

# 减压直流非转移弧等离子体射流速度的静电探针测量

郭志颖 孟 显 潘文霞

(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘 要** 组建了一套利用静电探针诊断技术测量减压直流非转移弧等离子体射流速度的实验系统。对以纯氩为工质的等离子体,在气流量  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s、弧电流 80A、真空室压力 165 Pa 的条件下,测量了射流的速度及其分布。结果表明射流在发生器出口处中心最高速度约为 1 200 m/s,在半径 20 mm 处减小到 635 m/s,沿射流轴线方向的速度梯度约为  $10 \text{ (ms}^{-1}\text{) /mm}$ 。射流速度随着弧电流增加而缓慢单调增加;当真空室压力从 165 Pa 提高到 2 kPa 时,发生器出口轴线上的射流速度从 1200 m/s 降至 570 m/s。

**关键词** 电弧加热发动机 等离子体射流 气流速度 静电探针 测量

## Flow Velocity Measurement in a Non-Transferred DC Arc Plasma-Jet by Using Electrostatic Probes

GUO Zhi-ying MENG Xian PAN Wen-xia

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

**Abstract** An electrostatic probe diagnostics system was established to measure the flow velocity in a non-transferred DC arc plasma-jet. The velocity distributions in an argon plasma jet at feeding-gas flow rate of  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s and arc current of 80 A were obtained when the chamber pressure was at 165 Pa. Results show that the central maximum velocity of the plasma jet-flow at the torch exit is about 1 200 m/s, the flow velocity reduces to 635 m/s at the radial distance of 20 mm, and the axial velocity gradient of the jet flow is about  $10 \text{ (ms}^{-1}\text{) /mm}$ ; A slow monotonic increasing of the flow velocity was observed with the increasing arc current; At elevated pressures up to 2 kPa, the central velocity of the plasma jet flow at the torch exit reduces to 570 m/s.

**Key words** Arc jet Plasma jet Flow velocity Electrostatic probe Measurement

## 1 引 言

电弧加热发动机具有比冲适中、体积小和系统简单等特点,是适合执行卫星姿态控制、位置保持、轨道转移等任务的一类推力器,在国际上已经得到了较为广泛的应用<sup>[1~2]</sup>。电弧加热发动机工作时,推进剂气体经发动机阴极和阳极之间的直流电弧加

热形成最高温度达万度以上的高温部分电离气体(等离子体),经拉瓦尔喷管膨胀加速后,以超声速射流形式喷出,产生推力。射流的速度与发动机的比冲直接相关,对速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结构、提高发动机的工作性能提供一定的指导依据,同时可为数值模拟计算提供初值等参考数据。

收稿日期: 2008 - 02 - 18; 修回日期: 2008 - 04 - 21

作者简介: 郭志颖 (1983 - ), 男, 硕士研究生, 从事热等离子体诊断工作。

等离子体射流速度的测量方法通常可分为接触式<sup>[3-5]</sup>和非接触式<sup>[6-7]</sup>两种。静电探针法属于接触式方法,虽然测量过程中探针需插入等离子体射流,会对射流流场造成一定的干扰,但因探针结构简单,制作方便,是一种常用的测量速度的方法。

本文介绍了一套利用静电探针诊断技术测量减压直流非转移弧等离子体射流速度的实验系统,测量了不同工况下氩等离子体射流的速度及其分布,得到了速度随弧电流和真空室压力变化的趋势。同时,该诊断技术也可作为测量电弧加热发动机羽流速度,了解电弧加热发动机工作特性的一种可行性方法的探索<sup>[5]</sup>。

## 2 实验装置及实验方法

将如图 1 所示<sup>[8]</sup>的两组静电探针沿射流流动方向相隔一定距离放置,发生器稳定工作时,两组探针获得的信号基本相似。此时,若主动改变等离子体射流状态,例如对弧电流施加一个负向电流脉冲,该脉冲会导致射流参数的变化,射流参数变化的信息将被两组探针先后捕获。由捕获时间之差与探针间距即可推算出射流在这段距离内的平均速度(下文中提到的速度均指平均速度)。

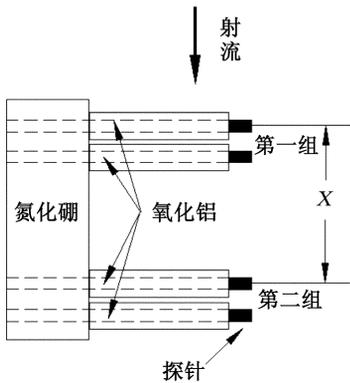


图 1 探针结构示意图, X 为两组探针在沿射流轴线方向的距离

本文的实验系统包括等离子体发生器、真空系统、电源系统、供气系统、冷却水系统以及探针测量与计算机控制电路。

等离子体发生器由实验室自行设计加工<sup>[9]</sup>。当工作气体为氩气,气流量  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s,腔压 165 Pa,弧电流 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 ~ 140) A 范围内调节,电源输出中含有频率为 300 Hz 的交流分量,能量波动幅度约

为电源输出平均值的  $\pm 10\%$ 。电源长时间工作时,输出电压会有稍许变动。

实验中等离子体射流的产生条件为:工作气体为纯氩,气流量为  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s,工作电流范围为 80 A ~ 100 A。整个系统工作在真空环境中,腔压范围为 165 Pa ~ 2 kPa。

探针选用直径为 0.3 mm 的钨丝制成,既可以保证探针的刚度,又可尽量减小对射流的扰动。探针外侧套装内径为 0.5 mm、外径为 1 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 4 个直径为 0.5 mm 的通孔,用以定位探针之间的距离。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移动。

同组两根探针沿射流方向相距 1 mm,两组探针在垂直射流的方向错开了一定的距离(距离射流出口近的定义为第一组探针,远的定义为第二组探针),以尽量避免第一组探针对射流流场的干扰影响到第二组探针的检测。两组探针在沿射流轴线方向间的距离为 15 mm,该距离可根据射流轴向速度梯度和数据采集系统的准确度来选择。

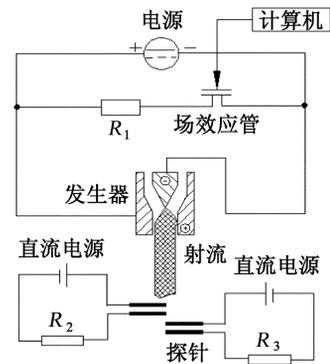


图 2 测量系统电路图

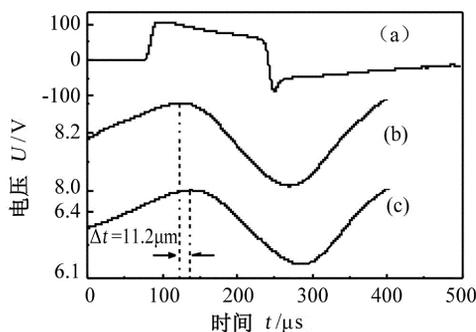
图 2 为速度测量系统的电路图。在等离子体射流产生的回路中,由主电源给等离子体发生器供电。电阻  $R_1$  和场效应管构成分流回路,场效应管在此起开关作用,其闭合开启时间由计算机控制。当场效应管闭合时,发生器的弧电流会分流一部分到  $R_1$ ,则发生器的弧电流同时相应地减小。因此  $R_1$  的阻值选择的原则是不能使产生等离子体的弧电流变化过大,在本实验中是保证对弧电流值的影响不超过 10%。计算机控制场效应管闭合的时间为  $150 \mu s$ ,此时发生器弧电流相应获得一个负向脉冲。在探针回路部分,直流稳压电源在两两探针之间施加 15 V 的偏置电压,电阻  $R_2$ 、 $R_3$  都为阻值 500  $\Omega$  的无感电

阻。电阻  $R_2$ 、 $R_3$  上的电压信号由通道间相互隔离的示波器采集。

实验具体步骤如下:首先由发生器产生等离子体射流,然后通过平动和升降杆将探针移动到射流中的预定位置,接着计算机控制场效应管闭合  $150 \mu\text{s}$  后断开。同时,通过示波器采集探针回路中电阻两端的信号,根据采集到的信号时间差导出射流速度。

### 3 结果及讨论

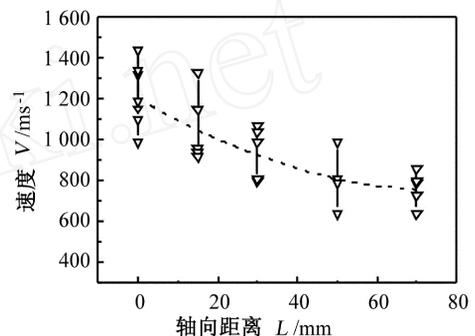
图 3 所示为两组探针捕获的脉冲信号图。工作参数为气流量  $1.25 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ , 弧电流  $80 \text{ A}$ , 腔压  $165 \text{ Pa}$ , 第一组探针放置在发生器出口中心。图中 (a) 为场效应管闭合后电阻  $R_1$  两端的脉冲电压信号, 其脉冲宽度约  $150 \mu\text{s}$ , 最大幅值约为  $100 \text{ V}$ 。图中 (b), (c) 分别为探针回路中电阻  $R_2$ ,  $R_3$  两端的电压信号。由图可见, 两组探针捕获的脉冲信号从上升到下降的转折点有时间差  $11.2 \mu\text{s}$ , 由此导出测量点的气流速度为  $1340 \text{ m/s}$ 。从图 3 还可看到, 电阻  $R_2$  和  $R_3$  两端的电压值并不相等, 这可能有多种原因, 例如: 第一组探针较第二组探针离发生器出口近, 第一组探针所处位置处的等离子体气流中带电粒子数密度较高; 或者是两组探针在等离子体中的感应面面积有一定差别; 也可能是由于两回路的阻值不完全一致。但是本实验的主要目的是通过信号的时间差导出速度, 两组信号的绝对值并不重要。从图 3 还可见, 图中 a 脉冲信号的变化与图中 b, c 中信号的变化有一定的时间差。产生此现象的主要原因可能是电弧弧根在阳极表面的贴附点与阳极出口 (也就是第一组探针所在位置) 有一定距离, 脉冲信号从弧根传递到探针也需要一定的时间。本实验中阳极弧根距第一组探针的距离约为  $40 \text{ mm}$ 。



(a) - 输入脉冲信号曲线; (b) - 第一组探针捕获的信号曲线;  
(c) - 第二组探针捕获的信号曲线。气流量  $1.25 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ ,  
腔压  $165 \text{ Pa}$ , 弧电流  $80 \text{ A}$ 。

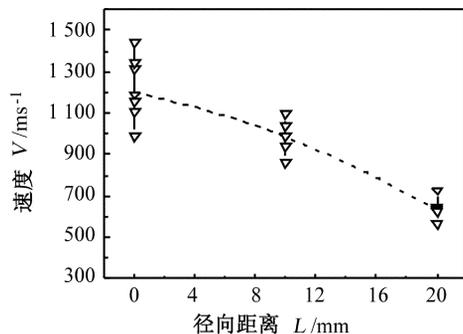
图 3 脉冲信号图

图 4 和图 5 分别为用双组探针方法测量得到的等离子体射流轴向和径向速度分布。工作参数为气流量  $1.25 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ , 腔压  $165 \text{ Pa}$ , 弧电流  $80 \text{ A}$ 。图中倒三角符号代表各次测量的数据, 虚线为各位置测量结果平均值的连线。由图 4 可见, 等离子体射流轴线上的速度随着离发生器出口距离的增加而降低。在发生器出口处, 测得的射流中心最大速度的平均值约为  $1200 \text{ m/s}$ 。当轴向距离增加到  $70 \text{ mm}$  时, 测得速度的平均值减小到  $755 \text{ m/s}$ 。射流速度沿轴向的变化梯度在这  $70 \text{ mm}$  范围内的平均值约为  $6.4 \text{ (ms}^{-1})/\text{mm}$ 。由图 5 可见, 射流速度的径向分布呈现较明显的以射流中心为最高值的抛物线分布形式, 由中心到离开中心  $20 \text{ mm}$  范围内的平均径向速度变化梯度约为  $28.4 \text{ (ms}^{-1})/\text{mm}$ , 远大于射流速度的轴向变化梯度。



图中: 虚线为各点测量速度平均值的连线 (气流量  $1.25 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ , 腔压  $165 \text{ Pa}$ , 弧电流  $80 \text{ A}$ )

图 4 射流在轴线上的气流速度随轴向距离的变化曲线图

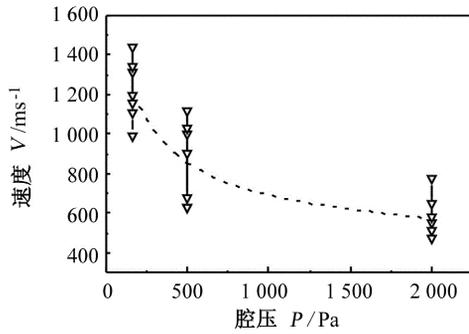


图中: 虚线为各处测量速度的平均值的连线 (气流量  $1.25 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ , 腔压  $165 \text{ Pa}$ , 弧电流  $80 \text{ A}$ )

图 5 发生器出口处射流速度随径向距离的变化曲线图

改变真空室压力, 可以得出图 6 所示的射流在发生器出口处的中心速度随真空室压力变化的关系。工作参数为气流量  $1.25 \times 10^{-4} \text{ kg/s}$ , 弧电流  $80 \text{ A}$ , 第一组探针放置在发生器出口轴线处。从图 6 看到, 射流中心速度随真空室压力的升高而降低, 当真空室压力从  $165 \text{ Pa}$  提高到  $2 \text{ kPa}$  时, 射流速度从

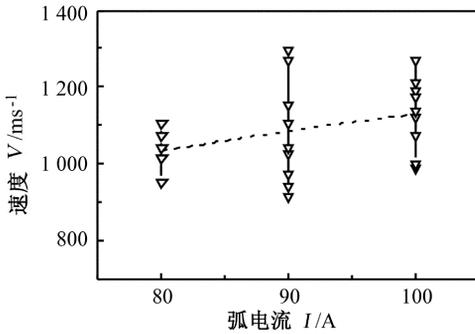
1 200 m/s减小到 570 m/s



图中:虚线为各压力条件下测量速度的平均值的连线(气流量  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s,弧电流 80 A)

图 6 发生器出口处射流中心速度随真空室压力的变化曲线图

图 7所示为发生器出口处射流中心速度随弧电流的变化曲线,工作参数为气流量  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s,腔压 165 Pa,第一组探针放置在发生器出口处轴线上。从图中看到,射流速度随弧电流的增加而单调缓慢地增加,当弧电流从 80 A增加到 100 A时,射流速度从 1 030 m/s增加到 1 130 m/s。这是因为弧电流增大使得发生器输入功率变大,从而导致射流速度的增加。



图中:虚线为不同电流条件下测量速度的平均值的连线(气流量  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s,腔压 165 Pa)

图 7 发生器出口处射流中心速度随弧电流的变化曲线图

由图 4到图 7的结果可以看到,各参数条件下速度实测值的波动较大,约为各速度平均值的  $\pm 15\%$ 。其原因可能主要有以下几个方面:

1)本文是利用两组探针得到脉冲信号的时间差来导出速度,当得到探针上的脉冲信号数据后,需首先对数据进行平滑处理,再读出两组信号的时间差。对数据的平滑处理以及读数准确度都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  $\pm 10\%$ ,

该波动会引起发生器输入功率的波动,从而导致射流速度的波动。

3)利用高速摄像机观察射流时,发现射流有一定的抖动,这也是速度波动的一个原因。

### 4 结束语

本文利用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速度,得到了射流速度的轴向和径向分布,以及发生器出口处射流中心速度随真空室压力和弧电流变化的趋势。结果表明,在本文实验参数范围内,射流速度随轴向或径向距离的增加而单调减少,射流的轴向速度梯度远小于径向速度梯度;射流速度随真空室压力的升高而降低,随弧电流的增加而略有增加。

### 参考文献

- [1] M Auweter-Kurtz, B Glocker, T Goelz, H L Kurtz, E W Messerschmid, M Riehle and D M Zube Arcjet thruster development, Journal of Propulsion and Power, 1996, 12 (6): 1 077 ~ 1 083.
- [2] Martinez - Sanchez, M and J E Pollard, Spacecraft electric propulsion-An overview. Journal of Propulsion and Power, 1998, 4 (5): 688 ~ 699.
- [3] Bufton S A, Burton R L, Krier H. Measured plasma Properties at the Exit Plane of a 1 kW Arcjet A AA 95 - 3066, 31st JPC, 1995.
- [4] Burton Rodney L. Krier Heman Overview of arcjet thruster research at the university of Illinois A AA 96 - 3296, 32nd JPC 1996
- [5] Pobst J A, Schilling J H. Time Resolved Measurements of 1 kw Arcjet Plumes Using Current Modulation Velocimetry and Triple Langmuir Probes 23rd International Electric Propulsion Conf, Seattle, WA, Sept, 1993: 93 ~ 128
- [6] Liebeskind John G, Hanson Ronald K, cappelh M A. Laser Induced Fluorescence Diagnostic for Temperature and Velocity Measurements in a Hydrogen arcjet plume APPLIED OPTICS, 1993, 32(30): 6 117 ~ 6 126
- [7] Ruyten W M, Burtner D, Keefer D. Spectroscopic Investigation of a low-power arcjet plume A AA 93 ~ 1790, 29th JPC, 1993.
- [8] James M, Joseph B, Olin J J. Velocity and Thrust Measurements in a Quasi-Steady Magneto-plasma dynamic Thruster A AA Journal, 1971: 1969 ~ 1974.
- [9] 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.