

纳米硫酸钡复合材料对改善纸张性能的研究



作者简介：杜鹏先生，在读硕士研究生；主要从事纳米纤维素和电池隔膜纸的制备与应用等方面的研究。

杜鹏 赵传山* 韩文佳 姜亦飞 丁其军 李杰华 熊晓敏
(齐鲁工业大学(山东省科学院)生物基材料与绿色造纸国家重点实验室, 山东济南, 250353)

摘要：作为造纸填料的二氧化钛(TiO₂)价格昂贵,为降低生产成本,着重研究了纳米硫酸钡复合材料部分替代TiO₂作为填料和涂布颜料对纸张物理性能的影响。结果表明,添加一定量的纳米硫酸钡复合材料有助于TiO₂的分散;当纳米硫酸钡复合材料作为浆内添加填料时,在替代量为0~16%的变化范围内,纸张的物理性能得到改善,替代量为6%时,纸张的白度提升至89.0%,不透明度达到96.5%;当纳米硫酸钡复合材料作为涂布颜料时,随着涂布量的增加,纸张油墨吸收性呈现增强的趋势, L_{ab}^* 值中 b^* 值逐渐减小,纸张抗蓝光能力显著增强。

关键词：纳米硫酸钡复合材料;二氧化钛;纸张性能

中图分类号：TS758*.1 **文献标识码：**A **DOI:** 10.11980/j.issn.0254-508X.2020.12.007

Study on the Improvement of Paper Properties by Nano-baritite Composites Material

DU Peng ZHAO Chuanshan* HAN Wenjia JIANG Yifei DING Qijun LI Jiehua XIONG Xiaomin
(State Key Lab of Bio-based Materials and Green Papermaking, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan, Shandong Province, 250353)
(*E-mail: ppzcs78@163.com)

Abstract: Due to the high price of titanium dioxide, this work focused on the effect of nano-baritite composites material partly replaced titanium dioxide as filler and coating pigment on the physical properties of paper to reduce the production cost. The results showed that the addition of nano-baritite composites material was helpful to the dispersion of titanium dioxide. In addition, the physical properties of the paper were improved when the substitution amount of nano-baritite composites material in the range of 0~16%. Particularly, the whiteness of paper was increased to 89.0% and the opacity improved to 96.5% with the substitution amount of nano-baritite composites material of 6%. When the nano-baritite composites material was used as coating pigment, with the increase of the coating amount of nano-baritite composites material, the paper ink absorption showed increased, and the b^* value in L_{ab}^* value gradually decreased, indicating the blue light resistance of the paper increased significantly.

Key words: nano-baritite composites material; titanium dioxide; paper properties

纳米材料具有的独特性质使其在造纸工业中得到了广泛的应用,但由于其易团聚,在应用过程中往往难以均匀分散,且纳米制品的性能检测和产品标准还有待进一步完善,因此纳米技术和纳米材料在造纸工业中的优势还没有完全被重视^[1],其在特种纸中的应用问题需要进一步研究和解决。

近年来,随着纳米科学技术的进步,纳米材料在造纸中的优势越来越明显。纳米材料特殊的结构使其表现出更优异的力、热、光和电磁等性能,同时还具有高强度、高扩散性、高韧性以及低弹性模量等优

点^[2-4],这些特殊的性能使纳米材料可以广泛应用于各个领域。王进等人^[5]研究了纳米二氧化硅(SiO₂)对纸张印刷性能的影响,发现添加纳米SiO₂可以提高纸张的印刷适性和强度,延长纸张的使用寿命;肖仙英等人^[6]对纳米碳酸钙(CaCO₃)在造纸涂料中的应用进行了探索,证明纳米CaCO₃可以提高纸张的强度和平滑度,并改善其对油墨的吸收性;张建平等^[7]利

收稿日期:2020-07-03(修改稿)

*通信作者:赵传山,教授,博士生导师;主要从事特种纸与功能纸的开发等方面的研究。

用二氧化钛 (TiO_2) 开发出高耐候和耐磨的装饰原纸,大幅度提高了纸张的综合性能。虽然我国纳米材料的制备技术已相当成熟,但纳米材料的应用仍具有一定的局限性^[8],如能耗大、成本高和工艺复杂等。

纳米硫酸钡 (BaSO_4) 复合材料具有无毒无害、稳定性好、比重高、白度高和化学惰性高等优点,是一种十分环保的材料,可以广泛用于各种涂料^[9]、化妆品、造纸^[10]、橡胶和陶瓷^[11-12]等领域。除了以上性质外,纳米 BaSO_4 复合材料还具有比表面积高、分散性好等^[13-14]优点,可以作为分散剂添加到颜料中,从而有效节省颜料用量^[15-17]。同时,纳米 BaSO_4 复合材料还具有杀菌和极强的紫外屏蔽作用^[18]。2019年,我国人造板饰面专用原纸总销售量约为 115 万 t,同比增长 2.48%。其中,装饰原纸销售量为 108.52 万 t,同比增长 2.86%^[4]。 TiO_2 作为装饰原纸的主要填料,国内价格达到 1.7 万~2.5 万元/t,而纳米 BaSO_4 复合材料价格仅为 5000 元/t。因此,以纳米 BaSO_4 复合材料部分替代 TiO_2 ,可有效降低材料制备成本,具有良好的应用前景。

本研究以化学浆为原料,纳米 BaSO_4 复合材料和 TiO_2 为浆内填料^[19],通过对纳米 BaSO_4 复合材料和 TiO_2 粒径的表征以及复合填料分散液的沉降现象研究,探索了纳米 BaSO_4 复合材料添加量对复合填料分散液稳定性的影响;并着重研究了纳米 BaSO_4 复合材料在复合填料中部分替代 TiO_2 对纸张不透明度、白度和抗张强度等性能的影响。另外,装饰原纸属于高填料纸张,本研究利用纳米 BaSO_4 复合材料对其进行表面微涂,研究了纳米 BaSO_4 复合材料作为涂料对纸张的白度、不透明度和强度等性能的影响。

1 实验

1.1 实验原料与药品

漂白硫酸盐针叶木浆、漂白硫酸盐阔叶木浆(以下分别简称针叶木浆和阔叶木浆,青岛丰凯瑞科技发展有限公司);装饰原纸(定量 90 g/m²,阳光王子特种纸有限公司);阳离子聚丙烯酰胺(CPAM,分析纯,北京沃特利源环保科技有限公司);硫酸铝($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,分析纯,济南春禄福商贸有限公司);聚酰胺环氧氯丙烷树脂(PAE,山东高超节能环保科技股份有限公司);分散剂 A1040(工业级,固含量 5%);聚乙烯醇(PVA-1799,分析纯,上海凯杜实业发展有限公司);氧化淀粉(河北源创生物科技有限公司);消泡剂(BKY-146,广州市多美材料有限公司); TiO_2 (R-902+,金红石型,美国杜邦公司);纳

米 BaSO_4 复合材料(包括 BaSO_4 、碳酸钙及滑石粉等,陕西山阳奥科粉体有限公司)。

1.2 实验设备与仪器

实验所用设备及仪器如表 1 所示。

表 1 实验设备与仪器

仪器名称	型号	生产厂家
超声波细胞粉碎机	JY98-3DN	宁波新芝生物科技股份有限公司
高速分散机		宁波新芝生物科技股份有限公司
Vally 打浆机	KRK2505	日本 KRK 公司
纤维疏解机	260	瑞典 L&W 公司
凯赛快速纸页成型器	ASM-32N2F	奥地利 Laboratory Equipment 公司
SBD-1 白度测定仪	YQ-Z-48B	杭州轻通博科自动化技术有限公司
HC-871A 电子拉力试验机	Instron5943	美国 Instron 公司
印刷适性测试仪	IMT-IGT309	东莞市英特耐森精密仪器有限公司
线棒式涂布试验机	AT-TB-2000	山东安尼麦特仪器有限公司
压光机		德国 SHW 公司
Zeta 电位和纳米粒径测定仪	ZS	英国马尔文公司
扫描电子显微镜	Regulus-8220	日本岛津

1.3 浆内加填纸的制备

将针叶木浆板和阔叶木浆板用蒸馏水浸泡 4 h,并移至 Vally 打浆机中分别打浆至打浆度为 35°SR,脱水干燥备用。

按照针叶木浆与阔叶木浆质量比 6:4 进行配抄,固定填料总质量为浆料绝干质量的 50%,将纳米 BaSO_4 复合材料按比例部分替代 TiO_2 ,并以 2% (相对 TiO_2) 变化梯度增加纳米 BaSO_4 复合材料添加量。同时,添加 1% 的 CPAM,以增加纤维与填料的留着,从而提高纸张灰分;添加 1% 的湿强剂 PAE,以提升纸张的干湿强度;添加 4% 的 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$,以除去浆料中阴离子干扰,使浆料 pH 值维持在 5.0~5.5 (助剂的添加量均相对于浆料绝干质量);然后向疏解机中加入一定量蒸馏水,分散均匀得到混合浆料,按图 1 所示流程进行抄造,本研究中抄造纸张定量为 90 g/m²。将抄造成形的纸张在 (105±2)°C 的烘箱中进行 30 min 熟化处理后,按照国家标准存放和平衡水分,进行纸张的白度和不透明度等物理指标的检测。

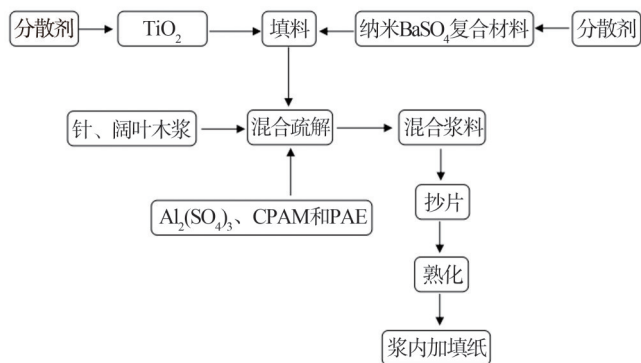


图1 浆内加填纸的抄造流程图

1.4 表面微涂纸的制备

装饰原纸属于高填料纸张，为进一步探究纳米BaSO₄复合材料对纸张性能的影响，将纳米BaSO₄复合材料制备成涂料对原纸进行表面微涂，具体步骤如下：将纳米BaSO₄复合材料配制成浓度为50%的分散液，向分散液中添加1%（相对于纳米BaSO₄复合材料绝干质量）的分散剂A-1040，用超声细胞粉碎机进行分散；将胶黏剂和分散液按照绝干质量比2：8混合，其中胶黏剂包括PVA和氧化淀粉，绝干质量比为1：4；搅拌均匀后，用高速分散机搅拌30 min，得到纳米BaSO₄复合涂料。将制备好的涂料在装饰原纸上进行表面微涂，实验室涂布流程图如图2所示。

将涂布纸张进行压光处理，本研究中进行两次压光，压光后的纸张进行白度和不透明度等物理指标的检测。

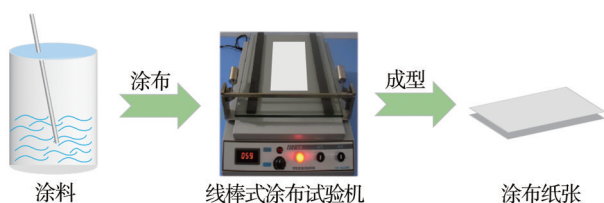


图2 表面微涂纸张制备流程图

1.5 纸张的性能表征

纸张的物理性能按照国家相关标准方法进行检测和计算，其中抗张指数测定方法参照GB/T 12914—2008；白度和不透明度测定方法参照GB/T 7974—2013；采用扫描电子显微镜观察纸张中纤维分布形态及纸张表面形貌变化。

2 结果与分析

2.1 复合填料分散液的稳定性

TiO₂粒径为微米级，作为填料加填到装饰原纸

中，可以起到遮盖作用。通过Zeta电位和纳米粒径测定仪测得TiO₂粒径范围为0.35~0.40 μm；当复合填料分散液中TiO₂的固含量大于10%，将其添加到浆内抄纸时，会因分散液浓度大，黏度大，导致TiO₂在纸张表面和内部分散不均匀，且随水流失现象较严重。因此，在机械分散过程中，需要加入1%（相对于TiO₂绝干质量）的分散剂A-1040，再进行高速分散，分散时间为5 min。通过Zeta电位和纳米粒径测定仪测得纳米BaSO₄复合材料的粒径范围为0.25~0.30 μm，按照相同方法进行5 min的高速分散。当两者分散完全后，将纳米BaSO₄复合材料按一定比例部分替代TiO₂，观察其稳定性，以一定时间后的沉降高度表示，结果见图3。

如图3(a)所示，与TiO₂分散液沉降现象不同，纳米BaSO₄复合材料粒径较小，在水相中分散较均匀，而TiO₂分散液静置后呈现明显的分层现象。将复合填料分散液混合均匀，静置24 h后，分散液会产生明显的分层现象，不同纳米BaSO₄复合材料替代量的分散液沉降高度结果见图3(b)。由图3(b)可以看出，在0~10%的纳米BaSO₄复合材料替代TiO₂的范围内，随替代量的增加，TiO₂分散液的沉降高度不断增大，说明纳米BaSO₄复合材料对TiO₂在水相中的分散有一定的协同作用^[20]。

使用Zeta电位和纳米粒径测定仪测得复合填料分散液的Zeta电位，结果如表2所示。从表2中可以看出，全纳米BaSO₄复合材料（纳米BaSO₄复合材料替代量100%）的分散液Zeta电位最高，加入TiO₂后，复合填料分散液的Zeta电位绝对值骤降，全TiO₂（纳米BaSO₄复合材料替代量0）的分散液Zeta电位最低。结合图3(b)中结果可知，所测粒径越小，Zeta电位的绝对值越高，分散效果和稳定性越好，这是由于TiO₂粒径较大，会发生严重的团聚，因此，从另一方面也可以反映出纳米BaSO₄复合材料对TiO₂在水相中的分散有一定的协同作用。

2.2 浆内加填对纸张物理性能的影响

本研究以打浆度35°SR的针叶木浆与阔叶木浆为原料配抄（质量比为6：4）成纸，并以TiO₂、纳米BaSO₄复合材料为填料、添加湿强剂PAE、CPAM以及Al₂(SO₄)₃等助剂，通过固定填料的用量，改变纳米BaSO₄复合材料对TiO₂的部分替代量，探究纳米BaSO₄复合材料的加填对纸张物理性能的影响。

图4(a)和4(b)显示了不同加填替代量的纳米BaSO₄复合材料对纸张白度和不透明度的影响。在填料全为TiO₂时，纸张白度与不透明度分别为88.7%和

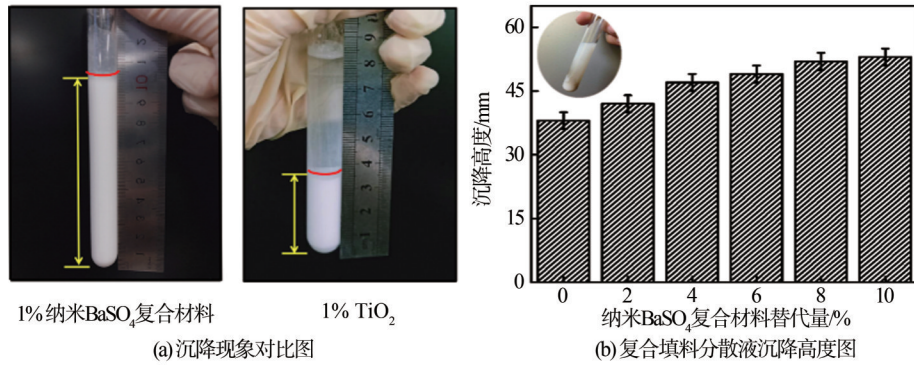


图3 纳米BaSO₄复合材料、TiO₂及复合填料分散液的沉降现象

表2 复合填料分散液的Zeta电位

纳米BaSO ₄ 复合材料替代量/%	Zeta电位绝对值
0	0.36
10	0.39
20	0.40
30	0.68
40	0.81
50	1.02
100	3.07

95.5%，而当填料全为纳米BaSO₄复合材料时，纸张白度与不透明度性能均下降，白度为87.5%，下降了1.2个百分点，不透明度为95.0%，下降了0.5个百分点。由图4(a)还可以看出，在0~16%的纳米BaSO₄复合材料替代TiO₂的范围内，随着替代量的增加，白度及不透明度性能变化趋势稳定，白度稳定在88.6%以上，整体白度相对于添加全TiO₂纸张均有所增加。在纳米BaSO₄复合材料替代量为6%时，白度最高，达到89.0%，与添加全TiO₂的纸张相比，增加了0.34%；不透明度达到96.5%，增加了1.05%。因此利用纳米BaSO₄复合材料部分替代TiO₂进行浆内加

填，可以提高纸张白度与不透明度。

从图4(c)可以看出，纸张的抗张指数随着纳米BaSO₄复合材料替代量的增加呈上升趋势，并且在纳米BaSO₄复合材料的替代量为6%时增长至22.9 N·m/g，继续增加纳米BaSO₄复合材料的替代量，抗张指数增加效果不明显。这些结果的出现与纳米BaSO₄复合材料本身的特性有关，纳米BaSO₄复合材料具有稳定性好、比表面积大及表面活性高等^[21]特性，使粒子彼此不易凝聚且易吸附其他物质，可以增强助剂在水中的分散性；此外，无机纳米粒子与纤维之间很难形成氢键作用，从而削弱了纳米材料与纤维间的结合力，使纸张的力学性能明显降低^[22]；纸张抗张强度的小幅上升可能是因为纳米BaSO₄复合材料自身的强度，适量添加可在一定程度上提高纸张的力学性能^[14]。

结果表明，将TiO₂作为纸张浆内加填的填料时，利用纳米BaSO₄复合材料部分替代TiO₂，可以使纸张白度、不透明度和抗张强度等物理性能得到有效提高，并在一定程度上降低成本。

2.3 浆内加填对纸张形貌的影响

当复合填料中纳米BaSO₄复合材料替代量为6%时，利用扫描电子显微镜（SEM）观察了不同倍数下

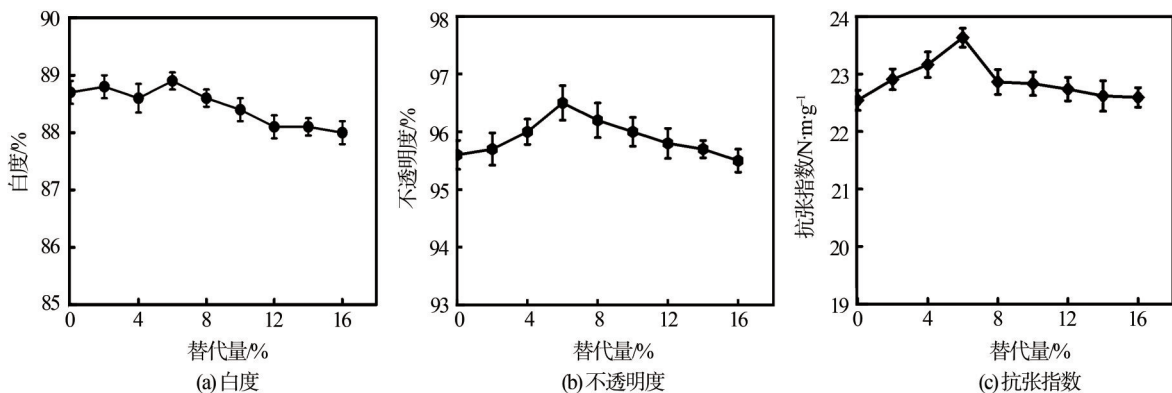


图4 纳米BaSO₄复合材料部分替代TiO₂对纸张物理性能的影响

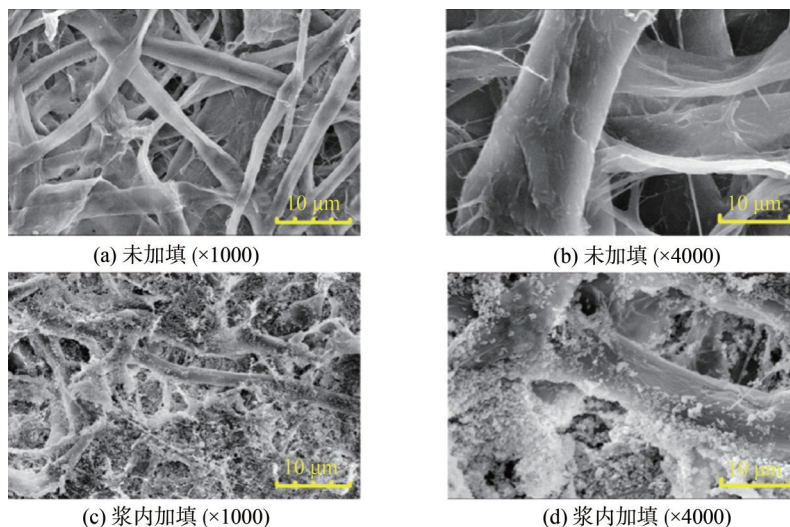


图5 不同倍数下未加填和浆内加填后的纸张SEM图

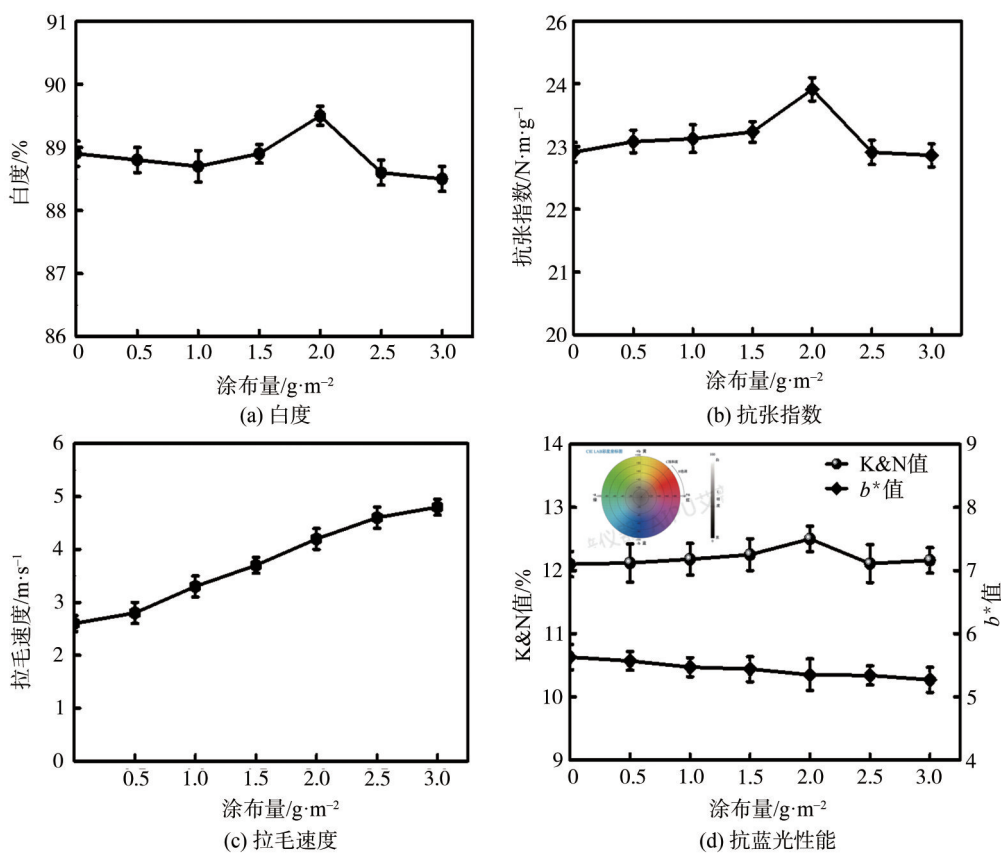


图6 纳米BaSO₄复合材料表面微涂对纸张物理性能的影响

未加填和浆内加填后的纸张形貌图(见图5)。从图5(a)可以看出,未加填纸中长、短纤维交织形成了复杂的三维网络结构;从图5(b)可以看出,纤维之间存在较大的孔径和孔隙率,所以纸张的透光率较高;与未加填纸相比,浆内加填后的纸张中,填料黏附在纤维上或填充在纤维网状结构的孔隙中,如图5(c)和图5(d)所示,纤维之间的孔径和孔隙率明显减小,光的

折射和透射减少,从而达到了提高纸张不透明度和白度^[24]的目的。

2.4 表面微涂对纸张物理性能的影响

醚化淀粉常被用作装饰原纸的表面微涂颜料,杨延昭^[19]利用涂布量为2 g/m²的醚化淀粉进行纸张表面修饰后,纸张白度为88.0%,抗张指数为23.6 N·m/g。为提高纸张的不透明度、力学性能等,减少掉毛掉粉

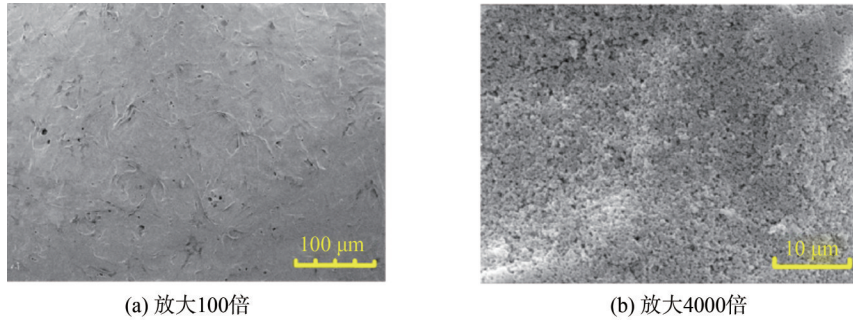


图7 不同倍数下表面微涂后的纸张SEM图

现象, 本研究以装饰原纸为基础, 通过改变纳米 BaSO_4 复合涂料的涂布量, 探究了纳米 BaSO_4 复合材料表面微涂对纸张物理性能的影响。

图 6(a) 和图 6(b) 是表面微涂不同涂布量后纸张的白度、抗张指数的变化趋势图。由图 6(a) 可以看出, 在涂布量为 2.0 g/m^2 时, 白度达到 89.5%, 相同涂布量的醚化淀粉表面微涂纸白度为 88.0%^[19]。从图 6(b) 看出, 当涂布量为 2.0 g/m^2 时, 表面微涂纸张的抗张指数增加效果明显, 达到 $23.9 \text{ N}\cdot\text{m/g}$, 与相同涂布量的醚化淀粉表面微涂纸相比, 增加了 $0.06 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ ^[19]。因此, 当纳米 BaSO_4 复合材料作为纸张表面微涂的涂料时, 可以提升纸张白度与抗张强度。

表面微涂对纸张的表面强度也有一定影响, 文献显示, 经涂布量为 3.0 g/m^2 醚化淀粉表面微涂后纸张的拉毛速度为 4.7 m/s ^[19]。由图 6(c) 可以看出, 随着纳米 BaSO_4 复合涂料涂布量的逐渐增加, 纸张的拉毛速度呈现上升趋势, 当涂布量为 2.0 g/m^2 时, 纸张拉毛速度达到 4.3 m/s , 当涂布量为 3.0 g/m^2 时, 拉毛速度达到 4.8 m/s 。因此, 将纳米 BaSO_4 复合材料作为纸张表面微涂涂料, 可以提高装饰原纸的表面强度, 减少纸张掉毛掉粉现象。

由于纳米 BaSO_4 复合材料还具有极强的紫外屏蔽作用, 从图 6(d) 可以看出, 纸张的 K&N 值随着表面涂布量的增加呈稳定趋势, 当涂布量为 2.0 g/m^2 时, 油墨吸收性最好。 L^* 值反映了抗蓝光能力, L^* 值中随着 b^* 值越大, 抗蓝光能力越差^[23]。从图 6(d) 可以看出, b^* 值随着涂料涂布量的增加而减小, 因此纳米 BaSO_4 复合材料作为涂料进行表面微涂时, 纸张的抗蓝光能力有了显著增强。

2.5 表面微涂对纸张形貌的分析

图 7 为不同放大倍数下纳米 BaSO_4 复合材料表面微涂后纸张 SEM 图。从图 7(a) 中看出, 表面微涂后可明显看出涂料覆盖在纤维表面, 或填充在纤维网络孔隙之间, 因此纤维之间的孔径和孔隙率明显减小, 从

而达到了提高纸张不透明度和白度^[24]的目的; 且经过纳米 BaSO_4 复合涂料涂布后的纸张表面也更加光滑, 因此表面微涂有纳米 BaSO_4 复合材料的涂料还可以提升纸张表面细腻度。

3 结论

本研究提出利用纳米 BaSO_4 复合材料部分替代 TiO_2 的方法, 并探究了其对纸张物理性能的影响。

3.1 添加纳米 BaSO_4 复合材料有助于 TiO_2 在水相中的分散, 增加了分散液的稳定性。

3.2 作为浆内添加填料, 当纳米 BaSO_4 复合材料替代 TiO_2 的范围在 0~16% 时, 纸张白度及抗张强度提高, 当替代量为 6% 时, 纸张白度最高, 可达到 89.0%, 不透明度达到 96.5%, 抗张指数达到 $22.9 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ 。适量的纳米 BaSO_4 复合材料部分替代 TiO_2 作为浆内添加填料可以在一定程度上提高纸张的白度、不透明度和力学性能。

3.3 作为纸张表面微涂的涂料, 当纳米 BaSO_4 复合涂料的涂布量为 2.0 g/m^2 时, 纸张白度达到 89.5%; 表面强度提高, 拉毛速度达到 4.3 m/s ; 抗张指数达到 $23.9 \text{ N}\cdot\text{m/g}$; 纸张的油墨吸收性增加, 抗蓝光能力显著增强。

3.4 通过添加纳米 BaSO_4 复合材料来替代 TiO_2 , 可降低工厂的生产成本, 但在纳米 BaSO_4 复合材料的替代量上仍需进一步研究。

参 考 文 献

- [1] XU Zhaonan, JIN Hailan. Research progress in the application of nanometer titanium dioxide in pulping and papermaking [J]. Heilongjiang Papermaking, 2017, 45(1):29. 徐兆楠, 金海兰. 纳米二氧化钛在制浆造纸中的应用研究进展 [J]. 黑龙江造纸, 2017, 45(1):29.
- [2] LAN Qixing. The application of nanomaterials in the paper industry [J]. Guangxi Light Industry, 2002(4):8. 蓝启星. 纳米材料在造纸工业中的应用 [J]. 广西轻工业, 2002(4):8.

- [3] LI Xiuling. Theoretical research on the performance control of low-dimensional nanomaterials[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2016.
李秀玲. 低维纳米材料性能调控的理论研究低维纳米材料性能调控的理论研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [4] ZHA Ruitao, ZHANG Chunliang. The application of nanotechnology in the paper industry[J]. China Pulp & Paper Industry, 2016, 37(21):45.
查瑞涛, 张春亮. 纳米技术在造纸工业中的应用[J]. 中华纸业, 2016, 37(21):45.
- [5] WANG Jin, CHEN Kefu, YANG Rendang, et al. Application of Nano-scale Silica in Color Inkjet Printing Paper Coatings[J]. China Pulp & Paper, 2005, 24(1):8.
王 进, 陈克复, 杨仁党, 等. 纳米级二氧化硅在彩色喷墨打印纸涂料中的应用[J]. 中国造纸, 2005, 24(1):8.
- [6] XIAO Xianying, ZHENG Chisong, HU Jian, et al. Exploration of Nano Calcium Carbonate Used in Papermaking Coatings[J]. Paper and Papermaking, 2002(2):30.
肖仙英, 郑焱嵩, 胡 健, 等. 纳米碳酸钙用于造纸涂料的探索[J]. 纸和造纸, 2002(2):30.
- [7] ZHANG Jianping, ZHANG Chuan, ZHANG Qian, et al. Nano TiO₂ dispersibility and research progress on functional paper[J]. Material Manufacturing and Application, 2019, 37(2):16.
张建平, 张 川, 张 千, 等. 纳米二氧化钛分散性及在功能纸上的研究进展[J]. 材料制造与应用, 2019, 37(2):16.
- [8] Xu J F, Ling L. Preparation of self-emulsifying styrene acrylate emulsion used to improve the printability of decorative base paper [C]//International Conference on Biobased Material Science & Engineering. 2013.
- [9] LIU Yaping. Preparation and application of functional composite fillers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.
刘雅萍. 功能性复合填料的制备及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [10] PENG Chunyan, MA Juying, WEI Qianqian. Research on the current situation and trend of global mineral pigments for papermaking [J]. Building Materials World, 2015(1):29.
彭春艳, 马菊英, 魏茜茜. 全球造纸用矿物颜料现状及趋势研究[J]. 建材世界, 2015(1):29.
- [11] Zhiqian J, Zhongzhou L. Synthesis of nanosized BaSO₄ particles with a membrane reactor: effects of operating parameters on particles[J]. Journal of Membrane Science, 2002, 209(1):153.
- [12] Guo S, Evans D G, Li D, et al. Experimental and Numerical Investigation of the Precipitation of Barium Sulfate in a Rotating Liquid Film Reactor[J]. Aiche Journal, 2010, 55(9):2024.
- [13] CHEN Yuliang, ZHANG Lei. Research progress of nano-barium sulfate composite materials[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(18):69.
陈虞亮, 张 雷. 纳米硫酸钡复合材料的研究进展[J]. 广东化工, 2013, 40(18):69.
- [14] CHEN Xiaolei, SHI Jianguo, LIU Yongli. The aging resistance and thermal properties of high-density polyethylene cage frame materials modified by nano-barium sulfate composite materials [J]. Marine Fisheries, 2012, 34(1):96.
陈晓蕾, 石建高, 刘永利. 纳米硫酸钡复合材料改性高密度聚乙烯网箱框架材料的耐老化性能和热性能[J]. 海洋渔业, 2012, 34(1):96.
- [15] Luo C, Chen G, Zhu K, et al. Preparation of X-ray developable LDPE/SA-BaSO₄ composites and their thermal and mechanical properties[J]. Polymer Composites, 2016, 37(5):1396.
- [16] ZHANG Zhengjian, ZHANG Qilian, ZHANG Mingzhi. The effect of coating on the surface properties and printability of wood-based decorative base paper and its mechanism[J]. Forestry Science, 2018, 54(1):111.
张正健, 张启莲, 张明志. 涂料涂布对人造板装饰原纸表面性状和印刷适性的影响及其机制[J]. 林业科学, 2018, 54(1):111.
- [17] HUO Hong, OUYANG Chaobin, LIU Youzhi. Preparation process and application of nano-barium sulfate composite materials[C]//Proceedings of China Nano-scale Inorganic Powder Materials Development, Energy Conservation and Environmental Protection Summit Forum, 2007.
霍 红, 欧阳朝斌, 刘有智. 纳米硫酸钡复合材料的制备工艺及其应用[C]//中国纳米级无机粉体材料发展·节能·环保高峰论坛论文集, 2007.
- [18] Tang Y J, Mosseler J A, He Z B, et al. Imparting cellulosic paper of high conductivity by surface coating of dispersed graphite [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2014, 53(24):1011.
- [19] YANG Yanzhao. The research mechanism of surface treatment on the structure and performance of decorative base paper[D]. Ji'nan: Qilu University of Technology, 2012.
杨延昭. 表面处理对装饰原纸的纸页结构和性能的研究机制[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2012.
- [20] ZHANG Yuanjing, LI Zhenqiu, SU Yanfang, et al. Application of Titanium Dioxide in Paper Industry [J]. Papermaking Chemicals, 2010, 22(5):26.
张元静, 黎振球, 苏彦芳, 等. 钛白粉在造纸工业中的应用[J]. 造纸化学品, 2010, 22(5):26.
- [21] WU Zhenjuan, ZANG Yonghua, LIU Hongbin, et al. The Effect of TiO₂ on the Whiteness Stability of Coated Paper Containing High-Yield Pulp[J]. China Pulp & Paper, 2010, 29(4):23.
吴振娟, 臧永华, 刘洪斌, 等. TiO₂对含高得率浆涂布纸白度稳定性的影响[J]. 中国造纸, 2010, 29(4):23.
- [22] ZHAO Yonghu, WANG Junfen, WU Yuying, et al. Preparation of nano-cellulose and its strengthening effect on paper[J]. Paper Science and Technology, 2015, 34(2):64.
赵永虎, 王俊芬, 吴玉英, 等. 纳米纤维素的制备及其对纸张增强作用的研究[J]. 造纸科学与技术, 2015, 34(2):64.
- [23] Maghrabi H A, Vijayan A, Mohaddes F, et al. Evaluation of X-ray radiation shielding performance of barium sulphate-coated fabrics [J]. Fibers and Polymers, 2016, 17(12):2047.
- [24] LIU Hongbin. Study on the relationship between fiber properties and paper tearing performance [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2004.
刘洪斌. 纤维特性与纸页撕裂性能关系的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2004. [CPP]

(责任编辑: 杨苗秀)