



DOI:10.13364/j.issn.1672-6510.20190237

改性磷石膏晶须加填效果与相应白水处理技术研究

高琦, 刘乐, 马昊然, 袁晓娇, 高玉杰

(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)

摘要: 以磷酸盐法和阳离子淀粉法二步复合包覆改性磷石膏晶须, 作为造纸填料进行抄纸, 探讨磷石膏晶须在不同助留体系下的留着率以及纸页性能的变化情况. 对白水中杂质离子进行沉淀处理, 并将沉淀物与晶须按不同比例回用于造纸混合加填, 研究其对填料留着率及纸页性能的影响. 结果表明: 复合改性后, 晶须溶解度降低 88.8%, 留着率增幅为 69.3%; 当未改性晶须以 CPAM1 为助留剂、改性晶须以 CPAM2 为助留剂时, 留着率分别达到 52.73% 和 66.56%. 沉淀混合物添加量为 5%~10% 时, 在提高填料留着率的同时可使纸张具有较好的强度指标, 同时有利于晶须造纸体系的白水循环.

关键词: 磷石膏晶须; 包覆改性; 留着率; 白水处理

中图分类号: TS753.9

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2021)01-0036-06

Filling Performance of Modified Phosphogypsum Whisker and White Water Treatment Technology

GAO Qi, LIU Le, MA Haoran, YUAN Xiaojiao, GAO Yujie

(Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China)

Abstract: Phosphogypsum whiskers were covered modified with phosphate and cationic starch, and then the unmodified and modified phosphogypsum whiskers were used as fillers for paper-making. The retention rate of the whisker and the paper property were investigated in different retention systems. The impure ions in the white water were subjected to precipitated treatment. The sediment and whiskers were mixed and then used as a kind of filler for paper-making to study the effect of its different proportions on the retention rate of the filler and the paper property. The results showed that the solubility of whiskers was reduced by 88.8%, and the retention rate was increased by 69.3% after composite modification. The retention rates reached 52.73% and 66.56% respectively when the original whiskers were treated with CPAM1 and the modified whiskers with CPAM2 as the retention aid. Better paper strength and better filler retention rate could be realized when the amount of the mixed sediment was between 5% and 10%, which was beneficial to the white water circulation in the whisker paper-making system.

Key words: phosphogypsum whisker; covered modification; retention rate; white water treatment

磷石膏晶须, 又称硫酸钙晶须, 一般为纤维状或针状, 是拥有 5~1000 的长径比的单晶体, 磷石膏晶须在兼具高强度、高耐热性和耐腐蚀性等优势的同时, 还具有价格低廉优势. 磷石膏转化为磷石膏晶须的主要方法, 包括水热法、常压酸化法等^[1-3]. 磷石膏晶须白度较高, 化学性能稳定, 是一种优选的造纸填

料^[4-5]. 将磷石膏晶须用在造纸工业中, 不仅能替代常规的造纸填料(如碳酸钙), 减少造纸纤维原料的使用, 降低成本, 同时磷石膏晶须较大的长径比有利于增强植物纤维间的结合, 减少纸张加填后带来的强度损失^[6-11]. 然而, 应用磷石膏晶须作为造纸填料的主要难点就是其水溶性较高, 容易流失. 因此, 本文通

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-11-18

作者简介: 高琦(1995—), 男, 吉林人, 硕士研究生; 通信作者: 高玉杰, 教授, yujie@tust.edu.cn

过探究改性晶须的最佳助留条件,确定适用于磷石膏晶须的最佳助留剂,并对加填后的纸张强度进行分析;同时初步研究晶须加填后造纸白水的处理及混合沉淀物回抄造纸的效果,以期为磷石膏晶须的应用提供必要的理论基础。

1 材料与方法

1.1 原料和仪器

漂白针叶木浆板,山东道欣新材料有限公司;磷石膏晶须(简称晶须),沃裕新材料科技有限公司;磷酸二氢铵、氢氧化镁、氢氧化钡、磷酸,分析纯,天津市北方天医化学试剂厂;阳离子淀粉,取代度 0.04,济南鑫宏化工有限公司;聚丙烯酰胺(CPAM),相对分子质量 5×10^6 ,法国爱森集团(CPAM1,离子化度 20%)、山东今朝化工(CPAM2,离子化度 30%);膨润土,浙江长安仁恒科技股份有限公司。

LS13320 型激光粒度仪,美国 Beckman Coulter 公司;S4800 型扫描电子显微镜,日本日立公司;ZQS2-23 型瓦利打浆机,西北轻工业学院机械厂;NO.704 7.S 型标准纸页成形器,英国 MAVIS 公司;970894 型分光光度计、SE062 型抗张强度测定仪、969920 型耐破度测定仪、SE099 型撕裂度测定仪,瑞典 L&W 有限公司;TD908-1 型耐折度测定仪,美国 Tinius Olsen 公司。

1.2 晶须性质的分析测定

粒径的测定:用烧杯称取一定质量的晶须,加入蒸馏水搅拌,形成悬浮液,用粒度仪对晶须粒径进行测定。

白度的测定:用电热恒温干燥箱在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下恒温干燥处理晶须 2 h,取适量干燥后的样品进行压片,用分光光度计测量白度。

溶解度的测定:用烧杯称取一定质量的晶须,加入 100 mL 蒸馏水搅拌,形成悬浮液,在室温条件下静置 4 h 后过滤。取一定质量的滤液(质量 m_1),置于称量瓶(绝干质量 m_2)中,在 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱里烘干至质量恒定,称量其总质量(质量 m_3)。

$$\text{溶解度} = \frac{100(m_3 - m_2)}{m_1 - (m_3 - m_2)} \quad (1)$$

留着率的测定:准确称取已裁剪好的 $5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的纸片(绝干质量为 m_4),置于已灼烧至质量恒定的坩埚(质量 m_5)中。在电炉上炭化完全后移入马弗炉中,在 $(575 \pm 25)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下灼烧、冷却、称量,反复操

作直至总质量恒定(质量为 m_6)。

$$\text{留着率} = \frac{m_6 - m_5}{m_4} \times 100\% \quad (2)$$

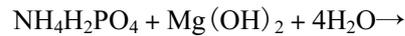
电导率的测定:取测溶解度时的滤液进行电导率的测定。

1.3 晶须改性

本文采用磷酸盐法和阳离子淀粉二步复合包覆改性法改性晶须。

1.3.1 磷酸盐法改性

磷酸盐法改性反应方程式:



反应步骤:(1)配制 0.08 mol/L 的 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 溶液,用量为 1.4% (相对于绝干晶须质量,下同),将其与一定量的晶须均匀混合。(2)使用热水浴将混合物加热到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后加入浓度为 0.07 mol/L 的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 悬浊液,用量为 0.7%;同时搅拌至混合完全,反应时间 5 min。 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 与 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 反应过程中产生 $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 沉淀并在混合过程中沉积包覆在晶须表面。(3)抽滤、洗涤,洗涤水用量 1.1 L/g 。抽滤完成后将滤饼烘干,干燥温度控制在 $40 \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$,干燥时间 2 h。(4)测定溶解度和电导率。

1.3.2 阳离子淀粉复合包覆改性

在磷酸盐法改性的抽滤步骤之前,加入 3% 的淀粉糊化液,在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下进行第二步改性 3 min。之后抽滤、洗涤、干燥,方法与上述磷酸盐法改性相同。

1.4 扫描电镜观察

用扫描电子显微镜观察改性前后的晶须形态。

1.5 纸页抄造和物理性能分析

将漂白针叶木浆打浆到 $35\text{ }^{\circ}\text{SR}$,用疏解机充分分散后调节浆浓至 0.4%,在搅拌的同时加入一定用量的晶须,在相关助留体系下抄造手抄片,定量为 70 g/m^2 。

将手抄片在温度为 $(23 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 $50\% \pm 5\%$ 的恒温恒湿条件下平衡 4 h。根据下列国标测定纸页相关性能:GB/T 451.2—2002《纸和纸板定量的测定》、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—2002《纸耐破度的测定》、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》、GB/T 1543—2005《纸和纸板不透明度(纸背衬)的测定(漫反射法)》、GB/T 7974—2013《纸、纸板和纸浆蓝光漫反射因数 D65 亮度的测定(漫射/

垂直法, 室外日光条件)》.

2 结果与分析

2.1 晶须改性前后主要性质分析

课题组前期实验分析了未改性晶须以及经过磷酸盐与阳离子淀粉二步复合改性后晶须白度、粒径、溶解度和电导率, 结果见表 1. 由表 1 可以看出: 经过复合改性后, 晶须溶解度由 0.224 g 降低到 0.025 g, 降低了 88.8%, 电导率亦有明显降低, 而白度未出现明显变化. 同时晶须具有一定长度, 较脆,

在改性的搅拌过程中会发生一定的断裂, 导致晶须粒径受到一定程度的损失.

表 1 复合改性前后晶须的基本性质

Tab. 1 Basic properties of whiskers before and after composite modification

样品	粒径/ μm	白度/%	溶解度/g	电导率/ $(\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1})$
改性前	166.6	96.0	0.224	2.420
改性后	109.0	95.7	0.025	0.503

2.2 晶须改性前后扫描电镜分析

改性前后晶须的 SEM 图如图 1 所示.



(a) 未改性晶须

(b) 磷酸盐法改性晶须

(c) 复合改性晶须

图 1 改性前后晶须 SEM 图

Fig. 1 SEM image of whiskers before and after modification

从图 1 可以看出: 未改性晶须表面平滑, 基本没有表面附着物, 尺寸及形状较均匀, 且基本无裂纹、残缺, 只含有少量短颗粒的晶须. 一次磷酸盐改性后的晶须表面覆盖了一些细小颗粒状的沉淀物, 即改性沉淀物磷酸镁铵, 导致晶须与水接触面积降低, 在一定程度上降低了磷酸盐改性晶须在水中的溶解度; 另外, 在晶须改性搅拌过程中, 有一些晶须被冲击打碎, 产生了细小晶须. 经过二步复合改性后的晶须表面覆盖的改性剂明显增多, 晶须表面被较多沉淀物包裹, 晶须末端光滑而表面粗糙, 这样的构造使晶须被包裹得更好, 从而使得晶须在水中的溶解度得以进一步降低.

2.3 晶须留着率在不同助留体系下的变化情况

分析了未改性晶须和改性晶须在不同助留条件下的留着率变化情况, 结果如图 2 所示. 所采用的助留体系分别为 CPAM1、CPAM2、CPAM1-膨润土(微粒体系 1)、CPAM2-膨润土(微粒体系 2). 疏解好纸浆后, 在搅拌过程中定量加入相关助留剂, 搅拌均匀后立即抄纸. CPAM1、CPAM2 以及膨润土的用量均为 0.2%, 晶须总加填量均为 30%.

实验结果表明, 在不添加助留剂的情况下, 未改性晶须的留着率为 35.26%, 改性晶须的留着率为

59.67%, 改性晶须留着率较未改性晶须增幅为 69.23%. 改性晶须留着率较未改性晶须明显提高, 导致这一结果有两方面原因. 一方面, 由于改性晶须的溶解度显著降低, 在抄纸过程中, 可减少晶须因溶解而导致的流失, 使得留着率升高; 另一方面, 阳离子淀粉的复合包裹使得晶须表面带正电荷, 在抄片过程中, 更易于吸附在带负电荷的纤维上, 减少了流失, 使得留着率提高.

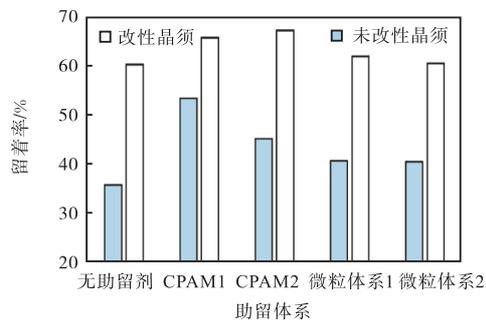


图 2 不同助留体系下晶须留着率的变化情况

Fig. 2 Changes of whisker retention rate in different retention systems

由图 2 可知: 在实验中所选取的几种助留体系中, CPAM2 助留剂可以最大程度地提高改性晶须留着率, 达到 66.56%, 较不添加助留剂时留着率的增幅

达 11.55%。此外,使用 CPAM1 后未改性晶须留着率可达到 52.73%,较不添加助留剂时留着率增幅为 49.55%,改性晶须留着率亦可达 65.06%。CPAM1-膨润土体系(微粒体系 1)、CPAM2-膨润土体系(微粒体系 2)对晶须的助留效果差于单纯的 CPAM1、CPAM2。

2.4 助留体系对纸页基本性能的影响

不同助留条件下加填晶须对纸页相关物理性能影响的实验结果见表 2 和表 3。可以看出,不同助留体系对白度与不透明度的影响不大。

结合图 2 的实验结果综合分析可知:加填改性晶须后由于留着率的提高,纸页的抗张指数、耐破指数以及撕裂指数均有所下降,但下降幅度不大;在微粒体系下,加填改性晶须后纸页的耐折度相对较好,但

和加填未改性晶须时相比,纸页的耐折度有一定程度的降低。

抗张强度的主要影响因素是纤维与纤维间的结合力以及纤维长度。晶须留着率的提高阻碍了纤维间的结合,因此纤维间结合力的降低导致了纸页抗张强度的下降。实验结果表明,未改性晶须在使用 CPAM1 时留着率最大,抗张指数为 57.56 N·m/g;改性晶须在使用 CPAM2 时留着率最大,抗张指数为 57.41 N·m/g。

耐破强度的高低主要取决于纤维间结合力的大小。由于未改性晶须以及改性晶须分别在 CPAM1 和 CPAM2 为助留剂时留着率最高,使纤维间结合力有一定程度下降,所以耐破指数较小,分别为 4.53 kPa·m²/g 和 4.40 kPa·m²/g。

表 2 不同助留体系下加填未改性晶须纸页性能

Tab. 2 Properties of unmodified whisker paper in different retention systems

助留体系	白度/%	不透明度/%	抗张指数/(N·m·g ⁻¹)	耐破指数/(kPa·m ² ·g ⁻¹)	撕裂指数/(mN·m ² ·g ⁻¹)	耐折度/次
无助留剂	82.50	71.21	65.35	4.86	11.65	980
CPAM1	83.59	72.50	57.56	4.53	11.14	800
CPAM2	83.21	74.87	60.06	4.75	11.52	900
微粒体系 1	82.70	72.35	58.51	4.62	11.44	850
微粒体系 2	82.75	72.05	59.62	4.72	11.36	850

表 3 不同助留体系下加填改性晶须纸页性能

Tab. 3 Properties of modified whisker paper in different retention systems

助留体系	白度/%	不透明度/%	抗张指数/(N·m·g ⁻¹)	耐破指数/(kPa·m ² ·g ⁻¹)	撕裂指数/(mN·m ² ·g ⁻¹)	耐折度/次
无助留剂	83.26	72.23	61.79	4.61	10.83	590
CPAM1	83.56	72.51	60.25	4.75	10.01	650
CPAM2	84.06	72.34	57.41	4.40	10.35	548
微粒体系 1	83.54	75.42	55.25	4.52	10.16	700
微粒体系 2	82.81	73.61	59.56	5.25	9.52	730

撕裂度在不同助留体系时的变化不大;但采用改性晶须后,撕裂指数稍有降低。如助留剂为 CPAM2 时加填未改性晶须所制备纸页的撕裂指数为 11.52 mN·m²/g,加填改性晶须后由于晶须留着率的提高,平均纤维长度有所降低,纸页的撕裂指数为 10.35 mN·m²/g,但降低的不多。

2.5 混合沉淀物对填料留着率的影响

使用复合改性和助留剂相结合的方法可大幅度改善磷石膏晶须加填时的留着率。但是,晶须仍会有一些的溶解度,在造纸过程中仍会有一些的 Ca²⁺和 SO₄²⁻溶解于白水中并不断富集,会在一定程度上影响纸机的白水循环和湿部运行。因此,在研究磷石膏晶须的表面改性和助留体系的同时,结合实际生产,在纸张强度能满足相关质量指标的基础上,既要考虑充分利用磷石膏晶须,同时还需要定期对循环白

水中的 Ca²⁺和 SO₄²⁻进行处理,进而减少纸机结垢以及循环白水 pH 降低的可能性。本文分别使用 Ba(OH)₂ 和 H₃PO₄ 处理白水,使之与白水中溶解的 Ca²⁺和 SO₄²⁻离子进行反应生成 BaSO₄ 和 Ca₃(PO₄)₂ 沉淀,从而去除 Ca²⁺和 SO₄²⁻离子,所得沉淀物无毒、无腐蚀作用,可将混合沉淀物作为造纸填料回用于造纸体系,考察添加混合沉淀物后对填料留着率以及纸页相关性能的影响。虽然白水经过处理后的体系 pH 略大于处理前体系的 pH,但变化程度并不明显,因此本文忽略体系 pH 变化对后续实验中晶须留着率的影响。

按 5%、10%、15%、20% 和 25% (相对于绝干晶须质量)的比例称取混合沉淀物,将其与未改性晶须或改性晶须均匀混合,并加填到纸张中,其总加填量均为 30% (相对绝干浆质量)。结合 2.3 节的实验结

果,使用未改性晶须加填时,助留剂采用 CPAM1,使用改性晶须加填时,助留剂选择 CPAM2.

在磷石膏晶须中配加混合沉淀物后,混合沉淀物添加量对填料留着率的影响如图 3 所示.

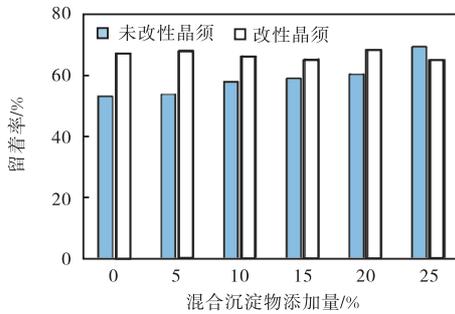


图 3 混合沉淀物对填料留着率的影响

Fig. 3 Effect of mixed sediments on the retention rate of the filler

从图 3 中可以看出:未改性晶须配加沉淀物后,其填料留着率随沉淀物添加量的增加而增大;当未添加混合沉淀物时(即单独加填 30%未改性晶须),填料留着率为 52.73%,当混合沉淀物的添加量为 25%时,填料留着率可达 68.80%,较未添加混合沉淀物时增幅达 30.48%.随着添加混合沉淀物比例的不不断提高,改性晶须的留着率呈波动变化,但总体上变化幅度不大,未添加混合沉淀物的填料留着率为 66.56%,添加

混合沉淀物的填料留着率在 65%左右,当沉淀物添加量分别为 5%和 25%时,填料的留着率分别可达 67.56%和 64.57%.

实验结果表明,在磷石膏晶须加填时,处理白水并在一定程度上回用混合沉淀物,必将有利于白水系统的优化和晶须留着率的提高.

2.6 配加混合沉淀物对纸页基本性能的影响

按一定比例将白水处理后产生的混合沉淀物配加未改性晶须或改性晶须,混合后用于纸页加填,这里进一步研究其对纸页白度、不透明度以及相关强度性能的影响,实验结果见表 4、表 5.

实验结果表明:晶须配加混合沉淀物后加填有改善纸页白度以及不透明度的效果.对于白度来说,未加填沉淀物时,未改性晶须的纸张白度略小于改性晶须,白度分别为 83.59%和 84.06%,两种纸张的白度随着沉淀物配加量的升高而有所提高,并在沉淀物添加量为 25%时均达到最大值,分别为 88.35%和 86.17%,增幅分别为 5.69%和 1.86%.在未添加沉淀物时,两种纸张的不透明度分别为 72.50%和 72.34%;随着沉淀物添加量的不断提高,纸页的不透明度有所提高,在沉淀物添加量为 25%时达到最大值,分别为 80.48%和 81.95%,增幅分别为 11.0%和 13.28%.

表 4 未改性晶须添加混合沉淀物对纸页性能的影响

Tab. 4 Effect of unmodified whiskers with mixed sediments on paper properties

沉淀物添加量/%	白度/%	不透明度/%	抗张指数/(N·m·g ⁻¹)	耐破指数/(kPa·m ² ·g ⁻¹)	撕裂指数/(mN·m ² ·g ⁻¹)	耐折度/次
0	83.59	72.50	57.56	4.53	11.14	800
5	83.00	76.25	57.50	3.87	12.56	410
10	83.78	77.14	46.25	3.51	12.00	400
15	84.50	78.00	46.00	3.42	12.48	270
20	85.12	78.34	40.05	3.00	12.76	140
25	88.35	80.48	33.06	2.23	12.91	85

表 5 改性晶须添加混合沉淀物对纸页性能的影响

Tab. 5 Effect of modified whiskers with mixed sediments on paper properties

沉淀物添加量/%	白度/%	不透明度/%	抗张指数/(N·m·g ⁻¹)	耐破指数/(kPa·m ² ·g ⁻¹)	撕裂指数/(mN·m ² ·g ⁻¹)	耐折度/次
0	84.06	72.34	57.41	4.40	10.35	548
5	83.57	76.00	53.12	3.62	11.12	420
10	83.75	77.25	48.52	3.55	11.50	360
15	84.12	77.31	44.31	3.31	11.25	280
20	84.92	78.00	38.00	3.05	11.53	120
25	86.17	81.95	37.20	2.79	10.88	96

同时,随着混合沉淀物添加量的提高,纸页的抗张强度、耐破强度以及耐折度等性能有一定程度的降低,尤其是耐折度的下降幅度较大.

在晶须中配加混合沉淀物后加填对纸页的撕裂强度基本上没有负面影响.在不添加混合沉淀物的

情况下,未改性晶须加填的纸张撕裂强度略大于改性晶须加填的纸张,分别为 11.14 mN·m²/g 和 10.35 mN·m²/g.随着沉淀物添加比例的增加,加填未改性晶须的纸张撕裂度稍有提高,并在沉淀物添加量为 25%时撕裂指数达到 12.91 mN·m²/g,较纯晶须加

填时增幅为 15.89%;而添加改性晶须的纸张撕裂度则呈现先增大后减小的趋势,但是整体变化趋势不大。

3 结 论

(1) 磷石膏晶须经过磷酸盐与阳离子淀粉二步复合改性后,溶解度由 0.224 g 降低到 0.025 g,降低了 88.8%;经改性后晶须的留着率较未改性晶须的留着率增幅达 69.3%。

(2) 通过对改性前后晶须在不同助留体系下的研究表明:未改性晶须在 CPAM1 为助留剂时留着率可达 52.73%;改性晶须在 CPAM2 为助留剂时留着率可达到 66.56%。随着晶须留着率的提高,纸页强度会有略微下降。

(3) 采用 $\text{Ba}(\text{OH})_2$ 和 H_3PO_4 处理白水并回收 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ,并将混合沉淀物作为填料与晶须以一定比例混合后回用于造纸体系。当添加混合沉淀物为 5%~10%(相对绝干晶须质量)时,在明显提高填料留着率的同时还能保证纸张具有较好的强度指标,同时有利于晶须造纸体系的白水循环。

参考文献:

- [1] 何玉鑫,万建东,华苏东,等. 磷石膏晶须多元化应用进展[J]. 现代化工,2013,33(7):43-45.
- [2] 刘焱,于钢. 硫酸钙晶须用于纸张增强[J]. 纸和造纸,2009,28(5):38-39.
- [3] Yang L S, Wang X, Zhu X F, et al. Preparation of calcium sulfate whisker by hydrothermal method from flue gas desulfurization (FGD) gypsum[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 268: 823-826.
- [4] 戴涛,高玉杰,武书彬. 硫酸钙晶须加填对湿纸页抄造性能的影响研究[J]. 造纸科学与技术,2011(4):60-63.
- [5] 王海龙,梁富政,周景辉,等. 煅烧硫酸钙晶须用于废纸浆生产文化用纸填料[J]. 大连工业大学学报,2014(1):28-33.
- [6] 印万忠,王晓丽,韩跃新,等. 硫酸钙晶须的表面改性研究[J]. 东北大学学报:自然科学版,2007,28(4):580-583.
- [7] Bown R. Particle size, shape and structure of paper fillers and their effect on paper properties[J]. Paper Technology, 1998, 39(2):44-48.
- [8] Dong C X, Song D L, Patterson T, et al. Energy saving in papermaking through filler addition[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008, 47(21):8430-8435.
- [9] Chen X Y, Qian X R, An X H. Using calcium carbonate whiskers as papermaking filler[J]. BioResources, 2011, 6(3):2435-2447.
- [10] Shen J, Song Z Q, Qian X R, et al. Nanofillers for papermaking wet end applications[J]. BioResources, 2010, 5(3):1328-1331.
- [11] 覃盛涛,王玉珑,詹怀宇,等. 硫酸钙晶须用作造纸填料的性能分析[J]. 造纸化学品,2013(5):12-15.

责任编辑:周建军