

毛竹纵向力学性质的梯度变化及断口特征

黄艳辉¹, 费本华¹, 余雁¹, 赵荣军²

(1 国际竹藤网络中心, 北京 100102; 2 中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091)

[摘要] **【目的】**研究气干竹材的力学特性, 为竹材的加工利用提供参考。**【方法】**使用配备高精度光学引伸计的 Instron 力学实验机, 对毛竹从竹青到竹黄的纵向力学性质进行了精确测定。**【结果】**毛竹竹壁径向不同位置的力学性质差异很大, 近竹青处的平均纵向弹性模量和抗拉强度分别达到 25.41 GPa 和 297.21 MPa, 远远高于近竹黄处的 5.78 GPa 和 65.80 MPa, 且从竹青到竹黄呈明显的梯度降低趋势。毛竹薄片的断裂为脆性断裂, 近竹青处为顺纹理的纵向劈裂, 竹中处呈现参差不齐的劈裂特征, 近竹黄处为平整的横向断裂。**【结论】**竹材为天然高分子复合材料, 其独特的力学特性源于自身组织含量的梯度性变化。

[关键词] 毛竹; 抗拉强度; 弹性模量; 力学性能; 断口特性

[中图分类号] S781.2; S795.08

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2011)06-0217-06

Gradient variation of longitudinal mechanical properties and fracture characteristic of Moso bamboo

HUANG Yan-hui¹, FEI Ben-hua¹, YU Yan¹, ZHAO Rong-jun²

(1 International Center for Bamboo and Rattan, Beijing 100102, China;

2 Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: **【Objective】**The research was done for better understanding of the mechanical properties of bamboo in air-dry condition. **【Method】**The longitudinal mechanical properties of Moso bamboo were investigated accurately by Instron tester equipped with advanced video extensometer. **【Result】**From outer to inner parts of bamboo culm, the values of average longitudinal elastic modulus and tensile strength reduced rapidly from 25.41 GPa and 297.21 MPa to 5.78 GPa and 65.80 MPa respectively, which presented a gradient-decreasing tendency. The fracture of Moso bamboo thin slice was brittle. However, the fracture appearance was disparate. In the outer part, it split along the longitudinal direction. In the middle part, it split and jagged. In the inner part, it presented very even transverse fracture. **【Conclusion】**Bamboo is natural polymer composites with distinct mechanical properties derived from its gradient design of content of different tissues.

Key words: Moso bamboo; tensile strength; elastic modulus; mechanical properties; fracture characteristic

竹材是天然的生物高分子复合材料, 可再生能力强, 力学性能优异, 是工程结构材料的优良原料, 被广泛用于建筑、家具、室内装饰、汽车、运输等领

域^[1]。竹材的力学性质有较大的分散性, 从竹青到竹黄力学性质有明显差异^[2-4], 对生产加工和实际应用造成很大影响。但由于无可依据的测试标准, 以

* [收稿日期] 2010-11-10

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(30730076)

[作者简介] 黄艳辉(1982—), 女, 河南洛阳人, 博士后, 主要从事木材微观力学研究。E-mail: huangyanhuizhou@163.com

[通信作者] 费本华(1964—), 男, 安徽六安人, 研究员, 博士生导师, 主要从事木材力学与木结构研究。

E-mail: feibenhua@icbr.ac.cn

及受加工设备和测试手段的限制,现阶段有关竹材从竹青到竹黄的非标准试样的力学性质研究尚比较少^[2-6],且大多研究者所采用的试样为手工劈制,这势必会使试验结果出现一定的误差。另外,有关竹材非标准试样断裂的研究也相当有限。为此,本试验精确锯制毛竹竹壁的宏观薄片,采用配备高精度光学引伸计的电子万能力学实验机,系统研究竹青、竹中、竹黄的纵向力学性质,并对其断裂特性进行分析,以期为竹材的加工应用提供参考。

1 材料与方法

供试毛竹竹材采自浙江省富阳市庙山坞林场。选 3~6 年竹龄的气干毛竹,在 2 m 高处竹节的中间部位锯取高(L)160 mm 竹筒,沿竹筒纵向劈制长 160 mm、宽(T)10 mm 的竹棍,刨去竹青后,将竹棍用特殊模具铣成如图 1 所示的中间平直、两端圆弧过渡的哑铃形结构,中间平直段长 40 mm,最后沿试样径向向内(竹黄)连续锯取厚约(R)1.5 mm 的薄片。每根竹棍取薄片 3 片左右,共得 51 片(3 年竹龄的 21 片,4 年竹龄的 5 片,6 年竹龄的 25 片)。将薄片两端用较硬的木材进行加强,加强片的尺寸为 40 mm×10 mm×1 mm,将其用环氧树脂胶粘于薄片两端(图 1),在实验室环境中压紧固化 3 h 以上。

试验仪器为配备高精度光学引伸计的 Instron 5582 万能力学实验机(美国)。拉伸测试前,用光学引伸计专用笔画出黑色圆点作为标记进行位移的识别,圆点间距 25 mm,然后用游标卡尺精确测量薄

片中间区域的宽度和厚度。实验室温度 24.5℃,湿度 19%。拉伸前将标记好的薄片垂直放于 Instron 试验机的气动夹头之中,操纵光学引伸计软件精确测量两导电胶之间的标距。设置加载速度为 1 mm/min,顺纹拉伸弹性模量(以下简称弹模,图表中英文简写为 MOE)取应变的 0.2%~0.5%,最后利用软件自动进行测试和计算。

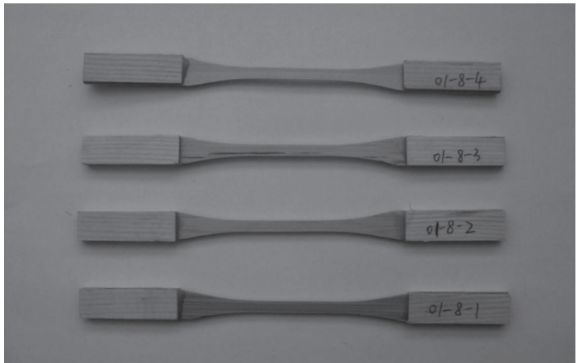


图 1 供试毛竹薄片试样
Fig. 1 Samples of the thin slices of Moso bamboo

2 结果与分析

2.1 气干毛竹薄片的应力应变曲线

一组毛竹薄片的应力应变曲线见图 2。由图 2 可见,从竹青到竹黄一共 3 个薄片,近竹青处薄片的抗拉强度和弹模最大,近竹黄处的抗拉强度和弹模最小,轴向应变均在 1% 以上。3 条应力应变曲线分布较为分散,且直线性较好,无明显的屈服和滑移,说明毛竹薄片的断裂为脆性断裂。

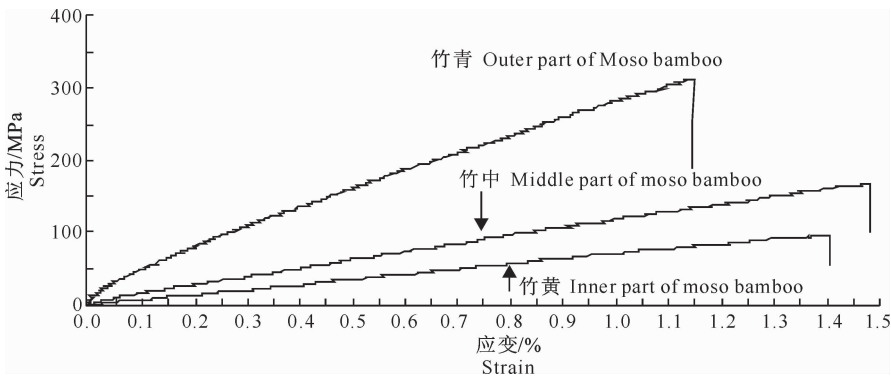


图 2 气干毛竹薄片的应力应变曲线
Fig. 2 The stress-strain curves of thin slices of Moso bamboo in air-dry condition

2.2 气干毛竹薄片的纵向力学特性

2.2.1 所有供试毛竹薄片的力学性质 51 片毛竹薄片的力学性质测试结果见表 1。由表 1 可知,被测毛竹薄片的横截面平均尺寸为 3.93 mm×1.34 mm,测试时的平均跨距为 24.25 mm;被测毛竹试

样的平均断裂荷载为 831.47 mN,其中最大断裂荷载达到 2 106.64 mN,最小断裂荷载仅为 99.66 mN;平均抗拉强度和弹模分别为 153.31 MPa 和 12.82 GPa,两者的变异系数均在 60% 以上。

表 1 气干毛竹薄片的纵向力学性质

Table 1 Lognitudinal mechanical properties of thin slices of Moso bamboo in air-dry condition

项目 Item	宽度/mm Width	厚度/mm Thickness	跨距/mm Span	断裂荷载/mN Break load	弹模/GPa MOE	抗拉强度/MPa Tensile strength
平均值 Mean	3.93	1.34	24.25	831.47	12.82	153.31
最大值 Max	4.38	1.58	26.11	2 106.64	30.71	393.90
最小值 Min	3.54	0.60	22.60	99.66	1.38	40.62
标准差 S. D.	0.23	0.15	0.53	547.09	7.99	94.39
变异系数 C. V.	0.057 6	0.108 6	0.021 8	0.658 0	0.623 1	0.615 7

2.2.2 近竹青位置毛竹薄片的力学性质 近竹青位置毛竹薄片力学性质的测试结果见表 2。由表 2 可知,被测试样的平均宽度为 3.99 mm,平均厚度为 1.43 mm,平均跨距为 24.23 mm,三者的变异系数均在 5%以下。平均断裂荷载为 1 687.35 mN,是所有供试毛竹试样平均断裂荷载 831.47 mN(表 1)的 2 倍以上;平均抗拉强度和弹模均较高,分别为 297.21 MPa 和 25.41 GPa,两者的最大值分别达到 393.90 MPa 和 30.71 GPa,变异系数分别为 19.17%和 11.20%。

表 2 近竹青位置毛竹薄片的纵向力学性质

Table 2 Lognitudinal mechanical properties of thin slices of outer part of Moso bamboo

项目 Item	宽度/mm Width	厚度/mm Thickness	跨距/mm Span	断裂荷载/mN Break load	弹模/GPa MOE	抗拉强度/MPa Tensile strength
平均值 Mean	3.99	1.43	24.23	1 687.35	25.41	297.21
最大值 Max	4.33	1.52	26.10	2 106.64	30.71	393.90
最小值 Min	3.74	1.34	23.80	935.41	21.04	149.24
标准差 S. D.	0.19	0.04	0.61	307.62	2.85	56.97
变异系数 C. V.	0.048 0	0.031 4	0.025 2	0.182 3	0.112 0	0.191 7

2.2.3 毛竹竹中薄片的力学性质 如表 3 所示,毛竹竹中薄片的平均宽度为 3.94 mm,平均厚度为 1.34 mm,平均跨距为 24.22 mm,三者的变异系数均较小;毛竹竹中薄片试样的平均断裂荷载为 715.85 mN,最大断裂荷载与最小断裂荷载相差达 824.59 mN;抗拉强度为 89.68~256.74 MPa,平均值为 136.05 MPa;弹模的变化也较大,为 6.21~19.26 GPa,平均为 10.35 GPa。

表 3 毛竹竹中薄片的纵向力学性质

Table 3 Lognitudinal mechanical properties of thin slices of middle part of of Moso bamboo

项目 Item	宽度/mm Width	厚度/mm Thickness	跨距/mm Span	断裂荷载/mN Break load	弹模/GPa MOE	抗拉强度/MPa Tensile strength
平均值 Mean	3.94	1.34	24.22	715.85	10.35	136.05
最大值 Max	4.38	1.48	24.73	1 248.81	19.26	256.74
最小值 Min	3.55	1.24	23.82	424.22	6.21	89.68
标准差 S. D.	0.23	0.06	0.25	192.46	3.23	39.36
变异系数 C. V.	0.057 7	0.043 7	0.010 5	0.268 9	0.312 2	0.289 3

2.2.4 近竹黄位置毛竹薄片的力学性质 由表 4 可知,近竹黄位置毛竹薄片的平均宽度和平均厚度均较低,分别为 3.88 和 1.26 mm,其厚度的变异系数较高(18.54%),平均跨距为 24.32 mm;近竹黄处毛竹试样的平均断裂荷载较低,为 331.76 mN,其中最小断裂荷载仅为 99.66 mN;平均抗拉强度和弹模也较低,分别为 65.80 MPa 和 5.78 GPa,其最小值分别为 40.62 MPa 和 1.38 GPa,变异系数均较高。

表 4 近竹黄位置毛竹薄片的纵向力学性质

Table 4 Lognitudinal mechanical properties of thin slices of inner part of Moso bamboo

项目 Item	宽度/mm Width	厚度/mm Thickness	跨距/mm Span	断裂荷载/mN Break load	弹模/GPa MOE	抗拉强度/MPa Tensile strength
平均值 Mean	3.88	1.26	24.32	331.76	5.78	65.80
最大值 Max	4.32	1.58	26.11	523.76	7.90	96.77
最小值 Min	3.54	0.60	22.60	99.66	1.38	40.62
标准差 S. D.	0.25	0.23	0.77	124.11	1.84	16.09
变异系数 C. V.	0.065 0	0.185 4	0.031 6	0.374 1	0.319 3	0.244 6

2.3 气干毛竹薄片的断口形貌

一般来讲,断口形貌能够反映材料的断裂属性,光滑或平坦的断口属于脆性断裂,粗糙不平的断口多为韧性断裂,然而毛竹薄片的断裂有些特殊。虽由毛竹薄片应力应变曲线的分析可知,毛竹薄片为脆性断裂,但由于毛竹径向竹壁中的维管束大小不同,且分布不均匀,故其断口形貌并不全为光滑或平

坦的断口^[7-8]。

如图 3 所示,毛竹近竹青位置薄片的断口为沿顺纹理的纵向劈裂,2 条纵向裂纹甚至一直扩展到夹持处的增强片以内,最后在拉伸的非有效区域,即试样夹持的横向相连处发生断裂。在图 3 中,试样的有效区域并没有被拉断,说明近竹青处毛竹薄片的力学特性非常高,一般很难被拉断。

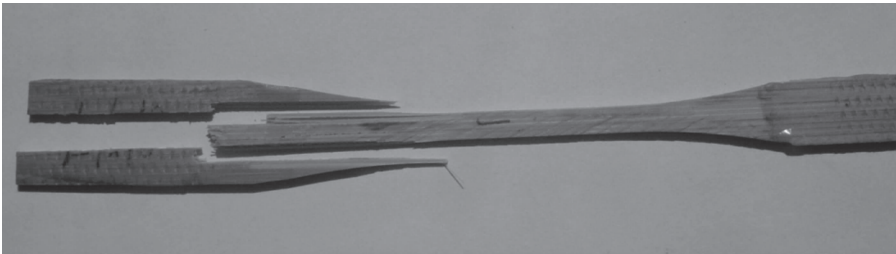


图 3 近竹青位置毛竹薄片的纵向劈裂

Fig. 3 Lognitudinal fracture of thin slices of outer part of Moso bamboo

如图 4 所示,毛竹竹中处薄片的断口形貌呈现出参差不齐的劈裂特征,裂纹沿纵向、横向均有扩

展,纵向扩展尺寸相对横向大得多,甚至延伸至非有效区域,而横向裂纹一般集中在有效区域内。

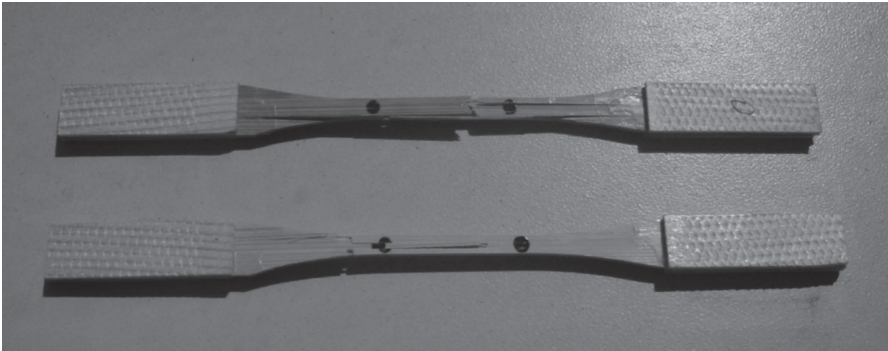


图 4 竹中处毛竹薄片的断裂

Fig. 4 Fracture of thin slices of middle part of Moso bamboo

如图 5 所示,毛竹近竹黄位置薄片的断口呈现出相对整齐的横向断裂形貌。拉伸时裂纹沿横向迅速扩展,遇到少量的纤维束时发生轻微的拔出现象,

但是由于薄壁细胞的强度较低,裂纹很快跨越纤维组成的维管束,迅速演化、横向扩展而发生断口相对整齐的断裂。

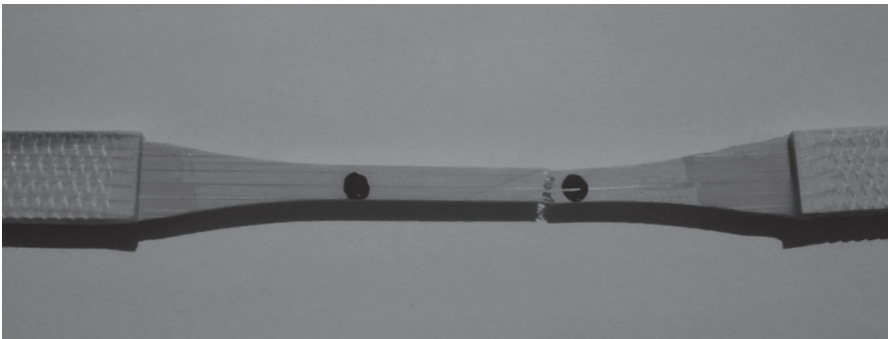


图 5 近竹黄位置毛竹薄片的横向断裂

Fig. 5 Transverse fracture of thin slices of inner part of Moso bamboo

3 讨 论

室温条件下,气干毛竹薄片的应力应变曲线与单纤维以及纤维束的拉伸曲线相似^[9],为接近完美的直线,没有明显的屈服和强化特征,说明毛竹宏观试样在径向厚度比较薄的情况下,可将其视为纤维均匀分布的均一性材料,在拉伸初期,变形主要是由纤维大分子链本身拉伸引起的可恢复的急弹性变形^[10],随着外力的进一步增加,由于纤维含量低的近竹黄位置试样的主体是低强度的基本组织,所以发生断口整齐的横向断裂^[5];而纤维含量高的近竹青位置试样的断口,可能沿纤维束与薄壁细胞的纵向界面迅速滑移,使纤维束抽拔出来而发生劈裂。总之,断裂在极短的时间内发生,应力应变曲线上无塑形变形特征出现,薄片的断裂为脆性断裂。

李霞镇^[6]按照 GB/T 15780—1995 对 2,4,6 年生毛竹宏观标样(280 mm×10 mm×竹壁厚(mm))的力学性质进行了测定,得到毛竹 1.5~3.5 m 的顺纹抗拉强度分别为 148.5、185.1 和 161.1 MPa。本试验所有供试毛竹薄片的测试结果与之相比略低,可能是由于试样尺寸和取样高度不同所致。申宗圻^[11]对湖北蒲圻、崇阳地区毛竹的力学数据进行了测定,得到其顺纹抗拉强度分别为 141 和 183.6 MPa,顺纹抗拉弹性模量分别为 11.47 和 10.40 GPa。与之相比,本试验的测试结果与其差别不大。

虞华强等^[4]研究指出,毛竹的顺纹抗拉弹性模量和抗拉强度的径向变异很大,不同位置处的顺纹抗拉弹性模量为 8.49~32.49 GPa,最外层近竹青处的顺纹抗拉弹性模量约是最内层的 3~4 倍;不同位置处的顺纹抗拉强度为 115.94~328.15 MPa,最外层近竹青处的顺纹抗拉强度是最内层的 2~3 倍。本试验的测试结果与虞华强等^[4]的测试结果相差不大,但后者的毛竹试样是手工劈取的,而近竹黄处试样的力学性质很差,手工劈取时很容易发生断裂,因此该研究近竹黄处的试样可能非常少,导致其测定数值的最低值仍较本试验的高。另外,毛竹是生物性材料,其力学性质与竹龄高度相关,随竹龄增大,力学性质不断增加,至 3~4 年生时趋于稳定,也有文献报道在 4~6 年生时才趋于稳定^[11]。本试验选择 3~6 年生的毛竹,因此,竹龄的不同使毛竹力学性质的变异系数有所增大。

毛竹薄片的平均弹模和抗拉强度的变化趋势非常相似,两者的数值在近竹青处最高,从竹青到竹中迅速降低,在近竹黄处最低,从竹青到竹黄呈明显的

降低趋势;竹中处的平均弹模和抗拉强度数值是近竹青处的一半略低,近竹黄处的平均弹模和抗拉强度数值是竹中处的一半左右,表明毛竹竹壁径向不同位置的力学性质差异很大,数据非常分散,近竹青处的力学性质远远高于近竹黄处(表 2~4)。这是由于竹壁是竹材优良力学特性的物质基础,从力学的角度看,竹壁细胞是由起传递载荷作用的薄壁组织和起机械增强作用的竹纤维厚壁细胞形成的纤维束所组成。因此,竹材的强度由纤维束与薄壁组织共同承载,又由于纤维束存在于维管束中,维管束在竹壁中的含量和分布沿竹青向内逐渐减少,所以竹材的力学性能沿竹黄到竹青呈现出明显的梯度特性^[12-14]。

毛竹独特的断口特性与其纤维含量的梯度分布高度相关。由于近竹青位置处试样的纤维含量高达 50%以上^[1],而毛竹纤维细胞是高强纤维(平均抗拉强度为 1 543.77 MPa)^[9,15],因此,试样拉伸时断裂最先发生在应力高度集中的圆弧过渡处,随后迅速沿纵向维管束与薄壁细胞的弱界面扩展,最后发生纵向劈裂。竹中试样的纤维含量(20%左右)适中,远低于近竹青处而高于近竹黄处,拉伸时纤维与基本组织共同发挥作用,并互相制约,使断口呈现出参差不齐的劈裂特征。近竹黄位置处试样的纤维含量很低,受力拉伸时以力学特性很低的薄壁细胞为主的基本组织起主导作用,裂纹很容易扩展而发生平整的横向断裂^[8]。

4 结 论

毛竹薄片的应力应变曲线分布较为分散,直线性好,无明显的屈服和滑移,为脆性断裂。说明毛竹宏观试样在径向厚度较薄时,可视为纤维均匀分布的均一性材料。

毛竹薄片的平均弹模和抗拉强度的变化趋势非常相似,两者从竹青到竹黄呈明显的降低趋势,近竹青处的力学性质远远高于近竹黄处。

毛竹薄片的断裂为脆性断裂,但其断口形貌仅近竹黄处为平坦的横向断裂,而竹青处表现为沿顺纹理的纵向劈裂,竹中处则呈现出参差不齐的劈裂特征。

【参考文献】

[1] 江泽慧,萧江华,许煌灿,等.世界竹藤 [M]. 辽宁沈阳:辽宁科学技术出版社,2002.

Jiang Z H, Xiao J H, Xu H C, et al. Bamboo and rattan in the

world [M]. Shenyang,Liaoning:Liaoning Science and Technology Press,2002. (in Chinese)

[2] 洗杏娟,洗定国. 竹材的微观结构及其力学性质的关系 [J]. 竹子研究汇刊,1990,9(3):10-23.

Xian X J,Xian D G. The relationship of microstructure and mechanical properties of bamboo [J]. Journal of Bamboo Research,1990,9(3):10-23. (in Chinese)

[3] 杨云芳,刘志坤. 毛竹材抗拉弹性横量及抗拉强度 [J]. 浙江林学院学报,1996,13 (1):21-27.

Yang Y F, Liu Z K. Tensile elastic modulus and tensile strength of bamboo [J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 1996,13(1):21-27. (in Chinese)

[4] 虞华强,费本华,任海青,等. 毛竹顺纹抗拉性质的变异及与气干密度的关系 [J]. 林业科学,2006,42(3):72-76.

Yu H Q,Fei B H,Ren H Q,et al. Variation in tensile properties and relationship between tensile properties and air-dried density for Moso bamboo [J]. Scientia Silvae Sinicae,2006,42 (3):72-76. (in Chinese)

[5] 黄盛霞,马丽娜,邵卓平,等. 毛竹微观构造特征与力学性质关系的研究 [J]. 安徽农业大学学报,2005,32(2):203-206.

Huang S X,Ma L N,Shao Z P,et al. Relationship between microstructure characteristics and mechanical properties of Moso bamboo [J]. Journal of Anhui Agricultural University,2005,32 (2):203-206. (in Chinese)

[6] 李霞镇. 毛竹材力学及破坏特性研究 [D]. 北京:中国林业科学研究院,2009.

Li X Z. Research on mechanics and failure properties of Moso bamboo [D]. Beijing:Chinese Academy of Forestry,2009. (in Chinese)

[7] Amada S,Untao S. Fracture properties of bamboo [J]. Composites;Part B,2001,32:451-459.

[8] Shao Z P,Fang C H,Huang S X,et al. Tensile properties of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) and its components with respect to its fiber-reinforced composite structure [J]. Wood Sci Technol,2010,44(4):655-666.

[9] 黄艳辉,费本华,余 雁,等. 毛竹单根纤维力学性质 [J]. 中国造纸,2009,28(8):10-12.

Huang Y H,Fei B H,Yu Y,et al. Study on the mechanical properties of Moso bamboo single fibers [J]. China Pulp & Paper,2009,28(8):10-12. (in Chinese)

[10] 于伟东. 纺织材料学 [M]. 北京:中国纺织出版社,2006.

Yu W D. Textile [M]. Beijing,ChinaTextile&Apparel Press, 2006. (in Chinese)

[11] 申宗圻. 木材学 [M]. 北京:中国林业出版社,1993.

Shen Z Q. Wood [M]. Beijing:Chinese Forestry Press,1993. (in Chinese)

[12] 田根林,江泽慧,余 雁,等. 竹材韧性之源:两相复合材料结构及多级弱界面机制 [C]//安徽黄山:第三届全国生物质材料科学与技术学术研讨会. 2009:81-84.

Tian G L,Jiang Z H,Yu Y,et al. Origin of bamboo toughness:two-phase composite material and gradient weak interfaces mechanism [C]//Huangshan, Anhui: The 3th conference on science and technology of biomass materials. 2009:81-84. (in Chinese)

[13] 嵇伟兵,姚文斌,马灵飞. 龙竹和绿竹竹材壁厚方向的梯度力学性能 [J]. 浙江林学院学报,2007,24(2):125-129.

Ji W B,Yao W B, Ma L F. Analysis on gradual mechanical properties by the depth of bamboo wall of *Dendrocalamus giganteus* and *Dendrocalamopsis oldhami* [J]. Journal of Zhejiang Forestry College,2007,24(2):125-129. (in Chinese)

[14] Amada S,Ichikawa Y,Munekata T,et al. Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo [J]. Composites;Part B,1997,28:13-20.

[15] 黄艳辉,费本华,王 戈,等. 单纤维拉伸技术研究毛竹纤维细胞壁力学性质 [C/CD]//湖南湘潭:第八届中国国际纳米科技研讨会. 2009.

Huang Y H,Fei B H,Wang G,et al. Cell wall mechanical properties of Moso bamboo fibers by using the tensile technique of single fibers [C/CD]. Xiangtan,Hunan:The 8th china interational conference on nanoscience and technology. 2009. (in Chinese)