

交直流电场下油纸绝缘中的空间电荷积累特性

周桂月, 朱昕阳, 尹毅*

(电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240)

Characteristics of Space Charge Accumulation in Oil-paper Insulation Under AC and DC Electric Fields

ZHOU Guiyue, ZHU Xinyang, YIN Yi*

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion (Shanghai Jiao Tong University),
Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The performance of the oil-paper (OP) insulation directly determines the operating life of the converter transformer. The investigation of space charge behavior in OP insulation under composite electric field is the key to analyze the electric field distribution and improve the insulation reliability. In this paper, space charge distribution is measured under the DC, AC and composite fields in the OP specimens with different aging degrees. By comparing the space charge distribution characteristics of composite field and single field, the role of different types of electric fields in the process of charge transport is analyzed. On this basis, the charge accumulation mechanism under the AC field is studied with the consideration of the non-uniformity of OP insulation. The results show that the periodic reversal of the electric field leads to a charge hysteresis phenomenon under the AC field, and the difference of material properties leads to the different contribution of charge injection and charge hysteresis in the space charge distribution. The charge accumulation under the AC field varies with the frequency of the applied field, which is essentially the performance of the carriers with different mobility selected by the frequency. The effects of directional migration under the DC component and charge hysteresis under the AC component are both reflected in the charge distribution under the composite field. The increase of the frequency promotes the charge accumulation under composite field. Exploring the characteristics of charge accumulation under composite field provides support for the further study on the insulation degradation under working conditions.

KEY WORDS: AC field; space charge; charge hysteresis; heterogeneous medium; carrier mobility

摘要: 换流变压器阀侧绕组需承受交直流复合电场, 研究油纸绝缘在复合电场下的电荷输运行为是掌握工况环境下的电场分布进而提高绝缘可靠性的必经之路。对不同老化程度油纸绝缘试样进行直流、正弦及交直流复合电场下的空间电荷检测, 通过对比复合场与单一场下的电荷分布, 分析不同类型电场分量承担的作用, 并考虑非均一介质的局域态特性, 研究空间电荷积累机制。结果表明: 交流电场下存在电荷迟滞现象, 材料本身的性质差异导致电荷注入和电荷迟滞在空间电荷分布中的贡献程度不同。交流电场下电荷积累量随外施电场频率变化, 其本质上是电场频率对不同迁移率的载流子的筛选结果。复合电场下直流分量作用于电荷的定向迁移作用与交流分量的电荷迟滞作用在电荷分布中均有体现, 交流分量频率上升使得电荷积累量上升。油纸绝缘在复合电场下的电荷积累特性研究为进一步探究实际工况下的绝缘老化机理提供支撑。

关键词: 交流电场; 空间电荷; 电荷迟滞; 非均一介质; 迁移率

0 引言

换流变压器是特高压输电系统中实现整流和逆变的核心设备, 其阀侧绕组需同时承受直流、工频基波及多次谐波复合电场的作用^[1-2]。在极其复杂的电场下, 油纸绝缘作为变压器的主绝缘, 其电荷输运的行为直接决定了绝缘性能, 从而决定了变压器的运行可靠性, 因此, 探究油纸绝缘在复合电场下的老化机理对于维护变压器的安全稳定运行具有重要意义。

目前, 国内外已普遍认可空间电荷是决定复杂工况下固体绝缘老化和寿命的关键因素^[3], 针对油纸绝缘中的空间电荷积累特性进行了细致且深入的研究, 并形成了较为成熟的分析方法和理论成

基金项目: 国家自然科学基金(重点项目)(51737009)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (Key Program)(51737009).

果。郝建等研究了不同水分含量对电荷分布的影响,发现水分含量越高加压过程中正负电荷的注入量越大,撤去电压后陷阱电荷的消散速率也越快^[4]。王霞等通过控制上下电极间的温差,针对温度梯度对空间电荷效应的影响进行了实验和仿真研究,发现低温电极侧呈现异极性电荷积累,温度梯度上升和电场力增大使得电场畸变率上升,空间电荷积累主要与受温度影响的电荷注入和传导过程相关^[5]。周远翔等通过制备不同老化程度的试样研究了热老化对空间电荷行为以及介电常数、电导率等其他特性的影响,未老化试样中的电荷积累以同极性注入电荷为主,而老化试样中异极性离子电荷起主导作用,热老化使得试样中产生了大量浅陷阱,导致老化程度更高的试样中电荷衰减更快^[6]。黄猛等研究了极性反转过程中的空间电荷特性,发现极性反转前注入电荷在极性反转后缓慢衰减是电场增强的主要原因,且反转周期越短空间电荷效应越强,将会对绝缘可靠性产生显著影响^[7]。

与直流电场下的测试不同,交流电场下空间电荷直接检测技术中所存在的信噪比差、检测相位分辨率低以及原始数据的相位识别与恢复处理难等问题均是未彻底解决或处理方法未得到广泛推广应用的技术难题^[8-11]。吴建东等采用自动均分移相(automatic equal phase shift, AEPS)原理用于周期电场下的空间电荷检测^[12-14],其核心思想是利用不同频率周期信号与检测脉冲之间的多周期重合关系对连续若干个交流周期的信号进行移相顺序采集,从而突破检测脉冲源频率的限制实现高相位分辨率的电荷检测。基于 AEPS 原理对工频电场下油纸绝缘中的空间电荷特性进行研究^[15],所用检测脉冲频率为 2010Hz,相位分辨率为 1.79°,结果表明,电场正负半周内空间电荷几乎成对称分布,下电极附近存在同极性注入电荷积累,电荷极性随外施电场快速变化。受限于周期电场下的空间电荷直接检测技术,难以获取交变电场下高相位分辨率的空间电荷分布信息,针对电荷在交流电场下的分布特性及其动态响应过程的研究仍然停留在简单现象描述阶段,欠缺系统的实验测试和机理分析。值得一提的是,基于 AEPS 原理的空间电荷检测技术为实现周期电场下高相位分辨率的空间电荷检测提供了途径^[16-17],特别是为高频电场下的空间电荷特性研究提供了技术支持。

变压器实际运行中由于绝缘结构的差异、运行

温度上升以及水分含量变化等因素均会影响绝缘中的空间电荷行为,本文主要针对电场应力对电荷行为的影响进行研究,考虑由绝缘老化引起的材料微观和宏观性能变化对电荷运输过程的影响,以不同老化程度的油纸绝缘试样为研究对象。首先,基于单一类型电场下的电荷分布特性分析不同类型电场力下的电荷响应特征,重点探究电荷响应关于交变电场应力的跟随特性;然后,研究复合电场下电荷分布的性质和来源。在此基础上,结合油纸绝缘的电导机理和陷阱分布特征,分析交流电场下的电荷积累机理。研究结果可为实际工况中的空间电荷特性研究提供理论支撑。

1 理化及介电性能测试

1.1 试样制备

本文所用绝缘纸为温州朝阳绝缘材料厂生产的纤维素纸板,厚度为 260 μm ,所用绝缘油为克拉玛依 25 号矿物油。试样预处理流程为:

1) 绝缘纸置于 110 $^{\circ}\text{C}$ 下真空干燥 24h,绝缘油经砂芯漏斗(滤孔为 15~40 μm)过滤后置于 40 $^{\circ}\text{C}$ 下真空干燥 24h;

2) 将干燥后的绝缘纸浸入绝缘油,在 40 $^{\circ}\text{C}$ 下真空静置 48h,确保浸油充分。

预处理后的油纸绝缘试样经卡尔费休水分仪检测水分含量为 0.28%,满足变压器出厂时关于绝缘水分含量的要求。预处理后的试样置于耐高温的高硼硅广口磨砂玻璃瓶中密封,在 130 $^{\circ}\text{C}$ 下老化 40d,每隔 10d 取样进行理化和介电性能测试。

1.2 断面形貌观测

由于纤维素纸板质地较韧,采用直接脆断的方式可能会改变纸和孔隙的原始排布,因此先采用三离子束切割技术对试样进行处理,再用扫描电子显微镜观察,最大程度还原试样原始断面形貌。

1.3 红外光谱测试

对不同老化程度的油纸绝缘试样进行红外光谱测试。所测光谱范围为 4000~400 cm^{-1} ,分辨率优于 0.09 cm^{-1} ,扫描次数为 32 次。为排除绝缘油的影响,测试前先用正己烷将样品中的油萃取出来,并对试样进行真空干燥处理。由于组成纸绝缘的成分除了纤维素之外还包含少量的半纤维素和木质素,且纤维素本身是半结晶材料,因此纸绝缘的结构分布是不均匀的。为减少测试结果的分散性,每种试样上选取 3 个不同的测试点,取其平均值作为

最终结果。

1.4 空间电荷分布的直接检测

采用基于电声脉冲法(pulsed electroacoustic, PEA)和 AEPS 原理的空间电荷测试系统,在直流、正弦交流以及直流-正弦复合电场下对不同老化程度油纸绝缘试样中的空间电荷分布进行检测。检测系统示意图如图 1 所示。上下电极分别为半导体电极和铝电极,高压信号施加在半导体电极侧,而铝电极侧接地,规定矢量正方向为从下至上。空间电荷测试过程中,关键电压信号通过双通道信号发生器来控制。双通道信号发生器可输出两路相互独立的电压信号,其中一路为直流或交流周期信号,经高压放大器放大后施加在试样上,另一路输出 TTL 电平信号,同时控制脉冲源产生脉冲激励和示波器触发采集原始信号。为获取交流电压信号对应的相位信息,原始信号的采集分为 PEA 信号和高压输入信号两部分,由示波器同步采集用于后期 PEA 原始信号的相位识别处理。

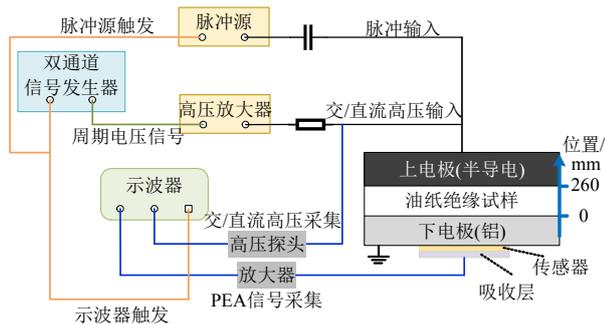


图 1 空间电荷检测系统示意图

Fig. 1 Schematic of space charge detection system based on PEA method

直流电场下 PEA 信号的检测策略与传统检测中并无二致,而正弦电场下的信号检测需考虑电荷响应的相位特性。根据 AEPS 原理的相位交互均分特性,理论上 AEPS 检测技术适用于周期电场和检测脉冲频率满足特征方程的任意方案设置,然而在低频电场下即便是相邻周期内的电荷动态响应也存在较大差异,若此时仍然采用多个连续周期电场下的信号进行平均将会增大数据处理的误差。因此,对于频率低于 1Hz 的正弦电场,采用脉冲簇法可保证完整原始信号的采集在单个周期内完成,减小数据误差。正弦电场的频率测试范围为 $10^{-2} \sim 10^4$ Hz,相位分辨率约为 1.8° ,具体检测方案参照文献[18]设置。

为避免试样间的差异给实验结果的对比分析造成影响,不同类型电场下的测试在同一片试样上

完成,因此加压极化后,需设置充分的短路时间以消除空间电荷积累的影响,具体方案如下:首先,在工频 3kV/mm 正弦电场下测试参考信号用以原始数据的处理;接着,按照频率从高至低的顺序依次进行不同频率正弦电场下的测试,电场峰值为 10kV/mm,每个频率电场下极化 30min 后短路 10min;再进行 10kV/mm 直流场下的测试,加压 30min 后短路 30min;最后,进行直流-正弦复合电场下的测试,保持正弦分量峰值为 10kV/mm 不变,按照正弦分量频率从高至低、直流分量幅值从低至高的顺序依次进行,每个电场下加压 30min 后短路 30min。整个测试流程不间断完成,测试前后试样中水分含量的波动不超过 0.04%,可忽略测试过程中水分变化对电荷输运的影响。

1.5 准稳态电导测试

研究表明,油纸绝缘中电荷注入的起始电场约为 1kV/mm^[19],因此准稳态电导特性的研究范围为 1~30kV/mm,各电场下极化后短路 30min 以保证电荷释放完全再进行更高电场下的测试,取每个电场下极化 600s 时刻的电流数据作为准稳态电流(极化 300s 左右电流已趋于稳定,忽略位移电流,此时外电流近似等于传导电流)。

2 不同类型电场下的空间电荷分布

界面处的电荷由电极注入电荷、内部电荷的感应电荷和电场极化的感应电荷这三部分组成,其中:1) 电极注入电荷反映了界面对电荷的阻挡能力,是试样内部产生空间电荷积累的主要来源之一;2) 内部电荷的感应电荷极性与电极注入电荷极性相反,其数值取决于试样中的空间电荷分布,即间接受注入电荷影响,两者无法简单区分;3) 电场极化的感应电荷属静电场电荷,依据其与电场强度之间的线性关系可将其与电荷输运的动态响应区分开,如式(1)所示^[20]。下文中的空间电荷分布均去除了极化电场的感应电荷。

$$\rho_{\text{acc}}(x) = \rho_{\text{app}}(x) - \frac{V_{\text{app}}}{V_{\text{ref}}} \rho_{\text{ref}}(x) \quad (1)$$

式中: V_{ref} 和 V_{app} 分别为参考和极化测试时施加的电压; ρ_{ref} 和 ρ_{app} 即为相应外施电场下的空间电荷分布信息; ρ_{acc} 为去除容性极化电荷后试样中的电荷分布信息。

2.1 直流电场下的空间电荷分布

直流电场下加压和短路过程中不同老化程度

试样内部的空间电荷时空分布特性如图 2 所示。为展示时间尺度上的电荷动态响应，时间轴采用对数坐标表示。加压过程中：未老化试样中以同极性注入电荷积累为主，极化 10s 左右，电荷分布达到动态平衡；老化试样中两侧界面附近均存在明显的异极性电荷积累，极化 100s 左右，空间电荷分布趋于动态平衡。老化 20d，试样内部以右侧电极注入的正极性电荷为主，而老化 40d，试样内部左侧电极注入的负极性电荷占据主导地位。撤去电压后，起初 3 种试样的界面附近均呈现同极性电荷积累。未老化试样界面附近在整个去极化的过程中始终表现为同极性电荷的单调衰减，并在短路 100s 左右电荷衰减至噪声水平；但老化试样界面附近很快显示出异极性电荷积累，且异极性电荷分布区域在短路过程中呈现出先增大再缓慢消失的变化趋势，试样内部的电荷在短路 1000s 左右衰减至噪声水平。

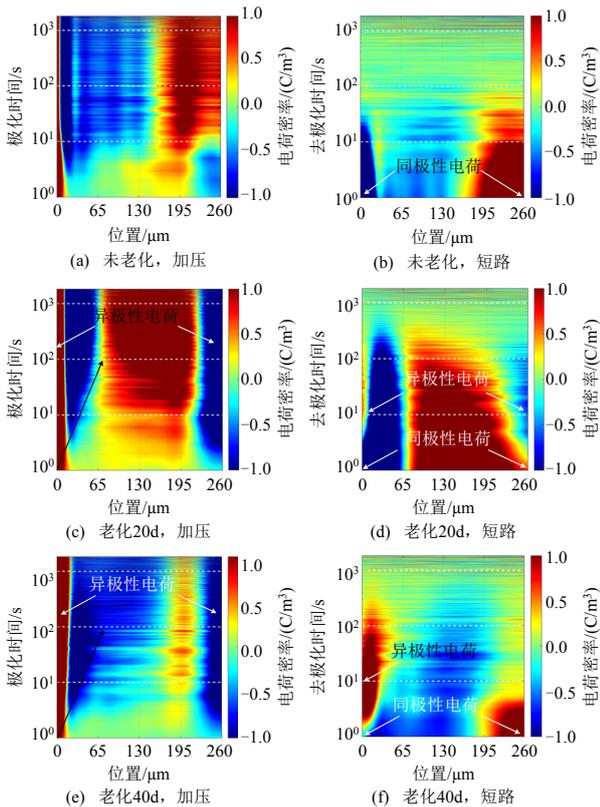


图 2 10kV/mm 直流电场下的空间电荷分布
Fig. 2 Charge distribution under the DC field of 10kV/mm

不同老化程度试样的红外光谱特性如图 3 所示。O—H 和 C—O—C 吸收强度下降表明老化过程中氢键被破坏，糖苷键断裂，分子间和分子内的作用力下降。老化试样中出现了 C=O 吸收峰，是纤维素老化的特征官能团，且其吸收强度随着老化加剧而增大。推测热老化过程中生成的老化副产物作

为杂质存在，解离后产生的带电粒子在电场下定向迁移导致老化试样的界面附近出现异极性电荷积累。无外施电场情况下的电荷松弛过程能够直观地反映试样内部的陷阱能态分布，电荷滞留的时间和电荷残留量分别对应陷阱的深度和密度。这里暂且定性分析：相同时刻老化试样中残留的电荷量更多，反映了热老化使绝缘中的深陷阱密度增大，老化试样中电荷衰减所需的时间越久则反映了热老化导致油纸绝缘中深陷阱的能级更深。

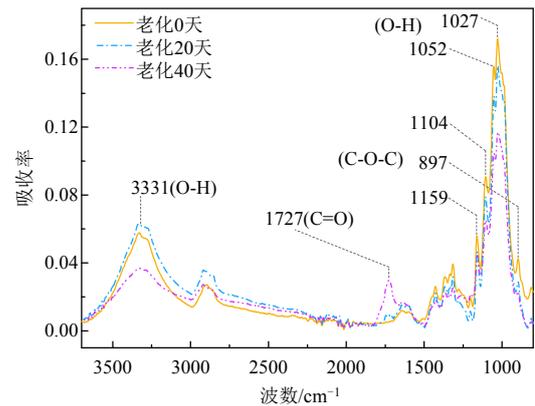


图 3 不同老化程度试样的红外光谱特性
Fig. 3 Infrared spectrum of samples with different aging degrees

2.2 正弦电场下的空间电荷分布

图 4 所示为未老化试样在工频正弦电场下加压初始时刻一个完整周期内的空间电荷分布。交流电压施加在右侧，左侧接地。可见，加压初始时刻电荷分布充斥了整个试样，左侧界面附近主要为同极性电荷积累，右侧界面附近分布大范围的异极性电荷积累。电荷分布的极性跟随外施电场极性迅速变化，表明试样中存在快速移动的电荷。

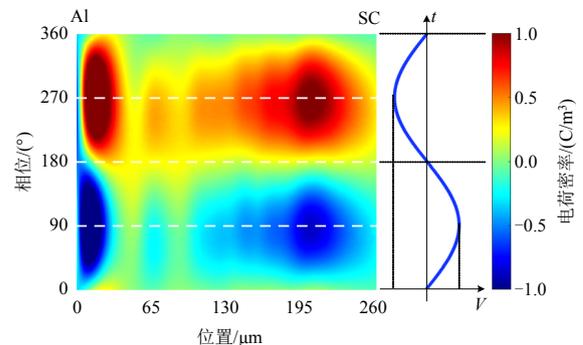


图 4 10kV/mm 工频电场下未老化试样种的空间电荷分布
Fig. 4 Charge distribution of fresh specimen under the 50Hz AC field of 10kV/mm

不同老化程度试样在不同频率正弦电场下极化 30min 后一个完整周期内的电荷分布如图 5 所示。在 10⁻²Hz 电场下，空间电荷分布随外施电场相

位的变化特性显示出电荷在交变电场应力作用下的迁移轨迹，即前半周期注入的电荷滞留到后半周期形成异极性电荷积累，将这种现象称为交流电场下的电荷迟滞现象。同极性的电荷注入和异极性的电荷迟滞共同决定了交流电场下的空间电荷分布特性，具体表现为：1) 对于未老化试样，右侧界面注入电荷占据主导地位，电荷迟滞现象也更显著。随着电场频率升高，电荷分布的相位变化特性虽不再显示出明显的电荷迁移轨迹，但相应区域内电荷积累的极性基本不变，电场频率对电荷分布的类型影响不大。2) 对于老化 20d 试样，左侧电极注入电荷占据主导地位，电场频率升高后左侧界面附近为同极性电荷积累，试样中部为左侧注入电荷形成的异极性迟滞电荷积累，而右侧界面为异极性电荷积累。3) 对于老化 40d 试样，左侧界面附近的同极性注入电荷积累区进一步扩大，两侧界面附近均为同极性电荷积累。另外，除了 10^{-2}Hz 频率电场外，老化试样的界面附近未显示出类似于直流场下的杂质解离引起的异极性电荷积累现象。

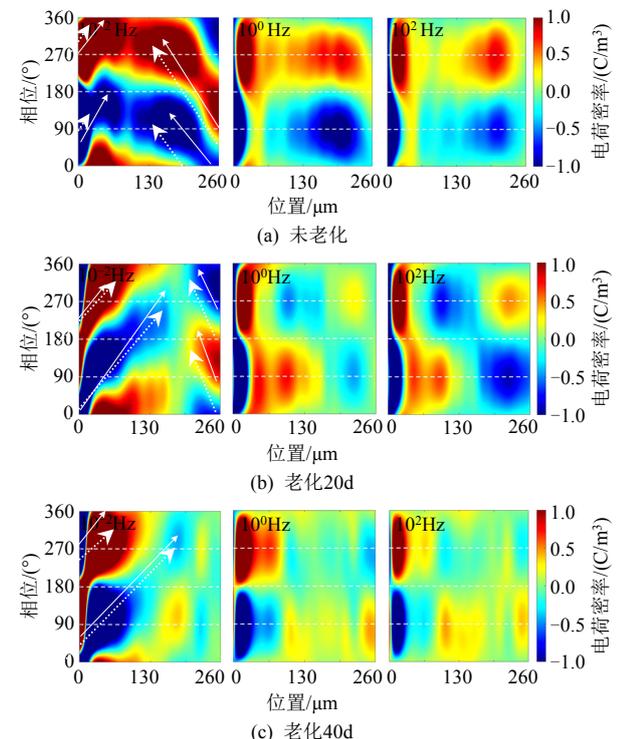


图5 10kV/mm 正弦电场下的空间电荷分布

Fig. 5 Charge distribution under the AC field of 10kV/mm

基于上文分析可知，电荷迟滞现象是交变应力作用下电荷分布更加复杂的主要原因。当前周期注入电荷与前半周期的迟滞电荷极性相反，加之由试样本身微观和宏观介电性能的差异导致两种类型

的积累电荷在电荷分布中所占的贡献程度不同，使得净电荷分布呈现多样化，对试样中电场分布的影响也将更加复杂。

2.3 交直流复合电场下的空间电荷分布

以未老化试样和老化 40d 试样为例，在 5kV/mm 直流叠加 10kV/mm 正弦电场下，交流分量频率对两种试样中电荷分布的影响如图 6 所示，图中黑色虚线表示电场过零点。当交流分量频率为 10^{-2}Hz 时，前半周期注入电荷的分布重心向后半周期偏移，且老化试样中的偏移程度更高。随着交流分量频率上升，电压正半周期注入的电荷主导了整个周期内的电荷分布，而电压负半周期注入的同极性电荷仅分布在界面附近极窄的区域内或在更高频率电场下基本消失不见。老化试样中左侧界面附近存在异极性电荷积累，但右侧界面附近无类似现象，这可能与右侧界面同极性注入电荷较多有关。因此在交直流复合电场下，交流分量的电荷迟滞作用与直流分量的电荷定向迁移作用在空间电荷分布中均有体现。

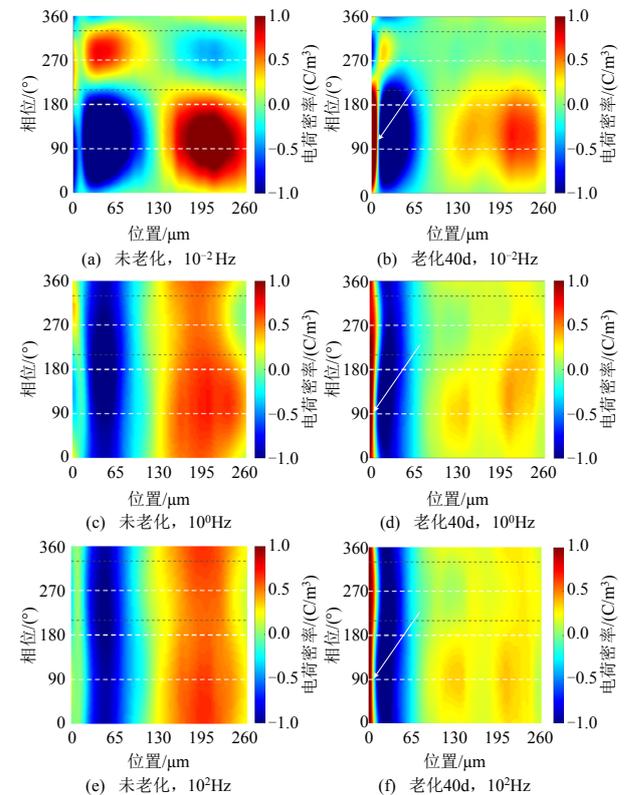


图6 5kV/mm 直流叠加 10kV/mm

不同频率正弦电场下的空间电荷分布特性

Fig. 6 Charge distribution under the composite field of DC-5kV/mm and AC-10kV/mm with different frequency

当周期内复合电场不存在极性反转时，如图 7 所示为 10kV/mm 直流叠加 10kV/mm 正弦电场下的

电荷分布特性。交流分量引起的电荷迟滞现象表现为电场过零点附近的电荷积累量随交流分量的频率升高而增大。老化试样中左侧界面附近的由直流分量作用引起的异极性电荷积累现象较直流分量为 5kV/mm 的电场下更为显著，右侧界面附近同极性电荷积累量局部下降，推测这与异极性电荷的叠加效果有关。

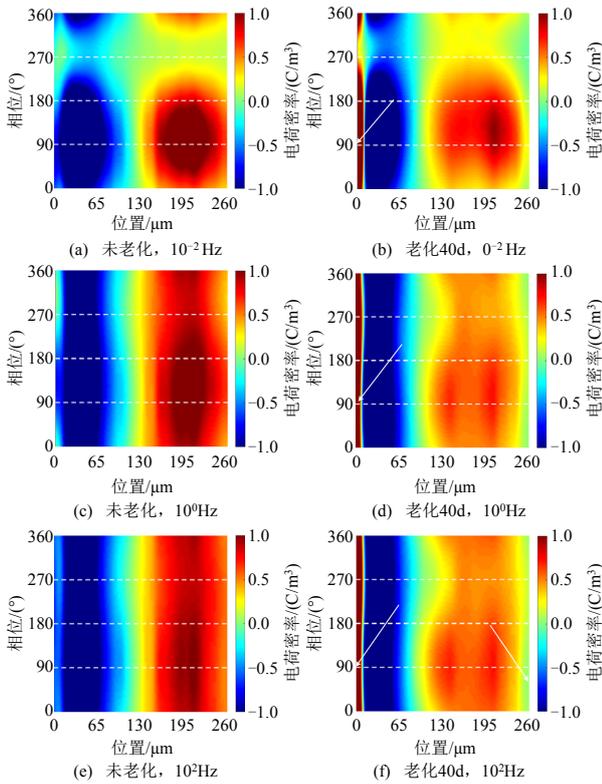


图 7 10kV/mm 直流叠加 10kV/mm 不同频率正弦电场下的空间电荷分布特性

Fig. 7 Charge distribution under the composite field of DC-10kV/mm and AC-10kV/mm with different frequency

3 空间电荷积累机理

基于上文空间电荷分布特性，以未老化和老化 40d 试样为例，考虑复合绝缘的非均一特性，对油纸绝缘的微观和宏观介电性能进行分析，进一步研究交流电场下的电荷积累机制。

3.1 油纸绝缘的电导机理

根据固体绝缘的空间电荷限制电流(space charge limited current, SCLC)理论，当注入载流子数目远超空间所能容纳的数目，就会在电极附近形成大量的同极性电荷积聚，并产生一个反向电场降低电荷的注入速率，此时必须考虑空间电荷对单位时间内从一个电极至另一个电极所通过的载流子数目的控制，即由绝缘本身的性质控制。因此，准稳态电流和外加电压的关系(即 $J-V$ 特性)，反映了

介质内部的陷阱情况。研究表明，在陷阱服从单一分立能级、禁带能隙内指数分布或高斯分布等典型物理模型下，双对数坐标中 $J-V$ 特性的斜率通常大于 2^[21]。

如图 8 所示，对两种试样的电流数据进行拟合，发现油纸绝缘的 $J-V$ 特性也由低场下的欧姆机制和高场下的 SCLC 机制构成。值得一提的是，SCLC 区 $J-V$ 特性的斜率明显小于 2，且老化试样的斜率更低。推测这是由于油纸绝缘的复合结构决定了其电导机理与一般聚合物绝缘存在不同。当注入的自由电荷密度快速增长时，一部分电荷在纸绝缘分布的陷阱中入陷，电流变化符合受陷阱控制的空间电荷限制电流，另一部分电荷在油中参与传导，符合液体电导模式。一般油中电导主要形式为离子电导，离子迁移率 μ 可表示为

$$\mu = \frac{\delta v}{6F} \exp\left(-\frac{u_0}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{\Delta u}{kT}\right) - \exp\left(-\frac{\Delta u}{kT}\right) \right] \quad (2)$$

式中： F 为电场强度； k 为 Boltzmann 常数； δ 为离子平均跃迁距离； u_0 为跃迁所需克服的平均势垒； v 为相对热振动频率； Δu 为电场作用下的势垒变化，定义为 $\delta qF/2$ 。

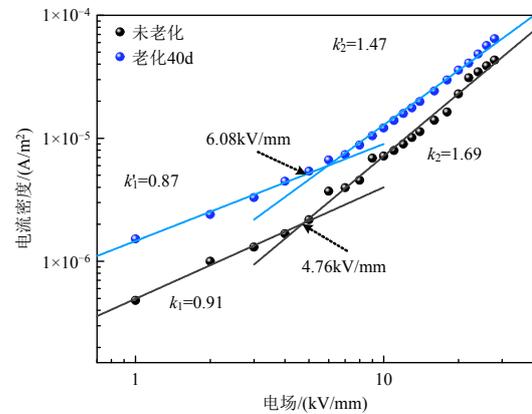


图 8 油纸绝缘的 $J-V$ 特性

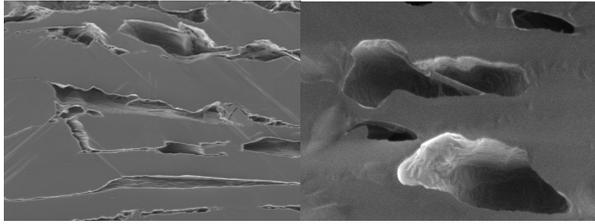
Fig. 8 $J-V$ characteristics of oil-impregnated paper

在非极高电场下，即 $\Delta u \ll kT$ 时，有：

$$\exp\left(\pm \frac{\Delta u}{kT}\right) \approx 1 \pm \frac{\Delta u}{kT} \Rightarrow \mu = \frac{q\delta^2 v}{6kT} \exp\left(\frac{u_0}{kT}\right) \quad (3)$$

可认为离子迁移率与场强无关，即电流正比于电场强度，液体电导遵循欧姆定律。推测复合绝缘中的液体电导成分中和了固体绝缘电导的非线性特性，从而导致 $J-V$ 特性的第二段拟合斜率小于 2。

图 9 所示为不同状态的油纸绝缘试样在相同放大倍数(SEM MAG: 6.67kx)下的断面形貌，可见老化试样中的孔隙明显大于未老化试样。据此可推



(a) 未老化 (b) 老化 40d

图9 不同状态油纸绝缘的断面形貌

Fig.9 Section morphology of the specimens

测, 老化试样中的液体电导成分所占比例更大, 对固体绝缘电导非线性特征的抑制作用更强, 使得图8中 $J-V$ 特性的斜率更小。

3.2 油纸绝缘中的陷阱分布特性

根据 J.G.Simmons 的等温松弛电流理论^[22], 捕获电荷的能级与电荷松弛时间 t 存在如下关系:

$$E_t = kT \ln(vt) \quad (4)$$

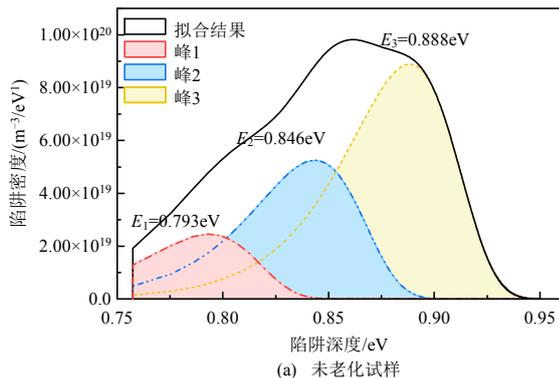
式中: v_0 为试图逃逸频率; E_t 为陷阱能级。式(4)表明, 在 t 时刻, 能级为 E_t 的陷阱电荷释放对松弛电流的贡献最大。松弛电流与松弛时间和对应能级的陷阱密度之间存在如下关系:

$$J = \frac{eLkT}{2t} f_0(E)N(E_t) \quad (5)$$

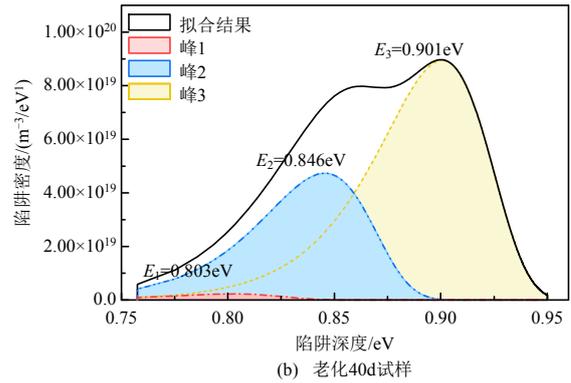
式中: $f_0(E)$ 为陷阱的初始占有率, 设为 0.5; $N(E_t)$ 为能级为 E_t 的陷阱密度。

联立式(4)和(5)可得到所测松弛时间范围内的陷阱能级分布, 对去极化电流进行分峰拟合可以定量分析材料内部的主要陷阱能级。

图10所示为采用三阶指数衰减模型拟合(拟合优度大于98%)处理后的陷阱能级分布结果。在1~1800s 时间范围内, 对应的陷阱深度范围为0.757~0.950eV, 即所测松弛电流为深陷阱电荷释放形成。未老化中存在3个明显的陷阱能级分布峰, 而老化40d 试样中峰1基本消失不见, 且3个特征陷阱能级峰略微右移。



(a) 未老化试样



(b) 老化40d试样

图10 试样内部的陷阱能级分布

Fig.10 Characteristics of trap energy distribution

为定量评估老化对纸绝缘缺陷的影响, 基于加权平均的概念来计算平均陷阱深度用于表征老化对试样陷阱深度的影响:

$$\bar{E} = \left[\sum_{E=E_1}^{E_2} E \cdot N(E) \right] / \left[\sum_{E=E_1}^{E_2} N(E) \right] \quad (6)$$

式中 E_1 和 E_2 分别表示所测松弛电流时间窗口对应的深陷阱能级范围的区间端点。

平均陷阱密度为

$$\bar{N} = \frac{1}{E_2 - E_1} \int_{E_1}^{E_2} N(E) dE \quad (7)$$

表1所示为两种试样内部深陷阱的评估结果。对于能级在0.757~0.950eV 之间的深陷阱, 热老化导致试样内部深陷阱的平均能级增大, 平均密度减小, 但能级最深的特征陷阱(峰3)其陷阱密度上升。因此, 热老化处理向油纸绝缘中引入了深陷阱, 或使原本深陷阱的能级更高。

表1 两种试样内部的深陷阱评估

Table 1 Evaluation of deep traps in the two samples

试样类型	平均陷阱	平均陷阱密度/(m ⁻³ eV ⁻¹)	
	深度/eV	峰3	总
未老化	0.89	3.20×10 ¹⁹	5.74×10 ¹⁹
老化40d	0.91	3.23×10 ¹⁹	4.96×10 ¹⁹

图8中 $J-V$ 特性从欧姆区过渡到 SCLC 区的阈值电场反映了试样内部的陷阱密度特性, 阈值电场越高, 陷阱密度越大^[21]。由图8可知, 老化试样中的陷阱密度更大, 而表1显示能级在0.757~0.950eV 之间的深陷阱密度更小, 因此, 推测老化主要增大了浅陷阱的密度。受限于测试系统硬件响应的限制, 撤去电压瞬间的电荷衰退特性无法捕获到, 因此通过对比加压末期与短路初期的电荷差量可以评估试样中快速移动的电荷量, 即与浅陷阱交互的电荷。图11所示为在10kV/mm 直流电场下极化

1800s 后加压至短路过渡过程中试样中平均体电荷密度的变化特性，其中加压过程中的电荷密度去除了极化电场的感应电荷，可以和短路时的电荷进行比较。可见，老化试样中的浅陷阱电荷量明显高于未老化试样，证实了上述热老化主要增大了油纸绝缘内部浅陷阱密度的推测是合理的。

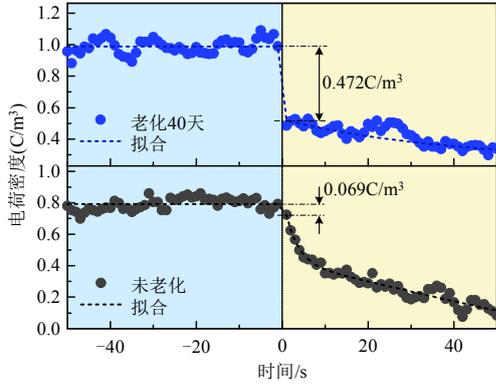


图 11 加压至短路过程中的平均体电荷密度变化
Fig. 11 Characteristics of mean volumn charge density during polarization to short circuit

3.3 交流电场下的电荷积累特性

试样中的平均体电荷密度根据极化 1800s 时刻的电荷分布来计算，该参量可用于评估试样在准稳态电场环境下的电荷积累能力。对于直流电场，取极化末期 30s 内的平均值定义为准稳态电荷积累量。对于交流电场或交直流复合电场，由于电荷响应存在周期变化特性，因此，考虑用平均体电荷密度在最后一个极化周期内的均值来评估交流电场下的长期电荷积累水平。计算公式如下：

$$\bar{q}_{DC} = \frac{1}{L} \int_0^L |q(x, t)| dx \quad (8)$$

$$\bar{q}_{AC} = \frac{1}{2\pi L} \int_0^{2\pi} \int_0^L |q(x, \theta)| dx d\theta \quad (9)$$

式中： L 为试样有效厚度； θ 为外施电场的相位； q 为电荷密度分布。

正弦和交直流复合电场下电荷积累量与频率的关系如图 12 所示，与直流场下的准稳态电荷量对照展示，其中理论叠加表示与复合场对应的单一类型电场下的电荷积累量之和。由图 12 可知，直流场下老化试样中的电荷积累量略高于未老化试样，这主要和界面附近大量异极性电荷积累相关；交流电场下，老化试样中的电荷积累量略低于未老化试样，两种试样中的电荷积累量随频率的变化趋势一致：正弦电场下电荷积累量随频率的上升而下降，复合电场下变化特性相反。整体而言，正弦电

场下的电荷积累量低于直流场。复合电场下的电荷积累量远高于相应单一类型电场下的代数和。推测这与电荷注入能力有关：油纸绝缘的电荷注入特性可用 Schottky 注入机制描述^[18]，此时注入电荷密度随外施电场强度增大加速上升，即复合电场下的电荷注入能力高于单一场下的注入能力之和，导致电荷积累量更高。

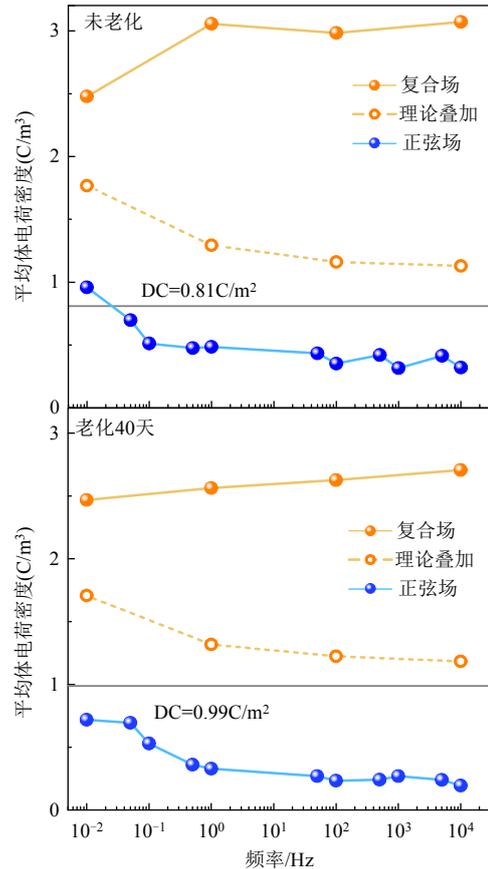


图 12 电荷积累量与交流场频率的关系

Fig. 12 Charge accumulation vs the frequency of AC field

由于电场方向控制电荷的运动方向，正弦电场下理论上电荷在单周期内向内迁移的有效时间最大不超过二分之一周期，当不考虑陷阱效应时外施电场频率越高，注入电荷向内迁移的有效距离越短，可用式(10)来评估有效迁移距离与载流子迁移率和电场频率的关系^[17]：

$$\Delta x = \mu F_{rms} / (2f) \quad (10)$$

式中： F_{rms} 为正弦电场的有效值； f 为频率。

由式(10)可知，对于特定频率下的正弦电场，试样中能够检测到的载流子其迁移率范围是有限的，具体而言：1) 当迁移率过低时，注入电荷因其有效迁移距离太短而导致电荷多积聚在界面附近，若有效迁移距离小于测试系统的空间分辨率，

则该部分电荷就无法被检测到。换言之,若特定电场频率下试样中能够观察到明显的电荷分布,该部分电荷的有效迁移率一定存在一个下限值,按照有效迁移距离为试样厚度的二分之一来算,该下限值可用式(11)表示^[18]。2)当迁移率过高时,大部分注入电荷能在电场反转前到达对面电极抽出,即高迁移率的电荷能残留在试样中的比例较少。因此在特定电场频率下试样中被检测到的大部分电荷,其迁移率在对应的下限值附近。

$$\mu_{\min} = L/fF_{\text{rms}} \quad (11)$$

空间电荷测试结果显示宽频率范围正弦电场下均可检测到明显空间电荷分布,这表明油纸绝缘内部载流子的有效迁移率无法用单一迁移率描述,能够检测到空间电荷分布的外施电场频率范围对应了载流子的迁移率范围。3.1节中指出电荷在油纸绝缘中的传导符合液体电导和固体电导共同作用的传导机理,这表明绝缘内部不同位置处的局域态存在差异,即对于油纸绝缘这种复合结构材料,电荷迁移至某个局域态时,或继续以原来的速率迁移或加快速率或降低速率这是不完全确定的。因此,当绝缘不能简化成均一介质时,载流子的传导过程也不能简化成单一迁移率模式。电荷积累量随频率的变化特性实质上是绝缘中存在宽范围迁移率的载流子现象的表现形式,不同频率电场下的电荷积累量是电场频率对不同迁移率载流子的筛选结果。根据3.2节中的陷阱分布情况可知,老化40d试样中自由移动电荷更多,使得注入电荷向内传导更快,导致同极性注入电荷与异极性迟滞电荷之间的叠加效应更显著,因此老化试样中的电荷积累量略低于未老化试样。

基于上文分析,不难对复合电场下电荷积累量随频率的变化特性做出解释:直流分量使注入电荷定向迁移,注入电荷大概率能够迁移至对侧电极抽出;交流电场频率归根结底影响的是电荷的有效迁移距离,电场频率升高使得电荷的有效迁移距离降低,电荷残留在试样中的概率变大,从而表现出电荷积累量随电场频率升高而增大的趋势。

4 结论

1)交直流复合电场下的电荷分布特性受交流分量的电荷迟滞作用与直流分量的电荷定向迁移作用的共同影响。电荷迟滞作用使注入电荷的分布重心向后半周期偏移,定向迁移作用使得老化试样

中杂质离子电荷在界面附近形成异极性电荷积累。

2)正弦电场下试样中的电荷积累量均随频率的上升而下降。复合电场下的电荷积累量高于单一电场下的电荷量之和,直流分量使大量注入电荷能够定向迁移至对侧电极抽出,而交流分量频率的升高会降低电荷的有效迁移距离,使得电荷残留在试样中,导致电荷积累量随交流分量频率升高而增大。

3)电荷在油纸绝缘中的传导符合固体电导和液体电导共同作用的电导机理,且老化试样中液体电导成分所占的比例更大。热老化处理一方面向绝缘中引入了深陷阱,或使原本深陷阱的能级更高;另一方面增大了浅陷阱密度,使得直流场下老化试样中存在大量自由移动的电荷。考虑换流变压器在实际运行过程中的电热场耦合效应,对油纸绝缘进行电-热加速老化会更贴合实际,其电荷输运过程及老化机理有待进一步研究。

参考文献

- [1] 周远翔,田冀焕,王云杉,等. 变压器油纸绝缘系统中的空间电荷现象[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 520-527. ZHOU Yuanxiang, TIAN Jihuan, WANG Yunshan, et al. Space charge phenomenon in oil-paper insulation system of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 520-527 (in Chinese).
- [2] 刘洪涛,周剑,梅琪,等. 换流变压器铁心饱和型谐波不稳定分析[J]. 高压电器, 2021, 57(12): 191-194, 200. LIU Hongtao, ZHOU Jian, MEI Qi, et al. Analysis saturation harmonic instability of converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12): 191-194, 200 (in Chinese).
- [3] 周远翔,王宁华,王云杉,等. 固体电介质空间电荷研究进展[J]. 电工技术学报, 2008, 23(9): 16-25. ZHOU Yuanxiang, WANG Ninghua, WANG Yunshan, et al. Review of research on space charge in solid dielectrics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(9): 16-25 (in Chinese).
- [4] HAO Jian, CHEN G, LIAO Ruijin, et al. Influence of moisture on space charge dynamics in multilayer oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(4): 1456-1464.
- [5] ZHU Qingdong, WANG Xia, WU Kai, et al. Space charge distribution in oil impregnated papers under temperature gradient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 142-151.
- [6] ZHOU Yuanxiang, HUANG Meng, CHEN Weijiang, et al. Space charge behavior evolution with thermal aging of oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1381-1388.
- [7] THOMAS C, TEYSSÉDRE G, LAURENT C. A new

- method for space charge measurements under periodic stress of arbitrary waveform by the pulsed electro-acoustic method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 554-559.
- [8] HUANG Meng, ZHOU Yuanxiang, CHEN Weijiang, et al. Influence of voltage reversal on space charge behavior in oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 331-339.
- [9] ZHANG Siyu, CHEN G, XU Zhiqiang, et al. An improved pulsed electroacoustic system for space charge measurements under high temperatures and arbitrary waveform voltages[J]. Review of Scientific Instruments, 2019, 90(10): 105112.
- [10] BAMJI S, DAKKA M A, BULINSKI A. Phase-resolved pulsed electro-acoustic technique to detect space charge in solid dielectrics subjected to AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 77-82.
- [11] 郝建, 徐瑞林, CHEN G, 等. 直流和工频电压下油浸纸绝缘系统空间电荷特性的差异[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1166-1173.
HAO Jian, XU Ruilin, CHEN G, et al. Space charge characteristics difference of oil-impregnated paper insulation system under DC and power frequency voltage[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1166-1173 (in Chinese).
- [12] WU Jiandong, WAN Jiandong, YIN Yi, et al. Automatic equal phase shift principle for space charge measurement under periodic stress of arbitrary waveform[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(3): 1820-1828.
- [13] WU Jiandong, YIN Yi. Space charge observation under periodic stresses — Part 1: the simplest system and corresponding phase identification[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2579-2588.
- [14] WU Jiandong, MIAO Linxin, ZHOU Guiyue, et al. Space charge observation under periodic stress — Part 2: Signal improvement and corresponding procedure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1195-1203.
- [15] 黄若栋, 邓云坤, 吴建东, 等. 交直流叠加电场下油浸绝缘纸的空间电荷特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1232-1238.
HUANG Ruodong, DENG Yunkun, WU Jiandong, et al. Investigation of space charge behavior under AC-DC combined stress for oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1232-1238 (in Chinese).
- [16] 缪林鑫, 吴建东, 戴畅, 等. 热处理温度对三元乙丙橡胶交流电场特性的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 5043-5049.
- MIAO Linxin, WU Jiandong, DAI Chang, et al. Influence of thermal treatment temperature on the characteristics of ethylene propylene diene monomer under AC field[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 5043-5049 (in Chinese).
- [17] 杨帆帆, 缪林鑫, 孙国强, 等. 基于宽频正弦场空间电荷响应的陷阱评估[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 7169-7176.
YANG Fanfan, MIAO Linxin, SUN Guoqiang, et al. Trap assessment based on space charge response under broadband sinusoidal field[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 7169-7177 (in Chinese).
- [18] ZHOU Guiyue, YIN Yi, ZHU Xinyang, et al. Space charge behavior in oil-impregnated paper insulation under sinusoidal electric field with wide frequency range[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(1): 127-136.
- [19] ZHOU Guiyue, WU Jiandong, CHE Lu, et al. Moisture-dependent interface and bulk behaviour of space charge in DC-stressed oil-impregnated pressboard insulation[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2021, 15(3): 558-567.
- [20] LIU Ning, ZHOU Churui, CHEN G, et al. Determination of threshold electric field for charge injection in polymeric materials[J]. Applied Physics Letters, 2015, 106(19): 192901.
- [21] 高观志, 黄维. 固体中的电输运[M]. 雷清泉, 译. 北京: 科学出版社, 1991.
GAO Guanzhi, HUANG Wei, LEI Qingquan. Electrical transport in solids[M]. Beijing: Science Press, 1991(in Chinese).
- [22] SIMMONS J G, TAYLOR G W. Nonequilibrium steady-state statistics and associated effects for insulators and semiconductors containing an arbitrary distribution of traps[J]. Physical Review B, 1971, 4(2): 502-511.



周桂月

在线出版日期: 2022-10-31。

收稿日期: 2022-04-27。

作者简介:

周桂月(1995), 女, 博士研究生, 主要从事油纸绝缘中空间电荷行为特性的实验和仿真研究, zhou_guiyue@sju.edu.cn;

*通信作者: 尹毅(1972), 男, 教授, 研究方向为聚合物绝缘材料和技术, 高电压工程和电力系统在线检测等, yiny@sju.edu.cn。

(编辑 胡琳琳)