

# 不同海拔高度下电晕放电等离子体粒子特性的仿真研究

冷雪健, 金福宝, 马山刚, 陈科元

(青海大学 能源与电气工程学院, 西宁 810000)

**摘要:** 电晕放电作为等离子体的一种重要获取手段, 它的放电特性及其降解能力与所处空气环境有着密切的关系. 为了得到不同海拔高度对电晕放电特性和等离子体降解能力的影响, 本文通过 COMSOL 软件基于流体动力学模型, 对不同海拔高度的放电模型进行数值模拟计算. 分别对电流波形、影响等离子体降解能力的电子密度、平均电子能量等物理量随海拔高度变化的规律进行研究. 结果表明, 海拔越高, 气压越低, 环境温度越低, 电流脉冲峰值越高, 频率越高, 脉冲启动时间越提前. 脉冲波形的上升时间减小、下降时间增大. 同时, 电子密度以及平均电子能量也会随着海拔高度的升高而增强.

**关键词:** 等离子体; 电晕放电; COMSOL 仿真; 电子密度

中图分类号: O539

文献标志码: A

DOI: 10.19855/j.1000-0364.2025.033001

## Simulation study of plasma particle characteristics of corona discharge at different altitudes

LENG Xue-Jian, JIN Fu-Bao, MA Shan-Gang, CHEN Ke-Yuan

(College of Energy and Electrical Engineering, Qinghai University, Xining 810000, China)

**Abstract:** As an important means of obtaining plasma, the discharge characteristics of corona discharge and its degradation capacity are closely related to the air environment in which it is located. In order to obtain the effects of different altitudes on the corona discharge characteristics and plasma degradation capacity, a hydrodynamic model was established by COMSOL software, and numerical simulations were performed for the discharge models at different altitudes, respectively. The variation laws of physical quantities, such as current waveform, electron density and average electron energy that affect plasma degradation ability, with altitude were investigated. It is calculated that the higher the altitude, the lower the air pressure and the lower the ambient temperature, the higher the peak current pulse, the higher the frequency and the earlier the start-up time. The rise time and fall time of the pulse waveform also change, and the electron density and the average electron energy, which affect the degradation ability of corona plasma, also increase with the altitude.

**Key words:** Plasma; Corona discharge; COMSOL simulation; Electron density

## 1 引言

电晕放电是一种自持放电, 普遍出现在曲率较大的电极上, 如针、棒电极<sup>[1, 2]</sup>. 电晕放电作为一种常见的低温等离子体获取手段, 广泛受到众多学者的关注, 由于在放电过程中会产生大量

的活性物质和高能粒子, 使其在废弃物降解, 材料改性以及医疗领域获得了许多的应用<sup>[3-6]</sup>. 随着青海地区对生态环境保护的愈发重视, 因此亟需探索等离子体降解技术在高海拔地区的应用, 但是由于海拔高度(温度、气压、空气密度等)会对放电特性产生较为明显的影响, 因此还需要进

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 国家自然科学基金(51865049); 青海省科技厅基础研究计划项目(2020-ZJ-708)

作者简介: 冷雪健(1999—), 男, 黑龙江绥化人, 硕士研究生, 研究方向为低温等离子体降解技术研究. E-mail: 2281400345@qq.com

通信作者: 金福宝. E-mail: jinfubao@163.com

一步对等离子体降解的微观机理和特性进行研究.

电晕电流的波形会受到放电空间内电子电离, 离子迁移及离子复合的影响, 通过观察波形的变化, 可以分析放电过程的状态变化和剧烈程度, 进而展开对微观粒子的分析研究<sup>[7]</sup>. 目前国内外学者对不同因素影响下的电晕特性进行了大量的研究<sup>[8]</sup>. 文献 [9] 发现大气条件会对棒板电极的起晕场强和电子密度分布产生一定程度的影响. 文献 [10] 通过对不同的温度下的不同电极结构进行仿真, 发现了温度和电极结构对特里切尔脉冲特性、电子密度、电场强度等物理量的影响. 文献 [11] 通过实验分析出不同气压对正电晕放电的影响, 得到了 60 ~ 100 kpa 时的起晕电压和脉冲参数. 文献 [12] 发现海拔高度的提升会导致空气密度的降低, 从而导致空气绝缘强度降低, 最终影响空气间隙的放电特性. 通过文献 [13] 可知臭氧是等离子体系统中最重要最持久的活性物质, 臭氧氧化在等离子体氧化中发挥主导作用. 放电空间内的臭氧产生主要通过经电场加速过的高能电子对空气中的氧分子进行电离、离解、附着生成氧原子, 之后氧原子再通过一系列的二体、三体反应生成臭氧分子, 实现污染物的氧化降解.

青海地区位于高海拔区域, 具有低压、低温的特点, 会对等离子体降解产生明显的影响, 因此可以通过分析不同海拔下对电流波形的变化, 进而分析对电子参数的影响, 提高等离子体的降解能力, 然而目前针对不同海拔高度对放电特性及降解能力的影响还鲜有研究. 因此, 开展针对不同海拔高度的电晕放电等离子体特性的研究对进一步理解放电机理、提高降解能力、指导实际应用具有十分重要的意义.

本文基于流体动力学模型进行负电晕放电的仿真, 将海拔高度产生的气压、温度变化加入到仿真当中, 研究海拔高度对负电晕放电特性的影响规律, 并且对电流波形进行计算和分析, 此外还对不同海拔高度对影响等离子体降解能力的电子参数进行了对比分析.

2 负电晕仿真模型

随着对等离子体放电仿真研究的不断深入, 目前可用于等离子体的仿真模型大致分为: 动力学模型、流体动力学模型以及混合模型等<sup>[14-16]</sup>. 针对所需的仿真效果及所需要的仿真条件, 不同的模型有着不同的计算效果. 在综合考虑之下,

流体动力学模型能够在较高气压下, 通过添加多种粒子间的复杂化学反应, 迅速、精准、清晰的求解到放电的物理图像, 被广泛的应用于大气压下的气体放电. 因此, 本文基于 COMSOL 软件中的流体动力学模型进行仿真研究.

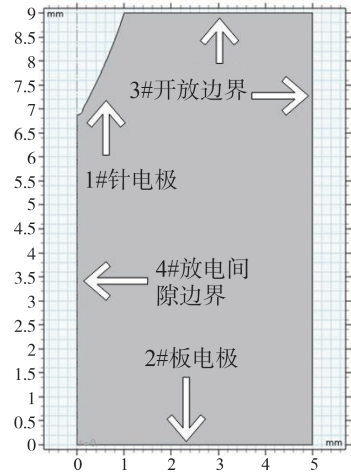


图1 模型示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the model

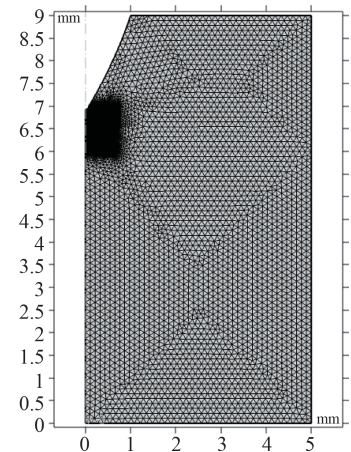


图2 网格划分图  
Fig. 2 Mesh division diagram

如图1为针板结构放电模型, 为了加快计算速度, 采用二维轴对称模型来进行计算. 其中下方板电极的半径为 5 mm, 针板距离为 7 mm, 针电极的曲率半径为 100  $\mu\text{m}$ , 由于特里切尔脉冲需要负电晕才能显现, 因此采用针电极施加负电压, 板电极接地的接线方式.

2.1 流体动力学模型

本文采用 COMSOL 中的等离子体模块, 通过粒子的连续性方程以及泊松方程等进行联立求解, 分析 Trichel 脉冲电流和电子参数的变化趋势, 具体方程如下<sup>[17]</sup>:

连续性方程:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial N_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-\mu_e N_e E - D_e \nabla N_e) \\
&= \alpha N_e |\mu_e E| - \eta N_e |\mu_e E| - k_{ep} N_e N_p \\
& \frac{\partial N_p}{\partial t} + \nabla \cdot (-\mu_p N_p E - D_p \nabla N_p) \\
&= \alpha N_e |\mu_e E| - k_{pn} N_n N_p - k_{pe} N_e N_p \\
& \frac{\partial N_n}{\partial t} + \nabla \cdot (-\mu_n N_n E - D_n \nabla N_n) \\
&= \eta N_e |\mu_e E| - k_{pn} N_n N_p \quad (1)
\end{aligned}$$

式中  $N_e$ 、 $N_p$ 、 $N_n$  分别为电子密度、正、负离子的密度;  $t$  为时间;  $D_e$ 、 $D_p$ 、 $D_n$  分别为电子和正负离子的扩散系数;  $\alpha$ 、 $\eta$  分别为电离、吸附系数;  $k_{ep}$ 、 $k_{pn}$  分别为电子与正离子、正离子和负离子的复合系数;  $E$  为电场强度。

泊松方程:

$$\begin{aligned}
E &= -\nabla \varphi \\
\varepsilon_0 \varepsilon_r \nabla^2 \varphi &= -q \cdot (N_p - N_n - N_e) \quad (2)
\end{aligned}$$

式中  $\varphi$  为电势;  $\varepsilon_0$  为真空介电常数;  $\varepsilon_r$  为相对介电常数;  $q$  为元电荷量。

## 2.2 边界条件

边界条件的设置对整个等离子体仿真计算发挥着极其重要的作用,为了准确的描绘气体放电的详细过程,将整个放电空间分为以下四种边界:分别为针电极边界、板电极边界、开放边界以及放电间隙边界。具体边界条件可以通过以下方程进行描述:

边界1为针电极,正离子通过轰击阴极引起二次电子发射,二次电子发射系数  $\gamma$  通常与电极材料有关,这里设置为0.03,正离子自由流入,由于边界排斥负离子,所以负离子的数密度为0.设置电势为-5 kV.取  $n$  为外法线方向,则控制方程如下:

$$\begin{aligned}
n \cdot (-D_e \nabla N_e) &= 0 \\
n \cdot (-D_p \nabla N_p) &= 0 \\
N_n &= 0 \\
V &= -5 \quad (3)
\end{aligned}$$

边界2为板电极,电子和负离子会流向接地电极,而正离子会因为电场力而收到排斥,控制方程如下:

$$\begin{aligned}
n \cdot (-D_e \nabla N_e) &= 0 \\
n \cdot (-D_n \nabla N_n) &= 0 \\
N_p &= 0 \\
V &= 0 \quad (4)
\end{aligned}$$

边界3为开放边界,在实际的放电空间内没

有此边界,但是由于仿真空间不能设置为无限大,需要设置一个开放边界,各类离子可以在此边界自由流动,控制方程如下:

$$\begin{aligned}
n \cdot (-D_e \nabla N_e) &= 0 \\
n \cdot (-D_p \nabla N_p) &= 0 \\
n \cdot (-D_n \nabla N_n) &= 0 \\
n \cdot (\varepsilon_0 \varepsilon_r E) &= 0 \quad (5)
\end{aligned}$$

边界4为放电间隙边界,是电晕放电中的各类物理化学反应的反应场所,具体方程如下:

$$\begin{aligned}
\frac{\partial N_e}{\partial r} &= 0 \\
\frac{\partial N_p}{\partial r} &= 0 \\
\frac{\partial N_n}{\partial r} &= 0 \\
\frac{\partial V}{\partial r} &= 0 \quad (6)
\end{aligned}$$

## 2.3 模型优化

网格划分作为仿真过程中极其重要的环节,具体网格模型如图2所示,由于针极附近的变化梯度较大,需要更为密集的网络分布,如果网格稀疏可能导致模型无法收敛.为了提高计算效率,可以采用局部加密的方法,在变化梯度小的区域减小网格数,这样可以既满足计算精度又能提高计算效率。

在瞬态求解中,当施加电压的初始值过大时可能导致模型无法找到初始解,使结果无法收敛.因此可以采用对施加电压添加一个斜坡函数,使其在10 ns内由0 kV增加至5.5 kV,具体方程如下:

$$U = u \times \left( \tanh\left(\frac{1}{10^8}\right) \right) \quad (7)$$

此外,可以采用高斯分布对初始电子密度进行划分,该分布的电子密度峰值  $N_{e0max}$  为  $10^{16} \text{ m}^{-3}$ ,宽度  $S_r$  为210  $\mu\text{m}$ ,高度  $S_z$  为270  $\mu\text{m}$ ,分布方程如下:

$$N_{e0} = N_{e0max} \times \exp\left[-\left(\frac{(z-z_0)}{S_z}\right)^2 - \left(\frac{(r-r_0)}{S_r}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中:  $N_{e0max} = 10^{16} \text{ m}^{-3}$ ,  $r_0 = 0 \text{ mm}$ ,  $z_0 = 7 \text{ mm}$ ,  $S_r = 0.21 \text{ mm}$ ,  $S_z = 0.27 \text{ mm}$ ,根据相关研究学者证明,初始的电子分布并不会对放电效果产生影响,只能加快第一个脉冲的形成时间,从而提高计算速度<sup>[18]</sup>。

3 结果与分析

3.1 不同海拔高度的负电晕放电

3.1.1 电晕电流脉冲波形

图3为不同海拔高度下的电流脉冲波形图,通过分析可以发现这5条波形图具有相似的变化趋势,第一组脉冲峰值最大,第二组峰值最小,并在第三组趋于稳定,通过分析可知第一组出现的最大脉冲电流,一方面是由于施加的电压较大导致的冲击电流,另一方面是由于初始电子密度分布条件产生的影响.第二组脉冲峰值较小是由于在整个放电过程第一组脉冲峰值是最大的,空间内存在的负离子是最多的,对空间电场的削弱也是最大的,进而降低了电流峰值,也导致第一个脉冲和第二个脉冲之间存在更长的死区.随着时间的推移,空间内的负离子团会不断的扩散,减少了对电场的抑制,使后续的电流峰值逐渐趋于稳定.

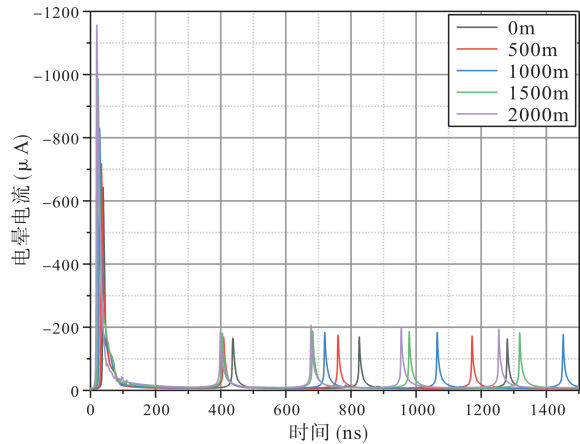


图3 脉冲电流波形图  
Fig. 3 Pulse current waveform

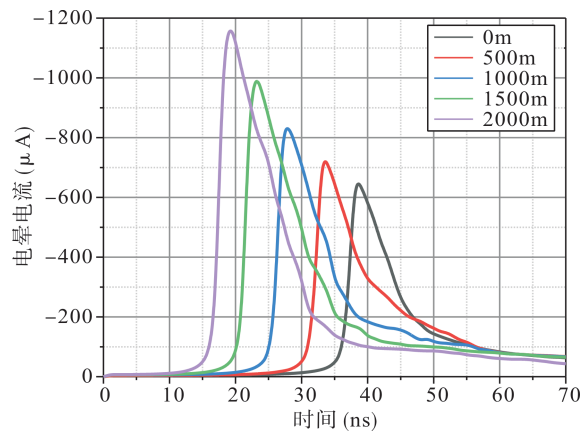


图4 不同海拔下脉冲波形  
Fig. 4 Pulse waveforms at different altitudes

图4为不同海拔下的第一个脉冲电流波形,通过该图可以看出,当海拔为0 m时,电晕电流的峰值为668.64 μA,所处的时刻为38 ns,当海拔为2000 m时,电流脉冲峰值为1189.3 μA,所处的时刻为19 ns.由此可见:随着海拔高度不断降低,电晕电流的发展时间也逐渐向后推迟,并且 Trichel 脉冲电流的脉冲峰值也随着海拔的降低而不断减少.发生这一现象的主要原因是当海拔高度降低,气体的分子数密度增大,电子平均自由程缩短,与中性粒子发生碰撞概率增大,电子获得的动能减少,电离碰撞生成电子的概率也会减少,从而导致电流峰值降低,脉冲峰值推迟.

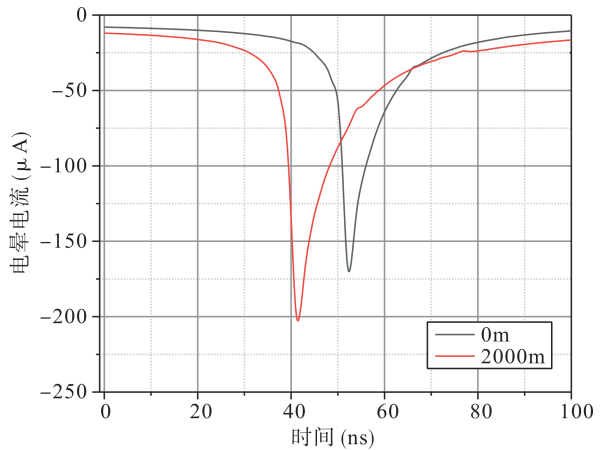


图5 不同海拔下脉冲持续时间  
Fig. 5 Pulse durations at different altitudes

图5为不同海拔下的电流脉冲持续时间,分别设定0 m和2000 m海拔的电流基准值为21 μA和24 μA,通过该图可知当海拔为0 m时,电流从基准值到最大值的上升时间为52 ns,从最大值到基准值的下降时间为81 ns,当海拔为2000 m时,电流从基准值到最大值的上升时间为41 ns,从最大值到基准值的下降时间为92 ns.所以,当海拔降低时,电流脉冲的上升时间减少,下降时间增大.这一现象的主要原因是由于电流脉冲的上升下降时间主要受电离系数和附着系数的影响,电离系数的增加会导致脉冲的上升时间缩短,附着系数的增加会导致电流脉冲的下降时间延长,通过文献[19]可知电离、附着系数会随着压强p影响而变化,当压强p增大时电离系数减小,吸附系数增大,进而影响脉冲上升和下降时间.

$$\alpha = \begin{cases} 3.9p\exp(-213p/E), & E/p < 108 \\ 14.5p\exp(-365p/E), & E/p > 108 \end{cases} \quad (9)$$

$$\eta = \begin{cases} \max(4.47 \times p/E, 4.47 \times 10^{-3}/(E/p)^2), & (E/p)^2 < 10 \\ 4.47 \times 10^{-3}/(E/p)^2, & 10 \leq E/p < 50 \\ 1.58/(E/p)^2, & 10 \leq E/p < 50 \\ 142/(E/p)^2, & 10 \leq E/p < 50 \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\alpha$ 、 $\eta$ 分别为电离系数和附着系数。

3.1.2 电晕电流脉冲频率与海拔高度的关系

图6为电晕电流脉冲频率随海拔变化的趋势图,通过图像可知,电晕电流的脉冲频率随着海拔的降低而减小,发生这一现象的主要原因是随着海拔的升高,放电间隙内的负离子云团就会距离阴极越近,而距离针尖的距离越近,电场越大,负离子云团也会更加迅速的从电离区迁移出来,导致电场的恢复速度也加快,循环往复,电晕电流的脉冲频率增大。

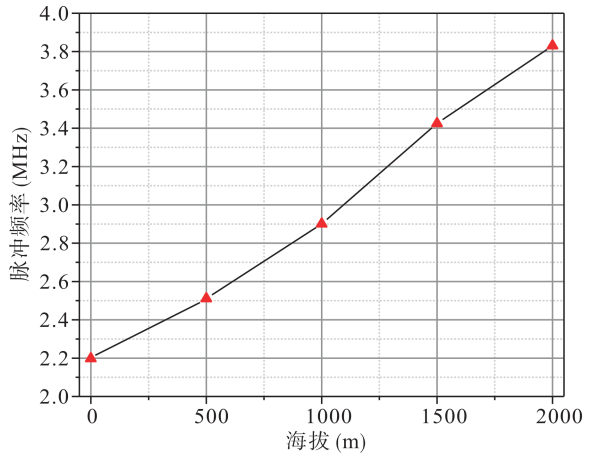


图6 不同海拔下脉冲频率  
Fig. 6 Pulse frequencies at different altitudes

3.2 电晕等离子体降解特性与海拔高度的关系

3.2.1 海拔与电子密度的关系

高能电子在等离子体降解中的作用一方面是依靠直接对污染物分子结构的撞击,而另一方面是通过将从电场中获得的能量通过与重离子碰撞,实现能量的转移,因此电子密度在等离子体降解中发挥着重要的作用。

图7为不同海拔高度下第一个脉冲电流峰值时刻的电子密度分布图,通过该图可知在距离板电极4.5 mm 以内的电子密度会随着海拔升高而升高,而在4.5 mm 以外低海拔时的电子密度会逐渐超过高海拔的电子密度,通过对空间内的电子密度分布进行积分计算,在海拔0 m, 1000 m, 2000 m 的电子密度分别为  $3.58 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ ,  $6.10$

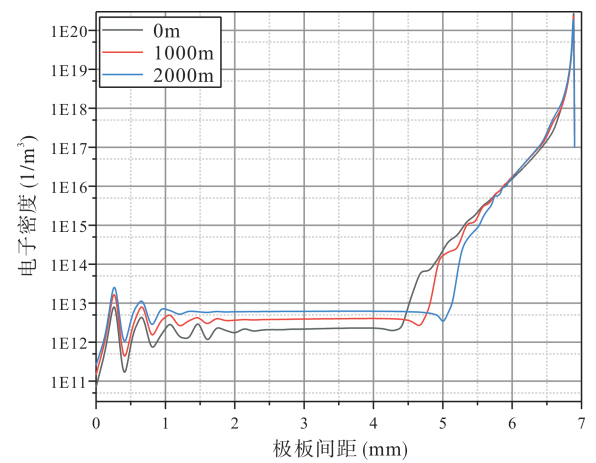


图7 不同海拔高度下的电子分布图  
Fig. 7 Electron distributions at different altitudes

$\times 10^{13} \text{ m}^{-3}$  以及  $8.79 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ , 可以看出电子密度会随着海拔升高而升高,发生这一现象的主要原因是由于海拔升高,气体的分子数密度减小,电子与中性粒子发生碰撞概率降低,电子获得的动能增大,电离的概率提高,生成电子的概率也会增大,从而导致电子密度升高.相应能够参与到反应的电子量也会增加,使反应更加剧烈,产生的氧原子和活性物质也会增多。

3.2.2 海拔与平均电子能量和电子温度的关系

在等离子体降解中,臭氧主要通过氧原子和氧分子发生三体反应进而生成的,其中氧原子离解反应需要电子能量大于6 eV,氮气、氧气的电离能分别为15.6 eV 和12.5 eV,只有拥有足够的能量才能使这些分子发生反应,生成活性物质,因此研究平均电子能量对于臭氧的产生具有十分重要的意义.本文分别选取了300 ns, 600 ns 以及900 ns 这三组脉冲电流平均电子能量,探究平均电子能量与海拔高度的关系。

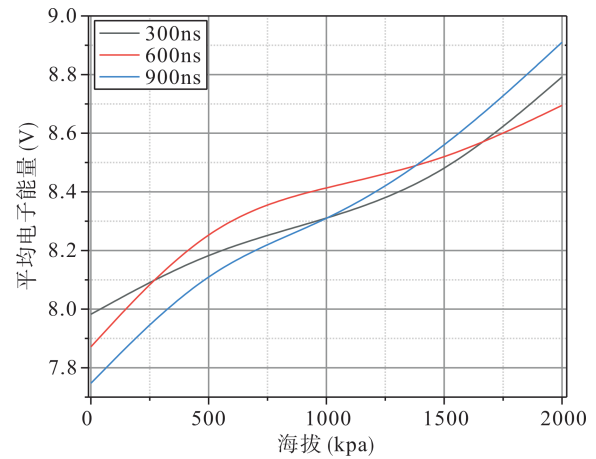


图8 不同海拔高度下平均电子能量  
Fig. 8 Average electron energies at different altitudes



通过图8可以发现在所选择的不同时间段内,随着海拔的不断升高,平均电子能量在随之不断增加.发生这一现象的主要原因是由于当海拔升高的时候,中性粒子的数密度也在不断减小,电子的平均自由程随即延长.电子加速时间更长,更容易获得更大的速度,因此平均电子能量更大.最终导致电子更容易与气体分子发生反应,加快反应速率,提高产生臭氧的浓度.并且随着平均电子能量的提高,电子温度也会得到提高,更高的电子温度也同样意味着电子更容易与气体分子发生反应,从而加快反应速率.

## 4 结 论

本文通过COMSOL建立了二维针板模型,对不同海拔高度下电晕放电等离子体特性进行了仿真研究,对比不同的海拔高度引起的电晕电流波形和电子特性的变化,由于等离子体的降解能力主要受到放电空间内的粒子特性等参数影响,因此可以通过分析微观状态下粒子的变化,进而得出高海拔地区采用电晕等离子体降解的可行性,主要得出以下结论:

1)当海拔升高时,电晕电流的峰值会不断变大,电流的启动时间也会提前,电流脉冲频率也会升高进而导致在放电区域的电离程度更加剧烈.

2)海拔会影响电离系数和吸附系数,从而影响脉冲波形的上升和下降时间,海拔高度越低,脉冲的上升时间越短,下降时间越长.

3)电子密度和平均电子能量作为电晕等离子体放电的重要指标,海拔越高,电子密度越大,平均电子能量和电子温度越高,电子更容易与气体分子发生反应,产生更多的活性物质,提高等离子体的降解能力.

## 参考文献:

- [1] Ouyang J T, Zhang C Y, Zhang Y, *et al.* Research on the bactericidal mechanism of corona discharge[J]. *J. Beijing Inst. Technol.*, 2020, 40: 908 (in Chinese) [欧阳吉庭, 张晨阳, 张宇, 等. 电晕放电的杀菌机理研究[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40: 908]
- [2] Eric M, Pierre A, Benard N. Ionic wind produced by positive and negative corona discharges in air [J]. *J. Electron.*, 2018, 93: 85.
- [3] Lian X Y, Miao J S, Yang B Y, *et al.* Bipolar corona discharge and its application in air purification[J]. *J. Nanchang Univ.: Nat. Sci.*, 2022, 46: 123 (in Chinese) [连秀云, 缪劲松, 杨冰彦, 等. 双极电晕放电及其在空气净化中的应用[J]. 南昌大学学报: 理科版, 2022, 46: 123]
- [4] Ding C, Tian H B, Chen C. Molecular simulation of thermal aging of plasma - modified polyimide [J]. *J. At. Mol. Phys.*, 2025, 42: 013001 (in Chinese) [丁臻, 田浩博, 陈琛. 等离子体改性聚酰亚胺热老化的分子模拟[J]. 原子与分子物理学报, 2025, 42: 013001]
- [5] Amar I D, Efrat E, Yulia L, *et al.* Effects of atmospheric plasma corona discharge on *saccharomyces cerevisiae*: viability, permeability, and morphology [J]. *Foods*, 2023, 12: 381.
- [6] Xu D, Dai L, Shui J X, *et al.* Research progress on surface energy enhancement modification of polyethylene film [J]. *Surf. Technol.*, 2021, 50: 178 (in Chinese) [徐迪, 戴力, 水佳鑫, 等. 聚乙烯膜表面能提升改性的研究进展 [J]. 表面技术, 2021, 50: 178]
- [7] Yang G, Dan M J, Nie C S, *et al.* Computational modelling of thermochemical physics of high temperature air [J]. *J. At. Mol. Phys.*, 2021, 38: 033002 (in Chinese) [杨光, 檀妹静, 聂春生, 等. 高温空气热化学物理计算模型研究 [J]. 原子与分子物理学报, 2021, 38: 033002]
- [8] Xu P F, Zhang B, Chen S M, *et al.* Influence of humidity on the characteristics of positive corona discharge in air[J]. *Phys. Plasmas*, 2016, 23: 11.
- [9] Li C Y, Li Y Q, Yu Y J. Generation and development mechanism of flow injection in centimetre - scale rod - plate gap negative polarity corona discharge under atmospheric conditions [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 1 - 14 [2023 - 09 - 11] (in Chinese) [李长云, 李岩青, 于永进. 大气条件下厘米级棒 - 板间隙负极性电晕放电中流注的产生与发展机制[J]. 电工技术学报: 1 - 14 [2023 - 09 - 11]]
- [10] Feng Q K, Huang L, Liu D F, *et al.* Negative corona discharge characteristics of needle - plate and rod - plate electrode structures at different temperatures [J]. *High Voltage Eng.*, 2021, 47: 1847 (in Chinese) [冯启琨, 黄磊, 刘获帆, 等. 针 - 板与棒 - 板电极结构在不同温度下的负电晕放电特性 [J]. 高电压技术, 2021, 47: 1847]
- [11] Hu Q, He G H, Peng H D, *et al.* Prediction of corona onset voltage of conductor based on condensation distribution model under high humidity conditions [J].

- Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33: 1634 (in Chinese) [胡琴, 何高辉, 彭华东, 等. 高湿条件下基于凝露分布模型的导线电晕起始电压预测 [J]. 电工技术学报, 2018, 33: 1634]
- [12] Wang P, Xiao Z Y, Wang X Y, *et al.* Characteristics of discharge onset delay under high – altitude positive polarity operating wave [J]. *High Voltage Eng.*, 2022, 48: 857 (in Chinese) [王平, 肖智勇, 汪鑫宇, 等. 高海拔正极性操作波下放电起始时延特性 [J]. 高电压技术, 2022, 48: 857]
- [13] Li R. *Research on low – temperature plasma remediation method and mechanism of organically contaminated soil* [D]. Shanghai: Donghua University, 2017 (in Chinese) [李蕊. 有机污染土壤的低温等离子体修复方法及机理研究 [D]. 上海: 东华大学, 2017]
- [14] Zou A X, Wang S G, Yang T, *et al.* Characterisation of dc corona discharge [J]. *Sci. Technol. Eng.*, 2023, 23: 8078 (in Chinese) [邹岸新, 王守刚, 杨滔, 等. 直流电晕放电特性分析 [J]. 科学技术与工程, 2023, 23: 8078]
- [15] Aleksander T M, Jozef M, Maciej C. Model investigations on electric discharges over balloon – borne stratospheric vlf antennas [J]. *Energ.*, 2022, 15: 6805.
- [16] Guo X F, Ji Z Y, Gao Y, *et al.* 3D corona discharge model and its use in the presence of wind during a thunderstorm [J]. *Front. Env. Sci.*, 2022, 10: 946020.
- [17] He W L, He J J, Zhang J, *et al.* Characterisation of negative corona Trichel pulse of coaxial electrodes [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31: 211 (in Chinese) [何旺龄, 何俊佳, 张锦, 等. 同轴电极的负电晕特里切尔脉冲特性分析 [J]. 电工技术学报, 2016, 31: 211]
- [18] Wu F F, Liao R J, Yang L J, *et al.* Analysis of microscopic processes in the Trichel pulse of dc negative corona discharge at rod – plate electrodes [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2013, 62: 348 (in Chinese) [伍飞飞, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 棒 – 板电极直流负电晕放电特里切尔脉冲的微观过程分析 [J]. 物理学报, 2013, 62: 348]
- [19] Peyman D, Kazimierz A, Peter C. Parametric study of the characteristics of Trichel pulses in the needle – plane negative corona discharge in atmospheric air [J]. *J. Electrostat.*, 2016, 84: 73.