第 42 卷 第 3 期
2006 年 3 月

林 业 科 学
SCIENTIA SILVAE SINICAE

Vol. 42, No. 3
Mar., 2006

毛竹顺纹抗拉性质的变异及与气干密度的关系*

虞华强[1] 费本华[1] 任海青[1] 江泽慧[1] 刘杏娥[2]

(1.中国林业科学研究院木材工业研究所 北京 100091 2.安徽农业大学森林利用学院 合肥 230036)

摘 要: 将毛竹轴向分段(4 段)、径向分层(6 层)取样,研究其顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度的变异规律,顺纹抗拉性质与气干密度之间的关系。结果表明:毛竹的顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度的径向变异很大,不同位置竹材的顺纹抗拉弹性模量为 8.49 ~ 32.49 GPa,最外层竹材的顺纹抗拉弹性模量约是最内层的 3 ~ 4 倍;不同位置顺竹材顺纹抗强度在 115.94 ~ 328.15 MPa 之间,最外层竹材的顺纹抗强度是最内层的 2 ~ 3 倍。用直线方程预测毛竹顺纹抗拉性质的效果略优于曲线方程的效果。

关键词: 毛竹; 气干密度; 顺纹抗拉弹性模量; 顺纹抗拉强度

中图分类号:S781.29 文献标识码:A 文章编号:1001 - 7488(2006)03 - 0072 - 05

Variation in Tensile Properties and Relationship between Tensile Properties and Air-Dried Density for Moso Bamboo

Yu Huaqiang[1] Fei Benhua[1] Ren Haiqing[1] Jiang Zehui[1] Liu Xing'e[2]

(1. *Research Institute of Wood Industry, CAF Beijing* 100091;
2. *Forest Utilization College, Anhui Agricaltural University Hefei* 230036)

Abstract: The longitudinal tensile strength and the longitudinal tensile modulus of elasticity were investigated for moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) at different heights and radial positions. Results showed that the variation of the longitudinal tensile properties in the radial direction was greater than that in the longitudinal direction. The longitudinal tensile modules of elasticity ranged from 8.49 to 32.49 GPa. The tensile module of elasticity in outer culm was about 3 to 4 times as high as that in inner culm. The longitudinal tensile strength ranged from 115.94 to 328.15 MPa. The tensile strength in the outer is 2 to 3 times as high as that in the inner. Linear and curvilinear regressions were done from tested data of tensile strength and modulus and air-dried density in this paper. The linear equation worked a little better than the curvilinear one to predict the longitudinal tensile strength and tensile modulus from air-dried density.

Key words: moso bamboo(*Phyllostachys pubescens*); air-dried density; tensile modulus of elasticity; tensile strength

竹材学者对毛竹(*Phyllostachys pubescens*)的顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度的变异已经有较多的研究。冼杏娟等(1995)研究了竹壁内、中、外不同部位材料的顺纹抗拉强度和顺纹抗拉弹性模量,并得到了毛竹的位置参数与顺纹抗拉弹性模量之间关系的经验方程。叶民权(1995)将毛竹壁分成内、中、外 3 部分,测定了各部分竹材和维管束的顺纹抗拉强度、维管束的数量和面积百分数,并得到了竹壁外、中、内竹材的顺纹抗拉强度与维管束面积百分率之间关系的经验公式。杨云芳等(1996)等将毛竹材视为维管束增强的单向复合材料,研究了竹材维管束和薄壁细胞含量沿竹壁厚度和竹竿高度的变异,并从理论上预测了其维管束和薄壁细胞的顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度。王朝晖(2001)研究了带竹青、竹黄的竹条顺纹抗拉强度的变异性,并分析了密度与其顺纹抗拉强度的关系。上述研究在取样时大多未将竹壁分层,或仅将竹壁分成 3 层,由于沿竹壁的径向竹材结构和性质是逐渐变化的,因此由这种试样测试得到的竹材性质将很难全面地反映其径向的变异规律。

木材的密度与其力学性质之间的关系是木材科学研究中的一项重要内容。研究证明木材的密度与其力学性质具较强的相关性,Newlin 等(1919)利用方程 $S = \alpha \cdot G^{\beta}$(方程中 S 代表某种力学性质、G 为密度、α、β 为常数)描述木材密度与力学性质之间关系;Armstrong 等(1984)、Walton 等(1986)利用大量树种的数据验证了

收稿日期:2004 - 07 - 06。

基金项目:国家"十五"科技攻关计划"竹藤资源培育及高效利用产业化技术研究与示范"项目(2001BA506B);国家林业局"948"项目"特有竹类植物种质资源引进"(2001 - 19)。

* 任海青为通讯作者。在试验中得到王朝晖、周海宾等博士的大力支持,在论文修改中得到鲍甫成、姜笑梅、王正研究员和日本专家 Canacai 先生等的指正,在此表示感谢。

此方程。然而在同种木材之内,人们普遍认为木材的力学特点与其密度呈线性关系(Liska, 1965; Forest Products Laboratory,1987; Zhang,1996),多年来这种线性方程也已经得到了广泛的应用。我国学者曾系统研究了木材的顺纹抗拉强度与密度之间的关系(成俊卿,1985),对竹材的力学性质与密度的关系只有少量研究,而对竹材分层后各层的力学性质与密度的关系的研究在国内尚未见报道。

本文将毛竹从高度方向上分 4 段、径向分为 6 层,系统测试分析不同部位竹材的顺纹抗拉弹性模量、顺纹抗拉强度及其气干密度,研究其顺纹抗拉性质的变异性、探讨其顺纹抗拉性质与气干密度之间的关系。本研究的目的在于深入探讨毛竹顺纹抗拉性质在竹材内的变异性,研究分层竹材的顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度与密度之间的关系。

1　材料与方法

1.1　材料

毛竹试材采自于浙江省新昌县小将镇山地的阴坡(海拔约 750 m)。取 4 ~ 6 年生中等径级的毛竹 10 株,胸高直径 7 ~ 9 cm,竹秆高度 5 ~ 6.5 m。将竹秆截成 1.33 m 长的 4 段,从下向上依次编号 A、B、C、D。从南北 2 个方向各取宽约 15 mm 的竹条一根,去掉竹青和竹黄部分,旋向劈成 6 层篾片,从内向外依次编号 1、2、3、4、5、6。运回气干后,用游标卡尺测量不同部位竹篾厚度(每段中间部位),得到平均值,结果见表 1。然后用砂光机(砂纸:100 目)砂平表面,得到厚度为(0.8 ±0.1) mm 的薄竹片。从每片竹片的中部节间部分制作顺纹抗拉试样(同时利用该试样测量气干密度)。由于最内层毛竹竹节部位材质脆软,在砂平竹篾表面时大多在竹节部位折断,获得的内层竹材试样不够充分,因此对内层(第 1 层)竹材的顺纹抗拉弹性模量和强度的测试在高度上没有区分。分段及分层取样方法如图 1、2。

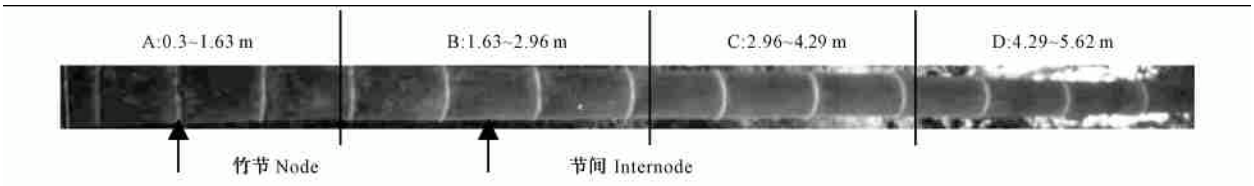


图 1　毛竹分段取样

Fig. 1　Sampling from moso bamboo culm in longitudinal direction

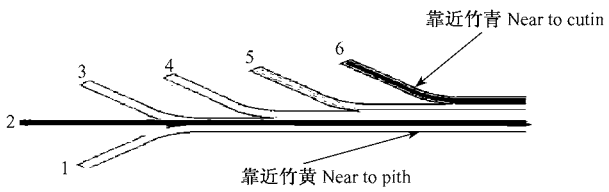


图 2　沿竹壁厚度方向分层取样

Fig. 2　Sampling from moso bamboo culm in radial direction

表 1　不同部位竹篾厚度的平均值

Tab. 1　Mean thickness of moso bamboo strips for specimens at different positions　　mm

位置 Position	1	2	3	4	5	6
A	2.34	2.3	1.78	1.55	1.73	0.94
B	1.90	2.00	1.49	1.34	1.33	0.95
C	1.77	1.74	1.40	1.32	1.22	0.94
D	1.53	1.48	1.30	1.31	1.22	0.95

1.2　密度、顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度的测定方法

试样设计:分层后的竹片薄,在本研究中参照高分子材料拉伸试样制作的原则(许凤和,1987)并结合毛竹的特点,设计顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度试样。顺纹抗拉弹性模量测试采用直条形试样,如图 3。顺纹抗拉强度试样是用弹性模量测试后的试样重新加工而成:哑铃形,圆弧过渡半径 75 mm,工作部分 50 mm(试验表明试样在强度试验中大部分的断裂都在有效部位),如图 4 所示。

测试步骤:在 20 ℃、65 %相对湿度下将试样调到平衡之后,测量顺纹抗拉弹性模量。测量完毕之后,小心刮去顺纹抗拉直条试样上的应变片后,立即称量气干质量,利用排水法测量试样体积,利用这些数据即可求得气干密度。此后,将直条试样进一步加工成为哑铃形顺纹抗拉强度试样,继续在 20 ℃与 65 %相对湿度条件下调湿并到达平衡后,进行顺纹抗拉强度测试。由于顺纹抗拉强度试样薄、长度短,在破坏之后薄片裂开、纤维拔出,使得在破坏后的顺纹抗拉试样上难以制作密度试样。因此选择在顺纹抗拉破坏之前测量试样密度。

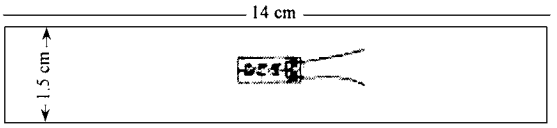


图 3 毛竹的顺纹抗拉弹性模量直条试样示意图

Fig. 3 Specimen from moso bamboo for tensile modulus of elasticity

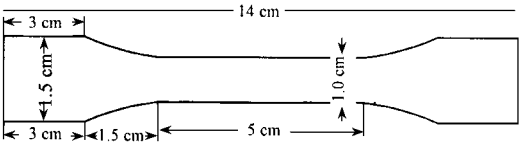


图 4 毛竹的顺纹抗拉强度哑铃形试样示意图

Fig. 4 Specimen from moso bamboo for tensile strength

测量和计算方法:测量试样中间部位的宽度、厚度和长度,精确到 0.02 mm。顺纹抗拉试验在日本产 NMB 力学试验机上进行,应变测定采用电阻应变法,选用河北省邢台市科华电阻应变计厂生产的[栅长为 10 mm,宽度为 3 mm,电阻值(119 ±0.2) Ω,灵敏系数为(2.06 ±0.8) %]纸基应变计。顺纹抗拉弹性模量测定试验加载速度为 0.5 mm·min^{-1}。计算公式:

$$E = \Delta P \Delta \varepsilon / bt \tag{1}$$

式中:E 为顺纹抗拉弹性模量,GPa;ΔP 为在比例极限之内的载荷增量,kN;$\Delta \varepsilon$ 为与 ΔP 对应的应变增量,无量纲;t 为试样厚度,mm;b 为试样宽度,mm。

顺纹抗拉强度试验加载速度为 3 mm·min^{-1},试样在(1 ±0.5) min 内被破坏,记录破坏荷载,断裂在无效部位的数据剔除。计算公式:

$$\sigma_t = P_{max} / tb \tag{2}$$

式中:σ_t 为顺纹抗拉强度,MPa;P_{max} 为最大荷载,N;t 为试样厚度,mm;b 为试样宽度,mm。

1.3 回归分析

调用 SPSS 统计软件中的曲线拟合功能,利用直线($S = a + bG$)(式中 G 是密度,a、b 为常数)和曲线($S = a \cdot G^{\beta}$) 2 种函数,以竹材的密度为自变量,分别对顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度进行回归分析。对回归方程进行方差分析检验和回归系数的显著性检验,并列出确定系数,根据判定系数 R^2 判定回归效果的优劣。

2 结果与讨论

2.1 顺纹抗拉性质的变异

2.1.1 顺纹抗拉弹性模量 测试顺纹抗拉强度时试样含水率平均值为 10.2 %,实验室温度 20 ℃。节间部分毛竹竹材的顺纹抗拉弹性模量的均值见图 5,从图 5 可以看出:从外向内、从上向下顺纹抗弹性模量均有逐渐减小的趋势,而且从外向内的变化(径向变异)远远大于从上向下的变化(轴向变异)。从外向内变异很大,不同位置竹材的顺纹抗拉弹性模量在 8.49 ~ 32.49 GPa 之间,最外层的顺纹抗拉弹性模量是最内层的 3 ~ 4 倍。如:B 段最内层毛竹的顺纹抗拉弹性模量均值为 8.49 GPa,最外层毛竹竹材顺纹抗拉弹性模量均值为 31.28 GPa,最外层是最内层的 3.7 倍。

冼杏娟等(1995)将毛竹分成 3 ~ 7 层,测得其外层的抗拉弹性模量 18.1 GPa,内层为 4.6 GPa,而本文中内外层竹材的顺纹抗弹性模量测定值均比冼杏娟等测定的高。引起其差异的原因可能主要有以下几点:1)采集地、竹材年龄的差异会引起其材性的不同(冼杏娟文中未对试样的年龄和采集地点作详细说明);2)纤维厚壁细胞沿轴向排列整齐,对竹材的力学性能贡献最大,使竹材具有高的强度和刚度。竹纤维含量自内层(竹黄)至表皮(竹青)沿径向逐渐增大,竹材的强度和弹性模量也逐渐增大。由于竹材的非均质特性,因此制样方式的差异也将引起测量结果的差异。

2.1.2 顺纹抗拉强度 节间部分毛竹材的顺纹抗拉强度的均值见图 6。不同位置竹材顺纹抗强度在 115.94 ~ 328.15 MPa 之间,从外向内毛竹顺纹抗拉强度有逐渐减小的趋势,纵向从下向上强度有逐渐增加的趋势。径向变异远远大于轴向变异,同一高度处最外层竹材的顺纹抗拉强度是最内层竹材的 2 ~ 3 倍。

本研究关于毛竹顺纹抗拉性质的变异趋势与冼杏娟等(1995)关于毛竹顺纹抗拉性质研究结果一致,即沿壁厚径向外层的强度模量最高,内层最低。但是,不同部位竹材顺纹抗拉弹性模量和抗拉强度的测定值及其变异幅度,本研究与冼杏娟等(1995)的结果间有一定的差异。冼杏娟测得的毛竹外层的拉伸强度 339 MPa 约是内层(70.4 MPa)的 5 倍,本文中最外层竹材的顺纹抗拉强度是最内层竹材的 2 ~ 3 倍。同样,这种差异

可能是由采集地、年龄和制样方式的差异引起的。

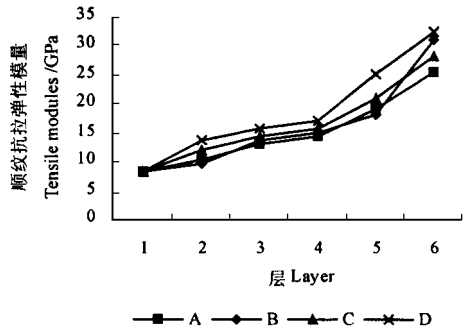


图 5　不同部位毛竹顺纹抗拉弹性模量的平均值

Fig. 5　Mean of the longitudinal tensile modules of elasticity for moso bamboo at different positions

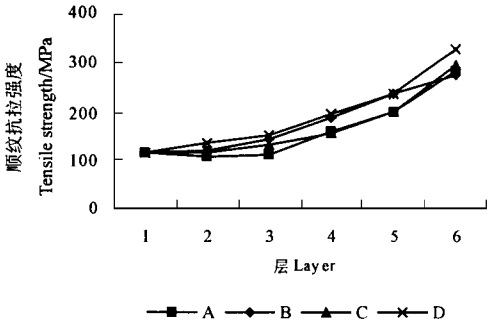


图 6　不同部位毛竹顺纹抗拉强度的平均值

Fig. 6　Mean of the longitudinal tensile strength for moso bamboo at different positions

2.1.3　顺纹抗拉性质与气干密度之间的关系　通过回归分析分别得到了气干密度与顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度之间关系的回归方程,结果见表 2。对于表 2 中 4 个回归方程,方差分析、回归系数检验结果都显示高度显著的相关性。因此,4 个回归方程中的回归系数都具有显著性意义,这样用直线和曲线方程来表示气干密度与竹材的顺纹抗拉弹性模量和强度之间的关系均具有意义。

表 2　气干密度与不同部位竹材的顺纹抗拉性质关系的拟合方程和判定系数

Tab. 2　Regression equation for the relationship between tensile properties and air-dried density and coefficient of determination

因变量 Dependent	方程类型 Equation type	判定系数 Determination coefficient R^2/ %	回归方程 Regression equation
顺纹抗拉弹性模量 Tensile modulus of elasticity parallel to grain/ GPa	直线 Linear	798	$y = 41.956\,x - 18.431$
	曲线 Curvilinear	777	$y = 23.430\,9\,x^{2.121\,1}$
顺纹抗拉强度 Tensile strength parallel to grain/ MPa	直线 Linear	643	$y = 334.941\,x - 93.847$
	曲线 Curvilinear	605	$y = 233.929\,x^{1.505\,2}$

另外,判定系数 R^2 体现了回归模型所能解释的因变量变异性的百分比。用直线和曲线方程 2 种模型分别进行顺纹抗拉弹性模量、顺纹抗拉强度与气干密度之间关系的回归拟合,直线模型比曲线模型的 R^2 都略高,见表 2。这表明通过气干密度预测顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度,利用直线方程更为适当,本结论与木材密度与力学性质关系研究的已有结果一致(Liska,1965;Forest Products Laboratory,1987;Zhang,1996)。气干密度与顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度关系的散点图(包括线性回归方程以及相应的趋势线)分别见图 7、8。

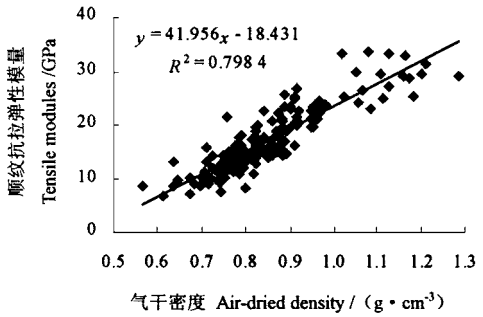


图 7　气干密度 - 顺纹抗拉弹性模量散点图

Fig. 7　The diagram of air-dried density versus the longitudial tensile modulus of elasticity

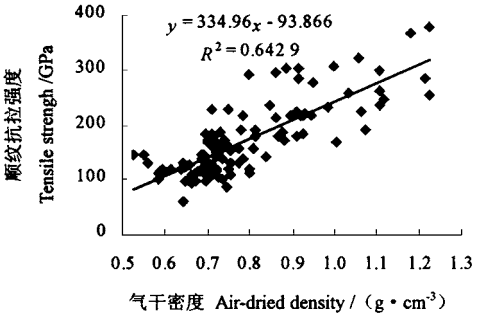


图 8　气干密度 - 顺纹抗拉强度散点图

Fig. 8　The diagram of air-dried density to the longitudial tensile strength

3 结论

1) 毛竹的顺纹抗拉弹性模量和顺纹抗拉强度的径向变异很大,不同位置竹材的顺纹抗拉弹性模量在 8.49 ~ 32.49 GPa 之间,最外层竹材的顺纹抗拉弹性模量约是最内层的 3 ~ 4 倍。不同位置顺竹材顺纹抗强度在 115.94 ~ 328.15 MPa 之间,最外层竹材的顺纹抗强度是最内层的 2 ~ 3 倍。

2) 用直线方程预测毛竹顺纹抗拉性质的效果略优于曲线方程的效果,预测弹性模量和顺纹抗拉强度的 2 个直线方程分别为: $y = 41.956x - 18.431$, $y = 334.941x - 93.847$。

参 考 文 献

成俊卿.1985.木材学.北京:中国林业出版社

王朝晖. 2001. 竹材材性变异规律与加工利用研究.北京:中国林业科学研究院博士学位论文

冼杏娟,冼定国,叶颖薇. 1995. 竹纤维增强树脂复合材料及其微观形貌.北京:科学出版社

许凤和. 1987. 高分子材料力学试验.北京:科学出版社

杨云芳,刘志坤. 1996. 毛竹材顺纹抗拉弹性模量及顺纹抗拉强度.浙江林学院学报,13(1):21 - 27

叶民权.1995.竹维管束抗张强度之评估.中华林业季刊,9(1):129 - 137

Armstrong J P,Skaar C,Zeeuwde C.1984. The effect of specific gravity on some mechanical properties of some world woods. Wood Sci Technol,18:137 - 146

Forest Products Laboratory.1987. Wood handbook: wood as an engineering material. USDA Forest Service, Washington, DC

Liska J A.1965. Research progress on the relationships between density and strength. USDA Forest Service, Forest Prod Lab, Madison, WI,89 - 97

Newlin J A, Wilson T R C. 1919. The relation of the shrinkage and strength properties of wood to its specific gravity. USDA Forest Service. Forest Prod Lab, Madison, WI

Walton D R, Armstrong J P.1986. Taxonomic and gross anatomic influences on specific gravity- mechanical property relationships. Wood Fiber Sci,18(3):413 - 420

Zhang S Y.1996. Wood Specific gravity- mechanical property relationship at species level. Wood Sci Technol,31:181 - 191

(责任编辑 石红青)