

探针移动速度对等离子体射流热流密度 测量结果的影响

孟 显 潘文霞 吴承康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘 要 采用自行研制的中心嵌有铜柱感应件的小尺寸杆状热流探针, 在低扰动条件下, 对射入大气环境的纯氩层流等离子体射流传向铜探头表面的热流密度进行了动态测量。结果表明, 在射流最高温度 16500 K、最大轴向速度 850 m/s、探针垂直于射流流动方向的移动速度 130~260 mm/s 的实验参数范围内, 随着探针移动速度的提高, 测得的热流密度值减小; 射流温度和速度越高, 探针移动速度对热流密度测量值的影响越大。

关键词 层流等离子体射流; 杆状热流探针; 热流密度; 动态测量; 移动速度
中图分类号: O536 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2007)05-0862-03

EFFECTS OF PROBE SWEEPING VELOCITY ON THE MEASURED HEAT FLUX FROM THE PLASMA JET

MENG Xian PAN Wen-Xia WU Cheng-Kang

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

Abstract The transient method was used to measure the heat flux from the plasma jet to the self-made stick-type heat flux probe with copper-slug sensor fixed in it. Within experimental parameter ranges of maximum jet temperature 16500 K, maximum axial velocity 850 m/s and probe sweeping velocity 130~260 mm/s, results show that the measured heat flux decreases with the increasing probe sweeping velocity, and effects of the probe sweeping velocity on the measured heat flux increased with increasing jet temperature and axial velocity.

Key words laminar plasma jet; stick-type heat flux probe; heat flux; transient measurement; sweeping velocity

1 引 言

等离子体射流传向固相表面的热流密度的测量方法有稳态法^[1,2]和动态法^[3,4]两种。稳态法通常采用水冷探针, 利用能量平衡关系得到射流传向探针表面的热流密度值。由于等离子体射流具有很大的径向参数梯度, 水冷探针一般仅适用于总热流的测量, 很难测量出局部热流密度及其分布。动态法采用高热导率材料作为感应探头, 当其在垂直于射流轴线的平面内快速扫过时, 可根据感应探头的温升变化推算出热流密度及其分布。以往常采用在平板中心嵌入铜探头、并在探头周围充填隔热材料的方法来测量射流冲击平板的热流密度及其分布^[4]。

近年来, 课题组在大气压条件下产生出了流动稳定、轴向温度及速度参数可调的直流层流等离子体长射流^[5]。用这种层流等离子体射流对铸铁表

面进行熔凝强化^[6]、在不锈钢表面熔覆 Al₂O₃ 复合涂层、在铝硅合金表面熔注 SiC 颗粒^[7,8]的实验结果表明了层流等离子体射流应用于材料表面加工的可行性和优异的工艺可控性。对于这类材料表面处理工艺, 等离子体射流传向工件表面的热流密度, 是表征射流对材料加热效果的一个重要物理量。目前还缺少这方面的研究报道。

本文应用自行研制的小尺寸杆状热流探针, 采用动态法对射入大气环境的纯氩层流等离子体射流传向铜探头表面的热流密度进行了测量, 探讨了探针移动速度对最大热流密度测量值产生影响的可能原因。

2 实验方法

图 1 为动态法测量热流密度的示意图。小尺寸

收稿日期: 2006-01-15; 修订日期: 2007-07-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.500336010; No.10575127)

作者简介: 孟 显 (1974-), 女, 河北石家庄人, 助理研究员, 主要从事热等离子体特性诊断及其与固相表面相互作用研究。

杆状热流探针由铜探头、隔热玻璃管、水冷支座和热电偶构成。铜探头直径 0.8 mm, 长 0.8 mm, 嵌在外径 1 mm 的隔热玻璃管中, 铜探头受热面和玻璃管一端平齐, 玻璃管固定于水冷支座, 前端伸出水冷支座 20 mm。水冷支座为锥形, 可尽量减少对射流的扰动。铜探头后表面焊接直径 0.1 mm 的镍铬-镍铝热电偶, 热电偶与数据采集系统相连, 数据采集系统可实时记录铜探头后表面的温度变化。热流密度是基于集总热容法, 根据关系式 $q = \rho C_p l \Delta T / \Delta t$ 得到, 其中 ρ 、 C_p 、 l 分别是铜探头的密度、热容和长度, ΔT 为热电偶在 Δt 时间内的升温。

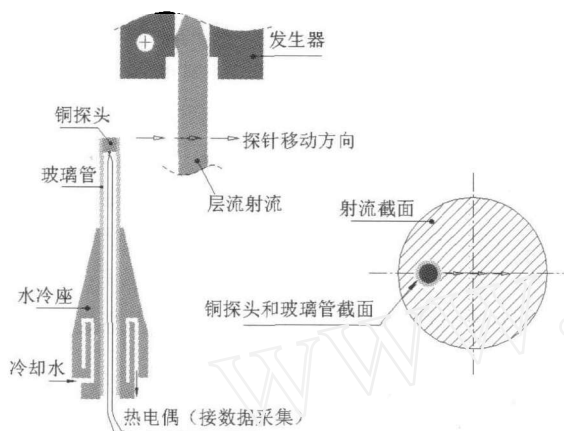


图 1 动态法测量热流密度示意图

实验中工作气体为纯氩, 气流量为 1.9×10^{-4} kg/s, 弧电流为 170 A, 环境气体为空气。层流射流^[9]在发生器出口的最高温度约为 16500 K, 最大速度约为 850 m/s, 射流直径约为 5 mm, 轴向温度梯度约为 55 K/mm, 轴向速度梯度约为 10 (m/s)/mm。热流探针移动速度为 130~260 mm/s, 铜探头表面与等离子体发生器出口间的距离为 2~55 mm。

3 结果与讨论

图 2 所示为铜探头表面与发生器出口间的距离为 2 mm 处, 在 3 种不同的探针移动速度条件下, 测得的热流密度 q 分布曲线。由图 2 可见, 在射流本身参数不变的情况下, 随探针移动速度的增加, 最大热流密度测量值 q_{\max} (定义为横坐标零点对应的热流密度测量值) 会明显降低。探针移动速度为 260 mm/s 时测得的最大热流密度值约为移动速度 165 mm/s 时的 55%。同时, 从图中看到, 热流密度分布曲线的轴对称性较差, 首先是迅速上升, 到达最高值后, 则相对缓慢地下降。这可能与探针自身结构有关。本文将只讨论热流密度上升部分 (即表示射流轴线的横坐标零点的左侧部分) 的变化关系。

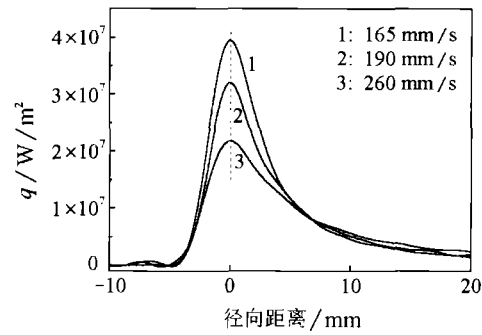


图 2 热流密度分布曲线 (铜探头表面距发生器出口 2 mm)

改变铜探头表面与发生器出口间的距离, 图 3 给出了最大热流密度测量值随探针移动速度变化的曲线。结果显示, 距离越近, 探针移动速度对最大热流密度测量值的影响越明显; 在同一距离, 最大热流密度测量值随探针移动速度的增加近似线性地降低。因此, 线性拟合最大热流密度测量值随探针移动速度的变化, 并外推到零速度, 可假设这样得到的探针移动零速度时的最大热流密度等同于稳态条件下的结果。图 4 给出了实验测得的最大热流密度值 q_{\max} 、外推到速度为零时的最大热流密度值、以及 q_{\max} 随探针移动速度的变化率 (dq_{\max}/dv) 随发生器轴向距离变化的曲线。无论是最大热流密度测量值、外推值, 还是变化率, 其随射流轴向距离的变化趋势都近似一致: 随着距离的增加, 三者都减小; 距离越近, 变化越明显, 即: 射流的温度和速度越高, 探针移动速度对热流密度测量值的影响越大。

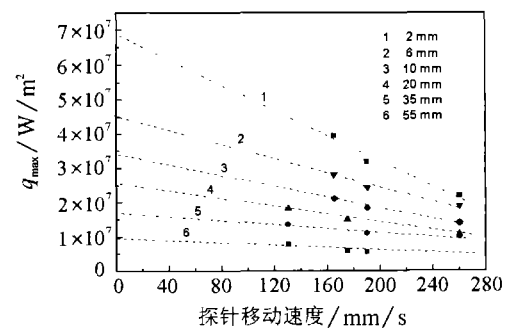


图 3 最大热流密度测量值随探针移动速度的变化

从图 3 看到, 探头表面距发生器出口 2 mm, 探针移动速度为 260 mm/s 时的测量值为 2.2×10^7 W/m², 外推速度为零时的最大值约为 6.8×10^7 W/m²。分析稳态测量与动态测量的热流密度差异, 特别是测量值随探头移动速度升高而减小的特点, 在平衡传热条件下, 可能的影响因素有: 热流从铜探头前表面传递到后表面的时间、铜探头周围隔热材料的隔热性能、铜探头尺寸效应等三方面。

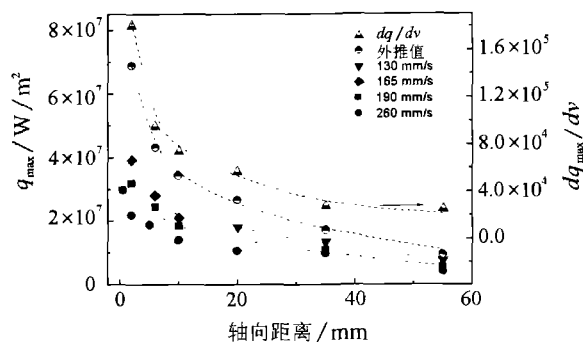


图4 最大热流密度测量值及其随探针移动速度的变化率随轴向距离的变化

采用一维热传导方程计算的结果显示, 在实验参数范围内, 热流从铜探头前表面传到后表面的时间并不影响最终的最大热流密度值; 探头周围的隔热材料不是理想的绝热体, 铜探头与周围隔热材料的热交换可能使测到的热流密度值降低, 但是, 这种影响会在探针移动速度低时更明显。以上两方面的因素都不能解释最大热流密度测量值随探针移动速度增加而降低的实验现象。对铜探头尺寸的影响分析如下: 由图2中横坐标零点左侧的数据线性外推, 得到了图5所示探针移动速度为零时的热流密度分布曲线。铜探头直径和移动速度取为和实验参数相同的值, 铜探头可能接受的热流密度为图5中速度为零时的外推值, 当探针以130 mm/s, 165 mm/s,

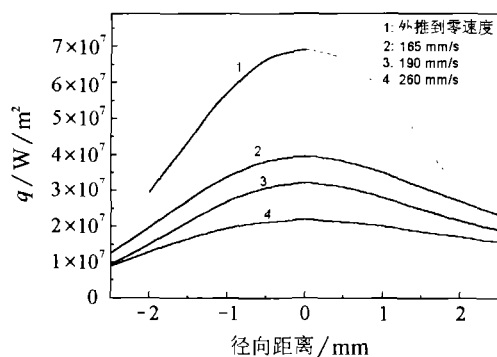


图5 外推移动速度为零时的热流密度分布

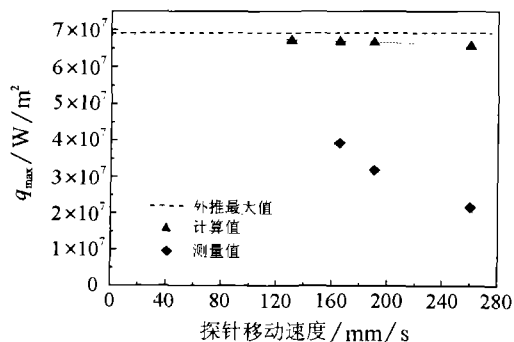


图6 探针尺度对热流密度最大值测量结果的影响

190 mm/s 和 260 mm/s 的速度移动时, 在 $t_2 \sim t_1$ 为 2 ms 的时间间隔内, 假设铜探头接受的热流密度为其移动范围内热流密度的平均值, 并把该平均值赋给 t_2 时刻铜探头中心所在的位置处的热流密度。图6给出了大致的计算结果, 显示铜探头尺寸对热流密度最大测量值有一些影响, 但远不能完全解释探针移动速度对热流密度测量结果产生影响的原因。因此, 气/固表面的非平衡换热过程可能是导致探针移动速度对测量结果产生影响的主要原因。

4 结 论

在实验参数范围内, 探针移动速度对最大热流密度测量值有较明显的影响; 射流参数不变时, 探针移动速度越快, 最大热流密度测量值越小; 射流的温度和速度越高, 移动速度对最大热流密度测量值的影响越大。通过外推实验数据, 预测探针移动速度为零的热流密度测量值及其分布; 在发生器出口附近, 以 260 mm/s 移动探针时的测量值为 $2.2 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, 外推值为 $6.8 \times 10^7 \text{ W/m}^2$, 气/固表面的非平衡换热过程可能是产生这一差值的主要原因。

参 考 文 献

- [1] Fasoulas S, Auweterkurtz M, Habiger H A. Experimental Investigation of a Nitrogen High-Enthalpy Flow. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 1994, 8(1): 48-58
- [2] Kishigami T, Heberlein J V, Pfender E. Experimental Investigation of Heat Transfer Between Plasma Jets and Substrate. In: *Proceedings of the 10th International Symposium on Plasma Chemistry*. Bochum, 1991. 1: 1.3-11
- [3] Pfender E. Heat Transfer from Thermal Plasmas to Neighboring Walls or Electrodes. *Pure and Applied Chemistry*, 1976, 48: 199-213
- [4] Chen X, Han P, Li H P, et al. Measurement of the Heat Flux, Impact Pressure and Electron Temperature on the Surface of a Plate Impinged Normally by a Thermal Plasma Jet. In: *Proceedings of the 14th International Symposium on Plasma Chemistry*, Prague, 1999. 1: 61-66
- [5] 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 Chemistry and Plasma Processing*, 2001, 21(1): 23-35
- [6] 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(2-3): 345-350
- [7] 费群星. 层流等离子体射流合金表面熔凝与熔敷工艺可行性研究: [硕士论文]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2004
- [8] Ma W, Fei Q X, Pan W X, et al. Investigation of Laminar Plasma Remelting/Cladding Processing. *Applied Surface Science*, 2006, 252(10): 3541-3546
- [9] 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