第 52 卷 第 2 期：779-788　　高电压技术　　Vol.52, No.2: 779-788
2026 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241858

重复闪络下 PBT 表面累积损伤对闪络电压的作用

李康乐[1]，张元涛[1]，王　杰[1]，李泽瑞[2]，周　凯[2]
（1. 兰州理工大学自动化与电气工程学院，兰州 730050；2. 四川大学电气工程学院，成都 610065）

摘　要：为研究聚对苯二甲酸丁二醇酯(polybutylene terephthalate, PBT)重复闪络特性，对 PBT 薄片样本进行重复闪络实验，研究闪络电压变化特征及原因。制备 5 组 PBT 薄片样本，在工频交流电压下对 5 组样本分别进行 0、100、200、300、400 次沿面闪络实验，记录样本闪络电压。分别采用扫描电镜、激光共聚焦显微镜、红外光谱仪、差示扫描量热仪、电刺激去极化电流仪和表面电位仪检测样本表面微观形貌、粗糙度、化学结构、结晶度、陷阱参数以及表面电位。测试结果表明：随闪络次数增加 PBT 样本表面闪络电压先增大后减小，在闪络 100 次时闪络电压达最大值；100 次闪络之前，随闪络次数增加样本变光滑，表面结晶度增大，深陷阱密度减小，能级减小；100 次闪络之后，随闪络次数增加，样本表面产生微裂缝及孔洞，表面结晶度减小，深陷阱密度增大，能级减小。分析认为，PBT 表面重复闪络特性与材料表面累积损伤紧密相关。累积损伤导致粗糙度和陷阱参数改变，进而导致表面电场分布及闪络电压发生变化。

关键词：PBT；闪络电压；重复闪络；累积损伤；电场畸变；陷阱

Effect of the Surface Cumulative Damage of PBT on Its Flashover Voltage Under Repeated Flashovers

LI Kangle[1], ZHANG Yuantao[1], WANG Jie[1], LI Zerui[2], ZHOU Kai[2]
(1. Automation and College of Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;
2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to study the repeated flashover characteristics of polybutylene terephthalate (PBT), repeated flashover experiments were carried out on PBT thin film samples to study the characteristics and causes of flashover voltage changes. Five groups of PBT thin film samples were prepared, and surface flashover experiments were carried out on the five groups of samples under power frequency AC voltage for 0, 100, 200, 300, and 400 times, respectively, and the flashover voltage of the samples was recorded. Scanning electron microscope, laser confocal microscope, infrared spectrometer, differential scanning calorimeter, electric stimulation depolarization current meter and surface potential meter were used to detect the surface microstructure, roughness, chemical structure, crystallinity, trap parameters and surface potential of the samples. The test results show that the surface flashover voltage of the PBT sample increases first and then decreases with the increase of flashover times, and reaches the maximum value when the flashover is 100 times. Before 100 flashovers, the sample becomes smoother with the increase of flashover times, the surface crystallinity increases, the deep trap density decreases, and the energy level decreases. After 100 flashovers, as the number of flashovers increases, microcracks and holes appear on the sample surface, the surface crystallinity decreases, the deep trap density increases, and the energy level decreases. Analysis shows that the repeated flashover characteristics of PBT surface are closely related to the cumulative damage on the surface of the material. Cumulative damage leads to changes in roughness and trap parameters, which in turn lead to changes in surface electric field distribution and flashover voltage.

Key words: PBT; flashover voltage; repeated flashover; cumulative damage; electric field distortion; trap

基金资助项目：甘肃省科技计划(23JRRA835)；甘肃省工业过程先进控制重点实验室开放基金项目(2022KX04)；国家自然科学基金(52277156)。
Project supported by Science and Technology Plan of Gansu Province (23JRRA835), Open Fund Project of Gansu Provincial Key Laboratory of Advanced Control for Industrial Processes (2022KX04), National Natural Science Foundation of China (52277156).

0 引言

聚对苯二甲酸丁二醇酯(polybutylene terephthalate，PBT)因其优良的机械强度及绝缘性能而在电动汽车电子器件绝缘组件中得到广泛应用[1]。然而，随着电子器件向高集成、轻量化、小型化方向发展，电动汽车电子器件绝缘距离减小，导致在工作电压下电子器件绝缘承受较高场强。尤其是在多次插拔插头瞬间易在电子器件绝缘表面引发局部高电场及多次沿面闪络，导致 PBT 绝缘性能下降、寿命缩短[2]。研究 PBT 多次沿面闪络特性对于认识电动汽车电子器件长期失效机制具有重要意义。

目前有关高聚物表面闪络特性的研究主要集中在绝缘子等高压电气设备，研究者在不同条件下对环氧树脂、硅橡胶、陶瓷、聚乙烯等绝缘材料进行表面闪络实验，研究材料表面闪络特性及闪络机理[3-7]。已有研究表明[8-10]，表面吸附气体及固体材料种类、电场形式、沿面电场分布、固体表面污秽情况、材料表面参数(粗糙度、结晶结构、电导率、陷阱参数及电荷分布等)是影响沿面闪络电压的主要因素[11-14]。有关 PBT 材料闪络特性，有研究制备了不同结晶度 PBT 样本并对样本施加直流电压进行表面闪络实验。发现随着 PBT 样本结晶度增加，样本表面闪络电压增加。该研究认为晶区更加规整、更不容易产生二次电子，此外，更有序的晶体结构和较低的表面电阻率有助于减少电荷积累和减弱电场畸变，因而导致闪络电压随结晶度上升而增大。然而，目前对于 PBT 表面交流重复闪络特性及机制尚不清楚。在多次交流闪络电压作用下 PBT 表面将发生损伤及老化，进而对后续闪络产生影响。多次交流闪络电压作用下 PBT 表面老化特征如何，其是如何作用于后续闪络电压的，值得进一步研究。

本文搭建了 PBT 表面闪络实验平台，利用指型电极对 PBT 表面施加交流电压，研究了交流电压下 PBT 表面重复闪络特性，并结合 PBT 材料表面损伤特点及陷阱参数变化，分析了 PBT 表面重复闪络机理。

1 实验设置

1.1 样本制备及重复闪络实验

将 PBT 粒料(型号：PBT 1100-211 M)放置在真空干燥箱中，在 80 ℃恒温下真空干燥 8 h。利用真空压膜机对粒料进行压片以制备 PBT 薄片样本。压片步骤如下：将干燥后的粒料放置在直径 90 mm、厚度 0.6 mm 的圆形模具中，首先在 240 ℃、2.2 MPa 下预热 10 min，之后在 240 ℃、10.2 MPa 下加热 10 min，在 180 ℃、10 MPa 下等温结晶 20 min，最后在 10.2 MPa 压力下冷压 5 min 后脱模，得到 PBT 圆形样本，如图 1 所示。用磨抛机和 400 目砂纸将 PBT 样本表面均匀打磨 1 min，使用无水乙醇清洗表面后将样本放置在真空干燥箱中，在 80 ℃恒温下干燥 0.5 h。利用激光共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscope，CLSM)测量样本表面粗糙度。测得打磨后样本算数平均粗糙度(R_{Sa})为 2.144 μm。

利用上述方法制备 5 组 PBT 薄片样本，并分别编号为 PBT-0f、PBT-100f、PBT-200f、PBT-300f、PBT-400f。其中 PBT-0f 为对照样本，不进行闪络老化实验，PBT-100f、PBT-200f、PBT-300f、PBT-400f 4 组样本分别进行 100、200、300、400 次闪络实验(每组包括 20 个薄片样本)。

PBT 样本表面闪络实验平台如图 2 所示。将指型电极固定于 PBT 表面，电极半径 9 mm，长度 80 mm，两电极间距 5 mm，指型电极一端通过限流电阻连接试验变压器高压端，另一端接地。采用调压器及

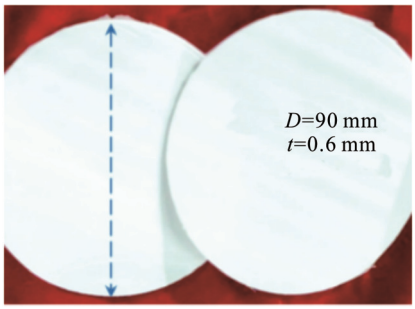


图 1 PBT 薄片样本

Fig.1 PBT sheet sample

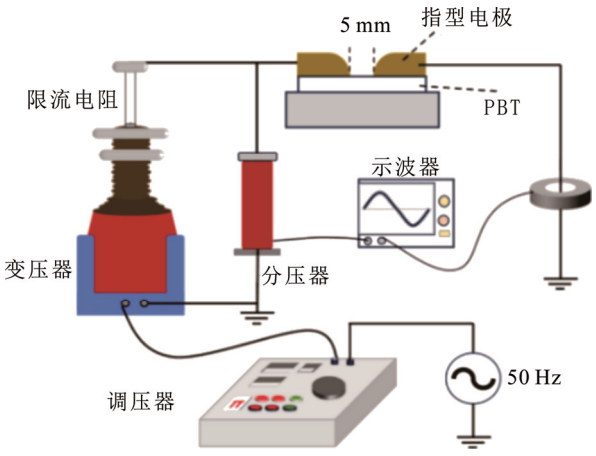


图 2 闪络实验平台

Fig.2 Experimental platform for flashover

试验变压器对 PBT 样本表面施加交流电压。

闪络实验中，通过电容式分压器测量高压端电压，并通过示波器记录闪络电压。以 500 V/s 的速率匀速升压直至材料表面闪络(模拟短时过电压)，记录闪络电压。每次闪络后间隔 10 s 进行下一次闪络实验。取每 20 次连续的闪络电压平均值为一个闪络电压统计点，统计闪络电压变化。根据前期实验，在本文闪络条件下样本经过 400 次闪络后样本表面将出现裂缝及毫米级孔洞(见图 4)，可认为此时样本已失效，故取最大闪络次数为 400 次。

冲击闪络和工频闪络下，材料的累积损伤特性具有一定的相似性，根据已有研究，在重复的脉冲闪络电压下，重复闪络电压也是先上升后下降，并且起始阶段的上升是和材料“老练”相关[15-17]。本文多次交流闪络实验是为了研究重复闪络下材料的损伤特性及其对材料闪络的影响。

1.2　样本表面微观表征

1）表面形貌及粗糙度测试

利用扫描电镜(scanning electron microscopy，SEM)观测 5 组 PBT 的 5 个样本表面闪络老化区域微观形貌(PBT-0f 组为中间未闪络部分，下同)。SEM 型号为 Apreo S HiVoc，检测电压为 1.0 kV，放大倍数为 50 倍。此外，利用能谱仪(energy dispersive spectroscope，EDS；型号：Octane Elect Supe)对 5 组样本表面闪络区域进行能谱测试。主要观测 C、O 元素分布及两元素比例。EDS 检测电压为 10.0 kV，放大倍数为 500 倍，分辨率为 127 eV。

而另一方面，我们利用激光共聚焦显微镜(laser scanning confocal microscope, CLSM；型号：Zen LSM700)观测 SEM 所测每组 5 个样本的闪络区域表面三维形貌，观测倍数为 10 倍。

2）化学结构

利用傅里叶红外光谱仪(Fourier transform infrared spectroscopy，FTIR；型号：Nicolet is50)对每组 5 个样本表面闪络区域进行检测(反射模式)。仪器分辨率为 0.4 cm^{-1}，测试范围为 350~4 000 cm^{-1}。

3）结晶度

利用差示扫描量热法(differential scanning calorimeter，DSC；型号：DSC3)测试每组中 5 个样本结晶度。在 PBT 样本闪络老化区域切取 5 mg 试样，对试样进行 DSC 检测。测试中升温速率为 10 ℃/min，温度区间为 20~240 ℃。

4）陷阱参数

采用电刺激去极化电流法(electrical stimulation depolarization current meter，ESDC)对每组的 5 个 PBT 样本进行陷阱参数测试[18]。将 PBT 样本放置在板电极上，针板电极间距 2 mm，在针电极上持续施加 40 kV 正极性电压 20 min，之后撤去高压并将样本静置 20 min，之后进行极化-去极化电流测试。极化电压为 2 600 V，极化时间为 20 min。

5）表面电位测试

采用表面电位衰减法(isothermal surface potential decay，ISPD)进一步对 ESDC 所测的每组 5 个 PBT 样本测试表面电位衰减规律。利用高压直流电源在真电极施加–5 kV 的电压，针板电极间距 10 mm，电晕充电 5 min 后利用位移控制台将样本移动至开尔文探头下，通过静电电压表与采集卡采集表面电位随时间的变化，采集频率为 1 Hz，采集时间为 90 min。

2　实验结果

2.1　闪络电压

5 组样本闪络电压如图 3 所示。未闪络老化 PBT 样本表面初始闪络电压为 6.4 kV，同时通过冲击电压测量未闪络的 PBT 样本闪络电压，结果显示平均冲击闪络电压为 11.4 kV。

随着闪络次数增多，样本闪络电压先升高后降低，在闪络 100 次时闪络电压达最大值。闪络 100 次样本闪络电压为 7.5 kV，相比于未闪络样本升高约 20%。闪络 400 次样本闪络电压降至 4.5 kV，相比于闪络 100 次样本下降约 40%。

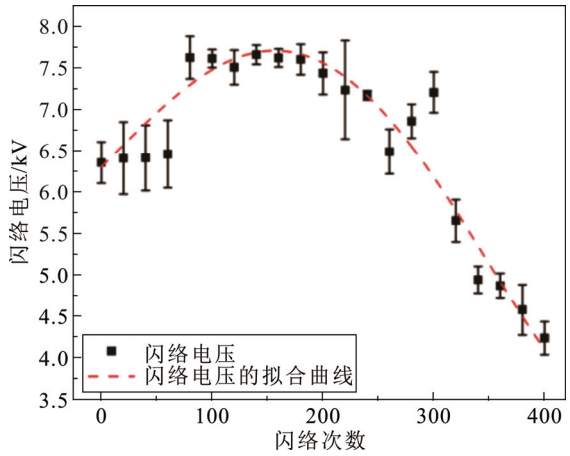


图 3　样本闪络电压统计结果

Fig.3　Statistical results of the flashover voltages of the samples

2.2 表面形貌及粗糙度

1）表面微观形貌

5 组 PBT 样本 SEM 观测结果见图 4。未闪络 PBT 样本表面存在打磨凸起颗粒。闪络 100 次后，PBT 表面放电老化区域中的打磨凸起颗粒大部分消失，在此区域出现较光滑的凹陷通道。闪络 200 次后样本表面出现微米级裂缝，闪络 300 次后样本表面裂缝数量增多、长度增大。闪络 400 次后，样本表面出现两个毫米级的大孔洞。不同组 PBT 样本均呈现 100 次闪络前表面变光滑，随后 200~400 次闪络时，逐渐出现微米级微裂痕及毫米级坑洞。

2）表面粗糙度

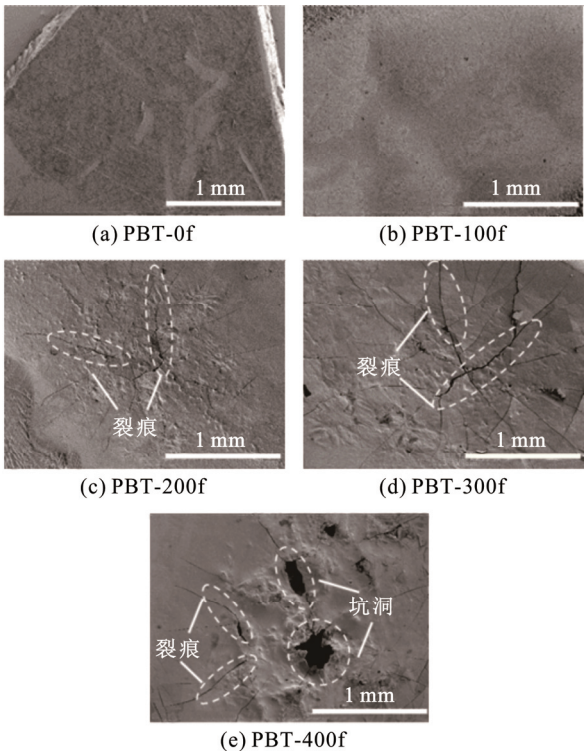
为了更好地表征表面损伤的程度，使用 CLSM 观察了 PBT 表面三维形貌，并计算了表面粗糙度。5 组样本表面闪络区域三维形貌如图 5 所示。未闪络样本(PBT-0f)表面存在打磨凸起颗粒。闪络 100 次后样本表面相比于未闪络样本更为光滑，同时存在约 400 μm 宽的凹陷通道，其和 SEM 观测结果一致。闪络 200 次后，在闪络区域出现新的凸起，且凸起随着闪络次数增加而显著增多。

结合 CLSM 数据，根据式(1)—(2)计算 PBT 样本算数平均粗糙度(见表 1)，并以每组样本测得数据的平均值作为样本的粗糙度[19]：

$$R_{\mathrm{Sa}}=\frac{1}{(N_x N_y)}\cdot\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}(Z(x_i,y_i)-R_{\mathrm{Sc}}) \tag{1}$$

$$R_{\mathrm{Sc}}=\frac{1}{(N_x N_y)}\sum_{i=1}^{N_x}\sum_{j=1}^{N_y}Z_{t_{ij}} \tag{2}$$

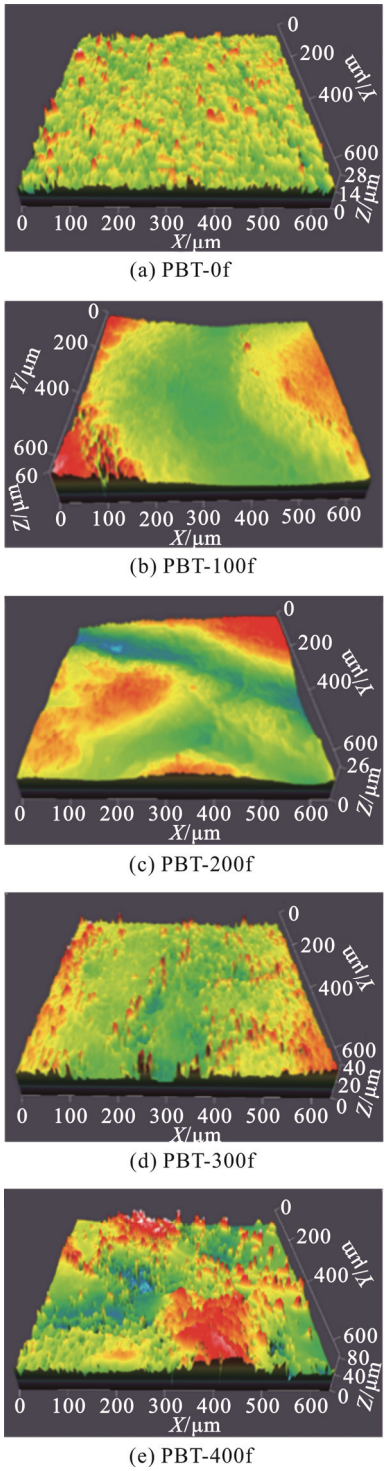
$$R_{\mathrm{St}}=Z_{\max}-Z_{\min} \tag{3}$$



(a) PBT-0f (b) PBT-100f (c) PBT-200f (d) PBT-300f (e) PBT-400f

图 4 PBT 样本表面微观形貌

Fig.4 Surface microscopical morphologies of the PBT samples



(a) PBT-0f (b) PBT-100f (c) PBT-200f (d) PBT-300f (e) PBT-400f

图 5 PBT 样品表面三维形貌

Fig.5 Three-dimensional surface morphology of the PBT samples

式中：R_{Sa} 为算数平均粗糙度；R_{Sc} 为表面元素高度；Z_{tij} 为表面元素(i,j)的峰谷高度。表面被分成 5×5 个表面元素。N_x、N_y 分别为 x、y 方向上的像素数；R_{St} 为最大高度差；Z_{max} 和 Z_{min} 分别为表面最大高度和最低高度。

由表 1 统计结果可知，样本表面粗糙度先减小后增加。闪络 100 次后，表面粗糙度从未闪络时的 2.144 μm 降至 1.211 μm，最大高度差从 16.756 μm 减小至 15.506 μm。此后表面粗糙度再次增加，闪络 400 次后表面粗糙度增至 9.639 μm，最大高度差增至 84.867 μm。在 100 次闪络以前 PBT 表面毛刺减少，因此粗糙度降低，随后 200~400 次闪络时，表面出现表面微裂痕、坑洞，因此粗糙度升高。

2.3　化学结构

1）FTIR

为了更好掌握不同闪络次数下样本化学结构的变化，对 5 组 PBT 的样本进行 FTIR 测试。PBT 样本闪络区域 FTIR 光谱见图 6。图中 1 760 cm^{-1} 处为羰基(C═O)特征峰(表征碳化程度)，2 940 cm^{-1} 及 720 cm^{-1} 处为亚甲基(CH_2)特征峰，1 260 cm^{-1} 及 1 100 cm^{-1} 处为脂基(—COOR)特征峰。因苯环结构较稳定，取苯环 C═C 键伸缩振动峰(1 504 cm^{-1})作为标准峰进行归一化处理。通过各组红外吸收峰平均面积及标准峰面积比值比较各特征基团相对强度。

随着闪络次数增加，PBT 表面红外特征峰强度均减小，且未出现新吸收峰。未闪络样本羰基(相对)吸收强度为 218.21，脂基吸收强度为 156.84，亚甲基吸收强度为 86.16。闪络 100 次后，羰基、脂基、亚甲基强度相比未老化样本分别下降 1.01%、9.55%、8.82%。闪络 400 次后，羰基、脂基、亚甲基强度相比未闪络样本分别下降 26.01%、44.43%、48.07%。以上结果说明，随着闪络次数增加，PBT 表面碳化程度、断链及脂解程度均增大[20]，闪络 100 次前样本表面碳化、分解的程度与未闪络样本接近，老化程度较低，而 200 次闪络以后劣化的程度显著增大。

2）EDS

为了进一步验证不同闪络次数下样本化学结构的变化，进行了 EDS 能谱测试。PBT 样本表面 EDS 测试结果如图 7。未闪络样本 C 元素平均占比为 65.65%，O 元素平均占比为 34.24%，闪络 100 次后 PBT 表面元素比例略有增大。随着闪络次数继续增加，C 元素比例逐渐增大，O 元素比例逐渐下降。闪络 400 次后，C 元素平均占比增至 70.71%，O 元素平均占比降至 29.29%。结合 IR 测试结果，闪络 100 次前样本表面碳化程度与未闪络样本接近，而闪络 200 次后样本表面碳化程度显著增大。

表 1　PBT 样本表面平均粗糙度

Table 1　Average surface roughness of the PBT samples

样本编号	R_{Sa}/μm	R_{St}/μm
PBT-0f	2.144	16.756
PBT-100f	1.211	15.506
PBT-200f	1.586	19.384
PBT-300f	2.738	28.58
PBT-400f	9.639	84.867

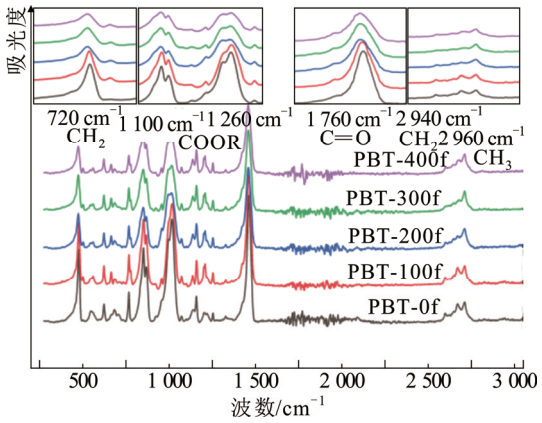


图 6　PBT 样本表面 FTIR 光谱

Fig.6　FTIR spectra of PBT sample surfaces

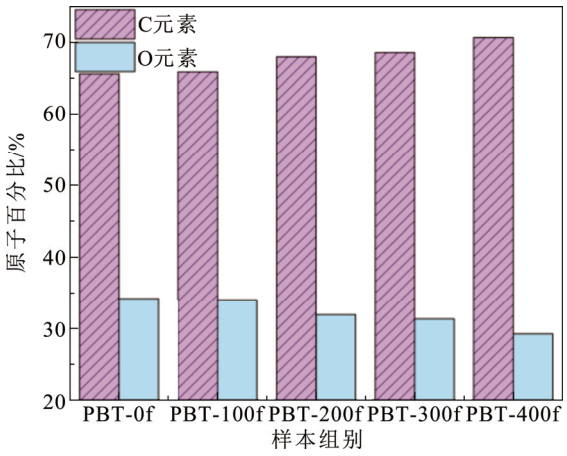


图 7　PBT 样本表面元素比例

Fig.7　The element ratio of PBT sample surfaces

2.4　结晶度

为了验证不同闪络次数下样本晶区占比的变化，进行了 DSC 测试。PBT 样本闪络区域 DSC 测试结果见图 8。

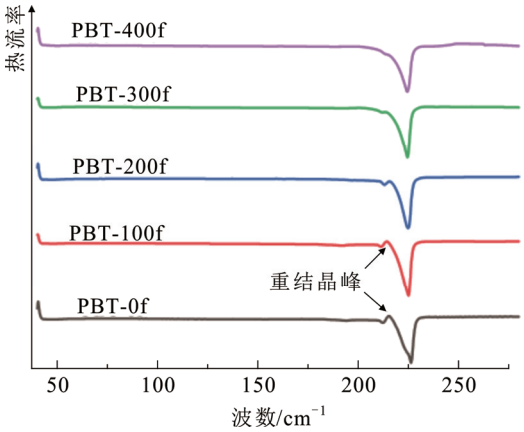


图 8 PBT 样本 DSC 测试结果

Fig.8 DSC testing results of the PBT samples

根据测试结果计算 PBT 表面结晶度，并取每组的平均值作为结晶度：

$$X_c = \frac{\Delta H_m - \Delta H_c}{\Delta H_f} \times 100\% \tag{4}$$

式中：X_c 为结晶度；ΔH_m 为熔融峰的焓；ΔH_f 为冷结晶峰的焓，其为 100%结晶 PBT 样品熔化热。

未闪络样本表面结晶度为 31.05%，闪络 100 次后，PBT 表面结晶度增至 35.64%。此后样本表面结晶度减小。闪络 400 次后样本表面结晶度降至 20.60%。由此说明 PBT 表面在 100 次闪络前表面非晶区被刻蚀，结晶度上升，而 100 次闪络后，表面晶区被破坏，因此结晶度下降。

2.5 陷阱参数

为了定量分析 PBT 表面陷阱参数随闪络次数的变化，我们进行了 ESDC 测试。PBT 样本 $i_{dt}t$-陷阱深度曲线见图 9 及表 3，其中 $i_{dt}t$ 正比于陷阱密度[21]。随着闪络次数增加，浅陷阱无明显规律；闪络 100 次前，深陷阱能级由 0.720 eV 减小至 0.698 eV，陷阱密度由 175.03 nA·s 减小至 146.10 nA·s；闪络 100 次后，深陷阱能级逐渐较小至 0.544 eV，陷阱密度逐渐增大至 224.53 nA·s。由此说明，在 100 次闪络前，PBT 表面缺陷减少，而 100 次闪络后表面引入了能级较小的物理缺陷。

2.6 表面电位

为了进一步验证陷阱参数对表面电荷聚集情况的影响，我们进行了 ISPD 测试。不同闪络次数作用下的 PBT 样本表面电位测试结果如图 10 所示。未老化样本初始表面电位为−2.33 kV，经 100、200、300、400 次闪络的样本表面初始电位分别为−2.08、−2.29、−2.65、−2.85 kV。100 次闪络之前，样本表

表 2 PBT 表面结晶度

Table 2 Crystallinity of PBT surfaces

样本编号	结晶度/%
PBT-0f	31.05
PBT-100f	35.64
PBT-200f	28.28
PBT-300f	24.38
PBT-400f	20.60

表 3 PBT 样本陷阱参数

Table 3 The trapping parameters of PBT samples

样本编号	浅陷阱能级/eV	浅陷阱密度/(nA·s)	深陷阱能级/eV	深陷阱密度/(nA·s)
PBT-0f	0.602 8	50.828	0.723 3	175.03
PBT-100f	0.607 5	95.904	0.697 7	146.10
PBT-200f	0.608 5	83.187	0.696 6	180.68
PBT-300f	0.610 2	92.510	0.680 1	200.55
PBT-400f	0.608 7	93.921	0.675 0	224.53

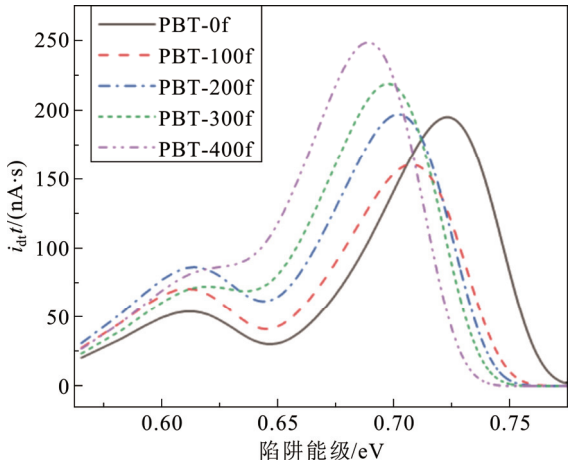


图 9 PBT 样本表面陷阱分布

Fig.9 Trap distribution on the PBT sample surfaces

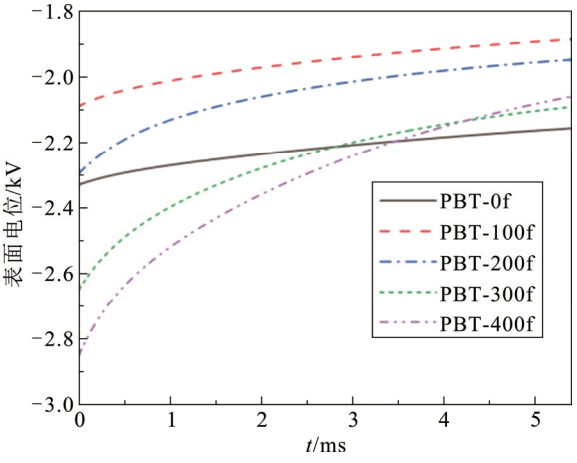


图 10 PBT 样本表面电位衰减趋势

Fig.10 Surface potential decay characteristics of the PBT samples

面初始电位下降而低于未老化样本，而 100 次闪络之后，样本表面初始电位再次上升。

在本文实验条件下，样本交流闪络时间约为十几秒，因此图 10 所示的样本表面电位初始值能够很大程度反映样本闪络之前的电位分布。为了更进一步分析电荷聚集对表面电场畸变的影响，我们通过初始表面电位计算电荷聚集导致的电场畸变值，如表 4 所示。

对比电场畸变程度及 ESDC 数据发现，样本表面电场畸变程度与深陷阱变化趋势一致，均是先下降(100 次闪络之前)后上升(100 次闪络之后)。上述结果说明闪络过程中深陷阱密度是影响样本表面电场的主要陷阱参数。有研究提出深陷阱密度对样本闪络电压具有重要影响。材料中的陷阱密度越高，其表面电荷密度越高，沿面闪络电压越低。在重复闪络过程中，由于氧化导致样本表面深陷阱密度增加，导致闪络电压下降。

总结交流闪络电压下 PBT 样本表面损伤特征，未闪络时，PBT 样本表面有大量打磨凸起颗粒。0~100 次闪络时，在闪络电弧(高能粒子轰击与高温)作用下，先烧蚀凸起颗粒，非晶区因力学强度低首先被破坏，形成凹陷通道，致使结晶度相对增高、非晶-晶界面减少，因此导致深陷阱密度降低[22-23]。而闪络 100 次后，PBT 表面逐渐出现微裂痕、坑洞及碳化颗粒，同时晶区也受损，结晶度下降，形成新的非晶-晶界面，使深陷阱密度增加、能级降低。

3　分析与讨论

3.1　PBT 表面损伤导致的电场畸变特征

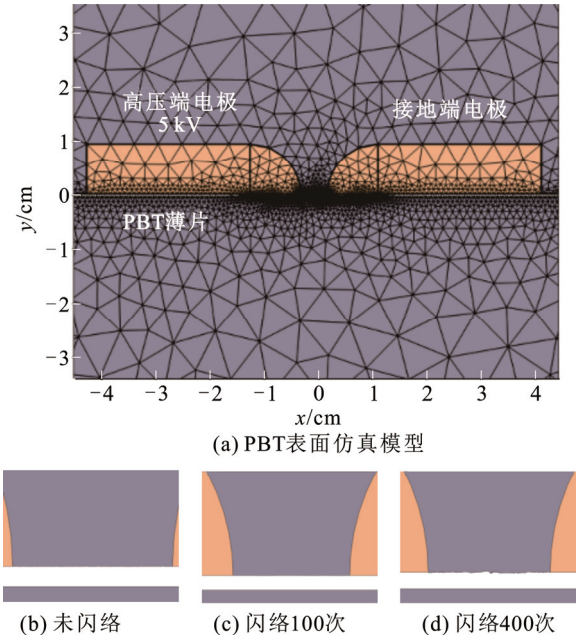
表面损伤会改变表面形貌和粗糙度，产生微观缺陷，从而影响电场分布，为此我们利用 CLSM 观测结果建立有限元模型，计算了微观缺陷对电场的影响。如图 11 所示，模型中 PBT 样本宽 90 mm，厚 0.6 mm，指型电极半径为 9 mm，电极间距 5 mm。其中图 11(b)、图 11(c)、图 11(d)分别由 PBT-0f、PBT-100f 与 PBT-400f 的 CLSM 观测结果建立。在指型电极一端施加幅值为 5 kV 的工频交流电压，另一端接地。PBT 样本表面电场仿真结果见图 12。

根据图 12 电场仿真结果所示，未闪络样本因表面细小凸起颗粒，三结点处电场畸变较高，电场强度分别为 8.63 kV/mm 和 8.07 kV/mm，表面中心区域最大电场为 1.48 kV/mm。闪络 100 次后，电场强度下降至 6.54 kV/mm 和 5.53 kV/mm，畸变减小，中心区域最大电场为 1.09 kV/mm。闪络 400 次后，三结点电场强度升高至 11.31 kV/mm，畸变增加，中心区域最大电场为 2.28 kV/mm，畸变程度高于未闪络和闪络 100 次样本。

表 4　电荷聚集下的 PBT 样本表面电场畸变

Table 4　The electric field distortion of PBT sample surface under charge aggregation

样本编号	电荷聚集下的电场畸变/(kV·mm^{-1})
PBT-0f	3.88
PBT-100f	3.47
PBT-200f	3.81
PBT-300f	4.41
PBT-400f	4.75



(a) PBT表面仿真模型

(b) 未闪络　(c) 闪络100次　(d) 闪络400次

图 11　PBT 表面电场仿真模型

Fig.11　PBT surface electric field simulation model

在 PBT 重复闪络过程中，样本表面损伤不仅将产生微孔、微裂纹等微观缺陷，同时将产生新的陷阱，其均将导致电场畸变。在电场仿真中 PBT 表面电场畸变是由微孔微裂纹等微观缺陷导致的，交流电场下微观缺陷处等位面受到压缩，导致电场畸变。而在表面电位测试中，表面电位变化及电场畸变主要是由材料表面陷阱引起的。样本表面损伤会导致表面非晶区及晶区破坏、表面深陷阱密度增加，进而导致电荷聚集程度增大。

为了比较微观缺陷对样本表面电场畸变的作用大小，统计不同闪络阶段电荷聚集引起的表面电场畸变及粗糙度引起的电场畸变，统计结果如表 5 所示。由表 5 统计结果可知，微观缺陷引起的电场

畸变较大，这主要是由于样本表面损伤程度较大所决定的。此外，随着闪络次数增加，微观缺陷引起的电场畸变变化趋势与电荷聚集引起的电场畸变趋势一致，均是先减小(100 次闪络之前)后增大(100 次闪络之后)。

3.2 PBT 表面累积损伤对闪络电压的作用

根据二次电子发射雪崩(SEEA)理论[24-25]，表面闪络是由初始电子在电场作用下轰击材料表面，产生二次电子、形成电子崩，最终导致表面击穿。在多次闪络作用下，材料表面损伤将导致表面电场及陷阱参数变化，从而影响初始电子发射、二次电子倍增过程，导致闪络电压发生变化。另一方面，多次闪络后，样品表面深陷阱密度增大，导致电荷积聚[26]、电场畸变，闪络电压降低。表面陷阱和微观缺陷通过改变表面电场的分布情况，从而影响电子输运、改变闪络电压[27]。

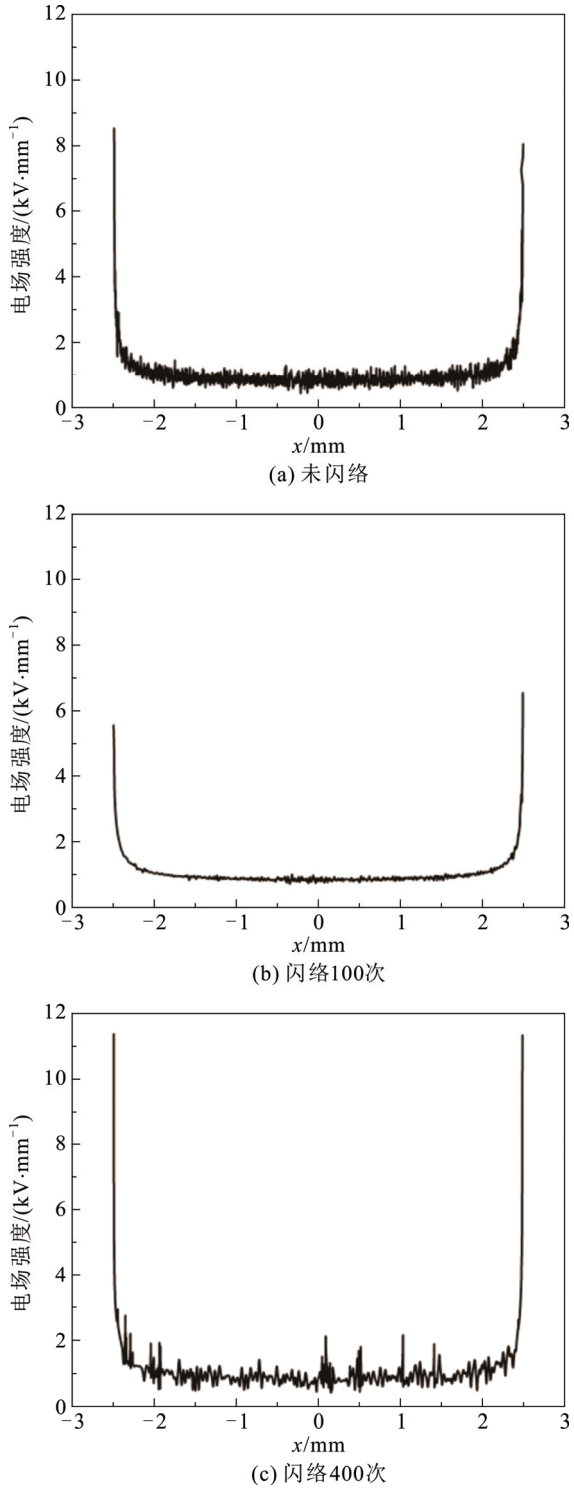


图 12 PBT 表面电场仿真结果

Fig.12 PBT surface electric field simulation results

如图 13 所示，未闪络样本三结点处电场强度较高，较高的垂直电场促进了表面电子的发射，相比于闪络 100 次样本具有更多的初始电子，且样本表面凸起颗粒处亦存在电场畸变，导致二次电子倍增过程比闪络 100 次样本容易发生，因而未闪络样本闪络电压较低。闪络 100 次之前，随着闪络次数增加，样本表面凸起颗粒被电弧清除，样本表面更加平整、电场畸变程度降低。同时随着非晶区的减少，样本表面深陷阱密度减小，样本表面电荷积聚程度降低，电极三结点处及样本表面电场畸变减小，从而抑制了初始电子的产生和二次电子倍增过程，因此闪络 100 次样本闪络电压高于未闪络样本。

闪络 100 次之后，由于高能电子的轰击、电弧烧蚀对样本表面的累积损伤作用，样本表面晶区开始破坏并形成裂缝及孔洞，电极三结点处电场畸变增大，从而促进初始电子发射，同时样本表面电场畸变程度增大，从而促进二次电子倍增过程。此外，

表 5 不同闪络阶段 PBT 样本表面电场畸变

Table 5 Surface electric field distortion caused by different factors

组别	电场畸变/(kV·mm⁻¹)	
	微观缺陷	电荷聚集
PBT-0f	1.48	3.88
PBT-100f	1.09	3.47
PBT-400f	2.28	4.75

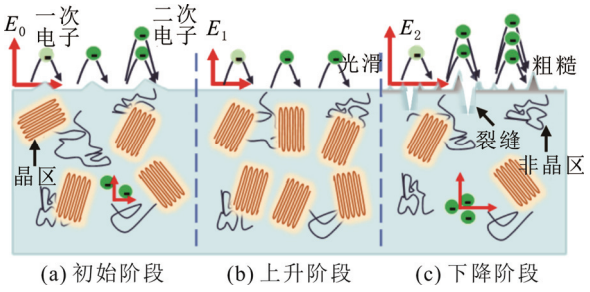


图 13 PBT 闪络电压的变化过程

Fig.13 The change process of PBT flashover voltage

晶区破坏将形成非晶区-晶区界面，导致样本表面深陷阱密度增大，因此二次电子倍增过程产生的电荷更容易被深陷阱捕获，从而进一步增大样本表面电场畸变程度，促进了二次电子倍增过程，导致闪络电压降低。因此闪络 100 次后样本表面闪络电压随闪络次数增加而下降。

4　结论

1）交流电压下 PBT 样本表面闪络电压呈现先升高后降低的变化规律。未闪络老化样本闪络电压为 6.4 kV，闪络 100 次样本表面闪络电压为 7.5 kV，比未闪络样本增加约 20%，闪络 400 次样本表面闪络电压下降至 4.5 kV，比闪络 100 次时下降约 40%。

2）闪络 100 次前，随着闪络次数增加，在闪络电弧作用下样本表面凸起被烧蚀、非晶区破坏，导致粗糙度减小、表面结晶度增加、深陷阱密度减小，样本表面电场畸变程度减小。闪络 100 次后，样本表面晶区开始破坏，导致生成新的凸起、微孔、裂缝及非晶区-晶区界面，导致样本表面深陷阱密度增大、电场畸变程度增加。

3）PBT 表面重复闪络特性与材料表面累积损伤特性密切相关。累积损伤特性导致粗糙度和陷阱参数改变，进而导致表面电场分布及闪络电压发生变化。

参考文献　References

[1] 王林超，王兆亮，黄　炜. PBT 工程塑料生产应用情况及发展趋势[J]. 工程塑料应用，2019，47(4)：144-147.
WANG Linchao, WANG Zhaoliang, HUANG Wei. Production and application and development trend of PBT engineering plastics[J]. Engineering Plastics Application, 2019, 47(4): 144-147.

[2] ZHANG C C, LI Y M, ZHOU K, et al. Crystal structure - flashover performance correlation in polybutylene terephthalate: insights into the mechanism[J]. Journal of Polymer Science, 2024, 62(14): 3206-3215.

[3] MILLER H C. Flashover of insulators in vacuum: the last twenty years[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3641-3657.

[4] KATO K, KATO H, ISHIDA T, et al. Influence of surface charges on impulse flashover characteristics of alumina dielectrics in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1710-1716.

[5] 李盛涛，黄奇峰，孙　健，等. 聚集态和陷阱对交联聚乙烯真空沿面闪络特性的影响[J]. 物理学报，2010，59(1)：422-429.
LI Shengtao, HUANG Qifeng, SUN Jian, et al. Influence of aggregation structure and traps on surface flashover of XLPE in vacuum[J]. Acta Physical Sinica, 2010, 59(1): 422-429.

[6] 苑伟光，高克利，任书波，等. CF_3SO_2F/N_2 混合气体中柱式环氧树脂绝缘子沿面闪络特性[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5388-5396.
YUAN Weiguang, GAO Keli, REN Shubo, et al. Surface flashover characteristics of cylindrical epoxy resin insulators in CF_3SO_2F/N_2 mixture[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5388-5396.

[7] 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.

[8] MILLER H C. Flashover of insulators in vacuum: review of the phenomena and techniques to improved holdoff voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 28(4): 512-527.

[9] 李大雨，张贵新，王天宇. 交流电压下绝缘子表面电荷对闪络电压影响的主导因素[J]. 高电压技术，2021，47(12)：4199-4206.
LI Dayu, ZHANG Guixin, WANG Tianyu. Dominant factors affecting flashover by the presence of surface charge under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4199-4206.

[10] 王哲铭，潘　越，张　磊，等. 直流 GIL 气-固界面电荷调控的影响因素分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(20)：7177-7192.
WANG Zheming, PAN Yue, ZHANG Lei, et al. Analysis of charge tailoring techniques for DC GIL gas-solid interface charges[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7177-7192.

[11] 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.

[12] HUANG Y, MIN D M, LI S T, et al. Surface flashover performance of epoxy resin microcomposites improved by electron beam irradiation[J]. Applied Surface Science, 2017, 406: 39-45.

[13] 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.

[14] 曹　雯，吴亚森，薛　豪，等. 计及水珠动态行为的硅橡胶表面直流闪络模型[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2101-2110.
CAO Wen, WU Yasen, XUE Hao, et al. DC flashover model of silicone rubber surface considering dynamic behavior of water droplets[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2101-2110.

[15] HU D, REN C Y, KONG F, et al. Aging characteristics of polymeric materials by repeated surface flashovers in vacuum under microsecond pulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 171-178.

[16] 李盛涛，聂永杰，闵道敏，等. 固体电介质真空沿面闪络研究进展[J]. 电工技术学报，2017，32(8)：1-9.
LI Shengtao, NIE Yongjie, MIN Daomin, et al. Research progress on vacuum surface flashover of solid dielectrics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 1-9.

[17] LI S T, WANG W W, YU S H, et al. Degradation of cross linked polystyrene by repetitive impulse surface flashovers in vacuum[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1934-1941.

[18] ZHOU K, LIN S Y, LI Y, et al. Realizing quantitative evaluation of trap energy distribution in polymers with an electric field stimulated depolarization current method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(2): 550-554.

[19] ZEISS. LSM 700 operating manual[M]. Oberkochen, German: ZEISS,

2024.

[20] PASSALACQUA V, PILATI F, ZAMBONI V, et al. Thermal degradation of poly(butylene terephthalate)[J]. Polymer, 1976, 17(12): 1044-1048.

[21] 李明志，周　凯，黄科荣，等. 基于极化-去极化电流测试的 XLPE 中陷阱电荷脱陷特性[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3194-3201.
LI Mingzhi, ZHOU Kai, HUANG Kerong, et al. Trapped charge de-trapping property of XLPE based on polarization and depolarization current test[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3194-3201.

[22] 李　群，赵宇民，陈天恒，等. 环氧树脂/SiO_2 纳米复合材料陷阱分布及直流闪络特性[J]. 南方电网技术，2019，13(6)：57-63.
LI Qun, ZHAO Yumin, CHEN Tianheng, et al. Trap distribution and DC flashover characteristics of epoxy resin/SiO_2 nanocomposites[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(6): 57-63.

[23] 梁　英，靳　哲，张君成. 硅橡胶电晕老化后的陷阱对其闪络电压的影响[J]. 高电压技术，2017，43(7)：2309-2315.
LIANG Ying, JIN Zhe, ZHANG Juncheng. Influence of trap on flashover voltage of silicone rubber after corona aging[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7): 2309-2315.

[24] DE TOURREIL C H, SRIVASTAVA K D. Mechanism of surface charging of high-voltage insulators in vacuum[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1973, EI-8(1): 17-21.

[25] 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.

[26] 齐　波，高春嘉，邢照亮，等. 直流/交流电压下 GIS 绝缘子表面电荷分布特性[J]. 中国电机工程学报，2016，36(21)：5990-6001.
QI Bo, GAO Chunjia, XING Zhaoliang, et al. Distribution characteristic for surface charge on GIS insulator under DC/AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5990-6001.

[27] 许文杰，黄正勇，李　剑，等. 碳化硅改性超疏水涂层协同增强直流沿面闪络性能及机理研究[J]. 电工技术学报，2023，38(9)：2480-2490.
XU Wenjie, HUANG Zhengyong, LI Jian, et al. Study on the synergistic enhancement of the DC surface flashover performance and the mechanism of the superhydrophobic coating modified by silicon carbide[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(9): 2480-2490.



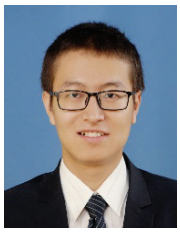
李康乐
1990—，男，博士，副教授，硕导
主要研究方向为电缆老化及状态诊断
E-mail: likangle6541@163.com

LI Kangle
Ph.D.
Associate professor



张元涛
1999—，男，硕士生
主要研究方向为绝缘老化机理及诊断
E-mail: lzjxzyt@163.com

ZHANG Yuantao



李泽瑞(通信作者)
1996—，男，博士，助理研究员
主要从事电缆附件绝缘老化机理及诊断、局部放电检测及新型固体绝缘材料方面的研究工作
E-mail: lizeruiscu@163.com

LI Zerui
Ph.D.
Corresponding author



周　凯
1975—，男，博士，教授，博导
主要从事电力设备状态监测与故障诊断方面研究工作
E-mail: zhoukai_scu@163.com

ZHOU Kai
Ph.D., Professor

收稿日期　2024-11-20　在线出版日期　2025-05-08　　编辑　曹昭君