

直流 GIL 内金属微粒/粉尘面向三支柱绝缘子的 吸附行为与闪络特性

李 玄¹, 尹奕淳¹, 王 媛¹, 边亚琳², 李庆民¹, 王 健¹

(1. 新能源电力系统全国重点实验室(华北电力大学), 北京 102206;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

摘 要: 气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal-enclosed transmission line, GIL)作为构建新能源电力系统不可或缺的物理支撑, 内部三支柱绝缘子由于几何结构复杂、直流电荷积聚严重, 极易吸附残留的金属异物造成表面电荷畸变并诱发沿面闪络, 严重影响直流输电系统的安全可靠运行。据此搭建了三支柱绝缘子电荷测量与沿面闪络试验平台, 观测并分析金属微粒与粉尘吸附的动力学特征行为, 获得了不同异物影响的电荷分布与沿面放电规律, 并从微观角度解释电荷积聚与闪络形成原因。研究结果表明: 金属微粒从绝缘子柱腿顶部逐渐向底部吸附, 腹部吸附量较少并受电场梯度力竖直排布, 电场力和库仑力是积聚式吸附的决定性因素; 粉尘电荷积聚明显影响吸附, 粒子间微观静电力与范德华力是爆炸式扩散的驱动性因素, 比面积与压力决定的静摩擦力是保持稳定吸附的必要因素。金属微粒导致绝缘子顶部呈大量负极性电荷峰、底部微量正极性电荷峰, 支腿中部影响最显著, 线形微粒对电荷积聚和闪络的影响最强、片状与球形微粒影响较弱, 微粒尺寸越长、半径越小, 负极性下闪络电压更低; 粉尘弥散分布形成大面积负极性电荷斑, 电荷积聚量与沿面闪络电压呈负相关, 闪络电压最多降低 32.7%, 极易放电造成危害, 气体电离源、面电导减小和等效电容充电是表面电荷的注入来源。该研究成果可为 GIL 三支柱绝缘子的绝缘设计和故障防护提供理论基础。

关键词: 三支柱绝缘子; 金属微粒; 微纳粉尘; 受力吸附; 沿面闪络

Adsorption Behavior and Flashover Characteristics of DC GIL Metal Particles/Dust Facing Tri-post Insulator

LI Xuan¹, YIN Yichun¹, WANG Yuan¹, BIAN Yalin², LI Qingmin¹, WANG Jian¹

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

Abstract: As an indispensable physical support in constructing new energy power systems, gas insulated lines(GIL) utilize internal tri-post insulator. Due to their complex geometric structures and significant DC charge accumulation, these insulators are prone to attracting residual metallic debris. This can cause surface charge distortion and induce surface flashover, severely impacting the safe and reliable operation of DC transmission systems. To address this issue, we established an experimental platform for tri-post insulator charge measurement and surface flashover tests. The dynamic adsorption behavior of metal particles and dust was observed and analyzed, revealing the charge distribution and surface discharge patterns influenced by different contaminants. The microscopic mechanisms underlying charge accumulation and flashover formation were elucidated. The research findings indicate that metal particles are adsorbed from the top to the bottom of the insulator leg, with minimal adsorption in the midsection, which aligns vertically due to the electric field gradient force. The electric field force and Coulomb force are the decisive factors for cumulative adsorption. Meanwhile, the electrostatic and Van der Waals forces between particles drive explosive diffusion. The specific surface area and pressure-determined static friction are essential for maintaining stable adsorption. Metal particles cause significant negative charge peaks at the top of the insulator and minor positive charge peaks at the bottom, with the middle of the legs being most affected. Linear particles have the strongest impact on charge accumulation and flashover, while flake and spherical particles have a weaker effect. The longer the particle size and the smaller the radius, the lower the flashover voltage under negative polarity. Dust can form large areas of negative charge spots, and the amount of charge accumulation is negatively correlated with surface flashover voltage, which can decrease by up to 32.7%, making discharge highly and

hazardous. The sources of surface charge injection include gas ionization, reduced surface conductivity, and equivalent capacitance charging. These research results provide a theoretical foundation for the insulation design and fault protection of GIL tri-post insulator.

Key words: tri-post insulator; metal particle; micro-nano dust; force adsorption; surface flashover

0 引言

随着构建能源电力互联网成为实现双碳战略目标的必然选择,传统输电系统在远距离、大容量、复杂地理环境与多样化能源输送方面逐渐凸显诸多不足。近年来,我国在特高压交直流工程领域的技术创新与工程建设上取得了显著成就,其中直流气体绝缘金属封闭输电线路(direct current gas insulated metal-enclosed transmission line, DC GIL)具有电能损耗小、传输能量大、敷设灵活性高等优势,在大容量直流输电方面弥补了架空线路和电缆的局限性,具有较高的研究前景和应用价值^[1-3]。

然而,对于直流 GIL 的安全可靠性与绝缘设计,仍面临着较多科学问题: GIL 内以三支柱绝缘子占比居多,其支腿与腹部曲面几何结构较为复杂,导致直流电压下不同区域的气-固界面电荷积聚严重,更易发生沿面闪络^[4-5];同时, GIL 内摩擦振动产生的金属微粒与粉尘易吸附于绝缘子表面,导致电场与电荷畸变且绝缘性能下降^[6-7]。特别当同时面临上述 2 个问题,三支柱绝缘子沿面绝缘性能会显著下降,极易引发沿面闪络故障造成危害。实际运行表明, GIL 内部金属微粒及粉尘诱发的放电故障率高达 20%,其中吸附并污染绝缘子形成沿面闪络的故障案例更不在少数^[8]。

为解决上述问题,已有学者对 GIL 三支柱绝缘子和附着金属异物的绝缘特性开展大量研究。许渊等基于粉尘图法研究了三支柱绝缘子存在金属异物时的电荷分布,发现小尺寸异物附着电荷未沉积,大尺寸微粒尖端沉积电荷并诱发放电,但试验为交流下开展,直流电荷积聚导致的结果尚未可知^[9]。王健等研究了直流电压下金属微粒对 GIL 柱式绝缘子表面电荷积聚的影响,表明金属微粒可引起表面电荷激增,中部激增量较大且两端电性相反,悬浮微粒影响较小,但几何结构较为简单,无法囊括复杂结构吸附情况^[10]。刘鹏等仿真获得了不同缺陷对三支柱绝缘子电场分布影响,表明附着导电颗粒对绝缘危害最大,其次为界面缺陷,但未讨论异物影响下电荷分布^[11]。张广阔采用弱形式偏微分方程优

化气体离子浓度迁移对三支柱绝缘子电荷积聚的影响,发现电压与气压升高均导致电荷积聚速率加快,对金属异物影响下的三支柱绝缘子电荷积聚无深入研究^[12]。胡琦等研究了雷电冲击电压下三支柱绝缘子附着微粒的电荷分布与沿面闪络特性,表明微粒会导致邻近电荷极性反转,异极性电压下更易闪络,但未考虑金属异物的不同吸附状态与尺寸类型等参数对绝缘子性能的影响^[13]。因此针对直流 GIL 三支柱绝缘子,仍须进一步开展金属异物吸附引起的表面电荷积聚畸变与闪络特性研究。

此外,金属异物的尺寸对绝缘子沿面闪络的影响也不可忽略,现有研究多采用毫米级以上的金属异物开展试验,张连根研究了绝缘子表面毫米级金属粉尘的受力运动行为和放电特性,表明径向跳动外轴向和切向也存在扩散运动,但尺寸仍较为庞大^[14]。也有学者从更小尺度分析,梁瑞雪等观测了微米级金属粉尘吸附行为,发现金属粉尘在绝缘子表面存在积聚、扩散等运动模式,但为盆式绝缘子且条件较为简单,且未涉及 GIL 内粉尘对三支柱绝缘子的影响规律^[15]。现有研究将金属粉尘和微粒大多混合在一起讨论^[16],或仅单独研究一种类型^[17-18],但由于尺寸与物化特性差异较大,二者受力吸附与闪络现象完全不同,不能一概而论,仍须对三支柱绝缘子金属微粒与粉尘的不同吸附行为与电荷积聚特性开展对比分析,进一步明晰其放电规律。

为此,本文建立了三支柱绝缘子附着金属异物的电荷测量与沿面闪络试验平台,归纳金属微粒与粉尘吸附的动力学特征,进一步获得微粒与粉尘影响的不同电荷分布与沿面放电规律,为直流 GIL 三支柱绝缘子的绝缘防护与优化设计提供指导。

1 试验平台与试验现象说明

1.1 试验平台结构

本文搭建了三支柱绝缘子表面电荷测量与沿面闪络试验平台,包括 GIL 管道段、直流电压源、模拟温升装置、多轴机械控制装置与电荷测量平台,如图 1 所示。多自由度移动扫描三支柱绝缘子表面电荷测量平台包括有源静电探头、机械臂、有源静

电计、多轴机械控制装置等部件。控制平台操控机械臂带动静电探头对绝缘子表面电位进行扫描,基于反演算法获得表面电荷分布。试验中每次加压后均会立刻测量三支柱绝缘子各点位电荷,分析金属异物对表面电荷的影响。油浴循环加热装置由改造通油导杆、储油罐与高温油泵构成,加热绝缘油并用液泵压入导杆两端,经过热交换提高温度,模拟实际 GIL 运行环境下导杆高载流发热的情况。本文首先预加导杆发热温度为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,壳体温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,保证三支柱绝缘子所受温差为 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$,与 GIL 实际工况保持相同情况,再开展后续试验^[19]。

模拟 GIL 同轴圆柱腔体的高/低压电极为半径 $30\text{ mm}/130\text{ mm}$ 、长为 400 mm 的铝制圆柱,厚度为 5 mm ,通过仿真分析其长度预留足够,对绝缘子电场与电荷分布无影响。试验采用 100 kV 三支柱绝缘子缩比样品,以原料为氟化双酚 A 二缩水甘油醚的含氟环氧树脂作为基体材料,甲基四氢苯酐作为固化剂,2,4,6-(二甲基氨基甲基)苯酚作为促进剂,内、外径分别为 70 mm 和 240 mm ,腹部与支腿通过铝制嵌件将高压导杆和接地外壳相连。考虑实际工程 GIL 故障解体残留的不同类型污染物,本文选取金属微粒与粉尘 2 种截然不同性质的金属异物开展试验:选取特征直径为 0.1 mm 、长为 5 mm 的线形微粒,边长为 2 mm 、厚度为 0.15 mm 的片状微粒,直径为 1 mm 的球形微粒;采用直径为 $15\text{ }\mu\text{m}$ 的细小粉尘颗粒,实物如图 2 所示。为排除试验前可能存在的残余电荷干扰,采用纯净的无水乙醇擦拭三支柱绝缘子表面,并用离子风机吹散剩余电荷,放入干燥箱中 10 h 保持洁净。

试验现象表明,金属微粒在三支柱绝缘子上的吸附存在随机性,难以在同一位置下重复试验获得普适性规律,具体特征如图 3 所示。为主要聚焦于实际工程中支腿处最危险的异物吸附现象,并方便绝缘子支腿的表面电荷测量,故将柱腿竖直向下放置,通过半接触导电胶将微粒固定在离绝缘子爬电距离最短的轮廓线上,距地电极 20 mm 、 40 mm 与 60 mm 不同位置分别代表支腿端部、中部与顶部;在距地电极 80 mm 处的绝缘子腹部切向固定微粒。所用金属粉尘为铝粉,通过电子精密天平称量 0.1 g (误差量 $\leq 0.1\%$),放置在距三支柱绝缘子柱腿 10 mm 接地外壳表面。进一步试验发现,在加压过程中部分粉尘会吸附于绝缘子表面,对电荷积聚与沿面闪络造成影响,由于吸附区域和特征较为稳定,故采取自

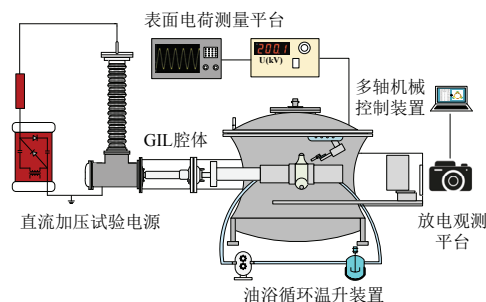


图 1 试验电路与测量回路示意图

Fig.1 Diagram of test circuit and measurement circuit

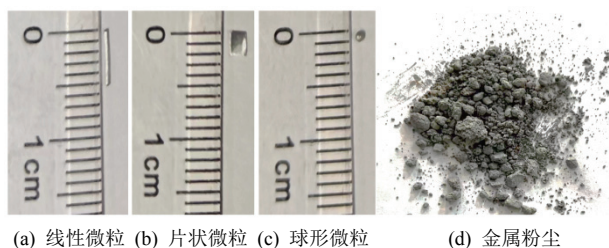


图 2 金属异物的尺寸形貌实物图

Fig.2 Physical figure of metal contaminant size and shape

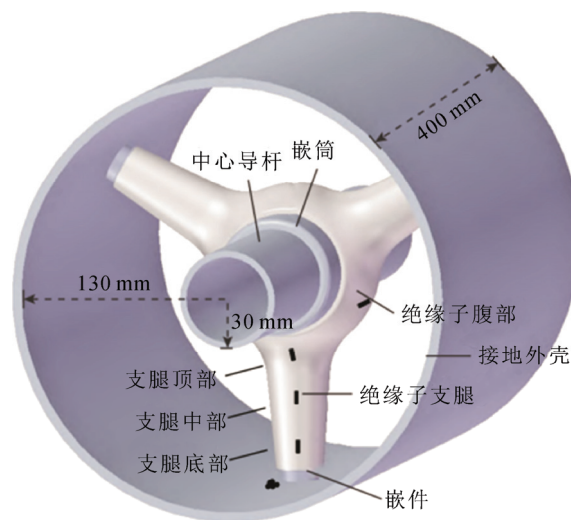


图 3 金属微粒与粉尘布置摆放的特征区域

Fig.3 Characteristic area for the arrangement of metal particles and dust

然加压下粉尘吸附的方法进行试验。在固定好微粒或放置粉尘后,将试验腔体充入 0.1 MPa 的 SF_6 气体,启动油浴装置持续加热中心导杆,温度达到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后再进行加压。

在模拟导杆通流热效应后,对三支柱绝缘子进行初步预加压试验,发现加压 2 h 后表面电荷值趋于饱和。升压方式为阶梯加压,升压速度为 2 kV/s ,

直至沿面闪络, 观测现象并记录闪络电压。为防止放电存在随机性并增强结论普适性, 每次试验均会在相同条件下重复开展 5 次并取平均值。

1.2 金属微粒与粉尘的吸附特性

本节研究金属微粒与粉尘 2 种不同类型异物对三支柱绝缘子的吸附特征。首先将 0.1 g 线形微粒放置于接地外壳距绝缘子支腿 10 mm 处, 持续施加正直流电压直至发生沿面闪络, 观察金属微粒在三支柱绝缘子表面的吸附行为, 如图 4 所示。

随着电压升高, 金属微粒在三支柱绝缘子支腿顶部、中部和底部会集中吸附, 腹部也有少量附着。36 kV 时微粒开始向绝缘子支腿顶部迁移, 在高压电极附近产生明显积聚式吸附并紧密排布; 随后在 64 kV 支腿中部形成微粒大面积附着区域, 呈现吸附量大且分散区域较广的特征; 随电压升至 78 kV, 少量微粒会吸附在支腿底部, 靠近低压电极并均匀分散于底面, 86 kV 时绝缘子侧面腹部吸附少量微粒。直至闪络前, 支腿微粒相对绝缘子截交线倾斜角度较小, 呈细线状衔接在地电极与高压导杆中央部分, 形成线形通路; 腹部微粒沿绝缘子轮廓切向附着, 并与导杆方向保持垂直分布。

另外, 再将 0.1 g 微纳粉尘放到接地外壳同样位置, 持续阶梯加压并观测粉尘的动态吸附过程。如图 5 所示, 28 kV 时粉尘逐渐起举并吸附至导体附近的支腿顶部, 形成积聚式吸附并产生弧状散开痕迹, 以支腿顶部为中心点向周围扩散; 随着电压升高, 粉尘斑吸附程度加剧, 在 70 kV 时瞬间产生爆炸式扩散并于支腿中部形成反曲状粉尘晕斑; 在 78 kV 时, 该晕斑上会吸附更密集浓度的粉尘, 在支腿曲面底部也有少量粉尘均匀吸附, 并逐渐向顶端蔓延, 在绝缘子腹部则呈细线状切向分布。直至达到击穿电压时, 粉尘沿所在截交线发生沿面闪络, 形成贯穿性放电通路并烧蚀。

进一步探究电压幅值与表面电荷对三支柱绝缘子吸附异物的影响, 将金属微粒和粉尘分别放置于支腿侧外壳处, 施加不同幅值电压并持续不同时间, 视为表面电荷部分或完全积聚。每次开盖擦拭异物称取其吸附量并取均值, 如表 1 所示, 随电压升高, 吸附于三支柱绝缘子上的金属微粒与粉尘量逐渐增大, 升压达到饱和后逐渐趋于稳定; 随电压作用时间增加, 电荷积聚逐渐严重, 微粒的吸附量也有所增多, 对粉尘的吸附量增加更为明显。该现象说明: 电场力是造成金属异物起举并吸附在三支

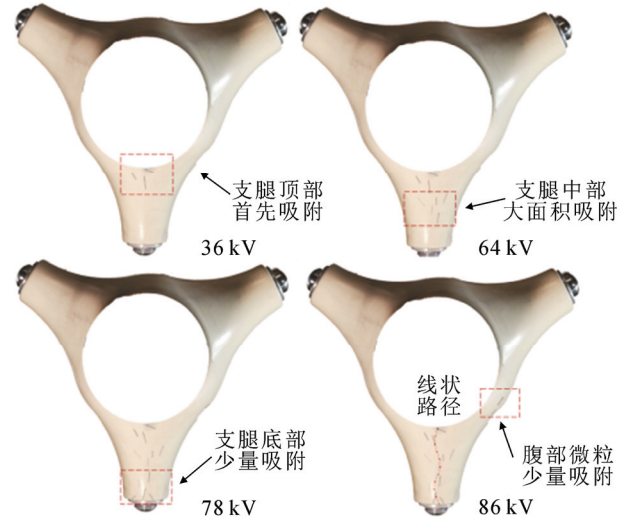


图 4 阶梯升压下微粒在三支柱绝缘子上的吸附特征
Fig.4 Characteristics of particles adsorbed on tri-post insulator under step-up voltage rise

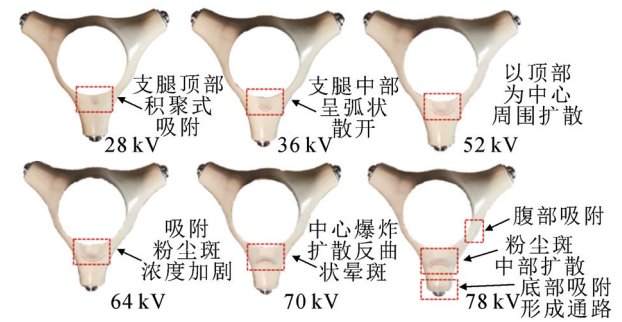


图 5 阶梯升压下粉尘在三支柱绝缘子上的吸附特征
Fig.5 Characteristics of dust adsorption on tri-post insulators under step-up voltage rise

表 1 金属异物吸附量随电压与表面电荷量变化
Table 1 The amount of metal contaminants adsorbed varies with voltage and surface charge

异物类型	时间/h	吸附量/g		
		30 kV 时	60 kV 时	90 kV 时
金属微粒	0.1	0.001 3	0.004 9	0.009 6
	1.0	0.002 8	0.006 5	0.012 1
	2.0	0.003 6	0.007 4	0.014 5
微纳粉尘	0.1	0.005 2	0.013 0	0.028 3
	1.0	0.013 8	0.021 7	0.035 1
	2.0	0.021 5	0.030 2	0.042 7

柱绝缘子表面的主导条件, 而不断积聚并累积的表面电荷导致异物更易吸附于三支柱绝缘子表面, 尤其对微纳粉尘的吸附起关键性作用。

1.3 金属微粒与粉尘的受力吸附模型

进一步研究金属微粒和粉尘在绝缘子不同位

置的特殊积聚吸附与扩散现象，对附着异物进行受力分析。将金属微粒与粉尘等效为不同尺度的单一点电荷并进行计算，归纳金属微粒与微纳粉尘的典型受力分布，相关物理量与计算式如表 2 所示。

其中， r 、 a 分别为微粒、粉尘半径； k_r 、 k_a 为微粒、粉尘异物静电修正系数，附着均取 0.832； E 为局部畸变场强； ε_0 、 ε_r 为所处材料的介电常数；金属微粒、粉尘所带电荷量分别为 $q_m=2\pi\epsilon r l E$ 、 $q_d=2\pi\epsilon a^2 E$ ； r' 、 a' ， q_m' 、 q_d' 为邻近微粒、粉尘的半径与电荷量，忽略弛豫效应对带电量的影响^[20]； ρ_{Al} 、 ρ_{gas} 分别为铝和 SF₆ 密度； η 为 SF₆ 粘性系数； v 为异物附着速度； q' 为异物附近绝缘子表面电荷量； ω 为表面黏附功； h 为粉尘粒子间距； z_0 为范德华力平衡距离； Re 为表征浮动的雷诺数，可描述粉尘间曳力； μ 为环氧树脂与铝之间的静摩擦系数； F_{qx} 、 F_{gx} 、 F_{cx} 分别为库仑力、介电泳力与范德华力在 x 方向的分量； θ 为金属异物与绝缘子曲面外法线的竖直方向夹角^[21]。

金属异物在绝缘子上的受力如图 6 所示，微粒吸附于三支柱绝缘子表面时，电场力 F_q 、电场梯度力 F_g 和库仑力 $F_{q'-q'}$ 占主导作用。加压后由地电极传导荷电并开始起举，随电压升高尖端畸变电场力与梯度力显著增大，当 x 方向合力大于重力 G 时，微粒开始沿电场线方向迁移。由于电极为相反极性电压，支腿顶部表面感应异极性电荷，故微粒受库仑引力影响，沿电场线方向最先吸附至支腿顶部。而支腿中部电场畸变严重，微粒受电场力与梯度力牵引大量吸附，中部高法向电场区域范围较广，吸附面积较宽。随电压进一步升高，电场力克服支腿底端同极性电荷的库仑斥力与重力，少量微粒均匀吸附在支腿近地端。腹部距离较远、电场较弱不易吸附，但随腹部同极性电荷产生的库仑力与电场力增加，仍吸附少量微粒。此外，附着在柱腿的微粒大多沿高压-地电极方向竖直排布，是由于沿该方向受微粒端部库仑力形成的力矩作用，电场畸变严重，受电场梯度力更高，微粒吸附更稳定。

进一步分析微纳粉尘在三支柱绝缘子表面的受力情况，除重力、电场力、库仑力和电场梯度力影响外，范德华力 F_c 、曳力 F_v 与摩擦阻力 F_f 在粉尘团聚与扩散过程中起重要作用。粉尘重力较小更易起举，而曳力导致运动粉尘易漂浮空中，保持相对静止状态并呈弥散分布。电压升高后随电场力作用粉尘上升并与绝缘子缩短距离，绝缘子表面电荷

表 2 附着金属微粒与微纳粉尘的受力分析

Table 2 Force analysis of attached metal particles and dust			
类型	受力名称	计算式	数量级/N
金属微粒	重力(去浮力)	$G = \pi r^2 l (\rho_{Al} - \rho_{gas}) g$	10^{-6}
	电场力	$F_q = k_r q_m E $	$10^{-6} \sim 10^{-7}$
	库仑力	$F_{q'-q'} = \frac{q_m q'_m (r - r')}{4\pi\epsilon r - r' ^3}$	$10^{-7} \sim 10^{-9}$
	电场梯度力	$F_g = 2\pi r^2 l \epsilon_0 \epsilon_r \nabla E^2 $	$10^{-8} \sim 10^{-10}$
	摩擦阻力	$F_f = 6\pi\eta a v + \mu(G - F_{qx} - F_{gx}) \cos\theta$	$10^{-8} \sim 10^{-11}$
微纳粉尘	重力(去浮力)	$G = \frac{4}{3}\pi a^3 (\rho_{Al} - \rho_{gas}) g$	10^{-10}
	电场力	$F_q = k_a q_d E $	$10^{-8} \sim 10^{-9}$
	库仑力	$F_{q'-q'} = \frac{q_d q'_d (a - a')}{4\pi\epsilon a - a' ^3}$	$10^{-9} \sim 10^{-11}$
	电场梯度力	$F_g = 2\pi a^3 \epsilon_0 \epsilon_r \nabla E^2 $	$10^{-11} \sim 10^{-13}$
	摩擦阻力	$F_f = \mu(G - F_{qx} - F_{gx} - F_{cx}) \cos\theta$	$10^{-9} \sim 10^{-11}$
	范德华力	$F_c = \frac{3}{4}\pi\omega a \left(1 + \frac{1}{4}\left(\frac{h}{z_0}\right)^8 - \left(\frac{h}{z_0}\right)^2\right)$	$10^{-8} \sim 10^{-10}$
	曳力 (气体阻力)	$F_v = \left(\frac{24}{Re} + \frac{6}{1 + \sqrt{Re}} + 0.4\right)\pi a^2 \frac{\rho_{gas} v^2}{2}$	$10^{-10} \sim 10^{-11}$

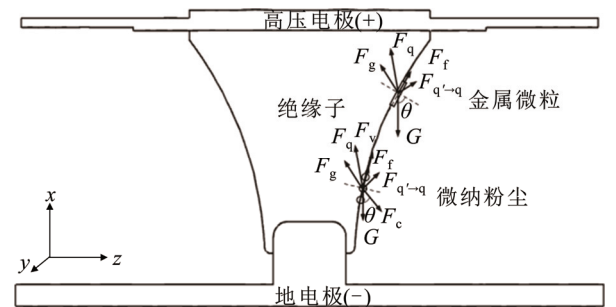


图 6 金属异物在三支柱绝缘子上的受力吸附图

Fig.6 Force adsorption diagram of metal contaminants on tri-post insulator

引起的库仑力与范德华力增强，导致粉尘积聚式吸附至支腿顶部，随电场畸变与大范围电场梯度力影响，支腿中部吸附大量粉尘。由于粉尘颗粒吸附与气体电离产生的大量异极性电荷，粒子之间荷电产生排斥的库仑力、粉尘间的范德华力占据主导作用，粉尘斑中心突然爆炸并扩散形成反曲状晕斑，粒子间距增大，库仑力与范德华力大幅减弱保持受力平衡。随后支腿底部电场力逐渐克服库仑力，粉尘开始逐渐吸附并沿柱腿曲面均匀分布，绝缘子腹部与侧面同样吸附大范围粉尘并形成粉尘斑。金属微粒与粉尘附着绝缘子的受力特征如表 3 所示。

此外，由于附着在绝缘子上的微纳粉尘重力 G 较小，法向压力形成的静摩擦力 F_f 成为粉尘吸附后维持受力平衡的关键因素。三支柱绝缘子柱腿曲面轮廓由不同角度的圆弧相切并旋转构成，当金属异物附着在绝缘子不同位置时，支腿处曲面的法向夹

角 θ 不同会导致静摩擦力显著变化, 根据其合成分量提出式(1)的粉尘稳定吸附判据。

$$\frac{1}{2}\mu(G - F_{qx} - F_{gx})\sin 2\theta + F_{qy} \geq G + F_{cy} \quad (1)$$

式中: F_{qy} 、 F_{cy} 为库仑力和范德华力的 y 方向分量。绝缘子支腿顶部曲面法向夹角 θ 较小, 导致电场力、库仑力与范德华力沿表面法向分量较强, 支腿顶部静摩擦力 F_f 与电场力较大, 克服重力与库仑力合力的下落, 使不等式(1)成立, 粉尘稳定吸附。随附着位置下降 θ 增大, 正法向分量减弱导致静摩擦力减小, 不等式(1)不满足, 难以稳定吸附, 直至电场增加导致正压力增大才能吸附。金属异物的比表面积 S 也是造成荷电与摩擦力变化的重要原因, 粉尘比表面积大, 电荷传导量增加, 静摩擦力更强。经过计算, 倾角 θ 由 $50^\circ \sim 80^\circ$ 变化时, 支腿底部附着微纳粉尘的静摩擦力相较于顶部可减小 75.4%, 严重影响金属粉尘的吸附行为。

上述过程说明, 畸变电场力与绝缘子表面的范德华力以及表面电荷的库仑引力是引起金属微粒在支腿积聚式吸附的决定性因素; 粉尘粒子随电场畸变导致电晕放电沉积大量电子, 库仑斥力与范德华力是产生爆炸与扩散式吸附的驱动性因素, 微纳粉尘与绝缘子间较大接触面与压力形成的静摩擦力是保持稳定吸附的必要性因素。

2 金属异物对绝缘子的表面电荷积聚特性

2.1 附着金属异物对电荷积聚的影响规律

首先测量并分析不同位置金属异物影响的三支柱绝缘子表面电荷积聚特性, 以微粒所在轮廓线为基准的电荷曲线如图 7 所示。无异物附着时, 靠近高压端的支腿表面呈正极性电荷峰, 接近地电极侧逐渐形成负极性电荷峰。附着金属微粒后, 会将原来洁净绝缘子表面正极性电荷峰完全抵消, 引起支腿顶部形成更高幅值的负极性电荷峰, 在底部感应微量正极性电荷。随位置向导杆靠近, 负极性电荷峰逐渐向支腿顶部迁移, 正极性电荷峰远离支腿底部。腹部吸附时并感应大量负极性电荷, 正极性电荷与零电荷带分布较窄且幅值较低。

另外, 绝缘子支腿中部附着微粒时, 正、负极性电荷的特征峰幅值明显且范围较宽, 表面电荷积聚最为严重, 容易产生沿面闪络加剧故障风险。与图 4 中线状通路的现象相符, 说明支腿中部有更多金属微粒吸附聚集, 促进放电路径的形成。

表 3 金属微粒与微纳粉尘吸附的主要影响因素

Table 3 The main influencing factors of adsorption of metal particle and dust

异物类型	吸附的主要作用力与影响过程
金属微粒	受电场力 F_q 起举后, 库仑引力 $F_{q-q'}$ 与电场力吸附于顶部, 电场梯度力 F_g 影响排布
微纳粉尘	受 F_q 起举, $F_{q-q'}$ 和范德华力 F_c 吸附顶部, 库仑斥力 $F_{q-q'}$ 与 F_c 主导爆炸式扩散, 静摩擦力 F_f 保持稳定吸附

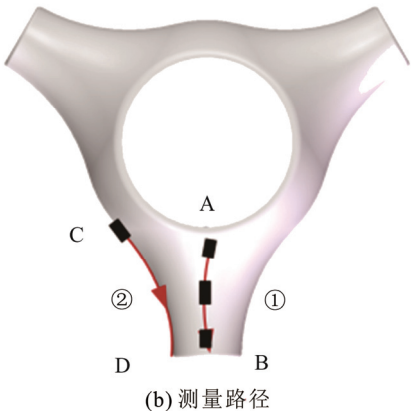
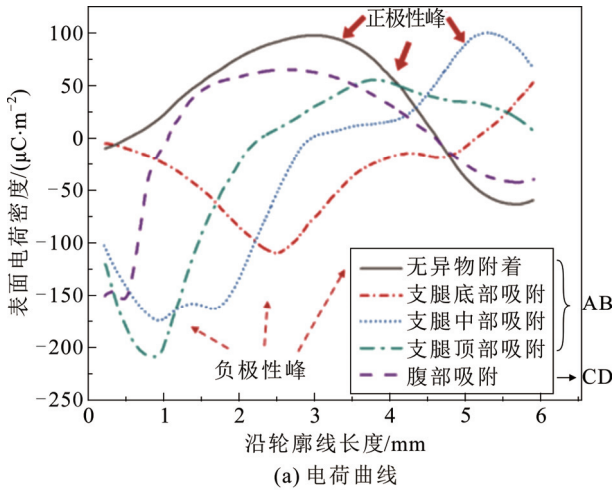


图 7 不同位置微粒附着的绝缘子轮廓表面电荷曲线

Fig.7 Insulator profile surface charge curve with particles attached at different locations

进一步针对上述特征, 分析三支柱绝缘子支腿中部附着不同种类异物的电荷积聚情况, 表面电荷曲线如图 8 所示。从图 8 中可见, 无论何种类型异物均会导致支腿顶部积聚大量负电荷, 支腿底部积聚少量负电荷, 而球形微粒影响最为微弱; 片状微粒产生的双极性电荷斑稍强; 线形微粒会形成更为明显的双极性电荷峰。此外, 粉尘附着时会导致绝缘子支腿顶部与中部形成大面积负极性电荷斑, 支腿底部形成微量正极性电荷斑。中部相较顶部电荷量稍低, 印证了粉尘在顶部积聚吸附浓度高、中部产生爆炸式扩散浓度较低的动态吸附规律。

上述试验说明,三支柱绝缘子支腿中部吸附微粒时产生双极性电荷斑的影响最为严重,且微粒为线状时影响范围与电荷量最大;微纳粉尘吸附会严重导致支腿和腹部产生大面积负极性电荷斑,进而加剧粉尘进一步扩散与沿面闪络的产生。

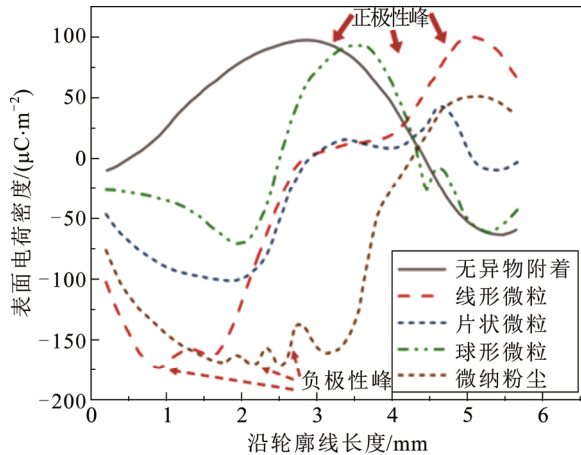
2.2 附着金属异物的表面电荷积聚原理

2.2.1 电流传导的宏观分析

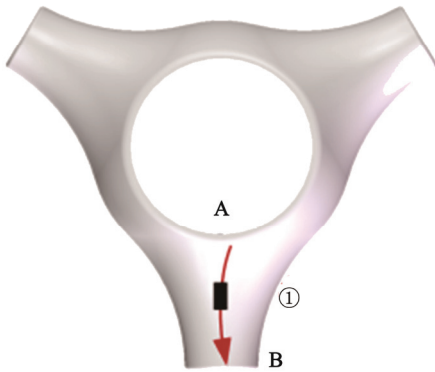
首先,由于长时间直流电压作用,绝缘子体电流 J_v 逐渐从容性场转化为阻性场,由体电导率 γ_v 与体法向场强 E_{vn} 表征,即 $J_v = \gamma_v E_{vn}$;而 SF_6 气体中局放导致的正负离子产生、迁移与复合过程,载流子浓度不均形成扩散,注入绝缘子表面形成电荷积聚,正负离子迁移过程如式(2)所示。

$$\begin{cases} \frac{\partial n^+}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - k_R n^+ n^- - \nabla \cdot (n^+ b^+ E) + D^+ \nabla^2 n^+ \\ \frac{\partial n^-}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - k_R n^+ n^- + \nabla \cdot (n^- b^- E) + D^- \nabla^2 n^- \end{cases} \quad (2)$$

式中: n^+ 、 n^- 为正负离子浓度; n_{IP} 为自然辐射下正负离子对的产生速率; k_R 为复合系数; b^+ 、 b^- 为正



(a) 电荷曲线



(b) 测量路径

图8 不同种类微粒附着的绝缘子轮廓表面电荷曲线

Fig.8 Insulator profiles surface charge curve with particles attached in different types

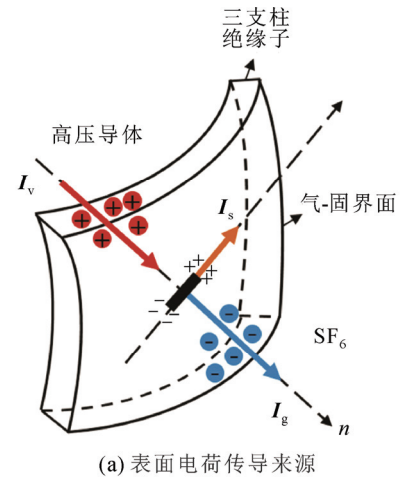
负离子迁移速率; D^+ 、 D^- 为正、负离子扩散系数。则气体侧电流密度 J_G 为:

$$J_G = eE_{Gn}(n^+ b^+ + n^- b^-) - e \nabla (D^+ n^+ + D^- n^-) \quad (3)$$

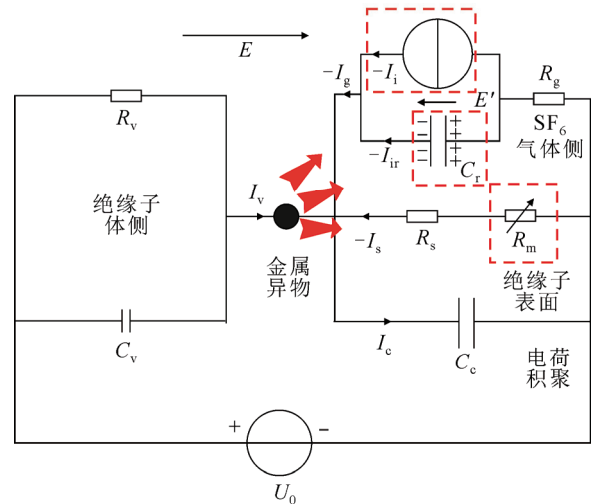
式中: E_{Gn} 为气体法向场强; e 为元电荷。此外,绝缘子面电流由表面电导率 γ_s 与切向场强 E_{st} 表征,即 $J_s = \gamma_s E_{st}$,在洁净绝缘子表面时面电流影响较小,但在绝缘子附着异物的情况下,沿面电流影响较大,不可忽略。故表面电荷积聚来源^[22]为:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \gamma_v \cdot E_{vn} - \gamma_g \cdot E_{Gn} - \nabla \cdot (\gamma_s \cdot E_{st}) \quad (4)$$

式中: γ_g 为 SF_6 气体电导率。温度梯度会导致绝缘子不同区域电导率差异性增大,进一步影响表面电荷积聚与电场分布。进一步直观表现表面电荷积聚形式如图9(a)所示,由导体侧流出的体电流密度 J_v 流入气-固界面形成面电流密度 J_s ,被 SF_6 侧迁移的离子电流密度 J_G 抵消,剩余电荷积聚在绝缘子表



(a) 表面电荷传导来源



(b) 异物附着的电荷传导等效电路

图9 三支柱绝缘子的界面电流传导等效过程

Fig.9 Equivalent process of current conduction at the interface of tri-post insulator

面。本文提出三支柱绝缘子表面电荷积聚等效电路如图 9(b)所示, 主路电流 I_v 由体电流密度 J_v 体积分得出, 支路电流为气体电离电流 I_G 、表面传导电流 I_s 、表面电荷充电电流 I_c , 由流入绝缘子不同位置表面的曲面积分得出。 U_0 为高压电极电位, R_v 、 C_v 为绝缘子等效容阻性场参数, 由体电导率与介电常数共同决定, R_s 为面电导率确定的表面电阻, R_g 为 SF_6 电导率等效的气体电阻, I_i 为电离扩散形成的气体离子流, C_c 为表征绝缘子表面电荷积聚的相应拓扑元件。

当三支柱绝缘子表面附着金属异物时, 一方面, 附着部分面电导率显著升高, 表现为支路等效电阻 R_m 的减小, 注入绝缘子表面的负极性电流 I_s 显著增大; 另一方面, 高压端附加正向电场 E 作用下, 由于静电感应金属异物荷电呈表面分布, 并按内部附加电场 E' 重新反向排布, 导致近地端感应正极性电荷、远地端感应负极性电荷, 表现为异物与电极间等效电容 C_r 产生感应电荷 Q_r , 形成等效电流 I_r 注入表面。此外, 金属异物端部曲率较高, 导致 SF_6 电离强度高并迁移形成离子流, 表现为电流源 I_i 的输入。采用拉式变换计算等效电路中支路 C_c 表面电荷的注入电流, 其通解为:

$$I_c(s) = \frac{\frac{U_0 C_c}{R_v} + I_i C_c}{sA + B} + \frac{\left(\frac{C_v C_c}{R_m} + \left(\ln \frac{R}{x_1} / \ln \frac{R}{r} \right) \frac{C_r C_c}{R_g} \right) U_0 s}{sA + B} \quad (5)$$

式中: s 为 Laplace 算子; A 为电路中 C_v 、 C_r 、 C_c 互电容之和; B 为 R_v 、 R_s 、 R_m 自电阻之和; r 、 R 为同轴圆柱电极内外半径; x_1 为异物与高压电极的距离。从式(5)可见, 随着等效电容 C_r 增大、气体电离 I_i 增加, 等效电阻 R_m 减小, 均会使 C_c 等效的电荷充电电流 I_c 增加, 表现为绝缘子表面积聚电荷斑。此外, 支腿顶部异物距离 x_1 较小, 等效电容高可感应大量负极性电荷, 根据倾角 θ 确定异物与电极组成的非平行板电容器 C_r 为:

$$C_r = \frac{\varepsilon a}{\tan \theta} \ln \frac{x_1 + l \sin \theta}{x_1} \quad (6)$$

式中: a 、 l 分别为异物半径和长度。当金属异物吸附于不同位置时, 倾角 θ 从支腿顶部到底部逐渐增大, 感应电容 C_r 相应减小, 导致离子迁移电流减弱, 影响程度降低。对表面充电电流 I_c 进行时间积分, 获得金属异物影响下表面电荷量 Q_T 为:

$$Q_T = \int_0^t L^{-1}(I_c(s)) dt = \left(\frac{D}{B} + \frac{E}{A} \right) (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (7)$$

式中: D 、 E 分别为式(5)中分式的分子项, 即 U_0 、 I_i 电源项和 C_r 感应电容项, 充电时间常数 $\tau = A/B$, 由总电容与电阻共同决定。在极化过程中, 随气体电离注入与金属异物感应电荷传导, 表面电荷逐渐达到饱和并稳定, 异物附着导致充电时间 τ 增加。

取附着金属异物的三支柱绝缘子环氧基体与 SF_6 气体中任意单位点 ij 的体/面积微元量 Ω , 获取微元电势差 V_i 、 V_j 与电位移和电场强度 D_i 和 E_j 。相关计算见式(8), 其中 $\gamma_{v,g,s}$ 为上述绝缘体-气-面电导率, L 、 S 分别为微元长度 1 mm 和面积 1 mm², x_1 、 r 为微元与中心导体距离和半径, 分别取为 60 mm 和 30 mm, 根据电导率与介电常数计算获得绝缘子体侧、表面和气体侧等效电阻 $R_{v,g,s}$ 与电容 C_v 、 C_c [23]。取前述异物尺寸 a 、 l 为 0.1 mm 和 5 mm, 附着倾角 $\theta = 50^\circ$, 根据式(6)计算可得 C_r , 因异物增大的表面电导率则取均值算得 R_m , 根据离子流传导对微元进行面积分, 得等效气体电流源 I [13]。将上述元件参数代入式(7)计算, 去除异物影响后进行比较, 对暂态电流时间积分即可获得宏观的表面电荷积聚量。

$$\begin{cases} R_{v,g,s} = \frac{L}{\gamma_{v,g,s} S} \\ C_v = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(x_1/r)} \\ C_c = \frac{\int_{\Omega} D_i \cdot E_j d\Omega}{(V_i - V_j)^2} \end{cases} \quad (8)$$

该电荷积聚量为三支柱绝缘子表面固定异物时特征点位的数据。图 10 表征了表面电荷积聚随时间变化曲线, 其中横纵坐标分别为绝缘子附着异物和洁净时, 电荷积聚量 Q 与充电时间 T 的比值, 定义无量纲数 $|Q_T/Q|_{\text{Source}}$ 与 $|Q_T/Q|_{\text{React}}$ 分别代表电源与感应电荷的充电比值曲线, $|Q_T/Q|_{\text{Total}}$ 为总电荷充电比值曲线, T_r 、 Q_r 为附着异物的电荷积聚饱和时间与荷电量。可见, 当电压作用时间 $T_r > 2T$ 时, 绝缘子表面电荷量 Q_r 基本达到饱和, 最大电荷积聚量达到无异物绝缘子 Q 的 5 倍。

2.2.2 电荷沉积的微观分析

三支柱绝缘子受金属异物影响的离子迁移与电荷积聚过程如图 11 所示。微粒尖端场强畸变严重, 电子崩加速发展形成流注, 电晕放电起始后形成不稳定的正负离子区域。腹部电场线朝向 SF_6 气体侧, 流注内发出的电子沿电场线反向传导至柱腿表面积聚负电荷; 支腿近地端的电场线朝向绝缘子,

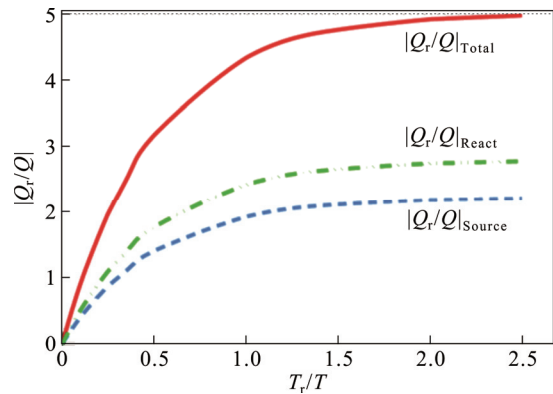


图 10 三支柱绝缘子表面电荷积聚的饱和曲线

Fig.10 Saturation curve of charge accumulation on the surface of tri-post insulator

流注内正离子会沿电场线顺移至表面积聚正电荷。此外，静电感应产生的电流 J_t 传导表面形成双极性电荷斑，面电流 J_s 增大导致正负电荷迁移。

当支腿中部附着微粒时沿面切向场强最大，电晕放电产生的离子受电场力更易沿电场线移至绝缘子表面，此时电荷斑分布最广，累积注入电荷量最高。绝缘子腹部与支腿顶部法向正场强较大， J_{vn} 向内注入电流并积聚正电荷，微粒附着时附加场强容易导致负电荷迁移，形成负极性电荷斑。支腿底部由于法向负场强较大， J_{Gn} 向外输出电流并积聚负电荷，正电荷容易迁移并形成正极性电荷斑。当微粒为片状时端部电场畸变较弱，而球状微粒由于接触面与曲率极小，电荷量传导较低，畸变边界电场更加微弱，故从气体侧电离程度与等效电容感应电流均难以向绝缘子表面注入大量异极性电荷，对三支柱绝缘子表面电荷的影响较弱。

当粉尘吸附于绝缘子表面时，微尺寸和高比表面积使得电子容易吸附荷电极化，但界面电场畸变较弱，粒子间隙先导头部流注发展较慢，粒子间微弱局放产生的电子崩占主导作用，金属原子由于强场发射导致电子逸出后，被表面电荷吸引并沉积在粉尘底部。此外，粉尘粒子外部包围的 SF_6 气体吸收电子形成正离子后产生流注，电负离子沿电场线移动至表面，增大气体侧传导电流 J_{Gn} ，导致绝缘子表面大量呈现负极性电荷积聚。金属微粒与粉尘影响下的电荷积聚行为如表4所示。

2.3 三支柱绝缘子附着异物的电场仿真

保持上述试验条件，对附着异物的三支柱绝缘子电场进行仿真分析。缩比模型下柱腿附着微粒的绝缘子电场分布见图12(a)，可见三支柱绝缘子附着

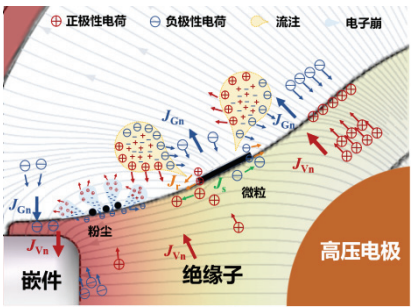


图 11 金属异物附着下的绝缘子表面电荷积聚过程

Fig.11 Process of surface charge accumulation on insulators under attachment of metal contaminants

表 4 金属微粒与粉尘影响下的电荷积聚行为

Charge accumulation behavior under the influence of metal particle and dust	
异物类型	影响三支柱绝缘子的电荷积聚行为
金属微粒	尖端电场畸变，流入/出气体离子流 J_{Gn} 增大，静电感应双极性电荷 J_t 流入，面电流 J_s 增加，形成双极性电荷斑
微纳粉尘	粒子间局放逸出电子，难以捕获正离子，流入负极性电流 J_t ，流入气体离子流 J_{Gn} 增大，形成负极性电荷斑

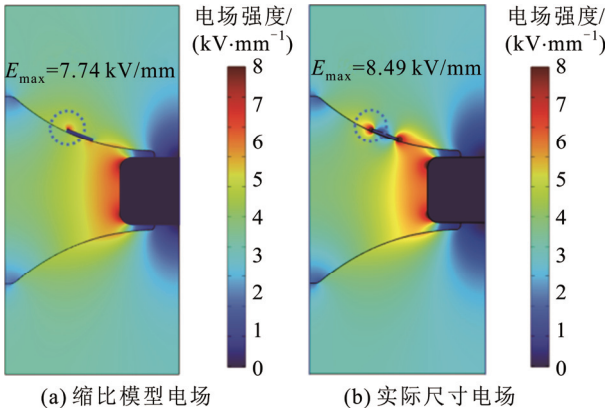


图 12 三支柱绝缘子支腿处附着微粒的电场分布

Fig.12 Electric field distribution of particles attached to the leg of tri-post insulator

微粒的远地侧感应负法向电场，则气体侧电流流入绝缘子并积聚负电荷；微粒近地侧感应正法向电场，则绝缘子体电流流出并积聚正电荷。

进一步对500 kV实际工程三支柱绝缘子进行电场仿真，附着异物实际绝缘子电场分布见图12(b)。结果表明，洁净绝缘子的最大场强为6.81 kV/mm，电场不均匀度为1.67，最大误差为5.4%，与缩比模型电场分布类似。此外，相较于缩比模型，单一微粒相对尺寸小且效果较弱，电场线密度范围均有增加，附着微粒尖端最大场强为8.49 kV/mm，相比增

大 9.7%。这是由于仿真网格剖分局限性, 缩比模型中微粒尺寸相对较大、模拟曲率不足导致电场畸变弱, 气体侧负离子传导入少。故缩比模型可一定程度反映实际绝缘子的电场分布情况, 但对金属异物端部电场畸变值仍存在误差。

为验证油浴循环加热对绝缘子温度加载试验与仿真的一致性。图 13(a)、(b)分别为红外成像与仿真设置导杆 60 °C/外壳 20 °C 时的温度场分布, 绝缘子呈现腹部温度较高、支腿底部温度呈梯度下降的趋势, 二者分布特征相对一致。由于试验中气体浮动形成的热对流使 SF₆ 分子密度减小, 集中向绝缘子顶部流动, 上端支腿温度稍高于两侧支腿, 并对表面电荷积聚结果产生影响。经计算由流体传热造成的绝缘子温差达 12.4%, 场强值误差为 10.3%, 后续研究可考虑流场对温度的影响。

3 三支柱绝缘子附着异物的沿面放电规律

3.1 三支柱绝缘子附着异物的沿面闪络特性

本节研究电压极性、电荷积聚、附着位置与异物尺寸等不同条件对三支柱绝缘子沿面闪络影响。附着异物的绝缘子闪络痕迹如图 14 所示, 当微粒吸附时, 支腿处放电痕迹为沿柱腿中心的曲线, 穿过微粒发展至地电极, 腹部则会沿侧面贯穿电极; 当粉尘向支腿顶部吸附蔓延后扩散至中部, 并与底部地电极周围粉尘连通形成短路区域。

附着不同类型异物的三支柱绝缘子闪络电压如图 15 所示。粉尘导致的闪络电压最低, 其次为线形和片状微粒, 球形微粒附着时闪络电压较高。随着加压时间增加, 表面电荷积聚严重, 附着异物的绝缘子闪络电压均有下降, 微纳粉尘下降最为严重, 线、片、球形微粒电压降低较弱, 与表面电荷影响程度类似, 且负极性下降最多达 32.7%。

将微粒附着于绝缘子支腿、腹部等不同位置, 不同极性电压的闪络特性如图 16 所示, 支腿中部和

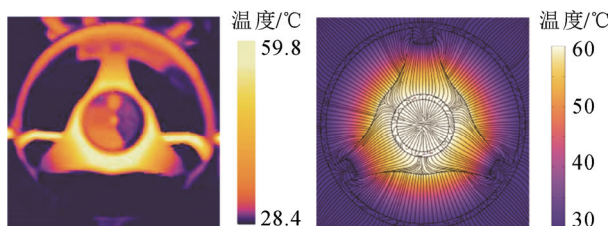


图 13 三支柱绝缘子导杆加热后的温度试验与仿真图

Fig.13 Experimental and simulation plots of temperature after heating of tri-post insulator guide bars

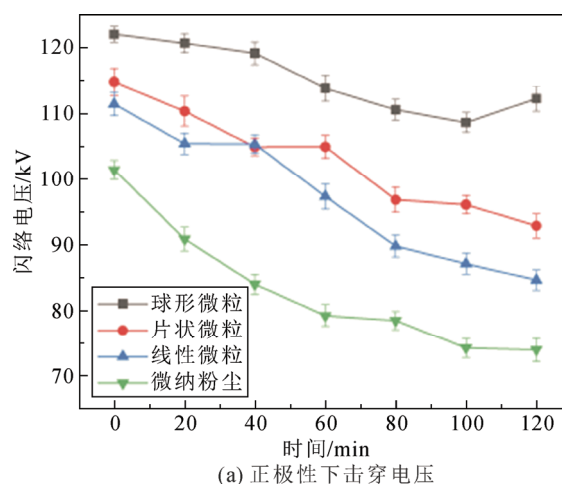
腹部微粒附着时闪络电压大幅下降, 降幅达 27.4%, 支腿底部电压下降较为微弱。此外, 负极性电压下微粒附着对绝缘子闪络电压的降低更为显著, 尤其在支腿顶部和腹部效果最为明显。

三支柱绝缘子附着不同尺寸金属微粒时, 施加正负极性下的闪络电压如图 17 所示。随微粒长度的增加, 闪络电压呈现逐渐下降的趋势, 较长微粒的击穿电压会显著降低; 且线形微粒越细, 即轴向半

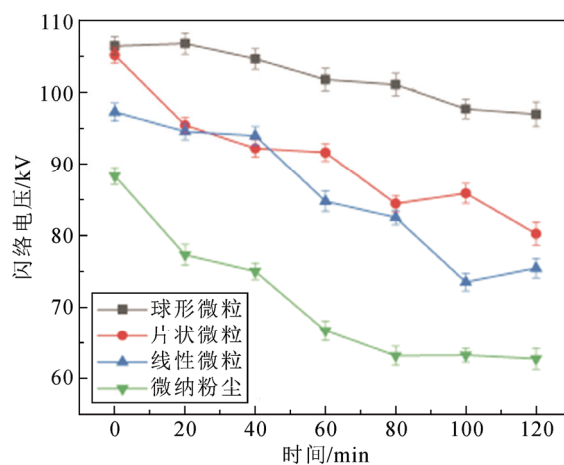


图 14 附着金属异物的三支柱绝缘子闪络痕迹

Fig.14 Traces of flashover of tri-post insulators with metal contaminants attached



(a) 正极性下击穿电压



(b) 负极性下击穿电压

图 15 正、负极性下加压时间与不同异物种类的闪络电压

Fig.15 Flashover voltage of pressurization time and different contaminant types under positive/negative polarity

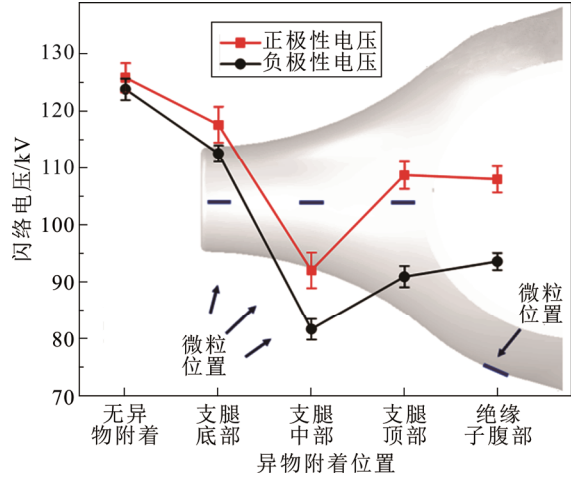


图 16 正、负极性下金属异物不同附着位置的闪络电压
Fig.16 Flashover voltage of metal contaminant at different positions under positive/negative polarity

径越小, 闪络电压越低, 可降低至 21.3%。此外, 负极性下绝缘子附着微粒的闪络电压稍低于正极性, 尤其在大尺寸异物影响下较为明显。

上述结论说明, 各类异物附着对绝缘子沿面闪络均有影响: 粉尘吸附时受表面电荷影响最明显, 尤其在负极性电压下最为危险。线形微粒闪络电压降低最多, 其次为片状和球形微粒, 支腿中部下降最大。随微粒半径减小、长度增大, 闪络电压有所降低, 微粒与粉尘对闪络的影响如表 5 所示。

3.2 三支柱绝缘子附着金属异物的闪络原理

三支柱绝缘子附着微粒时流注发展如图 18 所示。由于微粒尺寸较小, 正极性电压下将端部等效为负棒-正板极不均匀场模型, 尖端场强 E_{st} 从阴极感应发射电子, 汇入棒前端正空间电荷区形成大量电子崩, 并向板电极移动, 附着后形成强场区 E_{sp} 并引起电离, 造成尖端状分布的等离子体层, 剧烈电离和复合过程导致 SF_6 气体诱发二次电子崩, 放电通道不断延伸形成流注。剩余正电荷聚集于流注底部进一步畸变电场, 使大量电子汇入, 加强并延长等离子体通道。端部场强增大外场强 E_{ex} , 表面电荷场强 E_{ch} 会加剧棒板间流注内部正负离子的吸收与发展, 直至满足自持放电条件。同理可见, 微粒底端也可视作正棒-负板模型, 空间电荷产生的场强 E'_{sp} 会使电场畸变释放电子崩, 加强三结合点处的外场强 E'_{ex} 并使流注通道向地电极推进。

当腹部附着微粒时, 贴近绝缘子侧电场较高, 且受正电极牵引感应负电荷, 外侧排斥形成正电荷, 受微粒尖端的离子场强 E_{sp} 影响, 电子崩容易扩散

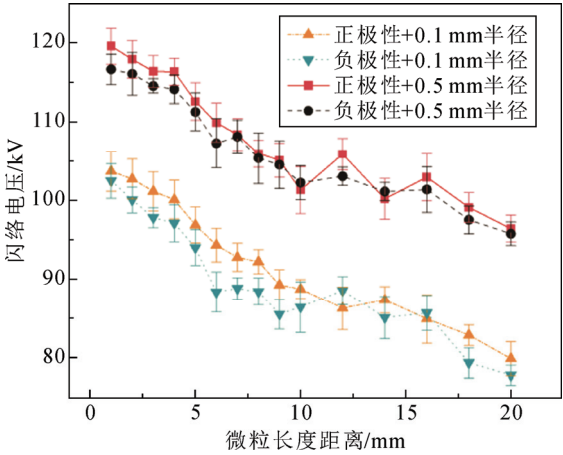


图 17 正、负极性下金属异物不同尺寸影响的闪络电压
Fig.17 Flashover voltage influenced by different sizes of metal contaminants under positive/negative polarity

表 5 金属微粒与粉尘影响下的沿面闪络特性
Table 5 Surface flashover characteristics under the influence of metal particle and dust

异物类型	影响三支柱绝缘子的闪络特性
金属微粒	闪络电压较低: 线形微粒<片状微粒<球形微粒, 支腿中部和腹部附着电压下降达 27.4%; 半径越小, 长度越大, 闪络电压下降高达 21.3%; 负极性电压下降显著。
微纳粉尘	闪络电压最低: 受表面电荷影响闪络电压下降 32.7%; 且负极性电压下降显著; 绝缘子沿面闪络最危险

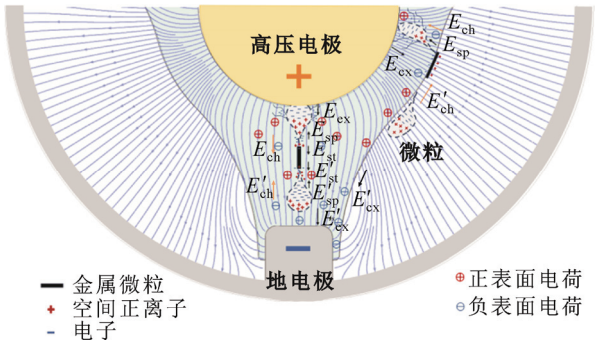


图 18 三支柱绝缘子附着微粒时的流注发展过程
Fig.18 Stream development process of tri-post insulator with metal particle attached

电子吸附进入高压电极, 再受电荷场强 E_{ch} 作用, 更易撞击腹部表面携带正电荷, 形成等离子体并向正极推进, 且腹部距电极较短易于形成流注通路。但支腿侧面绝缘距离较长, 为弱垂直分量的极不均匀电场, 表面电容电流小而电场较弱, 故流注沿表面延伸时受等离子体内反向电场影响较大并受阻, 故腹部闪络取决于侧面流注的发展贯穿。

负极性电压下微粒尖端正电荷加剧附近电场, 导致电晕起始电压低, 流注容易累积发展, 故负极性下流注更易贯穿形成沿面闪络。中部微粒与两电极距离较短, 且负表面电荷范围较宽并延伸流注, 粒子两端同时电离双向发展形成通路。微粒半径越小、长度越长, 尖端电场畸变更严重, 电子崩发射加剧导致自持放电条件满足, 更易造成闪络。

附着金属粉尘时如图 19 所示, 由于微观尺度下仅在粒子之间交互电离产生电晕, 正离子运动速度较慢包覆粉尘周围, 电场畸变弱难以瞬间产生流注。但随电压与吸附量增加, 粉尘振动导致热致载流子热电离程度提高, SF_6 离子与荷电粉尘更易碰撞产生电子雪崩, 形成了大片电子云弥散区域, 加强粉尘斑顶部场强 E_{sp} , 增大斥力产生爆炸式扩散。此后电子释放于粉尘斑两侧并汇入正离子区形成流注, 表面电荷电场同样加剧扩散状分布的等离子体层, 但圆弧层会增大曲率半径使前沿电场削弱, 直至电压升高粉尘吸附获得新电子并吸收贯穿正极。支腿中部表面电导率显著增大, 表面传导电流升高并向截交线双向传输负离子, 加速沿面先导流注的发展, 金属短接区域使沿面绝缘距离大幅下降, 增大外场强 E_{ex} 并导致粉尘两侧流注贯穿闪络。

试验发现加压粉尘吸附时, 绝缘子腹部侧面附着量较少, 先于支腿粉尘处大面积爆炸式吸附并闪络。由于腹部曲面轮廓较长, 支腿侧边受流体和温度梯度影响较大, 粉尘吸附难以连续排布, 电子崩无法二次电离获取汇入延伸流注并贯穿, 后续可研究三支柱绝缘子腹部的粉尘吸附闪络原理。

4 结论

1) 金属微粒在绝缘子上从柱腿顶部逐渐向底部吸附, 腹部吸附量少且受电场梯度力竖直排布, 电场力与库仑力是起举吸附的关键因素; 对于金属粉尘, 粒子间微观范德华力和库仑斥力是粉尘爆炸式扩散表面的主导条件, 电荷积聚明显影响吸附过程。接触面积与压力导致的静摩擦力是保持粉尘稳定吸附的必要性因素, 柱腿底部 F_f 可降低 75.4%。

2) 金属微粒附着绝缘子的表面电荷曲线呈现顶部大范围负极性峰、底部微量正极性峰的特征, 支腿中部附着时影响最大且腹部最小, 片状与球形微粒影响弱; 粉尘附着时会形成大面积负极性电荷斑, 仿真验证了微粒粉尘附着的电场分布情况。工程实际尺寸绝缘子仿真时由于尖端畸变严重以及热

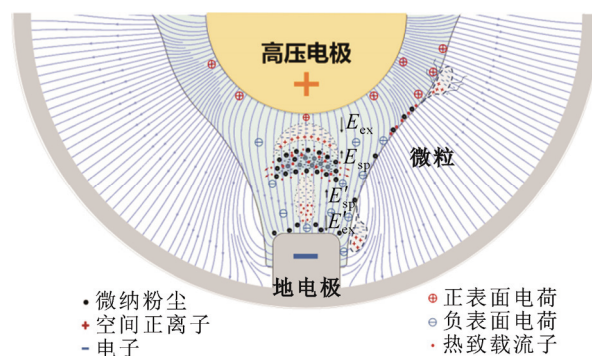


图 19 三支柱绝缘子附着粉尘时的电晕放电过程

Fig.19 Stream development process of tri-post insulator with metal dust attached

流场效应, 电场计算误差达 9.7%和 10.3%。

3) 建立了金属异物附着的三支柱绝缘子表面电荷积聚等效电路, 表明气体电离源、面电导减小和等效电容充电是注入电荷的主要来源。从流注角度分析异物离子注入电荷积累过程与流注发展阶段为: 微粒两端离子流迁移形成双极性电荷; 粉尘群间隙电子崩发展吸收负离子形成单一负极性电荷。

4) 试验获得了电压极性、表面电荷、附着位置与异物种类尺寸对三支柱绝缘子闪络的关系, 负极性电压下绝缘子附着异物的闪络电压有所降低, 表面电荷增加也会降低闪络电压。而支腿中部异物闪络电压明显下降, 且金属粉尘闪络电压下降最低, 线形、片状微粒次之, 球形微粒降幅最弱。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 杜伯学, 董佳楠, 梁虎成. 特高压 GIL 非均匀热气流特性与三支柱绝缘子绝缘裕度分析[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1678-1686.
DU Boxue, DONG Jianan, LIANG Hucheng. Non-uniform gas convection in UHV-GIL and insulation margin analysis for tri-post

- insulator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1678-1686.
- [6] 树 婷, 杨明坪, 郭若琛, 等. 交流与负性雷电冲击叠加电压下 SF₆ 中自由金属颗粒局部放电激发特性[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 3305-3315.
- SHU Ting, YANG Yueping, GUO Ruochen, et al. Partial discharge excitation characteristics of free metal particles in SF₆ gas under AC and negative lightning impulse superposition voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(8): 3305-3315.
- [7] XUE N F, LI B, WANG Y, et al. Spatial-temporal kinetic behaviors of micron-nano dust adsorption along epoxy resin insulator surfaces and the physical mechanism of induced surface flashover[J]. Polymers, 2024, 16(4): 485.
- [8] 孙秋芹, 罗宸江, 王 峰, 等. 直流 GIL 导体表面金属颗粒跳跃运动特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5206-5216.
- SUN Qiuqin, LUO Chenjiang, WANG Feng, et al. Jumping characteristics of metal particle on the surface of DC gas insulated transmission line conductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5206-5216.
- [9] LI X, LIU W D, XU Y, et al. Surface charge accumulation and pre-flashover characteristics induced by metal particles on the insulator surfaces of 1 100 kV GILs under AC voltage[J]. High Voltage, 2020, 5(2): 134-142.
- [10] 王 健, 李伯涛, 李庆民, 等. 直流 GIL 中线形金属微粒对柱式绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 213-222.
- WANG Jian, LI Botao, LI Qingmin, et al. Impact of linear metal particle on surface charge accumulation of post insulator within DC GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 213-222.
- [11] 刘 鹏, 吴泽华, 朱思佳, 等. 缺陷对交流 1 100 kV GIL 三支柱绝缘子电场分布影响的仿真[J]. 电工技术学报, 2022, 37(2): 469-478.
- LIU Peng, WU Zehua, ZHU Sijia, et al. Simulation on electric field distribution of 1 100 kV AC tri-post insulator influenced by defects[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 469-478.
- [12] 张广阔. 直流 GIL 中三支柱绝缘子表面电荷积聚特性影响研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- ZHANG Guangkuo. Study on the influence characteristics of surface charge accumulation of three-pillar insulators in DC GIL[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2022.
- [13] HU Q, LI Q M, LIU Z P, et al. Surface flashover induced by metal contaminants adhered to tri-post epoxy insulators under superimposed direct and lightning impulse voltages[J]. Polymers, 2022, 14(7): 1374.
- [14] 张连根, 路士杰, 李成榕, 等. 气体绝缘组合电器中微米量级金属粉尘运动和放电特征[J]. 电工技术学报, 2020, 35(2): 444-452.
- ZHANG Liangen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Movement and discharge characteristics of micron-scale metal dust in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 444-452.
- [15] 梁瑞雪, 王 健, 胡 琦, 等. 直流 GIL 盆式绝缘子附近微米级金属粉尘的动力学行为与吸附机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1387-1396, 1429.
- LIANG Ruixue, WANG Jian, HU Qi, et al. Study on kinetic behavior and adsorption mechanism of the micron metal dust near the basin-type insulator in DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1387-1396, 1429.
- [16] 卢斌先, 冯启琨, 李 晓, 等. 考虑金属异物存在时 220 kV 紧凑型 GIS 内电场分布精确分析[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3493-3501.
- LU Binxian, FENG Qikun, LI Xiao, et al. Precise analysis on distribution of electric field in 220 kV compact GIS considering metal protrusion[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3493-3501.
- [17] MA K, LIU H Q, WANG Q, et al. Study on movement and distribution characteristics of metal particle dust in DC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(3): 1208-1217.
- [18] OKABE S, UETA G, UTSUMI T. Behavior of metallic particles in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2889-2897.
- [19] 庞 曦, 许天蕾, 刘 鹏, 等. 考虑温度梯度的高压直流 GIL 盆式绝缘子空间电荷仿真[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1014-1024.
- PANG Xi, XU Tianlei, LIU Peng, et al. Space charge simulation for basin insulator of high voltage DC GIL considering temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1014-1024.
- [20] 王 健. 直流 GIL 金属微粒的荷电运动机制与治理方法研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- WANG Jian. Research on the moving mechanisms of charged metal particles in DC GIL and suppressing methods[D]. Beijing, China: North China Electric Power University(Beijing), 2017.
- [21] LIANG R X, HU Q, LIU H, et al. Research on discharge phenomenon caused by cross-adsorption of linear insulating fibre and metal dust under DC voltage[J]. High Voltage, 2022, 7(2): 269-278.
- [22] IWABUCHI H, MATSUOKA S, KUMADA A, et al. Influence of tiny metal particles on charge accumulation phenomena of GIS model spacer in high-pressure SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1895-1901.
- [23] 曹书云. GIS 管道 L 型拐角、支架和盆式绝缘子的电路建模[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- CAO Shuyun. Circuit modeling of L shape elbow, stents, spacers of the GIS pipe[D]. Beijing, China: North China Electric Power University(Beijing), 2017.



LI Xuan

Ph.D. candidate
Corresponding author

李 玄(通信作者)

2001—, 男, 博士生

主要从事 GIS/GIL 缺陷放电与内部绝缘失效机理研究

E-mail: lx18801239458@163.com

收稿日期 2024-06-19 修回日期 2025-01-19 编辑 曾文君