

Discharge Behaviors of Transformer Oil-Gap under Constant Voltage

Wei Li¹, Zhigang Ren¹, Lei Shi¹, Feng Xin², Guangyao Ma², Dianchun Zheng^{3*}, Zhengwei Wang³

¹State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing

²State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing

³Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application of Ministry of Education, Harbin University of Science and Technology, Harbin Heilongjiang

Email: *zhengdianchun@126.com

Received: Oct. 29th, 2016; accepted: Nov. 15th, 2016; published: Nov. 18th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The transformer oil was taken as the object of study, and the finite element method (FEM) was employed to analyze and solved the partial differential equations (PDE) which was built by field ionization for describing the generation and transport properties of free charge carriers. The results showing that the dynamic characteristics of space charges in the liquid-gap discharge under DC were gained. According to the simulating results, the fundamental causes of the dielectric liquids breakdown by the electric field dependent molecular ionization are described as following; the pre-breakdown current is firstly formed by the generation and migration of the charge carriers in the oil gap, then the joule heat generated from it makes liquid-gap to form the low density region in the liquid, which facilitate initiated little streamer emergence as avalanche in gas discharge, meanwhile, the streamer is continuously evolving. Then these conclusions enable ones easily understand breakdown mechanism of the liquid dielectrics that are reasonably applied to power system fields.

Keywords

Transformer Oil, Field Ionization, Charge Carriers, Space Charge, Streamer

恒定电压下变压器油隙放电特性

李 伟¹, 任志刚¹, 石 磊¹, 辛 锋², 马光耀², 郑殿春^{3*}, 王正伟³

*通讯作者。

文章引用: 李伟, 任志刚, 石磊, 辛锋, 马光耀, 郑殿春, 王正伟. 恒定电压下变压器油隙放电特性[J]. 凝聚态物理学进展, 2016, 5(4): 53-62. <http://dx.doi.org/10.12677/cmp.2016.54008>

¹国网北京电力科学研究院, 北京

²国网北京市电力公司, 北京

³哈尔滨理工大学, 工程电介质及其应用技术教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

Email: *zhengdianchun@126.com

收稿日期: 2016年10月29日; 录用日期: 2016年11月15日; 发布日期: 2016年11月18日

摘 要

以变压器油作为研究对象, 采用有限元方法(finite element method, FEM)对应用场致电离机理建立的用于表述液体电介质流注放电过程中载流子的产生及输运特性的偏微分方程(partial differential equations, PDE)进行求解分析, 获得直流电压下变压器油隙放电过程空间电荷动力学特性。数值模拟结果表明, 场致电离导致液体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形成低密度区, 利于流注发展。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, 场致电离, 载流子, 空间电荷, 流注

1. 引言

目前, 已有文献论述了液体介质击穿过程载流子增长机理, 包括碰撞电离、光电离以及场致电离机理[1]。碰撞电离是一高场强非弹性碰撞过程, 它通常发生在中性分子与受强电场作用而加速的自由电子之间。碰撞过程的能量交换导致一中性分子的价电子进入导带, 从而产生一个正离子和另一个自由电子[2][3][4]。通常情况下, 在纯净液体中很难确定引起碰撞电离的种子电子来源, 特别是在快速正流注时, 次级效应如光发射或阴极电子发射都是微不足道的。而光电离通常是气体电介质击穿的关键。在液体中, 极少或者说目前并没有实验数据证实流注的发展有光电离的存在。然而, 液体电介质流注发展过程中会有发光的现象[5], 尤其是在强电场下, 所发出的光不但明亮而且聚焦在流注头部[6][7], 这表明流注头部可能存在有效的光电离过程。但是, 对于光电离的任何数学模型若欲实施准确分析, 需要知道吸收光谱系数、吸收光谱长度等参数。遗憾的是, 许多液体电介质特别是对于常用液体电介质异构混合物变压器油来说, 这些参数都是未知的, 就使得光电离理论对液体电介质放电方面的影响还处于研究阶段[8]。

场致电离机理表明[9], 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。在极高的电场下从一个中性分子中电离出一个电子, 产生了一个自由电子和一个正离子。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, 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, 所以当电子迅速的向正极迁移时, 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显著的净空间电荷的形成, 从而触发流注的产生、发展直至击穿。

近年来, 关于液体电介质击穿机理的研究, 国内外相关研究机构根据不同的应用目的和实验条件提出了一些有参考价值的理论和研究方法。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, 获得了恒定电压下变压器油隙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, 试图给出液体介质放电过程流注生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。

2. 液体介质场致电离数学模型

2.1. 针 - 球电极系统

依据 IEC60897 标准[10], 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, 外施恒定直流电压。此电极系统易使在尖电极达到 $1 \times 10^8 \text{ V/m}$ 量级。

2.2. 模型的数学表达

在流注形成过程, 电场作用下产生的大量自由载流子的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, 形成低密度区, 低密度区有利于流注的形成。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, 促使液体介质低密度区沿着轴向电场的迅速延伸。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[11]。

2.2.1. 载流子的生成

液体电介质与固体电介质相比, 由于分子或原子的聚集状态不同, 使得它们在物理形态及某些性质方面有很大差异。但固体电介质的电子隧道效应却与场致电离机理极为相似, 液体介质激发放电过程中电子、正负离子电荷密度生成量表征如下式[12]:

$$G_I(|E|) = rn_0\gamma(|E|) = \frac{e^2 n_0 a |E|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a \Delta^2}{eh^2 |E|}\right) \quad (1)$$

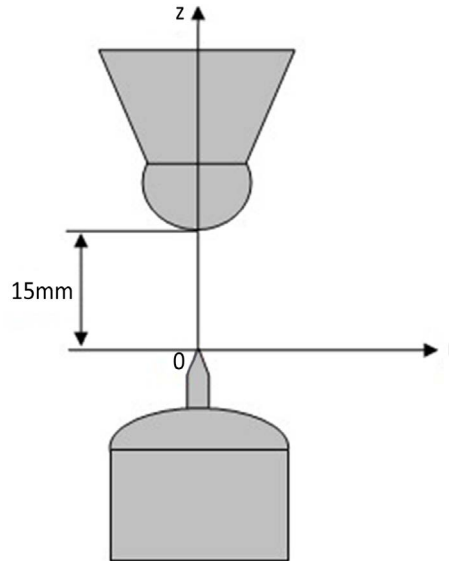


Figure 1. Needle-sphere electrode system
图 1. 针 - 球电极系统

其中, $\gamma(|\mathbf{E}|)$ 表示在电场作用下低能级电子跃迁成为自由电子的概率, e 表示电子电量, π 表示圆周率, a 表示分子间距, h 表示普朗克常量, m^* 表示有效电子质量, Δ 表示液体分子的电离能。 n_0 表示单位体积液体电介质中所含分子数目。因为变压器油是混合物, 存在分子结构不同的物质, 所以对于不同种类的分子, 分子密度 n_0 和分子电离能 Δ 也不同。

在变压器油的放电过程中, 电子在电场的作用下沿电场方向运动, 迁移的过程会有部分电子附着于中性分子形成负离子[13]。电子的附着时间常数 T_a 是平均衰减长度与电子的迁移速度之比, 电子附着中性分子的过程可以用 $\frac{\rho_e}{T_a}$ 描述[14], ρ_e 表示电子电量密度。综上所述可知, 正离子、电子、负离子电量密度的生成项分别可以表述为:

$$G_p = G_I(|\mathbf{E}|) = \frac{e^2 n_0 a |\mathbf{E}|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a \Delta^2}{eh^2 |\mathbf{E}|}\right) \quad (2)$$

$$G_e = -G_I(|\mathbf{E}|) = -\frac{e^2 n_0 a |\mathbf{E}|}{h} \exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a \Delta^2}{eh^2 |\mathbf{E}|}\right) \quad (3)$$

$$G_n = \frac{\rho_e}{T_a} \quad (4)$$

2.2.2. 载流子复合

载流子在电场的作用下做定向运动的过程中必然存在着电子、负离子与正离子重组形成中性分子的情况, 显然这是一个化学过程。根据 Langevin 重组理论, 得到描述电子、负离子与正离子之间的复合过程如下[15]:

$$Q_p = \frac{R_{pe} \rho_e \rho_p}{e} + \frac{R_{pn} \rho_n \rho_p}{e} \quad (5)$$

$$Q_e = \frac{\rho_e}{T_a} + \frac{R_{pe} \rho_e \rho_p}{e} \quad (6)$$

$$Q_n = \frac{R_{pn} \rho_n \rho_p}{e} \quad (7)$$

其中 Q_p, Q_e, Q_n 分别是正离子、电子、负离子之间复合过程的复合项。 R_{pe} 、 R_{pn} 表示两种正负电荷载体之间复合的复合常数表达式[16]。为了方便计算, 提高计算效率, 在误差允许范围内, 使得 $R_{pe} = R_{pn} = 1.64 \times 10^{-17} \text{ m}^3/\text{s}$; ρ_e, ρ_p, ρ_n 分别表示电子、正离子、负离子的电量密度。

3. 带电粒子的动力学行为

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, 显然, 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[17], 方程如下:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E}) = \rho \quad (8)$$

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i \mu_i \mathbf{E}) = G_i + Q_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho_i c_v} (k_T \nabla^2 T + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) \quad (10)$$

方程(8)是电场泊松方程, 它描述了自由载流子的电场分布。 ε 表示液体电介质的介电常数, ρ 表示放电空间中某点处空间电荷电量密度之和($\rho = \rho_e + \rho_p + \rho_n$)。方程(9)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, $\mathbf{E}$ 表示空间电场强度矢量, G_i 表示第 i 种粒子的生成项, Q_i 表示第 i 种粒子的复合项。方程(10)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, $\mathbf{v}$ 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, ρ_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, $\mathbf{J}$ 表示液体电介质中载流子迁移所导致的传导电流。

将自由载流子的生成项与复合项带入到液体电介质放电动态模型, 获得适合理论分析的数学模型, 即:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\varepsilon \mathbf{E}) = \rho_e + \rho_p + \rho_n \\ \frac{\partial \rho_p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_p \mu_p \mathbf{E}) = G_I + \frac{R_{pe} \rho_p \rho_e}{e} + \frac{R_{pn} \rho_p \rho_n}{e} \\ \frac{\partial \rho_n}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_n \mu_n \mathbf{E}) = G_n - \frac{R_{pn} \rho_p \rho_n}{e} \\ \frac{\partial \rho_e}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho_e \mu_e \mathbf{E}) = -G_I - \frac{R_{pe} \rho_p \rho_e}{e} - \frac{\rho_e}{T_a} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T = \frac{1}{\rho_l c_v} (k_T \nabla^2 T + \mathbf{E} \cdot \mathbf{J}) \end{cases} \quad (11)$$

4. 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(11)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、倍增及输运历程, 以及放电通道——流注形成演化的机制。

4.1. 约束条件与求解域

电极系统施加幅值 150 KV 恒定电压, 即针电极为正, 球电极接地, 而针-球电极间隙为 15 mm。本文选取 K125X 环烷基变压器油为研究对象, 由于富含环烷烃和适量的芳香烃, 且溶解能力适宜[18], 其相关参数为: 分子间距 $a = 3 \times 10^{-10}$ m, 分子电离能 $\Delta = 7.1$ eV, 单位体积变压器油中分子数目 $n_0 = 1 \times 10^{23}$ m⁻³, 普朗克常量 $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J·s。

采用有限元方法求解方程组(11), 其约束条件如下[19]:

1) 电场泊松方程(方程 8): 在 $t = 0$ 时刻针电极处电压为直流电压 V_0 , 球电极接地。对称轴 z 轴及绝缘壁满足条件:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{E} = 0$$

2) 电荷运动特性连续性方程(方程 9): 边界条件满足外边界通量为零, 即

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_p = 0, \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_n = 0, \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_e = 0$$

另外, 电极满足扩散通量为零, 即

$$\mathbf{n} \cdot \nabla \rho_p = 0, \mathbf{n} \cdot \nabla \rho_n = 0, \mathbf{n} \cdot \nabla \rho_e = 0$$

3) 热扩散方程(方程 10): 所有边界设置为热扩散通量为零, 即

$$\mathbf{n} \cdot \nabla T = 0$$

求解域如图 2 所示。

4.2. 油隙中电场分布

在 0 ns 时刻, 变压器油中电场分布服从拉普拉斯分布, 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 3 所示。

随着施加电压时间的延长, 液体电介质在高电场作用下在针电极附近形成低密度区, 其方向沿 z 轴向球电极方向发展, 电场峰值逐渐远离针电极沿着 z 轴向油隙延伸。图 4 分别给出 100 ns、300 ns 和 500 ns 时刻油隙中电场分布。

初始时刻, 针电极针尖处电场由外施直流电压引起, 电场强度能够达到 10^8 V/m 以上, 满足场致电离机理作用条件。 $t > 0$ 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

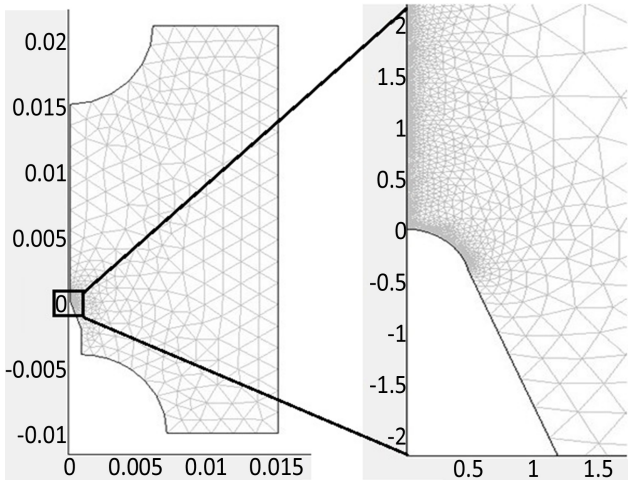


Figure 2. FEM solving domain and Meshed Needle Electrode Tip
图 2. FEM 求解域及针尖放大区网格剖分

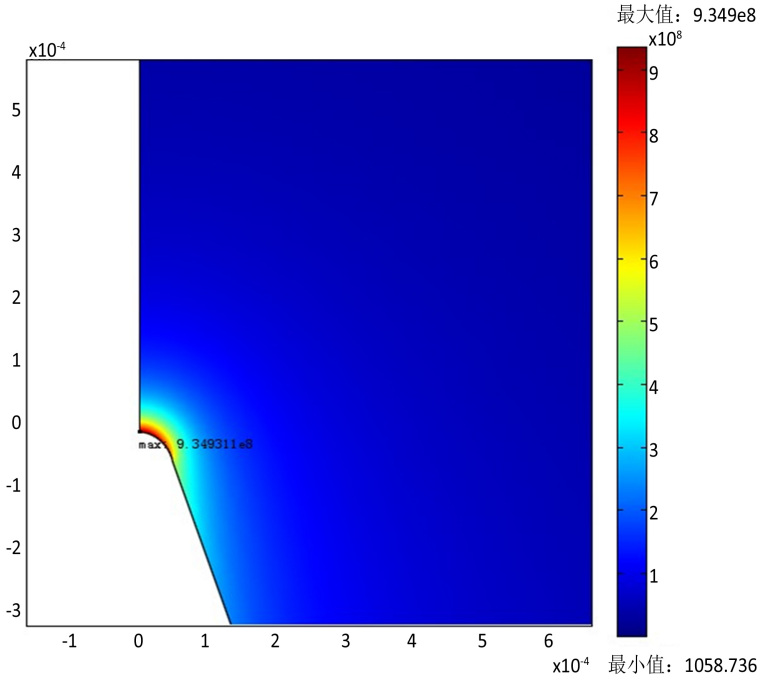


Figure 3. The Laplacian electric field distribution at initial moment
图 3. 初始时刻拉普拉斯电场分布

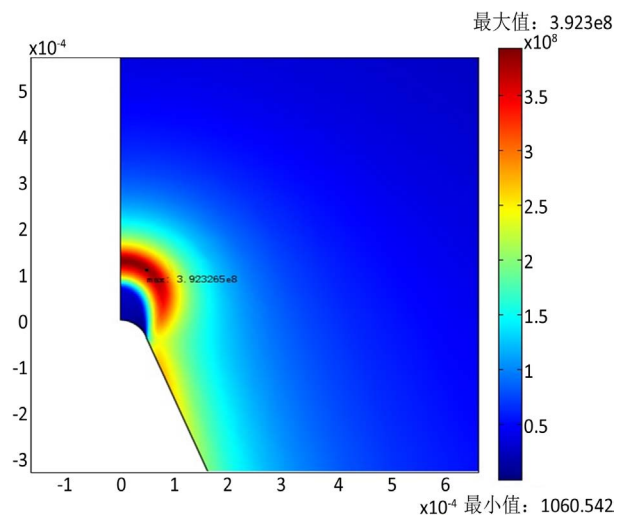
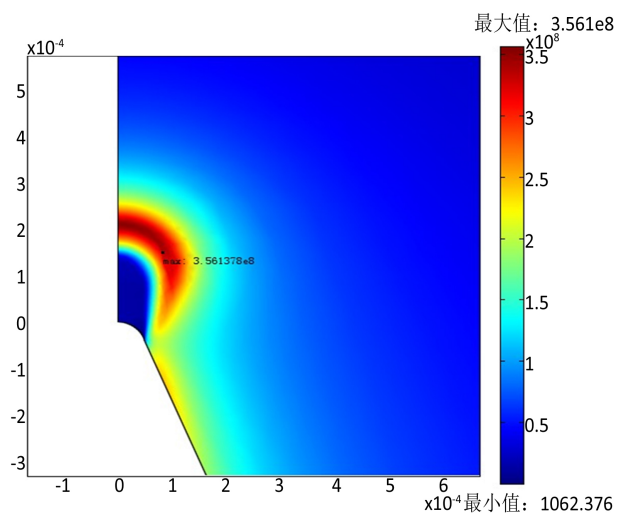
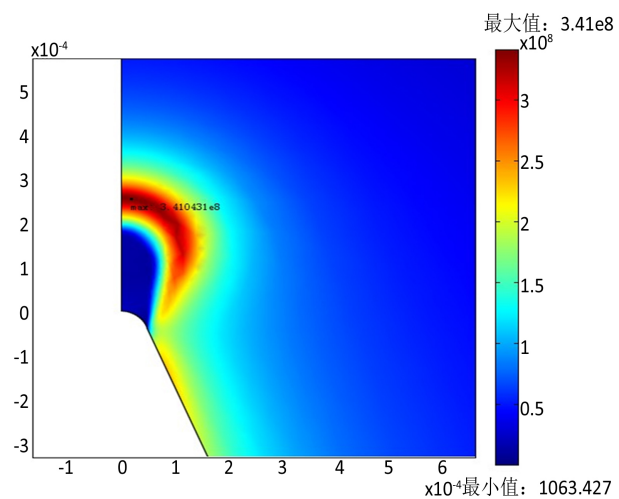
(a) $t = 100$ ns(b) $t = 300$ ns(c) $t = 500$ ns

Figure 4. Electric field distributions at different moment
图 4. 不同时刻电场分布

子和自由正离子。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。由于电子的迁移率远高于正离子的迁移率，相当于电子快速地向针电极运动，正离子可认为静止，因此针电极附近区域就滞留了大量正离子，形成了空间电荷区。又由于伴随着预击穿电流产生的焦耳热效应，此区域形成了低密度区，类似于气体放电过程，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(低密度区)电荷区域头部区域的电场得到加强，使畸变的电场区域延伸，既形成所谓的流注。

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 5 所示。

从图 5 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，且低密度区同时存在气-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 数量级，满足液体分子离解所需的电离能，使放电持续发展。在一些学者的实验[20]中，测得正流注的起始电场强度约为 2×10^8 V/m，本文计算结果与之相吻合。

4.3. 油隙中电荷分布

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。正是由于空间电荷的作用，畸变了油隙的电场，使得流注头部区域的电场得到加强，致使沿 z 轴处电场峰值与净电荷浓度最大值位置一致，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 6 给出了沿 z 轴方向电荷分布的变化。

4.4. 油隙中温度分布

图 7 给出了油隙中不同时刻的温度分布。

5. 结论

针对液体放电简化物理模型建立了液体放电数值模型，通过分析研究得出以下结论：

- 1) 场致电离机理能够对液体电介质中载流子浓度的增长进行合理的解释。

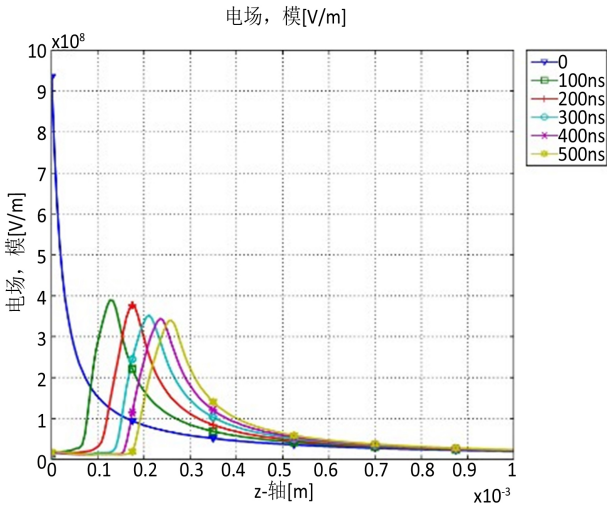


Figure 5. Electric field magnitude distributions at different moments

图 5. 不同时刻电场分布

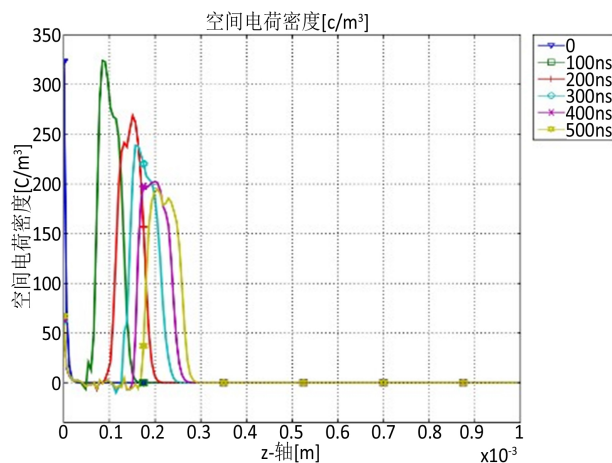


Figure 6. Space charge density distributions at different moments
图 6. 不同时刻空间电荷分布

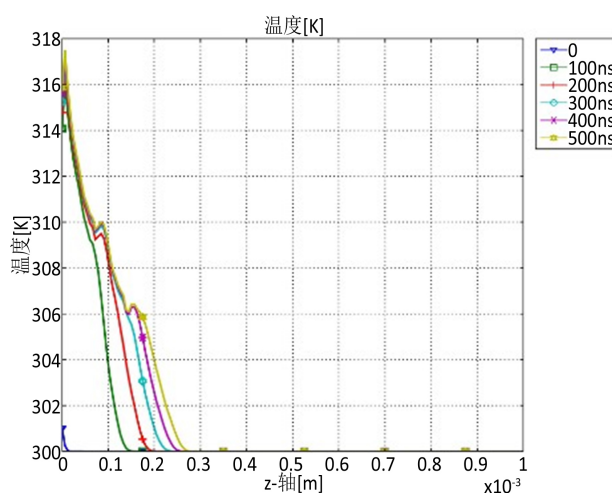


Figure 7. Temperature distributions of oil gap at different moments
图 7. 不同时刻温度分布

2) 液体放电过程可用流体动力学模型进行描述，在场致电离机理作用下放电过程中流注由“迁移电场”触发形成。

3) 液体放电过程数值分析能够从粒子动力学行为获取放电机理的微观过程并给出合理的解释。

随着计算技术的提高和计算工具的快速发展，液体放电过程的理论研究将会更加深入。而对液体电介质放电现象的深入探索，不但可以为电力设备结构设计提供技术支持和理论依据，而且也可以拓展液体电介质应用的领域。

基金项目

国家自然科学基金资助项目(No. 51077032)。

参考文献 (References)

- [1] Hwang, J.-W.G. (2010) Elucidating the Mechanisms Behind Pre-Breakdown Phenomena in Transformer Oil Systems. PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

- [2] Jadidian, J., Zahn, M., Lavesson, N., *et al.* (2012) Impulse Breakdown Delay in Liquid Dielectrics. *Applied Physics Letters*, **100**, 192910. <https://doi.org/10.1063/1.4716464>
- [3] Kim, M., Hebner, R.E. and Hallock, G.A. (2008) Modeling the Growth of Streamers during Liquid Breakdown. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **15**, 547-553. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2008.4483476>
- [4] Denat, A. (2006) High Field Conduction and Prebreakdown Phenomena in Dielectric Liquids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **13**, 518-525.
- [5] Qureshi, M.I., Beroual, A. and Al-Ammar, E.A. (2014) Optical Observation of Streamer Propagation and Breakdown in Seed Based Insulating Oil under Impulse Voltages. *International Journal of Physical Sciences*, **9**, 292-301. <https://doi.org/10.5897/IJPS2014.4147>
- [6] Aka-Ngnui, T. and Beroual, A. (2006) Determination of the Streamers Characteristics Propagating in Liquids Using the Electrical Network Computation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **13**, 572-579. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2006.1657970>
- [7] Hallac, A., Georghiou, G.E. and Metaxas, A.C. (2003) Secondary Emission Effects on Streamer Branching in Transient Non-Uniform Short-Gap Discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **36**, 2498-2509. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/20/011>
- [8] Dang, V. and Beroual, A. (2012) Investigations on Streamers Phenomena in Mineral, Synthetic and Natural Ester Oils under Lightning Impulse Voltage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **19**, 1521-1527. <https://doi.org/10.1109/tdei.2012.6311496>
- [9] Wang, Z.D., Liu, Q., Wang, X. and Jarman, P. (2011) Discussion on Possible Additions to IEC60897 and IEC 61294 for Insulating Liquid Tests. *IET Electric Power Applications*, **5**, 486-493. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2010.0209>
- [10] Sullivan, A. (2007) Model for the Initiation and Propagation of Electrical Streamers in Transformer Oil and Transformer Oil Based Nanofluids. Massachusetts Institute of Technology, USA.
- [11] 杨韦国. 变压器油纳秒脉冲流注发展的数值仿真及放电光谱分析[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2015.
- [12] 王正伟. 快脉冲电压下环烷基液体介质击穿特性[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- [13] Qian, J., Joshi, R.P., Schamiloglu, E., Gudet, J. and Woodworth J.R. (2006) Analysis of Polarity Effects in the Electrical Breakdown of Liquids. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **39**, 359-369. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/39/2/018>
- [14] Lesaint, O. and Jung, M. (2000) On the Relationship between Streamer Branching and Propagation in Liquids: Influence of Pyrene in Cyclohexane. *Journal of Physics D: Applied Physics*, **33**, 1360-1368. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/11/315>
- [15] Torshin, Y.V. (2003) Prediction of Breakdown Voltage of Transformer Oil from Predischage Phenomena. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **10**, 933-941. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2003.1255769>
- [16] O'Sullivan, F. (2006) Modeling the Effect of Ionic Dissociation on Charge Transport in Transformer Oil. *Proceedings of IEEE Conference on Electrical of Insulation*, Kansas City, 15-18 October 2006, 756-759. <https://doi.org/10.1109/ceidp.2006.312042>
- [17] Hwang, J.G. (2009) Modeling Streamers in Transformer Oil: The Transitional Fast 3rd Mode Streamer. *Proceedings of the 9th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials*, Harbin, 19-23 July 2009, 573-578.
- [18] George Hwang, J. and Zahn, M. (2012) Mechanisms behind Positive Streamers and Their Distinct Propagation Mode in Transformer Oil. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **19**, 162-174. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2012.6148515>
- [19] O'Sullivan, F.M., George Hwang, J. and Zahn, M. (2008) A Model for the Initiation and Propagation of Positive Streamers in Transformer Oil. *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Cambridge, 9-12 June 2008, 210-214. <https://doi.org/10.1109/elinsl.2008.4570312>
- [20] Beroual, A., Zahn, M., *et al.* (1998) Propagation and Structure of Streamers in Liquid Dielectrics. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, **14**, 6-17. <https://doi.org/10.1109/57.662781>

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：cmp@hanspub.org