

空气中沿面流注放电表面电荷分布特性的仿真研究

李晓冉^{1,2}, 张雅琪¹, 郭雨林¹, 孙安邦¹

(1. 西安交通大学电气工程学院电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 荷兰国家数学与计算机科学研究院, 荷兰 阿姆斯特丹 1098XG)

摘要: 绝缘子表面积聚的电荷会畸变电介质表面电场进而引发沿面闪络。为研究空气氛围中绝缘介质表面在沿面流注放电发展过程中动态电荷积聚情况,在自主开发的二维流体沿面放电仿真模型中增加化学反应体系,模拟了正负极性沿面放电在起始及发展过程中流注自身特性以及介质表面电荷分布特性的演化过程。研究发现施加电压为负极性时,介质表面始终累计负电荷,沿面流注头部累积电荷量极高,流注尾部后方界面处电场极性反转,正离子向介质表面运动;施加电压为正极性时,沿面流注头部累积正电荷,尾部电子朝介质表面扩散,介质表面总电荷量为负值。

关键词: 沿面放电; 表面电荷; 流体仿真; 流注仿真

Simulation Study on Surface Charge Distribution Characteristics of Surface Discharges in Air

LI Xiaoran^{1,2}, ZHANG Yaqi¹, GUO Yulin¹, SUN Anbang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Centrum Wiskunde & Informatica, Amsterdam, 1098XG, The Netherlands)

Abstract: The surface charge accumulated on insulating materials could distort the electric field along dielectric surfaces and further cause flashover. In order to study the dynamic charge accumulation on a dielectric surface in the air during the discharge, chemical reactions were added to a 2D fluid model for surface discharge simulations, and then the surface charge evolution during discharge inception, attachment to the dielectric and propagation over the surface were simulated for cases which positive and negative voltages are applied, respectively. We found that when the applied voltage is negative, the accumulated charges are always negative. The peak value is around the streamer head for a surface streamer; the polarity of the electric field at the interface would reverse when the streamer head passed by, then positive ions would move to the surface. When the applied voltage is positive, positive charges are accumulated at the head of the surface streamer, and at the streamer tail electrons diffuse toward the surface, and the total charge on the dielectric surface turns negative.

Key words: surface discharge; surface charge; fluid simulation; streamer simulation

0 引言

高压电力设备的整体绝缘性能很大程度上受制于其沿面耐电性能:发生沿绝缘表面的放电/闪络现象时的外施电压强度通常远低于相同几何长度

的纯固体绝缘或氛围自身的耐电强度^[1]。影响电力设备沿面耐电性能的因素众多,其中已有实验研究表明在绝缘子表面积聚的电荷会畸变表面电场,严重时将引起沿面闪络^[2]。因而研究气固交界面的电荷积聚现象对于电力设备的绝缘设计和优化具有

收稿日期:2023-03-13; 修回日期:2023-05-24

基金项目:电力设备电气绝缘国家重点实验室资助(EIPE22116)。

Project Supported by State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(EIPE22116).

重要意义。

实验上常见的表面电荷测量方法包括 Lichtenberg 粉末图法^[3]、Pockels 效应法^[4]、静电探头法^[5]等等。西安交通大学薛建议等^[6]用静电探头法测量了直流电压下 SF₆ 气体中缩比型盆式绝缘子表面电位分布, 根据表面电位分布, 应用高分辨率的电荷反演算法计算了绝缘子表面实际的电荷密度分布。陈俊鸿等^[7]同时使用粉尘图法和静电探头法测量了正极性脉冲电压下沿面放电后介质表面的电荷分布, 反向推理了 C₄F₇N/CO₂ 中正极性沿面放电的发展机制。

目前的实验手段大部停留在测量放电发生后表面电荷的残余情况, 实时观测放电发展过程中介质表面电荷的演化过程仍是一项挑战。采用数值模拟的方法则可以获得放电过程中更加全面细节的电场、电荷演化信息。重庆大学司马文霞等^[8]建立了沿绝缘介质放电的等离子体模型, 仿真分析获得了表面电荷的动态分布和沿面放电的阶段转化规律。作者团队在先前研究^[9-10]中报导过空气中正负极性沿面放电的二维流体仿真结果, 给出了沿面放电起始发展各阶段电场、电子密度、流注速度等参数的变化, 研究了施加电压、介电常数、介质表面电子发射等对沿面流注发展过程的影响。

文中的工作在文[9-10]的基础上展开, 采用了电介质置于平行平板电极间隙一侧的仿真结构, 该结构为工程中常见的盆式绝缘子沿面绝缘结构的简化。为使仿真更贴近可实施的实验条件, 文中采用带针型凸起的高压电极代替等离子体团^[9-10]促使放电起始, 施加电压波形包含电压上升沿时间。在二维沿面等离子体流体仿真模型中增加了化学反应体系, 模拟研究了正负极性沿面放电在起始及发展过程中流注自身特性及介质表面电荷分布特性的演化过程; 对比了施加电压极性对表面电荷分布的影响; 分析了放电过程中不同氮氧离子在介质表面的累积情况。

1 模型介绍

1.1 沿面等离子体流体仿真模型介绍

文中采用二维流体沿面等离子体仿真模型, 以开源流体等离子体代码 Afivo-streamer^[11]为基础自主搭建而成, 纳入了表面电荷对电场求解的影响, 同时耦合自适应网格加密技术、多重网格求解偏微分方程、OpenMP 并行计算等模拟加速技术, 模型细节

见文[9], 下面对仿真模型要点进行概述。

文中采用局部场近似的漂移扩散型流体模型, 电子密度 n_e 和各离子密度 n_i 的时空演化计算方法如下:

$$\partial_t n_e = \nabla \cdot (n_e \mu_e E + D_e \nabla n_e) + S_e \quad (1)$$

$$\partial_t n_i = -\nabla \cdot (\pm n_i \mu_i E) + S_{ion} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: μ_e 为电子迁移率; E 为电场强度; D_e 是电子扩散系数; μ_i 为离子迁移率, 此处设为常数 $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; S_{ion} 为各离子反应相关的源项; S_e 可由式(3)计算

$$S_e = S_i - S_\eta + S_{detach} - S_{recom} + S_{ph} + S_{se} \quad (3)$$

式(3)中, S_i 、 S_η 、 S_{detach} 、 S_{recom} 、 S_{ph} 、 S_{se} 分别为碰撞电离、吸附、解吸附、电子—离子复合、光电离及介质表面电子发射对应的源项。采用基于蒙特卡洛的光电离和光致发射方法, 详见文[9]。文中采用文[12]中的全反应列表, 包括电子碰撞电离、电子吸附、解吸附、离子转换、电子—离子复合、离子—离子复合反应等, 各反应的反应系数见文[12]。电子输运系数和电离反应系数采用 BOLSIG+^[13] 使用 Phelps 碰撞截面数据集^[14] 计算得到。

电子和离子运动到介质表面时会转化为表面电荷固定在被吸收的位置, 不再考虑表面电荷间的化学反应。介质表面总电荷数量计算方法为

$$\partial_t \sigma_s = q_e (\Gamma_e - \Gamma_{se}) + \sum q_i \Gamma_i \quad (4)$$

式(4)中: q_e 为电子携带的电荷量; Γ_e 为运动到介质表面的电子通量; Γ_{se} 为从介质表面向外发射的电子通量, 包括光致发射及离子引发的二次电子发射; q_i 和 Γ_i 分别为各离子携带电荷量及其在界面处的通量。文中考虑的离子包括 N_2^+ 、 O_2^+ 、 N_4^+ 、 O_4^+ 、 O_2^- 、 O^- 和 O_3^- 。

电场强度分布通过泊松方程求解, 如下:

$$\nabla \cdot (\varepsilon \nabla \varphi) = -(\rho + \delta_s \sigma_s) \quad (5)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (6)$$

式(5)、(6)中: ε 是介质材料介电常数; ρ 为空间电荷密度; σ_s 为表面总电荷密度; δ_s 为为将表面电荷分配至界面相邻网格的分配系数。在界面处, 电场强度的法相分量须满足以下边界条件

$$\varepsilon_1 E_1 - \varepsilon_2 E_2 = \sigma_s \quad (7)$$

式(7)中: ε_1 和 ε_2 分别为界面两侧的介电常数; E_1 和 E_2 为对应的电场强度法向分量。

1.2 仿真条件设置

文中采用高压电极带针型凸起的平行平板电

极结构,见图1。板电极间间距为40 mm,仿真域横向宽度也为40 mm,仿真域内左侧10 mm设置为电介质,相对介电常数为2。针型凸起长度为2.2 mm,头部为半圆形,半径为0.2 mm。针型凸起中心距电介质表面的横向距离为1.6 mm。仿真模拟施加电压分别为+100 kV和-100 kV的两个案例,电压波形上升沿时间均为30 ns。对于电势,上下边界为狄利克雷边界,左右为纽曼边界。背景气体为由80% N₂和20% O₂组成的干燥空气,气压为0.1 MPa,气体温度设置为300 K。背景电离密度设置为 10^{10} m^{-3} ,背景粒子种类为电子和N₂⁺。在施加电压为正极性时,考虑介质表面的电子发射,光致发射系数设为0.5,由正离子碰撞引发的二次电子发射系数也设为0.5^[9]。

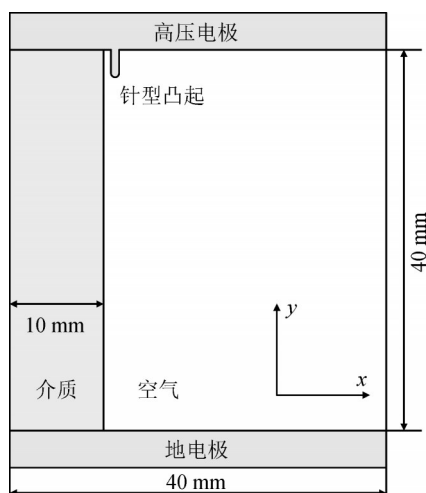


图1 仿真域示意图

Fig. 1 Schematic of the computational domain

2 仿真结果及分析

首先给出放电在介质附近起始、朝介质表面发展并转化为沿面流注过程中电子密度分布的演化过程,而后参照流注的发展阶段分析介质表面电荷的分布特性。

2.1 沿面流注发展过程

施加电压分别为-100 kV和+100 kV时电子密度分布随时间的变化过程见图2、3。零时刻施加电压为0 kV,至30 ns上升到±100 kV。正负流注头部位置随时间的变化以及流注速度和最大电场强度随流注头部位置的变化对比见图4。

施加电压为负极性时,15 ns时针电极头部最大电场强度达到4 kV/mm左右,负流注起始;在15 ns到90 ns间,负流注呈现弥散型发展,电子密度约为 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$,流注较宽,流注速度也较为稳定,约为0.2 mm/ns,最大电场强度保持在4 kV/mm左右;从

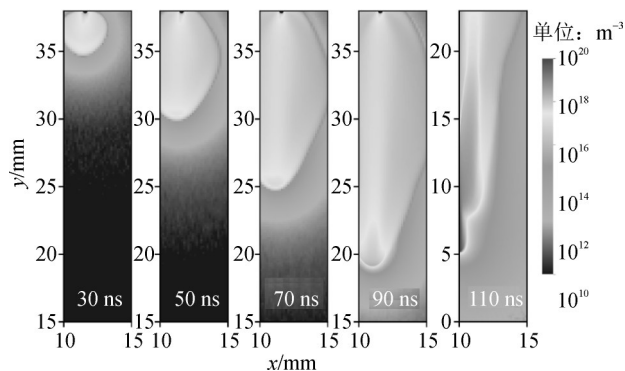


图2 负极性电压下流注30~110 ns间电子密度分布图

Fig. 2 Evolution of the electron density profile of a negative streamer between 30 ns and 110 ns

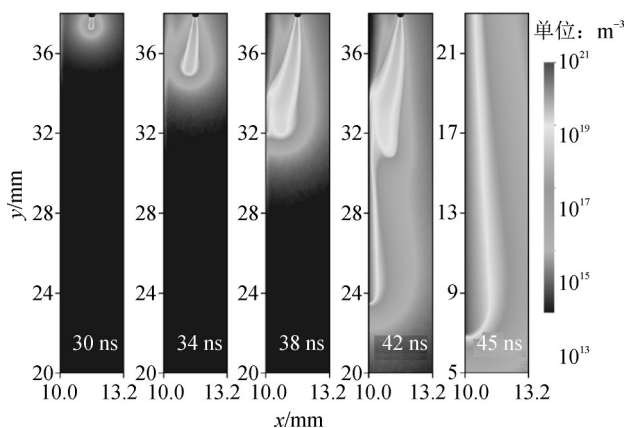


图3 正极性电压下流注30~45 ns间电子密度分布图

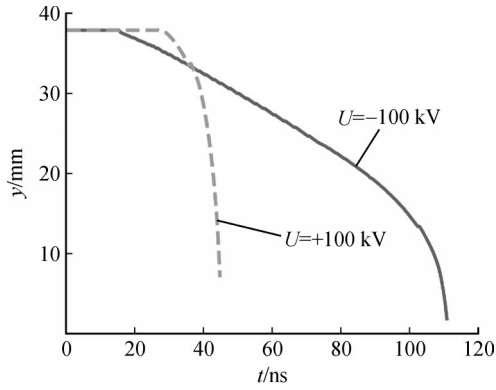
Fig. 3 Evolution of the electron density profile of a positive streamer between 30 ns and 45 ns

90 ns起,流注开始由弥散型流注转化为沿面流注,电子密度、电场强度、流注速度均开始增大;在 $y=7 \text{ mm}$ 处沿面流注形成,流注显著变窄,电子密度达到 10^{20} m^{-3} ,最大电场强度超过25 kV/mm。与文[10]中不包含电压上升沿的情况相比,负流注更晚转化为沿面流注,这是由于在电压较低时电子向四周扩散,空间电荷更加分散,抑制了最大电场强度的增长。

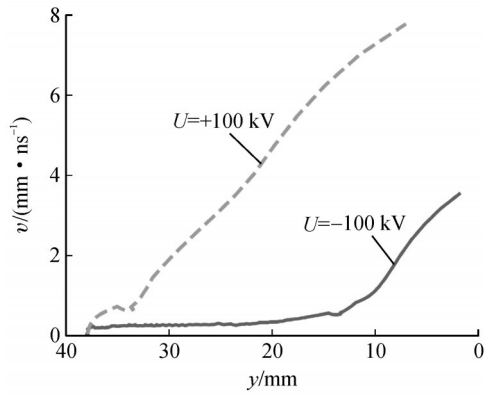
对正流注而言,电压上升沿为30 ns时流注的发展过程与不包含电压上升沿的情况^[9]较为相近,在接近30 ns时,针电极头部最大电场强度达到接近12 kV/mm,正流注刚刚起始,这是由于正流注电子运动方向与流注发展方向相反,流注需要更高的头部电场在其前方产生自由电子。流注起始后,存在明显的在空气中传播、向沿面流注转化、沿介质表面发展3个阶段,各阶段特性已在文[9]中介绍。相比负流注,正流注头部电场更高,也更快转化为沿面流注,流注速度也更快。

2.2 表面电荷分布特性

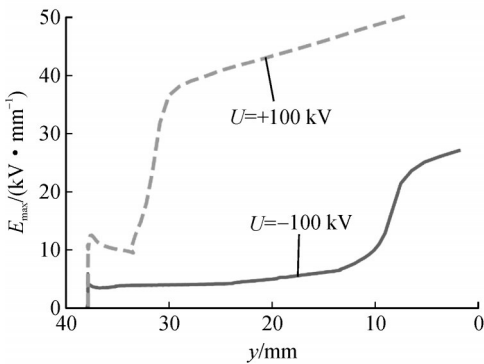
施加电压为-100 kV时流注在介质附近起始、朝介质表面发展并转化为沿面流注过程中介质表面总电荷密度的变化见图5。从图5可见,负流注在



(a) 流注头部位置随时间的变化



(b) 流注速度随流注头部位置的变化



(c) 最大电场强度随流注头部位置的变化

图4 正负极性电压下流注头部位置随时间的变化及流注速度、最大电场强度随流注头部位置的变化

Fig. 4 The position of streamer head versus time, the streamer velocity and the maximum electric field versus the position of streamer head for negative and positive surface streamers

弥散型发展的过程中介质表面积累负电荷,电荷量较为均匀,约为 -20 pC/mm^2 ,流注向前发展后介质表面电荷量仍保持稳定;弥散型流注向沿面流注转化时,流注头部附近介质表面电荷密度开始增大;转化为沿面流注后,流注头部附近介质表面电荷密度急剧增大,如 109 ns 时在 $y=8 \text{ mm}$ 处表面电荷密度达到 -300 pC/mm^2 ,但此极高的表面电荷量仅在该位置短暂出现,流注头部向前发展后, 110 ns 时该处表

面电荷密度恢复至 $-10^1 \text{ pC}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的量级。这是由于负流注头部空间电荷为负电荷,电场方向朝向介质表面,电子向介质表面运动,沿面流注电场强度和电子密度较高,介质表面积累了大量负电荷;而流注头部通过该位置后,该位置附近电场不再受流注头部空间电荷的影响,由于大量表面负电荷的存在,界面处出现电场方向反转,正离子开始向介质表面运动,见图6,中和了介质表面的负电荷,因而呈现表面总负电荷量下降的情况。总体来说,施加负极性电压时,介质表面总电荷量始终为负值,流注通过后介质表面残余电荷量在 $-10^1 \text{ pC}\cdot\text{mm}^{-2}$ 的量级。

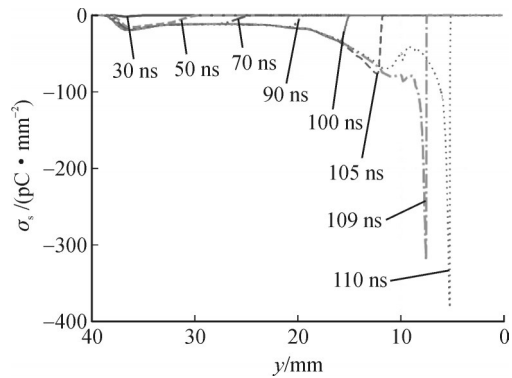


图5 负极性电压下流注30~110 ns间介质表面电荷分布图
Fig. 5 Evolution of the surface charge density profile of a negative streamer between 30 ns and 110 ns

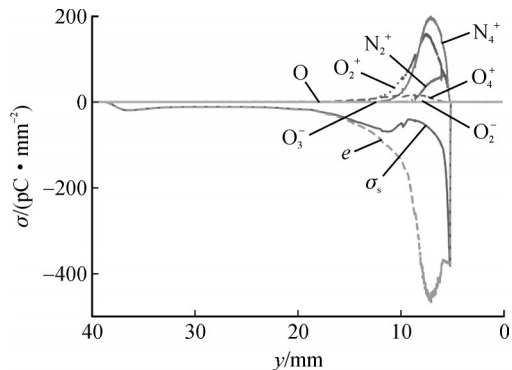


图6 负极性电压下110 ns时介质表面各类带电粒子密度分布

Fig. 6 Density profile at the surface of server charged particles of a negative streamer at 110 ns

施加电压为 $+100 \text{ kV}$ 时在 30 ns 到 45 ns 间介质表面总电荷密度的变化见图7。在正流注转化为沿面流注之前($30\sim 38 \text{ ns}$),介质表面存在极为微量的正电荷,表面电荷量近乎为0。在流注转化为沿面流注后(42 ns 起),流注头部积累正电荷量明显增加,约为 $10\sim 20 \text{ pC/mm}^2$,流注尾部积累负电荷,积累负电荷量随时间逐渐增加,由 -10 pC/mm^2 增加至 -40 pC/mm^2 。正流注 45 ns 时介质表面各类带电

粒子密度分布见图8。流注头部附近总电荷密度明显高于各正离子密度之和,可见介质表面的正电荷主要来源于光致发射在介质表面留下的空穴。而在流注头部经过后,界面处的电场强度显著降低,虽然电场方向仍由气体侧指向界面,正离子向介质表面迁移,但由于离子迁移速度较慢,电子向介质表面扩散使得介质表面残余负电荷。介质表面累积电荷与施加电压极性相反时沿面流注更容易起始^[10],故应更加重视施加电压为正极性时残余电荷对沿面耐电性能的影响。

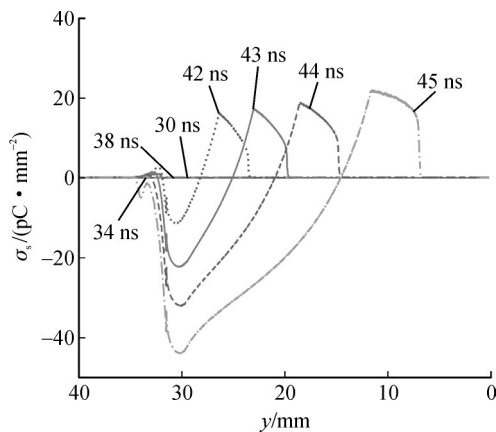


图7 正极性电压下流注30~45 ns间介质表面电荷分布图

Fig. 7 Evolution of the surface charge density profile of a positive streamer between 30 ns and 45 ns

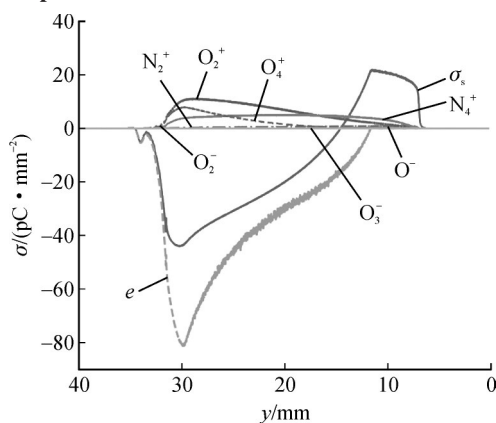


图8 正极性电压下45 ns时介质表面各类带电粒子密度分布

Fig. 8 Density profile at the surface of server charged particles of a positive streamer at 45 ns

3 结论

文中系统研究了放电在介质附近起始、朝介质表面发展并转化为沿面流注过程流注自身特性及介质表面电荷分布特性的演化过程,得到了以下主要结论:

1)流注在介质附近起始,会朝介质表面发展转化为沿面流注,同时电子密度、最大电场强度增大,

流注速度加快。电压上升沿的存在会使得负流注首先进入弥散型发展,延迟了流注向沿面流注的转化;相反电压上升沿对正流注的发展影响较小。

2)施加电压为负极性时,介质表面始终累计负电荷,弥散型发展时介质表面累积电荷量较为均匀稳定;转化为沿面流注后,流注头部累积电荷量极高,流注头部后方出现界面处电场极性反转,正离子向介质表面运动,总累积负电荷量降低。

3)施加电压为正极性时,转化为沿面流注前介质表面累积电荷量近乎为零;转化为沿面流注后,流注头部累积正电荷,尾部电子朝介质表面扩散,介质表面总电荷量为负值。

以上仿真结果表明,在绝缘子承受正极性直流高压、交流电压或正负极性反转的脉冲电压时,需更加关注介质表面电荷消散情况,如采用电荷消散更快的复合绝缘材料等。

参考文献:

- [1] COOKSON A H. Electrical breakdown for uniform fields in compressed gases[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1970, 117(1):269-280.
- [2] LI C, ZHU Y, HU J, et al. Charge cluster triggers unpredictable insulation surface flashover in pressurized SF₆[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2021, 54(1):015308.
- [3] LI C Y, ZHU Y J, ZHI Q Y, et al. Dust figures as a way for mapping surface charge distribution - a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(3):853-863.
- [4] KUMADA A, SHIMIZU Y, CHIBA M S K, et al. Pockels surface potential probe and surface charge density measurement[J]. Journal of Electrostatics, 2003, 58(1/2):45-58.
- [5] DENG J, KUMADA A, HIDAKA K, et al. Residual charge density distribution measurement of surface leader with feedback electrostatic probe[J]. Applied Physics Letters, 2012, 100(19):192906-1-192906-4.
- [6] 薛建议,王 涵,李科峰,等. 直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷分布特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20):6164-6172.
- [7] XUE Jianyi, WANG Han, LI Kefeng, et al. Research on charge distribution characteristics on spacer surface in DC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20):6164-6172.
- [8] CHEN J, LI J, DONG J, et al. Surface discharge propagation in C₄F₇N/CO₂ mixture under positive impulse voltages[J]. Applied Physics Letters, 2022, 120(6):061601.
- [9] 司马文霞,刘春香,杨 鸣,等. 沿绝缘介质表面的气体放电等离子体模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9):

- 2725-2734.
- SIMA Wenxia, LIU Chunxiang, YANG Ming, et al. Plasma model of gas discharge along the dielectric surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9):2725-2734.
- [9] LI X, SUN A, ZHANG G, et al. A computational study of positive streamers interacting with dielectrics[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(6):065004.
- [10] LI X R, SUN A B, TEUNISSEN J. A computational study of negative surface discharges: Characteristics of surface streamers and surface charges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1178-1186.
- [11] TEUNISSEN J, EBERT U. Simulating streamer discharges in 3D with the parallel adaptive Afivo framework[J]. Journal of Physics D -Applied Physics, 2017, 50(47):474001.
- [12] LI X, DIJCKS S, NIJDAM S, et al. Comparing simulations and experiments of positive streamers in air: Steps toward model validation[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2021, 30(9):095002-1-095002-11.
- [13] HAGELAAR G J M, PITCHFORD L C. Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2005, 14(4):722-733.
- [14] PHELPS A V, PITCHFORD L C. Anisotropic scattering of electrons by N₂ and its effect on electron transport[J]. Physical Review A, 1985, 31(5):2932-2949.
- 李晓冉(1996—),女,博士研究生,研究方向为放电等离子模拟(E-mail:lixiaoran1996@foxmail.com)。
- 孙安邦(1984—),男,教授,博士生导师,研究方向为气体放电和等离子体推进等(通信作者)(E-mail:anbang_sun@xjtu.edu.cn)。
-
- (上接第66页)
- [29] 周宏扬, 马国明, 刘姝嫔, 等. 基于电—热多物理场耦合模型的直流 GIS/GIL 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4):1251-1260. ZHOU Hongyang, MA Guoming, LIU Shupin, et al. Study on surface charges accumulation on insulator and its effects on the surface electrical field in DC - GIL with electro-thermal coupling model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1251-1260.
- [30] 秦司晨, 屠幼萍, 金花, 等. 不同温度下环氧树脂空间电荷特性仿真研究[J]. 高压电器, 2018, 54(5):144-149. QIN Sichen, TU Youping, JIN Hua, et al. Simulation of space charge characteristics of epoxy resin at different temperatures[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5):144-149.
- [31] 罗毅, 唐炬, 潘成, 等. 直流 GIS/GIL 盆式绝缘子表面电荷主导积聚方式的转变机理[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23):5039-5048. LUO Yi, TANG Ju, PAN Cheng, et al. The transition mechanism of surface charge accumulation dominating way in DC GIS/GIL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(23):5039-5048.
- [32] 孟伟航, 王巨丰, 黄上师, 等. 35 kV 配电线路绝缘子串与多断点灭弧防雷间隙雷电冲击绝缘配合研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(5): 109-115. MENG Weihang, WANG Jufeng, HUANG Shangshi, et al. Lighting insulating coordination between insulator string and multiple-breakarc-extinguishing lighting protection gap of 35 kV transmission line[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(5):109-115.
- 谢子豪(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为绝缘材料表面特性仿真与实验研究(E-mail:1047843161@qq.com)。
- 谢军(1988—),男,副教授,硕士生导师,研究方向为电工绝缘材料劣化机理与改性方法(通信作者)(E-mail:junxie@ncepu.edu.cn)。