

直流氩等离子体射流电子温度的测量

严建华, 潘新潮*, 马增益, 屠昕, 岑可法

浙江大学热能工程研究所, 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要 直流等离子体射流的电子激发温度, 是等离子体射流物理特性中的一个非常重要的参数, 并且影响着射流中其他众多特征参数。文章采用发射光谱诊断技术对直流氩等离子体射流进行实验研究, 对实验所测得的射流的光谱强度信号进行分析, 并采用玻尔兹曼曲线斜率法计算等离子体射流的激发温度。实验结果表明, 等离子体射流的激发温度在等离子体发生器的轴向上的分布, 随着离出口的距离增大, 激发温度显著地下降。并且激发温度受电流和流量的影响较大, 提高电源的输出电流, 或者增加氩气的流量, 激发温度都会升高。

关键词 等离子体; 发射光谱诊断; 激发温度; 玻尔兹曼图解

中图分类号: O53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0593(2008)01-0006-04

引言

等离子体技术是一门新兴的分支学科。其中热等离子体技术已覆盖了很广阔的应用领域, 并获得了新的进展。典型的有^[1]: (1)热等离子体涂镀技术, 包括等离子体喷涂、电弧喷涂、等离子体化学蒸气沉积(TPCVD)技术; (2)热等离子体微细粉末合成, 特别是达到纳米级粉末的合成; (3)热等离子体处理废物, 特别是有毒废物^[2-6]; (4)热等离子体使粉末致密化; (5)热等离子体冶金, 包括用于大型炉的熔炼、再熔炼; (6)热等离子体提取冶金技术。

为了更好地应用热等离子体技术, 还需更深入地研究热等离子体的基本特性及其基本物理参数^[7-12]。在众多参数中温度无疑是非常重要的一个物理参数, 它影响着等离子体射流中其他许多参数, 诸如射流中各种粒子的组成及含量、射流的电导率、热导率等等。

目前常用的测量等离子体射流温度的方法有: 静电探针法、发射光谱法及激光诱导荧光法^[13]。静电探针或 Langmuir 探针是一种接触式测量方法, 常用于测量等离子体射流的电子温度、电子数密度等。静电探针所要求的测量装置非常简单, 只要用一根金属丝, 再配上可调电压源与测量探针电流表就可以了。激光诱导荧光法(LIF)是一种非接触测量方法, 它是从激光荧光光谱的形状来确定重粒子的温度。光谱辐射法也是一种非接触式测量技术, 相比于其他技术, 具有操作方便和干扰小等优点。

本文利用发射光谱法对氩等离子体射流进行测量研究, 并分析了工作气体流量和电流对射流电子温度的影响。

1 实验系统与发射光谱法测量原理

1.1 等离子体测量系统

实验中的等离子体炬采用双阳极结构, 即由一个阴极和两个拉法尔型阳极构成。等离子体炬的这种双阳极结构具有如下两个特点: (1)能使等离子体电弧的弧长增加, 弧压升高, 功率也随之升高; (2)具有很好的稳弧作用, 实验得到的等离子弧非常稳定, 而且弧压的波动很小。

实验中, 两组等离子体电源都是采用工业三相交流电经整流滤波得到的直流电源, 其工作参数为: 第一组电源, 电压输出最大值为 45 V, 电流在 60~200 A 可调; 第二组电源, 电压输出最大值为 85 V, 电流在 60~200 A 可调。而实验中, 载气流量的调节范围在 0.290~0.750 g·s⁻¹。

光谱诊断系统由等离子体炬、光纤、光谱仪和计算机组成, 光谱仪采用 Ocean Optics 公司的 USB2000 型光纤光谱仪, 光纤的直径为 400 μm, 光谱仪测量的波长范围为 200~1 100 nm, 见图 1。

1.2 光谱法的理论基础

当等离子体处于热力学平衡或局域热力学平衡时, 同种粒子的两个能级 E_m 和 E_n 上的粒子数满足玻尔兹曼分布^[14]

$$\frac{n_m}{n_n} = \frac{g_m}{g_n} \exp\left(-\frac{E_m - E_n}{kT}\right) \quad (1)$$

收稿日期: 2006-05-10, 修订日期: 2006-11-20

基金项目: 科技部中法先进研究计划(PRA E01-06)和浙江省国际合作重点项目(2005C14014)资助

作者简介: 严建华, 1962年生, 浙江大学热能工程研究所教授 * 通讯联系人 e-mail: panxinchao@126.com

或

$$\frac{n_m}{n_n} = \frac{g_m}{Z(T)} \exp\left(-\frac{E_m}{kT}\right) \quad (2)$$

其中 $n = \sum_i n_i$, $Z(T) = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right)$, n_m 和 n_n 表示相应能级的粒子密度, g_m 和 g_n 表示该能级的统计权重, E_m 和 E_n 表示相应能级的激发能, n 和 $Z(T)$ 分别表示该原子数总密度和该原子的配分函数, T 为激发温度。

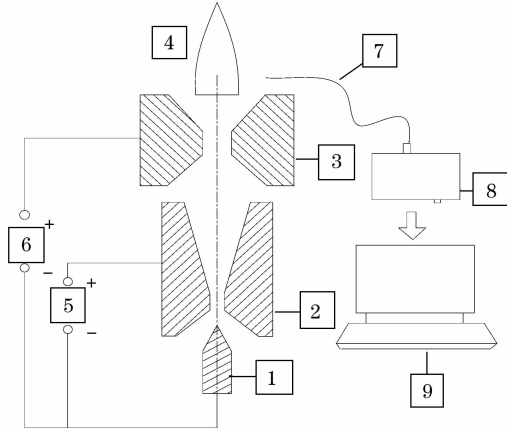


Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

- 1: Cathode; 2: Anode I; 3: Anode II; 4: Plasma jet;
- 5: Power supply I; 6: Power supply II; 7: Optical fiber;
- 8: Spectrometer; 9: Computer

由高能级 E_n 向低能级 E_m 跃迁的谱线强度可以表示为

$$I_{mn} = A_{mn} \frac{h\nu}{4\pi} n_n l \quad (3)$$

其中 n_n 是处于上能级的粒子数, A_{mn} 是由上能级向下能级跃迁的跃迁几率, ν_{mn} 是跃迁频率, h 是普朗克常数, l 是测量方向上等离子弧的厚度。

1. 2. 1 相对强度法计算激发温度

对于同种原子或离子的两条相近谱线, 有如下关系^[15]

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{A_p g_p \lambda_s}{A_s g_s \lambda_p} \exp\left(-\frac{E_p - E_s}{kT_e}\right) \quad (4)$$

式中 I_p , I_s , A_p , A_s , g_p , g_s , λ_p , λ_s , E_p , E_s 分别表示谱线 p 和谱线 s 的辐射强度、跃迁几率、能级统计权重、波长、激发能量, k 是玻尔兹曼常数, T_e 是电子温度。采用相对强度法时, 要选择波长、强度和波形轮廓相近的谱线, 这样可以提高测量精度。

1. 2. 2 玻尔兹曼图解法

由(2)和(3)式得到

$$\ln \frac{I_n}{A_n \nu_n g_n} = -\frac{1}{kT_{\text{exp}}} E_n + D \quad (5)$$

其中, $D = \ln \frac{hln}{4\pi Z(T)}$, 与谱线的选择无关, 以 E_n 为横坐标,

以 $\ln\left(\frac{I_n}{A_n \nu_n g_n}\right)$ 为纵坐标画出玻尔兹曼曲线, 然后对曲线进行线性拟合, 拟合直线的斜率就是 $-1/kT_{\text{ext}}$, 从而得到激发温度 T_{ext} 。

2 试验结果分析

实验中, 光谱仪测得的光谱信号主要是线状光谱, 连续光谱微弱, 与谱线信号相比可以忽略不计, 同时谱线信号也远大于噪音信号, 谱线轮廓清晰。光谱图中, 有许多氩原子的跃迁谱线, 分析这些谱线的光谱强度信号, 决定选用其中 5 条 Ar I 谱线作玻尔兹曼曲线, 这 5 条谱线对应的波长分别 603. 21, 687. 13, 703. 03, 714. 70, 727. 29 nm, 其他基本参数见表 1。

Table 1 Parameters of selected Ar I lines for Boltzmann temperature measurement

λ/nm	A/s^{-1}	E_u/eV	g_u	Ref
603. 21	2. 46E+06	15. 13	9	NIST
687. 13	2. 78E+06	14. 71	3	NIST
703. 03	2. 67E+06	14. 84	5	NIST
714. 70	6. 25E+05	13. 28	3	NIST
727. 29	1. 83E+06	13. 33	3	NIST

* NIST 全称为 National institute of standards and technology

把光谱仪测量得到的光谱强度, 结合表 1 的各参数, 代入公式(5), 得到各能级 E_n 以及对应的 $\ln\left(\frac{I_n}{A_n \nu_n g_n}\right)$ 值, 从而可以作玻尔兹曼曲线, 求得等离子体激发温度 T_{ext} , 见图 2。

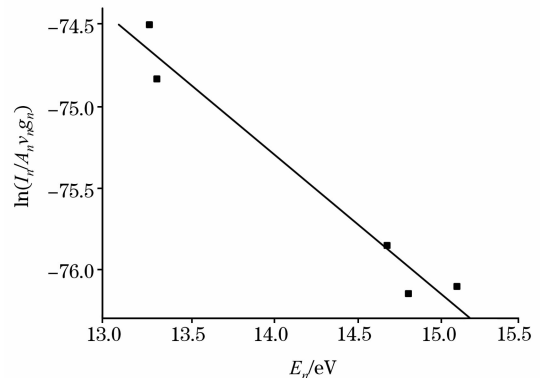


Fig. 2 Boltzmann plot for selected Ar I emission lines

$$q_{\text{Ar}} = 0. 520 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}, I_1 = I_2 = 100 \text{ A}$$

图 2 的玻尔兹曼曲线图是在如下实验条件下得到的, 等离子的流量为 $0. 520 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 电流 $I_1 = I_2 = 100 \text{ A}$, 光纤定位在离出口 6 mm。由图 2 拟合曲线的斜率求得等离子体激发温度 $T_{\text{ext}} \approx 13\ 600 \text{ K}$, 由于实验的等离子体弧的径向尺寸小, 并且处于大气压下, 认为是光学薄的, 激发温度近似等于电子温度 T_e 。

2. 1 等离子体射流轴向温度分布

保持等离子体炬的氩气流量在 $0. 520 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 两组电流 $I_1 = I_2 = 100 \text{ A}$ 不变, 调节光学平台, 使光纤沿着轴线在离第二个阳极出口不同距离处测量。从离第二个阳极出口 6 mm 升高到 40 mm, 等离子体电子温度的轴向变化见图 3。

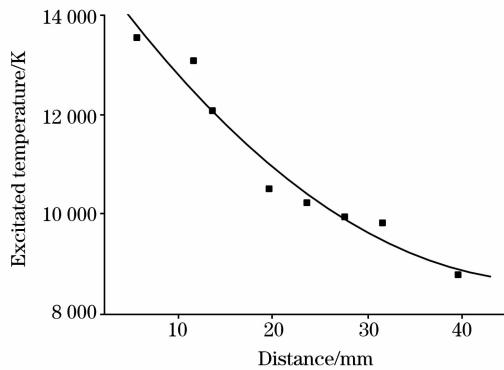


Fig. 3 Axial evolution of the electron temperature

在图 3 可以看出 T_{ext} 在随着轴向距离的增大, 先是显著地下降, 当距离增大到 20 mm 后, T_{ext} 的下降趋势变为缓和。造成这种下降趋势的原因, 可能是等离子体射流在出口处与空气发生强烈的卷吸作用, 致使 T_{ext} 大幅度地下降。在大于 20 mm, T_{ext} 的下降趋势变缓和, 因为在这区间, 射流卷吸很充分, 射流发展为湍流^[16]。

2.2 电流对等离子体激发温度的影响

调整光学平台, 使光纤对准到离第二个阳极出口处 6 mm 处, 进行两组试验: (1) 保持氩气流量为 $0.372 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时调节电流 I_1 和 I_2 , 保持 $I_1 = I_2$, 并从 80 A 逐渐提升到 110 A; (2) 保持氩气流量 $0.446 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时调节电流 I_1 和 I_2 , 保持 $I_1 = I_2$, 并从 90 A 逐渐提升到 120 A, 见图 4。

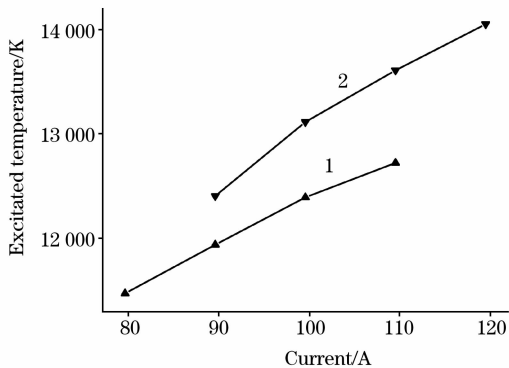


Fig. 4 Electron temperature variation with current intensities

1: 氩气流量为 $0.372 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$; 2: 氩气流量为 $0.446 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1}$

从图中可以看出, 电流对等离子体激发温度 T_{ext} 的影响较大, 这是因为, 当等离子体炬的工作气体流量一定时, 增大电流, 等离子弧的电压也升高了, 由于本等离子体发生器在实验过程中, 其伏安特性是上升的, 也就是说电源的输出功率也上升了, 那么增加的电能, 必然会有部分转移到等离子体射流, 所以, 在激发温度上也就体现出来, 随着电流的增大, 电子温度跟着上升。

另一方面, 在图 4 中还可以看出, 等离子体激发温度 T_{ext} 在电流保持不变时, 随着氩气流量的增加而升高。可能是因为, 在电流保持固定时, 增加气体的流量, 使等离子弧的电压升高了, 功率增加; 而且流量的增加使等离子体炬的热效率也增大, 因此等离子体的激发温度 T_{ext} 也升高了, 这一点从图 5 可以更清楚地体现。

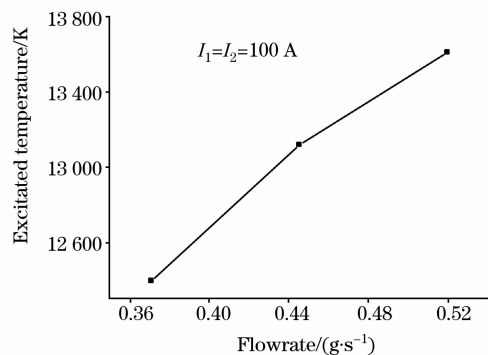


Fig. 5 Electron temperature variation with flowrate

3 结 论

光谱辐射法测量等离子体射流的电子温度, 是一种非接触式测量技术, 相比于其他技术, 具有操作方便和干扰小等优点。

文中通过对测得的光谱信号作玻尔兹曼斜率图, 计算等离子体射流的电子温度。分析研究射流的电子温度在轴向上的分布变化, 发现在距离出口的不同位置处, 电子温度的变化趋势不尽相同, 在离出口 6~20 mm, 电子温度下降得快, 在离出口 20~40 mm, 电子温度下降得慢。

研究等离子体射流在距出口 6 mm 处的电子温度, 发现电子温度受电源的供给电流的影响非常显著, 随电流的增大而显著地升高。并且发现电子温度也随着工作气体流量的增加而升高。

参 考 文 献

- [1] Pfender E. *Advances in Mechanics(力学进展)*, 1999, 29(2): 251.
- [2] Young Jun Park, Jong Heo. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, B91: 83.
- [3] Mina Sakanoa, Motofumi Tanakaa, Takayuki Watanabeb. *Thin Solid Films*, 2001, 386: 89.
- [4] Tsuginori Inaba, Yoshimoto Watanabe, Masayoshi Nagano, et al. *Thin Solid Films*, 1998, 316: 111.
- [5] Tadashi Ito. *Waste Manayement*, 1996, 16(5/6): 453.
- [6] Bonizzoni G, Vassallo E. *Vacuum*, 2002, 64(3-4): 327.
- [7] Konjevic N. *Plasma Sources Science & Technology*, 2001, 10: 356.
- [8] ZHAO Wen-hua, SHEN Yan, CHEN Li-ming(赵文华, 沈岩, 陈黎明). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2004, 24(8): 897.
- [9] TANG Yu-guo, LI Fu-tian(唐玉国, 李福田). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 1996, 16(1): 11.
- [10] YAN Jian-hua, TU Xin, MA Zeng-yi, et al(严建华, 屠昕, 马增益, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2006, 55(7): 3451.
- [11] TU Xin, YAN Jian-hua, MA Zeng-yi, et al(屠昕, 严建华, 马增益, 等). *Proceeding of the CSEE(中国电机工程学报)*, 2006, 26(20): 113.
- [12] TU Xin, LU Sheng-yong, YAN Jian-hua, et al(屠昕, 陆胜勇, 严建华, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2006, 26(10): 1785.
- [13] CHEN Li-ming, ZHAO Wen-hua, DANG Dao-yuan(陈黎明, 赵文华, 党道远). *Journal of Aerospace Power(航空动力学报)*, 2002, 17(2): 263.
- [14] Griem H R. *Plasma Spectroscopy*. New York: MC Graw Hill, 1964.
- [15] C. B. 德列斯文. *Physics and Tochnology of Low Temperature Plasma(低温等离子体物理及技术)*. Translated by TANG Fu-lin, CHEN Yuan-ming, MAO Bin(唐福林, 陈元明, 毛斌, 译). Beijing: Science Press(北京: 科学出版社), 1980. 83.
- [16] Pfender E, Fincke J, Spores R. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1991, 11(4): 529.

Temperature Measurement of DC Argon Plasma Jet

YAN Jian-hua, PAN Xin-chao*, MA Zeng-yi, TU Xin, CEN Ke-fa

Institute for Thermal Power Engineering, State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract The electron temperature of DC arc plasma jet is an important parameter, which determines the characteristics of plasma jet. The measurement of emission spectrum was performed to obtain the spectral intensities of some Ar lines and the method of diagrammatic view of Boltzmann was adopted to calculate the electron temperature. The results indicated that the electron temperature dropped at different speed along with the axes of the plasma jet and rose rapidly when the current was increased, and it also rose when the flowrate of argon was increased.

Keywords Plasma; Emission spectrum diagnosis; Excitated temperature; Diagrammatic view of Boltzmann

(Received May 10, 2006; accepted Nov. 20, 2006)

* Corresponding author