第 52 卷 第 5 期：2039-2051 高电压技术 Vol.52, No.5: 2039-2051
2026 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250405

胶浸纸干式套管气-固界面绝缘研究综述

刘轩东，李敏洁，史万豪，商高屹
（电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学)，西安 710049）

摘　要：近年来特高压胶浸纸干式套管多次发生沿面放电事故，引起广泛关注，分析表明环氧胶浸纸电容芯体与SF_6气体构成的气-固界面绝缘失效是引发事故的主要原因之一。因此，胶浸纸干式套管气-固界面绝缘成为当前广泛关注的研究热点。该文结合胶浸纸干式套管结构与运行工况，探讨了温度梯度、金属微粒、表面粗糙度、表面电荷积聚对沿面闪络的影响规律；分析了气-固界面闪络的物理过程和作用机制；梳理了气-固界面绝缘性能提升的主要技术手段；并讨论了胶浸纸干式套管气-固界面绝缘有待深入研究的问题及未来的发展趋势。

关键词：胶浸纸干式套管；气-固界面；沿面闪络；闪络机理；绝缘优化

Review of Research on Gas-solid Interface Insulation of Dry-type Epoxy Resin Impregnated Paper Bushing

LIU Xuandong, LI Minjie, SHI Wanhao, SHANG Gaoyi
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract：In recent years, there have been multiple incidents of gas-solid interface discharge in ultra-high voltage epoxy resin impregnated paper dry-type bushings, which have attracted widespread attention. Analysis shows that the insulation failure of the gas-solid interface between the epoxy resin impregnated paper capacitor core and SF_6 gas is one of the main causes of the accidents. Therefore, the gas-solid interface insulation of epoxy resin impregnated paper dry-type bushings has become a widely studied hotspot. This article explores the influences of temperature gradient, metal particles, surface roughness, and surface charge accumulation on surface flashover by combining the structure and operating conditions of epoxy resin impregnated paper dry-type bushings. Meanwhile, the physical process and mechanism of gas-solid interface flashover are analyzed, the main technical methods for improving the insulation performance of gas-solid interfaces are summarized, and the issues and future development trends of gas-solid interface insulation for epoxy resin impregnated paper dry-type bushings that need further research are discussed.

Key words：dry-type epoxy resin impregnated paper bushing; gas-solid interface; surface flashover; flashover mechanism; insulation optimization

0　引言

套管是用于换流变压器、换流阀组、平波电抗器等换流站设备的关键高压电气组件，具备绝缘、支撑与载流功能，是特高压直流输电系统的关键部件。胶浸纸套管因具有无油、无爆炸风险、机械强度高、介电性能好等优点，目前已广泛应用于特高压换流站[1]。

胶浸纸干式套管内部绝缘结构主要包括环氧树脂浸纸电容芯体固体绝缘与电容芯体/SF_6 气-固界面绝缘。后者因介电特性差异及气体环境变化等因素的影响，成为气体绝缘设备内的绝缘薄弱点之一[2]。其电容芯体制备工艺为：在每层浸纸内包入铝箔电极，再浇注环氧树脂，经固化后车削加工成特定锥体结构。这种绝缘结构使得电容芯体同时存在径向与轴向电场分量，沿面电场分布复杂[3]。此外，胶浸纸干式套管沿面距离很长，套管芯体表面经常存在纤维裸露、粗糙度不一致等情况，导致界面存在微放电与电荷积聚，加剧了气-固界面绝缘特性的复杂性[2]。近年来，国内外胶浸纸干式套管内发生多起环氧树脂浸纸电容芯体/SF_6 气-固界面贯穿性放电故障，例如 2022 年雁门关换流站±400 kV 穿墙套管和豫南换流站±800 kV 换流变干式阀侧套管内绝缘闪络事故[2]。相关放电事故均引发对应换流变压器阀组闭锁与停运，对特高压直流输电安全

基金资助项目：国家自然科学基金(U25B20195)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (U25B20195).

稳定运行造成严重影响，引起了广泛关注和研究。

本文从胶浸纸干式套管绝缘结构与放电影响因素入手，总结了胶浸纸干式套管沿面绝缘特性。综述了气-固界面闪络理论模型的最新进展。从结构优化、材料改性与表面改性三方面归纳了气-固界面绝缘优化手段。最后探讨了胶浸纸干式套管气-固界面绝缘领域有待研究的问题及未来的发展趋势。

1 胶浸纸干式套管沿面绝缘特性

1.1 胶浸纸干式套管绝缘结构

本文选取换流变压器阀侧套管与穿墙套管用于介绍胶浸纸干式套管绝缘结构，如图 1 所示。最外层为复合绝缘子外套，由硅橡胶和玻璃钢等绝缘材料制成，设计为伞裙结构以增加沿面距离，防止发生闪络。次外层为 SF_6 气腔，作为辅助绝缘。主绝缘为环氧树脂浸纸电容芯体，电容芯体内含有多层铝箔，用于控制套管内部轴向与径向电场。最内层为紫铜制作的导杆式载流管，用于传输电流。当载流量较大时，导杆发热严重，而由于环氧浸纸芯体导热率较低，导致套管运行期间电容芯体承受较大的温度与温度梯度。为防止高温损坏电容芯体，学者提出了双导管结构，如图 1(a)所示。外导管为铝合金卷制管，承载电容芯体；内导管为载流导杆，避免电容芯体直接与高温导杆直接接触。此外，在不同的环境温度与负荷下，套管内的温度分布也会随之变化。为了避免套管内热胀冷缩导致应力集中，破坏导杆结构，学者们又提出一种分段连接式导杆。上部是铝导杆，下部是铜导杆，中间采用表带触指连接。但表带触指也会由于电连接失效，导致套管发生过热故障[4]。因此须结合具体运行工况选择一体式导杆或分段式导杆时。

可知，胶浸纸干式套管电容芯体表面同时存在径向与轴向电场分量，沿面电场分布复杂。且实际运行中，“铜铝过渡连接”段长期微动磨损将产生金属微粒，在电场作用下，金属微粒可能发生运动或附着于芯体表面，影响沿面绝缘特性。此外，由于制备工艺的不足，套管芯体表面会存在纤维裸露、粗糙度不一致等情况[2]。由图 1 可知，胶浸纸干式套管属于长径比结构，这种长距离沿面加剧了研究各种因素对沿面绝缘特性的复杂性。

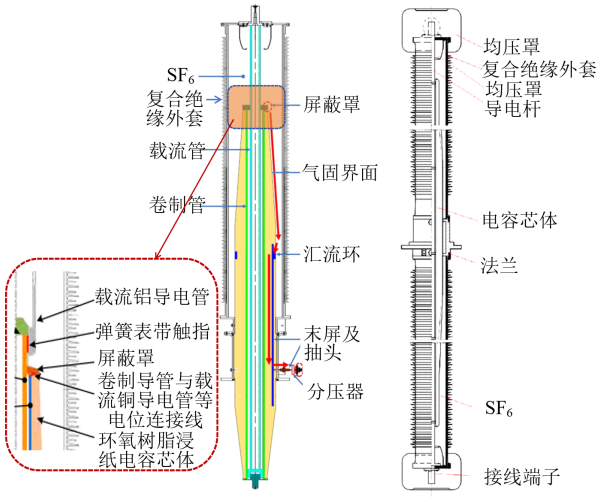
1.2 胶浸纸套管沿面绝缘影响因素

胶浸纸干式套管沿面绝缘特性主要受温度梯度、金属微粒及表面粗糙度不均等因素影响，如图 2 所示。1）由于导杆发热严重，电容芯体散热性能差，在芯体内部及表面会产生温度梯度，温度梯度通过改变材料电导率影响电场分布。2）套管在制备生产运行过程中不可避免地引入金属微粒、环氧晶粒或纤维碎屑，这些微粒处于屏蔽罩与电容芯体间隙时，大尺寸金属微粒的跳动、微米极小尺寸金属微粒与异物的附着会导致局部电场集中，增大电离概率，当气体作为主导因素时，异极性电荷密度的增加将进一步畸变间隙电场。3）由于打磨工艺不足导致的沿面粗糙度不均匀也会影响表面电荷积聚，较粗糙区域会提升电荷入陷概率，导致局部电荷密度增加，影响沿面电场分布。

1.2.1 温度梯度

胶浸纸干式套管采用环氧树脂浸纸电容芯体作为主绝缘结构，而环氧材料导热率较低，仅为 0.2~0.4 W/(m·K)，随着电压等级的提升，设备尺寸增大，散热更为困难，导致电容芯体存在较大的温度梯度。而温度梯度导致环氧树脂的体电导率发生数量级的变化，进而严重影响胶浸纸干式套管的电场分布[5-8]。此外，温度梯度也会对材料沿面绝缘特性产生影响，例如沿面放电过程中电子发射、气体吸附与气体间的碰撞电离，电荷积聚等[9-11]。

目前大量学者通过设计电-热耦合试样模型展开实验，探讨了温度梯度对沿面闪络电压的影响。何金良等人提出温度梯度导致了电导率梯度，使高压电极附近的表面电势上升，低压电极场强增加，当高压电极温度上升 100 ℃时，沿面电场强度增加



(a) 换流变阀侧套管绝缘结构 (b) 直流穿墙套管绝缘结构

图 1 胶浸纸干式套管绝缘结构

Fig.1 Insulation structure of the dry type epoxy resin impregnated paper bushing

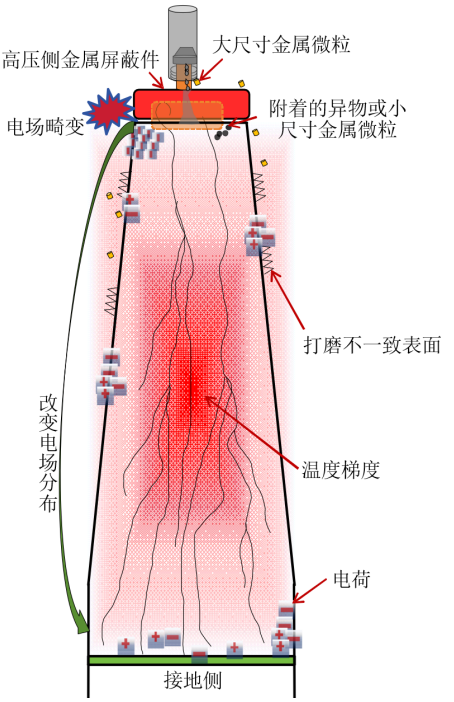


图 2 套管沿面闪络综合原因示意图

Fig.2 Schematic diagram of comprehensive causes of bushing surface flashover

了 3 倍左右[12]。Hering 等人通过加热地电极使环氧产生温度梯度，结果表明最大电场出现在低压电极，现象与何金良一致，实验结果表明当温差达到 80 ℃时，环氧的绝缘性能下降了 10%~15%[13]。宋波则重点关注低温度梯度下环氧沿面绝缘特性，同样发现沿面闪络电压随温度梯度的增大而减小，当温差达到 100 K 时，环氧沿面闪络电压降低了 24.1%[14]。宋波的实验结果表明最大电场强度出现在高压电极，这与何金良结果相反。这是因为二者高温点布置位置不同，前者将高压电极设置为温度高点，而后者的低压电极为高温位置，可知，最大场强总是向温度较低一侧移动。吴延宇研究了不同的环境温度对沿面绝缘特性的影响，他通过实验发现在 25~70 ℃范围内，闪络电压出现了先下降后增加的趋势，40 ℃时存在最低点。分析认为温度升高时，将导致 SF_6 气体临界场强下降与环氧树脂表面陷阱能级上升，当温度升高超过某一界限时，陷阱能级的作用将大于临界场强的下降，因此，沿面闪络电压出现了上升现象[15]。

此外，许多研究人员也利用数值模拟法深入探讨了温度梯度对表面电荷积聚的影响。谢子豪建立了二维气-固界面电荷积聚模型，讨论了环境温度在(−20~80 ℃)范围内环氧树脂沿面电荷及电场分布情况。计算发现温度的升高将导致环氧树脂表面电荷密度增大，当温度为 80 ℃时，电场畸变率达到 2%[16]。马国明等以绝缘子为研究对象，通过改变载流量控制温度分布，研究发现载流量增大时，下表面电荷密度峰值增加了 60.3%，切向电场强度增大了 17.8%[17-18]。Hajime Shimakawa 等人研究了表面电荷积聚对温度的依赖性以及对电场畸变的影响，结果表明，使用电荷捕获机理来解释其积聚现象是合理的，高温下电荷积累的速度更快[19]。J.Kindersberger 等建立了温度梯度下的表面电荷积聚模型，结果表明当温度>278 K 时，体电导为表面电荷来源的主要因素[20]。宋波等人同样研究了低温温度梯度下的表面电荷积聚现象，发现当高压侧与低压侧的温差 ΔT=100 K 时，材料表面最高电荷密度可达 68.68 μC/m^2[14]。

因此，温度对沿面绝缘性能的影响由界面临界电场、材料电导率、表面电荷密度与表面陷阱能级共同决定，最大电场总是出现在温度较低的一侧。但目前研究不足的是，上述学者均是以样片为模型开展仿真或实验分析，而胶浸纸套管属于长径比结构，沿面距离长。且温度梯度为电容芯体内的轴向分布，如图 3 所示，而非当前主要研究的沿面径向温度梯度。在该工况下，芯体内部轴向温度不均匀分布对表面电导、长距离沿面电荷积聚情况以及沿面闪络电压的相关研究较为缺乏，相关理论尚不明确。

1.2.2 金属微粒

胶浸纸干式套管在生产、安装运行过程中不可避免地会引入纸纤维碎屑、毫米级甚至厘米级金属丝或金属片等，是引发绝缘失效的主要原因之一[21-23]。除大尺寸金属微粒外，胶浸纸干式套管运行期间触指结构磨损也会产生大量微米级金属微粒，如图 4 所示[4]。微小金属微粒长期附着于套管表面对其造成的劣化也可能是导致沿面闪络的原因[24]。某故障现场套管内金属微粒微观电镜结构如图 5 所示，金属微粒多呈不规则的类球形，其分布模式包括孤立微粒、小规模聚集与大规模团簇[25]。带电金属微粒受到库仑力、重力、阻力、吸附力等多种作用力的影响，可能会在 SF_6 气氛内运动或黏附于环氧浸纸芯体表面，畸变表面电场，严重时导致沿面闪络故障。

针对大尺寸金属微粒影响沿面绝缘特性，华北电力大学王健研究了直径为 2 mm、长度为 10 mm 的单个线形金属微粒附着于试样表面不同位置时，

对沿面电荷积聚与电场分布的影响。结果表明微粒是沿面电荷积聚的主要因素，微粒两端的电晕放电能引起材料表面电荷激增。进一步地，王健又对半径为 0.1 mm、长度为 2~12 mm 的线性微粒运动状态开展研究。发现微粒的运动与其自身所带荷电量与电压极性有关，正极性电压下微粒容易站立，负极性下则容易跳起，且微粒的两端都会发生电晕放电[26-27]。李庆民等人考虑了气隙中电荷产生、迁移、复合、消散等过程，建立了金属微粒在电场影响下的运动轨迹动态修正模型，对毫米级的球形和线形金属微粒运动情况进行分析。根据该模型，金属微粒动态时对电场的畸变以及空间电荷的耦合作用引发的碰撞击穿和直立击穿是其诱发沿面闪络的主要类型[28-30]。文献[31-33]研究了直径为 0.1~0.5 mm、长度为 1~10 mm 的线形金属微粒的飞萤与竖立现象。发现飞萤出现的概率随着微粒长度的增加而增加，半径越小越容易出现飞萤现象。负极性直流电压下金属微粒出现飞萤现象的概率接近 100%，且此时微粒的局部放电量远高于正极性电压，严重畸变电场。

由于微米级金属微粒与设备尺寸相差过大，仿真与实验皆难以开展，目前国外暂无相关研究，国内有较少研究。清华大学刘卫东搭建了 500 μm 金属微粒局部放电测试平台，为微米级金属微粒引发的放电特性提供了测量基础[34]。李松参考毫米级金属微粒的运动特性，提出了微米级金属微粒的仿真与计算方法，并根据实际套管微粒分布情况搭建了实验平台，结果表明微粒尺寸越小，表面电荷对其吸附力越明显，可对微粒的运动起到一定的阻碍作用[35]。华北电力大学张连根等开展了交直流电压作用下微米级金属微粒的运动学行为研究，结果表明微米级金属微粒的吸附是镜像力和范德瓦尔斯力的共同作用[36-39]。杨卓栋将实际弹簧触指磨损产生的微小金属微粒附着于环氧材料上，研究了微米级金属微粒对环氧瞬时沿面闪络特性与长期放电对环氧劣化特性的影响[40]。发现当大量金属微粒附着于环氧表面时，会降低表面陷阱能级，减小沿面闪络电压。且长期放电产生的烧蚀区域会成为表面陷阱，提高二次电子发射概率，以及环氧烧蚀劣化后表面陷阱能级也会显著降低，促进电荷运输，降低沿面绝缘性能，微米级金属微粒附着材料表面导致绝缘失效如图 6 所示。

因此不论尺寸大小，金属微粒都会影响沿面闪络电压。大尺寸金属微粒通过金属电极传导、微粒与电极间微放电、微粒尖端电晕放电形式带电，在

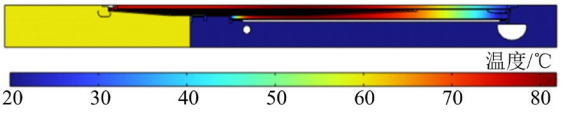


图 3 胶浸纸干式套管温度分布

Fig.3 Temperature distribution of the epoxy resin impregnated paper dry-type bushing

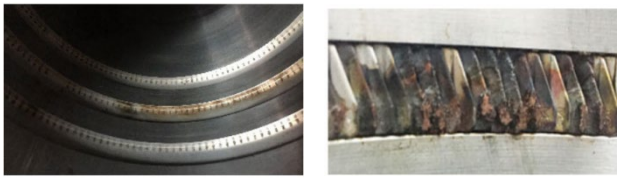


图 4 触指磨损示意图[4]

Fig.4 Schematic of contact finger wear[4]

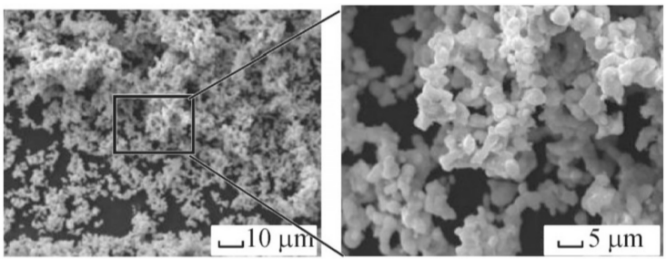


图 5 故障套管内金属微粒微观结构[24]

Fig.5 Micro-structure of metal particles inside the faulty bushing[24]

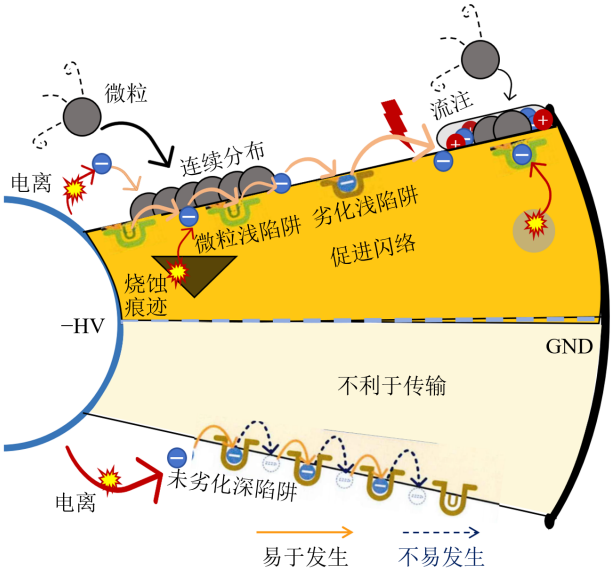


图 6 微米级金属微粒导致绝缘失效

Fig.6 Comprehensive induction mechanism of micro sized metal particles on insulation failure

气腔中受电场作用发生起举、旋转、跳动、悬浮或飞蛍行为，位于高压导体附近时，可能产生拉弧现象，大大缩短绝缘距离。当微粒运动到绝缘三结合区时，将严重畸变电场，大幅降低闪络电压。且金属微粒在气固界面的运动可能会导致气体发生电离，增加界面电荷密度，降低绝缘可靠性。当微粒尺寸处于微米级大小时，金属微粒将会被范德华力吸附在绝缘材料表面，一方面形成新的复合表面，改变原有的绝缘状态；另一方面畸变局部电场，增大电离概率。此外，微米级金属微粒长期在表面的微放电会使得环氧烧蚀劣化，增加初始电子发射概率的同时也会降低陷阱能级，在增强的电离过程以及表面电荷输运共同作用下诱导了沿面闪络的发生。

1.2.3 表面粗糙度

由于胶浸纸干式套管电容芯体打磨面积大，打磨工艺难度高，尤其是长 10 m 以上的芯体表面分段打磨一致性控制困难，套管电容芯体在打磨时存在不同区域处理不一致的情况，导致表面粗糙度不均匀，如图 7 所示[2]。表面粗糙度会影响环氧树脂气-固界面闪络电压，但目前的研究结果表明粗糙度对气-固界面绝缘的影响存在几种不同的结果，尚未达成一致。

有研究表明，只有与电极接触的表面形态才会对绝缘性能产生影响，若固体电介质表面粗糙，则场强会在微观范围内增大，但只要与电极接触处附近表面光滑，其闪络电压与电介质表面全部光滑时的一样[41]。但目前大多研究人员经过实验与仿真模拟相结合的手段发现表面整体形态的变化均会改变材料沿面绝缘性能，只是对于粗糙度究竟是提高或是降低闪络电压仍然存在分歧。一部分学者对不同打磨目数的样品进行局部放电实验，结果表明材料表面越粗糙则局部放电起始电压越低，从电场的角度解释说明表面粗糙会使局部电场不均匀，促进局部放电，进而降低闪络电压[42]。另一部分实验结果则表明粗糙度会提高沿面闪络电压，研究人员认为粗糙度提高会加强材料表面爬电距离，进而提高闪络电压[43-44]。此外，也有学者从电荷积聚的角度分析了沿面闪络电压随着表面粗糙度增加而增加的原因。通过实验发现随粗糙度增加，表面电荷积聚分为 2 个阶段，第 1 阶段为低粗糙度时，随粗糙度增加表面电荷积聚量有所降低；第 2 阶段为高粗糙度时，随粗糙度增加表面电荷积聚量显著降低。分析认为第 1 阶段中，表面电荷降低主要是由于表面电导率的增加，而第 2 阶段中表面电荷降低主要是表面电导率增加和深陷阱的引入二者共同作用引起[45]。

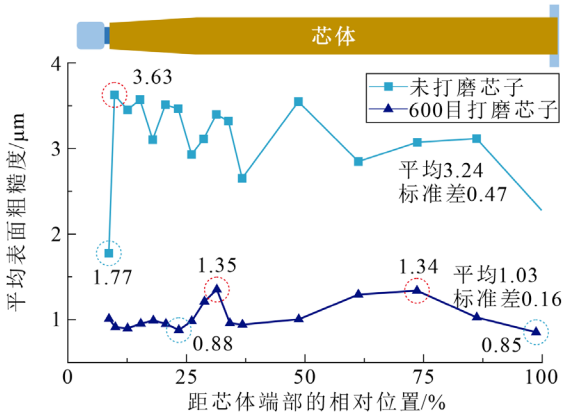


图 7 不同位置电容芯体表面粗糙度统计[2]

Fig.7 Statistics of surface roughness of capacitor cores at different positions[2]

可见，粗糙度的提高一方面会畸变电场，增大二次电子发射概率；另一方面也会增加爬电距离，增大表面陷阱能级，降低二次电子发射概率。2 种因素的作用力不同，可能是导致不同研究结果的原因。因此面向胶浸纸干式套管的工程应用，针对大尺寸效应带来的不均匀表面粗糙度对沿面闪络的作用机制仍须进一步研究。

1.2.4 表面电荷积聚

复合绝缘系统的气-固界面电荷积聚一直是国内外学者的研究热点问题。对于气-固界面电荷积聚模型而言，早期主要有法向电场模型[46-47]、切向电场模型[48-50]与体电导模型[51]。法向电场模型最初由 Knecht 提出，该模型指出绝缘材料表面的法向电场分量是导致电荷积聚的主要动力，带电粒子在电场力作用下不断聚集到材料表面。该模型对电荷来源与聚集过程解释较为清楚，与后来研究者的结果比较接近，因此被人们接受。切向电场模型由 Nakanishi 提出，认为表面切向电场及切向电场梯度对电荷积聚的影响显著。体电导模型由 Cooke 提出，重点解释了材料内空间电荷的形成。上述 3 种模型为后续研究电荷积聚机制奠定了理论基础。2000 年以来，随着直流输电技术发展，国内外学者对直流设备表面电荷积聚模型展开了更深入的研究。Kumada 通过对绝缘子表面电荷积聚实验结果分析，认为表面电导是决定电荷分布的决定性因素[52]。Franck 和 Kindersberger 通过对电荷积聚过程建模与实验验证，认为气-固界面电荷积聚是体电导、表面

电导和气体侧电导综合作用的结果[53-54]。近几年，随着实验观测与仿真技术的发展，一些专家学者从气体侧微观角度出发，全面考虑了绝缘气体中正负离子的产生、迁移、复合与扩散过程，并建立了离子输运数学模型，综合考虑固体侧、气体侧、气-固界面侧电流密度，计算表面电荷密度[55-56]。

除上述机理模型的不断发展外，国内外学者也针对表面电荷积聚对闪络电压的影响规律做了一定的研究。2002 年，Winter 测量了强切向电场下电荷积聚对闪络电压的影响，发现当材料表面积聚负极性电荷−18 nC/cm^2 时，正负直流闪络电压变化呈相反趋势，负直流闪络电压上升，正直流闪络电压下降。得出结论为：同极性电荷积聚提高沿面绝缘性能，异极性电荷积聚则导致沿面闪络电压下降[57]。张博雅、谢庆和 Kumara 等人均发现了相同的规律[58-60]。然而杜伯学等人发现在空气和 SF_6 气氛环境中材料表面不论是积聚同极性电荷或是异极性电荷，均会降低沿面闪络电压。其研究结果表明，沿面闪络电压下降主要归因于电荷导致的电场畸变及电子有效碰撞电离系数的增大[61-62]。

经过多年发展，人们对直流电场作用下气-固界面电荷积聚有了较为清晰的认识，但表面电荷积聚极性对沿面绝缘性能的影响结果尚未达成一致，不同的实验环境和实验模型可能是导致结果不一致的原因。未来可基于现有电荷积聚机理，综合考虑胶浸纸干式套管长径比结构、强法向电场，大尺寸效应带来的缺陷等多种因素，构建电荷积聚模型，探明电荷积聚对胶浸纸干式套管沿面绝缘性能的影响。

2 气-固界面闪络理论模型

早期研究认为气-固界面放电与气体放电过程类似，界面仅通过改变电场分布而影响绝缘气体的击穿过程，分界面对起始电子的产生、复合等的影响可以忽略不计[63-64]。与此同时，2 种真空沿面闪络模型逐步完善，即电子发射雪崩模型(secondary electron emission avalanche，SEEA)[65]与电子触发极化松弛模型(electron triggered polarization relaxation，ETPR)[65]。随着研究的不断深入，国内外学者发现气-固界面闪络也可能存在与真空闪络相似的过程。沿面闪络与固体绝缘特性、气-固界面耦合作用、表面电荷输运过程、气体中碰撞电离密切相关。学者从电场分布、气-固界面耦合作用、气体薄层等角度出发，研究了气氛环境下的沿面闪络过程，并提出了相应的气-固界面沿面闪络发展模型[66-68]。

2.1 临界电场模型

气-固界面中沿面闪络发展的研究最早可以追溯到 20 世纪 80 年代 Cooke 提出的临界场模型[66]。Cooke 将闪络过程分为起始和传播 2 个阶段，并强调以上 2 个阶段对表面或表面区域的外部扰动存在很强的敏感性。扰动可由多种原因引起，大致包含三结合区电场畸变、导电微粒附着、电荷积聚、不规则界面 4 个部分。但各类扰动最终都可归结为电场分布的扰动，电场强度是闪络的直接驱动力。

为更好地研究闪络过程，Cooke 针对受污染系统中的闪络过程设计了一款独立控制表面电场大小和方向、屏蔽三结合区畸变电场、可精确计算电场分布、以导电微粒为起始放电扰动的临界场模型，如图 8 所示。由 2 个独立的环形电极组成，棒状试样通过环形中心延伸到支撑区域，通过控制环形线圈的尺寸和位置以及棒状试样的直径，可以产生多种受控的电场分布。为了产生起始扰动，Cooke 在试样表面附着了 1 个或多个孤立的小导电微粒，发现表面闪络电压会随着扰动区域的变化而变化。在研究闪络发展过程中，Cooke 提到可能会有 3 种传播路径——沿绝缘体表面；部分沿表面，但随后跳过气隙；部分沿表面，但随后跳过实心绝缘体。具体路径发展与表面电场分布密切相关。

2.2 综合分析模型

Sudarshan 提出了一种本征函数解释不同因素对沿面闪络的影响，如式(1)所示。A_n 表示沿面闪络过程中不同因素的相对权重，例如在点-平面几何中，击穿最依赖流注过程，因此流注过程前的 A 系数最大，而其他过程如阴极的电子发射过程前的 A 系数可以忽略不计[67]。此外，通过总结前人研究成果，Sudarshan 从初始电子产生、二次电子发射、电荷扩散、杂质气体产生、电场变化这 5 个方面综合分析了沿面闪络的重要过程，如图 9 所示，并提出了综合分析模型。该模型强调了气-固界面气相和固

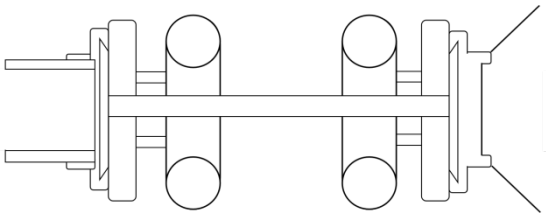


图 8 表面闪络环形测试模型[69]

Fig.8 Annular test model for surface flashover[69]

相之间的相互作用，认为电介质的表面电荷改变了电场结构，并可能限制气体中的电子扩散损失或影响表面雪崩的电离系数进而影响闪络过程。

$$U=\sum A_n\left(P_i\right)n \tag{1}$$

式中：U 为闪络电压，V；P_i 为影响闪络电压的特定物理过程；n 为不同物理过程对闪络电压贡献权重的幂指数，由实验拟合得到。

2.3 近似无效区理论模型

2017 年，李传扬等考虑了绝缘材料的温度梯度因素，研究了温度梯度下环氧复合材料气-固界面闪络的发展机理，提出了类似的直流表面闪络无效区域扩展模型[68]，如图 10 所示。表面电位达到高压电极 60%以上的绝缘体区域被定义为“类似无效区域”。当热量从高压电极传播到介质时，受晶格热振动相互作用激发的杂化能级的自由电子迁移到导带，然后在电场的驱动下通过体和表面移动，高压电极附近区域的表面电阻率和体电阻率都相应下降，从而导致电介质热区的电势逐渐增加，形成“类似无效区域”，结果减少了接地电极附近的有效绝缘距离，产生非常密集的电场，并在电极的三结合点处引起气体电离，从而形成电子雪崩。此外，光子发射是由电子与空间中正电荷复合产生的，部分光子被正空间电荷吸收，形成二次电子发射雪崩。电子雪崩前端与正空间电荷重新组合，最终形成从地电极到高压电极的闪络。

杜伯学在对温度梯度的研究中也得到了类似的结果[69]，并进一步地验证了通过消除温度梯度或减弱电荷积累，可以减小“类似无效区”的膨胀。

2.4 气体吸附于表面协同效应模型

固体绝缘材料表面吸附的绝缘气体会形成气体层，在这个气体层中，绝缘体的表面会与气体分子发生强烈的相互作用，形成致密的薄层，影响沿绝缘子表面的闪络过程。

2019 年，李盛涛等建立了一种考虑吸附气体和充电对表面闪络的协同效应的新型表面闪络模型[70]，如图 11 所示，α_1 和 α_0 分别代表绝缘材料表面的吸附气体和远离表面气氛环境中的冲击电离过程。E_x 和 E_y 分别是绝缘材料表面的切向与法向电场。实线表示初始电子与气体分子发生撞击，虚线表明撞击电离后产生的电子和离子。李盛涛等认为吸附的气体分子在垂直于绝缘体表面上方几纳米内形成一个致密的薄层，吸附的气体分子越多，一方面沿界面传输的电子散射越明显，沿面闪络电压越高；另一

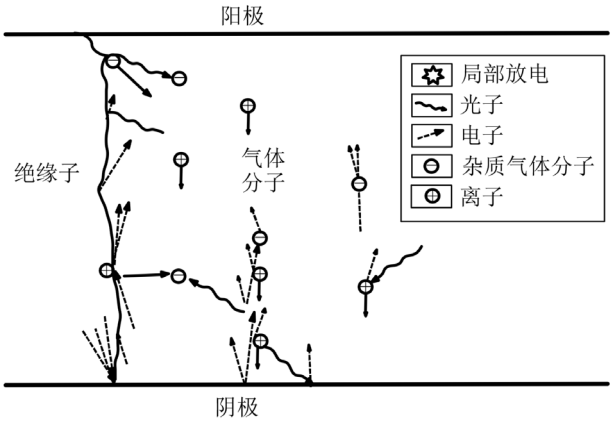
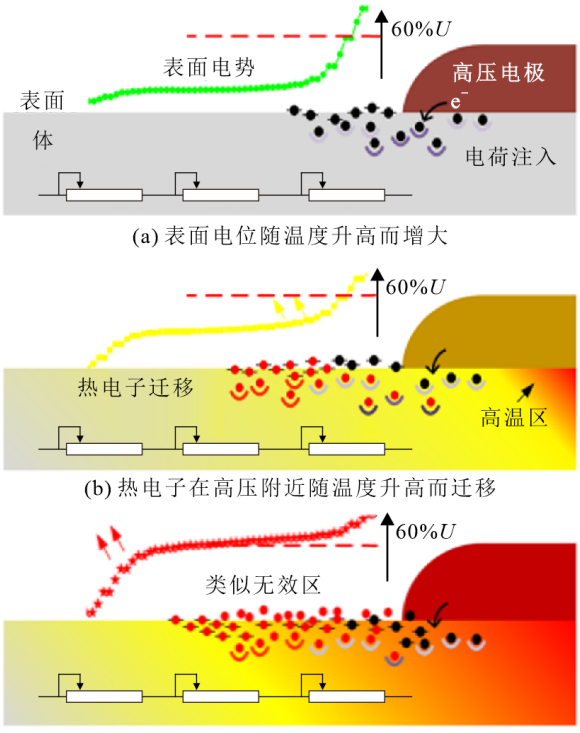


图 9 沿面闪络综合分析模型[67]

Fig.9 Comprehensive analysis model for surface flashover[67]



(a) 表面电位随温度升高而增大

(b) 热电子在高压附近随温度升高而迁移

(c) 热电子迁移引起的“类似无效区”膨胀

图 10 直流表面闪络的无效区域扩展模型[68]

Fig.10 Invalid area extension model for DC surface flashover[68]

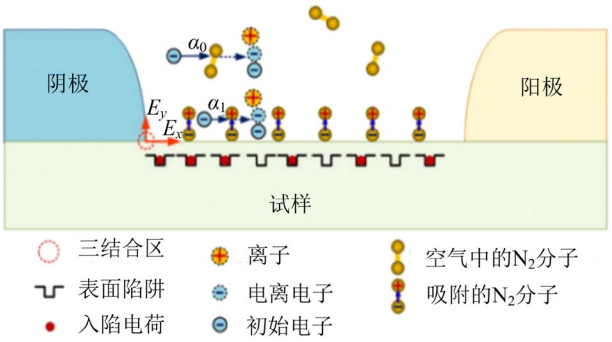


图 11 表面闪络模型示意图

Fig.11 Schematic of surface flashover model

方面吸附分子的电子分布也从自由态的对称分布扭曲为约束态下的不对称分布，这意味着极化表面偶极子的形成以及气体分子与固体表面之间的强相互作用，表面偶极子捕获固体表面附近气体中的移动电子，从而进一步抑制闪络。以上 2 种效应都抑制了气-固界面中电子的自由程长度，降低表面电荷密度，而电荷密度又进一步影响表面电场分布，最终提高沿面闪络电压。

2023 年，李盛涛等通过在环氧树脂表面涂覆聚硫脲来调整气体吸附量[71]，结果表明，压缩氮气中的直流表面闪络电压提高了 17%，这进一步强调了气体吸附对表面闪络的关键作用。

上述理论模型已从电场、电荷多种层面解释了气固界面闪络过程，但都可归结为初始电子的产生、二次电子的发射、电场增强以及放电通道的形成。胶浸纸干式套管具有复杂界面环境，包括承受外加直流叠加多频谐波电压、切向与轴向电场分布、纸纤维裸露、温度梯度、表面缺陷等，以上因素都会对电子产生、发射、电场分布产生影响。而上述机理模型仅强调 1 个或几个因素，每种表面闪络模型都没有考虑气-固界面电荷输运的全部过程，无法全面描述套管气固界面绝缘失效的整个过程。此外，胶浸纸干式套管是一种长径比绝缘结构，现有模型大多针对样片或绝缘子模型开展沿面闪络实验与仿真研究，对于超长界面闪络机理研究较为缺乏。

3 胶浸纸干式套管气-固界面绝缘性能优化

3.1 绝缘结构优化设计

胶浸纸干式套管结构分为内绝缘和外绝缘，内、外绝缘各主部件结构和尺寸均会影响套管芯体绝缘性能，且影响范围、影响强弱不同。

套管环氧芯体内绝缘优化设计经历了等厚度不等台阶设计、等裕度设计、优化设计软件和人工智能优化设计 4 个发展阶段。包括 80 年代提出的等厚度不等台阶设计方法[72]、90 年代提出的等裕度设计方法[73-74]。近年来，学者又利用遗传算法、有限元模拟等多种手段，考虑了套管内电热联合老化、应力应变分布等，对套管提出了多种绝缘的优化设计[75-78]。但上述的绝缘结构优化设计主要针对芯体内极板布置，旨在均匀芯体内电场分布，极少关注其对环氧芯体沿面电场分布的影响。

针对内、外绝缘性能相互影响方面，张成凯研究了穿墙套管伞裙个数、内外屏蔽层长度、半径、网孔及朝向等对屏蔽电极电场分布的影响[79]。刘杉分析了±800 kV 穿墙套管闪络原因，对套管内部结构进行了改进[80]。张施令等应用径向基函数神经网络与非支配排序遗传算法II，对换流变阀侧套管电容芯体、均压罩与套管尾部进行了优化设计[81]。但是，针对胶浸纸套管芯体极板布置、芯体外形、芯体端部屏蔽装置、护套外绝缘等结构对芯体绝缘性能的相互作用规律和其对环氧芯体沿面切法向电场分布影响程度的研究几乎未见报道，且当前胶浸纸干式套管绝缘结构设计时未充分考虑气-固界面电荷积聚特性、电压形式、温度分布、内外绝缘配合等因素的影响，整体外形设计常根据装配经验确定。随着我国特高压输电工程的大力发展，特别是在国产特高压胶浸纸干式套管屡次发生环氧芯体沿面闪络故障的现实背景下，亟须开展胶浸纸干式套管气-固界面绝缘结构优化设计。

3.2 掺杂填料改性

由 2.2.节中可知，绝缘材料的表面电导、体积电导等皆会影响材料表面电荷积聚，进而影响其绝缘性能。填料改性可以实现对环氧复合材料表面电导、表面陷阱能级、环氧体电导等多个层面的综合调控，且改性方法效果明显、稳定性较高，目前已成为绝缘优化领域研究的热点。学界对环氧树脂复合材料的填料改性研究进行了大量的探索，分析了填料的理化特性对环氧树脂绝缘性能的影响规律。

Kirkicl 等人早在本世纪初就尝试用纳米氧化铝掺杂改性环氧树脂，其沿面闪络电压相比于环氧材料有明显提升[82]。国内李枕等尝试用碳纳米管改性环氧树脂，发现填料掺杂能增加材料的陷阱深度，抑制放电发展过程中载流子的迁移[83]。天津大学杜伯学、西安交通大学张冠军研究了 SiC 纳米填料掺杂改性的环氧树脂复合材料，发现纳米填料掺杂一定程度提升材料的沿面闪络电压[84-85]。随着填料制备与改性工艺的逐渐成熟，学者逐渐尝试利用填料改性来提升胶浸纸套管绝缘性能。杜伯学团队使用氮化硼作为填料提高了材料热导率，通过仿真验证了氮化硼填充可改善套管电容芯体电场与温度分布[86]。傅明利计算了微米级 SiC 或 ZnO 颗粒改性后环氧树脂的非线性电导率变化趋势，仿真结果表明在采用非线性电导环氧树脂电容芯体后，端部 SF_6 气体内的电场强度随之降低，套管内电场分布得到了极大的改善[87]。张吼等人采用纳米 SiO_2 改性环氧树脂的方法提高了套管的电气性能和热性能[88]。

Santanu 等人研究了 TiO_2、ZnO、Al_2O_3 填充的环氧树脂纳米复合材料，结果表明纳米填料改性可有效提高材料电导率，改善套管电场分布[89]。陈庆国等人利用 SiO_2 对电容芯体进行改性，发现适当的 SiO_2 浓度可以提高电容芯体击穿电场[90]。周远翔等人制备了不同含量的环氧树脂/$BaTiO_3$ 复合材料(BT60)，结果表明 BT60 减小了温度对材料电阻率的影响程度，证明环氧树脂/BT60 可用于改善套管电容芯体电场分布[91]。

由上述研究可知，不同的填料均对环氧树脂具有改善作用，掺杂填料改性的环氧树脂复合材料具有更好的电气性能。但上述研究重点探究了填料改性对套管芯体内电场分布、温度分布等的影响，而该改性方法对气-固界面绝缘性能的研究成果相对较少。此外，套管电容芯体属于大尺寸绝缘结构，纳米颗粒的大量引入不可避免地给环氧基体内部或表面带来缺陷。因此，如何在大体积聚合物内实现填料均匀掺杂、减少缺陷的引入是需要重点考虑的一个问题。目前学者已经开始对纳米填料表面进行改性处理以增强其与聚合物基体的相容性，防止填料团聚，促进填料在复合材料内部的均匀分散[92-93]。但以上仅针对试样模型开展了实验研究，是否能成功应用于胶浸纸套管电容芯体中仍需验证。

4 未来发展趋势讨论

由上述总结可知，目前针对气-固界面闪络机理与发展模型已较为完善，环氧树脂/SF_6 气-固界面绝缘影响因素也得到充分考虑，优化手段也层出不穷，提高了沿面绝缘特性。但上述成果大多以试样模型为研究对象，针对胶浸纸干式套管这种长径比结构、长距离气-固界面、强垂直电场分量、直流叠加谐波复合激励等综合作用下的环氧树脂胶浸纸/SF_6 气-固界面闪络机理仍须进一步研究。未来可从以下方面深入开展胶浸纸干式套管气-固界面绝缘特性相关研究。

1）谐波影响气-固界面电荷积聚行为研究。谐波电压引起的周期性电场变化会改变胶浸纸套管气-固界面的电荷动态平衡过程。未来一方面可基于实际谐波频谱特征，建立直流谐波复合激励下的胶浸纸干式套管电场-电荷多物理场耦合模型，解析谐波周期性电场变化对电荷注入势垒，积聚行为的影响机制；另一方面可通过非接触式表面电位测量系统与电荷密度反演技术，实验表征不同谐波激励下的电荷积聚特性，并与仿真结果进行交叉验证。

2）环氧浸纸电容芯体各向异性对沿面电场分布的作用机制研究。由于制备工艺导致的纸纤维取向差异，电容芯体在气-固界面不同方向的介电常数、电导率等参数呈现不均匀分布，从而影响界面电荷积聚行为与消散特性。未来可建立基于材料各向异性参数(介电常数张量、电导率张量)的电场-电荷输运耦合模型，解析纤维取向差异对沿面电场分布与电荷动态变化的影响机制。结合纤维定向排布工艺，制备特定试样开展实验，验证仿真结果的同时也可进一步探索纤维取向调控对界面绝缘特性的改善效果。

3）长沿面放电发展过程与机制研究。一是要建立非线性表面电导模型，深层次挖掘长距离沿面侧非线性表面电导与电荷的双向耦合作用机制，总结出更为完善的电荷积聚机理，精确计算长沿面电场分布。二是要系统研究芯体几何参数(车削角度、屏蔽环间隙大小、长径比)与外部因素(金属微粒、表面粗糙度)对沿面电场分布的影响，建立结构+外因-电场对应关系。三是要开展放电发展速度与路径研究，明确放电通道扩展的连续传播与间歇传播的条件，阐明表面缺陷导致的微放电簇与主放电通道的竞争关系。

4）多角度协同增强气-固界面绝缘性能。为实现胶浸纸干式套管电容芯体 SF_6 气-固界面绝缘优化提升，可采取结构优化与电荷调控相结合的方式提升沿面绝缘性能。结构优化手段可从增加高压端至汇流环距离，调整芯体锥度与总长度，增大屏蔽罩与芯体端部距离等角度开展研究。电荷调控主要考虑减小电荷积聚与增加电荷消散速率两方面，未来可结合电荷积聚对材料表面微观结构影响机制，提出一种新型非导电涂层材料。由于电容芯体的大尺寸效应导致全面涂敷不适用，因此从可操作性角度出发，可仅对屏蔽罩与电容芯体间隙处涂敷非导电性涂层，改变接触电导，均匀电场分布，防止电荷积聚，从而提高绝缘性能。但在大体积聚合物内实现填料均匀掺杂、大面积气-固界面实现均匀涂敷非导电性涂层，复杂电气结构内布置微粒陷阱与驱赶电极等仍是未来需要攻克的技术手段。

5 结论

本文针对目前胶浸纸干式阀侧套管沿面闪络频发问题，从绝缘结构、影响因素、闪络模型、绝

缘优化方面对气固界面绝缘性能进行了综述，并对未来发展趋势进行了讨论。

1）胶浸纸干式套管以环氧树脂浸纸电容芯体为主绝缘、SF_6 气腔为辅助绝缘，芯体-SF_6 界面为绝缘薄弱点。沿面温度梯度、金属微粒、不一致粗糙度、电荷积聚等都会降低气固界面绝缘性能。

2）目前针对气固界面的闪络模型主要包括临界电场模型、综合分析模型、近似无效区理论模型、气体吸附于表面协同效应模型。未来可从非线性表面电导与电荷双向作用机制、绝缘结构对电场分布影响、放电发展速度与放电路径等方面开展研究，补充适用于超长界面的闪络模型。

3）结合各类模型对闪络过程的分析，从套管绝缘结构与表面改性方面提出的绝缘优化手段也层出不穷。但目前仅从单一角度考虑优化方案，未来可采取结构优化与电荷调控相结合的方式来进一步提升胶浸纸干式套管沿面绝缘性能。

参考文献 References

[1] 王青于，靳守锋，袁书文，等. 特高压环氧浸纸-SF_6气体复合绝缘穿墙套管界面电荷积累过程和直流电场分布特性仿真[J]. 高电压技术，2022，48(10)：4102-4112.
WANG Qingyu, JIN Shoufeng, YUAN Shuwen, et al. Simulation of interface charge accumulation progress and DC electric field distribution characteristics of the UHV epoxy impregnated paper-SF_6 gas composite insulation wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4102-4112.

[2] 张书琦，李金忠，汤 浩，等. 特高压直流套管气-固界面长时闪络放电特性及其影响因素[J]. 中国电机工程学报，2024，44(14)：5776-5786.
ZHANG Shuqi, LI Jinzhong, TANG Hao, et al. Long-time flashover discharge characteristics of gas-solid interface of UHVDC bushing and its influencing factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5776-5786.

[3] 兰贞波，宋 友，邓建钢，等. 我国特高压交直流套管研究现状[J]. 电瓷避雷器，2021(2)：1-6，14.
LAN Zhenbo, SONG You, DENG Jiangang et al. Status and application of UHV AC/DC bushing in China[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 1-6, 14.

[4] 田汇冬，靳守锋，龚 傲，等. 换流变阀侧干式套管表带触指失效过程分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(3)：1146-1155.
TIAN Huidong, JIN Shoufeng, GONG Ao, et al. Analysis on the deterioration behavior of electrical contact structure used in converter transformer RIP bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 1146-1155.

[5] 李钰鑫. 特高压换流变阀侧电容式套管内部电场分布与改善研究[D]. 徐州：中国矿业大学，2022.
LI Yuxin. Electric field distribution and improvement of the valve side capacitive bushing for a UHV converter transformer[D]. Xuzhou, China: Mining University, 2022.

[6] LESNIEWSKA E. The use of 3-D electric field analysis and the analytical approach for improvement of a combined instrument transformer insulation system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 1233-1236.

[7] 曾 瑞. 考虑温度分布下换流变阀侧套管电场特性研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2023.
ZENG Rui. Study on electric field characteristics of converter valve side casing considering temperature distribution[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2023.

[8] 孙 昊，杨定乾，孙瑛蔓，等. 谐波与温度对换流变压器干式阀侧套管环氧树脂绝缘劣化特性的影响[J/OL]. 高电压技术，2025：1-11 [2025-06-09]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250011.
SUN Hao, YANG Dingqian, SUN Yingman, et al. Influence of harmonics and temperature on the degradation characteristics of epoxy resin insulation in dry valve side bushing of converter transformers[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-11[2025-06-09]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250011.

[9] 庞 曦，许天蕾，刘 鹏，等. 考虑温度梯度的高压直流 GIL 盆式绝缘子空间电荷仿真[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1014-1024.
PANG Xi, XU Tianlei, LIU Peng, et al. Space charge simulation for basin insulator of high voltage DC GIL considering temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1014-1024.

[10] 陈 可，梁曦东，刘 杉. 空气中不同温度下环氧树脂绝缘子表面电荷消散过程的实验研究[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1723-1728.
CHEN Ke, LIANG Xidong, LIU Shan. Experimental study on the decay process of surface charges on epoxy insulators under different temperature in air[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1723-1728.

[11] 尚帅川，张周胜，王 亚. 高压直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷积聚与消散的仿真研究[J]. 水电能源科学，2021，39(1)：179-182.
SHANG Shuaichuan, ZHANG Zhousheng, WANG Ya. Simulation study on surface charge accumulation and dissipation of pot-type insulator in HVDC GIL[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(1): 179-182.

[12] 何 顺，郑易谷，林川杰，等. 温度梯度下电荷行为与直流沿面闪络的关联性[J]. 高电压技术，2020，46(10)：3597-3604.
HE Shun, ZHENG Yigu, LIN Chuanjie, et al. Relation between charge behavior and dc surface flashover under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10): 3597-3604.

[13] HERING M, SPECK J, GROßMANN S, et al. Influence of gas temperature on the breakdown voltage in gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 401-408.

[14] 宋 波，任 明，陈 跃，等. 低温温度梯度下环氧玻璃纤维材料表面电荷积聚行为及其对沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术，2023，49(2)：554-564.
SONG Bo, REN Ming, CHEN Yue, et al. Surface charges accumulation on glass fiber reinforced plastic and its effects on surface flashover at cryogenic temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 554-564.

[15] 吴延宇，张 蕾，黄 猛，等. 温度对环氧树脂沿面闪络特性的影响研究[J]. 高压电器，2024，60(4)：199-206.
WU Yanyu, ZHANG Lei, HUANG Meng, et al. Research on influence of temperature on surface flashover characteristics of epoxy resin[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(4): 199-206.

[16] 谢子豪，李 敏，宋岩泽，等. 温度对环氧树脂气-固界面电荷积聚的影响研究[J]. 高压电器，2023，59(9)：60-66，89.
XIE Zihao, LI Min, SONG Yanze, et al. Study on effect of temperature on charge accumulation at gas-solid interface of epoxy resin[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 60-66, 89.

[17] 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.

[18] 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.

[19] SHIMAKAWA H, SATO M, KUMADA A, et al. Temperature dependence of surface charge accumulation on DC-GIS insulating spacer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 4539-4547.

[20] 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.

[21] 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 GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 849-860.

[22] 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.

[23] 黄荣辉，张 欣，秦逸帆，等. 雷电冲击下金属污染物对 GIS 中盆式绝缘子闪络特性的影响[J]. 高压电器，2016，52(4)：111-116.
HUANG Ronghui, ZHANG Xin, QIN Yifan, et al. Influence of metallic particle contamination on flashover characteristics of disc insulators in GIS under lightning impulse voltages[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 111-116.

[24] 杨卓栋，齐 波，董 浩，等. SF_6 直流穿墙套管金属微粒产生过程模拟及沿面闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(7)：2848-2857，32.
YANG Zhuodong, QI Bo, DONG Hao, et al. Simulation of metal particles generation process in SF_6 DC wall bushing and experimental study of flashover characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2848-2857, 32.

[25] 李 松，李金忠，汤 浩，等. 直流套管中自由金属微粒运动特性分析[J]. 高压电器，2021，57(6)：162-170.
LI Song, LI Jinzhong, TANG Hao, et al. Motion characteristics analysis of free metal particles in DC bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(6): 162-170.

[26] 王 健，李伯涛，李庆民，等. 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.
WANG Jian, LI Botao, LI Qingmin, et al. Impact of linear metal particle on surface charge accumulation of post insulator within DC GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 213-222.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 律方成，马 康，刘华琦，等. 直流 GIL 微粒陷阱的捕获机理分析与优化设计[J]. 中国电机工程学报，2022，42(15)：5751-5762.
LÜ Fangcheng, MA Kang, LIU Huaqi, et al. Capture mechanism analysis and optimization design of DC GIL particle trap[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5751-5762.

[30] MA K, LIU H Q, WANG Q, et al. Study on movement and distribution characteristics of metal particle dust in DC GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(3): 1208-1217.

[31] 由志勋，刘 静. 直流 GIL 中线形金属微粒运动与放电特性研究综述[J]. 高压电器，2017，53(10)：36-43.
YOU Zhixun, LIU Jing. Review of motion and discharge characteristics of wire metallic particle in DC GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(10): 36-43.

[32] 贾江波，张乔根，师晓岩，等. 交流电压下绝缘子附近导电微粒运动特性[J]. 电工技术学报，2008，23(5)：7-11.
JIA Jiangbo, ZHANG Qiaogen, SHI Xiaoyan, et al. Motion of conducting particle near PTFE spacer under AC voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(5): 7-11.

[33] 张乔根，游浩洋，马径坦，等. 直流电压下 SF_6 中自由线形导电微粒运动特性[J]. 高电压技术，2018，44(3)：696-703.
ZHANG Qiaogen, YOU Haoyang, MA Jingtan, et al. Motion behavior of free conducting wire-type particles in SF_6 gas under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 696-703.

[34] 许 渊，刘卫东，陈维江，等. 交流 GIS 绝缘子表面亚毫米级金属颗粒的运动和局部放电特性[J]. 中国电机工程学报，2019，39(14)：4315-4324.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. Motion characteristics and partial discharge characteristics of submillimeter metal particles on the surface of AC GIS spacer[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(14): 4315-4324.

[35] 李 松. 直流套管中自由金属微粒的运动与放电特性研究[D]. 北京：中国电力科学研究院，2019.
LI Song. Study on motion and discharge characteristics of free mental particle in DC bushing[D]. Beijing, China: China Electric Power Research Institute, 2019.

[36] 梁瑞雪，刘 衡，胡 琦，等. GIS/GIL 内微米级金属粉尘动力学行为与诱发放电特性研究进展[J]. 中国电机工程学报，2020，40(22)：7153-7165.
LIANG Ruixue, LIU Heng, HU Qi, et al. Research advances in the kinetic behavior and induced discharge characteristics of micron metal dust within GIS/GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7153-7165.

[37] 薛乃凡，李庆民，刘智鹏，等. 微纳粉尘运动行为与微弱放电探测技术研究进展[J]. 电工技术学报，2022，37(13)：3380-3392.
XUE Naifan, LI Qingmin, LIU Zhipeng, et al. Research advances of the detection technology for kinetic behavior and weak discharge of the micro-nano dust[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3380-3392.

[38] 梁瑞雪，王 健，胡 琦，等. 直流 GIL 盆式绝缘子附近微米级金属粉尘的动力学行为与吸附机制研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(4)：1387-1396.
LIANG Ruixue, WANG Jian, HU Qi, et al. Study on kinetic behavior and adsorption mechanism of the micron metal dust near the basin-type insulator in DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1387-1396.

[39] 张连根，路士杰，李成榕，等. 气体绝缘组合电器中微米量级金属

粉尘运动和放电特征[J]. 电工技术学报，2020，35(2)：444-452.
ZHANG Lian'gen, LU Shijie, LI Chengrong, et al. Movement and discharge characteristics of micron-scale metal dust in gas insulated switchgear[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(2): 444-452.

[40] 杨卓栋. SF_6 直流穿墙套管内部微米级金属微粒诱导沿面闪络机制及抑制方法[D]. 北京：华北电力大学，2023.
YANG Zhuodong. Flashover mechanism induced by micron metal particles in SF_6 DC wall bushing and inhibition methods[D]. Beijing, China: North China Electric Power University, 2023.

[41] 张裕生. 高压开关设备检测和试验[M]. 北京：中国电力出版社，2004.
ZHANG Yusheng. Testing and inspection of high voltage switchgear[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2004.

[42] 邹 林，涂 扬，孟永鹏，等. 界面压强和表面粗糙度对聚乙烯与硅橡胶界面的局部放电的影响[J]. 绝缘材料，2014，47(3)：94-98，102.
ZOU Lin, TU Yang, MENG Yongpeng, et al. Effects of interface pressure and surface roughness on the partial discharge between polyethylene and silicone rubber[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 94-98, 102.

[43] HAQ I U, WANG F P, AKRAM S, et al. Significantly enhanced flashover voltage of epoxy in vacuum by graded surface roughness modification[J]. High Voltage, 2023, 8(5): 997-1010.

[44] HAQ I U, WANG F, AKRAM S, et al. Graded surface roughness of epoxy: a novel approach of surface modification to enhance surface flashover voltage[C]//Proceedings of the 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications(ICHVE). Chongqing, China: IEEE, 2022: 1-4.

[45] 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.

[46] 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.

[47] KNECHT A. Development of surface charges on epoxy resin spacers stressed with direct applied voltages[M]. Oxford, UK: Pergamon, 2013: 356-364.

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

[49] 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.

[50] NAKANISHI K, YOSHIOKA A, SHIBUYA Y, et al. Charge accumulation on spacer surface at DC stress in compressed SF_6 gas[M]. Oxford, UK: Pergamon Press, 2013: 365-373.

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

[52] 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.

[53] WINTER A, KINDERSBERGER J. Transient field distribution in gas-solid insulation systems under DC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 116-128.

[54] 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.

[55] 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.

[56] 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.

[57] 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]//Proceedings of the Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: IEEE, 2002: 757-761.

[58] 张博雅，王 强，祁 喆，等. 直流电压下聚合物表面电荷测量方法及积聚特性[J]. 中国电机工程学报，2016，36(24)：6664-6674.
ZHANG Boya, WANG Qiang, QI Zhe, et al. measurement method and accumulation characteristics of surface charge distribution on polymeric material under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6664-6674.

[59] 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.

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

[61] 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.

[62] 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.

[63] 严 璋，朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 2 版. 北京：中国电力出版社，2007.
YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage insulation technology[M]. 2nd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2007.

[64] ANDERSON R A, BRAINARD J P. Mechanism of pulsed surface flashover involving electron-stimulated desorption[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(3): 1414-1421.

[65] BLAISE G, LE GRESSUS C. Charging and flashover induced by surface polarization relaxation process[J]. Journal of Applied Physics, 1991, 69(9): 6334-6339.

[66] COOKE C M. Surface flashover of gas/solid interfaces[M]. CHRISTOPHOROU L G. Gaseous Dielectrics III. Oxford, UK: Pergamon, 2013: 337-348.

[67] SUDARSHAN T S, DOUGAL R A. Mechanisms of surface flashover along solid dielectrics in compressed gases: a review[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1986, 21(5): 727-746.

[68] 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.

[69] DU B X, LI J. Effects of ambient temperature on surface charge and flashover of heat-shrinkable polymer under polarity reversal voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 1190-1197.

[70] LI S T, HUANG Y, MIN D M, et al. Synergic effect of adsorbed gas and charging on surface flashover[J]. Scientific Reports, 2019, 9(1): 5464.

[71] NIU H, QU G H, LI M R, et al. Improved surface flashover voltage of epoxy following polythiourea-assisted coating with high gas adsorption ability[J]. Applied Surface Science, 2023, 618: 156546.

[72] 龚　军，周　凯，张福忠，等. 基于极化-去极化电流法的油纸绝缘套管的绝缘状态评估研究[J]. 绝缘材料，2018，51(12)：42-46.
GONG Jun, ZHOU Kai, ZHANG Fuzhong, et al. Insulation condition assessment of oil-paper insulation sleeving based on polarization-depolarization current method[J]. Insulating Materials, 2018, 51(12): 42-46.

[73] KONZELMANN S, HOFFMANN C, MERTE R, et al. Thermal and electrical properties of aluminum nitride filled epoxy-resin compound[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 327-333.

[74] BOUANGA C V, COUDERC H, FRECHETTE M F, et al. Dielectric study of low glass transition temperature cycloaliphatic UV-curable epoxy networks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1269-1282.

[75] HESAMZADEH M R, HOSSEINZADEH N, WOLFS P. An advanced optimal approach for high voltage AC bushing design[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 461-466.

[76] CAO W, SHEN W, HE B S, et al. Structural design for DC bushing core based on the material life[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(1): 281-288.

[77] 王青于，杨　熙，彭宗仁，等. 应用三维电磁-热-流耦合场分析法计算换流变压器干式套管的温度场分布[J]. 中国电机工程学报，2016，36(22)：6269-6275.
WANG Qingyu, YANG Xi, PENG Zongren, et al. 3D coupled electromagnetic-thermal-fluid method for computation of temperature field of converter transformer RIP bushings[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6269-6275.

[78] WANG Q Y, YANG X, TIAN H D, et al. A novel dissipating heat structure of converter transformer RIP bushings based on 3-D electromagnetic-fluid-thermal analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1938-1946.

[79] 张成凯. 40.5 kV 穿墙套管的绝缘性研究[D]. 厦门：厦门理工学院，2018.
ZHANG Chengkai. Study on insulation of 40.5 kV wall bushing[D]. Xiamen, China: Xiamen University of Technology, 2018.

[80] 刘　杉，宋胜利，卢理成，等. ±800 kV 特高压直流穿墙套管故障分析及设计改进[J]. 高电压技术，2019，45(9)：2928-2935.
LIU Shan, SONG Shengli, LU Licheng, et al. Failure analysis and design improvement of ±800 kV HUVDC wall bushings[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2928-2935.

[81] 张施令，彭宗仁. 高压换流变阀侧 SF_6 气体套管外绝缘结构设计[J]. 高压电器，2019，55(4)：117-124，132.
ZHANG Shiling, PENG Zongren. Design of SF_6 gas bushing external insulation structure on high voltage converter transformer valve side[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 117-124, 132.

[82] KIRKICI H, SERKAN M, KOPPISETTY K. Nano/micro dielectric surface flashover in partial vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(4): 790-795.

[83] 李　枕，黄　印，闵道敏，等. 环氧基碳纳米管纳米电介质的直流真空沿面闪络特性[J]. 高电压技术，2017，43(9)：2857-2865.
LI Zhen, HUANG Yin, MIN Daomin, et al. Surface flashover characteristic of EP/MWCNTS in vacuum under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2857-2865.

[84] LIANG H C, DU B X, LI J, et al. Effects of non-linear conductivity on charge trapping and de-trapping behaviours in epoxy/SiC composites under DC stress[J]. IET Science, Measurement& Technology, 2018, 12(1): 83-89.

[85] XUE J Y, LI Y, DONG J H, et al. Surface charge transport behavior and flashover mechanism on alumina/epoxy spacers coated by SiC/epoxy composites with varied SiC particle size[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(15): 155503.

[86] 王　干. 特高压换流变压器阀侧套管电热场分布特性与优化方法研究[D]. 天津：天津大学，2020.
WANG Qian. Electrothermal field distribution and optimization for a UHV converter transformer valve side bushing[D]. Tianjin, China: Tianjin university, 2020.

[87] 傅明利，梁虎成，杜伯学，等. 非线性电导环氧树脂复合材料在±600 kV 换流变压器套管中的应用仿真研究[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1476-1482.
FU Mingli, LIANG Hucheng, DU Boxue, et al. Simulation research on the application of epoxy resin with nonlinear conductivity in the ±600 kV converter transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1476-1482.

[88] 张　吼，韩幸军，郭安琪，等. 柔直换流站穿墙套管绝缘击穿分析及材料改性机理研究[J]. 浙江电力，2023，42(5)：113-119.
ZHANG Hou, HAN Xingjun, GUO Anqi, et al. Analysis of insulation breakdown of the wall bushing in a flexible DC converter station and modification mechanism research on the material[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 113-119.

[89] SINGHA S, THOMAS M J. Dielectric properties of epoxy nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 12-23

[90] CHEN Q G, YANG H D, WANG X Y, et al. Dielectric properties of epoxy resin impregnated nano-SiO_2 modified insulating paper[J]. Polymers, 2019, 11(3): 393.

[91] TENG C Y, ZHOU W J, ZHOU Y X, et al. Improvement of the electrical resistivity of epoxy resin at elevated temperature by adding a positive temperature coefficient $BaTiO_3$-based compound[J]. Plasma Science and Technology, 2020, 22(4): 044003.

[92] DUAN X H, SIEW W H, GIVEN M, et al. Effect of different surface treatment agents on the physical chemistry and electrical properties of polyethylene nano-alumina nanocomposites[J]. High Voltage, 2020, 5(4): 397-402.

[93] YIN Z, SUN P T, SIMA W, et al. Synergistic enhancement of arc ablation resistance and mechanical properties of epoxy resin insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 748-756.



刘轩东(通信作者)
1981—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为特高压电力设备绝缘状态检测与试验技术、脉冲功率技术及其应用、气体放电及其应用技术
E-mail: liuxuand@xjtu.edu.cn

LIU Xuandong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-03-28　在线出版日期　2025-07-31　　编辑　曾文君