

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2021.06.021

直流套管中自由金属微粒运动特性分析

李松¹, 李金忠^{1,2}, 汤浩¹, 邓江³

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031; 3. 西南交通大学, 成都 611756)

摘要:近年来在多起直流套管故障中,均在套管内部发现直径分布在数微米至数十微米间的金属微粒,金属微粒在套管内部附着与运动对套管内部电场分布及套管的安全稳定运行具有重要的影响。对故障套管内部存在的金属微粒分布位置与形态进行了分析,并建立了不同尺寸、不同分布模式下自由金属微粒的运动模型,用于计算微粒的起始运动场强。搭建微粒试验平台,结合套管实际运行状态分析微粒运动特性,对微粒运动模型进行验证。结果表明,直流套管内自由金属微粒将在电场作用下发生运动,且起始运动场强与微粒直径、微粒分布宽度、微粒分布厚度等因素密切相关。研究结果可用于直流套管的结构优化设计,在学术与工程应用上均值得进一步研究。

关键词:直流套管;微米级自由金属微粒;模型构建;起始运动场强

Motion Characteristics Analysis of Free Metal Particles in DC Bushing

LI Song¹, LI Jinzhong^{1,2}, TANG Hao¹, DENG Jiang³

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In several DC bushing failures in recent years, metal particles have been found inside the bushing, and the diameter was between several microns and several tens of microns. The adhesion and movement of metal particles inside the bushing had impact on the electric field distribution and safely operating. In order to calculate the initial motion field strength of particle, the position and shape of metal particles inside the fault bushing were analyzed, and the motion model of free metal particles with different sizes and forms were established. A test platform was built. The particle motion characteristics were analyzed according to the operating bushing, and the particle motion model was verified. The results showed that free metal particles in the DC bushing would move under the influence of the electric field. The initial motion field strength was related to factors such as particle diameter, width, and thickness. The research result could be used as structural optimization and design of DC bushings, which was worth a further study both in academic and engineering application.

Key words: DC bushing; micron length free metal particles; model building; initial motion field strength

0 引言

换流变压器阀侧套管和直流穿墙套管(统称为直流套管)是直流输电系统中的关键部件,在高压直流输电换流站中起连接换流站阀厅与交/直电网设备的作用。直流套管在运行中需耐受直流电压、谐波电流、户外污秽与雨雪等,对绝缘、热、机械、密封

等性能要求苛刻^[1-15]。近年来在特高压换流变压器的运行中发生了多起套管内绝缘、外绝缘击穿与闪络放电故障,特高压直流套管内部和外部存在绝缘薄弱环节,目前仍未能全面掌握直流套管在不同运行工况和环境条件下内外绝缘特性^[16-17]。

近年来发生的多起直流穿墙套管故障中,约50%的故障套管内部均发现金属微粒,微粒的直径

收稿日期:2020-11-26; 修回日期:2021-01-18

基金项目:国家电网公司科技项目(GY71-18-022)。

Project Supported by State Grid Corporation Project(GY71-18-022).

在数微米至数十微米之间。金属微粒对直流套管的影响主要体现在以下方面:微粒的积聚改变套管内部的电场分布,影响套管绝缘性能;微粒会在电场的作用下发生定向迁移运动,带来较大的安全隐患^[18-21]。因此,研究直流套管内部金属微粒运动特性对保证换流变压器安全稳定运行具有重要的意义。

由于微米级别微粒与常规电气设备尺寸差异较大,仿真与试验难度大,国内外暂无相关研究。但对于毫米级别金属微粒运动特性的研究可作为本文参考。文[22]仿真计算了直径1 mm的球形金属微粒在斜板电极间的运动轨迹,并指出微粒在电极间运动轨迹的主要影响因素包括:微粒初始位置、斜板倾角、微粒半径以及所加电压的频率和幅值等;文[23-24]对直径为0.5~3 mm的球形自由导电微粒电场中运动特性进行了仿真与试验分析,得到微粒在楔形平板电极间的水平运动与极板间振动的结论;文[25-27]研究了直径0.1~0.5 mm之间,长度1~10 mm之间的线形导电微粒在平板电极、同轴圆柱电极下的飞萤与竖立现象,并得到微粒长度、半径、气压等对运动的影响特性。

针对直流套管中存在的微米级别的微粒,文中对套管内金属微粒的形态与分布情况进行分析,提出了一种微米级别微粒模型的构建与计算方法,分析微粒的受力与运动特性,并根据实际套管中金属微粒分布情况与内部电场结构搭建试验平台,对微粒模型进行验证,证明了模型构建的合理性与准确性,为直流套管的结构优化与设计提供参考依据。

1 金属微粒形态及分布情况分析

在多起直流套管故障与缺陷案例中,均在套管内部发现了部分粉末状金属微粒。国内某换流站±800 kV纯SF₆气体绝缘直流穿墙套管发生内部放电故障,故障套管内部导电杆与屏蔽筒表面金属微粒分布情况见图1(a)、(b)。在另一起同类型套管闪络放电故障中,故障支撑绝缘子表面微粒与放电通道见图1(c)。国内某换流站平波电抗器套管温度异常缺陷中,在套管内部载流部件弹簧表带连接处金属微粒的分布情况见图1(d)。综上,在故障套管中,微粒大多分布在环氧树脂电容芯体表面、高压导电杆及其连接接头部位、环氧树脂支撑绝缘子表面、绝缘子附近屏蔽环内部等场强较为集中的区域。

某故障现场套管内部收集到金属微粒的微观电镜结构见图2。由图2可知,金属微粒多呈现不规则的类球形,具体分布形态有独立存在、十余个微粒聚集成组、或数十及以上微粒聚集成团。

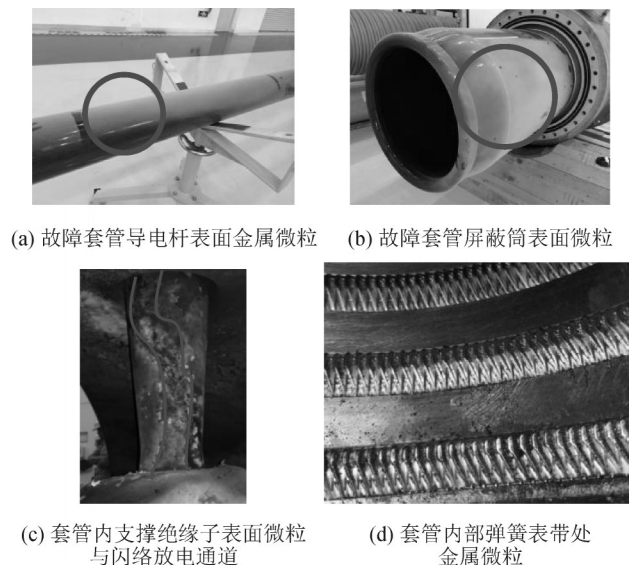


图1 某故障套管内部金属微粒

Fig. 1 Metal particles inside a fault bushing

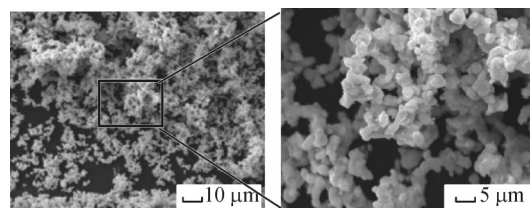


图2 某故障现场收集的微粒微观结构

Fig. 2 Micro structure of particle collected at a fault site

套管内部金属微粒的产生主要原因包括^[17-18]:

- 1) 直流套管导电杆多采用分段式结构,在长期运行中,因温度局部分布不均匀导致的热胀冷缩、机械应力与振动等均可导致导电杆发生位移,造成弹簧或导杆等载流部件磨损而产生金属微粒。
- 2) 因内部结构或工艺存在缺陷,套管在运行中可能出现内部涂层或表面金属微粒脱落等现象。
- 3) 生产、加工、运输或安装过程中操作不规范可能导致金属微粒在套管内部残留。

在使用SF₆作为绝缘介质的直流套管中,由于运行过程中套管内部温度不均衡,SF₆气体会在套管腔体内部流动,套管内产生的金属微粒将会随着SF₆气流附着于导电杆或环氧树脂材料表面。附着在表面的微粒将在电场作用下发生运动,其运动方式包含:在表面水平运动、跳起并悬浮于介质中、运动至其他表面等。

2 微粒运动模型构建

套管中存在的金属微粒大多为微米级别,且多以薄层状或小范围聚集形式存在于电极或环氧树脂表面,为模拟实际套管中微粒分布情况,研究微粒运动特性,文中将金属微粒等效为球形,分别针

对几种典型分布形式与分布位置进行建模分析。

2.1 电极表面分布微粒模型构建

当微粒存在于导电杆表面、接地屏蔽筒表面等位置时,微粒与电极直接接触,所带电荷直接来源于电极,微粒会在电场力作用下在电极表面产生运动。

1)对于电极表面单独存在的球形微粒而言,其带电量 q 为^[28-30]

$$q = \pm \frac{2}{3} \pi^3 \varepsilon_0 \varepsilon_r E r^2 \quad (1)$$

式(1)中: $\varepsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ 为真空介电常数; ε_r 为相对介电常数; r 为微粒半径; E 为微粒所处位置的电场强度。

导电微粒所受库仑力 F_q 为

$$F_q = kqE \quad (2)$$

式(2)中, k 为镜像电荷引起的修正系数^[31-32],微粒与电极接触或与同极性电极接近时, $k=0.832$,微粒与电极间距较远时, $k=1$ 。

在稍不均匀电场中,微粒还将受到电场梯度力 F_{grad} 的作用,电场梯度力的方向指向电场梯度方向,即电场增大方向。文[33]指出,对于微米级别的金属微粒而言,电场梯度力的影响可以忽略。

球形微粒所受重力 G 为

$$G = \frac{4}{3} \pi r^3 g (\rho_p - \rho_a) \quad (3)$$

式(3)中: ρ_p 为微粒密度; ρ_a 为环境气体密度; g 为重力加速度,取 9.8 m/s^2 。

微粒在竖直方向上起始运动条件为

$$F_q - G \geq 0 \quad (4)$$

对应微粒起始运动场强为

$$E = a \sqrt{\frac{rg(\rho_p - \rho_a)}{k\varepsilon_0}} \quad (5)$$

式(5)中,系数 $a = \sqrt{\frac{2}{\pi^2 \varepsilon_r}}$,其值与微粒排列方式相关。

2)对于 N 个半径为 r 呈线形排列的微粒,可将其等效为长度为 $2Nr$ 、半径为 r 的圆柱形导体,水平放置于电极上,其整体带电量为^[33]

$$Q = 4N\pi\varepsilon_0 r^2 E \quad (6)$$

电场方向与微粒排列方向垂直时,可认为电荷在圆柱体表面均匀分布,当微粒受力满足起始运动条件式(4)时,其起始运动场强见式(5),此时 $a = \frac{1}{\sqrt{3}}$;电场方向与微粒排列方向平行时,电荷将积聚在圆

柱体两端,此时对应式(5)中 $a = \sqrt{\frac{2}{N\pi^2 \varepsilon_r}}$;电场方向

任意时,可将电场按照微粒排列方向垂直与平行进行分解后叠加计算。

3)对于单层分布于长 M 个微粒,宽 N 个微粒的矩形内部的排列形式,当电场方向与微粒平面垂直时,可等效为 M 个长为 $2Nr$ 的圆柱体,此时对应式(5)中 $a = \frac{1}{\sqrt{3}}$ 。

当电场方向与微粒平面平行,与矩形边夹角为 θ 时,可将电场按矩形边的方向矢量分解,此时对应式(5)中 $a = \min(\sqrt{\frac{2}{N\varepsilon_r \cos \theta \sin \theta}}, \sqrt{\frac{2}{M\varepsilon_r \cos^2 \theta}})$ 。

4)对于层数为 L 层、长 M 个微粒、宽 N 个微粒多层分布的情况,当电场方向垂直于微粒平面时,电荷将积聚在顶层,此时对应式(5)中 $a = \frac{1}{\sqrt{3L}}$ 。

当电场方向平行于微粒平面,与矩形边夹角为 θ 时,感应电荷集中在矩形两个侧面,此种情况与步骤3)中电场方向与微粒平面平行时相同;

当电场方向为任一方向,与微粒平面夹角为 α 时,可将电场进行垂直于微粒平面、微粒平面内矩形长、宽边3个方向矢量分解,电荷集中在微粒堆顶层与矩形两个侧面,此时对应式

$$(5) \text{ 中 } a = \min[\sqrt{\frac{2}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \varepsilon_r (N \cos \alpha \sin \theta + 6L \sin \alpha)}}, \sqrt{\frac{2}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha \cdot \varepsilon_r (M \cos \theta \cos \alpha + 6L \sin \alpha)}}]$$

2.2 微粒抱团聚集情况分析

在套管实际运行过程中,对于尺寸较小的微粒(如直径 $1 \mu\text{m}$)而言,其分布状态经常呈现抱团聚集分布的特点,在此种分布状态下,微粒团将作为一个整体发生运动,在进行电荷量与受力分析时也应将微粒团作为一个整体考虑。

对于半径为 r 的微粒聚集成半径为 Yr 的球形微粒团时,其内部包含的微粒总数为 Y^3 个,此时对应式(5)中 $a = \sqrt{\frac{2Y}{\pi^2 \varepsilon_r}}$ 。

对于多个微粒团共同存在时,可将每个微粒团整体等效为半径为 Yr 的球形微粒,作为整体进行电荷量与受力分析。

2.3 环氧树脂表面分布微粒分析

当微粒存在于环氧树脂电容芯子表面或环氧树脂支撑绝缘子表面时,微粒不与电极直接接触,微粒所带电荷来源于静电感应、表面电荷等多个途径。

研究表明^[34-36],在电气设备运行过程中,绝缘子表面会感应出大量表面电荷,表面电荷主要来源于气体放电、介质夹层极化效应、材料电导率不均匀等,在撤去所施电压后表面电荷将向绝缘子内部、材料表面或气体中缓慢消散。

对于环氧树脂表面附着的微粒而言,表面电荷将对微粒带电量与运动产生较大影响。当绝缘子表面附着毫米级别的线形或片状金属微粒时,微粒两端绝缘子区域将感应出与靠近电极一端相反的电荷^[36]。在不考虑表面电荷的影响时,环氧树脂表面微粒所带电荷量与电极表面微粒相当,但表面电荷的存在将导致微粒所带电荷量有所减少;同时表面电荷对微粒有一定的吸附作用,对微粒的运动起到一定阻碍作用,且对于尺寸越小的微粒,表面电荷对微粒的吸附越明显。

表面电荷的分布与消散规律十分复杂^[34-35,37],对附着微粒的影响难以直接计算。文中认为可以将表面电荷对金属微粒的影响进行简化处理,将外界电场 E 与表面电荷的共同作用等效为一个削弱了的电场 λE ,其中 $0 < \lambda < 1$,其大小与微粒大小相关,微粒越小,表面电荷对微粒的吸附作用越明显,相应的 λ 值也越小。

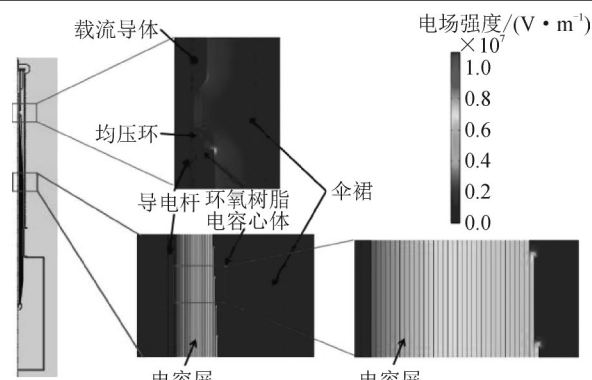
3 试验验证与结果分析

3.1 套管内部电场分布

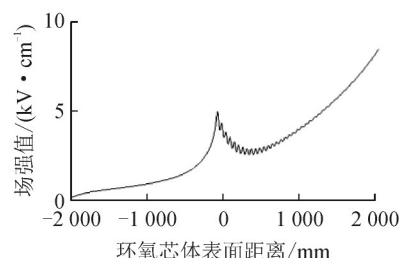
套管内部电场分布情况是试验装置电极形状与结构设计的重要因素。为得到套管内部电场分布情况,使用COMSOL Multiphysics软件对套管内部场强集中区域进行仿真分析。带环氧电容心子的直流套管电场仿真见图3,由于电容心子内部存在卷制电容屏,环氧树脂浇注的电容心子表面部位电场分布较均匀,电容心子与导电杆连接部位电场分布相对密集,在800 kV直流电压下局部场强达到8 kV/cm。

带支撑绝缘子的直流套管电场仿真见图4,在环氧树脂支撑绝缘子表面、绝缘子端部高压屏蔽环、套管内部屏蔽筒等位置是场强密集区域,且在靠近高压导电杆部位的场强最为集中,在800 kV直流电压下,绝缘子表面局部最高场强达到40 kV/cm。

套管内部环氧树脂电容心体表面、高压导电杆及其连接接头部位、环氧树脂支撑绝缘子表面、绝缘子附近屏蔽环内部等是场强较为集中的区域,电场强度的不均匀分布会导致金属微粒更易发生聚集,电场集中的位置与微粒聚集分布的位置基本吻合。



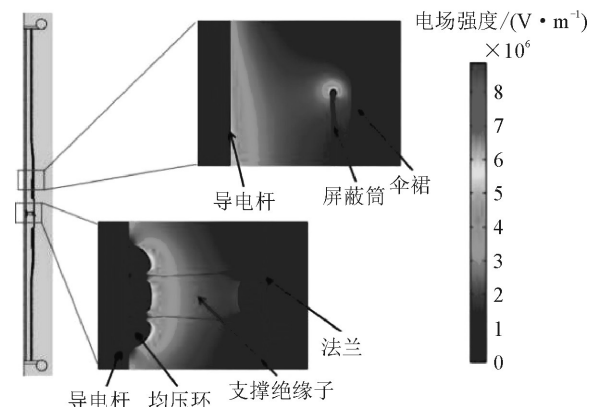
(a) 带电容心子的直流套管内部电场分布示意图



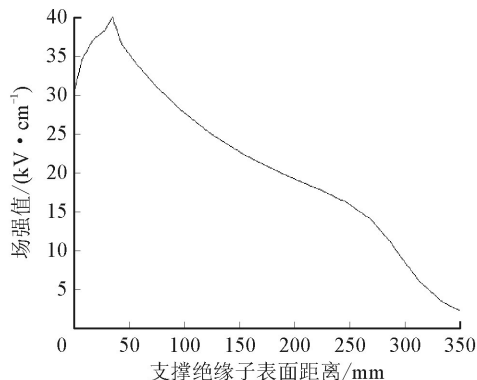
(b) 电容芯子表面场强值

图3 带电容芯子的直流套管电场分布

Fig. 3 Electric field distribution of DC bushing with capacitor core



(a) 带支撑绝缘子的直流套管内部电场分布示意图



(b) 支撑绝缘子表面场强值

图4 带支撑绝缘子的直流套管电场分布

Fig. 4 Electric field distribution of DC bushing with support insulator

3.2 试验装置与试验方法

试验装置为铝制金属材质,腔体底部支座、金属外壁、中部均压环接地,顶部通过辅助绝缘套筒将直流电压引入装置内部试验平台处。试验平台为聚四氟乙烯材质,在平台上进行微粒运动与放电特性试验,见图5。

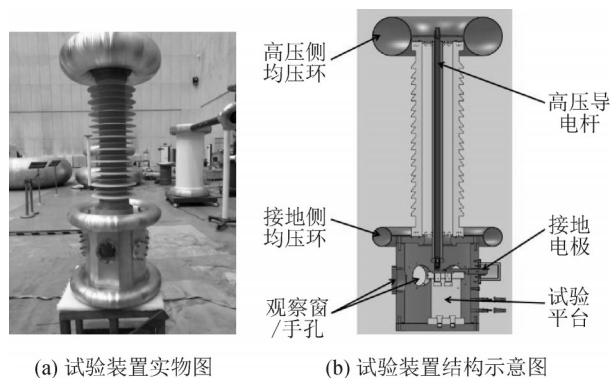


图5 试验装置示意图

Fig. 5 Picture of experimental vessel

在试验过程中,可以通过更换电极头部形状的方法分别进行电极表面与环氧树脂表面微粒运动特性试验。1)电极结构1:高压电极与地电极为平板电极结构水平放置,中间放置环氧树脂嵌件,电极间距离为20 mm,微粒布置于地电极上极板范围内,用于模拟微粒分布于导电杆表面、屏蔽筒表面等位置的情况;2)电极结构2:地电极头部更换为半球形,直径为25 mm,高压电极竖直向下,电极间距离35 mm,电极下部放置环氧树脂样片,微粒布置于样片表面,用于模拟微粒分布于环氧树脂电容芯体或支撑绝缘子表面等位置的情况见图6。

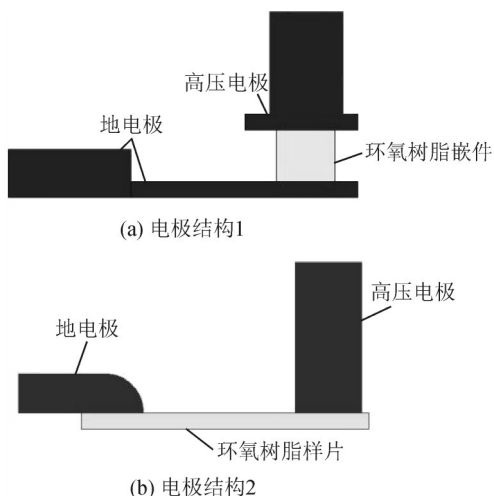
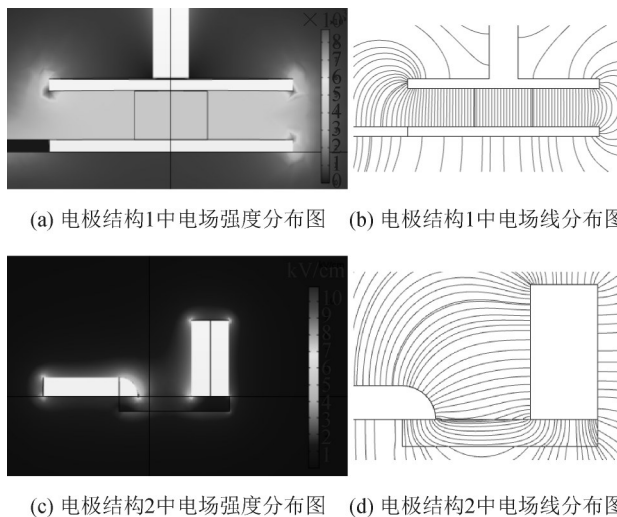


图6 试验中使用的电极结构

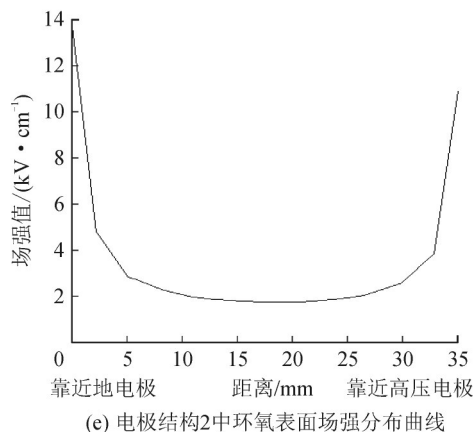
Fig. 6 Electrodes used in the experiment

对于电极结构1而言,平板电极间电场较均匀,施加10 kV直流电压时内部场强为5 kV/cm;对于电极结构2而言,距电极5 mm内局部场强较为集中,

距离电极10 mm以外的区域场强较为均匀,在施加10 kV直流电压时,场强大小约1.8 kV/cm,此部分环氧树脂表面可视为均匀电场见图7。



(c) 电极结构2中电场强度分布图 (d) 电极结构2中电场线分布图



(c) 电极结构2中环氧表面场强分布曲线

图7 电极电场分布

Fig. 7 Electric field distribution of the electrodes

试验中选取的微粒为铜粉末,微粒采用雾化法制备,通过目筛筛选出指定的微粒尺寸。试验选取的微粒尺寸直径分别为:1 μm 、1 000目(约13 μm)、400目(约38 μm)、200目(约75 μm)、80目(约180 μm)。其中,1 μm 微粒存在抱团聚集现象,文中取抱团直径为10 μm 进行理论计算与试验。

试验过程中,对试品施加纯直流电压,采用阶梯升压法,控制升压速度为0.2 kV/s,每次升压2 kV后维持5 min,观测微粒在电极表面、环氧树脂材料表面的分布情况,并与前次观测状态进行对比,直至观测到微粒发生运动。对于每组试验,在相同条件下进行10次,取其平均值进行数据分析处理。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 微粒布置于电极表面

将1、13、38、75、180 μm 5种尺寸微粒单层布置于地电极上极板范围内,分布面积为10 mm×10 mm,试验得到的微粒起始运动场强与理论计算

结果对比见图8。

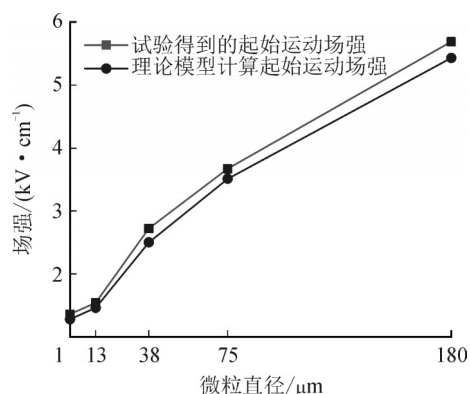


图8 电极上不同微粒起始运动场强

Fig. 8 Initial motion field strength of different particles on the electrode

随着微粒半径 r 的增大,微粒起始运动场强显著提高,在不考虑微粒抱团聚集的情况下,起始运动场强 E 与 $\sqrt{r}$ 成正比,与理论计算结果基本相符。

采用控制微粒厚度的方法,将 $13\text{ }\mu\text{m}$ 微粒按单层、2、4、6层布置于地电极表面,分布面积为 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,试验结果与理论计算结果见图9。

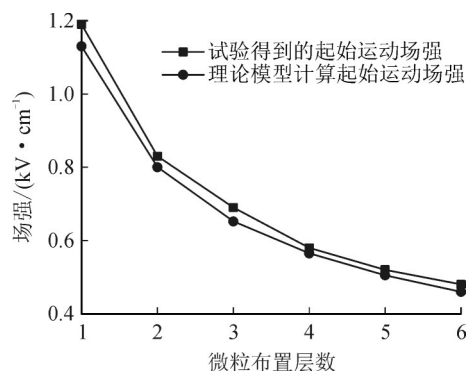


图9 电极上 $13\text{ }\mu\text{m}$ 微粒不同层数起始运动场强

Fig. 9 Initial motion field strength of different layers of $13\text{ }\mu\text{m}$ particles on the electrode

随着微粒层数 L 的增加,微粒起始运动场强逐渐降低,原因在于层数的增加会导致电荷积聚的增加,顶层微粒在电场力的作用下更易发生运动,起始运动场强 E 与 $\sqrt{L}$ 成反比。

3.3.2 $1\text{ }\mu\text{m}$ 微粒布置于环氧树脂表面

将 $1\text{ }\mu\text{m}$ 微粒按照垂直于电极连线方向宽度为 30 mm 、平行于电极连线方向长度为 10 mm 的分布面积单层分布于电极连线正中心位置、靠近高压电极位置(距离高压电极 5 mm 处)、靠近地电极位置(距离地电极 5 mm 处)。试验中,3个位置微粒的起始运动电压分别为: 22.3 、 15.3 、 13.6 kV ,且均在电极上距离环氧树脂样片高 $1\sim 2\text{ cm}$ 处首先发现微粒的吸附。证明表面电荷对微粒水平方向的阻碍效果较明显,微粒将首先在竖直方向上克服重力跳起后因

电场力的作用运动至电极表面。

对于分布于正中心区域的微粒,其所在位置电场可以视为均匀电场,此时对应式(11)中电场方向与微粒平面夹角为 $\alpha=20^\circ$,电场方向投影与矩形边夹角为 $\theta=90^\circ$,此时在考虑表面电荷影响下微粒竖直方向起始运动场强为 $(0.39/\lambda)\text{ kV/cm}$ 。试验中对应正中心位置微粒场强为 4.01 kV/cm ,此时对应 λ 值约为 0.097 ,即此种分布状态下、考虑表面电荷影响、在外界电场为 E 时,约 $0.097E$ 的电场对微粒的运动有促进作用,其余部分则因表面电荷的影响或其他阻力的原因,未能对电荷的运动产生影响。

对于分布于电极附近的微粒,由于靠近电极位置场强不均匀且高于中心位置场强,因此起始运动电压有所降低。

将微粒按照垂直于电极连线方向宽度为 30 mm 、平行于电极连线方向长度分别为 10 、 12.5 、 15 、 17.5 、 20 、 22.5 、 25 mm 的分布面积单层分布于电极连线正中心位置。试验得到的场强值与 $\lambda=0.097$ 时计算得到的理论值对比见图10。

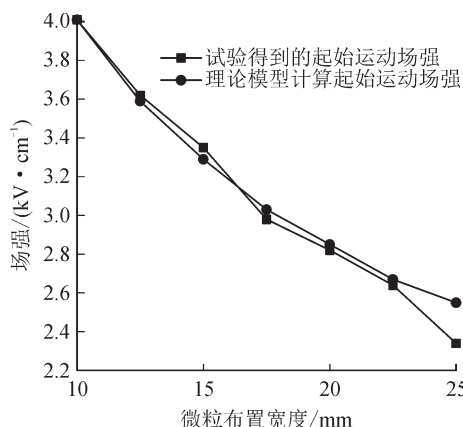


图10 环氧树脂上 $1\text{ }\mu\text{m}$ 微粒不同宽度起始运动场强

Fig. 10 Initial motion field strength of different width of $1\text{ }\mu\text{m}$ particles on the epoxy resin

随着微粒宽度 M 的增加,微粒起始运动场强逐渐降低,原因在于宽度的增加使得两端电荷更容易积聚,起始运动场强 E 与 $\sqrt{M}$ 成反比。对于 25 mm 的分布形式,由于两侧电场已经开始出现不均匀现象,因此试验中得到的场强值略低于理论计算值。

3.3.3 $13\text{ }\mu\text{m}$ 微粒布置于环氧树脂表面

将 $13\text{ }\mu\text{m}$ 微粒按相同方法单层分布于电极连线正中心、靠近高压电极、靠近地电极位置,分布面积为 $10\text{ mm} \times 30\text{ mm}$ 。试验中,3个位置微粒的起始运动电压分别为: 24.3 、 16.9 、 15.7 kV 。同样按照式(11)中 $\alpha=20^\circ$ 、 $\theta=90^\circ$,计算得到微粒竖直方向起始运动场强为 $(0.507/\lambda)\text{ kV/cm}$,试验中对应正中心位置

微粒场强为4.37 kV/cm,此时对应 λ 值约为0.116。

将微粒按照垂直于电极连线方向宽度为30 mm、平行于电极连线方向长度分别为10、15、20、25 mm的分布面积单层分布于电极连线正中心位置。试验得到的场强值与 $\lambda=0.116$ 时计算得到的理论值对比见图11。

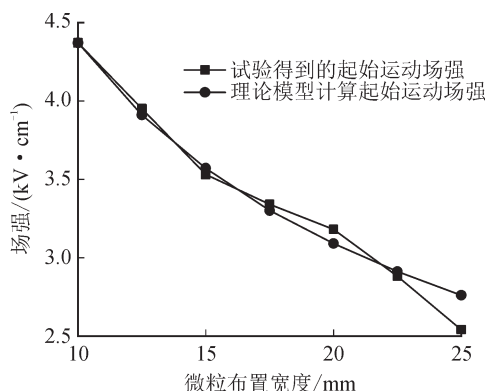


图11 环氧树脂上13 μm微粒不同宽度起始运动场强

Fig. 11 Initial motion field strength of different width of 13 μm particles on the epoxy resin

微粒起始运动场强 E 与 $\sqrt{M}$ 成反比,与理论计算结果基本相符。

3.4 实际套管中微粒运动情况分析

对于实际运行的套管而言,换流变压器阀侧套管一般与水平面呈30°安装,导电杆与环氧树脂电容芯表面与竖直方向呈30°,电场的方向近似与表面垂直;直流穿墙套管近似水平安装,但支撑绝缘子之间互成120°安装,绝缘子表面与屏蔽均压环表面与竖直方向呈60°。经计算,两种情况下微粒所处位置的场强均高于理论起始运动场强,微粒将在套管内部发生运动。因此在实际运行过程中应留有足够的安全裕度,并通过结构或工艺的优化来减少套管内部微粒的产生与吸附。

4 结论

1)直流套管中会存在微米级别的金属微粒,微粒主要附着于套管内部导电杆表面、环氧树脂表面等电场集中部分,且会在电场力作用下发生运动。微粒的附着与运动将对套管绝缘水平带来较大影响。

2)对微粒进行模型构建与理论分析,电极表面的微粒起始运动场强与微粒半径、沿电场方向分布宽度、沿电场方向分布厚度相关。一般来说,起始运动场强随微粒半径的增大而升高、随微粒沿电场方向分布宽度 M 的增大而降低、随微粒沿电场方向分布厚度 L 的增加而降低。

3)对于附着在环氧树脂表面的微粒,由于受表面电荷等因素的影响,起始运动场强高于附着在电

极表面的微粒,二者的比例系数与微粒半径相关,且随着微粒半径的增大,表面电荷对微粒的影响逐渐减弱。

4)对微粒各种分布状态进行试验验证,试验结果与理论计算值基本相符。在套管实际运行过程中,场强值将超过微粒起始运动场强,在设计与运行过程中需考虑微粒的运动对绝缘性能的影响。

参考文献:

- [1] MAXIMOV S, OLIVARES-GALVAN J C, MAGDALENO-ADAME S, et al. New analytical formulas for electromagnetic field and eddy current losses in bushing regions of transformers[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(4): 1-10.
- [2] 饶宏,张东辉,赵晓斌,等. 特高压直流输电的实践和分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2481-2488.
RAO Hong, ZHANG Donghui, ZHAO Xiaobin, et al. Practice and analyses of UHVDC power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2481-2488.
- [3] SU Chenyun, BRANCH D. On-site testing requirements of ultra-high voltage converter transformer insulating oil and SF₆ gas[J]. Electrical Engineering, 2016(7): 161-167.
- [4] 吴东,潘俊文,邹明,等. ±800 kV特高压直流输电线路带电作业人体体表电场分布特性[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 157-164.
WU Dong, PANG Junwen, ZOU Ming, et al. Research of electric field distribution characteristics for body surface of live working on ±800 kV DC transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 157-164.
- [5] 谭启德,潘超,陈铁,等. 特高压直流输电线路雷电绕击影响因素研究[J]. 电瓷避雷器, 2019(2): 157-162.
TAN Qide, PAN Chao, CHEN Tie, et al. Influence analysis on power frequency overvoltage of 500 kV power transmission and transformation project based on PSCAD[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(2): 157-162.
- [6] 雷梦飞,王少华,刘黎,等. 特高压直流输电线路雷击故障特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(3): 57-62.
LEI Mengfei, WANG Shaohua, LIU Li, et al. Analysis on lightning fault characteristics of UHVDC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3): 57-62.
- [7] 周春红,蒋利军,吴维柏,等. 特高压直流输电工程用直流滤波器高压电容器H型接线不平衡保护方案研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(1): 1-7.
ZHOU Chunhong, JIANG Lijun, WU Weibai, et al. Study on H-type wiring unbalance protection scheme of DC filter capacitor in UHV DC transmission project[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1): 1-7.
- [8] 洪权,李辉,宋军英,等. ±800 kV湘潭换流站调相机

- 与特高压直流输电无功电压协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(5):35-39.
- HONG Quan, LI Hui, SONG Junying, et al. Study on reactive voltage coordinate control strategy for synchronous condenser of ± 800 kV Xiangtan converter station and UHVDC [J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(5):35-39.
- [9] 张震, 王飞, 肖博文, 等. 基于Chebyshev窗滤波的特高压直流输电线路保护方案研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(2):87-92.
- ZHANG Zhen, WANG Fei, XIAO Bowen, et al. Protection scheme for UHVDC transmission line based on chebyshev window filtering[J]. Smart Power, 2019, 47(2):87-92.
- [10] 张启浩, 吴德贯, 马正霖. ± 800 kV特高压直流输电工程直流穿墙套管设计缺陷及其改进方法[J]. 高压电器, 2019, 55(4):239-244.
- ZHANG Qihao, WU Deguan, MA Zhenglin. Defect and improved method of DC wall bushing design in ± 800 kV UHVDC transmission project[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4):239-244.
- [11] 吴东, 潘俊文, 邹明, 等. ± 800 kV特高压直流输电线路带电作业人体体表电场分布特性[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2):157-164.
- WU Dong, PANG Junwen, ZOU Ming, et al. Research of electric field distribution characteristics for body surface of live working on ± 800 kV DC transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2):157-164.
- [12] 杨结春, 秦华忠, 黄有祥, 等. 特高压直流输电工程750 kV交流滤波电容器保护方案研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3):1-4.
- YANG Jiechun, QIN Huazhong, HUANG Youxiang, et al. Study on protection scheme of 750 kV AC filter capacitor for UHVDC transmission project[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3):1-4.
- [13] 戴志辉, 张程, 刘宁宁, 等. 基于反行波差值的特高压直流线路纵联保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21):1-10.
- DAI Zhihui, ZHANG Cheng, LIU Ningning, et al. A pilot protection scheme for UHVDC lines based on backward traveling-wave difference[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21):1-10.
- [14] 齐国强, 王增平, 裘愉涛, 等. 基于信号复杂度衰减的特高压直流输电线路雷电暂态识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17):1-8.
- QI Guoqiang, WANG Zengping, QIU Yutao, et al. Transient identification method of lightning strokes based on the attenuation of signal complexity for UHVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17):1-8.
- [15] 赵兰明, 李宽, 张友泉, 等. 基于FastICA-MP算法的次同步振荡模态参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8):37-42.
- ZHAO Lanming, LI Kuan, ZHANG Youquan, et al. Parameter identification of subsynchronous oscillation based on Fast ICA - MP algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8):37-42.
- [16] MAXIMOV S, ESCARELA - PEREZ R, MAGDALENO - ADAME S, et al. Calculation of nonlinear electromagnetic fields in the steel wall vicinity of transformer bushings[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(6):1-11.
- [17] 彭松. 特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- PENG Song. Study on electric field and temperature distribution characteristics in valve side bushing of converter transformer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [18] 谢超, 何平. 800 kV特高压直流穿墙套管故障分析[J]. 中国电力, 2015, 48(7):27-30.
- XIE Chao, HE Ping. Fault analysis of 800 kV UHVDC wall entrance bushing[J]. Electric Power, 2015, 48(7):27-30.
- [19] 邓志祥, 康琛, 王华云, 等. 10 kV开关柜穿屏套管的局部放电检测与结构优化[J]. 电瓷避雷器, 2019(2):226-230.
- DENG Zhixiang, KANG Chen, WANG Huayun, et al. Partial discharge detection and structure optimization of bushing for 10 kV switchgear[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(2):226-230.
- [20] 杨放南, 赵隆乾, 白伟, 等. 750 kV变压器(电抗器)高压套管雨闪事故分析及防范措施[J]. 电瓷避雷器, 2019(3):212-215.
- YANG Fangnan, ZHAO Longqian, BAI Wei, et al. Analysis of the rainstorm accident of 750 kV high voltage bushing for transformer(reactor)[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(3):212-215.
- [21] LI Peng, LI Jinzhong, QIN Yifan, et al. Wormholes effect in flashover process of alumina filled epoxy resin surfaces in SF₆[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4):2142-2147.
- [22] METWALLY I A, A-RAHIM A A. Dynamic analysis of motion of spherical metallic particles in non-uniform electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2002, 9(2):282-293.
- [23] 贾江波, 陶风波, 杨兰均, 等. GIS中不均匀直流电场下球状自由导电微粒运动分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8):106-111.
- JIA Jiangbo, TAO Fengbo, YANG Lanjun, et al. Motion analysis of spherical free conducting particle in non-uniform electric field of GIS under DC voltage[J]. Proceeding of the CSEE, 2006, 26(8):106-111.

- [24] 孙继星,戴琪,边凯,等.自由导电微粒受迫运动过程与振动特性[J].电工技术学报,2018,33(22):5224-5232.
SUN Jixing, DAI Qi, BIAN Kai, et al. Forced movement process and vibration characteristics of free conductive particle[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5224-5232.
- [25] 由志勋,刘静.直流GIL中线形金属微粒运动与放电特性研究综述[J].高压电器,2017,53(10):36-43.
YOU Zhixun, LIU Jing. Review of motion and discharge characteristics of wire metallic particle in DC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 36-43.
- [26] 贾江波,张乔根,师晓岩,等.交流电压下绝缘子附近导电微粒运动特性[J].电工技术学报,2008,23(5):7-11.
JIA Jiangbo, ZHANG Qiaogen, SHI Xiaoyan, et al. Motion of conducting particle near PTFE spacer under AC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 7-11.
- [27] 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.
- [28] DASCALESCU L, TOBAZEON R, ATTEN P. Behaviour of conducting particles in corona-dominated electric fields[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1611-1618.
- [29] KHAN Y, OKABE S, SUEHIRO J, et al. Proposal for new particle deactivation methods in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(1): 147-157.
- [30] ASANO K, ANNO K, HIGASHIYAMA Y. The behavior of charged conducting particles in electric fields[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(3): 679-686.
- [31] SAKAI K, TSURU S, ABELLA D L, et al. Conducting particle motion and particle-initiated breakdown in DC electric field between diverging conducting plates in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1999, 6(1): 122-130.
- [32] 贾江波,陶风波,杨兰均,等. GIS中不均匀直流电场下球状自由导电微粒运动分析[J].中国电机工程学报, 2006, 26(8): 106-111.
JIA Jiangbo, TAO Fengbo, YANG Lanjun, et al. Motion analysis of spherical free conducting particle in non-uniform electric field of GIS under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 106-111.
- [33] 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.
JI Hongxin. Study on movement behavior and discharge characteristic of metal particle in GIS under AC operating voltage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [34] 王涵,薛建议,陈俊鸿,等. F₂/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.
- [35] 李伯涛,王健,张圣富,等.直流GIL中附着导电微粒对绝缘子表面电荷积聚特性的影响分析[J].高压电器, 2017, 53(7): 80-86.
LI Botao, WANG Jian, ZHANG Shengfu, et al. Influence of the DC-GIL conductive adherent particles on the charge accumulation of insulator surface[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 80-86.
- [36] 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.
- [37] 王蓓,张责新,王强,等. SF₆及空气中绝缘子表面电荷的消散过程分析[J].高电压技术,2011,37(1):99-103.
WANG Bei, ZHANG Zexin, WANG Qiang, et al. Analysis of surface charge decay process on insulators in SF₆ and air[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 99-103.

李松(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为输变电设备的故障监测与运维管理(E-mail: li_song1995@163.com)。