

电场作用下变压器油中液滴荷电状态研究

胡 华¹, 周 爽¹, 刘漓枢¹, 张国治², 黎大健³, 麻守孝¹

(1. 青海大学能源与电气工程学院 (黄河上游生态保护与高质量发展实验室), 青海 西宁 810016;

2. 湖北工业大学 (新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心), 湖北 武汉 430068;

3. 广西电网有限责任公司, 广西 南宁 530023)

摘要: 为了研究电场作用下液滴荷电效应对其形变的影响, 对油中液滴表面电荷状态开展了理论研究, 并借助仿真建模软件搭建典型油道模型, 模拟了外加电场条件下分散相液滴的表面电荷密度分布, 获得了液滴表面电荷的变化趋势图及其表面所受的电场力分布图。研究结果表明: 静置于油中的水分子由于“H⁺”优先取向, 水滴带有正的初始表面电荷。随着电场强度不断增大, 表面电荷密度呈现正增长趋势。从微观角度分析了电场下液滴的运动变形行为, 可以进一步完善油中含有液滴时引起的放电机理, 为变压器稳定运行提供实用价值。

关键词: 表面电荷; 电荷感应; 水滴变形; 电场

Analysis of the electric charge of the droplets in transformer oil under electric field

HU Hua¹, ZHOU Shuang¹, LIU Lishu¹, ZHANG Guozhi², LI Dajian³, MA Shouxiao¹

(1. School of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, (Laboratory of Ecological Protection and High Quality Development in the Upper Yellow River), Xining 810016, China; 2. Hubei Engineering Research

Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology,

Wuhan 430068, China; 3. Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning 530023, China)

Abstract: In order to study the effect of droplet charge effect on its deformation under the action of electric field, this paper has carried out theoretical research on the surface charge state of droplets in oil, and established a typical oil channel model through simulation software, simulated the surface charge density distribution of droplets under the condition of electric field, and obtained the change trend of droplet surface charge and the distribution of electric field force on the surface. The results show that the water molecules placed in the oil have a positive initial surface charge due to the preferential orientation of “H⁺”. When the electric field strength increases continuously, the surface charge density shows a positive growth trend. This paper analyzes the movement and deformation behavior of droplets under electric field from a microscopic perspective, which can further improve the discharge mechanism caused by droplets in oil, and provide practical value for the stable operation of transformer.

Key words: surface charge; charge induction; water droplet deformation; electric field

0 引言

矿物变压器油作为变压器的绝缘材料，在贮存和运输过程中，温度会直接或间接地影响变压器油中溶解的水分含量。过高的含水量会导致变压器油绝缘特性变差，甚至会引起变压器油的局部放电，严重影响变压器的安全可靠运行^[1]。一般水分在变压器油中的状态可分为三类：悬浮水、溶解水和沉积水^[2]。悬浮水的本质是绝缘油中游离的水分子或水分子群，以单个悬移水滴或水滴群的形式存在于油道中，它们的存在会降低绝缘油的击穿电压，严重影响绝缘油的使用寿命；溶解水是被油分子束缚的非自由态水分子，通过改变绝缘油的PH值引起绝缘油抗氧化性能的降低，加快绝缘油的老化；沉积水在这三种状态中对绝缘油性能影响最小，当变压器运行时，它能够逐渐与油分离，沉积到底部。绝缘油中水分的这三种状态在一定条件下会相互转化。此外在实际运行过程中，变压器油温度由于内部电阻反应生热而不断升高，水分的溶解度随着温度的增加而增大，油中溶解水的含量上升。而且在青藏大温差环境下，空载运行的变压器温度更容易受到周围环境的影响。此时，变压器油中水分状态也在三种状态下随环境温度的变化而变化。在冬季太阳落山至黎明之前，温度往往会达到 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右，极端情况下可能达到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在低温环境下，水分的溶解度骤减，溶解水不断析出，在油中形成小水滴，转换为悬浮水状态。这将引起变压器油击穿电压和局部放电场强的降低，进而引发绝缘油绝缘性能失效。

目前，关于变压器油中杂质对其介电性能的影响有很多学者已经开展了大量的研究^[3-5]，有研究表明，变压器油中的水滴在电场下表面会感应出电荷，受电场力影响产生形变，最终发生流注放电。此外，文献[6]结合变压器实际运行经验，分析油中水分的来源以及存在的三种状态，确定不同状态下水分存在对变压器油绝缘性能的影响。文献[7]通过试验手段得到了变压器油介电性能随含水率和温度的变化曲线，发现含水率

增加使油的电导率增大，而相同条件下相对介电常数的变化幅度较小。

随着计算机技术普及，许多学者利用分子动力学模拟来仿真分子状态下的物质间变换的相关规律。近年来，这一技术运用在变压器油绝缘领域，用于观察油中水分子的微观扩散机理。文献[8]模拟油纸绝缘中水分扩散行为，发现水分子、纤维素分子以及油分子作用力的不同引起了不同的迁移规律。文献[9]发现植物油分子的电负性相较于矿物质油更大，易于与水分子形成氢键。

综上所述，目前水分对变压器油介电性能的影响在宏观和微观上都较为成熟，但针对变压器油中水分所开展的研究多数仅停留在分析其扩散和分布规律方面，而对于变压器油中水滴变形以及引起局部放电的微观机理还鲜有研究。尤其是在电场作用下，当低温使油中析出水滴时，其表面感应电荷的数据更少。因此，本文开展对变压器油中水滴在电场作用下感应电荷的研究，通过模拟电场作用下油道中水滴表面的电荷密度分布和电场力分布，分析水滴的荷电感应效应对水滴形变的影响，探究不同电压等级下水滴表面电荷密度分布的情况，为大温差地区变压器故障机理的研究提供一定的理论依据。

1 双电层原则和DLVO理论

在电化学中，将电极与溶液相界面之间的电荷层称为双电层模型，由Stern层和外扩散层两部分组成，表面电荷通过库仑力将抗衡离子吸引到界面，而液体的离子组成控制扩散层的厚度，如图1所示。

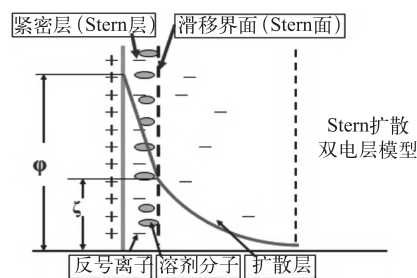


图1 双电层模型

Fig. 1 Electric double layer model

当Stern层和扩散层之间发生滑动时，产生电动现象，并产生 ζ 电动势，表示了颗粒的带电程度。颗粒的带电程度随着 ζ 电动势的增大而增大。

数学上使用Poisson Boltzmann方程描述带电表面附近的电动势分布。结合了表面的电性质（即表面电荷密度和表面电动势）和溶液的电性质（即离子类型、离子浓度和介电常数），表达式为

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{e}{\epsilon_0\epsilon_R} \sum_i Z_i n_{0i} \exp\left(\frac{-Z_i e\psi(x)}{KT}\right) \quad (1)$$

式中， n_{0i} 为本体溶液中型离子物质的浓度； Z_i 为价态； e 为元素电荷； ϵ_0 为真空中的介电常数； ϵ_R 为溶液的相对介电常数； $\psi(x)$ 为距离带电表面处的电动势； K 为玻尔兹曼常数； T 为温度。

双电层的存在，降低了粒子之间聚结的可能性，使胶体能够保持动力学上的稳定。DLVO理论认为溶胶在一定条件下能否稳定取决于胶粒之间相互作用的势能。总势能等于范德华吸引力和双电层静电排斥力的势能之和，势能的大小随着粒子之间的距离变化，如图2所示。当变压器油中析出水滴时，在油水两相不相容交界处必然存在一定量的电荷形成双电层，从而在外加电场作用下使液滴表面带有一定量的电荷。因此，需要采用双电层原则和DLVO理论从微观角度开展分析。

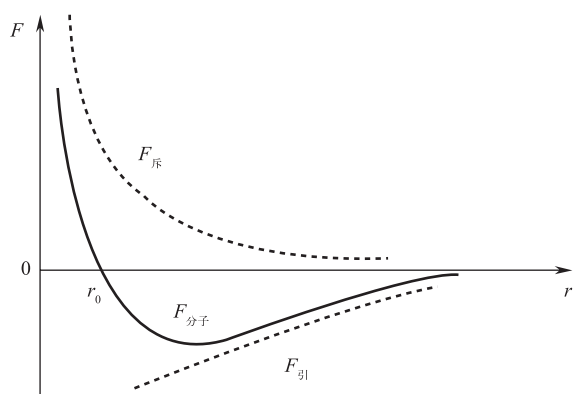


图2 粒子之间总势能和距离的关系

Fig. 2 Relationship between total potential energy and distance between particles

2 水滴表面荷电情况分析

变压器油和水是两种不同的物质，分子结构差别很大。变压器油为有机物，属于非极性物质，而水是无机物，属于极性物质，两者的密度不相同。当变压器油中含有水分时存在不相容的情况，局部形成胶体溶液，由双电层理论可知，油水界面有一定量的电荷分布。

已有学者对油水界面的电荷进行了相关的研究，早期的研究指出油滴在水中时表面显示出明显的负Zeta电位，这一现象可能是由于水这一连续相中 OH^- 在油滴表面的吸附所引起的。有相关学者通过增加水的PH值，提高 OH^- 的含量，发现随着 OH^- 含量的升高，油滴表面负电动势随之升高。2021年，文献[10]发现水中油滴表面带负电，原因是电荷从水 O^{2-} 转移到油中的C-H基团引起的。当连续相是油、分散相是水时，水滴的表面产生原始的正电荷。文献[11]通过光学显微镜测量水滴的电泳迁移率，确定液滴电荷的方法证实了这一观点。关于水滴表面带初始表面正电荷的原因，可以通过以下分析来解释：油分子中含有大量的 O^{2-} ，具有两个孤电子对，属于电负性原子，水分子含有两个正电 H^+ ，可能对有机硅的 O^{2-} 具有亲和力，水偶极子可能略微倾向于以其正端（即 H^+ ）朝向油分子，因此水滴表现出带正电的表面和相应的正电泳迁移率。

水是极性物质，由两个氢原子和一个氧原子构成。正常情况下，水分子中的氧原子与氢原子形成共价键，呈“V”字结构排列。由于其特殊的分子结构致使整个水分子的正电荷中心与负电荷中心重合，整体上呈现电中性，同时又表现出极性化合物的特征。当外界施加一个额外的高电压时，受电场力的影响，极性较强的水分子正负电荷中心点发生偏离，水分子中出现了一个由负电荷中心指向正电荷中心的电偶极矩，性质从中性分子转化为偶极子，如图3所示。在外电场力的作用下，水分子从中性转换为偶极性，朝着电场方向排布。

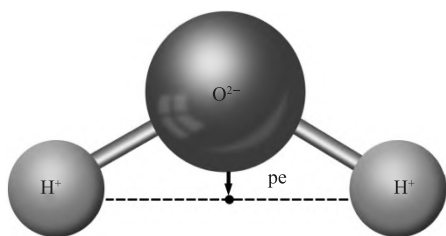


图3 水分子电偶极矩简化图

Fig. 3 Simplified diagram of electric dipole moment of water molecule

由此可见，偶极子转向极化引起了液滴极化，故外加电场强度是引起液滴表面极化电荷变化的一个十分重要的因素。外加电场的强度越大，偶极子极化转向越有序，液滴的极化程度也越高。宏观上表现为液滴表面的极化电荷越多，即表面电荷密度越大。

液滴的极化电荷量计算式为

$$q = \frac{1}{3} \frac{\mu_0 |E| N_A \pi r^2}{KTV_m} \quad (2)$$

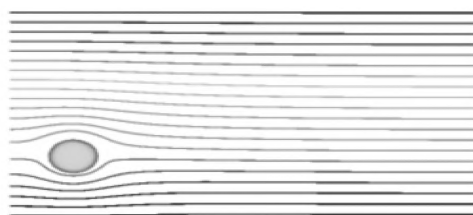
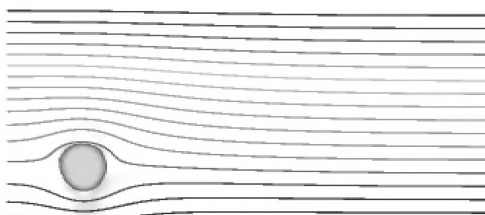
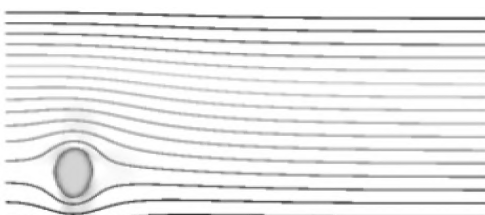
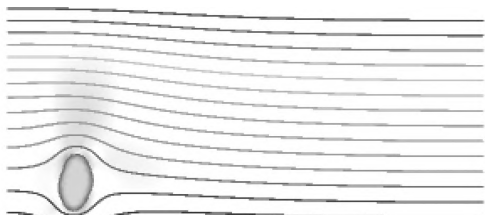
式中， μ_0 为偶极子的固有偶极矩，值为 $6.127 \times 10^{-30} \text{C} \cdot \text{m}$ ； E 为外施电场强度； N_A 为阿伏伽德罗常数，值为 $6.022 \times 10^{23} / \text{mol}$ ； r 为液滴半径，单位为mm； K 为玻尔兹曼常数，值为 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； T 为绝对温度，单位为K； V_m 为水的摩尔体积，值为 $18 \text{cm}^3 / \text{mol}$ 。

在油水两相流中，由双电层理论可知，其两相交界面必然存在一定量的电荷分布。初始状态下，油道中水滴由于受 H^+ 倾向性排列的影响，表面分布初始正电荷。作为极性物质，水滴在电场的作用下产生偶极转向极化和离子的定向运动。因此电场作用下，油道中水滴上下表面电荷表现出上负下正的情况，且下表面的电荷密度要多于上表面，整体受沿电场方向上下拉伸的不均匀的电场力，从而引起不规则形变。

3 油道中水滴仿真分析

由于水滴表面电荷的分布不均匀，油道中的水滴在电场作用下受到不均匀的力，从而发生不规则变化。当模型中上下极板之间施加正半周电压时，液滴的上表面感应出与上极板相反的电荷，同时下表面感应出等量的正电荷，水滴上表

面受到向上拉的电场力，下表面受到向下拉的电场力，水滴做竖直方向的拉伸运动，呈现细长椭圆形变化。图4~图7展示了0~0.03 s水滴在电场作用下竖直变形的过程。与此同时，液滴本身自带有天然的初始正电荷，使得液滴下表面的电荷数要多于上表面，下表面所受电场力也要高于上表面，在油道中表现出向下表面靠近的趋势。

图4 $t=0 \text{ s}$ Fig. 4 $t=0 \text{ seconds}$ 图5 $t=0.01 \text{ s}$ Fig. 5 $t=0.01 \text{ seconds}$ 图6 $t=0.02 \text{ s}$ Fig. 6 $t=0.02 \text{ seconds}$ 图7 $t=0.03 \text{ s}$ Fig. 7 $t=0.03 \text{ seconds}$

油道中水滴发生电泳运动, 可通过泊松方程求解水滴表面的电位分布, 由电学理论定义的泊松方程为

$$\nabla \varepsilon_0 \varepsilon_r E = \rho_e \quad (3)$$

式中, ∇ 为微分操作因子; ρ_e 为电解质溶液的空间电荷密度; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为分散相对介电常数; E 为电场强度。

$$E = -\nabla \phi \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3) 可得

$$\nabla \phi^2 = -\frac{\rho_e}{\varepsilon} \quad (5)$$

油道中液滴表面所受的电场力可由麦克斯韦应力张量 T 表示, 即

$$F_E = \nabla T \quad (6)$$

麦克斯韦应力张量 T 计算式为

$$T = ED^T - \frac{1}{2}(E \cdot D) \quad (7)$$

式中, D 为电位移场, $D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$ 。

在仿真中, 对油道上极板施加 5 kV 的高电压, 下极板接地。耦合流场、电场以及电荷传递模块可以直观地看到油道中水滴的表面电荷分布以及电场力分布, 如图 8、图 9 所示。可以看出, 液滴极化后的表面电荷密度分布是从两侧向中间依次递减, 并且下侧的电荷密度更大。除此之外, 水滴下表面电荷密度为正值, 上表面为负值。电荷差异性分布是由两部分引起的: ① 油水界面处水分子 H^+ 的特向性分布, 水滴表面带有正的初始电荷; ② 在电场作用下, 水滴表面感应出极化电荷, 分别分布在上下表面。从电场力的计算公式可知, 电场力和电场以及电荷之间存在密切的关系, 油中液滴表面电荷分布不同, 导致水滴表面所受电场力不同。从图 9 也可以看出, 下表面所受的向下拉伸的电场力较上表面更大, 同表面电荷分布类似, 表面电场力也表现出由中间向两端逐渐增大的趋势。水滴表面受到的电场力大小不一致, 从而引起了水滴的不规则形变。从整体来看, 在电场力作用下, 液滴克服连续相阻力, 一方面完成变形; 另一方面朝下发生电泳运动。

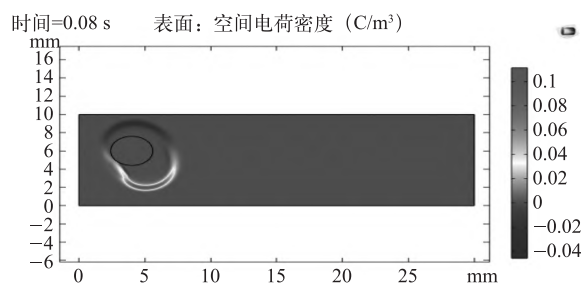


图 8 $t=0.08$ s 时油道中水滴表面的空间电荷密度图

Fig. 8 Space charge density diagram of water droplet surface in oil duct at $t=0.08$ s

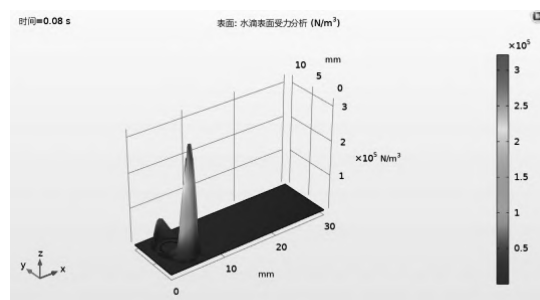


图 9 $t=0.08$ s 时油道中水滴表面的电场力分布图

Fig. 9 Electric field force distribution diagram of water droplet surface in oil duct at $t=0.08$ s

从式 (2) 极化电荷的表达式可以看出, 液滴表面的感应电荷和电场强度之间存在着一定的关系。在此次研究中, 分别设定了电场强度为 1 kV、2 kV、3 kV、4 kV 和 5 kV 时表面电荷密度的变化, 得出的趋势如图 10 所示。

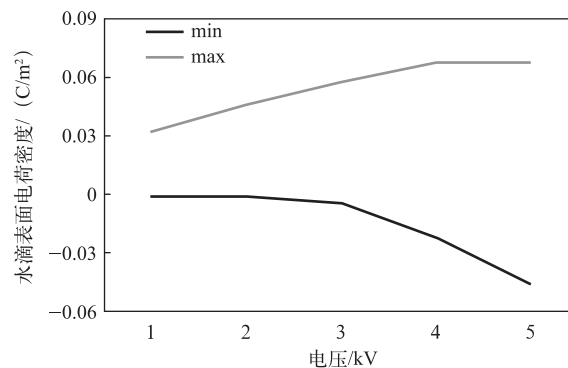


图 10 油道上下极板电压为 1 ~ 5 kV 之间水滴表面电荷密度变化趋势

Fig. 10 Change trend of surface charge density on the surface of water droplets from 1 ~ 5 kV for the upper and lower plate voltage of the oil passage

图 10 中, min 为表面电荷密度最小值, max 为

表面电荷密度最大值。从仿真数据分析来看,随着电场强度的增大,无论是表面电荷密度的最大值还是最小值,都呈现出正增长的趋势。水滴表面电荷密度随着电场强度的增大而增大。当电压为1 kV时,最小的表面电荷密度几乎为0。这是由于电压强度较小,水滴表面感应电荷少,此时还处于液滴表面带初始正电荷情况下,仿真数据取得最小值的点在水滴内部。通过表面电荷密度与电场强度的关系图可以看出,水滴表面电荷密度分布和电场强度的大小息息相关。

4 结束语

1) 当水滴作为分散相悬浮于变压器油中时,根据双电层理论和DLVO原则,水滴表面带有一定量的电荷。在与油相接触时由于水分子的正向性,使得朝外排列,倾向于油中烷烃的,水滴表面因此带有正的初始电荷。当对油道施加正半周电压时,水滴上表面会感应出负电荷,下表面会感应出正电荷,受初始正电荷的影响,此时下表面所受的电场力更强烈,水滴做竖直方向的不规则变形。

2) 同一电场强度下,极化后的液滴表面电荷密度和电场力的变化规律相似,都呈现出两端的向中间逐渐递减的趋势,并且下端表现的荷电效应更加明显,引起了下端更大的表面电荷密度和电场力。在电场力的驱动下,液滴一方面克服油水界面的粘滞阻力完成变形;另一方面发生电泳运动向下移动。

3) 油道中悬浮水滴的表面电荷密度分布和电场强度大小息息相关,表面电荷密度随着电场强度的增大而增大。

参考文献

- [1] 于会民,王会娟,张绮,等. 变压器油纸绝缘体系中水分和气体含量研究[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3): 86-90.
- [2] 王永忠,詹学生. 采用干燥气体保护及真空脱水

处理确保变压器油的质量[J]. 变压器, 2001, 38(1): 32-35.

- [3] 麻守孝. 绝缘油中金属颗粒在流动状态下产生的局部放电特性及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- [4] 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.
- [5] TANG J U, ZHU Liming, MA Shouxiao, et al. Partial discharge characteristics of suspended bubbles in insulating oil[J]. High Voltage Technology, 2010, 36 (6): 1341-1346.
- [6] 祝景中. 浅析变压器油中的水分[J]. 中国电力, 1996(3): 61-62.
- [7] 陈庆国,池明赫,王刚,等. 含水率对复合电场下油纸绝缘电场分布的影响[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 54-60.
- [8] LIAO R J, ZHU M Z, YANG L J, et al. Molecular dynamics study of water molecule diffusion in oil-paper insulation materials[J]. Physica B Condensed Matter, 2011, 406(5): 1162-1168.
- [9] 李剑,陈晓陵,张召涛,等. 植物油纸绝缘的微水扩散特性[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1379-1384.
- [10] Sylvie Roke, et al. Charge transfer across C-H...O hydrogen bonds stabilizes oil droplets in water. SCIENCE, 374, 6573, 1366-1370. DOI: 10.1126/science. abj3007.
- [11] ANDREAS M. SCHOELER, DIMITRIS N, et al. Charge of water droplets in non-polar oils[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114: 144903.

作者简介

胡华(1999—),女,硕士研究生,主要从事变压器油中水滴的运动轨迹和引起的放电研究工作。

(收稿日期: 2023-03-27)