

直流气体绝缘输电线路关键问题及装备研发现状综述

梁芳蔚¹, 张长虹², 吕金壮², 梁作栋¹, 庄伟建¹, 陈庚³,
范贤浩¹, 李传扬¹, 何金良¹

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心, 广州 510663; 3. 华北电力大学高电压和电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206)

摘要: 直流气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)可解决特殊地理环境下输电走廊空间限制问题,为构建“双碳”目标下中国未来能源结构提供装备基础。文中回顾了中国在直流GIL方面的研究进展,包括表面电荷及金属微粒动力学与抑制理论、导体表面形貌诱发的微电离理论等关键科学问题,以及绝缘件设计、微粒捕捉器设计等技术创新。此外,简要介绍了近年来中国在直流GIL的装备研发及设备评价标方面的进展。文中内容为未来直流GIL的研发及应用提供了参考。

关键词: 直流GIL; 表面电荷; 沿面闪络; 金属颗粒; 导体粗糙度

Review of Key Problems and Development Status of DC Gas Insulated Transmission Line

LIANG Fangwei¹, ZHANG Changhong², LYU Jinzhuang², LIANG Zuodong¹, ZHUANG Weijian¹,
CHEN Geng³, FAN Xianhao¹, LI Chuanyang¹, HE Jinliang¹

(1. State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Maintenance & Test Center of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China; 3. Beijing Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: DC gas insulated metal-enclosed transmission line (GIL) can solve such problem as the space limit of the transmission corridor under special geographical environment and provide facility foundation for constructing the ‘carbon peaking and carbon neutrality’ target. In this paper, the development progress of DC GIL in China is reviewed, including surface charge, metal particle kinetics and inhibition theory, the key scientific issue such as micro ionization theory induced by the conductor surface morphology, as well as such technical innovation as design of insulation part and of particle trapper. Moreover, the progress of DC GIL equipment development and evaluation in China in recent years is simply introduced. The contents in this paper can provide reference for the development and application of DC GIL in the future.

Key words: DC GIL; surface charge; surface flash-over; metal particle; conductor roughness

0 引言

中国一次能源主要分布于西北,然而,围绕能源基地的大型发电中心大都远离东南沿海的用电负荷中心。随着城市化的发展,大都市用电需求日益增长。在这种新型供电形式下,有必要发展大功率、远距离直流输电技术。然而,远距离输电走廊面临地理环境复杂、气象条件恶劣、环境保护严格

及输电管廊紧缺等问题。此外,为推动发展新能源,早日实现“碳达峰、碳中和”目标,需要发展海上风电等新能源。《“十四五”规划》将海上风电的发展作为未来能源结构建设的重要战略,预计2022年至2025年,新增海上风电装机容量超过300 GW^[1]。直流GIL凭借其优势可大量缩减中、远海海上风电平台体积,降低运维成本。因此,发展紧凑型直流输电装备是实现未来中国新型电网建设迫切需求

的关键装备。

气体绝缘金属封闭输电线路(gas insulated metal-enclosed transmission line, GIL)具有输送容量大、占地面积小、运行稳定性高、环境友好等优点^[2]。GIL采用金属封闭式结构,体积小、可靠性高、电磁辐射低、环境影响小,可直埋于地下或隧道,可解决特殊地理环境下的输电难题,是架空输电线路与电缆的有效替代方案^[3-4]。此外, GIL有利于减少换流站占地面积,实现换流站布置紧凑化,从而降低海上风电平台的体积与重量,极大地降低投资成本。然而,受绝缘子表面电荷积聚、金属微粒运动、电网供电需求以及政府政策驱使等因素的影响,直流 GIL 发展缓慢^[5-6]。在中国,围绕直流 GIL 关键科学问题及技术难题的研究已经进行了十多年,在电荷积聚理论、微粒动力学、 ± 500 kV 及以下电压等级气体绝缘组合电器设备(gas insulated switchgear, GIS)等相关

领域开展了一些原创性工作。但是,仍缺乏 ± 500 kV 及以上电压等级的商业 GIL。

文中总结了直流 GIL 存在的关键技术问题,包括:绝缘件设计、表面电荷抑制、金属微粒抑制、导体粗糙度标准等。针对上述问题,概述了当前研究状况。此外,介绍了直流 GIL 的装备研发情况以及设备评价标准的制定。通过文中综述 GIL 发展现状,为直流 GIL 的研发提供参考。

1 关键科学与技术问题

国内高校及研究机构围绕 DC GIL 关键技术已开展了大量的机理研究,为进一步实现 DC GIL 的商业化发展,应当由理论研究层面逐步聚焦至设备研发层面,实现理论基础与科技技术的产品化。DC GIL 应重点突破的关键技术问题及技术背后需要解决的科学难题见表 1。

表 1 DC GIL 面临的关键技术问题及科学难题

Table 1 Key technical and scientific challenges faced by DC GIL

项目	工程技术问题	对应的科学难题
绝缘件设计	不同工况下电学与力学性能优异的直流盆式绝缘子设计方案 低电荷密度直流盆式绝缘子力学性能提升关键技术	电、热、力多因子耦合关系
表面电荷抑制	绝缘子表面电荷抑制技术 如何评估电荷抑制技术的可靠性与有效性	表面电荷积聚来源与消散途径
金属微粒抑制	直流 GIL 微粒抑制技术(微粒捕捉器、表面覆膜等) 如何评估抑制技术的抑制效果	直流电压下金属微粒动力学
导体粗糙度选取	直流 GIL 微粒抑制技术(微粒捕捉器、表面覆膜等) 如何评估抑制技术的抑制效果	绝缘子表面电荷积聚
DC GIL 产品鉴定	如何确定 DC GIL 产品考核内容 如何制定 DC GIL 产品型式试验的考核标准	DC GIL 的安全性与可靠性

1.1 绝缘子设计

绝缘子为高压导体提供电气绝缘与机械支撑,是直流 GIL 的关键部件。直流电压下,绝缘子的绝缘失效是阻碍直流 GIL 发展的关键问题之一^[7]。在直流条件下,电阻性电场的分布不可避免地导致表面电荷的积聚,从而畸变原有电场分布,可能触发沿面闪络^[8]。因此,直流绝缘子的设计具有重要意义。直流绝缘子设计的目标是综合优化各种运行条件下的电气与机械性能。直流绝缘子的设计是基于许用准则,采用仿真分析,结合智能优化算法从而确定绝缘子几何形状。

目前,直流绝缘子设计标准尚不明确,交流 GIL 电场强度的设计标准见表 2。直流绝缘子的设计准则是在满足交流绝缘子设计标准条件下,尽量降低电场强度。然而,氧化铝环氧树脂在直流电压下的电学性能与交流电压下的截然不同^[9]。环氧树脂在

直流电压下的体电场强度通常高于交流电压下。我们团队的研究表明,相比于交流电树,直流电树需要更高的触发电压,且生长缓慢。由于直流绝缘子设计标准不明确,使得设计在不同运行条件下机电性能优异、可靠性高的直流绝缘子变得异常困难。

表 2 交流 GIL 电场强度设计标准

Table 2 AC GIL field strength design standard

考核位置	许用电场强度/ (kV·mm ⁻¹)	运行条件
屏蔽罩、母线表面	24	雷电冲击电压 额定相电压,有效值
绝缘子内部	3	
接地外壳内表面	14	雷电冲击电压
绝缘子外表面	12	雷电冲击电压

直流绝缘子的设计方法主要包括参数化设计、智能优化算法^[10-11]。在温度梯度下,直流盆式绝缘

子与三支柱绝缘子的最大电场强度急剧增大^[12-14]。增大绝缘距离是降低直流绝缘子电场强度的有效方法。然而,直流GIL的尺寸、高压导体与外壳直径的比值都受到了一定范围的限制,因此绝缘距离有限^[15]。另一种有效的直流绝缘子设计方法是几何形状的优化。对于直流盆式绝缘子,倾斜角度具有较大的调整范围,几何形状优化方法可以显著降低温度梯度下的最大电场强度^[16-18]。然而,直流三支柱绝缘子的几何形状的调整范围相对较小,几何形状优化效果不明显^[19-20]。此外,单纯的几何形状优化无法降低温度梯度下支柱绝缘子内部嵌入电极表面的电场强度。因此,基于纳米掺杂的材料改性,可作为直流绝缘子优化设计的重要手段。通过掺杂非线性SiC,从而自适应地均匀化电场分布,避免局部电场集中。

1.2 表面电荷

1.2.1 表面电荷积聚

准确地解析绝缘子表面电荷积聚特性是深入了解表面电荷输运行为的基础。绝缘子表面电荷积聚遵循场相关理论^[21]。随着外施电场的增大,表面电荷积聚途径由固体侧转变为气体侧,见图1^[21]。在低电场条件下,表面电荷积聚呈不规则分布。这主要是因为导致表面电荷积聚的因素众多,且没有一个主导因素。在高电场下,表面电荷积聚与绝缘子表面法向电场分布一致,说明气体侧的电离是表面电荷积聚的主要因素。

图1 场依赖效应电荷积聚模型

Fig. 1 Field dependent effect charge accumulation model

1)电荷积聚主导途径。绝缘子表面电荷积聚的途径主要包括:通过绝缘子本体的传导电流、沿面电流以及气体侧的传导电流。不同试验条件下,电荷积聚的主导途径截然不同。当表面电荷积聚以气体侧传导电流为主导时,电荷积聚主要由表面电场的法向分量 E_n 决定。在大多数情况下,表面电荷为随机分布的电荷斑点。针对绝缘子凹面,表面电荷与外施电压极性相同^[22]。电荷量与气体压力密切

相关,气体压力的增加导致了表面电荷的降低。此外,电极表面抛光处理后,表面电荷可忽略不计。由此推断,电极粗糙表面引起的气体电离是导致表面电荷积聚的主要原因。也就是说,气体电离产生的带电粒子是表面电荷积聚的主要来源^[23]。气体电离的发生主要位于电极表面突出物、绝缘子表面杂质、高压电极附近三联合点等绝缘缺陷处。

当固体体电导率主导表面电荷积聚时,电荷分布与表面电场的法向分量一致^[17]。当法向电场 E_n 由绝缘子侧指向气体侧时,电荷为同极性。否则,异极性表面电荷积聚。此外,表面电荷呈均匀的环状分布^[24]。另一方面,当绝缘子表面电流主导表面电荷积聚时,电荷分布依赖于表面电场的切向分量 E_t 。不均匀的表面电导率是导致双极电荷随机分布的主要原因^[25]。

2)电荷分布特征。实际的GIL管道内部不可避免地存在绝缘缺陷,局部放电对绝缘子表面电荷的影响不容忽视。表面电荷分布时常受多条积聚途径的共同影响。因此,表面电荷分布特征主要包括:同极性的中心对称分布、随机极性的点状分布以及异极性为主的带状分布。随机分布的表面电荷斑点可分为单极性电荷斑点以及双极性电荷斑点^[26]。此外,均匀分布的电荷环集中分布于高压电极附近,电极注入电流成为表面电荷的主要来源。注入至绝缘子表面的电荷被表面陷阱捕获成为表面电荷,而注入至绝缘子本体的电荷沿着表面电场的法向分量迁移至绝缘子表面,形成表面电荷。对于随机分布的电荷斑点,其来源主要是气体侧绝缘缺陷导致的气体电离。由此推断,表面电荷分布特征对于解释表面电荷积聚过程至关重要,有助于提出表面电荷抑制方法。

1.2.2 表面电荷对闪络的影响

受气体、固体以及气固界面协同贡献的影响,沿面闪络由三联合点触发,沿气固界面传播。直流电压下压缩气体中闪络的触发涉及多相电荷输运的复杂竞争。对不同环境下的沿面闪络和气体击穿电压的比较表明,压缩气体中沿面闪络的最终形式是沿气相的等离子体流注放电,而固体的影响是触发后续放电的“诱导”因素^[27]。因此,发掘潜在的诱导因素有利于明确绝缘子沿面闪络机制。

李传扬等人利用粉尘图显示了直流电压下绝缘子上的电荷簇,见图2^[4]。随着施加电压的增加,电荷簇从点状簇发展为甜甜圈状簇,最后转变为带状簇。此外,电荷簇主要集中在沿面闪络痕迹附近。在压缩SF₆气体中,表面电荷的积聚触发了簇

边缘的流注放电。

图2 绝缘子表面电荷粉尘图

Fig. 2 Insulator surface charge dust diagram

表面电荷的极性对直流沿面闪络电压的影响不容忽视。近十年来研究工作中预沉积的表面电荷对沿面闪络电压的影响见图3^[28-33]。张冠军等人^[28]在110 kV的绝缘子表面上沉积-100 kV以下的表面电荷后,负极性沿面闪络电压仅-764 kV。邵涛等人研究了不同极性的表面电荷对沿面闪络的影响,结果表明,样品表面预置电荷后,闪络电压均降低。同极性电荷时,沿面闪络电压降低15%。异极性电荷下,降低25%。汪泓等人的研究表明,表面电荷积聚条件下,脉冲电压可降低23%^[33]。此外,邓军波等人在绝缘子表面不同位置涂覆环氧/SiC涂层,研究了表面电荷对闪络电压的影响^[34]。结果表明,高压电极附近的高电导率区域加速了表面电荷的消散,而接地电极附近以及样品中间部分的区域导致了表面电荷极性反转现象,电场进一步失真,沿面闪络电压降低。

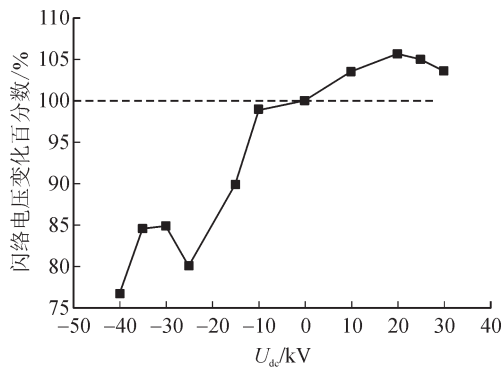


图3 表面电荷对直流沿面闪络的影响

Fig. 3 Effect of surface charge on DC surface flashover

绝缘子表面电荷积聚降低沿面闪络电压是制约直流气体绝缘输电线路广泛应用的关键因素之一。表面电荷对沿面闪络电压的影响,取决于电荷大小、极性及其分布位置。值得注意的是,绝缘子表面电荷在特定条件下,同样可提高沿面闪络电压。

1.2.3 表面电荷的抑制

绝缘子表面电荷的积聚畸变局部电场,降低沿面闪络电压。因此,有必要减少绝缘子表面电

荷。李传扬等人于2020年提出了“大坝—洪水”模型,见图4^[35-36]。其中,绝缘子表面电荷抑制措施包括:泄洪沟—促进电荷消散、加固堤坝—抑制电荷注入、疏浚—优化局部电场、综合治理—电荷自适应。

图4 “大坝—洪水”模型

Fig. 4 ‘Dam flood’ model

1)促进电荷消散。根据大坝模型,应用材料表面处理技术可以提高表面电荷的消散速率,从而减少绝缘子表面电荷。常见的材料表面处理方法包括直接氟化、等离子体表面处理、表面涂层等^[37-44]。杜伯学等人对各种绝缘子片进行了氟化处理,如环氧树脂、聚丙烯以及聚酰亚胺等。通过直接氟化,绝缘子表面电荷的消散速度提高^[45-47]。这主要是因为随着氟化层的形成,绝缘子表面陷阱能级变浅,表面电导率提高。张博雅等人将绝缘子表面分别氟化处理0、15、30、60 min,见图5^[48]。大量电荷积聚于未处理的绝缘子表面。氟化处理后,由于表面电导率的增大,表面电荷分布更加均匀,电荷密度明显降低。

图5 氟化为0、15、30、60 min的绝缘子物的表面电荷积聚

Fig. 5 Surface charge accumulation of insulators with fluoride for 0 min, 15 min, 30 min and 60 min

等离子体表面处理是改变绝缘子表面介电特性的有效方法,如深/浅陷阱之间的比率,载流子迁

移率以及表面电导率^[49-51]。邵涛等人对环氧基聚合物等离子体处理 3 min 后, 表面电导率为 1.4×10^{-17} S/m, 相比于未处理样品高 2 个数量级。等离子体中的自由基与环氧表面形成的碳基在材料表面产生了更浅的电荷陷阱, 从而提高了表面电导率, 促进了表面电荷的消散。

表面涂层是另一种通过促进电荷消散过程以减少表面电荷积聚的有效方法。典型的表面涂层技术包括: 磁控溅射、喷涂以及浸渍。如: 纳米 TiO_2 /EP 涂层。当纳米 TiO_2 掺杂质量分数为 1%~3% 时, 表面电荷主要积聚于高压电极附近, 当含量提高至 5%~7% 时, 表面电荷主要积聚于接地电极附近^[52]。

2) 抑制电荷注入。在气体中没有微放电时, 绝缘子表面电荷的积聚主要是由通过绝缘子本体的传导电流决定。也就是说, 大多数表面电荷来自于固体侧电荷的注入。因此, 通过降低绝缘子体电导率, 可以减少表面电荷的积聚。掺杂纳米粒子是降低聚合物电导率最常用的方法之一。纳米粒子处于孤立分散状态时, 由于粒子与环氧基材之间界面区域的存在抑制了载流子的运动, 环氧复合材料的电导率降低^[53]。研究表明, 当 SiO_2 的质量分数为 1% 时, 复合材料的体积电阻率提高了 27%^[54]。此外, 环氧树脂中掺杂 Cr_2O_3 , 可引入深陷阱, 抑制高压电极注入电荷^[55-56]。张博雅等人在环氧树脂中掺杂适量的纳米富勒烯 C_{60} , 同样可降低体电导率以抑制表面电荷的积聚^[57]。值得注意的是, 电极表面的微凸起处的电场强度较大, 容易触发微放电。因此, 优化电极表面粗糙度可以最少化气体电离产生的电荷源^[58-59]。

3) 优化局部电场。DC GIL 绝缘子的表面电荷分布是气体传导电流、沿面传导电流以及体传导电流共同作用的结果。由于金属微粒、微突出物、温度梯度等各种运行条件的影响, 表面电荷积聚过程异常复杂, 时常导致不规则的表面电荷积聚以及不可预测的局部电场畸变。具有非线性电导率的绝缘材料可以随着电场的增强而自适应地提高绝缘子体积电导率。因此, 当电场畸变达到非线性阈值时, 非线性材料可以释放积聚的表面电荷。当前, 掺杂碳化硅或氧化锌微粒, 是产生非线性电导率的有效方案。

通过适当的表面涂层, 同样可以产生具有非线性导电性的绝缘材料^[60-61]。具有非线性电导率的绝缘材料可以自适应地释放积聚的表面电荷, 但半导体微粒高浓度的掺杂可能增大泄漏电流, 降低环氧树脂的击穿强度。随着涂层 SiC 掺杂含量的增加,

绝缘子表面电荷先增多后减少^[62]。由此推断, 具有非线性电导率的 SiC/环氧涂层可有效抑制表面电荷的积聚。

4) 电荷自适应。根据大坝模型, 结合绝缘子形状优化以及非线性导电材料技术设计电荷自适应控制绝缘子, 可以控制并衰减表面电荷, 实现表面电荷的调控。李传扬等人设计了表面电荷自适应控制绝缘子(CACS), 由中心导体周围的“绝缘区”以及接地电极附近的“电荷自适应区”组成^[63-65]。绝缘子的“绝缘区域”是由环氧树脂/氧化铝制成的复合材料, “电荷自适应区域”是环氧树脂/碳化硅复合材料。当“电荷自适应区域”的表面电荷积聚达到一定程度时, 就会主动释放多余的表面电荷。

1.3 金属微粒

由于直流 GIL 多为滑动插拔式结构以及螺栓固定结构, 在生产、运输、安装、维护过程中的摩擦与振动可能产生金属微粒。金属微粒在电场力、重力等作用下运动, 导致局部电场急剧增大。当金属微粒粘附于绝缘子表面时, 可能导致沿面闪络。因此, 为了减少金属微粒对绝缘的影响, 确保设备的安全可靠运行, 有必要揭示金属微粒在直流电场下的运动特性, 实现粒子的捕获。

对粒子的运动特性的观测通常基于场强等效原理, 使用缩放模型以模拟 GIL 腔体内部电场分布。在大多数情况下, 金属微粒在电极之间往复跳跃。对于同轴电极结构, 负直流电压下, 线性与块状粒子出现“飞萤”现象, 围绕高压电极反复碰撞, 且远离接地电极, 见图 6^[66-68]。这些特殊的运动现象, 导致直流 GIL 中金属微粒的捕获与去除极为困难。

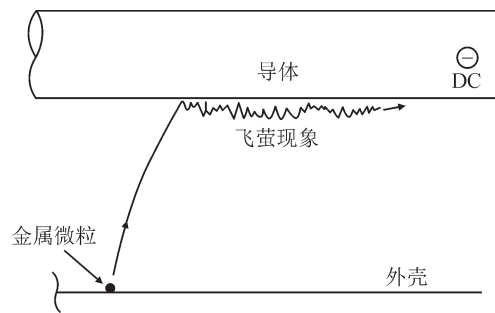


图6 金属微粒“飞萤”现象

Fig. 6 Phenomenon of metal particles ‘flying fireflies’

电极表面涂层与金属微粒捕捉器的采用是减少金属微粒对绝缘影响的重要手段。研究表明, 表面涂层可通过降低粒子的电荷以抑制粒子脱落, 从而避免粒子在设备中的运动^[69-71]。粒子捕捉器通过设计低电场区域, 降低入陷粒子的运动活性, 从而实现金属微粒的捕获。当前, 交流 GIL 中采用的微

粒捕捉器,主要包括网格型、条式、孔型等。然后,直流电压下,粒子的运动速度大,随机性强。因此,交流 GIL 中采用的粒子捕捉器的捕获效率较低,无法满足直流设备。

为了进一步发展直流粒子捕捉器,许多学者建立了考虑库仑力、粘性阻力、重力等条件下的金属微粒运动模型^[72]。基于直流电压下金属微粒的运动特性,分析了不同几何结构的捕捉器的捕获效率,并优化了捕捉器的尺寸参数^[73-76]。对于如何评估微粒抑制技术的有效性,尚未形成统一的评价标准。通过计算试验结束时陷阱捕获的微粒数量占初始微粒的百分比,以评估微粒抑制技术的有效性,必须考虑与绝缘子表面碰撞或粘附的微粒的影响。

1.4 导体粗糙度

GIL 的导体表面具有一定的粗糙度,不可避免地导致导体表面电场分布不均匀。随着电压等级以及气体压力的提高,导体表面微观形貌不规则引起的气体放电不容忽视^[77]。然而,直流 GIL 导体表面粗糙度缺乏设计标准,仅参照交流 GIL 设计标准,采用算术平均高度 Ra 表征导体表面的不均匀性。高压导体的表面 Ra 不大于 $6.3\ \mu\text{m}$,外壳内表面 Ra 不大于 $50\ \mu\text{m}$ ^[78]。导体表面粗糙度过高会显著降低绝缘性能,而表面粗糙度过小会增加设备制造成本。因此,有必要基于导体表面粗糙度对绝缘性能的影响制定表面粗糙度评价标准。

研究表明,交流电压下, SF_6 的气体击穿电压与导体表面粗糙度呈负相关^[77-78]。 SF_6 气体对导体表面粗糙度的敏感性随着气体压力的增加而增大。为了减少二氧化碳的排放,环保型气体逐渐替代纯 SF_6 的使用。环保气体采用 N_2 与 CO_2 作为缓冲气体,可有效降低混合气体对高电场的敏感性。此外,在直流电压下,极性效应不容忽视。这主要是由于正负极性的空间电荷的运动差异,电极在负电压下更容易发生电晕,而负击穿电压大于正击穿电压。由此推断,导体表面粗糙度越高,导体表面电场分布越不均匀,极性效应越明显。值得注意的是,高电场强度下电极表面的微放电与场致发射是直流 GIL 绝缘子表面电荷积聚的重要来源^[79-80]。因此,导体表面微放电与场致发射不容忽视。

算术平均高度 Ra 提供了一种导体表面粗糙度评估方法。然而,算术平均高度 Ra 无法反映表面局部突起。研究表明,表面局部高场强的比例决定了气体侧传导电流的大小,而不是算术平均高度 Ra 。因此,有必要综合考虑表面平均粗糙度及其峰值,以表征直流 GIL 导体表面形貌^[81]。

现有的 AC GIL 导体加工和粗糙度评估方法直接应用于 DC GIL 可能导致局放增多、绝缘子表面电荷积聚,如何制定直流气体设备的导体粗糙度评价标准,优化导体加工方法,需要更多关注。

2 装备研发现状

2.1 直流 GIL 研发现状

由于缺乏直流 GIL 的工程应用,仍缺乏成熟的 $\pm 500\ \text{kV}$ 直流 GIL。国内的产品研发相对落后且缺乏设备评价标准,尚未提出适用于直流 GIL 的在线监测技术。

华北电力大学屠幼萍等人以电荷积聚饱和后的异极性雷电冲击电压作用下沿面切向电场强度为评价依据,设计了 $\pm 100\ \text{kV}$ 直流盆式绝缘子,提出了材料选择、场强控制以及微粒陷阱等环保型直流输电管道样机设计关键技术;确定了环境友好型替代气体 SF_6/N_2 、 $\text{C}_3\text{F}_7\text{CN}/\text{CO}_2$ 混合气体在直流气体绝缘管道中的应用原则;此外,研制了 $\pm 100\ \text{kV}$ 环保型直流输电管道样机,通过了力学试验、气密性试验、直流耐压试验、直流叠加雷电冲击试验等,见图 7。

图 7 $\pm 100\ \text{kV}$ 环保型直流 GIL

Fig. 7 $\pm 100\ \text{kV}$ environmentally friendly DC GIL

清华大学何金良与江苏金鑫电器有限公司产学研合作,设计了 $\pm 320\ \text{kV}$ 盆式绝缘子、三支柱绝缘子以及金属颗粒捕捉器,通过了短时直流耐压、极性反转、直流叠加冲击等考核试验,见表 3^[81]。此外,研发的 $\pm 320\ \text{kV}$ 直流 GIL 样机分别在 $0.4\ \text{MPa}\ \text{SF}_6$ 、 $0.8\ \text{MPa}\ 4\%\text{C}_3\text{F}_7\text{N}/96\%\text{CO}_2$ 条件下,考核通过了 15 天-384 kV 的直流耐压,见图 8^[81]。

2.2 设备评价标准

2021 年底,CIGRE 联合工作组 D1/B3.57 发布了《TB 842 高压直流气体绝缘系统绝缘试验报告》,为直流 GIL 的开发与性能评估提供了重要参考^[82]。此外,电气与机械性能需满足 IEC 62271 标准^[83]。CIGRE JWG D1/B3.57 提出了“样机安装试验”作为验证测试^[82]。样机安装试验的主要目的是确认系统在实际

表3 ± 320 kV 直流 GIL 样机测试方案
Table 3 ± 320 kV DC GIL prototype testing plan

试验名称	试验内容	试验结果	结论
短时直流耐压	$1.5 \times U_n = 480$ kV, 正/负极性各持续 1 min	无闪络现象	通过测试
直流耐压+局部放电	$U_{DC} = 1.2 U_n = 384$ kV, 正/负极性各持续 1 min, 直流局放 30 min, 超过 1 000 pC 小于 20 次	超过 1 000 pC 的局放次数为 0	通过测试
直流耐压叠加雷电冲击	$1.0 \times U_n = 320$ kV, U_{DC} 持续 90 min 后施加雷电冲击, 正负冲击各 3 次, 雷电冲击电压: $\pm 1\ 175$ kV	无闪络现象	通过测试
极性反转	$U_{DC} = 1.275 U_n = 408$ kV, $-U_{DC}$ 90 min $\rightarrow +U_{DC}$ 90 min $\rightarrow -U_{DC}$ 45 min, 2 min 内完成极性反转, 无闪络	无闪络现象	通过测试
长期直流耐压	$U_{DC} = -1.2 U_n = -384$ kV, 15 天。	无闪络现象	通过测试

图8 ± 320 kV 环保型直流 GIL 样机

Fig. 8 ± 320 kV environmentally friendly DC GIL prototype

使用条件下的可靠性。实际使用条件包括: 测试对象中包括的组件、安装和调试程序、介电、热以及机械应力、典型应力测试等^[84]。因此, 样机安装试验不是额外的型式试验, 而是在成功完成型式试验后进行一次非强制性试验, 以验证系统的有效性。

全球首个推荐的高压直流 GIS 样机安装试验测试标准单元, 见图 9^[85]。高压直流 GIS 测试单元由母线环组成, 通过套管与高压电源连接。为了达到高负载条件下的典型热状态, 可采用电流互感器于母线环中感应交流电流实现温升。此外, 该测试原理同样适用于 550 kV 直流 GIL。

3 结论

在过去的 10 年中, 中国在直流 GIL 领域从基础研究到产业化发展取得了巨大进展。在基础研究

图9 高压直流 GIS 样机安装试验测试单元

Fig. 9 High voltage DC GIS prototype installation test unit

层面, 从关注绝缘子表面电荷测量技术开始, 基于材料改性的表面电荷抑制方法得到了进一步验证。近年来, 在金属微粒动力学方面的研究, 为粒子的捕获提供了理论依据。此外, 导体粗糙度的影响逐渐被关注。在产业化发展方面, 中国高压开关公司已成功开发了 ± 100 、 ± 320 kV 直流 GIL, 且通过了相关型式试验。然而, 相比于国外高压开关公司, 尚未开展长期的负荷评估。此外, 仍缺乏高压直流 GIL 的在线监测技术以及直流 GIL 电缆终端。对未来该领域的研究提出如下建议:

1) 在地方政府的扶持下, 积极同设备厂商开展产学研合作, 以实现更高电压等级(如: ± 500 、 ± 800 kV)的直流 GIL 产品研发, 提高输送功率, 从而降低投资成本, 打破国外技术封锁。

2) 研发高电压等级的直流 GIL, 必须尽可能减小产品几何尺寸, 以提高经济效益。此外, 更小的占地面积可降低海上风电平台的面积, 可有效替代穿墙套管, 从而大幅度降低海上风电平台的投资成本。

3) 为助力“双碳”目标, 新一代直流 GIL 应减少温室气体 SF_6 的使用。高气压的洁净空气或高真空设计, 有望成为未来的有效解决方案。

参考文献:

- [1] LI C, ZHANG C, LYU J, et al. China's 10-year progress in DC gas-insulated equipment: From basic research to industry perspective[J]. iEnergy, 2022, 1(4): 400-433.
- [2] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707.
XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage

- Engineering, 2017, 43(3): 699-707.
- [3] 宋晓斌, 陈剑青, 李天华, 等. 核电厂运行中 GIL 竖向形变的监控与校正策略[J]. 电气技术, 2017, 18(5): 82-86.
SONG Xiaobin, CHEN Jianqing, LI Tianhua, et al. Monitoring and correction strategy of GIL's vertical deformation in operation of nuclear power plant[J]. Electrical Engineering, 2017, 18(5): 82-86.
 - [4] 律方成, 刘宏宇, 李志兵, 等. 直流电压下 SF₆ 气体中电极覆膜对金属微粒启举的影响机理[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 239-247.
LYU Fangcheng, LIU Hongyu, LI Zhibing, et al. Influence mechanism of dielectric coated electrodes on metallic particle lift-off in SF₆ gas under DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 239-247.
 - [5] 周宏扬, 马国明, 刘姝嫔, 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, 37(4): 1251-1260.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, LIU Shupin, et al. Study on surface charges accumulation on insulator and its effects on the surface electrical field in DC - GIL with electro-thermal coupling model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1251-1260.
 - [6] 林川杰, 李传扬, 张贵新, 等. 盆式绝缘子表面电荷反演算法综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6654-6663.
LIN Chuanjie, LI Chuanyang, ZHANG Guixin, et al. Review and prospect of surface charge inversion algorithm of cone-type spacer based on surface potential measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6654-6663.
 - [7] LI C, YANG Y, XU G, et al. Insulating materials for realizing carbon neutrality: Opportunities, remaining issues and challenges[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 610-632.
 - [8] LI C, LIN C, CHEN G, et al. Field-dependent interface charging phenomenon based on dominant charge behaviors[J]. Applied Physics Letters, 2019, 114(20): 202904-1-202904-4.
 - [9] QIANG D, HE M, CHEN G, et al. Influence of nano-SiO₂ and BN on space charge and AC/DC performance of epoxy nanocomposites[C]//2015 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). USA: IEEE, 2015: 492-495.
 - [10] ZHANG B, ZHONG J Y, HAN G H, et al. Modification of HVDC GIS/GIL basin insulators based on electrical and mechanical collaborative design[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). China: IEEE, 2020: 1-5.
 - [11] 贾云飞, 高璐, 汲胜昌, 等. 1 100 kV 气体绝缘金属封闭输电线路用三支柱绝缘子电气性能优化[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(7): 168-179.
JIA Yunfei, GAO Lu, LIU Shengchang, et al. Electrical performance optimization for tri-post insulator on 1 100 kV gas-insulated metal-enclosed transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(7): 168-179.
 - [12] 胡琦, 李庆民, 刘智鹏, 等. 温度梯度下直流 GIL 三支柱绝缘子电荷积聚对电场分布的影响分析[J]. 2021, 40(7): 20-27.
HU Qi, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Impact analysis of charge accumulation on electric field distribution of DC GIL tripost insulator under temperature gradients[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(7): 20-27.
 - [13] LI C, HU J, LIN C, et al. The potentially neglected culprit of DC surface flashover: Electron migration under temperature gradients[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3271.
 - [14] 晏武, 张周胜, 邓保家, 等. 温度和正极性电压对直流 GIL 盆式绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 2019, 45(12): 3889-3897.
YAN Wu, ZHANG Zhousheng, DENG Baojia, et al. Influence of temperature and positive voltage on surface charge accumulation for the disc insulator of GIL under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3889-3897.
 - [15] 贾志杰, 甘德刚, 李晶, 等. ± 500 kV 气体绝缘金属封闭输电线路绝缘尺寸设计[J]. 2011, 35(8): 192-196.
JIA Zhijie, GAN Degang, LI Jing, et al. Design of insulation dimension for ± 500 kV DC gas insulated transmission line[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 192-196.
 - [16] LIANG Z, LIN C, LIANG F, et al. Designing HVDC GIS/GIL spacer to suppress charge accumulation[J]. High Voltage, 2022, 7(4): 645-651.
 - [17] MA G, ZHOU H, LI C, et al. Designing epoxy insulators in SF₆-filled DC-GIL with simulations of ionic conduction and surface charging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3312-3320.
 - [18] 孟维东, 汤伟, 魏俊梅, 等. 高压直流 GIS 母线绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 80-86.
MENG Weidong, TANG Wei, WEI Junmei. Research on insulation performance of busbar in HVDC GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(5): 80-86.
 - [19] 胡琦, 李庆民, 刘智鹏, 等. 基于表层梯度电导调控的直流三支柱绝缘子界面电场优化方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(7): 1856-1865.
HU Qi, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Interfacial electric field optimization of DC tripost insulator based on gradient surface conductance regulation. transactions of China electrotechnical society[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7): 1856-1865.
 - [20] TU Y, CHEN G, LI C, et al. ± 100 kV HVDC SF₆/N₂ gas-insulated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 735-744.
 - [21] 李传扬, 林川杰, 陈庚, 等. 高压直流盆式绝缘子气—固界面电荷行为研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(6): 2016-2025.

- LI Chunyang, LIN Chuanjie, CHEN Geng, et al. Review of gas-solid interface charging phenomena of HVDC spacers[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2016-2025.
- [22] 王 强, 张贵新, 王新新. 直流电压下气固交界面表面电荷积聚现象的实验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 594-598.
- WANG Qiang, ZHANG Guixin, WANG Xinin. Surface charge accumulation phenomenon at the gas-solid interface under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 594-598.
- [23] PAN C, TIANG J, WANG D B, et al. Influence of temperature on the characteristics of surface charge accumulation on PTFE model insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1210-1219.
- [24] 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.
- ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHAO Shujing, et al. Effect of temperature on charge accumulation on insulator in DC-GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6675-6681.
- [25] 薛建议. 直流气体绝缘输电管道气固界面电荷的积聚特性与涂层六法调控[D]. 西安: 西安交通大学, 2020.
- XUE Jianyi. Gas - solid interface charge accumulation characteristics and regulation by coating method in gas insulated line under DC voltage[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong university, 2020.
- [26] ZHANG B Y, QI Z, ZHANG G X. Charge accumulation patterns on spacer surface in HVDC gas-insulated system: dominant uniform charging and random charge speckles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 1229-1238.
- [27] LI C, LIN C, ZHANG B, et al. Understanding surface charge accumulation and surface flashover on spacers in compressed gas insulation[J]. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1152-1166.
- [28] 张博雅, 王 强, 张贵新, 等. SF₆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.
- ZHANG Boya, WANG Qiang, ZHANG Guixin, et al. Surface charge accumulation on insulators in SF₆ and its effects on the flashover characteristics of HVDC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1481-1487.
- [29] LI C H, HE J. Surface charge migration and DC surface flashover of surface-modified epoxy-based insulators[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2017, 50(6): 065301.
- [30] WANG F, LIANG F, CHEN S, et al. Effect of surface charges on flashover voltage-an examination considering charge decay rates[J]. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, 2021, 28(3): 1053-1060.
- [31] LIU Y, WU G, GAO G, et al. Surface charge accumulation behavior and its influence on surface flashover performance of Al₂O₃-filled epoxy resin insulators under DC voltages[J]. Plasma Science and Technology, 2019, 21(5): 055501.
- [32] MA J, TAO F, MA Y, et al. Quantitative analysis on the influence of surface charges on flashover of insulators in SF₆[J]. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 274-281.
- [33] WANG F, QIU Y, PFEIFFER W, et al. Insulator surface charge accumulation under impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(5): 847-554.
- [34] DONG J H, XUE J Y, CHEN J H, et al. Mechanism of SiC coating on surface charge behavior of epoxy/alumina spacers[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE) ICHVE. China: IEEE, 2020: 1-4.
- [35] LI C, FU J, ZI Y, et al. Insulator surface charge behaviors: From hazards to functionality[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2022, 38(3): 6-14.
- [36] ZHANG Z, WANG Z, TEYSSERE G, et al. Gas-solid interface charges tailoring techniques: What we grasped and where to go[J]. Nanotechnology, 2021, 32(12): 122001-122032.
- [37] DU B, DU Q, LI J, et al. Carrier mobility and trap distribution dependent flashover characteristics of epoxy resin[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 466-471.
- [38] LIU Y, AN Z, YIN Q, et al. Rapid potential decay on surface fluorinated epoxy resin samples[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(16): 164105.
- [39] AN Z, YIN Q, LIU Y, et al. Modulation of surface electrical properties of epoxy resin insulator by changing fluorination temperature and time[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 526-534.
- [40] SHAO T, KONG F, LIN H, et al. Correlation between surface charge and DC surface flashover of plasma treated epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1267-1274.
- [41] GAO Y, DU B, CUI J, et al. Effect of gamma-ray irradiation on lateral charge motion on surface of laminated polymer insulating materials[C]//2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: [s.n.], 2011: 153-156.
- [42] WANG F, LIANG F, ZHONG L, et al. Short-time X-ray irradiation as a non-contact charge dissipation solution for insulators in HVDC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 704-709.
- [43] HUANG Y, MIN D, XIE D, et al. Surface flashover performance of epoxy resin micro composites influenced by ozone treatment[C]// International Symposium on Electrical

- Insulating Materials. [S.l.]:[s.n.],2017:235-238.
- [44] TU Y, ZHOU F, CHENG Y, et al. The control mechanism of micron and nano SiO₂/epoxy composite coating on surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1275 - 1284.
- [45] DU B, LI Z. Hydrophobicity, surface charge and DC flashover characteristics of direct-fluorinated RTV silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 934-940.
- [46] DU B, HUANG P, XING Y. Surface charge and flashover characteristics of fluorinated PP under pulse voltage[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(1): 18-24.
- [47] DU B, LI Z. Surface charge and DC flashover characteristics of direct - fluorinated SiR/SiO₂ nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(6): 2602-2610.
- [48] ZHANG B, ZHANG G, WANG Q, et al. Suppression of surface charge accumulation on Al₂O₃ - filled epoxy resin insulator under DC voltage by direct fluorination[J]. AIP Advances, 2015, 5(12): 127207.
- [49] SHAOT, YANGW, ZHANG C, et al. Enhanced surface flashover strength in vacuum of polymethylmethacrylate by surface modification using atmospheric-pressure dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(7): 071607-1-071607-5.
- [50] ZHANG C, LIN H, ZHANG S, et al. Plasma surface treatment to improve surface charge accumulation and dissipation of epoxy resin exposed to DC and nanosecond-pulse voltages[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2017, 50(40): 405203-1-405203-12.
- [51] SHAO T, LIU F, HAI B, et al. Surface modification of epoxy using an atmospheric pressure dielectric barrier discharge to accelerate surface charge dissipation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1557-1565.
- [52] TU Y, ZHOU F, JIANG H, et al. Effect of nano-TiO₂/EP composite coating on dynamic characteristics of surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1308-1317.
- [53] LI S, YIN G, BAI S, et al. A new potential barrier model in epoxy resin nanodielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1535 - 1543.
- [54] CHU P, ZHANG H, ZHAO J, et al. On the volume resistivity of silica nanoparticle filled epoxy with different surface modifications[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017(99): 139-148.
- [55] LI C, HU J, LIN C, et al. The control mechanism of surface traps on surface charge behavior in alumina - filled epoxy composites[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2016, 49(44): 445304-1-445304-9.
- [56] LI C, HU J, LIN C, et al. Hot electron injection regulation in Al₂O₃-filled epoxy resin composite using Cr₂O₃ coatings [C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP). Toronto: [s.n.], 2016: 101-104.
- [57] ZHANG B, GAO W, HOU Y, et al. Surface charge accumulation and suppression on fullerene - filled epoxy - resin insulator under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 2011-2019.
- [58] ZAVATTONI L, HANNA R, LESAIN O, et al. Dark current measurements in humid SF₆: Influence of electrode roughness, relative humidity and pressure[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2015, 48(37): 375501 - 1 - 375501-9.
- [59] ZAVATTONI L, LESAIN O, GALLOT-LAVALLÉE O. Dark current measurements in pressurized air, N₂, and SF₆ [C]//2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. China: IEEE, 2013: 659-662.
- [60] PAN Z, TANG J, PAN C, et al. Contribution of nano-SiC/epoxy coating with nonlinear conduction characteristics to surface charge accumulation under DC voltage[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2020, 53(36): 365303-1-365303-14.
- [61] WANG T Y, LIU C, LI D Y, et al. Nano ZnO/epoxy coating to promote surface charge dissipation on insulators in DC gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1322-1329.
- [62] LIANG H, DU B, KONG X. Basin-type spacer for DC-GIL- Part II: Surface charge and electric field regulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(3): 1119-1126.
- [63] XUE J, CHEN J, DONG J, et al. The regulation mechanism of SiC/epoxy coatings on surface charge behavior and flashover performance of epoxy/alumina spacers[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2019, 52(40): 405502 - 1 - 405502-14.
- [64] LI C, LIN C, HU J, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges-Part I: Charge transport and control strategy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1238-1247.
- [65] LI C, LIN C, YANG Y, et al. Novel HVDC spacers by adaptively controlling surface charges - Part II: Experiment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1248-1258.
- [66] 王 健, 李庆民, 李伯涛, 等. 直流 GIL 中自由线形金属微粒的运动与放电特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4793-4800.

- WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Motion and discharge behavior of the free conducting wire type particle within DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4793-4800.
- [67] LIANG R, HU Q, LIU H, et al. Research on discharge phenomenon caused by cross - adsorption of linear insulating fiber and metal dust under DC voltage[J]. High Voltage, 2020, 7(2): 269-278.
- [68] 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, et al. Review on metal particle contamination in GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.
- [69] WANG R, CUI C, ZHANG C, et al. Deposition of SiO₂ film on electrode surface by DBD to improve the lift-off voltage of metal particles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1285-1292.
- [70] ZHANG L, CHENG H, WEI W, et al. Suppression on particle movement and discharge by nanocomposite film coating on DC GIL electrode surface[J]. IEEE Access, 2021(9): 126095-126103.
- [71] 黄旭炜, 倪潇茹, 王 健, 等. 苯硫醚聚酰亚胺电极覆膜材料合成及直流应力下对金属微粒运动特性的抑制作用[J]. 电工技术学报, 2018, 33(20): 4712-4721.
- HUANG Xuwei, NI Xiaoru, WANG Jian, et al. Synthesis of phenylthioether polyimide as the electrode coating film and its suppression effect on motion behavior of the metal particles under DC stresses[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4712-4721.
- [72] WU Z, LI Z, LIU P, et al. Simulation and analysis on motion behavior of metal particles in AC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 567-575.
- [73] ZHAN Z, WANG D, XIE J, et al. Motion characteristics of metal powder particles in AC GIL and its trap design[J]. IEEE Access, 2021(9): 68619-68628.
- [74] 刘 鹏, 李智凯, 田汇冬, 等. 直流电压下气体绝缘输电线路中微粒运动特性研究及微粒陷阱效能分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5740-5751.
- LIU Peng, LI Zhikai, TIAN Huidong, et al. Research on motion characteristics of metal particle and capture efficiency of particle traps in gas insulated transmission lines under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5740-5751.
- [75] 李庆民, 常亚楠, 王 健, 等. 气体绝缘输电管道微粒陷阱设计技术研究进展[J]. 高电压技术, 2020, 46(12): 4182-4193.
- LI Qingmin, CHANG Yanan, WANG Jian, et al. Methodological advances of metal particle traps design in gas insulated transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4182-4193.
- [76] 刘 鹏, 张语桐, 吴泽华, 等. ± 320 kV 直法 GIL 微粒陷阱关键结构参数分析及优化[J]. 高电压技术: 1-12[2023-03-03]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221207>.
- LIU Peng, ZHANG Yutong, WU Zehua, et al. Key parameter analysis and structure optimization of particle trap in ± 320 kV DC GIL[J]. High Voltage Engineering: 1-12 [2023-03-03]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20221207>.
- [77] QIU Y, CHALMERS I. Effect of electrode surface roughness on breakdown in SF₆/N₂ and SF₆/CO₂ gas mixtures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1993, 26(11): 1928-1932.
- [78] 黎 斌. SF₆高压电器设计[M]. 5版. 北京:机械工业出版社, 2019.
- LI Bin. SF₆ high-voltage electrical apparatus design[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2019.
- [79] ZHENG Y, ZHOU W, LI H, et al. Influence of conductor surface roughness on insulation performance of C₄F₇N/CO₂ mixed gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 922-929.
- [80] ZHANG L, WANG Y, YU D, et al. Conductor surface roughness-dependent gas conduction process for HVDC GIL-Part I: Simulation[J]. IEEE transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 511-519.
- [81] CHEN G, XU H, XU Y, et al. Standardizing conductor surface roughness for DC gas-insulated equipment - a careful analysis on local morphology[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2022, 55(23): 23LT01-1-23LT01-6.
- [82] CIGRE Joint Working Group D1/B3. 57. Dielectric testing of gas-insulated HVDC systems[EB/OL]. [2023-03-03]. <https://electra.cigre.org/fr/318-october-2021/technical-brochures/essais-dielectriques-des-systemes-cchta-isolation-gazeuse.html>.
- [83] High voltage switchgear and controlgear-Part III: Overhead, pad-mounted, dry vault, and submersible automatic circuit reclosers and fault interrupters for alternating current systems up to 38 kV: IEC 62271-111: 2019[S]. 2019.
- [84] RIECHERT U, BLUMENROTH F, STRAUMANN U, et al. Dielectric long-term behavior and testing of gas-insulated HVDC systems[C]//CIGRE Session. India: CIGRE, 2019: 1-10.
- [85] GATZSCHE M, RIECHERT U, HE H, et al. Prototype installation test of HVDC GIS for meshed offshore grids[C]//48th CIGRE Session. France: CIGRE, 2020: 2344-2356.
- 梁芳蔚(1991—), 男, 助理研究员, 主要从事 GIL/GIS 绝缘子形状优化设计、气固界面表面电荷特性研究(E-mail: liangfangwei@tsinghua.edu.cn)。
- 李传扬(1987—), 男, 助理研究员, 主要从事 GIL/GIS 关键技术研究、气固界面表面电荷特性研究(E-mail: chuanyang_li@tsinghua.edu.cn)。