

# 直流GIS/GIL中电荷诱发的固气界面闪络研究 综述：试验与模型

武绍琮<sup>1</sup>, 陈庚<sup>1,2</sup>, 王健<sup>1,2</sup>, 邵昱铭<sup>1</sup>, 屠幼萍<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京

<sup>2</sup>华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京

Email: wushaocong555@163.com, gengchen@ncepu@sina.com, wangjian31791.com,  
120192201129@ncepu.edu.cn, \*typ@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2021年3月28日; 录用日期: 2021年4月12日; 发布日期: 2021年4月25日

## 摘要

直流GIL/GIS绝缘子表面电荷积聚诱发的沿面闪络问题是制约其工程应用的关键, 而电荷诱发闪络的物理机制尚不明晰。本文对近20年直流电压下GIL/GIS绝缘子表面电荷对固-气界面闪络性能的影响及机理研究进行了梳理。首先以切向主导型与混合型电场分布对应的电荷积聚模式为分类标准, 归纳了固-气界面闪络电压的影响因素, 并分析了金属微粒等设备缺陷所导致的电荷积聚对沿面闪络的影响; 重点总结了表面电荷诱发沿面闪络现象的物理机制及理论模型; 最后, 对直流电压下固-气界面电荷积聚与沿面闪络关联机制研究的关键问题和未来挑战进行了展望。

## 关键词

表面电荷, 沿面闪络, 直流输电, GIL, GIS

# Review of Charge Induced Solid-Gas Interface Flashover in DC GIS/GIL: Experiments and Models

Shaocong Wu<sup>1</sup>, Geng Chen<sup>1,2</sup>, Jian Wang<sup>1,2</sup>, Yuming Shao<sup>1</sup>, Youping Tu<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC (North China Electric Power University), Beijing

<sup>2</sup>State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing

Email: wushaocong555@163.com, gengchen@ncepu@sina.com, wangjian31791.com,  
120192201129@ncepu.edu.cn, \*typ@ncepu.edu.cn

\*通讯作者。

文章引用: 武绍琮, 陈庚, 王健, 邵昱铭, 屠幼萍. 直流GIS/GIL中电荷诱发的固气界面闪络研究综述: 试验与模型[J]. 智能电网, 2021, 11(2): 130-139. DOI: 10.12677/sg.2021.112013

## Abstract

For DC GIL/GIS, the surface flashover induced by insulator surface charge accumulation has become the critical problem restricting its engineering application. However the physical mechanism of charge-induced flashover is unclear. This paper reviews the influence and method of insulator surface charge on the flashover performance of solid-gas interface under DC voltage in the last 20 years. Firstly, the influence factors of flashover voltage are summarized according to the charge accumulation mode corresponding to the distribution of the tangential component-dominant electric field and the hybrid electric field, and the influence of charge accumulation caused by metal particles on surface flashover is analyzed. Then, the physical mechanism and theoretical model of surface charge inducing flashover are summarized. Finally, the key issues and future challenges of the research on the correlation between surface charge accumulation and surface flashover under DC voltage are prospected.

## Keywords

Surface Charge, Surface Flashover, HVDC, GIL, GIS

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal enclosed transmission lines, GIL)和气体绝缘金属封闭开关装置(gas insulated metal enclosed switchgear, GIS)等气体绝缘输变电装备, 相比于架空线、输电电缆等传统输电方式, 在进行大容量远距离输电时具有传输损耗小、安全性高、环境影响小等优势[1]。盆式和支柱绝缘子是 GIL/GIS 的主要绝缘部件, 通过对我国近 30 年 GIL/GIS 绝缘故障调研统计, 绝缘子沿面放电故障在绝缘故障中占比最高, 达 43%, 严重威胁电网及设备安全。1996 年, 辽宁营口华能电厂的 220 kV GIS 设备在正常换相操作中, 一盆式绝缘子发生沿面闪络。2008 年, 南宁早塘变电站的 110 kV GIS 绝缘子发生闪络故障。2015 年, 溪-浙直流工程金华换流站的一根 800 kV 气体绝缘穿墙套管中的支柱绝缘子发生沿面闪络事故。2016 年 6 月, 特高压 1000 kV 北京东变电站在启动调试期间多次发生 GIL 母线上盆式绝缘子和支柱绝缘子沿面闪络事故[2]-[7]。在 GIL/GIS 的运行过程中, 高压导体上的残余直流电压、局部电场畸变、场发射效应、金属微粒等现象会导致固体绝缘体上积聚电荷, 这些表面电荷会使电场发生畸变, 并向闪络过程提供电荷, 是引起绝缘子沿面放电故障的主要原因。

另一方面, 国外设备制造厂商日本三菱、德国西门子等都开展了直流 GIL/GIS 设备的研发工作, 但产品均没有投入正式的商业运营[8]。其重要原因是直流 GIL/GIS 中的绝缘子固-气界面、三结合处等绝缘薄弱的位置更易产生表面电荷积聚等问题[9] [10], 诱发沿面闪络和绝缘破坏。由表面电荷引起的固-气界面闪络问题日益成为制约直流 GIL/GIS 发展的关键问题[11] [12]。

综上, 研究和解决电荷诱发的固-气界面闪络问题是气体绝缘装备绝缘设计与优化的当务之急。然而, 表面电荷诱发的固-气界面闪络物理机制复杂, 除表面电荷的形成与分布[13]-[18]对闪络的直接影响

外, 外加电压的形式、固体绝缘材料的性质以及金属微粒的存在都会改变表面电荷的分布, 进而影响到闪络过程。目前, 国内外学者主要从以下三方面对该问题进行了探索: 1) 不同形式电压应力下表面电荷在沿面闪络中的作用; 2) 固体材料种类、表面状态等与沿面闪络的关系[19]-[25]。3) 金属微粒的带电与运动情况对表面电荷以及沿面闪络的影响。在目前的研究成果中, 已经有综合模型、异极性电荷簇模型、同极性电荷注入模型、气体吸附模型等闪络模型被提出[26] [27] [28] [29] [30]。

本文针对直流电压下绝缘子表面电荷与沿面闪络的关联关系, 综述了相关科学研究的实验现象及提出的主要闪络模型, 最后对直流电压下电荷诱发固-气界面闪络的研究工作提出了展望。

## 2. 固-气界面电场、电荷与闪络之间的关联

电场分布是影响表面电荷积聚以及闪络发生的重要因素。绝缘子表面电场的法向分量(电场分量方向垂直于固-气界面)会使固体侧或气体侧的电荷沿法向迁移到固-气界面并发生积聚[28], 法向分量越大, 电子崩过程更容易发展成流注过程[31]。切向分量(电场分量方向平行于固-气界面)则影响固体绝缘介质的表面电导过程, 能使表面电荷产生一定的消散。在研究过程中, 将实际电极结构归入切向分量主导型电场(切向分量含量高)和混合型电场(切向和法向分量的影响都不可忽略)两种电场分布类型。分别考察绝缘子表面电场切向分量和法向分量的占比及分布, 可以更深刻地认识电场分布对电荷-闪络过程的影响。

目前, 学者们针对固-气界面电场、电荷与闪络之间的关联开展了大量的研究, 图 1 总结了现有的对直流下电荷-闪络关系的代表性研究。下面从切向分量主导型和混合型两类电场形式下的电荷积聚特征出发, 对近期研究进展进行梳理和总结。



Figure 1. Study on charge flashover relationship under different electric field distribution

图 1. 不同电场分布类型下电荷-闪络关系研究

### 2.1. 切向分量主导型电场下的电荷积聚特征与沿面闪络

切向分量主导型电场对应的电极系统为指状电极和平板电极, 主要利用电晕充电的方式在绝缘子表面预置电荷, 可以通过控制栅极电压在一定程度上定量控制表面电位, 电荷在试样表面呈现相对平均的分布状态。

确定固-气界面闪络电压在表面电荷影响下产生的直接变化量是深入分析电荷对闪络影响机制的前提。指状电极系统下, 相关学者通过电晕充电的方式为 PTFE 试样表面预置负电荷, 并利用一对棒状电极测量正极性的沿面闪络电压, 结果沿面闪络电压下降了 20%, 负极性的沿面闪络电压则分别增加了 15% 和 11% [32]。当向试样表面预置 0 到  $1.4 \text{ nC/mm}^2$  不等的正极性电荷, 并利用指状电极测量负极性闪络电

压时, 闪络电压从 $-37.5$  kV 降低到了 $-35$  kV 左右[33]。当利用脉冲电压为试样表面充电时, 脉冲幅值为 $5$  kV, 正、负极性的直流闪络电压分别下降了 $1.9\%$ 和 $3.9\%$ , 脉冲幅值为 $10$  kV 时, 直流闪络电压分别下降了 $6.5\%$ 和 $4.7\%$  [34]。这些结果表明无论试样表面积聚的电荷极性与闪络电压相同或相反, 表面电荷的存在都会导致沿面闪络电压的下降。

电荷诱发的固-气界面闪络与气固绝缘系统界面结构、状态等密切相关, 固体对闪络过程的影响, 是电荷与闪络之间作用机制的重要内容。目前在理论上常通过对表面陷阱和表面电导率的讨论来分析表面电荷对闪络的影响。调控固-气界面电导率和陷阱分布情况的手段主要包括对固体绝缘材料的表面处理、表面涂覆、掺杂等。

大气等离子体射流(APPJ)的技术常被用于对环氧试样进行预处理, 可以控制试样的表面陷阱分布、表面电导率等参数[35] [36]。在利用 APPJ 技术处理试样表面的研究中, 使用了电晕充电的方法为试样进行充电, 并分别测试了不同极性、不同充电电压幅值、不同衰减时间下试样沿面闪络电压的变化。结果显示, 两种极性的表面电荷都会使沿面闪络电压下降, 并且同极性电荷对闪络电压的影响更大。若控制电荷进行衰减, 则闪络电压将产生一定恢复, 衰减时间越长, 闪络电压恢复的越多。

表面涂覆可以一定程度上抑制绝缘介质的表面电荷积聚, 相关试验研究了表面涂覆环氧/SiC 涂层对试样闪络电压的影响。实验在指状电极系统中进行, 制备了涂有不同 SiC 含量涂层的材料并进行沿面闪络电压的测试。当 SiC 填充量分别为 $1\%$ 、 $3\%$ 和 $5\%$ 时, 闪络电压分别提高到 $26$  ( $25.8\sim 26.1$ ) kV、 $26.5$  ( $26.4\sim 26.6$ ) kV 和 $27$  ( $26.9\sim 27.2$ ) kV, 而无涂层的闪络电压仅为 $23.5$  ( $23.3\sim 23.7$ ) kV。闪络电压的提高通常与抑制表面电荷积累有关[37]。研究认为, 闪络电压随着最大表面电荷密度的减小而增大, 原因是表面电荷的积累得到抑制, 从而减轻了表面的场畸变。

氟化处理在工程中有着广泛的应用, 也可以用于提升绝缘材料的介电性能。相关学者对掺杂氧化铝的环氧样品进行了不同时间的氟化处理, 在分别进行 $8$  kV 和 $-8$  kV 的直流电晕预处理后, 测试了试样的负极性直流闪络电压[38]。实验结果显示, 在无处理和氟化处理 $60$  分钟实验组中, 负极性的表面电荷对闪络电压影响不明显, 正极性的表面电荷会使闪络电压出现明显下降; 而在氟化处理 $15$  分钟实验组中, 两种极性的表面电荷对闪络电压的影响都不明显。分析认为, 一方面氟化处理减小了绝缘材料表面的电阻率, 使表面电荷消散过程加速, 进而削弱了对闪络过程的影响, 另一方面氟化处理使试样的表面粗糙度更小, 减小了三结合处的局部放电, 使闪络电压提高[39]。

以上介绍的工作研究了表面电荷存在的情况下, 试样闪络电压的变化情况。表面电荷的极性、电荷量能够直接影响沿面闪络电压的大小, 材料的表面状态则往往通过影响表面电荷的积聚量而间接对沿面闪络电压产生影响。

## 2.2. 混合型电场下的电荷积聚特征与沿面闪络

混合型电场对应的电极系统为同轴电极。为绝缘子表面预置电荷的方式主要是接触充电, 在试样表面生成的电荷分布与电极结构紧密相关, 能够模拟不同固-气界面切、法向场强。

混合型电场分布下的真型盆式绝缘子实验可以研究实际工况下沿面闪络电压的变化量, 并为小模型模拟提供参考。在 $0.5$  MPa 的 $\text{SF}_6$  气体环境下进行的 $220$  kV 盆式绝缘子闪络实验中, 通过接触充电的方法, 利用导杆产生的外加电场对绝缘子表面进行充电。在电荷测试实验中, 正极性直流电压作用下, 绝缘子表面主要分布负极性的电荷。在随后的闪络电压测试中, 绝缘子的直流耐压水平约为 $765$  kV, 下降到了交流耐压的 $64\%$  [39]。

通过对电荷积聚量和闪络电压的实验分析, 可以得到闪络电压与表面电荷量的经验公式[40], 用以评估表面电荷对闪络的影响:

$$U_f = a \times Q^b \quad (1)$$

其中,  $a$  和  $b$  是电荷系数和特征指数, 取决于电荷量、材料、绝缘体几何形状等参数。

具有不同能量和密度的表面陷阱会促进或阻碍表面电荷的积聚, 固体绝缘材料电导率的大小和分布也对表面电荷积聚有复杂的作用, 二者共同影响着表面电荷的迁移率以及消散速率。从相关学者对固体绝缘材料表面不同粗糙度和不同种类涂层的研究中, 可以探究绝缘介质表面陷阱与材料电导率参数对电荷-闪络的影响。在实验中常通过掺杂特定填料的方式改变固体绝缘介质的表面或体电导率。

李传扬等在掺杂非线性材料的自适应电荷调节绝缘子研制中, 通过对绝缘子连续多次的直流闪络电压实验[28], 发现大部分的闪络痕迹都产生在绝缘子的凸面, 说明凸面的电荷积聚更多, 电场畸变更为严重。同时, 在前一次闪络引入的电荷影响下, 后一次闪络电压降低了 12.4%。

借助填料粒径对闪络电压影响的研究[40], 薛建议等认为在靠近固-气界面的固体侧存在着界面电荷迁移层, 在这一层中, 电子几乎被填充在价带中, 导带则几乎没有电子。由于表面陷阱的相互作用, 电子将被分布在禁带内的浅陷阱或深陷阱捕获。电荷很容易被浅陷阱从束缚中分离出来, 然后向相反的电极转移。而受深陷阱限制的电荷仅在获得足够大的能量时方能逃逸。填料的加入使电荷更多的存在于浅陷阱中, 并易于脱陷并迁移到电极, 大量种子电子的损失会导致沿面闪络较难发生。

在对功能梯度材料绝缘子的研究中, 杜伯学等比较了-20 kV 下无涂层和有涂层绝缘子的表面电荷分布与闪络之间的关系[41]。表面电荷主要来自空气电离, 在电场作用下, 正离子移动到高压电极, 电子漂移到地电极并在绝缘体表面聚集, 因此表面电荷主要为负。环氧/GR 涂层作为纳米复合材料, 具有较低的载流子迁移率和较高的表面电荷储存能力, 因此很容易积累较高的电荷密度, 且由于电荷在电场作用下很难沿绝缘子表面迁移, 表面电荷分布比较均匀。具有电场梯度作用, 提高了涂层绝缘子的闪络电压。

混合型电场作用下的研究以真型绝缘子的结构为多, 在这种电场结构下, 绝缘子的体参数和表面参数会同时作用于表面电荷, 影响其积聚。但是表面电荷影响闪络电压变化的机理与切向分量主导型电场基本一致。

### 3. GIL/GIS 中的金属微粒引起的电荷与闪络

在 GIL/GIS 设备的生产和安装过程中, 腔体内存在金属微粒。金属微粒本身会畸变固-气界面电场, 同时也是电荷积聚的重要来源, 近年来, 国内外学者认为金属微粒作为气体绝缘装备中的主要缺陷形式, 是绝缘子沿面闪络的重要诱因[42] [43] [44] [45]。

金属微粒的大小、形状和所处位置等都对电荷的形成和分布有重要影响[46] [47] [48] [49] [50]。当金属微粒与电极接触时, 微粒尖端积聚的电荷与电极极性相同; 当微粒位于绝缘子中部时, 微粒两端积聚的电荷与所对应电极呈现相反极性。当金属微粒位于绝缘子中部时, 表面电荷积聚幅值小于微粒直接与电极接触的情况[49]。此外, 微粒附着高压电极时对电荷分布的影响比附着地电极时强。即使毫米级的微粒也会成为绝缘子表面电荷积聚的主要因素, 甚至当金属微粒小于 0.1 毫米时, 也会对电荷分布产生显著影响[50], 随着微粒长度增加, 直径增大, 微粒引起电荷积聚也会增强。金属微粒还可能以悬浮于绝缘子表面的方式影响表面电荷分布, 但当微粒尖端与绝缘子表面的距离大于 4 倍微粒自身直径时, 微粒对绝缘子表面电荷分布的影响可以忽略[49]。金属微粒对电荷分布产生影响的原因可能是电场的畸变、局部放电的发生、微放电和微粒运动等。对于小直径微粒, 电场的畸变是电荷分布变化的主要原因; 而对于大直径微粒, 局放与微放电对电荷积聚的增加起主要作用[50]。

对于金属微粒造成沿面闪络电压降低的机制, 研究者针对不同类型的金属微粒, 提出了不同的解释。针对线形金属微粒附着的氧化铝掺杂环氧树脂与  $\text{SF}_6/\text{N}_2$  混合气体界面的沿面闪络问题, 王涵等认为金属微粒末端的微米级金属粉末在电场足够大时会从金属微粒表面飞出或者在温度足够高时变成蒸汽并扩散

到气体中，微米级金属粉末在电场力的作用下会加速向相反电极迁移，当其靠近对电极时，由于极强的电场作用，在微米级金属粉末与电极之间会产生剧烈的放电，从而引发闪络。因此，金属微粒表面的微观状态，金属的屈服强度、熔点等都会对沿面闪络产生影响[51]。鉴于实际工况下金属微粒尺寸较小，许渊等学者研究了毫米级金属微粒对沿面闪络的影响。其认为金属微粒运动是沿面闪络的主要诱因。机械振动，暂态过电压和颗粒荷电等因素均易引发微金属颗粒的运动，当金属微粒运动到金属筒壁和绝缘子的夹缝中时，金属颗粒局部放电量急剧增加，并在数秒后引发绝缘子的沿面闪络。由于金属颗粒的运动具有一定的随机性，因此沿面闪络的发生也具有一定的随机性[52]。王健等研究了附着在绝缘子表面的金属微粒引起的表面电荷积聚对沿面闪络的影响[53]。粘附在绝缘子中部的金属微粒引起微粒尖端附近场强畸变，绝缘子表面法向分量也显著提高，这将引起表面电荷量的激增。表面电荷最大值与金属微粒的粘附角度呈负相关，不同粘附形态会引起不同程度的电场畸变，而电场畸变程度越大，在绝缘子表面积聚电荷密度越大，越容易发生闪络。

#### 4. 电荷诱发的固 - 气沿面闪络理论模型

固 - 气沿面闪络的发生受到固体侧、气体侧、固 - 气界面三方面的综合影响，其中固体侧和气体侧的物理模型较为成熟[54] [55]。由于固 - 气界面电荷问题的重要影响的关注，相关学者开始建立考虑表面电荷、电场、闪络三者关系的物理模型。

##### 1) 综合模型(Comprehensive analytical model)

综合模型将闪络过程中可能涉及到的所有物理过程对闪络电压的影响都各自归结为一组特征函数，每组特征函数在基于实验研究的基础上，以尽可能少的关键物理量作为系统参数，并按闪络发生时的电场条件为各个过程分配权重系数，用于表示该过程在整个闪络中所占据的重要程度[56]：

$$V_{hd} = \sum A_n (process)_n \quad (2)$$

这些过程包括初始电子的产生、二次电子的产生、电荷扩散、电场的畸变等，在闪络发展的不同阶段，由不同的过程占据主导作用，在模型中，各个过程的权重系数也会随之变化。

综合模型对电荷 - 闪络的分析具有指导意义，能够全面描述闪络电压的变化。但是在计算某种具体情况时仍然需要具体分析，将所有过程量化到综合公式中还具有一定的困难。

##### 2) 异极性电荷簇影响闪络模型(Charge cluster model)

该模型主要关注了加压过程中出现在介质表面的异极性电荷及其分布形状对闪络的影响。在 GIL 与盆式绝缘子组合的电极系统中，接地外壳上存在着微小缺陷，会导致气体分子电离，产生异极性的电荷并向绝缘子的表面迁移。这些异极性电荷最终将以圆形电荷簇的形式驻留在绝缘子的表面，如图 2 所示[57]。电荷簇边缘的电场强度很高，容易诱发产生局部小流注，这降低了绝缘沿面距离，促进了沿面闪络的发生。

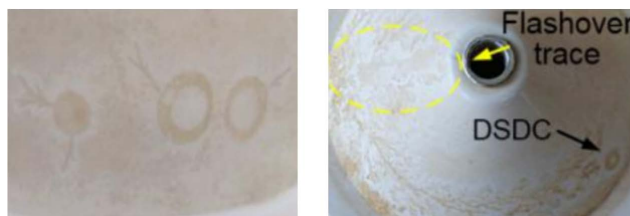


Figure 2. Flashover paths induced by charge clusters  
图 2. 电荷簇诱导的闪络路径

圆形电荷簇是混合型电场作用下一种典型的表面电荷积聚模式。适用于分析气体侧电荷来源对表面电荷以及闪络的影响。

### 3) “近似失效绝缘区”(Analogous ineffective region)扩张的闪络模型

该模型是在综合模型基础上,考虑到了 GIL 运行时的温度梯度对绝缘子的影响[58]。随着中央导杆中工作电流不断流过,环境温度随之升高。介质的体积电阻率和表面电阻率随温度的升高而降低,并导致高压电极附近出现高电位。将介质中表面电位达到高压导体 60% 电位以上的部分定义为近似失效绝缘区。由于近似失效绝缘区的存在,大部分电压降都降落在靠近接地电极的绝缘区域。因此,增大的电场将可能使电极的三结合处产生气体电离,从而形成电子崩。

在近似失效绝缘区的延伸过程中,自由电子主要受到切向电场的作用力产生移动,并将使切向电场逐渐发生畸变。该模型结合温度梯度的影响,揭示了切向分量主导型电场下,绝缘子电荷分布的演化过程。能够体现出固体侧在外加电压作用下的性质变化对电荷-闪络过程的影响。

### 4) 气体吸附模型(Synergic effect of adsorbed gas and charging model)

该模型分析了绝缘气体吸附在固体绝缘材料表面形成的气体层对闪络过程的影响。在该层中,气体分子与介质的表面之间存在较为强烈的相互作用,表现为致密的固体状薄层[59]。

在表面吸附层中,气体分子主要通过两种方式影响闪络的发生。一方面分子容易产生垂直于介质表面的取向,这会增大对自由电子的散射,削弱一次电子过程;另一方面气体分子本身的电荷分布中心会发生分离,转化成电偶极子的状态,并增加吸引表面电荷的效果。这两种影响方式都将导致闪络电压的升高。

在 GIL/GIS 中,气体分子在绝缘子表面的吸附是普遍存在的,表面吸附层对闪络电压的影响在切向分量主导型电场和混合型电场中都能得到体现。

## 5. 结论与展望

本文以 GIL/GIS 盆式绝缘子表面不同电场分布类型产生的表面电荷积聚模式为基础,综述了目前直流电压下固-气界面电场分布、电荷积聚、闪络特性三者关联关系的研究进展,总结了切向分量主导型和混合型两种电场分布类型所产生的电荷积聚模式,及其对沿面闪络的影响规律。本文总结了四种主要理论模型,从主导物理过程、表面电荷极性与分布、固-气相互作用等角度对该现象进行了解释。可以看出,固-气界面电荷的积聚及其对沿面闪络的影响机制十分复杂。因此,对相关研究提出以下几点展望:

1) 高压环境中,对于绝缘子表面电荷更为直观的在线观测手段需要突破,以深入考察电荷诱导闪络的动态过程,并对电荷积累-沿面放电的相互作用过程,给出准确的分析。

2) 现有气体沿面闪络模型大都基于气体放电和真空沿面放电,然而,高压环境中的载流子与固-气界面的作用机制需要更深入的理论研究和实验证据。需要建立能够反映电荷与闪络相互作用机制的定量物理模型。

3) 金属微粒等缺陷是引发 GIL/GIS 设备中的绝缘破坏事故的重要因素。缺陷与表面电荷之间的作用作为沿面闪络过程中的重要影响因素,需要得到更加深入的分析。

4) 针对现有的改性方法,需要开发面向工业的加工工艺,以用于实际固体材料沿面闪络性能的提升。同时改性处理的长期有效性需要得到进一步的研究与验证。

## 基金项目

国家自然科学基金项目(51877080); 直流输电技术国家重点实验室开放基金项目(SKLVDC-2020-KF-09); 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2014CB239502)。

## 参考文献

- [1] Li, C., Xu, Y., Lin, C., Chen, G., Tu, Y., Zhou, Y., Lei, Z., Han, T., Suraci, S.V. and Wang, J. (2019) Surface Charging Phenomena on HVDC Spacers for Compressed SF<sub>6</sub> Insulation and Charge Tailoring Strategies. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, **6**, 83-99.
- [2] Hama, H., Hikosaka, T., Okabe, S., *et al.* (2007) Cross-Equipment Study on Charging Phenomena of Solid Insulators in High Voltage Equipment. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, **14**, 508-519. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2007.344633>
- [3] 范建斌, 李鹏, 李金忠, 汤浩, 张乔根, 吴广宁.  $\pm 800\text{kV}$  特高压直流 GIL 关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2008(13): 1-7.
- [4] Geng, J.H. (2009) Research on the Influence of Surface Accumulation Charge on Flashover Voltage of Ceramic Insulator. *International Conference on Electronics Engineering and Technology*, Guilin, 16-18 October 2009, 244-246. <https://doi.org/10.1109/ICEET.2009.297>
- [5] 邢照亮. GIS 绝缘子表面电荷分布对沿面闪络的影响[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [6] 邓军波, 薛建议, 张冠军, 韩彦华, 蒲路, 熊田亚纪子. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体中沿面放电实验研究的现状与进展[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1190-1198.
- [7] 朱时阳, 邓雨荣, 兰国良. 一起 GIS 盆式绝缘子闪络事故的分析[J]. 电气应用, 2009, 28(13): 38-39+83.
- [8] 齐波, 高春嘉, 赵林杰, 李成榕, 屠幼萍. 交/直流电压下气体绝缘变电站盆式绝缘子表面电荷对闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 915-922.
- [9] Zhang, L., Lin, C., Li, C., *et al.* (2020) Gas-Solid Interface Charge Characterisation Techniques for HVDC GIS/GIL Insulators. *High Voltage Engineering*, **5**, 95-109. <https://doi.org/10.1049/hve.2019.0289>
- [10] 张子, 张周胜, 邓保家, 晏武, 李秋焯. 直流 GIL 绝缘子表面电荷研究现状与展望[J]. 绝缘材料, 2019, 52(6): 1-7.
- [11] 齐波, 张贵新, 李成榕, 高春嘉, 张博雅, 陈铮铮. 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.
- [12] 张贵新, 张博雅, 王强, 李金忠. 高压直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷积聚与消散的实验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1430-1436.
- [13] Li, C., Hu, J., Lin, C. and He, J. (2016) The Control Mechanism of Surface Traps on Surface Charge Behavior in Alumina-Filled Epoxy Composites. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **49**, Article ID: 445304. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/49/44/445304>
- [14] Li, C., Lin, C., Chen, G., Tu, Y., Zhou, Y., Li, Q., Zhang, B. and He, J. (2019) Field-Dependent Charging Phenomenon of HVDC Spacers Based on Dominant Charge Behaviors. *Applied Physics Letters*, **114**, Article ID: 202904. <https://doi.org/10.1063/1.5096228>
- [15] Tu, Y., Chen, G., Wang, C., Tong, Y., Li, C., Ma, G. and Shahsavarian, T. (2020) Feasibility of C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>CN/CO<sub>2</sub> Gas Mixtures in HVDC GIL: A Review on Recent Advances. *High Voltage Engineering*, **5**, 377-386. <https://doi.org/10.1049/hve.2020.0083>
- [16] Chen, G., Tu, Y., Wu, S., Lin, C., Qin, S., Li, C. and He, J. (2020) Intrinsic Hetero-Polar Surface Charge Phenomenon in Environmental Friendly C<sub>3</sub>F<sub>7</sub>CN/CO<sub>2</sub> Gas Mixture. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **53**, 18LT03. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab7565>
- [17] Zhou, H.Y., Ma, G.M., Li, C.R., *et al.* (2017) Impact of Temperature on Surface Charges Accumulation on Insulators in SF<sub>6</sub>-Filled DC-GIL. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **24**, 601-610. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.005838>
- [18] Tu, Y., Zhou, F., Jiang, H., *et al.* (2018) Effect of Nano-TiO<sub>2</sub>/EP Composite Coating on Dynamic Characteristics of Surface Charge in Epoxy Resin. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**, 1308-1317. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007149>
- [19] Li, C., Lin, C., Zhang, B., *et al.* (2018) Understanding Surface Charge Accumulation and Surface Flashover on Spacers in Compressed Gas Insulation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**, 1152-1166. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007004>
- [20] 高宇, 王明行, 赵宁, 李子逸, 杜伯学. 固体绝缘材料表面电荷特性的研究进展[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2628-2645.
- [21] Lin, C., Xu, Y., Chen, G., *et al.* (2020) Luminescence Reveals Micro Discharge Triggered Surface Flashover. *Journal of Physics D Applied Physics*, **53**, Article ID: 445103. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aba3ed>
- [22] 律方成, 边亚琳, 詹振宇, 金潮伟, 李志兵, 刘伟. 环保气体下灰尘对环氧树脂闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2628-2645.



- 2020, 46(4): 1319-1327.
- [23] Kumara, S., Alam, S., Hoque, I.R., *et al.* (2012) DC Flashover Characteristics of a Polymeric Insulator in Presence of Surface Charges. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **19**, 1084-1090. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6215116>
- [24] Kumara, S., Hoque, I.R., Alam, S., *et al.* (2012) Surface Charges on Cylindrical Polymeric Insulators. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **19**, 1076-1083. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6215115>
- [25] Mahmoodi, J., Mirzaie, M. and Akmal, A.S. (2018) Contribution of Surface Charges on High-Voltage DC Silicon Rubber Insulators to DC Flashover Performance. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **12**, 5851-5857. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6417>
- [26] Lin, C., Li, Q., Li, C., Zhang, B., Liu, W., Yang, Y., Liu, F., Liu, X., Hu, J. and He, J. (2018) Novel HVDC Spacers by Adaptively Controlling Surface Charges—Part III: Industrialization Prospects. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**, 1259-1266. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007555>
- [27] Li, C., Liu, B., Wang, J., *et al.* (2019) Novel HVDC Spacers in GIS/GIL by Adaptively Controlling Surface Charges-Insulation Compounding Scheme. 2019 *2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS) IEEE*, Denpasar, 1-4 October 2019, 268-271. <https://doi.org/10.1109/ICHVEPS47643.2019.9011050>
- [28] Wang, T.Y., Zhang, B.Y., Li, D.Y., *et al.* (2020) Metal Nanoparticle-Doped Epoxy Resin to Suppress Surface Charge Accumulation on Insulators under DC Voltage. *Nanotechnology*, **31**, Article ID: 324001. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/ab8b91>
- [29] Li, C., Lin, C., Hu, J., Liu, W., Li, Q., Zhang, B., He, S., Yang, Y., Liu, F. and He, J. (2018) Novel HVDC Spacers by Adaptively Controlling Surface Charges—Part I: Charge Transport and Control Strategy. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**, 1238-1247. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007054>
- [30] Li, C., Lin, C., Yang, Y., Zhang, B., Liu, W., Li, Q., Hu, J., He, S., Liu, X. and He, J. (2018) Novel HVDC Spacers by Adaptively Controlling Surface Charges—Part II: Experiment. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**, 1248-1258. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.007056>
- [31] 刘琳, 李晓昂, 张乔根, 梁成军, 李志兵. 沿面电场对 GIS 绝缘子闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2906-2913.
- [32] Winter, A. and Kindersberger, J. (2002) Surface Charge Accumulation on Insulating Plates in SF<sub>6</sub> and the Effect on DC and AC Breakdown Voltage of Electrode Arrangements. *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena IEEE*, West Lafayette, 17-20 October 2010, 757-761.
- [33] Liu, Y.Q., Wu, G.N., Gao, G.Q., *et al.* (2019) Surface Charge Accumulation Behavior and Its Influence on Surface Flashover Performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Filled Epoxy Resin Insulators under DC Voltages. *Plasma Science and Technology*, **21**, Article ID: 055501. <https://doi.org/10.1088/2058-6272/aafdf7>
- [34] Gao, Y., Wang, M., Zhao, N., *et al.* (2018) Surface Charge Distribution Measurement before and after DC Flashover: A Novel Insight to the Influence of Surface Charge on Flashover Voltage. 2018 *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, Athens, 10-13 September 2018, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2018.8642199>
- [35] Shao, T., Kong, F., Lin, H., *et al.* (2018) Correlation between Surface Charge and DC Surface Flashover of Plasma Treated Epoxy Resin. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**, 1267-1274. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.007132>
- [36] Wang, M.H., Gao, Y., Li, Z.Y., *et al.* (2018) Effect of Coating on Surface Charge Accumulation and DC Flashover of Epoxy/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites. 2018 *IEEE 2nd International Conference on Dielectrics (ICD)*, Budapest, 1-5 July 2018, 1-4. <https://doi.org/10.1109/ICD.2018.8514778>
- [37] Li, C., Hu, J., Lin, C., Zhang, B., Zhang, G. and He, J. (2017) Surface Charge Migration and DC Surface Flashover of Surface-Modified Epoxy-Based Insulators. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **50**, Article ID: 065301. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aa5207>
- [38] Du, B.X., Xu, R.R., Jin, L., *et al.* (2018) Improved Carrier Mobility Dependent Surface Charge and Flashover Voltage of Polypropylene Film under DC and Pulse Voltages. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **25**, 1014-1021. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006845>
- [39] 张博雅, 王强, 张贵新, 李金忠. SF<sub>6</sub> 中绝缘子表面电荷积聚及其对直流 GIL 闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1481-1487.
- [40] Xue, J., Li, Y., Dong, J., *et al.* (2020) Surface Charge Transport Behavior and Flashover Mechanism on Alumina/Epoxy Spacers Coated by SiC/Epoxy Composites with Varied SiC Particle Size. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **53**, Article ID: 155503. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ab6d1a>
- [41] Du, B.X., Liang, H.C. and Li, J. (2019) Surface Coating Affecting Charge Distribution and Flashover Voltage of

- Cone-Type Insulator under DC Stress. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **26**, 706-713. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.8726015>
- [42] Zhao, J., An, Z., Lv, B., *et al.* (2020) Characteristics of the Partial Discharge in the Development of Conductive Particle-Initiated Flashover of A GIS Insulator. *Energies*, **13**, 2481. <https://doi.org/10.3390/en13102481>
- [43] 高有华, 王彩云, 刘晓明, 王珊, 齐安智. 盆式绝缘子存在自由金属颗粒时的电场分析及其对沿面闪络的影响[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(8): 56-61.
- [44] 李伯涛. 直流 GIL 中金属微粒对绝缘子表面电荷积聚的作用机制研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
- [45] 王健, 李伯涛, 李庆民, 刘思华, 马国明. 直流 GIL 中线形金属微粒对柱式绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 213-222.
- [46] 李伯涛, 王健, 张圣富, 李庆民, 周勇, 李士动. 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.
- [47] 郭伟林. 盆式绝缘子表面绝缘特性的影响因素研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- [48] 邹钰洁, 唐忠, 晏武, 尹浩洁, 唐春童. 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.
- [49] Iwabuchi, H., *et al.* (2013) Influence of Tiny Metal Particles on Charge Accumulation Phenomena of GIS Model Spacer in High-Pressure SF6 Gas. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **20**, 1895-1901. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6633722>
- [50] 王邸博. 直流电压下聚四氟乙烯表面电荷的聚散及其对闪络特性的影响[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- [51] Wang, H., Xue, J.Y., Chen, J.H., Deng, J., Zhang, G.J. and Meng, S.X. (2019) Effects of Metal Particle Material on Surface Flashover Performance of Alumina-Filled Epoxy Resin Spacers in SF6/N2 Mixtures under DC Voltage. *AIP Advances*, **9**, Article ID: 085212. <https://doi.org/10.1063/1.5110976>
- [52] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 李星, 殷禹, 毕建刚, 崔博源, 牛勃. 运行工况下交流 GIS 绝缘子表面微金属颗粒运动诱发沿面闪络的研究[J]. 电网技术, 2020, 44(4): 1596-1602.
- [53] 王健. 直流 GIL 金属微粒的荷电运动机制与治理方法研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [54] 杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [55] Li, C., He, J. and Hu, J. (2016) Surface Morphology and Electrical Characteristics of Direct Fluorinated Epoxy-Resin/Alumina Composite. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **23**, 3071-3077. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2016.7736871>
- [56] Sudarshan, T.S. and Dougal, R.A. (1986) Mechanisms of Surface Flashover along Solid Dielectrics in Compressed Gases: A Review. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, **EI-21**, 727-746. <https://doi.org/10.1109/TEI.1986.348922>
- [57] Li, C., Zhu, Y. and Hu, J. (2020) Charge Cluster Triggers Unpredictable Insulation Surface Flashover in Pressurized SF6. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/abb38f>
- [58] Li, C., Hu, J., Lin, C. and He, J. (2017) The Potentially Neglected Culprit of DC Surface Flashover: Electron Migration under Temperature Gradients. *Scientific Reports*, **7**, Article No. 3271. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03657-1>
- [59] Li, S., Huang, Y., Min, D., *et al.* (2019) Synergic Effect of Adsorbed Gas and Charging on Surface Flashover. *Scientific Reports*, **9**, Article No. 5464. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41961-0>