

空心针板放电等离子体气体温度和振动温度研究

董丽芳, 刘为远, 杨玉杰, 王 帅

河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

摘 要 使用空心针板放电装置, 以氩气作为导入气体, 在大气环境下产生了 1.6~3 cm 波长的等离子体炬。利用发射光谱法, 研究了等离子体炬弧根和弧梢处的气体温度和振动温度, 以及它们随气体流量的变化。等离子体气体温度通过对 OH 基 309 nm 附近的谱带进行拟合得到, 等离子体振动温度由氮分子第二正带系 $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ 计算得到。实验发现弧根和弧梢处的气体温度相等, 并随着气体流量的增大而下降。当气体流量从 $3.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 $6.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 气体温度由 350 K 下降到 300 K。当气体流量较小 (如 $3.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$) 时, 弧梢处的振动温度 (1 950 K) 高于弧根处的振动温度 (1 755 K)。随着气体流量的增大, 弧梢处与弧根处的振动温度均下降, 但弧梢处下降速率较快。当气体流量较大时, 二者趋于相等。

关键词 冷等离子体炬; 气体温度; 振动温度; 发射光谱

中图分类号: O461.2; O433.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2010)09-2309-03

引 言

大气压冷等离子体炬是近年来发展起来的一门新技术, 已被应用于材料表面清洗与改性、灭菌消毒及污染控制等领域^[1-3]。关于冷等离子体炬的研究, 以往主要集中在等离子体射流方面, 而对于空心针板放电产生的等离子体炬的研究甚少^[4-7]。但近几年, 空心针-板放电等离子体炬引起人们广泛重视, 这是因为空心针-板放电具有结构简单、气体消耗量低等优点。

气体温度、电子温度、电子密度和振动温度是等离子体的重要参量, 决定着等离子体应用范围和效率等^[8]。例如在热敏材料的表面处理中, 等离子体的气体温度过高会造成材料表面灼伤, 所以气体温度在材料表面改性中是衡量等离子体适用性的先决条件。振动温度与电子的能量分布有关, 可以通过测量振动温度来了解等离子体状态, 判断等离子体应用范围。因而, 研究空心针-板放电等离子体炬的气体温度和振动温度等参量, 对于优化材料表面改性效果等方面具有重要意义。本工作采用光谱法, 研究了空心针-板放电等离子体炬弧根和弧梢处的气体温度和振动温度, 以及它们随气体流量的变化。

1 实验装置

实验装置如图 1 所示。空心不锈钢针的外径为 1.3 mm,

内径为 1 mm, 通过 50 Ω 的电阻接地。工作时氩气由质量流量控制器 (D07-7B 型) 控制并导入空心针。直径 8 cm、高 6 cm 的圆柱形铜块作为另一电极, 其周围用绝缘塑料包裹, 通过一接线柱接交流电源的高压端, 电极上面用厚度为 1.5 mm 的玻璃板覆盖。空心针末端与玻璃板形成距离为 3.5 cm 的放电间隙。交流电源的频率为 40 kHz, 其峰值电压在 0~12 kV 范围内连续可调。高压探头 (Tektronix P6015A, 1000Xd) 用来测量电压。放电电流信号通过测量 50 Ω 电阻上的电压信号得到。电流和电压信号由数字示波器 (Agilent, DSO6054A, 500 MHz) 记录并储存。放电产生的等离子体发出的光通过焦距为 10 cm 的透镜会聚后由光纤导入光谱仪 (型号: ACTON SP-2785, 1 340 \times 400 pixels), 由与其连接的计算机控制采集并存储。

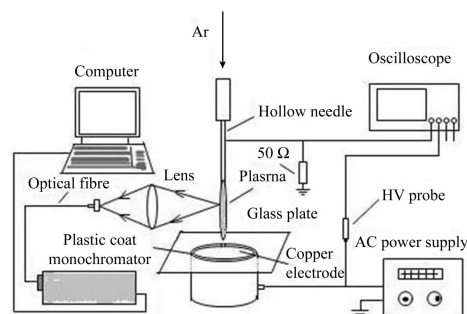


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

收稿日期: 2009-12-06, 修订日期: 2010-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (10775037, 10975043) 和河北省自然科学基金项目 (A2008000564) 资助

作者简介: 董丽芳, 女, 1963 年生, 河北大学物理科学与技术学院教授 e-mail: donglf@mail.hbu.edu.cn

2 实验结果和讨论

当外加电压 $U_p = 7.2$ kV 时, 在针末端放电形成等离子体炬。等离子体炬的长度与氩气流量有关, 气体流量从 1.9 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大至 3.5 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 等离子体炬的长度从 1.6 cm 增大到 3 cm。当气体流量在 $3.5 \sim 6.1$ $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 范围时, 等离子体炬的长度一直保持在 3 cm。当气体流量从 6.1 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 7.5 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 时等离子体炬的长度逐渐减小至 2 cm, 随后随着流量的增大等离子体炬的长度不再变化。图 2 给出了不同气体流量时等离子体炬的照片。

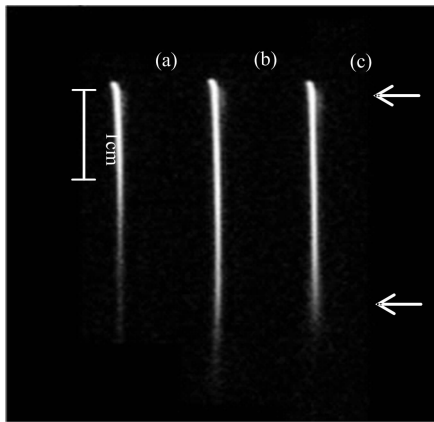


Fig. 2 Photographs of plasma at (a) 3.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, (b) 5.0 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$, and (c) 6.5 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ argon flow rate. The capital letters A and B indicate plasma root and plasma tip respectively

实验从等离子体炬的弧根和弧梢位置采集了 $300 \sim 420$ nm 范围内的光发射谱, 如图 3 所示。由于放电是在大气环境下进行的, 大气中的氮分子和水分子参与了等离子体化学物理过程, 实验得到了 309 nm 附近的 OH 基谱带和第二正带系的谱线。

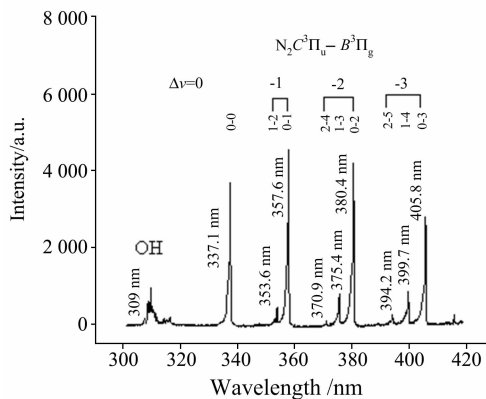


Fig. 3 An optical emission spectrum of hollowneedle-to-plate discharge at argon flow rate of 5 $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$. $U = 7.2$ kV

本实验利用 Lifbase 拟合程序对 OH 基谱带进行拟合^[9],

通过对比实验线型和模拟线型得出转动温度, 如图 4 所示。在大气压等离子体中, 人们通常采用分子的转动温度来测量等离子体气体温度。这是因为转动温度和平动温度在大气压条件下弛豫过程较强, 可以认为相等。实验在 $3.0 \sim 6.5$ $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 的流量范围内测量了弧根和弧梢处等离子体气体温度, 结果发现二者相同, 且随氩气流量的增大从 350 K 降低到 300 K, 如图 5 所示。在稍大的流量下等离子体的气体温度接近室温, 这与射流等离子体的气体温度非常相似。但射流所用的气体流量一般在每分钟几升量级, 远远高于空心针-板放电所用的气体流量。

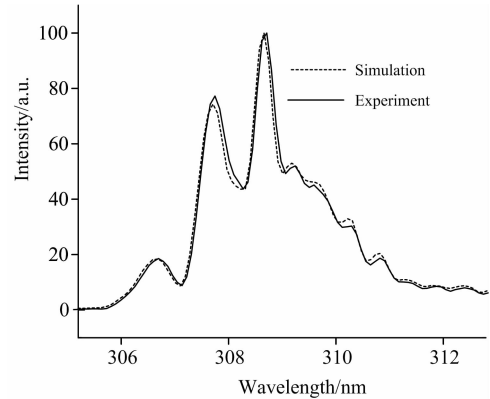


Fig. 4 Gas temperature estimation by comparing the simulated optical emission line profile of OH radicals around 309 nm with that obtained in experiment

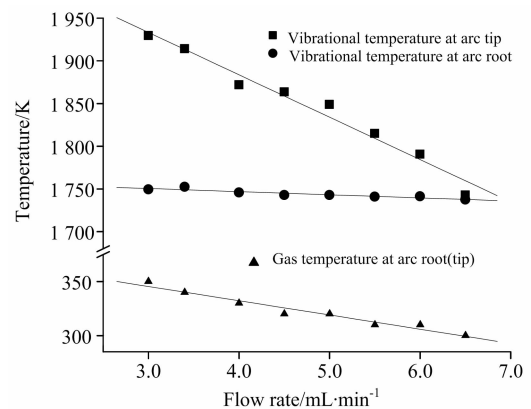


Fig. 5 Vibrational temperature and the gas temperature at different positions as a function of argon flow rate at $U = 7.2$ kV

振动温度利用氮分子第二正带系 $C^3\Pi_u - B^3\Pi_g$ 计算得到^[10]。在局域热平衡条件下, 上态粒子数分布满足玻尔兹曼分布

$$N_{v'} = N_0 e^{-E_{v'}/kT_v} \quad (1)$$

双原子分子带系发射光谱中的谱带强度公式

$$I_{v'v''} = hc\nu_{v'v''} A_{v'v''} N_{v'} \quad (2)$$

由方程式(1)和(2)可以得到

$$\ln B = c_0 - \frac{E_{v'}}{kT_v} \quad (3)$$

其中: c_0 为常数, $B = I_{\nu'v''} / (\nu'_{v''} A_{\nu'v''})$, 分子振动能级振动能
量 $E_{\nu'} = \omega_e \left(v' + \frac{1}{2} \right) - \omega_e x_e \left(v' + \frac{1}{2} \right)^2 + \omega_e x_e \left(v' + \frac{1}{2} \right)^3 + \dots$, 对氮分子而言, 振动常数 $\omega_e = 2\,035.1 \text{ cm}^{-1}$, $\omega_e x_e = 17.08 \text{ cm}^{-1}$, 第三项及后面的项可忽略。

由(3)式可以看出 $\ln B$ 随 $E_{\nu'}$ 线性变化, 其负斜率即为振动温度的倒数, 由此可得到氮分子的振动温度 T_v 。为了减小拟合误差, 本工作采用了两组振动序带: $\Delta v = -2(0-2, 1-3, 2-4)$ 和 $\Delta v = -3(0-3, 1-4, 2-5)$ 。

图5给出了等离子体炬弧根和弧梢处的振动温度随氩气流量的变化。当气体流量较小时, 弧梢处的振动温度高于弧根处的振动温度。随气体流量的增大, 弧梢处与弧根处的振动温度均下降, 但弧梢处下降速率较快。氩气流量从 $3.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 $6.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 过程中, 弧根处的振动温度略有减小, 从 $1\,755 \text{ K}$ 减小到 $1\,745 \text{ K}$ 。而弧梢处的振动温度下降明显, 从 $1\,950 \text{ K}$ 减小到 $1\,750 \text{ K}$ 。当气体流量较大时, 二者趋于相等。可见气体流量作为一个可以控制的外部参

量, 在空心针-板放电中对等离子体气体温度、振动温度等起着重要的调节作用。因而在应用中, 可根据不同的需要采用不同的气体流量, 并使用等离子体炬的不同部分(弧梢或弧根)。

3 结 论

采用发射光谱法, 测量了空心针-板介质阻挡放电产生的等离子体炬中弧根和弧梢位置处的气体温度和振动温度, 并讨论了它们随氩气流量的变化。实验表明等离子体气体温度随着氩气流量的增大而减小, 在稍大的气体流量下气体温度接近于室温, 这时空心针-板放电对于热敏材料的表面改性是一种温度适宜的等离子体源。弧根和弧梢处的振动温度随着气体流量的增大而减小, 并且逐渐趋于相等。由此可见, 气体流量作为一个控制参量, 在一定范围内可对等离子体气体温度、电子温度等量进行调控, 以达到应用效果的最优化。

参 考 文 献

- [1] Koinuma H, Ohkubo H, Hashimoto T, et al. Appl. Phys. Lett., 1992, 60: 816.
- [2] Kjdziński J, Engemann J, Teschke M, et al. Solid State Phenom., 2005, 107: 119.
- [3] Laroussi M, Akan T. Plasma Processes Polym., 2007, 4: 777.
- [4] ZHENG Pei-chao, WANG Hong-mei, LI Jian-quan, et al(郑培超, 王鸿梅, 李建权, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2009, 29(2): 289.
- [5] Jiang Nan, Ji Ailing, Cao Zexian. J. Appl. Phys., 2009, 106: 013308.
- [6] Yong Cheol Hong, Han Sup Uhm. Appl. Phys. Lett., 2006, 89: 221504.
- [7] Lu Xinpei, Jiang Zhonghe, Xiong Qing, et al. Appl. Phys. Lett., 2008, 92: 081502.
- [8] HE Xiang, SUN Feng-lou, ZHOU Wu-qing(何翔, 孙奉娄, 周武庆). Journal of Materials Science & Engineering(材料科学与工程学报), 2008, 26(4): 570.
- [9] Luque J, Crosley D R. LIFBASE: Database and Spectral Simulation (Version 1.5). SRI International Report No. MP 99-009, 1999.
- [10] Herzberg G. Molecular Spectra and Molecular Structure, Vol. I (分子光谱与分子结构, 第1卷). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1983. 15, 155.

Study on Vibrational Temperature and Gas Temperature in a Hollowneedle-Plate Discharge Plasma

DONG Li-fang, LIU Wei-yuan, YANG Yu-jie, WANG Shuai

College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China

Abstract A 1.6-3 cm long plasma torch was generated when argon gas was introduced by using a hollowneedle-plate discharge device working in atmosphere. The vibrational temperature and the gas temperature at plasma root and tip were studied by using optical emission spectrum at different argon gas flow. The gas temperature was obtained by comparing experimental line shape of OH radicals band around 309 nm with its simulated line shape. The vibrational temperature was calculated using N_2 second positive band system $C^3\Pi_u-B^3\Pi_g$. It was found that the gas temperatures at arc root and arc tip are equal and they decrease with the argon flow rate increasing. The gas temperature decreases from 350 to 300 K when argon flow rate increases from 3.0 to $6.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$. The vibrational temperature at arc tip ($1\,950 \text{ K}$) is higher than that at arc root ($1\,755 \text{ K}$) under a low gas flow rate (e. g. $3.0 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$). With gas flow rate increasing, the vibrational temperature at both tip and root decreases, but the decreasing rate at arc tip is faster than that at arc root. When gas flow is larger, the vibrational temperatures at tip and root tend to be equal.

Keywords Cold plasma torch; Gas temperature; Vibrational temperature; Optical emission spectroscopy

(Received Dec. 6, 2009; accepted Mar. 8, 2010)