

基于图像识别的绝缘材料憎水表面凝露形貌表征 及其对放电发展影响研究

贾子建^{1,2} 吴 田^{1,2} 高广德^{1,2} 吴 健³ 冯平辉⁴

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

摘 要:凝露是造成电气设备绝缘劣化或损坏,影响电力系统安全稳定运行的主要危害之一。在相同凝露条件下不同表面产生的凝露在形貌上存在差异,对其放电发展的影响不同。提出了一种基于图像识别的湿区占比和凝露平均接触面积等特征形貌参数对沿面放电影响的表征方法,采用3种涂覆有不同憎水涂层的试验样品进行憎水性测试,在分析测定了不同样品表面憎水性的基础上,通过相关试验研究了不同憎水表面下凝露液滴的发展过程及分布规律,并分析了凝露形貌参数对闪络电压的影响。结果表明,CSS涂层、P-EL88涂层和无涂层样品表面静态接触角分别为 103.17° 、 91.60° 、 80.77° ,在0.01的显著水平下湿区占比和液滴平均接触面积对凝露闪络电压的 Pearson 相关系数分别为-0.989和-0.696,凝露闪络电压受湿区占比和液滴平均接触面积联合影响。

关键词:凝露形貌;沿面放电;憎水涂料;图像识别;相关性分析

中图分类号: TM8 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 47040

Research on the characterization of hydrophobic surface condensation morphology of insulating materials and its influence on discharge development based on image recognition

Jia Zijian^{1,2} Wu Tian^{1,2} Gao Guangde^{1,2} Wu Jian³ Feng Pinghui⁴

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

Abstract: Condensation is one of the main hazards that cause insulation deterioration or damage to electrical equipment and affect the safe and stable operation of the power system. Under the same dewing condition, the dews produced on different surfaces have different morphologies and different influences on their discharge development. The article proposes a characterization method based on image recognition for the characteristic morphology parameters such as wet area ratio and average contact area of condensation to characterize the sound emitted along the surface. Three test samples coated with different hydrophobic coatings were used for hydrophobicity testing. On the basis of analyzing and measuring the surface hydrophobicity of different samples, the development process and distribution law of condensation droplets on different hydrophobic surfaces were studied through relevant experiments, And the influence of condensation morphology parameters on flashover voltage was analyzed. The results showed that the static contact angles on the surfaces of CSS coating, P-EL88 coating, and uncoated samples were 103.17° , 91.60° and 80.77° , respectively. At a significant level of 0.01, the Pearson correlation coefficients of the wet area ratio and the average contact area of droplets on the condensation flashover voltage were -0.989 and -0.696, respectively. The condensation flashover voltage was jointly affected by the wet area ratio and the average contact area of droplets.

Keywords: condensation morphology; flashover characteristics; hydrophobic coatings; image recognition; correlation analysis

0 引言

凝露是影响电气设备安全稳定运行的主要危害之一,凝露现象的产生导致泄漏电流增加,沿面闪络甚至爆炸起火,威胁电力系统安全可靠运行^[1-3]。因此,开展电气设备绝缘表面凝露形貌分布特性及放电试验研究具有重要意义。

目前高压电气设备凝露的防治措施主要加热法、通风法和除湿法^[4-6],涂料是一种低碳的防凝露的措施,不同涂层表面的凝露形貌存在差异,材料表面液滴的形貌对物质的化学和物理过程具有重要影响^[7-11],目前凝露放电的研究关注的试验参量主要有温湿度、接触角等,没有考虑凝露形貌对放电发展的影响。刘轩东等^[12]通过测量凝露质量、相对湿度、环境温度差等参数,研究凝露状态对绝缘硅橡胶表面闪络特性的影响,结果表明环境温度差的增大会引起凝露质量的增加,相对湿度大于80%时硅橡胶闪络电压大幅下降。然而,实际工程中难以对凝露质量进行测量,且凝露闪络电压与表面液滴的形状、大小、数量等凝露形貌分布特性密切相关,相较于传统的监测手段,图像监测具有更高的准确性和灵敏性。近年来,基于图像识别来识别绝缘材料的液滴的方面的研究较少,对凝露形貌参数也缺乏细致统计。耿江海等^[13]通过改进形态学方法对开关柜凝露图像进行边缘提取,对凝露图像进行区域划分后根据各区域的总灰度值大小判断出柜顶内壁边缘部位更容易形成凝露。牛莉等^[14]利用 ImageJ 图像处理软件对有机硅-SiO₂复合涂层对凝露过程进行分析并统计出不同涂层表面凝露30 min时的液滴尺寸范围分布,同时通过有限元对不同形态液滴表面的电场分布进行了计算,发现随着静态接触角的增大,液滴表面最大电场强度依次减少。

针对现有研究的不足,本文选用电力行业常用的高耐候硬质保护剂 P-EL88 和纳米自清洁憎水剂 CSS 两种不同憎水涂料^[15],对涂覆不同憎水材料后的环氧树脂板进行凝露和放电试验,采用液滴捕捉常用的图像识别方法^[16]对凝露形貌参数进行细致统计,研究绝缘材料表面凝露的发展规律及形貌分布特征,分析不同凝露形貌对绝缘材料表面闪络特性的影响,得到基于图像识别的不同憎水性绝缘材料表面凝露形貌及发展规律,为凝露闪络的图像监测手段提供依据。

1 试验装置与方法

为研究绝缘材料表面的凝露液滴的形貌分布对沿面放电的发展及闪络电压的影响,本文对3种试验样品分别进行液滴静态接触角测试和凝露模拟试验,采用图像识别的方法对不同试验样品表面的液滴的形貌分布特性进行分析并进行沿面放电特性试验,技术路线如图1所示。

1.1 试验样品与装置

1) 凝露发生及憎水性测试

对3种样品分别进行液滴静态接触角测试和凝露模拟试验,研究憎水涂料对凝露形貌的影响,样品制备流程

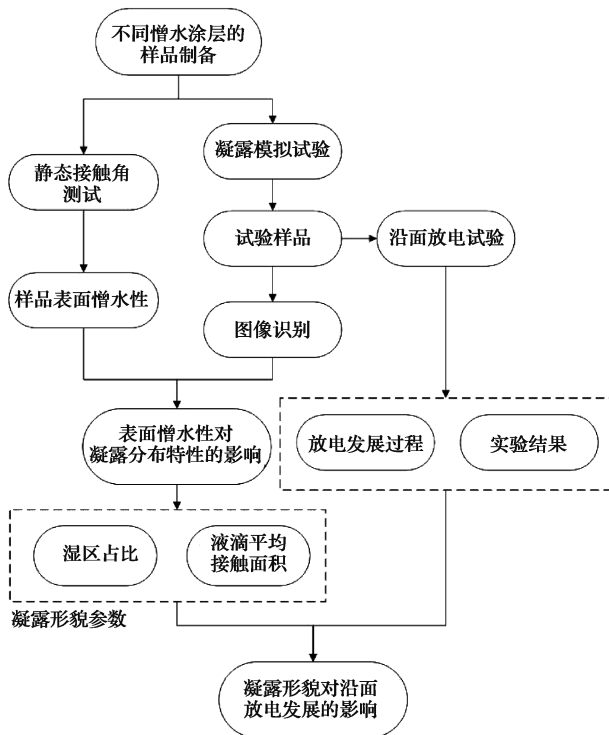


图1 凝露形貌分布对沿面放电发展影响研究技术路线

如下:分别将 P-EL88 涂料和 CSS 涂料用 1 mm 口径高压喷枪以 200 Pa 的压力对环氧树脂板表面自上而下进行喷涂,喷涂后将样品置于无尘箱,自干 12 h 后再次喷涂,循环 3 次,直至在表面形成一层明显的薄膜如图 2 所示。绝缘材料的憎水性测试方法主要有 3 种,分别为接触法、表面张力法、喷水分级法。相较于其他方法,静态接触角测量法可以通过液滴图像更加直观地反映样品表面的憎水性,对憎水性能有着细致的量化表征,因此本文选用此方法进行试验样品的憎水性测试,测试平台如图 3 所示。凝露试验平台如图 4 所示,其中主要包括超声水雾输出、放置台、温湿度控制箱、湿度传感器。温湿度控制箱采用加湿模块,试验平台相对湿度设置为 $90\% \pm 1\%$,温度设置为 $27\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

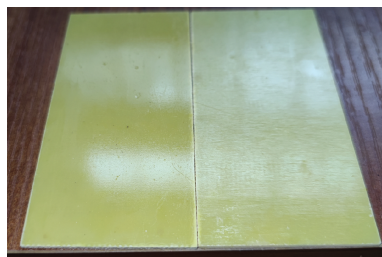


图2 涂覆憎水材料的环氧树脂板(左)

2) 沿面放电特性试验

为研究憎水性表面凝露形貌对闪络特性的影响,对3种样品分别进行沿面放电特性试验^[17-18]。沿面放电试验

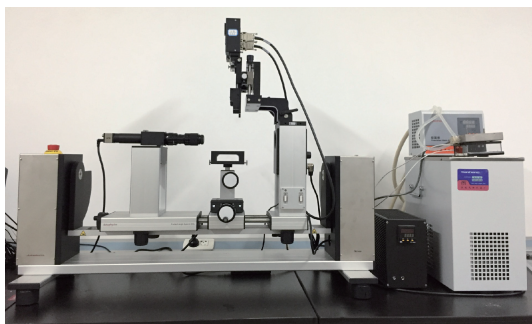


图3 全自动静态接触角测量平台

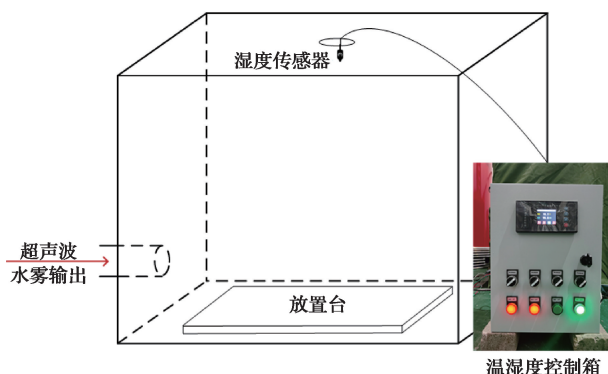


图4 凝露模拟试验平台

接线如图5所示,其中主要包括升压器、保护电阻、分压器、数据采集卡,为了减小电磁干扰的影响,使用屏蔽电缆连接数据采集卡,采样频率为10 kHz。

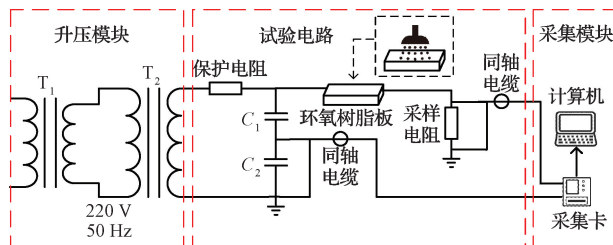


图5 沿面放电特性试验接线

1.2 基于图像识别的凝露液滴形貌提取方法

1) 图像表征方法

二值化图像处理方法具有图像分割、特征提取和图像识别等功能,被广泛应用于液滴识别和缺陷检测等领域^[19-21]。本文通过保留图像中的必要区域(环氧树脂板表面),对图像的结构元素进行分析重构,将图像灰度图转换为只包含为黑色和白色两个像素值的图像,以达到将复杂的凝露信息进行降维的目的,图像的转化表达式如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} 0, & f(x, y) \leq k \\ 1, & f(x, y) > k \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的灰度值; k 代表灰度阈

值; $g(x, y)$ 为二值化结果; 1 代表输出黑色; 0 代表输出白色。

二值化图像处理方法中常用大津算法(OTSU)选定阈值,OTSU 算法有着计算简单、不受图像亮度和对比影响等优点在数字图像处理上有着广泛的应用^[22-26]。通过该方法计算得到的阈值进行图像二值化分割后前景与背景图像的类间方差最大,根据所选定的灰度阈值 k ,将所有像素分为 C_1 和 C_2 两类,两类像素的灰度值均值分别为 m_1 和 m_2 。 MG 为全局灰度值均值, P_1 和 P_2 分别为 MG 属于 C_1 和 C_2 的概率,根据类间方差定义,得到:

$$\sigma^2 = p_1(m_1 - MG)^2 + p_2(m_2 - MG)^2 \quad (2)$$

又因为:

$$\begin{cases} p_1 m_1 + p_2 m_2 = MG \\ p_1 + p_2 = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $m_1 = \sum_{i=0}^k iP/p_1$, $m_2 = \sum_{i=k}^L iP/p_2$, $p_1 = \sum_{i=0}^k P_i$ 。 L 为图像的灰度级 ($0 \leq L \leq 255$), P_i 为灰度值为 i 的像素点出现的概率。

将式(3)代入式(2),化简得到 $\sigma^2 = p_1 p_2 (m_1 - m_2)^2$, 设 m 为灰度阈值 k 的累加均值,则 $m_1 = m/P_1$, $m_2 = (MG - m)/p_2$, 最终得到类间方差公式为:

$$\sigma^2 = \frac{(MG \times p_1 - m)^2}{p_1(1 - p_1)} \quad (4)$$

OTSU 法的优化目标可以表示为:

$$k^* = \operatorname{argmax}_{k \in L} \sigma^2 = \operatorname{argmax}_{k \in L} \frac{(MG \times p_1 - m)^2}{p_1(1 - p_1)} \quad (5)$$

2) 凝露特征提取

经过凝露试验后的样品如图6所示,为简化凝露信息,对图像进行二值化处理结果如图7所示,白色区域代表液滴覆盖区域,黑色区域代表干燥区域。通过环氧树脂板的尺寸信息与图像像素块的关系,将凝露信息降维成湿区面积、凝露液滴的接触面积以及液滴数量3个凝露形貌特征数据。由于样品边缘存在高亮区域影响图像识别准确度,在样品边缘采用人工分块处理的方式分别测量液滴特征参数。

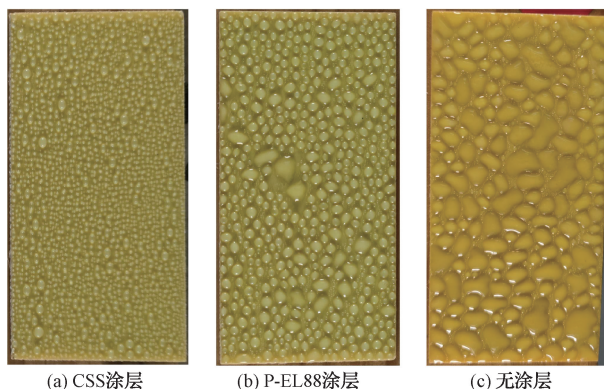


图6 加湿处理后的试验样品

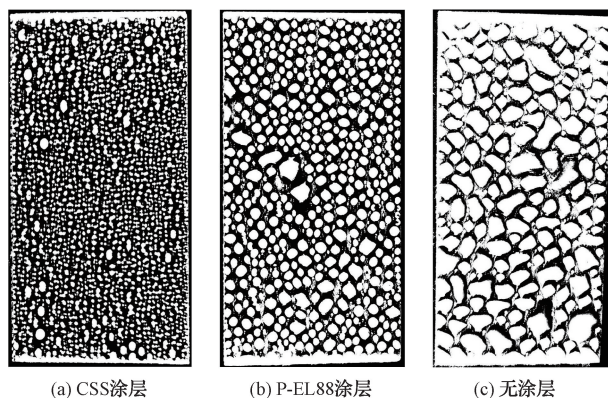


图7 图像处理结果

2 表面憎水性对凝露形貌的影响

2.1 样品表面憎水性测试

本文采用静态接触角法评估涂层的憎水性能,在27℃室温下,对3种试验样品表进行测试,拍摄液滴在不同样品表面的形态如图8所示。

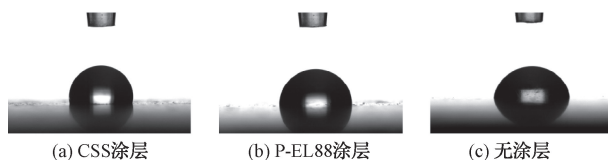


图8 不同样品表面的液滴形态

静态接触角测试结果如表1所示,结果表明憎水涂料有效提高了样品表面的憎水性。CSS涂层样品和P-EL88涂层样品表现为憎水性,无涂层样品表现为亲水性,CSS涂层样品、P-EL88涂层样品和无涂层样品的静态接触角分别为103.17°、91.60°、80.77°。

表1 静态接触角测试结果

时间/s	CSS 涂层/(°)	P-EL88 涂层/(°)	无涂层/(°)
0.00	103.23	92.38	82.16
0.30	103.31	92.27	81.51
0.60	103.08	91.59	81.33
⋮	⋮	⋮	⋮
9.04	103.03	90.49	80.80
9.34	103.09	93.63	80.98
9.65	103.17	91.60	80.77
计算结果	103.130	91.796	81.068

2.2 表面憎水性对凝露形貌分布特征的影响

1) 对凝露分布特征的影响

由于憎水涂层会在样品表面上形成一层憎水性薄膜形成隔离层,使得水汽无法与表面接触,从而达到减缓凝露产生的作用。为研究表面憎水性对凝露分布特征的影响,

在保证温度和相对湿度相同的条件下,分别选取加湿15 min、加湿30 min、加湿60 min、加湿90 min、加湿150 min共5组凝露条件,对3种不同憎水性表面的样品进行凝露试验,利用图像识别记录凝露形貌分布特征如图9所示,直方图为密集区域数据分布,总体样本数据如Lorentz分布曲线。

随着加湿时间的增加,不同憎水性表面的液滴分布特性具有明显的差异。加湿初始阶段,不同憎水性表面的凝露均以小液滴、零散分布的状态出现。随着表面憎水性的降低,凝露液滴数量减少,液滴平均接触面积增大。加湿中期阶段,不同憎水性表面凝露形貌分布差异逐渐明显,憎水性涂层表面的凝露液滴以大量小液滴为主,而亲水性涂层表面的凝露倾向于形成数量较少的大液滴或者大面积水膜。加湿后期阶段各样品表面仍存在大量小液滴,通过图像得知这些小液滴主要填充在大液滴或者水膜之间,产生这种分布特性的原因是液滴在凝露的过程中在表面张力的作用下不断融合、扩散,而在这个过程中留下的空隙又不断凝露出小液滴。随着凝露的发展,曲线波峰持续向增大方向移动,这是由于Lorentz分布曲线对极端值十分敏感,亲水性表面持续出现大块液滴并不断生长,使得波峰不断向增大方向偏移。

2) 对湿区面积的影响

通过图像识别提取凝露试验样品表面的凝露形貌参数,样品表面湿区占比随时间的变化曲线如图10所示。湿区面积的增大主要原因是新凝露的形成,由于先形成的凝露会影响后续水汽在样品表面的附着,湿区面积的增长速度随着加湿时间的增长而逐渐减缓。

加湿0~30 min阶段,由于样品表面与空气的接触面积相对较大,该阶段的湿区面积增长速度最快。随着加湿时间的增长,样品表面的湿区面积不断增大,样品表面与空气的可接触面积不断减小,使得湿区面积的增长速度减缓。加湿60~150 min阶段,由于样品表面已形成的大面积地湿区,导致空气中的水汽更多的被吸附在已有地凝露液滴上,试验样品表面的湿区面积增长速度明显减缓。

3) 对液滴平均接触面积的影响

通过图像识别提取凝露试验样品的凝露形貌参数,样品表面凝露液滴的平均接触面积随时间的变化曲线如图11所示,随加湿时间的增加,凝露液滴平均接触面积的增长速度逐渐加快。

加湿0~60 min阶段,样品表面不断形成新的凝露液滴,导致液滴平均接触面积增长缓慢,加湿60~90 min阶段,由于样品表面与空气的可接触面积不断减小,已有液滴表面与空气的可接触面积不断增大,导致空气中的水汽更多的被吸附于已有液滴上,液滴增大速度大于凝露产生速度,液滴平均接触面积不断增大。

2.3 不同液滴形貌下沿面放电的发展过程

为研究液滴形貌对沿面放电发展过程的影响,在保证

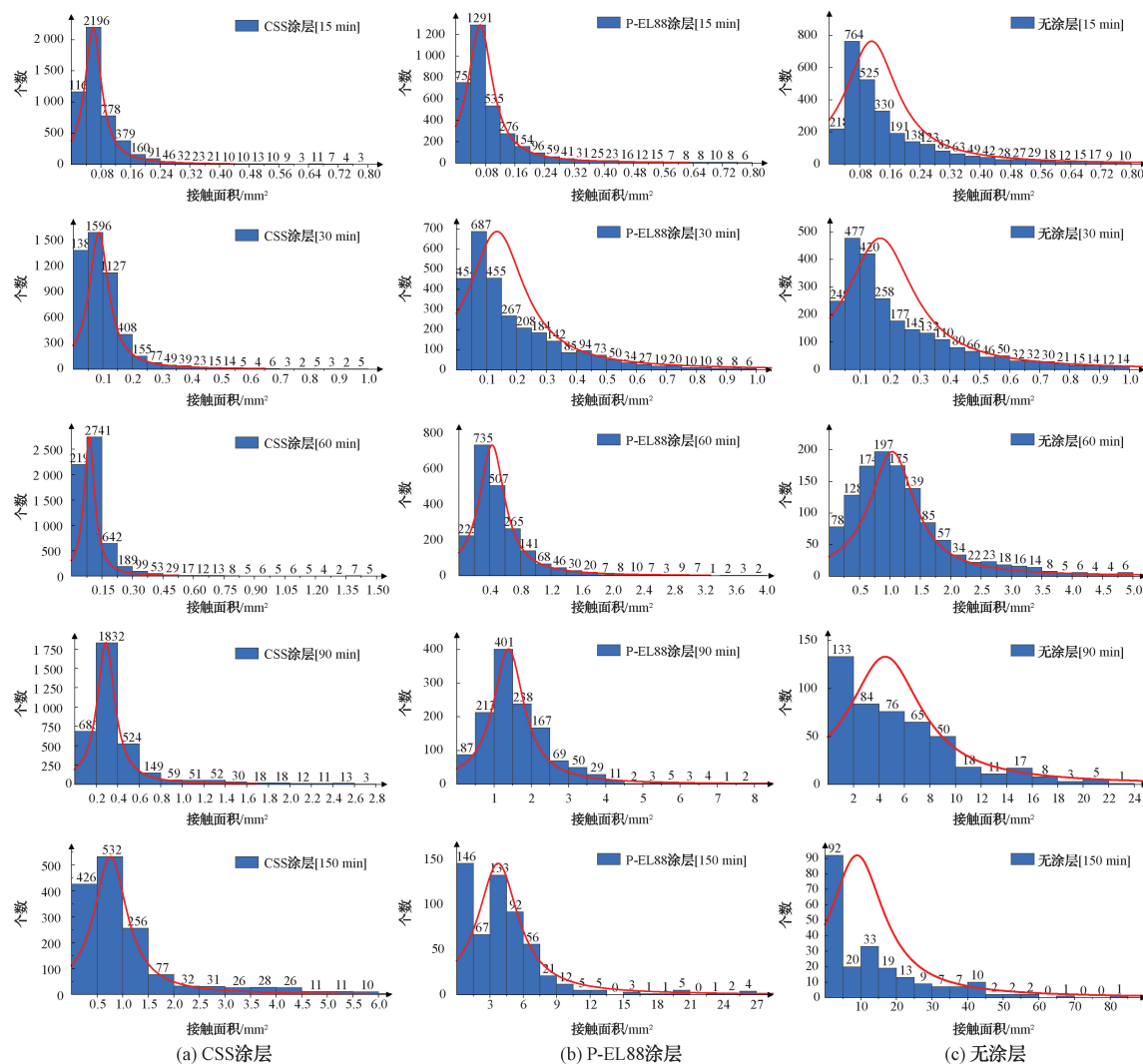


图9 凝露分布特性

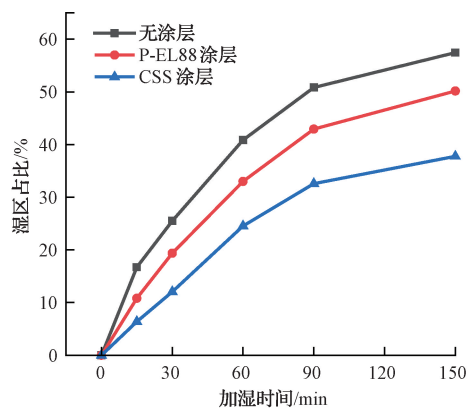


图10 样品表面湿区占比随时间的变化曲线

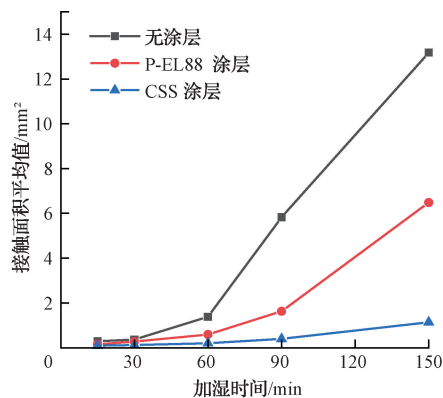


图11 样品表面液滴平均接触面积随时间的变化曲线

温度和相对湿度不变的条件下,分别选取干燥状态、加湿 15 min、加湿 30 min、加湿 60 min、加湿 90 min、加湿 150 min 共 6 组试验样品进行放电试验。试验样品短时间加湿后,表面凝露呈小颗粒均匀分布状,其放电发展过程

如图 12 所示。开始加压后液滴在电场力、摩擦力以及自身表面张力的影响下滚动,互相凝聚成大片湿润区域并向两极延伸。低阻通道的形成使得泄漏电流增大,在电流热效应的影响下出现部分烘干区,烘干区的高阻性使其所分

担的电压激增,在承担电压超过临界场强后发生闪烁放电。放电通道的产生使得大量泄露电流流过,通道末端附近湿润区域的电流密度也因此增大,加速了水分的蒸发,以至于出现更多的干区直至形成贯通两极的“干区—液滴”通道如图12(d)所示,两端电极继续加压至临界值后发生沿面闪络。

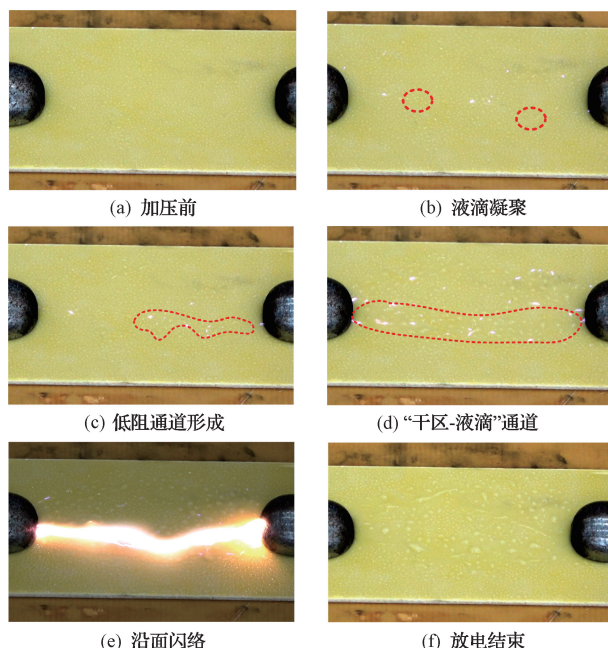


图12 凝露初期样品表面湿闪发展过程

在试验样品长时间加湿后,样品表面凝露呈大块水膜不均匀分布状,其放电发展过程如图13所示。开始加压后,低阻通道的存在使得泄露电流急剧增大,电极附近的水分开始快速蒸发并形成小型干区,由于小型干区与大块水膜串联,因此干区承担的电压激增超过临界值,发生局部放电并烧蚀板面造成绝缘破坏,两端电极继续加压后烧蚀路径末端与接地极之间的气隙被击穿。

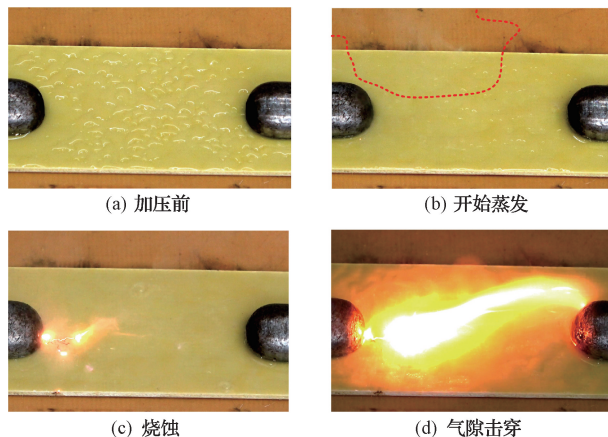


图13 凝露后期样品表面湿闪发展过程

总结不同样品沿面放电发展过程,表面凝露闪络的发

展过程主要包括如下4个阶段。

1)样品表面湿润,在高湿度环境下,空气中的水蒸气不断凝结于样品表面使其湿润。

2)液滴形态变化,在电场作用下,液滴不断融合、扩散,在凝露表面形成大面积水膜与干区串联,使得干区承担大部分电压,当干区的场强超过临界值,发生局部放电现象。

3)局部放电,局部电弧不断“熄灭—重燃”,极不稳定。由于电弧通道流经大量泄露电流,使得干燥区不断扩大,最后形成贯通两极的“干区—液滴”通道。

4)发生闪络,随着电压的上升,使得凝露表面达到临界场强,电弧迅速跃起,发生沿面闪络。

经过分析,凝露闪络发生的关键在于表面泄露电流的大小以及液滴表面的电场分布。泄露电流与凝露表面的湿区面积有关,湿区面积增加时凝露表面的电阻减小,从而使表面泄露电流增大,进而影响闪络电压。液滴表面电场分布受液滴平均接触面积的影响,由于液体表面张力的影响,随着液滴接触面积的增大,液滴逐渐在表面铺开,形状不规则的液滴对电场的畸变作用更强,液滴表面不均匀的电场加速闪络的发生。

2.4 凝露形貌对闪络电压的影响

随着加湿时间增加,样品的闪络电压不断下降,涂覆有憎水涂层样品的闪络电压始终高于无涂层样品,闪络电压随加湿时间的变化曲线如图14所示,闪络电压随加湿时间的变化曲线与湿区占比随时间的变化曲线的变化趋势相反,存在明显的线性负相关性。

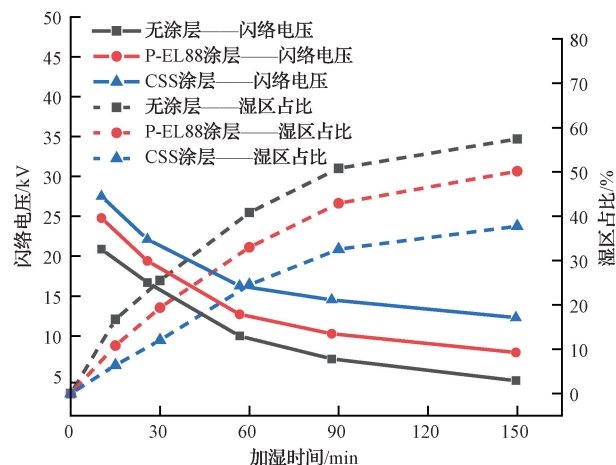


图14 闪络电压与湿区占比的关系

闪络电压除了与湿区面积相关外,还受凝露液滴平均接触面积的影响,为研究液滴平均接触面积对样品湿闪电压的影响,选取3组样品进行对比结果如表2所示。

对比数据中样品表面的湿区占比差值、液滴平均接触面积差值、湿闪电压差值第1组分别为1.23%、 -0.035 mm^2 、 -2.67 kV ;第2组分别为2.65%、 -0.017 mm^2 、 -1.47 kV ;第3组分别为7.08%、 0.031 mm^2 、 -2.17 kV 。

表 2 部分类别样品对比结果

组别	样品类别	湿区占比 /%	液滴平均接 触面积/mm ²	闪络电压 / kV
第 1 组	15 min-P-EL88	10.82	0.157	24.77
	30 min-CSS	12.05	0.122	22.1
第 2 组	15 min-无涂层	16.71	0.293	20.87
	30 min-P-EL88	19.37	0.276	19.40
第 3 组	30 min-无涂层	25.49	0.368	16.68
	90 min-CSS	32.57	0.399	14.51

按照湿区占比对闪络电压的影响进行分析,3 个对比组的闪络电压差值由高到低依次应为第 1 组、第 2 组、第 3 组,然而在不同液滴平均接触面积的影响下,闪络电压差值由高到低的实际排序为第 1 组、第 3 组、第 2 组,液滴平均接触面积同样为闪络电压的重要影响因素。

对比第 1 组与第 2 组,第 1 组数据中的湿区占比差值更小,但是由于其液滴平均接触面积差值远大于第 2 组,在液滴平均接触面积的影响下闪络电压差值更大。对比第 1 组与第 3 组,第 1 组数据中的湿区占比差值高于第 3 组 5.85%,液滴平均接触面积差值低于第 3 组 0.066 mm²,在两种液滴形貌参数的共同影响下,两组闪络电压差值仅相差 0.5 kV。为进一步研究两种凝露形貌参数对凝露闪络电压的影响,对其进行闪络电压的相关性分析。统计学中变量之间的相关程度通常用 Pearson 相关系数、Spearman 相关系数、Kendall 相关系数表示。分析对比图 10、11 和 14 得出,湿区占比和液滴平均接触面积与闪络电压呈负相关,因此采用线性相关程度的统计指标 Pearson 相关系数,其计算方法如下:

$$r(X,Y)=\frac{\sum_{i=1}^n\left(X_i-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^nX_j\right)\left(Y_i-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^nY_j\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n\left(X_i-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^nX_j\right)^2}\sqrt{\sum_{i=1}^n\left(Y_i-\frac{1}{n}\sum_{j=1}^nY_j\right)^2}}\tag{6}$$

凝露闪络电压相关分析计算结果如表 3 所示,通过双尾显著检验湿区占比和液滴平均接触面积与闪络电压的相关性,结果表明在 0.01 水平上两种凝露形貌参数与闪络电压相关性显著,湿区占比对闪络电压的影响更大。

表 3 凝露闪络电压相关性分析

	闪络电压	湿区占比	液滴平均 接触面积
Pearson 相关系数	1	-0.989	-0.696
p 值	—	3.66×10 ⁻¹²	3.98×10 ⁻³

通过放电试验以及凝露参数对闪络电压的相关性分析得到,湿区占比是闪络电压的主要影响因素,液滴平均接触面积对闪络电压的影响小于湿区占比,其影响体现在

湿区占比相差不大的情况下,液滴平均接触面积更小的表面闪络电压更高。

3 结 论

本文提出了一种基于图像识别的凝露形貌特征参数对沿面放电影响的表征方法。通过采用 3 种涂覆有不同憎水涂层的试验样品进行憎水性测试及凝露试验,在分析讨论了不同憎水表面下凝露液滴的发展过程及分布规律的基础上,试验研究了凝露形貌参数对闪络电压的影响,得出如下结论。

1)试验样品的表面憎水性由高到低依次为 CSS 涂层样品、PEL88 涂层样品、无涂层样品,其静态接触角分别为 103.17°、91.60°、80.77°。

2)不同憎水表面下,凝露发展规律如下:(1)凝露表面的湿区占比增长速度逐渐减缓;(2)凝露表面的液滴平均接触面积的增长速度逐渐加快;(3)高憎水性的表面凝露以数目众多的小颗粒形式出现,憎水性越低的表面凝露液滴数量越少,凝露颗粒越大。

3)利用图像识别提取湿区占比和液滴平均接触面积 2 种凝露形貌参数,讨论凝露形貌对放电发展的影响。(1)湿区占比的增大会使表面泄漏电流增大,从而加速烘干区产生,进而加速闪络的发生;(2)液滴平均接触面积的增大会使液滴几何形状改变,加强液体对电场的畸变作用,从而加速闪络的发生。

4)湿区占比和液滴平均接触面积与凝露闪络电压呈高度线性负相关,其中湿区占比对闪络电压的影响更大,但在相同程度湿区面积的情况下,拥有更小液滴平均接触面积的表面闪络电压更高。

5)憎水性涂料通过影响凝露的形貌参数降低基材表面的凝露闪络电压,在相同加湿条件下涂覆有憎水性涂料的基材表面凝露闪络电压更高。

参 考 文 献

[1] 魏登峰,黄勇,卞志文,等. 基于有效加热空间的 12 kV 开关柜加热器布置策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(6): 74-81.

[2] 王利福,刘屹江泽,王焱增. 基于 EEMD 能量矩与 ISSA-SVM 算法的 GIS 局部放电类型识别方法[J]. 电子测量与仪器学报,2022,36(5):204-212.

[3] SHU S, XU J, SHI S, et al. Corona onset characteristics of contact box in switchgear with condensation under high humidity and pollution conditions[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 2022, 12(6): 939-947.

[4] 舒胜文,许俊伟,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]. 高压电压技术, 2023, 49(2): 493-504.

- [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.
- [6] 孙庆峰, 屠晔炜, 刘雄军. 变电站除湿技术研究[J]. 机械设计, 2021, 38(S1): 205-208.
- [7] JIN X, WANG R, HUANG L, et al. The morphology of dryout nanofluid droplet and underlying mechanisms based on coarse-grained molecular dynamic simulations [J]. Journal of Molecular Liquids, 2023, 383 (1):122064.
- [8] WU Y, KUZINA M, WANG F, et al. Equilibrium droplet shapes on chemically patterned surfaces: Theoretical calculation, phase-field simulation, and experiments [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2021, DOI:10.1016/j.jcis.2021.08.029.
- [9] CHEN J, CHEN J, LI L, et al. Droplet rolling angle model of micro-nanostructure superhydrophobic coating surface [J]. The European Physical Journal E, 2021, DOI:10.1140/epje/s10189-021-00036-7.
- [10] LI X, YU J, HU D, et al. Freezing of nanofluid droplets on superhydrophobic surfaces [J]. Langmuir, 2020, 36(43):13034-13040.
- [11] MILJKOVIC N, ENRIGHT R, WANG E N. Effect of droplet morphology on growth dynamics and heat transfer during condensation on superhydrophobic nanostructured surfaces[J]. ACS Nano, 2012, 6(2): 1776-1785.
- [12] 刘轩东, 胡钰骁, 李亚伟, 等. 凝露状态对硅橡胶绝缘表面闪络特性影响的实验研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 3047-3054.
- [13] 耿江海, 郭沁, 许自强, 等. 基于改进形态学的户外设备凝露发展过程研究及防凝露措施优化 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16 (22): 213-218.
- [14] 牛莉, 方佳鹏, 李媛媛, 等. 有机硅-SiO₂ 复合涂层表面结构对其凝露和闪络特性的影响[J/OL]. 武汉大学学报(理学版):1-9[2023-08-02].
- [15] 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.
- [16] 生玮, 宋龙波, 康灿. 液体介质对上升气泡几何形态和运动特征的影响[J]. 化工学报, 2023, 74(10): 4140-4152.
- [17] BI M, TAN H, PENG H, et al. Study on the AC flashover voltage of corona-aged epoxy resin insulating surfaces under contamination and condensation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1205-1213.
- [18] 李群, 赵宇民, 陈天恒, 等. 环氧树脂/SiO₂ 纳米复合材料陷阱分布及直流闪络特性[J]. 南方电网技术, 2019, 13(6): 57-63.
- [19] 曾绍攀, 廖振陆, 吴晓杰, 等. 不同光照下的绝缘子串劣化灰度图像识别方法[J]. 激光与红外, 2022, 52(11): 1635-1640.
- [20] 宋宝玉, 王波涛. 基于树莓派嵌入式平台的车道线检测算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(23): 93-98.
- [21] 郑中华, 陈文坚, 卢宇, 等. 一种皮带轮规格测量及微缺陷检测方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11): 58-63.
- [22] 田昌, 蔡杨, 苏明旭. 基于图像法表征复杂背景下石膏雨液滴实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9): 224-231.
- [23] SINGH S, MITTAL N, SINGH H, et al. Improving the segmentation of digital images by using a modified Otsu's between-class variance[J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, DOI: 10.1007/s11042-023-15129-y.
- [24] QU X, WANG J, WANG X, et al. Fast detection of dam zone boundary based on Otsu thresholding optimized by enhanced harris hawks optimization[J]. Plos One, 2023, 18(2): e0271692.
- [25] 于希明, 彭宇, 姚博文, 等. 基于 FPGA 并行计算的多阈值分级海陆分割方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9): 166-177.
- [26] 李梦, 韩帮国. 双参数车辆行驶偏离提醒与预警策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(10): 82-90.

作者简介

贾子建, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压绝缘技术。

E-mail: 18163562809@ctgu.edu.cn