

废纸纤维气相防锈气凝胶的绿色制备及性能研究

黄新瑶, 李越, 张译文, 江帅, 肖丽贤, 史浩冉, 王海松, 吕艳娜*
(大连工业大学 轻工与化学工程学院, 辽宁 大连 116034)

摘要: **目的** 为了实现气相防锈包装材料基材的多样性, 以及废纸的高值化利用, 以废报纸为原料制备出一种具有防锈功能的气凝胶。**方法** 用 1-烯丙基-3-甲基咪唑氯盐 (AmimCl) 对脱墨后的废纸浆进行溶解再生, 冷冻干燥后制成气凝胶, 再通过化学浸渍法和气相沉积法分别对气凝胶进行疏水和防锈改性。**结果** 防锈气凝胶对 Q235 钢的缓蚀率为 81.93%, 水接触角为 104.78°, 压缩强度为 6.91 kPa, 密度为 0.22 g/cm³。**结论** 以废纸为原料制备的气凝胶, 经过疏水和防锈改性后, 具有优良的气相缓蚀性能, 可用于金属元器件的防锈缓蚀。

关键词: 废纸纤维; 气相防锈气凝胶; 疏水改性

中图分类号: TB485.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)23-0011-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.23.002

Green Preparation and Performance of Vapor Phase Antirust Aerogel from Waste Paper Fibre

HUANG Xin-yao, LI Yue, ZHANG Yi-wen, JIANG Shuai, XIAO Li-xian,
SHI Hao-ran, WANG Hai-song, LYU Yan-na*

(School of Light Industry and Chemical Engineering, Dalian Polytechnic University, Liaoning Dalian 116034, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare an aerogel with antirust function from waste newspaper, in order to achieve the diversity of substrates for vapor phase antirust packaging materials and the high-value utilization of waste paper. The waste paper pulp after deinking was dissolved and regenerated with 1-allyl-3-methylimidazole chloride salt (AmimCl), and the aerogel was made after freeze-drying, and then hydrophobic and antirust modifications were carried out on the aerogel by chemical impregnation and vapour phase deposition methods, respectively. The corrosion inhibition rate of the antirust aerogel on Q235 steel was 81.93%, the water contact angle was 104.78°, the compressive strength was 6.91 kPa, and the density was 0.22 g/cm³. The aerogel prepared from waste paper has excellent vapor phase corrosion inhibition performance after hydrophobic and antirust modification, and can be used for rust and corrosion inhibition of metal components.

KEY WORDS: waste paper fibre; vapor phase antirust aerogel; hydrophobic modification

世界防腐蚀联合会 WCO 于 2019 年发布的报告显示, 全球每年因金属腐蚀而造成的经济损失超过 2.2 万亿美元, 约占全球 GDP 的 3%。仅 2014 年, 我国金属锈蚀损失高达 20 多万亿元, 约占当年 GDP 的 3.3%^[1], 每年金属锈蚀造成的损失远远高于地震、洪

涝等自然灾害造成的损失之和^[2]。金属在石油化工、能源供应、基础设施建设、交通运输、制造业等领域应用广泛^[3], 一旦锈蚀, 不仅会产生经济损失, 对安全生产、海洋环境和人民群众的生命财产安全也产生重大威胁, 因此, 对金属锈蚀的防护研究刻不容缓。

收稿日期: 2023-10-14

基金项目: 广西清洁化制浆造纸与污染控制重点实验室开放基金资助 (2021KF21); 大连工业大学大学生创新创业训练计划 (X202310152353)

*通信作者

气相防锈法是利用气相缓蚀剂 (Vapor Phase Inhibitor, VPI) 具有比空气高的气化性压力的特点。在常温下可以缓慢持续地汽化得到缓蚀气体, 气体吸附在金属表面^[4-5], 使金属的表面、内腔和缝隙等部位均能受到有效保护, 且防锈期长、成本较低, 因此得到了广泛应用^[6]。

针对目前市场上气相防锈塑料材料难以完全降解, 且部分材料价格相对较高的情况, 开发对金属表面后续加工无影响, 使用安全, 低成本, 可完全降解的轻质生物质基气相防锈材料将成为防锈包装材料领域的重要方向。

气凝胶相比于普通的多孔材料具有纳米骨架结构, 以及密度小、比表面积大、孔隙率高等特点。气凝胶主要分为有机气凝胶、无机气凝胶和复合气凝胶, 纤维素基气凝胶是一种常见的有机气凝胶, 纤维素表面含有大量羟基, 可与多种物质相互作用, 易于改性, 可制成纤维素基气凝胶, 具有可降解性和可重复利用性, 在染料吸附、储能催化和保温建材等领域具有广阔的应用前景^[7]。

废纸中含有大量纤维素, 与木浆纤维素和棉短绒相比, 其成本较低, 如果对其加以利用, 制备纤维素基气凝胶, 这无疑开辟出一条废纸资源高值化利用的新途径。因此, 结合纤维素气凝胶和气相防锈材料的特点制备出纤维素基气相防锈气凝胶, 在此基础上, 通过赋予传统植物纤维防锈、防水和缓冲性能, 并将其应用于高端金属仪器和小型金属元器件的防护

包装上, 不仅符合国家绿色环保包装的政策, 而且为开发较低成本的通用型防锈缓冲包装材料提供了有益的借鉴, 为提升金属制品在国际市场的包装档次和水平提供了可行性方案。

本文以废报纸纤维为原料, 1-烯丙基-3-甲基咪唑氯盐为溶剂, 通过冷冻干燥法制备纤维素基气凝胶 (Cellulose-based Aerogel, CA)。通过沉积法对纤维素基气凝胶进行疏水改性, 得到疏水气凝胶 (Hydrophobic Aerogel, HA), 再通过浸渍处理将气相防锈油吸附在疏水气凝胶上, 制备防锈气凝胶 (Anti-rust Aerogel, AA), 并对其疏水、防锈和缓冲性能进行研究。

1 实验

1.1 原料

主要原料: 废报纸, 实验室自备; 硅酸钠、氢氧化钠、30%过氧化氢, 均购自天津大茂化学试剂有限公司; 十二烷基苯磺酸钠, 麦克林; 1-烯丙基-3-甲基咪唑氯盐 (AmimCl), 中科院兰州化物所; 无水乙醇, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 叔丁醇, 天津大茂化学试剂有限公司; 3-巯丙基三甲氧基硅烷 (MPTMS), 麦克林; 金属试片 (Q235 钢), 购于大

连红胜五金建材装饰; 气相防锈油 (DR-101 挥发性防锈油), 由东莞市科泽润滑油有限公司提供。

实验中所用试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

主要仪器与设备: CV-2 水力碎浆机, 陕西科技大学机械厂; IMT-TM02 浮选脱墨机, 英特耐森精密仪器有限公司; SCIENTZ-12ND 冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; RGI-5 电子万能试验机, 深圳市瑞格尔仪器有限公司; Sprctrum 10 傅里叶红外光谱仪, 铂金埃尔默仪器有限公司; 岛津 7000SX 射线衍射仪, 日本岛津公司; JSM-7800F 扫描电子显微镜, 日本电子公司; SL200K 接触角仪, 美国科诺工业有限公司; 热重分析仪, 美国 TA 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 脱墨

将 215 g 绝干废报纸撕成 20 mm×20 mm 的碎片放于塑料桶中, 称取 0.25 g 硅酸钠、2.15 g 氢氧化钠、0.65 mL 30%过氧化氢和 2.15 g 十二烷基苯磺酸钠, 溶于 1 929.73 g 水中, 将溶解后的药品倒入盛有废纸的桶中, 搅拌润湿后熟化 5 min, 再全部转移至碎浆机。碎浆后进行浮选, 并不断搅拌, 浮选 20 min 后将纸浆进行干燥, 测定其水分含量。

1.3.2 纤维素基气凝胶的制备

称取一定量干燥后的脱墨纸浆和 AmimCl 于烧杯中, 使纸浆纤维质量分数达到 2%、4%、6%、8%, 加热至 80 °C, 并磁力搅拌 30 min, 然后冷却至室温, 得到凝胶; 加入去离子水浸泡, 再分别用无水乙醇和叔丁醇浸泡, 得到醇凝胶, 将其进行冷冻干燥, 制得纤维素基气凝胶 (CA)。再将脱墨纸浆溶于 AmimCl, 当纸浆纤维质量分数为 4% 时, 分别加热至 70、80、90 °C, 按照上述流程制得纤维素基气凝胶 (CA)。

1.3.3 疏水气凝胶的制备

将在 80 °C 加热、纸浆纤维质量分数为 4% 条件下制得的 CA 放置在扁形称量瓶中, 参照 Boden 等^[8]的方法, 将疏水试剂 MPTMS 倒入烧杯, 将扁形称量瓶放在烧杯中; 将烧杯用保鲜膜密封, 并放入 105 °C 烘箱 24 h, 通过气相沉积得到疏水气凝胶 (HA)。

1.3.4 防锈气凝胶的制备

HA 冷却至室温后, 用气相防锈油浸渍, 将其在温度为 23 °C、相对湿度为 50% 的恒温恒湿箱中放置 24 h, 得到防锈气凝胶 (AA), 制备过程如图 1 所示。

1.3.5 防锈气凝胶的静态防锈甄别实验

实验采用湿热法, 通过失重分析防锈气凝胶在高温高湿环境的缓蚀效果^[9-10]。

将金属试片进行预处理, 打磨光滑后, 将 2 个金

属试片用无水乙醇和丙酮清洗并烘干, 分别称重。向 2 个广口瓶内注入 60 mL 质量分数为 5% 的 NaCl 溶液, 用铁丝穿过 2 个预处理好的金属试片, 分别吊挂在 2 个广口瓶内。将用铁丝穿过的气相防锈气凝胶悬挂在实验组金属试片的周围, 用橡胶塞将广口瓶密封后, 将密封好的 2 个广口瓶放入 $(50 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的恒温水浴箱中, 加热 12 h, 室温冷却 12 h。以 24 h 为 1 个周期, 实验持续 3 个周期, 每日记录试片的锈蚀情况。实验结束后, 先用酸洗液除去锈迹, 再用去离子水冲洗并烘干后, 计算金属试片的腐蚀速度和缓蚀率^[11]。

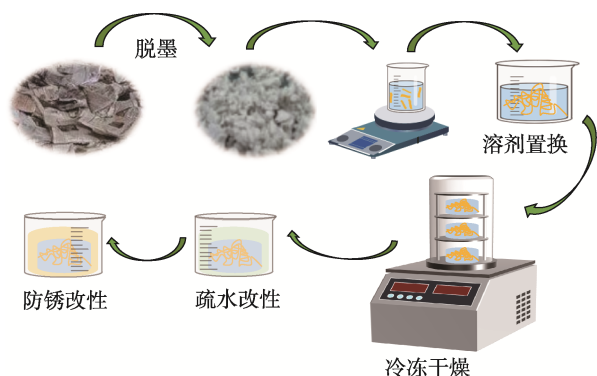


图 1 AA 制备工艺流程

Fig.1 Preparation process flow diagram of AA

1.4 表征

1.4.1 表观密度

密度 ρ 是通过样品的质量与其体积比值计算得到的。每种样品取 3 个进行测试, 最后得到其平均密度。

1.4.2 孔隙率

孔隙率 P 的计算见式 (1)。

$$P = \frac{V_0 - V}{V_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_0 为材料自然状态下的体积, cm^3 ; V 为材料的绝对密实体积, cm^3 ; ρ_0 为材料密度, g/cm^3 ; ρ 为材料密度, g/cm^3 。

1.4.3 压缩强度

根据 GB/T 8168—2008, 采用 RGI-5 型电子万能试验机测定气凝胶的压缩强度 3 次, 取平均值, 测试速度为 2 mm/min。

1.4.4 傅里叶变换红外光谱 (FT-IR)

采用 Spectrum 10 傅里叶变换红外光谱仪测定气凝胶的红外吸收光谱图, 扫描范围为 $4\,000 \sim 650 \text{ cm}^{-1}$ 。

1.4.5 X-射线衍射 (XRD)

测试前将样品均匀地平铺在样品台上, 采用反射模式测试角度 (2θ) 范围在 $5^\circ \sim 40^\circ$ 。

1.4.6 扫描电镜 (SEM)

将干燥的气凝胶用导电胶固定在样品台上, 喷金

1 min, 采用扫描电子显微镜观察气凝胶断面的微观形貌。

1.4.7 水接触角

采用 SL200KS 接触角/界面张力仪对气凝胶的水接触角进行测定, 评估气凝胶的疏水性。将 $10 \mu\text{L}$ 的水滴注入气凝胶表面, 捕获水滴的图像, 测试 3 次, 用椭圆拟合方法来计算接触角。

1.4.8 热重 (TG)

采用 Q50 型热重分析仪对气凝胶的热稳定性进行测定。在流速为 $40 \text{ mL}/\text{min}$ 的 N_2 保护下以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速度将约 7 mg 气凝胶样品从室温加热到 700°C , 常压下对样品进行热解。

1.4.9 金属试片锈蚀效果测试

腐蚀速率 v 计算见式 (2)。

$$v = \frac{8.76 \times 10^7 \times (m_0 - m_1)}{S \rho t} \quad (2)$$

式中: m_0 为实验前金属试片的质量, g; m_1 为实验后去除锈迹后金属试片的质量, g; S 为面积, cm^2 ; t 为试验时间, h; ρ 为 Q235 钢的密度, g/cm^3 。

缓蚀率 η 计算见式 (3)。

$$\eta = \frac{v_0 - v}{v_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中: v_0 为未经处理的金属试片的腐蚀速率; v 为经防锈处理的金属试片的腐蚀速率。

2 结果与讨论

2.1 纤维素气凝胶最佳制备工艺

2.1.1 纤维含量对气凝胶性能的影响

由图 2a、b 可知, 随着纤维含量的增大, 所制备的气凝胶密度逐渐增大, 孔隙率逐渐减小, 抗压强度也随之增加。从图 2a 可以看出, 纤维质量分数为 2% 的气凝胶的抗压强度最小, 气凝胶容易被压溃, 难以循环利用; 纤维质量分数为 6% 和 8% 的气凝胶的抗压强度较大, 但纸浆纤维中含有较多未溶解的纸浆颗粒; 纤维质量分数为 4% 的气凝胶抗压强度较大, 提高了气凝胶的抗破坏性, 且具有较高的孔隙率, 缓冲性能良好^[12], 可以为吸附 MPTMS 提供充足的存储面积, 因此, 选择纤维质量分数为 4% 的纸浆纤维制备气凝胶。

2.1.2 反应温度对气凝胶性能的影响

由图 3a、b 分析可知, 随着温度升高, 气凝胶的密度逐渐增大, 孔隙率逐渐减小, 抗压强度随之增加, 这是由于在离子液体中纤维的溶解度随着温度升高而增加^[13]。反应温度为 70°C 的气凝胶的抗压强度较低; 而反应温度为 90°C 时, 气凝胶可能由于温度过高破坏了纤维素分子间氢键的连接^[14], 导致压缩强度降低。因此, 本实验的最佳反应温度确定为 80°C 。

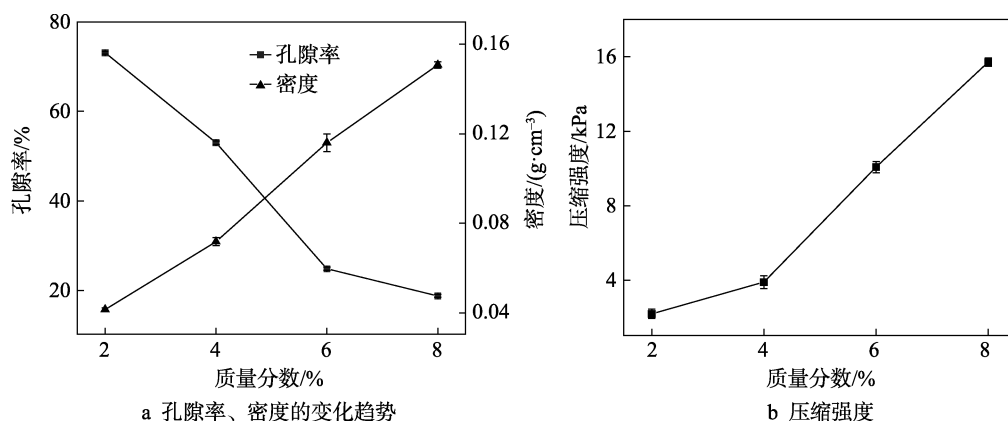


图2 纤维含量对纤维素基气凝胶物理和机械性能的影响
Fig.2 Effects of fibre content on the physical and mechanical properties of CA

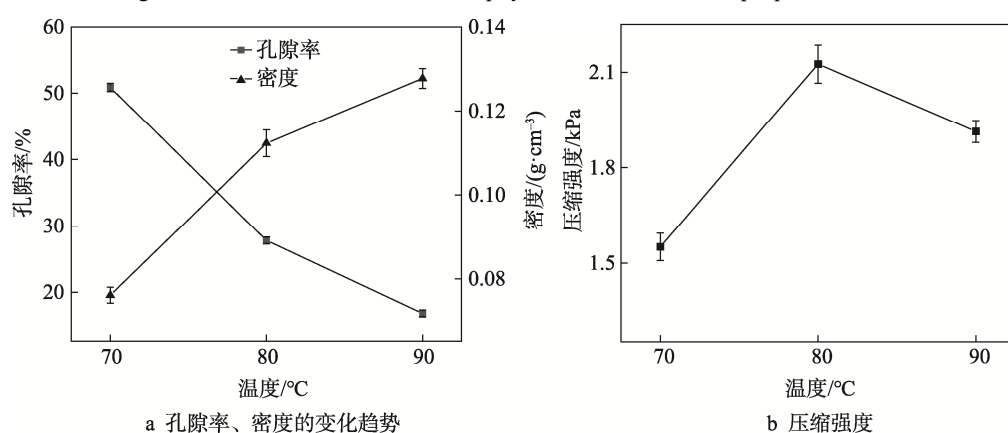
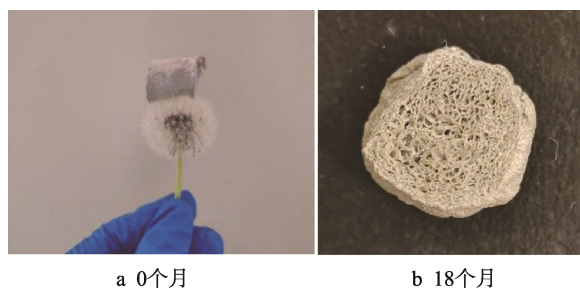


图3 温度对纤维素基气凝胶物理和机械性能的影响
Fig.3 Effects of temperature on the physical and mechanical properties of CA

2.1.3 废纸纤维气凝胶的形态

以纸浆质量分数为4%、温度为80℃作为最佳工艺条件，制得的气凝胶如图4a所示，放置18个月后的气凝胶如图4b所示。气凝胶的平均密度为0.0925 g/cm³，平均孔隙率为70.81%。



a 0个月 b 18个月
图4 纤维素基气凝胶的外观形态
Fig.4 Appearance of CA

2.2 改性气凝胶的性能

2.2.1 FT-IR 分析

图5中，CA在1600~1000 cm⁻¹为木质素的特征峰^[15]，3400 cm⁻¹处为O—H的伸缩振动峰。在疏水改性后，HA的Si—O—Si的伸缩振动吸收峰与C—O的特征峰在1000~1130 cm⁻¹处重叠，3151 cm⁻¹处为咪唑的C—H伸缩振动峰^[16]，HA在3340 cm⁻¹处O—H的伸缩振动峰

弱于CA在3400 cm⁻¹处O—H的伸缩振动峰，HA在2486 cm⁻¹处的弱峰是—SH的伸缩振动峰，证明(3-巯基丙基)三甲氧基硅烷接枝成功。对于AA，1254 cm⁻¹处是Si—O的伸缩振动峰，3427 cm⁻¹处为O—H的伸缩振动峰，比HA在3340 cm⁻¹处O—H的伸缩振动峰强，证明AA表面羟基含量比HA多。AA与CA、HA相比，在1571 cm⁻¹和995 cm⁻¹处的C=C和C—N伸缩振动峰增强，表明气相防锈油沉积在气凝胶表面。

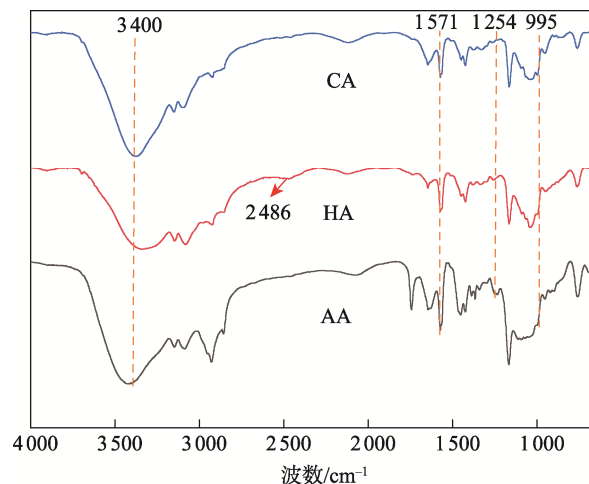


图5 CA、HA和AA的红外光谱图
Fig.5 Infrared spectra of CA, HA and AA

2.2.2 XRD 分析

由图 6 可知, CA 在 $2\theta=29.48^\circ$ 对应来自于废纸纤维中的方解石 (CaCO_3) 的 (1, 0, 4) 晶面^[17], $2\theta=23.2^\circ$ 处的 (0, 0, 2) 晶面对应的是纤维素 II 型的特征峰, 而 HA 在 $2\theta=22.26^\circ$ ((0, 0, 2) 晶面) 处仍为纤维素 II 型的特征峰^[18], 表明疏水改性对气凝胶晶型没有影响。与 CA 相比, AA 几乎没有结晶度, 表明在改性过程中气相防锈油会破坏氢键网络结构, 部分结晶区转化为无定形区, 表明气相防锈油附着在样品表面, 具有防锈疏水功能。

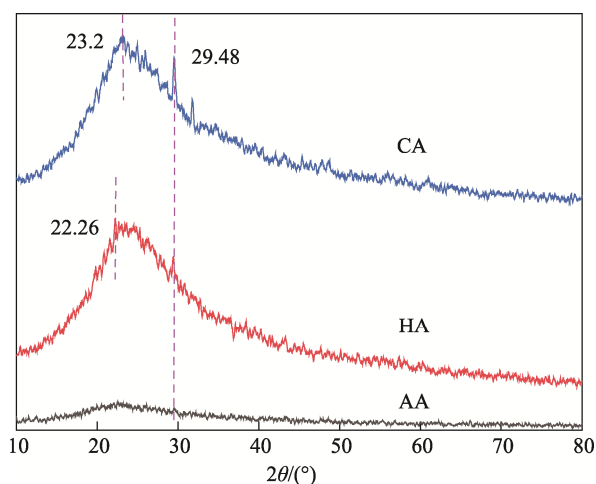


图 6 CA、HA 和 AA 的 X 射线衍射图
Fig.6 XRD curves of CA, HA and AA

2.2.3 SEM 分析

气凝胶微观结构如图 7 所示。图 7a 中纤维互相连接, 构成三维网状多孔结构, 孔隙较多, 为气相防锈油的沉积提供足够的吸附位点。图 7b 仍为三维网状多孔结构, 纤维表面光滑, 证明 3-巯丙基三甲氧基硅烷沉积在气凝胶表面。图 7c 纤维表面光滑, 孔隙变小, 结构致密化, 证明大量气相防锈油沉积在气凝胶表面^[19]。

2.2.4 能谱分析

图 8a 为 CA 气凝胶能谱 (EDS) 图, 可以观察到图内只有 C、N、O 3 种元素。图 8b 可见有大量的 S、Si 沉积分布于 HA 表面, 证明 MPTMS 成功沉积在气凝胶表面。图 8c 为 AA 能谱图, 可见新增大量 C、Cl 元素, 证明防锈试剂成功沉积在气凝胶表面。

2.2.5 气凝胶的疏水性能分析

通过静态水接触角来评价废纸纤维气凝胶以及改性后气凝胶的表面疏水性能。由图 9 可见, CA 组平均水接触角为 30.63° , 这是由于 CA 表面含有大量羟基, 具有良好的亲水性; HA 组平均水接触角为 122.61° , 这是因为在气凝胶表面沉积了大量的疏水试剂 (MPTMS), 含有 Si—O, 有明显的疏水性; AA 组平均水接触角为 104.78° , 这是因为 AA 中含有气相防锈油, 含有大量 C=C, 有一定的疏水效果, 与

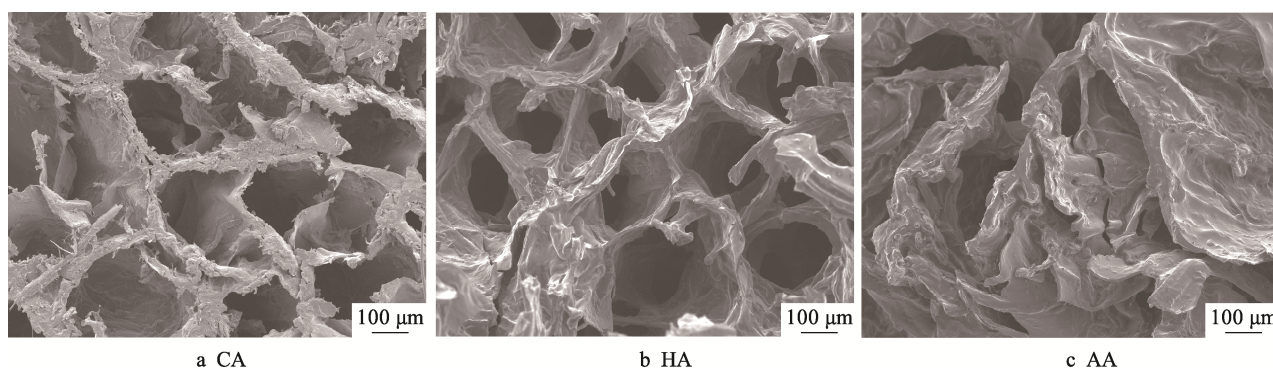


图 7 CA、HA 和 AA 的扫描电子显微镜图
Fig.7 SEM of CA, HA, and AA

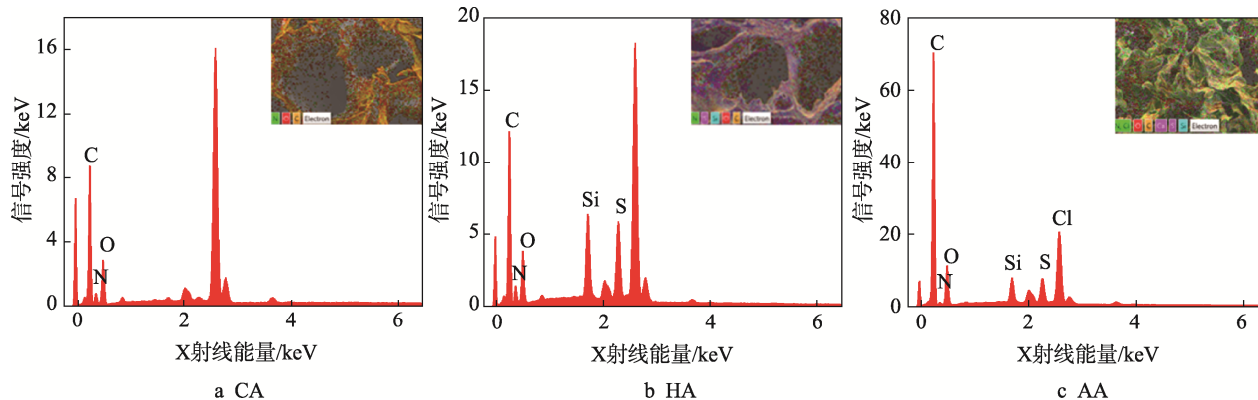


图 8 CA、HA 和 AA 的能谱图
Fig.8 EDS curves of the CA, HA and AA

HA 相比疏水性能有所下降。从 FTIR 图中可知,这是由于 AA 比 HA 的羟基含量增加^[20],但经过防锈改性后气凝胶仍具有较好的疏水性能。

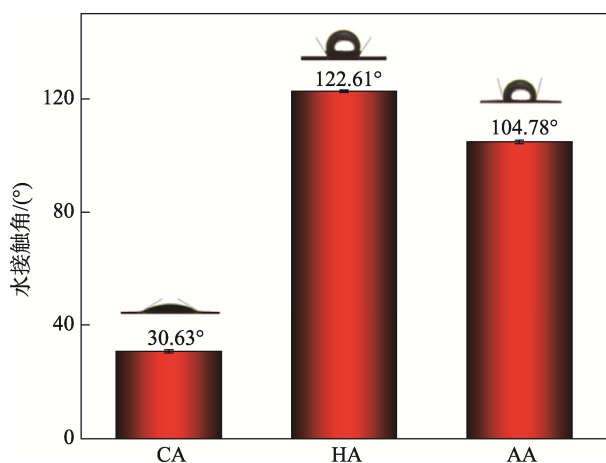


图 9 CA、HA 和 AA 的水接触角
Fig.9 Contact angle of CA, HA and AA

2.2.6 力学性能

气凝胶的压缩应力-应变曲线如图 10 所示, CA 气凝胶的抗压强度为 2.46 kPa, 经过疏水改性后得到的 HA 气凝胶的抗压强度为 6.30 kPa, 抗压强度增大了 1.56 倍, 可能归因于 MPTMS 与气凝胶形成的氢键。进一步防锈改性后, AA 气凝胶的抗压强度增大至 6.91 kPa, 这一结果主要归因于大量的气相防锈油附着后, 由图 7 可知, 气凝胶空隙变小, 结构更加致密, 且防锈改性后, 由图 5 可知, AA 含有大量羟基, 导致 AA 的氢键含量增加, 力学强度有所提高。

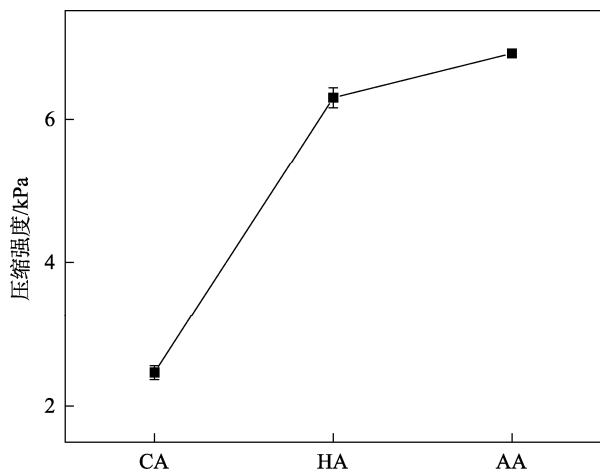
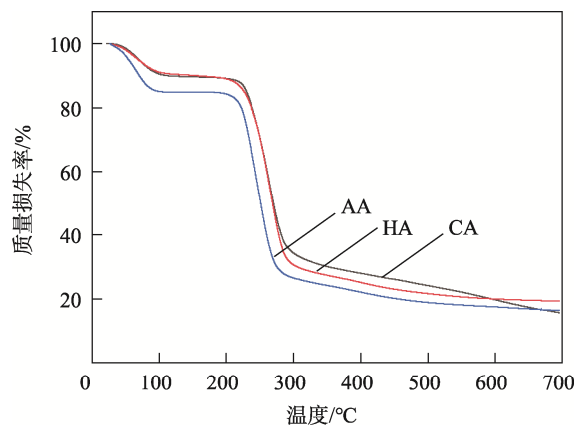


图 10 CA、HA 和 AA 的应力-应变
Fig.10 Stress-strain curves of CA, HA and AA

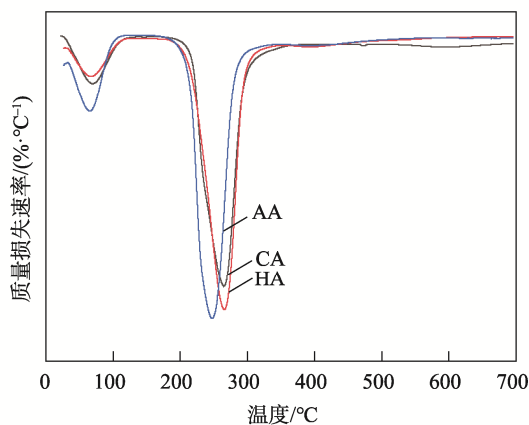
2.2.7 热稳定性分析

通过 TG 和 DTG 曲线反应 3 种气凝胶的热稳定性, 如图 11 所示, 3 种气凝胶的热分解分为 3 个阶段。第 1 阶段: 室温 ~ 100 °C 时, 主要是样品中水分

的蒸发。第 2 阶段: 200 ~ 300 °C 时, 这一阶段失重最多, 主要发生了纤维素和半纤维素的热分解^[21], CA、HA 和 AA 的最大分解速率对应的温度分别为 265.56、266.57 和 248.02 °C。第 3 阶段: 300 ~ 700 °C 时, 主要是木质素的热分解。



a TG 曲线



b DTG 曲线

图 11 CA、HA 和 AA 的热稳定性
Fig.11 Thermal stability of CA, HA and AA

2.3 气相防锈缓蚀性能分析

2.3.1 气相防锈效果

图 12 为气相防锈保护与未保护的金属试片的防锈甄别实验效果图, 涂覆气相防锈油的钢片没有明显锈蚀痕迹, 而对照组的锈蚀较为严重, 形成强烈对比。经计算, 防锈油的缓蚀率为 30.84%, 气相防锈气凝胶对金属的缓蚀率为 81.93%。

2.3.2 水接触角测试

水接触角测试通过对防锈气凝胶中的气相缓蚀剂在金属表面形成的保护层的疏水性能的测量, 以评定防锈气凝胶的缓蚀效果。如图 13 所示, 本次实验金属试样 Q235 钢在加速腐蚀模拟场中暴露, 表面接触角很小, 仅为 33.34°, 呈现亲水性; 在气相防锈气凝胶的保护下的表面接触角为 73.98°, 具有较为明显的疏水性, 说明金属表面形成了一层保护膜, 不具备

发生电化学反应的条件^[22], 难以发生金属腐蚀, 说明此气相防锈气凝胶具备良好的缓蚀性能。



a 有气相防锈气凝胶保护

b 没有保护

图 12 防锈甄别实验照片
Fig.12 Picture of antirust screening experiment

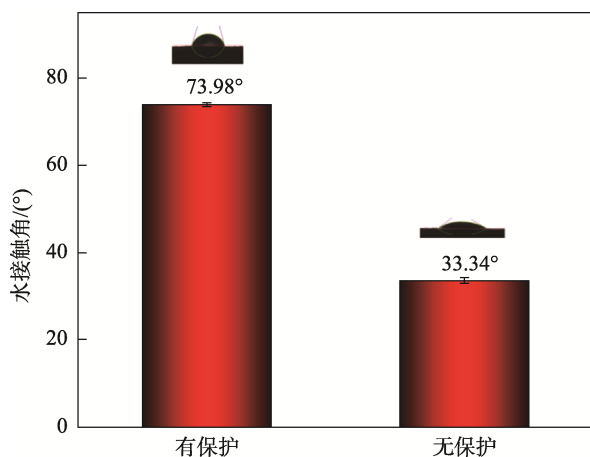


图 13 有、无保护的 Q235 钢表面接触角
Fig.13 Contact angle of Q235 steel surface with or without protection

3 结语

以废纸纤维为原料, 离子液体为溶剂, 通过溶解、置换、冷冻干燥制得 CA、HA 和 AA, 气凝胶具有三维网络多孔结构, 表明该材料具有良好的缓冲性能和吸附能力。纤维质量分数为 4% 时, 在 80 °C 下加热搅拌, 制备的 CA 性能最佳。疏水改性后, HA 的水接触角为 122.61°。再经防锈改性后, AA 的抗压强度为 6.86 kPa, 缓蚀率为 81.93%, 水接触角为 104.78°。本实验制备的防锈气凝胶具有良好的缓蚀性能, 实现了纸浆纤维的无污染缓冲防锈。

参考文献:

[1] 侯保荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京: 科学出版社, 2017:

1-10.

HOU Bao-rong. The Cost of Corrosion in China[M]. Beijing: Science Press, 2017: 1-10.

[2] 罗大明, 牛荻涛. 基于钢筋锈蚀的混凝土结构耐久性评定[J]. 工业建筑, 2022, 52(10): 1-8.

LUO Da-ming, NIU Di-tao. Durability Evaluation of Concrete Structure Based on Steel Bar Corrosion[J]. Industrial Construction, 2022, 52(10): 1-8.

[3] FURLAN P Y, JARAVATA E J, FURLAN A Y, et al. Will it rust? A Set of Simple Demonstrations Illustrating Iron Corrosion Prevention Strategies at Sea[J]. Journal of Chemical Education, 2023, 100(2): 1081-1088.

[4] VERMA C, EBENSO E E, QURAISHI M A, et al. Recent Developments in Sustainable Corrosion Inhibitors: Design, Performance and Industrial Scale Applications[J]. Materials Advances, 2021, 2(12): 3806-3850.

[5] 张天, 杨鸿燕, 鲁俊良, 等. 基于植酸的多组分协同增效型长效气相防锈纸的制备[J]. 造纸科学与技术, 2019, 38(4): 9-15.

ZHANG Tian, YANG Hong-yan, LU Jun-liang, et al. Preparation of Multi-Component Synergistic Long-Acting Gas-Phase Antirust Paper Based on Phytic Acid[J]. Paper Science & Technology, 2019, 38(4): 9-15.

[6] 翟俊俊, 赵思, 肖秦箭, 等. 生物质气凝胶的疏水改性及应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(23): 170-184.

ZHAI Jun-jun, ZHAO Si, XIAO Qin-jian, et al. Research Progress on Hydrophobic Modification and Application of Biomass Aerogels[J]. Materials Reports, 2022, 36(23): 170-184.

[7] KATAKI R, KATAKI M D. Weeds as a Renewable Bioresource: Prospects for Bioconversion to Biofuels and Biomaterials Through a Cascade of Approaches[M]. Elsevier: Biofuels and Bioenergy, 2022: 437-461.

[8] BODEN A C, BHAVE M, CIPOLLA L, et al. Solution Deposition Conditions Influence the Surface Properties of 3-Mercaptopropyl (Trimethoxysilane)(MPTS) Films[J]. Applied Surface Science, 2022, 602: 154282.

[9] WANG Xin-wei, REN Jie, LI Zheng-lin, et al. Research Progress of Vapor Phase Corrosion Inhibitors in Marine Environment[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(59): 88432-88439.

[10] PANCHAL J, SHAH D, PATEL R, et al. Comprehensive Review and Critical Data Analysis on Corrosion and Emphasizing on Green Eco-Friendly Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Industries[J]. Journal of Bio-and Tribo-Corrosion, 2021, 7(3): 107.

[11] 赵艳东, 郝晓秀, 邢紫玉. 金属包装用气相防锈纸缓蚀性能研究[J]. 包装工程, 2019, 40(1): 128-132.

ZHAO Yan-dong, HAO Xiao-xiu, XING Zi-yu. Study

- on Corrosion Inhibition Performance of Vapor-Phase Antirust Paper for Metal Packaging[J]. *Packaging Engineering*, 2019, 40(1): 128-132.
- [12] 罗瑜莹, 肖生苓, 李琛, 等. 纤维多孔缓冲包装材料泡孔参数与其力学性能的关系[J]. *林业科学*, 2017, 53(5): 116-124.
- LUO Yu-ying, XIAO Sheng-ling, LI Chen, et al. Relationships between Bubble Parameters and Mechanical Properties of Fiber Porous Cushioning Packaging Material[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2017, 53(5): 116-124.
- [13] ISHIDA T. Theoretical Investigation of Dissolution and Decomposition Mechanisms of a Cellulose Fiber in Ionic Liquids[J]. *The Journal of Physical Chemistry B*, 2020, 124(15): 3090-3102.
- [14] SWATLOSKI R P, SPEAR S K, HOLBREY J D, et al. Dissolution of Cellulose with Ionic Liquids[J]. *Macromolecules*, 1998, 31(31): 7776-7783.
- [15] RAMFUL R, SUNTHART P M, MARIN E, et al. Investigating the Effect of Smoke Treatment on Hygroscopic Characteristics of Bamboo by FTIR and Raman Spectroscopy[J]. *Materials*, 2022, 15(4): 1544.
- [16] 付飞飞, 邓宇. 废纸在离子液体[Emim]Br中的溶解特性[J]. *纸和造纸*, 2010, 29(10): 30-32.
- FU Fei-fei, DENG Yu. Dissolution Characteristics of Waste Paper in Ionic Liquids[J]. *Paper and Paper Making*, 2010, 29(10): 30-32.
- [17] 陈琪, 杨浩, 马新华, 等. 废纸浆气凝胶的制备及性能研究[J]. *化工新型材料*, 2020, 48(6): 261-265.
- CHEN Qi, YANG Hao, MA Xin-hua, et al. Preparation and Properties of Waste Paper Pulp Aerogels[J]. *New Chemical Materials*, 2020, 48(6): 261-265.
- [18] HAN W, GENG Y. Optimization and Characterization of Cellulose Extraction from Olive Pomace[J]. *Cellulose*, 2023, 4: 1-15.
- [19] 李贞. 废报纸基纤维素复合气凝胶的制备及吸附性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019: 25.
- LI Zhen. Preparation and Adsorption Properties of Waste Newspaper-Based Cellulose Composite Aerogels[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019: 25.
- [20] 任龙芳, 林聪聪, 郭悦, 等. 多羟基植酸衍生物交联改性水性聚氨酯胶黏剂的制备及其性能研究[J]. *陕西科技大学学报*, 2022, 40(4): 87-93.
- REN Long-fang, LIN Cong-cong, GUO Yue, et al. Study on Preparation and Properties of Crosslinking Modification of Waterborne Polyurethane Adhesive with Polyhydroxyphytic Acid Derivatives[J]. *Journal of Shaanxi University of Science & Technology*, 2022, 40(4): 87-93.
- [21] 郝丞艺, 张凯强, 宋伟, 等. 木聚糖酶改性对竹粉/聚乳酸复合材料性能的影响[J]. *林业工程学报*, 2020, 5(3): 36-40.
- HAO Cheng-yi, ZHANG Kai-qiang, SONG Wei, et al. Influence of Xylanase Treatment on Properties of Bamboo Powder/Polylactic Acid Composites[J]. *China Forestry Science and Technology*, 2020, 5(3): 36-40.
- [22] SUN Bing-yang, YAN Lu-chun, GAO Ke-wei. Hydrophobicity and Improved Corrosion Resistance of Weathering Steel via a Facile Sol-Gel Process with a Natural Rust Film[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, 15(39): 46400-46407.

责任编辑: 曾钰婵