

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.04.003

植物油与固体绝缘材料在电力变压器中的相容性研究

梁苏宁¹, 杨智¹, 邵先军¹, 王强²

(1. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 杭州 310014; 2. 重庆大学电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了研究植物绝缘油与变压器绝缘纸材料的相容性, 将变压器常用的9种不同类型的绝缘纸材料与植物绝缘油相结合, 研究了植物绝缘油和绝缘纸在老化164 h后的性能变化。观察了绝缘纸和绝缘油在热老化实验前后的性能差异, 并测试了这些不同油纸组合的运动黏度、水分含量、酸值、介电损耗系数、击穿电压和油的气相色谱分析。结果表明, 植物绝缘油老化后, 运动黏度没有较大变化, 且植物绝缘油结构完整性和功能稳定性仍然良好。此外, 植物绝缘油与22HCC丹尼森绝缘纸高度相容。相较于其他实验组, 电绝缘纸板与植物绝缘油的相容性较差。热老化后, 金属皱纹纸和层压纸板与植物绝缘油的击穿电压较低, 两者之间的相容性较差。这些发现为选择相容性好的绝缘材料和优化绝缘结构以确保植物基绝缘油变压器的安全稳定运行提供了依据。此外, 研究结果有助于推广和应用植物绝缘油, 促进可持续能源的发展。

关键词: 植物绝缘油; 纸油绝缘; 相容性; 热老化; 溶解气体

Study on Compatibility of Vegetable Oil and Solid Insulation Materials in Power Transformer

LIANG Suning¹, YANG Zhi¹, SHAO Xianjun¹, WANG Qiang²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: For studying the compatibility of vegetable insulating oil with insulating paper materials of transformer, 9 different types of insulating paper materials commonly used in transformers are combined with vegetable insulating oil to study the performance variation of vegetable insulating oil and insulating paper after 164 h of aging. The performance difference of the insulation paper and insulating oil before and after the thermal aging experiment is observed, and the movement viscosity, moisture content, acidity value, dielectric loss factor, breakdown voltage of the oil paper combination as well as gas chromatographic analysis of the oil are tested. The results show that the movement viscosity of the vegetable insulating oil has changed to some extent after aging, but the the structural integrity and functional stability remain good. Moreover, the vegetable-based insulating oil is highly compatible with 22HCC Dennison insulation paper. Compared to other test group, the compatibility of the electrical insulating paper and vegetable insulating oil is weak. After the thermal aging, the breakdown voltage of the metallized crepe paper, laminated paper board and the vegetable insulating oil is lower and the their compatibility is weak. These findings provide a basis for selecting insulation materials with good compatibility and optimizing insulation structures to ensure the safe and stable operation of vegetable-based insulating oil transformers. Furthermore, the study results help promote and apply vegetable insulating oil and promote the development of sustainable energy.

Key words: vegetable insulating oil; paper-oil insulation; compatibility; thermal aging; dissolved gases

收稿日期:2023-11-21; 修回日期:2024-01-27

0 引言

变压器是电力系统中的重要部件,需要可靠和安全的运行。绝缘材料对于确保变压器的安全和寿命至关重要。其中,绝缘油是电力变压器的关键材料,对保持变压器的绝缘性能和延长变压器的使用寿命起着至关重要的作用。近年来,由天然酯类制成的绝缘油,如植物绝缘油,由于其环境友好和优异的绝缘性能,得到了广泛的研究和应用^[1-5]。

研究表明,植物绝缘油可以有效吸收绝缘纸板中的水分,从而缓解变压器绝缘的老化,延长变压器的使用寿命^[5-12]。然而,绝缘油与其他变压器材料之间的兼容性也是影响变压器绝缘性能的关键因素^[13]。因此,在选择变压器绝缘油时,必须考虑变压器材料与绝缘油之间的兼容性。变压器绝缘油与绝缘材料的相容性决定了变压器的绝缘性能。Abdelmalik 等人^[14]对纤维素纸在矿物油和植物油中的老化进行了比较研究,发现用新开发的酯液(PKOE)浸渍的纤维素纸表现出较慢的热降解速率。PKOAE 浸渍纸在老化条件下的抗拉强度下降率显著低于矿物油浸渍纸样品。这些结果表明,绝缘纸能够承受更高的温度,在植物绝缘油中具有更长的老化时间,表明植物绝缘油和绝缘纸之间具有更好的相容性。虽然先前的研究已经证明植物绝缘油与特定类型的绝缘纸或电缆纸之间具有良好的兼容性,但关于植物绝缘油和多种类型的绝缘纸之间的兼容性的文献有限。在实际的变压器制造中,使用了各种绝缘纸材料,远远超出了先前研究中所研究的有限类型的范围。因此,有必要进一步研究,以充分评估植物绝缘油与变压器制造中常用的各种绝缘纸材料之间的兼容性。

为了研究绝缘油与绝缘材料的相容性,在模拟油纸绝缘系统中,研究了绝缘纸板(台州鑫源)、耐热皱纹纸、22HCC 丹尼森、金属皱纹纸和 335HC 丹尼森等不同变压器绝缘纸与植物绝缘油的老化特性。本研究重点评估了不同油纸组合的热老化特性,并检测了绝缘纸和绝缘油在 100 ℃老化 164 h 前后的变化。实验测试了绝缘油的运动黏度、含水量、酸值、介电损耗系数、击穿电压和气相色谱等参数。总的来说,绝缘油和绝缘材料之间的兼容性对于确保变压器的绝缘性能和延长变压器的使用寿命至关重要。

1 材料和方法

1.1 实验材料

本实验使用的绝缘纸材料为绝缘纸板(台州鑫

源)、绝缘纸板(邵阳广信)、耐热皱纹纸、22HCC 丹尼森、金属皱纹纸和 335HC 丹尼森、电缆纸、层压纸板和电绝缘纸板(用于变压器的材料)。实验中绝缘纸的接触面积为 60 cm²,植物绝缘油的使用量为 750 mL。与每个样品编号相对应的绝缘纸的名称见表 1。

表 1 样品绝缘纸名称

Table 1 Names of sample insulation paper

编号	样品
0	空白油样
1	绝缘纸板(台州鑫源)
2	绝缘纸板(邵阳广信)
3	耐热皱纹纸
4	22HCC 丹尼森
5	金属皱纹纸
6	335HC 丹尼森
7	电缆纸
8	层压纸板
9	电绝缘纸板(用于变压器的材料)

1.2 样品制备

实验程序如下,将通过过滤器过滤的植物绝缘油置于 90 ℃的真空干燥炉中 24 h,进行干燥。将为实验制备的绝缘纸置于 105 ℃的真空干燥炉中 16 h,进行干燥和脱水。然后,将干燥的绝缘纸浸入干燥的植物绝缘油中,并在 60 ℃的真空干燥炉中放置 48 h,进行油浸渍。然后将植物绝缘油浸渍绝缘纸置于温度为 100 ℃的干燥炉中,测试周期为 164 h。测试期结束后,将样品冷却至室温,并测试绝缘油的含水量、黏度、介电损耗因数、酸值、击穿电压和气相色谱。样品制备过程见图 1。

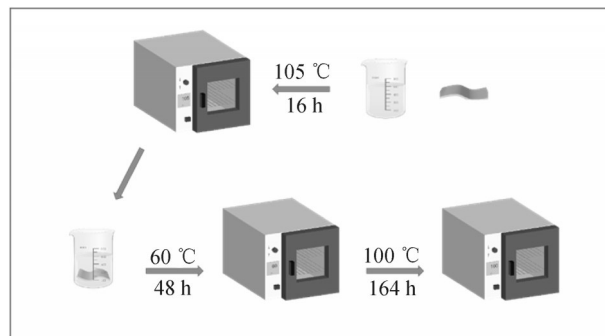


图 1 样品制备过程

Fig. 1 Sample preparation process

2 结果和讨论

2.1 运动黏度

对植物油绝缘纸进行了 164 h 的热老化试验。植物绝缘油热老化 164 h 后的运动黏度见图 2,植物油绝缘纸在 100 ℃热老化 164 h 后的运动黏度测试

结果表明,测试前后植物油的运动黏度没有显著变化。这些发现表明,绝缘纸对植物油运动黏度的影响并不显著,当与变压器中使用的其他固体材料结合时,植物油本身的黏度性能是影响黏度的主要因素。

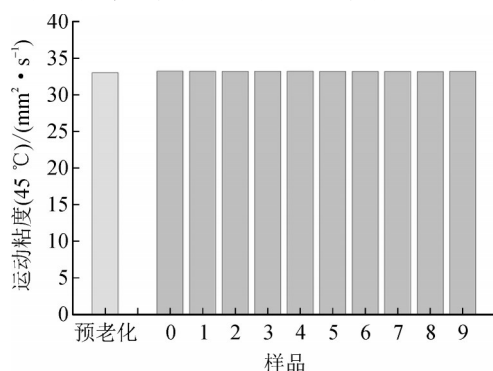


图2 植物绝缘油热老化 164 h 后的运动粘度

Fig. 2 Kinematic viscosity of vegetable insulation oil after thermal aging for 164 h

2.2 含水量

植物绝缘油和绝缘纸在 100 °C 热老化后的含水量见图 3。随着实验的进行,与老化对照组相比,油中的含水量显著增加。保温纸板(台州鑫源)和保温纸板(邵阳广信)的组合,即 1 号组和 2 号组,其含水量高于老化对照组。值得注意的是,与老化对照组相比,第 8 号组和第 9 号组的含水量增加较少,这表明这两种类型的绝缘纸和植物绝缘油之间具有更好的兼容性。

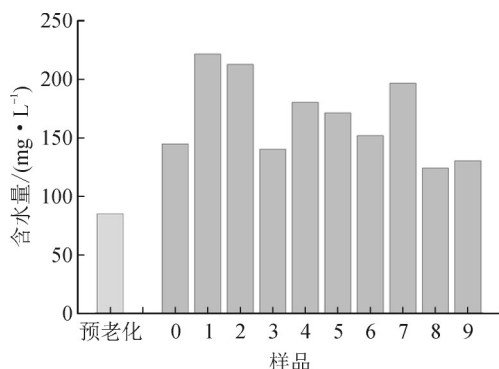


图3 植物绝缘油热老化 164 h 后的含水量

Fig. 3 Moisture content of vegetable insulating oil after 164 h of thermal aging

2.3 酸值

在本实验中,对不同组的植物绝缘油进行 164 h 的热老化试验,并测量老化前后的酸值。结果见图 4。具体而言,空白对照组的酸值增加了 0.02 mgKOH/g,而 1、2、6、8 号组仅增加了 0.01 mgKOH/g。3、4、5、7 号组在实验前后酸值没有变化,而 9 号组增加了 0.02 mgKOH/g。这表明热老化处理对植物绝缘油的酸值有一定影响,可能是由于油分子的降解或氧化反应导致酸值增加。与空白对照组相比,在植物绝

缘油体系中添加绝缘纸导致酸值增加较少,表明添加绝缘纸在一定程度上缓解了油分子的降解和氧化引起的酸值增加。

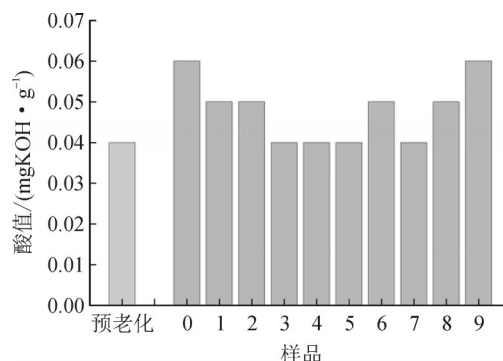


图4 植物绝缘油热老化 164 h 后的酸值

Fig. 4 Acid value of vegetable insulation oil after thermal aging for 164 h

植物绝缘油的主要成分是甘油三酯,在高温下会逐渐水解为甘油和游离脂肪酸。不饱和链断裂形成过氧化物和自由基,进一步生成短链脂肪酸、醛、酮和其他物质,导致酸值增加。然而,油中的游离脂肪酸与绝缘纸表面之间存在扩散平衡关系,这可能导致溶解在油中的自由脂肪酸含量下降。同时,游离脂肪酸可能与绝缘纸表面的羟基结合,发生酯交换反应,降低酸值。所得脂肪酸酯附着在绝缘纸表面,进一步延缓固体材料的老化分解,抑制酸值的增加^[15]。先前的研究表明,植物绝缘油可以与水分子和酸性分子形成稳定的氢键,通过氢键抑制它们对绝缘纸加速老化和催化水解的影响^[16-18]。此外,纤维素上的羟基和脂肪酸之间的酯化抑制了绝缘纸的加速老化。此外,实验结果还表明,不同实验组之间酸值升高幅度存在差异,这可能与不同组合的绝缘纸与植物绝缘油的相容性有关。总体而言,结果表明,9 号组与植物绝缘油的相容性比其他实验组差一些。

2.4 介质损耗系数

植物绝缘油浸渍绝缘纸热老化 164 h 后的介电损耗系数见图 5。在相容性方面,实验组表现出不同的性能,实验组 1、2、7、9 号中的绝缘油的介电损耗因子比实验前更小。相反,实验组 3 号和 6 号表现最差,与空白对照组相比,介电损耗显著增加。这表明,1、2、7、9 号组的绝缘组合对介电损耗的增加具有一定的抑制作用,表明这些材料在热老化早期与植物绝缘油具有良好的相容性。此外,浸渍植物绝缘油的 4 种绝缘纸对油的降解没有显著影响,表明这些材料与植物绝缘油具有良好的相容性。

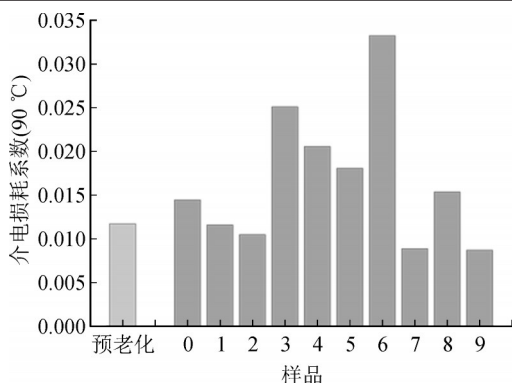


图5 植物绝缘油热老化 164 h 后的介电损耗系数

Fig. 5 Dielectric loss coefficient of vegetable insulating oil after 164 h of thermal aging

2.5 击穿电压

绝缘击穿电压是评价系统绝缘状态的重要性指标。绝缘系统在热老化 164 h 前后的击穿电压见图 6。可以观察到,每个实验组的击穿电压在热老化后降低,表明系统的绝缘性能恶化。具体而言,在 5 号和 8 号实验组中使用植物绝缘油显示出热老化后击穿电压的最显著降低,表明这些绝缘材料与相应的植物绝缘油之间的兼容性较差。相比之下,4 号和 7 号实验组中使用的植物绝缘油在热老化后的击穿电压下降较小,表明这些绝缘材料与相应的植物绝缘用油之间具有更好的兼容性。总体而言,结果表明,该系统的绝缘性能受到绝缘材料与植物绝缘油之间兼容性的影响,某些类型的绝缘材料可能表现出比其他类型更好的兼容性。

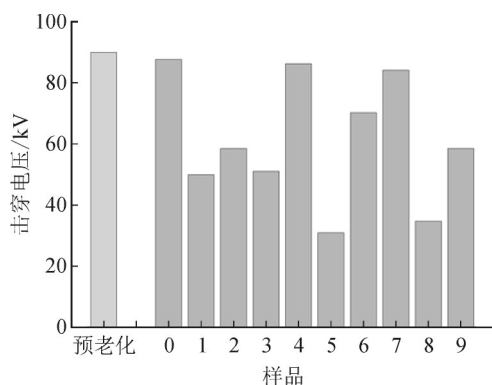


图6 植物绝缘油热老化 164 h 后的击穿电压

Fig. 6 Breakdown voltage of vegetable insulating oil after thermal aging for 164 h

2.6 溶解气体

在老化前后的实验中,使用气相色谱法分析了绝缘油中气体体积分数的变化。热老化 164 h 后植物绝缘油中溶解气体的气相色谱图见图 7。碳氢化合物、碳氧化物和氢气与变压器中所有类型的内部故障有关^[19-21]。结果表明,热老化会导致更多气体的释放。在实验 4 号中, H_2 、 CH_4 和 C_2H_4 的体积分数

高于其他实验组。此外,在实验 1 号和 9 号中, C_2H_4 、 C_2H_6 、 CO 和 CO_2 的体积分数显著高于其他实验组。这表明这些实验组中的绝缘材料可能对油中放电产生的气体有一定的促进作用。相比之下,2 号和 8 号组中各种气体的体积分数变化较小,这可能是由于这些绝缘材料与植物绝缘油的兼容性更好,可以有效减缓老化和气体产生。总的来说,气相色谱结果进一步证明了绝缘材料和植物绝缘油之间的兼容性对绝缘系统性能的重要性。

2.7 实验前后植物油和固体物质的变化

164 h 热老化实验前后植物绝缘油的变化见图 8。图 8(a)表示老化前的空白植物绝缘油,而图 8(b)显示了用不同的绝缘纸热老化后的油样品。从实验结果中可以观察到,绝缘油最初是浅黄色,并且在 164 h 的热老化后,空白油样品的颜色略有变化并变得略暗。绝缘纸油体系中的植物绝缘油在老化前后呈微红棕色,但仍保持透明。这可能是由于在长期老化过程中,绝缘纸中的一些老化产物溶解在油中,导致油的颜色略有变暗。然而,由于老化时间相对较短,因此颜色变化并不显著。这表明油纸系统在热老化 164 h 后没有明显的结构变化,也没有可见的脱落或杂质颗粒。这进一步证明了植物绝缘油与实验中使用的各种类型的绝缘纸之间的良好兼容性。

在这一部分中,我们研究了保温纸在热老化前后的形态变化。绝缘纸在老化过程前后的变化见图 9。在老化 164 h 后,绝缘纸表现出稍微更亮和更光滑的外观,并且观察到光穿过间隙。此外,老化绝缘纸的表面表现出更高的光泽,看起来更光滑,这可能是由于溶解在绝缘油中的气体或老化产物填充了绝缘纸的微孔。尽管发生了这些变化,但没有证据表明存在损坏、碎片脱落或杂质。此外,即使在长时间老化后,绝缘纸仍保持其结构完整性和与植物绝缘油的兼容性。本研究结果表明,用于高压电气设备的绝缘纸具有良好的抗热老化性能,适合长期使用。

3 结语

这项研究证明了高压电气设备中常用的植物绝缘油和各种绝缘纸材料具有良好的兼容性和抗热老化性。这些材料在外观和酸值方面表现出显著的稳定性,在老化过程中没有观察到显著的劣化,并且保持了其结构完整性和功能稳定性。值得注意的是,台州鑫源(1 号)和邵阳广信(2 号)的绝缘

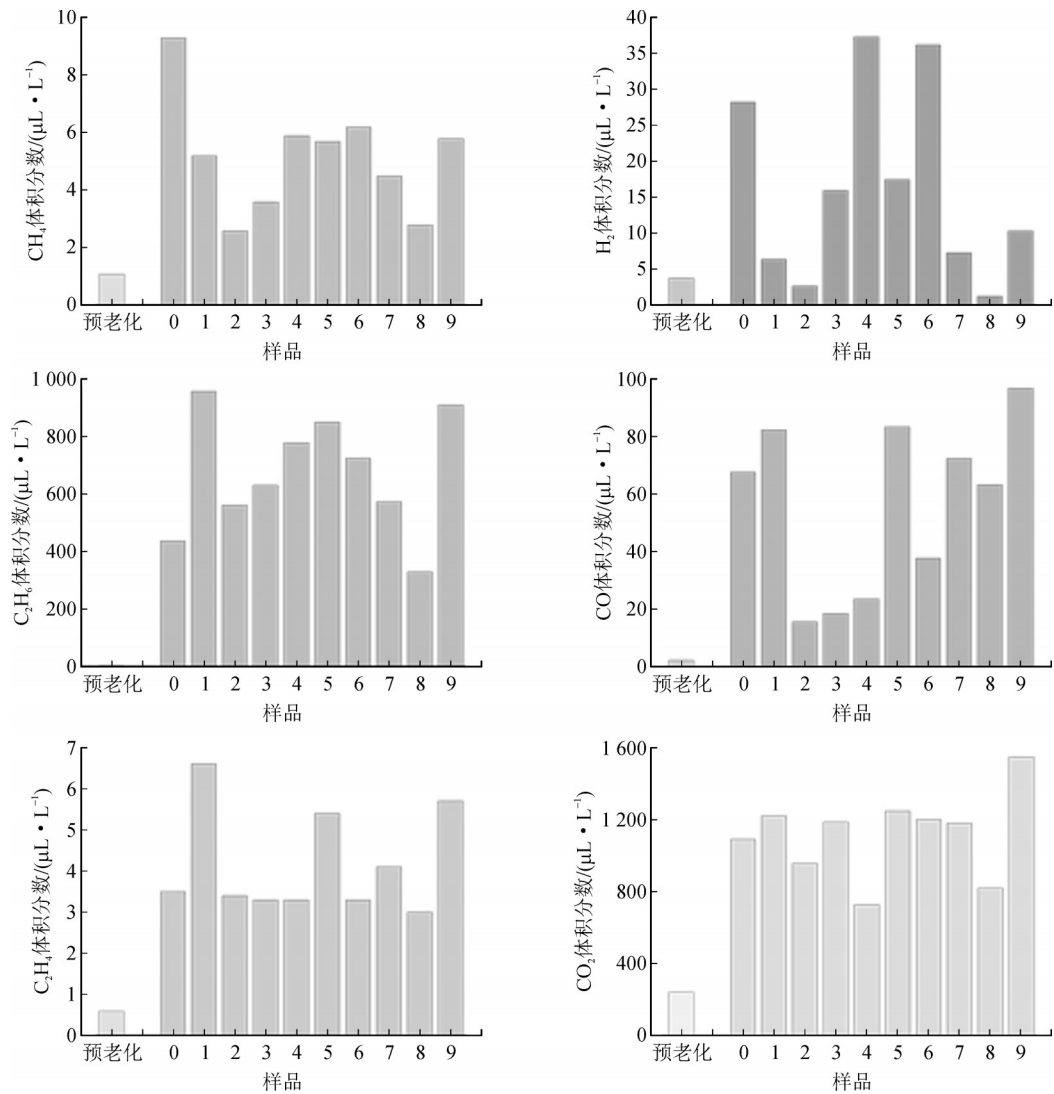
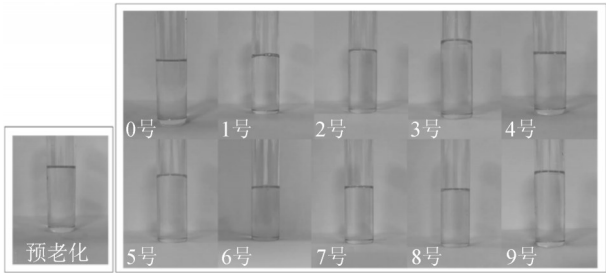
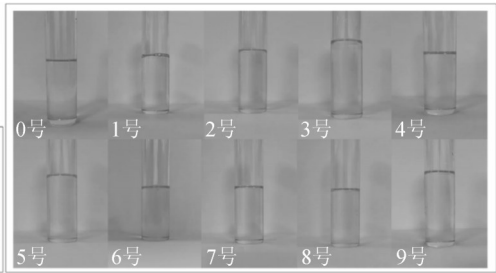


图7 热老化 164 h 后植物绝缘油中溶解气体的气相色谱图

Fig. 7 Gas chromatogram of dissolved gases in plant insulating oil after 164 h of thermal aging



(a) 老化前实验

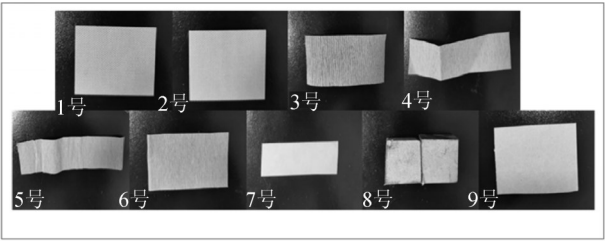


(b) 老化后实验

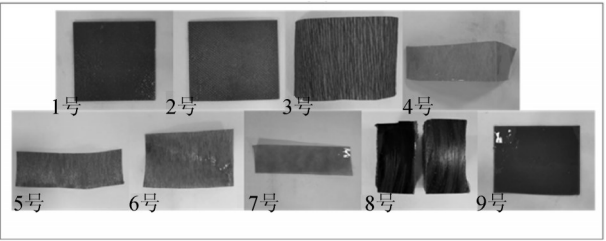
图8 各种蔬菜绝缘油样品在热老化 164 h 前后的变化

Fig. 8 Changes in insulation oil samples of various vegetables before and after thermal aging for 164 h

纸、电缆纸、电工纸板、22HCC 丹尼森绝缘纸和植物绝缘油在老化性能的各个方面都表现出优异的相容性,其中,相较于实验之前的介电损耗因子,台州鑫源(1号)和邵阳广信(2号)绝缘纸介电损耗因子有所降低。且邵阳广信(2号)和层压纸板(8号)中气体体积分数变化较小,这表明这些绝缘材料与植物绝



(a) 老化实验前



(b) 老化实验后

图9 各种绝缘纸样品在热老化 164 h 前后的变化

Fig. 9 Changes of various insulating paper samples before and after thermal aging for 164 h

缘油的兼容性较好。金属皱纹纸(5号)和层压纸板(8号)在热老化后与植物绝缘油的击穿电压较低,两者之间的兼容性较差。这些发现对高压电气设备绝缘系统的优化和设计具有重要意义。未来的研究工作应该探索这些材料在更复杂的操作条件下的性能,并确定改进和优化的机会。

致谢

本工作得到了国网浙江省电力有限公司科技项目的支持,项目号5211DS22000H。项目名称为《高压大容量天然酯植物油变压器关键技术研究》。

参考文献:

- [1] YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Caixin, et al. Influence of vegetable oil on the thermal aging of transformer paper and its mechanism[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 692-700.
- [2] 李松江, 胡 婷, 曾四秀, 等. 植物绝缘油变压器的研究进展[J]. 绝缘材料, 2021, 54(8): 18-23.
LI Songjiang, HU Ting, ZENG Sixiu, et al. Research progress of natural ester insulating liquid transformer[J]. Insulating Materials, 2021, 54(8): 18-23.
- [3] MAHANTA D K, LASKAR S. Electrical insulating liquid: A review[J]. Journal of Advanced Dielectrics, 2017, 7(4): 1730001.
- [4] 江 均, 芦 杨, 杨 涛, 等. 光照和储藏温度对植物绝缘油性能的影响[J]. 变压器, 2022, 59(10): 37-42.
JIANG Jun, LU Yang, YANG Tao, et al. Influence of light and storage temperature on properties of vegetable insulating oil[J]. Transformer, 2022, 59(10): 37-42.
- [5] 赵 辉, 张亚杰, 张江辉, 等. 天然酯绝缘油变压器绝缘件渗透速率研究[J]. 变压器, 2022, 59(2): 47-50.
ZHAO Hui, ZHANG Yajie, ZHANG Jianghui, et al. Research on penetration rate of transformer insulation with natural ester insulating oil[J]. Transformer, 2022, 59(2): 47-50.
- [6] RAFIQ M, LYU Y Z, ZHOU Y, et al. Use of vegetable oils as transformer oils-a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 52(12): 308-324.
- [7] 娄 为, 吴奕南, 花啸昌, 等. 变压器油纸绝缘干燥过程中水分迁移规律与评估方法研究[J]. 变压器, 2022, 59(6): 18-24.
- [8] LOU Wei, WU Yinan, HUA Xiaochang, et al. Research on migration characteristics and evaluation method of moisture in drying process of oil-paper insulation[J]. Transformer, 2022, 59(6): 18-24.
- [8] 赵莉华, 安建国, 杨 兰, 等. 水分对天然酯变压器油热老化特性的影响[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 164-167.
ZHAO Lihua, AN Jianguo, YANG Lan, et al. Influence of moisture content on thermal aging characteristics of natural ester transformer oil[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(3): 164-167.
- [9] JIN Yongliang, DUAN Haitao, WEI Lei, et al. Comparison of the oxidation resistance of synthetic ester oils DOA and TDTM: Experimental evaluation and theoretical calculation [J]. Lubrication Science, 2019, 31(6): 252-261.
- [10] SIDDIQUE Z B, BASU S, BASAK P. Effect of graphene oxide dispersed natural ester based insulating oil on transformer solid insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 378-385.
- [11] KARTHIK M, NARMADHAI N, THANGARAJ R, et al. Evaluating the crucial qualities of hybrid esters for transformer applications[C]//2021 International Conference on Advancements in Electrical, Electronics, Communication, Computing and Automation (ICAECA). India: IEEE, 2021: 1-4.
- [12] 姜良民, 殷守斌, 徐 珂, 等. 变压器油纸绝缘电热联合老化机理研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(5): 86-94.
JIANG Liangmin, YIN Shoubin, XU Ke, et al. A study on the electrical-thermal aging mechanism of oil-paper insulation in transformers[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(5): 86-94.
- [13] 曾四秀, 胡 婷, 周竹君. 植物绝缘油与多种变压器用绝缘纸的相容性研究[J]. 电工电气, 2020(9): 51-54.
ZENG Sixiu, HU Ting, ZHOU Zhujun. Study on compatibility between vegetable insulation oil and various insulation papers for transformers[J]. Electrotechnics Electric, 2020(9): 51-54.
- [14] 解 浩, 张 苛. Nomex 绝缘纸热老化油中溶解气体分析[J]. 山西电力, 2023(2): 40-44.
XIE Hao, ZHANG Ke. Analysis of dissolved gases in heat aged oil of Nomex insulation paper[J]. Shanxi Electric Power, 2023(2): 40-44.
- [15] LUNDGAARD L E, HANSEN W, INGEBRIGTSEN S. Ageing of mineral oil impregnated cellulose by acid catalysis [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insula-

- tion, 2008, 15(2): 540-546.
- [16] WANG W, DONG W Y, JIANG D, et al. Water molecules migration at oil-paper interface under the coupling fields of electric and temperature: A molecular dynamics study[J]. Molecular Physics, 2018, 117(1): 11-22.
- [17] DAN Linyang, ZHANG Kai, HUANG Zhengyong, et al. Molecular-level evaluation of ionic transport under external electric fields in biological dielectric liquids[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021(340): 116883.
- [18] DAN Linyang, ZHANG Kai, HUANG Zhengyong, et al. Suppressing ion aggregation on cellulose surface by bio-dielectric liquids: Insights from molecular dynamics simulations [J]. Journal of Molecular Liquids, 2021(327): 114805.
- [19] YANG L J, QI C L, WU G L, et al. Molecular dynamics simulation of diffusion behaviour of gas molecules within oil-paper insulation system[J]. Molecular Simulation, 2013, 39(12): 988-999.
- [20] PERRIER C, MARUGAN M, BEROUAL A. DGA comparison between ester and mineral oils[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1609-1614.
- [21] LIN C H, CHEN J L, HUANG P Z. Dissolved gases forecast to enhance oil-immersed transformer fault diagnosis with grey prediction - clustering analysis[J]. Expert Systems, 2011, 28(2): 123-137.
- 梁苏宁(1991—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为高压与绝缘技术(E-mail: liangsunigzj@163.com)。
- 杨智(1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高压与绝缘技术(E-mail: dawn1303@163.com)。
- 邵先军(1983—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为高压与绝缘技术(E-mail: shaoxianjun0575@163.com)。
- 王强(1991—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为高压与绝缘技术(E-mail: wangqiang0609@cqu.edu.cn)。
- (上接第16页)
- Chemical Physics, 2012(398): 148-153.
- [30] ROZUM I, LIMA O - VIEIRA P, EDEN S, et al. Electron interaction cross sections for CF_3I , C_2F_4 and $\text{CF}_x(x=1-3)$ radicals[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2006, 35(1): 267-284.
- [31] CLITEUR G J, HAYASHI Y, HAGINOMORI E, et al. Calculation of the uniform breakdown field strength of SF_6 gas [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(6): 843-849.
- [32] ZHONG Linlin. Fast prediction of electron-impact ionization cross sections of large molecules via machine learning [J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(18): 183302.
- [33] 郭晓雪, 赵虎, 李兴文. 热态 CO_2 及其与 O_2 混合气体热动属性及电击穿特性的计算分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3085-3090.
- GUO Xiaoxue, ZHAO Hu, LI Xingwen. Calculation and characteristic analysis of thermodynamic properties and dielectric breakdown properties of CO_2 and its mixture with O_2 [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3085-3090.
- [34] LI Xingwen, ZHAO Hu, JIA Shenli. Dielectric breakdown properties of $\text{SF}_6\text{-N}_2$ mixtures in the temperature range 300-3 000 K[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012(45): 445202.
- [35] YOUSFI M, ROBIN-JOUAN P, KANZARI Z. Breakdown electric field calculations of hot SF_6 for high voltage circuit breaker applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(6): 1192-1200.
- [36] LIN Xin, CUI Zhaoxuan, GENG Zhenxin, et al. Calculation of thermodynamic physical parameters of $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ and $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}/\text{CO}_2$ mixtures[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment Switching Technology. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2019: 55-59.
- 崔兆轩(1996—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为高压电器设计、 SF_6 替代技术等(E-mail: sygyzczx@163.com)。
- 林莘(1961—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为高压电工装备等离子体放电理论、高压电器及其智能化技术、 SF_6 替代技术等(通信作者)(E-mail: sylinxin@163.com)。