

换流变压器油纸绝缘气泡动态行为与高能电弧演化机理及其防治技术综述

刘洪顺¹, 隋宜臻¹, 赵茹雪¹, 武宏斌¹, 任富强¹, 李清泉¹, 李元²

(1. 山东大学山东省先进输电技术与智能装备重点实验室, 济南 250061; 2. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049)

摘要: 换流变压器作为交直流输电环节中的关键设备,其运行的稳定性和安全性直接关系到整个电力系统的可靠性与稳定水平。近年来,由高能电弧引发的换流变压器爆燃事故呈现高发趋势,已成为影响电网运行安全的主要隐患之一。由于油纸绝缘中的气泡在电场、温度场等作用下,对油纸绝缘的绝缘性能有显著影响,在高能电弧的形成过程中起着至关重要的作用,因此探究换流变压器油纸绝缘气泡动态行为与高能电弧演化机理及其防治技术具有重要意义。为此系统综述了换流变压器油纸绝缘气泡的产生机理与复杂动态行为,重点总结了热致与电致气泡在不同工况下的形成机理,并进一步介绍了气泡簇爆发与局部放电演化之间的耦合机制。通过总结放电阶段划分与预警方法,归纳了当前高能电弧前兆识别方法及其存在的问题,最后从材料改性与油路结构控制两个层面综述了典型的放电抑制技术路径,为换流变压器电弧前兆预警与防治、保障交直流输电系统安全可靠运行提供思路。

关键词: 换流变压器; 油纸绝缘; 气泡; 高能电弧

Review on the Dynamic Bubble Behavior in Oil-paper Insulation of Converter Transformer and the Evolution Mechanism of High-energy Arcs and Mitigation Techniques

LIU Hongshun¹, SUI Yizhen¹, ZHAO Ruxue¹, WU Hongbin¹, REN Fuqiang¹,
LI Qingquan¹, LI Yuan²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Advanced Power Transmission Technology and Intelligent Equipment, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Converter transformer is a key equipment in the AC/DC transmission link and its operation stability and safety directly affects both reliability and stability level of the entire power system. In recent years, the deflagration accidents in converter transformers caused by high-energy arcs have shown an increasing trend, posing a major threat to the operational safety of power grids. Due to the significant impact of bubbles in oil paper insulation on its insulation performance under the influence of electric and temperature fields, and their crucial role in the formation process of high-energy arcs, it is of great importance to investigate the dynamic behavior of bubbles in oil paper insulation of converter transformers, the evolution mechanism of high-energy arcs, and their prevention and their corresponding mitigation techniques. Therefore, the generation mechanism and complex dynamic behavior of oil paper insulation bubbles in converter transformers is systematically reviewed, with a focus on summarizing the formation mechanisms of thermally induced and electrically induced bubbles under different operating conditions, and the coupling mechanism between bubble cluster explosion and partial discharge evolution is introduced further. By sum-

收稿日期:2025-09-18; 修回日期:2025-12-09

基金项目:国家自然科学基金(52577171);电工材料电气绝缘全国重点实验室项目(EIPE25206)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52577171), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(EIPE25206).

marizing the division of discharge stages and warning methods, the current methods for identifying high-energy arc precursors and their existing problems are summarized. Finally, typical discharge mitigation technique paths are summarized from the perspectives of material modification and oil circuit structure control, providing ideas for early warning and prevention of arc precursors in converter transformers and ensuring the safe and reliable operation of AC/DC transmission systems.

Key words: converter transformer; oil-paper insulation; gas bubble; high-energy arc

0 引言

凭借成本低、能量损耗小、输电能力强以及便于实现电网互联等优点,高压直流输电已成为实现长距离、跨区域电力传输的主要技术路径。中国《2025年能源工作指导意见》计划推动“金上一湖北、陇东—山东等特高压直流工程”建成投运,抓紧开展“重点特高压输电、直流背靠背工程以及跨省交流互济工程前期工作”^[1]。为配套“沙戈荒”新能源大基地送出,“十五五”期间特高压直流建设将维持高位,高压直流输电工程将迎来新的历史发展机遇^[2]。作为交直流输电系统中互联的重要组成部分,换流变压器与换流阀的协同安全运行对于保障直流系统的稳定可靠具有决定性作用^[3-4]。而换流变压器长期处于电场、温度场和机械场等多物理场耦合作用下,特别是其阀侧绕组承受交直流复合电压叠加谐波作用,在换相瞬间或输送能量反向时还要遭受极性反转电压,运行温度较交流变压器更高,面临周期性拉伸或剪切应力和短时反转冲击力影响,因此换流变压器运行工况较交流变压器更加严苛,带来的绝缘问题也更加复杂^[5-6]。

近年来换流变压器事故频发,在直流输电系统故障统计中占比约为50%,加之其电压等级高、储油量多、能量大,因此具有较高的爆燃风险^[7]。据国家电网公司统计,2018年以来,国内在运变电站累计发生9次严重故障或爆燃事故,其中特高压换流变占7起,换流变爆燃事故造成重大设备损失,对系统运行、安全生产均带来了重大影响^[8-10]。在文[11]报道中,2018年,某±800 kV换流站发生网侧高压套管根部突发高能电弧故障,造成爆炸并引发火灾,严重损毁阀厅封堵装置,致使换流变压器被迫紧急切除,最终导致整个换流站停运。文[12]统计,在魁北克水电公司25年间发生在735 kV输电系统的175次交流变压器故障记录中,其中高能量电弧故障占比为63.4%,而且高能电弧故障引发油箱爆炸概率为39.6%,相比于交流变压器,在换流变压器更为苛刻的运行工况下,电弧故障引发事故的概率更高。综合分析可见,高能电弧故障是导致换流变压器油箱

发生爆炸的首要原因。

实际运行过程中,一旦换流变压器内部出现短路故障,高能电弧会迅速释放大量能量,促使周围绝缘油快速气化,导致油箱内压力骤然升高。若该压强超出箱体结构极限,便可能引发油箱破裂,内部可燃气体与空气中的氧气接触后极易发生剧烈燃烧。为深入探究此类故障的发生机理,国家电网公司刘泽洪教授主持开展了针对换流变网侧升高座及油箱区域的大电流、高能电弧真型模拟实验,成功再现了网侧升高座短路导致爆燃的完整过程。实验结果表明,压强在10 ms内达到1.2 MPa,最大电弧能量达到了56 MJ,发展速度极快^[13]。高能电弧在毫秒量级的时间内释放出极高能量,能量级别可达兆焦甚至更大,促使绝缘油迅速发生裂解与气化,导致油箱内压力迅速升高,最终可能引发换流变压器的爆炸故障。因此,由于高能电弧故障发生后发展迅速,采用传统泄压和保护装置实现爆炸预警和阻断的难度较高^[14-15]。解决换流变压器高能电弧引发爆炸的实际工程难题,关键在于如何避免高能电弧产生。为了从源头上避免高能电弧产生,亟需研究引发换流变压器内部高能电弧的演化机理与主动防治方法,需要重点关注以下关键过程:

1)油纸绝缘气泡的产生及其动态行为。油纸绝缘气泡的产生主要与水分含量、温度变化和电场强度有关,其动态行为包括运动轨迹、速度变化和形变特性等。这些气泡的产生及其动态行为对油纸绝缘的绝缘性能有显著影响,可能导致电气强度降低和电场分布改变,进而引发初始放电。

2)气泡簇爆发与放电演化交互作用规律。放电的进一步演化引起泄漏电流增大、发热增多,在加速水分汽化的同时造成变压器油裂解为烃类气体,致使气泡簇爆发,进而导致绝缘失效引发高能电弧。

3)高能电弧产生前兆预警和放电抑制。高能电弧发生通常伴随着电气、光学、化学和热力学等前兆特征,其与换流变压器内部结构的多物理场耦合变化及运行工况有着密切联系。通过优化绝缘结构设计及运维调控方式,可以有效抑制放电发展,从而避免高能电弧的发生。

因此,针对换流变压器爆燃事故频发的问题,亟需开展换流变油纸绝缘气泡动态行为引发高能电弧的演化机理与防治方法研究综述。以避免换流变压器高能电弧产生为目标,从油纸绝缘气泡产生及其动态行为特征出发,以揭示引发高能电弧的演化机理为核心,实现绝缘油电弧产生前兆预警与放电抑制,提升换流变压器绝缘运行安全和可靠性。

1 油纸绝缘气泡产生及其动态行为

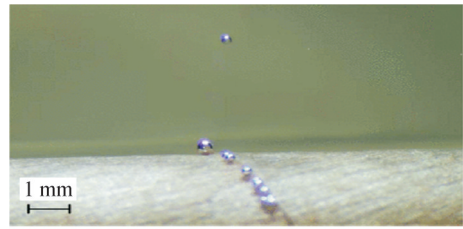
厘清初始放电形成机制对于探究避免高能电弧产生的方式具有重要意义,初始放电形成与气泡的产生、迁移、形变、聚并等动态行为密切相关,气泡存在严重影响到换流变压器内部绝缘结构,进而影响到放电的产生,因此亟待开展油纸绝缘气泡产生及其动态行为研究综述。

1.1 油纸绝缘气泡产生机理

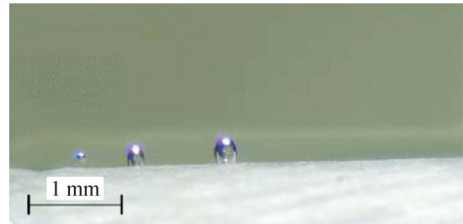
油纸绝缘气泡的形成过程与多种因素有关,除了本体结构在非运行过程中既存在的气体析出外,最主要与热和电相关,即温度和电场条件的改变会影响到气泡的形成过程。在长期承受热应力和电场作用的条件下,纸质绝缘中的纤维素分子会发生降解反应,释放出水分、碳氧类化合物以及小分子烃类等副产物。这些物质在绝缘内部逐步积聚,进而成为引发绝缘性能退化的关键因素之一^[16-17]。

1.1.1 介质电极本身析出气泡

复合绝缘体系中滞留气体以环境空气为主,同时包含制造流程与服役周期内产生的其他成分。在制造阶段,固体绝缘材料在裁剪、模压加工时表面易形成微米级粗糙凸起与内部孔隙,这些微观空间会直接包裹环境空气;材料组装环节,固体件与固体件、固体件与金属电极的贴合面若存在平整度偏差或组装压力不足,会留下缝隙并滞留空气;绝缘树脂固化反应中生成的小分子挥发分若未通过高温脱气工艺充分排出,会以气泡形式残留在树脂内部,成为滞留气体的重要组成;服役周期内,体系受温度波动影响固体材料热胀冷缩会使原有微小缝隙扩大外界空气可能渗入;在浸入液体中的固体表面结构特征影响下,材料表面可能形成排斥液体的特定区域,致使气隙现象在任何润湿度条件下都可能存在。通过实施液相介质脱气处理、真空注油及优化材料空间占比等措施,可有效抑制此类缺陷诱发的绝缘性能下降^[18]。气泡的形态和位置见图1^[19]。



(a) 层边缘出现气泡



(b) 纸张表面出现气泡

图1 气泡的形态和位置

Fig. 1 Bubble morphology and location

1.1.2 热致气泡产生机理

换流变压器常规运行工况下,内部温升可达近 $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[20]。20世纪70年代的研究证实,在过载工况下油纸绝缘系统内会析出游离态气泡,初期研究主要聚焦其形成机制^[21]。同时,在未达到临界放电强度时,因为绝缘油热解阈值显著高于运行温区,气泡主要源于纤维素介质内部孔隙的残留气体逸出及析出水分脱附^[22]。但变压器正常运行工况下,即未达到最大温度限制,仍会有气泡析出,若是在过载情况下则产气现象更为严重^[23]。

相较于传统油浸式变压器而言,具有更高运行温度的换流变压器在局部过热情况下更加接近绝缘油汽化阈值,气泡生成门槛更低,长期高温的情况下使得油纸绝缘界面劣化时间更短,其纤维裂解导致孔隙率增加,间隙扩大形成气泡形成的腔体,水蒸气,烃类气体以及部分有机小分子在界面积聚产生气泡。

通过对变压器的绕组热点模型展开的气泡产生试验,发现大多数气泡主要由绕组的层间或匝间析出^[18,24-25],通过观测纸板表面气泡的尺寸变化,可发现其源自更小气泡在纸表面聚集并逐渐融合的过程。因此,研究表明,对气泡生成时刻的观测存在滞后性,即当气泡在纸板表面析出被检测到时,其在油纸绝缘结构内部实际上已提前形成^[26]。

水分含量对绝缘纸中气泡的生成行为具有显著影响。随着绝缘纸中含水率的增加,气泡的初始析出温度呈现出明显下降趋势,即含水量促进热致气泡形成过程,不同水分质量分数纸板的气泡生成起始温度见图2^[18,27]。在快速升温过程中,纤维素介质表面的微观缺陷处吸附的水分发生相变,蒸发膨

胀并释放气体。当局部压力超过纤维素微管结构的毛细束缚力时,绝缘油被迫溢出,微管内部形成初始气泡胚。随着温度进一步升高,更多气体逐步扩散进入气泡胚中,推动其体积不断膨胀,最终发展为稳定的气泡结构。

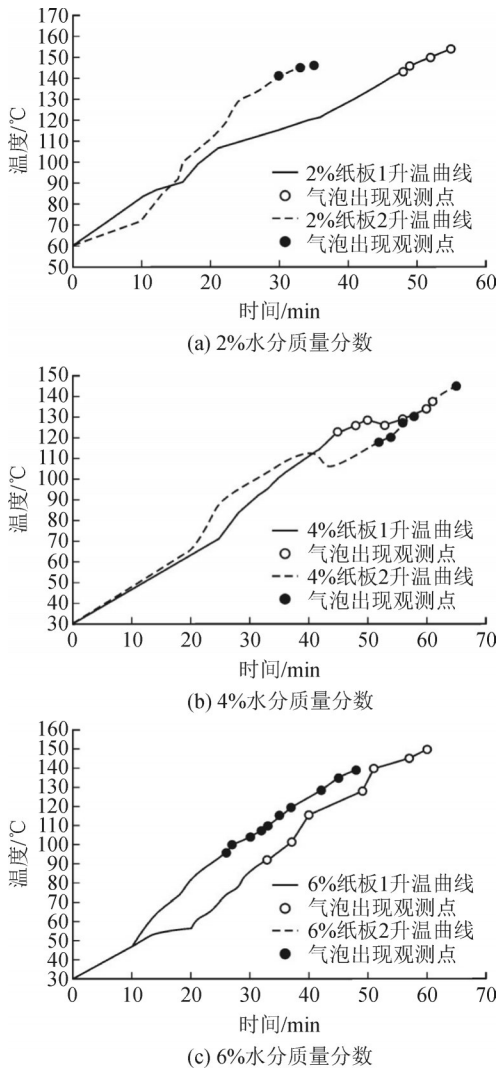


图2 不同水分质量分数纸板的升温曲线和气泡生成起始温度

Fig. 2 Temperature rise curves and initial bubble formation temperatures of paperboards with different moisture contents

部分学者通过分析油纸绝缘体系在升温、起泡及降温过程中的局部放电特征变化,可间接反映油纸界面水分分布动态聚集规律。温升阶段促使界面区域水分富集,导致局部含水量陡增,从而显著提高热致气泡生成概率^[22]。结合油中溶解气体扩散机制与游离水相变过程,揭示了过热及受潮缺陷协同作用下气泡的生成与迁移规律^[28-29]。

1.1.3 电致气泡产生机理

目前,大多数研究聚焦于油纸绝缘纤维素纸板

在局部过热或受潮缺陷条件下的热致气泡析出机制,而电场因素在气泡生成过程中的具体作用仍缺乏明确认识。

在电场作用下,纯净变压器油中气泡的产生机制主要涵盖以下几个方面:由场致电子电流加热引起的液体热分解产气、高能电子碰撞导致的液体分子解离、电极凸起部位的电晕放电引发的局部液体气化,以及电压冲击波所致的空化效应。相关研究指出,电场效应是促使纯净变压器油中气泡生成的关键驱动力^[30]。

在承受交直流复合电压叠加谐波作用以及极性反转电压等复杂工况下的换流变压器相较于交流变压器,其直流分量使油纸界面、油中杂质持续累积空间电荷,同时由于其更快的变化速率更易打破电荷弛豫平衡,导致局部场强剧烈畸变进而产生气泡。在外加电场作用下,气泡的动力学行为受多种关键因素影响,包括电场类型、电极结构以及介质的物理特性。气泡的形成过程通常分为3个阶段:成核、稳定增长和颈缩^[27]。

电场作用下,气泡生长动力学呈现明显的各向异性特征:气泡在横向与纵向收到电场力的作用时,其生长过程会变化,因此,电场强度与介电常数被认为是调控这一行为的主要参数^[31]。WANG等通过数值模拟研究了非均匀电场下的气泡生长过程,结果表明,毛细管口附近的高强度电场区域能够产生替代浮力的电场力,从而促进气泡的脱离^[32]。王军锋等人针对电场作用下介电介质中气泡的生成过程开展研究,结果表明,随着电场强度的增加,气泡的形成周期明显缩短,且气泡体积显著减小。同时,较强的电场促进了气泡初始运动速度的提升。电场力不仅限制了气泡的体积膨胀,还加快了气泡的生长进程。随着电场强度进一步增强,电场极化力逐渐成为气泡生长及脱离的主导力,使气泡以更高速度脱离,见图3^[33-35]。张香平等人总结了水中电催化反应电极界面纳微气泡的多尺度研究,阐述了电荷转移作用下纳米气泡成核、生长和微米气泡脱离的反应界面纳微气泡演化的多尺度过程,为电场作用下油纸绝缘气泡产生的研究提供了借鉴^[35]。

热致气泡与电致气泡生成机制对比见表1,其诱因、生成位置以及影响因素均有较大不同。需要说明的是,现有研究多基于纯热激励或纯电激励条件下的气泡生成与演化过程分析,但换流变压器实际运行属于热、电、力与油流耦合场,两种气泡并非完全独立产生。热致气泡可能在高温区域先行成核,而电致气泡在强电场畸变区域更易快速增

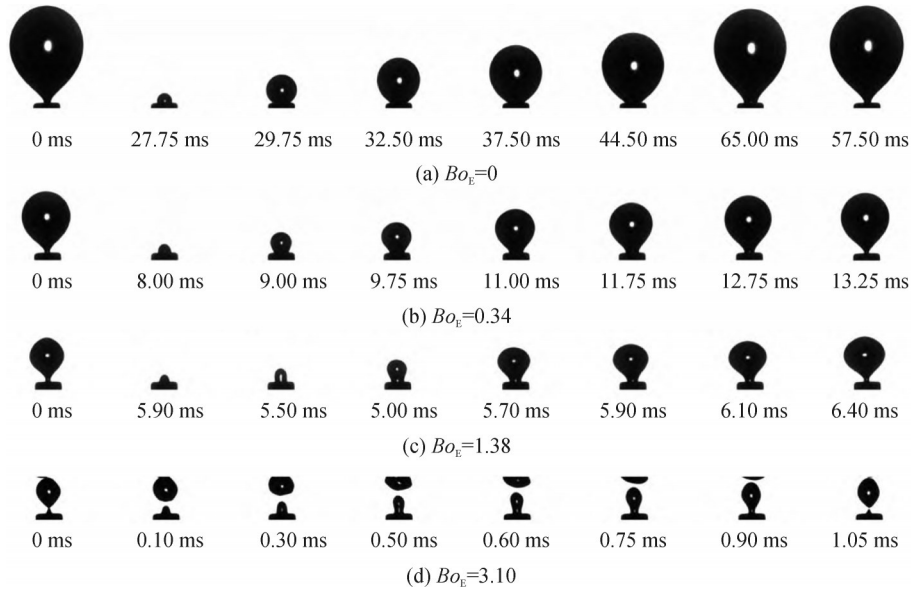


图3 电场作用下的气泡生长过程

Fig. 3 Bubble growth process under electric field

长,因此实际工况中协同演化。但在不同的工况情况下二类气泡占据的主次是不同的,在过载运行、局部绝缘劣化等温度长期累积、散热受阻或局部热分布不均等情况下热致气泡占主导地位,属于长期过程;在恶劣工况、局放发展等强电场、非均匀电场或高能电冲击工况等情况下电致气泡占地位。实际工程中,气泡多表现为放电气泡以及产热、产热促进气泡生成、气泡生成扰动换流变运行的耦合过程。因此,对热致与电致气泡机理的独立分析可为基础认识提供分解视角,但并不能完全代表真实运行状态,下一步研究应进一步考虑混合气泡行为对绝缘系统电场分布的综合影响,这也是未来研究的延伸方向。

表1 热致气泡与电致气泡生成机制对比

Table 1 Comparison of thermally and electrically induced bubble formation mechanisms

特征	主要诱因	生成位置	关键影响因素
热致气泡	温度升高、水分汽化	纸板层间/匝间、纤维素微管	水分含量、温升速率
电致气泡	电场畸变、电子碰撞	电极凸起处、强场区	电场强度、介电常数

1.2 气泡复杂的动态行为

1.2.1 运动

关于气泡复杂的动态行为,宋耀祖^[36]、李庆民^[37]、WANG Zhongdong^[38]等人研究了交流电场下静止绝缘油中气泡的形态变化与迁移轨迹以及放电图像,得到了气泡的部分运动轨迹与放电的演变过程,发现气泡动态行为与绝缘油中放电密切相关。换流变压器受交直流复合电场、高频谐波、油流场与温

度场的耦合作用:直流分量使气泡极化吸附电荷产生定向电场力,驱动气泡沿电场方向迁移,这与油浸式变压器工频电场与油流场不同。

学者们针对气泡在不同电场环境下的迁移与积聚现象展开了深入探究。有些学者研究聚焦于交/直流电场对气泡行为的影响,揭示了气泡在电场线作用下呈现拉伸变形及定向迁移趋势,当抵达特定等势面时,气泡间易发生融合与积聚行为^[39-40]。与此同时,Andalib^[41]、Masanori Hara^[42]、P.Wang^[43]等将关注点投向非均匀直流电场,研究发现,电场强度的增加和液体粘度的降低均会导致气泡上升路径产生偏移。鉴于工频交流电场在实际电气设备中的广泛应用,深入探讨此条件下气泡迁移行为具有重要意义。赵涛等人^[28]基于数值模拟方法,系统研究了工频交流电场环境中变压器油内气泡的动力学响应特征。

刘秋实围绕不均匀电场条件下气泡的动力学行为开展了深入研究,系统探讨了电场分布对气泡运动、形变及迁移规律的影响。研究表明,气泡的迁移过程可被精细划分为4个关键阶段,依次为气泡从起始位置脱离的初始脱离阶段,气泡在液体介质中向上竖直移动的竖直上升阶段,气泡接近锥形电极尖端时的靠近阶段,以及气泡沿电极表面或容器壁缓慢爬升的壁面附着阶段。极不均匀电场条件下气泡的运动特性表现出显著差异,研究指出,电场力的存在会使气泡的脱离过程持续时间显著延长,脱离区域显著扩大,同时诱发气泡产生微弱脉动,从而使其迁移路径呈现出非稳定的波动行

为,见图4^[37],这一发现为理解电场对气泡动力学行为的调控机制提供了重要依据^[37]。

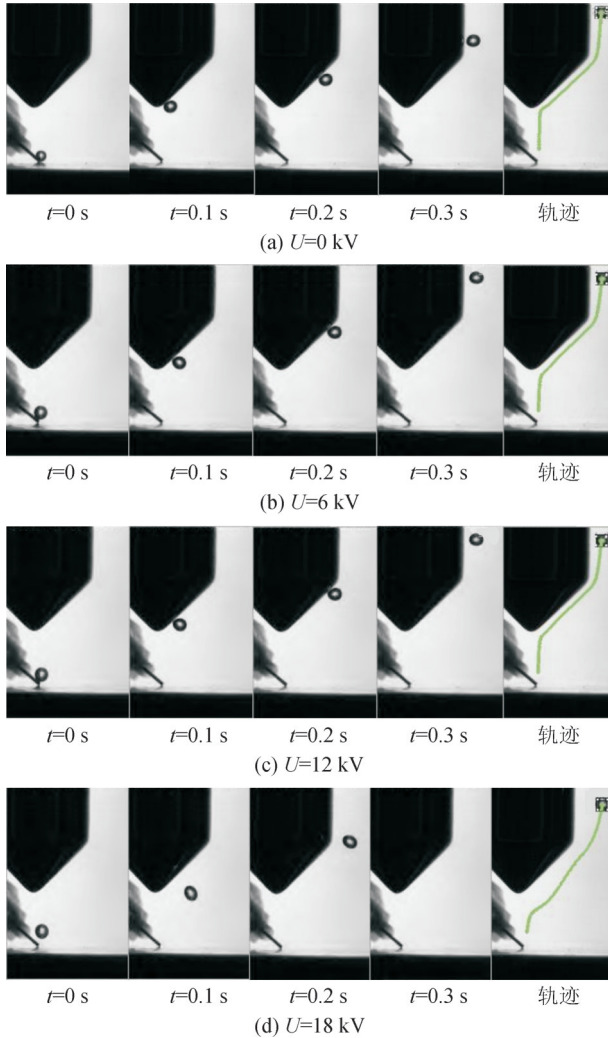


图4 不同场强下气泡迁移路径

Fig. 4 Bubble migration paths under different electric field strengths

1.2.2 形变

除运动外,油纸绝缘气泡的形变过程同样受到研究人员的关注。深入探究了气泡在不同电场条件下的动力学行为。这些成果为理解电场调控气泡行为提供了多维度的理论支撑。

Dong 等人研究发现,极不均匀电场中壁面附近的气泡会显著畸变局部场强分布,导致气泡呈现扁平椭球体形态^[44]。Cho 与 Kweon 通过均匀电场下的实验观察发现,贴附在底部壁面上的气泡在电场强度增大时,会沿电场方向产生更明显的纵向形变^[45]。彭耀等针对孔板附着气泡的研究表明,直流电场强度的提升会使气泡伸长,同时脱附体积减小;而孔径增大则促使气泡半径、形变率及脱附体积同步增加^[46]。交流电场中气泡展现出更复杂的动力学特性,Korobeynikov 在均匀电场下发现,悬浮气泡在

100 Hz 交流电压作用下呈现周期性变形振荡^[47]。同时油流速度对气泡变形具有显著影响,流速加快会加剧气泡的拉伸程度,表明气泡形变与流体动力学环境存在关联关系^[48]。

张乔根等人系统研究了交流电场作用下变压器油中贴壁气泡的形变行为。研究显示,在电场作用下,气泡会沿电场方向产生拉伸变形,并表现出周期性脉动的动态特征,见图5^[49]。气泡的形变程度与电场强度、气泡半径及温度呈正相关关系。研究表明,气泡的形变本质上是电场力与表面张力相互作用下形成的一种动态平衡状态。气泡的存在会显著扰动油隙内的电场分布特性,且随着其在电场方向上拉伸程度的增加,气泡内部的电场强度呈现逐步减弱的趋势^[49]。

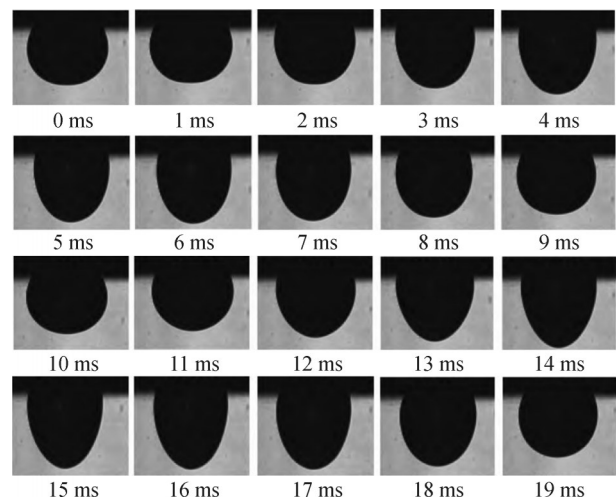


图5 交流电场下气泡变形过程

Fig. 5 Bubble deformation process under an AC electric field

唐炬等人^[50-51]和李清泉等人^[52]探究了局部放电作用下绝缘油中悬移气泡的动态特性,从力学视角出发对处于不同运动状态下绝缘油中气泡的形变行为进行了研究。P.Wang^[53]、Hara^[54]及陈凤^[36]等通过高速摄像手段发现,气泡在电场方向上发生拉伸并趋于椭球形,其变形幅度随施加电压的上升而逐渐增强。

1.2.3 多气泡行为

研究表明,气泡的形变本质上是电场力与表面张力相互作用下形成的一种动态平衡状态。气泡的存在会显著扰动油隙内的电场分布特性,且随着其在电场方向上拉伸程度的增加,气泡内部的电场强度呈现逐步减弱的趋势。由于换流变中的直流分量会导致气泡在带电荷后产生定向运动的力,具有明确的迁移方向,因此与油浸式变压器无明确迁移方向有一定的区别。

当多个气泡彼此距离较近并满足聚并条件时,尾流效应可能导致后方气泡向前方气泡靠近并发生聚并现象^[55]。刘静如^[56]围绕非牛顿流体中气泡在不同排列结构下的运动特性开展研究,深入分析了气泡之间的聚并与破裂机制。冯俊杰^[57]则从多种运行条件出发,对气泡的聚合、连接及其破碎特征进行了系统性探讨。

在气泡聚并动力学研究领域,多团队通过实验与模拟手段系统探究了油纸绝缘环境中的多气泡动态行为与特征变化。针对非牛顿流体体系,马友光考察了幂律指数对多气泡排列形式下动力学特性及聚并路径的影响^[56];张宁等人分析了气泡聚并行为与电场分布的耦合关系,揭示了极间电压、流速、气泡尺寸及数量等参数对聚并过程的作用机制^[58]。蒋晓刚等人通过多物理场耦合模型,研究证实了气泡空间构型对聚并行为的显著调控作用^[59],闻昭权建

立了碰撞速度与聚并效率的定量关联模型^[60]。张淑君等人探究了气泡间距与介质粘性被证实可显著改变融合动力学与上升速度演化规律^[61],表面活性剂、电解质浓度及pH值等化学因素则通过界面改性影响聚并时间尺度^[62]。数值模拟研究进一步验证了多向度聚并过程的物理真实性,仿真结果与实验观测呈现良好一致性^[63]。

此外,王一凡等人构建了极不均匀的交流电场局部放电实验平台,观测了放电过程中气泡的产生与动态行为变化过程,揭示了油纸绝缘针板系统中局部放电作用下气泡运动与聚并规律,见图6^[64]。气泡动态行为导致的电场畸变是初始放电形成的关键因素,少有学者将气泡动态行为与气泡内部电场畸变联合分析,需要进一步开展气泡复杂动态行为诱发交直流复合电场初始放电形成规律的研究。

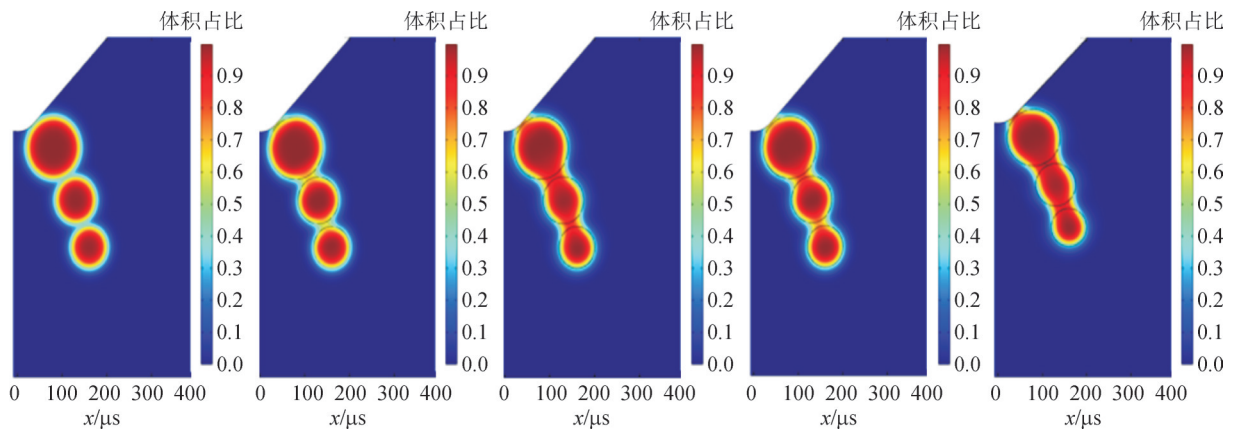


图6 油纸绝缘针板系统中局部放电作用下多气泡聚并过程

Fig. 6 Coalescence process of multiple bubbles under partial discharge in the needle-plate system of oil-paper insulation

现有研究已较为深入地揭示了过热与潮湿缺陷引发的油纸绝缘气泡析出机制,但在交直流复合叠加谐波电压及瞬态极性反转等复杂电压条件下,气泡的产生、破裂、聚并与渗析等动态演化过程仍缺乏系统认识,尚处于研究空白阶段。尤其在换流变压器绝缘系统中,气泡受到电场畸变、油流扰动与机械振动的多重耦合影响,其力学行为瞬变且微弱,传统实验手段难以实现精准捕捉与量化表征。同时多物理场耦合下热致与电致气泡的交互作用研究不足,可进一步探究温度场对电致气泡的间接作用。例如高温使绝缘油介电常数降低,是否会改变电场力对气泡生长的调控效率,电场畸变是否会加速热致气泡的聚并等关联问题,弥补单一因素研究多、耦合作用研究较少的局限。

2 气泡簇爆发与放电演化交互作用规律

为了揭示高能电弧的产生机理,换流变压器绝缘油中气泡簇爆发特征研究具有重要理论意义,气泡簇爆发与放电演化两者间相互激励规律亟待研究。

2.1 放电下气泡簇复杂的动态行为

针对放电演化阶段中气泡簇爆发的现象,齐波等人分别在施加交流、直流及多种交直流叠加比例电压条件下进行了放电试验,并通过测定绝缘油中溶解气体的体积分数,对放电过程的产气规律进行了系统研究^[65]。目前绝缘油中放电演化的研究更多集中于放电发生后产气特性,对于放电能量引发液体相变进而导致气泡簇的爆发过程,尚未取得实质性的进展。

李显东等人围绕针板电极条件下水中亚音速流注的形态演化与发展过程进行了研究。结果表明,阳极流注在大部分时间内以气泡簇形式缓慢扩展,最终迅速生长为树枝状的高速长流注,见图7^[66]。其演化过程通常经历液体介质在电极尖端区域的扰动、初始气泡及气泡簇的形成、气泡簇以亚音速扩展,以及第二类流注以超音速传播等阶段。两种模式之间的核心差异在于主导机制不同:亚音速模式主要受气泡簇扩展控制,而在超音速模式下,则以第二类流注的快速传播为主导过程。

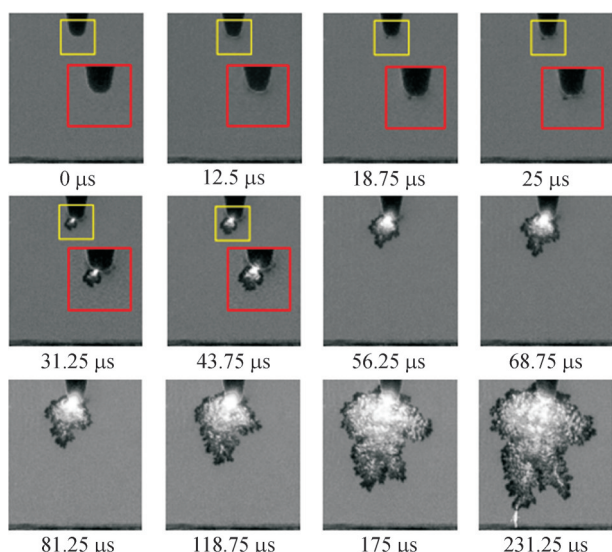


图7 水中亚音速阳极流注发展过程($U=20$ kV)

Fig. 7 Development process of subsonic anode streamers in water ($U=20$ kV)

温小琼^[67]、李剑等人^[68]研究了水中均匀场预击穿动力学特性,发现超长脉冲下气泡簇生长膨胀与脱离破裂动态平衡是放电持续发展为流注并引发最终击穿的原因,正极性电极放电与气泡簇爆发过程见图8^[68]。在低电压水平下,放电过程经历初始液相扰动后,针状电极表面会形成气泡群,进入生长、形变以及脱离或破裂的周期性演化阶段。然而,受限于发散流动模式下的对流干扰,这些气泡难以构建连续贯通的通道,间隙击穿因此受到抑制。相比之下,在高电压条件下,气泡可持续扩展至临界体积,继而诱发内部电离现象,并迅速演化为亚音速流注,打破原有循环模式,显著加快击穿过程的发生。超长脉冲工况下,气泡能否持续演化为流注并引发最终击穿,取决于电极界面处气泡生长膨胀与脱离破裂之间的动态平衡机制。

电弧产生高压脉动气泡是气泡簇形成中的重要部分。胡振宇等人针对水中高压脉动气泡与浮体流固耦合特性进行了研究,通过采用水下放电技术生成气泡,使用高速摄影捕捉气泡动力学行为与

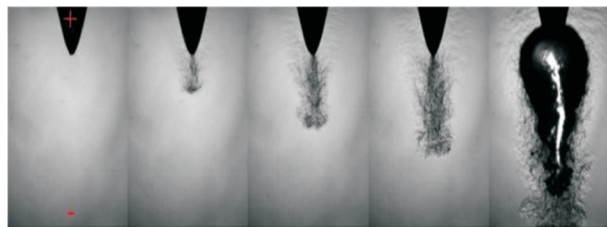


图8 正极性电极放电与气泡簇爆发过程

Fig. 8 Discharge of positive-polarity electrode and bubble cluster burst process

浮体运动响应^[69]。P.CUI等人针对不同边界条件下进行了水下爆炸气泡实验,拍摄了脉动气泡生成过程并分析了压力脉冲的特性^[70]。李帅等人分析了水中高压脉动气泡水射流形成机理及载荷特性,为电弧放电下气泡簇的产生过程分析提供了借鉴^[71]。

现有关于气泡簇和流注演化的高速可视化研究多采用水介质,主要基于其良好的成像可视性和便于界面行为观测的实验条件。虽然水与绝缘油在介电特性和流变性能方面存在差异,但二者在强电场作用下均遵循气泡极化—形变—聚并—通道—放电演化的基本物理过程,因此水介质实验可在机理理解、观测方法及演化阶段划分等方面为绝缘油体系提供可借鉴的研究基础。绝缘油中相关定量参数仍需在油介质环境下进一步验证和获取。绝缘油中放电引起的气泡簇爆发是导致进一步放电的关键因素,当前研究主要关注水中流注发展中气泡簇动态发展过程,对交直流复合电场下绝缘油中气泡簇爆发关注较少,亟待探究换流变压器放电演化下气泡簇爆发与动态发展规律。

2.2 气泡簇爆发下的放电演化规律

换流变压器因其直流分量,电弧等离子体可持续获得能量维持电离状态,导致电弧持续时间相较于油浸式变压器更长;长时间电弧持续加热会使绝缘油大量汽化,生成的气泡在电场与油流作用下易聚并形成气泡簇,加剧局部场强畸变进一步维持并强化放电。

围绕气泡簇爆发对放电过程演化机制的影响,潘成等人借助数值仿真手段,对流动条件下变压器油中气泡的运动行为及其对局部电场分布展开了系统性分析,探究了不同油流速度下气泡水平与竖直方向上形变对电场畸变的影响^[48,51]。蔡新景等人探究了气泡放电对变压器油中放电的影响,研究了含气泡变压器油中电场强度和空间电荷密度的变化规律,证明气泡位置、大小和数量与放电剧烈程度具有显著关系^[72]。Ramesh Oruganti^[73]、王黎明^[74]等人针对不同类型杂质对绝缘油击穿性能的影响进

行了研究, 结果表明, 气泡的逸出过程及其动态响应行为在击穿机制中起到了关键作用, 将气泡演化的模式分为4个阶段: 初始阶段、发展阶段、收敛阶段和放电阶段, 见图9^[74]。

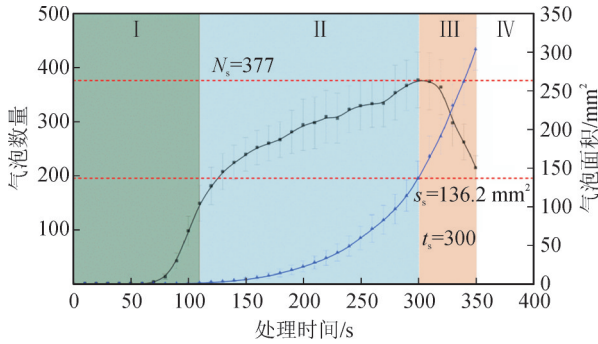


图9 气泡演化不同阶段气泡数和气泡总横截面积的时间变化曲线

Fig. 9 Time variation curves of bubble count and total cross-sectional area at different stages of bubble evolution

气泡动态行为与放电发展存在紧密联系。P. Adda 等人探究了水中长时间脉冲放电预击穿过程, 并明确了焦耳热与电流体动力竞争作用产生的气泡中放电发展, 进而将产生的气泡簇转化为流注的演化机理^[75]。电场作用下的气泡簇行为相比于零星气泡呈现多样性和复杂性, 其爆发特征深刻影响放电演化过程。刘振等人通过电压电流探头和高速相机分别对水中放电通道的电学参数、气泡动力学指标进行了同步测量, 认为气泡能量与电极距离呈负相关, 气泡能量效率随着电极数目的增加而降低^[76]。M. Kh. Gadzhiev 等人研究了电场对变压器油中空气和SF₆气泡的影响, 探究了其生长过程中气泡引发绝缘击穿进而诱发电弧放电的现象, 说明气泡的流注放电特性与变压器油间隙的击穿有一定的相关性^[77]。李云鹏研究了不同绝缘状态对绝缘油中单气泡拉伸以及多气泡聚并“成桥”的作用规律^[78]。赵涛对气泡和纤维素颗粒对变压器油冲击击穿特性影响的研究工作, 交直流脉冲电压下针板电极气泡的运动过程与放电演化进行了分析^[79]。气泡内部电场能与热能积聚是引发初始放电的主导因素, 其爆发导致的能量分配极有可能决定高能电弧是否发生。当前多数研究聚焦于孤立气泡对放电过程的影响, 而对于气泡簇演化对放电行为的整体作用机制尚缺乏系统探讨。零星气泡与气泡簇之间在放电演化过程中的内在关联仍未被充分揭示, 相关认识仍较为有限。

在换流变压器爆炸前电弧放电动态过程中存在着强电磁场、高温场和强流体场、高压场等多物理场耦合作用, 其耦合关系见图10。图10中,

温度场影响材料温度特性进而对油中电磁场分布产生影响, 电磁场作用下电弧燃烧产生焦耳热使温度场改变; 电磁场使油中气泡发生迁移进而影响压力场, 压力场使电弧放电通道更加曲折改变空间电磁场分布; 电磁场会影响放电电弧磁流体动力学运动特性进而改变流体场, 流体场会改变气泡分散程度进而影响电磁场; 温度场影响绝缘油产气的速率进而改变油箱中的压力场, 压力场影响电弧燃烧继而改变温度场; 压力场改变绝缘油的动力粘度等理化性质进而影响流体场, 流体场改变影响油中气泡滤除的速度进而影响油箱中的压力场; 流体场改变决定绝缘油散热进而影响温度场, 温度场改变动力粘度系数等特性继而影响流体场。

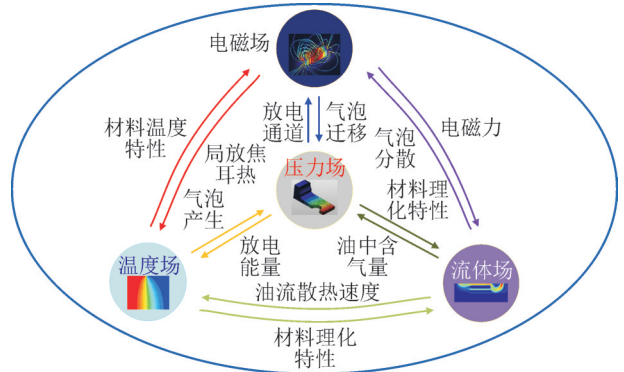


图10 高能电弧放电前换流变内部多物理场耦合关系
Fig. 10 Multi physics field coupling relationship layer inside the converter transformer before high-energy arc discharge

目前在绝缘油中放电研究方面已有诸多成果, 尤其集中于产气机制与气体成分分析, 但对于气泡动力学行为与放电过程之间相互作用的系统研究仍显薄弱, 特别是在气泡簇演化、高能电弧形成等关键节点的研究进展缓慢。现有工作多关注孤立气泡的放电影响, 对于气泡群协同作用、能量积聚以及气泡主导的放电通道变异机制认知不足。实践中, 受到油流与气泡耦合运动的影响, 放电路径常呈现高度非线性和随机性特征, 尤其在气泡迅速逸出与聚并阶段, 其对高能电弧触发的诱发效应尤为显著。

3 高能电弧产生前兆预警和放电抑制

为了从根源上避免高能电弧的产生, 基于放电阶段划分准则搭建前兆预警模型, 进而优化变压器绝缘结构与运维方式从而抑制放电演化, 具有显著研究价值和广阔应用前景。

3.1 放电阶段划分与电弧预警

研究高能电弧产生前兆预警和放电抑制,需要实现对放电发展阶段划分,通过将电弧故障从微弱放电到剧烈爆发的渐进过程进行科学拆解,为电弧预警模型提供准确的控制范围;同时在阶段变化的时刻设定多个分析的参量,避免传统单一方法导致的误报与漏报,可以大幅提升预警准确性;又将预警节点前移至放电前期,显著延长超前时间,为运维处置争取关键时间,成为解决电弧预警的核心基石。

关于放电阶段的划分准则,吴治诚^[80]、吴广宁^[81]、杨丽君^[82]等人根据放电量、放电重复率和相位谱图的变化,将油纸绝缘层间局部放电演化分为3到4个阶段,见图11^[81]。Mohammad Jafari Jozani^[83]、孙长海^[84]等人提取了油纸绝缘沿面放电多物理场特征参量,通过层次聚类法、概率神经网络算法对放电发展过程进行了阶段划分。李宇杰等人根据放电过程中能量分布占比的演化路径,将放电划分为3个严重程度阶段^[85]。

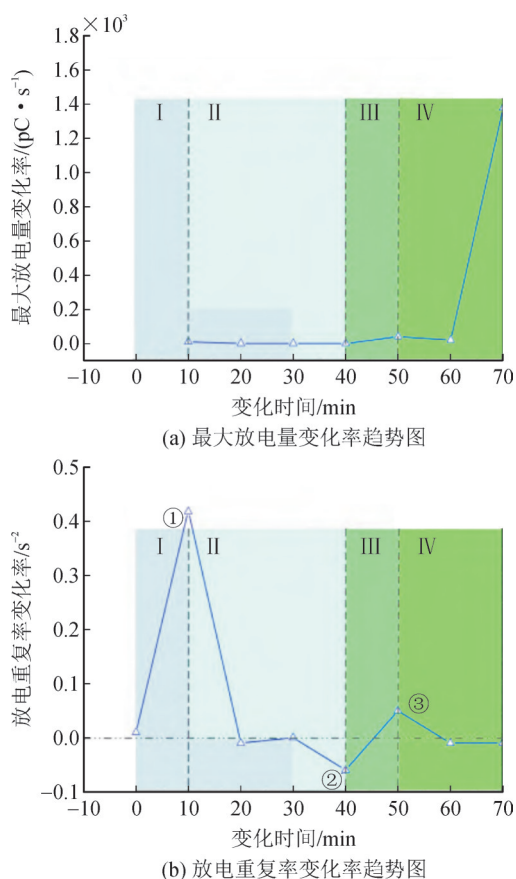


图11 不同阶段的局部放电特征参量发展过程

Fig. 11 Evolution of characteristic partial discharge parameters at different stages

当前对于油纸绝缘放电阶段的划分,通常采用放电量、重复率与谱图等电特征进行描述,但油纸绝缘产气特性、光信号等其他变化同样包含丰富的

关键信息,这些方面的研究和关注仍显不足。董明等人分析了针板电极下酯类绝缘油放电特性及产气规律,根据放电统计特征参量和油中溶解气体产物将放电过程划分为起始阶段、发展阶段和预击穿阶段3个主要阶段^[86]。同时,对不同场强下局部放电光信号的强度变化进行了分析,根据不同谱段内光辐射强度的占比来判定放电的严重程度^[87]。当前对于油纸绝缘全过程放电阶段的划分,通常依据单一测量手段得到的局部放电、沿面放电等典型缺陷的统计结果,难以覆盖所有的缺陷类型及发展阶段,细致程度和分类适用性也需要提高。亟待提出高能电弧产生前全周期、精细化的阶段划分准则,为高能电弧的前兆预警和放电抑制提供有价值的参考。

3.2 放电的抑制方法

在变压器的长期运行过程中,油纸绝缘系统作为其主要绝缘形式,常常面临电、热、机械等多重应力的耦合作用,容易导致局部放电等绝缘性能劣化现象,从而影响变压器的运行可靠性。为有效抑制局部放电,提高绝缘系统的整体性能,研究者们主要从材料改性和结构设计两个方面展开了深入探索。

3.2.1 油纸绝缘材料改性

关于放电的抑制方法,廖瑞金^[88]、陈庆国^[89]、李杰^[90]以及Emran Jawad Kadim^[91]等人通过掺杂 Al_2O_3 、 SiC 、 SiO_2 等纳米颗粒,研究了绝缘纸板的改性,从绝缘性能、机械性能、疏水性能及热老化性能等多方面提升了改性效果,其中SP- Al_2O_3 /PTFE的界面电荷缓解机制见图12^[82]。CAVALCANTE C L^[92]、郝建^[93]等人分别采用硅烷偶联剂和抗氧化剂改性植物绝缘油,通过束缚水分子在油中的扩散抑制“小桥”放电,调节复合抗氧化剂最佳配比提高变压器油的介电常数,显著提升了绝缘性能。绝缘材料疏水性、抗氧化性直接影响气泡生成,采用上述研究中的油纸绝缘材料性能改良方法调控气泡动态行为,将是一种有效的放电抑制手段。朱文兵发明了一种油中溶解气体的扩散模拟实验方法,使观测放电下气泡的动态行为与变化过程更加便捷,为换流变压器放电抑制实验模拟提供了重要的技术支撑^[94]。

3.2.2 油路结构设计

除此之外,油流对于抑制放电也可能具有明显效果。潘成^[95]、赵涛^[96]、潘卓洪^[97]等人通过搭建油循环系统,进行了变压器油在多种流速条件下的直流局部放电与击穿试验,结果表明油流的存在显著增强了绝缘油的绝缘能力,显著降低了击穿的风险,不同油流速度下击穿电压分布见图13^[97]。然而,当

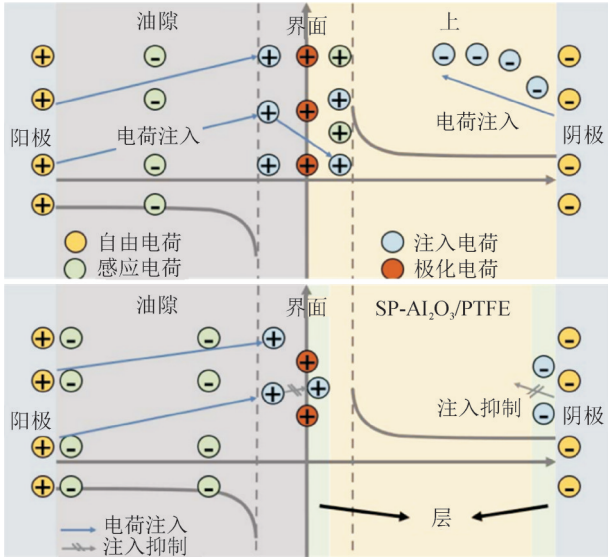


图 12 SP-Al₂O₃/PTFE 的界面电荷消减机制
Fig. 12 Interfacial charge dissipation mechanism of SP-Al₂O₃/PTFE

前针对放电抑制的工作主要分为绝缘材料改性、结构优化设计与油流调控, 针对交直流复合电压下的油纸绝缘气泡调控、局部过热与电场畸变抑制少有研究。同时, 基于气泡簇爆发的换流变运行工况自适应调控方式仍需进一步科学验证, 多物理场影响的极端环境下气泡簇动态消解与放电自熄控制也需深入研究。

需要说明的是, 相关实验结论多基于新油及洁净绝缘材料条件, 属于理想化实验环境下的机理认识。实际换流变压器中, 油品老化产物、微水含量增加以及绝缘纸板孔隙等会增强气泡表面吸附作用, 而绝缘纸板孔隙结构亦随运行时间发生演化,

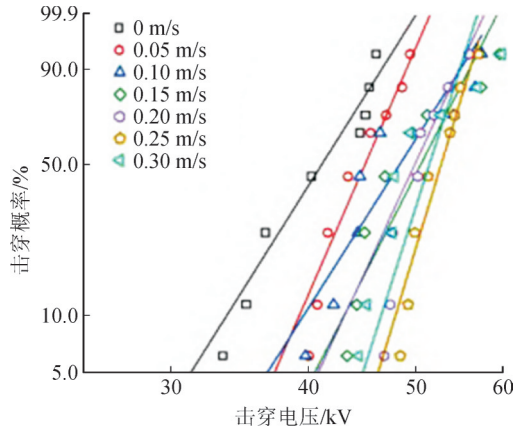


图 13 不同油流速度下击穿电压 Weibull 分布图
Fig. 13 Weibull distribution of breakdown voltage under different oil flow velocities

上述因素均可能影响气泡迁移效率, 使实验室数值结果在工程现场出现一定程度衰减。有必要结合油品老化状态、界面吸附特性及材料孔隙演化规律, 对换流变运行特征参量与结论进行修正, 以实现实验室结论在实际中应用的适用性和可靠性。

综合当前气泡—电弧防治技术现状, 总结技术路线图见图 14。当前对变压器内部放电阶段的划分仍多集中于特定典型缺陷模式, 研究重心局限于绝缘改性或油流引导对放电过程的单一调控。然而, 变压器放电过程在多物理场交互影响下, 其演化路径呈现出高度复杂性与多样性, 尤其是在高能电弧形成前的临界阶段, 放电行为识别存在明显模糊性。这种模糊性直接制约了对预警指标的提取与响应控制机制的建立。

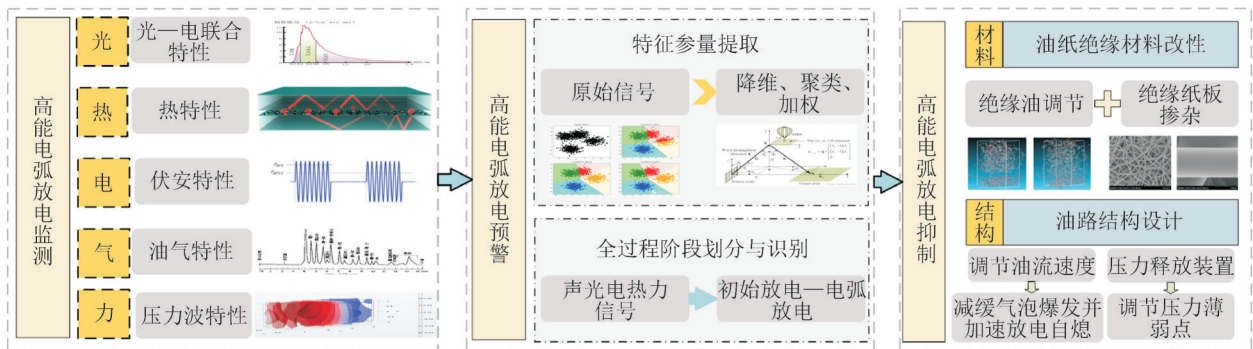


图 14 气泡—电弧防治技术路线图
Fig. 14 Roadmap of bubble arc prevention technology

4 结论与展望

综上所述, 现有变压器放电阶段划分与放电抑制研究, 往往局限于针对典型缺陷下同一类型放电

过程、油纸绝缘改性与油流调控。但是, 放电演化过程受到多物理场耦合作用, 影响因素众多、发展过程复杂多变, 变压器高能电弧产生前放电阶段表征定义界限模糊。如何有效提取高能电弧产生预

警判据,进而实现对电弧产生前气泡动态行为调控和放电抑制,是当前面临的主要难题。对比分析了现有的变压器气泡动态行为、气泡与放电的交互关系等研究现状,得到结论与展望如下所述。

当前油纸绝缘气泡研究多涉及过热与潮湿缺陷下的析出过程,对于交直流复合叠加谐波电压以及瞬态极性反转电压条件下,气泡产生过程与破裂、聚并和渗析等气泡动态行为特征的研究尚处于起步阶段。由于气泡的生成、变形、运动及聚并过程极其微小且快速,单纯依靠实验难以精确捕捉其受力变化。此外,换流变压器绝缘油中的气泡动态还受到油流、机械振动和电场畸变等多重因素的共同作用,分析气泡复杂动态行为下的换流变压器初始放电形成过程困难。亟待明晰多物理场耦合作用下油纸绝缘气泡的产生以及运动发展规律,探索基于油纸绝缘气泡复杂动力学行为的初始放电形成机制。

1)现有文献关于绝缘油中放电的研究更多集中于油中产气特性,对气泡动态行为与放电演化的交互作用重视程度不够;同时大多关注悬浮气泡对放电的影响,关于气泡簇、气泡能量的相关成果较少,油纸绝缘气泡动态行为引发高能电弧演化全过程尚待深入研究;在“流场—气泡群”作用下,绝缘油中放电通道不断快速延伸,形成扭曲或成为树状,行为具有较强的随机性。放电作用下从气泡零星产生到气泡簇爆发的演化过程较为复杂多变,特别是高能电弧产生前气泡逸出速度快、数量多导致观测与分析难度较高。亟待揭示气液两相流中气泡簇爆发与放电演化交互作用规律,进而明晰气泡动态行为引发高能电弧的演化机理。

2)现有变压器放电阶段划分与放电抑制研究,往往局限于针对典型缺陷下同一类型放电过程、油纸绝缘改性与油流调控。但是,放电演化过程受到多物理场耦合作用,影响因素众多、发展过程复杂多变,变压器高能电弧产生前放电阶段表征定义界限模糊。如何有效提取高能电弧产生预警判据,进而实现对电弧产生前气泡动态行为调控和放电抑制,是当前面临的主要难题。因此,有必要从源头上避免高能电弧产生,研究并提出相应策略实现对换流变压器高能电弧产生前兆预警和放电抑制,降低爆炸事故的发生概率。

参考文献:

- [1] 国家能源局. 2025年能源工作指导意见[R]. 北京:国家能源局, 2025.
- [2] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2024[R]. 北京:中国电力企业联合会, 2024.
- [3] HE Shuang, LI Jiangtao, WANG Yifeng. Analysis of electromagnetic transient characteristics on the winding of UHVDC converter transformers based on an improved broadband model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8):1-5.
- [4] 何国阳,汲胜昌,祝令瑜,等.在运换流变压器噪声特性及噪声预测方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):117-127.
- [5] MORSHUIS P, CAVALLINI A, FABIANI D, et al. Stress conditions in HVDC equipment and routes to in service failure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 81-91.
- [6] 杜伯学,朱闻博,李进,等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6):1300-1309.
- [7] 赵志刚,徐征宇,王健一,等. 大型电力变压器火灾安全研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10):3378-3384.
- [8] FORREST J A C, ALLARD B. Thermal problems caused by harmonic frequency leakage fluxes in three-phase, three-winding converter transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1):208-213.
- [9] 陈洪波,曹培,高凯,等. 换流变压器有载调压开关防爆试验研究与分析[J]. 高压电器, 2024, 60(2):119-126.
- [10] WANG Qingyu, YANG Xi, TIAN Huidong, et al. A novel dissipating heat structure of converter transformer RIP bushings based on 3-D electromagnetic-fluid-thermal analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3):1938-1946.
- [11] 张佳庆,李国辉,汪亚龙,等. 典型特高压换流变压器火灾数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8):1115-1120.
- [12] 陈涛,赵力增,傅学成,等. 大型换流变压器火灾事故特点与灭火方案[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8):1138-1141.

National Energy Administration.Guiding opinions on energy work in 2025[R]. Beijing: National Energy Administration, 2025.

[2] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告2024[R]. 北京:中国电力企业联合会, 2024.

China Electricity Council.Annual development report of China's electric power industry 2024[R]. Beijing: China Electricity Council, 2024.

[3] HE Shuang, LI Jiangtao, WANG Yifeng. Analysis of electromagnetic transient characteristics on the winding of UHVDC converter transformers based on an improved broadband model[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8):1-5.

[4] 何国阳,汲胜昌,祝令瑜,等.在运换流变压器噪声特性及噪声预测方法[J]. 电力工程技术, 2025, 44(5):117-127.

HE Guoyang, JI Shengchang, ZHU Lingyu, et al. Noise characteristics and prediction methods of operating converter transformers[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5):117-127.

[5] MORSHUIS P, CAVALLINI A, FABIANI D, et al. Stress conditions in HVDC equipment and routes to in service failure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 81-91.

[6] 杜伯学,朱闻博,李进,等. 换流变压器阀侧套管油纸绝缘研究现状[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6):1300-1309.

DU Boxue, ZHU Wenbo, LI Jin, et al. Research status of oil-paper insulation for valve side bushing of converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1300-1309.

[7] 赵志刚,徐征宇,王健一,等. 大型电力变压器火灾安全研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(10):3378-3384.

ZHAO Zhigang, XU Zhengyu, WANG Jianyi, et al. Research on the fire safety of large power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10):3378-3384.

[8] FORREST J A C, ALLARD B. Thermal problems caused by harmonic frequency leakage fluxes in three-phase, three-winding converter transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1):208-213.

[9] 陈洪波,曹培,高凯,等. 换流变压器有载调压开关防爆试验研究与分析[J]. 高压电器, 2024, 60(2):119-126.

CHEN Hongbo, CAO Pei, GAO Kai, et al. Research and analysis on explosion-proof test of converter transformer OLTC[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(2): 119-126.

[10] WANG Qingyu, YANG Xi, TIAN Huidong, et al. A novel dissipating heat structure of converter transformer RIP bushings based on 3-D electromagnetic-fluid-thermal analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3):1938-1946.

[11] 张佳庆,李国辉,汪亚龙,等. 典型特高压换流变压器火灾数值模拟研究[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8):1115-1120.

ZHANG Jiaqing, LI Guohui, WANG Yalong, et al. Numerical simulation study on fire of typical UHV converter transformer[J]. Fire Science and Technology, 2020, 39(8):1115-1120.

[12] 陈涛,赵力增,傅学成,等. 大型换流变压器火灾事故特点与灭火方案[J]. 消防科学与技术, 2020, 39(8):1138-1141.

CHEN Tao, ZHAO Lizeng, FU Xuecheng, et al. Fire accident char-

- acteristics and firefighting solutions of large converter transformer [J]. *Fire Science and Technology*, 2020, 39(8):1138-1141.
- [13] 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.
- [14] 周远翔, 姜鑫鑫, 陈维江, 等. 交直流复合电压下变压器油中电弧放电及产气特性[J]. *高电压技术*, 2011, 37(7):1584-1589.
ZHOU Yuanxiang, JIANG Xinxin, CHEN Weijiang, et al. Arcing discharge and gas generation characteristics of transformer oil under combined AC and DC voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2011, 37(7):1584-1589.
- [15] 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):7651-7658.
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):7651-7658.
- [16] 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 needle - plate electrodes in aging oil - paper insulation under combined AC - DC voltage[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(6):1980-1987.
- [17] 刘志华, 崔彦捷, 汲胜昌, 等. 热机联合应力对油浸纸板绝缘及机械特性影响研究[J]. *电力工程技术*, 2020, 39(5):126-132.
LIU Zhihua, CUI Yanjie, JI Shengchang, et al. Influence of thermo-mechanical combined stress on insulation and mechanical characteristics of oil - impregnated paperboard[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2020, 39(5):126-132.
- [18] 汪佛池, 程祥瑞, 赵涛, 等. 油纸绝缘中气泡的生成特性及其对击穿性能的影响[J]. *高压电器*, 2020, 56(1):61-67.
WANG Fochi, CHENG Xiangrui, ZHAO Tao, et al. Characteristics of bubble formation in oil-paper insulation and its influence on the breakdown[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(1):61-67.
- [19] MENG Gao, ZHANG Qiaogen, DING Yuqin, et al. Investigation on bubbling phenomenon in oil - paper insulation[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2017, 24(4):2362-2370.
- [20] Loading guide for oil-immersed power transformers: IEC 60076-7:2018[S]. 2018.
- [21] HEINRICHS F W. Bubble formation in power transformer windings at overload temperatures[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1979, PAS-98(5):1576-1582.
- [22] 杨超杰. 油纸绝缘中热致气泡效应机制及气泡放电特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2024.
YANG Chaojie. Study on thermal effect mechanism and discharge characteristics of bubble in oil-paper insulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2024.
- [23] PRZYBYLEK P. The influence of cellulose insulation aging degree on its water sorption properties and bubble evolution[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2010, 17(3):906-912.
- [24] 李继方, 周一帆, 周星耀, 等. 变压器油间气泡局部放电对绝缘性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2024, 24(17):7159-7167.
LI Jifang, ZHOU Yifan, ZHOU Xingyao, et al. Effect of partial discharges of air bubbles between transformer oils on insulation performance[J]. *Science Technology and Engineering*, 2024, 24(17):7159-7167.
- [25] OOMMEN T V, LINDGREN S R. Bubble evolution from transformer overload[C]//2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives (Cat. No.01CH37294). Atlanta, GA, USA:IEEE, 2001:137-142.
- [26] LIU Yunpeng, CHAO Nijie, ZHAO Tao, et al. Mechanism and numerical model of bubble effect in oil-paper insulation based on microtubule model[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(5):1529-1537.
- [27] ZHANG Jian, YU Yong, QU Chen, et al. Experimental study and numerical simulation of periodic bubble formation at submerged micron - sized nozzles with constant gas flow rate[J]. *Chemical Engineering Science*, 2017(168):1-10.
- [28] 赵涛, 刘云鹏, 律方成, 等. 交流电场下变压器油中气泡动力学特性仿真[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(12):3081-3086.
ZHAO Tao, LIU Yunpeng, LYU Fangcheng, et al. Bubble dynamics simulation in transformer oil under AC electric field[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(12):3081-3086.
- [29] KOROBAYNIKOV S M, RIDEL A V, MEDVEDEV D A, et al. Registration and simulation of partial discharges in free bubbles at AC voltage[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(4):1035-1042.
- [30] USHAKOV V Y. Impulse breakdown of liquids[M]. Berlin:Springer Press, 2007:281-300.
- [31] CHEN F, PENG Y, SONG Y Z, et al. EHD behavior of nitrogen bubbles in DC electric fields[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2007, 32(1):174-181.
- [32] WANG Tai, LI Huixiong, ZHAO Jianfu. Three-dimensional numerical simulation of bubble dynamics in microgravity under the influence of nonuniform electric fields[J]. *Microgravity Science and Technology*, 2016, 28(2):133-142.
- [33] 苏巧玲, 王军锋, 张伟, 等. 电场作用下气泡在介电介质中的形成及聚并特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(5):1270-1276.
SU Qiaoling, WANG Junfeng, ZHANG Wei, et al. Investigation on bubble generation and coalescence characteristics in dielectric medium under electric field[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(5):1270-1276.
- [34] 张伟, 王军锋, 詹水清, 等. 电场作用下的气泡生长动力学特性实验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2022, 53(8):3202-3211.
ZHANG Wei, WANG Junfeng, ZHAN Shuiqing, et al. Experimental investigation on dynamic characteristics of bubble generation with electric field[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53(8):3202-3211.
- [35] 褚俊杰, 王宗旭, 白璐, 等. 电催化反应电极界面纳微气泡多尺度研究进展[J]. *中国科学化学*, 2024, 54(6):892-902.
CHU Junjie, WANG Zongxu, BAI Lu, et al. Advances in multi-scale nano-micro bubble evolution of electrocatalysis reaction electrode

- interfaces[J]. *Scientia Sinica Chimica*, 2024, 54(6):892-902.
- [36] 陈凤, 彭耀, 宋耀祖, 等. 电场作用下单气泡行为的可视化[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2007, 47(5):722-725.
CHEN Feng, PENG Yao, SONG Yaozu, et al. Experimental visualization of single bubbles in an electric field[J]. *Journal of Tsinghua University(Science and Technology)*, 2007, 47(5):722-725.
- [37] 刘秋实, 李庆民, NIYOMUGABO E L, 等. 极不均匀电场下绝缘油中气泡动力学特性与迁移机制[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(9):3460-3469.
LIU Qiushi, LI Qingmin, NIYOMUGABO E L, et al. Bubble dynamics and migration mechanism in insulation oil under extremely inhomogeneous electric field[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(9):3460-3469.
- [38] HUANG Yiming, LIU Qiang, WANG Zhongdong. Effects of temperature on partial discharges and streamers in an ester liquid under AC stress[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2019, 26(5):1512-1519.
- [39] 蔡丹, 刘列. 强电场下气泡形变对液体绝缘的影响[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(11):2966-2970.
CAI Dan, LIU Lie. Impact of air bubble deformation on dielectric liquid subjected to strong electric field[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(11):2966-2970.
- [40] 陈凤, 宋耀祖, 陈民. 电场作用下的气泡受力分析[J]. *工程热物理学报*, 2005, 26(s1):146-148.
CHEN Feng, SONG Yaozu, CHEN Min. Analysis of the electric stresses acting on a bubble in electric field[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2005, 26(s1):146-148.
- [41] ANDALIB S, VAJDI HOKMABAD B, ESMAEILZADEH E. Study of a single coarse bubble behavior in the presence of D.C. electric field[J]. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2013(436):604-617.
- [42] HARA M, WANG Zenchao. An analytical study of bubble motion in liquid nitrogen under DC nonuniform electric fields[C]//*Proceedings of 1994 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials(ICPADM)*. Brisbane: IEEE, 1994:459-462.
- [43] WANG P, SWAFFIELD D J, LEWIN P L, et al. Thermal bubble motion in liquid Nitrogen under nonuniform electric fields[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(3):626-634.
- [44] DONG W, LI R Y, YU H L, et al. An investigation of behaviours of a single bubble in a uniform electric field[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2006, 30(6):579-586.
- [45] CHO H J, KANG I S, KWEON Y C, et al. Study of the behavior of a bubble attached to a wall in a uniform electric field[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1996, 22(5):909-922.
- [46] PENG Y, CHEN F, SONG Y Z, et al. Single bubble behavior in direct current electric field[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2008, 16(2):178-183.
- [47] KOROBAYNIKOV S M, RIDEL A V, MEDVEDEV D A. Deformation of bubbles in transformer oil at the action of alternating electric field[J]. *European Journal of Mechanics B-Fluids*, 2019(75):105-109.
- [48] 张永泽, 唐炬, 潘成, 等. 流动变压器油中气泡动力学行为及电场分布仿真[J]. *高电压技术*, 2020, 46(6):2004-2012.
ZHANG Yongze, TANG Ju, PAN Cheng, et al. Simulation of the bubble dynamics and electric field distribution in flowing transformer oil[J]. *High Voltage Engineering*, 2020, 46(6):2004-2012.
- [49] 张哲滔, 张锐, 郭冲, 等. 交流电场下变压器油中贴壁气泡形变特性[J]. *高电压技术*, 2024, 50(2):846-854.
ZHANG Zhetao, ZHANG Rui, GUO Chong, et al. Deformation characteristics of bubbles attached to solid wall in transformer oil under AC electric field[J]. *High Voltage Engineering*, 2024, 50(2):846-854.
- [50] 唐炬, 朱黎明, 麻守孝, 等. 绝缘油中悬移气泡局部放电特性[J]. *高电压技术*, 2010, 36(6):1341-1346.
TANG Ju, ZHU Liming, MA Shouxiao, et al. Characteristics of suspended and mobile microbubble partial discharge in insulation oil[J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(6):1341-1346.
- [51] ZHANG Yongze, TAO Xiantao, PAN Cheng, et al. Role of air bubbles in the breakdown of flowing transformer oil[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2020, 27(5):1752-1760.
- [52] 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.
- [53] WANG P, SWAFFIELD D J, LEWIN P L, et al. The effect of an electric field on behaviour of thermally induced bubble in liquid Nitrogen[C]//2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids. Chasseneuil: IEEE, 2008:1-4.
- [54] HARA M, KOISHIHARA H, SAITA K. Breakdown behavior of cryogenic liquids in the presence of thermal bubbles under ramped voltage[J]. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1991, 26(4):685-691.
- [55] 李昕晨. 双气泡聚并的流体力学行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
LI Xinchun. Study of hydrodynamics behavior of two bubbles coalescence[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [56] LIU Jingru, ZHU Chunying, FU Taotao, et al. Systematic study on the coalescence and breakup behaviors of multiple parallel bubbles rising in power-law fluid[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, 53(12):4850-4860.
- [57] 冯俊杰. 气液两相体系气泡的流体力学行为研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2016.
FENG Junjie. Study of hydrodynamics behaviors of bubbles in gas-liquid systems[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [58] 刘士利, 韩继涛, 张宁, 等. 变压器油中气泡聚并行为及其对电场分布的影响[J]. *高电压技术*, 2023, 49(8):3534-3543.
LIU Shili, HAN Jitao, ZHANG Ning, et al. Coalescence behavior of bubbles in transformer oil and its effect on electric field distribution[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(8):3534-3543.

- [59] 蒋晓刚,苑志江,翟玉婷,等.基于COMSOL的气泡聚并行为仿真研究[J].计算机仿真,2019,36(7):191-194.
JIANG Xiaogang, YUAN Zhijiang, ZHAI Yuting, et al. Simulated analysis of the relative location impact on bubbles coalescence behavior in the water based on COMSOL[J]. Computer Simulation, 2019, 36(7): 191-194.
- [60] 闻昭权.气泡聚并机理的实验及模型研究[D].湘潭:湘潭大学,2019.
WEN Zhaoquan. Experimental and model studies on the mechanism of bubble coalescence[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2019.
- [61] 张淑君,吴锤结.气泡之间相互作用的数值模拟[J].水动力学研究与进展,2008,23(6):681-686.
ZHANG Shujun, WU Chuijie. Numerical simulation of the interactions between two three-dimensional deformable bubbles[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2008, 23(6): 681-686.
- [62] ATA S. Coalescence of bubbles covered by particles[J]. Langmuir, 2008, 24(12): 6085-6091.
- [63] VAN SINT ANNALAND M, DEEN N G, KUIPERS J A M. Numerical simulation of gas bubbles behaviour using a three-dimensional volume of fluid method[J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(11): 2999-3011.
- [64] WANG Yifan, LIU Hongshun, ZHANG Ziyue, et al. Study on the dynamic evolution of bubbles in oil/pressboard insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 2295-2304.
- [65] 苑清,齐波,张书琦,等.交直流复合电压下油纸绝缘典型缺陷产气特性[J].电网技术,2018,42(9):3093-3100.
YUAN Qing, QI Bo, ZHANG Shuqi, et al. Gas generating characteristics of oil-paper defect models under composite AC-DC voltage[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 3093-3100.
- [66] 李显东,刘毅,周古月,等.针—板电极下水中亚音速流注形态与发展过程[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1562-1571.
LI Xiandong, LIU Yi, ZHOU Guyue, et al. Morphology and development of underwater subsonic streamer under needle to plane electrodes[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1562-1571.
- [67] LI Jingsen, WEN Xiaoqiong, LIU Xinghui, et al. A study on the primary mode of pulsed positive streamer discharge in water[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(3): 1514-1519.
- [68] 李显东,何桦,肖天飞,等.水中超长脉冲放电的预击穿过程研究[J].中国电机工程学报,2021,41(17):6100-6107.
LI Xiandong, HE Hua, XIAO Tianfei, et al. Study on pre-breakdown process of underwater ultra-long discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 6100-6107.
- [69] 胡振宇,曹卓尔,李帅,等.水中高压脉动气泡与浮体流固耦合特性研究[J].力学学报,2021,53(4):944-961.
HU Zhenyu, CAO Zhuoer, LI Shuai, et al. Fluid-structure interaction between a high-pressure pulsating bubble and a floating structure[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2021, 53(4): 944-961.
- [70] CUI P, ZHANG A M, WANG S P. Small-charge underwater explosion bubble experiments under various boundary conditions [J]. Physics of Fluids, 2016(28): 117103
- [71] 李帅,张阿漫,韩蕊.水中高压脉动气泡水射流形成机理及载荷特性研究[J].力学学报,2019,51(6):1666-1681.
LI Shuai, ZHANG Aman, HAN Rui. The mechanism of jetting behaviors of an oscillating bubble[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(6): 1666-1681.
- [72] 刘波洋,蔡新景.气泡放电对变压器油流注放电的影响[J].电机与控制应用,2024,51(5):90-99.
LIU Boyang, CAI Xinjing. Effect of bubble discharge on transformer oil streamer discharge[J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(5): 90-99.
- [73] THIRUMURUGAN C, KUMBHAR G B, ORUGANTI R. Effects of impurities on surface discharges at synthetic ester/cellulose board [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 64-71.
- [74] ZHANG Ruobing, LI Xin, WANG Zhiyuan. Pattern of bubble evolution in liquids under repetitive pulsed power[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(2): 353-360.
- [75] ADDA P, LESAINTE O, BOUSSETTA N, et al. Vapor bubble and streamer initiation in water under long duration impulses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1967-1973.
- [76] 管显涛.水中等离子体放电气泡动力学实验研究[D].杭州:浙江大学,2020.
GUAN Xiantao. Experimental studies on the bubble dynamics generated by underwater discharge[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [77] GADZHIEV M K, TYUFTYAEV A S, IL'ICHEV M V. Single bubble of an electronegative gas in transformer oil in the presence of an electric field[J]. Technical Physics, 2017, 62(10): 1500-1504.
- [78] 李云鹏.气泡在油纸绝缘中的分子积聚微观机制与迁移动力学过程研究[D].北京:华北电力大学,2023.
LI Yunpeng. Study on molecular accumulation mechanism and migration dynamics of bubbles in oil paper insulation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.
- [79] 赵涛.气泡和纤维素颗粒对变压器油冲击击穿特性影响研究[D].北京:华北电力大学,2017.
ZHAO Tao. Research of the effect of bubbles and cellulose particles on impulse breakdown in transformer oil[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [80] ZHANG Rui, ZHANG Qiaogen, GUO Chong, et al. Bubbles in transformer oil: Dynamic behavior, internal discharge, and triggered liquid breakdown[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(1): 86-94.
- [81] 张君颖,吴楠,王野,等.基于放电统计参数动态变化率的油浸芳纶绝缘纸局部放电发展过程研究[J].绝缘材料,2022, 55(3):72-77.
ZHANG Junying, WU Nan, WANG Ye, et al. Partial discharge development process of oil-immersed aramid paper based on dynamic change rate of discharge statistical parameters[J]. Insulating Materials, 2022, 55(3): 72-77.
- [82] 魏意恒,杨丽君,徐治仁,等.“快速发展型”放电故障及其对油

- 纸绝缘的损伤特性[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 1020-1030.
- WEI Yiheng, YANG Lijun, XU Zhiren, et al. The rapid - development-type discharge failure and its damage characteristics to oil - paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(4): 1020-1030.
- [83] JANANI H, KORDI B, JOZANI M J. Classification of simultaneous multiple partial discharge sources based on probabilistic interpretation using a two - step logistic regression algorithm[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 54-65.
- [84] 孙长海, 苏晓敏, 李天伦, 等. 基于概率神经网络的油纸绝缘局部放电发展阶段识别[J]. 高压电器, 2022, 58(1): 138-147.
- SUN Changhai, SU Xiaomin, LI Tianlun, et al. Development stage recognition of partial discharge in oil - paper insulation based on probabilistic neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(1): 138-147.
- [85] 李玉杰, 路永玲, 王 真, 等. 基于多物理量的GIS绝缘件沿面放电阶段划分策略研究[J/OL]. 高压电器, 1-8[2025-09-18]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20250217.1124.002>.
- LI Yujie, LU Yongling, WANG Zhen, et al. Division strategy study for gas insulation surface discharge stage based on multi-physical information[J/OL]. High Voltage Apparatus, 1 - 8[2025 - 09 - 18]. <https://link.cnki.net/urlid/61.1127.TM.20250217.1124.002>.
- [86] 邢亚东, 董 明, 刘 阳, 等. 针板电极下酯类绝缘油放电特性及产气规律研究[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 405-415.
- XING Yadong, DONG Ming, LIU Yang, et al. Discharge characteristics and gas production laws of ester insulating oil under needle - plate electrode[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 405-415.
- [87] 范文杰, 张志斌, 夏昌杰, 等. 多手段测量下的油纸绝缘针板电极局部放电的演化规律分析[J]. 高电压技术, 2022, 48(3): 914-927.
- FAN Wenjie, ZHANG Zhibin, XIA Changjie, et al. Evolution law of partial discharge of oil - paper insulated needle - plate electrode based on multi-method measurement[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(3): 914-927.
- [88] LI Yanqing, HAO Jian, LIAO Ruijin, et al. Charge injection suppression and breakdown strength enhancement of cellulose pressboard via Al₂O₃/PTFE functional film depositing[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(3): 1011-1021.
- [89] 关 毅, 翁 凌, 刘春晖, 等. 静电纺丝聚酰亚胺绝缘纸孔隙结构对其浸渍与击穿特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(2): 769-777.
- GUAN Yi, WENG Ling, LIU Chunhui, et al. Effect of pore structure of electrospun polyimide insulating paper on its impregnation and breakdown characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 769-777.
- [90] 姜 楠, 李志阳, 孙新怡, 等. 纳米SiO₂掺杂协同等离子体氟化改性纤维素绝缘纸[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3260-3269.
- JIANG Nan, LI Zhiyang, SUN Xinyi, et al. Modification of cellulose insulating paper by nano - SiO₂ doping and plasma fluorination[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3260-3269.
- [91] KADIM E J, NOORDEN Z A, ADZIS Z, et al. Nanoparticle effects on the electrical and thermal performance of the transformer mineral oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5): 1932-1940.
- [92] FILHO A A P, LUNA F M T, CAVALCANTE C L. Oxidative stability of mineral naphthenic insulating oils: Optimization of commercial antioxidants and metal passivators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(1): 240-246.
- [93] LIAO Ruijin, LIANG Shuaiwei, YANG Lijun, et al. Comparison of ageing results for transformer oil - paper insulation subjected to thermal ageing in mineral oil and ageing in retardant oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 225-232.
- [94] 朱孟兆, 朱文兵, 王 建, 等. 一种油中溶解气体的扩散模拟试验方法及装置: ZL202411649559.7[P]. 2025.
- ZHU Mengzhao, ZHU Wenbing, WANG Jian, et al. A diffusion simulation test method and device for dissolved gases in oil: ZL202411649559.7[P]. 2025.
- [95] XIA Suyi, PAN Cheng, YAO Yuhuang, et al. Bridging characteristics of cellulosic particles in flowing transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1056-1065.
- [96] ZHAO Tao, TONG Yixin, ZHENG Yameng, et al. Experimental study on bubble effect of oil - paper insulation in natural ester[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(6): 2387-2393.
- [97] 王金铜, 温 刚, 姜东飞, 等. 含金属微粒流动变压器油的直流局部放电与击穿特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 66-70.
- WANG Jintong, WEN Gang, JIANG Dongfei, et al. DC partial discharge and breakdown characteristics of flowing transformer oil containing metal particles[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 66-70.

刘洪顺(1981—), 男, 博士, 副教授/博士生导师, 主要研究方向为电气设备诊断与大数据分析、电磁暂态分析与抑制、电弧放电理论及其应用、电工装备电磁兼容技术等(通信作者)(E-mail: lhs@sdu.edu.cn)。