

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.007

冲击电压下变压器油中放电电弧放电通道形态 及激波特性的研究

贾灵杰¹, 王琦¹, 李柳霞², 李金璐², 刘毅²

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 武汉 430074; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 油中电弧放电是变压器燃爆事故的主要诱因,随着电力系统发展和电压等级提升,暂态脉冲电压频率和幅值增加,使得油中电弧放电行为变得更加复杂。研究旨在探讨脉冲电压下变压器油中电弧放电的电弧及激波形态变化。为此,设计并搭建了高压脉冲放电油击穿实验平台,通过同步采集脉冲电弧放电过程中的电压—电流信号,并结合高速摄影技术,捕捉了油中电弧放电动态演变及激波的传播过程。研究分析了放电过程中电弧与激波的形态变化规律及其相互作用机制,并探讨了不同电极间隙对电弧及激波直径的影响。实验结果表明:油中放电时电弧膨胀速度较水中放电情况下更快,在更短时间内电弧膨胀至最大,激波分离时,电弧呈现缩小趋势,随后激波气泡破裂后电弧呈现膨胀趋势;放电间隙距离对激波形态有显著影响,激波形态可等效为两个椭球体的叠加;电弧放电初期,电弧膨胀体积与施加电压有关,后期则与间隙长度成正比。研究为脉冲电压下油中电弧放电的电弧及激波形态变化提供了新的实验依据,对精细化变压器形变破裂建模具有重要参考价值。

关键词: 脉冲电压; 变压器油; 电弧放电; 激波; 电极间隙

Research on the Discharge Channel Morphology and Shock Wave Characteristics of Arcs in Transformer Oil Under Impulse Voltage

JIA Lingjie¹, WANG Qi¹, LI Liuxia², LI Jinlu², LIU Yi²

(1. China Electrical Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Arc discharge in oil is the main cause of transformer deflagration accidents. With the development of power systems and the increase in voltage levels, the frequency and amplitude of transient pulse voltages have increased, making the behavior of arc discharge in oil more complex. This study aims to explore the morphological changes of arc and shock waves generated by arc discharge in transformer oil under impulse voltage. To this end, a high-voltage pulse discharge oil breakdown experimental platform is designed and set up. By synchronously collecting the voltage-current signals during the pulse arc discharge process and combining with high-speed photography technology, the dynamic evolution of the arc and the propagation process of the shock wave in the oil are captured. The morphological variation and interaction mechanisms of the arc and shock wave during the discharge process are studied and analyzed and the influence of different electrode gaps on the diameters of the arc and shock wave is explored. The experimental results show that the arc expansion speed in oil discharge is faster than that in water discharge, and the arc expands to the maximum in a shorter time. In case of shock wave separation, the arc shows a shrinking trend, and then expands after the shock wave bubble bursts. The discharge gap distance has a significant impact on the shock wave morphology, which can be equivalent to the superposition of two ellipsoids. In the initial stage of arc discharge, the arc expansion volume is related to the applied voltage, and in the later stage, it is propor-

收稿日期:2025-10-10; 修回日期:2025-12-28

基金项目:湖北省自然科学基金一般面上项目(2024AFB852)。

Project Supported by Hubei Provincial Natural Science Foundation General Program(2024AFB852).

tional to the gap length. This study provides new experimental evidence for the changes in arc and shock wave morphology during oil arc discharge under pulse voltage, and has important reference value for the refined modeling of transformer deformation and rupture.

Key words: impulse voltage; transformer oil; arc discharge; shock wave; electrode gap

0 引言

变压器作为电力系统的核心设备,在电压变换、电能传输和分配中起着至关重要的作用,其运行可靠性直接关系到整个电力系统的稳定性和安全性。然而,变压器内部的绝缘故障,尤其是油中电弧放电问题,严重威胁着变压器的安全运行,甚至可能引发灾难性的事故^[1-4],目前工频电弧实验^[5-7]是模拟真型变压器电弧故障的有效方法。然而随着电力系统的不断发展和电压等级的逐步提高,变压器油纸绝缘所承受的电应力环境日益复杂。暂态脉冲电压的出现频率增加,其幅值和陡度也不断增大,这使得油纸绝缘内部的放电行为变得更加复杂和难以预测。在这种背景下,传统的工频电弧放电研究已无法满足实际需求,亟需开展脉冲电压下油中电弧放电的研究。

在工频电压下变压器油中的电弧放电研究中,已有多项关键发现。研究表明^[9],电弧的电压、电流及气泡特性等理化特征对于研究油中电弧放电机理至关重要。针对针板结构油纸放电与柱板结构沿面放电两种放电模型^[6],西安交通大学李博宇通过研究压强信号的变化特征以及其同步电压电流数据,对两种放电过程进行阶段划分,证明了两种电弧激励下压力波动特征一致,均由3种频率压力分量叠加。进一步对电弧放电下的压力上升过程及传递特性进行分析,通过研究不同燃弧能量下升高座内部压强时域变化曲线^[7],分析电弧能量、电流与压力的关系,证明了电弧能量与电弧电流是影响升压的重要因素。针对工频电压下电弧放电时的气泡特性,西安交通大学闫晨光^[8]通过观察绝缘油作用下电弧周围气泡的温度及生长过程,将电弧诱导气泡的动态生长分为两个不同的阶段,第一阶段产生高温高压气腔,第二阶段可看作等温过程。在液体介质中,气泡的动态生长与放电通道的膨胀会使得其周围液体被推动,从而产生快速传播的压力波^[9],通过观察变压器油中电弧放电初期电极间发生重击穿现象,与气泡在油中脉动过程共同作用,形成多次压力波向外传播,且发现一次压力波波强度最高,而后续的压力波强度几乎接近。但是工频交流电弧持续时间长,期间存在电弧重燃现象,且

会导致连续产气,多种物理效应混叠,给油中电弧压力波的特征辨识造成巨大困难,未能明显观测到压力波波阵面以及电弧的形态变化。

而脉冲放电可产生单次在油中产生电弧,极大削弱了工频电压放电产生的电弧重燃、连续产气等现象,可以有效揭示压力波的产生过程及影响因素。目前关于脉冲电压下的变压器油中电弧放电研究相对较少,但液相脉冲放电压力波的研究相对成熟,目前常应用于水下爆炸^[10-12]、岩石爆破^[13-15]和废水处理^[16-18]等领域。对水中放电电弧发展的随机性以及激波强度与电弧膨胀速度的对应关系进行分析^[19],发现电弧膨胀体积的大小与注入电弧通道的能量直接相关,电弧膨胀速度主要取决于注入电弧通道的功率。进一步对水中脉冲放电过程中电弧、气泡形态与运动变化规律进行了综合分析^[20],将放电过程中电弧的发展过程分为4个阶段,其中电弧在高速膨胀阶段后便进入周期性的收缩和膨胀过程,且弧根和弧柱的变化规律不同步,受电流影响较大。

上述研究对于脉冲放电产生单次油中电弧过程的分析具有启发参考作用。对变压器油中脉冲放电进行研究^[21-22],综合分析气泡形态与运动变化规律,将油中脉冲电弧放电分为经历预击穿、主放电和能量衰减振荡3个发展阶段,脉冲油中放电可多次产生压力波,其幅值呈指数型衰减规律,且衰减速度显著大于水中脉冲放电产生的压力波幅值的衰减速度。但现有关于油中脉冲放电研究仅深入探究不同电极距离下变压器油中压力波的传播衰减规律,并未观测到激波及电弧的畸变状态,并综合分析二者之间的相互作用关系。不规则形态的激波会对对变压器不同部位造成多维度的机械损伤、绝缘破坏及功能性隐患,因此亟需开展不同放电间隙下产生脉冲电弧放电通道形态及激波特性的研究,揭示二者发展规律与联系。

文中构建了高压脉冲放电油击穿系统综合试验平台,利用Marx发生器产生其具有单次、高幅值、陡升前沿脉冲特征的冲击电压,实质上也可视为特定形式的脉冲电压,使得电极两端施加单次电压,产生脉冲电弧放电,实验采集脉冲电弧放电过程中的电压—电流信号;利用高速摄影模块,观测油中

电弧放电时电弧与激波形态变化与运动过程。结合电压—电流信号及动态形态变化,分析电弧与激波发展规律及联系,并分析不同电极间隙下电弧及激波的直径的影响规律。

1 实验平台及方法

1.1 实验腔体及放电模型

本实验的主要目的是研究冲击电压下变压器油中电弧放电特性。其中放电腔体为尺寸 $37\text{ cm}\times 37\text{ cm}\times 47\text{ cm}$ 的不锈钢箱体,腔体四周设有 $27\text{ cm}\times 20\text{ cm}$ 的光学观测窗。其结构图见图1。

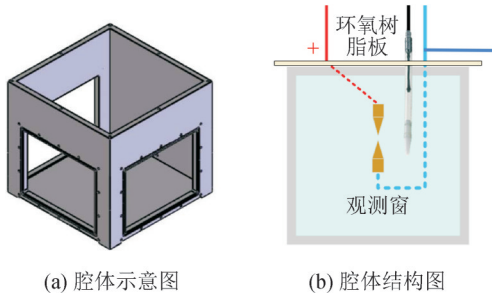


图1 试验腔体结构图

Fig. 1 Structure diagram of the test cavity

试验腔体主要包括如下结构:①电极接线柱,用于安装电极并调整电极间距;②试验油箱,腔体整体为长方体不锈钢结构,侧面三面设有玻璃透视镜观察窗,便于观测放电现象,并通过高速相机记录放电时的电弧通道及气体运动形态;③测量接线柱,在腔体顶部设置,用于安装高压探针以及连接电流互感器,对放电时的电压和电流进行记录。

针—针电极结构能够在电极间形成极不均匀电场。在这种电场中,针尖附近的电场强度极高,而远离针尖处电场强度迅速减弱。采用针—针电极结构可以很好地模拟这种局部强电场的情况,有助于研究油中放电的起始、发展和击穿等过程。文中放电电极采用针—针结构,材料为钨铜合金(W70%-Cu30%)。针电极尖端直径为 0.23 mm ,锥角 27° ,电极间距 L 可在 $0\sim 30\text{ mm}$ 范围内精确调节,每次放电后均更换电极。实验腔体内注入25号矿物绝缘油,确保绝缘油液面始终高于电极顶端 5 cm 。

1.2 实验平台

高压脉冲放电油击穿系统综合试验平台见图2。主要由Marx发生器单元、脉冲放电单元和测量单元组成。

1) Marx发生器单元。220 V直流电源与高压脉冲变压器共同构成了高压脉冲能量的初级供能模块,电源部分负责提供基础能量,变压器实现电压升

高,Marx发生器则实现脉冲能量的瞬时释放。Marx输出电压范围为 $0\sim 500\text{ kV}$,每级电容量为 $0.2\text{ }\mu\text{F}$ 。

2) 脉冲放电单元。

3) 测量单元。测量单元包括电压—电流测量模块、压力波测量模块以及高速摄影模块。电压—电流测量模块中,采用电流互感器(Pearson 1330)测量放电通道的电流,采用高压探头(NorthStarPVM-5)测量电压,并将电压—电流波形储存至高精度示波器(Tektronix MDO3054)中。在压力波测量模块中,将压力传感器(PCB138)放置于放电腔体中,并与适配的信号调理仪相连,将压力波信号存储至高精度示波器(Tektronix MS054)。高速摄影模块,采用配有 $18\sim 200\text{ mm}$ 焦距镜头的高速相机(Phantom V2512)对放电时的电弧通道以及所产生的气体运动形态进行记录,其分辨率为 128×128 像素,采样帧率 $380\ 000\text{ fps}$,帧间隔 $2.63\text{ }\mu\text{s}$,可实现 μm 到 mm 量级的空间分辨率和 μs 到 ms 量级的时间分辨率。高速相机通过光电隔离单元实现与示波器互联,并由示波器同步触发。由于电弧本身发光强烈,采用中性灰度镜进行减光,并设计有单独的不间断电源对相机单独供电,避免电压电流等因素对相机的干扰。

1.3 实验方法

试验中针—针电极间隙分别调整为 5 mm 、 10 mm 、 15 mm ,利用高速相机拍摄电弧放电初期电弧通道的形成过程以及激波的传播过程,通过电压电流测量系统捕捉放电过程中的电压和电流变化特征,压力传感器测量脉冲放电产生的激波峰值。试验时,使用冲击电压发生器在电极两端施加电压,冲击电压发生器充电电压起始于 50 kV ,升压间隔为 10 kV ,直至电极间隙击穿。考虑实验的安全性和规范性,电压充电时长为 20 s ,每次放电试验间隔不小于 3 min 。由于油中电弧放电存在一定的分散性,每个间隙下会进行重复试验,并选取有效试验结果5次。

2 实验结果与分析

2.1 典型试验波形及图像

液相脉冲放电下,一次激波作为放电初始阶段的重要物理表征,因其形成机制与放电能量沉积过程直接关联,能更准确表征放电初始阶段物理特性。相较于主要由介质界面反射、波阵面干涉等复杂非线性效应形成的二次激波,一次激波在时空演化过程中具有更好的形态稳定性与物理可重复性,可更直观地分析速度、压力、粒子运动等动态特征,因此选择一次激波作为放电特征参量分析对象。

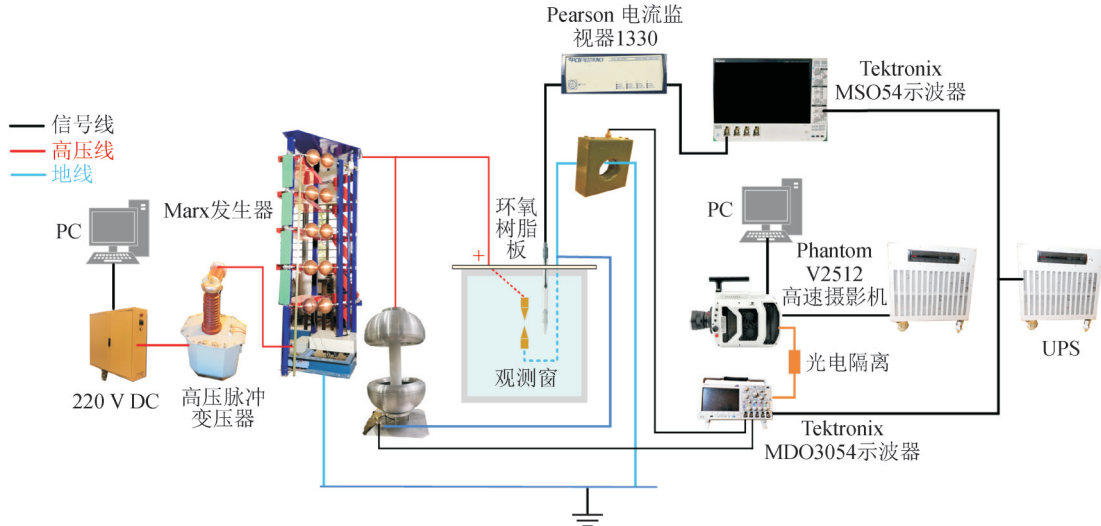


图2 高压脉冲放电油击穿系统综合试验平台

Fig. 2 Comprehensive test platform for high-voltage pulse discharge oil breakdown system

实验采用冲击电压发生器输出 80 kV 标准雷电波见图 3, 介质间隙击穿过程电压电流波形见图 3, 将间隙击穿瞬间定为 0 时刻即 t_1 时刻, 将间隙击穿前存在预击穿阶段 ($t_0 \sim t_1$), 击穿后存在电弧放电阶段 ($t_1 \sim t_3$) 和电弧消散阶段 ($t_3 \sim t_4$)。电弧、一次激波运动及形态变化的典型图像见图 4。

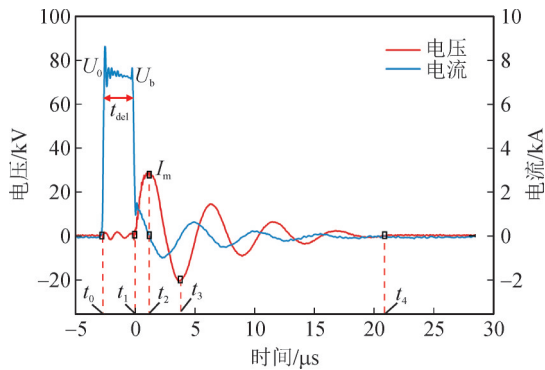


图3 典型电压、电流波形

Fig. 3 Typical voltage and current waveforms

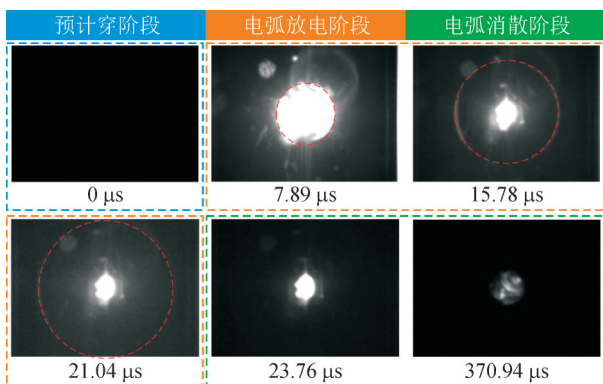


图4 电弧、一次激波运动及形态变化典型图像

Fig. 4 Typical images of arc, primary shock wave motion and morphological changes

1) 预击穿阶段 ($t_0 \sim t_1$ 即 0 时刻之前)。间隙承受

的瞬态过电压 $U_0=84.3$ kV, 此时 Marx 发生器等效电路与间隙分布参数构成 RLC 谐振回路, 导致电压呈现阻尼振荡特征并最终稳定于静态击穿阈值 $U_b=78.2$ kV。此阶段仅存在微安级泄漏电流, 表明间隙尚未形成有效导电通道。对应图 4 中绿色阶段, 此时电极未击穿。

2) 电弧放电阶段 ($t_1 \sim t_3$ 即 $0 \sim 23.67 \mu s$)。其中 $t_1 \sim t_2$ 时刻, 间隙电压由放电电压 U_b 快速下降, 间隙电流迅速上升且达到峰值 $I_m=30.20$ kA, 同时由于回路电阻较小, t_2 时刻后随后电压和电流进入震荡衰减状态。对应图 4 中橙色阶段, 可以看到在该阶段, 间隙击穿, 电弧通道迅速膨胀并压缩油介质, 产生一次激波, 并对外传播。

3) 电弧消散阶段 ($t_3 \sim t_4$ 即 $23.67 \sim 370.94 \mu s$)。此时电压电流震荡衰减直至波形归零, 对应图 4 中绿色阶段, 此时由于一次激波的传播, 图像难以继续观测激波, 电弧形态由柱状变为椭圆状随后变为圆状, 电弧边缘区域形成具有灰度梯度的过渡区域并逐渐消散。

2.2 电弧、一次激波形态变化与运动过程

电弧间隙为 5 mm 下高速摄影机拍摄的电弧、一次激波运动过程及形态变化见图 5。电弧及压力波变化主要可分为 3 个阶段, 首先是电弧快速膨胀阶段, 压缩油介质产生压力波, 此时压力波壁与电弧壁重合; 随后电弧膨胀速度降低, 压力波膨胀速度增加, 二者存在速度差值, 导致电弧壁与气泡壁中间出现空腔, 此时一次激波传播, 而电弧膨胀至最大后开始收缩; 最后, 电弧形态开始由不规则柱状演变为规则椭圆状, 演变过程中, 电弧体积逐渐缓慢增大至最大椭圆状, 最后电弧开始消散。

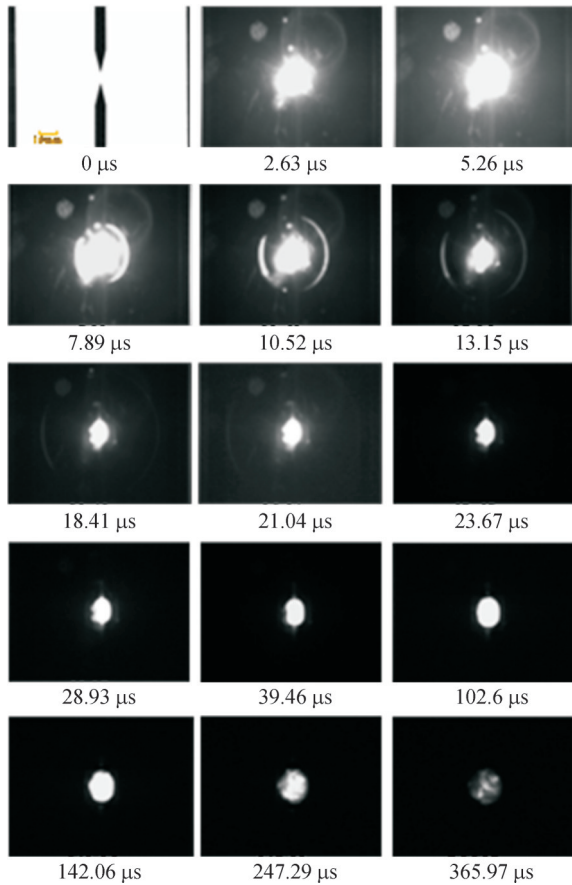


图5 电弧、一次激波动态过程及形态变化

Fig. 5 Dynamic processes and morphological changes of electric arcs and primary shock waves

为进一步分析电弧、一次激波的运动与形态变化规律,统计了图5中电弧最大直径、最小直径以及一次激波波阵面直径随时间变化的规律,见图6。根据直径变化,文中将放电过程分为起始放电阶段、快速膨胀阶段、一次激波分离阶段以及电弧消散阶段4个过程,并分别进行分析说明。

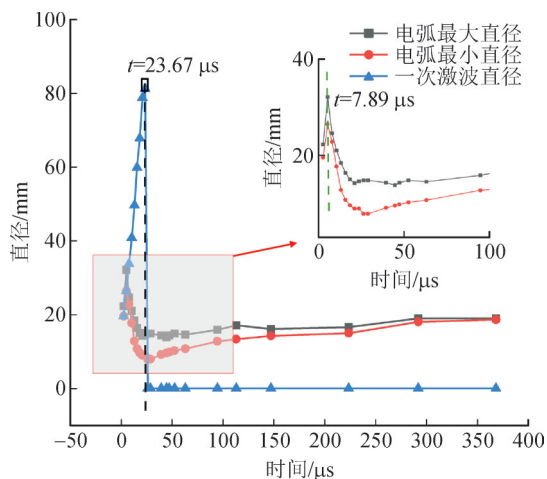
图6 电弧最大直径、最小直径及一次激波直径
随时间的变化

Fig. 6 Variations of the maximum arc diameter, minimum arc diameter and primary shock wave diameter with time

1)起始放电阶段(0时刻及之前)。将击穿时刻定为0时刻,在0时刻之前,冲击发生器电压上升至80 kV达到击穿电压,0时刻间隙击穿,电极间隙击穿后,在亚微秒时间尺度内形成具有轴对称特征的球形电弧等离子体。等离子体核心区因高能电子碰撞激发产生强烈连续辐射,其径向温度梯度导致发光强度呈高斯分布特征。油液分子在可达数千摄氏度的瞬时高温作用下发生剧烈热膨胀,产生的高温高压气体压缩周围液体介质,形成一次激波。

2)快速膨胀阶段(0~7.86 μs)。此阶段对应图3中的 $t_1 \sim t_2$ 阶段,随着电弧电流的上升,电弧通道吸收的能量逐渐增加,电弧通道呈现快速膨胀特征并迅速达到峰值,随着等离子体通道能量注入减弱,其膨胀速率呈现显著衰减趋势。由图6可以看到,电弧半径增加,此时一次激波传播速度与电弧膨胀速度一致,激波波面与电弧边界二者重合,半径保持一致。

3)一次激波分离阶段(7.86~23.67 μs)。此阶段对应图3中 $t_2 \sim t_4$ 阶段,电弧电流骤降,脉冲能量注入终止后,等离子体通道内储存的焦耳热能量通过热辐射与电子—分子非弹性碰撞过程进行快速耗散,电弧通道温度和压力呈指数衰减特性,电弧开始缩小。同时激波气泡内部压强远高于周围油介质,并且由于惯性,一次激波继续传播,与电弧膨胀速度存在速度差,因此二者之间产生空腔,此阶段中,可以清晰的观测到一次激波的变化。结合图6,此时,一次激波半径逐渐增大,而电弧半径逐渐减小。

4)电弧消散阶段(23.67 μs~结束)。此阶段开始时,此时由于一次激波的传播,图像难以继续观测激波,电弧半径最小,运动液体介质的动能此时完全转化为激波气泡的位能。在激波气泡坍塌时,释放部分能量,对电弧产生影响,此时,电弧吸收能量,结合图6,发现电弧直径略微增大。同时,根据图5所示的电弧动态变化图可以发现,等离子体通道内储存的焦耳热能量通过热辐射与电子—分子非弹性碰撞过程进行快速耗散,残余电离粒子通过双极扩散机制向周围介质迁移,并伴随着复合辐射光谱强度的渐进式衰减,等离子体和气体冷却恢复为油相状态,电弧通道亮度减弱直至完全消失。

同时,观测整个过程中一次激波及电弧的形态变化,发现一次激波形态基本维持在椭圆状,而电弧在快速膨胀期呈现带有树枝的椭圆状,在一次激波分离阶段呈现不规则的柱状,在电弧消散阶段呈现较规则的椭圆状。

油中电弧在7.89 μs膨胀至最大,在电弧膨胀阶

段, 电弧形态呈现椭圆形, 在激波气泡破裂时, 电弧直径达到最小, 随后消散。而水中脉冲放电工况下的电弧在 $44 \mu\text{s}$ 膨胀至最大^[9], 且电弧膨胀阶段呈现柱形, 在激波气泡破裂后, 电弧未表现出膨胀趋势, 而是直接消散。这可能是由于放电介质不同, 使得油介质中的放电过程更为复杂, 且对局部电场和激波的变化更为敏感, 导致在激波气泡破裂时, 电弧受到激波释放能量的影响, 呈现略微膨胀的趋势, 而水介质中的放电过程则更为直接和快速。

3 不同间隙下电弧及一次激波形态变化

3.1 不同间隙下电弧及一次激波形态

实验中调整放电间隙分别为 10 mm 和 15 mm, 研究油中放电间隙长度对于电弧及一次激波形态变化的影响, 试验结果分别见图 7。

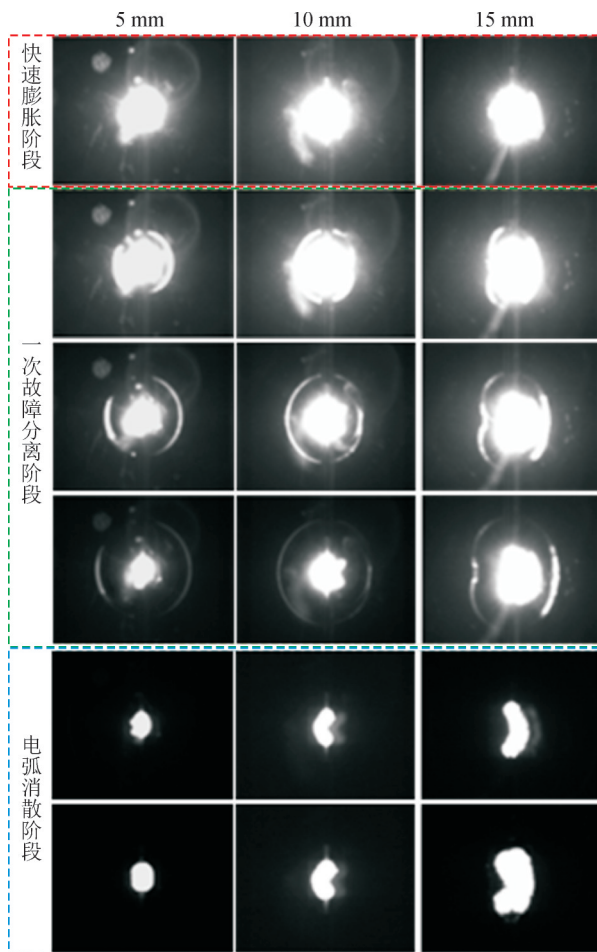


图 7 不同放电间隙下电弧及一次激波形态变化

Fig. 7 Morphological changes of arc and primary shock wave under different discharge gaps

由于在放电初始阶段电弧及一次激波暂未形成, 因此本节仅讨论电弧及一次激波存在形态变化的 3 个阶段, 即快速膨胀阶段、一次激波分离阶段及电弧消散阶段。结果表明, 在快速膨胀阶段, 此时

由于电弧电流增加, 电弧快速膨胀, 受放电间隙影响较小, 不同放电间隙下的电弧形态差别较小, 均呈现较强光强的带有树枝的椭圆形态; 而在一次激波分离阶段, 一次激波形态有较大差异, 间隙越小, 激波形状越规整, 在 5 mm 间隙下, 激波呈现椭圆状, 在 10 mm 间隙下, 激波呈现不规则柱状, 在 15 mm 下, 激波的不规则状态加剧, 这是由于间隙长度影响带电粒子在电场中的运动距离和时间。较长间隙中, 电子从阴极到阳极运动距离长, 有更多机会与气体分子碰撞, 产生更多的电离和激发过程, 使电弧通道更宽、更弥散; 在电弧消散阶段, 带电粒子的扩散也会因间隙长度不同而变化, 较短间隙中粒子扩散范围小, 电弧相对集中; 长间隙中粒子有更多空间扩散, 电弧会更分散, 可能出现分支或不均匀分布的情况, 因此观察到电弧形态有较大差异, 间隙越小, 电弧形状越规整, 同时电弧长度越短, 整体体积越小。而在变压器油箱破裂的压力震源建模中, 通常将压力源设置为球体^[23], 通过分析不同间隙下压力激波的形态变化, 表明实际上压力激波并不为一个标准的球体。当放电间隙较小时, 电弧形态较为规整, 此时可认为是一个以电弧中点为球心的球体, 但是电弧电流在通道内流动时, 会产生自生磁场, 形成向内的洛伦兹力, 导致电弧柱体发生径向收缩。在长间隙中, 电弧长度增加, 电流路径的微小不对称性会被放大, 使得电弧因受力不均而向一侧弯曲。一次激波形态也随之变化, 电弧突出的一侧一次激波呈现标准椭球体, 电弧内凹的一侧激波则由两个椭球体组合而成, 中间呈现凹陷状态。由图 7 可知, 当放电间隙较大时, 电弧形态畸变, 呈现侧放的 v 字形。因此根据分析及激波现象观测, 当放电间隙较大时, 可以将其一半等效为两个椭球体的叠加, 另一半等效为一个标准椭球体, 见图 8。

一次激波形状会对变压器油箱的形变产生影响。在未来中可进一步研究间隙长度与组成一次激波椭球体球心及半轴长度之间的关系, 使得变压器油箱破裂的压力源建模进一步精细化, 从而更好地分析故障油压骤升与油箱形变和破裂的机理和过程。

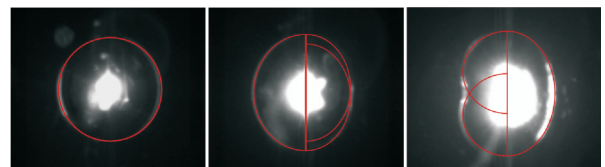


图 8 一次激波形状等效图

Fig. 8 Equivalent diagram of the shape of a primary shock wave

3.2 不同间隙下电弧形态变化规律

为具体分析电弧及一次激波的形态变化规律,统计了图7中不同间隙下电弧最大直径随时间变化的规律,见图9。

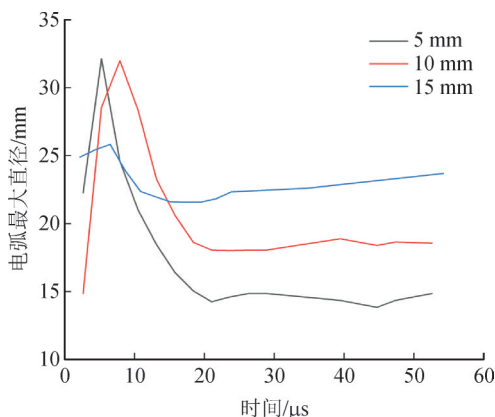


图9 不同间隙电弧最大直径随时间变化

Fig. 9 Variation of the maximum arc diameter with time under different gaps

由图6可知,不同间隙下,在快速膨胀时期,其激波与电弧半径重合,在激波分离阶段,激波半径保持增加,而电弧半径开始减小,在电弧消散阶段,激波观测不到,此时电弧略微膨胀,半径呈现微弱的增长趋势。同时,由图9可知,在间隙击穿初期,击穿能量来源于施加的脉冲电压,根据文[17]可知,电弧膨胀体积的大小与注入电弧通道的能量直接相关,而间隙长度对激波及电弧直径影响较小。由图9也可看出,此阶段3种间隙下电弧直径相差较小,与间隙长度无明显关系;随着击穿瞬间电弧能量逐渐转移至激波的位能,可以看到间隙对电弧直径的影响逐渐变大,在一次激波分离阶段,由图7可知,15 mm 间隙下激波直径最大,且率先破裂,在电弧消散阶段,15 mm 间隙下电弧的最大直径最大,此时电弧直径与间隙长度呈正比,间隙越大,电弧直径越大。

4 结论

文中对脉冲电压下变压器油中电弧、一次激波形态变化与运动过程进行观测与分析,比较了不同放电间隙长度对于电弧及一次激波形态影响。得到如下结论:

1)脉冲电压下电弧放电初期,电极间击穿,释放大量能量,与气泡在油中脉动过程共同作用压缩油介质,形成激波向外传播。脉冲电压下的电弧放电可分为4个阶段:初始放电阶段、快速膨胀阶段、一次激波分离阶段以及电弧消散阶段。初始放电阶段电弧及一次激波暂未形成。快速膨胀阶段电

弧与一次激波形状重叠,直径增大;一次激波分离阶段,一次激波直径持续增大,而电弧直径开始减小;电弧消散阶段,激波气泡破裂,直径变为0,此时电弧直径达到最小,随后直径开始略微增大,直至扩散消散。相较于水中放电电弧在44 μs膨胀至最大,油中放电时电弧快速膨胀,在更短时间内膨胀至最大,且在激波破裂后,电弧呈现膨胀趋势。

2)传统变压器油箱破裂建模中,将激波等效为球体,但通过观测不同间隙下激波形态变化,表明当放电间隙较小时,电弧形态较为规整,此时可认为是一个以电弧中点为球心的球体,而当放电间隙较长情况下,实际上激波并不为一个标准的球体,而是可以将其一半等效为两个椭球体的叠加,另一半等效为一个标准椭球体,为对精细化变压器形变破裂建模具有重要参考价值。

3)由于快速膨胀阶段电极击穿能量来源于施加脉冲电压,电弧膨胀体积的大小与注入电弧通道的能量直接相关,而间隙长度对电弧直径影响较小。随着电极击穿能量的转移,间隙长度对于电弧直径的影响开始变得显著,在电弧消散阶段,间隙长度与电弧直径成正比。

参考文献:

- [1] ABI-SAMRA N, ARTEAGA J, DAROVNY B, et al. Power transformer tank rupture and mitigation-a summary of current state of practice and knowledge by the task force of IEEE power transformer subcommittee[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4):1959-1967.
- [2] 罗迅, 桂林, 贾云飞, 等. 油中工频电弧电磁脉冲特性分析[J]. 变压器, 2025, 62(12):6-11.
LUO Xun, GUI Lin, JIA Yunfei, et al. Analysis of electromagnetic pulse characteristics of power frequency arc in oil[J]. Transformer, 2025, 62(12):6-11.
- [3] 邱晟璇, 王松, 刘子瑞, 等. 基于FRA法和CNN的变压器绕组故障诊断研究[J]. 大电机技术, 2025(3):108-116.
QIU Shengxuan, WANG Song, LIU Zirui, et al. Research on fault diagnosis of transformer windings based on FRA method and CNN[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2025(3):108-116.
- [4] 张德文, 张健, 曲利民, 等. 基于PSO-ELM的变压器油纸绝缘状态无损评估方法[J]. 电力工程技术, 2024, 43(3):201-208.
ZHANG Dewen, ZHANG Jian, QU Limin, et al. The assessment method of transformer oil-paper insulation state based on PSO-ELM[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(3):201-208.
- [5] 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.
- [6] 李博宇, 郝治国, 李斯盟, 等. 油浸式电力设备内部电弧引发的压力特征[J]. 高电压技术, 2023, 49(1): 198-206.
LI Boyu, HAO Zhiguo, LI Simeng, et al. Pressure characteristics of oil-immersed power equipment under internal arc[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(1): 198-206.
- [7] 刘泽洪, 卢理成, 周远翔, 等. 变压器升高座区域电弧故障与压力特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13):4688-4697.
LIU Zehong, LU Licheng, ZHOU Yuanxiang, et al. Research on pressure characteristics of AC turret on arc fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(13):4688-4697.
- [8] YAN C, ZHOU X, XU Y, et al. Experimental study on the gas bubble temperature around an arc under insulation oil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(2): 1245-1248.
- [9] 王卓非, 章程, 张耀, 等. 工频交流电压下变压器油中电弧放电初期压力波特性[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(9):3320-3332.
WANG Zhuofei, ZHANG Cheng, ZHANG Yao, et al. Characteristics of shock waves during the initial arc discharge in transformer oil under power frequency AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(9): 3320-3332.
- [10] 李元, 孙滢, 刘毅, 等. 液电效应及电火花震源的研究现状与展望[J]. 高电压技术, 2021, 47(3):753-765.
LI Yuan, SUN Ying, LIU Yi, et al. Electrohydraulic effect and sparker source: Current situation and prospects[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3):753-765.
- [11] 周海滨, 张永民, 刘巧珏, 等. 铜丝电爆炸等离子体对含能材料的驱动特性[J]. 高电压技术, 2017, 43(12):4026-4031.
ZHOU Haibin, ZHANG Yongmin, LIU Qiaojue, et al. Ignition performance of Cu-wire electrical explosion plasma on energetic materials[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(12):4026-4031.
- [12] HAN R Y, ZHOU H B, WU J W, et al. Relationship between energy deposition and shock wave phenomenon in an underwater electrical wire explosion[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(9): 093506.
- [13] SPERNER B, JONCKHEERE R, PFÄNDER J A. Testing the influence of high-voltage mineral liberation on grain size, shape and yield, and on fission track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating[J]. Chemical Geology, 2014(371):83-95.
- [14] 付荣耀, 孙鹤鸿, 樊爱龙, 等. 高压电脉冲在页岩气开采中的压裂实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(7):079001.
FU Rongyao, SUN Yaohong, FAN Ailong, et al. Research of rock fracturing based on high voltage pulse in shale gas drilling[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28(7):079001.
- [15] 徐尤来, 刘毅, 黄仕杰, 等. 高压电脉冲放电破岩系统建模分析[J]. 真空科学与技术学报, 2023, 43(4):298-304.
XU Youlai, LIU Yi, HUANG Shijie, et al. Simulation of high voltage pulse rock breaking system[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2023, 43(4):298-304.
- [16] 屈广周, 赵良琪, 梁东丽, 等. 脉冲电晕放电等离子体-活性炭协同去除废水中重金属离子和有机物[J]. 高电压技术, 2014, 40(1):201-205.
QU Guangzhou, ZHAO Liangqi, LIANG Dongli, et al. Simultaneous removal of heavy metal ions and organic compounds in wastewater by pulsed corona discharge plasma combined with activated carbon[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(1):201-205.
- [17] XIANG H J, LEI B, YUAN X C, et al. Design and simulation of new type reactor in the wastewater treatment system based on discharge plasma[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1):952-957.
- [18] LI Y, WEN J Y, JIANG Q Y, et al. Influences of discharge modes and gas bubbling conditions on E. coli sterilization by pulsed underwater discharge treatments[J]. AIP Advances, 2020, 10(2): 025207.
- [19] 刘毅, 李志远, 李显东, 等. 水中大电流脉冲放电激波影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9):2741-2750.
LIU Yi, LI Zhiyuan, LI Xiandong, et al. Effect factors of the characteristics of shock waves induced by underwater high current pulsed discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2741-2750.
- [20] 李显东, 刘毅, 李志远, 等. 不均匀电场下水中脉冲放电观测及沉积能量对激波的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 3028-3036.
LI Xiandong, LIU Yi, LI Zhiyuan, et al. Observation of underwater pulse discharge and influence of deposited energy on shock wave in non-uniform electric field[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10):3028-3036.
- [21] 李元, 王亚桢, 施沛澍, 等. 变压器油中脉冲电弧放电电压波的产生过程研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(10):4349-4357.
LI Yuan, WANG Yazhen, SHI Peishu, et al. Study on pressure wave generation in transformer oil by pulsed arc discharge[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10):4349-4357.
- [22] 杨在葆, 刘永, 郭鹏鸿, 等. 基于放电脉冲极性鉴别的局放故障定位技术研究及工程应用[J]. 变压器, 2025, 62(10):51-56.
YANG Zaibao, LIU Yong, GUO Penghong, et al. Research and engineering application on fault localization technology of PD test based on discharge pulse polarity identification[J]. Transformer, 2025, 62(10):51-56.
- [23] 闫晨光, 郝治国, 张保会, 等. 电力变压器油箱形变破裂建模及仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3):180-187.
YAN Chenguang, HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, et al. Modeling and simulation of power transformer tank deformation and rupture[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 180-187.

贾灵杰(2000—),女,硕士研究生,助理工程师,主要从事变压器设备试验及相关科研工作(通信作者)(E-mail: jialingjie@epri.sgcc.com.cn)。