

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026001

香蕉假茎纤维配抄竹浆纤维制备纸张 协同增强机制研究

刘真真, 刘孟钰, 刘杏娥, 陈复明, 马千里

(国际竹藤中心竹藤生物质新材料研究所; 竹藤科学与技术国家林业和草原局重点实验室, 北京 100102)



摘要: 以香蕉 (*Musa acuminata*) 假茎为原料, 采用常温碱预浸泡-碱蒸煮-H₂O₂漂白工艺制备香蕉假茎纤维, 并将其与竹浆纤维混合抄造纸张, 研究香蕉假茎纤维的打浆度、添加量对纸张强度等性能的影响规律及增强机制。结果表明, 该工艺制备的香蕉假茎纤维分离效果好, 打浆处理对纤维形态参数影响显著 ($P < 0.05$), 纤维平均长度、宽度和长宽比分别为 2.65~2.99 mm、20.6~21.4 μm 、127.4~145.1, 纤维素含量和结晶度分别高达 88.4% 和 78.0%。相较于纯竹浆纸 (打浆度 40 °SR), 仅添加 20%~30% 质量分数、打浆度为 37 °SR 的香蕉假茎纤维配抄竹浆纤维纸张的抗张指数、撕裂指数、耐破指数和耐折次数分别增加 3.1%~7.0%、15.4%~30.3%、27.6%~27.8% 和 1.3~1.6 倍, 配抄纸张机械强度指标显著提升 ($P < 0.05$), 同时纸张润湿性和透气度降低。香蕉假茎长纤维发挥柔韧性起到骨架支撑作用, 竹浆短纤维填充空隙缺陷减少应力集中现象出现的概率, “长-短” 互补的多尺度三维交织结构赋予纸张挺度的同时提升其强度, 在微观尺度上微纤丝三维缠结形成的整体结构赋予配抄纸张良好的强度。香蕉假茎纤维可作为高性能纸张的生物质配抄原料, 有效提升竹浆纸张的机械强度, 为香蕉假茎农作物废弃资源的高值化利用提供科学依据。

关键词: 香蕉假茎; 竹浆纤维; 纤维配抄; 纸张强度

中图分类号: TQ35; TS721 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 02-0012-11

Preparation and Reinforcement of Paper Made of Banana Pseudostem Fibers Blended with Bamboo Pulp Fibers

LIU Zhenzhen, LIU Mengyu, LIU Xinge, CHEN Fuming, MA Qianli

(Institute of New Bamboo and Rattan Based Biomaterials, International Center for Bamboo and Rattan; Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Bamboo & Rattan Science and Technology, Beijing 100102, China)

Abstract: Banana (*Musa acuminata*) pseudostem fibers were used as the raw material which were prepared through pre-alkali soaking, high-temperature alkaline cooking, and hydrogen peroxide bleaching. Papers were then prepared by blending banana pseudostem fibers with bamboo pulp fibers. The effects of the beating degree and banana pseudostem fibers dosage on the mechanical properties and reinforcement mechanism of paper were investigated. The results demonstrated that the banana pseudostem fibers exhibited good separation. The fiber morphological parameters of banana pseudostem fibers and bamboo pulp fibers were significantly changed with increasing of beating degree ($P < 0.05$).

收稿日期: 2026-01-04; 修改日期: 2026-03-14

基金项目: 国际竹藤中心基本业务费项目“有机酸耦合体系解聚竹材木质纤维素及组分增值应用研究”(1632024004)。

作者简介: 刘真真 (1992—), 女, 助理研究员。Email: liuzhenzhen@icbr.ac.cn

通讯作者: 马千里, 男, 副研究员。Email: maql@icbr.ac.cn

Their average length ranged from 2.65 to 2.99 mm, average width from 20.6 to 21.4 μm , and average length-to-width ratio from 127.4 to 145.1. Notably, the cellulose content and crystallinity of banana pseudostem fibers were 88.4% and 78.0%, respectively. When banana pseudostem fibers (37 °SR, 20%~30%) were mixed with bamboo pulp fibers (40 °SR), the properties of paper were improved compared with pure bamboo pulp paper. Specifically, the tensile index increased by 3.1%~7.0%, the tear index by 15.4%~30.3%, the burst index by 27.6%~27.8%, and the folding endurance by a factor of 1.3~1.6 ($P<0.05$). The wettability and air permeability of paper were reduced. The long fibers from banana pseudostem provided flexibility and acted as a skeletal support, while the short fibers from bamboo pulp filled voids and defects to reduce the probability of stress concentration. The “long-short” complementary multi-scale three-dimensional intertwined structure imparted both stiffness and strength to the paper. Furthermore, the overall structure formed by the three-dimensional entanglement of microfibrils at the microscopic scale endowed the composite paper with good strength. Banana pseudostem fibers could serve as one of the biomass blending raw materials for high-performance paper, effectively improving the physical strength of bamboo pulp paper, thereby providing a scientific basis for the high-value utilization of agricultural waste resources from banana pseudostems.

Key words: banana pseudo-stem; bamboo pulp; fiber blending; paper strength

近年来,我国经济持续增长推动纸张需求显著提升,2024年造纸工业总产量达1.32亿t,同比增长3.8%,造纸领域植物纤维原料供需问题日益严峻^[1]。根据国家林业和草原局最新统计,我国木材资源短缺严重,2024年木材进口依赖度已攀升至53.6%,原料安全面临重大挑战^[2]。在此背景下,开发非木材纤维原料应用于造纸行业不仅可以缓解资源约束,还能降低生产成本和提升产品性能^[3]。竹子作为速生禾本科植物,生长速度快(3~5年即可成材),具有储量丰富、来源广泛和可再生等优势,竹浆纤维现已成为造纸工业最重要的木材替代原料之一,被广泛用于生产文化用纸、包装材料等各类纸制品^[4-6]。然而,研究表明,竹纤维存在明显的性能缺陷:其细胞壁厚度(6.5~9.7 μm)明显高于针叶树材纤维(2.3~4.5 μm),纤维韧性差(竹纤维断裂伸长率仅为4.8%~9.2%,低于针叶木浆5.7%~14.3%),导致单一竹浆纤维纸的强度、耐折次数有限,难以满足高强度纸制品的要求^[7-8]。针对这一瓶颈,构建多元纤维配抄体系被证实为有效解决策略,其核心机制在于通过纤维形态互补(长度/宽度匹配度优化)和界面结合优化(氢键密度提升)实现协同增强^[9-10]。学者多采用桉木(*Eucalyptus* spp.)浆、马尾松(*Pinus massoniana*)木浆、蔗渣(*Saccharum officinarum*)

浆、麦草(*Triticum aestivum*)浆等植物纤维与竹浆纤维配抄制备纸张^[11-12],研究结果表明竹浆配抄木材纤维时(桉木浆、马尾松木浆等),纸张的各项强度均较高;相比而言,非木材纤维(蔗渣浆、麦草浆等)细而短、纤维长宽比小(<40)、杂细胞含量高,纤维结晶度为35%~40%,纤维柔韧性相对较差^[13-15]。利用传统的蔗渣浆、麦草浆等配抄竹浆纤维除配抄比例受限外($<30\%$),也会降低纸张的品质和等级,纸张的机械强度较低,多用于低档文化纸或箱板纸芯层。因此,筛选并制备来源丰富、成本低廉、与竹浆纤维互配性好、优化纸张性能的非木材纤维至关重要。

香蕉(*Musa acuminata*)是全球广泛种植的第四大水果作物,在我国农业生产中占有重要地位。据统计,2023年我国香蕉种植面积约为32万 hm^2 ,生产总量高达1170万t^[16],保持全球第二大香蕉生产国的地位。香蕉成熟采摘后,约60%的植株生物量(以干基计)以假茎、叶片等农业废弃物的形式残留,这些废弃物通常被置于田地腐烂或者焚烧处理,不仅造成农业资源浪费,还存在温室气体排放等环境污染问题^[17-18]。香蕉假茎是由叶鞘层层包裹形成的柱状结构,主要起支撑作用,富含纤维素组分,纤维形态细长(长度2.65~2.99 mm)、长宽比大(>100),具有韧性好、柔

软度高、杂细胞少等特点,是一种优良的造纸纤维原料。研究表明,利用香蕉假茎纤维生产的日元纸币使用期超过100年^[19]。TRIPATHI等^[20]将香蕉假茎纤维替代75%的针叶木纤维制备牛皮纸,其强度与针叶木浆纸张相似。尽管香蕉假茎纤维已被初步利用,但目前研究主要聚焦于纤维提取工艺,常采用常温碱预处理(2 h)-2次高温碱蒸煮(>4.5 h),或高温碱预处理(100 °C)-高温碱蒸煮(160 °C)步骤,普遍存在蒸煮时间长、能耗高、化学药品用量大等问题^[21-22]。若通过延长常温碱预浸泡时间,香蕉假茎纤维充分润胀后,可促进碱溶液渗透进入纤维内部,提升高温碱蒸煮效率。同时,竹浆纤维短小(平均长度1.2 mm)、挺度高,成纸松厚度大但撕裂度低。因此,若利用柔韧香蕉假茎长纤维构建三维网络骨架,竹浆纤维填充其间,可形成“长-短”互补的多尺度三维交织结构,预期在保持纸张松厚度的同时,提高其机械强度。但是,目前关于香蕉假茎纤维与竹浆纤维配抄以增强纸张性能的研究鲜有报道。

鉴于此,本研究首先利用常温碱预浸泡-碱蒸煮-H₂O₂漂白体系制备香蕉假茎纤维,分析香蕉假茎纤维与竹浆纤维的结构特征,在此基础上,研究不同打浆度及添加量的香蕉假茎纤维与竹浆纤维配抄对纸张机械强度、润湿性和透气性的影响,旨在制备一种低成本、高强度的竹浆复合纸张,为农业废弃植物纤维的资源化利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

香蕉假茎原料,采集于云南省文山州广南县;漂白竹浆板,购自泰盛(贵州)竹资源发展有限公司。氢氧化钠(NaOH)、乙二胺四乙酸(EDTA)、硫酸镁(MgSO₄)、硅酸钠(Na₂SiO₃)、聚氧化乙烯(分子量为400万)、过氧化氢溶液(质量分数30%)等均为市售,分析纯。

1.2 仪器设备

水平式旋转蒸煮器、PFI磨浆机、打浆度测定仪、纤维质量分析仪、傅里叶变换红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy, FT-IR)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope,

SEM)、热重分析仪(thermogravimetry, TG)、X射线衍射仪(X-ray diffraction analysis, XRD)、光学显微镜、凯塞法自动抄纸机、纤维疏解器、抗张强度测定仪、耐破度测定仪、撕裂度测定仪、微电脑耐折度测定仪、接触角/表面张力测量仪、透气度仪、高分辨X射线断层扫描系统(μ -CT)。

1.3 试验方法

1.3.1 香蕉假茎纤维的制备 将新鲜的香蕉假茎原料切成长度为7~8 cm的均匀块状,置于80 °C干燥箱烘干至含水率10%左右备用。基于前期试验优化工艺,称取300 g香蕉假茎(绝干)加入烧杯中,按照浴比(香蕉假茎原料与溶液的质量之比)1:20加入NaOH溶液(质量浓度为13 g/L),于室温下浸泡24 h,将香蕉假茎洗涤至中性后平衡水分。随后将预处理后的原料置于蒸煮器中,设置浴比为1:20,NaOH溶液质量浓度为12 g/L,在170 °C下蒸煮90 min,反应结束后冷却至室温,将浆料水洗至中性。

采用H₂O₂体系漂白浆料:基于绝干浆料质量计,浆料质量分数为10%,H₂O₂、EDTA、MgSO₄、NaOH、Na₂SiO₃用量分别为3%、1%、0.05%、1.5%和1.5%,在80 °C水浴中反应100 min。漂白结束后,将浆料充分洗涤至中性,平衡水分后获得香蕉假茎纤维。

1.3.2 香蕉假茎纤维与竹浆纤维配抄制备纸张 采用PFI磨浆机分别对竹浆纤维和香蕉假茎纤维(浆料质量分数均为10%)进行打浆处理,获得打浆度为14 °SR、30 °SR、40 °SR、50 °SR和60 °SR的竹浆纤维,以及打浆度为25 °SR、31 °SR、37 °SR、41 °SR和46 °SR的香蕉假茎纤维。

将不同打浆度的竹浆纤维在纤维疏解器中疏解(8 000 r)得到分散均匀的浆料,在不添加任何辅料条件下,采用凯塞法自动抄纸机制备定量为40 g/m²的纯竹浆纸,纸张烘干温度为90 °C,时间为10 min。测试不同打浆度纯竹浆纸的抗张指数、撕裂指数、耐破指数和耐折次数,确定竹浆纤维比较适宜的打浆度为40 °SR,以其制备纯竹浆纸的抗张指数为50.09 N·m·g⁻¹,撕裂指数为9.18 mN·m²·g⁻¹,耐破指数为3.81 kPa·m²·g⁻¹,耐折次数为510次。

按上述工艺步骤抄造定量为40 g/m²的复合纸张,采用单因素方法,探究香蕉假茎纤维打浆度和添加量对复合纸张性能的影响。1) 设定香蕉假茎纤维添加量为30%,取打浆度分别为25 °SR、31 °SR、37 °SR、41 °SR、46 °SR的香蕉假茎纤维,与打浆度为40 °SR的竹浆纤维混合均匀后抄造纸张。2) 取打浆度为37 °SR的香蕉假茎纤维与打浆度为40 °SR的竹浆纤维,在香蕉假茎纤维添加量为10%、20%、30%、40%、50%的5个水平下,分别配抄复合纸张。

1.4 性能检测

1.4.1 化学组分分析 根据美国可再生能源国家实验室制定的生物质组分分析方法NREL/TP-510-42618 “*Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass*”,测定香蕉假茎原料、香蕉假茎纤维的化学组分。

1.4.2 纤维化学官能团分析 将香蕉假茎原料、香蕉假茎纤维与竹浆纤维样品,与溴化钾(质量比为1:100)充分研磨、压片后,利用FT-IR测试纤维样品的化学官能团变化,设置扫描范围为4 000~400 cm⁻¹,扫描次数为32次。

1.4.3 纤维结晶度分析 利用X射线衍射仪对纤维样品的结晶性能进行测试,采用Cu靶、K α 射线,扫描范围为5°~80°,测试电压和电流分别为40 kV、40 mA,扫描速度为2 °/min。依据公式(1)计算纤维结晶度(CrI)^[23]。

$$\text{CrI} = \frac{I_{200} - I_{\text{am}}}{I_{200}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: I_{200} 为纤维素结晶区(002晶面)衍射峰强度; I_{am} 为无定型区(2θ 约为18°)衍射峰强度。

1.4.4 纤维热稳定性分析 利用TG测试香蕉假茎原料、香蕉假茎纤维与竹浆纤维的热稳定性,测试程序为:以10 °C/min的升温速率从室温升高至800 °C,氮气流速为30 mL/min。

1.4.5 纤维和纸张形貌分析 将纤维和纸张样品表面喷金,利用SEM测试其表面形貌,扫描加速电压为10 kV,利用Nano measurer软件测量多根纤维直径,取平均值。另取纤维样品超声分散后滴于载玻片上,在光学显微镜下观察纤维形态。

1.4.6 纤维质量分析 采用纤维疏解器将不同打浆度的香蕉假茎纤维和竹浆纤维充分疏解为单根

纤维,将纤维分散液定容至1 000 mL,纤维浓度为30 mg/L,利用纤维质量分析仪测定纤维样品的长度、宽度、长宽比等纤维形态参数,各纤维样品测试3次结果取平均值。

1.4.7 纸张性能测定 制备的纸张在恒温恒湿(23 °C、50%)环境中放置24 h,按GB/T 451.2—2023《纸和纸板 第2部分:定量的测定》、GB/T 451.3—2002《纸和纸板厚度的测定》、GB/T 12914—2018《纸和纸板 抗张强度的测定 恒速拉伸法(20 mm/min)》、GB/T 455—2002《纸和纸板撕裂度的测定》、GB/T 454—2020《纸 耐破度的测定》、GB/T 457—2008《纸和纸板耐折度的测定》、GB/T 458—2008《纸和纸板透气度的测定》,分别测试相应指标。每个样品对应的性能指标测试5次。采用接触角/表面张力测量仪测定纸张表面润湿性能,测试液体选用超纯水,设置1.5 μ L水滴接触纸张,记录初始水接触角。

1.4.8 纸张纤维扫描分析 利用高分辨X射线断层扫描系统测试纸张中纤维的排列、交织状态。测试条件为:扫描分辨率为3 μ m,测试电压和电流分别为45 kV、70 μ A,曝光时间为170 ms。

2 结果与讨论

2.1 纤维化学结构分析

香蕉假茎原料中纤维素、半纤维素和木质素的质量分数分别为46.5%、22.7%和16.4%,还含有苯-醇抽出物(质量分数6.9%)和灰分(质量分数3.5%)。经过常温碱预浸泡-碱高温蒸煮-H₂O₂漂白体系处理后,香蕉假茎纤维得率为23.6%,半纤维素去除率达90.7%,木质素含量降低至3.7%,纤维素含量提升为88.4%。由于经过常温碱预浸泡后,香蕉假茎原料中纤维润胀、变松,在后续高温碱蒸煮过程中,NaOH溶液迅速扩散渗透到纤维内部,可缩短蒸煮时间,促进半纤维素和木质素的有效去除。目前已报道的制备香蕉假茎纤维方法,通常在碱预浸泡阶段采用100 °C反应温度,或需经过2次高温蒸煮,蒸煮时间较长(4.5 h),制备过程相对繁琐^[21-22]。而本研究在碱预浸泡阶段只需常温即可,且在高温蒸煮阶段反应时间缩短约30%,反应效率提升。

图1a为不同纤维原料和含20%香蕉假茎纤维纸张的FT-IR谱图,3种纤维样品在 $3\,423\text{ cm}^{-1}$ 、 $2\,925\text{ cm}^{-1}$ 处的吸收峰分别为—OH、—CH伸缩振动峰,归属于纤维素的特征峰。相比香蕉假茎原料,香蕉假茎纤维在 $1\,734\text{ cm}^{-1}$ 处的半纤维素特征峰基本消失,表明在碱处理过程中半纤维素因聚合度较低发生降解; $1\,633\text{ cm}^{-1}$ 处有关纤维吸附水的特征峰降低^[24]。 $1\,514\text{ cm}^{-1}$ (芳环C=C伸缩振动峰)和 $1\,249\text{ cm}^{-1}$ (C—O伸缩振动峰)处的吸收峰主要是木质素的特征峰^[25],香蕉假茎纤维中木质素信号峰强度明显变弱,表明经碱蒸煮-H₂O₂漂白后脱除大部分木质素,但仍有残余。 $1\,161\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,031\text{ cm}^{-1}$ 处是纤维素和半纤维素的C—O伸缩振动峰。 892 cm^{-1} 处为纤维素 β -糖苷键伸缩振动峰,香蕉假茎纤维在该处的吸收峰强度明显增加,表明经预处理后半纤维素和木质素含量降低,纤维素含量大幅提高。竹浆纤维主要呈现明显的纤维

素吸收特征峰,仅有微弱的木质素吸收峰。与竹浆纤维相比,含20%香蕉假茎纤维纸张的—OH伸缩振动峰红移于 $3\,330\text{ cm}^{-1}$ 处,表明竹浆纤维与香蕉假茎纤维在纸张成型时形成了较强的氢键作用^[26]。

利用XRD表征香蕉假茎原料、香蕉假茎纤维、竹浆纤维的晶体结构和结晶度(图1b),香蕉假茎原料在 15.6° 、 22.3° 存在两个典型衍射峰,峰型较宽,分别归属于(101)晶面和(002)晶面,符合典型的I型纤维素特征^[27],结晶度为40.3%。相比香蕉假茎原料,香蕉假茎纤维的晶体结构和纤维素类型未发生变化,而衍射峰强度增强,结晶度提高至78.0%,明显高于香蕉假茎原料,表明经处理后半纤维素和木质素等无定形区域的成分发生降解,导致其结晶度显著增加^[28]。竹浆纤维也保持I型纤维素晶体结构,其结晶度为62.0%,低于香蕉假茎纤维。

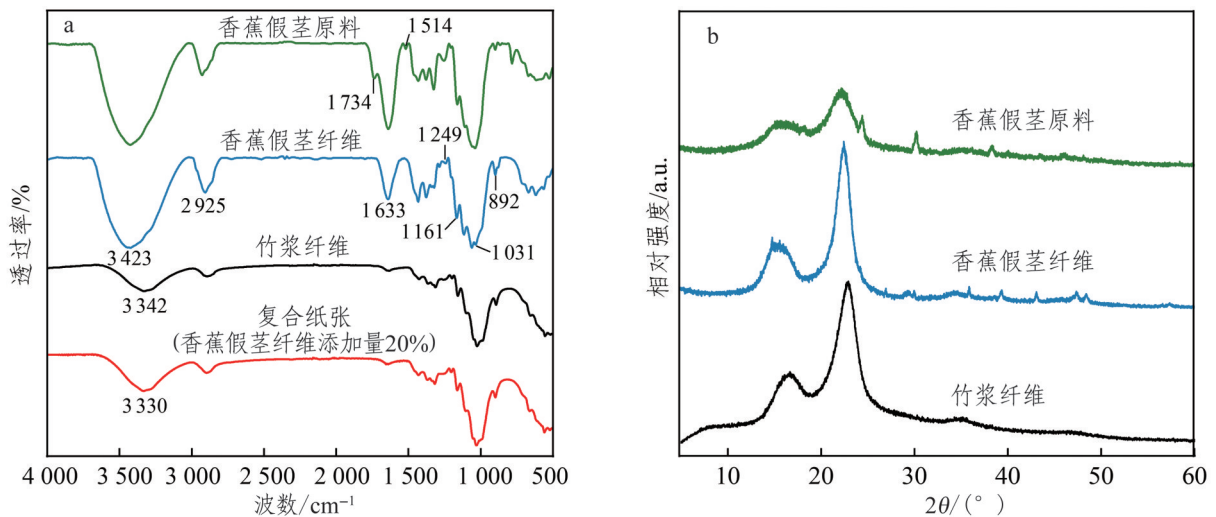


图1 香蕉假茎纤维与竹浆纤维的FT-IR谱图和XRD谱图

Fig.1 FT-IR and XRD spectra of banana pseudostem fibers and bamboo pulp fibers

从TG谱图(图2a)可以看出,香蕉假茎原料包含2个热解过程。第1个解热过程是吸附水蒸发和低热稳定性的半纤维素发生降解,在约 183.1°C 处;第2个热解过程主要是纤维素糖苷键断裂和木质素解聚,在约 273.2°C 处。香蕉假茎纤维的初始降解温度为 203.8°C ,高于香蕉假茎原料(158.4°C)。当热解温度大于 400°C 时,香蕉假茎原料的质量分数高于香蕉假茎纤维和竹浆纤维,质量差为13%~16%,由香蕉假茎原料中木质素、灰分等组分未发

生完全热解导致。DTG谱图(图2b)显示香蕉假茎原料、香蕉假茎纤维、竹浆纤维的最大质量损失速率对应温度分别为 341.3°C 、 381.7°C 、 376.6°C ,香蕉假茎纤维的热稳定性高于香蕉假茎原料,说明高温碱液脱除了无定形区的非纤维素组分,使纤维结构更加致密,同时,纤维具有较高的结晶度也会使热稳定性提升^[29]。热稳定性较好的纤维在抄造纸张时,可使纸张保持优良的机械强度和化学稳定性。

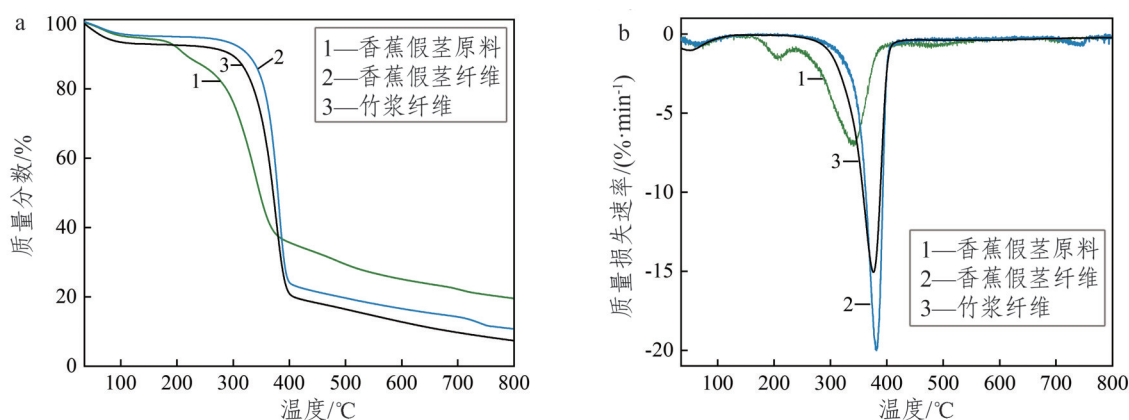


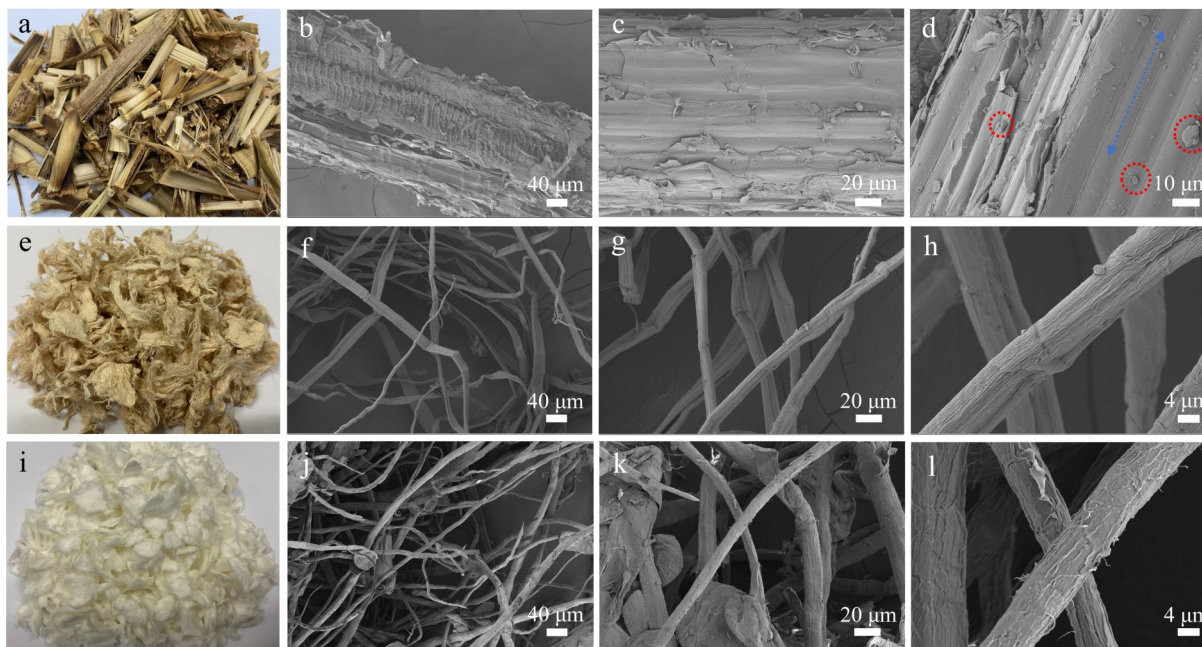
图2 香蕉假茎纤维与竹浆纤维样品的TG(a)和DTG(b)谱图
 Fig.2 TG (a) and DTG (b) curves of banana pseudostem fibers and bamboo pulp fibers

2.2 纤维形态结构分析

采用SEM分析香蕉假茎原料、香蕉假茎纤维和竹浆纤维的表面形貌。由图3a~3d可知，香蕉假茎原料表面相对粗糙，带有凹槽，有较多的颗粒杂质（红圈），纤维呈纵向排列（蓝箭头）。

香蕉假茎纤维形态如图3e~3h所示，其表面存

在褶皱，展现自然弯曲状态，以单根纤维形式存在，纤维分离效果明显，非纤维物质大部分被去除，表面无明显颗粒状杂质，纤维平均直径约为9.7 μm。竹浆纤维平均直径约为10.6 μm，其形态如图3i~3l所示，可见其表面相对粗糙，具有分丝现象，可能与其制备工艺有关。



注：a~d 香蕉假茎原料，e~h 香蕉假茎纤维，i~l 竹浆纤维。

图3 香蕉假茎及竹浆纤维样品和SEM图
 Fig.3 The samples and SEM images of banana pseudostem fibers and bamboo pulp fibers

图4a、4b分别为香蕉假茎纤维、竹浆纤维的光学显微镜图。在低倍数下（40×），香蕉假茎纤维呈细长带状，具有明显长纤维特性，纤维粗细较为均匀，存在纤维弯曲、扭结现象，纤维间干净且相互交错。竹浆纤维长度相对较短，且浆料

中含有较多的纤维碎片，竹浆纤维呈现自然弯曲、扭结形态。

纤维形态对于纸张特性至关重要，可在一定程度上影响抄造纸张的性能。不同打浆度香蕉假茎纤维和竹浆纤维的纤维形态参数列于表1。

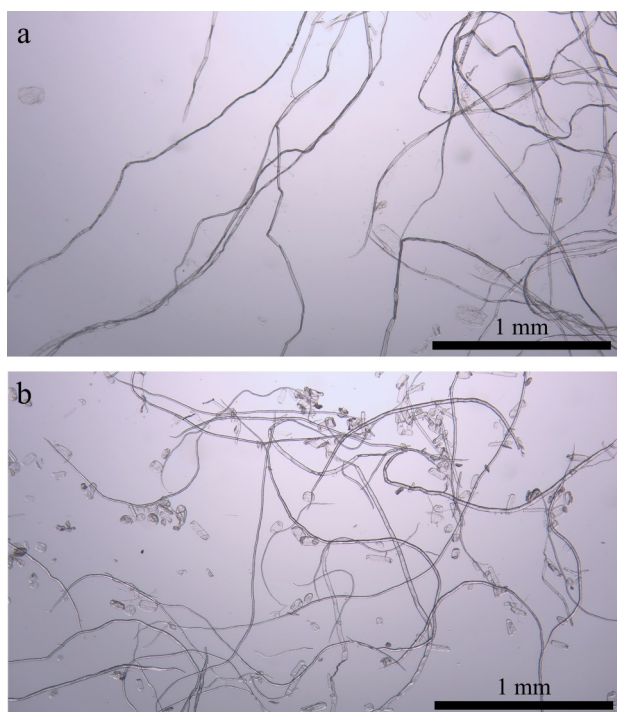


图4 香蕉假茎纤维(a)及竹浆纤维(b)的光学显微镜图
Fig.4 Optical microscopy images of banana pseudostem fibers(a) and bamboo pulp fibers(b)

表1 不同打浆度的香蕉假茎纤维和竹浆纤维形态参数
Tab.1 Morphological parameters of banana pseudo-stem fibers and bamboo pulp fibers with different beating degree

样品	打浆度/ °SR	纤维平均 长度/mm	纤维平均 宽度/ μm	长宽比	扭结指 数/%	细小纤维 含量/%
香蕉 假茎 纤维	25	2.99±0.10	20.6±0.4	145.1±3.2	64.8±1.1	3.6±0.1
	31	2.88±0.08	20.8±0.5	138.5±2.8	65.1±1.4	4.7±0.1
	37	2.76±0.10	21.4±0.7	129.0±3.5	63.5±1.1	5.7±0.2
	41	2.70±0.09	21.0±1.0	128.6±4.1	63.0±1.2	8.0±0.2
	46	2.65±0.11	20.8±0.6	127.4±2.4	61.9±1.5	9.4±0.3
竹浆 纤维	14	1.58±0.07	15.6±0.6	101.3±3.5	67.6±1.3	3.9±0.1
	30	1.53±0.06	17.2±0.8	89.0±2.3	56.1±1.0	4.2±0.1
	40	1.47±0.07	17.4±0.5	84.5±3.0	56.9±1.5	5.3±0.2
	50	1.40±0.06	17.6±0.6	79.5±2.7	56.8±1.2	5.4±0.2
	60	1.31±0.06	18.0±0.7	72.8±2.1	58.7±1.0	6.3±0.2

香蕉假茎纤维打浆度在25~46 °SR范围内时,平均长度均大于1.6 mm,属于长纤维;随着打浆度升高,其平均长度从2.99 mm下降至2.65 mm,减少比例约为11.4%,由于香蕉假茎纤维在打浆过程中受机械作用,纤维发生横向切断、撕裂,导致纤维长度降低。相较于打浆初期(25 °SR),随着打浆度增加,香蕉假茎纤维因吸水向外润胀或受机械作用,纤维平均宽度增加^[8]。同时,香蕉假

茎纤维的长宽比随着打浆度增加逐渐降低,从145.1下降至127.4,其降低比例约为12.2%,竹浆纤维的长宽比由101.3降低至72.8。纤维的长宽比降低主要与纤维长度减小和纤维宽度增加相关,然而,在相近的打浆度条件下,香蕉假茎纤维的长宽比仍远高于竹浆纤维。长纤维在造纸过程中可以形成更牢固的交织网络,使纤维结合紧密,在提升纸张强度方面具有优势。随着打浆度的提升,香蕉假茎纤维的扭结指数从64.8%下降至61.9%,表明香蕉假茎纤维在打浆过程中受到机械作用,原本扭结或弯曲的纤维被拉直或切断;细小纤维含量从3.6%增加至9.4%,细小纤维比表面积较大,容易吸水,其含量增加可提高纤维间的氢键结合力。

打浆度对竹浆纤维形态参数的影响与香蕉假茎纤维相似,即随着打浆度的增加,竹浆纤维的平均长度、长宽比逐渐下降,平均宽度略有增加,竹浆纤维的平均长度和宽度明显低于香蕉假茎纤维。竹浆纤维的扭结指数先减少后增加,表明竹浆纤维受到机械作用后易发生纤维形态扭曲;细小纤维含量逐渐升高,有利于增强纤维间结合力,纤维整体分丝帚化良好。

综合分析,打浆度对香蕉假茎纤维和竹浆纤维的平均长度、平均宽度、长宽比、扭结指数和细小纤维含量等参数均有显著影响($P<0.05$),且制备的香蕉假茎纤维相比竹浆纤维具有纤维长度大、长宽比高等优势。通过合理调控香蕉假茎纤维和竹浆纤维的打浆度及配比,可实现两种纤维性能的优势互补,制备性能优异的纸张。

2.3 香蕉假茎纤维打浆度和添加量对复合纸张性能的影响

香蕉假茎纤维打浆度对复合纸张机械强度的影响,如图5a、5b所示。图5a显示,香蕉假茎纤维以添加量30%与竹浆纤维(打浆度40 °SR)配抄,随着香蕉假茎纤维的打浆度增大,复合纸张的抗张指数逐步提升,撕裂指数先升高后降低,香蕉假茎纤维打浆度为31 °SR和37 °SR时复合纸张的撕裂指数相对较高。中等打浆度的作用主要是纤维分丝帚化,纤维长度下降不明显,较长的香蕉假茎纤维与竹浆短纤维之间结合力增强。香蕉

假茎纤维的打浆度提升至 46°SR 时, 复合纸张的撕裂指数迅速降低, 此时纤维的切断效应占据主导地位, 香蕉假茎纤维的平均长度下降, 纤维自身强度受损。由图5b可知, 复合纸张的耐破指数和耐折次数随着香蕉假茎纤维打浆度的提高均先增加后降低。与纯竹浆纤维(打浆度 40°SR)纸张相比, 香蕉假茎纤维(打浆度 37°SR)添加量30%的复合纸张的抗张指数($53.61\text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$)、撕裂指数($10.59\text{ mN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)、耐破指数($4.87\text{ kPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)和耐折次数(1 326次)分别增加了7.0%、15.4%、27.8%和1.6倍, 撕裂指数和耐破指数均超过GB/T 22865—2008《牛皮纸》优等品要求($7.25\text{ mN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $3.375\text{ kPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)。

将香蕉假茎纤维和竹浆纤维的打浆度分别保持为 37°SR 和 40°SR , 进一步探讨香蕉假茎纤维添加量对复合纸张机械强度的影响, 如图5c、5d所示。香蕉假茎纤维添加量对复合纸张的抗张指数和耐破指数影响较小, 均在其添加量为20%~

30%时, 复合纸张的抗张指数和耐破指数提升相对稳定。而香蕉假茎纤维添加量对复合纸张的撕裂指数和耐折次数影响显著($P<0.05$), 其添加量为20%时, 复合纸张的撕裂指数达到最大值($11.96\text{ mN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$)。这是因为在该添加量条件下, 香蕉假茎纤维作为增强骨架均匀分布于竹浆纤维中, 纤维网络的结合强度和长纤维被拔出过程达到平衡, 长纤维的增强效应和短纤维的结合效应协同作用, 使撕裂指数最高。而继续增加香蕉假茎纤维添加量时, 上述平衡可能被打破, 导致复合纸张的撕裂指数迅速降低。复合纸张的耐折次数随着香蕉假茎纤维添加量增加而逐渐提升, 添加量为50%时, 耐折次数高达1 899次。由于香蕉假茎纤维属于韧皮纤维, 兼具优异的柔韧性和强度, 与竹浆纤维混合配抄时, 柔韧的长纤维可抵抗反复弯曲疲劳, 而竹浆纤维则提供纤维粘结, 使复合纸张的耐折次数显著增加($P<0.05$)。

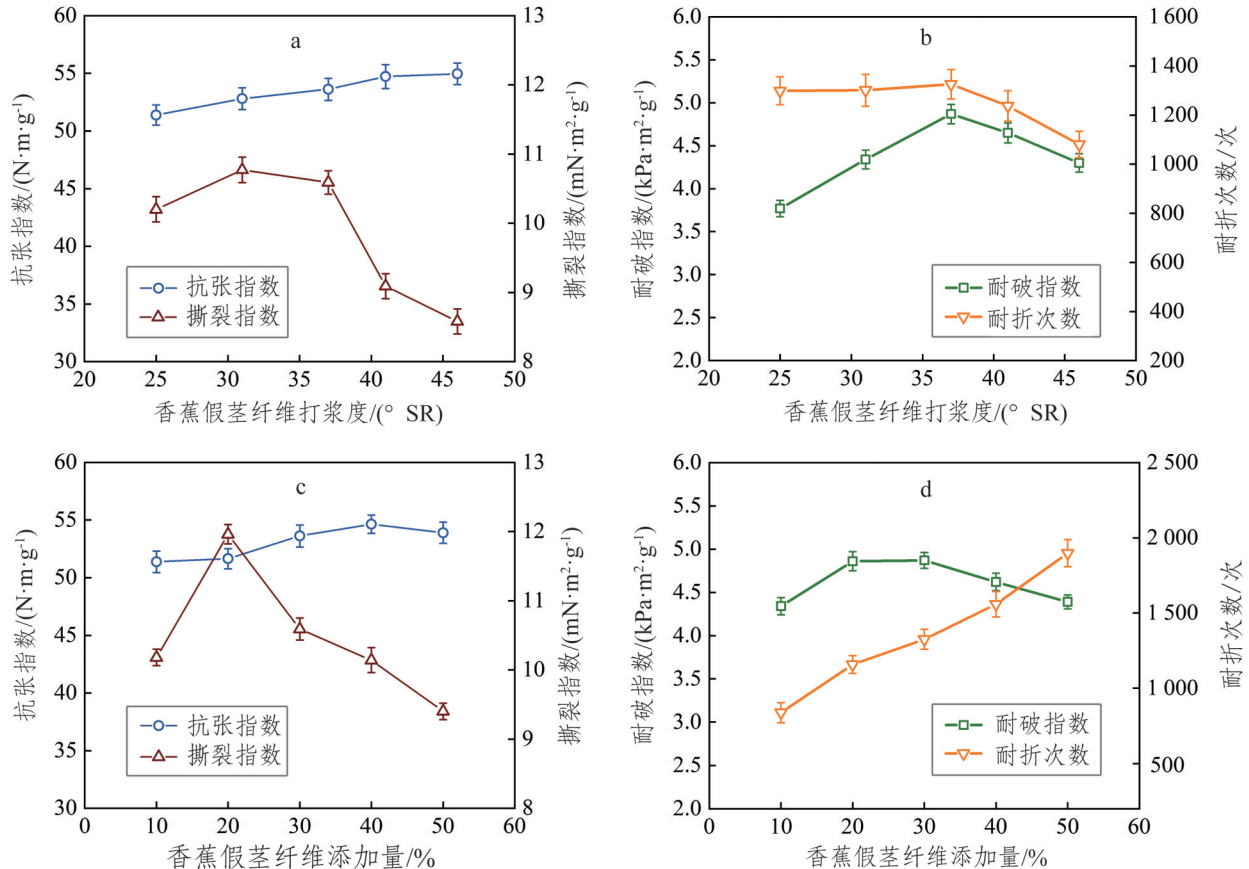
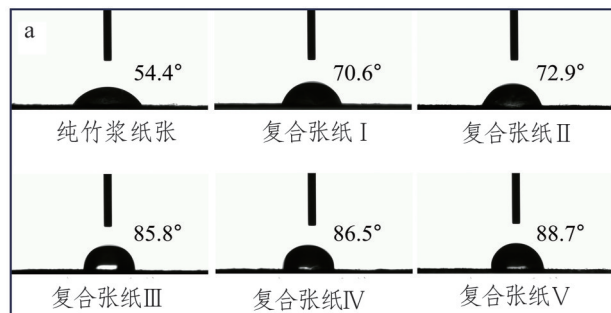


图5 香蕉假茎纤维打浆度和添加量对纸张机械强度的影响

Fig.5 Effect of beating degree and content of banana pseudostem fibers on mechanical strength of paper

香蕉假茎纤维（打浆度 37 °SR）添加量对复合纸张润湿性和透气性的影响如图 6 所示。纯竹浆（打浆度 40 °SR）纸张水接触角为 54.4°，具有较高亲水性。这是由于竹浆纤维抄造成纸张时，纤维交织不够紧密，存在较多的孔隙结构，使得水滴接触纸张表面时能迅速渗入纤维网络中。纯竹浆纸张的透气度为 93.4 $\mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ ，透气性较高。随着香蕉假茎纤维添加量增加，纸张水接触角逐渐增大，同时透气度降低。香蕉假茎纤维添加量为 20%~30% 时，复合纸张的水接触角为 72.9°~85.8°，透气度分别为 15.2 和 8.0 $\mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ ；继续增加香蕉假茎纤维添加量至 40%~50% 时，纸张水接触角为 86.5°~88.7°，透气度降低至 5.4 和 3.7 $\mu\text{m}/\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。由于香蕉假茎纤维中仍保留部分木质素，随着香蕉假茎纤维含量的增加，疏水物质木质素在纸张表面富集，同时香蕉假茎纤维与竹浆纤维相互交织更加紧密，纸张孔隙减少，进一步阻止水分渗透和空气扩散，导致复合纸张的润湿性和透气性降低。

基于复合纸张的机械强度、润湿性和透气性综合分析，复合纸张的最优制备工艺条件为：香



注：复合纸张 I、II、III、IV、V 香蕉假茎纤维添加量分别为 10%、20%、30%、40%、50%。

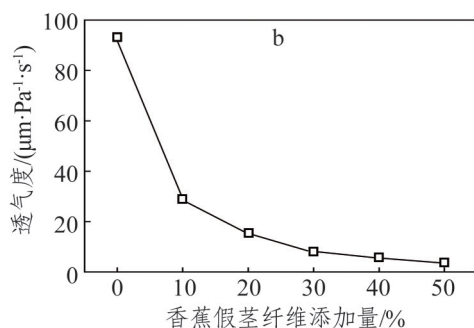


图 6 香蕉假茎纤维添加量对纸张润湿性和透气性的影响

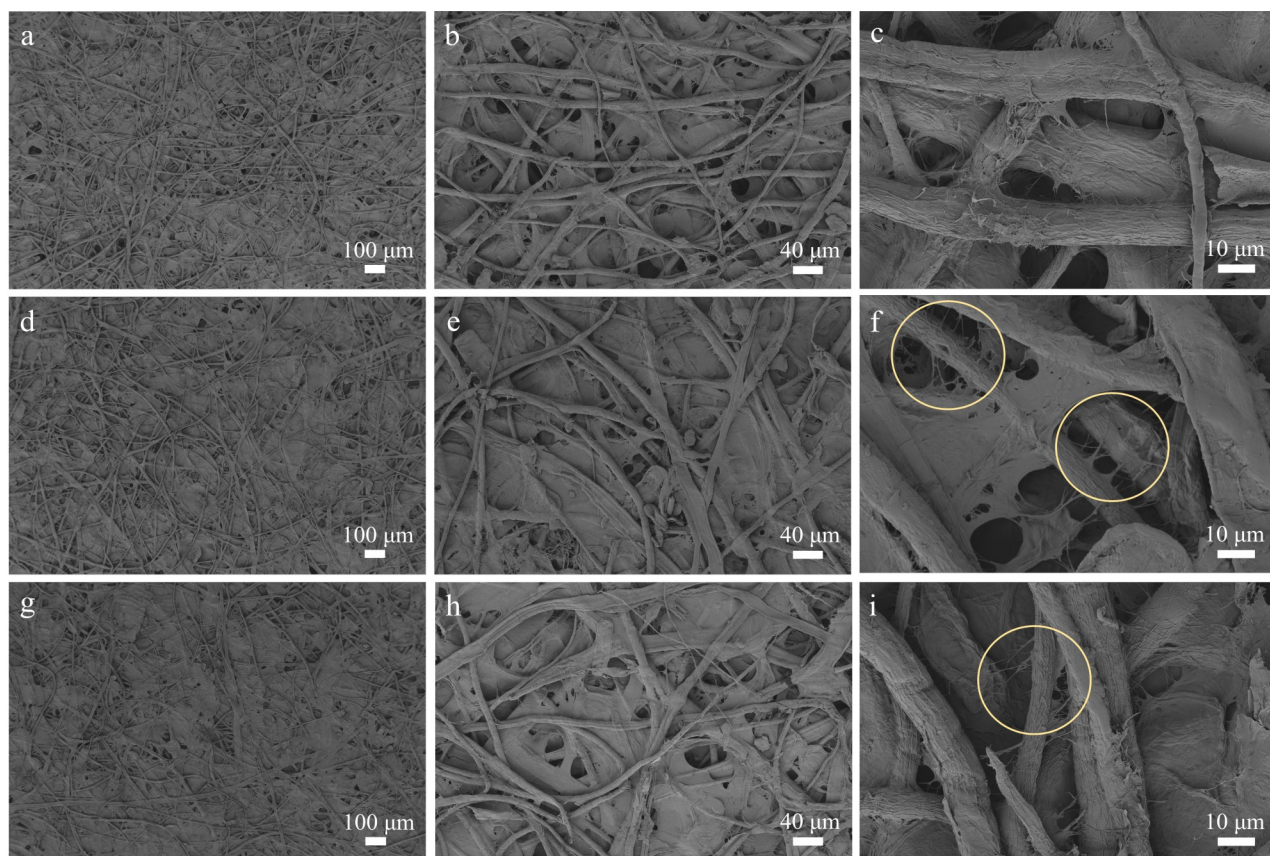
Fig.6 Effect of banana pseudostem fibers content on wettability and air permeability of paper

蕉假茎纤维和竹浆纤维打浆度分别为 37 °SR 和 40 °SR，香蕉假茎纤维添加量为 20%~30%。

2.4 最优工艺复合纸张微观结构分析

图 7 为纯竹浆纸和不同添加量香蕉假茎纤维抄造复合纸张的 SEM 图。从图 7a~7c 中观察到竹浆纤维相互交织形成网络结构，竹浆纤维打浆度至 40 °SR 后纤维分丝帚化且表面起毛，细小纤维填充于纤维框架中，由于竹浆纤维相互交织不够紧密，在纸张表面存在较多的孔隙，整体表现为疏松、多孔结构。添加 20% 香蕉假茎纤维时（图 7d~7f），较长的香蕉假茎纤维交织缠绕于竹浆纤维网络中，将交织较弱的竹浆纤维区域更加紧密结合，纸张表面致密化，有利于提高纤维之间氢键结合机率，从而增强配抄纸张的机械强度。随着香蕉假茎纤维添加量增加至 40% 时（图 7g~7i），配抄纸张表面相对紧密，存在较小的孔隙结构，从图 7i 中观察到纤维之间连接点减少，可能是由于较长的香蕉假茎纤维含量较多，竹短纤维填充减少，出现纤维交织应力集中点，导致纸张撕裂指数降低。但由于香蕉假茎纤维具有良好的韧性，其添加量的增加可提升纸张的耐折性能。基于纸张形貌分析，香蕉假茎纤维添加量对纸张撕裂指数及耐折次数影响规律相一致。

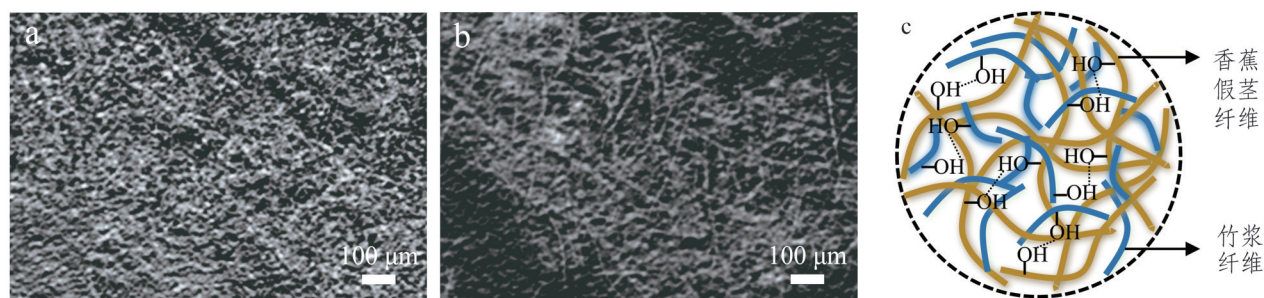
纸张的 μ -CT 扫描如图 8a~8b 所示。纯竹浆纸张中的竹浆纤维呈分散均匀的较短颗粒状，竹浆纤维之间形成相对紧密的交织，但由于纤维长度有限，难以形成连续的缠绕网络结构（图 8a）。在竹浆纤维与香蕉假茎纤维（打浆度 37 °SR、添加量 30%）配抄的纸张中观察到，香蕉假茎纤维呈柔软的长丝状，且纤维之间相互交织缠绕形成复杂的网络结构，大量短而硬的竹浆纤维被香蕉假茎纤维紧密包裹（图 8b）；通过较长的香蕉假茎纤维构建连续的骨架支撑，较短的竹浆纤维均匀填充，长-短纤维的紧密交织进一步增强了网络结构稳定性，较长的香蕉假茎纤维可显著增加纤维间交叉接触的面积（图 8c）。通过对比纯竹浆纸张和复合纸张的 μ -CT 扫描图，可以清晰地观察到从单一竹浆纤维的分散填充到配抄纤维体系的交织缠绕结构的转变，从微观结构证实了香蕉假茎纤维与竹浆纤维协同增强纸张的机械强度。



注：从上至下第1行 a~c 为纯竹浆纸张(打浆度 40 °SR)；第2行 d~f、第3行 g~i 为复合纸张(香蕉假茎纤维打浆度为 37 °SR，添加量分别为 20%、40%)。

图7 不同竹浆纸张样品的SEM图

Fig.7 SEM images of various bamboo-based paper samples



注：a 为纯竹浆纸张(打浆度 40 °SR)，b 为复合纸张(香蕉假茎纤维打浆度为 37 °SR，添加量为 30%)，c 为纤维交织示意图。

图8 不同竹浆纸张样品的μ-CT图和纤维交织示意

Fig.8 μ-CT images of various bamboo-based papers and schematic diagram of fibers interweaving

2.5 最优工艺复合纸张与其他复合浆纸张性能比较

将本研究最优工艺制备的复合纸张与已报道的竹浆纤维与其他纤维配抄纸张的机械强度进行对比，结果列于表2。竹浆纤维与香蕉假茎纤维配抄的纸张，比竹浆纤维与桉木浆纤维配抄的纸张^[11]，抗张指数、撕裂指数、耐破指数和耐折次数指标

分别提升 12.8%、97.0%、70.9% 和 27.8 倍。本研究制备的复合纸张在机械强度方面具有明显优势，尤其是复合纸张的撕裂指数、耐破指数和耐折次数指标。同时，对于麦秆、甘蔗渣等复合纤维，添加香蕉假茎纤维后均能显著提高复合纸张的机械强度^[20, 30]。

表2 本研究制备的纸张与已报道竹浆复合纸张机械强度的对比

Tab.2 Comparisons of mechanical strength of bamboo-based paper in this study and reported composite paper

纤维种类	配抄比例 (质量分数%)	抗张指数/(N·m·g ⁻¹)	撕裂指数/(mN·m ² ·g ⁻¹)	耐破指数/(kPa·m ² ·g ⁻¹)	耐折次数/次	文献
竹浆	-	50.09	9.18	3.81	510	本研究
竹浆:香蕉假茎	(70~80):(20~30)	51.64~53.61	10.59~11.96	4.86~4.87	1 158~1 326	本研究
竹浆	-	41.70	-	-	-	[6]
竹浆:桉木浆	75:25	47.54	6.07	2.85	46	[11]
竹浆:甘蔗渣	80:20	52.70	11.28	3.10	-	[12]
(麦秆+甘蔗渣):香蕉假茎	80:20	34.70	7.60	2.50	85	[20]
麦秆:甘蔗渣	60:40	28.30	5.60	1.92	27	[20]
甘蔗渣:香蕉假茎	80:20	35.11	4.31	1.90	1 200	[30]

3 结论

1) 采用常温碱预浸泡-碱蒸煮-H₂O₂漂白体系制备香蕉假茎纤维,得率为23.6%,纤维素含量提升至88.4%;香蕉假茎纤维的结晶度达78.0%,高于竹浆纤维,归属于I型纤维素,热稳定性良好。在打浆度为25~46°SR范围内,香蕉假茎纤维的平均长度为2.65~2.99 mm,平均宽度为20.6~21.4 μm,长宽比为127.4~145.1,其长宽比明显大于竹浆纤维(72.8~101.3)。

2) 相比纯竹浆(打浆度40°SR)纸张,添加20%~30%的香蕉假茎纤维(打浆度37°SR)与竹浆纤维配抄,复合纸张的抗张指数、撕裂指数、耐破指数和耐折次数分别提高了3.1%~7.0%、15.4%~30.3%、27.6%~27.8%和1.3~1.6倍。香蕉假茎纤维有效提升纸张的机械强度,同时降低纸张的润湿性和透气性。

3) 香蕉假茎纤维与竹浆纤维“长-短”互补的多尺度三维交织结构,赋予纸张挺度的同时提升其强度。漂白香蕉假茎长纤维发挥柔韧性起到骨架支撑作用,竹短纤维填充空隙缺陷减少应力集中现象出现的概率,并在微观尺度上微纤丝三维缠结形成的整体结构赋予配抄纸张良好的强度。研究结果为香蕉假茎农作物废弃资源的高值化利用提供科学依据。

参考文献:

- [1] 中国造纸学会. 中国造纸年鉴-2024[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2024.
- [2] 国家林业和草原局, 国家金融监督管理总局. 2024中国森林保险发展报告[M]. 北京: 中国林业出版社, 2025.

- [3] 刘一山, 张俊苗, 房桂干, 等. 推行竹浆纸一体化实现竹子造纸持续发展[J]. 中国造纸, 2023, 42(8): 55-60.
LIU Y S, ZHANG J M, FANG G G, et al. Implementing bamboo-pulp-paper integration and promoting sustainable development of bamboo papermaking[J]. China Pulp & Paper, 2023, 42(8): 55-60.
- [4] 李好, 陈其兵. 纸浆竹林研究现状与发展趋势[J]. 中国造纸学报, 2024, 39(1): 21-26.
LI H, CHEN Q B. Research status and development trend of pulp and bamboo forest[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2024, 39(1): 21-26.
- [5] 易晓辉, 李英, 雷心瑶. 传统生料法与熟料法手工竹纸性能差异研究[J]. 中国造纸学报, 2022, 37(3): 78-85.
YI X H, LI Y, LEI X Y. Study on performance difference of handmade bamboo paper between traditional uncooked process and cooking process[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2022, 37(3): 78-85.
- [6] 许跃, 陈雪峰, 毛宗久, 等. 氧漂慈竹硫酸盐浆制备卫生纸和防油纸的工艺[C]//中国造纸学会第二十届学术年会论文集, 2022: 34-38.
- [7] 曹双平. 植物单根纤维拉伸性能测试与评价[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2010.
- [8] 朱宗伟. 不同竹龄竹材纤维形态及制浆造纸性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
- [9] 姜峰, 唐敏, 赵举, 等. 竹浆与油樟渣配抄瓦楞原纸及强度性能研究[J]. 中国造纸, 2024, 43(4): 63-70.
JIANG F, TANG M, ZHAO J, et al. Study on preparation and strength properties of corrugated medium using bamboo pulp and camphor residue pulp[J]. China Pulp & Paper, 2024, 43(4): 63-70.
- [10] 殷沛沛, 刘莹莹, 赵梦醒, 等. 不同外加纤维对烟草复合滤嘴棒用性能的影响[J]. 天津科技大学学报, 2024, 39(3): 41-48, 55.
YIN P P, LIU Y Y, ZHAO M X, et al. Effects of different external fibers on the quality of tobacco composite filter rod paper[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2024, 39(3): 41-48, 55.
- [11] 陈云, 王修朋, 刘一山. 竹浆配抄阔叶木浆生产白牛皮纸[J]. 纸和造纸, 2014, 33(7): 1-2.
CHEN Y, WANG X P, LIU Y S. Production of white kraft paper using bamboo pulp and hard wood pulp[J]. Paper and Paper Making, 2014, 33(7): 1-2.
- [12] 贾剑, 杨忠奎, 彭成, 等. 用全漂白竹浆或与蔗渣浆配抄白色牛皮纸的研究[J]. 纸和造纸, 2017, 36(6): 14-16.
JIA J, YANG Z K, PENG C, et al. Study on the white kraft paper preparation using bleached bamboo pulp and bagasse pulp[J]. Paper and Paper Making, 2017, 36(6): 14-16.
- [13] 刘明阳. 麦草高得率浆防油性能及制浆工艺改进研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2024.

(下转第41页)