

大尺度磁分散电弧等离子体的探针诊断

焦凌云, 查俊, 白冰, 张晓宁, 夏维东

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 合肥 230027)

摘要: 利用自行设计的快速移动静电探针对大气压下以氩气为工质的大尺度磁分散电弧等离子体进行诊断, 分析了探针电压与电流的波形, 绘制探针伏安特征曲线($U-I$ 曲线), 得到了发生器轴线方向等离子体波动特性以及电子温度沿轴线的变化趋势。发现等离子体发生器中心具有回流区, 得到了电弧等离子体的大致体积。

关键词: 静电探针; 大尺度; 磁分散电弧; 等离子体; 电子温度

中图分类号: O536; TL65+6

文献标志码: A

1 引言

电弧等离子体具有温度高、能量集中、化学特性活跃等特点^[1], 被广泛应用于工业生产, 如金属熔炼、切割、喷涂等。但由于横向截面小、物理参数梯度大等特点, 电弧等离子体在一些工艺过程中的应用受到了一定的限制, 如在大面积的表面处理、材料宏观制备等方面, 则产生产品均匀性和一致性不足等问题。而通过外加磁场驱动电弧高速旋转产生的大面积、均匀分散电弧可以很好地弥补上述不足, 提高工作效率以及产品的一致性^[2]。目前对大尺度磁分散电弧的了解还不充分。本实验使用静电探针对大尺度磁分散电弧等离子体进行了诊断, 对大尺度磁分散电弧等离子体有了更深一步的了解, 为其在工业上的进一步应用提供基础数据。

2 实验装置

实验使用的大尺度磁分散电弧等离子体发生器如图1所示。其中, 阳极弧室直径为70mm, 弧室长度为235mm, 阴极直径为18mm, 阴极长度为150mm, 阴、阳极材料均为石墨, 石墨阳极外有一

含水冷夹层的不锈钢套管, 在水冷不锈钢套管上同轴绕制水冷螺线管励磁线圈产生轴向磁场。实验在大气压下进行, 工作介质为氩气, 气体流量控制通过浮子流量计监测。

在图1所示的探针电路中, 扫描电源电压峰值125V、频率1250Hz正弦交流, 限流电阻为4k Ω , 分压电阻为1M Ω /1000 Ω , 电流采样电阻为50 Ω 的无感电阻, 参考电位取等离子体发生器阳极(发生器阳极接地)。

探针材料为钨(含钨量99.96%), 直径1mm, 钨丝表面套有外径2mm、内径1mm的耐高温陶瓷管(如图1所示), 保证探针的带电粒子接受面积为 $\varnothing 1$ mm的钨丝截面。探针固定于三维电机驱动高速移动坐标实验台上如图2所示, 移动精度精确为0.1mm, 移动速度为40mm \cdot s⁻¹, 调节探针的位置以便对不同位置的等离子体进行诊断。静电探针从前端盖板中心进入弧室对发生器轴线方向的等离子体进行诊断。

实验时要注意探针表面清洁, 探针污染会带来各种实验偏差^[3]。实验之前可以采用细砂纸对探针表面进行清洁, 然后用酒精擦拭或者将探针负偏置

收稿日期: 2012-01-14; 修订日期: 2012-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(NSFC50876101, NSFC11035005)

作者简介: 焦凌云(1987-), 男, 江苏省兴化市人, 硕士研究生, 热能工程专业。

后置于等离子体中，利用离子对静电探针表面的轰击使探针白热化，以此对探针表面进行清洁^[3,4]。

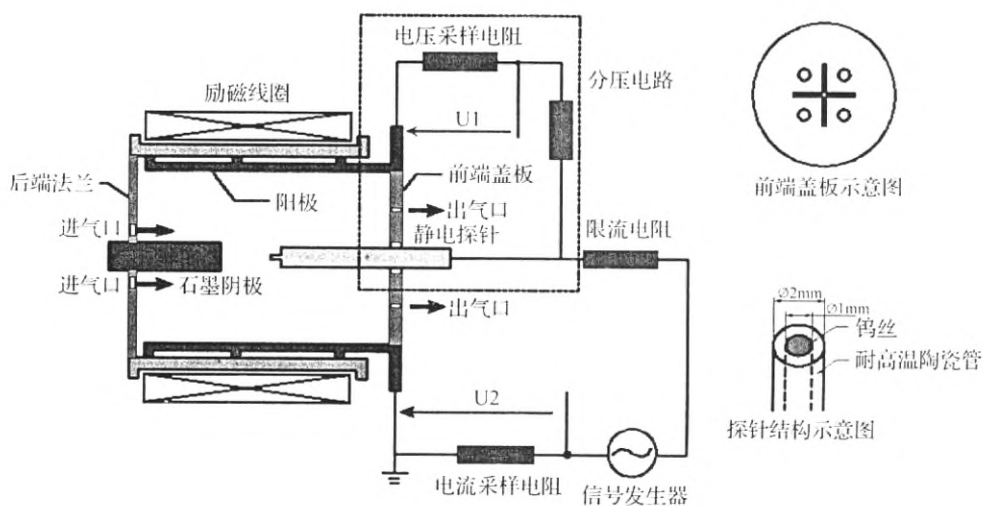


图 1 实验原理图

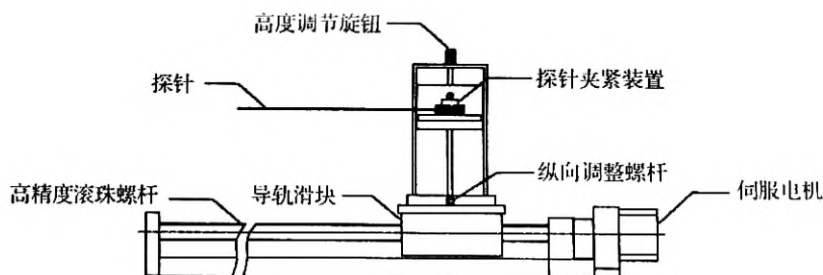


图 2 静电探针移动装置

3 实验结果及讨论

3.1 大尺度磁分散电弧等离子体

Xia^[2]提出了产生大面积均匀电弧等离子体的产生方法，其原理是在同轴等离子体发生器弧室中，径向电弧在轴向磁场作用下高速旋转，高速运动过程中产生的对流会使电弧分散，产生充满整个阳极弧室截面的等离子体。典型的磁分散电弧等离子体位形如图 3 所示(左)Fluent 数值模拟圆柱半截面结果和(右)等离子体在弧室出口方向上的投影照片^[2](上倾角 3°，中心阴影为遮光板产生的结果)。从图 3 中可看出，等离子体充满整个弧室截面，横断面位形呈碗状，在轴向有一定的厚度。在发生器轴心处等离子体位形产生轴向收缩的原因是，等离

子体高速旋转导致中心气压降低，从而在发生器中心阴极前端产生冷气回流所致。

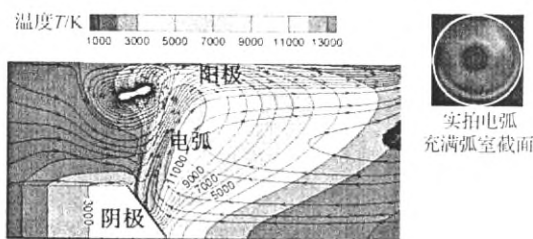


图 3 磁分散电弧等离子体的数值模拟结果(轴向半剖面)和出口投影照片

3.2 静电探针在磁分散电弧等离子体中的应用

静电探针是最早被应用于等离子体诊断的工

具，通过分析静电探针的 $U-I$ 曲线，可以得到等离子体中的各种参数(如电子温度、等离子体电位、电子密度等)^[3, 5]。图4为典型静电探针 $U-I$ 曲线，A段为饱和离子流段，B段为过渡段，C段为饱和电子流段， V_f 为探针电流 $I=0A$ 时的特殊点，定义为探针的“悬浮电位”。

大气压状态下的电弧等离子体由于带电粒子密度很高，带电粒子的平均碰撞自由程很小，带电粒子之间碰撞频繁，而碰撞给静电探针诊断带来的影响至今还不明朗^[4, 6]。但是只要等离子体参数满足表达式 $\lambda_D < \lambda_i$ 、 $\lambda_e \ll 2R$ ，就可以认为探针表面形成的鞘层为无碰撞鞘层^[6-8]。其中 λ_D 为等离子体德拜长度， λ_e 和 λ_i 分别为电子平均自由程、离子平均自由程， R 为探针的特征长度^[3]。因为只要带电粒子的平均自由程大于鞘层厚度，就可以认为带电粒子通过鞘层时不发生碰撞。此时，无碰撞鞘层理论就可以得到应用。

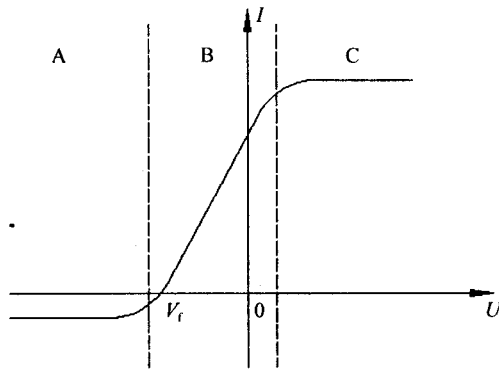


图4 典型静电探针 $U-I$ 曲线

本实验中的电弧等离子体，以氩气为工作介质，经查阅资料计算^[9]，满足上述不等式，即可以按照无碰撞鞘层探针理论来计算等离子体电子温度 T_e 。在过渡段，探针收集到的电子电流^[3-6, 8, 11]满足：

$$I_e = I_{\infty} \exp \left[\frac{e(V_{\text{probe}} - V_p)}{kT_e} \right] \quad (1)$$

式中， I_e 为电子电流； I_{∞} 为饱和电子电流； V_{probe} 为探针电位； V_p 为等离子体电位； k 为波尔兹曼常

数； T_e 为电子温度。其实，即使电子通过探针鞘层时发生碰撞，只要等离子体满足爱因斯坦方程^[3]，上式仍然成立。通过上式可知探针 $U-\ln I$ 曲线($U-I$ 曲线的半对数曲线)的过渡段斜率与等离子体的电子温度 T_e 唯一相关(波尔兹曼常数 k 与电子电荷 e 为常量)。

外加磁场对探针收集电流时会有一定的影响，根据影响的程度可以分为弱磁场、中等强度磁场、强磁场^[5]。本实验中等离子体中的磁通密度变化范围 0.01~0.1T。通过计算，电子回旋半径大于电子平均自由程和离子平均自由程，属于“弱磁场”，即外加磁场对探针诊断的影响可以忽略不计。

3.3 实验结果讨论

实验中氩气流量为 $2.5\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ，电弧电流为 280A。探针测量范围为发生器轴线上距离阴极端面 10~55mm 的位置，测量点间距 5mm。引弧后待电弧稳定后，将探针从发生器外快速置于测量点，停留 1~2s，迅速移出发生器。探针移动过程典型电流波形如图 5(左)所示。从图 5 中可以看出，插入过程探针电流(峰值轮廓)随着插入深度增加，移出过程探针电流(峰值轮廓)迅速降低，探针电流增加与降低速度与探针速度成相关。

图 5(右)为距离阴极端面 35mm 处探针电流波形。从图中可以看出，探针电流明显的无电流间断区间(A、C、E、G)，区间宽度约为 3~5ms。此间探针无电流，表明没有等离子体或等离子体密度过低，这可能与卷吸进入的冷气体有关，当探针接触冷气泡时，探针收集不到电流，只有当探针接触等离子体时，探针上才会出现电流。图 6 给出了发生器轴向各点探针电流信号波动情况。探针距离阴极端面较远时(例如 55mm)，由于距离发生器出气口较近，冷气体的卷入导致等离子体中存在较多冷气泡，此时无电流间断区间出现较频繁(50%)，间断时间约为 3~5ms，说明此时探针所在位置等离子体波动较大，比较稀薄，等离子体中冷气体较多。随着探针逐渐靠近阴极端面，探针无电流间断区间出现频次降低，间断时间变化不大。在距离阴极 40mm 处，探针电流已无间断区间，越来越密集，说明等

离子体越来越均匀，等离子体中冷气体越来越少，但仍存在较大电流波动，低电流区间依然为 3~5ms，与远离阴极端面时(55mm)无电流区间近似一致。当探针距离阴极端面 10mm 时，探针电流波动基本消失，出现连续电流信号波段，说明此时等离子体中

已经基本不存在冷气体或者冷气体已经非常少了，表明等离子体已经非常均匀。从轴线处等离子体波动性质可以推断，发生器阴极前端存在明显的回流卷吸区，可以利用探针电流间断时间结合模拟的等离子体流速估计气泡大小。

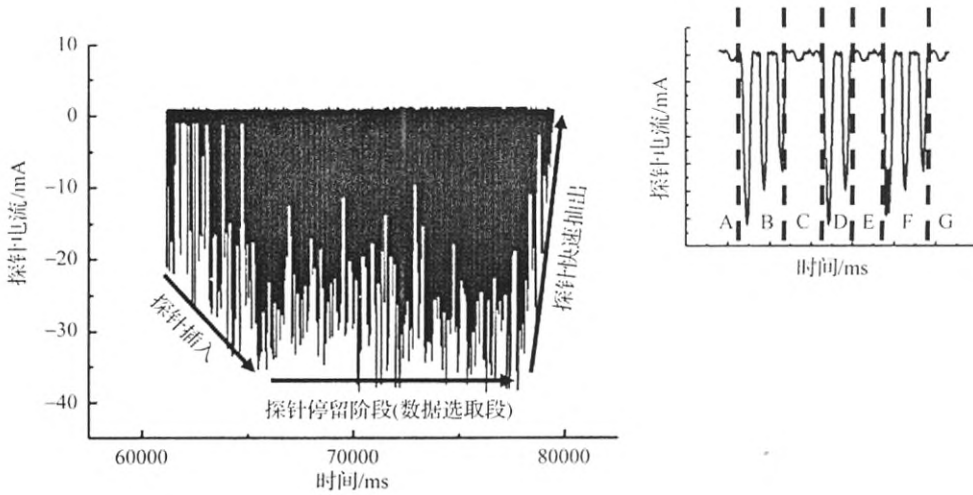


图 5 探针移动过程电流波形

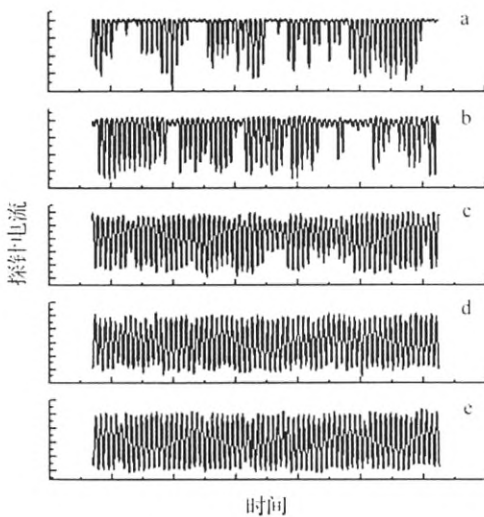


图 6 不同位置探针信号波动

探针距离阴极端面 a— $d=55\text{mm}$; b— $d=50\text{mm}$; c— $d=40\text{mm}$; d— $d=30\text{mm}$; e— $d=10\text{mm}$ 。

图 7 为探针距离阴极表面 10mm 时的探针 $U-I$ 数据图，从图 7 中可以很清晰地看到稳定的“饱和

离子流段”，以及当探针电压大于 -80V 后，探针电流随着探针电压增加迅速变化，幅值最大达到 40mA ，没有看到稳定的电子饱和电流段。这是由于电弧等离子体中电子密度较大，电子热运动很强，导致探针的表面鞘层被破坏^[10]。

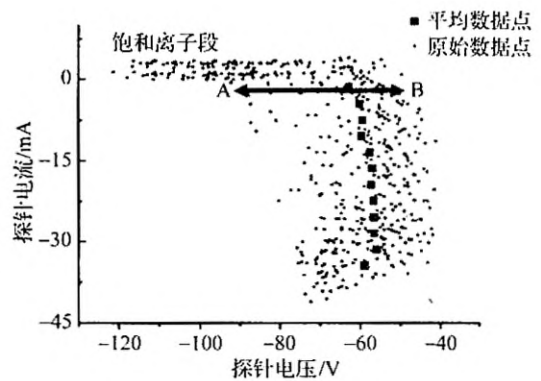


图 7 距离阴极端面 10mm 处的实验数据

从图 7 可以看出， $U-I$ 曲线与 $I=0\text{A}$ 这条直线的

交点分布于 A 点和 B 点之间, 即探针悬浮电位 V_f 波动范围($V_B - V_A$), 约为 40V 左右。将图 7 中的实验数据做电压平均, 得到探针 $U-I$ 特性, 进一步将过渡段作半对数处理, 得到过渡段的半对数曲线 $U \ln|I|$, 如图 8 所示。对图 8 中的数据点进行线性拟合, 拟合直线斜率 $k \approx 0.4287$, 通过计算得到该处等离子体电子温度 $T_e \approx 24654K$ 。

对发生器轴线上的点逐次诊断, 得到发生器轴线上等离子体电子温度的分布如图 9 所示。由图 9 可知, 等离子体电子温度随着距离阴极端面距离缩小而上升, 在距离阴极端面 30~50mm 区间变化不大, 约为 6000~8000K, 20~30mm 区间上升较快, 在 10~20mm 区间温度为略大于 20000K。

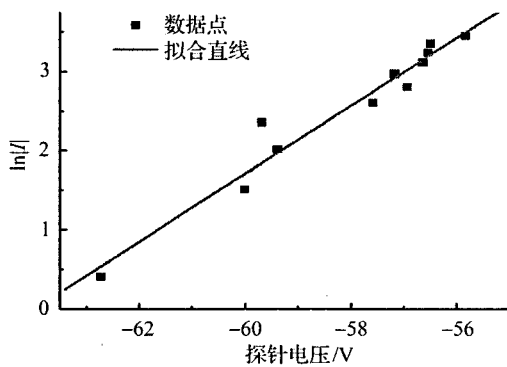


图 8 静电探针的 $U-\ln|I|$ 图

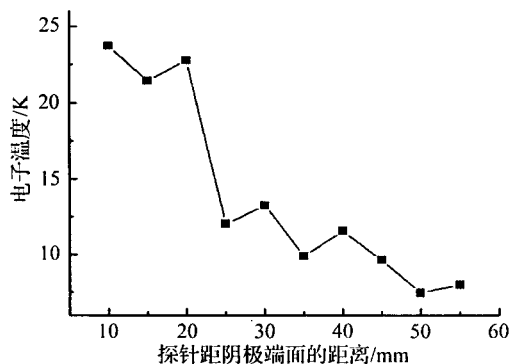


图 9 发生器轴线方向电子温度分布

4 结束语

本次实验将静电探针应用于大尺度磁分散电弧等离子体, 得到等离子体波动特性和轴线电子温度分布。从探针电流波动特性分析, 这种大尺度磁分散电弧等离子体中心存在明显的回流卷吸区, 与数值模拟结果一致。从等离子体轴向温度分布, 可以看出在中心具有回流区, 轴向厚度达到 50mm, 结合数值模拟位形和等离子体轴向投影照片判断, 等离子体体积大致为 $50 \times \pi \times 35^2 \text{mm}^3$ 。

参考文献:

- [1] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体 [M]. 北京: 科学出版社, 1986: 73-77.
- [2] Weidong Xia, Lincun Li. Dynamics of large-scale magnetically rotating arc plasmas [J]. Appl. Phys. Lett., 2006, 88 (21): 1063-1065.
- [3] Demidov V I. Electric probes for plasmas: the link between theory and instrument [J]. Rev. Sci. Instrum., 2002, 73(10): 3409-3449.
- [4] E.Leveroni. Electric probe measurements in the boundary layer of thermal arcs: theory and experiments [D]. Minnesota: University of Minnesota, 1990.
- [5] 项志遴, 俞昌旋. 高温等离子体诊断技术(上册) [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982. 27-54.
- [6] Yang G, Pfender E. Experimental investigations of the anode boundary layer in high intensity arcs with cross flow [J]. J. Phys. D, Appl. Phys., 2006, 39(13): 2764-2774.
- [7] Tanaka M, Ushio M. Observations of the anode boundary layer free-burning argon arcs [J]. J. Phys. D, Appl. Phys., 1999, 32(8): 906-912.
- [8] Sanders N A, Pfender E. Measurement of anode falls and anode heat transfer in atmospheric pressure high intensity arcs [J]. J. Appl. Phys., 1984, 55(3): 714-722.
- [9] 陈熙. 热等离子体传热与流动 [M]. 北京: 科学出版社, 2009, 3: 29-34.
- [10] Srivastava A K. Characterization of atmospheric pressure glow discharge in helium using Langmuir probe, emission spectroscopy, and discharge resistivity [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2007, 35(4): 1135-1141.
- [11] Luhmann J, Benilov M S. Determination of HID electrode falls in a model lamp II: Langmuir-probe measurements [J]. J. Phys. D, Appl. Phys., 2001, 35(14): 1631-1638.

Langmuir-probe diagnostics of large-scale magnetically rotating arc plasmas

JIAO Ling-yun, ZHA Jun, BAI Bing, ZHANG Xiao-ning, XIA Wei-dong

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

Abstract: The fast-moving electric probe designed by ourselves is used to diagnose the large-scale magnetically rotating arc plasmas in the argon under the atmospheric pressure. The signal shape of the voltage and current of the electric probe is analyzed to draw the $U-I$ curve. The fluctuation characteristic of the plasmas on the axis of the generator is obtained, and the axial distribution of the electron temperature on the axis of the generator is found. It is found that there is a recirculation zone in the center of the generator, and the approximate volume of the arc plasmas is got.

Key words: Electric probe; Large-scale; Magnetically rotating arc; Plasmas; Electron temperature