

# 兼具高直流沿面闪络电压与超疏水性能的 SiO<sub>2</sub>/MWCNT/PDMS 复合绝缘涂层的制备与性能研究

陈廷鑫<sup>1</sup>, 乔汪洋<sup>2</sup>, 吴媚<sup>3</sup>, 张远鑫<sup>3</sup>, 张恒<sup>4</sup>, 于徽<sup>1</sup>, 马启钊<sup>1</sup>

(1. 新疆油田采油工艺研究院(监理公司), 新疆 克拉玛依 834099; 2. 新疆油田基建工程部, 新疆 克拉玛依 834099; 3. 新疆油田新能源事业部, 新疆 克拉玛依 834099; 4. 新疆油田玛湖勘探开发项目部, 新疆 克拉玛依 834099)

**摘要:** 绝缘材料因本身性质、积污、雨雪等因素易发生沿面闪络的问题, 本文应用“聚合物+纳米填料”的方法, 以聚二甲基硅氧烷(PDMS)弹性体为基体, SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒和多壁碳纳米管(MWCNTs)为填料, 利用喷涂法制备了一种多功能纳米复合涂层(SiO<sub>2</sub>/MWCNTs/PDMS), 并对纳米复合涂层的陷阱分布、直流沿面闪络电压及疏水性进行测试与分析。结果表明: 复合涂层具有较高的表面粗糙度, 对沿面放电的发展有阻碍作用, 复合涂层的表面闪络电压由 17.7 kV 提升至 24.3 kV, 提升了 37.3%; 复合涂层的水接触角随 SiO<sub>2</sub> 和 MWCNTs 含量的增大变化不明显, 水接触角最大达到 150.5°, 且复合涂层具有较好的自清洁能力。研究结果可为今后复合绝缘涂层材料的工程应用提供参考。

**关键词:** 电介质; 纳米涂层; 直流闪络电压; 超疏水

## Research on preparation and performance of SiO<sub>2</sub>/MWCNT/PDMS composite insulation coating with high DC surface flashover voltage and superhydrophobic performance

CHEN Tingxin<sup>1</sup>, QIAO Wangyang<sup>2</sup>, WU Mei<sup>3</sup>, ZHANG Yuanxin<sup>3</sup>,  
ZHANG Heng<sup>4</sup>, YU Hui<sup>1</sup>, MA Qizhao<sup>1</sup>

(1. Xinjiang Oilfield Oil Production Technology Research Institute (Supervision Company), karamay 834099, China; 2. Xinjiang Oilfield Infrastructure Engineering Department, karamay 834099 China; 3. New Energy Business Unit of Xinjiang Oilfield, karamay 834099, China; 4. Mahu Exploration and Development Project Department of Xinjiang Oilfield, karamay 834099, China)

**Abstract:** Insulating materials are prone to flashover along the surface due to their inherent properties, contamination accumulation, rain and snow, and so on. In this paper, a multifunctional nanocomposite coating (SiO<sub>2</sub>/MWCNTs/PDMS) was prepared through a "polymer+nanofiller" method by using polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer as the matrix, SiO<sub>2</sub> nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) as fillers. The trap distribution, DC surface flashover voltage, and hydrophobicity of the nanocomposite coating were tested and analyzed. The results show that the composite coating has a high surface roughness, which hinders the development of surface discharge. The surface flashover voltage of the composite coating increases from 17.7 kV to 24.3 kV, with a growth of 37.3%. With the increase of SiO<sub>2</sub> and MWCNTs content, the water contact angle of the composite coating has no obvious change the maximum water contact angle reaches 150.5°, and the composite coating has good self-cleaning ability. The research results can provide reference for the engineering application of composite insulation coating materials in the future.

**Key words:** dielectric; nano coating; DC flashover voltage; superhydrophobicity

## 0 引言

在实现国家“双碳”目标的发展过程中, 以新能源电力系统为主体的新型电力系统是低碳发展的主流趋势<sup>[1]</sup>。在具有广阔的土地资源、丰富的光照资源的新疆, 发展光伏和光热是实现“双碳”目标的

重要手段<sup>[2-5]</sup>。然而西北地区属于风沙盐碱地区, 还具有昼夜温差大、风沙污染严重等特征, 由此带来的表面积污、盐碱腐蚀、高紫外线以及积雪等特殊环境条件给户外电气设备的可靠性运行造成威胁<sup>[6]</sup>。特别是户外高压设备中气体、固体等不同介

质之间所形成的界面是绝缘系统中的薄弱一环,即沿面闪络相较于绝缘材料本体击穿更容易发生<sup>[7]</sup>。

在高压直流输电系统中,绝缘子长期承受单极性直流电场作用,在其表面会积聚大量电荷,致使材料表面发生局部电场畸变的问题,极大降低设备绝缘水平<sup>[8-10]</sup>。表面电荷积聚致使电场发生畸变后会诱发表面放电;同时,表面电荷积聚也为沿面放电的发展提供了基础电荷,进而促进闪络过程的形成<sup>[11]</sup>。此外,粘附在电介质表面的水分或水滴也可能进一步降低闪络电压,意味着疏水性是电介质的另一个重要特性<sup>[12-13]</sup>。因此,研发一种同时具有高直流沿面闪络电压和超疏水性的表面材料,对保障电力绝缘系统的安全稳定运行具有重要意义。

通过改变绝缘子的表面特性进而抑制表面电荷的积累是提高绝缘子闪络性能的有效途径,目前已经提出了氟化、等离子体处理和掺杂功能填料等方法。其中,氟化极大地提高了表面电导率,使表面电势衰减更快<sup>[14]</sup>;等离子体处理使样品的表面电导率明显增加<sup>[15]</sup>;掺杂功能填料可限制电荷载流子的迁移率,从而抑制绝缘子表面的电荷积聚<sup>[16]</sup>。氟化和等离子体处理均是通过加速表面电荷耗散来提高闪络强度。此外,在绝缘体上刷涂复合绝缘涂层,可以调整表面特性,改善电荷积累行为和um提高闪络强度。例如,文献[17]中的SiO<sub>2</sub>/环氧和TiO<sub>2</sub>/环氧涂层可以有效抑制电荷积累。文献[18]在复合涂层中采用微米级SiC和ZnO等非线性导电填料来改变表面电导率,进而加快电荷耗散。文献[19]通过改变聚合物的排列制备纳米层状涂层,以提高闪络电压。以上研究为提升干燥室内环境下的绝缘材料表面直流闪络电压提供了较好的参考方案,但上述技术可能会引入高表面能化学基团,进而降低水接触角(CA)。超疏水涂层可以使绝缘子表面不易浸湿,降雨时滑落的水滴可以带走绝缘子表面的污物<sup>[20-22]</sup>,从而降低污闪发生的概率,减轻经济损失<sup>[23]</sup>。然而,同时具有优异的表面绝缘强度和超疏水性且适用于室内外的多功能涂料鲜有报道。

受现有研究的启发,本文采用基于“聚合物+纳米填料”的方法,通过在聚二甲基硅氧烷(PDMS)溶液中混合SiO<sub>2</sub>纳米颗粒和多壁碳纳米管(MWCNTs)制备复合绝缘涂层。其中,PDMS确保在外力和紫外线照射下涂层具有弹性和稳定性<sup>[24]</sup>。将涂层溶液喷涂于环氧树脂(EP)片上,固化后得到

SiO<sub>2</sub>/MWCNT/PDMS-EP复合材料试样,对试样进行陷阱分布、闪络电压、疏水性测试,以期为复合绝缘涂层材料的工程应用提供参考。

## 1 试验

### 1.1 原材料

本文选用的基底树脂为双酚A型环氧树脂(E51),固化剂为甲基四氢苯酐二甲酸酐,江苏星辰合成材料有限公司;促进剂选用2,4,6-三(二甲氨基甲基)苯酚,二氧化硅(SiO<sub>2</sub>)填料粒径为30 nm,上海迈坤化工有限公司;多壁碳纳米管(MWCNTs)填料粒径为30 nm,上海阿拉丁科技有限公司。

### 1.2 复合绝缘涂层的制备

室温下,将1.88 g PDMS预聚物在搅拌下溶于100 mL乙酸乙酯中形成均相溶液,然后添加一定量的SiO<sub>2</sub>纳米颗粒和MWCNTs通过搅拌和超声分散形成悬浮液。定义SiO<sub>2</sub>颗粒与PDMS预聚物的质量占比为 $r_{\text{SiO}_2}$ ,定义添加MWCNTs的质量为 $g_{\text{CNT}}$ 。随后向溶液中添加0.19 g固化剂(PDMS与固化剂质量比约为10:1),搅拌10 min使悬浮液和固化剂充分反应。通过喷涂方法将制备的溶液涂覆到选定的EP基底上,其中基底的表面用砂纸(1 000目)预处理以增强粘附强度。再通过控制喷枪压力(0.29 MPa)、基板与喷枪之间的距离(约200 mm)和喷涂角度(约90°),以平衡喷涂过程和溶剂蒸发时间,喷涂时间为65 s。最后将涂层样品在100℃的真空干燥箱中固化4 h,得到SiO<sub>2</sub>/MWCNT/PDMS-EP复合材料试样。试验过程中保证纳米填料均匀溶解,同时严格限定喷涂条件以减少制备流程偏差对试验结果的影响,复合绝缘涂层的制备流程如图1所示。

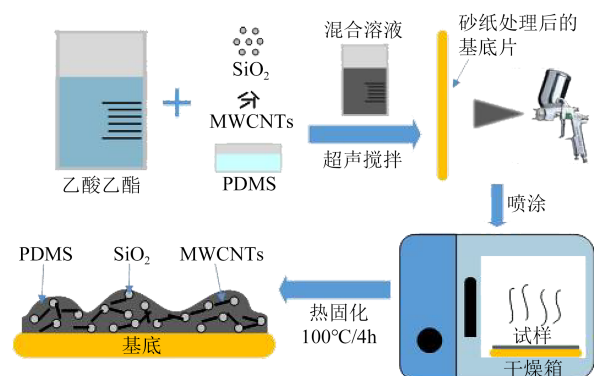


图1 复合绝缘涂层的制备流程图

Fig.1 Preparation process diagram of composite insulation coating

试验中通过调节SiO<sub>2</sub>和MWCNTs的浓度可得到不同浓度复合涂层,各复合涂层命名和浓度配比如表1所示。

表1 不同复合涂层的填料配比  
Table 1 Filling ratio of different composite coatings

样品	$r_{\text{SiO}_2}/\%$	$g_{\text{CNT}}/g$
纯EP	0	0
复合涂层1	15	0.01
复合涂层2	30	0.02
复合涂层3	45	0.03
复合涂层4	60	0.04

### 1.3 试验系统

#### 1.3.1 陷阱分布测试

采用等温表面电势衰减法测定纳米涂层试样的陷阱能级分布,测试系统搭建如图2所示。用无水乙醇对样品表面进行处理,清除涂层表面的残留电荷。将恒温台设定为50℃,待温度稳定后将样品放置于恒温台表面。将恒温台移动至高压探针下方,样品表面使用“针栅到表面”结构进行电晕充电处理。高压直流电源对针电极施加6 kV电压,计时5 min后将恒温台移至开尔文探头下,通过静电电位计采集样品表面电势,测量表面电位衰减曲线。通过数据采集卡,将电位数据收集至计算机中存储。对数据进行分析处理,计算不同浓度复合涂层材料的表面陷阱深度情况。

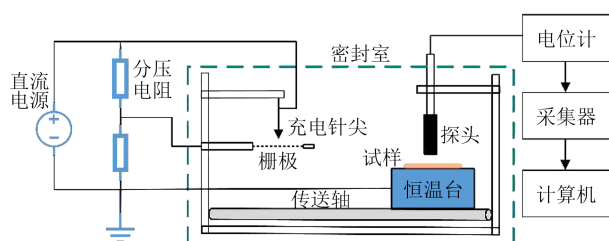


图2 陷阱测试系统

Fig.2 Trap testing system

根据Simmons的等温放电电流理论<sup>[25]</sup>,陷阱能级和陷阱密度可分别由式(1)、式(2)确定。

$$E_T = kT \ln(\gamma t) \quad (1)$$

$$N(E_T) = \frac{\epsilon t}{q_e f_0 k T \delta L} \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: $E_T$ 为陷阱能级; $k$ 是玻尔兹曼常数; $T$ 是绝对温度,323 K; $\gamma$ 为捕获空穴/电子的逃逸频率,约等于 $10^{12} \text{ s}^{-1}$ ; $t$ 为测量时间; $N(E_T)$ 为陷阱密度; $\epsilon$ 和 $L$ 分别为试样的介电常数和厚度; $q_e$ 为基本电荷量;

$f_0$ 是陷阱的初始占用率,本文假设为1; $\delta$ 为注入电荷穿透深度,设为 $2 \mu\text{m}$ ; $\varphi(t)$ 为开尔文探头测得的电势。

在等温表面电势衰减过程中,较浅陷阱中的电荷比较深陷阱中的电荷更容易被俘获,即电荷的释放时间与其陷阱深度有关。一般两种衰变过程同时发生,因此表面电势衰减曲线可以用双指数方程拟合,如式(3)所示。

$$\varphi(t) = a_1 e^{-b_1 t} + a_2 e^{-b_2 t} \quad (3)$$

式(3)中: $a_1$ 、 $a_2$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 为拟合参数,其中 $b_1$ 、 $b_2$ 分别代表深、浅陷阱的衰减时间常数。

#### 1.3.2 直流沿面闪络测试

采用DW-N104-2ACB2型直流高压电源进行闪络测试。其中,试样的固定及涂层表面闪络电压测试采用指形电极,电极两端子间距为10 mm,在大气条件下进行试验。用酒精擦拭样品表面,待样品干燥后将其固定于支撑台,并将支撑台置于绝缘板上。采用正极性直流电压,利用程序控制加压速率为1 kV/s直到样品表面发生闪络,记录闪络电压值。不同复合涂层重复12次试验,并做威布尔分析。

#### 1.3.3 疏水性测试

为探究涂层疏水性,需要测量涂层表面的水接触角。接触角是指在材料表面上滴入约 $7 \mu\text{L}$ 的水滴后,材料表面上的固-液-气三相交界点处所作的气-液界面切线在液体一方与液-固界面切线所形成的夹角( $\theta$ )。利用JC2000型接触角测量仪测试涂层表面疏水性能:使用仪器针管滴取适量液体,调节镜头角度及亮度;通过计算机、光学系统和CCD摄像头结合,采集并保存液滴影像。

## 2 结果及分析

### 2.1 SEM分析

通过扫描电镜(SEM)得到纳米复合涂层的表面形貌,如图3所示。对比图3(a)、(c)可以看出,SiO<sub>2</sub>纳米填料在溶剂挥发过程中聚集形成较大的微球,刚性微球在撞击基底时仍能保持其形状,在涂层表面形成微米级的高原平台状颗粒。这是由于纳米颗粒中的-OH形成的氢键之间存在吸引力,在溶剂蒸发过程中促进纳米颗粒形成了团聚体。随着填料浓度的增加,PDMS基质覆盖了更多的纳米填料,涂层表面形成了一定的纳米多孔微结构特征。

### 2.2 陷阱分布

各纳米复合涂层的表面电位衰减及陷阱分布情况分别如图4、图5所示。

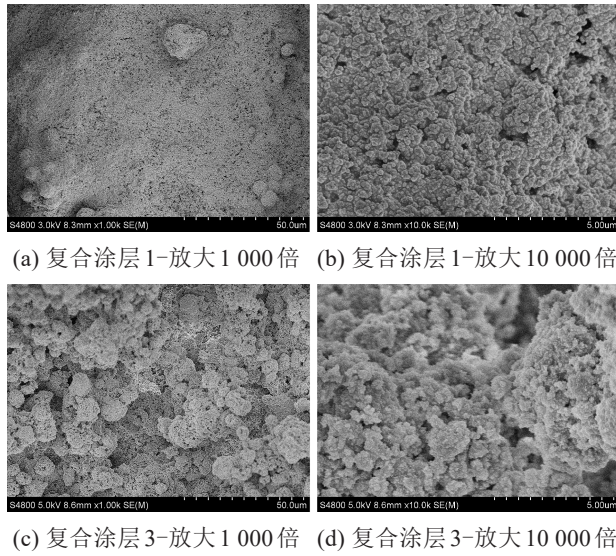


图3 纳米复合涂层的扫描电镜图

Fig.3 SEM images of nanocomposite coatings

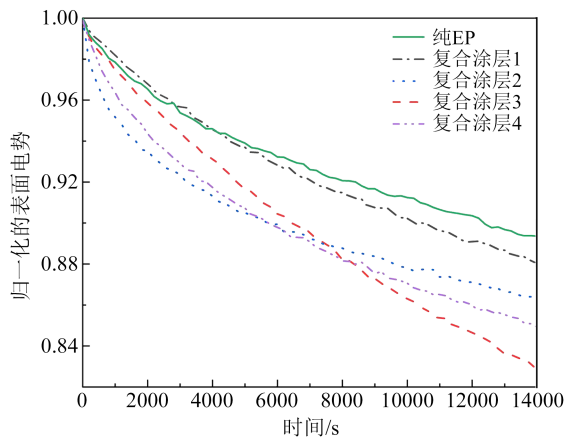


图4 不同浓度复合涂层材料的表面电位衰减

Fig.4 Surface potential attenuation of composite coating materials with different concentrations

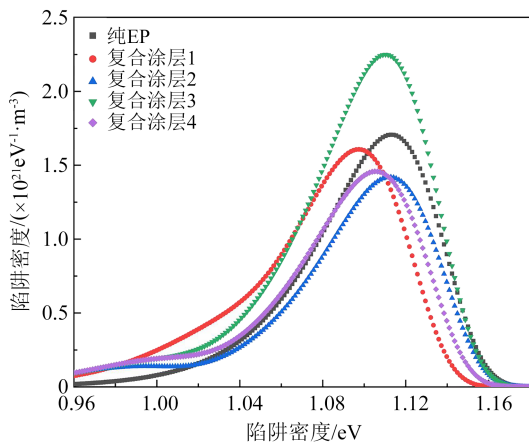


图5 不同浓度复合涂层材料的陷阱分布

Fig.5 Trap distribution of composite coating materials with different concentrations

从图4可以看出,在针电极开始放电初期,材料表面电荷密度较大,电荷自身脱陷能力强,衰减速度较快。随着测试的进行,材料表面电场逐渐衰减,故电荷的脱陷速率也逐渐减小<sup>[26]</sup>。表面电荷脱陷后主要有界面处中和、沿面耗散、内部衰减这3种形式<sup>[27-28]</sup>。

从图5可以看出,无填料涂层的陷阱能级约为1.110 eV,随着 $r_{SiO_2}$ 从15%增大至60%,陷阱能级随填料浓度的增大呈随机分布,最大值为1.124 eV。可见,环氧树脂样品表面喷涂 $SiO_2/MWCNTs/PDMS$ 涂层后电位衰减速度与陷阱深度变化较小,即该涂层对表面电荷的输运过程影响较小。

### 2.3 闪络电压分析

为了验证复合绝缘涂层能够提高样品的绝缘性能,采用1.3.2所述试验过程在标准大气压下对复合绝缘涂层进行沿面闪络电压测试。闪络强度的分析通常采用双参数威布尔统计量的框架,闪络电压威布尔分布计算如式(4)所示。

$$P(V_s) = 1 - \exp\left(-\left(V_s/\alpha\right)^\beta\right) \quad (4)$$

式(4)中: $P(V_s)$ 为表面闪络累积概率; $V_s$ 为实测闪络电压;尺度参数 $\alpha$ 为试样闪络概率为63.2%时对应的电压(威布尔闪络电压);形状参数 $\beta$ 用于评价测量数据的散度,更高的 $\beta$ 意味着更高的介电可靠性。

不同浓度复合涂层的闪络电压威布尔分布如图6所示。由于手指型电极两端间距相同,图6中威布尔分布线与纵坐标等于0时的交点的横坐标即可表示涂层表面沿面闪络电压,拟合直线的斜率可以表示测试过程中闪络电压的分布情况,斜率越大则分布越集中。

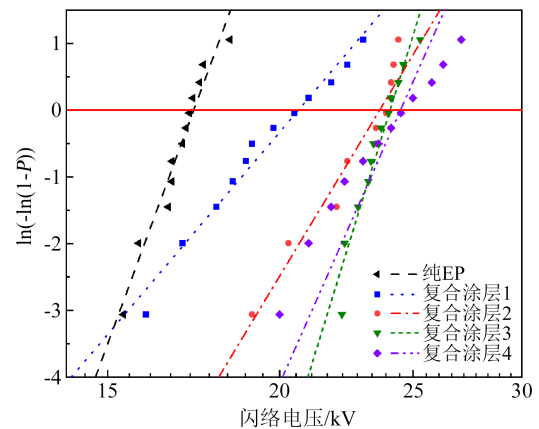


图6 不同浓度复合涂层材料的闪络电压威布尔分布

Fig.6 Weibull distribution of flashover voltage of composite coating materials with different concentrations

从图6可以看出,无填料环氧的闪络电压为17.7 kV;当 $r_{\text{SiO}_2}=60\%$ , $g_{\text{CNT}}=0.04$ 时,即复合涂层4的闪络电压达到最大值,为24.3 kV,较无填料环氧提升了37.3%。由于表面电位衰减测试中各浓度试样的电位衰减速度及陷阱深度差距不大,分析认为闪络电压提升受陷阱能量的影响较小,而可能是受到试样表面粗糙度和复合纳米填料性质的影响。涂层表面的纳米级孔隙和微纳米级的分层特征有助于闪络电压的提升。其中,SiO<sub>2</sub>/MWCNTs涂层表面的微纳米颗粒延长了表面爬电距离,阻碍了电子雪崩的发展,对闪络电压的提升起积极作用<sup>[29]</sup>。且涂层的多孔结构孔径约为数百纳米,接近空气中的电子平均自由程,可以抑制闪络过程中的碰撞电离,进而有效地提高闪络电压。此外,在涂层材料中,载流子的导电路径为SiO<sub>2</sub>、MWCNTs、PDMS的串联连接,以及不同成分之间的界面。由于纳米填料具有较高的电导率,载流子在SiO<sub>2</sub>和MWCNTs填料内迁移,可以有效抑制涂层表面电荷积累,进而提高沿面闪络电压。

#### 2.4 疏水性分析

超疏水性的概念源于荷叶的自清洁作用<sup>[30]</sup>,荷叶表面有层次的粗糙度是其具有超疏水性的主要原因<sup>[20]</sup>。户外绝缘子表面也需要具备荷叶效应以满足使用需求,即良好的疏水性。通常,接触角大于90°时称为疏水,其中接触角大于150°、滚动接触角小于10°时可认为表面具备超疏水效果。按照1.3.3所述试验步骤对涂层表面接触角进行测试,部分测试结果如图7所示。从图7可以看出,当SiO<sub>2</sub>添加量较少( $r_{\text{SiO}_2}=15\%$ )时,涂层接近达到超疏水效果,这是因为SiO<sub>2</sub>的加入影响了超疏水涂层中其与PDMS在基体表面的接枝。而碳纳米管的加入改变了基体表面的微观形貌,使得本来比较平滑的基体表面形成一些微米级的小突起,影响了涂层的表面结构,从而影响了表层的疏水性。由试验结果可知,涂层水接触角随填料浓度的增加变化趋势不明显,可推测均具有较好的表面自清洁能力,各浓度复合涂层均能满足户外绝缘材料超疏水的性能需求。

综合考虑2.2节及2.3节中所得出的结论,复合涂层4的直流沿面闪络电压最大,此时复合涂层的水接触角大于150°,能够达到户外绝缘子同时提升直流沿面闪络与超疏水性能的要求,基本满足材料性能提升的综合需求。

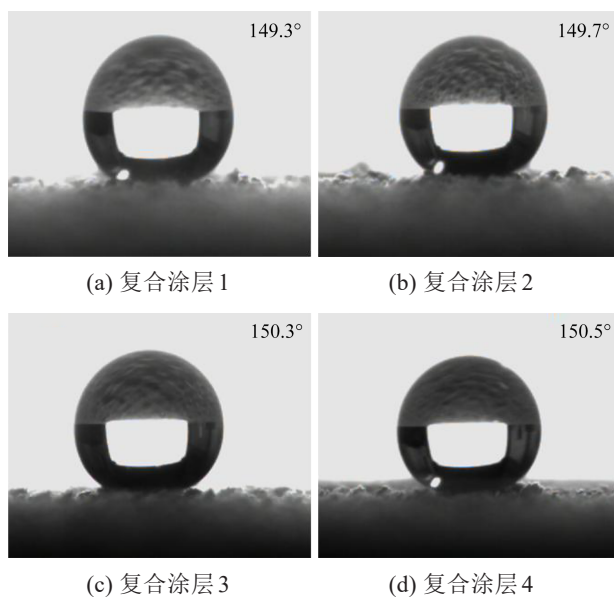


图7 不同浓度复合涂层材料的超疏水测试结果

Fig.7 Superhydrophobic test results of composite coating materials with different concentrations

户外绝缘子普遍承受着降雨、积污、覆冰等因素的影响。本文以复合涂层4为例,研究了其自清洁能力,测试过程如图8所示。从图8可以看出,在涂层表面铺洒沙土模拟绝缘子的表面污垢,水滴以约5°的倾斜角滴在超疏水表面上可轻易地滚下来,同时带走了沉积在表面上的沙土,说明复合涂层4具有较好的自清洁能力。



图8 自清洁测试结果

Fig.8 Self cleaning test result

### 3 结论

本文研究了一种新型绝缘子复合绝缘涂层的制备方法,并分析了复合绝缘涂层的陷阱分布、沿面闪络电压和超疏水性能,得到如下结论:

(1)复合涂层具有较高的表面粗糙度,对沿面放电的发展有阻碍作用,闪络电压最高提升至24.3 kV,较无填料环氧提升了37.3%。

(2)复合涂层水接触角随SiO<sub>2</sub>与PDMS质量占比和MWCNTs质量的增大变化趋势不明显,不同浓度复合涂层的水接触角均在150°以上,同时复合涂层具有较好的自清洁能力。

(3)SiO<sub>2</sub>/MWCNTs/PDMS复合绝缘涂料附着于

绝缘子表面形成复合绝缘涂层的方法操作灵活,成本低廉,能够同时提升直流沿面闪络电压及疏水性,可为今后工业大规模开发应用提供参考。

### 参考文献 References

- [1] 舒胜文,占兆璇,许俊炜,等. 湿污绝缘材料表面冷凝相变与局部电弧耦合机理和放电模型研究综述及展望[J]. 高电压技术, 2023,49(7):2875-2890.  
SHU Shengwen, ZHAN Zhaoxuan, XU Junwei, et al. Review and prospect of research on surface condensation phase transition and local arc coupling mechanism and discharge model of wet and dirty insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49 (7):2875-2890.
- [2] 周凯,汪洋,陈香玉,等. 采油平台分布式光伏电站试验[J]. 新疆石油天然气,2022,18(2):1-9.  
ZHOU Kai, WANG Yang, CHEN Xiangyu, et al. Experimental on distributed photovoltaic power plant of oil production platform [J]. Xinjiang Oil & Gas,2022,18(2):1-9.
- [3] 张彦菊,石兵波,赵娇燕,等. 中国石油新能源电力系统[J]. 新疆石油天然气,2022,18(2):21-25.  
ZHANG Yanju, SHI Bingbo, ZHAO Jiaoyan, et al. New energy power system of petrochina[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022, 18(2): 21-25.
- [4] 樊玉新,李泓洲,段胜男,等. 太阳能高温光热技术赋能浅层超稠油低碳开发[J]. 新疆石油天然气,2023,19(4):82-87.  
FAN Yuxin, LI Hongzhou, DUAN Shengnan, et al. Solar high-temperature photothermal technology empowers low-carbon development of shallow ultra heavy oil[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2023,19(4):82-87
- [5] 张晨阳,王福焕,魏华,等. “双碳”目标下塔里木油田油气与新能源融合发展实践[J]. 新疆石油天然气,2022,18(2):16-20.  
ZHANG Chenyang, WANG Fuhuan, WEI Hua, et al. Practice of integrated development of oil and gas and new energy in tarim oilfield under the "dual carbon" goal[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2022,18(2):16-20.
- [6] 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.
- [7] MILLER H C. Flashover of insulators in vacuum:the last twenty years[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(6):3641-3657.
- [8] LI C Y, LIN C J, ZHANG B, et al. Understanding surface charge accumulation and surface flashover on spacers in compressed gas insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1152-1166.
- [9] 尹国华,段祺君,邵帅,等. ZnO形貌及粒径对EP复合材料表面电荷传输及沿面闪络性能的影响[J]. 绝缘材料,2024,57(3):50-57.  
YIN G H, DUAN Q J, SHAO S, et al. The influence of ZnO morphology and particle size on surface charge transfer and surface flashover performance of EP composite materials[J]. Insulating Materials,2024,57(3):50-57
- [10] 张博雅,张贵新. 直流 GIL 中固-气界面电荷特性研究综述I:测量技术及积聚机理[J]. 电工技术学报,2018,33(20):4649-4662.  
ZHANG B Y, ZHANG G X. Review of solid-gas interface charge characteristics in DC GIL I: measurement techniques and accumulation mechanism[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2018,33(20):4649-4662.
- [11] 高宇,王明行,赵宁,等. 固体绝缘材料表面电荷特性的研究进展[J]. 高电压技术,2018,44(8):2628-2645.  
GAO Y, WANG M X, ZHAO N, et al. Research progress of surface charge characteristics of solid insulating materials[J]. High Voltage Engineering,2018,44(8):2628-2645.
- [12] 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 Q G, WANG S W, CHEN J Y, et al. Research on direct current pollution flashover characteristics of superhydrophobic insulation surface[J]. Insulating Materials,2023,56(5):40-48
- [13] GUBANSKI S M. Modern outdoor insulation - concerns and challenges[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2005, 21(6): 5-11.
- [14] QUE L K, AN Z L, MA Y, et al. Improved DC flashover performance of epoxy insulators in SF<sub>6</sub> gas by direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017, 24(2):1153-1161.
- [15] GUAN H L, CHEN X R, DU H, et al. Mechanisms of surface charge dissipation of silicone rubber enhanced by dielectric barrier discharge plasma treatments[J]. Journal of Applied Physics,2019,126(9):093301.
- [16] ZHANG B Y, GAO W Q, HOU Y C, et al. Surface charge accumulation and suppression on fullerene-filled epoxy-resin insulator under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(5):2011-2019.
- [17] TU Y P, ZHOU F W, JIANG H, et al. Effect of nano-TiO<sub>2</sub>/EP composite coating on dynamic characteristics of surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1308-1317.
- [18] DU B X, LIANG H C, LI J, et al. Temperature dependent surface potential decay and flashover characteristics of epoxy/SiC composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(2):631-638.
- [19] ZHANG B Y, WANG Q, ZHANG Y X, et al. A self-assembled, nacre-mimetic, nano-laminar structure as a superior charge dissipation coating on insulators for HVDC gas-insulated systems[J]. Nanoscale,2019,11(39):18046-18051.
- [20] SHARMA V, GOYAT M S, HOODA A, et al. Recent progress in nano-oxides and CNTs based corrosion resistant superhydrophobic coatings: a critical review[J]. Progress in Organic Coatings, 2019,140:105512.
- [21] LI L Y, BAI Y Y, LI L L, et al. A superhydrophobic smart coating for flexible and wearable sensing electronics[J]. Advanced Materials,2017,29(43):1702517.
- [22] NGUYEN-TRI P, TRAN H N, PLAMONDON C O, et al. Recent progress in the preparation, properties and applications

- of superhydrophobic nano-based coatings and surfaces: a review [J]. *Progress in Organic Coatings*,2019,132:235-256.
- [23] ZHU H, WU L Z, MENG X, et al. An anti-UV superhydrophobic material with photocatalysis, self-cleaning, self-healing and oil/water separation functions[J]. *Nanoscale*,2020,12(21):11455-11459.
- [24] 唐炬,潘成,王邸博,等. 高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展[J]. *电工技术学报*,2017,32(8):10-21.  
TANG J, PAN C, WANG D B, et al. Research progress on surface charge accumulation of HVDC insulating materials[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2017,32(8):10-21.
- [25] 吕金壮,李成榕,丁立健,等. 陷阱分布对Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>陶瓷介质在真空中沿面闪络特性的影响[J]. *中国电机工程学报*,2003,23(2):77-81.  
LU J Z, LI C R, DING L J, et al. Effect of trap distribution on surface flashover characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic medium in vacuum[J]. *Proceedings of the CSEE*,2003,23(2):77-81.
- [26] 高宇,门业堃,杜伯学,等. 表面电荷对典型聚合物绝缘材料直流闪络电压的影响[J]. *高电压技术*,2015,41(5):1474-1480.  
GAO Y, MEN Y K, DU B X, et al. Effect of surface charge on DC flashover voltage of typical polymer insulating materials[J]. *High Voltage Engineering*,2015,41(5):1474-1480.
- [27] KUMARA J R S S, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Surface potential decay on LDPE and LDPE/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nano-composites: measurements and modeling[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2016,23(6):3466-3475.
- [28] MOLINIE P. A review of mechanisms and models accounting for surface potential decay[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*,2012,40(2):167-176.
- [29] CHAO W, LI W D, JIANG Z H, et al. UV-cured nanocomposite coating for surface charging mitigation and breakdown strength enhancement: exploring the combination of surface topographical structure and perfluorooctyl chain[J]. *RSC Advances*,2020,10(28):16422-16430.
- [30] GUPTA R K, KUMAR P, YADAV V, et al. Challenges and opportunities in fabrication of transparent superhydrophobic surfaces[J]. *Current Nanoscience*,2016,12(4):429-447.

收稿日期:2024-03-20;修回日期:2024-05-27。

作者简介:

陈廷鑫(1996-),男(汉族),四川绵阳人,助理工程师,主要研究方向为油田高压交(直)流配电、低压配电。