

# 超疏水绝缘表面直流沿面污闪特性研究

邹乔戈, 王晟伍, 陈劲宇, 刘楠, 郭浚安, 李黎, 陈俊武

(华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**利用一种具有优异憎水性和自清洁特性的仿生超疏水涂层制备绝缘表面,设计雾水润湿下污秽绝缘表面的直流闪络试验,研究仿生超疏水绝缘表面的直流污闪特性。同时依据表面液滴的浸润状态,从电场角度对超疏水涂层表面的污闪电压进行预测。结果表明:超疏水涂层表面在润湿加压过程中具有自洁性,闪络经表面液滴和干区形成。本文提出的方法预测的闪络电压分别与液滴体积呈负相关,与接触角呈正相关,预测值与实测值相吻合,精度高于传统预测模型。

**关键词:**超疏水;沿面闪络;直流污闪模型;电场分布;闪络电压

**中图分类号:**TM215;TM854 **DOI:**10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.05.007

## Study on DC surface pollution flashover characteristics of superhydrophobic insulation surfaces

ZOU Qiaoge, WANG Shengwu, CHEN Jinyu, LIU Nan, GUO Jun'an, LI Li, CHEN Junwu

(School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A bionic superhydrophobic coating with excellent hydrophobicity and self-cleaning properties was used to prepare insulation surfaces, a DC flashover test of the contaminated insulation surface wetted by fog water was designed to study the DC pollution flashover characteristics of the bionic superhydrophobic insulation surface. At the same time, according to the wetting state of surface droplets, the pollution flashover voltage of the superhydrophobic coating surface was predicted from the perspective of electric field. The results show that the superhydrophobic coating surface exhibits self-cleaning properties during wetting and voltage applying process, and the flashover is formed through surface droplets and dry regions. The flashover voltage predicted by the method in this paper is negatively correlated with the droplet volume and positively correlated with the contact angle, the predicted value is in good agreement with the measured value, and the accuracy is higher than that of the traditional prediction model.

**Key words:** superhydrophobicity; surface flashover; DC pollution flashover model; electric field distribution; flashover voltage

## 0 引言

为实现“双碳”发展目标,能源开发逐步向绿色能源靠拢。目前,风力发电在我国电力总装机中的比重已超过7%,并在中东部地区远海处依然具有开发海上风电的巨大潜力<sup>[1]</sup>。为配合海上风电的电能输出,沿海直流输电线路也在不断建设中<sup>[2]</sup>。在高湿、高盐雾的海洋环境下,受到直流电场的单极性作用,污秽更容易附着在固体绝缘表面,因此对风电机组以及沿海直流输电线路的绝缘系统提出了更为严苛的要求<sup>[3]</sup>。

在外绝缘系统中,气固绝缘界面是整个绝缘体系的薄弱环节之一,易受外界环境影响降低绝缘强度,从而发生沿面放电甚至闪络现象,导致绝缘性能丧失。在电力器件表面涂覆室温硫化硅橡胶(RTV)涂层是提升现代电力系统外绝缘强度的主要措施之一,但是由于RTV涂层的疏水性有限且易老化<sup>[4-5]</sup>,难以满足现阶段特高压输电工程的外绝缘防污闪要求。为了降低污闪事故发生的概率,需要针对气固绝缘界面做出进一步的改进,乃至引入新型绝缘涂层。

仿生超疏水涂层拥有优异的疏水性能,主要体现在极大的静态接触角( $>150^\circ$ )和极小的滚动角( $<10^\circ$ )<sup>[6-7]</sup>,当液滴与该类涂层表面接触时,能轻易发生弹跳、滚动弹跳现象,使液滴从表面滑落,带走

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(52077091);硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金项目(SYSJJ2021-02)

表面累积的污秽。因此,将仿生超疏水涂层应用于电力器件表面可有效降低污闪事故发生的概率。赵林杰<sup>[8]</sup>研究了憎水性材料表面水珠、水带结构形态对材料防污闪性能的影响,邵仕超等<sup>[9]</sup>在此基础上研究了电场分布和电弧发展与水带长度及弯曲度的关系。颜薪瞩等<sup>[10]</sup>和高佳峻等<sup>[11]</sup>研制了一种甲基硅树脂超疏水涂层,能够提高污秽闪络电压,适用于室内外高压输电绝缘系统中介质的表面改性。同时研究人员对于污闪过程和污闪模型也进行了大量研究。F OBENAU<sup>[12]</sup>首先提出了平板电路模型,将沿面发展的局部电弧过程简化为局部电弧与剩余污层串联。P K NEUMARKER<sup>[13]</sup>和R WILKINS<sup>[14]</sup>针对闪络路径上剩余污层电阻开展研究,明确指出剩余污层电阻与其形状密切相关。

以上研究在工程应用中取得了一定成果,说明超疏水绝缘表面具备降低污闪事故发生概率的潜力,但大多是针对雾水天气下超疏水表面自清洁性能的简单测试,针对超疏水绝缘表面污闪机制的研究仍缺乏足够的试验数据及明确的结论。本研究通过一种简便、低成本的方法制备超疏水绝缘表面,从理论和试验方面对超疏水表面的直流污闪特性进行分析。并依据表面液滴的浸润状态,从电场角度对超疏水表面的沿面污闪电压进行预测,将预测结果与实验结果和理论结果进行比较来判断其准确性,以期超疏水涂层在海上风电机组以及沿海直流输电系统的应用提供参考。

## 1 仿生超疏水涂层的制备

超疏水涂层的制备方法主要分为物理法和化学法两大类,目前常用的制备方法有喷涂法、模板法、电化学法和刻蚀法等<sup>[15-16]</sup>。本研究参考荷叶上表皮结构,使用喷涂法制备了一种由底漆与面漆两部分共同构成的仿生超疏水涂层表面。其中面漆由SiO<sub>2</sub>纳米颗粒(SiO<sub>2</sub>-NPs)构成,SiO<sub>2</sub>-NPs是通过六甲基二硅胺烷(HMDS)对正硅酸乙酯(TEOS)的控制性水解产物进行修饰得到。底漆部分则由树脂、尼龙粉和助剂等物质混合组成,主要用作连接面漆与基底的中间层,提高涂层对基底的附着力。制备工艺如图1所示,使用气枪先后将底漆与面漆喷涂在基底表面,待干燥成型后得到由面漆与底漆共同组成的微纳级结构仿生超疏水涂层。

通过扫描电镜观察制得的涂层如图2所示,可以看出涂层表面存在粗糙的微米级乳突阵列结构,而各微米级乳突上又排列有等尺寸的纳米级柱体。正因为存在微米与纳米相复合的分层结构,导致各

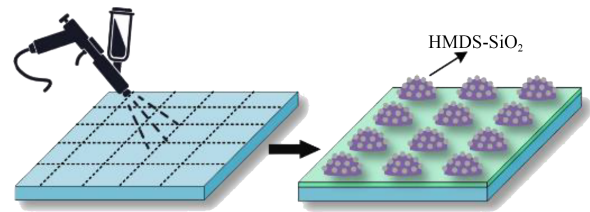


图1 仿生超疏水涂层制备

Fig.1 Preparation of biomimetic superhydrophobic coating

乳突与柱体间存在大量空气,这些空气垫阻止了液滴与涂层表面完全接触,使液滴在表面呈现为球冠状,减小了液滴与涂层的接触面积,实现了涂层的超疏水性。经测量,该涂层表面去离子水的静态接触角大于150°,滚动角小于10°。涂层也具备优异的绝缘性能,漆膜的电气强度大于8 kV/mm。

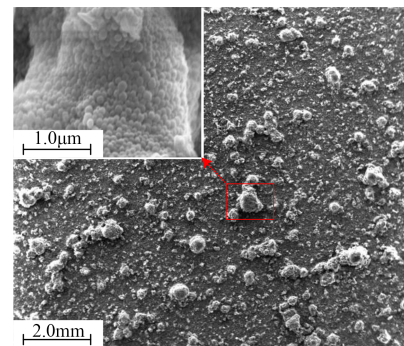


图2 仿生超疏水涂层的表面微观结构

Fig.2 Surface microstructure of the biomimetic superhydrophobic coating

## 2 超疏水表面直流沿面污闪特性分析

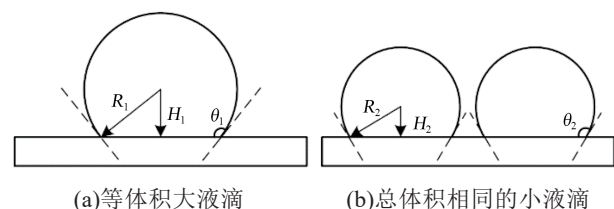
### 2.1 超疏水表面液滴及污秽的分布形态

涂层表面的污闪电压取决于干燥区的电弧压降和污秽区的剩余电阻压降,故首先针对污秽区的液滴分布形态进行分析。

当向涂层表面滴下相同体积的水分后,涂层表面会形成如图3所示的两种液滴体系,其中大小液滴的体积 $V_1$ 、 $V_2$ 可由式(1)表示。

$$V_i = \frac{1}{3} \pi R_i^3 (2 - 3 \cos \theta_i + \cos^3 \theta_i) \quad (1)$$

式(1)中: $\theta_i$ 为液滴的接触角; $R_i$ 为液滴半径; $i=1,2$ 。



(a)等体积大液滴

(b)总体积相同的小液滴

图3 涂层表面液滴体系

Fig.3 Droplet system on coating surface

液滴的静态接触角与液滴体积无关,从相关试验可知,当改变液滴的体积时,液滴静态接触角的波动范围仅为1%<sup>[17]</sup>。故在两种等体积的液滴体系下,由 $V_1=2V_2$ 可得 $R_1=\sqrt[3]{2}R_2$ 。

液滴体系所具有的总能量包括表面自由能和重力势能。以涂层表面为零势能面,小液滴体系相较于大液滴体系而言,整个体系的重力势能变化量( $\Delta E_g$ )如式(2)所示。

$$\Delta E_g = 2\rho V_2 g H_2 - \rho V_1 g H_1 \quad (2)$$

式(2)中: $\rho$ 为液滴密度; $V_1$ 、 $V_2$ 为液滴体积; $H_1$ 、 $H_2$ 为液滴的重心高度; $g$ 为重力加速度。

当液滴的接触角为 $\theta$ 时,体系的重力势能变化量可表示为式(3)。

$$\Delta E_g = \frac{2\rho V_2 g (3 - 2\cos\theta - \cos^2\theta)}{8 + 4\cos\theta} (1 - \sqrt[3]{2}) R_2 \quad (3)$$

因为超疏水表面液滴接触角大于 $90^\circ$ ,同时结合液滴的质心变化情况可以判断小液滴体系的重力势能小于大液滴体系的重力势能,即 $\Delta E_g < 0$ ,所以只能通过增加液滴体系的表面自由能来维持体系能量平衡。基于纯水液滴的比表面能公式<sup>[18]</sup>,在相同环境下,两种体系气-液界面的比表面能变化量 $\Delta E_s$ 如式(4)所示。

$$\Delta E_s = \frac{\pi^2 (N_L - N_V)^2 (1 - \cos\theta)}{12r_L^2} (2 - \sqrt[3]{4}) R_2 \quad (4)$$

式(4)中: $N_L$ 、 $N_V$ 分别为单位体积液相和气相材料中的分子数; $r_L$ 为液滴中分子间的平衡距离。

记单个小液滴的表面能为 $E_{s2}$ ,从式(4)可得,当液滴体系发生变化时,小液滴体系为维持能量平衡会增加体系的总表面能,大液滴具有的表面能是 $E_{s1} = \sqrt[3]{4} E_{s2} \approx 1.59 E_{s2}$ ,因此虽然体系总表面能增大,但是体系中单个液滴的表面能却会减少,使得液滴本身更加稳定。综上可知,超疏水涂层表面的液滴倾向于以更小的体积滞留于涂层表面,液滴体积总是小于普通疏水表面,不会存在大面积的水带。

随着润湿程度的提高,涂层表面的液滴体积逐渐增大,在电场和重力作用下无法维持自身稳定便会发生滚动现象,由于在超疏水涂层表面存在空气垫结构,且液滴在其表面呈现为Cassie接触状态,液滴会吸附滚动路径上的污秽颗粒,并带离表面<sup>[19]</sup>,使得污秽不会在超疏水涂层表面呈现结块现象,残留在超疏水涂层表面的仅是包含污秽的独立微小液滴,有益于提高超疏水涂层表面的沿面闪络电压。

## 2.2 超疏水表面污闪电压预测

直流污秽闪络的过程宏观上可分为积污、湿

润、局部放电以及放电发展形成闪络4个阶段。当表面污秽发生潮解时,在电场作用下,局部场强大于表面临界空气的电气强度,且泄漏电流足够大,能维持电弧持续,则绝缘子表面会发生污秽闪络。

Obenaus平板模型适用于亲水性表面,如图4(a)所示,亲水性表面剩余污层较大,呈长条状,连接层的电弧较长,可通过式(5)计算得到亲水性表面污秽闪络的临界电压。

$$U_c = A^{n+1} L r_c^{\frac{n}{n+1}} \quad (5)$$

式(5)中: $U_c$ 为临界闪络电压; $A$ 、 $n$ 为电弧参数; $L$ 为闪络总长度; $r_c$ 为剩余污层电阻,其大小跟污秽区长度 $x$ 和污秽含量有关。

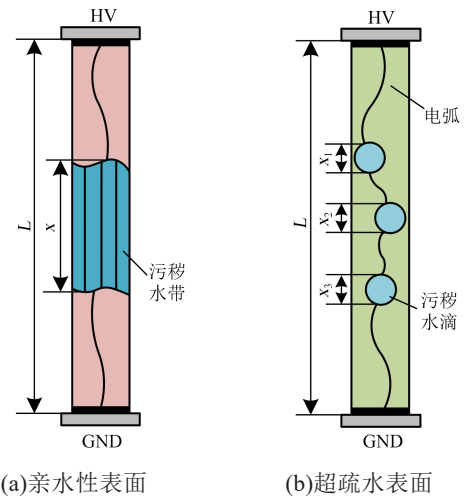


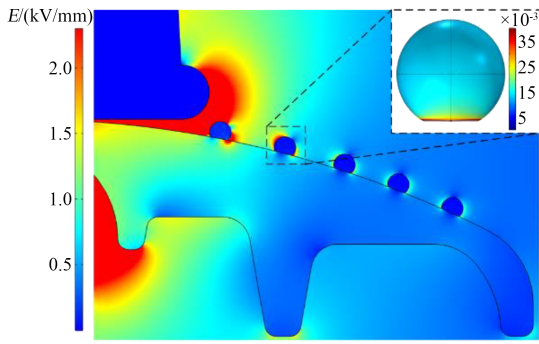
图4 两种表面放电模型

Fig.4 Two surface discharge models

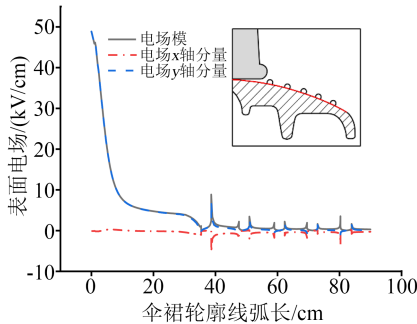
而超疏水涂层表面仅残留小体积的污浊液滴,表面的泄漏通道是由多段空气短干区与污浊液滴串联而成,单个污浊液滴处的泄漏长度为 $x_i$ ,如图4(b)所示,各液滴之间通过干燥区连接,当干燥区场强值超过起晕场强时,便会在该处发生微放电。由于超疏水涂层表面存留的污浊液滴长度均小于临界闪络长度<sup>[8]</sup>,超疏水涂层表面是否发生污闪主要取决于干带沿面空气能否发生碰撞电离并产生局部电弧桥接污浊液滴。

与亲水性表面不同,超疏水涂层表面仅会残留离散分布的污浊液滴,其表面的电场分布以及闪络路径均需进一步研究。为明确超疏水涂层的防污闪特性,以三片涂覆有仿生超疏水涂层串接的XP-70绝缘子为研究对象,对绝缘子串两端施加35 kV的电压差,通过Comsol软件仿真得到绝缘子伞裙涂层表面由于液滴引起的场强畸变情况如图5所示。

由图5可知,液滴对绝缘子表面电场分布的畸变明显,尤其在沿爬电路径上液滴表面处场强发生



(a)伞裙表面存在液滴时电场强度畸变云图



(b)伞裙表面存在液滴时各场强分量畸变情况

图5 液滴对伞裙表面电场畸变的影响

Fig.5 The influence of droplets on the electric field distortion on insulator surface

陡增,距离绝缘子轴线越近,液滴表面电场强度越大,使连接液滴的干燥区最大场强出现在液滴-空气-绝缘子三相交界处。而液滴内部由于屏蔽作用与外界空气不同,内部最大场强出现在液滴与涂层交界面处,故闪络更易从液滴两侧及液滴底部与涂层表面交界处形成,明确了闪络的发展路径。

基于闪络发展路径及空气液滴介质串联模型,设涂层表面分布有  $n$  个大小相等的污浊液滴,则污秽区闪络路径总长度  $x$  可表示为式(6)。

$$x = \sum_{i=1}^n 2rf_i f_2 \quad (6)$$

式(6)中: $f_1$ 、 $f_2$ 分别为涂层纳米级和微米级结构的固液接触面积分数; $r$ 为单个液滴浸润区半径,可以通过液滴体积  $V$  和静态接触角  $\theta$  进一步表示为式(7)<sup>[20]</sup>。

$$r = \left[ \frac{3V}{\pi(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)} \right]^{\frac{1}{3}} \sin\theta \quad (7)$$

而  $f_1$ 、 $f_2$  的乘积可以通过 S HERMINGHAUS<sup>[21]</sup> 提出的分级结构超疏水涂层表面静态接触角计算公式计算,用接触角表示为式(8)

$$f_1 f_2 = \frac{\cos\theta + 1}{\cos\theta_0 + 1} \quad (8)$$

式(8)中, $\theta_0$ 为本征接触角,取值为  $107^\circ$ 。由于处于电场中的液滴会沿电场方向拉长变形,引入液滴形

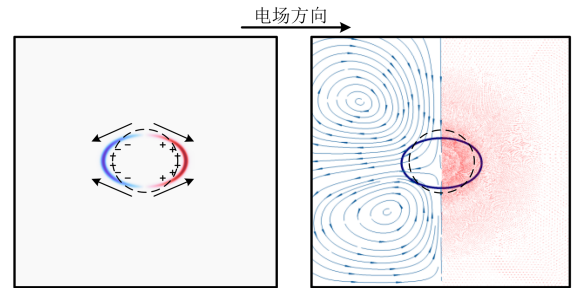
变参数  $D$  对湿区长度进行细致化描述。根据 G TAYLOR 的理论<sup>[22]</sup>,形变参数  $D$  的计算公式如式(9)所示

$$D = \frac{X - Y}{X + Y} = C_{aE} \frac{F_d(A, B)}{3(1 + A)^2} \quad (9)$$

式(9)中: $X$ 、 $Y$ 分别是液滴沿电场方向的长度和垂直于电场方向的长度; $A$ 、 $B$ 分别为液滴和空气的电导比和介电比; $C_{aE}$ 为电毛细管数,用于描述电场力与表面张力之间的关系<sup>[23]</sup>; $F_d(A, B)$ 为形变判别参数,其计算公式如式(10)所示。

$$F_d(A, B) = 1 - 3B + A + A^2 \quad (10)$$

通过 Comsol 仿真软件搭建直流电场和流体的耦合仿真,得到液滴的俯视角度形变情况,结果如图6所示,其中虚线部分是未受电场力时的初始形状。从图6可以看出,当液滴在直流电场中时,沿电场方向上液滴的两端会感应异极性电荷,导致液滴两端受力及移动加剧,从而促使液滴被拉长变形。



(a)空间电荷分布 (b)空气及液滴流体速度分布

图6 直流电场下表面残留液滴形变模拟结果

Fig.6 Simulation results of surface residual droplet deformation under DC electric field

从仿真结果可知,液滴沿电场方向的形变远大于垂直于电场方向的形变,故简化预测方法,忽略液滴垂直于电场方向的形变,则考虑电场作用下的污秽湿区总长度  $x$  可以表示为式(11)。

$$x = \frac{(1 + D)(\cos\theta + 1)}{(1 - D)(\cos\theta_0 + 1)} \left[ \frac{24n^3 V \sin^3\theta}{\pi(2 - 3\cos\theta + \cos^3\theta)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

沿面闪络空气中电弧的形成受气体的电气强度限制,局部电弧一旦发展至串接湿区,涂层表面闪络即会发生。因此临近闪络发生时,干燥区的平均电场强度即为气体击穿的临界场强  $E_a$ ,通过球心沿外电场  $E_a$  方向设定极轴,  $E_m$  为污浊液滴内部场强,以球心为原点建立球坐标系如图7所示。

由于残留液滴体积很小,且实验表明仿生超疏水涂层表面污浊液滴中所包含的污秽量小于  $10\%$ <sup>[24]</sup>,则污浊液滴中可溶并形成自由移动的离子电荷可以忽略不计。故污浊区电势  $\varphi_m$  和干燥区电

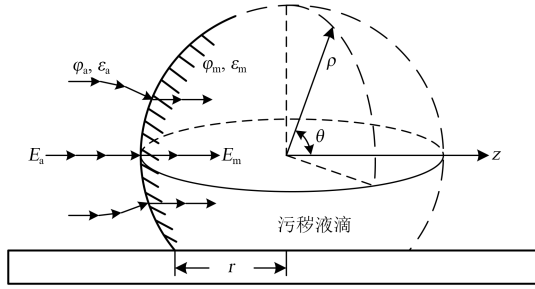


图7 涂层表面电场示意图

Fig.7 Schematic diagram of the electric field on coating surface

势  $\varphi_a$  均满足拉普拉斯方程,如式(12)所示。

$$\nabla^2 \varphi_{a,m} = 0 \quad (12)$$

基于电场高斯定理,设定污浊液滴表面处的边界条件,如式(13)所示。

$$\begin{cases} \varphi_a|_{\rho=R} = \varphi_m|_{\rho=R} \\ \varepsilon_a \frac{\partial \varphi_a}{\rho}|_{\rho=R} = \varepsilon_m \frac{\partial \varphi_m}{\rho}|_{\rho=R} \end{cases} \quad (13)$$

式(13)中,  $\varepsilon_a$  和  $\varepsilon_m$  分别是空气和污浊液滴的介电常数。由于污浊液滴中混合有硅藻土颗粒,而硅藻土和水的相对介电常数分别为3.9和81,则根据非均匀电介质混合规则,混合物的介电常数可表示为式(14)。

$$\varepsilon'_{\text{mix}} = v_1^j \varepsilon_1 + v_2^j \varepsilon_2 \quad (14)$$

式(14)中:  $\varepsilon_1$ 、 $\varepsilon_2$  分别是物质1和物质2的介电常数;  $v_1$ 、 $v_2$  分别是物质1和物质2的体积分数;  $j$  为指数常量,此处按并联混合方式取  $j = 1$ 。

由于液滴中可溶污秽较少,即残留于表面的污浊液滴以水分为主,因此混合物的介电常数和水的相对介电常数接近。

根据所建立的方程和边界条件即可求出临界闪络产生时液滴内部的电场强度,如式(15)所示。

$$E_m = \frac{3\varepsilon_a}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_a} E_a \quad (15)$$

已知沿面污秽闪络路径以及干燥区和污浊液滴内平均电场强度值,即可得到超疏水涂层表面临界污闪电压  $U_c$ ,如式(16)所示。

$$U_c = E_a(L - x) + \frac{3\varepsilon_a E_a}{\varepsilon_m + 2\varepsilon_a} x \quad (16)$$

相同闪络路径时干闪电压为  $U_L = E_a \times L$ ,可求得临界污闪电压和干闪电压之间的比值关系为  $k = U_c / U_L$ ,结合式(11),可将比值关系  $k$  转换成接触角以及液滴体积相关的函数,如式(17)所示。

$$k = 1 - \frac{(1 + D)(\cos \theta + 1)(\varepsilon_m - \varepsilon_a)}{(1 - D)(\varepsilon_m + 2\varepsilon_a)L(\cos \theta_0 + 1)} \times \left[ \frac{24n^3 V \sin^3 \theta}{\pi(2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (17)$$

基于式(17)可计算出超疏水涂层表面污闪电压与干闪电压之间的关系。通过液滴体积  $V$  和接触角  $\theta$  表征润湿和染污程度,润湿和染污程度越高,液滴体积越大,接触角越小。定义涂层表面液滴间距为  $d$ ,当涂层表面平均每1 cm存在1个污浊液滴时,即  $d = 1$  cm时,依据式(17)将污闪电压和干闪电压的比值随污浊液滴静态接触角和体积变化的曲线绘制如图8所示。

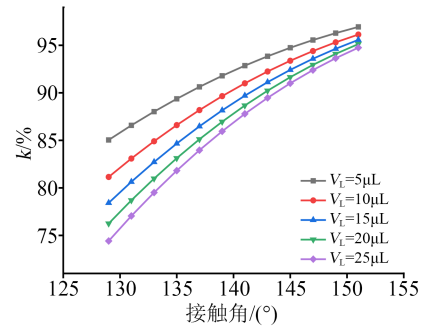


图8 液滴体积及接触角对污闪电压的影响

Fig.8 Influences of droplet volume and contact angle on pollution flashover voltage

从图8可知,微纳分级结构绝缘表面的临界污闪电压不低于干闪电压的70%,同时染污越严重,液滴的接触角越小,污闪电压最大会出现20%左右的波动变化。残留液滴体积同样会影响污闪电压,残留液滴的体积越大,闪络路径上污区长度越长。因此相同染污条件下,润湿程度越高,污闪电压越低。润湿程度还会间接影响液滴对污秽的牵引和吸附量,从图8可见,当染污程度严重,对应液滴的接触角较小时,液滴体积对污闪电压的影响较大,会出现10%左右的波动变化,而染污程度较轻时,润湿程度对污闪电压的影响很小。基于上述分析,所预测的污闪电压计算结果与现实情况相符,超疏水表面的污闪电压接近干闪电压,且受污秽程度和润湿程度的影响情况符合预期。

### 3 试验

基于上述理论分析,开展人工污秽闪络试验,通过设计表面污秽闪络试验进行对比分析,验证超疏水涂层表面的防污闪性能及所建立的污秽闪络模型的准确性。

### 3.1 试验试品

试品采用喷涂有仿生超疏水涂层的玻璃基板,其尺寸为15 cm×7 cm×0.5 cm,参考XP-70型绝缘子的伞裙斜度,将试品与水平面呈20°倾斜角摆放。试品表面贴有半径为1 cm的圆形锡箔片作为电极,两电极之间的距离设置为5 cm。连接电极的导线通过绝缘胶带固定在玻璃绝缘支柱上,调整高度保证其与试品表面呈45°夹角摆放,如图9所示。同时将涂覆有RTV涂层的基板作为对照组进行闪络试验结果比较。

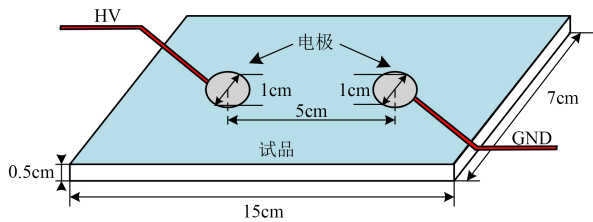


图9 实验试品与电极示意图

Fig.9 Schematic diagram of sample and electrode

本试验采用硅藻土颗粒作为不溶不导电性污秽,氯化钠颗粒作为可溶导电性污秽<sup>[25-26]</sup>,充分考虑硅藻土颗粒的吸水性以及室温条件下盐的溶解度,设置3种染污等级,如表1所示。

表1 染污程度参照表

Tab.1 Contamination degree reference table

染污程度	灰密/(mg/cm <sup>2</sup> )	盐密/(mg/cm <sup>2</sup> )
轻度	0.3	0.05
中度	0.6	0.1
重度	1.2	0.2

### 3.2 试验系统

搭建人工可控外部环境系统及施压、测量回路,主要包括温湿度可控雾室、污秽试验电源、闪络电压监测设备和操作系统,如图10所示。图10中人工可控外部环境系统包含温湿度测量及调节装置,以保证试验温度为当前环境温度,波动范围为±1℃。外置一台水雾发生器产生人造微米级水雾,并通过绝缘套管将水雾引入系统中,保证相对湿度在当前环境湿度至99%范围内可调。试验采用100 kV/0.5 A污秽试验变压器和高压整流硅堆作为试验直流电源。整个试验过程中通过超高速摄影机记录,并使用分压器测量试品表面的闪络电压。

### 3.3 试验方法

根据GB/T 22707—2008的试验规定<sup>[27]</sup>,本文的试验方法如下:

(1)试品预处理。使用去离子水对试品表面进

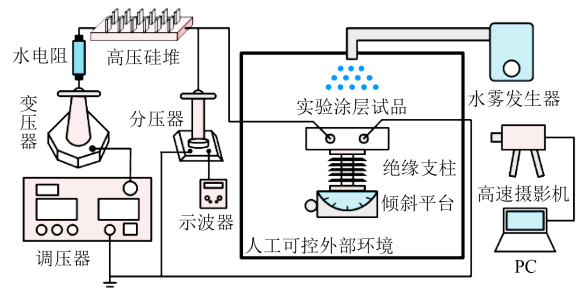


图10 闪络试验装置接线示意图

Fig.10 Schematic diagram of flashover test device wiring

行冲洗,减少因污秽、粉尘和可迁移性疏水物质残留于表面引起的试验误差,洗净后用无屑纸轻轻沾拭,吸净表面残留水滴,干燥待用。

(2)试品染污。采用筛粉法对试品进行染污,参照表1的盐密和灰密配置不同程度的污秽液,并高温蒸干、研磨备用。筛粉时,在装有污秽颗粒的容器瓶口扎紧两层200目的尼龙网,在试品上方轻敲容器底部,使污秽颗粒均匀筛落至表面。染污过程中通过电子分析天平称量染污前后的样品质量,达到污秽密度目标数值即停止筛粉。

(3)试品润湿。将试品置于玻璃绝缘支柱上,启动水雾发生器,通过布置于可控环境系统顶部的放气孔使雾气分布均匀,控制水雾的输入速率为380 mL/h,持续通气15 min,以保证试品表面充分润湿。

(4)施压及测量。试品表面两电极分别连接电源的高低电压端,首先以0.5 kV/s的升压速度施压至预计闪络电压的60%,然后以0.2 kV/s的速度均匀升压直至闪络发生,以高速摄影机记录试品表面润湿和污秽情况及表面均匀加压至闪络的全过程。针对同一RTV试品仅进行一次闪络试验,记录加压过程中出现的最高电压,即为RTV表面的污闪电压。针对超疏水试品,按升降法来改变电压水平,电压级差设计为预试验击穿电压的10%,即试品若在电压水平 $U_i$ 下通过耐受,则提高10%电压,若发生闪络,则降低10%电压进行下一次试验,反复试验直到有效次数在10次以上,此时表面的闪络电压值如式(18)所示。

$$U = \frac{\sum(n_i U_i)}{N} \quad (18)$$

式(18)中: $U$ 为50%闪络电压; $U_i$ 为某一电压水平; $n_i$ 为相同施加电压水平下进行的闪络次数; $N$ 为有效试验次数<sup>[27-28]</sup>。

(5)取出污闪后的涂层,将试品置于温度为60℃的恒温箱中蒸干表面水分并称量闪络后试品

表面的污秽质量。

## 4 试验结果与分析

### 4.1 污秽闪络放电过程分析

各试品经过充分润湿后,通过高速摄影机拍摄的RTV涂层及仿生超疏水涂层表面的污闪放电过程如图11所示。



图 11 试品表面污秽闪络放电过程

Fig.11 Contamination flashover discharge process on the surface of samples

从图11(a)可以看出,对于超疏水涂层表面,充分润湿后,试品表面仅存在离散分布的小体积污秽液滴,表面整体存在极少的水分和污秽。当施加电压后,在电场的作用下液滴会发生振动,并融合滚动掉落表面,进一步减少了表面水分及污秽的残留量。随着电压升高到一定值后,表面空气达到临界击穿电压,一道明亮的电弧连接两极,闪络发生。闪络路径上污秽液滴极少,基本上通过空气介质构成。闪络结束后,超疏水涂层表面没有明显的烧痕,依然能保持很高的疏水性。

从图11(b)可以看出,对于RTV涂层表面,经过充分润湿后,其表面存在大量较低接触角的污秽液滴,并且体积明显大于超疏水涂层表面的液滴体积。当施加电压后,表面液滴开始流动,大部分液滴融合后逐渐拉长变形、形成液膜,成为固定的泄漏通道。随着外施电压的升高,绝缘子表面的泄漏电流逐渐上升,并沿着表面水带首先在电极与水

带、水带与水带之间产生局部电弧,当外施电压继续升高时,电弧沿表面水带相连,试品表面发生闪络,并由于电流热效应导致表面水分蒸发,形成干燥的高电阻污秽区。当闪络结束后,RTV表面产生明显的烧蚀痕迹,疏水性大幅下降。

### 4.2 染污程度影响分析

依据表1对各基板试品表面进行不同程度的染污,并经过充分润湿后进行闪络试验,试验结果如图12所示。

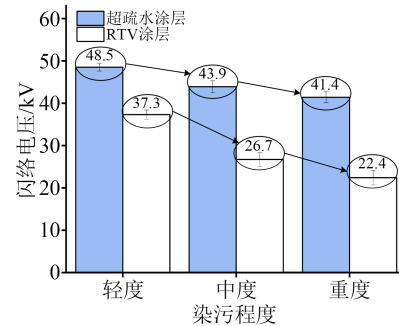


图 12 不同染污程度试品表面闪络试验测量结果

Fig.12 Surface flashover test results of samples with different contamination levels

从图12可以看出,在不同染污程度下,仿生超疏水涂层表面的临界闪络电压明显高于RTV表面的临界闪络电压,在不同染污条件下仿生超疏水涂层表面的临界闪络电压均在40 kV以上,且随着染污程度的提高,超疏水涂层表面的闪络电压相较于RTV涂层表面的闪络电压分别提升了30%、64%、85%。正是因为超疏水涂层表面具有良好的疏水性和自清洁特性,在充分润湿后,液滴滚落会带走大量污秽,使得超疏水涂层表面临界闪络电压受染污程度的影响有限。

充分润湿前及闪络试验结束后超疏水涂层表面的污秽质量如图13所示。从图13可以看出,由于超疏水涂层表面大量污秽随液滴滚落表面,表面剩余的污秽质量大幅减少。且在3种染污程度下,闪络试验后剩余污秽质量均处于极低水平,因此污秽随液滴滚落后涂层表面的清洁程度提高,降低了污层的导电性,污秽对表面闪络电压的影响下降。由于大量污秽随液滴滚落,并且残留的污秽液滴仍能维持较高的接触角和分离状态,保证了超疏水涂层表面具有更多的干燥清洁区域,闪络路径上有更小的液滴和更长的干区,从而提高了超疏水涂层表面的污闪电压。

### 4.3 超疏水表面沿面污闪模型验证

通过SDC-100型接触角测量仪测量3种染污程

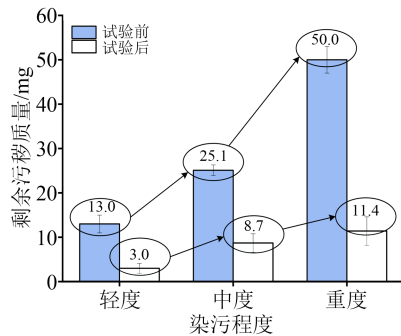


图13 闪络试验前后超疏水涂层表面污秽质量

Fig.13 Dirty quality on the superhydrophobic coating surface before and after flashover test

度下超疏水涂层表面的接触角变化情况,结果如图14所示。从图14可知,随着染污程度的提高,超疏水涂层表面的接触角随之下降,但接触角整体上仍能保持较高水平,始终维持疏水性。

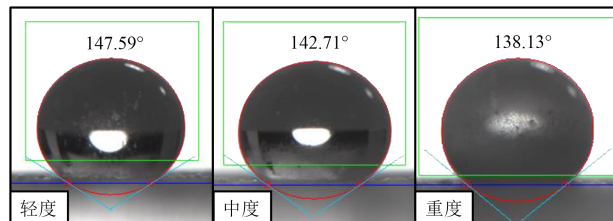


图14 3种染污程度下超疏水涂层表面的接触角

Fig.14 Contact angles on the superhydrophobic coating surface under three pollution levels

人工闪络试验测得超疏水涂层表面的干闪电压为51.4 kV。通过本文建立的超疏水涂层沿面污秽闪络模型,代入上述测量的3种染污条件下液滴的接触角,并人工观察测量残余污浊液滴的个数及体积,分别计算3种染污程度下污闪电压和干闪电压的比值 $k_1$ 。同时基于染污表面电弧参数 $A=140, n=0.67^{[5]}$ ,通过Obenaus平板模型计算3种染污等级下污闪电压和干闪电压的比值 $k_2$ 。将上述两种模型的计算结果和实测结果 $k_0$ 进行对比,结果如图15所示。从图15可知,根据Obenaus平板模型计算的污闪电压与干闪电压的比值均偏小,这是由于Obenaus平板模型不适用于超疏水涂层表面,在计算污闪电压值时未考虑超疏水涂层表面的自清洁效应,导致代入计算的剩余污层电阻值偏低,从而使计算得到的临界污闪电压偏低。而根据本文方法对污闪电压的预测结果与实测结果相吻合,误差在5%以内,验证了该方法的准确性。产生误差的原因是人工观测表面液滴体积不够精准,同时表面残留液滴形态不一,接触角不完全相同。

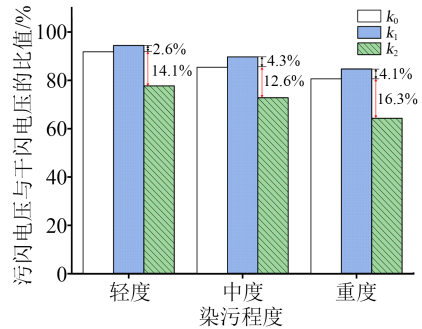


图15 试验结果与模型计算结果对比图

Fig.15 Comparison of test results and model calculating results

## 5 结论

(1)超疏水涂层表面仅会残留极少个数的液滴,为维持自身稳定,其体积均小于普通疏水涂层表面残留的液滴体积。由于其自收缩特性导致超疏水表面液滴无法达到水带临界闪络长度,当干区发生击穿时,局部电弧便能向前发展,连接液滴,形成闪络。

(2)污秽液滴会畸变表面电场,干区最大场强出现在液滴-空气-绝缘表面交界处,液滴内部最大场强出现在液滴与涂层交界面处,进而推测在超疏水涂层表面,闪络更容易从液滴两侧及液滴底部与涂层表面交界处形成。在电场作用下,与普通疏水涂层表面液滴流动形成的液膜不同,超疏水涂层表面的液滴会振动并进一步滚落从而保持了表面的干燥、洁净,使超疏水涂层的抗污闪性能优于RTV涂层。

(3)与平板模型需近似估计电弧及剩余电阻参数不同,本模型从电场角度出发,将表面电场看作由多段静电场耦合产生,联立污闪电压和表面液滴接触角,充分考虑了液滴形态及闪络路径,能有效用于评估超疏水涂层表面的污闪电压。经过试验验证,本文方法对超疏水涂层表面污闪电压的预测结果与实测结果相吻合,误差在5%以内,精确度高。

## 参考文献:

- [1] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.
- [2] 陈晴,薛源,王克,等.用于海上风电电网的柔性直流系统过电压和绝缘配合研究[J].高压电器,2019,55(4):178-184.
- [3] 康佳,姜磊,高景晖,等.漂浮式风电平台动态海缆用绝缘材料性能研究[J].高压电器,2022,58(1):12-17.
- [4] 戴罕奇,赵晨龙,梁建瑜,等.染污硅橡胶在不同憎水性时的污闪特性[J].电工技术学报,2016,31(10):102-111.
- [5] 徐志钮.RTV涂层憎水性及对绝缘子电场和污闪特性影响的研究

- 究[D].北京:华北电力大学,2011.
- [6] 陈冠三,陈俊武,谢毅,等.超疏水防污闪绝缘材料的疏水物质转移研究[J].绝缘材料,2020,53(6):25-29.
- [7] 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.
- [8] 赵林杰.硅橡胶复合绝缘子憎水性与污闪特性研究[D].北京:华北电力大学,2008.
- [9] 邵仕超,王黎明,曹彬,等.憎水性表面水带形状对其闪络特性的影响[J].高电压技术,2021,47(7):2425-2433.
- [10] 颜薪囡,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.
- [11] 吴佳峻,任婷婷.甲基硅树脂超疏水涂层的凝露特性及防污闪性能探讨[J].电工技术,2020(21):153-155.
- [12] OBENAUS F. Contamination flashover and creepage path length [J]. Dtsch. Elektrotechnik,1958,12:135-136.
- [13] PATNI P K. Review of models which predict the flashover voltage of polluted insulators[D]. Manitoba: University of Manitoba, 1997:43-48.
- [14] WILKINS R. Flashover voltage of high voltage insulators with uniform surface pollution films[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers,1969,116(3):457-465.
- [15] 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.
- [16] 刘成宝,李敏佳,刘晓杰,等.超疏水材料的研究进展[J].苏州科技大学学报(自然科学版),2018,35(4):1-8.
- [17] 任帅.直流电场环境中仿生超疏水绝缘涂层表面液滴的电致运动特性研究[D].武汉:华中科技大学,2021.
- [18] 王世孟,王甲春,陈彦文.液体表面张力与比表面自由能的热力学分析[J].沈阳建筑工程学院学报(自然科学版),2002,18(4):282-284.
- [19] 全云云.基于液滴弹跳现象的超疏水表面自清洁特性研究[D].广州:华南理工大学,2016.
- [20] 杨周.仿生超疏水功能表面的制备及其性能研究[D].合肥:中国科学技术大学,2012.
- [21] HERMINGHAUS S. Roughness-induced non-wetting[J]. Europhysics Letters,2007,52(2):165-130.
- [22] TAYLOR G. Studies in electrohydrodynamics. I. Circulation produced in a drop by electric field[J]. Proceedings of the Royal Society A,1966,291:159-166.
- [23] FALLAH K, FATTAHI E. Splitting of droplet with different sizes inside a symmetric T-junction microchannel using an electric field[J]. Scientific Reports,2022,12(1):3226.
- [24] 杨忠毅.绝缘子表面污秽成分检测方法及其成分对交流污闪特性的影响研究[D].重庆:重庆大学,2019.
- [25] 张志劲,蒋兴良,孙才新,等.染污绝缘子串直流污闪放电模型及验证[J].电工技术学报,2009,24(4):36-41.
- [26] 关志成,牛康,彭功茂,等.硅藻土特性对复合绝缘子人工污秽试验的影响[J].高电压技术,2012,38(9):2383-2388.
- [27] 全国绝缘子标准化技术委员会.直流系统用高压绝缘子的人工污秽试验:GB/T 22707—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
- [28] 蒋兴良,杨忠毅,韩兴波,等.硅橡胶复合绝缘子在不同可溶污秽成分下的闪络特性研究[J].中国电机工程学报,2018,38(1):320-329,370.

收稿日期:2022-05-09 修回日期:2022-06-06

作者简介:邹乔戈(1998-),男(汉族),湖北宜昌人,硕士生,主要从事绝缘材料沿面放电的研究;李黎(1976-),男(汉族),湖北荆州人,教授,主要从事高电压与绝缘技术、电气工程领域的研究。