第 50 卷 第 12 期：5435-5448　　高电压技术　　Vol.50, No.12: 5435-5448
2024 年 12 月 31 日　　High Voltage Engineering　　December 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231666

三元混合绝缘油雷电冲击流注放电发展特性仿真研究

张钧奕[1,2]，郝　建[1]，张静文[1]，叶文郁[1]，秦　威[2]，廖瑞金[1]
（1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学)，重庆 400044;
2. 国网重庆市电力公司电力科学研究院，重庆 401123）

摘　要：为将三元混合绝缘油应用于更高电压等级变压器，考虑油品化学成分对油品电离能的影响，以及油品电离能随电场强度的变化规律，在传统流体动力学漂移扩散模型基础上，研究建立三元混合绝缘油流注放电仿真模型，仿真分析不同外施条件下三元混合绝缘油的流注放电发展特性，分析讨论三元混合绝缘油流注发展的混合平衡效应、尺寸效应和极性效应。结果表明：构建的三元混合绝缘油流注放电模型能更好的反应油品流注放电发展形貌；外施正极性电压越大，三元混合绝缘油流注放电发展长度激增的时刻出现得越早；针尖曲率半径减小，三元混合绝缘油流注放电的发展速度越快，但其主通道流注放电的直径越小；针-板电极间油隙距离减小，相同电压下三元混合绝缘油流注放电发展越剧烈；与矿物油、大豆基天然酯、棕榈基天然酯的流注放电发展特性相比，三元混合绝缘油流注放电发展过程中呈现由油品成分主导的混合平衡效应。

关键词：变压器；混合绝缘油；电离能；流注放电；雷电冲击

Development Characteristics of Lightning Impulse Discharge Streamer of Three-element Mixed Insulation Oil Based on Simulation Research

ZHANG Junyi[1, 2], HAO Jian[1], ZHANG Jingwen[1], YE Wenyu[1], QIN Wei[2], LIAO Ruijin[1]
(1. National Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China;
2. State Grid Chongqing Electric Power Co. Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China)

Abstract：In order to apply three-element mixed insulation oil to transformers with higher voltage levels, a simulation model of three-element mixed insulation oil streamer discharge was established on the basis of traditional fluid dynamics drift diffusion model, considering the influences of oil chemical composition on oil ionization energy and the variation law of oil ionization energy with electric field intensity. The characteristics of streamer discharge development of three-element mixed insulation oil under different application conditions were analyzed by simulation, and the effects of mixing balance, size and polarity were discussed. The results show that the three-element mixed insulation oil streamer discharge model established in this paper can better reflect the development morphology of oil streamer discharge. The larger the positive polarity voltage applied, the earlier the time of the surge in the development length of the three-element mixed insulation oil stream discharge. With the decrease of the tip curvature radius, the development speed of the streamer discharge is faster, but the diameter of the main channel streamer discharge is smaller. With the decrease of the oil gap distance between the pin-plate electrodes, the development of the three-element mixed insulation oil streamer discharge becomes more severe under the same voltage. Compared with the development characteristics of mineral oil, soya-based natural ester and palmit-based natural ester, the mixing balance effect dominated by oil composition is presented in the development process of three-element mixed insulation oil.

Key words：transformer; mixed insulation oil; ionization energy; discharge streamer; lightning impulse

0　引言

绝缘油是油浸式变压器的“血液”，对保障变压器安全至关重要[1-2]。将矿物绝缘油和植物绝缘油按照一定工序混合起来组成的混合绝缘油，可改善单一绝缘油性能的不足，统筹兼顾矿物绝缘油和植物绝缘油的优缺点，是国际液体电介质发展的重要方向[3-4]。2019 年，重庆大学廖瑞金教授等研制出满足标准 GB 2536—2011 要求的新型抗老化三元混合绝缘油，其具备低粘度、低介损、高氧化安定性的技术优势；与矿物油纸绝缘体系相比，三元混合

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5500-202327118A-1-1-ZN)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202327118A-1-1-ZN).

油提升油纸绝缘工频击穿强度约 10%~15%[5-6]，该新型混合绝缘油已在 10 kV、35 kV 变压器安全应用 3 年多。为将三元混合绝缘油应用于更高电压等级变压器，迫切需要掌握其雷电冲击放电特性，以支撑高电压等级混合油变压器的绝缘结构设计。

目前，获得绝缘油雷电冲击放电特性主要通过试验和仿真两种途径，试验中主要采用阴影成像法或暗室拍摄法获得绝缘油流注放电形特性，通过击穿电压、油隙距离、极性和针尖曲率半径等影响因素对绝缘油雷电冲击流注发展特性进行宏观的解释[7-8]，但试验手段难以针对流注放电过程中的电场分布及带电粒子分布等微观参量进行研究[9]。然而，通过仿真手段可对流注发展微观物理过程进行模拟，进一步揭示流注放电发展机理[10]。已有不少研究者通过建立不同的仿真模型对液体绝缘电介质的流注放电特性进行研究，如电子动能模型[11]、气体电介质击穿模型(NPW 模型)[12]，液体电介质击穿模型 WZ 模型[13]，基于分形理论的液体电介质流注放电模型等模型[14]。但是，这些模型尚未能较好的描述流注发展中的物理过程。

2010—2012 年，麻省理工学院 M. Zahn 等建立了三载流子连续电流体动力学模型[15]，该模型较好地反映了矿物油流注放电过程中载流子产生、迁移、消散的微观过程。2018 年，西班牙马德里理工大学 Juan V elasco 等基于电流体动力学模型对矿物油、矿物油纸体系和含有纳米颗粒的矿物油 3 种油变压器结构下的正流注发展进行了比较，表明纳米颗粒和绝缘纸板能够有效改善矿物油的介电性能[16]。近些年来，不少研究者继续采用电流体动力学模型开展天然酯中流注放电特性的研究。2023 年，广西大学郑含博等基于流体动力学模型研究了温度对天然酯放电特性的影响，表明随外加电压增加，流注放电通道温度变化更剧烈，进而促进了流注放电的传播[17]。2023 年，重庆大学李剑等人基于三载流子连续电流体动力学模型研究了针尖曲率半径对天然酯雷电冲击电压下流注放电发展的影响，表明较小的曲率半径更易导致放电二次流注的发展[18]。虽然，目前有关矿物油和天然酯的流注放电发展特性已得到深入解释。但是，尚未针对混合绝缘油开展相关研究。此外，大量文献研究认为电离是液体电介质放电过程中带电粒子产生的主要来源[19-21]。然而，上述研究缺乏考虑不同种类油品电离能的场强依赖特性。

本文开展三元混合绝缘油雷电冲击流注放电发展特性仿真分析研究。首先，考虑油品电离能随电场变化和绝缘油成分的影响，研究建立改进的绝缘油流注放电模型；然后，研究分析三元混合绝缘油在不同外施电压、不同间隙和不同曲率半径下的流注放电形貌、电场及空间电荷分布特性。最后，从机理上讨论分析三元混合绝缘油中的混合平衡效应、尺寸效应和极性效应。本文成果将为三元混合绝缘油应用于更高等级变压器及绝缘结构设计提供数据支撑。

1 仿真与试验部分

1.1 绝缘油流注放电传统仿真模型

目前，雷电冲击电压下矿物油和天然酯的流注放电仿真广泛采用的流体动力学漂移-扩散近似模型包括 7 个方程[22]：泊松方程、电子连续性方程、正离子连续性方程、负离子连续性方程、传热方程、耗散传导电流密度方程和场致电离源项方程。其中，泊松方程、电子连续性方程、正离子连续性方程和负离子连续性方程如式(1)—(4)所示[22]，其描述了电子和正负离子的产生、迁移和耗散以及流注在绝缘油中的引发和传播过程。

$$\nabla\cdot\left(\varepsilon_{\mathrm{r}}\varepsilon_0\boldsymbol{E}\right)=\rho_{\mathrm{p}}+\rho_{\mathrm{n}}+\rho_{\mathrm{e}} \tag{1}$$

$$\frac{\partial\rho_{\mathrm{p}}}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho_{\mathrm{p}}\mu_{\mathrm{p}}\boldsymbol{E}\right)=G_{\mathrm{F}}\left(\left|\boldsymbol{E}\right|\right)+G_{\mathrm{A}}\left(\left|\boldsymbol{E}\right|\right)+\frac{\rho_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{e}}R_{\mathrm{pe}}}{q}+\frac{\rho_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{n}}R_{\mathrm{pn}}}{q} \tag{2}$$

$$\frac{\partial\rho_{\mathrm{n}}}{\partial t}-\nabla\cdot\left(\rho_{\mathrm{n}}\mu_{\mathrm{n}}\boldsymbol{E}\right)=\frac{\rho_{\mathrm{e}}}{\tau_{\mathrm{a}}}-\frac{\rho_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{n}}R_{\mathrm{pn}}}{q} \tag{3}$$

$$\frac{\partial\rho_{\mathrm{e}}}{\partial t}-\nabla\cdot\left(\rho_{\mathrm{e}}\mu_{\mathrm{e}}\boldsymbol{E}\right)=-G_{\mathrm{F}}\left(\left|\boldsymbol{E}\right|\right)-G_{\mathrm{A}}-\frac{\rho_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{e}}R_{\mathrm{pe}}}{q}-\frac{\rho_{\mathrm{e}}}{\tau_{\mathrm{a}}} \tag{4}$$

式中：ε_{r} 和 ε_0 分别是油的相对介电常数和真空介电常数；$\boldsymbol{E}$ 为电场强度，V/m；G_{F} 为场致电离源项；G_{A} 为碰撞电离源项；ρ_{p}、ρ_{n} 和 ρ_{e} 分别是正离子、负离子和电子的电荷密度，mol/m^3；μ_{p}、μ_{n} 和 μ_{e} 分别是正离子、负离子和电子的迁移率，m^2/(V·s)；R_{pe} 和 R_{pn} 分别是离子-离子和离子-电子复合率，m^3/s；q 为电子电荷，C；τ_{a} 是电子与中性分子的附着时间，ns。

考虑到绝缘油流注放电会引起放电通道及其周围温度的变化，采用传热方程和耗散传导电流密度方程描述放电过程中流注温度的变化，如式

(5)—(6)所示，其描述了放电产生的温度变化过程。

$$\frac{\partial T}{\partial t}+\boldsymbol{v}\cdot\nabla T=\frac{1}{\rho_{\mathrm{oil}}c_{\mathrm{v}}}\left(k_{\mathrm{T}}\nabla^2 T+\boldsymbol{J}\cdot\boldsymbol{E}\right) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{J}=(\rho_{\mathrm{p}}\mu_{\mathrm{p}}-\rho_{\mathrm{e}}\mu_{\mathrm{e}}-\rho_{\mathrm{n}}\mu_{\mathrm{n}})\boldsymbol{E} \tag{6}$$

式中：T 是油温，K；ρ_{oil} 是质量密度，kg/dm^3；c_{v} 是比热，J/(kg·K)；k_{T} 是导热系数，W/(m·K)。根据文献[22]，在流注启动和传播的纳秒级到微秒级时间尺度上油速 v 可以忽略不计。

式(4)中的场致电离源项方程如式(7)所示。

$$G_{\mathrm{F}}=\frac{q^2 n_0 a|\boldsymbol{E}|}{h}\exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a\Delta^2}{qh^2|\boldsymbol{E}|}\right) \tag{7}$$

式中：h 是普朗克常数，m^2·kg/s；a 是分子分离距离，m；m*是有效电子质量，kg；n_0 是可电离分子数，m^{-3}；Δ 是绝缘油电离能，eV。式(4)中的碰撞电离源项方程如式(8)所示，A_{t} 和 B_{t} 分别是前指数系数(单位 m^{-1})和指数项系数(单位 V·m)。

$$G_{\mathrm{A}}=A_{\mathrm{t}}|\rho_{\mathrm{e}}||\mu_{\mathrm{e}}||\boldsymbol{E}|\exp\left(\frac{-B_{\mathrm{t}}}{|\boldsymbol{E}|}\right) \tag{8}$$

上述绝缘油流注放电仿真模型均将电离能作为恒定参量，未考虑油品电离能随电场强度的变化，因此，本文着重构建考虑电离能随电场变化的绝缘油流注放电仿真模型。

1.2　考虑电离能影响的绝缘油流注放电仿真模型

1.2.1　考虑油品电离能随电场变化的影响

油品的电离能是影响雷电冲击放电特性的重要因素，而电场强度也会影响油品电离能[23-25]。矿物油中含有链烷烃(11.6%)、环烷烃(77%)和少量芳烃(9.9%)等；大豆基天然酯成分中含量最高的是三油酸甘油酯(25.4%)和三亚油酸甘油酯(52%)[26]；棕榈基天然酯中绝大部分是棕榈基分子(PFAE)[27]。因此，本文基于密度泛函理论(DFT)的量子化学计算软件计算了环烷烃、链烷烃、棕榈基分子(PFAE)、三亚油酸甘油酯和三油酸甘油酯 5 种典型油品分子在不同电场下的电离能。环烷烃和链烷烃是矿物油的主要代表成分，棕榈基分子(PFAE)是改性棕榈基天然酯的代表成分，三亚油酸甘油酯和三油酸甘油酯分子是大豆基天然酯的主要代表成分。

首先，利用量子化学计算软件分别对不施加电场作用和施加不同电场作用下的分子进行结构优化。本文选择量子化学软件 Gaussian 16，选择 M062X 交换相关函数结合 6-311G 基集对上述油品分子在不同电场强度下的电离能 E_{IP} 进行计算[28-30]，计算式如式(9)所示，E^{A+}为阳离子 A+的能量，E^{A}为孤立态分子 A 的能量。

$$E_{\mathrm{IP}}=E^{\mathrm{A}+}-E^{\mathrm{A}} \tag{9}$$

不同电场下的油品电离能如图 1 所示，矿物油中链烷烃、环烷烃和棕榈基天然酯中 PFAE 分子的电离能随电场强度的增大而逐渐增大，而三油酸甘油酯和三亚油酸甘油酯分子的电离能随电场强度的增大而减小。电场作用下 5 种油品分子的电离能与不存在电场作用时存在差异，特别是场强较大时。可见，不同类型绝缘油分子会对油品本身电离能产生重要影响。因此，需增设绝缘油分子电离能随电场变化的公式，如式(10)所示：

$$\boldsymbol{E}_{\mathrm{IP}_i}=\Delta_i-\gamma_i\sqrt{|\boldsymbol{E}|} \tag{10}$$

式中：Δ_i 为油品初始电离能；eV；γ_i 是电离能系数，eV；$\boldsymbol{E}_{\mathrm{IP}_i}$ (其中 i=1, 2, 3, …, n)是不同类型绝缘油分子随电场变化的电离能。

1.2.2　考虑绝缘油成分对电离的影响

油品组分会对可电离分子数 n_i(其中 i=1, 2, 3, …, n)产生影响[22]，因此，需对传统场致电离源项进行改进，改进后的场致电离源项 $G_{\mathrm{F}i}$ 如式(11)所示。综合考虑油品分子电离能随电场变化和绝缘油组成成分的影响，绝缘油模型改进后的正离子连续性方程和负离子连续性方程如式(12)和式(13)所示：

$$G_{\mathrm{F}i}=\frac{q^2 n_i a|\boldsymbol{E}|}{h}\exp\left(-\frac{\pi^2 m^* a\boldsymbol{E}_{\mathrm{IP}_i}{}^2}{qh^2|\boldsymbol{E}|}\right) \tag{11}$$

$$\frac{\partial\rho_{\mathrm{p}}}{\partial t}+\nabla\cdot\left(\rho_{\mathrm{p}}\mu_{\mathrm{p}}\boldsymbol{E}\right)=G_{Fi}\left(|\boldsymbol{E}|\right)+G_{\mathrm{A}}\left(|\boldsymbol{E}|\right)+\frac{\rho_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{e}}R_{\mathrm{pe}}}{q}+\frac{\rho_{\mathrm{p}}\rho_{\mathrm{n}}R_{\mathrm{pn}}}{q} \tag{12}$$

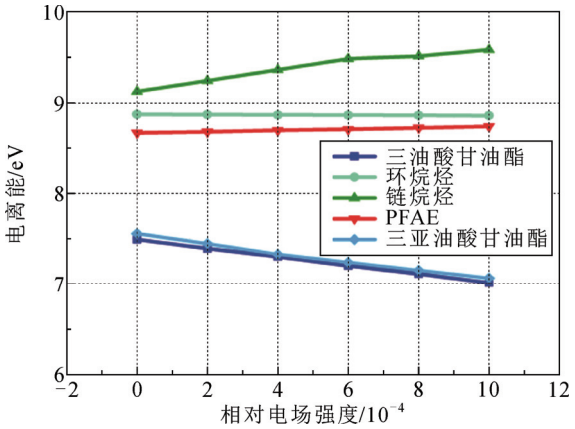


图 1　电场作用下不同油品分子的电离能计算结果

Fig.1　Calculation results of ionization energy of different oil molecules under electric field

$$\frac{\partial \rho_e}{\partial t}-\nabla\cdot(\rho_e\mu_e\boldsymbol{E})=-G_{Fi}(|\boldsymbol{E}|)-G_A(|\boldsymbol{E}|)-\frac{\rho_p\rho_e R_{pe}}{q}-\frac{\rho_e}{\tau_a} \tag{13}$$

1.3 典型绝缘油的流注放电仿真参数

1.3.1 矿物油和天然酯流注放电仿真参数

本文根据 IEC 60897 标准，选用针-板电极构建矿物油和天然酯流注放电仿真几何模型，间隙设置为 10 mm，选用有限元仿真软件中的二维对称模型进行建模，如图 2(a)所示。为节省计算资源，模型采用三角形网格，通过添加辅助面使流注发展区域内最大网格边长小于 4 μm，其他区域采用控制网格变量法，网格大小从辅助面向外逐渐增大，网格剖分如图 2(b)所示。矿物油、大豆基天然酯和棕榈基天然酯的流注放电模型主要参数如表 1 所示。

根据文献[22, 31]对流注放电模型进行边界条件设置，对于电流连续性方程式(2)—式(4)，在每个绝缘边界处，正离子、负离子和电子电流密度的法向分量分别设为 0，即 $\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{J}_p=0$，$\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{J}_n=0$ 和 $\boldsymbol{n}\cdot\boldsymbol{J}_e=0$。对于传热方程(5)，所有边界都设置为绝热。仿真中施加的雷电电压波形函数可设置为：

$$U=U_0K\left(e^{-t/\tau_1}-e^{-t/\tau_2}\right) \tag{14}$$

式中：K 为电压校正系数，K=1.037；U_0 为施加电压；τ_1、τ_2 为波头和波尾时间参数；t 为施压时间。为了避免网格划分对仿真分析造成干扰，仿真均在同一网格模型下进行计算。仿真的时间步长设置为 2.4×10^{-7} s，最后使用直接求解器 PARDISO 对模型进行求解。

1.3.2 三元混合绝缘油流注放电仿真参数

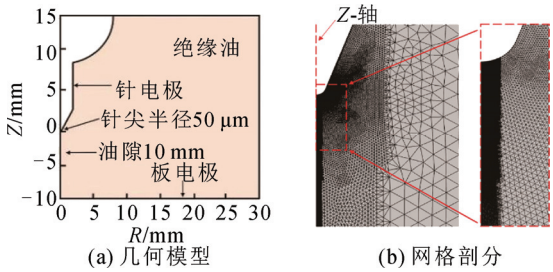
根据图2构建三元混合绝缘油流注放电仿真几何模型并对模型网格进行剖分。矿物油、大豆基天然酯、棕榈基天然酯的流注放电仿真模型所用的可电离分子数选用 $n=1\times10^{25}$ m^{-3}，矿物油密度 ρ_1=0.89 kg/dm^3，大豆基天然酯密度 ρ_2=0.92 kg/dm^3，棕榈基天然酯密度 ρ_3=0.86 kg/dm^3，根据图 2 油品在不同电场下的电离能结果，拟合得出了矿物油、大豆基天然酯和棕榈基天然酯电离能系数 Δ_1，Δ_2，Δ_3，γ_1，γ_2，γ_3，其中 Δ_1=8.91 eV，Δ_2=7.78 eV，Δ_3=8.67 eV，$\gamma_1=2.65\times10^{-6}$ eV，$\gamma_2=3.97\times10^{-5}$ eV，$\gamma_3=-3\times10^{-6}$ eV。

考虑三元混合绝缘油成分对油品可电离分子数的影响，根据三元混合绝缘油中矿物油、大豆基天然酯和棕榈基天然酯体积比例为 76:19:5，通过式(15)计算出三元混合绝缘油的可电离分子数 n_i(i=1, 2, 3)，即：

$$n_iM=\rho_{oil}V_{oil} \tag{15}$$

式中：V_{oil} 是绝缘油体积，cm^3；n_1 是矿物油组分的可电离分子数；n_2 是大豆基天然酯组分的可电离分子数；n_3 是棕榈基天然酯的可电离分子数。$n_1=9.18\times10^{24}$ m^{-3}，$n_2=4.9\times10^{23}$ m^{-3}，$n_3=3.3\times10^{23}$ m^{-3}。矿物油、大豆基天然酯和棕榈基天然酯流注放电仿真模型所用基本参数如表 1 所示，三元混合绝缘油的流注放电仿真模型需要综合三种油品的性能参数，改进参数如表 2 所示。在边界条件和直接求解器设置上，三元混合绝缘油流注放电模型与矿物油和天然酯流注放电模型一致。

本文仿真分析三元混合绝缘油分别在 10 mm 间隙下 120、140、160、200 kV 不同外施电压的放电发展特性，在 400 kV 外施电压下油隙距离为 10、25、50 mm 的放电发展特性，在 400 kV 外施电压和 10 mm 间隙下曲率半径分别为 25、50、100、150 μm 时的放电发展特性。最后讨论分析三元混合绝缘油的混合平衡效应、尺寸效应和极性效应。



(a) 几何模型 (b) 网格剖分

图 2 绝缘油流注放电几何模型

Fig.2 Insulation oil discharge stream geometry model

表 1 绝缘油流注放电仿真模型基本参数[15,22,31]

Table 1 Insulation oil discharge streamer simulation model parameters[15,22,31]

符号	参数含义	数值
μ_p、μ_n	正、负离子迁移率/(m^2·V^{-1}·s^{-1})	10^{-9}
μ_e	电子迁移率/(m^2·V^{-1}·s^{-1})	10^{-4}
c_v	比热/(J·kg^{-1}·K^{-1})	1.7×10^3
m	有效电子质量/kg	9.1×10^{-32}
a	分子间距离/m	3.0×10^{-10}
q	电子电荷/C	1.602×10^{-19}
h	普朗克常量/(m^2·kg·s^{-1})	$6.626\,068\times10^{-34}$
R_{pn}、R_{pe}	正负离子复合率、电子-正离子复合率/(m^3·s^{-1})	1.64×10^{-17}
k_t	热导率/(W·m^{-1}·K^{-1})	0.17

表 2　三元混合绝缘油流注放电仿真模型改进参数[15,22,31]

Table 2　The improved parameters of three-element mixed insulation oil stream discharge simulation model[15,22,31]

符号	参数含义	传统模型数值	三元混合绝缘油数值
τ	电子吸附时间/ns	200	50
ρ	密度(kg/dm^3)	0.88	0.886 8
n_1	矿物油可电离分子数/m^{-3}	1×10^{25}	9.18×10^{24}
n_2	大豆基天然酯可电离分子数/m^{-3}	1×10^{25}	4.9×10^{23}
n_3	棕榈基天然酯可电离分子数/m^{-3}	1×10^{25}	3.3×10^{23}
E_{IP1}	矿物油电离能/eV	8.5	$(8.91-2.65)\times10^{-6}\times\sqrt{\lvert \boldsymbol{E} \rvert}$
E_{IP2}	大豆基天然酯电离能/eV	8.5	$(7.78-3.97)\times10^{-5}\times\sqrt{\lvert \boldsymbol{E} \rvert}$
E_{IP3}	棕榈基天然酯电离能/eV	8.5	$(7.78-3.97)\times10^{-5}\times\sqrt{\lvert \boldsymbol{E} \rvert}$

2　结果及分析

2.1　不同外施电压下三元混合绝缘油流注放电发展特性

在正极性外施电压 120~400 kV 下，针-板距离为 10 mm，针尖曲率半径为 50 μm 时，仿真获得的三元混合绝缘油流注放电分支发展形貌如图 3 所示。图 3 表明，随外施电压的升高，针尖处的流注放电分支越容易产生和发展，初始流注放电发展越快；与 160 kV 及下电压下的流注放电相比，200 kV 和 400 kV 下的初始流注放电具有更快的起始速度和更大的直径，主通道流注放电发展长度更长。

在正极性外施电压 120~400 kV 下、针-板距离为 10 mm、针尖曲率半径为 50 μm 时，仿真获得的三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)在 240 ns 的电场分布和电荷分布特性如图 4 所示。图 4 表明，在 120~160 kV 范围内，随外施电压的升高，流注放电头部的电场强度和电荷密度逐渐增大，在 200~400 kV 范围内，随外施电压的升高，流注放电头部的最大电场强度和最大电荷密度反而逐渐减小；160 kV 时放电发展流注头部对应的最大电场强度为4.3×10^8 V/m，最大净空间电荷密度为6 900 C/m^3。出现该现象主要原因是当外施电压≥200 kV 时，针尖电极附近处流注放电分支的产生导致 *Z*-轴流注头部净空间电荷密度显著下降，进而也引起流注放电头部电场强度显著下降。

在正极性外施电压 120~400 kV 下，针-板距离为 10 mm，针尖曲率半径为 50 μm 时，仿真获得的

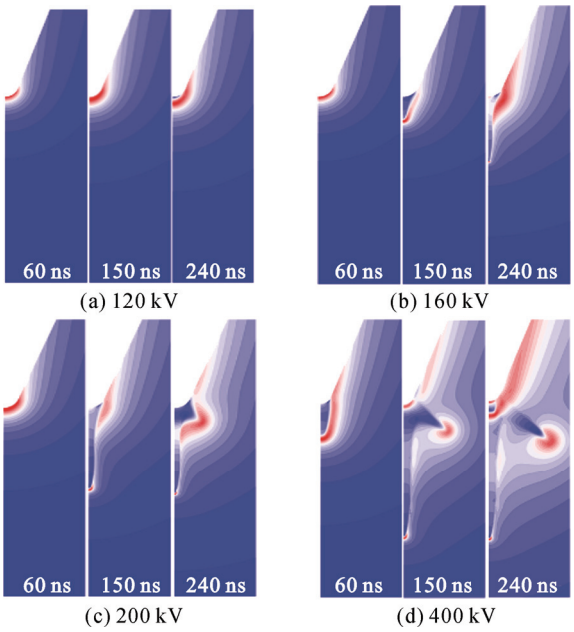


图 3　不同正极性外施电压下三元混合绝缘油流注放电形貌

Fig.3　Three-element mixed insulation oil discharge stream morphology under different positive applied voltages

三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)在 0~240 ns 的电场分布和电荷分布特性如图 5 所示。图 5 表明，在电压 120~400 kV 范围内，随放电时间的增加，流注放电头部的电场强度和电荷密度出现了先骤增后平缓下降的趋势；随外施电压的升高，流注放电头部的电场强度和电荷密度达到最大峰值的时间越短。

在正极性外施电压 120~400 kV 下，针-板距离为 10 mm，针尖曲率半径为 50 μm 时，仿真获得的三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)的发展速度和发展长度见图 6。根据文献[22]描述的流注 4 种放电模式，图 6(a)中在外施电压为 120 kV 时，流注速度仅为第一模式流注，当电压≥140 kV 时出现了第一模式和第二模式流注，在外施电压从 140 kV 增加到 400 kV 时，流注放电最大发展速度从 3.2 km/s 增加至 6.2 km/s，增加了约 1 倍。

图 6(b)表明，在外施电压为 120 kV 时，流注放电保持在针尖头部发展，处于积累阶段。在外施电压为 140~200 kV 时，流注放电发展出现了 3 个阶段：积累阶段、快速发展阶段和饱和停滞阶段。在外施电压从 140 kV 增加到 200 kV 时，电压增大了 0.54 倍，流注放电最大发展长度增大了约 1.6 倍；随外施电压的升高，流注放电积累阶段的时间越短，快速发展阶段和饱和停滞阶段的时间越长。在外施

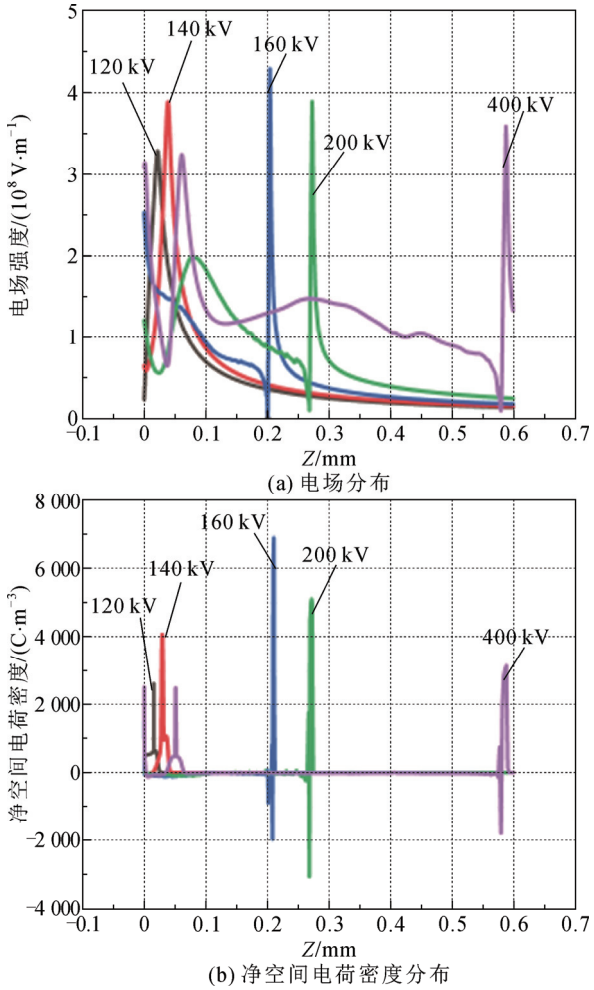


图 4 不同正极性外施电压下三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)在 240 ns 的电场分布和电荷分布图

Fig.4 Electric field distribution and charge distribution diagram of three-element mixed insulation oil discharge developing in the streamer head (*Z*-axis direction) at 240 ns under different positive applied voltages

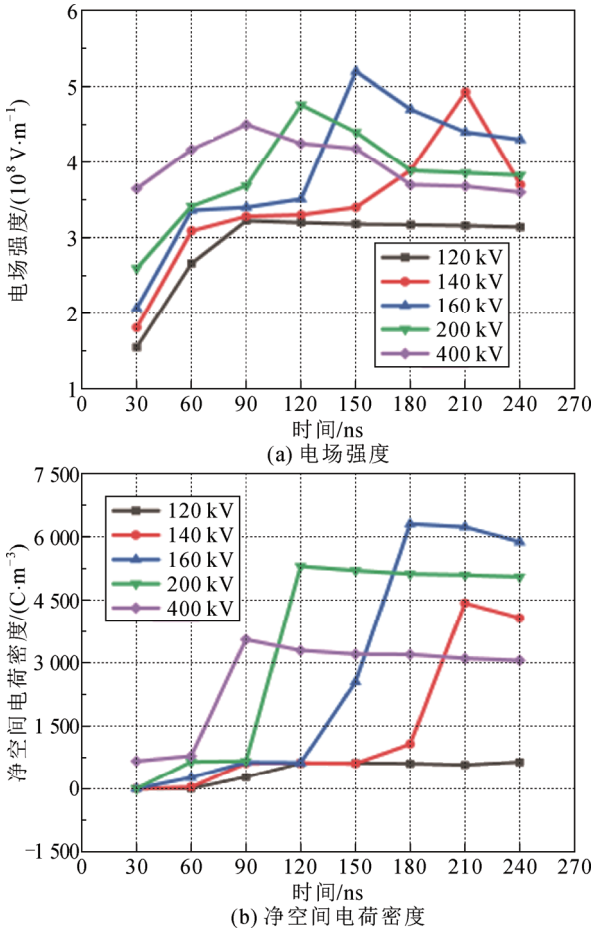


图 5 不同正极性外施电压下三元混合绝缘油发展流注头部(*Z*-轴方向)在 0~240 ns 的电场分布和电荷分布图

Fig.5 Electric field distribution and charge distribution of three-element mixed insulation oil in the streamer head (*Z*-axis direction) from 0 to 240 ns under different positive applied voltages

电压为 400 kV 时，流注放电发展仅出现两个阶段：快速发展阶段和饱和停滞阶段。出现该现象的主要原因在于当外施电压≤140 kV 时，流注放电头部难以积聚足够的净空间电荷，导致流注放电难以沿轴向发展；在外施电压为 140~200 kV 时，更高的外施电压导致流注放电能够更快在头部积累净空间电荷，进而更快的发展到饱和停滞阶段。在外施电压为 400 kV 时，足够高的电压导致流注放电在极短时间积累净空间电荷，导致其迅速到达快速发展阶段。图 6(c)表明，在外施电压 120~400 kV 范围内，随外施电压的增大，流注放电长度激增的时刻越早，在外施电压从 140 kV 增加到 400 kV 时，电压增大了 1.86 倍，流注放电最大发展长度激增时刻从 210 ns 减小至 30 ns，减小了 6 倍。

2.2 不同针尖曲率半径下三元混合绝缘油流注放电发展特性

在正极性外施电压 400 kV 下，针-板距离为 10 mm，针尖曲率半径为 25~150 μm 时，仿真获得的三元混合绝缘油流注放电分支发展形貌如图 7 所示。图 7 表明，随针尖曲率半径的减小，针尖处的流注放电分支和放电二次流注越容易产生和发展；与针尖曲率半径为 150 μm 相比，针尖曲率半径为 25 μm 的流注放电具有更快的发展速度和更多的流注放电分支数，流注放电发展长度更长，但其主通道流注放电的直径更小。

三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)的电场分布和电荷分布特性如图 8 所示。图 8 表明，

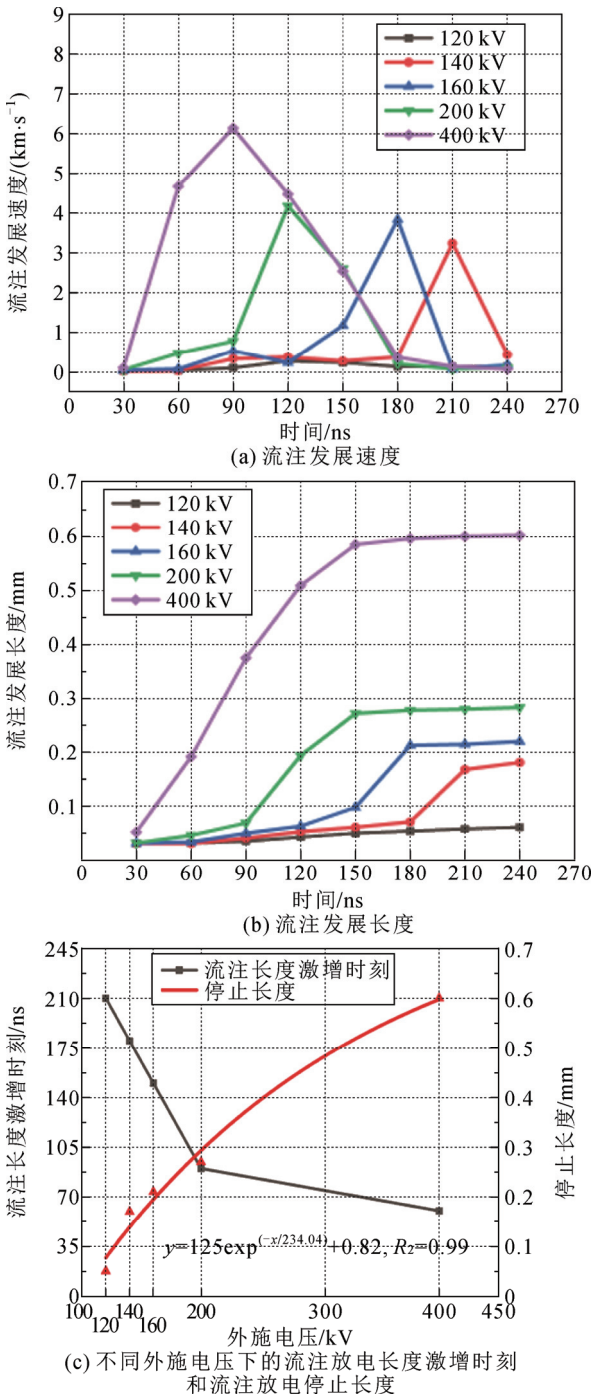


图 6　不同正极性外施电压下三元混合绝缘油流注放电(*Z*-轴方向)的发展速度和发展长度

Fig.6　Development speed and length of three-element mixed insulation oil discharge stream (*Z*-axis direction) under different positive applied voltages

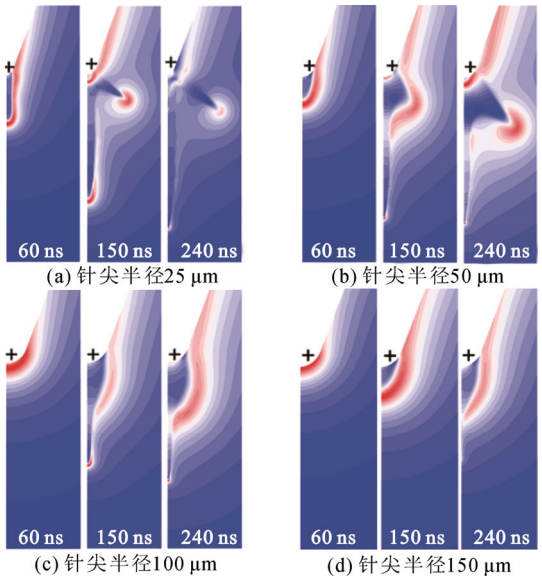


图 7　不同针尖半径下的三元混合绝缘油流注发展形貌

Fig.7　Development morphology of three-element mixed insulation oil stream under different tip radius

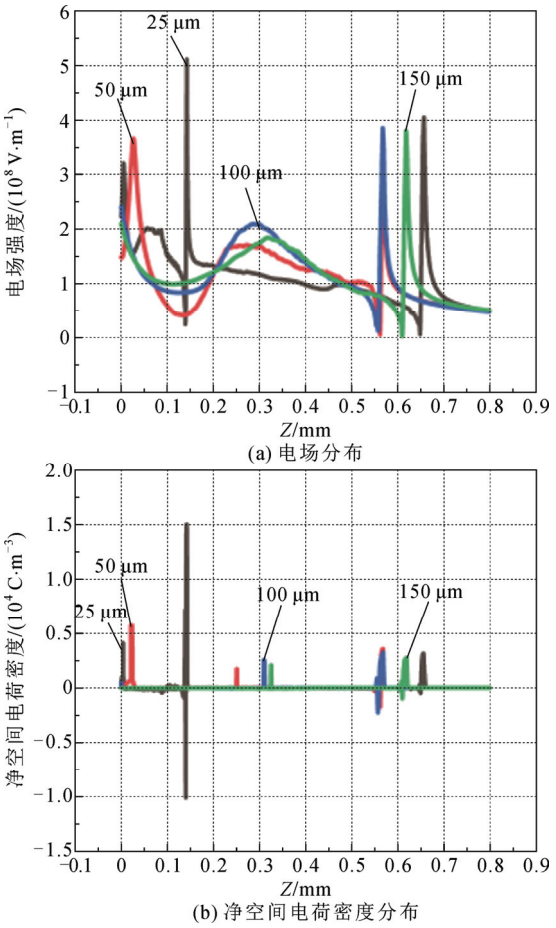


图 8　不同针尖曲率半径下三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)的电场分布和电荷分布图

Fig.8　Electric field distribution and charge distribution diagram of three-element mixed insulation oil discharge stream head (*Z*-axis direction) under different tip curvature radius

在针尖曲率半径为 25~50 μm 范围和 100~150 μm 范围内，随针尖曲率半径的增大，流注放电头部的最大电场强度和电荷密度逐渐减小；在 50~100 μm 范围内，随针尖曲率半径的增大，流注放电头部的最大电场强度和电荷密度反而逐渐增大。出现该现象

的主要原因在于当针尖曲率半径≤100 μm 时，较小的曲率半径增强了针尖处电场，产生了更多的空间电荷使流注放电头部更容易发展，而流注放电产生的分支和二次流注放电会削弱头部电场。

三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)的发展速度和发展长度如图 9 所示。图 9(a)表明，随针尖曲率半径减小，流注放电最大发展速度逐渐上升，达到流注放电最大发展速度的时间越短，流注放电均保持在第一模式流注和第二模式流注，在针尖曲率半径从从 150 μm 减小到 25 μm 时，流注放电最大发展速度从 5.6 km/s 增加至 7.1 km/s，增加了约 0.27 倍。图 9(b)表明，随针尖曲率半径的减小，流注放电发展长度逐渐增大，在针尖曲率半径从 150 μm 减小到 25 μm 时，流注放电最大发展长度从 0.57 mm 增加至 0.66 mm，增加了约 0.16 倍。

2.3 不同油隙距离下三元混合绝缘油流注放电发展特性

在针-板距离 10~50 mm，针尖曲率半径为 50 μm 下，正极性外施电压为 400 kV 时，仿真获得的三元混合绝缘油流注放电分支发展形貌如图 10 所示。图 10 表明，随针-板距离的增加，针尖处的流注放电分支越难以产生和发展；与 50 mm 间隙下的流注放电相比，10 mm 和 25 mm 间隙下的初始流注放电更易产生放电二次流注和流注放电分支，主通道流注放电发展长度更长。

三元混合绝缘油流注放电分支发展形貌如图 11 所示。在 10~25 mm 范围内，随针-板间隙的增大，流注放电头部的电场强度和电荷密度逐渐减小，在 25~50 mm 范围内，随针-板间隙的增大，流注放电头部的电场强度和电荷密度反而逐渐增大。出现该现象的主要原因在于当针-板距离≥25 mm 时，较大的针-板距离导致绝缘油中净空间电荷较为分散，流注放电头部积聚净空间电荷的能力下降，进而也引起流注放电头部电场强度显著下降；当针-板距离≤25 mm 时，较小的针-板距离导致针尖电极附近处流注放电出现分支，进而导致 *Z*-轴流注头部净空间电荷密度显著下降，最终引起流注放电头部电场强度显著下降。

3 讨论

3.1 考虑电离能随电场变化前后的流注放电特性差异分析

在正极性外施电压 400 kV 下，针-板间隙为

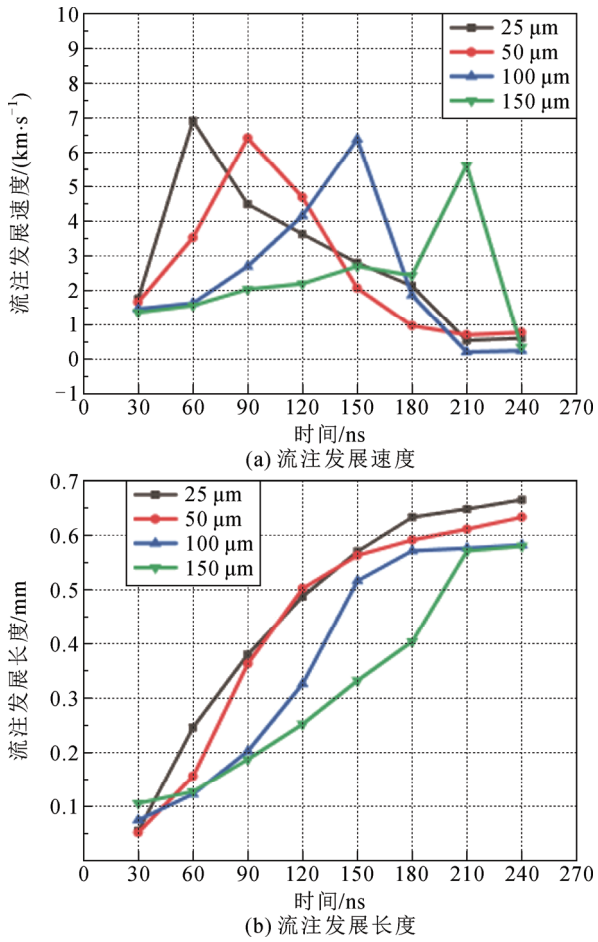


图 9 不同针尖曲率半径下三元混合绝缘油流注放电(*Z*-轴方向)的发展速度和发展长度

Fig.9 Development speed and length of three-element mixed insulation oil discharge stream (*Z*-axis direction) under different tip curvature radius

10 mm 和 25 mm，针尖曲率半径为 50 μm，*t*=240 ns 时，仿真获得的考虑电离能随电场变化优化前后三元混合绝缘油流注放电分支发展形貌如图 12 所示。和试验获得的实际流注放电发展形貌相比，优化后的三元混合绝缘油主流注均比电离能固定的三元混合绝缘油主流注的发展长度更长，且位于针尖处的流注分支发展更明显。通过实际拍摄得到的三元混合绝缘油在针-板间隙为 10 mm 和 25 mm 下的放电流注可以看出，正极性外施电压下的主通道流注发展较快且发光强度较大，放电流注分支发展也较为明显。因此，通过与实际拍摄到的流注发展形貌对比，考虑了电离能随电场变化后的放电流注仿真对分支特征的描述更加有效。

3.2 三元混合绝缘油流注发展的混合平衡效应

在正极性外施电压 400 kV 下，针-板距离为

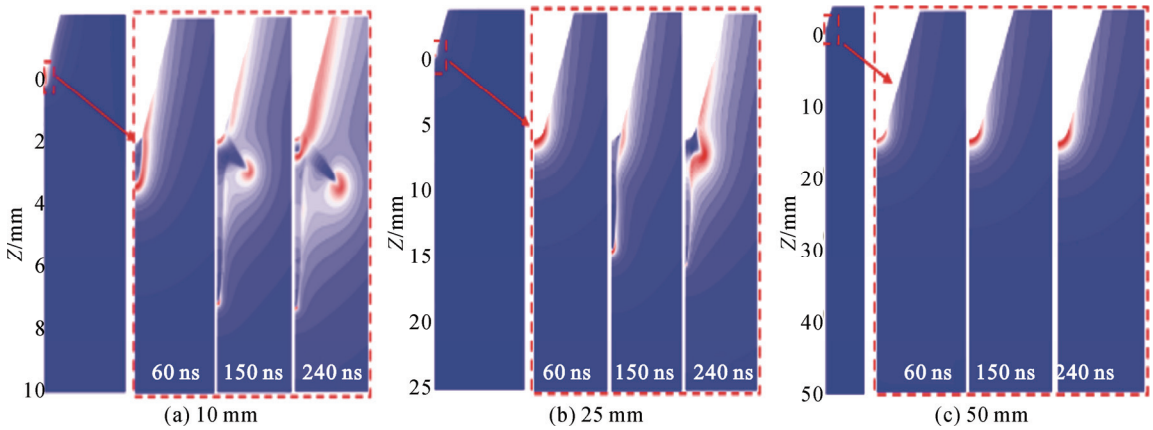


图 10　不同油隙距离下三元混合绝缘油流注放电的形貌图

Fig.10　Morphology of three-element mixed insulation oil discharge stream at different oil gap distances

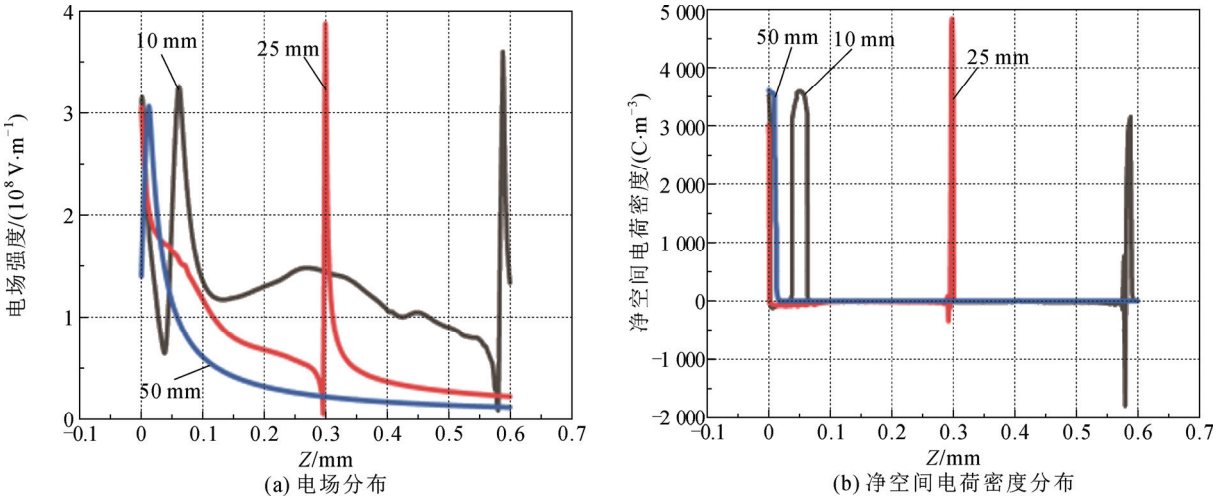


图 11　不同油隙下的三元混合绝缘油流注放电 *Z*-轴电场及电荷分布特性

Fig.11　*Z*-axis electric field and charge distribution characteristics of three-element mixed insulated oil discharge streamer under different oil gaps

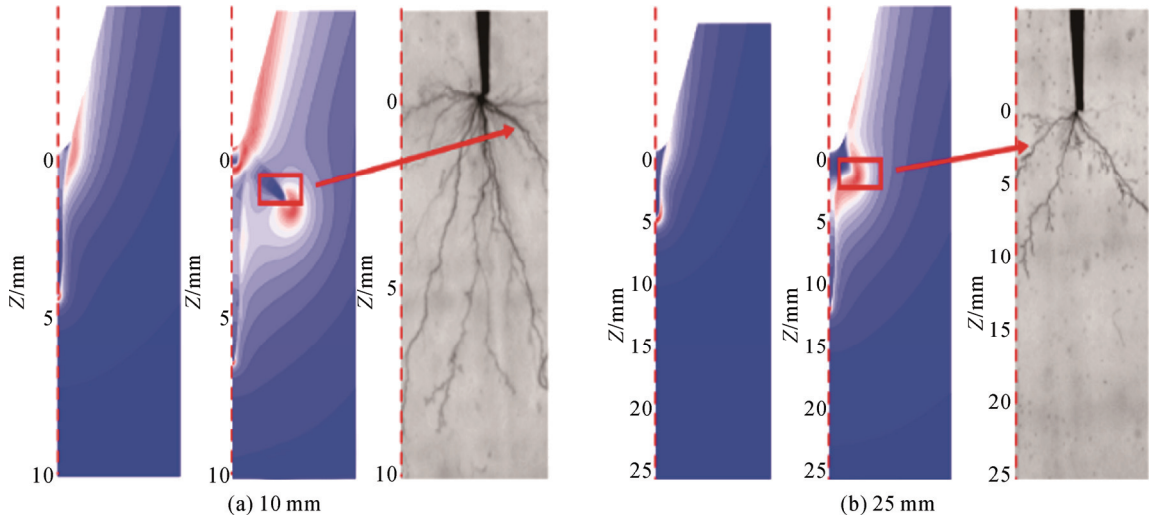


图 12　考虑电离能随电场变化优化前后的三元混合绝缘油流注放电形貌对比图

Fig.12　Comparison of discharge morphology of three-element mixed insulation oil before and after optimization considering ionization energy variation with electric field

10 mm 时，仿真获得的矿物油、大豆基天然酯、棕榈基天然酯和三元混合绝缘油的流注放电分支发展形貌如图 13 所示。根据流注形貌可以看出矿物油中仅产生了 1 条流注分支且无二次流注，而大豆基天然酯和棕榈基天然酯中产生了 3~6 条流注分支并出现了二次流注。出现该现象的主要原因是大豆基天然酯的电离能较矿物油更低，且随着电场强度的增加大豆基天然酯的电离能逐渐下降，导致大豆基天然酯流注发展更加剧烈。三元混合绝缘油的流注分支数与矿物油流注分支相同且产生了二次流注，表明三元混合绝缘油中含有的矿物油对流注分支数起主导作用，而三元混合绝缘油中的大豆基天然酯和棕榈基天然酯对三元混合绝缘油二次流注的发展起主导作用。对比各绝缘油流注发展长度可以看出，三元混合绝缘油的流注发展存在混合平衡效应，三元混合绝缘油流注发展长度比矿物油和棕榈基天然酯的流注发展长度长，但比大豆基天然酯的流注放电发展长度短，其流注发展长度和流注形貌介于矿物油和两种植物油之间。综上可见，三元混合绝缘油流注放电发展存在混合平衡效应，其中大豆基天然酯的存在对其流注放电发展长度起显著促进作用。

在 t=240 ns 时矿物油、大豆基天然酯、棕榈基天然酯和三元混合绝缘油放电发展流注头部(Z-轴方向)的电场分布和电荷分布特性见图 14。在绝缘油电场分布下存在混合平衡效应，其中矿物油的最大电场为 5×10^8 V/m，而大豆基天然酯的最大电场仅约为矿物油最大电场的 50%，为 2.4×10^8 V/m，三元混合绝缘油的电场强度介于矿物油和两种植物油之间(见图 14(a))。净空间电荷密度分布如图 14(b)所示，由图可知三元混合绝缘油流注头部的电荷密度处于矿物油和两种植物油之间，混合平衡效应仍存在。

3.3 三元混合绝缘油流注发展的尺寸效应

前文研究表明针-板间隙距离和针尖曲率半径会影响三元混合绝缘油的流注放电发展特性，在正极性外施电压 400 kV 下，同时增大针-板间隙距离(单位 mm)和针尖曲率半径(单位 μm)，仿真获得的三元混合绝缘油的流注放电分支发展形貌如图 15

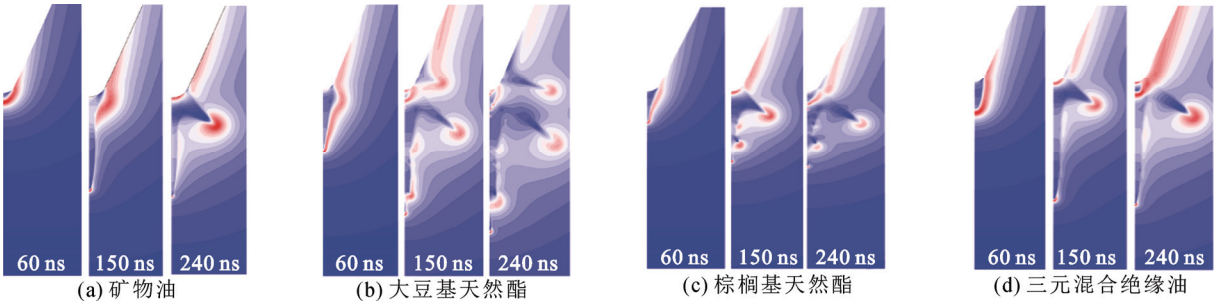


图 13 绝缘油流注放电发展形貌对比

Fig.13 Comparison of the development morphology of insulation oil discharge stream

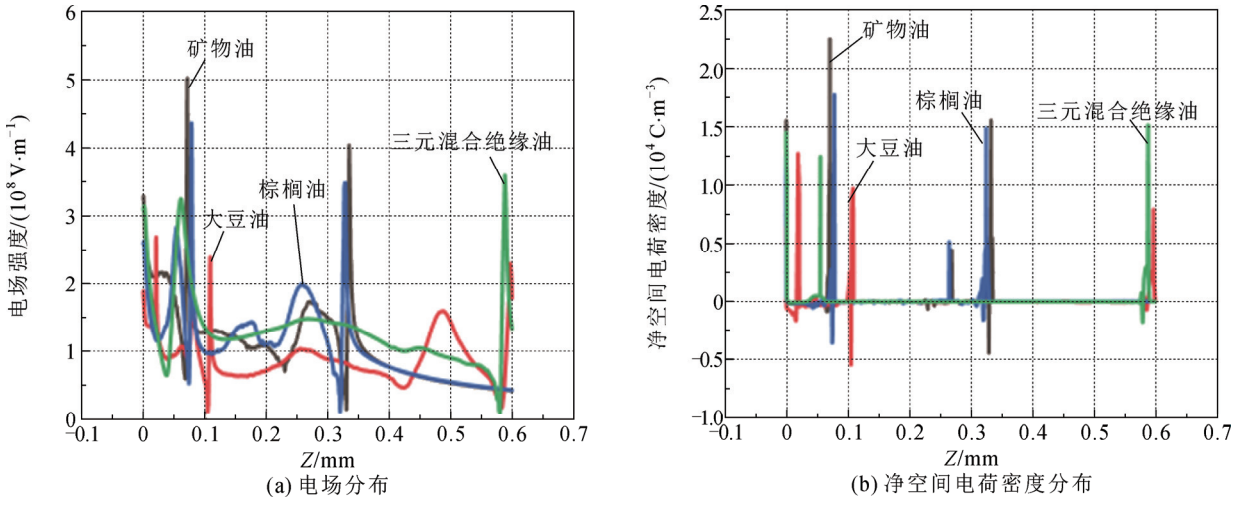
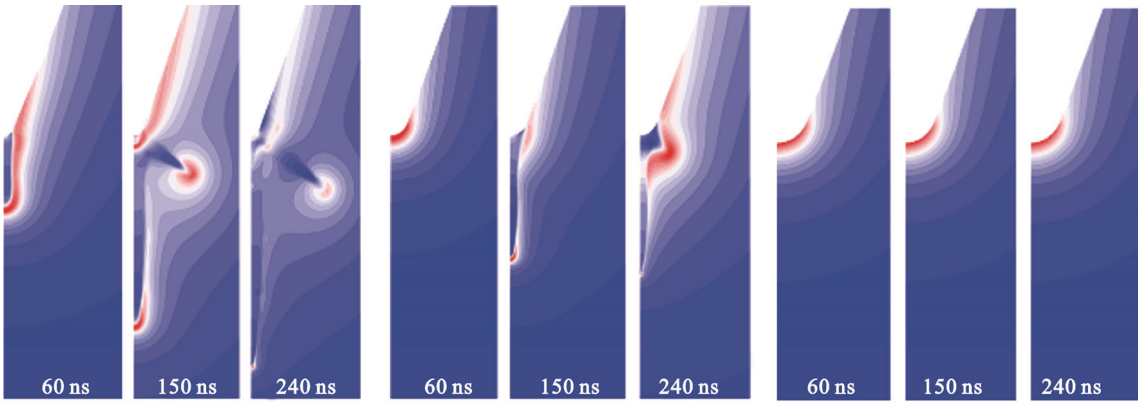


图 14 不同绝缘油流注放电 Z-轴电场及电荷分布

Fig.14 Z-axis electric field and charge distribution of different insulation oil discharge streams



(a) 10 mm, 25 μm　(b) 25 mm, 50 μm　(c) 50 mm, 100 μm

图 15　三元混合绝缘油流注随针-板间隙增加和曲率半径增加的放电发展形貌

Fig.15　Discharge morphology of three-element mixed insulation oil stream with the increase of needle gap and curvature radius

所示。同时增加针板间隙距离和针尖曲率半径，三元混合绝缘油的流注放电长度急剧下降，图 15(c)中流注放电仅在头部形成了微弱的电晕区域。

在正极性外施电压 400 kV 下，同时增大针-板间隙距离和针尖曲率半径，仿真获得的三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)的电场分布和电荷分布特性如图 16 所示。图 16 表明，针-板间隙 10 mm 针尖曲率半径 25 μm 条件下的流注放电最大场强最高，是针-板间隙 50 mm 针尖曲率半径 100 μm 条件下最大场强的 1.7 倍左右，同时根据净空间电荷密度可以看出，针-板间隙 10mm 针尖曲率半径 25 μm 条件下净空间电荷密度最大，表明其发展的剧烈程度远高于其他尺寸条件下的流注放电。

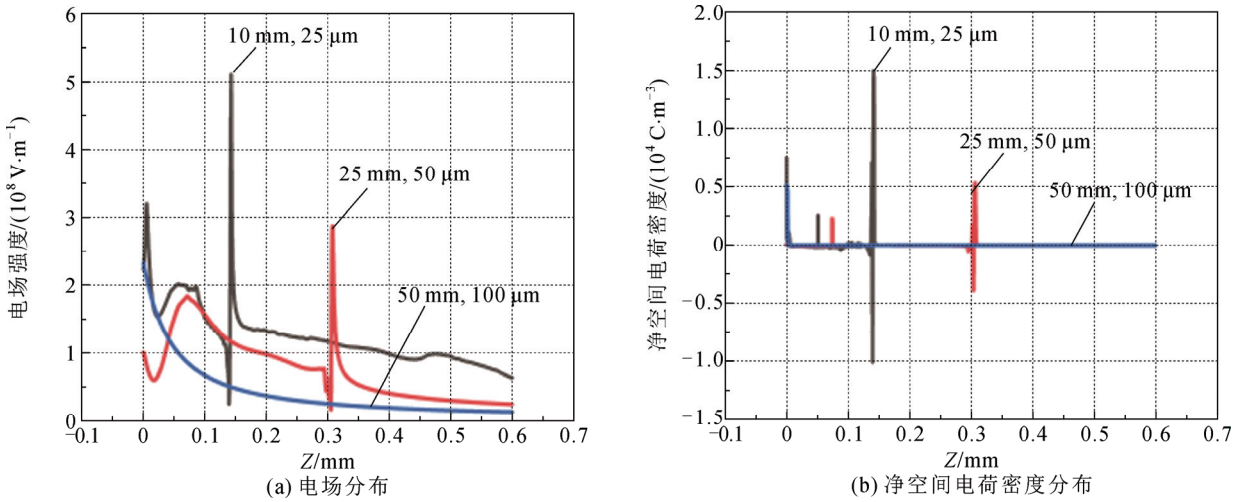
在正极性外施电压 400 kV 下，同时增大针-板间隙和减小曲率半径，仿真获得的三元混合绝缘油的流注放电分支发展形貌如图 17 所示。图 17 表明，图 17(a)的流注放电长度略高于图 17(b)且为图 17(c)中流注放电长度的 2 倍左右。图 17(b)中流注放电产生了分支，图 17(a)中流注放电出现了分支头部，虽然具有一定发展趋势但并未产生主流注通道，而图 17(c)中流注放电并未产生分支。

在正极性外施电压 400 kV 下，同时增大针-板间隙增加和减小曲率半径，仿真获得的三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)的电场分布和电荷分布特性如图 18 所示。图 18 表明，针-板间隙 10 mm，针尖曲率半径 100 μm 条件下的流注放电最大场强和针-板间隙 50 mm 针尖曲率半径 25 μm 条件下的流注放电最大场强相近，其流注放电最大电场头部在 *Z*-轴的位置是针-板间隙 25 mm，针尖曲率半径 50 μm 的流注放电最大电场的 1.3 倍左右。针-板间隙 25 mm，针尖曲率半径 50 μm 下的流注放电最大电场为 3.9×10^8 V/m，最大净空间电荷密度为 5.2×10^3 C/m^3。出现该现象的主要原因是在针-板间隙 10 mm 增加至 25 mm，同时针尖曲率半径从 100 μm 减小至 50 μm 范围内，曲率半径的变化主导了流注放电分支的产生，较小的曲率半径更易在针尖处积聚净空间电荷产生流注放电分支；在针-板间隙 25 mm 增加至 50 mm，同时针尖曲率半径从 50 μm 减小至 25 μm 范围内，间隙距离不仅主导了流注放电发展长度，同时也主导了流注放电分支的产生，较大的间隙距离导致三元混合绝缘油中净空间电荷分散，在针尖处积聚净空间电荷能力减弱，进而影响三元混合绝缘油流注放电的发展长度和流注放电分支的产生。

3.4　三元混合绝缘油流注放电发展的极性效应

在针-板距离 10 mm，针尖曲率半径为 50 μm，正极性和负极性外施电压为 400 kV 时，仿真获得的三元混合绝缘油正极性与负极性流注放电分支发展形貌如图 19 所示。图 19 表明，正流注通道半径比负极性流注通道半径明显更大，负极性流注的仿真结果呈“点状”且沿 *Z*-轴呈圆弧状向外不断扩散，而正流注不仅发展长度远大于负极性流注，且产生了流注分支和二次流注，可以看出外施电压为正极性时三元混合绝缘油流注发展较负极性流注更剧烈。

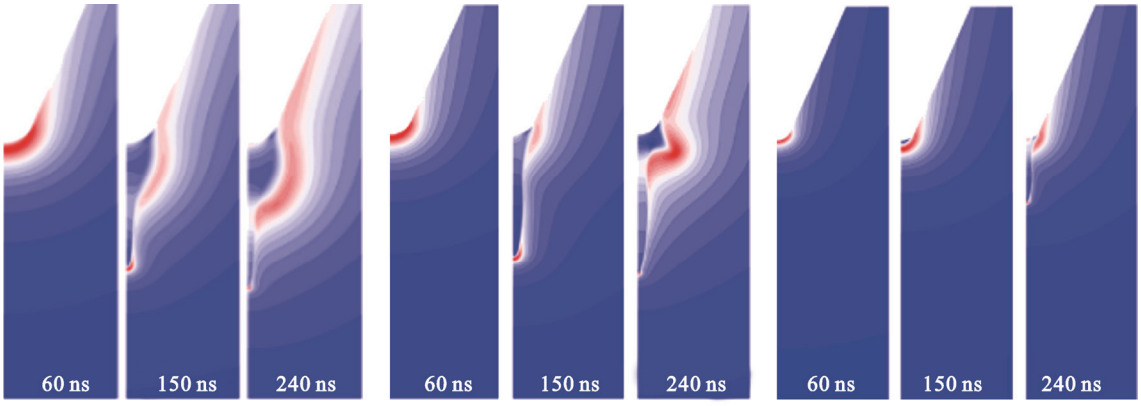
在针-板距离 10 mm 下、正极性和负极性外施电压为 400 kV 时，仿真获得的三元混合绝缘油放电发展流注头部(*Z*-轴方向)的电场分布和电荷分布特性如图 20 所示。图 20 表明，负极性流注的电场强



(a) 电场分布 (b) 净空间电荷密度分布

图 16 针板间隙增加和曲率半径增加下三元混合绝缘油流注放电 *Z*-轴电场及电荷分布

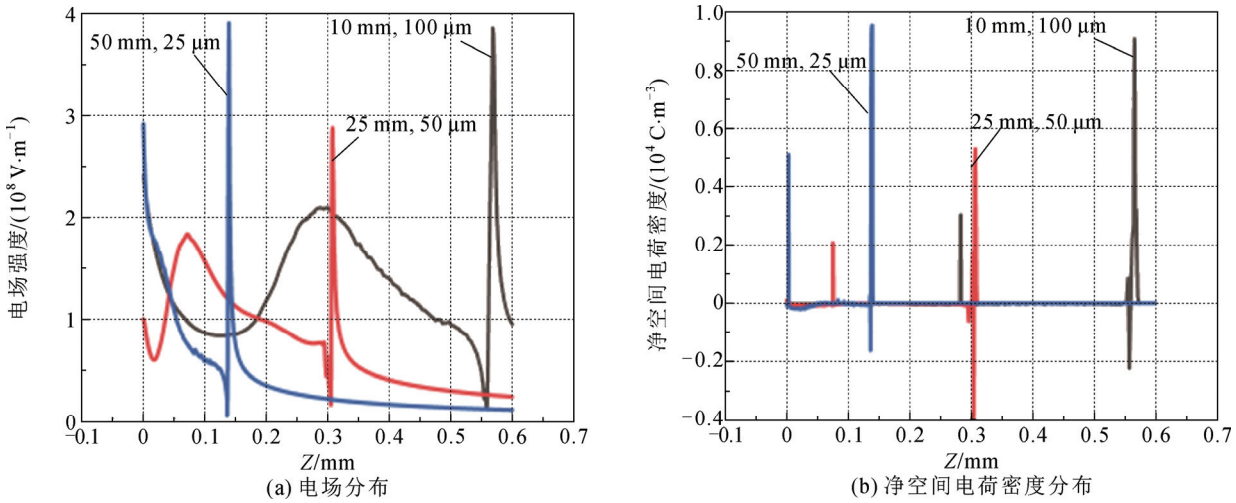
Fig.16 The *Z*-axis electric field and charge distribution of three-element mixed insulation oil discharge streamer with the increase of pin plate clearance and curvature radius



(a) 10 mm, 100 μm (b) 25 mm, 50 μm (c) 50 mm, 25 μm

图 17 三元混合绝缘油流注随针-板间隙增加和曲率半径减小的放电发展形貌

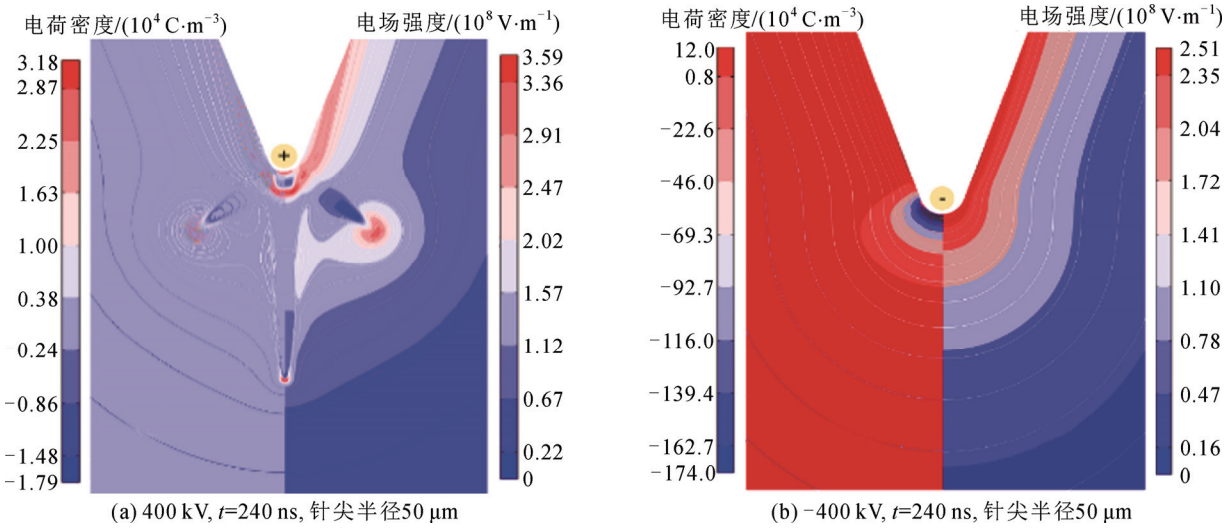
Fig.17 Discharge morphology of three-element mixed insulation oil stream with the increase of pin-plate gap and the decrease of curvature radius



(a) 电场分布 (b) 净空间电荷密度分布

图 18 针-板间隙增加和曲率半径减小下三元混合绝缘油流注放电 *Z*-轴电场及电荷分布

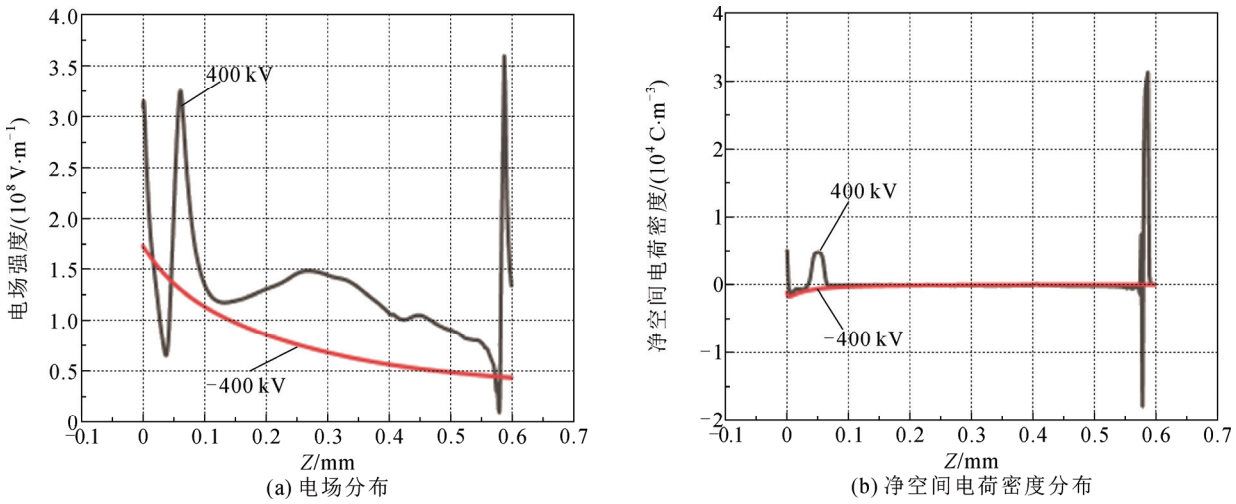
Fig.18 The *Z*-axis electric field and charge distribution of three-element mixed insulation oil discharge streamer with the increase of pin-plate gap and the decrease of curvature radius



(a) 400 kV, t=240 ns, 针尖半径50 μm　(b) −400 kV, t=240 ns, 针尖半径50 μm

图 19　正负极性电压下的三元混合绝缘油流注放电形貌

Fig.19　Three-element mixed insulation oil discharge stream morphology at positive and negative polar voltages



(a) 电场分布　(b) 净空间电荷密度分布

图 20　不同电压极性下的三元混合绝缘油流注放电 Z-轴电场及电荷分布

Fig.20　The Z-axis electric field and charge distribution of three-element mixed insulation oil discharge streamer under different voltage polarity

度随着 Z-轴呈指数型降低，且最大电场强度仅为正流注最大电场强度的 50 %左右(见图 20(a))，负极性流注的净空电荷远远小于正流注净空间电荷(见图 20(b))。

4　结论

1）与传统绝缘油流注放电模型相比，在三元混合绝缘油改进模型中考虑了电离能随电场变化的影响，可以更好的反应实际中的流注放电发展形貌；仿真结果表明：随外施正极性电压的增大，三元混合绝缘油流注放电发展长度激增的时刻越早；随针尖曲率半径减小，三元混合绝缘油流注放电的发展速度越快，流注放电分支数越多，但其主通道流注放电的直径越小；随针-板间隙距离减小，三元混合绝缘油流注放电发展越剧烈。

2）电离能随电场变化会影响三元混合绝缘油的流注放电特性；三元混合绝缘油及其三种基础油的流注放电发展特性表明三元混合绝缘油流柱放电发展过程中存在混合平衡效应；同时改变针尖曲率半径和间隙距离会协同影响三元混合绝缘油流注放电发展特性；三元混合绝缘油正极性流注放电比其负极性流注放电发展更剧烈，且三元混合绝缘油正极性流注放电发展长度远大于其负极性流注放电，同时产生了流注分支和二次流注。

参考文献 References

[1] RAYMON A, PAKIANATHAN P S, RAJAMANI M P E, et al. Enhancing the critical characteristics of natural esters with antioxidants for power transformer applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(3): 899-912.

[2] 张弦亮，郝 建，刘 丛，等. 变压器绕组热缺陷温度演化规律及其辨识方法[J]. 高电压技术，2024，50(4)：1548-1559.
ZHANG Xianliang, HAO Jian, LIU Cong, et al. Temperature distribution evolution of transformer windings thermal defect and its identification method[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(4): 1548-1559.

[3] FENG D W, HAO J, LIAO R J, et al. Comparative study on the thermal-aging characteristics of cellulose insulation polymer immersed in new three-element mixed oil and mineral oil[J]. Polymers, 2019, 11(8): 1292.

[4] 徐 晴，郝 建，叶文郁，等. 三元混合绝缘油热裂解过程与产气特性[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1026-1037.
XU Qing, HAO Jian, YE Wenyu, et al. Microscopic mechanism of thermal cracking and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1026-1037.

[5] 杨 涛，郝 建，陈 鑫，等. 三元混合式绝缘油吸潮、工频击穿及产气特性研究[J]. 高电压技术，2020，46(11)：4014-4022.
YANG Tao, HAO Jian, CHEN Xin, et al. Study on moisture absorption, power frequency breakdown and gas production characteristics of three-element mixed insulation oil[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 4014-4022.

[6] 郝 建，高晨煜，陈 鑫，等. 三元混合式绝缘油与绝缘纸板“液–固”组合体系的沿面闪络特性[J]. 高电压技术，2021，47(1)：241-250.
HAO Jian, GAO Chenyu, CHEN Xin, et al. Creeping discharge characteristics of the liquid/solid system composited of three-element mixed insulation oil and insulation pressboard[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 241-250.

[7] VON THIEN Y, AZIS N, JASNI J, et al. Pre-breakdown streamer propagation and positive lightning breakdown characteristics of palm oil impregnated aged pressboard[J]. IEEE Access, 2020, 8: 58836-58844.

[8] ROZGA P. Using the light emission measurement in assessment of electrical discharge development in different liquid dielectrics under lightning impulse voltage[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 140: 321-328.

[9] JADIDIAN J, ZAHN M, LAVESSON N, et al. Stochastic and deterministic causes of streamer branching in liquid dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 114(6): 063301.

[10] 杨 帆，郝翰学，王鹏博，等. 电力装备多物理场数值计算发展现状[J]. 高电压技术，2023，49(6)：2348-2364.
YANG Fan, HAO Hanxue, WANG Pengbo, et al. State of the art of multiphysics simulation technology for power equipment[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2348-2364.

[11] DEVINS J C, RZAD S J, SCHWABE R J. Breakdown and prebreakdown phenomena in liquids[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(7): 4531-4545.

[12] NIEMEYER L, PIETRONERO L, WIESMANN H J. Fractal dimension of dielectric breakdown[J]. Physical Review Letters, 1984, 52(12): 1033-1036.

[13] WIESMANN H, ZELLER H. A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 1986, 60(5): 1770-1773.

[14] KIM M, HEBNER R E, HALLOCK G A. Modeling the growth of streamers during liquid breakdown[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 547-553.

[15] HWANG J G, ZAHN M, PETTERSSON L A A. Mechanisms behind positive streamers and their distinct propagation modes in transformer oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 162-174.

[16] VELASCO J, FRASCELLA R, ALBARRACÍN R, et al. Comparison of positive streamers in liquid dielectrics with and without nanoparticles simulated with finite-element software[J]. Energies, 2018, 11(2): 361.

[17] ZHENG H B, YANG H, FENG Y J, et al. Numerical analysis of streamer discharge propagation characteristics in natural ester[J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2023, 18(2): 164-171.

[18] LI S, WANG F P, WANG Q, et al. Numerical modeling of branching-streamer propagation in ester-based insulation oil under positive lightning impulse voltage: effects from needle curvature radius[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 139-147.

[19] 相晨萌，周 溱，李 剑，等. 基于分子动力学模拟的植物绝缘 油过热分解产气特性[J]. 高电压技术，2018，44(11)：3595-3603.
XIANG Chenmeng, ZHOU Quan, LI Jian, et al. Gas production characteristics of vegetable insulating oils under thermal decomposition based on molecular dynamic simulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3595-3603.

[20] FUJITA H, KANAZAWA S, OHTANI K, et al. Initiation process and propagation mechanism of positive streamer discharge in water[J]. Journal of the Applied Physics, 2014, 116(21): 213301.

[21] UNGE M, SINGHA S, VAN DUNG N, et al. Enhancements in the lightning impulse breakdown characteristics of natural ester dielectric liquids[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(17): 172905.

[22] HWANG J W G. Elucidating the mechanisms behind pre-breakdown phenomena in transformer oil systems[D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2010.

[23] DANG V H, BEROUAL A, PERRIER C. Investigations on streamers phenomena in mineral, synthetic and natural ester oils under lightning impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1521-1527.

[24] DUY C T, LESAINT O, DENAT A, et al. Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(6): 1582-1594.

[25] REFFAS A, MOULAI H, BEROUAL A. Comparison of dielectric properties of olive oil, mineral oil, and other natural and synthetic ester liquids under AC and lightning impulse stresses[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 1822-1830.

[26] ZHANG J W, HAO J, HUANG Z Y, et al. Effect of molecular structure on the difference of lightning impulse discharge between mineral oil and natural ester using DFT calculation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(1): 114-121.

[27] WANG W, SONG H Y, CHENY Q, et al. Dissolved gases in natural ester and modified ester under thermal faults for transformer[C]// Proceedings of 2021 IEEE 2nd China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE). Chengdu, China: IEEE, 2021: 1-6.

[28] DENAT A, LESAINT O, MC CLUSKEY F. Breakdown of liquids in long gaps: influence of distance, impulse shape, liquid nature, and interpretation of measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(5): 2581-2591.



张钧奕
1999—，男，硕士生
主要研究方向为为电气设备绝缘在线监测及故障诊断
E-mail: 202111131239@cqu.edu.cn

ZHANG Junyi



郝 建(通信作者)
1984—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为输变电设备运行状态监测及故障诊断、先进绝缘材料研发及工程应用
E-mail: cquhaojian@126.com

HAO Jian
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2023-09-14 修回日期 2024-02-18 编辑 曹昭君