

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.009

绝缘介质与放电机理研究

雷电冲击击穿下多元混合绝缘油的关键性能变化及裂解机理研究

刘梦娜^{1,2}, 刘熙^{1,2}, 刘熊³, 杨旭^{1,2}, 周正钦^{1,2}, 王谦³, 叶文郁⁴

(1. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 武汉 430074; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 南京 211000;
3. 国网重庆市电力公司, 重庆 400014; 4. 重庆大学电气工程学院输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为揭示多元混合绝缘油在雷电冲击击穿后的关键性能劣化规律及微观裂解机理, 搭建了雷电冲击击穿试验平台, 测试了不同油隙条件下油品的理化性能、介电性能及溶解气体体积分数, 并基于 ReaxFF 反应力场开展了分子动力学模拟, 分析了击穿放电产生的高温强电场耦合作用下油分子的裂解路径与特征气体生成机制。结果表明: 随油隙增大, 击穿后油品性能劣化加剧, 其中酸值增幅最为显著, 长间隙条件下较初始值升高近 190%, 可作为冲击老化程度的敏感指标; 介质损耗因数与体积电阻率在长间隙下分别劣化约 53% 和 40%, 颗粒浓度显著增加且集中于 5~15 μm 粒径范围; H_2 与 C_2H_2 为主要特征气体, 其体积分数随放电能量增加持续上升。分子模拟表明, 低电场下裂解以单键逐步断裂为主, 强电场通过增强分子极化和化学键断裂概率加快裂解过程并诱发芳香烃开环反应, 但特征气体生成路径仍遵循传统热裂解机制。研究结果可为多元混合绝缘油的工程应用及绝缘状态评估提供理论依据。

关键词: 多元混合绝缘油; 雷电冲击; 产气特性; 裂解; 反应动力学; 变压器; 性能演化; 机理

Study on Key Performance Variations and Pyrolysis Mechanisms of Multicomponent Mixed Insulating Oil Under Lightning Impulse Breakdown

LIU Mengna^{1,2}, LIU Xi^{1,2}, LIU Xiong³, YANG Xu^{1,2}, ZHOU Zhengqin^{1,2}, WANG Qian³, YE Wenyu⁴

(1. Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. NARI Group Corporation, State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211000, China; 3. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400014, China; 4. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: To reveal the key performance degradation behavior and the microscopic pyrolysis mechanism of multicomponent mixed insulating oil after lightning impulse breakdown, a lightning impulse breakdown test platform is established. The physicochemical properties, dielectric performance, and dissolved gas content of the oil samples are tested under different oil-gap conditions. Furthermore, molecular dynamics simulations based on the ReaxFF reactive force field are conducted to analyze the pyrolysis pathways of oil molecules and the formation mechanisms of characteristic gases under the coupled effects of high-temperature and strong electric field generated by the breakdown discharge. The results show that with increase of oil gap, the performance degradation of the oil samples after breakdown becomes more severe. Among all parameters, the acid value exhibits the most significant increase, rising by nearly 190% compared to the initial value under long-gap conditions, which can serve as a sensitive indicator of impulse aging degree. Under long-gap conditions, the dielectric dissipation factor and volume resis-

收稿日期: 2026-03-21; 修回日期: 2026-05-22

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5500-202327118A-1-1-ZN)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China Headquarters(5500-202327118A-1-1-ZN).

tivity deteriorate by approximately 53% and 40%, respectively, while the particle concentration increases significantly and is mainly distributed in the 5~15 μm size range. The H_2 and C_2H_2 are identified as the main characteristic gases, and their contents increase continuously with increase of discharge energy. The molecular simulation indicates that under a low electric field, pyrolysis is dominated by stepwise single-bond scission, while a strong electric field accelerates the pyrolysis process by enhancing molecular polarization and increasing the probability of chemical bond cleavage, and also induces ring-opening reactions of aromatic hydrocarbons. However, the formation pathways of characteristic gases still follow conventional thermal pyrolysis mechanisms. The study results can provide a theoretical basis for the engineering application and insulation condition assessment of multi-component mixed insulating oil.

Key words: multi-component mixed insulating oil; lightning impulse; gas generation characteristics; pyrolysis mechanism; reactive molecular dynamics; dielectric performance; transformer; performance evolution; mechanism

0 引言

电力变压器是电网中实现电能转换与传输的关键设备,绝缘油作为其重要绝缘介质,承担电气绝缘、散热冷却、电弧熄灭等重要作用^[1-2]。因此,性能优异的绝缘油对保障变压器的可靠运行至关重要^[3-4]。通过将不同类型绝缘油进行混合以实现性能优势互补,是新型液体电介质研发的重要方向^[5-6]。基于矿物油、天然酯、合成酯等绝缘液体,研究人员已开发出二元和三元混合绝缘油^[7-9]并开展了相关研究,但其冲击绝缘性能、介电损耗、运动黏度等指标仍有提升空间。在前期研究中,本课题组基于分子结构—性能关系的设计思路制备了一种多元混合绝缘油,在兼顾环境友好性的同时表现出优良的综合性能^[10]。

实际运行工况下,电力设备常遭受雷电过电压等瞬态强电场冲击,由此引发的绝缘油击穿不仅导致设备绝缘失效,更伴随着油品性能的多维度劣化。在雷电冲击击穿瞬间,强电场与局部高温的共同作用使油品理化参数发生显著改变,具体表现为介质损耗因数升高、颗粒杂质析出、黏度变化、溶解气体组分异常等^[11-12]。上述性能指标的演变规律直接反映了绝缘油的劣化程度与设备的绝缘健康状况,是变压器状态评估与故障预警的重要依据。然而,目前针对多元混合绝缘油在雷电冲击击穿后的关键性能变化规律,尤其是理化性能、介电性能、产气特性的协同演变机制,仍缺乏系统研究。因此,开展多元混合绝缘油雷电冲击击穿后的油品状态表征与性能劣化机理研究,对于完善绝缘油性能评价体系、提升变压器绝缘故障诊断水平具有重要的理论价值与工程意义。

近年来,国内外学者针对绝缘油在雷电冲击击

穿后的油品性能劣化问题开展了多方面研究。研究表明,冲击电压作用下变压器油中的颗粒杂质会显著影响击穿特性,其中碳粒及金属微粒的存在将明显降低绝缘强度^[13];于会民等分析了不同组成变压器油在冲击击穿后溶解气体的变化规律,指出芳烃与抗氧剂含量是决定气体组分的关键因素^[14];廖瑞金等研究了冲击电压下变压器油的介电响应行为,发现油中极性物质的增多会导致介质损耗因数升高和体积电阻率下降^[15];陈鑫等对比了三元混合绝缘油与矿物油在雷电冲击条件下的击穿特性及产气规律,结果表明 H_2 与 C_2H_2 为其主要特征气体^[16]。上述研究表明,绝缘油在冲击击穿后的性能劣化涵盖理化、介电及产气等多个维度,相关成果为绝缘油在变压器中的应用与运行维护提供了重要支撑。然而,针对多元混合绝缘油在雷电冲击击穿后的性能演变规律,现有研究仍较为有限。

随着计算化学方法的快速发展,基于 ReaxFF 反应力场的反应分子动力学模拟为绝缘材料裂解机理研究提供了原子尺度的分析手段,已成功应用于油纸绝缘体系分解路径与特征气体生成机制的解析^[17-18]。相关模拟研究表明,在强电场作用下,矿物绝缘油裂解以 H_2 为主要产物,而天然酯绝缘油则以 C_2H_2 和 H_2 为主,且矿物油发生放电产气的临界电场强度高于酯基绝缘油^[19];在热场作用下,棕榈油热解产物以 C_2H_4 和 CO_2 为主,水解反应对其热解进程具有显著促进作用^[20]。上述模拟研究揭示了单一油品体系在电、热应力下的微观裂解路径与产物分布规律。然而,现有研究多集中于矿物油或单一酯类绝缘油体系,针对多元混合绝缘油在高温—强电场耦合工况下的裂解行为与产气机制仍鲜有报道,特别是混合体系中多组分间相互作用对裂解路径的影响规律尚不清晰。因此,亟需结合宏观试验表征

与微观分子模拟方法,系统探明多元混合绝缘油在雷电冲击条件下的裂解演化规律与动力学机制。

文中以多元混合绝缘油为研究对象,开展雷电冲击击穿后的关键性能表征与裂解机理研究。首先,搭建雷电冲击击穿试验平台,测试不同油品间隙条件下多元混合绝缘油击穿后的理化性能、介电性能、产气特性,揭示间隙距离对击穿后油品状态的影响规律。其次,基于反应动力学理论,建立多元混合绝缘油在高温与电场耦合作用下的裂解动力学模型,分析绝缘油分子裂解规律、特征气体生成路径、主要中间体的反应历程。研究结果可为多元混合绝缘油在变压器中的工程应用、绝缘状态评估、故障诊断提供理论依据与数据支撑。

1 试验与仿真方法

1.1 雷电冲击作用下的绝缘油性能测试

本试验选用多元混合绝缘油作为研究对象,其组成为25号矿物油、大豆油天然酯、月桂酸乙基己酯、月桂酸异辛酯,体积比为65:10:20:5^[10]。试验前,对油样进行经真空干燥和过滤处理。将油样注入双级真空滤油机中,在小于-0.08 MPa、60℃条件下过滤干燥6~8 h,以降低油中水分、气体、悬浮颗粒杂质。主要理化性能见表1。

表1 多元混合绝缘油的性能参数

Table 1 Performance parameters of multi-element mixed insulating oil

性能参数	多元混合绝缘油参数数值
运动黏度(40℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	8.74
倾点/℃	-57
含水量/(×10 ⁻⁶)	28
界面张力/(mN·m ⁻¹)	42.3
击穿电压(2.5 mm)/kV	80.9
密度(20℃)/(kg·m ⁻³)	881
介质损耗(90℃)	0.004 79
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	0.008
闪点/℃	154

多元混合绝缘油雷电冲击试验平台见图1,由冲击电压发生器、电容分压器、试验油罐、计算机控制系统、示波器组成。冲击电压发生器采用DY-600 kV六级发生器,额定输出电压为600 kV,可产生1.2/50 μs的标准雷电冲击波形,示波器采集波形信号。试验中采用针—板电极模拟不均匀电场,针电极曲率半径为100 μm,板电极直径70 mm。

根据IEC 60897:1987标准要求,采用逐级升压法测定绝缘油的负极性的雷电冲击击穿电压。油隙设置为25、65、105 mm。试验过程中,每次施加冲

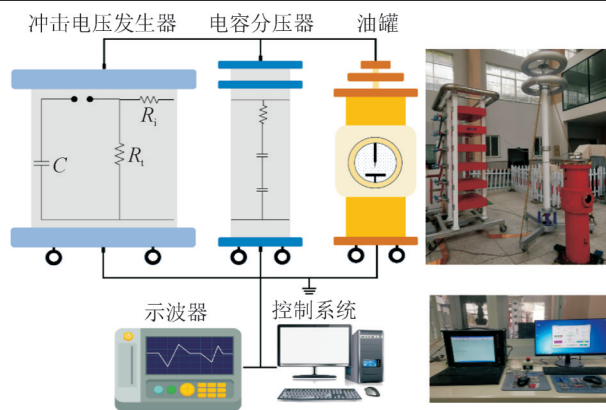


图1 绝缘油雷电冲击试验平台

Fig. 1 Lightning impulse test platform for insulating oil

击电压前油样静置1 min,击穿后对油样进行充分搅拌并静置5 min。每个油隙条件下完成10次击穿后立即取样。取样时采用洁净、干燥、密封性良好的取样容器,并尽量缩短油样暴露于空气中的时间。不同油隙条件下油样的预处理、击穿后搅拌、静置、取样流程保持一致,以降低取样过程对测试结果的影响。依据GB 2536—2011测试雷电冲击击穿后的多元混合绝缘油理化性能和介电性能,依据GB/T 17623—2017标准测试多元混合绝缘油的油中溶解气体体积分数。运动黏度、含水量、酸值性能均进行了3次重复测试,并以平均值作为测试结果,以减少误差的影响,确保结果的可靠性。为进一步评价雷电冲击击穿后多元混合绝缘油的工程适用性,文中参考GB/T 7595—2017《运行中变压器油质量》对击穿后油样的关键性能指标进行对比分析,用于初步评价雷电冲击击穿后油品性能劣化的工程适用性。

1.2 基于ReaxFF反应动力学仿真方法

依据多元混合绝缘油的成分和分子结构^[10],构建了其分子模拟模型,见图2。多元混合绝缘油模型中各绝缘油分子的分子数量见表2。在裂解模拟前,对模型进行了几何结构优化、退火处理、动力学弛豫,均采用COMPASS力场。采用smart算法进行10 000步结构优化,使体系能量达到最低。随后在NVT系综下于300~500 K范围内进行5次循环退火并能量最小化。范德华相互作用采用Atom-based方法,静电作用采Ewald方法。最后,在NPT和NVT系综下分别进行500 ps动力学弛豫,压力101.325 kPa,温度300 K,压力和温度控制方法分别为Berendsen和Nose-Hoover。经过上述处理,模型结构更加合理。

ReaxFF反应力场由Van Duin等开发^[21],是一种能够描述化学反应过程中化学键断裂与生成的分子力场,在燃烧、催化及分子裂解等复杂反应体系

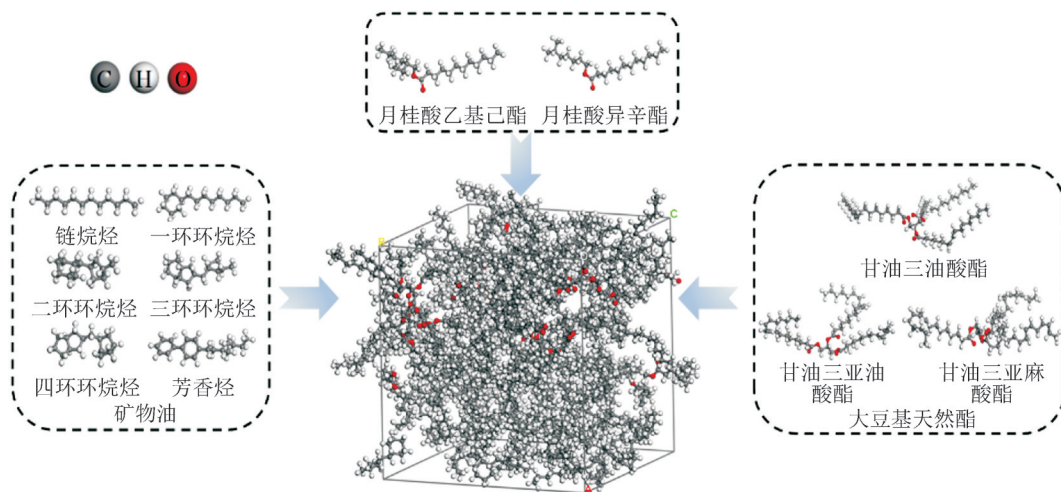


图2 多元混合绝缘油模型

Fig. 2 Multi-component mixed insulating oil model

表2 多元混合绝缘油模型组成成分

Table 2 Components of the multi-component mixed insulating oil model

成分	分子数量
矿物油	链烷烃
	一环环烷烃
	二环环烷烃
	三环环烷烃
	四环环烷烃
	芳香烃
改性天然酯	月桂酸乙基己酯
	月桂酸异辛酯
大豆油天然酯	甘油三油酸酯
	甘油三亚油酸酯
	甘油三亚麻酸酯

的模拟中具有显著优势^[22]。文中基于优化后的分子模型,选用适用于碳氢氧体系的CHO.f力场^[23],在LAMMPS平台上开展反应分子动力学模拟。模拟采用周期性边界条件,在NVT系综下进行,时间步长设为0.1 fs,温度阻尼参数设为10 fs,模拟时长为100 ps。试验中,绝缘油在针电极尖端的强电场作用下发生击穿并裂解产气,3种油隙下测得的负极性平均击穿电压分别为105、224、375 kV^[24]。为获取对应的电场强度,基于Comsol有限元软件建立与试验工况一致的电场仿真模型,代入上述平均击穿电压及油隙参数进行计算,得到最大电场强度分别为304、570、900 kV/mm。因此,文中在仿真中设置了0~6×10³ kV/mm的不同电场强度条件,模拟试验中不同油隙距离下的击穿电场强度。仿真温度设定为2 400 K,用于表征雷电冲击击穿瞬间放电通道附近的局部瞬态高温环境。需要说明的是,由于反应分子动力学模拟的时间尺度通常为皮秒量级,在实

际温度和电场强度下难以在有限模拟时间内观察到充分的裂解反应,提高温度^[25-26]或电场^[27]可有效加速反应进程,且不会改变裂解路径与反应机理^[21]。尽管仿真温度与电场强度均高于实际运行工况,该加速策略在相关文中已被广泛采用并得到有效性验证^[25-27]。

2 结果与讨论

2.1 多元混合绝缘油理化性能分析

多元混合绝缘油在不同间隙条件下雷电冲击击穿后的运动黏度、含水量及酸值测试结果见表3。在运动黏度方面,与未击穿状态相比,3种间隙条件下油样的运动黏度分别仅增加约0.1%、0.7%、4%,整体变化幅度较小,仅在大间隙条件下呈现一定程度的上升趋势。尽管放电过程中多元混合绝缘油在电热共同作用下裂解生成部分小分子产物,导致分子间作用力有所减弱,但裂解过程同时伴随极性产物的生成,增强了分子间的相互作用。这两种效应的相互竞争使得击穿后运动黏度未发生显著变化。在含水量方面,油样击穿后水分含量较初始值分别升高约25%、29%、43%,且随油隙增大呈持续上升趋势。该结果表明,雷电冲击击穿所形成的高温放电通道显著促进了绝缘油分子的裂解与含氧小分子的生成,同时可能伴随微量水分的累积效应。在较大间隙条件下,放电通道更长,能量沉积更强,水分的生成与富集更为明显。在酸值方面,其变化幅度最为显著,3种间隙条件下的酸值较初始值分别增加约25%、75%、190%,呈现出典型的加速增长特征。这表明冲击放电诱导的自由基反应与氧化裂解过程显著增强,促进了羧酸类等极性氧化产物的

生成与积累,酸值可作为反映绝缘油冲击老化程度最为敏感的指标。

表3 多元混合绝缘油的理化性能变化规律

Table 3 The physical and chemical performance variation patterns of multi-component mixed insulating oil

性能参数	未击穿	25 mm 击穿后	65 mm 击穿后	105 mm 击穿后
运动黏度 (40 ℃)/(mm ² ·s ⁻¹)	8.74	8.75	8.80	9.10
含水量/(×10 ⁻⁶)	28	35	36	40
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	0.008	0.010	0.014	0.023

从理化性能看,3种油隙下击穿后的油样酸值均低于 GB/T 7595—2017 中运行油酸值限值 0.10 mgKOH/g,也低于投入运行前油酸值限值 0.03 mgKOH/g,说明短时雷电冲击后油样酸值虽然显著升高,但仍处于参考标准允许范围内。然而,105 mm 油隙下击穿后的油样酸值较初始值升高近 190%,表明油中酸性产物已明显积累,酸值可作为冲击老化程度的敏感预警指标。含水量方面,击穿后油样含水量已接近或超过 GB/T 7595—2017 中 110 kV 电压等级运行油的水分限值,且难以满足 220 kV 及以上电压等级设备对运行油水分的要求。

雷电冲击击穿后绝缘油中颗粒浓度的粒径分布情况见图3。未击穿时,油中颗粒数量极少,主要分布于 5~15 μm 粒径范围,总颗粒浓度约为 1 600 个/100 mL。击穿发生后,颗粒浓度显著升高,且与油隙距离呈明显的正相关关系。在 25 mm 油隙条件下,5~15 μm 粒径范围的颗粒浓度增至约 13 000 个/100 mL,15~25 μm 和 25~50 μm 粒径范围的颗粒浓度均为 100 个/100 mL 左右。当油隙增大至 65 mm 时,各粒径范围颗粒浓度进一步上升:5~15 μm 颗粒浓度达到约 14 000 个/100 mL,15~25 μm 和 25~50 μm 颗粒浓度均增至约 100 个/100 mL。在 105 mm 长油隙条件下,颗粒浓度继续增加,其中 5~15 μm 颗粒浓度约为 31 000 个/100 mL,与 65 mm 条件相近并略有上升,而 15~25 μm 和 25~50 μm 颗粒浓度则持续增长。不同油隙条件下,颗粒均高度集中于 5~15 μm 的小粒径范围,其数量占总颗粒数的 90% 以上,表明击穿产生的颗粒物以微小碳颗粒为主。

2.2 多元混合绝缘油介电性能分析

多元混合绝缘油在不同间隙条件下雷电冲击击穿后的介电性能测试结果见表4。在相对介电常数方面,与未击穿状态相比,小间隙和中间隙条件下击穿后油样的相对介电常数变化不大;当油隙增大至长间隙时,相对介电常数呈现较为明显的上升趋势,表明长间隙放电条件下油中极性产物生成量

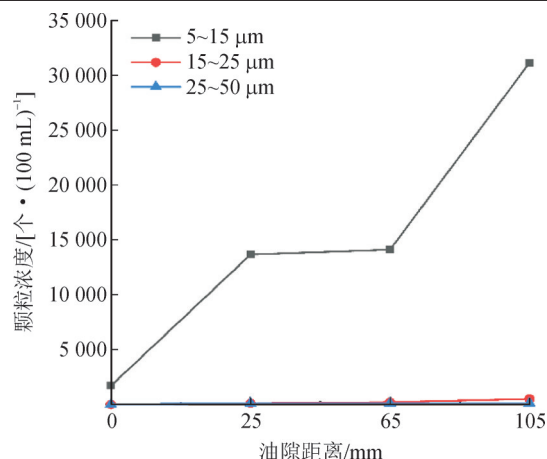


图3 多元混合绝缘油颗粒浓度

Fig. 3 Particle concentration of multi-component mixed insulating oil

显著增加。在介质损耗因数方面,击穿后3种油隙条件下的介损值均有所升高,且随油隙增大呈持续上升趋势,增幅逐步扩大。该趋势表明,雷电冲击击穿诱导的极性氧化产物及带电粒子随放电能量增加而不断积累,导致极化损耗与电导损耗逐步增大。在体积电阻率方面,小间隙和中间隙条件下击穿后电阻率降幅较小,而在长油隙条件下电阻率显著下降。该结果表明,大间隙放电条件下油中载流子浓度显著升高,绝缘性能出现明显劣化。综合来看,相对介电常数、介质损耗因数及体积电阻率均对长间隙雷电冲击击穿表现出较高的敏感性,可作为评估多元混合绝缘油冲击绝缘性能劣化程度的重要介电特征参数。

表4 多元混合绝缘油的介电性能变化规律

Table 4 The dielectric properties variation patterns of multi-component mixed insulating oil

性能参数(90 ℃)	未击穿	25 mm 击穿后	65 mm 击穿后	105 mm 击穿后
相对介电常数	2.42	2.41	2.45	2.60
介质损耗因数	0.004 79	0.005 01	0.006 20	0.007 33
体积电阻率/ (×10 ¹⁰ Ω·m)	7.2	7.1	6.5	4.3

从介电性能看,与未击穿油样相比,长油隙击穿后的介质损耗因数增加约 53%,体积电阻率下降约 40%,表明雷电冲击击穿后油中极性裂解产物、带电粒子及微小碳颗粒逐渐积累,绝缘性能明显降低。随着油隙的增大,击穿后油样的介质损耗因数升高,但仍低于 GB/T 7595—2017 中运行油介质损耗因数限值;105 mm 油隙下击穿后的油样体积电阻率为 4.3×10¹⁰ Ω·m,仍高于运行油参考限值,这体现了多元混合绝缘油雷电冲击击穿后在介电性能方面较好的工程适用性。

2.3 多元混合绝缘油产气特性分析

不同油隙距离下多元混合绝缘油雷电冲击击穿后油中溶解气体体积分数见图4,并与油中初始溶解气体进行对比。结果表明,随着油隙距离增加,油中溶解气体的总量及组成均发生显著变化。未击穿绝缘油中仅含少量背景气体,击穿后各特征气体体积分数明显增加。当油隙距离为25 mm时, H_2 和 C_2H_2 体积分数分别约为138 $\mu L/L$ 和127 $\mu L/L$,位居前两位, CH_4 和 C_2H_4 约为20 $\mu L/L$, C_2H_6 体积分数较低。油隙距离增至65 mm时, H_2 和 C_2H_2 体积分数约为265 $\mu L/L$ 和271 $\mu L/L$,而 C_2H_6 仍保持较低水平。当油隙距离达到105 mm时, H_2 体积分数显著升高至约386 $\mu L/L$,成为主导气体, CH_4 和 C_2H_4 分别增至约80 $\mu L/L$ 和60 $\mu L/L$,但增幅相对较小, C_2H_6 体积分数始终最低。

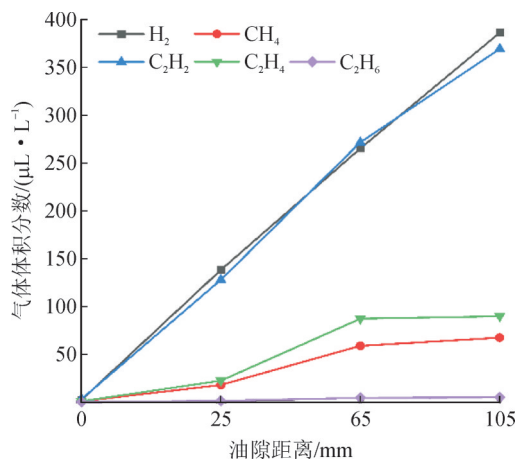


图4 多元混合绝缘油中溶解气体体积分数

Fig. 4 Dissolved gas content in multi-component mixed insulating oil

2.4 多元混合绝缘油的裂解过程

为揭示电场强度对多元混合绝缘油裂解机理的影响,文中以二环烷烃、芳香烃、甘油三酯、月桂酸异辛酯为代表,分析了它们在 1×10^3 、 4×10^3 kV/mm两种电场下的裂解路径。 1×10^3 kV/mm条件下的裂解过程见图5,环烷烃主要经历C-C键断裂和脱氢反应,六环结构开环生成 C_9H_{16} 及 C_2H_4 ,随后连续断裂形成 C_3H_5 、H-等小烷烃片段及自由基。芳香烃结构稳定,主要通过侧链断裂生成短链芳香烃中间体和烷烃自由基,苯环保持完整。甘油三酯从甘油C-O键断裂开始,生成 $C_{18}H_{31}O_2$ -与 C_3H_5 -, $C_{18}H_{31}O_2$ -经脱羧反应生成长链烃 $C_{17}H_{31}$ -和 CO_2 。长链烃进一步持续裂解,生成 C_2H_4 等小分子气体及 CH_3 ·、H·、 C_2H_3 ·等自由基。自由基彼此结合生成 CH_4 和 H_2 。月桂酸异辛酯的异辛基裂解生成 C_3H_7 ·和 $C_{17}H_{33}O_2$ ·, $C_{17}H_{33}O_2$ ·在酯基处断裂生成 CO_2 以及长链烃 C_5H_{10} ·和 $C_{11}H_{23}$ ·,长

链烃继续分解形成 C_2 和 C_3 等小分子产物。

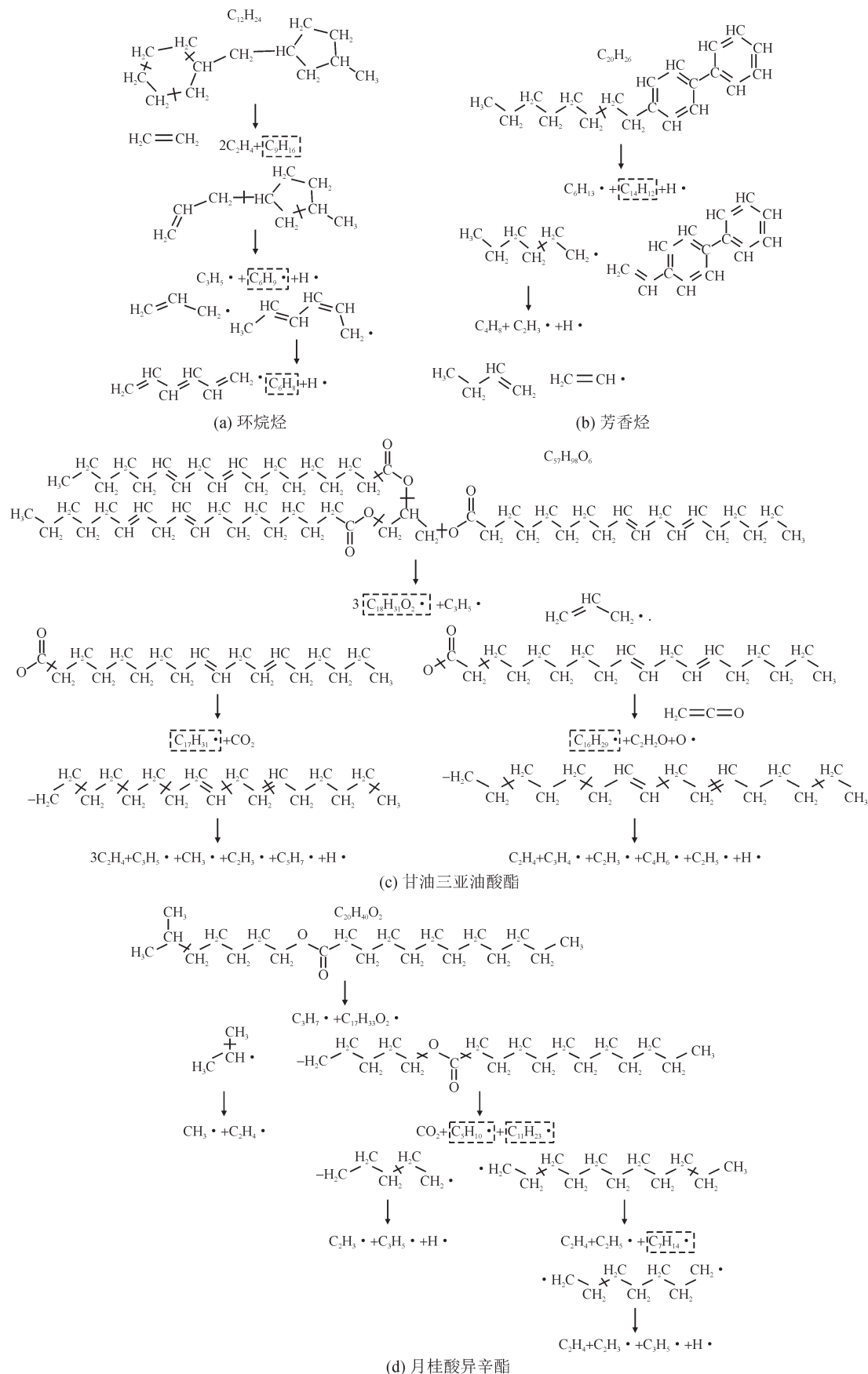
4×10^3 kV/mm强电场下绝缘油分子的裂解路径见图6。二环烷烃开环生成链烃 $C_{10}H_{15}$ ·,进一步分解为 C_2H_2 、 C_2H_4 等小分子。芳香烃除侧链断裂外,苯环结构发生开环反应,生成不饱和烃中间体,并快速裂解为 C_2H_2 、 C_2H_4 。甘油三酯经酯键断裂生成 CO_2 与长链烃,最终形成 C_1 - C_4 小分子和自由基。月桂酸异辛酯裂解路径与低电场相似。总体来看,低电场条件下裂解以单键逐步断裂为主,裂解速度较慢。强电场通过增强分子内电荷扰动显著加快裂解速率并诱发苯环开环、多键及长链多点同时断裂,使油分子裂解更加彻底。

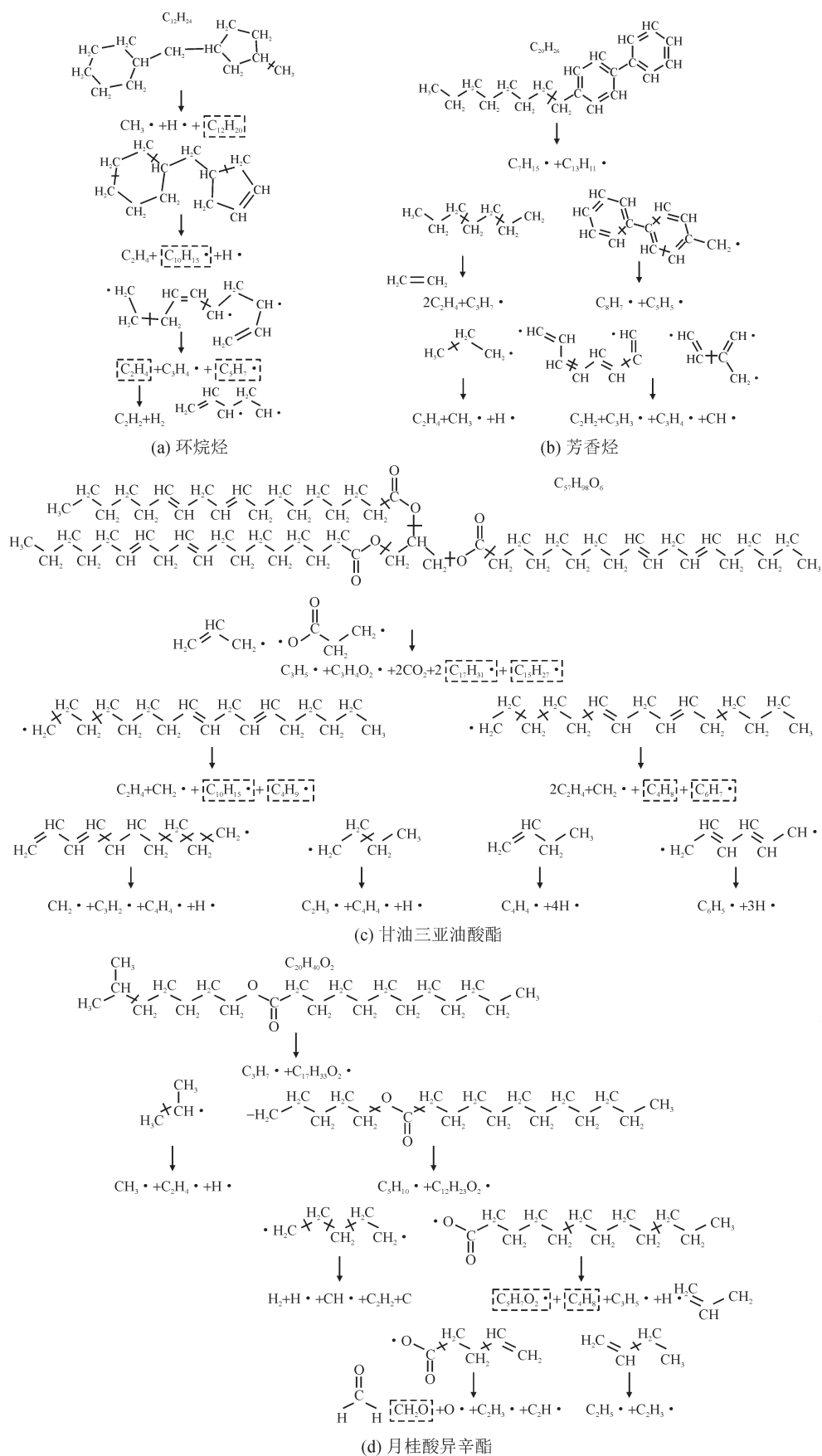
2.5 多元混合绝缘油中特征气体生成路径

为揭示特征气体的微观生成机理,文中追踪分析了 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 5种特征气体的生成路径,见图7。 H_2 主要来源于裂解过程中的脱氢反应,长链烷烃、环烷烃或不饱和烃的C-H键断裂形成烷基自由基并释放H·,两个H·结合生成 H_2 。 CH_4 主要由长链烷烃末端甲基断裂生成 CH_3 ·,并夺取H·生成 CH_4 。 C_2H_2 主要通过 C_2H_4 或其他 C_2 烃类的连续脱氢反应生成,经历 $C_2H_4 \rightarrow C_2H_3 \cdot \rightarrow C_2H_2$ 的脱氢过程逐步生成。 C_2H_4 的生成途径较多,主要包括长链烷烃自由基的 β -C键断裂或者碳链中部断裂形成碳碳双键。 C_2H_6 则主要由长链烷烃的 β -C键断裂生成乙基自由基 C_2H_5 ·,随后通过夺取H·生成 C_2H_6 。

分析表明,虽然电场强度显著影响特征气体的生成量及产气组成,但对其生成路径影响较小,各气体仍主要遵循传统热裂解反应机制。 H_2 由脱氢产生的H·结合形成, CH_4 由 CH_3 ·与H·结合生成; C_2H_2 来源于 C_2H_4 的连续脱氢反应, C_2H_4 为烷烃 β -C键断裂的直接产物,而 C_2H_6 则由 C_2H_5 ·和H·合成。电场的作用主要是加快反应速率,而非产生新的反应路径,强电场通过增强分子极化和化学键断裂概率,加速绝缘油裂解及气体生成。

上述分析从特征气体角度揭示了 H_2 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 的主要生成路径,但多元混合绝缘油由矿物油、天然酯和合成酯等多类组分共同构成。多元混合绝缘油在雷电冲击击穿下裂解生成气体小分子产物的过程并不是各单一组分独立裂解完成的,而是在高温—强电场耦合作用下由各组分参与裂解,共同形成的包含H·、 CH_3 ·、 C_2H_3 ·、 C_2H_5 ·、长链烷基自由基以及含氧酯基自由基等的自由基反应体系。由图5、6可知,矿物油组分中的链烷烃、环烷烃和芳香烃主要提供烃类自由基、不饱和烃片段和H·,天然酯及合成酯组分则在酯键断裂后生成各种含氧产物。不同组分裂解生成的自由基和中

图5 1×10^3 kV/mm 电场下多元混合绝缘油分子裂解路径Fig. 5 The decomposition pathways of multi-component mixed insulating oil molecules at 1×10^3 kV/mm

图6 4×10^3 kV/mm 电场下多元混合绝缘油分子裂解路径Fig. 6 The decomposition pathways of multi-component mixed insulating oil molecules at 4×10^3 kV/mm

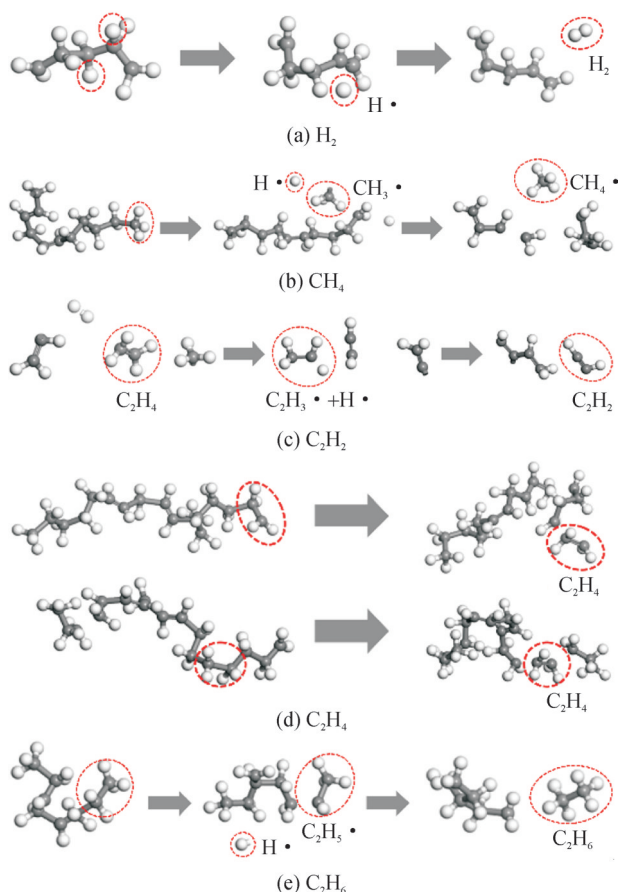


图7 特征气体主要生成路径

Fig. 7 The main generation paths of characteristic gases

间体在混合体系中彼此之间进一步发生氢转移、自由基重组、 β -C键断裂等反应,共同影响特征气体生成和油品性能劣化过程。

3 讨论

文中围绕雷电冲击击穿后多元混合绝缘油的性能劣化与裂解机制开展了试验和分子模拟研究。结果表明,随油隙距离增大,击穿后油样的理化性能、介电性能和产气特性均出现不同程度劣化。参考GB/T 7595—2017《运行中变压器油质量》中关键指标可知,击穿后油样的酸值、介质损耗因数、体积电阻率仍处于相应参考限值范围内,但含水量已接近或超过部分电压等级运行油水分限值,说明水分控制是多元混合绝缘油雷电冲击后油品状态评估中需重点关注的问题。

文中试验主要基于针—板电极结构、负极性雷电冲击开展,重点揭示多元混合绝缘油在雷电冲击击穿后的关键性能变化及微观裂解机制。实际变压器运行中,绝缘系统通常由油纸复合绝缘体系构成,同时还受到温升、老化状态等因素影响。因此,

后续研究应进一步结合油纸绝缘体系和实际设备等工况,结合不同冲击极性、温度水平、老化状态、水分含量、电极结构条件,深入研究多元混合绝缘油的冲击绝缘性能演化、油纸协同劣化机制和特征气体诊断方法,为其工程应用和运行状态评估提供更加完善的依据。

4 结论

文中通过雷电冲击击穿试验与ReaxFF反应分子动力学模拟,研究了多元混合绝缘油在不同油隙条件下雷电冲击击穿后的关键性能劣化特征及微观裂解机理,得到以下主要结论:

1)雷电冲击击穿会导致多元混合绝缘油的运动黏度、含水量、酸值升高,且劣化程度随油隙距离增大而加剧。其中酸值呈明显上升趋势,但仍处于相关标准运行绝缘油的允许范围内。但含水量已接近或超过110 kV电压等级运行油的水分限值,不满足220 kV及以上电压等级设备对运行油水分的要求。多元混合绝缘油在雷电冲击击穿产生的颗粒物以微小碳颗粒为主,主要集中于5~15 μm 小粒径范围。

2)雷电冲击击穿后,多元混合绝缘油的介质损耗因数升高、体积电阻率下降,说明油中极性裂解产物、带电粒子及颗粒杂质逐渐积累,导致极化损耗和电导损耗增强,油品绝缘裕度降低。击穿后油样的介质损耗因数和体积电阻率仍处于运行油参考限值范围内,表明其介电性能具有较好工程适用性。但与未击穿油样相比,介质损耗因数增幅明显、体积电阻率下降显著,说明多元混合绝缘油在强雷电冲击击穿后应结合水分、酸值、介损、电阻率、油中溶解气体等对其适用性进行综合评估。

3)多元混合绝缘油在雷电冲击击穿后表现出明显的放电产气特征, H_2 和 C_2H_2 是主要特征气体,且其体积分数随油隙距离增大而显著升高。ReaxFF模拟表明,高温—强电场耦合作用下油分子裂解和特征气体的生成主要涉及C-C键断裂、脱氢反应、酯键断裂、 β -C键断裂及自由基重组等过程。多元混合绝缘油的裂解产气并非各组分独立反应,不同组分裂解生成的自由基彼此间进一步发生氢转移、自由基重组、连续脱氢反应的耦合过程。电场的作用主要在于增强分子极化和化学键断裂概率,从而加速裂解进程,而非改变反应路径。

参考文献:

- [1] 李建明, 王志同, 米西岩, 等. 低压采用箔式绕组的变压器优化设计[J]. 变压器, 2024, 61(1): 5-8.
Li Jianming, Wang Zhitong, Mi Xiyan, et al. Optimal design of low-voltage transformer with foil winding[J]. Transformer, 2024, 61(1): 5-8.
- [2] 钱国超, 胡 锦, 代维菊, 等. 基于循环神经网络的运行变压器绕组压紧状态检测[J]. 智慧电力, 2024, 52(8): 129-136.
Qian Guochao, Hu Jin, Dai Weiju, et al. Clamping state detection of transformer windings based on recurrent neural networks[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 129-136.
- [3] 尹琦琳, 宋 媛, 王 帅, 等. 基于绝缘油色谱试验的 110 kV 变压器异常状态分析[J]. 变压器, 2024, 61(5): 71-74.
Yin Qilin, Song Yuan, Wang Shuai, et al. Analysis of abnormal state of 110 kV transformer based on insulation oil chromatography test[J]. Transformer, 2024, 61(5): 71-74.
- [4] 连鸿松, 黄 锦, 郑东升, 等. 绝缘油中溶解气体在线监测装置可靠性评测的现场加速试验方法及平台[J]. 变压器, 2025, 62(5): 53-58.
Lian Hongsong, Huang Jin, Zheng Dongsheng, et al. Accelerated testing method and platform for reliability of online monitoring device used to gases dissolved in insulation oil[J]. Transformer, 2025, 62(5): 53-58.
- [5] Beroual A, Sitorus H B H, Setiabudy R, et al. Comparative study of AC and DC breakdown voltages in jatropha methyl ester oil, mineral oil, and their mixtures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1831-1836.
- [6] 侯 赛, 成润坤, 刘 达. 基于二次采样和集成学习方法的变压器故障预测[J]. 智慧电力, 2024, 52(7): 40-47.
Hou Sai, Cheng Runkun, Liu Da. Transformer fault forecast based on resampling and integrated learning approach[J]. Smart Power, 2024, 52(7): 40-47.
- [7] 郑玉周, 杜金龙, 武永强, 等. 基于改进热路模型和PINN的变压器直流偏磁温升预测及绝缘寿命评估[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(2): 107-117.
Zheng Yuzhou, Du Jinlong, Wu Yongqiang, et al. Prediction of DC-bias temperature rise in transformer and insulation life assessment based on an improved thermal circuit model and PINN[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(2): 107-117.
- [8] 陈 建, 张亚杰, 黄宝新, 等. 天然酯绝缘油与矿物绝缘油变压器试验数据对比分析[J]. 变压器, 2024, 61(6): 56-61.
Chen Jian, Zhang Yajie, Huang Baoxin, et al. Comparison and analysis of test data of transformer with natural ester oil and mineral oil[J]. Transformer, 2024, 61(6): 56-61.
- [9] Liao Ruijin, Feng Dawei, Hao Jian, et al. Thermal and electrical properties of a novel 3-element mixed insulation oil for power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 610-617.
- [10] Hao Jian, Ye Wenyu, Zhang Jingwen, et al. Preparation and performance characterization of multi-component mixed insulating oil for transformers based on the structure-activity relationship between molecular structure and impulse discharge performance[J]. Energy, 2025(319): 135023.
- [11] DL/T 722—2014 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].
DL/T 722—2014 Guidelines for analysis and judgment of dissolved gases in transformer oil[S].
- [12] 李 跃, 刘安荭, 窦 陈, 等. 基于低压侧多级调压的融冰变压器磁—热耦合计算分析[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(10): 36-46.
Li Yue, Liu Anjiang, Dou Chen, et al. Magnetic-thermal coupling analysis of deicing transformers based on low-voltage side multi-stage voltage regulation[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(10): 36-46.
- [13] 周远翔, 张云霄, 张 灵, 等. 雷电冲击电压下变压器油中颗粒杂质对击穿特性影响的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 105-111.
Zhou Yuanxiang, Zhang Yunxiao, Zhang Ling, et al. Study on influence of particle impurities on breakdown characteristics of transformer oil under lightning impulse voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 105-111.
- [14] 于会民, 张培恒, 王会娟, 等. 不同组成变压器油及油纸绝缘体系受雷电冲击后油中溶解气体变化[J]. 绝缘材料, 2020, 53(10): 89-95.
Yu Huimin, Zhang Peiheng, Wang Huijuan, et al. Change of dissolved gas content in transformer oil of oil or oil-paper insulation system with different composition after lightning impulse[J]. Insulating Materials, 2020, 53(10): 89-95.
- [15] 廖瑞金, 杨丽君, 孙才新, 等. 雷电冲击电压作用下变压器油的击穿特性及介电响应研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 113-119.
Liao Ruijin, Yang Lijun, Sun Caixin, et al. Study on breakdown characteristics and dielectric response of transformer oil under lightning impulse voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 113-119.
- [16] 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.
- [17] 丁 喆, 吴嘉磊, 张 宇, 等. 220 kV 升压站母线加装串抗后的雷电及操作过电压计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2026, 47(2): 90-97.
Ding Zhe, Wu Jialei, Zhang Yu, et al. Lightning and switching overvoltages for 220 kV booster substation busbar after installation of series reactors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2026, 47(2): 90-97.
- [18] 邓祥力, 沈宇卿, 曾 平, 等. 基于生成对抗网络小样本扩展与多模态特征深度融合的变压器绕组故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(9): 89-101.
Deng Xiangli, Shen Yuqing, Zeng Ping, et al. Transformer winding fault diagnosis method based on small sample extension of

(下转第 107 页)

- [22] Rahman M F, Nigude P. Partial discharge behaviour due to irregular-shaped copper particles in transformer oil with a different moisture content of pressboard barrier under uniform field[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(24):5550-5560.
- [23] 胡一卓, 王 昊, 常昊鑫, 等. 油纸绝缘匝间电弧产生和发展过程及其时频特性[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(9):3346-3357. Hu Yizhuo, Wang Hao, Chang Haoxin, et al. Generation and development process of inter-turn arc in oil-pressboard insulation and its time-frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9):3346-3357.
- [24] 宋浩永, 陈于晴, 黄青丹, 等. 植物绝缘油纸匝间绝缘的电气性能研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(5):110-115. Song Haoyong, Chen Yuqing, Huang Qingdan, et al. Study on electrical properties of vegetable oil - pressboard inter - turn insulation[J]. Insulating Materials, 2024, 57(5):110-115.
- [25] 司 雯, 李天娇, 李斯盟, 等. 交直流复合电压下老化油纸绝缘针板模型局部放电特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(6):1980-1987. Si Wen, Li Tianjiao, Li Simeng, et al. Partial discharge characteristics of aged oil-pressboard insulation needle-plate model under AC-DC combined voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6):1980-1987.
- [26] 汲胜昌, 赵德华, 贾云飞, 等. 变压器绝缘缺陷放电发展特性及检测方法研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(10):4297-4314. Ji Shengchang, Zhao Dehua, Jia Yunfei, et al. Research status and prospect of discharge development characteristics and detection methods of transformer insulation defects[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10):4297-4314.
- [27] 刘 鑫, 常文婧, 张学友, 等. 电力变压器绝缘成型件的局部放电特性及其绝缘性能综合评价方法[J]. 绝缘材料, 2024, 57(1):58-67. Liu Xin, Chang Wenjing, Zhang Xueyou, et al. Partial discharge characteristics and comprehensive evaluation method for insulation performance of power transformer insulation molded parts[J]. Insulating Materials, 2024, 57(1):58-67.

原子超(2003—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为油纸绝缘劣化及其改性(E-mail:202534786@mail.sdu.edu.cn)。

任富强(1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为新型电力系统构建背景下电力设备多场耦合分析及可靠性提升、绝缘劣化机理、绝缘状态评估、人工智能在电力设备中的应用(通信作者)(E-mail:renfuqiang@sdu.edu.cn)。

(上接第 88 页)

- generative adversarial network and deep multimodal feature fusion [J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(9):89-101.
- [19] 齐伟惟, 卢 武, 王哲铭, 等. 强场条件下酯基绝缘油产气规律和机制的分子动力学仿真[J]. 绝缘材料, 2025, 58(8):57-66. Qi Weiwei, Lu Wu, Wang Zheming, et al. Molecular dynamics simulation of gas production law and mechanisms of ester-based insulating oil under strong electric field conditions[J]. Insulating Materials, 2025, 58(8):57-66.
- [20] Zheng Hanbo, Wang Zijian, Yang Tao, et al. Investigation on pyrolysis mechanism of palm olein and the effect of moisture on its pyrolysis[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021(339):116824.
- [21] Van Duin A C T, Dasgupta S, Lorant F, et al. ReaxFF: a reactive force field for hydrocarbons[J]. The Journal of Physical Chemistry A, 2001, 105(41):9396-9409.
- [22] Chenoweth K, Cheung S, Van Duin A C T, et al. Simulations on the thermal decomposition of a poly(dimethylsiloxane) polymer using the ReaxFF reactive force field[J]. Journal of the American Chemical Society, 2005, 127(19):7192-7202.
- [23] He Jiaxuan, Zhang Enze, Zhang Heng. Comparative analysis of methanol generation mechanism in different oil-cellulose insulation based on ReaxFF MD[J]. Journal of Molecular Liquids, 2023 (382):121872.
- [24] 王 宾, 陈 冉, 才志远, 等. 晶闸管控制串并联中压配电变压器暂态建模及解析分析[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(5):155-163. Wang Bin, Chen Ran, Cai Zhiyuan, et al. Transient modeling and analytical study of a thyristor-controlled series-parallel medium-voltage distribution transformer[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(5):155-163.
- [25] 叶文郁, 郝 建, 刘广良, 等. 长油隙下多元混合绝缘油的雷电冲击放电特性[J]. 高电压技术, 2026, 52(5):2271-2281. Ye Wenyu, Hao Jian, Liu Guangliang, et al. Lightning impulse discharge characteristics of multi-component mixed insulating oil under long oil gaps[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(5):2271-2281.
- [26] 陈贝贝, 李晓涵, 刘金凤, 等. 电热联合故障下天然气合成油分解特性[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):168-175. Chen Beibei, Li Xiaohan, Liu Jinfeng, et al. The decomposition characteristics of gas to liquid insulating oil under electric-thermal fault conditions[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5):168-175.
- [27] 汪 倩, 赵婉萌, 曹伟东, 等. 基于 ReaxFF 的产气材料热解及动力学分析[J]. 电工技术学报, 2025, 40(10):3082-3096. Wang Qian, Zhao Wanmeng, Cao Weidong, et al. Analyzing the pyrolysis kinetics and pyrolysis gases of gassing materials using ReaxFF[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(10):3082-3096.

刘梦娜(1993—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

叶文郁(1995—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为先进电工材料研发、性能表征及微观机理(通信作者)(E-mail:ywywpost@163.com)。