

# 硅铝微粉/钛白粉复合填料在装饰原纸中的应用研究

薛袭岳<sup>1</sup>, 赵雷鸣<sup>1</sup>, 殷志刚<sup>2</sup>, 张文晖<sup>1,2</sup>

(1.天津市制浆造纸重点实验室, 生物基纤维材料全国重点实验室, 天津科技大学轻工科学与工程学院, 天津 300457; 2. 锂资源综合利用与新型电池基础锂材料四川省重点实验室, 天齐锂业股份有限公司, 成都 610299)

**摘要:**为降低装饰原纸生产成本并推动锂渣固废资源化利用,本文采用球磨法制备钛白粉/硅铝微粉复合填料,以硅铝微粉部分替代钛白粉,在30%加填量条件下进行抄纸实验,系统探究了钛白粉与硅铝微粉的质量比及压光处理对纸张性能的影响。结果表明:球磨处理使钛白粉均匀紧密包覆于硅铝微粉表面,形成稳定复合结构,且二者界面生成Si—O—Ti共价键,显著提升了填料界面结合稳定性;随着钛白粉与硅铝微粉质量比从0:100增至100:0,未压光纸样的ISO白度从84.0%提升至87.8%,不透明度始终稳定在96.5%以上,当钛白粉替代量为25%(质量比75:25)时,纸张白度已接近纯钛白粉加填水平;压光处理可显著提高纸张紧度、降低透气度,且对光学性能影响微弱;力学性能测试显示,钛白粉替代量25%的压光后纸样干、湿抗张强度均达峰值,表明该比例下复合填料的刚性与其在纤维网络中的分散性达到了良好平衡。本研究为锂渣基硅铝微粉在装饰原纸领域的高值化应用提供了工业化适配方案,该技术在保障成纸核心性能的同时,同步实现钛白粉减量降本与工业固废资源化利用,为造纸行业绿色可持续发展提供了关键技术支撑。

**关键词:**装饰原纸;硅铝微粉;钛白粉;复合填料;球磨法;固废资源化

## Application Research of Silica-Aluminum Micropowder/Titanium Dioxide Composite Filler in Decorative Base Paper

XUE Xiyue<sup>1</sup>, ZHAO Leiming<sup>1</sup>, YIN Zhigang<sup>2</sup>, ZHANG Wenhui<sup>1,2</sup>

(1.Tianjin Key Laboratory of Pulp and Paper, State Key Laboratory of Bio-based Fiber Materials, College of Light Industry Science and Engineering, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2.Key Laboratory of Sichuan Province for Lithium Resources Comprehensive Utilization and New Lithium Based Materials for Advanced Battery Technology, Tianqi Lithium Corporation, Chengdu 610299, China)

**Abstract:** To reduce the cost of decorative base paper and promote the resource utilization of lithium slag solid waste, this paper proposes the use of a composite filler prepared by ball milling, in which a portion of titanium dioxide is replaced with silica-alumina micro-powder. Paper samples were fabricated at a filler loading of 30%, and the effects of the titanium dioxide to silica-alumina micro-powder mass ratio and the calendering process on paper properties were systematically investigated. Results showed that ball milling enabled uniform and tight coating of titanium dioxide onto the surface of silica-alumina micro-powder,

基金项目:锂资源与锂材料四川省重点实验室开放基金资助(LRMKF202306)

作者简介:薛袭岳(2001—),硕士研究生;通信作者:张文晖,副研究员, zhangwhui@tust.edu.cn。

forming a stable composite structure. Si—O—Ti covalent bonds were generated at the interface between the two components, significantly enhancing the interfacial bonding stability of the filler. As the mass ratio of titanium dioxide to silica - alumina micro - powder increased from 0: 100 to 100: 0, the ISO brightness of uncalendered paper samples rose from 84.0% to 87.8%, while the opacity remained above 96.5%. Notably, when 25% of titanium dioxide was substituted (mass ratio of 75:25), the paper brightness approached that of the sample filled with pure titanium dioxide. Calendering treatment significantly increased paper density and reduced air permeability, while having only a minor effect on optical properties. Mechanical property testing revealed that the calendered paper samples with 25% titanium dioxide substitution achieved peak dry and wet tensile strengths, indicating that at this ratio, the rigidity of the composite filler and its dispersion within the fiber network reach an optimal balance. This study provides an industrially applicable scheme for the high-value utilization of silica-alumina micro-powder in the field of decorative base paper. On the premise of ensuring the core properties of finished paper, this technology can simultaneously reduce the consumption and cost of titanium dioxide and realize the resource utilization of industrial solid waste, offering key technical support for the green and sustainable development of the paper industry.

**Key words:** decorative base paper; silico-aluminum micro-powder; titanium dioxide; composite filler; ball milling method; solid waste resource utilization

装饰原纸作为人造板饰面与家具装饰的关键材料,其生产长期依赖钛白粉作为主要填料,以保障纸张的白度、遮盖力及印刷适应性<sup>[1]</sup>。然而,钛白粉(二氧化钛)价格较为昂贵,且传统生产工艺带来较大的环境污染,致使装饰原纸的生产成本居高不下,并伴随显著的环境压力。在资源与环境约束日益严格的背景下,开发可替代钛白粉的低成本、环保型填料已成为行业亟待解决的关键问题<sup>[2]</sup>。

针对钛白粉的低成本、高性能替代,国内外学者开展了大量研究。陈雪峰等<sup>[3]</sup>通过亚微米-微米自组装法制备了含硅灰石或白炭黑的复合钛白粉,发现在30%~50%加填量下,复合填料的遮盖力与物理性能均可接近纯钛白粉体系,且加填后纸张的物理性能与使用钛白粉时相近。惠岚峰等<sup>[4]</sup>探索了钛白粉/高岭土复合体系,结果表明:在5%~30%替代范围内,成纸的物理强度、白度、不透明度及透气度均有所降低,但毛细吸液高度略有提高,整体性能可接近纯钛白粉加填的纸张。薛斌等<sup>[5]</sup>采用硅酸盐作为钛白粉替代剂,在填料加填量为60%(硅酸盐与钛白粉的质量比为3:7)且采用干粉预混合工艺时,原纸色相和遮盖性得到改善;在相近不透明度下,原纸灰分下降1.92%。苏艳群等<sup>[6]</sup>探究了采用20%高吸油煅烧土替代钛白粉的效果,发现其可改善浆料滤水和纸张遮盖性能,但会降低抗张指数;后续添加6%纳米纤维素可提升填料留着率与

湿遮盖性能。张研等<sup>[7-9]</sup>采用乳液法、化学沉淀法和球磨制备了多种二氧化钛/滑石粉复合填料,在加填量达到30%时的光学性能接近纯钛白粉。可见,现有研究已从不同路径证实了钛白粉部分替代的技术可行性,复合填料的遮盖性能及加填后纸张的物理性能已可接近纯钛白粉体系。然而,上述研究多采用天然矿物(高岭土、滑石粉、煅烧土)作为替代基体,对工业固废的资源化利用涉及较少;同时,复合填料与钛白粉之间的结合多依赖于物理共混或包覆,关于界面化学键合对填料体系稳定性及纸张性能影响的研究仍较匮乏。

锂渣是锂辉石提锂过程中产生的工业固废,产量巨大且堆存处置难,其资源化利用已成为行业关注焦点<sup>[10]</sup>。锂渣的主要成分为SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和少量CaO,具有水化活性、高硅铝含量、多孔、高吸附性等特点<sup>[11-12]</sup>。何卓凡等<sup>[13]</sup>报道,当锂渣加填量为12%~18%时,纸张的抗张指数与撕裂指数相较于使用沉淀碳酸钙作为填料的纸张可提升20%~40%。锂渣经脱硫、除铁等除杂提纯工艺及研磨细化处理后,可制备得到人造硅铝酸盐矿物(即硅铝微粉)。该硅铝微粉不仅具备优异的化学稳定性、热稳定性及分散性,还拥有原料易得、成本低廉的突出优势;相较于高岭土、滑石粉等传统天然矿物替代填料,其在成本控制与环保效益方面优势显著,在造纸填料领域展现出广阔的应用前景。更重要的是,硅铝微粉表

面富含硅/铝羟基活性位点,具备与钛白粉形成界面化学键合(Si—O—Ti)的潜力,这为构建高性能复合填料体系提供了可能。本课题组前期的研究发现,将硅铝微粉作为填料,与硅烷偶联剂KH550改性聚磷酸铵复配用于浆内加填,可赋予纸张优异的阻燃性能;当总加填量为30%,且硅铝微粉占比不超过总填料量的25%时,纸张表现出显著的自熄特性,这也从侧面证实了硅铝微粉与纤维体系具有良好的相容性<sup>[14]</sup>。

本文旨在探讨以硅铝微粉部分替代钛白粉的可行性,采用球磨法制备硅铝微粉/钛白粉复合填料并用于抄造装饰原纸,系统分析钛白粉与硅铝微粉质量比对装饰原纸光学性能与物理性能的影响规律,以期为固废资源化利用及装饰原纸行业的可持续发展提供理论依据与技术支持。

## 1 实验

### 1.1 原料与试剂

漂白化学针叶木商品浆(简称针叶木浆)、漂白化学阔叶木商品浆(简称阔叶木浆),厦门建发浆纸集团有限公司;聚酰胺环氧氯丙烷树脂(PAE),东莞辉腾新材料公司;六偏磷酸钠,天津博迪化工股份有限公司;阴离子聚丙烯酰胺(APAM,分子量1200万),山东优索化工科技有限公司;钛白粉(ISO白度为93.5%, $D_{50}=0.13\ \mu\text{m}$ ),广东冠豪高新技术股份有限公司;硅铝微粉(主要成分为 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,ISO白度为77.9%,575℃焙烧灰分为96.7%),天齐锂业股份有限公司。

### 1.2 仪器与设备

11952419型标准浆料疏解器,瑞典ABB公司;1304027型瓦力打浆机,日本KRK仪器制造公司;RK-3A-KWT型快速纸页成型器,奥地利PTI仪器制造公司;014型肖伯式打浆度测定仪、12012028型厚度仪、991739型抗张强度测试仪、166型透气度测试仪,瑞典L&W公司;EJA Vantaga-1型湿抗张强度仪,美国Thwing-Albert公司;别克平滑度测定仪,美国TMI公司;TJ型行星式球磨机,天津市东方天津科技发展有限公司;S-CA5.250型压光机,德国Sumet-Messtechnik公司;FTIR-650型傅里叶变换红外光谱仪,天津港东科技股份有限公司;NP-30S型旋涡混合器,常州恩培制造有限公司;JSM-IT300LV型扫描电子显微镜(SEM),日本电子公司;Lasentec S400A

型聚焦光束反射测量仪(FBRM),瑞士梅特勒-托利多公司。

### 1.3 实验与分析方法

#### 1.3.1 钛白粉-硅铝微粉复合填料的制备

将钛白粉与预球磨处理的硅铝微粉( $D_{50}=1.2\ \mu\text{m}$ )按设计质量比称取,总质量为3 g。将其与6 mL含4.5 mg六偏磷酸钠的水溶液(分散剂)共同置于离心管中漩涡初步混匀,后放入球磨罐中。球磨介质为氧化锆珠,球料质量比为15:1。在行星式球磨机中以20 Hz频率球磨2 h。球磨结束后,产物依次使用乙醇和去离子水交替洗涤两次,以去除残留分散剂,随后经抽滤并于105℃下干燥12 h,最终制得钛白粉-硅铝微粉复合填料。

#### 1.3.2 纸张抄造

用瓦力打浆机对两种商品浆分别进行打浆,将针叶木浆与阔叶木浆的打浆度分别控制在32°SR和33°SR;随后,将钛白粉-硅铝微粉复合填料置于200 mL水中混合均匀,配置成悬浮液备用。将针叶木浆和阔叶木浆按质量比1:4混合,向混合浆料中加入相对于绝干浆质量30%的钛白粉-硅铝微粉复合填料悬浮液(以固体填料计),于标准纤维解离器中疏解。进一步以绝干浆质量为基准,依次加入1%的PAE湿强剂与0.06%的APAM助剂,在250 r/min下搅拌30 s至体系充分混合。随后采用快速纸页成型器抄制定量为90 g/m<sup>2</sup>的纸页,干燥后得到未压光纸样。

压光处理步骤如下:将干燥纸样置于加湿器中,正反面各加湿处理30 s;随后立即采用压光机在5 N压力下压光,压光后的纸样置于标准温湿环境中平衡12 h。

#### 1.3.3 纸张物理性能测定

根据国家标准方法对纸样分别进行以下性能测定:定量按GB/T 451.2—2023测定;白度按GB/T 7974—2013测定;不透明度按GB/T 1543—2005测定;厚度按GB/T 451.3—2002测定,紧度根据厚度与定量计算得出;透气度按GB/T 458—2008测定;干抗张指数按GB/T 12914—2018测定;湿抗张指数按GB/T 465.2—2008测定;吸水高度按GB/T 461.1—2002测定;平滑度按GB/T 456—2002测定。

#### 1.3.4 其他分析方法

采用傅里叶变换红外光谱(FTIR)分析样品化学结构:取1 mg样品与150 mg KBr共同研磨并压片

(压力 10 MPa, 保压 1 min), 使用透射模式采集光谱。

采用扫描电子显微镜(SEM)观察纸张表面形貌与填料加填情况。

为分析填料絮凝行为, 设计如下实验方案: 首先, 在盛有水的烧杯中放入 250 目圆柱形敞口浆袋, 将经疏解处理的纸浆置于浆袋内, 再向浆袋外的烧杯中加入经预分散处理的钛白粉/硅铝微粉复合填料; 随后, 在持续搅拌条件下, 按照抄纸工艺比例依次加入 PAE 与 APAM, 搅拌至设定时间后, 提起浆袋以实现纤维与填料悬浮液的分离; 最后, 收集袋外的填料悬浮液, 在 200 r/min 持续搅拌状态下, 采用 FBRM 测定其粒径分布。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合填料样品分析

图 1 展示了钛白粉、硅铝微粉及其复合填料(钛白粉与硅铝微粉的质量比为 75:25)的傅里叶变换红外光谱。分析可知, 三种材料在  $3434\text{ cm}^{-1}$  附近均出现宽吸收峰, 可归属于表面吸附水或结构羟基的 O—H 伸缩振动; 而在  $1384\text{ cm}^{-1}$  处的吸收峰则可能来源于碳酸根物种或表面吸附含碳/氮官能团。具体来看, 钛白粉在约  $661\text{ cm}^{-1}$  处表现出明显的 Ti—O—Ti 晶格振动特征峰<sup>[7]</sup>; 相比之下, 硅铝微粉在  $1101\sim 1166\text{ cm}^{-1}$  范围内的宽化吸收谱带, 这来源于 Si—O—Si 及 Si—O—Al 键的反对称伸缩振动<sup>[15]</sup>, 表明其以无定形硅铝酸盐为主的结构特征。进一步对比复合填料的光谱, 可以发现两处显著变化: 首先, Si—O—(Si/Al) 的吸收带向低频方向移动至

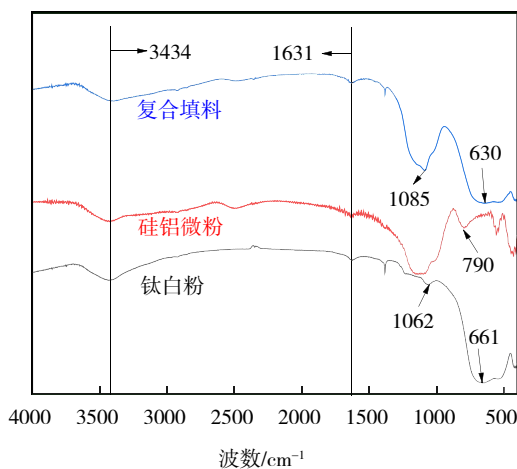
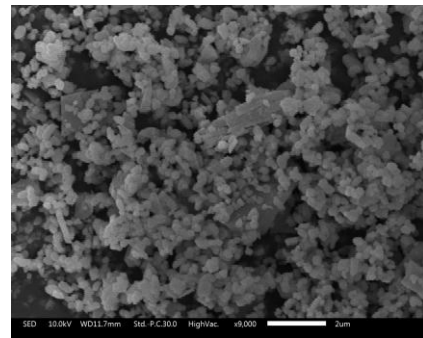


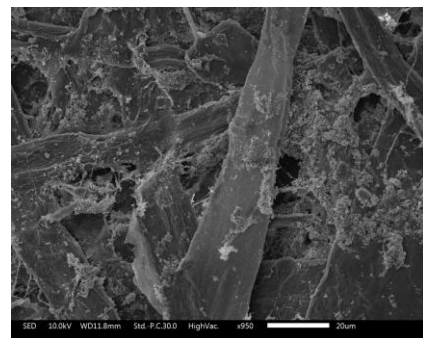
图 1 钛白粉、硅铝微粉及复合填料(钛白粉与硅铝微粉的质量比为 75:25)的傅里叶变换红外光谱图

$1085\text{ cm}^{-1}$ , 表明硅氧网络的局部分化学环境因球磨发生改变; 其次, 钛白粉中位于  $661\text{ cm}^{-1}$  的 Ti—O—Ti 特征峰在复合后宽化并红移至  $630\text{ cm}^{-1}$ 。该红移现象表明, 钛白粉颗粒表面的 Ti—O 键与硅铝微粉的 Si—O—(Si/Al) 网络发生了键合, 形成了键能更低、振动频率因而降低的 Si—O—Ti 键。综上, 上述谱学变化共同证实: 球磨处理不仅实现了钛白粉与硅铝微粉的物理混合, 更在界面处诱发了化学反应, 导致 Si—O—Ti 共价键的生成, 从而实现两者在化学层面上的复合。

图 2 呈现了钛白粉/硅铝微粉复合材料及其在纸张中加填后的 SEM 图。从复合材料的形貌可见, 经球磨处理后, 不规则的硅铝微粉颗粒被球状钛白粉有效包裹, 同时体系中仍存在大量游离的钛白粉颗粒。进一步观察填料的纸张中的分布情况可以发现, 钛白粉/硅铝微粉复合填料主要填充于纤维之间的孔隙结构内, 另有部分颗粒附着于纤维表面。整体上, 填料颗粒在纤维网络中分散较为均匀, 且与纤维之间结合较为紧密。该形貌特征直观反映了复合填料在纸张纤维网络中的分布状态, 为其对纸张性能的影响提供了结构层面的解释。



(a) 钛白粉/硅铝微粉复合填料



(b) 加填复合填料的纸张

图 2 钛白粉/硅铝微粉复合填料(钛白粉与硅铝微粉的质量比为 75:25)及加填该复合填料后纸张的 SEM 图

## 2.2 钛白粉与硅铝微粉的质量比及压光处理对纸样紧度与透气度的影响

图3展示了钛白粉/硅铝微粉的质量比及压光处理对纸样紧度及透气度的影响规律。分析结果显示,随着钛白粉与硅铝微粉的质量比由25:75提高到100:0,未压光及压光纸样的紧度均呈现总体上升趋势,但增幅较小( $<0.06 \text{ g/cm}^3$ );与此同时,透气度则表现出明显下降趋势。进一步观察发现,压光处理显著强化了上述变化趋势,使纸样紧度普遍提升约 $0.2 \text{ g/cm}^3$ ,透气度则从690~810 mL/min显著地降低至25~28 mL/min,反映出压光工艺对纸张微观结构的显著压实作用。

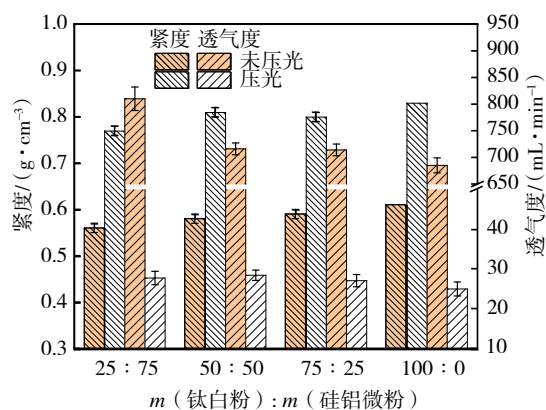


图3 钛白粉与硅铝微粉质量比及压光处理对纸样紧度及透气度的影响

纸张紧度变化与填料本身的特性及其在纤维间的分布状态密切相关。本实验所采用硅铝微粉的密度为 $2.4\sim 2.5 \text{ g/cm}^3$ (密度基于锂渣的主要成分估算<sup>[11]</sup>),平均粒径 $D_{50}$ 为 $1.2 \mu\text{m}$ ;相比之下,钛白粉密度为 $4.2 \text{ g/cm}^3$ <sup>[16]</sup>,平均粒径 $D_{50}$ 仅为 $0.13 \mu\text{m}$ 。因此,在机械球磨复合过程中,部分超细钛白粉颗粒可负载于硅铝微粉表面,其余则以游离态存在(图2)。随着钛白粉与硅铝微粉的质量比提高,游离态超细钛白粉数量相应增加,这些颗粒能够进一步填充于纤维与复合填料之间的孔隙中,形成微填充效应,从而使纸张结构更为密实,紧度随之略有上升。压光处理则通过高压辊施加的线压力使纤维被压溃并扁平化,进而显著压缩纤维间的宏观孔隙,特别是那些未被填料充分填充的较大孔隙。该过程导致纸页厚度明显下降,在定量不变的条件下,紧度显著提高。

另一方面,纸张的透气性能主要受纸张内部孔

隙率与孔隙结构控制。填料的引入可有效填充纤维间空隙,降低孔隙率,尤其是亚微米级孔隙的形成会增加气体穿透的曲折度,阻碍空气通过。由于钛白粉粒径远小于硅铝微粉,其比例提高进一步增强了微填充效应,使得更多纤维间及填料间的微细孔隙被有效填充,导致透气度进一步下降。此外,压光过程不可逆地压缩纤维网络,大幅降低整体孔隙率并使孔隙结构趋于扁平,是造成所有纸样透气度显著降低的根本原因<sup>[17]</sup>。

## 2.3 钛白粉与硅铝微粉的质量比及压光处理对纸样白度与不透明度的影响

图4展示了复合填料中钛白粉与硅铝微粉的质量比与压光处理对纸样白度与不透明的影响规律。如图所示,随着钛白粉与硅铝微粉的质量比由25:75提高至75:25,成纸的ISO白度从84.0%提升至87.7%,而不透明度稳定在96.5%左右。值得注意的是,当填料全部采用钛白粉(100:0)时,纸样的ISO白度为87.8%,不透明度为97.2%,这说明白度在钛白粉比例较高时已接近上限,而不透明度在全部使用钛白粉时略有提升。此外,压光处理对纸样的白度与不透明度影响甚微。

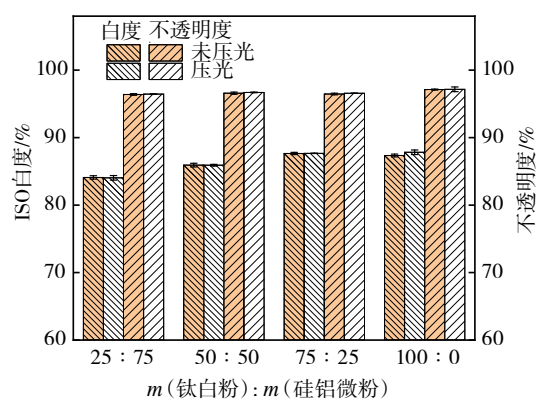


图4 钛白粉/硅铝微粉质量比及压光处理对纸样白度与不透明的影响

白度的变化主要源于钛白粉优异的光学性能。钛白粉具有高折射率(2.5~2.7)和较强的蓝光区反射能力<sup>[16]</sup>,其原料的ISO白度达93.5%,显著高于硅铝微粉(77.9%)。在球磨复合过程中,钛白粉部分包裹于硅铝微粉表面,从而提升复合填料的整体白度。随着钛白粉比例增加,其在硅铝微粉表面的覆盖程度提高,复合填料的白度也随之上升。当钛白粉与硅铝微粉质量比达到75:25时,钛白粉已基本

实现对硅铝微粉的有效包覆,此时其对成纸白度的提升效果与纯钛白粉相近。

纸张不透明度则主要受光散射能力的影响。在30%的较高加填量下,纸张不透明度已处于较高水平( $\geq 96.5\%$ ),继续增强光散射对其提升空间有限,因为不透明度理论极限为100%,在接近该阈值时,即使光散射能力进一步增强,不透明度也难以出现显著提升。因此,尽管钛白粉比例提高带来光散射能力的增强,不透明度在多数复合比例下保持稳定,仅在全钛白粉填充时因散射能力最大化而略有上升。

根据光散射理论,白度和不透明度主要取决于填料颗粒对光的散射和吸收效率,而这些系数主要由填料本身的特性(如折射率、粒径分布)及其在纸张中的分布状态决定<sup>[18]</sup>。压光工艺主要通过机械压力压实纤维网络,虽显著改变了纸张的宏观结构和表面平滑度,但对填料颗粒自身的光散射行为及其在纤维-填料体系中的光学界面影响有限。因此,压光后白度与不透明度并未发生显著变化。

#### 2.4 钛白粉与硅铝微粉的质量比与压光处理对纸样抗张指数的影响

图5展示了钛白粉与硅铝微粉的质量比及压光处理对纸张干、湿抗张指数的影响规律。对于未压光纸样,随着钛白粉与硅铝微粉的质量比从25:75增至100:0,干抗张指数由 $22.4 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ 增至 $27.3 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ ,湿抗张指数由 $3.5 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ 增至 $4.3 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ 。该趋势可归因于填料表面状态与分散性及APAM架桥效率的协同变化:钛白粉与硅铝微粉的质量比较低时,硅铝微粉表面包覆不充分,电中性区域易团聚而遮蔽纤维结合位点,且APAM吸附不足导致架桥薄弱

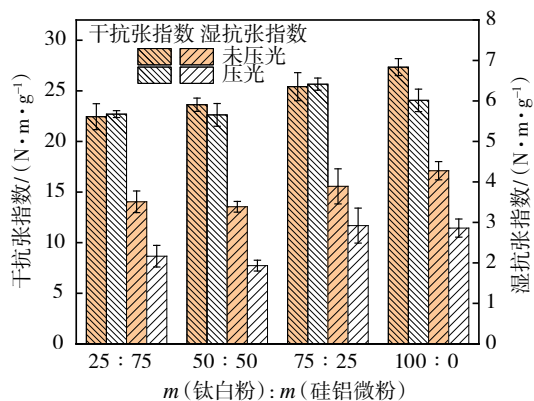


图5 钛白粉与硅铝微粉质量比及压光处理对纸样抗张指数的影响

弱——这一结论可通过FBRM测试验证,当钛白粉与硅铝微粉的质量比为25:75时,絮体尺寸较小, $D_{50}$ 仅为4.5 mm;随着钛白粉与硅铝微粉的质量比增加,游离钛白粉在APAM作用下均匀分散,既能有效填充纤维间隙,又凭借高比表面积增强纤维-APAM-钛白粉桥接结构(实验观察到纯钛白粉体系的絮体尺寸显著增大,FBRM测试显示 $D_{50}$ 达6.1 mm,直接佐证了桥接作用的充分发挥),从而强化纤维网络<sup>[16]</sup>。

经压光处理后,纸样的干、湿抗张指数均在钛白粉与硅铝微粉的质量比为75:25时达到峰值,分别为 $25.6 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ 与 $2.9 \text{ N}\cdot\text{m/g}$ 。该比例可视为填料级配的优化点。在此条件下,球磨形成的核壳结构复合颗粒兼具刚性骨架与表面弱负电特性,辅以适量游离钛白粉,可在压光中提供支撑、避免过度压缩,同时优化纤维间接触。该结构有效规避了纯钛白粉导致的过度架桥(形成大絮体)导致的纸张结构不均、压光后APAM桥联断裂,以及纯硅铝微粉引起的应力集中与PAE流失问题,从而更好地保护纤维间氢键与PAE交联网络。

总体上,压光处理降低了纸张抗张性能,且对湿抗张指数的影响更为显著:干抗张指数降幅为1%~16%,而湿抗张指数下降达24%~43%。值得注意的是,相较于纯钛白粉,复合填料加填纸样的干抗张指数变化较小。这主要源于干强度形成机制的差异及絮体结构的稳定性:干抗张指数依赖于纤维间氢键、PAE-纤维交联酯键和APAM桥接的共同作用<sup>[19]</sup>。复合填料中钛白粉包裹的硅铝微粉尺寸较大,能抵抗机械压力,避免过度压缩,使内部氢键得以保留;同时,钛白粉包覆层赋予其均匀的弱负电性,使APAM吸附更稳定,压光过程中桥接结构不易断裂(其结构在压光时更不易因团聚导致应力集中),从而补偿强度损失。相比之下,湿抗张指数唯一依赖于PAE交联网络<sup>[20]</sup>,其受压力导致的PAE-纤维结合位点机械损伤更为直接,因此对压光工艺极为敏感,表现出更剧烈的下降。

#### 2.5 钛白粉与硅铝微粉的质量比及压光处理对纸样平滑度与吸水高度的影响

图6展示了钛白粉与硅铝微粉的质量比及压光处理对纸样吸水高度与平滑度的影响规律。对于未压光纸样,其吸水高度随钛白粉与硅铝微粉的质量比增加而从28.5 mm/10 min显著降低至21.8 mm/

10 min,这主要源于钛白粉相较于硅铝微粉具有更小的粒径与更强的孔隙填充能力。比例提高后,更多纤维间的毛细管道被有效堵塞,增大了水分横向扩散的阻力。压光处理后,所有纸样的吸水高度均大幅下降且趋于一致(19.5~20.5 mm/10 min),对钛白粉比例的敏感性显著减弱。这是因为压光的机械压力效应占据了主导地位:它剧烈压缩了纸张的立体纤维结构,导致孔隙率发生质变性的下降。这种强烈的物理致密化作用,从根本上限制了液体的渗透路径,使得填料组分差异所带来的次级影响被大幅掩盖。

对于未压光纸样,其平滑度极低(1.4~1.5 s)且基本不受钛白粉与硅铝微粉的质量比影响,因表面形态由纤维网络宏观起伏主导,填料粒径与形貌的微调效应被掩盖。压光后平滑度显著提升(11.6~24.9 s),纤维经压溃、塑性变形后,网络被剧烈压缩,宏观凹凸大幅碾平。在此基础上,钛白粉凭借更小粒径与更高硬度,随比例增大更有效地填充纤维间微小空隙,提供均匀支撑,使平滑度呈线性上升。

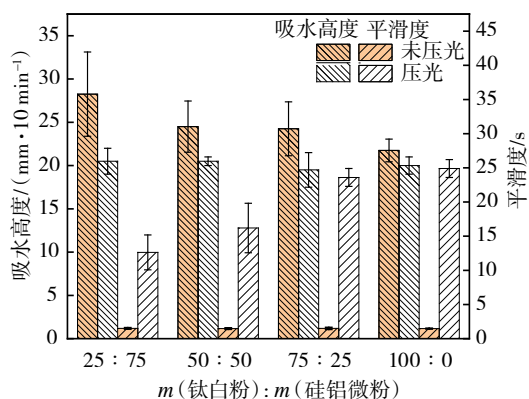


图6 钛白粉与硅铝微粉质量比及压光处理对纸样吸水高度与平滑度的影响

### 3 结论

本文以锂渣基硅铝微粉替代部分钛白粉,通过球磨法制备钛白粉/硅铝微粉复合填料,在30%加填量下抄造装饰原纸,系统探究了钛白粉与硅铝微粉的质量比及压光处理对纸张性能的影响,得到如下结论:(1)界面结构方面,球磨处理可使钛白粉有效包裹于硅铝微粉表面,二者界面形成Si—O—Ti共价键,实现了化学层面的稳定复合。(2)光学性能方面,随着复合填料中钛白粉与硅铝微粉的质量比增加,纸张白度显著提升,不透明度始终保持在96.5%

以上。当钛白粉替代量为25%(钛白粉与硅铝微粉的质量比为75:25)时,纸张白度已接近纯钛白粉加填水平。(3)压光处理效果方面,压光可显著提高纸张紧度,降低透气度,但对光学性能影响微弱,表明该工艺在改善纸张表面性能的同时,可有效保留填料的光学贡献。(4)力学性能方面,经压光处理后,钛白粉替代量为25%的纸样干、湿抗张强度均达到最大值,表明该比例下复合填料的刚性与其在纤维网络中的分散性达到了最佳平衡。

综上,采用硅铝微粉替代25%的钛白粉制备复合填料,可在保障装饰原纸核心性能的前提下,实现钛白粉减量降本与锂渣固废资源化利用,为造纸行业的绿色可持续发展提供了重要技术支撑。

### 参考文献:

- [1] 张建平,张川,张千.装饰原纸二氧化钛应用及发展趋势[J].造纸装备及材料,2018,47(3):17-21.
- [2] 李佳,张美云,李承刚,等.装饰原纸二氧化钛减量替代技术研究进展[J/OL].中国造纸,1-14[2026-03-17].<https://link.cnki.net/urlid/11.1967.TS.20260204.0908.002>.
- [3] 陈雪峰,许跃,刘文,等.复合钛白粉性能及在装饰原纸中应用的研究[J].中国造纸,2016,34(12):1-6.
- [4] 惠岚峰,衣然,刘忠,等.影响装饰原纸性能的因素及复合钛白粉应用研究[J].中华纸业,2019(8):6-13.
- [5] 薛斌,王磊,王金霞,等.干粉预混合对装饰原纸色相和遮盖性能的影响[J].中华纸业,2022,43(14):20-23.
- [6] 苏艳群,张瑞娟,刘金刚,等.煅烧土/纳米纤维素协同二氧化钛加填对装饰原纸性能的影响[J].中国造纸,2022,41(12):36-42.
- [7] 张妍,王慧乐,赵会芳,等.二氧化钛复合填料的制备及在装饰原纸中的应用研究[J].中国造纸,2022,41(12):43-50.
- [8] 张妍,王慧乐,吴海标,等.化学沉淀法制备二氧化钛复合填料及其在装饰原纸中应用[J].中国造纸,2023,42(12):38-45.
- [9] 张妍,乔文朴,黄靖钧,等.复合二氧化钛的制备及在装饰原纸中的应用[J].化工进展,2024,43(10):5642-5652.
- [10] 郑熠,邹伟民,李青竹,等.锂渣资源化利用现状与大规模消纳潜力分析[J].有色金属(冶炼部分),2025(4):18-29.
- [11] 王雪,王恒,王强.我国锂渣资源化利用研究进展[J].材料导报,2023,36(24):63-73.
- [12] 孟庆鹏,祝小靓,杨文,等.锂渣矿相组成对其活性及浆

- 体体积稳定性的影响[J]. 混凝土, 2025(12): 62-65.
- [13] 何卓凡, 宋顺喜, 杜盛静, 等. 锂渣作为造纸填料的可行性探讨[J]. 中国造纸, 2024, 43(2): 65-71.
- [14] 薛袭岳, 林碧莹, 殷志刚, 等. 基于硅铝微粉与改性聚磷酸铵复配填料体系的阻燃纸性能研究[J]. 造纸与纤维材料, 2025, 47(3): 35-41.
- [15] LIU Z, WANG J X, Li L, et al. Characteristics of alkali-activated lithium slag at early reaction age[J]. Journal of materials in civil engineering, 2019, 31(12): 04019312.
- [16] HUBBE M A, GILL R A. Fillers for papermaking: a review of their properties, usage practices, and their mechanistic role[J]. Bioresources, 2016, 11(1): 2886-2963.
- [17] PARK J, SHIN J H, PARK J-K. Experimental analysis of porosity and permeability in pressed paper[J]. Micromaterials, 2016, 7(3): 48.
- [18] FARNOOD R. Review: optical properties of paper: theory and practice[C]//I' ANSON S J. Transactions of the XIVth fundamental research symposium: advances in pulp and paper research. manchester: FRC, 2018: 273-352.
- [19] HUBBE M A. Bonding between cellulosic fibers in the absence and presence of dry-strength agents: a review[J]. Bioresources, 2006, 1(2): 281-318.
- [20] OBOKATA T, ISOGAI A. The mechanism of wet-strength development of cellulose sheets prepared with polyamid-amine-epichlorohydrin (PAE) resin[J]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2007, 302(1): 525-531.

(责任编辑:常涛)

