

文章编号: 1001-4322(2011)03-0783-04

# 层流氩等离子体射流温度的测量\*

孟 显<sup>1</sup>, 李 腾<sup>1</sup>, 潘文霞<sup>1</sup>, 陈 熙<sup>2</sup>, 吴承康<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 力学研究所, 北京 100190; 2. 清华大学 工程力学系, 北京 100084)

摘 要: 采用水冷管状静电探针施加负偏置电压,并使探针以一定速度垂直于射流轴线扫过层流氩等离子体射流的方法,测量探针所收集到的累积离子饱和电流随侧向位置的变化,利用 Abel 变换推导出了局部离子饱和电流密度沿射流径向的分布;采用自制的水冷动压探针,以动态扫描法测量了射流动压沿射流径向的分布;根据局部离子饱和电流密度和射流动压的测量数据,由理论关系式推导出了等离子体射流横截面上的温度分布,同时,采用谱线相对强度法测量了等离子体射流的激发温度。结果表明:两种方法得到的等离子体射流中心温度吻合较好,所得到的射流中心温度随弧电流加大而增大的变化趋势也一致。

关键词: 温度测量; 层流等离子体射流; 离子饱和电流; 动压; 光谱法

中图分类号: O536 文献标志码: A doi:10.3788/HPLPB20112303.0783

直流非转移式电弧等离子体射流是经电弧加热后从等离子体发生器喷嘴喷出的高温高速气流<sup>[1]</sup>,由于电弧放电过程极为复杂,流动状态控制困难,通常在 0.1 MPa 环境下产生的等离子体射流大多处于湍流状态,而层流等离子体射流的产生需要精心设计发生器结构和适当选择产生参数<sup>[2-4]</sup>。层流等离子体射流具有流动稳定、参数的轴向梯度小、工作噪声低、可重复性好等优点<sup>[2]</sup>,实验研究表明,层流等离子体射流可应用于熔凝、熔覆等材料表面加工场合且具有优异的工艺可控性<sup>[5-6]</sup>。然而,针对层流等离子体射流的参数诊断研究报道还不多。温度是表征等离子体射流热特性的一个重要参数。准确测量射流温度,既可为实际应用提供必要的参考数据,也可作为检验数值模拟所使用的数学物理模型及模拟结果正确性的依据。本文采用探针法和谱线相对强度法<sup>[7]</sup>测量了氩层流等离子体射流的温度,并比较两种方法得到的温度数据。

## 1 实验方法

层流等离子体射流的产生条件为:工作气体为纯氩,环境气体为空气;工作电流范围为 160~210 A;气流量为  $2.4 \times 10^{-4}$  kg/s。根据前期研究结果<sup>[8]</sup>,该条件下等离子体射流为亚声速流动,马赫数较低。水冷管状静电探针和水冷动压探针的移动速度为 116 mm/s。

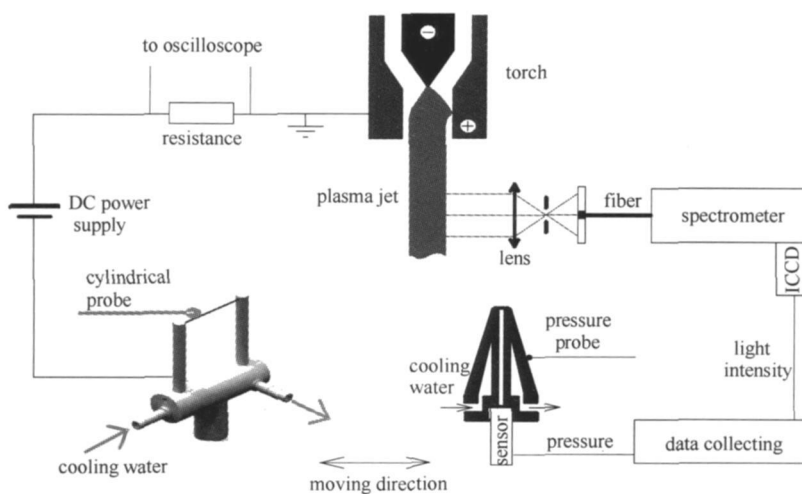


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

图 1 测量系统示意图

图 1 为测量系统示意图。接触式测温系统主要由水冷管状静电探针、直流偏压电源、采样电阻、水冷动压

\* 收稿日期: 2010-05-05; 修订日期: 2010-11-11  
基金项目: 国家自然科学基金项目(50836007, 10805066, 10772016)  
作者简介: 孟 显(1974-), 女, 助理研究员, 主要从事热等离子体特性诊断研究; mengxian@imech.ac.cn。

探针和数字示波器组成。水冷管状静电探针主体由外径 0.75 mm、内径 0.45 mm 的紫铜管制成,紫铜管整体固定在水冷支架上,冷却水通过水冷支架流经紫铜管,以防止实验过程中紫铜管过热烧毁。通过直流偏压电源在静电探针和发生器阳极间施加-32 V 的偏置电压(此时离子电流已经饱和),使静电探针垂直于射流轴线快速扫过等离子体射流截面,通过数字示波器实时采集电阻两端的电压信号,可得到累积离子饱和电流随探针侧向距离的变化。对测量数据进行高斯拟合处理以消除干扰影响,再经 Abel 变换<sup>[9]</sup>,可得到局部离子饱和电流密度沿射流径向的分布。

水冷动压探针前端设计为锥形,以减少测量过程中对等离子体射流的扰动。探针锥尖处直径为 1.5 mm,中心开有直径 0.6 mm 的引压孔;探针后端连接响应频率为 40 kHz 的压差传感器。射流中的局部动压分布也通过动态扫描法测量得到,即水冷动压探针沿垂直于射流轴线的方向快速扫过等离子体射流截面,压差传感器可实时将测到的压力信号转换成 mV 电压信号,经放大器放大 100 倍后,由数字示波器采集得到。

等离子体射流温度分布根据文献[10]给出的局部离子饱和电流密度  $j_{is}$  公式和文献[11]给出的射流动压  $p$  公式得出,即

$$j_{is} = \frac{1}{2}(Sc_{\infty})^{-0.16}(Pr_{\infty})^{0.06}en_{i\infty}(D_{i\infty}^*u_{\infty}/d_0)^{0.5} \quad (1)$$

$$p = \frac{1}{2}\rho_{\infty}u_{\infty}^2 \quad (2)$$

式中:  $Sc_{\infty}$  和  $Pr_{\infty}$  分别为来流温度下的 Schmidt 数和 Prandtl 数;  $e$  为基元电荷量;  $n_{i\infty}$  为离子数密度;  $D_{i\infty}^* = 2D_i$ , 为离子的双级扩散系数,  $D_i$  为离子扩散系数;  $u_{\infty}$  为来流速度;  $d_0$  为水冷管状探针直径;  $\rho_{\infty}$  为气体密度。

将式(2)代入式(1),可得到

$$j_{is}\left(\frac{d_0}{p}\right)^{0.5} = \frac{1}{2}(Sc_{\infty})^{-0.16}(Pr_{\infty})^{0.06}\left(\frac{2}{\rho_{\infty}}\right)^{0.25}en_{i\infty}(D_{i\infty})^{0.5} \quad (3)$$

式中:  $Sc_{\infty}$ ,  $Pr_{\infty}$ ,  $\rho_{\infty}$ ,  $n_{i\infty}$  和  $D_{i\infty}$  均依赖于温度<sup>[10]</sup>。实验条件下,式(3)的右边只是温度  $T$  的函数,只要测得了等离子体射流中的局部离子饱和电流密度和射流动压,便可根据式(3)得到射流温度,相应地可以得到气体密度和等离子体速度。

光谱测温系统由焦距 120 mm 的透镜、10 mm × 1 mm 的线状光纤、焦距 550 mm 的光谱仪和具有精确曝光时间的 ICCD 探测器组成。本文选用 ArI 750.4 nm 和 ArI 751.5 nm 的两条氩原子谱线,通过相对强度法导出等离子体射流的激发温度。ICCD 探测器的曝光时间设定为 500 ms。在 0.1 MPa、亚声速射流条件下,局域热力学平衡(LTE)假定成立,激发温度可认为是气体温度。

## 2 结果与讨论

图2所示为弧电流 160 A 和 180 A 条件下测得的累积离子饱和电流随探针至射流中心侧向距离的变化。产生等离子体射流的气流量为  $2.4 \times 10^{-4}$  kg/s,探针中心距发生器出口平面 5 mm。从图中看到,累积离子饱和电流曲线上带有较规则的交流波动,这是因为产生等离子体射流所用电源为全波整流型直流电源,其电流输出中含有一定的交流成分,这直接导致了等离子体射流参数的波动特性。对测得的累积离子饱和电流分布进行高斯拟合以消除交流干扰的影响,可得到图2中虚线所示的拟合曲线,本文将根据这两条曲线导出相应条件下的等离子体射流温度分布。从图中看到在等离子体射流中心区域,弧电流 180 A 时测得的累积离子饱和电流明显高于 160 A 时的结果,说明在 180 A 时带电粒子密度要高于

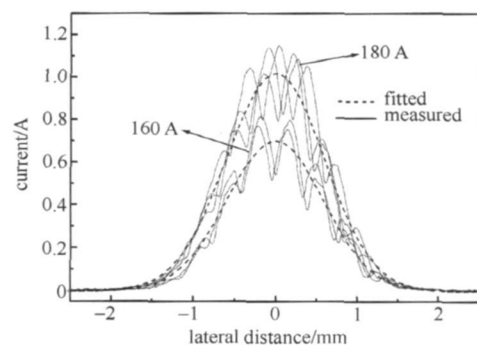


Fig. 2 Measured profiles of cumulative ion saturation current and Gaussian fitting curves

图2 累积离子饱和电流分布及高斯拟合曲线

160 A 时的值。图中所示为 180 A 条件下不同时刻得到的 3 条累积离子饱和电流曲线,160 A 条件下为 2 条,可以看到所得结果的重复性很好,这也间接证明了层流等离子体射流流动稳定的特点。

图3给出了动压探针测得的等离子体射流中的动压分布及根据动压波动最低值得到的动压分布拟合曲线(图中虚线)。实验中所用气流量为  $2.4 \times 10^{-4}$  kg/s,弧电流为 180 A,动压探针中心距发生器出口平面 5

mm。图中包含 5 条不同时刻测量得到的动压分布曲线。可以看到,同累积离子饱和和电流结果类似,测得的动压信号也含有交流波动。实验中曾尝试将动压探针后端的压差传感器换为 U 型管,测量相同条件下的动压分布。多次的测量结果发现,U 型管测得的动压值总是接近用压差传感器测得的动压波动值的最低值。通过对压差传感器在现有结构的动压探针中工作过程的细致分析<sup>[12]</sup>,发现脉动气流通过动压探针通道冲击压差传感器的作用会使传感器信号的平均值高于实际的动压平均值,而 U 形管的读数则更接近于实际平均值。因此,本文将根据动压探针测得的动压波动最低值拟合得到动压分布曲线,如图 3 中虚线所示。

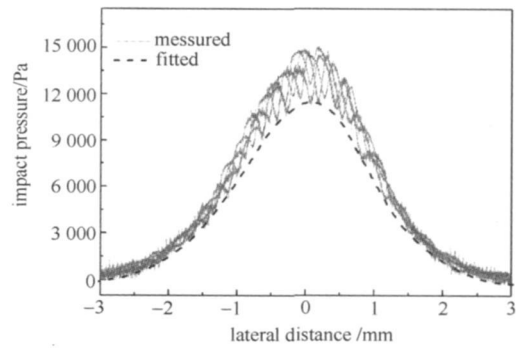


Fig. 3 Measured profiles of impact pressure and minimum fitting curve  
图 3 动压分布及动压最小值拟合曲线

对图 2 得到的累积离子饱和和电流拟合曲线做 Abel 变换,

可得到图 4 所示的局部离子饱和和电流密度沿射流径向的分布。图 4 同时给出了相同工作参数条件下的射流动压分布的测量结果。从图 4 看到,当弧电流从 180 A 降低到 160 A 时,射流中心处的局部离子饱和和电流密度值从 0.47 A/mm<sup>2</sup>减小到 0.33 A/mm<sup>2</sup>,射流动压也由 12 000 Pa 减小到 9 400 Pa,这说明弧电流大小明显影响离子饱和和电流密度与射流动压,影响射流的温度与速度。同时也看到,局部离子饱和和电流密度显著不为零的区域要比射流动压显著不为零的区域窄很多。这是因为射流边缘区域的温度较低,相应的氩气电离度很低,从而探针收集到的离子饱和和电流几乎为零,但射流动压在该区域仍具有相当高的数值。

将图 4 对应条件下的局部离子饱和和电流密度值和动压值代入式(3),可导出等离子体射流温度的径向分布曲线,如图 5 所示。当弧电流由 180 A 降低到 160 A 时,通过探针法测得的等离子体射流中心温度从约 14 000 K 降低为约 13 300 K。根据射流温度和动压数据,由动压式(2)计算可得,此时对应的射流中心速度分别约为

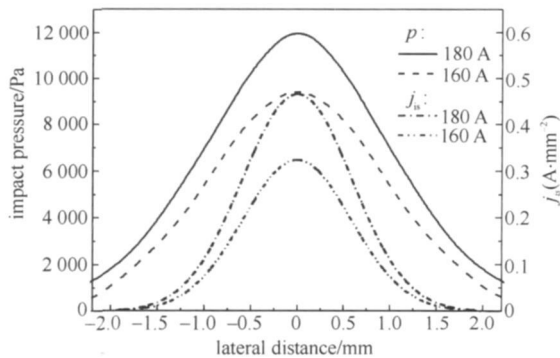


Fig. 4 Minimum fitting curves of impact pressure and Abel inversion results of ion saturation current density

4 等离子体射流动压及局部离子饱和和电流密度的径向分布图

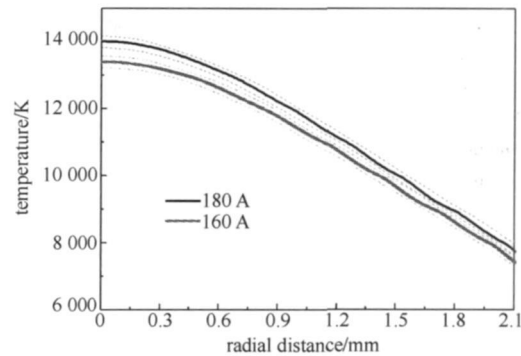


Fig. 5 Radial distributions of jet temperature derived from measured ion saturation current density and impact pressure

图 5 由等离子体射流离子饱和和电流密度和动压导出  
的等离子体射流径向温度分布

980 m/s 和 810 m/s。该条件下声速的计算值分别为 2 191 m/s 和 2 036 m/s,从而得到马赫数分别为 0.44 和 0.39,即射流处于亚声速流动状态。在该马赫数条件下,由动压式(2)计算的射流速度和根据适用于可压缩完全气体的无粘、绝热流动条件下的驻点压力和流速的关系式<sup>[13]</sup>计算得到的射流速度相差小于 3%。由式(3)可知,射流温度与局部离子饱和和电流密度  $j_s$  及射流动压  $p^{-1/4}$  相关,因此温度测量误差可认为主要来自于局部离子饱和和电流密度测量带来的误差。图 5 虚线给出了弧电流 160 和 180 A 条件下,由于电源输出中含有的交流分量引起的局部离子饱和和电流密度波动带来的温度测量误差范围。

图 6 所示为光谱法和探针法得到的射流中心温度随弧电流

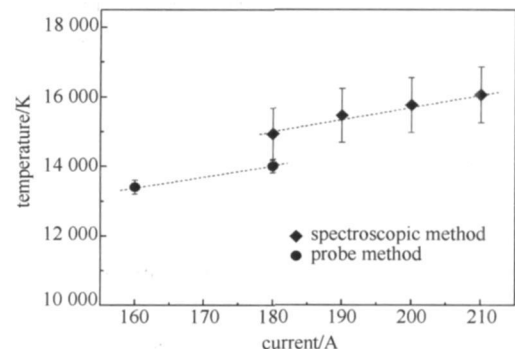


Fig. 6 Comparison of measured temperature at jet center between spectroscopic method and sweeping probe method

图 6 探针法和光谱法测得的等离子体射流温度比较

的变化图。当弧电流从 180 A 增加到 210 A 时,通过谱线相对强度法得到的等离子体射流中心激发温度从约 15 000 K 升高到约 16 000 K。弧电流为 180 A 时,光谱法测量的射流中心激发温度比探针法测量的气体温度约高 1 000 K,考虑到两种测温方法自身所包含的误差,可认为二者是吻合的。本文光谱测温所用方法为谱线的相对强度法,由于相对强度法可以不用进行绝对光强的标定,如果选用两条相邻近谱线,又可以认为光谱仪对谱线的响应是一样的,因此操作起来比较方便,但这样也带来了测量误差较大的问题。在今后的工作中,将考虑采用测量误差相对较小的方法,如谱线绝对强度法, Boltzmann 图表法<sup>[7]</sup>等来进一步测量射流温度。图 6 还表明,两种测温方法得出的射流中心最高温度随着弧电流的加大而增高,变化趋势一致。

### 3 结 论

本文通过探针法和光谱法两种测温方法测量了喷射于大气压环境中的氩层流等离子体射流的温度。在弧电流为 180 A、氩流量为  $2.4 \times 10^{-4}$  kg/s 时,距发生器出口 5 mm 处层流等离子体射流中心的最高温度可达 14 000 K,最高速度可达 980 m/s。探针法和光谱法测得的等离子体射流中心温度吻合较好,所得到的射流中心温度随弧电流变化的趋势也一致。

#### 参考文献:

- [1] Pfender E, Spores R, Chen W L T. A new look at the thermal and gas dynamic characteristics of a plasma jet[J]. *Int J Mater Product Technol*, 1995, **10**(3/6): 548-565.
- [2] Pan Wenxia, Zhang Wenhua, Zhang Wenhong, et al. Generation of long, laminar plasma jets at atmospheric pressure and effects of flow turbulence[J]. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 2001, **21**(1): 23-35.
- [3] Kuz' min V, Solonenko O, Zhukov M. Application of DC plasma torch with a quasilaminar jet outflow for coating treatment[C]//Proceedings of the 8th National Thermal Spray Conference, 1995: 83-89.
- [4] Osaki K, Fukumasa O. High thermal efficiency-type laminar plasma jet generator for plasma processing[J]. *Vacuum*, 2000, **59**: 47-54.
- [5] Pan Wenxia, Meng Xian, Li Gang, et al. Feasibility of laminar plasma jet hardening of cast iron surface[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, **197**(2/3): 345-350.
- [6] Ma Wei, Fei Qunxing, Pan Wenxia, et al. Investigation of laminar plasma remelting/cladding processing[J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(10): 3541-3546.
- [7] Auclero O, Flamm D L. Plasma diagnostics: Vol. 1. Discharge parameters and chemistry[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1994.
- [8] 孟显, 潘文霞, 吴承康. 层流等离子体射流温度与速度测量[J]. 工程热物理学报, 2004, **25**(3): 490-492. (Meng Xian, Pan Wenxia, Wu Chengkang. Temperature and velocity measurement of laminar plasma jet. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2004, **25**(3): 490-492)
- [9] Deutsch M, Beniaminy I. Inversion of Abel's integral equation for experimental data[J]. *Journal of Applied Physics*, 1983, **54**(1): 137-143.
- [10] Chen X. Ion saturation current density and specific heat flux on a cylindrical probe immersed in a dense plasma flow[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1982, **15**: 1695-1708.
- [11] 吴望一. 流体力学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000. (Wu Wangyi. Fluid dynamics[M]. Beijing: Peking University Press, 2000)
- [12] 孟显. 层流等离子体射流的流动与传热特性研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2006: 77-81. (Meng Xian, Studies of the laminar plasma jet flow and heat transfer characteristics. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2006: 77-81)
- [13] Zucrow M J, Hoffman J D. Gas dynamics: Volume I [M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1976.

## Temperature measurements of laminar argon plasma jet

Meng Xian<sup>1</sup>, Li Teng<sup>1</sup>, Pan Wenxia<sup>1</sup>, Chen Xi<sup>2</sup>, Wu Chengkang<sup>1</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The cumulative ion saturation currents on a cylindrical probe are measured by using a negatively biased, water cooled cylindrical electrostatic probe sweeping with a fixed speed perpendicularly across a laminar argon plasma jet, and the radial distribution of local ion saturation current density is then obtained by use of the Abel inversion. The radial distribution of the jet impact pressure is also measured dynamically using a water cooled pressure probe. Based on the measured profiles of the local ion saturation current density and impact pressure and using related theoretical relations, the radial distribution of the plasma jet temperature is deduced. Additionally, the spectroscopic method based on the relative intensity of spectral lines is employed to measure the plasma jet temperature. Experimental results show that the plasma jet temperature and its variation with arc current measured with these two methods are consistent with each other.

**Key words:** temperature measurement; laminar plasma jet; ion saturation current; impact pressure; spectroscopic method