

基于氟硅橡胶的超憎水高耐候性防污闪涂料的制备与性能研究

张益博¹, 莫千雪², 曾琦尧¹, 林子熙², 王一伟³, 徐铭申^{4,*}

1. 华北电力大学, 环境科学与工程系, 河北 保定, 071003
2. 华北电力大学, 电力工程系, 河北 保定, 071003
3. 华北电力大学, 机械工程系, 河北 保定, 071003
4. 华北电力大学, 数理系, 河北 保定, 071003

摘要: 本研究在借鉴高温硫化氟硅橡胶制备工艺和复合绝缘子表面处理技术的基础上, 通过氟化占位定向技术、超分子合金化与原位聚合法精细调控硅橡胶主链结构, 并引入功能化石墨烯及多种有机/无机填料, 成功合成了一种新型超憎水、防污闪、耐候性优异的复合涂料。配方中合理优化氧化镁、氢氧化铝、铁氧体、异丙基氨基甲基丙烯酸酯、含氟酯类、嵌段硅氧烷、膨胀石墨及阻燃助剂等组分比例, 使涂层在标准实验室条件下初始静态接触角可达 113° 以上, 喷水分级达HC1级。在连续水浸96 h、192 h及360 h等加速老化试验后, 涂层仍能保持 $\theta_{av} > 100^\circ$ 、HC1~HC3; 经24 h恢复后, 憎水性能完全恢复至HC1。污染迁移试验表明, 涂层表面污染物也能快速获得超憎水性($\theta_{av} \approx 132^\circ$, HC1)。第三方型式试验中, 十九项性能指标全部满足或优于现行标准, 自洁系数99.26%, 最小电蚀损深度仅0.06 mm。研究表明, 该涂料具备超强憎水性、优异耐候性和显著的自愈/迁移能力, 能够满足重污染区复合外绝缘长期防污闪的应用需求。

关键词: 氟化占位定向技术; 超憎水性; 污染迁移; 复合填料设计; 耐候性

Research on Fabrication and Performance of a Fluorosilicone Rubber-Based Superhydrophobic Coating with High Weatherability for Anti-Pollution-Flashover Applications

Yibo Zhang¹, Qianxue Mo², Qiyao Zeng¹, Yuxi Lin², Yiwei Wang³, Mingshen Xu^{4,*}

1. North China Electric Power University, Department of Environmental Science And Engineering, Baoding, Hebei, China, 071003
2. North China Electric Power University, Department of Electrical Engineering, Baoding, Hebei, China, 071003
3. North China Electric Power University, Department of Mechanical Engineering, Baoding, Hebei, China, 071003
4. North China Electric Power University, Department of Mathematics And Physics, Baoding, Hebei, China, 071003

Abstract: Based on established high-temperature vulcanized fluorosilicone rubber manufacturing processes and composite insulator surface treatment technologies, this study successfully synthesized a novel composite coating with

superhydrophobicity, pollution flashover resistance, and outstanding weatherability. This was achieved through precise modulation of the silicone rubber main chain structure using fluorination site-directed techniques, supramolecular alloying, and in-situ polymerization methods, combined with the incorporation of functionalized graphene and diverse organic/inorganic fillers. Through optimized ratio control of magnesium oxide, aluminum hydroxide, ferrite, isopropyl aminomethyl methacrylate, fluorinated esters, block siloxanes, expanded graphite, and flame-retardant additives in the formulation, the coating achieves an initial static contact angle exceeding 113° and a hydrophobicity classification (HC) of HC1 under standard laboratory conditions. After accelerated aging tests involving continuous water immersion for 96 h, 192 h, and 360 h, the coating maintained an average contact angle (θ_{av}) $> 100^\circ$ and an HC rating between HC1 to HC3. Following a 24-hour recovery period, its hydrophobicity fully restored to HC1. Pollution migration tests demonstrated that contaminants on the coating surface rapidly acquire superhydrophobicity ($\theta_{av} \approx 132^\circ$, HC1). In third-party Type Tests, all 19 performance metrics met or exceeded current standards, with a self-cleaning coefficient of 99.26% and a minimum electrical erosion depth of only 0.06 mm. The results confirm that this coating possesses exceptional hydrophobicity, superior weather resistance, and significant self-recovery/pollution migration capabilities, making it suitable for long-term pollution flashover prevention on composite external insulation in heavily contaminated areas.

Keywords: Fluorination site-directed technique; Superhydrophobicity; Pollution migration; Composite filler design; Weatherability

自 20 世纪 80 年代我国首次将室温硫化硅橡胶 (RTV) 喷涂于瓷、玻璃绝缘子表面以来, 这种涂层凭借固有的憎水性与憎水迁移性显著抑制了潮湿、污秽环境下的泄漏电流和污闪事故^[1]。随后, 研究者通过调控二氧化硅填料含量、粒径及交联体系, 对涂层的憎水恢复、耐电蚀和自洁性能进行了系统优化, 为性能提升奠定了配方基础^[2]。然而, 运行实践表明, 在高湿、重污及风沙交互等复杂环境下, 传统 RTV 涂层易形成“软基体-硬污染”复合层, 导致憎水衰减加速, 实际服役寿命往往不足 8 年, 并且复涂成本高昂。

进入 21 世纪, 超疏水/自清洁理念被引入防污闪领域, 通过构筑微纳双尺度粗糙结构并引入低表面能基团, 使涂层接触角大于 150° 、滚动角小于 5° , 显著降低干湿复合污染的附着力^[3]。采用双喷涂法制备的 F-SiO₂@PDMS 复合涂层在实验室条件下将闪络电压提升至基材的两倍以上^[4]; 利用 FAS-17 改性纳米 SiO₂ 的喷涂体系将接触角提升至 159.2° 、滑动角降至 1.3° , 并在重污试验中保持优异绝缘特性^[5]。同时, 基于氟硅树脂与疏水 SiO₂ 纳米颗粒原位复合固化的一步喷涂工艺, 实现了室温固化、强附着和超疏水三重特性兼顾, 显著提高了现场施工可行性^[6]。

针对盐雾、高湿并存的极端工况, 研究进一步证实氟硅橡胶可以显著提升复合绝缘子的闪络电压, 并抑制表面干带放电的发展^[7]。欧美学者通过盐雾-放电交替试验揭示, RTV 表层不饱和和低分子链段的迁移与氧化固化循环是憎水性暂失与自愈的主导机制^[8-9], 为材料微观改性和寿命评估提供了理论基础。但现场反馈仍暴露出机械强度不足、长期电蚀损耗快及施工窗口窄等工程痛点^[10]。因此, 迫切需要研究和开发具备超憎水性及优异耐候性的防污闪涂料, 以满足重污染区复合外绝缘的长期防污闪需求。本团队研发的新型材料, 已完成多次第三方型式试验 (共计 19 项指标) 验证了涂料的可靠性: 所有性能均满足或优于现行标准, 自洁系数达 99.26%, TMA2.5 电蚀损深度仅 0.06mm ($<<$

标准限值 2.5mm)，表明其在机械强度、电气耐久性及抗老化方面具备工程应用优势。

1 新型防污闪涂料制备技术研究

1.1 新型防污闪涂料制备

相对于硅橡胶，氟硅橡胶在憎水性能、耐候性等方面具有明显的优势，虽然华北电科院、河北硅谷化工有限公司等将其应用于现有防污闪涂料中，但是由于传统 RTV-II 质量不稳定，造成“涂层开裂、起皮、附着力差、憎水性下降、粉化、积污严重”等问题的发生。因此，在借鉴高温氟硅橡胶制备工艺的基础上，通过优化各类填料工艺，研制了新型超憎水性防污闪涂料。

1.1.1 氟元素定向替代技术

根据对氟硅橡胶复合绝缘子制备技术的研究结果，现有防污闪涂料配方进行优化提升的方法，主要也是采用氟化占位定向技术、超分子合金技术和原位聚合法。通过氟化占位定向技术，以 F 元素定向替代 -OH、-CH₃ 和 H 元素，在硅橡胶材料中形成超强憎水性能官能团（Si-F 键），Si-F 键中 F 原子电负性（3.98）远大于 Si（1.90），导致 Si-F 键电子云高度偏向 F 原子（极性键矩达 1.08 D）。硅原子呈强 δ^+ 状态，排斥水分子中带 δ^+ 的 H 原子，使水分子无法稳定吸附（接触角 $\theta > 110^\circ$ ），提高憎水性能；耐候性官能团（C-F 键）：C-F 键 HOMO 能级（-12.3 eV）低于 C-H 键（-10.5 eV），抑制光氧化反应。F 原子通过 p- π 共轭效应稳定相邻自由基（如 $\cdot\text{CH}_2 \rightarrow \cdot\text{CF}_2$ ），使自由基半衰期从 10^{-6} s 延长至 10^{-3} s，阻断氧化链式反应，减弱氧化的影响。-OH 基团可与水形成氢键（键能 ~20 kJ/mol），而 -F 仅产生弱范德华力（<5 kJ/mol）。取代后表面水吸附热降低 75%。F 原子的高电负性吸引电解质阳离子（如 Na⁺），在表面形成 Stern 层压缩（厚度 <1 nm），抑制电润湿现象（湿润电压提升至 >8 kV/cm）。抑制自由基和抗离子化官能团（-F 基团替代 -OH 基团）；通过超分子合金技术和原位聚合法，使无机填料以粒子形成存在，与生胶的分散程度达到最大。

1.1.2 有机材料保护膜原理

通过 2-(异丙基氨基)甲基丙烯酸乙酯与含氟的对羟基苯甲酸酯的复配，在绝缘子的表面形成三维结构的氟保护膜，含氟对羟基苯甲酸酯中的氟碳链（C-F 键）在交联网络中定向排列，通过阻断液体介质渗透路径和电荷载流子侵入绝缘子，避免电解质在绝缘体表面形成导电路径，达到持久防护的效果。同时当表面有污染物时，甲基丙烯酸酯柔性链构成的三维自由体积网络使得涂料中的憎水物质能够快速、通畅的迁移至绝缘子表面的污染物中，破坏水膜连续性并阻断泄漏电流累积，使污染物也具有良好的憎水性，从而大幅度提高绝缘子的耐污闪性能和陡坡前冲击电压性能。

1.1.3 石墨烯片层掺杂的效果研究

石墨烯与有机涂料的相容性是其发挥优异性能的基础，因此，石墨烯的功能化处理是其应用的前提。项目组采用高效的萘基反应型石墨烯分散剂对石墨烯粉体进行处理，优化工艺，获得了能在水和多种有机溶剂体系分散的功能化石墨烯。对石墨烯的功能化处理是基于原位聚合技术。



图1 石墨烯功能化处理工艺路线示意图

Fig. 1 Schematic Diagram of Graphene Functionalization Process Route

石墨烯是二维的纳米片层材料，比表面积较大，很容易团聚，导致其性能降低。因此，石墨烯的功能化处理是其应用的前提。将石墨烯与去离子水或有机溶剂混合，加入分散剂，在 5000 rpm 高速搅拌 30 分钟，随后在 40 kHz 下超声处理 60 分钟，石墨烯纳米片层均匀、稳定、剥离分散到溶剂中去。然后经反复洗涤、抽滤、真空干燥，得功能化处理的石墨烯材料。项目组通过分散剂的选择，最终获得了能在去离子水和多种有机溶剂中能稳定分散的石墨烯材料，石墨烯分散浓度可高达 10 mg/ml，稳定分散长达 1 年之久。原子力显微镜结果显示如图 123 所示，经功能化处理后，石墨烯纳米片层能均匀分散在溶剂中，团聚情况减弱。



图 2 功能化石墨烯在水和多种有机溶剂中的分散

Fig. 2 Dispersion of functionalized graphene in water and various organic solvents

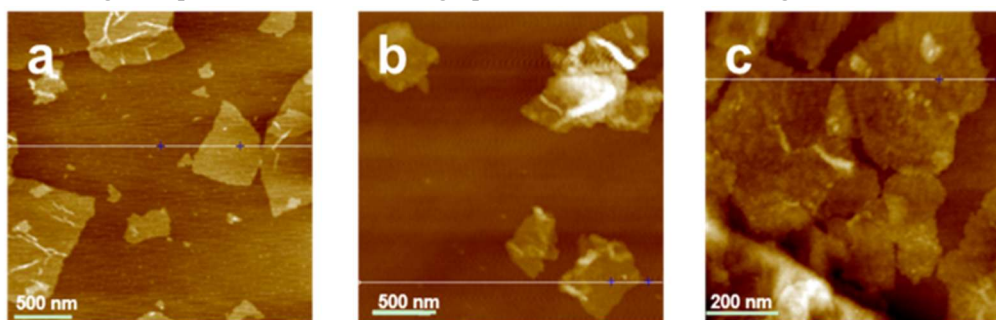


图 3 不同功能化处理后的石墨烯纳米片层的原子力显微镜照片

Fig. 3 Atomic force microscopy (AFM) images of graphene nanosheets subjected to different functionalization treatments

石墨与十溴二苯乙烷起到阻燃和导热的作用，一旦发生受热膨胀，“鳞片”状炭体体积增大数百倍，变成“蠕虫”状炭体，生成的膨胀物具有较好的稳定性，覆盖在基材表面，起到稳定隔热的作用。

1.1.4 材料制备配比总结

2-(异丙基氨基)甲基丙烯酸乙酯、含氟的对羟基苯甲酸酯、含嵌段甲基基的聚二甲基羟基硅氧烷、含硼的聚二甲基硅氧烷、双丙酮丙烯酰胺、草酸二酰肼联用可以提高污闪电压、耐漏电起痕及电饰性高的效果。

通过上述分析，可以得到新型防污闪涂料的配方。包括氧化镁 10~15 份、氢氧化铝 8~12 份、四氧化三铁 3~5 份、2-(异丙基氨基)甲基丙烯酸乙酯 2~8 份、含氟的对羟基苯甲酸酯 3050 份、有机硅 20~25 份、含嵌段甲基基的聚二甲基羟基硅氧烷 10~15 份、含硼的聚二甲基硅氧烷 5~8 份、膨胀石墨 3~5 份、十溴二苯乙烷 8~10 份、聚氨酯 PPA5~10 份、双丙酮丙烯酰胺 10~15 份、草酸二酰肼 2~8 份、辛酸亚锡 1~3 份、石油醚 80~200 份、乙二醇 2~8 份、超疏水粉体 1~8 份。其中超疏水粉体制备方法与高温硫化氟硅橡胶中制备方法一致。对氟化占比等进行优化可以研制出适用于重污秽、强紫

外、高湿等各类环境下的系列产品。

2 新型防污闪涂料性能测试

2.1 憎水性验证实验

2.1.1 初始憎水性

在标准实验室条件下（25±2℃，RH40%~70%，下同），5 个试样分别用静态接触角法（CA 法）和喷水分级法(HC 法) (HC 为憎水等级，HC1 是中国国家标准 GB/T 36585-2018 中定义的憎水性最高等级，材料浸水试验吸水率 ≤10% 或透水量 ≤0.1 kg/m²。)测量憎水性能(表中 θav 是英文 average (平均) 的缩写。指特定时间段内平均温度)。

表 1 新型防污闪涂料制备的涂层初始憎水性
Table 1 Initial hydrophobicity of coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

试验编号	静态接触角 θ 实测值 (°)						HC 值
	水珠1	水珠 2	水珠 3	水珠 4	水珠 5	θav	
No.P-30	113.45	110.22	108.56	112.90	118.30		HC1
No.P-31	108.02	116.31	115.18	110.02	109.78	113.17	HC1
No.P-32	119.09	114.03	113.09	113.58	115.06		HC1
No.P-33	—	—	—	—	—	—	HC1
No.P-34	—	—	—	—	—	—	HC1

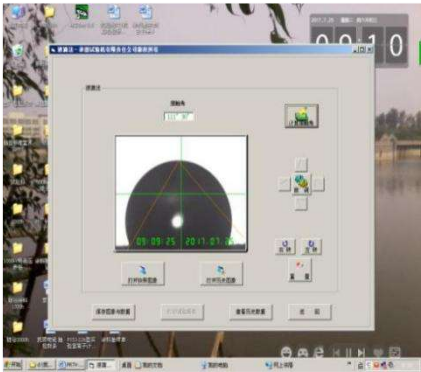


图 4 新型防污闪涂料制备的涂层初始静态接触角

Fig. 4 Initial static contact angle of coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

2.1.2 憎水性的减弱特性试验

将待测清洁试片放入盛有蒸馏水的容器中浸泡 96h，96h 后取出用滤纸吸掉表面的水分，测量其中 3 个试样的静态接触角 θ 和 HC 值，剩余 2 个仅测量 HC 值。该试件继续浸入蒸馏水容器中再次进行 96h（共计 192h）的持续减弱性试验，试验结束取出用滤纸吸掉表面的水分，测量其中 3 个试样的静态接触角 θ 和 HC 值，剩余 2 个仅测量 HC 值。

表 2 新型防污闪涂料制备涂层憎水性的减弱特性（96h）试验

Table 2 Hydrophobicity decline characteristics test (96h) for coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

试品编号	静态接触角 θ 实测值 (°)						HC 值
	水珠 1	水珠 2	水珠 3	水珠 4	水珠 5	θ_{av}	
No.P-35	112.00	107.60	114.48	114.48	110.12		HC1
No.P-36	110.18	111.24	114.60	112.00	111.48	112.12	HC1
No.P-37	110.00	114.00	112.00	115.12	112.54		HC1
No.P-38	—	—	—	—	—	—	HC1
No.P-39	—	—	—	—	—	—	HC1



图 5 新型防污闪涂料制备涂层憎水性减弱 96h 的静态接触角

Fig. 5 Static contact angle after 96h hydrophobicity decline for coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

表 3 新型防污闪涂料制备涂层憎水性的减弱特性（192h）试验

Table 3 Hydrophobicity decline characteristics test (192h) for coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

试品编号	静态接触角 θ 实测值 (°)						HC 值
	水珠 1	水珠 2	水珠 3	水珠 4	水珠 5	θ_{av}	
No.R-35	108.56	104.26	103.04	107.05	105.05		HC2
No.R-36	108.00	107.05	108.30	108.64	106.07	104.80	HC1
No.R-37	102.65	102.48	100.48	100.12	100.23		HC2
No.R-38	—	—	—	—	—	—	HC1
No.R-39	—	—	—	—	—	—	HC2



图 6 新型防污闪涂料制备涂层憎水性减弱 192h 的静态接触角

Fig. 6 Static contact angle after 192h hydrophobicity decline for coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

为进一步验证涂料的憎水减弱特性，将样品在去离子水中持续浸泡，当浸泡时间为 360h 时，涂层憎水性能仍为 HC2~HC3 左右，未完全丧失，由于现有高温硫化硅橡胶（2.1 节中高温硫化硅橡胶在去离子水中浸泡 360h 即完全丧失憎水性）。

2.1.3 憎水性的恢复试验

将憎水性减弱特性试验后的试样在标准实验室条件下静置 24h（标准规定 48h 内），然后任选 3 个试样顺序测量其静态接触角 θ 和 HC 值，其余 2 个试样仅测 HC 值。

试品编号	静态接触角 θ 实测值 (°)						HC 值
	水珠 1	水珠 2	水珠 3	水珠 4	水珠 5	θ_{av}	
No.P-39	114.12	115.30	112.24	112.08	114.30	113.19	HC1
No.P-40	110.36	114.34	112.12	112.36	113.42		HC1
No.P-41	112.54	112.24	111.48	114.79	116.16		HC1
No.P-42	—	—	—	—	—		HC1
No.P-43	—	—	—	—	—		HC1
憎水性恢复时间						$\leq 24h$	



图 7 新型防污闪涂料制备涂层憎水性恢复的静态接触角

Fig. 7 Static contact angle after hydrophobicity recovery for coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

2.1.4 憎水性的迁移特性试验

将待测涂料制成的 5 个试片按盐密 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 、灰密 $0.5\text{mg}/\text{cm}^2$ 进行染污，迁移 96h 后测量其中 3 个试样的静态接触角 θ 和 HC 值，其余 2 个仅测量 HC 值。

表 5 新型防污闪涂料制备涂层憎水性的迁移特性试验

Table 5 Hydrophobicity transfer characteristics test for coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

试品编号	静态接触角 θ 实测值 (°)						HC 值
	水珠 1	水珠 2	水珠 3	水珠 4	水珠 5	θ_{av}	
No.P-44	132.40	135.10	129.80	135.42	131.50		HC1
No.P-45	125.30	134.90	132.60	134.10	131.60	132.35	HC1
No.P-46	132.50	134.40	130.90	134.10	130.70		HC1
No.P-47	—	—	—	—	—	—	HC1
No.P-48	—	—	—	—	—	—	HC1

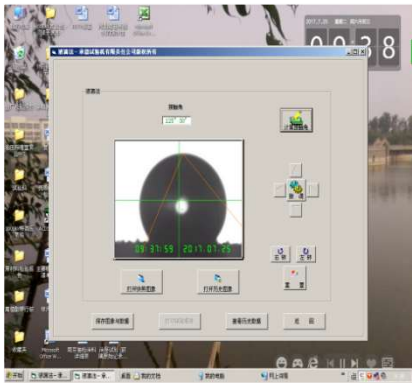


图 8 新型防污闪涂料制备涂层憎水性迁移的静态接触角

Fig. 8 Static contact angle after hydrophobicity transfer for coatings prepared with novel anti-pollution flashover coatings

2.2 第三方测试

将材料送至电力工业电力设备及仪表质量检验测试中心进行型式试验，19 项试验全部满足现有标准要求，憎水性能、憎水迁移性能、憎水恢复性能、憎水减弱特性均达到 HC1 级，自洁系数达到 99.26%，TMA2.5 电蚀损最小深度仅为 0.06mm，远小于标准的 2.5mm。

3 结论

本研究通过分子结构精准调控与复合填料协同优化，在以下三个方面进行取得突破，成功研制出一种基于氟硅橡胶的超憎水、高耐候性防污闪涂料，为解决重污染地区复合外绝缘长期防污闪难题提供了创新性解决方案。采用氟化占位定向技术实现硅橡胶主链官能团的精准替代（Si-F、C-F 键构建），结合超分子合金化与原位聚合法优化填料分散性，显著提升了涂层的固有憎水性（初始接触角 $>113^\circ$ ，HC1 级）与化学稳定性。功能化石墨烯的片层掺杂（分散浓度达 $10\text{mg}/\text{ml}$ ，稳定性 >1 年）进一步强化了涂层的导热性与阻燃效果。涂层在加速老化试验中展现出超强耐候性：连续水浸

360h 后仍维持接触角 $>100^\circ$ (HC2~HC3 级), 远超传统硅橡胶 (360h 即丧失憎水性); 经 24h 恢复后憎水性完全回归 HC1 级, 证明其具备快速自愈能力。这种特性源于三维氟保护膜结构对水/污染物渗透的有效阻隔及小分子憎水物质的定向迁移机制。染污试验 (盐密 $0.1\text{mg}/\text{cm}^2$ 、灰密 $0.5\text{mg}/\text{cm}^2$) 证实, 涂层表面污染物在 96h 内快速获得超憎水性 ($\theta_{\text{av}}\approx 132^\circ$, HC1 级)。该现象归因于 2-(异丙基氨基)甲基丙烯酸乙酯与含氟酯类复配形成的动态迁移网络, 显著提升了污秽条件下的闪络抑制能力。

综上, 本研究通过“分子设计-填料协同-结构优化”三位一体的策略, 突破了传统防污闪涂料在长期憎水性维持、耐候性及污染迁移能力方面的瓶颈。该涂料可广泛应用于高湿、强紫外、重污染区域的输变电设备外绝缘防护, 为电网安全运行提供长效保障。

附录:

第三方检验的十九项性能指标:

一、电气性能试验 (5 项)

- 1.工频耐受电压试验: 验证绝缘子在额定电压下的耐压能力。
- 2.雷电冲击耐受电压试验: 模拟雷电冲击下的绝缘性能。
- 3.操作冲击耐受电压试验: 验证系统操作过电压下的绝缘可靠性。
- 4.陡波前冲击耐受电压试验: 考核绝缘子对陡波冲击的耐受能力。
- 5.无线电干扰试验: 评估绝缘子表面电晕放电产生的无线电干扰水平。

二、机械性能试验 (6 项)

- 1.拉伸负荷试验: 验证绝缘子在最大设计拉力下的机械强度 (如耐张串需通过 160kN 拉力测试)。
- 2.弯曲负荷试验: 验证绝缘子抗弯曲能力 (尤其针对耐张串应用)。
- 3.扭转负荷试验: 验证绝缘子安装或运行中的扭转应力。
- 4.机械破坏负荷试验: 确定绝缘子的极限机械承载能力。
- 5.悬垂复合绝缘子抗拉性能试验: 针对悬垂串的专项机械强度验证。
- 6.长期机械负荷试验 (如适用): 考核长期运行中的机械稳定性。

三、环境适应性试验 (5 项)

- 1.热机试验 (冷热循环试验): 模拟高低温交替环境下的材料稳定性。
- 2.温度循环试验: 验证绝缘子在温度剧烈变化下的性能。
- 3.紫外线老化试验: 考核硅橡胶材料在紫外辐射下的耐老化能力。
- 4.湿热试验: 模拟高湿度环境下的绝缘性能。
- 5.盐雾试验 (或人工污秽试验): 评估绝缘子在盐雾或污秽环境下的耐受性。

四、憎水性及防污闪性能试验 (3 项)

- 1.憎水性迁移试验: 验证硅橡胶表面憎水性的自我恢复能力 (如 HC 值变化)。
- 2.憎水性丧失试验: 考核长期运行后憎水性保持能力。
- 3.人工污秽耐受试验 (如爬电比距验证): 模拟污秽条件下绝缘子的闪络电压。

参考文献:

- [1] 高海峰, 贾志东, 关志成, 朱可能. 运行多年 RTV 涂料绝缘子防污性能的研究[J]. 中国电力, 2004, 37(12): 22-26.

- [2] 杨翠茹, 贾志东. 基于斜面法试验研究 SiO₂ 质量分数对 RTV 硅橡胶涂料性能的影响[J]. 广东电力, 2010, 23(9): 27-31.
- [3] Liu S, Qian W, Li Y, et al. Superhydrophobic RTV silicone rubber insulator coatings with micro/nano hierarchical structures[J]. Applied Surface Science, 2012, 258(7): 2972-2976.
- [4] Shen Y, Li K, Zhang L, et al. Superhydrophobic F-SiO₂@PDMS composite coatings prepared by a two-step spraying method for interface erosion mechanism and anti-corrosive applications[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 413: 127455.
- [5] Li C, Dou P, Zhao R, et al. Preparation and super-hydrophobic mechanism analysis of FAS-17-modified SiO₂/PDMS coatings for high-voltage composite insulators[J]. Coatings, 2023, 13(3): 563.
- [6] Wang X, Li X, Lei Q, et al. Fabrication of superhydrophobic composite coating based on fluorosilicone resin and silica nanoparticles[J]. Royal Society Open Science, 2018, 5(7): 180598.
- [7] Liu J, Wang H, Sun C, et al. Study on flashover characteristics of fluorosilicone rubber insulators under high humidity and pollution conditions[C]//Proceedings of the 2nd Asia Power and Electrical Technology Conference (APET 2023). IEEE, 2023: 1-6.
- [8] Kim S H, Cherney E A, Hackam R. The loss and recovery of hydrophobicity of RTV silicone rubber insulator coatings[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(3): 1491-1500.
- [9] Wankowicz J G, Gubanski S M, Lampe W D. Loss and recovery of hydrophobicity on RTV coating surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(4): 604-614.
- [10] Cherney E A. RTV silicone—A high-tech solution for a dirty insulator problem[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1995, 11(6): 22-29.

基金项目: 本研究受华北电力大学创新创业训练项目(X2025153X), 河北省大学生创新创业训练项目(S202510079199) 支持。

¹ **第1作者:** 张益博(2004-), 华北电力大学环境科学与工程系, 研究方向: 新型复合绝缘材料。
Email: 2897087862@qq.com。

*** 通讯作者:** 徐铭申(2004-), 华北电力大学数理系, 研究方向: 深度学习。E-mail: 220221100326@ncepu.edu.cn。