

交流水平电场作用下压缩空气中金属微粒群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. 西安交通大学电气工程学院, 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超高压公司, 710026, 西安)

摘要: 为对环保气体绝缘组合电器(GIS)机构室水平绝缘结构中自由金属微粒的运行风险进行管控,针对既有研究在水平构型下微粒群迁移与放电耦合规律欠缺的问题,提出了金属微粒群迁移与放电耦合的表征与机制分析方法,以揭示迁移机制及其对闪络风险的影响。通过电荷耦合器件工业相机(CCD)获取连续成像与放电信号时序,对交流水平场下 0.3 MPa 压缩空气中 0.8 mm 球形微粒群的迁移与放电行为进行了分析,同时通过计算扩散指标明确了电压对迁移特性的影响,进而构建受力模型,阐明迁移模式切换机理。结果表明:微粒群迁移行为随电压演化可分为定向漂移、局部活化与电极发射碰撞活化 3 类,高活跃阶段的微粒在几个周期内发生多次弹跳碰撞,提高闪络触发概率;微粒的扩散速率与运动活性随电压升高呈台阶式增长;低压环境中,微粒沿 X 轴的电场诱导扩散速率较 Y 轴高出 40%,高压条件下,空气电晕会对微粒群产生扰动,使其平衡稳定性下降,体系达到平衡状态的耗时也随之增加;交流水平电场中,微粒迁移行为由低阻尼水平运动工况下,电场力与粒间库仑作用分阶段耦合共同控制。该研究可为环保 GIS 机构室类水平绝缘结构中微粒缺陷的机理认识与风险评估提供试验依据和理论参考。

关键词: 压缩空气;金属微粒群;交流水平场;迁移机制;空气电晕

中图分类号: **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202609008 **文章编号:** 0253-987X(2026)09-0072-13

Motion Behavior and Migration Mechanism of Metallic Particle Groups in Compressed Air under an AC Horizontal Electric Field

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

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China;
3. Ultra-High Voltage Company, State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710026, China)

Abstract: To control the operational risks posed by free metallic particles in the horizontal insulation structures of mechanism compartments in air-insulated eco-friendly GIS, the migration and discharge behavior of 0.8 mm spherical particle groups in compressed air at 0.3 MPa under an AC horizontal electric field is analyzed by continuous CCD imaging and time-resolved discharge signal measurements. Diffusion indices are calculated to clarify the influence of voltage on the migration characteristics, and a force model is established to reveal the mechanism of migration-

mode transition. The results show that the voltage-dependent migration behavior of the particle groups can be classified into three modes: directional drift, local activation, and electrode-emission-induced collision activation. During highly active stages, the particles undergo multiple bouncing collisions within several cycles, increasing the probability of flashover initiation. As the voltage increases, the particle diffusion rate and motion activity exhibit stepwise increases. The diffusion rate in the X-axis direction is much higher than that in the Y-axis direction under the electric field, the time required for the particle groups to reach equilibrium becomes longer, and the equilibrium stability decreases under corona disturbance. Particle migration in the AC horizontal electric field is governed by the stage-dependent coupling of the electric force and Coulomb interactions under low-damping horizontal-motion conditions. The results provide experimental evidence and a theoretical reference for understanding the mechanisms of particle defects and assessing their risks in horizontal insulation structures of mechanism compartments.

Keywords: compressed air; metallic particle groups; horizontal electric field; migration mechanism; air corona

气体绝缘组合电器(GIS)/输电线路(GIL)具有结构紧凑、运行可靠等优势,而基于压缩空气的环保GIS在减少SF₆污染的同时,最大程度地保留了其绝缘能力,近年来已成为研究的热点。电力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,采用微粒的起动场强、运动概率等统计参数对运动特性进行表征,建立微粒位置和姿态与放电行为、放电特性之间的关联来表征微粒运动对绝缘的影响。Lundgaard、Nojima等研究发现,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]。Götz等采用局部放电测量与光学观测,指出直流电压自由微粒的运动模式与交流存在显著差异,从而影响局部放电信号的可检测性与特征提取策略^[6]。季洪鑫发现并总结了交流电压下微粒的4种运动方式,以及不同形状金属微粒的运动倾向和危害^[7]。Wang等从仿真和实验的角度系统研究了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,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治污染措施^[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就

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]。李杰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次方近似呈正比^[15]。韩旭涛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]。近年来,学者们也开始考虑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]。

尽管上述研究为微粒缺陷的认识与治理奠定了重要基础,但现有成果仍存在不足。首先,现有研究主要针对GIS灭弧室的同轴电场与竖直电场环境,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;此时,微粒间的静电相互作用以及碰撞引发的电荷再分配,会使得微粒迁移规律与放电触发行为表现出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SF₆的气体环境下,而空气的电负性弱,对局部放电的抑制效果不如SF₆。显著,这些条件下微粒更易荷电,由此带来的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,构建压缩空气下的实验模型,在交流电压作用下对微粒运动、迁移和放电等行为进行观测分析,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 试验平台

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,根据功能不同断路器内部分为机构室和灭弧室。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,而机构室支柱绝缘筒处电极水平相对,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,本文搭建了如图 2 所示的工频交流电压试验平台与测量系统。试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 kV/10 kW 的无局部放电变压器。测量系统包括电荷耦合器件(CCD)工业相机、电容分压器、罗氏电流线圈,CCD 型号为 HY-800B,分辨率为 800 万像素,帧率可达 240 帧/s,具备长时间录像功能,可对微粒运动全过程进行记录,电容分压器量程为 100 kV,分压比为 1 000 : 1,罗氏电流线圈衰减比为 2 : 1。

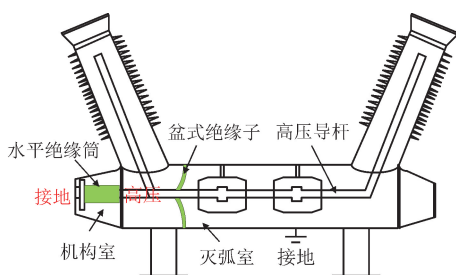


图 1 GIS 断路器典型结构

Fig. 1 Typical structure of GIS circuit breaker

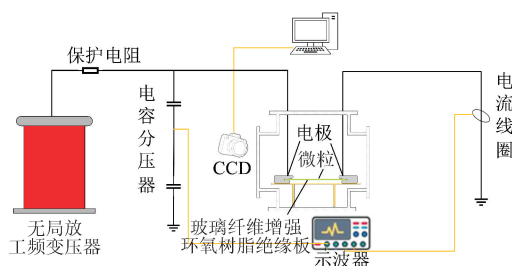


图 2 工频电压试验平台与测量系统

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

腔体内所采用的试品模型结构尺寸如图 3 所示,试品设计参照了 GIS 设备侧绝缘筒内壁的指形电极结构;为便于观测,将绝缘筒剖面简化设计为平板构型。试品电极采用铝合金材质,绝缘板选用电力系统通用 B 级工业 FR4 板材;电极极间间距为 70 mm,电极沿边长度为 140 mm。电极与绝缘板间设有一处截面尺寸为 2 mm×5 mm 的缝隙,用于模拟真实 GIS 电极的补偿间隙,该缝隙为本模型最典型的金属-气体-固体三介质结合点,金属微粒放置于绝缘板中心区域。

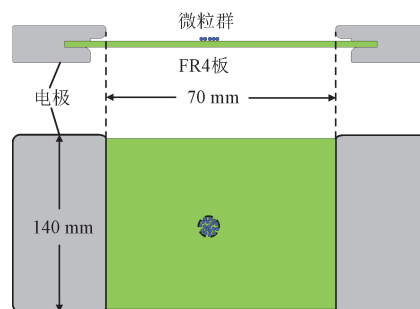


图 3 试品模型尺寸示意图

Fig. 3 Schematic of the specimen dimensions

为评估缩比试品内的电场环境,采用有限元法对试品表面进行了静电场仿真,结果如图 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、绝缘筒和气体的三介质结合点处,场强峰值 $E_{\max}$ 约为 1.2 kV/mm,计算得到电场不均匀系数 $k = E_{\max}/E_{\text{avg}} \approx 2.8$,其中 E_{avg} 为场强均值。下部的电场的矢量分布图中箭头表明了不同区域电场线的分布方向,可以看出,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

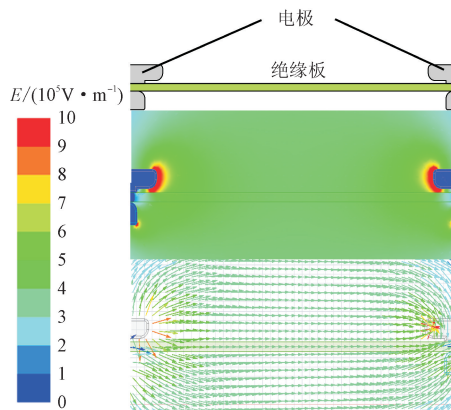


图 4 试品表面电场仿真结果

Fig. 4 Simulated electric-field distribution on the specimen surface

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。

1.2 试验方法

电力现场的实践结果表明,除了少数 mm 级的大微粒,GIS 内部往往存在大量的亚 mm 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方法,本文选取绝缘板中心 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的圆形区域内部均匀布置金属微粒,微粒选取 0.8 mm 的球形金属铝粒。目前,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 $0.5 \sim 0.9\text{ MPa}$,而实验室下多采用 $0.3 \sim 0.6\text{ MPa}$ 的气体压力范围开展试验。鉴于此,本文选用 0.3 MPa 干燥压缩空气作为填充介质,该压力条件下设备内部能尽可能贴近实际绝缘强度,且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,以及其在不同场强下的演化特性。

交流试验采用阶梯升压法。起始电压设为 0 ,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。试验过程中,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。

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①和②分别表示微粒滚动和跳跃两大类运动,其中滚动行为可细分为 3 种模式。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;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,以及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原地振荡式的周期滚动。图 5 中②为微粒在法向分量的瞬时驱动力作用下发生的短程跳跃行为,微粒落地后再被新的陷阱或电场方向捕获。图 6 所示是个体微粒运动行为方式的实物图,黑色箭头所指即为发生运动的微粒,图 6(a)中①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,②号微粒则发生了约 2 mm 的阶跃式迁移,图 6(b)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)中箭头所指示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(c)描绘了微粒的跳跃轨迹。

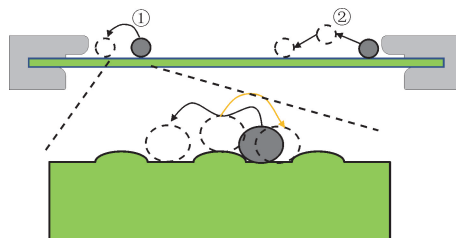


图 5 个体微粒典型运动方式示意图

Fig. 5 Schematic diagram of typical motion patterns for individual particles

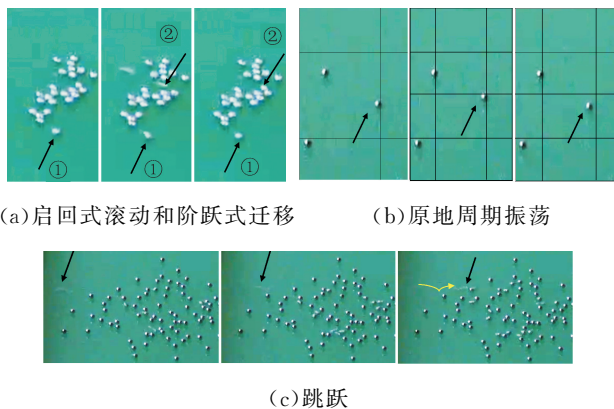


图 6 个体微粒运动方式实物图

Fig. 6 Experimental images of individual particle motion modes

微粒个体的运动行为与群体分布特征相互耦合,会演化出更为复杂的轨迹模式。4 种典型的微粒运动轨迹如图 7 所示。①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。②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。③捕获-盘旋型。补偿缝隙内静止的金属微粒在电极区域突发带电并起跳;微粒运动过程中会受周边微粒静电吸引、局部电场畸变共同作用发生偏转,该偏转行为会在微粒途经其他微粒、高场强区域时反复出现。④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。

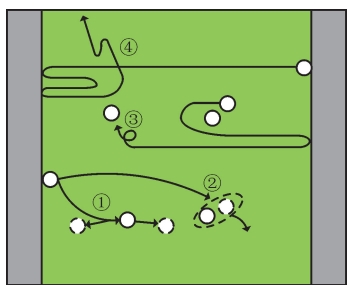


图7 微粒运动轨迹示意图

Fig. 7 Schematic of particle motion trajectories

微粒运动轨迹的多变性可能与其在交变电场力中荷电、受力状态的变化,以及行进过程中与其他微粒的相对位置的时变性有关,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。图8展示了在同一次微粒运动中,游离微粒与群体边缘微粒碰撞前后不同时刻的微粒典型运动状态。微粒①先后撞击②号、③号微粒。每次碰撞后,被撞微粒均获得动力沿原方向迁移,而微粒①初次与微粒②碰撞回弹至电极,第二次与微粒③碰撞则仅发生短程回弹并转入原地振荡,表现出明显的行为差异。这一现象表明,碰撞同时具备动量传递与电荷再分配的双重作用^[20]。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。

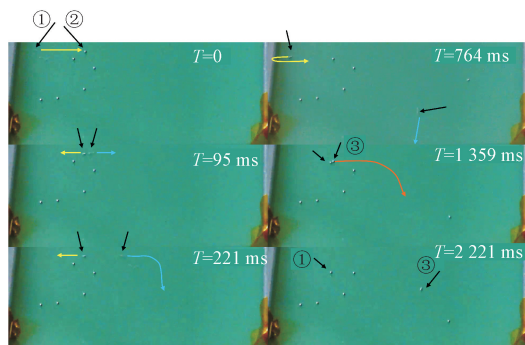


图8 微粒碰撞与电荷交换过程

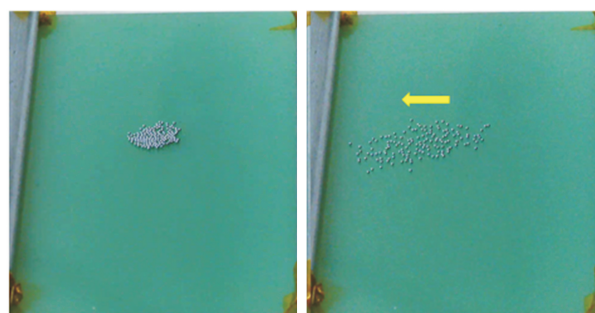
Fig. 8 Particle collision and charge-exchange process

微粒运动的全过程受到严格约束,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

程中的短距离启停为主。其原因在于,水平电场中球形微粒的滚动摩擦力通常比重力低2~3个数量级,而 μm 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电场不均匀性,都使得微粒在时空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^[21-22],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。

2.2 微粒群体的迁移行为

在升压过程中,微粒群的群体迁移表现出阶段性特征,图9所示为在低电压范围内,微粒团簇结构致密,微粒群表现出显著的定向振荡漂移特征。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)的初始分布到图9(b)的向地电极侧定向漂移。此时群体内部运动具有高度的一致性,迁移轨迹呈现为均匀、连续的平移。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,个体存在两类振荡模式: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。



(a) 初始分布

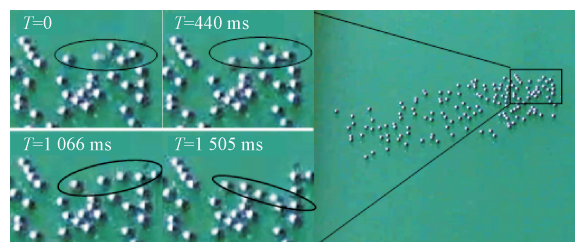
(b) 定向漂移

图9 微粒群振荡漂移过程

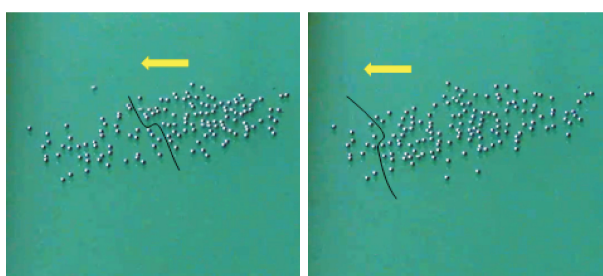
Fig. 9 Oscillatory drift process of the particle cluster

图10展示了当电压升至局部起跳阈值后,微粒群进入局部活化阶段。首先,图10(a)展示了右侧群体边缘的5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)、图 10(c)所示,振荡波前由边缘向中心传递(图 10 中曲线清晰勾勒了不同时刻的活化边界)。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。由于各区域活化时刻存在时滞,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。



(a) 右侧 5 颗微粒率先运动



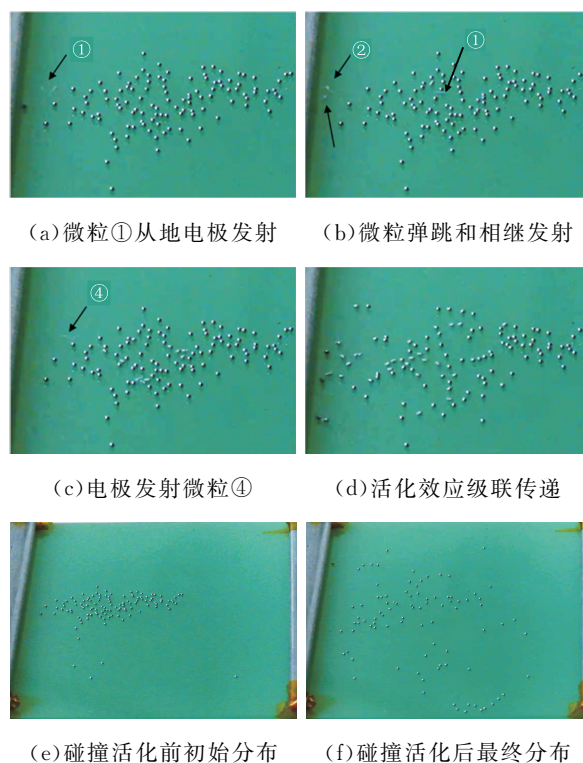
(b) 振荡波左行至中心

(c) 振荡波左行至左侧

图 10 微粒群局部活化过程

Fig. 10 Local activation process of the particle cluster

图 11 展示了在更高电压下,微粒群边缘微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活化机制。以 30 kV 工况为例,图 11(a)中微粒①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,如图 11(b)中所示以约 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②、③相继被发射。值得注意的是,微粒①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②、③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 11(c)、11(d)中,随着微粒④的进一步侵入,活化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。图 11(e)、11(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:活化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。



(a) 微粒①从地电极发射

(b) 微粒弹跳和相继发射

(c) 电极发射微粒④

(d) 活化效应级联传递

(e) 碰撞活化前初始分布

(f) 碰撞活化后最终分布

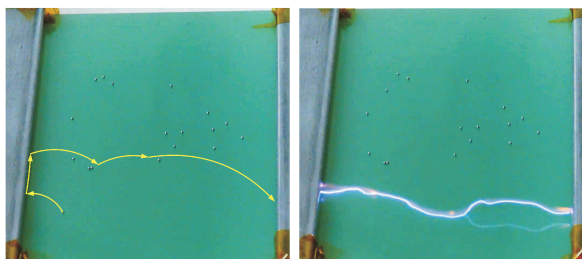
图 11 电极发射碰撞活化过程

Fig. 11 Collision activation process of electrode-emitted particles

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。观测结果表明,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,不必要途经微粒就能形成闪络放电的通道。这种微粒群的时空分布演化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^[23]。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,进而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。

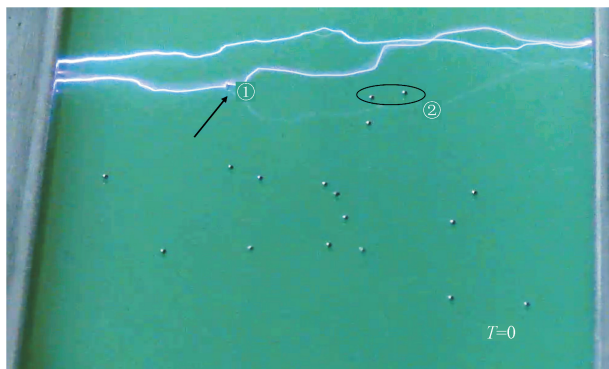


(a) 微粒运动路线 (b) 微粒诱发闪络通道

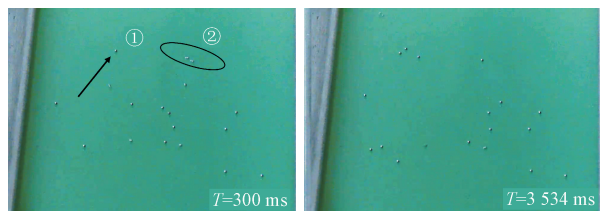
图 12 微粒运动引发闪络过程

Fig. 12 Flashover triggered by particle motion

闪络发生后,微粒的运动状态发生突变并呈现显著分化特征,图 13 所示为绝缘板平面闪络引发后续微粒运动的过程。图 13(a)所示为 $T=0$ 时刻微粒引发的闪络现象, $T=300$ ms 时刻,处于闪络通道上的微粒①仅沿电场方向产生短程位移后即停止,并在图 13(b)位置转为弱振荡,而微粒②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,最终分布如 13(c)所示。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。



(a) 微粒引发闪络



(b) 微粒的分化运动行为

(c) 微粒群最终分布

图 13 沿面闪络引发微粒运动过程

Fig. 13 Particle motion triggered by surface flashover

综上所述,微粒的跨域迁移与向电极侧的持续运输提高了闪络触发概率,而闪络过程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。

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 L_x 、 L_y ,定义 x 轴与 y 轴方向扩散距离比为

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

同时以微粒群包络面积 A_c 与绝缘板总面积 A_0 的比值定义扩散面积比

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

统计单位电压等级内微粒动作次数 N 以及 3 类典型迁移行为(定向漂移、局部激活、电极发射碰撞激活)的持续动作时间,用于表征不同阶段的主导迁移模式及其活跃程度。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 均呈现明显的台阶式非线性增长特征。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容易被触发。 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,但进入高电压区间后, 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。

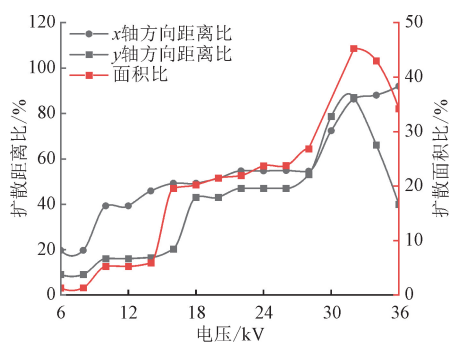


图 14 电压幅值对扩散过程的影响

Fig. 14 Effect of voltage amplitude on particle dispersion

图 15 给出了电压幅值对运动活性的影响。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变化更敏感,表现为先交替上升、后在高电压区间显著抬升;同时在 18~28 kV 区间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。

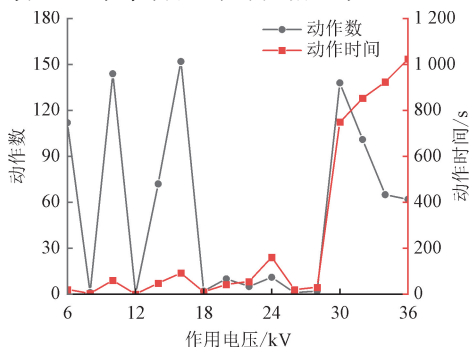
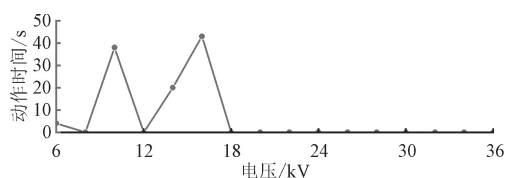


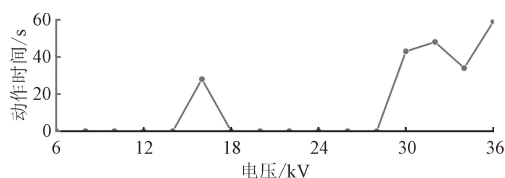
图 15 电压幅值对运动活性的影响

Fig. 15 Effect of voltage amplitude on particle activity

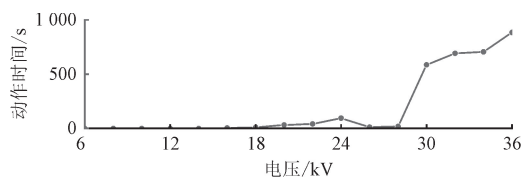
图 16 进一步展示了 3 类迁移模式的持续时间。结果表明,低电压阶段群体以定向漂移为主导,多数微粒以一致性较高的迁移性振荡推进,这一模式决定了早期 η_x 的快速增长,并导致运动活性呈现波动上升的过程。电压升至约 16 kV 后开始出现局部激活,部分区域率先失稳并带动周围微粒进入更大范围的迁移性振荡,使得 η_y 的扩散更容易发生;当微粒群在扩散后达到新的相对稳定状态,微粒间距增大、群体约束减弱,并在 18~28 kV 区间形成动态平衡,此时以少量微粒原地振荡为主,虽然可出现电极发射现象,但对群体再扩散的推动有限。继续升压至约 30 kV 及以上后,局部激活与电极发射碰撞激活的占比明显提高,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, η_A 出现更显著的波动。



(a) 群体漂移



(b) 局部激活



(c) 发射碰撞

图 16 电压幅值对迁移模式的影响

Fig. 16 Effect of voltage amplitude on migration modes

图 14~16 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。

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。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、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,呈现出延迟活化特征,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。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。

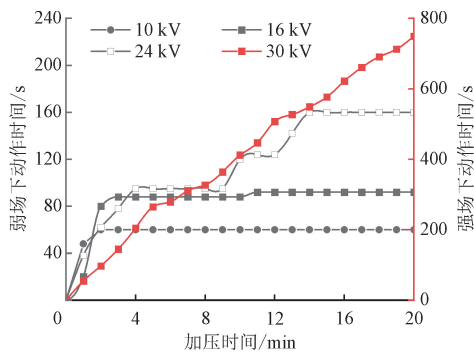


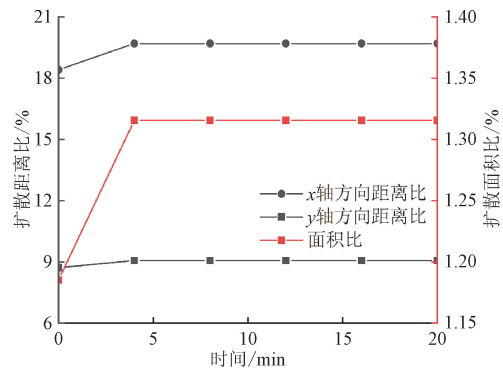
图 17 电压作用时间对动作时间的影响

Fig. 17 Effect of voltage duration on particle movement time

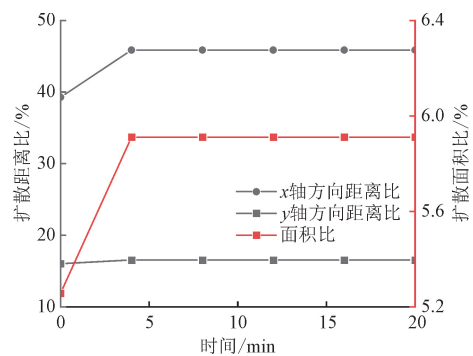
图 18 进一步解析了扩散过程随时间的演化规律。低电压下, η_x 明显高于 η_y , 且主要在加压初期快速跃升后趋于稳定; η_A 的变化与 η_x 、 η_y 同步, 说明扩散主要体现为沿电场方向的整体拉伸与平移, 沿 y 方向扩散受限, 微粒群在短时间内完成重排后进入稳态; 30 kV 下, η_x 与 η_y 均随时间显著增长, 尤其 η_y 的上升更为剧烈, 并伴随面积比的大幅增加, 呈现出持续扩散的特征, 这与该电压等级下高能微粒反复侵入群体、通过非弹性碰撞重构局部荷电与场分布的过程相吻合, 导致微粒群在沿场扩展的同时, 受碰撞散射与库仑斥力作用产生更强的横向解耦与松散。当电压进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

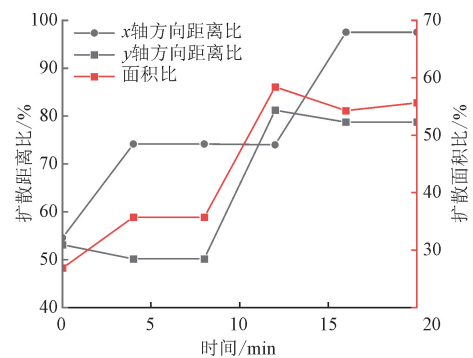
段, 该稳定窗口极易被持续的电极发射与碰撞激活机制破坏, 导致微粒群难以保持静止状态。



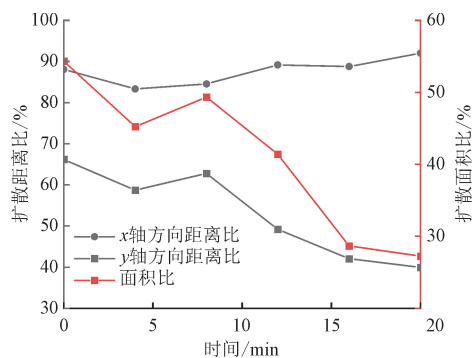
(a) 6 kV



(b) 14 kV



(c) 30 kV



(d) 36 kV

图 18 电压作用时间对扩散过程的影响

Fig. 18 Effect of voltage duration on particle dispersion

台阶式扩散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,微粒更易在接地侧停留并以起跳和落回为主^[24];而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^[25],微粒在电极间更容易出现反复起动、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。

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具体联系,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,图19给出了绝缘板表面微粒的受力示意图。

对于本文研究的平板模型,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电场强度可写为

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

式中: $\eta(x)$ 由电极几何决定; U 为电极间电压; d 为电极间距离。这些变量可通过一次有限元计算获得,例如在基准电压 U_{ref} 下有

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

式中: $E_{\text{FEM}}(x, U_{\text{ref}})$ 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^[26]为

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

式中: 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^[27-28]。由此得到该微粒在极间主电场中的电场力为

$$F_E = q(x)E(x) = k\epsilon_0\epsilon_r a^2 \eta^2(x) \left(\frac{U}{d}\right)^2 \quad (6)$$

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 $\eta(x)$ 较大, F_E 也明显增强。

此外,微粒与周围微粒及微粒群之间存在相互作用的库仑力。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

$$F_C = \sum_{j \neq i} \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r} \frac{q_i q_j}{r_{ij}^2} \quad (7)$$

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

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

式中: k_g 为与微粒形状有关的修正系数,由于 $\eta(x)$ 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

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

式中: μ_f 为FR4材料表面的滚动摩擦系数; ρ 为金属微粒的密度; g 为重力加速度。

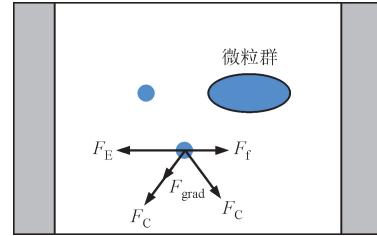


图19 微粒受力示意图

Fig. 19 Schematic of forces acting on a particle

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;随后场强随外加电压线性增加,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1至数个粒径,此时库仑力下降,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体发生扩散受库仑力影响,这二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。

4.2 群体迁移主导机制及切换机理分析

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仑斥力将微粒群撑开,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。

当电压达到起始局部放电电压时,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。局部活化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在更高的电压下建立新的约束,这也是局部活化后通常会存在低活跃的平台期的原因。由此可以得知,局部活化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成为微粒荷电与运动的主要诱因^[29]。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。

群体迁移主导机制的切换本质上源于电场力与库仑力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,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微粒与电极/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。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试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,得到如下结论。

(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、局部活化与电极发射碰撞活化 3 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,低压下受电场作用 x 轴向扩散比 y 轴高出 40%;每级电压下动作主要集中在升压后初期,电压越高,系统达到稳定所需时间越长;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源于电场力与库仑力相互作用对群体耦合状态的重塑,在空气电晕和水平方向的弱阻力体系中,交变电场的往复充电效应加剧了微粒迁移的非稳态性和偶发性。

参考文献:

- [1] 张欣,李高扬,黄荣辉,等.不同运行年限的 GIS 缺陷率统计分析运维建议[J].高压电器,2016,

- 52(3): 184-188.
- Zhang Xin, Li Gaoyang, Huang Ronghui, et al. Statistical analysis of defects and maintenance advice for GIS in different operating years above 110 kV [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 184-188.
- [2] Schichler U, Koltunowicz W, Endo F, et al. Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics [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]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [4] Lundgaard L E. Particles in GIS characterization from acoustic signatures [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(6): 1064-1074.
- [5] Nojima K, Zhang Xueqin, Sato M, et al. Forces affecting metallic particle motion in GIS [C]//Proceedings of 2014 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 132-135.
- [6] Götz T, Gao C, Wenger P. Partial discharge analysis in gas-insulated HVDC systems using conventional and non-conventional methods [C]//CIGRE Session 2020. Paris, French: CIGRE, 2020: 1-109.
- [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]. 北京: 华北电力大学, 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(5): 2516-2528.
- Li Xuan, Yin Yichun, Wang Yuan, et al. Adsorption behavior and flashover characteristics of DC GIL metal particles/dust facing tri-post insulator [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 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(3): 987-1009.
- Li Qingmin, Wang Changzhu, Wu Wenqi, et al. Advance in research of insulation performance enhancement methods along the surface of DC GIS/GIL insulators [J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 987-1009.
- [11] 李庆民, 王健, 李伯涛, 等. GIS/GIL 中金属微粒污染问题研究进展 [J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 849-860.
- Li Qingmin, Wang Jian, Li Botao. 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): 7153-7165.
- 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.
- [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 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.
- [14] 路鑫晟. GIS 内金属微粒带电运动机理与特性研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 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(3): 1166-1175.
- Li Jie, Li Xiaoang, Lü 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.
- [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 Xutao, Wu Xutao, Zhao Yingying, et al. Partial discharge and motion characteristics of linear metal particles in SF₆ under AC superimposed lightning impulse voltage [J]. 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 Jian, Qin Chengyi, Zhang Jianmin, et al. Particle motion under typical vibration excitation of live operation based on energy method [J]. 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.
- Li Jie, Li Xiaoang, Lü Yufang, et al. Motion characteristics of free metal particles in GIS under sinusoidal vibration [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4580-4589.

- [19] 宋颜峰, 郑中原, 于金山, 等. 机-电联合作用下 SF_6 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(7): 74-83.
- Song Yanfeng, Zheng Zhongyuan, Yu Jinshan, et al. Study on the motion behavior and partial discharge characteristics of metal particles in SF_6 gas under the combined action of mechanical and electrical [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(7): 74-83.
- [20] Chowdhury F, Ray M, Passalacqua A, et al. Electrostatic charging due to individual particle-particle collisions [J]. Powder Technology, 2021, 381: 352-365.
- [21] 周鑫森, 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(1): 168-177.
- Zhou Xinmiao, Zhang Boya, Chen Li, et al. Simulation of effect of metal particles on breakdown process of three-electrode gas spark switches [J]. Acta Physica Sinica, 2024, 73(1): 168-177.
- [22] Li Chuanyang, Shahsavarian T, 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.
- [23] Schichler U, Koltunowicz W, Endo F, et al. Risk assessment on defects in GIS based on PD diagnostics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2165-2172.
- [24] 陈杏伟, 郑旭, 张震锋, 等. 交流 GIS 内金属微粒启运运动影响因素分析 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(10): 168-172.
- Chen Yaowei, Zheng Xu, Zhang Zhenfeng, et al. Analysis of factors influencing the lifting movement of metal particles in alternating current GIS [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2025, 54(10): 168-172.
- [25] 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.
- [26] 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 Qiuyu, Hu Zhiying, Li Qingmin, et al. 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.
- [27] Pérez A T. Charge and force on a conducting sphere between two parallel electrodes [J]. Journal of Electrostatics, 2002, 56(2): 199-217.
- [28] 张强, 贾军, 杨亮, 等. 介质涂覆电极上金属导电微粒的充电机理 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1287-1291.
- Zhang Qiang, Jia Jun, Yang Liang, et al. Charging mechanism of metallic conducting particle on a dielectrically coated electrode in gas insulated system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1287-1291.
- [29] 何聪, 张芊, 曹铎耀, 等. 交流与操作冲击叠加电压下 SF_6 气体中沿面局部放电特性 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1807-1817.
- He Cong, Zhang Qian, Cao Duoyao, et al. Surface partial discharge characteristics in SF_6 under AC and switching impulse superimposed voltage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1807-1817.

(编辑 武红江)