

# 凝露液滴在超疏水涂层表面的形貌演化及对沿面放电特性的影响研究

刘会家<sup>1,2</sup>, 王少奇<sup>1,2</sup>, 吴田<sup>1,2</sup>, 吴健<sup>3</sup>, 朱伟<sup>4</sup>, 陈攀峰<sup>4</sup>

(1. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;  
3. 浙江泰仑电力集团有限责任公司, 浙江 湖州 313000; 4. 国网浙江省湖州供电有限公司, 浙江 湖州 313000)

**摘要:** 在高湿度大温差条件下室内开关设备内部构件表面极易出现凝露, 危害设备的安全稳定运行。为解决电场下开关设备表面凝露液滴形貌演化对其沿面绝缘性能的影响, 以环氧树脂板为基底利用喷涂法制备了超疏水和普通硬质疏水涂层, 搭建了人工凝露试验箱对不同凝露时间下超疏水、普通硬质疏水及无涂层表面进行了闪络试验, 观测了3种试品表面的凝露状态、交流场下的闪络特性及液滴的动态行为。利用基于图像的边缘检测方法对电场作用下3种试品表面的凝露形貌演变过程进行了统计分析。结果表明: 随着凝露时间增加, 超疏水表面液滴呈球状分布, 体积逐渐增大, 且始终小于其他2种试品; 超疏水表面放电过程稳定, 闪络后其表面没有明显烧蚀痕迹; 超疏水表面液滴出现滚动合并和电致伸缩行为, 方向与外施电场基本一致; 加压过程中超疏水表面液滴覆盖率始终为三者最低, 从16.95%下降至5.17%, 且闪络前液滴平均尺寸 $<1\text{ mm}^2$ , 远低于其他2种试品。

**关键词:** 开关设备; 超疏水涂层; 凝露状态; 闪络特性; 动态行为; 形貌演化

## Study on the Morphology Evolution of Condensation Droplet on Superhydrophobic Coating Surface and Its Influence on Surface Discharge

LIU Huijia<sup>1,2</sup>, WANG Shaoqi<sup>1,2</sup>, WU Tian<sup>1,2</sup>, WU Jian<sup>3</sup>, ZHU Wei<sup>4</sup>, CHEN Panfeng<sup>4</sup>

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Zhejiang Tailun Electric Power Group Co., Ltd., Zhejiang Huzhou 313000, China; 4. State Grid Zhejiang Huzhou County Power Supply Co., Ltd., Zhejiang Huzhou 313000, China)

**Abstract:** Under the condition of high humidity and large temperature difference, the surface of internal components of indoor switchgear is easy to condensation, which endangers the safe and stable operation of the equipment. In order to solve the effect of surface condensation droplet morphology evolution on the surface insulation performance of switchgear under electric field, superhydrophobic and ordinary rigid hydrophobic coatings were prepared by spraying method on epoxy resin plate as the base, and an artificial condensation test chamber was built to conduct flashover tests on superhydrophobic, ordinary rigid hydrophobic and uncoated surfaces under different condensation time. The condensation state of the surface, the flashover characteristics and the dynamic behavior of the droplet in the AC field were observed. An image-based edge detection method was used to make a statistical analysis of the evolution process of the condensation morphology of three samples under the action of electric field. The results show that with the increase of condensation time, the droplets on the superhydrophobic surface are spherically distributed and their volume increases gradually, and they are always smaller than the other two samples. The discharge process of the superhydrophobic surface is stable, and there is no obvious ablative trace on the surface after flashover. The droplet on the superhydrophobic surface shows rolling merging and electrostriction behavior, and the movement direction is basically consistent with the applied electric field. In the process of voltage increase, the droplet coverage on the superhydrophobic surface is always the lowest, which decreases from 16.95% to 5.17%, and the average droplet size before flashover is  $<1\text{ mm}^2$ , which is much lower than the other two samples.

**Key words:** high voltage switchgear; superhydrophobic coatings; Condensation condition; flashover performance; dynamic behavior; morphology evolution

## 0 引言

在社会经济迈入高质量发展的新阶段，电力系统的供电质量、安全性与可靠性已成为关注的焦点<sup>[1-4]</sup>。配电网中的开关设备绝缘水平较低且常在恶劣环境中运行，绝缘性能的优劣成为决定其能否安全稳定运作的关键因素之一。当前，开关设备的结构设计趋向于紧凑化，导致内部绝缘间隙减小，从而降低了绝缘裕度。在长期经历极端温差和高湿度环境的条件下，设备内部构件表面易于形成凝结水，进而引发电气设备的腐蚀和绝缘性能退化，对配电系统的安全稳定运行构成威胁<sup>[5-8]</sup>。目前，主要通过加热或除湿设备来降低设备内部湿度，以达到防止凝结水的目的<sup>[9-11]</sup>。然而，这些方法可能导致显著的电能损耗，与低碳电力系统的建设目标相悖。因此，开发一种既可靠又环保的防凝结水技术，成为电力行业亟待解决的问题。目前，文[12]提出在金属表面涂覆硅胶干燥剂的方法，通过试验验证了涂覆硅胶涂层可以有效延缓凝露时间。但在长时间高湿天气，涂层容易老化失效，需频繁更换，导致经济成本大幅提升。文[13]在电力设备构件表面涂覆硬质疏水涂层在一定程度上提升了构件表面的绝缘强度，但普通硬质疏水涂层的疏水能力有限，静态接触角 $<120^\circ$ ，且表面粘附力较大，具有明显的滞后性。

受生物模拟学的启发，研究人员采用多种技术合成了超疏水涂层，这些涂层具有极低的表面粘附力，能够促使液滴在轻微扰动下沿表面滚动，并清除路径上的液滴和污染物<sup>[14-17]</sup>。因此，超疏水涂层

在开关设备防凝露方面具有广阔的应用前景<sup>[18]</sup>。但由于涂层疏水性能的差异，使得涂层表面液滴在电场力的作用下呈现出不同的动态行为和形貌变化。因此，研究外施电场作用下不同疏水性涂层表面液滴的动态行为和形貌变化对开关设备表面的绝缘能力的影响有着重要的意义。

环氧树脂因其较好的绝缘性能和机械性能，被广泛应用于开关设备内部作为其主要的绝缘材料<sup>[19-21]</sup>。因此，本研究以环氧树脂板为基材，通过喷涂法制备了超疏水和普通硬质疏水涂层。利用人工模拟的高湿温差环境，进行了不同凝结时间下的涂层表面闪络试验，观察并分析了超疏水、普通硬质疏水及无涂层表面的凝结状态、闪络特性和动态行为。同时，采用基于图像边缘检测的方法，对外加电场下3种试样表面凝结的形态演变进行了统计分析，并探讨了其对涂层绝缘性能的影响。

## 1 试验样品及试验方法

### 1.1 试验样品

试验所用的超疏水涂层的制备流程见图1，超疏水溶液的主要成分为纳米二氧化硅、氟化物修饰剂和醋酸丁酯等，利用高压喷涂法将其喷涂在环氧树脂板制得超疏水涂层进行后续试验，为了保证超疏水涂层优越的疏水性，本涂料将纳米二氧化硅的质量分数调整为60%<sup>[22]</sup>。为了对比超疏水表面和普通硬质疏水表面的闪络特性的差异，同样利用图1方法制备了尺寸均为 $100\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 2\text{ mm}$ 普通硬质疏水涂层，硬质疏水溶液主要成分为含氟聚合物、酒精等，核心性能参数见表1。

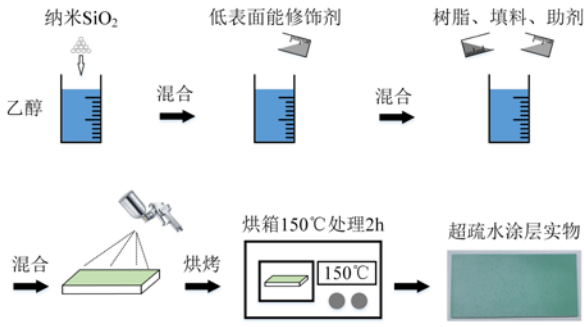


图1 超疏水涂层制备流程

Fig. 1 Superhydrophobic coating preparation process

表1 超疏水溶液和硬质疏水溶液核心参数

Table 1 Superhydrophobic solution and hard hydrophobic solution core parameters

核心参数	超疏水溶液	硬质疏水溶液
外观	乳白色	无色透明
型号	XN-204AL	P-EL88
主要成分	氟硅烷聚合物、醋酸丁酯	含氟聚合物、酒精
保质期/a	1	2
耐候性/a	5	5
腐蚀性	无腐蚀性	无腐蚀性
pH值	中性	中性
憎水性能	超疏水性	疏水性

## 1.2 涂层表面特性测试方法

涂层表面二维微观结构采用日本电子JSM-7500F型场发射扫描电子显微镜(FM-SEM)获取;涂层表面的化学成分采用X射线能谱仪(EDS)定性分析;涂层的静态接触角采用接触角测量平台,将10 μL的去离子水滴在涂层表面,测量基板的4个角及中心处共5个点的静态接触角,取其平均值。

## 1.3 试验平台

利用自行搭建的人工凝露试验箱对超疏水、普通硬质疏水以及无涂层试品进行凝露试验,示意图见图2。设置半导体冷台温度5℃,利用自控加湿

器、自控加热风扇将试验箱内温湿度分别维持在20℃、90%,以此模拟高湿度大温差的凝露环境。

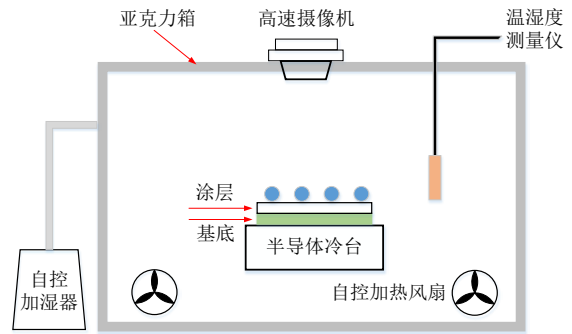


图2 人工凝露试验箱示意图

Fig. 2 Schematic diagram of artificial condensation test chamber

涂层表面的闪络特性试验平台见图3,主要包括:调压台,调压范围0~220V;试验变压器,变比为220V/150kV;保护电阻,阻值10kΩ,功率10kW。涂层表面放电过程中的泄漏电流和闪络电压信号分别通过采样电阻和阻容式分压器通过同轴电缆输入到TiePie-HS5采集装置。该采集装置可高效准确快速的采集电压和电流信号,最大采样信号范围可达±80kV,采样频率选用25kHz。涂层闪络特性试验步骤如下:

1)使用去离子水和高锰酸钾配置电导率为200 μs/cm的加湿剂,以便于更清楚观察涂层表面凝露情况。

2)在涂层两端各粘贴一个2cm的铜片电极,电极间距6cm。启动凝露试验装置,分别凝露20、40、60min后,擦拭掉涂层边缘和电极周围多余液滴进行闪络试验。

3)对3种试品表面分别加压直至闪络,记录此时的闪络电压和泄漏电流。采用高速摄像机记录不同凝露时间涂层表面的凝露状态及闪络过程。

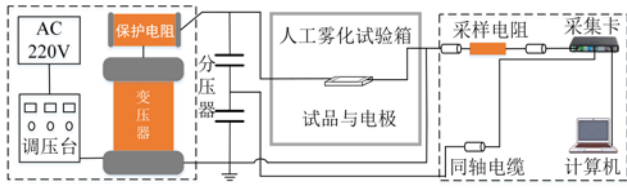


图3 闪络试验平台

Fig. 3 Flashover test platform

### 1.4 基于图像识别的凝露分布状态分析

为了研究超疏水、普通硬质疏水和无涂层表面在凝结液滴条件下的闪络电压和泄漏电流特性，本研究采用软件 ImageJ 对涂层表面的液滴覆盖率、数量、面积分布和平均尺寸进行了定量分析。操作流程见图 4，涵盖尺寸校准、模型训练、图像处理和结果输出 4 个主要步骤：

1) 尺寸标定。基于试样的实际尺寸与图像像素尺寸的比例，进行尺寸校准。本研究以试样短边长度(50 mm)为基准进行校准。

2) 模型训练。使用 Weka 插件，选择部分液滴区域和无液滴区域作为训练样本，进行类别划分训练。通过与原始图像对比，调整误差区域，并进行多次迭代训练以优化模型。

3) 图像处理。对处理后的图像进行二值化处理，并对液滴边缘进行修补和残缺填充，以完善目标区域。随后，进行噪声滤波以清除干扰噪点。

4) 输出结果。利用 Analyze Particles，选取液滴覆盖率、液滴尺寸及总个数等数据导出至 Excel 以便做后期统计分析。

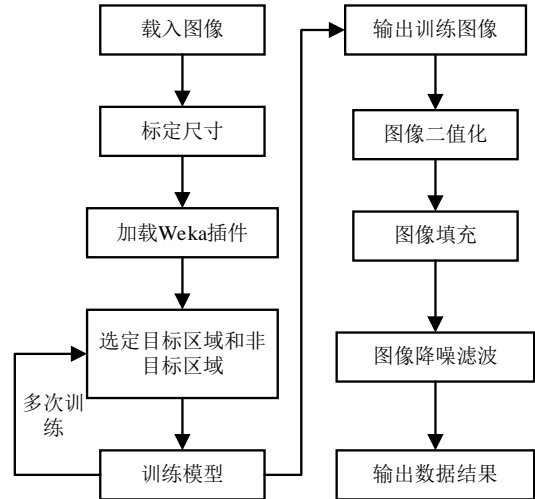


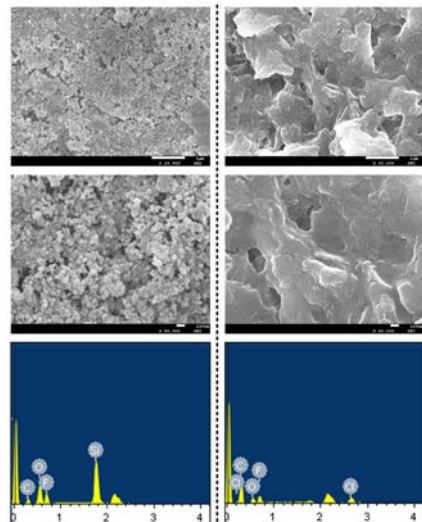
图4 ImageJ-Weka 图像处理流程

Fig. 4 ImageJ-Weka image processing flow

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 涂层的表面特性

超疏水特性需要具备两个条件：首先是微一纳米二元复合粗糙结构，其次是低表面能基团。从图 5(a)中可以观察到超疏水涂层表面具有明显的微一纳米二元复合粗糙结构，并且 EDS 能谱分析发现其表面存在氟元素，主要是来自氟硅烷对纳米  $\text{SiO}_2$  粒子的低表面能改性；而图 5(b)发现普通涂层虽然存在氟元素对其表面进行低表面能修饰，但其表面以微米级尺寸结构为主，并不能构成微一纳分级结构。

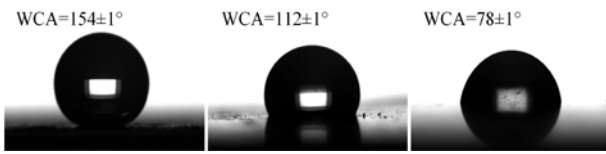


(a) 超疏水涂层 (b) 普通硬质疏水涂层

图 5 超疏水和普通硬质疏水表面的微观结构及元素成分

Fig. 5 Microstructure and elemental composition of superhydrophobic and ordinary rigid hydrophobic coatings

超疏水、普通硬质疏水、无涂层表面的静态接触角见图 6，超疏水涂层静态接触角均值为  $(154\pm 1)^\circ$ ，具有超疏水性；普通硬质疏水涂层静态接触角为  $(112\pm 1)^\circ$ ，具有一定的疏水性；无涂层静态接触角为  $(78\pm 1)^\circ$ ，表现为亲水性。



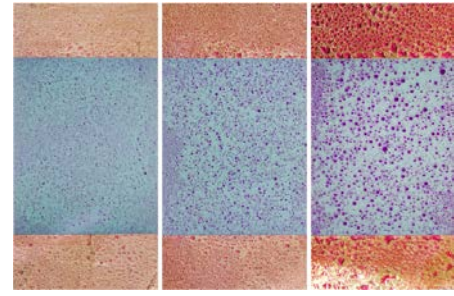
(a) 超疏水涂层 (b) 普通硬质疏水涂层 (c) 无涂层

图 6 超疏水和普通硬质疏水表面液滴静态接触角

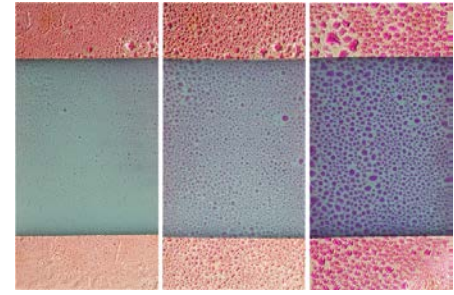
Fig. 6 Water contact Angle of droplets on superhydrophobic and hard film surfaces

## 2.2 不同涂层表面的凝露状态对比

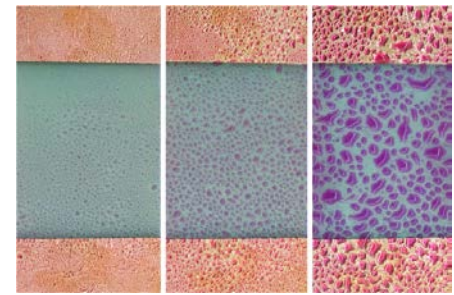
在凝露试验 20、40、60 min 条件下超疏水、普通硬质疏水和无涂层表面的凝露状态见图 7。随着凝露时间的增加，3 种试品表面的液滴体积逐渐增大，但超疏水涂层表面的液滴体积始终小于其他 2 种试品，其表面液滴呈球状分布，且较为密集。由于液滴的滚动合并现象使其表面无水膜区域面积增大；对于普通硬质疏水涂层，其表面液滴呈半球形状分布。随着凝露时间的增加，出现少量液滴的滑动合并现象。相较于超疏水涂层，普通硬质疏水表面液滴体积更大，分布更加密集；而无涂层表面液滴发展速度最快，相较于其他 2 种试品液滴体积最大，且表面液滴形状极不规则。



(a) 超疏水涂层



(b) 普通硬质疏水涂层



(c) 无涂层

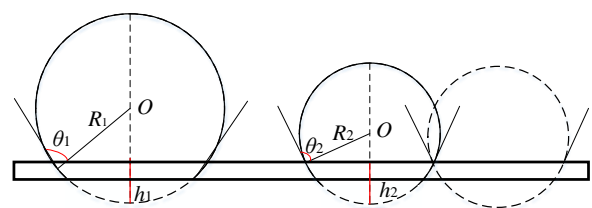
图 7 3 种试品表面的凝露状态

Fig. 7 The condensation state of 3 test samples surfaces

在相同凝露时间，超疏水表面液滴体积总小于普通硬质疏水或亲水表面，见图 8，假设相邻两个体积相同的小液滴合并成一个等体积的大液滴，液滴体积可表示为

$$V = \left[ \frac{4}{3} - (1 + \cos \theta_1)^2 + (1 + \cos \theta_2)^3 \right] \pi R_i^3 = N(\theta_i) \pi R_i^3 \quad (1)$$

式(1)中： $\theta_i$ 为液滴的静态接触角； $R_i$ 为液滴的半径； $i$ 取 1, 2。



(a) 合并后大液滴

(b) 合并前小液滴

图 8 涂层表面液滴的合并现象

Fig. 8 Coalescence of droplets on coating surfaces

超疏水涂层表面液滴体积对于其静态接触角影响较小<sup>[22]</sup>, 由  $V_1=2V_2$  可得  $R_1=\sqrt[3]{2}R_2$ 。液滴与涂层表面的接触面积  $S_i$  为

$$S_i=\pi R_i^2 \sin^2 \theta \quad (2)$$

根据式(2)可得  $S_1=\sqrt[3]{4}S_2 \approx 1.6S_2$ ,  $S_1 < 2S_2$ , 2 个同体积小液滴相较于合并后大液滴, 固-液表面接触面积更大。根据牛顿粘滞定律

$$F=\mu A \frac{du}{dy} \quad (3)$$

式(3)中:  $F$  为液滴所受粘滞力;  $A$  为固-液接触凝露面积;  $\mu$  为动力粘度;  $du/dy$  为液滴的速度梯度。

根据式(3), 一定体积的液滴被分成小体积液滴时, 所受总粘滞力增加, 即总表面自由能增加。同时, 涂层表面液滴的稳定体系受重力势能和表面自由能的综合影响<sup>[23-24]</sup>。而大体积液滴分成两个等体积小液滴的重力势能变化可表示为

$$\Delta E_g = \rho V_1 g h_1 - 2\rho V_2 g h_2 = 2\rho V_2 g (1 - \sqrt[3]{2}) R_2 \cos \theta \quad (4)$$

式(4)中:  $h_1$ 、 $h_2$  分别为液滴中心高度;  $\rho$  为液滴密度;  $g$  为重力加速度。

当涂层表面液滴静态接触角大于  $90^\circ$ , 故  $\Delta E_g > 0$ , 表明液滴重力势能减小, 表面自由能增加以维持液滴体系的稳定, 该趋势随着静态接触角的增大更为明显。超疏水涂层由于其微纳结构和低表面能基团, 展现出更大的静态接触角。在相同凝结条件下, 超疏水涂层上的液滴体积较亲水和普通硬质疏水表面小, 以保持系统的稳定。

### 2.3 不同涂层的闪络特性对比

在工频交流电场中, 采用逐步升压法对不同凝

露条件下的超疏水、普通硬质疏水及无涂层表面进行了闪络电压和泄漏电流测试。3 种试品在不同凝露时间下的闪络电压见图 9, 实验选用了尺寸、质量、形状几近相同的试品 50 件, 以确保结果的可靠性。在干燥状态下(凝露 0 min), 三者的闪络电压分别为 43.3、42.8、41.4 kV, 差异不显著, 表明表面状态对干闪电压影响较小。然而, 在凝露条件下, 所有试品的闪络电压均有所下降, 且下降程度与凝露时间呈正比。超疏水涂层的闪络电压始终高于其他两种表面, 在凝露 20、40、60 min 时, 分别较普通硬质疏水涂层高出 6.10、6.40、9.76 kV, 较无涂层高出 13.20、9.50、11.96 kV。

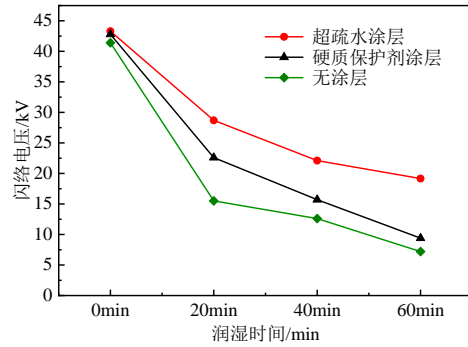


图 9 3 种试品不同凝露时间表面的闪络电压

Fig. 9 Flashover voltages on 3 samples surfaces under different condensation time

交流电弧仅在电压峰值附近向闪络发展, 因此选用临界泄漏电流  $I_{CR}$  为特征量, 分析超疏水、普通硬质疏水以及无涂层表面闪络的发展阶段。临界泄漏电流  $I_{CR}$  指的是涂层表面闪络前半个周期波形的泄漏电流值<sup>[25]</sup>。在不同凝露时间下, 3 种试品表面的临界泄漏电流值见图 10, 在干态下(凝露 0 min), 3 种试品的  $I_{CR}$  几乎为零, 均表现出良好的绝缘能力。随着凝露时间的增加, 3 种试品表面  $I_{CR}$  均有所上升, 且上升程度与凝露时间呈正相关。超

疏水涂层的泄漏电流始终低于其他 2 种试品，在凝露 20、40、60 min 条件下，分别为 7.54、21.38、49.90 mA，较普通硬质疏水涂层分别降低了 3.12、14.60、25.36 mA，较无涂层分别降低了 81.76、79.98、80.10 mA。

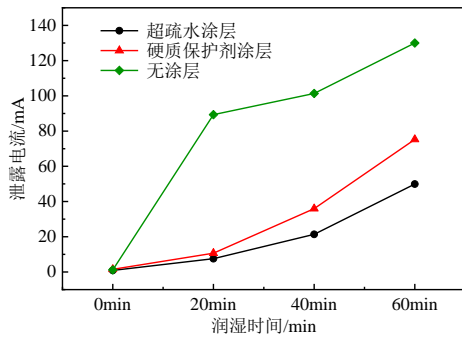
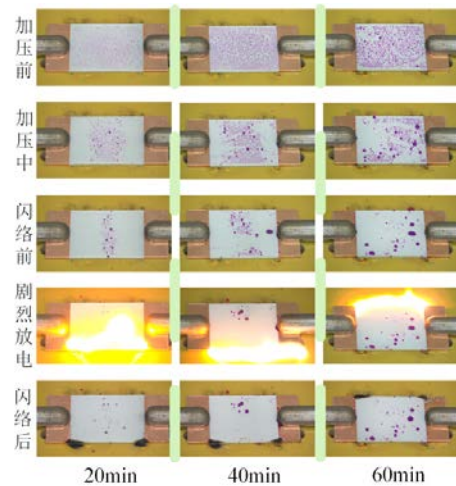


图 10 3 种试品不同凝露时间表面的泄漏电流

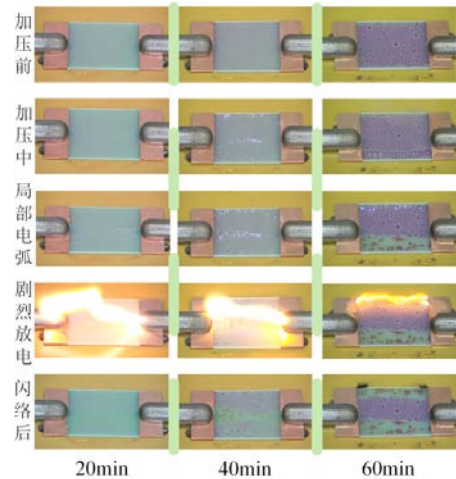
Fig. 10 Leakage current of three coatings with different wetting schedules

上述结果表明：随着凝露时间的增加，超疏水涂层湿闪电压降幅最小，临界泄漏电流仅增幅最小，其表面绝缘能力始终优于其他两种试品。

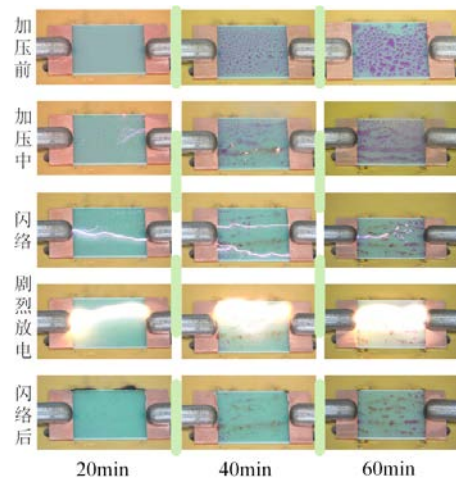
3 种试品表面的湿闪过程见图 11，超疏水涂层在电压升高时，液滴经历振动、滚动和合并，形成无液滴区域，随后发生闪络，但表面未留下烧蚀痕迹，疏水性得以保持。普通硬质疏水涂层表面液滴在电场作用下延伸并融合成水带，电压继续升高时，水带间产生电弧，导致闪络，闪络通道处出现烧蚀，疏水性能降低，而非闪络区域疏水性保持不变。无涂层试品在电压作用下液滴融合成多条水带，引发闪络，闪络后表面液滴蒸发，留下烧蚀痕迹，疏水性能显著下降。



(a) 超疏水涂层



(b) 普通硬质疏水涂层



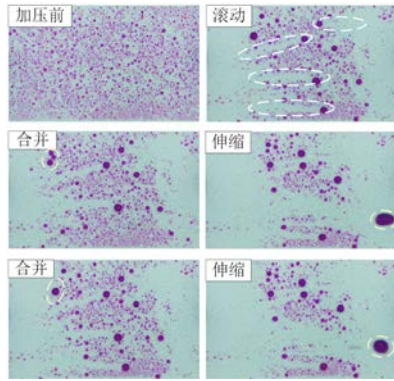
(c) 无涂层

图 11 3 种试品表面的湿闪过程

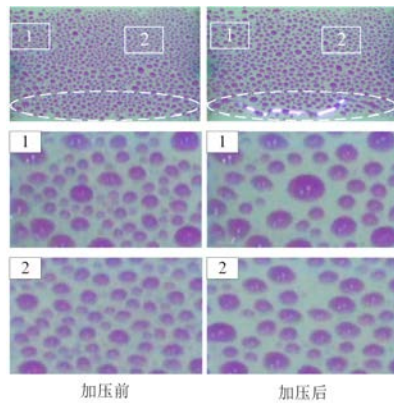
Fig. 11 Wet flashover process on three coated surfaces

## 2.4 不同涂层表面液滴的动态行为

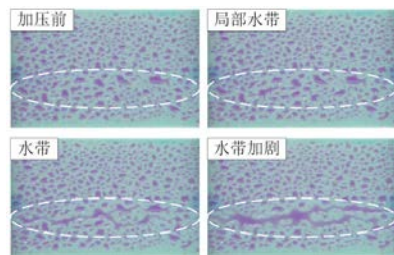
在不同凝露时间下，对于同一种试品表面液滴的动态行为几乎一致。以凝露 60 min 为例说明加压过程中液滴的动态行为，3 种试品表面液滴动态行为见图 12。



(a) 超疏水涂层



(b) 普通硬质疏水涂层



(c) 无涂层

图 12 加压过程中 3 种试品表面液滴的动态行为

Fig. 12 The dynamic behavior of droplets on the surface of three coatings during voltage raising

在外施电压增加时，超疏水涂层上的液滴会向电极间区域集中并合并，保持球形并沿电场方向滚动，合并路径上的小液滴，其运动轨迹与电场方向一致，并表现出方向性的伸缩变化。对于普通硬质

疏水涂层，液滴在滑动合并后会延伸成椭圆形，导致表面液滴覆盖率降低，部分液滴桥接形成局部水带，电弧在这些水带间形成并贯穿电极。而在无涂层表面，液滴在电场作用下会延伸并桥接形成多条局部水带，随着电压的进一步增加，这些水带会合并形成贯通的水带。

为分析外施电场作用下涂层表面液滴的动态行为，对涂层及其表面液滴的电场分布进行了仿真计算，在涂层两侧电极施加 30 kV 电压，电场分布结果见图 13。电场在涂层表面形成均匀分布，而在“液滴—涂层—空气”交界区域由于介电常数差异导致电场畸变，场强显著增强，可达液滴内部的数十倍。当局部场强达到空气的临界电离场，液滴表面将发生电晕放电，空间电荷通过电晕通道转移至液滴表面，积累净负电荷<sup>[26-28]</sup>。在此过程中，液滴主要受库仑力和反向粘附力作用，这两种力随交流电场周期性变化。在交流电场作用下，超疏水表面液滴在库仑力大于粘附力时，开始向涂层中心滚动并合并，同时展现电致伸缩行为。

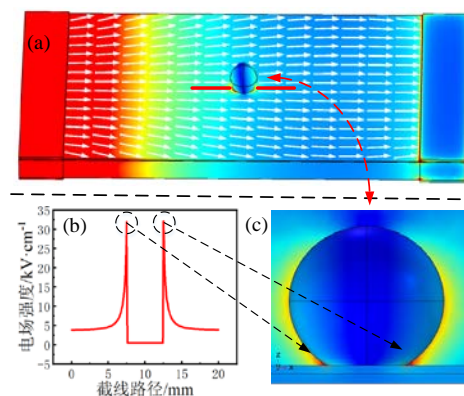


图 13 涂层表面液滴电场分布

Fig. 13 Droplet electric field distribution on coating surface

不同涂层表面的液滴在电场作用下表现出不同

动态。根据式(2)可知,当液滴体积恒定时,涂层表面静态接触角越大,固-液接触面积越大。根据式(3)牛顿粘滞定律,涂层表面液滴所受粘滞力与固-液接触凝露面积呈正相关。超疏水表面液滴受粘附力较小,表现为滚动合并;普通硬质疏水表面液滴表现为滑动合并;无涂层表面液滴表现为桥接合并。

### 2.5 不同涂层表面液滴加压过程中的形貌变化

在凝露状态下,超疏水涂层的绝缘能力明显优于其他2种试品,主要原因是三者憎水性的差异使涂层表面液滴形貌和分布状态不同。为进一步分析涂层表面液滴的形貌对闪络电压和泄漏电流的影响,采用ImageJ软件对不同涂层加压前和放电前一帧的图像进行处理,获取了不同涂层表面的液滴形貌、覆盖率和尺寸分布数据。3种试品表面液滴分布状态见图14,从图14可以看出加压前超疏水涂层表面液滴呈球形且相互独立,放电前液滴由于电动力的作用出现大规模合并滚动现象,其表面出现大面积无液滴区域;对于加压前普通硬质疏水涂层表面液滴呈椭圆形且紧密分布,放电前少部分相邻液滴合并;而无涂层表面加压前液滴形状极不规则,单一体积较大,放电前相邻液滴桥接合并形成连续水带。

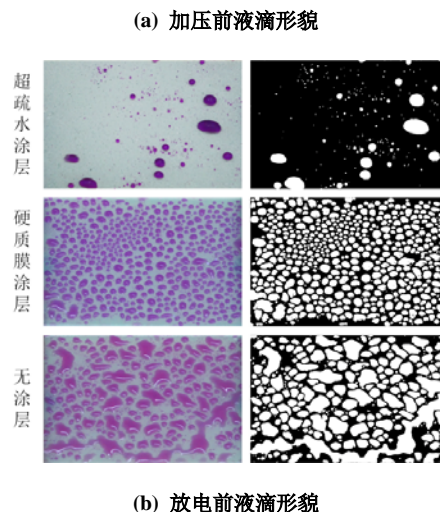
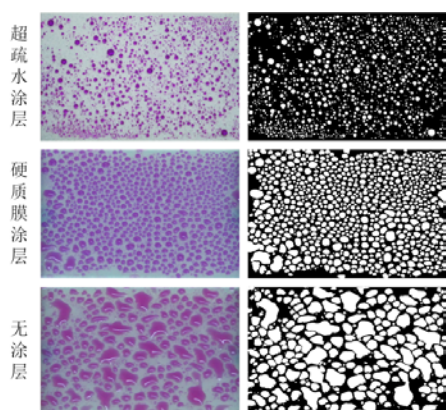
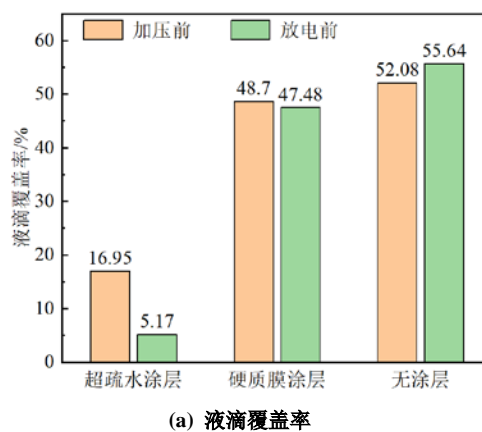


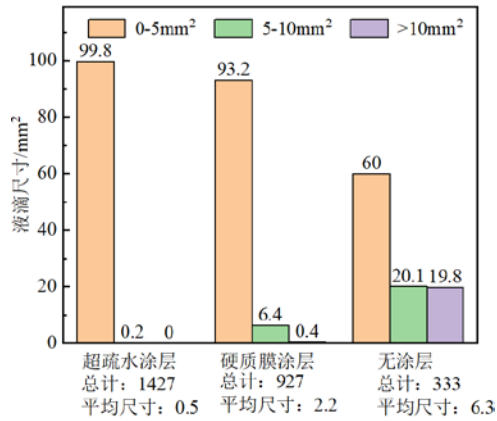
图14 3种试品表面液滴分布状态

Fig. 14 Droplet distribution on the surface of three coatings

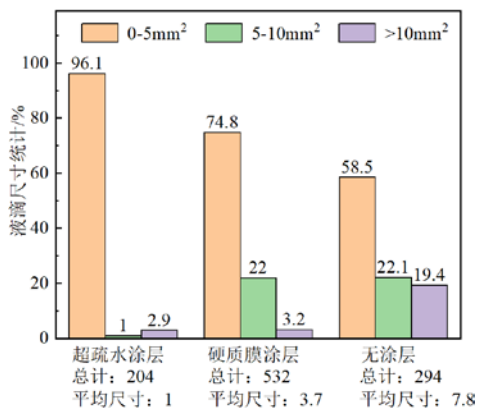
加压过程中3种试品表面液滴的形貌统计见图15,图15数据显示,加压前超疏水表面液滴总个数约为1427,覆盖率约为16.95%,平均尺寸约为 $0.5 \text{ mm}^2$ ,99.8%的液滴面积在 $5 \text{ mm}^2$ 以下。而放电前其表面液滴总个数仅为204,覆盖率下降至约5.17%,平均尺寸提高至约 $1 \text{ mm}^2$ , $5 \text{ mm}^2$ 以上液滴占比从0.2%提升至3.9%。



(a) 液滴覆盖率



(b) 加压前涂层表面液滴尺寸



(c) 放电前涂层表面液滴尺寸

图 15 加压过程中 3 种试品表面液滴的形貌统计

Fig. 15 Morphology statistics of liquid droplet on the surface of 3 kinds of samples during pressurization

对于普通硬质疏水涂层，加压前表面液滴总个数约为 927，其表面液滴覆盖率约为 48.7%，远高于超疏水涂层。液滴平均尺寸约为  $2.2\text{mm}^2$ ，93.2% 的液滴面积在  $5\text{mm}^2$  以下。而放电前其表面液滴总个数降至约 532，其表面液滴覆盖率小幅下降，平均尺寸增加至  $3.7\text{mm}^2$ ， $5\text{mm}^2$  以上液滴占比从 6.8% 提升至 25.2%。

对于无涂层，加压前表面液滴总个数约为 333，液滴覆盖率约为 52.08%，为三者最高。液滴平均尺寸约为  $6.3\text{mm}^2$ ，60% 的液滴面积在  $5\text{mm}^2$  以下。而放电前其表面液滴总个数略微下降，液滴覆盖率小幅上升，平均尺寸增加至  $7.8\text{mm}^2$ ， $5\text{mm}^2$  以上液

滴占比到达 51.5%。

以上结果表明，在加压前和放电前，超疏水涂层因其优异的疏水性其表面液滴覆盖率和平均尺寸远小于其他 2 种试品。结合图 9、10，在凝露 60 min 后，超疏水涂层的闪络电压比其他两种试品提高了 103.3% 和 165.1%，泄漏电流降低了 33.7% 和 61.6%，这主要是因为超疏水涂层表面的液滴在滚动过程中带走了涂层上的污秽颗粒，使滚动路径保持清洁干燥，增加了干区面积，从而抑制了局部电弧的发展。

### 3 结论

1) 在不同凝露时间下，超疏水涂层表面的液滴体积始终小于其他两种试品，以维持体系稳定，且呈球状分布，表现出超疏水性；普通硬质疏水涂层表面液滴呈半球状分布，表现出疏水性；无涂层表面液滴形状不规则，表现出亲水性。

2) 在闪络过程中，超疏水涂层表面放电稳定，闪络后表面无明显烧蚀痕迹，保持优异的疏水性和绝缘能力；而普通硬质疏水和无涂层表面放电剧烈且不稳定，闪络后表面出现明显烧蚀痕迹，疏水性能和绝缘性能大幅下降。

3) 加压过程中，超疏水涂层表面液滴呈现滚动合并现象，运动轨迹与外施电场方向基本一致，并出现沿电场方向的电致伸缩行为，液滴覆盖率从 16.95% 下降至 5.17%，平均尺寸小于  $1\text{mm}^2$ ，有效抑制了局部电弧的发展，表现出优异的绝缘水平；普通硬质疏水涂层和无涂层表面液滴分别呈现滑动合并、桥接合并行为，加剧了局部电弧发展，导致绝缘性能大幅下降。

## 参考文献:

- [1] 韩肖清, 李廷钧, 张东霞, 等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3036-3046.  
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double Carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [2] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3125.  
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “three elements of energy” toward Carbon peak and Carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125.
- [3] 马 钊, 张恒旭, 赵浩然, 等. 双碳目标下配用电系统的新使命和新挑战[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(19): 6931-6944.  
MA Zhao, ZHANG Hengxu, ZHAO Haoran, et al. New mission and challenge of power distribution and consumption system under dual-carbon target[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(19): 6931-6944.
- [4] 周远翔, 陈健宁, 张 灵, 等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术, 2021, 47(7): 2396-2408.  
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, Carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.
- [5] 李 元, 薛建议, 任双赞, 等. 高压开关柜温湿度分布的三维数值模拟研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(24): 5095-5103.  
LI Yuan, XUE Jianyi, REN Shuangzan, et al. Research on 3D numerical simulation of temperature and humidity distribution inside high voltage switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5095-5103.
- [6] 刘若溪, 白宝军, 郭 沁, 等. 开关柜凝露现象机理分析研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 80-84.  
LIU Ruoxi, BAI Baojun, GUO Qin, et al. Analysis on condensation phenomenon mechanism of switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 80-84.
- [7] 郭 沁, 张炜琦, 郭 雨, 等. 温湿度对户外设备凝露现象的影响研究[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 60-64.  
GUO Qin, ZHANG Weiqi, GUO Yu, et al. Study on the influence of temperature and humidity on the condensation of outdoor equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 60-64.
- [8] 舒胜文, 许俊炜, 占兆璇, 等. 高湿环境下 40.5 kV 开关柜凝露发展特性与加热器布置方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(2): 493-504.  
SHU Shengwen, XU Junwei, ZHAN Zhaoxuan, et al. Condensation development characteristics and heater arrangement method of 40.5 kV switchgear under high-humidity environment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 493-504.
- [9] ZHENG Xuejing, HU Fangshu, WANG Yaran, et al. Optimization on airflow distribution for anti-condensation of high-voltage switchgear using CFD method[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021(28): 101479.
- [10] SONG J, ZHANG J, FAN X. Device for online monitoring of insulation faults in high-voltage switchgears[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2021: 17(2): 119-120.
- [11] PAN Q Z, YANG F, YANG Z. Discussion on mechanism of the dampness and dewing inside 12 kV high-voltage switchgear and its key control techniques[J]. Power System Protection and Control, 47(5): 160-172.
- [12] 郝瑞英, 葛天舒, 代彦军. 金属表面涂覆干燥剂的防凝露研究[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(11): 1588-1594.  
HAO Ruiying, GE Tianshu, DAI Yanjun. Anti-Condensation based on Desiccant-Coated metal surface[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(11): 1588-1594.
- [13] 吴 田, 曹探深, 劳国威, 等. 基于硬质疏水性涂层的配网遮蔽用具的沿面放电特性研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 21-27.  
WU Tian, CAO Tanshen, LAO Guowei, et al. Study on surface discharge characteristic for distribution network cover appliance based on toughing hydrophobic coating[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 21-27.
- [14] 李 剑, 王湘雯, 黄正勇, 等. 超疏水绝缘涂层制备与防冰、防污研究现状[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 61-75.  
LI Jian, WANG Xiangwen, HUANG Zhengyong, et al.

- Research of preparation, anti-icing and anti-pollution of super hydrophobic insulation coatings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 61-75.
- [15]SAJI V S. Recent progress in superhydrophobic and superamphiphobic coatings for Magnesium and its alloys[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2021, 9(3): 748-778.
- [16]LIU Guanyu, XIA Huiyun, ZHANG Wenshuo, et al. Photocatalytic superamphiphobic coatings and the effect of surface microstructures on superamphiphobicity[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(10): 12509-12520.
- [17]ELLINAS K, TSEREPI A, GOGOLIDES E. Durable superhydrophobic and superamphiphobic polymeric surfaces and their applications: A review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2017(250): 132-157.
- [18]王华云, 王晟伍, 邓志祥, 等. 超疏水绝缘材料与室温硫化硅橡胶的防凝露性能对比研究[J]. 电瓷避雷器, 2021(4): 196-202.
- WANG Huayun, WANG Shengwu, DENG Zhixiang, et al. Comparative research on Anti-Condensation capabilities of superhydrophobic insulating material and room temperature vulcanized Silicon rubber[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(4): 196-202.
- [19]苏凡云, 黄正勇, 张樱凡, 等. 硅树脂超疏水涂层的制备及湿闪特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(5): 49-54.
- SU Fanyun, HUANG Zhengyong, ZHANG Yingfan, et al. Preparation and wet flashover characteristics of silicone superhydrophobic coating[J]. Insulating Materials, 2023, 56(5): 49-54.
- [20]靳艳娇, 乔光尧, 邓占锋, 等. 全环氧固封高频变压器散热优化设计研究[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2531-2537.
- JIN Yanjiao, QIAO Guangyao, DENG Zhanfeng, et al. Heat dissipation optimization design of epoxy resin sealing high frequency transformer[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2531-2537.
- [21]李亚丰, 姚学玲, 孙晋茹, 等. 绝缘封装用环氧树脂固化物的湿热老化特性[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3600-3607.
- LI Yafeng, YAO Xueling, SUN Jinru, et al. Hydrothermal aging characteristics of cured epoxy resin for insulation encapsulation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3600-3607.
- [22]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.
- [23]REN Shuai, CHEN Junwu, JIANG Miao, et al. The effect of drop volume on the apparent contact angle of hierarchical structured superhydrophobic surfaces[J]. Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects, 2021(611): 125849.
- [24]金海云, 周慧敏, 卫世超, 等. 污秽超疏水硅橡胶表面的润湿闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5690-5699.
- JIN Haiyun, ZHOU Huimin, WEI Shichao, et al. Study on flashover characteristics of polluted super-hydrophobic silicone rubber surface under wetting condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5690-5699.
- [25]邹乔戈, 王晟伍, 陈劲宇, 等. 超疏水绝缘表面直流沿面污闪特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(5): 40-48.
- ZOU Qiaoge, WANG Shengwu, CHEN Jinyu, et al. Study on DC surface pollution flashover characteristics of superhydrophobic insulation surfaces[J]. Insulating Materials, 2023, 56(5): 40-48.
- [26]颜薪瞩, 李立涅, 李剑, 等. 甲基硅树脂超疏水涂层的防污闪性能[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2835-2843.
- YAN Xinzhu, LI Linie, LI Jian, et al. Anti-pollution Flashover Performance of Methyl Silicone Resin Superhydrophobic Coating[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2835-2843.
- [27]ZHU Y, HAJI K, OTSUBO M, et al. Electrohydrodynamic behaviour of water droplet on an electrically stressed hydrophobic surface[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(9): 1970-1975.
- [28]POLI E, JONG K H, HASSANALI A. Charge transfer as a ubiquitous mechanism in determining the negative charge at hydrophobic interfaces[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 901.
- 刘会家(1969—), 男, 博士, 副教授, 主研究方向为配电网无功优化、潮流计算等(E-mail: [874884829@qq.com](mailto:874884829@qq.com))。
- 王少奇(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事带电作业、

---

超疏水绝缘材料防凝露的研究 (E-mail : 1910654759@qq.com)。