

交流 GIS/GIL 绝缘子介电功能梯度化设计与金属微粒驱离方法研究

陈田¹, 金洲玉², 胡睿智¹, 梁虎成², 杜伯学²

(1. 国网江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 气体绝缘金属封闭开关(GIS)设备内部的金属微粒污染物会引起严重的电场畸变,进而诱发绝缘子沿面放电。针对此问题,本文提出一种介电功能梯度绝缘子的金属微粒驱离方法,仿真研究盆式绝缘子周围电场分布以及金属微粒运动特性。结果表明:GIS 外壳表面释放的金属微粒受到轴向电场力作用,有朝着绝缘子运动的趋势。叠层式功能梯度(ϵ_L -FGM)绝缘子的介电常数沿径向递减,可在均匀沿面电场分布的同时,使金属微粒所受的电场力方向随轴向电场反转,让金属微粒远离绝缘子运动。然而, ϵ_L -FGM 绝缘子 GIS 使外壳表面电场增强,使金属微粒运动高度较均匀绝缘子上增大约 2.7 倍。与 ϵ_L -FGM 绝缘子相比,基于拓扑优化算法设计的具有空间介电常数梯度的 ϵ_r -FGM 绝缘子减小了金属微粒跳跃高度,具有更佳的电场调控与微粒抑制效果。

关键词: GIS; GIL; 功能梯度材料; 沿面电场均化; 金属微粒抑制; 拓扑优化

Dielectric functional gradient design of AC GIS/GIL insulator and research on expelling of metal particles

CHEN Tian¹, JIN Zhouyu², HU Ruizhi¹, LIANG Hucheng², DU Boxue²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Metal particle pollutants inside gas-insulated metal enclosed switchgear (GIS) equipment can cause severe electric field distortion, leading to surface discharge of insulators. This paper proposed a method of dielectrically functionally gradient insulator for suppressing metal particles. The electric field distribution around the basin insulator and the motion characteristics of metal particles were simulated. The results show that metal particles released from the shell are affected by the axial electric field force and tend to move towards the insulator. The permittivity distribution of the laminated functionally gradient (ϵ_L -FGM) insulator decreases in the radial direction, which can homogenize the electric field distribution along the insulator surface and drive away the metal particles by reversing the electric force with the axial electric field. However, the ϵ_L -FGM insulator enhances the electric field on the surface of the shell, and the jump height of metal particle is 2.7 times higher than those around the uniform insulator. Compared with ϵ_L -FGM insulator, the ϵ_r -FGM insulator with a spatial permittivity gradient, which designed based on the topology optimization, reduces the jump height of metal particles and performs better effect in regulating the electric field and expelling the particles.

Key words: GIS; GIL; functionally graded material; surface electric field homogenization; metal particle suppression; topology optimization

0 引言

气体绝缘金属封闭开关(GIS)因具有占地面积小、运行可靠性高、维护周期长等优势,已广泛应用于国内外各电压等级的输变电工程^[1-3]。气体绝缘输电线路(GIL)具有容量大、损耗低、环境适应能力

基金项目:国网江西省电力有限公司科技项目(521820220003)。

强等特点,是穿山、过江、过海等特殊环境下电缆和架空线的理想替代品^[4-5]。然而,在 GIS/GIL 生产、装配和运行过程中,不可避免地会因为震动、摩擦等因素产生金属微粒污染物^[6]。金属微粒会加剧 GIS/GIL 电场畸变,导致六氟化硫(SF_6)气体的绝缘强度降幅高达 80%^[7]。交流 GIS 故障统计表明,由金属微粒污染物造成的绝缘故障占比超过 38%^[8],是威胁

我国GIS/GIL工程安全的重要隐患。

目前,常见的金属微粒抑制方法主要包括微粒捕捉器和电极覆膜两种方式。金属微粒捕捉器通常布置在绝缘子附近,通过在GIS外壳表面形成低电场区,使运动至此的金属微粒所受电场力小于重力,从而被陷阱捕获^[9-10]。詹振宇等^[11]研究表明,在绝缘子至屏蔽罩下方设置槽宽较大的栅格形陷阱及在管道其余部分设置宽度较大的条形陷阱,可达到最优的捕获效果。刘鹏等^[12]提出了上提式微粒陷阱优化设计的约束条件,结合混沌粒子群算法,对陷阱结构进行优化,使微粒捕获率提升至74.16%。电极覆膜一般是对绝缘子附近20~30 cm范围内的外壳内壁涂覆厚度为0.03~0.50 mm的介质层,例如聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)。介质层可以阻碍绝缘气体中预放电的发展并提高气隙击穿电压和微粒启举所需的电场强度,是降低金属微粒活性的有效方法^[13-14]。律方成等^[15]分析了覆膜对空间电场分布、微粒表面电荷及其所受电场力的影响规律,揭示了电极覆膜提高微粒启举电压的内在原因。

由于微粒运动具有随机性,微粒捕捉器只能被动等待其掉入陷阱,无法主动收集金属微粒。此外,陷阱边缘产生的电场畸变也可能会削弱腔体内部的气体绝缘强度^[16]。而电极覆膜的PET薄膜抗热性差,极易遭到破坏,此外,PET薄膜粘覆在电极表面会存在难以控制的气隙,影响其使用效果^[17]。

本团队前期研究表明,介电功能梯度绝缘子(FGM)不仅可以均化沿面电场分布,还可以调节绝缘子周围的空间电场强度及方向。因此,本文提出基于功能梯度绝缘子的金属微粒驱离方法,并以800 kV GIS/GIL为模型开展绝缘子介电功能梯度化设计及微粒运动特性分析。希望研究结果能为实现GIS/GIL金属微粒控制提供新思路,为解决高压电工装备金属微粒污染问题,提升设备运行可靠性提供参考。

1 仿真模型

1.1 控制方程

图1为交流800 kV GIS/GIL的简化结构图,包括盆式绝缘子、外壳、导体以及SF₆气体。在工频电压下,金属微粒受到交变电场力的作用,GIS/GIL内部电场分布可由麦克斯韦方程表示,如式(1)~(2)所示。

$$\mathbf{E} = -\nabla V \quad (1)$$

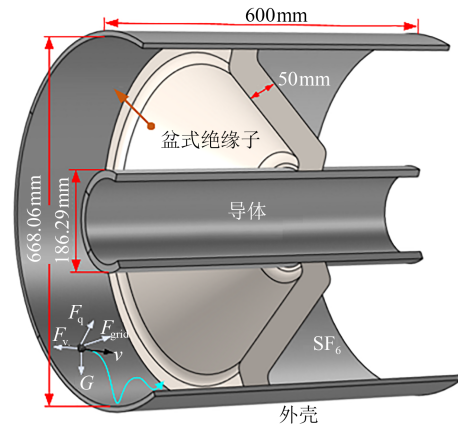


图1 800 kV AC-GIS/GIL简化结构示意图

Fig.1 Structure diagram of a simplified ± 800 kV AC-GIS/GIL

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}) = \rho_v \quad (2)$$

式(1)~(2)中: \mathbf{E} 为电场强度,V/m; V 为电势,V; ρ_v 为体电荷密度,C/m³; ε_0 和 ε_r 分别为真空介电常数和材料的相对介电常数。

交流800 kV GIS/GIL的单相交流电压为461.9 kV,单相交流电压最大值为635.1 kV,因此将导杆电压设置为635.1 kV,外壳接地。

以球形金属微粒为研究对象,金属微粒材料为铝,其半径和密度分别记为 r_{Al} 和 ρ_{Al} 。金属微粒的运动过程受重力(\mathbf{G})、电场力(\mathbf{F}_q)、电场梯度力(\mathbf{F}_{grad})以及粘滞阻力(\mathbf{F}_v)共同作用,其表达如式(3)~(6)所示。

$$\mathbf{G} = (4/3)\pi r_{Al}^3 g \rho_{Al} \quad (3)$$

$$\mathbf{F}_q = \mathbf{E}_p \cdot q \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{grad} = 2\pi r_{Al}^3 \varepsilon_0 \varepsilon_r |\nabla E_p|^2 \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_v = \frac{\pi r_{Al}^2 \rho_g}{2} \left(\frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4 \right) (\mathbf{v}_g - \mathbf{v}_p)^2 \quad (6)$$

式(3)~(6)中: g 为重力加速度,m/s²; \mathbf{E}_p 为金属微粒所在位置电场强度,kV/mm; q 为金属微粒带电量,C; ρ_g 为SF₆气体密度,kg/m³; Re 为雷诺数; \mathbf{v}_g 为SF₆气体流速,m/s; \mathbf{v}_p 为金属微粒运动速度,m/s。

金属微粒在运动过程中的动力学行为可表示为式(7)。

$$\frac{4}{3}\pi r_{Al}^3 \rho_{Al} \frac{d\mathbf{v}_p}{dt} = \mathbf{F}_q + \mathbf{G} + \mathbf{F}_{grad} + \mathbf{F}_v \quad (7)$$

金属微粒与电极碰撞时会携带与电极极性相同的电荷,其每次碰撞带电量为 q ,如式(8)所示。

$$q_{\pm}(t) = \pm 2\pi^3 \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}_n r_{Al}^2 / 3 \quad (8)$$

式(8)中, \mathbf{E}_n 为金属微粒与电极发生碰撞时所处位置的法向电场,V/m。

金属微粒与导杆或外壳之间的碰撞过程并非弹性碰撞,存在一定的能量损失,因此引入恢复系数对碰撞后的切向和法向速度进行修正,如式(9)所示。

$$\begin{cases} v_{2n} = -k_n v_{1n} \\ v_{2t} = k_t v_{1t} \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中: v_{1n} 、 v_{1t} 分别为碰撞前粒子速度的法向分量以及切向分量,m/s; v_{2n} 、 v_{2t} 为碰撞后粒子速度的法向分量以及切向分量,m/s; k_n 、 k_t 分别代表法向以及切向的恢复系数。

1.2 材料参数

本文利用静电场与流体粒子追踪模块对腔体内部电场、自由导电微粒运动进行耦合计算,仿真过程将导杆、外壳、金属微粒材质设置为铝,密度为

2 700 kg/m³;将绝缘气体设置为 SF₆ 气体,相对介电常数为 1.002,密度为 6.088 kg/m³。

2 ϵ_L -FGM 绝缘子仿真分析

2.1 介电参数梯度设置

均匀绝缘子与叠层式功能梯度(ϵ_L -FGM)绝缘子的介电常数设置如图2所示,其中均匀绝缘子的相对介电常数为 5^[18]。将层叠式 ϵ_L -FGM 绝缘子沿轴向划分为 9 个区域,相对介电常数沿轴向逐渐降低,导杆附近介电常数最高为 11,外壳附近介电常数最低为 2。在实践中,可以通过在环氧基体中掺入 BaTiO₃ 颗粒来提高材料的相对介电常数。相反,通过掺入空心 SiO₂ 颗粒,可以降低材料的相对介电常数。

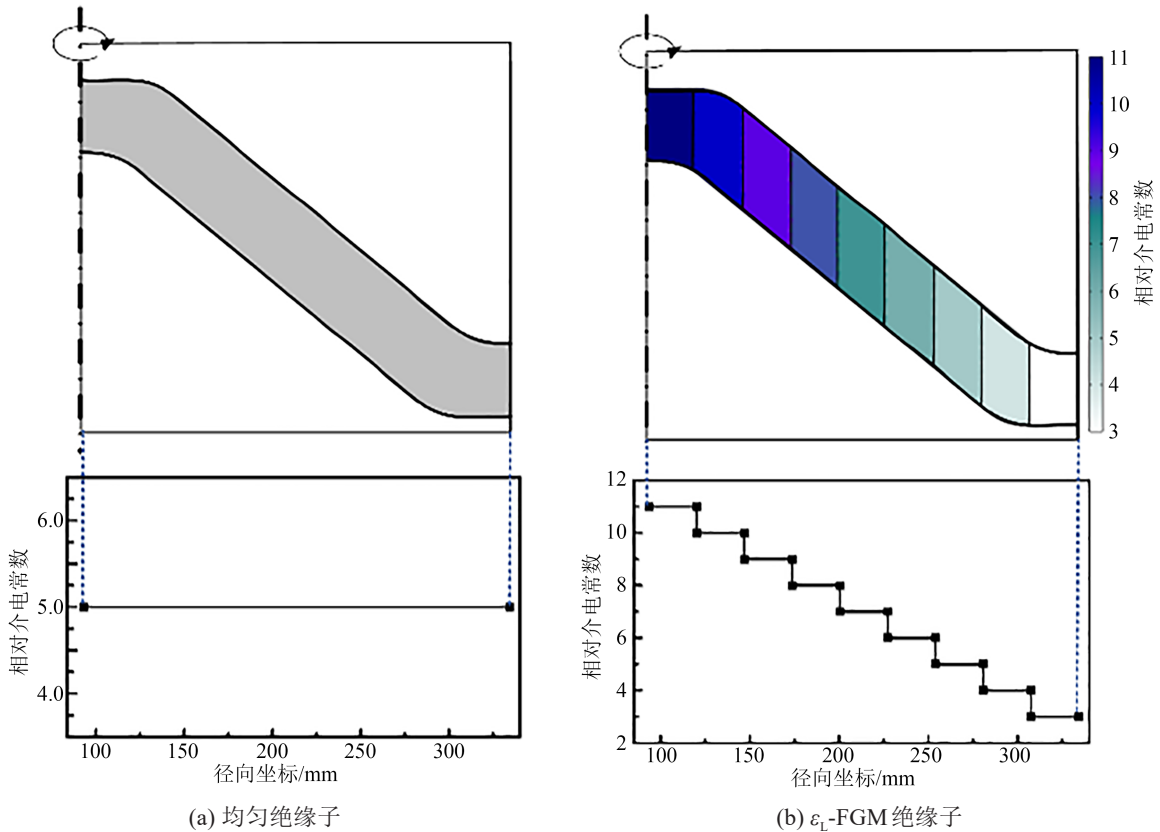


图2 均匀和 ϵ_L -FGM 绝缘子的介电常数分布

Fig.2 Relative permittivity distributions of the uniform and ϵ_L -FGM insulators

2.2 沿面电场分布均化

图3为两种绝缘子沿面切向电场的分布情况。从图3可以看出,在导杆附近 ϵ_L -FGM 绝缘子凸面和凹面的沿面切向电场均有所降低,而在外壳附近则有所升高。表1列出了绝缘子沿面切向电场分布特征参数,其中 f 为切向电场不均匀系数,为最大切向

场强($E_{t,max}$)与平均切向场强($E_{t,mean}$)之比。从表1可以看出, ϵ_L -FGM 绝缘子凹面的 $E_{t,max}$ 为 4.32 kV/mm,不均匀系数与均匀绝缘子相比降低了 23.4%;凸面的 $E_{t,max}$ 为 3.19 kV/mm,不均匀系数与均匀绝缘子相比降低了 28.6%,证明 ϵ_L -FGM 绝缘子可以显著提高绝缘子沿面切向电场分布的均匀程度。而在 r 分别

为173.5、200.2、226.9 mm处, ϵ_L -FGM 绝缘子的凸面切向电场分布存在明显拐点,这是由于离散后的梯度绝缘子在界面处存在参数突变,导致沿面电场分布的跳跃畸变。

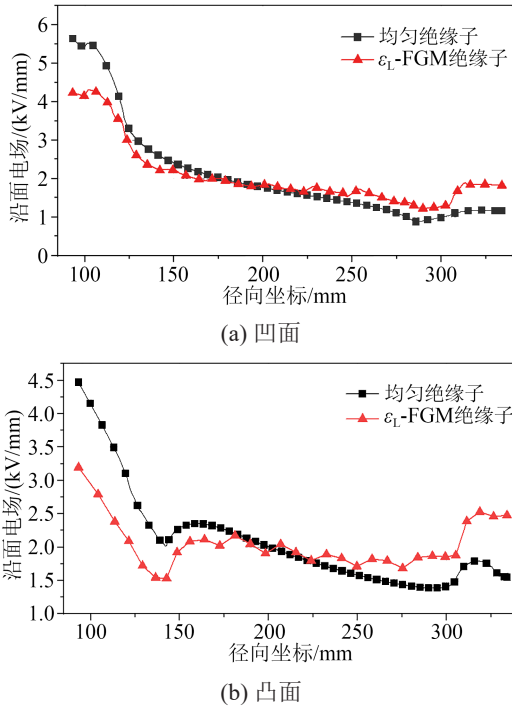


图3 均匀和 ϵ_L -FGM 绝缘子的沿面电场分布
Fig.3 Electric field distributions along the surfaces of the uniform and ϵ_L -FGM insulators

表1 沿面切电场分布的特征参数
Table 1 Characteristic parameters of electric field distributions along the insulator surface

部位	绝缘子	$E_{t,max}/(kV/mm)$	$E_{t,mean}/(kV/mm)$	$f=E_{t,max}/E_{t,mean}$
凹面	均匀	5.64	2.029 5	2.78
	ϵ_L -FGM	4.32		2.13
凸面	均匀	4.47	2.20	2.20
	ϵ_L -FGM	3.19		1.57

2.3 凹面金属微粒抑制

图4为绝缘子凹面侧不同位置金属微粒的运动轨迹,仿真时间设置为1 s, dz 为金属微粒距绝缘子表面的初始距离。其中图4(a)所示为均匀绝缘子凹面侧不同位置释放的金属微粒运动轨迹,可以看出,不同位置释放的金属微粒均朝绝缘子运动。当微粒距离绝缘子5 mm时,在电场力驱动下,微粒会与绝缘子表面发生多次碰撞,并且多次运动到三结合点处。文献[19]研究表明,微粒在三结合点处时,绝缘子的沿面闪络电压将大幅降低,严重威胁 GIS/GIL的安全运行。

图4(b)为 ϵ_L -FGM 绝缘子凹面侧不同位置释放

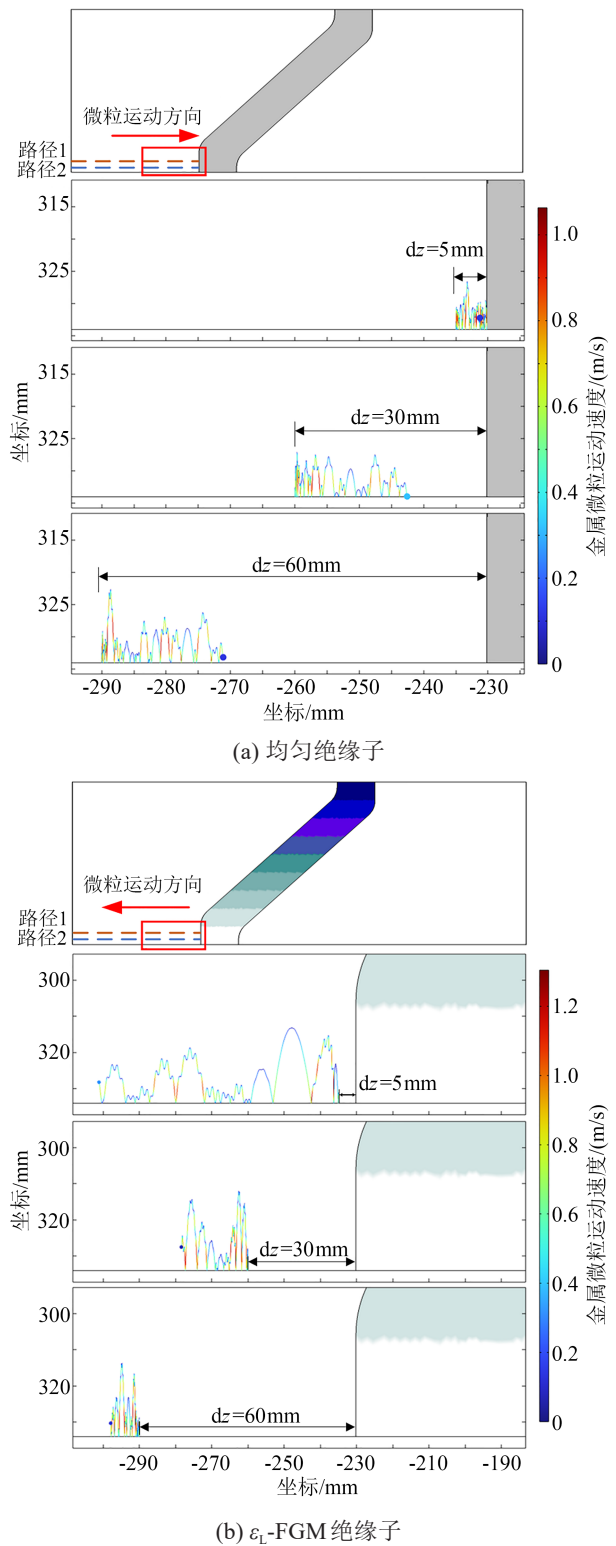


图4 绝缘子凹面侧不同位置金属微粒的运动轨迹
Fig.4 Movement trajectories of metal particles with different initial distances from the concave surface of the insulator

的金属微粒运动轨迹,可以看出,任意位置释放的金属微粒均远离绝缘子,这与均匀绝缘子附近的微粒运动趋势完全相反。并且,释放的金属微粒越靠近绝缘子,其被驱离的速度越快。此外,实验观察

到均匀绝缘子或 ϵ_L -FGM绝缘子周围的金属微粒运动轨迹,实验结果与仿真结果一致。

图5为绝缘子凹面侧沿路径1(距离外壳表面20 mm)和路径2(距离外壳表面10 mm)计算得到的初始时刻轴向电场分布,初始相位 φ 为 90° 。定义指向绝缘子的方向为正方向。从图5可以看出,均匀绝缘子凹面侧的轴向电场方向为正,从微粒运动轨迹来看,这种电场分布极易引导金属微粒朝绝缘子运动。而对于 ϵ_L -FGM绝缘子,其轴向电场分量均为负值,轴向电场与均匀绝缘子的反向,此时金属微粒运动趋势表现为远离绝缘子。因此,轴向电场的反转是金属微粒产生两种相反运动模式的主要因素,这与金属微粒的尺寸无关。理论上,只要金属微粒能从外壳表面启举, ϵ_L -FGM绝缘子就可以起到驱离金属微粒的作用。

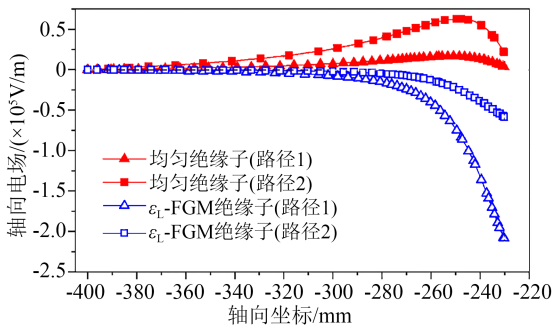


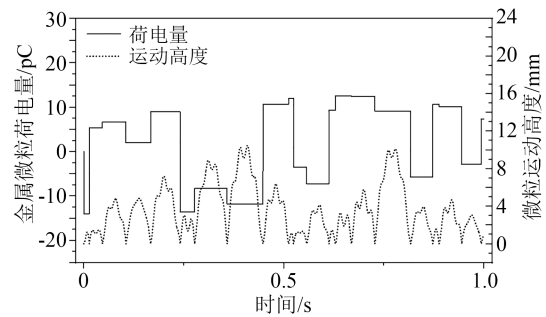
图5 沿路径1和路径2的轴向电场分布

Fig.5 Axial electric field distributions along path 1 and path 2

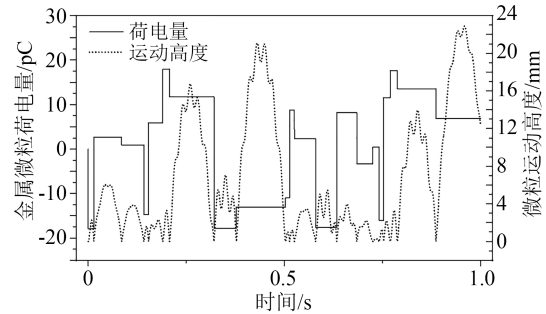
图6为距绝缘子30 mm处释放金属微粒的跳跃高度与电荷量变化。由于 ϵ_L -FGM绝缘子加强了外壳附近的电场强度,根据式(4),金属微粒的最大带电量增大,电荷量变化范围更广。同时,相较于均匀绝缘子, ϵ_L -FGM绝缘子使金属微粒的跳跃高度增大,最大跳跃高度约为均匀绝缘子的3倍。

图7是绝缘子凸面侧不同位置金属微粒的运动轨迹。图7(a)为均匀绝缘子凸面侧不同位置释放的金属微粒运动轨迹,可以看出,绝缘子凸面侧的金属微粒存在两个运动方向相反的区域。在距离绝缘子较近的区域,金属微粒朝向绝缘子运动;而在远离绝缘子的区域,金属微粒远离绝缘子运动,二者的分界线在距绝缘子32 mm处。在GIL/GIS运行过程中,如果有金属微粒掉落在I区,其在电场力驱动下会朝绝缘子运动,并与绝缘子发生多次碰撞,产生安全隐患。

图7(b)为 ϵ_L -FGM绝缘子凸面附近金属微粒的



(a) 均匀绝缘子



(b) ϵ_L -FGM绝缘子

图6 距绝缘子30 mm释放金属微粒跳跃高度与电荷量
Fig.6 Jump height and charge amount of the metal particle released at 30 mm from the insulator

运动轨迹,可以看出,在绝缘子凸面的任何区域,金属微粒总是远离绝缘子运动。并且金属微粒的运动速度较快,1 s左右便到达仿真模型边界。然而, ϵ_L -FGM绝缘子在外壳附近具有较低的介电常数,使外壳附近的径向电场增强,导致金属微粒的运动高度显著增加。在 $d_z=15$ mm处金属微粒与 ϵ_L -FGM绝缘子发生碰撞;在 $d_z=40$ mm处均匀绝缘子附近金属微粒最高跳跃高度为37 mm, ϵ_L -FGM绝缘子附近金属微粒最高跳跃高度为62 mm,最高跳跃高度增大了约67%;在 $d_z=70$ mm处在均匀绝缘子与 ϵ_L -FGM绝缘子附近金属微粒最高跳跃高度分别为16 mm和59 mm,最高跳跃高度增大了约2.7倍。

3 拓扑优化 ϵ_L -FGM绝缘子仿真分析

3.1 介电参数拓扑优化

叠层式 ϵ_L -FGM绝缘子在均匀沿面电场分布的同时,加强了外壳附近的径向电场强度,导致凸面侧金属微粒的运动高度大幅增加,这是弊端。本文采用拓扑优化算法^[20],对绝缘子介电梯度进行设计,进一步改善其电场均化与金属微粒抑制效果。

采用变密度拓扑优化方法对绝缘子的介电常数分布进行逐点式优化设计,将绝缘子分割成若干

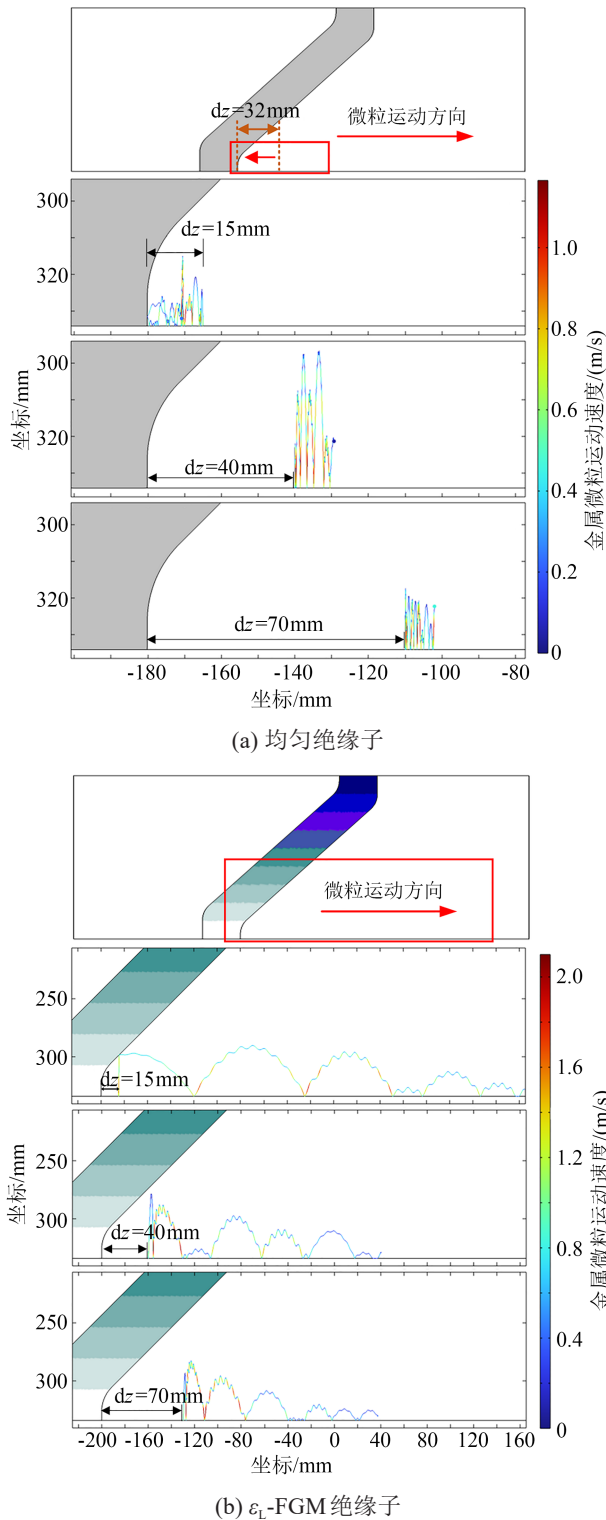


图7 绝缘子凸面侧不同位置金属微粒的运动轨迹

Fig.7 Movement trajectories of metal particles with different initial distances from the convex surface of the insulator

个三角形离散单元,并采用虚拟密度 ρ 替代 ε 进行计算,如式(10)所示。

$$\varepsilon_i = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) \rho_i^p + \varepsilon_{\min} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式(10)中: ε_i 和 ρ_i 分别为第 i 个单元内的相对介电常

数和虚拟密度, $0 < \rho_i < 1$;参数 p 满足 $p > 0$; ε_{\min} 和 ε_{\max} 分别为介电常数约束范围的下限和上限,分别设置为4和24。

在目标函数中引入梯度惩罚项 f_{grad} ,抑制棋盘格、细小分枝、锯齿状边界等数值不稳定现象,如式(11)所示。

$$f_{\text{grad}} = \frac{h_{\text{mesh}}^2}{A} \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right] d\Omega \quad (11)$$

式(11)中: h_{mesh} 为网格最大单元长度,mm; A 为盆式绝缘子截面积, m^2 ; Ω 为绝缘子优化区域。

综上,可以得到基于变密度方法的逐点式介电梯度的拓扑优化表达式,如式(12)所示。

$$\begin{cases} \text{find } \rho = \{ \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_i, \dots, \rho_n \} & 0 < \rho_{\min} \\ (\leq \rho_i \leq 1, i = 1, 2, \dots, n) \\ \min F = f_a + f_b + f_c + f_d + q f_{\text{grad}} \\ = \frac{w_a}{C_{\text{ref}}} \int_{\Omega_2} (E - E_{\text{mean}})^2 d\Omega + w_b \left(\frac{E_{\text{TJ}}}{E_{\text{TJ0}}} \right) \\ + \frac{w_c}{C_{\text{axial}}} \int_{\Omega_3} -\frac{\partial V}{\partial z} d\Omega + \frac{w_d}{C_q} \int_{l_i} E dl \\ + q \frac{h_{\text{mesh}}^2}{A} \int_{\Omega} \left[\left(\frac{\partial \rho}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right)^2 \right] d\Omega \\ q > 0, 0 \leq w_a, w_b, w_c, w_d \leq 1 \\ \text{s.t. } \varepsilon = (\varepsilon_{\max} - \varepsilon_{\min}) \rho_i^p + \varepsilon_{\min} & p > 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)中: l 为沿外壳内表面的积分路径; f_a 为表征电场均匀度的子目标函数; f_b 为表征三结合点附近电场强度的子目标函数; f_c 为表征绝缘子凹面侧轴向电场分布的子目标函数; f_d 为表征限制绝缘子凸面侧外壳表面电场强度的子目标函数; $w_a \sim w_d$ 为各个子目标的权重因子, w_a, w_b, w_c, w_d 分别设置为0.3、0.2、0.4、0.1; $C_{\text{ref}}, C_{\text{axial}}, C_q$ 为均一化系数; E_{mean} 为平均电场强度,其值为2.64 kV/mm; E_{TJ} 为实际三结合点处电场强度,kV/mm; E_{TJ0} 为三结合点处优化目标的电场强度,其值为2.64 kV/mm。

图8为拓扑优化后绝缘子(ε_r -FGM)的介电常数分布。从图8可以看出,两处介电常数较高的区域分别位于绝缘子凹面高压三结合点和接地侧拐角附近。在实践中,可以通过将3D打印技术与传统浇注方法结合起来制备 ε_r -FGM绝缘子。首先,利用3D打印技术制造高介电区域,然后将其嵌入模具,最后采用传统的浇筑工艺制备余下的低介电区域^[21]。

3.2 电场分布均化效果

图9为3种绝缘子周围的电场分布云图。从图

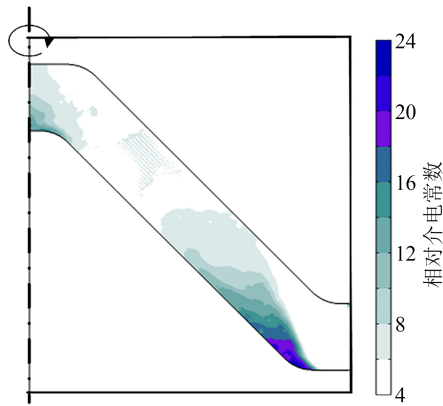


图8 拓扑优化 ϵ_T -FGM绝缘子的介电常数分布

Fig.8 Permittivity distribution of the ϵ_T -FGM insulator after topology optimization

9可以看出,均匀绝缘子三结合点处的最大电场强度为5.71 kV/mm,而 ϵ_L -FGM绝缘子三结合点处的最大电场强度为4.38 kV/mm,降低了23.3%, ϵ_T -FGM绝缘子三结合点处的最大电场强度为4.18 kV/mm,降低了26.8%。两种梯度绝缘子均改变了凹面附近电场线分布(圆圈标记处),使用均匀绝缘子时电场线向绝缘子弯曲,而使用另外两种梯度绝缘子时,电场线逆向偏转,背离绝缘子弯曲。

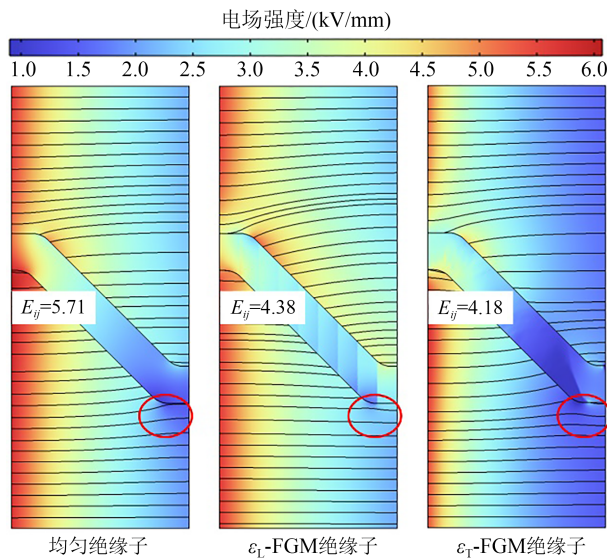


图9 绝缘子周围电场分布

Fig.9 Electric field distribution around insulators

图10为初始时刻沿路径1计算的轴向电场分布。从图10可以看出,拓扑优化后 ϵ_T -FGM绝缘子的轴向电场方向与均匀绝缘子相反,且幅值大于 ϵ_L -FGM绝缘子,意味着 ϵ_T -FGM绝缘子具有更佳金属微粒驱离效果。

图11为绝缘子凸面侧外壳表面径向电场分布。

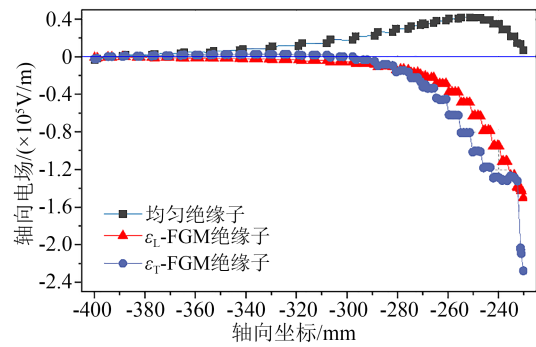


图10 GIS外壳附近轴向电场分布(路径1)

Fig.10 Axial electric field distribution nearby the GIS shell (path 1)

从图11可以看出, ϵ_L -FGM绝缘子周围的径向电场强度最高,约为2.61 kV/mm,较均匀绝缘子最大径向电场强度1.67 kV/mm提高了56%。而 ϵ_T -FGM绝缘子周围的最大径向电场强度为1.98 kV/mm,仅为均匀绝缘子的1.16倍。并且在 $z > -100$ mm的区域, ϵ_T -FGM绝缘子的径向电场强度与均匀绝缘子相当,可以有效解决 ϵ_L -FGM绝缘子凸面侧金属微粒运动高度过大的问题。

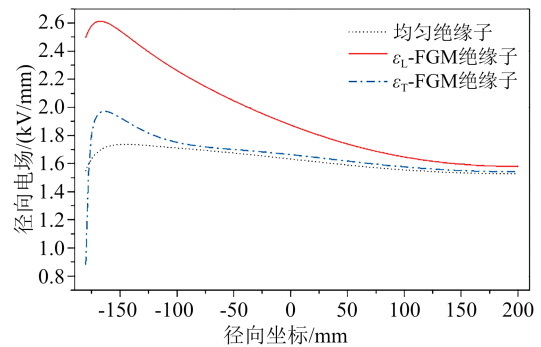


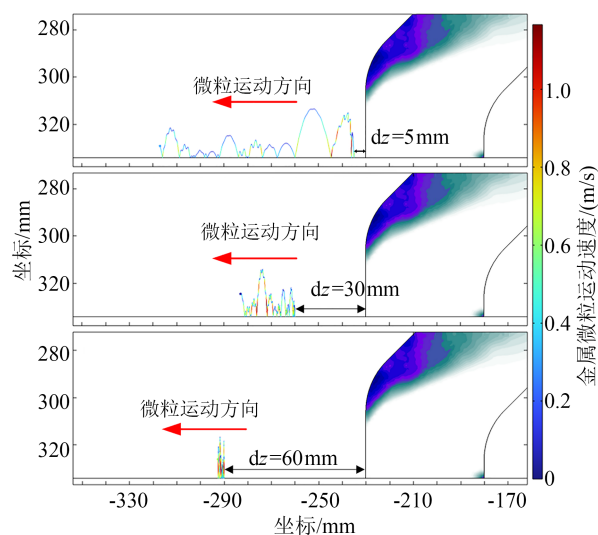
图11 GIS外壳表面径向电场分布(凸面侧)

Fig.11 Radial electric field distribution along the GIS shell (convex side)

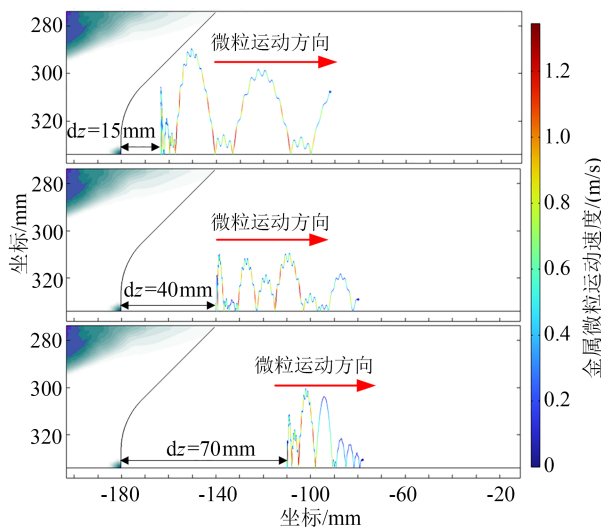
3.3 金属微粒抑制效果

图12为 ϵ_T -FGM绝缘子附近释放金属微粒的运动轨迹。从图12可以看出, ϵ_T -FGM绝缘子展现出与 ϵ_L -FGM绝缘子相当的金属微粒驱离效果,任意位置释放的金属微粒均朝着远离绝缘子的方向运动。此外,由于 ϵ_T -FGM绝缘子附近外壳表面的电场强度较 ϵ_L -FGM绝缘子有所降低,金属微粒的运动高度大幅下降,其与绝缘子表面发生碰撞的概率降低。

图13为运动过程中金属微粒与绝缘子凸面的最小距离。对于 $dz=15$ mm处释放的金属微粒,其



(a) 凹面



(b) 凸面

图12 ϵ_r -FGM绝缘子周围不同位置释放金属微粒运动轨迹
Fig.12 Movement trajectories of metal particles with different initial positions around the ϵ_r -FGM insulator

与均匀绝缘子和 ϵ_L -FGM绝缘子表面均发生碰撞,而与 ϵ_r -FGM绝缘子表面依然保持5.2 mm的距离。对于 $dz=40$ mm和 $dz=70$ mm处释放的金属微粒,其与 ϵ_r -FGM绝缘子的最小距离与均匀绝缘子相当,且远大于 ϵ_L -FGM绝缘子,证明 ϵ_r -FGM绝缘子具有更优异的金属微粒抑制效果。

4 结论

(1)均匀绝缘子三结合点处电场强度为5.71 kV/mm,沿面电场不均匀系数为2.78(凹面)、2.20(凸面);在其周围释放的金属微粒受到轴向电场力的作用,有朝着绝缘子运动的趋势。

(2)与均匀绝缘子相比, ϵ_L -FGM绝缘子的沿面

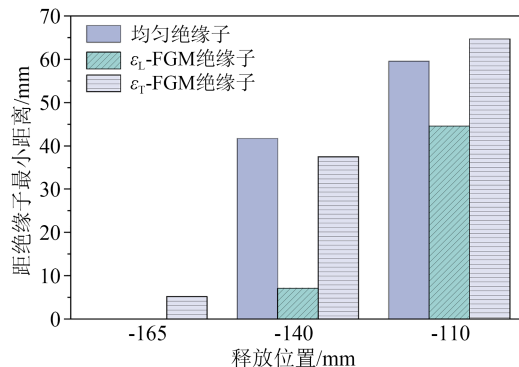


图13 金属微粒与绝缘子最小距离(凸面侧)

Fig.13 Minimum distance between metal particles and insulators (convex side)

电场不均匀系数降低了23.4%(凸面)和28.6%(凹面); ϵ_L -FGM绝缘子使金属微粒所受的轴向电场力反向,使金属微粒远离绝缘子;同时,其增强了GIS外壳表面电场,使金属微粒的运动高度最大提高约2.7倍。

(3)采用拓扑优化算法设计了具有空间介电梯度的 ϵ_r -FGM绝缘子,其轴向电场方向与均匀绝缘子相反,且幅值大于 ϵ_L -FGM绝缘子,加快了金属微粒驱离速度;同时,拓扑优化 ϵ_r -FGM绝缘子降低了GIS外壳表面径向电场强度及金属微粒运动高度,使金属微粒与绝缘子碰撞的概率降低。

参考文献 References

- [1] 沙伟燕,罗艳,马鹏欢,等.不同金属微粒缺陷下GIS盆式绝缘子表面放电与电场特性研究[J].绝缘材料,2023,56(9):89-93.
SHA W Y, LUO Y, MA P H, et al. Study on surface discharge and electric field characteristics of GIS basin insulator with different metal particle defects[J]. Insulating Materials,2023,56(9):89-93.
- [2] MA J, ZHAO K, LI H, et al. Influence of spacer on the movement law of free metal particles in GIS[C]//Conference Record of the 2021 IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering. Beijing, China: IEEE,2021:66-70.
- [3] 王文渠,高宇,赵慧存,等.振动诱发金属微粒弹跳对圆盘绝缘子表面电荷积聚的影响[J].绝缘材料,2022,55(11):63-70.
WANG W Q, GAO Y, ZHAO H C, et al. Effect of vibration induced metal particle bouncing on surface charge accumulation of disk spacer[J]. Insulating Materials,2022,55(11):63-70.
- [4] 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 C H, ZHANG B Y, LI M Y, et al. Review of key insulation technologies of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023,49(3):920-936.
- [5] 吴泽华,龚傲,王浩然,等.GIL绝缘子用环氧复合材料固化形变的试验研究与仿真模拟[J].高电压技术,2021,47(10):3590-3599.
WU Z H, GONG A, WANG H R, et al. Experimental and simula-

- tion study on cure-induced distortion of epoxy composite used in GIL insulators[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3590-3599.
- [6] 杨保利, 韩丽娟, 郝留成, 等. 金属微粒和臭氧处理对GIS用盆式绝缘子闪络电压的影响[J]. 绝缘材料, 2019, 52(4): 33-36, 44.
YANG B L, HAN L J, HAO L C, et al. Effects of metallic particle and ozone treatment on flashover voltage of basin insulator for GIS[J]. Insulating Materials, 2019, 52(4): 33-36, 44.
- [7] 李佳, 杨丽薇, 于佼. GIS/GIL设备中金属微粒污染研究综述[J]. 电工电气, 2022(3): 1-7.
LI J, YANG L W, YU J, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL equipment[J]. Electrotechnics Electric, 2022(3): 1-7.
- [8] 张连根, 路士杰, 李成榕, 等. GIS中线形和球形金属微粒的运动行为和危害性[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4217-4225.
ZHANG L G, LU S J, LI C R, et al. Motor behavior and hazard of spherical and linear particle in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4217-4225.
- [9] 汪佛池, 曹东亮, 杨磊, 等. 微粒陷阱对直流稍不均匀场中球状自由导电微粒运动的影响规律[J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2897-2903.
WANG F C, CAO D L, YANG L, et al. Effect of particle traps on movement of spherical free-conducting particles in slightly inhomogeneous DC field[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2897-2903.
- [10] 王健, 常亚楠, 王靖瑞, 等. 基于捕捉效用分析的直流GIL微粒陷阱设计与参数优化[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 5050-5061.
WANG J, CHANG Y N, WANG J R, et al. Design and optimization of particle traps in DC GIL based on the capture effect analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 5050-5061.
- [11] 詹振宇, 宋曼青, 律方成, 等. 交流环保GIL中微粒运动规律及陷阱抑制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(增刊1): 278-286.
ZHAN Z Y, SONG M Q, LÜ F C, et al. Study on particle movement and trap suppression in AC environmentally friendly GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(S1): 278-286.
- [12] 刘鹏, 张语桐, 吴泽华, 等. ±320 kV直流GIL微粒陷阱关键结构参数分析及优化[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4695-4706.
LI P, ZHANG Y T, WU Z H, et al. Key parameter analysis and structure optimization of particle trap in +320 kV DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4695-4706.
- [13] HAMA H, HIKOSAKA T, OKABE S, et al. Cross-equipment study on charging phenomena of solid insulators in high voltage equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(2): 508-519.
- [14] 海彬, 章程, 王瑞雪, 等. 等离子体沉积类SiO₂薄膜抑制环氧树脂表面电荷积聚[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 375-384.
HAI B, ZHANG C, WANG R X, et al. Plasma depositing SiO₂-like film to suppress surface charge accumulation on epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 375-384.
- [15] 律方成, 董蒙, 颜湘莲, 等. GIL中电极覆膜对金属微粒表面电场及受力的影响[J]. 南方电网技术, 2017, 11(8): 55-60.
LÜ F C, DONG M, YAN X L, et al. Effect of dielectrically coated electrode on surface electric field and force of metal particles in GIL[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(8): 55-60.
- [16] ZHANG L, CHENG H, WEI W, et al. Suppression on particle movement and discharge by nanocomposite film coating on DC GIL electrode surface[J]. IEEE Access, 2021, 9: 126095-126103.
- [17] 倪潇茹, 王靖瑞, 王健, 等. 直流GIL电极覆膜对微粒抑制的极性效应[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2695-2703.
NI X R, WANG J R, WANG J, et al. Polarity effect of DC GIL electrode coating on particle inhibition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2695-2703.
- [18] DU B, YAO H, LIANG H, et al. Multidimensional functionally graded materials (ϵ/σ -MFGM) for HVDC GIL/GIS spacers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(5): 1966-1973.
- [19] WANG J, WANG Z, NI X, et al. Experimental studies on the motion and discharge behavior of free conducting wire particle in DC GIL[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2017, 12(7): 89-91.
- [20] LI X, LIU W, DING D, et al. Metal particle movement and induced insulator flashover under impact vibration generated by switching operation in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 757-766.
- [21] 李文栋, 王超, 陈泰然, 等. 550kV GIS盆式绝缘子小型化设计(二)——介电分布优化[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2743-2752.
LI W D, WANG C, CHEN T R, et al. Compact design of 550kV basin-type spacer in gas insulated switchgear(part II)-dielectric distribution optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2743-2752.

收稿日期: 2023-11-03; 修回日期: 2024-01-03。

作者简介:

陈田(1986-), 男(汉族), 湖北黄冈人, 高级工程师, 主要从事电工材料与器件检测技术的研究;

通信作者: 梁虎成(1992-), 男(汉族), 河南南阳人, 副教授, 主要从事高压GIL/GIS绝缘关键技术的研究。