

不同类型变压器油的油纸复合绝缘空间电荷积聚与消散特性研究

于会民^{1,2}, 王会娟^{1,2}, 张培恒³, 陈 华^{1,2}, 张 昱^{1,2}, 张 绮^{1,2}, 马书杰^{1,2}, 李盛涛⁴

(1. 中国石油兰州润滑油研究开发中心, 新疆 克拉玛依 834003; 2. 中国石油润滑油重点实验室, 新疆 克拉玛依 834003; 3. 中国石油辽河润滑油厂, 辽宁 盘锦 124000; 4. 西安交通大学, 陕西 西安 710000)

摘要:在施加和撤去不同强度的直流电场下,研究了不同类型变压器油所构成的油纸绝缘体系空间电荷的积聚和消散特性。结果表明:与石蜡基变压器油相比,环烷基变压器油具有更高的环烷烃含量和适宜的芳烃含量,以及更高的电荷迁移速率,由它们构成的油纸绝缘体系在施加和撤去高压直流电场后,油纸之间电荷积聚量更小且更容易消散,从而有利于换流变压器中油纸绝缘材料中电荷的消散。

关键词:变压器油;油纸绝缘;不同类型;空间电荷

中图分类号:TM214;TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)06-0084-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.06.014

Space Charge Accumulation and Dissipation Characteristics of Oil-paper Composite Insulation with Different Types of Transformer Oils

YU Huimin^{1,2}, WANG Huijuan^{1,2}, ZHANG Peiheng³, CHEN Hua^{1,2},
ZHANG Yu^{1,2}, ZHANG Qi^{1,2}, MA Shujie^{1,2}, LI Shengtao⁴

(1. PetroChina Lanzhou Lubricating Oil R&D Institute, Karamay 834003, China; 2. PetroChina Lubricant Key Laboratory, Karamay 834003, China; 3. PetroChina Liaohe Lubricating Oil Plant, Panjin 124000, China; 4. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China)

Abstract: The space charge accumulation and dissipation characteristics of the oil-paper insulation systems composed of different types of transformer oils were studied under the conditions of applying and removing different intensity of DC electric field. The results show that compared with paraffin-based transformer oil, the naphthenic transformer oils have higher naphthenic hydrocarbon content, more suitable aromatic hydrocarbon content, and higher charge transfer rate, and the oil-paper insulation systems composed by them has less charge accumulation and the charges dissipates more easily after applying and removing the high voltage DC electric field, which is beneficial to the dissipation of charge in oil-paper insulation for converter transformer.

Key words: transformer oil; oil-paper insulation; different type; space charge

0 引言

换流变压器是直流输电系统的关键设备,与传统的电力变压器相比,换流变压器的油纸绝缘体系除了需承受交流电压、雷电冲击电压和操作过电压外,还需承受直流电压、直流与交流的混合电压和

系统发生潮流反转时产生的极性反转电压作用^[1-3],因此其绝缘体系中空间电荷积聚和消散特性会直接影响换流变压器的运行稳定性。换流变压器在出厂和投运前需要进行阀侧绕组的直流外施试验和极性反转试验,根据试验程序在极性反转试验后还需要进行阀侧绕组的交流外施试验,而换流变压器器身内部空间电荷的分布情况以及电压消失后这些空间电荷的释放路径及释放时间的长短,会直

收稿日期:2020-05-21 修回日期:2020-06-24

作者简介:于会民(1974-),男(汉族),山东聊城人,高级工程师,主要从事变压器油绝缘性能检测的研究。

接对交流电压外施试验产生影响,因为未释放的空间电荷会叠加在后续的阀侧绕组的交流外施试验电压下而发生放电问题。换流变压器空间电荷的释放途径主要是整个器身绝缘纸板对应的油隙中,变压器油的电阻率是决定空间电荷释放速率的关键因素,电阻率越小,空间电荷释放越快^[4]。目前的研究主要集中于水分、温度、电场类型及强度对油纸绝缘空间电荷的影响^[5-13],关于不同类型变压器油组成的油纸绝缘体系的空间电荷积聚和消散特性的研究尚未见报道。

换流变压器用绝缘油都是矿物型变压器油,主要由不同含量的链烷烃、环烷烃和芳香烃组成。本研究在不同电场强度下,研究环烷基和石蜡基变

压器组成的油纸绝缘体系的空间电荷分布、积聚和消散特性,得到不同电压下油纸绝缘空间电荷的积聚和消散规律,揭示不同组成变压器油对油纸复合绝缘空间电荷积聚和消散特性的影响规律。

1 试验

1.1 主要原材料

环烷基变压器油(K50X型)、环烷基变压器油(P50X型),中国石油润滑油公司;石蜡基变压器油(S4),SHELL公司;绝缘纸(T4型),厚度为0.3 mm,泰州魏德曼高压绝缘有限公司。各绝缘油的性质见表1,不同温度及电场强度下变压器油的电导率数据见表2。

表1 变压器油典型性质
Tab.1 Typical properties of transformer oils

| 项目 | K50X | P50X | S4 | 试验方法 | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|---------------|
| 密度(20℃)/(kg/m ³) | 884.2 | 872.1 | 804.3 | SH/T 0604—2000 | |
| 运动黏度/(mm ² /s) | 40℃ | 7.324 | 7.116 | 9.792 GB/T 265—1988 | |
| | 100℃ | 1.995 | 1.993 | | 2.694 |
| 黏度指数 | 42 | 52 | 114 | GB/T 1995—1998 | |
| 折光率(20℃) | 1.481 4 | 1.475 7 | 1.449 5 | SH/T 0724—2002 | |
| 倾点/℃ | -51 | -60 | -45 | GB/T 3535—2006 | |
| 苯胺点/℃ | 75 | 77 | 113 | GB/T 262—2010 | |
| 介质损耗因数(90℃) | 0.000 4 | 0.000 4 | 0.000 4 | | |
| 介电常数(90℃) | 2.280 | 2.324 | 2.168 | GB/T 5654—2007 | |
| 体积电阻率(90℃)/(Ω·m) | 1.82×10 ¹² | 4.46×10 ¹² | 11.0×10 ¹² | | |
| 析气性/(μL/min) | 28 | 39 | 60 | NB/SH/T 0810—2010 | |
| 带电度/(μC/m ³) | 1 | 1 | 10 | DL/T 385—2010 | |
| 碳型分析/% | C _A | 5.2 | 4.1 | 1.2 | |
| | C _N | 56.0 | 52.2 | 27.3 | DL/T 929—2018 |
| | C _P | 38.8 | 43.7 | 71.5 | |
| 抗氧化剂含量/% | 0.29 | 0.30 | 0.20 | SH/T 0802—2019 | |

碳型分析中,C_A指芳香碳原子占总碳原子的百分数,C_N指环烷碳原子占总碳原子的百分数,C_P指链烷烃碳原子占总碳原子的百分数^[14]。国际上,根据碳型分析对基础油的分类规则如下:若基础油C_P小于50%,则归类为环烷基油;若基础油C_P为50%

~56%,则归类为中间基油;若基础油C_P大于56%,则归类为石蜡基油。

从表1可以看出,K50X和P50X变压器油的C_P值小于50%,都是典型的环烷基变压器油。S4变压器油的C_P值在56%以上,是典型的石蜡基变

表2 不同温度及电场强度下变压器油电导率

| Tab.2 Electrical conductivity of transformer oils under different temperature and electric field strength | | | | | | |
|---|--------------|------|------------------------|------------------------|------------------------|----------------|
| 项目 | 电场强度/(kV/mm) | K50X | P50X | S4 | 试验方法 | |
| 电导率/(S/m) | 1.0 | 30℃ | 6.46×10^{-14} | 7.98×10^{-14} | 6.66×10^{-15} | GB/T 5654—2007 |
| | | 50℃ | 6.46×10^{-13} | 9.88×10^{-14} | 1.25×10^{-14} | |
| | | 70℃ | 2.38×10^{-13} | 1.43×10^{-13} | 2.68×10^{-14} | |
| | | 90℃ | 5.07×10^{-13} | 1.59×10^{-13} | 5.41×10^{-14} | |
| | 2.0 | 30℃ | 1.25×10^{-13} | 1.0×10^{-13} | 3.79×10^{-15} | |
| | | 50℃ | 1.95×10^{-13} | 1.21×10^{-13} | 1.05×10^{-14} | |
| | | 70℃ | 4.12×10^{-13} | 3.75×10^{-13} | 2.54×10^{-14} | |
| | | 90℃ | 4.68×10^{-13} | 4.13×10^{-13} | 7.38×10^{-14} | |

油。K50X和P50X变压器油的 C_N 值为52%~56%、 C_A 值为4.1%~5.2%，远高于S4变压器油的 C_N 值和 C_A 值含量。在温度为90℃，介质损耗因数为0.0004的情况下，K50X和P50X变压器油的电阻率小于S4变压器油的电阻率。

从表2可以看出，在不同温度和电场强度下，K50X和P50X变压器油的电导率明显大于S4变压器油的电导率，说明K50X和P50X变压器油的电荷迁移速率更快。

1.2 空间电荷测量技术及方法

脉冲电声法(PEA)是一种常用于测量绝缘介质中空间电荷的方法，是在库仑定律的基础之上，结合绝缘介质所处环境以及空间电荷的相关陷阱理论等共同构建的。测量时，脉冲源向试样施加一个高压窄脉冲，引起介质中的空间电荷产生微小位移，并以声波形式传播至压电传感器，转换为电信号后即可获取空间电荷密度分布特性，其基本原理如图1所示。

本研究的PEA试验在恒温箱中进行，由PEA-NUTS软件进行数据的记录和处理，分为加直流电压后的空间电荷积聚试验和去直流电压后的空间电荷消散试验。

1.3 试验方案

根据文献[15]研究结果，换流变压器在外施直流电压下降过程中，绝缘纸板中的电场强度继续升高。其中，绝缘纸中的最大电场强度为22.8 kV/mm，绝缘油中的最大电场强度为6.0 kV/mm；在加上极性反转电压后，绝缘纸中的最大电场强度为11.2 kV/mm，绝缘油中的最大电场强度为4 kV/mm；在极性反转试验中，绝缘纸中的最大电场强度为19.2 kV/mm，绝缘油中的最大电场强度为8.3

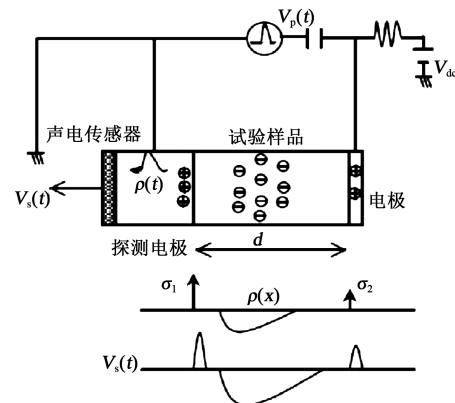


图1 脉冲电声法(PEA)原理图

Fig.1 Principle diagram of pulsed electro acoustic method

kV/mm。在整个换流变压器油直流和直流极性反转试验过程中，油浸纸板的最大电场强度为11.2~22.8 kV/mm。此次试验绝缘纸选用厚度为0.3 mm的T4绝缘纸，施加电压为3~8 kV，由于设备条件限制，本研究主要在20℃下开展空间电荷试验，在试验电压为4、6、8、10 kV下，分别采集施压5 s、1 min、10 min、20 min和30 min时的电荷量。

1.4 样品处理

为了控制绝缘油中水分、杂质微粒、含气量及绝缘纸中水分等因素的影响，需要对实验材料进行预处理。

(1) 绝缘油预处理

除不溶性杂质：用抽滤瓶、真空泵和Whatmann 42号滤纸（孔径为2.5 μm）对变压器油进行真空抽滤，过滤掉不溶性杂质。

除气除水：用真空泵和磁力搅拌器将过滤后的变压器油进行加热搅拌，除气除水。抽滤瓶中的气压维持在10 Pa，加热至70℃保持12 h，之后导入干

干燥氮气静置 8 h。经过处理的绝缘油微水含量 $\leq 10 \times 10^{-6}$, 气体含量 $\leq 0.1\%$, 杂质粒度 $\leq 2.5 \mu\text{m}$ 。

(2) 绝缘纸预处理

将 T4 绝缘纸在 105°C 鼓风干燥箱烘干 48 h, 经过预处理的绝缘纸水分含量 $\leq 0.3\%$ 。

(3) 绝缘纸油浸过程

浸渍过程在真空浸油罐中完成, 以隔绝环境水分。将预处理后的绝缘油注入浸油罐, 升温至 105°C , 将绝缘纸浸没在油面以下, 然后用螺栓紧固

并关闭罐体两侧的出入口, 抽真空 8 h, 使绝缘纸充分浸渍, 并注入一个标准大气压的氮气, 静置 4 h, 即可得到油纸绝缘试样。

2 结果与讨论

2.1 不同变压器油对油纸绝缘空间电荷积聚特性的影响

在 20°C 、不同外加电压下充电过程中不同类型变压器油纸绝缘试样的空间电荷分布情况结果如图 2~5 所示。

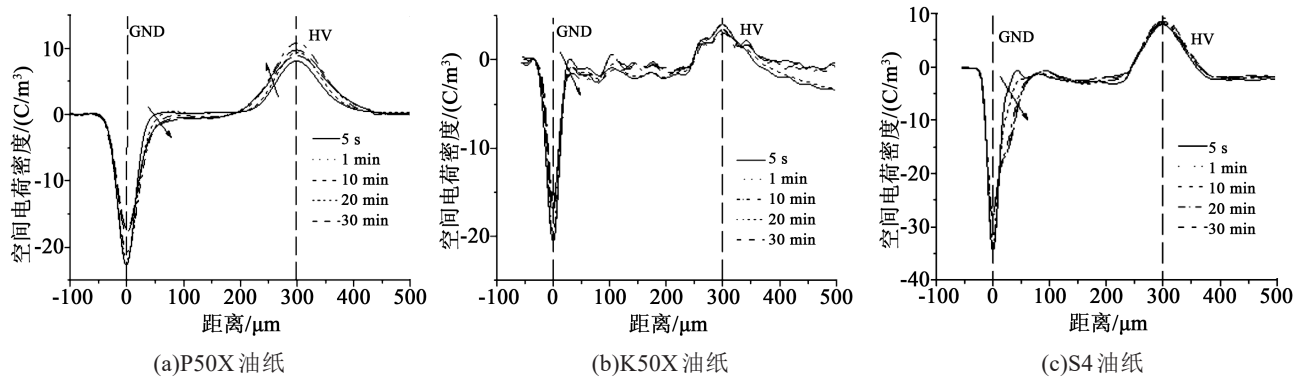


图 2 4 kV 电压下不同油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.2 Space charge distribution of different oil-paper insulation systems under 4 kV

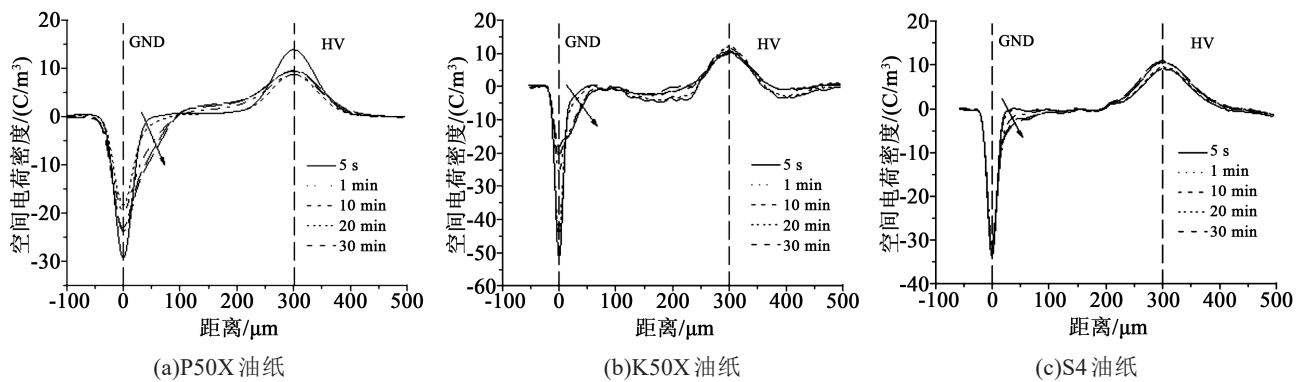


图 3 6 kV 电压下不同油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.3 Space charge distribution of different oil-paper insulation systems under 6 kV

从图 2~5 可以看出: ①4 个电压等级下都发生了同极性电荷的注入, 即正极板大量注入正电荷, 而负极板注入负电荷。随着外施电压的升高, 空间电荷注入的深度也逐渐增大, 注入介质内部的电荷量也有所增加; ②S4 油纸绝缘极板处的电荷密度较大, K50X 油纸绝缘在极板处的电荷密度分布峰值随着时间推移有明显减小的趋势, 原因是同极性电荷大量注入; 相比 S4 油纸绝缘, K50X 油纸绝缘更容易发生电荷的注入, 并且注入速度更快; ③S4 油纸绝缘阴极同极性电荷的注入深度、数量均比 P50X

和 K50X 油纸绝缘更多、更深。从油的烃组成看, K50X 和 P50X 变压器油的 C_N 值为 $52\% \sim 56\%$ 、 C_A 值 (芳烃含量) 为 $4.1\% \sim 5.2\%$, 远高于 S4 变压器油的 C_N 值和 C_A 值, 导致 K50X 和 P50X 变压器油的电导率明显大于 S4 变压器油的电导率, 说明 K50X 和 P50X 变压器油的电荷迁移速率更快。S4 油较低的电导率会导致其构成的油纸绝缘相比于 P50X 和 K50X 油纸绝缘积聚的电荷量更多。

为了便于对比说明, 单独列出加压 5 s 时 (其他时间点规律类似), 不同油浸纸内部空间电荷积聚

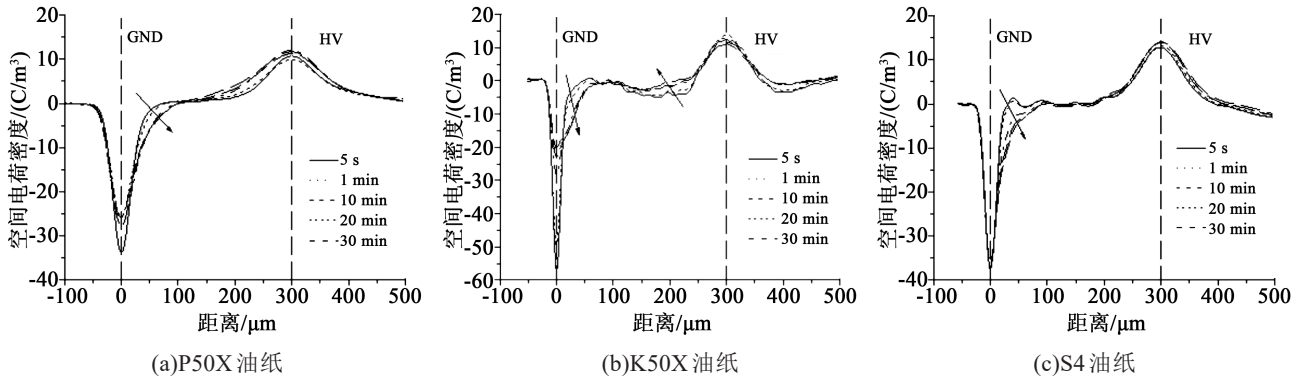


图4 8 kV电压下不同油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.4 Space charge distribution of different oil-paper insulation systems under 8 kV

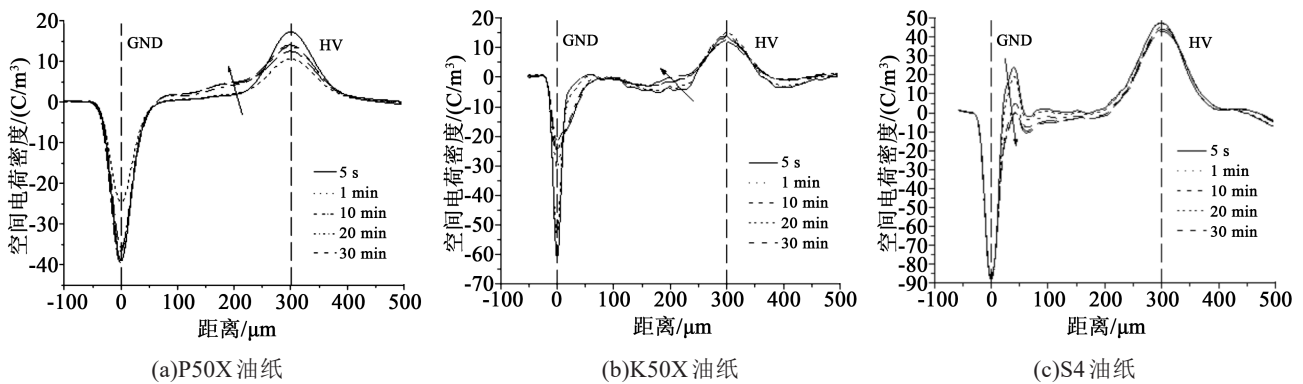


图5 10 kV电压下不同油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.5 Space charge distribution of different oil-paper insulation systems under 10 kV

总量随电压等级的变化,结果如图6所示。

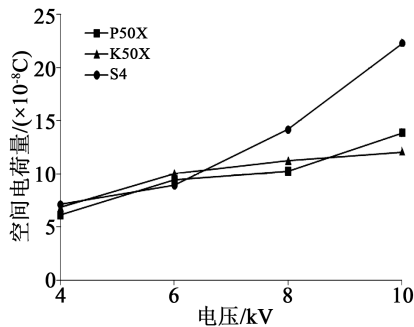


图6 加压5 s时不同油浸纸内部空间电荷积聚总量随电压等级的变化

Fig.6 Change of total space charge accumulation of different oil-paper insulation systems applying different voltage levels for 5 s

从图6可以看出,在低电压等级(4 kV、6 kV)时,3种油纸绝缘积聚的电荷量相近;在高电压等级(8 kV、10 kV)时,S4油纸绝缘积聚的电荷量更多,且随着施加电压的增大这种趋势更加明显。即电压等级增大,S4油纸绝缘相比于P50X和K50X油纸绝缘积聚的电荷量更多。

2.2 不同变压器油对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响

测量了在20℃、不同外加电压等级下放电过程中油纸绝缘试样的空间电荷分布情况,结果如图7~10所示。从图7~10可以看出,在不同电压等级下,3种油纸绝缘中K50X和P50X油纸绝缘的电荷消散速率更快,可以快速消除藏匿在浅陷阱中的电荷,其油纸绝缘的残余电荷量更少。这是由于K50X和P50X变压器油的 C_N 值和 C_A 值远大于S4变压器油的 C_N 值和 C_A 值,导致K50X和P50X变压器油的电导率明显大于S4变压器油的电导率造成的。

为了进行对比说明,将撤去电压30 min后各油纸绝缘试样的空间电荷最终残余总量绘于图11。从图11可以看出,撤去电压30 min后,不同电压等级油纸绝缘内部空间电荷积聚的残余总量均随电压等级的提高而增加。在撤去电压相同时间后,低电压等级(4 kV、6 kV)下,3种油纸绝缘残余的电荷量相近;高电压等级(8 kV、10 kV)下,S4油纸绝缘残余的电荷量更多,且电压等级越高,S4油纸绝缘

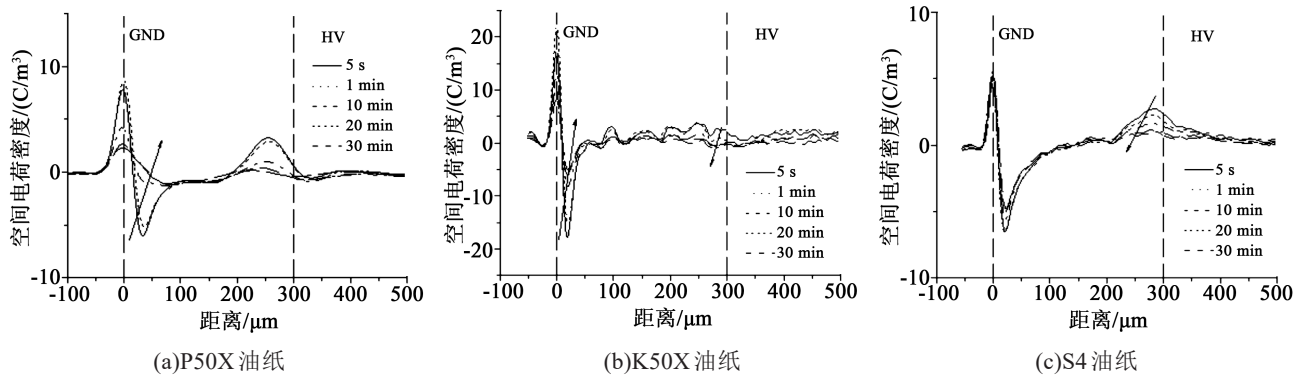


图7 4 kV撤去电压后油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.7 Space charge distribution of oil-paper insulation system after removing voltage (4 kV)

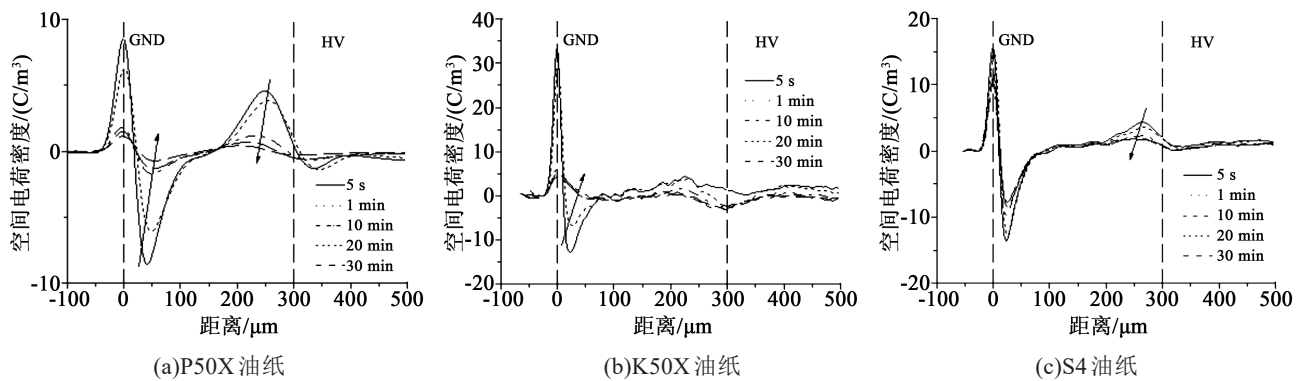


图8 6 kV撤去电压后油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.8 Space charge distribution of oil-paper insulation system after removing voltage (6 kV)

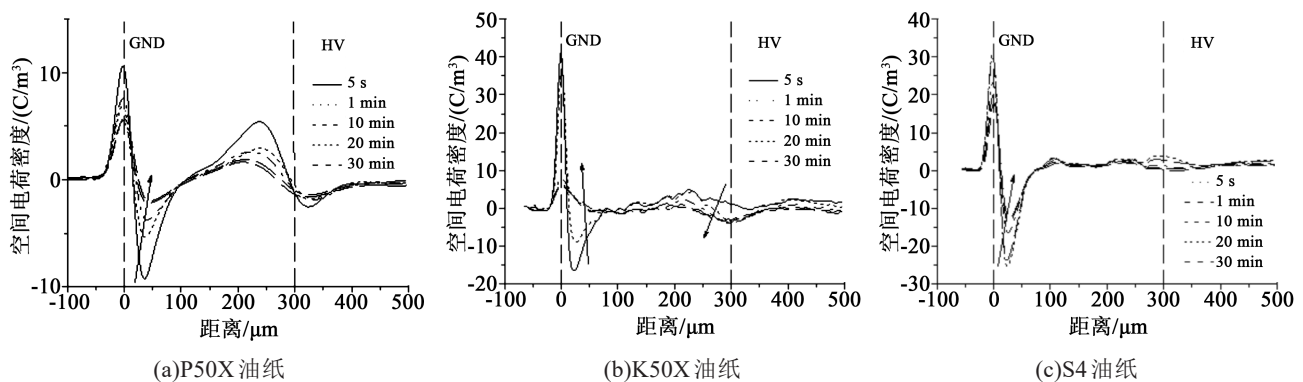


图9 8 kV撤去电压后油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.9 Space charge distribution of oil-paper insulation system after removing voltage (8 kV)

相比于 P50X、K50X 油纸绝缘残余的电荷增量更大。从油的烃组成看, K50X 和 P50X 变压器油的 C_N 值和 C_A 值远高于 S4 变压器油的 C_N 值和 C_A 值, 导致 K50X 和 P50X 变压器油的电导率明显大于 S4 变压器油的电导率, 在撤去电压时, S4 油较低的电导率会导致其构成的油纸绝缘相比于 P50X 和 K50X 油纸绝缘积聚的电荷量释放速率慢很多, 积聚的电荷量相对较高。

3 结论

(1) K50X 和 P50X 变压器油的 C_N 值和 C_A 值远高于 S4 变压器油, K50X 和 P50X 变压器油的电导率明显大于 S4 变压器油。

(2) 高环烷烃含量的 K50X 和适当芳烃含量的 P50X 变压器油具有更好的电荷积聚和消散特性, 由它们构成的油纸绝缘体系在施加和撤去高压直流电场后, 油纸之间电荷积聚量更小且更容易消散,

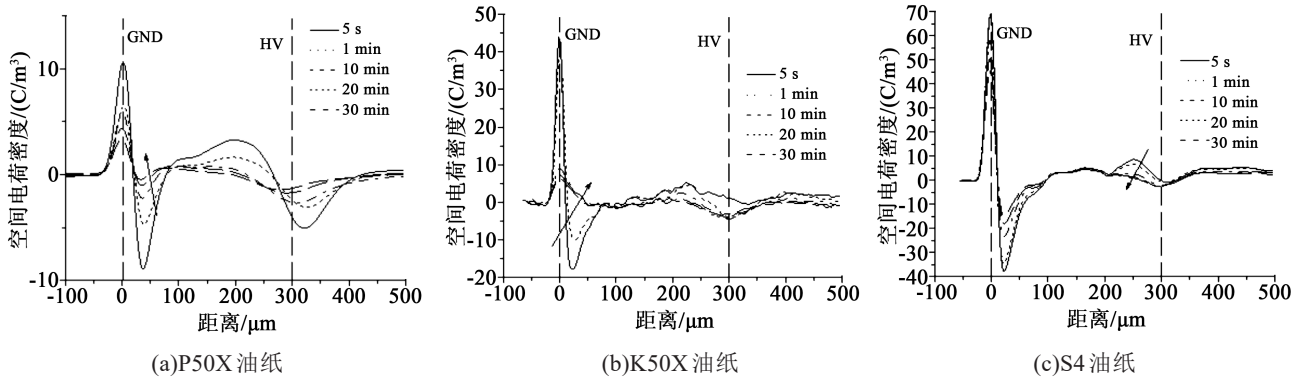


图10 10 kV 撤去电压后油纸绝缘体系的空间电荷分布

Fig.10 Space charge distribution of oil-paper insulation system after removing voltage (10 kV)

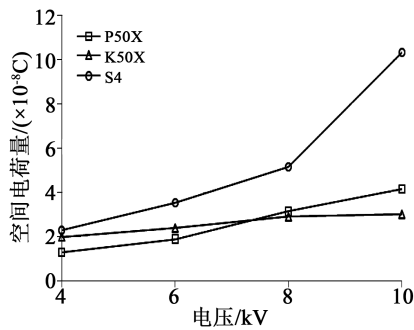


图11 撤去电压30 min后不同油纸绝缘内部空间电荷积聚总量随电压的变化

Fig.11 Change of total space charge accumulation in different oil-paper insulation systems with voltage after removing voltage for 30 min

从而有利于换流变压器中油纸绝缘材料中电荷的消散。

参考文献：

[1] 傅铁军,王健,钟俊涛,等. 直流输电±800kV换流变压器的绝缘结构分析[J]. 变压器,2009,46(3):1-5.
 [2] 罗青林. 关于800kV换流变压器主绝缘研究[J]. 变压器,2009,46(11):7-9.
 [3] 赵文祥,齐桂芬,李文平. ±1100kV直流输电工程用换流变压器主绝缘结构的研究[J]. 电气制造,2014,46(5):42-44.

[4] 李文平. 特高压换流变压器空间电荷分布的计算分析[J]. 变压器,2011,48(5):6-9.
 [5] 廖瑞金,李伟,杨丽君,等. 变压器油纸绝缘介质在直流电场中的空间电荷输运特性[J]. 高电压技术,2011,37(5):1057-1065.
 [6] 周远翔,田冀焕,王去杉,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.
 [7] 廖瑞金,周之,郝建,等. 水分和温度联合作用时油浸绝缘纸空间电荷特性[J]. 高电压技术,2012,38(10):2647-2654.
 [8] 李剑,徐洪,王艳杨,等. 脉动直流电压下油中电晕老化过程中油纸绝缘的空间电荷特性[J]. 高电压技术,2012,38(10):2662-2668.
 [9] 周远翔,黄猛,陈维江,等. 直流电压下多层油纸绝缘介质的界面空间电荷特性[J]. 高电压技术,2013,39(6):1304-1311.
 [10] 周远翔,黄猛,戴超,等. 不同含水量油纸绝缘热老化过程中的空间电荷特性研究[J]. 高电压技术,2015,41(6):1921-1928.
 [11] 陈义龙,齐波,李成榕,等. 极性反转条件下的油纸界面电荷对沿面闪络电压的影响[J]. 南方电网技术,2015,9(4):75-79.
 [12] 郝建,黄博, GEORGE C,等. 空间电荷在多层结构油纸绝缘混合体系的积聚规律及其对电场分布的影响[J]. 高电压技术,2017,43(6):1973-1979.
 [13] 周远翔,黄欣,黄猛,等. 温度对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响[J]. 电工电能新技术,2018,37(7):1-8.
 [14] 于会民,张培恒,王会娟,等. 直流电场下变压器油的成份与其击穿电压的关联性研究[J]. 绝缘材料,2014,47(3):36-40.
 [15] 曹利强,王森,张宏亮,等. 换流变压器空间电荷分布及快速释放方法的研究[J]. 陕西电力,2013,41(5):38-42.