

层流等离子体射流温度与速度测量

孟 显 潘文霞 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 本文分别应用光谱诊断、水冷皮托管及小尺寸杆状热流探针, 对自由射入空气中的纯氩层流等离子体射流中心最高温度、滞止压力以及最大热流密度进行了测量, 由测量结果导出了层流射流的中心最大速度, 得到了射流气体温度和速度的轴向分布及其随工作电流和气流量变化的一些规律, 探讨了气体的温度和速度对其向探针表面换热系数的影响。

关键词 层流等离子体射流; 温度; 速度

中图分类号: O536 文献标识码: A 文章编号: 0253-231X(2004)03-0490-03

TEMPERATURE AND VELOCITY MEASUREMENT OF LAMINAR PLASMA JET

MENG Xian PAN Wen-Xia WU Cheng-Kang

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract The axial temperature of a DC argon laminar plasma jet injecting into the atmosphere was measured by using spectrometric method. The stagnation pressure and maximum heat flux were measured through water-cooled pitot-tube and a small stick-shaped probe separately. The axial velocity was calculated according to the measured pressure and temperature. The maximum temperature and velocity of the jet flow at the center of the torch exit increase with arc current. The effect of gas temperature and velocity on heat transfer coefficient from jet flow to probe surface was also discussed.

Key words laminar plasma jet; temperature; velocity

1 引 言

纯氩层流等离子体射流射入到空气中的长度可达 550 mm^[1], 随着产生射流的工作参数变化, 其长度明显改变, 也就是流场分布明显变化, 并有很好的可重复性。这些特点除了可能发展其新的应用领域以外, 也为热等离子体特性的理论和实验对照研究提供了典型的对象。但由于层流射流的产生需要很好地平衡发生器结构和产生参数, 到目前能成功地产生出这种射流的报告不多, 因此, 也基本上查不到对其特性的系统研究结果。文献 [2,3] 对纯氩层流等离子体射流的温度及速度分布作了一些数值模拟工作。由于缺乏系统可靠的实测数据, 计算中只能适当假定温度和速度的初值, 对模拟结果也只能作定性分析, 对数学物理模型的正确性缺少判定的依据。因此, 有必要对层流等离子体射流的特性参数进行系统的测量。

热等离子体射流具有极高温度及大的径向温度梯度, 对其特性参数的确切测量存在一些困难^[4]。本文应用光谱诊断、水冷皮托管和小尺寸杆状热流探针, 分别对射入空气中的纯氩层流等离子体射流的温度、滞止压力及热流密度进行了测量, 导出了层流射流的速度以及射流与探针表面之间的换热系数。

2 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, 气流量变化范围从 1.6×10^{-4} kg/s 到 2.4×10^{-4} kg/s, 工作电流变化范围从 110 A 到 180 A, 环境气体为空气。

图 1 为测量系统示意图。光谱系统包括透镜、直径 0.4 mm 的石英光纤、减光片和光谱分析仪。光谱测温属于非接触式方法, 不对射流产生扰动。在

收稿日期: 2004-01-08; 修订日期: 2004-03-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50276065; No. 50336010)

作者简介: 孟显 (1974-), 女, 河北石家庄人, 博士生, 主要从事热等离子体射流特性诊断及其与固相表面相互作用研究。

假定射流为定常流动、处于局域热力学平衡状态、轴对称的前提下, 采用谱线相对强度法^[5]及 Abel 变换^[5]得到了层流射流的温度。实验选用的是波长为 750.4 nm 和 751.5 nm 的氩原子谱线。

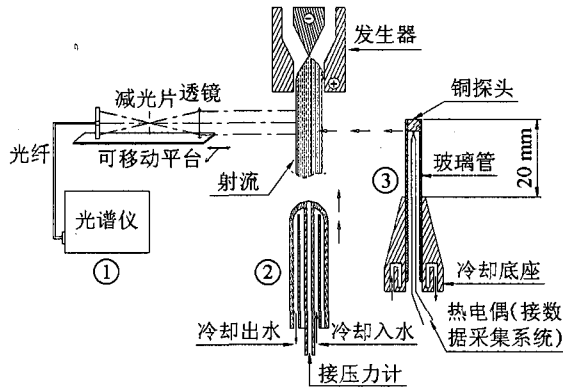


图1 测量系统图 (①光谱仪测温部分, ②皮托管测压部分, ③小尺寸杆状热流探针测热流密度部分)

滞止压力测量系统主要由水冷皮托管和 U 型管压力计构成。皮托管测量端外径为 13 mm, 球形端中心开孔为 0.8 mm, 小孔的后端连接 U 型管压力计。根据伯努利方程 $P = 1/2\rho u^2$, 这里 P , ρ , u 分别为测得的滞止压力、气体密度和测量点的气流速度, 其中密度是温度的函数^[6], 在已知对应点温度的情况下, 可以得到测量点的气流速度。

热流密度的动态测量采用外径为 1 mm 的小尺寸杆状热流探针^[4], 探针相对射流的移动速度固定为 260 mm/s。

等离子体发生器出口处的射流平均温度通过测量射流功率 (总焓) 的方法得到^[1]。测量装置的设计考虑了在尽量不影响射流状态的情况下将气体冷却至室温, 并认为冷却水温升的焓值等于射流的功率, 同时根据工作气流量得到射流的比焓, 由此得到射流在发生器出口处的平均温度^[6]。

3 实验结果及讨论

图 2 为由光谱法得到的射流在发生器出口处中心最高温度, 以及由比焓法得到的平均温度随气流量 (图 2(a)) 和电流 (图 2(b)) 变化的曲线。由图 2(a) 看到, 在 1.6×10^{-4} kg/s 到 2.4×10^{-4} kg/s 的气流量变化范围, 发生器出口处射流的平均温度和中心最高温度几乎不随气流量而改变, 这说明在工作电流不变而改变气流量的条件下, 射流的总焓会改变, 但比焓保持不变。从图 2(b) 看到, 发生器出口处的射流平均温度和中心最高温度都随工作电流的增加而增加。电流从 110 A 增至 180 A 时, 射流最高温度大约从 15000 K 增至 17000 K, 这比以往数值计

算中假定的最高温度要高^[2,3]。

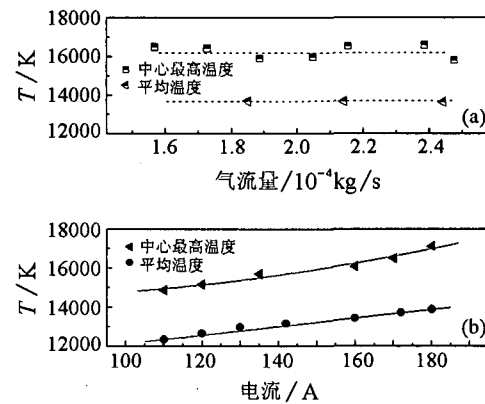


图2 射流温度随: (a) 气流量 (电流 170 A) 及 (b) 电流 (气流量 1.6×10^{-4} kg/s) 的变化曲线

图 3 所示为射流中心温度和速度沿轴线的变化。在距发生器出口 60 mm 范围内, 射流的温度梯度大约为 55 K/mm, 这和文献 [7] 中的数值模拟结果基本一致, 而湍流射流高温区的轴向温度梯度一般大于 200 K/mm^[7,8]。由于皮托管的直径大于发生器出口直径, 测量距发生器出口较近的滞止压力时, 可能会对流场产生较大扰动。因此距出口 5 mm 以内的压力值是通过 10 mm 到 5 mm 的测定值外延得到的^[4]。由伯努利方程计算得到的发生器出口处射流中心气流速度大约为 840 m/s, 比一般数值计算时层流射流的最大速度假定值 (低于 500 m/s)^[2,3] 要高得多, 接近一般的湍流射流最大速度。但出口处的平均雷诺数大约为 340, 处于层流等离子体射流的雷诺数范围^[9]。

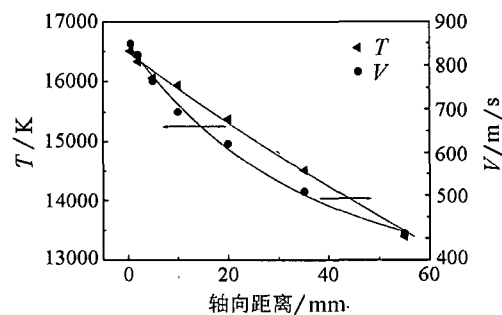


图3 射流轴线上的温度及速度变化 (气流量 1.6×10^{-4} kg/s, 电流 170 A)

图 4 所示为由滞止压力测定值和伯努利方程推出的发生器出口处射流最大速度随气流量变化 (工作电流为 170A) 和随工作电流变化 (气流量为 1.6×10^{-4} kg/s) 的曲线。同时, 图 4 也标示了由平均温度和实际工作气流量, 射流直径按 4.7 mm 计算得到的射流在发生器出口处的平均速度, 以及根据射流速度分布^[7]: $u = u_{\max}[1 - (r/R)^2]^{3/2}$ (其中

u_{\max} 为发生器出口处射流中心最大速度, R 为射流半径, u 为射流截面上任一点 r 对应的速度), 由平均速度算出的射流中心最大速度。从图中看到, 两种方法得到的射流中心最大速度的变化趋势很好地吻合。以往数值计算时所取的层流射流的最大速度假定值比该图所示平均速度还要低。当然, 气流速度与产生等离子体的工作参数和发生器出口直径等多项因素有关, 但本实验结果无疑为数值计算的初值选定提供了有价值的参考。

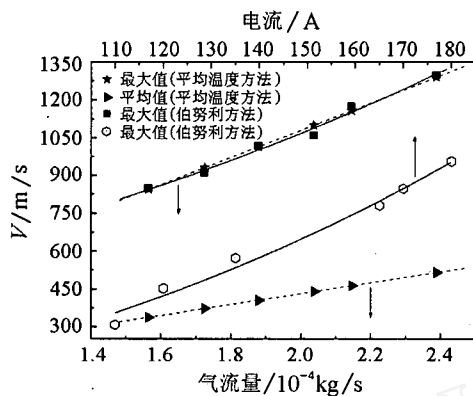


图 4 发生器出口处射流最大速度和平均速度随气流量及电流的变化曲线

图 5 为杆状热流探针测得的发生器出口处射流中心的最大热流密度以及气体与探针表面的换热系数与温度和速度的关系。换热系数由换热方程 $q = h_i(i_e - i_w)^{[10]}$ 导出, 本研究中 q 为探针测得的热流密度, i_e 和 i_w 分别是边界层边界处的气体比焓和探头表面的气体比焓, 这里 i_w 近似取壁面温度对应

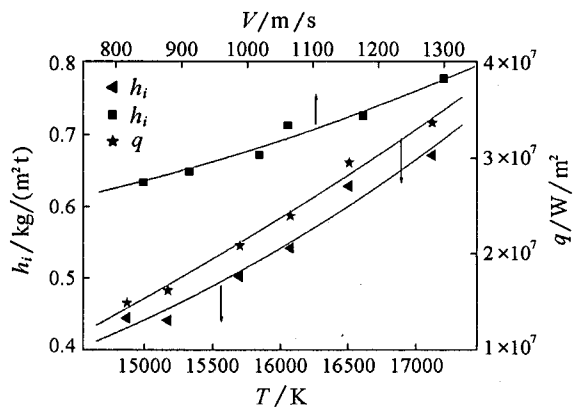


图 5 最大热流密度 q 随温度的变化曲线及换热系数 h_i 随温度、速度的变化曲线

的气体比焓。图中热流密度、换热系数与温度的关系是在同图 2 气流量固定的条件下得到的。因此, 图中换热系数随温度的变化关系中隐含了气流速度的影响。而换热系数随气流速度变化的关系, 是在同图 2 电流固定的条件下导出的。如图 2 所示, 在工作电流一定的条件下, 射流最高温度不随气流量而变化, 因此, 这里的换热系数随速度的变化关系是在等温条件下得到的。可见不仅是气体温度, 气流速度对换热效果也有明显的影响。

4 结 论

通过本文研究, 得到以下结论: 在本文实验条件范围内, 层流等离子体射流在发生器出口处的平均温度和中心最高温度不随气流量的变化而改变, 但随弧电流的增加而单调上升; 射流最大速度随气流量和电流的增加而单调增加, 并可能接近一般的湍流射流最大速度值; 高温气体向固体表面的换热系数随气体温度和速度的增加而增加。

参 考 文 献

- [1] W X Pan, W H Zhang, W Ma, et al. Characteristics of Argon Laminar DC Plasma Jet at Atmospheric Pressure. Plasma Chem. Plasma Process, 2002, 22(2): 271-283
- [2] X Chen, Y X GU. A numerical Analysis of Laminar and Turbulent Jets. In: Edited by A Bouchoule et al. Proc. of ISPC15. Orleans, 2001. 1045-1050
- [3] 徐东艳, 陈熙. 层流氩等离子体射流特性的数值模拟研究. 见: 中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集(下册). 上海, 2002. 669-672
- [4] 孟显, 潘文霞, 吴承康. 层流高温部分电离气体射流向铜探头表面换热的实验研究. 见: 中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集(下册). 北京, 2003. 926-929
- [5] O Auciello, D Flamm. 等离子体诊断(第一卷). 放电参量与化学, 北京: 电子工业出版社, 1994. 392-395
- [6] M Boulos, P Fauchais, E Pfender. Thermal Plasmas 1. Plenum Press, New York, 1994. 388-392
- [7] W X Pan, W H Zhang, W H Zhang, et al. Generation of Long, Laminar Plasma Jets at Atmospheric Pressure and Effects of Flow Turbulence. Plasma Chem. Plasma Process, 2001, 21(1): 23-35
- [8] E Pfender, R Spores, W Chen. A New Look at the Thermal and Gas Dynamic Characteristics of a Plasma Jet. Int. J. Mater. Product Technol, 1995, 10(3-6): 548-565
- [9] V Kuamin, O Solonenko, M Zhukov. In: Proc. 8th National Thermal Spray Conference, Houston, 1999. 83-88
- [10] E R Eckert, E Pfender, Advances in Plasma Heat Transfer. Advances in heat transfer, 1967, 4: 229-316