

层 / 湍流等离子体射流的稳定性与三维特性的实验观测研究

潘文霞¹ 孟显¹ 李腾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 采用普通照相和短时间曝光成像的 ICCD 照相技术, 观测了低于大气压条件下产生的纯氩和氩-氢直流电弧等离子体射流的高温区的瞬时形貌及其变化, 结合电弧弧根在阳极表面贴附行为的观测结果, 对射流的稳定性与三维特性和弧根行为之间的关联进行了分析。结果表明, 层流等离子体射流的高温区长度明显长于湍流射流情形, 并且具有很好的轴对称性和时间稳定性; 湍流射流的高温区瞬时形貌则表现出明显的三维特征; 等离子体射流的三维特性与弧根在阳极表面的贴附行为没有直接的联系。

关键词 层 / 湍流等离子体射流; 弧根贴附; 稳定性; 三维特性; 实验观测

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2008)01-0139-03

EXPERIMENTAL OBSERVATIONS ON THE STABILITY AND THE 3-D CHARACTERISTICS OF LAMINAR/TURBULENT PLASMA JETS

PAN Wen-Xia¹ MENG Xian¹ LI Teng¹ CHEN Xi² WU Cheng-Kang¹

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

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

Abstract The high temperature region and its instantaneous characteristics of the pure argon and argon-hydrogen DC arc plasma jets, generated at reduced pressure, have been observed by using a common digital camera and an ICCD camera with short exposure time. Associated with the observation of the arc root attachment on the anode surface, the relationship between the jet stability and 3-D characteristics and the arc root behavior has been analyzed. The results show that the high temperature region of a laminar plasma jet is much longer than its turbulent counterpart, and with good axial-symmetry and time stability. The instantaneous high temperature region of the turbulent jet shows apparent 3-D characteristics. And there is no obvious dependence between the 3-D characteristics of the plasma jet and the arc-root attachment behavior.

Key words laminar/turbulent plasma jet; arc-root attachment; stability; 3-D characteristics; experimental observation

1 引言

由于直流电弧湍流等离子体射流容易产生并且具有很高的能量密度, 过去几十年中已被广泛应用于航空航天、机械加工、冶金以及新材料制备和材料表面改性等领域^[1]。但是由于其流动状态不稳定和涉及的物理过程比较复杂, 难以调控所形成的等离子体射流的状态, 也很难把握射流参数的空间分布和时间变化, 使这种射流的应用受到限制, 仅能用于对精度和可重复性要求不太高的工艺过程。

前期的初步研究结果^[2~3]表明, 非转移弧层流等离子体射流用于材料表面加工, 具有明显优于使用湍流等离子体射流时的工艺稳定性和可控性。这样的结果起初主要被归结于层流等离子体射流的参数脉动低、在射流轴线方向上变化梯度小等特点, 见文献 [4], [5]。要深入理解层流和湍流等离子体射流对材料的不同加热特性, 应仔细研究电弧加热和等离子体射流的流动状态及其发展。

本文采用普通照相和 ICCD 照相技术, 对层流和湍流等离子体射流高温区的宏观形貌及其瞬态特

收稿日期: 2007-01-15; 修订日期: 2007-12-06

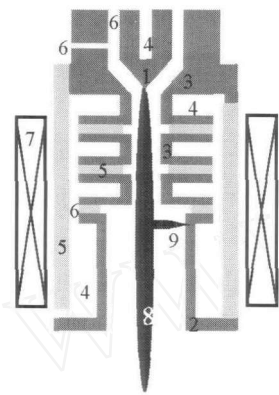
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.10575127; No.50336010)

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产生、流动与传热特性诊断及相关应用研究。

征进行了观测,同时结合对电弧弧根在阳极表面的贴附状况的直接观察,讨论弧根贴附状况与射流特性之间的关系,进而探讨射流流动状态与其能量密度分布的均匀性和瞬时变化特征。

2 实验方法

图1为用于在低于大气压的环境中产生层流或湍流等离子体射流的直流非转移式电弧等离子体发生器的结构示意图,主要由阳极、阴极和介于其间的三个串联安放并相互绝缘的中间段组成。发生器与真空室连接,射流喷射于真空室中,真空腔压力范围为 $(0.05\sim 3)\times 10^4$ Pa。分别以纯氩或氩-氢(氢的体积含量为 $0\%\sim 18\%$)混合气体为工作气体,气体轴向和切向供入发生器,气流量范围为 $(2.1\sim 6.1)\times 10^{-4}$ kg/s,根据气流量和腔压的不同,同一个发生器可以产生出层流或湍流等离子体射流。电源输入功率范围为 $5.5\sim 18$ kW。



1. 阴极 2. 阳极 3. 中间段 4. 冷却水通路 5. 绝缘体
6. 进气口 7. 磁场线圈 8. 等离子体射流 9. 弧根点

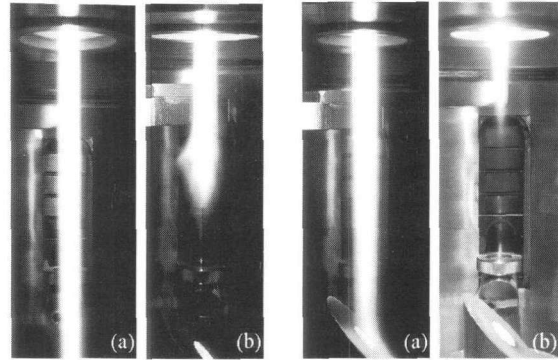
图1 等离子体发生器结构示意图

以普通数码相机和ICCD照相的方法观测层流和湍流等离子体射流高温区的宏观形貌。ICCD照相能将曝光时间控制在微秒以至纳秒范围,可拍摄到射流高温发光区的瞬时形貌。电弧弧根在阳极表面贴附状况的观察方法与文献[6]一致,即采用一个特殊设计的铜镜,获得图1所示发生器的仰视结构图像和电弧弧根的ICCD图像。

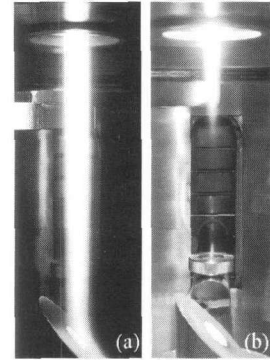
3 结果与讨论

图2和图3为使用普通数码相机拍摄的等离子体射流照片。图2为纯氩层流和湍流射流的发光区照片,图3为添加少量氢的氩-氢等离子体射流照片。由这两组照片可见,层流等离子体射流的高温区明显长于湍流射流;同时,添加少量氢会使氩-氢层流和湍流射流的长度都较纯氩射流时缩短。

在图2(b)所示的纯氩湍流等离子体射流的尾部能看到发光区出现分叉,可认为是射流湍流能量脉动和非轴对称摆动的表现。



(a) 层流、(b) 湍流

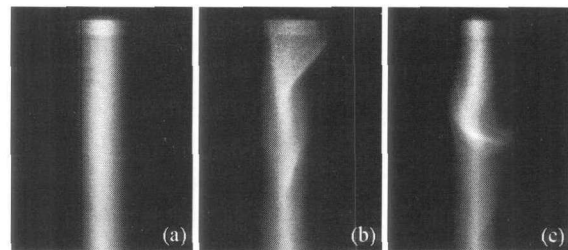


(a) 层流、(b) 湍流

图2 纯氩等离子体射流

图3 氩-氢等离子体射流

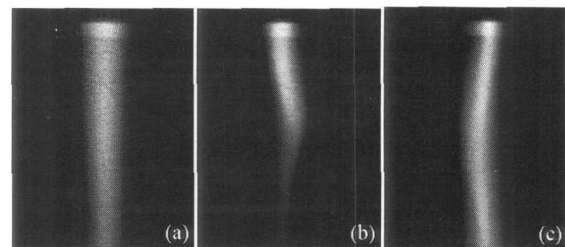
图4和图5为采用ICCD照相得到的,以纯氩和添加少量氢的氩-氢混合物为工作气体所产生的层流和湍流等离子体射流的发光区形貌照片。图4(a)所示的纯氩层流等离子体射流发光区有很好的轴对称性。图4(b)和图4(c)为加大气流量而产生的湍流氩等离子体射流在不同时刻拍摄的发光区形貌照片。可以看到,湍流氩等离子体射流的形貌是非正常的,瞬时温度或能量分布具有明显的三维特征,并且随时间变化的幅度很大。少量氢气的添加,使射流的长度缩短,图5(a)表明氩-氢层流等离子体



(a) 层流, 气流量 2.1×10^{-4} kg/s, 曝光时间 $10\ \mu\text{s}$

(b) 与 (c) 湍流, 气流量 6.1×10^{-4} kg/s, 曝光时间 $5\ \mu\text{s}$

图4 纯氩等离子体射流的ICCD照片



(a) 层流, 气流量 2.1×10^{-4} kg/s

(b) 与 (c) 湍流, 气流量 3.2×10^{-4} kg/s

图5 氩-氢等离子体射流的ICCD照片, 曝光时间 $10\ \mu\text{s}$

射流下游发光区半径逐渐缩小, 但是射流整体的轴对称性仍然很好。图 5(b) 和图 5(c) 是加大气流量后产生的氩 - 氢湍流等离子体射流的不同时刻的发光区照片, 同样表现出瞬时发光区的非定常性和三维特征。

采用上述铜镜, 配合 ICCD 照相, 容易得到弧根在阳极表面的贴附行为 (扩散型或集聚型) 以及弧根沿阳极表面周向分布的确切信息; 同时, 由于所采用的阳极喷管带有一定的扩张角, 通过测量弧根在阳极表面贴附点距离阳极中心的半径变化, 可以判断弧根轴向跳动的有无和跳动幅度。

图 6 和图 7 为使用 ICCD 照相得到的弧根发光区域的照片。由图 6 可见, 纯氩电弧的弧根为均匀的周向贴附。产生图 6 层流纯氩射流的工作参数与图 4 的相同, 图 6(a) 的弧根照片上方中部的微弱竖直发光区是由于层流射流高温区一直延伸至反射镜表面附近所致; 这样周向均匀分布的弧根图像不能解释为非轴对称的局部贴附的弧根旋转所引起的, 因为在旋转气流推动下产生的弧根旋转一般不能达到如此高的转速。图 6 所示结果表明, 无论产生的射流是层流或湍流流动的, 纯氩电弧弧根都是扩散型的; 也就是说, 图 4(b) 与图 4(c) 所示的湍流氩等离子体射流的三维与非定常特征可能是由射流流动的脉动所引起的, 与阳极处弧根的贴附行为没有直接的关联。图 7 为添加了少量氢的氩 - 氢电弧弧根

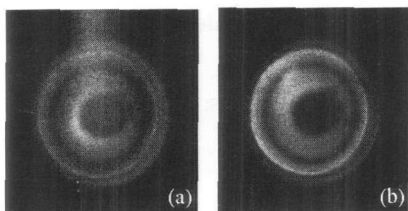
附状态的照片, 由于氢的添加量少且工作压力低, 图 7(a) 所示弧根虽然已为集聚型, 但是弧根区域还是比工作气体流量大且压力高的图 7(b) 时明显扩大。图 7 所示两照片中的白色圆环是人为添加的, 目的是为了标示弧根在阳极表面贴附点分布区域的半径, 并以此推测弧根贴附点的轴向位置。对于图 7 中的两种射流工作状态, 实验中分别各拍摄了 5 幅以上的照片, 总时间跨度为数分钟, 但是没有观测到弧根形貌或贴附位置的变化。也就是说, 虽然图 7(a) 表明层流氩 - 氢等离子体射流的弧根为没有明显周向移动的集聚型, 弧根贴附于阳极表面的局部区域, 但是图 5(a) 所示层流射流形貌却表现为轴对称。因此, 图 4~7 的结果表明, 射流的三维特性与弧根的贴附行为并没有直接的联系。

4 结 论

本文实验观测和分析的结果表明: 层流等离子体射流的高温区有很好的轴对称性; 湍流射流的瞬时能量分布具有明显的三维特性, 并且随时间变化的幅度很大; 纯氩射流的高温区长度长于氩 - 氢射流; 在纯氩条件下, 无论最终形成的射流是层流还是湍流流动, 阳极表面的弧根贴附都是扩散型的; 在加入少量氢气的条件下, 氩 - 氢电弧弧根则转为集聚型贴附; 射流的三维和非定常特性与弧根的贴附行为没有直接的关联。

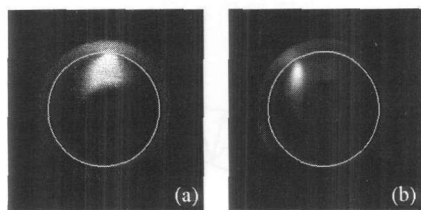
参 考 文 献

- [1] Pfender E. Thermal Plasma Technology: Where do we Stand and Wher are we Going? Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1999, 19(1): 1-31
- [2] Pan W X, Zhang W H, Ma W, et al. Characteristics of Argon Laminar DC Plasma Jet at Atmospheric Pressure. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2002, 22(2): 271-283
- [3] Pan W X, Meng X, Li G, et al. Feasibility of Laminar Plasma-Jet Hardening of Cast Iron Surface. Surface and Coatings Technology, 2005, 197: 345-350
- [4] Pan W X, Zhang W Hua, Zhang W Hong, et al. Generation of Long, Laminar Plasma Jets at Atmospheric Pressure and Effects of Flow Turbulence. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2001, 21(1): 23-35
- [5] 孟显, 潘文霞, 吴承康. 层流等离子体射流温度与速度测量. 工程热物理学报, 2004, 25(3): 490-492
- [6] Pan W X, Li T, Meng X, et al. Arc Root Attachment on the Anode Surface of Arc Plasma Torch Observed with a Novel Method. Chinese Physics Letters, 2005, 22(11): 2895-2898



(a) 层流, (b) 湍流; 曝光时间 $50 \mu\text{s}$

图 6 纯氩等离子体射流弧根的 ICCD 照片



(a) 层流, (b) 湍流; 图中白色圆周线为人为添加

图 7 氩 - 氢等离子体射流弧根的 ICCD 照片