第 49 卷 第 1 期：301-310　　高电压技术　　Vol.49, No.1: 301-310
2023 年 1 月 31 日　　High Voltage Engineering　　January 31, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221048

极性反转电压下的油纸绝缘空间电荷特性

张金烽[1]，董　霞[1]，刘树林[2]，俞晓冬[1]，郝玲艳[1]，李　阳[3]
（1. 齐鲁工业大学(山东省科学院)信息与自动化学院，济南 250353；2. 临沂大学自动化与电气工程学院，临沂 276000；3. 中国南方电网超高压输电公司大理局，大理 671000）

摘　要：极性反转电压下换流变压器内部电场分布复杂，而空间电荷是引起电场畸变的重要因素。为研究极性反转电压下油纸绝缘空间电荷与电场分布特性，为此利用电声脉冲法开展了不同温度下单层油浸纸板与油−纸双层绝缘空间电荷试验研究。研究发现：不同温度下单层油浸纸板空间电荷在极性反转过程中变化很少，极性反转后电极附近电荷密度与电场畸变严重；温度通过改变反转前空间电荷分布影响极性反转过程中电场分布。双层绝缘中，温度升高导致油−纸界面电荷和纸中空间电荷密度降低；电压极性反转过程中，不同温度下纸内部空间电荷变化较少，常温时双层暂态电场符合容性电场分布；而 60 ℃时油−纸界面电荷密度与极性快速变化，导致双层暂态电场分布不符合容性电场分布。

关键词：油纸绝缘；空间电荷；温度；双层；极性反转

Space Charge Characteristic of Oil-paper Insulation Under Polarity Reversal Voltage

ZHANG Jinfeng[1], DONG Xia[1], LIU Shulin[2], YU Xiaodong[1], HAO Lingyan[1], LI Yang[3]
(1. School of Information and Automation Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China;
2. School of Automation and Electrical Engineering, Linyi University, Linyi 276000, China;
3. EHV Transmission Companies Dali Office of China Southern Power Grid, Dali 671000, China)

Abstract：The electric field distribution inside the converter transformer is complex under the polarity reversal voltage, and the space charge is an important factor causing the electric field distortion. In order to study the space charge and electric field distribution characteristics of oil-paper insulation under polarity reversal voltage,in this paper, experiments are carried out to study the space charge of single-layer oil-impregnated pressboard and oil-paper double-layer insulation at different temperatures by using the pulse electro-acoustic method. The study reveals that the space charge of single-layer oil-impregnated pressboard negligibly change during the polarity reversal process at different temperatures, and the charge density and electric field near the electrode are seriously distorted after the polarity reversal. Temperature affects the electric field distribution by changing the space charge distribution before voltage reversal. In double-layer insulation, the increase in temperature leads to a decrease in the oil-paper interface charge and the space charge density in the pressboard. During the voltage polarity reversal process, the space charge inside the pressboard changes less under different temperatures, and the transient electric field in double-layer conforms to the capacitive electric field distribution at room temperature. However, the charge density and polarity at the oil-paper interface change rapidly at 60 ℃, thus the transient electric field distribution in double-layer does not conform to the capacitive electric field distribution.

Key words：oil-paper insulation; space charge; temperature; double layers; polarity reversal voltage

0　引言

换流变压器是直流输电工程中承担交−直流电压转换的重要设备之一，其运行的可靠性关系到整个系统的稳定性[1]。相比于传统交流变压器，换流变压器除承受交流电压、雷电冲击电压、操作过电压外，还要承受直流电压、交−直流叠加、极性反转电压等复杂工况。直流电场下绝缘介质内部更易积聚空间电荷，空间电荷会使介质内部电场畸变，进而增加了油−纸绝缘结构绝缘设计复杂性[2]。电压极性反转过程中，反转电场与空间电荷形成电场叠加会使介质内部电场发生畸变，直接影响换流变压

基金资助项目：山东省自然科学基金(ZR2020ME206)。
Project supported by Shandong Natural Science Foundation (ZR2020ME206).

器的可靠性及安全性。

直流电场下油纸绝缘中空间电荷积聚及消散机理复杂，空间电荷在电荷来源、迁移、入陷、脱陷、复合、抽出等物理过程受温度、水分、老化、电场、纳米改性等因素影响[3-6]。随着温度和含水率的增加，电荷迁移率上升会影响空间电荷分布，且短路时空间电荷衰减更快[7-8]。随着温度梯度增加，低温侧更易积聚异极性电荷，且低温侧场强也随之增加[9-10]。油纸绝缘空间电荷密度随电老化与热老化时间增加而提高，电−热联合老化下试样内部空间电荷具有更高的积聚速率[11]。相比于单层油浸纸，油−纸双层绝缘空间电荷特性研究较少，已有研究指出：油−纸双层绝缘中电场和电荷分布不符合“Maxwell-Wagner”极化模型，油−纸界面电荷的极性与油隙附近电极的极性相同，并且电荷密度随着油隙厚度的增加而减小[12-13]。变压器油老化会降低油−纸界面势垒，增加纸中的空间电荷密度；变压器油老化可使电荷在加压与短路测量时更快达到平衡的状态[14]。

相比直流电压，极性反转电压下油纸绝缘空间电荷特性相关研究报道较少，且主要集中于常温下开展研究。周远翔等人采用电声脉冲法在室温下研究了极性反转电压下油浸纸板中空间电荷分布，指出电压极性反转后电极附近电荷及电场强度畸变严重，并且反转时间越长电场畸变越大，在纸−纸双层绝缘内部最大场强可能出现于纸−纸界面和纸−铝电极界面位置[15-16]。George Chen 等人基于直流电场下油−纸双层绝缘电荷分布的测量结果基础上，通过有限元仿真的方法研究极性反转电压下油−纸双层、油−纸多层中电场分布，结果表明电压极性反转后，油−纸双层中纸板内部积累的空间电荷使油中电场产生了严重畸变，油中电场高于“Maxwell- Wagner”理论值[17-18]。李长云等基于双极性电荷输运模型对极性反转电场下油纸绝缘空间电荷与电场分布进行了仿真研究，结果表明在极性反转过程中空间电荷积聚导致电场畸变严重[19]。

目前，关于温度对极性反转电压下单层油纸、油−纸双层绝缘空间电荷影响规律与机理研究尚不充分。为此，本文采用电声脉冲(pulsed electro-acoustic method，PEA)法在 20~60 ℃范围内对单层油浸纸板和油−纸双层绝缘进行空间电荷测量，研究极性反转电压下油纸绝缘空间电荷与电场变化规律与机理。

1 试验方法

1.1 试样制备

试验所用纸板采用 1 mm 厚纸板，变压器油型号为 45 号。试验前变压器油经滤油机滤除其中水和气等杂质，置于真空罐内保存。未浸油纸板裁成 6 cm×6 cm 的方形放入容器中，然后纸板经过真空加热干燥、真空注入过滤好的变压器油(含水质量分数为 7.3×10^{-6})，最后将充分浸渍的油浸纸板放入容器中真空保存，预处理后的纸板含水质量分数为 0.43%[20]。

1.2 空间电荷测量

本文采用电声脉冲法测量油浸纸板中空间电荷分布[21]。测量系统如图 1 所示，其中脉冲源脉宽为 10 ns，频率为 1 kHz。油纸双层结构中油隙和油浸纸板厚度分别为 0.5 mm 和 1 mm，测量时变压器油置于下层靠近下电极。本文对空间电荷测量信号“过冲”现象进行了恢复；并参照文献[13]中方法，对超声波在油−纸界面处发生折反射而造成的衰减进行了恢复，信号恢复所需的不同温度下变压器油和油浸纸板声速参考文献[22]。

本文主要研究恒温下空间电荷分布特性，测量系统通过油浴循环对上、下电极进行温度控制，恒温槽控制精度范围为[−0.01 ℃，0.01 ℃]，试验温度设定为 20、40、60 ℃。为研究油−纸双层绝缘内部温度分布，本文利用有限元仿真软件并根据实际结构建立二维模型如图 2(a)所示，并在油纸搭接位置设置探针 1 和探针 2，模型中变压器油和绝缘纸的密度、导热系数、恒压热容参考文献[23-24]。仿真时模型中上、下电极(模型中上、下边)温度为 60 ℃，油和纸内部初始温度设为 20 ℃。60 ℃时两探针温度如图 2(b)所示，其温度在前 20 s 内快速

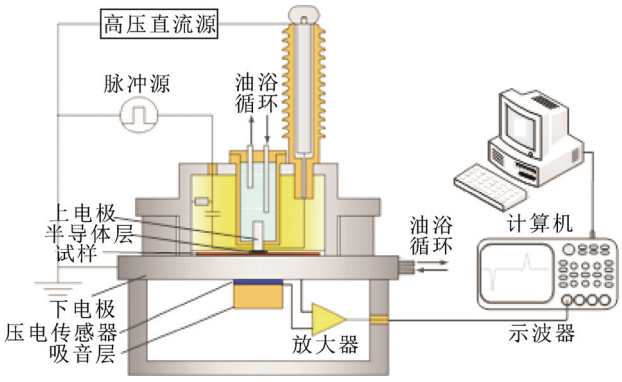


图 1 空间电荷测量装置图

Fig.1 Space charge measurement device

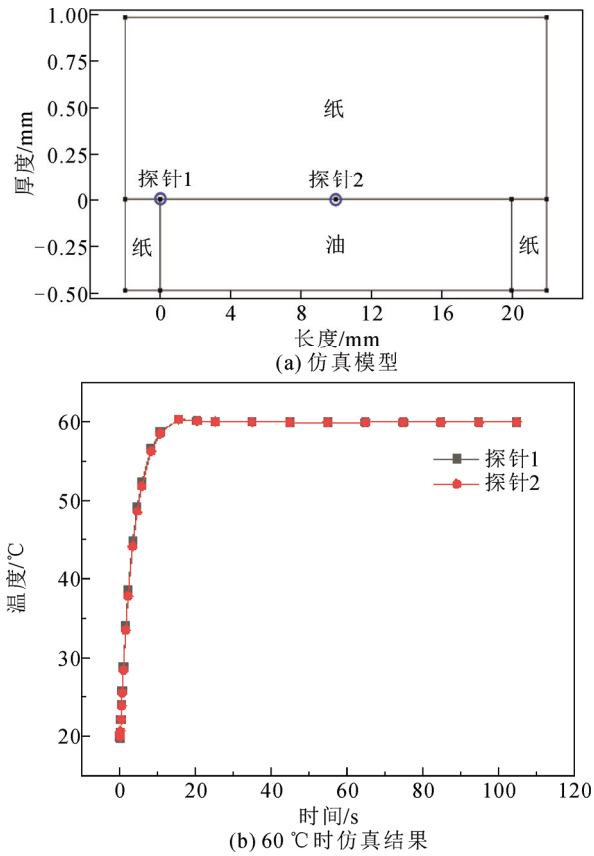


图 2　油−纸双层结构的仿真模型与结果

Fig.2　Simulation model and results of oil-paper double layer structure

上升，温度在 30 s 后达到设定温度并趋于稳定，这也表明此时油纸双层绝缘内部温度达到均匀分布。为了保证试验过程中试样内部温度稳定而不发生变化，试验时在温度稳定在设定温度 30 min 后开始测量，测量数据每隔 10 s 记录 1 次。

电压极性反转过程如图 3 所示，测量时首先对试样施加时间为 T 的 U_p，再经 60 s 将电压由 U_p 反转到$-U_p$。单层油浸纸板的时间 T=1 h，外施电压为 U_p 为 10 kV；考虑到油−纸双层绝缘极化所需时间较长，其时间 T=3 h，外施电压为 U_p=15 kV。反转过程中：−30、0、30 s 分别对应电压反转起始、电压为 0 kV、电压反转结束所对应的时刻。

2　试验结果

2.1　单层油浸纸板极性反转电压下空间电荷分布

极性反转电压下(10 kV 至−5 kV、−10 kV、−15 kV)单层油浸纸板的空间电荷如图 4 所示、电场分布如图 5 所示，上、下电极坐标分别为 0 和 1 000 μm。由于 PEA 法测量中声波在试样内部传递存在衰减，

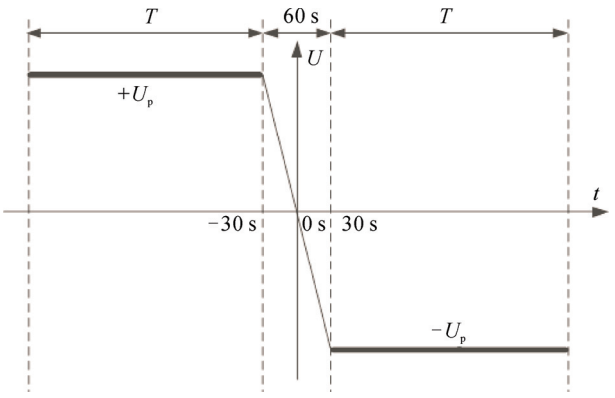


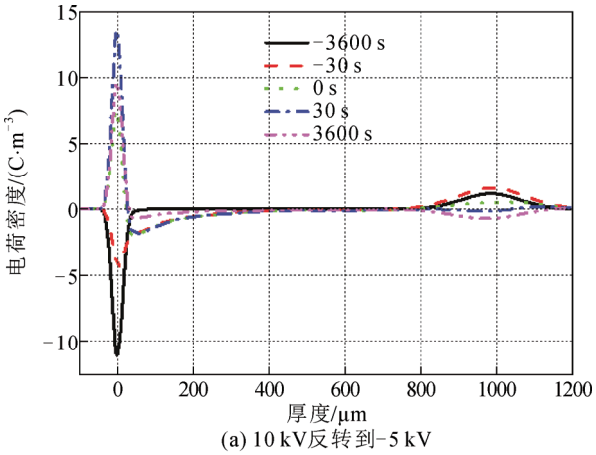
图 3　电压极性反转过程

Fig.3　Process of voltage polarity reversal

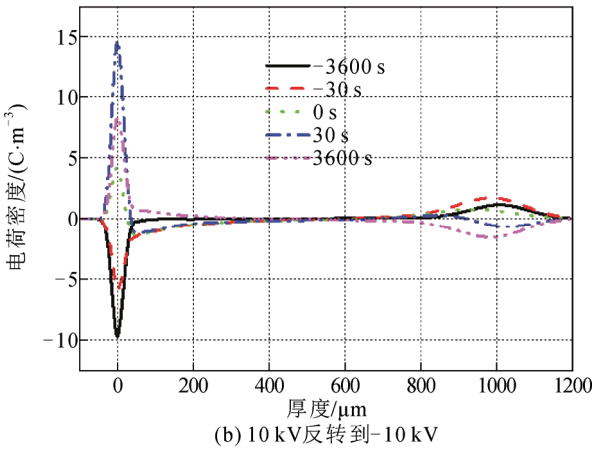
上电极信号的幅值减少脉宽增加的衰减现象，在研究电场分布时本文主要研究下电极附近的电场分布。在 10 kV 下纸板内部积聚同极性电荷(即空间电荷极性与相邻电极的极性相同)，试样内部电场增加，电极附近电场下降。在−30、0、30 s 时纸板内部的空间电荷分布曲线基本重合，这表明在 60 s 的极性反转过程中空间电荷衰减很小；并且，0~600 μm 范围内的电场曲线平行。电压反转后(30 s)，下电极电荷密度与电场畸变明显，且随着反转电压增加而增加。电压反转到−5、−10、−15 kV 时(30 s)下电极的界面电荷密度分别为 13.4 、17.8、21.1 C/m^3。电压极性反转 1 h 后，在−5 kV 下试样内部的空间电荷密度明显减少，空间电荷极性仍然与反转前相同，下电极附近场强仍高于外施场强 - 5 kV/mm；在反转电压为−10 kV 和−15 kV 时，反转后试样内部空间电荷极性改变，下电极场强低于对应的外施场强，试样内部场强高于外施场强，反转电压为−15 kV 下的空间电荷密度与内部场强高于反转电压为−10 kV 下情况的。

2.2　极性反转电压下高温时单层油浸纸板空间电荷分布

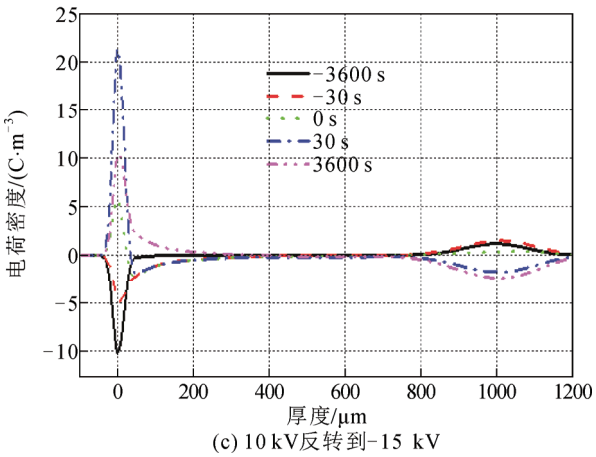
40 与 60 ℃下外施电压由 10 kV 反转到−10 kV 时单层油浸纸板空间电荷如图 6 所示，试样内部同样积累同极性空间电荷，与 20 ℃下的测试结果一致。在电压极性反转前，油浸纸板下电极附近出现“空间电荷包”现象，即下电极附近的空间电荷密度低于纸板内部空间电荷。60 ℃时“空间电荷包”现象要更加明显，且温度升高导致空间电荷分布范围增加。电压极性反转后，下电极界面电荷密度极性由负变正；40 ℃下电极的电荷密度从−10.24 C/m^3 变化到



(a) 10 kV反转到−5 kV



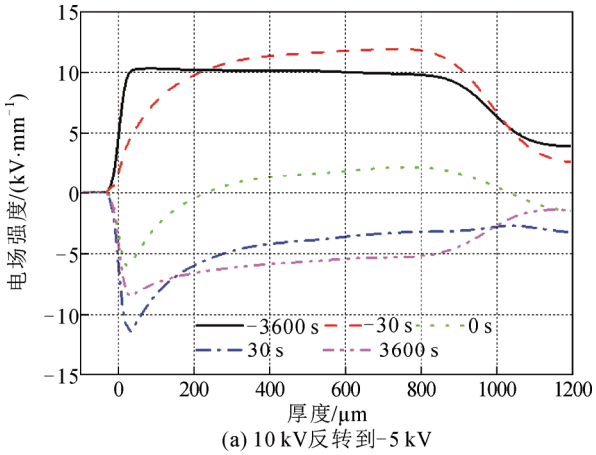
(b) 10 kV反转到−10 kV



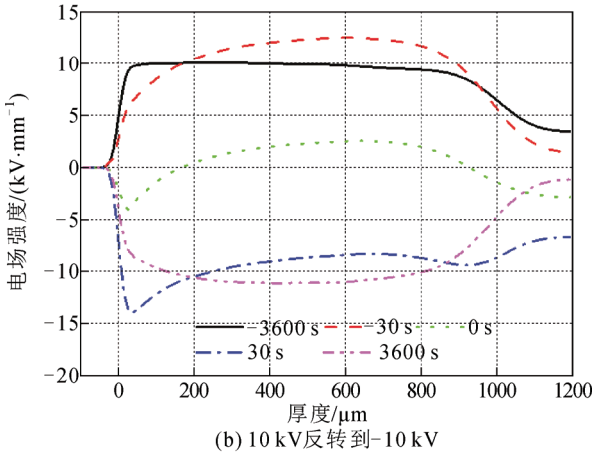
(c) 10 kV反转到−15 kV

图 4 极性反转电压下单层纸板的空间电荷分布

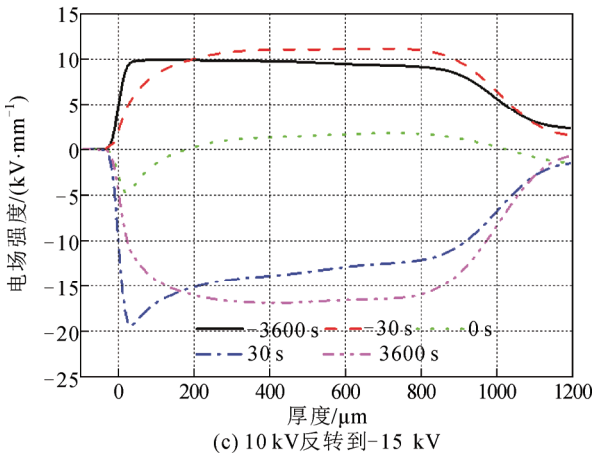
Fig.4 Space charge distribution of single layer pressboard under polarity reversal voltage



(a) 10 kV反转到−5 kV



(b) 10 kV反转到−10 kV



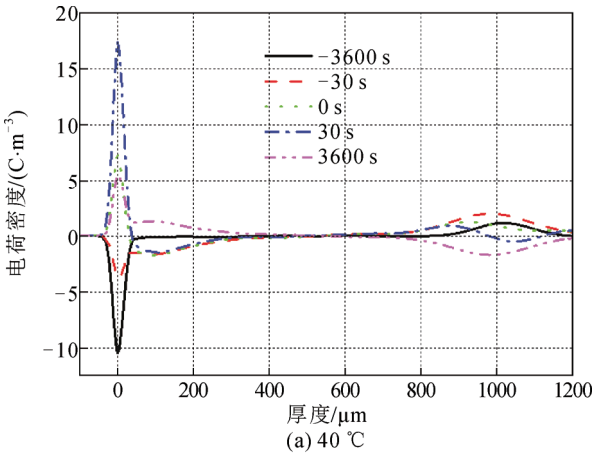
(c) 10 kV反转到−15 kV

图 5 极性反转电压下单层纸板的电场分布

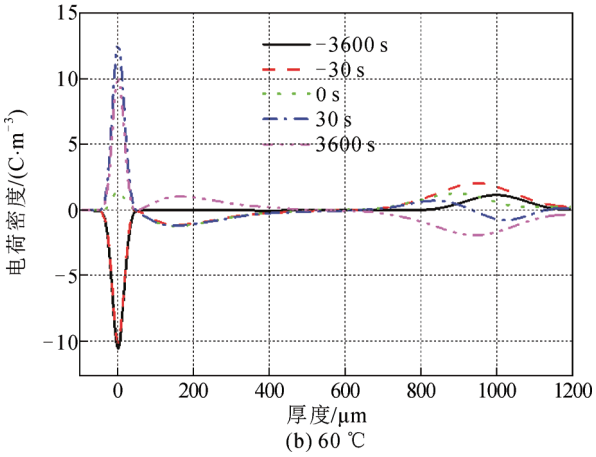
Fig.5 Electric field distribution of single layer pressboard under polarity reversal voltage

17.42 C/m³；60 ℃时电荷密度从−10.46 C/m³ 变化到12.88 C/m³。电压极性反转过程中，下电极附近空间电荷分布曲线在−30、0、30 s 内基本重合，表明高温时油浸纸内部空间电荷衰减很少，而上电极附近空间电荷曲线却并不重合。高温时在−3600 和3600 s 处的电荷分布呈对称分布，表明温度升高导致电压反转后空间电荷更快达到平衡状态。

电压反转之前高温时单层油浸纸板场强分布如图 7 所示，在电压反转之前，电极附近的场强逐渐减小，样品内部的场强相应增加。电压反转后电场极性由正变负，下电极处场强明显高于试样内部场强，且 30 s 时下电极场强幅值大于−30 s 时的场强幅值。电压反转后，40 ℃时的下电极处电场强度大于 20 与 60 ℃时的场强。极性反转过程中，试样



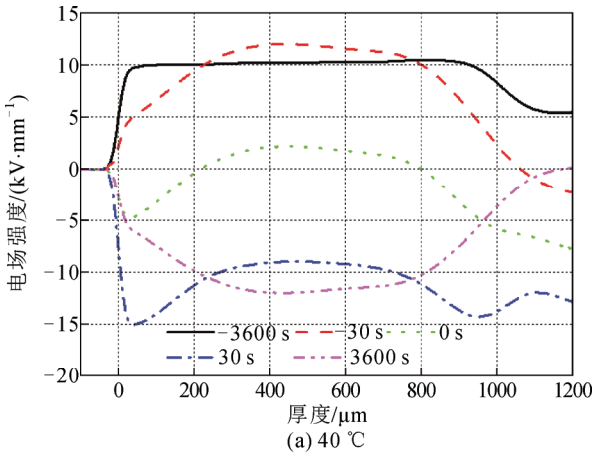
(a) 40 ℃



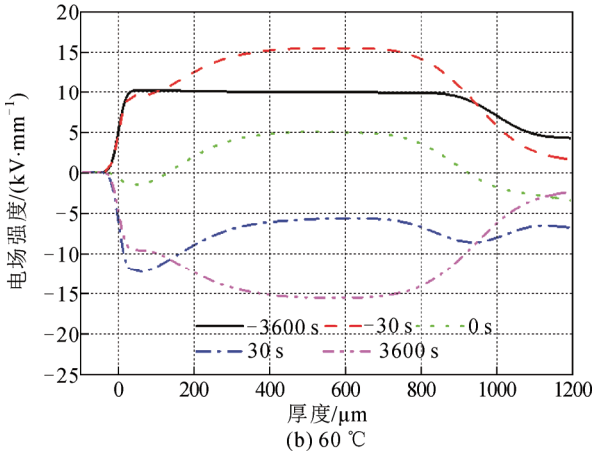
(b) 60 ℃

图 6　高温时单层油浸纸板空间电荷分布

Fig.6　Space charge distribution of single layer pressboard under high temperature



(a) 40 ℃



(b) 60 ℃

图 7　高温时单层油浸纸板电场分布

Fig.7　Electric field distribution of single layer pressboard under high temperature

左半部分在−30、0、30 s 的电场曲线平行分布。在−3600 和 3600 s 处电场分布曲线呈对称分布，这与空间电荷分布相对应。

2.3　油−纸双层绝缘极性反转电压下空间电荷与电场分布

极性反转电压下油−纸双层绝缘空间电荷与电场分布如图 8 所示，双层试样中变压器油内部空间电荷积聚不明显，油浸纸板内部积累空间电荷较多。电压极性反转前：温度的升高导致油浸纸板内部同极性空间电荷密度逐渐减少，20 ℃时油浸纸板内部空间电荷分布主要集中于试样两侧，越靠近试样内部空间电荷密度越少；40 与 60 ℃时油−纸界面处电荷密度较少，油浸纸板内部出现“空间电荷包”现象，这与高温时单层油浸纸板空间电荷测量结果相一致。20 ℃时油−纸界面积累负极性电荷，40 ℃时油−纸界面电荷积聚较少，60 ℃时积累正极性电荷。直流加压 3 h 后，20、40 ℃时下电极附近电荷密度降低，而 60 ℃时下电极附近电荷密度却增加。反转过程中(−30~30 s)：不同温度下油浸纸板内部空间电荷分布曲线基本相符，表明电压极性反转过程中试样内部空间电荷消散很少；20、40 ℃时油−纸界面电荷密度变化较少，反转结束时下电极界面电荷密度畸变明显；60 ℃时油−纸界面电荷密度下降，油−纸界面电荷极性由正变负，电压极性反转后下电极界面电荷畸变较少。

根据电荷分布计算对应油−纸双层绝缘电场分布曲线如图 9 所示，图中 3 条虚线依次对应位置为下电极、油−纸界面、上电极。由于变压器油与油浸纸板介电常数不同，导致变压器油与油浸纸板电场分布不连续。直流电压初期(−10 830 s)油−纸双层绝缘内部没有电荷积聚，此时电场分布按电容反比分布，变压器油中场强高于油浸纸板中场强。正极性直流电压作用时 20、40 ℃下的油中场强下降，而 60 ℃时油中场强增加。温度的升高使得油中稳态场强增加，纸中稳态场强下降。电压极性反转过程中，在−30、0、30 s 时刻所对应的电场分布曲线

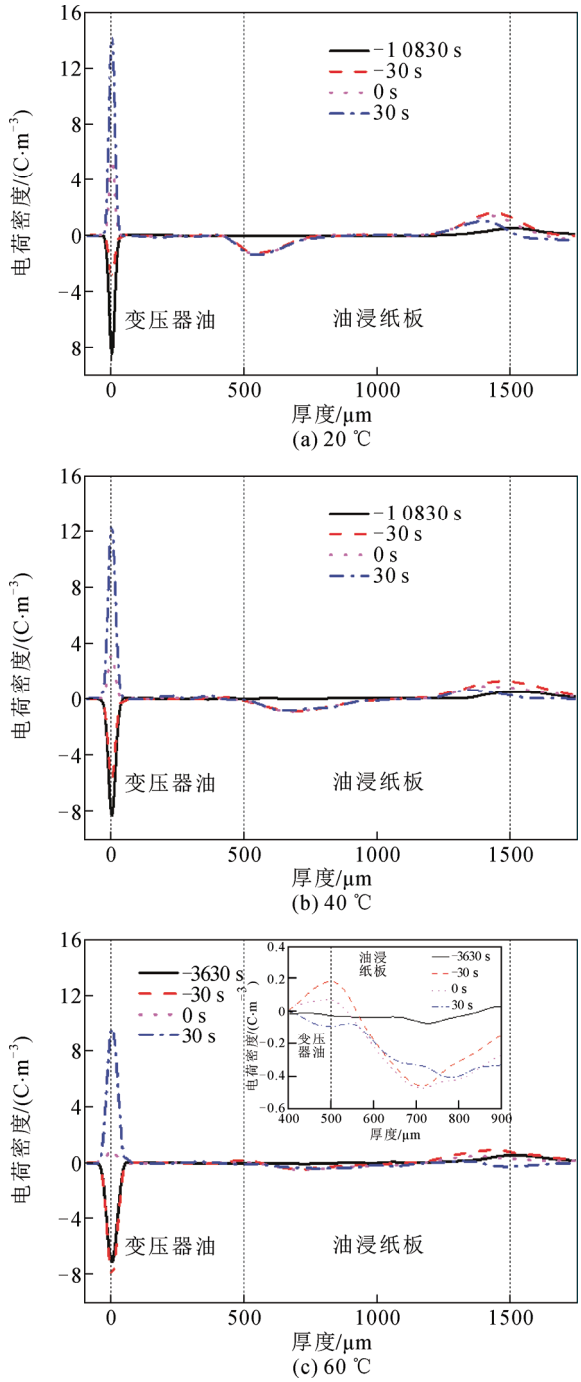


图 8 极性反转电压下油−纸双层绝缘空间电荷分布

Fig.8 Space charge distribution of oil-paper double layers under polarity reversal voltage

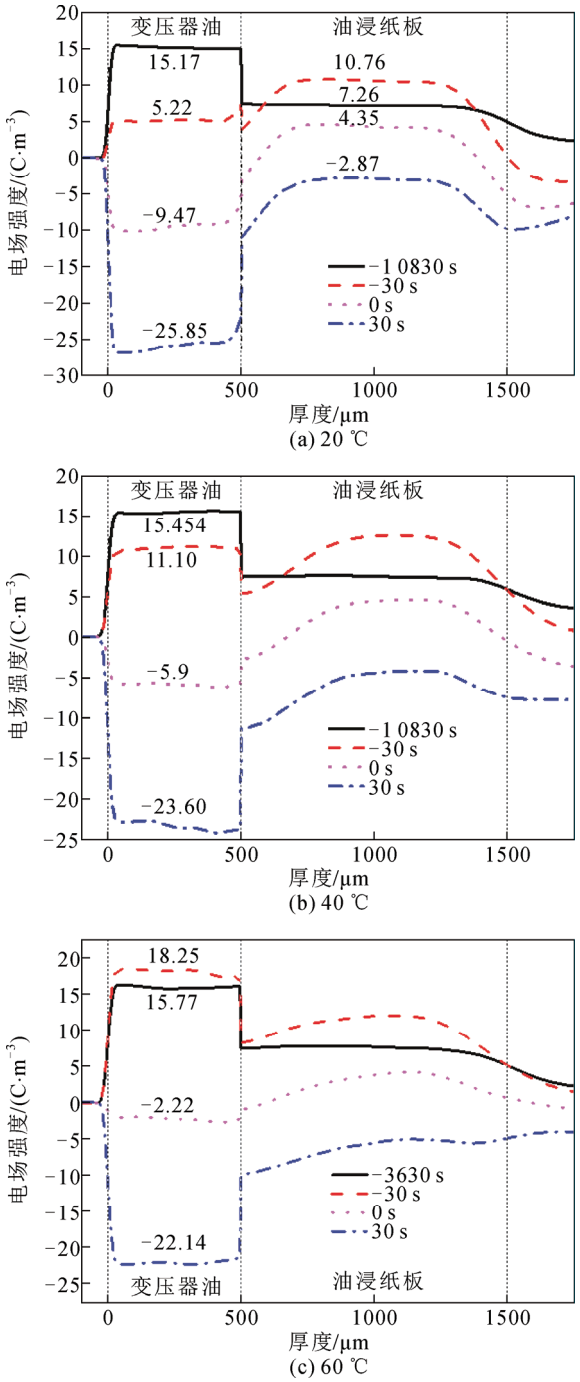


图 9 极性反转电压下油−纸双层绝缘电场分布

Fig.9 Electric field distribution of oil-paper double layers under polarity reversal voltage

具有平行关系，这与反转过程中空间电荷变化较少相对应。电压极性反转后油中场强明显增加，而温度升高会降低反转后油中场强。对比反转前后(−30 与 30 s)油中电场，20、40、60 ℃时反转前后油中场强差值分别为 31.07、34.7、40.34 kV/mm，由此看出 20 ℃条件下反转前后油中场强变化大小基本为−10 830 s 时油中场强的 2 倍，即反转过程中油中暂态电场满足“容性电场分布”；60 ℃时电压反转前后油中电场变化程度远大于 20 与 40 ℃的，极性反转前后 60 ℃时油暂态电场不符合“容性电场”分布。外施电压由 0 kV 转为负极性过程中(即 0 至 30 s)，20、40、60 ℃时油中场强变化分别为 16.38、17.7、19.92 kV/mm，油中场强变化大于初始场强，且随温度升高而增加。

3　讨论

3.1　单层油浸纸板在极性反转电压下空间电荷与电场分布

测量结果中上、下电极附近空间电荷信号存在差异，这是由于本文采用电声脉冲法测量空间电荷过程中声波在试样内部传播存在衰减及色散，从而导致测量信号的幅值变小、脉宽增加。本文根据参考信号中上、下电极处波形求取声波衰减系数，将图 4(b)中左侧波形对中点取镜像作为上电极未衰减信号，如图 10(a)所示；将衰减系数与未衰减信号进行运算得到衰减信号[25]，如图 10(b)所示。由图 10 可知：衰减信号与未衰减信号存在较大差异，衰减信号隐藏了极性反转中真实波形变化趋势，电极界面电荷密度衰减严重，并与空间电荷信号叠加在一起。图 10(b)中衰减信号随时间变化趋势与图 4(b)60 ℃时上电极附近的测量结果相一致，由此表明上、下电极处空间电荷变化趋势基本一致，但由于声波衰减使得测量结果中上、下电极信号存在差异。

电压极性反转后下电极处界面电荷及场强畸变严重，且上电极处信号存在衰减，因此本文主要分析下电极处电荷及场强分布，如图 11 所示。在电压反转之前(−30 s)，由于不同温度下的空间电荷分布不同，导致反转前下电极电场强度不同；电压极性反转过程中下电极电场强度与外施电压呈线性关系。试样内部空间电荷会在两侧电极处形成感应电荷，进而改变界面处电荷密度及电场强度。由于下电极接地，其面电荷密度 σ_d 及电场场强 E_d 如式(1)、式(2)所示：

$$\sigma_d = -\int_0^L \frac{L-x}{L}\rho(x)\mathrm{d}x - \varepsilon_0\varepsilon_r E \tag{1}$$

$$E_d = \frac{1}{\varepsilon_0\varepsilon_r}\int_0^L \frac{L-x}{L}\rho(x)\mathrm{d}x + E \tag{2}$$

式中：L 为试样厚度；x 为水平位置坐标；ε_0 为真空介电常数；ε_r 为相对介电常数；σ_d 为下电极界面电荷面密度；E_d 为下电极处电场强度；$\rho(x)$为空间电荷密度；E 为外施电场强度；当 E=0 kV/mm 时为短路。

由式(2)可知：试样内部积累同极性电荷会减少 σ_d 及 E_d，而异极性电荷会增加 σ_d 及 E_d。电压极性反转前，试样内部积累同极性电荷，σ_d 及 E_d 会下降；而反转后，相对于外施电压试样内部积累的电荷由同极性转为异极性，σ_d 及 E_d 相应增加。σ_d 及 E_d 受外施电场、空间电荷密度分布的影响，靠近电极处的空间电荷对 σ_d 及 E_d 影响较大，40 ℃时试样内部积累电荷较多，且主要分布在电极附近，因此电压极性反转后 σ_d 及 E_d 畸变最大。而 60 ℃时试样内部

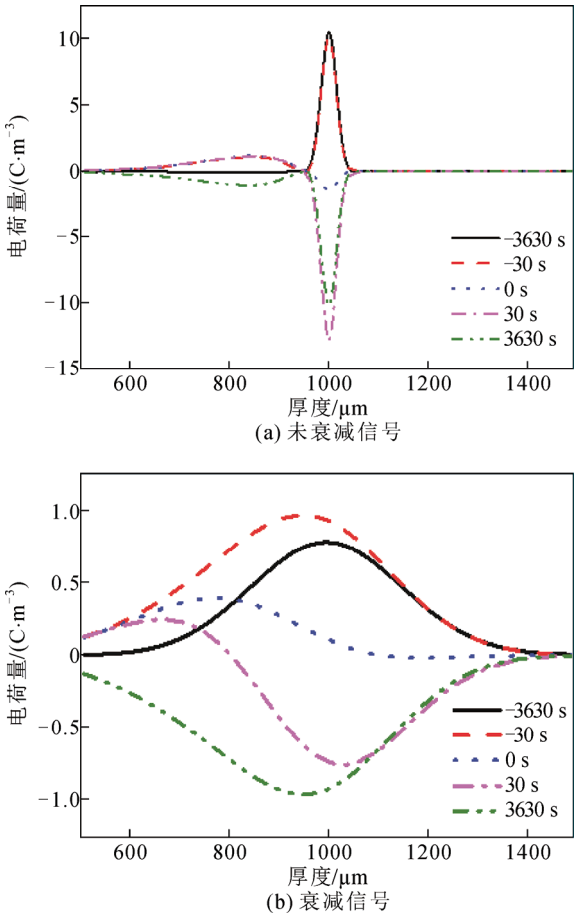


图 10　极性反转过程中空间电荷衰减模拟

Fig.10　Simulated results of attenuation on space charge distributions during voltage polarity reversal

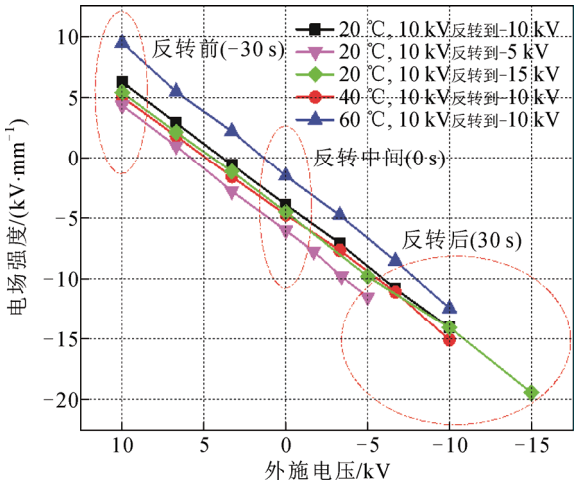


图 11　极性反转过程中下电极处电场强度

Fig.11　Electric field strength of lower electrode during polarity reversal process

电荷在电极附近分布较少，因此反转后 σ_d 及 E_d 变化较小。同时试验结果表明极性反转过程中空间电荷基本保持不变，因此根据式(1)与式(2)，在极性反转过程中试样内部空间电荷对下电极界面电荷密度及场强的影响是保持不变的，因此下电极界面处电场强度及电荷密度随外施场强呈线性变化。

3.2 油−纸双层绝缘在极性反转下空间电荷与电场分布

相比于单层油浸纸板是在恒定电场下测量空间电荷，双层中油和纸电场随极化时间增加而发生变化。稳态时纸中电场强度随温度升高而降低，从而导致纸中空间电荷密度相应减少，但空间电荷分布规律与图 4 和图 6 恒压下单层纸板空间电荷分布规律相一致，即不同温度下油浸纸板内部积累同极性电荷，20 ℃时纸两侧空间电荷密度大于试样内部的，40 与 60 ℃时纸中出现“空间电荷包”现象。对于双层介质中电场分布，由夹层极化与“Maxwell-Wagner”理论可知，电场由初始电场按相对介电常数反比分布转为按电导率反比分布，稳态时界面电荷极性与电导率大的介质一侧电极的极性相同，不同温度下油的电导率均大于纸电导率，稳态时油−纸界面电荷密度均应为负极性；而本文试验结果表明：20 ℃时油−纸界面电荷极性为负极性，40 ℃时油−纸界面电荷积聚不明显，60 ℃时油−纸界面电荷极性为正极性极性。实际双层电介质中油−纸界面电荷形成机理复杂，油−纸界面电荷在电场力的作用下会克服界面势垒而注入到另一介质内部，并受温度、电场、表面陷阱等因素的影响。油−纸界面作为液−固两相界面，油浸纸板因表面具有物理孔洞而具有浸渍特性，致使油−纸交界面不为理想界面，纸中油隙可为油−纸界面电荷向纸内部迁移提供路径，这都增加了分析油−纸界面电荷形成机理的复杂性。已有利用 PEA 法、Kerr 效应等方法研究油−纸界面电荷已得到相对统一结果：直流电场下双层介质中油−纸界面电荷、空间电荷与电场分布相互影响，最终达到新的平衡状态，从而导致油−纸界面电荷与电场分布不满足于“Maxwell-Wagner”理论[14,26]。20 与 40 ℃时油和纸电导率差异较大，温度升高会减少油和纸之间电导率的差异和油−纸界面电荷密度，且温度升高有助于油−纸界面电荷克服界面势垒注入到另一介质，从而导致 40 ℃时油−纸界面电荷积聚不明显。根据夹层极化理论，由于 60 ℃时油和纸电导率相近，油−纸界面应积累负极性电荷且电荷密度少于 20 和 40 ℃的。在电场下油中负电荷与纸中正电荷向油−纸界面迁移。由于油−纸界面不为理想界面，纸表面的宏观油隙更易于油中负电荷向纸内部迁移，而在纸内部迁移的正电荷需脱离纤维素中陷阱束缚与油−纸界面势垒才能注入到变压器油。空间电荷测量结果反应的是对应位置的净电荷，并且由于测量分辨率限制，油−纸界面电荷结果包含油侧的负极性电荷与纸侧的正极性电荷，但后者电荷密度大于前者，从而导致油−纸界面电荷以正极性为主。

直流电场下油−纸双层介质中空间电荷与油−纸界面电荷积聚，会改变电极处电荷密度与电场分布，从而导致油电场测量值大于根据表 1 中电导率与厚度计算的理论值(Maxwell-Wagner 理论值)，如图 12 中−30 s 所对应结果。20 与 40 ℃时正电压下负极性空间电荷与油−纸界面电荷积累会在下电极产生正极性感应电荷，从而降低下电极负极性电荷密度，使得加压过程中油中电场下降、纸中电场上升；相比于理论值，直流稳态时空间电荷与油−纸界面电荷在下电极引起的感应电荷密度减少，导致下电极实测电荷密度与油中场强增加。60 ℃时纸中积累同极性空间电荷，而油−纸界面电荷却为正极性，其电荷分布示意图如图 13 所示。此时油−纸界

表 1 变压器油和油浸纸电导率

Table 1 Conductivity of transformer oil and paper

温度/℃	纸电导率/(10^{-14} S·m^{-1})	油电导率/(10^{-14} S·m^{-1})
20	0.166	6.45
40	1.17	7.69
60	7.39	8.13

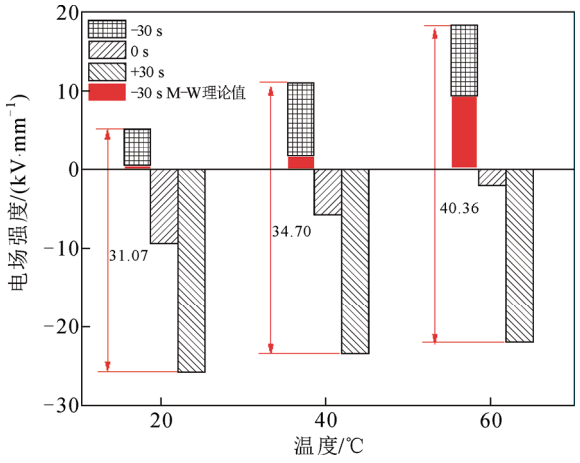


图 12 极性反转过程中油中电场强度

Fig.12 Electric field strength of oil during voltage polarity reversal

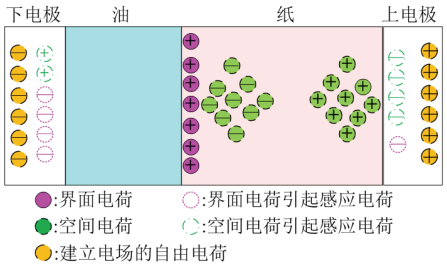


图 13　油−纸双层介质电荷分布示意图

Fig.13　Schematic diagram of charge distribution in oil-paper double layer medium

面电荷与空间电荷靠近且极性相反，参考图 10 由于测量系统信号衰减与分辨率限制，测量结果中油−纸界面电荷信息会被隐藏，实际界面电密度要比测量结果大。负极性的空间电荷在下电极引起感应电荷为正极性，而正极性的油−纸界面电荷引起感应电荷为负极性；其中油−纸界面电荷距离下电极更近，其对下电极感应电荷密度与极性影响更大。因此，60 ℃时在加压过程中下电极电荷密度与油中场强增加，高于油中初始场强。

极性反转过程中外施电压极性由正变负，下电极电荷密度由负变正。20 与 40 ℃时双层中油−纸界面电荷与空间电荷变化较少，在下电极处引起的正极性感应电荷基本保持不变，从而使得电压极性反转过程中电场分布主要受外施电压影响，即双层介质内部电场随外施电场线性变化，−30、0、30 s 时电场分布曲线近似平行。由于试验起始时(−1830 s)试样内部空间电荷与油−纸界面电荷积累较少，此时电场呈“容性电场分布”。极性反转前后，20 ℃油中场强变化量约为初始场强的 2 倍，即反转过程中油中暂态电场呈“容性电场分布”；而 60 ℃时油中场强变化量为初始场强的 2.56 倍，此时暂态电场不呈“容性电场分布”。当外施电压由 0 kV 转到负极性过程中，油−纸界面在油侧积累的负极性电荷会沿新电场方向朝着下电极方向移动，并在下电极感应出更多的正极性感应电荷，从而使得此阶段(0~30 s)油中场强大于油中初始场强，即油中电场变化大于容性电场分布；温度升高会加速油−纸界面电荷向下电极移动，从而导致油中电场变化随温度升高而增加。试验结果表明电压极性反转过程中，60 ℃时油−纸界面电荷变化速率明显快于纸中空间电荷的，正极性油−纸界面电荷快速下降，极性由正极性转为负极性；而纸中空间电荷分布曲线大致相符，纸中空间电荷极性仍为负极性。这是由于油−纸界面电荷形成是由于两介质中自由电荷迁移能力不同而在界面堆积，空间电荷多为被试样内部陷阱束缚形成，在外施电压变化过程中界面自由电荷具有更快的变化速度，而空间电荷变化则需脱离陷阱束缚导致其变化速度变慢。电压极性反转后，由油侧迁移到油−纸界面的负极性电荷沿新电场方向迁移至下电极，从而导致此时下电极的正极性感应电荷增多，油中场强相应增加。综上所述：60 ℃时极性反转过程中，油−纸界面电荷快速变化是油中暂态电场不符合“容性电场分布”的主要原因。

4　结论

1）电压极性反转后，单层油浸纸板下电极电场与电荷密度畸变明显，且 40 ℃时畸变最为严重。由于不同温度下空间电荷在反转过程中变化较少，导致电极处电场强度随反转电场线性变化。

2）电压极性反转后，油−纸双层绝缘结构中油中电场畸变严重，高于施加直流电场初始时油中电场强度，油中畸变电场随温度升高呈下降趋势。

3）电压极性反转过程中，常温时双层中空间电荷与油−纸界面电荷基本保持不变，油中暂态电场随外施电压变化规律符合“容性电场分布”；60 ℃时双层中纸内部空间电荷基本保持不变，但油−纸界面电荷密度与极性随外施电场变化，导致油中暂态电场不符合“容性电场分布”。

参考文献　References

[1] 杜伯学，姜金鹏. 换流变压器油纸绝缘水分对局部放电行为的影响综述[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2932-2945.
DU Boxue, JIANG Jinpeng. Research progress on influence of water content of oil-paper insulation on partial discharge of converter transformer[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2932-2945.

[2] 陈　驰，王　霞，吴　锴，等. 温度梯度下 XLPE 同轴和平板结构试样空间电荷行为对比性研究[J]. 高电压技术，2021，47(11)：4078-4086.
CHEN Chi, WANG Xia, WU Kai, et al. Comparative study on space charge behaviors for coaxial and flat structures XLPE specimen under temperature gradient[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(11): 4078-4086.

[3] WANG S Q, ZHANG G J, MU H B, et al. Effects of paper-aged state on space charge characteristics in oil-impregnated paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1871-1878.

[4] ZHAO X F, PU L, LIU J, et al. Temperature gradient effect on the space charge behaviour in multilayers of oil and pressboard[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1645-1653.

[5] ZHANG J F, CHEN Q G, CHI M H, et al. Effect of temperature on space charge characteristics of oil-paper insulation and its numerical simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4): 1334-1342.

[6] ZHANG J F, CHEN Q G, CHI M H, et al. Space charge and insulation properties of nano-Al_2O_3-modified oil-impregnated paper used for HVDC convertor transformer[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2021, 32(3): 3720-3731.

[7] CHE L, WU J D, ZHOU G Y, et al. Effect of moisture content on space charge behavior in oil-paper insulation under DC electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(5): 1570-1577.

[8] TANG C, CHEN G, FU M L, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 775-784.

[9] ZHU Q D, WANG X, WU K, 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.

[10] HUANG M, ZHOU Y X, DAI C, et al. Charge transport in thermally and electrically stressed oil-impregnated paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(1): 266-274.

[11] ZHOU Y X, HUANG M, CHEN W J, 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.

[12] WU K, CHENG C H. Interface charges between insulating materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2633-2642.

[13] WU K, ZHU Q D, WANG H S, et al. Space charge behavior in the sample with two layers of oil-immersed-paper and oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(4): 1857-1865.

[14] HAO M, ZHOU Y, CHEN G, et al. Space charge behavior in oil gap and impregnated pressboard combined system under HVDC stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 848-858.

[15] HUANG M, ZHOU Y X, CHEN W J, 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.

[16] HUANG M, ZHOU Y X, CHEN W J, et al. Space charge dynamics at the physical interface in oil-paper insulation under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1739-1746.

[17] HUANG B, HAO M, HAO J, et al. Space charge characteristics in oil and oil-impregnated pressboard and electric field distortion after polarity reversal[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 881-891.

[18] HUANG B, XU Z Q, HAO M, et al. Multilayers oil and oil-impregnated pressboard electric field simulation based on space charge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 530-538.

[19] 李长云，冀 章，闫宏伟. 绝缘纸特性和极性反转对油纸绝缘空间电荷效应的影响[J]. 中国电机工程学报，2020，40(14)：4708-4718.
LI Changyun, JI Zhang, YAN Hongwei. Influence of insulation paper characteristics and polarity reversal on space charge effect of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4708-4718.

[20] 中华人民共和国能源部. 油浸纤维质绝缘材料含水量测定法(萃取法)：DL/T 449—1991[S]. 北京：中国电力出版社，1992.
Ministry of Energy of the People's Republic of China. Method for determining water content in oil-impregnated insulating materials (extraction method): DL/T 449—1991[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 1992.

[21] LI Y, YASUDA M, TAKADA T. Pulsed electroacoustic method for measurement of charge accumulation in solid dielectrics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(2): 18-195.

[22] ZHANG J F, CHI M H, CHEN Q G, et al. Effect of temperature on space charge distribution in two layers of transformer oil and impregnated pressboard under DC voltage[J]. IEEE Access, 2020, 8: 16647-16655.

[23] 何东欣，巩文洁，刘洪顺，等. 直流电场下油纸绝缘楔形油隙局部放电仿真研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(16)：5779-5788.
HE Dongxin, GONG Wenjie, LIU Hongshun, et al. Simulation study on partial discharge of oil-paper insulated in wedge-shaped oil gaps under DC electric field[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5779-5788.

[24] 王有元，李伯男，黄磊峰，等. 倒置式油浸电流互感器受潮过程微水含量动态推演方法[J]. 高电压技术，2021，47(6)：1921-1930.
WANG Youyuan, LI Bonan, HUANG Leifeng, et al. Dynamic deduction method of moisture content of inverted oil immersed current transformer during damp process[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 1921-1930.

[25] 吴超一，钟力生，王 霞，等. 脉冲电声法空间电荷测量波形恢复的数据处理[J]. 中国电机工程学报，2005，25(16)：137-140.
WU Chaoyi, ZHONG Lisheng, WANG Xia, et al. Data processing of space charge waveform recovery in PEA method[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(16): 137-140.

[26] 吴 昊，李成榕，齐 波，等. 直流电压下油、纸绝缘结构不连续界面空间电荷积聚特性[J]. 高电压技术，2013，39(6)：1419-1425.
WU Hao, LI Chengrong, QI Bo, et al. Accumulation characteristics of interface charge in the oil-paper insulation under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1419-1425.



张金烽(通信作者)
1991—，男，博士，讲师
主要从事油纸绝缘、空间电荷测量技术、绝缘检测技术的研究工作
E-mail: zjinfeng2020@qlu.edu.cn

ZHANG Jinfeng
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期 2022-06-27 修回日期 2022-10-18 编辑 曾文君