

强制对流对高压套管油介质中乙炔分子传质过程的影响

陈图南^{1,2}, 李康¹, 邱宗甲¹, 韩冬^{1,2}, 张国强^{1,2}

(1. 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为优化对高压套管进行油中溶解气体分析时的取样质量,提升分析结果的代表性和准确性,提出一种对高压套管中的绝缘油施加强制对流的方法,通过向绝缘油施加速度场促进油中溶解气体的传质过程,进而改善油中溶解气体分析的取样质量。从仿真计算和实验验证2个方面对绝缘油中溶解乙炔气体传质过程进行研究。首先分析无强制对流情况下气体的传质过程,并测量气体从故障源到取样口的时间;然后分析在强制对流情况下气体的传质过程并测量了传质时间,在此基础上讨论气体传质时间缩短的原因;最后探究不同强制对流动作周期对传质过程影响的程度。研究成果能够为高压套管在线监测装置的研发提供参考。

关键词:高压套管;油中溶解气体分析;乙炔;传质;强制对流

DOI:10.15938/j.emc.2024.04.004

中图分类号:TM930.1

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2024)04-0031-10

Influence of compulsory convection on acetylene gas mass transfer process in insulation oil

CHEN Tunan^{1,2}, LI Kang¹, QIU Zongjia¹, HAN Dong^{1,2}, ZHANG Guoqiang^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract:In order to optimize the sampling procedure of dissolved gas analysis (DGA), and to improve the universality and accuracy of DGA results, a compulsory convection method was proposed to accelerate the mass transfer process of decomposition gas dissolved in insulating oil. Firstly, the mass transfer process without compulsory convection was studied. And the time gas travels from failure source to sampling port was measured. Secondly, the mass transfer process with compulsory convection was studied and corresponding travel time was measured. Plus, the difference between those two travel times was discussed. Thirdly, the difference was studied among the mass transfer processes of different compulsory convection motion periods. The research findings may serve as a reference for the development of online monitoring equipment for bushing.

Keywords:high voltage bushing; dissolved gas analysis; acetylene; mass transfer; compulsory convection

收稿日期:2023-04-27

基金项目:中国科学院青年创新促进会项目(2021135);中国科学院电工研究所科研基金(E155440201)

作者简介:陈图南(1993—),男,博士研究生,研究方向为电力设备故障诊断与应用光学交叉;

李康(1985—),男,博士,副研究员,研究方向为电力设备故障诊断与应用光学交叉;

邱宗甲(1983—),男,博士,助理工程师,研究方向为电力设备故障诊断与应用光学交叉;

韩冬(1975—),女,博士,副研究员,研究方向为电力设备故障诊断与应用光学交叉;

张国强(1964—),男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为电力设备故障诊断与应用光学交叉。

通信作者:张国强

0 引言

高压套管是电力变压器的重要组成部分,在高压套管的实际加工、安装过程中,设计不当、加工精度不高、接触不良均会导致高压套管产生缺陷。此外部件的老化、环境的影响也会致使高压套管产生缺陷。上述缺陷使得高压套管在运行过程中会产生过热、放电、受潮等故障,进而影响高压套管的绝缘性能。高压套管发生故障不仅会导致套管自身损坏,还有可能波及变压器本身,更进一步地造成高压输电系统中断,使社会蒙受巨大的经济损失。高压套管故障是造成变压器非计划停运的主要原因之一,具有故障突发率高、故障影响时间长等特点^[1]。随着电力系统的发展与电网规模的扩张,高压套管在电力系统中的重要性愈发凸显,对高压套管的绝缘状态检测逐渐成为电力系统运行领域中备受关注的热点问题。准确评估高压套管的绝缘状态、及时采取适当的运行维护策略,对电力系统的安全稳定运行具有重要意义,值得深入进行研究。

油中溶解气体分析(dissolved gas analysis, DGA)是对采用绝缘油为绝缘介质的高压套管绝缘状态进行检测最常见方法。现有文献表明,绝缘油故障时会产生一系列分解气体^[2],一般认为 H_2 、 CO 、 CH_4 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 C_2H_6 这6种气体是绝缘油典型故障分解气体。其中,当绝缘油中发生局部放电时,会产生少量 C_2H_2 气体。随着放电程度的加深,故障进行到火花放电以及电弧放电时, C_2H_2 含量会逐渐上升,并成为主要故障分解气体成分^[3]。因此, C_2H_2 本身的含量通常也会被认为是判断变压器故障的重要指标之一^[4]。

取样是进行 DGA 的前提,现有研究表明 C_2H_2 在绝缘油中的扩散系数约为 $10^{-10} m^2/s$ 量级^[5]。若故障分解气体仅依靠自由扩散到达取样口处通常需要数小时。所以需要借助其他手段促进油中溶解气体的传质过程,加速油中溶解气体的均匀分布,进而缩短在线监测装置的响应时间,提升 DGA 的取样质量。通常而言,油浸式变压器主设备中各部分的温差较大,具有较大横截面的油流通道,且部分变压器配备有强迫油循环冷却系统。因此,变压器中的绝缘油往往具有较强的流动性^[6-7]。当变压器内部发生故障时,故障分解气体能够随流动的绝缘油扩散至变压器内各处,结合一台变压器往往具备多个取样口,故对变压器进行 DGA 时,取得的油样具有很强的代表性。

相较于油浸式变压器主设备,油浸式套管的体量较小,绝缘油横截面积小。因此,油浸式套管中绝缘油通常处于流动性较弱的状态。此外,油浸式套管往往只有一个取样口,限制了取样位置,这进一步降低了取得的油样的代表性。当故障发生时,故障分解气体并不会均匀分布在绝缘油中,而是会集中在故障区域,并以缓慢的速度向四周扩散,导致取样口取得的油样中溶解气体的含量往往与发生故障的位置处油中溶解气体含量相差较大。因此,在对油浸式套管进行 DGA 时取样质量往往偏低,这极大地降低了油浸式套管在线监测装置的实用价值。综上,采用外部手段促进高压套管内油中溶解气体的均匀分布能够促使取样口处的绝缘油与其他各处的绝缘油状态趋于一致,从而有效改善 DGA 中的取样质量,提高在线监测装置性能,具备重大的实际意义。

本文中提出一种对高压套管中的绝缘油施加强制对流以改善 DGA 取样质量的方法,并论证该方法的可行性及有效性。首先对强制对流引起高压套管内部绝缘油产生流动可能导致的后果进行分析,并计算不影响高压套管本身性能前提下的强制对流流率限制;然后对油中溶解气体在高压套管中的传质过程进行研究,并通过仿真计算强制对流对该传质过程的影响;最后建立高压套管模型及实验平台,结合气相色谱仪,通过分析取样口处油中溶解气体的浓度,就强制对流对油中溶解气体传质过程的影响进行实验验证。本文研究成果能够为应用于高压套管的在线监测装置取样提供参考。

1 强制对流对气体分子传质过程影响的仿真计算

1.1 溶解气体在稀溶液中的传质过程

对于绝缘油中溶解 C_2H_2 气体而言,其浓度通常小于 $10^{-6} \mu L/L$ 量级,该浓度下溶解 C_2H_2 气体的绝缘油属于稀溶液,绝缘油中的物质质量传递符合 Fick 定律。 C_2H_2 气体会在浓度梯度的驱动下形成扩散,其浓度会趋于均匀分布,此时 C_2H_2 气体在绝缘油中的质量传递由扩散引起。 C_2H_2 气体的扩散过程可由 Fick 第一定律^[8]描述为

$$J_d = -D \nabla c. \quad (1)$$

其中: J_d 表示气体的通量; D 表示气体在绝缘油中的扩散系数; c 表示气体浓度。根据质量连续性方程,可得由浓度梯度引起的浓度^[9]变化为

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_d = -\nabla \cdot \mathbf{J}_d = D \nabla^2 c. \quad (2)$$

其中下标 d 表示该浓度变化由扩散引起。 C_2H_2 气体在绝缘油中的传质过程与其在绝缘油中的扩散系数 D 直接相关。扩散系数 D 随温度的变化遵循 Arrhenius 关系^[10], 即有

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta E}{RT}\right). \quad (3)$$

其中: D_0 表示指前因子; ΔE 表示气体分子的扩散活化能; R 表示普适气体常数; T 表示温度。由此可知绝缘油中的 C_2H_2 气体扩散系数随着温度的升高而增大。通过提高绝缘油的温度可以在一定程度上促进 C_2H_2 气体的传质过程,加速其浓度的均匀分布。考虑到采用绝缘油作为绝缘介质的电气设备通常具有额定的工作温度范围,通过提升温度促进气体扩散的效果比较有限。因此需要用其他方法促进溶解气体在绝缘油中的质量传递过程。

除扩散外,流体的整体运动同样会引起溶质的质量传递,即为对流。相较于扩散是由单个分子随时间变化的随机速度引起的质量传递,对流可认为是所有分子的平均速度引起的质量传递,发生质量传递的分子的速度同时包含对流分量和扩散分量。因此在运动的绝缘油中, C_2H_2 气体的传质过程由对流与扩散共同决定,由对流产生的通量 $\mathbf{J}_c$ 可写为如下形式^[11]:

$$\mathbf{J}_c = c\mathbf{u}. \quad (4)$$

其中 $\mathbf{u}$ 表示流体速度。因为对流是流体整体运动引起的质量传递,所以对流通量矢量与速度方向相同。对于溶解于绝缘油中的 C_2H_2 气体而言,该速度为溶剂绝缘油的速度。将上式代入质量连续性方程中,可得某一点处由对流引起的浓度变化^[12]为

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_c = -\nabla \cdot \mathbf{J}_c = -c \nabla \cdot \mathbf{u} - \mathbf{u} \cdot \nabla c. \quad (5)$$

其中下标 c 表示该浓度变化由对流引起。假设绝缘油为不可压缩的流体,由于整个流体的质量守恒,式(5)中第一项为0。由此可知,仅当溶剂中存在溶质的浓度梯度时,某一点的浓度才会因对流而发生改变。此时由对流引起的浓度变化可表示为

$$\left(\frac{\partial c}{\partial t}\right)_c = -\mathbf{u} \cdot \nabla c. \quad (6)$$

综上可知,当模拟高压套管内部发生绝缘故障使绝缘油分解产生故障分解气体 C_2H_2 时,如果绝缘油处于流动状态,则某一点处的 C_2H_2 气体浓度变化由扩散和对流共同引起。对于稀溶液情况,浓度变化可表示^[13]为

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{J}_d + \mathbf{u} \cdot \nabla c = R_t. \quad (7)$$

其中 R_t 表示时间 t 内气体的增量。采用强制对流的方式对套管内的绝缘油施加速度场,绝缘油相应地产生流速,将流速代入式(7)中即可进行数值求解,得到各点处的气体浓度变化。

通过无量纲 Peclet 数可以量化对流与扩散引起的质量传递的比值^[14]为

$$Pe = \frac{J_c}{J_d} = \frac{LU}{D}. \quad (8)$$

其中: L 表示特征长度; U 表示平均流速大小; D 表示 C_2H_2 气体在绝缘油中的扩散系数。考虑到高压套管的实际尺寸、高压套管内部绝缘油流速的限制及 C_2H_2 气体在绝缘油中的扩散系数,对流相较于扩散对质量传递的贡献更为显著。由此可以看出,通过向绝缘油施加速度场,加强其流动性,能够有效增大由对流引起的质量传递,从而促进 C_2H_2 气体浓度的均匀分布。

1.2 气体分子在高压套管中的传质过程

按照 110 kV 高压套管实际尺寸建立简化实验模型,主体部分为高压套管包含的绝缘介质部分,高压套管简化实验模型如图 1 所示。

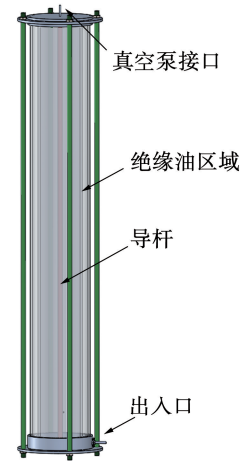


图1 高压套管简化实验模型

Fig.1 Simplified experimental model of bushing

基于上述实验模型建立高压套管绝缘油域仿真模型,模型外径为 125 mm,内径为 95 mm,高度为 1 915 mm。在绝缘油域中设置气源模拟发生绝缘故障的位置,仿真模型如图 2 所示。

为使仿真计算结果具有代表性,能够适用于套管内部任何区域发生绝缘故障时的情况,将气源置于离出入口最远处的对侧顶部。此外,考虑到计算

结果的普适性,另外在出入口对侧中部和底部分别设置气源。结合模型的对称性,为简化建模并优化计算,将仿真模型进行左右对称处理。同时,在出入口处设置域点探针,用于探测油中溶解气体浓度,模拟高压套管取样口处油样的油中溶解气体浓度。

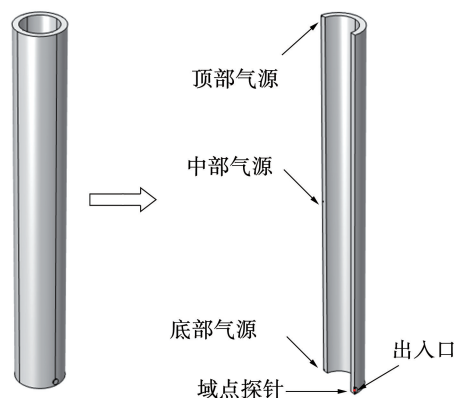


图2 含气源的高压套管绝缘油域仿真模型

Fig.2 Symmetrical model of oil area with gas source

在 COMSOL Multiphysics 中采用气泡流,层流模块对绝缘故障产生的气泡进行模拟,采用稀物质传递模块对故障产生的气体在绝缘油中的扩散过程进行模拟,通过多物理场耦合 2 个物理场进行联立求解。

首先对顶部气源情况进行研究。在气泡流,层流模块中,设置入口为顶部气源对应边界,设置出口为出入口对应边界,并设置出口的法相流出速度为 0。实验中采用的 C_2H_2 标气浓度为 $2\ 680\ \mu\text{L/L}$,约为 $0.112\ \text{mol/m}^3$,故设置稀物质传递模块中流入的浓度为 $0.112\ \text{mol/m}^3$ 。实验中通过流量计控制进入高压套管模型的气体流量为 $16\ \text{mL/min}$,约为 $2.67 \times 10^{-7}\ \text{m}^3/\text{s}$,故设置气泡流,层流模块中入口的流量为 $2.67 \times 10^{-7}\ \text{m}^3/\text{s}$ 。对仿真模型进行瞬态研究,气体传质过程如图 3 所示。

类似地,对中部、底部气源情况进行瞬态研究,气体传质过程如图 4 及图 5 所示。

由图 3~图 5 可知,随着时间的推移,油中溶解气体由气源处不断向四周扩散,绝缘油域内各点处的气体浓度随之上升。为实现浓度的可视化输出,表征油中溶解气体在绝缘油中的分布情况,对域点探针处的气体浓度进行时域计算,结果如图 6 所示。

通过对比 3 种气源位置的溶解气体传质过程及域点探针处气体浓度可知,随着气源距离取样口处的距离减小,取样口处气体浓度开始迅速上升的时间随之减小,且上升速率增加,经过相同的扩散时间

后,取样口处的气体浓度也随之增加。结合前述 Fick 定律,造成这种现象的主要原因如下:

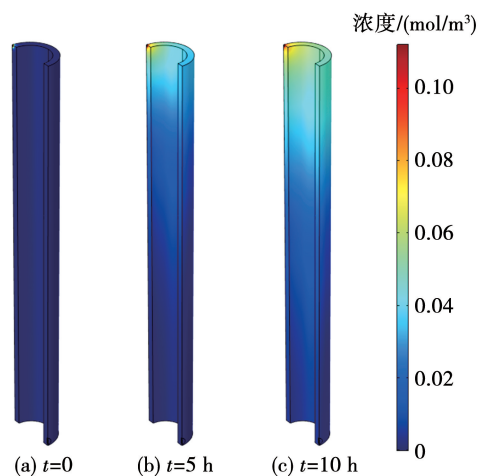


图3 顶部气源情况下油中溶解气体传质过程

Fig.3 Gas diffusion process with top gas source

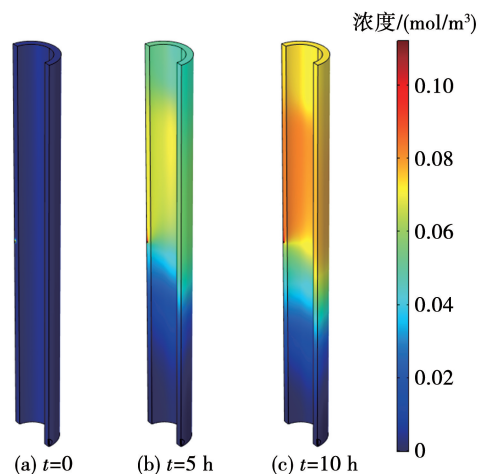


图4 中部气源情况下油中溶解气体传质过程

Fig.4 Gas diffusion process with middle gas source

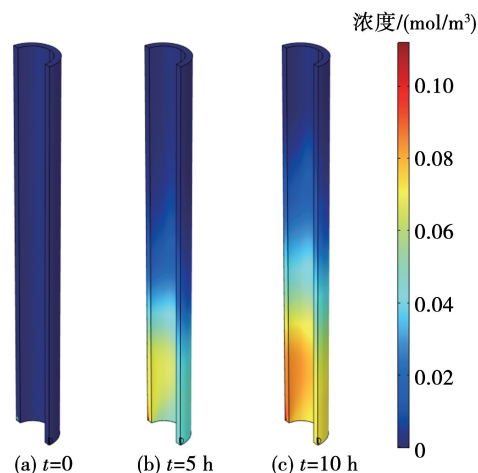


图5 底部气源情况下油中溶解气体传质过程

Fig.5 Gas diffusion process with bottom gas source

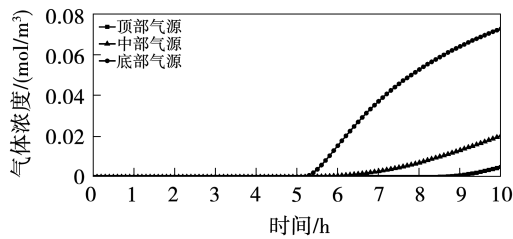


图6 域点探针处油中溶解气体浓度

Fig. 6 Gas concentration at domain point probe

1) 由 Fick 第一定律可知,溶解气体在浓度梯度的作用下,会向各向扩散。由式(4)可知,扩散系数在国际单位制下的单位为 m^2/s ,因此从形式上来看,扩散系数是溶解气体初始集中于气源处,然后扩散开来的均方根位移球面面积的参数化形式,该面积会随着时间而增长。因此当气源距离取样口的位置越近,该面积扩大至取样口处的时间越短,因此取样口处气体浓度开始迅速上升的时间随之减小。

2) 由式(5)可知,溶解气体浓度的变化是由浓度梯度引起的。由于初始状态时绝缘油域内溶解气体的浓度为 0,当溶解气体由气源处扩散至取样口处时,取样口处的周围会对取样口处形成溶解气体的浓度梯度,并引起取样口处溶解气体浓度的上升。由于气源处的气体浓度保持恒定,因此绝缘油域内溶解气体的浓度呈现气源处高四周低的分布,在绝缘油域内气体浓度均达到气源处的气体浓度时,浓度梯度始终存在。当溶解气体由气源处扩散至取样口处时,取样口处溶解气体浓度会迅速持续上升。

3) 当气源处产生气泡时,在浮力的作用下气泡会上浮并最终脱离绝缘油区域。上浮气泡在行进过程中会对周围绝缘油形成浓度梯度而产生扩散,因此气源上方的溶解气体浓度变化由气源处的扩散及上升气泡的扩散共同引起,而气源下方的溶解气体浓度变化则只由气源处的扩散引起。所以相较于气源下方而言,气源上方的气体浓度变化更大。结合气源位置与取样口之间的距离,当气源距离取样口越近时,经过相同的时间取样口处的溶解气体浓度上升越大。

1.3 强制对流对气体分子传质过程的影响

在 COMSOL Multiphysics 中采用气泡流,层流模块对绝缘故障产生的气泡进行模拟,采用稀物质传递模块对故障产生的气体在绝缘油中的传质过程进

行模拟。首先对顶部气源情况进行研究。在气泡流,层流模块中,设置入口为顶部气源对应边界,设置出口为出入口对应边界。接下来对出入口处的流量进行设置。

本章中采用的齿轮泵的流量为 24 mL/s ,管路的直径为 6 mm ,故管路内油流的流速约为 0.85 m/s 。强制对流会迫使绝缘油进行往复运动,应限制强制对流的周期,控制流出高压套管的油量。一般而言,高压套管可承受的油量减少不超过 1 L ,故将齿轮泵正转和反转时间均设为 30 s ,即动作周期为 60 s ,依此设置流速的函数如图 7 所示。

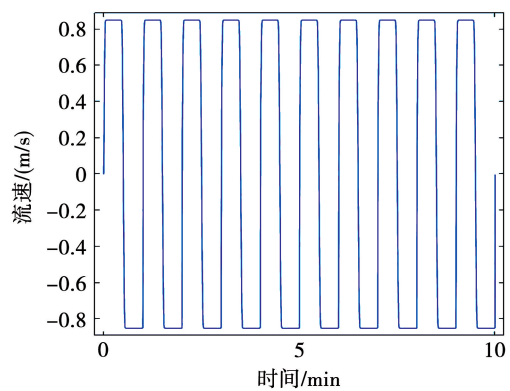


图7 出入口处流速函数图

Fig. 7 Flow velocity function at entrance

考虑到实际应用中齿轮泵在正反转切换过程中存在启停时间,因此将矩形波函数的过渡区大小设为 0.1 min 。除此之外,其他条件与前述仿真计算相同,设置稀物质传递模块中流入的浓度为 0.112 mol/m^3 ,设置气泡流,层流模块中入口的流量为 $2.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

考虑到实际应用中齿轮泵在正反转切换过程中存在启停时间,因此将矩形波函数的过渡区大小设为 0.1 min 。其他条件与前述仿真计算相同,设置稀物质传递模块中流入的浓度为 0.112 mol/m^3 ,设置气泡流,层流模块中入口的流率为 $2.67 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$ 。

首先就顶部气源情况进行仿真计算,结果如图 8 所示。

同理,对中部气源情况进行仿真计算,气体传质过程如图 9 所示。

对底部气源情况进行仿真计算,气体传质过程如图 10 所示。

在 3 种气源情况下对域点探针处的气体浓度分别进行时域计算,结果如图 11 所示。

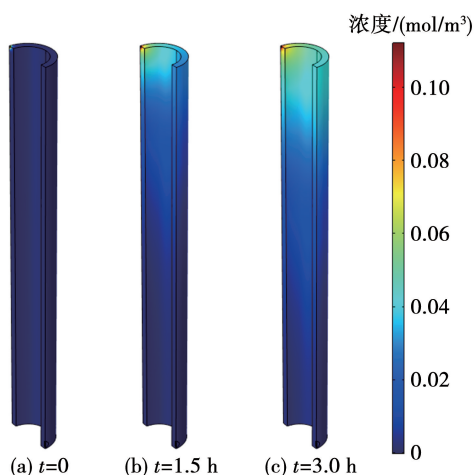


图8 强制对流时顶部气源情况下油中溶解气体传质过程
Fig. 8 Gas diffusion process with top gas source under compulsory convection

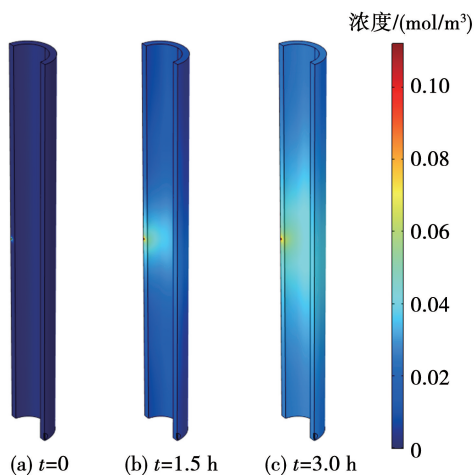


图9 强制对流时中部气源情况下油中溶解气体传质过程
Fig. 9 Gas diffusion process with middle gas source under compulsory convection

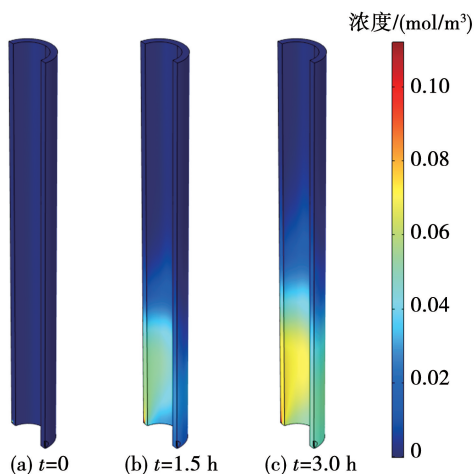


图10 强制对流时底部气源情况下油中溶解气体传质过程
Fig. 10 Gas diffusion process with bottom gas source under compulsory convection

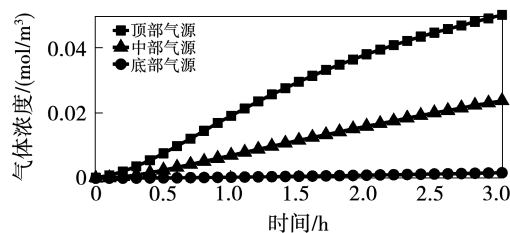


图11 域点探针处油中溶解气体浓度
Fig. 11 Gas concentration at domain point probe

通过对比3种气源位置的油中溶解气体扩散过程及域点探针处气体浓度,结合前述无强制对流情况下油中溶解气体在油浸式套管中的传质过程可知,对于3种气源位置,强制对流均能够有效促进油中溶解气体的传质过程,大幅提前取样口处油中溶解气体含量迅速上升的时间。这是因为当油浸式套管内的绝缘油受到强制对流的影响时会产生对流,在这种情况下绝缘油域内某点处的油中溶解气体的浓度变化由对流引起质量传递与扩散引起的质量传递共同作用产生。通过Peclet数分析对流与扩散对质量传递的贡献,取 L 为 C_2H_2 气体在绝缘油域中最大的扩散路径长度,为 10^0 量级。根据前述仿真计算,绝缘油平均流速约为 10^{-3} 量级。 C_2H_2 气体在绝缘油中的扩散系数约为 10^{-10} 量级。即在本章的条件下 C_2H_2 气体的Peclet数约为 10^7 量级,由此可知当对绝缘油施加强制对流时,由对流引起的质量传递远大于由扩散引起的质量传递。

综上所述,当存在强制对流时,油中溶解气体的质量传递主要由对流引起,且对流传质明显大于扩散传质。因此,对于不同气源位置而言,取样口处的油中溶解气体浓度均在对流的作用下于短时间内发生迅速上升。结合气源位置与取样口之间的距离,当气源距离取样口越近时,经过相同的时间取样口处的溶解气体浓度上升越大。仿真计算结果说明通过强制对流的手段能够极大地促进油中溶解 C_2H_2 气体浓度的均匀分布,从而缩短在线监测装置的响应时间。

进一步地,就强制对流的周期对传质过程的影响进行分析。前述提到,高压套管能够承受的油量减少通常不超过1 L,考虑到保留一定裕量,故设置齿轮泵的正反转时间均不超过30 s。此外,考虑到齿轮泵本身切换正反转时存在启停时间,正反转的时间不应过短。综上,分别设置齿轮泵的正反转时间为10、20、30 s,即动作周期分别为20、40、60 s。重复上述仿真过程,可以得到齿轮泵不同动作周期

下域点探针处油中溶解气体浓度随时间的变化趋势。其中,顶部气源情况下,不同动作周期时域点探针处油中溶解气体浓度随时间的变化趋势如图 12 所示。

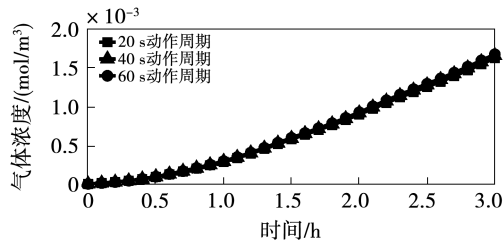


图 12 顶部气源时不同动作周期下域点探针处气体浓度
Fig. 12 Gas concentration at probe with top gas source under different motion periods

同理,中部气源情况下,变化趋势图如图 13 所示。

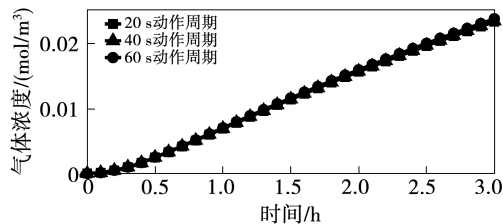


图 13 中部气源时不同动作周期下域点探针处气体浓度
Fig. 13 Gas concentration at probe with top gas source under different motion periods

底部气源情况下,变化趋势如图 14 所示。

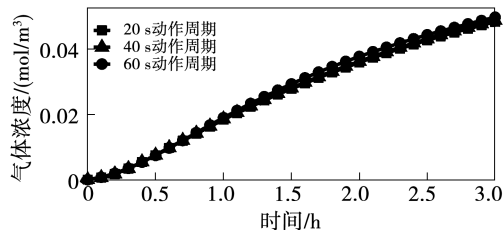


图 14 底部气源时不同动作周期下域点探针处气体浓度
Fig. 14 Gas concentration at probe with bottom gas source under different motion periods

由图 12 ~ 图 14 可知,在本节实验条件范围内,随着动作周期的增大,油中溶解气体从气源处到达至取样口处的时间略微增大。由式(8)可知,由于齿轮泵的动作存在启停时间,取样口处的流速函数具有一定的过渡区。因此当动作周期越大时,过渡区在同一时间段内占比越小,从而在同一时间段内平均流速 U 越大,油中溶解气体的 Peclet 数越大,对

流引起的气体通量越大,使得气体到达取样口处的时间缩短。

综上所述,在无外加速度场的情况下,顶部气源、中部气源、底部气源产生的气体扩散至取样口处所需时间大约为 8、7、5.5 h。而在有外加速度场的情况下,该时间均提前至 0.5 h 左右。由前述分析可知,当强制对流存在时,绝缘油内的油中溶解气体质量传递主要由对流决定,且对流传质的大小仅与流速有关,而与流速的周期无关,但动作周期的不同会使一段时间内绝缘油的平均流速稍有不同。结合图 12 ~ 图 14 可知,在考虑实际情况的动作周期范围内,齿轮泵的动作周期大小对油中溶解气体传质过程的促进程度差异并不显著,因此可以适当减小齿轮泵的动作周期以降低对高压套管油量的影响。

2 强制对流对气体分子扩散过程影响的实验验证

2.1 强制对流的实现方式

本章采用外加齿轮泵的方式实现对高压套管内部绝缘油的强制对流。强制对流系统示意图如图 15 所示。齿轮泵与高压套管取样口相连,通过齿轮泵的正反转向封闭环境内的绝缘油施加周期性的速度场,从而增加高压套管内绝缘油的流速,促进油中溶解气体扩散。驱动器用于控制齿轮泵的流率和转向。气缸用于储存从高压套管中流出的绝缘油,防止绝缘油与外界接触。

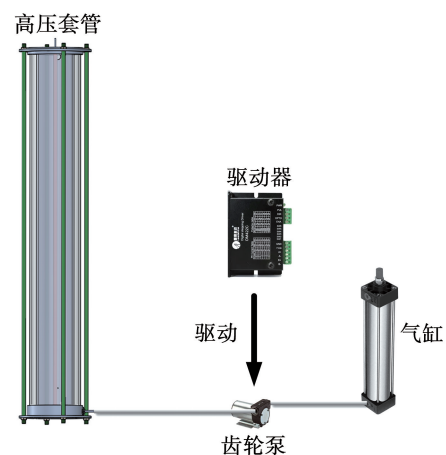


图 15 强制对流示意图

Fig. 15 Diagram of compulsory convection

2.2 实验平台的建立

进一步地,本节建立了相应的实验平台,采用控制电路对齿轮泵驱动器进行控制,通过驱动器即可

实现对齿轮泵流向、流率的控制。在气罐与高压套管进气口之间串联流量计,通过流量计控制进入高压套管的气体流率。实验平台如图16所示。

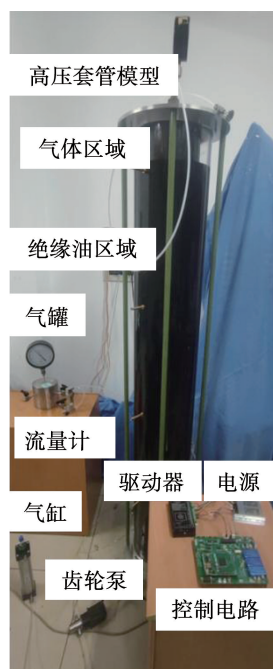


图16 高压套管强制对流实验平台

Fig. 16 Experimental platform of compulsory convection system for bushing

本文采用浓度为 $2\ 680\ \mu\text{L/L}$ 的 C_2H_2 标气模拟故障时绝缘油分解产生的 C_2H_2 。标气储存于气罐中,并通过流量计通入高压套管的进气口处模拟故障源。考虑到高压套管中的实际故障产气速率,本章将流量计的流率设置为 $16\ \text{mL/min}$ 。此外,采用 SHIMADZU 公司生产的 GCMS-QP2010SE 型号气相色谱质谱联用仪对取样口取得的油样进行脱气和检测,以获得油中溶解气体浓度。

2.3 实验结果及分析

首先对无强制对流的情况下油中溶解 C_2H_2 的传质过程进行研究,以顶部气源为例,实验流程如下:

1) 将气罐与高压套管模型的顶部进气口通过流量计相连。

2) 开启气罐出气口,通过流量计控制气体流率为 $16\ \text{mL/min}$ 。

3) 每隔 $1\ \text{h}$ 从高压套管模型的底部取样口取出油样并通入气相色谱仪中对油中溶解气体进行定量检测。

类似地,将气罐与高压模型的中部进气口、底部

进气口通过流量计相连,重复上述步骤。由此可得取样口油样的油中溶解气体浓度随时间的变化,结果如图17所示。

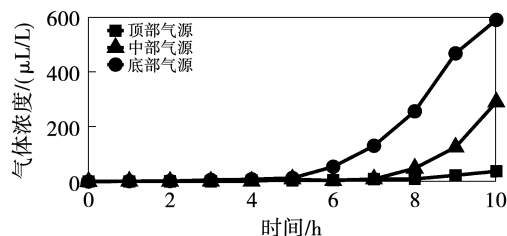


图17 取样口油中溶解气体浓度

Fig. 17 Gas concentration at sampling port

结合前述仿真结果的分析,并考虑到实验可能存在的误差,本章以油中溶解气体浓度出现显著持续上升的时间为标志,并认为此时间标志着由进气口处通入的标气溶解并扩散至取样口处。由图17可知,在无强制对流的情况下,由不同进气口处通入的标气溶解于油中并扩散至取样口处的时间随着进气口与取样口距离的减少而缩短。此外,在浮力的作用下由进气口通入的气泡会上浮并最终脱离绝缘油区域。上浮气泡在行进过程中会对周围绝缘油形成浓度梯度而产生扩散,当进气口位置越低时,上浮气泡在脱离绝缘油区域前在绝缘油中扩散时间更长。因此,在标气扩散至取样口处后,取样口处油中溶解气体浓度的上升速率随着进气口与取样口距离的减少而增大。综上所述,油中溶解气体的浓度随着实验结果验证了仿真计算中相关结论与分析。

以顶部进气口为例,对有强制对流的情况下油中溶解 C_2H_2 的传质过程进行研究,实验流程如下:

1) 将气罐与高压套管模型的顶部进气口通过流量计相连。

2) 开启气罐出气口,通过流量计控制气体流率为 $16\ \text{mL/min}$ 。

3) 启动齿轮泵及控制电路,齿轮泵以 $24\ \text{mL/s}$ 的流率持续正转 $30\ \text{s}$ 后关停,然后以 $24\ \text{mL/s}$ 的流率持续反转 $30\ \text{s}$,如此往复。

4) 每隔 $0.5\ \text{h}$ 从高压套管模型的底部取样口取出油样并通入气相色谱仪中对油中溶解气体进行定量检测。

类似地,将气罐与高压模型的底部进气口和中部进气口依次通过流量计相连,重复上述步骤。由此可得取样口油样的油中溶解气体浓度随时间的变化,结果如图18所示。

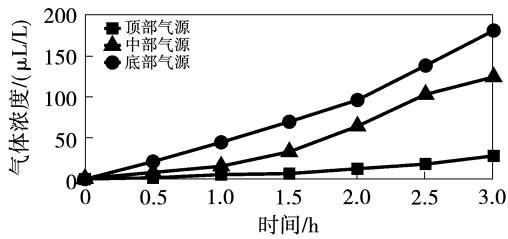


图 18 强制对流时取样口油中溶解气体浓度

Fig. 18 Gas concentration at sampling port under compulsory convection

结合前述仿真结果的分析,并考虑到实验可能存在的误差,以油中溶解气体浓度出现显著持续上升的时间为标志,并认为此时间标志着由进气口处通入的标气溶解并扩散至取样口处。由图 18 可知,相较无强制对流时,从 0.5 h 开始气体浓度开始显著持续上升。结合前节的内容可知,在强制对流的情况下,气体由进气口通入、溶解并到达取样口的时间从无强制对流的数小时缩短至数分钟。说明由顶部进气口处通入的标气能够迅速溶解并到达至取样口处。此外,随着进气口距离取样口的距离减小,取样口油样的油中溶解气体的上升速率增加。由此,在线监测装置能够在更早的时间点处检测到油中溶解气体浓度的变化,极大地缩短了在线监测装置的响应时间。

综上所述,在无对流的情况下,由顶部进气口、中部进气口、底部进气口处通入的 C_2H_2 扩散至取样口处所需时间大约为 8、7、5 h。而增加对流后经过 0.5 h 左右即可通过气相色谱仪检测到 C_2H_2 的浓度变化。油中溶解气体的浓度随着实验结果验证了仿真计算中相关结论与分析。结合前述分析可知,强制对流赋予绝缘油速度场,此时油中溶解气体的 Peclet 数上升,传质过程由强制对流引起的对流主导,而对流引起的传质通常远大于扩散引起的传质。由此可以得到结论,采用强制对流的方式能够极大促进油中溶解气体扩散的过程,加速油浸式套管内的油中溶解气体均匀分布的过程,从而提前了潜伏性故障的预警时间,延长了高压套管发生潜伏性故障时的预维护时间。

进一步地,调整齿轮泵的动作周期,并重复上述实验步骤,分别设置动作周期为 20、40 和 60 s,测量不同动作周期下取样口处的油中溶解气体浓度。顶部气源情况下结果如图 19 所示。

由图 19 可知,随着动作周期的增大,油中溶解

气体从气源处到达取样口处的时间基本一致。考虑到实验存在的误差,在不同的动作周期下,实验中的绝缘油平均流速 U 基本一致,由 $Pe \propto U$ 可知,此时油中溶解气体的 Peclet 数基本一致,因此不同动作周期下由对流引起的传质过程基本一致,所以气体从进气口处通入然后到达取样口处的时间基本一致,且上升趋势类似。实验结论与仿真结果一致,即相同流速的不同动作周期对油中溶解气体的传质过程影响的差异并不显著。

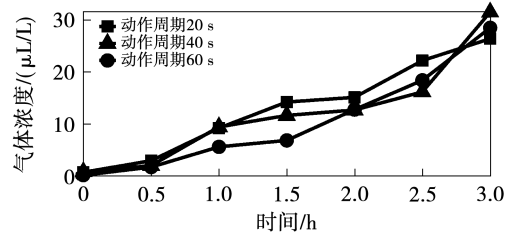


图 19 顶部气源时不同动作周期下取样口处油中溶解气体浓度

Fig. 19 Gas concentration at sampling port under different motion periods

中部气源情况下结果如图 20 所示。

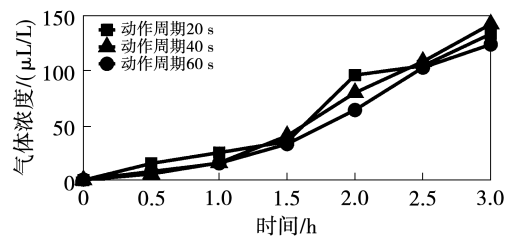


图 20 中部气源时不同动作周期下取样口处油中溶解气体浓度

Fig. 20 Gas concentration at sampling port under different motion periods

底部气源情况下结果如图 21 所示。

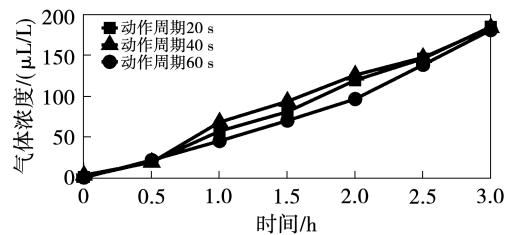


图 21 底部气源时不同动作周期下取样口处油中溶解气体浓度

Fig. 21 Gas concentration at sampling port under different motion periods

由图19~图21可知,对于3个位置的进气口,不同动作周期下取样口处气体浓度的上升趋势均类似。这说明在实际动作周期允许范围内,动作周期的不同对气体传质过程无显著影响。该实验结果验证了前述仿真计算中的相关结果与分析。

综上所述,由于不同齿轮泵动作周期对传质过程的影响区别较小,在实际应用时可以适当选择动作周期较小的强制对流,在提升取样质量、缩短在线监测装置的响应时间的同时,尽量降低对油浸式套管油量的影响。

3 结 论

本文提出一种对高压套管内部绝缘油施加强制对流以改善DGA取样质量的方法,并论证了其可行性与有效性。通过本文的研究,可得到如下结论:

1) 本文建立了绝缘油域仿真模型用于模拟不同位置发生故障时产生故障分解气体的情况。分别在有无外加速度场的情况下对油中溶解气体的传质过程进行仿真研究。仿真计算结果与理论分析表明,当无对流时,绝缘油中溶解气体 C_2H_2 的传质过程由扩散决定。当存在对流时,对流引起的气体通量远大于扩散,油中溶解气体 C_2H_2 传质过程主要由对流决定,这种情况下进气口处通入的气体能在很短时间内扩散至取样口处。

2) 为验证仿真结果,本文建立了以齿轮泵和气缸为核心的强制对流系统,通过齿轮泵向绝缘油施加周期性变化的速度场。实验结果验证了仿真计算的结果,当通过外部手段赋予绝缘油速度场时,油中溶解气体的传质过程以对流为主,气体通量增大,油中溶解气体的传质过程得到促进,DGA的取样质量得到提升。

3) 进一步地,本文探究了强制对流动作周期对油中溶解气体传质过程的影响。研究表明,不同强制对流动作周期对油中溶解气体传质过程的影响差异较小。在实际应用中可以选择动作周期较小的强制对流,降低高压套管内绝缘油的减少量。

参 考 文 献:

- [1] 印海洋. 套管局部放电 UHF 检测与定位方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [2] BUSTAMANTE S, MANANA M, ARROYO A, et al. Dissolved gas analysis equipment for online monitoring of transformer oil: a review[J]. *Sensors*, 2019, 19(19): 4.
- [3] MA Fengxiang, LIAO Zhenghai, ZHAO Yue, et al. Detection of trace C_2H_2 in N_2 buffer gas with cantilever-enhanced photoacoustic spectrometer[J]. *Optik*, 2021, 232: 166525.
- [4] MA Yufei, QIAO Shunda, HE Ying, et al. Highly sensitive acetylene detection based on multi-pass retro-reflection-cavity-enhanced photoacoustic spectroscopy and a fiber amplified diode laser[J]. *Optics Express*, 2019, 27(10): 14163.
- [5] 相晨萌. 山茶籽绝缘油中溶解气体分析与判断方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [6] 井永腾. 大容量变压器中油流分布与绕组温度场研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.
- [7] 李龙女. 自然油循环变压器的油流分布与温度场研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.
- [8] MARASCO P L. Examination of index gradients created by Fick's law diffusion[J]. *Optical Engineering*, 2020, 59(11): 112606.
- [9] MUIR C E, LOWRY B J, BALCOM B J. Measuring diffusion using the differential form of Fick's law and magnetic resonance imaging[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13: 015005.
- [10] PÉREZ-FRANCISCO J M, SANTIAGO-GARCÍA J L, LORÍA-BASTARRACHEA M I, et al. CMS membranes from PBI/PI blends: temperature effect on gas transport and separation performance [J]. *Journal of Membrane Science*, 2020, 597: 117703.
- [11] JIA Shengkun, ZHANG Chao, YUAN Xigang, et al. An optimization approach to find the thermodynamic limit on convective mass transfer enhancement for a given viscous dissipation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 146: 26.
- [12] HUA Zulin, XING Linghang, CHU Kejian, et al. Verification of Q-quick scheme for convective flux in incompressible flow on unstructured grids [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2009, 47(6): 764.
- [13] QIU Z H, WROBEL L C, POWER H. Numerical solution of convection-diffusion problems at high Péclet number using boundary elements[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1998, 41(5): 899.
- [14] MOEN C D. Solution algorithm for low-Peclet-number reacting flow[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 1997, 25(2): 225.

(编辑: 刘琳琳)