

# 氩气等离子体射流特性: 电压、气流、外磁场的综合影响\*

周雄峰 陈彬 刘坤†

(重庆大学电气工程学院, 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

(2024年8月23日收到; 2024年9月11日收到修改稿)

大气压等离子体射流具有广阔的应用前景, 而电压、气体流速、外磁场均会影响其性能, 其综合影响更会使得放电规律复杂化. 但是目前缺乏三者组合对射流特性的综合影响研究, 无法更全面评估多放电条件下的放电特性规律. 因此, 本文以交流氩气等离子体射流为对象, 研究了电压、外磁场、气体流速三者组合作用对放电的宏观形貌、功率、气体温度、电子激发温度、电子密度、Ar\* 光谱强度、·OH 粒子数密度等参量的影响. 结果表明, 电压对射流参量的影响规律不受气体流速和外磁场的影响, 增大电压能提升放电性能; 加入外磁场可以在不引起放电功率显著变化的情况下提升放电性能, 尤其是当磁场仅作用于等离子体羽时, 提升效果最显著; 气体流速对射流性能的改变会受到电压和外磁场的影响, 并不是在单个放电条件最优的组合情况下取得最佳的射流性能. 本研究有助于更全面了解不同放电条件下射流特性, 为优化射流性能提供指导, 有利于推动大气压等离子体射流技术的发展.

**关键词:** 大气压等离子体射流, 等离子体特性, 活性粒子, 外磁场

**PACS:** 52.25.-b, 52.25.Tx, 52.70.Kz, 52.70.-m

**DOI:** 10.7498/aps.73.20241166

**CSTR:** 32037.14.aps.73.20241166

## 1 引言

大气压等离子体射流 (atmospheric pressure plasma jet, APPJ) 能在低温下保持较强的物理化学活性, 同时还能将等离子体产生区域和工作区域分离, 具有很强的处理灵活性, 在生物医学<sup>[1-3]</sup>、表面改性<sup>[4,5]</sup>、材料制备<sup>[6,7]</sup>等诸多领域展示出了广阔的应用前景. APPJ 的应用效果直接受到其物理性质和产生的化学活性粒子影响<sup>[8-10]</sup>, 而这些物理化学特性又由放电条件决定. 因此了解不同放电条件下 APPJ 的放电特性对于优化应用结果至关重要.

电压和气体流速是常见的影响放电特性的参数<sup>[11-15]</sup>, 研究者们开展了广泛的电压和气体

流速下 APPJ 特性及其应用效果研究. 例如 Huang 等<sup>[16]</sup>研究了电压对 APPJ 传播速度的影响, 发现增大电压能加快电离波传播速度. Wang 等<sup>[17]</sup>发现随着放电电压的增大, APPJ 射流长度呈现先增大后趋于稳定的变化趋势. 虽然较高电压下射流长度不会受到影响, 但是射流末端会出现“跳动”的不稳定性现象. Chen 等<sup>[18,19]</sup>观察到低压电下 APPJ 等离子体羽是无放电细丝的流光模式, 而随着电压增大会转变为有放电细丝的丝状模式, 后者电子密度更高, 对 PET 亲水性改善效果更优. 张雪雪等<sup>[20]</sup>发现随着电压增大, APPJ 等离子体羽中的活性粒子浓度提升, 但气体温度可以基本保持不变. 田富超等<sup>[21]</sup>观察到 APPJ 长度会随着气体流速增大呈现先增大后减小的趋势. Jurov 等<sup>[22]</sup>研究了气体

\* 国家自然科学基金 (批准号: 52307160) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 2023CDJXY-029) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liukun@cqu.edu.cn

流速对 APPJ 杀灭不同细菌的影响, 发现增大气体流速时能提高化学活性粒子浓度, 从而显著提升杀灭多种细菌的速率. 除了研究单个放电参数的影响外, 也有文献报道了电压和气体流速两者组合对 APPJ 的影响. 例如 Bousba 等<sup>[23]</sup> 研究不同电压和气体流速下 APPJ 特性时, 发现两个变量的组合会影响等离子体羽湍流出现的阈值, 导致在较低气流流速下, APPJ 射流长度随着电压的增大而增大, 但在较高气流流速下, APPJ 射流长度随着电压的增大而减小.

除了电压和气体流速外, 近年来研究者发现外磁场也能通过磁化电子来影响电子碰撞反应以及后续的链式化学反应<sup>[24,25]</sup>, 进而改变 APPJ 特性和应用效果. 例如 Jiang 等<sup>[26]</sup> 观察到外磁场能增大 APPJ 的射流长度和改善放电均匀性. Liu 等<sup>[27]</sup> 和 Xu 等<sup>[28]</sup> 发现外磁场能提高 APPJ 产生的活性粒子浓度, 使得其杀灭大肠杆菌和黑色素瘤的效率分别提高 2.4 倍和 2 倍. Sah 等<sup>[29]</sup> 利用 APPJ 降解纺织染料时, 发现外磁场引入后活性粒子浓度的增大提高了 20% 的降解效率. 此外, 外磁场也被报道能协同电压、气体流速等放电条件变化, 在优化放电性能和应用方面取得更佳的效果. 例如, Guo 等<sup>[30]</sup> 研究了外磁场和气体流速组合对放电均匀性的影响, 发现外磁场的加入可以使得实现均匀放电所需要的气体流速减小. Wang 等<sup>[31]</sup> 发现电场和磁场的结合能够促进电离, 可以在较低的电压下产生更长的 APPJ 射流.

通过以上分析可以看出, 调节电压或者气体流速以及施加外磁场, 这 3 种方式都可以改变 APPJ 性能及其应用效果, 而且两两组合的影响会起到更佳的效果, 但是这种组合影响也会使得放电现象的变化趋于复杂. 那么在外磁场作用下, 电压和气体流速对 APPJ 的影响如何? 目前尚未有这方面相关研究报道. 而研究外磁场、电压、气体流速三者组合作用下 APPJ 特性的变化规律, 可以更全面了解不同放电条件下 APPJ 的放电特性, 为优化 APPJ 放电性能提供指导, 有利于推动 APPJ 技术在不同应用领域的发展. 因此, 本文以交流电源驱动的氩气 APPJ 为研究对象, 利用相机拍摄和电气参数、发射光谱、吸收光谱测量等手段表征了放电的宏观形貌、功率、气体温度、电子激发温度、电子密度、激发态  $\text{Ar}^*$  光谱强度、基态  $\cdot\text{OH}$  粒子数密度等参量, 研究了外磁场、电压、气体流速三者组

合作用对上述 APPJ 参量的影响.

## 2 实验装置与方法

实验装置如图 1(a) 所示, 包括 APPJ 产生系统、电参数诊断系统、光学诊断系统三部分. APPJ 装置由一根外径 6 mm、内径 4 mm 的石英玻璃管和两个厚度 1 mm、宽度 5 mm 的铜环构成. 石英玻璃管上端通入氩气 (纯度 99.999%), 由质量流量控制器 (型号 Sevenstar D07-7) 控制其气体流速. 两个铜环紧密贴附在石英玻璃管上, 相距 10 mm. 其中上端铜管作为高压电极与高压交流电源相连, 下端铜环作为地电极与交流电源共地. 高压交流电源由实验室自制<sup>[32]</sup>, 输出电压在 0—27 kV 连续可调, 电压抖动小于 0.2 kV. 实验中电源频率固定为 13.5 kHz. 高压交流电源施加到 APPJ 装置上的放电电压通过高压探头 (型号 Tektronix P6015A) 测量并在示波器 (型号 Tektronix DPO2014) 上显示记录. 为了得到 APPJ 的放电功率, 还在放电低压端回路中串联了一个 1 nF 的电容. 通过低压探头 (型号 Tektronix TPP0051) 测量电容两端的电压, 然后结合放电电压, 就可以利用 Lissajour 图计算放电功率<sup>[33,34]</sup>. APPJ 放电形貌由数码相机 (型号 Canon R50) 拍摄, 曝光时间设置为 1/15 s.

为了研究外磁场的影响, 搭建了如图 1(b) 所示的 4 种磁场与 APPJ 相互作用方式. 通过调节升降平台高度可以改变磁场与 APPJ 的作用方式. Case 1 中没有磁场作用, Case 2 中外磁场作用于整个 APPJ, Case 3 中外磁场作用于低压电极和等离子体羽, Case 4 中外磁场仅作用于等离子体羽. 不同相互作用方式中的外磁场都是由两块相距 4 cm 的平行磁铁 (型号 Amoeba N52) 产生. 通过台式高斯计 (型号 Tunkia TD8650) 测量磁感应强度, 发现磁铁的表面强度约为 500 mT, 其在作用区域产生的磁场为匀强磁场, 强度约为 125 mT.

光学诊断系统可以对 APPJ 的发射光谱和吸收光谱进行测量. 利用凸透镜汇聚 APPJ 等离子体羽产生的光信号, 然后经光纤收集传输到光谱仪 (型号 AvaSpect-2048-8) 中, 由光谱采集软件分析发射光谱信号. 光谱仪的狭缝宽度为 5  $\mu\text{m}$ , 分辨率为 0.042 nm. 典型的 APPJ 发射光谱图如图 2(a) 所示, 实现了光谱的高分率测量, 能清晰观测到  $\text{Ar}(4p-4s)$  谱线和  $\text{OH}(A-X)$  谱带. 利用  $\text{Ar}(4p-4s)$

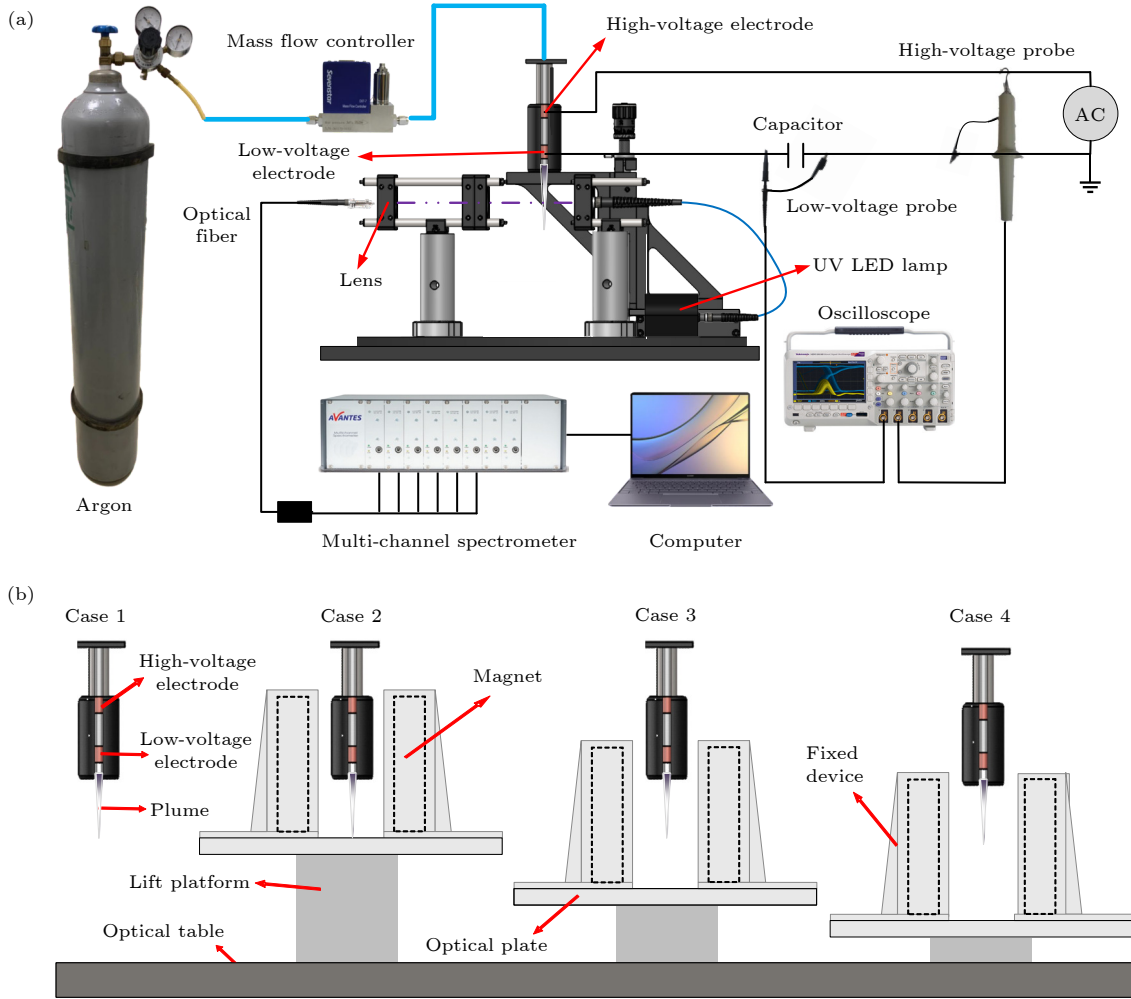


图 1 (a) APPJ 实验装置; (b) 磁场系统

Fig. 1. (a) Experimental setup of APPJ; (b) magnetic field system.

谱线可以结合 Stark 展宽法和玻尔兹曼斜率法计算电子密度和电子激发温度<sup>[35,36]</sup>, 利用 OH(A-X) 谱带可以结合玻尔兹曼斜率法计算气体温度<sup>[37]</sup>, 相关示意图在图 2(b)—(d) 中展示. 吸收光谱测量时, 由紫外光源产生稳定光信号, 穿过等离子体区域时会被部分吸收, 然后由透镜和光纤收集剩余光信号, 传递到光谱仪上进行分析. 实验中利用对 309 nm 附近处紫外光的吸收特性进行吸收光谱原位测量, 可以得到基态 ·OH 粒子数密度<sup>[38]</sup>. 上述特征参量的具体表征计算方法见补充材料 (online).

### 3 研究结果

#### 3.1 放电形貌

图 3(a) 展示了一组氩气 APPJ 放电形貌随电压变化的照片, 其气体流速为 6 L/min(标准状况),

磁场作用方式为 Case 1, 电压值在图中给出. 可以看到, 高低压之间的放电为明亮的白色细丝, 喷口下方的等离子羽形状类似一把“剑”, 为白色羽毛状且在末端带有微弱的紫色光. 随着放电条件的变化, 等离子羽的长度明显不同. 图 3(b) 直观展示了 APPJ 等离子体羽长度随放电条件的变化. 可以看到, 等离子体羽长度与电压大小呈正比例关系. 例如在 Case 1、气体流速 6 L/min(标准状况)下, 当电压从 19 kV 增至 24 kV 时, 长度从 12.21 mm 增至 24.72 mm. 另外 3 种外磁场作用方式 (Case 2—Case 4) 均可提升等离子体羽长度. 例如在 22 kV, 6 L/min(标准状况)下, Case 1 中的长度为 21.57 mm, 而 Case 2—Case 4 中的长度分别达到了 28.55, 29.72, 29.89 mm. 同时还需注意到, Case 2 中长度低于 Case 3 和 Case 4 的长度, 而后两者情况中长度差异较小. 等离子体羽长度与气体

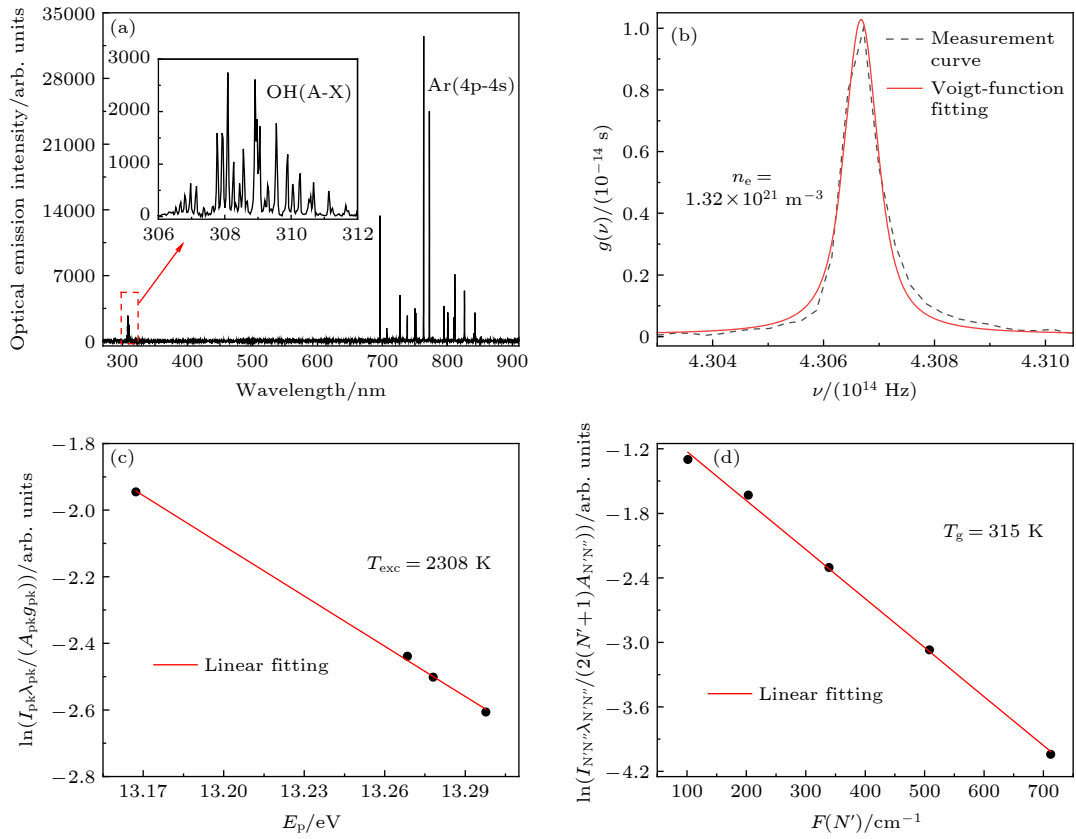


图 2 (a) 发射光谱图; (b) 计算电子密度示意图; (c) 计算电子激发温度示意图; (d) 计算气体温度示意图  
 Fig. 2. (a) Diagram for optical emission spectrum; (b) diagram for electron density calculation; (c) diagram for electron excitation temperature calculation; (d) diagram for gas temperature calculation.

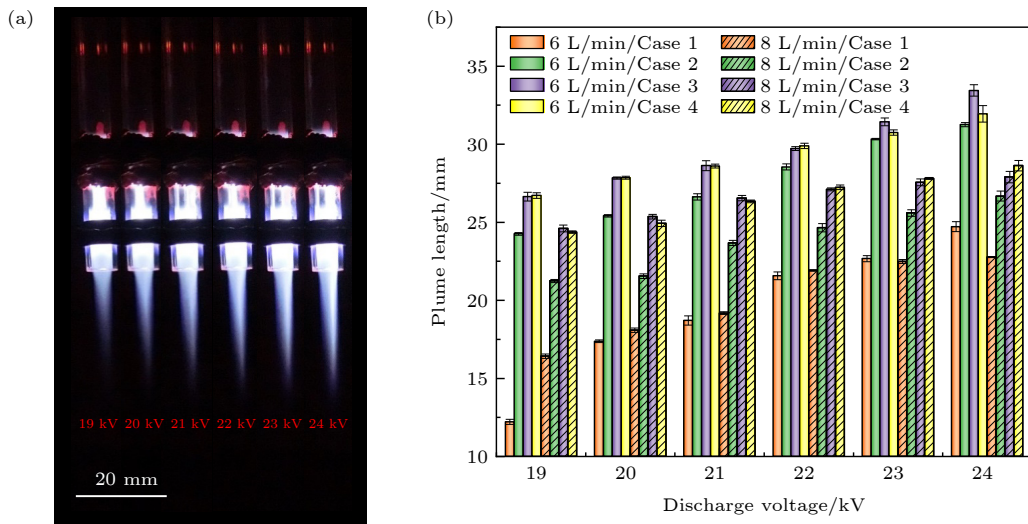


图 3 (a) APPJ 放电形貌; (b) 等离子体羽长度随放电条件的变化  
 Fig. 3. (a) APPJ discharge morphology; (b) variation of plume length with discharge conditions.

流速的关系比较复杂. 没有外磁场时, 在低电压下长度随着气体流速的增大而增大, 而在较高电压下呈下降趋势. 例如 Case 1 中, 当气体流速从 6 L/min (标准状况) 增至 8 L/min(标准状况) 时, 在 19 kV

下长度能从 12.21 mm 增至 16.42 mm, 但在 24 kV 时长度却从 24.72 mm 略微下降到 22.77 mm. 引入外磁场后, 不论在何种磁场作用方式下, 长度随着气流的增大而下降.

### 3.2 放电功率

图 4 展示了不同放电条件下的 APPJ 放电功率变化, 功率随着电压的增大而增大. 例如 Case 1, 6 L/min(标准状况)下, 电压从 19 kV 增至 24 kV 时, 功率从 0.86 W 增大了 69.77%, 达到 1.46 W. 而引入外磁场和改变气体流速并不会显著影响功率. 引入外磁场和改变气体流速时功率变化最大出现在电压 24 kV 时, 此时 Case 1, 6 L/min (标准状况)下功率为 1.46 W, 而外磁场作用方式变为 Case 4 或者气体流速增至 8 L/min (标准状况)时, 放电功率均为 1.25 W, 仅减小 14.38%.

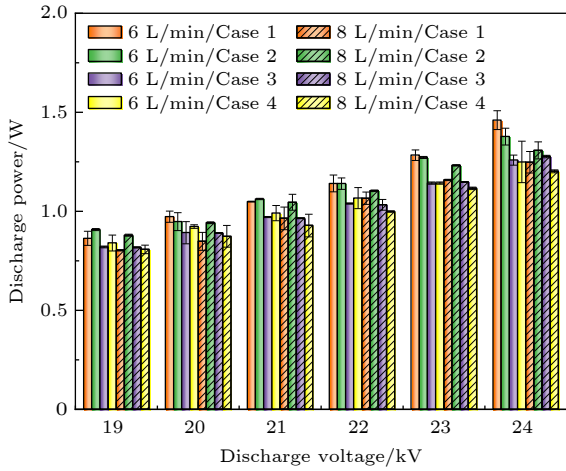


图 4 放电功率随放电条件的变化

Fig. 4. Variation of power with discharge conditions.

### 3.3 气体温度和电子激发温度

图 5(a) 展示了不同放电条件下 APPJ 气体温度  $T_g$  的变化情况,  $T_g$  随着电压的增大而升高. 例如在 Case 1, 8 L/min(标准状况)下, 当电压从 19 kV 增至 24 kV 时,  $T_g$  从 298 K 升高到了 311 K. 引入外磁场之后,  $T_g$  会有升高趋势, 且不同磁场作用方式下的排序为 Case 4 > Case 3 > Case 2. 例如在 24 kV, 8 L/min(标准状况)下, Case 1 中  $T_g$  为 311 K, 而 Case 2—Case 4 中  $T_g$  能分别增至 314, 318, 321 K. 气体流速对  $T_g$  的影响与电压大小和外磁场作用方式有关. 在 Case 1—Case 3 中, 无论电压如何, 气体流速增大都会较明显的提升  $T_g$ ; 但是在 Case 4 中, 低电压小气体流速提升  $T_g$  的效应较明显, 而高电压下气体流速提升  $T_g$  的效应不显著. 例如当气体流速从 6 L/min 增至 8 L/min (标准状况)时, 在 20 kV 下, Case 1—Case 4 中的  $T_g$  能分别从 297 K, 302 K, 304 K, 307 K 提升到 302 K,

310 K, 311 K, 315 K; 在 23 kV 下, Case 1—Case 3 中的  $T_g$  也能分别从 302 K, 303 K, 307 K 提升到 309 K, 313 K, 318 K, 但是 Case 4 中的  $T_g$  却保持在 318—319 K.

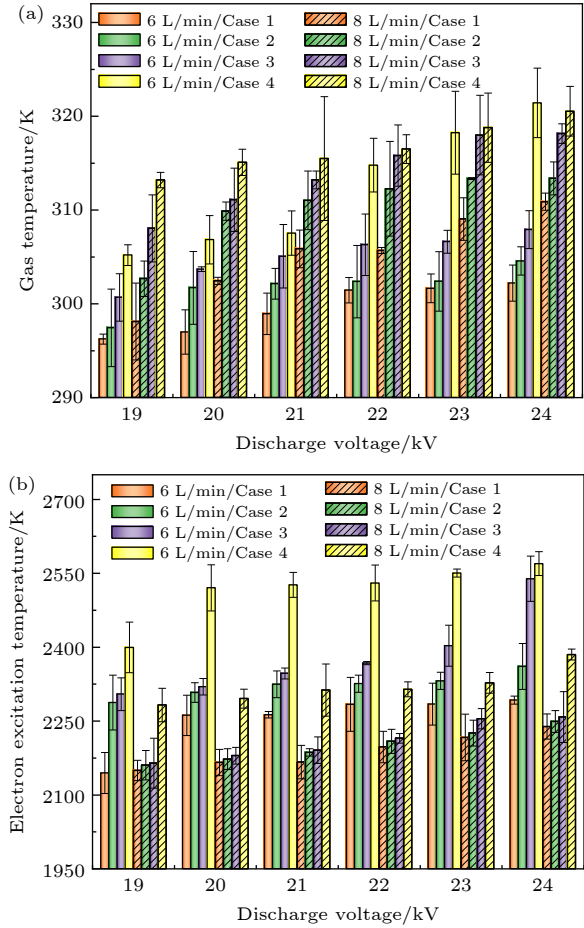


图 5 (a) 气体温度和 (b) 电子激发温度随放电条件的变化

Fig. 5. Variation of (a) gas temperature and (b) electron excitation temperature with discharge conditions.

图 5(b) 展示了不同放电条件下 APPJ 电子激发温度  $T_{exc}$  的变化情况,  $T_{exc}$  随着电压的增大呈现升高趋势. 例如在 Case 1, 6 L/min (标准状况)下, 当电压从 19 kV 增至 24 kV 时,  $T_{exc}$  能从 2144 K 升高到 2292 K. 引入外磁场之后,  $T_{exc}$  会有升高趋势, 但是在不同磁场作用方式下增大幅度会有差异, 其排序为 Case 4 > Case 3 > Case 2. 例如在 23 kV, 6 L/min (标准状况)下, Case 1 中的  $T_{exc}$  为 2284 K, 而 Case 2—Case 4 中的  $T_{exc}$  能分别增至 2332 K, 2401 K, 2550 K. 增大气体流速后  $T_{exc}$  基本呈现下降趋势. 但是气体流速的变化会使得电压和外磁场对  $T_{exc}$  的影响复杂化. 例如电压 19 kV, Case 1 下, 增大气体流速时  $T_{exc}$  变化就会

不显著; 气体流速增大后还会减小不同外磁场作用方式下  $T_{\text{exc}}$  的差异性, 尤其是高气体流速下 Case 3 中的  $T_{\text{exc}}$  只是略高于 Case 2.

### 3.4 电子密度

图 6 展示了不同放电条件下 APPJ 电子密度  $n_e$  的变化情况,  $n_e$  随着电压的升高会有小幅增大的趋势. 例如在 Case 1, 6 L/min(标准状况) 下, 当电压从 19 kV 增至 24 kV 时,  $n_e$  从  $1.32 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  变为  $1.44 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ . 引入外磁场之后,  $n_e$  有增大趋势, 但是不同磁场作用方式下增大幅度会有差异, 其排序为 Case 4 > Case 3 > Case 2. 例如在 20 kV, 8 L/min (标准状况) 条件下, Case 1 中  $n_e$  为  $1.73 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , 而 Case 2—Case 4 中的  $n_e$  能分别增至  $2.15 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,  $2.78 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,  $2.94 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ . 增大气体流速时  $n_e$  呈现增大趋势, 其幅度与磁场作用方式有关. 在 Case 4 中, 增大气体流速只会小幅提升  $n_e$ ; 但是在 Case 1—Case 3 中, 增大气体流速会显著提升  $n_e$ . 例如在 23 kV 下, 当气体流速从 6 L/min(标准状况) 增至 8 L/min(标准状况) 时, Case 1—Case 3 中  $n_e$  能分别从  $1.43 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,  $1.58 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,  $1.68 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  提升到  $2.31 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,  $2.58 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ ,  $2.85 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ , 而 Case 4 中  $n_e$  仅从  $2.91 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$  变为  $2.98 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$ .

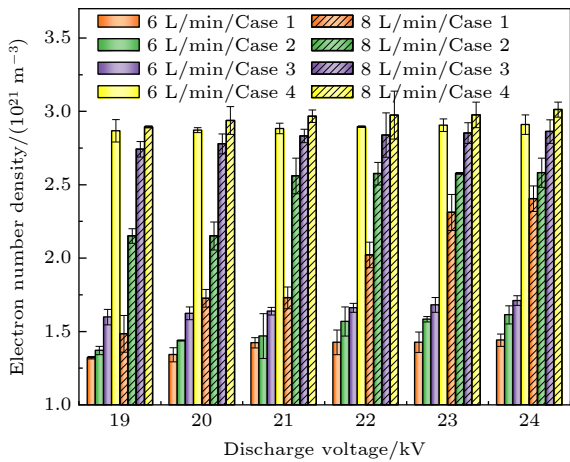


图 6 电子密度随放电条件的变化

Fig. 6. Variation of electron number density with discharge conditions.

### 3.5 激发态 Ar\* 光谱强度和基态 ·OH 粒子数密度

图 7(a), (b) 显示了激发态 Ar\* 光谱强度和基态 ·OH 粒子数密度在不同条件下的变化情况. 激

发态 Ar\* 泛指不处于基态的氩原子, 这儿是利用 Ar(4p-4s) 在 706.72 nm 处的谱线强度来表示激发态 Ar\* 光谱强度. 可以看到, 两种粒子强度/密度随着电压增大均呈现略微增大趋势. 例如在 Case 1, 8 L/min(标准状况) 下, 当电压从 19 kV 增至 24 kV 时, Ar\* 光谱强度和 ·OH 粒子数密度分别从 1266 arb.units,  $3.47 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  增至 1560 arb.units,  $3.55 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . 引入外磁场之后, 两种粒子强度/密度有增大趋势, 且在不同磁场作用方式下的排序为 Case 4 > Case 3 > Case 2. 在 24 kV, 6 L/min (标准状况) 下, Case 1 中的 Ar\* 光谱强度和 ·OH 粒子数密度分别为 1487 arb.units 和  $3.49 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 而 Case 2—Case 4 中分别增至 2525 arb.units 和  $3.50 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 2616 arb.units 和  $3.53 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 2765 arb.units 和  $3.69 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ . 随着气体流速的增大, Ar\* 光谱强度增大; ·OH 粒子数密度在 Case 1 到 Case 3 中也会略微增大, 但在 Case 4 中的变化

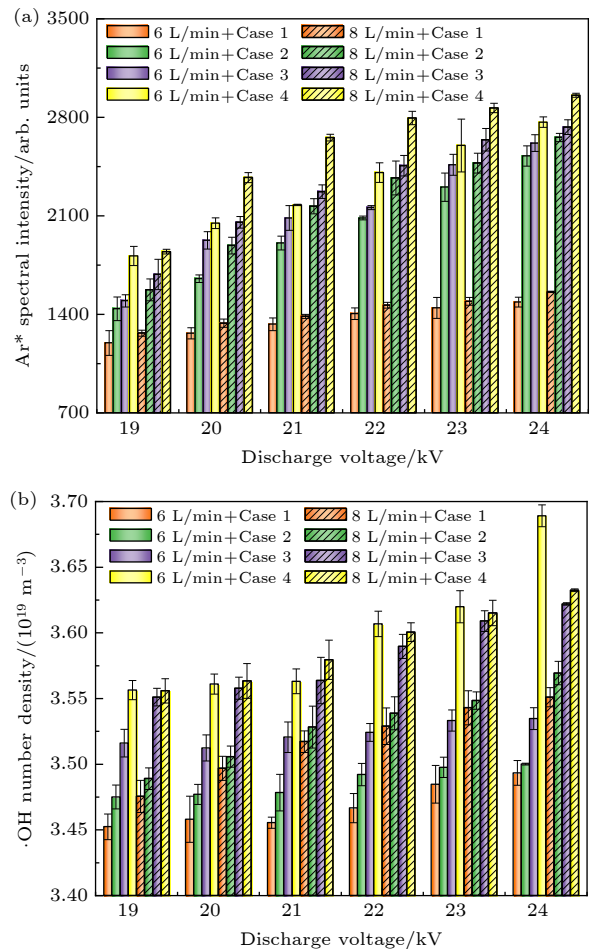


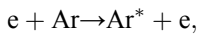
图 7 (a) 激发态 Ar\* 光谱强度和 (b) 基态 ·OH 粒子数密度随放电条件的变化

Fig. 7. Variation of (a) excited Ar\* spectral intensity and (b) ·OH number density with discharge conditions.

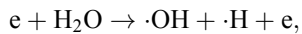
趋势将会不明显, 甚至在高电压时出现下降趋势. 例如当气体流速从 6 L/min(标准状况) 增至 8 L/min(标准状况) 时, 在 23 kV 下, Case 1—Case 4 中的 Ar\* 光谱强度能分别从 1446, 2304, 2463, 2560 arb.units 增至 1492, 2475, 2640, 2866 arb.units; ·OH 粒子数密度在 Case 1—Case 3 中分别从  $3.48 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.50 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.53 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  提升到  $3.54 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.55 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ ,  $3.61 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ , 但是 Case 4 中却从  $3.62 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$  略微下降到  $3.61 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ .

#### 4 影响机理

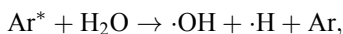
实验中发现无论外磁场作用方式以及气体流速如何, 电压增大会增大放电功率、提升等离子体羽长度、升高气体温度  $T_g$  和电子激发温度  $T_{\text{exc}}$ 、提高电子密度  $n_e$  和激发态 Ar\* 光谱强度以及基态·OH 粒子数密度. 当施加的电压增大时, 注入 APPJ 放电体系的能量增大<sup>[39]</sup>, 因此导致放电功率增大. 此时放电空间电场强度增强<sup>[40]</sup>, 电子获得的能量将增大, 能更有效碰撞电离生成更多电子<sup>[41]</sup>, 提高  $n_e$ . 而电子能量和密度的提升能延长其反应路径, 增强 APPJ 与周围环境气体之间的碰撞反应, 宏观表现为 APPJ 等离子体羽长度变长. 另外, 电子与氛围粒子间更频繁的碰撞也会使得 APPJ 体系能量传递过程加快, 增大的功率将通过能量传递过程使得  $T_{\text{exc}}$  和  $T_g$  升高. 而  $n_e$ ,  $T_{\text{exc}}$  的提升将加剧链式化学反应的反应速率(如 (1) 式—(3) 式所示<sup>[42-44]</sup>, 其中  $k$  为反应速率系数,  $\varepsilon$  为电子温度, 可近似用  $T_{\text{exc}}$  代替), 从而导致生成更多的激发态 Ar\* 原子和基态·OH 粒子, 因此其发射光谱强度/粒子数密度增大.



$$k = 2.1 \times 10^{-14} \exp(-13.13/\varepsilon) \text{ m}^3/\text{s}, \quad (1)$$



$$k = 5.15 \times 10^{-15} \varepsilon^{0.62} \exp(-10.9/\varepsilon) \text{ m}^3/\text{s}, \quad (2)$$



$$k = 4.8 \times 10^{-10} \text{ cm}^3/\text{s}. \quad (3)$$

在 APPJ 体系中引入外磁场时, 它能磁化放电空间电子<sup>[45]</sup>, 使其受到洛伦兹力而做拉莫尔回旋运动<sup>[46]</sup>. 虽然这不会引起放电功率的显著变化,

但是能通过改变放电空间内电子的运动轨迹, 降低电子扩散系数从而延长高能电子在放电空间内的停留时间, 使放电空间内高能电子的比例以及其与氛围粒子间的碰撞概率增大<sup>[47]</sup>, 最终影响 APPJ 的放电特性, 增强了等离子体羽长度、气体温度  $T_g$ 、电子激发温度  $T_{\text{exc}}$ 、电子密度  $n_e$ 、激发态 Ar\* 光谱强度、基态·OH 粒子数密度等参量.

此外, 实验中还发现外磁场与 APPJ 的作用方式会影响 APPJ 特性. 除了等离子体羽长度外, 气体温度  $T_g$ 、电子激发温度  $T_{\text{exc}}$ 、电子密度  $n_e$ 、激发态 Ar\* 光谱强度、基态·OH 粒子数密度等参量在不同作用方式下的数值排序均为 Case 4 > Case 3 > Case 2. 原因分析如下: 本文研究中外磁场方向与 APPJ 等离子体羽方向垂直. 在这个垂直磁场的作用下, 等离子体羽方向上的电子受到朝向 APPJ 石英管壁的洛伦兹力. 因此, 磁化电子可以与石英管壁复合, 限制了它们的进一步碰撞和发展. 在 Case 2 中, 外磁场覆盖了两个电极和等离子体羽, 这意味着外磁场作用区域内的石英管最长. 此时, 磁化电子与管壁复合的概率最高, 电子和能量损失最大, 温度和活性粒子增大幅度最小. 当外磁场位置调整到 Case 3 时, 它只覆盖了低压电极和等离子体羽. 此时, 外磁场作用区域内石英管的长度缩短, 导致磁化电子与管壁复合的概率降低, 电子和能量损失减少, 温度和活性粒子增加幅度大于 Case 2. 通过进一步将位置降低到 Case 4, 外磁场仅覆盖了等离子体羽. 此时, 外磁场作用区域缺少石英管, 允许磁化电子在开放的空气中自由移动, 而不会与管壁发生复合损失, 电子和能量损失最小, 温度和活性粒子增加幅度最大. 虽然等离子体羽长度不完全满足上述规律, 但也是在 Case 2 情况下最短的, 而在 Case 3 和 Case 4 中长度相差不大. 分析原因可能是因为较长等离子体羽长度下湍流效应加剧, 导致 Case 3 和 Case 4 中的长度呈现波动性, 因此差异性不大.

类似外磁场, 气体流速的变化不会显著影响放电功率, 但会改变 APPJ 的放电特性. 不过气体流速对放电特性的改变会受到电压、外磁场的影响, 变得复杂化. 对于等离子体羽长度, 在没有外磁场 (Case 1)、低电压的情况下, 增大气体流速时, 放电空间的粒子数增多, 促进了碰撞电离, APPJ 等离子体羽长度增大; 但是当等离子体羽长度过长后 (例如没有外磁场时高电压放电或者引入外磁场时

放电), 气体流速增大会导致湍流效应变得明显, 此时等离子体羽长度反而呈现下降趋势. 对于电子密度  $n_e$ , 增大气体流速后, 碰撞电离的促进会生成更多的电子, 因此  $n_e$  增大. 在 Case 2—Case 3 中, 增大气体流速能减小电子与 APPJ 管壁的复合作用, 此时  $n_e$  提升效果显著. Case 1 和 Case 4 中不涉及到管壁复合作用的差异性, 但是这两种情况下  $n_e$  增长情况具有差异性. 分析原因可能是 Case 4 中等离子羽长度过长, 导致电子与氛围空气粒子的吸附效应增大, 因此  $n_e$  变化不显著, 而 Case 1 中等离子体长度较短, 因此  $n_e$  提升显著. 对于气体温度  $T_g$  和电子激发温度  $T_{exc}$ , 增大气体流速时粒子间更频繁的碰撞将导致能量传递过程加快, 因此  $T_g$  基本呈现升高趋势; 而频繁碰撞导致能量消耗变多, 为了持碰撞电离过程和离子逃逸过程损失能量的平衡<sup>[48]</sup>, 此时  $T_{exc}$  会降低. 不过在 Case 4、高电压的情况下, 等离子体羽长度较长, APPJ 与氛围空气粒子的碰撞导致散热增强, 此时再增大气体流速时对提升  $T_g$  的效果不显著. 另外, 在 Case 1、低电压 (19 kV) 的情况下, 此时放电相对较弱, 气体流速增大导致的碰撞消耗能量效应不明显, 因此  $T_{exc}$  也不会发生显著变化. 此外, 在 Case 2 和 Case 3 中, 增大气体流速时减小的电子与 APPJ 管壁复合效应能弥补部分碰撞消耗能量效应, 而且 Case 2 中减小的电子与 APPJ 管壁复合效应更显著, 因此缩小了与 Case 3 中  $T_{exc}$  的差异性. 对于激发态  $Ar^*$  和基态  $\cdot OH$  粒子, 增大气体流速时粒子间更频繁的碰撞能导致生成更多的活性粒子, 因此  $Ar^*$  光谱强度增大;  $\cdot OH$  粒子数在 Case 1—Case 3 中也会随着气体流速增大而略微增加, 但是在 Case 4 中的变化趋势将会不明显, 甚至在高电压 (22—24 kV) 时出现下降趋势. 出现这种情况的原因是因为在 Case 4、高电压的情况下, 随着气体流速增大, APPJ 的等离子羽长度下降, 而  $n_e$  没有显著变化, 这减弱了等离子羽与氛围空气粒子的碰撞, 因此  $\cdot OH$  粒子数下降, 而激发态  $Ar^*$  来源于等离子内部, 不受上面特征参量变化的影响. 从此处也可以看出, 虽然高电压、高气体流速、外磁场单个影响下往往能取得有益效果, 促进 APPJ 物理化学活性, 但是当三者组合作用时, 并不是总能取得更优效果, 这也说明更全面了解不同放电条件组合下 APPJ 放电特性变化的必要性.

## 5 结 论

本文利用交流电源驱动氩气 APPJ, 研究了不同电压、气体流速、外磁场作用方式三者组合下, 放电的宏观形貌、功率、气体温度、电子激发温度、电子密度、激发态  $Ar^*$  光谱强度、基态  $\cdot OH$  粒子数密度等参量的变化规律. 主要结论如下.

1) 电压对 APPJ 上述参量的影响规律不受气体流速和外磁场的影响, 增大电压能提升上述参量性能.

2) 加入外磁场可以在不引起放电功率显著变化的情况下提升 APPJ 上述其余参量, 其提升效果受到外磁场作用方式的影响. 除了等离子羽长度和放电功率外, 其他参量数值在不同外磁场作用方式下的排序为 Case 4 > Case 3 > Case 2. 当等离子羽长度过长后, Case 3 和 Case 4 中的长度差异性不大.

3) 气体流速不会显著改变 APPJ 放电功率, 对其他参量的改变也会受到电压和外磁场的影响, 变得复杂化. 当三者协同作用时, 并不是在单个条件最优的组合情况下取得最佳的 APPJ 性能.

本研究有助于更全面了解多放电条件组合下 APPJ 特性的变化规律, 能为优化 APPJ 放电性能提供指导, 有利于推动 APPJ 技术在不同应用领域的发展.

## 参考文献

- [1] Ma L, Chen Y, Gong Q, Cheng Z, Ran C F, Liu K, Shi C M 2023 *Free Rad. Biol. Medic.* **204** 184
- [2] Wang X L, Liu J, Li Q X, Li L, Li S R, Ding Y H, Zhao T, Sun Y, Zhang Y T 2023 *High Volt.* **8** 841
- [3] Xi D K, Zhang X H, Yang S Z, Yap S S, Ishikawa K, Hori M, Yap S L 2022 *Chin. Phys. B* **31** 128201
- [4] Kong X H, Xue S, Li H Y, Yang W M, Martynovich E F, Ning W J, Wang R X 2022 *Plasma Sources Sci. Technol.* **31** 095010
- [5] Cui X L, Xu Z B, Zhou Y Y, Zhu X, Wang S, Fang Z 2022 *Surf. Coat. Technol.* **451** 129066
- [6] Kong D L, Yang B Y, He F, Han R Y, Miao J S, Song T L, Ouyang J T 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 095205 (in Chinese) [孔得霖, 杨冰彦, 何锋, 韩若愚, 缪劲松, 宋廷鲁, 欧阳吉庭 2021 *物理学报* **70** 095205]
- [7] Wang R Y, Shen J Y, Ma Y P X, Qin X R, Qin X, Yang F, Ostrikov K, Zhang Q, He J, Zhong X X 2024 *Plasma Process. Polym.* **21** 2300174
- [8] Liu K, Ren W, Ran C F, Zhou R S, Tang W B, Zhou R W, Yang Z H, Ostrikov K 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 065201



- [9] Liu Z J, Wang S T, Pang B L, Gao Y T, Li Q S, Xu D H, Liu D X, Zhou R W 2022 *Plasma Sources Sci. Technol.* **31** 05LT03
- [10] Guo L, Xu R B, Guo L, Liu Z C, Zhao Y M, Liu D X, Zhang L, Chen H L, Kong M G 2018 *Appl. Environ. Microbiol.* **84** e00726-18
- [11] Ran C F, Zhou X F, Wang Z Y, Liu K 2024 *Plasma Sources Sci. Technol.* **33** 015009
- [12] Liu K, Geng W Q, Zhou X F, Duan Q S, Zheng Z F, Ostrikov K 2023 *Plasma Sources Sci. Technol.* **32** 025005
- [13] Liu K, Zuo J, Ran C F, Yang M H, Geng W Q, Liu S T, Ostrikov K 2022 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **24** 8940
- [14] Xu H M, Gao J G, Jia P Y, Ran J X, Chen J Y, Li J M 2024 *Chin. Phys. B* **33** 015205
- [15] Chen Z Q, Zhong A, Dai D, Ning W J 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 165201 (in Chinese) [陈忠琪, 钟安, 戴栋, 宁文军 2022 物理学报 **71** 165201]
- [16] Huang B D, Zhang C, Zhu W C, Lu X P, Shao T 2021 *High Volt.* **6** 665
- [17] Wang B H, Chen L, Liu G M, Song P, Cheng F C, Sun D L, Zeng W, Xu L 2023 *Phys. Scr.* **98** 045612
- [18] Chen M, Dong X P, Wu K Y, Ran J X, Jia P Y, Wu J C, Li X C 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 214102
- [19] Wu K Y, Liu J N, Wu J C, Chen M, Ran J X, Pang X X, Jia P Y, Li X C, Ren C H 2023 *High Volt.* **8** 1161
- [20] Zheng X X, Jia P Y, Ran J X, Li J M, Sun H X, Li X C 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 085201 (in Chinese) [张雪雪, 贾鹏英, 冉俊霞, 李金懋, 孙换霞, 李雪辰 2024 物理学报 **73** 085201]
- [21] Tian F C, Chen L, Pei H, Bai J Q, Zeng W 2023 *Spectros. Spect. Anal.* **43** 3682 (in Chinese) [田富超, 陈雷, 裴欢, 白洁琪, 曾文 2023 光谱学与光谱分析 **43** 3682]
- [22] Jurov A, Skoro N, Spasic K, Modic M, Hojnik N, Vojosevic D, Durovic M, Petrovic Z L, Cvelbar U 2022 *Eur. Phys. J. D* **76** 29
- [23] Bousba H E, Sahli S, Namous W S E, Benterrouche L 2022 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **50** 1218
- [24] Zhou X F, Yang M H, Xiang H F, Geng W Q, Liu K 2023 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **25** 27427
- [25] Liu K, Yang M H, Zhou X F, Bai Y, Ran C F 2023 *Chem. J. Chin. Universities* **44** 20230327 (in Chinese) [刘坤, 杨明昊, 周雄峰, 白杨, 冉从福 2023 高等学校化学学报 **44** 20230327]
- [26] Jiang W M, Tang J, Wang Y S, Zhao W, Duan Y X 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 013505
- [27] Liu C T, Kunakura T, Ishikawa K, Hashizume H, Takeda K, Ito M, Hori M, Wu J S 2016 *Plasma Sources Sci. Technol.* **25** 065005
- [28] Xu H, Guo S S, Zhang H, Liu D X, Xie K 2021 *Phys. Plasmas* **28** 123521
- [29] Sah A K, Al-Amin M, Talukder M R 2023 *Environ. Sci. Pollut. Res.* **30** 74877
- [30] Guo H F, Xu Y F, Wang Y Y, Ren C S 2020 *Phys. Plasmas* **27** 023519
- [31] Wang M Y, Han R Y, Zhang C Y, Ouyang J T 2020 *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application* Beijing, China, September 6–10, 2020 pp1–4
- [32] Liu K, Xia H T, Yang M H, Geng W Q, Zuo J, Ostrikov K 2022 *Vacuum* **198** 110901
- [33] Liu K, Zuo J, Zhou X F, Ran C F, Yang M H, Geng W Q 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 055201 (in Chinese) [刘坤, 左杰, 周雄峰, 冉从福, 杨明昊, 耿文强 2023 物理学报 **72** 055201]
- [34] Yuan H, Wang W C, Yang D Z, Zhao Z L, Zhang L, Wang S 2017 *Plasma Sci. Technol.* **19** 125401
- [35] Liu K, Xiang H F, Zhou X F, Xia H T, Li H 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 115201 (in Chinese) [刘坤, 项红甫, 周雄峰, 夏昊天, 李华 2023 物理学报 **72** 115201]
- [36] Chen X, Wang X Q, Zhang B X, Yuan M, Yang S Z 2023 *Chin. Phys. B* **32** 115201
- [37] Yang D Z, Zhou X F, Liang J P, Xu Q N, Wang H L, Yang K, Wang B, Wang W C 2021 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **54** 244002
- [38] Ran C F, Zhou X F, Liu K 2024 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **26** 18408
- [39] Dang V S M M, Foucher E, Rousseau A 2015 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **48** 424003
- [40] Zhou X F, Xiang H F, Yang M H, Geng W Q, Liu K 2023 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **56** 455202
- [41] Chen J Y, Zhao N, Wu J C, Wu K Y, Zhang F R, Ran J X, Jia P Y, Pang X X, Li X C 2022 *Chin. Phys. B* **31** 065205
- [42] Gudmundsson J T, Thorstinson E G 2007 *Plasma Sources Sci. Technol.* **16** 399
- [43] Sakiyama Y, Graves D B, Chang H W, Shimizu T, Morfill G E 2012 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **45** 425201
- [44] Tian W, Tachibana K, Kushner M J 2014 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **47** 055202
- [45] Jiang N, Sun Y, Peng B F, Li J, Shang K F, Lu N, Wu Y 2022 *Plasma Process. Polym.* **19** e2100108
- [46] Hu Y, Luo J Y, Cai Y Y, Lu X P 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 130501 (in Chinese) [胡杨, 罗婧怡, 蔡雨烟, 卢新培 2023 物理学报 **72** 130501]
- [47] Singh K S, Sharma A K 2021 *J. Appl. Phys.* **130** 043302
- [48] Jeroen J, van de Sande M, Sola A, Gamero A, Rodero A, van der Mullen J 2003 *Plasma Sources Sci. Technol.* **12** 464

# Characteristics of argon discharge plasma jet: comprehensive effects of discharge voltage, gas flow rate, and external magnetic field\*

Zhou Xiong-Feng    Chen Bin    Liu Kun †

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering,  
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

( Received 23 August 2024; revised manuscript received 11 September 2024 )

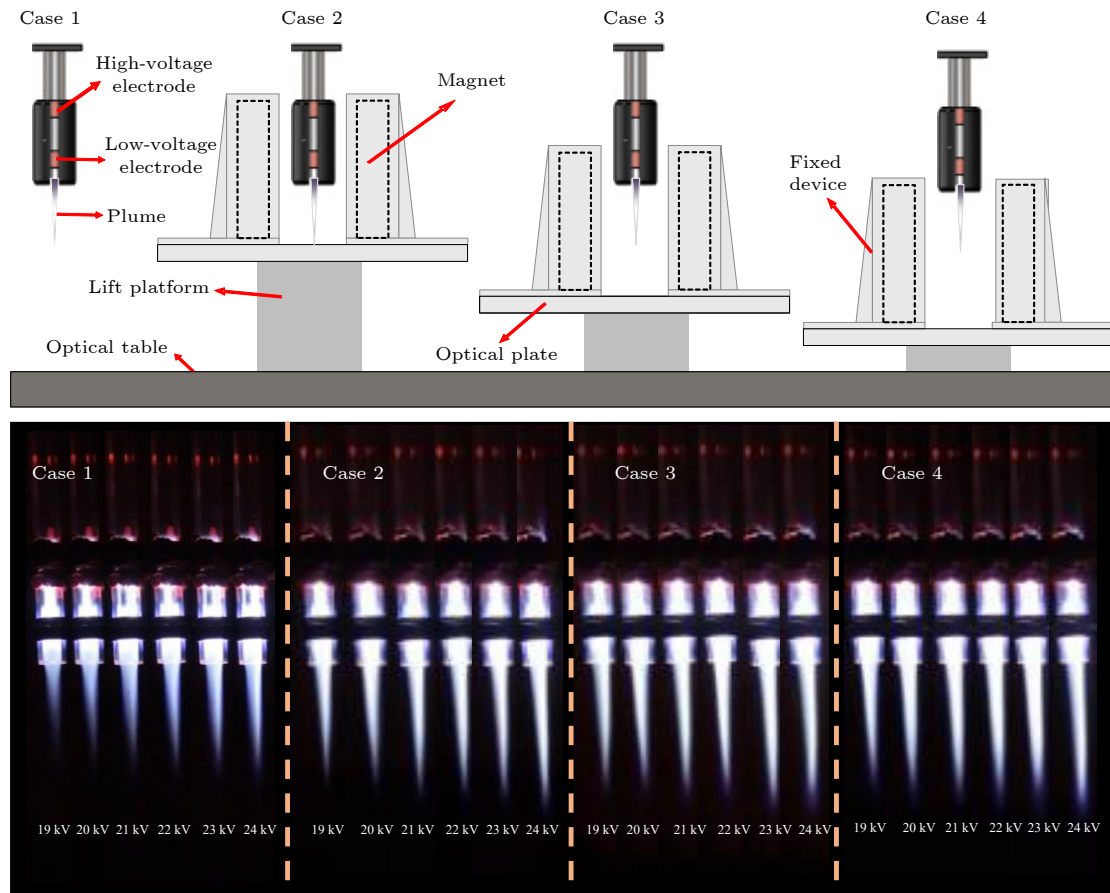
## Abstract

Atmospheric pressure plasma jet has received widespread attention due to its enormous potential applications in various fields, and its discharge conditions play a key role in changing their physical and chemical properties and ultimately determining its application effectiveness. Factors such as discharge voltage, gas flow rate, and the introduction of an external magnetic field intricately influence the performance of plasma jet. The combined effects of any two of these factors can yield enhanced outcomes, while also bringing complexity to the discharge phenomenon. However, there is currently a lack of research on the combined effects of external magnetic field, discharge voltage, and gas flow rate on the characteristics of plasma jets, making it difficult to comprehensively evaluate the discharge characteristics of plasma jet under multiple discharge conditions. Therefore, this paper focuses on an AC excited atmospheric pressure argon plasma jet and investigates the combined effects of external magnetic field, discharge voltage, and gas flow rate on various characteristic parameters of the plasma jet, including macroscopic morphology, discharge power, gas temperature  $T_g$ , electron excitation temperature  $T_{exc}$ , electron density  $n_e$ , emission intensity of excited state Ar\* particles, and number density of ground state ·OH particles by using methods of camera shooting, and electrical parameter measurement, spectroscopic analysis of emission and absorption spectra. The obtained results are shown below. The effect of discharge voltage on the characteristic parameters of the plasma jet is not affected by gas flow rate or the existence of an external magnetic field. The increase of discharge voltage can improve jet performance by enhancing the discharge power, extending the plasma plume length, elevating the gas temperature  $T_g$  and electron excitation temperature  $T_{exc}$ , increasing the electron density  $n_e$  and emission intensity of excited state Ar\* particles, as well as the number density of ground state ·OH particles. The addition of an external magnetic field can improve the jet performance without significantly changing the discharge power, and the extent of this improvement is influenced by the mode of magnetic field action. Notably, the enhancement of jet performance is most significant when the magnetic field selectively targets the plasma plume, excluding direct interaction with electrode discharge region. The effect of gas flow rate on jet performance becomes intricate: it is intertwined with the effect of voltage and the effect of external magnetic field. When an external magnetic field is present, excessive voltage and gas flow rate may reduce the number density of ground state ·OH particles generated by plasma jet. This underscores the need for a detailed understanding when optimizing jet performance under various discharge conditions. Simply combining the optimal conditions for each individual factor does not guarantee the achievement of peak jet performance when all three discharge conditions work synergistically. This study presents valuable insights into the discharge

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 52307160) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant No. 2023CDJXY-029).

† Corresponding author. E-mail: [liukun@cqu.edu.cn](mailto:liukun@cqu.edu.cn)

characteristics of plasma jet under different discharge conditions, providing guidance for optimizing the performance of plasma jet and promoting the advancement of atmospheric pressure plasma jet technology in different application fields.



**Keywords:** atmospheric pressure plasma jet, plasma characteristics, reactive species, external magnetic field

**PACS:** 52.25.-b, 52.25.Tx, 52.70.Kz, 52.70.-m

**DOI:** [10.7498/aps.73.20241166](https://doi.org/10.7498/aps.73.20241166)

**CSTR:** [32037.14.aps.73.20241166](https://cstr.cn/32037.14.aps.73.20241166)



氩气等离子体射流特性：电压、气流、外磁场的综合影响

周雄峰 陈彬 刘坤

**Characteristics of argon discharge plasma jet: comprehensive effects of discharge voltage, gas flow rate, and external magnetic field**

Zhou Xiong-Feng Chen Bin Liu Kun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 225201 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20241166

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241166>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

固定功率下大气压交流氩气等离子体射流的光谱特性

Spectral diagnosis of atmospheric pressure AC argon plasma jet at constant power

物理学报. 2023, 72(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230307>

屏蔽气体流速对同轴双管式氦气大气压等离子体射流粒子分布的影响

Effect of flow rate of shielding gas on distribution of particles in coaxial double-tube helium atmospheric pressure plasma jet

物理学报. 2022, 71(16): 165201 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220421>

大气压电晕等离子体射流制备氧化钛薄膜

Deposition of titanium oxide films by atmospheric pressure corona discharge plasma jet

物理学报. 2021, 70(9): 095205 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202181>

大气压脉冲放电等离子体射流特性及机理研究

Discharge characteristics and mechanism of plasma plume generated by atmospheric pulsed discharge

物理学报. 2021, 70(9): 095202 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202246>

脉冲电压上升沿对He 大气压等离子体射流管内放电发展演化特性的影响

Effects of pulse voltage rising edge on discharge evolution of He atmospheric pressure plasma jet in dielectric tube

物理学报. 2022, 71(2): 025202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20210470>

大气压氩气刷形等离子体羽的特性研究

Discharge characteristics of argon brush plasma plume operated at atmospheric pressure

物理学报. 2021, 70(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20202091>