

大气压直流正电晕放电暂态空间电荷分布仿真研究*

廖瑞金^{1)†} 伍飞飞¹⁾ 刘兴华²⁾ 杨帆¹⁾ 杨丽君¹⁾ 周之¹⁾ 翟蕾²⁾

1) (输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 400044)

2) (淄博供电公司, 山东省电力集团公司, 淄博 255000)

(2012年6月11日收到; 2012年7月6日收到修改稿)

本文提出了流体-化学动力学二维正电晕放电混合模型, 该模型包含 12 种粒子间的 27 种化学反应, 并且考虑光电离的影响. 此外, 在实验室内对该模型开展试验验证, 单次脉冲波形及伏安特性曲线符合较好. 基于上述模型, 本文研究了在外施电压 3 kV 时棒-板电极正电晕放电过程中的电场分布、电子温度分布、空间电荷分布的发展规律, 并对电晕放电过程中粒子的成分进行了详细分析, 讨论了电子、正负离子、中性粒子在放电过程中的生成规律及对电晕放电的影响. 结果表明: 在整个电晕放电过程中, 电子温度分布和电场强度分布曲线相似, 电子密度维持在 10^{19} m^{-3} 左右, 只发现带正电的等离子体特征. O_4^+ 密度是放电过程中数量最多的正离子, O_2^+ 和 N_2^+ 在二次电子发射过程中具有重要作用, O_2^- 离子和 O 分别是负离子和中性粒子中数量最多的粒子, 由于负离子和中性粒子在电晕放电过程中数量较小, 因而起的作用相对较小.

关键词: 正电晕, 空气, 混合模型, 空间电荷

PACS: 52.25.Dg, 52.65.-y, 52.80.Hc, 52.40.K

1 引言

电晕放电是极不均匀电场特有的自持放电形式^[1]. 随着我国电力工业的发展, 高压和超高压输电线路成为我国主要骨干网架并即将建立特高压线路, 电晕损失已不可忽视^[2,3]. 此外电晕放电带来的可听噪声、电磁干扰、线路腐蚀、绝缘裂化以及民众的不和谐问题已日渐受到重视^[4,5]. 空间电荷的积累和分布与电晕放电机理和起始、自持条件紧密相关, 是影响电晕放电的重要原因之一^[1]. 电晕放电研究具有复杂性、多样性、多学科交叉性^[6]的特点, 因而从试验方面推进空气放电机理的研究, 需要花费大量的时间精力, 耗资巨大. 且目前缺乏有效的关于大气压下空气放电等离子体诊断手段^[7], 放电过程中的很多特征量都还不能通过试验获得. 而且通过试验设备准确获得电晕放电的空间电荷分布, 一直是国际上尚未解决的难题. 借助

有限的试验结果, 采用数值模拟方法研究空气放电过程不仅能够描述气体放电的宏观过程, 而且能够在更微观的角度对各种微观粒子的产生、扩散、迁移以及消失等问题, 从而为高压输电线路和电力设备外绝缘设计提供理论依据^[8,9].

Davies^[10] 提出了描述空气放电等离子体过程的流体模型. Passchier 等^[11] 采用一维流体方法, 通过采用粒子迁移-扩散近似, 模拟了平行板之间的空气放电过程, 但模型中假设电子能量分布函数处于热平衡状态. Lymberopoulos 等^[12,13] 采用流体模型研究了平行板之间氩气放电的发展过程. 他们的研究表明: 亚稳态氩原子虽然在放电过程中数量较少, 但是他们对放电过程的影响较大. Bera^[14-17] 等采用流体方法研究了低气压下射频感性耦合等离子体 (ICP) 放电过程. 在射频放电模型中, 假设电子能量以 Maxwellian 方式分布, 没有考虑空气中粒子之间的化学反应过程. 他们在仿真中采用了电子和正离子的输运方程、电子能量

* 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) (批准号: 2011CB209401)、和中央高校基本科研业务费专项资金 (批准号: CDJXS1215003) 和国家自然科学基金创新研究群体科学基金 (批准号: 51021005) 资助的课题.

† E-mail: rjliao@cqu.edu.cn

方程以及泊松方程, 计算仿真结果与试验结果一致. 考虑化学反应和非平衡态的大气压空气放电将是未来进行科学研究的一个极其重要的方向^[18]. Gordiets^[19] 利用 N_2 - O_2 混合物代替空气减少其化学反应类型, 研究了激发态中性分子和原子在气体放电过程中的作用. Nahomy^[20] 在空气放电研究中考虑了 430 种化学反应, 是目前考虑化学反应类型最多的研究. Zhang 和 Adamiak^[21] 在棒-板电极电晕放电研究中采用了一种动理学模型, 模型中只考虑了单一粒子, 利用有限单元法 (FEM) 对电场特性和放电电流进行研究, 获得了较好的效果. 纵观目前的研究成果可知, 大多数学者均采用单一数值模型分析空气放电过程, 仅仅侧重于空气放电的某一点、未能较全面的反应其宏观与微观过程.

本文将动理学模型的准确性与流体模型的鲁棒性、高效的计算能力相结合, 提出了棒-板电极电晕放电的流体-化学动理学混合改进模型. 该模型中包含能够基本反应空气放电过程的 12 种粒子以及它们之间的 27 种化学反应, 并考虑光电离的影响. 此外, 在实验室内开展试验对模型进行了验证, 结果表明单次脉冲波形及伏安特性曲线符合较好. 基于该模型, 本文主要研究外施电压 3 kV 下棒-板电极正电晕放电过程中的电场分布、电子温度分布、净空间电荷分布的发展规律, 并对电晕放电过程中的关键粒子成分的生成规律进行了详细分析.

2 棒板电极电晕放电混合计算模型

2.1 控制方程

采用流体理论与化学动理学理论结合, 并在混合数值模型中加入光电离和化学反应过程来分析空气放电的物理过程, 其实质就是将电子连续性方程、重粒子多组分扩散输运方程、重粒子动量方程、能量方程和泊松方程化为适当的偏微分方程组, 再将偏微分方程组归一化后以离散的数值差分形式求解.

电子的连续控制方程为^[22]

$$\begin{aligned} & \frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-(\mu_e \cdot \nabla \phi)n_e - D_e \nabla n_e) \\ & = \alpha n_e t |w_e| - \eta m_e |w_e| - R_{ei} n_e n_i + v_{det} n_n \\ & + S_0 + S_{ph}, \end{aligned} \quad (1)$$

其中, n_e , n_p 和 n_n 分别为电子、正离子和负离子

数密度. ϕ 为电势, 等号右边是由于化学反应的产生净速率. D_e 为电子扩散系数, μ_e 为电子迁移率, w_e 是电子的漂移速率, α 是电离系数, η 是附着系数, R_{ei} 是电子与离子的复合系数, v_{det} 是解离系数, 这些系数都是局域场的函数. S_0 是初始电子的出现速率. S_{ph} 是光电离项, 大气压下空气放电过程中电子与中性粒子之间的碰撞电离会辐射光子, 这些光子按一定的概率被分子吸收, 如光子能量达到电离能的水平, 就会发生光电离. 通常光电离制造的电子数量远小于碰撞电离, 但是光电离过程在电子崩头部可以引发新的二次电子崩, 促使放电向前发展, 因此大气压下光电离过程对空气放电起着重要的作用. Zheleznyak 等^[23] 认为空气放电过程中光电离是由处在激发态的氮气分子 ($b^1 \Pi$, $b^1 \Sigma_u^+$ 和 $c^1 \Sigma_u^+$) 衰变成稳态 $N_2(x^1 \Sigma_g^+$ 时, 释放出的光子被氧分子吸收而形成氧离子的过程. 本文采用的光电离系数计算公式为^[24]

$$\begin{aligned} S_{ph} &= \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{P_q}{P + P_q} \\ &\times \int_V d^3 r_1 \frac{S_{ion}(r_1)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|^2} \Psi(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1| \cdot P), \end{aligned} \quad (2)$$

其中, $1/4\pi$ 是归一化常数, P 是背景气压, P_q 为激发态氮原子的湮没分压设为 30 Torr (1 Torr = 1.33322×10^2 Pa), $\Psi(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1| \cdot P)$ 为电离辐射吸收系数, \mathbf{r} 为光子辐射和吸收之间的距离.

为了能够更准确的描述空气放电中电子能量产生与损失机理, 电子温度被考虑到模型中, 完整的电子能量约束方程表达如下:

$$\begin{aligned} & \frac{3}{2} \frac{\partial (k_B n_e T_e)}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\frac{5}{2} k_B T_e \Gamma_e - \frac{5}{2} k_B n_e D_e \nabla T_e \right) \\ & = j_e \cdot E - n_e \sum_k n_k \eta_k \\ & - 2n_e k_B \frac{m_e}{M_k} (T_e - T) v_{e,n}, \end{aligned} \quad (3)$$

其中, T_e 是电子温度, Γ_e 是电子通量, n_k 是粒子 k 的密度, η_k 是电子与重粒子 k 碰撞的能量损失系数, m_e 是电子质量, M_k 是重粒子 k 质量, T 是空气温度, $v_{e,n}$ 是电子动量传递碰撞频率. 方程 (3) 右边为源项: $j_e \cdot E$ 表示电子由于焦耳加热效应获得的能量, 最后两项分别表示非弹性碰撞和弹性碰撞的能量损失.

本模型中, 对于重粒子 (例如, 正离子、负离子和中性粒子), 多组分输运方程组表示为^[25]

$$\rho \frac{\partial n_k}{\partial t} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) n_k = \nabla \cdot \mathbf{j}_k + R_k + S_{ph}, \quad (4)$$

其中, ρ 为总的密度, \mathbf{u} 平均流体速度矢量, R_k 为粒子 k 由于化学反应的变化速率, \mathbf{j}_k 为扩散通量矢量 [26],

$$\mathbf{j}_k = \rho n_k \left(\sum_{j=1}^N \tilde{D}_{kj} d_k - \frac{D_k^T}{\rho n_k} \nabla \ln T \right), \quad (5)$$

其中, \tilde{D}_{kj} 是多组分 Maxwell-Stefan [27] 扩散系数, D_k^T 热扩散系数, T 空气温度, 以及 d_k 扩散驱动力, 而分子之间的相互作用力则采用空气分子的 Lennard-Jones(12-6) 势能参数, $\Omega^{(1,1)*}$ 由碰撞积分项计算得到.

重粒子的动量方程表示为 [28]

$$\frac{\partial n_k \mathbf{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (n \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \frac{\mu}{3} \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \sum_k n_k \mathbf{F}_k, \quad (6)$$

其中, μ 动力黏性系数, p 为重离子所有分压的总和. 其由以下方程来决定: [29]

$$\nabla p = \sum \left[\frac{\rho_k}{M_k} \nabla (\bar{G}_k - \bar{G}_k^0) + \frac{\rho_k}{M_k} (\bar{H}_k - \bar{H}_k^0) (\nabla \ln T) \right] = \sum \nabla p_k, \quad (7)$$

其中, ρ_k 是粒子 k 的质量浓度, \bar{G}_k 是粒子 k 的摩尔

吉布斯自由能, \bar{G}_k^0 是基态的摩尔吉布斯自由能, \bar{H}_k 是粒子 k 的摩尔焓, \bar{H}_k^0 是粒子 k 的基态摩尔焓, p_k 是粒子 k 的分压, \mathbf{F}_k 是作用在粒子 k 上的体积力, 对于带电粒子体积力与电场 \mathbf{E} 有关, 并且表示为

$$\mathbf{F}_k = Z_k f_c \mathbf{E}, \quad (8)$$

其中, Z_k 是粒子 k 的电荷数, f_c 是 Faraday 常数.

最后, 泊松方程为

$$\nabla \cdot (\epsilon_0 \nabla \phi) = -e(n_i - n_e - n_n), \quad (9)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \phi, \quad (10)$$

其中, ϵ_0 是真空介电常数.

2.2 化学反应类型

空气放电的本质是带电粒子与中性空气分子 (原子)、分子 (原子) 团簇等基本粒子之间, 以及这些粒子与电极表面相互碰撞作用的结果 [30]. 当两个粒子之间发生碰撞时, 可以出现不同的现象 [31]. 例如, 粒子的动量或能量会发生改变; 中性粒子会被电离; 以及带电离子可能会变成中性粒子等. 电子与原子碰撞中的主要过程是弹性散射 (电子动量的改变) 和非弹性碰撞 (激发反应和电离反

表 1 空气放电过程中主要粒子的化学反应过程

序号	反应	反应系数 [34]	$\Delta E/\text{eV}$
R_1	$\text{N}_2 + \text{e} \rightarrow 2\text{e} + \text{N}_2^+$	$f(\epsilon)$	15.6
R_2	$\text{O}_2 + \text{e} \rightarrow 2\text{e} + \text{O}_2^+$	$f(\epsilon)$	12.06
R_{3-4}	$\text{N}_2^+ + \text{N}_2 + M \rightarrow \text{N}_4^+ + M$	5×10^{-41}	
R_5	$\text{N}_4^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + 2\text{N}_2$	25×10^{-16}	
R_6	$\text{N}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + \text{N}_2$	5×10^{-41}	
R_7	$2\text{N}_2 + \text{O}_2^+ \rightarrow \text{N}_2\text{O}_2^+ + \text{N}_2$	$1.04 \times 10^{-15} T^{-0.5}$	
R_8	$\text{N}_2\text{O}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{O}_2^+ + 2\text{N}_2$	$14.6 T^{-5.3} \exp(-2357/T)$	
R_9	$\text{N}_2\text{O}_2^+ + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_4^+ + \text{N}_2$		
R_{10-11}	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2 + M \rightarrow \text{O}_4^+ + M$	$2.04 \times 10^{-34} T^{-3.2}$	
R_{12}	$\text{O}_4^+ + \text{e} \rightarrow 2\text{O}_2$	$1.4 \times 10^{-12} (300/T_e)^{0.5}$	
R_{13}	$\text{O}_2^+ + \text{e} \rightarrow 2\text{O}$	$2.42 \times 10^{-13} (300/T_e)$	
R_{14}	$2\text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}_2^-$	$2 \times 10^{-41} (300/T_e)$	
R_{15}	$\text{O}_4^+ + \text{O}_2^- \rightarrow 3\text{O}_2$	1×10^{-13}	
R_{16-17}	$\text{O}_4^+ + \text{O}_2^- + M \rightarrow 3\text{O}_2 + M$	2×10^{-37}	
R_{18-19}	$\text{O}_2^+ + \text{O}_2^- + M \rightarrow 2\text{O}_2 + M$	2×10^{-37}	
R_{20-21}	$\text{O} + \text{O}_2 + M \rightarrow \text{O}_3 + M$	2.5×10^{-46}	
R_{22}	$\text{e} + \text{N}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{N}_2$	$6.07 \times 10^{-34} T_e^{2.5}$	
R_{23}	$2\text{e} + \text{N}_2^+ \rightarrow \text{N}_2 + \text{e}$	$5.651 \times 10^{-27} T_e^{-0.8}$	
R_{24}	$\text{O}_2^+ + \text{O}^- \rightarrow \text{O} + \text{O}_2$	$3.46 \times 10^{-12} T^{0.5}$	
R_{25}	$\text{N}_2 + \text{e} \rightarrow \text{e} + \text{N}_2$	$f(\epsilon)$	1.0
R_{26}	$\text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{e} + \text{O}_2$	$f(\epsilon)$	1.0
R_{27}	$\text{O}_2 + \text{e} \rightarrow \text{O} + \text{O}^-$		3.6

注: 单体反应速率常数单位 s^{-1} ; 二体碰撞的反应速率常数单位: $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$; 三体碰撞的反应速率常数单位: $\text{m}^6 \text{s}^{-1}$; T_e 和 T 单位为 K; $M = \text{O}_2, \text{N}_2$

应). 离子和原子碰撞中的主要过程是弹性散射(动量和能量的交换)和共振电荷转移. 在空气中还有其他的重要碰撞过程, 例如, 分解、离解复合、涉及负离子的过程(电子吸附、解吸附、正负离子之间的电荷转移), 以及涉及分子振动和转动的激发过程. 本文所考虑的 12 种粒子间的 27 种化学反应如表 1 所示^[32,33].

2.3 边界条件设置

在本文中所用的大气压下棒-板电极电晕放电的原理图如图 1 所示. 电晕放电物理计算模型通过轴对称旋转简化为二维棒-板结构(图 1 虚线框内部分). 双曲线体的柱状棒电极的曲率半径为 0.4 mm, 半径为 50 mm 为圆板电极接地, 棒电极与板电极之间的间距为 5 mm. 本模型详细的边界条件如表 2 所示. 本模型基于有限元方法的 COMSOL Multiphysics 软件求解, 计算网格总共划分为 244884 个单元. 在仿真过程中, 分别设置外部直流电压为 2—5.5 kV, 保护电阻为 5 kΩ, 环境温度 $T = 300$ K, 背景压强为 1 atm ($1 \text{ atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$).

其中 D_p 和 D_n 分别为正负离子扩散系数, γ 为

二次电子发射系数, 一般在 10^{-2} 到 10^{-3} 之间, 本文取值为 0.004 时, 能够和试验结果符合较好.

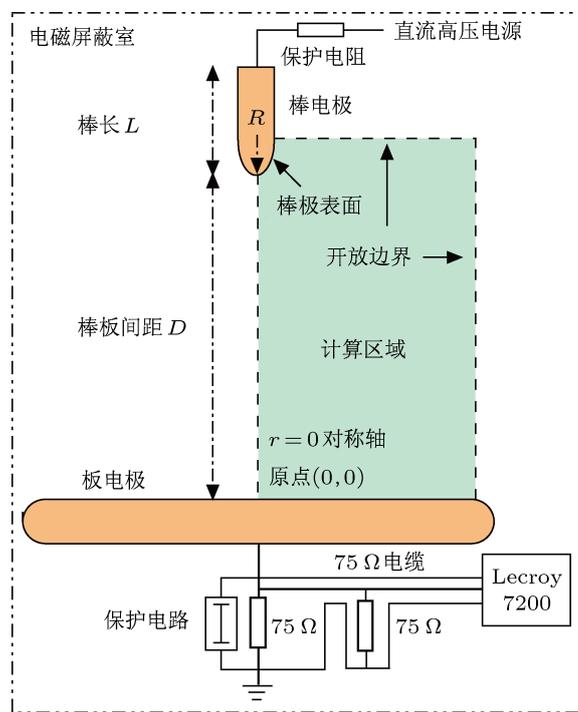


图 1 正电晕放电计算模型和试验电路原理图

表 2 本模型的边界条件

边界条件	N_e	N_p	N_n	施加电压
对称轴	$\frac{\partial n_e}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial n_p}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial n_n}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial V}{\partial r} = 0$
棒电极	$n_e _{w_e} - D_e \nabla n_e = \gamma n_p _{w_p}$	$\mathbf{n} \cdot (-D_p \nabla n_p) = 0$	$n_n = 0$	$V = 3 \text{ kV}$
开放边界	$\mathbf{n} \cdot (-D_e \nabla n_e) = 0$	$\mathbf{n} \cdot (-D_p \nabla n_p) = 0$	$\mathbf{n} \cdot (-D_n \nabla n_n) = 0$	$\mathbf{n} \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}) = 0$
板电极	$\mathbf{n} \cdot (-D_e \nabla n_e) = 0$	$n_p = 0$	$\mathbf{n} \cdot (-D_n \nabla n_n) = 0$	$V = 0$

在棒尖端, 假设空气放电前存在的粒子(种电子和正离子)是最大值为 10^{16} m^{-3} 的高斯分布^[35]

$$N_{e,i} = N_{\max} \times \exp\left(-\frac{(r-r_0)^2}{2s_0^2} - \frac{(z-z_0)^2}{2s_0^2}\right), \quad (11)$$

其中, $N_{\max} = 10^{16} \text{ m}^{-3}$, $r_0 = 0 \text{ } \mu\text{m}$, z_0 为棒尖的位置, $s_0 = 25 \text{ } \mu\text{m}$. 初始条件已经被证明仅仅会加快脉冲的形成, 不会改变放电的特性^[36].

2.4 试验验证

图 1 所示正电晕放电试验电路中, 棒电极长

度为 2 mm, 棒头曲率为 0.4 mm, 垂直安装于一块厚度为 8 mm, 半径为 5 cm 的板电极上方, 两者相距为 5 mm. 外施电压由 MatsusadaAU-20R15 直流电源提供, 该电源可提供在 0—20 kV 内的正负电压. 板电极经一采样电阻为 75 Ω 的电流传感器接地由 Lecroy7200 示波器记录电晕电流波形. 保护电路主要由陶瓷气体放电管构成, 能够在 1 ns 之内进行快速响应以确保示波器安全. 试验时环境温度 $T = 300$ K, 背景压强为 1 atm. 整个实验在重庆大学电磁屏蔽实验室内进行, 可以有效降低各种干扰, 确保试验数据的准确性. 图 2 是大气压下直流正电晕放电过程中仿真计算数据与相

应试验数据的放电电压-电流 ($V-I$) 对比曲线. 其中 $V = V_{\text{pow}} - IR$, V 为棒板电极放电电压, I 为电晕放电有效电流, R 为保护电阻和采样电阻之和.

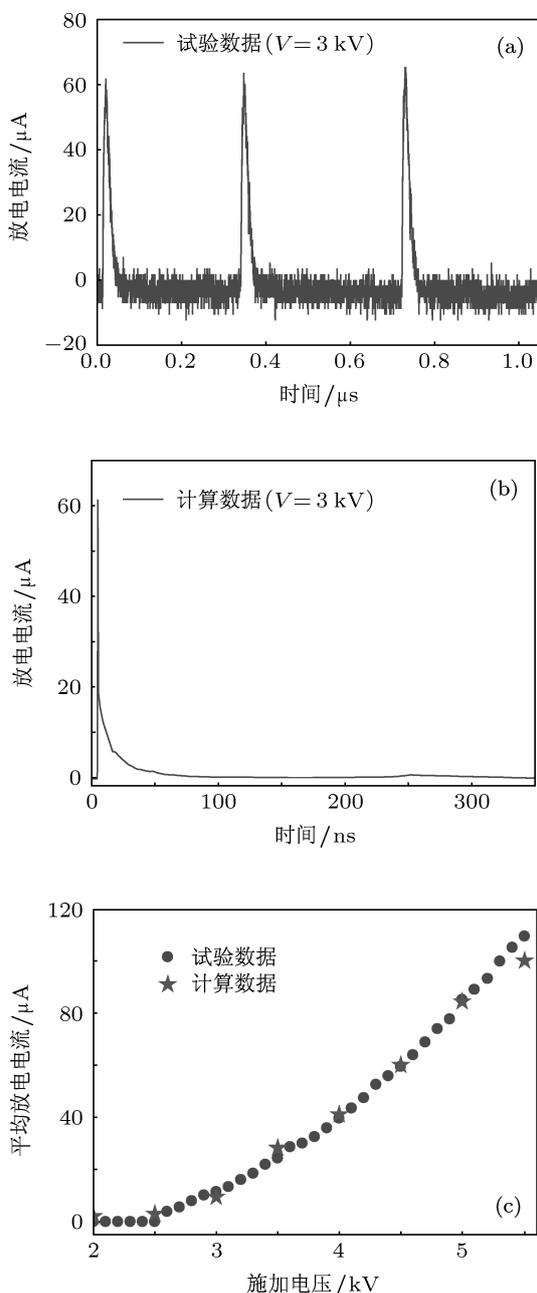


图 2 正电晕放电电流仿真与试验结果对比 (a) 电晕放电电流实测波形 ($V = 3 \text{ kV}$); (b) 电晕放电电流单个计算波形 ($V = 3 \text{ kV}$); (c) 电晕放电伏安特性曲线仿真与实验对比

当施加电压达到棒-板电极的阈值电压以后, 电晕电流为如图 2(a) 所示的脉冲电流形式. 随着电压、电极结构的变化, 脉冲幅值和频率均会有一些的变化, 其中包含的许多高次谐波, 能对无线电和

高频通讯造成干扰. 图 2(b) 为本文模型计算得到的单个电晕放电波形, 通过和图 2(a) 的对比可知, 计算所得波形和实测波形基本类似仅波峰的下降时间稍快. 图 2(c) 为电晕放电有效电流的试验和计算数据对比. 由图 2 中可以发现, 整体而言计算数据与试验数据符合较好, 从而验证了该混合模型的正确性. 除此之外, 随着施加电压的增加, 计算与试验获得的伏安特性曲线的斜率都是逐渐减小的, 说明棒-板电极的等效电阻也是逐渐减小的. 这是因为随着放电电压的升高, 棒-板间隙内的场强增大使得因为电离作用产生的带电粒子增多, 等效电流变大, 该规律与文献 [37] 得到的结果一致.

3 大气压下正电晕放电空间电荷特性研究

3.1 电场分布发展规律

在正电晕放电过程中, 电场强度分布对于分析放电的物理机理过程具有相当重要的意义. 由图 3 可知: 电场在阳极和迁移区之间几乎保持一个恒定值, 电场在迁移区内迅速降到一个较低值, 而在体等离子体区域内基本保持这个值, 这种分布趋势与直流氦气放电中采用分光镜测量到的电势分布基本类似 [38]. 随着放电时间的发展, 迁移区不断向阴极移动, 相当于“棒极”不断往前推进. 迁移区的电场幅值先逐渐减小, 阴极鞘附近的电场 (即体等离子体区的电场较小值) 随着时间的发展逐渐增大. 前者是由于阳极和迁移区电场使得“棒极”电势降低, 后者主要是由于空间的正离子对等离子体区的电场加强作用. 当电晕区发展至阴极鞘附近时, 电场幅值突然增大, 这是由于迁移区发展到阴极附近, 空间积累的电荷被完全泄放, 整个间隙的正电荷涌向阴极, 此时阴极鞘附近的电场畸变是最严重的, 随后放电间隙复原.

3.2 电子温度发展规律

电子从电场中获得能量, 通过与重粒子之间的碰撞过程把能量传递给重粒子. 电子温度是空气放电中能量传递最主要的媒介, 其对于了解空气放电中电离、激发等反应过程以及能量转移速率具有非常重要的作用. 图 4 为不同放电时刻沿着轴线的电子温度分布曲线. 由图可以发现, 电子温度在阳

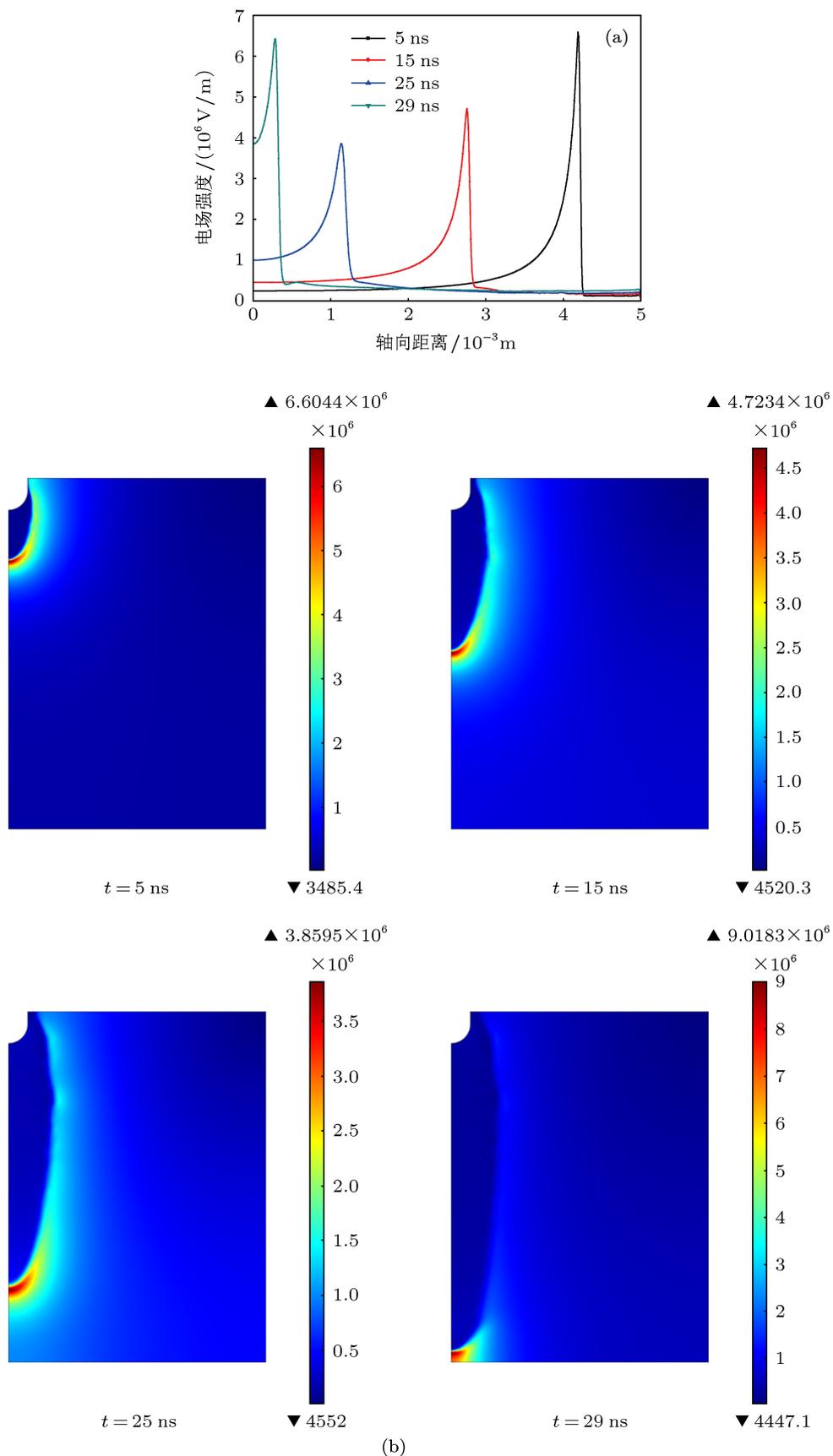


图3 电场强度分布图 (a) 四个不同时间电场强度沿轴线分布图; (b) 四个不同时间电场强度二维分布图 ($V = 3 \text{ kV}$)

极附近略有增加, 在迁移区迅速下降, 在电离区和体等离子体区保持一个相对稳定的值; 并且随着放电时间的增加, 电子温度最大值逐渐减小并且向阴极表面移动, 靠近阴极附近又表现出迅速上升的趋势. 这个现象和电场分布及发展规律极其类似, 这也证明电子通过电场的焦耳加热效应获得能量使得自身温度升高^[39]. 当电离区发展到阴极附近时, 电子温度最大值可达到 6.7 eV, 这个值与 Sigmond 的试验结果基本一致^[40].

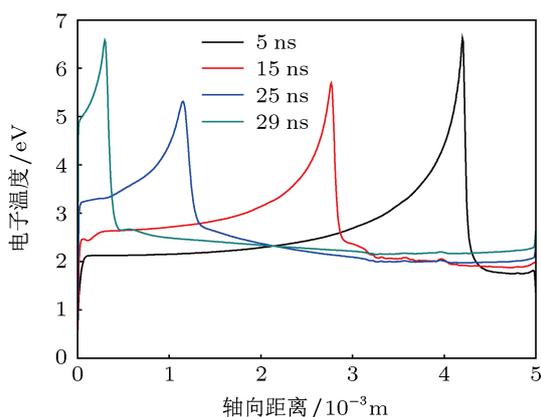


图4 不同时刻沿着轴线的电子温度分布曲线 ($V = 3 \text{ kV}$)

3.3 净空间电荷密度分布发展规律

由图 5 可以发现, 在整个放电区域, 只有带正电的等离子体特征, 在体等离子体区域和电晕层基本保持电中性, 没有发现带负电的等离子体特征. 随着时间的发展, 净空间电荷不断向阴极发展, 并且每个时间段, 净空间电荷轴向分布的范围大致相同, 都出现在迁移区内. 这是由于在迁移区内, 电场强度最大, 电场的焦耳效应使得电子获得较高能量, 高能电子与空气分子发生碰撞电离产出大量正离子和电子, 电子的速率远大于正离子速率, 从而导致在迁移区附近正空间电荷的密度较大. 从图中可以发现, 在阳极鞘附近净空间电荷幅值迅速上升, 在间隙则缓慢下降, 在靠近阴极时又突然上升. 这是因为阳极附近电场最大, 电离程度较消电离具有明显优势, 使得在一定范围内, 净电荷密度具有上升趋势; 在迁移区靠近阴极的过程中, 电场强度逐渐减小, 因为电离产生正离子数量变少, 同时由于消电离而导致的带电粒子减少; 在阴极附近的净电荷突升则是由于迁移区发展到阴极导致的泄流引起的, 整个空间的正电荷通过阴极流向地电极, 而此时由于正离子撞击阴极表面产生的二次电子发

射则是电晕放电自持的关键因素.

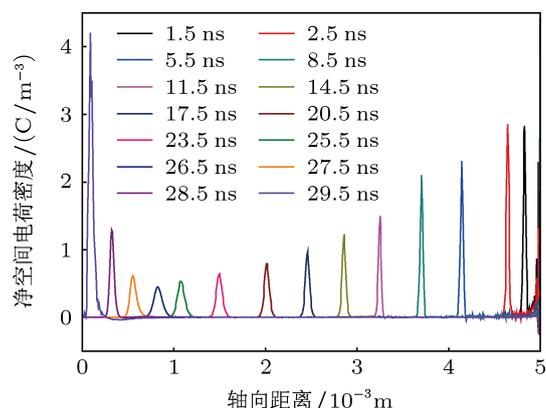


图5 不同时间的净电荷密度轴向分布 ($V = 3 \text{ kV}$)

3.4 电子密度分布发展规律研究

图 6 为四个不同放电时刻沿着轴线电子密度分布曲线. 由图可以发现, 随着时间增加, 电子密度整体增加, 并且有向阴极发展的趋势. 在阴极鞘内, 电子密度近似为 0. 而在阳极附近, 电子密度出现最大值, 这是因为被电离的空气分子随着放电的发展越来越多, 导致放电区域内的电子密度逐渐增大, 电子崩逐渐建立并且向阳极发展. 当迁移区发展到阴极附近, 电子密度开始迅速增加, 并且阴极鞘附近电子密度的增加幅度要比阳极大很多, 这是由于正离子到达阴极表面数量逐渐增加, 导致在阴极表面产生二次电子数目逐渐增多, 从而导致电子密度增加变快. 在整个放电过程中, 电子密度维持在 10^{19} m^{-3} 左右. 当迁移区发展到阴极附近 (如图 6 $t = 29 \text{ ns}$ 和图 7) 时, 阴极鞘附近由于电子的二次发射的缘故, 电子密度迅速增 $6.0 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 左右. 该过程中, 电子从阴极出来进入电场较强的区域内被电场加速, 但在阴极附近电子速度较低, 此时电子从电场中获得的能量还不足以激发原子. 随后, 在 0.15—0.5 mm 区域, 电子穿过该区域后能量达到空气分子的激发能, 此时电子碰撞分子/原子而产生激发态分子/原子, 处于激发态的分子/原子, 此时容易发生辐射复合使得电子密度有一个减小的过程. 在 0.5—3.2 mm 区域, 电子在电场加速下能量达到电离能, 使得电离程度大大提高, 电子密度逐渐升高. 此时电子主要有两类, 一类是快电子, 这部分电子从阴极表面产生后, 一直被电场加速到该处, 另一类是慢电子, 这部分电子从阴极表面发射出来后虽然经过电场加速, 但是同时经历了多次非弹性

碰撞, 电子能量小于电离能 (接近激发能), 所以这个分布带具有强烈的电离和激发过程. 在 3.2—4 mm 分布区域内电场强度变化不大, 且低于大气压空气电离强度, 高能电子的能量以弹性碰撞和非弹性碰撞的形式消耗掉, 电离作用减弱, 所以靠近阳极表面电子密度会出现一个下降过程. 随后电子又重新获得加速, 使得电离过程变强, 且电子崩通过阳极发生中和反应, 使得阳极附近的电子密度在整个放电区域是最大的.

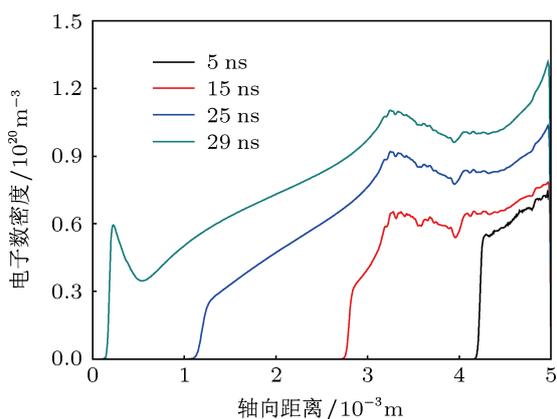


图 6 不同时刻沿着轴线的电子密度分布曲线 ($V = 3 \text{ kV}$)

分布曲线与电子密度分布曲线类似, 这是因为正离子主要是由电子的碰撞电离产生. 与正离子密度相比, 负离子密度的明显特征是从阴极到阳极过程中缓慢增加, 这是因为负离子主要是由电子和中性分子 (原子) 的附着反应而产生, 在靠近阳极的区域电子密度较大, 另外由于在阴极鞘内存在较大电场强度的缘故, 使得负离子快速向阳极运动, 使得阴极附近密度较低. 由图示坐标可以发现, 负离子密度比阳离子且整体要小 2 个数量级左右. 这是因为在强场作用下, 主要发生的是电离反应, 产生大量正离子; 中性分子 (原子) 难以捕捉到运动速度很快的电子发生吸附反应形成负离子; 同时, 负离子容易和周围大量的正离子之间发生碰撞反应而形成中性粒子而降低负离子密度.

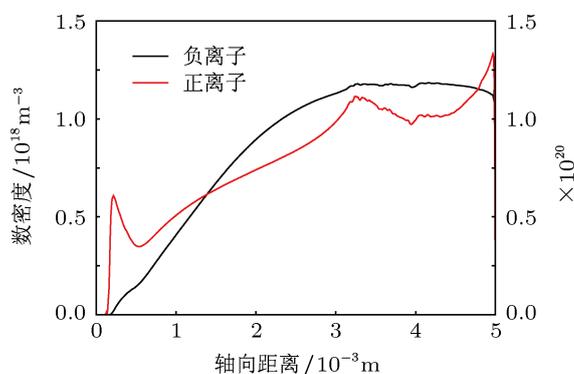


图 8 29 ns 时沿着轴线的正负离子密度分布 ($V = 3 \text{ kV}$)

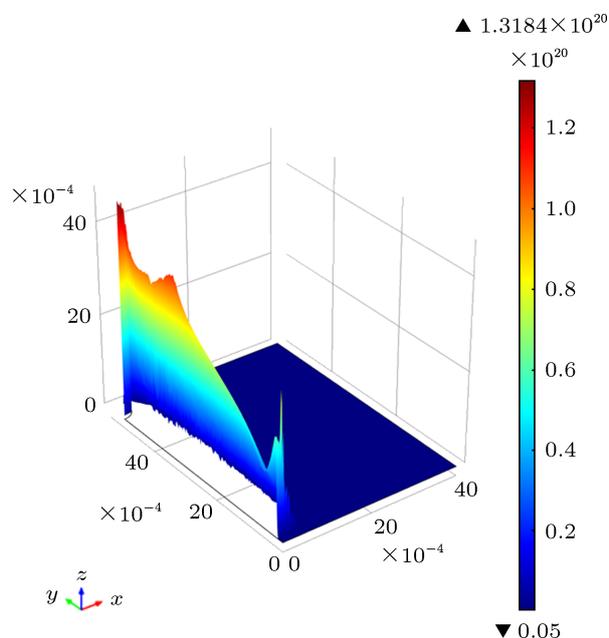


图 7 29 ns 时电子密度分布的二维高度表达图 ($V = 3 \text{ kV}$)

3.5 粒子成分分析

图 8 是在电晕放电 29 ns 时, 沿着轴线的正负离子密度分布曲线. 由图中可以发现, 正离子密度

由图 9 可以看出, 与其他正离子相比, O_4^+ 离子是放电过程中数量最多的正离子, 在电离区占有绝对优势. O_2^+ 和 N_2^+ 仅仅在迁移区内数量较多, 在阴极鞘附近, 迅速升高到一个较高的值, 然后以一个相对稳定的值延续到阳极. O_2^+ 粒子数量明显多于 N_2^+ , 这是因为在电场强度较高的阴极鞘内, O_2 的电离阈值能量 (12.06 eV) 比 N_2 的电离阈值能量 (15.6 eV) 要低, 导致 O_2 的电离速率和程度比 N_2 的电离速率和程度高, N_2 的电离反应被抑制, 所以 O_2^+ 离子的二次电子发射系数对本文所采用的流体-化学反应混合模型具有非常重要的作用. 在阳极鞘附近, 光电离加强, 大量激发态的氮气分子衰变成稳态, 光子被氧分子吸收而形成 O_2^+ 离子是阳极鞘附近 O_2^+ 离子密度上升的原因, 这与 Zheleznyak 等人的假设也是相符的. 放电过程中, N_4^+ 和 N_2O_2^+ 分别由三体反应 R_3 , R_4 和 R_7 产生的, 与放电过程中其他带电粒子相比是可以忽略的.

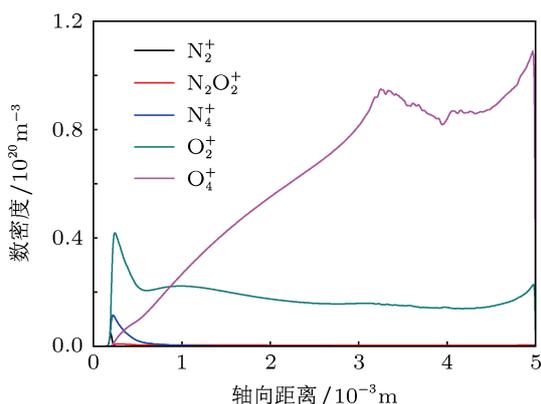


图9 29 ns 时 N_2^+ , N_4^+ , O_2^+ , O_4^+ 和 $O_2^+N_2$ 分布曲线 ($V = 3$ kV)

除此之外,在放电过程中仅仅发现有 O_2^- 和 O^- 负离子, O_2^- 离子是主要的负离子, O_2^- 离子密度要比 O^- 离子密度大 2 个数量级左右. 这是因为 O^- 离子是通过分离附着反应 R_{27} 产生, O_2^- 则是通过三体反应 R_{14} 产生, 而且 R_{27} 反应速率要比 R_{14} 反应速率小的缘故. 如果是在低气压的空气放电过程中, O^- 离子密度与 O_2^- 离子密度基本相等或者比 O_2^- 离子密度大 [33]. 图 6 中负离子的曲线就是 O_2^- 和 O^- 负离子两者的综合表现.

图 10 为沿着轴线的中性粒子 O 和 O_3 的密度分布曲线. 由图可以看出, O 和 O_3 中性粒子在整个放电过程中密度非常小, 两种粒子具有相似的变化趋势, 在阴极鞘附近与体等离子体区域基本保持一个较低的数值, 沿着阳极逐渐增大. 然而 O 比 O_3 粒子的密度大 4 个数量级左右. 这是因为 O 中性粒子是化学反应 R_{13} , R_{24} 和 R_{27} 的产物, 参与反应的 O_2^+ , O^- 和电子均沿着阳极方向变多, 使得靠近阳极区域反应速率较大, 而 O_3 中性粒子则由化学反应 R_{20} 和 R_{21} 产生, 并且均以 O 为原料, 因此密度远低于 O . O 和 O_3 中性粒子在放电过程中均不参与电离反应, 和负离子一样所以对电晕放电微观过程的影响较小.

4 结论

本文提出了流体-化学动力学二维棒-板电极正电晕放电混合数学模型, 考虑了光电离对电晕放电影响, 并且通过试验研究, 发现仿真和试验的结果符合较好, 从而验证了该模型的正确性. 基于以上被验证的模型, 研究了外施电压 3 kV 时, 棒-板电极

正电晕放电过程中的电场分布、电子温度分布、净空间电荷分布的发展规律, 并对电晕放电过程中的粒子成分进行了详细分析, 讨论了电子、正负离子和中性粒子在放电过程中的生成规律及对电晕放电的影响. 本文的主要结论如下:

1. 随着放电时间的增加, 电场分布具有向阴极发展的趋势, 幅值逐渐减小, 在迁移区靠近阴极附近时, 幅值迅速增大. 电子温度和电场分布曲线和发展规律类似, 说明电子主要通过电场的焦耳加热效应获得能量使得自身温度升高.

2. 在整个放电区域, 仅发现带正电的等离子体特征, 在体等离子体区域和电晕层基本保持电中性, 没有发现带负电的等离子体特征. 随着时间的发展, 净空间电荷不断向阴极发展, 并且每个时间段, 净空间电荷轴向分布的范围大致相同, 且都出现在迁移区内; 净空间电荷密度在阳极鞘附近迅速上升, 在棒板间隙间缓慢下降, 靠近阴极附近又突然上升.

3. 随着时间增加, 电子密度整体增加, 并且有往阴极发展的趋势; 在阳极鞘内, 电子密度出现最大值, 阴极鞘附近电子密度近似为 0; 电子密度在阴极附近会因电子的二次发射迅速增大, 这也是电晕放电是否自持的判据. 在整个放电过程中, 电子密度维持在 10^{19} m^{-3} 左右.

4. O_4^+ 密度是放电过程中数量最多的正离子, 在电离区占有绝对优势; O_2^+ 和 N_2^+ 是迁移区内数量最多的正离子, 其在二次电子发射过程中占有重要作用. O_2^- 离子是主要的负离子, 负离子密度比阳离子且整体要小 2 个数量级左右. 中性粒子中数量最多的 O 密度与正离子相比小 3 个数量级左右. 中性粒子在放电过程中不参与电离反应, 与负离子一样所以对电晕放电微观过程的影响较小.

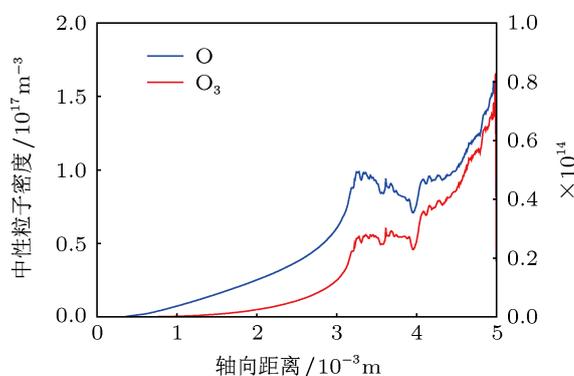


图10 29 ns 时中性粒子密度分布 ($V = 3$ kV)

- [1] Yang B C, Liu X B, Dai Y S 2002 *High Voltage Engineering* (Chongqing: Chongqing University Press) (in Chinese) [杨保初, 刘晓波, 戴玉松 2002 高电压技术 (重庆: 重庆大学出版社)]
- [2] Liu Z Y 2005 *Ultra-Hig Grid* (Beijing: China Economic Publishing) (in Chinese) [刘振亚 2005 特高压电网 (北京: 中国经济出版社)]
- [3] Shu Y B, Hu Y 2007 *Proceedings of the CSEE* **27** 1 (in Chinese) [舒印彪, 胡毅 2007 中国电机工程学报 **27** 1]
- [4] Zheng Y S He J L, Zhang B 2011 *High Voltage Engineering* **3** 752 (in Chinese) [郑跃胜, 何金良, 张波 2011 高电压技术 **3** 752]
- [5] Qiu C R, Wang N Q 1994 *Electrical Equipment Partial Discharge and Testing Technology* (Beijing: China Machine Press) (in Chinese) [邱昌容, 王乃庆 1994 电工设备局部放电及其测试技术 (北京: 机械工业出版社)]
- [6] Bai X Y, Bai M D, Zhang Z T 2003 *China Basic Science* **6** 30 (in Chinese) [白希尧, 白敏冬, 张芝涛 2003 中国基础科学 **6** 30]
- [7] Michael A L Allan J L 2007 *Plasma Discharge Principle and Materials Processing* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [迈克尔 A 力伯曼, 阿伦 J 里登伯格 2007 等离子体放电原理与材料处理 (北京: 科学出版社)]
- [8] Hu Q, Shu L C, Jiang X L 2010 *High Voltage Engineering* **36** 1669 (in Chinese) [胡琴, 舒立春, 蒋兴良 2010 高电压技术 **36** 1669]
- [9] Liu Y P You S H, Lv F C 2010 *High Voltage Engineering* **36** 2424 (in Chinese) [胡琴, 舒立春, 蒋兴良 2010 高电压技术 **36** 2424]
- [10] Davies A J, Davies C S, Evans C J 1971 *Proc. Inst. Electrical Eng.* **118** 816
- [11] Passchier J D P Goedheer W J 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 1073
- [12] Lymberopoulos D P, Economou D J 1993 *J. Appl. Phys.* **73** 3668
- [13] Lymberopoulos D P, Economou D J 1993 *Appl. Phys. Lett.* **63** 2478
- [14] Bera K, Farouk B, Lee Y H 1998 *JSME International Journal* **41** 132
- [15] Bera K, Farouk B, Lee Y H 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** 412
- [16] Bera K, Farouk B, Lee Y H 1999 *J. Electrochem. Soc.* **146** 3264
- [17] Bera K, Farouk B, Vitello P 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 1479
- [18] Agostino R D, Favia P, Oehr C Wertheimer M R 2005 *Plasma Processes and Polymers* **2** 7
- [19] Gordiets B F, Ferreira C M Guerra V L Loureiro J M A H Nahomy J 1995 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **23** 750
- [20] Nahomy J, Ferreira C M, Gordiets B, Pagnon D, Touzeau M, Vialle M 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **107** 093304
- [21] Zhang J, Adamiak K 2008 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **44** 494
- [22] Hagelaar G J M Pitchford L C 2005 *Plasma Sources Sci. Technol.* **14** 722
- [23] Zheleznyak M D, Mnattskanyan A K 1977 *Zhurnal Tekhnicheskoi Fiziki* **47** 2497
- [24] Yu V S, Larsson A, Gubanski S M, Akyuz M 2001 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** 614
- [25] Philip D N, Janzen A R, Aziz R A 1972 *J. Chem. Phys.* **57** 1100
- [26] Brokaw R S 1969 *Ind. Eng. Chem. Process Des.* **8** 240
- [27] Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N 1960 *Transport Phenomena* (Madison: Madison Press)
- [28] Farouk T, Farouk B, Gutsol A, Fridman A 2008 *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** 035015
- [29] Curtiss C F, Bird R B 1999 *Ind. Eng. Chem. Res.* **38** 2515
- [30] Xu X J, Zhu D C 1996 *Air Discharge Physical* (Shanghai: Fudan University Press) (in Chinese) [徐学基, 诸定昌 1996 空气放电物理 (上海: 复旦大学出版社)]
- [31] Yao P L 1994 *Plasma Physics* (Beijing: Science Press) (in Chinese) [姚平录 1994 等离子体物理学 (北京: 科学出版社)]
- [32] Gordiets B F, Ferreira C M, Guerra V L, Louriero M 1995 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **23** 750
- [33] Mahadev S, Raja L L 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 093304
- [34] Liu X H, He W, Yang F, Xiao H G, Ma J 2011 *High Voltage Engineering* **37** 1614 (in Chinese) [刘兴华, 何为, 杨帆, 肖汉光, 马俊 2011 高电压技术 **37** 1614]
- [35] Tran T N, Golosnoy I O, Lewin P L, Georghiou G E 2009 *IEEE Conf. on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Virginia USA*, 2009 p559
- [36] Tran T N, Golosnoy I O, Lewin P L, Georghiou G E 2011 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **44** 015203
- [37] Li Q, Li H F, Sun X R, Zhang W Y, Wang H 2010 *High Voltage Engineering* **36** 2739 (in Chinese) [李庆, 李海凤, 孙晓荣, 张文月, 王昊 2010 高电压技术 **36** 2739]
- [38] Arkhipenko V I, Zgairovskii S M, Kirillov A A, Simonchick L V 2002 *Plasma Phys. Rep.* **28** 858
- [39] Marode E, Bastien F, Bakker M 1979 *J. Appl. Phys.* **50** 140
- [40] Sigmond R S 1984 *J. Appl. Phys.* **56** 1355

Numerical simulation of transient space charge distribution of DC positive corona discharge under atmospheric pressure air*

Liao Rui-Jin^{1)†} Wu Fei-Fei¹⁾ Liu Xing-Hua²⁾ Yang Fan¹⁾
Yang Li-Jun¹⁾ Zhou Zhi¹⁾ Zhai Lei²⁾

1) (State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing 400044, China)

2) (Zibo Power Supply Company, Shandong Electric Power Corporation, Zibo 255000, China)

(Received 11 June 2012; revised manuscript received 6 July 2012)

Abstract

Corona discharges are usually generated at sharp points, edges or on thin wires where the electric field is strongly concentrated. With the rapid development of extra and ultra high-voltage transmission lines, the air corona discharge becomes one of the critical problems associated with high-voltage lines, which can lead to the deterioration of insulation systems, power loss, radio noise. Corona discharge studies have been undertaken for many years, not only because of the scientific interest in the corona mechanism but also because of its practical engineering importance. Transient space charge distribution effect that is one of the important causes in the process of corona discharge, is closely related to the corona discharge mechanism and onset, self-sustaining. In this paper, we present an improved self-consistent, multi-component and two-dimensional plasma hybrid model for simulating the DC positive corona discharge under atmospheric environment. The model is based on the plasma hydrodynamics and the chemical dynamics, and it includes 12 species and 27 reactions. Besides, the photoionization effect is also considered in the proposed model. The simulation and the experiment on bar-plate electrode configuration with an inter-electrode gap of 5.0 mm at 2–5.5 kV are carried out. The discharge voltage-current characteristics and single pulse waveform are in good agreement with the experimental measurements. Based on this model, the electric field distribution, the electron temperature distribution, and the evolution of charged species distribution are investigated in detail. The results show that distributions of electron temperature and electric field have the same patterns. In the process of discharge, electron density is kept at 10^{19} m^{-3} or so. O_4^+ is dominant compared with the other charged heavy species, and O_2^+ and N_2^+ play the key role in secondary electron emission: the numbers of O_2^- and O are the largest in negative ions and neutral particle respectively, they play a negligible role in discharge process.

Keywords: positive corona discharge, air, hybrid model, space charge

PACS: 52.25.Dg, 52.65.-y, 52.80.Hc, 52.40.K

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2011CB209401), the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. CDJXS1215003), and the Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51021005).

† E-mail: rjliao@cqu.edu.cn