

## 竹纤维结构及其性能研究

蒋建新<sup>1</sup> 杨中开<sup>2</sup> 朱莉伟<sup>1</sup> 史丽敏<sup>2</sup> 闫立杰<sup>1</sup>

(1 北京林业大学材料科学与技术学院 2 北京服装学院服装材料研究开发与评价北京市重点实验室)

**摘要:**该文采用红外光谱(IR)、X-射线衍射(X-ray)、差示扫描量热(DSC)等方法对厚壁毛竹、唐竹、茶秆竹、黄金间碧玉竹、慈竹等竹材的化学组成、纤维形态、结晶结构、机械和热性能进行了研究。结果表明:竹材苯醇抽提物含量较木材高得多,木素含量 19.1%~25.3%,戊聚糖含量 14.9%~22.6%,纤维素含量除厚壁毛竹外均高于 50%;慈竹纤维平均长度最长(1.861 mm);竹材纤维的长宽比均大于木材,唐竹纤维的长宽比(142)最大。IR、X-ray 分析表明,竹纤维结晶体属于纤维素I,茶秆竹纤维的结晶度最大;DSC 热分析图谱可作为鉴别各种纤维材料的方法之一。此外,研究了蒸汽爆破处理前后慈竹成分的变化。经过处理后的慈竹,其纤维素含量从 50.5%提高到 69.2%,纤维素结晶度也有所增加,纤维断裂强度指标满足纺织材料要求,证明蒸汽爆破手段是开发竹纤维复合材料和服用竹纤维的一种有效预处理方法。

**关键词:**竹材;纤维结构;纤维性能;蒸汽爆破

中图分类号:TS 102.5;S 795 文献标识码:A 文章编号:1000-1522(2008)01-0128-05

JIANG Jian xin<sup>1</sup>; YANG Zhong kai<sup>2</sup>; ZHU Li wei<sup>1</sup>; SHI Li min<sup>2</sup>; YAN Li jie<sup>1</sup>. **Structure and property of bamboo fiber**. *Journal of Beijing Forestry University* (2008) 30(1) 128-132[Ch., 15ref.]

<sup>1</sup> College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, 100083, P. R. China;

<sup>2</sup> Beijing Municipal Key Laboratory of Clothing Materials R&D and Assessment, Beijing Institute of Clothing Technology, 100029, P. R. China.

The chemical composition, fiber characteristics, crystalline structure, mechanical properties and thermal behavior of the five bamboo species, ie *Phyllostachys edulis* cv. *Pachyloe*, *Bambusa tootsik*, *Arundinaria amabilis*, *B. vulgaris*, *Dendrocalamus affinis*, were studied by IR, X ray, DSC and chemical analyses. The results indicated that the benzene ethanol extractive content of bamboo was higher than that of wood materials, the content of lignin and xylan was 19.1%-25.3% and 14.9%-22.6% respectively. Excepting *P. edulis*, the content of cellulose in other bamboo species was over 50%. The average length of fiber of *D. affinis* was the longest (1.861 mm). The length/width ratio of bamboo fiber was also higher than that of wood, and it was the highest for *B. tootsik*, which reached 142. The results of IR and X ray confirmed that crystalline structure of bamboo fiber was cellulose I, and *A. amabilis* had the highest crystallinity index. The differential thermal analysis (DSC) can be one of the methods to identify various fiber materials. After steam explosive pretreatment, cellulose content of *D. affinis* had increased from 50.5% to 69.2%, the crystallinity index had increased and the breaking tenacity of bamboo fibers was suitable for producing textile products, indicating that steam explosion is an useful pretreatment for bamboo fibers being made into composite materials and textiles.

**Key words** bamboo wood; fiber structure; fiber property; steam explosion

竹材为我国重要的森林资源之一。竹子的应用有着悠久的历史,被广泛应用于各种行业<sup>[1-3]</sup>。

近几年来,国内外研究开发的热点是竹子束纤

维制备增强复合材料<sup>[3]</sup>以及纺织用竹子纤维<sup>[4-9]</sup>。陈炳洪等<sup>[9]</sup>发明了一种用机械碾压机去除竹髓层生产竹纤维增强胶合板的方法,这种胶合板可提高抗

收稿日期:2006-10-14

http://www.bjfujournal.cn, http://journal.bjfu.edu.cn

基金项目:北京市服装材料研究开发与评价重点实验室项目(2004ZK-2)。

第一作者:蒋建新,博士,副教授。主要研究方向:林产化工材料及生物质能源。电话:010-62338152 Email: jiangjx@bjfu.edu.cn 地址:100083北京林业大学材料科学与技术学院。Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

弯强度 15% 以上。纺织用竹纤维根据生产方法不同有竹原纤维和竹粘胶纤维两种。竹纤维由于其几何形态和结构特性,具有良好的吸湿性、透气性、耐磨性和染色性能<sup>[3]</sup>。国内外关于纺织用竹材纤维的基础研究报道较少,本研究以我国分布较广的厚壁毛竹(*Phyllostachys edulis* cv. *Pachyloe*)、唐竹(*Bambusa tootsik*)、茶秆竹(*Arundinaria amabilis*)、黄金间碧玉竹(*Bambusa vulgaris* cv. *Vittata*)、慈竹(*Dendrocladus affinis*)以及蒸汽爆破慈竹为原料,进行化学组成、结构、机械和热性能的比较研究,以期作为竹材新型纤维材料的开发提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与仪器

原料:厚壁毛竹和黄金间碧玉竹由江西农业大学林学院提供,唐竹、茶秆竹采于福建,慈竹来自重庆市涪陵区。竹材均为 2 年生,每种竹材伐取 3 株全秆,从每株秆茎中部(秆部全高 1/2 处)截取 1 m 长试样。每种竹材相同部位的 3 段试样分别去竹节,劈成竹片(长 50 mm,厚 3~5 mm),混合均匀,部分试样磨碎并通过 40 目筛,密封封存;慈竹竹片经蒸汽爆破(压力 15 kg/cm<sup>2</sup>,时间 4 min),水洗、过滤、磨碎并通过 40 目筛,密封封存。

仪器:超级恒温水浴、电子天平、烘箱、离心机、真空干燥箱、红外光谱仪(TENSOR 27)、X-衍射仪(Shimadzu XRD-6000)、差示扫描量热分析仪(Shimadzu DSC-60/60A)、YGOOIA 纤维电子强力仪(太仓纺织仪器)。

### 1.2 化学组分测定

竹材磨碎得到粒径为 40~60 目筛之间的竹粉,在测定含水率后分别进行以下成分的分析:纤维素含量采用硝酸乙醇重量法测定,果胶含量采用咔唑硫酸分光光度计法测定,试样灰分、苯-醇抽出物、木素、戊聚糖测定分别按文献[7]规定的方法进行。

### 1.3 纤维结构表征

#### 1.3.1 纤维细胞形态分析

将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 30% 硝酸和一些氯酸钾煮沸试样成黄白色或白色,水洗至中性,赫氏染色剂进行染色制片,观察纤维形态,分别测定 100 根纤维的长度和宽度。

将竹材剖切为宽 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,赫氏染色剂染色制片,在生物显微镜下进行纤维细胞壁、细胞腔参数的测定。

#### 1.3.2 红外光谱分析

将硝酸-乙醇处理得到的纤维素样品研磨成粉

末,KB 制片后通过 TENSOR 27 进行红外光谱测定,测定范围 4 000~400 cm<sup>-1</sup>,实验重复 3 次,结晶指数计算后取平均值。

#### 1.3.3 X-射线衍射测定

将硝酸-乙醇处理得到的纤维素样品研磨成粉末,压入样品架内在 Shimadzu XRD-6000 仪器上测定。实验条件:CuK $\alpha$  靶(射线波长  $\lambda=0.154$  nm),电压 40 kV,电流 30 mA,衍射方向  $\theta\sim 2\theta$  联动扫描方式,旋转半圆锥角  $2\theta$  从 5°~40°。实验重复 3 次,结晶指数计算后取平均值。

### 1.4 纤维性能分析

将硝酸乙醇处理得到的纤维素样品研磨成粉末,分别称取样品量 2.5 mg,把试样放入样品池中,然后放入 DSC 中让仪器走基线,待基线稳定后,开始测定。氮气流速为 40 mL/min;升温速率 10°C/min,温度范围 65~400°C。

将蒸汽爆破慈竹纤维部分试样水洗、烘干,取 10 批次分别进行直径、长度、线密度、断裂伸长率、断裂强度等物理机械性能测试。

## 2 结果与讨论

### 2.1 竹材化学组成

从表 1 中可以看出,竹材含灰分 2%~3%,而一般木材所含灰分不到 1%。竹材中苯醇抽提物含量较木材高<sup>[3]</sup>,尤其厚壁毛竹、唐竹、黄金间碧玉竹等比木材高得多。竹材中木素含量与阔叶材相近,其中黄金间碧玉竹含量最低。戊聚糖含量则比阔叶材稍高,比针叶材高 2 倍以上。纤维素含量除厚壁毛竹外均高于 50%,与针阔叶材相近<sup>[3]</sup>。爆破慈竹试样中纤维素含量已超过黄麻工艺纤维中的纤维素<sup>[3]</sup>,比原料慈竹的纤维素提高了 37%,戊聚糖含量减少至 6.51%,木素含量亦有所降低。慈竹蒸汽爆破是原料在高压、高温介质下汽相蒸煮,半纤维素和木素产生一些酸性物质,使半纤维素降解成可溶性糖,同时复合胞间层的木素软化和部分降解,从而削弱了纤维间的粘结,可为竹纤维进一步分离打下基础。竹材及蒸汽爆破处理竹材化学组成及其变化对制备纺织用竹原纤维有理论指导意义,原料中纤维素含量越高,产品的得率越高;制备竹原纤维的过程,就是部分脱除戊聚糖、木素和果胶的过程。

### 2.2 纤维结构

#### 2.2.1 纤维形态

纤维形态指纤维的长度、宽度、长宽比、壁厚、壁腔比等。纤维原料的形态,与纸张的性能有密切联系,5 种竹材的主要纤维形态指标见表 2。一般认为,为长宽比大的纤维,成纸时单位面积中纤维之

表1 竹材化学组成

TABLE 1 Chemical components of different species of bamboo

组成	厚壁毛竹	唐竹	茶秆竹	黄金间碧玉竹	慈竹	爆破慈竹
纤维素/%	45.31	54.20	53.77	54.17	50.51	69.20
戊聚糖/%	22.48	14.92	17.00	21.52	22.64	6.51
木素/%	24.11	25.30	23.49	19.11	23.65	20.76
苯醇抽提物/%	7.89	9.35	4.04	7.45	2.34	1.17
灰分/%	3.18	2.97	3.07	2.78	2.11	0.36
果胶/%	0.75	0.68	0.73	0.87	0.92	—
pH	5.5	5.3	4.9	5.8	5.8	4.5

间相互交织的次数多,纤维分布细密,成纸强度高,这一规律同样适用于纺织服用纤维。慈竹纤维平均

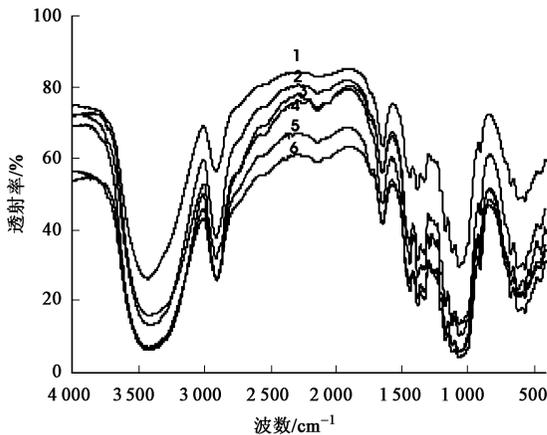
表2 5种竹纤维的形态参数

TABLE 2 Fiber morphological characteristics of five bamboo species

种类	纤维长度/mm		宽度/ $\mu\text{m}$		长宽比	壁厚/ $\mu\text{m}$	壁腔比
	平均	范围	平均	范围			
厚壁毛竹	1.254	0.729~2.162	10.404	5.776~18.839	121	6.3	4.20
唐竹	1.435	0.667~2.554	10.122	5.087~18.615	142	5.9	2.17
茶秆竹	1.486	0.861~2.999	13.450	6.145~27.346	110	5.5	2.44
黄金间碧玉竹	1.690	0.954~2.741	13.512	6.280~21.530	125	5.3	2.79
慈竹	1.861	0.860~3.794	15.560	9.514~22.058	120	5.6	2.60

2.2.2 红外光谱分析

根据纤维的红外光谱吸收谱图可以推断出化学键类型和数量等,还能反映纤维素纤维结晶度的大小。图1可以看出5种竹纤维以及蒸汽爆破慈竹纤维的红外光谱吸收图谱相似,具有一般纤维素的特征吸收峰。 $2899\text{cm}^{-1}$  CH 伸缩振动, $1637\text{cm}^{-1}$  吸附水吸收峰, $1433\text{cm}^{-1}$  CH<sub>2</sub> 弯曲振动, $1373\text{cm}^{-1}$  CH 弯曲振动, $1320\text{cm}^{-1}$  OH 面内变形振动, $1059\text{cm}^{-1}$  环状C—O—C的C—O伸缩振动, $897\text{cm}^{-1}$  环状C—O—C 不对称面外伸缩振动/CH<sub>2</sub>(CH<sub>2</sub>OH) 非平面摇摆振动。



1. 唐竹;2. 爆破慈竹;3. 慈竹;4. 茶秆竹;  
5. 厚壁毛竹;6. 黄金间碧玉竹

图1 竹材纤维红外光谱

FIGURE 1 Infrared spectra of bamboo fibers

长度1.861 mm,最大纤维长度达3.794 mm,纤维长度标准差系数28.2%。其次是黄金间碧玉竹,纤维长度标准差系数24.0%。5种竹材的长宽比均较大(>110),大于一般的针阔叶材(50~70),唐竹的长宽比最大(142)。

与造纸原料类似,纤维的壁腔比对纺织用纤维的性能也有重要影响。细胞壁薄而腔大的原料其纤维柔软性较好,相互间易于结合,纤维间的结合强度较大;壁厚腔小的细胞比较硬,彼此结合力差,纤维间的结合强度较小。从表2可见,除厚壁毛竹外,唐竹等4种竹纤维壁腔比均较小,因而有较好的缠绕、交织性能,有利提高纤维间的结合力。

红外光谱可以确定纤维素纤维的结晶度和加工对其结晶度变化的影响程度<sup>[9-11]</sup>。 $1373\text{cm}^{-1}$ 吸收峰的吸收强度与 $2899\text{cm}^{-1}$ 吸收峰的吸收强度之比( $A_{1373}/A_{2899}$ )为纤维素I和II的相对结晶度, $1433\text{cm}^{-1}$ 吸收峰的吸收强度与 $897\text{cm}^{-1}$ 吸收峰的吸收强度之比( $A_{1433}/A_{897}$ )也可用于表征纤维素I和II的相对结晶度。从表3可知,唐竹纤维素的结晶度指数最高,其他纤维素结晶度大小依次为茶秆竹、慈竹、黄金间碧玉竹和厚壁毛竹,蒸汽爆破处理后慈竹纤维素结晶度略有提高。

表3 竹纤维的结晶指数

TABLE 3 Crystallinity index of bamboo fibers

	厚壁毛竹	唐竹	茶秆竹	黄金间碧玉竹	慈竹	爆破慈竹
$A_{1373}/A_{2899}$	0.802	0.908	0.841	0.827	0.827	0.831
$A_{1433}/A_{897}$	0.764	0.888	0.807	0.793	0.804	0.815
X ray	0.677	0.761	0.738	0.689	0.723	0.733

2.2.3 X-射线衍射分析

5种竹纤维以及蒸汽爆破慈竹纤维的X-射线衍射曲线见图2。竹材纤维衍射峰的半圆锥角( $2\theta$ 角)是一致的,分别为 $15.2^\circ$ 、 $22.6^\circ$ 和 $34.8^\circ$ ,与棉纤维相同,表明竹纤维结晶体属于典型的纤维素I。应用X-射线衍射对纤维进行测试可以推断纤维的结构情况。根据X-射线衍射图谱中特征衍射峰可推断纤维晶体类型,还可估算纤维的结晶度大小,即用X-射线结晶指数来表示结晶度<sup>[13]</sup>。

$$X\text{-射线结晶指数} = (I_{002} - I_{am}) / I_{002}$$

式中,  $I_{002}$  代表 002 面峰即结晶区的衍射强度;  $I_{am}$  为  $2\theta = 18^\circ$  时峰, 即无定形区的衍射强度。

竹材纤维中, 唐竹纤维的结晶度最大(76.1%), 厚壁毛竹纤维的结晶度最小(67.7%)。蒸汽爆破处理对慈竹纤维的结晶度有一定的影响, 纤维结晶度从 72.3% 上升至 73.3%。这说明, 蒸汽爆破处理过程中纤维素较疏松的无定形区遭到了破坏, 而结构规则的结晶区还未受到破坏, 使得结晶度略有上升。这一结论与蒸汽爆破处理使木材纤维结晶度升高相一致<sup>[9]</sup>。由 X-射线衍射图谱中特征衍射峰估算得到的纤维结晶度大小规律与红外光谱分析结果是一致的。

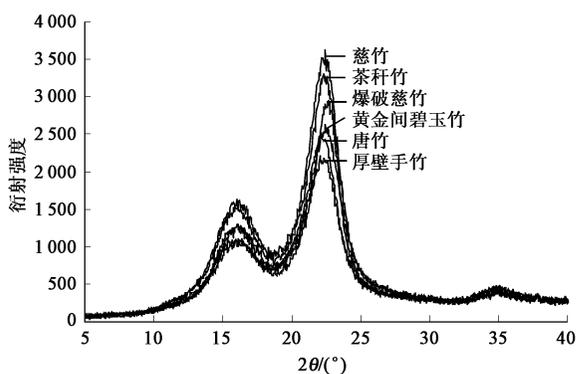


图 2 竹材纤维 X-射线衍射曲线  
FIGURE 2 Xray patterns of bamboo fibers

### 2.3 纤维热性能与机械性能

由图 3 和表 4 的 DSC 分析结果可知, 竹纤维在氮气气氛中的最大吸热峰温度约  $320 \sim 340^\circ\text{C}$ , 这是纤维素的热裂解吸热峰, 其中厚壁毛竹热裂解峰温  $320^\circ\text{C}$ 、吸热量  $290.5 \text{ J/g}$  均为试样中的最低值, 而茶秆竹热裂解吸热量最大、唐竹热裂解峰温最高。结果表明, 纤维结晶度越高, 则纤维热裂解时吸热量和峰温就越大。经蒸汽爆破处理的慈竹纤维与未处理的相比, 最大吸热峰温度相差不大, 而其热裂解吸热量较小。因蒸汽爆破处理对慈竹纤维分子链间氢键作用和化学键连接有一定的影响, 导致慈竹纤维热裂解时吸热量减小。

表 4 竹纤维吸热峰温度和吸热值

TABLE 4 Temperature and enthalpy of DSC endothermic peak for bamboo fibers

纤维	厚壁毛竹	唐竹	茶秆竹	黄金间碧玉竹	慈竹	爆破慈竹
起始温度/ $^\circ\text{C}$	304.6	318.2	313.3	300.4	349.2	353.4
终止温度/ $^\circ\text{C}$	327.4	354.5	351.6	338.5	357.2	360.4
峰温/ $^\circ\text{C}$	320.2	340.2	336.7	328.0	335.7	337.3
吸热值/ $(\text{J g}^{-1})$	290.5	350.0	498.2	492.4	479.2	447.8

竹纤维的 DSC 分析结果与文献 [12] 报道的棉纤维、麻纤维等有明显的区别。一方面由于热现象本身

的特性, 特别是由对流产生的热转移是一种非常复杂的物理过程, 热分析曲线不可避免地受到有关设备的结构装置、实验操作条件和其他各种因素的影响; 另一方面, 由于竹纤维、棉纤维、麻纤维的微观结构、分子链间氢键作用和纤维结晶度存在较显著的差异, 即使竹纤维本身不同种竹子之间也存在差异<sup>[13-14]</sup>。

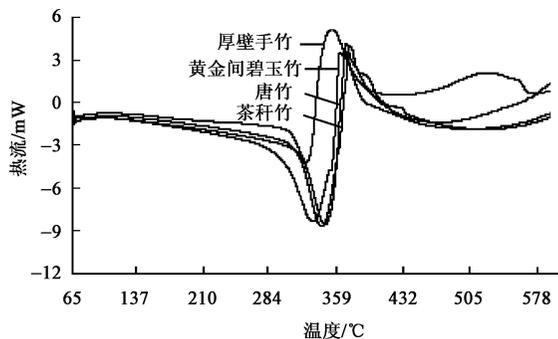


图 3 竹材纤维 DSC 曲线

FIGURE 3 DSC curves of bamboo fibers

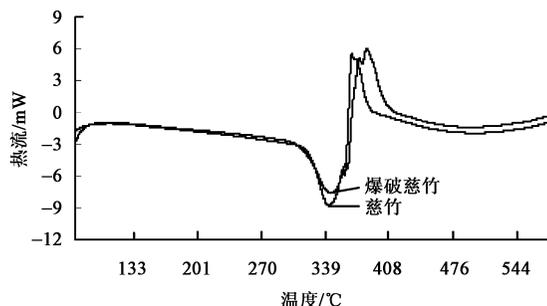


图 4 慈竹和蒸汽爆破慈竹纤维的 DSC 曲线

FIGURE 4 DSC curves of normal bamboo fibers and steam explosive ones for *D. affinis*

纤维的长度、线密度、强度不仅影响其可纺织性能, 还在很大程度上影响织物的耐用性、手感、悬垂性、舒适性等。一般要求纺织用纤维的线密度小于  $5 \text{ dtex}$ , 断裂强度  $2.5 \text{ CN/dtex}$  左右, 长度  $20 \sim 30 \text{ mm}$ 。表 5 列出了蒸汽爆破慈竹纤维物理性能测定结果,

表 5 蒸汽爆破慈竹纤维的物理性能

TABLE 5 Physical properties of bamboo fibers for steam explosive *D. affinis*

性能	直径/ mm	线密度/ dtex	长度/ mm	断裂伸长 率/%	断裂强度/ ( $\text{CN dtex}^{-1}$ )
1	0.087 5	31.312 9	20	2.0	3.630 5
2	0.132 5	71.802 4	15	1.5	0.818 9
3	0.115 0	54.088 3	25	2.5	2.239 5
4	0.112 5	51.762 2	20	2.0	2.423 4
5	0.097 5	38.879 1	17	1.7	2.258 5
6	0.122 5	61.373 3	42	4.2	2.331 3
7	0.090 0	33.127 8	16	1.6	1.278 0
8	0.105 0	45.090 6	18	1.8	1.982 1
9	0.087 5	31.312 9	35	3.5	7.148 2
10	0.125 0	63.903 9	20	2.0	2.269 7

纤维的长度和断裂强度指标可以达到服用要求,但纤维线密度还不符合纺纱要求,需要进一步细化处理。

### 3 结论与讨论

1) 竹材中尤其厚壁毛竹、唐竹、黄金间碧玉竹等苯醇抽提物含量比木材高得多。竹材中木素含量与阔叶材相近,戊聚糖含量则比阔叶材稍高,纤维素含量除厚壁毛竹外均高于50%,与针阔叶材相近。

2) 慈竹纤维平均长度最长,最大纤维长度达3.794 mm;5种竹材的长宽比大于一般的针阔叶材,唐竹的长宽比最大(142)。与厚壁毛竹相比,唐竹等4种竹纤维的壁腔比较小,因而唐竹、福建茶秆竹、黄金间碧玉竹以及慈竹纤维有较好的缠绕、交织性能,有利于提高纤维间的结合力。

3) 竹纤维具有纤维素的特征红外光谱吸收峰和X-衍射峰 $2\theta$ 角。用红外光谱吸收强度确定的纤维素结晶度大小规律与由X-射线衍射分析结果是一致的,在所分析的竹纤维中,唐竹纤维的结晶度最大,厚壁毛竹纤维的结晶度最小。

4) 竹纤维在氮气气氛中的热裂解吸热峰峰温约 $320\sim 340^{\circ}\text{C}$ ,厚壁毛竹的热裂解峰温 $320^{\circ}\text{C}$ 、吸热量 $290.5\text{J/g}$ 均为试样中的最低值,而茶秆竹热裂解吸热量最大、唐竹热裂解峰温最高。DSC热分析图谱作为有机物的指纹图谱,辅以其他手段可以作为鉴定与鉴别各种纤维材料的方法之一。

5) 蒸汽爆破慈竹试样比原料慈竹纤维素提高了37%,戊聚糖含量大幅度降低。蒸汽爆破处理对慈竹纤维的结晶度和热裂解峰温有一定的影响,但变化不大。蒸汽爆破慈竹纤维的长度和断裂强度指标可以达到服用要求,但在纤维线密度方面还需要进一步的细化处理。

#### 参 考 文 献

[ 1 ] 陈嵘.竹的种类及栽培利用[M].北京:中国林业出版社,1984;260-266.  
CHEN R. *Species and utilizations of bamboo and its breeding* [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1984; 260-266.

[ 2 ] 杨淑蕙.植物纤维化学[M].北京:中国轻工业出版社,2001;48-66.  
YANG S H. *Hant fiber chemistry* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2001; 48-66.

[ 3 ] THWE M M, HAO K. Characterization of bamboo glass fiber reinforced polymer matrix hybrid composite [J]. *Journal of Materials*

*Science Letters*, 2000, 19: 1 873-1 876.

[ 4 ] 柳世龙,周贻华.利用竹纤维开发舒适抗菌针织面料[J].天津纺织科技,2004,42(3):38-40.  
LIU S L, ZHOU Y H. Development of anti bacterial comfortable knitted fabrics using bamboo fiber [J]. *Tianjin Textile Technology*, 2004, 42(3): 38-40.

[ 5 ] RAY A K, DAS S K, MONDAL S. Microstructural characterization of bamboo [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2004, 39: 1 055-1 060.

[ 6 ] 陈炳洪.竹材纤维的制取方法;中国,01123617.5[P].2004-04-28.  
CHEN B H. Preparation method of bamboo fiber; China, 01123617.5[P]. 2004-04-28.

[ 7 ] 石淑兰.制浆造纸分析与检测[M].北京:中国轻工业出版社,2003;10-34.  
SHI S L. *Analysis and determination of pulp and paper* [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003; 10-34.

[ 8 ] 陈琼华,于伟东,黄麻纤维的形态结构及组分研究现状[J].中国麻业,2005,27(5):254-258.  
CHEN Q H, YU W D. Investigation on the morphology, microstructure and chemical component of Jute fiber [J]. *Hant Fibers and Products*, 2005, 27(5): 254-258.

[ 9 ] KOSI KOVA B, EBRINGEROVA A, KACURAKOVA M. Effect of steaming on the solubility and structural changes of wood lignin-polysaccharide complex [J]. *Cellulose Chemistry and Technology*, 1995, 29(6): 683-690.

[ 10 ] DAWY M, NADA A A. IR and dielectric analysis of cellulose and its derivative [J]. *Polymer Plastics Technology and Engineering*, 2003, 42(4): 643-658.

[ 11 ] BALDINGER T, MOOBAUER J, SIXTA H. Supermolecular structure of cellulosic material by Fourier Transform Infrared Spectroscopy calibrated by WAXS and  $^{13}\text{C}$ NMR [J]. *Lenzing Berichte*, 2000, 79:15-17.

[ 12 ] 唐人成,杨旭红,王华杰.纺织用天然竹纤维的结构和热性能[J].林产化学与工业,2004,24(1):43-47.  
TANG R C, YANG X H, WANG H J. Structure and thermal behavior of natural bamboo fibers for textile purposes [J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2004, 24(1): 43-47.

[ 13 ] STURCOVA A, HSI I, APPERLEY D C. *et al*. Structural details of crystalline cellulose from higher plants [J]. *Biomacromolecules*, 2004, 5(4): 1 333-1 339.

[ 14 ] NEGULESCU I I, KWON H, COLLIER B J. Determining fiber content of blended textiles [J]. *Textile Chemist and Colorist*, 1998, 30(6): 21-25.

[ 15 ] BASAL G, OXENHAM W. Comparison of properties and structures of compact and conventional spun yarns [J]. *Textile Research Journal*, 2006, 76(7): 567-575.

(责任编辑 李文军)