

# 楠竹加筋复合锚杆管材力学性能试验研究

王晓东, 张虎元, 吕擎峰, 张艳军, 严耿升

(兰州大学 西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:** 楠竹加筋复合锚杆是一种应用于土遗址加固工程的新型锚杆, 为了解锚杆的工作机制, 对其管材楠竹进行力学性能试验, 研究竹材的抗压、抗拉、抗弯强度及其影响因素。结果表明: 3 a 生楠竹块顺纹抗压强度达 119 MPa, 比 5 a 生楠竹大; 同一根楠竹, 取自基部和中部的竹块试样, 顺纹抗压强度相当, 均小于顶部试样; 竹块顺纹、横纹、径向抗压强度分别为 98, 37 和 65 MPa, 强度差异是由加压方向和竹纤维生长方向之间的关系决定的; 竹材的顺纹抗压、抗拉和抗弯强度均与竹材的含水率有关, 含水率增大强度降低, 当含水率达到一定值时, 抗压强度趋于稳定; 径高比为 1:1 和 1:2 的竹筒抗压强度试验以及竹条抗拉强度试验结果表明, 竹节对竹筒和竹条的强度有一定的削弱作用。

**关键词:** 边坡工程; 复合锚杆; 楠竹; 力学性质; 土遗址

**中图分类号:** P 642

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2009)增 1-2941-06

## EXPERIMENTAL RESEARCH ON MECHANICAL PROPERTIES OF PIPE MATERIAL FOR BAMBOO-STEEL COMPOSITE ANCHOR BOLT

WANG Xiaodong, ZHANG Huyuan, LU Qingfeng, ZHANG Yanjun, YAN Gengsheng

(*Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Ministry of Education,*

*Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China*)

**Abstract:** Compressive, tensile and bending strength tests were conducted on bamboo specimens in laboratory to understand the working mechanism of bamboo-steel cable composite(BSCC) anchor, a newly invented anchor for reinforcing earthen archaeological sites. Test results show that the longitudinal compressive strength of the 3 year-old bamboo is up to 119 MPa, which is higher than that of 5 year-old one. With respect to the height positions of the same bamboo, the longitudinal strength is almost the same for the specimens from the middle and bottom parts, but less than that from the top part. The relationship between compressive direction and arrangement of bamboo fiber is highly responsible for the variation of compressive strength of bamboo, namely, the longitudinal, tangential and radial strengths are 98, 37 and 65 MPa respectively. The compressive, tensile and bending strengths of bamboo specimens are found to decrease gradually with the increase of moisture content except that the compressive strength becomes stable when the moisture content is greater than a constant. Compressive tests on bamboo pipes in two different diameter-to-height ratios, 1:1 and 1:2, and tensile tests on bamboo splints, illustrate that the existence of bamboo knots results to a little decrease in bamboo pipe and splint strengths.

**Key words:** slope engineering; composite anchor; bamboo wood; mechanical properties; earthen archaeological sites

**收稿日期:** 2008-01-25; **修回日期:** 2008-05-06

**基金项目:** 国家科技支撑计划课题资助项目(2006BAK30B02)

**作者简介:** 王晓东(1981-), 男, 2006年毕业于兰州大学土木工程专业, 现为博士研究生, 主要从事岩土锚固方面的研究工作。E-mail: wangxiaod06@lzu.cn

# 1 引言

楠竹加筋复合锚杆<sup>[1]</sup>, 作为一种应用于土遗址加固这一特殊领域的新型土层锚杆, 已经在吐鲁番交河故城的加固工程中得到很好应用(实体模型参见图 1), 该锚杆的主要特征是, 由楠竹、黏结剂与钢绞线复合为一体, 楠竹的内腔安放有钢绞线, 楠竹与钢绞线之间充填黏结剂, 然后用箍筋绑扎。为了和传统锚杆区别, 楠竹与钢绞线之间充填的黏结剂称为内黏结剂, 是用环氧树脂、粉煤灰以及石棉按一定比例配制而成的。楠竹在复合锚杆中有很重要的作用: 一方面是加筋作用, 另一方面是增加锚杆直径, 起到扩大摩擦受力面积的作用。

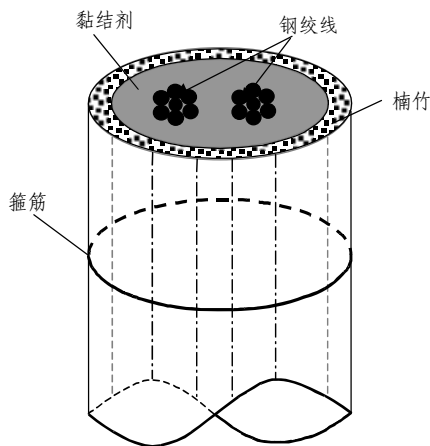


图 1 楠竹加筋复合锚杆实体模型图

Fig.1 Bamboo-steel cable composite anchor

目前, 传统锚杆杆材根据相关材料规范直接选取, 而对于新型的锚杆或新型锚杆材料需进行相应的研究, 因此有必要对楠竹加筋复合锚杆进行相应研究。贾新等<sup>[2, 3]</sup>对新型的锚杆材料 GFRP 进行了实体模型的力学性能试验研究。王者尧等<sup>[4~7]</sup>直接将竹子作为杆材, 应用到了煤矿回采巷道和软岩的支护中, 其中有些还研究了处理后竹子的抗压、抗拉、抗弯强度。王卫军和侯朝炯<sup>[8]</sup>研究了利用竹条的柔韧性和弹性, 将竹条编网与锚杆联合加固软岩, 应用于工程取得了很好的效果。

关于竹材的力学性质的研究, 已经取得了一定的进展。苏文会等<sup>[9~11]</sup>分别对大木竹、苦竹、毛竹、麻竹、绿竹的抗拉、抗压、抗劈裂等方面进行了试验研究, 并给出了部分力学性质之间的相关性。俞友明等<sup>[12]</sup>研究了苦竹的力学性质与物理性质之间

的联系, 回归分析了竹龄与竹材各项物理力学性质之间的关系。嵇伟兵等<sup>[13]</sup>以云南龙竹和浙江绿竹为研究对象, 将竹子沿壁厚方向分为若干个轴单板层, 测定分析了竹材表观弹性模量与不同方向单板层弹性模量之间的关系。T. Tabarsa 和 Y. H. Chui<sup>[14]</sup>在研究了木材结构在受力作用下的微观动态变化过程, 而邵卓平<sup>[15, 16]</sup>对在压缩大变形条件下竹材的应力-应变关系和微观变形特征进行了研究。

本文对楠竹加筋复合锚杆的管材即加筋材料楠竹进行了抗压、抗拉、抗弯等力学性能试验。

# 2 楠竹材料与试件加工

试验主要采用四川 5 a 生楠竹, 生长正常, 无病害, 胸径差别不大, 无裂缝及变形。试验时楠竹经过天然风干, 含水率为 5.8%~8.0%, 密度为 0.78~0.83 g/cm<sup>3</sup>, 内径为 50~67 mm, 外径为 58~78 mm, 壁厚为 8~11 mm。实验室环境温度为 18 °C 左右, 相对湿度约为 69%。

抗压、抗拉、抗弯试件制作和试验测试, 依照相关试验方法<sup>[17]</sup>进行。为了比较竹节对抗拉强度的影响, 特意制作了包含和不包含竹节的对比试件(见图 2)。而对于竹筒压缩试验, 由于没有相应的规范可供参考, 试件按照如下方法自行设计及制作(见图 3), 试验方法借鉴竹块压缩的试验方法。

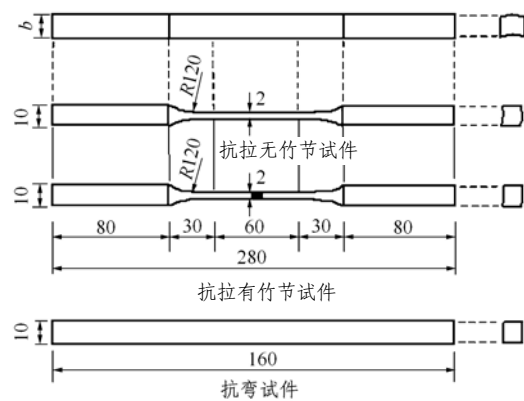


图 2 抗拉和抗弯试件(单位: mm)

Fig.2 Tensile and bending specimen(unit: mm)

竹筒试验中, 制作了 4 种试件, 即分为有竹节筒和无竹节筒, 且分别制作直径和高度比例(D/H)为 1:1 和 1:2 两种, 在试件制作及试验过程中严格控制竹筒两端面的平行度, 并保持与竖直方向垂直。

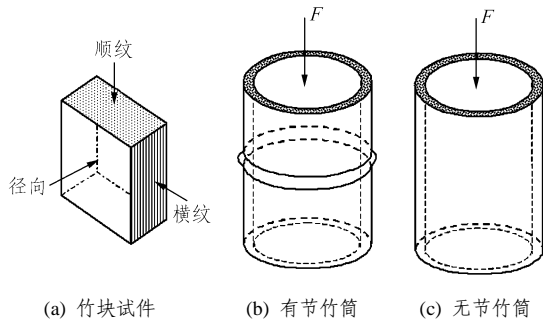


图 3 竹块和竹筒试件及压缩方向

Fig.3 Specimens of bamboo block and pipe and compressive direction

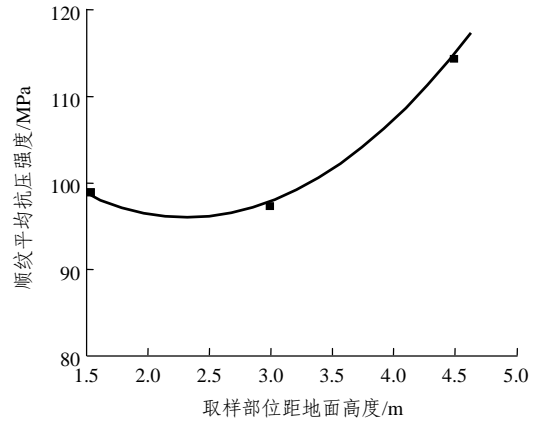


图 4 不同部位顺纹平均抗压强度变化趋势

Fig.4 Variation of compressive strength of bamboo block in longitudinal direction with different sample locations

### 3 楠竹块压缩试验

#### 3.1 不同竹龄竹块压缩性能

表 1 中数据显示出 3 a 比 5 a 生的竹子抗压强度和静力压缩弹性模量高, 此结果与刘力等<sup>[10]</sup>中苦竹的竹龄与强度的关系一致, 说明了竹材性质上的相似性, 但其强度比苦竹的高。

表 1 不同竹龄竹块的顺纹压缩性能

Table 1 Compressive performance in longitudinal direction for bamboo block with different bamboo ages

竹龄 /a	抗压强度			静压缩弹性模量		
	平均值 /MPa	标准差	变异系数	平均值 /GPa	标准差	变异系数
5	98.30	2.02	2.06	1.42	0.01	0.70
3	119.00	1.99	1.67	2.75	0.08	2.90

#### 3.2 不同部位竹块压缩性能

从图 4 中可以看出, 在同一根竹子上的不同部位的顺纹平均抗压强度是不同的, 基部和中部的强度相差不大, 而顶部的抗压强度较高, 这是因为顶部竹筒的直径较小, 其纤维密度较大, 与刘力等<sup>[10, 12]</sup>对苦竹的研究结果较为相似。从微观角度来说, 竹材顺纹方向强度的变化主要由于竹材单位面积上的维管束个数变化引起<sup>[9]</sup>。

#### 3.3 竹块不同方向的压缩性能

由图 5 中可以看出, 在进行顺纹压缩时, 应力 - 应变经历了 3 个阶段: 第一阶段为完全弹性阶段, 纤维被压缩, 变形可恢复; 第二阶段为强化阶段, 由于纤维的分布原因试件竹青表面开始出现较小的折皱; 第三阶段, 为局部变形阶段, 应力急剧下降, 在试件的表面开始出现大的折皱, 纤维束被折断, 承载能力急剧下降。

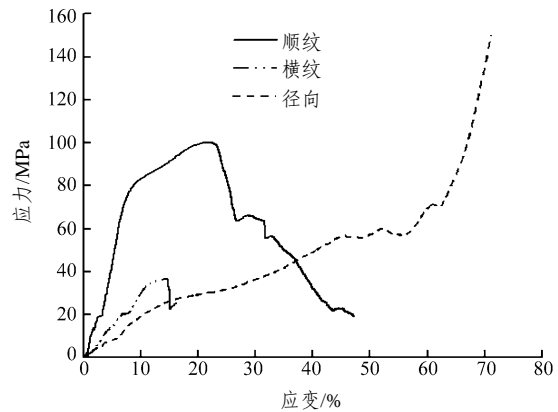


图 5 顺纹、横纹、径向压缩应力 - 应变曲线

Fig.5 Stress-strain curves of bamboo block with different compressive directions of samples

横纹压缩时, 与顺纹压缩经历同样的 3 个阶段, 开始阶段也是弹性阶段, 竹子的内部组织不断被压缩挤密, 荷载继续增加时, 竹青部位首先开始出现变形, 随后内侧出现变形, 这是因为竹子的承载结构主要是纤维和薄壁细胞, 而靠近竹青部位的纤维密度较大, 强度较高而压缩性较小。本试验中得出的楠竹在横纹压缩时的抗压强度平均值为 37.22 MPa, 顺纹抗压强度是横纹抗压强度 3.0 倍左右。

径向压缩过程也将经历 3 个阶段, 所有试件初始阶段的应力 - 应变关系基本上成线性关系, 当应力超过比例极限, 曲线趋于水平, 楠竹进入塑性变形阶段, 但此阶段较短, 随后经过一转折点, 进入了第三阶段, 细胞腔已经被完全压密, 应力进入类指数增加阶段。到达转折点时, 竹块已经被压坏, 产生了不可恢复变形, 纤维间的胶结和组织结构被破坏, 所有的空间被压密实。此后的变形来自细胞

间的距离减小量, 虽然其承载力急剧增加, 但其抗弯、抗折、抗拉性能变得很差, 一般把这个转折点作为竹子径向压密的临界点, 该点对于楠竹其平均值为 65 MPa。

### 3.4 不同含水率竹块压缩性能

从图 6 可以看出, 竹块的抗压强度随着含水率的增加而减小, 当含水率达到 15% 以上时, 其抗压强度趋于稳定。天然风干的竹子的含水率为 5.8%~8.0%, 此区间内竹子的抗压强度为 87~122 MPa, 而烘干后的竹块抗压强度可高达 128 MPa。根据相关试验方法<sup>[17]</sup>对安徽毛竹的研究, 温度在 100 °C 以下时, 竹子的抗压强度随温度的变化不大。

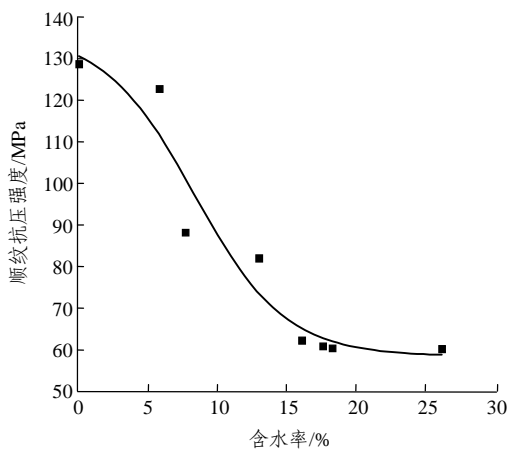


图 6 不同含水率竹块顺纹抗压强度的变化趋势

Fig.6 Compression strength of bamboo block in longitudinal direction with different moisture contents

楠竹不同含水率下的抗压强度近似符合 S 型曲线分布, 即

$$f = 58.41 + \frac{77.75}{1 + e^{\frac{w-8.34}{3.28}}} \quad (1)$$

式中:  $f$  为顺纹抗压强度(MPa),  $w$  为含水率(%).

## 4 楠竹条拉伸和弯曲试验

### 4.1 拉伸试验

天然含水率时, 抗拉强度平均值为 308.30 MPa, 含水率在 22.80%~25.89% 时, 其平均抗拉强度为 252.21 MPa, 而对于带有竹节的天然含水率抗拉试件, 其平均抗拉强度为 151.13 MPa。从图 7 可以看出, 竹子具有较强脆性, 含水率较大的竹子的塑性比天然含水率试件有所提高, 但承载力降低。从曲线 C 可以看出, 竹节是竹条的一个薄弱环节, 试验

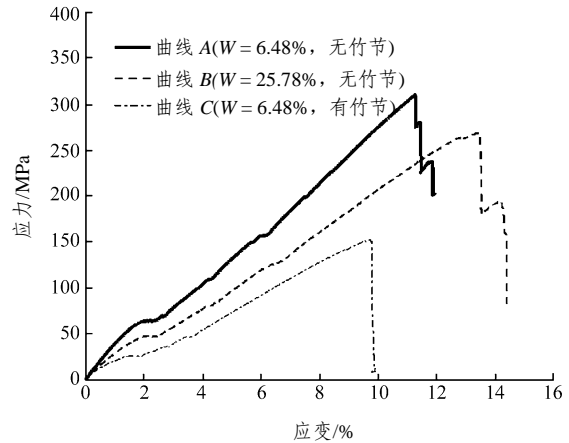


图 7 楠竹拉伸应力 - 应变曲线

Fig.7 Stress-strain curves of tensile for bamboo splint

中试件均是从竹节处拉断, 可见竹节处纤维排列方式破坏了纤维的连续性, 对其强度是很大的削弱。

### 4.2 弯曲试验

表 2 给出了不同含水率楠竹抗弯强度, 从表中可以看出, 楠竹的抗弯强度随着含水率的升高呈逐渐下降趋势, 这与抗压、抗拉强度随含水率升高逐渐降低趋势是一致的。在进行抗弯试验时, 竹青处受拉, 当荷载达到一定值时, 竹青一侧的纤维先被拉断, 破坏逐步向内扩展, 最终竹条被折断。楠竹加筋复合锚杆一般的使用长度为 5~15 m, 在运输及吊装过程中经常有锚杆被折断的现象。楠竹作为锚杆的外层, 因此研究竹子的抗弯强度, 能给锚杆的运输及安装提供了一定的依据。

表 2 不同含水率楠竹抗弯强度

Table 2 Bending strengths of bamboo with different moisture contents

编号	尺寸/mm				含水率/%	抗弯强度/MPa
	宽度	厚度	总长度	有效长度		
WQ1	10	4.8	160	120	6.73	217.36
WQ2	10	4.8	160	120	6.82	224.42
WQ3	10	4.8	160	120	6.78	228.96
WQ4	10	4.8	160	120	19.33	205.76
WQ5	10	4.8	160	120	19.89	212.72
WQ6	10	4.8	160	120	20.13	210.40
WQ7	10	5.0	160	120	25.73	159.72
WQ8	10	4.8	160	120	26.78	167.85
WQ9	10	4.9	160	120	30.19	154.39

## 5 楠竹筒压缩试验

表 3 是不同形态竹筒抗压强度, 从表中的数据

表 3 不同形态竹筒抗压强度

Table 3 Compressive strengths of bamboo pipe with different forms

试件类型	D/H	试件尺寸/mm			最大压力 /kN	抗压强度 /MPa	平均抗压强度/MPa
		高度	内径	外径			
无节竹筒	1:1	77.0	64.7	76.9	102.14	75.27	74.23
		67.9	59.8	70.0	77.54	74.57	
		78.3	65.5	76.2	86.76	72.85	
无节竹筒	1:2	125.1	52.8	61.1	58.98	79.43	76.54
		129.0	53.9	62.6	58.73	73.77	
		119.5	50.9	58.9	52.69	76.41	
有节竹筒	1:1	71.2	63.0	77.9	94.46	57.28	68.12
		78.7	65.0	77.8	94.25	65.65	
		75.2	67.0	77.5	97.24	81.60	
有节竹筒	1:2	150.0	61.5	73.0	87.64	72.14	71.21
		149.0	65.0	75.5	90.45	78.06	
		149.3	61.3	72.5	74.66	63.43	

可以看出, 无节竹筒的强度比有节竹筒高一些, 这是因为无节竹筒是连续的竹纤维, 而当中间出现竹节时, 竹节处纤维的特殊排列方式削弱了纤维的连续性。径高比为 1:2 的竹筒的强度比 1:1 竹筒略高。目前对竹筒的研究没有相应规范, 且对竹筒的研究甚少, 本文对竹筒的试验方法和结果可为今后进一步研究提供参考。

竹筒的压缩破坏整体上是拉裂破坏, 但特征有所差异。对于无节竹筒, 当应力逐渐增大时, 竹筒开始产生裂缝并逐渐贯通, 随着应力继续增大裂缝越来越多, 最终竹筒破坏为宽为 2~3 cm 的竹条, 竹条中部被压弯折。

对于有节竹筒, 由于竹节板所起的约束作用, 其劈裂的竹条不发生向内弯折, 竹节板被拉裂为不规则的小块连在竹条上, 呈灯笼状破坏(见图 8)。从图 9 可以看出, 竹筒的压缩过程也经历 3 个阶段:



图 8 径高比 1:1 竹筒压缩破坏特征

Fig.8 Compressive damage characters of bamboo pipe with D/H = 1:1

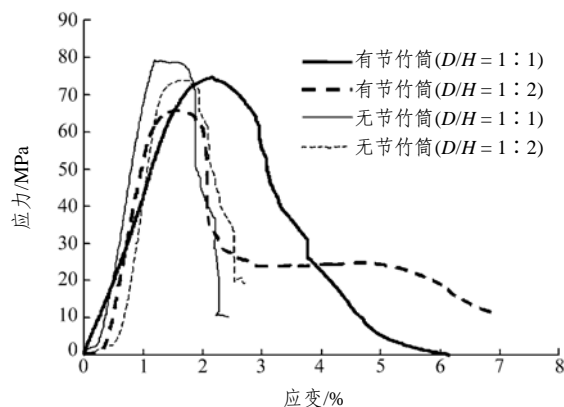


图 9 竹筒压缩应力 - 应变曲线

Fig.9 Stress-strain curves of compressive bamboo pipe

第一阶段为弹性阶段; 第二阶段为强化阶段; 第三阶段为局部变形阶段, 其应力急剧下降, 从竹筒的压缩试验也同样说明了竹子脆性很强。

## 6 结 论

本文对楠竹加筋复合锚杆管材楠竹的试验得出如下结论:

(1) 天然含水率的楠竹顺纹抗压强度平均值为 98.30 MPa, 约为横纹抗压强度的 3.0 倍, 径向抗压强度的 1.5 倍。无竹节筒比有竹节筒的抗压强度略高, 比竹块的抗压强度下降了 25% 左右。

(2) 楠竹的拉伸强度较高, 为 308.30 MPa 左右, 是顺纹抗压强度的 3 倍多, 但若试件中含有竹节, 其强度将降低一半。

(3) 抗弯与其抗拉过程具有相似性, 但抗弯强度较抗拉强度低约 40%, 为 223.58 MPa。

(4) 对于竹块和竹条, 随着含水率的增大, 其抗压和抗拉强度都有不同程度的下降。

(5) 在另外一项试验中, 钢管锚杆的单位锚固力是楠竹加筋复合锚杆的一半<sup>[18]</sup>, 而钢管锚杆的抗腐蚀性较差, 不适合应用于文物保护工程中。另外, 由本文试验可以得出, 楠竹的比强度约为  $38.5 \times 10^6$  mm, 钢管的比强度为  $6.5 \times 10^6$  mm, 作为锚杆管材楠竹比钢管更有优势。

## 参考文献(References):

[1] 李最雄, 王旭东, 张 鲁. 楠竹加筋复合锚杆 ZL200520107950.0[P]. 中国, 2006.(LI Zuixiong, WANG Xudong, ZHANG Lu. Bamboo-steel cable composite anchor, ZL200520107950.0[P]. China, 2006.(in Chinese))

- [2] 贾新, 袁勇, 李焯芬. 新型玻璃纤维增强塑料砂浆锚杆的黏结性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2108 - 2114. (JIA Xin, YUAN Yong, LEE C F. Experimental study on bond behavior of new type cement grouted GFRP bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2108 - 2114. (in Chinese))
- [3] 刘汉东, 于新政, 李国维. GFRP 锚杆拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(20): 3719 - 3723. (LIU Handong, YU Xinzheng, LI Guowei. Experimental study on tensile mechanical properties of GFRP rebar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(20): 3719 - 3723. (in Chinese))
- [4] 王者尧. 复合竹锚杆在屯兰矿回采巷道中的应用[J]. 建井技术, 1997, 18(5): 17 - 19. (WANG Zheyao. Application of bamboo-composite anchor in the recovery entries at Tunlan mine[J]. Mine Construction Technology, 1997, 18(5): 17 - 19. (in Chinese))
- [5] 李彦斌, 苏学贵, 张召千. 新型锚固式竹锚杆试验研究[J]. 建井技术, 2000, 21(1): 30 - 32. (LI Yanbin, SU Xuegui, ZHANG Zhaoqian. Test on new bamboo anchor[J]. Mine Construction Technology, 2000, 21(1): 30 - 32. (in Chinese))
- [6] 吕康成, 王晓利. 竹锚杆在软岩巷道支护中的应用[J]. 湘潭矿业学院学报, 1994, 9(2): 59 - 64. (LU Kangcheng, WANG Xiaoli. Application of bamboo rockbolts supporting an opening in soft coal[J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 1994, 9(2): 59 - 64. (in Chinese))
- [7] 李先炜, 甘吉庆, 余锋. 砂浆竹锚杆支护煤巷两帮的试验研究[J]. 中国矿业学院学报, 1988, (3): 6 - 15. (LI Xianwei, GAN Jiqing, YU Feng. Experimental study on the supporting capacity of grouted bamboo rockbolts in coal roadway sides[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 1988, (3): 6 - 15. (in Chinese))
- [8] 王卫军, 侯朝炯. 软岩巷道支护参数优化与工程实践[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 647 - 650. (WANG Weijun, HOU Chaojiong. Optimum of supporting parameter of soft-rock roadway and engineering practice[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(5): 647 - 650. (in Chinese))
- [9] 苏文会, 顾小平, 马灵飞, 等. 大木竹竹材力学性质的研究[J]. 林业科学研究, 2006, 19(5): 621 - 624. (SU Wenhui, GU Xiaoping, MA Lingfei, et al. Study on wood mechanical properties of bambusa wenchouensis[J]. Forest Research, 2006, 19(5): 621 - 624. (in Chinese))
- [10] 刘力, 俞明友, 林新春, 等. 苦竹竹材化学与力学性质的相关性分析[J]. 浙江林业科技, 2006, 26(2): 19 - 22. (LIU Li, YU Youming, LIN Xinchun, et al. Correlation analysis between mechanical and chemical properties of pleioblastus amarus culm[J]. Journal of Zhejiang Forestry Science and Technology, 2006, 26(2): 19 - 22. (in Chinese))
- [11] 任海青, 张东升, 潘雁红. 竹材抗压动态破坏过程分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2007, 31(2): 47 - 50. (REN Haiqing, ZHANG Dongsheng, PAN Yanhong. Dynamic compressive mechanical behavior of bamboo[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences), 2007, 31(2): 47 - 50. (in Chinese))
- [12] 俞友明, 方伟, 林新春, 等. 苦竹竹材物理力学性质的研究[J]. 西南林学院学报, 2005, 25(3): 64 - 67. (YU Youming, FANG Wei, LIN Xinchun, et al. Physico-mechanical properties of pleioblastus amarus bamboo wood[J]. Journal of Southwest Forest College, 2005, 25(3): 64 - 67. (in Chinese))
- [13] 嵇伟兵, 姚文斌, 马灵飞. 龙竹和绿竹竹材壁厚度方向的梯度力学性能[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(2): 125 - 129. (JI Weibing, YAO Wenbin, MA Lingfei. Analysis of 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] TABARSA T, CHUI Y H. Stress-strain response of wood under radial compression[J]. Wood Fiber Sci., 2000, 32(2): 144 - 152.
- [15] 邵卓平. 竹材在压缩大变形下的力学行为 I. 应力 - 应变关系[J]. 木材工业, 2003, 17(2): 12 - 14. (SHAO Zhuoping. Mechanical behavior of bamboo with large deformation I. stress-strain relation[J]. China Wood Industry, 2003, 17(2): 12 - 14. (in Chinese))
- [16] 邵卓平. 竹材在压缩大变形下的力学行为 II. 微观变形特征[J]. 木材工业, 2004, 18(1): 27 - 29. (SHAO Zhuoping. Mechanical behavior of bamboo with large deformation II. the characteristics of microcosmic deformation[J]. China Wood Industry, 2004, 18(1): 27 - 29. (in Chinese))
- [17] 中华人民共和国国家标准编写组. GBT 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. (The National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB/ T 15780 - 1995 Testing methods for physical and mechanical properties of bamboos[S]. Beijing: Standards Press of China, 1995. (in Chinese))
- [18] 孙满利. 吐鲁番交河故城保护加固研究[博士学位论文][D]. 兰州: 兰州大学, 2006. (SUN Manli. A study of protection and reinforcement about the ruins of Jiaohe, Turpan, China[Ph. D. Thesis][D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2006. (in Chinese))