

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.011

基于铜箔—多层油纸绝缘结构的局部放电特性研究

原子超, 赵正宇, 武宏斌, 任富强, 李清泉

(山东大学山东省先进输变电技术与智能装备重点实验室, 济南 250061)

摘要: 电力变压器主绝缘、绕组层间及绕组导体附近绝缘均为油纸绝缘结构, 纸层厚度、油纸界面数量和铜箔导体层分布不同, 局部放电特征存在显著差异。为分析相近绝缘厚度下结构差异对交流局部放电的影响, 制备单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸试样, 采用脉冲电流法于针板电极模型测量局部放电起始电压(*PDIV*), 获取相位分辨局部放电和时间分辨局部放电谱图, 并统计放电重复率和平均放电量。结果表明, 3类试样*PDIV*分别为5.73、8.42、10.19 kV; 加压120 min时, 多层薄油纸放电重复率最高, 约82次/s, 铜箔—多层薄油纸平均放电量最高, 约199 pC。多层界面增强放电重复率, 铜箔层提高放电强度, 应联合谱图和统计特征来评估放电发展状态。

关键词: 电力变压器; 油纸绝缘; 针板电极; 局部放电

Study on Partial Discharge Characteristics Based on Copper Foil-multilayer Oil-pressboard Insulation Structure

YUAN Zichao, ZHAO Zhengyu, WU Hongbin, REN Fuqiang, LI Qingquan

(Shandong Provincial Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology and Intelligent Equipment, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The main insulation, inter-winding layer insulation and insulation near winding conductors of power transformers are all oil-pressboard insulation structures. However, due to differences in pressboard layer thickness, the number of oil-pressboard interfaces and the distribution of copper foil conductor layers, the partial discharge characteristics exhibit significant variations. To analyze the influence of structural differences on AC partial discharge under similar insulation thicknesses, the samples of single-layer thick oil-pressboard, multi-layer thin oil-pressboard and copper foil-multilayer thin oil-pressboard are prepared. The partial discharge inception voltage (*PDIV*) is measured using the pulse current method in a needle-plate electrode model, the phase-resolved partial discharge and time-resolved partial discharge patterns are obtained, and the discharge repetition rate and average discharge magnitude are calculated. The results show that the *PDIV* of the three samples are 5.73 kV, 8.42 kV and 10.19 kV, respectively. After voltage application for 120 minutes, the multi-layer thin oil-pressboard sample has the highest discharge repetition rate, approximately 82 times/s, while the copper foil-multilayer thin oil-pressboard sample has the highest average discharge magnitude, approximately 199 pC. Multi-layer interfaces increase the discharge repetition rate, while the copper foil layer enhances the discharge intensity. The discharge development status shall be assessed by combining discharge patterns with statistical features.

Key words: power transformer; oil-pressboard insulation; needle-plate electrode; partial discharge characteristics

收稿日期:2026-03-21; 修回日期:2026-05-20

基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U25B20199);国家自然科学基金青年科学基金项目(52307180)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China Joint Fund Key Projects(U25B20199), Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(52307180).

0 引言

电力变压器是电力系统中电压变换与电能传输的关键设备,其绝缘可靠性直接关系到电网的安全稳定运行^[1-4]。油纸绝缘因具有较高介电强度、良好机械支撑能力与较强散热性能,被广泛应用于电力变压器主绝缘、绕组层间绝缘及导体间绝缘结构^[5-6]。而在长期工频交流电压、热应力、机械应力等共同作用下,油纸绝缘内部易出现局部油隙、层间脱黏、电荷积聚、绝缘劣化、电场畸变等问题,进而诱发局部放电。局部放电虽然通常不会立即造成贯穿性击穿^[7-9],但其持续作用会加速绝缘油分解、纸板碳化和绝缘强度下降,是变压器绝缘故障的重要早期表征^[10-11]。因此,电力变压器不同油纸绝缘结构在交流电压下的局部放电特性亟待研究。

局部放电的发生与油纸绝缘结构、局部电场分布和界面电荷行为密切相关。已有研究表明,局部放电过程中释放的能量会引发绝缘油分解和气泡生成,气泡在油纸界面及局部强场区域的形成、迁移和演化会进一步改变介质局部电场分布^[12-16]。在针板电极等极不均匀电场模型中,放电通常集中于局部场强较高区域,并伴随空间电荷积聚、界面极化和放电脉冲幅值变化等现象^[17-19]。相位分辨局部放电谱图(PRPD)能够反映放电脉冲幅值、放电次数与工频电压相位之间的对应关系;时间分辨局部放电谱图(TRPD)则可以表征放电脉冲随加压时间的演化过程。围绕PRPD谱图、谱图识别、放电阶段划分和多参量特征提取,已有研究开展了较多工作,为油纸绝缘局部放电特征分析提供了坚实基础^[20-23]。但是,电力变压器内部油纸绝缘并非单一均质结构,不同绝缘部位的材料形式、界面数量和导体边界条件存在显著差异,其局部放电特征也可能表现出不同规律。主绝缘通常由较厚油纸板承担主要电压应力,绕组绝缘多由多层薄纸及层间油隙组成,而绕组导体附近匝间、层间绝缘还会受到铜箔等导体结构影响。现有研究分别关注了油纸绝缘匝间电弧、匝间绝缘电气性能、老化油纸针板模型局部放电特性及极性效应等问题^[24-27],但针对单层厚油纸、多层薄油纸及铜箔—多层薄油纸结构在相同工频交流电压条件下的对比研究仍相对不足。

文中基于针板电极搭建工频交流电压下油纸绝缘局部放电实验平台,设计单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸3类等效模型,分别模拟电力变压器主绝缘、绕组层间绝缘及绕组导体附近匝间/层间复合绝缘结构。测量3类试样的局部放

电起始电压,绘制PRPD和TRPD谱图,并统计不同加压时间下的放电重复率和平均放电量,进而分析不同油纸绝缘结构对交流局部放电特性的影响规律。

1 实验平台与方法

1.1 试样结构与等效模型

为研究不同油纸绝缘结构在工频交流电压下的局部放电特性,文中采用针板电极构建极不均匀电场等效模型。针板电极结构见图1。实验中,针电极接高压端,板电极接地,油纸试样置于两电极间并完全浸入绝缘油中。针尖附近在外施电压作用下形成局部电场集中,可模拟变压器油纸绝缘中由导体毛刺、局部尖端、层间缺陷或微小油隙引起的极不均匀电场区域。

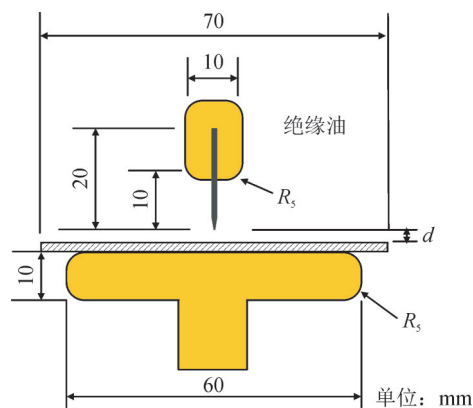


图1 针板电极模型

Fig. 1 Needle-plate electrode model

为保证不同结构间具有可比性,3类试样绝缘厚度均控制在0.5 mm。单层厚油纸试样采用厚度为0.5 mm的油浸纸板,用于模拟变压器主绝缘中较厚油纸板承受局部电场作用的情况。多层薄油纸试样由6层厚度为0.08 mm的薄纸叠放组成,层间由绝缘油充分浸润,用于模拟绕组层间绝缘中“油—纸”交替分布的复合介质结构。铜箔—多层薄油纸试样则在第4层与第5层薄纸之间加入铜箔,用于模拟绕组导体附近匝间、层间复合绝缘结构。铜箔厚度为0.01 mm,设置于第4层与第5层薄纸之间,以模拟实际绕组导体被多层绝缘纸包覆且绝缘分布非完全对称的结构特征,同时避免铜箔过于靠近针电极而产生过强的局部金属边界效应。

通过对上述3类试样在相近绝缘厚度及相同工频交流加压条件下于针板电极开展局部放电实验,可对比不同油纸绝缘结构对局部放电起始电压、PRPD谱图、TRPD谱图及统计特征的影响规律。

1.2 绝缘油与绝缘纸预处理

绝缘油和绝缘纸的含水量、含气量及杂质会直

接影响油纸绝缘的介电性能和局部放电起始特性。为降低试样初始状态差异对实验结果的影响,实验前需对绝缘油和绝缘纸进行预处理。油纸绝缘制样流程见图2,预处理流程及关键指标主要参考IEC 60422:2024和IEC 60641:2027相关要求确定。

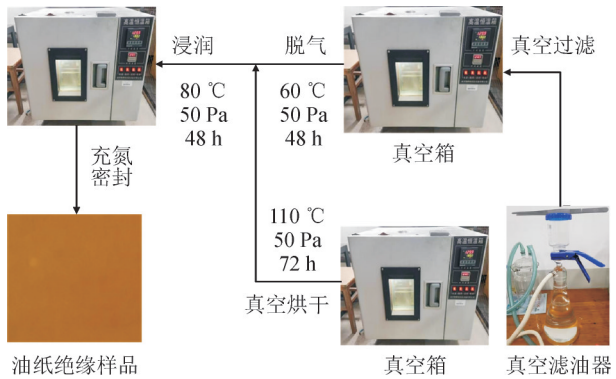


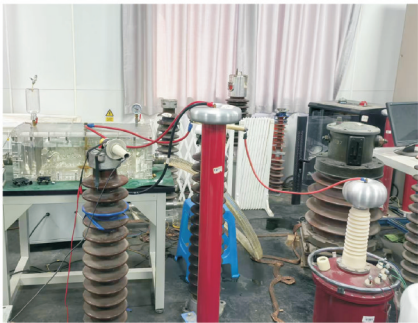
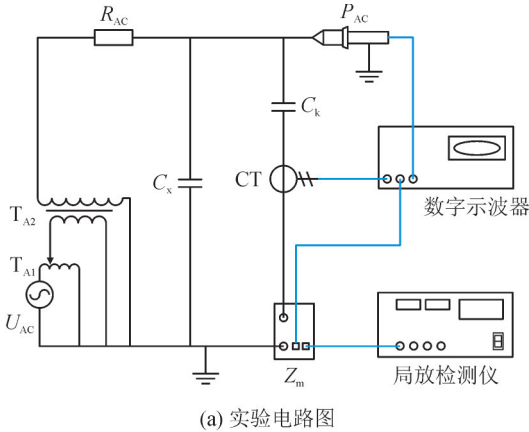
图2 油纸绝缘制样流程图
Fig. 2 Flow chart of oil-pressboard insulation sample preparation

绝缘油采用昆仑牌25号变压器油,并通过真空滤油器ZY-10进行过滤处理;绝缘纸采用厚度为0.5 mm的油浸纸板和厚度为0.08 mm的绝缘薄纸,均裁剪为边长70 mm的方形。预处理过程中,绝缘油在60 °C、50 Pa条件下进行循环过滤和真空脱气处理,以去除油中水分、溶解气体及固体杂质;绝缘纸在110 °C、50 Pa条件下真空干燥72 h,以去除其中的游离水、结合水及残余气体,随后在80 °C、50 Pa条件下真空浸油48 h,使绝缘油充分填充纸纤维孔隙和层间微小空隙。

预处理完成后,对油浸纸板和绝缘油关键参数进行检测,确保油浸纸板微水含量低于1%、绝缘油微水含量低于10 μL/L、油中气体体积分数低于2%。检测合格后,试样置于真空环境中低温密封保存。多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸试样在单层薄纸干燥、浸油后再叠放组装,并保证各层油纸充分浸润、贴合平整,以减少褶皱、气泡和异物影响,从而保证3类试样具有较一致的初始状态。

1.3 局部放电测试回路

为获取不同油纸绝缘结构在工频交流电压下的局部放电信号,搭建了基于脉冲电流法的局部放电测试回路。实验电路图及实际连接图见图3,实验设备主要参数见表1。测试回路主要由工频交流电源、调压器、升压变压器、限流电阻、耦合电容、检测阻抗、局放检测仪、数字示波器及针板电极试样组成。试样 C_x 置于油箱内,针电极接高压端,板电极可靠接地。



(a) 实验电路图
(b) 实验连接图
图3 实验电路图及连接图

Fig. 3 Experimental circuit diagram and connection diagram

表1 实验设备主要参数

Table 1 Main parameters of experimental equipment

实验设备	参数及单位	数值
数字示波器	模拟带宽/GHz	1
	灵敏度/mV	1
	带宽/kHz	16~1 500
局放检测仪	灵敏度/pC	<0.1
	输入阻抗/ Ω	50
	耦合电容 C_k	容量/nF
限流电阻 R_{AC}	阻抗/ $M\Omega$	5
检测阻抗 Z_m	阻抗/ Ω	50
电流互感器CT	带宽/MHz	3~30

实验过程中,工频交流电压经调压器和升压变压器升压后施加于针电极。高压侧串接限流电阻 R_{AC} ,用于限制异常放电或击穿时的短路电流。耦合电容 C_k 与检测阻抗 Z_m 构成局部放电脉冲检测通道,当试样 C_x 内部或界面发生局部放电时,放电脉冲电流经耦合电容耦合至检测支路,在 Z_m 两端形成瞬态电压信号。该信号输入局放检测仪,用于获取视在放电量、放电次数及PRPD谱图数据;同时接入数字示波器,用于观察放电脉冲波形及其时间演化特征。正式实验前,采用JZF-9校正脉冲发生器对局部放电测试系统进行校准,先以50 pC标准脉冲完

成标定,再以 100、150 pC 标准脉冲进行复核,局放检测仪显示值与校正脉冲发生器输出值一致时认为校准合格。实验采用恒定电压法进行加压,外施电压每升高 1 kV 后保持 5 min,以保证电压稳定并观察局部放电是否出现;当检测到稳定局部放电信号时,记录此时电压作为局部放电起始电压。数据采集过程中,3类试样的外施电压则为其局部放电起始电压的 1.2 倍,即单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸试样的外施电压分别为 6.88、10.10、12.23 kV。

2 局部放电起始电压与谱图特征

2.1 局部放电起始电压对比

在相同针板电极、相近绝缘厚度及相同工频交流加压条件下,3类油纸绝缘结构表现出不同的局部放电起始特性。不同油纸绝缘结构的局部放电起始电压见表2。

表2 不同油纸绝缘结构的局部放电起始电压

Table 2 Partial discharge inception voltage of different oil-pressboard insulation structures

试样类型	等效结构	$PDIV/kV$
单层厚油纸	主绝缘	5.73
多层薄油纸	绕组层间绝缘	8.42
铜箔—多层薄油纸	导体附近匝间/层间复合绝缘	10.19

由表2可知,单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸试样的 $PDIV$ 分别为 5.73、8.42、10.19 kV,呈逐渐升高趋势。其中,单层厚油纸试样 $PDIV$ 最低,说明在针板电极形成的极不均匀电场下,连续厚纸板结构更易在针尖附近发生局部放电。多层薄油纸试样 $PDIV$ 高于单层厚油纸,表明多层油纸界面和层间油隙对放电通道发展具有一定阻滞作用。铜箔—多层薄油纸试样 $PDIV$ 最高,说明铜箔导体层改变了试样内部电场分布,使局部放电起始所需电压进一步升高。总体来看,油纸结构由单层连续介质向多层复合介质及含导体边界结构转变时,局部放电起始电压明显提高。

2.2 单层厚油纸主绝缘模型谱图特征

单层厚油纸主绝缘模型的局部放电脉冲波形和 PRPD 谱图见图4,TRPD 谱图见图5。由放电脉冲波形可知,放电脉冲主要出现在工频电压的特定相位区间内,其中约 $60^\circ \sim 110^\circ$ 附近出现一组正极性脉冲,约 $220^\circ \sim 250^\circ$ 附近出现一组负极性脉冲,说明放电具有明显的相位选择性。

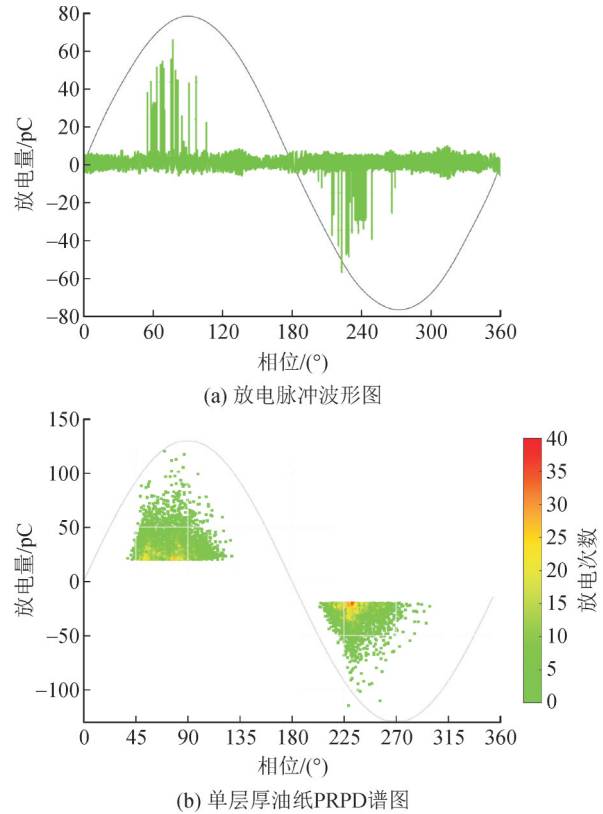


图4 单层厚油纸放电脉冲波形图及 PRPD 谱图

Fig. 4 Waveform of partial discharge pulses and PRPD spectra of single-layer thick oil-pressboard

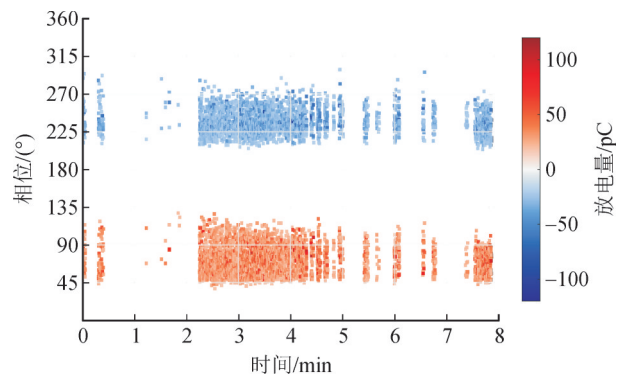


Fig. 5 TRPD spectra of single-layer thick oil-pressboard

由 PRPD 谱图可知,放电脉冲主要集中于 $45^\circ \sim 125^\circ$ 和 $200^\circ \sim 280^\circ$ 两个相位区间内,呈明显簇状分布。数据统计显示,该模型有效放电脉冲数为 7 827 个,平均放电量为 33.14 pC,中位放电量为 29.69 pC,95% 放电脉冲低于 57.54 pC,约 99.27% 的放电脉冲低于 80 pC,说明单层厚油纸在稳定放电阶段以低幅值放电为主。

由 TRPD 谱图可知,放电在时间上具有阶段性。加压初期放电脉冲较少,约 2 min 后脉冲数量明显增加,并稳定分布于上述相位区间内。随后放电密度呈间歇性变化,反映出局部电荷积聚与释放过程对重复触发的影响。总体来看,单层厚油纸模

型表现为 $PDIV$ 较低、相位分布集中、放电量较低的特征,说明连续厚纸结构虽易在针尖局部强场作用下起始放电,但对放电通道进一步发展仍具有一定限制。

2.3 多层薄油纸绕组绝缘模型谱图特征

多层薄油纸绕组绝缘模型的局部放电脉冲波形和 PRPD 谱图见图 6, TRPD 谱图见图 7。由放电脉冲波形可知,放电脉冲同样集中出现在工频电压的特定相位区间内,其中约 $45^\circ \sim 105^\circ$ 附近出现一组正极性脉冲,约 $215^\circ \sim 250^\circ$ 附近出现一组负极性脉冲;与单层厚油纸相比,脉冲幅值明显增大,正、负极性脉冲均可达到百 pC 量级。

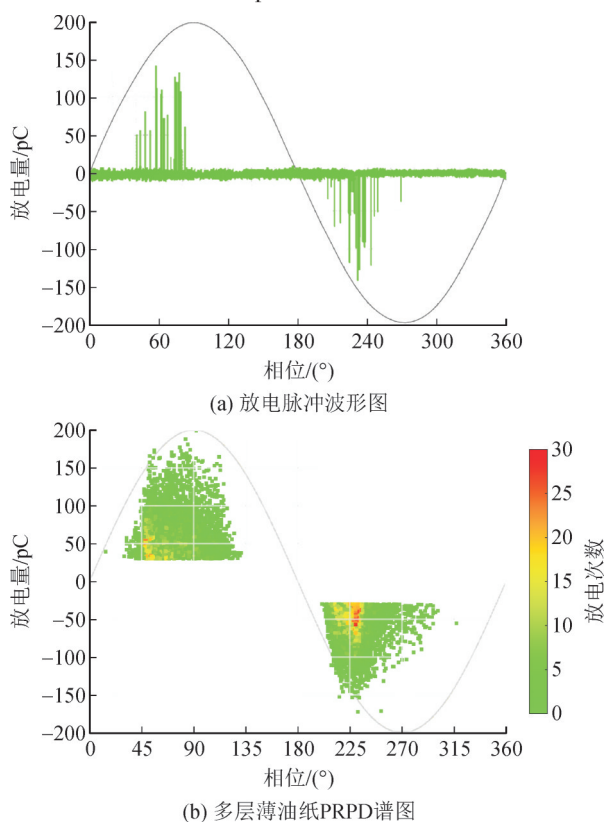


图 6 多层薄油纸放电脉冲波形图及 PRPD 谱图

Fig. 6 Waveform of partial discharge pulses and PRPD spectra of multi-layer thin oil-pressboard

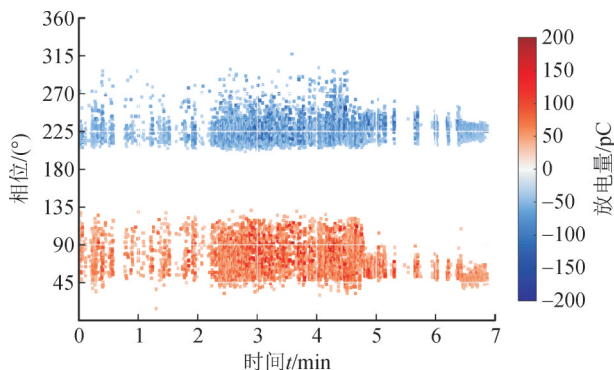


Fig. 7 TRPD spectra of multi-layer thin oil-pressboard

由 PRPD 谱图可知,放电脉冲主要集中于 $45^\circ \sim 130^\circ$ 和 $200^\circ \sim 280^\circ$ 两个相位区间内,呈明显簇状分布。绘图数据统计显示,该模型有效放电脉冲数为 10 950 个,平均放电量 61.30 pC,中位放电量为 55.18 pC,95% 放电脉冲低于 111.14 pC,最大放电量接近 199.11 pC。与单层厚油纸相比,其平均放电量和高幅值放电脉冲占比均明显提高。

由 TRPD 谱图可知,加压初期放电较稀疏,约 2 min 后脉冲密度明显增加,并持续分布于上述两个相位区间内,说明试样进入较稳定的局部放电阶段。多层薄油纸中油纸界面和层间油隙数量增加,界面极化与电荷积聚作用更明显,使局部放电更易重复触发。总体来看,多层薄油纸模型表现为 $PDIV$ 较高、放电重复性更强、平均放电量更大的特征。

2.4 铜箔—多层薄油纸导体绝缘模型谱图特征

铜箔—多层薄油纸导体绝缘模型的局部放电脉冲波形和 PRPD 谱图见图 8, TRPD 谱图见图 9。由放电脉冲波形可知,放电脉冲主要出现在约 $50^\circ \sim 110^\circ$ 和 $220^\circ \sim 255^\circ$ 相位区间,脉冲幅值显著高于前两类试样,局部脉冲已达到数 pC 量级,说明铜箔结构下单次放电强度更高。

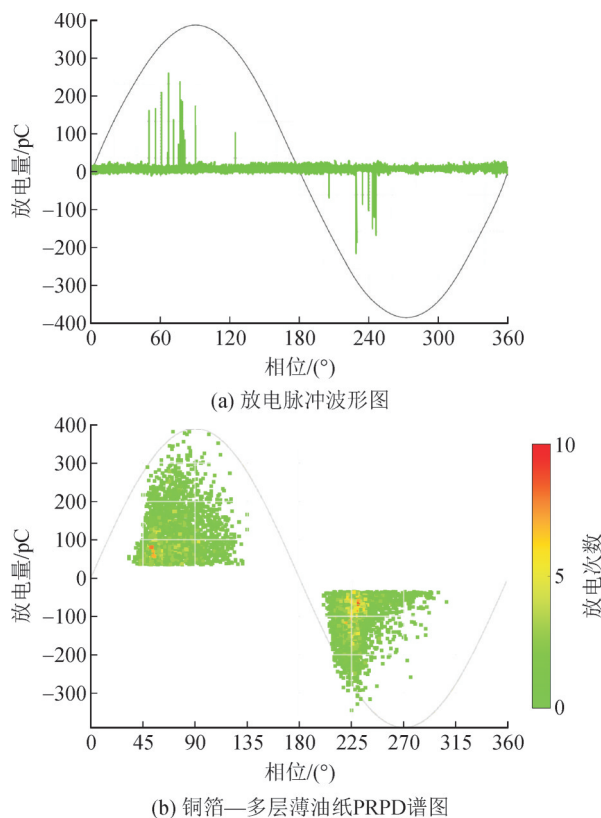


图 8 铜箔—多层薄油纸放电脉冲波形图及 PRPD 谱图

Fig. 8 Waveform of partial discharge pulses and PRPD spectra of copper foil-multilayer thin oil-pressboard

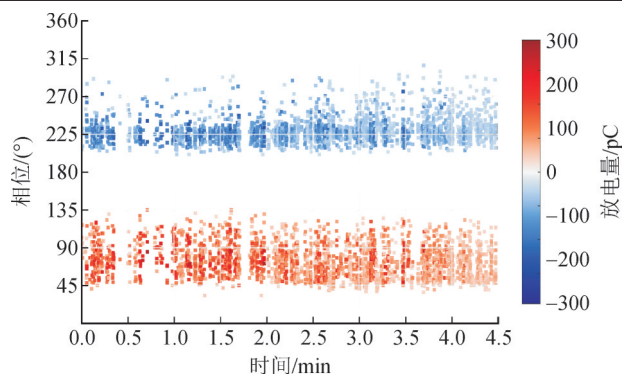


图9 铜箔—多层薄油纸 TRPD 谱图

Fig. 9 TRPD spectra of copper foil-multilayer thin oil-pressboard

由 PRPD 谱图进一步可知,放电脉冲主要分布于 $45^\circ \sim 135^\circ$ 和 $200^\circ \sim 285^\circ$ 相位区间内,呈双簇状特征。统计结果表明,该模型有效放电脉冲数为 5 181 个,少于单层厚油纸和多层薄油纸模型;平均放电量为 114.90 pC,中位放电量为 98.58 pC,95% 放电脉冲低于 231.91 pC,其中高于 150 pC 的脉冲占 25.98%。因此,铜箔—多层薄油纸模型表现为放电重复频次较低、单次放电强度较高的特征。

由 TRPD 谱图可知,放电脉冲在采集过程中主要维持于上述相位区间内,时间分布相对连续,但脉冲密度低于多层薄油纸模型。铜箔作为导体层改变了油纸复合介质内部电场分布,并可能在局部区域引起感应电荷积聚,使放电触发后的电荷释放量增大。总体来看,铜箔—多层薄油纸模型表现为 PDIV 最高、放电重复率较低、平均放电量最大的特征。

3 加压时间下局部放电统计特征

为分析加压时间对不同油纸绝缘结构局部放电发展的影响,选取 0、40、80、120 min 作为特征时刻,统计放电重复率和平均放电量,结果见图 10-12。

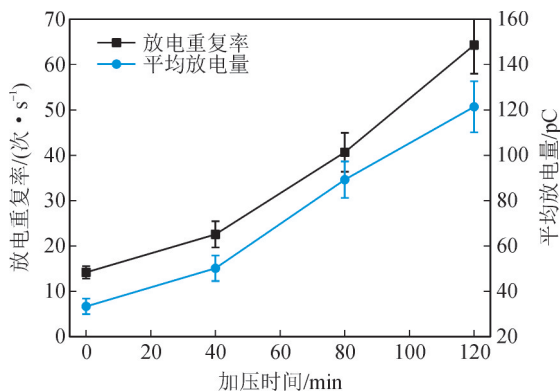


图10 单层厚油纸放电重复率和平均放电量变化曲线

Fig. 10 The variation curves of discharge repetition rate and average discharge amount of single-layer thick oil-pressboard

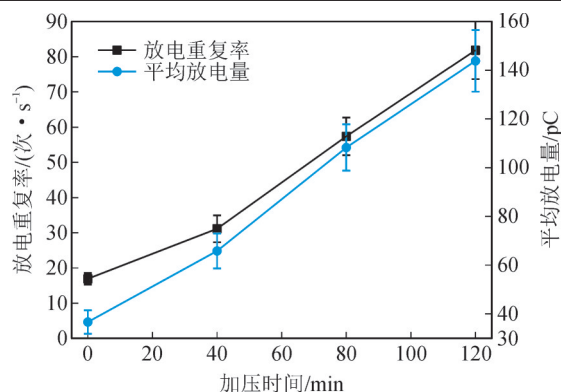


图11 多层薄油纸放电重复率和平均放电量变化曲线

Fig. 11 The variation curves of discharge repetition rate and average discharge amount of multi-layer thin oil-pressboard

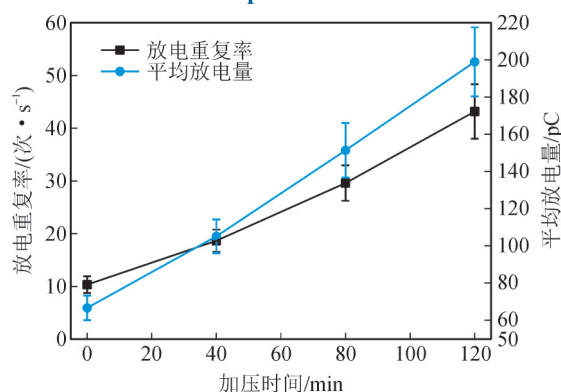


图12 铜箔—多层薄油纸放电重复率和平均放电量变化曲线

Fig. 12 The variation curves of discharge repetition rate and average discharge amount of copper foil-multilayer thin oil-pressboard

3.1 放电重复率随加压时间变化

由图 10-12 可知,3 类试样的放电重复率均随加压时间延长而升高。单层厚油纸试样由 0 min 时的 14.20 次/s 增至 120 min 时的 60.30 次/s;多层薄油纸试样由 16.90 次/s 增至 81.72 次/s;铜箔—多层薄油纸试样由 10.30 次/s 增至 43.20 次/s。说明持续加压过程中,油纸界面电荷积聚、局部弱点发展及微小油隙活化程度逐渐增强,使放电重复触发概率增加。

对比不同结构可知,放电重复率整体表现为:多层薄油纸最高,单层厚油纸次之,铜箔—多层薄油纸最低。120 min 时,三者放电重复率分别为 81.72、60.30、43.20 次/s。多层薄油纸界面数量多、层间油隙分布更复杂,容易形成更多重复放电触发点,因此放电重复率最高;铜箔结构下放电区域相对集中,重复触发频次较低。

3.2 平均放电量随加压时间变化

平均放电量也随加压时间增加而增大。单层厚油纸试样平均放电量由 33.30 pC 增至 121.30 pC;多层薄油纸试样由 36.70 pC 增至 143.80 pC;铜箔—

多层薄油纸试样由 66.70 pC 增至 198.80 pC。表明持续局部放电会使油纸局部区域逐渐劣化, 放电通道发展能力增强, 单次放电释放电荷量随之增大。

从不同结构对比看, 平均放电量整体表现为铜箔—多层薄油纸最高, 多层薄油纸次之, 单层厚油纸最低。120 min 时, 三者平均放电量分别为 198.80、143.80、121.30 pC。铜箔导体层改变了油纸复合介质内部电场分布, 并增强局部电荷积聚效应, 因此放电触发后释放的电荷量更大。

3.3 特征参数综合对比

由 $PDIV$ 、放电重复率和平均放电量可知, 3 类油纸绝缘结构表现出不同放电特征。单层厚油纸 $PDIV$ 最低, 为 5.73 kV, 说明其在针尖局部强场下更易起始放电, 但平均放电量相对较低。多层薄油纸 $PDIV$ 为 8.42 kV, 且 120 min 时放电重复率最高, 达到 81.72 次/s, 表明多界面和层间油隙结构更易形成重复触发放电。铜箔—多层薄油纸 $PDIV$ 最高, 为 10.19 kV, 120 min 时放电重复率最低, 为 43.20 次/s, 但平均放电量最高, 为 198.80 pC, 表现为较难起始、低频次、高幅值放电特征。

因此, 油纸绝缘结构由单层厚纸向多层薄纸及含铜箔导体层结构转变时, 局部放电起始电压逐渐升高; 放电发展后, 其重复触发能力和单次放电强度则受界面数量、层间油隙及导体边界条件共同影响。

4 局部放电物理机理分析

在针板电极形成的极不均匀电场中, 局部放电受电场集中、油纸界面极化、空间电荷积聚及层间微小油隙共同控制。实验结果表明, 单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸试样的 $PDIV$ 分别为 5.73、8.42、10.19 kV。与单层厚油纸相比, 多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸的 $PDIV$ 分别提高约 46.9% 和 77.8%, 说明多层界面及导体边界会改变局部电场分布, 并阻滞放电通道的起始发展。

单层厚油纸界面较少, 针尖强场更易直接作用于连续纸板区域, 因此 $PDIV$ 最低; 但连续纸板对放电通道扩展仍有一定限制, 使其放电量相对较低。多层薄油纸中层间油隙和油纸界面数量增加, 持续加压后界面极化与空间电荷积聚增强, 易形成多个可重复触发的局部弱点。因此, 加压 120 min 时, 多层薄油纸放电重复率达到 81.72 次/s, 分别比单层厚油纸和铜箔—多层薄油纸高约 35.5% 和 89.2%, 表现出更强的重复放电特征。

铜箔—多层薄油纸中, 铜箔导体边界会引起局

部电场重新分布, 并增强邻近区域的感应电荷积聚。一方面, 该结构使 $PDIV$ 升高至 10.19 kV; 另一方面, 放电触发后导体边界附近电荷释放能力增强, 使单次放电量增大。加压 120 min 时, 其平均放电量为 198.80 pC, 分别比单层厚油纸和多层薄油纸高约 63.9% 和 38.2%, 但放电重复率仅为 43.20 次/s, 表现出“低频次、高幅值”的放电特征。

因此, 3 类油纸绝缘结构局部放电特性的差异, 本质来源于绝缘层结构、界面数量、层间油隙及铜箔导体边界对局部电场分布和电荷行为的共同调控; 随着加压时间延长, 界面电荷积聚、微小油隙活化及局部绝缘劣化进一步促进了放电发展。

5 结论

文中基于针板电极模型, 研究了工频交流电压下单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸 3 类典型变压器油纸绝缘结构的局部放电特性, 得到如下结论。

1) 不同油纸绝缘结构的局部放电起始电压差异明显。单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸的 $PDIV$ 分别为 5.73、8.42、10.19 kV, 呈逐渐升高趋势, 说明多层界面及铜箔导体层会改变局部电场分布, 提高局部放电起始难度。

2) 3 类试样的 PRPD 谱图均呈现两个主要相位区间分布。单层厚油纸放电主要集中于 $45^\circ \sim 125^\circ$ 和 $200^\circ \sim 280^\circ$, 多层薄油纸集中于 $45^\circ \sim 130^\circ$ 和 $200^\circ \sim 280^\circ$, 铜箔—多层薄油纸集中于 $45^\circ \sim 135^\circ$ 和 $200^\circ \sim 285^\circ$ 。随着绝缘结构由单层厚纸向多层薄纸及含铜箔结构转变, 放电量水平逐渐升高, 放电分布范围也有所扩展。

3) 加压时间延长会促进局部放电发展。120 min 时, 单层厚油纸、多层薄油纸和铜箔—多层薄油纸的放电重复率分别为 60.30、81.72、43.20 次/s, 平均放电量分别为 121.30、143.80、198.80 pC。其中, 多层薄油纸放电重复率最高, 说明多界面和层间油隙更易形成重复触发放电; 铜箔—多层薄油纸平均放电量最高, 表现出低频次、高幅值放电特征。

参考文献:

- [1] 张明泽, 孟繁昊, 刘 骥, 等. 变压器油纸绝缘频域介电响应非线性特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 831-843.
Zhang Mingze, Meng Fanhao, Liu Ji, et al. Research on nonlinear characteristics for frequency domain dielectric response of transformer oil-pressboard insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 831-843.

- [2] 钱国超,张 宁,郝 建,等.工频叠加谐波电压复合应力对油纸绝缘局部放电特性及击穿失效规律的影响[J]. 高电压技术, 2026,52(4):1750-1762.
- Qian Guochao,Zhang Ning,Hao Jian,et al. Influence of compound stress of power frequency superimposed harmonic voltage on partial discharge characteristics and breakdown failure law of oil-pressboard insulation[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(4): 1750-1762.
- [3] 胡雪莹,李 琳.基于全寿命周期成本和综合故障率的油浸式变压器经济寿命评估[J]. 智慧电力,2024,52(1):47-54.
- Hu Xueying, Li Lin. Economic life evaluation of oil-immersed transformer based on life cycle cost and comprehensive failure rate [J]. Smart Power, 2024, 52(1): 47-54.
- [4] 林智勇,苏若杭,黄国泰,等.基于等值老化容抗的变压器油纸绝缘状态评[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(3): 140-147.
- Lin Zhiyong, Su Ruohang, Huang Guotai, et al. Evaluation of the oil-paper insulation state of a transformer based on equivalent aging capacitance[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(3): 140-147.
- [5] 崔 岩. 环境温度影响下变压器内油纸绝缘缺陷发展过程研究[D]. 北京:华北电力大学,2025.
- Cui Yan. Study on the development process of oil-pressboard insulation defects in transformer under the influence of ambient temperature[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2025.
- [6] Wu Hongbin, Liu Hongshun, Xue Zhitong, et al. The generation and migration of bubbles in oil-pressboard insulation needle-plate system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2110-2121.
- [7] 张晓琴,朱洪斌,杨廷涛,等.局部放电电压及放电时长对油纸绝缘劣化性能的影响研究[J]. 高压电器,2025,61(10):30-38.
- Zhang Xiaoqin, Zhu Hongbin, Yang Yantao, et al. Effect of partial discharge voltage and discharge duration on degradation performance of oil-pressboard insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(10): 30-38.
- [8] 徐治仁,杨丽君,魏意恒,等.油纸绝缘快速发展型局部放电特征[J]. 中国电机工程学报,2021,41(21):7529-7540.
- Xu Zhiren, Yang Lijun, Wei Yiheng, et al. Characteristics of rapidly developing partial discharge in oil-pressboard insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7529-7540.
- [9] 王新兵,刘冬迪,燕 蕾,等.天然酯油纸绝缘混油特性试验分析研究[J]. 变压器,2025,62(8):45-50.
- Wang Xinbing, Liu Dongdi, Yan Lei, et al. Experimental analysis of oil mixing characteristics of natural ester oil paper insulation[J]. Transformer, 2025, 62(8): 45-50.
- [10] 顾刘欢. 20 Hz电压下局部放电特性及诊断方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2025.
- Gu Liuhuan. Study on partial discharge characteristics and diagnosis method under 20 Hz voltage[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2025.
- [11] Zhu Ran, He Dongxin, Li Shuqi, et al. Effect of voltage waveform steepness on partial discharge and charge distribution of oil-pressboard insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(3): 1224-1232.
- [12] Li Xiaonan, Wu Guangning, Yang Yan, et al. Partial discharge characteristics of oil-pressboard insulation for on-board traction transformers under superposed inter-harmonic AC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 240-248.
- [13] 赵 琳,顾刘欢,金涌涛,等.交流电压频率对GIS绝缘子内部气隙局部放电特性的影响[J]. 电机与控制学报,2025,29(2):126-135.
- Zhao Lin, Gu Liuhuan, Jin Yongtao, et al. Influence of AC voltage frequency on partial discharge characteristics of internal air gap in GIS insulator[J]. Electric Machines and Control, 2025, 29(2): 126-135.
- [14] 刘 娟,罗日成,曾 赟,等.变压器油中气泡运动特性及聚并影响因素分析[J]. 变压器,2024,61(12):31-40.
- Liu Juan, Luo Richen, Zeng Yun, et al. Analysis of bubble motion characteristics and coalescence influencing factors in transformer oil[J]. Transformer, 2024, 61(12): 31-40.
- [15] Wu Hongbin, Liu Hongshun, Wang Yifan, et al. Investigating the dynamic behavior of bubbles in oil during partial discharge[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2026, 12(1): 547-556.
- [16] 王 新,金 洪,杨 敏,等.直流电压下热老化对表面划伤交联聚乙烯电缆局部放电特性的影响[J]. 绝缘材料,2024,57(7): 76-83.
- Wang Xin, Jin Yang, Yang Min, et al. Effect of thermal aging on partial discharge characteristics of surface-scratched XLPE cable under DC voltage[J]. Insulating Materials, 2024, 57(7): 76-83.
- [17] 王流火,谭令其,王增彬,等.局部放电信号PRPD谱图输出系统[J]. 高电压技术,2021,47(6):2132-2140.
- Wang Liuhuo, Tan Lingqi, Wang Zengbin, et al. PRPD pattern output system for partial discharge signals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(6): 2132-2140.
- [18] 庄奎萃. 基于深度学习的变压器局部放电PRPD谱图模式识别[D]. 北京:华北电力大学,2023.
- Zhuang Yincui. Pattern recognition of transformer partial discharge PRPD spectra based on deep learning[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [19] Li Simeng, Si Wen, Li Qingquan. Partition and recognition of partial discharge development stages in oil-pressboard insulation with needle-plate electrodes under combined AC-DC voltage stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1781-1793.
- [20] 高久国,王新伟,熊军辉,等.油纸系统典型绝缘缺陷火花放电发展过程的多参量特征分析[J]. 高压电器,2023,59(8):53-60.
- Gao Jiuguo, Wang Xinwei, Xiong Junhui, et al. Multi-parameter characteristic analysis of spark discharge development process of typical insulation defects in oil-pressboard system[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(8): 53-60.
- [21] 李 星,丁登伟,吴传奇,等.550 kV GIL三支柱绝缘子表面金属异物局部放电发展规律和闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报,2026,46(4):1662-1671.
- Li Xing, Ding Dengwei, Wu Chuanqi, et al. Study on partial discharge development law and flashover characteristics of metal foreign matters on the surface of 550 kV GIL tri-post insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2026, 46(4): 1662-1671.

- [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)。