

层 / 湍流等离子体射流波动特性实验研究

孟 显 潘文霞 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 本文应用电压传感器、光电倍增管及水冷皮托管, 对产生射入空气中的纯氩层流和湍流等离子体射流的弧电压波动、发生器出口处的射流光强波动以及沿射流轴线的滞止压力波动进行了测量。结果显示层流等离子体射流各参数的波动幅度远小于湍流射流的对应值; 弧电压的波动幅度随气流量的变化明显, 但随电流的变化很小; 弧电压的波动幅度与其平均值之比随电流增加呈下降的趋势。

关键词 等离子体射流; 层流; 湍流; 波动

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)01-0124-08

EXPERIMENTAL STUDY ON FLUCTUATION CHARACTERISTICS OF LAMINAR/TURBULENT PLASMA JETS

MENG Xian PAN Wen-Xia WU Cheng-Kang

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

Abstract Fluctuations of arc voltage in generating DC pure-argon laminar/turbulent plasma jets issuing into the atmosphere, and responses of light intensity in the jet at torch exit and local stagnation pressure along the jet axis were measured separately by using voltage sensor, photo-multiplier and water-cooled pitot tube. Results show that fluctuation amplitudes of all the measured parameters in laminar jets are much smaller than those in turbulent ones. The fluctuation amplitude of arc voltage changes appreciably with the change of gas flow rate, while it shows little difference with the change of arc current; the ratio of the voltage fluctuation to the mean voltage decreases with the increase of arc current.

Key words plasma jet; laminar flow; turbulent flow; fluctuation

1 引 言

热等离子体射流具有温度高、能量密度集中等特点, 已广泛应用于材料表面加工领域。按照流动状态划分, 非转移弧直流等离子体射流可分为湍流射流和层流射流两类。通常, 射流处于湍流状态, 主要应用于喷涂工艺。由于湍流射流脉动性很强, 与周围冷气体掺混严重, 导致喷涂涂层的性能不稳定, 这一定程度制约了等离子体喷涂技术的进一步发展。在等离子体射流的产生过程中, 电弧弧根的跳动乃至弧电压的大幅度波动, 可能是导致射流能量相应波动的主要原因, 而射流能量的大幅度波动是影响喷涂过程中颗粒加热及工艺可控性的重要因素。相对于湍流射流, 层流射流具有流动脉动小、与周围气体掺混少、射流长度可随产生参数的改变而大幅度变化、可重复性好等特点^[1]。应用层流等

离子体射流对铸铁表面进行熔凝强化处理, 得到了稳定而可重复的强化效果^[2], 而湍流射流由于其强脉动性, 基本无法应用于该类材料表面处理工艺^[3]。

迄今为止, 对湍流射流波动性的研究报道^[4~6]较多, 文献[4, 5]的结果认为电源的交流分量及弧根在阳极表面的跳动对射流脉动有明显影响。文献[6]提出湍流等离子体射流可分为对冷气体卷吸但不完全混合的过渡区、冷气体团的破碎区及湍流的完全发展三个区域。由于产生出层流等离子体射流的报告不多, 也没有对其稳定性的系统研究报道。

利用实验室研制的随工作参数变化可产生层流或湍流等离子体射流的发生器, 本文对产生层流和湍流射流的弧电压波动、射流在发生器出口处的光强波动及沿射流轴线的滞止压力进行了测量和比较, 旨在为发展层流等离子体射流材料加工新工艺提供

收稿日期: 2005-03-14; 修订日期: 2005-11-08

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。

一些理论依据。

2 实验方法

等离子体射流的产生参数: 工作气体为纯氩, 气流量变化范围从 1.9×10^{-4} kg/s 到 3.3×10^{-4} kg/s, 工作电流从 90 A 到 170 A, 环境气体为空气。

图 1 为测量系统示意图。弧电压波动测量部分由科海 KT0.02A 型电压传感器及阿尔泰高速数据采集卡组成, 传感器的响应频率为 50 kHz, 采集卡的采样速率为 800 kHz。传感器把电压信号转换为小电流信号, 在传感器的输出端串接无感电阻, 采集卡采集电阻两端的电压, 经变换得到弧电压值。滞止压力测量部分主要由水冷皮托管和 U 型测压管组成。光强部分由成像光路、滨松 CH-172 型光电倍增管 (PMT) 及阿尔泰高速数据采集卡组成。光纤端面高 10 mm、宽 1 mm。通过成像光路, 射流在光纤接收端成 1:1 的实像, 经光纤传输到光电倍增管感应面, 光电倍增管的输出信号直接由采集卡采集。光电倍增管的输出信号为电压信号, 它和光强成正比。光强波动是射流温度波动的体现, 而温度的波动反映了射流能量的波动。

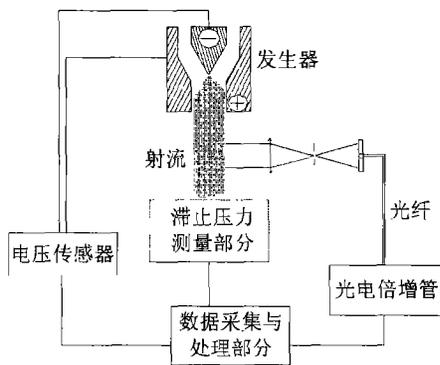


图 1 测量系统示意图

3 实验结果及讨论

对产生层流射流和湍流射流的弧电压及发生器出口处的光强进行同时测量, 得到了图 2 所示的结果。其中 (a) 图为层流时的弧电压 (上图) 和光强 (下图) 的波形, 气流量为 1.9×10^{-4} kg/s; (b) 图为湍流时的弧电压 (上图) 和光强 (下图) 的波形, 气流量为 3.3×10^{-4} kg/s。两组图的弧电流都为 170 A。从图中看到: 产生层流和湍流射流的弧电压和发生器出口处射流的光强波动都呈现明显的交流特性, 这是由于所采用的直流整流电源的输出中含有一定的交流成分, 说明电源本身的特性对射流的产生过程及其特性有一定的影响。同时, 还可注意到: 湍

流状态时, 弧电压和光强的波动在交流变化的基础上还叠加有一定程度的高频脉动。因为等离子体射流是经电弧加热产生的高温部分电离气体射流, 电弧能量的脉动必然导致射流能量及其流场的脉动。湍流时的弧电压波动幅度远较层流时的大, 可以说明湍流状态时的电弧弧根在阳极表面的跳动幅度要大于层流时的情况。弧根的跳动直接导致电弧长短的变化, 电弧越长, 气体被加热的路径越长, 射流会获得更多的能量。由湍流状态时弧电压的波动幅度较大, 可说明湍流状态时射流能量的波动幅度要大于层流的能量波动。因此, 可以推测, 应用于材料表面加热, 层流等离子体射流可能会有更稳定的加热效果。此外, 图中结果还表明: 弧电压和光强波形的相位几乎一致。在相近的工作条件下, 曾经测得在发生器出口处的层流射流的最高速度约为 800 m/s^[7], 湍流射流的速度更高。在本研究的条件范围电弧弧根在阳极表面的位置距离发生器出口大约为 20 mm, 因此弧根处的脉动传到发生器出口的时间短于 $25 \mu\text{s}$, 从图中也就不能明显地看到弧电压和射流光强波形的相位差别。

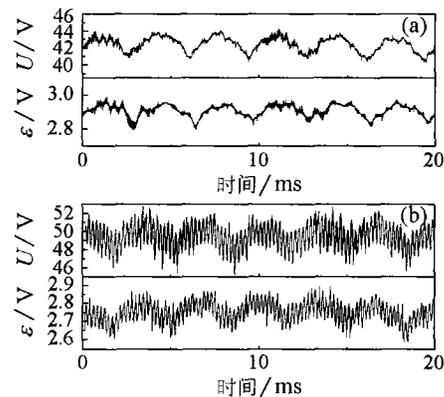


图 2 弧电压 U 及发生器出口处光强 ϵ 测量结果, 弧电流: 170 A

(a) 层流射流, 气流量 1.9×10^{-4} kg/s,

(b) 湍流射流, 气流量 3.3×10^{-4} kg/s

去掉图 2 中弧电压和光强信号中的交流分量, 可以得到图 3 所示的弧电压和光强的波动曲线。不论弧电压的波动, 还是光强的波动, 湍流状态时的最大波动幅度比层流状态时的要大将近 6 倍。

图 4 为弧电压的波动幅度及其与平均弧电压的比值随弧电流的变化 (a) 以及随气流量的变化关系 (b)。随电流变化时, 层流射流的气流量为 1.9×10^{-4} kg/s; 湍流射流的气流量为 3.3×10^{-4} kg/s; 随气流量变化时, 弧电流为 170 A。由图 4(a) 看到, 尽管层流与湍流射流的相应波动值相差很大, 但是基本上都分别不随弧电流而明显改变; 弧电压的波动幅

度与弧电压平均值之比随电流的增加略呈下降的趋势。图 4(b) 显示不管是弧电压的波动幅度, 还是其与平均弧电压的比值, 都随气流量的增加而增加。

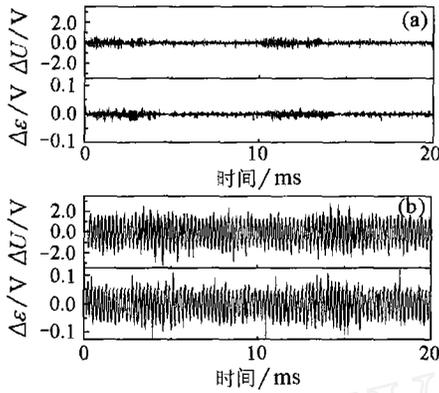
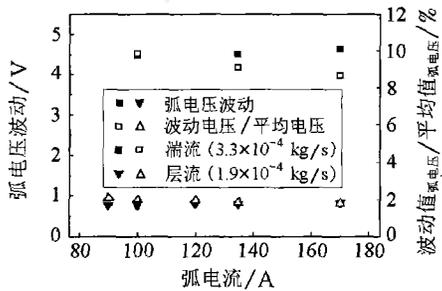
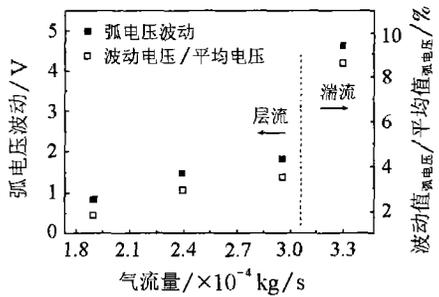


图 3 弧电压波动 ΔU 及发生器出口处光强波动 $\Delta \varepsilon$, 工况同图 2。(a) 层流; (b) 湍流



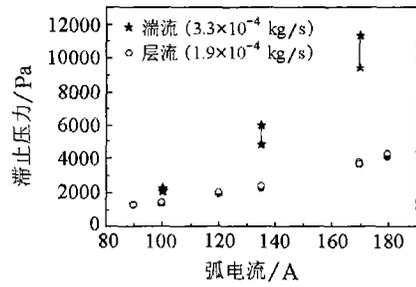
(a) 弧电压波动随弧电流的变化曲线



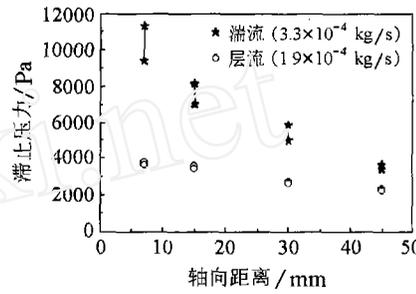
(b) 弧电压波动随气流量的变化曲线

图 4 弧电压波动随弧电流和气流量的变化曲线

根据伯努利方程 $P = 1/2\rho u^2$ (P, ρ, u 分别为测量点的滞止压力、气体密度和气流速度, 其中密度是温度的函数^[8]), 可知滞止压力的波动反映射流温度和速度的波动。图 5(a) 显示随着电流的增加, 湍流和层流射流的滞止压力值都增加, 但湍流射流滞止压力波动幅度变化要远大于层流时的波动。图 5(b) 显示湍流射流滞止压力的轴向变化梯度要大于层流的轴向滞止压力梯度。这些结果可以部分解释湍流等离子体射流用于材料表面处理时可控性差的现状。



(a) 射流滞止压力随电流的变化 (距发生器出口 7 mm)



(b) 射流滞止压力随轴向距离的变化 (170 A)

图 5 射流滞止压力随电流的变化及随轴向距离的变化

4 结 论

在本研究的实验参数范围内, 得到以下结论: 电源本身的特性对产生等离子体的弧电压有一定的影响; 产生层流射流时的弧电压波动幅度只有湍流状态时的六分之一、弧电压波动幅度与弧电压平均值之比只有湍流时的四分之一; 层流射流的滞止压力波动以及滞止压力沿轴向的变化梯度远小于湍流时波动和轴向梯度。

参 考 文 献

- [1] Pan W X, Zhang W H, Zhang W H, 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
- [2] 李罡. 层流等离子体射流特性及其材料表面强化工艺: [硕士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2002
- [3] Pan W X, Zhang W H, Ma W, et al. Characteristics of Argon Laminar DC Plasma Jet at Atmospheric Pressure. *Plasma Chem. Plasma Process.*, 2002, 22(2): 271-283
- [4] Zhao W H, Tian K, Liu D, et al. Fluctuation Phenomenon Analysis of an Arc Plasma Spraying Jet. *Chin. Phys. Lett.*, 2001, 18(8): 1092-1094
- [5] Zhao W H, Tian K, Tang H Z, et al. Experimental Studies on the Unsteadiness of Atmospheric Pressure Plasma Jet. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2003, 35(21): 2815-2822
- [6] Pfender E, Spores R, Chen W L T. A New Look at the Thermal and Gas Dynamic Characteristics of a Plasma Jet. *Int. J. Mater. Product Tech.*, 1995, 10(3-6): 548-565
- [7] 孟显, 潘文霞, 吴承康. 层流等离子射流的温度与速度测量. *工程热物理学报*, 2004, 25(3): 490-492
- [8] Boulos M I, Fauchais P, Pfender E. *Thermal Plasmas 1*. Plenum Press, New York, 1994. 388-392