

交流水平电场中金属微粒群的运动行为与迁移机制研究

王超¹ 石浩天¹ 成林² 左坤³ 谷永刚³ 杨兰均¹

(1. 西安交通大学, 710049, 西安; 2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 710100, 西安; 3. 国网陕西省电力有限公司, 710048, 西安)

摘要: 为研究罐式断路器机构室水平绝缘结构在运行工况下的自由金属微粒运动与放电特性, 搭建水平电场实验平台, 在0.3 MPa洁净干燥空气中以0.8 mm球形金属微粒群为对象开展交流阶梯升压试验。采用CCD连续观测, 并结合放电信号测量获取微粒运动轨迹、群体迁移过程及放电现象。结果表明: 微粒个体运动以沿面滚动与跃动为主, 高压阶段普遍出现启-停式短程运动与频繁变向; 微粒群迁移可归纳为定向漂移、局部激活和电极发射碰撞激活三类, 且主导机制随电压升高呈阶段性切换。升压过程中微粒运动活性呈现波动上升的趋势, 扩散呈台阶性非线性增长, 约18-28 kV出现低活跃窗口, 约30 kV后电极发射显著增强并诱发更强的横向扩散, 电压越高微粒达到平衡态所需时间越长; 交流电压下水平绝缘板表面微粒群的迁移行为本质是水平方向低阻尼状态下, 电场力与库仑力在不同电场水平下个体与群体耦合作用的结果。研究结果为机构室类水平绝缘结构中微粒缺陷的演化机理认识与风险评估提供实验依据。

关键词: 环保GIS; 机构室; 金属微粒群; 水平电场; 交流电压; 迁移机制; 空气电晕; 闪络

中图分类号: 文献标志码: AA

文章编号: 0253-987X(XXXX)XX-0001-21

Study on Motion Behaviors and Migration Mechanisms of Metallic Particle Clusters in a Horizontal AC Electric Field

WANG Chao¹, SHI Haotian¹, CHENG Lin², ZUO Kun³, GU Yonggang³, YANG Lanjun¹

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China;

3. State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710048, China)

Abstract: To investigate the motion and discharge characteristics of free metallic particles in the horizontal insulating structure of a tank-type circuit breaker operating under service conditions, a horizontal electric-field test platform was established. Stepwise AC voltage tests were conducted in 0.3 MPa clean dry air using a cluster of 0.8 mm spherical metallic particles. Particle trajectories, cluster migration processes, and discharge phenomena were obtained via continuous CCD observation combined with discharge-signal measurements. The results show that individual particles mainly exhibit surface rolling and hopping, and short-range start-stop motions with frequent direction changes become prevalent at high voltages. Cluster migration can be categorized into three modes—directional drift,

收稿日期: XXXX-XX-XX。

local activation, and collision activation induced by electrode-emitted particles—and the dominant mechanism switches in stages as the voltage increases. During voltage ramping, particle activity increases with pronounced fluctuations, while dispersion grows in a stepwise nonlinear manner; a low-activity window appears at approximately 18–28 kV, and above ~30 kV electrode emission is markedly enhanced, leading to stronger transverse dispersion. Higher voltages also require longer times for the particle cluster to reach a quasi-steady state. Overall, the migration of particle clusters on a horizontal insulating surface under AC voltage is governed by the coupled effects of electric-field forces and Coulomb interactions in a low-damping horizontal configuration across different field levels. These findings provide experimental evidence for understanding the evolution mechanisms and assessing the risk of particle defects in mechanism-chamber-type horizontal insulation structures.

Keywords: Eco-friendly GIS; mechanism chamber; metallic particle cluster; horizontal electric field; AC voltage; migration mechanism; air corona; flashover

气体绝缘组合电器/输电线路 (GIS/GIL) 具有结构紧凑、运行可靠等优势, 基于空气的环保 GIS 在减少 SF_6 污染的同时, 最大程度地保留了其绝缘能力, 成为近年来研究的热点。设备在运行中不可避免地会产生金属微粒, 微粒在电场作用下发生运动, 引发局部放电乃至沿面闪络, 是影响气体绝缘装备绝缘裕度与运行可靠性的典型隐患之一^[1-3]。

围绕金属微粒缺陷, 国内外学者已开展了大量工作, 并形成了较为成熟的观测与分析方法。交直流电压下, 通过观测不同微粒在加压过程中的运动方式和轨迹, 采用微粒的起动机强、运动概率等统计参数对运动特性进行表征, 建立微粒位置与姿态与放电行为、放电特性来表征微粒运动对绝缘的影响。国外 Lundgaard、Nojima 等学者研究发现交流电压下自由微粒往往表现为反复碰撞、弹跳的运动特性^[4-5], Wenger 等采用局放测量与光学观测, 指出直流电压

自由颗粒的运动模式与交流存在显著差异, 从而影响局放信号的可检测性与特征提取策略^[6]。国内季洪鑫发现并总结了交流电压下微粒的四种运动方式以及不同形状金属微粒的运动倾向和危害^[7]。王健等从仿真和实验的角度对直流电压下微粒位置、形态和尺寸等对放电过程和放电参数的影响进行了系统性的研究, 并提出基于改进算法的绝缘子结构优化和基于新兴改性材料覆膜技术的微粒防止污染措施^[8-11]。梁瑞雪等发现金属粉尘的运动主要以“扩散式吸附”和“积聚式吸附”为主, 快速升压过程中还会出现粉尘爆炸现象^[12-13]。路鑫晟使用双层介质模型和微元法计算了金属微粒的带电荷量, 结合有限元和微元法更加准确地分析了微粒的运动轨迹, 发现直流场中球形微粒一旦被吸引而运动会快速发展为贯穿运动, 而线性微粒则会在起举过程中损失电荷, 表现为单侧部分起举或旋转运动^[14]。李晓昂等实验研究了交流运行工况下片状金属

微粒的运动与带电特性,发现微粒竖起后存在旋转和滚动两种运动方式,运动过程中伴随有微弱的局部放电过程,微粒的起跳场强与厚度的 $1/2$ 次方呈近似正比^[15]。李军浩等发现交流叠加冲击电压时,更有利于激发微粒运动,而冲击过后微粒的运动与放电则会出现迟滞现象^[16]。此外,近年来学者们也考虑到将机械振动纳入到微粒运动的激励源,发现机电联合作用下微粒起跳场强随振幅增加而降低,微粒飞行谱图呈现明显的多山峰状^[17-19]。

尽管上述研究为颗粒缺陷的认识与治理奠定了重要基础,但现有成果仍存不足。首先,由于GIS的应用,现有研究主要针对灭弧室的同轴场型与竖直电场环境,重力方向与主电场方向基本一致,便于观测以起跳和飞行为主导的轨迹演化,而在罐式断路器机构室等结构中,绝缘筒内壁附近常呈“水平电场—水平表面”的组合特征,微粒以沿面滚动/跃动为主,重力与主电场方向解耦,运动的约束条件与能量获取方式均与同轴竖直场显著不同,使得既有表征方式难以直接套用。其次,工程中的金属微粒通常并非单颗孤立金属微粒,而以一定密度的微粒群出现;在这种情况下,微粒间的静电相互作用与碰撞后的电荷再分配会造成的,导致迁移模式与放电触发呈现更强的非线性与不确定性。最后,目前针对GIS罐体内部微粒运动的研究多集中在 SF_6 的气体环境下,而空气的电负性弱,对局放的抑制效果不如

SF_6 显著,对等条件下微粒更易荷电,由此带来的微粒运动行为的差异及其对放电过程的影响都需要重新研究。

基于上述研究现状,本文以 0.8 mm 球形金属微粒群为研究对象,构建空气下的实验模型,在交流电压作用对微粒运动、迁移和放电等行为进行观测分析,本文的研究成果可以作为对金属微粒在特定条件下的运动与放电行为特性的补充,为水平绝缘构型下微粒缺陷的风险评估与现场诊断提供实验依据。

1 实验平台

1.1 交流电压平台及试品模型

图1展示了GIS罐式断路器的典型结构,断路器内部根据功能不同分为了机构室和灭弧室,其中灭弧室内为中心高压导杆与外壳构成的同轴电极结构,这种构型下连接电极的盆式绝缘子或GIS接地壳体表面微粒在重力和电场力的角力下发生运动,而机构室中支柱绝缘筒中电极水平相对,电场方向水平,静止在绝缘筒表面的微粒主要在水平方向的电场力和摩擦力等力的角力下运动。为研究空气中交流电压下机构室绝缘筒内表面的微粒运动与放电行为,本文搭建了图2所示的工频电压实验平台与测量系统。实验平台主要由工频变压器与密封试品腔组成,工频变压器为 $100\text{ kV}/10\text{ kW}$ 的无局放变压器。测量系统包括CCD工业相机、电容分压器、罗氏电流线圈组成,CCD型号为HY-800B,输出像素 800 W ,帧率可达

240FPS, 具备长时间录像功能, 可对微粒运动全过程进行记录, 电容分压器量程 100kV, 分压比为 1000:1 罗氏电流线圈衰减比为 2:1。

如图 3 所示为腔体内所采用的试品模型, 试品设计参照了 GIS 机构侧绝缘筒内侧的指形电极结构, 为了便于观测, 取绝缘筒剖面结构设计了平板构型, 试品电极 of 铝合金材质, 绝缘板材采用电力系统常用的工业 B 级 FR4, 电极极间距离为 70mm, 沿电极边缘长度为 140mm, 电极与绝缘板之间存在一截面为 2mm×5mm 的缝隙, 模拟真实电极的补偿间隙, 这也是本实验模型中最典型的“金属-气体-固体介质”三结合点处, 微粒置于绝缘板上中心区域。

为评估缩比试品内的电场环境, 采用有限元法对试品结构进行了静电场仿真, 如图 4 所示。上部的电场云图反映绝缘筒表面电场分布较为均匀, 高场区域主要集中在两端金属电极、绝缘筒和气体的三结合点处, 场强峰值约为 1.2 kV/mm, 计算得到电场不均匀系数 $\alpha = \alpha_{\max}/\alpha_{\text{avg}} \approx 2.8$ 。下部的电场的矢量分布图显示除电极附近高场强区存在明显的法向分量以外, 电场整体沿绝缘筒表面切向分布。由此可见, 本缩比模型能够提供整体近似水平且相对均匀的电场环境, 电场强度与电极的不均匀系数均符合机构室电极及绝缘筒的设计要求和运行情况。

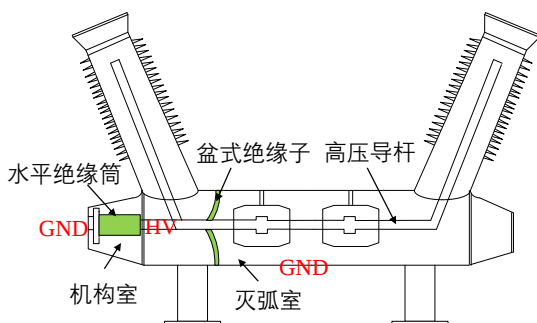


图 1 GIS 断路器典型结构

Fig.1 Typical structure of GIS circuit breaker

1.2 实验方法

电力现场的实践表明, 除了少数毫米级的大颗粒, GIS 内部往往存在大量的亚毫米级的金属微粒, 这些微粒通常以团簇的方式存在, 参照现有关于微粒团簇的相关研究实验方法, 本文选取绝

缘筒中心 1cm×1cm 的圆形区域内部均匀布置金属微粒, 微粒选取 0.8mm 的球形金属铝粒。环保 GIS 仍处于工程应用的起步阶段, 关于气压的选择, 工程实际中主气室的气体压力通常为 0.5~0.9 MPa, 而实验室下多采用 0.3~0.6 MPa 的气体压力范围开展试验。鉴于

此本文选用 0.3 MPa 干燥空气作为填充介质,一方面,该压力条件下设备内部能尽可能贴近实际绝缘强度;另一方面,又不会对缺陷放电和微粒起动的过

程产生过强抑制,从而更有利于观察空气电晕条件下微粒运动、放电起始与发展过程,以及其不同场强下的演化特性。

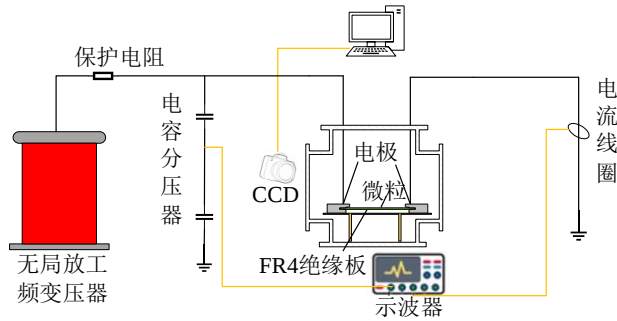


图2 工频电压实验平台与测量系统

Fig. 2 Power-frequency voltage test platform and measurement system

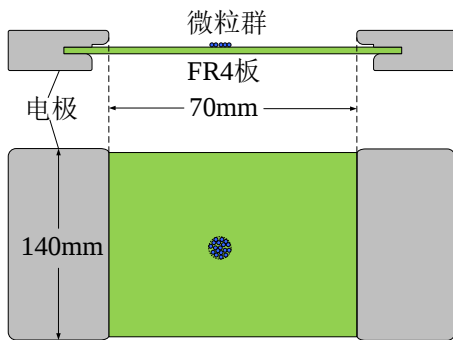


图3 试品模型尺寸示意图

Fig. 3 Schematic of the specimen dimensions

交流实验采用阶梯升压法。起始电压设为 0 kV, 以 2 kV 为步长逐级升压, 在各电压等级下维持 20 min, 以确保微粒在准稳态电场作用下的迁移及再分布过程充分发展, 直至发生闪络。实验过程中, 通过观测示波器波形和 CCD 记录的实时画面, 记录起始放电电压、闪络电压等特征参数, 对比分析

不同电压等级下微粒运动、迁移过程与放电现象的演变规律。

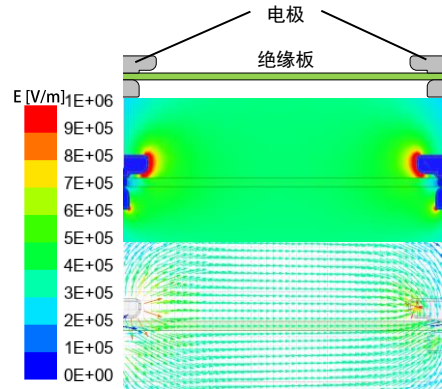


图4 试品表面电场仿真结果

Fig 4 Simulated electric-field distribution on the specimen surface

2 微粒运动、迁移及其诱发闪

络放电过程

2.1 个体微粒的运动方式

图5展示了绝缘板表面个体微粒的典型运动方式,图中□和□分别表示了微粒滚动和跳跃两大类运动,其中滚动行为可细分为三种模式:一是当驱动力与阻力相当微粒处于临界运动状态时,微粒仅发生有限角度的滚动,最终回到原始位置,实现启回式滚动;二是驱动力略高于摩擦力时,微粒沿表面缓慢爬升并越过当前陷阱,被相邻陷阱重新捕获,从而形成沿水平方向的阶跃式迁移;三是当微粒位于相对平坦区域且带电量稳定时,在周期变化的电场力作用下围绕某一平衡位置做小幅往返滚动,即原地振荡式周期滚动。跳跃行为对应图中□:当存在法向分量的瞬时驱动力时微粒在表面发生短程跳跃,落地后再被新的陷阱或电场方向捕获。如图6所示则是几种典型的微粒运动行为的实物图。黑色箭头所指即为发生运动的微粒,图6(a)中□号微粒由于作用力微弱且作用时间短暂,微粒发生启回式滚动,□号微粒则发生了约2mm的阶跃式迁移,图6(b)中通过网格对照箭头所指微粒的位置变化来表征微粒所发生的原地周期振荡运动,图6(c)箭头所指的微粒从左侧地电极处发射,由于地电极存在较强的法向电场,当力足够大时,微粒就会发生水平方向的跳跃运动,图6(c3)描绘了微粒的跳跃轨迹。

基于滚动与跃动这两种基本形态,微粒个体的运动行为与群体分布特征相

互耦合,演化出更为复杂的轨迹模式。图7展示了四种具有代表性的运动方式:□碰撞—换向型:运动微粒撞击前方静止微粒,并发生电荷重新分配。随后入射微粒发生反向或偏转,而被撞微粒则沿撞击方向被激发,并在新位置呈现小幅振荡直至停滞;□纠缠—协同型:运动微粒进入特定区域后,受局部电场及邻近微粒束缚,形成保持一定间距的微粒团簇。团簇内微粒间保持相对稳定的间隙,并以整体形式发生平移与振荡。□捕获—盘旋型:电极处补偿缝隙内静止微粒突发带电起跳,运动中途受邻近微粒吸引或局部电场畸变影响而转向,这种行为会伴随微粒在行进过程中途径微粒和高场强区多次发生。□电极发射—多级启停型:微粒由三结合点附近被发射至对侧电极并反弹回绝缘表面。落点急停后,在电极二次发射作用与沿面电场驱动下,呈现多次短促的“启—停”式快速变向运动。

上述现象表明微粒运动呈现几个典型特征:

(1) 微粒运动是多因素影响下的复杂运动过程。球形微粒的运动方式虽然简单,但是运动轨迹却变化多端,这主要与交变电场力中微粒荷电、受力状态的变化,以及微粒行进过程中其他微粒的带电状态和相对位置有关,而微粒运动过程中与其他微粒或电极之间发生碰撞,不仅会在碰撞力学上发生状态变化,碰撞导致的接触电荷重新分配又会使得微粒进入新的状态。如图8所示展

示了游离微粒与群体边缘微粒碰撞导致运动状态突变的典型过程。 $\square$ 号微粒先后撞击 $\square$ 号与 $\square$ 号微粒:每次碰撞后,被撞微粒($\square$ 号、 $\square$ 号)均获得动力沿原方向迁移,而 $\square$ 号微粒首次回弹至电极,二次碰撞后则仅短程回弹并转入原地振荡。这一现象表明,碰撞过程兼具动量传递与电荷再分配的双重作用^[23]。接触导致的带电状态突变重置了微粒受到的电场驱动力,进而改变后续轨迹:首次碰撞后的长距离回弹反映了微粒获得了足以支持逆向迁移的电场做功;而二次碰撞后的微幅振荡,则说明其碰撞后的电荷量与局部场条件已不足以支撑持续迁移;

(2) 微粒运动是多个力严格约束下的随机性行为。纵观微粒运动的全过程,长距离的连续惯性滑行较为罕见,多以静止、小幅振荡或迁移过程中的短程“启—停”为主,表明运动中的微粒总是受到力的牵引。其原因在于,不同于竖直同轴电场始终存在重力约束微粒不在电场方向轻易发生运动,水平电场中球形微粒的滚动摩擦力通常要比重力低2~3个量级,而微米级的金属微粒质量小,惯性低,导致其对驱动力的变化十分敏感。宏观上周期变化的电场力与局部微粒分布不均、表面电荷积累等因素导致的局部不均匀电场,加之微粒因局部放电、碰撞导致的电荷状态变化,使得微粒在时间和空间上受到不断变化的合力作用,合力在短距离内即可使微粒运动状态发生改变^[24-25],而影响微粒

运动的因素虽然较多,但不同场景下微粒是否会被影响也与微粒自身和周围环境的相对状态密切相关,因此不论是微粒带电还是微粒运动,其状态都难以被直接准确地预测,而表现出较强的随机性。

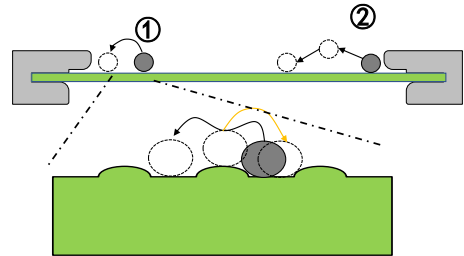


图5 个体微粒运动方式示意图

Fig. 5 Schematic of individual particle motion modes

2.2 微粒群体的迁移行为

在交流电压作用下,当大量微粒以团簇形式分布于绝缘表面时,个体运动通过库仑相互作用与局部电场畸变发生强耦合,进而呈现出随电压等级演变的群体迁移模式。

图9展示了在较低电压范围内,微粒间库仑斥力有限且团簇结构致密,微粒群表现出显著的定向漂移特征。此时,群体内绝大多数微粒以近似一致的幅值与频率在原位振荡,并在一个周期内叠加沿电场方向的微小净位移,越靠近头部微粒净位移越大,从而实现微粒群在保持宏观紧凑形态下发生由图9(a)向图9(b)演变的向地电极侧的漂移。由于群体内部运动具有高度的一致性,其迁移轨迹呈现为均匀、连续的平移,而

非少数个体的突发性扩散。随着电压升高,振荡过程中的微粒间距逐渐增大,单周期位移显著提升,但微粒群在一定范围内仍能维持相对稳定的拓扑结构。在此阶段,需严格区分两类振荡模式:

一类为叠加了宏观净位移的迁移性振荡,是群体推进的主导机制;另一类为受表面微观形貌约束的原位振荡,微粒仅在局部陷阱内往返滚动,不产生有效迁移。

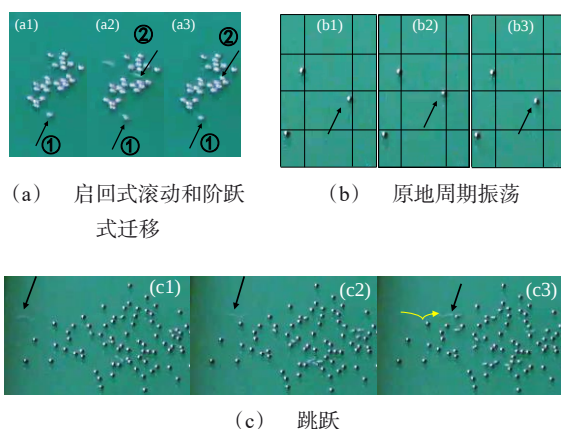


图6 个体微粒运动方式实物图

Fig. 6 Experimental images of individual particle motion modes

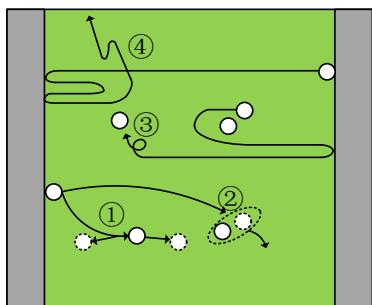


图7 微粒运动轨迹示意图

Fig. 7 Schematic of particle motion trajectory

图10展示了当电压升至局部起跳阈值后,微粒群进入局部激活阶段。图10(a)中右侧群体边缘的五颗微粒率先发生原位振荡,打破原有的动态平衡;随后,更大范围的微粒逐步被卷入迁移

性振荡状态,如图10(b)、(c)所示,振荡波前由边缘向中心传递(图中曲线清晰勾勒了不同时刻的激活边界)。此外,受库仑斥力主导,微粒群在垂直于电场方向亦出现横向扩散。由于各区域激活时刻存在时滞,该阶段的群体行为一致性显著弱于低电压下的定向漂移,导致微粒群形态更易发生非均匀拉伸与局部重排。

图11展示了在更高电压下,微粒群边缘颗粒易脱离团簇束缚并侵入电极补偿间隙的三结合点区域,诱发电极发射与碰撞激活机制。以30 kV工况为例,图11(a)中微粒□作为首个地电极发射微粒,受三结合点处强法向分量电

场驱动, 以约 0.18 m/s 的水平速度在 30 ms 内完成两次高弹跳跨越; 随后, 微粒 ①、② 相继被发射。值得注意的是, 微粒 ③ 以弹跳模式跨越群体上方, 与群内微粒接触有限, 未引起显著的群体响应; 相比之下, 微粒 ①、② 以滚动模式侵入群体并与内部微粒发生非弹性碰撞, 剧烈改变了局部荷电状态与场分布, 致使群体活跃度急剧攀升。图 10(c)、(d) 中, 随着微粒 ③ 的进一步

侵入, 激活效应沿碰撞区向四周级联传递, 最终导致原本紧凑的微粒群从内部瓦解并发生整体性的显著迁移与扩散如图, 扩散, 图 10(e)、(f) 给出了初始与最终稳定状态的对比。该过程存在显著的正反馈效应: 被激活的微粒群持续向电极输运微粒, 诱发后续的电极二次发射, 反过来进一步强化群体的溃散与迁移, 直至系统达到新的动态平衡。

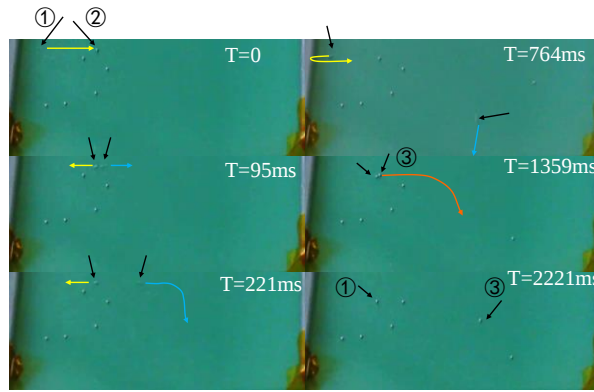


图 8 微粒碰撞与电荷交换过程

Fig. 8 Particle collision and charge-exchange process

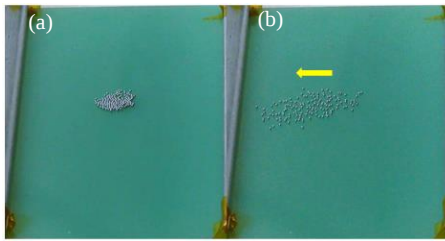


图 9 微粒群振荡漂移过程

Fig 9 Oscillatory drift process of the particle cluster

2.3 微粒运动与闪络放电的关联

图 12 展示了微粒运动诱发间隙闪络的全过程。观测表明, 图 12(a) 中的微粒运动沿图中黄色轨迹跨越电极间隙并侵入三结合点区域后, 随即引发贯穿性闪络, 这是因为微粒显著提升了局部场强与场梯度, 降低了流注放电的起始门槛并加速其向对侧电极扩展。值得注意的是, 该放电通道主要在气隙中发展, 其路径精确锚定于三结合点处的微

粒,但未沿绝缘板表面穿越其上散布的微粒链,通常来讲,自由金属微粒对绝缘的影响,通常表现为对局部电场的畸变作用和对放电的桥接作用上,前者通过激发局部放电形成带电粒子参与流注放电,后者则通过其本身的导电性强化放电并缩短等效放电距离,图12(b)中的闪络通道表明此时的闪络机制并非单纯依赖沿面微粒的桥接作用,而是主要由三结合点邻域的局部场畸变主导,当流注足够强时,不必要途径微粒就能形成闪络放电的通道。

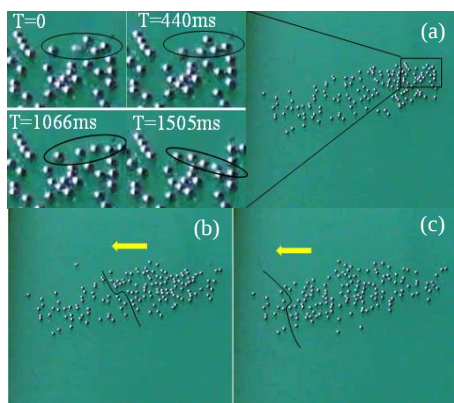


图10 微粒群局部激活过程

Fig. 10 Local activation process of the particle cluster

基于上述两种原理可知,微粒群的时空分布演化进一步拓宽了闪络的易发窗口,在电压达到较高水平时,微粒群逐渐瓦解并广泛分布,一部分微粒运动至三结合点,使介质表面最高场强部位进一步发生畸变,成为强电晕放电的集中区,而初始放电和流注形成以后,流注总是沿着气隙中最有利于击穿的主电

场线方向发展,当流注头部附近存在微粒时,微粒的场畸变和桥接作用会强化放电,从而使得流注更易发展成为闪络通道^[27]。同时也要注意,微粒分布的非均匀性导致局部强场区与弱场区交替分布,致使放电起始条件随时间剧烈波动,从统计学层面提高了贯穿性放电的偶发性。更进一步地,电极发射微粒进入群体后,通过碰撞机制改变局部荷电分布与电场结构,诱导更多微粒向电极侧输运并反复侵入三结合点,形成“运动—碰撞—再激活”的循环机制。该机制阻碍了群体达到稳定平衡态,使其持续处于易触发闪络的高风险临界状态。

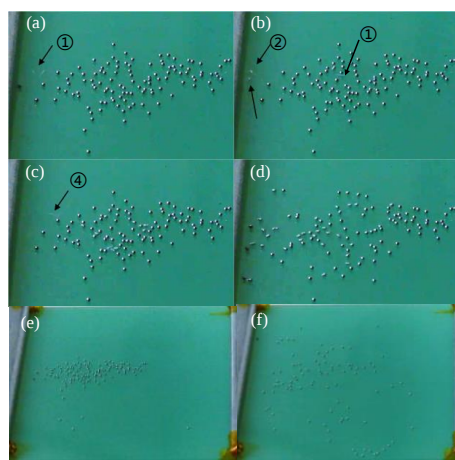


图11 电极发射碰撞激活微粒群过程

Fig. 11 Collision activation of the particle cluster induced by electrode-emitted particles

闪络发生后,微粒的运动状态发生瞬时突变并呈现显著分化特征,如图13所示,处于闪络通道上的□号微粒仅沿电场方向产生短程位移后即停止并

转为弱振荡,而□号微粒受下方微粒捕获影响发生了轨迹转向。与此同时,高压侧三结合点处有微粒以约 0.5 m/s 的速度被再次发射,并呈现出多次启停式的快速变向运动,进而带动表面部分微粒进入活跃态。这表明闪络过程通过电荷沉积与局部电场重构,显著提高了部分微粒的等效荷质比与驱动力,触发了微粒的二次活化与群体重排,且越靠近放电通道起点的微粒荷电能力越强、运动活跃度越高。综上所述,微粒的跨域迁移与向电极侧的持续输运提高了闪络触发概率,而闪络过程反之又激活了微粒运动并推动其分布演化,二者构成了一个显著的正反馈耦合过程。

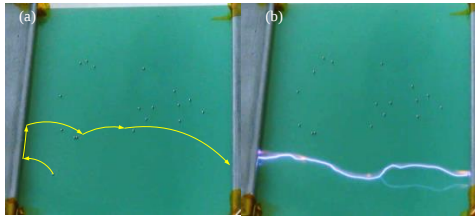


图 12 微粒运动引发闪络过程

Fig.12 Flashover triggered by particle motion

3 微粒运动与分布特性

为了进一步表征升压过程中微粒群的演化规律,本文从电压幅值和电压累积作用时间两个角度,来描述电压对微粒群的空间分布与运动活性的影响。

取绝缘板表面电场线方向为 X 轴,垂直电场线方向为 Y 轴。在每一电压等级下,分别提取 X/Y 方向最边缘微粒间最大距离 D_x , D_y ,并以绝缘板对

应方向有效长度归一化,定义扩散距离比 L_x , L_y ,定义扩散距离比为

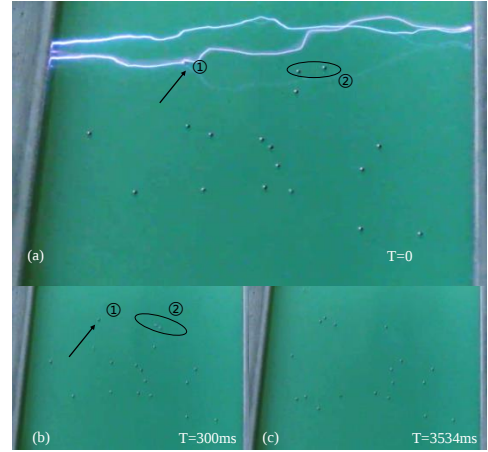


图 13 沿面闪络引发微粒运动过程

Fig.13 Particle motion triggered by surface flashover

$$\eta_x = \frac{D_x}{L_x}, \eta_y = \frac{D_y}{L_y} \quad (1)$$

同时以微粒群包围面积 A_c 与绝缘板总面积 A_0 的比值定义扩散面积比

$$\eta_A = \frac{A_c}{A_0} \quad (2)$$

此外,统计单位电压等级内微粒动作次数 N 以及三类典型迁移行为(定向漂移、局部激活、电极发射碰撞激活)的持续时间 T_i ,用于表征不同阶段的主导迁移模式与活跃程度。需要说明的是,微粒群起始动作受初始排布、个体荷电与表面陷阱等多因素影响,为保证可重复性,本章在多次实验一致性较好,选取具有代表性的一组结果进行展示与讨论。

3.1 电压幅值的影响

电压幅值对微粒群扩散的影响如图14所示,图中反映了 η_x 与 η_y 均呈现明显的台阶状非线性增长特征。升压初期, η_x 在约10 kV左右率先出现跃升,微粒群沿电场方向迅速拉伸,扩散距离比可达约40%,此时 η_y 增幅不明显,说明低电压阶段微粒群整体迁移以沿场方向为主。随后 η_x 增长趋缓并进入平台,电压继续升高后 η_y 在某一电压范围出现较大幅度扩散,同时 η_x 仅缓慢增加,表现为群体在保持沿场推进的同时开始发生横向松散。进一步升高至高电压区间后, η_x 与 η_y 再次同步增长,且 η_y 的波动与增幅更为显著,反映出高电压阶段微粒群不仅沿电场方向的迁移增强,垂直于电场方向的扩散也更易被触发。

扩散面积比 η_A 的变化与 η_x , η_y 在低电压阶段具有较好的对应关系。当 η_x , η_y 发生台阶式增长时, η_A 往往发生同步响应。进入高电压阶段后, η_A 的波动明显增大,且与 η_x , η_y 不再严格同步,这是因为部分微粒频繁进入三结合点、被电极捕获或飞离绝缘表面,使得表面有效微粒数减少,包络边界更容易受少数离散微粒位置的支配,从而表现为面积比对瞬态活跃运动更敏感。

图15给出了微粒运动活性与持续时间随电压的变化。总体来看,升压过程中微粒活性呈现波动增强的特征:在某一电压等级出现大量动作后,继续升压可能短时间内趋于平缓,直到电压再

次突破新的启动阈值,动作次数与持续时间才会再次上升。相比动作次数,运动持续时间对电压更敏感,表现为先交替上升、后在高电压区间显著抬升;同时在约18-28 kV存在一个相对低活跃区段,微粒群整体扩散变化不大,但仍可观察到少量微粒的原地振荡或短程响应,这与图14中平台段的出现相一致。

为解释上述现象,图16进一步对三类迁移模式的持续时间进行了分解。低电压阶段以定向漂移为主导,群体内多数微粒以一致性较高的迁移性振荡推进,这一模式决定了早期 η_x 的快速增长,并导致运动活性呈现波动上升的过程。电压升至约16 kV后开始出现局部激活,部分区域率先失稳并带动周围微粒进入更大范围的迁移性振荡,使得 η_y 的扩散更容易被触发;当微粒群在扩散后达到新的相对稳定状态,微粒间距增大、群体约束减弱,并在18—28 kV区间形成动态平衡,此时以少量微粒原地振荡为主,虽然可出现电极发射现象,但对群体再扩散的推动有限。继续升压至约30 kV及以上后,局部激活与电极发射碰撞激活的占比明显提高,尤其是电极发射微粒的高活跃运动通过碰撞改变局部荷电与场分布,容易打散原有团簇,使微粒群在X/Y两方向扩散到更高水平;与此同时,大量微粒被电极捕获或飞出表面,使 η_A 出现更显著的波动。

综上,图12-图14共同揭示了升压过程中微粒群扩散的台阶状规律,其

本质来源于主导迁移机制随电压的切换: 低压阶段的定向漂移推动沿场方向快速扩散但难以持续突破平台; 中等电压阶段局部激活触发横向松散并形成一段相对低活跃的稳态窗口; 高压阶段电极发射碰撞激活显著增强群体扰动与再扩散, 同时伴随微粒离面与被捕获导致包络面积波动加剧。

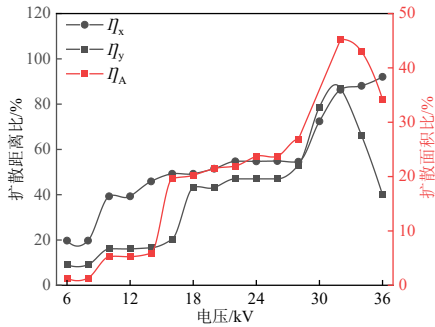


图 14 电压幅值对扩散过程的影响

Fig.14 Effect of voltage amplitude on particle dispersion

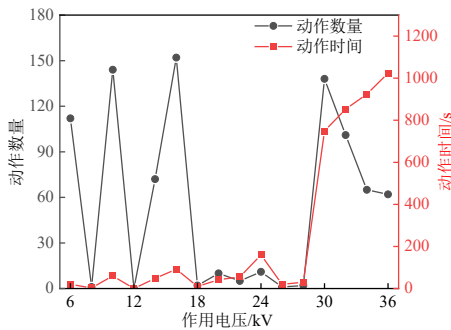


图 15 电压幅值对运动活性的影响

Fig.15 Effect of voltage amplitude on particle activity

3.2 电压作用时间的影响

除电压幅值外, 电压施加的累积效应应对微粒群的扩散进程与运动活性同样

具有显著的调制作用。总体规律显示, 微粒群的剧烈运动与空间重排主要集中于加压初期; 随着电压等级的升高, 系统达到准稳态分布所需的弛豫时间显著延长, 且在高场强阶段, 该稳定窗口极易被持续的电极发射与碰撞激活机制破坏, 导致微粒群难以进入静止状态。

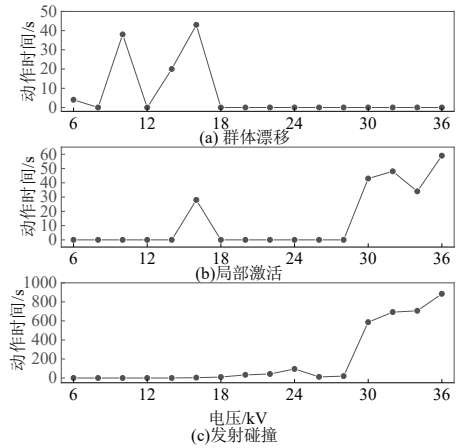


图 16 电压幅值对迁移模式的影响

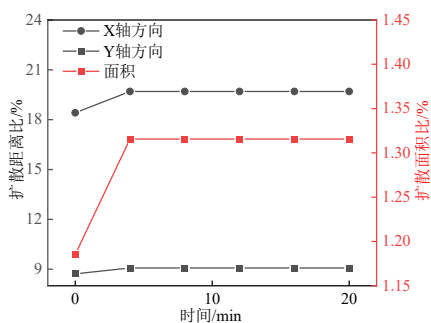
Fig.16 Effect of voltage amplitude on migration modes

图 17 揭示了不同电压等级下微粒累计动作时间随加压时长的演变规律。在 10 kV 与 16 kV 弱场条件下, 动作时间在加压初期呈阶跃式上升, 随即迅速进入饱和平台期。这表明低压阶段的主导机制为定向漂移与局域短程滚动, 微粒群在经历一次性的拓扑结构重排后, 迅速从暂态过渡至相对静止的稳态。相比之下, 24 kV 工况下的动作时间除初期增长外, 在加压中后段再次出现显著爬升并最终趋稳, 呈现出独特的延迟激活特征: 即微粒群在初期达到暂态平衡

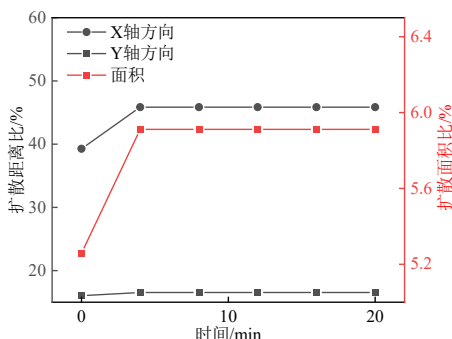
后,受累积电场力作用发生二次局部失稳与再迁移,导致扩散与活性在后期被再次激发。而在 30 kV 强场下,动作时间呈持续线性增长,未观测到明显的平台特征,表明微粒群处于长期活跃状态。

图 18 进一步解析了典型电压下扩散距离比与扩散面积比随时间的演化规律。低电压下, η_x 明显高于 η_y , 且主要在加压初期快速跃升后趋于稳定; η_A 的变化与 η_x , η_y 同步, 说明扩散主要体现为沿电场方向的整体拉伸与平移, 沿 Y 方向扩散受限, 微粒群在短时间内完成重排后进入稳态; 30 kV 下, η_x 与 η_y 均随时间显著增长, 尤其 η_y 的上升更为剧烈, 并伴随面积比的大幅增加, 呈现出持续扩散的特征, 这与该电压等级下高能微粒反复侵入群体、通过非弹性碰撞重构局部荷电与场分布的过程相吻合, 导致微粒群在沿场扩展的同时, 受碰撞散射与库仑斥力作用产生更强的横向解耦与松散。当电压进一步升至 36 kV 后, η_x 的趋于饱和, 而 η_y 与 η_A 反而出现下降趋势, 这主要归因于前述的高活跃度导致的微粒流失效应。

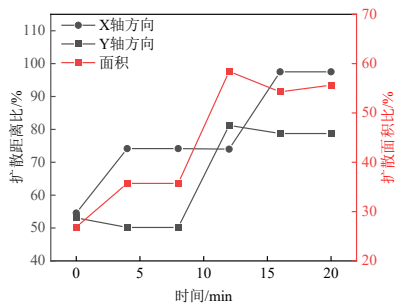
综上所述, 电压的累积效应与主导迁移机制切换一致: 当定向漂移或弱局部激活占主导时, 微粒群更易形成可维持的动态平衡; 当电极发射一碰撞激活占主导时, 微粒群长期处于重排过程中, 扩散程度对时间更敏感且稳定期显著缩短。



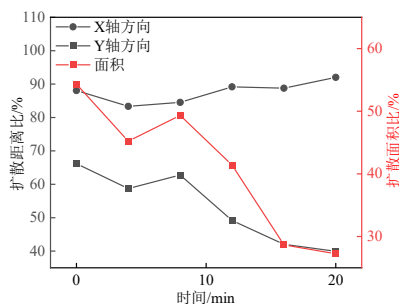
(a) 6kV



(b) 14kV



(c) 30kV



(d) 36kV

图 17 电压作用时间对扩散过程的影响

Fig. 17 Effect of voltage duration on particle dispersion

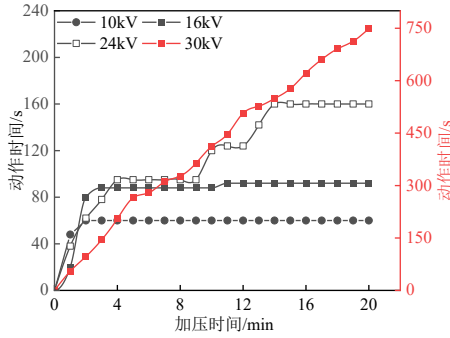


图 18 电压作用时间对微粒动作

Fig18 Effect of voltage duration on particle activity

需要指出的是,上述扩散台阶、活跃窗口与高压持续动作等特征,体现了水平构型下微粒群行为与传统同轴竖直构型的差异。竖直构型中微粒运动往往受重力约束显著,颗粒更易在低位(通常靠近接地侧)停留并以起跳和落回为主^[20];而本文水平构型中微粒以沿面滚动与跳跃为主,滚动摩擦提供的阻碍相对较小,使得启动门槛降低、扰动更易触发迁移。同时,交流电场的时变性使微粒的荷电与受力状态随相位波动,群体的动态平衡更脆弱^[21],微粒在电极间更容易出现反复起、碰撞传导和多次再分布,从而沿电场线方向形成更广泛的空间展开,上述差异是造成微粒群迁移不确定性与多变性的关键背景。

4 分析与讨论

4.1 微粒受力分析

为建立极间电场分布与微粒运动行为之间的定量联系,需要对极间场强在空间上的变化进行表征,并据此构建绝缘板上球形微粒的受力模型。

本文试品模型主要为水平电场,仅在电极附近存在一定的法向分量,为刻画这种空间不均匀性,可引入与位置相关的无量纲修正系数 $\eta(x)$,则绝缘板表面上任意位置的场强可写为

$$E(x) = \eta(x) \frac{U}{d} \quad (3)$$

$\eta(x)$ 由电极几何决定,可通过一次有限元计算获得,例如在基准电压 U_{ref} 下有

$$\eta(x) = \frac{E_{FEM}(x, U_{ref})}{U_{ref}/d} \quad (4)$$

其中 $\eta_{FEM}(x, U_{ref})$ 为对应位置的仿真场强,由之前的仿真结果可知,在绝缘板中央区域 $\eta(x)$ 接近常数,而靠近电极端部 $\eta(x)$ 显著增大。

考虑绝缘板中央一颗半径为 a 的球形金属微粒。该微粒在场强作用下通过极化及接触放电过程获得净电荷。参照导体微粒带电模型,其带电量可简化表征为^[22]

$$q(x) = k\epsilon_0\epsilon_r a^2 E(x) \quad (5)$$

其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 为气体相对介电常数, k 为综合几何形状和充电机理的修正系数^[28-29]。由此得到该微粒在极间主电场中的电场力为。

$$F_E = q(x)E(x) = k\varepsilon_0\varepsilon_r a^2 \eta^2(x) \left(\frac{U}{d}\right)^2 \quad (6)$$

可以看出,在粒径既定时,电场力随电压近似按 U^2 增长,同时受位置修正系数控制,即靠近电极端部 $\square(\square)$ 较大, F_E 也明显增强。

此外,微粒与周围微粒及微粒群之间的静电相互作用。设当前微粒带电量为 q_{ij} , 周围第 j 颗微粒带电量为 q_j , 二者间距为 r_{ij} , 则库仑力可以写为

$$F_C = \sum_{j \neq i} \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r} \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \quad (7)$$

当考虑场强在空间中的梯度时,微粒还会受到介电泳力,其表达式为

$$F_{grad}(x) = k_g \frac{U}{d} a^3 |\nabla(E^2(x))| \quad (8)$$

其中 k_g 为与微粒形状有关的修正系数,由于 $\square(\square)$ 在电极端部变化最为剧烈,在该区域也达到峰值,介电泳力将驱动微粒向高场区聚集。

阻力方面,球形微粒主要以滚动在绝缘板表面运动,摩擦力为

$$F_f = \mu_f mg = \frac{4}{3} \mu_f \rho \pi a^3 g \quad (9)$$

其中, μ_f 为FR4材料表面的滚动摩擦系数, ρ 为金属微粒的密度。

绝缘板中央微粒群的演化可以看作是 F_E 、 F_C 、 F_f 三者重新分配主次的结果。初始时刻微粒排布紧凑,当电压达到微粒群的起始动作电压后,电场力 F_E 与库仑力 F_C 合力克服摩擦力 F_f , 微粒群内部被初步撑开;随后场强随外施电压线性增加,而电场力与库仑力随 U^2 线性增大,使得微粒群沿电场方向的定向

漂移显著加速,团簇内在仍然较小的间距下,最近邻 F_C 会在短时间内强力撑开局部结构,将微粒推离原位,直到间距增大到一至数个粒径,此时库仑力反而下降,与摩擦力持平,内部扩散趋于饱和而整体漂移仍在继续。这一过程表明,微粒群的定向漂移主要受电场力驱使,内部微粒群之间相互排斥使得微粒群整发生扩散则是受库仑力影响,这两者与摩擦阻力之间的角力构成了微粒定向漂移过程中的实验现象。

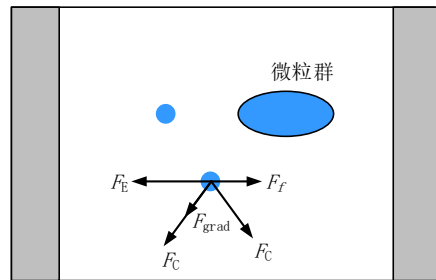


图19 微粒受力示意图

Fig.19 Schematic of forces acting on a particle

4.2 群体迁移主导机制及切换机理分析

群体迁移在不同电压阶段的主导机制本质上是电场力、库仑力和阻力的角力关系在不同场强水平下重构,同时,随场强增强,影响电场力与库仑作用的诱发因素逐步增多并动态变化,从而使主导作用由单一驱动逐渐转为多因素共同控制。

在低电压阶段,微粒群运动以定向漂移为主。此时微粒主要通过场致带电或传导带电获得较为均一的电荷,当电

压达到起始动作阈值时,沿电场方向的头部微粒与尾部微粒通常带异种电荷,电场力与库仑力合力在头部与尾部分别表现出促进和抑制扩散的特性,由于此时各作用力均较弱,仅二力同向时微粒才能运动,由此表现出头部微粒群扩散较快,尾部微粒群扩散较慢甚至出现反向扩散的微弱趋势,而垂向方向上仅依靠库伦斥力将微粒群撑开,且库仑力对微粒间的距离十分敏感,因此场向的扩散程度要高于垂向。低电压阶段的定向漂移是带电均匀的微粒群的整体与局部统一的有序过程;

当电压达到起始局放电压时,少数微粒带电状态的突变会打破原有的动态平衡,通过引发邻域电荷与电场的再分配,级联激活更多微粒。特别是在空气介质中,电晕与局部放电更易发生,荷电与电荷沉积过程更为活跃,这使得“局部突变—传导扩展”机制更容易被触发并维持,推动微粒群由同步推进向非同步扩散转变。局部激活后微粒群仍表现为有序的整体结构,但由于内部微粒间距较大,库仑力影响减弱,导致微粒间的相互约束也随之减弱,团簇中个体行为逐渐突出,临近高场强电极附近的微粒在强电场下更易荷电发生运动,而微粒群体的漂移和扩散行为则需要更高的电压下建立新的约束,这也是局部激活后通常会存在低活跃的平台期的原因。由此可以得知,局部激活阶段是通过局部放电加速微粒的漂移扩散进程,通过拉大团簇内部个体的距离实现

内部解耦,是微粒群由有序整体行为向无序个体行为过渡的阶段。

进入高压阶段后,三结合点附近频繁的电晕或局部放电使其成为微粒荷电与运动的主要诱因[26]。尤其是电极三结合点处的微粒,除了发生局部放电,还会通过与电极接触带电的方式,频繁从电极发射出高能微粒,行进过程中通过介入改变局部电场分布或碰撞等方式,影响其余微粒的状态。这一阶段瓦解的原始群体逐渐演变为多个分散的团簇,而团簇之间又通过局部电场相互约束形成动态平衡,此时个体微粒行为的影响具有不确定性,既有可能表现为游离在体系外的独立个体,也有可能成为团簇之间动态平衡的打破点。此外,交流电场的时变性加剧了微粒在电极附近的往复运动与反复充放电,叠加空气放电形成的表面电荷斑及离散分布导致的受力快速重构,致使微粒频繁出现启停与变向行为,进而导致这一阶段处在频繁建立和打破平衡的循环之中。

综上所述,群体迁移主导机制的切换本质上源于电场力与库仑相互作用对群体耦合状态的重塑:随着外加电场增强,整体电场力与粒间库仑力的竞争关系发生变化,原本相互耦合的微粒群逐步解耦,使得群体协同迁移的等效运动门槛抬升,同时个体响应差异被显著放大。在此过程中,电晕产生的空间电荷、绝缘表面电荷沉积以及颗粒与电极/介质的接触与碰撞带电等效应不断介入并叠加,进一步引入随机扰动与时

变电荷状态,导致微粒运动由早期的整体有序迁移,逐步过渡为以个体为主导的无序运动。而水平构型下摩擦导致的低启动门槛是微粒活跃的重要原因。因此本文所研究的空气交变水平场,其时变驱动力、低阻力和强电晕扰动使微粒呈现更高活跃度与更强演化不确定性,从而显著放大其绝缘风险。上述认识弥补了传统同轴竖直电场体系对水平绝缘表面微粒群体演化规律刻画不足,为机构室类水平绝缘结构中微粒缺陷的机理分析与风险评估提供了实验依据与物理解释框架。

5 结论

本文搭建了水平电场缩比试验平台,在0.3 MPa洁净干燥空气中开展0.8 mm球形金属微粒群的交流升压试验,利用CCD与放电信号同步检测对微粒运动、分布演化及放电现象进行分析,得到结论如下。

(1) 交流电压下微粒个体以滚动与跳跃为主,群体迁移可归纳为定向漂移、局部激活与电极发射碰撞激活三类;高压阶段常出现微粒碰撞和启-停式变向运动,迁移呈突发性与传导性。

(2) 电压幅值与作用时间共同决定了微粒群的扩散进程,扩散随电压呈台阶状非线性增长特征,18-28 kV出现低活跃窗口;每级电压下动作主要集中在升压后初期,电压越高稳定所需时间越长;30 kV以上电极发射长期存在,X/Y并发扩散且难形成稳定分布。

(3) 微粒群迁移机制的切换本质上由主导受力及其来源随场强变化所致,空气中的电晕现象和水平电场下摩擦力约束较弱使得交变电场下往复再充电效应进一步放大了这种非稳态、强偶发的迁移特征。

参考文献

- [1] 张欣,李高扬,黄荣辉,等.不同运行年限的GIS缺陷率统计分析与运维建议[J].高压电器,2016,52(3):184-188,194.
ZHANG X, LI G, HUANG R, . Statistical analysis of defects and maintenance advice for GIS in different operating years above 110kV[J]. High Voltage Apparatus , 2016 , 52(3) : 184-188 , 194.
- [2] SCHICHLER U, KOLTUNOWICZ W, ENDO F. Risk assessment on defects in GIS based on PDdiagnostics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2165-2172.
- [3] 许渊.运行中GIS绝缘子表面金属颗粒诱发放电研究[D].华北电力大学,2020.
XU Yuan. Investigation on mechanism of metallic particle induced flashover of GIS insulators in operation condition[D]. North China Electric Power University, 2020.
- [4] LUNDGAARD L E, RUNDE M, SKYBERG B. Particles in GIS: characterization from acoustic signatures [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1064-1074.
- [5] NOJIMA K. Forces Affecting Metallic

- Particle Motion in GIS [C]//International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM). Niigata, Japan: IEEE, 2014. DOI: 10.1109/ISEIM.2014.6870738.
- [6] GÖTZ T, GAO C, WENGER P. Partial Discharge Analysis in Gas-Insulated HVDC Systems Using Conventional and Non-Conventional Methods [C]. Paris: CIGRE Session, 2020, Paper D1-109..
- [7] 季洪鑫. 交流运行电压下 GIS 中金属颗粒运动行为及放电特征[D]. 华北电力大学, 2017.
- JI H. Study on Movement Behavior and Discharge Characteristic of Metal Particle in GIS under AC Operating Voltage[D]. North China Electric Power University, 2017.
- [8] WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Theoretical and experimental studies of air gap breakdown triggered by free spherical conducting particles in DC uniform field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 1951-1958.
- [9] 李玄, 尹奕淳, 王媛, 等. 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[J]. 高电压技术, 2025, 51(05): 2516-2528.
- LI X, YIN Y, WANG Y. Adsorption Behavior and Flashover Characteristics of DC GIL Metal Particles/Dust Facing Tripole Insulator[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(05): 2516-2528.
- [10] 李庆民, 王昌柱, 武文琪, 等. 直流 GIS/GIL 绝缘子沿面绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术, 2025, 51(03): 987-1009.
- LI Q, Wang C, Wu W. Advance in Research of Insulation Performance Enhancement Methods Along the Surface of DC GIS/GIL Insulators[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(03): 987-1009.
- [11] LI Qingmin, WANG Jian, LI Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860
- [12] 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): 7153-7166.
- LIANG R, LIU H, HU Q. 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): 7153-7166.
- [13] 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 R, WANG J, Hu Q. 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.
- [14] 路鑫晟. GIS 内金属微粒带电运动机理与特性研究[D]. 西安工程大学, 2023.
- LU X. Research on the mechanism and characteristics of charged motion of metallic particles in GIS. Xi'an Polytechnic University, 2023.
- [15] 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(03): 1166-1176.
- LI J, LI X, Lv. Study on the Charge Characteristics and Movement Pattern of Lamellar Particles Under Power Frequency

- Voltage. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(03):1166-1176.
- [16] 韩旭涛,吴旭涛,赵莹莹,等.交流叠加雷电冲击电压下SF6中线形金属微粒局部放电和运动特性[J].高电压技术,2024,50(12):5406-5414.
- HAN X, WU X, ZHAO Y. Partial Discharge and Motion Characteristics of Linear Metal Particles in SF6 Under AC Superimposed Lightning Impulse Voltage. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5406-5414.
- [17] 王健,秦诚意,张建民,等.基于能量法的带电操作典型振动激励下金属微粒运动模型[J].电工技术学报,2025,40(11):3653-3666.
- WANG J, QIN C, ZHANG J. Particle Motion under Typical Vibration Excitation of Live Operation Based on Energy Method. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2025, 40(11):3653-3666.
- [18] 李杰,李晓昂,吕玉芳,等.正弦振动激励下GIS内自由金属微粒运动特性[J].电工技术学报,2021,36(21):4580-4589+4597.
- Li J, Li X, Lv Y. Motion Characteristics of Free Metal Particles in GIS under Sinusoidal Vibration[J]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2021,36(21):4580-4589+4597.
- [19] 宋颜峰,郑中原,于金山,等.机-电联合作用下SF6气体中金属微粒运动行为与局部放电特性研究[J].西安交通大学学报,2023,57(07):74-83.
- Song Y, Zheng Z, Yu J. Study on the Motion Behavior and Partial Discharge Characteristics of Metal Particles in SF6 Gas Under the Combined Action of Mechanical and Electrical[J]. JOURNAL OF XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY, 2023, 57(07): 74-83.
- [20] 陈杳伟,郑旭,张震锋,等.交流GIS内金属微粒启举运动影响因素分析[J].机电工程技术,2025,54(10):168-172.
- CHEN Y, ZHENG X, ZHANG Z. Analysis of Factors Influencing the Lifting Movement of Metal Particles in Alternating Current GIS. MECHANICAL & ELECTRICAL ENGINEERING TECHNOLOGY, 2025,54(10):168-172.
- [21] 程涵,魏威,Bilallqbal Ayubi,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 H, WEI W, Bilallqbal A. Study on the Electrodynamics Behavior of Linear Metal Particles in DC Gas Insulated Transmission Line[J]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2021,36(24):5283-5293.
- [22] 耿秋钰,胡智莹,李庆民,等.特高压交流GIS/GIL拔孔型陷阱优化设计与协同布置方法[J].电工技术学报,2023,38(23):6539-6552.
- GENG Q, HU Z, LI Q. Optimal Design and Synergism Arrangement Methodology of Convex-Shaped Traps for Ultra High Voltage Ac Gis/GIL Applications[J]. TRANSACTIONS OF CHINA ELECTROTECHNICAL SOCIETY, 2023, 38(23):6539-6552.
- [23] CHOWDHURY F, ELCHAMAA B, RAY M, et al. Electrostatic charging due to individual particle-particle collisions [J]. Powder Technology, 2021, 381: 352-365.
- [24] 周鑫淼,张博雅,陈立,等.金属微粒影响三电极气体火花开关击穿过程的仿真研究[J].物理学报,2024,73(01):254-263.
- ZHOU X, ZHANG B, CHEN L. Simula-

- tion study on the influence of metal particles on the breakdown process of three electrode gas spark switch[J]. *Acta Phys. Sin*, 2024,73(01):254-263.
- [25] LI C, SHAHSAVARIAN T, ARAB BAFERANI M A, et al. Understanding DC Partial Discharge: Recent Progress, Challenges, and Outlooks [J]. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2022, 8 (3): 894-909.
- [26] HE C, ZHANG Q, CAO D, et al. Surface Partial Discharge Characteristics in SF₆ under AC and Switching Impulse Superimposed Voltage [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(8): 1807-1817.
- [27] SCHICHLER U, KOLTUNOWICZ W, ENDO F. Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(6): 2165-2172.
- [28] Liu Y., Zhang L., et al. (2006). "Study on the charging characteristics of insulating particles." *Journal of Electrostatics*, 64(5), 367-372.
- [29] Tavares A. F., Lima J. A. (2010). "Charging of Insulating Particles in Alternating Electric Fields." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 17(5), 1585-1591.