

DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20230039

## 麦草高得率浆的细小组分特性及其对纸浆性能的影响

朱 勇<sup>1</sup>, 邵英杰<sup>1</sup>, 刘明阳<sup>1</sup>, 邵学军<sup>2</sup>, 王东兴<sup>2</sup>, 王高升<sup>1</sup>

(1. 天津市制浆造纸重点实验室, 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457;

2. 山东世纪阳光纸业集团有限公司, 潍坊 262400)

**摘要:** 针对两种不同打浆度的麦草高得率浆, 分别采用 100、200 和 350 目的筛网筛分, 对所得不同尺度细小组分的特性及其对麦草高得率浆性能的影响进行研究。通过 Bauer-Mcnett 筛分仪分析, 麦草高得率浆中长纤维组分 R<sub>30</sub> 和细小组分 P<sub>200</sub> 是占比较大的两种筛分组分, 高打浆度的纸浆中含有较多的细小组分。麦草高得率浆中不同尺度细小组分的含量、大小和外观不同, 其中 P350 组分在纸浆中占比为 10% 左右, 粒径为 25 μm 左右, 外观呈大小不一、形状不规则的片状或颗粒状。筛除 P350 组分可以显著改善纸浆性能。通过筛除 P100 细小组分得到的纤维组分, 打浆度在 20 °SR 以下, 但保水值还高达 250% 左右。在麦草高得率制浆过程中, 通过优化磨浆工艺、加强纸浆洗涤, 控制 P350 细小组分含量, 是改善麦草高得率浆性能的一条有效途径。

**关键词:** 麦草高得率浆; 细小组分; 脱水性能; 纸浆强度

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2023)05-0023-07

## Characteristics of Fines from Wheat Straw High Yield Pulp and Its Effect on Pulp Properties

ZHU Yong<sup>1</sup>, SHAO Yingjie<sup>1</sup>, LIU Mingyang<sup>1</sup>, SHAO Xuejun<sup>2</sup>,  
WANG Dongxing<sup>2</sup>, WANG Gaosheng<sup>1</sup>

(1. Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Light Industry Science and Engineering,

Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. Shandong Century Sunshine Paper Group Co., Ltd., Weifang 262400, China)

**Abstract:** Two kinds of wheat straw high yield pulps with different beating degrees were sieved by using 100, 200 and 350 mesh screens in the laboratory. The characteristics of fines with different scales and their effects on the performance of wheat straw high yield pulp were studied. According to Bauer-Mcnett classification analysis, the long fiber fraction R<sub>30</sub> and fine fraction P<sub>200</sub> in wheat straw high yield pulp were the two fractions with the largest proportion, and the pulp with high beating degree contained more fine fraction. There were great differences in the content, size and appearance of fines with different scales in wheat straw high yield pulp. Among them, the P350 fraction content in the wheat straw high yield pulp was about 10%, and the particle size was about 25 μm, the appearance was in the shape of irregular flakes or granules. The pulp properties could be improved significantly by removing the P350 fine from the pulp. The R100, which mainly contained fibers, had a beating degree below 20 °SR, but the water retention value was still up to about 250%. In the process of wheat straw high yield pulping, it is an effective way to improve the performance of wheat straw high yield pulp by optimizing the refining process and strengthening the pulp washing to reduce the content of P350 fine.

**Key words:** wheat straw high yield pulp; fines; dewaterability; pulp strength

从 2021 年开始, 我国全面禁止进口固体废物, 国内市场受到冲击, 废纸价格上涨, 企业生产成本增

加。我国农业秸秆资源十分丰富, 但高附加值利用率不高, 积极探索农业秸秆制浆新技术, 对缓解我国造

收稿日期: 2023-02-26; 修回日期: 2023-04-21

作者简介: 朱 勇 (1998—), 男, 河南人, 硕士研究生; 通信作者: 王高升, 教授, gswang@tust.edu.cn

纸原料短缺问题具有重要的现实意义。麦草是我国传统的非木材造纸纤维原料之一,麦草化学浆曾经在我国造纸工业中占有重要地位,我国的麦草化学制浆技术也处于世界领先地位<sup>[1]</sup>。为了应对造纸纤维原料短缺的困扰,近年来包括麦草高得率浆在内的农业秸秆高得率浆引发造纸行业关注<sup>[2-3]</sup>。农业秸秆高得率浆的制造工艺不同于化学浆,它首先采用化学、生物或其他方法处理原料,再进行机械磨浆,得到的纸浆中最大程度地保留了木素和半纤维素。这种制浆工艺具有得率高、成本低、化学品用量少、纸浆性能好、污染负荷小等优点<sup>[4-6]</sup>。

细小组分是纸浆的重要组成部分,它通常包括细小纤维、来自纤维细胞壁的碎片、杂细胞及纤维素基胶体物质等<sup>[7-9]</sup>。无论是化学浆还是高得率浆,细小组分的含量对其物理性能和抄造性能均有较大的影响<sup>[10-11]</sup>。不同于木材,麦草原料含有大量的薄壁细胞、表皮细胞等杂细胞。麦草化学浆的细小组分中含有大量的薄壁细胞、表皮细胞、硅质细胞等非纤维性杂细胞和部分细小纤维,导致纸浆保水值高,滤水困难,所抄造的纸张脆性大、表面强度低<sup>[12-13]</sup>。与化学法制浆不同,在高得率浆制浆过程中,麦草原料除受到化学作用外,还遭受到比较剧烈的机械作用,薄壁细胞等细胞壁薄的杂细胞容易破裂而产生大量的更加微细的细小组分。为了深入了解麦草高得率浆,阐明细小组分对麦草高得率浆性能的影响,本文对两种不同打浆度的麦草高得率浆进行精细化筛分,研究筛除不同尺度的细小组分对麦草高得率浆性能的影响,为深入认识进而合理利用麦草高得率浆打下基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 原料与仪器

#### 1.1.1 实验原料

实验所研究的两种麦草高得率浆取自山东世纪阳光纸业集团有限公司制浆生产线末端成浆塔。两种纸浆只有磨浆强度不同,打浆度分别为 63 °SR 和 39 °SR,在后文中分别称为高打浆度麦草高得率浆和低打浆度麦草高得率浆。样品以湿浆形式在 4 °C 冷库中贮存备用,浆料浓度分别为 15.00% 和 17.84%。

#### 1.1.2 实验仪器

71-03-04-0002 型 Bauer-Mcnett 筛分仪,美国 TMI 公司;DSC75 型动态滤水仪,美国 PRM 公司;Fiber Tester 912 型纤维分析仪,瑞典 RGW 公司;CX-41 型光学显微镜,日本奥林巴斯有限公司;JSM-

IT300 LV 型扫描电子显微镜,日本电子株式会社;LS13320 型激光散射粒度分析仪,美国贝克曼公司;RK3A-KWT 型快速纸页成型器,奥地利 PTI 公司。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 纸浆分级筛分

称取 10 g 绝干纸浆稀释至浆料浓度为 1%,在标准纤维解离机中疏解 5 000 转后,使用 Bauer-Mcnett 筛分仪对纸浆进行分级筛分并收集:截留 30 目以上的纸浆( $R_{\text{f}30}$ )、通过 30 目截留 50 目以上的纸浆( $P_{\text{f}30}/R_{\text{f}50}$ )、通过 50 目截留 100 目以上的纸浆( $P_{\text{f}50}/R_{\text{f}100}$ )、通过 100 目截留 200 目以上的纸浆( $P_{\text{f}100}/R_{\text{f}200}$ )和通过 200 目的纸浆( $P_{\text{f}200}$ )。

#### 1.2.2 纸浆中细小组分的筛除

取一定量纸浆样品置于标准纤维解离机中,用自来水稀释到浆料浓度为 1% 后进行疏解。取疏解后绝干质量约 2.5 g 的浆料,用动态滤水仪进行筛选分离,分别选用 100 目、200 目和 350 目筛网,搅拌转速 750 r/min,当滤下白水清澈后,将截留在筛网上的组分(分别记为  $R_{100}$ 、 $R_{200}$  和  $R_{350}$ )及滤下的细小组分(分别记为  $P_{100}$ 、 $P_{200}$  和  $P_{350}$ )收集备用。

#### 1.2.3 打浆度和保水值的测定

按照国家标准 GB/T 3332—2004《纸浆 打浆度的测定(肖伯尔-瑞格勒法)》和 GB/T 29286—2012《纸浆 保水值的测定》测定纸浆打浆度和保水值。

#### 1.2.4 纤维形态分析

使用纤维分析仪测定纸浆及其截留在筛网上组分的平均纤维长度、平均纤维宽度、细小纤维含量、扭结指数和形态因子,并计算长宽比。

#### 1.2.5 光学显微镜及扫描电子显微镜观察

将样品悬浮液用玻璃球疏解后滴于载玻片上,用光学显微镜进行观察并拍照;将需观察的样品进行冷冻干燥、喷金后,用扫描电子显微镜对其进行观察并拍照。

#### 1.2.6 细小组分粒径测定

使用激光散射粒度分析仪测定样品的体积粒径,每个样品测试 3 次,取平均值。

#### 1.2.7 手抄片抄造

将纸浆样品在快速纸页成型器上抄造定量为 100 g/m<sup>2</sup> 的纸页,在真空度 -90 kPa、温度 95 °C 的条件下干燥 10 min。

#### 1.2.8 纸张物理性能检测

所得手抄片按照国家标准 GB/T 10739—2002《纸、纸板和纸浆试样处理和试验的标准大气条件》进行处理后,分别依照 GB/T 451.2—2002《纸和纸板

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 454—2020《纸 耐破度的测定》、GB/T 2679.8—2016《纸和纸板 环压强度的测定》、GB/T 455—2002《纸和纸板 撕裂度的测定》、GB/T 457—2008《纸和纸板 耐折度的测定》和 GB/T 458—2008《纸和纸板 透气度的测定》对手抄片的定量、紧度、抗张强度、耐破度、

环压强度、撕裂度、耐折度和透气度进行测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 两种麦草高得率浆性能的比较

对两种不同打浆度的麦草高得率浆的性能进行分析,结果见表1。

表1 麦草高得率浆性能的比较

Tab. 1 Comparison of properties of wheat straw high yield pulp

纸浆种类	打浆度/°SR	保水值/%	紧度/(g·cm <sup>-3</sup> )	耐破指数/(kPa·m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	抗张指数/(N·m·g <sup>-1</sup> )
高打浆度麦草高得率浆	63	322	0.64	3.19	60.5
低打浆度麦草高得率浆	41	281	0.60	2.73	52.4
纸浆种类	撕裂指数/(mN·m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	环压指数/(N·m·g <sup>-1</sup> )	耐折度/次	透气度/(μm·Pa <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	
高打浆度麦草高得率浆	3.55	11.15	37	0.095	
低打浆度麦草高得率浆	4.20	9.88	83	0.300	

从表1可以看出,打浆度不同的两种纸浆性能差别较大,与低打浆度麦草高得率浆相比,高打浆度麦草高得率浆的保水值大,紧度高;高打浆度麦草高得率浆所抄造纸页的抗张强度、耐破强度和环压强度较高,而撕裂强度、耐折度和透气度较低。

### 2.2 麦草高得率浆的筛分结果

为了了解麦草高得率浆的纤维长度及其分布,使用 Bauer-Mcnett 筛分仪对两种不同打浆度的麦草高得率浆进行筛分,对得到的纸浆各筛分组分进行烘干处理并称量,各组分质量分数如图1所示。

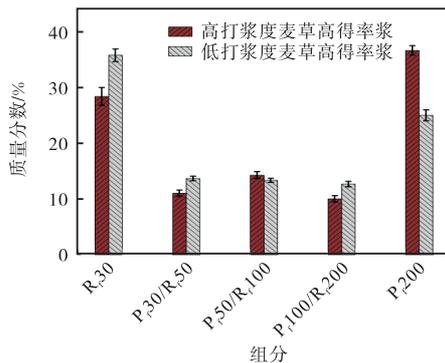


图1 两种麦草高得率浆筛分组分分布

Fig. 1 Fractions distribution of two kinds of wheat straw high yield pulps

从图1可以看出:两种不同打浆度的麦草高得率浆占比较大的两个组分均是截留在30目筛之上的长纤维组分R<sub>30</sub>和通过200目筛的细小组分P<sub>200</sub>。高打浆度麦草高得率浆R<sub>30</sub>和P<sub>200</sub>占比分别为28.25%和35.60%,而低打浆度麦草高得率浆R<sub>30</sub>和

P<sub>200</sub>占比分别为36.46%和24.89%。低打浆度的麦草高得率浆R<sub>30</sub>所占比例最高,而高打浆度的麦草高得率浆P<sub>200</sub>所占比例最高;通过30目且保留在200目之上的中等长度纤维组分所占的比例,高打浆度麦草高得率浆为36.15%,低打浆度麦草高得率浆为38.65%,两者相差不大。对草类纤维原料而言,一般将通过100目筛的组分定义为细小组分,即P<sub>100</sub>筛分组分,细小组分所占比例为P<sub>100</sub>/R<sub>200</sub>与P<sub>200</sub>所占比例之和,高打浆度和低打浆度麦草高得率浆P<sub>100</sub>所占比例分别为46.45%和32.60%。Cole等<sup>[14]</sup>的研究表明在纸浆中细小组分含量较高的情况下,滤水阻力随着细小组分含量变化不是线性增长而是指数增长。无论P<sub>200</sub>组分还是P<sub>100</sub>组分被视为细小组分,麦草高得率浆都有较高的细小组分含量,且高打浆度麦草高得率浆细小组分含量均高于低打浆度麦草高得率浆40%以上,细小组分含量差异是两种纸浆打浆度产生差异的主要原因。另外,低打浆度麦草高得率浆中高R<sub>30</sub>含量对滤水性能的改善也有贡献。

使用光学显微镜拍摄麦草高得率浆及其筛分组分的照片,结果如图2所示。图2(a)—图2(f)为高打浆度麦草高得率浆的照片,图2(g)—图2(l)为低打浆度麦草高得率浆的照片。由图2可知:未进行筛分的麦草高得率浆中细胞种类丰富,除细长的纤维细胞和粗长的导管外,还有形态各异的杂细胞以及微小颗粒,具有明显的草类纤维原料特征。在R<sub>30</sub>和P<sub>30</sub>/R<sub>50</sub>组分中基本上为细长纤维细胞和粗长的导

管,且纤维细胞表面光滑,并未出现明显的细纤维化现象;在  $P_{f100}/R_{f100}$  组分中,除细长的纤维外,还出现棒状薄壁细胞;在  $P_{f100}/R_{f200}$  组分中,浆中充斥着细小纤维、囊状和短棒状薄壁细胞;在  $P_{f200}$  组分中,存在少量短棒状薄壁细胞和表皮细胞,还有各种

纤维和杂细胞碎片,它们之间易相互聚集成团。可见,对麦草高得率浆而言,高强度的机械作用不仅会使各种组织细胞分离,而且会使薄壁细胞等杂细胞破碎变小。

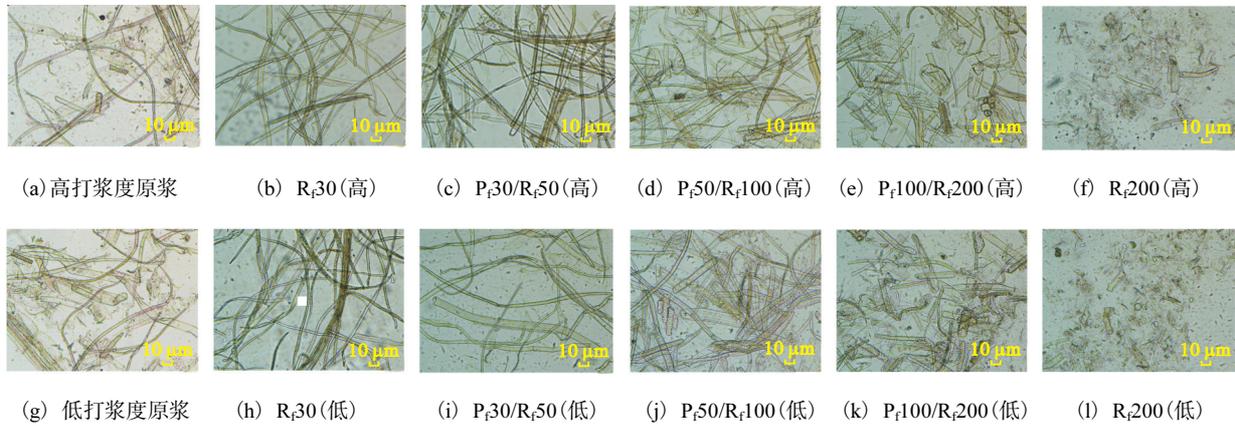


图2 两种麦草高得率浆及其筛分组分的光学显微镜照片

Fig. 2 Optical microscope photos of two wheat straw high yield pulps and their fractions

### 2.3 不同尺度的细小组分筛除对麦草高得率浆纤维形态的影响

从前文的分析可知,无论是用  $P_{f100}$  还是用  $P_{f200}$  表示细小组分,麦草高得率浆中细小组分含量都很高;并且发现  $P_{f200}$  中含有大量非常细小的细胞碎片。故在实验中使用更细的 350 目筛网进行筛分,以便进一步深入研究不同尺度的细小组分对纸浆性能的影响。借助动态滤水仪对麦草高得率浆进行筛分,筛除了不同尺度的细小组分,得到 3 种纸浆,即 R100、R200 和 R350,使用纤维分析仪对纸浆进行纤维形态分析,结果见表 2。由表 2 可知:筛除不同尺

度的细小组分后麦草高得率浆的重均纤维长度发生变化。与未筛浆相比,随着筛网目数的降低,两种纸浆的重均纤维长度逐渐增加,而重均宽度有所降低,长宽比增加。从细小纤维含量来看,随着筛网目数降低,纸浆中更多的细小组分被筛除,细小纤维含量逐渐降低。未筛浆和 R350 这两种纸浆的细小纤维含量相差不大,说明 350 目筛网筛除对细小纤维含量影响不大;R200 和 R100 的细小纤维含量较未筛浆有较大幅度下降,筛网目数越低,细小纤维含量越低。从表 2 还可以看出,细小组分的筛除有利于纤维扭结指数的降低和形态因子的提高。

表 2 不同尺度细小组分的筛除对麦草高得率浆纤维形态的影响

Tab. 2 Effects of fines with different scales removal on fiber morphology of wheat straw high yield pulp

纸浆种类	纸浆组分	重均纤维长度/mm	重均纤维宽度/ $\mu\text{m}$	长宽比	细小纤维含量/%	平均扭结指数/ $\text{mm}^{-1}$	形态因子/%
高打浆度麦草高得率浆	未筛浆	0.737	21.3	34.60	16.43	1.918	88.70
	R350	0.769	20.9	36.79	15.65	1.806	89.20
	R200	0.775	20.7	37.44	9.67	1.778	89.13
	R100	0.829	20.6	40.24	5.50	1.724	89.10
低打浆度麦草高得率浆	未筛浆	0.795	21.2	37.50	16.13	2.287	86.67
	R350	0.800	21.0	38.09	15.50	2.029	86.95
	R200	0.807	20.9	38.61	10.90	2.012	87.93
	R100	0.812	20.7	39.23	6.57	1.885	88.35

注:纤维分析仪所测的细小纤维为长度小于 0.2 mm 的部分。

为了更加深入地理解不同尺度的细小组分对麦草高得率浆性能的影响,实验中对  $P_{100}$ 、 $P_{200}$  和  $P_{350}$  细小组分进行比较分析。利用激光散射粒度仪研究不同尺度细小组分  $P_{100}$ 、 $P_{200}$  和  $P_{350}$  的粒径

及其分布,结果见表 3。随着筛网目数的降低,细小组分含量逐渐增加,高打浆度纸浆所得到的细小组分含量高于相应的低打浆度纸浆所得到的细小组分含量。高打浆度麦草高得率浆中  $P_{350}$  平均粒径为

25.83  $\mu\text{m}$ , P200 平均粒径是其 2.5 倍, P100 平均粒径是其 2.9 倍; 而低打浆度麦草高得率浆中 P350 平均粒径为 28.96  $\mu\text{m}$ , P200 平均粒径是其 2.4 倍, P100 平均粒径是其 2.7 倍。对 P350、P200 和 P100 而言, 高打浆度纸浆的细小组分粒径均低于低打浆度纸浆, 这是由于高打浆度纸浆受到较剧烈的机械作用, 不但使

细小组分的含量增多, 而且也使粒径变得更小。从表 3 还可以看出, 麦草高得率浆的细小组分粒径分布较宽, 如高打浆度纸浆的 P350 细小组分, 其中位粒径为 18.73  $\mu\text{m}$ ,  $D_{10}$  为 2.94  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  为 60.23  $\mu\text{m}$ ,  $D_{90}$  约为  $D_{10}$  的 20 倍。

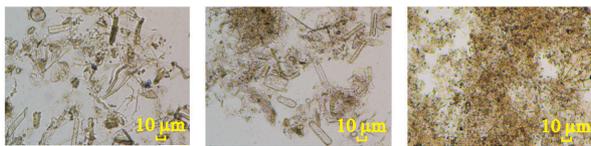
表 3 两种麦草高得率浆不同尺度细小组分的粒径

Tab. 3 Particle size of fines with different scales in two wheat straw high yield pulps

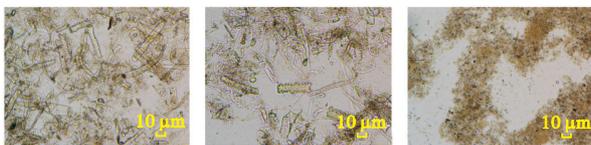
纸浆种类	组分	在纸浆中占比/%	平均粒径/ $\mu\text{m}$	中位粒径/ $\mu\text{m}$	$D_{10}/\mu\text{m}$	$D_{90}/\mu\text{m}$
高打浆度麦草高得率浆	P350	13.63	25.83	18.73	2.94	60.23
	P200	36.46	64.27	52.79	13.02	134.30
	P100	46.45	74.38	61.25	15.96	152.40
低打浆度麦草高得率浆	P350	9.86	28.96	19.59	3.16	78.47
	P200	24.89	68.29	58.67	14.12	134.70
	P100	37.51	78.96	66.71	16.92	153.50

注:  $D_{10}$  表示粒径小于该数值的颗粒占 10%,  $D_{90}$  表示粒径小于该数值的颗粒占 90%。

为了了解细小组分的形态, 用光学显微镜对各组细小组分进行观察并拍摄照片, 结果如图 3 所示。由图 3 可知: 两种麦草高得率浆 P100 中细胞种类丰富, 既有一些细小纤维, 也有形态各异的薄壁细胞、表皮细胞, 其中薄壁细胞有棒状也有囊状, 还有一些碎片和细小的絮状物质充斥其间。在 P200 中, 细小纤维基本消失, 主要构成部分多为棒状或囊状薄壁细胞以及表皮细胞, 同时还有一些微小的絮状物。在 P350 中, 各种完整的细胞均消失, 只有细小物质聚集在一起形成团状絮状物。



(a) P100(高打浆度) (b) P200(高打浆度) (c) P350(高打浆度)



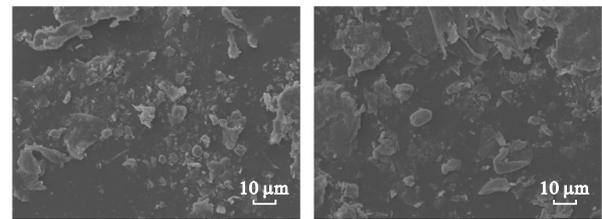
(d) P100(低打浆度) (e) P200(低打浆度) (f) P350(低打浆度)

图 3 两种麦草高得率浆中不同尺度细小组分的光学显微镜照片

Fig. 3 Microscopical photos of fines with different scales in two wheat straw high yield pulps

为了细致了解 P350 的形态, 使用扫描电子显微镜对 P350 进行观察并拍摄照片, 结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, P350 呈现为大小不一、形状不规则的片状或颗粒状的微小物质。这些物质应该来源于原料中的薄壁细胞等杂细胞、胞间层或复合胞间层。

在磨浆过程中, 剧烈的机械作用使得杂细胞破碎, 在组织细胞分离过程中胞间层或复合胞间层也会因机械作用而剥落, 产生的这些微细物质将会对纸浆滤水性能和强度产生影响。



(a) 高打浆度

(b) 低打浆度

图 4 两种麦草高得率浆 P350 的扫描电子显微镜照片

Fig. 4 Scanning electron microscope photos of P350 in two wheat straw high yield pulps

## 2.4 不同尺度的细小组分筛除对麦草高得率浆性能的影响

### 2.4.1 脱水性能

为了了解不同尺度细小组分对纸浆脱水性能的影响, 分析了筛除不同尺度细小组分的纸浆打浆度和保水值的变化, 结果如图 5 所示。从图 5(a)可以看出, 随着所用筛网目数的降低, 纸浆打浆度下降。与未筛分纸浆相比, 高打浆度麦草高得率浆的 R350 组分打浆度下降至 42  $^{\circ}\text{SR}$ , 低打浆度纸浆的 R350 组分打浆度下降至 31  $^{\circ}\text{SR}$ ; 而 R200 组分筛除的 P200 组分包括了 P350, 纸浆的打浆度继续下降, 高打浆度麦草高得率浆的 R200 打浆度下降至 25  $^{\circ}\text{SR}$ , 低打浆度麦草高得率浆的 R200 打浆度下降至 21  $^{\circ}\text{SR}$ ; R100 组分筛除的 P100 部分包括了 P200, 高打浆度麦草高得率浆的 R100 打浆度下降至 16  $^{\circ}\text{SR}$ , 低打浆度浆的

R100 打浆度下降至 18 °SR。R100 主要为长纤维，具有优良的滤水性能。R200 和 R100 相比，增加了 P100/R200 组分(主要是细小纤维、薄壁细胞等)，此时纸浆的滤水性能也能满足一般抄纸要求。R350 和 R200 相比，增加了 P200/R350 组分，与未筛浆比较，减少了 P350 组分，除去的主要是微小的片状和颗粒状物质，此时打浆度出现大幅度下降。

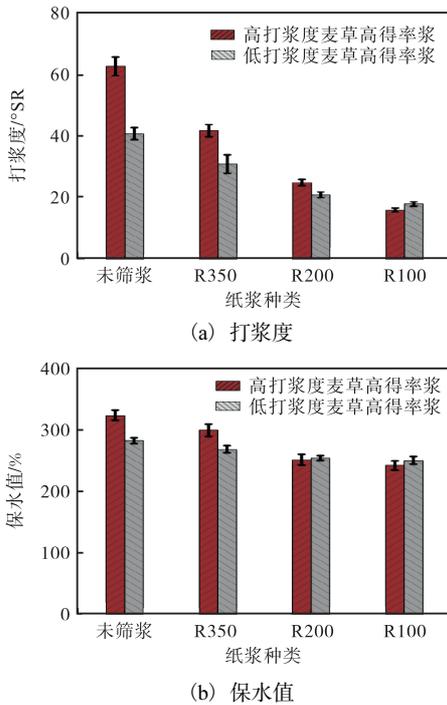


图 5 不同尺度细小组分筛除对麦草高得率浆脱水性能的影响

Fig. 5 Effects of fines with different scales removal on dewaterability of wheat straw high yield pulp

根据 Darcy 方程和 Kozeny-Carman 方程，细小组分的粒径越小，纸页成型时滤水阻力越大<sup>[15]</sup>。细小组分 P350 的筛除，可以大幅度改善纸浆的滤水性能，高打浆度纸浆在去除通过 350 目筛网的细小组分后，打浆度有较大幅度的下降，由 63 °SR 下降至 42 °SR；而低打浆度纸浆在去除通过 350 目筛网的细小组分后，打浆度由 41 °SR 下降至 31 °SR。因此，细小组分含量和大小均对纸浆的滤水性能有重要的影响，在实际生产过程中，可以通过加强磨浆后纸浆的洗涤，除去更细微的细小组分，进而有效改善纸浆的滤水性能。

从图 5(b)可以看出：随着筛网目数的降低，麦草高得率浆保水值呈现下降趋势。与未筛分浆比较，高打浆度麦草高得率浆的 R350、R200 和 R100 组分保水值分别下降了 7.45%、22.36% 和 25.16%；低打浆度麦草高得率浆的 R350、R200 和 R100 组分保水值

分别下降了 4.98%、9.96% 和 11.39%。筛除通过 350 目和 200 目的细小组分对保水值降低影响较大，而筛除 100 目细小组分的保水值相较于筛除 200 目的变化不大。由此可见，筛除细小组分对保水值的影响要比打浆度小得多。从图 5(b)还可以看出，当筛除通过 200 目筛网或 100 目筛网的细小组分后，两种不同打浆度的纸浆的保水值几乎相同，这表明通过 200 目筛网的细小组分对纸浆的保水值影响大。结合图 2 可知，P200 组分多为破碎的杂细胞，而 P100/R200 筛分组分多是完整的杂细胞。Luukko 等<sup>[16]</sup>的研究认为机械浆润胀程度和其细小组分的细纤维化程度有关，细纤维化程度越高，润胀程度越大。也就是说，通过去除通过 200 目筛网的细小组分可以降低纸浆的保水值，若要继续通过筛除细小组分的途径降低麦草高得率浆的保水值是难以实现的。

从前文的分析可以看出，通过筛除麦草高得率浆中的细小组分，可以降低纸浆的打浆度，如 R200 和 R100 的打浆度可以到 20 °SR 左右的水平，而它们的保水值并没有出现大幅度下降，R200 和 R100 的保水值相近，且处于比较高的水平，高打浆度麦草高得率浆 R200 和 R100 的保水值为 250% 和 241%，低打浆度麦草高得率浆 R200 和 R100 的保水值为 256% 和 249%，远高于木浆甚至麦草化学浆的纤维组分<sup>[17]</sup>。麦草高得率浆中半纤维素和木素脱除量少，因此含有大量的半纤维素和木素。一般认为，半纤维素含量越高，浆料的保水值越高，而木素对纤维的润胀有限制作用，导致麦草高得率浆的纤维组分如 R100 筛分具有高保水值的原因仍需要进一步探讨。

#### 2.4.2 物理性能

筛除不同尺度细小组分后，两种麦草高得率浆的物理性能变化见表 4。由表 4 可知，对两种麦草高得率浆，所用的筛网目数不同，筛除细小组分的量及尺度不同，对所抄造纸页的物理性能产生较大的影响。与未筛分纸浆相比，随着筛网目数降低，不同纸浆所抄造纸页的耐破指数、抗张指数和撕裂指数均呈现先上升后下降的变化趋势。R350 所抄造纸页的强度最高，而环压指数和耐折度随着筛网目数降低而逐渐增加。与未筛分纸浆比较，R350 所抄造纸页的紧度增加而透气度降低；随着筛网目数的进一步降低，所抄造纸页的紧度降低而透气度升高。两种打浆度的纸浆，随着筛分时所用筛网目数的变化，所抄造纸页物理性能变化趋势相同。R350 抄造纸页的抗张指数和耐破指数大，说明所抄造纸页纤维间结合强度大。也就是说，P350 细小组分的筛除提高了纤维的结合强

度,同时提高了纸浆的平均纤维长度,使得撕裂指数有较大幅度的提高。与未筛分的原浆相比,高打浆度纸浆的 R350 抄造纸页的撕裂指数提高了 72.11%;低打浆度纸浆的 R350 抄造纸页的撕裂指数提高了 46.90%。随着筛网目数的降低,平均纤维长度进一步提高,虽然纤维间孔隙变大,但是与未筛分纸浆比

较,R100 纸浆所抄造纸页的耐折度大幅度提高,说明麦草高得率浆的纤维的柔韧性好。由此可见,筛除 P350 细小组分有利于提高纸浆的结合强度;筛除 P200 细小组分对纸浆结合强度的影响稍逊于 P350;而 P100 细小组分的筛除导致细小组分被全部去除,使得纸浆结合强度降低。

表 4 不同尺度细小组分筛除对麦草高得率浆物理性能的影响

Tab. 4 Effects of fines with different scales removal on physical performance of wheat straw high yield pulp

纸浆种类	纸浆组分	紧度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	耐破指数/ ( $\text{kPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	抗张指数/ ( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$ )	撕裂指数/ ( $\text{mN}\cdot\text{m}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	环压指数/ ( $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{g}^{-1}$ )	透气度/ ( $\mu\text{m}\cdot\text{Pa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	耐折度/次
高打浆度麦草 高得率浆	未筛浆	0.64	3.19	60.50	3.55	11.15	0.095	37
	R350	0.67	3.66	65.41	6.11	11.22	0.037	73
	R200	0.61	3.57	64.63	5.49	11.87	0.322	173
	R100	0.59	2.96	55.54	4.30	12.01	1.677	326
低打浆度麦草 高得率浆	未筛浆	0.60	2.73	52.40	4.20	9.88	0.300	83
	R350	0.62	3.90	67.91	6.17	10.52	0.131	110
	R200	0.59	3.73	62.70	5.16	11.52	0.691	384
	R100	0.58	2.83	55.46	4.12	11.98	1.147	454

当 P350 细小组分被筛除后,纸浆的打浆度和保水值降低,所抄造纸页的紧度增加,结合强度增大,说明这些超细的细小组分不但增加湿纸幅的滤水阻力,而且阻碍纤维间的结合。Luukko 等<sup>[16]</sup>研究认为富含纤丝状的细小组分对纸页强度的贡献要大于碎片状的细小组分。P350 通常为形状不规则的片状或颗粒状的微小物质,这可以解释 P350 对纸浆结合强度有不利影响。若筛除 P100 细小组分后,纸浆中的细小组分被完全筛除,纸页主要由纤维交织而成,所抄造纸页紧度低、透气度大,纸页结构变得疏松,造成纸页结合力变差。Vainio 等<sup>[18]</sup>的研究认为纸浆中细小组分和纤维在特定比例时可以获得最好的纸浆性能,此时纤维能够交叉形成网络,又有足够的细小组分填充纤维之间的空隙,增加紧度,在纤维之间起“黏合”作用。筛除 P350 细小组分后,R350 中还存在着一定量的细小组分,主要是磨浆后残存的一些较为完整的细纤维、薄壁细胞和表皮细胞等,说明这类细小组分对纤维间的结合是有利的,若进一步降低这部分细小组分的含量,纸页的结合性能有所下降,如用 R200 所抄造纸页所显示的那样,说明若纸浆中细小组分筛除过多,也就是纸浆中细小组分含量较低时,虽然打浆度和保水能力降低,但对纸浆强度有不利影响。

### 3 结论

(1)通过 Bauer-Mcnett 筛分仪筛分分析,麦草高

得率浆中长纤维组分  $R_{\beta 30}$  和细小组分  $P_{\beta 200}$  是占比较大的两个筛分组分。由于在制浆过程中受到较为剧烈的机械作用,高打浆度麦草高得率浆中含有较多的细小组分(如  $P_{\beta 200}$ ),细小组分含量是影响纸浆滤水性能的重要原因。

(2)采用 100 目、200 目和 350 目的筛网筛分纸浆,得到的细小组分比例和大小不同。高打浆度麦草高得率浆、低打浆度麦草高得率浆中 P350 组分占比分别为 13.63% 和 9.86%,粒径在 25  $\mu\text{m}$  左右,外观为大小不一、形状不规则的片状或颗粒状。P200 和 P100 组分中含有大量完整的薄壁细胞、表皮细胞甚至细纤维。

(3)P350 细小组分对麦草高得率浆机械强度和滤水性能均有较大的影响,筛除这部分细小组分,不但可以降低纸浆的打浆度和保水值,而且能够提高与纤维间结合强度有关的机械强度指标。

(4)通过筛除 P100 细小组分得到的纤维组分的打浆度低,在 20°SR 以下;但其保水值高,在 250% 左右,所抄造纸页具有较高的耐折度。

(5)在麦草高得率制浆实际生产过程中,通过优化制浆工艺,减少薄壁细胞等杂细胞的破碎,同时加强纸浆洗涤,可以得到滤水性能好、机械强度高的麦草高得率浆。

### 参考文献:

[1] 李群,聂坤,张红杰. 现阶段我国麦草原料制浆造纸生

(下转第 56 页)

- fusion classification network (DFFCNet) : towards accurate diagnosis of COVID-19 using chest X-rays images [J]. *Biomedical signal processing and control*, 2022, 76: 103677.
- [20] YANG X, XI X M, YANG L, et al. Multi-modality relation attention network for breast tumor classification [J]. *Computers in biology and medicine*, 2022, 150: 106210.
- [21] SELVARAJU R R, COGSWELL M, DAS A, et al. Grad-CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization [J]. *International journal of computer vision*, 2020, 128 (2) : 336–359.

责任编辑:周建军

(上接第 29 页)

- 产状况解析 [J]. *中国造纸*, 2012, 31 (11) : 63–68.
- [2] 房桂干, 施英乔, 邓拥军, 等. 农业秸秆增值利用的有效途径: 秸秆高得率制浆清洁生产技术 [J]. *华东纸业*, 2016, 47 (2) : 1–11.
- [3] GONZALO A, BIMBELA F, SÁNCHEZ J L, et al. Evaluation of different agricultural residues as raw materials for pulp and paper production using a semichemical process [J]. *Journal of cleaner production*, 2017, 156: 184–193.
- [4] 葛银凯, 吉兴香, 田中建, 等. KOH 与 NaOH 浸渍麦草化学机械法制浆性能比较 [J]. *中国造纸*, 2021, 40 (5) : 30–40.
- [5] 于红, 卢雪梅, 秦梦华, 等. 微生物预处理对麦草化机浆性能的影响 [J]. *中国造纸*, 2004, 23 (3) : 16–19.
- [6] 张琛霞, 王高升, 孔军军, 等. 玉米秸秆高得率浆细小组分特性及其对纸浆性能影响 [J]. *中国造纸*, 2019, 38 (7) : 28–35.
- [7] 郭玉倩, 田中建, 吉兴香, 等. 化学机械浆工艺技术的研究综述 [C] // 中国造纸学会第十八届学术年会论文集. 北京: 中国轻工业出版社, 2018: 56–59.
- [8] PAAVILAINEN L. Importance of particle size-fibre length and fines-for the characterization of softwood kraft pulp [J]. *Paperi ja puu*, 1990, 72 (5) : 516–526.
- [9] LUUKKO K. On the characterization of mechanical pulp fines: a review [J]. *Paperi ja puu*, 1998, 80 (6) : 441–448.
- [10] SUNDBERG A, PRANOVICH A V, HOLMBOM B. Chemical characterization of various types of mechanical pulp fines [J]. *Journal of pulp and paper science*, 2003, 29 (5) : 173–178.
- [11] ODABAS N, HENNIGES U, POTTHAST A, et al. Cellulosic fines: properties and effects [J]. *Progress in materials science*, 2016, 83: 574–594.
- [12] 邝仕均, 英格利·菲曼. 麦草浆抄造性能的研究 [J]. *中国造纸*, 1989 (2) : 4–13.
- [13] 邝仕均. 关于麦草浆造纸若干问题的讨论 [J]. *中国造纸*, 1992 (6) : 4–12.
- [14] COLE C A, HUBBE M A, HEITMANN J A. Water release from fractionated stock suspensions. Part 1: effects of the amounts and types of fiber fines [J]. *Tappi journal*, 2008, 7 (7) : 28–32.
- [15] LINDHOLM C A. Comparison of some papermaking properties of groundwood, pressure groundwood and thermomechanical pulp by means of artificial blends of pulp fractions. 1: primary results [J]. *Paperi ja puu*, 1980, 62 (10) : 593–605.
- [16] LUUKKO K, PAULAPURO H. Mechanical pulp fines: effect of particle size and shape [J]. *Tappi journal*, 1999, 82 (2) : 95–101.
- [17] 李忠正. 禾草类纤维制浆造纸 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013: 46–47.
- [18] VAINIO A, PAULAPURO H. Interfiber bonding and fiber segment activation in paper [J]. *BioResources*, 2007, 2 (3) : 442–458.

责任编辑:周建军