

直流 GIS/GIL 中金属微粒诱发沿面闪络的机理 研究与抑制策略综述

卢 武, 杨 华, 张 俊, 杨 晨, 王耀港, 王哲铭
(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘 要: 直流气体绝缘金属封闭开关和传输设备(gas-insulated switchgear/gas-insulated transmission line, GIS/GIL) 因其体积小、传输容量大、运行稳定等优点, 已被视为中国新型电力系统布局中的关键装备。然而, 当前直流 GIS/GIL 的研发应用仍面临挑战, 其在长时间运行过程中易受到金属微粒的影响而产生电场分布畸变, 进而引起绝缘子表面电荷积聚甚至引发沿面闪络, 导致其耐压水平显著低于交流 GIS/GIL, 对于金属微粒诱发沿面闪络的机理认识与防护治理迫在眉睫。因此, 围绕当前直流 GIS/GIL 中金属微粒诱发的表面电荷积聚至沿面闪络阶段性过程的发展机制及其抑制调控方法等研究进行了梳理, 总结了金属微粒在直流 GIS/GIL 腔体内的典型运动行为, 并探讨了其对表面电荷积聚及沿面闪络过程的影响及作用机理。针对当前机理和调控手段研究所面临的挑战, 提出了金属微粒影响下表面电荷积聚至沿面闪络阶段化研究路线, 通过多参量阈值界定的闪络发展模型指导调控策略, 旨在深化对高压直流条件下绝缘子沿面闪络机制的理解, 推动 GIS/GIL 气固界面闪络调控理论体系的发展, 并为直流 GIS/GIL 的绝缘设计提供理论基础。

关键词: 直流气体绝缘金属封闭开关和传输设备; 沿面闪络; 金属微粒; 电荷积聚; 调控策略

Review on Mechanism Study and Suppression Strategy of Metal Particles Induced Surface Flashover in DC GIS/GIL

LU Wu, YANG Hua, ZHANG Jun, YANG Chen, WANG Yaogang, WANG Zheming
(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: DC GIS/GIL is regarded as the key equipment in the layout of China's new power system due to its advantages of small size, large transmission capacity and stable operation. However, the current research and development applications of DC GIS/GIL is still facing challenges. It is susceptible to the influence of metal particles in the process of long-time operation and produces electric field distribution distortion, which in turn causes insulator surface charge accumulation and even triggers surface flashover, resulting in a significantly lower level of voltage withstand than that of AC GIS/GIL; moreover, the understanding of the mechanism of metal particles-induced surface flashover and the protection and management are imminent. Therefore, this paper focuses on the current DC GIS/GIL metal particles-induced surface charge accumulation to surface flashover stage process development mechanism, its inhibition and regulation methods and other research are sorted out, the typical behaviors of metal particles in the cavity of the DC GIS/GIL are summarized, and its impact on the surface charge accumulation and the surface flashover process and the role of the mechanism are explored. In view of the challenges faced by the current research on mechanisms and regulation means, corresponding technical paths and solutions are proposed, in accordance with the challenges faced by the current research on mechanisms and regulation tools, a staged research route from surface charge accumulation to surface flashover under the influence of metal particles is proposed, and the regulation strategy is guided by a flashover development model defined by a multi-parameter threshold, promoting the development of the theoretical system of flashover regulation at the air-solid interface of GIS/GIL, and providing a theoretical basis for the insulation design of DC GIS/GIL.

Key words: DC GIS/GIL; surface flashover; metal particles; charge accumulation; tailoring strateg

0 引言

柔性直流输电是助力我国“双碳”战略下实现绿色能源高效汇集和远距离输送的共性关键技术。在深、远海风力发电及特高压西电东送等应用场景中, 柔性直流输电工程目前仍面临着海上柔直换流站平台空间和重量受限、自然环境恶劣地区输电走廊建造难度大等一系列系统和关键设备设计与制造难题。直流气体绝缘金属封闭开关和传输设备(gas-insulated switchgear/gas-insulated transmission line, GIS/GIL), 以其体积小、容量大、运行稳定等优势, 为上述问题的解决提供了思路。近期西门子能源公司成功研制了可供小型化开关站使用的 ± 550 kV 直流 GIS 设备样机, 载流量可达 5 kA。平高集团牵头自主研发制造了国内首套可用于海上风电的 ± 320 kV 直流 GIS 设备样机^[1]。清华大学与江苏金鑫电器有限公司合作开发的 ± 320 kV 直流 GIL 已通过多种工况下的评估测试^[1], 中国电气装备研制的国内首台 ± 550 kV 直流 GIS 在行业内率先通过了长期带电考核^[1-2]。但是国内外关于直流 GIS/GIL 的大规模工程化应用尚未见报告。

制约直流 GIS/GIL 设备的核心技术问题是: 设备内部的绝缘子在长期承受单极性电压时, 其内部绝缘子表面将积聚大量难以消散的电荷, 畸变周边电场分布, 使直流 GIS/GIL 的耐压水平仅为交流 GIS/GIL 的 64% 左右^[2-3]。如何维持直流 GIS/GIL 长期运行中良好的绝缘性能成为其在柔性直流输电系统中成熟应用所亟须攻克的难题。

直流 GIS/GIL 中的绝缘失效主要是腔体内中心电极结构的绝缘子表面发生闪络现象导致的。统计表明, 由金属微粒诱发的沿面闪络占交流 GIS/GIL 绝缘故障的 38% 以上; 而在直流 GIS/GIL 设备中, 金属微粒引发的绝缘危害不仅存在, 且发展机制更为复杂^[4]。金属微粒的危害和调控成为影响直流 GIS/GIL 绝缘设计的重要因素。以往大量研究表明, 金属微粒诱发的沿面闪络是一个表面电荷积聚向沿面放电转变的阶段性的发展过程。因此, 为了实现优化绝缘子绝缘性能的目标, 需要对沿面闪络全过程的电荷注入、输运等微观演变机理进行梳理。

直流电压下, 金属微粒更容易在单极性电压下产生站立、飞萤、极板间跳动等更加复杂的运动行为, 并易引起不可预测的偶发性闪络, 严重威胁直流 GIS/GIL 的气-固界面绝缘性能。因此需要在微纳

秒到小时的完整时间尺度下, 明确不同运动特征的金屬微粒对表面电荷积聚特性乃至沿面放电的影响规律, 以电荷输运动态演变的视角, 揭示在金属微粒电动力学特性影响机制下直流 GIS/GIL 绝缘子气-固界面中表面电荷以及放电特性演变机理。最终建立描述绝缘子沿面闪络起始和发展过程的精细化模型, 推动对高压直流条件下绝缘子沿面闪络机理的深入理解, 并为直流 GIS/GIL 在柔性直流输电系统中的绝缘设计提供理论基础。

本文首先对直流 GIS/GIL 腔体内金属微粒行为研究进展进行归纳和总结, 明确在 GIS/GIL 腔体内毫米级大尺寸微粒的起举、竖立、跳动、飞萤与微米级小尺寸微粒的粘附、扩散等典型运动行为; 其次, 结合金属微粒对气-固界面绝缘特性的影响机制, 探讨了金属微粒影响下绝缘子表面电荷积聚至沿面闪络的过程化发展机理; 最后, 在现有调控体系的基础上, 针对当前调控手段所面临的亟待解决的关键问题, 提出相应的技术路径和解决方案, 力求推进沿面闪络精细化调控理论体系发展。

1 金属微粒运动特性及其诱发的表面电荷积聚和沿面闪络现象

1.1 直流 GIS/GIL 中金属微粒运动特性

GIS/GIL 腔体的制造、运输、安装和运维过程中, 不可避免地会产生片状、线形和球形金属微粒, 这 3 种类型的微粒因其对直流 GIS/GIL 设备电气绝缘性能具有潜在影响而成为目前国内外研究的重点^[5-6]。金属微粒带电来源主要有金属电极传导带电、微粒与电极之间进行微放电和微粒尖端电晕放电。静止在 GIS/GIL 腔体内的金属微粒在场强达到一定值后将会起举, 微粒的起举场强受到半径、气压、金属种类等因素影响, 半径越小的微粒越容易起举。在起举后, 毫米级大小尺寸的微粒可能会在腔体内的极板间进行跳动, 或是以线性方式贴近电极表面悬浮和飞行; 微米级小尺寸微粒相互间会受到范德华力的影响, 微粒独立的跳动、飞行过程会演变为复杂的“沙尘暴”、吸附、扩散等行为。这些运动形式展现了微粒在电场作用下的复杂动态行为。

1.1.1 金属微粒的起举行为

贾江波等人研究了直径为 0.5 mm 的球形微粒和长度为 2 mm、直径为 0.15 mm 的线形微粒在不同种类绝缘子 GIS 腔体中的起始运动情况。研究发现, 对于布置于地电极上的球形微粒, 起举电压与

微粒的相对位置有关。当微粒与绝缘子的直线距离 $<10\text{ mm}$ 时,起举电压随距离减少而降低;当距离 $<2\text{ mm}$ 时,微粒仅出现水平滚动而未能浮起。对于线形金属微粒,起始运动电压变化情况与球形微粒类似,但在与绝缘子直线距离 $<2\text{ mm}$ 时,由于形状原因不能发生横向移动^[7]。律方成等人研究了楔形电极下直径为 $1.0\sim 2.5\text{ mm}$ 的不同材质球形金属微粒初始运动情况。研究发现,只有对于密度较大的不锈钢和铜制微粒,在其较大半径下才会出现水平滚动情况^[8]。文献[9]研究了半径分别为 0.1 、 0.25 、 0.4 mm ,长度为 $2\sim 15\text{ mm}$ 的铝制线形微粒起举电压,发现起举电压随着半径增大而升高,与长度和极性无关。文献[10]通过实验总结了直流电压下不同截面形状和摆放方式的线形微粒起举方式,如图1所示。

1.1.2 金属微粒的竖立行为

王健等人采用同轴圆柱电极对半径为 0.1 mm 、长度分别为 2 、 4 、 8 mm 及 12 mm 的线形微粒运动特性进行了观测。研究表明,线形金属微粒在起举后表现出不同的行为,这与其荷电量密切相关。当荷电量充足时,这些微粒会从电极表面跳起;相反,当荷电量不足时,它们则会继续停留在电极表面^[11]。这一过程带有明显的极性效应,施加正极性电压时,微粒易发生站立;施加负极性电压时,微粒易跳起并站立于中心电极上。若微粒带电量不足以克服重力,则微粒会处于站立的平衡状态。站立的几率与长度相关,微粒长度增加使得其所受重力增加,旋转力矩相对更小,更容易发生站立。竖立的微粒顶端和微粒与地电极接触的底端都会发生电晕放电,如图2所示,并且在施加负电压下更容易发生击穿。

文献[10, 12]发现微粒在悬浮运动过程中也可能发生竖立现象,这一现象发生的本质是空间电荷作用。如图3所示,微粒尖端的电晕放电削弱了区域2中电场,使其不易起跳;电子崩形成的正离子加强了前方区域1中的电场使得更容易出现局部放电。文献[9]中对半径为 0.25 mm 、不同长度下的线形金属微粒进行气隙击穿实验后发现,线形金属微粒若在运动后出现竖立行为,则大概率发生击穿。文献[13]对片状金属微粒的研究中发现,片状钢制金属微粒起举后会保持旋转,继续加大电压则旋转加快并略微跳起,跳动过程中微粒底端与地电极会产生微弱的火花放电。

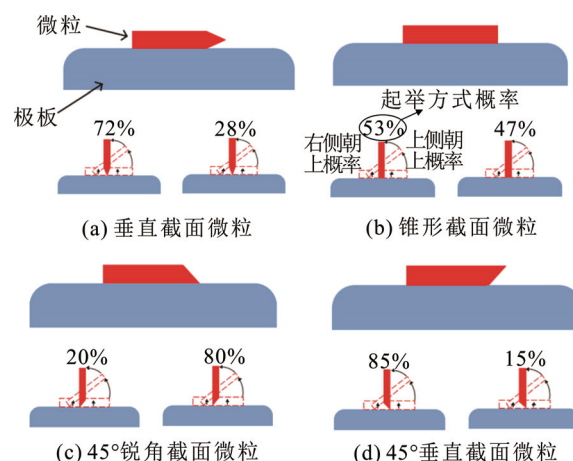


图1 线形微粒不同截面形状和摆放方式下的起举规律^[10]

Fig.1 Lifting pattern of linear particles with different cross-sectional shapes and placement methods^[10]

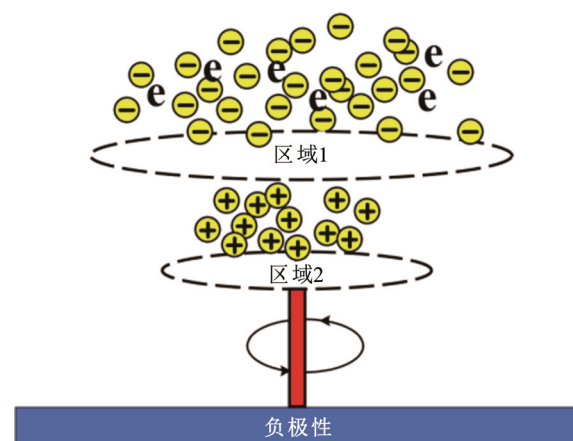


图2 竖立现象解释原理图^[10]

Fig.2 Schematic diagram of the explanation of the erection phenomenon^[10]

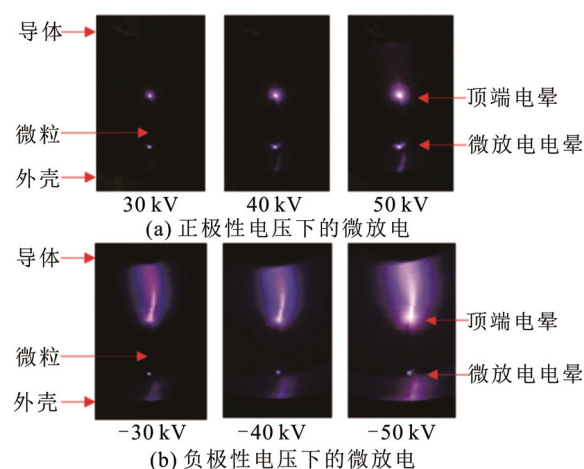


图3 金属微粒竖立过程中的微放电现象^[11]

Fig.3 Micro-discharge phenomenon during the erection of metal particles^[11]

1.1.3 金属微粒的跳动行为

王健等人基于球形微粒的运动方程, 并考虑微粒与电极间的非弹性碰撞, 建立了直流 GIL 内球形金属粒子的动态运动模型, 发现直流电压等级增加会使微粒扩散角增加, 如图 4 所示^[14]。西安交通大学吴泽华、刘鹏等人基于直流 GIL 腔体中微粒的受力分析, 建立了包含荷电效应、浮力、摩擦力等因素的二维有限元模型, 用以描述金属微粒运动, 并总结了其基本模式^[15]。如图 5 所示, I 区、III 区、V 区内的电场线几乎呈径向分布, 微粒很难获得轴向速度, 所以原地跳跃是微粒主要的运动模式; 对于 II 区和 IV 区的位置, 由于电场梯度力作用, 电场线与径向形成夹角, 合成电场梯度力和库仑力具有轴向分量, 会使粒子向水平方向移动。

微米级金属微粒(后称金属粉尘)由于尺寸较小, 难以对跳动前的运动行为进行详细的观测, 因此对小尺寸微粒的研究重点为跳动和吸附规律。许渊等对布置在 126 kV 绝缘子表面的单个至多个金属粉尘施加 90 kV 交流电压, 研究发现单个颗粒存在时几乎不发生运动, 而较多颗粒存在时先由少数颗粒“激活”其他颗粒并沿电场方向做周期跳动^[16]。律方成等通过金属粉尘的电动力学模型和实验研究, 发现金属粉尘在 GIL 腔体内运动过程中受到轴向电场分量的影响, 易运动并吸附至绝缘子表面^[17]。李庆民等将直流电压下绝缘子附近的粉尘运动行为分为绝缘子表面的“积聚性”吸附和电极表面的“扩散性吸附”, 并认为绝缘子表面电荷积聚产生的库仑力是金属粉尘吸附的重要因素^[18-19]。

1.1.4 金属微粒的飞萤行为

随着导电微粒长度的增加, 运动时竖立的微粒在之后运动中容易发生飞萤现象^[10]。文献[20]对直径为 0.3 mm、长度为 4 m 的线形微粒施加不同幅值和极性的电压, 将多微粒群飞萤运动规律总结为: 1) 微粒对角碰撞; 2) 跨微粒运动; 3) 静止微粒飞萤。目前研究认为空间中微粒的飞萤现象由微粒荷电量极性变化引起, 与微粒电晕放电引起的空间电荷相关^[21]。金属微粒的运动行为与其微放电特性存在密切联系, 为了进一步完善金属微粒运动特性的理论模型, 需要更准确的电晕放电数学描述方法。

对比现阶段国内外关于金属微粒运动特性的实验研究和仿真模拟工作进展可以发现, 虽然金属微粒畸变电场会在气体侧引发自然电离以外的新增电离过程已经成为共识, 但现有的仿真模型仍局限

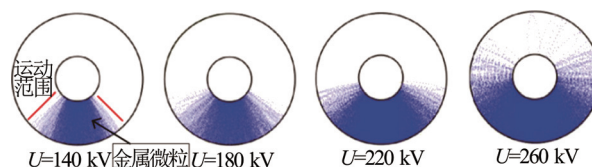


图 4 不同电压下的球形微粒运动分布仿真模拟结果^[14]

Fig.4 Simulation results of spherical particle motion distribution under different voltages^[14]

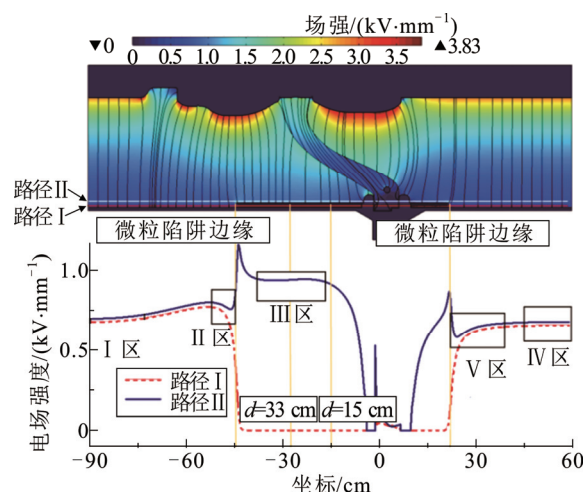


图 5 GIS/GIL 腔体内电场分布和微粒运动行为分区^[15]

Fig.5 Partitioning of electric field distribution and particle motion behavior in GIS/GIL cavities^[15]

于对绝缘子表面以外气体间隙中的空间电荷发展情况进行模拟, 由实验总结的运动模式尚不能和实际 GIS/GIL 腔体内金属微粒诱发沿面闪络过程进行较好的对应。

1.2 直流 GIS/GIL 中金属微粒诱发的表面电荷积聚和沿面闪络现象

金属微粒对直流 GIS/GIL 绝缘性能的潜在破坏主要有 4 个方面: 1) 尺寸较大的金属微粒在高压导体附近的飞萤产生拉弧现象, 大大缩短绝缘距离, 可能会直接导致击穿; 2) 随机运动到绝缘子楔形气隙附近的金属微粒, 会极大地畸变绝缘子三结合点处的电场, 导致电场陡增, 大幅减低闪络电压; 3) 金属微粒在绝缘子附近的运动可能会导致绝缘气体发生电离, 电离出的电荷会在绝缘子表面入陷, 增加局部电荷密度, 降低绝缘可靠性; 4) 绝缘子表面积聚电荷的影响下, 尺寸较小的金属粉尘动态吸附于绝缘子表面, 引发沿面闪络。现有的大量实验结果表明^[22-24]: 前 2 种机制引起的绝缘失效现象为不可预测的小概率闪络事件, 后 2 种机制引起的绝缘强度下降问题是引起绝缘子沿面闪络的主要潜在原

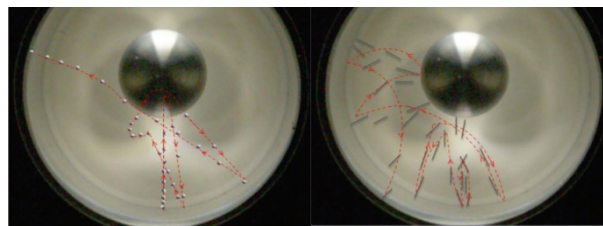
因。在此机制下,金属微粒诱发的沿面闪络是一个表面电荷积聚向沿面放电转变的阶段性发展过程^[25-26]。

日本东京大学 A.Kumada、清华大学李传扬、河北工业大学邢云琪等人利用高速摄影技术,对毫米级球形和线形金属微粒在中心电极结构的盆式绝缘子模型中的运动特性进行了观测^[27-29],并通过粉尘图法对金属微粒运动过程中的表面电荷积聚情况进行了详细分析,如图6和图7所示。相关结果表明金属微粒的运动速度、轨迹和起举电压(针对线性微粒)等电动力学特性与原生静电场的径向分量、金属微粒的起始位置和几何形貌等因素都密切相关。李传扬等人推测金属微粒在绝缘子附近会诱发电体电离,且电离出的电荷会在绝缘子表面入陷,造成异极性电荷在绝缘子表面电荷积聚是导致沿面闪络的主要作用机制^[22,28-30]。绝缘子周围的金属微粒引发的微放电提供了额外的电荷源,影响气固界面的气体侧电荷注入,同时微粒引发的电场畸变也为沿面闪络创造了可能的路径^[31]。

山东大学的张黎、华北电力大学的李庆民、律方成和王健等人在简化的同轴圆柱和平板电极结构中,考虑原生静电场作用下气隙中空间电荷的产生、复合及迁移、扩散等物理过程,对毫米级线形和球形的金属微粒受到的电场力和电场梯度力变化情况进行分析,建立了金属微粒荷电量和运动轨迹的动态修正模型^[9,17,32-34]。根据该模型,金属微粒运动过程中的电场畸变效应与气-固界面的气体侧空间电荷的协同耦合作用引发的碰撞击穿和直立击穿是金属微粒诱发沿面闪络的主要类型。

2 金属微粒诱发表面电荷积聚与沿面闪络的阶段性发展机理

直流 GIS/GIL 在长期高压直流条件和金属微粒的表面电荷积聚和沿面闪络击穿现象与机理已成为国内外学者的研究热点。三菱电机株式会社 K.Nakanishi、德国慕尼黑理工大学 J.Kindersberger 和清华大学张贵新等人的相关研究证明直流 GIS/GIL 绝缘子表面电荷积聚现象按照电荷积聚形态的不同可以被具体划分为晕圈状电荷积聚和离散型电荷积聚 2 种模式^[35-38]。其中前者可以被称为“基本”模式,后者可以被称为“电荷斑”模式。西安交通大学张博雅等人通过大量在 10~47.4 kV 正极性与负极性直流电压下的缩比 GIL 绝缘子中得到的表面电荷积聚实验结果,发现金属微粒诱发“电荷



(a) 毫米级球形微粒

(b) 毫米级线形微粒

图6 直流 GIL 腔体中金属微粒运动轨迹^[27]

Fig.6 Metal particle motion trajectories in the DC GIL cavity^[27]



(a) 毫米级球形微粒诱发表面电荷形态



(b) 毫米级线形微粒诱发表面电荷形态

图7 直流 GIL 腔体中金属微粒运动特性对表面电荷积聚特性的影响^[27]

Fig.7 Influence of metal particle kinematic properties on surface charge accumulation characteristics in a DC GIL cavity^[27]

斑”模式表面电荷加速积聚是引发沿面闪络的重要原因^[35,39]。

而在直流 GIS/GIL 设备中,金属微粒在自身带电特性影响下会发生粘附、跳动、飞萤等行为,影响气固界面绝缘性能。研究表明,在金属颗粒的影响下,纯 SF₆ 的闪络电压降低了 21.2%, 20%SF₆/80%N₂ 混合气体的闪络电压降低了 18.68%, 4%C₃F₇CN/96%CO₂ 混合气体的闪络电压降低了 16.82%^[30]。因而,通过合理手段改善直流 GIS/GIL 绝缘子的电场分布情况,尽可能地降低绝缘子在附着、悬浮金属微粒等情况下的沿面闪络概率,成为使用直流 GIS/GIL 的海上换流站等柔性直流输电应用场景下绝缘设计的一个重要内容。该问题的解决需要从研究金属微粒运动特性对沿面闪络过程中表面电荷注入和输运的影响规律,从而明确“电荷斑”阶段表面电荷积聚向沿面放电阶段转变的主导机制,并完善沿面闪络的微纳秒时间尺度电荷输运模型这一基础理论问题入手。此外,金属微粒引发的电晕放电对异极性表面电荷积聚的微观主导物理机

制难以进行验证, 亟须解决仿真模拟和实验研究中的放电场所不一致性问题。

2.1 金属微粒诱发绝缘子表面电荷积聚的发展机理

绝缘子作为气体绝缘设备中支撑高压导体的关键部件, 其在长期高压直流条件下容易在表面积聚电荷引发电场畸变, 严重影响设备绝缘性能, 实验表明, 正极性电压下表面电荷积聚使闪络电压最大下降 9.3%, 负极性电压闪络电压最大下降 10.7%^[40]。表面电荷的密度、位置和极性随演化过程与电极和绝缘子的形状、电压极性、温度梯度、相对湿度、介电表面的传导性相关, 并服从场效应模型, 固体侧的电荷注入、极化和气体侧缺陷的局部放电是造成表面电荷积聚模式变化的重要机理原因, 且电荷积聚主导模式的变化具有高度的电场依赖性^[25,41-42]。GIL 腔体内部电场分布受绝缘子几何形状影响, 因此绝缘子的表面电荷分布和发展规律与其几何结构关联紧密。

盘式绝缘子表面电荷主要积聚在绝缘子的非平面区和地电极附近, 呈晕状分布, 在施加 -25 kV 的电压下, 绝缘子在靠近中心电极非平面区域积聚同极性电荷, 在地电极附近积聚异极性电荷^[43-44]。李成榕等人构建建立了包含 SF₆ 绝缘气体中载流子的产生、重组和扩散的 DC-GIL 仿真模型, 并分别研究了盘式、盆式和圆头盆式 3 种不同形状的绝缘子表面电荷积聚情况, 结果表明, 圆头盆式绝缘子积聚的电荷较少^[45]。J. Kindersberger、张贵新、张博雅等人在对直流电压下缩放的 GIL 盆式和锥形绝缘子进行表面电荷测量时发现^[28,46-47], 绝缘子表面电荷积聚是一个由同极性电荷整体呈圆周对称分布的“基本”模式向个别区域出现异极性电荷簇分布的“电荷斑”模式转变的阶段性发展过程, 如图 8 所示。其中, “基本”模式表面电荷积聚特征主要受气-固界面的固体侧电流主导的径向电场分布情况决定, “电荷斑”模式表面电荷积聚特征主要受绝缘子本体缺陷如毛刺、气隙以及外来缺陷如金属微粒引发的电场畸变或气体侧局部放电情况决定^[38]。

华北电力大学王健等人通过实验对比有、无金属微粒存在时绝缘子表面电位分布情况, 研究发现当金属微粒黏附于绝缘子表面时, 靠近中心导体的金属微粒尖端附近出现负电位区域, 远离高压电极一侧出现正电位区域^[31]。文献^[48]通过实验研究运动状态下的金属微粒对表面电荷的影响, 发现固定的金属微粒不会引起电荷积累模式的显著变化。微

粒在移动过程中撞击高压或接地电极的边缘, 会促进电荷积累, 如图 9 所示, 电荷积累行为与微粒的运动轨迹和停止位置相关。

已有的研究表明金属微粒通过 2 个方面影响绝缘子表面电荷积累^[49], 一是金属微粒畸变电场使得肖特基势垒降低, 降低势垒如式(1)所示, 电荷更容易从高压电极注入, 并通过体积电导积聚在高压电极周围; 二是金属微粒引发局部气体分子电离产生带电粒子, 并在法向电场作用下向绝缘子表面迁移。

$$\Delta\varphi = \left(\frac{e^3}{4\pi\epsilon\epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}} E^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi$ 为降低的肖特基势垒; E 为电场强度; e 为电子电量; ϵ 为介电常数; ϵ_0 为真空介电常数。

西安交通大学邓军波等人将雷电冲击电压下表面电荷积累分为金属粒子附近的双极电荷和随机

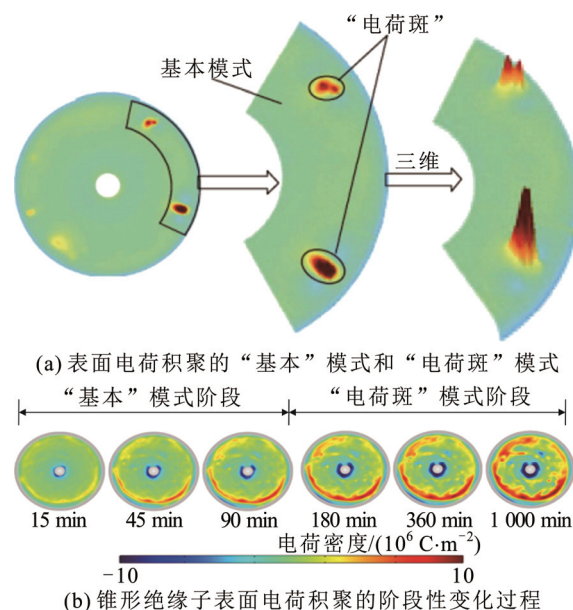


图 8 直流 GIL 腔体中表面电荷积聚特性的发展规律^[29]

Fig.8 Development of surface charge accumulation characteristics in a DC GIL cavity^[29]

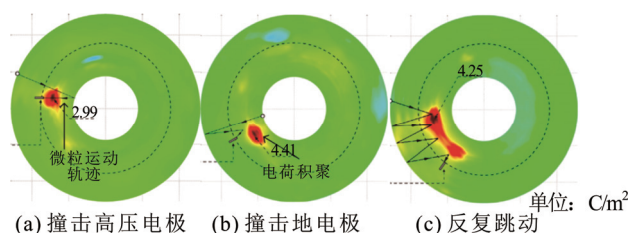


图 9 线性微粒运动引发的表面电荷积聚^[48]

Fig.9 Surface charge buildup induced by linear particle motion^[48]

电荷组成^[50]。该研究认为第1种电荷源于在金属粒子处的电场浓度引起的气体电离,第2种电荷源于由微小的金属尘埃或绝缘体内部缺陷引起的局部气体电离。冲击电压下微粒在绝缘子附近的电晕放电是表面电荷积累的必要条件。不存在电晕放电时,由于在气体侧缺乏自由的空间电荷,只有非常少量的电荷可以聚集在绝缘体表面上;当存在电晕放电时,绝缘子表面积聚可以在很短时间内完成。

构建绝缘子表面电荷积聚模型对于理解电荷行为、指导精细化调控沿面闪络具有重要意义。通过考虑绝缘子气-固界面的固体侧体电流、气体侧体电流和沿面切向电流主导的3种表面电荷积聚机制的动态博弈关系,J.Kindersberger建立了用于计算“基本”模式下表面电荷积聚分布特征的经典数学模型^[51]。华北电力大学马国明和李成榕、沈阳工业大学李晓龙等人在此模型基础上引入了电-热多物理场耦合效应,分析了温度梯度和压力变化导致的

电场畸变对“基本”模式的表面电荷积聚态的影响规律^[24,52-56]。

上海电力大学卢武等人三维视角下对不同体电导率($10^{-17} \sim 10^{-14}$ S/m)以及表面陷阱存在情况下的盆式绝缘子表面电荷积聚情况进行了数值分析^[57-59],见图10。仿真结果证明,由绝缘子凹-凸面法向电场差异导致的异面电荷注入耦合效应、表面陷阱引起的不均匀电荷耗散效应,同样是导致“电荷斑”模式表面电荷积聚的重要原因。文献[60]研究了金属微粒污染环境绝缘子附着和悬浮微粒对绝缘子表面电荷积聚的影响,研究发现对于附着绝缘子表面情况,附着微粒能引起表面电荷积聚激增,微粒两端附近出现新的表面电荷最大值。

对于悬浮于表面的微粒^[53,61],当微粒靠近绝缘子表面时,将引起其正对绝缘子表面区域异性电荷积聚增加,并且当尖端距绝缘子表面距离大于4倍微粒直径时,微粒对绝缘子表面电荷积聚的影响

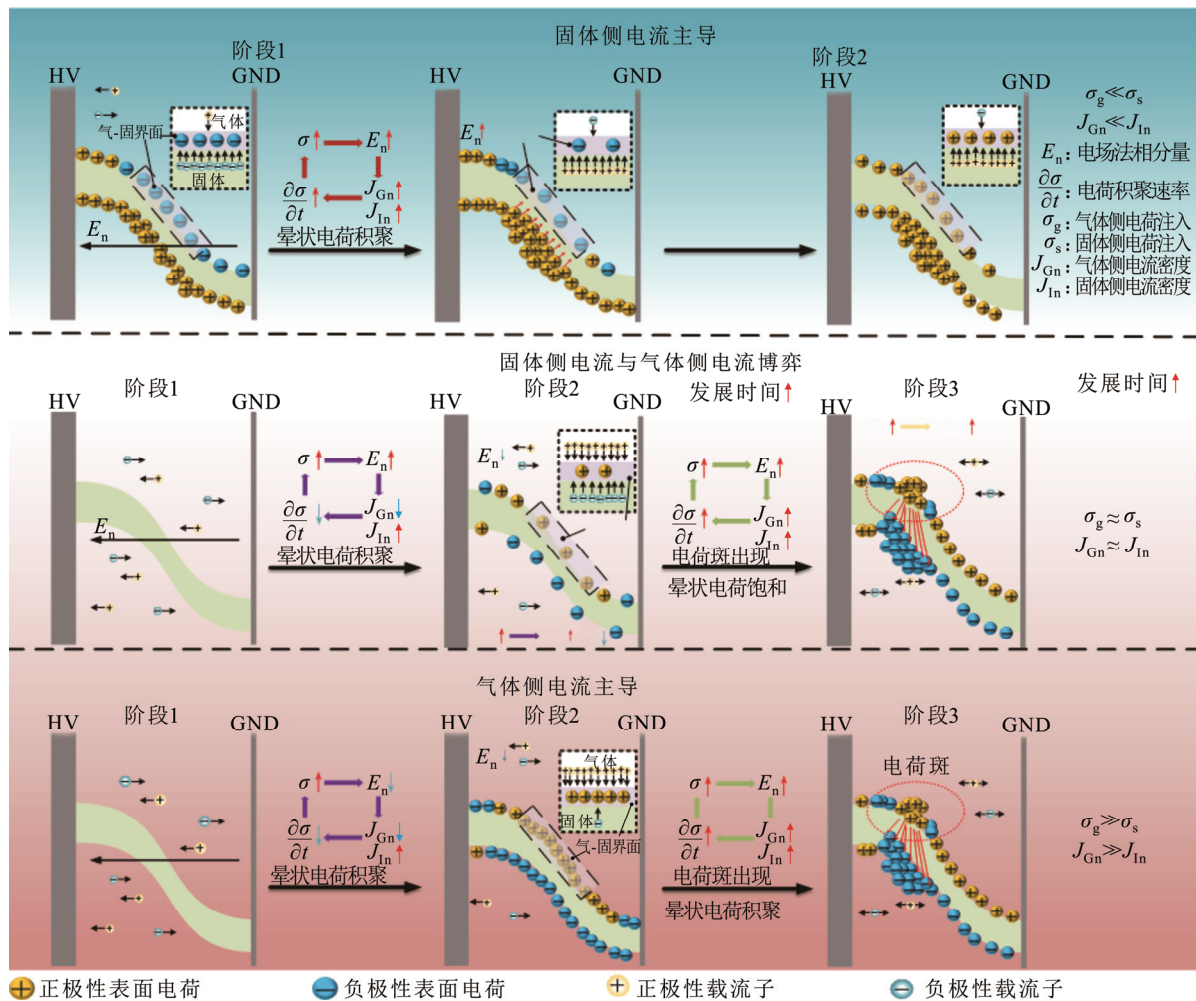


图10 不同主导机制下盆式绝缘子表面离散电荷斑形成机理^[58]

Fig.10 Mechanism of discrete charge spot formation on basin insulator surface under different dominant mechanisms^[58]

可忽略不计。后续金属微粒诱发沿面闪络的机理研究需要引入真实工况中存在的电-热耦合应力和微放电特性, 重点关注微粒电动力学特性对气-固界面电荷输运行为的影响规律, 研究其与表面电荷积聚的关联关系。

2.2 金属微粒诱发沿面闪络的发展机理

天津大学梁虎成和杜伯学在 60~100 kV 正极性和负极性直流电压下对由 0.1 MPa SF_6 气体填充的 GIL 绝缘子沿面闪络现象进行了观测, 总结出绝缘子沿面闪络是一个由如图 11 所示的自然电离、电晕放电、刷状放电和电弧击穿组成的 4 阶段过程, 且沿面闪络的形成概率与绝缘子凹-凸面异侧的同极性电荷输运导致的同侧电场增强效应密切相关^[62]。西安交通大学李盛涛、闵道敏等人围绕三结合点电荷发射、固体表层电荷输运、气体碰撞电离的物理过程及耦合机制, 建立了基于高斯分布特征参数的绝缘子沿面闪络与失效概率分布仿真模型, 并提出绝缘子固体侧电荷注入势垒和陷阱能级是影响绝缘子沿面闪络的主要电荷输运特征参数^[63]。重庆大学许杭等人发现表面电荷积聚导致的场强畸变提高了局部电子有效碰撞电离系数, 降低了电子崩起始所需外施场强, 从而降低闪络电压^[64]。而分布在电子崩发展长度内的表面电荷捕获异极性电荷和促进同极性电荷迁移, 阻碍流注发展, 提高了闪络电压。2 种机制协同作用导致沿面闪络电压下降。

沿面闪络的发展过程始于高场强处, 电子在强电场作用下激发并撞击固体界面, 使绝缘材料表面发射出二次电子。二次电子再在电场中加速, 从而进一步产生更多的二次电子, 实现电子倍增。同时, 撞击绝缘材料表面的电子也会刺激气体分子与绝缘材料发生降解和电离并产生高能等离子体。最终, 生成的等离子体通道向地电极扩展, 形成沿面闪络通道, 引发电流剧烈增加并导致放电现象的发生。因此沿面闪络发展可分为起始微放电阶段、流注阶段、贯穿闪络阶段。高压电极附近的金属微粒易于产生局部流注, 为绝缘子的沿面闪络发展提供固定的路径^[22,31]。齐波等人通过对固定绝缘子表面的沿面放电图谱特征研究, 将固定金属粒子引发的表面放电分为 3 个发展阶段, 从初期电晕放电, 到膨胀阶段电晕放电与表面放电共存, 最后阶段表面放电^[65]。

对比现阶段国内外关于表面电荷积聚与沿面闪络的实验研究和仿真模拟工作进展可以发现, 目前关于绝缘子表面电荷积聚机理的理论工作主要集

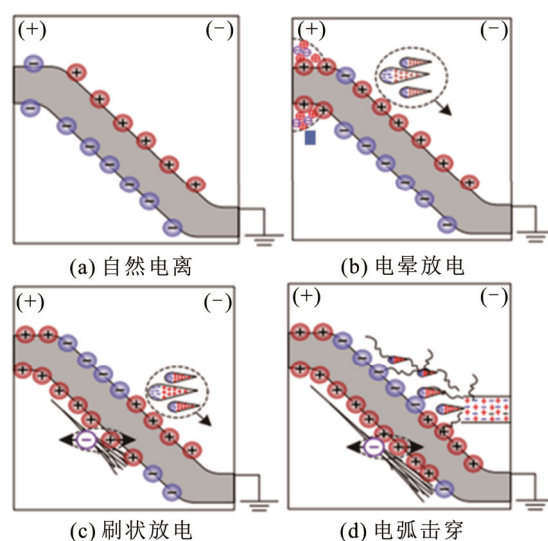


图 11 直流 GIL 腔体中绝缘子沿面闪络的阶段性变化过程^[62]

Fig.11 Staged process of insulator surface flashover in the DC GIL cavity^[62]

中在对理想状况下无缺陷、无气体放电源的“基本”模式电荷积聚数学模型的开发和改进上, 由绝缘子表面缺陷态以及金属微粒等气体侧微放电源导致的“电荷斑”模式电荷积聚数学模型尚须完善。现有的沿面闪络模型使用数据拟合和概率分布的形式对不同电离形式下的电荷输运特征变量进行权重判定, 这种适用于预设和固定种类特征参数的计算方法给金属微粒可能诱发的新增电荷输运特征变量导入模型计算带来一定困难。因此, 为了掌握沿面闪络微观电荷行为和宏观放电现象的阶段化对应关系和过程性发展机理, 还须寻找能够在实验观测层面上有效描述微观放电行为的参量, 从而实现对闪络发展阶段的精细化判别。

3 金属微粒诱发表面电荷积聚及沿面闪络的抑制方法研究现状

3.1 金属微粒抑制手段

金属微粒的荷电是其在 GIS/GIL 腔体内运动行为的基础, 因此通过改变腔体内微粒的荷电特性可有效调控微粒的运动活性。李庆民、律方成和王健等人开发出改性聚酰亚胺电极覆膜材料, 发现直流电压下电极覆膜可对金属微粒荷电进行有效抑制, 使用该材料对中心电极进行处理后, 可使直流 GIL 腔体内随机分布的金属微粒活性降低 20%以上^[66-67]。

此外, 在合理位置设置微粒陷阱可以使运动到该区域的微粒由于所受电场力小于重力而失活, 达

到捕获微粒的目的。文献[68]通过仿真研究发现楔形微粒陷阱相比于传统陷阱,有更好的电场屏蔽效应,并能防止微粒逃逸。文献[69]提出上提式陷阱结构,能有效防止入陷动能较大的金属微粒逃逸。文献[70]发现绝缘子附近金属微粒弹射后落点集中于距离绝缘子底部 2~6 cm 处,在此处布置微粒陷阱可提高捕获效率。文献[29]研究发现,微粒陷阱底部的电场强度随着槽宽的增大而上升,随着厚度、槽数的增大而降低,陷阱的厚度增加会增大其前方轴向的电场值,提高捕获效果。通过优化微粒陷阱几何参数,王健、李庆民等人发现金属微粒的捕捉效率可提升至 36.2%^[32,71-74]。

针对微粒在不同区域的运动行为,设置多组陷阱装置,例如在屏蔽罩下方微粒运动较为强烈的区域附近使用栅格型陷阱,并在管道其他地方加设条形陷阱^[75]。此外,设置驱赶电极可使金属微粒在碰撞后朝远离绝缘子的方向运动,从而降低金属微粒引发沿面闪络的危害。驱赶电极仅改变运动方向,不能降低微粒运动活性,因此可与微粒陷阱协同作用,提高微粒陷阱的捕获效率。文献[72]在微粒集中落点处布置微粒陷阱,捕获效率相较于无驱赶电极时提升了 25%。文献[76]通过有限元仿真,优化驱赶电极与陷阱间的位置配合,通过考虑不同微粒的最佳驱动电场得到直流老练优化程序,将陷阱捕获不同尺寸微粒概率平均提升 50%。

仅依靠微粒陷阱作为主要抑制手段只能捕获跳动状态的微粒,而对于微粒飞萤等复杂的运动行为,则需要多种防控手段相互协同作用。文献[77]通过微粒陷阱表面涂层的方法,降低跳动至陷阱表

面微粒的活性,使得捕获效率提高了 17.2%。文献[78]提出一种微粒协同抑制方法,通过电极覆膜终止微粒运动行为,在微粒降落至电极表面后通过直流老练程序和驱赶电极相互配合,实现对飞萤微粒的捕获。该协同抑制方法使飞萤微粒捕获效率达到 78%。此外,绝缘子表面同极性电荷能增加金属粉尘的吸附能力,异极性电荷可以削弱金属粉尘的吸附能力,因此,合理的电荷调控方法与微粒治理手段协同作用可以更好地降低金属粉尘对沿面绝缘性能的影响。

3.2 表面电荷调控方法

上海电力大学王哲铭、张周胜从电荷输运过程的物理机制角度出发,引入“大坝-洪水”模型,对目前常用的氟化^[79]、涂层^[80]、臭氧处理^[81]、粒子掺杂^[82]等电荷和闪络调控手段进行了分类,提出了如图 12 所示的直流 GIL 气-固界面介电特性的“分层式”调控体系,将抑制闪络措施归类为“疏散电荷”和“束缚电荷”2 种模式,为不同理念电荷调控手段的协同作用提供了新思路^[83]。

清华大学李传扬等人通过观测环氧薄片表面的电子迁移现象,发现高压电极附近的电子迁移在热梯度的作用下显著加剧,进而产生“近似绝缘失效区”,使绝缘子表面的大部分压降集中在地电极附近^[23]。基于此发现,李传扬等人进一步设计了基于碳化硅/氧化铝掺杂比例优化的电荷自适应绝缘子,由中心导体周围的“绝缘区”和地电极附近的“电荷自适应区”组成,利用碳化硅的非线性电导特性,加快高电场时的表面电荷消散,以达到限制电荷积聚的效果^[84-85],见图 13。文献[86]通过降低法向场

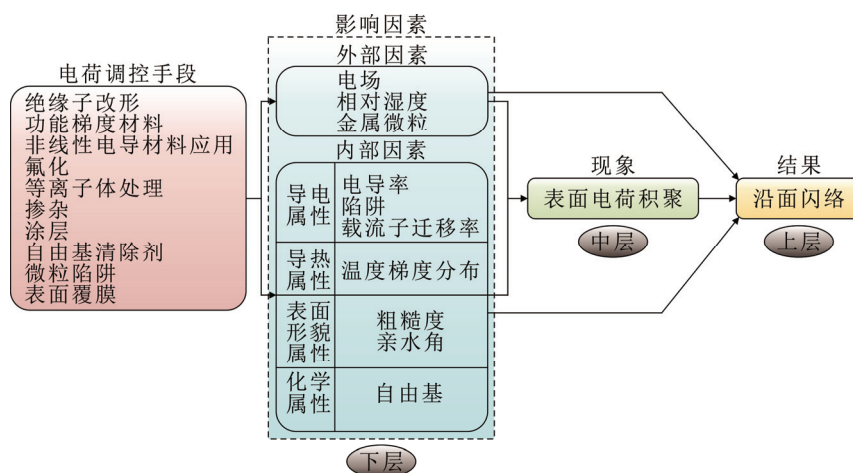


图 12 直流 GIL 气-固界面介电特性的“分层式”调控体系^[83]

Fig.12 “Layered” system for regulating the dielectric properties of the DC GIL gas-solid interface^[83]

强为准则的几何优化, 有效减少绝缘子表面电荷积聚和粉尘吸附, 并进一步通过 Si/C 含氟复合涂层, 构建复合梯度界面绝缘体系, 最终使凸面闪络电压提升了 24.9%。文献[87]采用 3,3',4,4'-二苯酮四酸二酐(3,3',4,4'-diphenylketetetracyclic anhydride, BTDA)提高环氧/玻璃纤维复合材料的分子链交联度, 研究表明, 少量的 BTDA 剂可以引入碳基, 有效提高 EP/玻璃复合材料的捕集水平和密度, 抑制表面电荷的积累, 降低表面电导率, 提高闪络电压, 过量的 BTDA 会降低陷阱的能级和密度, 导致表面电荷的积累, 最终提高表面电导率。当 BTDA 加入质量分数为 15% 时, 表面闪络电压增加到其最大, 比纯 EP/玻璃材料的值高出 17.3%。合肥工业大学薛建议、西安交通大学张冠军、李文栋等人通过仿真研究发现, 采用绝缘子几何形状轮廓和介电分布拓扑优化的方式, 可以有效抑制绝缘子表面异极性电荷的积聚, 从而调控整体和高场强区域的电场分布并提高沿面闪络电压^[71]。

氟化可在绝缘子表面引入浅层陷阱, 加速表面电荷的耗散, 提高绝缘子沿面闪络性能。同济大学安振连等人通过对绝缘子表面进行氟化处理, 改善了绝缘子表面电场分布情况, 显著减少了表面电荷积聚和提高了绝缘子闪络电压^[88-91]。文献[79]将盘式绝缘子在 0.05 MPa、55 °C 的 12.5%F₂/N₂ 混合气

体环境中氟化 30 min, 使得 Weibull 特征直流闪络电压和平均直流闪络电压分别提高了 15.5% 和 15.7%。在掺杂 Al₂O₃ 粒子的环氧材料中, 氟化反应可能导致 Al₂O₃ 粒子释放氧气, 这一过程对环氧材料的氟化特性产生显著影响^[92]。研究表明, 表面氟化处理增加了环氧复合绝缘体和纯环氧绝缘体的表面亲水性, 显著提高了表面电导率。且在 Al₂O₃ 质量分数为 1.0% 的掺杂样品具有最低的表面电势衰减率和最高的深度的陷阱能级和陷阱密度, 闪络电压也在质量分数为 1.0% 时达到峰值^[93]。

表面紫外线辐照会使得绝缘子表面的分子链与空气中的 O₂ 反应发生断裂, 生成羟基、羰基或羧基等极性基团, 降低气固界面绝缘性能。但无氧条件下紫外线辐照会使得环氧表面分子链发生交联反应, 提升绝缘性能。文献[94]通过分析真空紫外辐照处理后环氧复合材料的红外反射光谱图, 发现环氧材料中 C—H 键和环氧基会因紫外辐照而断裂生产稳定的分子链和羟基结构。进一步对陷阱参数研究后发现, 紫外线辐照能降低环氧复合材料表面浅陷阱的密度, 增加深陷阱的能级和密度。

对比现阶段国内外关于金属微粒诱发绝缘子表面电荷积聚及沿面闪络抑制方法的实验研究和仿真模拟工作进展可以发现, 目前大多数文献中的研究成果均是以闪络电压、微粒捕获概率、电场分布

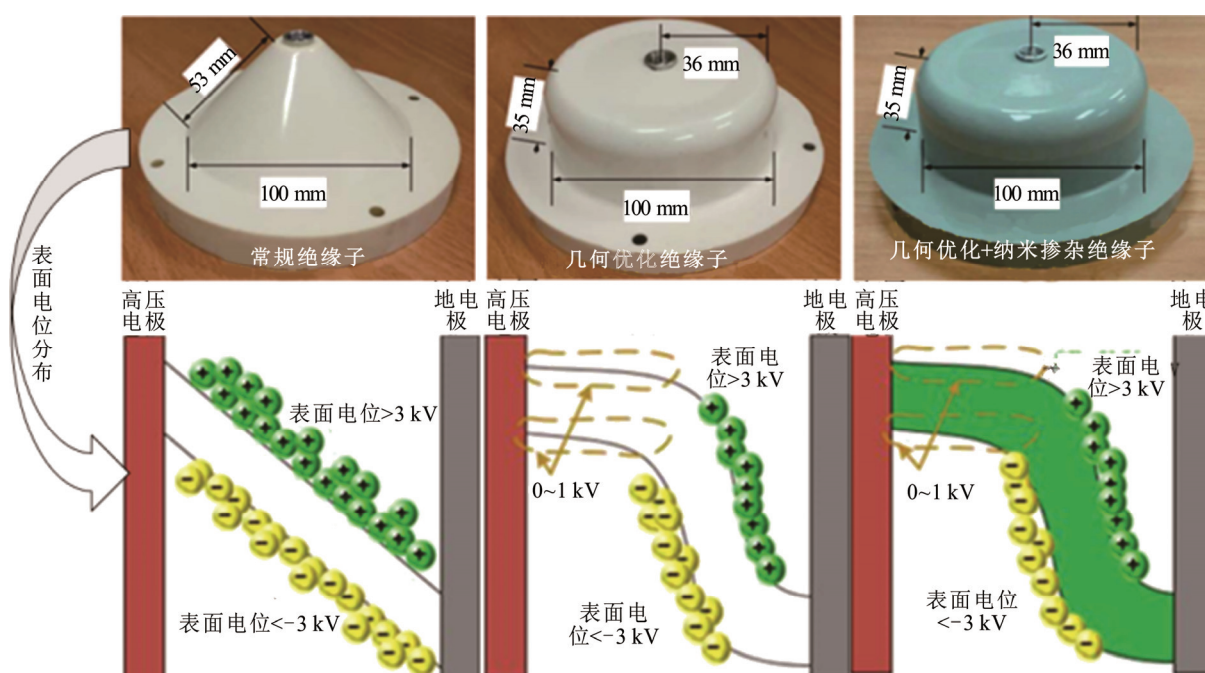


图 13 基于碳化硅/氧化铝掺杂比例优化的电荷自适应绝缘子设计方案/效果对比^[84-85]

Fig.13 Comparison of design options/effects of charge-adaptive insulators based on optimization of silicon carbide/alumina doping ratio^[84-85]

情况等结果性的指标作为评估调控效果的判定依据。可是沿面闪络行为的主导机制具有高度不确定性,受各类直接及间接因素影响,现阶段不完善的沿面闪络起始和发展模型尚不能为研究人员提供过程化的视角,对实验具体场景下绝缘子闪络抑制效果进行有效评估。

4 待解决问题与技术路径

综上,现阶段关于金属微粒诱发直流 GIS/GIL 绝缘子沿面闪络现象及机理的相关研究存在着以下不足之处。

1) 现有的金属微粒电动力学特性仿真模型主要关注绝缘子表面以外气体间隙中的空间电荷发展情况,尚不能对金属微粒在沿面闪络过程中对表面电荷注入和输运的影响规律和作用机理进行精确模拟和有效验证。

2) 金属微粒诱发沿面闪络过程中“电荷斑”模式表面电荷积聚阶段向沿面放电阶段转变的物理机制尚未清晰探明,缺乏完善的数学模型对表面电荷起始到形成贯通电流的沿面闪络全过程中电荷输运等微观演变机制进行梳理。

3) 现阶段针对单一特征参量的沿面闪络观测实验难以表征具有多尺度时间特征的闪络阶段化发展过程,尚缺乏能精细化阐释沿面闪络的多阶段、全时域的观测方法。

4) 现有的自适应调控方法大都以本征电荷积聚引发的长期渐变型闪络为抑制对象,针对由局部电荷积聚引起的短时突变型闪络的自适应调控方法还须进一步深入。

如图 14 所示,为了实现优化绝缘子的绝缘性能的目标,需要对沿面闪络全过程的电荷注入、输运等微观演变机理进行梳理。然而,现有研究大都对秒到小时时间尺度下的表面电荷积聚,或者微纳秒到毫秒时间尺度下的放电过程进行单独分析^[62],以至于表面电荷积聚行为与沿面放电的发展现象无法统一,两者的过程化转变机制并不准确。因此有必要在微纳秒到小时的完整时间尺度下,开展符合实际运动特征的金屬微粒对表面电荷积聚特性乃至沿面放电的精细化影响性研究,以电荷输运动态演变的视角,揭示在金属微粒电动力学特性影响机制下直流 GIS/GIL 绝缘子气-固界面中表面电荷以及放电特性演变机理。最终建立描述绝缘子沿面闪络起始和发展过程的精细化模型,推动对高压直

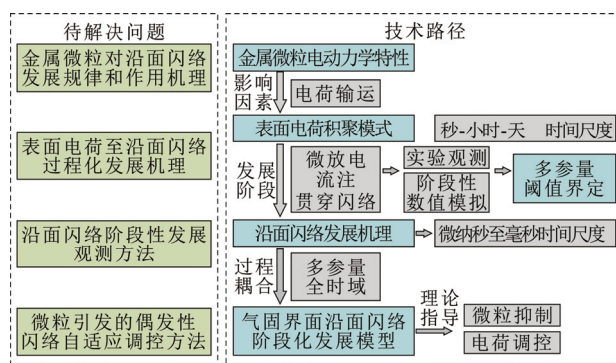


图 14 待解决问题与技术路径

Fig.14 Pending issues and technology pathways

流条件下绝缘子沿面闪络机理的深入理解,并为直流 GIS/GIL 在柔性直流输电系统中的绝缘设计提供理论基础。

5 结论

本文紧密围绕直流 GIS/GIL 中金属微粒诱发沿面闪络的机理研究与抑制中亟须解决的闪络现象过程观测与模拟、表面电荷与沿面放电底层物理机制统一等关键问题做如下工作。

1) 综述了金属微粒对气-固界面电气特性影响机制、诱发沿面闪络过程化发展机理、表面电荷积聚及沿面闪络的抑制方法 3 个方面的研究进展。

2) 探究金属微粒电动力学的动态模拟方法、表面电荷积聚向闪络演变的微观机理模型、沿面闪络阶段性发展过程中的主导因素与机制。

3) 结合现有研究的不足,提出金属微粒调控与沿面闪络抑制研究技术路线,为直流 GIS/GIL 绝缘子沿面闪络抑制及绝缘性能提升提供了探索方向。

参考文献 References

- [1] LI C Y, ZHANG C H, LV J Z, et al. China's 10-year progress in DC gas-insulated equipment: from basic research to industry perspective[J]. iEnergy, 2022, 1(4): 400-433.
- [2] LI Y X, ZHANG B Y, LI X W, et al. Optimization of insulators in ± 550 kV HVDC GIS for offshore wind platform considering charge accumulation[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 223: 109549.
- [3] LI Z, LIU J, OHKI Y, et al. Surface flashover in 50 years: theoretical models and competing mechanisms[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 853-877.
- [4] 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.

- [5] 杨卓栋, 齐波, 董浩, 等. SF₆ 直流穿墙套管金属微粒产生过程模拟及沿面闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2848-2857.
YANG Zhuodong, QI Bo, DONG Hao, et al. Simulation of metal particles generation process in SF₆ DC wall bushing and experimental study of flashover characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2848-2857.
- [6] 丁屹林, 郝建, 钟尧, 等. 超高压 GIL 设备振动模态及振动特性分析研究[J]. 电网技术, 2023, 47(7): 2810-2819.
DING Yilin, HAO Jian, ZHONG Yao, et al. Vibration modes and characteristics of EHV GIL equipment[J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2810-2819.
- [7] 贾江波, 查玮, 张乔根, 等. 交流电压下预埋电极对绝缘子附近导电微粒运动的影响[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 136-141.
JIA Jiangbo, ZHA Wei, ZHANG Qiaogen, et al. Influence of metal inserted polytetrafluorethylene spacer on the motion of conducting particle under AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 136-141.
- [8] 律方成, 刘宏宇, 阴凯, 等. 直流 GIL 不均匀场中金属微粒运动的数值模拟及放电特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2798-2806.
LÜ Fangcheng, LIU Hongyu, YIN Kai, et al. Numerical simulation and discharge characteristic analysis of metallic particle motion in non-uniform electric field of DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2798-2806.
- [9] 程涵, 魏威, AYUBI B L, 等. 直流 GIL 中线形金属微粒电动力学行为研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(24): 5283-5293.
CHENG Han, WEI Wei, AYUBI B L, et al. Study on the electrodynamic behavior of linear metal particles in DC gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5283-5293.
- [10] 张乔根, 游浩洋, 马径坦, 等. 直流电压下 SF₆ 中自由线形导电微粒运动特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(3): 696-703.
ZHANG Qiaogen, YOU Haoyang, MA Jingtan, et al. Motion behavior of free conducting wire-type particles in SF₆ gas under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 696-703.
- [11] 王健, 李庆民, 李伯涛, 等. 直流 GIL 中自由线形金属微粒的运动与放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4793-4800.
WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Motion and discharge behavior of the free conducting wire-type particle within DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4793-4800.
- [12] YOU H Y, ZHANG Q G, GUO C, et al. Motion and discharge characteristics of metal particles existing in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 876-885.
- [13] 李杰, 李晓昂, 吕玉芳, 等. 工频电压下片状自由金属微粒带电特性与运动规律研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 1166-1175.
LI Jie, LI Xiaolang, LYU Yufang, et al. Study on the charge characteristics and movement pattern of lamellar particles under power frequency voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1166-1175.
- [14] WANG J, LI Q M, LI B T, et al. Motion analysis of the particle in DC GIL considering the random collisions and gaseous resistance[C]//Proceedings of the 2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Sydney, Australia: IEEE, 2015: 480-483.
- [15] WU Z H, LI Z K, LIU P, et al. Simulation and analysis on motion behavior of metal particles in AC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 567-574.
- [16] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. 交流 GIS 绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(14): 4315-4324.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of submillimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4315-4324.
- [17] 律方成, 马康, 刘华琦, 等. 直流 GIL 微粒陷阱的捕获机理分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5751-5762.
LYU Fangcheng, MA Kang, LIU Huaqi, et al. Capture mechanism analysis and optimization design of DC GIL particle trap[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5751-5762.
- [18] 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.
- [19] 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.
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.
- [20] 胡智莹, 魏来, 耿秋钰, 等. 直流 GIS/GIL 中线形金属微粒群飞萤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.
- [21] 常亚楠, 耿秋钰, 胡智莹, 等. 直流电压下线形微粒飞萤运动物理机制与临界起始判据[J]. 电工技术学报, 2023, 38(3): 648-658.
CHANG Ya'nan, GENG Qiuyu, HU Zhiying, et al. Physical mechanism and critical starting criterion of wire particle firefly movement under DC electric stress[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(3): 648-658.
- [22] LI C Y, ZHU Y J, HU J, et al. Charge cluster triggers unpredictable insulation surface flashover in pressurized SF₆[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(1): 015308.
- [23] LIN C J, XU Y J, CHEN G, et al. Luminescence reveals micro discharge as a potential triggering factor for surface flashover[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(44): 445103.
- [24] LI C Y, HU J, LIN C J, et al. The potentially neglected culprit of DC surface flashover: electron migration under temperature gradients[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3271.
- [25] QI B, GAO C J, LI C R, et al. The influence of surface charge accumulation on flashover voltage of GIS/GIL basin insulator under various voltage stresses[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 105: 514-520.
- [26] 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.
- [27] XING Y Q, SUN X B, YANG Y, et al. Metal particle induced spacer surface charging phenomena in direct current gas-insulated transmission lines[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(34): 345401.

- 34LT03.
- [28] 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.
- [29] 李大雨, 张博雅, 高文强, 等. 直流电压下绝缘子表面电荷分布中“电荷斑”模式的分析与研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5217-5223.
- LI Dayu, ZHANG Boya, GAO Wenqiang, et al. “Charge speckles” pattern in surface charge distribution of insulator under DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5217-5223.
- [30] 齐波, 李成榕, 郝震, 等. GIS绝缘子表面固定金属颗粒沿面局部放电发展的现象及特征[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 101-108.
- QI Bo, LI Chengrong, HAO Zhen, et al. Evolution phenomena and features of surface partial discharge initiated by immobilized metal particles on GIS insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 101-108.
- [31] WANG J, WANG J R, HU Q, et al. Mechanism analysis of particle-triggered flashover in different gas dielectrics under DC superposition lightning impulse voltage[J]. IEEE Access, 2020, 8: 182888-182897.
- [32] 王健, 李庆民, 李泊涛, 等. 考虑非弹性随机碰撞与 SF₆/N₂ 混合气体影响的直流 GIL 球形金属微粒运动行为研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3971-3978.
- WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Motion analysis of spherical conducting particle in DC GIL considering the influence of inelastic random collisions and SF₆/N₂ gaseous mixture[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3971-3978.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] OOTERA H, NAKANISHI K. Analytical method for evaluating surface charge distribution on a dielectric from capacitive probe measurement-application to a cone-type spacer in/or-500 kV DC-GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(1): 165-172.
- [37] 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.
- [38] ZHANG B Y, QI Z, ZHANG G X. Charge accumulation patterns on spacer surface in HVDC gas-insulated system: dominant uniform charging and random charge speckles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1229-1238.
- [39] 张博雅, 王强, 张贵新, 等. SF₆ 中绝缘子表面电荷积聚及其对直流 GIL 闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1481-1487.
- ZHANG Boya, WANG Qiang, ZHANG Guixin, et al. Surface charge accumulation on insulators in SF₆ and its effects on the flashover characteristics of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1481-1487.
- [40] 金硕, 郭世瑞, 杨宇晨, 等. 直流电压下盆式绝缘子表面电荷对沿面闪络的影响[J/OL]. 高电压技术, 2024: 1-12[2024-10-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240056>.
- JIN Shuo, GUO Shirui, YANG Yuchen, et al. Effect of surface charge on surface flashover of Basin-type insulator under DC voltage[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-12[2024-10-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240056>.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] 王文渠, 赵慧存, 高宇, 等. 基于分区涂覆的圆盘绝缘子表面电荷抑制试验分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(5): 111-119.
- WANG Wenqu, ZHAO Huicun, GAO Yu, et al. Experimental analysis of disc insulator surface charge suppression based on zoning coating[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(5): 111-119.
- [44] 赵慧存. 基于分区涂覆的圆盘绝缘子表面电荷抑制方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2021.
- ZHAO Huicun. Research on surface charge suppression method of disc insulator based on zoning coating[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2021.
- [45] MA G M, ZHOU H Y, LI C R, et al. Designing epoxy insulators in SF₆-filled DC-GIL with simulations of ionic conduction and surface charging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3312-3320.
- [46] WANG Q, ZHANG G X, WANG X X. Characteristics and mechanisms of surface charge accumulation on a cone-type insulator under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 150-155.
- [47] KINDERSBERGER J, LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluoride-part II: measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 949-957.
- [48] GAO Y, WANG H, YUAN X C, et al. Surface charge accumulation on a real size epoxy insulator with bouncing metal particle under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(7): 2166-2175.
- [49] 王涵, 薛建议, 陈俊鸿, 等. SF₆/N₂ 混合气体中金属微粒对 GIL 盆式绝缘子表面电荷积聚特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4663-4671.
- WANG Han, XUE Jianyi, CHEN Junhong, et al. Influence of metal particles on surface charge accumulation characteristics of GIL spacer in SF₆/N₂ mixture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4663-4671.
- [50] LIU Y O, LI K F, FAN X F, et al. Influence of metal particles on surface charge accumulation characteristics of spacer in SF₆/N₂ Mixtures under impulse voltage[C]//Proceedings of 2018 Condition Monitoring and Diagnosis. Perth, Australia: IEEE, 2018: 1-5.
- [51] 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.
- [52] LI X L, WAN M D, ZHANG G K, et al. Surface charge characteristics of DC-GIL insulator under multiphysics coupled field: effects of ambient temperature, load current, and gas pressure[J]. IEEE Transactions

- on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(4): 1530-1539.
- [53] 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.
- [54] 周宏扬, 马国明, 赵书静, 等. 温度对直流 GIL 绝缘子电荷积聚特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6675-6681. ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHAO Shujing, et al. Effect of temperature on charge accumulation on insulator in DC-GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6675-6681.
- [55] 周宏扬, 马国明, 刘姝媛, 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.
- [56] LIANG F W, FAN X H, HU J, et al. Surface charging physics of the basin insulator in ± 320 -kV gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(3): 1654-1656.
- [57] 王耀港, 王哲铭, 李珂, 等. 不同主导机制下考虑表面陷阱效应的直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚特性[J/OL]. 上海交通大学学报, 2023: 1-24[2024-10-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1466.U.20231020.1700.002.html>. WANG Yaogang, WANG Zheming, LI Ke, et al. Characteristics of surface charge accumulation on DC GIL Insulators under different dominant mechanisms considering surface trapping effect[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023: 1-24[2024-10-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1466.U.20231020.1700.002.html>.
- [58] WANG Y G, WANG Z M, ZHAO W B, et al. Competitive effect of charge injection on surface charge accumulation of the DC GIL insulator: a numerical study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2320-2329.
- [59] WANG Z M, WANG Y G, DING H, et al. Modeling of surface trapping effect on charge accumulation pattern at gas-solid interface in DC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 466-476.
- [60] 王志远, 王健, 李庆民, 等. 直流 GIL 内金属微粒对表面电荷积聚影响的三维仿真及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6718-6726. WANG Zhiyuan, WANG Jian, LI Qingmin, et al. 3D simulation and experimental study of metal particles' effect in DC GIL on surface charge accumulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6718-6726.
- [61] RADWAN R M, ABOU-ELYAZIED A M. Effect of spacer's defects and conducting particles on the electric field distribution along their surfaces in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(6): 1484-1491.
- [62] LIANG H C, DU B X, KONG X X. Basin-type spacer for DC-GIL-part I: surface charging and discharging behaviors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(3): 1111-1118.
- [63] 陈韵中, 蔡姝娆, 闵道敏, 等. 环氧介质与 SF₆ 气体的气固耦合沿面闪络与失效概率分布特性仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(16): 6145-6154. CHEN Yunzhong, CAI Shurao, MIN Daomin, et al. Simulation on gas-solid coupling surface flashover and failure probability distribution between epoxy resin and SF₆[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(16): 6145-6154.
- [64] 许航, 司马文霞, 孙魄韬, 等. SF₆ 气氛中表面电荷对环氧树脂气固界面电子倍增过程的影响机制[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1716-1725. XU Hang, SIMA Wenxia, SUN Potao, et al. Effect of surface charge on electron multiplication process of ER/SF₆ interface[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1716-1725.
- [65] QI B, LI C R, HAO Z, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 792-800.
- [66] 黄旭炜, 倪潇茹, 王健, 等. 苯硫醚聚酰亚胺电极覆膜材料合成及直流应力下对金属微粒运动特性的抑制作用[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4712-4721. HUANG Xuwei, NI Xiaoru, WANG Jian, et al. Synthesis of phenyl-thioether polyimide as the electrode coating film and its suppression effect on motion behavior of the metal particles under DC stresses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4712-4721.
- [67] 黄旭炜, 李庆民, 邹亮. 聚酰亚胺纳米复合绝缘体系中 TiO₂ 颗粒团聚现象的微观作用机制研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(2): 14-21. HUANG Xuwei, LI Qingmin, ZOU Liang. Research on microscopic mechanism of TiO₂ particles aggregation phenomenon in polyimide nanocomposite insulating system[J]. Insulating Materials, 2020, 53(2): 14-21.
- [68] CHANG Y N, LIU C H, HE J, et al. Design and optimization of particle traps in DC GIL based on the capture effect analysis[C]// Proceedings of the IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Richland, USA: IEEE, 2019: 600-603.
- [69] 刘鹏, 李智凯, 田汇冬, 等. 直流电压下气体绝缘输电线路中微粒运动特性研究及微粒陷阱效能分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5740-5750. LIU Peng, LI Zhikai, TIAN Huidong, et al. Research on motion characteristics of metal particles and capture efficiency of particle traps in gas insulated transmission lines under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5740-5750.
- [70] 王健, 倪潇茹, 王志远, 等. 直流 GIL 金属微粒陷阱捕捉概率与优化设计[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 4090-4097. WANG Jian, NI Xiaoru, WANG Zhiyuan, et al. Trapping probability and designing optimization of particle trap in DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 4090-4097.
- [71] 王超, 李文栋, 杨雄, 等. 基于几何形状/电分布综合优化的 GIS/GIL 盆式绝缘子电场分布特性调控[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7166-7174. WANG Chao, LI Wendong, YANG Xiong, et al. A comprehensive strategy for electric field regulation of GIS/GIL spacer by using structure and dielectric distribution optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7166-7174.
- [72] 胡智莹, 耿秋钰, 魏来, 等. 直流 GIS/GIL 中驱赶电极与微粒陷阱的协同抑制作用及优化设计方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(12): 3338-3349. HU Zhiying, GENG Qiuyu, WEI Lai, et al. Synergistic inhibitory effect and optimal design method of driving electrode and particle trap in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3338-3349.
- [73] 李庆民, 常亚楠, 王健, 等. 气体绝缘输电管道微粒陷阱设计技术研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4182-4193. LI Qingmin, CHANG Yanan, WANG Jian, et al. Methodological ad-

- vances of metal particle traps design in gas insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4182-4193.
- [74] LIANG R X, HU Q, MAN Y Y, et al. Study on kinetic behavior and adsorption mechanism of the micron metal dust near the basin-type insulator in DC GIL[C]//Proceedings of 2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Richland, USA: IEEE, 2019: 604-607.
- [75] 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 Zhenyu, SONG Manqing, LÜ Fangcheng, et al. Study on particle movement and trap suppression in AC environmentally friendly GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(Supplement 1): 278-286.
- [76] 王健, 平安, 常亚楠, 等. 直流应力下主动式微粒抑制方法的动态配合研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(10): 2794-2805, 2831. WANG Jian, PING An, CHANG Ya'nan, et al. Research on dynamic coordination of active particles suppression methods under DC stress[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(10): 2794-2805, 2831.
- [77] ZHANG Y T, WU Z H, XIN L M, et al. Study on capture efficiency of particle trap and performance improvement method for DC GIL/GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 2258-2266.
- [78] 常亚楠. GIL 金属微粒飞萤运动物理机制与协同抑制方法[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2023. CHANG Ya'nan. Physical mechanism and synergistic suppression method of metal particle firefly in GIL[D]. Beijing, China: North China Electric Power University(Beijing), 2023.
- [79] 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.
- [80] XUE J Y, CHEN J H, DONG J H, et al. Enhancing flashover performance of alumina/epoxy spacers by adaptive surface charge regulation using graded conductivity coating[J]. Nanotechnology, 2020, 31(36): 364002.
- [81] HUANG Y, MIN D M, XIE D R, et al. Surface flashover performance of epoxy resin microcomposites influenced by ozone treatment[C]//Proceedings of 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Toyohashi, Japan: IEEE, 2017: 235-238.
- [82] TU Y P, ZHOU F W, CHENG Y, et al. The control mechanism of micron and nano SiO₂/epoxy composite coating on surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1275-1284.
- [83] 王哲铭, 潘越, 张磊, 等. 直流 GIL 气-固界面电荷调控的影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7177-7192. WANG Zheming, PAN Yue, ZHANG Lei, et al. Analysis of charge tailoring techniques for DC GIL gas-solid interface charges[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7177-7192.
- [84] LI C Y, LIN C J, HU J, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges-part I: charge transport and control strategy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1238-1247.
- [85] LI C Y, LIN C J, YANG Y, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges-part II: experiment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1248-1258.
- [86] 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.
- [87] ZHANG L, LIU J, LI Z, et al. Effects of BTDA crosslink on DC surface discharge characteristics of EP/glass composite for smoothing reactor[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(1): 66-74.
- [88] 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.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] 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.
- [92] ZHANG C, MA Y Y, KONG F, et al. Atmospheric pressure plasmas and direct fluorination treatment of Al₂O₃-filled epoxy resin: a comparison of surface charge dissipation[J]. Surface and Coatings Technology, 2019, 362: 1-11.
- [93] WANG F P, ZHANG T, LI J, et al. DC breakdown and flashover characteristics of direct fluorinated epoxy/Al₂O₃ nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 702-737.
- [94] 张磊, 张国宝, 杨为, 等. 真空紫外辐照改性环氧复合材料的直流沿面闪络特性[J/OL]. 高电压技术, 2024: 1-12[2024-10-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240759>. ZHANG Lei, ZHANG Guobao, YANG Wei, et al. DC surface flashover characteristics of epoxy composites modified by ultraviolet irradiation in vacuum[J/OL]. High Voltage Engineering, 2024: 1-12[2024-10-21]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20240759>.



LU Wu

Ph.D.

Associate professor



WANG Zheming

Ph.D. candidate

Corresponding author

卢武

1991—, 男, 博士, 副教授

主要从事高压直流 GIS/GIL 绝缘子表面电荷积聚及沿面闪络特性研究

E-mail: wuluee@shiep.edu.cn

王哲铭(通信作者)

1995—, 男, 博士生

主要从事高压直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚特性、液体放电等

E-mail: 747837606@qq.com