2009年 8月 宇航计测技术 Aug ,2009
第 29卷 第 4期 Journal of Astronautic Metrology and Measurement Vol 29,No. 4

文章编号:1000 - 7202(2009) 04 - 0012 - 04 中图分类号:O536 文献标识码:A

减压直流等离子体射流电子温度的双静电探针测量

郭志颖[1,2] 孟 显[1] 黄河激[1] 潘文霞[1]
(1. 中国科学院力学研究所,北京 100190; 2. 北京东方计量测试研究所,北京 100086)

摘 要 建立了一套双静电探针诊断系统,用于检测在气流量为 4. 2 slm、弧电流为 80 A、真空室压力为 165 Pa的条件下纯氩直流非转移弧等离子体射流的电子温度及其分布。结果表明:发生器出口处射流中心的电子温度约为 14 500 K,射流中电子温度随离开发生器出口的轴向或径向距离的增加而单调降低;径向电子温度梯度约为 263 K/mm,轴向电子温度梯度为 69 K/mm;射流中电子温度随弧电流增加而单调上升。

关键词 热等离子体射流 电子温度 双静电探针测量

Electron Temperature Measurement of a Reduced-pressure arc Plasma jet by Using Double-electrostatic-probe

GUO Zhi-ying[1,2] MENG Xian[1] HUANG He-ji[1] PAN Wen-xia[1]
(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190;
2. Beijing Orient Institute Measurement & Test, Beijing 100086)

Abstract A double-electrostatic-probe diagnostic system is established to measure the electron temperature in a reduced-pressure arc plasma jet. Electron temperature distributions in an argon plasma jet at working-gas flow rate of 4. 2 slm and arc current of 80 A are obtained when the chamber pressure is at 165 Pa. Experimental results show that the electron temperature in the plasma jet monotonically decreases with the increasing axial/radial distance from the torch exit. The central maximum electron temperature of the plasma jet at the torch exit is about 14 500 K, and the radial gradient of the electron temperature is about 263 K/mm, which is much higher than the axial gradient of 69 K/mm. The electron temperature increases with the increase of the arc current.

Key words Thermal plasma jet Electron temperature Double-electrostatic-probe measurement

1 引 言

在比冲远高于传统化学推进的多种空间电推进方案中,电弧加热推进系统具有比冲适中、发动机体积小和系统简单等特点,适合执行卫星姿态控制、位置保持、轨道转移等任务,在国际上已经得到了较为广泛的应用[1~3]。电弧加热发动机的射流参数在一定程度上反映了其推力效率和比冲等重要性能指

收稿日期:2008 - 10 - 13; 修回日期:2008 - 11 - 24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10775164, 10621202)
作者简介:郭志颖 (1983 -),男,硕士研究生,主要从事热等离子技术的研究。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

标,了解这些参数可为相关性能调控提供一些科学有效的参考依据。电子温度是表征射流特性的主要参数之一。对电子温度的准确测量不仅可加深人们对射流流场特性的认识,也可为优化电弧加热发动机的结构设计以及运行参数的组合提供一定的指导依据。

作为一种接触式测量方法,静电探针常用于等离子体射流中电子温度、电子数密度等参数的局部诊断[4~6]。静电探针法的突出优点是仪器结构简单,制作方便,但会对流场造成一定的干扰。

本研究建立了一套双静电探针诊断系统,以检测喷入低气压环境的电弧等离子体射流中的电子温度。对不同工况下氩等离子体射流中的电子温度及其分布进行了诊断,研究了电子温度随弧电流变化的趋势。该诊断技术可作为测量电弧加热发动机射流中的电子温度,了解发动机工作特性的一种方法[6]。

2　实验系统及实验方法

实验系统由等离子体发生器、真空系统、电源系统、供气系统、冷却水系统以及探针测量系统组成。

等离子体发生器由实验室自行研制[7]。等离子体射流的产生条件为:工作气体为纯氩,气流量为 4.2 slm,弧电流范围为 80 A～100 A,真空室压力为 165 Pa。当弧电流为 80 A时,射流可见长度大于 450 mm,在发生器出口处可见径向尺寸大于 50 mm。

等离子体发生器由全波整流型直流电源供电,输出电流可在 70 A～140 A范围调节,电源输出中含有频率为 300 Hz的交流分量[8],能量波动幅度约为电源输出平均值的 ±18%。

双静电探针系统主要由接受信号的表面积近似相等的两根静电探针组成。工作电压 U_D 加在两探针之间,通过测量探针上的工作电流 I_D 随 U_D 的变化获得双探针的伏安特性曲线,根据公式 (1)[9] 即可计算出探测点的电子温度 T_e

$$\left.\frac{\mathrm{d}I_D}{\mathrm{d}U_D}\right|_{I_D=0}=\frac{e}{kT_e}\times\frac{I_{i01}\times I_{i02}}{I_{i01}+I_{i02}} \qquad (1)$$

式中: I_{i01} 和 I_{i02} ——分别为两根探针上的离子饱和电流,在计算中都取正值; k——玻耳兹曼常数; e——电子电量。

双静电探针系统中无接地端,以避免等离子体悬浮电位不稳定对测量结果的影响[9]。

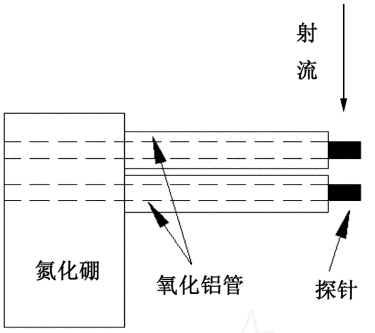

图 1　双静电探针检测端结构示意图

图 1所示为双静电探针系统检测端的结构示意图。探针采用直径为 Φ0.3 mm的钨丝制成,它具有很高的熔点,同时 Φ0.3 mm的直径既不会对射流产生太大的扰动,也具有足够的刚度。探针外侧套装内径为 Φ0.5 mm,外径为 Φ1 mm,长度为 35 mm的氧化铝管,用以保证探针间的绝缘,探针露出氧化铝管的长度为 2 mm。氧化铝管和钨丝利用耐高温无机胶固定在氮化硼支撑台上,氮化硼支撑台上开有 2个直径为 Φ0.5 mm,中心垂直距离为 1 mm的通孔,用以定位探针的位置。氮化硼支撑台装在真空室内的平动和升降杆上,可实现探针沿射流轴向和径向的移动。

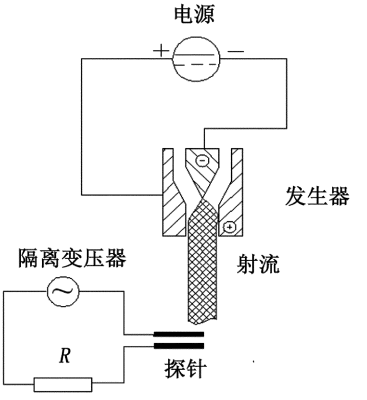

图 2　测量系统电路图

图 2是探针测量电路示意图。采用可将 220 V交流电变压到实验所需范围的隔离变压器,为探针回路提供工作电压并隔离市电地,确保实验电路悬浮。本文中交流工作电压为 - 10 V～ + 10 V,电阻 R的阻值为 10 Ω。用示波器采集隔离变压器的输出电压以及电阻两端的电压,二者之差即为两探针

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

间的工作电压 U_D。探针工作电流 I_D与流经电阻 R 的电流相等,等于电阻两端电压与电阻阻值之比。

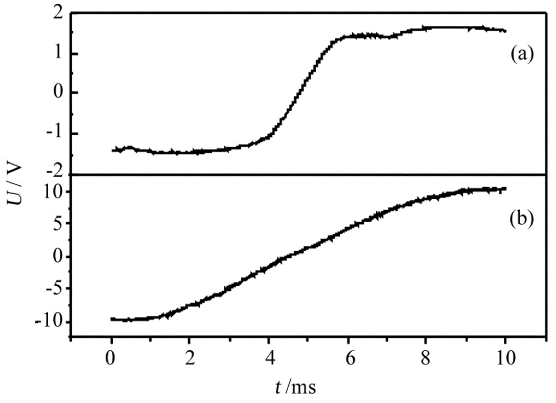

图 3 双探针对射流的检测数据图

图 3给出了弧电流 80 A、探针放置在发生器出口中心时示波器采集到的数据。图 3(a)为电阻 R 两端的电压信号。由于实验所用的电源输出中含有 300 Hz的波动,因此探针采集到的离子饱和电流信号中也含有 300 Hz的波动[8]。图 3(b)为隔离变压器的输出电压信号。整理图 3的数据,可获得双探针 I - U特性曲线,见图 4。

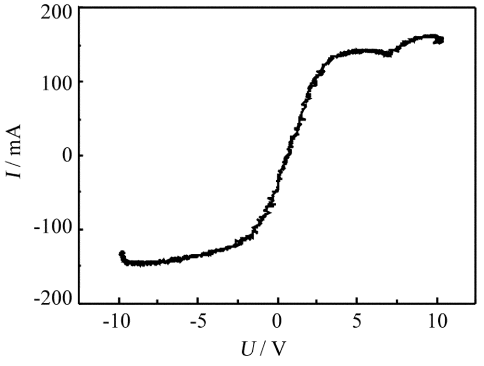

图 4 双探针的 I - U特性曲线图

3 实验结果及讨论

图 5和图 6分别为用上述双探针法测量得到的等离子体射流轴向和径向的电子温度分布。图中倒三角符号为单次测量的结果。由图 5可见,等离子体射流轴线上的电子温度随着离开发生器出口距离的增加而降低,在发生器出口处,射流中心电子温度的平均值约为 14 500 K,当轴向距离增加到 75 mm时,电子温度的平均值减小到 9 300 K,射流电子温度沿轴向的平均变化梯度约为 69 K/mm。由图 6可见,等离子体射流电子温度随着径向距离的增加而降低。离开射流中心 30 mm处的平均电子温度为 6 570 K,此范围内的平均径向电子温度梯度约为 263 K/mm,远大于轴向电子温度梯度。

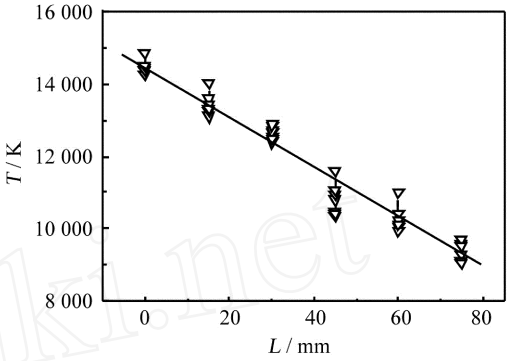

图 5 射流在轴线上的电子温度随轴向距离的变化曲线。弧电流 80A

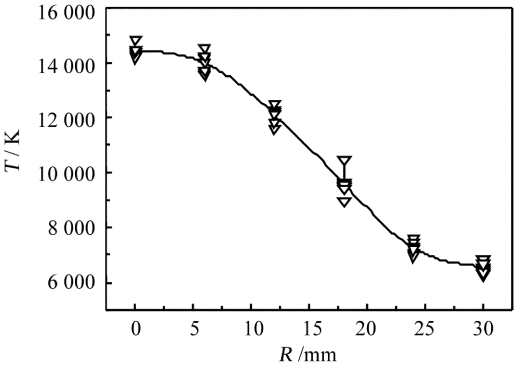

图 6 发生器出口处射流电子温度随径向距离的变化曲线。弧电流 80A

改变弧电流,可以得到图 7所示的发生器出口处射流中心电子温度随弧电流的变化曲线。从图中看到,射流中心的电子温度随弧电流的增加而单调地增加,当弧电流从 80 A增加到 100 A时,电子温度从 14 470 K增加到 19 020 K,电子温度随弧电流的变化梯度约为 227 K/A。这可能是由于弧电流的增大使得发生器输入功率提高,从而导致了射流电子温度的增加。

由图 5到图 7的结果可以看到,各工作参数条件下电子温度实测值的波动较大,波动幅度约为其平均值的 ±10%,产生这样结果和引起测量误差的原因可能主要有以下几个方面:

(1)根据实验测量数据确定两根探针的离子饱

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

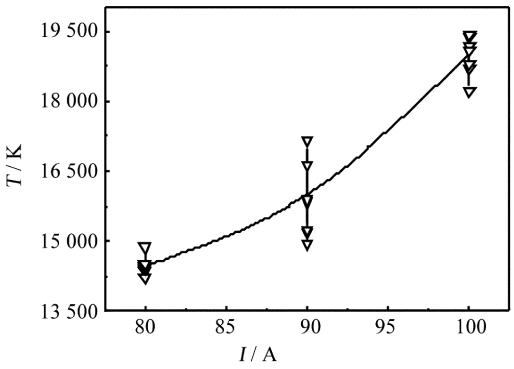

图 7　发生器出口处射流中心电子温度随孤电流的变化曲线图

和电流 I_{i01}, I_{i02}和 I - V曲线中的斜率 α时,数据处理过程可能会带来一定的误差。

(2)等离子体发生器电源输出中含有一定的交流分量,其波动幅度约为电源输出平均值的 ±18%,该波动会引起发生器输入功率的波动,从而导致射流温度的波动。

(3)探针露出氧化铝管的长度为 2 mm,测得的电子温度为这段长度内的平均值,这可能也会给电子温度测量带来一定的偏差。但是在本实验参数范围内,射流平均径向电子温度变化梯度约为 263 K/mm,电子温度的最高平均值为 14 500 K,最低平均值为 6 570 K,探针尺寸引起的偏差约为 6%。

(4)实验所用的两根探针组成的探针平面平行于射流轴线方向。射流通过第一根探针时产生的扰动可能会影响到第二根探针,从而使得第二根探针检测的离子饱和电流 I_{i02}存在一定的偏差。

(5)双探针测温实验中,理论上要求测量过程中探针与等离子体接触的表面积恒定,但在本研究中,由于探针的外径小于绝缘瓷管的内径,两者之间存在约 0.1 mm的间隙,等离子体会渗入其中,导致等离子体与探针接触的表面积在置于射流的不同位置时发生变化,影响测量结果。

4　结束语

本文利用双静电探针法测量了减压条件下直流非转移式电弧等离子体射流的电子温度。结果表明,在本文实验参数范围内,射流在发生器出口处中心最高电子温度约为 14 500 K,射流电子温度随轴向或径向距离的增加而单调减少。在发生器出口处,射流的径向电子温度梯度约为 263 K/mm,远大于从发生器出口到距出口 75 mm范围内的轴向电子温度梯度 69 K/mm;射流电子温度随弧电流的增加而增加的梯度约为 227 K/A。

参考文献

[1] Fred C. Wilson. Recent Advances in Satellite Propulsion and Associated Mission Benefits, AIAA 2006, 5306.

[2] Sanchez M M, Pollard J E. Spacecraft electric propulsion-An overview, Journal of Propulsion and Power, 1998, 4(5): 688～699.

[3] Burton R L, Krier H. Overview of arcjet thruster research at the university of Illinois, AIAA 96～3296, 32nd JPC 1996.

[4] Bufton S A, Burton R L, Krier H. Measured plasma Properties at the Exit Plane of a 1 kW Arcjet, AIAA 95～3066, 31st JPC, 1995.

[5] Scott C D. Survey of measurement of flow properties in arcjets, Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 1993, 7(1): 9～24.

[6] Burton R L, Bufton S A. Exit-plane electrostatic probe measurements of a low-power Arcjet, Journal of Propulsion and Power, 1996, 12(6): 1 099～1 106.

[7] Pan Wenxia, Li Teng, Meng Xian, Wu Chengkang. Arc root attachment on the anode surface of arc plasma torch observed with a novel method, Chinese Physics Letters, 2005, 22(11): 2 895～2 898.

[8] 郭志颖. 热等离子体射流温度与速度测量的研究, 硕士学位论文, 中科院力学所, 2008.

[9] 金佑民 著. 高温测量中的探针技术, 中国计量出版社, 1988.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net