

层流高温部分电离气体射流热流密度 分布动态测量与分析

孟 显 潘文霞 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 采用表面中心位置装有铜探头的平板, 对射入大气环境的层流纯氩高温部分电离气体射流冲击平板的热流密度进行了动态测量, 分析了测量条件对热流密度及其分布特性测量结果的影响。同时, 研制了嵌有铜探头的小尺寸杆状热流探针, 在小扰动条件下测量了射流的热流密度分布。结果显示层流等离子体射流具有稳定的能流密度, 探针的移动速度对射流中心区域的热流密度测量结果影响很大。

关键词 层流等离子体射流; 热流密度; 动态测量

中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2005)01-0137-03

TRANSIENT MEASUREMENT AND ANALYSIS ON HEAT FLUX DISTRIBUTIONS OF PARTIALLY-IONIZED HIGH-TEMPERATURE LAMINAR FLOW JET

MENG Xian PAN Wen-Xia WU Cheng-Kang

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

Abstract By using transient method, the heat flux distributions were measured for a partially-ionized high-temperature argon laminar-flow jet impinging normally on a flat plate, where a copper slug was embedded in the center of the plate as heat flux probe. The effects of measuring factors on the results were analyzed. A stick-shaped heat flux probe of 1mm outer diameter was also designed to measure the heat flux distributions of the jet flow with small disturbance. Results show that the heat flux of laminar flow jet was stable, and sweeping velocity of the probe across the jet flow can affect the measuring result appreciably.

Key words laminar plasma jet; heat flux; transient measurement

1 引 言

作为高温部分电离气体的热等离子体射流, 在发生器出口处的最高温度可超过一万度^[1], 能流密度可达 10^8 W/m^2 ^[2], 用于材料表面加工, 具有很高的工艺速率, 同时, 相比于激光、电子束等其它高能束流加工, 具有设备简单和能量利用率高的特点。以往应用的非转移弧等离子体射流大都处于湍流状态, 射流流动的脉动性强, 高温区域短, 且基本上不随产生参数的变化而改变, 因此, 轴向温度梯度和速度梯度很大, 用于材料表面加工的工艺可控性很

差, 这不仅制约了它在工业应用中的进一步发展, 也妨碍了对这类高温气体射流与固相表面换热机理的深入认识。层流等离子体射流具有脉动小、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、可重复性好等优点^[3]。这些特性为深入的机理研究提供了可调控的实验条件, 也为层流射流材料表面加工新工艺的探讨提供了可能性^[4]。

热流密度及其分布是表征高温气流特性的一个重要参数, 由于热等离子体射流的极高温和大的径向温度梯度, 动态法是常用的测量热流密度分布的方法^[5,6]。射流冲击平板的热流密度分布测量, 对

收稿日期: 2004-01-08; 修订日期: 2004-11-08

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。

了解应用于熔凝强化等工艺时材料表面的热流状况有实际意义。而射流本身的流场表征虽然具有更重要的意义,却也有更大的难度。不需要对射流做定常、轴对称等假设,并且对流场扰动小的小尺寸热流探针动态测量法的研究,目前还很难查到。

本文采用动态法,对射入大气中的纯氩层流等离子体射流及其冲击平板时在平板表面的热流密度分布进行了实验测量和分析。

2 实验方法

图 1 为动态法测量热流密度分布的示意图。其中图 1(a) 是射流冲击平板时的测量示意图。在平板表面中心固定着直径 0.8 mm, 长 0.8 mm 的紫铜探头, 探头后面焊接直径 0.1 mm 的镍铬 - 镍铝热电偶, 热电偶和数据采集系统相连接。探头与平板之间充填隔热性良好的 ZrO_2 粉体。当射流以一定速度垂直扫过平板时, 数据采集系统实时记录探头温度随时间的变化, 对温升曲线进行数据处理, 可以得到射流冲击平板时的径向热流密度分布。图 1(b) 是杆状小尺寸热流探针测量的示意图。探针整体结构设计尽可能减少测量过程中对射流的扰动。紫铜探头的直径为 0.8 mm, 长 0.8 mm, 探头外套有外径为 1 mm 的隔热玻璃管, 玻璃管固定于水冷支座。

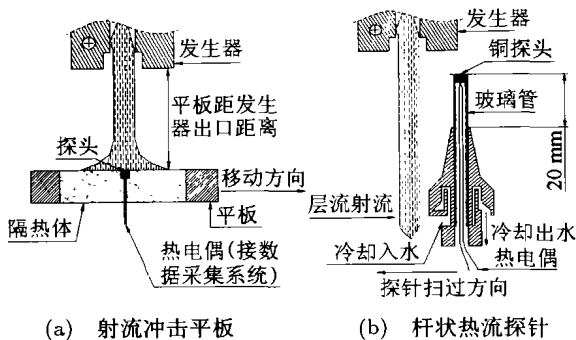


图 1 热流密度动态测量方法示意图

3 实验结果及讨论

图 2 所示为射流冲击平板时在平板表面的热流密度分布图。产生层流与湍流射流的电流均为 200 A, 工作气流量分别为 1.2×10^{-4} kg/s 和 2.3×10^{-4} kg/s, 射流相对平板的移动速度同为 100 mm/s。在层流状态下, 热流密度径向分布的轴对称性较好, 没有明显的波动, 对应于射流中心处有热流密度最大值; 随着发生器出口到平板表面间距离的增加, 最大热流值减小的梯度较小, 同时, 热流密度的径向分布没有明显的展宽。这说明层流射流具有良好的轴对称性和流动稳定性。在湍流状态下, 热流密

度沿径向明显地不规则波动, 射流沿轴线方向最大热流的变化梯度也比层流射流要大得多, 这是湍流射流脉动性大的反映, 也是其应用于材料表面加工时工艺参数难以控制的主要原因 [7]。

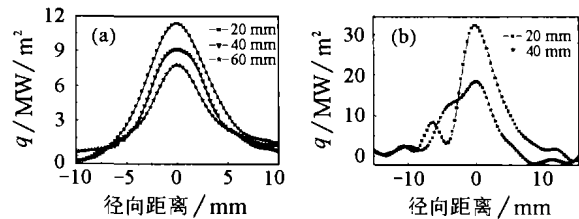


图 2 层流射流冲击平板时的热流密度 q 分布图

(图中数字代表平板与发生器出口间距离)

图 3 所示为层流等离子体射流冲击平板时和杆状热流探针测得的热流密度径向分布图。产生等离子体射流的弧电流为 170 A, 工作气流量 1.6×10^{-4} kg/s, 发生器出口距离探头表面 6 mm, 平板表面相对射流的移动速度 245 mm/s, 杆状热流探针的移动速度 260 mm/s。由图可见, 杆状热流探针测得的热流密度分布的轴对称性较差, 首先是迅速上升, 到达最高值后, 则相对缓慢地下降。这可能是由于杆状热流探针的隔热玻璃管壁厚只有 0.1 mm, 隔热效果不足, 扫过射流时管壁会有明显的温升, 在测量过程的后期, 玻璃管可能会向紫铜探头侧面传热而导致测得的热流密度下降缓慢。因此, 现有杆状热流探针的结构需要做改进。比较两条曲线的左半侧, 杆状热流探针测得的热流密度径向分布范围比冲击平板得到的结果要窄。由于杆状热流探针的尺寸小, 对射流的扰动小, 因而曲线左侧的热流密度分布, 可能更能反映射流流场的实际情况。

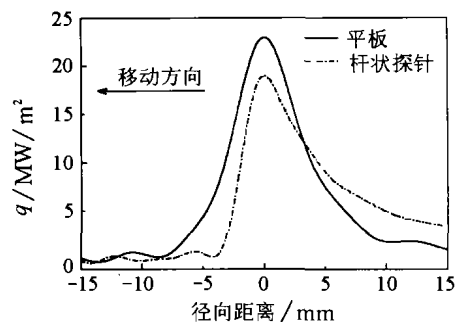


图 3 层流射流冲击平板及杆状热流探针测得的热流密度分布图 (移动方向为射流固定时的探针移动方向)

图 4 是层流射流冲击平板及杆状热流探针测得的中心最大热流密度沿轴线的变化曲线, 实验条件同图 3。由杆状热流探针的测量结果看到, 在探针表面距发生器出口较远时, 最大热流变化较平缓,

但是在距离小于 20 mm 的情况下, 最大热流变化梯度显著增大。这可能是由于随着距离的减小, 射流中心的温度和速度同时增高, 在本实验条件范围内, 高温气体与铜探头表面的换热系数分别随温度和速度的增加而单调增加^[8], 促成气/固界面的充分换热。射流冲击平板的情况下, 在发生器出口附近, 最大热流密度值的增加不如杆状热流探针时显著, 这可能是在平板表面附近射流流场改变的结果。

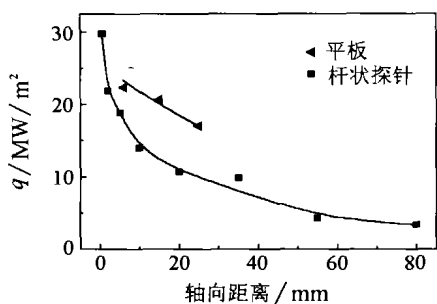


图 4 层流射流冲击平板及杆状热流探针测得的最大热流密度沿射流轴线的变化图

图 5 显示层流射流冲击平板时的中心滞止压力要小于皮托管测量的结果, 距离发生器出口越近, 差别越大。根据伯努利方程, 滞止压力越高, 在气体温度一定的条件下, 气流速度也越大。因此, 图 5 的结果可以补充说明图 4 所示两种方法测得的热流密度变化趋势的差异。

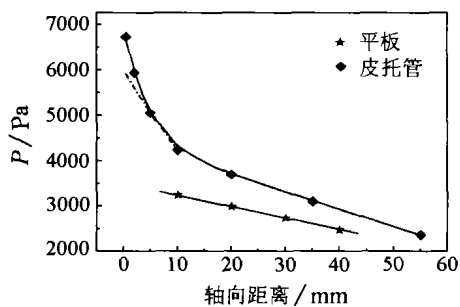


图 5 射流冲击平板及皮托管测得的滞止压力 P 沿射流轴线的变化图 (射流产生条件同图 3)

图 6 是最大热流密度随探头相对射流移动速度变化的曲线, 射流的产生条件同图 3。其中曲线 1, 2 是射流冲击平板时的结果, 曲线 3, 4, 5 是杆状热流探针的测量结果。由图看到, 探头移动速度越高, 测得的最大热流密度值越小; 同时, 随着距离的减小, 移动速度对最大热流测量值的影响变得更加明显。这和参考文献 [2, 9] 的结果是一致的。这可能是由于在该实验条件范围内, 气/固换热过程中边界层处于冻结状态, 探针对输入的热流有一定的响应时间, 在移动速度低的情况下, 射流和固体表面之间

有更充分的换热时间, 从而测得的热流密度值高。

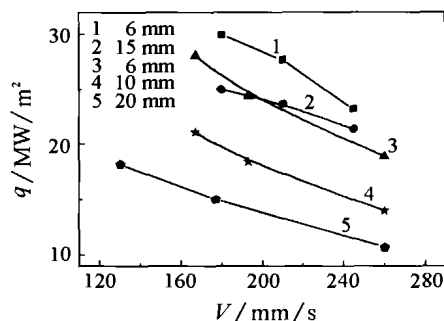


图 6 不同的探头移动速度 v 对最大热流密度 q 的影响 (1,2: 平板 3,4,5: 杆状探针)

4 结 论

本文实验测量和结果分析表明: 层流等离子体射流流动稳定, 轴线方向的热流密度变化梯度远小于湍流射流; 对射流流场扰动较小的杆状热流探针测量适合于射流本身流场特性表征; 探针移动速度对热流密度的测量值有明显的影。

参 考 文 献

- [1] E Pfender, R Spores, W Chen. A New Look at the Thermal and Gas Dynamic Characteristics of a Plasma Jet. *Int. J. Mater. Product Technol*, 1995, 10(3-6): 548-565
- [2] T Petrie, E Pfender. The Effect of Ionization on Heat Transfer to Wires Immersed in a Highly Thermally-Ionized Plasma. *Warme- u. Stoffübertragung*, 1972, 5: 85-100
- [3] W X Pan, W H Zhang, W H Zhang, 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
- [4] G Li, W X Pan, C K Wu. Non-transferred DC Laminar Plasma Cladding at Atmospheric Pressure. Edited by A Bouchoule, et al. In: *Proc. of ISPC15*. Orleans, 2001. 319-324
- [5] X Chen, P Han, H P Li, et al. Measurement of the Heat Flux, Impact Pressure and Electron Temperature on the Surface of a Plate Impinging Normally by a Thermal Plasma Jet. In: *Proc. of ISPC 14*, 1999. 61-66
- [6] X Meng, W X Pan, W H Zhang, et al. Heat Flux Characterization of DC Laminar-Plasma Jets Impinging on a Flat Plate at Atmospheric Pressure. *Plasma Sci. Technol.*, 2001, 3(5): 953-958
- [7] W X Pan, W H Zhang, W Ma, et al. Characteristics of Argon Laminar DC Plasma Jet at Atmospheric Pressure. *Plasma Chem. Plasma Process*, 2002, 22(2): 271-284
- [8] 孟显, 潘文霞, 吴承康. 层流等离子体射流特性参数测量. 见: 中国工程热物理学会编. 中国工程热物理学会传热传质学学术会议论文集 (下册). 北京: 2003. 899-902
- [9] E Pfender. Heat Transfer from Thermal Plasmas to Neighboring Walls or Electrodes. *Pure & Appl. Chem.*, 1976, 48: 199-213