

不同温度下弹跳金属微粒对圆盘绝缘子表面电荷积聚的影响

赵慧存, 高宇, 王文渠, 王欢, 苑晓晨
(天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 气体绝缘开关设备(GIS)和输电线路(GIL)中的金属微粒在电场作用下可弹跳至绝缘子附近,加剧表面电荷积聚,严重时会引起沿面闪络事故。选取126 kV圆盘绝缘子为试样,设计了同轴电极系统,采用Kelvin型静电探头研究了不同温度下(23、40、60℃)弹跳金属微粒对绝缘子表面电荷积聚特性的影响。结果表明:在室温下,绝缘子非平面区的电荷积聚模式与金属微粒的运动模式有着密切的关系;表面电荷积聚量与温度呈正相关;当温度上升至60℃时,运动到地电极垂直面的金属微粒易引发闪络,在与闪络同径向的非平面区会积聚大量的异极性电荷。

关键词: 气体绝缘设备;绝缘子;表面电荷;弹跳金属微粒;温度

中图分类号:TM216 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)10-0039-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.10.007

Effect of Bouncing Metal Particles on Charge Accumulation on Disc Insulator Surface at Different Temperatures

ZHAO Huicun, GAO Yu, WANG Wenqu, WANG Huan, YUAN Xiaochen

(School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Metal particles in gas insulated metal enclosed switchgear (GIS) and gas insulated enclosed transmission line (GIL) can bounce near the insulator under the electric field, which intensifies the charge accumulation and may cause surface flashover in serious cases. In this paper, a 126 kV real size disc insulator was selected as the test sample. A sealed chamber and coaxial structure electrodes were designed, and the effects of bouncing metal particles on the surface charge accumulation behaviors of insulator at different temperatures (23, 40 and 60℃) were studied by using Kelvin electrostatic probe. The results show that the charge accumulation on the nonplanar region is closely related to the motion mode of metal particles at room temperature. And the charge accumulation on the insulator surface is positively correlated with the temperature. As the temperature rise to 60℃, the metal particles moving to the vertical surface of the ground electrode are easy to cause surface flashover, and a large number of heteropolar charges would be accumulated on the non-plane region in the same radial direction as the flashover.

Key words: gas insulated equipment; insulator; surface charge; bouncing metal particles; temperature

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)及气体绝缘输电线路(gas insulated transmis-

sion line, GIL)具有占地面积小、布置灵活、可靠性高、受环境影响小、传输容量大等优点,在电力系统中有着广阔的应用前景^[1]。目前,GIS和GIL在交流输电系统中的应用已有大量的实例,但在直流系统中的应用相对匮乏。环氧绝缘子是GIS和GIL中的重要组成部分,起到机械固定母线导体和电气绝缘等作用^[2]。在直流电场下,自由电荷会积聚在绝缘子表面,形成表面电荷。这些表面电荷一方面会

收稿日期:2021-10-03 修回日期:2021-12-09

基金项目:国网天津市电力公司项目(5500-202099277A-0-0-00)

作者简介:赵慧存(1996-),男(汉族),河南南阳人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究;通信作者:高宇(1981-),男(汉族),辽宁新民人,副教授,主要从事电力系统输电装备关键绝缘技术、电力系统过电压计算与防护和高电压新技术在环境领域的应用相关工作。

畸变表面电场,另一方面也为沿面放电的过程提供种子电荷,从而促进沿面闪络。目前,表面电荷被视作导致环氧绝缘子气-固界面绝缘性能下降的重要原因之一^[3-5]。此外,在GIS和GIL设备的生产、运输和安装过程中,不可避免地会引入一些金属微粒^[6],这些金属微粒在设备运行过程中,将在重力、电场力等作用下发生运动,运动到绝缘子附近的金属微粒一方面会直接畸变绝缘子表面电场,另一方面会引起绝缘子表面电荷的积聚,对绝缘子的绝缘性能产生严重的危害^[7-8]。

在GIL和GIS中,金属微粒有线形、球形、片形、螺旋形等各种形状,其中线形和球形金属微粒最为典型。由于线形金属微粒的端部电场很高,容易发生微放电,产生的大量电荷能为闪络提供种子电荷,最终降低击穿电压,因此线形金属微粒对设备的绝缘性能影响最大^[9-10]。近年来,已有学者研究了线形和球形金属微粒在直流电场下的受力以及运动情况。JIA J等^[11]发现在绝缘子附近的金属微粒会向绝缘子方向移动,根据初始位置的不同,金属微粒的运动情况分为3种:①微粒直接浮起;②先水平移动然后浮起;③水平移动,直至附着于绝缘子表面。张连根等^[12]对比了线形和球形金属微粒的运动行为区别,发现由于二者的受力不同,线形金属微粒容易吸附在绝缘子表面,并明显降低沿面闪络电压。

此外,当金属微粒在绝缘子附近时,会畸变周围的电场诱发气体电离,并引起绝缘子表面电荷的积聚^[13]。针对这一问题,研究人员也开展了相关研究。邹钰洁等^[14]研究了附着在柱式绝缘子上的线形金属微粒对电荷积聚的影响,结果表明,线形金属微粒影响电荷积聚的方式和微粒位置有关。在正直流电压下,当金属微粒直接与地电极接触时,金属微粒的尖端附近会积聚负极性电荷;当微粒直接与高压电极接触时,金属微粒的尖端附近会积聚正极性电荷,并且电荷密度最大。王涵等^[15]在0.5 MPa 20% SF₆/N₂混合气体中,探究了电压类型和微粒长度对盆式绝缘子表面电荷积聚的影响,发现根据电荷来源的不同,可将绝缘子表面电荷分布分为:①高压电极周围的同极性电荷,其电荷来源于高压电极的注入;②分布在金属微粒周围的双极性电荷,来源于金属微粒引起的气体电离,且随着金属微粒长度的增加,微粒诱发的气体电离程度加剧。LIB T等^[16]研究了金属微粒长度对绝缘子表面

电荷分布情况的影响,结果表明,微粒长度越大,电荷积聚程度越严重。

在金属微粒对绝缘子表面电荷积聚的影响研究中,静止微粒对表面电荷的影响广受关注。而当金属微粒在绝缘子周围运动时,其对表面电荷积聚特性的影响还鲜有报道。GIS和GIL设备在载流运行时,腔体内的环氧绝缘子将工作在高于环境温度的条件下。考虑到运动金属微粒的存在,有必要探究不同温度条件下动态金属微粒对表面电荷积聚的影响机理。

本文选取126 kV圆盘绝缘子为试样,搭建同轴电极系统,设计弹跳金属微粒发生装置和加热系统,研究不同温度下弹跳微粒对绝缘子表面电荷分布的作用机理。

1 实验

1.1 圆盘绝缘子与电极结构

本文采用的126 kV圆盘绝缘子试样由山东泰开开关有限公司提供,其实物如图1所示。

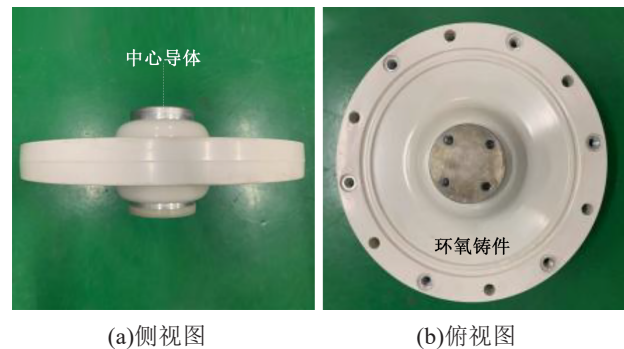


图1 圆盘绝缘子试样实物

Fig.1 Picture of the test insulator

为模拟GIS/GIL中的电场分布,设计了一套同轴电极系统。该电极系统包括高压电极和接地电极。高压电极由两部分组成,上部用于连接高压电源,其下表面与绝缘子的中心电极接触,绝缘子的中心电极即为高压电极的下部。地电极基于GIS/GIL外壳形状设计,在此同轴电极系统间产生的电场与真实设备中的电场一致^[17-18]。圆盘绝缘子和电极的剖面图与详细尺寸如图2所示。文中将圆弧1、2和直线2内的区域称作绝缘子表面的非平面区,而将直线1内的区域称作平面区。

1.2 实验平台设计

实验中,将绝缘子及电极系统、表面电位扫描系统、金属微粒喷射系统和加热装置等主要设备均

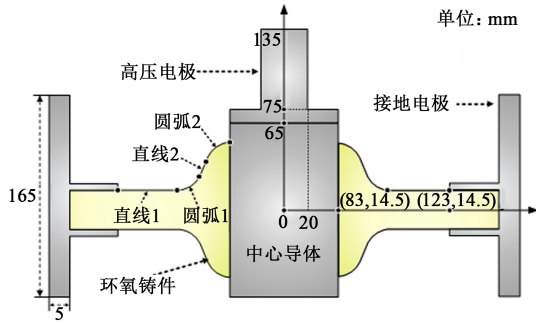


图2 绝缘子轮廓与电极尺寸

Fig.2 Schematic diagram of insulator and electrode

放置于金属全封闭实验舱内。微粒喷射及电位测量系统的结构如图3所示。该喷射系统主要由聚丙烯直角弯管、微粒喷射头以及微型气泵构成，喷射头通过硅胶气管连接气泵，气泵以1.25 Hz的频率向气管泵出压缩气体并作用于金属微粒，使其发生运动，被喷射出的微粒速度为1.1~1.4 m/s，喷射角度与水平面呈(90±10)°。红外辐射加热灯的原理为电热丝电阻发热，以辐射的方式加热腔体，配合智能数显温控器和温度传感器，可升高腔体的温度并稳定在60℃。高速摄像机放置于绝缘子附近，拍摄速度最高可达330帧/秒，用以捕获金属微粒的运动轨迹。

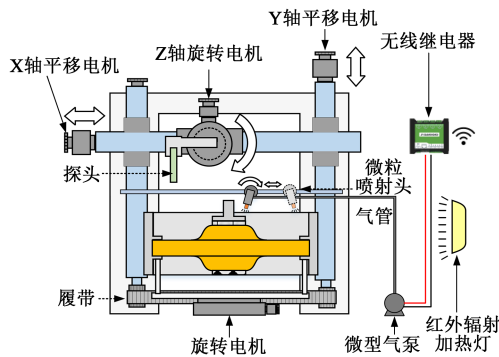


图3 金属微粒喷溅和表面电荷扫描系统结构
Fig. 3 Structure of metal particle splashing and surface charge scanning system

在实际的GIS和GIL中，金属微粒的动态行为与微粒的初始位置、荷电特性和局部电场等因素密切相关，完全重复GIS和GIL中金属微粒复杂、随机的动态过程不仅在实验上难以实现，也不利于剖析其动态过程中究竟哪些行为影响了表面电荷的积聚特征。因此，本文采用微粒喷射的方式引入动态微粒，在其运动过程中包含了与高压电极、地电极及绝缘子表面的碰撞过程，这些过程与实际GIS和

GIL中微粒运动时的碰撞要素一致。换言之，本文将工程上的复杂现象进行了简化等效，便于分析微粒动态行为对电荷积聚机理的影响。

1.3 实验方法

实验分别在23、40、60℃的空气氛围中进行，相对湿度控制在20%。相比于SF₆气体，空气的密度更低，金属微粒与电极间的碰撞过程更充分和快捷。同时，空气比SF₆气体更容易电离，在不同金属微粒弹跳模式下，产生的表面电荷分布特征差异的区分度更高。以上两点均有助于分析微粒运动导致的表面电荷积聚特征差异背后的内在机理。采用空气分析金属微粒的弹跳行为和表面电荷积聚特征的理念，已被研究人员采用，研究结果对于SF₆气体绝缘设备内相关现象的参考意义也被认可^[18-19]，因此，本文选择空气为介质开展实验研究。实验前，采用无水乙醇擦拭绝缘子表面，消除残余电荷。实验分为A和B两组，均在同轴电极间施加-40 kV的直流电压，但加压步骤不同。开始加压后，在A组中，通过喷头将长度为5 mm、直径为0.5 mm的铝制线性金属微粒(如图4所示)喷出，控制喷头的喷射位置，使金属微粒的第1次碰撞位置在地电极或者高压电极表面，并采用高速摄像机记录金属微粒的弹跳过程。加压60 min后，停止加压并进行表面电位测量。在B组中，加压之前将微粒放置于A组中微粒最终停止的位置，再加压60 min，随后撤去外施电压并进行表面电位测量。表面电荷密度可通过反演计算获得^[18]。

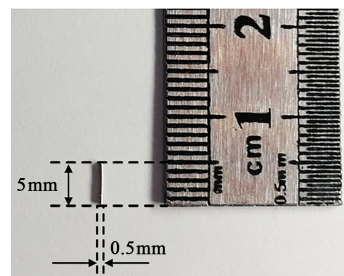


图4 线形金属微粒实物及尺寸

Fig.4 The picture and the size of linear metal particle

2 结果及分析

2.1 金属微粒的运动规律

在本文中，将金属微粒的运动模式归纳为两类。运动模式1指微粒的首次碰撞在高压电极表面，运动模式2指微粒的首次碰撞在地电极表面。运动模式1中，金属微粒碰撞到高压电极后，以不同

的速度反弹,向各个方向随机跳跃,并最终停止在不同位置。通过100次实验观察,发现7种典型的运动模式,其轨迹如图5所示。

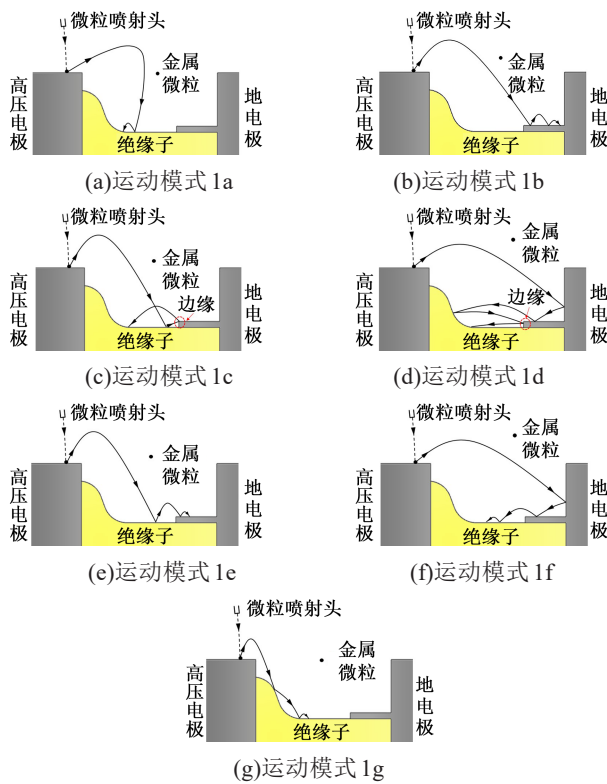


图5 运动模式1中金属微粒的典型运动轨迹

Fig.5 Typical trajectories of metal particles in motion mode 1

图5中,黑色圆球表示线形金属微粒,实线和箭头表示微粒的运动轨迹和方向。运动模式1a中,金属微粒从高压电极出发,向地电极运动,途中运动方向发生改变,转而向高压电极运动,最终停在平面区和非平面区的交界处;运动模式1b中,金属微粒直接运动到地电极;运动模式1c中,金属微粒途经绝缘子表面,碰撞到地电极边缘后又反弹至绝缘子表面;运动模式1d中,金属微粒从高压电极出发,依次撞击地电极的垂直面和水平面、绝缘子非平面区和地电极边缘,最终停在绝缘子表面。运动模式1e中,金属微粒先从绝缘子表面反弹,之后再运动到地电极。运动模式1f中,金属微粒弹跳至地电极后,反弹回绝缘子表面。运动模式1g中,金属微粒从高压电极出发,向非平面区运动,发生反弹并静止在平面区。运动模式1a~1g发生的比例分别为14%、17%、14%、17%、5%、8%、11%。除上述7种典型运动模式以外,实验中还出现了其他运动轨迹,

但分散性较大,不作具体分析。

运动模式2中金属微粒的典型运动轨迹如图6所示。运动模式2a中,金属微粒从地电极出发后,向非平面区运动,经过反弹后停在绝缘子表面;运动模式2b中,微粒出发后碰撞到非平面区,反弹至地电极边缘,最终停留在绝缘子表面;运动模式2c中,金属微粒停在地电极表面;运动模式2d中,金属微粒从地电极出发,经过非平面区反弹后撞到了高压电极。运动模式2a~2d发生的比例分别为43%、20%、6%、10%。除上述4种典型运动模式以外,实验中还出现了其他运动轨迹,但分散性较大,不作具体分析。

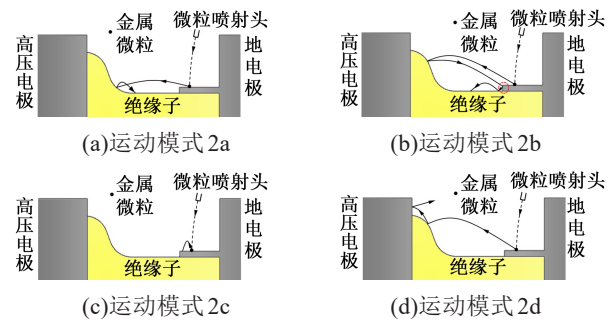


图6 运动模式2中金属微粒的典型运动轨迹

Fig.6 Typical trajectories of metal particles in motion mode 2

2.2 弹跳金属微粒对表面电荷积聚的影响

环境温度为23℃时,运动模式1a下的弹跳金属微粒对表面电荷积聚分布的影响如图7所示。从图7可以看出,金属微粒从高压电极跳落到绝缘子表面后,在平面区和非平面区的交界处沿着圆周方向逆时针滚动了大约270°,最终绝缘子表面形成双极性电荷带,电荷带中最大电荷密度为4.8 pC/mm²。双极性电荷带紧邻金属微粒的轨迹,其中正电荷带分布在轨迹内侧的非平面区,负电荷带分布在轨迹外侧的平面区。

对于运动模式1b中的金属微粒,实验发现其对电荷积聚没有明显影响。

运动模式1c下,金属微粒对表面电荷分布的影响如图8所示。从图8可以看出,在绝缘子非平面区形成了明显的正电荷斑,电荷斑与金属微粒最终静止位置和撞击地电极的位置在同一个半径方向上,最大电荷密度为37.2 pC/mm²,电荷密度远大于运动模式1a,这可能由多次碰撞电极而导致。

运动模式1d下,弹跳金属微粒对表面电荷分布

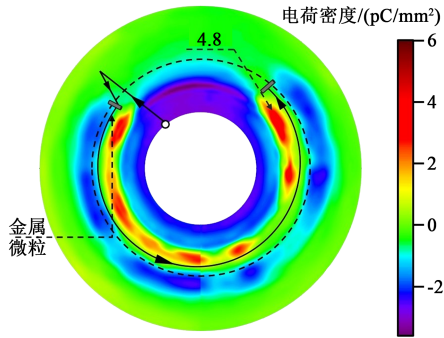


图7 运动模式1a滚动的表面电荷分布

Fig.7 Surface charge distribution of motion mode 1a

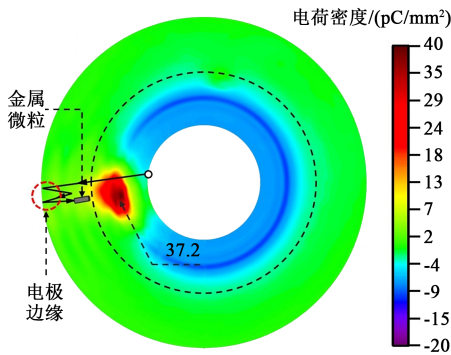


图8 运动模式1c下的表面电荷分布

Fig.8 Surface charge distribution in of motion mode 1c

的影响如图9所示。从图9可以看出,金属微粒从地电极反弹后,沿着绝缘子移动至非平面区,再沿着表面滑向交界处,最终在交界处顺时针滚动了一段距离。在绝缘子表面形成双极性电荷带,最大表面电荷密度为13.7 pC/mm²,但是正电荷带分布的面积比负电荷带大。由图9可见,正电荷带分布在微粒滚动轨迹的内侧,而双极性电荷带只分布于交界区滚动轨迹的两侧,说明微粒在非平面区滚动会引起正电荷斑积聚,但不会积聚双极性电荷带。

对于运动模式1e、1f的金属微粒,实验中未发

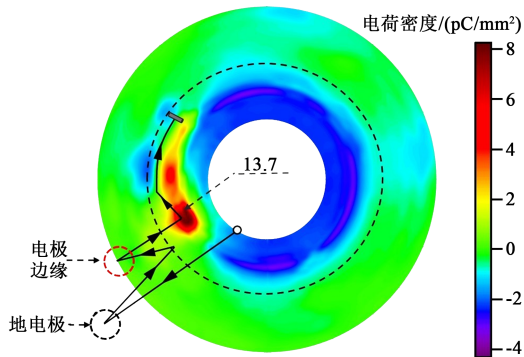


图9 运动模式1d下的表面电荷分布

Fig.9 Surface charge distribution of motion mode 1d

现表面形成明显电荷斑。

运动模式1g下的电荷分布如图10所示。从图10可以看出,非平面区有正电荷斑积聚,最大电荷密度为11.3 pC/mm²,电荷斑分布的位置与微粒在非平面区旋转弹跳的位置相同。

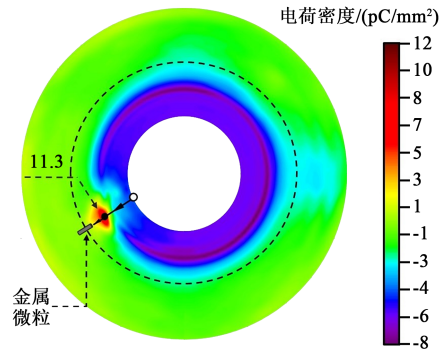


图10 运动模式1g下的表面电荷分布

Fig.10 Surface charge distribution of motion mode 1g

金属微粒在运动模式2a下导致的表面电荷积聚特征如图11所示。

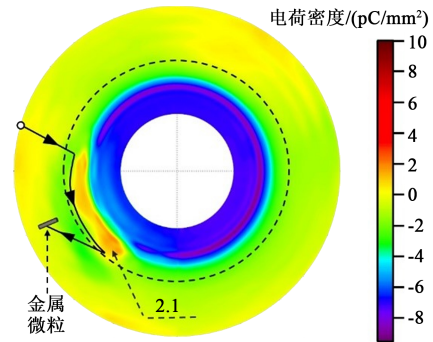


图11 运动模式2a下的表面电荷分布

Fig.11 Surface charge distribution of motion mode 2a

从图11可以看出,金属微粒沿着交界处滚动一段距离之后,向地电极的方向在平面区斜向滚动了一段距离,最终停在平面区中央。在交界处滚动的轨迹两侧形成双极性电荷带,最大电荷密度为2.1 pC/mm²,但在平面区滚动的轨迹周围无明显电荷带积聚。结合图9中的结果,可推断金属微粒只有在交界处滚动时,才会产生双极性电荷带,而在平面区或者非平面区滚动时,不易产生电荷带。在运动模式2b下,则发现金属微粒与地电极多次碰撞后能够引起表面电荷积聚,并产生异性电荷斑。而对于运动模式2c、2d的金属微粒,实验中发现绝缘子表面无明显电荷斑形成。

作为对比,在实验B组中,分别将两个金属微粒

放置在绝缘子的交界处和平面区中央, 加压后测量表面电荷的分布情况, 其电荷分布结果如图 12 所示。从图 12 可以看出, 绝缘子表面除了在非平面区有负电荷积聚之外, 金属微粒附近以及与之相对的非平面区无明显正电荷积聚, 这表明静止的金属微粒对表面电荷积聚的影响较小。

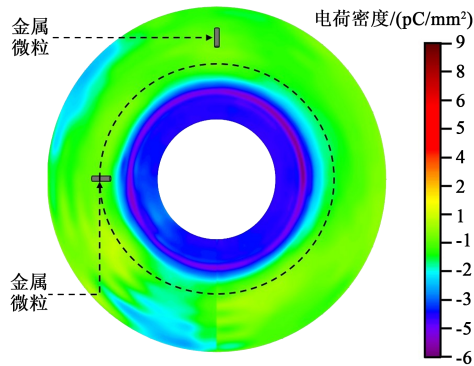


图 12 实验组 B 中的表面电荷分布
Fig.12 Surface charge distribution in experimental group B

综合分析实验 A 和 B 组中的结果, 可知: ①在交界处滚动的金属微粒易产生双极性电荷带, 而在其他区域滚动则不易产生电荷带; ②微粒运动过程中在非平面出现翻滚弹跳时, 容易在非平面区积聚正电荷斑; ③在相同区域撞击电极边缘次数越多, 在非平面区积聚的电荷斑电荷密度越大。

当环境温度为 40℃ 时, 金属微粒的运动模式与常温时无明显区别, 但表面电荷的积聚模式则差异较大。对于最终静止位置在地电极上的运动模式, 如模式 1b, 金属微粒对表面电荷积聚无明显影响; 对于金属微粒最终静止在绝缘子表面, 但没有碰撞到电极边缘的运动模式, 如模式 1a 与 2a, 金属微粒将促进表面电荷的积聚, 导致绝缘子表面形成“电荷缺口”, 如图 13 所示。图 13 中所示为运动模式 1a 下的表面电荷分布, 非平面区除了负电荷之外, 还有正电荷积聚, 其位置与金属微粒最终静止位置在同一半径方向上, 最大电荷密度为 0.95 pC/mm²。此“电荷缺口”是因为正电荷在非平面区小面积的积聚, 导致原来负电荷积聚的区域面积“缺少”了一部分。而在图 7 中, 此运动模式在室温下并不会产生“电荷缺口”。

图 14 为运动模式 2a 下的表面电荷分布, 在绝缘子非平面区同样可以发现“电荷缺口”现象, 其最大电荷密度为 1.9 pC/mm², 电荷缺口与金属微粒位置

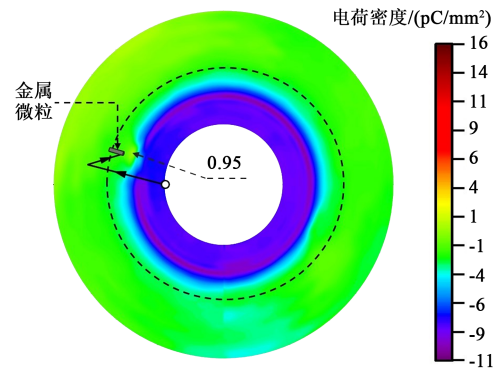


图 13 40℃ 运动模式 1a 下的表面电荷分布
Fig.13 Surface charge distribution of motion mode 1a at 40℃

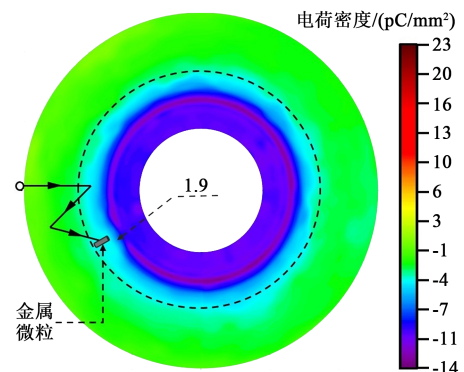


图 14 40℃ 运动模式 2a 下的表面电荷分布
Fig.14 Surface charge distribution of motion mode 2a at 40℃

在同一半径方向上。但在室温下, 此运动模式下的微粒对电荷积聚无促进作用。对于在非平面区与平面区交界处滚动的金属微粒, 其引起的电荷分布如图 15 所示, 运动模式为 2a。在微粒滚动轨迹的两侧形成双极性电荷带, 正电荷最大电荷密度为 3.21 pC/mm²。与图 11 相比, 尽管金属微粒的运动轨迹相似, 但 40℃ 时正电荷密度峰值更高。综上分析可知, 温度升高对表面电荷的积聚有促进作用。

当环境温度升高至 60℃ 时, 弹跳金属微粒不仅促进了表面电荷积聚, 还诱发了闪络现象。图 16 展示了金属微粒在运动模式 2b 下的表面电荷分布特征, 可以看出, 当金属微粒在运动过程中与地电极垂直面发生碰撞时, 引发了地电极与高压电极之间的闪络, 闪络路径用红线标注。在闪络路径的同一半径方向上, 绝缘子非平面区形成了一个明显的正电荷斑, 最大电荷密度高达 53.6 pC/mm²。与其他温度条件下的电荷积聚相比, 电荷密度显著提高。

图 17 展示了沿面闪络发生前后金属微粒的位

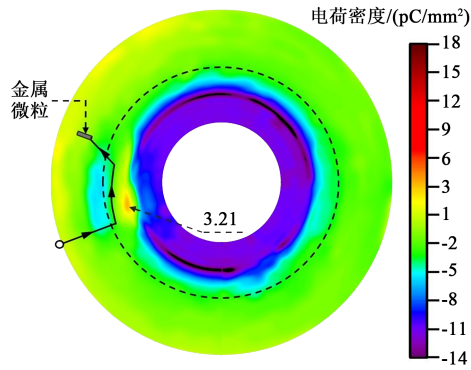


图 15 40°C 运动模式 2a(交界处滚动的金属微粒)下的表面电荷分布

Fig.15 Surface charge distribution of motion mode 2a (metal particle rolling at the junction) at 40°C

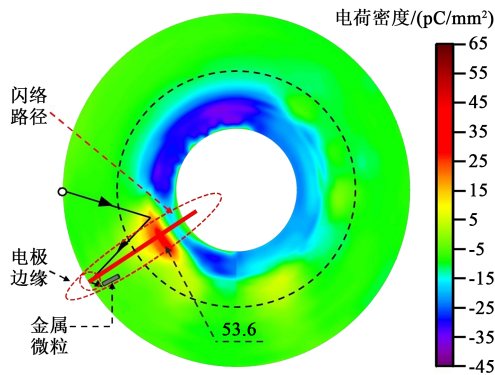


图 16 60°C 运动模式 2b 的电荷分布

Fig.16 Surface charge distribution of motion mode 2b at 60°C



(a)闪络前的画面 (b)发生闪络的画面

图 17 闪络前后的画面

Fig.17 Screen before and after flashover

置。从图 17 可以看出,闪络发生之前金属微粒向地电极边缘运动,金属微粒的长度方向平行于绝缘子的半径方向。随着金属微粒与地电极的距离逐渐缩短,沿面闪络发生且金属微粒处于闪络路径中。闪络持续的时间很短,随着金属微粒远离地电极,闪络结束。以上结果表明,高温下电荷积聚更为显著,且能够诱发闪络;电荷积聚的位置与闪络路径有关。

3 不同温度下金属微粒对表面电荷积聚的影响机理

无金属微粒时,不同温度下绝缘子表面电荷平均密度的径向分布如图 18 所示。从图 18 可以看出,温度为 23、40、60°C 下的平均电荷密度分布规律相似,峰值分别为 -6.93、-13.69、-19.93 pC/mm²,即随着温度升高,电荷积聚量增大。本文采用的圆盘绝缘子,其表面电荷的积聚特征受气体侧传导、表面电导和体电导综合作用,当绝缘子体传导占主导因素时,在非平面区形成负极性的表面电荷^[17-18]。随着温度的升高,环氧绝缘子的体电导率增大^[17,20-21],自由电荷在电场的作用下从绝缘子体内向表面迁移,使负极性电荷密度增大。因此,电荷积聚现象随温度升高而愈发显著。

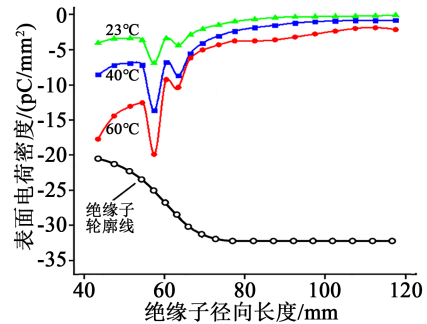


图 18 不同温度下绝缘子径向平均表面电荷分布

Fig.18 Radial average surface charge distribution of insulator at different temperatures

当存在弹跳金属微粒时,由图 13~15 的结果可知,在 40°C 下金属微粒对表面电荷积聚的影响比在室温下大。这是由于温度升高后,气体中的正、负带电粒子的扩散系数增大^[22],带电粒子的热运动更加剧烈。此外,温度升高有利于电子崩的发展,促进气体电离,产生更多带电粒子^[23-25]。因此,温度升高既使气体中电荷数量增多,又加快带电粒子的迁移,使得因金属微粒诱发气体电离而导致的绝缘子表面电荷积聚更为显著。

当温度进一步升高至 60°C 时,金属微粒靠近地电极时引起了正电荷积聚,并诱发沿面闪络。这是由于当金属微粒与地电极的距离缩短时,微粒靠近地电极的一端感应带负电,微粒和地电极之间的电场被加强,导致二者之间的电隙发生击穿。若假设击穿通道的电导率足够高,可认为金属微粒与地电极等电位,金属微粒可被视作地电极侧面的凸起尖刺。于是,在金属微粒尖端附近由于放电产生的大

量正、负电荷中,电子经金属微粒流入地电极,残留的正电荷则增强了外部空间的电场,有助于流注的发展。又因为高温下气体电离增强,故闪络快速形成。在闪络路径所对的非平面区,形成了正极性电荷斑。

综上所述,弹跳金属微粒对绝缘子表面电荷积聚的影响随温度升高而更加明显。当温度达到60℃时,弹跳微粒一方面通过诱发强烈气体电离的方式直接影响表面电荷积聚,另一方面通过引起绝缘子沿面闪络间接促进表面电荷积聚。

4 结论

(1)在室温(23℃)条件下,绝缘子非平面区电荷的积聚模式与金属微粒的运动方式有着密切关系。在非平面区滚动的微粒引起表面正电荷积聚;在交界处滚动时,滚动轨迹两侧将形成双极性电荷带;在平面区滚动时,金属微粒对电荷积聚无影响。当微粒碰撞地电极垂直边缘或高压电极时,会导致非平面区积聚高密度正电荷。

(2)随着温度的升高,绝缘子表面积聚的负极性电荷量增多。此外,弹跳金属微粒引起的正极性电荷积聚也增强。当温度升高至60℃时,弹跳金属微粒在向地电极垂直面运动时诱发了沿面闪络,并进一步促进了正极性电荷的积聚。

参考文献:

- [1] BENATO R, DI MARIO C, KOCH H. High-capability applications of long gas-insulated lines in structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(1):619-626.
- [2] 汪宁,陈延辉,杨庆宇,等.一种GIS用绝缘子的结构设计[J].电气制造,2008(10):58-59.
- [3] 阮全荣,谢小平.气体绝缘金属封闭输电线路工程设计研究与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2011.
- [4] 齐波,张贵新,李成榕,等.气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J].高电压技术,2015,41(5):1466-1473.
- [5] NAKANISHI K, YOSHIOKA A, ARAHATA Y, et al. Surface charging on epoxy spacer at DC stress in compressed SF₆ gas[J]. IEEE Power Engineering Review,1983, PER-3(12):46-46.
- [6] ZHOU H Y, MA G M, LI C R, et al. Impact of temperature on surface charges accumulation on insulators in SF₆-filled DC-GIL[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,2017,24(1):601-610.
- [7] LI C Y, LIN C J, ZHANG B Y, et al. Understanding surface charge accumulation and surface flashover on spacers in compressed gas insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1152-1166.
- [8] LI C Y, LIN C J, CHEN G, et al. Field-dependent charging phenomenon of HVDC spacers based on dominant charge behaviors[J]. Applied Physics Letters,2019,114(20):202904.
- [9] ASANO K, HISHINUMA R, YATSUZUKA K. Bipolar DC corona discharge from a floating filamentary metal-particle[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2002,38(1):57-63.
- [10] HARA M, MAEDA Y, NAKAGAWA N, et al. DC breakdown voltage characteristics of saturated liquid helium in the presence of metallic particles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2006,13(3):470-476.
- [11] JIA J, ZHA W, YANG L, et al. Motion behavior of spherical conducting particle around PTFE insulator under DC voltage[J]. High Voltage Engineering,2006,32(11):18-21.
- [12] 张连根,路士杰,李成榕,等.GIS中线形和球形金属微粒的运动行为和危害性[J].电工技术学报,2019,34(20):4217-4225.
- [13] SCHURER R, FESER K. The accumulation of surface charge due to a conducting particle on a spacer[C]//1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London, UK: IEEE,1999:59-62.
- [14] 邹钰洁,唐忠,晏武,等.直流GIL中柱式绝缘子附着金属微粒对表面电荷积聚的影响研究[J].电瓷避雷器,2020(2):236-243.
- [15] 王涵,薛建议,陈俊鸿,等.SF₆/N₂混合气体中金属微粒对GIL盆式绝缘子表面电荷积聚特性的影响[J].电工技术学报,2018,33(20):4663-4671.
- [16] LI B T, WANG J, ZHANG S F, 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.
- [17] GAO Y, WANG H, LI Z Y, et al. Gaseous ionization dependence of surface charge pattern on epoxy insulator with complex surface profile under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2021,49(5):1627-1635.
- [18] GAO Y, LI Z Y, WANG H, et al. Metal particle encouraged surface charge accumulation on epoxy insulator with multi-arc surface profile under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(3):998-1006.
- [19] 王健.直流GIL金属微粒的荷电运动机制与治理方法研究[D].北京:华北电力大学,2017.
- [20] 周宏扬,马国明,赵书静,等.温度对直流GIL绝缘子电荷积聚特性的影响[J].中国电机工程学报,2016,36(24):6675-6681, 6920.
- [21] STRAUMANN U, SCHULLER M, FRANCK C M. Theoretical investigation of HVDC disc spacer charging in SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(6):2196-2205.
- [22] 周宏扬,马国明,刘姝斌,等.基于电-热多物理场耦合模型的直流GIL绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J].中国电机工程学报,2017,7(4):1251-1260.
- [23] 冯启琨,黄磊,刘获帆,等.针-板与棒-板电极结构在不同温度下的负电晕放电特性[J].高电压技术,2021,47(5):1847-1856.
- [24] LU B X, FENG Q K, SUN H Y. The effect of environmental temperature on negative corona discharge under the action of photoionization[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2019, 47(1):149-154.
- [25] 李博,淡淑恒.直流GIL中温度对绝缘子表面电荷积聚时变特性影响研究[J].绝缘材料,2020,53(4):52-58.