

固定功率下大气压交流氩气等离子体射流的光谱特性*

刘坤^{1)2)†} 项红甫¹⁾²⁾ 周雄峰¹⁾²⁾ 夏昊天¹⁾²⁾ 李华³⁾

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

2) (重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

3) (桂林电子科技大学生命与环境科学学院, 桂林 541004)

(2023年3月2日收到; 2023年3月16日收到修改稿)

大气压 kHz 频率交流等离子体射流具有广泛的应用前景, 而目前研究电源参数影响时只能探究单一驱动参数变化时的射流放电规律, 这无疑也会耦合进功率对射流放电的影响, 不能体现驱动参数本身对放电的影响. 本研究利用自研的可调脉冲调制占空比的交流电源驱动大气压氩气等离子体射流, 结合发射光谱与吸收光谱诊断, 研究了固定放电功率下不同电压、频率和脉冲调制占空比参数对等离子体射流的气体温度 T_g 、电子激发温度 T_{exc} 、电子密度 n_e 、OH 粒子数密度等性能的影响. 结果表明, 固定功率下, 电子密度不会随着驱动参数的改变而变化, 而气体温度、电子激发温度、OH 粒子数密度变化受脉冲调制占空比影响最大; 其次是电压影响, 频率影响最小. 降低频率提高电压时气体温度和电子激发温度会升高, OH 粒子数密度会增大; 而降低脉冲调制占空比提高电压时气体温度和电子激发温度会降低, OH 粒子数密度会减少. 此外, 降低脉冲调制占空比能够使得大气压等离子体射流在更低的气体温度下产生更多的 OH 活性粒子.

关键词: 大气压等离子体射流, 光谱诊断, 等离子体表征, 活性粒子

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

DOI: 10.7498/aps.72.20230307

1 引言

大气压 kHz 频率交流氩气等离子体射流由于其具有气体温度适中、产生便捷、成本较低等优势, 被广泛应用于材料表面清洁与蚀刻^[1-3]、聚合物材料表面改性^[4,5]、创口消毒^[6,7]以及癌细胞处理^[8-10]等多种不同的领域. 等离子体射流的物理性质和产生的化学自由基会显著影响应用的效果^[11-13], 而驱动产生等离子体射流的电源参数是影响等离子体射流物理化学性质的重要因素. 许多研究者都对不同电源参数下的大气压等离子体射流特性进行了研究. 例如 Xiong 等^[14]研究了不同驱动电压下等

离子体射流的形貌变化规律, 发现射流长度随着电源电压的增大呈现变长. Kim 等^[15]研究了不同频率下等离子体射流的形貌变化, 发现在 kHz 频率范围内, 等离子体射流的长度会随着频率的增加而减小. Gott 等^[16]研究了不同电压参数下大气压氩气等离子体射流的气体温度和产生的 OH 特性, 发现随着电压的增大等离子体气体温度和 OH 都会呈现上升趋势. Qian 等^[17]研究了频率对大气压氩气等离子体气体温度的影响, 发现随着频率的增大等离子体气体温度会升高. Moon 等^[18]研究了频率对大气压氩气等离子体射流电子密度的影响, 发现随着频率的增大, 电子漂移损耗的降低会使得电子密度大幅提高. 可以看出, 大多数研究都是通过

* 国家自然科学基金 (批准号: 51877021)、电力设备电气绝缘国家重点实验室基金 (批准号: EIPE21204) 和广西自动检测技术与仪器重点实验室基金 (批准号: YQ21204) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liukun@cqu.edu.cn

保持电压恒定改变频率, 或者保持频率恒定改变电压的方法来进行实验. 但在这个过程中, 作为大气压等离子体射流放电最重要输入参数之一的放电功率也在发生变化. 功率的变化必然会导致等离子体特性也发生变化. 那么在固定功率条件下, 电源驱动参数变化对射流性质的影响研究如何? 这是有待进一步研究的. 此外, 除了电压和频率参数可调外, kHz 频率范围的交流电源还能通过脉冲调制的方式输出脉冲调制占空比可调的间歇性交流电压, 实现放电平均电流可调. 在放电过程中平均电流一般只能随驱动电压变化而改变, 而通过脉冲调制占空比的变化来调节平均电流, 可以在不引起电压和频率变化的情况下就能实现单独改变输出平均电流^[19]. 但是, 目前市面上只有少数交流电源具备脉冲调制的功能, 而且电压稳定性不够高. 这

就导致很少有研究者对脉冲调制输出占空比这一能直接改变平均输出电流的重要参数进行研究.

本论文以大气压氩气等离子体射流为研究对象, 使用自研的可调脉冲调制占空比的高压交流电源, 在固定功率的条件下, 通过调整驱动电源的电压、频率和脉冲调制占空比, 结合放电等离子体发射光谱测量和紫外吸收光谱测量, 研究了不同电源驱动参数变化对等离子体射流的气体温度、电子密度、电子激发温度等物理性质以及·OH 等化学性质的影响.

2 实验装置与仪器

实验装置如图 1(a) 所示, 其主要由等离子体射流系统和光学诊断系统两部分自组成. 等离子体射流装置由自制 T 型石英玻璃管 (直管内径

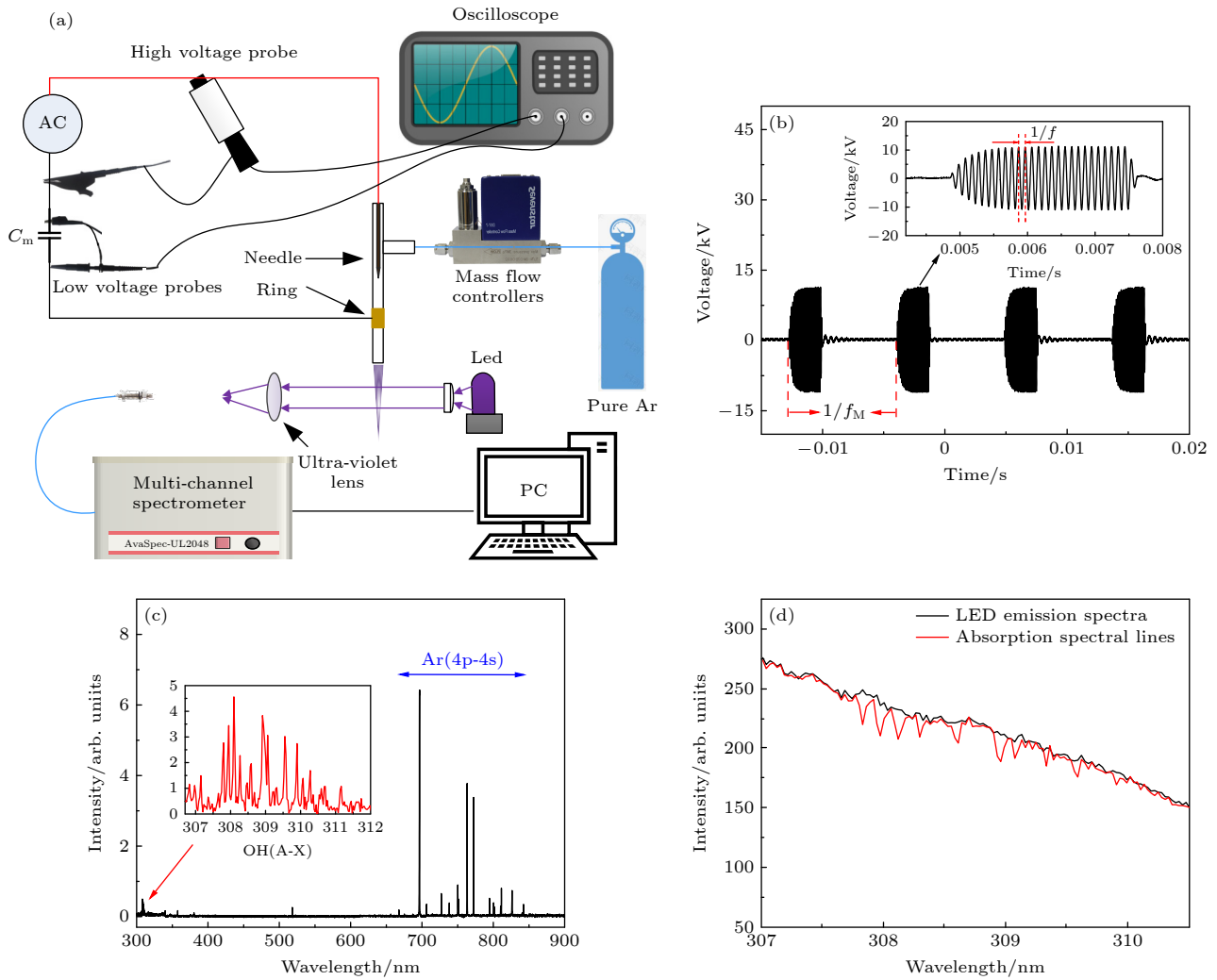


图 1 大气压氩气等离子体射流的 (a) 实验装置、(b) 驱动电源输出电压波形、(c) 发射光谱图和 (d) 吸收光谱图的示意图

Fig. 1. Schematic diagram of the (a) experimental device, (b) output voltage waveform of driving power, (c) emission spectrum, and (d) absorption spectrum of atmospheric pressure argon plasma jet.

6 mm, 厚度 1 mm) 和铜环电极 (宽 10 mm) 以及钨钢针电极组成. 钨钢针电极连接自研的高压交流电源作为高压电极同轴伸入石英玻璃管直管中, 其外径为 5 mm, 长度为 30 mm, 尖端曲率半径为 50 μm . 而铜环电极作为接地电极缠绕在直管外侧距底端管口 8 mm 处, 与高压电极底端之间的距离为 6 mm. 高压电源为自研的可调脉冲调制占空比电源, 脉冲间隙频率固定 100 Hz, 输出参数为电压 4—20 kV 可调, 频率 4—20 kHz 可调, 脉冲调制占空比 10%—100% 可调, 电源输出电压波形示意图如图 1(b) 所示. 此时间隙频率 f_M 为 100 Hz, 电压 U 为 10.0 kV, 频率 f 为 11 kHz, 脉冲调制占空比 η 为 30%. 实验中电压波形由高压探头 (型号 Tektronix P6015A) 采集并由示波器 (型号 Tektronix DPO2014) 显示; 在低压端串联一个电容 C_m , 电容容值为 0.44 pF, 利用电容电压为通过其的电荷量的特性, 通过低压探头 (型号 Tektronix TPP0051) 采集其两端的电压波形. 通过这个电压计算得到流过此电容的电流, 也就是通过等离子体射流的电流, 最后利用李萨如图计算得到放电功率 [20,21]. 实验中为了保证交流电源的电压、频率、脉冲调制占空比等参数的可调范围适中, 放电功率固定为 2 W. 此时对应的的具体电压、频率、脉冲调制占空比 (间隙频率保持在 100 Hz) 数值在表 1 中给出. 储气瓶中的 Ar (纯度 99.99%) 由质量流量控制器控制, 以 5 L/min 的流速装置经石英玻璃管支管通入到放电区域.

表 1 固定功率 2 W 时不同频率和脉冲调制占空比下的电压 (单位: kV)

Table 1. The voltage (unit: kV) at different frequencies and duty cycles under a constant power of 2 W.

频率/kHz	脉冲调制占空比			
	100%	70%	50%	30%
7	11.0	13.0	14.5	16.4
8	10.4	12.4	14.0	15.7
9	9.9	11.9	13.5	15.1
10	9.3	11.4	13.0	14.6
11	8.8	11.0	12.5	13.9
12	8.4	10.4	12.0	13.1
13	7.9	9.7	11.0	11.9
14	7.5	8.9	10.0	11.3

光学诊断系统由光谱仪和紫外光源组成, 并设置了允许紫外光束轴向穿过等离子体的光路 (如图 1(a) 所示). 光由透镜 (焦距 75 mm) 聚焦, 经光纤传输到光谱仪检测. 光谱仪型号为 AvaSpect-2048-8, 狭缝宽度为 5 μm , 光谱分辨率为 0.042 nm, 光栅刻度为 1800 线/mm, 光谱测量范围覆盖 270.0—900.0 nm, 曝光时间设定为 200 ms. 紫外光源为紫外发光二极管 (型号 Hamamatsu L6302-40). 紫外光源关闭时, 可以利用光学系统测量等离子体射流的发射光谱 (如图 1(c) 所示), 此时的放电条件为电压 10 kV, 频率为 12 kHz, 脉冲调制占空比为 100%. 在光谱诊断中, 其具体测量位置为等离子体射流装置玻璃管的喷口下方 4 mm 处. 实验中大气压氩气等离子体射流的发射光谱主要包含 OH(A-X) 的谱带和 Ar(4p-4s) 的谱线. 紫外光源打开时, 可以利用光学系统测量等离子体射流的吸收光谱. 实验中利用基态·OH 对 309.0 nm 附近处的紫外光的吸收特性进行吸收光谱法原位测量 (如图 1(d) 所示), 然后基于朗博-比尔定律可以得到基态·OH 的绝对粒子数密度 [22].

3 结果与讨论

3.1 气体温度

在大气压条件下, 分子的转动温度和粒子的平均平动温度之间达到热平衡的弛豫时间很短, 因此放电等离子体中分子的转动温度 T_{rot} 可以等同于等离子体的气体温度 T_g [23–25]. 实验中大气压等离子体射流很容易能观测到 OH(A-X) 的发射光谱 (如图 1(c) 所示), 此时放电条件为电压 14.6 kV, 频率 12 kHz, 脉冲调制占空比 30%. 利用 Lifbase 软件可以对其谱线进行拟合得到 OH(A) 的转动温度 T_{rot} (如图 2(a) 所示), 将其近似代替为等离子体气体温度 T_g .

图 2(b) 所示为固定功率 2 W 时不同脉冲调制占空比下大气压氩气等离子体射流的气体温度 T_g 随频率的变化情况. 由图 2(b) 可以看出, 不同脉冲调制占空比下随着频率的增加等离子体气体温度都会呈现下降趋势. 例如随着频率从 7 kHz 增加到 14 kHz, 在脉冲调制占空比 100%, 70%, 50% 和 30% 的情况下, 气体温度会分别从 386, 382, 378 和 364 K 下降到 330, 326, 325, 315 K. 虽然 Liu 等 [26] 报道放电频率增加时由于热效应气体温

度会呈现上升趋势,但是我们在实验中却发现,固定功率下频率的增加会导致气体温度的降低.这是因为固定功率下增加驱动频率时,电压会逐渐降低(如表1所列),这将导致维持等离子体射流与管外粒子之间反应的电场强度降低.因此,注入反应区域的能量降低,粒子之间的碰撞变得更弱,该区域的气体温度也就随之降低.这也说明固定功率下电压对气体温度的影响要大于频率的影响.此外,从图2(b)中还可以看出,相同频率下随着脉冲调制占空比的降低,等离子体气体温度会呈现下降趋势.例如频率8 kHz时,脉冲调制占空比从100%降低到30%时,等离子体气体温度会从328 K下降到358 K;频率12 kHz时,脉冲调制占空比从100%降低到30%时,等离子体气体温度会从346 K下降到322 K.固定功率下保持频率一定,随着脉冲调制占空比的降低电压会呈现增加趋势,

但是气体温度会呈现下降趋势,这说明此时脉冲调制占空比对气体温度的影响要大于电压的影响.在频率保持一致的情况下,虽然脉冲调制占空比降低时电场强度随着电压升高而增强了,但是此时平均电流降低意味注入反应体系的能量降低,从而使得气体温度降低.

3.2 电子激发温度

大气压氩气等离子体射流的发射光谱中(如图1(c)所示)能观测到丰富的Ar原子谱线,因此可以利用玻尔兹曼图解法求解得到等离子体的电子激发温度 T_{exc} ^[27,28].玻尔兹曼图解法示意图如图3(a)所示,此时放电条件为电压12.0 kV,频率12.0 kHz,脉冲调制占空比50%,其数学表达式为

$$\ln \left(\frac{I_{ji} \lambda_{ji}}{g_j A_{ji}} \right) = - \frac{E_j}{k_B T_{\text{exc}}} + C,$$

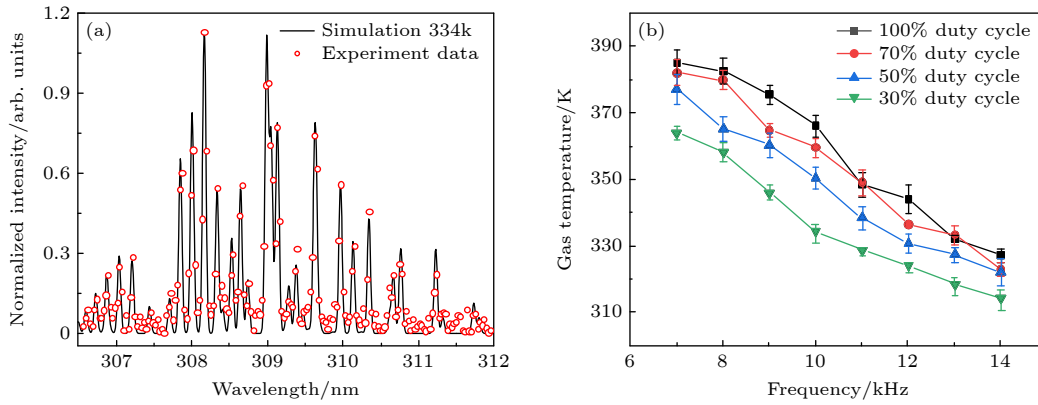


图2 大气压氩气等离子体射流气体温度 (a) 拟合示意图和 (b) 随驱动参数变化趋势

Fig. 2. (a) Fitting diagram of the gas temperature of atmospheric pressure argon plasma jet and (b) the vibration trend with driving parameters.

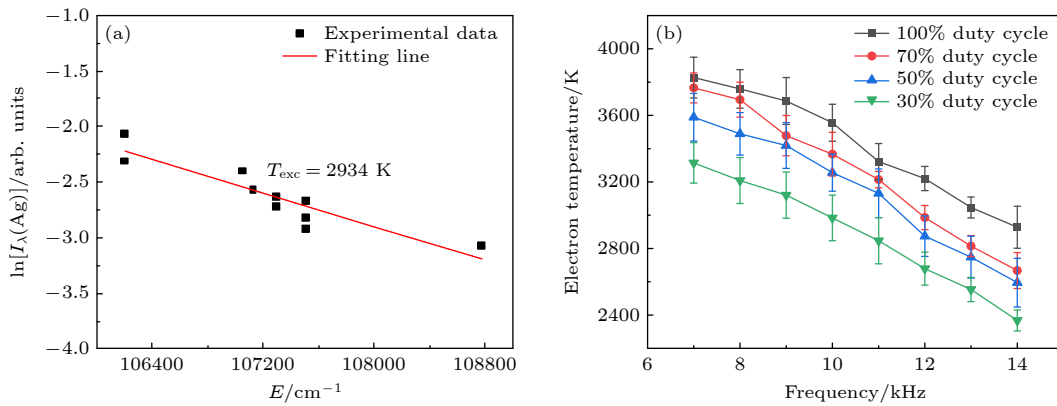


图3 大气压氩气等离子体射流电子激发温度的 (a) 玻尔兹曼图解法示意图和 (b) 随驱动参数变化趋势

Fig. 3. (a) Boltzmann diagram of the electron excitation temperature of atmospheric pressure argon plasma jet and (b) the vibration trend with driving parameters.

其中 I_{ji} 表示 Ar 原子从高能级 j 态向低能级 i 态跃迁的发射光谱的强度; λ_{ji} 表示跃迁形成的谱线的中心波长; g_j 表示能级 j 的统计权重; A_{ji} 表示自发辐射的爱因斯坦跃迁概率; E_j 表示能级 j 的能量; h_B 表示玻尔兹曼常数; C 表示与原子类型相关的常数. 计算电子激发温度 T_{exc} 所选取的 Ar 原子谱线在表 2 中给出.

表 2 玻尔兹曼图解法计算电子激发温度用到的 Ar 原子谱线相关参数

Table 2. The relevant parameters of Ar atomic spectral lines used in calculating electron excitation temperature by Boltzmann diagram method.

λ_{ji}/nm	E_j/cm^{-1}	g_j	$A_{ji}/(10^6 \text{ s}^{-1})$
706.7	107289.7	5	3.80
727.3	107496.4	3	1.83
738.4	107289.7	5	8.47
750.4	108722.2	1	44.50
751.5	107054.3	1	40.20
763.5	106237.5	5	24.50
772.4	107496.4	3	11.70
794.8	107131.7	3	18.60
800.6	106237.5	5	4.90
801.5	105617.3	5	9.28
826.5	107496.4	3	15.30

图 3(b) 所示为固定功率 2 W 时不同脉冲调制占空比下大气压氩气等离子体射流电子激发温度 T_{exc} 随频率的变化情况. 由图 3(b) 可以看出, 与对气体温度的影响类似, 固定功率下, 对电子激发温度参数影响最大的驱动参数是脉冲调制占空比, 其次是电压, 而频率影响最小. 即使电压降低, 增加占空比也能使电子激发温度上升. 例如频率 7 kHz 情况下, 随着脉冲调制占空比从 30% 增加到 100%, 尽管此时电压能从 16.4 kV 降低到 11.0 kV, 但是随着放电平均电流增大, 此时电子激发温度还是能从 3315 K 上升到 3766 K. 此外, 电压降低时, 即使增加频率电子激发温度还是呈现上升趋势. 也就是在不同脉冲调制占空比下, 电子激发温度会随着频率增加时电压的降低而下降. 例如 70% 脉冲调制占空比下, 频率从 7 kHz 增加到 14 kHz 时, 电压会从 13.0 kV 下降到 8.9 kV, 此时电子激发温度也会从 3766 K 下降到 2668 K. 这是因为虽然频率增加会使得空间内粒子碰撞加剧, 但是由于电场强度降低, 电子在空间内获得的能量降低, 使得电子激发温度降低.

3.3 电子密度

实验中利用 Ar(4p-4s) 在 696.5 nm 处谱线的斯塔克展宽 $\Delta\lambda_{\text{stark}}$ 来计算大气压氩气等离子体射流的电子密度 n_e ^[29], 其表达式为

$$\Delta\lambda_{\text{stark}} = 2 \times [1 + 1.75 \times 10^{-4} \times n_e^{\frac{1}{4}} \alpha (1 - 0.068 n_e^{1/6} T_e^{-1/2})] \times 10^{-16} \omega n_e, \quad (1)$$

其中 α 表示碰撞参数; T_e 表示电子温度; ω 表示电子碰撞半高宽. 根据 Tu 等^[30] 的研究, 一个标准大气压下, α , T_e , ω 这三个参数近似取值为 0.032, 1 eV 和 0.00537 nm/cm³. 谱线展宽是辐射原子或离子环境的复杂函数. 测得的谱线形状是几种展宽机制综合作用的结果^[31]. Ar 原子谱线的半面积宽 $\Delta\lambda$ 与洛伦兹展宽 $\Delta\lambda_L$ 和高斯展宽 $\Delta\lambda_G$ 满足^[32]:

$$\Delta\lambda = [\Delta\lambda_G^2 + (\Delta\lambda_L/2)^2]^{0.5} + \Delta\lambda_L/2, \quad (2)$$

其中高斯展宽 $\Delta\lambda_G$ 主要由多普勒展宽 $\Delta\lambda_D$ 和仪器展宽 $\Delta\lambda_{\text{in}}$ 构成:

$$\Delta\lambda_G = (\Delta\lambda_D^2 + \Delta\lambda_{\text{in}}^2)^{0.5}, \quad (3)$$

其中仪器展宽由标准汞灯对实验所用光谱仪进行标定测量得到, 为 0.02 nm. 多普勒展宽计算公式为^[33]:

$$\Delta\lambda_D = 7.16 \times 10^{-7} \lambda_0 \left(\frac{T_g}{M} \right)^{0.5}, \quad (4)$$

其中 λ_0 为所计算谱线的中心波长, M 为物质的量. 洛伦兹展宽主要由范德瓦耳斯展宽 $\Delta\lambda_{\text{vdw}}$ 和斯塔克展宽 $\Delta\lambda_S$ 构成, 且等于两者之和. 范德瓦耳斯 $\Delta\lambda_{\text{vdw}}$ 展宽是激发辐射源与其他辐射源碰撞所产生的. 它是影响谱线最终展宽的重要因素, 计算公式如下^[33]:

$$\lambda_{\text{vdw}} = 6.8 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{T_g^{0.7}} \right). \quad (5)$$

在该实验中, 通过 (3) 式和 (4) 式计算得到的高斯展宽, 再根据 (5) 式算出范德瓦耳斯展宽; 根据 (2) 式经过反卷积可以得到总洛伦兹半高宽, 减去范德瓦耳斯展宽即可得到斯塔克展宽, 最后根据 (1) 式计算得出电子密度. 图 4(a) 展示的是在电压 10.0 kV, 频率 12 kHz, 脉冲调制占空比 100% 时等离子体射流的电子密度 n_e 拟合图.

图 4(b) 所示为固定功率 2 W 时不同脉冲调制占空比下大气压氩气等离子体射流电子密度 n_e 随频率的变化情况. 可以发现, 随着脉冲调制占空比、频率、电压的改变, 不同条件下电子密度没有

发生明显的变化, 在 $2.8 \times 10^{15} \text{—} 3.3 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 范围内波动. 这说明大气压氩气等离子体射流电子密度只受到放电功率的影响, 功率不变时脉冲调制占空比、频率、电压参数的综合变化不会影响电子密度. 实验中等离子体的功率和针环电极的相对位置是固定的, 因此降低驱动频率或者脉冲调制占空比的同时会导致极间电压增加. 在交流电场的作用下, 电子将在两个电极之间来回移动. 单独改变频率时, 频率的增加会导致电子运动的周期变短, 从而限制电子在半个周期时间内漂移的距离, 因此更多的电子将约束在放电区域. 单独改变电压或者脉冲调制占空比时, 电压或者脉冲调制占空比的减小会使得注入等离子体的能量减少, 导致产生的电子减少. 固定功率下, 脉冲调制占空比一定时频率增加会使得电压减小, 而频率一定时脉冲调制占空比增加也会使得电压减小. 虽然脉冲调制占空比、频

率、电压任一参数的变化都会影响电子密度的变化. 而在固定功率下, 固定任一参数时, 其余两个参数引起的变化趋势是相反相互抵消的, 因此导致电子密度几乎恒定.

3.4 OH 粒子数密度

实验中·OH 粒子数密度通过前文介绍的原位吸收光谱法得到. 图 5(a) 所示为固定功率 2 W 时不同脉冲调制占空比下大气压氩气等离子体射流·OH 粒子数密度随频率的变化情况. 由图 5(a) 可以看到, 脉冲调制占空比一定时, OH 粒子数密度会随着频率增加时电压的降低而降低. 例如在脉冲调制占空比 50% 时, 频率从 7 kHz 增加到 14 kHz, ·OH 粒子数密度会从 $4.49 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 降低到 $1.15 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 此外, 频率一定时, 尽管降低脉冲调制占空比电压会增大, 但是·OH 粒子数密度会随着脉冲

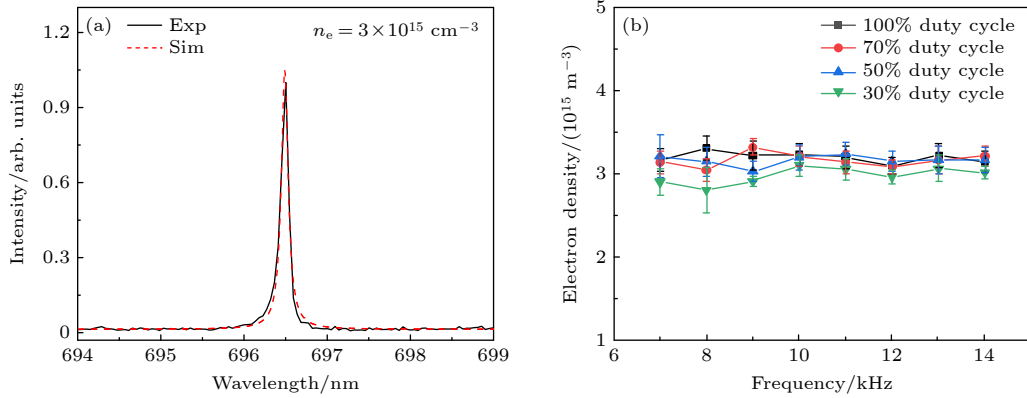


图 4 大气压氩气等离子体射流电子密度的 (a) 拟合示意图和 (b) 随驱动参数变化趋势

Fig. 4. (a) Fitting diagram of electron density of atmospheric pressure argon plasma jet and (b) variation trend with driving parameters.

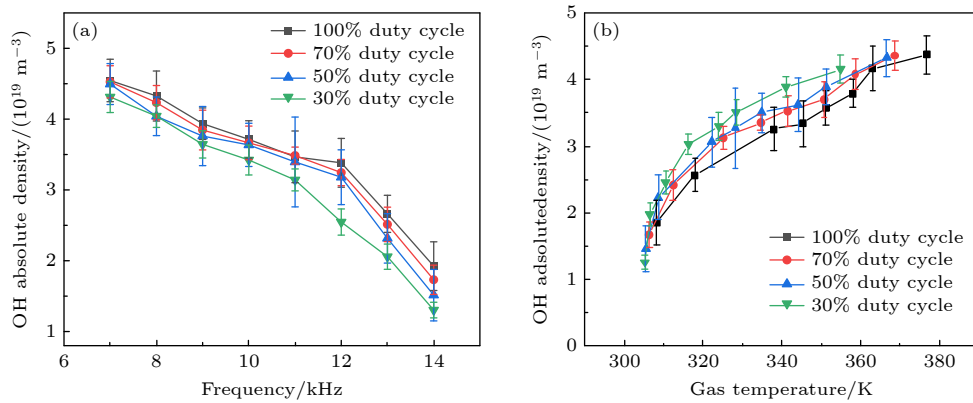


图 5 大气压氩气等离子体射流·OH 粒子数密度随 (a) 驱动参数变化和 (b) 气体温度变化的趋势

Fig. 5. The trend of ·OH particle number density of atmospheric pressure argon plasma jet variation with (a) driving parameters and (b) gas temperature.

调制占空比降低而降低. 例如频率 12 kHz 时, 脉冲调制占空比从 100% 降低到 30%, $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度会从 $3.38 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ 降低到 $2.55 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$. 大气压氩气等离子体射流中 $\cdot\text{OH}$ 的产生路径主要有三种 (如表 3 中反应式所列). 一种是 H_2O 与亚稳态 Ar^* 原子的反应 (反应式 R1—R2), 另一种是 H_2O^+ 的解离电子离子重组 (反应式 R3—R4), 最后一种是由电子直接解离激发 H_2O 产生 (反应式 R5—R6). 对于反应式 R1—R6, 可以发现产生的 $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度取决于水分子、亚稳态 Ar^* 以及电子激发温度、电子密度等参数. 大气压氩气等离子体射流时水分子主要来自于环境空气, 可以视为不变. 而随着频率升高时电压会降低, 导致电场强度降低, 亚稳态 Ar^* 原子密度和电子激发温度都随之降低, 从而导致 $\cdot\text{OH}$ 的生成受到限制, 导致其密度下降. 与气体温度和电子激发温度的变化趋势类似, 虽然随着脉冲调制占空比的下降, 电压在增大, 但是等离子体生成的 $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度也是在减少.

表 3 大气压氩气等离子体射流生成 $\cdot\text{OH}$ 的相关反应式
Table 3. The relevant generation pathways of $\cdot\text{OH}$ in atmospheric pressure argon plasma jet.

反应方程式	反应系数	编号	文献
$\text{Ar} + \text{e} \rightarrow \text{Ar}^* + \text{e}$	$f(T_e)$	R1	[34]
$\text{Ar}^* + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ar} + \cdot\text{H} + \cdot\text{OH}$	2.10×10^{-10}	R2	[35]
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}^+ + 2 \text{e}$	$f(T_e)$	R3	[36]
$\text{e} + \text{H}_2\text{O}^+ \rightarrow \cdot\text{H} + \cdot\text{OH}$	1.38×10^{-8}	R4	[35]
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{e} + \cdot\text{H} + \cdot\text{OH}$	$f(T_e)$	R5	[37]
$\text{e} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{e} + \text{H}^+ + \cdot\text{OH}$	$f(T_e)$	R6	[36]

大气压等离子体射流放电面向应用时, 气体温度和活性粒子数密度是最重要的性能指标. 图 5(b) 展示了不同放电驱动参数下, $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度和气体温度的对应曲线. 由图 5(b) 可以看出, $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度与气体温度呈现正相关关系. 如果调节放电参数使得气体温度增加, 此时放电产生 $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度也会对应增多. 但是调节放电参数来产生同样密度的 $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度时, 可以在气体温度降低的情况下实现. 例如随着脉冲调制占空比从 100% 下降到 30% 时, 在相同的气体温度 340 K 时, $\cdot\text{OH}$ 的产量反而能从 $3.25 \times 10^{19} / \text{m}^3$ 提升到 $3.91 \times 10^{19} / \text{m}^3$. 也就是说产生同样密度的 $\cdot\text{OH}$, 交流电源的脉冲调制占空比越低, 此时大气压等离子体射流的气体温

度也就越低, 这对于要求低气体温度、高活性粒子密度的生物医学领域应用具有重大的意义.

4 结 论

本研究利用自研的可调脉冲调制占空比交流电源驱动大气压氩气等离子体射流, 研究了固定放电功率 2 W 时不同的脉冲调制占空比、输出电压、频率等电源驱动参数对等离子体射流的气体温度 T_g 、电子激发温度 T_{exc} 、电子密度 n_e 、 $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度等性能的影响. 主要结论如下:

1) 固定放电功率下, 对大气压氩气等离子体射流的气体温度 T_g 、电子激发温度 T_{exc} 、 $\cdot\text{OH}$ 粒子数密度影响最大的驱动参数是脉冲调制占空比, 其次是电压, 而频率影响最小;

2) 固定放电功率下, 大气压氩气等离子体射流的电子密度 n_e 基本保持稳定. 脉冲调制占空比、电压、频率参数的改变不会影响电子密度;

3) 固定功率下, 通过降低交流电源的脉冲调制占空比, 可以在更低的气体温度 T_g 下获得更高粒子数密度的 $\cdot\text{OH}$.

本研究为固定功率下放电参数对大气压等离子体射流性质的变化影响提供了新的见解, 能够为产生低气体温度、高活性粒子密度的等离子体射流的电源参数选取提供重要指导, 有利于推动大气压等离子体射流在生物医学等领域的发展.

参考文献

- [1] Fallon M, Kennedy S, Kumar S, Daniels S, Humphreys H 2021 *Plasma Med.* **11** 15
- [2] Wang T, Wang J H, Wang S Q, lv L, Li M, Shi L P 2021 *Appl. Surf. Sci.* **570** 151258
- [3] Zhang H B, Chen Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 095203 (in Chinese) [张海宝, 陈强 2021 物理学报 **70** 095203]
- [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] Wang R X, Xia Z C, Kong X H, Xue S, Wang H Y 2022 *Surf. Coat. Technol.* **437** 128365
- [6] Shimizu T, Ikehara Y 2017 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **50** 503001
- [7] Huang Y M, Chang W C, Hsu C L 2021 *Food Res. Int.* **141** 110108
- [8] Lu X P, Keudar M, Laroussi M, Choi E, Szili E J, Ostrikov K 2019 *Mater. Sci. Eng., R* **138** 36
- [9] Schweigert I, Zakrevsky D, Milakhina E, Gugin P, Biryukov M, Patrakova E, Koval O 2022 *Plasma Phys. Control. Fusion* **64** 044015
- [10] Pang B L, Liu Z J, Wang S T, Gao Y T, Zhang H Y, Zhang F, Tantai X M, Xu D H, Liu D X, Kong M G 2021 *J. Appl.*

- Phys.* **130** 153301
- [11] 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
- [12] 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
- [13] 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
- [14] Xiong Q, Lu X, Ostrikov K, Jiang Z Y 2009 *Phys. Plasmas* **16** 043505
- [15] Kim D B, Rhee J K, Gweon B, Moon S Y, Choe W 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 151502
- [16] Gott R P, Xu K G 2019 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **47** 4988
- [17] Qian M Y, Fan Q Q, Ren C S, Wang D Z, Nie Q Y, Zhang J L, Wen X Q 2012 *Thin Solid Films* **521** 265
- [18] Moon S Y, Kim D B, Gweon B, Choe W 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 2215006
- [19] Long Y X, Li H X, Meng X S, Li J, Xiang Z C 2018 *Mod. Phys. Lett. B* **32** 1850315
- [20] Yuan H, Wang W C, Yang D Z, Zhao Z L, Zhang L, Wang S 2017 *Plasma Sci. Technol.* **19** 125401
- [21] Fu Q, Wang C, Wang Y F, Chang Z S 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 115204 (in Chinese) [付强, 王聪, 王语菲, 常正实 2022 物理学报 **71** 115204]
- [22] Liu K, Lei J, Zheng Z, Zhu Z, Liu S 2018 *Appl. Surf. Sci.* **458** 183
- [23] 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
- [24] 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
- [25] Liu K, Geng W Q, Zhou X F, Duan Q S, Zheng Z F, Ostrikov K 2023 *Plasma Sources Sci. Technol.* **32** 025005
- [26] 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]
- [27] Yuan H, Feng J, Yang D Z, Zhou X F, Liang J P, Zhang L, Zhao Z L, Wang W C 2020 *J. Appl. Phys.* **128** 093303
- [28] Wang W, Wang Y G, WU Z H, Rao J F, Jiang S, Li Z 2023 *Spectrosc. Spectral Anal.* **43** 455 (in Chinese) [王伟, 王永刚, 吴忠航, 饶俊峰, 姜松, 李夜 2023 光谱学与光谱分析 **43** 455]
- [29] Liu K, Xia H T, Yang M H, Geng W Q, Zuo J, Ostrikov K 2022 *Vacuum* **198** 110901
- [30] Tu X, Cheron B G, Yan J H, Cen K F 2007 *Plasma Sources Sci. Technol.* **16** 803
- [31] Peng B F, Jiang N, Shang K F, Lu N, Li J, Wu Y 2022 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **55** 265202
- [32] Bruggeman P, Schram D, Gonzalez M 2009 *Plasma Sources Sci. Technol.* **18** 025017
- [33] Belostotskiy S G, Ouk T, Donnelly V M 2010 *J. Appl. Phys.* **107** 05330
- [34] Zhou X F, Wang W C, Yang D Z, Liang J P, Zhao Z L, Yuan H 2019 *Plasma Process Polym.* **16** e1800124
- [35] Gaens W V, Bogaerts A 2013 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **46** 275201
- [36] Itikawa Y, Mason N 2005 *J. Phys. Chem. Ref. Data* **34** 1
- [37] Zhou X F, Zhao Z L, Liang J P, Yuan H, Wang W C, Yang D Z 2019 *Plasma Process Polym.* **16** e1900001

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

Liu Kun^{1)2)†} Xiang Hong-Fu¹⁾²⁾ Zhou Xiong-Feng¹⁾²⁾
Xia Hao-Tian¹⁾²⁾ Li Hua³⁾

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

2) (*School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*)

3) (*College of Life and Environmental Sciences, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China*)

(Received 2 March 2023; revised manuscript received 16 March 2023)

Abstract

In the application of atmospheric pressure plasma jet, because the frequency of AC power supply is limited in the kHz range, the research on the influence of power supply electrical parameters on discharge is basically aimed at the variation of plasma jet characteristics with a single driving electrical parameter (such as voltage and frequency). However, the discharge power usually changes with a single electrical parameter changing, which can undoubtedly affect the discharge performances including the plasma physical parameters and generated reactive species, resulting in the failure to reflect the influence of the single driving parameter on the discharge. In this study, an atmospheric pressure argon plasma jet is driven by a home-made AC power supply with adjustable pulse modulated duty cycle. And combining the diagnosis of the optical emission spectrum and the optical absorption spectrum, the influences of the voltage, frequency and pulse modulated duty cycle parameters on the gas temperature T_g , electron excitation temperature T_{exc} , electron density n_e , and OH radical particle number density of the plasma jet are studied under a constant discharge power of 2 W. The results show that at the constant power, the electron density n_e does not change with the variation of electrical parameters as the linkage change of electrical parameters will offset the influence of a single parameter on the electron density, while the gas temperature T_g , electron excitation temperature T_{exc} , and OH radical particle density are most affected by the pulse modulated duty cycle, followed by driving voltage, and the frequency effect is the smallest. Under the constant power, as the frequency decreases, the voltage will increase, and also the gas temperature T_g , electron excitation temperature T_{exc} , and OH radical particle number density will increase. On the contrary, although the voltage also increases as the pulse modulated duty cycle decreases, the gas temperature T_g , electron excitation temperature T_{exc} , and OH radical particle number density are all reduced. In addition, the results indicate that reducing the duty cycle of AC power can make the atmospheric pressure plasma jet produce more OH radicals at lower gas temperature. This study provides a new insight into the influence of electrical parameters on the characteristics of atmospheric pressure plasma jets under constant power, and also presents a guidance for choosing power parameters of plasma jets with low gas temperature and high density of reactive species, which is conducive to the development of atmospheric pressure plasma jets in biomedicine and other fields.

Keywords: atmospheric pressure plasma jet, spectral diagnosis, plasma characterization, reactive species

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

DOI: 10.7498/aps.72.20230307

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51877021), the Foundation of State Key Laboratory of Electrical Insulation for Power Equipment, China (Grant No. EIPE21204), and the Foundation of Guangxi Key Laboratory of Automatic Testing Technology and Instruments, China (Grant No. YQ21204).

† Corresponding author. E-mail: liukun@cqu.edu.cn



固定功率下大气压交流氩气等离子体射流的光谱特性

刘坤 项红甫 周雄峰 夏昊天 李华

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

Liu Kun Xiang Hong-Fu Zhou Xiong-Feng Xia Hao-Tian Li Hua

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 115201 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230307

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230307>

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

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>

亚大气压六相交流电弧等离子体射流特性研究:实验测量

Characteristics of meso-pressure six-phase alternative current arc discharge plasma jet: Experiments

物理学报. 2018, 67(4): 045201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172556>

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>

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>

亚大气压六相交流电弧放电等离子体射流特性数值模拟

Numerical modelling for characteristics of the meso-pressure six-phase alternative current arc discharge plasma jet

物理学报. 2018, 67(5): 055201 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172557>