

GIS 内微纳粉尘沿绝缘子界面吸附的时空动力学特性与团聚爆炸现象

薛乃凡¹, 李庆民¹, 王媛², 杨睿成¹, 杨宁², 张斐琛²

(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. 北京市高电压与电磁兼容重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

摘要: 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)是构建新能源电力系统不可或缺的物理支撑。近十年超/特高压放电故障统计分析表明, 金属微粒与粉尘放电占比超过 60%, 现有特高频、超声传感等技术手段针对亚毫米及以上大尺寸微粒可以实现较好的在线监测, 而随机性高、隐蔽性强且必然存在的微纳粉尘由于无法被现有技术有效表征, 极有可能是隐藏在背后的“安全杀手”。为此针对微纳粉尘检测难、机制复杂这一难题, 搭建了适于观察且契合 GIS 运行实际的微纳粉尘吸附实验平台, 发现微纳粉尘在电场中的吸附状态主要包括沿绝缘子界面的团聚式吸附与沿地电极方向的扩散式吸附, 影响运动行为的关键因素包括微纳粉尘的初始位置、质量、材质以及外施电压; 进一步厘清了吸附过程中的特殊物理现象, 团聚式吸附会在环氧树脂绝缘子表面吸附形成微纳粉尘斑随着电压升高, 微纳粉尘斑会“爆炸”形成环状粉尘晕、粉尘晕轮廓加深等不同起举吸附的特殊物理现象, 这类特殊物理现象被认为是诱导沿面闪络的必要条件。粉尘斑构成的局部短路区域与剧烈电场畸变被认为是微纳粉尘诱导沿面闪络的重要先导因素, 最多可降低实验系统击穿电压达 71%。该研究针对微纳粉尘吸附动力学特性的研究可为提升交直流输电管道绝缘安全运行水平提供理论基础和技术支撑。

关键词: 气体绝缘开关设备; 微纳粉尘; 吸附动力学行为; 沿面闪络; 团聚爆炸

Spatial-temporal Dynamic Characteristics and Agglomeration Explosion Phenomenon of Micron-nano Dust Adsorption Along the Insulator Interface in GIS

XUE Naifan¹, LI Qingmin¹, WANG Yuan², YANG Ruicheng¹, YANG Ning², ZHANG Feichen²

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

Abstract: Gas insulated switchgear(GIS) is an indispensable physical support for the construction of new energy power system. Statistical analyses on ultra/ultra-high voltage discharge faults in ten years show that the discharge of metal particles and dusts accounts for more than 60%, the existing ultra-high frequency, ultrasonic sensing and other technical means can be used to achieve better online monitoring for large-size particles with sub-millimeter and above; however, micron-nano dusts are unable to be effectively characterized by the existing technology due to high randomness and, hidden and inevitable existence, thus it is very likely to be hidden in the back of the “safety killer”. Therefore, in accordance with the difficulty in detecting micron-nano dust and the complexity of the mechanism, a micron-nano dust adsorption experimental platform suitable for observation and suitable for the actual operation of GIS is constructed, and it is found that the adsorption state of micron-nano dust in the electric field mainly consists of agglomerative adsorption along the insulator interface and diffusive adsorption along the direction of the ground electrode, and the key factors influencing the behavior of the movement include the initial position of the micron-nano dust, the quality, the material, and the applied voltage; it is further clarified that micron-nano dust may be the hidden safety killer behind. The special physical phenomena in the adsorption process are further clarified. Agglomerative adsorption will occur on the surface of the epoxy resin insulator to form a micron-nano dust speckle, meanwhile, with the increase of voltage, the micro-nano dust speckle will “explode” to form an annular dust halo, and the contour of the halo will be deepened, etc., which is different from that of the starting

adsorption, and such special physical phenomena are considered to induce the flashover along the face of the insulator. This kind of special physical phenomenon is a necessary condition for inducing flashover along the surface. Finally, the physical mechanism of flashover along the surface triggered by micron-nano dust is revealed, and the localized short-circuit area and violent electric field distortion constituted by dust speckle are the important predisposing factors of micron-nano dust induced flashover along the surface, reducing the breakdown voltage up to 71%. In this paper, the research on the dynamic characteristics of micro-nano dust adsorption can provide a theoretical basis and technical support for improving the safe operation level of AC/DC GIS insulation.

Key words: GIS; micron-nano dust; adsorption dynamic behavior; surface flashover; agglomeration explosive

0 引言

建立融合多态能源的新型电力系统是实现我国双碳战略目标的重要技术途径,而先进输变电装备是构建新型电力系统不可或缺的物理支撑。近 20 年来,中国的超/特高压输电技术已在世界上实现了“中国创造”和“中国引领”,其中气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)作为能源输送的“网络关节”和“安全守卫”,以输电损耗小、输电容量大、运行可靠性高、利于可再生能源集成输送等独特优势,在超/高压电网中获得了广泛应用,也为新型电力系统的未来发展提供了强有力的装备支撑^[1-3]。但实际的运行统计表明,绝缘故障仍是造成 GIS 运行失效的主要原因,而内部异物引发的放电故障则成为影响运行安全的首要因素^[4-7]。

对于大尺寸金属微粒(亚毫米级以上)引发的放电故障,基于现有的特高频、超声传感等技术手段可以实现较好的在线监测和预警^[8-10],但工程现场仍存在大量不明原因的绝缘放电故障。经分析,随机性高、隐蔽性强且必然存在的微纳粉尘有可能是隐藏在背后的“安全杀手”。尺寸更小的微纳粉尘因物化活性强、运动随机性高以及集群效应突出,极易运动到绝缘子附近而诱发放电,由此引发的电荷动态转移、电磁辐射、声光辐射及其统计学特性相较于大颗粒呈现独有差异化特征,现有的特高频与超声传感技术已不能有效检测微纳粉尘的弥散运动与放电信号,更无法表征其电动力学特性^[11-13]。

梁瑞雪观测了微米级金属粉尘吸附行为,发现金属粉尘在绝缘子附近存在积聚式、扩散式等 3 种运动模式^[14],但实验在空气中开展且绝缘子材料为聚四氟乙烯。尽管与工程现场有一定差别,仍然为微米级粉尘运动特性研究奠定基础。王靖瑞对不同倾角的绝缘子附近金属粉尘吸附分布特征进行了研究^[15],得到角度越大则绝缘子表面粉尘吸附量越小的定量分析结果以及绝缘子表面金属粉尘分布的共

性特征,但由于其在实验中同时获得粉尘吸附量数值与诱发沿面闪络击穿电压值,导致实验结果误差大、可靠性不高。张连根开展了绝缘子表面毫米级金属异物诱发局部放电的研究,发现了恒压下绝缘子表面密集微放电形态会造成持续性侵蚀并且阐述了诱导沿面闪络机理,但尚未对微米级及以下的金属异物吸附及诱发放电机理进行研究^[16]。许渊通过实验总结得到了 GIS 绝缘子表面不同数量的百微米级金属颗粒运动特性并与局部放电特性进行关联分析,但只得定性结论且未得出直接对应关系^[17]。

由上所述, GIS 中存在的微细金属粉尘易于吸附在绝缘子表面,危害较大,但其动力学行为及吸附机制尚不清晰。在已有对毫米级金属微粒运动行为及放电特性研究的基础上,本文通过搭建易于观察且符合 GIS 实际运行情况的金属粉尘吸附实验平台,明晰了靠近绝缘子侧金属粉尘的动力学行为与吸附过程,发现了吸附过程中的特殊物理现象,重点考察畸变电场和微观力场对金属粉尘动力学行为模式的影响,以期揭示 GIS 盆式绝缘子附近微细金属粉尘的吸附机理,为粉尘防护和绝缘设计提供基础依据。

1 实验平台与参数设置

为厘清 GIS 中微纳粉尘沿绝缘子气固界面的吸附动力学特性规律,搭建了如图 1 所示的同轴圆柱电极实验平台示意图。实验平台中包括了实验腔体(内含同轴圆柱模型)、直流电源以及高清摄像系统 3 部分。

其中同轴圆柱模型为缩比模型,高压电极为直径 40 mm、长度 260 mm 的铝制圆柱体,地电极为内径 120 mm、外径 140 mm、长度 260 mm 的铝制圆柱壳体。高压电极与地电极由透明亚克力板支撑,两者中心轴线重合。同轴圆柱电极平台中使用缩比盆式绝缘子,其内径为 40 mm,外径为 120 mm,厚度为 40 mm,倾角为 45°。图 2 为同轴圆柱缩比

模型三视图。通过开展预实验,该缩比模型在空气中的击穿电压为 40 kV,在 0.1 MPa 的 SF₆ 环境下击穿电压为 140 kV。

高压电极通过实验腔体中的高压电线,经保护电阻与直流电源连接;地电极与地线相接,形成完整的电气回路。实验时将同轴圆柱电极整体放置在正方体密闭实验腔体中,对侧开有透明观察窗,一侧放置光源对整个腔体空间进行补光,一侧架设高清摄像机记录粉尘吸附运动过程。

采用有限元仿真的方法验证本实验采用的半包围式同轴圆柱实验平台与 GIS 全包围式同轴圆柱真型平台电场的等价性。建立半包围式与全包围式同轴圆柱仿真模型,在 SF₆ 气体环境下外施 25 kV 电压,分别得到 2 个模型中气固界面电场分布情况。由于实验中粉尘放置在绝缘子凸侧底部,故粉尘吸附区域大致为地电极对应的绝缘子气固界面 45° 范围内,参照文献[12]的仿真结果,可以证明本实验采用的同轴圆柱电极实验平台的等效性及有效性^[12]。

本实验粉尘放置位置如图 3 所示,放置在凸式绝缘子顶端地电极上,将摆放位置剖分为九宫格,其中位置 1、2、3 位于三结合处,位置 7、8、9 远离三结合处最远。实验前将铝粉放置在干燥箱中 24 h 以上,充分干燥防止水分对实验结果产生影响。为避免前一次实验对后续实验产生影响,开展新一轮实验前用乙醇擦拭高压电极、地电极、绝缘子表面以及腔体内部以消除表面电荷影响,待乙醇蒸发后再开展实验。实验开展时采用高精度天平(误差量 ≤0.1%)称取实验所需质量的粉尘,并在温度为 25 °C、0.1 MPa 的 SF₆ 环境中进行实验,升压速度为 2 kV/s。每组实验重复 5 次取平均值,以消除实验中的偶然现象对实验结果造成的不确定性,后续本文中出现的电压实验记录值均为多次实验求取的平均值。

2 微纳粉尘面向绝缘子的吸附动力学行为

2.1 微纳粉尘吸附过程的典型现象

将 $m=20$ mg、 $d=50$ nm 的铝粉均匀放置在地电极平行于高压导体位置处(位置 2、5、8),其中 m 为粉尘地初始质量, d 为粉尘粒径电压。外加负极性直流电,采用第 1 章所述流程开展实验,观察随电压升高时微纳粉尘沿绝缘子界面的实时吸附运动行为,对粉尘所处绝缘子位置进行拍摄如图 4 所示。

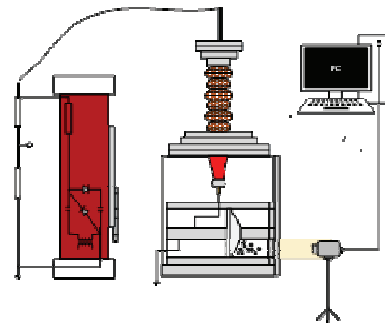


图 1 同轴圆柱电极实验平台示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental platform for coaxial cylindrical electrodes

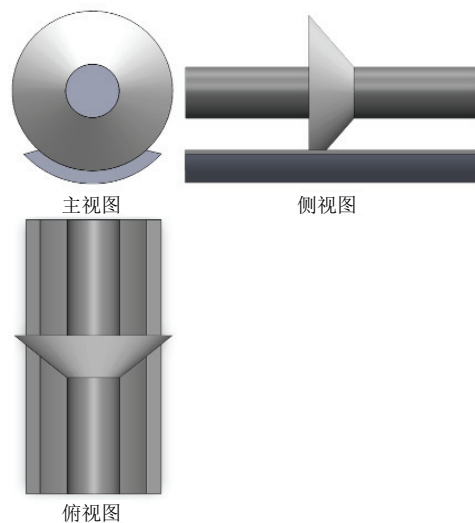


图 2 同轴圆柱电极三视图

Fig.2 Three views of coaxial cylindrical electrode

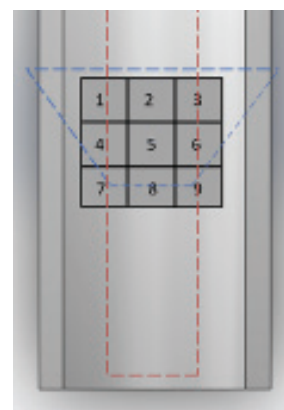


图 3 粉尘摆放位置

Fig.3 Dust placement

需要指出,50 nm 铝粉因光学色散效应,肉眼观测为银黑色。实验结果表明,微纳粉尘从 -10 kV 开始逐渐起举,与大尺寸颗粒不同的是,微纳粉尘的起举具有连续性,且所有粉尘不在同一时刻起举,故

本文后续只记录微纳粉尘的开始起举电压。随着电压逐渐升高, 微纳粉尘在电场中的运动形式主要体现为以下 2 种——沿绝缘子界面的团聚式吸附、沿地电极方向的扩散吸附, 如图 5 所示。

升压超过 -10 kV 之后, 微纳粉尘起举运动到绝缘子表面, 随着电压升高, 微纳粉尘吸附量逐渐增加, 团聚的微纳粉尘量逐渐增加, 颜色越来越深, 团聚式吸附的微纳粉尘于 -40 kV 在凸侧绝缘子表面形成斑状、块状微纳粉尘团聚物, 本文将该团聚物定义为微纳粉尘斑。微纳粉尘斑稳定吸附在绝缘子表面, 如果此时停止升压, 其吸附状态与吸附量基本不再发生变化。但是, 若继续升高电压, 存在于气固界面的微纳粉尘斑将是后续引发环氧树脂绝缘子沿面闪络的重要诱导因素。

而对于沿地电极方向的微纳粉尘扩散吸附行为, 当电压超过 -15 kV 后, 微纳粉尘扩散吸附面积增加, 扩散吸附量增加, 会在地电极表面形成垂直于高压导体方向的贯穿粉尘带, 且随着电压逐渐升高, 粉尘带颜色逐渐加深, 从俯视图看类似于“树状”结构。需要指出, 单从粉尘吸附运动来看, 在形成微纳粉尘斑并完成地电极扩散式吸附行为之后, 初始的 20 mg 微纳粉尘仍有剩余, 后续开展的所有实验并未观测到初始粉尘被完全吸附的实验现象。剩余微纳粉尘堆为后续沿面闪络导致的放电化学反应提供了充分的金属反应物。

2.2 影响微纳粉尘运动行为的关键因素

$m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铝粉吸附实验表明, 粉尘的初始状态将直接影响微纳粉尘沿环氧树脂绝缘子吸附行为, 本文归纳出 4 种影响微纳粉尘吸附行为的因素分别是: 粉尘初始位置、粉尘初始质量、交流/直流、粉尘材质。

2.2.1 不同初始位置微纳粉尘的吸附行为

在图 4 所示实验中, 微纳粉尘布置在平行于高压导体且位于正下方的位置 2、5、8 处。以此位置作为参考位置, 开展布置在平行于高压导体方向且位于侧下方的位置 1、4、7 处、垂直于高压导体方向的位置 4、5、6 处、贯穿布置区域的位置 1、5、9 处以及平行于高压导体的双初始位置 1、4、7/3、6、9 的 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 铝粉沿环氧树脂绝缘子表面吸附实验, 吸附行为动态变化如图 6—图 9 所示。

初始位置位于 1、4、7 处的微纳粉尘整体吸附过程与位于高压导体正下方位置 2、5、8 处的粉尘吸附过程类似, 如图 6 所示。 50 nm 铝粉从 -12 kV

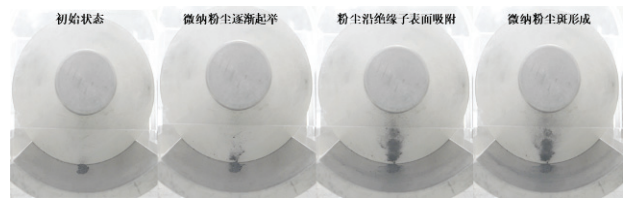


图 4 平行高压导体(位置 2、5、8)处的微纳铝粉尘吸附行为
Fig.4 Adsorption behavior of micron-nano aluminum dust parallel to high-voltage conductor (position No. 2, 5, 8)

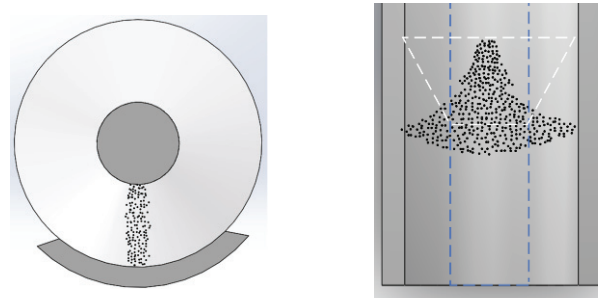


图 5 沿绝缘子界面的团聚式吸附、沿地电极方向的扩散吸附
Fig.5 Agglomerative adsorption along the insulator interface, diffusive adsorption in the direction of the ground electrode

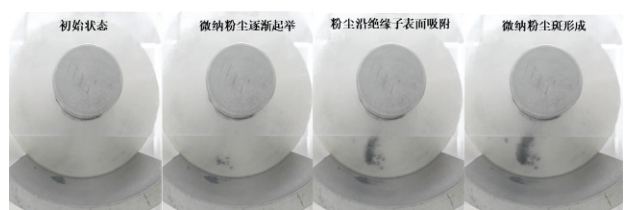


图 6 平行高压导体(位置 1、4、7)处的微纳粉尘吸附行为
Fig.6 Micron-nano dust adsorption behavior at a parallel high-voltage conductor(position No. 1, 4, 7)

开始逐渐起举, 沿着同轴圆柱电极径向向上吸附, 从主视图观测为斜向右上的吸附状态。随着电压逐渐升高, 倾斜的团聚微纳粉尘吸附量逐渐增加, 颜色越来越深。当升压达到 -40 kV 时, 环氧树脂绝缘子表面形成倾斜的稳定微纳粉尘斑。针对地电极上发生的扩散式吸附行为, 整体发展过程与位置 2、5、8 类似。当升压 $>18\text{ kV}$ 后, 粉尘同时沿着地电极远离绝缘子方向、垂直高压导体方向扩散, 由于初始位置在地电极左侧, 形成的地电极扩散痕迹表现出明显的左深右浅特征。

通过分析可知, 2 种平行于高压导体布置(位置 2、5、8 与位置 1、4、7)的微纳粉尘团聚式吸附行为、沿地电极扩散式吸附行为大同小异, 且动态过程对应的电压值偏差较小, 主要原因是布置在这 2

种初始位置的 50 nm 铝粉起举所需要的爬升高度差别不大, 故形成类似的吸附特性所需的电压值也接近。

图 7 展示了初始位置位于垂直高压导体方向(位置 4、5、6)的微纳粉尘吸附过程。50 nm 铝粉从 -10 kV 开始逐渐起举, 与平行高压导体布置的粉尘起举相比, 虽然同样沿着同轴圆柱电极径向向上吸附, 但由于初始位置垂直高压电极, 从主视图观测为横向的吸附状态。随着电压逐渐升高, 横向团聚微纳粉尘吸附量逐渐增加。当升压达到 -42 kV 时, 环氧树脂绝缘子表面形成稳定的横向微纳粉尘斑。针对地电极上发生的扩散式吸附行为; 当升压超过 -12 kV 后, 位置 4、5、6 的粉尘开始沿地电极表面扩散, 整体发展过程稍弱于平行高压电极布置的微纳粉尘, 形成的地电极贯穿式扩散痕迹也较浅。

与前 2 组实验相比, 横向微纳粉尘斑沿绝缘子径向的长度明显更小, 虽然吸附动态过程对应的电压值偏差较小, 与平行高压导体形成粉尘斑的电压值接近, 但为后续阻碍沿面闪络发展提供了可能性。图 8 展示了初始位置位于位置 1、5、9 的微纳粉尘吸附过程。微纳粉尘从 -15 kV 开始逐渐起举, 出现沿界面的团聚式吸附与地电极扩散吸附行为, 起举与吸附过程没有出现明显变化; 当升压达到 -52 kV 时, 形成比位置 1、4、7 倾角更大的微纳粉尘斑。同时不难发现, 地电极扩散吸附面积更大, 已逐渐接近地电极边缘。

由于按照初始位置 1、5、9 布置的微纳粉尘分布在地电极表面的距离长, 其从开始起举到形成的稳定的微纳粉尘斑所需的时间与电压更高, 比初始位置 2、5、8 的同质量粉尘高出 25%。

图 9 表示了双初始位置的微纳粉尘吸附过程, 双初始位置选择了平行于高压导体的位置 1、4、7 与位置 3、6、9。需要指出, 2 堆微纳粉尘总质量仍保持为 20 mg。2 堆微纳粉尘与位置 2、5、8, 位置 1、4、7 对应的起举与团聚式吸附状态保持一致, 电压升到 -10 kV 时, 微纳粉尘开始起举, 于 -44 kV 形成双微纳粉尘斑。与位置 1、4、7 积聚吸附形成的单微纳粉尘斑相比, 形成的双微纳粉尘斑明显颜色更浅, 吸附面积更小。

虽然面向绝缘子的吸附过程、粉尘斑生长行为一致, 即不同初始位置微纳粉尘的粉尘斑形成过程区别不大, 但最终形成的微纳粉尘斑形貌、所需的时间与电压差别较大, 所以微纳粉尘初始位置是影响团聚式吸附形成微纳粉尘斑形态的重要因素。经

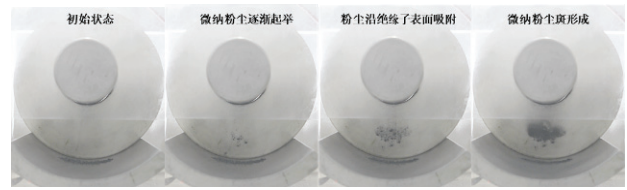


图 7 垂直高压导体(位置 4、5、6)处的微纳粉尘吸附行为
Fig.7 Micron-nano dust adsorption behavior at a vertical high-voltage conductor(position No. 4, 5, 6)

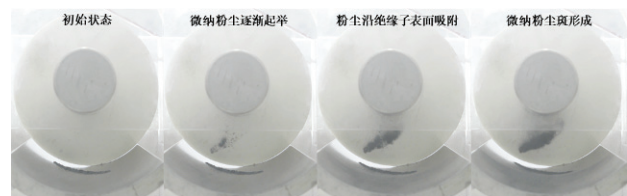


图 8 初始位置 1、5、9 处的微纳粉尘吸附行为
Fig.8 Micron-nano dust adsorption behavior at initial position No. 1, 5, 9

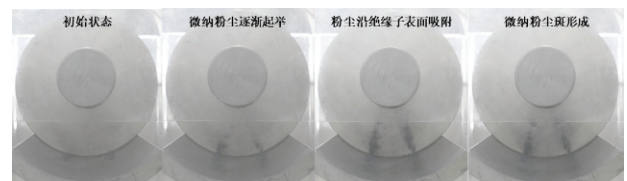


图 9 初始位置 1、4、7/3、6、9 处的微纳粉尘吸附行为
Fig.9 Micron-nano dust adsorption behavior at initial position No. 1, 4, 7/3, 6, 9

前述分析可知, 平行于高压导体布置的微纳粉尘生长阶段对应的电场强度低于垂直于高压导体方向。对平行于高压导体的不同初始位置放置的粉尘吸附情况分析可得, 中心位置粉尘斑出现所需的电场强度略低于两侧粉尘斑出现所需电场强度的 5%~10%。而垂直于高压导体放置的粉尘吸附情况表现出了更明显的位置敏感性, 越靠近绝缘子, 形成粉尘斑、粉尘斑生长所需的电场强度越低, 最大偏差超过 40%。

2.2.2 不同初始质量微纳粉尘的吸附行为

从上述对图 9 所示的双微纳粉尘斑的分析不难看出, 与位置 1、4、7 积聚吸附形成的单微纳粉尘斑相比, 双微纳粉尘斑明显颜色更浅, 吸附面积更小, 正是因为双初始粉尘堆质量小于单粉尘堆, 其用来进行团聚式吸附的总量小于单粉尘堆。

图 10 展示了初始位置位于平行高压导体方向

(位置 2、5、8)的 $m=40\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 微纳铝粉尘吸附过程。粉尘从 -10 kV 开始逐渐起举, 团聚式吸附过程与图 4 所示动态吸附过程没有明显区别, 同样于 -40 kV 形成粉尘斑, 但 40 mg 粉尘形成的微纳粉尘斑表面积更大、颜色更深。而对于沿地电极方向的微纳粉尘扩散吸附行为, 质量越高, 扩散式吸附面积越大, 由于实验所用地电极尺寸有限, 大部分粉尘扩散至地电极以外区域。

同时通过开展相同位置不同初始质量实验发现, 随着初始质量的提高, 团聚式吸附现象更加明显。对于初始位置位于位置 2、5、8 区域的微纳粉尘, 当其初始质量 $\geq 40\text{ mg}$ 时, 在其形成微纳粉尘斑后的极短时间内, 绝缘子表面发生剧烈沿面闪络现象如图 11 所示。由于微纳粉尘斑诱导沿面闪络时的击穿电压为 -40 kV , 等于实验系统在空气中的击穿电压, 为此可以认为, 质量 $\geq 40\text{ mg}$ 位于位置 2、5、8 的微纳粉尘将使 0.1 MPa SF_6 失效。

由上述实验现象与分析可知, 不同初始质量的微纳粉尘形成粉尘斑的动态过程基本一致, 但最终形成的微纳粉尘斑表面积差别较大, 且存在临界质量 40 mg 。当布置的初始微纳粉尘质量超过临界质量后, 微纳粉尘斑生长速度将大幅提高, 会极大降低气固界面绝缘裕度, 并直接诱导沿面闪络, 粉尘晕加深对应的电压值存在最大值。为此, 初始质量是影响微纳粉尘运动行为的重要因素。

2.2.3 外施电压为交流时微纳粉尘的吸附行为

图 12 展示了外施交流电压下初始位置位于平行高压导体方向(位置 2、5、8)的 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的微纳铝粉尘吸附过程。微纳粉尘开始起举电压为 10 kV , 形成微纳粉尘斑时对应的电压为 42 kV , 需要指出, 交流电压下形成的微纳粉尘斑稳定性不如直流电压下形成的微纳粉尘斑。同时地电极扩散吸附行为完全不同, 通过高清摄像机发现微纳粉尘在地电极表面形成“气浪”, 随着交变电场在平行高压导体方向往复运动。

交流或直流对粉尘吸附运动行为发展影响较小。直流电场下极性效应不明显, 正极性下的粉尘对应生长阶段所需电场强度比负极性高 5% 以下, 但是交流中粉尘比大尺寸微粒更活跃。

2.2.4 不同材质微纳粉尘的吸附行为

将 $m=100\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铜粉放置在平行高压导体方向位置 2、5、8, 开展微纳粉尘吸附实验。其吸附行为如图 13 所示。 50 nm 铜粉从 -14 kV 开始

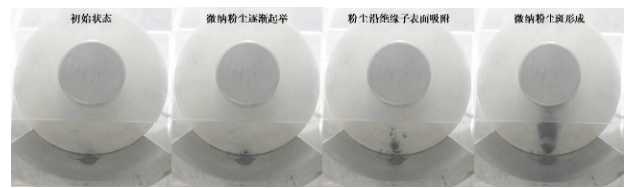


图 10 位置 2、5、8 处的 40 mg 微纳粉尘吸附行为
Fig.10 Adsorption behavior of 40-mg micron-nano dust at position No. 2, 5, 8

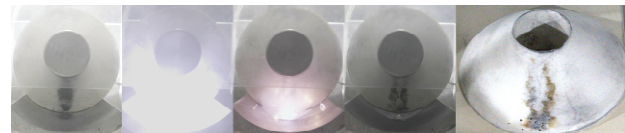


图 11 初始粉尘质量 $\geq 40\text{ mg}$ 时微纳粉尘斑诱导沿面闪络
Fig.11 Micron-nano dust speckle induced flashover along the surface when the initial dust mass is greater than or equal to 40 mg

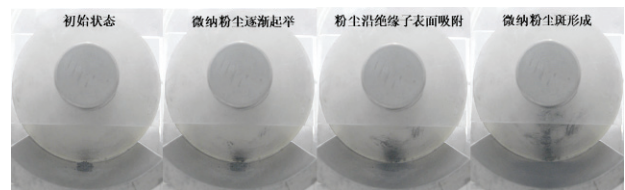


图 12 交流电压下 20 mg 位置 2、5、8 处的微纳粉尘吸附行为

Fig.12 Micron-nano dust adsorption behavior at 20 mg position No. 2, 5, 8 under AC voltage

逐渐起举, 沿着同轴圆柱电极径向向上吸附, 随着电压逐渐升高, 倾斜的团聚微纳粉尘吸附量逐渐增加, 颜色越来越深。当升压达到 -40 kV 时, 环氧树脂绝缘子表面形成倾斜的稳定微纳粉尘斑。针对地电极上发生的扩散式吸附行为, 整体发展过程与位置 2、5、8 类似。当升压超过 -10 kV 后, 粉尘同时沿着地电极远离绝缘子方向、垂直高压导体方向扩散, 形成的地电极扩散痕迹明显深于铝粉形成的扩散痕迹。材质并不影响粉尘斑的生长行为, 但铜粉生长阶段所需的电场强度高于铝粉。

综上所述, 随着电压逐渐升高, 微纳粉尘在电场中的吸附状态主要包括沿绝缘子界面的团聚式吸附与沿地电极方向的扩散式吸附, 影响运动行为的关键因素包括微纳粉尘的初始位置、质量、材质以及外施电压的幅值、类型。

3 附着微纳粉尘诱发沿面闪络的动态过程

为研究微纳粉尘诱导环氧树脂绝缘子气固界面沿面闪络的物理机制,在上述微纳粉尘吸附行为观测实验基础上继续升高电压,观测已形成的微纳粉尘斑如何诱发沿面闪络。

3.1 沿面闪络前的特殊物理现象

如图4所示,初始位置2、5、8处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 铝粉的吸附实验中,当电压升高到 -40 kV 时,环氧树脂绝缘子表面形成稳定的微纳粉尘斑。继续升高电压,观测到如图14所示的不同于起举吸附的特殊物理现象。

随着电压继续升高,微纳粉尘团聚式吸附现象并不明显,微纳粉尘斑稳定吸附在绝缘子表面。当电压升高到 -52 kV 时,微纳粉尘斑瞬间“爆炸”,在粉尘斑上方形成环状微纳粉尘晕。环状微纳粉尘晕与粉尘斑类似,若不继续升高电压,将稳定吸附在环氧树脂绝缘子表面。需要指出,粉尘斑“爆炸”弹开形成粉尘晕时间很短,是电压升高到 -52 kV 之后立刻发生并结束的,这里“爆炸”并非化学意义上的氧化还原反应,而是物理意义上的快速弹开现象。与此同时,地电极扩散式吸附现象继续加剧,扩散面积变大,颜色加深。

在形成环状微纳粉尘晕之后继续升高电压,当电压达到 -60 kV 时,地电极上残余的微纳粉尘发生明显的一次瞬间吸附,且大多吸附至刚刚形成的环状微纳粉尘晕附近,表现为如图14所示的微纳粉尘晕轮廓显著加深。同时,地电极上的微纳粉尘也发生一次快速扩散。

3.1.1 不同初始位置微纳粉尘晕的形成与轮廓加深

如图6所示,初始147位置处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铝粉的吸附实验中,当电压升高到 -40 kV 时,环氧树脂绝缘子表面形成稳定的微纳粉尘斑。当电压升高到 -60 kV 时,微纳粉尘斑“爆炸”,在粉尘斑斜上方形成环状微纳粉尘晕。当电压达到 -66 kV 时,地电极上残余的微纳粉尘发生明显的一次瞬间吸附,且大多吸附至刚刚形成的环状微纳粉尘晕附近,微纳粉尘晕明显加深如图14所示。

如图15所示,初始位置4、5、6处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铝粉的吸附实验中,当电压升高到 -42 kV 时,环氧树脂绝缘子表面形成横向微纳粉尘斑。当电压升高到 -52 kV 时,微纳粉尘斑“爆炸”,在粉尘斑上方形成环状微纳粉尘晕。当电压达到

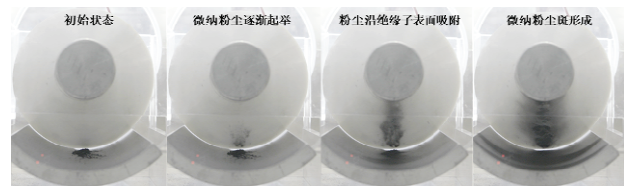


图13 平行高压导体(位置2、5、8)处的微纳铜粉尘吸附行为
Fig.13 Adsorption behavior of micron-nano copper dust at a parallel high-voltage conductor (position No. 2, 5, 8)

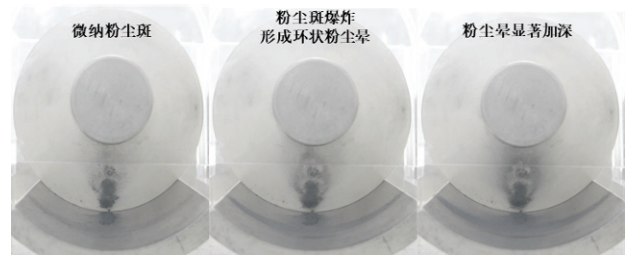


图14 初始位置2、5、8处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铝粉尘斑的特殊物理现象

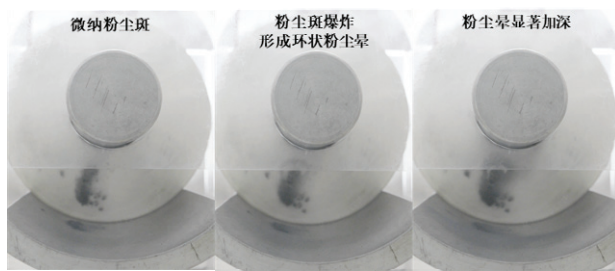
Fig.14 Special physical phenomena of 20-mg and 50-nm aluminum dust speckle at initial position No. 2, 5, 8

-64 kV 时,粉尘晕轮廓加深。初始位置1、5、9处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铝粉的吸附实验中,当电压升高到 -52 kV 时,环氧树脂绝缘子表面形成微纳粉尘斑。当电压升高到 -60 kV 时,微纳粉尘斑“爆炸”,在粉尘斑斜上方形成环状微纳粉尘晕。当电压达到 -66 kV 时,粉尘晕轮廓加深。初始位置1、4、7/3、6、9处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的双堆铝粉的吸附实验中,当电压升高到 -44 kV 时,环氧树脂绝缘子表面形成双微纳粉尘斑。当电压升高到 -60 kV 时,双微纳粉尘斑均“爆炸”,在粉尘斑上方形成2个环状微纳粉尘晕。当电压达到 -70 kV 时,2个粉尘晕轮廓加深。

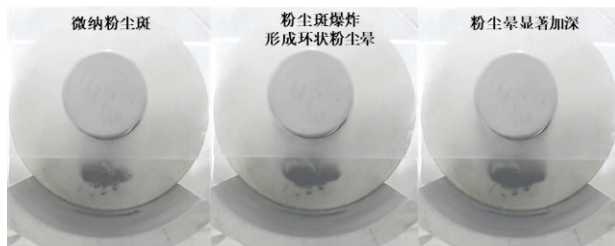
虽然不同初始位置形成的微纳粉尘斑形貌不同,但随着电压升高,直流电压下的微纳粉尘斑都出现了爆炸,形成环状粉尘晕、粉尘晕轮廓加深的实验现象。

3.1.2 微纳铜粉尘晕的形成与轮廓加深

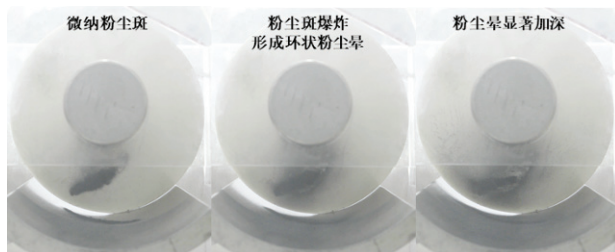
如图13所示,初始位置2、5、8处铜粉的吸附实验中,当电压升高到 -40 kV 时,环氧树脂绝缘子表面形成微纳铜粉尘斑。当电压升高到 -60 kV 时,微纳粉尘斑“爆炸”,向粉尘斑左右两侧形成粉尘晕,其形成的粉尘晕半径更大,虽不是闭合的圆环,但仍然呈圆弧状分布,上方形成环状微纳粉尘晕。当电压达到 -72 kV 时,粉尘晕轮廓加深见图16。



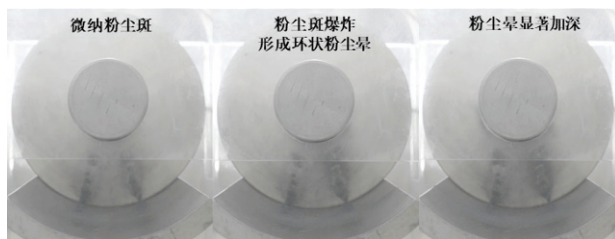
(a) 初始位置 1、4、7 处



(b) 初始位置 4、5、6 处



(c) 初始位置 1、5、9 处



(d) 初始位置 1、4、7/3、6、9 处

图 15 不同初始位置 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 铝粉尘晕形成与轮廓加深

Fig.15 Schematic of 20-mg and 50-nm aluminum dust halo formation and contour deepening at different initial positions No. 1, 4, 7

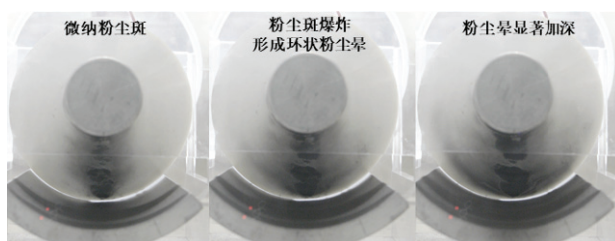


图 16 初始位置 2、5、8 处铜粉尘晕形成与轮廓加深

Fig.16 Copper dust halo formation and contour deepening at initial position No. 2, 5, 8

3.1.3 交流电压下沿面闪络前的特殊物理现象

如图 12 所示, 外施交流电压下初始位置 2、5、8 处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铝粉的吸附实验中, 当电压升高到 -42 kV 时, 环氧树脂绝缘子表面团聚出不稳定的粉尘斑。当电压升高到 52 kV 时, 微纳粉尘斑“爆炸”, 形成表面积更大的微纳粉尘带, 如图 17 所示。与直流电压相比, 交流电压下并没有出现粉尘斑爆炸形成粉尘晕的实验现象, 而是直接完成了一次爆炸, 并与此时吸附到绝缘子表面的微纳粉尘一同形成了团聚面积较大的带状粉尘斑。

综上, 不同材质的微纳粉尘在相同外施电压的作用下, 粉尘斑爆炸形成环状粉尘晕继而粉尘晕轮廓加深的实验现象并不相同。铜粉与铝粉形成的粉尘斑类似, 但粉尘斑“爆炸”形成的粉尘晕形状有圆弧状、环状等不同形貌。但是不可否认的是, 微纳粉尘斑随着外施电压的继续升高, 都将产生不同于起举吸附的特殊物理现象, 为诱发沿面闪络创造必要条件。

3.2 促进粉尘斑爆炸发生的主导因素

在加压过程中, 附着在环氧树脂绝缘子表面的稳定荷电微纳粉尘斑引起气固界面处电场发生严重畸变, 粉尘粒子间隙的剧烈电场畸变诱发粉尘斑附近 SF_6 气体局部放电, 附着在绝缘子表面的微纳粉尘斑内部温度升高, 团聚成粉尘斑的粉尘获得大量能量, 导致粉尘斑内部应力过大, 使得粉尘粒子向外急速飞溅, 宏观上呈现为“爆炸现象”。

与此同时, 初始放置在地电极的微纳粉尘粒子因高压导体感应出同种电荷, 带同种电荷的微纳粉尘一齐起举至绝缘子表面, 形成微纳粉尘斑, 随着电压继续升高, 带同种电荷的微纳粉尘堆之间的库仑斥力逐渐增大, 当后起举的粉尘撞击到稳定粉尘斑上时, 打破了受力平衡, 使得数量少的粉尘堆向外弹开, 也在宏观上表征为向外急速飞溅的“爆炸现象”。

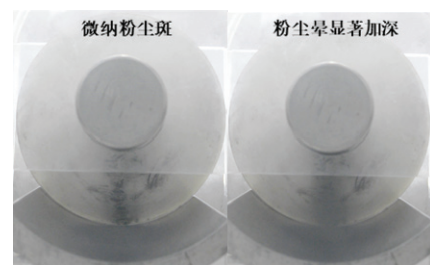
图 17 交流电压下初始位置 2、5、8 处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 铝粉尘带

Fig.17 Schematic of 20-mg and 50-nm aluminum dust band at initial position No. 2, 5, 8 under AC voltage

3.3 微纳粉尘斑诱发沿面闪络特性与机制

如图 14 所示, 微纳粉尘晕轮廓在-60 kV 处显著加深。随着电压继续升高, 当外施电压达到-64 kV 时, 团聚吸附在环氧树脂绝缘子表面的微纳粉尘将诱导沿面闪络, 剧烈烧蚀环氧树脂表面, 沿面闪络的电流将直接引发地电极上残留的金属粉尘与 SF₆ 剧烈反应, 如图 18 集中展示了不同位置、不同材质、不同外施电压类型的微纳粉尘斑诱导沿面闪络的过程图。不难发现, 尽管形成微纳粉尘斑、爆炸形成环状粉尘晕、粉尘晕轮廓加深等过程存在差异, 由微纳粉尘斑诱发的沿面闪络发展路径均贯穿微纳粉

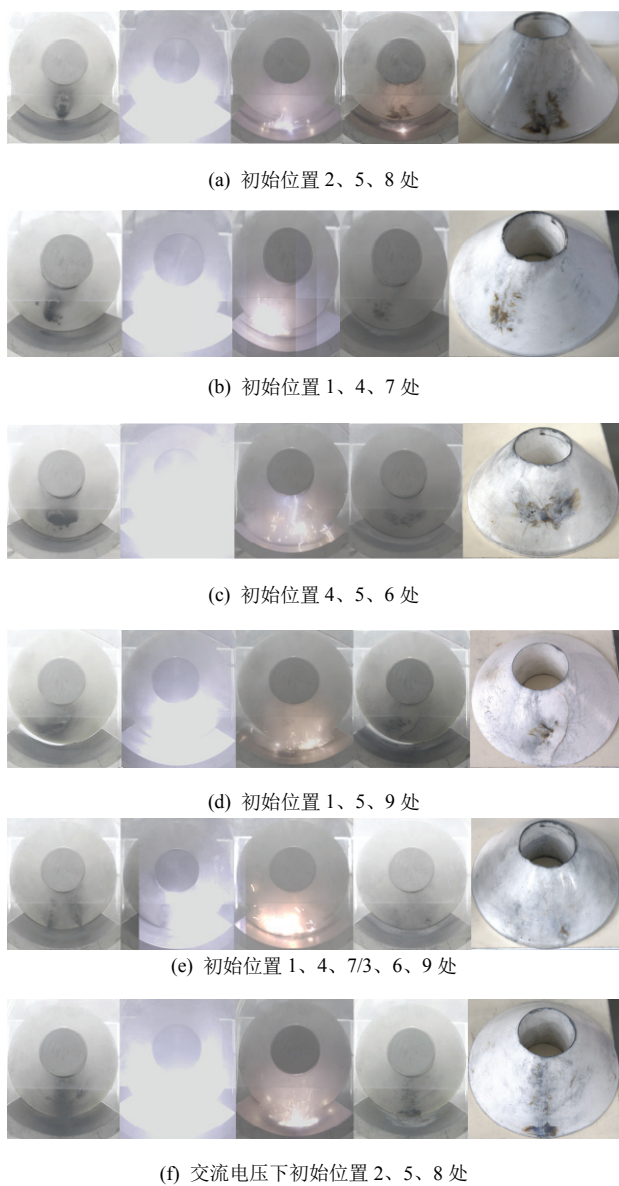


图 18 初始位置 2、5、8 处 $m=20\text{ mg}$ 、 $d=50\text{ nm}$ 的铝粉诱发的沿面闪络

Fig.18 Along-surface flashover induced by 20-mg and 50-nm aluminum powder at different initial positions

尘斑, 闪络电流流经粉尘晕、粉尘斑, 在环氧树脂界面充分反应, 最终点燃地电极上的剩余粉尘。表 1 展示了不同初始条件下, 微纳粉尘沿绝缘子界面吸附乃至导致沿面闪络各特征阶段的电压值。

分析表 1 可知, 直流电压下微纳粉尘诱发沿面闪络的必要条件是形成微纳粉尘斑并且粉尘斑发生“爆炸”。对于大尺寸颗粒来说, 直流电压下因为受力方向单一更容易导致绝缘故障, 而对于微纳粉尘来说刚好相反。交流电压下微纳粉尘的危害程度更高, 同等情况下的击穿电压明显小于直流环境。

直流电压下, 初始位置、初始质量、粉尘材质都对沿面闪络电压有很大影响, 微纳粉尘的存在最多使得实验系统击穿电压降低了 71%。击穿电压至少是微纳粉尘斑形成电压的 1.6 倍以上。

微纳粉尘具有强导电性, 团聚吸附在环氧树脂绝缘子表面的微纳粉尘斑构成了局部短路区域, 缩短了高压导体和接地外壳之间的绝缘距离, 随着粉尘斑沿绝缘子表面母线方向长度增加, 高、低压电极间的“短路区域”变长, 因而闪络更容易发生。

表 1 微纳粉尘诱发沿面闪络各特征阶段电压平均值

Table 1 Values of voltage at each characteristic stage of micron-nano dust induced surface flashover

实验参数	电压平均值/kV				
	粉尘开始起举	粉尘斑形成	环状粉尘晕出现	粉尘晕轮廓加深	沿面闪络
DC 20 mg、50 nm Al, 位置 2、5、8	-10	-40	-50	-60	-64
DC 20 mg、50 nm Al, 位置 1、4、7	-12	-40	-60	-66	-68
DC 20 mg、50 nm Al, 位置 4、5、6	-10	-42	-52	-64	-88
DC 20 mg、50 nm Al, 位置 1、5、9	-15	-42	-60	-66	-70
DC 20 mg、50 nm Al, 位置 1、4、7/3、6、9	-10	-44	-60	-70	-95
DC 40 mg、50 nm Al, 位置 2、5、8	-10	-40			-40
DC 100 mg、50 nm Cu, 位置 2、5、8	-14	-40	-60	-72	-128
AC 20 mg、50 nm Al, 位置 2、5、8	10	42		52	54

从微观上分析, 团聚吸附在气固界面的微纳粉尘斑, 其本身的存在形式和排列方式不同会对周围的电场造成不同程度的畸变。铝、铜材质微纳粉尘在放电过程中主要以团状形式存在, 其对电场畸变的理论计算情况中心球体处对电场的畸变程度最大, 且最大可达原场强的 4.5 倍。然而, 在 GIS/GIL 腔体内产生的粉尘通常是机械磨损产生的不规则几何体, 粉尘粒子本身会带有多个尖刺, 由此造成的局部电场畸变将更为严重。

畸变的电场会加剧绝缘子表面电荷的积累, 而绝缘子表面电荷的积聚又会反过来加剧周围电场的畸变。当 2 个粒子之间的电场畸变足够强烈, 超过气体的局部击穿场强时, 粉尘粒子间将发生局部放电, 局部放电进一步演变, 即发展为绝缘子的沿面闪络现象。

4 结论

1) 微纳粉尘在电场中的吸附状态主要包括沿绝缘子界面的团聚式吸附与沿地电极方向的扩散式吸附, 影响运动行为的关键因素包括微纳粉尘的初始位置、质量、材质以及外施电压。

2) 微纳粉尘团聚式吸附会在环氧树脂绝缘子表面吸附形成微纳粉尘斑, 粉尘斑是后续诱导沿面闪络的重要主导因素。随着电压升高, 微纳粉尘斑会“爆炸”形成环状粉尘晕、粉尘晕轮廓加深等不同起举吸附的特殊物理现象, 这类特殊物理现象被认为是诱导沿面闪络的必要条件。

3) 团聚吸附在环氧树脂绝缘子表面的微纳粉尘斑构成了局部短路区域, 缩短了高压导体和接地外壳之间的绝缘距离, 再加之微纳粉尘斑导致气固界面电场剧烈畸变, 加剧粉尘粒子之间的局部放电, 使得沿面闪络更易发生, 微纳粉尘的存在使得试验系统的击穿电压最多下降了 71%。后续将重点开展建模分析工作, 进一步厘清微纳粉尘沿绝缘子界面吸附而诱发沿面闪络的物理机制。

参考文献 References

[1] 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.

[2] 黄 蕾, 唐 悦, 茅鑫同. 电力“蛟龙”过江华东特高压环网合环[N]. 国家电网报, 2021-12-15(002).
HUANG Lei, TANG Yue, MAO Xintong. Power “Jiaolong” cross-river East China UHV ring network closed loop[N]. State Grid News, 2021-12-15(002).

[3] 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.

[4] 薛乃凡, 李庆民, 刘智鹏, 等. 微纳粉尘运动行为与微弱放电探测技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3380-3392.
XUE Naifan, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Research advances of the detection technology for kinetic behavior and weak discharge of the micro-nano dust[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3380-3392.

[5] 李 进, 王禹淮, 张黎明, 等. 抛光方式对交流电压下盆式绝缘子表面电荷分布和沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4093-4101.
LI Jin, WANG Yuhuai, ZHANG Liming, et al. Influence of polishing treatments on surface charge distribution and flashover characteristics of basin spacer under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4093-4101.

[6] 郝艳捧, 梁学致, 黄盛龙, 等. GIS/GIL 绝缘子超声检测研究进展与展望[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3596-3606.
HAO Yanpeng, LIANG Xuezi, HUANG Shenglong, et al. Status and prospect of ultrasonic detection for GIS/GIL insulators[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3596-3606.

[7] 文 韬, 向念文, 章 程, 等. 高压放电等离子体研究现状及发展趋势[J]. 高电压技术, 2023, 49(8): 3226-3239.
WEN Tao, XIANG Nianwen, ZHANG Cheng, et al. Research status and development trend of high voltage discharge plasma[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3226-3239.

[8] 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.

[9] XUE N F, YANG J J, SHEN D Y, et al. The location of partial discharge sources inside power transformers based on TDOA database with UHF sensors[J]. IEEE Access, 2019, 7: 146732-146744.

[10] 齐 波, 高春嘉, 赵林杰, 等. 交/直流电压下气体绝缘变电站盆式绝缘子表面电荷对闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 915-922.
QI Bo, GAO Chunjia, ZHAO Linjie, et al. Influence of surface charge on flashover voltage of gas insulated substation basin insulator under AC and DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 915-922.

[11] 任 明, 余家赫, 王 凯, 等. 气体绝缘微粒放电多光谱脉冲检测及特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊 1): 295-304.
REN Ming, YU Jiahe, WANG Kai, et al. Multispectral pulse detection and characteristic analysis of gas insulated particle discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(Supplement 1): 295-304.

[12] 李 鹏, 李志兵, 孙 倩, 等. 特高压气体绝缘金属封闭输电线路绝缘设计[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3305-3312.
LI Peng, LI Zhibing, SUN Qian, et al. Research on insulation design of UHV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3305-3312.

[13] 李庆民, 魏 来, 薛乃凡, 等. 交直流 GIS/GIL 微纳粉尘可视化探测技术研究进展[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3607-3624.
LI Qingmin, WEI Lai, XUE Naifan, et al. Research advances in visualization detection technology of micron-nano dust in AC and DC

- GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3607-3624.
- [14] 梁瑞雪. 直流 GIL 内微米级金属粉尘的吸附动力学行为及诱导放电现象研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
LIANG Ruixue. Study on kinetic adsorption behavior and its induced discharge phenomena of μm -level metal dust within DC GIL[D]. Beijing, China: North China Electric Power University(Beijing), 2021.
- [15] WANG J R, LI Q M, GONG Y F, et al. Enhancement of surface electrical performances of epoxy film by blending with fluorinated and crosslinking monomer[J]. Materials Letters, 2022, 327: 133036.
- [16] 张连根. 长期耐压下 GIS 绝缘子表面金属异物局部放电特性和闪络机理研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
ZHANG Liangen. Research on partial discharge characteristics and flashover mechanism of metal particle on GIS insulator under long-term voltage[D]. Beijing, China: North China Electric Power University(Beijing), 2020.
- [17] 许 澜, 刘卫东, 陈维江, 等. 基于高灵敏测量的 GIS 绝缘子表面微金属颗粒局部放电特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2707-2714.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Partial discharge characteristics of metal particles on spacer surface in GIS based on high sensitivity measurement[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2707-2714.



XUE Naifan
Ph.D. candidate



LI Qingmin
Ph.D., Professor
Corresponding author

薛乃凡

1994—, 男, 博士生

主要从事 GIS/GIL 内微粒与粉尘诱发电物理机制的研究工作

E-mail: 18612332728@163.com

李庆民(通信作者)

1968—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事高压交直流 GIS/GIL、高性能绝缘与电接触材料、光电子学微纳传感与测量、新能源系统雷击物理及防护等方面研究工作

E-mail: lqmeee@ncepu.edu.cn

收稿日期 2023-12-18 修回日期 2025-01-12 编辑 曾文君