

文章编号: 1005-0523(2024)05-0074-10



低气压低氧环境流注放电机理研究

邹丹丹¹, 宋子浚¹, 潘建兵²

(1. 华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013;
2. 国家电网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要:【目的】针对高海拔低气压低氧环境下电气设备空气间隙绝缘性能显著下降问题, 对不同气压和氧含量下的流注传播特性展开研究。【方法】将流体模型与等离子体化学反应相结合, 搭建了棒-板电极结构、高海拔低气压低氧空气流注放电仿真模型, 分别对不同气压和氧含量下的空气流注传播过程进行仿真, 分析气压和氧含量对流注传播速度、电子密度、流注通道半径、电场强度分布变化的影响。【结果】结果表明随着气压降低, 流注传播速度不断加快, 流注头部及通道电子密度和电场强度呈下降趋势, 流注通道半径整体有所增大; 随着氧含量的降低, 流注传播速度显著减小, 电子密度不断增大, 电场强度整体上增大, 流注通道半径减小。【结论】气压和氧含量因素均对流注放电特性和等离子体反应机理产生重要影响, 在实际工程设计中应予以综合考虑。

关键词: 气压; 氧含量; 流注放电; 等离子体

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A

本文引用格式: 邹丹丹, 宋子浚, 潘建兵. 低气压低氧环境流注放电机理研究[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(5): 74-83.

Study on the Mechanism of Flow Injection Discharge Under Low-Pressure and Low-Oxygen Environment

Zou Dandan¹, Song Zixun¹, Pan Jianbing²

(1. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330096, China)

Abstract: 【Objective】Aiming at the significant degradation of air gap insulation performance of electrical equipment under high-altitude, low-pressure and low-oxygen environments, a study was carried out to characterize the flow propagation under different air pressures and oxygen contents. 【Method】By combining the fluid model with the plasma chemical reaction, a rod-plate electrode structure and a high-altitude low-pressure low-oxygen air injection discharge simulation model were constructed to simulate the air injection propagation process under different air pressures and oxygen contents, and to analyze the effects of air pressure and oxygen content on the injection propagation speed, electron density, injection channel radius and electric field intensity distribution. It analyzed the effects of air pressure and oxygen content on the propagation speed, electron density, channel radius and electric field distribution. 【Result】The results show that, with the reduction of air pressure, the flow injection propagation speed is accelerating, the flow injection head and channel electron density and electric field strength is decreasing trend, the flow injection channel radius on the whole increased; with the re-

收稿日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(52467016); 江西省自然科学基金项目(20232BAB204061, 20242BAB23043)

duction of the oxygen content, the flow injection propagation speed is decreasing significantly, the electron density is increasing, while the electric field strength on the whole increases, and the radius of the flow injection channel is decreasing. **[Conclusion]** The factors of gas pressure and oxygen content have an important influence on the flow injection discharge characteristics and plasma reaction mechanism, which should be considered comprehensively in the actual engineering design.

Key words: gas pressure; oxygen content; streamer discharge; plasma

Citation format: ZOU D D, SONG Z X, PAN J B. Study on the mechanism of flow injection discharge under low-pressure and low-oxygen environment[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(5): 74–83.

[研究意义]中国地势西高东低,川藏铁路作为第二条进藏铁路^[1],途经地域海拔发生显著变化,随着海拔的逐渐升高,气压和氧含量的降低导致电气设备中的绝缘子、受电弓、电压互感器等关键组件的空气间隙绝缘性能显著下降,易发生电晕^[2-4]、电弧^[5-7]、闪络^[8-10]等放电现象。先导流注放电作为常见的一种气体放电形式,是气体间隙放电击穿的初始阶段,对电气设备间隙的绝缘性能至关重要^[11]。目前受实验条件所限,对于气压、氧含量的流注放电多集中于电流脉冲幅值变化^[12-13]、击穿电压^[14]、流注分叉^[15-17]等易于观测的宏观参数研究,对于流注内部电子密度、电场强度等难于观测的微观参数研究较少。加深气压和氧含量对流注放电特性的研究,有助于加强对流注放电形成与发展过程的认识,完善流注放电理论机制,为高海拔地区电气设备外绝缘设计提供理论依据。

[研究进展]虽然目前的实验条件、检测手段难以完整记录流注放电发展的全过程,但是流注放电试验仍是观测流注发展及形态最为直观准确的方式。Ono等^[18]使用短门宽增强型CCD相机观测针-板放电间隙中氧气含量对一次流注和二次流注放电特性的影响,研究结果表明氧气含量对流注的传播速度、直径和形状有着显著影响。杨亚奇等^[19]利用自制低气压放电腔体对气压0.5~60 kPa范围内200~600 mm棒-板间隙交、直流放电特性进行了研究,结果表明极性效应反转后的负极性直流击穿仍为正流注引起。Beloplotov等^[20]使用ICCD相机研究了不均匀电场下空气负极性流注放电特性,研究发现,在纳秒级放电时间下,放电间隙中形成了具有大尺寸径向的流注,随着流注传播长度和直径的增大,流注传播速度先减小后增大。律方成等^[21]研

究了在正极性操作冲击电压下流注放电过程中空间电场的变化规律,发现在电晕起始阶段,流注产生的紫外光会引起空间电场的畸变,且针电极头部发光的强度与附近空间建立的电场强度成正比,但是由于测量手段的限制仅测量了放电间隙某一点附近的电场强度随放电时间的变化,无法完整测量整个流注内部电场变化情况。

仿真研究方面,赵志航等^[22]利用针-板、针-针电极结构,在控制约化场强一致的条件下通过仿真和实验对低温次大气压空气流注放电特性进行研究。结果表明海拔增加对流注传播速度、流注分叉数目、放电电流峰值起抑制作用,对流注半径起促进作用。朱毅佳等^[23]利用COMSOL软件等离子体模块对大气压板-板1 cm间隙的空气流注放电分叉特性进行研究,通过改变初始种子电子分布区域和电压大小分析流注形态变化,结果表明初始种子电子包络面间距越小以及施加电压越大都会抑制流注头部分叉。为了研究湿度对电晕放电特性的影响,Wang等^[24]建立了考虑含有H₂O分子的重要反应建立了包含69种粒子和393种化学反应的动力学模型,该模型的缺点是化学反应复杂,消耗大量计算时间但是能够全面反应放电过程中的带电粒子演化过程为等离子体流体模型中重物质化学反应系数提供数据支撑。由上述文献可知,目前对于气压、氧含量等因素对流注放电特性影响做了大量研究,研究的重点主要集中于对流注分叉、传播速度、直径等易于观测的宏观参数,对于流注内部电子密度、电场分布、电子温度等微观参数的研究较少,且仅能够测量内部某一点位置的参数。

[创新特色]将流体模型与等离子体化学碰撞反应相结合,搭建了棒-板电极结构、4 mm放电间

隙的高海拔低氧空气流注放电仿真模型。**【关键问题】**利用数值模拟方法对流注内部电子密度、电场分布、电子温度等微观参数进行研究,加深气压和氧含量对流注放电特性的研究,有助于加深对流注放电形成与发展过程的认识,完善流注放电机制,为高海拔地区外绝缘设计提供理论依据。

1 高海拔低氧空气流注放电模型

1.1 控制方程

目前研究流注放电的经典流体模型多适用于大气压干空气环境下,对于研究湿空气、不同氧含量、温度等对空气流注放电的影响往往需要进行参数校正^[25-26]。本文基于流体模型与等离子体化学反应相结合,构建了高海拔低氧空气流注放电模型。其中电子在电场中的迁移和扩散过程表达式为

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (-\mu_e E n_e - D_e \nabla n_e) = R_e \quad (1)$$

$$R_e = \sum_{i=1}^p x_i k_i n_i N_e \quad (2)$$

$$k_i = \int_0^{\infty} (\varepsilon)^{1/2} f_0(\varepsilon) \sigma_i(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3)$$

式中: n_e 为电子的数密度; n_i 为负离子的数密度; t 为反应时间; s ; E 为电场强度; p 为电子源项,任意时刻有电子产生和消失的反应之和; μ_e 为电子迁移率; ∇ 为哈密顿算子; D_e 为电子扩散系数; R_e 为电子的净速率; x_i 为参与电子生成消失的第*i*种粒子的摩尔分数; k_i 为第*i*种粒子生成消失电子的反应速率; $\sigma_i(\varepsilon)$ 为第*i*种粒子与电子的碰撞横截面积; f_0 为电子能量分布函数; ε 为电子能量,eV。

正、负离子连续性方程为

$$\rho \frac{\partial n_k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) n_k = \nabla j_k + R_k \quad (4)$$

$$j_k = \rho n_k \left(\sum_{N=1}^{j=1} D_k d_k - \frac{D_{k,T}}{\rho n_k} \nabla \ln T \right) \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度,kg/m³; n_k 为重粒子*k*的数密度,m⁻³; \mathbf{u} 为平均流体矢量,m/s; j_k 为重粒子*k*的扩散通量,kg/(m²·s); R_k 为粒子*k*由于等离子体化学反应造成的速率变化,kg/(m³·s); D_k 和 d_k 分别为重粒子*k*的多组分扩散系统中Maxwell-Stefan扩散系数和扩散驱动力; $D_{k,T}$ 为热扩散系数; T 为气体温度。泊松方程为

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{q}{\varepsilon_r \varepsilon_0} (n_p - n_e - n_f) \quad (6)$$

式中: φ 为电势; n_p 为正离子的数密度; ε_0 为真空

介电常数, ε_r 为气体的相对介电常数; q 为单位电荷量。

1.2 空气放电等离子体化学反应

由于空气放电过程中发生的等离子体化学反应众多^[27-29],且部分气体的碰撞截面数据尚未得到完善,如果考虑所有的化学反应会使得整个数值模拟求解消耗的时间大幅增加,方程高度非线性且难以收敛。因此本模型仅考虑气体成分为氮气(79%)和氧气(21%)与电子发生的25种化学反应涉及11种粒子见表1。

表1 25种等离子体化学反应
Tab.1 25 plasma chemical reactions

Nos	Reaction	Rate coefficient	Energy losses
R ₁	e+N ₂ →2e+N ₂ ⁺	k_1	15.6
R ₂	e+O ₂ →2e+O ₂ ⁺	k_2	12.06
R ₃	e+N ₂ →e+N ₂	k_3	-
R ₄	e+O ₂ →e+O ₂	k_4	-
R ₅	e+N ₂ +N ₂ ⁺ →2N ₂	$6.07 \times 10^{-34} T_e^{-2.5}$	-
R ₆	e+O ₄ ⁺ →2O ₂	$1.4 \times 10^{-12} (300/T_e)^{0.5}$	-
R ₇	e+O ₂ ⁺ →2O	$2.42 \times 10^{-13} (300/T_e)$	-
R ₈	e+2O ₂ →O ₂ +O ₂ ⁺	$2 \times 10^{-41} (300/T_e)$	-
R ₉	2e+N ₂ ⁺ →N ₂ +e	$5.651 \times 10^{-27} T_e^{-0.8}$	-
R ₁₀ , R ₁₁	N ₂ ⁺ +N ₂ +M→N ₂ ⁺ +M	5×10^{-41}	-
R ₁₂	N ₄ ⁺ +O ₂ →O ₂ ⁺ +2N ₂	2.5×10^{-16}	-
R ₁₃	N ₂ ⁺ +O ₂ →O ₂ ⁺ +N ₂	$1.04 \times 10^{-15} T^{-0.5}$	-
R ₁₄	2N ₂ +O ₂ ⁺ →N ₂ O ₂ ⁺ +N ₂	$8.1 \times 10^{-38} T^{-2}$	-
R ₁₅	N ₂ O ₂ ⁺ +N ₂ →O ₂ ⁺ +2N ₂	$14.6 T^{-5.3} \exp(-2357/T)$	-
R ₁₆	N ₂ O ₂ ⁺ +O ₂ →O ₄ ⁺ +N ₂	1×10^{-15}	-
R ₁₇ , R ₁₈	O ₂ ⁺ +O ₂ +M→O ₄ ⁺ +M	$2.04 \times 10^{-34} T^{-3.2}$	-
R ₁₉	O ₄ ⁺ +O ₂ →3O ₂	1×10^{-13}	-
R ₂₀ , R ₂₁	O ₄ ⁺ +O ₂ +M→3O ₂ +M	2×10^{-37}	-
R ₂₂ , R ₂₃	O ₂ ⁺ +O ₂ +M→2O ₂ +M	2×10^{-37}	-
R ₂₄ , R ₂₅	O+O ₂ +M→O ₃ +M	2.5×10^{-46}	-

本文中电子(e)与氮气(N₂)、氧气(O₂)的碰撞截面来源于Lawton等^[30]提供的数据。对于迁移率、扩散系数等输运参数根据提供的碰撞截面利用波尔兹曼方程计算得到。

表3中R_i为第*i*种粒子的等离子体化学反应;R₅,R₈,R₁₁,R₁₂,R₁₅,R₁₈,R₁₉,R₂₁~R₂₅为三体反应,m⁶/s;

其余反应为二体反应, m^3/s ; T_e 为电子温度; $T=300\text{ K}$; M 代表 N_2 、 O_2 ; k_i 为第 i 种粒子的反应速率常数, $k_1 \sim k_4$ 通过式(3)计算;施加电压 $V=8\text{ kV}$ 。

1.3 边界条件

模型采用二维轴对称结构对棒板放电进行仿真。电极边界采用反应壁边界条件,气体边界设置为零电荷、零通量边界。

电子密度通量在正负电极上的边界条件表达式为

$$n\Gamma_e = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e} n_e - \sum \gamma(\Gamma_p n)} \quad (7)$$

式中: n 为指向边界表面的法向量; γ 为二次电子发射系数,正离子在阳极取0,在阴极管取0.004,负离子反之; m_e 为电子质量; Γ_e 为电子密度通量, Γ_p 为正离子通量; k 为玻尔兹曼常量。

电子能量通量在正负电极上的边界条件表达式为

$$n\Gamma_e = \frac{5}{6} \sqrt{\frac{8kT_e}{\pi m_e} n_e - \sum \gamma \Delta_e(\Gamma_p n)} \quad (8)$$

所有正、负离子、中性分子在正负电极边界上满足

$$n\Gamma_i = \frac{1}{4} + an_i \mu_i En \quad (9)$$

式中: Γ_e 为电子能量密度通量; n_e 为电子能量密度; Δ_e 为电子能量损失; n_i 为第 i 种粒子的数密度; Γ_i 为第 i 种粒子的通量; μ_i 为其迁移率;对于正离子在阳极处 a 取0,阴极 a 取1,负离子反之,中性粒子在电极处 a 取0。

2 气压对流注放电特性的影响

气压随海拔的升高而减小这对于输变电设备以及输电线路的绝缘性能提出了更高要求。流注放电作为气体间隙击穿的起始过程,对后续气体击穿过程具有显著影响。根据式(10),对海拔0~5 000 m对应气压下的一次流注贯通气体放电间隙形成等离子体通道的放电过程进行仿真。通过比较流注放电传播速度、电子密度、流注半径、电场分布等物理量,分析了气压变化对放电微观过程的影响。

$$P = 101.3 \times 10^3 e^{-0.121H} \quad (10)$$

式中: H 为海拔; P 为气压。

2.1 气压对流注放电传播速度的影响

随着海拔升高气压降低,流注传播速度发生显

著变化,图1计算了流注传播长度每间隔0.5 mm对应的流注传播速度。如图1所示,在流注传播到特定位置时其传播速度随着海拔升高气压降低而增大,其中在流注传播长度为0.5 mm时,5种海拔对应气压下的流注传播速度在 $7.69 \times 10^4 \sim 2.00 \times 10^5\text{ m/s}$,这一阶段需要不断积累电子产生流注,属于流注起始阶段,传播速度较小。在流注传播距离大于3 mm时,流注传播速度显著增大。由于海拔升高气压降低,增大了平均电子自由程从而加速了流注的产生及传播。

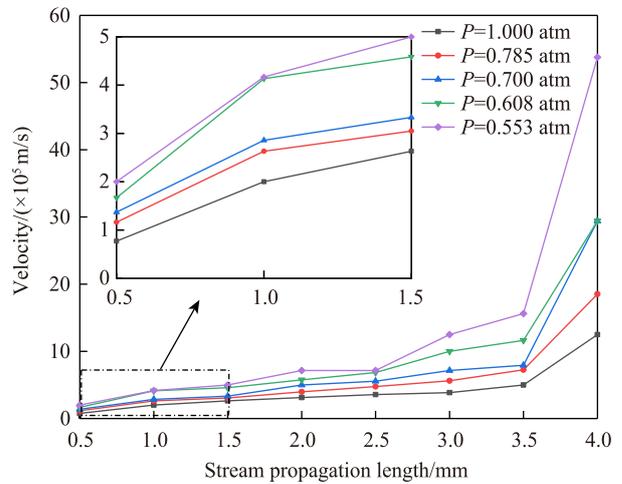


图1 不同气压下的流注传播速度变化

Fig.1 Variation of flow injection propagation velocity at different air pressures

2.2 气压对流注电子密度及流注通道半径的影响

图2给出了5种海拔对应气压下流注贯穿两极的电子密度分布图。由图2可知随着海拔升高气压降低无论是流注头部还是通道内电子密度都呈下降趋势,虽然电子密度在减小但是流注头部以及通道均呈现扩大的趋势。这是由于随着海拔的上升,空气变得相对稀薄,中性粒子数密度即氮气、氧气数密度在减少,相对应的电子平均自由程增大,电子在放电间隙中与中性粒子碰撞概率减小,因而由碰撞电离产生的电子数减少,使得电子在运动过程中能量损耗也在减少,沿轴线两边运动的电子也能够获得较高的能量发生碰撞电离,所以流注通道及头部会相应地增大。

为了能够更加明确了解流注通道及流注头部

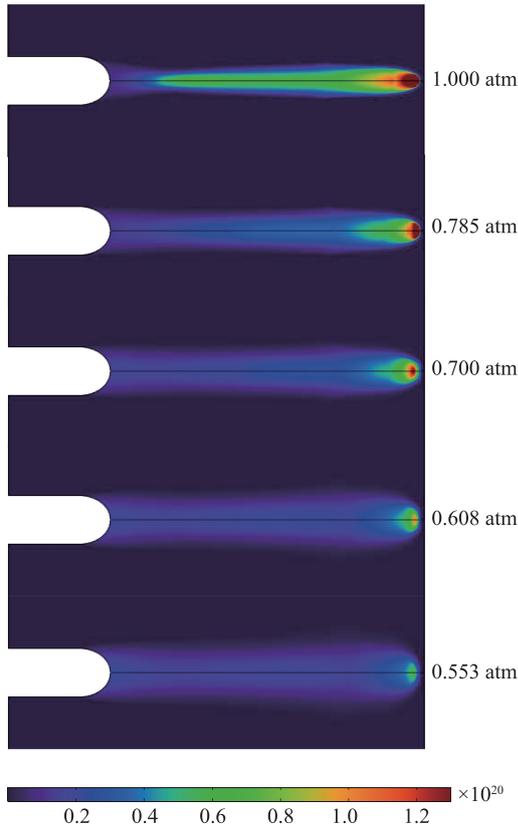


图2 不同海拔对应气压下的电子密度分布

Fig. 2 Electron density distribution at different altitudes corresponding to air pressure

电子密度的变化,本文对流注半径进行了计算。对于流注半径的测量,在实验中可以采用高速摄像机拍摄流注放电动态图像,根据放电图像的发光亮度来测量流注半径,但是在数值模拟中对于流注半径的计算并没有统一的方法。本文根据近年来使用较多的半峰值法^[31]对流注半径进行计算。

如图3所示,其中横坐标轴0处为棒极,4 mm位置处为阴极。由图3可以看到从棒电极到阴极流注半径呈现先减小后增大再减小的规律,其次在横坐标0~1 mm范围内即棒电极附近随着海拔升高流注半径减小的趋势在减缓,整体上看流注半径随海拔升高而增大。

这是因为在流注从产生开始从棒电极向阴极发展,由于海拔升高气压降低对应环境中的中性粒子数密度减小,约化电场增大,致使轴线靠近棒极的位置两边约化电场增大。电离碰撞反应增强,使得随着海拔升高正极附近流注半径减小趋势在减缓。

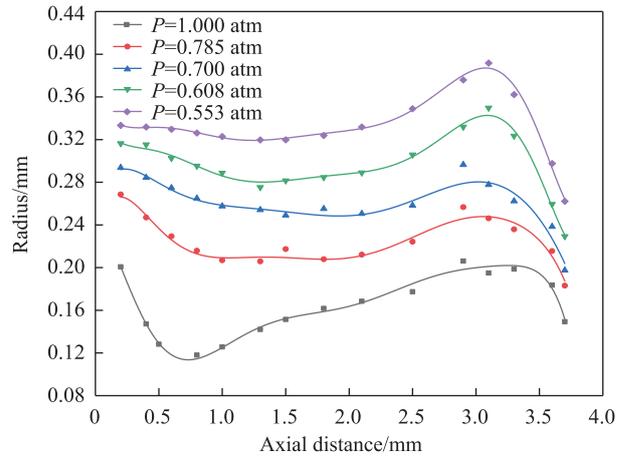


图3 不同海拔对应气压下的流注半径

Fig. 3 Radius of the streamer at different altitudes corresponding to air pressure

2.3 气压对流注放电电场分布的影响

图4为5种海拔对应气压下流注起始阶段的空间电场分布情况。由图4(a)所示,大气压下电场最大值 E_{\max} 出现在棒电极表面,为75.2 kV/cm,此时流注已经产生但还未开始向阴极传播;由图4(b)所示, $P=0.785$ atm时电场最大值出现在流注头部,此时流注已经产生并向阴极传播0.05 mm,电场最大值为72.4 kV/cm;由图4(e)所示,流注已经产生并向阴极传播0.28 mm,电场最大值为63.8 kV/cm;由以上结果可以说明气压的降低(海拔升高)有助于加速流

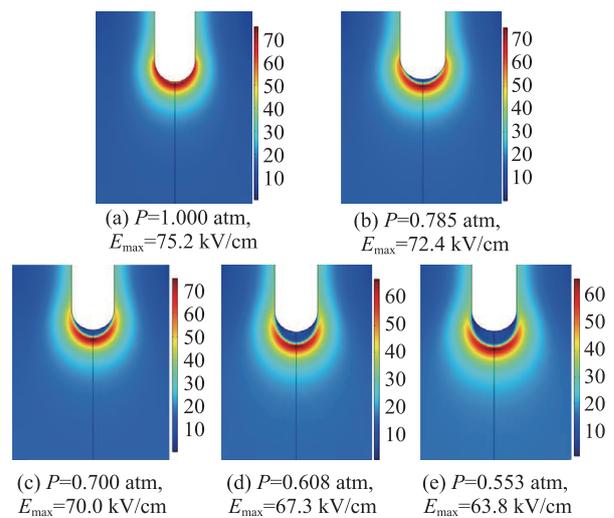


图4 不同气压下的电场强度分布

Fig. 4 Distribution of electric field intensity under different pressure

注的产生传播。

如图5所示,流注头部电场强度在流注传播长度为2.5~3.5 mm范围内变化规律保持一致,而在前2.5 mm范围内不同海拔流注头部电场强度变化规律并不相似,整体上看流注头部电场强度随海拔的升高而减小。从电子平均自由程的角度考虑电场变化情况,在温度保持不变的情况下,电子平均自由程与中性粒子数密度成反比关系,随着海拔升高气体压强减小,空气中中性粒子数密度整体减小,电子平均自由程增大,使得单位距离内与电子与中性粒子碰撞的概率降低,从而导致碰撞电离系数减小即产生的电子数在减小,由图2电子密度图可以验证这一结论。而流注头部电场强度在流注离开棒电极后主要依赖于空间电荷的畸变程度,由于碰撞概率的减小,产生的电子数减小,相应的离子数密度也在减小,离子数密度的降低使得空间电场的畸变程度减弱不足以引起头部电场强度变化,导致流注头部电场强度随气压下降而减小。图4图5表明虽然随着海拔升高气压降低,空气放电剧烈程度有所减弱,但是加速了流注的产生和传播。

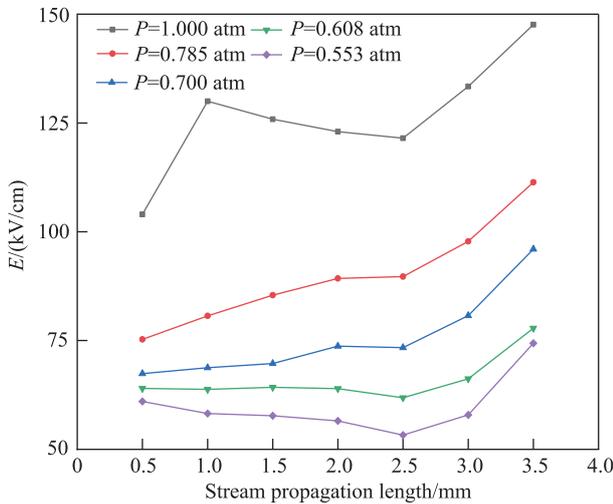


图5 不同海拔对应气压下的电场强度分布

Fig. 5 Distribution of electric field intensity at different altitudes corresponding to atmospheric pressure

3 氧含量对流注放电特性的影响

3.1 氧含量对流注放电传播速度的影响

如图6所示,在氧含量为21%时,流注传播速度随流注传播长度的增大而增大,在流注尚未传播到阴极前,传播速度在缓慢增大,而在流注传播

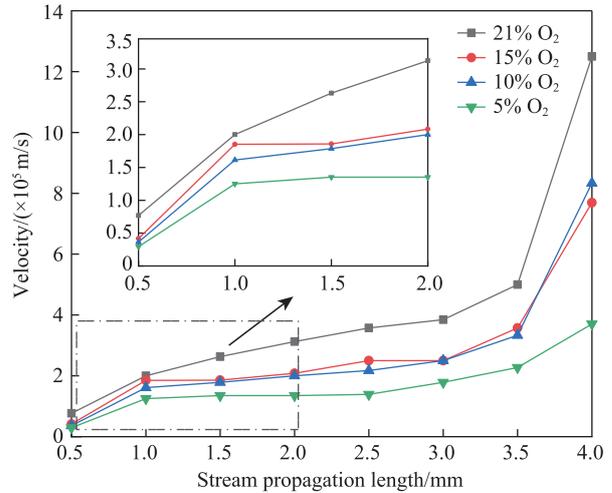


图6 不同氧含量下的流注传播速度

Fig. 6 The velocity of stream propagation under different oxygen content

到阴极附近(3.5~4.0 mm处)流注传播速度迅速增大。在氧含量为15%、10%时,流注传播速度变化较小,两者曲线几乎重叠。当氧含量为5%时在流注传播长度在1.5~2 mm的阶段,流注传播速度为定值 1.35×10^5 m/s,在此阶段以恒定速度传播。结果表明,不同氧含量流注传播速度规律基本一致,但是在低氧含量(10%、5%)下会出现定值传播的现象。

在流注传播起始阶段流注发展速度较慢,这是由于在起始阶段主要是依靠背景电场来维持流注的发展,此时空间电荷产生的畸变较小。由于所施加的电压较小,与氧气发生碰撞电离需要的能量比氮气发生碰撞电离需要的能量低,在一个平均自由程里电子与中性粒子的碰撞概率是不变的,获得的能量也不变,氧含量降低,电子更多的与氮气碰撞损失的能量更多,流注起始需要更长的时间积累电子崩。

3.2 氧含量对电子密度及流注通道半径的影响

图7为不同氧含量下流注放电沿轴线方向上的电子密度分布情况,由图7(a)可以看到氧气含量为21%、流注传播长度小于1 mm时电子密度最大值出现在流注头部,且在这一段距离内电子密度最大值在不断增大,从 $3.80 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 增大至 $8.22 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。当流注传播长度在1.5~2.5 mm之间时电子密度最大

值出现在流注通道中,且在这一段距离内电子密度最大值随着传播距离增大有所减小,从 $7.82 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 减小至 $6.60 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$,而在这段距离内流注头部电子密度有所下降,从 $8.17 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 减小至 $6.62 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。当流注传播长度在3.0~3.5 mm接近阴极时,流注头部电子密度迅速增大,且传播长度为3.5 mm时电子密度最大值出现流注头部。

由图7(b)可以看到氧气含量为15%、流注传播长度小于0.5 mm时电子密度最大值出现在流注头部,最大值为 $1.07 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 。当流注传播长度在1.0~2.5 mm之间时电子密度最大值出现在流注通道中,且在这一段距离内电子密度最大值随着传播距离增大有所减小,从 $1.47 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ 减小至 $1.05 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$,而在这段距离内流注头部电子密度有所下降,从 $9.47 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 减小至 $8.12 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 。当流注传播长度在3.0~3.5 mm接近阴极时,流注头部电子密度迅速

增大,但是增大的趋势相较于21%氧气有所减缓,且流注头部电子密度在传播长度为3.0,3.5 mm时基本一致。

图7(c),图7(d)氧气含量分别为10%,5%时的轴向电子密度分布规律与氧气含量15%时基本一致。根据以上结果可以发现当流注传播长度一致时,无论是流注头部还是流注通道电子密度都随着氧含量的减少而增大。

由图8可知在4种氧气含量下,流注通道半径都呈现先减小再增大再减小的趋势。其中氧含量从21%降到15%时,流注通道半径减小的趋势明显,在流注通道尾部即棒极附近(0~0.5 mm处)流注半径减小了约0.05 mm,在远离棒极的流注通道内(0.6~3.5 mm处)流注半径减小了约0.4 mm。而当氧含量在15%、10%、5%时,流注通道尾部流注半径变化较小。

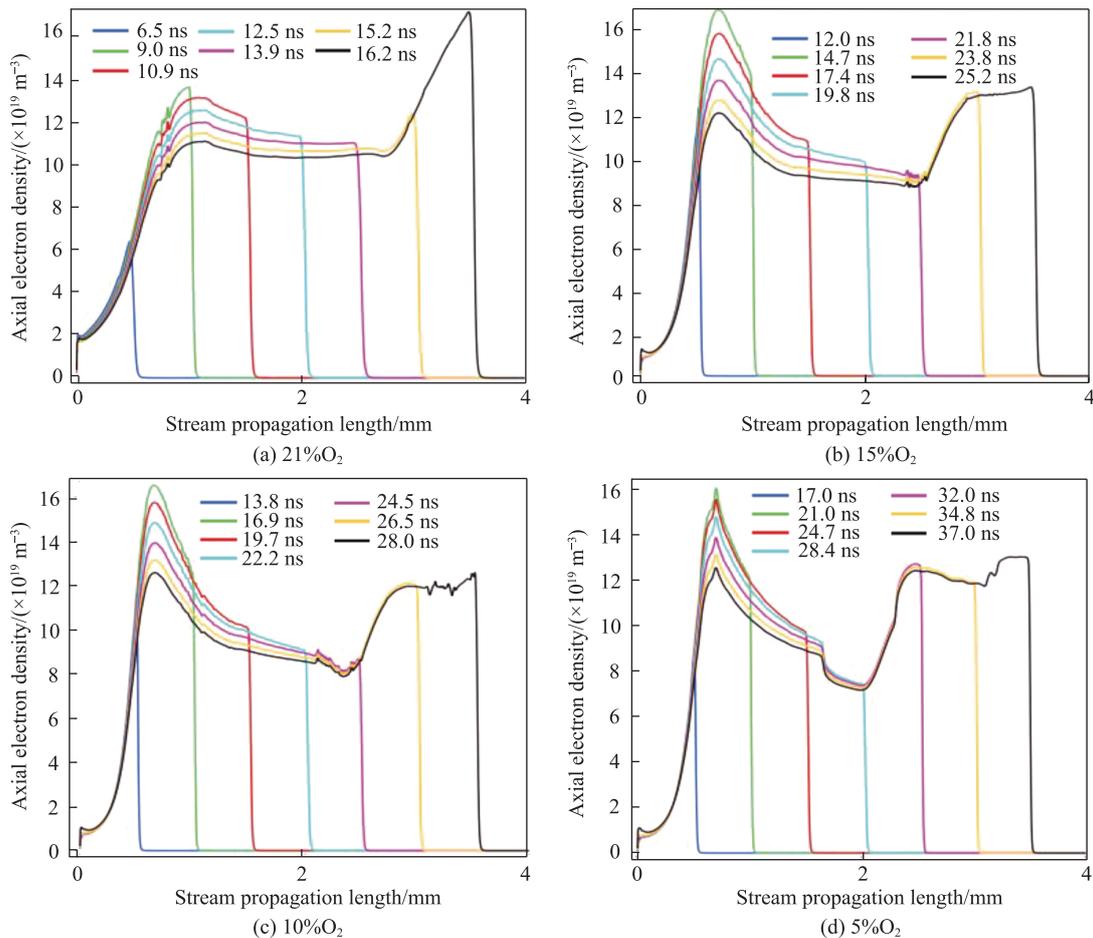


图7 不同氧含量下流注轴线电子密度分布

Fig. 7 Electron density distribution of the stream axis under different oxygen content

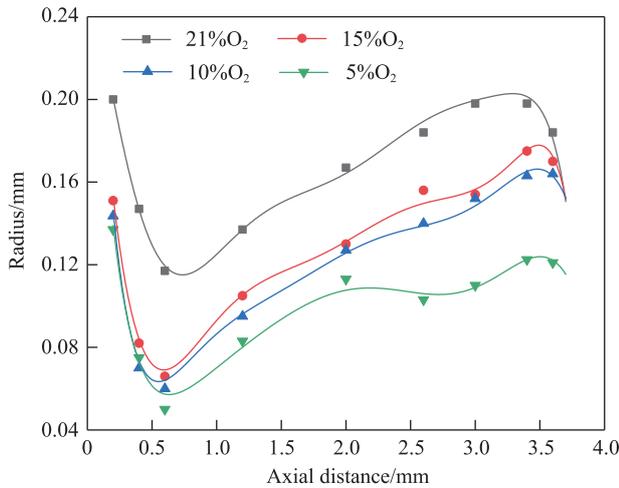


图8 同海拔不同氧含量流注半径分布

Fig. 8 Distribution of flow radius with different oxygen content at the same altitude

3.3 氧含量对流注放电电场分布的影响

在本文研究的氧含量范围内,21%氧含量下的流注头部电场强度最小,氧含量从21%减小到15%时流注头部电场强度涨幅最大,整体上看流注头部电场强度随氧含量的降低有所增大。在文献[32]中,对不同比例氧含量下的流注放电特性进行了研究,不同氧含量下电场强度分布并无明显规律,氮气/1%氧气轴上电场强度低于氮气/0.01%氧气,氮气/1%氧气电场强度与空气相比基本相同。在文献[33]中对氧含量为30%、20%、10%的空气流注特性进行了研究,得到了流注头部电场强度随氧含量减小而减小的结论。两篇文献所施加的电压并不相同前者为52 kV,后者为24 kV。本文与文献[32-33]得出的规律一致,电场强度随流注传播长度的增加有先增大后减小再增大的趋势。但是对于不同氧含量下流注头部电场强度变化规律,本文与文献[32-33]得出的规律相似。由于氧气性质的特殊,在不同电压下可能表现出的流注头部电场强度变化规律不尽相同。

4 结论

1) 随着气压降低,流注传播速度不断加快,流注头部及流注通道电子密度和电场强度均呈下降趋势,流注通道半径整体上有增大,均呈现先减小后增大再减小的变化规律。

2) 从整体上看电子密度随氧含量的减少而增大,其中棒电极附近电子密度基本保持不变;不同

氧含量下流注头部电子密度随流注传播长度的增加均呈现先增大后减小在传播到阴极附近时又迅速增大的趋势,且流注通道和流注头部电子密度随氧含量的减小而增大。随着空气中氧气含量的减少,流注通道半径减小。

3) 气压降低时,流注半径和传播速度变化趋势近似呈比例关系。当氧气含量从21%减小至15%时流注半径减小幅度最大,氧气含量从15%减小到5%时流注通道半径减小幅度较小。流注传播速度随着氧气含量的减少而减小。

参考文献:

- [1] 周昱涵,杨泽锋,鲁超,等.弓网系统离线电弧在低气压环境下运动特性研究[J].中国电机工程学报,2021,41(15):5412-5421.
ZHOU Y H, YANG Z F, LU C, et al. Research on motion characteristics of offline arc in pantograph catenary system under low air pressure environment[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5412-5421.
- [2] 张友鹏,刘家治,赵珊珊,等.接触网绝缘子电晕放电特性仿真研究[J].铁道科学与工程学报,2018,15(7):1839-1847.
ZHANG Y P, LIU J Z, ZHAO S P, et al. Simulation study on corona discharge characteristics of insulators on the contact wire[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(7): 1839-1847.
- [3] 刘永聪,何旺龄,刘兴发,等.不同海拔高度交流电晕电流脉冲特性实验研究[J].电测与仪表,2024,61(2):41-48.
LIU Y C, HE W L, LIU X F, et al. Experimental research on the characteristics of AC corona current pulse at different altitudes[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2024, 61(2): 41-48.
- [4] ZHANG X, SHI C, KANG Y, et al. Flashover characteristics of cylindrical insulator in high-speed sand environment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 455-461.
- [5] 郝静,高国强.受电弓降弓过程弓网电弧等离子体动态特性研究[J].铁道学报,2018,40(9):65-70.
HAO J, GAO G Q. Dynamic analysis of pantograph-catenary arc plasma during pantograph lowering[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(9): 65-70.
- [6] 刘仕兵,曾聿田,刘欢,等.基于支持向量机的弓网间电弧诊断策略[J].华东交通大学学报,2018,35(2):129-136.

- LIU S B, ZENG L T, LIU H, et al. Diagnosis strategy for arc state between catenary and pantograph based on support vector machine[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2018, 35(2): 129-136.
- [7] CHENG J Y, ZHAO N, WU K C, et al. Influence of oxygen addition on the discharge characteristics of an argon plasma jet at atmospheric pressure[J]. Chinese Physics B, 2022, 31(6): 619-624.
- [8] 雷栋, 张海波, 王家伟, 等. 电气化铁路接触网用绝缘子污闪测试系统研制[J]. 电气化铁道, 2023, 34(5): 37-40.
LEI D, ZHANG H B, WANG J W, et al. Development of insulator fouling flash test system for contact network of electrified railroad[J]. Electric Railway, 2023, 34(5): 37-40.
- [9] 张吉彬. 沈佳高速铁路牡佳段AF线绝缘子闪络故障浅析[J]. 电气化铁道, 2022, 33(6): 65-67.
ZHANG J B. Brief Analysis on insulator flashover fault of AF wire in Mudanjiang-Jiamusi section of Shenyang-Jiamusi high-speed railway[J]. Electric Railway, 2022, 33(6): 65-67.
- [10] 刘继永, 李威龙. 调整接触网避雷线保护角降低雷电绕击概率的研究[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(6): 61-66.
LIU J Y, LI W L. Research on reducing the probability of lightning shielding failure by adjusting the protection angle of catenary lightning conductor[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(6): 61-66.
- [11] 王平, 陈雅茜, 姚修远, 等. 海拔2 200 m地区正极性操作冲击下大尺寸球-板间隙放电转化特性[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 6112-6124.
WANG P, CHEN Y X, YAO X Y, et al. Discharge conversion characteristics of large size sphere-plane gap under positive switching impulse voltage at altitude of 2 200 m [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15): 6112-6124.
- [12] 丁玉剑, 律方成, 李鹏, 等. $\pm 1 100$ kV特高压直流杆塔间隙放电特性[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1032-1038.
DING Y J, LU F C, LI P, et al. Discharge characteristics of $\pm 1 100$ kV UHV DC tower air gaps[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1032-1038.
- [13] 方雅琪, 王力农, 李瑞, 等. 超/特高压线路带电作业间隙放电特性仿真计算[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4435-4444.
FANG Y Q, WANG L N, LI R, et al. Discharge characteristics calculation method for live working gaps of EHV and UHV lines[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4435-4444.
- [14] 郑跃胜, 任建华, 舒胜文, 等. 空气湿度对非均匀交流电场下短间隙击穿特性的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(5): 1352-1359.
ZHENG Y S, REN J H, SHU S W, et al. Effect of air humidity on breakdown characteristics of short gaps under alternating non-uniform electric fields[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(5): 1352-1359.
- [15] BRIELS T, KOS J, WINANDS G, et al. Positive and negative streamers in ambient air: measuring diameter, velocity and dissipated energy[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2008, 41(23): 234004.
- [16] CHEN S, ZENG R, ZHUANG C. The diameters of long positive streamers in atmospheric air under lightning impulse voltage[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013, 46(37): 375203.
- [17] NIJDAM S, VAN D W F, BLANCE R, et al. Probing photo-ionization: experiments on positive streamers in pure gases and mixtures[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2010, 43(14): 145204.
- [18] ONO R, ODA T. Formation and structure of primary and secondary streamers in positive pulsed corona discharge-effect of oxygen concentration and applied voltage[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2003, 36(16): 1952-1958.
- [19] 杨亚奇, 李卫国, 夏喻, 等. 低气压下长间隙交直流放电特性研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1143-1150.
YANG Y Q, LI W G, XIA Y, et al. Research of AC and DC discharge characteristics of long gap under low pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1143-1150.
- [20] BELOPLOTOV D V, SOROKIN D A, LOMAEV M I, et al. Formation of a negative streamer in a sharply nonuniform electric field and the time of generation of runaway electrons[J]. Russian Physics Journal, 2020, 62: 1967-1975.
- [21] 律方成, 钦雨晨, 王平, 等. 正极性操作冲击电压下流注发展过程中空间电场变化规律[J]. 高电压技术, 2019, 45(9): 2964-2970.
LU F C, QIN Y C, WANG P, et al. Variation law of spatial electric field during the development of streamer under positive switching impulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(9): 2964-2970.
- [22] 赵志航, 魏新劳, 姚远航, 等. 低温次大气压不均匀电场空气流注放电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 4034-4046.
ZHAO Z H, WEI X L, YAO Y H, et al. Study on discharge characteristics of non-uniform electric field air streamer at low temperature and sub atmospheric pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 4034-4046.
- [23] 朱毅佳, 朱武, 张佳民. 基于COMSOL的流注头部分叉

- 过程仿真与分析[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(5): 88-92.
- ZHU Y J, ZHU W, ZHANG J M. Simulation and analysis of streamer discharges front splitting process based on COMSOL[J]. Computer Application and Software, 2021, 38(5): 88-92.
- [24] WANG L, CHEN S, WANG F. Kinetic modelling of atmospheric pressure corona discharges in humid air[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2019, 39: 1291-1315.
- [25] 蒋兴良, 吴建国, 任晓东, 等. 大气压下湿度对气隙流注放电及击穿的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(4): 1743-1752.
- JIANG X L, WU J G, REN X D, et al. Influence of humidity on air gap streamer discharge and breakdown under atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1743-1752.
- [26] 张钊棋, 宋辉, 代杰杰, 等. 大气压下温度对针板空气间隙流注放电影响的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2929-2939.
- ZHANG Z Q, SONG H, DAI J J, et al. Simulation research on the influences of temperature on streamer discharge of the needle plate air gap at atmospheric pressure [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2929-2939.
- [27] SAKIYAMA Y, GRAVES D B, CHANG H W, et al. Plasma chemistry model of surface microdischarge in humid air and dynamics of reactive neutral species[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2012, 45(42): 425201.
- [28] LI X, GUO B, SUN A, et al. A computational study of steady and stagnating positive streamers in N_2 - O_2 mixtures [J]. Plasma Sources Science and Technology, 2022, 31 (6): 065011.
- [29] LIN P, ZHANG J, NGUYEN T, et al. Numerical simulation of an atmospheric pressure plasma jet with coaxial shielding gas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 54(7): 075205.
- [30] LAWTON S A, PHELPS A V. Excitation of the $b\ 1\Sigma^+g$ state of O_2 by low energy electrons[J]. The Journal of Chemical Physics, 1978, 69(3): 1055-1068.
- [31] ZOU D D, TU C S, CUI C M. Helical streamers guided by surface electromagnetic standing waves[J]. Plasma Science and Technology, 2023, 25(7): 072001.
- [32] 蔡新景, 王新新, 邹晓兵, 等. 大气压下不同气体的流注放电特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 2047-2053.
- CAI X J, WANG X X, ZOU X B, et al. Properties of streamer discharges in different gases at atmospheric pressure[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 2047-2053.
- [33] 彭庆军. 空气中流注放电等离子体化学模型研究及其影响因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- PENG Q J. Research of plasma chemical model and analysis of influencing factors of streamer discharge in air [D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.



第一作者: 邹丹丹(1985—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为放电等离子体, 弓网电弧, 故障智能辨识, 脉冲电源。E-mail: ddzou@ecjtu.edu.cn。



通信作者: 宋子浔(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为流注放电, 气体放电。E-mail: 838532132@qq.com。

(责任编辑:姜红贵)