

铱丝静电探针及其在高温风洞中应用

王 柏 懿

(中国科学院力学研究所)

提要 本文介绍一种可测量高温气流电子密度、电子温度等参数的静电探针，并给出适用于空气等离子体的探针理论曲线。这种铱丝探针已成功地应用于电弧风洞。

一、概 述

在高温高速空气动力学实验研究中，以及气动激光、电磁流体力学实验研究中，高温介质的电子密度、电子温度等是十分重要的参数，需要从实验上予以测定。本文介绍一种应用于高温风洞测量气流电子密度、电子温度等参数的静电探针。

静电探针是等离子体诊断的重要手段^[1]，它测试系统简单，动态范围大，而且可以取得所测参数的当地局部值。所谓的静电探针，实质上就是一个金属电极。将探针置于待测的气体中，由外部电源提供电压，使之相对于被测气体有一定的电位，从而由该气体中收集一定数量的电子和离子，形成电流。当探针电位改变时，探针电流将依照一定的规律变化，经测试后便得到探针的“伏安特性”。这种伏安特性与气体中带电粒子的数密度、温度等参数有关。探针理论可以给出这两者之间的定量关系。

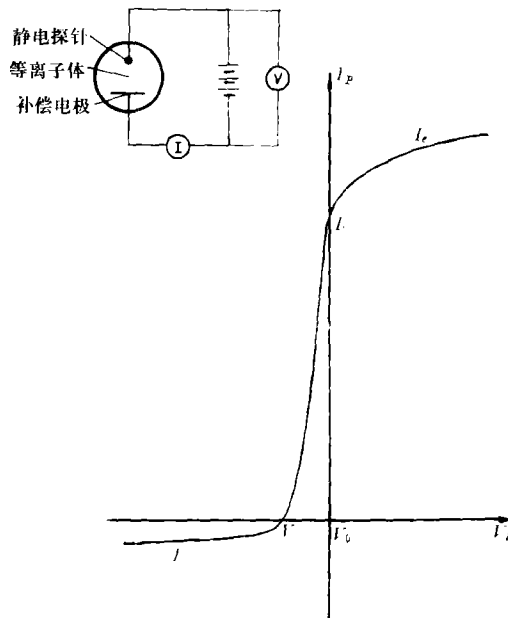


图1 静电探针及其伏安特性曲线

本文于1979年9月收到。

在高温风洞严酷的热环境下,使用静电探针并实现测量,首先要解决探针在高温气流中的生存问题.为此,我们研制了铱丝静电探针,并成功地应用于 H-4 电弧风洞,对试验气流的电子密度、电子温度及其剖面分布进行了校测.校测结果与理论估算基本相符.

二、铱丝静电探针的结构设计

根据电弧风洞的高温高速特点,我们研制的静电探针由中心电极、绝缘衬块及水冷外套三部分组成.

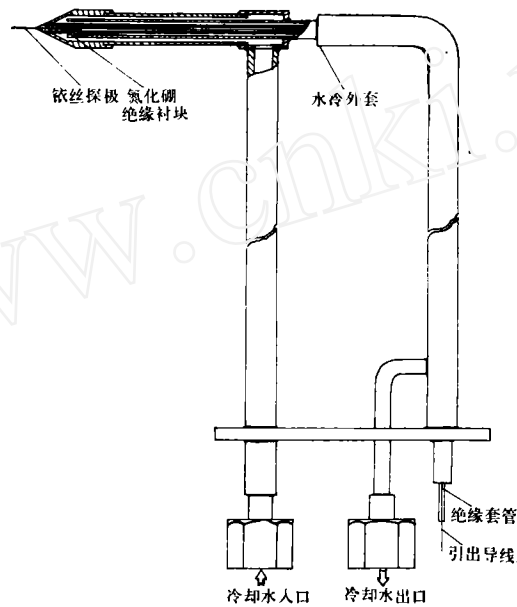


图2 铱丝静电探针结构图

中心电极包括铱丝探极、引出导线和耐热绝缘套管等。铱丝具有熔点高、导电导热性能好、功函数高、不易氧化的优点,而且质地刚硬挺直,很适宜作为探针,可在高温空气的环境中使用.试验证明:这种铱丝静电探针可以在焓值为 14.6MJ/kg 、流量为 20g/s 的气

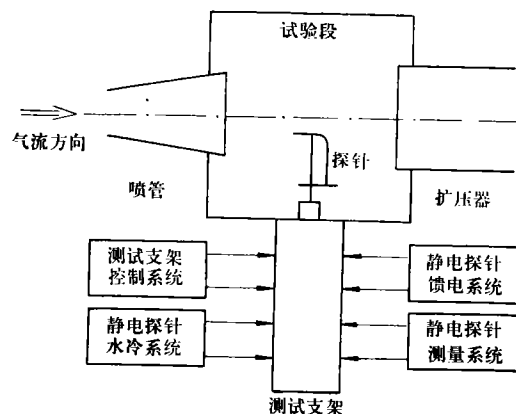


图3 校测电弧风洞的铱丝静电探针系统示意图

流中成功地连续运行。

水冷外套采用 28 个压力的高压水泵提供的冷却水, 它除了保护中心电极外, 还兼作探针的补偿电极。

绝缘衬块可确保外水套和铱丝电极之间的电绝缘, 其材料为氮化硼, 它不仅绝缘性能好, 烧蚀和传热性能也好, 因此对铱丝还可起一定的冷却作用。中心电极和氮化硼之间用高温材料封塞。

整个探针放置在三维风洞测试支架上。

三、静电探针的理论及数据分析

静电探针的理论分析是比较复杂的。特别是在风洞气流校测中, 流动效应和等离子体的静电效应耦合在一起, 使得理论的描述更为困难。为避免考虑流动效应, 我们使用轴线与气流速度方向平行的柱探针, 并要求探针的直径足够小, 以满足自由分子流静电探针理论的要求:

$$D, R_p \ll \lambda$$

其中 D 为德拜屏蔽长度, R_p 为探针半径, λ 为气流中带电粒子的平均自由程。

高温气体是部分电离的等离子体, 其中电子和离子的数密度相等 $n_e = n_i$ (n_e, n_i 分别为电子和离子的数密度)。因此, 探针电流由电子电流和离子电流组成:

$$I_p = I_e - I_i$$

其中 I_p 为探针电流, I_e 为电子电流, I_i 为离子电流。由图 1 可以看到, 当探针电位 V_p 低于等离子体的空间电位 V_0 时(一般称之为负探针), 探针将吸引离子而拒斥电子。电位越负, 拒斥的电子越多, 因此探针电流迅速下降。当到达浮置电位 V_f 时, 电子电流和离子电流相等, 探针电流为零。探针电位低于浮置电位甚多时, 探针收集的几乎全部是离子电流, 而且电流随电位的变化非常缓慢, 一般称作**饱和离子电流**。

精确的探针理论^[2]给出离子电流的表达式:

$$j_i = en_i \left(\frac{kT_e}{2\pi m_i} \right)^{\frac{1}{2}} I_+(\chi_p, \xi, \varepsilon) \quad (1)$$

其中 j_i 为探针的离子电流密度, e 为电子电荷, T_e 为电子温度, m_i 为离子质量, k 为玻尔兹曼常数, I_+ 为无量纲离子电流密度, χ_p, ξ, ε 为无量纲变量, 它们的定义为:

$$\chi_p = \frac{eV_p}{kT_e}, \quad \xi = \frac{R_p}{D}, \quad \varepsilon = \frac{T_i}{T_e}$$

其中 T_i 为离子温度。文献 [2] 利用数值方法给出了无量纲函数 I_+ 作为 χ_p, ξ, ε 的函数的计算结果。从这一结果出发, 我们给出了适用于空气等离子体的理论曲线(参见图 4), 其横坐标为 $\xi^2 I_+(\chi_f - 10)$, 纵坐标为 $I_+(\chi_f - 10)$ 。这里 $\chi_f = \frac{eV_f}{kT_e}$, 即无量纲的浮置电位。 $I_+(\chi_f - 10)$ 则表示电位比浮置电位低 $10 \frac{kT_e}{e}$ 伏特处离子电流密度的无量纲值。当电子温度 T_e 已知时, 在实验测定的探针伏安特性上, 不难确定 $(\chi_f - 10)$ 的位置, 随即可找到 $I_+(\chi_f - 10)$ 的值。

这样便要求首先由实测曲线确定电子温度, 其方法有以下两种:

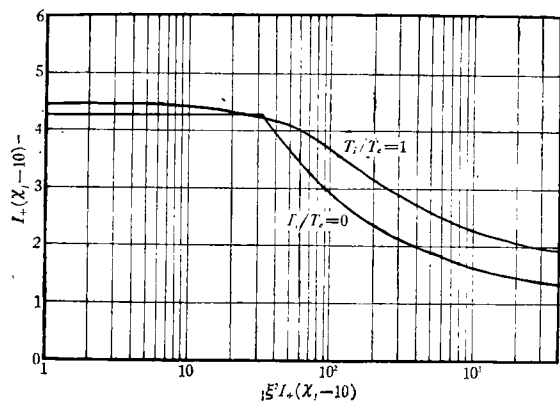


图4 空气等离子体中静电探针理论曲线

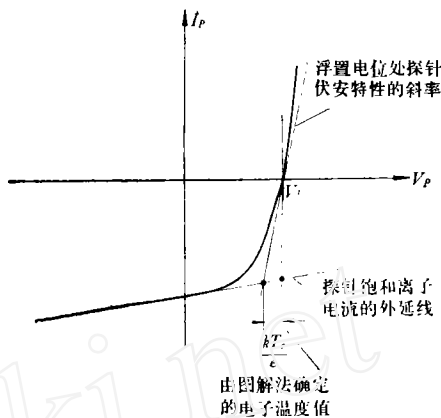


图5 确定电子温度的图解法

1. 负探针电子电流半对数曲线的斜率

$$\frac{kT_e}{e} = \frac{1}{\frac{d}{dV_p} (\ln I_e)} \quad (2)$$

2. 浮置电位处探针特性曲线的斜率

$$\frac{kT_e}{e} = \left[\frac{I_i}{\frac{dI_p}{dV_p} - \frac{dI_i}{dV_p}} \right] \Big|_{V_p=V_f} \quad (3)$$

采用图解法可以简便地确定电子温度值(图5)。

在已知电子温度的情况下,我们便可利用实测的探针特性和给定的理论曲线,确定出电子(或离子)密度值。步骤如下:

1. 由实测的探针离子电流曲线确定 $I_i(X_f - 10)$ 。
2. 计算电位 $(X_f - 10)$ 处离子电流密度值

$$j_i(X_f - 10) = \frac{I_i(X_f - 10)}{A_p} \quad (4)$$

其中 $A_p = 2\pi R_p l$ 为探针表面积, l 为探针长度。

3. 计算相应的 $\xi^2 I_+(X_f - 10)$ 值

$$\xi^2 I_+(X_f - 10) = 1.563 \times 10^8 R_p^2 \frac{j_i(X_f - 10)}{\left(\frac{kT_e}{e}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

其中 R_p 的单位为 M, j_i 的单位为 A/M², 而 $\frac{kT_e}{e}$ 的单位为 V。

4. 由探针理论曲线(图4)确定相应于实测的 $\xi^2 I_+(X_f - 10)$ 值的 $I_+(X_f - 10)$ 值。
5. 计算相应的离子密度值

$$n_i = \frac{j_i(X_f - 10)}{e \left(\frac{kT_e}{2\pi m_i}\right)^{\frac{1}{2}} I_+(X_f - 10)}$$

$$= 8.64 \times 10^{15} \frac{j_i(\chi_f - 10)}{I_+ (\chi_f - 10)} \left(\frac{e}{kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

其中 n_i 的单位为 $[1/M^3]$ ，其它单位同上。而对于等离子体来说， $n_e = n_i$ ，因此这也就确定了电子密度。

四、风洞试验段气流电子密度校测结果

利用铱丝静电探针对我实验室现有的 H-4 电弧风洞进行了校测试验。H-4 电弧风洞的基本性能参数为：

电源功率：1500kW；工作介质：空气；气体流量：15--40g/s；弧室气压： $3 \times 10^5 - 10^6 N/m^2$ ；气体总焓：8—18MJ/kg。另外，喷管喉部直径为 8.1mm，出口直径为 220mm；实测的试验段总压约为 $3 \times 10^2 N/m^2$ ，静压约为 $3 N/m^2$ 。

根据上述的风洞运行参数，我们估算了试验气流的电子密度和电子温度的理论数值（估算时假定风洞弧室压力为 $6.87 \times 10^5 N/m^2$ ，即 6.8 大气压），结果示于图 6 和图 7 中。

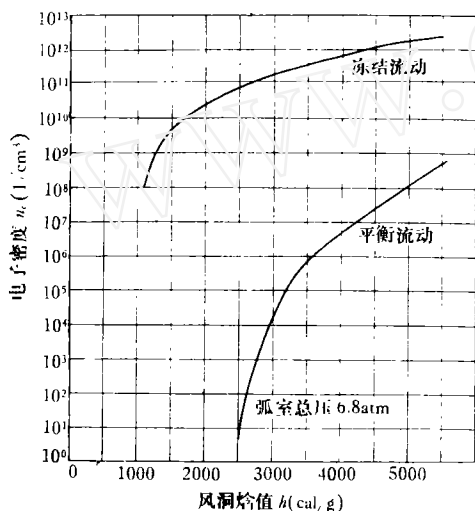


图 6 H-4 电弧风洞试验气流电子密度估算

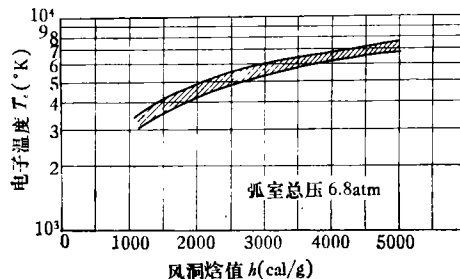


图 7 H-4 电弧风洞试验气流电子温度范围估算

校测试验分两个阶段进行。第一阶段着重测量电子密度等参数的当地局部值。在三个不同的气流剖面上，共对 11 个测点进行了测试。探针电压扫描，给出整个伏安特性。

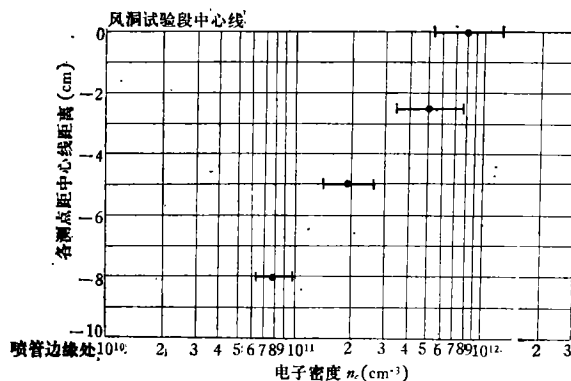


图 8 H-4 电弧风洞试验气流电子密度校测结果
(该气流剖面距喷管出口处 8cm，风洞焓值 2870—3250 卡/克)

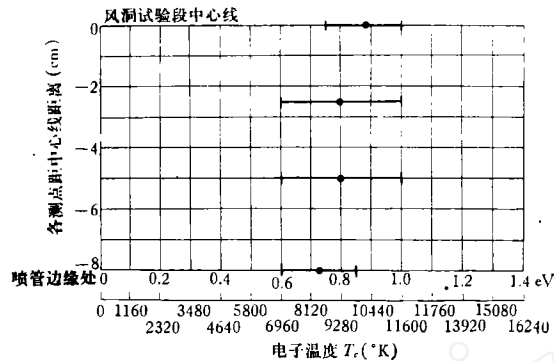


图9 H-4电弧风洞试验气流电子温度校测结果

(为距喷管出口处分别为0, 4, 8cm三个剖面上结果的综合, 风洞焓值为2400—3500卡/克)

典型的测试结果整理后在图8和图9中绘出。由这些实测结果可以得知, H-4电弧风洞的试验气流是接近于冻结流的。测得的电子密度与理论估算的量级基本相符。但测得的电子温度值比估算值高, 这可能是图解法不太精确所致。同时, 电子温度的实测结果表明, 试验气流中电子温度基本上是均匀的。因为各测点处的实测值是随机散布的, 并在测量的误差范围之内。这一结果是符合物理实质的。因为电子质量远小于气流中离子和中性分子的质量, 在它们相互碰撞过程中, 电子与这些粒子之间的能量交换甚少, 因此电子来不及和其它重粒子达到能量平衡, 仍保持其在喉道前方的能量状况。

第二阶段的校测试验着重于电子密度剖面分布的测量。由于可以认为在同一个剖面上电子温度是均匀的, 因此离子电流值的变化就代表了电子密度的变化。这样, 可以使探针固定偏置(电压固定在 -12V), 并使三维支架连续地横越气流。这样所测得的饱和离子电流值剖面分布便是电子密度剖面分布的形式。图10是一条典型的实测曲线。

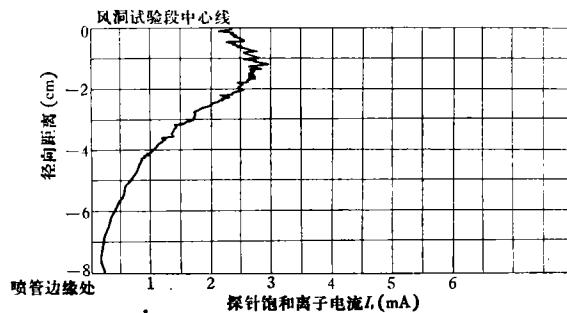


图10 H-4电弧风洞试验气流中离子饱和电流剖面分布的实测曲线

(为距喷管出口15cm处截面上的结果)

五、结 论

校测试验表明铱丝静电探针可以在高温风洞中应用, 其性能完全符合试验要求。

静电探针可以测定风洞试验气流的电子密度、电子温度及其剖面分布情况。同时, 探针测量的结果还给出了评定风洞气流非平衡程度的一种依据, 因为风洞气流非平衡程度的差异明显反映在气流中电子密度的量级多少上。对风洞气流的非平衡程度进行假定,

并依据理论计算其中的电子密度值,再与实测的电子密度值比较,便可确定该气流的非平衡程度.

参 考 文 献

- [1] Swift, J. D. and Schwar, M. J. R., *Electrical Probes for Plasma Diagnostics*, London, Iliffe (1970).
[2] Laframboise, J., AD634596.

IRIDIUM ELECTROSTATIC PROBE AND ITS APPLICATION IN A HIGH TEMPERATURE WIND TUNNEL

Wang Boyi

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Abstract

The paper describes a kind of electrostatic probe which can be used to measure parameters of high temperature gas flow, such as electron density, electron temperature, etc. It also gives theoretical curves of probe characteristic for air plasma. This iridium electrostatic probe has been operated successfully in an arc-heated tunnel.