第 52 卷 第 7 期：3395-3404 高电压技术 Vol.52, No.7: 3395-3404
2026 年 7 月 31 日 High Voltage Engineering July 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250530

基于非晶原位强化的超疏水涂层提升输电线路防覆冰性能

王　瑞，蔡杭川，王庆禹，谢从珍
（华南理工大学电力学院，广州 510640）

摘　要：高分子超疏水涂料是解决导线覆冰和绝缘子湿闪问题的有效策略之一。然而，纯聚合物涂层普遍疏水性不高，难以满足导线防覆冰和绝缘子抗湿闪需求。为此，通过硅酸四乙酯共水解形成非晶二氧化硅，成功将氟化二氧化硅(SiO_2@F)锚定于基材表面，制备了具有高绝缘性能的超疏水涂层。在最佳负载条件下实现了优异的超疏水特性，其接触角高达 165.1°，滚动角低至 0.3°。在经受长期紫外线辐射、盐雾腐蚀、降雨冲刷、砂纸磨损和超低温试验后，该涂层仍保持优异的超疏水性。此外，该涂层的抗湿闪强度较室温硫化硅橡胶(RTV)涂层提高了74.26%，提升了复合绝缘子对绝缘性能的需求。最后，结合不同基材验证了该聚合物涂层的超疏水性能，证明了应用效果的普适性。综上，该文研究的超疏水涂料可为输电线路防覆冰新材料设计提供新的思路。
关键词：超疏水；耐久性；绝缘涂层；防覆冰；原位生长

Superhydrophobic Coating Based on Amorphous In-situ Strengthening Improves the Anti-icing Performance of Transmission Lines

WANG Rui, CAI Hangchuan, WANG Qingyu, XIE Congzhen
(School of Electric Power Engireening, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Polymer superhydrophobic coating is one of the effective strategies to solve the icing problem of transmission lines icing and insulator wet flashover; however, it is difficult for the low hydrophobicity of pure polymer to meet the needs of transmission lines anti-icing and insulator anti-wet flashover. Therefore, amorphous silica was formed by co-hydrolysis of tetraethyl silicate, and fluorinated silica (SiO_2@F) was successfully anchored on the surface of the substrate to prepare a superhydrophobic coating with high insulation performance. Under optimal loading conditions, the coating exhibits excellent superhydrophobic properties, with a contact angle of 165.1°, and a sliding angle of 0.3°. After undergoing UV radiation, salt spray corrosion, rainwater erosion, sandpaper abrasion, and ultra-low temperature testing, the coating still maintains excellent superhydrophobicity. Additionally, the wet flashover strength of the coating is 74.26% higher than that of room-temperature vulcanized silicone rubber (RTV) coating, which improves the insulation performance of insulators. Finally, the superhydrophobic properties of the polymer coating were verified on different substrates, proving the universality of the polymer coating. In summary, the superhydrophobic coating studied in this paper provides new insights for the design of new materials for anti-icing applications in power transmission lines.
Key words: superhydrophobic; durability; insulating coatings; anti-icing; in-situ synthesis

0　引言

超疏水涂层在设备表面展现出优异的抗液体黏附、抑制液体扩散和自清洁性能，具有广阔的应用前景。然而，输电设备长期暴露于复杂且恶劣的户外环境中[1-3]，包括强降雨、沙尘侵蚀、紫外线辐射以及海边盐雾等因素，这些条件会导致超疏水涂层失去超疏水特性。因此，开发具有耐磨性、高绝缘性和应用范围广泛的超疏水涂层，有助于降低湿闪和覆冰等潜在风险[4-8]，从而提升设备运行的可靠性和安全性。

构建超疏水表面特性主要依赖于两种策略：粗糙表面策略与低表面能策略[9-12]。前者通过在材料表面构筑微米级或纳米级的粗糙结构[13-15]，在气固界面捕获气体形成空气层，从而有效降低水滴与表面的实际接触面积。尽管该结构使水滴易于滚动带

基金资助项目：国家自然科学基金(52307025)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52307025).

走污物从而赋予表面优异的自清洁特性，然而，构建精细的微结构空腔和支柱等复杂制造工艺限制了该方法的大规模应用。后者则主要利用氟碳化合物、硅树脂等低表面能材料，通过减少液体在材料表面的铺展以提高疏水性。相较之下，该策略工艺简单、成本低，但低表面能树脂与基材之间的界面结合强度较低，这不仅影响了涂层的附着力，还进一步降低了其耐磨性能[16]。

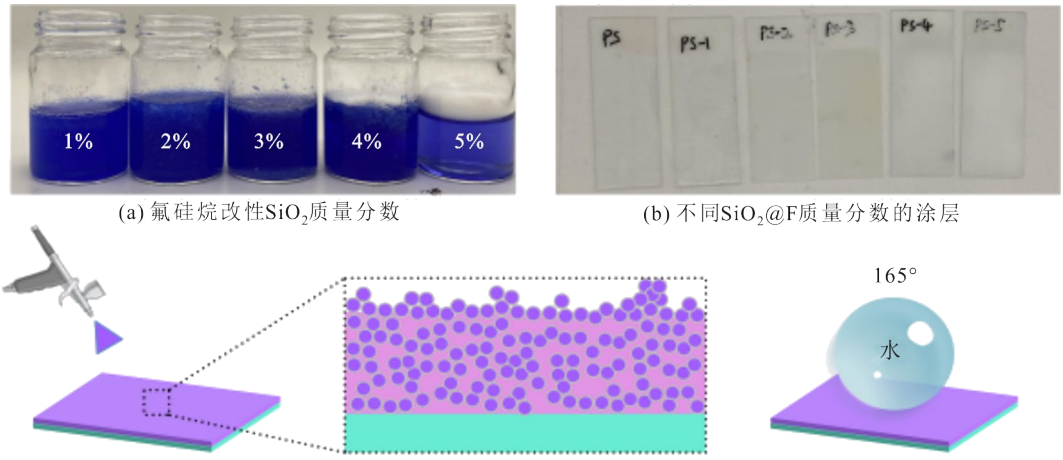
融合粗糙表面与低表面能两种策略的材料设计兼具造价低廉、工艺简便和耐磨强等优势。例如，近期西安交通大学张冠军团队通过整合氧化锌、碳纳米管和聚二甲基硅烷，制备出接触角达 153°的超疏水涂层；涂覆于环氧基材表面，在 15°倾斜角度下湿闪强度达到 24 kV/cm[3]，显著高于纯环氧绝缘子的 10.87 kV/cm。本课题组前期工作采用疏水性纳米二氧化硅，通过 3-巯基丙基三乙氧基硅烷共价接枝到苯乙烯-异戊二烯-苯乙烯嵌段共聚物上，成功制备了超疏水涂层[17]；该涂层在提升绝缘强度的同时，展现出优异的疏水性能。然而，经砂纸往复磨损 20 次后，表面的高分子与填料脱落，暴露的新表面接触角从 152.2°下降至 151.8°。因此，在提升聚合物涂层超疏水性能的同时，仍需关注其耐磨性能。

过去有研究发现，硅酸四乙酯水解后能增强高分子与填料间的界面结合力，从而提升复合材料的稳定性[18]。鉴于此，本文提出了一种基于高分子黏结策略的耐磨超疏水绝缘涂层，通过硅酸四乙酯辅助共水解将氟化二氧化硅(SiO_2@F)连接形成硅酸盐网络，从而锚定 SiO_2@F 于基材表面。在经受长期紫外线辐射、盐雾腐蚀、降雨冲刷、砂纸打磨、超低温试验后，该涂层仍保持优异的超疏水性。该涂层在抗湿闪和防覆冰试验中显示出良好的效果，并且在不同的基材表面验证了其普适性，为提高电力系统的安全性提供了重要的材料基础。

1 实验制备与表征

1.1 材料

异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)、三羟甲基丙烷(TMP)、2-羟基-4′-(2-羟基乙氧基)-2-甲基丙酚(光引发剂 2959)、丙烯酸羟乙酯(HEA)、二月桂酸二丁基锡(DBTBL)、二氧化硅、硅酸四乙酯、2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚、十七氟癸基三甲氧基硅烷(POTS)、丙酮、乙醇、去离子水购自上海阿拉丁试剂有限公司，尘土呈红灰色，具有酸性(pH 值约 5.5~6.5)，密度约为 1.3~1.5 g/cm³。



(a) 氟硅烷改性SiO_2质量分数　(b) 不同SiO_2@F质量分数的涂层

(c) 涂层制备工艺图

图 1　超疏水涂层的制备示意图

Fig.1　Schematic diagram for the fabrication of superhydrophobic coatings

1.2 二氧化硅表面含氟改性方法

取 5.0 g 二氧化硅加入 100 mL 的乙醇中和 1.0 mL 的去离子水中，加入 1%、2%、3%、4%、5%十七氟癸基三甲氧基硅烷搅拌 2 h，在 60 ℃烘箱中干燥。当十七氟癸基三甲氧基硅烷浓度(质量分数)低于 4%时，改性后的纳米粒子部分未能呈现高憎水性；而当十七氟癸基三甲氧基硅烷浓度高于 5%时，改性后的二氧化硅均表现出优异的疏水性，如图 1(a)所示。最终选择 5%的改性剂浓度作为实验条件，并将 F 改性的 SiO_2 记为 SiO_2@F。

1.3 涂料的制备方法

将 4.44 g IPDI、0.894 g TMP 搅拌 30 min 后，加入 1 滴 DBTBL，搅拌 120 min 后加入 2.32 g HEA、0.04 g 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚和丙酮溶解，再加入

16 mL 硅酸四乙酯，加入 5%的光引发剂 2959，记为 PS 溶液。在 PS 溶液中分别加入 0、1.68 g、3.36 g、5.04 g、6.73 g、8.41 g SiO_2@F，标记为 PS、PS-1、PS-2、PS-3、PS-4、PS-5，如图 1(b)所示。当 SiO_2@F 纳米粒子在超疏水涂层中含量超过一定阈值，超疏水涂层表面的纳米粒子会在触碰、振动等条件下发生脱落，导致表面涂层掉落。

1.4　喷涂法制备超疏水涂层

使用 0.8 cm 口径的高雾化喷枪，气压约为 0.2 kPa，喷口距离基材约 15 cm，将 PS 涂料溶液喷涂到基材表面，室温干燥 15 min，如图 1(c)所示。

1.5　微观表征和电性能测试方法

采用超高分辨场发射扫描电子显微镜(SU8600)、X 射线光电子能谱(Axis Supra$^+$)、原子力显微镜(Multimode 8)、傅里叶变换红外光谱(Nicolet IS50-Nicolet)对喷涂在铝片上的涂层进行微观形貌、结构和组成进行表征。接触角、滚动角由接触角测试仪(OCA40 Micro)测定[19]。对每个样本测量 3 个位置，然后取平均值。湿闪试验在直流电压上升速率为 1 kV/s、倾斜 15°、液滴流速(体积流量) 0.02 mL/s 的条件下，采用经典的手指电极结构，在大气条件下测试了表面闪络电压。介质击穿强度采用 PK-CPR1601 测定仪进行测试，升压速率为 1000 V/s。

1.6　机械稳定性和化学耐久性测试方法

为了研究涂层的耐久性，本文依次开展了砂纸磨损、紫外辐射、模拟强降雨冲刷及低温冻融循环试验。紫外辐射老化根据国标(GB/T 14522—2008)，每 24 h 测量一次接触角与滚动角。中性盐雾老化参照国标(GB/T 6461—2002)进行试验。将试样放置于与样品台垂直方向角度为 30°，采用 5% NaCl 溶液作为喷雾腐蚀溶液(pH 6.5~7.2)，控制在 2 mL/(80 cm^2·h)的沉降量；设置 35 ℃为试验温度，每 24 h 记录一次接触角和滑动角；低温冻融循环测试在−25 ℃下结冰融冰，每 10 个循环记录一次接触角和滑动角。在砂纸磨损实验中，超疏水涂层被放置在 500 目砂纸上，并在 100 g 砝码的压力下往复移动，每 5 次往复循环记录一次接触角和滑动角[1,17]；模拟强降雨冲刷老化，样品置于 200 mm^2/h 的降雨下冲刷，涂层与出水口之间的距离为 50 cm，每 6 h 记录一次接触角和滑动角[1,17]；结冰融冰循环实验是在−25 ℃下，将制备的耐磨超疏水涂层放置在烧杯中，当完全结冰后，将样品从冰箱中取出。在冰融化后干燥表面，记录一次接触角和滑动角[1,17]。每个样本至少测量 3 个位置，然后取平均值。针对最优性能的 PS-5，制备了 19 个样品。其中，1 个测试接触角，1 个测试表面能(防止二碘甲烷污染)，15 个老化测试(3 个紫外、3 个盐雾、3 个降雨、3 个砂纸打磨、3 个冻融循环)，1 个自清洁、1 个覆冰实验。

1.7　涂层自清洁能力与防覆冰能力测试方法

为证明所制备的超疏水涂层的自清洁性能，本研究选择尘土作为污染物，将尘土置于 PS-5 超疏水涂层表面。测试时，将样品倾斜 10°，使亚甲基蓝染色液滴滴在表面，以观测水滴去除表面污染物的运动过程[1,17]。为证明所制备的超疏水涂层的防覆冰性能，将 PS-5 超疏水涂层贴在半导体板上，调控半导体板温度为−25 ℃，测试时，试样倾斜约 30°，将亚甲基蓝染色液滴滴在表面，以观测水滴在表面结冰过程[1,17]。

2　结果与讨论

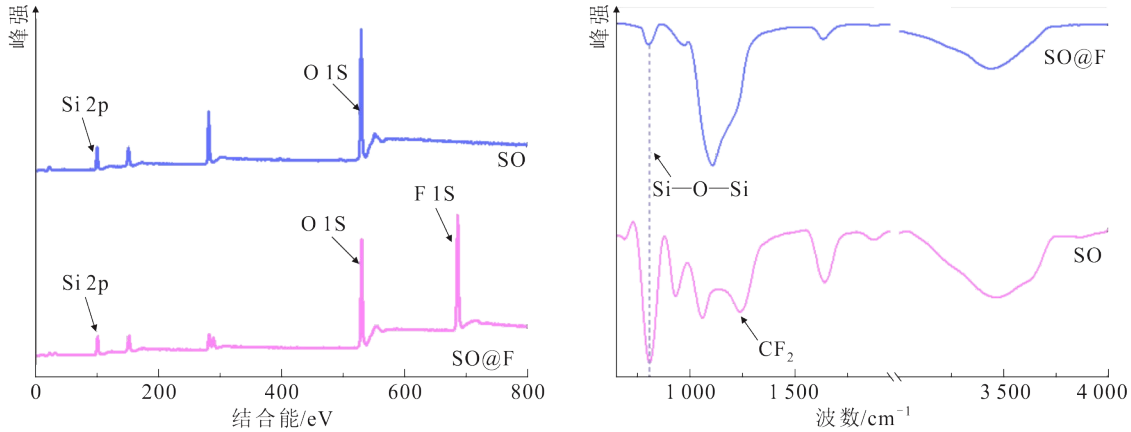
受荷叶仿生学启发，本文研发了一种基于高分子黏结策略的超疏水绝缘纳米复合涂层，该涂层将氟化二氧化硅(SiO_2@F)锚定于基材表面，并通过硅酸四乙酯辅助共水解将 SiO_2@F 连接形成硅酸盐网络。

2.1　SiO_2@F 粒子的化学特性分析

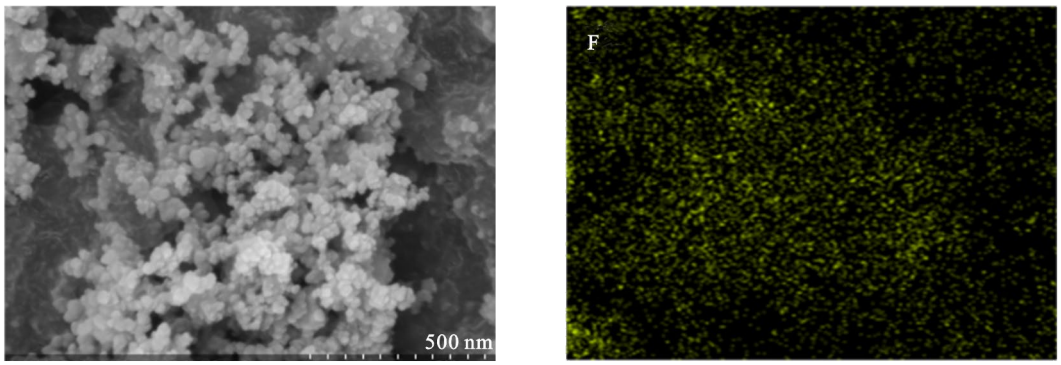
图 2(a)对比改性前后二氧化硅的元素组成。经十七氟癸基三甲氧基硅烷改性后，SiO_2@F 在 XPS 谱中多了 F 1s 峰。在红外光谱图中，与未改性的 SiO_2 相比，SiO_2@F 在 1 250 cm^{-1} 多了 CF_3 峰(图 2(b))，进一步证明改性后的 SiO_2 引入 F 元素。扫描电镜和面扫描元素分布结果证明表面改性后的 SiO_2@F 粒径约为 16~20 nm 且氟元素均匀分散于表面(图 2(c)—2(d))。

2.2　超疏水涂层形貌分析

纳米粒子含量对涂层的微纳形貌有显著影响。图 3 对比了不同 SiO_2@F 负载量对超疏水图层形貌的影响。如图 3(a)—3(f)可见，随着 SiO_2@F 纳米粒子含量增多，涂层表面粗糙度随之增加。由图 3(g) 中 PS-5 涂层的元素分布图可见，F 元素均匀分布于涂层表面。其中，F 元素负责提供低表面能特性，这是实现超疏水性的关键因素之一。氟原子间的范德华力极弱(因原子半径小且电子云稳定)，水分子难以通过范德华力吸附在含氟表面，从而显著增强了涂层表面的疏水性。



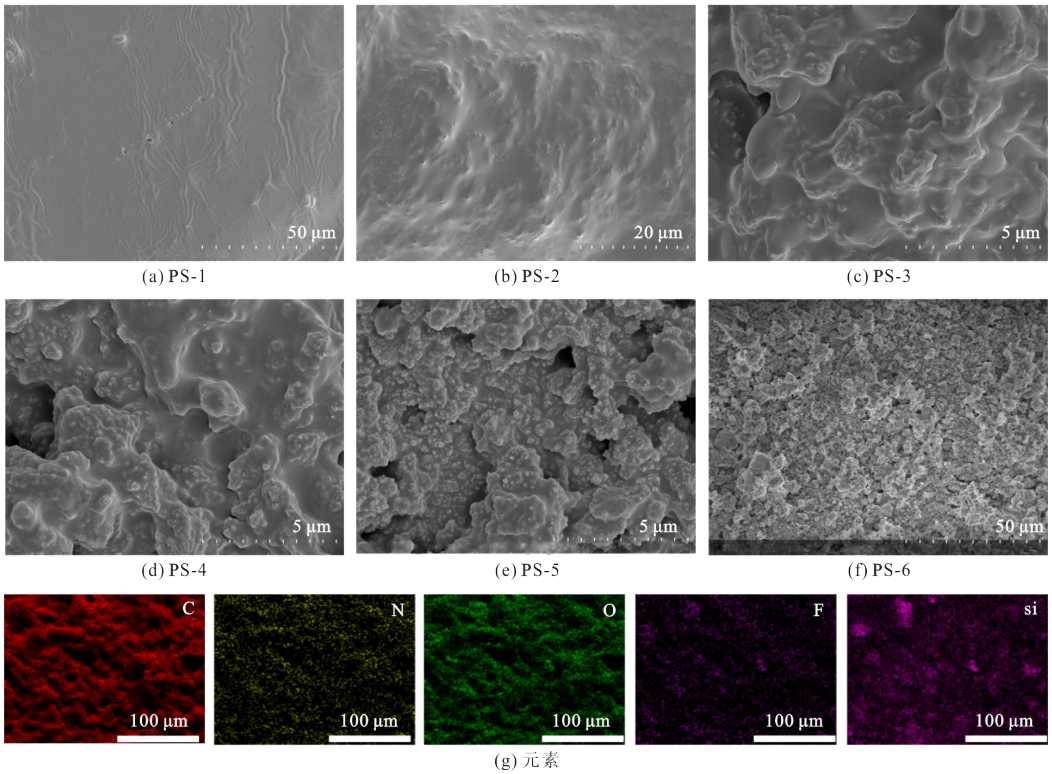
(a) X射线光电子能 (b) 红外光谱



(c) SiO_2@F电镜 (d) F元素能谱

图 2 改性前与改性后的纳米粒子表征

Fig.2 Characterization of nanoparticles before and after modification



(a) PS-1 (b) PS-2 (c) PS-3

(d) PS-4 (e) PS-5 (f) PS-6

(g) 元素

图 3 涂层的表面形貌

Fig.3 Surface morphology of the coating

2.3　超疏水涂层的润湿性分析

图 4(a)对比了不同 SiO_2@F 纳米粒子负载量下 PS 涂层的接触角和滚动角，如图 3(a)—(f)所示。随着 SiO_2@F 负载量增加，PS-5 涂层粗糙度增加。当负载量低于 3.36 g 时，SiO_2@F 纳米粒子被聚合物完全包覆，表面无纳米粒子暴露。而当负载量大于 6.73 g，SiO_2@F 纳米粒子在涂层表面富集并形成明显的微纳结构。这种由低表面能 SiO_2@F 纳米粒子构筑的微纳结构，有效降低了水与涂层表面的相互作用力，使水滴难以附着在表面。如图 4(a)所示，接触角从聚氨酯的 63.4°增加到 PS-5 的 165.1°。如图 4(a)所示，与不具备自清洁能力的铝片相比，PS-5 涂层的滚动角低至 0.6°，表明超疏水涂层显著提升了表面的憎水性能。如图 4(b)所示，通过测试水和二碘甲烷的接触角计算 Owens-Wendt-Rabel & Kaelble (OWRK)表面自由能[19-20]。结果显示，随着 SiO_2@F 负载量的增大，PS-5 涂层表面能最低至 0.23 mN/m。分子动力学模拟结果表明，涂层与水之间的库仑相互作用和范德华相互作用导致界面结合能降低，如图 4(c)—4(d)所示，在室温下由 2 778.80 kJ/mol 降至 2 603.83 kJ/mol。这主要归因于两方面：随着黏结的 SiO_2@F 纳米粒子暴露的表面积增加，涂层表面能降低；以及 TEOS 的水解与 SiO_2@F 形成的微纳结构进一步提升了超疏水特性。此外，如图 4(e)所示，PS-5 涂层表面具有抗液滴附着性，这有助于拓宽超疏水涂层在电力系统及设备上的应用范围。

实际应用中，喷涂厚度可能影响涂层性能。为探究喷涂厚度与表面润湿特性的关系，本文制备了厚度分别为 12、20 和 28 μm 的超疏水涂层，如图 5(a)所示。如图 5(b)所示，3 种厚度的 PS-5 涂层接触角均稳定在约 165°。如图 5(c)—(h)所示，通过扫描电镜观察表面形貌和截面形貌发现，PS-5 涂层的超疏水特性不受喷涂厚度影响。这主要归因于 SiO_2@F 在涂层表面富集，形成稳定的低表面能表面。扫描电镜结果显示，随着喷涂厚度增加，表面 SiO_2@F 纳米粒子形成的微纳结构增多，但接触角基本保持不变。

2.4　超疏水涂层的环境稳定性分析

聚合物涂层的应用环境对其耐久性构成严峻挑战。不同地区存在不同的恶劣条件：沙漠地区面临长期机械磨损，高海拔地区遭受强紫外线辐照，高纬度地区需耐受极端低温，而沿海地区则需应对高盐雾环境与强降雨冲刷。图 6(a)展示了 PS-5 涂层紫外老化后的接触角和滚动角性能。经过紫外老化 120 h 后，PS-5 的接触角仍大于 160°和滚动角低于 2.1°。这归因于 SiO_2@F 具有优异的紫外稳定性，其在紫外辐照下不易降解。图 6(b)展示了 PS-5 涂层

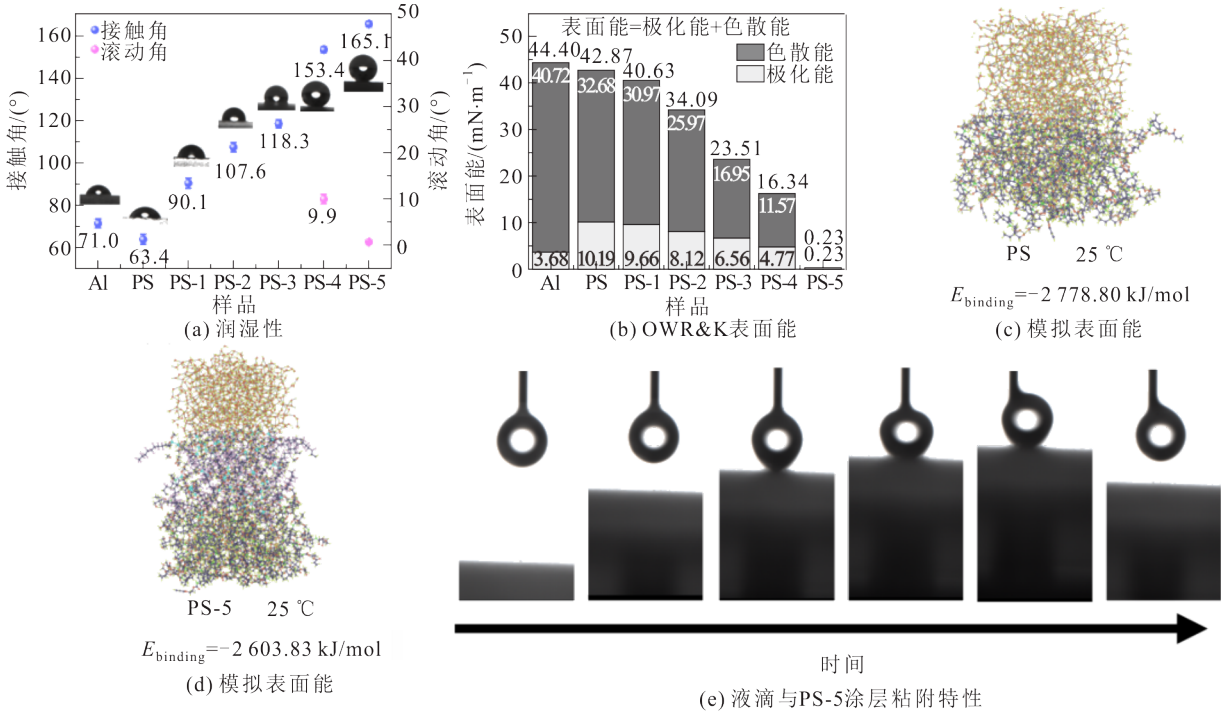
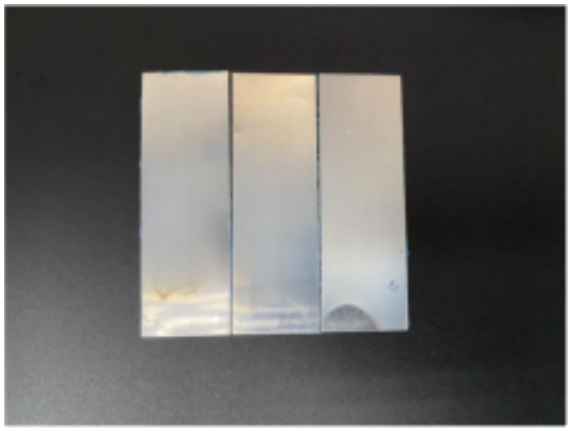
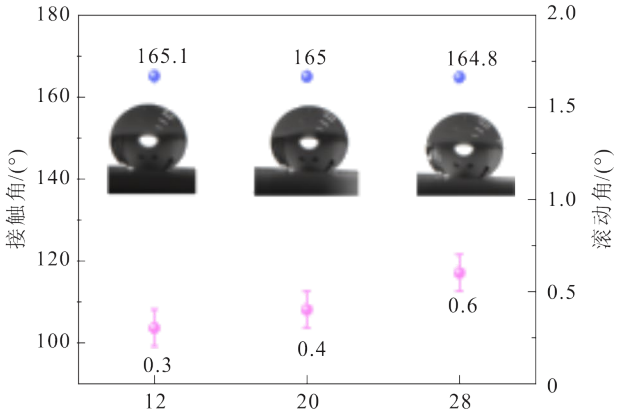


图 4　不同涂层的润湿性性能

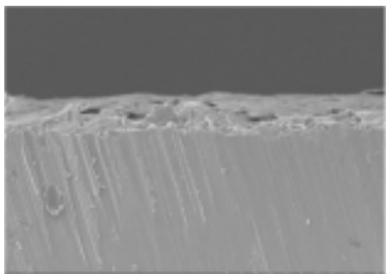
Fig.4　Wettability wetting properties of different coatings



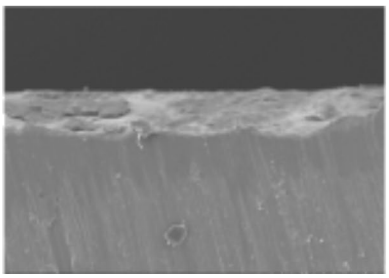
(a) 不同厚度涂层照片



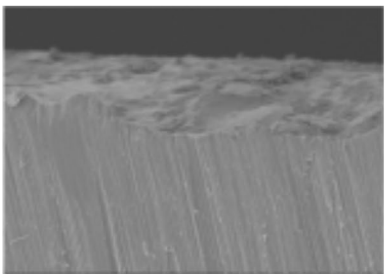
(b) 不同厚度的润湿性



(c) 12 μm扫描电镜图



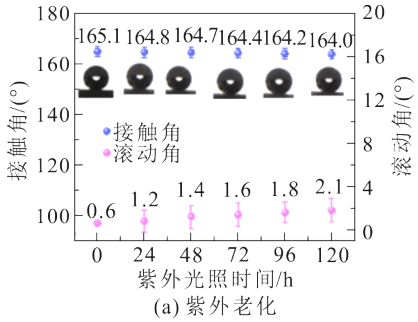
(d) 20 μm扫描电镜图



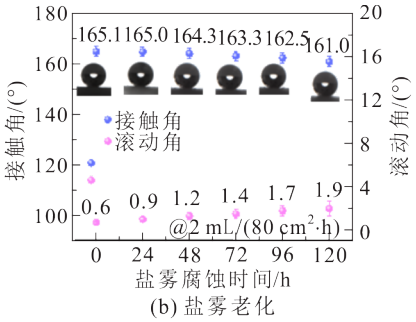
(e) 28 μm扫描电镜图

图 5 不同厚度 PS-5 涂层的润湿性性能

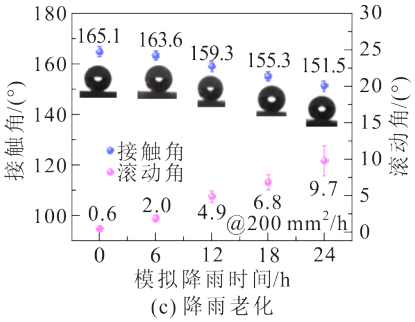
Fig.5 Wettability of PS-5 coatings with different thickness



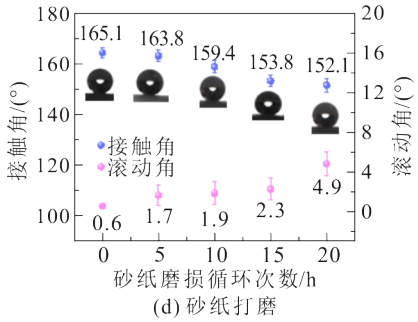
(a) 紫外老化



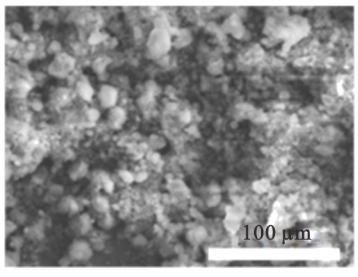
(b) 盐雾老化



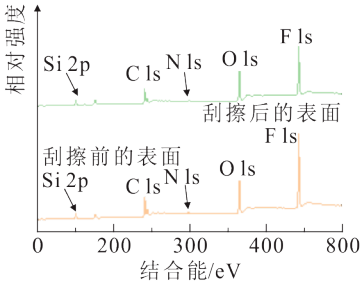
(c) 降雨老化



(d) 砂纸打磨



(e) 打磨后的扫描电镜图



(f) 砂纸打磨前后PS-5涂层的XPS

图 6 PS-5 涂层的老化性能

Fig.6 Aging properties of PS-5 coating

中性盐雾腐蚀后的接触角和滚动角性能。如图 6(b)所示，将 PS-5 暴露在 5% NaCl 溶液以 2 mL/(80 cm^2·h) 沉降量下暴露 120 h，接触角和滚动角几乎不变。随后评估了抗液滴高速撞击性能，如图 6(c)所示，将 PS-5 涂层暴露在强降雨(200 mm^2/h)下 24 h，PS-5 的接触角降至 151.5°和滚动角增至 9.7°。

这主要是在高湿度环境下，水蒸气逐渐渗入微纳结构中的气室，导致原本存在于气室内的气体被排出。这一过程使得液滴与表面的接触方式发生改变，从 Cassie 态(液滴悬浮于微纳结构之上)转变为 Wenzel 态(液滴浸润到微纳结构内部)，从而降低了表面的疏水特性[15,21]。

此外，机械耐久性是评价超疏水涂层耐久性的另一个关键性能。本研究使用 500 目砂纸往复打磨 PS-5 涂层，并在此过程中施加 2.57 kPa 恒定负载以确保磨损过程的均匀性。如图 6(d)所示，经过 20 次 500 目砂纸往复打磨后，接触角降至 152.1°。为探究 PS-5 涂层疏水性能下降的机制，通过 SEM 和 XPS 表征了 PS-5 涂层磨损后的微观形貌和化学组成。如图 6(e)—6(f)所示，SEM 图像显示表面 SiO_2@F 纳米粒子显著减少，这是由于未被高分子黏结的纳米粒子在打磨过程中脱落。如图 6(f)所示，XPS 结果进一步表明，磨损后表面 F 元素含量降低，证实氟含量减少是超疏水特性下降的主要因素。

2.5　超疏水涂层的自清洁特性和防覆冰性能分析

超疏水涂层的防覆冰特性在高纬度地区的应用备受关注。自清洁是防覆冰的首要前提，可防止因涂层表面积污后造成超疏水特性失效。值得注意的是，由于 PS-5 涂层具有低滚动角，表面滴落可以有效带走表面尘土，如图 7(a)—7(b)所示。为评估低温环境下的超疏水稳定性，对 PS-5 涂层进行 −25 ℃冻融循环试验。如图 8 所示，经 50 次循环后，接触角仍达 153.4°，证实其优异的低温耐受性[20]。为了进一步评估涂层的防覆冰性能，首先评估了液滴在涂层表面的结冰时间和冰的黏附强度。图 9(a)的结果表明，PS-5 涂层结冰时间对比纯铝片延迟约 38 倍。图 9(b)的结果表明，对比铝片，冰与 PS-5 涂层冰黏附强度下降 36.88%。本研究模拟了过冷液滴在低温环境下的冻结过程。实验结果表明，如图 9(c)的结果表明，液滴附着在玻片上导致液滴快速冻结。相比之下，PS-5 涂层上的液滴则发生反弹或滚落，有效避免了液滴在表面的冻结。这一现象归因于超疏水表面的微纳结构中的气室形成空气阻隔层，空气阻隔层延迟了液滴的非均匀成核时间。随着表面水蒸气的凝核，冷凝液滴在表面结冰，使得 PS-5 超疏水涂层失效[22]。

2.6　超疏水涂层在电力应用场景的分析

为评估 PS-5 涂层在电气设备中的应用潜力，将其喷涂于环氧树脂、硅橡胶及铝板基材表面。图

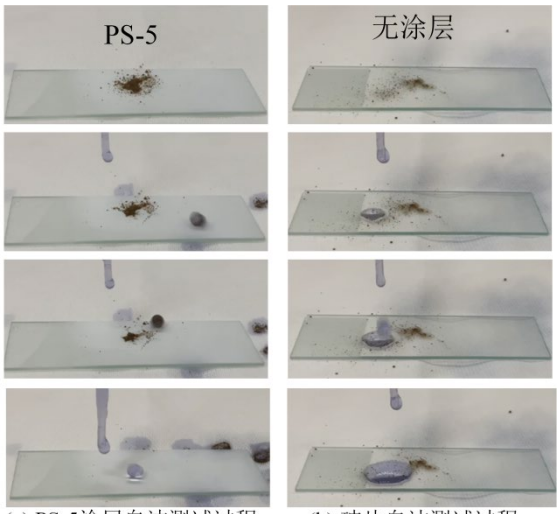


图 7　玻片与 PS-5 涂层喷涂在玻片表面的自洁测试过程

Fig.7　The self-cleaning test of glass and glass coated with PS-5 coating

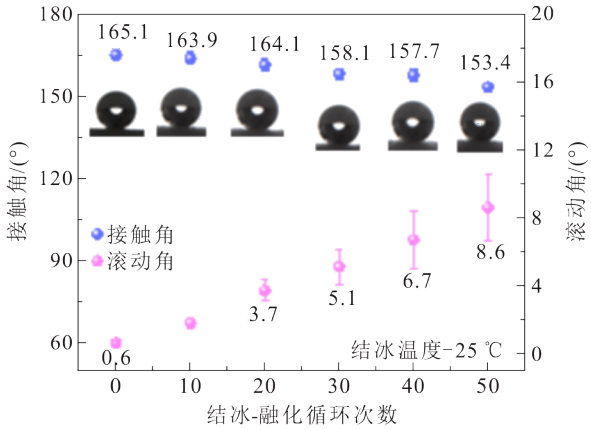


图 8　PS-5 涂层在结冰/融化循环下的疏水性能

Fig.8　Hydrophobic properties of PS-5 coatings under icing/melting cycles

10(a)结果显示，PS-5 涂层喷涂在环氧树脂、硅橡胶及铝板基材表面均有超疏水特性，接触角均超过 165.1°。为满足电气设备安全需求，涂层应具有电绝缘性能：如图 10(b)所示，PS-5 涂层的击穿场强为 78.31 MV/m 显著优于商用室温硫化硅橡胶涂层的 20.0 MV/m[23-24]。针对电工外绝缘常用基材(陶瓷、硅橡胶、玻璃及环氧树脂)，在 4 种基材表面喷涂 PS-5 超疏水涂层，并与未喷涂涂层的基材进行抗湿闪强度对比[3]，如图 10(c)所示，所有喷涂 PS-5 超疏水涂层的基材湿闪强度均高于未喷涂涂层的基材。如未喷涂涂层的环氧树脂湿闪络强度从 10.87 kV/cm 提升至表面喷涂 PS-5 涂层的 19.65 kV/cm。此现象

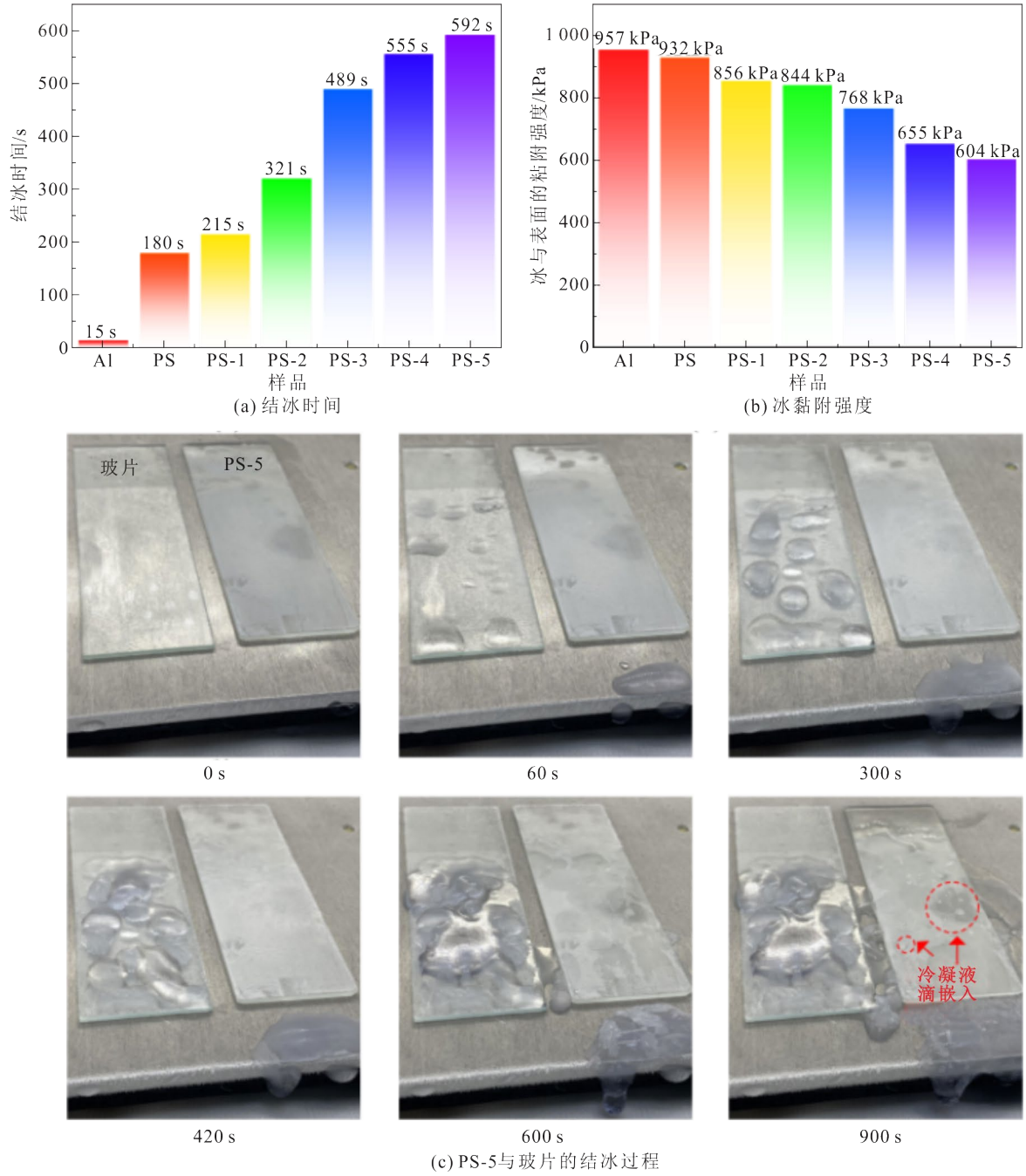


图 9 玻片与 PS-5 涂层喷涂在玻片表面的防覆冰性能

Fig.9 Anti-icing performance of glass and glass coated with PS-5 coating

归因于 PS-5 超疏水涂层表面液滴快速滚落，而液滴附着在环氧树脂表面，液滴扭曲电场分布，从而诱导闪络。

如图 10(d)所示，液滴在环氧表面的扩散行为进一步证明了液滴在环氧表面诱导闪络，液滴接触环氧树脂后牢固吸附在环氧树脂表面，而在 PS-5 涂层表面则发生弹跳。通过扩散系数(D)可量化液滴在表面扩散特性，其定义为接触面积直径(D_1)与初始液滴直径(D_0)的比值($D=D_1/D_0$)[25-27]。如图 10(e)所示，PS-5 涂层的 D 值为 1.27，显著低于纯环氧树脂的 1.58，进一步证实了该超疏水涂层可有效降低湿闪风险。

3 结论

1）通过硅酸四乙酯共水解形成非晶二氧化硅，成功将 SiO_2@F 锚定于基材表面，制备了具有高绝缘性能的超疏水涂层。其接触角高达 165.1°，滚动角低至 0.3°。并通过分子动力学证明 25 ℃时其表面能相较于纯高分子涂层下降了 6.29%。

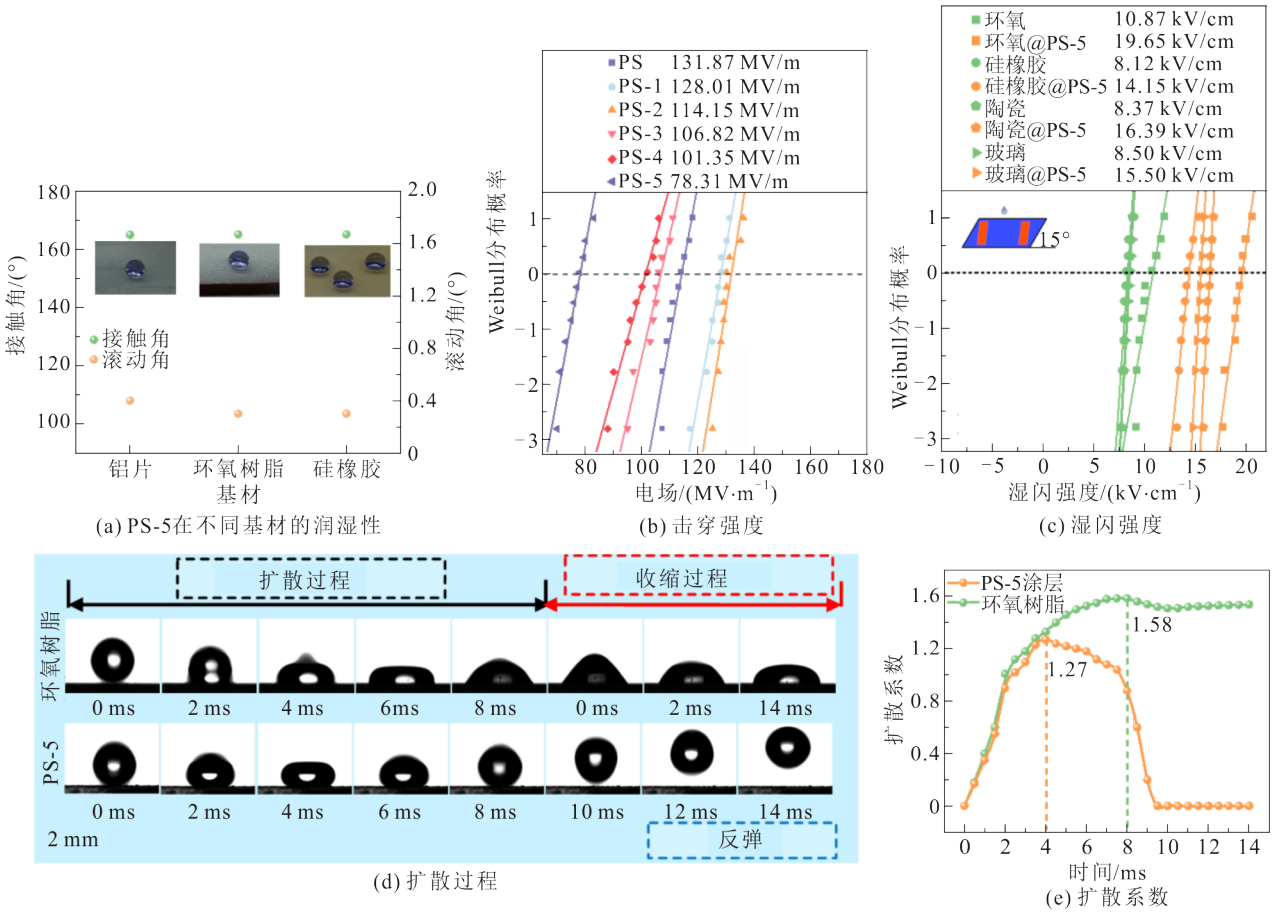


图 10　PS-5 涂层在电力应用场景的综合性能

Fig.10　Comprehensive properties of PS-5 coating in power application scenarios

2）得益于硅酸四乙酯界面增强作用，超疏水涂层展现出优异的机械耐磨性和化学稳定性。同时，在环氧树脂、硅橡胶、铝等基材表面保持超疏水特性。与铝片结冰时间 15 s 对比，涂覆 PS-5 涂层的铝片结冰时间提升至 592 s。对比铝片的冰黏附强度，PS-5 涂层的冰黏附强度下降了 36.88%。

3）与室温硫化硅橡胶相比，PS-5 超疏水涂层的击穿强度提升 2.91 倍，湿闪强度提升 42.61%。

4）提出了利用液滴扩散系数量化超疏水涂层表面液滴扩散特性和抗湿闪特性的方法。

参考文献　References

[1] FU K, LU C, LIU Y B, et al. Mechanically robust, self-healing superhydrophobic anti-icing coatings based on a novel fluorinated polyurethane synthesized by a two-step thiol click reaction[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 404: 127110.

[2] LAMBLEY H, GRAEBER G, VOGT R, et al. Freezing-induced wetting transitions on superhydrophobic surfaces[J]. Nature Physics, 2023, 19(5): 649-655.

[3] ZHU M X, SONG H G, LI J C, et al. Superhydrophobic and high-flashover-strength coating for HVDC insulating system[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 404: 126476.

[4] 胡琴，李超，舒立春，等. 凝露条件下环氧超疏水涂层工频污闪特性研究[J]. 中国电机工程学报，2024，44(14)：5787-5796.
HU Qin, LI Chao, SHU Lichun, et al. Study on power-frequency pollution flashover characteristics of epoxy superhydrophobic coating under condensation condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5787-5796.

[5] 胡玉耀，刘宗源，李欣，等. 正极性直流电场对绝缘子雾凇覆冰的影响机理及覆冰试验验证[J]. 高电压技术，2024，50(2)：822-833.
HU Yuyao, LIU Zongyuan, LI Xin, et al. Influence mechanism of positive DC electric field on rime ice accretion on the insulators and its experimental verification[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 822-833.

[6] 郭裕钧，闫向龙，黄桂灶，等. 非均匀覆冰下输电导线的脱冰跳跃动力特性[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4411-4420.
GUO Yujun, YAN Xianglong, HUANG Guizao, et al. Dynamic characteristics of transmission line conductors with non-uniform accreted ice after ice-shedding[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4411-4420.

[7] WANG R, ZHU Y J, FU J, et al. Designing tailored combinations of structural units in polymer dielectrics for high-temperature capacitive energy storage[J]. Nature Communications, 2023, 14(1): 2406.

[8] ILLARIONOV Y Y, KNOBLOCH T, JECH M, et al. Insulators for 2D nanoelectronics: the gap to bridge[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 3385.

[9] 罗康，李黎，谢雨龙，等. 具有超疏水迁移特性的超疏水防污闪材料的构筑及其性能[J]. 高电压技术，2025，51(4)：2013-2024.
LUO Kang, LI Li, Xie Yulong, et al. Construction and performance of superhydrophobic anti-pollution flashover materials with superhydrophobic migration properties[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(4): 2013-2024.

[10] RABIZADEH D S, ABBASALIZADEH M. Contradictory behavior of superhydrophobic surfaces: investigation of hydrodynamic behavior[J]. Surfaces and Interfaces, 2022, 33: 102142.

[11] XIAO Z C, ZHENG R, LIU Y J, et al. Slippery for scaling resistance in membrane distillation: a novel porous micropillared superhydrophobic surface[J]. Water Research, 2019, 155: 152-161.

[12] DONG S L, WANG Z L, WANG Y K, et al. Roll-to-roll manufacturing of robust superhydrophobic coating on metallic engineering materials[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(2): 2174-2184.

[13] 郝犇珂，陈俊武，谢毅，等. 超疏水和 RTV 涂层表面覆冰剪切强度及其影响因素的对比分析[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4227-4233.
HAO Benke, CHEN Junwu, XIE Yi, et al. Comparative analysis of the variation of icing shear strength of superhydrophobic and RTV coatings[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4227-4233.

[14] HE X Y, LI G Q, ZHANG Y B, et al. Bioinspired functional glass integrated with multiplex repellency ability from laser-patterned hexagonal texturing[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 416: 129113.

[15] 王力，胡琴，舒立春，等. 荷叶超疏水表面防覆冰试验及机理研究[J]. 电工技术学报，2025，40(3)：855-863.
WANG Li, HU Qin, SHU Lichun, et al. Experimental and mechanistic study on anti-icing of superhydrophobic surface of lotus leaf[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(3): 855-863.

[16] WU M M, SHI G G, LIU W M, et al. A universal strategy for the preparation of dual superlyophobic surfaces in oil-water systems[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(12): 14759-14767.

[17] CAI H C, XIE C Z, GOU B, et al. Durable superhydrophobic insulating coatings for prevention of wet flashover and icing in power system[J]. Applied Surface Science, 2024, 671: 160768.

[18] YANG H, ZHOU J G, XU H S, et al. Achieving ultra-high discharge energy density of dielectric polymer nanocomposites by in situ synthesis[J]. Materials Today Energy, 2022, 30: 101165.

[19] 胡琴，王欢，舒立春. 覆冰条件下风力发电机叶片防/除冰方法综述[J]. 电工技术学报，2024，39(17)：5482-5496.
HU Qin, WANG Huan, SHU Lichun. Review of anti-/de-icing methods for wind turbine blades under icing conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5482-5496.

[20] DANESHMAND H, SAZGAR A, ARAGHCHI M. Fabrication of robust and versatile superhydrophobic coating by two-step spray method: an experimental and molecular dynamics simulation study[J]. Applied Surface Science, 2021, 567: 150825.

[21] MURAKAMI D, JINNAI H, TAKAHARA A. Wetting transition from the cassie-baxter state to the Wenzel state on textured polymer surfaces[J]. Langmuir, 2014, 30(8): 2061-2067.

[22] 王晟伍，李黎，陈劲宇，等. 超疏水和超双疏涂层表面覆冰剪切强度及剥离强度对比[J]. 高电压技术，2023，48(12)：4809-4816.
WANG Shengwu, LI Li, CHEN Jinyu, et al. Comparison of icing shear strength and peel strength between superhydrophobic and superamphiphobic coatings[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4809-4816.

[23] XIAO Y H, CHEN Z Q, MAO J, et al. Self-strengthening dielectric elastomer of triblock copolymer with significantly improved electromechanical performance under low voltage[J]. Macromolecular Materials and Engineering, 2021, 306(5): 2000732.

[24] FANG H M, BAI S L, WONG C P. Thermal, mechanical and dielectric properties of flexible BN foam and BN nanosheets reinforced polymer composites for electronic packaging application[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 100: 71-80.

[25] ZENG D, LI Y, HUAN D J, et al. Robust epoxy-modified superhydrophobic coating for aircraft anti-icing systems[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 628: 127377.

[26] HAO C L, LI J, LIU Y, et al. Superhydrophobic-like tunable droplet bouncing on slippery liquid interfaces[J]. Nature Communications, 2015, 6(1): 7986.

[27] LEI Y H, JIANG B C, LIU H, et al. Mechanically robust superhydrophobic polyurethane coating for anti-icing application[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 183: 107795.



王 瑞
1996—，男，博士，副教授，硕导
主要从事高温介电储能电容器开发、电工绝缘环氧材料回收再利用及新型可回收绿色电工绝缘材料开发、智能电介质材料开发等方面的研究工作
E-mail: wangruiscut@scut.edu.cn

WANG Rui
Ph.D.
Associate professor



谢从珍(通信作者)
1973—，女，博士，教授，博导
主要从事新型高性能电工绝缘材料开发及缺陷诊断、电绝缘环氧材料回收再利用、输变电设备在线监测及大数据分析等方面的研究工作
E-mail: ccongzhen168@163.com

XIE Congzhen
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-04-18 在线出版日期 2025-09-26 编辑 曹昭君