们沿竹壁厚度方向分为若干个轴单板层, 通过万能材料力学试验机测得竹材的表观弹性模量及2个轴单板层的弹性模量, 并用拉格朗日插值法推算出其余任意层的弹性模量。通过复合材料力学方法构建了竹材表观弹性模量和各个轴单板层弹性模量之间内在关系的力学模型; 由构建的力学模型推算得到的竹材表观弹性模量与试验机上测得的弹性模量基本吻合。图3表2参10

关键词: 林业工程; 竹材; 复合材料; 弹性模量; 拉格朗日插值法

中图分类号: S781.2 **文献标志码:** A

竹材是我国重要的速生可再生森林资源之一。与木材相比, 竹材具有强度高、弹性好和硬度大等优点^[1]。我国竹材加工利用始于20世纪80年代初。几十年来, 我国竹材工业已取得长足的发展, 竹材人造板从车厢底板和水泥模板两大系列产品发展到今天的车厢底板和水泥模板及竹材集成材和竹材地板三大系列产品, 特别是竹材集成材和竹材地板系列产品, 其生产技术先进, 生产工艺精良, 产品质量上乘, 堪称为竹材加工产品中的精品^[2]。竹材的加工利用日益完善, 且国内学者对于竹材的物理力学性质及竹木复合板已有相当多的研究, 并取得一定成果^[3-6]。笔者的研究视竹材为功能梯度材料(所谓功能梯度材料, 一般由2种或2种以上材料复合而成, 各组分材料的体积含量在空间位置上是连续变化的, 因而功能梯度材料的宏观材料特性表现出梯度的性质^[7]), 选用龙竹 *Dendrocalamus giganteus* 和绿竹 *Dendrocalamopsis oldhami* 为研究对象, 对竹青到竹黄的各轴单板层力学性能的梯度性质进行初步研究, 现报道如下。

1 实验材料和实验方法

1.1 实验材料

龙竹采自云南德宏, 竹径为15~16 cm, 取竹中部竹段。绿竹采自浙江温州, 竹径为8~9 cm, 取竹中部竹段, 气干后进行试验。绿竹平均气干密度为 $760 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 龙竹为 $780 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2 实验方法

1.2.1 试材制备及预处理 实验方法按《GB/T 15780—1995 竹材物理力学性质试验方法》^[8], 先将采

收稿日期: 2006-05-18; 修回日期: 2006-07-25

基金项目: 浙江省科学技术重大攻关项目(2004C12018)

作者简介: 嵇伟兵, 硕士, 从事木材科学与技术研究。E-mail: jweibing_810616@yahoo.com.cn. 通信作者: 马灵飞, 教授, 博士, 从事木材科学和木质复合材料研究。E-mail: malingfei@zjfc.edu.cn

集到的竹材样品(竹筒段)按相对称的4个方向分别劈制200 mm以上的无节竹条(每个方向各1条)。竹条宽度为15 mm,各取10根,用于抗弯弹性模量(MOE)的测定。试样制成后进行气干,最终的气干密度绿竹为 $760 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,龙竹为 $780 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

1.2.2 竹材抗弯弹性模量的测定 竹材抗弯弹性模量指试样在受力弯曲(采用弦向加荷)时,在竹材弹性变形范围内,载荷与变形之间的关系,按下式计算:

$$E = \frac{\Delta P L^3}{4 \Delta Y b h^3}$$

其中: E 为弹性模量,MPa; ΔP 为上、下限载荷差值,N; ΔY 为上、下限载荷变形值,mm; b 为试件宽度(竹壁厚),mm; h 为试件厚度,mm; L 为跨距,mm。

分别按上述方法测得龙竹和绿竹竹材的表观弹性模量后,各取5根在压刨床上刨去靠竹青部分,制取厚度约1.5 mm的靠竹黄部分试件;然后其他5根刨去靠竹黄部分,制取厚度约1.5 mm的靠竹青部分试件,测其抗弯弹性模量。即测得图1中轴单板层1(靠竹青部分)和轴单板层2(靠竹黄部分)的弹性模量后,通过拉格朗日插值法推算其任意层 r 的弹性模量。

1.2.3 拉格朗日插值法^[9] 构造 n 次多项式:

$$p_n(x) = \sum_{k=0}^n y_k l_k(x) = y_0 l_0(x) + y_1 l_1(x) + \dots + y_n l_n(x)$$

这是不超过 n 次的多项式。其中基函数:

$$l_k(x) = \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\dots(x-x_n)}{(x_k-x_0)(x_k-x_1)\dots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\dots(x_k-x_n)}, (k=0,1,2,\dots,n)$$

基函数 $l_k(x)$ 满足 $l_k(x_i) = \begin{cases} 1 & i=k \\ 0 & i \neq k \end{cases}$ 。 $f(x) \approx p_n(x)$ 。

截断误差为:

$$R_n(x) = f(x) - p_n(x) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \omega_{(n+1)}(x)$$

其中 $\xi \in (a, b)$,且依赖于 x 。

$$\omega_{(n+1)}(x) = (x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)$$

当 $n=1$ 时,插值节点2个 x_k, x_{k+1} 线性插值。

$$p_1(x) = y_k l_k(x) + y_{k+1} l_{k+1}(x)$$

其中基函数为:

$$l_k(x) = \frac{x-x_{k+1}}{x_k-x_{k+1}}, \quad l_{k+1}(x) = \frac{x-x_k}{x_{k+1}-x_k}$$

插值余项:

$$R_1 = f(x) - p_1(x) = \frac{1}{2} f''(\xi) \omega_2(x) = \frac{1}{2} f''(\xi) (x-x_k)(x-x_{k+1});$$

$$\xi \in (x_k, x_{k+1})$$

2 试验结果与分析

2.1 龙竹和绿竹的物理力学性能

实测数据按照国家标准所规定的方法进行统计和处理,龙竹和绿竹的物理力学性能的试验结果见表1。

由表1可知,绿竹的表观弹性模量比龙竹的大,且靠竹青部分的弹性模量均比靠竹黄部分的弹性模量大得多。

2.2 龙竹和绿竹的任意轴单板层 r 的物理力学性能

将1.2.3中的拉格朗日线性插值法运用到竹材力学性能的复合材料特性研究上来,将竹材试件沿壁厚方向分为若干层,并构建数学模型如下:

表 1 龙竹和绿竹竹材的物理力学性能

Table 1 Physico-mechanical properties of *Dendrocalamus giganteus* wood and *Dendrocalamus oldhami* wood

竹材	试样	竹壁厚/mm	弹性模量			试件数
			平均值/GPa	标准差/GPa	变异系数/%	
龙竹	表观	6.74	17.125	0.824	4.811	10
	轴单板层 1	1.35	22.413	0.725	3.235	5
	轴单板层 2	1.25	12.255	0.386	3.148	5
绿竹	表观	8.36	18.250	0.447	2.452	10
	轴单板层 1	1.40	25.988	1.106	4.256	5
	轴单板层 2	1.35	11.398	0.215	1.886	5

$$E_r = E_1 \times \frac{X_r - X_n}{X_1 - X_n} + E_n \times \frac{X_r - X_1}{X_n - X_1}$$

其中, E_1, E_n, E_r 分别为轴单板层 1, 轴单板层 n 及任意层 r 的抗弯弹性模量, GPa; X_1, X_n, X_r 分别为轴单板层 1, 轴单板层 n 及任意层 r 沿厚度方向中点的坐标, 如图 1 所示。

将龙竹和绿竹均分为 6 个轴单板层, 在测得轴单板层 1 和轴单板层 n 的基础上, 根据拉格朗日插值法推算出其中间 4 层的弹性模量。龙竹和绿竹各轴单板层的厚度和弹性模量如图 2 和图 3 所示。

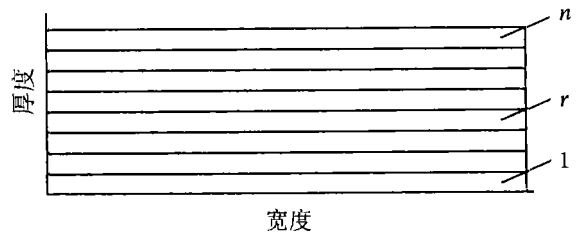


图 1 竹材试样

Figure 1 Bamboo specimen

图 2 表明, 龙竹中间 2 层的壁厚较薄, 这是由于龙竹的壁厚相对较薄, 加之刨床精度有限所引起的。从图 3 可以看出, 龙竹和绿竹各轴单板层的弹性模量均从竹青到竹黄逐渐减小, 显现出功能梯度材料的特性。

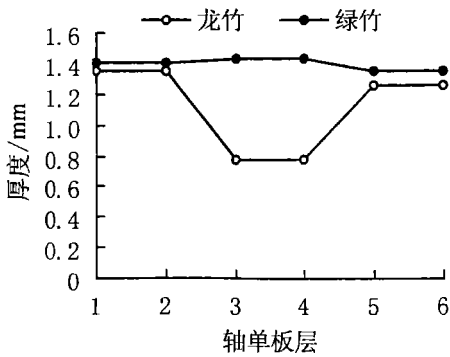


图 2 竹材各轴单板层厚度

Figure 2 Thickness of axis veneers of bamboo

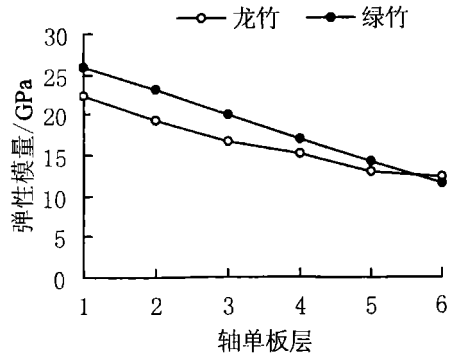


图 3 竹材各轴单板层弹性模量

Figure 3 MOE of axis veneers of bamboo

2.3 用材料力学方法分析竹材表观弹性模量和各轴单板层弹性模量之关系

在材料力学方法中, 假设各层承受着同一个横向应力 $\sigma^{[10]}$ 。因此各层的应变为:

$$\epsilon_1 = \frac{\sigma}{E_1}, \epsilon_2 = \frac{\sigma}{E_2}, \dots, \epsilon_n = \frac{\sigma}{E_n} \quad (1)$$

ϵ_1 作用的横向尺寸近似平均值为 $\frac{A_1}{A}W$, ϵ_2 作用的横向尺寸近似平均值为 $\frac{A_2}{A}W$, ..., ϵ_n 作用的横向尺寸近似平均值为 $\frac{A_n}{A}W$ 。

$$\epsilon_1 = \frac{\Delta h_1}{h_1} = \frac{\Delta A_1}{A_1}, \epsilon_2 = \frac{\Delta h_2}{h_2} = \frac{\Delta A_2}{A_2}, \dots, \epsilon_n = \frac{\Delta h_n}{h_n} = \frac{\Delta A_n}{A_n}$$

总的横向变形:

$$\Delta h = \Delta h_1 + \Delta h_2 + \dots + \Delta h_n.$$

因为竹材试件各层宽度相同, 故:

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \dots + \Delta A_n = A_1 \epsilon_1 + A_2 \epsilon_2 + \dots + A_n \epsilon_n.$$

$$\epsilon = \frac{\Delta A}{A} = \frac{A_1}{A} \epsilon_1 + \frac{A_2}{A} \epsilon_2 + \dots + \frac{A_n}{A} \epsilon_n. \quad (2)$$

将式(1)式代入式(2)式后, 它成为:

$$\epsilon = \frac{A_1 \sigma}{AE_1} + \frac{A_2 \sigma}{AE_2} + \dots + \frac{A_n \sigma}{AE_n};$$

$$\sigma = E_w \epsilon = E_w \left[\frac{A_1 \sigma}{AE_1} + \frac{A_2 \sigma}{AE_2} + \dots + \frac{A_n \sigma}{AE_n} \right].$$

两边约去 σ , 得:

$$1 = E_w \left[\frac{A_1}{AE_1} + \frac{A_2}{AE_2} + \dots + \frac{A_n}{AE_n} \right];$$

$$E_w = 1 / \left[\frac{A_1}{AE_1} + \frac{A_2}{AE_2} + \dots + \frac{A_n}{AE_n} \right].$$

其中: $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_n$ 为竹材各轴单板层应变, ϵ 为总应变; E_1, E_2, \dots, E_n 为竹材各轴单板层弹性模量, E_w 为表观弹性模量; A_1, A_2, \dots, A_n 为竹材各轴单板层横截面积, A 为总的横截面积; h_1, h_2, \dots, h_n 为竹材各轴单板层厚度, W 为总厚度。

由上述材料力学方法和实验方法所得的龙竹和绿竹竹材的表观弹性模量如表 2 所示。

由表 2 可知, 万能试验机测得的竹材的表观弹性模量比材料力学方法得到的表观弹性模量略大, 差异相对值均在 5% 左右, 表明用材料力学方法所构建的数学模型基本正确。

表 2 不同方法得到的竹材表观弹性模量

试样	表观弹性模量 /GPa		差异相对值 /%
	材料力学方法	实验方法	
龙竹	15.887	17.125	7.51
绿竹	17.317	18.250	5.25

3 结论

针对竹材为功能梯度复合材料特

性, 构建了拉各朗日线性插值模型, 即 $E_r = E_1 \times \frac{X_r - X_n}{X_1 - X_n} + E_n \times \frac{X_r - X_1}{X_n - X_1}$; 同时, 通过复合材料力学方法构建了竹材表观弹性模量和各轴单板层弹性模量之间内在关系的力学模型, 即 $E_w = 1 / \left[\frac{A_1}{AE_1} + \frac{A_2}{AE_2} + \dots + \frac{A_n}{AE_n} \right]$ 。

由实验方法测得任意 2 个或 2 个以上轴单板层的弹性模量后, 通过构建的拉各朗日线性插值模型推算出任意轴单板层的弹性模量, 结果表明竹材各轴单板层的弹性模量均从竹青到竹黄逐渐减小, 显现出功能梯度材料的特性。

通过构建的力学模型得到的竹材表观弹性模量与万能试验机上测得的静弹性模量值基本吻合, 龙竹和绿竹的差异相对值均在 5% 左右。

致谢: 在实验过程中, 俞友明博士曾给予帮助; 在成文过程中, 钱俊教授提出了许多有益的建议, 谨致谢忱。

参考文献:

- [1] 王正, 郭文静. 丛生竹物理力学性能及其对制造竹建筑材料的影响[J]. 世界竹藤通讯, 2003, 1(1): 25-28.
- [2] 张齐生. 我国竹材加工利用要重视科学和创新[J]. 浙江林学院学报, 2003, 20(1): 1-4.
- [3] 马灵飞, 韩红, 马乃训. 部分散生竹纤维形态及主要理化性能[J]. 浙江林学院学报, 1993, 10(4): 361-367.

- [4] 马灵飞, 韩红, 马乃训, 等. 丛生竹材纤维形态及主要理化性能[J]. 浙江林学院学报, 1994, 11(3): 274-280.
- [5] 俞友明, 方伟, 杨云芳, 等. 不同立地条件红壳竹竹材物理力学性质的比较[J]. 浙江林学院学报, 2001, 18(4): 380-383.
- [6] 张晓冬, 李君, 王泉中, 等. 木竹复合层合板力学性能预测与分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2005, 29(6): 103-105.
- [7] 王保林, 韩杰才, 张幸红. 非均匀材料力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 15780-1995 竹材物理力学性质试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [9] 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1994.
- [10] 琼斯 R.M. 复合材料力学[M]. 朱颐龄, 陈名甫, 沈燮昌, 译. 上海: 上海科学技术出版社, 1981.

Analysis on gradual mechanical properties by the depth of bamboo wall of *Dendrocalamus giganteus* and *Dendrocalamopsis oldhami*

Ji Wei-bing, YAO Wen-bin, MA Ling-fei

(School of Engineering, Zhejiang Forestry College, Lin'an 311300, Zhejiang, China)

Abstract: To analyze the characteristic of bamboo as composite material, taking *Dendrocalamus giganteus* and *Dendrocalamopsis oldhami* as specimen considered that bamboo wood was composed of several axis veneers along the thickness. The modulus of elasticity (MOE) of integrative bamboo and two axis veneers was tested by the apparatus of omnipotence test-bed while the MOE of the other veneers was evaluated by Lagrange interpolation. The results were as follows: A mechanical model of MOE between integrative bamboo and axis veneers was developed. Besides, the MOE of integrative bamboo acquired from the model above and tested by the apparatus of omnipotence test-bed was almost uniform. [Ch, 3 fig. 2 tab. 10 ref.]

Key words: forest engineering; bamboo wood; composite material; modulus of elasticity; Lagrange interpolation

浙江省木材工程技术研究中心与浙江丽人集团 共建科技研发中心

2006年11月10日上午,浙江省木材工程技术研究中心与浙江丽人集团共建省级科技研发中心签字仪式在丽水举行。浙江林学院院长张齐生院士、副院长鲍滨福教授率浙江林学院木材学科的有关专家出席了仪式,丽水市副市长肖建中、浙江丽人集团董事长徐梦璋以及丽水市政府、林业局、科技局、经贸委有关负责人出席了仪式。

签字仪式上,张齐生院士介绍了浙江林学院的科研创新、人才培养等方面的情况,并针对研发中心的成立发表讲话。张齐生表示,该研发中心的建立,将有效地发挥双方的人才资源、技术和设备优势,形成高校、企业研发机构的产学研联盟,改善科技创新条件,共享科技人才,共攻创新项目,形成科技研发、转化和推广一体化的创新基地,促进浙江丽人集团更大的发展,为中、高密度纤维板整个产业的提升服务。

丽水市副市长肖建中对浙江丽人科技研发中心的成立表示祝贺。他高度肯定双方长期以来相互支持、密切合作所取得的可喜成绩,对浙江林学院利用人才和科研优势,积极服务丽水地方建设表示感谢。

鲍滨福、徐梦璋分别代表浙江省木材工程技术研究中心和浙江丽人集团在共建浙江丽人科技研发中心协议书上签字。签约仪式后,专家组一行在丽水市副市长肖建中的陪同下,深入到浙江丽人集团生产车间以及有关单位进行现场指导。