

- [2] 屠规彰,非线性演化方程的散射反演解法,应用数学与计算数学,1979年第1期,21—43页.
- [3] 屠规彰,Boussinesq 方程的 Bäcklund 变换与守恒律,应用数学学报,4(1981),63—68.
- [4] Bullough, R. K. and Caudrey, P. J., Solitons, Topics in Current Physics Vol. 17, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1980).
- [5] Scott, A. C., Analysis of nonlinear distributed systems, IRE Trans. Circuit Theory CT-9 (1962), 192—195.
- [6] Nagumo, J., Arimoto, S. and Yoshizawa, S., Bistable transmission lines, IEEE Trans. Circuit Theory CT-12 (1965), 400—412.
- [7] Rogers, C. and Shadwick, W. F., Bäcklund Transformations, Acad. Press New York (1982).
- [8] Chen, H. H., General derivation of Bäcklund transformations from inverse scattering problems, Phys. Rev. Lett., 33 (1974), 925—928.
- [9] Tu Gui-Zhang (屠规彰), On the permutability of Bäcklund-transformations: I. Infinitesimal Bäcklund transformations of the sine-Gordon equation, Lett. Math. Phys., 6 (1982), 63—71.
- [10] Huang Xun-Cheng (黄迅成), A two-parameter Bäcklund transformation for the Boussinesq equation, J. Phys. A: Math. Gen., 15 (1982), 3367—3372.
- [11] Miura, R. M. ed., Bäcklund transformations, the inverse scattering method, solitons, and their applications, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York (1976).
- [12] Eckhaus W. and Van Harten A. 著,黄迅成译,逆散射变换和孤立子理论,上海科学技术文献出版社,(1984).
- [13] 郭柏灵,非线性波和孤立子,力学与实践.
- [14] 屠规彰,孤立子数学理论的若干方面,中国数学会第四次代表大会,武汉(1983.10).

快速静电探针的研制与应用

王柏懿 戚隆溪

(中国科学院力学研究所)

1. 引言

静电探针作为等离子体诊断的一种基本手段,在许多高温气体动力学的地面模拟实验设备(诸如电弧加热器、等离子体风洞、火箭发动机、激波管、高速弹道靶等)以及再入飞行试验中均有广泛的应用。因此,它对于同遥测、通讯、识别、突防、制导与引爆等使命相关的再入物理现象研究来说,有着重要的意义。

在高温气体动力学实验设备及再入飞行中,等离子体是由于气体的高温离解电离而形成的。确保探针在这种高温环境中不被烧毁并正常工作是应用静电探针进行测量的关键问题之一。对于激波管、高速弹道靶这类装置,由于运行时间甚短,可以直接采用耐高温金属材料制成的静电探针。但是在电弧加热器、等离子体风洞这类运行时间较长的高焓设备中,则往往要求采取其它的保护性措施。一种途径是采用水冷结构^[1]。但是,这不仅要求一整套供应高

压冷却水的系统,而且使静电探针的结构复杂、体积庞大,对被测等离子体造成了较大的干扰。解决此问题的另一途径是研制快速静电探针,避免将探针长时间暴露于高温气流。这时,探针仅在进行测量的瞬间迅速到达等离子体中的待测点位置,快速测量完毕后,随即迅速离开高温环境。

本文将讨论快速静电探针的研制与应用问题。该系统已在力学所 H11DF 电弧风洞中正常运行,并成为再入通讯中断化学减轻技术试验研究的基本测试手段之一。

2. 快速静电探针系统简介

快速静电探针系统包括非水冷静电探针、快速送进支架以及测试控制电路三个部分。

本系统的非水冷静电探针为圆柱单探针结构(图1)。石英玻璃包封的中心电极由钽丝制成,可以在氧化气氛中工作(若工作介质是还原气体,则可以采用熔点更高的材料,如钨、钼

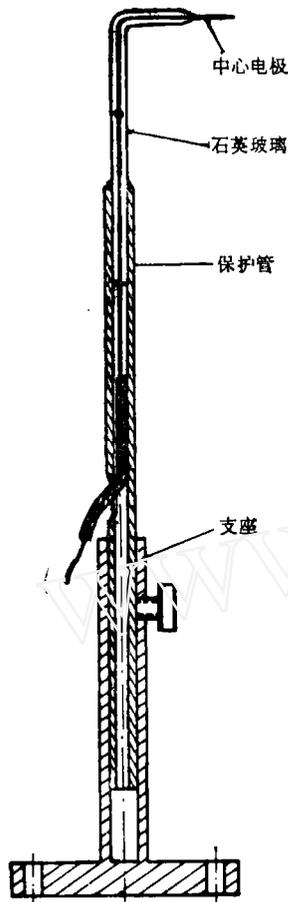


图1 非水冷静电柱探针

等). 加热器壳体作为探针的补偿极。

快速送进支架的作用是支撑探针并将它送至风洞试验段中指定的位置。该支架由牵引电磁铁、行程开关、杠杆机构、滑轨、探针支座及水平移动机构等部分组成。其主要运行参数为：最大牵引力 5 公斤；最大垂直行程 65 毫米；最大水平行程 130 毫米。图 2 为探针与支架组合体的实物照片。

为了减少探针在高温气流中的停留时间，要求快速测试静电探针的伏安特性曲线。为此组装了包括电子扫描电源的测试控制电路。每次静电探针运行时，它可以提供从 -30 伏到 +30 伏的线性扫描激励电压。扫描时间可以调节，本系统采用 X-Y 记录仪记录探针特性，扫描时间选为 0.8 秒。其下限为静电探针的动态响应时间，即带电粒子渡越空间电荷鞘层的



图2 静电探针与快速送进支架组合体

时间。整个电路系统的工作过程如下：首先接通电磁铁，当牵引电磁铁动作后将探针送至指定位置时，行程开关的常闭触点断开。这样扫描电路开始充电，从而驱动探针工作。探针伏安特性曲线图示完毕，电磁铁断电复位，行程开关的触点便重新闭合，扫描电路放电，等待下次探针运行。

此探针系统业已在 H11DF 电弧风洞中使用。H11DF 风洞的运行条件为：总焓 5800 卡/克，总压 0.87 大气压，质量流量 0.47 克/秒。图 3 为典型的实测静电探针伏安特性曲线。

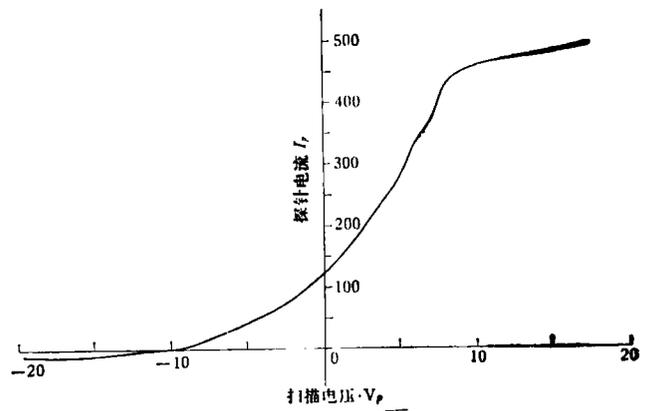


图3 典型的实测探针伏安特性曲线

3. 静电柱探针理论概述

探针理论可以给出静电探针在给定电位下所收集的电流与被测等离子体参数之间的定量关系。到目前为止,无碰撞的静电探针理论发展得最完善。因此设计时应当设法使探针尺寸尽量小,满足自由分子流条件: $\lambda_D, R_p \ll \lambda$ 。其中 λ_D 为德拜长度, R_p 为探针半径, λ 为带电粒子与中性粒子碰撞的平行自由程。在本实验中,我们亦使柱探针的轴线平行于气流的速度方向,这样便无需考虑等离子体流动对探针收集的影响。在这种运行状况下,探针电流的表达式为

$$\text{无规电子电流密度 } i_r = en_e (kT_e / 2\pi m_e)^{1/2} (V_p - 0) \quad (1)$$

$$\text{负探针电子电流密度 } i_c = j_r \exp(eV_p / kT_e) (V_p < 0) \quad (2)$$

$$\text{饱和离子电流密度 } i_i = en_i (kT_e / 2\pi m_i)^{1/2} I_+(\chi_p, \xi, \epsilon) \quad (3)$$

$$\text{其中探针相对等离子体的电位 } V_p = V - V_s \quad (4)$$

此处 e 为电子电荷; $n_{e,i}$ 为电子,离子的数密度; $m_{e,i}$ 为电子,离子的质量; T_e 为电子温度, k 为玻尔兹曼常数; I_+ 为无量纲离子电流密度; $\chi_p = eV_p / kT_e$ 为无量纲探针电位; $\xi = R_p / \lambda_D$ 为探针半径与德拜长度之比; $\epsilon = T_i / T_e$ 为离子温度与电子温度之比; V 为探针电位; V_s 为等离子体空间电位。根据 Laframboise 的精确理论^[2], 可以给出 $I_+(\chi_p, \xi, \epsilon)$ 的理论曲线。

这样,在处理探针数据时,先利用负探针电子电流(式(2))的半对数曲线斜率来确定电子温度 T_e 。当电子温度已知后,便可由式(1)求出电子密度 n_e , 或由式(3)求出离子密度 n_i 。若等离子体中不存在负离子,采用式(1)或式(3)是等效的。不过人们一般宁愿选用离子电流来测量电子密度。因为这样探针从等离子体中抽吸的电流较小,造成的干扰亦小。但是处理试验数据时无法直接利用式(3),还需转换为 $I_+(\chi_f - 10) \sim \xi^2 I_+(\chi_f - 10)$ 曲线^[3]。

当自由分子流条件不能满足时,无碰撞理论不再适用。计入碰撞效应将使包鞘加厚、电流下降。当满足条件 $\lambda_D, R_p \gg \lambda$ 时,可以采用

碰撞控制的连续探针理论。对此情况, Kiel 导出了下述关系式^[4]

$$i_i = en_i [\mu_i k(T_e + T_i)] / R_p \ln(\pi L / 4 R_i) \quad (5)$$

其中 μ_i 为离子迁移率, R_i 为包鞘半径, L 为探针长度。在风洞运行条件下还会出现介于无碰撞和碰撞控制两种极限情况之间的过渡状态。此时进行严格的理论分析是相当困难的。对于诊断实验而言,可作近似处理,即采用简单的内插公式^[5]

$$i_i = i_n / (1 + i_n / i_0) \quad (6)$$

其中 i_n, i_0 分别为无碰撞和碰撞控制条件下的电流密度,即分别由式(3)和式(5)给定。

人们常常应用静电探针来校测各种高温气流的电特性。采用上述的探针理论便可确定电子密度、电子温度等参数。

4. 静电探针在再入通讯中断化学减轻技术试验研究中的应用

高速飞行器的再入等离子鞘中含有大量自由电子,对弹载电磁通讯系统产生严重的干扰。因此,人们尝试将亲电子化学物质添加到再入流场中。这类物质可以吸附自由电子形成负离子,从而避免再入通讯中断的发生或减轻其影响程度。在这一研究中,一般采用添加亲电子化学物质前后等离子体气流中电子密度之比 n_e / n_{e0} 作为该物质减轻效果的度量(其中 n_{e0}, n_e 分别为添加物质前后的电子密度)。电弧加热的等离子体风洞可以模拟再入等离子鞘并研究各种亲电子物质的减轻效果^[6]。静电探针是减轻技术研究的重要测试手段。

图4给出在 H11DF 电弧风洞中进行化学减轻技术研究的一种试验布置。其中将亲电子化学物质作为衬套置入加热器喉道内部。

在这类应用中,必须考虑有负离子存在时的探针理论。负离子将使探针的电子电流显著下降,离子电流稍微增加(图5)。Luzzi 等人对于无碰撞情况导出了下述表达式^[7]

$$\frac{n_e}{n_{e0}} = \frac{j_i / j_{i0} - Q_7 D \exp[(e/kT_i)(V_{j0} - V_j)]}{\exp[(e/kT_e)(V_{j0} - V_j)] - Q_7 D \exp[(e/kT_i)(V_{j0} - V_j)]} \quad (7)$$

其中 j_{i0}, V_{j0} 分别为添加物质前的饱和离子电流

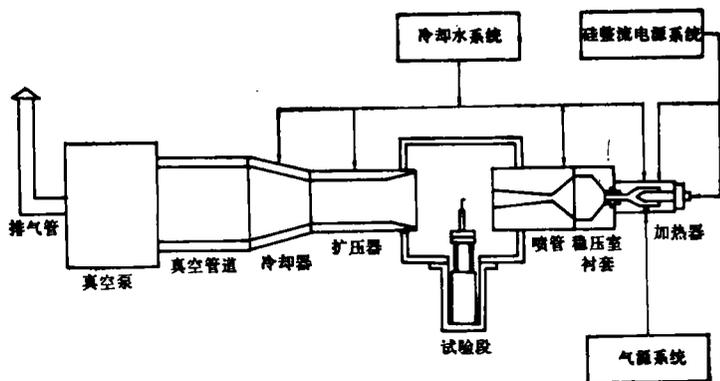


图4 研究化学减轻技术的地面模拟试验装置H11DF电弧风洞

密度和浮置电位。而 $Q_T D$ 是亲电子淬灭参数，它与气流中添加化学物质后复杂的气体动力学及化学动力学过程有关。我们针对含氟类的亲电子添加物质的情况，在电子温度 $T_e = 3000^\circ\text{K} - 11600^\circ\text{K}$ 及离子温度 $T_i = 365^\circ\text{K} - 3000^\circ\text{K}$ 的参数范围内，对式(7)进行了数值计算。计算结果表明，在高焓低密度电弧风洞条件下，由于试验气流为双温度等离子体并可采用冷离子近似 ($T_i \ll T_e$)，式(7)可以简化为：

$$\frac{n_e}{n_{e0}} = \frac{i_i / i_{i0}}{\exp[(e/kT_e)(V_{j0} - V_0)]} \quad (8)$$

式(8)中不再含有参数 $Q_T D$ ，也不涉及离子温度 T_i 。这样就大大简化了实验步骤和数据处理。除了电子温度甚低 ($T_e \leq 2900^\circ\text{K}$) 及浮置电位差较大的情况外，采用式(8)所造成的误差不超过 0.001，完全可以满足试验的精度要求。

5. 结语

实验表明：快速静电探针系统可以在电弧加热的高温等离子体风洞中正常运行，提供数据。该系统可以校测风洞试验气流的电子密度，并可以在再入通讯中断化学减轻技术的试验研

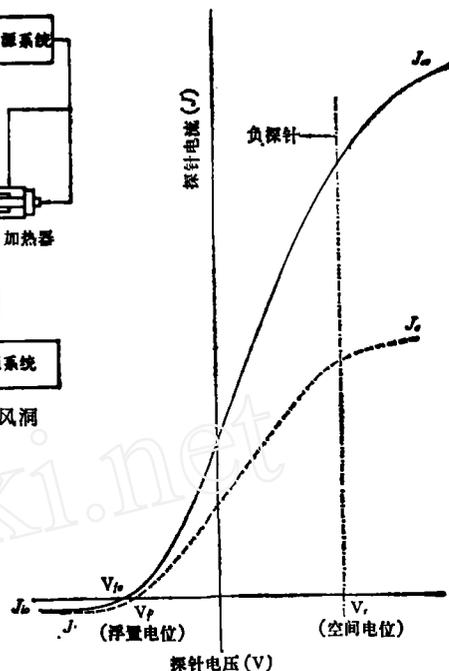


图5 有负离子存在时探针伏安特性曲线示意

究中测定化学添加剂的减轻效果。

本系统研制过程中，曾得到力学所石茂同志的大力协助，作者在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] 王柏懿，铱丝静电探针及其在高温风洞中应用，力学学报，1982年第1期。
- [2] Laframboise, J., Fourth Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Vol. II, (1966) 22-44.
- [3] Sonin, A.A., AIAA J., 4, 9(1966) 1588-1596.
- [4] Kiel, R.E., J. Appl. Phys., 40, 9(1969) 3668-3673.
- [5] Thornton, J.A., AIAA J., 9, 2(1971) 342-344.
- [6] 王柏懿、朱宗厚、林烈，等离子体淬灭的实验研究，力学所工作报告，1982年。
- [7] Luzzi, T. and Jenkins, R., AIAA J., 9, 12(1971) 2411-2416.

(本文于1983年12月5日收到)

北京国际实验力学会议举办小型实物展览启事

中国力学学会定于1985年10月7日至10日在北京召开国际实验力学会议，参加会议的有中外代表200余人。为进一步搞好交流，会议期间拟组织一小型实物展览会，凡与会议内容有关的比较先进的，具有特色的仪器、探头、元件、设备等小型实物或图片，愿意在本次会议中展出者，请于1985年5月1日前与北京中关村中国力学学会办公室联系，并请写明单位、通讯地址、联系人以及展品的体积、面积。信封上请写“展”字，以便专人处理。