第 50 卷 第 2 期：816-824 高电压技术 Vol.50, No.2: 816-824
2024 年 2 月 29 日 High Voltage Engineering February 29, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221787

交流电场下变压器油中贴壁气泡形变特性

张哲滔，张　锐，郭　冲，张乔根
（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：气泡是油纸绝缘系统的典型缺陷，会显著地降低变压器油的绝缘性能。为了明晰气泡对油纸绝缘系统的危害，搭建了油中贴壁气泡动力学观测平台，研究吸附于电极表面的气泡在交流电场中的形变特性及影响规律。结果发现：油中贴壁气泡沿电场方向拉伸并以 100 Hz 的频率进行脉动变形；随着电场强度、气泡半径和温度的增大，气泡的变形程度也逐渐增大。基于相场方法搭建了气液两相流仿真模型，仿真与实验结果相互验证，揭示了气泡变形的本质为电场力和表面张力作用的平衡。气泡会影响油隙电场分布，其内部场强随气泡沿电场方向的拉伸而降低。该文研究可为深入评估气泡对液体绝缘的危害和变压器的绝缘设计提供参考。
关键词：变压器油；交流电场；贴壁气泡；形变特性；相场方法

Deformation Characteristics of Bubbles Attached to Solid Wall in Transformer Oil Under AC Electric Field

ZHANG Zhetao, ZHANG Rui, GUO Chong, ZHANG Qiaogen
(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Air bubbles are a typical defect of oil-paper insulation system, which can significantly reduce the insulation performance of transformer oil. In order to clarify the hazard of bubbles to the oil-paper insulation system, this paper builds a bubble dynamics observation platform to study the deformation characteristics and the influence law of bubbles adsorbed on the electrode surface under AC electric field. It is found that the adherent bubble in transformer oil stretches in the direction of the electric field and pulsates at a frequency of 100 Hz. The degree of bubble deformation increases gradually with the increase of electric field strength, bubble radius, and temperature. A simulation model of gas-liquid two-phase flow is built based on the phase field method, and the simulation and experimental results are verified with each other, revealing that the essence of bubble deformation is the balance of electric field force and surface tension performance. The bubble affects the electric field distribution of the oil gap, and its internal field strength decreases with the stretching of the bubble along the electric field direction. The research in this paper can provide a reference for in-depth evaluation of the hazard of bubbles to liquid insulation and design of transformer insulation.
Key words: oil-paper insulation; AC electric field; bubble attached to a solid wall; deformation characteristics; phase field method

0　引言

电力变压器是电力系统中最核心的设备，其绝缘状态对电网的安全稳定运行具有重要意义[1-2]。以矿物油(变压器油)和绝缘纸组成的油纸复合绝缘结构是大型电力变压器中普遍采用的绝缘形式。气泡是油纸绝缘系统的典型缺陷，其来源可能是制造、安装过程中祛气不彻底、浸油不充分，以及运行时油中水分、溶解气体和绝缘材料的分解[3-7]。

由于气体的介电常数小于液体电介质，电场中气泡内部承担更高的场强，而气体的耐电强度较低，因此气泡内部极易发生局部放电[8]。Gadzhiev 发现单个气泡会降低液体间隙的击穿电压：SF_6 气泡可使纯净变压器油的击穿电压降低 25%，而空气气泡则可使其降低 35%[9]。重庆大学唐炬等人发现静止的气泡更容易导致间隙放电，对绝缘系统构成更大的威胁[10]。因此，气泡一旦运动并停留于高场强区，由于其较低的耐电强度和较高的内部场强，在电场作用下极易发生放电，引起变压器油劣化，甚至引发油隙击穿，造成绝缘损伤，严重危害变压器的安全[11-12]。

由于介质的不连续性，液体中的气泡具有迁移、变形、积聚、破裂等多种行为特征[13]，这些行为特征会进一步改变绝缘间隙中的电荷积聚与电场

基金资助项目：国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-347-XG)。Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5108-202218280A-2-347-XG).

分布，从而影响气泡放电特性。因此，为预防气泡造成的绝缘损伤和破坏，有必要深入探究气泡在电场中的动力学行为，建立气泡行为特征与放电特性之间的依赖关系。电场作用下气泡在电介质中的行为受到电流体动力学(electro-hydro dynamics, EHD)效应的影响，针对直流电场中气泡行为国内外已有诸多研究。Dong 等人研究了极不均匀电场中的气泡动力学行为，发现壁面上的气泡会畸变周围场强，气泡变形为扁平的椭球体[14]。赵涛研究了针板电极下逐渐上升的气泡，发现气泡在电场力作用下被推向弱场强区，且电压越高运动轨迹的改变越明显[15]。Cho 和 Kweon 等人研究了均匀电场中吸附于下壁面的气泡[16]，发现随着电场强度的增大，吸附气泡沿场强方向的拉伸程度逐渐增大。彭耀等人研究了附着在孔板上的气泡在直流电场下的变形情况，发现随着电场增强，气泡逐渐伸长，脱附体积减小；气泡半径、形变率和离开体积随孔径的增大而增大[17]。在交流电场中，气泡具有更加复杂的动力学行为。Korobeynikov 研究了均匀电场中交流电压下悬浮上升气泡的变形过程，发现气泡以 100 Hz 的频率进行周期性的变形[18]。张永泽发现油流中气泡的变形与油流的速度有关，流动速度越快，气泡拉伸越明显[10]。气泡在变压器油中受到浮力作用上升，可能吸附至电极表面，贴壁静止气泡相对运动气泡对变压器油绝缘性能可能具有更大的威胁。以上研究多关注直流电场下气泡的生长、变形和脱附过程，或是悬浮上升气泡的运动规律，而对于工频交流电场中吸附于电极表面气泡的形变特性和影响规律研究较少，其动力学行为机制尚不明确。

为了明晰气泡对油纸绝缘系统的危害，本文搭建了油中贴壁气泡动力学观测平台，该平台基于阴影成像系统，能够较为清晰准确地观测气泡的动力学行为。搭建了气液两相流仿真模型，通过仿真与实验相互印证的方式，研究了变压器油中贴壁气泡的形变特性和基本规律，并进一步探究了气泡变形的行为机制。该研究有助于理解气泡行为特征与液体放电特性之间的关系，为阐明气泡放电机理，评估气泡对液体绝缘的危害及建立有效检测手段提供参考。

1　油中贴壁气泡动力学观测平台

为观测变压器油中贴壁气泡在交流电场下的行为特征，并探究电场强度、温度、间隙距离等参数对气泡形变的影响，在尺寸为 3 m×3 m×3 m 的电磁屏蔽室内搭建了油中贴壁气泡动力学观测实验平台，如图 1 所示。

平台包括高压实验腔体、交流高压回路、阴影成像系统，以及加热与温控系统 4 个部分。高压实验腔体为一个 200 mm×150 mm×180 mm 的石英玻璃容器，内部注满 K150X 昆仑牌变压器油。不锈钢平板电极安装在腔体中央，电极直径 30 mm，用于模拟均匀电场。间隙距离可以通过旋转螺栓来调节，并通过螺母固定，调节范围 0~12 mm。可通过微量进样器在电极间注入气泡，气泡的等效半径范围为 0.4~2 mm。

交流高压回路中，调压器输出的电压(0~250 V/50 Hz)经过无局放试验变压器(100 kV/25 kVA)升压，经过 1 MΩ 的保护电阻连接至实验腔体高压端。高压引线各处需要做好防电晕措施以防止局部放电干扰。高压引线端并联有 10 000:1 的电容分压器用于电压测量，电压信号经同轴电缆发送至示波器(Tektronix DPO3014)。

加热与温控系统包括调压器、温控继电器(CHB702)、加热片和温度传感器(Pt100)，该装置基于 PID 原理设计温度反馈控制回路，可实现本文所研究的 25~100 ℃范围内温度的准确控制。

本文基于阴影成像技术进行油中贴壁气泡行为的观测。其基本原理为：平行光穿过介质时，由于介质各部分密度差异，介质折射率发生改变，使得光线之间存在相位偏移，在成像平面上形成不同的光强分布[19]。

实验搭建的阴影成像系统包括氙灯、透镜组和高速相机，图 2 展示了其原理图。氙灯光源发出的光束经过变焦透镜汇聚至焦点针孔处，经针孔滤波为点光源；点光源的出射光线经过 1 号透镜变为平

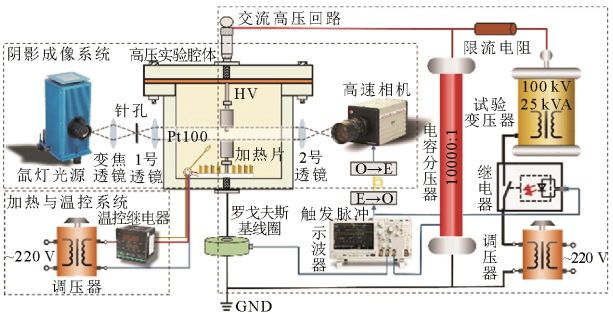


图 1　油中贴壁气泡动力学观测平台

Fig.1　Platform for observation of dynamics of bubbles attached to a wall in oil

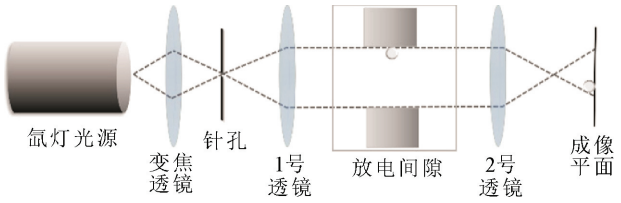


图 2 阴影成像系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of shadow imaging system

行光穿过间隙，在腔体内由于介质折射率的变化而产生偏折，经过 2 号透镜发散，在成像平面上形成一个倒立的实像。调整 2 号透镜的位置可改变成像的大小。阴影法拍摄所使用的高速相机为 Motion pro X3CP-G-4，帧率设置为 2 000 帧/s。

2 油中贴壁气泡形变特性观测和影响规律研究

为分析交流电场对油中贴壁气泡动力学行为的影响，本节主要借助实验平台对交流电场下的气泡形变特性进行观测，并研究电场强度、温度和气泡大小对气泡形变的影响规律。

2.1 气泡形变特性

实验前，维持变压器油温度为 25 ℃，注入 1.1 mm 半径大小的气泡，气泡受浮力作用贴附于上电极表面，随后施加有效值为 3 kV/mm 的交流电场。一个工频电压周期内气泡行为特征如图 3 所示。已有研究表明，悬浮气泡在电场作用下近似变形为一个椭球体，气泡沿电场方向拉伸[20]。对于本实验中的贴壁气泡，气泡有着类似的行为特征：近似呈现为一个被平面截断的长椭球。随着瞬时电压的变化，气泡呈现周期性的“脉动变形”。图 3 将外施电压相位角 0° 的时刻记为零时刻，在 1 ms、11 ms 时，气泡的形变达到最小值，接近于无外加电场时的状态；随后，气泡沿电场方向逐渐拉伸；在 6 ms、16 ms 时，气泡达到最大变形程度，气泡长度达最大值。

对于贴壁气泡，定义 d 为气泡的长度，即气泡头部到上电极表面的距离；d_0 为无电场作用时的气泡长度。图 4 展示了电场作用下气泡伸长率 d/d_0 随时间变化的曲线，可以看出，气泡伸长率在交流电场作用下存在脉动特征，其脉动频率为电场频率的两倍，即 100 Hz。但是气泡伸长率的变化相比交流电场存在大约 1~2 ms 的滞后，这可能是由液体的动力黏度造成的。

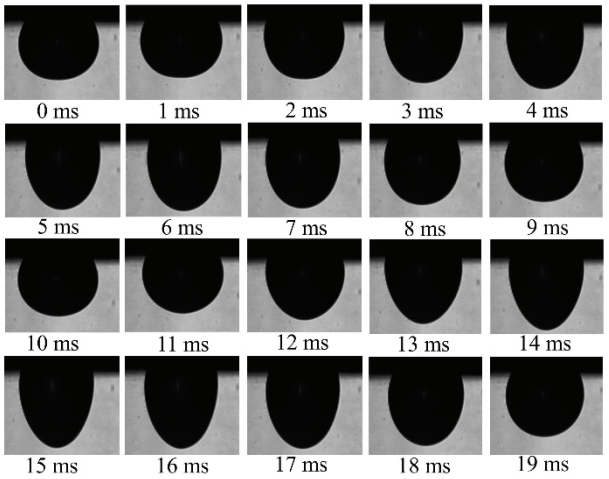


图 3 交流电场下气泡变形过程

Fig.3 Bubble deformation process under AC electric field

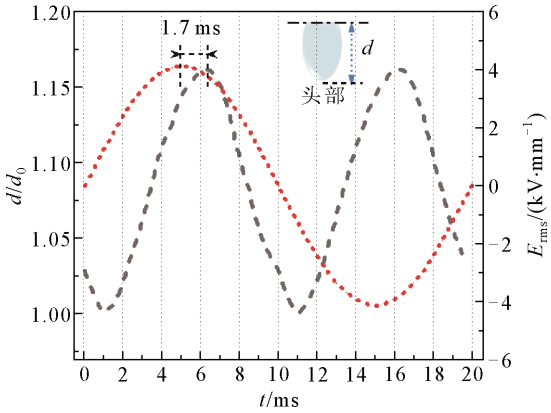


图 4 交流电场中气泡的伸长率

Fig.4 Bubble elongation ratio under AC electric field

2.2 气泡形变影响规律

气泡在流场和电场作用下受力而产生动力学行为，因此，改变电场和流场的条件必然对气泡形变特性产生影响[21]。下面利用高速阴影成像方法，对电场强度、气泡半径和温度如何影响气泡的形变展开研究。

2.2.1 电场强度的影响

电场强度会影响气泡受到电场力的大小，而电场力是引起气泡变形的直接原因。保持温度在 25 ℃，向间隙注入等效半径大小为 1.1 mm 的气泡后，分别施加 0~6 kV/mm 的场强。图 5 展示了不同场强的交流电场作用下气泡的最大变形。通过高速摄像机观察发现，不同大小的电场强度作用下气泡变形规律基本一致。随着电场强度的增大，气泡沿电场方向的拉伸程度也逐渐增大。

2.2.2 气泡半径的影响

充油设备内部气泡尺寸主要为毫米级和微米

级，其中毫米级气泡对绝缘危害最大。不同半径大小的气泡可能由于表面张力作用的差异而产生不同程度的变形，因此有必要研究毫米级别气泡半径的影响规律。通过注射器在间隙中先后注入 5 个不同半径大小的气泡，在 25 ℃、3 kV/mm 交流电场的条件下，观察并拍摄气泡的变形过程，如图 6 所示。其中 6(a)和 6(b)分别为气泡产生最小变形和最大变形的时刻。可以看到，不同半径大小的气泡都会在电场作用下拉伸，并且随着气泡半径增大，气泡拉伸程度逐渐增大。

2.2.3　温度的影响

以上实验都在室温下进行，而在实际工况下，变压器内部具有更加复杂的温度场。温度是影响流场的重要因素，因此很可能进一步气泡的形变特性。在控制气泡大小基本一致的情况下，施加 3 kV/mm 的电场，对 25、50、75、100 ℃油温的气泡变形过程进行拍摄，得到气泡的最大变形见图 7。可以看到，随着温度的升高，气泡的拉伸程度逐渐增大。

3　油中贴壁气泡形变特性和机制仿真研究

为验证实验结果的有效性，并深入分析气泡动力学行为机制，本节利用有限元仿真软件，建立了气液两相流仿真模型，并根据仿真结果展开进一步研究。

3.1　气液两相流仿真模型

变压器油中贴壁气泡动力学系统涉及气体和液体两种流体，为气液两相流问题，需要考虑两相流的界面追踪，同时系统内还存在电场和流场的相互作用，即电流体动力学效应。多相电流体动力学数值模拟的关键挑战是对相间动态界面的处理，相场法[22]可以精确处理表面张力和拓扑变化，且质量守恒特性较好，因此本文基于相场方法，在 Comsol Multiphysics 软件中进行数值仿真。

相场模型引入无量纲相场变量ϕ来得到流体相和界面层的信息，并引入相场助变量ψ，相场的控制方程可表示为两个 2 阶偏微分方程[23]：

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}+\nu\cdot\nabla\phi=\nabla\cdot\frac{\kappa\lambda}{\varepsilon^2}\nabla\psi \tag{1}$$

$$\psi=-\nabla\cdot\varepsilon^2\nabla\phi+(\phi^2-1) \tag{2}$$

式中：κ为迁移率；ν是对流运动的速度场；λ是混合能密度的大小；ε是界面层厚度的毛细宽度。这两个参数与表面张力系数γ有关：

$$\gamma=\frac{2\sqrt{2}}{3}\frac{\lambda}{\varepsilon} \tag{3}$$

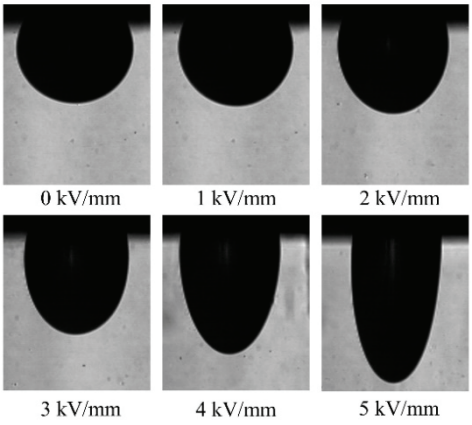


图 5　不同电场强度下气泡的最大变形

Fig.5　Maximum deformation of bubbles under different electric field strengths

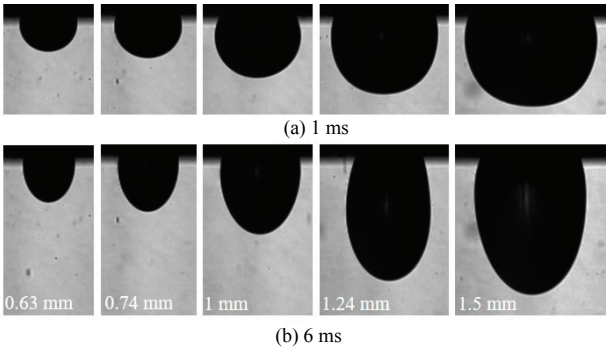


图 6　不同半径大小气泡的最大变形

Fig.6　Maximum deformation of bubbles with different radius sizes

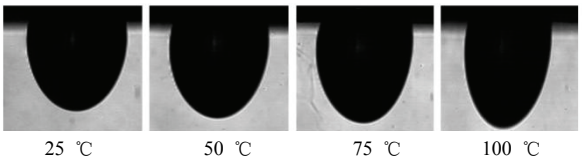


图 7　不同温度下气泡的最大变形

Fig.7　Maximum deformation of bubbles at different temperatures

假设两相流体互不相溶，且均为不可压缩流体，流动模式为层流且等温流动，由流体力学动量守恒和质量守恒定律可推导得以下流体运动控制方程，即 Navier-Stokes(NS)方程[13]：

$$\rho\left(\frac{\partial \nu}{\partial t}+(\nu\cdot\nabla)\nu\right)=\nabla\cdot\left(-p\boldsymbol{I}+\tau\right)+F_{\mathrm{st}}+F_{\mathrm{e}}+\rho g \tag{4}$$

$$\nabla\cdot\nu=0 \tag{5}$$

式中：ρ为密度；ν为流体速度；p 为压强；$\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵；τ为粘性切应力；F_{st} 为表面张力；F_{e} 为电场

力；g 为重力加速度。根据牛顿内摩擦定律，τ具有表达式：

$$\tau = \mu(\nabla u + (\nabla u)^{\mathrm{T}}) \tag{6}$$

电场力 F_e 作为耦合力被加入到 NS 方程中，表达式见(7)。根据 Maxwell 应力张量，可得电场体积力 F_e 为：

$$F_e = \nabla \cdot T = qE - \frac{1}{2}E^2\nabla\varepsilon + \frac{1}{2}\nabla E^2 \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho}\rho \tag{7}$$

式中：T 为 Maxwell 应力张量；右边 q、ε和 E 分别为自由电荷密度、介电常数和电场强度。等式右边 3 项分别表示自由电荷库仑力、介电泳力和电致收缩力。考虑到流体不可压缩的假设和本研究所施加的均匀电场以及所使用的绝缘介质，模型中气泡界面所受电场力主要为介电常数的不连续导致的介电泳力。

相场模型中将表面张力等效为场变量ϕ的梯度和化学势ψ的乘积，表达式为[23]：

$$F_{st} = \frac{\lambda}{\varepsilon^2}\psi\nabla\phi \tag{8}$$

考虑电场对流体运动的作用，需要建立电场的控制方程。设置仿真物理场为静电场，上极板电势为φ，则电场控制方程为：

$$E = -\nabla\varphi \tag{9}$$

$$\nabla \cdot (\varepsilon_0\varepsilon_r E) = \rho_v \tag{10}$$

式中：ε_0为真空介电常数；ε_r 为相对介电常数；ρ_v为体电荷密度。结合上式，得到了流场-相场-电场多物理场耦合仿真模型。

为减少仿真时间和空间占用，采用二维轴对称结构进行建模，仿真模型如图 8 所示。上下边界为平板电极，间隙距离 6 mm。模型以 r 轴为对称轴，计算结果绕 $r = 0$ cm 旋转一轴即得到三维仿真结果。气泡吸附于上电极表面，接触角为 30°。表 1 为 25 ℃时的材料物性参数。

3.2 仿真结果分析

设置仿真参数与实验条件一致，获得了气泡在一个工频周期下的变形过程，如图 9 所示。可以看到，$(10N + 2)$ ms 时刻($N = 0, 1, 2, \cdots$)，气泡变形程度最小，接近于无电场作用时的气泡形状；$(10N + 7)$ ms 时刻，气泡变形达到最大。气泡变形为沿电场方向的拉伸，且呈现脉动变形的特征，脉动频率为 100 Hz，且气泡变形周期相比工频电场存在约 2 ms 的滞后。

图 10 展示了伸长率曲线的仿真结果与实验结果，其规律基本一致。仿真得到的气泡变形周期比实验滞后约 0.6 ms，并且仿真得到的伸长率略小于实验结果，这可能与实验观测误差和仿真参数设置有关。

根据仿真模型验证电场强度、气泡半径和温度对气泡变形的影响规律。图 11 为分别施加 1~5 kV/mm 的电场时，气泡产生的最大变形。显然随着电场强度增大，气泡变形程度也明显增大，与实验结果一致。

改变气泡等效半径大小分别：0.4、0.7、1、1.3 和 1.6 mm，仿真结果如图 12 所示。随着气泡半径

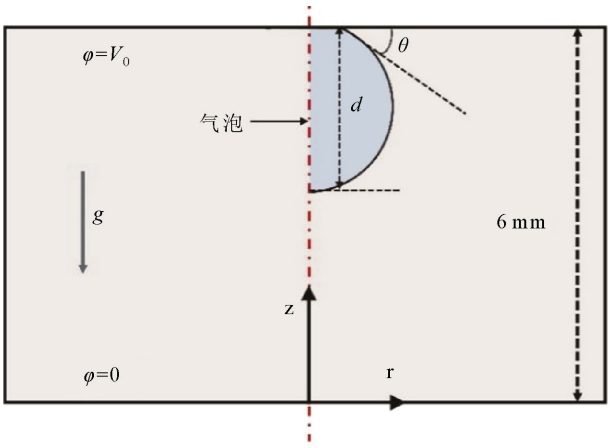


图 8 气泡仿真模型示意图

Fig.8 Schematic diagram of bubble simulation model

表 1 25 ℃时材料物性参数

Table 1 Material physical parameters at 25 ℃

材料	电导率/ (S·m^{-1})	相对介电常数	密度/ (kg·m^{-3})	动力黏度/ (Pa·s)
变压器油	1×10^{-12}	2.2	885	0.015
空气	1×10^{-16}	1.0	1.29	1.8×10^{-5}

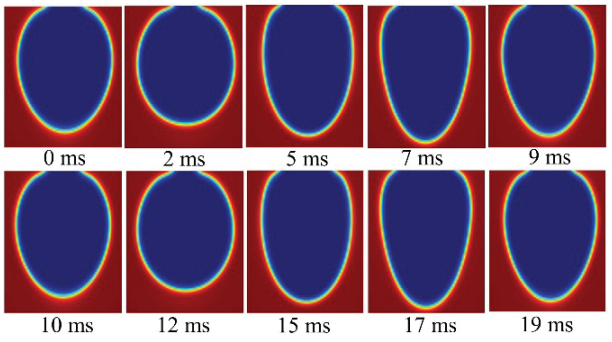


图 9 气泡变形过程仿真结果

Fig.9 Simulation results of bubble deformation process

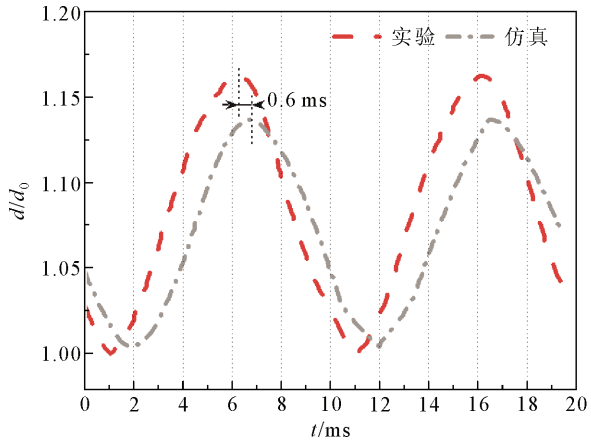


图 10　气泡伸长率的仿真结果

Fig.10　Simulation results of bubble elongation ratio

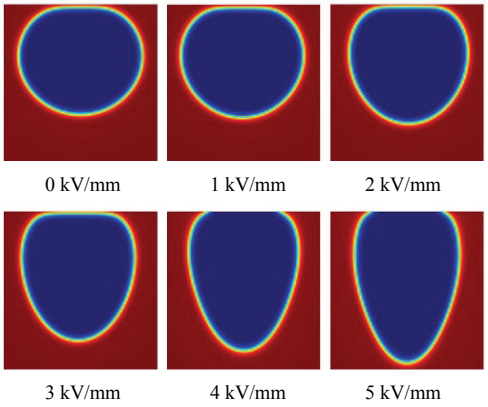


图 11　不同场强大小下气泡最大变形仿真结果

Fig.11　Simulation results of maximum bubble deformation under different field strengths

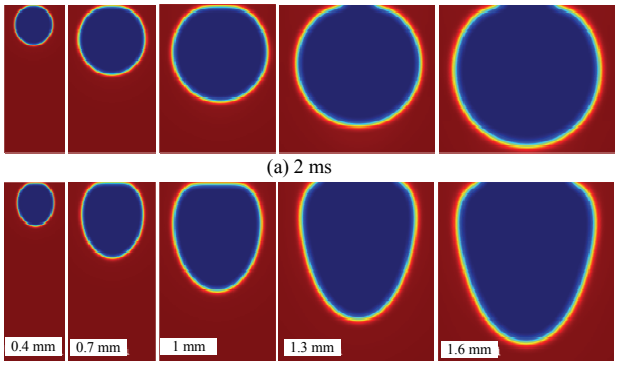


图 12　不同半径气泡最大变形仿真结果

Fig.12　Simulation results of maximum bubble deformation with different radii

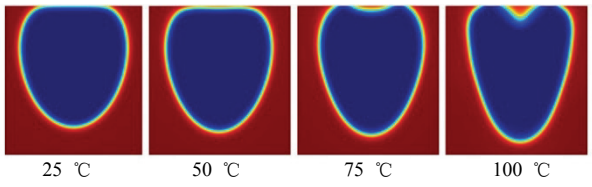


图 13　不同温度下气泡最大变形仿真结果

Fig.13　Simulation results of maximum bubble deformation at different temperatures

增大，气泡变形程度逐渐增大。此外观察气泡形态发现，半径较大的气泡变形后头部更尖，形状更接近于“锥体”；而半径较小的气泡则头部较圆。

分别改变温度为 25、50、75、100 ℃，仿真结果如图 13 所示。观察发现，随着温度升高，气泡伸长的程度增大，与实验结果一致。然而温度较高时，气泡贴壁侧向下凹陷，仿真结果与实验结果存在一定差异。

3.3　气泡形变机制分析

实验中气泡的形状主要由电场力和表面张力的共同作用来决定，在球和伸长的椭球体之间的交替变形，下面分别分析两个力对气泡变形的作用。

由式(7)的电场力体积力算式可知，气液界面的电场力由于介电常数分布不均匀引起，其大小与电场强度的平方成正比。交流电场中，E^2 随时间变化，其频率为电场频率的两倍，因此气泡在电场力作用下以 100 Hz 的频率发生周期性地变形。图 14 展示了交流电压相位为 90°时，电场力水平分量 F_{er} 和竖直分量 F_{ez}，以及电场体积力合力 F_e 的模值。由图 14(a)可知，气液界面所受的电场力始终指向挤压气泡的方向，气泡同时受到水平和竖直方向的挤压。由于气泡受力具有对称性，因此介电泳力的合力为零，气泡不会产生运动。观察图 14(b)发现，水平方向电场力合力要大于竖直方向，因此气泡被水平方向电场力挤压为沿竖直方向伸长的椭球形体，变形程度随电场强度增大而增大。

表面张力的以压强的形式作用于气液界面，其作用在于使气泡维持球形，抑制气泡的变形。当电场力的作用大于表面张力的作用时，气泡被拉伸为椭球体。随着变形程度增大，曲率增大，气泡表面张力也逐渐增大，直到气泡内外压强平衡，伸长率达到最大值。场强减小时，电场力的作用小于表面张力，此时表面张力占主导，使气泡趋向于球形，变形减小。当气泡半径增大时，表面张力的作用减小，因此气泡的变形程度增大。

温度通过影响物性条件间接影响气泡的变形。图 15 为变压器油动力黏度、表面张力系数和密度随温度的变化曲线。随着温度升高，表面张力系数逐渐减小，气泡表面所受表面张力减小。由于表面张力的作用是抑制气泡的变形，因此气泡变形会加剧。

另一方面，随着温度升高，动力黏度逐渐减小。黏度为液体流动的内摩擦力，会限制气泡变形的速度，黏度降低时，气泡变形受到的阻力减小，因此产生更大的振荡。

综上，电场、温度、气泡半径都是通过改变电场力或表面张力大小来影响气泡行为。稳态条件下气泡形变的本质为电场力和表面张力作用的平衡。

3.4 气泡对电场的畸变效应

交流电场中，电场分布主要由材料的相对介电常数决定，平板电场中场强大小与相对介电常数成反比。空气相对介电常数为 1，而变压器矿物油的相对介电常数约为 2.2，因此含气泡变压器油隙中，场强主要集中于气泡内。同时，由前文可知，气泡在受电场力作用拉伸，产生脉动变形，其变形又会反过来畸变电场。因此，下面将在静电场中对吸附气泡内部电场进行讨论。

定义电场增强系数 f_E 为气泡内部场强 E_g 与间隙平均场强 E_0 的比值，即：

$$f_E = \frac{E_g}{E_0} \tag{11}$$

式中：E_0 为外施场强。图 16 展示了不同形状气泡内部及周围绝缘液体的电场分布。

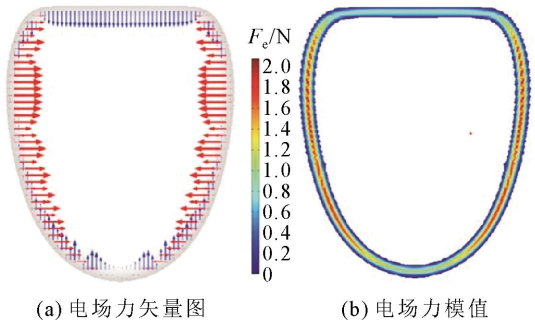
可以看到，气泡内部场强分布除上电极表面附近电场较小外，其余部分基本均匀。气泡内部场强大于间隙平均场强。对比不同形状的气泡的电场分布可以发现，当气泡沿垂直于电场的方向拉伸时，内部场强明显增大。当气泡沿电场方向伸长时，内部的场强逐渐减小。为便于研究不同形状气泡对电场的畸变程度，式(12)定义了气泡的形变率来描述气泡的形状：

$$D_r = \frac{b}{a} \tag{12}$$

图 17 和 18 分别为不同形变率和半径气泡的 f_E 曲线。随着 D_r 的增大，f_E 逐渐减小，而气泡半径基本不影响 f_E。

结合相场模型，根据仿真结果计算气泡变形过程中随时间变化的 E_g 和 f_E，得到图 19 的变化曲线。2 ms 时伸长率达到最小值，f_E 为最大值；在 7 ms 时为伸长率最大值，f_E 为最小值。

尽管气泡沿电场方向的拉伸会减弱内部场强，但是气泡本身耐电强度低，伸长的气泡很有可能短接油隙而引起局部放电，或诱导油中流注的起始。因此应当避免变压器中气泡滞留于高场强区域而引起局部放电，以此为关注点进行变压器设计，改进油循环方式，优化绝缘结构。



(a) 电场力矢量图 (b) 电场力模值

图 14 气液界面电场力

Fig.14 Electric field force at the gas-liquid interface

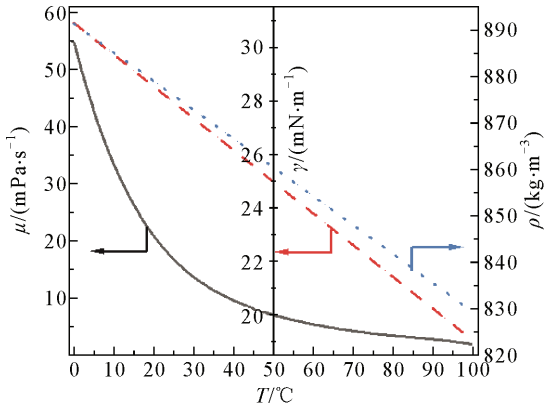


图 15 变压器油动力黏度、密度和油气表面张力随温度变化曲线

Fig.15 Variation of transformer oil dynamic viscosity, density and oil-gas surface tension with temperature

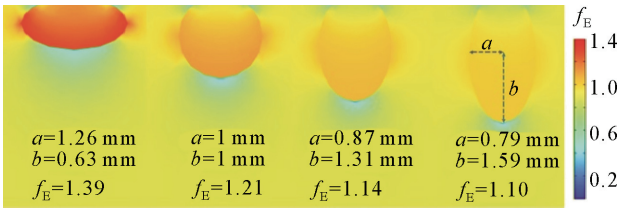


图 16 气泡内部及周围介质的电场分布

Fig.16 Electric field distribution inside the bubble and the surrounding medium

4 结论

1）油中贴壁气泡在电场作用下沿电场方向拉伸，在交流电场中以 100 Hz 的频率进行周期性的脉动变形。

2）油中贴壁气泡在电场中的形变受电场强度、

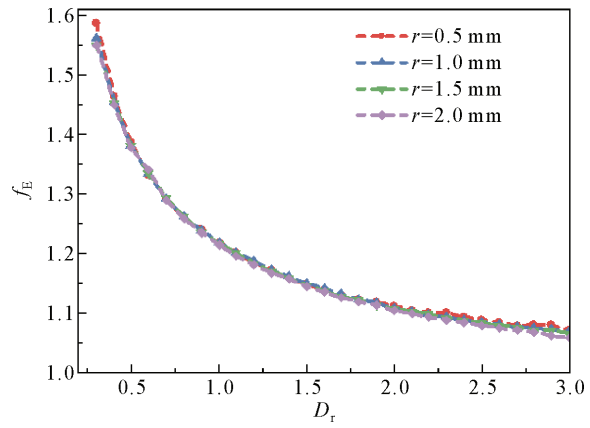


图 17　不同形变率气泡的电场增强系数

Fig.17　Electric field enhancement coefficients of bubbles with different deformation ratios

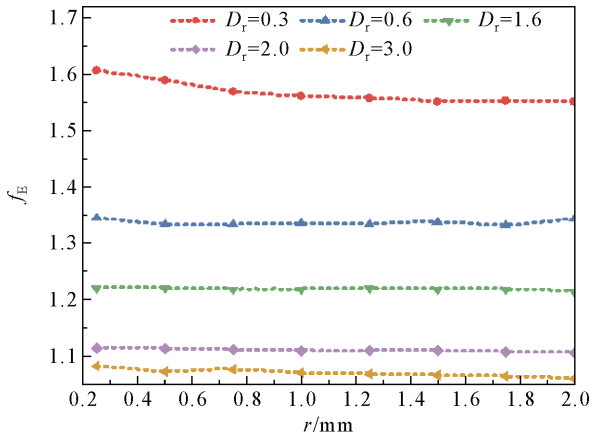


图 18　不同半径气泡的电场增强系数

Fig.18　Electric field enhancement factor for bubbles of different radii

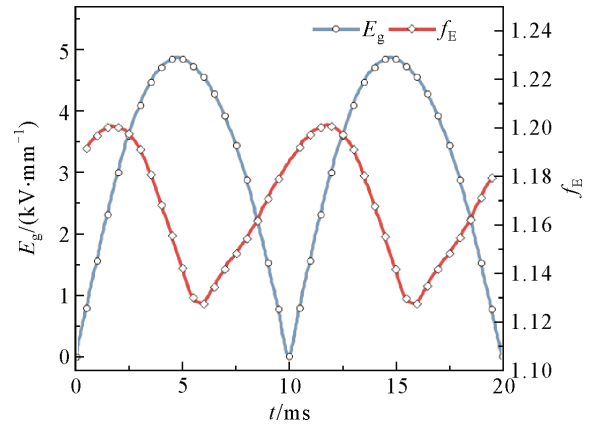


图 19　气泡内部场强和电场增强系数变化曲线

Fig.19　Variation curves of field strength and electric field enhancement coefficient inside the bubble

气泡半径和温度的影响。随着电场强度增大，气泡所受的电场力增大，气泡形变程度增大；随着气泡半径增大，表面张力作用减小，气泡形变程度增大；随着变压器油温度升高，表面张力系数和动力黏度逐渐减小，气泡的形变程度增大。

3）气泡形变的本质是电场力和表面张力作用的平衡。气液表面电场力在垂直电场的方向上挤压气泡促使沿电场方向伸长，而表面张力则限制气泡的变形。

4）气泡会畸变电场，其内部场强大于间隙平均场强。气泡为变压器绝缘结构的典型缺陷，变压器绝缘设计中应当充分考虑气泡动力学行为特性，避免气泡进入强电场区。

5）考虑到实际变压器运行所处的复杂工况，其它电极结构、液体介质、气泡成分等诸多因素对气泡动力学行为的影响有待进一步研究。

参考文献　References

[1] 唐　炬. 防御变电设备内绝缘故障引发电网停电事故的基础研究[J]. 高电压技术，2012，38(6)：1281-1291.
TANG Ju. Basic research on preventing power supply blackout caused by the inner insulation fault of transformation equipments[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1281-1291.

[2] 赵莉华，王释颖. 油浸式变压器高温绝缘材料的研究现状[J]. 绝缘材料，2016，49(4)：1-6.
ZHAO Lihua, WANG Shiying. Research status of high-temperature insulating materials used in oil-immersed transformers[J]. Insulating Materials, 2016, 49(4): 1-6.

[3] 高　萌，张乔根，丁玉琴，等. 油浸纸绝缘热致气泡形成特性[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3634-3640.
GAO Meng, ZHANG Qiaogen, DING Yuqin, et al. Characteristics of thermal-induced bubble formation in oil-impregnated paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3634-3640.

[4] OOMMEN T V, LINDGREN S R. Bubble evolution from transformer overload[C]//Proceedings of 2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Atlanta: USA: IEEE, 2001: 137-142.

[5] PERKASA C Y, LELEKAKIS N, CZASZEJKO T, et al. A comparison of the formation of bubbles and water droplets in vegetable and mineral oil impregnated transformer paper[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(5): 2111-2118.

[6] KOROBEYNIKOV S M, BYCHKOV A L, RYZHKINA A Y, et al. Microbubbling in transformer oil due to vibration[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 675-677.

[7] 吴治诚，周俊杰，张乔根，等. 油纸绝缘水分迁移特性研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(2)：781-792.
WU Zhicheng, ZHOU Junjie, ZHANG Qiaogen, et al. Review on moisture migration characteristics of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(2): 781-792.

[8] QIAN J, JOSHI R P, KOLB J, et al. Microbubble-based model analysis of liquid breakdown initiation by a submicrosecond pulse[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(11): 113304.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] DANIKAS M. Bubbles in insulating liquids: a short review[J]. Engineering, Technology & Applied Science Research, 2019, 9(6): 4870-4875.

[13] LANDAU L D. Electrodynamics of continuous media[M]. 2nd ed. Oxford, UK: Pergamon Press, 1984: 34-85.

[14] 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.

[15] ZHAO T, LIU Y P, LÜ F C, et al. Study on dynamics of the bubble in transformer oil under non-uniform electric field[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2016, 10(5): 498-504.

[16] 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.

[17] 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.

[18] KOROBEYNIKOV 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.

[19] PANIGRAHI P K, MURALIDHAR K. Laser schlieren and shadowgraph[M]. PANIGRAHI P K, MURALIDHAR K. New York, USA: Springer, 2012: 23-46.

[20] KOROBEYNIKOV S M, OVSYANNIKOV A G, RIDEL A V, et al. Dynamics of bubbles in electric field[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 899(8): 082003.

[21] 蔡 丹. 气泡影响液体绝缘性能的模拟研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2011.
CAI Dan. Simulation study on the effects of bubble on liquid dielectric insulation[D]. Changsha, China: National University of Defense Technology, 2011.

[22] ALPAK F O, RIVIERE B, FRANK F. A phase-field method for the direct simulation of two-phase flows in pore-scale media using a non-equilibrium wetting boundary condition[J]. Computational Geosciences, 2016, 20(5): 881-908.

[23] YUE P T, FENG J J, LIU C, et al. A diffuse-interface method for simulating two-phase flows of complex fluids[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2004, 515: 293-317.



张哲滔
2000—，男，硕士生
主要从事油浸式电力设备状态评估方面的研究工作
Email: zzt362034272@stu.xjtu.edu.cn

ZHANG Zhetao



张乔根(通信作者)
1965—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压试验技术、电力设备状态诊断、脉冲放电与等离子体等方面的研究工作
E-mail: hvzhang@xjtu.edu.cn

ZHANG Qiaogen
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-10-28 修回日期 2023-06-05 编辑 曹昭君