

文章编号: 0258-1825(2001)01-0123-05

高频感应等离子体风洞的光谱诊断

张秀杰, 林烈, 吴彬

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要:建立高频感应等离子体风洞在国内是近几年的事情,因此对风洞内等离子体参数的诊断也刚刚开始。本文论述了利用氩光谱的相对强度法测量高频感应风洞的等离子体温度及其分布的原理和装置,并给出了实验结果。

关键词:等离子体风洞; 等离子体光谱诊断; 局部热力学平衡

中图分类号: V211.74⁺⁵ **文献标识码:** A

0 引言

光谱测量在等离子体参数的诊断中占据很重要的地位,又因是非接触性测量,不会干扰等离子体的流场,因此得到广泛应用。其原理在很多专著中都有详细论述^[1]。

我们的高频感应等离子体风洞是用高频感应电弧做加热源,这就克服了直流电弧电极烧损所造成的污染,可为实验提供纯净的等离子体射流,以满足某些特殊试验所要求的工作条件。在对等离子体参数诊断的研究中,其中温度及温度场的分布是一个最重要的参数,我们利用等离子体辐射光谱相对强度法进行了测量并取得了一定的结果,本文主要介绍了这方面工作。

1 测量原理

对于局部热力学平衡(LTE)等离子体,当辐射源为光学薄体系时综合爱因斯坦发射强度公式和波尔兹曼分布定律,电子从高能态向低能态跃迁时的光谱发射系数为^[1]

$$I_{nm} = \frac{h}{4} A_{nm} \frac{g_n}{Z(T)} N e^{-\frac{E_n}{kT}} \quad (1)$$

式中 I_{nm} - 光谱的发射系数; h - Planck 常数; ν - 发射光谱的频率; A_{nm} - 光子从 n 态到 m 态的自发跃迁几率; g_n - 激发态统计权重; $Z(T)$ - 所论粒子的配分函数(其值为原子所有能级的统计权重与波尔兹曼因子的总和); N - 所论粒子的总浓度; E_n - 激发态能量; k - Boltzmann 常数; T - 等离子体温度(严格地讲由此得到的温度是相应于 n 能级上的分布温度称为激发温

收稿日期: 2000-01-20; 修订日期: 2000-03-29.

度 T_{ex})。采用同一元素两条激发能不同谱线发射系数比来测量等离子体温度,利用(1)式很容易得到两谱线发射系数比和等离子体温度的关系为

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{A_1 g_1}{A_2 g_2} e^{-\frac{(E_1 - E_2)}{kT}} \tag{2}$$

其中 $I_1、I_2$ 为二谱线发射系数; $A_1、A_2$ 为二谱线的自发跃迁几率; $g_1、g_2$ 为二谱线相应激发态 ($E_1、E_2$) 统计权重。对上式取对数并代入物理常数整理后得到

$$T = \frac{5040.2(E_1 - E_2)}{\log \frac{g_1 A_1}{g_2 A_2} - \log \frac{I_1}{I_2} - \log \frac{A_2}{A_1}} \tag{3}$$

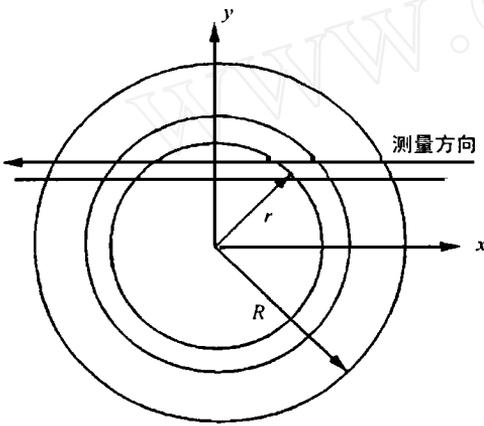


图 1 轴对称情况下的 Abel 变换

Fig. 1 The Abel inversion of acylindrical plasma

$E_1、E_2$ 是以 eV 为单位, $I_1、I_2$ 为二谱线的波长,测量 $I_1、I_2$ 比值可得到等离子体激发温度。

在温度分布测量中,对局域发射系数是无法直接测量的,在实验中实际测得是谱线发射系数沿光程的积分量即谱强度 $I(y)$ 。由谱强度 $I(y)$ 求出不能测量的发射系数 $I(r)$ 须做相应的 Abel 转换^[2]。在等离子体是轴对称分布情况下,由图 1 可知谱强度和发射系数的积分关系式为

$$I(y) = 2 \int_y^R \frac{I(r) r dr}{\sqrt{r^2 - y^2}} \tag{4}$$

经 Abel 转换可求出 $I(r)$

$$I(r) = -\frac{1}{r} \int_r^R \frac{I(y) dy}{\sqrt{y^2 - r^2}} \tag{5}$$

$I'(y)$ 是 $I(y)$ 的导数,计算上面积分的方法很多,一般采用多项式法,文献[2]介绍了多种计算方法。

2 实验及测试

风洞试验段和测试装置如图 2 所示。上部是用于加热的高频感应线圈(电功率为 30KW,频率为 4MHz),下部是抽真空设备。

光谱测量采用比较先进的一个被称为 OSA (Optical Spectra Analyzer) 的系统。它是在光谱仪后接硅靶摄像管和计算机数据处理系统,集光电法和照相机之优点,具有很高的灵敏度同时又有较宽的摄谱范围。在用 250mm 焦距的光谱仪,1200 道光栅的情况下,一次摄谱可达 20nm。同时又具有二维功能,在 X 方向可以得到按波长排列的光谱,在 Y 方向可以得到按空间分布的

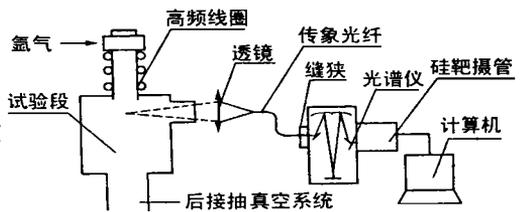


图 2 实验装置和测试装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental apparatus and instrumentation for measurement of intensities

谱强度。这都为温度场分布测量提供了有利条件。

具体做法是在气流中掺入少量氩气,利用氩谱线测温。掺入氩气有以下优点:1.在高频起弧时就需要加入氩气,不必增加任何设备和工作量。2.氩可利用的谱线比较多而且自发跃迁几率 A 值也较准确^[3]。一般常利用 400nm 附近的氩谱线来测等离子体温度,但在我们的实验中没有发现,而在长波段得到若干条可利用的谱线,同时还得到几条亚稳态氩的谱线。图 3 是氩的三条原子谱线和氮原子的一条三重线,图 4 是氧原子和氩原子的谱线。

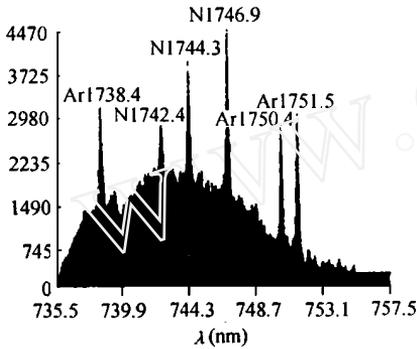


图 3 氩原子和氮原子谱线
Fig. 3 Atomic N and Ar lines

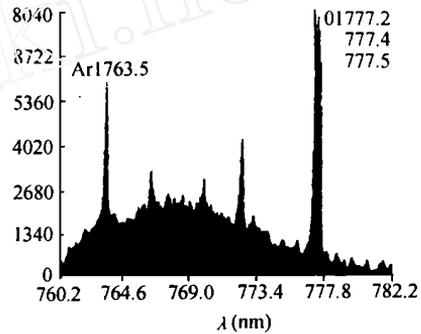


图 4 氩原子和氧原子谱线
Fig. 4 Atomic Ar and O lines

图 5 是测得的 NI746.9nm 谱线强度的径向分布。图 6 是测得的温度的径向分布。图 3~图 5 的纵坐标是 OSA 光谱仪谱线强度的计数,而计算温度是用谱线的积分强度。温度是利用 ArI750.4nm 和 ArI751.5nm 两条谱线的相对强度得到的,从图 3 可看出这两条谱线相距很近但

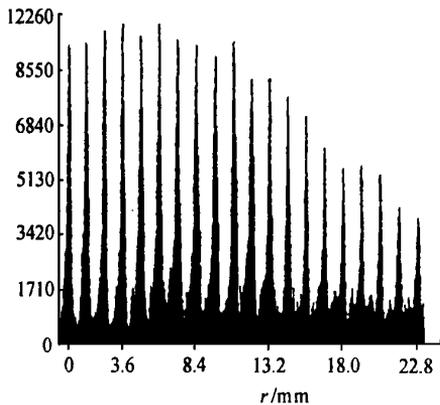


图 5 等离子体中 NI746.9nm 谱线强度的径向分布
Fig. 5 Radial distribution of N746.9nm spectral intensities

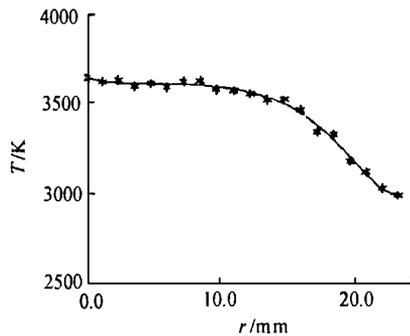


图 6 等离子体温度的径向分布.
Fig. 6 Radial distribution of plasma temperature

又完全能够分开,这样一次摄谱可以完成,可不必进行标定,误差也可大大减小。径向分布是利用 OSA 的二维功能同时移动一次缝狭分二次摄谱完成,每次测 12 点。为保证二次摄谱接点的重合性,第一次摄谱的最后一点与第二次摄谱的第一点重合,移动狭缝用百分表计数,可精

确到 0.01mm。从图 2 可看出光谱仪的缝狭是无法移动的,实际上是移动传象光纤。传象光纤的作用是便于对光,以及随意改变缝狭的方向,并使 OSA 系统远离高频辐射源,一定程度上减少了高频辐射对 OSA 系统的干扰。

3 讨 论

(1) 关于用氩谱线测温问题

关于高频感应等离子体(ICP)弧区温度、电子密度的测量,国外已有很多报导^[4~5],基本是在弧区或距感应线圈 4mm~25mm 范围内,而在距线圈 30mm~100mm 风洞内较为少见,可借鉴的方法较少。试验段内的温度比高频等离子体发生器中的温度下降了很多,用辐射光谱法是否合适有待考虑。一般利用氩谱线测温是在 4000K~10000K 范围,在 4000K 以下一般使用分子光谱和光谱吸收法,限于我们的经费和条件,我们又有一台极高灵敏度的 OSA 光谱仪,最少可感应 15 个光子的能量,这给我们测量微弱辐射提供了条件。结果我们在较低激发能的长波段得到可用来测温的谱线。

(2) 关于风洞等离子体的局部热力学平衡(LTE)问题的讨论

所谓局部热力学平衡(LTE)概念,其主要特征是体系具有统一的温度 T ,即等离子中各种粒子温度比较接近,浓度参数的梯度较小,各组分气体粒子的速度分布满足 Maxwell 速度分布定律,等离子体中各粒子的各能级分布满足 Boltzmann 分布,等离子体中各粒子在电离反应中满足 Saha 方程。但在很多情况下等离子体不能达到局部热力学平衡,这时等离子体可区分出不同的温度:

- (a) 电子温度 T_e (电子平均动能);
- (b) 激发温度 T_{ex} ;
- (c) 振动温度 T_{vib} ,与振动能级的能量分布有关;
- (d) 转动温度 T_{rot} ,与转动能级的能量分布有关;
- (e) 重粒子的平动温度 T_h 。

当碰撞不够频繁时一般存在有: $T_e > T_{ex} > T_{vib} = T_{rot} = T_h$ 。对局部热力学平衡在数学上的简化判据为^[5]: $N_e \cdot 1.6 \times 10^{12} \times T_e^{1/2} (E)^3 (cm^{-3})$, N_e - 电子密度; T_e - 电子温度; E - 所涉及能态间能量差(eV)。据文献[6]报导在高频弧区电子密度大约在 $(10^{15}-10^{16})/cm^3$ 范围内,对 LTE 略有偏离但不严重。在我们的试验段内虽抽真空,但压力在 0.06Mpa 左右,仍有较高的电子密度。试验段四周有保温材料包围,所以由热辐射、传导、扩散和对流等引起的能量损失大大减小,浓度梯度和温度梯度也比敞口情况下小,所以我们认为在我们的实验条件下比较接近 LTE 状态,因此用辐射光谱法是可行的。下一步还需要测定等离子体重粒子温度或者电子密度来加以验证。

本工作是在吴承康院士指导下进行的,同时参加实验工作的还有阎嘉坪高工,在此一并表示感谢。

参 考 文 献：

- [1] GRIEM H R. Plasma Spectroscopy[M]. McGraw-Hill ,New York ,1964
- [2] 刘克玲. 测量轴对称等离子体辐射源物理参数所用的几种变换法[J]. 光谱学与光谱分析, 1982, 2(1、2).
- [3] OLSEN H N, J. Q. S. R. T, 1963, (3) :59-76
- [4] BOUMANS P W J M, DE BOER F J. Spectrochimica Acta[J]. 1977, 32B :36
- [5] KORNBLUM G R, DE GALAN L. Spectrochimica Acta[J]. 1977, 32B :71-96
- [6] 陈隆懋等译. 感耦等离子在原子光谱分析法中的应用[M]. 北京人民卫生出版社, 1992. 6

The spectral measurement in an inductively coupled plasma wind tunnel

ZHANG Xiu-jie , LIN Lie , WU Bin

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

Abstract : An inductively coupled plasma wind tunnel was built in our laboratory. The temperature of plasma and its distribution were measured with an Optical Spectra Analyzer. The experiment was conducted for a oscillator frequency of 4.0 MHz , input power of 30 kW. The relative intensities of atomic argon lines (ArI750.4nm and ArI751.5nm) were used to get the plasma temperature and its distribution. The experimental apparatus and instrumentation for measurements were shown in this paper. The local thermal equilibrium (LTE) in the plasma of wind tunnel was discussed.

Key words : plasma wind tunnel ; optical diagnostic of plasma ; local thermal equilibrium