

# 利用吸收光谱法测量激波风洞自由流中 一氧化氮的含量

余西龙, 杨乾锁, 姜乃波, 郭大华, 葛学真, 林贞彬, 竺乃宜

(中国科学院力学研究所高温气体动力学实验室, 北京 100080)

**摘要:**以空心阴极灯 Te 灯作为光源,采用光学多道分析仪(OMA),首先在静态条件下,获得了 Te 灯的透射光强随一氧化氮压强的变化曲线,计算出一氧化氮对 Te 灯 214nm 和 225.9nm 两条谱线的吸收系数。根据 OMA 拍摄的氢氧爆轰驱动激波风洞喷管出口气流中一氧化氮带 ( $A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2$  跃迁)对 Te 灯的吸收光谱,确定了自由流中一氧化氮的最大含量。

**关键词:**氢氧爆轰驱动;激波风洞;一氧化氮;带;吸收系数;吸收光谱;含量

**中图分类号:** V211.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-3124(1999)04-0062-05

## Measurement of nitric oxide concentration in a shock tunnel using absorptive spectroscopy technique

YU Xi-long, YANG Qian-suo, JIANG Nai-bo,

GUO Da-hua, GE Xue-zhen, LIN Zhen-bin, ZHU Nai-yi

(Laboratory of High Temperature Gas Dynamics,

Institute of Mechanics, CAS, Beijing, 100080, China)

**Abstract:** The transmission light intensity of Te HCL versus pressure of nitric oxide on static condition is obtained by optical multichannel analyzer(OMA), thus, absorptive coefficients of nitric oxide to 214nm and 225.9nm of Te HCL is presented through above mentioned investigation. The absorptive spectroscopy of band ( $A^2 \Sigma^+ \rightarrow X^2$  transition) of nitric oxide in free stream at nozzle exit of a hydrogen oxygen detonation driven shock tunnel is acquired by OMA. We apply static experimental results and measure the concentration of nitric oxide in free stream.

**Key words:** hydrogen oxygen detonation driven; shock tunnel; band; nitric oxide; absorptive coefficients; absorptive spectroscopy; concentration

## 0 引 言

利用吸收光谱方法来测量气体中某种成分的含量无疑是一种有效的非侵入式测量手

收稿日期: 1999-05-31

基金项目: 国家 863 高技术领域和中科院力学所所长基金资助

作者简介: 余西龙(1971-),男,陕西西安市人,中科院力学所博士研究生。

段。这种方法的基本思想是利用气体中的被测成分对入射光吸收的大小来决定这种成分在气体中的含量。然而,这种测量方法要求经过被测物质出射光只能来源于原来的入射光。这就要求被测物质在测量的时候,不能发射出与入射光波长相同或相近的光辐射。在常温下,对于由基态到激发态的跃迁和辐射,由于只存在由基态到激发态的吸收,而激发态到基态的辐射很弱,因此上述的条件很容易被满足。在常温下,利用吸收光谱方法来测量气体中某种成分的含量是很容易实现的。

在高温状态下,特别是在数千度的高温,由于从激发态到基态存在着非常强烈的辐射,并且由于这种辐射和从基态到激发态的吸收共存,因此出射光不仅包括了来自于入射光的成分,而且包括了被测物质的辐射光。这样由于出射光不能直接反应被测物质对光的吸收的大小使得利用吸收方法来测量气体中某种成分含量的方法失去了准确性。如果在测量出射光时,能够同时测定来自与被测物体本身的辐射强度和总的辐射强度的话,由此可以得到入射光被吸收后的强度,这样仍然可以根据入射光和出射光的强度之比来推算被测物质的浓度。

笔者利用光学多通道分析仪(OMA)和Te灯的紫外波段的光测定了JF-10爆轰驱动激波风洞喷管出口自由流中一氧化氮的含量的实验。

## 1 实验原理

### 1.1 测量原理

按照 Beer-Lambert 定律,一束波数为  $\nu$  的光通过均匀的吸收介质后,这束光的强度变化可以用以下公式来描述<sup>[1]</sup>:

$$I/I_0(\nu) = 1 - \exp(-k(\nu)P_{\text{abs}}L) \quad (1)$$

上式中,  $I$  是被吸收的光强,  $I_0(\nu)$  是入射光的光强,  $k(\nu)$  是吸收系数(单位为  $\text{m}^{-1}\text{Pa}^{-1}$ ),  $P_{\text{abs}}$  是吸收介质的分压,  $L$  是光通过的吸收介质的长度(m)。

在实验中,采用空心阴极灯作为锐线光源,光源的光谱轮廓曲线比吸收谱线的轮廓要窄得多,吸收系数可以定义为最大吸收系数,由公式(1)得到<sup>[2]</sup>:

$$K_{\text{vm}} = -1/(P_{\text{abs}}L) \lg(1 - I/I_0(\nu)) \quad (2)$$

在实验中,首先采用静态标定装置获得组分压强随透射光和入射光之比的变化曲线,然后利用该曲线得到吸收系数  $K_{\text{vm}}$ ,再将动态实验中获得的透射光与入射光之比反推出组分的分压,利用(3)计算出该组分的摩尔浓度。

$$p_{\text{abs}} = P_{\text{abs}}/P \quad (3)$$

上式  $P$  为气流的压强。

### 1.2 一氧化氮谱线和光源的选择

对一氧化氮分子的能级结构的了解已经非常清楚。它的电子态的基态是一个双重态,表示为  $X^2$ , 激发能态依能级由低至高分别为  $A^2$ ,  $B^2$ ,  $C^2$ ,  $D^2$  和  $E^2$ 。带即为  $A^2 \Sigma^+ \leftarrow X^2$  跃迁。选择  $A^2$  带作为测量一氧化氮浓度的原因在于:

- (1) 理论上计算的一氧化氮  $A^2$  带的吸收系数不低于 0.2 (不考虑振子强度)<sup>[4]</sup>。
- (2) 在一氧化氮  $A^2$  带的波长范围内不同空气中别的组分谱带重叠<sup>[4]</sup>。这点对于准确

获得自由流中一氧化氮浓度的大小极为重要。

选择合适的一氧化氮谱线应该考虑测量的灵敏度要求。在一氧化氮的谱带中,按照跃迁规则,由上下能级转动量子数差  $J$  和电子自旋方向决定的谱带精细结构中各谱线的灵敏度各不相同。按照文献[5],较为合适的谱线应不低于 200nm。

空心阴极灯(Hollow Cathode Lamp)的谱线宽度可以窄至 0.001 ~ 0.002nm<sup>[2]</sup>。我们选择的化学分析用空心阴极灯 Te 灯,Te 灯的发射谱线分别为 214 和 225.9nm。与此相应分别有一氧化氮的带 R<sub>21</sub> + Q<sub>11</sub> (13.5) (波长为 214nm)和 P<sub>21</sub> + Q<sub>12</sub> (17.5) (波长为 225.9nm)的两条谱线被吸收。

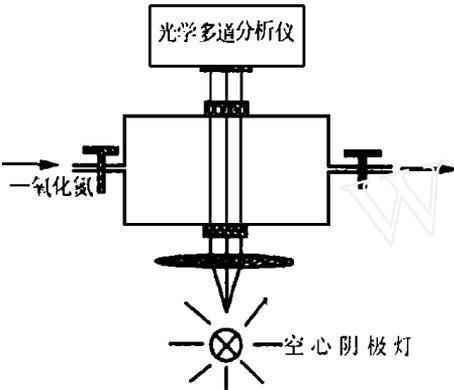


图1 一氧化氮浓度测量的静态标定装置  
Fig.1 The calibration apparatus of concentration of nitric oxide

## 2 实验设备

### 2.1 静态标定装置

静态标定装置由光谱仪(OMA 光学系统)、标定腔体和配气系统组成。如图1所示。

气体选用一氧化氮含量为 1.0 %、Ar 为填充气体的商用气体。

### 2.2 激波风洞采用的测量系统

整个实验系统由 JF-10 爆轰驱动激波风洞、OMA 光学系统、空心阴极灯光源及其电源系统和用于测量其它气体参数的高速数据采集系统组成(如图2所示)。

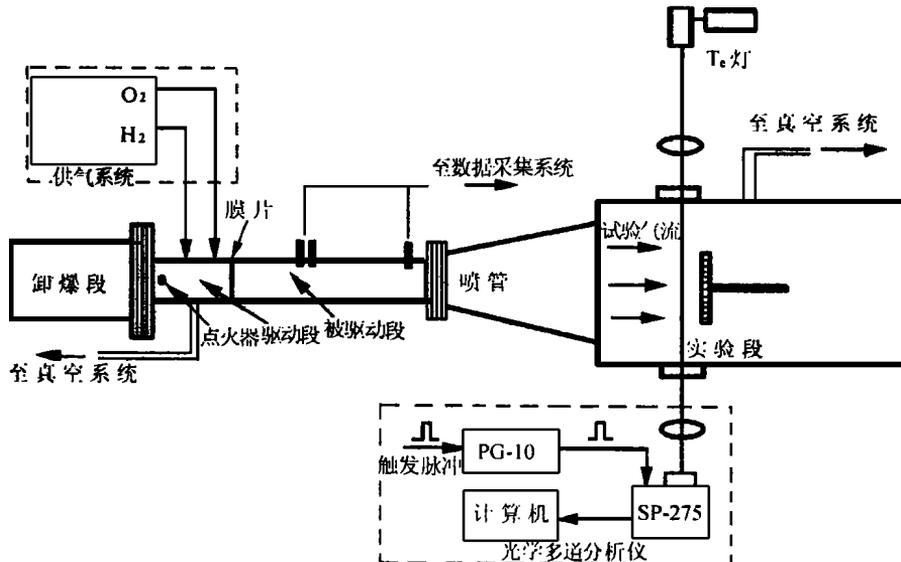


图2 JF-10 爆轰驱动激波风洞和 OMA 光学系统实验装置简图

Fig.2 Experimental setup of JF-10 hydrogen oxygen detonation driven shock tunnel and OMA

JF-10 爆轰驱动激波风洞被驱动段内径为 0.10m,长 12m,驱动段内径 0.15m,长

10m,卸爆段内径 0.35m,长 2.4m。它能够提供的喷管出口空气气流速度为马赫数 7.5。实验段气流宽度为 1.2m。

OMA 光学系统 SP-275 光谱仪内部有三块光栅,在实验中采用 600groove/mm 的光栅。PG-10 脉冲发生器控制 OMA 采集光谱的曝光时间和延迟时间。

### 3 实验结果

#### 3.1 标定曲线的获得

在进行标定实验时,首先将含一氧化氮 1.0%的混合气体充入标定容器内(光程为 0.078m),控制容器内的压强,利用 OMA 测量 Te 灯两条谱线的透射光强度随一氧化氮压强增加的变化曲线(图 3),采用最小二乘法拟合,得到一氧化氮对 Te 灯两条谱线的吸收系数。214nm 处的吸收系数为  $9.18 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ ,225nm 处的吸收系数为  $7.31 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1} \text{ Pa}^{-1}$ 。

#### 3.2 激波风洞的实验结果

氢氧爆轰驱动风洞驱动段采用氢氧混合比为 4:1 的气体为驱动气体,驱动段混合气体压力为 2MPa,低压段气体为空气,压力为 0.1MPa。

当每次实验时,由数据采集系统提供一个触发信号,触发 OMA 光学系统的 PG-10 脉冲发生器,PG-10 控制 OMA 采集光谱曲线。实验时 PG-10 触发脉冲的延迟时间为 7.5ms,脉冲宽度为 400μs,触发时刻位于 P<sub>5</sub> 压力随时间变化的平台段。因此,测量的光谱曲线为实验时刻的光谱。

由于 OMA 每次只能拍摄到一幅光谱。实验中气流的发射信号很强,因此,获得准确的吸收信号采用以下实验方法:

- (1) 实验前,首先测量 Te 灯相应谱线的发射强度(图 4 为归一化的 Te 灯发射光谱)。
- (2) 获得实验气流的发射光谱(图 5)。

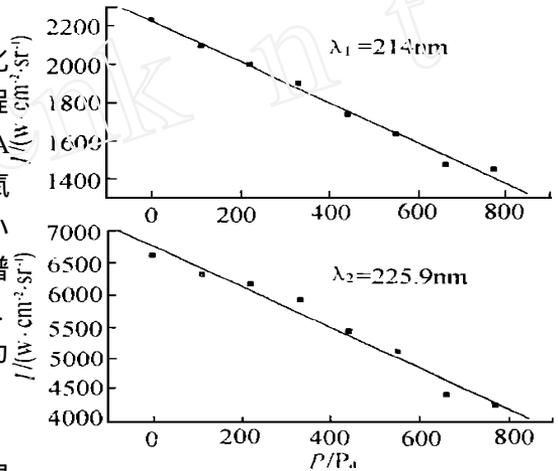


图 3 Te 灯谱线的透射光强随一氧化氮压强的变化曲线

Fig.3 The transmission light intensity vs pressure of nitric oxide for selected line of Te HCL

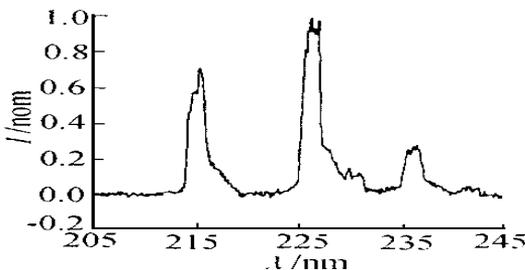


图 4 Te 灯的发射谱线  
Fig.4 The emission spectrum of Te HCL

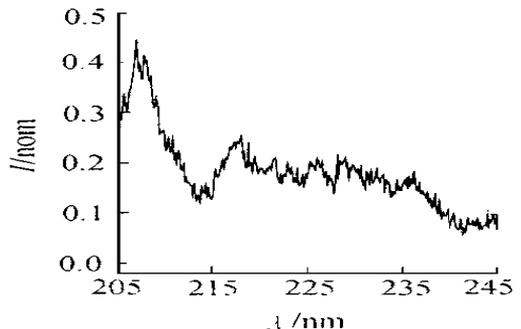


图 5 实验测得喷管出口气流的发射光谱  
Fig.5 The emission spectrum of gas flow at nozzle exit

(3)在确定 Te 灯相应谱线的发射强度后,利用 OMA 拍摄到同(2)相同参数的实验气流中一氧化氮对 Te 灯谱线的含气流发射信号的吸收光谱曲线(图 6)。

(4)用(3)得到的光谱曲线减去(2)中一氧化氮的发射光谱曲线,即为实验气流中一氧化氮对 Te 灯谱线的吸收光谱曲线(图 7)。

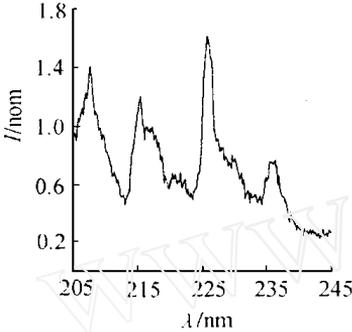


图 6 喷管出口的实验气流对 Te 灯谱线的吸收光谱

Fig. 6 The absorptive spectrum of gas flow to selected lines of Te HCL

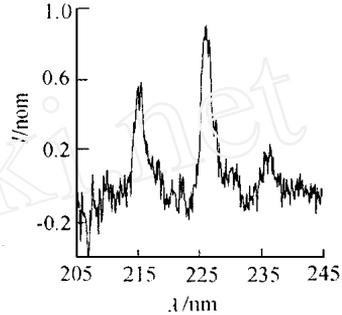


图 7 Te 灯的吸收光谱减去气流的发射光谱得到的光谱曲线

Fig. 7 The spectrum curve obtained from the absorptive spectrum of gas flow to selected lines of Te HCL minus the emission spectrum of gas flow at nozzle exit

表 1 给出了 Te 灯各工作谱线的归一化入射光强度和透射光强度值。由此,获得了气流中一氧化氮的分压和一氧化氮的浓度。

表 1 自由流中一氧化氮的含量

Table 1 The concentration of nitric oxide in free stream

Te 灯谱线	入射光强度	出射光强度	气流中 NO 分压	NO 含量
214nm	0.70	0.60	13.2Pa	3.33 %
225.9nm	1.00	0.88	13.0Pa	3.28 %

由表 1 可以得出,自由流中一氧化氮的浓度在 3 %左右。这一结果同文献[4]给出的结果是一致的。如果气流中别的组分对 Te 灯谱线有吸收的话,那么,自由流中一氧化氮的含量应不高于这一测量结果。

### 4 结 论

利用静态测量的一氧化氮对 Te 灯两条谱线的吸收系数和用 OMA 在激波风洞中得到的光谱数据,能推算出在激波风洞自由流中一氧化氮的最大含量值。

#### 参考文献:

[1] ALBERT Y C, EDWARD CR Jr, RONALD K H. Temperature measurements in shock tubes using a laser-based absorption technique. Applied Optics, 1987, 26(5) : 885 ~ 891.

[2] JAMES D I Jr, STANLEY R C 著. 光谱化学分析. 张寒琦等译. 吉林:吉林大学出版社,1996.

[3] MCGREGOR W K and Few J D. Resonance line absorption method for determination of nitric oxide Concentration. AEDC-TR-73-182.

[4] 泽尔道维奇, 莱依捷尔. 激波和高温流体动力学现象物理学. 北京:科学出版社,1985.

[5] ALBERT Y C, MICHAEL D R, DAVID F D, RONALD K H. Rapid Turning CW laser technique for measurements of gas velocity, temperature, pressure, density, and mass flux using NO. Applied Optics, 1984, 30(21) :1691 ~ 1698.