



·等离子体及应用技术·

# 环氧树脂的等离子体表面梯度刻蚀及沿面闪络性能研究<sup>\*</sup>

闫纪源<sup>1,2</sup>, 梁贵书<sup>2</sup>, 康玉婵<sup>2</sup>, 彭程凯<sup>2</sup>, 万子剑<sup>2</sup>, 吕天舒<sup>2</sup>, 谢庆<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学 电力与电子工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** 结合等离子体表面刻蚀方法与梯度改性方法, 实现了氧化铝/环氧树脂表面的等离子体梯度刻蚀。利用扫描电子显微镜 (SEM)、表面轮廓仪、X 射线光电子能谱分析 (XPS)、高阻计、闪络电压和表面电位测试系统, 对比了未处理、等离子体均匀刻蚀、等离子体梯度刻蚀三种情况的样片表面形貌、化学元素和电气参数, 研究了等离子体梯度刻蚀对沿面闪络性能的提升机理。结果表明, 等离子体表面刻蚀可提升环氧树脂表面粗糙度、提高样片表面电导率、浅化陷阱能级以及提升沿面闪络电压。等离子体梯度刻蚀对闪络电压的提升效果要优于等离子体均匀刻蚀, 相比于未处理样片最大可提升 26.5%。分析认为针-针电极的电场分布可划分为三结合点处附近的高场强区和电极之间的低场强区, 加快高场强区的表面电荷消散速率并适当控制低场强区表面电荷迁移速率, 可以最大程度地提升样片整体的沿面闪络性能。

**关键词:** 等离子体; 表面刻蚀; 环氧树脂; 梯度改性; 沿面闪络; 表面电荷

中图分类号: O53

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202133.210100

## Effect of plasma surface gradient etching on surface flashover performance of epoxy resin

Yan Jiyuan<sup>1,2</sup>, Liang Guishu<sup>2</sup>, Kang Yuchan<sup>2</sup>, Peng Chengkai<sup>2</sup>, Wan Zijian<sup>2</sup>, Lü Tianshu<sup>2</sup>, Xie Qing<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding, 071003, China)

**Abstract:** In this paper, plasma gradient etching of alumina/epoxy resin surface is realized by combining plasma surface etching method and gradient modification method. Scanning electron microscope (SEM), surface profiler, X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), high resistance meter, flashover voltage and surface potential measurement system were used to compare the surface morphology, chemical elements and electrical parameters of untreated, uniform plasma etching and gradient plasma etching samples, and the mechanism of improving the surface flashover performance by gradient plasma etching was studied. The results show that plasma surface etching can improve the surface roughness of epoxy resin, increase the surface conductivity, shallow the trap energy level and increase the surface flashover voltage. The enhancement of flashover voltage by plasma gradient etching is better than that by plasma uniform etching, and the maximum increase is 26.5% compared with the untreated sample. The analysis shows that the electric field distribution of the needle-needle electrodes can be separated into the high field intensity region (near the triple junction) and the low field intensity region (between the electrodes). Speeding up the surface charge dissipation rate in the high field intensity region and properly controlling the surface charge migration rate in the low field intensity region can improve the overall surface flashover performance of the sample to the greatest extent.

**Key words:** plasma; surface etching; epoxy resin; gradient modification; surface flashover; surface charge

\* 收稿日期: 2021-03-22; 修订日期: 2021-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51777076); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019MS083); 新能源电力系统国家重点实验室自主研究课题(LAPS2019-21)

作者简介: 闫纪源(1995—), 男, 博士研究生, 从事等离子体、高电压与绝缘技术相关研究。

通信作者: 谢庆(1979—), 男, 教授, 博士, 从事等离子体、高电压与绝缘技术相关研究。

随着高压直流输电系统的快速发展,对电气设备的绝缘性能提出了更高的要求<sup>[1-2]</sup>。目前国内外常用氧化铝/环氧树脂复合材料作为气体绝缘输电线路(GIL)等直流输电设备的绝缘支撑<sup>[3-5]</sup>。但环氧树脂在直流高压下会发生沿面闪络现象,导致电气设备故障和绝缘失效,严重威胁电力系统的安全稳定运行<sup>[6-7]</sup>。研究表明,环氧树脂的沿面闪络与气固界面表面电荷的聚散行为密切相关,而表面电荷的运动特性受材料的表面形貌、化学成分、电气参数等多方面的影响,具体包括表面粗糙度<sup>[8-9]</sup>、官能团含量<sup>[10]</sup>、表面电导率与体积电导率<sup>[11-12]</sup>、陷阱能级分布<sup>[13-14]</sup>等。因此,国内外学者主要通过物理刻蚀<sup>[15-17]</sup>、表面氟化<sup>[18]</sup>、表面镀膜<sup>[19]</sup>等手段来改变以上参数,进而提升环氧树脂的沿面闪络性能。其中,表面刻蚀方法实现难度低、参数可控,成为了绝缘材料表面改性的主要手段。于开坤等采用激光刻蚀和砂纸打磨技术在陶瓷表面构造规律的凹坑结构,通过调控材料表面粗糙度提高其沿面闪络性能<sup>[20]</sup>。薛建议等通过喷砂技术处理绝缘子表面,发现表面粗糙化处理可以抑制绝缘子表面电荷积聚<sup>[21]</sup>。

等离子体表面改性技术具有设备简单、环境友好、改性效率高等特点,逐渐成为了环氧树脂等绝缘材料表面改性的热门方法<sup>[22-24]</sup>。高能等离子体在轰击材料表面时不仅可以实现纳米级的表面刻蚀,而且使表面原有化学键断裂并与其他基团重组,实现材料表面物理形貌与化学成分的双重改性<sup>[25-26]</sup>。邵涛等以氩气为工作气体,采用大气压等离子体射流(APPJ)方法实现了聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的表面刻蚀,发现等离子体刻蚀对样片的表面形貌、元素组成、水接触角和真空闪络电压均有影响<sup>[27]</sup>。万方超等对交联聚苯乙烯(CLPS)进行CF<sub>4</sub>等离子体表面改性,提高了材料的真空闪络电压<sup>[28]</sup>。张冠军等通过He/CF<sub>4</sub>混合气体实现环氧树脂等离子体射流改性,从表面形貌、化学元素、水接触角等方面研究了闪络性能的影响因素<sup>[29]</sup>。谢庆等以正硅酸乙酯(TEOS)为前驱物,采用APPJ方法实现环氧树脂表面硅沉积,发现改性后的样片表面电导率和表面电荷消散速率大幅增加,样片沿面闪络电压显著提高<sup>[30]</sup>。邵涛等系统研究了等离子体表面硅沉积对材料表面绝缘特性的影响,通过调控前驱物浓度<sup>[31]</sup>、载气流速<sup>[32]</sup>、氧气含量<sup>[33]</sup>、电极结构<sup>[34]</sup>等参数揭示了绝缘材料沿面闪络的提升机理。

以等离子体表面处理手段为基础的材料改性技术虽然研究详实、方法多样,但一般只对材料表面进行均匀处理。实际工况下绝缘材料所处的电场往往为非均匀分布,均匀化的表面改性手段或许难以达到最优效果。因此“功能梯度材料(FGM)”这一概念引入到绝缘材料改性中,即通过各种手段实现材料的介电参数在空间上的连续变化,从而实现电场调控与表面绝缘性能的提升<sup>[35-36]</sup>。杜伯学等人在此基础上提出了表层功能梯度材料(SFGM)这一概念,即通过表面改性技术,在材料表面构建介电功能梯度层,以表层介电梯度来调控气固界面的电场分布<sup>[37]</sup>。他们采用磁控溅射方法实现BaTiO<sub>3</sub>在绝缘子表面的梯度分布,通过仿真发现三结合点处的最大场度有明显降低,并且通过实验证明闪络电压有所上升。李进等通过控制绝缘子表面不同区域的氟化时间,得到表面电导梯度分布的R-SFGM绝缘子,提高了沿面闪络电压<sup>[38]</sup>。此外,他们通过构建GIL仿真模型,研究传统绝缘子与非线性电导分布绝缘子的电场分布规律,发现表面电导的非线性分布可以调控绝缘子的表面电场和损耗特性,进而提升沿面闪络性能<sup>[39]</sup>。

本文结合了等离子体表面刻蚀方法与梯度改性思路,实现了氧化铝/环氧树脂的表面梯度刻蚀。通过对比未处理、等离子体均匀刻蚀、等离子体梯度刻蚀三种情况的样片的表面形貌、化学元素、电气参数的变化,找到不同改性方法对环氧树脂表面特性的影响规律,以及研究等离子体梯度刻蚀对环氧树脂沿面闪络性能的影响机理。

## 1 实验装置与测试系统

### 1.1 样片制备与改性

本文中采用的所有微米氧化铝/环氧树脂样片均由课题组制备。样片以上海树脂厂生产的双酚A型环氧树脂(E-51)为基体,以甲基四氢邻苯二甲酸酐(MTHPA)为固化剂,以2,4,6-三(二甲胺基甲基)苯酚(DMP30)为促进剂,以上海超威纳米科技有限公司生产的100 μm氧化铝为填料进行固化合成,制备流程如图1所示。其中基体、固化剂、促进剂、填料的质量分数比例为100:80:1:300,与实际运用的GIL配比相仿<sup>[3]</sup>。制备好的样片实物如图1所示,样片直径为40 mm,厚15 mm,表面平整且填料分散较为均匀。

制备好的样片首先用装有无水乙醇和去离子水的超声波清洗机各清洗10 min,然后将样片置于30 ℃的干燥箱中,6 h后方可进一步改性处理。本文以等离子体射流装置为基础,分别实现样片表面的等离子体均匀刻蚀与梯度刻蚀,实验设备如图2所示。整套装置由南京苏曼公司定制生产,以高频高压电源(中心频率50 kHz,输出电压0~30 kV)为等离子体激励源,高压端与等离子体射流枪的高压模块相连。该射流枪由高压模块、接地模块、射流

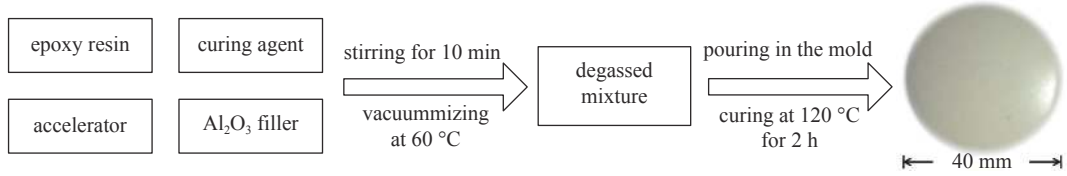


Fig. 1 Preparation process of the  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -filled epoxy resin sample

图1 氧化铝/环氧树脂样片制备流程图

管和其他固定与绝缘装置组成。其中高压模块与接地模块均为直径 25 mm 的铁制圆柱，圆柱内有  $2 \times 2$  排列、直径 8 mm 的小孔，可以使射流管穿过圆柱并固定。射流管为外径 8 mm、内径 4 mm 的石英玻璃管，组装时需将 4 根射流管同时穿过两类模块，每根射流管的一端均与各自的质量流量计 (D07-19B) 相连，用于控制气体流速，另一端即为等离子体改性区域。实验前将射流枪的接地模块与 0.1 F 的电容串联后接地，通过电压探头与示波器 (Tektronix DPO 2002B) 可监控等离子体放电参数。进行等离子体均匀刻蚀实验时，将氩气通入 4 根射流管中并控制每根管内的气体流速为 4 L/min。当电源电压为 4.5 kV，频率为 53 kHz 时即可产生 4 条淡蓝色等离子体射流焰。通过示波器监控电源及电容电压可得到李萨如图，进而计算得到总放电功率为 58.86 W。此时通过升降平台将待处理样片移至射流管下方 15 mm 处，并通过旋转平台增大处理区域并提高处理的均匀程度。本文等离子体均匀刻蚀的时间为 5 min 和 10 min，分别命名为 E5 和 E10，并将未处理样片命名为 UT。

等离子体梯度刻蚀与均匀刻蚀的区别在于对样片的处理。梯度刻蚀前根据沿面闪络针-针电极的电场特性，将样片划分成高场强区和低场强区，如图 3(a) 所示。其中低场强区宽 4 mm，两个高场强区分别宽 1.5 mm。分别对两类区域采用不同时间的等离子体刻蚀，即可得到表面参数梯度分布的样片，因此需对两类区域单独处理。实验前对每根射流管编号，如图 3(b) 所示。在刻蚀高场强区前，使用遮挡装置盖住中间的低场强区，调整射流枪位置，使 1 号和 2 号射流管与左侧高场强区中心处对齐，3 号和 4 号射流管与右侧高场强区对齐，这样可同时处理高场强区且处理效果保持一致。处理低场强区时同样用遮挡装置盖住两侧的高场强区，调整射流枪位置，使 2 号和 3 号管对准低场强区，停用 1 号和 4 号管。梯度刻蚀时分别对高场强区和低场强区处理 5 min 和 10 min，每根射流管的气体流速与电源参数与均匀刻蚀一致。处理后的样片表面刻蚀时间从左到右依次为 5 min-10 min-5 min 和 10 min-5 min-10 min，分别命名为 G5-10-5 和 G10-5-10。

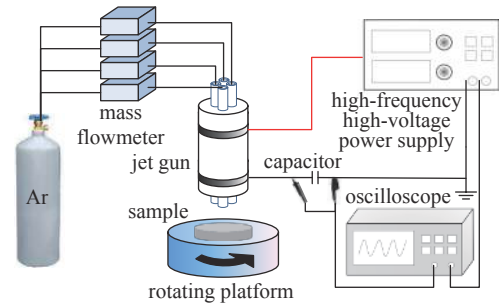


Fig. 2 Schematic diagram of the plasma etching platform

图2 等离子体刻蚀平台示意图

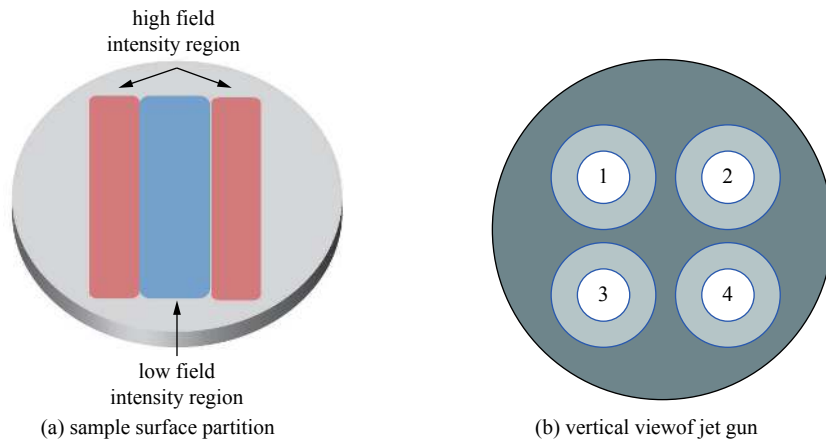


Fig. 3 Schematic diagram of the sample surface partition

图3 样片表面分区示意图

## 1.2 样片表征与测试

为探究等离子体均匀刻蚀与梯度刻蚀前后样片表面特性的变化情况，本文通过扫描电子显微镜 (SEM, Zeiss

Sigma)观测所有样片的表面形貌,并通过表面轮廓仪测量样片表面粗糙度变化。表面化学元素含量变化通过X射线光电子能谱分析仪测量。样片的表面电导率由SM7110高阻计测量。

样片的沿面闪络测试平台与表面电位测量平台均由课题组自主搭建,其中沿面闪络平台如图4所示。本文采用针-针电极测试样片的沿面闪络电压。负极性直流高压电源(0~-50 kV)通过10 MΩ的保护电阻接入闪络腔体的高压端,腔体的接电端与腔体表面确保接地。腔体内有间距可调的针-针电极以及可控制样片位置的二维运动平台。实验前调整电极间距为7 mm,通过二维运动平台使样片紧贴电极下端,并且保证样片两侧高场强区位于针尖处。闪络实验在大气压空气环境下进行,环境温度为25℃,湿度为30%,以0.5 kV/s的速率匀速升压,闪络发生瞬间立即切断电源并通过高压探头(Trek P6015)与示波器(Tektronix DPO 2002B)捕捉闪络电压的数值和波形,记录数据并在5 min后开始下一次加压。为减少闪络实验的波动和误差,每个样片进行10次闪络实验,取10次闪络电压的平均值为该样片的闪络电压值。

样片的表面电位测量平台如图5所示。该平台由负极性直流高压电源(0~-50 kV)、电晕充电针(长5 cm,针尖曲率半径25 mm)、静电探头和静电计(Trek P0865)、数据采集卡及配套软件(阿尔泰科技有限公司,USB2884)和升降平台组成。实验前将样片置于电晕针下5 mm处,样片背部作接地处理。实验时同样控制环境温度为25℃,湿度为30%,对电晕针施加1 min的-7 kV直流电压,可使样片产生表面电荷。充电完成后立即将样片移至静电探头下2 mm处,样片背部同样接地,通过静电计和频率为10 Hz的采集卡即可得到连续30 min的样片表面电位数据。

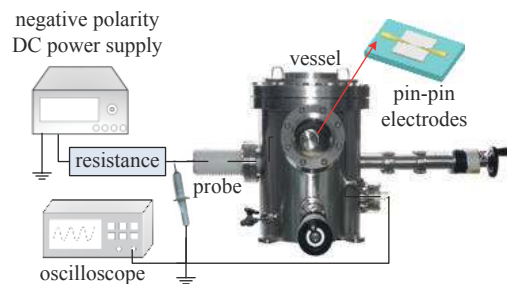


Fig. 4 The surface flashover test platform for epoxy resin

图4 环氧树脂沿面闪络测试平台

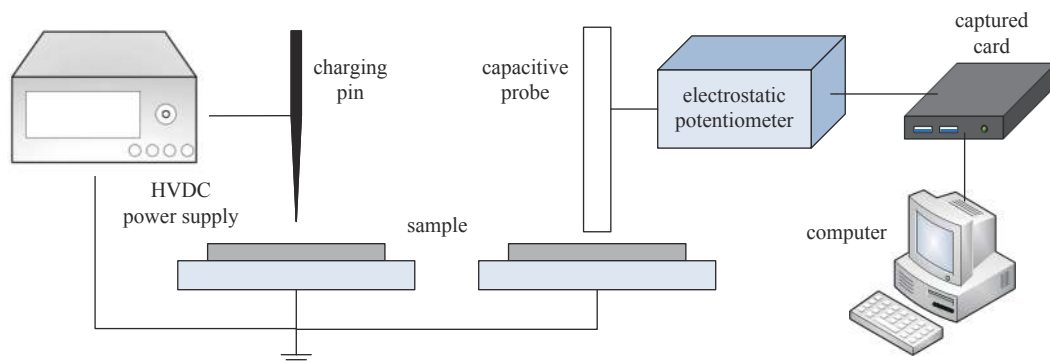


Fig. 5 The surface potential decay test platform for epoxy resin

图5 环氧树脂表面电位衰减测试平台

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 表面形貌及化学元素变化

样片处理前后的SEM图如图6所示。可以发现,未处理样片表面除了有少量毛刺外整体较为平坦,而在持续5 min的等离子体刻蚀后,样片表面开始出现突起和沟壑,部分 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填料暴露出来。等离子体刻蚀10 min后样片表面的突起和沟壑进一步增多,不仅加剧了填料的暴露,许多填料也被刻蚀,表面平整度受到影响。为证明等离子体梯度刻蚀是否成功,对等离子体梯度刻蚀样片的分界区域进行观察,发现该区域可分成短时间处理区、过渡区和长时间处理区。短时间处理区进行了5 min的等离子体刻蚀,其表面也出现了部分突起和沟壑。长时间处理区为10 min的等离子体刻蚀,该区域可发现部分颗粒状填料暴露出来。过渡区的存在是因为不同遮挡装置的覆盖区域稍有重合,导致该部分无法被刻蚀,其表面形貌与未处理样片较一致。

为进一步研究等离子体刻蚀对样片表面形貌的影响,对改性前后样片表面粗糙度进行了测量,如图7所示。以算数平均偏差粗糙度 $R_a$ 为样片的表面粗糙度值,可以发现未处理 $R_a$ 为532.463 nm,其样片表面较为平整。样片被刻蚀5 min后表面出现起伏, $R_a$ 也提升至766.154 nm。在等离子体刻蚀10 min后,样片表面出现大量山峰状突起, $R_a$ 也增至948.661 nm。综上所述,等离子体刻蚀可以增加材料表面的突起和沟壑,暴露基体内的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 填料,增大材料表面粗糙度,并且刻蚀程度受处理时间影响。

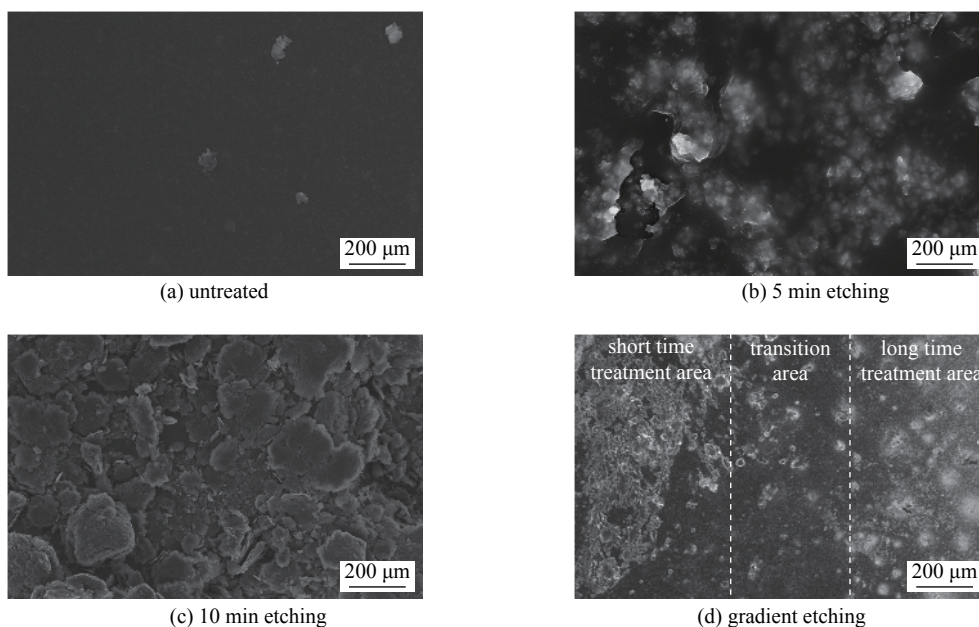


Fig. 6 SEM images of sample surface before and after plasma etching

图 6 等离子体刻蚀前后样片表面 SEM 图

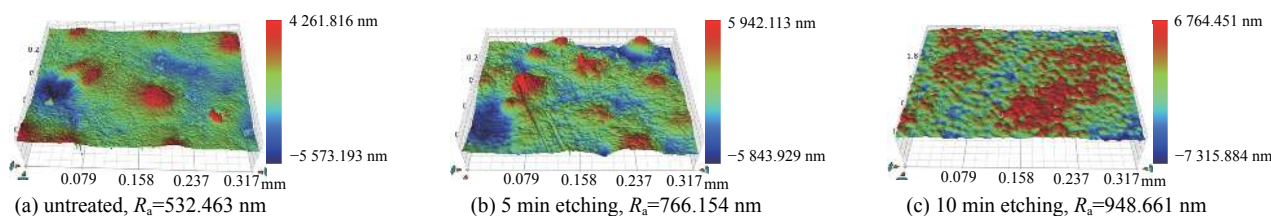


Fig. 7 Sample surface roughness before and after plasma etching

图 7 等离子体刻蚀前后样片表面粗糙度

此外,通过 XPS 可知样片改性前后化学元素的变化,如图 8 所示。根据图 8 可以统计各种元素的相对占比,如表 1 所示。发现随着刻蚀时间的增长,样片表面碳元素相对含量逐渐下降,而氧元素与铝元素的相对含量逐渐上升。对所有样片的 C1s 峰进行分峰处理,如图 9 所示。发现经等离子体刻蚀的样片表面 C—O 键与 C=O 双键含量有所上升。这是因为 APPJ 的处理环境为大气,高能等离子体会分解空气中的氧气与水分子,生成羟基等含氧官能团,并与样片表面同样被高能破坏的化学键进行重组,从而使氧元素接枝到样片上。此外,长时间的等离子体刻蚀会使基体内部的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 填料暴露,因此铝元素含量也有所增加。

## 2.2 表面电气性能变化

改性前后样片沿面闪络变化情况如图 10 所示。由图可知不同处理的样片闪络电压由低到高排序为: UT, G5-

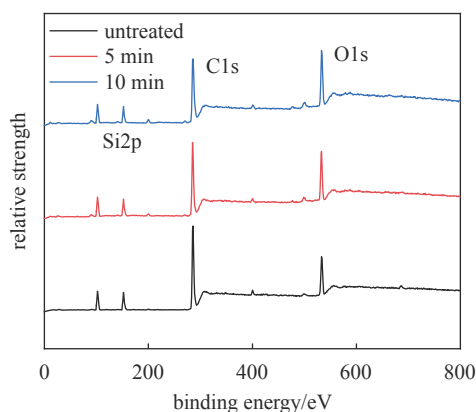


Fig. 8 XPS spectra of all samples

图 8 所有样片的 XPS 谱图

表 1 等离子体刻蚀前后表面元素含量变化  
Table 1 Surface elements changes before and after plasma etching (%)

sample	ratio			
	C	O	Al	Si
UT	74.42	11.28	0.89	13.41
E5	62.66	19.43	3.26	14.65
E10	53.41	24.21	8.46	13.92

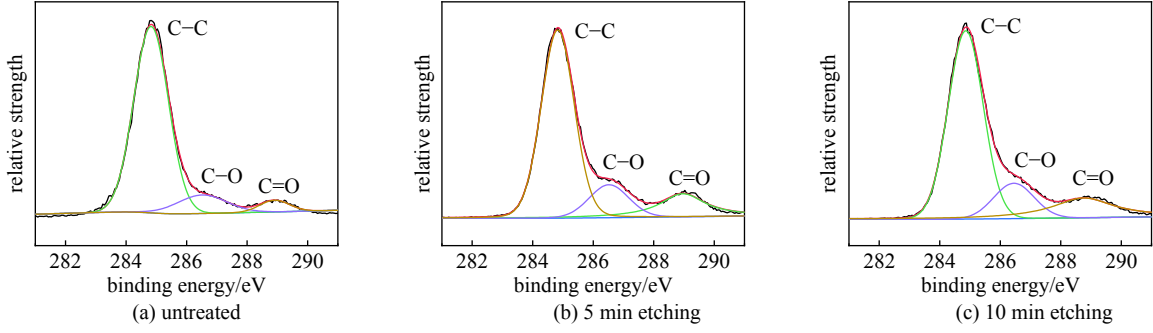


Fig. 9 C1s peak-fitting of all samples  
图 9 所有样片 C1s 峰分峰处理

10-5, E5, E10, G10-5-10。发现等离子体均匀刻蚀与梯度刻蚀均能提高样片的沿面闪络电压,但提升幅度有所不同,其中不同梯度刻蚀方式对闪络电压的提升有明显区别。对高场强区采用长时间的等离子体刻蚀对闪络电压的提升效果更好,最多可提升 26.5%,但对低场强区进行长时间的处理会削弱等离子体改性的提升效果,最低仅提升 7.57%。

为探索不同等离子体刻蚀手段对闪络电压的提升机理,图 11 给出了改性前后的样片表面电导率变化情况。发现未改性样片表面电导率为  $2.77 \times 10^{-18}$  S, 5 min 的等离子体刻蚀使样片表面电导率提升至  $5.91 \times 10^{-17}$  S, 提升了一个数量级,而 10 min 的等离子体刻蚀将表面电导率进一步提升至  $9.88 \times 10^{-16}$  S, 相比未处理样片提升了两个数量级。因此对等离子体梯度刻蚀方法可以获得表面电导率呈梯度分布的样片。

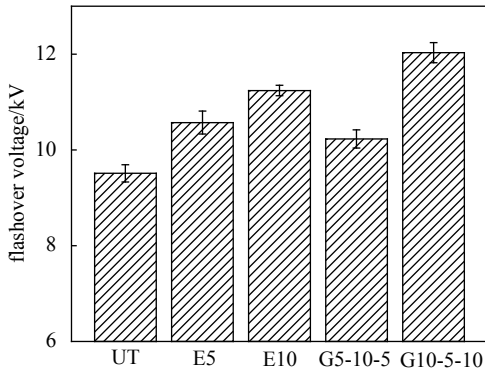


Fig. 10 Sample surface flashover voltages before and after treatment

图 10 改性前后样片的沿面闪络电压测量结果

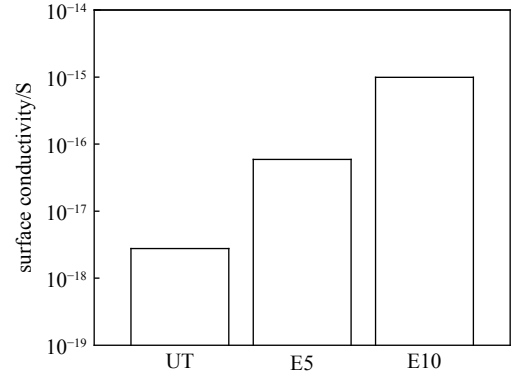


Fig. 11 Sample surface conductivities before and after treatment

图 11 改性前后样片表面电导率测量结果

研究表明,材料表面电导率的提升可以促进表面电荷的消散,而表面电荷的消散特性与表面电位的衰减速率密切相关<sup>[40]</sup>。本文测量了改性前后 30 min 的样片单点表面电位衰减情况,通过归一化处理得到了样片表面电位衰减曲线,如图 12 所示。发现等离子体表面刻蚀可以提升表面电位衰减速率,且随改性时间的增加而逐渐加快。

为研究表面电位衰减原因,本文通过等温表面电位衰减法 (ISPD),将表面电位衰减曲线拟合成双指数函数,公式如下<sup>[41]</sup>

$$\varphi_s(t) = Ae^{-\frac{t}{m}} + Be^{-\frac{t}{n}} \quad (1)$$

式中:  $t$  为消散时间;  $\varphi_s(t)$  为某一时刻的表面电位;  $A, B, m, n$  为双指数函数的拟合参数。根据 ISPD 法,陷阱能级  $E_T$  与陷阱密度  $Q_S$  满足如下关系

$$E_T = k_B T \ln(\nu t) \quad (2)$$

$$Q_S = t \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{eL} \cdot \frac{d\varphi_s(t)}{dt} \quad (3)$$

式中:  $k_B$  为玻耳兹曼常数;  $T$  为绝对温度;  $\nu$  为电子逃逸频率;  $e$  为元电荷量;  $L$  为样片厚度;  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_r$  分别为真空介电常数和相对介电常数。因此将表面电位衰减曲线变换为陷阱能级分布曲线,如图 13 所示。发现改性后的样片陷阱能级逐渐变浅,并且浅陷阱的含量逐渐增加。结合 2.1 节的表面形貌与化学元素变化可知,等离子体刻蚀提高

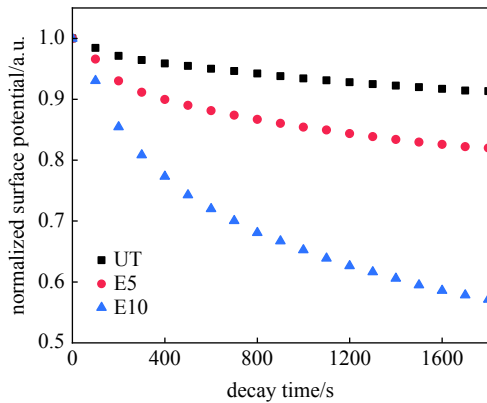


Fig. 12 Sample surface potential decay curves before and after plasma etching

图 12 等离子体刻蚀前后样片表面电位消散曲线

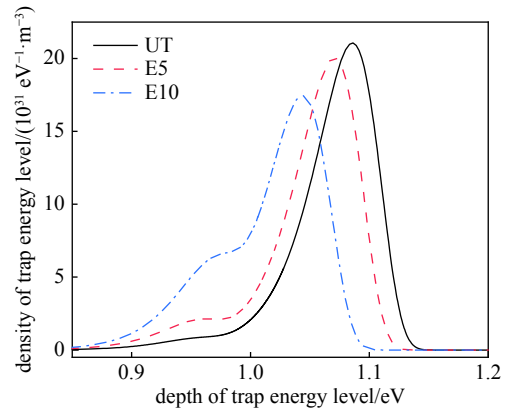


Fig. 13 Trap energy level distribution of sample surfaces before and after plasma etching

图 13 等离子体刻蚀前后样片表面陷阱能级分布

了表面粗糙度,增加了表面的物理陷阱,从而浅化了表面陷阱能级。另一方面,等离子体刻蚀使羟基等含氧基团接枝在材料表面,导致部分浅陷阱的引入。两者的综合作用加快了表面电荷的消散速率。因此,等离子体梯度刻蚀法可获得表面电荷消散速率呈梯度分布的样片。

### 2.3 沿面闪络性能提升机理分析

等离子体刻蚀可以改变样片表面的物理形貌、化学元素以及电气性能。未处理的样片由于制备工艺和模具精度的限制,其表面存在少量的毛刺和缺陷,在外加电压时会畸变附近电场,产生局部电晕并积聚大量电荷,严重影响样片整体的闪络性能。等离子体刻蚀可以一定程度上祛除与修饰表面缺陷,减小样片表面对电场的畸变效应。并且等离子体刻蚀会在材料表面引入含氧官能团,进而提高样片的表面电导率。此外,含氧官能团的引入会增加材料的物理陷阱与化学浅陷阱,使表面电荷更快消散,抑制了表面电荷对外部电场的畸变能力。理化综合作用使得等离子体刻蚀方法可以有效提升样片的沿面闪络性能。

由 2.2 节可知,不同等离子体刻蚀方法对样片沿面闪络性能的提升幅度有所区别。这是因为针电极的针尖处为空气-电极-样片的三结合点,其周围会积聚大量表面电荷,严重畸变附近场强<sup>[2]</sup>。对该区域采用长时间的等离子体刻蚀,可以显著促进表面电荷的消散,抑制表面电荷在三结合点的积聚,因此在高场强区用长时间等离子体刻蚀方法(E10, G10-5-10)可以大幅提升样片的闪络电压。然而,表面电荷消散过快会为沿面放电的发展引入种子电荷,为形成贯穿性的导电通道提供条件,反而促进了沿面闪络的发生<sup>[19]</sup>。因此在样片的低场强区采用长时间等离子体刻蚀(E10, G5-10-5)会降低沿面闪络电压。综上可知,等离子体梯度刻蚀改性可以针对性地调控样片表面电荷运动特性,可进一步提升样片的沿面闪络性能。

## 3 结 论

本文通过大气压等离子体射流刻蚀方法,对氧化铝/环氧树脂样片进行了不同时间的均匀刻蚀与梯度刻蚀改性,研究了改性前后样片的表面形貌、化学元素、沿面闪络电压、表面电导率和表面电荷消散速率的变化情况,并分析了等离子体梯度刻蚀改性对样片沿面闪络性能的提升机理。主要结论如下:(1)等离子体刻蚀方法通过提高样片表面粗糙度和接枝含氧官能团,在样片表面引入了物理陷阱与化学浅陷阱,加快了表面电荷的消散,进而提高了样片的沿面闪络电压。(2)采用等离子体梯度刻蚀方法使闪络电压最多提高 26.5%,提升效果优于均匀刻蚀与未处理样片。(3)表面电荷消散较慢会畸变周围场强,但消散速率过快会为放电发展提供有利条件,因此对空气-电极-样片三结合点处加快表面电荷消散速率,同时控制电极之间电荷迁移速率可最大程度地提升样片整体闪络性能。

### 参考文献:

- [1] Shao Tao, Kong Fei, Lin Haofan, et al. Correlation between surface charge and DC surface flashover of plasma treated epoxy resin[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1267-1274.
- [2] Li Chuanyang, Shahsavarian T, Baferani M A, et al. High temperature insulation materials for DC cable insulation—Part III: Oegradation and surface breakdown[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(1): 240-247.

- [3] 高克利, 颜湘莲, 王浩, 等. 环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J]. 高电压技术, 2018, 44(10): 3105-3113. (Gao Keli, Yan Xianglian, Wang Hao, et al. Progress in environment-friendly gas-insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3105-3113)
- [4] 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)
- [5] Yin Kai, Xie Qing, Ruan Haou, et al. Causation of ultra-high surface insulation of  $\text{Bi}_{0.95}\text{Y}_{0.05}\text{FeO}_3$ /epoxy composites: simultaneous sine-variations of dielectric and trap properties with filler content[J]. *Composites Science and Technology*, 2020, 197: 108199.
- [6] 谢庆, 段祺君, 邵帅, 等. BTO纳米纤维及其等离子体氟化对EP复合材料表面绝缘特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 4051-4062. (Xie Qing, Duan Qijun, Shao Shuai, et al. Effect of barium titanate nanofibers and plasma fluorination on surface insulation properties of epoxy resin composites[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 4051-4062)
- [7] Du B X, Liang H C, Li J, et al. Electrical field distribution along  $\text{SG}_6/\text{N}_2$  filled DC-GIS/GIL epoxy spacer[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2018, 25(4): 1202-1210.
- [8] Cheng Guoxin, Cai Dan, Hong Zhiqiang, et al. Variation in time lags of vacuum surface flashover utilizing a periodically grooved dielectric[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(5): 1942-1950.
- [9] Yamamoto O, Takuma T, Fukuda M, et al. Improving withstand voltage by roughening the surface of an insulating spacer used in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2003, 10(4): 550-556.
- [10] 詹振宇, 阮浩鸥, 律方成, 等. 等离子体氟化改性环氧树脂及其在 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体中电气性能研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(8): 1787-1798. (Zhan Zhenyu, Ruan Haou, Lü Fangcheng, et al. Plasma fluorinated epoxy resin and its insulation properties in  $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$  mixed gas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(8): 1787-1798)
- [11] Li Chuanyang, Zhu Yujie, Hu Jun, et al. Charge cluster triggers unpredictable insulation surface flashover in pressurized  $\text{SF}_6$ [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2021, 54: 015308.
- [12] Ruan Haou, Xie Qing, Lv Fangcheng, et al. Enhanced breakdown strength of BN/ER by the 2D ordinal tiled structure of fillers[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2021, 28(2): 423-430.
- [13] 申巍, 李枕, 李盛涛. 电子束辐照处理环氧纳米复合材料沿面闪络性能提升及机理[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7144-7152. (Shen Wei, Li Zhen, Li Shengtao. Improvement and mechanism of surface flashover performances of epoxy nanocomposites treated by electron beam irradiation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7144-7152)
- [14] Ruan Haou, Xie Qing, Lü Fangcheng, et al. Filler fluorination of nano $\text{TiO}_2$ /ER composites and their surface insulation properties: A comparison of dielectric barrier discharge and chemical solution fluorination[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2020, 53: 145204.
- [15] 谢庆, 付可欣, 陆路, 等. 环氧树脂真空沿面闪络后表面形貌的AFM分析及分形特征提取[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 245-255. (Xie Qing, Fu Kexin, Lu Lu, et al. AFM analysis and fractal characteristics extraction of the surface morphology of epoxy resin after vacuum flashover[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 245-255)
- [16] 于开坤, 张冠军, 穆海宝, 等. 表面处理对可加工陶瓷真空沿面闪络特性的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 115-120, 131. (Yu Kaikun, Zhang Guanjun, Mu Haibao, et al. Effect of different surface treatment on the surface flashover characteristics of machinable ceramic in vacuum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 115-120, 131)
- [17] 郭跃文, 刘文元, 霍艳坤, 等. 表面喷砂对有机玻璃沿面闪络性能影响[J]. 强激光与粒子束, 2020, 32: 065002. (Guo Yuewen, Liu Wenyuan, Huo Yankun, et al. Influence of surface sand blasting treatment on vacuum surface flashover characteristics of PMMA insulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2020, 32: 065002)
- [18] An Zhenlian, Yin Qianqian, Liu Yaqiang, et al. Modulation of surface electrical properties of epoxy resin insulator by changing fluorination temperature and time[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(1): 526-534.
- [19] Li Chuanyang, Hu Jun, Lin Chuanjie, et al. The control mechanism of surface traps on surface charge behavior in alumina-filled epoxy composites[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49: 445304.
- [20] 于开坤, 张冠军, 郑楠, 等. 表面激光处理对氧化铝陶瓷真空中闪络特性的影响[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 28-34. (Yu Kaikun, Zhang Guanjun, Zheng Nan, et al. Effects of surface laser treatment on flashover characteristics across alumina ceramics in vacuum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 28-34)
- [21] Xue Jianyi, Wang Han, Chen Junhong, 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: 083302.
- [22] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705. (Shao Tao, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 685-705)
- [23] 章程, 顾建伟, 邵涛, 等. 大气压空气中重复频率纳秒脉冲气体放电模式研究[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26: 045029. (Zhang Cheng, Gu Jianwei, Shao Tao, et al. Discharge mode in the repetitive nanosecond-pulse discharge in atmospheric pressure air[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 045029)
- [24] 沈苑, 王瑞雪, 章程, 等. 微秒脉冲激励的大气压氦等离子体射流放电特性[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 055001. (Shen Yuan, Wang Ruixue, Zhang Cheng, et al. Characterization of atmospheric pressure helium plasma jet driven by microsecond pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 055001)



- [25] Kostov K G, Nishime T M C, Castro A H R, et al. Surface modification of polymeric materials by cold atmospheric plasma jet[J]. *Applied Surface Science*, 2014, 314: 367-375.
- [26] 周亦骁, 邵涛, 章程, 等. 微秒脉冲大气压氦气等离子体射流阵列特性[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 045003. (Zhou Yixiao, Shao Tao, Zhang Cheng, et al. Atmospheric pressure plasma jet array in helium driven by microsecond pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 045003)
- [27] Shao Tao, Zhou Yixiao, Zhang Cheng, et al. Surface modification of polymethyl-methacrylate using atmospheric pressure argon plasma jets to improve surface flashover performance in vacuum[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(3): 1747-1754.
- [28] 万方超, 许飞凡, 魏伟, 等. 交联聚苯乙烯表面CF<sub>4</sub>等离子体改性及其真空沿面闪络性能[J]. *高电压技术*, 2018, 44(12): 3857-3864. (Wan Fangchao, Xu Feifan, Wei Wei, et al. Surface modification of cross-linked polystyrene by CF<sub>4</sub> plasma and its vacuum surface flashover[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(12): 3857-3864)
- [29] Chen Sile, Wang Shuai, Wang Yibo, et al. Surface modification of epoxy resin using He/CF<sub>4</sub> atmospheric pressure plasma jet for flashover withstanding characteristics improvement in vacuum[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 414: 107-113.
- [30] Xie Qing, Lin Haofan, Zhang Shuai, et al. Deposition of SiC<sub>x</sub>H<sub>y</sub>O<sub>z</sub> thin film on epoxy resin by nanosecond pulsed APPJ for improving the surface insulating performance[J]. *Plasma Science and Technology*, 2018, 20: 025504.
- [31] 林浩凡, 王瑞雪, 谢庆, 等. 等离子体射流快速改性促进表面电荷衰减[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(16): 256-264. (Lin Haofan, Wang Ruixue, Xie Qing, et al. Rapid surface modification by plasma jet to promote surface charge decaying[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(16): 256-264)
- [32] 胡多, 任成燕, 章程, 等. 等离子体射流处理对聚全氟乙丙烯薄膜沿面绝缘特性的影响研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(15): 4633-4640. (Hu Duo, Ren Chengyan, Zhang Cheng, et al. Effect of deposited film on the surface insulation characteristics of FEP material by atmospheric pressure plasma jet[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(15): 4633-4640)
- [33] 王婷婷, 章程, 张福增, 等. 氧含量对大气压等离子体薄膜沉积提高环氧树脂沿面耐压的影响[J]. *高电压技术*, 2020, 46(10): 3708-3714. (Wang Tingting, Zhang Cheng, Zhang Fuzeng, et al. Effect of oxygen concentration on improvement of surface pressure resistance of epoxy resin by atmospheric pressure plasma deposition[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(10): 3708-3714)
- [34] 马翊洋, 章程, 孔飞, 等. 等离子体射流阵列辅助薄膜沉积对环氧树脂表面电气特性的影响[J]. *高电压技术*, 2018, 44(9): 3089-3096. (Ma Yiyang, Zhang Cheng, Kong Fei, et al. Effect of plasma jet array assisted film deposition on epoxy resin surface electrical characteristics[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(9): 3089-3096)
- [35] Li Shengtao, Zhang Tuo, Sun Jian, et al. Improvement of surface flashover performance in vacuum by co-firing Mo/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cermets and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramics[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(6): 1931-1937.
- [36] 柯昌凤, 刘文元, 段荔, 等. 表面改性对绝缘子真空沿面闪络特性的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 065010. (Ke Changfeng, Liu Wenyuan, Duan Li, et al. Influence of surface modification on vacuum flashover performance of insulators[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 065010)
- [37] 李进, 王泽华, 陈允, 等. 高压气体绝缘输设备用功能梯度材料研究进展[J]. *高电压技术*, 2020, 46(7): 2471-2477. (Li Jin, Wang Zehua, Chen Yun, et al. Research progress on functionally graded materials for high voltage gas insulated transmission apparatus[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(7): 2471-2477)
- [38] Du B X, Ran Z Y, Li J, et al. Novel insulator with interfacial  $\sigma$ -FGM for DC compact gaseous insulated pipeline[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(3): 818-825.
- [39] 李进, 王雨帆, 梁虎成, 等. 高压直流GIL盆式绝缘子非线性电导参数优化[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(1): 166-173+407. (Li Jin, Wang Yufan, Liang Hucheng, et al. Parameter optimization of nonlinear conductivity spacer for HVDC GIL[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(1): 166-173+407)
- [40] Li Chuanyang, Lin Chuanjie, Chen Geng, et al. Field-dependent charging phenomenon of HVDC spacers based on dominant charge behaviors[J]. *Applied Physics Letters*, 2019, 114: 202904.
- [41] 高宇, 王小芳, 李楠, 等. 聚合物绝缘材料载流子陷阱的表征方法及陷阱对绝缘击穿影响的研究进展[J]. *高电压技术*, 2019, 45(7): 2219-2230. (Gao Yu, Wang Xiaofang, Li Nan, et al. Characterization method for carrier trap and the effect on insulation breakdown within polymer insulating materials: a review[J]. *High Voltage Engineering*, 2019, 45(7): 2219-2230)