DOI:10.15938/j.jhust.2014.03.017

阶跃电压下液体电介质击穿过程数值分析

王正伟， 赵大伟， 杨嘉祥， 郑殿春， 杨韦国， 陈 楠， 王 佳
(哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院，黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 以变压器油作为研究对象，采用有限元方法对针－球电极下建立的用于表述液体电介质流注预放电过程中载流子的产生及输运特性的偏微分方程进行求解分析，获得阶跃电压下变压器油隙预放电过程空间电荷动力学特性. 数值模拟结果表明，液体介质击穿的根本原因是油隙中自由载流子的产生、迁移形成了预击穿电流，由此产生的焦耳热使得油隙中温度升高，促进流注发展. 根据这些现象得出的结论能够很容易理解液体电介质的击穿机理，有利于液体电介质在电力系统领域得到更合理的应用.

关键词: 变压器油; 数值模拟; 空间电荷; 流注
中图分类号: TM 214 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007－2683(2014)03－0080－04

Numerical Analysis of Liquid Dielectric Breakdown Process Applied in Step Voltage

WANG Zheng-wei， *ZHAO Da-wei*， *YANG Jia-xiang*， *ZHENG Dian-chun*，
YANG Wei-guo， *CHEN Nan*， *WANG Jia*
(School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: The transformer oil was taken as the object of study in this paper, and the finite element method (FEM) was employed to analyze and solve the partial differential equations (PDE) which was built under needle-sphere electrode for describing the generation and transport properties of free charge carriers, and then the dynamics characteristics of space charges in the liquid-gap pre-discharge process under step voltages were gained. According to the simulating results, the fundamental causes of the dielectric liquids breakdown are described as follows, the pre-breakdown current is firstly formed by the generation and migration of the charge carriers in the oil gap, and then the joule heat generated from it makes temperature rise along the oil-gap. Meanwhile, the streamer is continuously evolving in the liquid. Then these conclusions enable people to easily understand breakdown mechanism of the liquid dielectrics that are reasonably applied to power system fields.

Key words: transformer oil; numerical simulation; space charge; streamer

0 引 言

关于液体电介质的击穿机理，目前主要包括电击穿理论和气泡击穿理论，而针对含有水分和杂质情况，则提出了杂质桥理论. 这些理论虽然在一定程度上定性解释液体介质击穿现象，但是由于液体介质净化程度不够高，不少实验结果差异很大，无法进行分析比较. 近年来随着净化技术的提高和检测仪器的进步，大大促进了液体电介质击穿机理的研究

收稿日期: 2013－06－22
基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究重点项目(12511Z008).
作者简介: 王正伟(1989—)，男，硕士研究生，E-mail: wangzhengwei314@sina.com;
赵大伟(1965—)，男，副教授;
杨嘉祥(1938—)，男，教授，博士生导师.

进程.

实验研究表明[1-2]，外施电场及击穿过程空间电荷场对液体介质放电过程载流子的生成起主导作用. 低电场情况下，液体分子中的电子在其能级轨道上围绕原子核做圆周运动; 当液体电介质中某处处于极端电场下，电场强度达到 1×10^8 V/m 及以上时[3]，处于该区域的液体分子内部低能级电子将受到电场激励，所获得的能量足以使其向高能级轨道跃迁，电子挣脱原子核的束缚，成为可以自由移动的电子. 在生成自由电子的同时，原本显电中性的液体分子因失去电子而成为自由正离子. 由于电子的迁移率远高于正离子的迁移率，所以当电子迅速向正极迁移时，在原位置便留下了新生成的正离子. 这种不对称的迁移率导致净空间电荷的形成，从而触发正流注的产生、发展直至击穿.

本文以纯净的变压器油作为研究对象，建立了纯油隙放电过程模型并进行求解分析，获得了阶跃电压下变压器油隙预放电过程中载流子的产生、输运以及放电通道演化的时空特性，给出液体介质预放电过程流注形成传播与不同参量之间的相互关系，为进一步开发利用液体电介质提供理论参考.

1　液体介质场致电离放电模型

1.1　针－球电极系统

依据 IEC60897 标准[4]，采用如图 1 所示的针－球电极系统模拟液体介质中的非均匀场，有助于对液体介质放电过程带电粒子产生、增长、熄灭以及放电通道微观机制的分析. 极间距 15 mm，针尖曲率半径 40 μm，球半径 6 mm，其中球电极接地，针电极接正极，外施电压采用阶跃电压. 此电极系统易使在针电极处场强达到 1×10^8 V/m 量级.

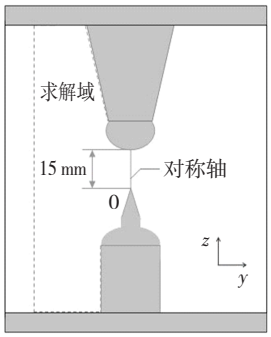

图 1　针－球电极系统

1.2　模型的数学表述

在流注形成过程，电场作用下产生大量的自由电荷做定向移动形成了预击穿电流. 由焦耳热效应可知，预击穿电流使得液体电介质温度升高，高温区域内的介质形态会由液态向气态转变，有利于流注的形成及发展. 空间电场导致空间电荷的生成，而空间电荷产生的电场使得针－球电极间隙的电场畸变，这种畸变的电场加剧了液体中载流子生成、倍增、移动和焦耳热效应，促使液体电介质中轴向电场的延伸. 所以，纯净液体介质放电过程主要体现在载流子的生成、倍增、移动和焦耳热效应与畸变电场的相互作用过程[5-6].

液体电介质放电过程中存在着大量自由载流子的定向移动以及电场、温度等条件的改变，整个模型系统的状态是随着时间变化的动态过程，而液体电介质放电过程中自由载流子的运动行为可以仿照流体中微粒子运动特性的连续性方程给出表述. 因此本文采用非线性瞬态流体模型，结合表述流体相变的热扩散方程并耦合电场泊松方程，构成了液体电介质放电的动态模型[7-8]，方程如下:

$$\nabla\cdot(\varepsilon\vec{E})=\rho \tag{1}$$

$$\frac{\partial\rho_i}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho_i\mu_i\vec{E})=G_i+Q_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\vec{v}\cdot\nabla T=\frac{1}{\rho_l c_v}(k_T\nabla^2T+\vec{E}\cdot\vec{J}) \tag{3}$$

其中: 式(1)是描述电场的泊松方程; ε 表示液体介质的介电常数; ρ 表示放电空间中某处空间电荷电量密度之和($\rho=\rho_e+\rho_p+\rho_n$). 式(2)是微观粒子运动特性的连续性方程，它描述了流体中第 i 种粒子的密度分布随时间变化的情况，其中 ρ_i 表示流体中第 i 种粒子的电量密度; μ_i 表示第 i 种粒子的迁移率; $\vec{E}$ 表示空间电场强度矢量; G_i 表示第 i 种粒子的生成项[9]; Q_i 表示第 i 种粒子的复合项. 式(3)是流体温度变化的热扩散方程，其中 T 表示放电空间的温度，单位选取热力学温度单位 K; $\vec{v}$ 表示液体流动速度，由于液体放电时间极短，液体流速相对放电时间可以忽略不计; $g\rho_l$ 表示液体密度; c_v 表示液体比热容; k_T 表示液体热传导率，$\vec{J}$ 表示液体电介质中载流子迁移形成的传导电流密度.

2　数值解析与讨论

针对由图 1 针－球电极系统建立的液体介质放电模型及式(1)～(3)的表述形式，进行数值求解，以便揭示出针－球电极间隙变压器油带电粒子产生、倍增及输运过程，以及放电通道流注形成演化机制.

2.1 约束条件

电极系统施加幅值为 300 kV 阶跃电压，即针电极为正，球电极接地，而针 - 球电极间隙 15 mm. 变压器油相关参数为[10]：分子间距 $a = 3 \times 10^{-10}$ m，电子有效质量 $m^* = 9.1 \times 10^{-32}$ kg，变压器油电离能 $\Delta = 7.1$ eV，单位体积内变压器油中分子数目为 $n_0 = 1 \times 10^{23}$ m^{-3}，比热容 c_v 为 1.7×10^3 Jkg^{-1} K^{-1}，热传导率 k_T 为 0.13 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

采用有限元方法求解方程约束条件如下[11-12]：

1) 电场泊松方程(方程(1))：在 $t = 0$ 时刻针电极处电压为阶跃电压 V_0，球电极接地；对称轴 z 轴及求解域外边界满足电场法向分量为零，即：$\vec{n} \cdot \vec{E} = 0$.

2) 电荷运动特性连续性方程(方程(2))：边界条件满足外边界通量为零，即：$\vec{n} \cdot \vec{J}_e = 0$，$\vec{n} \cdot \vec{J}_p = 0$，$\vec{n} \cdot \vec{J}_n = 0$；电极表面满足扩散通量为零，即：$\vec{n} \cdot \nabla \rho_e = 0$，$\vec{n} \cdot \nabla \rho_p = 0$，$\vec{n} \cdot \nabla \rho_n = 0$.

3) 热扩散方程(方程(3))：所有边界设置为热扩散通量为零，即：$\vec{n} \cdot \nabla T = 0$.

2.2 油隙中电场分布

在 $t = 0$ ns 时刻，变压器油中电场服从拉普拉斯分布，电场仅仅是由外施电压引起的，电场强度峰值在针电极处，如图 2(a) 所示. 随着施压时间的延长，液体电介质在高电场作用下针电极附近处分子不断电离，空间电荷方向沿 z 轴向球电极方向发展，电场峰值也逐渐远离针电极沿着 z 轴向变压器油隙延伸. 图 2 分别给出 100 ns、300 ns 以及 500 ns 时刻油隙中空间电场分布图，从图中可以明显看出流注随时间的发展过程.

初始时刻，针尖处电场由外施阶跃电压引起，电场强度能够达到 10^8 V/m 及以上，达到使液体分子电离所需的电场强度. 在 $t > 0$ ns 以后，针电极附近区域油分子受到强电场作用发生电离，产生了大量的自由电子和正离子. 在电场力的作用下，电子向针电极运动，正离子向球电极运动. 由于电子的迁移率($u_e = 1 \times 10^{-4}$ $m^2V^{-1}s^{-1}$)远高于正离子($u_p = 1 \times 10^{-9}$ $m^2V^{-1}s^{-1}$)的迁移率，相当于电子快速地向针电极运动，正离子可认为静止，这种不对称的迁移使针电极附近区域滞留了大量正离子形成空间电荷区. 又由于伴随着预击穿电流产生的焦耳热效应使油温升高，使油分子电离加剧，此时空间电荷产生的电场与外电场同向并叠加畸变且沿轴向发展，空间电荷区沿着轴向扩展的同时，其头部电荷区域的电场得到加强，使畸变的电场区域不断延伸，既形成正流注[13].

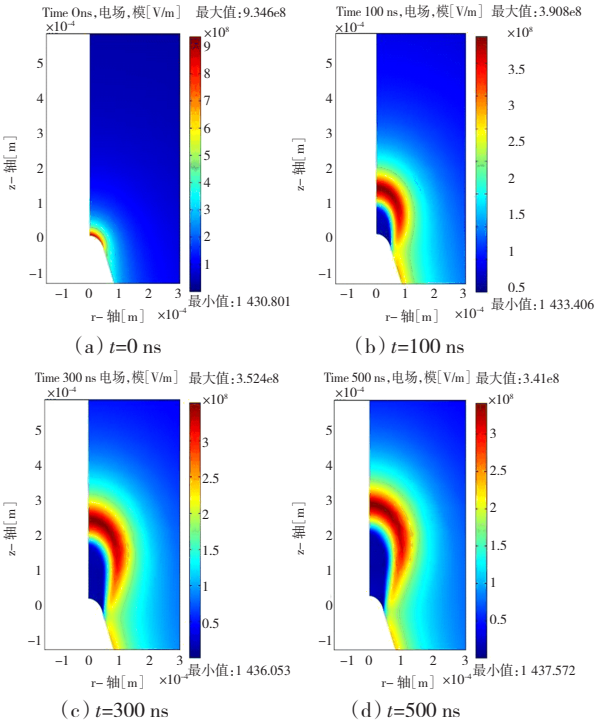

图 2 不同时刻空间电场分布

从不同时刻电场分布一维图更容易看出伴随着流注的形成发展，放电通道电场分布的变化，如图 3 所示.

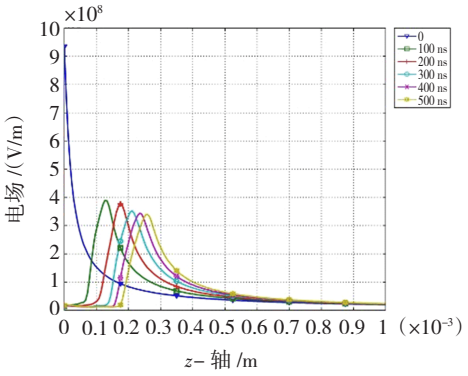

图 3 不同时刻电场分布

从图 3 可以看到一个“迁移”的电场，且电场强度有逐渐减弱的趋势. 这是因为电场的“迁移”形成了一个移动的耗散源，油隙中的能量以热的形式向外耗散，使变压器油温度升高，油隙中可能存在气 - 液两相介质，使得离子的复合能力加强，从而导致其头部的场强略有降低，但仍保持 10^8 V/m 的数量级，满足液体分子电离所需的电场强度，使放电持续发展.

2.3 油隙中电荷分布

液体电介质中空间电荷产生、复合对电场的迁移和流注的发展起到决定性的作用. 由大量滞留在油隙中的正离子形成了空间电荷区域，即流注，其电性由流注头部正离子决定. 当空间电荷量达到一定

程度,便可畸变周围电场使电场峰值向油隙中发展,形成迁移电场,迁移的电场能够继续电离峰值电场处的变压器油分子,产生正离子与自由电子,空间电荷的产生和迁移过程又促使电场向球电极发展,这是电场与空间电荷相互耦合的过程. 沿 z 轴处电场峰值与空间电荷密度最大值位置一致,即空间电荷产生的电场与外施电场同向并叠加. 同时,正离子可能复合成分子,使正离子数量略有减少,图 4 给出了沿 z 轴方向空间电荷分布.

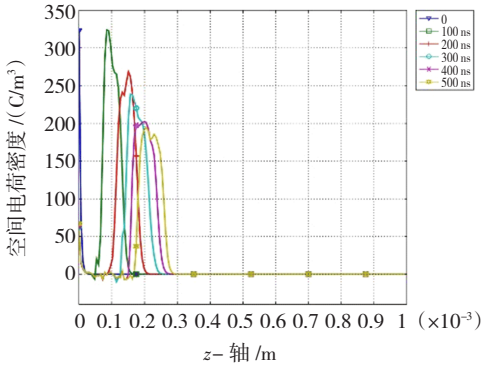

图 4　不同时刻空间电荷密度分布

2.4　油隙中温度分布

油隙中载流子在电场作用下作定向运动,尤其是电子,形成了预击穿电流,因为变压器油电阻率约为 $1\times10^{9}\ \Omega/\mathrm{cm}$,预击穿电流通过焦耳热效应向油分子注入能量,导致油温升高,促进流注发展. 由图 5 可以看出,针电极附近的油温度上升了 18 K 左右,且温度曲线头部位置与图 4 空间电荷曲线头部位置一致,印证了空间电荷的“迁移”会导致油温度升高的事实.

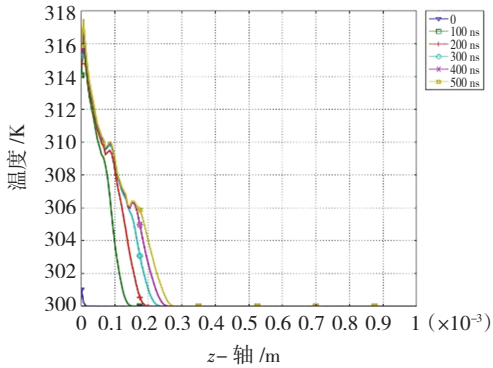

图 5　不同时刻油隙温度分布

3　结　论

本文通过建立液体放电流体模型,数值求解了电场泊松方程、热扩散方程及带电粒子连续性方程,分析研究得出以下结论:

1) 液体电介质中自由载流子的产生、复合过程对电场的迁移和流注的发展起关键作用.

2) 液体放电过程可用流体动力学模型进行描述,在极端场强的作用下放电过程中流注由“迁移电场”触发形成.

3) 在电场力作用下,电子以及液体分子电离出的正负离子在放电间隙中不断迁移,通过焦耳热效应向液体介质中散热使温度升高,促进流注发展.

参 考 文 献:

[1] LUNDGAARD L, LINHJELL D, BERG G, et al. Propagation of Positive and Negative Streamers in Oil with and without Pressboard Interfaces [J]. IEEE Trans on Dielectrics And Electrical Insulation, 1998, 5(3): 388 – 395.

[2] LESAINT O, MASSALA G. Positive Streamer Propagation in Large Oil Gaps: Experimental Characterization of Propagation Modes [J]. IEEE Trans on Dielectrics And Electrical Insulation, 1998, 5(3): 360 – 370.

[3] HWANG J G. Modeling Streamers in Transformer Oil: The Transitional Fast 3rd Mode Streamer [C] //Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, Harbin, China, 2009: 573 – 578.

[4] WANG Z D, LIU Q, WANG X, et al. Discussion on Possible Additions to IEC60897 and IEC 61294 for Insulating Liquid tests [J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(6): 486 – 493.

[5] TOBAZEON R. Pre-breakdown Phenomena in Dielectric Liquids [J]. IEEE Trans on Dielectrics And Electrical Insulation, 1994, 1(6): 1132 – 1147.

[6] QIAN J, GUDET J, WOODWORTH J R. Analysis of Ppolarity Effects in the Electrical Breakdown of Liquids [J]. J. Phys. D: Appl., 2006, 39: 359 – 369.

[7] 吕树明. 液体电介质场致分子电离机理分析 [J]. 变压器, 2012, 49(10): 20 – 23.

[8] 李元,穆海宝. 正极性纳秒脉冲电压下变压器油中流注放电仿真研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(12): 124703.

[9] HO Young L, SE Hee L. Finite Element Analysis of Positive Streamer Propagation with Lightning Impulse Voltage [C]. In International Conference on Electrical Machines and Systems, 2010: 1836 – 1839.

[10] 陈楠. 冲击电压下液体介质放电特性分析 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013: 22 – 23.

[11] ZAHN M, HWANG J G. Mechanisms Behind Positive Streamers and Their Distinct Propagation Mode in Transformer Oil [J]. IEEE Trans on Dielectrics And Electrical Insulation, 2012, 19(1): 162 – 174.

[12] SULLIVAN F. Modeling the Effect of Ionic Dissociation on Charge Transport in Transformer Oil [C] //Proceedings of IEEE Conference on Electrical of Insulation, Kansas, Missouri, USA, 2006: 11 – 14.

[13] JADIDIAN J, ZAHN M. Effects of Impulse Voltage Effects of Impulse Voltage Polarity, Peak Amplitude, and Rise Time on Streamers Initiated From a Needle Electrode in Transformer Oil [J]. IEEE Trans. Plasma Sci. 2012, 40(3): 909 – 917.

(编辑: 付长缨)