

# 直流 GIS/GIL 绝缘子沿面绝缘性能提升方法研究进展

李庆民<sup>1</sup>, 王昌柱<sup>1</sup>, 武文琪<sup>2</sup>, 边亚琳<sup>3</sup>, 任瀚文<sup>2</sup>, 王健<sup>1</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 北京市高电压与电磁兼容重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 直流气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)和气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)具有体积小、通流容量高、适用范围广等优点, 是构建新型电力系统、实现双碳目标的重要支撑。尽管 GIS/GIL 等气体绝缘装备获得了广泛应用, 绝缘子沿面绝缘故障仍然是造成设备失效的重要原因, 故障两大重要来源是绝缘子表面电荷积聚和金属微粒或粉尘吸附。为此着眼于气-固界面电荷输运关系, 修正了绝缘气体离子密度连续性方程并分析了电场调控的重要性, 梳理了国内外学者通过绝缘子结构优化、本体材料改性和表面材料改性的技术手段, 总结了调控界面电荷、优化沿面电场和抑制粉尘吸附方面的研究成果, 并进一步提出亟待解决的关键问题和重要技术瓶颈。针对绝缘子结构优化研究, 在电场仿真准确及优化算法先进的基础上, 还须发掘闪络电压与沿面电场矢量及放电路径的泛函表征关系, 以确定合适的最优化目标函数; 针对绝缘子本体及表面材料改性, 须开发新型改性材料的规模化制备工艺及精确掺杂与稳定涂覆技术, 关注改性材料长时服役稳定运行下的耐热性能与绝缘性能, 并提出长时可靠粘附而又抑制粉尘附着的高粘度、低表面能涂层的设计方法。上述问题的有效解决, 可为处理直流 GIS/GIL 的沿面绝缘问题提供有效支撑。

**关键词:** 直流 GIS/GIL; 电荷积聚; 粉尘吸附; 几何结构优化; 材料改性

## Advance in Research of Insulation Performance Enhancement Methods Along the Surface of DC GIS/GIL Insulators

LI Qingmin<sup>1</sup>, WANG Changzhu<sup>1</sup>, WU Wenqi<sup>2</sup>, BIAN Yalin<sup>3</sup>, REN Hanwen<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>

(1. State Key Lab of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Beijing Key Laboratory of HV and EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** DC gas insulated switchgear/gas insulated transmission line (GIS/GIL) has the advantages of a compact size, high current capacity, and a broad range of applications, making it an important support for constructing new types of power systems and achieving dual carbon goals. However, despite the widespread application of gas-insulated equipment, surface discharge faults of insulators remain a primary cause of equipment failure. The two significant sources of these faults are the accumulation of charge on the insulator surface and the adsorption of metal particles or dust. We focus on the charge transport relationship at the gas-solid interface, revise the continuity equation for ion density in the insulating gas, and analyze the importance of electric field control. Furthermore, we summarize the research findings of scholars both domestically and internationally who have used technical means such as structural optimization of insulators, modification of bulk materials, and modification of surface materials to control interface charge, optimization of the surface electric field, and suppressions of dust adsorption. Additionally, we outline the key issues and significant technical challenges that remain to be addressed. For research on the structural optimization of insulators, it is necessary to identify the functional relationship between flashover voltage and the vector of the surface electric field and discharge path, based on accurate electric field simulation and advanced optimization algorithms, so as to determine the appropriate optimization target function. For the modification of the bulk and surface materials of insulators, the development of large-scale preparation processes for new types of modified materials and precise doping and stable coating technologies is required. Attention must be paid to the thermal stability and insulation performance of modified materials during long-term operation and a design method for high-viscosity, low-surface-energy coatings that ensure long-term reliable adhesion while inhibiting dust adhesion should be proposed. Effective solutions to the aforementioned issues can provide effective support for addressing the surface insulation problems of DC GIS/GIL.

**Key words:** DC GIS/GIL; charge accumulation; dust adsorption; geometric structure optimization; material modification

## 0 引言

构建以新能源为主体、多态能源融合的新型电力系统是我国实现“双碳”战略目标的重要技术途径<sup>[1-2]</sup>，而先进输电变电装备是其不可或缺的物理支撑。在高压直流输电(DC power transmission, HVDC)领域，气体绝缘开关设备(switchgear, GIS)和气体绝缘输电线路(gas insulated transmission lines, GIL)因具有体积小、通流容量高、适用范围广等诸多优点，逐渐成为能源输送的重要装备支撑<sup>[3-6]</sup>，并愈加受到学术界和工业界的普遍重视。

尽管 GIS/GIL 等气体绝缘输电装备已有了广泛的运用，但绝缘故障仍然是导致设备故障、造成安全、经济损失的主要原因，且在直流工况下将更为复杂、严峻。这些故障主要有两大来源：1) 直流电应力下，由于绝缘子与绝缘气体的电导率、介电常数及传导电流本构关系等存在显著差异，自由电荷容易在绝缘子表面累积<sup>[7-11]</sup>，其产生的附加电场加剧了沿面电场畸变；2) GIS/GIL 在生产、运输、服役等过程中不可避免地产生金属微粒，其中较小尺寸的微粒或粉尘受恒定电场作用，更容易吸附在绝缘子表面，诱导电荷向微粒局部区域积聚，且间接缩短了沿面绝缘距离<sup>[12-14]</sup>。上述问题的存在将使沿面绝缘性能显著下降，甚至诱发沿面闪络，严重危害气体绝缘系统的耐电强度。

针对直流绝缘子沿面绝缘性能提升方法，国内外学者展开了广泛的研究，但多只以降低表面电荷积聚作为沿面绝缘优化的研究思路<sup>[15]</sup>，较少考虑电荷与电场的交互关系，且绝缘气体的电流密度-电场强度本构方程存在偏差，一定程度上将影响通过多物理场仿真方式指导绝缘子几何结构及电导分布的优化结果。因此，本文首先研究了直流绝缘子表面电荷积聚的数学物理方程并修正了绝缘气体离子密度连续性方程，其次分析了稳恒电场下单纯以降低表面电荷密度为目标的局限性，提出沿面电场调控、粉尘吸附抑制较于电荷调控具有同等的重要性；在此基础上梳理了国内外学者在绝缘子几何结构优化、绝缘子本体改性和绝缘子表面改性 3 个方面的研究成果，总结了不同优化方法的优势和不足之处，最后提出了直流 GIS/GIL 绝缘子沿面性能提升亟待解决的关键问题，并给出可能的技术路径，为高压直流 GIS/GIL 绝缘子设计提供参考。

## 1 直流绝缘子表面电荷积聚的数理方程

直流绝缘子的电场分布相比交流绝缘子有着显著不同。对于交流绝缘子，工频电应力下电场散度远大于旋度，可视为电准静态场，假定绝缘子电导率的数量级为  $10^{-15}$  S/m，相对介电常数为 5，则阻抗的实部和虚部之比约为  $1:1.39 \times 10^7$ ，电导的影响基本可忽略不计，因而稳态工频电场往往可进一步简化为静电场，电荷迁移的影响较小。而直流绝缘子的稳态沿面电场分布仅由传导电流密度  $J$  与电场强度  $E$  的本构关系决定<sup>[16]</sup>，受到气体非线性电导的影响，直流稳态电场分布将具有较大的不确定性，特别是绝缘子与绝缘气体存在明显分界面，分界面上多种介电参量的不连续导致其成为电荷积聚的主要区域<sup>[17]</sup>。

在不考虑电场足够大至绝缘气隙能明显发生电离的情况下，固体侧的电荷主要来源于电极的电荷注入<sup>[18]</sup>，气体侧的电荷来源包括宇宙射线造成气体的自然电离、导体尖端或金属微粒/粉尘等绝缘缺陷引起的局部放电、导体场致发射产生的电流等<sup>[19]</sup>，GIL 中微粒、电荷与盆式绝缘子的交互过程如图 1 所示。

根据电流连续性方程，任意介质的自由电荷密度  $\rho$  与传导电流密度  $J$  存在如下关系：

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\frac{\partial(\nabla \cdot D)}{\partial t} = -\nabla \cdot \frac{\partial D}{\partial t} \quad (1)$$

式中： $D$  为电位移。位移电流密度作为电流连续性方程的补充，本身并不代表自由电荷的运动，且电

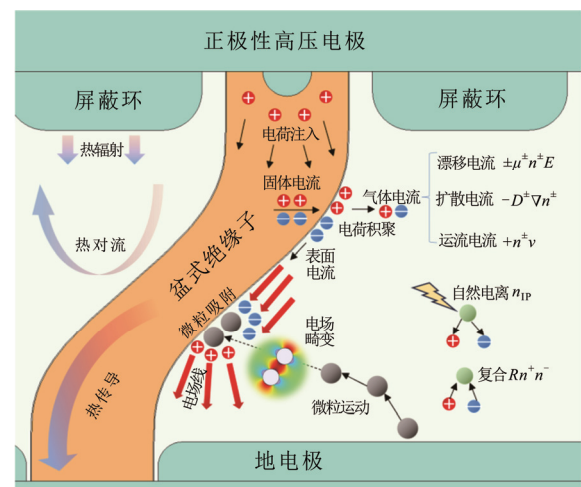


图 1 微粒、电荷与盆式绝缘子交互过程

Fig.1 Interaction process of particles, charge and basin insulator

准静态场的位移电流密度通常可以忽略<sup>[20]</sup>, 因而电荷运输的研究重点为传导电流。针对气-固界面, Volpov 构建了如图 2 所示的气-固界面微小薄层模型<sup>[15]</sup>, 并将式(1)做近似展开, 得到表面电荷密度  $\sigma$  的运输方程如式(2)所示。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_V - \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_G - \nabla \cdot (\kappa_s \mathbf{E}_\tau) \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{n}$  为外法线单位矢量;  $\kappa_s$  为绝缘子表面电导率; 下标  $\tau$  对应的物理量为其切向分量; 下标 V 和 G 对应的物理量分别为固体介质和气体介质;  $\sigma$  为“表面电荷密度”, 实际为薄层体电荷密度的近似, 即  $\sigma \approx \rho d$ , 其中  $d$  为薄层厚度, 如图 2 所示, 同理  $\kappa_s \approx \gamma d$ ,  $\gamma$  为薄层电导率。该式得到了表面电荷密度与固体电流、气体电流、固体表面电流的关系, 后续大量研究也表明界面电荷密度的来源与这 3 种电流密度直接相关<sup>[21-24]</sup>。

绝缘气体侧的传导电流密度与电场强度之间并非线性本构关系, 而是与正负离子浓度有关。对于 SF<sub>6</sub> 等具有高电子亲和性的气体, 自由电子的传导电流可被忽略, 气体传导电流以正负离子的漂移电流、扩散电流及绝缘气体整体运动的运流电流为主<sup>[23,25]</sup>, 即:

$$\begin{cases} \mathbf{j}^+ = \mu^+ n^+ \mathbf{E} - D^+ \nabla n^+ + n^+ \mathbf{v} \\ \mathbf{j}^- = -\mu^- n^- \mathbf{E} - D^- \nabla n^- + n^- \mathbf{v} \\ \mathbf{J}_G = e(\mathbf{j}^+ - \mathbf{j}^-) = e((n^+ \mu^+ + n^- \mu^-) \mathbf{E} - (D^+ \nabla n^+ - D^- \nabla n^-) + (n^+ - n^-) \mathbf{v}) \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{j}^+$  和  $\mathbf{j}^-$ 、 $\mu^+$  和  $\mu^-$ 、 $n^+$  和  $n^-$ 、 $D^+$  和  $D^-$  分别为正带电离子和负带电离子的离子流密度、迁移率、浓度和扩散系数;  $e$  为元电荷;  $\mathbf{v}$  为绝缘气体整体因温度梯度产生的对流运动速度。

与电流连续性方程类似, 正负离子浓度同样满足通量连续性方程, 反映正负离子的生成、复合等状态变化<sup>[17]</sup>, 即:

$$\begin{cases} \frac{\partial n^+}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{j}^+ + n_{ip} - R n^+ n^- \\ \frac{\partial n^-}{\partial t} = -\nabla \cdot \mathbf{j}^- + n_{ip} - R n^+ n^- \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $n_{ip}$  为自然电离系数;  $R$  为正负离子复合系数。将式(3)代入式(4)便可得到离子连续性方程的展开表达式, 其中  $D^+$  和  $D^-$  还可用 Einstein 关系表示为:

$$\begin{cases} D^+ = \mu^+ \frac{k_B T_G}{e} \\ D^- = \mu^- \frac{k_B T_G}{e} \end{cases} \quad (5)$$

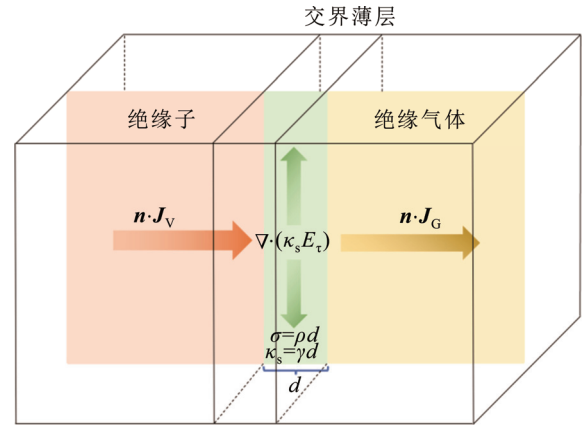


图 2 气固界面微小薄层模型

Fig.2 Small thin layer model of gas-solid interface

式中:  $k_B$  为玻耳兹曼常数;  $T_G$  为气体绝对温度。由于 GIS/GIL 受温度梯度影响,  $T_G$  并非常数, 即  $\mathbf{v} \neq 0$  且  $\nabla D^+ \neq 0$ 、 $\nabla D^- \neq 0$ , 因而还须对 Winter 等提出的正负离子密度连续性方程<sup>[25]</sup>作出修正, 表示为:

$$\begin{cases} \frac{\partial n^+}{\partial t} = -\nabla \cdot (\mu^+ n^+ \mathbf{E}) + \nabla D^+ \cdot \nabla n^+ + D^+ \nabla^2 n^+ - \nabla \cdot (n^+ \mathbf{v}) + n_{ip} - R n^+ n^- \\ \frac{\partial n^-}{\partial t} = \nabla \cdot (\mu^- n^- \mathbf{E}) + \nabla D^- \cdot \nabla n^- + D^- \nabla^2 n^- - \nabla \cdot (n^- \mathbf{v}) + n_{ip} - R n^+ n^- \end{cases} \quad (6)$$

针对绝缘子与绝缘气体各自传导电流对表面电荷的贡献程度, 张博雅等提出电荷积累具有“基本模式”和“电荷斑”2 种形式, 主要分别来源于绝缘子体传导电流和气体放电产生的电导电流<sup>[24]</sup>。李传扬等提出基于主导电荷行为的绝缘子场依赖效应模型, 在施加的电场模值逐步升高时, 电势分布将由绝缘子本体引导的欧姆传导过渡至绝缘气体引导的电离主导<sup>[18]</sup>。由于非强电场下, 气体自然电离是产生正负离子最为主要的方式<sup>[16]</sup>, 在一定场强范围内, 绝缘气体的传导电流密度基本可视为恒定, 因而其产生的电荷积聚效果有限, 稳态工况下洁净干燥的绝缘子的固体电流传导为产生电荷积聚的主要原因<sup>[18,26-28]</sup>。

对于绝缘子本体及表面涂层, 法向传导电流密度  $\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_V$  的本构关系为:

$$|\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_V| = |\gamma \mathbf{n} \cdot \mathbf{E}| = \gamma E_n \quad (7)$$

式中: 带有下标 n 的物理量为其对应的法向分量。可见绝缘子法向电流密度模值与电导率及法向电场模值成正比, 参照式(2)表面电荷运输方程, 便有改变绝缘子体电导率、绝缘子表面电导率以及绝缘子

沿面法向场强 3 种调控电荷积聚的方法。

然而, 电荷积聚密度大小并不完全代表沿面电场畸变大小。由于  $\rho = \nabla \cdot \mathbf{D} = \nabla \cdot \varepsilon \mathbf{E}$ , 其中  $\varepsilon$  为介质的介电常数, 可知介电常数的大小直接影响了积聚电荷密度, 但是稳恒电场下  $\mathbf{E}$  与  $\varepsilon$  无关, 意味着即使绝缘材料的介电常数非常大以至电荷积聚密度也足够大, 但稳态电场分布却没有变化, 使得击穿电压可能也不会有明显改变。因此, 电场调控同样是增强界面绝缘的重要环节。另一方面, 从初态电容性电场向稳态电阻性电场的过渡过程并非一蹴而就, 而是存在由几分钟到数小时以至数天不等的时时间常数  $\zeta$ , 其主要受  $\gamma(\mathbf{r})$  和  $\varepsilon(\mathbf{r})$  的影响 ( $\mathbf{r}$  为位置矢量), 在合理的调控下,  $\zeta$  可能达到数月甚至数年级别, 可视为不能达到稳态, 也就抑制了电荷积聚造成的电场畸变; 而当  $\zeta$  较小时, 电荷积聚速率虽快, 但电荷消散速率也快, 不少研究表明电荷消散速率对沿面闪络电压有明显影响<sup>[24,29-30]</sup>, 因而在同等的沿面电场分布下沿面闪络电压也可能存在差异。所以电场优化与电荷调控具有同等的地位, 均能对沿面绝缘性能的提升作出贡献。

除了从电荷积聚和电场分布的角度提升沿面绝缘外, 易吸附于绝缘子表面的小尺寸微粒及金属粉尘也是重要影响因素。金属粉尘在受到多种宏观和介观力的作用下容易向绝缘子表面移动<sup>[31]</sup>, 对于这些高速运动且尺度较小的粉尘而言, 工程已有的微粒陷阱基本处于无效状态<sup>[13]</sup>, 难以防治微纳粉尘带来的绝缘安全隐患。当绝缘子表面吸附大量粉尘时, 局部将产生严重的电荷积聚及电场畸变, 大幅降低绝缘子沿面闪络电压<sup>[32]</sup>。在实现主动抑制粉尘运动之前, 降低金属粉尘在绝缘子表面的吸附量便是提升沿面绝缘性能的另一重要方向。

因此, 提升绝缘子沿面绝缘强度的研究思路有 3 种——界面电荷调控(抑制电荷积聚与加速电荷消散)、沿面电场优化以及粉尘吸附抑制; 主要解决方案有 3 种——绝缘子本体改性、结构优化以及表面改性。下文将围绕上述内容对沿面绝缘性能提升方法展开综述。

## 2 绝缘子几何结构优化

绝缘子结构优化是最为简单且直接的沿面电场分布优化方式, 只要优化后的绝缘子在确保足够的机械性能下提升了沿面绝缘性能, 便可直接运用于工程之中, 具有非常强的实用性。

### 2.1 几何结构优化准则

最优化问题中, 首要且必要关注的是最优化的目标函数。在电荷调控方面, Volpov 在提出表面电荷输运方程<sup>[15]</sup>后, 随即提出了使表面电荷密度最小的结构优化准则<sup>[33]</sup>, 即:

$$f: \min \left\{ \max(|\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_{V0}|), \max(|\nabla \cdot (\kappa_s \mathbf{E}_{\tau 0})|) \right\} \quad (8)$$

式中: 带有下标“0”的物理量表示其初态电容性电场时刻, 即目标函数为最小化初态电容性电场下的绝缘子侧最大法向电场模值和最大表面传导电流密度。

式(8)从表面电荷输运方程直接推导得出, 从数学角度考虑是合理的, 但从物理角度考虑则不然。 $\kappa_s$  的获取来自材料样品表面电流的测量及外施电压之比, 在理想情况下, 测量时电流通过材料的截面积应越小越好, 此时才能反映绝缘材料的表面电流而非体电流, 在绝缘子表面干燥、洁净的情况下, 表面电流将非常小,  $\kappa_s \mathbf{E}_{\tau 0} \approx \mathbf{0}$ , 因而最优化问题重点在于  $|\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_{V0}|$ 。然而, 要使固体侧法向最大电场模值为  $\mathbf{0}$ , 只需让盆式绝缘子与导体的夹角为  $90^\circ$  即可, 但完全垂直的绝缘子爬电距离过短, 且法向场强完全转化成了切向场强, 并不利于沿面绝缘。可见若只以最小化表面电荷密度为目标函数, 优化的结果可能会明显偏离实际需求。

在电场调控方面, 基本思想是设定切向和法向电场模值的可行域, 以限制绝缘子的几何结构, 即:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \max(\mathbf{E}_{\tau 0}) < E_T \\ \max(|\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_{V0}|) < E_N \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $E_T$  和  $E_N$  分别为切向及法向电场模值限制值, 主要结合实验测定。Volpov 认为在标准环氧绝缘子材料及 SF<sub>6</sub> 气压下, 应使得  $E_T < 3.5 \text{ kV/mm}$ 、 $E_N < 1 \text{ kV/mm}$ , 并以此为指导设计了  $\pm 750 \text{ kV}$  的盆式绝缘子<sup>[34]</sup>。De Lorenzi 等在上述限制准则的基础上, 还补充了切向电场梯度的可行域<sup>[35]</sup>, 并指导设计了  $1\ 000 \text{ kV}$  盆式绝缘子, 即:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \max(|\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}_{V0}|) < 3.5 \text{ kV/mm} \\ \max|\mathbf{E}_{\tau 0}| < 3.5 \text{ kV/mm} \\ \max(|\partial \mathbf{E}_\tau / \partial \tau|) < 0.2 \text{ kV/mm}^2 \end{cases} \quad (10)$$

切向电场梯度较大时, 意味着沿绝缘子切向方向为极不均匀电场, 同样可能导致沿面绝缘性能下降。王靖瑞定义了切向场强平均梯度  $f_\tau$  来定量表征切向电场的分布特性<sup>[36]</sup>, 即:

$$f_{\tau} = \frac{1}{l} \int_l |\mathbf{E}_{\tau}(\mathbf{r}) / E_{av} - 1| dl \quad (11)$$

式中:  $\mathbf{r}$  为位置矢量;  $l$  为绝缘子沿面路径;  $E_{av}$  为沿面平均电场模值。  $f_{\tau}$  的大小代表了  $|\mathbf{E}_{\tau}(\mathbf{r})|$  沿绝缘子方向分布的均匀程度以及切向分量所占总电场模值的比例。

虽然切向电场与沿面绝缘性能息息相关, 但张乔根等研究发现, 沿面闪络电压与切向、法向、总场强的相关系数分别为  $-0.84$ 、 $-0.73$ 、 $-0.90$ , 表明沿面闪络电压和总场强的相关性更高, 且法向电场容易与积聚电荷交互而诱导场强进一步畸变<sup>[37]</sup>。王靖瑞在目标函数中考虑了二者的关系<sup>[36]</sup>, 即:

$$f: \min(\omega \max |\mathbf{E}_n| + (1 - \omega) \max |\mathbf{E}_{\tau}|) \quad (12)$$

式中:  $\omega$  为法向电场的占比权重。由此为目标函数设计了  $\pm 100$  kV 盆式绝缘子, 如图 3、图 4 所示, 通过直流叠加雷电冲击电压实验表明, 相比于优化前的绝缘子, 其闪络电压提升了约 16%。

王超等将许用电场模值与沿面电场模值组合, 提出以下优化目标函数<sup>[38]</sup>, 即:

$$f_1: \min \left( \frac{\int_l (|\mathbf{E}(\mathbf{r})| - E_d) dl}{\int_l |\mathbf{E}(\mathbf{r})| dl} \right) \quad (13)$$

式中:  $E_d$  为电场许用值。在此基础上, 还考虑了绝缘子本体的机械强度及材料用量, 将二者结合, 提出优化目标函数为:

$$f_2: \min \left( \omega \frac{1}{C_0} \int_{\Omega} \rho d\Omega + (1 - \omega) \frac{B}{B_0} \right) \quad (14)$$

式中:  $\rho$  为材料密度;  $B$  为加压时的最大形变量;  $B_0$  为原始结构的形变量;  $C_0$  为单位化常数。

由于直流绝缘子受电荷积聚影响, 考虑最优化电荷产生的附加电场将会对迭代优化求解造成困难, 屠幼萍等将优化准则设定为: 满足交流绝缘子沿面电场标准的基础上, 最小化电荷积聚密度<sup>[39]</sup>。此时若能找到电荷密度较小的解、使之不足以产生较大的附加电场时, 优化后的绝缘子沿面电场基本可视为交流下的电容性电场, 由此设计的  $\pm 100$  kV 盆式绝缘子直流叠加雷电冲击闪络电压为 915 kV, 超过 650 kV 的考核标准。

由于绝缘子优化准则与沿面绝缘性能的表面方法有关, 其相关研究仍然较少, 目标函数普遍以最小化沿面最大电场模值或平均电场模值为主, 少有切向、法向电场各自对沿面电场的影响。考虑到沿面放电还和爬电路径有关, 因而在不改变材料的

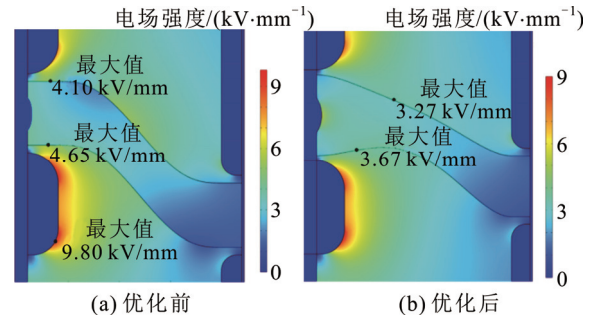


图 3 优化前后盆式绝缘子电场分布<sup>[36]</sup>

Fig.3 Electric field distribution of the basin insulator before and after optimization<sup>[36]</sup>

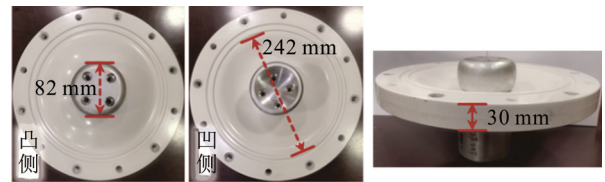


图 4 优化后的  $\pm 100$  kV 盆式绝缘子<sup>[36]</sup>

Fig.4 Optimized  $\pm 100$  kV basin insulator<sup>[36]</sup>

情况下, 绝缘子结构优化的目标函数可能是切向、法向电场以及爬电路径的泛函, 而若考虑粉尘吸附的影响, 则还须引入绝缘子的倾斜角度<sup>[40]</sup>, 过低的倾角可能使粉尘更容易吸附在盆式绝缘子上。粉尘吸附量与盆式绝缘子倾角关系如图 5(a)所示, 考虑粉尘吸附时不同倾角绝缘子的闪络电压如图 5(b)所示<sup>[36]</sup>。一方面随倾角的增大, 粉尘吸附量将明显下降; 但另一方面, 由于倾角增大使得沿面绝缘路径缩短, 即使在洁净情况下,  $90^\circ$  绝缘子的闪络电压也是最低的。因此, 只有明晰各物理量之间复杂的交互关系, 才能进一步提高几何结构优化的精度。

## 2.2 几何结构优化算法

在确定了优化的目标函数及定解条件后, 合适的优化算法可以更好地找到最优解, 减少迭代计算的步数, 提高计算的收敛性。

吴泽华等采用粒子群算法, 优化三相共箱盆式绝缘子电场和应力场分布<sup>[41]</sup>, 使得沿面最大电场模值下降了 13.5%, 第一主应力最大值下降了 8.5%。对于三相三支柱绝缘子, 设计由总电场模值到综合优化切向场强和嵌件场强的顺序, 通过参数扫描法分析了各个几何参数对电场变化的敏感性, 选取关键参数优化, 使各电场指标电场均有下降<sup>[42]</sup>。贾云飞等通过遗传算法, 将盆式绝缘子表面轮廓及屏蔽

罩的厚度、嵌件的凹凸程度均设为优化参数, 优化得到的 1 100 kV 盆式绝缘子沿面最大电场模值降低约 10%<sup>[43]</sup>; 他们还用该算法优化了三支柱绝缘子本体及嵌件、滚轮, 使绝缘裕度提升 6.3%<sup>[44]</sup>。

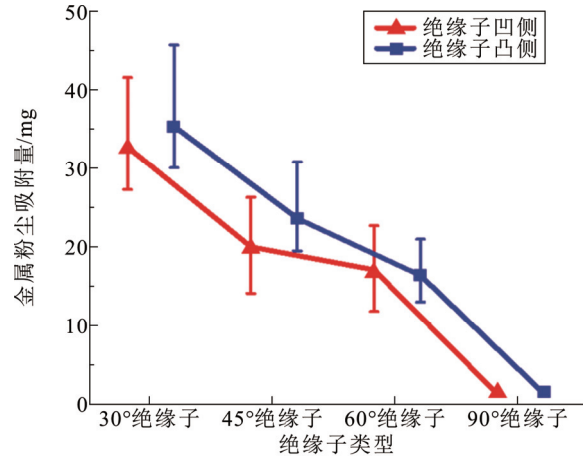
受限于传统粒子群算法和遗传算法的局限性, 前者容易陷入局部最优解, 后者在求解规模庞大时收敛性较差, 因而有的学者探索了改进优化算法的有效性。彭宗仁等采用自适应变异的粒子群算法, 将特高压 GIS 单支撑绝缘子轮廓转变为贝塞尔曲线进行整体结构优化, 使得金属嵌件及绝缘子沿面最大电场模值均降低 20%以上<sup>[45]</sup>; 采用改进遗传算法 (non-dominated sorting genetic algorithm- II, NSGA-II) 优化特高压盆式绝缘子屏蔽罩轮廓, 使得绝缘子凹侧的沿面最大电场模值降低 7.2%<sup>[46]</sup>。高文胜等通过 NSGA-II 算法, 综合优化隔离开关盆式绝缘子电场分布与机械性能, 使凹侧和凸侧最大电场模值分别下降 11.63%和 12.87%, 且具有 1.11 倍的最大应力裕度<sup>[47]</sup>, 如图 6 所示。

还有学者采用神经网络算法展开结构优化。淡淑恒等利用反向传播(back propagation, BP)神经网络优化盆式绝缘子均压环的几何结构, 使绝缘子两侧平均电场模值有所下降<sup>[48-49]</sup>。彭宗仁等应用粒子群-径向基 (particle swarm optimization-radial basis function, PSO-RBF) 神经网络拟合盆式绝缘子结构和沿面路径各点的电场分布, 实现盆式绝缘子最优化结构参数的非线性设计, 最终使最大电场模值和应力均有下降, 且电场分布更加均匀<sup>[50]</sup>。

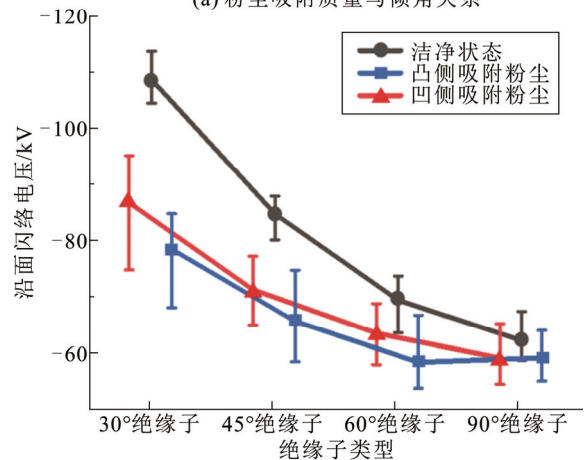
由于绝缘子结构优化须迭代计算每一时刻的多物理场模型, 求解多物理场的时空复杂度无法依靠算法解决, 但若将算法用于大量的电场采样、训练、学习, 直至输入修改后的几何结构参数, 就可直接通过逆向求解此时的沿面电场分布, 而不需要经过有限元多物理场仿真求解, 便可使计算难度大为下降, 特别是直流环境下须充分考虑绝缘气体的载流子输运过程, 算法的运用更为关键。而不论何种优化算法, 其最根本的前提——直流多物理场仿真的可靠性须得到保证, 优化的目标函数也应与沿面绝缘性能紧密相关, 否则无法从本质上提高绝缘子结构优化的有效性。

### 3 绝缘子本体材料改性

在绝缘子中掺杂纳米颗粒或非线性电导材料等可以有效改善绝缘子本体的电流传导特性, 从而



(a) 粉尘吸附质量与倾角关系



(b) 考虑粉尘吸附时不同倾角绝缘子的闪络电压

图 5 不同倾角盆式绝缘子的粉尘吸附量及闪络电压<sup>[36]</sup>

Fig.5 Dust adsorption capacity and flashover voltage of different tilt basin insulators<sup>[36]</sup>

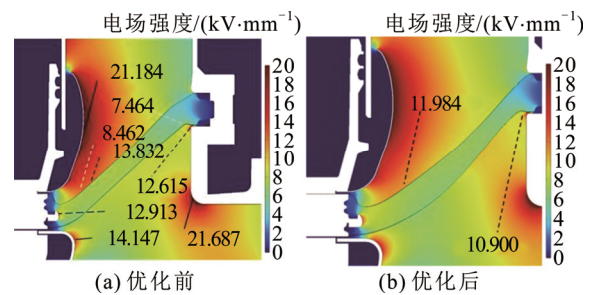


图 6 NSGA-II 算法优化前后的绝缘子电场分布<sup>[46]</sup>

Fig.6 Insulator electric field distribution before and after optimization by NSGA-II algorithm<sup>[46]</sup>

抑制电荷积聚或优化沿面电场分布。

### 3.1 电荷角度——提升本体材料电阻率

从抑制电荷积聚的角度出发, 绝缘子表面电荷积聚的一大主要来源是固体侧体电流的传导<sup>[51]</sup>, 因而提高绝缘子体电阻率是抑制电荷向绝缘子表面迁移、降低表面电荷积聚的主要方式之一, 其与绝缘

材料的陷阱能级和陷阱密度密切相关。对于绝缘材料表面的陷阱分布特性, 可通过静电探头测量材料表面电位衰减速率曲线, 结合等温电位衰减理论(isothermal surface potential decay, ISPD)直接计算出表面陷阱能级和陷阱密度的分布特性<sup>[52]</sup>。对于均匀分布的体绝缘材料, 可采用电声脉冲法(pulsed electro-acoustic method, PEA)获得其空间电荷消散过程, 采用指数函数拟合后, 再结合式(15)、(16)可得材料内部陷阱能级  $F_m$  及陷阱密度  $N(F_m)$  的分布特性<sup>[53]</sup>为:

$$F_m = k_B T \ln(\nu t) \quad (15)$$

$$N(F_m) = \frac{\eta_2}{\eta_1} \frac{t}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad (16)$$

式中:  $T$  为材料温度;  $\nu$  为电子振动频率;  $\tau$  为时间常数;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$  均为常数。通过绘制  $N(F_m)$ - $F_m$  曲线便可获得不同能级下的陷阱密度分布特性, 且深陷阱具有更高的能级, 可从该曲线的陷阱密度极值获知深、浅陷阱的能级中心。聚合物绝缘材料的深、浅陷阱分别由其化学、物理缺陷造成<sup>[54]</sup>, 深陷阱对载流子具有强束缚能力, 会抑制其迁移和脱陷过程, 增大材料的电阻率; 浅陷阱则会促进载流子的迁移, 降低材料电阻率<sup>[55]</sup>。因而在绝缘子本体材料改性方面, 增大绝缘子本体材料的深陷阱能级和密度可以提高体电阻率、抑制电荷向绝缘子表面的迁移, 从而增强绝缘子沿面绝缘性能。

张忠等采用 4 种纳米  $\text{SiO}_2$  制备环氧纳米复合材料, 发现经过烷基修饰的  $\text{SiO}_2$  在质量分数为 1% 时即可较纯环氧的电阻率提升约 27%<sup>[56]</sup>。李盛涛等将硅烷偶联剂改性的  $\text{TiO}_2$  掺杂至环氧材料中, 发现深陷阱密度随填料浓度的增大而降低, 当质量分数 > 1% 时, 过渡区的重叠降低了陷阱的能级, 反而降低了沿面闪络电压。杜伯学等制备了掺杂质量分数分别为 1%、3%、5% 的氮化铝( $\text{AlN}$ )环氧复合材料, 分析它们在不同温度下的陷阱能级与陷阱密度分布特性<sup>[57]</sup>, 结果表明: 随着环境温度的升高, 陷阱能级越深而密度越小, 80 °C 下填料质量分数为 1% 时具有最高的深陷阱密度。Zeeshan Khan 等制备了不同掺杂浓度的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  环氧复合材料, 发现质量分数为 3% 时纳米颗粒在分子之间形成紧密的连接, 增加环氧的分解温度, 而填料质量分数为 1% 时, 深陷阱能级和深陷阱密度将显著增加, 阻碍了电荷的迁移, 提高了环氧复合材料的击穿强度<sup>[58]</sup>。谢庆等制备了多种掺杂 La/Cr 的铋铁氧体纳米填料, 使

用这种填料制备的环氧复合涂层, 在掺杂质量分数为 4% 时具有最高的深陷阱能级与密度, 载流子的迁移速率明显降低, 使得沿面闪络电压提升 45.2%<sup>[59]</sup>。

张博雅等在环氧材料中引入了巴克敏斯特富勒烯( $\text{C}_{60}$ )<sup>[60]</sup>, 发现仅需要极为微量的掺杂质量分数 ( $100 \times 10^{-6} \sim 200 \times 10^{-6}$ ) 即可让环氧树脂的电导率显著下降, 在质量分数为  $200 \times 10^{-6}$  时的电导率仅为纯环氧树脂的 20%, 引入了大量深陷阱, 并进一步抑制了表面电荷积聚。除了  $\text{C}_{60}$  以外还研究了掺杂二维纳米材料 MXene 对环氧绝缘子表面电荷积聚的影响<sup>[61]</sup>, 发现只需要更低的掺杂质量分数 ( $30 \times 10^{-6}$ ) 即可使环氧复合材料的电阻率显著增加, 但是进一步提升掺杂浓度反而会降低材料的电阻率, 这和高浓度下 MXene 产生团聚、构建新的导电通道有关。

张贵新等将几种不同粒径和浓度的金属纳米颗粒掺杂至环氧树脂中<sup>[62-63]</sup>, 与常规理论中掺杂导电粒子使电阻率下降的结果不同, 发现质量分数为  $120 \times 10^{-6}$ 、粒径为 10 nm 的铜颗粒掺杂后会引入大量的深陷阱, 使材料的体电阻率提高了约 3.6 倍, 从而抑制了表面电荷的积累, 使闪络电压提升了约 12.8%。他们认为这可能与介观尺度下的单电子隧穿效应有关, 虽然随着掺杂浓度的提升, 材料的绝缘性能越好, 但当掺杂浓度较高或者粒径较大时, 它们同样可能存在团聚效果, 使得陷阱能级下降, 因而要尽可能选择较小的粒径并合理调控掺杂的浓度。

上述多种绝缘子掺杂改性表明, 绝缘子体电阻率受填料的影响显著, 甚至在  $10^{-6}$  级别的掺杂都可以明显改变绝缘子的体电阻率, 这对工程应用的难度和产品合格率带来一定挑战。此外还有一重要问题, 表面电荷积聚的时间常数并不是简单的  $\varepsilon/\gamma$ , 其至少和材料的厚度有关。例如由平行板和 2 种有损介质(分别定义为“介质 1”和“介质 2”)构成的串联模型, 如图 7 所示, 介质 1 和介质 2 的厚度、相对介电常数、电导率分别为  $d_1$  和  $d_2$ 、 $\varepsilon_1$  和  $\varepsilon_2$ 、 $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ , 它可以等效为电阻  $R_1$  与电容  $C_1$  并联、 $R_2$  和  $C_2$  并联后再一同串联的电路模型, 当外电压为  $U_0$  时, 其界面电荷积聚的时间常数  $\varsigma$  为:

$$\varsigma = \frac{d_2 \varepsilon_1 + d_1 \varepsilon_2}{d_2 \gamma_1 + d_1 \gamma_2} \varepsilon_0 \quad (17)$$

式中:  $\varepsilon_0$  为真空介电常数。式(17)表明, 时间常数是 2 种介质厚度的函数, 即使绝缘子体电导率很低, 以至于数天内均不会有明显的电荷积聚, 但这并非

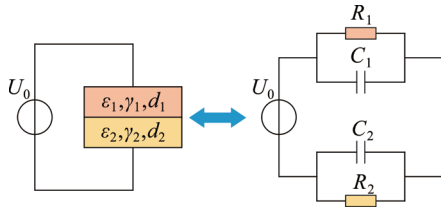


图7 有损介质串联模型

Fig.7 Lossy medium series model

代表 GIS/GIL 在数月乃至数年的长时运行下也不会达到直流稳态, 此时若电导分布不合理, 也可能使稳态电场畸变明显, 因而在抑制固体侧电流传导的同时, 合理的电场调控也是有必要的。

### 3.2 电场角度——本体电导率分布优化

从沿面电场调控的角度出发, 由于绝缘子在 GIS/GIL 内受到温度梯度影响, 而环氧树脂的电导率与温度呈指数变化关系<sup>[64]</sup>, 提高导热系数也可以在一定程度上优化沿面电场分布。邹亮等设计了掺杂羟基功能化石墨烯纳米片的环氧材料<sup>[65]</sup>, 使导热系数比纯环氧大 44%, 介电常数降低了 25%。王增彬等通过硅烷偶联剂修饰氮化硼(BN)填料的方法制备了多种 BN 复合环氧材料<sup>[66]</sup>, 其中聚合六方 BN 复合材料的热导率可达到 10.1 W/(m·K), 而在添加尺度更小的 AlN 填充样品空隙时, 热导率可以进一步提升为 12.3 W/(m·K)。邵涛等使用聚多巴胺和  $\gamma$ -(2,3-环氧丙氧基)丙基三甲氧基硅烷分别对 BN 及 AlN 进行改性, 并将纳米 BN 固定在微 AlN 表面, 可使得导热系数比纯环氧提升 946%<sup>[67]</sup>。

在绝缘子内掺杂一定浓度的非线性电导材料, 可以使绝缘子电导率转变为电场敏感参数, 使其随电场的增大而增大, 形成负反馈调节效应, 从而均化沿面电场分布。李进等分析了碳化硅(SiC)体积分数为 0~14%时环氧复合材料的电导特性<sup>[68-69]</sup>, 发现非线性电导率阈值随填料含量的增加而减小, 在 20 °C、体积分数为 14%时具有最高的闪络电压, 但随着温度的升高, 环氧复合涂层的电导率也明显升高, 在 70 °C 时甚至不如纯环氧树脂的沿面闪络电压。因而非线性电导材料需要严格考虑到温度梯度的影响, 尽可能增大热导率的同时, 避免电导率的急剧增加导致沿面击穿。

在可调节非线性电导材料的电导率变化范围内, 针对绝缘子的几何结构, 在不同区域设置不同的电导率, 可以进一步优化绝缘子沿面电场分布。2006 年, Rachmawati 等提出了功能梯度材料在

GIS/GIL 中的适用性, 通过离心法制备了具有非连续分布的介电常数-功能梯度材料( $\epsilon$ -functionally gradient materials,  $\epsilon$ -FGM)绝缘子, 改善了沿面电场分布, 使沿面闪络电压有明显提升<sup>[70]</sup>。虽然直流稳态环境下电荷积聚与电场分布受电导率影响为主,  $\epsilon$ -FGM 绝缘子难以直接用于 HVDC 系统, 但类比这种梯度改性的方式同样可指导直流工况下绝缘子掺杂改性设计, 15 年后该团队通过多种直流工况下的绝缘子电场仿真, 提出了介电常数/电导率-功能梯度材料( $\epsilon/\sigma$ -FGM)绝缘子的设计思路<sup>[71]</sup>, 可以使盆式绝缘子凸侧、凹侧最大沿面电场模值分别降低了 30%、43%、7%和 20%, 且在极性反转、直流叠加冲击等暂态工况下也有一定的应对能力。Kingdersberger 等提出在一种电导率各向异性的环氧树脂中掺杂非线性电导材料, 使其具有明显不同的表面及体积特性<sup>[72]</sup>。何金良等在设计了一种盆式绝缘子几何结构的基础上, 进一步将绝缘子划分为两个部分, 在靠近中心导杆区域使用 SiC 掺杂浓度较低的环氧材料, 在靠近外壳区域使用较高 SiC 浓度环氧材料<sup>[19]</sup>, 仿真发现其两侧最大电场模值及下降明显, 并通过 X 射线、水压实验等验证了这种设计的可行性。

上述绝缘子本体改性研究基本以环氧材料为基体, 但为了进一步提升 GIS/GIL 绝缘支撑材料的综合性能, 研究视野不应局限于环氧材料改性。Harshada 等曾提出一种内嵌玻璃微粒的绝缘泡沫材料模型, 既能支撑高压导体, 又能替代绝缘气体, 无须再考虑气固界面绝缘, 但泡沫材料难以具备绝缘气体击穿后的绝缘自恢复能力<sup>[73]</sup>。齐波等研究了一种新型陶瓷材料的绝缘特性, 相较于环氧材料, 陶瓷受温度影响时其载流子仍基本沿晶界迁移, 使其电导率对温度具有较低的关联特性, 可以缓解温度梯度下绝缘子高电场区域向地电极的迁移, 且在 10 kV 正、负极性电压作用下的表面电荷密度比环氧复合材料分别低 93%与 87%<sup>[74]</sup>。还有学者分析了多种非线性电导材料与介电功能梯度材料对沿面电场的改善效果<sup>[75-77]</sup>, 但这些材料仍依赖于基本的绝缘支撑材料, 对于新型绝缘支撑材料的研究还有较大的探索空间。

通过仿真模拟, 可从场的角度直接指导绝缘子的本体材料设计, 且在材料允许的参数范围内有较大的调节能力, 例如将电导率作为决策变量展开拓扑优化等。但这种方法的优化结果可能会存在多个

分界面, 固-固界面材料的不连续导致绝缘子的机械性能受到影响, 界面可能会成为固体绝缘的薄弱点。而当非线性电导材料的浓度过高时, 其泄漏电流也不可忽视, 应当在优化过程中设置泄漏电流的上限, 并通过实验验证优化结果的可行性。

## 4 绝缘子表面改性

绝缘子表面作为与绝缘气体的直接接触面, 其界面的电气性能将直接影响沿面绝缘强度, 通过对绝缘子表面进行物理或化学改性, 如表面氟化、等离子体处理、涂覆功能性涂层等, 可以有效抑制电荷积聚、改善电场分布, 使用低黏附力的涂层还可以降低微纳粉尘在绝缘子表面的吸附量, 间接提升沿面绝缘的可靠性。

### 4.1 表面粗糙度改性

通过物理打磨的方式对绝缘子表面处理时会改变绝缘子的表面形态, 而不同的表面形态一方面将影响局部的电场分布和放电发展路径, 另一方面会改变材料表面的晶体结构, 影响材料表面陷阱分布特性<sup>[52]</sup>, 从而改变绝缘子沿面闪络电压。

Yamamoto 等学者研究了  $\text{SiO}_2$ 、聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)、聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  掺杂的绝缘子在不同表面粗糙度  $R_o$  下的闪络特性<sup>[78]</sup>, 得出  $R_o \leq 100 \mu\text{m}$  时闪络电压  $U_c$  随  $R_o$  增大而增大的结论。You-Ho 等分析了玻璃纤维增强塑料、酚醛树脂、单体浇铸尼龙材料的闪络特性<sup>[79]</sup>, 在  $R_o \leq 20 \mu\text{m}$  范围内得出  $U_c$  随  $R_o$  增大而减小的结论。张冠军等分析了  $R_o$  为  $0.1 \sim 2.0 \mu\text{m}$  范围内有机玻璃材料的  $U_c$  变化特性<sup>[80]</sup>, 发现随  $R_o$  的逐步增大,  $U_c$  呈现先减小后增大的趋势, 在  $R_o$  为  $0.5 \sim 1.0 \mu\text{m}$  时闪络电压最低, 分析试样的表面电子陷阱分布发现,  $R_o = 0.5 \mu\text{m}$  时表面电子陷阱能级最低, 较多的浅陷阱能级使之难以俘获材料表面的载流子, 从而促进了沿面放电的发展。

Shinya 等使用 3D 打印技术构建了垂直与平行电极的粗糙度沟壑样板, 发现槽型结构的闪络电压明显高于平行结构, 即使二者的介电参数基本一致<sup>[81]</sup>。姚鑫等测量了绝缘子不同打磨方式下雷电冲击闪络电压变化曲线, 同样得出在垂直于电极打磨的情况下闪络电压提升最高的结论<sup>[82]</sup>, 但其随粗糙度的变化规律并不明显。薛建议等分析了绝缘子粗糙度对表面电荷密度及正、负极性闪络电压的影响<sup>[83]</sup>, 发现电荷密度、闪络电压与  $R_o$  的关系存在 2

个阶段, 在  $R_o \geq 7.48 \mu\text{m}$  时表面电荷密度明显降低, 正、负极性  $U_c$  也均有提升, 认为阶段 II 引入了更多的空穴或电子深陷阱、抑制了电荷积聚、延长了放电路径而使闪络电压提升。

詹振宇等进一步研究了不同极性电压与不同的打磨方式对环氧材料沿面闪络电压的影响<sup>[84-85]</sup>, 发现在乱序打磨时, 随  $R_o$  的增大, 正、负极性闪络电压均呈现先上升后稳定的情况; 当打磨方式为平行于电极方向时,  $U_c$  随  $R_o$  的增加先上升而后又明显下降; 而垂直于电极方向打磨时, 正、负极性闪络电压有明显提升, 特别是在  $R_o = 1.3 \mu\text{m}$  时, 正、负极性闪络电压均较未处理时提升 50% 以上, 该粗糙度下满足  $U_c(\text{垂直电极打磨}) > U_c(\text{平行电极打磨}) > U_c(\text{乱序打磨})$ , 如图 8 所示。并且在不同电压极性下, 表面电位消散速率与陷阱能级分布具有显著差异, 但是  $R_o = 1.3 \mu\text{m}$  时, 这 3 种打磨方式的最高正、负极性闪络电压却均高于其他粗糙度情况, 见图 9, 认为浅陷阱的引入可以使电子容易脱陷, 降低积聚电荷对沿面电场影响, 从而提升了闪络电压。

除了在绝缘气体中的粗糙度改性外, 还有学者研究了真空环境下的沿面闪络特性。张冠军等发现在  $R_o \leq 8 \mu\text{m}$  时,  $U_c$  随  $R_o$  的增加呈现恒定、增长和退化 3 个阶段, 电荷密度随  $R_o$  增大而降低<sup>[86]</sup>。Inzamam 等设计了 4 种  $0.5 \mu\text{m} \leq R_o \leq 9 \mu\text{m}$  的绝缘子, 发现随  $R_o$  的增大, 正负电压极性表面电位的消散速率以及  $U_c$  均有明显提升<sup>[87]</sup>。李盛涛等认为表面深陷阱密度增大时, 固体表面层中的电荷输运和电子发射过程受到阻碍, 从而降低了表面电荷密度和沿面电场畸变, 提高了真空沿面闪络电压<sup>[88]</sup>。

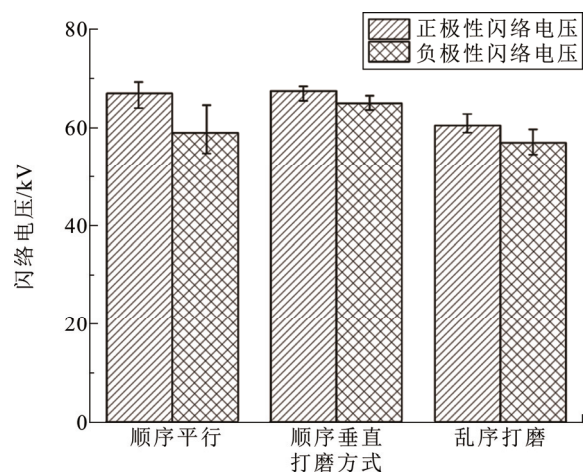
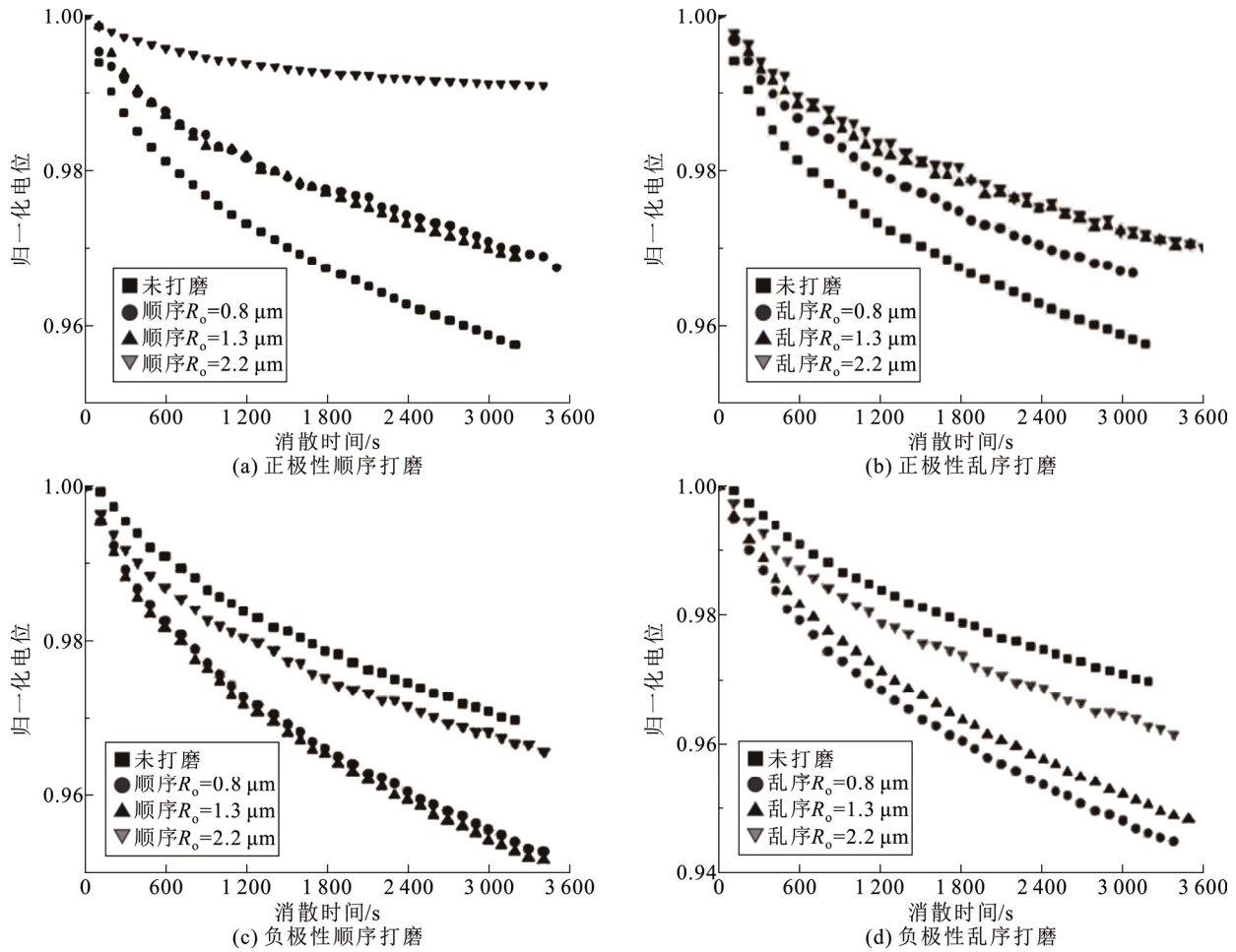


图 8 不同打磨方式下的正、负极性闪络电压<sup>[84-85]</sup>

Fig.8 Positive and negative polarity flashover voltages under different grinding methods<sup>[84-85]</sup>

图9 不同极性电压下表面电荷消散特性<sup>[84-85]</sup>Fig.9 Surface charge dissipation characteristics under different polar voltages<sup>[84-85]</sup>

上述多种研究表明: 1) 绝缘子表面粗糙度分布对沿面绝缘性能具有明显影响, 合理的粗糙度及打磨方式能有效提升沿面闪络电压, 但除了垂直电极方向打磨效果较优的结论外, 并未得到关于粗糙度的普遍结论。2) 对于表面粗糙度而言, 仅以电荷密度/电荷消散速率或深浅陷阱能级密度为标准可能会得出完全相反的结论, 其不能直接代表沿面绝缘性能的变化特性, 而是受局部电场分布、沿面放电路径以及绝缘气体环境等多种因素影响。同时, 粗糙度打磨实验也可能存在一定的工艺或操作误差, 如何保证实验的稳定性和严谨性也是亟待解决的关键问题之一。在此基础上进一步分析粗糙度梯度对沿面闪络电压的影响机理与定量关联机制, 若能从中得出绝缘材料最优粗糙度梯度分布模式, 这可很大程度上降低绝缘子表面改性的成本、提升工程应用的可靠性与可实施性, 同时也能为化学手段改善绝缘材料表面粗糙度的方式提供理论指导。

## 4.2 表面材料处理

在不外加绝缘材料涂覆的情况下, 通过多种化学方式改变绝缘子表面的理化性质, 可以起到抑制电荷积聚、加速电荷消散的效果, 材料处理过程中还可能优化绝缘子表面的粗糙度, 提升沿面绝缘性能。

### 1) 表面氟化处理

氟化技术可通过多种方式将氟原子引入原有的分子体系, 是一种应用广泛且有效的材料表面处理方式。

刘亚强等通过  $F_2/N_2$  混合气体与环氧绝缘子短时直接接触的方式进行氟化处理, 发现  $F_2$  显著提高了绝缘子表面电导率, 抑制了表面电荷的积累<sup>[89]</sup>。安振连等分析了直接氟化温度(25~95 °C)和氟化时间(5~120 min)对绝缘子表面电导率及表面电荷密度的影响<sup>[90]</sup>, 发现表面电导率随氟化温度的升高而至多提升 4 个数量级, 但表面电荷消散速率与氟化

时间的关系呈先增后降的趋势。在随后的研究中发现, 定向氟化环氧绝缘子可显著提高其沿面绝缘性能, 直流负极性闪络电压平均提升了 13%以上<sup>[91]</sup>, 且在电晕放电<sup>[92]</sup>和交流电应力<sup>[93]</sup>下氟化处理的绝缘子沿面绝缘性能同样有一定程度的提升。通过 PEA 法分析认为氟化表面层的引入可以有效阻止电极处的电荷注入<sup>[94]</sup>, 绝缘子表面氟化后除了增大表面电导率、降低表面电荷积聚以外, C—F 键的引入使绝缘子不易受电晕影响而降解或与绝缘气体发生反应, 同时还使得表面介电常数有所增大, 改善了三接合点处的电场分布。

在纯环氧绝缘子的氟化处理基础上, 大量学者还对工程实际中的掺杂  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的环氧绝缘子(epoxy/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ , EP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$ )的氟化展开研究。安振连等发现  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒对环氧基体的氟化及表面电导率改性的影响较小, 但是氟化反应可能导致氧化铝颗粒暴露于绝缘子表面, 由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  与  $\text{F}_2$  反应释放的  $\text{O}_2$  可能会使氟化变成氧化氟化<sup>[95-96]</sup>。李传扬等研究了 EP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  直接氟化后的表面形貌特性, 发现材料的表面能以及  $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的表面积随氟化时间呈现先增大后减小的趋势, 在空气环境下的直流闪络电压可提高近 1/3<sup>[97-98]</sup>。王飞鹏等对比了不同质量分数  $\text{Al}_2\text{O}_3$  掺杂的环氧绝缘子氟化处理后的绝缘性能, 发现质量分数为 1%的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  可使得氟化环氧树脂闪络电压提升 17%<sup>[99]</sup>。张博雅等对 EP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  展开分区域直接氟化处理, 发现氟化处理 15~60 min 后, 在 -40 kV 充电下表面电荷积聚情况明显优于未处理绝缘子表面, 认为氟化处理后表面引入了大量电子和空穴浅陷阱, 使得表面电荷密度显著降低、表面电导率增大<sup>[100]</sup>。

章程等研究了氟化处理后的 EP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  在空气环境放置后的电荷消散特性<sup>[101]</sup>, 经过环境空气存储 5 d 以后, 表面电荷衰减率仍超过 97%, 但在空气中长时贮存时表面电荷衰减率会明显下降, 氟化处理 60 min 的 EP/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  在贮存时间为 35~100 d 时, 电荷衰减率由 57.7%大幅下降至 8.5%。他们发现长时存放后的氟化绝缘子水接触角逐步降低, 表现为更强的亲水性, 通过傅里叶红外(fourier transform infrared, FTIR)光谱仪测试表明 C=O 键的波峰明显, 分析可能是—C(O)F 进一步水解为—COOH 基团, 增强了亲水性, 从而改变了原氟化处理时材料表面的理化性能<sup>[102]</sup>。

除了环氧材料外, 安振连等还分析了硅橡胶氟化的闪络性能<sup>[103-105]</sup>, 发现同样可以提高其表面电导率、加速表面电荷消散; 氟化效果受到温度影响, 在氟化温度为 85 °C、氟化 120 min 时具有更好的抗电晕性能, 但在 55 °C 时抗电晕性能较差; 此外, 由于氟化处理增大了硅橡胶表面的水接触角, 使其抗湿闪与抗污闪性能也有所提高。还有许多学者的研究也表明氟化处理可提升硅橡胶的疏水性, 在其他常用的绝缘材料如聚酰亚胺、聚乙烯等也均可通过氟化处理加速表面电荷的消散, 提升绝缘能力<sup>[106-110]</sup>。

上述多种研究表明, 材料表面氟化处理仍具有很大的发展潜力, 但表面氟化由于浅陷阱的引入, 表面泄漏电流会增加。直接氟化技术需要用到的  $\text{F}_2$  单质一方面可能增加生产成本, 另一方面也并非环境友好, 同时还可能和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  及 H、O 等反应而破坏了绝缘性能, 亟待使用新的氟化技术。表面水接触角的变化也可能使贮存成本增加, 而— $\text{CF}_3$ 、— $\text{CF}_2$ —本身是低表面能基团<sup>[111]</sup>, 合理的氟化处理可能使其具有疏水的能力。因而需要对氟化过程的温度、时间等参量展开多次测试与调控, 寻找最优处理流程。

## 2) 表面等离子体处理

通过低温等离子体放电的方式同样可以改变绝缘子表面理化性能、提升沿面绝缘强度, 且绿色环保, 不易产生污染。常用的处理方法有介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)等离子体和大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ), 前者操作简单、成本较低, 可用于多种气体环境, 后者作为一种新兴的大气压等离子体放电技术, 可在大气压下工作, 具有放电温度和激发电压低、放电相较 DBD 更为均匀的优势<sup>[112]</sup>。2014 年, 邵涛等使用 DBD 等离子体处理 PMMA 表面, 发现可以显著提高其表面粗糙度、降低二次电子发射率、提高电荷捕获率, 增强了真空沿面闪络性能<sup>[113]</sup>; 通过支持自调节的 APPJ 阵列对 PMMA 表面进行粗糙度改性<sup>[114]</sup>, 结果表明 APPJ 中的 OH、O 等极性基团增强了 PMMA 的亲水性, 使表面粗糙度约为未处理样品的 2~3 倍, 亲水基团还会引入大量的浅陷阱, 增大了沿面闪络电压。

对于环氧绝缘子, 邵涛等通过 DBD 等离子体处理环氧材料表面, 提升其表面粗糙度并利用等离子体中的 O 自由基和表面形成的羰基产生大量浅陷阱, 加速表面电荷消散, 发现闪络电压随等离子体

处理时间有先增后降的趋势,认为长时处理下等离子体能量沉积会使环氧表面受损,反而抑制了电荷消散速率<sup>[115]</sup>。李盛涛等对此持相同的观点,通过不同时间的等离子体处理 EP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面后发现陷阱密度及电荷消散速率先增大后减小,沿面闪络电压在等离子体处理 3 min 时达到最高<sup>[116]</sup>。陈向荣等通过 DBD 等离子体处理 AlN 掺杂的绝缘子,发现引入了更多的极性基团,增大了表面粗糙度及浅陷阱密度,使正、负极性闪络电压均有提升,尤其是负极性闪络电压提升明显<sup>[117]</sup>。谢庆等对比了 DBD 和 APPJ 对环氧表面处理的效果,结果表明后者可使表面电导率多提高 1 个数量级,二者的闪络电压较未改性样品的分别提升了 14.4%和 18%<sup>[118]</sup>。

除了等离子体直接处理绝缘材料表面外,近年来,通过在材料表面沉积 1 层纳米薄膜的等离子体增强化学气相沉积(plasma enhanced chemical vapor deposition, PECVD)技术也愈发受到许多学者的关注。该方法不但具有较低的污染水平,而且只会穿透材料表面非常薄的 1 层纳米层,因而亦可在不影响材料形态的基础上改变其表面性能<sup>[119]</sup>。邵涛等通过常压 DBD 在环氧绝缘子表面沉积 SiO<sub>x</sub> 薄膜<sup>[120-121]</sup>,发现 C—H、C=O 及 C=C 键被 Si—O—Si 及 Si—OH 取代,这类无机基团可以降低表面浅陷阱密度,使得表面电荷密度减少 12%、闪络电压提升了 42%。在纳秒脉冲电压下,沉积 SiO<sub>x</sub> 薄膜的 EP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的电荷积聚密度及电荷消散速率也均有显著改善<sup>[122]</sup>,在快速暂态过电压下也能有一定程度的绝缘提升。他们还发现这种方法可以用于金属导体材料,抑制金属导体向电极附近的金属微粒的电荷注入,引入 SiO<sub>x</sub> 薄膜后,线形微粒的启举电压提升了 38%<sup>[123]</sup>。除了 SiO<sub>x</sub> 薄膜外, TiO<sub>x</sub> 薄膜也有类似阻隔电极的作用<sup>[124-125]</sup>。

张冠军等通过 DBD 等离子体在环氧表面沉积粉尘状的氟碳颗粒后发现表面几乎不再积累电荷,最大表面电荷密度由 77.84 pC/mm<sup>2</sup> 降低至 1.42 pC/mm<sup>2</sup>,并使得环氧绝缘子在真空中的沿面绝缘强度提升 50%<sup>[126]</sup>。谢庆等将等离子体氟化与等离子体沉积相结合,实现等离子体梯度改性,通过设置阶梯式电导率分布方式有效抑制了三结合点处表面电荷的积累,并使电荷分布更为均匀,梯度改性的样品较于未改性样品的闪络电压高 30%<sup>[127]</sup>。

虽然等离子体处理技术已有许多的研究成果,但是和氟化处理类似,由于改性的厚度较低,其长

期保持能力仍有待进一步研究。章程等发现 DBD 等离子体处理绝缘子表面后引入的含氧官能团可能会重新取向,使其表现出明显的时效性,而 DBD 沉积法处理的样品在 100 d 贮存后,表面电荷密度也会有一定幅度的增加,这与空气中的水分及等离子体处理后的亲水基团相关,因而可能需要考虑处理前后均维持干燥环境<sup>[101-102]</sup>。另一方面,虽然常压下的等离子体处理不需要严苛的气体氛围,但等离子体处理会受到气体环境的影响,不同气体组分可能会导致不一样的处理结果,其大规模工程应用还有待进一步探索。

### 3) 其他表面处理方案

还有一些利用高能粒子或高反应活性物质等处理材料表面的方式。高宇等利用伽马射线照射绝缘子表面的方法,使得在绝缘子表面羰基和羟基数量增加,起到了电荷消散的效果<sup>[128]</sup>。汪泓等提出了通过 X 射线短时照射绝缘子表面使表面电荷快速主动消散的方法<sup>[129-131]</sup>,即使在绝缘子表面附着金属微粒使电荷积聚更为明显的情况下,用 150 kV、3 mA 的 X 射线照射表面 30 s,就可以使表面电位大幅降低,实现 GIS/GIL 不开盖消散绝缘子表面电荷。王天宇等揭示了聚合物电介质表面电荷积聚的根本原因:介质中深陷阱的来源是自由基<sup>[132]</sup>。通过第一性原理计算发现自由基出现时,聚合物的带隙中存在深能级缺陷态,而通过自由基清除剂处理环氧绝缘子表面后,表面电荷积累量大幅减少,分布更为均匀,而在绝缘材料表面进行预充电后,其沿面闪络电压可以增加 72.8%,极大程度提升了绝缘材料的沿面绝缘性能。

上述研究不局限于原有的表面处理框架,未来同样具有较大的应用潜力,但仍然有一些关键问题亟待解决。一是处理的稳定性和长期可靠性,通过高能射线等方法是否可以均匀处理绝缘子表面,并在长时服役下仍然具有较好的抑制表面电荷积聚性能。二是工程实施的适用性,例如高能 X 射线虽然可以快速实现表面电荷消散,但其若在运行工况下进行,则可能因为电导的大幅增加而立即导致沿面击穿,而若在离线工况下操作,且绝缘子电荷积聚的时间常数较小,则每隔较短时间就要消散 1 次电荷,不利于 GIS/GIL 长期运行。三是表面陷阱调控的合理性,根据 4.1 节有关粗糙度的综述,表面浅陷阱可以加速电荷消散,而深陷阱可以抑制电子发射过程,后者不一定对沿面绝缘百害而无一利。例

如李盛涛等研究中认为深、浅陷阱与沿面的闪络电压的关系是 1 条“U”型曲线<sup>[133]</sup>, 曲线左侧的表面电荷密度由表面浅陷阱控制, 而右侧的表面电荷密度由表面深陷阱决定, 综合考虑深、浅陷阱的影响, 合理调控表面陷阱分布, 方能更好地提升沿面绝缘性能。

### 4.3 表面涂覆涂层

在绝缘子表面涂覆功能性材料, 可以改变表面电导特性, 能有效调控表面电荷、改善电场分布, 具有低粘附力的涂层还可以减少粉尘的吸附量, 提升沿面绝缘性能。

#### 1) 掺杂纳米材料

常见的纳米填料以金属或非金属氧化物为主, 适宜的掺杂浓度可以改变表面电荷分布特性。

齐波等以 P25-TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒为填料制备了环氧复合涂层, 将厚度为 50 μm 的涂料以喷涂的形式涂覆于环氧表面, 发现其对电荷积聚有明显的抑制作用, 但电荷密度随填料质量分数的增加会有先降低后升高的趋势, 在质量分数为 0.5% 时电荷密度达到最小值<sup>[134]</sup>。通过对纳米填料的形貌特征分析, 发现填料质量分数过高时纳米颗粒会发生聚集, 增加了深陷阱的密度。深陷阱与浅陷阱密度之间的平衡关系在 P25-TiO<sub>2</sub> 的质量分数为 0.5% 时达到最佳状态, 如图 10 所示。

屠幼萍等也制备了一种不同 TiO<sub>2</sub> 浓度下的环氧复合涂层<sup>[135]</sup>, 将其以 0.78 mm 厚度均匀涂覆于 2 种分别以法向和切向电场分量为为主的电极体系中, 发现 TiO<sub>2</sub> 浓度较低时电荷主要积聚于高压电极附近, 较高时则积聚于地电极附近, 在 TiO<sub>2</sub> 质量分数为 5% 时对抑制电荷积聚的效果最为显著。他们同时还研究了在环氧表面喷涂微米级和纳米级的 SiO<sub>2</sub> 环氧复合涂层<sup>[136]</sup>, 分析表明阳极附近的表面电荷以电荷捕获为主, 阴极附近则以电场力带动电荷移动为主, 在填充质量分数为 1%~3% 的微米级 SiO<sub>2</sub> 和质量分数为 3% 的纳米级 SiO<sub>2</sub> 颗粒可以有效抑制表面电荷积聚, 而较高的颗粒浓度同样会因为出现团聚而使得抑制电荷积聚能力下降。

谢庆等先通过 DBD 等离子体氟化方法将纳米 SnO<sub>2</sub> 改性, 然后将不同浓度的氟化 SnO<sub>2</sub> 作为环氧填料, 发现可以显著提高电荷消散速率及沿面闪络电压, 在掺杂质量分数为 0.8% 时可使表面电导率为原样品的 42 倍, 沿面闪络电压提高了 15%<sup>[137]</sup>。

与绝缘子本体改性类似, 通过掺杂具有非线性

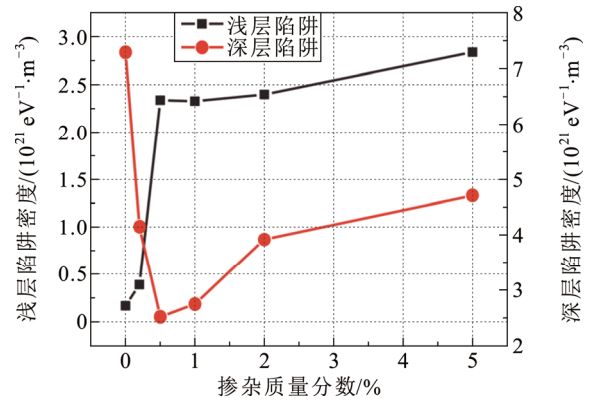


图 10 纳米涂层对深、浅陷阱密度的影响<sup>[134]</sup>

Fig.10 Effect of nano-coating on the density of deep and shallow traps<sup>[134]</sup>

电导特性的金属氧化物或非金属碳化物, 也可均化表面电荷及电场分布。

张贵新等制备了质量分数分别为 20%、25% 和 30% 的 ZnO 环氧复合涂层, 发现其可引入大量浅陷阱, 加速表面电荷消散, 且 30% 的质量分数下涂层具有很高的非线性电导特性, 能够有效均化电场分布<sup>[138]</sup>。杜伯学等采用磁控溅射法在绝缘子表面沉积 1 层 ZnO 薄膜, 并通过仿真迭代方式确定了磁控溅射时间的最优梯度分布, 设计了一种功能梯度 ZnO 非线性电导涂层, 其可以大幅降低三结合点处的电场强度, 正、负极性沿面闪络电压均有明显提升<sup>[139]</sup>。

薛建议等探究了不同 SiC 掺杂质量分数下环氧基非线性电导涂层对 EP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面电荷积聚的影响<sup>[140-141]</sup>, 发现随 SiC 质量分数的增加, 表面电荷密度较原始绝缘子呈现先增大后降低的趋势, 但随着 SiC 含量的继续增加, 表面电荷密度可分为低 SiC 含量时的加重区、中等 SiC 含量时的平衡区和高 SiC 含量时的抑制区, 认为这种变化的原因在于表面电导率的增大与陷阱密度的增加存在“竞争”的关系, 闪络电压的变化与电荷密度的变化趋势基本一致, 但在 SiC 含量过高时, 闪络电压却会迅速降低。

唐炬等分析了在电极接触非紧密与紧密 2 种情形下 SiC 环氧复合涂层对表面电荷积聚及电荷消散的影响特性<sup>[142-143]</sup>, 发现前者在较高的 SiC 含量下电荷积聚抑制逐渐明显, 质量分数为 7%~10% 时高压电极附近电荷急剧减少; 后者在较大 SiC 含量下高压电极处的电荷密度和分布面积反而也会增大, 但高含量的 SiC 可使上述 2 种情形及电晕放电后的电荷消散速率提升更为显著, 表明 SiC 环氧复合涂层的电荷调控性能仍受多种等外部条件影响。

胡琦等针对 3 支柱绝缘子电荷分布特性, 提出了“类 U 型”梯度电导的双界面电场调控方法<sup>[144-145]</sup>, 如图 11 所示。制备质量分数为 40% 的 SiC 环氧复合涂层并涂覆于支腿及嵌件双界面电荷积聚区域, 使表面电荷密度下降 67%, 嵌件-环氧界面的最大场强模值也由 6.76 kV/mm 降至 0.26 kV/mm, 如图 12 所示。在考虑温度梯度及有线形微粒(长 10 mm, 直径 0.2 mm)附着下的直流闪络电压均有明显提升, 如图 13 所示。

上述环氧复合涂层的研究表明, 环氧基体掺杂改性是一种有效的改善表面电荷与电场分布的方法, 但不同的掺杂条件可能产生截然不同的效果, 且掺杂填料含量过高时可能导致黏度较大, 使传统的涂覆方法失效, 涂覆的厚度不同也可能使得绝缘性能有较大改变, 因而涂层的研究与新型涂覆技术也须同步进行。

2) 设计新型涂层

新型涂层的设计与制备不局限于环氧基体或掺杂填料, 而是能与材料科学领域多种设计与制备工艺等方面结合, 具有很强的应用潜力、可扩展性及多功能性。

张博雅等设计了一种具有纳米级周期性排列的二维自组装涂层, 其特殊的排列方式使其具有各向异性的电导参数, 在切向方向的电导率远高于绝缘子本体的表面电导率, 在法向方向的体电导率与绝缘子基本一致, 从而能抑制绝缘子侧载流子向表面的传导, 而又能提升表面电荷沿切向方向的消散<sup>[146]</sup>。该涂层还可以大幅提升电容储能效率, 并且基于溶液制备的二维自组装涂层具有大面积卷对卷加工的可能<sup>[147]</sup>。

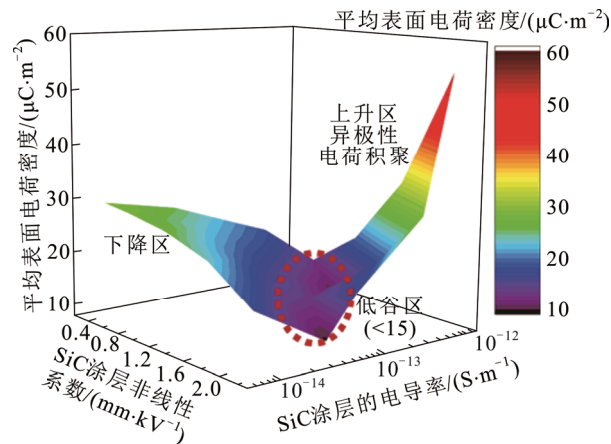


图 11 “类 U 型”梯度电导调控方法<sup>[144-145]</sup>

Fig. 11 “U-like” gradient conductance control method<sup>[144-145]</sup>

邵涛等通过低温等离子体聚合法制备了以甲基丙烯酸甲酯和甲基丙烯酸十二氟庚酯混合物为基础的氟碳涂层<sup>[148]</sup>, 其在聚苯乙烯表面涂覆后可使表面电荷消散速率为原样品的 6 倍以上, 且在空气环境中存放 7 d 后电荷消散速率基本不变, 在沿面闪络发生后仍然具有重复使用能力。

李庆民等设计并制备了一种含氟双酚二缩水甘油醚(fluorinated diglycidyl ethers bisphenol A, F-DGEBA)<sup>[149]</sup>, 其结构与制备过程如图 14 所示, 该单体的固化方式与传统双酚 A 型环氧树脂一致, 可在不改变固化剂的情况下大规模投入制造, 但其

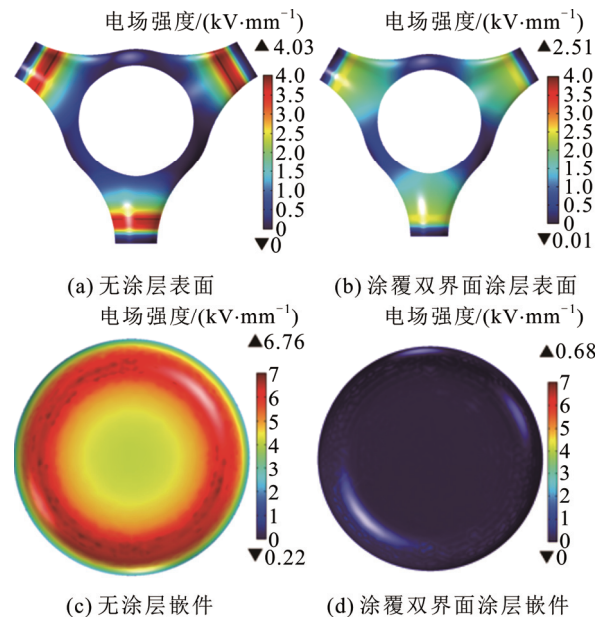


图 12 表面改性前后三支柱绝缘子沿面电场分布<sup>[144-145]</sup>

Fig. 12 Surface electric field distribution of three-post insulators before and after surface modification<sup>[144-145]</sup>

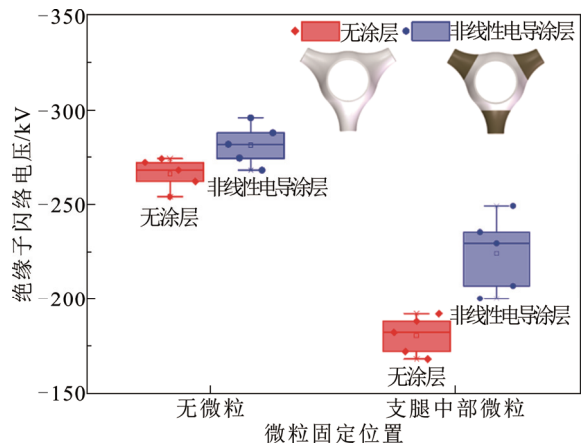
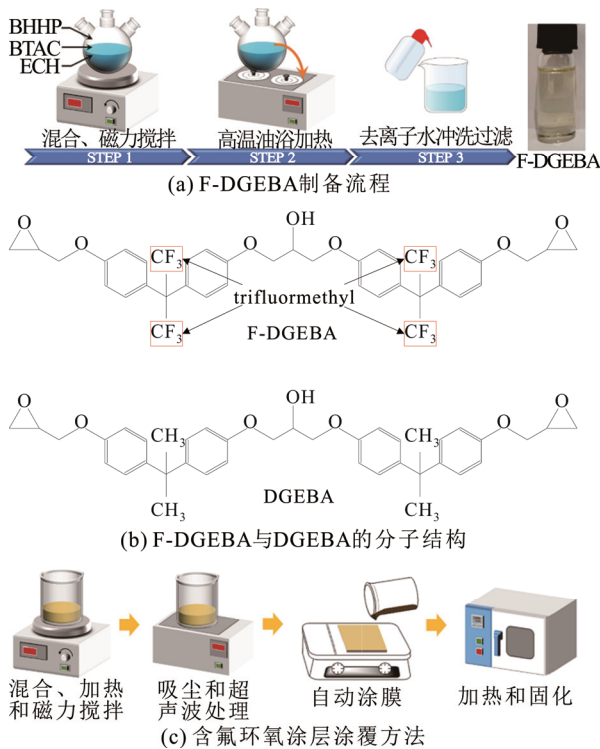


图 13 涂覆前后三支柱绝缘子闪络电压<sup>[144-145]</sup>

Fig. 13 Flashover voltage of three-post insulators before and after coating<sup>[144-145]</sup>

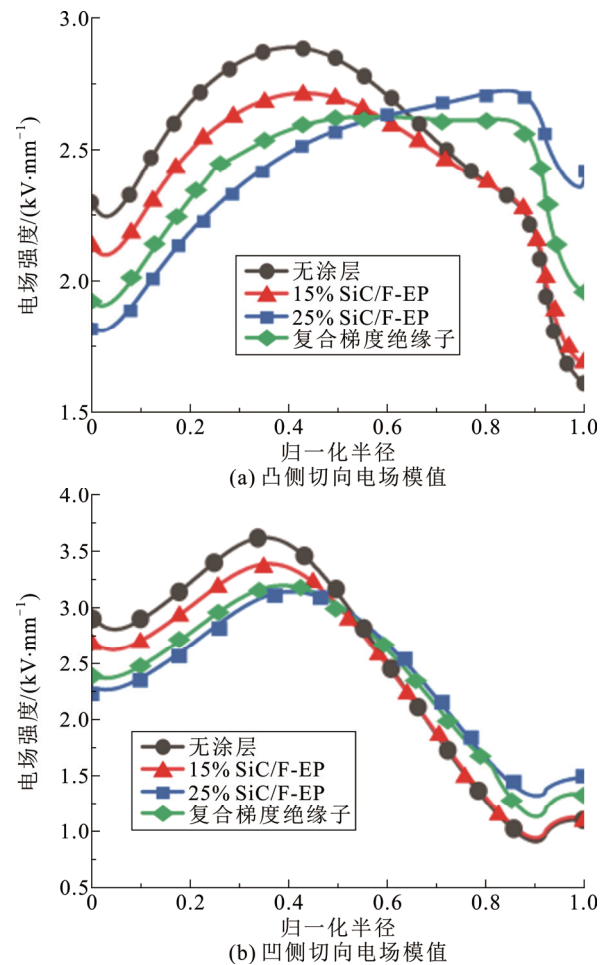
图 14 含氟环氧涂层制备与涂覆方法<sup>[149]</sup>Fig.14 Preparation and coating method for fluorine-containing epoxy coating<sup>[149]</sup>

表面电荷消散速率及沿面闪络电压均明显高于纯环氧绝缘子, 且随含氟环氧相对纯环氧的比例增大而增大。在此基础上再掺杂 SiC 制备含氟环氧 SiC 复合涂层<sup>[36]</sup>, 可以进一步改善绝缘子沿面电场分布特性, 并根据不同掺杂含量对应的电导率非线性度, 在盆式绝缘子凸侧和凹侧分区域涂覆 SiC 质量分数为 15% 及 25% 的复合涂层, 使得凸侧和凹侧的最大切向场强分别降低 12.7% 和 15.1%, 切向电场梯度均值也大幅下降, 如图 15 所示。

### 3) 设计可长时服役的低表面能涂层

虽然现在的涂层相关研究已有了大量的成果, 但仍鲜有投入 GIS/GIL 工程实际运用之中, 主要原因在于涂层长时服役情况下, 涂层的电气性能和附着性能需要得到保证, 如若产生绝缘劣化甚至涂层脱落的情况反而可能加剧危害沿面绝缘性能, 而附着性得到保证的同时对粉尘的粘附力可能也会增大, 从而影响沿面绝缘强度。因而为确保工程运用的可靠性, 上述两方面的研究同样具有举足轻重的作用。

针对环氧材料的表面劣化过程, 在放电诱导绝缘失效方面, 不少学者的研究表明, 多次直流电弧放电易使得环氧材料发生分解, 进而导致表面微观

图 15 不同涂覆方式下绝缘子两侧切向电场分布<sup>[36]</sup>Fig.15 Tangential electric field distribution on both sides of insulator under different coating methods<sup>[36]</sup>

形貌改变、深陷阱密度增加<sup>[150-152]</sup>。在长时电、热老化诱导绝缘失效方面, Das 等通过长时高温热老化实验, 发现环氧和金属电极界面的电荷密度明显增加<sup>[153]</sup>。而 Yahyaoui 等发现直流电、热应力同时作用还会使得空间电荷密度增加, 使得 1 年老化后的环氧材料直流击穿电压降低了 10%~20%<sup>[154]</sup>。张一分析了长期电热耦合环境下环氧-SF<sub>6</sub> 界面劣化的微观原因<sup>[155]</sup>, 发现其存在“劣化—陷阱增多—电荷密度增大—进一步劣化”的正反馈现象, 认为积聚电荷及温度梯度提供的机电能促进了环氧表面分子弱键的断裂与自由基的形成, 三结合点处的强场区与高电荷密度区的共同作用导致闪络的发生。可见, 受温度梯度及电荷积聚的影响, 环氧材料在长期服役下, 其表面形貌和陷阱密度等均可能存在显著改变, 促使沿面绝缘失效, 现有的涂层研究也多以环氧为基体, 如若没有针对性的改性材料制备方法, 势必难以支撑其长时稳定、可靠运行。

当固体材料表面相对某种液体的表面能较低时,其不易被该液体润湿,呈现较高的液体接触角。材料表面能由固体和液体共同决定,但有学者发现较高的疏水性材料同样可以抑制粉尘的吸附。崔燕等分析了表面活性剂处理载玻片前后对微小颗粒的吸附特性,发现表面活性剂增大了界面的亲水性及对粉尘的吸附力,使得表面吸附颗粒明显增大<sup>[156]</sup>。李庆民等研究了纳米 SiC 和蒙脱土-TiO<sub>2</sub> 2 种环氧复合涂层对粉尘吸附的影响<sup>[157]</sup>,发现后者抑制粉尘吸附的效果整体要优于前者,当蒙脱土-TiO<sub>2</sub> 的掺杂质量分数为 6% 时,粉尘吸附范围明显减少,较无涂层绝缘子时吸附质量降低了 54%,且该掺杂质量分数下材料表面的水接触角最高。

刘华等制备了一种以 SiO<sub>2</sub> 为掺杂填料的超疏水涂层<sup>[158]</sup>,其静态水接触角达到了 156.5°,通过炭黑污染实验发现这种涂层具备良好的防污性和自清洁特性。许文杰等通过掺杂纳米 SiC 的方式制备氟碳树脂复合涂层<sup>[159]</sup>,在 SiC 掺杂质量分数为 50% 时,静态水接触角达到了 165.1°,呈现超疏水特性;在 SiC 掺杂质量分数为 40% 时,该涂层相较于普通 RTV 硅橡胶涂层的沿面干闪和湿闪电压分别提升了 62.1% 和 90.6%;相较于纯氟碳树脂、超疏水涂层的沿面干闪和湿闪电压分别提升了 58.8% 和 60.5%。

低表面能涂层的制备方式虽然已有不少研究<sup>[160-162]</sup>,但考虑其长时服役特性,涂层与绝缘子间的粘附力及本身电气性能均需得到保证。李庆民等通过反应分子动力学(reactive force field molecular dynamics, ReaxFF-MD)方法构建了 SFO 的反应力场<sup>[163-165]</sup>,并分析了高能粒子作用下 EP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 表面的分解机理,发现直径为 1 nm 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 颗粒可以有效减少 SF 和 S 等粒子对绝缘子表面的侵蚀,而对于 SiC 掺杂的环氧复合涂层,发现 SiC 增强了与环氧树脂长链的相互作用,阻碍了高能粒子的直接轰击,从而提高了纳米复合材料的抗电晕性能。进一步搭建了涂层长时电晕侵蚀及热老化的模拟平台<sup>[36]</sup>,如图 16 所示,发现质量分数为 25% 的 SiC 含氟环氧复合涂层在等效电晕侵蚀及热老化下,均具有更强的抗电晕侵蚀能力以及足够的附着拉伸强度,如图 17、图 18 所示。

综上所述,现有关于抑制粉尘吸附的绝缘子涂层研究较少,降低涂层的表面能只是其中 1 种方案,例如从粉尘间的范德华力或静电除尘等角度考虑,也可能有更好的抑制方法。而若能将调控电荷与电

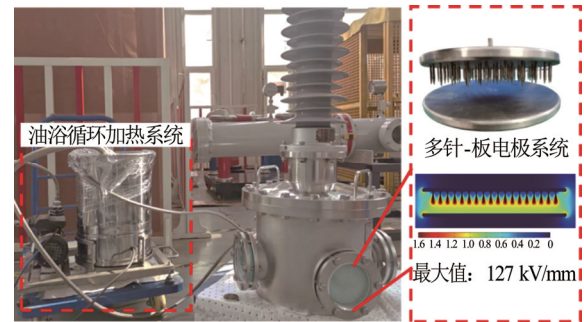


图 16 涂层电热老化模拟平台<sup>[163-165]</sup>

Fig. 16 Electrothermal aging simulation platform for coating<sup>[163-165]</sup>

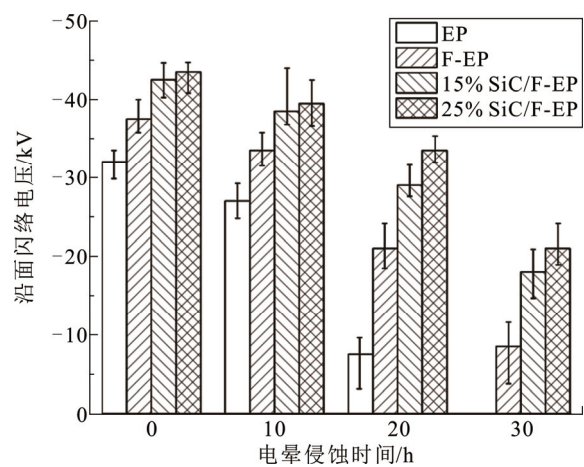


图 17 不同涂层在电晕侵蚀后的沿面闪络电压<sup>[36]</sup>

Fig. 17 Surface flashover voltage of different coatings after corona erosion<sup>[36]</sup>

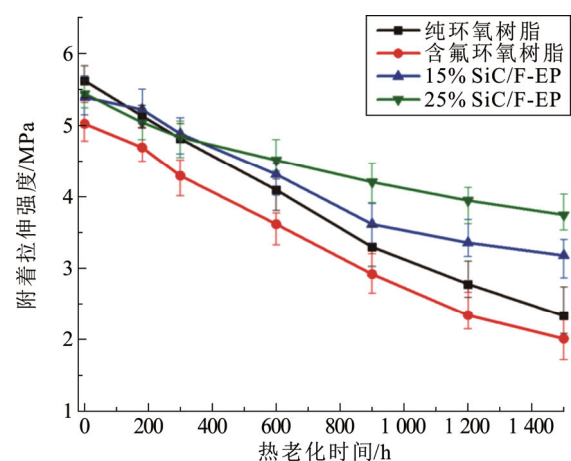


图 18 不同涂层在热老化后的附着拉伸强度<sup>[36]</sup>

Fig. 18 Adhesion tensile strength of different coatings after thermal aging<sup>[36]</sup>

场分布、抑制粉尘吸附及长时服役稳定运行三者有机结合,方能有更好的工程应用潜力。

## 5 待解决问题与技术路径

本文基于前述梳理, 认为直流 GIS/GIL 沿面绝缘性能领域有以下 3 个问题亟待深入研究: 一是绝缘子结构优化准则和优化算法设计, 二是绝缘子本体掺杂改性的长时服役效果和引入多界面时的机械及绝缘性能, 三是绝缘子表面改性的界面深、浅陷阱的合理调控和高粘性、低表面能涂层制备技术。

1) 在绝缘子结构优化方面, 目前最小化绝缘子沿面最大电场模值仍是最常用的优化准则, 但由于切向电场和法向电场对沿面闪络电压的贡献并不一致, 有必要差异化考虑切向电场和法向电场的优化权重。由于沿面放电路径也是沿面绝缘性能中的重要一环, 应构建综合双向电场与沿面放电路径的泛函关系模型, 以此表征沿面绝缘强度并作为最优化的目标函数。绝缘子结构优化算法本身不是限制绝缘子几何结构优化的关键, 但可借此通过采样、学习、训练, 跳过多物理场有限元仿真, 直接构建几何结构与沿面电场分布的数学映射关系, 从而降低求解难度、提高寻找全局最优解的可能。

2) 在绝缘子本体材料改性方面, 提高绝缘子本体电阻率可抑制固体侧的电荷注入, 但体电阻率受掺杂浓度等影响显著, 对工程应用和产品良率带来一定挑战, 且电荷积聚的时间常数不会因电导率足够低而达到可认为无穷大的地步, 在 GIS/GIL 长时服役下能否始终抑制电荷积聚还有待进一步探究。使用功能梯度改性的非线性电导材料可以均化沿面电场分布, 但会带来多个绝缘子分界面、增大泄漏电流密度, 使其机械性能或固-固界面绝缘性能下降, 因而需要确定协同调控绝缘性能及机械性能的关键材料参数, 引入更为精确、能实现非线性及非均匀改性的绝缘子制备技术, 以及探索新型绝缘支撑材料, 从材料本征特性层面提升沿面绝缘性能。

3) 在绝缘子表面改性方面, 通过表面粗糙度改性、氟化或等离子处理、表面涂覆涂层等手段均可调控界面电荷、优化电场分布, 但表面粗糙度分布特性、电荷消散速率及表面深浅陷阱密度等对沿面绝缘性能的定量关联机制仍有待突破。使用低表面能涂层可以有效抑制粉尘吸附, 但同时还须保证涂层的电气强度及其与绝缘子间有足够的粘附力, 防止长时服役下涂层绝缘性能与粘附性能劣化而放电或脱落, 有必要设计高附着强度、低表面能的双界面涂层。针对新型涂层材料设计和长时服役性能

预测, 除了分子模拟方法外, 还可引入机器学习等先进材料预测、设计与制备方法, 进一步提升沿面绝缘性能, 并确保改性方法能长时稳定、有效运行。

直流 GIS/GIL 沿面绝缘性能提升方法亟须在上述 3 方面领域展开深入研究, 但各调控手段之间并非完全孤立, 其中的关联性和协同优化方法同样值得进一步探索, 以先进、优异的绝缘子本体及表面材料匹配合适的绝缘子几何结构, 从而能设计多维度的沿面绝缘性能增强方案。

## 6 结论

1) 直流 GIS/GIL 绝缘子结构优化是最为可靠且容易实现的沿面绝缘性能提升方法之一, 应进一步分析绝缘子沿面放电的物理过程, 获得闪络电压和沿面切向电场、法向电场及放电路径的泛函表征关系, 从中提炼出直流绝缘子的结构优化准则, 并结合先进优化算法得出最优化的绝缘子几何结构。

2) 绝缘子本体材料改性可以抑制固体侧的电荷注入过程、均匀沿面电场分布, 应进一步研究长时服役下本体改性对表面电荷积聚及沿面电场影响的时空演化过程, 确定本体材料改性参数的调控方向, 并探索更精准的掺杂工艺及新型绝缘支撑材料。

3) 绝缘子表面改性可以改变电荷消散速率、深浅陷阱密度分布及粉尘吸附能力, 应进一步研究表面微观区域结构及深浅陷阱能级对沿面绝缘性能的影响, 设计既能显著抑制粉尘吸附, 又能在长时服役下仍强力附着于绝缘子表面的低表面能、高粘附涂层。

## 参考文献 References

- [1] 张长虹, 张博雅, 李明洋, 等. 高压直流 GIL 设备绝缘关键技术研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 920-936.  
ZHANG Changhong, ZHANG Boya, LI Mingyang, et al. Review of key insulation technologies of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 920-936.
- [2] SHU Y B, CHEN W J. Research and application of UHV power transmission in China[J]. High Voltage, 2018, 3(1): 1-13.
- [3] 何金良. 构建地下能源综合通道的设想[J]. 南方电网技术, 2016, 10(3): 66-70.  
HE Jinliang. Ideas on building underground energy complex passage[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(3): 66-70.
- [4] 黄 蕾. 电力“蛟龙”过江华东特高压环网合环[N]. 国家电网报, 2021-12-20(002).  
HUANG Lei. The “Jiaolong” of power crosses the river: the integration of the East China ultra-high voltage loop network[N]. State Grid Daily, 2021-12-20.
- [5] 国网江苏省电力有限公司. 苏通 1 000 千伏交流特高压 GIL 综合管廊工程[J]. 中国电力企业管理, 2022(27): 45, 44.

- State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. The Suzhou-Nantong 1 000 kV AC ultra-high voltage GIL comprehensive pipe gallery project[J]. *China Power Enterprise Management*, 2022(27): 45, 44.
- [6] 彭宗仁, 张鹏飞, 刘鹏, 等. 苏通综合管廊工程特高压 GIL 绝缘关键技术[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4046-4057.  
PENG Zongren, ZHANG Pengfei, LIU Peng, et al. Key insulation technology of UHV GIL in Sutong utility tunnel project[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4046-4057.
- [7] LI C Y, FU J J, ZI Y L, et al. Insulator surface charge behaviors: from hazards to functionality[J]. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 2022, 38(3): 6-14.
- [8] 黄寅, 孟永鹏, 马鑫哲, 等. 表面电荷对介质阻挡放电发展的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(8): 3248-3259.  
HUANG Yin, MENG Yongpeng, MA Xinzhe, et al. Influence of surface charge on development of dielectric barrier discharge[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(8): 3248-3259.
- [9] ZHOU H Y, MA G M, WANG C, et al. Review of charge accumulation on spacers of gas insulated equipment at DC stress[J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020, 6(3): 496-517.
- [10] 胡伯立, 潘成, 潘子君, 等. 电极接触方式对环氧树脂表面电荷积聚与消散特性的影响[J]. *高电压技术*, 2023, 49(1): 321-330.  
HU Boli, PAN Cheng, PAN Zijun, et al. Effect of electrode contact mode on surface charge accumulation and dissipation characteristics of epoxy resin[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(1): 321-330.
- [11] 邓军波, 董俊豪, 陈俊鸿, 等. SF<sub>6</sub> 替代气体界面绝缘特性的研究进展[J]. *高电压技术*, 2022, 48(2): 661-673.  
DENG Junbo, DONG Junhao, CHEN Junhong, et al. Research advances in interface insulation characteristics of SF<sub>6</sub> alternative gases[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(2): 661-673.
- [12] 李庆民, 魏来, 薛乃凡, 等. 交直流 GIS/GIL 微纳粉尘可视化探测技术研究进展[J]. *高电压技术*, 2023, 49(9): 3607-3624.  
LI Qingmin, WEI Lai, XUE Naifan, et al. Research advances in visualization detection technology of micron-nano dust in AC and DC GIS/GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(9): 3607-3624.
- [13] 梁瑞雪, 刘衡, 胡琦, 等. GIS/GIL 内微米级金属粉尘动力学行为与诱发放电特性研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7153-7165.  
LIANG Ruixue, LIU Heng, HU Qi, et al. Research advances in the kinetic behavior and induced discharge characteristics of micron metal dust within GIS/GIL[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7153-7165.
- [14] 王健, 平安, 刘人鄂, 等. 直流电压下绝缘子附近纤维的吸附运动行为及其对表面电荷积聚的影响[J]. *高电压技术*, 2022, 48(12): 4697-4706.  
WANG Jian, PING An, LIU Renyong, et al. Adsorption motion behavior of fibers near insulators under DC voltage and its influence on surface charge accumulation[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(12): 4697-4706.
- [15] VOLPOV E. Electric field modeling and field formation mechanism in HVDC SF<sub>6</sub> gas insulated systems[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(2): 204-215.
- [16] 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 Boya, ZHANG Guixin. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, part I: measurement and mechanisms[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(20): 4649-4662.
- [17] STRAUMANN U, SCHULLER M, FRANCK C M. Theoretical investigation of HVDC disc spacer charging in SF<sub>6</sub> gas insulated systems[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(6): 2196-2205.
- [18] 李传扬, 林川杰, 陈庚, 等. 高压直流盆式绝缘子气-固界面电荷行为研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(6): 2016-2025.  
LI Chuanyang, LIN Chuanjie, CHEN Geng, et al. Review of gas-solid interface charging phenomena of HVDC spacers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(6): 2016-2025.
- [19] LIN C J, LI Q, LI C Y, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges - part III: industrialization prospects[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1259-1266.
- [20] 王泽忠, 全玉生, 卢斌先. 工程电磁场[M]. 2 版. 清华大学出版社, 2011.  
WANG Zezhong, QUAN Yusheng, LU Binxian. *Engineering electromagnetic field*[M]. 2nd ed. Beijing, China: Tsinghua University Press, 2011.
- [21] LUTZ B, KINDERSBERGER J. Surface charge accumulation on cylindrical polymeric model insulators in air: simulation and measurement[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(6): 2040-2048.
- [22] 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.
- [23] WINTER A, KINDERSBERGER J. Transient field distribution in gas-solid insulation systems under DC voltages[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(1): 116-128.
- [24] 张博雅, 张贵新. 直流 GIL 中国-气界面电荷特性研究综述 II: 电荷调控及抑制策略[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(22): 5145-5158.  
ZHANG Boya, ZHANG Guixin. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, part II: charge control and suppression strategy[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(22): 5145-5158.
- [25] WINTER A, KINDERSBERGER J. Stationary resistive field distribution along epoxy resin insulators in air under DC voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(5): 1732-1739.
- [26] 王邸博, 唐炬, 刘凯. 直流高压下 GIS 支柱绝缘子表面电荷积聚特性[J]. *高电压技术*, 2015, 41(9): 3073-3081.  
WANG Dibo, TANG Ju, LIU Kai. Charge accumulation on post insulator surface under HVDC in GIS[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(9): 3073-3081.
- [27] LI C Y, LIN C J, CHEN G, et al. Field-dependent charging phenomenon of HVDC spacers based on dominant charge behaviors[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114(20): 202904.
- [28] LI Q Y, NADERIALLAF H, LEI Z P, et al. Surface charge pattern analysis based on the field-dependent charging theory: a review[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(1): 257-269.
- [29] 董佳楠, 杜伯学, 梁虎成, 等. 高压 GIS 功能梯度绝缘子交/直流电场优化与沿面闪络抑制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(8): 3297-3305.  
DONG Jianan, DU Boxue, LIANG Hucheng, et al. Electric field relaxation and surface flashover suppression under AC/DC voltages by functionally graded spacer for HVDC GIS[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(8): 3297-3305.
- [30] 许庆重, 李秀峰, 邓繁盛, 等. 交联行为对 XLPE/OMMT 纳米复合材料结构和介电性能的影响[J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(2): 843-852.  
XU Qingzhong, LI Xiufeng, DENG Fansheng, et al. Effect of cross-linking behavior on the structure and dielectric properties of XLPE/OMMT nanocomposites[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(2): 843-852.

- [31] 胡智莹, 魏 来, 耿秋钰, 等. 直流 GIS/GIL 中线形金属微粒群飞虫运动现象与危险程度评估[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6219-6228.  
HU Zhiying, WEI Lai, GENG Qiuyu, et al. Firefly movement phenomenon of wire particle swarm and risk assessment in DC GIS/GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6219-6228.
- [32] 李庆民, 薛乃凡, 王 媛, 等. 交直流输电管道绝缘运行安全关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1629-1648.  
LI Qingmin, XUE Naifan, WANG Yuan, et al. Key technologies for operation safety of AC/DC gas insulated transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1629-1648.
- [33] VOLPOV E. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF<sub>6</sub> gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949-963.
- [34] VOLPOV E. HVDC gas insulated apparatus: electric field specificity and insulation design concept[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(2): 7-36.
- [35] LORENZI A D, GRANDO L, PESCE A, et al. Modeling of epoxy resin spacers for the 1 MV DC gas insulated line of ITER neutral beam injector system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 77-87.
- [36] 王靖瑞. 直流盆式绝缘子复合梯度绝缘界面电气性能增强设计方法[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.  
WANG Jingrui. Interface electrical performance enhancement design method of DC basin insulator composite gradient insulation[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2023.
- [37] 刘 琳, 李晓昂, 张乔根, 等. 沿面电场对 GIS 绝缘子闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2906-2913.  
LIU Lin, LI Xiao'ang, ZHANG Qiaogen, et al. Effect of electric field along the surface on the flashover voltage of GIS insulators[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2906-2913.
- [38] 王 超, 李文栋, 陈泰然, 等. 550 kV GIS 盆式绝缘子小型化设计(一)——几何形状优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1847-1855.  
WANG Chao, LI Wendong, CHEN Tairan, et al. Compact design of 550 kV basin-type spacer in gas insulated switchgear (part I) - structure optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1847-1855.
- [39] TU Y P, CHEN G, LI C Y, et al.  $\pm 100$ -kV HVDC SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> gas-insulated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 735-744.
- [40] 梁瑞雪. 直流 GIL 内微米级金属粉尘的吸附动力学行为及诱导放电现象研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.  
LIANG Ruixue. Study on kinetic adsorption behavior and its induced discharge phenomena of mm-level metal dust within DC GIL[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2021.
- [41] 吴泽华, 田汇冬, 靳守锋, 等. 252 kV 紧凑型气体绝缘金属封闭输电线路三相盆式绝缘子结构综合优化[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 138-146.  
WU Zehua, TIAN Huidong, JIN Shoufeng, et al. Comprehensive optimization for the structure of three-phase spacer in 252 kV compact gas insulated metal enclosed transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(12): 138-146.
- [42] 吴泽华, 田汇冬, 靳守锋, 等. 252 kV 紧凑型 GIL 三相三支柱绝缘子绝缘结构设计及优化[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2030-2039.  
WU Zehua, TIAN Huidong, JIN Shoufeng, et al. Design and optimization of insulation structure of three-phase tri-post insulator in 252 kV compact GIL[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2030-2039.
- [43] 贾云飞, 高 璐, 汲胜昌, 等. 基于有限元仿真和遗传算法的 1 100 kV 盆式绝缘子电气、机械性能综合优化[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3844-3853.  
JIA Yunfei, GAO Lu, JI Shengchang, et al. Comprehensive optimization of electrical and mechanical performance of 1 100 kV basin-type insulator based on genetic algorithm and finite element simulation[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3844-3853.
- [44] 贾云飞, 高 璐, 汲胜昌, 等. 1 100 kV 气体绝缘金属封闭输电线路用三支柱绝缘子电气性能优化[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(7): 168-179.  
JIA Yunfei, GAO Lu, JI Shengchang, et al. Electrical performance optimization for tri-post insulator on 1 100 kV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(7): 168-179.
- [45] 张语桐, 吴泽华, 徐家忠, 等. 特高压 GIS 用单支撑绝缘子绝缘结构优化设计[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 258-269.  
ZHANG Yutong, WU Zehua, XU Jiazhong, et al. Optimization design of insulation structure for post insulator in UHVAC GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 258-269.
- [46] 杜进桥, 张施令, 李乃一, 等. 特高压交流盆式绝缘子电场分布计算及屏蔽罩结构优化[J]. 高电压技术, 2013, 39(12): 3037-3043.  
DU Jinqiao, ZHANG Shiling, LI Naiyi, et al. Electric field distribution calculation and shielding electrode structure optimization of UHVAC basin-type insulator[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12): 3037-3043.
- [47] 张维凯, 孙 强, 葛延鹏, 等. 基于 NSGA-II 算法的 GIS 隔离开关盆式绝缘子电场分布和机械性能综合优化[J/OL]. 高电压技术, 2024: 1-10[2024-11-28]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231810>.  
ZHANG Weikai, SUN Qiang, GE Yanpeng, et al. Integrated optimization of electrical field distribution and mechanical performance of basin-type insulator in GIS disconnector based on NSGA-II [J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-10[2024-11-28]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20231810>.
- [48] 淡淑恒, 吴 娜, 姜 腾, 等. 基于有限元和神经网络方法对 220 kV 盆式绝缘子屏蔽罩结构优化设计[J]. 电瓷避雷器, 2017(3): 153-158, 165.  
DAN Shuheng, WU Na, JIANG Teng, et al. Optimization of shielding electrode design for 220 kV basin-type insulator by finite element method and neural network method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2017(3): 153-158, 165.
- [49] 淡淑恒, 吴 娜, 李昊东, 等. 基于有限元和神经网络方法对 220 kV 盆式绝缘子均压环结构优化设计[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 79-85.  
DAN Shuheng, WU Na, LI Haodong, et al. Optimization design of grading ring for 220 kV basin-type insulator based on finite element method and neural network method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 79-85.
- [50] 张施令, 彭宗仁, 王浩然, 等. 盆式绝缘子多物理场耦合数值计算及结构优化[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3994-4005.  
ZHANG Shiling, PENG Zongren, WANG Haoran, et al. Numerical calculation and structural optimization of multi-physical field coupling for basin insulator[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3994-4005.
- [51] ZHANG B Y, ZHANG G X. Interpretation of the surface charge decay kinetics on insulators with different neutralization mechanisms[J]. Journal of Applied Physics, 2017, 121(10): 105105.
- [52] 高 宇, 王小芳, 李 楠, 等. 聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2219-2230.  
GAO Yu, WANG Xiaofang, LI Nan, et al. Characterization method for carrier trap and the effect on insulation breakdown within polymer insulating materials: a review[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2219-2230.
- [53] 王 霞, 陈少卿, 成 霞, 等. 电声脉冲法测量聚合物绝缘表面陷阱能级分布[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(1): 127-132.

- WANG Xia, CHEN Shaoqing, CHENG Xia, et al. Measuring energy distribution of surface trap in polymer insulation by PEA method[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(1): 127-132.
- [54] TEYSSEDRE G, LAURENT C. Charge transport modeling in insulating polymers: from molecular to macroscopic scale[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 857-875.
- [55] DU B X, HAN C L, LI Z L, et al. Effect of graphene oxide particles on space charge accumulation in LDPE/GO nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1479-1486.
- [56] CHU P F, ZHANG H, ZHAO J, et al. On the volume resistivity of silica nanoparticle filled epoxy with different surface modifications[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 99: 139-148.
- [57] DU B X, WANG M Y, LI J, et al. Temperature dependent surface charge and discharge behavior of epoxy/AlN nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1300-1307.
- [58] KHAN M Z, WANG F P, WALEED A, et al. Filler concentration effect on breakdown strength and trap level of epoxy resin-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites[J]. Polymer Bulletin, 2021, 78(10): 5891-5903.
- [59] XIE J, XIAO C X, SHAO S, et al. Effect of bismuth ferrite nanometer filler element doping on the surface insulation properties of epoxy resin composites[J]. Nanomaterials, 2021, 11(9): 2200.
- [60] 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.
- [61] WANG T Y, ZHANG G X, LI D Y, et al. MXene-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators in a DC gas-insulated system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 939-946.
- [62] WANG T Y, ZHANG B Y, LI D Y, et al. Metal nanoparticle-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators under DC voltage[J]. Nanotechnology, 2020, 31(32): 324001.
- [63] WANG T Y, ZHANG B Y, LI D Y, et al. A single-electron tunneling model: a theoretical analysis of a metal nanoparticle-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators subjected to DC voltages[J]. Nanotechnology, 2020, 31(47): 475707.
- [64] 周宏扬, 马国明, 刘姝妮, 等. 基于电-热多物理场耦合模型的直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1251-1259.
- ZHOU Hongyang, MA Guoming, LIU Shupin, et al. Study on surface charges accumulation on insulator and its effects on the surface electrical field in DC-GIL with electro-thermal coupling model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1251-1259.
- [65] SHEN L, ZOU L, DING M, et al. Investigation of physical properties of epoxy-functionalized graphene nanoplatelets composite coatings on DC-GIL insulators by molecular dynamics simulation[J]. Applied Surface Science, 2020, 505: 144197.
- [66] WANG Z B, IIZUKA T, KOZAKO M, et al. Development of epoxy/BN composites with high thermal conductivity and sufficient dielectric breakdown strength part I - sample preparations and thermal conductivity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 1963-1972.
- [67] YAO T, CHEN K, SHAO T, et al. Nano-BN encapsulated micro-AlN as fillers for epoxy composites with high thermal conductivity and sufficient dielectric breakdown strength[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 528-534.
- [68] LIANG H C, DU B X, LI J, et al. Effects of non-linear conductivity on charge trapping and de-trapping behaviours in epoxy/SiC composites under DC stress[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018, 12(1): 83-89.
- [69] 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.
- [70] KATO K, KURIMOTO M, SHUMIYA H, et al. Application of functionally graded material for solid insulator in gaseous insulation system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2): 362-372.
- [71] RACHMAWATI, KOJIMA H, HAYAKAWA N, et al. Electric field simulation of permittivity and conductivity graded materials ( $\epsilon/\sigma$ -FGM) for HVDC GIS spacers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 736-744.
- [72] TENZER M, HINRICHSEN V, WINTER A, et al. Compact gas-solid insulating systems for high-field-stress in HVDC applications[C]//Proceedings of the CIGRE Study Committee B3 & Study Committee D1 Colloquium. Brisbane, Australia: [s. n.], 2013.
- [73] PENDSE H, KARADY G. Development of the insulating foam model for the study of electric field distribution for the application of gas insulated transmission line[C]//Proceedings of 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver, USA: IEEE, 2015: 1-5.
- [74] 张一, 卢理成, 杨霄, 等. SF<sub>6</sub> 气体绝缘高压直流设备内部绝缘子用新型陶瓷材料特性探索[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(1): 174-182.
- ZHANG Yi, LU Licheng, YANG Xiao, et al. Exploration on the characteristics of new ceramic materials for insulators used in SF<sub>6</sub> gas insulated HVDC equipment[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 174-182.
- [75] PAN W K, WANG Y, DING H, et al. Nonlinear materials applied in HVDC gas insulated equipment: from fundamentals to applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5): 1588-1603.
- [76] LI J, LIANG H C, CHEN Y, et al. Promising functional graded materials for compact gaseous insulated switchgears/pipelines[J]. High Voltage, 2020, 5(3): 231-240.
- [77] LI W D, ZHANG Y C, ZHAO X, et al. Full-life-cycle eco-friendly polymeric insulating materials: research progress and future prospects[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2023, 56(37): 373003.
- [78] YAMAMOTO O, TAKUMA T, FUKUDA M, et al. Improving withstand voltage by roughening the surface of an insulating spacer used in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 550-556.
- [79] KIM Y H, LEE H, LEE O, et al. Dielectric characteristics of solid insulation materials with respect to surface roughness[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(3): 1-4.
- [80] 王艺博, 苏国强, 张冠军. 粗糙度对有机绝缘材料表面陷阱特性的影响[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会 2015 年学术年会论文集. 西安: 中国电机工程学会高电压专业委员会, 2015.
- WANG Yibo, SU Guoqiang, ZHANG Guanjun. Influence of roughness on surface trap characteristics of organic insulating material[C]//Proceedings of the 2015 Annual Academic Conference of the High Voltage Committee, China Society for Electrical Engineering. Xi'an, China: High Voltage Professional Committee of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2015.
- [81] IWATA S, KITANI R. Influence of surface roughness of additive manufacturing polymer on surface flashover voltage[J]. Electrical Engineering, 2018, 100(3): 1949-1955.
- [82] 姚鑫, 张长胜, 谭向宇, 等. 表面粗糙度对变电站绝缘子冲击闪

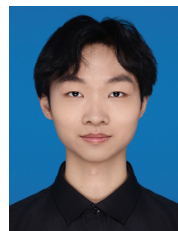
- 络特性的影响[J]. 传感器与微系统, 2017, 36(5): 80-82, 87.
- YAO Xin, ZHANG Changsheng, TAN Xiangyu, et al. Influence of surface roughness on impulse flashover characteristics of substation insulator[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2017, 36(5): 80-82, 87.
- [83] XUE J Y, WANG H, CHEN J H, et al. Effects of surface roughness on surface charge accumulation characteristics and surface flashover performance of alumina-filled epoxy resin spacers[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(8): 083302.
- [84] 律方成, 宋曼青, 詹振宇, 等. 环氧树脂试样局部粗糙度处理对其直流绝缘性能的影响[J]. 高压电器, 2022, 58(7): 149-161, 198.
- LYU Fangcheng, SONG Manqing, ZHAN Zhenyu, et al. Influence of partial roughness treatment of epoxy resin sample on its DC insulation properties[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(7): 149-161, 198.
- [85] 詹振宇. 气体绝缘输电管道中支撑绝缘子沿面绝缘特性提升关键技术研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- ZHAN Zhenyu. Key technology for optimizing surface insulation properties of spacer in gas insulated transmission line[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2020.
- [86] GUO B H, SUN G Y, ZHANG S, et al. Mechanism of vacuum flashover on surface roughness[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(21): 215301.
- [87] HAQ I U, WANG F P, AKRAM S, et al. Significantly enhanced flashover voltage of epoxy in vacuum by graded surface roughness modification[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 997-1010.
- [88] LI Z, MA K Y, LI B N, et al. Understanding effects of deep traps on DC surface flashover characteristics of epoxy/MWCNTs-TiO<sub>2</sub> nanocomposites in a vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 1838-1846.
- [89] LIU Y Q, LI L Q, DU X L. Effect of fluorination on the surface electrical properties of epoxy resin insulation[J]. Applied Physics A, 2015, 118(2): 757-762.
- [90] AN Z L, YIN Q Q, LIU Y Q, et al. Modulation of surface electrical properties of epoxy resin insulator by changing fluorination temperature and time[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 526-534.
- [91] 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.
- [92] AN Z L, XIAO H H, LIU F L, et al. Improved resistance of epoxy resin to corona discharge by direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2278-2287.
- [93] QUE L K, AN Z L, MA Y, et al. High resistance of surface fluorinated epoxy insulators to surface discharge in SF<sub>6</sub> gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(1): 245-252.
- [94] MOHAMAD A, CHEN G, ZHANG Y, et al. Surface fluorinated epoxy resin for high voltage DC application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 101-108.
- [95] CHEN W J, AN Z L, QUE L K, et al. Characterization of the fluorinated surface layer of the alumina-filled epoxy insulator[C]//Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment. Guangzhou, China: IEEE, 2019: 435-438.
- [96] AN Z L, CHEN W J, CHEN K, et al. Comparative study on direct fluorination and surface properties of alumina-filled and unfilled epoxy insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 85-93.
- [97] LI C Y, HE J L, HU J. Surface morphology and electrical characteristics of direct fluorinated epoxy-resin/alumina composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 3071-3077.
- [98] LI C Y, HU J, LIN C J, et al. Surface charge migration and dc surface flashover of surface-modified epoxy-based insulators[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2017, 50(6): 065301.
- [99] WANG F P, ZHANG T, LI J, et al. DC breakdown and flashover characteristics of direct fluorinated epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 702-737.
- [100] ZHANG B Y, ZHANG G X, WANG Q, et al. Suppression of surface charge accumulation on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-filled epoxy resin insulator under dc voltage by direct fluorination[J]. AIP Advances, 2015, 5(12): 127207.
- [101] ZHANG C, MA Y Y, KONG F, et al. Atmospheric pressure plasmas and direct fluorination treatment of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-filled epoxy resin: a comparison of surface charge dissipation[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 362: 1-11.
- [102] ZHANG C, MA Y Y, KONG F, et al. Surface charge decay of epoxy resin treated by AP-DBD deposition and direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 768-775.
- [103] AN Z L, GU X X, SHEN R C, et al. Resistance to corona discharge of HTV silicone rubber surface layers fluorinated at different temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(2): 729-740.
- [104] AN Z L, SHEN Z H, GAO W J, et al. Enhancement of DC flashover of liquid silicone rubber by direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 2023-2030.
- [105] AN Z L, SHEN R C, GAO W J, et al. Improved flashover performance and tracking resistance of silicone rubber by direct fluorination[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020, 137(15): 48556.
- [106] DU B X, LI Z L. Surface charge and DC flashover characteristics of direct-fluorinated SiR/SiO<sub>2</sub> nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(6): 2602-2610.
- [107] DU B X, LI J. Surface charge coupling behavior of fluorinated polyimide film under DC and pulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 567-573.
- [108] KONG F, CHANG C, MA Y Y, et al. Surface modifications of polystyrene and their stability: a comparison of DBD plasma deposition and direct fluorination[J]. Applied Surface Science, 2018, 459: 300-308.
- [109] ZHOU R D, SUN G Y, SONG B P, et al. Mechanism of F<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> fluorination mitigating vacuum flashover of polymers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(37): 375304.
- [110] 相中华, 牛勃, 马飞越, 等. GIS 绝缘子的直接氟化与直流闪络性能[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4306-4315.
- XIANG Zhonghua, NIU Bo, MA Feiyue, et al. Direct fluorination and DC flashover performance of GIS spacers[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4306-4315.
- [111] 连衍成, 梁富源, 贺建超, 等. 超疏水聚四氟乙烯材料制备工艺的研究进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(2): 231-241.
- LIAN Yancheng, LIANG Fuyuan, HE Jianchao, et al. Research progress on preparation process of superhydrophobic polytetrafluoroethylene[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(2): 231-241.
- [112] CHEN S L, WANG S, WANG Y B, et al. Surface modification of epoxy resin using He/CF<sub>4</sub> atmospheric pressure plasma jet for flashover withstanding characteristics improvement in vacuum[J]. Applied Surface Science, 2017, 414: 107-113.
- [113] SHAO T, YANG W J, ZHANG C, et al. Enhanced surface flashover strength in vacuum of polymethylmethacrylate by surface modification using atmospheric-pressure dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(7): 071607.
- [114] SHAO T, ZHOU Y X, ZHANG C, et al. Surface modification of

- polymethyl-methacrylate using atmospheric pressure argon plasma jets to improve surface flashover performance in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(3): 1747-1754.
- [115] SHAO T, LIU F, HAI B, et al. Surface modification of epoxy using an atmospheric pressure dielectric barrier discharge to accelerate surface charge dissipation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(3): 1557-1565.
- [116] YUE W Y, MIN D M, NIE Y J, et al. Plasma treatment enhances surface flashover performance of EP/AI<sub>2</sub>O<sub>3</sub> micro-composite in vacuum[C]//*Proceedings of the 2018 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials*. Xi'an, China: IEEE, 2018: 1086-1089.
- [117] CHEN X R, GUAN H L, JIANG T, et al. Surface charge dissipation and DC flashover characteristic of DBD plasma treated epoxy resin/AlN nanocomposites[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(2): 504-511.
- [118] RAN H J, SONG Y Z, YAN J Y, et al. Improving the surface insulation of epoxy resin by plasma etching[J]. *Plasma Science and Technology*, 2021, 23(9): 095502.
- [119] LEE Y S, HAN J H, PARK J S, et al. Low temperature SiO<sub>x</sub> thin film deposited by plasma enhanced atomic layer deposition for thin film encapsulation applications[J]. *Journal of Vacuum Science & Technology A*, 2017, 35(4): 041508.
- [120] WANG R X, LIN H F, GAO Y, et al. Inorganic nanofilms for surface charge control on polymer surfaces by atmospheric-pressure plasma deposition[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 122(23): 233302.
- [121] SHAO T, KONG F, LIN H F, et al. Correlation between surface charge and DC surface flashover of plasma treated epoxy resin[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1267-1274.
- [122] ZHANG C, LIN H F, ZHANG S, et al. Plasma surface treatment to improve surface charge accumulation and dissipation of epoxy resin exposed to DC and nanosecond-pulse voltages[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(40): 405203.
- [123] WANG R X, CUI C C, ZHANG C, et al. Deposition of SiO<sub>x</sub> film on electrode surface by DBD to improve the lift-off voltage of metal particles[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1285-1292.
- [124] WU S L, YANG Q, ZHANG Z T, et al. Deposition of SiO<sub>2</sub> and TiO<sub>2</sub> films on electrode materials to suppress space charge injection[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2020, 48(11): 3895-3904.
- [125] WU S L, YANG Q, SHAO T, et al. Effects of TiO<sub>2</sub> nanoparticles and electrodes surface-modified by low-temperature plasma on impulse breakdown voltage of propylene carbonate[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(2): 442-449.
- [126] CHEN X Y, CHEN S L, ZHANG B, et al. Promotion of epoxy resin surface electrical insulation performance and its stability by atmospheric fluorocarbon dielectric barrier discharge[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(6): 1973-1981.
- [127] YAN J Y, LIANG G S, LIAN H L, et al. Effect of plasma step gradient modification on surface electrical properties of epoxy resin[J]. *Plasma Science & Technology*, 2021, 23(6): 064012.
- [128] GAO Y, LI N, LI J, et al. Charge transport behavior in gamma-ray irradiated poly(ethylene terephthalate) estimated by surface potential decay[J]. *High Voltage*, 2021, 6(3): 435-447.
- [129] 汪 汛, 梁芳蔚, 钟理鹏, 等. 基于 X 射线短时照射的高压直流 GIS/GIL 绝缘子表面电荷主动消散方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(14): 3147-3151.  
WANG Feng, LIANG Fangwei, ZHONG Lipeng, et al. Active charge dissipation method for surface charge on the surface of DC GIS/GIL insulator based on short-time X-ray irradiation[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(14): 3147-3151.
- [130] WANG F, LIANG F W, ZHONG L P, et al. Short-time X-ray irradiation as a non-contact charge dissipation solution for insulators in HVDC GIS/GIL[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(2): 704-709.
- [131] 梁芳蔚. 高压直流 GIL 绝缘子表面电荷动态积聚与消散机制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.  
LIANG Fangwei. Dynamic accumulation and dissipation mechanism of surface charges on HVDC GIL insulators[D]. Changsha, China: Hunan University, 2021.
- [132] WANG T Y, LI X F, ZHANG B Y, et al. Basic reason for the accumulation of charge on the surface of polymer dielectrics[J]. *Science China Materials*, 2022, 65(10): 2884-2888.
- [133] LI S T, LI Z, HUANG Y, et al. Unraveling the "U-shaped" dependence of surface flashover performance on the surface trap level[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 180923-180934.
- [134] QI B, GAO C J, LV Y Z, et al. The impact of nano-coating on surface charge accumulation of epoxy resin insulator: characteristic and mechanism[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2018, 51(24): 245303.
- [135] 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.
- [136] TU Y P, ZHOU F W, CHENG Y, et al. The control mechanism of micron and nano SiO<sub>2</sub>/epoxy composite coating on surface charge in epoxy resin[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1275-1284.
- [137] WU G T, RUAN H O, TIAN Y, et al. Fluorinated SnO<sub>2</sub>/ER as an antistatic coating for enhancing the surface insulating strength of epoxy insulators[J]. *Polymer Composites*, 2020, 41(12): 5281-5293.
- [138] WANG T Y, LIU C, LI D Y, et al. Nano ZnO/epoxy coating to promote surface charge dissipation on insulators in DC gas-insulated systems[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(4): 1322-1329.
- [139] DU B X, LIANG H C, LI J. Novel spacer coated with functionally graded ZnO film for HVDC gas insulated line[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(1): 231-239.
- [140] XUE J Y, CHEN J H, WANG H, et al. Effects of surface nonlinear conductive coatings on surface charge behavior of alumina-filled epoxy resin spacers[C]//*Proceedings of the 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*. Richland, USA: IEEE, 2019: 397-400.
- [141] XUE J Y, CHEN J H, DONG J H, et al. The regulation mechanism of SiC/epoxy coatings on surface charge behavior and flashover performance of epoxy/alumina spacers[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52(40): 405502.
- [142] PAN Z J, PAN C, TANG J, et al. Influence of SiC/epoxy coating on surface charging phenomenon at DC voltage-part I: charge accumulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, 29(4): 1333-1342.
- [143] PAN Z J, PAN C, TANG J, et al. Influence of SiC/epoxy coating on surface charging phenomenon at DC voltage-part II: charge dissipation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, 29(4): 1343-1352.
- [144] 胡 琦, 李庆民, 刘智鹏, 等. 基于表层梯度电导调控的直流支柱绝缘子界面电场优化方法[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(7): 1856-1865.  
HU Qi, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Interfacial electric field optimization of DC tri-post insulator based on gradient surface

- conductance regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1856-1865.
- [145] 胡琦. 直流 GIL 三支柱绝缘子界面电荷积聚特性与界面绝缘增强设计方法[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.  
HU Qi. Interfacial charge accumulation characteristics and interface insulation enhancement design method of DC GIL tri-post insulators[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2022.
- [146] ZHANG B Y, WANG Q, ZHANG Y X, et al. A self-assembled, nature-mimetic, nano-laminar structure as a superior charge dissipation coating on insulators for HVDC gas-insulated systems[J]. Nanoscale, 2019, 11(39): 18046-18051.
- [147] ZHANG B Y, LIU J J, REN M, et al. Reviving the "schottky" barrier for flexible polymer dielectrics with a superior 2D nanoassembly coating[J]. Advanced Materials, 2021, 33(34): 2101374.
- [148] ZHANG P H, ZHANG C, ZHANG C S, et al. Low-temperature plasma polymerized fluorocarbon coating promotes surface charge dissipation in polystyrene[J]. Nanotechnology, 2021, 32(12): 125703.
- [149] WANG J R, LI Q M, GONG Y F, et al. Enhancement of surface electrical performances of epoxy film by blending with fluorinated and crosslinking monomer[J]. Materials Letters, 2022, 327: 133036.
- [150] SIMA W X, YIN Z, SUN P T, et al. Effects of arc ablation on surface electrical performance of epoxy resin insulation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(26): 265601.
- [151] XIE Q, REN J, HUANG H, et al. Aging characteristics of epoxy resin discharged by very fast transient overvoltage in SF<sub>6</sub>[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1178-1188.
- [152] WEN H, ZHANG X X, XIA R, et al. Decomposition characteristics of SF<sub>6</sub> under flashover discharge on the epoxy resin surface[J]. Materials, 2019, 12(9): 1408.
- [153] DAS S, GUPTA N. Effect of ageing on space charge distribution in homogeneous and composite dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 541-547.
- [154] YAHYAOUI H, NOTINGHER P, AGNEL S, et al. Electrical properties of alumina-filled epoxy resin for HVDC applications[C]// Proceedings of the International Conference of the French Electrostatics Society. Poitiers, France: SFE, 2016.
- [155] 张一. 运行条件下 SF<sub>6</sub>-环氧树脂界面绝缘长期劣化过程与失效机理研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023.  
ZHANG Yi. Research on the long-term degradation process and failure mechanism of the insulation at the SF<sub>6</sub>-epoxy interface under operating conditions[D]. Beijing, China: North China Electric Power University (Beijing), 2023.
- [156] 崔燕. 微米级固体颗粒的分形及其与界面间粘附力的关系研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
CUI Yan. Investigation on the relationship between adhesion force and the fractal characteristics of solid micro-particle[D]. Changsha, China: Central South University, 2011.
- [157] 王靖瑞, 李庆民, 刘衡, 等. 纳米复合涂层对微米级金属粉尘吸附行为的抑制作用[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 3172-3182.  
WANG Jingrui, LI Qingmin, LIU Heng, et al. Suppression effect of nanocomposite coating on the adsorption behavior of micron-scale metal dust[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 3172-3182.
- [158] 刘华, 常昌凡, 刘坐镇. 低表面能环氧树脂超疏水涂层的制备与研究[J]. 热固性树脂, 2024, 39(1): 25-30.  
LIU Hua, CHANG Changfan, LIU Zuozhen. Preparation and study of low surface energy epoxy resin superhydrophobic coatings[J]. Thermosetting Resin, 2024, 39(1): 25-30.
- [159] 许文杰, 黄正勇, 李剑, 等. 碳化硅改性超疏水涂层协同增强直流沿面闪络性能及机理研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(9): 2480-2490.  
XU Wenjie, HUANG Zhengyong, LI Jian, et al. Study on the synergistic enhancement of the DC surface flashover performance and the mechanism of the superhydrophobic coating modified by silicon carbide[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2480-2490.
- [160] LIU Y J, GUO Y J, WANG B, et al. Pollution morphology characteristics on a superhydrophobic surface and its pollution flashover voltage in DC electric field[J]. High Voltage, 2022, 7(3): 564-574.
- [161] XIE Y, XIONG W, KAREEM S, et al. Robust superamphiphobic coatings with gradient and hierarchical architecture and excellent anti-flashover performances[J]. Nano Research, 2022, 15(8): 7565-7576.
- [162] LI C Q, DOU P, ZHAO R Y, et al. Preparation and super-hydrophobic mechanism analysis of FAS-17-modified SiO<sub>2</sub>/PDMS coatings for high-voltage composite insulators[J]. Coatings, 2023, 13(3): 563.
- [163] LIU H, WANG J, WANG J R, et al. Study on pyrolysis characteristics of SF<sub>6</sub> in a trace-oxygen (O<sub>2</sub>) environment: ReaxFF-SFO force field optimization and reactive molecular dynamics simulation[J]. ACS Omega, 2020, 5(41): 26518-26526.
- [164] WANG J R, LI Q M, LIU H, et al. Impact of SF<sub>6</sub> decomposition products on epoxy resin chemical stability and doping-nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-based enhancement using the ReaxFF-MD method[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(2): 779-789.
- [165] WANG J R, LI Q M, GONG Y F, et al. Long-term corona behaviour and performance enhancing mechanism of SiC/epoxy nanocomposite in SF<sub>6</sub> gas environment[J]. Plasma Science and Technology, 2023, 25(3): 035501.



LI Qingmin  
Ph.D., Professor



WANG Changzhu  
Ph.D. candidate



WANG Jian  
Ph.D.  
Associate professor  
Corresponding author

#### 李庆民

1968—, 男, 博士, 教授, 博导  
主要从事高压交直流 GIS/GIL、先进输电技术、高性能绝缘与电接触材料等领域的研究工作  
E-mail: lqmeee@ncepu.edu.cn

#### 王昌柱

2001—, 男, 博士生  
主要从事 GIS/GIL 绝缘子材料改性及沿面绝缘性能提升方法研究  
E-mail: wczncepu@163.com

#### 王健(通信作者)

1985—, 男, 博士, 副教授, 博导  
主要从事直流气体绝缘装备、电气设备绝缘缺陷在线监测等领域的研究工作  
E-mail: wangjian31791@ncepu.edu.cn