第 50 卷 第 11 期：5078-5086　　高电压技术　　Vol.50, No.11: 5078-5086
2024 年 11 月 30 日　　High Voltage Engineering　　November 30, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231465

航空低气压条件下磁控溅射 PTFE 表面耐电性能

邢云琪[1,2]，王　彬[1,2]，杨广正[1,2]，王智文[1,2]，陈媛媛[1,2]，郭　泽[1,2]
（1. 河北工业大学电气工程学院，天津 300131；
2. 省部共建电工装备可靠性与智能化国家重点实验室(河北工业大学)，天津 300131）

摘　要：聚四氟乙烯(PTFE)具有良好的耐热性能和机械性能，已逐渐成为航空线缆的主流绝缘材料，为满足多电飞机供电系统电压等级提升及航空条件下复杂环境绝缘要求，亟须进一步提升线缆绝缘耐电性能。采用磁控溅射 TiO_2 制备了 5 种 PTFE 样品，测试了改性样品的水接触角及电导率，通过闪络及电老化实验对试样表面耐电性能进行分析，基于表面陷阱分布对磁控溅射的影响机理进行解释。结果表明，改性后样品表面疏水性提升，电导率降低，随磁控溅射时间增长 PTFE 表面闪络电压及抗电老化性能先提升后下降，效果在改性 45 min 时最好。溅射后提升了绝缘表面电荷捕获能力，抑制放电发展过程，使闪络电压提高；深陷阱捕获电荷形成反向电场，自由电荷注入-脱出过程受到抑制，PTFE 耐电老化性能得到提升。

关键词：多电飞机；PTFE；磁控溅射；沿面放电；电老化

Surface Electrical Properties of Magnetron Sputtered PTFE Under Aeronautical Low Pressure Conditions

XING Yunqi[1,2], WANG Bin[1,2], YANG Guangzheng[1,2], WANG Zhiwen[1,2], CHEN Yuanyuan[1,2], GUO Ze[1,2]
(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China; 2. State Key Laboratory of Reliability and Intelligence of Electrical Equipment, Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China)

Abstract: Polytetrafluoroethylene (PTFE) has good heat resistance and mechanical properties and has gradually become the mainstream insulation material for aviation cables. To satisfy the requirements of increased voltage level for the power supply system of more electric aircraft and the insulation in the complex environment and aviation conditions, it is urgent to further improve the electrical resistance of cable insulation. In this paper, five kinds of PTFE samples were prepared by magnetron sputtering TiO_2. The water contact angle and conductivity of the modified samples were tested. The electrical resistance of the sample surfaces was analyzed by flash and electrical aging experiments, and the mechanism of the effect of magnetron sputtering was explained based on the surface trap distribution. The results show that the surface hydrophobicity of the modified samples is improved and the conductivity is reduced. With the growth of magnetron sputtering time, the flashover voltage and anti-electro-aging properties of PTFE surface are first enhanced and then decreased, and the effect is best at 45 min of modification. The surface charge trapping capability is enhanced after splashing inhibits the development of discharge, resulting in an increase in flashover voltage. Deep traps capture charges, forming a reverse electric field that suppresses the injection-extraction process of free charges and improves the electrical aging resistance of PTFE.

Key words: more electric aircraft; PTFE; magnetron sputtering; surface discharge; electrical aging

0　引言

目前飞机控制系统开始大规模电气化并由此衍生出多电飞机(more electric aircraft，MEA)。飞机电气化能提高其经济性、安全性、可靠性，并且能够减少碳排放，降低对化石能源的需求，已成为未来的主要发展趋势[1]。与传统飞机相比 MEA 电气设备占比显著提升，所需供电系统的容量也大幅上升，预计 2050 年飞机供电容量可达到 10 MVA[2]。但提高容量将主要依靠提高电压等级，以 A380 为例，线缆总长度超过 500 km，增大电流会带来损耗升高与质量增大的致命性问题[3]。目前 MEA 电力系统电压等级最高为 1 kV，未来随飞机电气化程度增加电压等级将不断升高。如波音 787 第二代 MEA 将实现 1~3 kV 供电[4]；NASA 设计的 N3-X 系列电动飞

基金资助项目：国家自然科学基金(52277143)；河北省省级科技计划(215676146H；225676163GH)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52277143), S&T Program of Hebei (215676146H, 225676163GH).

机计划以 6 kV 作为系统电压等级[5]。

MEA 电力系统电压升高后，电机、输电线缆、PCB 板、电源转换器等部件绝缘可靠性面临着新的挑战[6-7]。输电线缆是连接飞机各设备的重要组成部分，工况下外部绝缘环境复杂。目前民用及军用飞机飞行高度通常在 6~15 km，在飞行过程中航空电缆的工况气压值最低可至 10~20 kPa[8]。根据巴申定律，在 MEA 电缆运行环境中，绝缘闪络电压随气压降低而减小，航空低气压环境增加了发生局部放电的风险[9]；与此同时，气体密度降低减缓了热交换速度，在飞机狭小的空间内，电缆本体更易产生热量积累导致温度升高；气压大幅度变化也加剧了空气中水分的凝结，成为局部放电的诱因之一[10-11]。因此，除随电压等级提升带来的高电场外，MEA 电缆绝缘还存在气压变化范围广、运行温度高、水汽凝结、磨损等问题。在如此复杂的工作环境下，易引发局部放电并产生绝缘老化，严重降低了 MEA 可靠性及安全性。

Rui 发现在航空气压范围内，随气压降低局部放电起始电压降低，而放电强度及次数均增加，低气压环境下对绝缘寿命形成威胁更大[12]；Borghei Moein 利用有限元仿真模拟了低气压下的放电过程，发现低气压下单次放电持续时间变长，电荷量增多，产生放电更加强烈[13]；杨亚奇研究了低气压下交直流放电特性，击穿时观测到明显的电离层，分析为低气压下电子积累能量高，达到地电极时无法瞬间中和，在板电极表面反射并扩散，形成明亮的电离层[14]；江军在 10~101 kPa 气压范围内对比了 3 种飞机供电常用频率对线缆放电的影响，频率变化影响了放电间隙的总电荷量，电源频率升高放电次数增加，幅值减小，高频下对绝缘层产生了更大破坏，而随气压减小不同频率下局部放电起始电压均降低，线缆绝缘更易提前失效[15]；Karadjian 研究了航空线缆绝缘材料热老化后的性能，绝缘层由聚四氟乙烯(polytetrafluoroethylene, PTFE)包裹聚酰亚胺(polyimide, PI)组成，老化 9 000 h 后绝缘击穿电压下降 30%，通过 X 射线成像发现老化后不同绝缘层之间形成气隙，在较低电压条件下产生放电[16]；为抑制摩擦产生微粒及绝缘劣化，Bhargava 研究了多种微、纳米颗粒掺杂对 PTFE 耐磨性的影响，结果表明适当含量的微米颗粒能大幅度降低材料磨损，这是由于填充物使聚四氟乙烯键断裂并发生氧化和羧基化，之后又与填充物形成更强的交联结合[17]。目前，线缆绝缘研究主要集中于分析航空环境的影响，性能提升方法涉及较少。

由于 PTFE 具有良好的耐腐蚀性、耐高温性和绝缘性能，已成为航空领域主流绝缘材料[18]。为满足前文提及的复杂工况及飞机电气化发展需求，其绝缘性能仍需进一步提升，此外优良的表面耐电性能也可延长航空线缆使用寿命并促进飞机轻量化[19]。磁控溅射是一种沉积速率高、成膜质量高的方法，在绝缘材料表面性能提升方面得到了广泛应用[20]。何金良通过磁控溅射在试样表面涂覆 Cr_2O_3，处理后样品表面突起及凹陷几乎消失，并引入深陷阱捕获自由电荷形成反向电场，抑制了电荷注入，表面电位远低于等离子体处理和氟化处理样品[21]。郝建在绝缘纸表面制备 Al_2O_3 功能膜，处理后样品内场强畸变率由 33.33%降至 6.67%，直流预压条件下击穿电压提高了 13%[22]；杜伯学利用磁控溅射在 GIL 绝缘子表面沉积了梯度 $BaTiO_3$ 层来调控电场分布，相较于未处理绝缘子最大电场强度降低了 70%，放电起始电压及闪络电压均得到提升[23]。

由于 TiO_2 表面不饱和配位点能够捕获自由电子，且具有优异的电学性能、良好的化学稳定性和热稳定性[24]，因此本文采用磁控溅射 TiO_2 改性方法对 PTFE 绝缘性能进行调控，制备了不同磁控溅射时长的改性 PTFE 绝缘材料，并研究了改性 PTFE 绝缘材料在 20~100 kPa 条件下的直流沿面放电发展、沿面闪络以及电老化特性，分析了磁控溅射 TiO_2 改性对于沿面闪络和电老化过程的影响机理。

1　试验设置

1.1　样品制备

本文所使用 PTFE 材料满足航空线缆绝缘要求。样品化学成分、密度及温度如表 1 所示。通过磁控溅射对试验样品进行表面改性，靶材为 TiO_2。改性前使用纯净氮气对 TiO_2 靶材和 PTFE 基片表面进行清洗。在 0.5~1 Pa 纯度 99.99%氩气环境中进行磁控溅射，氩气体积流量为 40 cm^3/min，射频功率设置为 200 W，溅射温度为室温 26 ℃。高电场下产生氩离子并轰击靶材表面，溅射出的 TiO_2 分子沉积在 PTFE 表面形成一层致密镀膜。本文试样表面改性时长为 0、15、30、45 和 60 min。通过红外光谱测试了改性后 PTFE 样品表面化学成分，结果如图 1 所示。除 F—C—F 化学键峰强度有所变化外，在波数为 631 cm^{-1} 处和 2 925 cm^{-1} 处均产生了新的

表 1 样品化学成分、密度及允许温度

Table 1 Chemical composition, density and allowable temperature of the sample

分子式	密度/(g·cm^{-3})	允许温度/℃
	2.2	−180~260

峰，分别对应 O—Ti—O 变角伸缩振动和 Ti—O 伸缩振动，表明通过磁控溅射在基片表面成功构筑了 TiO_2 膜。

磁控溅射 TiO_2 后 PTFE 水接触角如表 2 所示。随溅射时间增长，水接触角从 77°最高上升至 152°。PTFE 由亲水性转变为憎水性，此时材料表面不易凝结形成水膜，能够减少由水分引起的局部放电，提高其在航空环境中的适用性。水接触角的变化主要受表面粗糙度影响，在文献[25]中得到相似结果。

1.2 实验方法

为验证改性后样品能否满足航空线缆绝缘要求，本文使用 DSAHT 型高温水接触角测量仪对改性后样品进行测试，测试溶液选用超纯水；通过三电极法测试了不同气压条件下改性 PTFE 表面电导率，三电极系统为黄铜材质，试验样品为直径 130 mm、厚度 2 mm 的圆片。

搭建了低气压表面放电测试及电老化平台，如图 2 所示。实验所用指形电极为黄铜材质，电极端部为半径 4 mm 的 1/4 球体，电极间距 8 mm。负极性直流电源通过保护电阻与高压电极相连，另一电极接地。实验时电极置于低气压腔体内，通过真空泵控制压强，分别设置为 20、40、60、80、100 kPa，环境温度为 20 ℃，相对湿度为 30%。进行实验时以 0.1 kV/s 的速率匀速升压，直至发生闪络。使用 MSO54 示波器及高频电流互感器获取放电信息。每种样品进行 10 次实验并取平均值。绝缘电老化主要由局部放电导致，因此匀速升压至沿面闪络并保持 4 min 制备老化样品，使用皮安表及精密天平分别测量泄漏电流和质量损失。

研究表明，绝缘材料表面放电与电荷特性密切相关，而表面电荷与表面电位成正比。为分析磁控溅射对 PTFE 表面放电影响机理，测试了不同改性时长样品的表面电位衰减特性。使用针-栅电极对样品表面充电，通过 Kelvin 探头及 P0865 高压静电计测试

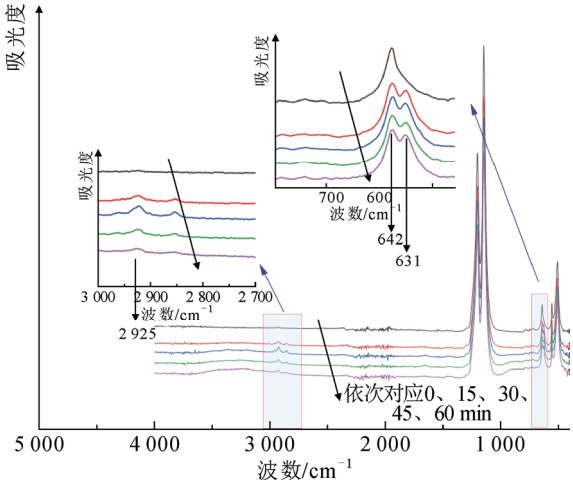


图 1 改性后 PTFE 红外光谱图

Fig.1 Infrared spectra of modified PTFE

表 2 改性后 PTFE 水接触角

Table 2 Water contact angle of PTFE after modification

时间/min	0	15	30	45	60
水接触角/(°)	77	99	131	152	127

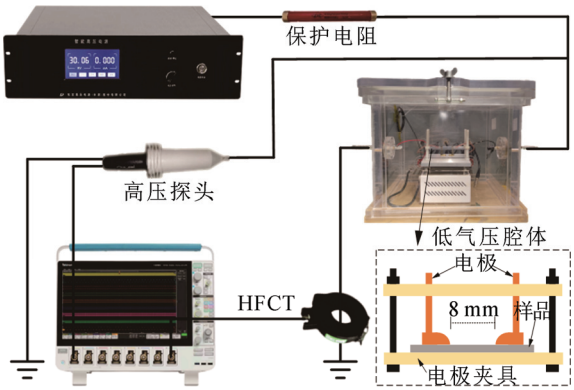


图 2 实验装置图

Fig.2 Diagram of experimental device

表面电位。实验前均对样品进行干燥和放电处理。

2 结果分析

2.1 沿面放电特性

图 3 为不同气压下改性 PTFE 局部放电起始电压(partial discharge inception voltage, PDIV)。PDIV 与气压正相关，相较于 100 kPa，20 kPa 下未改性样品下降幅度达 73.42%。随改性时间增长，PDIV 整体为先上升后下降的趋势。在各气压条件下，均为 45 min 磁控溅射提升效果最好，相较于未改性材料，100 kPa 和 20 kPa 时提升幅度分别为 19.02%和

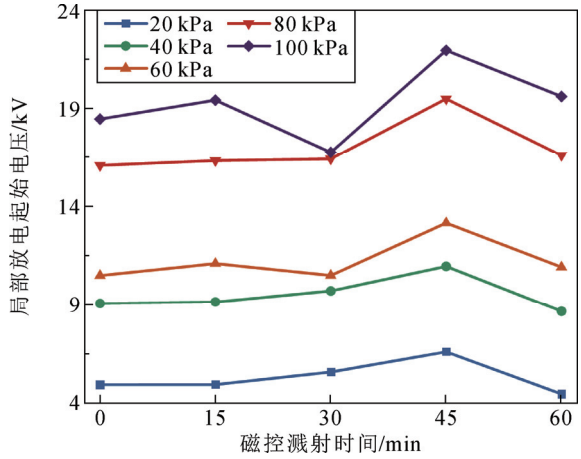


图 3　不同气压下改性 PTFE 局部放电起始电压

Fig.3　Partial discharge inception voltage of modified PTFE under different pressures

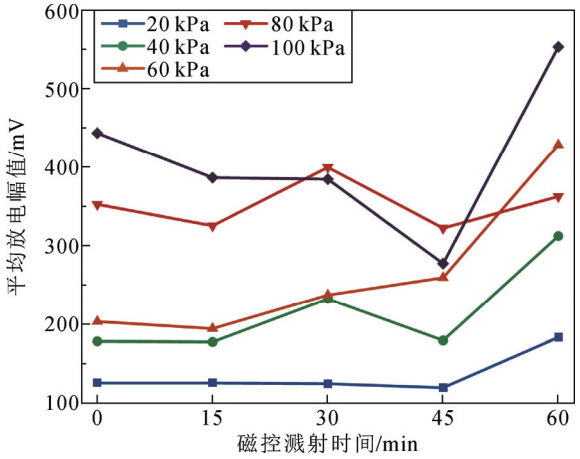


图 4　不同气压下改性 PTFE 平均放电幅值

Fig.4　Average discharge amplitude of modified PTFE under different pressures

34.20%，随气压降低，提升幅度呈上升趋势。磁控溅射时长为 30 min 时常压下的 PDIV 出现低谷，这是因为在接近常压条件下气体密度大，加速电子更易与气体分子发生碰撞电离，且根据后文陷阱特性，30 min 时陷阱密度上升幅度较小，陷阱对电荷的捕获效果下降，整体表现为更易发生放电，故磁控溅射 30 min 样品的 PDIV 出现明显下降。

根据国家局部放电测量标准 GB/T 7345—2003 测试了不同气压条件下改性 PTFE 平均放电幅值及放电重复率，如图 4、图 5 所示。根据未改性样品可以看出，随气压升高放电幅值及重复率主要表现为上升趋势。结合图 3 分析，虽然高气压下放电起始所需电压更高，但达到放电条件后，其放电幅值及重复率远高于低气压条件下，分别可达到 3.54 倍和 3.87 倍。随改性时间增长，两者均呈波动性变化，由于局部放电随机性较强，并未展现统一的规律。其中多数情况下出现两段先下降后上升变化，且放电幅值及重复率最小值主要发生于 45 min 处，整体上表现为改性后沿面放电受到抑制。

本文测试了样品闪络电压威布尔分布，并选取 63.2%概率所对应的值进行分析[26]。不同气压下改性 PTFE 闪络电压如图 6 所示，其变化规律与 PDIV 相同，随气压降低出现明显下降，并且下降幅度表现为先减小后增大。对于未改性样品，20 kPa 条件下闪络电压比 100 kPa 降低了 70.37%。低气压条件下，随磁控溅射时间增长闪络电压先上升后下降，在 45 min 达到峰值。气压接近常压时同样出现两段先上升后下降变化规律，闪络电压在改性 30 min 时

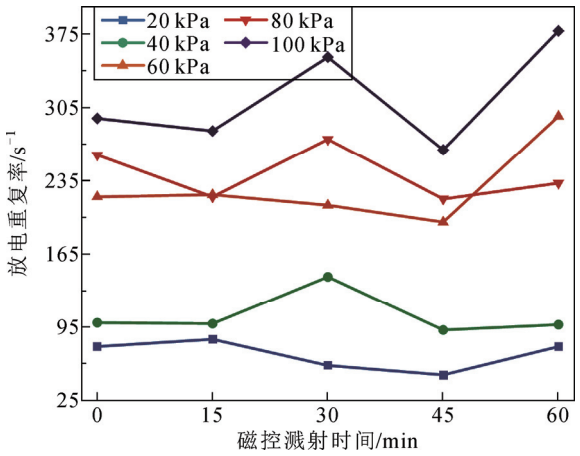


图 5　不同气压下改性 PTFE 放电重复率

Fig.5　Discharge repetition rate of modified PTFE under different pressures

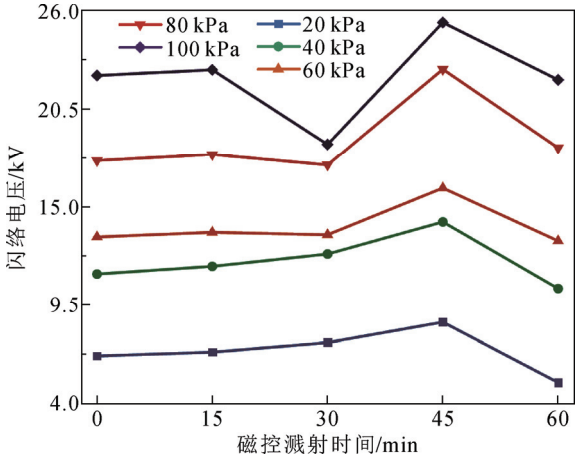


图 6　不同气压下改性 PTFE 闪络电压

Fig.6　Flashover voltage of modified PTFE under different pressures

出现下降，又在改性 45 min 时上升到最大值，并且 60 min 时闪络电压均低于未改性样品。

2.2 电老化特性

电老化后改性 PTFE 泄漏电流如图 7 所示。随气压上升，不同改性时间 PTFE 表面泄漏电流均出现不同程度增大，说明其表面电导率上升。高气压条件下闪络电压更高，放电产生的高能粒子对绝缘表面破坏程度更严重，而在实际应用中低气压条件下先发生闪络，因此同样需要引起重视[27]。随磁控溅射时间增长，不同气压下泄漏电流先持续降低，在改性为 45 min 时达到最小值，随后改性 60 min 样品又呈上升趋势，但电流值始终低于未改性样品。

图 8 为不同气压下样品电老化后质量损失，100 kPa 条件下不同改性时长样品质量损失均高于 20 kPa。样品改性后质量损失明显下降，磁控溅射 45 min 样品质量损失最小。表明溅射 45 min 时在 PTFE 表面形成一层致密的镀膜，对绝缘材料表面形成保护。当磁控溅射时间进一步增长，将在表面形成冗余堆积，电老化过程中易发生脱落。因此溅射 60 min 样品质量损失又出现增加趋势。此外，综合图 7、8 可以看出，不同气压下磁控溅射对材料老化抑制规律基本一致，泄漏电流和质量损失分别最高下降 46.7%和 71.55%。

电老化是局部放电对绝缘材料表面绝缘的破坏累积过程。为分析磁控溅射 TiO_2 对 PTFE 表面抗电老化性能的影响，通过扫描电子显微镜(SEM)拍摄了改性 PTFE 在不同气压下电老化的微观形貌。20 kPa 及 100 kPa 下 SEM 观测如图 9(a)所示。未改性样品电老化后表面出现明显裂纹，100 kPa 下裂纹尺寸更大，并且存在因放电发热而产生的纤维状黏连。随溅射时间增长，表面破坏程度逐渐减弱。溅射 30 min 样品表面虽然也在电老化下出现了损伤，但其破坏区域开始减少且表面更加平整。45 min 样品电老化程度减小，低气压区间效果较好，溅射后几乎观测不到表面损伤，而中高气压区间由较大缺陷转变为小缺陷，并且此时泄漏电流与质量损失最小，说明 TiO_2 镀膜对绝缘表面已形成有效保护。随溅射时间增长，绝缘表面破坏程度加重。不同气压下未改性及磁控溅射 45 min 样品老化结果见图 9(b)。两种样品电老化程度均随气压降低而减弱，表明 TiO_2 镀层对样品老化抑制效果同样受气压的影响。

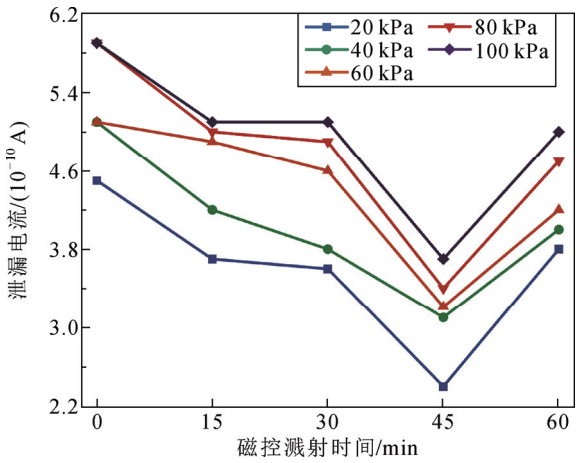


图 7 不同气压下改性 PTFE 电老化后表面泄漏电流

Fig.7 Surface leakage current of modified PTFE after electrical aging at different pressures

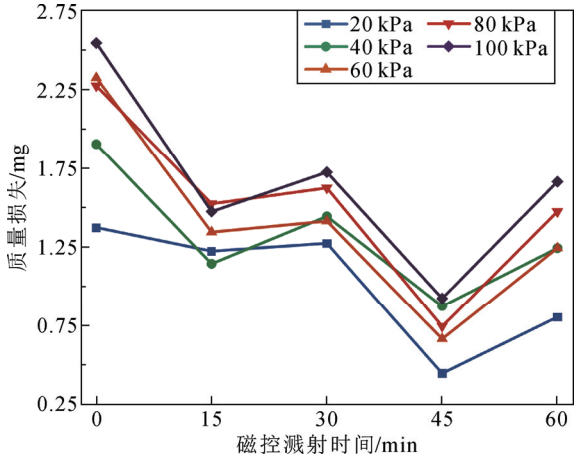


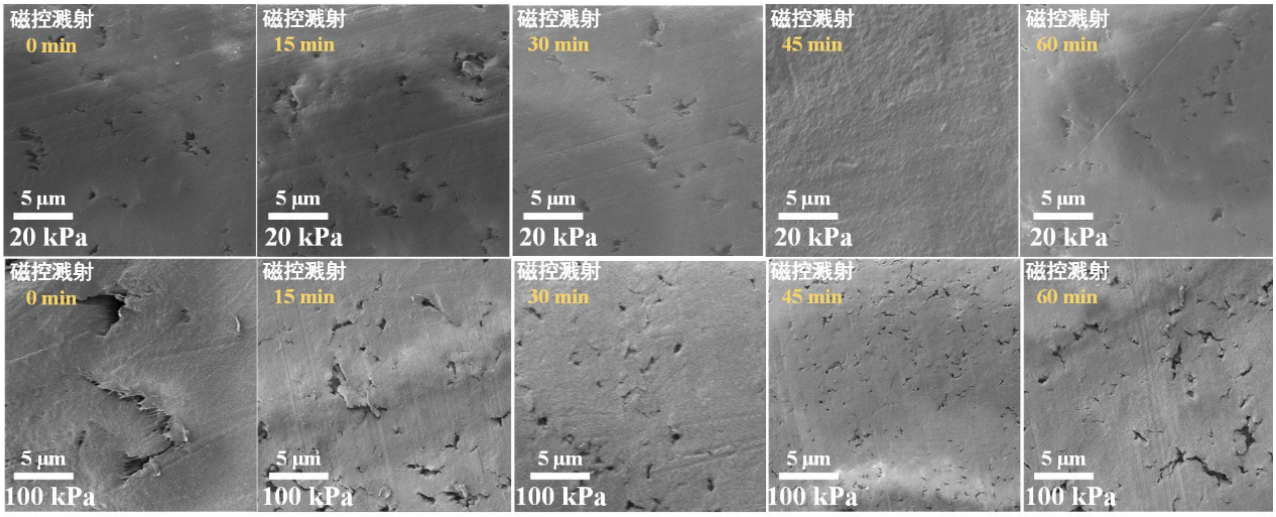
图 8 不同气压下改性 PTFE 电老化后质量损失

Fig.8 Mass loss of modified PTFE after electrical aging under different pressures

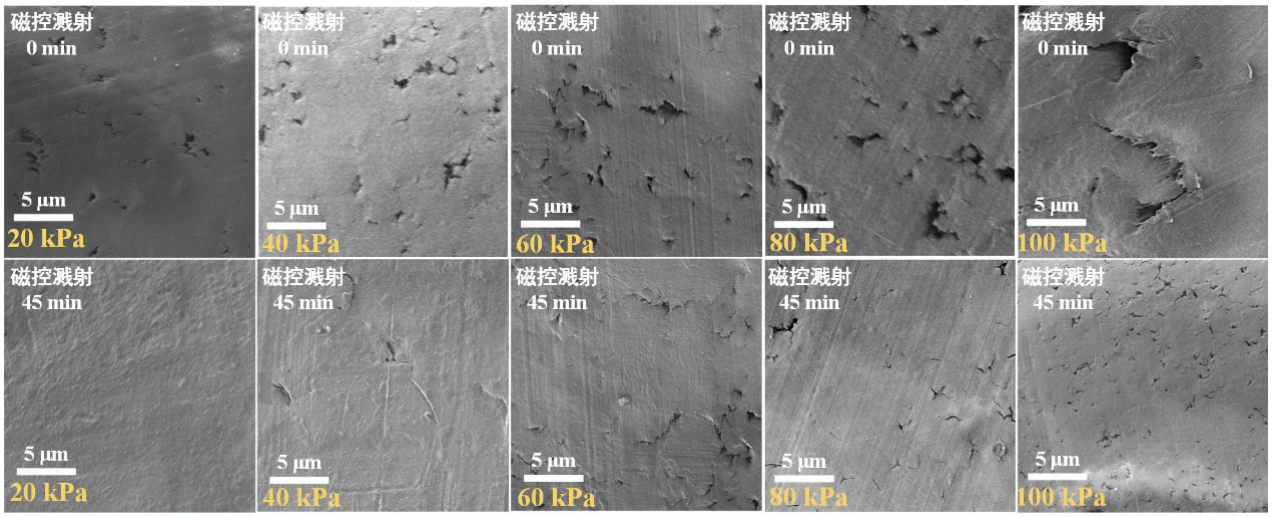
3 讨论

不同气压下样品表面电导率如图 10 所示，大气环境中电导率受气压影响明显，主要与低气压下水分减少相关[28]。随溅射时间增长，电导率先减小后增加，在 45 min 处达到最小值，20 kPa 及 100 kPa 下电导率最小分别为 5.79×10^{-15} S/m 和 1.19×10^{-14} S/m。随气压降低，电导率下降幅度增大，与未改性样品相比，各气压下电导率下降比例为 28%、40%、43%、44%、54%。

图 11 为不同改性时间下 PTFE 的表面电荷消散曲线。由于电晕充电后表面电位存在差异，对表面电位进行归一化处理，方法为某时刻表面电位除以初始电位。基于电位衰减原始数据计算表面电位衰减率，如表 3 所示。衰减率 D 计算式如下：



(a) 不同溅射时间样品老化后表面形貌



(b) 不同气压下样品老化后表面形貌

图 9　不同气压下改性 PTFE 电老化后表面 SEM 图

Fig.9　Surface SEM images of modified PTFE after electrical aging under different pressures

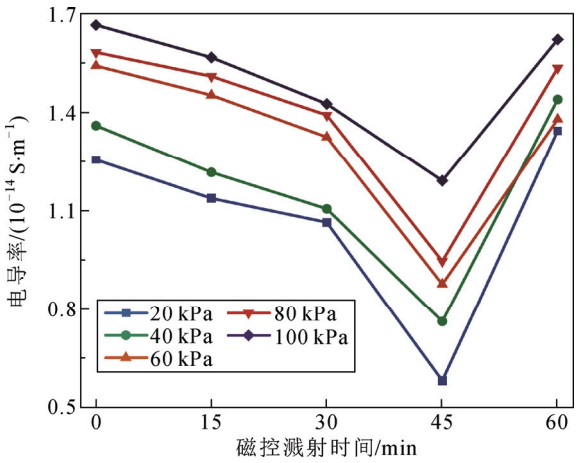


图 10　不同气压下改性 PTFE 表面电导率

Fig.10　Surface conductivity of modified PTFE under different pressures

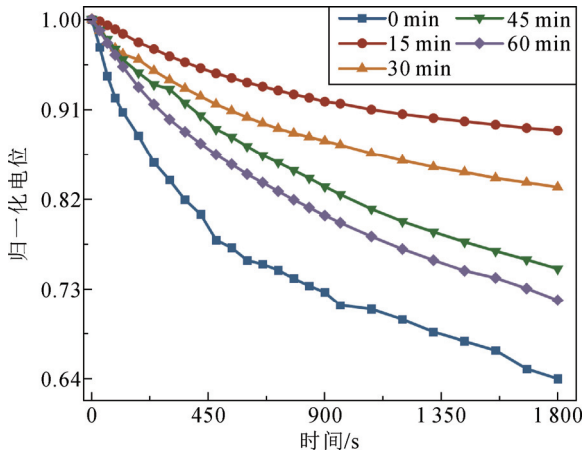


图 11　改性 PTFE 表面电位衰减特性

Fig.11　Surface potential attenuation characteristics of modified PTFE

$$D=\frac{V(t_0)-V(t)}{V(t_0)}\times 100\% \tag{1}$$

式中：$V(t_0)$为初始表面电位；$V(t)$为 t 时刻表面电位。

由图 11 可知，磁控溅射对 PTFE 表面电位衰减速度影响分为两个阶段。溅射 15 min 样品衰减速度降低，随溅射时间增长表面电位衰减速度又呈上升趋势，但均明显慢于未改性样品。表 3 为不同改性时间样品的电位衰减率，其与电位衰减速度变化趋势相似。溅射 15 min 时衰减率大幅度下降，之后呈上升趋势并在 45 min 时趋于平缓。可以发现，随改性时间增长，电导率在 45 min 处最小，而电位衰减率和速度在 15 min 处最小，表明电荷行为并非受单一因素影响，而是处于陷阱分布特性与反向电场共同作用下。

为深入分析磁控溅射对表面电荷行为的影响，对电位衰减数据进行拟合[29]。得到如图 12 所示的陷阱分布特性。根据陷阱能级不同，常将其分为深陷阱和浅陷阱。图 12 中虽然出现了较为明显的双峰曲线，但从其陷阱密度上可以看出深陷阱占据了主要影响因素。深陷阱中载流子激发概率较低，被捕获的电荷难以脱陷。

根据二次电子发射雪崩模型(secondary electron emission avalanche, SEEA)，本文电极结构中三结合点处电场最易发生畸变。随电压升高，在三结合点先产生初始电子，与气体分子发生碰撞形成电子崩，最终引发闪络[30]。由于表面陷阱对电荷的捕获作用，PTFE 闪络特性与陷阱分布密切相关。随改性时间增长，表面陷阱的变化主要表现为被捕获电荷更难脱陷或被捕获电荷数量增加。导致参与气固界面放电过程的电荷数量减少，降低了二次电子发射系数，从而提高了 PDIV 及闪络电压。

结合图 13 陷阱分布特性分析，磁控溅射初期只提高了陷阱能级，入陷电荷脱陷所需能量增加。这解释了溅射 15 min 样品表面电位衰减速率明显降低的原因。30 min 时深陷阱能级降低，浅陷阱密度升高，电子更易脱陷，因此各气压下 PTFE 闪络电压出现不同程度减小。而随磁控溅射时间增长到 45 min，深陷阱密度上升到较大值，对自由电荷捕获作用增强，闪络电压均呈上升趋势。由于捕获电荷形成反向电场及陷阱能级进一步降低的影响，表面电位衰减速度及衰减率均增大。相较于未改性样品，被 TiO_2 溅射层深陷阱捕获电荷数量增多，电导率随溅射时间增长而下降。当溅射时间达到 60 min，

表 3 不同改性时间 PTFE 表面电位衰减率

Table 3 Surface potential decay rate of PTFE with different modification time

溅射时间/min	0	15	30	45	60
衰减率 D/%	35.81	15.41	20.21	30.94	30.68

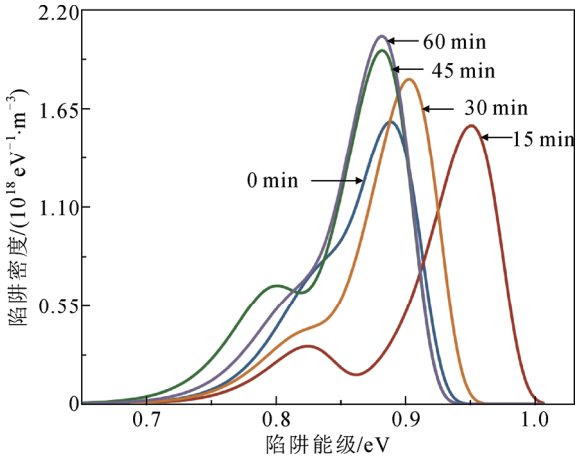


图 12 改性 PTFE 表面陷阱

Fig.12 Surface traps of modified PTFE

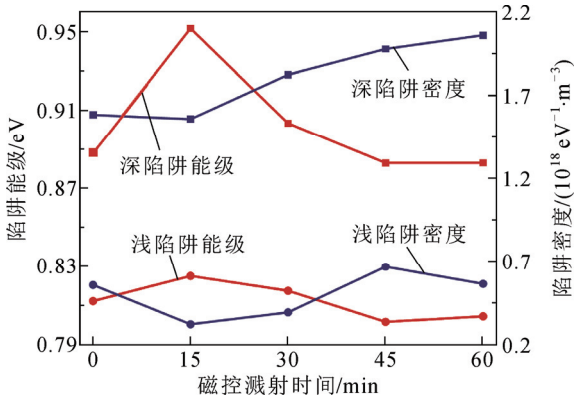


图 13 改性 PTFE 表面陷阱分布特性

Fig.13 Surface trap distribution characteristics of modified PTFE

深陷阱能级几乎不变，密度小幅度提高，闪络电压降低，这表明 45 min 时样品表面已形成致密 TiO_2 膜，进一步溅射在表面形成了冗余突起，导致绝缘性能下降。

气压是影响闪络电压的关键因素。由于放电过程中加速电子与气体分子碰撞并增殖，碰撞过程成为带电质点的重要来源。随气压降低，电极间分子数量减少，电子与粒子的自由行程增加。带电质点在电场中的加速时间增长，发生碰撞时传递的能量更多，更易形成有效碰撞，促进了放电时的 α 过程。

因此，随气压降低闪络电压降低。

放电是绝缘劣化的主要原因之一，随放电次数增加，绝缘表面形成缺陷导致泄漏电流增大。泄漏电流引起的局部发热将进一步加速绝缘老化，因此由放电引起的绝缘老化通常为电热老化。PTFE 经过磁控溅射改性后，磁控溅射后样品表面放电幅值和频率均有所降低，绝缘表面高能粒子冲击强度及热累积损伤减弱。此外，改性后样品表面层深陷阱中的电荷不易脱陷，与外界形成了反向电场，抑制了电荷注入。由于深陷阱束缚及反向电场作用，高能电子无法完成频繁的注入-脱出循环，PTFE 老化反应势垒提高，对 PTFE 老化进程起到抑制效果[31]。

4　结论

1）PTFE 表面耐电性能受气压影响，低气压使局部放电明显提前，而磁控溅射 TiO_2 能够调控样品水接触角、电导率、绝缘及抗电老化性能，提升了 PTFE 在航空环境下的适用性。

2）在 20~100 kPa 气压条件下，适当时间的磁控溅射能够有效提升 PTFE 表面绝缘性能。常压下 PDIV 和闪络电压最多可提升 19.0%和 13.2%；随气压降低提升比例均升高，20 kPa 条件下 PDIV 和闪络电压分别为 34.2%和 28.4%。

3）PTFE 表面磁控溅射改性后，不同气压下放电幅值和频率均减小，绝缘老化速率减缓。另一方面，表层深陷阱对电荷捕获作用增强，电子注入-脱出循环减缓，抑制了绝缘老化进程。

参考文献　References

[1] 宋清超，陈家伟，蔡坤城，等. 多电飞机用燃料电池-蓄电池-超级电容混合供电系统的高可靠动态功率分配技术[J]. 电工技术学报，2022，37(2)：445-458.
SONG Qingchao, CHEN Jiawei, CAI Kuncheng, et al. A highly reliable power allocation technology for the fuel cell-battery-supercapacitor hybrid power supply system of a more electric aircraft[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 445-458.

[2] TARIQ M, MASWOOD A I, GAJANAYAKE C J, et al. Aircraft batteries: current trend towards more electric aircraft[J]. IET Electrical Systems in Transportation, 2017, 7(2): 93-103.

[3] DIAW E H N, LE ROY S, TEYSSÈDRE G, et al. Current measurements in high performance polymers used in aeronautic cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(6): 2195-2202.

[4] PORNET C, GOLOGAN C, VRATNY P C, et al. Methodology for sizing and performance assessment of hybrid energy aircraft[J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(1): 341-352.

[5] KIM H D, FELDER J L, TONG M T, et al. Turboelectric distributed propulsion benefits on the N3-X vehicle[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 558-561.

[6] 赵　鑫，韩　涛，马婷婷，等. 交直流叠加电压下硅橡胶内电树枝特性[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3173-3180.
ZHAO Xin, HAN Tao, MA Tingting, et al. Characteristics of electrical tree in silicone rubber under DC superimposed with AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3173-3180.

[7] BORGHEI M, GHASSEMI M. Insulation materials and systems for more- and all-electric aircraft: a review identifying challenges and future research needs[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1930-1953.

[8] SHAHSAVARIAN T, LI C Y, BAFERANI M A, et al. High temperature insulation materials for dc cable insulation-part II: partial discharge behavior at elevated altitudes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 231-239.

[9] 孙　浩，王亚林，范　路，等. 低气压方波电压下多电飞机电机绝缘局部放电研究[J]. 高电压技术，2023，49(2)：565-576.
SUN Hao, WANG Yalin, FAN Lu, et al. Research on partial discharge of more electric aircraft propulsion motor insulation under low pressure and square wave voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 565-576.

[10] RIBA J R, GÓMEZ-PAU Á, MORENO-EGUILAZ M. Sensor comparison for corona discharge detection under low pressure conditions[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(19): 11698-11706.

[11] 江　军，李　治，张本栋，等. 航空线缆的绝缘性能与检测综述[J]. 中国电机工程学报，2023，43(10)：4005-4021.
JIANG Jun, LI Zhi, ZHANG Bendong, et al. A review on insulation performance and detection for aeronautical cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 4005-4021.

[12] RUI R, COTTON I. Impact of low pressure aerospace environment on machine winding insulation[C]// 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Diego, USA: IEEE, 2010: 1-5.

[13] BORGHEI M, GHASSEMI M. Effects of low-pressure condition on partial discharges in WBG power electronics modules[C]// 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). Knoxville, USA: IEEE, 2020: 199-202.

[14] 杨亚奇，李卫国，夏　喻，等. 低气压下长间隙交直流放电特性研究[J]. 电工技术学报，2018，33(5)：1143-1150.
YANG Yaqi, LI Weiguo, XIA Yu, et al. Research of AC and DC discharge characteristics of long gap under low pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1143-1150.

[15] 江　军，李　治，张本栋，等. 低气压下航空线缆的局部放电特性[J]. 电工技术学报，2022，37(21)：5578-5586，5626.
JIANG Jun, LI Zhi, ZHANG Bendong, et al. Partial discharge characteristics of aeronautical cables at low pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(21): 5578-5586, 5626.

[16] KARADJIAN M, IMBERT N, MUNIER C, et al. Partial discharge detection in an aeronautical power cable[C]// 2018 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). Cincinnati, USA: IEEE, 2018: 1-9.

[17] BHARGAVA S, BLANCHET T A. Unusually effective nanofiller a contradiction of microfiller-specific mechanisms of PTFE composite wear resistance?[J]. Journal of Tribology, 2016, 138(4): 042001.

[18] SCHEFER H, FAUTH L, KOPP T H, et al. Discussion on electric power supply systems for all electric aircraft[J]. IEEE Access, 2020, 8: 84188-84216.

[19] JIANG J, LI Z, LI W Y, et al. A review on insulation challenges towards electrification of aircraft[J]. High Voltage, 2023, 8(2): 209-230.

[20] ZHANG C, MA Y Y, KONG F, et al. Surface charge decay of epoxy

resin treated by AP-DBD deposition and direct fluorination[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 768-775.

[21] LI C Y, HU J, LIN C J, et al. The control mechanism of surface traps on surface charge behavior in alumina-filled epoxy composites[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(44): 445304.

[22] 郝　建，李彦青，廖瑞金，等. 绝缘纸板表面微纳结构 Al_2O_3 功能膜的构筑及其抑制空间电荷注入的机制[J]. 中国电机工程学报，2019，39(18)：5555-5564.
HAO Jian, LI Yanqing, LIAO Ruijin, et al. Construction of micro/nano-structure Al_2O_3 functional film on the surface of insulation pressboard and its mechanism of suppressing space charge injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5555-5564.

[23] DU B X, WANG Z H, LI J, et al. Epoxy insulator with surface graded-permittivity by magnetron sputtering for gas-insulated line[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 197-205.

[24] 赵鸣鸣，于维鑫，孔　飞，等. 基于二元布气的大气压等离子体沉积 TiO_2 功能层提高陶瓷表面绝缘性能[J]. 电工技术学报，2022，37(13)：3404-3412.
ZHAO Mingming, YU Weixin, KONG Fei, et al. Improvement of surface insulating properties of ceramics by deposition of TiO_2 functional layer by atmospheric pressure plasma with binary gas distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3404-3412.

[25] LIAO R J, LI C, YUAN Y, et al. Anti-icing performance of ZnO/SiO_2/PTFE sandwich-nanostructure superhydrophobic film on glass prepared via RF magnetron sputtering[J]. Materials Letters, 2017, 206: 109-112.

[26] 孔晓晓，杜伯学，姜金鹏，等. 纳米纤维素掺杂改善油浸纸介电性能的研究[J]. 高电压技术，2022，48(5)：2020-2027.
KONG Xiaoxiao, DU Boxue, JIANG Jinpeng, et al. Study on improving the dielectric properties of oil-immersed paper by doping Nano-cellulose[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 2020-2027.

[27] 杨国清，刘　阳，戚相成，等. 低气压介质阻挡放电条件下纳米 SiO_2 表面氟化研究[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3144-3152.
YANG Guoqing, LIU Yang, QI Xiangcheng, et al. Research on surface fluorination of nanosilica by dielectric barrier discharge under low pressure[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3144-3152.

[28] 阎首伊. SF_6 中电-热复合场对绝缘子表面电荷积聚影响特性研究[D]. 沈阳：沈阳工业大学，2022.
YAN Shouyi. Influence characteristics of electric-thermal compound field on insulator surface charge accumulation in SF_6[D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2022.

[29] GAO Y, LI N, LI J, et al. Charge transport behavior in gamma-ray irradiated poly(ethylene terephthalate) estimated by surface potential decay[J]. High Voltage, 2021, 6(3): 435-447.

[30] 李　进，王泽华，陈　允，等. 高压气体绝缘输电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.

[31] 张　杰，赵学童，边浩然，等. 电荷陷阱对 XLPE 绝缘电老化特性的影响[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2991-3000.
ZHANG Jie, ZHAO Xuetong, BIAN Haoran, et al. Effect of charge traps on electrical aging of XLPE insulation[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2991-3000.



邢云琪
1986—，男，博士，教授
主要从事极端环境高性能高可靠绝缘设计与服役状态评价研究
E-mail: yqxing@hebut.edu.cn

XING Yunqi
Ph.D., Professor



郭　泽(通信作者)
1993—，男，博士，讲师
主要从事高压电器电弧理论及可靠性提升技术研究
E-mail: guoze92@hebut.edu.cn

GUO Ze
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2023-08-11　修回日期　2024-01-27　　编辑　曹昭君