

基于磁控溅射-氟化改性的新型 ZnO/SiO₂ 复合超疏水涂层防冰性能研究

舒忠虎¹, 鲍江涌², 陈标¹, 何建军², 揭军¹, 蒲珉²

(1. 国家能源集团龙源江永风力发电有限公司, 长沙 410000;

2. 长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410114)

摘要: **目的** 通过磁控溅射及表面氟化修饰不同纳米尺度的氧化锌 (ZnO) 和二氧化硅 (SiO₂) 粒子, 获得一种新型的 ZnO/SiO₂ 复合超疏水涂层。**方法** 研究不同氟化修饰剂对新型 ZnO/SiO₂ 复合超疏水涂层防冰性能的影响。采用光学接触角测量仪、扫描电子显微镜 (SEM)、傅里叶红外光谱仪 (FTIR) 对涂层的水接触角 (CA)、滚动角 (SA)、微观膜层形貌以及氟化前后化学键的改变进行分析。采用自制结冰装置及数显拉力计对涂层在高温低温环境中的结冰时间和冰层在涂层表面的黏附强度进行测试。**结果** 磁控溅射 ZnO 和 SiO₂ 纳米粒子复合制膜得到的粒子排列状态规则, 并且两种不同尺寸粒子的掺混使得涂层表面呈多簇状微纳米二级结构, 能够很好地降低液滴与表面的附着力; 分别选用十七氟癸基三乙氧基硅烷 (FAS-17)、聚二甲基硅氧烷 (PDMS)、十二氟庚基丙基三甲氧基硅烷 (G502)、十六烷基三甲氧基硅烷 (HDTMS) 4 种氟化修饰剂对涂层表面进行整体修饰, 其中, FAS-17 修饰后的涂层表面防冰效果最好, 其液-气复合接触面积比例达到了 94.38%, 接触角和滚动角达到最佳, 分别为 164.7° 和 3°, 且冰在表面的黏附强度降低至 3.8 kPa; 在湿度为 60%, 温度分别为 -2、-10 及 -20 °C 的条件下, 涂层延缓结冰时间分别为 244 s、160 s、137 s。**结论** 采用不同纳米尺度的 ZnO 和 SiO₂ 纳米粒子, 经过磁控溅射和整体表面改性可以得到簇状结构的新型复合超疏水涂层。通过 FAS-17 乙醇溶液进行表面氟化修饰, 更加显著地提高了涂层的超疏水性能。

关键词: 风力机叶片; 超疏水涂层; 防覆冰; 磁控溅射; ZnO/SiO₂

中图分类号: TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)08-0452-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.08.042

Research on Anti-ice Performance of a Novel ZnO/SiO₂ Composite Superhydrophobic Coating Modified by Magnetron Sputtering and Fluoridation

SHU Zhong-hu¹, BAO Jiang-yong², CHEN Biao¹, HE Jian-jun², JIE Jun¹, PU Min¹

收稿日期: 2021-08-11; 修订日期: 2021-11-29

Received: 2021-08-11; Revised: 2021-11-29

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2019JJ40304); 国家能源集团龙源江永风力发电有限公司科技项目 (HJLFD)

Fund: S Hunan Natural Science Foundation of China (2019JJ40304); Science and Technology Project of National Energy Group Longyuan Jiangyong Wind Power Co., LTD. (HJLFD)

作者简介: 舒忠虎 (1972—), 男, 工程师, 主要研究方向为能源动力工程及新能源技术。

Biography: SHU Zhong-hu (1972-), Male, Engineer, Research focus: energy power engineering and new energy technology.

通讯作者: 鲍江涌 (1994—), 男, 硕士, 主要研究方向为动力工程及新能源材料。

Corresponding author: BAO Jiang-yong (1994-), Male, Master, Research focus: power engineering and new energy materials.

引文格式: 舒忠虎, 鲍江涌, 陈标, 等. 基于磁控溅射-氟化改性的新型 ZnO/SiO₂ 复合超疏水涂层防冰性能研究[J]. 表面技术, 2022, 51(8): 452-459.

SHU Zhong-hu, BAO Jiang-yong, CHEN Biao, et al. Research on Anti-ice Performance of a Novel ZnO/SiO₂ Composite Superhydrophobic Coating Modified by Magnetron Sputtering and Fluoridation[J]. Surface Technology, 2022, 51(8): 452-459.

- (1. Longyuan Jiangyong Wind Power Generation Co., Ltd. of CHN Energy Group, Changsha 410000, China;
2. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

ABSTRACT: In this paper, A novel ZnO/SiO₂ composite superhydrophobic coating was obtained by magnetron sputtering and surface fluoridation of zinc oxide (ZnO) and silicon dioxide (SiO₂) particles at different nanoscales. And the effect of different fluoride modifiers on the anti-icing performance of the novel ZnO/SiO₂ composite superhydrophobic coating was studied. Water contact Angle (CA), rolling Angle (SA), microstructure of the coating and the change of chemical bond before and after fluorination were analyzed by optical contact angle measuring instrument, scanning electron microscope (SEM) and Fourier transform infrared spectrometer (FTIR). Icing time of the coating and the adhesion strength of the ice on the coating surface in high humidity and low temperature were tested by self-made icing device and digital display tension meter. The results show that the particle arrangement of composite ZnO and SiO₂ nanoparticles prepared by magnetron sputtering is regular, and the mixing of the two different size particles makes the coating surface show multi-cluster micro/nano secondary structure, which can reduce the adhesion of the droplets to the surface. Heptafluorodecyl triethoxysilane (FAS-17), polydimethylsiloxane (PDMS), dodecylheptyl propyl trimethoxysilane (G502) and hexyl trimethoxysilane (HDTMS) were selected to modify the coating surface as a whole respectively. Among them, FAS-17 modified coating surface had the best anti-icing effect, the liquid-gas composite contact area ratio reached 94.38%, the contact angle and rolling angle reached the best, was 164° and 3°, respectively, and the surface ice adhesion strength decreased to 3.8 kPa. Under the conditions of 60% humidity, -2 -10 and -20 °C, respectively, the delaying freezing time of the coating was 2 446, 1 604 and 137 s. It is concluded that a new type of composite superhydrophobic coating with cluster structure can be obtained by magnetron sputtering and whole surface modification of ZnO and SiO₂ nanoparticles with different nanoscale. The surface fluoridation of FAS-17 ethanol solution can significantly improve the superhydrophobic properties of the coating.

KEY WORDS: wind turbine blade; superhydrophobic coating; anti-ice; magnetron sputtering; ZnO/SiO₂

我国南方高海拔山区冬季低温高湿, 风力机叶片容易覆冰而停机。风机叶片作为风力发电机的重要组成部分之一, 冰在风机叶片上的黏附和过度积聚会导致风机的发电效率急剧下降, 造成重大的经济损失和安全隐患, 风力机叶片覆冰问题已经成为风电行业研究的焦点之一^[1-2]。目前, 风机叶片防冰除冰的常用方法有化学试剂除冰和机械除冰^[3-4]。然而, 这些方法都存在耗时、除冰效率低和制动系统可能出现故障等技术缺陷, 因此, 开发一种高效、经济、对环境友好的防覆冰方法十分关键。

近年来, 随着超疏水技术应用的发展, 研究具有超疏水效应的防冰涂层被认为是实现风机叶片防冰除冰的一个重要方向^[5-7]。涂层的超疏水效应主要取决于构建表面粗糙的微结构以及低表面能材料改性两个方面^[8-10]。基于这一原理, 学者们提出了多种方法来制备超疏水涂层, 例如电化学沉积法、溶胶-凝胶法和相分离技术等^[11-13]。电化学沉积法能对涂层表面特有的生长动力学过程进行控制, 且制备较为简单、快速、可重复, 但制备成本高昂、制备涂层不透明, 有一定的应用局限性。溶胶-凝胶法是一种简便、经济高效的技术, 用于生产具有多种形态特征的纳米材料和超疏水涂层/薄膜, 但难以精确地控制膜厚和解决由于膜的热处理而导致沉积膜破裂的问题。相分离技术主要用来制造超疏水多孔聚合物膜, 该技术操

作简便且廉价, 但其适用材料有限。研究发现, 磁控溅射法是有效的制膜方法之一, 具有易于控制、镀膜面积大和附着力强等优点^[14-16]。通过在真空中利用核能粒子轰击靶表面, 可制备具有超疏水性和对气体敏感的复合 TiO₂ 薄膜以及 ZnO 超疏水薄膜等^[17-18]。

风机叶片防冰材料需要涂层具有一定的耐候性, 本文选择耐热耐候性和耐腐蚀性较强的 SiO₂ 纳米粒子^[19]和易于实现掺杂的 ZnO 纳米粒子^[20]作为涂层制备原料, 两种不同尺寸的粒子掺混更容易构建超疏水功能所需的微观尺度下的粗糙表面, 且 SiO₂ 的存在可以提高涂层质量。通过磁控溅射构造具有一定粗糙程度的纳米超疏水薄膜, 再进行涂层整体的表面氟化修饰, 制备一种新型 ZnO/SiO₂ 复合防冰涂层, 探索一种新型高质量纳米复合防冰涂层的制备方法。

1 试验

1.1 新型 ZnO/SiO₂ 复合涂层的制备

将载玻片依次通过丙酮、去离子水、乙醇、去离子水超声波清洗 20 min, 然后放入干燥箱内 100 °C 高温干燥; 将干燥处理后的载玻片放入磁控溅射镀膜腔室内, 使用机械泵将真空度抽低至 6.0×10^{-4} Pa 并通入纯度超过 99.999% 的氩气, 控制工作压力为 4 Pa, 偏压 100 V, 直流溅射锌靶, 直流溅射功率 80 W, 射

频溅射硅靶, 射频溅射功率为 140 W, 样品旋转速度为 5 r/min, 开启溅射挡板, 溅射至预定时间, 关机通气, 取出样品。

在溅射过程中, 靶材分子分裂, 与工艺气体离子发生反应形成氧化物, 作为沉积物质沉积成膜。将溅射后得到的薄膜涂层样品放置于马弗炉中进行高温退火处理, 以 10 °C/min 的升温速度将马弗炉升温至 400 °C, 并保持高温退火 30 min 以上, 然后随炉冷却至室温, 取出试样。

将 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层分别浸入质量分数为 5% 的 FAS-17 和 HDTMS 乙醇溶液中 45 min, 进行表面修饰。取出后放入干燥箱内, 在 90 °C 下干燥 30 min 以上, 得到经 FAS-17 及 HDTMS 氟化修饰的 ZnO/SiO₂ 涂层。将涂层样品分别放入有 1.5 g G502、PDMS 的广口瓶中, 通过气相沉积法进行涂层的表面修饰, 在 150 °C 下热处理 2 h, 再冷却至室温, 得到经 G502 及 PDMS 氟化修饰的 ZnO/SiO₂ 涂层。

1.2 性能测试

1) 涂层显微组织分析。采用 Zeiss Gemini 300 型扫描电子显微镜观察涂层表面形貌特征。

2) 润湿性能检测。采用视频光学接触角测量仪测量样品的水接触角 (CA) 和滚动角 (SA)。每个样品的 CA 和 SA 分别为测量 5 个不同位置所得结果的平均值。

3) 涂层耐用性能测试。将涂层试样面朝下放在 SiC 砂纸上, 然后将 50 g 重的砝码放在涂层试样上, 使用玻璃棒推动涂层试样沿着直尺移动 10 cm。将样品旋转 90° 并沿原轨迹相反的方向再移动 10 cm。通过在水平和垂直方向上进行上述磨损测试, 再将涂层试样磨损表面进行显微拍照, 确定磨损程度, 如图 1 所示。

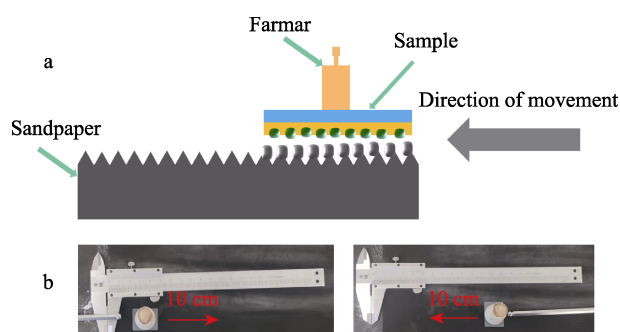


图 1 砂纸磨损试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of sandpaper wear experiment: a) experimental diagram; b) experimental operation diagram

4) 抗冰性能检测。通过测定样品表面延长水滴结冰的时间来表征抗冰性能。将样品置于 -10 °C、相对湿度为 60% 的环境中, 模拟具体高海拔、低温、高湿环境下的实际防冰性能。然后利用自制装置让水以一定

的速度落在涂覆 ZnO/SiO₂ 的复合涂层表面, 如图 2 所示。液滴从液相完全变为固相所需要的时间即为冰冻时间。

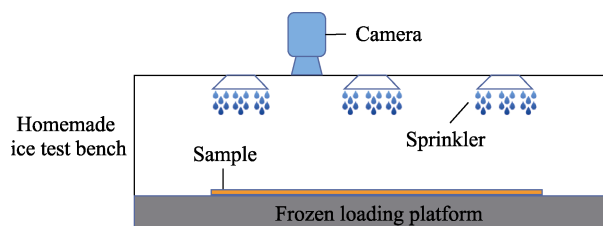


图 2 自制结冰试验装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of homemade icing experimental device

5) 冰黏附强度测试: 将涂覆了涂层的试样固定在试验台上, 取一个内径 d 为 13 mm 的直通塑料圆筒, 垂直放置在涂层表面并注入 3 mL 去离子水, 将其完全冻结并与涂层表面完全粘结后, 通过数显拉力计推动圆筒外壁, 获得推动冰柱的剪切力峰值 F_r , 以此为指标评估冰的黏附强度。冰黏附强度的计算如式 (1) 所示。

$$\tau = 4 \frac{F_r}{\pi d^2} \quad (1)$$

式中: τ 为冰的黏附强度, kPa。

2 结果与分析

2.1 不同氟化修饰剂对磁控溅射 ZnO/SiO₂ 涂层表面疏水性能的影响

常用的氟化改性剂主要是长链烷烃部分氟化或者完全氟化的硅烷和聚二甲基硅氧烷^[21-23]。为了准确验证表面氟化改性对超疏水表面疏水性能的影响, 分别采用 FAS-17、PDMS、G502 和 HDTMS 4 种修饰剂对其进行表面氟化改性试验。改性后液滴在涂层上的滞留状态如图 3 所示, 表面氟化改性后的涂层超疏水效果更加显著。

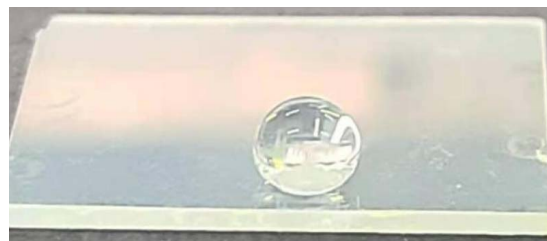


图 3 磁控溅射氟化改性 ZnO/SiO₂ 涂层上的水滴
Fig.3 Water droplets on fluorinated ZnO/SiO₂ coatings by magnetron sputtering

对经不同修饰剂氟化改性后的涂层进行涂层接触角/滚动角以及冰黏附强度测试, 将测试结果与未经处理的超疏水涂层和普通玻璃表面进行对比, 结果如图 4 所示。

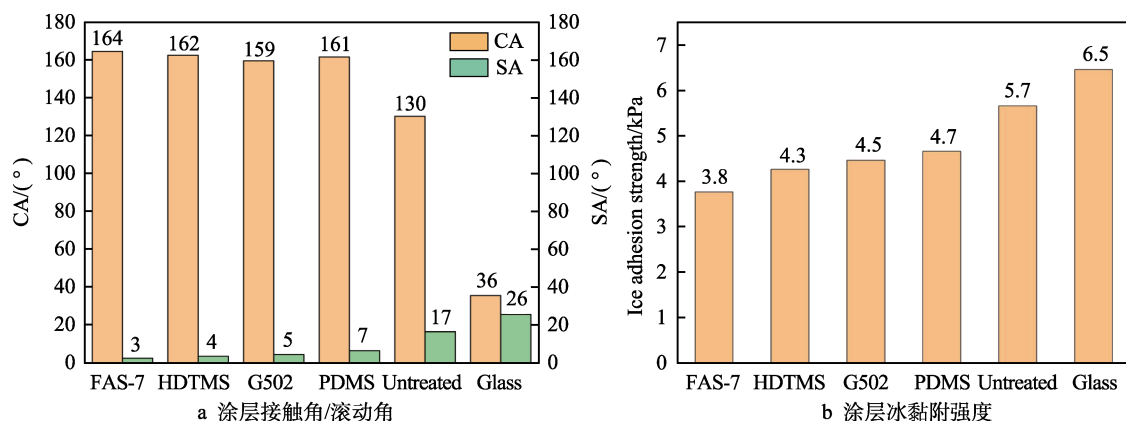


图 4 不同修饰剂处理得到的 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层的疏水性能
Fig.4 Hydrophobic properties of ZnO/SiO₂ film coatings treated with different modifiers:
a) contact angle/roll angle of coating; b) ice adhesion strength of coating

如图 4a 所示, 经过 FAS-17、HDTMS、G502 和 PDMS 改性得到的 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层的接触角分别为 164°、162°、159°和 161°, 滚动角分别为 3°、4°、5°和 7°。4 种经不同修饰剂改性后的涂层均具有优异的超疏水性能。相比未经处理的 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层 (表面接触角为 130°, 滚动角为 17°), 经过 4 种不同修饰剂氟化改性后的涂层表面接触角和滚动角有非常大的提升。在图 4b 中, 4 种修饰剂处理后的涂层冰黏附强度由高到低排列为: PDMS>G502>HDTMS>FAS-7。经 FAS-17 修饰得到的氟化 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层具有最低冰黏附强度 (3.8 kPa), 而未氟化处理的超疏水涂层冰黏附强度高达 5.7 kPa。FAS-17 修饰改性后的涂层超疏水性最佳。

为进一步分析液滴在薄膜涂层表面所占的接触面积, 通过 Cassie-Baxter 方程计算液滴在 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层表面的固-液接触面积, 见式 (2)。

$$\cos \theta_{CB} = f_{SL} \cos \theta_C - f_{LA} = (1 - f_{LA}) \cos \theta_C - f_{LA} \quad (2)$$

式中: f_{SL} 和 f_{LA} 分别为液滴在薄膜涂层表面与固体、气体的接触面积的比例, θ_{CB} 和 θ_C 分别为液滴在 Cassie-Baxter 状态下和光滑平面状态下的接触角。经过上述方程计算得到的液滴在 FAS-17 修饰后的 Zn/SiO₂ 薄膜涂层表面的液-气复合接触面积比例为 94.38%。

2.2 涂层的氟化改性机理

选用 4 种氟化剂中氟化效果最佳的 FAS-17 对 ZnO/SiO₂ 超疏水涂层进行表面改性, 涂层表面的红外光谱图如图 5 所示。

在 1168.77、1118.30 和 1105.68 cm⁻¹ 处显示了三个峰。峰的出现归因于—CF₂、—CF₃ 基团的拉伸振动, 说明—CF₂、—CF₃ 基团成功替代了薄膜涂层表面的亲水基团—OH。在 FAS-17 乙醇溶液中, 硅氧烷基团 (Si—OC₂H₅) 首先转化为硅烷醇基团 (—Si—OH), 而涂层表面亲水基团—OH 十分丰富, 与 FAS-17 的—Si—OH 进行脱水缩合反应^[24], 涂层表面

的亲水基团—OH 被低表面能的—CF₂ 基团 (6.7 mJ·m⁻²) 和—CF₃ 基团 (18 mJ·m⁻²) 所替代, 使得氟化后的涂层表面能降低, 表现出优异的超疏水性能。这与氟化改性前 ZnO/SiO₂ 涂层由于表面具有一定的粗糙度所表现出来的疏水性是不同的。

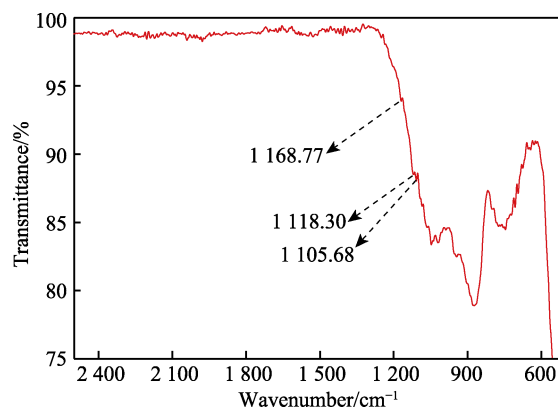


图 5 氟化改性后的 ZnO/SiO₂ 超疏水涂层红外光谱图

Fig.5 Infrared spectrum of ZnO/SiO₂ superhydrophobic coating after fluorination modification

2.3 磁控溅射-氟化改性复合处理 ZnO/SiO₂ 涂层的表面形貌分析

超疏水表面的微观结构中疏水基团的排列状态 and 排列的紧密程度对其超疏水性能有显著的影响^[25-27]。图 6 为磁控溅射-氟化改性复合处理前后的 ZnO/SiO₂ 涂层的 SEM 图。超疏水表面由 ZnO 和 SiO₂ 颗粒构成规则致密的微纳米结构, 如图 6a 所示。对该微纳米结构进行放大观察, 发现 ZnO 和 SiO₂ 颗粒的这种排列状态和紧密程度对于超疏水表面微纳米结构的“气穴”构造并无任何帮助。反之, 由于其表面的 ZnO 和 SiO₂ 颗粒大面积堆叠, 使其表面能无法得到大程度的降低, 超疏水性能下降。氟化处理后的涂层表面存在大量包含“气穴”的簇状二级结构, 如图 6b 所示。由于“气穴”的存在, 液体与超疏水表面之间会形

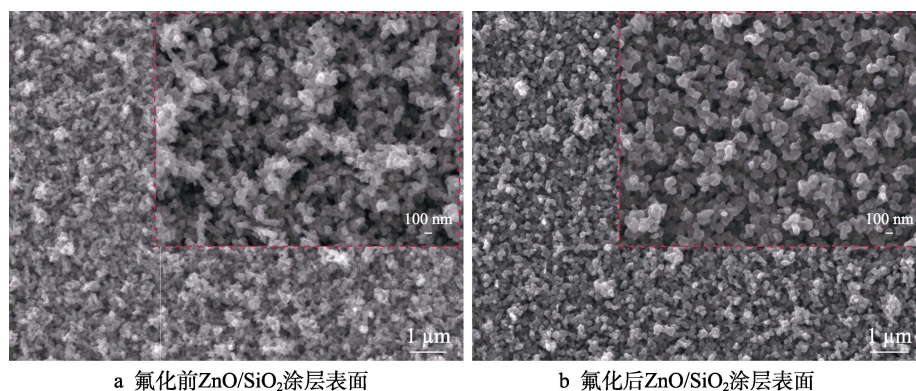


图 6 磁控溅射-氟化改性复合处理 ZnO/SiO₂ 涂层表面的 SEM 图

Fig.6 SEM images of ZnO/SiO₂ coating surface treated by magnetron sputtering and fluorination modification: a) ZnO/SiO₂ coating surface before fluorination; b) ZnO/SiO₂ coating surface after fluorination

成一层“气垫”，使得液滴与表面之间的接触面积减小，表面的润湿滞后角降低，导致液滴与表面的附着力大幅度下降，液滴能够轻易地从表面滚落。

此外，涂层的粗糙结构能将空气截留在表面结构中，使表面上的液滴处于非润湿的 Cassie-Baxter 状态，截留的空气使液滴和固体表面之间的相互作用最小化，当表面稍微倾斜时，水滴很容易从表面滑落，从而延迟液滴结冰的时间，而且纳米结构“空间间隙”的存在也减少了冰晶不均匀成核的机会。

2.4 磁控溅射氟化 ZnO/SiO₂ 涂层的机械稳定性

对磁控溅射氟化 ZnO/SiO₂ 涂层进行砂纸磨损测试，通过前述涂层耐用性能测试的磨损步骤，对涂层试样进行 10 次循环磨损试验。图 7a 显示了涂层样品的 CA 和 SA 随试验循环次数的变化。图 7b 为 10 次砂纸磨损试验后涂层样品的光学显微照片。经过 10 次循环磨损后，涂层的 CA 由 164° 下降到 151°，SA 由 3.0° 上升到 5.8°，说明即使经过循环磨损，砂纸仍

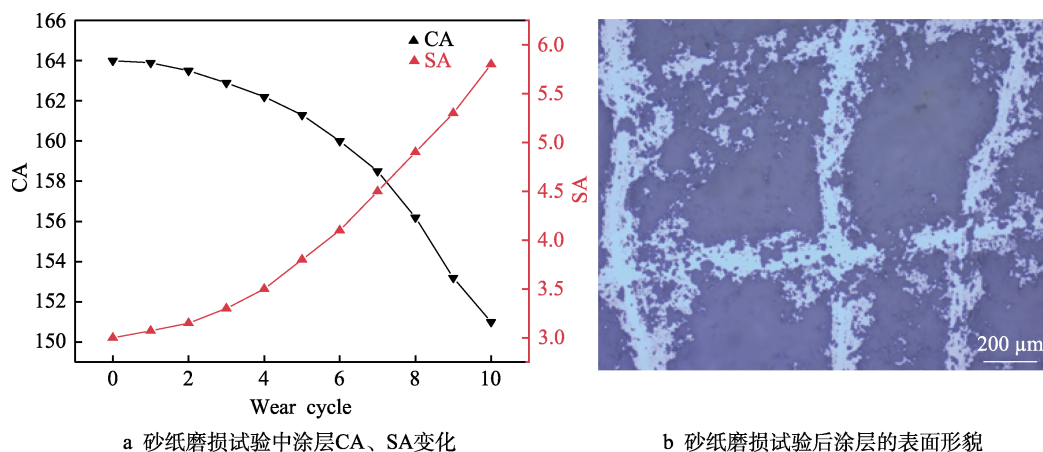
保持了良好的疏水性。

磁控溅射氟化 ZnO/SiO₂ 涂层之所以能保持如此优异的性能，主要是由于其构筑的微纳结构多尺度 ZnO 和 SiO₂ 纳米颗粒的混合，在表面微纳结构中的 SiO₂ 有效提高了涂层的耐磨损性能。另外，氟化后的 ZnO 和 SiO₂ 纳米颗粒具有极低的表面能，与纳米级和微米级表面粗糙度具有协同作用。

2.5 磁控溅射氟化 ZnO/SiO₂ 涂层的防冰性能

磁控溅射氟化 ZnO/SiO₂ 涂层的防冰性能主要通过比较磁控溅射氟化 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层和未处理的载玻片上水滴的延长冻结时间进行表征，试验过程如图 8 所示。

如图 8a—c 所示，在 -2 °C 下，未涂覆涂层的载玻片在 329 s 时冻结，涂覆涂层的载玻片在 2 775 s 时冻结，冻结时间延迟了 2 446 s。在温度下降至 -10 °C 时，如图 8e—g 所示，未涂覆涂层的载玻片上水滴在 12 s 后开始结冰，53 s 后局部结冰，151 s 后



a 砂纸磨损试验中涂层 CA、SA 变化

b 砂纸磨损试验后涂层的表面形貌

图 7 砂纸磨损试验

Fig.7 Sandpaper wear experiment: a) changes of coating CA and SA in sandpaper wear experiment; b) surface morphology of coating after sandpaper wear experiment

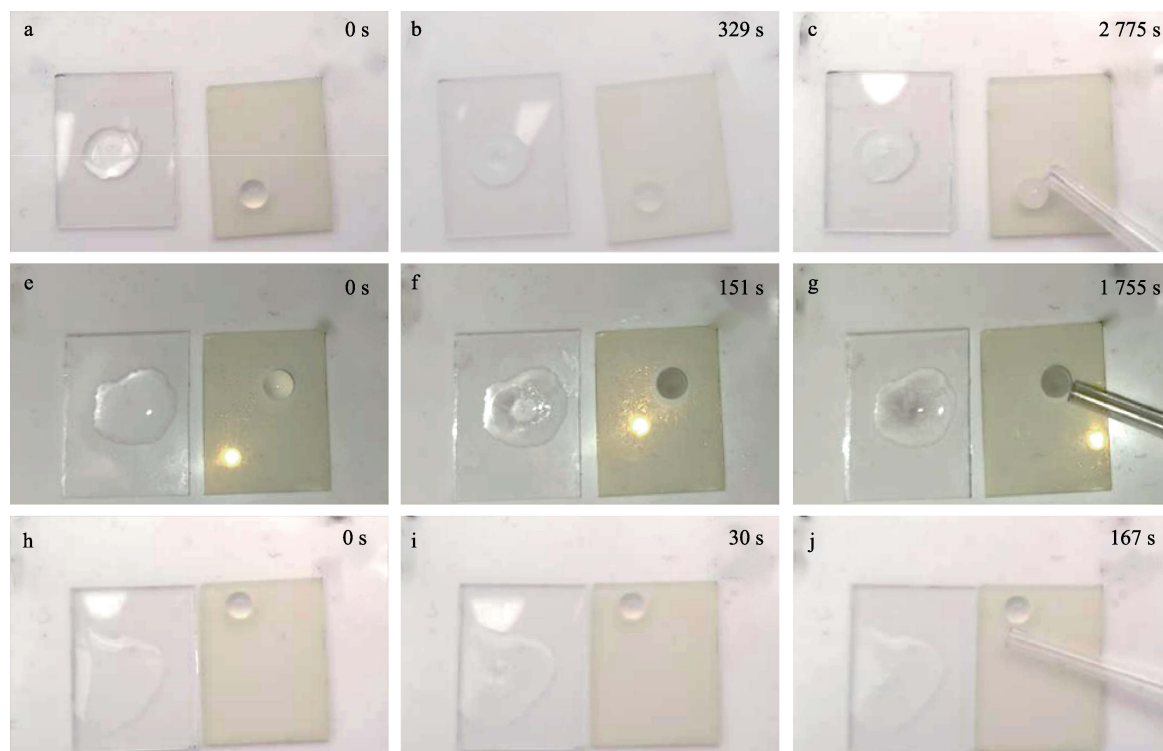


图 8 结冰试验图: (a-c) $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$, (e-g) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, (h-j) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$
Fig.8 Freezing test diagram: a)-c) $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$; e)-g) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$; h)-j): $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

完全结冰。从 853 s 到 1 367 s, 涂层表面的水滴开始变得不透明, 液滴表面开始结冰, 而液滴内部还是液体, 直到 1 755 s, 涂层表面的水滴完全冻结, 结冰延缓 1 604 s。图 8h—j 为在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的涂层结冰时间, 未涂覆涂层的载玻片在 30 s 时完全冻结, 涂覆涂层的载玻片在 167 s 时冻结, 延迟了 137 s。

3 结论

本文对 ZnO、SiO₂ 粒子进行磁控溅射, 构造了微纳米结构表面, 通过 FAS-17 乙醇溶液进行表面氟化修饰, 使得制备出的薄膜涂层表现出优异的超疏水性能, 丰富了涂层制备工艺的基础研究, 为涂层表面修饰改性提供了新的思路。

1) 所选用的 4 种氟化修饰剂中, FAS-17 对磁控溅射超疏水防冰纳米 ZnO/SiO₂ 薄膜涂层的修饰效果最好, 其涂层表面的液-气复合接触面积比例达到了 94.38%, 接触角和滚动角分别达到最佳 (164.7° 和 3°), 且表面冰黏附强度降低至 3.8 kPa。

2) 在磁控溅射法制膜的微观组织结构中, 纳米粒子的排列状态很规则, 并具有很强的机械稳定性; ZnO 和 SiO₂ 纳米粒子的掺混构建了涂层表面的多簇状二级微纳米结构, 能够很好地降低液滴与表面的附着力; 对涂层整体的氟化处理使得其表面的亲水性羟基官能团被 $-\text{CF}_2$ 、 $-\text{CF}_3$ 基团所取代, 降低了涂层的表面能, 使得涂层的防冰性能进一步提升。

3) 在湿度为 60%, 温度为 -2 、 -10 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的

条件下, 磁控溅射-氟化改性的新型 ZnO/SiO₂ 复合涂层延迟结冰时间分别为 2 446、1 604 和 137 s。

参考文献:

- [1] 蒋兴良, 周洪宇, 何凯, 等. 风机叶片运用超疏水涂层防覆冰的性能衰减[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 167-172. JIANG Xing-liang, ZHOU Hong-yu, HE Kai, et al. Anti-Icing Performance Degradation for Wind Blades with Superhydrophobic Coatings[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 167-172.
- [2] 冯放, 沈虎, 赵宏伟, 等. 超疏水 MoS₂ 纳米涂层叶片防覆冰特性研究[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(5): 1168-1175. FENG Fang, SHEN Hu, ZHAO Hong-wei, et al. Research on Anti-Icing Characteristics of Super-Hydrophobic MoS₂ Nano-Coated Blade[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2021, 42(5): 1168-1175.
- [3] 郭鹏, 冯云霞, 孟献春, 等. 蓄盐融雪除冰剂微观分析及对混合料水稳定性的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(6): 6062-6065. GUO Peng, FENG Yun-xia, MENG Xian-chun, et al. Microscopic Analysis of Salt-Stored Snow De-Icing Agent and Its Effect on Water Stability of Mixture[J]. Materials Reports, 2020, 34(6): 6062-6065.
- [4] WEI Ke-xiang, YANG Yue, ZUO Hong-yan, et al. A Review on Ice Detection Technology and Ice Elimination Technology for Wind Turbine[J]. Wind Energy, 2020, 23(3): 433-457.

- [5] 龙远炎. 风力发电机组叶片覆冰成因及防冻除冰技术综述[J]. 工程机械文摘, 2021(3): 26-29.
LONG Yuan-yan. Formation of Wind Turbine Blade Icing and Review of Anti-Freezing and Deicing Technology[J]. Construction Machinery Digest, 2021(3): 26-29.
- [6] 闫德峰, 刘子艾, 潘维浩, 等. 多功能超疏水表面的制造和应用研究现状[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 1-19.
YAN De-feng, LIU Zi-ai, PAN Wei-hao, et al. Research Status on the Fabrication and Application of Multifunctional Superhydrophobic Surfaces[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 1-19.
- [7] 郑奇凯, 孙阔腾, 黄松强, 等. 防冰涂层材料及电力材料防覆冰应用的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 282-293.
ZHENG Qi-kai, SUN Kuo-teng, HUANG Song-qiang, et al. Research Progress of Anti-Icing Coating Materials and Its Applications in the Protection of Power Materials[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 282-293.
- [8] 李国滨, 刘海峰, 李金辉, 等. 超疏水材料的研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(12): 142-150.
LI Guo-bin, LIU Hai-feng, LI Jin-hui, et al. Progress in Research of Preparation of Superhydrophobic[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(12): 142-150.
- [9] YALCINKAYA F, BOYRAZ E, MARYSKA J, et al. A Review on Membrane Technology and Chemical Surface Modification for the Oily Wastewater Treatment[J]. Materials (Basel, Switzerland), 2020, 13(2): 493.
- [10] 王建鑫, 李冬燕, 张福磊, 等. 微纳米结构疏水材料的研究进展[J]. 精细石油化工进展, 2020, 21(5): 40-43.
WANG Jian-xin, LI Dong-yan, ZHANG Fu-lei, et al. Progress of Research on Micro-Nanostructure Hydrophobic Materials[J]. Advances in Fine Petrochemicals, 2020, 21(5): 40-43.
- [11] ZANG Jie, YU Si-rong, ZHU Guang, et al. Fabrication of Superhydrophobic Surface on Aluminum Alloy 6061 by a Facile and Effective Anodic Oxidation Method[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 380: 125078.
- [12] JOO Y H, JIN M J, KIM S K, et al. BCl_3/Ar Plasma Etching for the Performance Enhancement of Al-Doped ZnO Thin Films[J]. Applied Surface Science, 2021, 561: 149957.
- [13] 顾强, 陈英, 陈东, 等. 白铜基体低表面能复合膜的制备及其耐腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 220-228.
GU Qiang, CHEN Ying, CHEN Dong, et al. Preparation of Copper Alloys Based Low Surface Energy Composite Film and Its Corrosion Resistance[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 220-228.
- [14] 任芝龙, 肖娇玉, 黄佳木. 靶材成分对磁控溅射 PTFE 超疏水薄膜的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 141-146.
REN Zhi-long, XIAO Jiao-yu, HUANG Jia-mu. Effects of Target Composition on Super-Hydrophobic Polytetrafluoroethylene Films Prepared by Magnetron Sputtering[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 141-146.
- [15] 姜思宇, 熊芬, 吴隽, 等. 不同磁控溅射方式制备的 C 掺杂 h-BN 薄膜微观结构与导电性研究[J]. 人工晶体学报, 2019, 48(5): 846-853.
JIANG Si-yu, XIONG Fen, WU Jun, et al. Microstructure and Conductivity of the C Doped h-BN Thin Films Prepared by Different Magnetron Sputtering Methods[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2019, 48(5): 846-853.
- [16] 卢金德, 韦春贝, 林松盛, 等. 磁控溅射 $\text{NiCrAlY}/\text{MoS}_2$ 复合薄膜结构与性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(5): 198-207.
LU Jin-de, WEI Chun-bei, LIN Song-sheng, et al. Structure and Properties of $\text{NiCrAlY}/\text{MoS}_2$ Composite Films Fabricated by Magnetron Sputtering[J]. Surface Technology, 2021, 50(5): 198-207.
- [17] GAO Bo, DU Xiao-ye, LIU Yang-yang, et al. Candle Soot as a Template for Fabricating Superhydrophobic Titanium Dioxide Film by Magnetron Sputtering[J]. Vacuum, 2019, 159: 29-36.
- [18] LIU Guo-yong, YUAN Yuan, JIANG Zhou, et al. Anti-Frosting/Anti-Icing Property of Nano-ZnO Superhydrophobic Surface on Al Alloy Prepared by Radio Frequency Magnetron Sputtering[J]. Materials Research Express, 2020, 7(2): 026401.
- [19] SOLIMAN T S, VSHIVKOV S A, ELKALASHY S I. Structural, Thermal, and Linear Optical Properties of SiO_2 Nanoparticles Dispersed in Polyvinyl Alcohol Nanocomposite Films[J]. Polymer Composites, 2020, 41(8): 3340-3350.
- [20] 计俞伟, 薛名山, 李娜, 等. 纳米氧化锌掺杂对多孔聚氨酯薄膜表面结构和性能的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(7): 149-157.
JI Yu-wei, XUE Ming-shan, LI Na, et al. Effect of Nano-ZnO Doping on Surface Microstructures and Properties of Cellular Porous Polyurethane Films[J]. Surface Technology, 2021, 50(7): 149-157.
- [21] BAYER I S. Superhydrophobic Coatings from Eco-friendly Materials and Processes: A Review[J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(13): 2000095.
- [22] KIM J H, YASUKAWA A, YONEZAWA S. Enhanced Dispersion Stability and Fluidity of Rutile TiO_2 Particles Using Surface Fluorination[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 20: 311-319.
- [23] 李嘉碧, 吴熙, 刘升卫. 表面氟化 TiO_2 空心光催化剂制备及其应用[J]. 物理化学学报, 2021, 37(6): 33-44.
LI Jia-bi, WU Xi, LIU Sheng-wei. Fluorinated TiO_2 Hollow Photocatalysts for Photocatalytic Applications[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2021, 37(6): 33-44.
- [24] PENG Jun-yan, ZHAO Xiu-jian, WANG Wu-feng, et al. Durable Self-Cleaning Surfaces With Superhydrophobic and Highly Oleophobic Properties[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2019, 35(25): 8404-8412.
- [25] 曹琨, 胡玲寓, 刘春森, 等. 超疏水泡沫铜的制备及油水分离应用研究[J]. 表面技术, 2018, 47(8): 71-76.
CAO Kun, HU Ling-yu, LIU Chun-miao, et al. Fabrication of Super-Hydrophobic Copper Foam and Its Application in Oil-Water Separation[J]. Surface Technology, 2018, 47(8): 71-76.
- [26] 马国佳, 郑海坤, 常士楠, 等. 微纳结构超疏水表面的

浸润性分析及设计[J]. 化学学报, 2019, 77(3): 269-277.
MA Guo-jia, ZHENG Hai-kun, CHANG Shi-nan, et al. Wettability Analysis and Design of Micro-Nanostructured Superhydrophobic Surface[J]. Acta Chimica Sinica, 2019, 77(3): 269-277.

[27] JIANG Shu-yue, ZHANG Hai-feng, JIANG Chun-feng, et al. Antifrosting Performance of a Superhydrophobic Surface by Optimizing the Surface Morphology[J]. Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids, 2020, 36(34): 10156-10165.

(上接第 380 页)

- [20] XIA Yun-qing, HE Yi, CHEN Chun-lin, et al. MoS₂ Nanosheets Modified SiO₂ to Enhance the Anticorrosive and Mechanical Performance of Epoxy Coating[J]. Progress in Organic Coatings, 2019, 132: 316-327.
- [21] HU Shi-hao, MUHAMMAD M, WANG Meng-zhe, et al. Corrosion Resistance Performance of Nano-MoS₂-Containing Zinc Phosphate Coating on Q235 Steel[J]. Materials Letters, 2020, 265: 127256.
- [22] CHEN Chun-lin, HE Yi, XIAO Guoqing, et al. Two-Dimensional Hybrid Materials: MoS₂-RGO Nanocomposites Enhanced the Barrier Properties of Epoxy Coating [J]. Applied Surface Science, 2018, 444: 511-521.

- [23] 赵鹏飞, 宋喜梅, 张海琛, 等. 碳纳米管与二硫化钼协同增强丁腈橡胶复合材料吸波性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2021, 37(4): 174-181.
Zhao Peng-fei, Song Xi-mei, Zhang Hai-chen, et al. Synergetic Effects of Molybdenum Disulfide and Multiwalled Carbon Nanotubes on the Microwave Absorbing Performance of Nitrile Butadiene Rubber Composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2021, 37(4): 174-181.
- [24] ZHANG Guo-zhu, QIN Shu-yang, YAN Long-ge, et al. Simultaneous Improvement of Electromagnetic Shielding Effectiveness and Corrosion Resistance in Magnesium Alloys by Electropulsing[J]. Materials Characterization, 2021, 174: 111042.

(上接第 407 页)

- [22] 谭悦, 陈燕, 曾加恒, 等. 电解-磁力复合研磨 TA18 钛合金管内表面研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2018(2): 140-142.
TAN Yue, CHEN Yan, ZENG Jia-heng, et al. Study on Inner Surface of TA18 Titanium Alloy Pipe by Electrochemical Magnetic Composite Finishing[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2018(2): 140-142.
- [23] JAIN V K, SAREN K K, RAGHURAM V, et al. Force Analysis of Magnetic Abrasive Nano-Finishing of Magnetic and Non-Magnetic Materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5): 1137-1147.
- [24] LIU Z Q, CHEN Y, LI Y J, et al. Comprehensive Performance Evaluation of the Magnetic Abrasive Particles [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 68(1): 631-640.

- [25] LIN C T, YANG L D, CHOW H M. Study of Magnetic Abrasive Finishing in Free-Form Surface Operations Using the Taguchi Method[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 34(1): 122-130.
- [26] 周传强, 韩冰, 马学东, 等. SUS316 异形管件内表面磁针磁力研磨的试验研究[J]. 现代制造工程, 2019(10): 1-5.
ZHOU Chuan-qiang, HAN Bing, MA Xue-dong, et al. Study on the Magnetic Abrasive Finishing of the Inner Surface of SUS316 Irregular Tubular by Magnetic Needles [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(10): 1-5.
- [27] 陈燕, 胡玉刚, 巫昌海, 等. 磁针磁力研磨去除涡轮轴内壁积碳[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 259-266.
CHEN Yan, HU Yu-gang, WU Chang-hai, et al. Removal of Carbon Deposition on the Inner Wall of Turbo Shaft by Magnetic Needle Grinding[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 259-266.

责任编辑: 彭颀

(上接第 451 页)

- [36] KAMDEM D P, RIEDL B, ADNOT A, et al. ESCA Spectroscopy of Poly(Methyl Methacrylate) Grafted Onto Wood Fibers[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1991, 43(10): 1901-1912.
- [37] POPESCU C M, TIBIRNA C M, VASILE C. XPS Characterization of Naturally Aged Wood[J]. Applied Surface Science, 2009, 256(5): 1355-1360.
- [38] VENKATESWARA RAO A, KULKARNI M M, AMALNERKAR D P, et al. Superhydrophobic Silica Aerogels Based on Methyltrimethoxysilane Precursor[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2003, 330(1/2/3): 187-195.
- [39] SHAFRIN E G, ZISMAN W A. Constitutive Relations in the Wetting of Low Energy Surfaces and the Theory of

the Retraction Method of Preparing Monolayers[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1960, 64(5): 519-524.

- [40] ZHANG Yang, XU De-liang, MA Li-bo, et al. Influence of Heat Treatment on the Water Uptake Behavior of Wood[J]. BioResources, 2017, 12(1): 1697-1705.
- [41] 方露, 王正, 熊先青. 热压温度对硅烷化木单板/聚乙烯薄膜复合材料性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2016, 33(3): 483-488.
FANG Lu, WANG Zheng, XIONG Xian-qing. Properties of Silane Modified Poplar Veneer/High Density Polyethylene Film Composites with Varying Pressing Temperatures[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2016, 33(3): 483-488.

责任编辑: 彭颀