

天然酯绝缘油中工频电弧放电特性及其对变压器防爆性能的影响

陈艺昕, 贾云飞, 汲胜昌, 丘子诚, 罗 迅, 高婉婧, 惠思思
(电工材料电气绝缘全国重点实验室(西安交通大学), 西安 710049)

摘 要: 天然酯绝缘油具有绿色环保、可再生、高燃点、安全性高等优点, 目前缺少天然酯绝缘油中工频高能电弧放电特性的相关研究。为此开展棒-棒电极在不同绝缘油中的工频高能电弧实验, 从电弧能量、压力特性、产气特性等方面对比了矿物油和天然酯中电弧放电特性的差异。结果表明: 在相同电弧电流和间隙距离下(5 kA, 30 mm), 矿物油与天然酯中的电弧能量分别为 48.267 kJ 和 41.891 kJ; 天然酯中的电弧能量、压力峰值、产气量、产气率、气泡表面积、单位面积产气率、平均电压梯度均小于矿物油的值。在油中电弧放电过程中, 电弧放电、绝缘油裂解产气和气泡脉动三者相互耦合。绝缘油种类会显著影响产气成分与单位面积产气率, 进而造成各放电特性的差异。相同实验条件下, 天然酯中电弧产生的压力峰值比矿物油低 47%, 说明使用天然酯可以显著降低电弧故障下的变压器内部压力上升、提高其防爆能力。此外, 该实验结果可进一步用于指导天然酯变压器瓦斯保护的参数整定。

关键词: 变压器; 油中电弧; 天然酯; 矿物油; 变压器防爆

Power-frequency Arc Discharge Characteristics of Natural Ester Insulating Oil and Its Influence to Transformer Explosion-proof Performance

CHEN Yixin, JIA Yunfei, JI Shengchang, QIU Zicheng, LUO Xun, GAO Wanjing, HUI Sisi

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

Abstract: Natural ester insulating oil has the advantages of environmental protection, renewable property, high ignition point, high safety, etc. At present, the research on the characteristics of high energy arc discharge at working frequency in natural ester insulating oil is rarely available in the literature. We performed the experiments of high-frequency high-energy arc in different insulating oils with rod-stick electrodes, and compared the differences of arc discharge characteristics between mineral oil and natural ester in terms of arc energy, pressure characteristics, gas production characteristics, and so on. The results show that, under the same arc current and gap distance (5 kA, 30 mm), the arc energy in mineral oil and natural ester is 48.267 kJ and 41.891 kJ, respectively. The arc energy, pressure peak, gas production, gas production rate, bubble surface area, gas production per unit area and average voltage gradient of the natural ester are smaller than those of mineral oil. In the process of arc discharge in oil, arc discharge, insulating oil cracking gas production and bubble pulsation are coupled with each other. The type of insulation oil significantly affects the gas production rate per unit area, which in turn causes the differences in the discharge characteristics. Under the same experimental conditions, the peak pressure generated by arcing in natural ester is 47% lower than that in mineral oil, indicating that the use of natural ester can significantly reduce the pressure rise inside the transformer under arcing faults and improve its explosion-proof capability. In addition, the experimental results of this paper can be further used to guide the parameterization of natural ester transformer gas protection.

Key words: transformer; arc in oil; natural ester; mineral oil; transformer explosion-proof

0 引言

天然酯是从油料植物中提取的, 主要成分为甘

油三酯, 具有可生物降解、高燃点、良好的防火安全性等优点, 甚至可以延缓固体绝缘的老化和提升设备的过负载能力^[1]。天然酯的燃点温度为 360 ℃左右, 对生物无毒且能够被自然分解, 在人们对环保、安全意识逐渐提高的背景下, 天然酯及天然酯

基金资助项目: 国家重点研发计划(2023YFB2407001)。

Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2407001).

变压器研究不断深入, 越来越多的天然酯变压器得到了应用与推广^[2-4]。全球天然酯绝缘油市场基本分布在亚太、北美、欧洲等区域, 同时, 天然酯绝缘油配电变压器列入《中国制造 2025》重点领域技术路线图和《配电变压器能效提升计划》^[5-6]。

在变压器用天然酯绝缘油的基础理论与应用研究过程中, 天然酯绝缘油的理化特性^[7]、电气性能^[8-12]及温升性能^[13-16]得到了较为深入的研究, 而对工频电弧放电特性等能量的研究仍存在空白。

油中电弧在快速汽化和分解周围变压器油时会产生气泡, 这部分气泡挤压周围变压器油形成压力波, 因此油中工频电弧的压力特性与产气特性密切相关。目前国内外专家学者针对于天然酯中不同温度下故障的产气特性进行研究。在低温过热情况下, 天然酯中会产生大量的 C_2H_6 ; 在中高温 ($300\sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) 下, 天然酯的故障特征气体为 C_2H_6 和碳氧化物; 在高温故障情况下, 天然酯的故障特征气体为 C_2H_2 , 并且故障气体的产量会随着温度指数增长^[17-20]。C PERRIER 等研究表明, 热故障下矿物油的 CH_4 含量要高于天然酯^[21]。蔡胜伟等研究人员探索了天然酯绝缘油热老化过程中的气体含量, 发现其产气速率高于矿物油, 且产生较多的 C_2H_6 、CO 和 CO_2 ^[22]。此外, 诸多学者也围绕天然酯在不同放电类型下油中溶解气体进行研究, 主要是局部放电和电弧放电模拟。N A MUHAMAD 等研究表明, 在局部放电条件下, 天然酯的气体产量小于矿物油, 但在电弧放电条件下, 没有纸板时天然酯中产生更多的 H_2 ^[23]。C PERRIER 等研究表明, 在击穿条件下, 矿物油和天然酯的特征故障气体均为 C_2H_2 及 H_2 ^[21]。K BANDARA 等研究了电故障下天然酯绝缘油中溶解气体的情况, 结果表明矿物油中的气体总量高于天然酯^[24]。

变压器作为电力系统中的枢纽设备, 其发生故障将会给电力系统的安全稳定运行带来严重影响。变压器内部发生电弧故障会产生巨大的电弧能量, 将会立即汽化、分解周围的绝缘油, 同时会形成快速膨胀的气泡, 该气泡压缩周围绝缘油引起油压骤升^[25]。骤升的油压将导致变压器油箱内部应力集中甚至超过油箱极限, 油箱会破裂并引发严重的爆炸起火事故^[26]。通过上述分析可知, 天然酯变压器在运行过程也会出现如局部放电的低能放电造成的故障, 此时变压器有可以继续运行的可能, 但随着放电的不断发展, 低能放电将会转变成高能放电, 当

放电能量 $> 10^6\text{ pC}$ 时就会出现电弧放电^[27]。而目前针对天然酯的研究主要集中在局部放电、理化特性研究、温升特性研究等小能量的范畴, 天然酯中工频高能电弧放电下的放电特性未知, 压力变化存在不确定性, 因此需要对天然酯变压器的瓦斯保护整定与油箱结构设计采取改进措施。

针对上述研究空白和天然酯变压器瓦斯保护整定需求, 本文开展了 20 次绝缘油中工频高能电弧放电实验, 通过控制初始条件不变, 研究矿物油与天然酯在棒-棒电极下的工频高能电弧实验, 从电弧能量、压力特性、产气特性等方面对比了矿物油和天然酯中电弧放电特性的差异, 并且结合油中工频高能电弧放电过程中的耦合关系分析了这一差异的机理。研究结果有助于掌握天然酯中工频高能电弧的放电特性, 可为天然酯变压器瓦斯保护的参数整定提供数据支撑。

1 实验平台

本章介绍油中工频高能电弧实验所搭建的大电流实验回路、各电弧特性的测量设备以及所使用的电极结构与样品。

1.1 基于电容电感谐振法的实验回路

油中工频大电流电弧实验对实验设备要求极高: 电流须至少达到千安级、电流过零点时须提供数十千伏电压以确保电弧重燃。因此, 实验设备对电源容量要求高, 变压器需在短时间提供数十兆瓦的功率, 这将对变压器绕组造成损伤, 对电网稳定运行造成冲击。

使用短路冲击发电机直接在实验罐体中产生大电流电弧是最符合实际的方法, 电流可达数十千安、电流过零点时也可提供数十千伏电压, 但对实验场地与设备要求高、实验成本昂贵^[26]。

在电源容量相对低的实验室条件下, 可基于电容电感谐振法产生工频大电流电弧, 对电源容量和设备的要求低^[28-31]。课题组搭建了基于电容电感谐振法的大电流产生回路及油中电弧特性测量平台如图 1 所示^[28-29]。

图 1 中, 电容 C 可使用半波整流、全波整流、脉冲电流等方式进行充电, 本文选取结构相对简单的半波整流。电容 C 充电完成后, 断路器 S_1 闭合, 电容 C 对电感 L 谐振放电, 在实验罐体中产生电弧。断路器 S_2 则用于为实验罐体提供电流旁路, 从而控制燃弧时间。回路中, 电容为 $1\ 000\ \mu\text{F}$, 电感为

10.15 mH, 谐振频率约为 50 Hz, 电容充电电压约为 16 kV, 谐振电流峰值约为 5 kA, 电容电感谐振产生的电流由图 1 中的 I 表示。

1.2 测量设备

图 1 所示的电弧特性测量平台中, 实验罐体为直径为 40 cm、高 60 cm 的不锈钢圆桶。工频大电流由上端套管引入、下端引出。罐体内部为 1 对棒-棒紫铜导杆, 可连接不同电极结构。电弧位于罐体正中间的位置, 本文均使用直径为 0.1 mm 的金属铜丝引燃。罐体顶部安装泄压阀, 避免电弧实验由于压力过大而发生燃爆事故。出于安全考虑, 在罐体内部预留了一定气体缓冲空间^[29-31], 从而避免电弧实验导致罐体破裂, 同时这一气体空间有助于后续测量产气量、测量产气成分、计算气泡体积。本文的实验均在 75.4 L 体积的罐体中预留 2 L 气体空间, 并注入常温常压的氮气。

除此之外, 电弧特性测试平台中分别使用高压探头和罗氏线圈测量电弧电压和电流。对于压力测量方面, 在顶部和圆柱形罐体侧壁正中间位置各安装 1 个 0.5 Hz~500 kHz 的压力传感器 (PCB M102B16), 分别用于测量顶部气体空间的气相压力和绝缘油的液相压力。对于产气成分方面, 绝缘油裂解产气的成分使用中分 2000B 气相色谱仪测量。

1.3 电极结构与样品选择

目前研究表明, 棒-棒电极结构下的气泡表面积更大, 产气率更大, 压力更高, 放电更剧烈, 目前实验和开展的油中电弧放电校核中大多采用这一结构, 这样的校核更为保守, 并且电极结构的影响已有文献研究^[29], 因此本文选用棒-棒电极进行测量。电极示意图如图 2 所示。棒-棒电极选择紫铜材料, 直径为 15 mm, 间隙为 30 mm; 直径为 0.1 mm 的引弧用金属丝安装在电极正中间位置。

本文选择矿物油 KI25X 与天然酯 FR3 这 2 种不同类型的绝缘油进行实验。其中, 昆仑变压器油 KI25X 是特种矿物绝缘油, 含硫量低、含抗氧化剂、含钝化剂, 目前已投入市场广泛使用。天然酯 FR3 是大豆植物绝缘油, 具有高燃点、不含硫的特点, 在许多国家和地区有工程应用案例^[9,32]。

2 不同绝缘油下的电弧放电特性对比

本章在控制电流为 5 kA、电极间隙为 30 mm 的前提下(根据现有的能量、产气和压力计算方法, 其电弧能量、产气和压力计算方法相同), 从电弧能

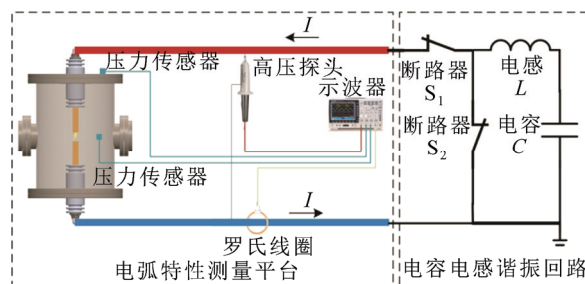


图 1 电容电感谐振回路与电弧特性测量平台

Fig.1 Capacitor-inductor resonant circuit and arc characteristic measurement platform

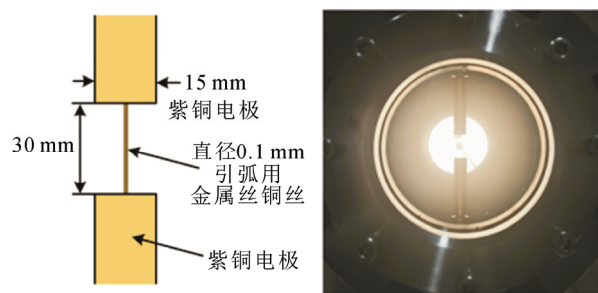


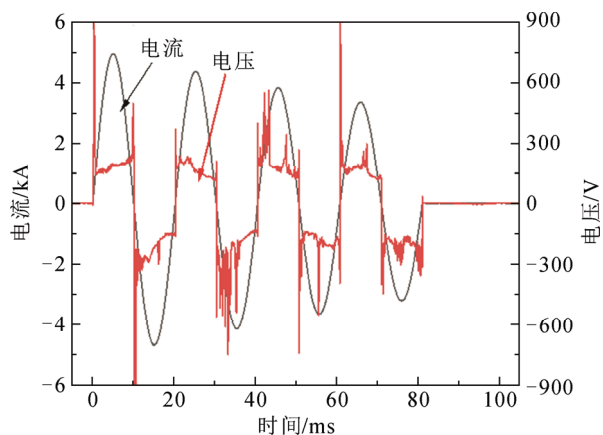
图 2 电极结构示意图

Fig.2 Schematic of electrode structure

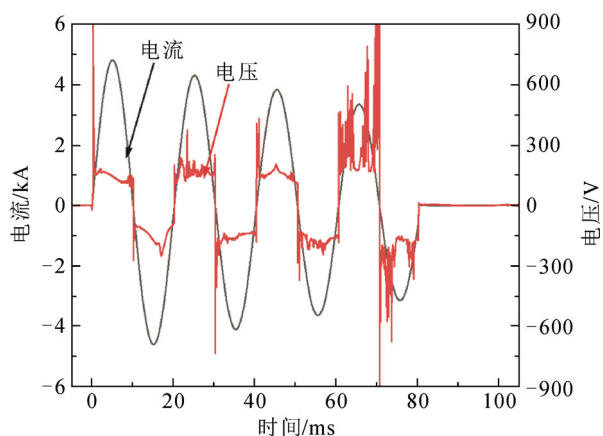
量、压力波与产气 3 个方面对比了 2 种绝缘油下电弧的放电特性。若电弧稳定燃烧, 天然酯的油中电弧能量、平均电压梯度、压力峰值、产气量、产气率均小于矿物油; 绝缘油的种类会导致产气成分、各成分含量、气泡平均表面积不同, 这些特性的差异直接影响不同绝缘油中电弧产气率, 间接造成电弧能量、产气量与压力特性的差异。

2.1 电弧能量

在棒-棒电极结构下矿物油 KI25X 与天然酯 FR3 均开展 10 次油中工频高能电弧实验, 电流峰值均为 5 kA, 电极间隙均为 30 mm。2 种绝缘油中的电弧电压、电流波形如图 3 与图 4 所示。矿物油与天然酯中均存在放电和气泡发展的随机性导致的电压尖峰, 这些随机出现的电压尖峰出现往往出现在稳定燃弧的 10 ms 半周期内。实验单次测量所得数据如图 3 所示, 为了更好地对比绝缘油种类对电弧电压的影响, 图 4(a)和图 4(b)中的电压均为 10 次实验所测得的波形的算术平均值。图 4(a)和图 4(b)中还呈现了 10 次实验所测得的电流波形的算术平均值。电流波形主要取决于实验外回路, 实验平台选择电容电感谐振的方式产生电弧, 因此电流为衰减的工频正弦波, 其第一峰值约为 5 kA。



(a) 矿物油KI25X



(b) 天然酯FR3

图3 单次实验电弧电压、电流波形

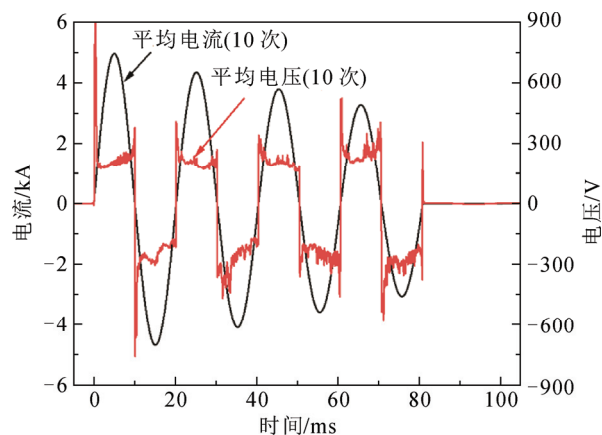
Fig.3 Voltage and current waveforms of the arc in a single experiment

从矿物油 KI25X 的电弧电压波形分析可得, 电压波形虽然可近似于矩形波, 但在电流过零点时, 电弧会发生短暂熄灭、重燃, 电压产生尖峰。此外, 在 10 ms 半周期的稳定燃弧期间, 由于电弧气泡的边界上会分裂产生较多包裹等离子体的小气泡, 导致电压的短暂升高和再击穿, 形成随机性较强的小尖峰。但是, 在燃弧前期(0~20 ms), 由于气泡刚形成, 电压尖峰明显少于气泡剧烈振荡和分裂的燃弧后期。天然酯 FR3 的电弧电压波形也符合上述规律, 但是由于压强低、气泡表面积小、气泡相对稳定, 其电压尖峰数量相对更少, 曲线更平滑。

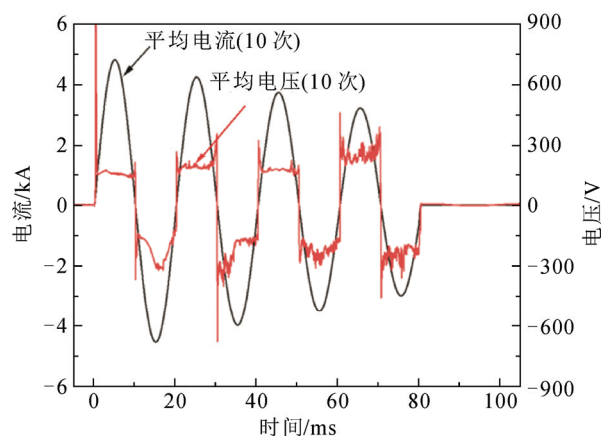
根据式(1)计算可得电弧能量, 电弧能量为绝缘击穿后, 工频电弧燃弧过程中产生的能量。

$$W(t) = \int_0^t P(\tau) d\tau = \int_0^t u(\tau) \cdot i(\tau) d\tau \quad (1)$$

式中: W 为电弧能量, J; P 为电弧功率, W; u 为电弧电压, V; i 为电弧电流, A; t 为时间, s; τ 为



(a) 矿物油KI25X



(b) 天然酯FR3

图4 电弧平均电压、电流波形

Fig.4 Average voltage and current waveforms of the arc

用于积分的时间变量。在图 3 所示的实验中, 以矿物油 KI25X 为例, 一次电弧实验的电弧能量为 55.24 kJ, 因此计算可得电弧能量如图 5 所示, 其中天然酯 FR3 的电弧能量平均值为 41.891 kJ, 低于矿物油 KI25X 的 48.267 kJ, 说明天然酯 FR3 中电弧放电的能量是比较小的, 进一步说明其放电过程更平稳, 有利于变压器的防爆性能提升。推测其原因为放电、产气以及压强 3 种特性相互耦合相互影响, 绝缘油裂解产生气体的成分与气泡的形态和压强会影响电弧能量, 这两者之间也会相互作用, 从而使电弧能量的差异更加明显。因此, 本文在后续研究中进一步对比产气与压强特性。

2.2 压强波

2 种绝缘油下的单次实验测得压强波形如图 6 所示, 平均压强波形如图 7 所示。

图 6 和图 7 中, 气相压强是罐体顶部预留 2 L 气体空间的压强, 液相压强是圆柱形罐体壁面正中间、与电弧等高位置测得的压强。

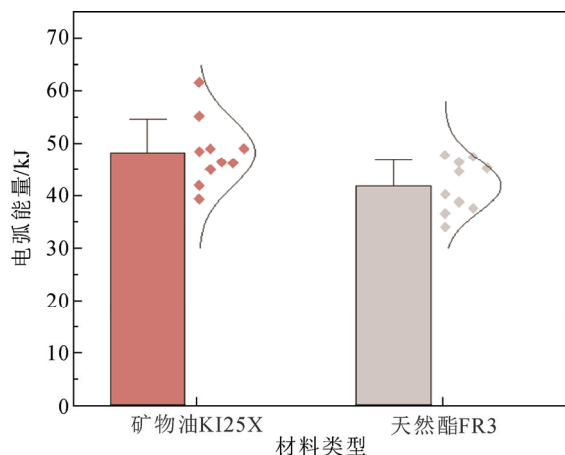
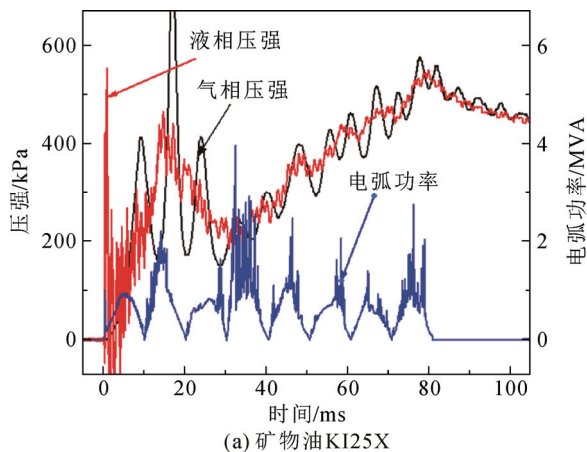
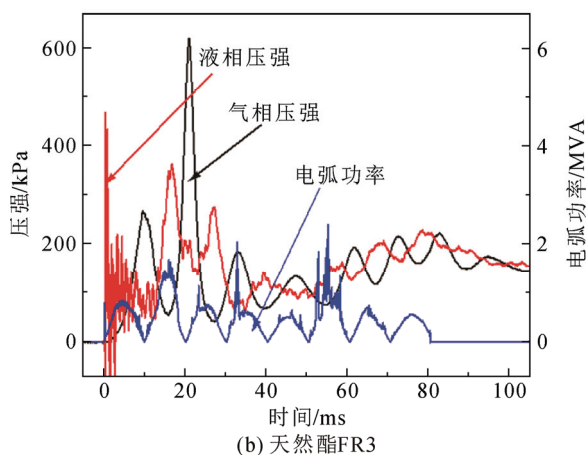


图5 电弧能量平均值及拟合曲线对比

Fig.5 Comparison of average arc energy and fitting curve



(a) 矿物油KI25X

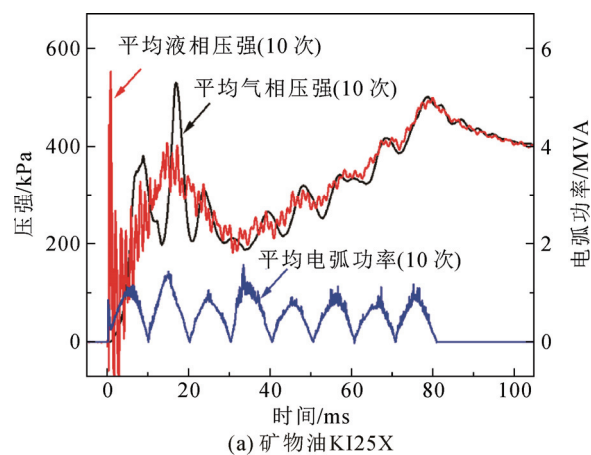


(b) 天然酯FR3

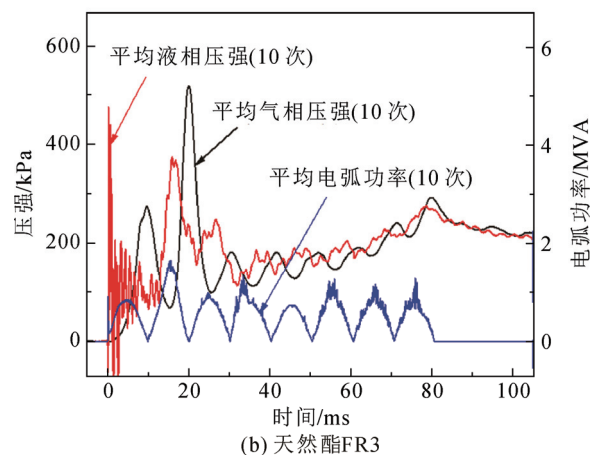
图6 单次实验罐体顶部气相压强与中部液相压强

Fig.6 Gas-phase pressure at the top of the tank and liquid-phase pressure in the middle of the tank in a single experiment

根据图7可以明显看出,2种绝缘油中气相压强与液相压强变化趋势与振荡规律大致相同。电弧功率的波动会造成产气速率的波动,其产生的压强存在约100 Hz的脉动。在液相压强中,油中压强在



(a) 矿物油KI25X



(b) 天然酯FR3

图7 罐体顶部气相压强与中部液相压强

Fig.7 Gas-phase pressure at the top of the tank and liquid-phase pressure in the middle of the tank

前期2 ms内存在快速折反射的冲击波,在中期持续约20 ms的快速振荡,最后在后期的80 ms内压强持续上升。其中,前期2 ms内产生的快速折反射的冲击波是由金属丝电爆炸产生的。其次,在燃弧瞬间,较多气体被压缩在极小的空间内,压强骤升,迅速推动周围绝缘油向四周运动,随后导致气泡快速膨胀,而产气速度无法跟随气泡体积的快速变化,从而压强骤降;气泡快速膨胀后,其表面积扩大、产气速率增加,再次在气泡内快速产气、压强再次上升。上述过程中压强上升、气泡膨胀(压强下降)、产气增加(压强上升)3个过程交替循环,使中期出现液相压强的快速振荡,这一振荡会随着气泡体积的增大、气泡缓冲效果的加强而在20 ms内逐步衰减。后期电弧持续产气造成液相压强持续升高。

由于油压存在波动,提取图5中80±5 ms的平均液相压强进行对比,如图8所示。

根据图8分析可得,80±5 ms期间,矿物油KI25X中的平均液相压强显著高于天然酯FR3,推

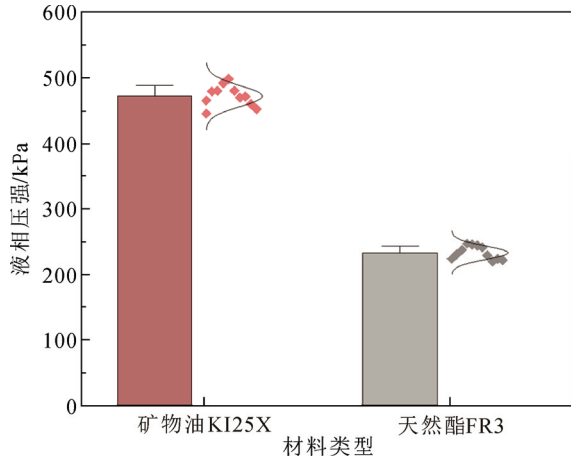


图8 液相压强平均值及拟合曲线对比

Fig.8 Comparison of average liquid-phase pressure and fitting curve

测其主要原因在于: 在相同电流和电极间隙下, 矿物油 KI25X 中的气泡表面积远大于天然酯 FR3, 并且其产生的气体更多, 因此压强更大。

2.3 气泡形态

分析 2 种绝缘油中的电弧放电过程中罐体内压强与体积变化不难得出: 预留的 2 L 气体空间与罐体形变体积之和, 燃弧期间罐体顶部的气体空间与电弧气泡体积之和, 两者数值应当相等, 即满足:

$$V_{\text{gas}}(0) + V_{\text{def}}(t) = V_{\text{gas}}(t) + V_{\text{bubble}}(t) \quad (2)$$

式中: $V_{\text{gas}}(0)$ 为罐体顶部气体空间, 0 s 时等于预留气体空间, 取值 2 L; V_{def} 为罐体在高压下的形变体积, L; V_{gas} 为燃弧期间罐体顶部气体空间, L; V_{bubble} 为燃弧期间的气泡体积, L。

式(2)中, 罐体形变体积和燃弧期间罐体顶部气体空间近似为:

$$V_{\text{def}}(t) = p_{\text{gas}}(t)C \quad (3)$$

$$p_{\text{gas}}(t) + p_0)V_{\text{gas}}^\gamma(t) = p_0 V_{\text{gas}}^\gamma(0) \quad (4)$$

式中, p_{gas} 为顶部气相压强波动, kPa; C 为罐体形变系数, 基于实验罐体结构和有限元仿真, 取 $C=3.6 \times 10^{-5}$ L/kPa; p_0 为大气压强, kPa; γ 为比热容比, 取值为 1.40。

联立上述三式并结合图 5 油中电弧压力波形计算可得矿物油 KI25X 和天然酯 FR3 中的电弧气泡体积如图 9(a)所示, 若将产生的气泡近似视为球形, 则可得其表面积如图 9(b)所示。

分析图 9 可得: 相同初始条件下, 天然酯 FR3 中的气泡表面积小于矿物油 KI25X, 这将进一步造

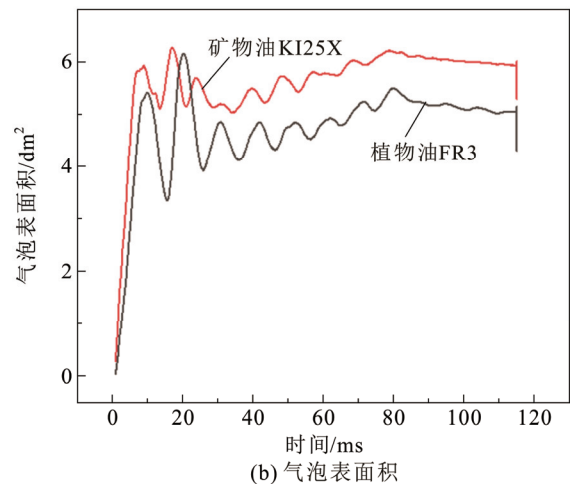
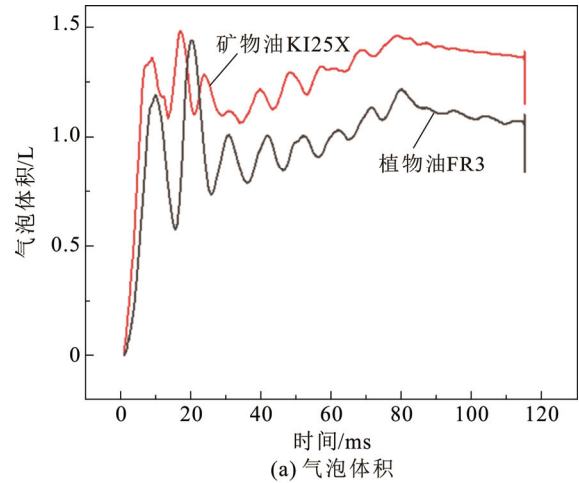


图9 气泡体积与表面积对比

Fig.9 Comparison of bubble volume and surface area

成电弧产气特性的差异。

2.4 产气特性

使用气相色谱仪测量每次实验后的各类气体的浓度比例, 进而换算出成分百分比; 基于放电前后顶部预留气体空间的静压强变化, 计算常温常压下的产气量。2 种绝缘油中的电弧产气成分与产气量对比如表 1 所示。

产气成分的差异主要是由于 2 种油的化学成分不同。由于天然酯 FR3 中含有氧元素且极易氧化, 因此产气成分有较多的 CO 和 CO₂; 同时, 因为天然酯主要由含有双键(C=C)的不饱和脂肪酸甘油酯组成, 在电弧作用下更易产生乙炔^[33-36], 因此乙炔含量高于矿物油中电弧所产生的。

天然酯 FR3 中的产气量明显少于矿物油 KI25X 中的产气量。其一是因为天然酯 FR3 中的电弧能量更小; 其二, 天然酯 FR3 的气泡表面积更小、产气率也较低。

表 1 电弧产气成分与产气量对比

Table 1 Comparison of gas production composition and

参数	volume	
	数值(10 次平均)	
	矿物油 KI25X	天然酯 FR3
H ₂ 体积分数/%	71.96	61.77
CH ₄ 体积分数/%	13.58	5.71
C ₂ H ₆ 体积分数/%	5.37	0.25
C ₂ H ₂ 体积分数/%	0.37	11.00
CO 体积分数/%	0	10.83
CO ₂ 体积分数/%	0	3.44
产气体积/L	4.787	2.834
电弧能量/kJ	48.267	41.891

基于各次实验后的常温常压产气量和电弧能量，得到产气率如图 10 所示。

现有文献中，矿物油中电弧产气率在 0.05~0.1 L/kJ 不等^[37-39]，图 10 中矿物油 KI25X 中的电弧产气率为 0.098 6 L/kJ，与目前研究结论相符。天然酯 FR3 中的电弧产气率仅为 0.066 5 L/kJ，推测其原因为此时的电弧气泡表面积更小、参与绝缘油裂解反应的面积更少、产气率更低。有必要进一步对比单位气泡表面积下的产气率，结果如图 11 所示，其中矿物油 KI25X 和天然酯 FR3 平均单位气泡表面积产气率分别约为 0.018 L/(kJ·dm²)和 0.013 L/(kJ·dm²)。

2.5 电弧电压梯度

电弧电压可近似视为矩形波，因此电弧功率可近似表示为：

$$P(t) = i(t)u(t) \approx I_A |\sin(\omega t)| kl \quad (5)$$

式中： u 为电弧电压，V； I_A 为电流峰值，A； ω 为工频角频率，取 $2\pi \times 50$ rad/s； k 为电弧电压梯度，V/cm； l 为电弧长度，cm。

$$\begin{aligned} W(t) &= \int_0^t I_A |\sin(\omega \tau)| kl d\tau = \\ &= \int_0^{0.02n} I_A |\sin(100\pi \tau)| kl d\tau = \\ &= \frac{n I_A kl}{100\pi} \int_0^{2\pi} |\sin(\tau)| d\tau = \frac{n I_A kl}{25\pi} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： n 为燃弧周期数量。其中，电弧能量为绝缘击穿后，工频电弧燃弧过程中产生的能量。

在图 3 所示的实验中，以矿物油 KI25X 为例，一次电弧实验的电弧能量为 55.24 kJ。同时将 $I_A=4.12$ kA(由 4.96 kA 逐渐衰减至 3.27 kA，取平均值)、 $n=4$ 、 $l=3$ cm 代入式(6)，可得整个燃弧期间的平均电压梯度为 87.75 V/cm。

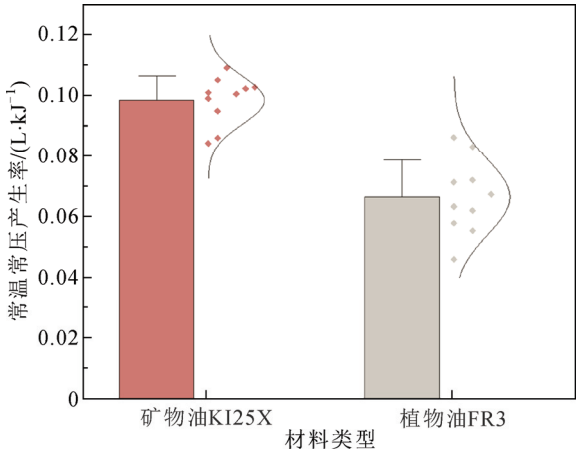


图 10 产气率平均值及拟合曲线对比

Fig.10 Comparison of average gas production rate and fitting curve

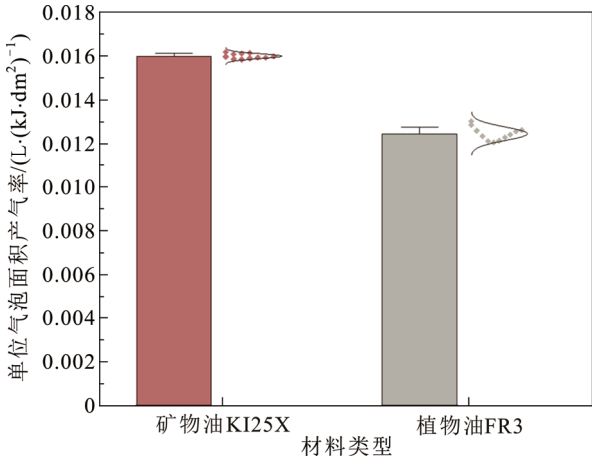


图 11 单位气泡面积产气率平均值及拟合曲线对比

Fig.11 Comparison of average gas production rate per unit bubble area and fitting curve

使用上述方法得到各次实验的电压梯度以及 2 种绝缘油的平均电压梯度如图 12 所示。

根据图 12 可以看出，矿物油 KI25X 中的电弧电压梯度高于天然酯 FR3 中的电弧电压梯度，两者分别为 78.14 V/cm 和 69.20 V/cm。在保障电极间隙、电流大小等实验条件相同条件下进行测量，即实验初始条件相同，电弧电压梯度和通道成分、通道结构与尺寸相关，因此分析其原因在于：其一，两者的放电气体氛围不同，天然酯 FR3 中的电弧产气成分相较于矿物油 KI25X 增加 CO 和 CO₂；其二，如图 8、图 9(b)、图 10、表 1 所示，天然酯的气泡表面积为 4.631 dm² 低于矿物油的 5.508 dm²；产气率为 0.066 5 L/kJ，低于矿物油的 0.098 6 L/kJ；产气

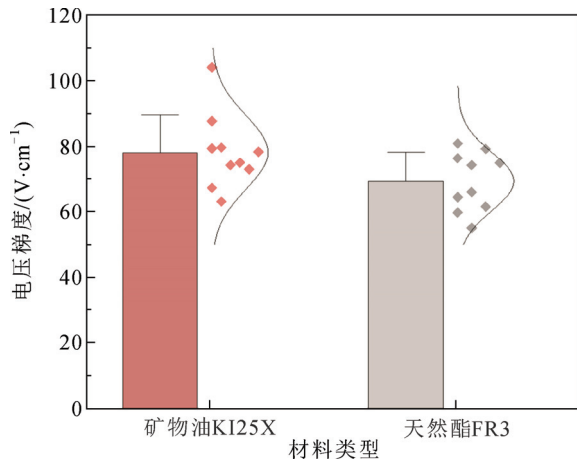


图 12 电弧电压梯度平均值及拟合曲线对比

Fig.12 Comparison of average arc voltage gradient and fitting curve

量为 2.834 L, 低于矿物油的 4.787 L; 压强为 265.37 kPa, 低于矿物油的 500.67 kPa。因此天然酯 FR3 中的气泡表面积更小、产气率更低、产气量更少、压强更低, 而小气泡、低气压下的电弧燃烧和气泡脉动相对更加稳定, 因此电弧电压梯度更低^[29]。

3 不同绝缘油油中电弧放电的差异性与耦合关系分析

综合上述研究结果, 矿物油 KI25X 与天然酯 FR3 中的工频高能电弧放电关键参数对比见表 2。

根据表 2 分析可得, 天然酯 FR3 中的电弧能量略低于矿物油 KI25X, 产气率、产气量与燃弧稳定后的液相压强差异较大, 差异值分别为 32.6%、40.8%和 47%。

基于现有研究现状^[29,40-41]、结合本文研究结果, 2 种绝缘油中的工频高能电弧放电发展中存在如图 13 的耦合关系。

分析图 13 可知, 电弧形态会影响电弧能量, 进而改变了绝缘油裂解产气量。在绝缘油受热、裂解、产气的过程中, 其成分将影响电弧等离子体, 其产气量将促进气泡脉动, 使压强增加。在气泡脉动过程中, 其形态和内部压强将影响绝缘油裂解产气的相关反应, 并一定程度上约束了电弧放电的形态。气泡脉动及其内部压强急剧则将产生高幅值的压强波在油箱内部传递。油箱在高压强下产生的形变体积会反过来影响气泡的形态, 上述过程中, 油箱既有可能由于受到高应变速率的作用而发生脆性断裂, 或是受到持续升高的压强而发生韧性断裂, 造

表 2 矿物油 KI25X 与天然酯 FR3 中电弧放电关键参数对比

Table 2 Comparison of key parameters of arc discharge in KI25X and FR3

关键参数	数值		差异值/%
	矿物油 KI25X	天然酯 FR3	
电弧能量/kJ	48.267	41.891	-13.2
产气率/(L·kJ ⁻¹)	0.098 6	0.066 5	-32.6
平均气泡表面积/dm ²	5.508	4.631	-15.9
单位气泡面积产气率/(L·(kJ·dm ²) ⁻¹)	0.018	0.013	-27.8
产气量/L	4.787	2.834	-40.8
80 ms 附近压力/kPa	500.67	265.37	-47.0

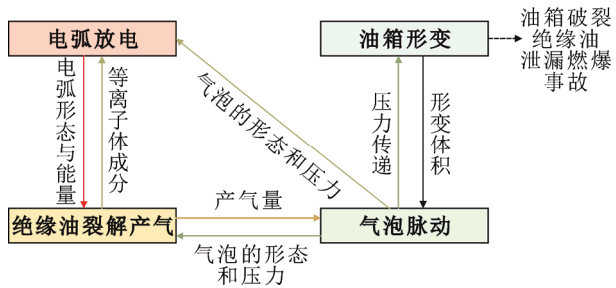


图 13 油中电弧放电中的耦合关系

Fig.13 Coupling relations during arc discharge in oil

成油箱的破裂、绝缘油的泄漏, 甚至引发燃爆事故。

当绝缘油种类发生了变化, 直接影响了电弧放电的气体氛围和单位气泡面积产气率。相比于矿物油, 天然酯 FR3 的单位气泡面积产气率降低约 27.8%, 因此造成了气泡体积和表面积的减少。两者共同作用下, 产气率降低了 32.6%。而气泡压强的降低使得气泡和电弧发展更加稳定, 加上放电气体氛围的变化, 电弧能量降低了 13.2%。最终, 整体的产气量降低了 40.8%, 形成的油箱内部压强峰值降低了 47%。因此, 在相同初始放电条件下, 相比于矿物油 KI25X, 天然酯 FR3 中工频电弧故障形成的压强更低、油箱形变更小、安全性更高, 天然酯变压器将会具有更高的防爆性能。

4 结论

1) 在相同电弧电流和电极距离下 (5 kA, 30 mm), 若电弧稳定燃烧, 矿物油 KI25X 与天然酯 FR3 中的电弧能量分别为 48.267 kJ 和 41.891 kJ。天然酯 FR3 中的电弧能量、压强峰值、平均电压梯度均低于矿物油 KI25X。天然酯 FR3 中的电弧气泡表面积降低了 15.9%; 天然酯 FR3 中的电弧产气成分相较于矿物油 KI25X 增加 CO 和 CO₂; 天然酯 FR3 和矿物油 KI25X 中的电弧产气率分别为 0.066 5 L/kJ

和 0.098 6 L/kJ; 天然酯 FR3 和矿物油 KI25X 中的单位气泡面积产气率分别为 0.018 L/(kJ·dm²)和 0.013 L/(kJ·dm²), 天然酯 FR3 的单位气泡面积产气率降低约 27.8%; 天然酯 FR3 中的平均电压梯度为 69.20 V/cm, 低于矿物油 KI25X 中的 78.14 V/cm。

2) 在油中工频高能电弧放电过程中, 电弧放电、绝缘油裂解产气、气泡脉动、油箱形变, 上述过程相互耦合, 耦合关系复杂、影响因素多。其中, 绝缘油的种类会直接影响电弧放电的气体氛围以及单位气泡面积下的产气率, 间接造成产气率、气泡形态、产气量、电弧能量的差异, 天然酯 FR3 相比于矿物油 KI25X 具有更低的电弧能量、产气率与产气量。

3) 相同的初始放电条件下, 天然酯 FR3 中的压强比矿物油 KI25X 降低了约 47%, 因此, 在油箱规格一致的情况下, 天然酯变压器具有更好的防爆性能。

本文对天然酯中工频高能电弧放电特性进行探索, 说明了使用天然酯可以显著降低电弧故障下的变压器内部压强上升、提高其防爆能力, 为天然酯变压器的瓦斯保护整定提供支撑。但是, 为实现变压器防爆的准确计算与瓦斯保护的精准整定, 还需要开展大量电弧实验, 并进一步对天然酯中电弧放电的复杂耦合关系进行定量分析。

参考文献 References

- [1] 赵耀洪, 何艳琪, 钱艺华, 等. 天然酯绝缘油的氧化安定性评估及性能提升研究进展[J]. 绝缘材料, 2023, 56(5): 7-13.
ZHAO Yaohong, HE Yanqi, QIAN Yihua, et al. Research progress in oxidative stability assessment and performance improvement of natural esters[J]. Insulating Materials, 2023, 56(5): 7-13.
- [2] MEHTA D M, KUNDU P, CHOWDHURY A, et al. A review on critical evaluation of natural ester vis-a-vis mineral oil insulating liquid for use in transformers: part 1[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(2): 873-880.
- [3] MOHAN RAO U, FOFANA I, JAYA T, et al. Alternative dielectric fluids for transformer insulation system: progress, challenges, and future prospects[J]. IEEE Access, 2019, 7: 184552-184571.
- [4] 邓小聘, 李松江, 胡婷, 等. 变压器用植物绝缘油的研究进展[J]. 绝缘材料, 2019, 52(11): 25-30.
DENG Xiaopin, LI Songjiang, HU Ting, et al. Research progress of vegetable insulating oil for transformer[J]. Insulating Materials, 2019, 52(11): 25-30.
- [5] 潘永莉, 王鹏, 王会娟, 等. 天然酯绝缘油研究进展及发展展望[J]. 石油炼制与化工, 2024, 55(8): 178-186.
PAN Yongli, WANG Peng, WANG Huijuan, et al. Research progress and development prospect of natural ester insulating oil[J]. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2024, 55(8): 178-186.
- [6] 张亚杰, 杜振斌, 刘新颜, 等. 天然酯绝缘油在变压器中的应用研究与探讨[J]. 绝缘材料, 2023, 56(5): 69-75.
ZHANG Yajie, DU Zhenbin, LIU Xinyan, et al. Application research and discussion on natural ester insulating oil in transformer[J]. Insulating Materials, 2023, 56(5): 69-75.
- [7] SUZUKI T, OBA R, KANETANI A, et al. Consideration on the relationship between dielectric breakdown voltage and water content in fatty acid esters[C]//2011 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Trondheim, Norway: IEEE, 2011: 1-4.
- [8] 李继攀, 王智杰, 刘宏领, 等. 酯类绝缘油在直流电压下的击穿特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(7): 93-98.
LI Jipan, WANG Zhijie, LIU Hongling, et al. Breakdown characteristics of ester insulating oils under DC voltage[J]. Insulating Materials, 2022, 55(7): 93-98.
- [9] 毛淦霖, 赵峰, 李世军, 等. 绝缘油种类对油纸绝缘直流空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1726-1736.
MAO Ganlin, ZHAO Feng, LI Shijun, et al. Influences of insulating oil type on DC space charge characteristics of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1726-1736.
- [10] 但林阳, 黄正勇, 王飞鹏, 等. 植物绝缘油抑制离子迁移的动力学机制研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4474-4484.
DAN Linyang, HUANG Zhengyong, WANG Feipeng, et al. Study on the dynamic mechanism of inhibited ion mobility in vegetable insulating oil[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4474-4484.
- [11] LIU Q, WANG Z D. Streamer characteristic and breakdown in synthetic and natural ester transformer liquids under standard lightning impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(1): 285-294.
- [12] BEROUAL A, KHALED U, MBOLO NOAH P S, et al. Comparative study of breakdown voltage of mineral, synthetic and natural oils and based mineral oil mixtures under AC and DC voltages[J]. Energies, 2017, 10(4): 511.
- [13] 刘东升, 刘新颜, 史哲文, 等. 天然酯变压器与矿物油变压器温升特性差异分析[J]. 变压器, 2023, 60(9): 19-23.
LIU Dongsheng, LIU Xinyan, SHI Zhewen, et al. Difference analysis on temperature rise characteristics between natural ester insulating oil transformer and mineral insulating oil transformer[J]. Transformer, 2023, 60(9): 19-23.
- [14] 袁飞, 李沐, 王华兴, 等. 天然酯绝缘油的基础特性及其应用研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(6): 58-61, 68.
YUAN Fei, LI Mu, WANG Huaxing, et al. Basic properties and application of natural ester insulating oil[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(6): 58-61, 68.
- [15] 徐秋元. 低压轴向双分裂变压器分裂绕组温升检测的探讨[J]. 变压器, 2013, 50(9): 7-11.
XU Qiuyuan. Discussion on temperature rise test of split winding in Dual-low-voltage transformers[J]. Transformer, 2013, 50(9): 7-11.
- [16] 李剑, 党剑亮, 杨丽君, 等. 三种植物绝缘油的理化与电气性能的比较[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(9): 42-45.
LI Jian, DANG Jianliang, YANG Lijun, et al. Comparison on physical and chemical characteristics and electric properties of three types of vegetable insulating oil[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2007, 30(9): 42-45.
- [17] 国家技术监督局. 电力变压器 第2部分: 温升: GB 1094.2-1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
The State Bureau of Quality and Technical Supervision. Power transformers-part 2: temperature rise: GB 1094.2—1996[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 1996.
- [18] 袁帅, 胡远翔, 余辉, 等. 植物绝缘油热故障的模拟与产气规律研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(5): 50-56.
YUAN Shuai, HU Yuanxiang, YU Hui, et al. Thermal fault simulation of vegetable insulating oils and their characteristic gases[J]. Insulating Materials, 2015, 48(5): 50-56.

- [19] 徐 晴, 郝 建, 叶文郁, 等. 三元混合绝缘油热裂解过程与产气特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 1026-1037.
XU Qing, HAO Jian, YE Wenyu, et al. Thermal cracking process and gas production characteristics of ternary mixed insulating oil[J]. High Voltage Technology, 2023, 49(3): 1026-1037.
- [20] WANG Z D, YI X, HUANG J P, et al. Fault gas generation in natural-ester fluid under localized thermal faults[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2012, 28(6): 45-56.
- [21] 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.
- [22] 蔡胜伟, 胡远翔, 陈江波, 等. 天然酯绝缘油加速热老化时油中溶解气体研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(4): 30-34.
CAI Shengwei, HU Yuanxiang, CHEN Jiangbo, et al. Study on dissolved gas in natural ester insulating oil during accelerated thermal ageing[J]. Insulating Materials, 2015, 48(4): 30-34.
- [23] MUHAMAD N A, PHUNG B T, BLACKBURN T R. Dissolved gas analysis for common transformer faults in soy seed-based oil[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(1): 133-142.
- [24] BANDARA K, EKANAYAKE C, SAHA T K. Comparative study for understanding the behaviour of natural ester with mineral oil as a transformer insulating liquid[C]//2014 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). Des Moines, USA: IEEE, 2014: 792-795.
- [25] JIA Y F, LUO X, JI S C, et al. Pyrolysis and temperature characteristics of the gas produced by power-frequency arc in transformer oil[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 61: 104913.
- [26] 李金忠, 汪 可, 任家帆, 等. 分接开关油室电弧故障压力传播过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(20): 7651-7657.
LI Jinzhong, WANG Ke, REN Jiafan, et al. Study on pressure propagation process of arc fault in OLTC oil chamber[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7651-7657.
- [27] 杜诗悦. 植物油变压器电热故障产气规律与诊断方法[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2019.
DU Shiyue. Gas generation characteristic and diagnosis method of electric-thermal fault in vegetable oil transformer[D]. Beijing, China: North China Electric Power University(Beijing), 2019.
- [28] 贾云飞, 汲胜昌, 李金忠, 等. 变压器油中工频电弧特性及变压器防爆研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(7): 2910-2926.
JIA Yunfei, JI Shengchang, LI Jinzhong, et al. Overview on the characteristics of power frequency arc in transformer oil and transformer explosion protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(7): 2910-2926.
- [29] JIA Y F, LUO X, JI S C, et al. The influence of electrode structure on the discharge characteristics of power-frequency arc in insulating oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(2): 725-733.
- [30] TADOKOTO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Pressure rises due to arc under insulating oil in closed vessel-pressure fluctuation of depth direction in oil[J]. Electrical Engineering in Japan, 2018, 202(2): 43-53.
- [31] TADOKORO T, KOTARI M, OHTAKA T, et al. Numerical analysis of bubble behavior and pressure rise phenomena due to arc under insulating oil in closed vessel[J]. IEEE Transactions on Fundamentals and Materials, 2020, 140(4): 230-240.
- [32] 西门子首台 420 kV 植物油变压器成功调试运营[J]. 农村电工, 2014, 22(6): 50.
Siemens' first 420 kV vegetable oil transformer successfully debugged and put into operation[J]. Rural Electrician, 2014, 22(6): 50.
- [33] 刘宏领, 田克强, 李继攀, 等. 天然酯绝缘油中溶解气体研究现状[J]. 绝缘材料, 2022, 55(1): 12-18.
- LIU Hongling, TIAN Keqiang, LI Jipan, et al. Research status of dissolved gases in natural ester insulating oil[J]. Insulating Materials, 2022, 55(1): 12-18.
- [34] 陈 鑫, 郝 建, 冯大伟, 等. 三元混合式绝缘油和矿物油的雷电冲击击穿及产气特性对比分析研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 906-918.
CHEN Xin, HAO Jian, FENG Dawei, et al. Comparative study on lightning impulse breakdown and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil and mineral oil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(4): 906-918.
- [35] 陈 晗, 黄正勇, 魏 聪, 等. 电-热-流多场作用下天然酯绝缘油杂散气体产生特性[J/OL]. 高电压技术, 2025: 1-13[2025-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241177>.
CHEN Han, HUANG Zhengyong, WEI Cong, et al. Characteristics of stray gas generation in natural ester insulation oil under electric thermal current multi field action[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-13[2020-01-16]. <https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241177>.
- [36] 胡小博, 李 坤, 陈 荣, 等. 天然酯绝缘油在油纸界面放电故障条件下的分解产气特性研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(11): 70-74.
HU Xiaobo, LI Kun, CHEN Rong, et al. Gas generation characteristics of natural ester under discharge fault at oil-pressboard interface[J]. Insulating Materials, 2019, 52(11): 70-74.
- [37] MEIRA M, VERUCCHI C, ÁLVAREZ R, et al. Dissolved gas analysis in mineral oil and natural ester liquids from thermal faults[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1317-1325.
- [38] PRZYBYLEK P, GIELNIAK J. Analysis of gas generated in mineral oil, synthetic ester, and natural ester as a consequence of thermal faults[J]. IEEE Access, 2019, 7: 65040-65051.
- [39] TRENCHAM H. Circuit breaking[M]. London, Britain: Butterworths Scientific Publications, 1953.
- [40] 贾云飞, 贾双瑞, 罗 迅, 等. 变压器内部电弧故障快速检测方法研究与对比[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2158-2165.
JIA Yunfei, JIA Shuangrui, LUO Xun, et al. Research and comparison on rapid detection methods of transformer internal arc fault[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2158-2165.
- [41] JIA S R, JIA Y F, LUO X, et al. Optical signal characteristics of power frequency arc in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(1): 675-678.



CHEN Yixin

陈艺昕

2001—, 女, 硕士生

主要从事天然酯绝缘油中电弧放电特性的研究工作

E-mail: cheniyixin1119@stu.xjtu.edu.cn



JI Shengchang

Ph.D., Professor

Corresponding author

汲胜昌(通信作者)

1976—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事电力设备在线监测及故障诊断、振动噪声机理及抑制等研究

E-mail: jsc@xjtu.edu.cn

收稿日期 2024-09-10 修回日期 2025-03-31 编辑 曾文君