

等离子体射流产生与特性的实验研究

潘文霞¹ 孟显¹ 陈熙² 吴承康¹

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100080; 2. 清华大学工程力学系, 北京 100084)

摘要 本文报道热等离子体射流产生及射流特性的实验研究结果。采用同一个直流等离子体发生器, 工作气体流量小时产生出层流等离子体长射流, 射流长度随气体流量或弧电流的增加而明显增加; 工作气体流量大时则产生出湍流等离子体短射流, 此时射流长度几乎与工作气体流量或弧电流无关; 在层流与湍流等离子体射流工况之间, 存在一个流动状况不稳定的过渡区, 此时等离子体射流的平均长度随气流量的加大而减小, 但随弧电流的加大而明显加大。层流等离子体长射流有相当好的刚性。

关键词 热等离子体; 射流产生; 层流射流; 湍流射流; 实验研究

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)03-0499-03

EXPERIMENTAL STUDY ON THE GENERATION AND CHARACTERISTICS OF PLASMA JETS

PAN Wen-Xia¹ MENG Xian¹ CHEN Xi² WU Cheng-Kang¹

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Qinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract Experimental results of the generation and characteristics of plasma jets have been presented in this paper. By using the same DC arc plasma generator, long laminar plasma jets are generated with lower working-gas flow rates and the laminar jet length increases apparently with increasing working-gas flow rate or arc current; while short turbulent plasma jets are generated with higher working-gas flow rates and the turbulent jet length is almost independent of the working-gas flow rate or arc current. Between the laminar and turbulent jet regimes, there exists an unstable transient regime, in which the mean jet length decreases with increasing gas flow rate but increases with increasing arc current. The long laminar plasma jet has good stiffness.

Key words thermal plasma; jet generation; laminar jet; turbulent jet; experimental research

1 前言

温度约 10^4 K 的热等离子体已广泛应用于航空航天、材料加工、机械加工、化工、冶金、废弃物处理等各个领域。在工业应用中所遇到的热等离子体大多以湍流等离子体射流的形式出现。湍流等离子体射流存在脉动大、噪声强、对环境气体卷吸多, 等离子体参数轴向梯度大等缺点, 从而使其应用限制于一些对过程重复性与可控性要求不是太高的场合。正是由于这个原因, 在一些应用场合, 如对于航空燃气轮机叶片热障涂层制备, 由于湍流等离子体喷涂所产生的涂层质量不尽如人意, 一些大航空发动机公司投入巨资与人力, 研究用电子束-物理气

相沉积等其它办法来取代等离子体喷涂。

近年来, 采用专门设计的直流电弧等离子体发生器成功地产生出层流等离子体长射流^[1,2], 被认为是一项重要的研究进展。和通常的湍流等离子体射流相比, 层流等离子体长射流具有流动稳定, 噪声低, 对环境气体卷吸少从而射流的高温区长、等离子体参数的轴向梯度小等优点, 为改进材料加工过程的重复性与加工质量, 提供了可能。将层流等离子体长射流用于热障涂层的制备、铸铁表面熔凝硬化处理及不锈钢表面熔覆的初步实验研究表明, 采用层流等离子体长射流的确能取得较好的效果^[3]。

目前已发表了大量研究湍流等离子体射流产生与特性的文章, 也发表了若干研究层流等离子体长

收稿日期: 2006-01-09; 修订日期: 2006-03-14

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

作者简介: 潘文霞 (1957-), 女, 福建建瓯人, 研究员, 主要从事热等离子体的产生、流动与传热特性诊断及相关应用的研究。

射流产生与特性的文章,但还没有对湍流和层流等离子体射流的产生与射流特性进行过系统性的对比研究。由于本文实验中所采用的等离子体发生器可以同时产生出湍流和层流等离子体射流,为开展上述系统性的对比研究提供了可能。本文报道有关的实验研究结果。

2 实验方法

本文实验研究中所采用的直流非转移型电弧等离子体发生器与文献 [1] 中所用的类似。即在发生器的阴极与阳极之间加入一个带中心通孔的中间插入件;等离子体形成气体(氩)一部分从阴极根部周围轴向与切向供入;另一部分则在中间插入件的下游切向供入发生器。从侧面对水平喷射的等离子体射流进行照相,读取照片上可见的射流长度作为等离子体射流的长度。实验中曾改变中间插入件中心通孔的直径和采用两个不同的整流型直流电源(最大输出功率分别为 20 和 50 kW)进行试验,以检验发生器结构和电源对等离子体射流的产生与射流特性的影响。还曾从侧面通过载气携带向所产生的层流等离子体射流喷注粒径小于 $30\ \mu\text{m}$ 的氧化铝粉,以研究侧向喷射的原材料颗粒和载气对层流等离子体射流特性有怎样的影响。

3 实验结果与分析

图 1 给出了一组有关热等离子体射流的产生与射流特性的典型的实验结果。该图纵坐标的弧电流和横坐标的氩质量流量,是在实验过程中可以加以调节的产生等离子体射流的两个基本工作参数。图中的数字代表观测到的等离子体射流的可见区的长度,以 mm 为单位。图 1 的实验结果表明,该发生器可以产生出不同流动状态的等离子体射流,即层流射流、湍流射流和处于二者之间的过渡态射流。图 1 上以两条直线作为临界条件来分开这三个不同的射流流动区域,即虚线的左边为层流区,实线的右边为湍流区,虚实线之间为过渡区。这两条表示过渡临界条件的直线几乎相互平行,可分别以经验关联式 $G_1 = 0.024I - 1.10$ 和 $G_2 = 0.024I + 0.07$ 加以表示,此处 I 是弧电流,以 A 为单位, G_1 和 G_2 是对应于流动状态过渡的两个临界氩质量流量,以 $10^{-4}\ \text{kg/s}$ 为单位, G_1 和 G_2 均随弧电流的加大而线性增加。可以看到,层流等离子体射流可以在颇宽的发生器工作参数范围内产生。观察表明,层流等离子体射流流动稳定,可见区轴向长度长,几乎无噪声;湍流等离子体射流脉动大,射流长度短,噪声强烈;而处

于过渡流动状态的射流是非定期的,射流长度随时间不断变化(当射流长度变长时伴随着噪声减小,而在射流长度缩短时伴随着噪声增强),因此,图 1 上过渡区内的数字代表射流长度的平均值。

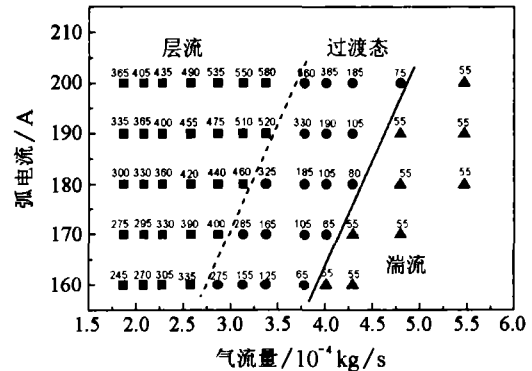


图 1 射流流动状态与射流长度随弧电流与工作气体流量的变化

图 2 对 5 个不同的弧电流,更清楚地给出了射流流动状态与射流长度如何随工作气体流量而变化的情况。可以看到,层流等离子体射流的长度比湍流等离子体射流的长得多;对于给定的弧电流,层流射流的长度随工作气体流量的加大而加长,对于给定的气流量,层流射流的长度随弧电流的加大而加长;湍流等离子体射流的长度短,并且受工作气体流量与弧电流的影响很小;处于过渡流动状态的等离子体射流,其平均长度在弧电流给定时随气流量的加大而缩短,在气流量给定时随弧电流的加大而加长。

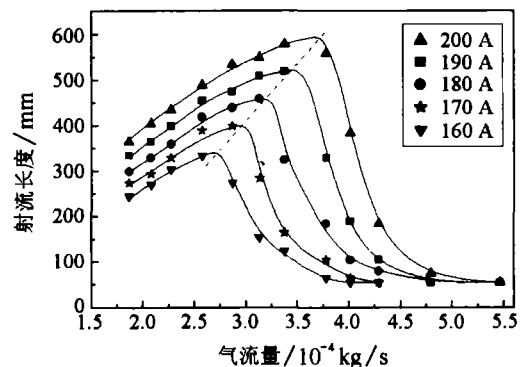


图 2 不同弧电流条件下射流流动状态与射流长度随工作气体流量的变化

图 3 比较了不同结构的发生器(中间插入件中心通孔直径不同)对等离子体射流产生与射流特性的影响,其中实线和虚线分别表示中间插入件中心通孔分别为小直径和大直径时的实验结果。可以看到,采用小直径中心通孔的中间插入件,对于给定的弧电流,可以在更高的临界气流量条件下产生层

流等离子体长射流, 并且层流等离子体射流的最大长度更长一些。

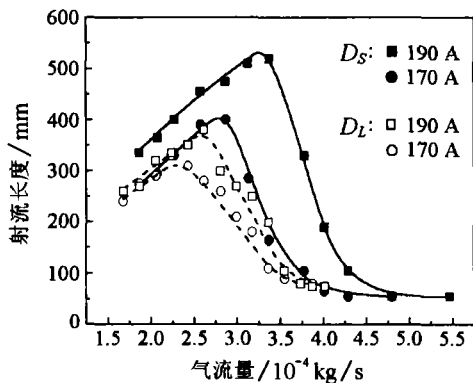


图3 不同发生器中间插入件中心孔直径对射流产生与射流特性的影响

图4 比较了对同一个发生器结构(中间插入件中心通孔为小直径)、但采用两个不同的直流电源(P_1 为20 kW电源, P_2 为50 kW电源)对射流产生与射流特性的影响, 其中实线(及实心符号)和虚线(及空心符号)分别表示采用电源 P_2 和采用电源 P_1 供电时的实验结果。可以看到, 在发生器结构不变的情况下, 采用不同的直流电源对实验结果影响不大。

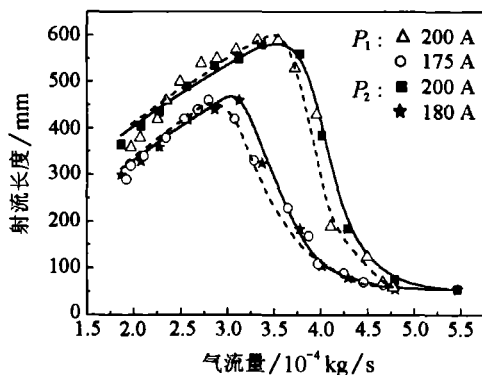


图4 不同电源对射流产生与射流特性的影响

为了揭示侧向喷射的原料颗粒及其载气对层流等离子体长射流特性的影响, 实验中以载气(氩)携带粒径小于 $30 \mu\text{m}$ 的氧化铝粉从侧面喷注于所产生的层流等离子体射流。图5给出了4幅照片, (a)无侧向载气供粉, (b)~(d)有侧向载气供粉且载气与氧化铝粉的流量逐渐增加。可以看到, 层流等离子体长射流具有良好的刚性, 可以承受侧向喷射的原料颗粒及其载气的冲击, 维持其层流状态并几乎不产生偏斜和紊流。随着载气与氧化铝粉的流量增加,

层流等离子体射流的能量由于消耗于供入颗粒和冷却气的加热而逐渐缩短。

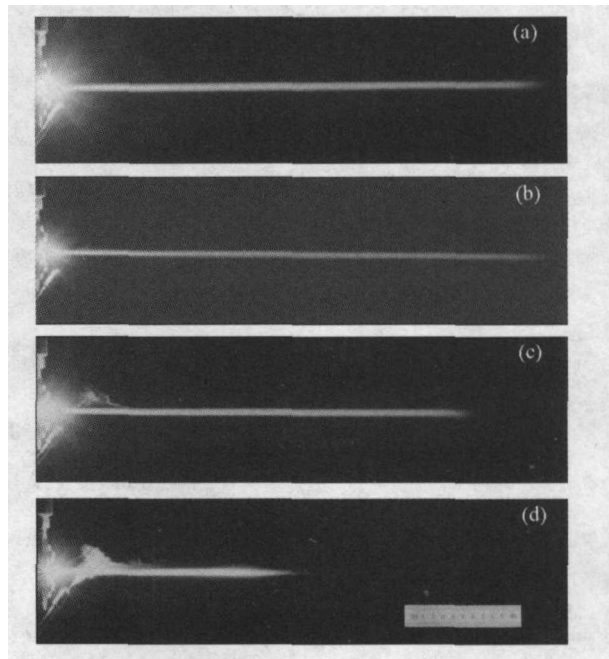


图5 层流等离子体射流照片 (a) 无侧向载气供粉; (b)~(d) 有侧向载气供粉, 对应载气供粉流量分别为 0.82×10^{-5} , 1.90×10^{-5} , 3.26×10^{-5} kg/s

4 结 论

本文的实验研究结果表明, 采用同一个直流等离子体发生器, 依赖于工作气体流量与弧电流, 所产生的等离子体射流可处于层流、湍流或过渡态。不同的发生器结构对射流特性有一定影响, 不同电源的影响则不大。层流射流长度远大于湍流射流长度, 且随气体流量或弧电流的增加而明显增加; 湍流射流的长度几乎与气流量和弧电流无关。层流等离子体长射流可以承受侧向喷射的颗粒及其载气的冲击并维持层流状态。

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] 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
- [3] Pan W X, Ma W, Wu G K. Surface Materials Processing with DC Laminar Plasma Jets. In: Zhou Y C, Gu Y X, Li Z, eds. In: *Proceedings of Mechanics and Material Engineering for Science and Experiments*. Beijing: Science Press, 2001. 427-431