

# 快速焓探针

赵太泽 王 飞 郭少峰 郭文康<sup>†</sup> 须 平

(复旦大学现代物理研究所, 上海 200433)

(2006 年 1 月 24 日收到, 2007 年 1 月 23 日收到修改稿)

传统焓探针测量系统采用质量流量计测量样品气体的流量, 这种方法的缺点是强烈依赖于等离子体工作气体的组分以及在测量时必须等待在焓探头内样品气体流动达到稳定状态, 因此测量时间较长. 本文介绍的快速焓探针测量系统中, 用一个已知体积的储气罐获得被抽样品气体的摩尔量, 从而克服了传统焓探针的缺点, 实现了在几秒之内完成对一点的焓值测量. 本文从四个方面的实验验证了快速焓探针测量结果的准确性.

关键词: 焓探针, 等离子体, 等离子体诊断

PACC: 5265, 5235, 5225F, 5240K

## 1. 引 言

在 20 世纪 90 年代, 由于对热等离子体各种过程深入研究的需要, 焓探针技术再一次受到人们的重视. 焓探针测量是一种简便的测量高温流体温度和速度分布的方法, Swank 等人<sup>[1,2]</sup>详细地介绍了利用焓探针测量等离子体温度和速度的方法. 2000—10000 K 的温度范围是热等离子体的主要工作参数范围, 而现有的温度测量方法运用到这个温度范围存在各种局限. 传统热电偶难以承受这一温度, 激光 Doppler 法和谱线强度法往往需要昂贵的光学仪器和适宜的工作环境<sup>[3]</sup>. 焓探针测量技术具有设备简单, 测量方便, 并能准确给出被测气体的温度和速度分布等特点, 它已成为测量在这一温度区域内高温气体属性的最有效的测量方式. 1992 年 Fincke<sup>[4]</sup>在高温等离子体射流中对激光散射技术与焓探针测量技术进行比较, 得到两者符合较好的结果.

虽然焓探针具有简单、便宜和方便的优点, 但传统的焓探针测量有一些基本的局限性: 测量时间长, 因而需要提供稳定的测量环境; 气体流量计的测量强烈依赖于被测气体的种类和成份, 只能对已标定了的气体进行测量, 对混合气体基本上无法测量.

为了克服这些局限性, 我们搭建了一套快速焓探针测量系统, 其特点是: 1) 利用被测气体在热交换后的压强  $P$ 、体积  $V$  和温度  $T$  来确定焓探针抽取

的被测气体的摩尔量; 2) 利用与焓探针相连的气相色谱测量气体的成分; 3) 依据一定的理论计算被测气体的热力学函数, 从而得到气体的焓值.

## 2. 快速焓探针测量原理

焓探针测量的基本物理思想是抽取一定量的高温气体与冷却水进行热交换, 通过测量冷却水的温升来确定热交换量, 由热交换量及被冷却后气体的温度可以得到高温气体的焓值和温度. 同时, 测量不抽气时探针顶端的驻点压力和周围环境压力, 算出气体在抽取点的速度.

焓探针进行高温气体焓值测量时的一个主要的技术问题是, 用精密的气体流量计来测量被测气体的质量流量率, 要求被测气体流量处于稳定状态下. 不同于传统焓探针, 快速焓探针测量系统用一个已知容积的测量罐来储存被抽取的气体, 然后根据理想气体状态方程来确定被抽取气体的量, 因此被测气体的量可以处于非稳定状态而被测量.

由于整个测量过程是一个非稳态状态, 所有测量值都取这个时间过程的积分. 高温等离子体气体焓值  $h_{1g}$  的确定, 首先确定在非抽气状态下  $T$  时间内冷却水带走的热量

$$Q_{nf} = \int_0^T \dot{m}_c c \Delta T_{nf} dt, \quad (1)$$

其中  $\Delta T_{nf}$  是此时冷却水的温升,  $c$  是水的比热容,

<sup>†</sup> 通讯联系人. E-mail: wkguo@fudan.edu.cn

$\dot{m}_c$  是冷却水的质量流量率.

抽气状态下  $T$  时间冷却水所带走的热量为

$$Q_f = \int_0^T \dot{m}_c c \Delta T_f dt$$

$$= (h_{1g} - h_{2g}) \int_0^T \dot{m}_g dt + Q_{nf}, \quad (2)$$

$\Delta T_f$  是抽气时水的温升,  $\dot{m}_g$  是抽气时气体的质量流量率.

由 (1) 和 (2) 式可得

$$h_{1g} = h_{2g} + \frac{\int_0^T \dot{m}_c c (\Delta T_f - \Delta T_{nf}) dt}{\int_0^T \dot{m}_g dt}, \quad (3)$$

其中  $h_{1g}$  是被测高温气体的焓值,  $h_{2g}$  是经过热交换后的尾气的焓值, 经过热交换后的尾气的温度一般在 1000 K 以下, 可由热电偶直接测得, 进而可得尾气焓值.

### 3. 快速焓探针测量系统

新的测量方式结合了自动控制技术, 构成一套快速的焓值测量系统, 一次焓值测量的时间可以被压缩到 3 s 左右.

#### 3.1. 焓探头的结构

图 1 为焓探头部分的结构示意图.

焓探头是由三层导热良好的紫铜管同心相套而成, 其内层管的外径是 2.0 mm, 内径 1.2 mm, 中间管的外径 3.0 mm, 内径 2.5 mm, 最外层管的外径 4.0 mm, 内径 3.5 mm. 冷却水由中间套管引导经外

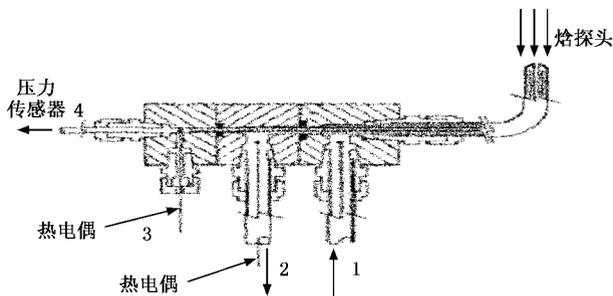


图 1 焓探头结构示意图

层间隙流入, 经探头的顶部后再由内层间隙流出. 探头可以承受 12 MPa 冷却水压, 到目前为止探头测量最大的焓值为  $1.629 \times 10^7$  J/kg 而未烧毁.

焓探针测量的灵敏度与探头的直径的大小成反比关系, 降低焓探针的空间尺寸可以提高焓探针测量的灵敏度. 目前我们的焓探头和所见文献报道中焓探头尺寸相比, 外直径是较小的.

高压冷却水从引脚 1 处注入, 经过焓探头中间套管引导后, 从引脚 2 处流出, 同时, 一只热电偶温度传感器也装在 2 处, 用来测量冷却水的温度. 在 3 处, 一只热电偶温度传感器被安置来测量尾气的温度, 用以决定尾气的焓值  $h_{2g}$ . 在 4 处一个压力传感器被安置用来测量不抽气时探头顶端的驻点压力  $p_a$ .

#### 3.2. 测量系统的结构

测量系统的结构示意图如图 2 所示.

整个焓探针测量系统可以分成四个模块, 即: 1) 气体流量测量模块 2) 高压冷却水及流量测量模块 3) 气体取样模块 4) 数据采集和电气控制模块.

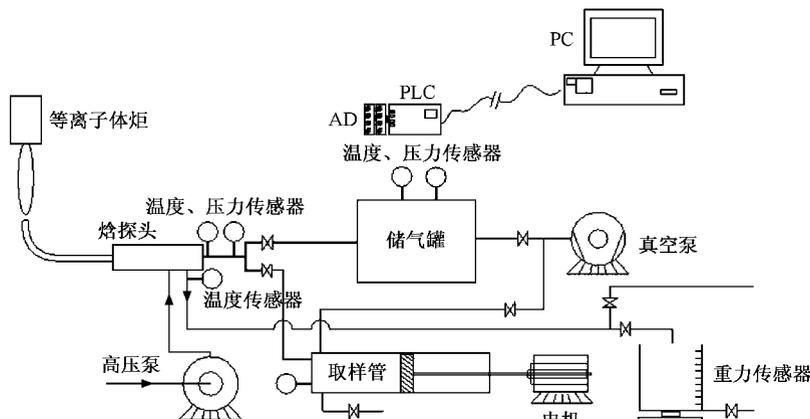


图 2 测量系统结构示意图

### 3.2.1. 气体流量测量模块

对于非化学反应气体,并在常温下仍旧是气态的气体,我们可以用理想气体状态方程来确定其质量.

用一个已知容积  $V = 4 \text{ L}$  的测量罐来储存被抽取的气体,同时一个热电偶被安置来测量容器内气体的温度  $T$  和一个压力传感器来测量容器内压力  $P$ ,然后根据理想气体状态方程来确定被抽取气体的质量

$$m = \frac{\left(P_2 - P_1 \frac{T_2}{T_1}\right) m_n v}{RT_2}, \quad (4)$$

$P_1 P_2$  和  $T_1 T_2$  分别为抽气前后的气罐中的气压和温度,  $m_n$  为抽取气体的摩尔质量.

由所得的气体的质量  $m$  和热交换量来确定高温混合气体的焓值.在这种方式中,以前困扰焓探针测量的气体质量流量率问题被克服了.

### 3.2.2. 高压冷却水及流量测量模块

高压冷却水流量测量模块主要由高压水泵,水量测量系统等组成.其主要作用是实现对焓探头的冷却以及流量的测量.

冷却水由一个高压水泵提供,使冷却水能在很小的间隙中有比较大的流量,确保焓探头在高温气体中不被烧损.高压水泵压强可在 4—12 MPa 气压范围内调节.一般工作水压为 8 MPa.探头的接口一定要经过加固,使之能承受巨大的压力.

高压冷却水的流量测量是由一个质量传感器用来测量进入量杯中水的质量  $m$ ,确定特定泵压下的水的质量流量率  $\dot{m} = \frac{m}{t}$ ,其中  $t$  是量杯进水的时间,可由可编程控制器中的计时器确定.实验发现在一定的泵压下  $\dot{m}$  是定值.

### 3.2.3. 气体取样模块

气体取样模块由数个取样管、电机和真空泵构成.取样管用来存储样品气,电机用来推拉取样管的活塞,取样前,由真空泵将取样管和导气管抽真空.

之所以在这套系统中加入取样的功能,是希望将来与气相色谱结合,将这套焓值测量系统用到多组分气体的焓值测量中去.由多组分气体的焓值及其成分可以得到多组分气体的温度.

### 3.2.4. 数据采集和电气控制模块

数据采集和电气控制模块是整个焓探针测量系统的关键模块,它由可编程控制器 PLC,模数转换器 AD,直流继电器,计算机等组成;其主要实现以下两

个功能:

1) 现场采集驻点气压、气罐气压、取样管气压、高压冷却水的温度、气罐中气体的温度及经过热交换后尾气的温度,并将采集到的数据传送到计算机中储存.

2) 控制实验执行部件(真空泵,电机,电磁阀等),实现快速的焓值测量.

数据采集和电气控制模块的核心器件是一个三菱 FX<sub>2N</sub>-32MT 的可编程控制器,同时外加了一个 FX<sub>2N</sub>-16EYT 的扩展单元作为输出冗余,其提供 16 点晶体管输出.还选了一个 RS232 功能扩展板,通过它把由可编程控制器经由 AD 采集到的数据传递到上位计算机中存储.

## 4. 焓探针测量系统的实验检验

在直流等离子体(空气)射流下<sup>[5]</sup>进行了焓探针测量系统特性的实验研究:1)就抽气状态、抽气时间对焓值测量的影响进行了系统地测试;2)在射流低温区,将焓探针与热电偶的测量结果进行比较;3)在高温区域(等离子体炬的喷口处),测得等离子体射流在所测量截面上的焓值、速度和密度的分布,将该截面上射流焓值、速度和射流气体质量密度的面积积分与等离子体炬的功率进行比较.

### 4.1. 测量时间对测量结果的影响

在以前的焓探针测量系统研究中,人们很少注意整个焓值测量所需要的时间. Brossa<sup>[6]</sup>提到了焓值测量的时间以分钟计.降低每次焓值测量的时间,对于提升焓探针测量系统的使用寿命和拓展焓探针测量系统的应用范围是很有意义的.在我们的测量模式中,焓值测量是不依赖于测量时间的.我们使用快速焓探针测量系统在空气等离子体射流中的同一点进行不同抽气时间下的测量,其结果如图 3 所示.

从图 3 中可以看出,我们的焓探针测量系统可以进行快速的焓值测量,在几秒钟内完成一次焓值测量.

### 4.2. 不同抽气状态对焓值测量的影响

对抽气状态进行合理的调节控制,我们需要注意以下两个方面:

1) 避免探头周围的冷气体对焓值测量的影响  
当高压水冷的焓探头置入高温等离子体气体

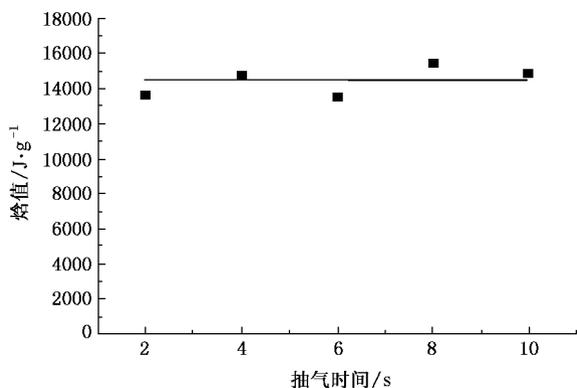


图3 不同抽气时间测量的焓值

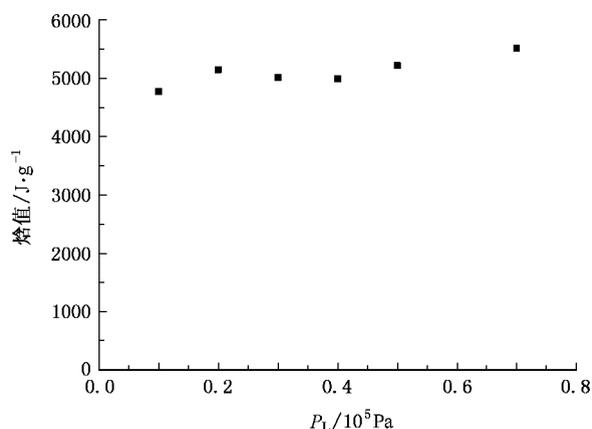


图4 不同压差时测量的焓值

中,在探头附近会形成一层低温冷气体,在进行焓值测量的时候,如果抽取的气体质量比较小,那么焓探头周围冷气体对焓值测量的影响就会比较大,会导致焓值测量偏小。

## 2) 射流中的静力平衡条件

在焓值测量过程中,如果被抽气体在焓探头中的流速大于射流的自由流速,那么射流的静力平衡将不会保持,被抽取的进行热交换的气体有相当一部分不是测量点处的气体,而是来自上游的温度较高的气体,得到的焓值会偏大。一般认为探头中抽样气体的流速应接近测量点处等离子体气体的自由流速,焓值测量才比较合适。

焓探针系统不需要测量气体的质量流量率,只需要测量一次抽取的气体的质量。在焓值测量系统中,通过控制密闭容器和探头顶端驻点压强间的压强差来进行抽气控制。

定义一个变量  $P_L$ , 探头顶端的驻点压强与抽气前测量罐内的压强的差值为

$$P_L = P_{sta} - P_{con}, \quad (5)$$

式中,  $P_{sta}$  是探头顶端的驻点压强,  $P_{con}$  为抽气前测量罐内的压强。在容器的体积比较大,而且抽气时间比较短的情况下(3 s),在空气等离子体中进行了以下实验,结果如图4。

从图4看,在一个比较大的压差范围内( $0.2 \times 10^{-5} - 0.5 \times 10^{-5}$  Pa),焓值测量的结果是比较合理的。当压差比较小时( $< 0.1 \times 10^5$  Pa)冷气体层的影响比较大,测得焓值偏小。当压差较大时( $> 0.7 \times 10^5$  Pa)上游高温气体的影响显著,测得焓值偏大。焓值测量在一个相当大的质量流量率范围内都是比较稳定的<sup>[7]</sup>,这和我们的实验是较一致的。

## 4.3. 低温区的焓值测量检验

空气等离子体射流的低温区域,即射流离开喷口比较远的地方,这里的等离子体射流温度在1000—2000 K范围内,可以使用传统的热电偶进行直接测量,我们用热电偶对射流低温区域中的一点进行了温度测量,并且查表得到其焓值;同时,使用焓探针系统对同一点同时进行了焓值测量,以热电偶测量值为横坐标,探针测量值为纵坐标,二者测量结果之间的比较见图5。

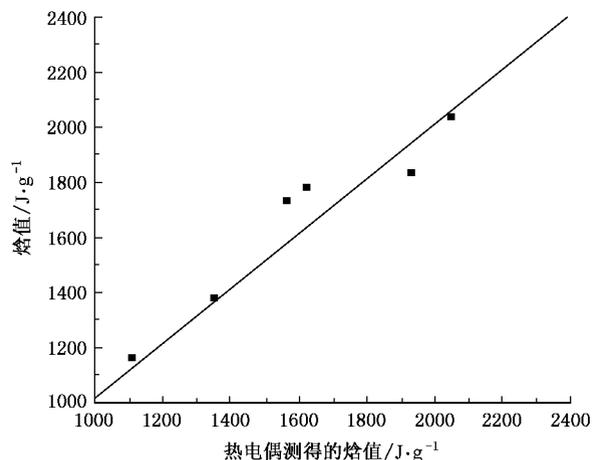


图5 热电偶与焓探针测量的焓值的比较

图5各点基本上处于角平分线上,可见在射流的低温区焓探针测量和热电偶测量符合的较好。

## 4.4. 高温区的整体可靠性检验

在等离子体射流的高温区域,也就是在接近等离子体炬喷口的区域:气体的温度高,湍流度低,同

时,由于射流离开喷口的距离比较短,其横向热损失比较小.在喷口附近垂直于射流轴线的截面上,射流通过该截面的射流的热功率,在忽略等离子体辐射热损失的情况下,应该等于等离子体炬的输出功率.而通过该截面射流的热功率,是该截面上射流焓值、速度和射流气体质量密度的面积积分.通过检验射流的热功率和炬的输出功率是否相当,可以反应焓探针在焓值、速度测量的整体可靠性.

使用焓探针在氩等离子体射流高温区域进行了焓探针测量的整体可靠性检验.在氩等离子体射流喷口下 2 mm 处,垂直于轴线半径为 3 mm 的截面上均匀分配了 29 个测量点,在此射流截面进行了逐点测量.测量得到各个测量点等离子体射流的焓值和速度,查表得到温度和质量密度,根据(6)式计算炬的功率.

$$P = w - \dot{m}_w c \Delta T = \sum_{i=1}^{29} \rho_i h_i v_i \Delta S_i, \quad (6)$$

其中  $P$  是炬的输出功率; $w$  是炬工作时输入的电功率; $\dot{m}_w$  是炬的冷却水质量流量率; $\Delta T$  是冷却水的温度进入炬前后的变化值; $c$  为水的比热; $\rho_i$  是第  $i$  测量点的气体质量密度; $h_i$  是第  $i$  测量点测量的焓值; $v_i$  是第  $i$  测量点处的速度; $\Delta S_i$  是第  $i$  测量点处的面积.

我们进行实验时, $w = 6900 \text{ W}$ ,  $\dot{m}_w = 68 \text{ g/s}$ ,  $\Delta T = 10.2 \text{ K}$ . 以下是实验得到等离子体射流在所测量截面上的焓值、速度和密度分布图.

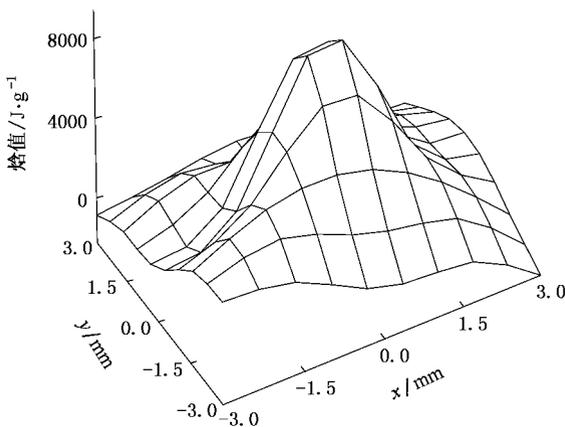


图 6 所测截面的焓值分布

从图 6—8 中可见,等离子体射流的属性在空间分布上是不对称的,实验测得的焓值和速度是对应的,即在焓值比较高的地方射流速度也比较大.

按上式求和计算得到的结果为射流在截面上的热功率为 3661 W,而直流等离子体炬的输出功率为

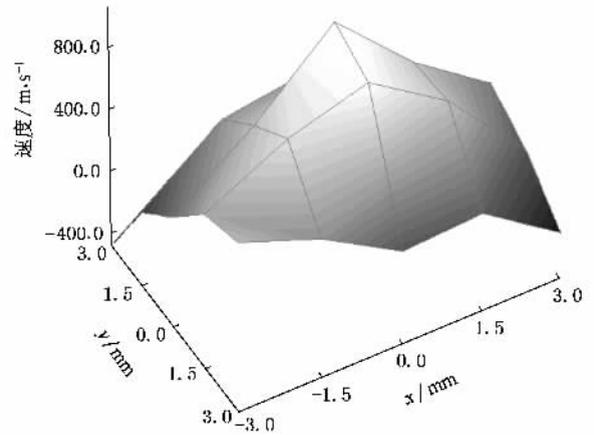


图 7 所测截面的速度分布

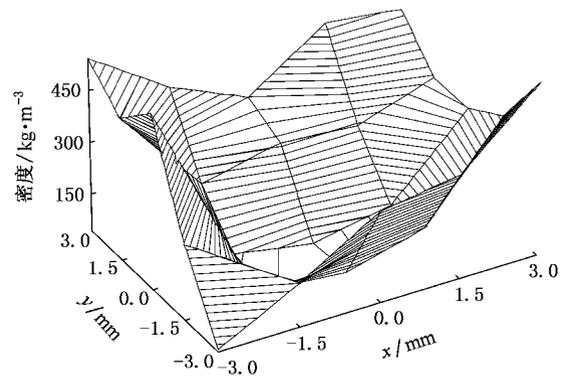


图 8 所测截面的密度分布

4000 W,两者相差 8.5%.

通过以上的实验验证,可见这种焓探针测量系统能够快速简便的完成热等离子体气体的属性测量,可以运用到热等离子体气体的研究中去.

## 5. 结 论

本文介绍的快速焓探针测量系统创造性的用一个已知体积的储气罐获得被抽取样品气体的摩尔量,用瞬态测量的方法代替了传统焓探针中稳态测量的方法,实现了快速测量焓值的目的.从四个方面的实验验证了焓探针测量系统的稳定性,得出如下结论:对一个点的焓值测量只需要几秒钟,抽取样品气体压差在  $0.2 \times 10^5$ — $0.5 \times 10^5 \text{ Pa}$  范围内时,探针周围的冷气层和测量点上游高温射流对焓值测量的影响最小;在等离子体射流低温区,分别用热电偶和焓探针测量同一点的焓值,通过比较表明在低温区焓探针的测量性能是可靠的;在氩等离子体射流喷口 2 mm 处垂直于轴线半径为 3 mm 的截面上测量

29 个点的焓值 , 计算了该截面的热功率 , 通过与等离子体炬输出功率的比较 , 得出误差为 8.5% , 表

明在高温区焓探针的测量性能同样可靠 .

- 
- [ 1 ] Swank W D , Fincke J R , Haggard D C 1993 *Rev. Sci. Instrum.* **64** 56
- [ 2 ] Swank W D , Fincke J R , Haggard D C 1993 *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **13** 579
- [ 3 ] Liu F S , Xu P , Guo W K 2000 *Nuclear Fusion and Plasma Phys.* **4** 7
- [ 4 ] Feng C H , Li Z L , Yang X Z , Zheng S B , Li W L , Wang L 2003 *Chin. Phys.* **12** 1135
- [ 5 ] Fincke J R , Snyder S C , Swank W D 1993 *Rev. Sci. Instrum.* **64** 711
- [ 6 ] Yuan X Q , Li H , Zhao T Z , Wang F , Yu G Y , Guo W K , Xu P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3806 ( in Chinese ) [ 袁行环、李 辉、赵太泽、王 飞、俞国扬、郭文康、须 平 2004 物理学报 **53** 3806 ]
- [ 7 ] Brossa M , Pfender E 1988 *Plasma Chemistry and Plasma Processing* **8** 75
- [ 8 ] Mohamed R , Gervais S , Maher I B 1995 *Rev. Sci. Instrum.* **66** 3424

## Rapid enthalpy probe

Zhao Tai-Ze Wang Fei Guo Shao-Feng Guo Wen-Kang<sup>†</sup> Xu Ping

( *Institute of Modern Physics , Fudan University , Shanghai 200433 , China* )

( Received 24 January 2006 ; revised manuscript received 23 January 2007 )

### Abstract

Traditional enthalpy probe system use the Mass Flux Controller ( MFC ) to measure the flux rate of sample gas . However , this method much depend on the composition of plasma working gas under the condition of steady state of sample gas inside the probe , so it takes much more time to measure the enthalpy of a point . In order to overcome the disadvantage of traditional probe , the rapid enthalpy probe system we devised measure the molar weight of sample gas by using a known volume gas container instead of MFC , making it possible to measure the enthalpy of one point in several seconds . The accuracy of result acquired by our rapid enthalpy probe system is verified through our four different experiments .

**Keywords** : enthalpy probe , plasma , plasma diagnose

**PACC** : 5265 , 5235 , 5225F , 5240K

---

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail : wkguo@fudan.edu.cn