

# 德宏州巨龙竹纤维形态和化学成分 与制浆性能的初步研究

刘晓波, 韩绍中, 穆道友, 张伦, 赵玲花, 马全灯  
(昆明理工大学 生物与化学工程学院, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 对德宏州巨龙竹的化学成分、纤维形态、成浆性能进行了研究. 结果表明: 巨龙竹灰分、 $\text{SiO}_2$ 、冷水抽出物、热水抽出物、苯-醇抽出物、1% NaOH 抽出物、木素、多戊糖、综纤维素含量分别为 1.43%, 0.49%, 2.90%, 4.31%, 2.72%, 15.17%, 27.68%, 22.40%, 73.20%; 纤维平均长度、宽度、壁厚、腔径、长宽比、壁腔比分别为 2.90 mm, 16.05  $\mu\text{m}$ , 5.7  $\mu\text{m}$ , 4.5  $\mu\text{m}$ , 180, 2.53; 该竹种易于成浆, 与针叶木浆比较撕裂强度较高, 是一种优良的竹类纤维原料.

**关键词:** 巨龙竹; 化学成分; 纤维形态; 制浆性能; 德宏

**中图分类号:** S785 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2006)01-0083-06

## Preliminary Study on the Chemical Component and Fiber Morphology and Pulping Properties of *Dendrocalamus Sinicus* from Dehongzhou

LU Xiao-bo, HAN Shao-zhong, MU Dao-you,  
ZHANG Lun, ZHAO Lin-hua, MA Quan-deng

(Faculty of Biological and Chemical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

**Abstract:** The chemical composition, fiber morphology and physical properties of *dendrocalamus sinicus* from Dehongzhou are studied. The results show that the chemical composition: ash content is 1.43%,  $\text{SiO}_2$  0.49%, cool water extractive 2.90%, hot water extractive 4.31%, benzene-alcohol extractive 2.72%, 1% NaOH extractive 15.17%, Klason lignin 27.68%, pentosan 22.40% and holocellulose 73.20%; and fiber length is 2.90mm, fiber width 16.05  $\mu\text{m}$ , length/width ratio 180, fiber wall thickness 5.7  $\mu\text{m}$ , lumen diameter 4.5  $\mu\text{m}$ , the ratio of wall thickness to lumen diameter 2.53; *Dendrocalamus sinicus* is easier to pulp than some other species of bamboo; its tearing strength property is much better than that of the wood pulp. Therefore, it is a good fiber material of bamboo for papemaking industry.

**Key words:** *dendrocalamus sinicus*; chemical component; fiber morphology; pulping properties; Dehong

## 0 引言

德宏州地处云南省西部,属南亚热带气候,日照长,热量丰富,雨量充沛,土壤肥沃,特别适宜热带、亚热带农作物,尤其适宜竹类的繁殖生长,竹子种类达 40 余种.竹子栽培具有面积大、产量高、质量好的特点,素有“滇西竹乡”、“大型丛生竹之乡”的美誉,已被列为云南省重要的竹浆纸一体化生产基地.在当前造纸工业木材资源较为匮乏的情况下,利用竹子生长快、周期短、可再生和一次造林年年受益等特点,加快培育竹林资源,发展竹浆产业,是云南省纸业得以可持续发展,进而参与国际市场竞争的可取之路.选择适宜的品种进行纸浆林的营造,是云南造纸工业充分利用林地资源和持续不断取得质优价廉的原料的关

收稿日期: 2005-05-08

第一作者简介: 刘晓波 (1969.2~),男,讲师.主要研究方向:植物纤维资源的制浆造纸特性及生物技术应用.

E-mail: liuxiaobo\_km@sina.com

键<sup>[1~3]</sup>。因此,对云南优势生长的竹种进行制浆造纸性能研究对合理利用竹种与进行人工培育纸浆竹林基地的建设具有迫切的现实意义。

巨龙竹(*Dendrocalamus sinicus* Chia et J. L. Su) 属禾本科(*Gramineae*)竹亚科(*Bambusoideae*)牡竹属(*Dendrocalamus*),分布于云南南部和西南部,是云南特有的大型合轴热性丛生竹种,具有秆形通直和弯曲两个类型,其直径一般在15 cm以上,最粗接近30 cm,秆高近30 m,单株鲜重最大可达450 kg,是迄今为止发现的世界最粗大的巨型丛生竹种,具有巨大的开发价值和利用前景。1982年在西双版纳作为新种被发现以来的研究主要集中在竹材结构、解剖学、生物学特性及引种、栽培研究上<sup>[4~8]</sup>,其制浆造纸性能的研究至今尚未见相关报道。本文对德宏州引种的巨龙竹进行了纤维形态、化学成分和成浆性能进行了初步研究,为德宏州巨龙竹的制浆造纸产业化开发提供一些基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料取自云南省德宏傣族景颇族自治州陇川县县城,属秆形通直类型的巨龙竹。在现场将竹劈成竹片,实验室后风干备用。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 竹材结构和纤维形态的观测

##### 1) 竹材制片及细胞壁、细胞腔的测定

将试材剖切为宽1 cm,长2~3 cm的竹块,用氢氟酸泡软,经冲洗后切片,用无水乙醇和二甲苯进行透明处理,用赫氏染色剂染色制片,在生物显微镜下进行竹材横切面观测和纤维细胞壁、细胞腔的测定。

##### 2) 纤维长度、宽度的测定

取有代表性的风干竹片剖切成火柴杆大小,采用四分法取适量,水中煮沸数次排气后,用双氧水和冰乙酸混合液(1:1)于65℃浸泡至可全部分散开。洗净后,用赫氏染色剂进行染色制片,观察纤维形态,分别测定200根纤维的长度和宽度。

#### 1.2.2 化学成分的分析测定<sup>[9]</sup>

化学成分分析试样处理按GB/T2677.1-1993进行。试样水分、灰分、热水抽出物、1% NaOH抽出物、苯-醇抽出物、木素、多戊糖、综纤维素测定分别按GB/T2677.3-1993, GB/T2677.4-1993, GB/T2677.4-1993, GB/T2677.5-1993, GB/T2677.6-1994, GB/T2677.8-1994, GB/T2677.9-1994, GB/T2677.10-1995方法进行。

#### 1.2.3 蒸煮试验方法

利用ZQSI/15L电热回转式蒸煮锅进行蒸煮,分别按文献[10]中“纸浆得率的测定方法”、“蒸煮废液的测定方法”与GB/T1546-1989方法测定其得率、黑液的残碱、有机物含量、二氧化硅含量等蒸煮废液性质与纸浆硬度。

#### 1.2.4 纸浆物理性能的评价<sup>[9~10]</sup>

取适量未漂浆,在PF打浆机中进行适度打浆,测定打浆度,抄造纸样,进行定量、抗张强度、撕裂度、耐破度、耐折度等纸张物理性能的测定,综合评价其制浆性能。

定量、抗张指数、撕裂指数、耐破指数、耐折度测定分别采用GB/T451.2-1989, GB/T453-1989, GB/T455.1-1989, GB/T454-1989, GB/T457-1989方法进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 维管束形态和纤维形态分析

生物显微镜下巨龙竹的维管束形态、维管束横切面、纤维形态如图1~图3所示。巨龙竹具有丛生竹种普遍具有的双断腰型维管束,在中心维管束的外方和内方各有一纤维股。纤维壁厚与腔径差异较大,纤维纤细、挺硬,在显微镜视野中纤维弯曲、缠绕较少。

纤维形态是指纤维的长度、宽度、长度及宽度的均匀性、长宽比、壁厚、壁腔比等, 作为植物纤维原料的特征, 与纸张的性能有密切联系. 巨龙竹的主要纤维形态指标分别列于表 1、表 2、表 3.

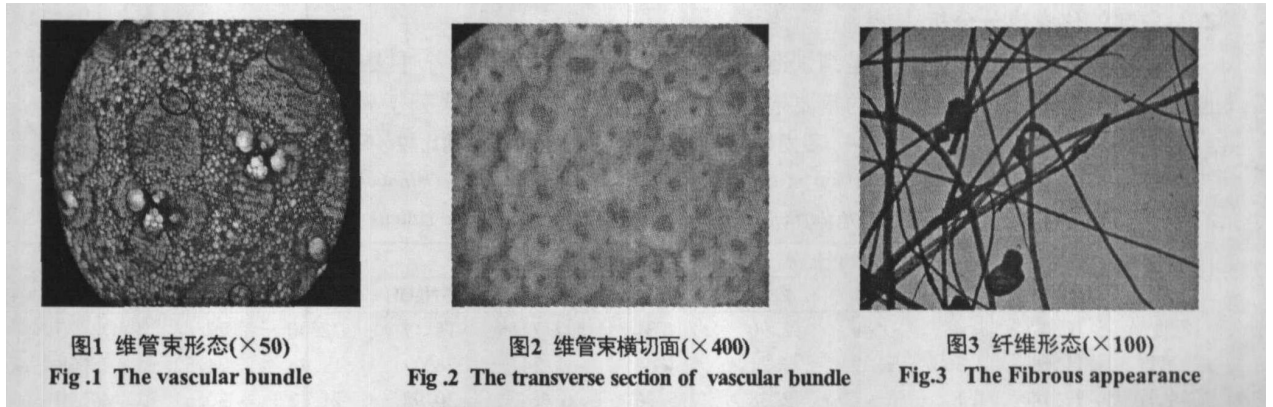


表 1 巨龙竹与毛竹、慈竹<sup>[11]</sup>的纤维长度、宽度与长宽比的比较

Tab.1 Comparison the fiber length, width and ratio of length to width among *Neosinocalamus affinis*, *Phyllostachys pubesdens* and *Dendrocalamus sinicus*

	长度 /mm			宽度 / $\mu\text{m}$			长宽比
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	
巨龙竹	2.90	6.78	0.65	16.05	32.04	6.81	180
毛竹	2.00	5.39	0.48	16.2	33.3	7.8	123
慈竹	1.99	4.77	5.0	15.0	29.4	5.0	133

表 2 巨龙竹与毛竹、慈竹<sup>[11]</sup>的纤维长度分布频率的比较

Tab.2 Comparison of fiber length frequency among

*Neosinocalamus affinis*, *Phyllostachys pubesdens* and *Dendrocalamus sinicus*

长度范围 /mm	0.5	0.5~1.0	1.0~1.5	1.5~2.0	2.0~2.5	2.5~3.0	3.0~3.5	3.5~4.0	4.0
巨龙竹 /%	0	1.5	6.5	13.0	15.0	18.0	18.5	18.5	9.0
毛竹 /%	0	6.5	18.5	28.0	22.0	15.5	7.0	2.5	0
慈竹 /%	2	9	18	23	21	17	6	3	1

表 3 巨龙竹与毛竹、慈竹<sup>[11]</sup>的纤维细胞壁厚、细胞腔径、壁腔比的比较

Tab.3 Comparison of fiber wall thickness, and cavity diameter and its ratio among

*Neosinocalamus affinis*, *Phyllostachys pubesdens* and *Dendrocalamus sinicus*

	腔径 / $\mu\text{m}$			壁厚 / $\mu\text{m}$			壁腔比
	平均	最大	最小	平均	最大	最小	
巨龙竹	4.5	11.2	0.7	5.7	14.6	2.4	180
毛竹	2.9	7.0	1.0	6.6	13.0	3.0	123
慈竹	4.2	-	-	5.7	-	-	133

从表 1、表 2 可见, 巨龙竹纤维平均长度长达 2.9 mm, 是文献报道的毛竹、慈竹纤维平均长度的 1.45 倍以上. 从纤维长度频率分布来看, 巨龙竹纤维长度在 3.0 mm 以上的比例为 46.0%, 比毛竹 9.5%、慈竹 10.0% 的比例高 4.6~4.8 倍. 纤维长度是衡量植物纤维原料优劣最重要的指标之一, 纤维长度长, 可以提高纸张的撕裂度、抗张强度、耐破度、耐折度等纸张强度指标. 因此, 就纤维平均长度和纤维长度分布频率而言, 巨龙竹作为植物纤维原料的质量要优于毛竹、慈竹这两种目前造纸工业使用较多的竹种.

作为造纸原料, 纤维细胞壁的绝对厚度与纸张性能无关, 而壁腔比对纸张的性能有重要影响, 细胞壁薄而腔大的原料的纤维柔软性较好, 相互间易于结合, 抄制的纸张结合强度较大. 壁厚腔小的细胞比较挺硬, 彼此结合力差, 抄制的纸张结合强度较小<sup>[9]</sup>. 从表 3 可见, 巨龙竹纤维细胞壁平均厚度为 5.7  $\mu\text{m}$ , 平

均腔径为  $4.5 \mu\text{m}$ , 壁腔比为 2.53. 与毛竹、慈竹相比较, 巨龙竹的壁腔比较低, 由此可以大致推断出, 巨龙竹浆纤维抄纸时会有比慈竹、毛竹纸浆纤维稍好的缠绕、交织性能, 有利提高纤维间的结合力.

## 2.2 原料的化学成分分析

植物纤维原料的化学成分是判别造纸原料优劣与利用价值的一个重要方面, 同时也是合理利用纤维原料和制定制浆工艺技术条件的重要依据. 巨龙竹化学成分分析结果列于表 4.

表 4 巨龙竹与毛竹、慈竹<sup>[11,14]</sup>的化学成分的比较 /%

Tab 4 Comparison of the chemical component among *Neesosinocalamus affinis*, *Phyllostachys pubesdens* and *Dendrocalamus sinicus*

	水分	灰分	SiO <sub>2</sub>	抽出物				多戊糖	木素	综纤维素
				冷水	热水	苯-醇	1% NaOH			
巨龙竹	10.47	1.43	0.49	2.90	4.31	2.72	15.17	22.40	27.68	73.20
慈竹	11.64	2.36	1.39	3.21	4.64	1.24	24.27	19.46	24.52	75.68
毛竹	12.14	1.10	-	2.38	5.96	0.66 <sup>*</sup>	30.98	21.12	30.67	45.50

注:含<sup>\*</sup>者分别为乙醚抽出物、纤维素.

造纸纤维原料的灰分含量对生产绝缘纸和精制浆外的纸张生产影响不大. 由表 4 可见, 巨龙竹的灰分含量为 1.43%, 与文献报道的毛竹灰分 1.16% 相当, 与慈竹灰分 2.36% 相比则较低. SiO<sub>2</sub> 含量仅为 0.49%, 远较慈竹达 1.39% 的 SiO<sub>2</sub> 含量低. 对制浆与碱回收过程而言, 巨龙竹较低的灰分和 SiO<sub>2</sub> 含量还不会导致较明显的硅干扰.

冷水抽出物、热水抽出物主要反映植物纤维原料中能溶于水的无机盐、植物碱、环多醇、单宁、色素以及果胶质、植物粘液、淀粉、多乳糖等多糖的含量多少. 而 1% NaOH 溶液除能溶解冷水和热水溶出的物质外, 还能溶出部分木素、聚戊糖、聚己糖等. 由表 4 可见, 巨龙竹冷水抽出物、热水抽出物分别为 2.90%, 4.31% 的含量与慈竹分别为 3.21%, 4.64%, 毛竹分别为 2.38%, 5.96% 的含量相比较, 基本处于同一水平. 但巨龙竹 1% NaOH 抽出物 15.17% 的含量远较慈竹 24.27%、毛竹 30.98% 的含量低, 这可能是因为巨龙竹中含有的能被 1% NaOH 溶液溶出的低分子木素、聚戊糖、聚己糖含量较少. 尽管同一原料的 1% NaOH 抽出物含量主要反映原料受光、热、微生物降解的程度, 对不同原料而言, 也可在一定程度上反映碱法制浆得率的相对高低, 但由于碱法蒸煮过程是在远比 1% NaOH 抽出物测定剧烈得多的碱-热-水条件下进行的, 巨龙竹虽具有较低的 1% NaOH 抽出物含量, 能否具有较高得率, 还主要取决于构成纸浆的主要成分纤维素与半纤维素在蒸煮过程中发生碱性降解、剥皮反应、终止反应等影响低制浆得率高低的化学反应的反应程度.

植物纤维原料中的木素、纤维素、半纤维素等主要成分含量对制浆造纸性能有重要影响, 是判断原料使用价值高低的主要评价指标, 并对制浆造纸生产工艺有直接的影响. 在植物纤维原料的主要成分中, 木素是化学法制浆需要去除的部分, 木素含量越高, 代表纤维素和半纤维素含量的综纤维素含量越低, 在蒸煮、漂白过程中消耗的化学药品越多, 制浆得率越低, 生产成本越高. 由表 4 可见, 巨龙竹 27.68% 的木素含量较毛竹 30.67% 的木素含量低, 高于慈竹 24.52% 的木素含量, 而可代表半纤维素的戊糖的含量, 巨龙竹为 22.40%, 比毛竹 21.12% 和慈竹 19.46% 的含量均较高, 纤维易于润胀, 有利于打浆和提高纤维间的结合力. 巨龙竹综纤维素 73.20% 的含量虽较慈竹 75.68% 的含量略低, 但如此水平的综纤维素含量已充分说明单就主要化学成分含量而言, 巨龙竹是一种优良的制浆造纸原料.

## 2.3 蒸煮性能与成浆物理性能的评价

植物纤维原料纤维形态、化学成分是评价其作为制浆造纸原料质量优劣的最主要因素, 能否利用具有良好纤维形态、化学成分组成的巨龙竹生产出质量优良的纸浆, 还要取决于制浆过程中在脱除木素, 对纸浆进行纯化时, 所含的纤维素、半纤维素是否易于产生各种降解反应而使纸浆质量劣化. 与根据化学成分、纤维形态来判断植物纤维原料作为制浆造纸原料的价值这样一种相对静态方法比较, 根据目前的工业化生产方法对植物纤维原料进行制浆性能和成浆物理性能的评价更能了解其工业化生产的利用价值.

硫酸盐法蒸煮目前仍是化学法制浆中最主要的生产方法, 本试验采用硫酸盐法对巨龙竹进行了蒸煮实验. 根据对巨龙竹的化学成分的分析结果, 参照其他竹种的蒸煮工艺条件, 经初步探索实验后, 确定了列于表 5 的蒸煮工艺条件. 蒸煮实验结果、成浆物理性能指标测定结果列于表 6、表 7.

表 5 蒸煮工艺条件

Tab 5 Cooking condition

碱量 /%	硫化度 /%	液比	升温曲线 /min			
			60 ~ 120	20 保温	120 ~ 165	165 保温
16.0	25.0	1 3.5	40	110	30	70

表 6 蒸煮实验结果

Tab 6 Cooking result

卡伯值	得率 /%	黑液性质					
		残碱 /g L <sup>-1</sup>	总固形物 /g L <sup>-1</sup>	无机物 /g L <sup>-1</sup>	有机物 /g L <sup>-1</sup>	SO <sub>2</sub> /g L <sup>-1</sup>	燃烧值 /kJ g <sup>-1</sup>
22.8	44.0	10.30	92.40	73.27	119.13	1.45	- 13.12

表 7 巨龙竹成浆造纸物理性能指标

Tab 7 Papermaking property index of *Dendrocalamus sinicus* pulp

	打浆度	定量	抗张指数	撕裂指数	耐破指数	耐折度
	/°SR	/g cm <sup>-2</sup>	/N·m·g <sup>-1</sup>	/mN·m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	/kPa·m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup>	/9.8N·次
巨龙竹	47	67	41.7	24.5	3.1	215
木浆 <sup>(1)</sup>	45	60	68.0	11.0	4.5	-

注 (1): 木浆为 C 级未漂硫酸盐针叶木浆 (QB/T1679 - 1993), 卡伯值为 35.

在表 5 所示蒸煮实验条件下, 从表 6 可见, 巨龙竹能制得卡伯值为 22.8, 粗浆得率为 44.0% 的硫酸盐浆, 对未加水洗涤, 挤压粗浆所得黑液的分析表明, 黑液残碱为 10.30 g/L. 结合黑液残碱偏高、卡伯值较低 (一般针叶木未漂浆卡伯值达 30 以上) 及所得浆中未见未蒸解物的成浆情况, 可以推测出: 巨龙竹硫酸盐蒸煮在本实验所采用的升温条件下, 蒸煮用碱量可进一步降低至 14% ~ 15%, 还能制得得率大于 44%, 卡伯值约为 30 的软浆. 与文献报道的毛竹、慈竹、白夹竹、撑篙竹等竹种<sup>[12, 14, 15]</sup> 制得硬度基本相近时纸浆比较, 用碱量较低而得率较高, 表明巨龙竹与常用制浆竹种相比, 具有成浆较容易的特点. 另外, 巨龙竹黑液的有机物含为 119.13 g/L, 占总固形物含量的 61.92%, SO<sub>2</sub> 含量为 1.45 g/L (占总固形物含量为 0.73%) 与文献 [16] 报道的落叶松黑液 SO<sub>2</sub> 含量 (0.58%) 近似, 远低于蔗渣、芦苇、麦草黑液 SO<sub>2</sub> 的含量 (分别为 2.36%、2.38%、7.48%). 也较文献 [15] 报道的毛竹黑液 SO<sub>2</sub> 含量 (2.08%) 低. 巨龙竹黑液的燃烧值达 - 13.12 kJ/g, 与文献 [16] 报道的马尾松、慈竹黑液燃烧值相近 (分别为 - 13.92 kJ/g, - 13.98 kJ/g).

纸张的物理强度是纤维的平均长度、纤维间的结合力、纤维自身的强度、纤维在纸张中的定位等因素复杂作用的综合反映. 其中, 抗张强度、耐破度受纤维间的结合力的影响程度较高, 而撕裂度、耐折度则更易受到纤维自身强度、纤维平均长度的影响. 从表 7 可以看出, 实验蒸煮条件下, 巨龙竹成浆的物理性能指标与 C 级硫酸盐针叶木浆比较, 巨龙竹浆具有撕裂度明显较高的优势 (也远远超过 A 级硫酸盐浆撕裂指数 13.0 mN·m<sup>2</sup>/g 的要求), 耐折度也达到较高水平, 而抗张强度、耐破度则明显较低. 这与巨龙竹纤维细胞壁较厚, 纤维本身强度较高, 纤维较挺硬, 纤维间缠绕、交织能力略差而导致纤维间结合力较低, 同时纤维平均长度比针叶木略低的特性相一致. 较高的撕裂强度特性也说明巨龙竹浆尤其适宜作为撕裂度、挺度要求较高的包装纸和纸板、高级文化用纸的纤维原料.

### 3 结论

综上所述, 对德宏州巨龙竹的化学成分分析、纤维形态、蒸煮实验和成浆物理性能评价的研究表明, 与造纸工业目前使用较多的慈竹、毛竹相比较, 巨龙竹具有纤维平均长度较长, 壁腔比较低、长宽比较高、木素

含量较低的优势;巨龙竹硫酸盐法蒸煮成浆容易,具有撕裂强度远高于针叶木硫酸盐浆的特性.其远较其它竹种高得多的单产量与良好的制浆造纸性能使其具备了在德宏州可作为制浆造纸竹浆林基地建设的主要竹种之一.

#### 参考文献:

- [1] 西南林学院,云南省科学技术委员会,云南省林业厅,等.云南竹类资源及其开发利用[M].昆明:云南科技出版社,1995. 5~12,58~60,110~114.
- [2] 辉朝茂,郝吉明,杨宇明,等.关于中国竹浆产业和纸浆竹林基地建设的探讨[J].中国造纸学报,2003,18(1):152~155.
- [3] 辉朝茂,杨宇明,杜凡,等.云南竹林基地建设应重视竹种选择和发展区划问题[J].云南林业,2004,25(2):24~25.
- [4] 谭宏超,武国华.巨龙竹的栽培及效益分析[J].云南林业,2003,24(3):19.
- [5] 杜凡,赵晓惠,杨宇明,等.巨龙竹的变异类型及其引种区划的研究[J].竹子研究汇刊,2001,20(1):19~26.
- [6] 普晓兰.巨龙竹生物学特性的研究[J].南京林业大学学报(自然科学版),2004,28(2):93~93.
- [7] 普晓兰,杜凡.巨龙竹竹材结构及其变异的解剖学研究[J].西南林学院学报,2003,23(1):1~5.
- [8] 杨本鹏,张树珍,辉朝茂,等.巨龙竹的组织培养和快速繁殖植物[J].生理学通讯,2004,40(3):346~346.
- [9] 中国轻工业标准汇编.造纸卷(上、下册)[M].北京:中国轻工出版社,1999.
- [10] 石淑兰,何福望.制浆造纸分析与检测[M].北京:中国轻工出版社,2003.1~48,91~116,159~163.
- [11] 制浆造纸手册编写组.制浆造纸手册(第一分册:纤维原料和化工原料)[M].北京:轻工出版社,1988.143,147~150,173~175.
- [12] 制浆造纸手册编写组.制浆造纸手册(第三分册:碱法制浆)[M].北京:轻工出版社,1988.242~268.
- [13] 杨淑蕙.植物纤维化学·第三版[M].北京:中国轻工出版社,2001.18~19,47.
- [14] 胡惠仁,石淑兰,魏德津.四种竹材硫酸盐法制浆的比较[J].天津造纸,1999,(4):2~8.
- [15] 朱先军,伍红,詹怀宇,等.粤东四种竹子硫酸盐法制浆的研究[J].造纸科学与技术,2004,23(2):10~11.
- [16] 造纸工业碱回收编写组.造纸工业碱回收[M].北京:轻工出版社,1979.59,204.

(上接第 76 页)

表 2 为构件破坏时,柱的极限承载力  $N_u^T$ 、柱中点最大挠度  $e_u^T$  等的计算值和试验值的对比.试件 HT6 的极限承载力及由外加荷载所引起的附加弯矩的计算值偏大于实测值,而柱中点最大挠度偏小;试件 HT8 的极限承载力和附加弯矩的计算值小于实测值,而附加弯矩的计算结果偏大于实测结果.

表 2 柱极限承载力及挠度的计算值和试验值的对比

Tab 2 Comparison of ultimate load and center deflection between calculation and experiment

试件 编号	恒温值 /	极限承载力 $N_u^T$ /kN		柱中点最大挠度 $e_u^T$ /mm		附加弯矩 $N_u^T$ /kN·m <sup>-1</sup>	
		计算值	实测值	计算值	实测值	计算值	实测值
HT6	600	484	425	1.25	2.2	0.935	0.605
HT8	800	305	318	4.93	5.4	1.717	1.50

## 4 结语

在加热初期,柱内测点温度的计算值稍大于实测值,随着温度的升高,实测温度的增长较快,超过了计算曲线,但两者相差不大,其荷载-挠度变化规律与实测曲线基本相同,当恒温值较高时,承载力的计算值偏小,但误差不大.通过试验值和计算值的对比分析表明:以有限元分析软件计算的混凝土柱内部的温度分布和变形作为后续加载计算的初始条件是可行的,在分析柱的高温力学性能时采用先升温后加载荷载步法所得到的结果是可参考的.

#### 参考文献:

- [1] 胡海涛.三面高温时混凝土轴心受压柱强度和变形试验研究[J].建筑结构,2004,34(1):48~50.
- [2] 孙劲峰.多种温度工况下钢筋混凝土基本构件性能的比较研究:[硕士学位论文][D].北京:清华大学,2001.
- [3] 胡海涛.高温时高强混凝土压弯构件的试验研究及理论分析:[博士学位论文][D].西安:西安建筑科技大学,2002.