# 减压直流非转移电弧及等离子体射流波动特性研究

郭志颖<sup>1,2\*</sup> 黄河激<sup>1</sup> 潘文霞<sup>1</sup>

(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)

# Fluctuations of Arc Voltage and Jet Flow in Non-Transferred DC Plasma at Reduced Pressure

Guo Zhiying<sup>1, 2\*</sup>, Huang Heji<sup>1</sup>, Pan Wenxia<sup>1</sup>

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

2. Beijing Orient Institute Measurement & Test, Beijing 100086, China)

**Abstract** The fluctuations of plasma jet, generated at a reduced pressure ranging from 500 Pa to 10000 Pa, were characterized by imaging the shape of the plasma jet with a high speed video camera and by profiling the real-time ion saturation current spectra with a double electrostatic probe. The variations in the arc voltage were experimentally evaluated by varying the plasma generation conditions, such as the gas flow rate and pressure. The results show that the plasma jet remains stable at a fairly small gas flow rate and a low pressure. As the gas flow rate and pressure increase, the high frequency voltage fluctuation intensifies, accompanied with deterioration of time and special stabilities of plasma jet energy, and with higher frequency perturbation in the ion current. A steady plasma jet can be easily maintained, in spite of a possible input power perturbation up to 35% at 300 Hz. We suggest that the double electrostatic probe is capable of effective ly characterizing the plasma jet.

Keywords Electrostatic probe, Plasma stability, Arc voltage fluctuation, Reduced pressure

摘要 实时测量了减压直流纯氩等离子体的弧电压和射流高温区的瞬时离子饱和电流。结合射流高温区的瞬时形貌, 探讨了在真空室压力 500~10000 Pa条件下电弧及等离子体射流的波动特性。结果表明:当气流量较小和真空室压力较低时, 射流流场呈现较好的稳定性。随着气流量和真空室压力增加,弧电压出现高频脉动,射流能量分布的空间和时间稳定性逐渐 变差,离子饱和电流信号变得紊乱;即使由于电源特性引起电弧功率 300 Hz 的波动幅度高达 35%,依然能够产生流场较稳定 的等离子体射流;静电探针检测等离子体射流的瞬时离子饱和电流可作为了解射流波动特性的一种快速响应方法。

关键词 静电探针 等离子体稳定性 弧电压高频脉动 减压 中图分类号: 0536 文献标识码: A doi: 10.3969/j. issn. 1672-7126.2010.04.07

工作压力低于大气压、而又明显高于一般冷等 离子体工作压力的减压热等离子体,具有体积较大、 能量密度适中、流场相对稳定等优点,被广泛应用于 快速制备高质量的涂层/薄膜(如金刚石膜、SiC 膜、 单晶 Si 膜、高质量氧化锆陶瓷涂层等)<sup>[1-3]</sup>,是具有 良好发展前景的高速率、高可控等离子体材料工艺 方法。在工艺过程中,能否实现对原材料的均匀加 热是决定所制备涂层/薄膜质量的关键因素之一,而 射流的波动特性则会直接影响对材料的均匀加热及 工艺稳定性。

在多种减压热等离子体源中,直流电弧等离子体具有适用范围广、操作简便、易于实现自动化控制等优点<sup>[4-5]</sup>,是最为广泛应用的减压热等离子体源。 然而,目前为止的相关研究大多是从材料工艺的角度出发,得到了一些直观、经验性的认识,对工艺过程物理机制的研究仍远未深入系统。为进一步提高减压直流热等离子体材料工艺的可控性,有必要对射流的波动特性进行系统研究,确定影响射流波

基金项目:国家自然科学基金(50702064、10921062)

<sup>•</sup> 联系人: Tel: (010) 68116504; E mail: guozhiyng05@ mails. gucas. ac. en © 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期: 2009 08 21

动特性的主要控制参数,为材料制备工艺方案设计 提供数据积累。

测量弧电压、射流光强信号和拍摄射流形貌是 比较常见的研究射流波动特性的方法<sup>[6-9]</sup>。本文通 过实时测量弧电压谱研究射流产生过程中输入能量 的波动;利用高速摄像仪拍摄射流高温区的瞬时形 貌,直观并整体判断射流稳定性;采用静电探针系统 监测射流内固定点的瞬时离子饱和电流变化情况, 对减压纯氩直流电弧等离子体的弧电压脉动和射流 波动特性进行了较为全面的观测和分析。

# 1 实验装置及实验方法

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、冷却水系统以及测量系统。

等离子体发生器由实验室自行研制<sup>[10]</sup>。等离 子体射流的产生条件为:工作气体为纯氩,气流量范 围为 4.4~17.6 L/min(标准状态),工作电流为 80 A,整个系统工作在低于大气压的减压环境中,真空 室压力变化范围为 165~10000 Pa。当气流量为 4.4 L/min,真空室压力为 165 Pa,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, 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 ±18%。

本文利用双静电探针系统研究射流的瞬时离子 饱和电流的波动特性。每组静电探针检测端的具体 结构如图 1 所示,探针(probe)采用两根直径为 0.3 mm 的钨丝制成,外侧套装内径 0.5 mm、外径 1 mm、 长度为 35 mm 的氧化铝管,用以保证两根探针间的



采用 KT 300A 霍尔传感器对弧电流进行测量。 弧电压信号由数字示波器直接采集。

采用每秒可拍摄 300~120000 帧的高速摄像 仪,以及焦距 50 mm、最大光圈 0.95 的镜头,通过真 空室的观察窗连续拍摄射流高温区的瞬时形貌,了 解射流整体的波动特性。



#### 图 1 探针结构示意图



图 2 离子饱和电流测量系统电路图

Fig. 2 Schematic diagram of the electric circuit for ion satura

Fig. 1 Schematic diagram of the electrostatic probes © 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

# 2 实验结果及讨论

#### 2.1 弧电压与弧电流

图 3 所示的多组曲线显示当输入电流为 80 A、 真空室压力为 3000 Pa 时,产生纯氩等离子体射流 的弧电压的波动特性随气流量的变化规律。当气流 量为 4.4 L/min 时,弧电压信号中仅能观察到 300 Hz 电源本身的波动。随着气流量的增加,弧电压信号 在 300 Hz 波动的基础上明显叠加了高频脉动分量。 气流量越大,高频脉动幅度显著增大。弧电压的平 均值也从气流量 4.4 L/min 时的 62.9 V 逐渐增加到 17.6 L/min 时的 70.3 V。从图 3 的测量结果可知, 由于所采用的全波整流电源的直流输出中含有一定 的交流成分,弧电压的 300 Hz 低频波动表明电源本 身的纹波特性对射流的特性有一定影响,而气流量 增大时弧电压信号中的高频脉动,可能和载气在等 离子体中产生声波引起赫姆霍茨共振有关<sup>[11-12]</sup>。



Fig. 3 Variations of arc voltage with gas flow rate

当气流量固定为 17.6 L/min 弧电流 80 A, 真空 室压力变化时, 如图 4 所示, 弧电压的高频脉动随真 空室压力的变化趋势不明显。图中弧电压平均值从 500 Pa 时的 70 V 逐渐增加到 10000 Pa 时的 73.4 V。 弧电压信号在电源波动特性的基础上都明显叠加了 高频脉动分量, 但是无论真空室压力高或者低, 脉动 幅度变化不明显。

对真空室压力 500 Pa 时的弧电压信号进行分离,可以得到图 5 所示的结果,其中图 5(a)为弧电压信号和对弧电压信号进行快速傅立叶平滑



处理得到的低频交流分量(图中标示为"smoothed"的 粗实线);两种信号相减,即可得到弧电压的高频脉 动分量,如图(b)所示,进一步可以得到弧电压高频 脉动幅度平均值,即高频脉动所有波峰与波谷之差 的平均值。图 6 总结了在不同真空室压力、气流量 条件下,高频脉动幅度平均值 θ 与弧电压平均值 U 之比θ/U 的变化趋势。从图中可以看到:真空室压 力维持在 3000 Pa 不变,气流量上升时,θ/U 从 0.5% 单调上升到 3.7% 左右;当气流量固定在 17.6 L/min,真空室压力变化时,θ/U 维持在 3% 左右,随 真空室压力变化不明显。因此气流量变化更影响高 频脉动的幅度。



#### 图 5 弧电压低频和高频分量的分离



© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net







对图 4 中真空室压力 500 Pa 的弧电压信号做快 速傅立叶变换(FFT),可以得到图 7 所示的频谱图。 从图中可以清楚看到,弧电压信号除了 300 Hz 的低 频波动外,还有约为 3.17 kHz 高频脉动出现。同样 可以得到不同真空室压力、气流量条件下弧电压信 号的高频特征频率如图 8 所示。从图中可以看到: 真空室压力维持在 3000 Pa 不变,气流量从 6.6 L/min上升到 17.6 L/min时,高频特征频率从 3.66 kHz 下降到约 3.17 kHz;当气流量固定在 17.6 L/min,真空室压力变化时,高频特征频率维持 在3.17 kHz,不随真空室压力变化。因此在目前气 流量的工况下,真空室压力变化并不影响高频脉动 的特征频率。

在与测量弧电压相同的等离子体射流产生条件 下,测量了弧电流信号,结果显示弧电流信号中只含 有较高幅度的 300 Hz 低频波动,观测不到高频脉 动。本文各工况中给出的弧电流值均指平均电流。









## 2.2 射流高温区瞬时形貌和瞬时离子饱和电流特性

图 9 所示为减压条件下纯氩等离子体射流的高速摄像照片,其中(a)-(e)采用光圈为 2,(f)-(j)采用 光圈为 0.95,曝光时间都为 10 чs,每秒拍摄 2500 帧。每种工况下任意选择了相邻的三帧照片,两两 图片之间时间间隔为 0.4 ms,可以清楚观察到等离 子体射流高温区在短时间内的变化情况。当气流量 维持在 17.6 L/min,真空室压力较小时,如图 9(j) 所 示,相邻帧的三张射流高温区形貌图片差别很小,说



#### 图 9 减压条件下纯氩等离子体射流高速摄像照片

Fig. 9 High speed video camera images of plasma jets generated under different working conditions

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

明射流在空间和时间尺度上都表现出很好的均匀性 和稳定性。当真空室压力逐渐增高时,如图 9(h)所 示,射流瞬时形貌明显扭曲,各幅间形貌差异很大, 高温区域明显变亮。当真空室压力进一步增高至 10000 Pa,如图 9(f)所示,射流高温区长度进一步缩 减、瞬时形貌扭曲更严重,相邻帧的三张射流高温区 形貌图片差别很大,说明射流比较紊乱。同样从图 9(a)-(e)看到,当真空室压力固定在 3000 Pa 时,随 着气流量的增加,射流抖动逐渐增大,高温区域变 亮。由以上分析并结合图 6、图 8 可见,射流的稳定 性与弧电压高频脉动的特征频率及幅度没有必然的 联系,在气流量较小或者真空室压力较低时,可获得 时间和空间稳定的射流流场。

利用静电探针检测射流中的瞬时离子饱和电流。 气流量固定在 17.6 L/min, 真空室压力变化时, 第一 组探针采集到的离子饱和电流信号如图 10 所示。当 真空室压力为 500 Pa 时, 射流状态较稳定, 放置在射 流中的探针可以很好地检测到电源的 300 Hz 波动特 性<sup>[13]</sup>;当真空室压力增大时, 如图 10 中 2000 Pa 时所 示, 射流开始转为不稳定, 探针检测到的电流信号会 出现瞬时突跳; 当真空室压力进一步增大时, 探针检 测到的电流信号波动非常大, 如图 10 中真空室压力 10000 Pa 时所示, 离子饱和电流在 1 mA 到 34 mA 之 间快速跳动且没有固定频率, 说明探针所在位置处等 离子体射流的能量密度波动很大; 同时结合图9(f) 的



图 10 第一组静电探针采集的离子饱和电流信号随真空 室压力变化规律

Fig 10 Ion saturation current captured by the electrostatic probes of first group at different chamber pressure

高速摄像结果,可看出射流这时处于充分发展的湍 流状态。通过静电探针检测的瞬时离子饱和电流信 号说明,随着真空室压力或气流量增加,射流流动逐 渐向充分紊乱状态发展,这与射流高温区瞬时形貌图 片所示结果吻合。因此静电探针检测瞬时离子饱和 电流可作为了解射流波动特性的一种可行的方法,并 且该方法简单和具有很高的时间分辨特性。

同样,如图 11 和图 12 所示,当真空室压力固定 在 3000 Pa 时,随着气流量的增加,探针检测到离子 饱和电流信号的波动逐渐增大。其中图 11 显示的



图 11 第一组静电探针采集的离子饱和电流信号随气流 量变化规律





probes of first group at different chamber pressure probes of second group at different gas flow rate © 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

是第一组探针(靠近发生器出口)检测的离子饱和电 流信号,图 12 是第二组探针(远离发生器出口)检测 的离子饱和电流信号。可以看到随着气流量的增 加,第二组探针检测的电流信号更早地进入了波动 状态,而且相同工况下第二组探针信号波动更大。 这正是由于处于下游的射流抖动更加厉害,能量密 度变化更为明显。可见利用静电探针法评价射流波 动性具有很高的空间分辨特性。

## 2.3 输入功率波动的影响

在同种工况下,对应的弧电流和弧电压信号相 乘,就能得到这种工况下的功率波动曲线,进一步可 以得到功率波动幅度的平均值。图 13 总结了在不 同真空室压力、气流量条件下,功率波动幅度平均值 与功率平均值之比(Ψ/W)的变化趋势。从图中可 以看到:Ψ/W 的值在 34% 到 38% 之间变化。虽然 功率波动幅度比较大,但瞬时离子饱和电流及射流 高温区图片的观测结果显示射流状态在有些工况下 很稳定,例如:气流量 4.4 L/min、真空室压力 3000 Pa时;有些工况下却很紊乱,例如气流量 17.6 L/ min、真空室压力 10000 Pa时。说明在本实验工况 下,电弧功率的波动并不是影响射流状态的主要原 因。当电弧功率波动在 35% 附近时,依然能够产生 流场稳定的射流。



#### 图 13 输入功率波动随气流量、真空室压力变化规律

Fig 13 Variations in the wave of power with the change of chamber pressure and gas flow rate

# 3 结论

本实验研究的参数范围内得到以下结果: (1)静电探针检测等离子体射流的瞬时离子饱 和电流可作为了解射流能量波动特性的一种简单有 效的方法,并具有较高的时间和空间分辨率。 (2) 当弧电流一定时, 在气流量较小或者真空室 压力较低情况下, 能得到时间和空间稳定的热等离 子体射流流场。随着气流量增大或真空室压力增 高, 射 流 的 空 间 和 时 间 稳 定 性 逐 渐 变 差, 在 17.6 L/min及 10 kPa 条件下, 射流呈现充分发展的 湍流状态, 则不宜用于可控性要求高的材料处理工 艺。

(3) 当气流量固定, 真空室压力变化时, 由赫姆 霍茨共振引起的弧电压高频脉动幅度变化不明显, 弧电压高频特征频率维持在 3.17 kHz; 当真空室压 力不变, 随气流量的增加, 不仅弧电压高频脉动幅度 增大, 特征频率也降低。

(4) 电弧功率的波动并不是影响射流流动状态 的主要原因, 当电弧功率波动在 35% 附近时, 在低 气流量和低压力下依然能产生流场稳定的射流。

#### 参考文献

- Marcinauskas L, Grigonis A, Kulikauskas V. Synthesis of Carbon Coatings Employing a Plasma Torch from an Argon Acetylene Gas Mixture at Reduced Pressure [J]. Vacuum, 2007, 81(10): 1220-1223
- [2] Waggoner J W. Novel Low Power Reduced Pressure Inductively Coupled Plasma Ionization Source for Mass Spectrometric Detection of Organotin Species [J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1998, 13(9): 879–883
- [3] Dianov E M, Golant K M, Karpov V I, et al. Application of Reduced Pressure Plasma CVD Technology to the Fabrication of Er Doped Optical Fibers [J]. Optical Materials, 1994, 3 (3):181-185
- [4] Wada T. New Development of Plasma Spraying Technology
  [J]. Journal of the Japan Welding Society, 2006, 75(8): 622
   626
- [5] Mcpheison R. Plasma Sprayed Ceramic Coatings[J]. Surface Engineering: Processes and Applications, 1994
- [6] Planche M P, Duan Z, Lagnoux O, et al. Study of Arc Fluctuar tions with Different Plasma Spray Torch Configurations [C]. In Proceedings of the 13th International Symposium of Plasma Chemistry, Beijing, 1997: 1460–1465
- [7] Pfender E. Plasma Jet Behavior and Modeling Associated with the Plasma Spray Process[J]. Thin Solid Films, 1994, 238: 228-241
- [8] Dussoubs B, Mariaux G, Vardelle A. DC Plasma Spraying: Effect of Arc Root Fluctuations on Particle Behavior in the Plasma Jet[J]. High Temperature Material Processes, 1999, 3(2–3): 235–254

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

分析[J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(2): 109-112

- Pan Wenxia, Li Teng, Meng Xian, et al. Arc Root Attachment on the Anode Surface of Arc Plasma Torch Observed with a Novel Method[J]. Chinese Physics Letters, 2005, 22 (11): 2895–2898
- [11] 屠 昕, 严建华, 马增益, 等. 大气压直流双阳极等离 子弧脉动特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26

(20):113-117

- [12] Coudert J F, Rat V, Rigot D. Influence of Helmholtz Oscillar tions on Arc Voltage Fluctuations in a DC Plasma Spraying Torch[J]. J Phys D: Appl Phys, 2007, 40: 7357–7366
- [13] 郭志颖. 热等离子体射流温度与速度测量的研究[C]. 硕士学位论文, 中科院力学所, 2008