

DOI:10.16136/j.joel.2024.11.0171

基于发射光谱的大气放电等离子体温度特性分析

杨涛¹, 王军^{2,3*}, 董兴法²

(1. 苏州科技大学 物理科学与技术学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学 电子与信息工程学院, 江苏 苏州 215009; 3. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 针对直接测量等离子体射流温度操作繁琐且粒子种类易受干扰的问题, 本文基于发射光谱法分析了不同功率下大气放电等离子体射流的温度特性。通过针-筒电晕放电装置, 在气压为 0.2 MPa 的条件下, 以空气为介质对不同放电功率下的等离子体发射光谱进行诊断。采用玻耳兹曼斜率法和双谱线强度法对粒子的振动温度和电子温度进行计算, 并通过 LIFBASE 软件对分子的转动温度进行拟合。计算结果表明, 随着功率从 500 W 上升到 1000 W, 发射光谱相对强度随着功率的升高而增强, 同时活性粒子的种类也在增加, 粒子的振动温度从 5200 K 上升至 7000 K 左右, 电子激发温度从 16700 K 上升至 17200 K 左右, 拟合出分子的转动温度在 300—550 K 之间。研究表明, 放电功率直接影响等离子体射流温度和粒子的种类, 并且该研究可对等离子体表面处理应用提供参考。

关键词: 发射光谱; 等离子体射流; 激发温度; 振动温度; 转动温度

中图分类号: O433.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-0086(2024)11-1201-07

Temperature characteristics analysis of atmospheric discharge plasma based on emission spectrum

YANG Tao¹, WANG Jun^{2,3*}, DONG Xingfa²

(1. School of Physical Science and Technology, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China; 2. School of Electronic and Information Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215009, China; 3. Changchun Institute of Optical, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China)

Abstract: The direct measurement operation of plasma jet temperature is complicated and the particles types are easily disturbed, in this paper, the temperature characteristics of atmospheric discharge plasma jets are analyzed based on emission spectroscopy at different powers. The plasma emission spectra at different discharge powers are diagnosed by a pin-canister corona discharge device with air as the medium at a atmospheric pressure of 0.2 MPa. The vibration temperature and electron temperature of particles are calculated by Boltzmann slope method and bispectral intensity method, and the molecular rotational temperature is fitted by LIFBASE software. The results show that with the increase of power from 500 W to 1000 W, the relative intensity of emission spectrum increases with power, and the types of active particles also increase, the vibration temperature of particles increase from 5200 K to 7000 K, and the electron excitation temperature increases from 16700 K to 17200 K, the fitting molecular rotation temperature is between 300 and 550 K. It is concluded that the discharge power directly affects the plasma jet temperature and particle type, and this study can provide reference for the application of plasma surface treatment.

Key words: emission spectrum; plasma jet; excitation temperature; vibration temperature; rotational temperature

* E-mail: wjyhl@126.com

收稿日期: 2023-04-07 修订日期: 2023-07-25

基金项目: “十四五”江苏省重点学科项目(2021135) 资助项目

0 引言

大气等离子体射流根据放电方式,可以产生不同温度的等离子体射流,同时改变工作气体可以产生不同活性粒子的等离子体射流,因此在半导体制造、材料改性及刻蚀、材料表面处理、电子屏幕、消毒杀菌^[1]等重点领域有着广阔的应用前景且等离子体工艺与传统工艺相比具有很大的优势,所以国内外也掀起了对等离子体研究的热潮。现如今等离子体放电方式一般可以分为电晕放电、辉光放电、介质阻挡放电、射频放电、滑动电弧放电等,而在工业领域中,电晕放电等离子体被广泛应用于表面处理、生物灭菌^[2]等方面,因此对大气放电等离子体参数的研究就有很大的应用价值。

电晕放电等离子体是通过高频电压使电极周围的空气电离而产生。目前在电晕放电等离子体理论研究和应用方面国内外学者已经做了大量的工作。在理论研究方面,山东大学张远涛教授等^[3]对大气压下气体放电进行了数值模拟,提出利用数值模拟的方法对等离子体放电特性和参数进行分析,提出了一套适合分析大气压环境的理论方法,为实际应用提供了指导。赵文华博士等^[4]通过发射光谱法研究了在尖-板电极结构下,通过改变电压大小和电极之间的距离来分析光谱强度的变化。李彦飞等^[5]通过光谱研究了空气电晕放电的发展过程以及利用光谱信息来判断放电程度。伊本卓尔大学 SABER 等^[6]对大气压下尖-板电极结构空气电晕放电的等离子体能量效率进行研究,利用递归最小二乘法的数学方法研究了他们的演化过程,对脉冲电压与直流电压、干燥空气与潮湿空气对测量电流、放电功率和等离子体能效等参数的影响进行了比较研究。在实际应用方面,SOHBATZADEH 等^[7]发现纱线经等离子处理后强度以及浮力功能和防水性能都有明显的上升。中国民航大学邹田春教授等^[8]利用等离子喷枪对碳纤维增强树脂基复合材料进行处理后,材料的表面润湿性能、表面活性以及胶接强度,对比处理之前有明显的提升。

等离子射流在工业中多应用于材料表面的清洗或者改性,通常需要等离子喷枪距被处理材料很近,要求在处理材料达到预期效果的同时不能损伤材料的原有的性质,所以研究以大气为介质的等离子体射流的温度参数有着重大意义。本文使用课题组自主研发的空气电晕放电等离子体设备,通过光谱仪测得不同功率下等离子射流的发射光谱,进而求出等离子体射流中分子的振动温度和激发温度,使用 LIFBASE 软件拟合出分子转动温度,最终总结出功率对等离子体温度参数

的影响。

1 实验装置与理论分析

1.1 实验装置

如图 1 所示,等离子射流是由自主研发的针-筒放电装置产生。等离子体装置的电源采用交流高压电源,输出频率 20—80 kHz,其中高压部分接到内部一根针状铜质电极上,筒状金属外壳是外电极,通过高压探头测量电源输出的电压,电流通过串联在回路中的 50 Ω 电阻 R 得到。实验所采用的工作气体为空气,气压通过调压阀进行调节。光谱测量系统由计算机、海洋光学发射光谱仪(2 048 pixel,检测范围 200—900 nm)以及光纤组成,等离子射流从喷枪发射出,所产生的光信号由光纤探头捕捉,通过光纤传入光谱仪,产生的实验数据由计算机储存。

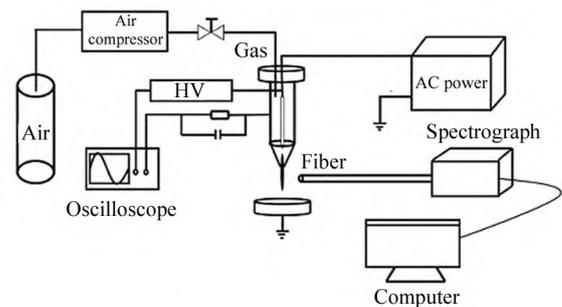


图 1 等离子射流产生装置与光谱系统装置图

Fig. 1 Plasma jet generating and spectral system device

1.2 理论分析

如今等离子射流参数诊断方法主要分为侵入式和非侵入式诊断,由于侵入式测量方法,如朗缪尔探针法^[9]等是直接和等离子体射流中的粒子接触,会对数据造成一定影响,所以选择发射光谱法这种非侵入式的高精度原位测量方法^[10]。

1.2.1 等离子体粒子振动温度

本次实验采用空气作为介质,由于氮气(N_2)在空气中占 78%,所以 N_2 的第一正带系谱线($B^2\Pi_u-A^3\Pi_u^4$)和第二正带系谱线($C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$)容易激发。图 1 中等离子体射流所产生的光信号利用光谱仪进行分析后形成发射光谱,观察光谱图选取 N_2 的第二正带($C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$)谱线,利用玻耳兹曼曲线法计算粒子的振动温度^[11]。理论上分析,当等离子体处于局部热平衡状态(local thermal equilibrium, LTE)下,激发态能级上的粒子数满足玻耳兹曼分布定律,两条原子谱线对应辐射粒子数满足^[12]:

$$\frac{N_m}{N_n} = \frac{g_m}{g_n} \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{kT_e}\right), \quad (1)$$

式中, N_m 、 N_n 为处于 m 和 n 能级上的粒子数, g_m 、 g_n 为 m 和 n 能级上的权重, E_m 和 E_n 为对应能级的能量, k 为玻耳兹曼常数, 同一原子辐射谱线强度可以表示为:

$$I_{m1} = N_m h \nu_{m1} A_{m1} = N_n h \nu_{n1} A_{n1}, \quad (2)$$

式中, I_{m1} 、 I_{n1} 表示对应谱线的相对强度, ν_{m1} 、 ν_{n1} 表示从 m 、 n 能级跃迁到能级的辐射频率, A_{m1} 、 A_{n1} 表示相应的自发辐射概率。由上式(1)、(2)可以得到:

$$\ln\left(\frac{I_{\nu\nu'}}{\nu_{\nu\nu'} A_{\nu\nu'}}\right) = -\frac{E_m - E_n}{k T_v} + B, \quad (3)$$

式中, B 为常数, $E_m - E_n$ 为自变量, $\ln(I_{\nu\nu'}/\nu_{\nu\nu'} A_{\nu\nu'})$ 为因变量找点, 并将所得结果利用最小二乘法进行处理, 最后拟合得出的一条直线, 如图 2 所示, 其斜率的倒数就是粒子的振动温度 T_v [12]。

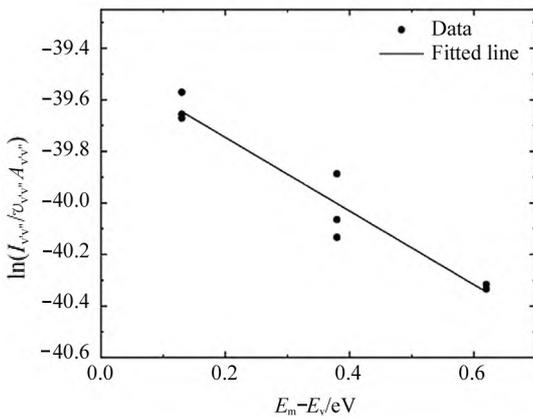


图 2 玻耳兹曼拟合曲线
Fig. 2 Boltzmann fitting curve

1.2.2 等离子体电子激发温度

等离子体射流的电子激发温度是等离子射流中的重要参数, 由于具有高能级的电子会与介质气体中的原子发生非弹性碰撞, 将介质气体中的原子激发到不同电子能级, 所以不同激发电子能级的粒子布局数就反应了等离子体射流的电子能量分布 [13]。根据图 1 装置所测的光谱数据, 选取两条相对清晰的原子谱线强度的方法来求解等离子体射流的电子激发温度, 双谱线法是根据同一原子的两条不同的特征谱线强度与激发能态间的确定关系来测量电子温度。假设同种原子的两条特征谱线 λ_1 、 λ_2 , 激发能量分别为 E_1 和 E_2 , 则在 LTE 下, 两条谱线的强度满足 [14]:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1 \lambda_2}{A_2 g_2 \lambda_1} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{k T_e}\right), \quad (4)$$

将上式移项两边取对数整理可得:

$$T_e = -\frac{E_1 - E_2}{k} \ln \frac{A_1 g_1 \lambda_2 I_2}{A_2 g_2 \lambda_1 I_1}, \quad (5)$$

式中, A_i 为相应能级上的自发跃迁概率, g_i 为响应能级上的简并度, 参数均可在 NIST 原子数据库中查到, I_i 为光谱强度, T_e 为电子激发温度。

1.2.3 等离子体分子转动温度

等离子体射流的分子转动温度是区分热等离子体和冷等离子体的重要参数。由于气体分子间的转动能级的空隙十分微小, 所以在电场的作用下气体分子间容易发生碰撞, 在频繁的碰撞中, 分子间的转动能和平动能达到平衡的状态, 即等离子射流中的气体温度近似于分子的转动温度 [15]。

由双原子分子光谱理论可知, 从高能级 (e', v', J') 到低能级 (e'', v'', J'') 跃迁谱线强度可以表示为 [16]:

$$I_{e'v'J' \rightarrow e''v''J''} = N_{e'v'J'} A_{e'v'J' \rightarrow e''v''J''} h \nu_{e'v'J' \rightarrow e''v''J''}, \quad (6)$$

式中, $N_{e'v'J'}$ 为高能级粒子数, $A_{e'v'J' \rightarrow e''v''J''}$ 为高低能级辐射跃迁系数, h 为普朗克常量, $\nu_{e'v'J' \rightarrow e''v''J''}$ 为跃迁频率, e, v, J 为电子、振动、转动量子数。在 LTE 假设下 ($T_e = T_v = T_r$), 高能级粒子的布居数服从玻耳兹曼分布 [16]:

$$N_{e'v'J'} = \frac{L}{\delta} \times \frac{g_{e'} (2J + 1) \exp\left(-\frac{\epsilon_{e'}}{k T_e} - \frac{\epsilon_{v'}}{k T_v} - \frac{\epsilon_{J'}}{k T_r}\right)}{N \frac{Q_e Q_v Q_r}{Q_e Q_v Q_r}}, \quad (7)$$

式中, N 为粒子总数, $\epsilon_{e'}, \epsilon_{v'}, \epsilon_{J'}$ 分别为电子能、振动能、转动能; T_r 为转动温度, Q_e, Q_v, Q_r 为相应的分配函数, L 为强度变化因子, $g_{e'}$ 为电子能级简并度, 同核分子 $\sigma = 1$, 异核分子 $\sigma = 2$ 。

结合式(6)和式(7), 可知上能级布居数只随温度改变, 因此可以通过图 1 所得到的实验数据和软件中的模拟数据进行拟合, 计算等离子体的转动温度, 结果如图 9 所示。

本文使用 LIFBASE 软件对等离子射流的转动温度进行拟合。在求转动温度时, 通常采取 OH ($A^2 \Sigma^+ - X^2 \Pi, 0-0$) 谱线和 N_2 ($B^2 \Sigma_u^- - X^2 \Sigma_g^-, 0-0$) 谱线与软件中的模拟光谱进行对比, 若实验光谱与模拟光谱能拟合成功, 则模拟光谱的转动温度为等离子射流的转动温度 [14]。

2 结果与讨论

2.1 等离子射流发射光谱分析

图 3 所示为固定压强 0.2 MPa、工作功率 900 W 时, 空气电晕放电等离子发射光谱的谱线图。在电晕放电过程中, 与高压电极直接连接的铜质电极周

围会形成强大电场,电极附近的气体被电离,因此会产生大量的激发态粒子。粒子在跃迁到基态或者低能级的时候,多余的能量会以光子的形式辐射出去,最终形成光谱,粒子具有不同的激发态导致发射光谱不同^[16,17]。所以可以利用发射光谱法对空气电晕放电产生的等离子体射流中的粒子成分以及温度等参数进行研究,由于当光的波长小于 200 nm 时,光在空气中容易被吸收,而波长大于 900 nm 的红外光有较强的辐射,会对实验所产生的等粒子体有影响,所以本实验中得到的粒子的光谱大多集中在 200—900 nm 的可见光范围内^[13]。

如图 3 所示,实验中等离子体射流的发射光谱主要集中在 200—400 nm 且发射强度较高,由于空气中含有 N₂、O₂ 和 H₂O 等气体,所以可以看到的谱线会有 200—300 nm 的 NO-γ (A₂Σ⁺-X²Π) 带系谱线,300—390 nm 的 N₂ (C³Π_u-B³Π_g) 第二正系统谱线,390—480 nm 的 N₂⁺ (B²Σ_u⁺-X²Σ_g⁺) 第一负带系谱线,以及 308.4 nm 的 OH(A²Σ⁺-X²Π,0-0) 谱线、777.2 nm 和 844.9 nm 处的 OI 谱线^[18]。其中 N₂ 第二正带系、N₂⁺ 的第一负带系以及 O 原子的产生是由于高能分子、O 分子的非弹性碰撞,OH 谱线的出现可能是与空气中的水分子反应产生^[17]。

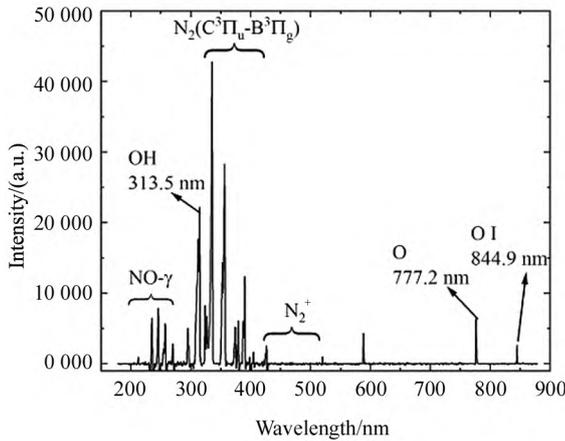


图 3 空气放电等离子体射流全谱图
Fig. 3 Full spectrum of air discharge plasma jet

2.2 不同功率下等离子射流发射光谱强度分析

图 4 为不同功率下空气电晕放电等离子体射流的光谱图,在不同功率下,250—450 nm 的谱线相对集中且相对度较高,只有功率上升至 700 W 的时候,500—800 nm 才会产生明显的光谱,且谱线强度低于 450 nm 之前的强度。总体上,随着放电功率的增加,等离子体射流中各条谱线的相对强度均有增强的趋

势,见图 5,选取光谱中相对强度最大的 335.4 nm 谱线峰值,可以清晰地观察到光谱的相对强度在随着功率增加而增强。

当放电功率为 500 W 和 600 W 时,比较明显的谱线范围在 300—400 nm 处,由于当功率低的时候,此波段的主要谱线是由 N₂ 分子谱带和一些跃迁能量要求较低、跃迁频率较高的 O 和 N 所产生,随着功率的增加,当功率上升至 700 W 以后,一些跃迁能量要求较高、跃迁频率较低的 N、O、N⁺、O⁺ 等谱线(主要在 500—800 nm)能被明显地观察到^[17]。由于功率的增加,电极周围的电场强度也随着增加,空气的电离能力增强,因此电子能够从电场中获得更高的能量去跃迁,且高能粒子与空气中的分子碰撞的概率也随之增加,从而产生更多激发态的原子,光谱的强度也随之增强。

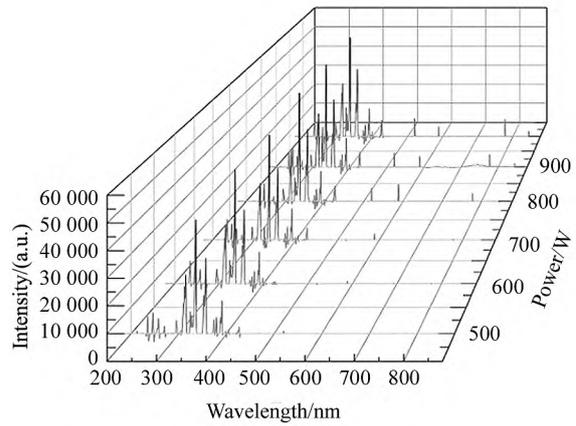


图 4 不同功率下的等离子体射流发射光谱图
Fig. 4 Emission spectra of plasma jets at different powers

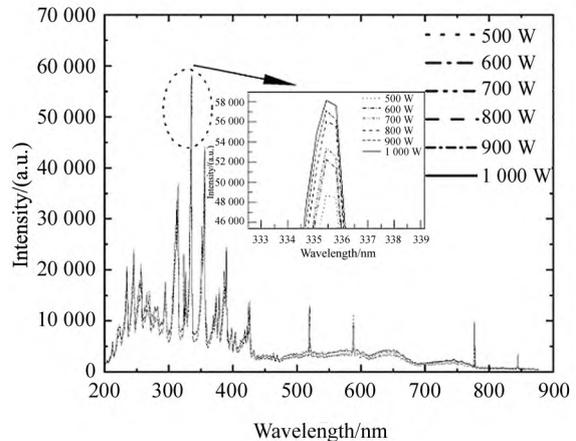


图 5 不同功率下等离子体发射光谱相对强度对比图
Fig. 5 Comparison of relative intensity of plasma emission spectra at different powers

2.3 不同功率下振动温度分析

根据图 3,可以清晰地观察到第二正带系的一系列光谱和带系中各转动峰的相对强度,因此本次实验选取第二正带系中的 3 组振动序带(选取 8 组数据减少实验误差): $\Delta v = -1(0-1, 1-2)$, $\Delta v = -2(0-2, 1-3, 2-4)$ 和 $\Delta v = -3(0-3, 1-4, 2-5)$,通过在 NIST 查询相关谱线参数(如表 1 所示),最后利用最小二乘法线性拟合后可以求出不同功率下的 N_2 振动温度。

表 1 N_2 第二正带系振动能级参数
Tab. 1 Vibrational energy level parameters of N_2 second positive band system

$v' \rightarrow v''$	$\lambda_{v,v'}/nm$	$A_{v,v'}/(\times 10^6 s^{-1})$
0-1	357.6	7.33
1-2	353.6	4.61
0-2	380.4	2.94
1-3	375.4	4.10
2-4	370.9	3.37
0-3	405.8	0.92
1-4	399.7	2.49
2-5	394.2	2.63

通过图 5 可以得到不同功率下的等离子体发射光谱相对强度,然后结合表 1 将相应的参数带入公式中,最终对实验数据进行拟合可以清晰地得到不同功率下粒子的振动温度,结果如图 6 所示,从图中可以观察到数据在拟合直线两侧均匀分布,所以拟合结果在可接受范围内。

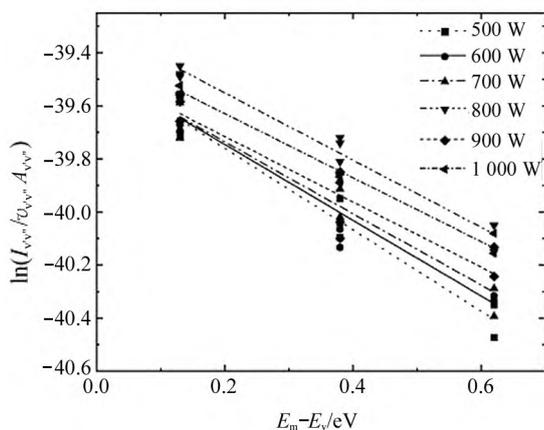


图 6 不同功率下等离子体振动温度拟合
Fig. 6 Plasma vibration temperature fitting under different powers

从图 7 中可以观察到等离子体振动温度随着功率的增加呈现上升趋势,当功率小于 800 W 时的斜

率比 900 W 之后的斜率大,说明 800 W 之前粒子振动温度上升速度较快,900 W 之后上升缓慢。其原因是功率的增加,使得电子能量分布发生变化,产生了许多高能量密度的电子,进而增加了处于基态的 N 分子与自由电子非弹性碰撞频率,因此造成了分子的振动温度的上升,空气随着功率的增大,激发越来越充分,当达到饱和后,振动温度上升速度也将变缓。

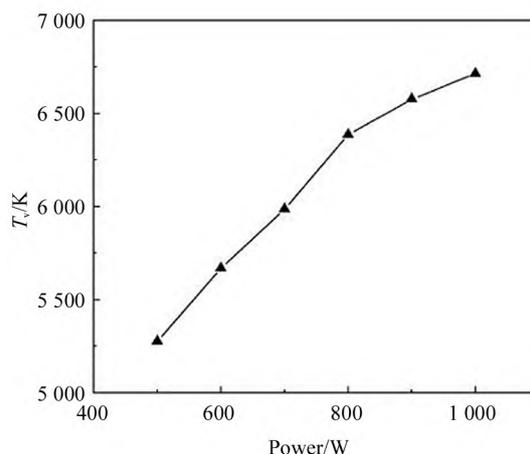


图 7 不同功率下的等离子体振动温度

Fig. 7 Plasma vibration temperature at different powers

2.4 不同功率下电子激发温度分析

本实验工作气体为空气,因此电离空气会产生大量的 N 的激发态,使用双谱线强度法,根据图 5,选择同属于 N 原子谱系下,且发射强度较高,谱线较为清晰的 335.4 nm 和 378.9 nm 谱线来计算电子激发温度,通过 NIST 官网查询相关光谱参数带入式(5),参数见表 2。

表 2 N 原子光谱参数
Tab. 2 Atomic spectral parameters of nitrogen

λ/nm	E/eV	A/s^{-1}	g
335.4	39.35	5.5×10^7	6
378.9	43.82	2.4×10^6	2

图 8 为等离子体电子激发温度随不同放电功率的变化趋势,可以发现,当气体压强固定在 0.2 MPa、功率达到 500 W 时,空气电晕放电等离子体的电子激发温度大约为 16 776 K,随着功率达到 1 000 W,电子温度也随之上升为 17 188 K,电子激发温度随着功率的增加呈现上升趋势。因为随着电功率的增加,电场所做的功主要施加在自由电子上,且自由电子平均自由程不变,所以自由电子所能获得的期望能量也就越高,电子平均能量的高低主要反应

在电子激发温度的变化上,导致电子的激发温度随功率的增加而增加。

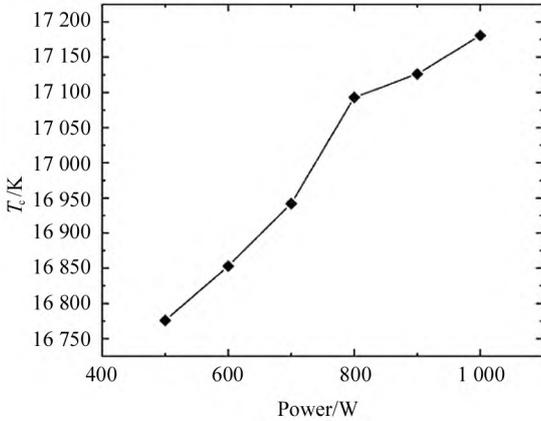


图 8 不同功率下等离子体电子激发温度
Fig. 8 Plasma electron excitation temperature at different powers

2.5 不同功率下等离子体转动温度分析

选取 N₂⁺ 的第一负带系谱线(B²Σ_u⁻-X²Σ_g⁻)中的 389—392 nm 谱线,在不同放电功率下用 LIFBASE 软件与模拟谱线进行拟合,进而求出气体分子的转动温度。图 9 是 700 W 功率下进行的实验光谱与模拟光谱的拟合图,图 10 为利用相同方法得到的不同功率下气体转动温度随着功率变化的趋势图,从 300 K 上升至 550 K 左右,随着功率的增加呈现上升趋势。其原因可以从两个方面来考虑,首先粒子的热运动效应,随着功率的上升,伴随着电场强度的增加,从而使得粒子热运动的剧烈程度增加,造成气体温度升高。其次粒子的数目,放电功率的增加导致等离子体射流的放电区域的增加和气体电离程度进

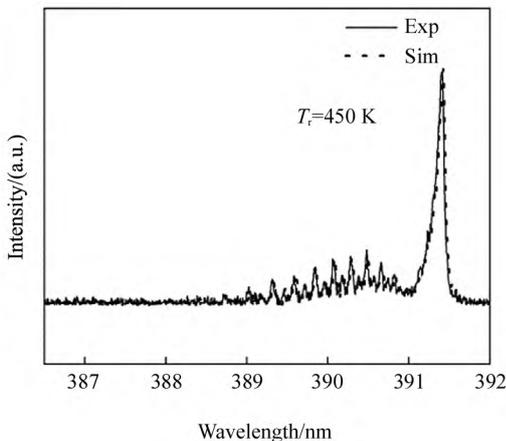


图 9 700 W 功率时实验光谱与模拟光谱的拟合
Fig. 9 Fitting of experimental spectrum and simulation spectrum at 700 W power

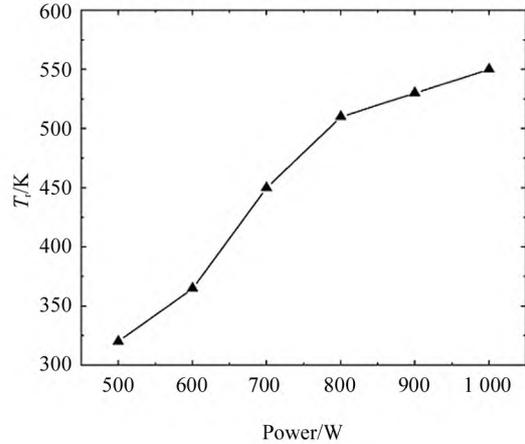


图 10 不同功率下的等离子体转动温度
Fig. 10 Plasma rotation temperature at different powers

一步加深,从而使带电粒子数目增加,最终导致气体温度的升高。带电粒子数目和热运动剧烈程度增加的原因导致等离子体的气体温度进一步升高^[19]

3 结 论

本文主要采用发射光谱法对不同功率下等离子体的粒子种类及温度特性进行了分析。利用发射光谱非侵入式诊断方法,可以精确测量到等离子射流中的粒子种类,随着功率从 500 W 上升到 1000 W,等离子体射流的光谱强度不断升高的同时,活性粒子的种类也在增加,当功率大于 700 W 后,O 原子大量激发,产生的活性粒子主要为羟基、单态 O 原子等。随着放电功率的增加,振动温度、激发温度以及转动温度都呈现上升趋势,电子激发温度远大于振动温度和转动温度,可达 17 200 K。当功率达到 800 W,振动温度和转动温度的上升趋势逐渐变缓,振动温度由 5 200 K 上升至 7 000 K,转动温度由 300 K 上升至 550 K。综上所述,放电功率是影响大气等离子射流温度参数和粒子种类的重要因素,在等离子应用中可以根据不同应用环境选择合适功率,达到最佳的应用效果。

参考文献:

[1] LI H L, LV H S, MENG Y, et al. Research on laser-induced breakdown spectroscopy based on planar mirrors[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2022, 33(1): 75-82.
李红莲,吕贺帅,孟岩,等.基于平面反射镜约束的激光诱导击穿光谱技术研究[J].光电子·激光, 2022, 33(1): 75-82.

[2] LU F Q, JIANG X X, ZHANG X B, et al. The study of spa-

- tial expansion and energy dependence of laser-induced breakdown zinc plasma[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2020, 31(12):1313-1319.
- 卢芳琴,姜效玺,张小兵,等. 激光诱导击穿锌等离子体的空间膨胀特性及能量依赖关系的研究[J]. *光电子 • 激光*, 2020, 31(12):1313-1319.
- [3] ZHANG Y T, WANG G. Numerical study on generation of reactive oxygen species influenced by discharge parameters in atmospheric radio-frequency discharges with helium-oxygen admixtures[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(2):428-438.
- 张远涛,王冠. 大气压射频放电中放电参数对活性粒子影响的数值模拟研究[J]. *高电压技术*, 2016, 42(2):428-438.
- [4] ZHAO W H, ZHANG X D, JIANG J G, et al. Spectrum analysis of tip-plane corona discharges[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2003, 23(5):955-957.
- 赵文华,张旭东,姜建国,等. 尖一板电晕放电光谱分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2003, 23(5):955-957.
- [5] LI Y F, HAN D, ZOU Z J, et al. Characteristic emission spectrum analysis and discharge identification on the development process of air corona discharge[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(9):2956-2962.
- 李彦飞,韩冬,邱宗甲,等. 空气电晕放电发展过程的特征发射光谱分析与放电识别[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(9):2956-2962.
- [6] SABER K, ABAHAZEM A, MERBAHI N, et al. Plasma energy efficiency in tip-to-plane air corona discharges at atmospheric pressure[J]. *Journal of Electrostatics*, 2022, 115:103642.
- [7] SOHBATZADEH F, SHAKERINASAB E, MIRZANEJHAD S. Surface modification of aramid yarn by atmospheric pressure plasma: Reinforcement and floating properties[J]. *Polymer Testing*, 2023, 117:107836.
- [8] ZOU T C, LIU Z H, LI Y, et al. Effect of plasma surface treatment on bonding properties and surface properties of CFRP[J]. *China Surface Engineering*, 2019, 35(1):125-134.
- 邹田春,刘志浩,李晔,等. 等离子体表面处理对碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)胶接性能及表面特性的影响[J]. *中国表面工程*, 2022, 35(1):125-134.
- [9] SALO S, ABDALLAH B, AKEL M, et al. Structural and plasma characterization of the power effect on the chromium thin film deposited by DC magnetron sputtering[J]. *Optoelectronics Letters*, 2020, 16(5):369-372.
- [10] ISHIHARA D, NOMA Y, STAUSS S, et al. Development of a dielectric barrier discharge (DBD) cryo-microplasma: generation and diagnostics[J]. *Plasma Sources Science & Technology*, 2008, 17(3):035008.
- [11] LI H L, XIE H J, LV H S, et al. Research on metal matrix-assisted measurement based on laser-induced breakdown spectroscopy[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2021, 32(2):166-172.
- 李红莲,谢红杰,吕贺帅,等. 基于激光诱导击穿光谱技术的金属基体辅助测量研究[J]. *光电子 • 激光*, 2021, 32(2):166-172.
- [12] SONG P, LI Z K, CHEN L, et al. Diagnosis of atmospheric pressure helium cryogenic plasma jet[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, 41(6):1874-1879.
- 宋鹏,李政楷,陈雷,等. 大气压低温氦等离子体射流的诊断研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2021, 41(6):1874-1879.
- [13] LIU Y Z. The study of the optical emission spectra diagnosis of cold temperature plasma[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016:1-33.
- 刘耀泽. 低温等离子体的发射光谱诊断研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2016:1-33.
- [14] LI Z J, CHEN M, LIU D X. Review of detection methods for physico chemical characteristics of atmospheric pressure cold plasma[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(10):4196-4214.
- 刘志杰,陈旻,刘定新. 大气压冷等离子体的理化特性检测方法综述[J]. *高电压技术*, 2022, 48(10):4196-4214.
- [15] ZHANG L, YU J L, ZHAO B B, et al. Experimental of alternating current rotating gliding arc discharge investigation of discharge under high air pressure[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(7):075204.
- 张磊,于锦禄,赵兵兵,等. 高气压下交流旋转滑动弧放电特性实验研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(7):075204.
- [16] YANG W B, ZHOU J N, LI B C, et al. Time-resolved spectra and measurements of temperature and electron density of laser induced nitrogen plasma[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(9):095201.
- 杨文斌,周江宁,李斌成,等. 激光诱导氮气等离子体时间分辨光谱研究及温度和电子密度测量[J]. *物理学报*, 2017, 66(9):095201.
- [17] FAN M Y. Experimental study on the inactivation effect of *E. coli* by atmospheric pressure plasma jet[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016:10-17.
- 范明阳. 大气压等离子体射流灭活大肠杆菌的实验研究[D]. 无锡:江南大学, 2016:10-17.
- [18] HE H W. Spectral diagnosis of high power inductively coupled plasma[D]. Xi'an: Xidian University, 2021:7-54.
- 何宏伟. 大功率电感耦合等离子体光谱诊断[D]. 西安:西安电子科技大学, 2021:7-54.
- [19] FENG J, YANG D Z, ZHANG L, et al. Study of characteristics for stable gas-liquid discharge plasma in oxygen at atmospheric pressure[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2019, 59(2):118-123.
- 冯静,杨德正,张丽,等. 大气压氧气中稳定形态气液放电等离子体特性研究[J]. *大连理工大学学报*, 2019, 59(2):118-123.

作者简介:

王 军 (1979—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事光电测控技术和等离子表面处理技术方面的研究。