

毛竹采伐剩余物的化学成分、纤维形态及纸浆性能

李媛媛, 张双燕, 王传贵, 方徐勤

(安徽农业大学, 安徽 合肥 230036)

摘要: 为了更好地利用毛竹 *Phyllostachys edulis* 采伐剩余物, 以4年生毛竹采伐剩余物竹枝和竹梢为研究对象, 采用体视显微镜、傅里叶变换红外光谱仪以及热重分析仪等对毛竹采伐剩余物的化学成分和纤维形态等的性质进行分析, 且利用硫酸盐法对毛竹采伐剩余物进行制浆造纸, 并对纸张性能进行了评价。结果表明: 毛竹采伐剩余物主要由纤维素、半纤维素和木质素组成; 毛竹采伐剩余物的硝酸-乙醇纤维素质量分数介于 342.9~409.3 g·kg⁻¹, α -纤维素质量分数约 420.0 g·kg⁻¹, 木质素约 240.0 g·kg⁻¹, 苯醇抽提物为 36.7~54.3 g·kg⁻¹, 10.0 g·L⁻¹ 氢氧化钠抽提物为 256.7~296.7 g·kg⁻¹, 灰分质量分数为 8.5~26.5 g·kg⁻¹; 毛竹采伐剩余物半纤维素主要是由阿拉伯糖, 木糖和糠醛等糖单元组成, 其中以木糖为主(>85.0%); 毛竹采伐剩余物纤维长度主要分布在 400~2 000 μm , 长宽比为 64.70~65.54; 毛竹采伐剩余物热解过程主要分为3个阶段, 热分解过程主要发生在第2阶段, 毛竹采伐剩余物最大热分解温度为 339~341 $^{\circ}\text{C}$; 毛竹采伐剩余物经硫酸盐法成浆后, 纸浆得率为 44.71%, 有良好的成浆性能, 有较高的抗张强度(63.88 N·m⁻¹·g⁻¹)和耐破强度(4.14 kPa·m⁻²·g⁻¹), 比巨龙竹 *Dendrocalamus sinicus* 和龙竹 *D. peculiaris* 要优良, 可作为纸浆材使用。图3表4参29

关键词: 木材学; 毛竹; 采伐剩余物; 化学成分; 纤维形态; 热重分析; 制浆性能

中图分类号: S781.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2019)02-0219-08

Chemical composition, fiber morphology, and pulping properties of logging residues in *Phyllostachys edulis*

LI Yuanyuan, ZHANG Shuangyan, WANG Chuangui, FANG Xuqin

(Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China)

Abstract: To make better use of logging residues of *Phyllostachys edulis*, this study used bamboo culm tops and branches as research objects. Properties of the bamboo culm tops and branches, such as chemical composition and fiber morphology, were analyzed by Stereoscopic Microscope, Fourier Transform Infrared Spectrometer (FTIR), and Thermogravimetric Analyzer (four-year-old bamboo). The kraft process was used for pulp and paper and evaluating its pulping properties. The results showed that the logging residues of moso bamboo were mainly composed of cellulose, hemicellulose and lignin. The contents of nitric acid-ethanol cellulose in bamboo residues were between 342.9–409.3 g·kg⁻¹, and the contents of α -cellulose were about 420.0 g·kg⁻¹. The insoluble lignin contents were about 240.0 g·kg⁻¹, the phenyl alcohol extract contents were 36.7–54.3 g·kg⁻¹, the 10.0 g·L⁻¹ NaOH extract contents were 256.7–296.7 g·kg⁻¹, the ash contents were 8.5–26.5 g·kg⁻¹, and the hemicellulose bamboo logging residues were mainly composed of sugar units such as arabinose, xylose and furfural. The contents of xylose were more than 85.0%. The bamboo fibers of logging residues were mainly distributed in the range of 400–2 000 μm and the aspect ratio was 64.70–65.54; The pyrolysis process of bamboo logging residues is mainly divided into three stages, and the thermal decomposition process mainly occurs in the second stage. The maximum thermal decomposition temperature of the bamboo logging residue was 339–341

收稿日期: 2018-03-13; 修回日期: 2018-05-11

基金项目: “十三五”国家重大研发计划项目(2017YFD0600805)

作者简介: 李媛媛, 从事生物质材料加工及利用研究。E-mail: 630169243@qq.com。通信作者: 王传贵, 教授, 从事生物质材料加工及利用研究。E-mail: nj230036@163.com

°C; the bamboo logging residues were treated by the sulfate method. After pulping, the pulp yield was 44.71%, with good pulping performance, high tensile strength ($63.88 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$) and burst strength ($4.14 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{g}^{-1}$), better than *Dendrocalamus sinicus* and *D. peculiaris*, and the logging residues from bamboo could be used as pulp instead of wood. [Ch, 3 fig. 4 tab. 29 ref.]

Key words: wood science; *Phyllostachys edulis*; logging residues; chemical composition; fiber morphology; thermogravimetric analysis; pulping performance

中国竹子资源丰富,素有“第二森林”之美称。中国竹林面积达 720 万 hm^2 , 约占世界总量的 30%, 种类、面积、蓄积量、产量均居世界首位^[1]。竹材资源是中国除木材外第二大重要资源,而且竹材具有生长周期短、强度大和韧性好的特点,被认为是代替木材的最佳资源^[2-4]。近些年来竹材产业的发展也愈来愈受到重视,毛竹 *Phyllostachys edulis* 竹秆被当成材料广泛用于各种生产,例如建筑材、造纸材、竹家具等^[5]。但是竹材属于中空有节结构,表面覆有蜡质层,从而导致竹材利用率低,采伐剩余物累积量增大^[6-7]。王红彦等^[8]估算了中国林木剩余物数量的参考值,指出竹枝叶质量相当于竹材质量的 38.07%,相当于竹材加工剩余物质量的 62.00%。辜夕容等^[9]也曾指出竹枝、竹梢竹叶等采伐剩余物占整竹的 40.00%,由此估算出中国大概有 720 万 t 的竹材采伐剩余物^[10]。这些采伐剩余物大部分都被焚烧或者直接填埋^[11-13],利用方式都比较初级,技术含量低,不仅造成环境污染,还对竹资源造成了极大的浪费。在中国森林资源日益减少的情况下,如何充分有效地利用这些剩余物,实现资源“零剩余”,已成为竹资源综合利用的一个紧迫问题。竹采伐剩余物和竹加工剩余物都是竹资源废弃物,由于其组成的微观结构存在区别,其性质也是不同的^[14],这直接关系到其加工利用途径。目前,虽然关于毛竹性质和竹加工剩余物有相关的研究^[15-16],但针对竹采伐剩余物尚未见报道。鉴于此,本研究拟对毛竹采伐剩余物竹枝和竹梢的主要性质进行分析,并对毛竹采伐剩余物通过传统工艺制浆造纸,测试纸张性能,从而判断毛竹采伐剩余物作为纸基材料的优劣性,以期竹采伐剩余物的高效利用提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

实验材料为 4 年生毛竹采伐剩余物,主要为竹枝和竹梢部分,取自安徽省金寨县青山镇(31.43°N, 115.90°E)。竹材砍伐后分别收集竹枝和竹梢部分竹材,运回实验室后放置 1 周,达到气干状态。利用微型植物粉碎机粉碎,过筛,截取 40~60 目的竹粉,并贮存于密封袋中保存,供原料分析使用。其中竹秆是指取毛竹胸径部位的竹材。

1.2 化学成分的测定

毛竹采伐剩余物竹枝、竹梢部位化学成分参照 GB/T 2677.3-1993《造纸原料灰分的测定》,GB/T 2677.6-1994《造纸原料有机溶剂抽出物含量的测定》,GB/T 2677.5-1994《造纸原料 1%氢氧化钠抽出物含量的测定》,GB/T 2677.8-1994《造纸原料酸不溶木素含量的测定》和 GB/T 2677.10-1995《造纸原料综纤维素含量的测定》^[17],分别测定灰分、苯醇抽提物、10.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠抽提物、酸不溶木质素、纤维素和综纤维素等化学组成的质量分数,其中灰分采用坩埚法测定,苯醇抽提物采用索式抽提法测定,10.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠抽出物采用蒸煮法测定,综纤维素采用索式抽提和脱木素法测定,纤维素测定采用硝酸乙醇和 α -纤维素方法测定,酸不溶木质素采用索式抽提和硫酸法测定。

1.3 半纤维素的提取及多糖的测定

1.3.1 提取半纤维素 分别取竹枝、竹梢竹粉样品,用苯醇[V(苯):V(乙醇)=2:1]抽提 6 h 脱脂,然后参照 GB/T 2677.10-1994《造纸原料综纤维素含量测定》脱木素后,得到综纤维素。将得到的综纤维素加入到 1 000 mL 锥形瓶中,加入 50.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠,固液质量比 $m(\text{固}):m(\text{液})=1:25$,在 60 °C 水浴中反应。4 h 后,用纱布过滤,蒸馏水洗涤至中性,待滤液沉淀后,将上层清液移出,下面沉淀用滤纸抽滤,将所有的滤液 pH 值调制为 pH 5.5~6.0。将调好的滤液浓缩后透析 1 周,再浓缩,冷冻干燥后得到半纤维样品。

1.3.2 多糖测定 用 1.00 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硫酸在 105 °C 下浸泡半纤维素样品(5.0 mg)2.5 h 后,过滤并稀释 50

倍, 采用高效离子交换色谱(HPAEC, Dionex, ICS-3000, 美国)测定水解液中的单糖, 该检测系统包括安培检测器, AS50 自动进样器, PA-20 柱(4 × 250 mm, Dionex)。流动相先用 5.00 mmol·L⁻¹ 氢氧化钠洗脱 20 min, 其次用溶解于 5.00 mmol·L⁻¹ 氢氧化钠的 0.75 mmol·L⁻¹ 醋酸钠梯度洗脱 15 min, 可分离出中性糖和醛酸。然后用 200 mmol·L⁻¹ 氢氧化钠冲洗柱子 10 min, 最后用 5.00 mmol·L⁻¹ 氢氧化钠平衡柱子 5 min。分析过程中温度始终保持 30 ℃。

1.4 纤维形态测定

将毛竹采伐剩余物竹枝、竹梢部位以及竹秆部位试样劈成火柴杆大小, 取适量放入试管中, 加入 300.0 g·L⁻¹ 的过氧化氢与冰醋酸[V(过氧化氢):V(冰醋酸)=1:1]配比溶液, 淹没试样, 放入 70~80 ℃ 水浴锅中, 直至试样变白为止, 大约 8 h。离析后在 40 倍显微镜下测定纤维长度和宽度。

1.5 红外光谱(FT-IR)分析

采用傅里叶变换红外光谱仪(6670 Nicolet, 美国)对毛竹采伐剩余物竹枝和竹梢样品进行分析, 谱图扫描次数 32 次, 分辨率为 4 cm⁻¹, 光谱采集范围为 4 000~400 cm⁻¹。

1.6 热重分析

毛竹采伐剩余物竹枝和竹梢的热解特性采用热重分析仪(209 Netzsch)进行测定。即随机称取 2~5 mg 热分析样品置于坩埚内, 然后将坩埚放入热重分析仪。升温速率为 20 ℃·min⁻¹, 最终温度为 600 ℃, 同时加入保护气氮气。

1.7 蒸煮试验方法

采用硫酸盐法对毛竹采伐剩余物进行蒸煮实验。根据对竹枝竹梢化学成分的分析以及对比其他竹材蒸煮工艺, 选择以下参数: 料液比 $m(\text{料}):V(\text{液})=4:1$, 蒸煮最高温度为 170 ℃, 升温时间约 30 min (100~170 ℃), 保温为 2 h, 用碱量为 200.0 g·L⁻¹ 的氢氧化钠。按照 GB/T 1546-2004《纸浆 卡伯值的测定》的方法测定纸浆卡伯值。

1.8 纸浆及纸张性能评价

取适量未漂白浆, 使用 PFI 型立式磨浆机(ZQS7)打浆, 打浆度为 51 °SR, 利用抄片机(M153200, MESSMER)抄造纸张, 根据 GB/T 454-2002《纸耐破度的测定》, GB/T 12914-2008《纸和纸板 扩张强度的测定》, GB/T 455-2002《纸和纸板 撕裂度的测定》综合评价纸张耐破、抗张和撕裂度性能。

2 结果与分析

2.1 化学成分分析

植物纤维原料中纤维素、半纤维素及木质素 3 大成分直接影响了原料的用途。由表 1 可知: 毛竹采伐剩余物的硝酸-乙醇纤维素质量分数为 403.6~342.9 g·kg⁻¹, 而 α -纤维素质量分数约 420.0 g·kg⁻¹。其中, 竹梢部位的硝酸-乙醇纤维素质量分数高于竹枝部位的, 但都小于竹秆部位的(417.0 g·kg⁻¹), 而 α -纤维素, 竹枝与竹梢竹秆差不多, 这是因为 α -纤维素中还有抗碱的半纤维素, 这也说明竹枝、竹梢中半纤维素较多, 可以在打浆时增加纤维细纤维化程度^[18]。与毛竹竹秆相比, 采伐剩余物竹枝、竹梢含有较高的木质素, 且竹枝、竹梢的木质素差异不大。表明毛竹采伐剩余物可作为生产木质素衍生物的原料。毛竹的竹梢综纤维素质量分数高于竹秆和竹枝, 综纤维素一般用来表示原料中碳水化合物的多少, 这与制浆得浆率的高低有关, 也说明竹梢满足了纸浆材中对碳水化合物的需求。与毛竹竹秆相比, 采伐剩余物灰分质量分数较高, 其中竹枝中含有最高的灰分(26.5 g·kg⁻¹)。与毛竹竹秆相比, 采伐剩余物抽出物较高, 其中竹枝的抽出物最高, 这样会使制浆过程中浸渍药品消耗量增加, 且抽出物质量分数在一

表 1 毛竹采伐剩余物的化学成分

Table 1 Chemical constituents of the logging residues in *Phyllostachys edulis*

部位	化学成分质量分数/(g·kg ⁻¹)						
	灰分	苯醇抽提物	10.0 g·L ⁻¹ 氢氧化钠抽提物	酸不溶木素	α -纤维素	综纤维素	硝酸-乙醇纤维素
竹枝	26.5	54.3	296.7	243.6	427.5	630.2	342.9
竹梢	8.5	36.7	256.7	245.0	434.8	708.8	403.6
竹秆	7.3	31.0	251.3	239.4	434.4	667.1	417.0

一定程度上可以预估原料在碱法制浆中的纸浆得率情况^[19]。

2.2 半纤维素中多糖分析

半纤维素在水中润胀性较好, 会提高竹纤维细纤维化程度, 增加纤维间的结合力^[18]。半纤维素由酸水解可以成多种单糖。表2可以看出: 竹材半纤维素主要成分是木糖, 无论竹枝还是竹梢, 均在 $850.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, 表明竹采伐剩余物半纤维素中有大量木聚糖存在。第二大组分是阿拉伯糖。此外, 还有少量的糖醛酸和葡萄糖, 有微量的鼠李糖和半乳糖。糖醛酸主要是葡萄糖醛酸和半乳糖醛酸。与竹枝相比, 竹梢的半纤维素中各种单糖均与竹枝的各个单糖差异不明显, 其中鼠李糖、半乳糖、阿拉伯糖均比竹枝稍低。

表2 毛竹采伐剩余物半纤维素组成

Table 2 Composition of hemicellulose of the logging residues in *Phyllostachys edulis*

部位	占总成分比例/%	质量分数/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)						
		鼠李糖	阿拉伯糖	半乳糖	葡萄糖	木糖	葡萄糖醛酸	半乳糖醛酸
竹梢	29.57	2.0	71.4	8.0	13.0	872.1	30.9	2.6
竹枝	29.38	2.3	78.6	10.2	11.1	864.2	30.9	2.6

2.3 纤维形态分析

纤维形态是衡量造纸原料是否适用于造纸的一个重要指标, 其包括纤维长度、纤维宽度和长宽比等指标, 它们数值的大小直接影响了纸张性能。

如表3所示: 竹秆的平均纤维长度 > 竹梢纤维长度 > 竹枝纤维长度, 竹秆的纤维长度为 $514 \sim 3\ 391 \mu\text{m}$, 竹梢的最长纤维为 $2\ 947.3 \mu\text{m}$, 最短为 $128.9 \mu\text{m}$, 而竹枝纤维长度分散在 $115.9 \sim 2\ 545.9 \mu\text{m}$ 。竹秆和竹梢、竹枝纤维长度差异显著 ($P < 0.05$)。竹枝、竹梢、竹秆平均宽度分别为 15.05 , 16.47 和 $15.55 \mu\text{m}$, 其宽度差异不大。竹秆的纤维长宽比最大, 但竹枝、竹梢的长宽比差异并不明显, 而竹秆与竹梢、竹枝的差异显著 ($P < 0.05$)。由图1所示: 竹枝的纤维长度 60.62% 分布在 $400 \sim 1\ 000 \mu\text{m}$, 29.62% 以上分布在 $1\ 000 \sim 1\ 500 \mu\text{m}$, 还有少量分布在 $400 \mu\text{m}$ 以下; 竹梢的纤维长度约 48.14% 分布在 $400 \sim 1\ 000 \mu\text{m}$, 33.14% 分布在 $1\ 000 \sim 1\ 500 \mu\text{m}$, 还有 13.57% 以上分布在 $1\ 500 \mu\text{m}$ 以上; 竹秆的纤维长度主要分布在 $1\ 500 \sim 2\ 500 \mu\text{m}$, $400 \mu\text{m}$ 以下几乎没有, 少量分布在 $2\ 500 \mu\text{m}$ 以上。按照造纸原料要求^[20], 毛竹采伐剩余物可以作为造纸原料使用。

表3 毛竹采伐剩余物纤维形态

Table 3 Fiber morphology of the logging residues in *Phyllostachys edulis*

部位	纤维长度/ μm			纤维宽度/ μm			长宽比 (平均值 \pm 标准差)
	最大值	最小值	平均值 \pm 标准差	最大值	最小值	平均值 \pm 标准差	
竹秆	3 391.0	514.0	$1\ 643.66 \pm 585.50 \text{ a}$	26.4	5.0	$15.55 \pm 3.77 \text{ b}$	$123.12 \pm 34.74 \text{ a}$
竹梢	2 947.3	128.9	$1\ 030.70 \pm 537.28 \text{ b}$	30.3	5.2	$16.47 \pm 7.39 \text{ a}$	$64.70 \pm 35.29 \text{ b}$
竹枝	2 545.9	115.9	$948.54 \pm 361.37 \text{ b}$	30.4	3.9	$15.05 \pm 4.38 \text{ b}$	$65.54 \pm 30.52 \text{ b}$

说明: 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同字母表示差异不显著

2.4 毛竹采伐剩余物 FT-IR 分析

由图2可知: 毛竹采伐剩余物与竹秆在 FT-IR 图谱中的出峰位置相同, 这表明毛竹采伐剩余物和竹秆的化学成分相同。 $3\ 435 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为羟基键的伸缩振动吸收峰, $2\ 924 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为碳氢键的伸缩振动吸收峰, $1\ 059 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为醚键的伸缩振动吸收峰。这些吸收峰均为典型的纤维素特征峰^[21-22]。与毛竹竹秆相比较, 竹枝和竹梢分别在 $1\ 510 \text{ cm}^{-1}$ 处出现木质素吸收峰^[23], 且竹枝在 $1\ 510 \text{ cm}^{-1}$ 处吸收峰相对强度更高, 这与竹枝含有较高的木质素有关。此外, $1\ 735 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为羰基键的伸缩振动吸收峰, $1\ 249 \text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰为乙酰基的伸缩振动吸收峰, 均为半纤维素的特征吸收峰^[24-25]。由 FT-IR 图谱可知: 毛竹采伐剩余物与竹秆一样, 均由纤维素、半纤维素和木质素构成, 而3大素结构影响了毛竹采伐剩余物在蒸煮时的反应。

2.5 热重分析

由图3可知: 毛竹采伐剩余物和竹秆一样, 热降解过程相似主要包括3个阶段, 但降解温度不同。

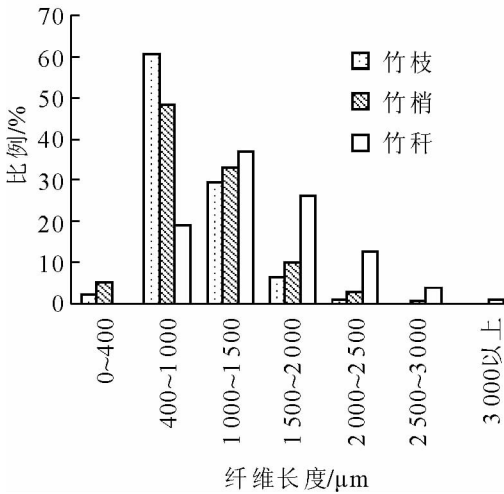


图 1 竹秆和竹材采伐剩余物纤维长度分布
Figure 1 Distribution of fiber length of the logging residues in *Phyllostachys edulis*

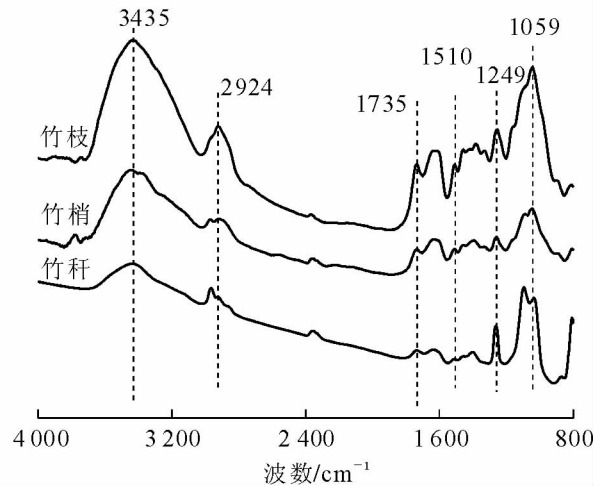


图 2 毛竹采伐剩余物各部位竹材的 FT-IR 图谱
Figure 2 FT-IR atlas of bamboo in various parts of the logging residues in *Phyllostachys edulis*

第 1 阶段，竹枝、竹梢和竹秆热降解温度一致，均是从 30 ℃到 156 ℃，与毛竹竹秆相比，竹枝质量损失最大(4.50%)，竹梢质量损失最小(3.11%)，这可能是竹枝、竹梢和竹秆中水分析出的阶段。第 2 阶段，竹枝、竹梢的热降解温度从 156 ℃到 369 ℃，而竹秆部位的热降解温度则从 156 ℃到 360 ℃。这是纤维素、半纤维素和部分木质素发生降解的阶段，是热降解过程中的主要阶段。与毛竹竹秆相比，该阶段毛竹采伐剩余物的质量损失率较高，其中竹枝达 65.10%，竹梢达 66.98%。由图 3 可知：毛竹采伐剩余物的最大热解温度高于竹秆部位的(330 ℃)，其中，竹枝的最大热解温度为 341 ℃，此时质量损失达 50.88%；竹梢的最大热解温度为 339 ℃，此时质量损失为 51.86%。这可能与竹采伐剩余物中木质素含量较高有关。表明毛竹采伐剩余物的热稳定性稍优于竹秆，其中竹枝的热稳定性最好。第 3 阶段，毛竹采伐剩余物的热分解温度从 369 ℃到 595 ℃，而竹秆的则从 360 ℃到 595 ℃。该阶段竹枝、竹梢质量损失率分别达 9.18%和 7.94%。通过毛竹竹枝和竹梢的热解过程可以看出，毛竹采伐剩余物组分从 156 ℃开始热解，与竹秆的热解过程对比，并参照毛竹硫酸盐法制浆时^[26]的工艺条件，选定毛竹采伐剩余物制浆时蒸煮温度为 0~170 ℃，防止选取更高的温度导致纤维素在碱水解时剥皮反应剧烈而纸浆强度下降^[27]。

2.6 制浆性能分析

根据对毛竹采伐剩余物竹枝、竹梢的化学成分、纤维形态等信息，参照其他竹材蒸煮工艺参数，经初步探究后，确定了以下打浆工艺：料液比 $m(\text{料}):V(\text{液})=1:4$ ，蒸煮最高温度为 170 ℃，用碱量为 200.0 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的氢氧化钠，打浆度 51 °SR。蒸煮实验结果及浆料物理性质：毛竹采伐剩余物制得的竹浆卡伯值为 31.10，残碱量为 27.60%(相对于加入量)，pH 12.2，筛渣率为 2.20%，粗浆得率为 44.71%，比细浆得率高 2.00%，介于德宏州巨龙竹 *Dendrocalamus sinicus* (粗浆得率 44.00%)和金平龙竹 *Dendrocalamus*

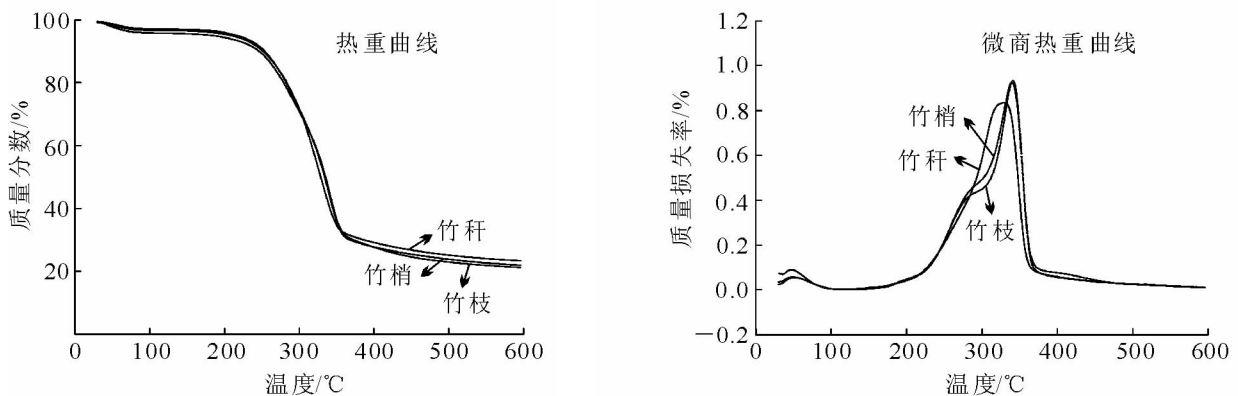


图 3 毛竹采伐剩余物的热重和微商热重曲线

Figure 3 Thermogravimetric and derivative thermogravimetry curves of the logging residues in *Phyllostachys edulis*

peculiaris (粗浆得率 45.26%) 之间^[28-29], 但是卡伯值比这 2 种竹种高, 与针叶木浆差不多(一般针叶木未漂白浆卡伯值达 30 以上^[29]), 说明毛竹采伐剩余物的纸浆比其他竹种竹浆较硬, 这也是为什么后期其打浆度较高的原因。

2.7 手抄纸片性能分析

纸张的物理性能是多因素综合作用的结果。原料纤维长度的大小与纸张抗涨性能、耐破度和撕裂指数等性能指标直接相关, 而纤维长宽比的大小直接影响了纸张的撕裂强度、交织性、柔韧性等性能。如表 4 所示: 毛竹采伐剩余物打浆度普遍比其他几种高, 这可能是因为毛竹采伐剩余物的抽出物和灰分比较高, 而且其纤维平均长度较其他几种较短, 增加了打浆难度。而成浆纸片抗张指数和耐破指数分别为 $63.88 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, $4.14 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{g}^{-1}$, 都达到漂白硫酸盐竹浆质量规定的优等品级别(抗张指数 $>58.00 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}$, 耐破指数 $>4.00 \text{ kPa}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{g}^{-1}$), 虽然撕裂指数 ($6.96 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{g}^{-1}$) 不是很高, 但也达到了一级漂白硫酸盐竹浆质量规定 ($>6.50 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{g}^{-1}$)。对比其他竹种物理性能, 毛竹采伐剩余物所制得纸片的抗张指数、耐破指数均大于巨龙竹和龙竹, 这可能是毛竹采伐剩余物的半纤维素质量分数高, 使得打浆时纤维化程度提高, 增加了纤维间的结合力, 增加了纸张强度, 但稍低于木浆和毛竹竹秆的抗张指数和耐破指数。毛竹采伐剩余物的撕裂指数较低, 这可能是毛竹采伐剩余物的纤维属于短粗纤维的原因。

表 4 毛竹采伐剩余物成浆造纸物理性能指标

Table 4 Papermaking property index of the logging residues in *Phyllostachys edulis*

种类	打浆度/(°SR)	定量/(g·cm ⁻²)	抗张指数/(N·m ⁻¹ ·g ⁻¹)	撕裂指数/(mN·m ⁻² ·g ⁻¹)	耐破指数/(kPa·m ⁻² ·g ⁻¹)
毛竹采伐剩余物	51	54	64.88	6.96	4.14
巨龙竹 ^[28]	47	67	42.70	24.50	3.10
龙竹 ^[29]	48	65	49.65	29.20	3.80
木浆 ^[29]	45	60	68.00	11.00	4.50
毛竹竹秆 ^[27]	45	61	75.89	6.51	4.91

3 结论

毛竹采伐剩余物竹枝、竹梢的主要化学成分均为纤维素、半纤维素及木质素, 各部位主成分的化学结构与毛竹竹秆部位的竹材相似。毛竹采伐剩余物半纤维素主要由木糖、阿拉伯糖和糖醛酸组成, 竹枝、竹梢半纤维素各个组分质量分数相差不大, 其中鼠李糖、半乳糖、阿拉伯糖质量分数竹梢均比竹枝稍低。纤维长度和长宽比, 均是竹秆 $>$ 竹梢 $>$ 竹枝, 竹秆、竹梢、竹枝纤维平均长度分别为 $1\ 643.66$, $1\ 030.7$ 和 $948.54 \mu\text{m}$, 长宽比分别为 123.12 , 64.70 和 65.55 , 其次竹梢和竹枝纤维主要分布在 $400\sim 2\ 000 \mu\text{m}$, 而竹秆主要分布在 $1\ 500\sim 2\ 500 \mu\text{m}$ 。毛竹采伐剩余物竹枝、竹梢的热分解过程与毛竹竹秆相似, 热分解温度不同。热分解过程主要发生在第 2 阶段, 毛竹采伐剩余物竹枝、竹梢的最大热分解温度分别为 341 和 $339 \text{ }^\circ\text{C}$, 与毛竹竹秆相比, 毛竹采伐剩余物具有较好的热稳定性。毛竹采伐剩余物经硫酸盐法成浆后, 纸浆得率为 44.71% , 有良好的成浆性能, 有较高的抗张强度和耐破强度, 比巨龙竹和龙竹要优良, 可作为纸浆材使用。

4 参考文献

- [1] 吴协保, 吴健, 但新球, 等. 竹类资源在我国石漠化防治中的应用研究[J]. 世界林业研究, 2015, **28**(3): 37 - 41.
WU Xiebao, WU Jian, DAN Xinqiu, *et al.* Application research of bamboo resources on rockification control in China [J]. *World For Res*, 2015, **28**(3): 37 - 41.
- [2] 徐有明, 郝培应, 刘清平. 竹材性质及其资源开发利用的研究进展[J]. 东北林业大学学报, 2003, **31**(5): 71 - 77.
XU Youming, HAO Peiying, LIU Qingping. Advances of bamboo properties and their resources exploitation and utilization [J]. *J Northeast For Univ*, 2003, **31**(5): 71 - 77.
- [3] SCURLOCK J M O, DAYTON D C, HAMES B. Bamboo: an overlooked biomass resource? [J]. *Biomass Bioenergy*,

- 2000, **19**(4): 229 – 244.
- [4] QIAN Shaoping, WANG Hui, ZAREI E, *et al.* Effect of hydrothermal pretreatment on the properties of moso bamboo particles reinforced polyvinyl chloride composites [J]. *Compos Part B Eng*, 2015, **82**: 23 – 29.
- [5] 张齐生. 竹类资源加工的特点及其利用途径的展望[J]. 中国林业产业, 2004(1): 9 – 11.
ZHANG Qisheng. Characteristics of bamboo resource processing and prospect of its utilization [J]. *China For Ind*, 2004(1): 9 – 11.
- [6] 张建, 汪奎宏, 李琴, 等. 我国竹材利用率现状分析与建议[J]. 林业机械与木工设备, 2006, **34**(8): 7 – 10.
ZHANG Jian, WANG Kuihong, LI Qin, *et al.* Status analysis and suggestions for bamboo utilization rate in China [J]. *For Mach Woodwork Equip*, 2006, **34**(8): 7 – 10.
- [7] 段新芳, 周泽峰, 徐金梅, 等. 我国林业剩余物资源、利用现状及建议[J]. 中国人造板, 2017, **24**(11): 1 – 5.
DUAN Xinfang, ZHOU Zefeng, XU Jinmei, *et al.* Utilization situation and suggestion of forestry residues resource in China [J]. *China Wood-Bas Pan*, 2017, **24**(11): 1 – 5.
- [8] 王红彦, 左旭, 王道龙, 等. 中国林木剩余物数量估算[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, **37**(2): 29 – 38.
WANG Hongyan, ZUO Xu, WANG Daolong, *et al.* The estimation of forest residue resources in China [J]. *J Cent South Univ For Technol*, 2017, **37**(2): 29 – 38.
- [9] 辜夕容, 邓雪梅, 刘颖旒, 等. 竹废弃物的资源化利用研究进展[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(1): 236 – 242.
GU Xirong, DENG Xuemei, LIU Yinni, *et al.* Review on comprehensive utilization of bamboo residues [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 2016, **32**(1): 236 – 242.
- [10] YAN Keliang, LIU Fang, CHEN Qing, *et al.* Pyrolysis characteristics and kinetics of lignin derived from enzymatic hydrolysis residue of bamboo pretreated with white-rot fungus [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2016, **9**(1): 76. doi: 10.1186/s13068-016-0489-y.
- [11] YANG Zhanping, XU Songwei, MA Xiaolong, *et al.* Characterization and acetylation behavior of bamboo pulp [J]. *Wood Sci Technol*, 2008, **42**(8): 621 – 632.
- [12] 邓长春, 林晓庆, 李建平, 等. 我国采伐剩余物的清理和利用现状及对策[J]. 四川林业科技, 2016, **37**(2): 107 – 110.
DENG Changchun, LIN Xiaoqing, LI Jianping, *et al.* The status and some suggestions about the cleaning and utilization of logging residues in China [J]. *J Sichuan For Sci Technol*, 2016, **37**(2): 107 – 110.
- [13] MORIANA R, VILAPLANA F, EK M. Forest residues as renewable resources for bio-based polymeric materials and bioenergy: chemical composition, structure and thermal properties [J]. *Cellulose*, 2015, **22**(5): 3409 – 3423.
- [14] 蒋新元, 胡迅, 李湘洲, 等. 不同部位竹材制备竹活性炭及其对苯酚的吸附性能[J]. 林业科学, 2009, **45**(4): 107 – 111.
JIANG Xinyuan, HU Xun, LI Xiangzhou, *et al.* Preparation of bamboo activated carbon by different parts of bamboo and their adsorption on phenol [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45**(4): 107 – 111.
- [15] 崔敏, 殷亚方, 姜笑梅, 等. 不同竹龄毛竹物理性质的差异分析[J]. 福建林学院学报, 2010, **30**(4): 338 – 343.
CUI Min, YIN Yafang, JIANG Xiaomei, *et al.* Variation analysis of physical characteristics in *Phyllostachy pubescens* stem at different growth ages [J]. *J Fujian Coll For*, 2010, **30**(4): 338 – 343.
- [16] 别士霞, 沈葵忠, 焦健, 等. 竹材加工剩余物的应用研究[J]. 黑龙江造纸, 2014, **42**(1): 7 – 10.
BIE Shixia, CHEN Kuizhong, JIAO Jian, *et al.* Study on the application of bamboo processing surplus [J]. *Heilongjiang Pulp Paper*, 2014, **42**(1): 7 – 10.
- [17] 石淑兰, 何福望. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- [18] 王忠厚. 制浆造纸工艺[M]. 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2006.
- [19] 苏文会, 顾小平, 马灵飞, 等. 大木竹化学成分的研究[J]. 浙江林学院学报, 2005, **22**(2): 180 – 184.
SU Wenhui, GU Xiaoping, MA Lingfei, *et al.* Study on chemical compositions of *Bambusa wenchouensis* wood [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2005, **22**(2): 180 – 184.
- [20] 苏文会, 范少辉, 彭颖, 等. 车筒竹、籐竹和越南巨竹竹材的纤维形态与组织比量[J]. 浙江农林大学学报, 2011, **28**(3): 386 – 390.

- SU Wenhui, FAN Shaohui, PENG Ying, *et al.* Fiber forms and tissue measurements of *Bambusa sinospinosa*, *Bambusa blumeana* and *Dendrocalamus yunnanicus* stem [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2011, **28**(3): 386 – 390.
- [21] LATIF S S, NAHAR S, HASAN M. Fabrication and electrical characterization of bamboo fiber-reinforced polypropylene composite [J]. *J Reinf Plast Compos*, 2015, **34**(3): 187 – 195.
- [22] 楚杰, 马莉, 张军华. 热处理竹材的化学成分傅里叶变化红外光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, **36**(11): 3557 – 3562.
- CHU Jie, MA Li, ZHANG Junhua. The chemical composition of bamboo after heat pretreatment with fourier infrared spectrum analysis [J]. *Spectrosc Spect Anal*, 2016, **36**(11): 3557 – 3562.
- [23] ÅKERHOLM M, SALMÉN L. The oriented structure of lignin and its viscoelastic properties studied by static and dynamic FT-IR spectroscopy [J]. *Holzforschung*, 2003, **57**(5): 459 – 465.
- [24] LUO Qiang, PENG Hong, ZHOU Mengyang, *et al.* Alkali extration and physicochemical characterization of hemicellulose from young bamboo (*Phyllostachy pubescens* Mazel) [J]. *Bioresources*, 2012, **7**(4): 5817 – 5828.
- [25] MA Xiaojuan, CAO Shilin, LUO Xiaolin, *et al.* Pulp and fiber characterization of bamboo dissolving pulp [J]. *J Biobased Mater Bioenergy*, 2012, **6**(3): 323 – 328.
- [26] 崔敏. 毛竹竹龄对制浆性能的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
- CUI Min. *Influence of Bamboo Ages on the Pulping Performance of Phyllostachy pubescens* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010.
- [27] 李忠正. 植物纤维资源化学[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2012.
- [28] 刘晓波, 韩绍中, 穆道友, 等. 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[J]. *昆明理工大学学报(自然科学版)*, 2006, **31**(1): 83 – 88.
- LIU Xiaobo, HAN Shaozhong, MU Daoyou, *et al.* Preliminary study on the chemical component and fiber morphology and pulping properties of *Dendrocalamus sinicus* from Dehongzhou [J]. *J Kunming Univ Sci Technol*, 2006, **31**(1): 83 – 88.
- [29] 杨清, 彭镇华, 孙启祥, 等. 金平龙竹的化学成分与制浆性能[J]. *东北林业大学学报*, 2007, **35**(8): 33 – 35.
- YANG Qing, PENG Zhenhua, SUN Qixiang, *et al.* Chemical components and pulping properties of *Dendrocalamus peculiaris* [J]. *J Northeast For Univ*, 2007, **35**(8): 33 – 35.