第 49 卷 第 1 期：321-330 高电压技术 Vol.49, No.1: 321-330
2023 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20220167

电极接触方式对环氧树脂表面电荷积聚与消散特性的影响

胡伯立，潘　成，潘子君，叶宇涵，唐　炬
（武汉大学电气与自动化学院，武汉 430072）

摘　要：直流电压下绝缘子表面电荷积聚会造成电场畸变，导致气–固界面沿面放电甚至绝缘失效，因此研究表面电荷积聚与消散特性具有重要意义。为了研究电极接触方式对环氧树脂表面电荷积聚与消散特性的影响，通过在电极–环氧树脂制备而成的绝缘子接触面涂抹/不涂抹导电胶来模拟电极–绝缘子间的两种接触状态，即紧密接触/非紧密接触。进而研究金属和固体电介质间不同的接触方式对直流电压下绝缘子表面电荷积聚和消散特性的影响。实验结果表明：当电极与绝缘子间紧密接触时，材料表面主要积聚与施加电压极性相同的电荷，而当电极与绝缘子间非紧密接触时，材料表面主要积聚与施加电压极性相反的电荷。同时，随加压时间延长不同接触方式下的电荷积聚总量也有显著差异。而在消散过程中，两种接触方式下表面电荷都以沿面迁移为主导，电荷分布区域呈显著的收缩现象，且紧密接触方式下的电荷消散速度快于非紧密接触方式。

关键词：直流 GIS；环氧树脂；表面电荷积聚与消散；电极接触方式；导电胶

Effect of Electrode Contact Mode on Surface Charge Accumulation and Dissipation Characteristics of Epoxy Resin

HU Boli, PAN Cheng, PAN Zijun, YE Yuhan, TANG Ju
(School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Surface charge accumulation on insulators under DC voltage can cause electric field distortion and lead to surface discharge and even insulation failure at gas-solid interface. Therefore, it is of great significance to study the characteristics of surface charge accumulation and dissipation. In order to study the influence of electrode contact mode on the surface charge accumulation and dissipation characteristics of epoxy resin, this paper simulates two contact modes between electrode and insulator, namely close contact and non-close contact, by applying or not applying conductive adhesive on the contact surface of electrode and epoxy resin. The influence of different contact modes between metal and solid dielectric on the surface charge accumulation and dissipation characteristics of insulator under DC voltage is studied. The experimental results show that when the electrode and insulator are in close contact, the charge with the same polarity as the applied voltage is mainly accumulated on the surface of the material, when the electrode and insulator are not in close contact, the charge with the opposite polarity of the applied voltage is mainly accumulated on the surface of the material. At the same time, the total amount of charge accumulation under different contact modes is significantly different with increasing pressure time. In the process of dissipation, the surface charge migration is dominant in the two contact modes, and the charge distribution area shows a significant contraction phenomenon, and the charge dissipation rate in the close contact mode is faster than that in the non-close contact mode.

Key words: DC-GIS; epoxy; surface charge accumulation and dissipation; electrode contact mode; conductive adhesives

0　引言

直流气体绝缘设备内部的绝缘子表面电荷积聚将导致气–固界面局部电场畸变，极易引发沿面闪络事故，从而限制其发展[1-3]。因此，深入开展绝缘子表面电荷积聚与消散特性的研究，并理清电荷聚散机理是推进高压直流气体绝缘设备大规模应用的前提[4-5]。

现有研究表明，表面电荷的聚散特性涉及气体侧、固体侧以及沿材料表面 3 个传导路径[6]。目前用于探究表面电荷聚散特性的试验电极结构主要包

基金资助项目：国家自然科学基金(51877156)
Project supported by National Natural Science Foundation of China (51877156).

括：1）柱状绝缘子的上下两端紧贴放置平行平板电极；2）锥形或盆式绝缘子搭配同轴电极；3）平面绝缘子表面两端放置类指形电极等[7]。其中，前两种电极结构在绝缘子表面提供的电场同时具备切向与法向分量，能够较好地模拟实际盆式绝缘子的工作状态，而被研究者所采用[8-10]。除此之外，一些研究者也采用平面绝缘子搭配指形电极来开展实验研究。在这种电极布置方式下，绝缘子沿面电场分布以切向分量为主，使得沉积在绝缘子表面的电荷将以沿面迁移为主要的传导方式，从而削弱了法向传导带来的影响，更加有助于单独分析沿面传导过程对电荷聚散特性的影响机理[11]，尤其是在分析表面改性前后电荷聚散特性调控效果的相关研究中应用广泛[12]。

以平面绝缘子加指形电极进行实验研究中较有代表性的有：华北电力大学齐波等人将一对指形电极放置在经纳米 TiO_2 涂覆的平板绝缘子两侧，发现电荷主要积聚在高压电极附近，且电荷极性与外施电压极性相同[13]；S.G.J. Ehnberg 等人在脉冲电压下的实验也曾得到类似的结果，即同极性电荷积聚在电极周围[14]。而在类似的电极结构下，屠幼萍等人利用 SiO_2(TiO_2)/环氧树脂材料开展了环氧树脂表面改性的研究，结果表明高压电极周围将积聚与外施电压极性相反的电荷，即主要呈现出异极性电荷积聚[15-16]，他们认为异极性电荷主要来自于地电极的注入，并在切向电场的牵引下积聚于高压极附近；武汉大学唐炬等人在 nano-SiC/环氧树脂涂层表面改性的研究中也观察到了与之类似的异极性电荷积聚现象，且积聚在高压极周围的电荷将随材料表面电导率的提升而呈现出沿切向电场方向的迁移趋势[17]；根据电荷积聚极性的不同，S.Kumara 等人基于文献[14]的实验数据仿真了不同极性电荷积聚时平板绝缘子的沿面闪络特性，发现电荷极性的变化将影响电极周围的电场分布，从而改变闪络路径[18]。天津大学杜伯学等人将上述电极结构进行了一定的改动，他们通过在电极与试样的接触面涂抹导电胶来将电极粘贴在试样表面，使得电极–介质的接触程度变得更为紧密[19]，其研究表明，Al_2O_3/环氧树脂试样表面在高压极与地电极周围均有显著电荷积聚，且电荷极性与其距离最近一侧的电极极性相同，即以同极性电荷积聚为主[20]，此时两侧电极的注入效应主导电荷积聚过程。

综上可知：在以指形电极为试验结构的研究中，多数学者均认为材料表面电荷主要来自于电极的注入效应，并在切向电场作用下积聚于两侧电极附近。但对比上述文献可知，在相似的充电方式下，不同研究结果会呈现出积聚电荷极性相反的现象，例如文献[13-14,20]的研究结果均为同极性电荷积聚，而文献[15-17]则主要呈现异极性电荷积聚。如果电荷均来自于相同的积聚途径(即电极注入)，那么电荷积聚极性的转变是由何种原因导致的？是否为实验过程中某些实验条件的改变(如：外施电压幅值，极性，电极–介质接触方式等)导致产生了不同的充电方式，从而影响了电荷分布特性？目前暂未有相关研究内容被报道。因此，为了深入开展绝缘子表面电荷聚散特性的研究，并理清在以切向分量为主的外施电场下，绝缘子表面电荷的动态行为规律，有必要针对平面绝缘子加类指形电极的试验结构开展不同充电方式下的表面电荷聚散特性的研究，这有助于全面掌握不同充电方式下的表面电荷分布规律，为推进直流 GIS 的工程应用提供理论支撑。在充电方式的选择上，考虑到在 GIS 内部绝缘子与金属件间的连接方式有两种： 1）绝缘子在固化过程中与金属电极紧密黏合[21]；2）固化成型后的绝缘子与金属件压接[22]。这两种情况将形成两种不同的电极–固体电介质接触状态，即：紧密接触与非紧密接触。且现有研究表明，电极与固体电介质间的接触方式或者紧密程度会显著影响绝缘材料中电荷的注入与抽出行为[23]，进而对表面电荷积聚与消散特性产生影响[7]。因此，因介质–电极间不同接触方式而导致的差异化充电过程，是研究表面电荷沿面输运过程需要考虑的重点问题。而现有研究大多在单一接触方式下开展，缺乏对不同接触方式下的电荷聚散特性的对比。

目前，关于两种接触方式下表面电荷积聚特性差异的相关研究主要由天津大学的高宇等人完成。他们以 PE 与 PBN 两种材料为研究对象，在指形电极结构下分别研究了介质–电极接触面直接压接与涂抹导电胶两种条件下的电荷分布特性[24]。其研究表明，无论电极–介质是何种接触状态，材料表面均为同极性电荷积聚，这两种实验条件仅在电荷积聚量与消散速度方面存在差异。虽然文献[24]考虑到了不同的电极–介质接触方式，但其研究中所采用的材料种类并非 GIS 用绝缘子的常用材料(通常应为环氧树脂或环氧基复合材料)。而电荷积聚特性有可能会因材料种类的不同而发生转变：例如同样是非

紧密接触条件，文献[17]中环氧基复合材料表面主要呈现异极性电荷积聚，而文献[24]中 PE 表面主要为同极性电荷积聚。因此文献[24]所得结论是否同样适用于以环氧树脂为主要绝缘部件的气体绝缘设备，还有待进一步证实。综上，本文以平板环氧树脂绝缘子为研究对象，并采用一对指形电极进行加压，通过在电极–固体电介质接触面涂抹/不涂抹导电胶来模拟电极–固体电介质紧密/非紧密接触两种不同的接触状态，进而研究了不同电压极性下电极–固体电介质接触方式对绝缘子表面电荷积聚与消散特性的影响，最后结合沿面电场分布与材料陷阱特性对实验现象进行了分析。

1　实验平台及方法

1.1　实验电极与试样

绝缘试样为纯环氧树脂圆片，厚度 3 mm、直径 90 mm，两个铝制指形电极厚度均为 2 mm、半径 30 mm，电极与试样的布置见图 1。左侧电极接直流高压，右侧接地，二者最近点相距 60 mm，电极与试样间通过绝缘螺栓固定。利用 COMSOL Multiphysics 软件对+10 kV 直流电压下的绝缘子周围电场分布进行了仿真计算，如图 2 所示。可见，指形平板电极在材料表面形成以切向分量为主的电场分布，仅在靠近电极的区域内有一定的法向分量。

1.2　表面电荷测量系统

实验平台如图 3 所示，其中电压源为 TRC2025P100 直流电压源能提供 0~±100 kV 的电压；静电探头和静电电位计(Trek–341B)用以测量材料的表面电位大小；示波器(Tektronix DPO–4102B)记录数据。

测试表面电位分布时，设置探头与试样表面的距离为 2 mm，之后用两台步进电机组成的二维操动系统来控制静电探头对试样表面进行扫描，扫描路径与范围见图 4，为一个 45 mm×45 mm 的正方形区域。每个测量点间隔 1 mm，整个扫描过程耗时 90 s。在获取表面电位分布后，利用文献[25-26]所述反演算法计算得到表面电荷密度分布。

1.3　实验条件

电极接触方式分为两种，如下所述。

1）非紧密接触：直接将电极压接到试样表面。

2）紧密接触：在试样与电极接触面涂抹导电胶后将电极压接到试样表面。

针对上述两种电极–试样接触方式，分别在

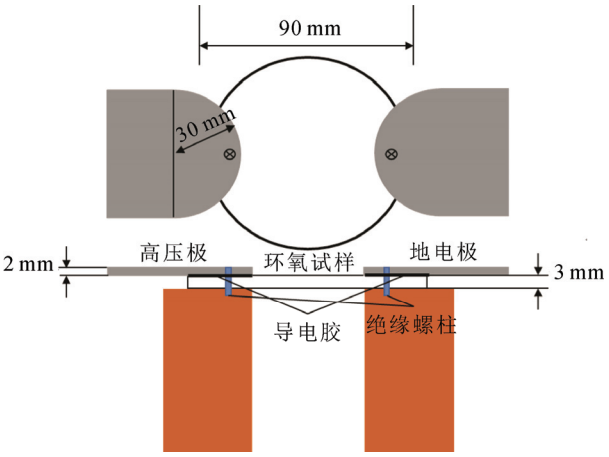


图 1　试品及电极结构

Fig.1　Sample and electrode structure

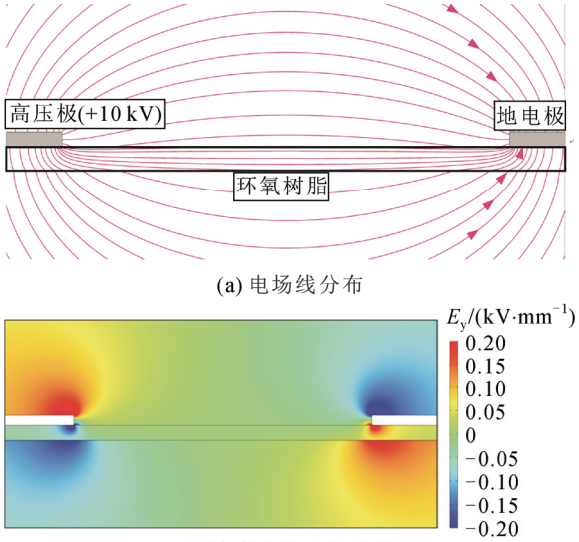


图 2　电场分布

Fig.2　Electric field distribution

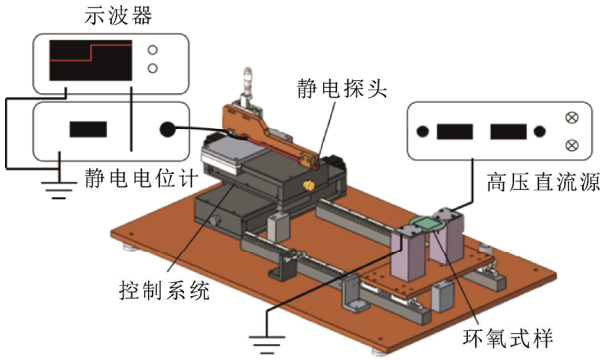


图 3　表面电荷实验平台

Fig.3　Surface charge experiment platform

±10 kV 直流电压作用下开展绝缘子表面电荷积聚与消散特性试验。在电荷积聚实验过程中，总加压

时间为 60 min，分别在 10、20、40、60 min 时间节点测量表面电位分布。测量过程中先将直流源断电，并将高压极接地。测量完毕后，电源再次接通高压极，进行加压实验，直到下一个时间节点重复上述测量步骤。积聚试验结束后立即关闭电源并将高压极接地，进行表面电荷消散实验，分别在消散 10、20、40、60 min 后测量表面电位分布。每次实验前，利用无水乙醇清洗电极和样品，并利用等离子风机吹扫样品表面，尽可能地确保绝缘子初始表面电位为零。

2 实验结果

2.1 +10 kV 下表面电荷积聚与消散实验结果

图 5、图 6 分别为两种接触方式在直流+10 kV 电压作用后的表面电荷积聚与消散结果。观察可知，非紧密接触实验组的试样表面主要积聚负极性的电荷，紧密接触实验组的试样表面主要积聚正极性的电荷。两种接触方式下的电荷均主要分布于高压极附近，地电极附近仅有少量电荷积聚，地电极附近积聚电荷的极性与该接触方式下高压极附近电荷极性相反。随着加压时间的增加，试样表面电荷的积聚总量与分布面积逐渐增加。0~40 min 内电荷积聚量增长明显，40~60 min 表面电荷积聚量增长不明显，电荷分布面积也无明显变化，此时积聚过程趋于稳定。

在电荷消散过程中，材料表面的电荷量随时间延长逐渐减少，电荷分布面积沿切向朝两侧电极逐渐收缩。两种不同的接触方式对比，消散时间 60 min，紧密接触实验组试样表面的电荷几乎消散完全，非紧密接触实验组试样表面依旧有较明显的电荷分布存在。

2.2 –10 kV 下表面电荷积聚与消散实验结果

图 7、图 8 分别为两种接触方式在直流–10 kV 电压作用后的表面电荷积聚与消散结果。非紧密接触实验组试样表面主要积聚正极性电荷，紧密接触实验组中试样表面主要积聚负极性电荷。在整个积聚与消散过程中，环氧材料表面电荷的分布形貌与聚散速度随时间变化的规律与施加电压为+10 kV 时相似。即：在积聚过程中，表面积聚电荷总量随加压时间的延长逐渐增加，前 40 min 内电荷积聚增量大于 40~60 min 内的电荷积聚增量。

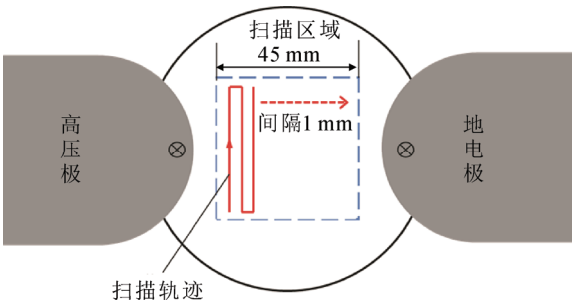


图 4 扫描模式图

Fig.4 Scanning mode diagram

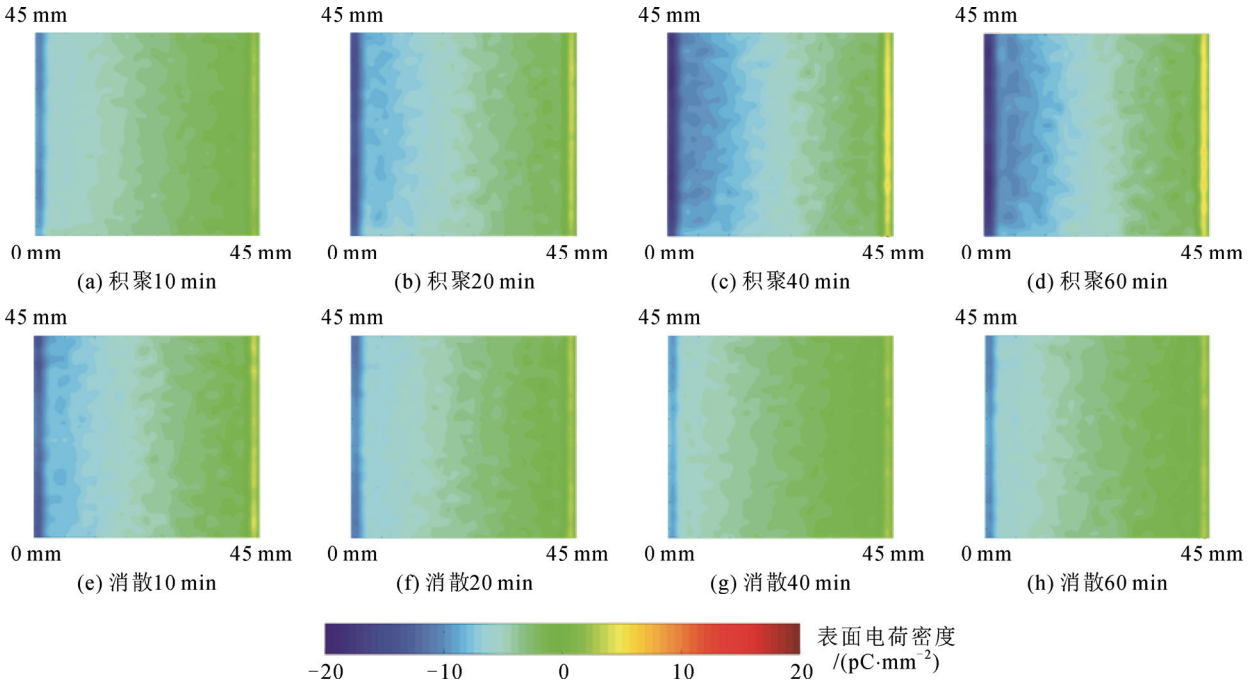


图 5 +10 kV 非紧密接触组表面电荷分布

Fig.5 Surface charge distribution of non close contact group under +10 kV

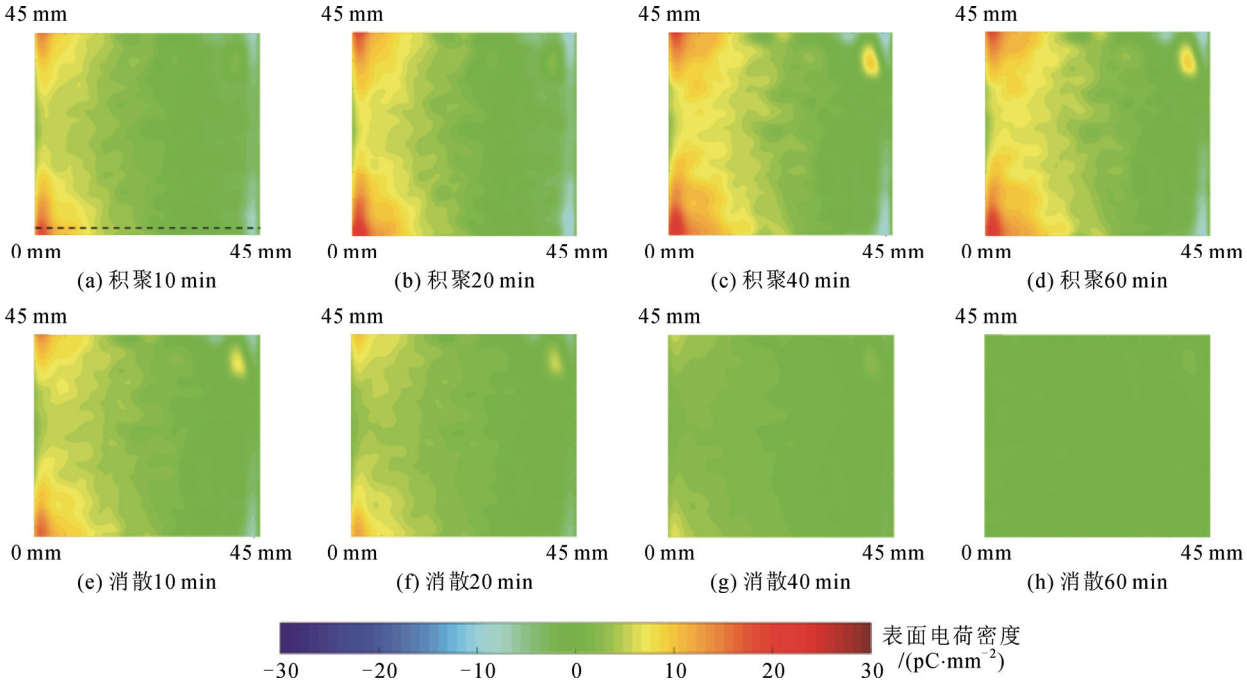


图 6　+10 kV 紧密接触组表面电荷分布

Fig.6　Surface charge distribution of close contact group under +10 kV

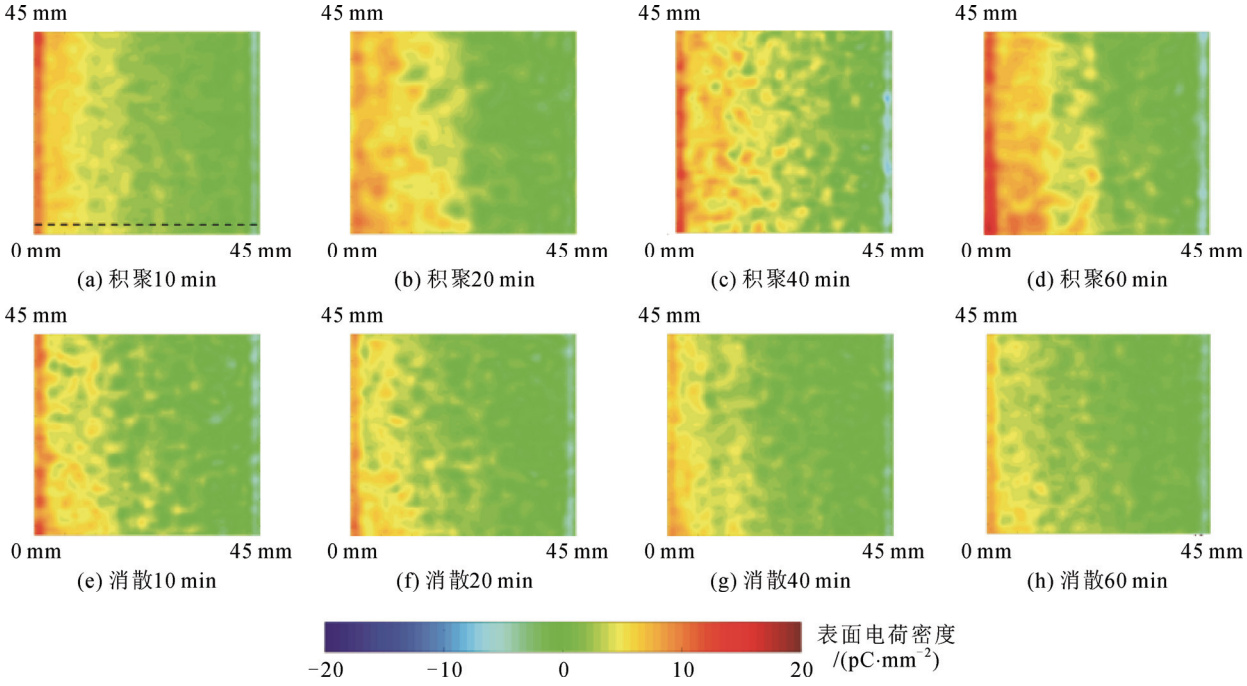


图 7　–10 kV 非紧密接触组表面电荷分布

Fig.7　Surface charge distribution of non close contact group under –10 kV

在消散过程中，表面电荷积聚量随时间延长逐渐减少，电荷形貌向两侧电极逐渐收缩。消散 60 min，紧密接触实验组表面几乎观察不到残余电荷，非紧密接触实验组仍可观察到显著的残余电荷。

综合图 5—图 8 结果可知：电极–固体电介质非紧密接触条件下，材料表面积聚的电荷极性与施加电压的极性相反；电极–固体电介质紧密接触条件下，表面积聚的电荷极性与施加电压的极性相同。

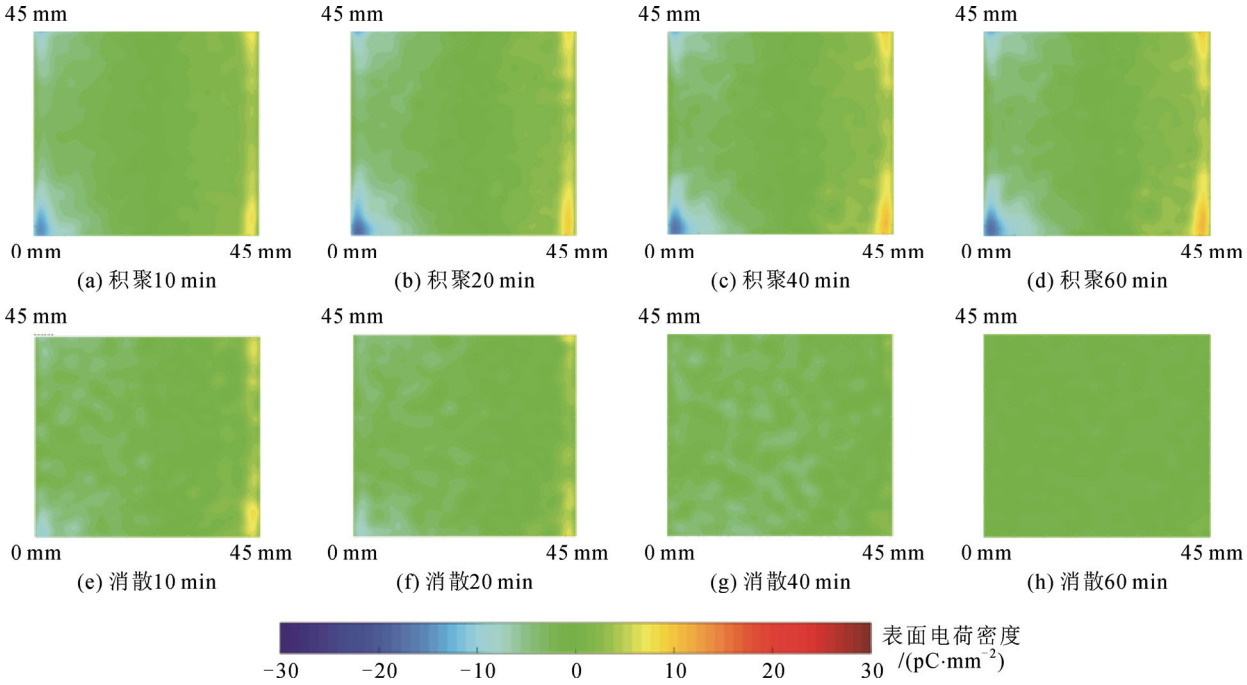


图 8 –10 kV 紧密接触组表面电荷分布

Fig.8 Surface charge distribution of close contact group under –10 kV

3 分析与讨论

3.1 电极接触方式对积聚电荷极性的影响

表面电荷积聚途径共有 3 种：气体侧传导、绝缘材料体传导和表面传导[27-28]。现有研究表明，材料表面电荷主导积聚途径和电荷分布模式与沿面电场分布紧密相关[29-30]。由图 2 可知，在本文电极布置下绝缘子沿面电场以切向分量为主，仅在两侧电极附近有显著法向分量，这并不利于以体传导为主导的电荷积聚途径。同时，上述实验测量结果中并未观察到因体传导而导致的均匀电荷分布模式[31]，因此排除体传导为主的积聚方式。综上，本实验中表面电荷的可能积聚途径有两种：1）空气侧的游离电荷传导到材料表面；2）电极注入的电荷沿材料表面迁移。电荷附着于绝缘子表面后，在切向电场的作用下沿着绝缘子表面迁移，最终形成相应的电荷分布模式。

当电极与试样不涂导电胶直接与试样接触时，由于电极与环氧试样的表面微观上存在大量的突起与凹陷，金属与环氧树脂接触不紧密，如图 9 所示。从而在电极与环氧树脂间出现一层很薄的气隙，形成了附加的势垒即能隙[32]，降低了电极注入电荷的效率[33]。涂抹导电胶后，这些气隙被填满，电极与环氧树脂实现了更完善的接触，有利于电荷的注入。

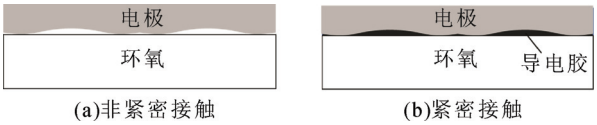


图 9 不同的电极与环氧接触关系

Fig.9 Contact relationship of electrode and epoxy

以+10 kV 条件下的电荷积聚为例，对高压极附近绝缘材料表面测量区域的电场进行仿真，如图 10 所示，图中箭头指向为此处空间电场的方向。可见，电极与材料接触面处的电场方向垂直于表面向下，此处法向电场会促进电极对材料中电荷的注入过程。位于高压极附近的测量区域法向电场分量向上。当电极与试样直接压接时，电荷的注入受到抑制，此时表面电荷主导积聚途径为气体侧的游离电荷在电场的作用下吸附在材料表面，并被材料表面态捕获形成了表面电荷。因此非紧密接触实验组在材料表面得到异极性的电荷分布。即：+10 kV 条件下呈现高压极(阳极)积聚负电荷，地电极(阴极)附近积聚正电荷的实验现象；而–10 kV 条件下则为高压极(阴极)积聚正电荷，地电极(阳极)附近积聚负电荷的现象。涂抹导电胶后，导体与环氧材料之间的注入势垒降低，电荷更容易从电极注入环氧基体[34]，这些电荷在切向电场的作用下向对侧电极迁移，并被注入电极附近材料表面态捕获成为束缚电荷。因此，

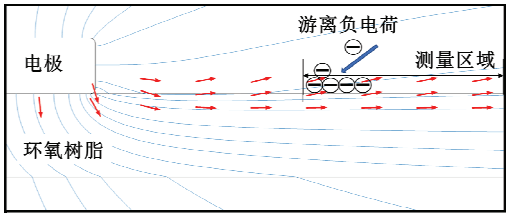


图 10　电场分布图

Fig.10　Electric field direction

紧密接触实验组加压积聚实验后在材料表面得到同极性的电荷分布。即在+10 kV 条件下呈现高压极(阳极)附近积聚正电荷和地电极(阴极)附近积聚负电荷的实验现象；而–10 kV 条件下则为高压极(阴极)积聚负电荷，地电极(阳极)附近积聚正电荷的现象。

综上分析可知：非紧密接触条件下积聚的电荷主要来自于空气中游离的自由电荷，在电极附近法向电场的牵引下积聚到绝缘子表面，使得高压电极附近积聚量最大；紧密接触条件下积聚的电荷主要来自于电极注入，并在切向电场的作用下有向对侧电极迁移的趋势，仍然是高压电极附近的电荷积聚量最大。

3.2　电极接触方式对表面电荷积聚量的影响

为观察不同条件下电荷积聚过程中表面电荷量的变化，将图 5—图 8 中分布的主要电荷极性的表面电荷密度进行积分，如图 5 中试样表面主要积累负电荷，则统计材料表面负电荷的总积累量。计算得到不同时刻表面电荷积聚总量，如图 11 所示。

图中浅色图块代表正电荷；黑色图块代表负电荷。非紧密接触实验组在+10 kV 下积聚的负电荷量大于–10 kV 下积聚的正电荷量；紧密接触实验组相反，–10 kV 下积聚的负电荷量大于+10 kV 下积聚的正电荷量。不同的电极接触方式会影响正负电荷在材料表面的积聚量的大小。

为分析电压极性改变后，不同接触方式下正负电荷积聚量出现差异的现象，通过等温表面电位衰减法(isothermal surface potential decay，ISPD)测试了环氧材料表面的电子陷阱与空穴陷阱的密度[35]。在 25℃室温下使用栅电极电晕放电对环氧薄片进行充电，得到正、负电晕放电充电后的电压衰减曲线。计算得到材料电子陷阱与空穴陷阱特性曲线，如图 12 所示。电子陷阱密度峰值在能级 1.12eV 处，大小为 $3.3\times10^{21}\text{eV}^{-1}\text{m}^{-3}$，空穴陷阱密度峰值在能级 1.14 eV 处，大小为 $3.59\times10^{21}\text{ eV}^{-1}\text{m}^{-3}$，在环氧树脂材料内部，电子陷阱的能级更深、密度更高。

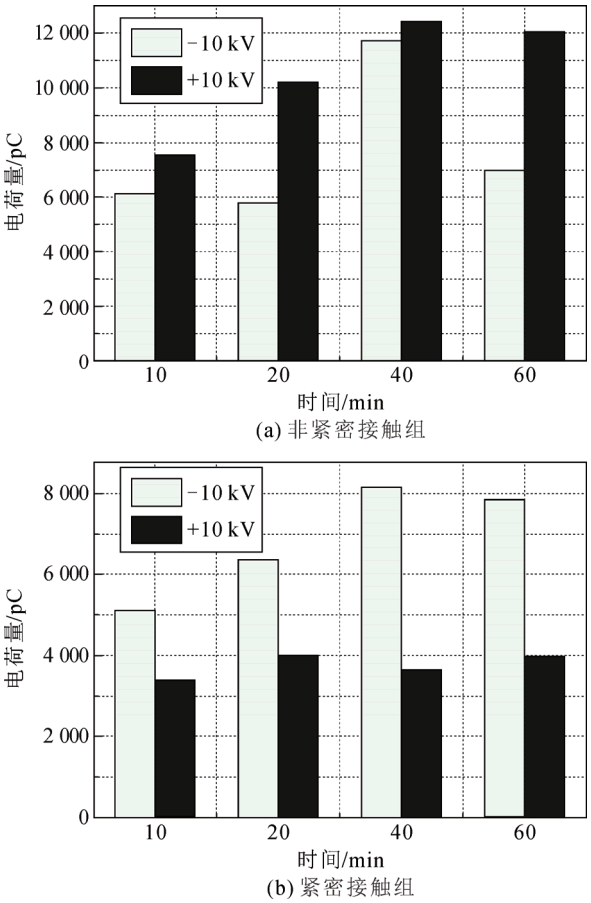


图 11　表面电荷积聚总量随加压时间的关系

Fig.11　Relationship between total surface charge accumulation and pressurization time

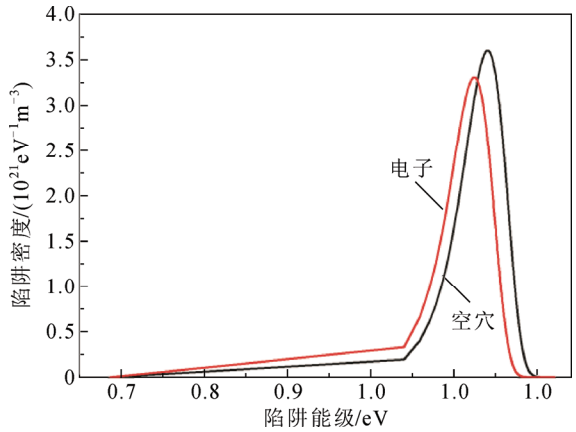


图 12　环氧树脂电子陷阱与空穴陷阱分布

Fig.12　Distribution of electron traps and hole traps in epoxy resin

较高的电荷陷阱密度会增加载流子迁移过程中被捕获的概率，较大的陷阱能级会增加载流子从陷阱中脱陷所需克服的陷阱势垒高度[36]。因此，对以电子为主的负电荷而言，较高的电子陷阱密度增

强了材料对电子的捕获效应，限制了电子脱陷过程与沿面迁移速率，导致–10 kV 加压过程中大量从高压极注入的电子会聚集在电极与绝缘子交界处，削弱电极–固体电介质界面处的负电荷注入等效电场，抑制负电荷注入。相对地，空穴陷阱的能级较浅，陷阱密度较低，正电荷更容易脱陷并在切向电场作用下沿面迁移，减少了+10 kV 加压过程中电极–固体电介质界面处累积的正电荷量，进一步缓解电极附近正电荷积聚对电荷注入过程的抑制效应而有利于正电荷的注入过程。

在紧密接触实验组中，表面电荷主要来源于电极注入，正电荷更易进入到材料中，观察到+10 kV 条件下表面积聚的正电荷比–10 kV 时积聚的负电荷多。在非紧密接触实验组中，材料表面电荷的主要来源为空气中的游离电荷。因表面电子陷阱密度大，能级深，导致被材料表面捕获的负电荷更难在切向电场的作用下向高压极迁移而抽出，因此+10 kV 条件下积聚的负电荷比–10 kV 条件下积聚的正电荷多。

3.3 电极接触方式对表面电荷消散速度的影响

为了进一步定量比较两种不同电极接触方式下表面电荷的消散速率，在表面电荷分布区域选取一条直线，如图 6(a)和 7(a)所示，该直线经过材料表面电荷密度最高点。统计这条直线上表面电荷密度随时间的变化如图 13 所示。紧密接触实验组的表面电荷密度经过 60 min 后降低了 75%，非紧密接触实验组经过 60 min 后仅下降了 26%。由此可见，电极与环氧树脂绝缘子紧密接触后，材料表面的电荷消散速度显著加快。

现有关于表面电荷消散的机理研究表明，表面电荷衰减途径主要分为 3 种：表面电导迁移、体传导以及与气体中的带电粒子中和[37]。3 种途径可能同时存在，但在具体的实验条件下，往往其中一个途径占主导地位。本文消散实验所用的两对地电极布置在绝缘子上表面的两侧，这种电极结构并未在法向提供传导路径，因此电荷难以从沿着表面向绝缘体内部传导并消散。文献[38-39]认为：若电荷消散过程中，材料表面电荷的形貌发生横向迁移，则主要为沿面消散；若出现火山口或是马鞍状电荷斑则为气体侧中和。观察本文电荷消散图谱可知，整个实验过程中并未出现火山口或是马鞍状的电荷分布模式，同时由图 5–图 8 表面电荷消散结果，可观察到表面电荷向左侧地电极收缩的过程，电荷运动

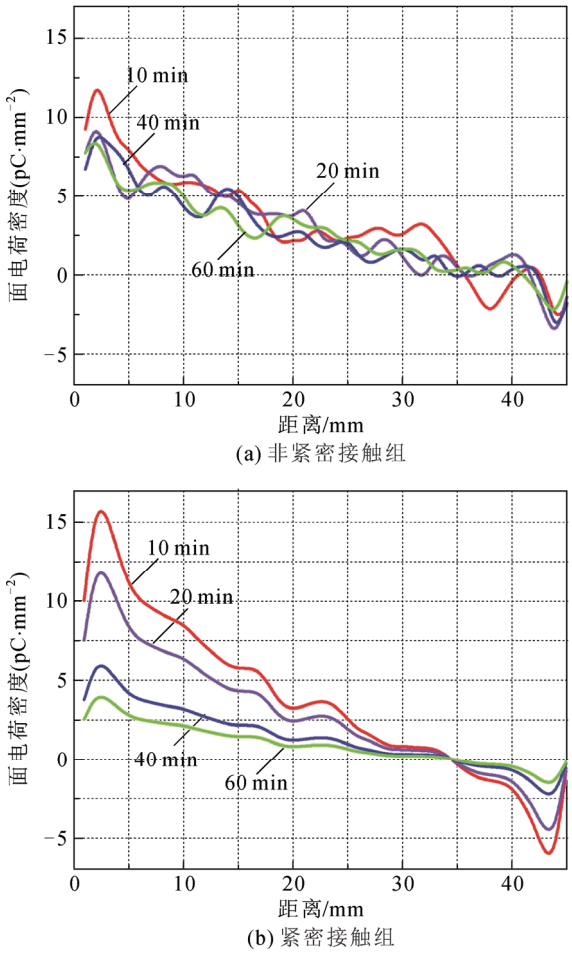


图 13 中线表面电荷密度分布

Fig.13 Surface charge density distribution on the line in the sample

规律与横向迁移理论更相符。因此本文认为电荷消散过程中表面电荷衰减途径为：表面电荷在自建电场作用下沿材料表面向两侧地电极横向迁移而消散。

与电荷注入过程类似，迁移到地电极附近的电荷需要克服界面势垒才能从固体电介质进入到导体中，因此电极与试样之间接触程度会显著影响电荷的消散速度。在紧密接触条件下，电极–固体电介质间的接触面积变大，电荷更容易进入地电极，这也是紧密接触实验组比非紧密接触实验组具备更快表面电荷消散速度的原因。

需要指出的是：在改变电极–介质接触方式的条件下，本文获取了两种不同的电荷积聚模式，即：电极–介质直接压接的非紧密接触对应异极性电荷积聚；电极–介质界面引入导电胶黏合的紧密接触对应同极性电荷积聚。对比文献[24]，在相似的电极结构下，将绝缘材料从 PE/PBN 替换为 GIS 中常用

的环氧树脂而获得了不同的实验结果。这可能和不同介质与金属间的接触势垒有关。在接触势垒较高的金属–介质界面上，电极内部的电荷难以在直接压接的条件下进入绝缘子表面态；而在接触势垒较低的界面上，由电极注入的电荷无需借助导电胶即可越过势垒进入绝缘子表面态，并呈现出同极性电荷积聚。因此，为全面掌握不同电极接触方式下的表面电荷分布特性转变机理，后续有必要选择多种不同的绝缘材料开展研究，以求完善不同电极接触方式下的气–固界面电荷聚散特性理论体系。

4　结论

1）电极–固体电介质间不同的接触方式会影响表面电荷积聚特性，具体如下：在电极–固体电介质非紧密接触条件下，绝缘子表面呈现异极性电荷分布；而紧密接触条件下，绝缘子表面呈现同极性电荷分布。

2）电极–试样接触方式还会引起不同外施电压极性下积聚电荷量的差异。电极–试样紧密接触条件下，+10 kV 材料表面积聚的正电荷多于–10 kV 时积聚的负电荷；而电极–试样非紧密接触条件下，+10 kV 材料表面积聚的负电荷多于–10 kV 时积聚的正电荷。

3）电极–试样接触方式会显著影响表面电荷的消散速度，电极与环氧树脂绝缘子之间紧密接触后材料表面电荷的消散速度会大大加快。

4）由于电极接触方式会对绝缘子表面电荷积聚与消散造成显著的影响。在实际工程中，需要针对不同的电极接触方式对绝缘子表面电荷积聚与消散特性进行研究，用以全面掌握不同电极–介质接触状态下的绝缘子表面电荷聚散特性，进而对实际直流盆式绝缘子的设计与制造提供参考。

参考文献　References

[1] 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.

[2] 李大雨，侯易岑，张贵新，等. 直流/交流电压下锥形绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 高电压技术，2019，45(4)：1086-1092.
LI Dayu, HOU Yicen, ZHANG Guixin, et al. Surface charge accumulation characteristics of cone-shape insulator under DC/AC[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1086-1092.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 高　宇，门业堃，杜伯学，等. 表面电荷对典型聚合物绝缘材料直流闪络电压的影响[J]. 高电压技术，2015，41(5)：1474-1480.
GAO Yu, MEN Yekun, DU Boxue, et al. Effect of surface charge on DC flashover voltage of typical polymer insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1474-1480.

[6] 唐　炬，潘　成，王邸博，等. 高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展[J]. 电工技术学报，2017，32(8)：10-21.
TANG Ju, PAN Cheng, WANG Dibo, et al. Development of studies about surface charge accumulation on insulating material under HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(8): 10-21.

[7] 李传扬，林川杰，陈　庚，等. 高压直流盆式绝缘子气-固界面电荷行为研究综述[J]. 中国电机工程学报，2020，40(6)：2016-2025.
LI Chuanyang, LIN Chuanjie, CHEN Geng, et al. Review of gas-solid interface charging phenomena of HVDC spacers[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(6): 2016-2025.

[8] 李大雨，张贵新，王天宇. 交流电压下圆台型绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 高电压技术，2022，48(4)：1480-1488.
LI Dayu, ZHANG Guixin, WANG Tianyu. Characteristics of surface charge accumulation on truncated cone-type insulator under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(4): 1480-1488.

[9] 蔺占芳，王　柯. 直流电场下盆式绝缘子体积电导率对其表面电荷积聚特性的影响[J]. 绝缘材料，2021，54(3)：54-59.
LIN Zhanfang, WANG Ke. Effect of volume conductivity of basin type insulator on its surface charge accumulation under DC electric filed[J]. Insulating Materials, 2021, 54(3): 54-59.

[10] XUE J Y, CHEN J H, DONG J H, et al. The regulation mechanism of SiC/epoxy coatings on surface charge behavior and flashover performance of epoxy/alumina spacers[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019, 52(40): 405502.

[11] 薛建议，王　涵，王艺博，等. 直流电压下 SF_6 中环氧复合绝缘的表面电荷积聚与衰减特性[J]. 高电压技术，2018，44(12)：3824-3832.
XUE Jianyi, WANG Han, WANG Yibo, et al. Accumulation and decay characteristics of surface charges on epoxy composite insulationin SF_6 under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(12): 3824-3832.

[12] 王明行. 纳米涂层对环氧基纳米复合材料表面电荷动态特性及对闪络的影响研究[D]. 天津：天津大学，2018.
WANG Mingxing. Effect of Nano-coating on surface charge dynamic behavior and flashover of epoxy nanocomposites[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2018.

[13] QI B, GAO C J, LV Y Z, et al. The impact of Nano-coating on surface charge accumulation of epoxy resin insulator: characteristic and mechanism[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(24): 245303.

[14] EHNBERG J, BLENNOW J. Effects of surface charge accumulation on impulse flashover voltage on silicone rubber surface[C]// XIIIth International Symposium on High Voltage Engineering. 2003.

[15] TU Y P, ZHOU F W, JIANG H, et al. Effect of nano-TiO_2/EP composite coating on dynamic characteristics of surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1308-1317.

[16] TU Y P, ZHOU F W, CHENG Y, et al. The control mechanism of micron and Nano SiO_2/epoxy composite coating on surface charge in epoxy resin[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1275-1284.

[17] PAN Z J, TANG J, PAN C, et al. Contribution of Nano-SiC/epoxy coating with nonlinear conduction characteristics to surface charge accumulation under DC voltage[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(36): 365303.

[18] KUMARA S, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Simulation of surface charge effect on impulse flashover characteristics of outdoor polymeric insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1754-1763.

[19] WANG M H, GAO Y, LI Z Y, et al. Effect of coating on surface charge accumulation and DC flashover of epoxy/Al_2O_3 nanocomposites[C]// IEEE 2nd International Conference on Dielectrics. Budapest, Hungary: IEEE, 2018: 1-4.
[20] GAO Y, LI Z Y, WANG M H, et al. Magnetic field induced variation in surface charge accumulation behavior on epoxy/Al_2O_3 nanocomposites under DC stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(3): 859-867.
[21] 王义平，张 舸，屈文锋，等. 伞裙式盆式绝缘子：CN215770712U[P]. 2022-02-08.
WANG Yiping, ZHANG Ge, QU Wenfeng, et al. Umbrella skirt and basin insulator: CN215770712U[P]. 2022-02-08.
[22] 高晋文，王克胜，段星辉，等. 一种 GIS 盆式绝缘子：CN209729633U[P]. 2019-12-03.
GAO Jinwen, WANG Kesheng, DUAN Xinghui, et al. A GIS basin insulator: CN209729633U[P]. 2019-12-03.
[23] BAUM E A, LEWIS T J, TOOMER R. The lateral motion of charge on thin films of polyethylene terephthalate[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1978, 11(6): 963-977.
[24] 高 宇. 聚合物电介质表面电荷动态特性研究[D]. 天津：天津大学，2009.
GAO Yu. Dynamic behavior of surface charge on polymer insulating materials[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2009.
[25] PAN Z J, TANG J, HU B L, et al. Inversion algorithm for surface charge distribution on insulator in shift-invariant system based on constrained least square filter[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6010212.
[26] 潘子君，潘 成，唐 炬，等. 基于图像复原技术与约束最小二乘方滤波器的绝缘子表面电荷反演算法[J]. 电工技术学报，2021，36(17)：3627-3638.
PAN Zijun, PAN Cheng, TANG Ju, et al. Inversion algorithm for surface charge on insulator based on image restoration technology and constrained least square filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3627-3638.
[27] 张博雅，张贵新. 直流 GIL 中固-气界面电荷特性研究综述 I：测量技术及积聚机理[J]. 电工技术学报，2018，33(20)：4649-4662.
ZHANG Boya, ZHANG Guixin. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, part Ⅰ: measurement and mechanisms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(20): 4649-4662.
[28] 邓军波，董俊豪，陈俊鸿，等. SF_6 替代气体界面绝缘特性的研究进展[J]. 高电压技术，2022，48(2)：661-673.
DENG Junbo, DONG Junhao, CHEN Junhong, et al. Research advances in interface insulation characteristics of SF_6 alternative gases[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 661-673.
[29] 杨 为，朱太云，田 宇，等. 直流电压下盆式绝缘子电荷积聚与电场过渡特性[J]. 高电压技术，2020，46(6)：1978-1985.
YANG Wei, ZHU Taiyun, TIAN Yu, et al. Charge accumulation and electric field transition characteristics of basin insulator under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 1978-1985.
[30] 王邸博. 直流电压下聚四氟乙烯表面电荷的聚散及其对闪络特性的影响[D]. 重庆：重庆大学，2015.
WANG Dibo. Accumulation and decay of surface charge on PTFE under DC voltage and its influence on flashover[D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2015.
[31] 罗 毅，唐 炬，潘 成，等. 直流 GIS/GIL 盆式绝缘子表面电荷主导积聚方式的转变机理[J]. 电工技术学报，2019，34(23)：5039-5048.
LUO Yi, TANG Ju, PAN Cheng, et al. The transition mechanism of surface charge accumulation dominating way in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 5039-5048.
[32] 高观志，黄 维. 固体中的电运输[M]. 雷清泉，译. 北京：科学出版社，1991.
GAO Guanzhi, HUANG Wei. Electrical transport in solids[M]. LEI Qingquan, trans. Beijing, China: Science Press, 1991.
[33] 张冠军. 真空中固体绝缘材料沿面闪络的起始机理与发展过程[D]. 西安：西安交通大学，2001.
ZHANG Guanjun. Initiating mechanism and developing process of surface flashover along solid insulating materials in vacuum[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2001.
[34] 杨嘉祥，池晓春. 电工电子材料物性理论[M]. 北京：机械工业出版社，1996.
YANG Jiaxiang, CHI Xiaochun. Physical property theory of electrical and electronic materials[M]. Beijing, China: China Machine Press, 1996.
[35] 刘孟佳，周福升，陈铮铮，等. 采用等温表面电位衰减法表征 LDPE 与 HDPE 内陷阱的分布特性[J]. 中国电机工程学报，2016，36(1)：285-291.
LIU Mengjia, ZHOU Fusheng, CHEN Zhengzheng, et al. Characterizing trap distribution in LDPE and HDPE based on isothermal surface potential decay measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 285-291.
[36] 王天宇，李大雨，侯易岑，等. SiO_2 纳米颗粒表面接枝对环氧树脂纳米复合电介质表面电荷积聚的抑制[J]. 高电压技术，2020，46(12)：4129-4137.
WANG Tianyu, LI Dayu, HOU Yicen, et al. Suppression of surface charge accumulation of epoxy resin nanocomposites by SiO_2 Nano-particle surface grafting[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(12): 4129-4137.
[37] 杜乾栋，赵军平，吴治诚，等. 直流 GIL 盆式绝缘子的表面电荷分布[J]. 高压电器，2018，54(5)：119-126.
DU Qiandong, ZHAO Junping, WU Zhicheng, et al. Surface charge distribution of DC GIL basin-type insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 119-126.
[38] KINDERSBERGER J, LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid-part I: simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 941-948.
[39] KINDERSBERGER J, LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid-part II: measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 949-957.



胡伯立
1998—，男，硕士
主要从事绝缘材料表面电荷聚散特性的研究工作
E-mail: 1309352958@qq.com
HU Boli



潘子君
1993—，男，博士
主要从事绝缘材料表面电荷聚散特性的研究工作
E-mail: panzijun@whu.edu.cn
PAN Zijun
Ph.D.



潘 成(通信作者)
1986—，男，博士，副教授，博导
主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作
E-mail: pancheng2036@gmail.com
PAN Cheng
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2022-02-10 在线出版日期 2022-07-26 编辑 曹昭君