第 49 卷 第 3 期：920-936 高电压技术 Vol.49, No.3: 920-936
2023 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20222016

高压直流 GIL 设备绝缘关键技术研究综述

张长虹[1]，张博雅[2]，李明洋[1]，李奕萱[2]，李兴文[2]，吕金壮[1]，王志刚[3]，
黎卫国[1]，杨 旭[1]
（1. 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;
2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室，西安 710049;
3. 平高集团有限公司，平顶山 467001）

摘 要：直流 GIL 具有输送容量大，占地面积小，可靠性高，受外界环境影响小等优势，在特殊环境中具有广泛的应用前景。然而直流电压下 GIL 内部气固界面电荷积聚及金属微粒的存在会导致 GIL 内部电场畸变、绝缘性能下降，甚至诱发沿面闪络，是限制直流 GIL 发展的重要因素。因此，论文总结了近年来关于直流 GIL 绝缘关键技术和 GIL 设备研制的相关研究，从气固界面电荷积聚机理与调控方法，GIL 中金属微粒对绝缘性能的影响，绝缘材料沿面耐电性能，新型环保气体在直流 GIL 中的应用，直流 GIL 设备研制与试验和特高压直流 GIL 研制关键技术等 6 个方面进行总结评述，为高压直流 GIL 研发提供参考。
关键词：直流 GIL；绝缘技术；表面电荷积聚；沿面闪络；金属微粒；特高压直流

Review of Key Insulation Technologies of HVDC GIL

ZHANG Changhong[1], ZHANG Boya[2], LI Mingyang[1], LI Yixuan[2], LI Xingwen[2], LÜ Jinzhuang[1],
WANG Zhigang[3], LI Weiguo[1], YANG Xu[1]
(1. Maintenance & Test Center of EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Guangzhou 510663, China;
2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
3. Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China)

Abstract: HVDC GIL with the advantages of large transmission capacity, small footprint and high reliability has a wide application prospect in the special geographical environment. However, the accumulated gas-solid interface charge and the existence of metal particles in GIL are essential factors which lead to the electric field distortion and even the surface flashover and thus limit the development of DC GIL. In this paper, we summarize and review the related research progress in surface charge accumulation mechanism and suppression methods, metal particles in GIL, surface flashover characteristics, application of eco-friendly gases in DC GIL, HVDC GIL manufacturing and testing, and key technologies for developing UHVDC GIL. The paper provides a reference to the design and development of DC GIL equipment.
Key words: DC GIL; insulation technology; surface charge accumulation; surface flashover; metal particles; UHVDC

0 引言

高压直流输电是世界上电力大国解决远距离、大容量输电和电网互联的重要手段，能够推动各类能源清洁、高效地开发利用，促进更大范围内能源资源的优化配置。随着我国特高压电网的大力发展，以及西部水电、东南沿海风电资源的进一步开发，超、特高压直流输电工程的建设还将进一步加快[1]。近期，国家重大工程“藏东南清洁能源送出粤港澳大湾区直流工程”列入了国家电力发展“十四五”规划，规划电压等级为±800 kV，输电容量至少 800 万 kW，建成后将实现藏东南水电群就近送电南方电网，满足南方区域负荷需求发展需要。但是西藏地区自然环境恶劣，3500 m 以上高海拔、0.3g~0.4g (g=9.8 m/s^2)高地震烈度、高寒环境给输电线路和换流站建设与维护带来了巨大挑战。而粤港澳大湾区受端换流站和对应的输电线路建设也面临规划选址及征地难度大的问题，如现有的广州—深圳输电线

基金资助项目：国家自然科学基金(52277162；51907154)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277162, 51907154).

路采用绕行方式，输电线路长度为直线距离的 3 倍。复杂的自然环境和紧张的土地资源对输电线路提出了可靠性高、布线方式灵活、受外界环境影响小等要求。空气绝缘的敞开式设备难以满足以上要求，而气体绝缘输电管道(gas insulated transmission line, GIL)具有输送容量大、电能损耗低、结构紧凑、布线方式灵活和可靠性高等优点，可以完美解决以上严苛环境下输电线路与换流站在设计制造、运维、规划建设等方面的难题[2-4]。因此，针对西藏地区送电南方电网特高压直流输电工程的新要求，有必要开展特高压直流气体绝缘装备关键技术研究。

在直流电压下，由于受到单极性电场长期作用，SF_6 气体中的带电粒子和绝缘材料中的载流子在电场作用下逐渐转移到气固界面，导致 GIL 中绝缘子表面发生显著的界面电荷积聚现象，引发气固界面电场畸变，容易诱发绝缘子沿面闪络[5-6]，严重影响直流 GIL 的安全稳定运行。另外，直流 GIL 中绝缘子还将面临温度梯度[7-8]、金属微粒[9-10]和极性反转电压等多种工况联合作用，其表面电荷积聚行为与电场分布特性极其复杂[11-12]。

由于上述问题的存在，使得直流气固绝缘系统中电场分布和绝缘水平具有很大的不确定性，给绝缘设计带来极大困难。目前，国际上已针对直流气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)的绝缘问题开展了相关研究。例如，ABB 公司已经研发了±320 kV 的直流 GIS 样机，西门子公司先后研发了±320 kV 与±500 kV 的直流 GIS 样机，为直流 GIL 的研发提供了重要经验，但是至今仍未有成熟的直流 GIL 产品实现工程应用，也未形成统一的直流 GIL 型式试验标准。因此，对高压直流 GIL 中气固界面电荷积聚特性与调控技术、金属微粒运动特性及抑制技术、环保气体在直流 GIL 中的应用、直流 GIL 绝缘性能试验技术等开展系统研究，对于高压直流 GIL 的设计、研制、试验、运行和维护等环节具有重要意义。

近期，国内外对于直流气体绝缘设备的需求日益迫切，直流 GIL/GIS 绝缘关键技术也有了新的进展。2021 年底，国际大电网组织 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测试》报告[13]，为直流 GIL 的研发和性能考核提供了重要参考。2022 年 9 月，国际大电网会议 2022 巴黎大会上西门子等公司分享了环保型空气绝缘直流 GIS/GIL 设备、洁净空气绝缘海上风电用高压开关设备等最新进展。因此，在新的重大需求和发展趋势下，有必要对直流 GIL 设备研制关键技术进行重新梳理。

本文以 GIL 设备在未来特高压直流输电工程中的应用为目标，综述了近年来有关直流 GIL 设备研制的关键技术问题和主要研究成果。首先分析了高压直流 GIL 工程应用的必要性，接着，详细梳理了直流 GIL 关键绝缘问题，包括界面电荷、金属微粒、沿面耐电性能和环保绝缘气体 4 个方面；其次，总结了直流 GIL 设备研制进展与试验方案；最后，提出了特高压直流 GIL 研制关键技术，为高电压等级的直流 GIL 设备研发提供参考。

1 高压直流 GIL 工程应用的必要性分析

跨区跨省输电工程是助力实现我国双碳目标、解决我国电力供应短缺的咽喉工程。藏东南送电粤港澳大湾区两回直流工程(藏—玉直流、藏—澜直流)将使特高压直流输电通道延伸至高原、雪山、荒漠、戈壁等区域，项目建设施工、大件运输、运行维护较以往西电东送工程难度进一步增大。总体来看，目前国家推动西部清洁能源基地送出工程面临 3 个方面的技术难题：一是直流设备外绝缘和抗震性能矛盾带来的直流设备设计制造难题；二是恶劣自然环境带来的设备运维难题；三是输电走廊受自然条件限制引发的可选路径拥挤的规划建设难题。特高压直流 GIL 可完美解决以上 3 个难题，承担现有架空线和电缆不能胜任的直流输电和电器联结任务。以下对特高压直流 GIL 工程应用的必要性进行梳理分析。

1.1 解决特殊输电通道问题

特殊输电通道是指宽度在 600 m 以内、包含至少 2 回特高压直流线路或至少 5 回 500 kV 及以上重要输电线路。在山火等不可控力的因素下容易导致整条特殊输电通道电能输送中断。密集通道内线路一旦发生多线路同跳故障，将严重影响供电可靠性甚至造成大面积停电，对经济发展和社会稳定带来不良影响。近年来，国家、地方政府以及两大电网公司对特殊输电通道的安全可靠运行愈加关注。

初步统计，前期建设的藏—玉直流与现状电力线共同构成特殊通道长度约 235.36 km(优化前)，远期藏—澜直流建设投产后，藏—玉直流、藏—澜直流和现状电力线共同构成特殊通道长度约 1265.6 km (优化前)，如图 1 所示。虽然局部路段可通过线路

迁改方式解决，但普遍代价巨大，包括大量拆除密集房屋、占用成片基本农田、穿越自然保护区、迁移现有敏感设施、限制城镇发展等问题，前期工作几乎无法开展。直流 GIL 线路可采用地下管廊、直埋等方式辐射，对周边环境影响较小，在技术成熟、成本可控的前提下，是解决特殊输电通道问题的较好解决方法。

1.2 解决跨区域输电翻越无人区雪山问题

西藏地区建设的直流输电线路面临高海拔、高地震烈度、以及低温冻土等复杂环境和地质条件叠加的相互影响，还可能穿过雪山、无人区等特殊地段。其中，西藏墨脱县雅下地区蕴藏巨大电能，中长期预计能开发 8~10 回直流外送，从墨脱—波密出线方向，线路须翻越多雄拉雪山，海拔 750~5500 m，地形起伏大。由于波密—墨脱公路以隧道翻越嘎瓦龙雪山，如图 2 所示，线路在该段公路实际可利用率低，设计、施工、运行和维护难度极大。直流 GIL 线路可采用隧道形式架设，不受外界恶劣环境和大落差影响，解决以上复杂环境带来的设计、建设和运维难题，是打通该区域输送通道为数不多的选择方案，对于推动雅鲁藏布江下游清洁能源基地开发外送具有重大意义。

1.3 解决大湾区电源直入负荷中心问题

粤港澳大湾区经济发达、城镇化水平高，受端换流站深入大湾区腹地，换流站毗邻居民密集区或生态保护区概率高，站址及路径方案难度日趋增大，如花都潜在站址均位于限建区甚至禁建区。广州—深圳直线距离约 150~200 km，但广东敏感设施众多，规划选址及征地难度大，面临复杂的生态、环境、社会影响等多重限制因素导致线路绕行，最终广州与深圳站址设计长达 550~600 km，中长期自西送电珠东南负荷中心更加困难。苏通 1000 kV GIL 工程为跨海工程应用 GIL 做了良好示范，后期可研究利用 GIL 技术建设珠江隧道，自粤西、珠西南向珠东南送电，对于解决大湾区电源直入负荷中心具有重要意义。

2 直流电压下气固界面电荷积聚与调控

盆式与支柱绝缘子作为直流 GIL 的关键绝缘件，其绝缘问题至关重要。在直流电场长期作用下，绝缘子表面电荷积聚问题十分突出，引发研究者长期关注。以下从气固界面电荷积聚与界面电荷调控两个方面对近期研究进展进行梳理。

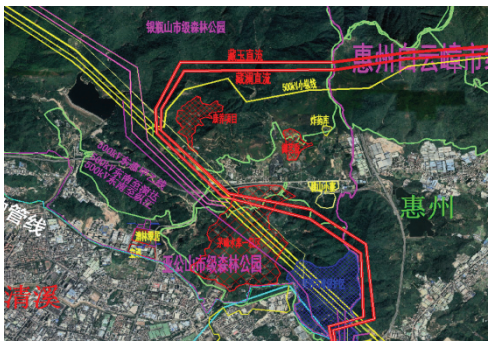


图 1 藏—玉、藏—澜直流和现状电力线构成的密集输电通道

Fig.1 The dense power transmission corridors formed by Zang-Yu DC, Zang-Lan DC and current electric power lines



图 2 波密—墨脱公路嘎隆拉隧道

Fig.2 Galongla tunnel on the Bomi-Metuo highway

2.1 气固界面电荷积聚

2.1.1 气固界面电荷积聚机理

早在 20 世纪 80 年代，国际上就已经关注到了直流电场下气固界面电荷积聚的问题。瑞士科学院[14]、日本三菱公司[15]和美国麻省理工学院[16]最早对气固界面电荷积聚问题开展了研究，并分别提出了法向电场模型、切向电场模型和体电导模型解释电荷积聚机制，为后续研究奠定了基础。

2000 年以来，随着直流输电技术发展，国内外学者对直流气体绝缘设备的界面电荷积聚问题进行了更加深入的研究，对电荷积聚的机制提出了众多观点。东京大学 Kumada[17]研究发现盆式绝缘子表面打磨和未打磨区域的边界处积聚电荷量最多，认为表面电导是决定电荷分布的重要因素。苏黎世理工大学 Franck[18]和慕尼黑工业大学 Kindersberger[19]对电荷积聚的动力学过程进行建模和实验验证，认为电荷积聚是体电导、表面电导和气体电导综合作用的结果。在国内，清华大学张贵新[20]、湖南大学汪沨[21]、华北电力大学李成榕[22]等最早开始对气固界面电荷的积聚问题开展研究。张贵新等人发现界面电荷积聚与电压幅值有关且存在阈值效应，认为气体侧的局部放电是导致界面电荷积聚的主要原因[20]。

近几年来，国内外研究者采用实验方法对绝缘子的表面电荷积聚特性进行了更加细致的分析，在电荷分布特性和积聚机理方面有了新的进展，提出了盆式绝缘子积聚的不同模式以及电场主导的气固界面电荷积聚等模型。在表面电荷分布特性方面，2017 年张博雅等对缩比绝缘子表面电荷进行测量，提出表面电荷积聚存在“基本模式”和“电荷斑”两种模式[23]，如图 3 所示。基本模式与施加电压极性相同，且呈对称均匀分布，由固体侧传导电流为主导产生。“电荷斑”模式则呈随机分布，与绝缘缺陷导致的微放电现象有关。邓军波等人对上述现象进行了进一步验证，认为绝缘子表面存在同极性的基本模式，双极性的点电荷模式和随机分布的电荷云模式[24]。在表面电荷积聚机理方面，王邸博等研究了不同形状的绝缘子表面电荷积聚特性[25]，发现表面电荷积聚是介质分界面处电导率不连续导致的结果，在高电压等级下，气体侧传导是界面电荷积聚的重要因素。2019 年，何金良等提出了电场主导的气固界面电荷积聚模型，认为电场小于 2.5 kV/mm 时，电荷积聚由固体侧传导主导，当电场大于 2.5 kV/mm 时，电荷积聚由气体侧传导主导[26]。

此外，大量学者也采用数值模拟的方法对气固界面电荷的积聚机理进行了研究，综合考虑了 3 种途径下的电荷积聚特性，即：1）气固界面法向电场下的气体侧传导；2）气固界面法向电场下的固体侧传导；3）气固界面表面传导。罗毅等研究发现气体中的离子对生成率和绝缘子体电导率、表面电导率的变化会影响传导电流，进而改变电荷积聚的主要传导路径，影响绝缘子表面积聚电荷的极性[27]。另外，体积电导率的变化也会影响过渡时间，DC GIL 中电场容性–阻性转变的过渡时间随着体积电导率的增加而减小[28]。

综上可以看出，经过数十年的发展，目前人们对直流电场下气固界面电荷积聚特性及其机制已经有了比较清晰的认识。但是，上述研究大多针对缩比样品和稳态直流条件，面向直流 GIL 设备的工程应用，针对运行工况下的暂态电压、大尺寸效应带来的典型缺陷、以及大尺寸结构下高温度梯度、强气体流动导致的气体密度非均匀分布对界面电荷特性的影响等问题仍需进一步研究。

2.1.2 温度梯度对界面电荷积聚特性的影响

正常运行条件下，GIL 内部高压端金属导杆由于载流产生欧姆热，而接地外壳的温度与环境温度

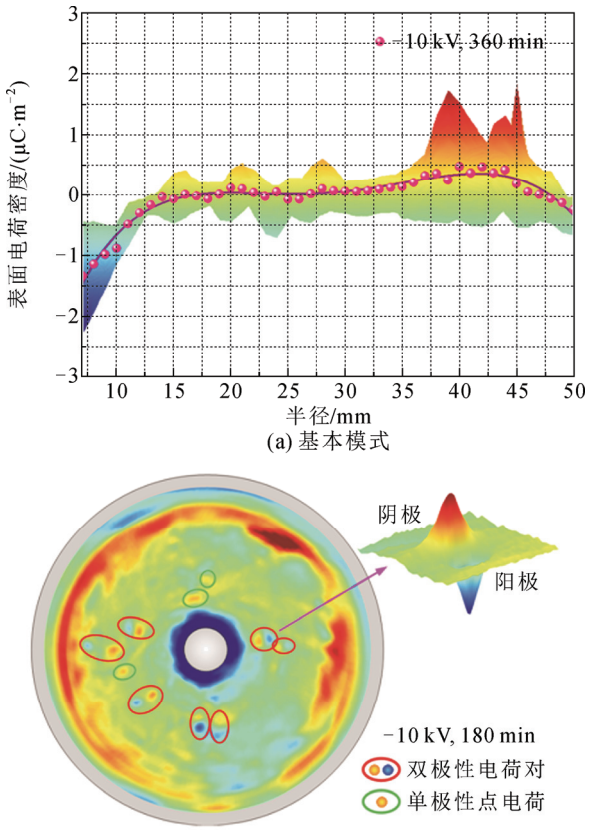


图 3 绝缘子表面电荷测量结果[23]

Fig.3 Measurement results of surface charge distribution[23]

相近，因此 GIL 内部存在较大的温度梯度，导致直流盆式绝缘子的电场分布与常温下相比发生显著变化，也影响了气固界面电荷积聚特性。

针对温度梯度下气固界面电荷的积聚特性，华北电力大学、平高集团、天津大学等采用仿真方法展开相关研究[29-33]。温度梯度影响盆式绝缘子的介电常数和电导率分布，进而影响电场分布和界面电荷的积聚路径。马国明等研究发现随着温度增加，绝缘子表面电荷积聚量上升，绝缘子表面切向电场增加[29-30]。钟建英等研究发现温度梯度导致绝缘子表面电场分布更均匀，高压导体侧电场降低 80%，低压壳体侧电场增加 2.6 倍。另外，温度梯度的存在导致电荷积聚主导因素的改变。杜伯学等对三支柱绝缘子仿真发现温度梯度的存在导致体电流传导的电荷量增加。张博雅等通过仿真和实验研究发现，温度梯度作用下绝缘子体电导率增加，绝缘子表面电荷积聚特性以固体侧传导为主导[34]。

与交流 GIL 相比，直流 GIL 中电场分布更容易受到温度梯度的影响，主要原因在于以下两个方面：直流电压下 GIL 中的电场呈电阻性分布，由绝缘材

料的电导率决定，而电导率受温度影响十分显著，相比于环境温度 25 ℃下，环氧复合材料的电导率在 60 ℃的温度梯度下会增大 10 倍，并随着温度升高呈数量级式上升，这将导致电场分布出现显著变化；另外，在温度梯度作用下，固体侧电流与气体侧电流的相对大小发生变化，导致气固界面电荷积聚的主导因素发生改变，从而影响电荷分布。可见，温度梯度下 GIL 设备内部电场分布将会变得更加复杂，对绝缘设计与性能考核的要求更加严苛。

2.1.3 气体暗电流对电荷积聚特性的影响

气体侧离子流的传导是表面电荷积聚的重要途经，通过测量气体暗电流，可以得到绝缘气体电导率等重要信息。气压、水分含量、温度和电极粗糙度等都是影响气体暗电流大小的关键因素。格勒诺布尔大学的 Zavattoni 等系统研究了直流场下 SF_6 气体的暗电流[35]，结果表明，随着气压的增加，气体的相对湿度对气体暗电流的影响明显增加。另外，在气体干燥和含有水分的条件下，温度对暗电流大小的影响相反，这与测量系统的结构有关。金属导体表面水分子的化学吸附作用及电场解吸附形成的水分子离子团簇导致气体暗电流随水分含量增加而增加。

目前研究人员普遍认为气体侧带电粒子有 3 个主要来源：宇宙背景辐射导致的自然电离、电极表面微突起和缺陷导致的微放电、以及电极在高电场强度下产生的场致发射[36]。文献[37]仿真结果表明，在电场强度为 6.548 kV/mm，气压为 0.4 MPa 的情况下，当导体粗糙度分别为 R_a<24.16 μm、24.16 μm<R_a<188.59 μm、R_a>188.59 μm 时，气体暗电流分别以自然辐射电离、微放电和场致发射为主。文献[38]进一步研究表明当相对湿度为 45%，电极粗糙度 14.152 μm，电场小于 2.2 kV/mm 时，气压对暗电流有显著的抑制作用。

气体在直流场下产生的暗电流是受多种因素综合作用的结果，直流 GIL 内部存在绝缘缺陷或者金属电极材料的粗糙度过大时，GIL 内部不但存在自然电离，还存在微放电，导致气固界面电荷积聚量增加。水分含量的增加也会导致气体暗电流的增加，而气压的增加对气体暗电流有抑制作用。因此，对于直流 GIL 设备，应尽量减少绝缘内部的缺陷，减小电极粗糙度，保证气体的干燥度、增加气压、优化局部电场增强区域以减小气体暗电流，抑制绝缘子表面电荷积聚。

2.2 气固界面电荷调控方法

气–固界面电荷调控主要有以下两种途径：一是绝缘子几何结构改进，通过改善界面法向电场以减少界面电荷积聚；二是绝缘子材料改性，通过增大体电阻率减小固体侧传导电流，或者适当减小表面电阻率以增大表面传导电流，分别达到抑制电荷注入和促进电荷疏散的作用。

2.2.1 几何结构改进

目前，直流 GIL 中的盆式绝缘子结构研究主要包括圆头锥形、圆盘形和圆锥形。早在 1997 年，关西电力公司就对±500 kV 直流 GIS 展开研究[39]，提出了绝缘结构设计准则，并对 3 种结构的绝缘子电场进行仿真。结果表明圆头锥形绝缘子的切向电场最小，有利于降低沿面闪络概率，且优化的法向电场有利于降低积聚电荷量。马国明等的仿真研究进一步证实了以上研究结果[40]。

另外，Volpov 等针对旋转对称的绝缘子提出了以下设计准则[41-42]：

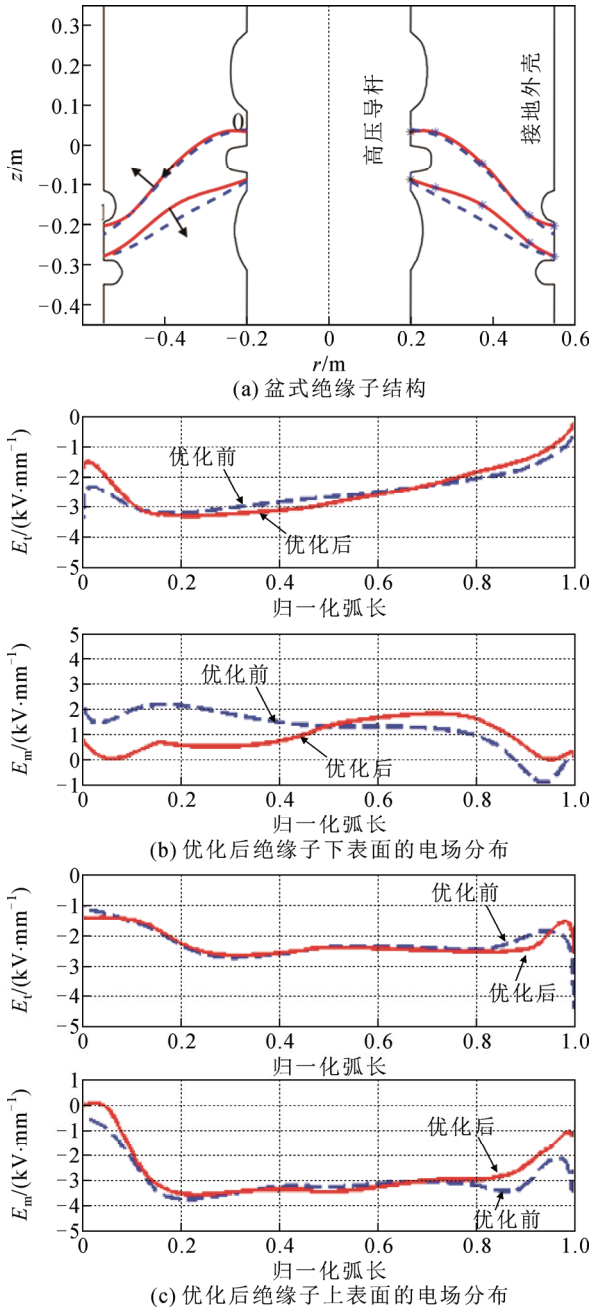
$$E_{jn}(+0,l)_{max} < E_N \tag{1}$$

$$E_{\tau}(+0,l)_{max} < E_T \tag{2}$$

式中：E_N 为法向电场强度，E_N<1 kV/mm；E_T 为切向电场强度，E_T<3.5 kV/mm；$E_{jn}(+0,l)$与 $E_{\tau}(+0,l)$分别为初始容性状态下的法向电场和切向电场。在该初始条件下，稳态下盆式绝缘子表面积聚电荷量小于 10~20 μC/m^2 量级。根据以上设计准则，Volpov 在交流 1150 kV 盆式绝缘子的基础上设计了圆锥形直流±750 kV 盆式绝缘子。

Lorenzi 等采用遗传算法对圆锥形直流±1000 kV 盆式绝缘子进行优化设计，在绝缘子上下表面分别选取 5 个点作为几何结构变化的基准点，以 E_T<3.5 kV/mm，E_N<3.5 kV/mm，切向电场梯度 ∇E_t <0.2 kV/mm^2 作为优化判据，优化后的绝缘结构如图 4 所示。其中，图 4(a)中蓝色(虚线)、红色(实线)部分分别为优化前后的绝缘结构，星号为基准点[43]。平高集团研究发现减小绝缘子倾角可以减小界面电荷积聚量，在考虑电场和机械场的综合作用下，设计了圆弧形、小倾角的绝缘子，如图 5 所示[44]。

目前，国内外学者提出的直流 GIL 绝缘结构设计准则总结如表 1 所示。直流 GIL 中的盆式绝缘子几何结构优化应尽量减小电场线与盆式绝缘子表面的夹角以减小法向电场和气固界面电荷积聚量，但是法向电场的减小往往导致切向电场增加，所以需要综合考虑切向与法向电场。而绝缘子结构设计除



(a) 盆式绝缘子结构

(b) 优化后绝缘子下表面的电场分布

(c) 优化后绝缘子上表面的电场分布

图 4　采用遗传算法优化的盆式绝缘子几何结构[44]

Fig.4　Optimization of basin insulator geometry using a genetic algorithm[44]



图 5　平高集团设计的直流盆式绝缘子[44]

Fig.5　DC insulators designed by Pinggao Group[44]

表 1　直流 GIL 绝缘结构设计准则

Table 1　The Structure design criteria of DC GIL

时间	单位	设计准则
1991	日本三菱电机公司[15,45]	穿过绝缘子表面的电场线与绝缘子尽量呈锐角以减小界面法向分量
1997	日本关西电力公司[39]	1.法向电场分量应尽可能小；2.高压导体电场线与绝缘子表面不相交；3.满足雷电冲击电压下的测试
2002	以色列电力公司[41-42]	1.$E_{jn}(+0,l)_{max}<E_N$；2.$E_t(+0,l)_{max}<E_T$；3.界面电荷密度小于 10~20 μC/m^2 量级
2009	意大利乌迪内大学[43]	1.切向电场：E_T<3.5 kV/mm；2.法向电场：E_N<3.5 kV/mm；3.电场梯度：∇E_t <0.2 kV/mm^2
2016	ABB[46]	1.考虑界面电荷积聚特性；2.满足直流叠加冲击电压下的试验；3.温度梯度
2020	华北电力大学[47]	1.满足交流绝缘子相关标准的前提下；2.尽量减小绝缘子表面电荷积聚量
2021	平高集团[44]	界面电荷密度小于 10~20 μC/m^2 量级

了考虑直流电压下的电场分布，也需要考虑极端运行环境下的绝缘性能，如较大温度梯度、直流叠加冲击电压等。另外，盆式绝缘子结构在保证绝缘性能的同时，也需考虑机械应力等综合作用，因此采用多目标优化方法设计最优绝缘结构是未来的发展趋势。

2.2.2　绝缘材料改性

1）绝缘材料掺杂改性。纳米材料或功能材料的掺杂以改善绝缘材料的介电性能是常见的材料本体改性方法，常用的填料包括 SiC、ZnO 等，也有部分学者对功能梯度填料展开研究。中科院国家纳米中心褚鹏飞等研究发现当 SiO_2 纳米颗粒的质量分数为 1%时，可以将环氧树脂的体积电阻率提高 27%左右[48]。Rachmawati 等仿真发现在绝缘子高压侧具有低电导率分布的介电常数(U 型分布)/电导率(梯度增加分布)的功能梯度材料(FGM)可以有效降低电场最大值，该方法已用于制造具有理想 ε 分布的 ε-FGM 绝缘子[49]。

另外，也有部分学者研究了新型材料的掺杂对绝缘材料电气性能的影响。张博雅等在绝缘子内部掺杂 C_{60} 降低了环氧树脂的体电导率，绝缘子表面积聚的电荷量也显著下降[50]。其中 C_{60} 很强的亲电子性能及对基体中自由电子的捕获是导致电荷量下降的重要因素。清华大学的王天宇等研究发现少量掺杂 MXene 纳米颗粒使绝缘子体电阻率增加 4 倍，表面电荷积聚量减少 1/3，闪络电压下降 10%[51]。

2）绝缘材料表面改性。绝缘子表面改性主要工艺包括表面氟化、等离子体表面处理、表面涂层

等，目前上述方法还未在实际的直流 GIL 绝缘子中进行长期带电试验考核，其在工程应用中的可靠性仍需验证。

针对绝缘子表面氟化，南安普顿大学[52]、同济大学[53]、清华大学[54]和天津大学[55]都进行了相关实验研究。绝缘子表面短时间氟化会导致表面电阻率、陷阱分布特性及表面形貌发生改变。短时间的氟化(<30 min)可使绝缘子表面电阻率下降 2~3 个数量级[52,54-55]。中科院电工所[56]与西安交通大学[57]对绝缘子进行了表面等离子体处理，发现等离子体处理后绝缘子表面粗糙度的改变以及浅陷阱的引入导致绝缘子表面电荷衰减率增加，表面电导率增大，使得绝缘子沿面闪络电压提高。

目前绝缘子的表面涂层材料主要包括纳米材料、非线性材料以及一些新型材料[58-63]。天津大学杜伯学等采用仿真和实验方法，对传统绝缘子、表层电导非线性绝缘子和体电导非线性绝缘子的电场分布及损耗特性进行了系统研究[60-62]，并对新型绝缘子的非线性电导参数进行了优化[61]，如图 6 所示，研究表明，绝缘子表面非线性电导涂层的电场畸变率、电导率和非线性系数呈负相关[62]。西安交通大学薛建议等研究了掺杂 SiC 填料的表面涂层材料，结果表明绝缘子表面积聚的电荷量随 SiC 填料的增加先上升后下降[63]。

张博雅等提出了一种具有高度取向性的 PVA/MMT 二维纳米涂层，实现了绝缘材料表面电荷的有效疏散，如图 7 所示[64]，可以使绝缘材料沿面闪络电压提高 18%。王天宇等研究了一种氮化硼掺杂的纳米涂层，在绝缘材料表面引入大量浅陷阱，促进了积聚的表面电荷在切向电场下的耗散，直流闪络电压提高了 30%[65]。

目前针对绝缘材料体掺杂和表面改性已经进行了大量研究，非线性材料、纳米材料的掺杂和涂覆对表面电荷都具有良好的抑制效果。但是实际运行过程中，绝缘子需要承受电、热、机械应力等综合作用，上述改性方法的可靠性和老化性能还需进一步确认。未来绝缘子的配方和工艺是直流 GIL 研发最关键的问题，性能优良的环氧浇注配方、工艺制造无缺陷、环氧与嵌件的绝缘界面处理工艺是绝缘子制造的关键[8,66-67]。西门子公司研究了 MFF 材料在高场强下的应用[8,66]。平高集团选用两种多官能度环氧树脂、两种脂环族环氧树脂组分进行配伍优化和表面处理获得了具备双交联固化网络结构的

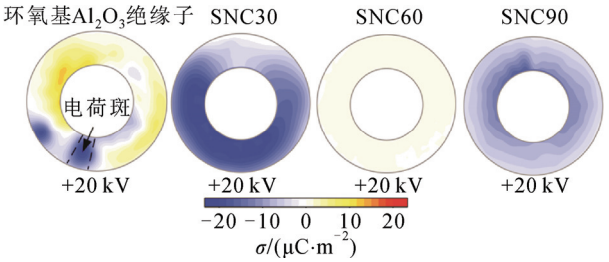
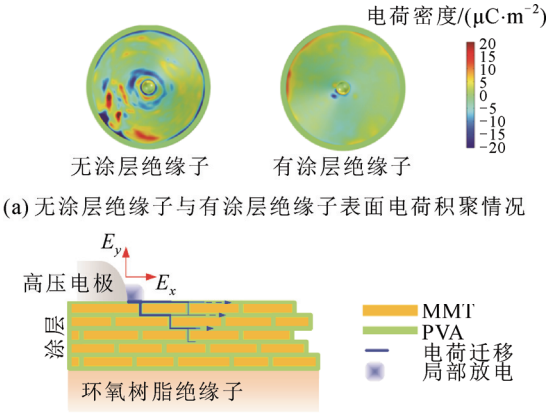


图 6 不同 SiC 含量的 SNC 绝缘子表面电荷分布[61]

Fig.6 Surface charge distribution of insulators with different SiC content[61]



(a) 无涂层绝缘子与有涂层绝缘子表面电荷积聚情况

(b) 电荷沿涂层材料消散机理

图 7 PVA/MMT 纳米涂层材料的表面电荷积聚特性及消散机理[64]

Fig.7 Surface charge accumulation on insulators with PVA/MMT coating and its dissipation mechanism[64]

绝缘子[44]。直流 GIL 中绝缘子材料配方与制造工艺是西门子、ABB 等设备制造企业的核心技术秘密，突破绝缘子配方和工艺研究是国内企业研发直流 GIL 的重要任务之一。

3 金属微粒对绝缘性能的影响

GIL 生产、组装、输运和运行过程中内部可能会产生球形、线形等金属微粒，在 GIL 的实际运行过程中，带电微粒受到库伦力、重力、气体黏滞力等综合作用，可能在 GIL 腔体内部运动或者粘附在绝缘子表面，导致周围电场发生畸变，甚至引发气体击穿或者绝缘子沿面闪络，是影响直流输电系统安全可靠运行的重要因素[68-69]。

3.1 金属微粒运动特性

金属微粒运动特性与施加电压波形、金属微粒形状、大小等因素相关。交流电压下，金属微粒主要发生水平方向滚动和竖直方向跳跃两种运动，其

在达到起跳电压后并不会立即贯穿气体间隙，而是在地电极进行重复跳跃运动，在多次跳跃后有概率运动到高压电极。然而直流电压下，金属微粒受单向电场力作用，容易贯穿气隙引发气隙击穿[70]。直流电压下金属微粒运动特性与电压极性有关，当达到启举电压时，正极性电压下，线形金属微粒一端抬起后，在下极板小幅跳跃、旋转或者直立，难以贯穿气隙，而负极性电压下，微粒贯穿气隙运动，极易出现飞萤现象[71]。

直流 GIL 中金属微粒主要包括球形和线性金属微粒。线形金属微粒因其易形成电晕而引发气隙击穿，球形金属微粒因其易影响电子崩发展形成流注而导致气隙击穿。线形微粒相比球形微粒对设备绝缘性能的威胁更大[72]。随着线形金属微粒半径增大，启举电压升高；线形金属微粒半径越小、长度越大时更易导致气隙击穿[73]。固定在绝缘材料表面或电极上的金属微粒尖端电场显著增强，会影响绝缘子表面电荷和空间电荷分布特性，而自由微粒则会在电场作用下发生运动，自由微粒较固定微粒更易造成气隙击穿[74-75]。

相比直流和交流电压，冲击电压下金属微粒启举或者间隙击穿电压值更高[76]。Ma J 等研究了金属微粒在直流叠加脉冲电压下的行为特性[9-10]。负直流叠加正脉冲电压下，随着金属微粒长度的增加和半径的减小，直流电压的影响增加，相同粒径下，其击穿电压低于负直流叠加负脉冲电压。

目前针对直流电压下金属微粒的研究主要采用平板电极和楔形电极模拟直流 GIL 中的不均匀电场。日本九州大学[77]和西安交通大学[78]都采用楔形结构对金属微粒运动特性展开研究。但是平板电极和楔形电极与实际的直流 GIS 存在一定的差异，也有学者建立了等效直流 GIS 的缩比同轴圆柱模型分析实际运行工况下的微粒运动。Okabe S 等建立与±300 kV GIS 等效的母线模型[79]，研究发现当罐底表面的电场超过其启举电场时，金属颗粒在高压导体和护套之间以每秒约 5 次的较高频率往复运动；而护套侧涂有绝缘层时，微粒在正常工作电压水平下不会移动，即使在施加振动时移动，也会较快地停止。文献[80-81]研究了 GIL 中不同类型金属微粒的带电及受力机理，在分析微粒碰撞弹性恢复系数的基础上，归纳了电压类型、微粒尺寸与微粒的运动特性和设备绝缘劣化之间的关系和规律，获得不同电压下的微粒分布运动如图 8 所示，随着直流电压等级的提高，微粒越活跃且分布范围越大。

另外，大量学者也采用仿真对金属微粒运动特性展开研究。贾江波等分析了楔形不均匀直流电场导电金属微粒的启举及运动特性[78]。孙继星等提出了金属微粒运动过程中的带电量及碰撞恢复系数的解析计算方法，实验结合仿真研究了金属微粒运动特性的影响因素[82]。律方成等研究了楔形不均匀直流电场下金属微粒启举前及运动过程中金属微粒表面电场畸变的瞬时情况[83-84]。

3.2 微粒陷阱

微粒陷阱是抑制直流 GIL 中微粒运动、提高 GIL 运行可靠性的重要手段。交流 GIL 中，网孔式金属圆筒式陷阱、壁面卡槽式陷阱、内置可拆卸式陷阱都已经得到大量研究。但是在直流 GIL 中，金属微粒运动速度快、动量大，需在地电极针对性地设置阻挡微粒逃逸并有效降低微粒速度的陷阱结构[85]。华北电力大学李庆民等对微粒陷阱进行了深入研究[10]，并应用于±550 kV 直流 GIL 的样机研制。李庆民等设计了同轴圆柱实验平台，提出了基于捕捉参数的微粒陷阱设计方法，研究发现在捕捉参数为 0.8 左右时，捕捉概率趋于稳定，且直流电压下金属微粒的落点具有很强的集中性，因此在落点集中区域捕捉可以缩短捕捉时间、取得良好的效果，陷阱的捕捉效果如图 9 所示。对于出现“站立”和

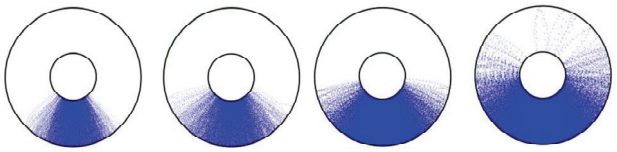


图 8 不同电压下的微粒运动分布[81]

Fig.8 Distribution of the particle-motion at different voltages[81]

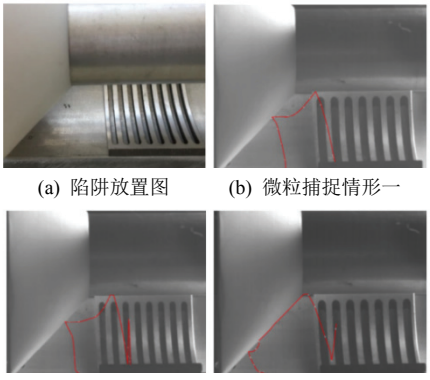


图 9 针对性陷阱布置捕捉效果图

Fig.9 Trapping effect of targeted placement

“飞萤”等特殊运动模式的微粒，仅靠布置微粒陷阱难以实现有效捕捉，此时建议配合覆膜[86]、驱赶电极、黏附材料等其他微粒抑制手段提升微粒捕捉效率。

4 直流 GIL 绝缘子沿面耐电性能

以 SF_6 气体为绝缘介质的交流 GIL 研发已经有了成熟的经验，绝缘材料内部的沿面许用场强以雷电冲击电压下的许用场强为设计阈值[87]。对于直流 GIS 设备研发，日本关西电力公司和 ABB 提出，绝缘设计不但需要考虑电荷积聚、金属微粒的影响，还需要考虑其在雷电和直流叠加雷电冲击下的绝缘性能。直流 GIL 中绝缘子沿面电场不但会受到直流、直流叠加雷电等多种电压波形的作用，还会受到绝缘子表面积聚电荷、金属微粒、以及温度梯度的影响，导致绝缘材料在未达到沿面闪络阈值时即有可能发生击穿。

4.1 界面积聚电荷对沿面闪络电压特性的影响

气固界面电荷积聚是导致沿面闪络电压下降的重要因素。目前，针对气固界面电荷对沿面闪络影响规律已经进行了一些研究。部分学者测量了在强切向电场分量下电荷对平板绝缘材料闪络电压的影响，另一部分学者考虑到直流 GIS 的实际运行条件，模拟盆式绝缘子结构进行研究。

2002 年，慕尼黑理工大学在强切向电场分量下研究了电荷对沿面闪络的影响规律[88]，发现绝缘材料表面积聚电荷量为–18 nC/cm^2 时，负直流闪络电压值上升 15%，正直流闪络电压下降 20%，交流闪络电压下降 25%[88]。同极性电荷积聚会导致沿面闪络电压上升，异极性电荷积聚会导致沿面闪络电压下降。查尔姆斯理工大学[5]和华北电力大学[89]研究发现了相同的规律。

然而，也有部分学者的实验结果与以上研究结果不同。Amer 等人对 3 种不同绝缘材料研究发现，同极性电荷积聚导致正极性闪络电压下降，异极性电荷积聚导致正极性闪络电压上升[90]。杜伯学等和司马文霞等研究发现空气及 SF_6 氛围中绝缘材料表面同极性电荷和异极性电荷积聚都会导致沿面闪络电压下降[91-92]。电荷对三结合点处的电场畸变作用和电子有效碰撞电离系数的提高是导致沿面闪络电压下降的重要因素[92]。

气固界面电荷积聚不但会导致电场畸变，也有一部分电荷可能参与沿面闪络的发展，影响流注的发展过程。根据以上文献研究，界面电荷的积聚会导致沿面闪络电压的下降，但是电荷积聚量、电荷积聚位置、电荷极性、电极结构、绝缘材料都是影响沿面闪络特性的重要因素，这可能是导致不同文献中测量结果不一致的原因。

另外，也有学者在真实盆式绝缘子上展开研究，齐波等人采用 220 kV 绝缘子开展不同电压波形下沿面闪络特性研究[93]，结果表明界面电荷的积聚导致直流沿面闪络电压与操作冲击电压下降。波兰 AGH 科技大学则采用倾斜放置的绝缘板模拟盆式绝缘子倾斜状态，研究发现正电荷会抑制正流注的发展，正流注放电树枝长度减小且沿着远离电荷的方向发展，而负流注被促进，放电树枝长度急剧增加，且沿着中心电荷的方向发展[94]。

尽管目前对界面电荷对沿面闪络特性的影响已经开展了一定研究，但是电荷对沿面闪络的诱导机制十分复杂，放电过程中气体分子与绝缘材料表面的吸附作用[95]以及气体分子的碰撞电离对电子崩发展的作用过程都会影响沿面流注发展[96]，作用规律尚不清楚，对直流 GIL 中界面电荷积聚诱导沿面闪络的机制仍需进一步研究。

4.2 金属微粒对沿面闪络电压特性的影响

金属微粒对气固界面电荷积聚的影响主要体现在两个方面，一是附着在绝缘材料表面的金属微粒两端发生局部放电导致绝缘界面积聚双极性电荷，进一步畸变电场，导致沿面闪络电压下降[23]；二是附着在高压电极或者三结合点的金属微粒会加速气体电离，增加气体侧传导电流，进而导致绝缘材料表面积聚电荷量增加[20]。Hoshina Y 等研究发现，绝缘材料表面的金属微粒是导致绝缘表面电荷积聚的重要因素，且与金属微粒的大小无关[97]。王健等研究发现直流叠加雷电冲击下金属微粒导致气固界面产生双极性电荷，沿面闪络电压下降 21.2%[98]。邢云琪等研究发现距离绝缘子表面 10 mm 的金属微粒在电场作用下会先附着在绝缘子表面，进而在电场作用下发生运动。金属微粒的存在导致气体电离，气固界面产生双极性电荷积聚，如图 10 所示[99]。

金属微粒除了影响盆式绝缘子表面电荷分布导致沿面闪络电压下降外，其存在还会导致电场发生畸变，微粒在电场作用下运动，当运动到高压电极附近时，可能发生强烈的放电进而引发闪络。金属微粒引发沿面闪络电压下降与微粒大小、微粒位置、及施加电压波形相关。金属微粒长度对沿面闪

络电压的影响较大，而金属微粒直径对沿面闪络的影响较小[100]。金属微粒与电极的距离是影响沿面闪络电压的重要因素，随着金属微粒与电极间距越小，沿面闪络电压值越小[101-102]。金属微粒紧贴电极时，对初始放电和流注的促进作用是导致沿面闪络电压下降的重要因素[102]。沿面闪络电压与冲击电压波形有关，绝缘材料表面存在金属颗粒时，其在标准雷电冲击电压下的沿面闪络电压下降 70%，而在标准操作冲击电压下的沿面闪络电压下降 35%[103]。

上述研究关注的是金属微粒对沿面闪络的宏观影响，但是金属微粒对沿面闪络的作用机制复杂，是电场畸变和电荷积聚综合作用的结果，金属微粒对沿面闪络的微观影响机制需进一步探索。

5 新型环保气体在直流 GIL 中的应用

高压气体绝缘设备以 SF_6 为主要绝缘介质，然而由于 SF_6 具有极强的温室效应，其使用和排放受到多个国际公约的严格限制，电力行业始终在寻找环境友好的 SF_6 气体替代方案，目前已取得一些积极成果，如含有少量 SF_6 的 SF_6/N_2 混合气体已在交流 GIL 设备中得到成功应用。2016 年以来，由 3M 公司研制的 C_4F_7N 等新型环保气体表现出优异的绝缘和环保性能。C_4F_7N 气体的绝缘强度可达纯 SF_6 的 2.2 倍，全球变暖潜能值约为 2200，常压下的液化温度约为–4.7 ℃，通过和 CO_2 混合，可以达到工程上最低使用温度的需求。目前，GE 公司已研制出以 C_4F_7N/CO_2 为绝缘介质的交流 420 kV GIL 和 145 kV GIS 等产品。

国内外对 C_4F_7N/CO_2 气体在交流高压设备中应用时需要考虑的基本理化性能、间隙击穿性能、灭弧性能等已开展了大量研究，但是其对直流绝缘性能的研究还十分有限。华北电力大学屠幼萍等从 C_4F_7N/CO_2 混合气体的环境相容性、传热性能、绝缘性能、气体分解特性与固体材料的相容性等方面综述了新型环保气体在高压直流下的应用前景[104]。环保气体在直流和雷电冲击电压下的闪络特性是其在高压直流下应用的重要指标，C_4F_7N/CO_2 与 SF_6 气体的等效闪络电压如图 11 所示，0.7 MPa 下 8%C_4F_7N/92%CO_2 混合气体的直流闪络电压与 0.5 MPa 下的 SF_6 气体相当。在传热性能方面，C_4F_7N 虽具有良好的传热性能，但是缓冲气体 CO_2 会降低散热能力，导致 C_4F_7N/CO_2 混合气体的散热能力低于 SF_6。因此应采取结构优化等措施，以避免或减

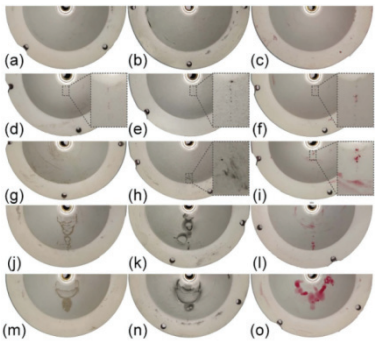


图 10 粉尘图表征的绝缘子表面电荷分布[99]

Fig.10 Surface charge patterns obtained by the dust figure method[99]

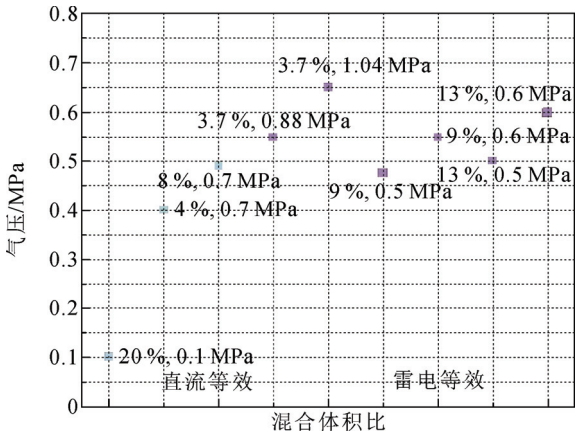


图 11 直流与雷电冲击电压下与 SF_6 气体闪络电压相同的 C_4F_7N/CO_2 混合体积比[104]

Fig.11 Equivalence of breakdown voltages between C_4F_7N/CO_2 and SF_6 gas at DC voltage and LI voltage[104]

少由传热性能下降而引起的 GIL 载流量的限制。

直流电压下气固界面电荷积聚特性是环保气体在直流 GIL 中应用的另一重要判据。张博雅等为评估直流 GIL 中 C_4F_7N/CO_2 混合气体的可行性[105]，详细研究了直流电压下绝缘子表面的电荷积聚特性。研究发现：与 SF_6 绝缘性能相当的 C_4F_7N/CO_2 混合气体，在直流电压下绝缘子表面电荷密度高于 SF_6，电荷密度随混合气体中 C_4F_7N 含量的增加而下降。认为 C_4F_7N/CO_2 混合气体与 SF_6 不同的局部放电特性是导致表面电荷积聚特性不同的主要原因。西安交通大学邓军波等采用类似的方法，研究了 C_4F_7N/CO_2 混合气体和 C_4F_7N/N_2 混合气体中绝缘子表面电荷积聚特性[106]。华北电力大学屠幼萍等研究发现随着 C_4F_7N 含量的增加，气固界面积聚的异极性电荷量下降，CO_2 气体中气固界面积聚的异极性电荷量最多[107]，如图 12 所示。异极性电荷的存在导致环保气体的应用仍存在一定的风险，因此建议在直流

GIL 中应用环保气体时需提高 C_4F_7N 含量，增加气压。

由于表面电荷积聚现象较为复杂，不仅与气体性质相关，还与固体性质以及气体与固体的相互作用相关，因此新型环保气体在直流电压下的应用可行性仍需进一步研究。特别是新型环保气体在直流电场下的非线性电导特性、局部放电特性等，都会直接或间接影响界面电荷积聚及沿面闪络特性，最终决定了环保型直流 GIL 的绝缘水平。2022 年 9 月，国际大电网会议 2022 巴黎大会上西门子公司已经分享了其在环保型空气绝缘直流 GIS/GIL 设备研发方面的最新进展。考虑到环保气体替代 SF_6 的紧迫性，突破环保型直流 GIL 绝缘关键技术将是该领域未来重要的研究方向。

6 直流 GIL 设备研制与试验

直流 GIS 和直流 GIL 面临的关键绝缘问题类似，国内外针对直流 GIS 和 GIL 的设备研发工作已经展开了相应研究。早在 1996 年，法国 BPA 和瑞典 ABB 公司联合对一台由交流 550 kV 和 800 kV GIS 改进得到的±500 kV 直流 GIS 样机进行为期 2 年的长期带电试验[108]，试验包括连续直流试验、雷电和操作冲击试验、极性反转试验、局部放电试验和热循环试验，所有试验均通过，证明了直流 GIS 技术的可行性。2000 年，关西电力公司与日立公司等研制的 500 kV 直流 GIS 在进行长期带电试验后成功应用于阿南换流站[4]，但其在一年后降压为±250 kV 运行。

目前，ABB 设计了±320 kV 直流 GIL 绝缘子[47]，并已完成了包括绝缘系统测试在内的型式试验。西门子在交流 GIS 的基础上设计制造了额定电压±320 kV 和±550 kV 的直流 GIS[109-111]。其中，±320 kV 直流 GIS 将用于德国北海风电的 Dolwin5、BorWin5 和美国的 Sunrise 工程。±550 kV 直流 GIS 将用于德国计划中的南北直流输电线路的变电站，预计于 2026 年投运。

国内对直流 GIL 的研制也进行了相关工作。华北电力大学屠幼萍等设计制造了±100 kV 直流 GIL，并通过了水压试验、气密性试验、雷电冲击和操作冲击试验等相关试验[48]。平高集团研制的±200 kV 和±320 kV 直流 GIS 已完成了为期三个月的带电考核试验[45]，如图 13 所示。西电集团设计了±550 kV 直流 GIS，目前已完成了绝缘实验、温升试验、动热稳定试验和机械寿命试验等性能试验，见图 14。

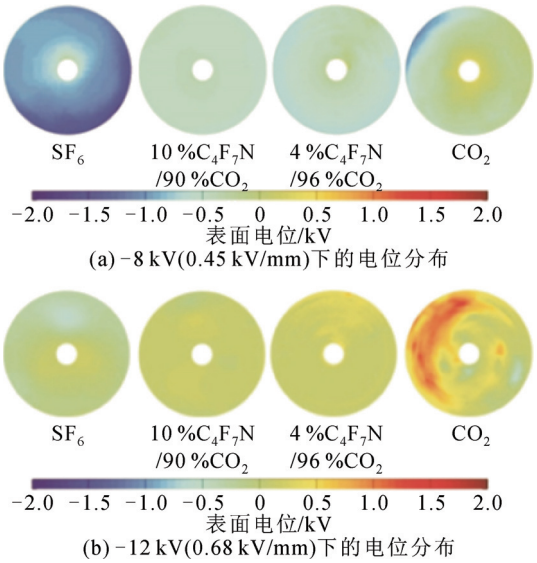


图 12 直流下 C_4F_7N/CO_2 与 SF_6 中绝缘子电势分布[107]

Fig.12 Surface potential distribution of insulators in C_4F_7N/CO_2 and SF_6 gas under DC voltage[107]



图 13 ±210 kV 直流 GIS 长期带电试验

Fig.13 ±210 kV DC GIS long-term live test



图 14 ±550 kV 直流 GIS 绝缘试验

Fig.14 Insulation test of ± 550 kV DC GIS

目前，尽管国内外已经研发了相关的直流 GIL 样机，但是对直流 GIL 的设计标准及性能考核试验仍没有相关标准。ABB 公司提出直流 GIL 型式试验的设计需要包括以下内容[47]：(1)材料绝缘性能评估，包括电阻率测试、击穿实验、空间电荷、表面电荷测试。(2)典型负载情况下的电场分布特性。(3)考虑电应力、温度、外部环境等因素影响的直流 GIL 长期运行稳定性的研究。(4)电场分布对设备尺寸、材料和运行环境的敏感性研究。西门子公司按照

IEC 62271 和国际大电网组织 CIGRE 提出的绝缘系统试验，针对±550 kV 直流 GIS 进行了绝缘实验、温升试验、机械寿命试验/高低温试验、动热稳定试验、绝缘件试验和绝缘系统试验[109-111]。针对±550 kV 直流 GIS 进行的绝缘系统实验[109]，主要包括交流耐压试验和局部放电测量、雷电冲击耐压试验、操作冲击耐压试验、直流叠加雷电冲击耐压试验和直流叠加操作冲击耐压试验。因此建议直流 GIL 样机的型式试验除了包括以上典型的绝缘实验、温升试验、机械寿命实验、动热稳定实验等，还需要进行长期带电试验以验证研发样机的可行性。

7 特高压直流 GIL 研制关键技术

随着我国特高压直流电网的规模化建设，输电线路走廊受限难题逐渐凸显，特高压直流输电西电东送路径需跨越垂直落差大、电磁干扰严格限制、自然与人文景观保护严格等区域，采用常规的架空线或电缆难以满足设计要求[112]，亟需研制出环境友好、高效紧凑的特高压直流 GIL 产品。目前，国内外特高压直流 GIL 设备研发工作尚处于起步阶段，设备内难以完全消除的金属颗粒以及绝缘子的表面电荷积累被认为是影响直流 GIL 装备安全可靠运行的两大关键绝缘问题，以致至今尚无特高压直流 GIL 的工程应用案例。经梳理，特高压直流 GIL 产品研制需解决以下技术难题：

1）直流 GIL 绝缘材料特性、界面效应和电荷效应。受单极性电场应力作用，自由电荷极易发生定向移动而积聚，积聚的表面电荷会导致绝缘子表面电场分布发生畸变，易引发沿面闪络，是制约直流管道输电技术发展的关键问题。因此，需通过研究直流电压条件下金属嵌件与环氧复合材料固–固界面、环氧复合材料与气体介质气–固界面的主要特性，获得影响界面效应的主要因素，提出释缓和消除界面效应的方法。

2）直流 GIL 金属微粒的运动特性与控制技术。在 GIL 生产、装配和运行过程中，金属微粒的产生不可避免，是 GIL 绝缘故障的重要诱因，而直流 GIL 中金属微粒的活跃程度更高，电–磁–热–流耦合场中微粒与电荷共同作用更剧烈，金属微粒在直流 GIL 内的运动特性和治理措施是亟待解决的难题。因此，需研究金属微粒在直流电场下的运动特性，探索金属粒子对 GIL 绝缘子表面电荷特性的影响及引发气–固沿面放电的机理，提出抑制直流 GIL 内部金属微粒活性的有效方案。

3）直流 GIL 多物理场仿真分析与绝缘结构优化设计。直流 GIL 运行工况复杂，受电、热、力等多重因素影响，其绝缘可靠性直接影响产品的安全运行。需建立直流电压下绝缘件的气–固界面电荷产生、输运、积聚与消散动力学模型，研究关键绝缘结构在电、热、暂态电压作用下的电场分布规律，提出绝缘气体配置方案及绝缘子配置方式，开发出适用的支撑绝缘子及气隔绝缘子。

4）直流 GIL 关键工艺技术研究与模拟试验样机试制。直流 GIL 对杂质颗粒、内部气隙、气固界面异物等典型绝缘子制造缺陷更加敏感，对尖角毛刺、金属异物等控制要求更严，产品制造工艺难度大。需研究获得抑制绝缘子制造缺陷的方法，提出典型单元结构设计及制造工艺，试制出特高压直流 GIL 模拟试验样机单元。

5）直流 GIL 试验考核方法研究。特高压直流 GIL 缺乏设计、制造及运行经验，为保证产品的安全可靠运行，需研究提出适用于特高压直流 GIL 的考核技术方案及评价技术，并开展相关试验验证。

6）直流 GIL 状态感知与智能化运维技术研究。针对直流 GIL 运维难题，提出直流 GIL 状态全息感知方案，开发状态精准评估和预警系统，实现 GIL 绝缘状态、机械状态和发热状态的全面感知、精准评估和和故障隐患辨识。

特高压直流 GIL 研制需首先开展相关基础理论研究，掌握直流 GIL 绝缘材料特性、界面效应和电荷效应规律、直流电场下金属微粒运动特性与控制技术等；其次开展多物理场仿真分析与产品优化设计，研制出直流 GIL 单元；最后提出产品试验考核方法，完成样机试验，并提出现场运行状态感知与智能化运维方案。特高压直流 GIL 关键技术研究与样机研发技术路线如图 15 所示。

8 结论

1）进一步研究直流 GIL 中关键部件的绝缘性能提升方法，考虑不同理念电荷调控手段的协同作用，将抑制电荷注入、提高电荷疏散两种改善电场分布的理念协同运用提出新的电荷调控方法。比如，采用 FGM 材料、在电极–绝缘子的界面进行 Cr_2O_3 薄层覆盖、优化绝缘子的形状、在电荷易积聚区域进行非线性电导材料的涂覆、布置微粒陷阱等措施提高绝缘子的闪络电压。

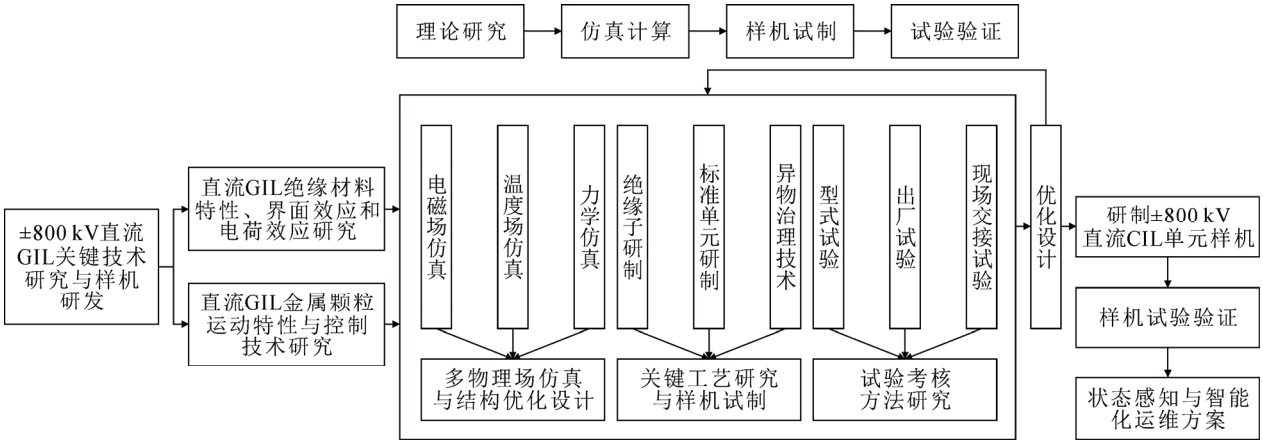


图 15 ±800 kV 直流 GIL 研制技术路线

Fig.15 Technology roadmap of ±800 kV DC GIL

2）针对目前绿色环保电力设备发展的需求，应进一步研究 C_4F_7N 等新型环保绝缘气体在直流 GIL 中的应用可行性，全面掌握新型环保气体在直流电压下的间隙击穿、沿面闪络、气固界面电荷积聚等特性，提出适用于 SF_6 及环保气体的气固两相协同匹配的直流 GIL 绝缘通用设计原则，有效指导直流 GIL 产品研发和应用。

3）基于实际应用场景的条件，搭建与真实绝缘子服役场景契合度更高的直流 GIL 样机实验平台，研究多因素(温度、湿度、电场、压强、振动等)共同作用下直流 GIL 的性能。尝试对采用不同技术手段的样机进行控制变量法的耐闪络性能测试，通过试验结果对比找寻彼此间的优缺点。

4）在样机的考核验证方面，采用 CIGRE 国际大电网组织建议的试验方法，进行一年以上的带电考核验证，并采用相应的局部放电监测手段检验其运行可靠性。

参考文献 References

[1] 周远翔，陈健宁，张 灵，等. “双碳”与“新基建”背景下特高压输电技术的发展机遇[J]. 高电压技术，2021，47(7)：2396-2408.
ZHOU Yuanxiang, CHEN Jianning, ZHANG Ling, et al. Opportunity for developing ultra high voltage transmission technology under the emission peak, carbon neutrality and new infrastructure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(7): 2396-2408.

[2] KOCH H. Gas-insulated transmission lines (GIL)[M]. Piscataway: John Wiley & Sons, 2012.

[3] 相中华，牛 勃，马飞越，等. GIS 绝缘子的直接氟化与直流闪络性能[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4306-4315.
XIANG Zhonghua, NIU Bo, MA Feiyue, et al. Direct fluorination and DC flashover performance of GIS spacers[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4306-4315.

[4] RIECHERT U, KOSSE M. HVDC gas-insulated systems for compact substation design[C]//CIGRE Session 48. Paris, France: CIGRE, 2020: B3-120.

[5] KUMARA S, ALAM S, HOQUE I R, et al. DC flashover characteristics of a polymeric insulator in presence of surface charges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 1084-1090.

[6] LI C Y, HU J, LIN C J, et al. The potentially neglected culprit of DC surface flashover: electron migration under temperature gradients[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 3271.

[7] LUO Y, TANG J, PAN Z J, et al. How temperature and pressure affect the electric field distribution in HVDC GIS/GIL: a numerical study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1334-1342.

[8] WINTER A, KINDERSBERGER J, TENZER M, et al. Solid/gaseous insulation systems for compact HVDC solutions[C]// CIGRE Session 45. Paris, France: CIGRE, 2014: D1-102.

[9] MA J T, ZHANG Q G, WU Z C, et al. Breakdown characteristics of particle-contaminated HVDC GIL under superimposed voltage of DC and impulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1439-1447.

[10] 王 健，倪潇茹，王志远，等. 直流 GIL 金属微粒陷阱捕捉概率与优化设计[J]. 高电压技术，2018，44(12)：4090-4097.
WANG Jian, NI Xiaoru, WANG Zhiyuan, et al. Trapping probability and designing optimization of particle trap in DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 4090-4097.

[11] 张博雅，张贵新. 直流 GIL 中固−气界面电荷特性研究综述Ⅰ：测量技术及积聚机理[J]. 电工技术学报，2018，33(20)：4649-4662.
ZHANG Boya, ZHANG Guixin. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, part I: measurement and mechanisms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4649-4662.

[12] 张博雅，张贵新. 直流 GIL 中固−气界面电荷特性研究综述Ⅱ：电荷调控及抑制策略[J]. 电工技术学报，2018，33(22)：5145-5158.
ZHANG Boya, ZHANG Guixin. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, part Ⅱ: charge control and suppression strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5145-5158.

[13] CIGRE Technical Brochure. Dielectric testing of gas insulated HVDC systems: CIGRE JWG D1/B3.57[S], 2021.

[14] SATO S, ZAENGL W S, KNECHT A. A numerical analysis of accumulated surface charge on DC epoxy rrsin spaces[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1987, EI-22(3): 333-340.

[15] NITTA T, NAKANISHI K. Charge accumulation on insulating spacers for HVDC GIS[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(3): 418-427.

[16] MANGELSDORF C W, COOKE C M. Bulk charging of epoxy insulation under DC stress[C]//1980 IEEE International Conference on Electrical Insulation. Boston, USA: IEEE, 1980: 146-149.

[17] IWABUCHI H, DONEN T, MATSUOKA S, et al. Influence of surface-conductivity nonuniformity on charge accumulation of GIS downsized model spacer under DC field application[J]. Electrical Engineering in Japan, 2012, 181(2): 29-36.

[18] STRAUMANN U, SCHULLER M, FRANCK C M. Theoretical investigation of HVDC disc spacer charging in SF_6 gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2196-2205.

[19] WINTER A, KINDERSBERGER J. Stationary resistive field distribution along epoxy resin insulators in air under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1732-1739.

[20] WANG Q, ZHANG G X, WANG X X. Characteristics and mechanisms of surface charge accumulation on a cone-type insulator under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 150-155.

[21] 汪　沨，方　志，邱毓昌. 高压直流 GIS 中绝缘子的表面电荷积聚的研究[J]. 中国电机工程学报，2005，25(3)：105-109.
WANG Feng, FANG Zhi, QIU Yuchang. Study of charge accumulation on insulator surface in HVDC GAS-INSULATED SWITCHGEAR[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 105-109.

[22] LI M, LI C R, ZHAN H M, et al. Effect of surface charge trapping on dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2008, 92(3): 031503.

[23] 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.

[24] XUE J Y, WANG H, CHEN J H, et al. Effects of surface roughness on surface charge accumulation characteristics and surface flashover performance of alumina-filled epoxy resin spacers[J]. Journal of Applied Physics, 2018, 124(8): 083302.

[25] 王邸博，唐　炬，刘　凯. 直流高压下 GIS 支柱绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 高电压技术，2015，41(9)：3073-3081.
WANG Dibo, TANG Ju, LIU Kai, et al. Charge accumulation on post insulator surface under HVDC in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3073-3081.

[26] 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.

[27] LUO Y, TANG J, PAN C, et al. Transition of the dominant charge accumulation mechanism at a gas-solid interface under DC voltage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(15): 3078-3088.

[28] LUTZ B, KINDERSBERGER J. Surface charge accumulation on cylindrical polymeric model insulators in air: simulation and measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 2040-2048.

[29] 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)：1251-1259.
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): 1251-1259.

[30] MA G M, ZHOU H Y, LIU S P, et al. Measurement and simulation of charge accumulation on a disc spacer with electro-thermal stress in SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1221-1229.

[31] ZHONG J Y, ZHANG B, HAO L C, et al. Thermoelectric coupling characteristics of 1100 kV GIS/GIL basin insulators under AC and DC voltage[C]// 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China: IEEE, 2020: 852-856.

[32] DU B X, DONG J N, LI J, et al. Gas convection affecting surface charge and electric field distribution around tri-post insulators in ±800 kV GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1372-1379.

[33] 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]. 电工电能新技术，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 tri-post insulator under temperature gradients[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(7): 20-27.

[34] ZHANG B Y, QI Z, ZHANG G X. Thermal gradient effects on surface charge of HVDC spacer in gas insulated system[C]// 2016 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Toronto, Canada: IEEE, 2016: 703-706.

[35] ZAVATTONI L. Conduction phenomena through gas and insulating solids in HVDC gas insulated substations, and consequences on electric field distribution[D]. Grenoble: Université de Grenoble, 2014.

[36] ZAVATTONI L, HANNA R, LESAINT O, et al. Dark current measurements in humid SF_6: influence of electrode roughness, relative humidity and pressure[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(37): 375501.

[37] 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.

[38] LI C Y, ZHANG L, WANG Y, et al. Conductor surface roughness-dependent gas conduction process for HVDC GIL—part II: experiment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3): 988-995.

[39] HASEGAWA T, YAMAJI K, HATANO M, et al. Development of insulation structure and enhancement of insulation reliability of 500 kV DC GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 194-202.

[40] MA G M, ZHOU H Y, LI C R, et al. Designing epoxy insulators in SF_6-filled DC-GIL with simulations of ionic conduction and surface charging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3312-3320.

[41] VOLPOV E. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF_6 gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949-963.

[42] VOLPOV E. HVDC gas insulated apparatus: electric field specificity and insulation design concept[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(2): 7-36.

[43] DE LORENZI A, GRANDO L, PESCE A, et al. Modeling of epoxy resin spacers for the 1 MV DC gas insulated line of ITER neutral beam injector system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 77-87.

[44] 王　刚，魏建巍，贺永明，等. ±200 kV 直流盆式绝缘子的研制[J].

绝缘材料，2021，54(4)，64-71.
WANG Gang, WEI Jianwei, HE Yongming, et al. Development of ±200 kV DC basin insulator[J]. Insulating Materials, 2021, 54(4), 64-71.

[45] NAKANISHI K, YOSHIOKA A, ARAHATA Y, et al. Surface charging on epoxy spacer at DC stress in compressed SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(12): 3919-3927.

[46] RIECHERT U, STRAUMANN U, GREMAUD R, et al. Compact gas-insulated systems for high voltage direct current transmission: basic design[C] // 2016 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Dallas, USA: IEEE, 2016: 1-5.

[47] TU Y P, CHEN G, LI C Y, et al. ±100 kV HVDC SF_6/N_2 gas-insulated transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 735-744.

[48] CHU P F, ZHANG H, ZHAO J, et al. On the volume resistivity of silica nanoparticle filled epoxy with different surface modifications[J]. Composites Part A, 2017, 99: 139-148.

[49] RACHMAWATI, KOJIMA H, HAYAKAWA N, et al. Electric field simulation of permittivity and conductivity graded materials (ε/σ -FGM) for HVDC GIS spacers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 736-744.

[50] ZHANG B Y, GAO W Q, HOU Y C, 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.

[51] WANG T Y, ZHANG G X, LI D Y, et al. MXene-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators in a DC gas-insulated system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 939-946.

[52] MOHAMAD A, CHEN G, ZHANG Y, et al. Surface potential decay measurements on fluorinated polymeric insulation for high voltage DC applications[C] // 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Shenzhen, China: IEEE, 2013: 1132-1135.

[53] AN Z L, CHEN W J, CHEN K, et al. Comparative study on direct fluorination and surface properties of alumina-filled and unfilled epoxy insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 85-93.

[54] ZHANG B Y, ZHANG G X, WANG Q, et al. Suppression of surface charge accumulation on Al_2O_3-filled epoxy resin insulator under dc voltage by direct fluorination[J]. AIP Advances, 2015, 5(12): 127207.

[55] DU B X, HUANG P H, XING Y Q. Surface charge and flashover characteristics of fluorinated PP under pulse voltage[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(1): 18-24.

[56] ZHANG C, LIN H F, 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.

[57] YUE W Y, MIN D M, NIE Y J, et al. Plasma treatment enhances surface flashover performance of EP/AI2O3 micro-composite in vacuum[C] // 12th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Xi'an, China: IEEE, 2018: 1086-1089.

[58] TU Y P, ZHOU F W, JIANG H, et al. Effect of nano-TiO_2/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.

[59] SHAO Q Q, SIMA W X, SUN P, et al. A novel nonlinear conductive ZnO micro-varistor/epoxy resin composite film for metallic particle deactivation in DC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 675-683.

[60] LIANG H C, DU B X, LI J. Electric field regulation and parameter optimization of surface nonlinear conductivity spacer for 500 kV DC-GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1330-1338.

[61] 梁虎成，王雨帆，杜伯学，等. 表层非线性电导盆式绝缘子表面电荷分布与沿面放电特性[J]. 中国电机工程学报，2022，42(2): 835-843.
LIANG Hucheng, WANG Yufan, DU Boxue, et al. Surface charge distribution and discharge behaviors of basin spacer with surface nonlinear conductivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(2): 835-843.

[62] 李　进，张　程，杜伯学，等. 直流 GIL 用非线性电导环氧绝缘子电场仿真[J]. 高电压技术，2019，45(4)：1056-1063.
LI Jin, ZHANG Cheng, DU Boxue, et al. Electrical field simulation of epoxy spacer with nonlinear conductivity for DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1056-1063.

[63] XUE J Y, CHEN J H, DONG J H, 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.

[64] ZHANG B Y, WANG Q, ZHANG Y X, et al. A self-assembled, nacre-mimetic, nano-laminar structure as a superior charge dissipation coating on insulators for HVDC gas-insulated systems[J]. Nanoscale, 2019, 11(39): 18046-18051.

[65] WANG T Y, ZHANG G X, ZHANG B Y, el al. Oriented boron nitride nanosheet films for thermal management and electrical insulation in electrical and electronic equipment[J]. ACS Applied Nano Materials, 2021, 4(4): 4153-4161.

[66] TENZER M, HINRICHSEN V, WINTER A, et al. Compact gas-solid insulating systems for high-field-stress in HVDC applications[C] // CIGRE Session. Brisbane, Australia: CIGRE, 2013.

[67] GREMAUD R, DOIRON C, BAUR M, et al. Solid-gas insulation in HVDC gas-insulated system: measurement, modeling and experimental validation for reliable operation[C] // CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2016: D1-101.

[68] XIAO S, ZHANG X X, ZHUO R. The influence of Cu, Al and Fe free metal particles on the insulating performance of SF_6 in C-GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2299-2305.

[69] 孙秋芹，罗宸江，王　峰，等. 直流 GIL 导体表面金属颗粒跳跃运动特性研究[J]. 电工技术学报，2018，33(22)：5206-5216.
SUN Qiuqin, LUO Chenjiang, WANG Feng, et al. Jumping characteristics of metal particle on the surface of DC gas insulated transmission line conductor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5206-5216.

[70] 汪　飏，邱毓昌. 直流气体绝缘开关装置绝缘设计的探讨[J]. 中国电力，2002，35(11)：47-50.
WANG Feng, QIU Yuchang. Discussion on the electrical insulation design of the HVDC gas insulated switchgear[J]. Electric Power, 2002, 35(11): 47-50.

[71] 程　涵，魏　威，AYUBI B，等. 直流 GIL 中线形金属微粒电动力学行为研究[J]. 电工技术学报，2021，36(24)：5283-5293.
CHENG Han, WEI Wei, AYUBI B, et al. Study on the electrodynamic behavior of linear metal particles in DC gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(24): 5283-5293.

[72] 律方成，刘宏宇，颜湘莲，等. 直流均匀场中球形金属微粒与电极

碰撞的超声特性研究[J]. 高压电器，2017，53(12)：1-7.
LÜ Fangcheng, LIU Hongyu, YAN Xianglian, et al. Ultrasound characteristics of impact between spherical metal particles and electrode in DC uniform field[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(12): 1-7.

[73] PEDERSEN A. Calculation of spark breakdown or corona starting voltages in nonuniform fields[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(2): 200-206.

[74] BUDIMAN F N, KHAN Y, Al-ARAINY A A, et al. Estimation of particle initiated PD inception voltage around spacer in GIS[C]// 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. Istanbul, Turkey: IEEE, 2013: 517-521.

[75] RADWAN R M, MORSI R, ABD-ALLAH M A. Motion of free conducting particles in SF_6 insulated systems under dc switching voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(1): 25-30.

[76] 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.

[77] KHAN Y, SAKAI K I, LEE E K, et al. Motion behavior and deactivation method of free-conducting particle around spacer between diverging conducting plates under DC voltage in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 444-457.

[78] 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.

[79] OKABE S, UETA G, UTSUMI T. Behavior of metallic particles in GIS under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2889-2897.

[80] 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.

[81] 王　健，李庆民，李伯涛，等. 考虑非弹性随机碰撞与 SF_6/N_2 混合气体影响的直流 GIL 球形金属微粒运动行为研究[J]. 中国电机工程学报，2015，35(15)：3971-3978.
WANG Jian, LI Qingmin, LI Botao, et al. Motion analysis of spherical conducting particle in DC GIL considering the influence of inelastic random collisions and SF_6/N_2 gaseous mixture[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3971-3978.

[82] 孙继星，陈维江，李志兵，等. 直流电场下运动金属微粒的带电估算与碰撞分析[J]. 高电压技术，2018，44(3)：779-786.
SUN Jixing, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Charge estimation and impact analysis of moving metal particle under DC electric field[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 779-786.

[83] 律方成，刘宏宇，李志兵，等. 直流电压下 SF_6 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.
LÜ Fangcheng, LIU Hongyu, LI Zhibing, et al. Influence mechanism of dielectric coated electrodes on metallic particle lift-off in SF_6 gas under DC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 239-247.

[84] 律方成，刘宏宇，阴　凯，等. 直流 GIL 不均匀场中金属微粒运动的数值模拟及放电特性分析[J]. 中国电机工程学报，2017，37(10)：2798-2806.
LÜ Fangcheng, LIU Hongyu, YIN Kai, et al. Numerical simulation and discharge characteristic analysis of metallic particle motion in non-uniform electric field of DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2798-2806.

[85] 常亚楠，王　健，李庆民，等. 交直流气体绝缘管道输电装备微粒污染治理措施研究进展[J]. 高压电器，2021，57(10)：91-100，110.
CHANG Yanan, WANG Jian, LI Qingmin, et al. Research progress of particle contamination suppression measures in AC and DC gas-insulated transmission equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 91-100, 110.

[86] 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 phenyl-thioether 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.

[87] 黎　斌. SF_6 高压电器设计[M]. 3 版. 北京：机械工业出版社，2010.
LI Bin. SF_6 High-voltage electrical appliance design[M]. 3rd ed. Beijing, China: Machinery Industry Press, 2010.

[88] WINTER A, KINDERSBERGER J. Surface charge accumulation on insulating plates in SF_6 and the effect on DC and AC breakdown voltage of electrode arrangements[C]// Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2002: 757-761.

[89] XIE Q, LIANG S D, FU K X, et al. Distribution of polymer surface charge under DC voltag and its influence on surface flashover characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2157-2168.

[90] AMER M, LANINGA J, MCDERMID W, et al. Surface charging and its effects on DC flashover strengt of insulating materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(6): 2452-2460.

[91] DU B X, LI Z L. Surface charge and dc flashover characteristics of direct-fluorinated SiR/SiO_2 nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(6): 2602-2610.

[92] 许　航，司马文霞，孙魄韬，等. SF_6 气氛中表面电荷对环氧树脂气固界面电子倍增过程的影响机制[J]. 高电压技术，2022，48(5)：1716-1725.
XU Hang, SIMA Wenxia, SUN Potao, et al. Effect of surface charge on electron multiplication process of ER/SF_6 interface[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1716-1725.

[93] QI B, GAO C J, LI C R, et al. The influence of surface charge accumulation on flashover voltage of GIS/GIL basin insulator under various voltage stresses[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 105: 514-520.

[94] FLORKOWSKI M, KRZEŚNIAK D, KUNIEWSKI M, et al. Surface discharge imaging in presence of deposited space charges in non-uniform DC electric field[J]. High Voltage, 2021, 6(4): 576-589.

[95] LI Z, LI S T, XU H M, et al. The mechanism of gas pressure and temperature dependent surface flashover in compressed gas involving gas adsorption[J]. Applied Surface Science, 2021, 539: 148107.

[96] FLORKOWSKI M. Imaging and simulations of positive surface and airborne streamers adjacent to dielectric material[J]. Measurement, 2021, 186: 110170.

[97] IWABUCHI H, MATSUOKA S, KUMADA A, et al. Influence of tiny metal particles on charge accumulation phenomena of GIS model spacer in high-pressure SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics

and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1895-1901.

[98] WANG J, WANG J R, HU Q, et al. Mechanism analysis of particle-triggered flashover in different gas dielectrics under DC superposition lightning impulse voltage[J]. IEEE Access, 2020, 8: 182888-182897.

[99] XING Y Q, SUN X B, YANG Y, et al. Metal particle induced spacer surface charging phenomena in direct current gas-insulated transmission lines[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021, 54(34): 34LT03.

[100] MORCOS M M, WARD S A, ANIS H, et al. Insulation integrity of GIS/GITL systems and management of particle contamination[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(5): 25-37.

[101] LI X L, CAO C, LIN X. Influence of conducting particle on dc flashover characteristics and tracking property of GIS/GIL insulator[J]. IEEE Access, 2022, 10: 17212-17220.

[102] 邵千秋，孙魄韬，司马文霞，等. 铜微粒对环氧树脂直流沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1651-1659.
SHAO Qianqiu, SUN Potao, SIMA Wenxia, et al. Effect of a copper particle on DC surface flashover characteristics of epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1651-1659.

[103] MING L, VLASTOS A E. Influence of impulse voltage waveshape on the flashover of clean and particle-contaminated spacers in SF_6 gas-insulated system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 326-334.

[104] TU Y P, CHEN G, WANG C, et al. Feasibility of C_3F_7CN/CO_2 gas mixtures in high-voltage DC GIL: a review on recent advances[J]. High Voltage, 2020, 5(4): 377-386.

[105] ZHANG B Y, LI X W, WANG T Y, et al. Surface charging characteristics of GIL model spacers under DC stress in C_4F_7N/CO_2 gas mixture[J]. Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(2): 597-605.

[106] LIU Y, LIU J B, DONG J H, et al. Surface charge accumulation characteristics in C_4F_7N mixtures with different buffer gases[C]// 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Wuhan, China: IEEE, 2021: 1-4.

[107] CHEN G, TU Y P, WU S C, et al. Intrinsic hetero-polar surface charge phenomenon in environmental friendly C_3F_7CN/CO_2 gas mixture[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(18): 18LT03.

[108] MENDIK M, LOWDER S M, ELLIOTT F. Long term performance verification of high voltage DC GIS[C]// 1999 IEEE Transmission and Distribution Conference. New Orleans, USA: 1999: 484-488.

[109] MAGIER T, TENZER M, KOCH H. Direct current gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 440-446.

[110] KOSSE M, JUHRE K, KUSCHEL M, et al. Overview of development, design, testing and application of compact gas-insulated DC systems up to ±550 kV[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 567-577.

[111] HALLAS M, HINRICHSEN V, NEUMANN C, et al. Cigré prototype installation test for gas-insulated DC systems - testing a gas-insulated DC transmission line (DC-GIL) for ±550 kV and 5000 a under real service conditions[C]// CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2020.

[112] 范建斌，李　鹏，李金忠，等. ±800 kV 特高压直流 GIL 关键技术研究[J]. 中国电机工程学报，2008，28(13)：1-7.
FAN Jianbin, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Study on key technology of ±800 kV UHVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 1-7.



张长虹
1983—，男，教授级高工
主要从事高电压试验技术、高压电器方面的研究工作
E-mail: 183048839@qq.com

ZHANG Changhong
Senior engineer



张博雅(通信作者)
1990—，男，博士，副教授，博导
主要从事高电压与大电流、气体放电与等离子体方面的科研工作
E-mail: zhangby@xjtu.edu.cn

ZHANG Boya
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期　2022-12-12　修回日期　2023-03-06　　编辑　曹昭君