

# 高焓风洞自由流中一氧化氮含量的诊断<sup>1)</sup>

林贞彬 葛学贞 余西龙·竺乃宜 姜乃波 杨乾锁 郭大华  
(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** 介绍 JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞自由流中 NO 的诊断技术及其实验结果. 这里使用的是新研制的紫外波段的动态吸收光谱测量系统. 该系统以 Te 元素空心阴极灯为光源, 以 OMAIV 为探测设备, 通过标定, 获得一氧化氮  $\gamma$  带系 ( $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ ) 对 Te 两条谱线 214 nm 和 225 nm 的吸收特性, 得到在 NO 低含量时对两条谱线的吸收系数差别很大并呈非线性的特点. 利用这两条谱线吸收系数的差值, 用“差比法”对新建的高焓爆轰驱动激波风洞中自由流 NO 含量进行了诊断. 实验结果表明, 在总温 8500 K、总压 21.6 MPa 时 NO 含量甚微, 小于  $4 \times 10^{14}$  分子/cm<sup>3</sup>. 这一结果说明该风洞自由流处于化学准平衡状态.

**关键词** 一氧化氮  $\gamma$  带, 吸收光谱, 一氧化氮浓度, 自由流

## 前 言

随着航天飞行器速度的不断提高, 当它们返回地球大气层、或者进入别的星球大气圈时, 由于飞行器周围流场的温度非常高, 引发气体介质中化学反应等复杂的过程, 对飞行器性能产生重要影响. 高温气体介质性质的种种变化及其对流动特性的一系列影响统称为高温真实气体效应. 这方面的实验研究是当前与航天飞行密切相关的国际前沿研究领域.

为了开展高温真实气体效应研究并给我国新一代航天飞行器的研制提供相应的地面模拟设备, 在俞鸿儒院士主持下, 中科院力学所研制成功 JF-10 爆轰驱动激波风洞<sup>[1~3]</sup>, 这是一台新型的脉冲式高焓风洞. 它利用氢氧爆轰波产生的高温、高压气体为驱动气体, 建立高总焓及高驻室压力的气流状态. 这一风洞最核心的部分氢氧爆轰驱动激波管已经通过中国科学院和 863 项目的验收. 在此基础上, 我们对该风洞自由流性能开展实验研究工作.

由于这一设备的总温达到 8500 K, 驻室的气体介质发生氮与氧解离的化学反应, 并生成 NO 组分. 在气体经过喉道和喷管膨胀加速到高超声速时, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O, N 和 NO 各种组分发生平衡或非平衡的变化. 如果这一变化过程是平衡的, 那么实验段气流中的 O, N 和 NO 将消失, 气体组分将全部恢复到通常的空气. 但是如果气体中化学反应的过程是非平衡的, 那么残存的组分包含的一部分能量在一定程度上影响模拟实验结果. 因此需要研究该风洞自由流的非平衡程度. 这是高超声速实验中出现的新要求.

本文着重讨论采用光谱吸收技术诊断气流中 NO 的含量, 从而判断其非平衡程度.

对高焓风洞自由流 NO 组分的诊断国际上普遍采用的技术有 LIF (激光诱导荧光) 技术和吸收光谱技术. LIF 技术设备昂贵, 技术复杂, 尤其是在爆轰激波风洞中存在着强自发光, 给弱的荧光探测带来更大困难. 而吸收光谱技术的难度和经济上的压力都相对地小, 尤其是 NO

1999-09-13 收到第一稿, 2000-06-09 收到修改稿.

1) 中国科学院“九五”基础性研究重大项目和国家自然科学基金(19982005 和 10032050) 资助项目.

组分比较适合于使用吸收光谱法测量,这是因为 NO 的  $\gamma$  带吸收系数较高,容易被激发,它在很多 LIF 技术的应用中被用作示踪物就是很好的证明.当然,吸收光谱技术<sup>[4]</sup>是一种线测量技术(line of sight),它得出的结果是在介质吸收路径上的平均值.尽管如此,这种方法在高焓设备上诊断自由流 NO 组分仍是很受欢迎的.

把吸收光谱技术应用于高焓风洞自由流诊断的最大困难在于消除系统性的误差.在目前的实验条件下,设备中使用碳氢化合物薄膜,作为隔离激波管和喷管之间的膜片,在高温条件下不完全燃烧有可能产生微粒,此外设备上也可能烧蚀下一些金属微粒,这些少量的粒子混在气流中有可能遮挡掉一部分入射光.为了解决这个问题,我们采用了差比式的吸收光谱技术.

## 1 测量原理

光线通过均匀气体时,光的吸收由 Beer-Lambert 定律描述<sup>[5]</sup>

$$I_{\lambda} = I_{\lambda}^0 \exp(-k_{\lambda} \rho_{\text{abs}} l) \quad (1)$$

式中,  $I_{\lambda}^0$  为进入介质的波长为  $\lambda$  的光束强度;  $I_{\lambda}$  为射出介质后的光束强度;  $l$  为光束在介质中经过的路径长度 (cm);  $\rho_{\text{abs}}$  是对光束有吸收的组分密度;  $k_{\lambda}$  称为吸收系数,取决于浓度、介质的性质以及介质温度等.当导致吸收的分子跃迁的共振频率与光束频率相吻合时,即产生共振吸收时,  $k_{\lambda}$  的作用就明显地显现出来.对于组元分子不同量子数之间的跃迁这种吸收系数是由吸收线强度和吸收线型两个函数来描述,在我们的试验中, NO 谱线的吸收系数是在室温下通过实验确定的.

差比式的吸收光谱技术是使用对 NO 吸收灵敏度相差悬殊的两条独立的谱线同时进行测量.其中不敏感的谱线主要用于测定微粒等遮挡影响,而敏感谱线的输出信号中既有遮挡的影响,同时包含 NO 的吸收信号.这两条谱线透射光的比值,只与 NO 的吸收有关.

## 2 NO 紫外光谱特性和吸收谱线的选择<sup>[6]</sup>

NO 的吸收光谱是由电子态基态向较高能态的跃迁发生的,其中跃迁的第一电子激发态的吸收谱带为  $\gamma$  带,由于电子态的基态和第一激发态都是双重态,其表达式为  $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$ . 对应着不同的振动量子数  $v'$  (上) 和  $v''$  (下),谱线的吸收强度也不同,图 1 给出了 NO  $\gamma$  带系的跃迁谱线.按跃迁规则,转动量子数  $\Delta J = 0, \pm 1$ ,因而谱带中形成了 P( $\Delta J = -1$ ), Q( $\Delta J = 0$ ) 和 R( $\Delta J = +1$ ) 三个支结构,又因自旋量子数的方向不同,因而形成了分支结构,分别为 P11, P12, P21, P22, Q11, Q12, Q22, Q21, R11, R12, R22, R21, 如图 2 所示.每个分支中又有几十条精细结构,这样在  $\gamma$  带中就形成了二三百条的谱线序列,而每条的强度都不同.

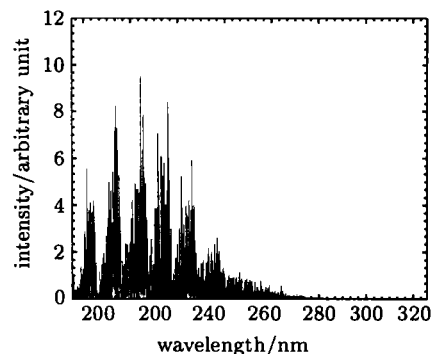


图 1 NO 紫外光谱图 ( $\gamma$  带系)  
Fig.1 Calculated line shape of nitric oxide ultraviolet spectroscopy ( $\gamma$  band)

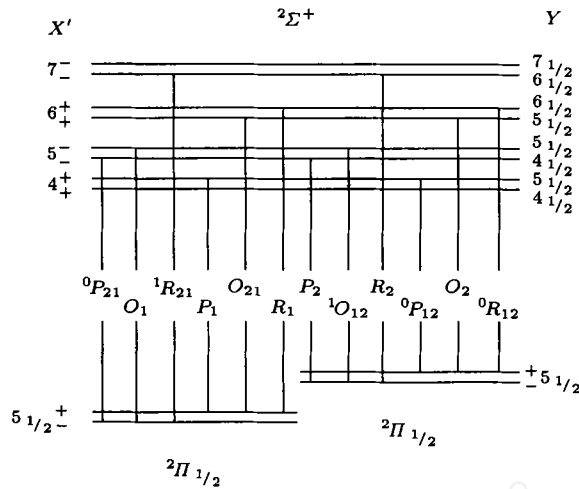


图 2 NO  $\gamma$  带  $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$  跃迁图  
 Fig.2 Nitric oxide  $\gamma$  band  $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$  transition

### 3 静态标定和 NO 吸收系数的确定 [5,7]

静态标定在一个静标腔体中进行, 通光长度为 1060 mm, 两端用石英玻璃窗口密封. 腔体上装有真空泵阀门、真空表和两个进气阀门, 分别用于注入含量 1% 的 NO 气体和稀释气体  $N_2$ . Te 空心阴极灯为锐线光源, 石英透镜将紫外光聚焦到光电倍增管 /OMA (optical multichannel analyzer) 探头的狭缝上, 如图 3 所示. 用光电倍增管分别加中心波长为 212 nm (用于 214 nm 线) 和 227 nm (用于 225.9 nm 线) 的窄带滤光片, 用 4 位数字电压表测得的结果与用 OMAIV 系统得到的结果是一致的. 其结果表明: NO 含量在  $2.42 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$  以上的  $\ln(I_0/I)$  值基本呈线性关系; 在低含量时 (低于  $2.42 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ ) 214 nm 线比 225.90 nm 线的吸收要强得多且呈非线性. 考虑到爆轰风洞自由流中 NO 的含量属低密度范围, 采用较长的通光长度  $L$  提高测量灵敏度, 同时用  $N_2$

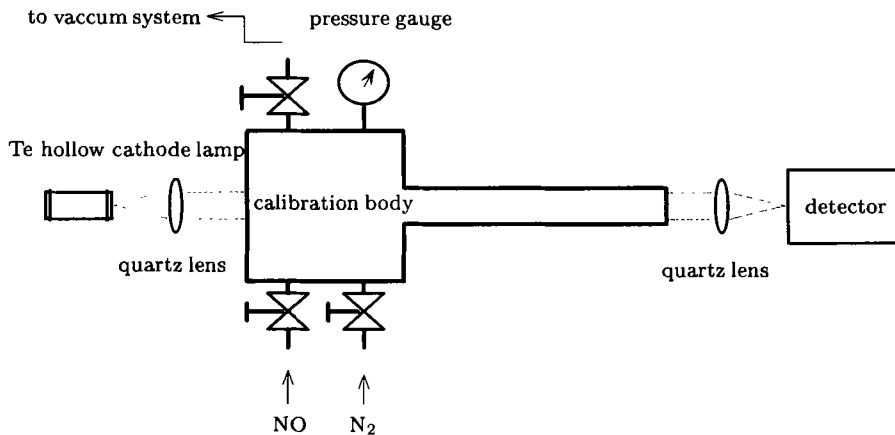


图 3 一氧化氮浓度测量的静态标定装置  
 Fig.3 Static calibration apparatus for Nitric Oxide concentration measurement

将 NO 含量为 1%、Ar 含量为 99% 的气体稀释提高  $\rho_{NO}$  读数精度. 利用 OMA IV 在低含量时同时测量这两条谱线的吸收特性, 这时 NO 最小检出量可达  $1.21 \times 10^{-6} \text{kg/m}^3$ . 图 4 是静态标定结果. 214nm 的标定曲线呈非线性是因为 Te 灯的 214nm 谱线实际是难以分辨的两条线: 214.28 nm 和 214.72 nm. 214.72 nm 线在少量 NO 吸收时起主要作用. NO 的 214 nm 和 225.9 nm 两条谱线在 NO 的密度低时吸收系数差得很大, 使得用“差比法”处理数据成为可能.

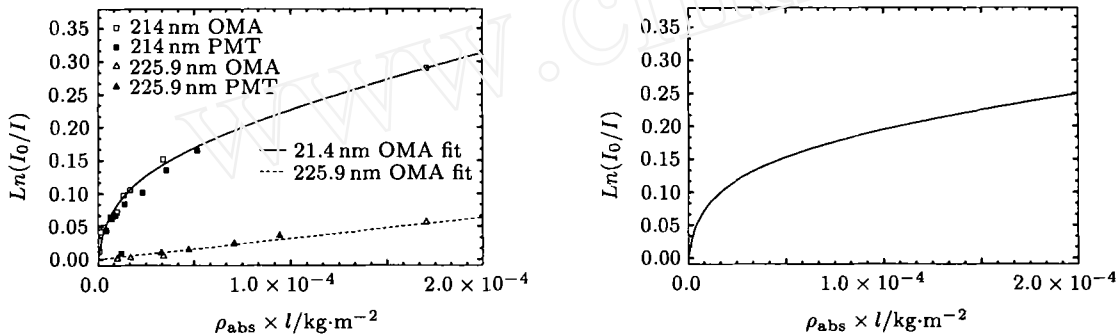
按 Beer-Lambert 定律, 对 Te 灯 214 nm 谱线

$$I_{214} = I_{214.28}^0 \exp(-k_{214.28} \rho_{NO} l) + I_{214.72}^0 \exp(-k_{214.72} \rho_{NO} l) \quad (2)$$

对 Te 灯 225.9 nm 谱线

$$I_{225.9} = I_{225.9}^0 \exp(-k_{225.9} \rho_{NO} l) \quad (3)$$

对 214 nm 线, 将静态测试的  $\ln(I_0/I)$  结果用 Beer-Lambert 公式双线混合强度关系拟合成一条曲线; 对 225.9 nm 用最小二乘法拟合成一条直线. 实验点和拟合关系都表示在图 4(a) 中. 所测得的对数“差值”吸收特性曲线示于图 4(b).



(a) 214 nm 和 225.9 nm 谱线的静标结果和拟合曲线

(a) Static calibration results of 214 nm and 225.9 nm and fitting lines

(b) 相减后得到的差值曲线

(b) Curve which 214 nm fitting line minus 225.9 nm fitting line

图 4 Te 灯两条谱线的静标结果

Fig.4 Static calibration results for selected lines of Te HCL

#### 4 激波风洞实验

JF-10 爆轰驱动激波风洞是中科院力学所新建成的新型风洞, 它的驱动段内径 150 mm, 长 10 m; 被驱动段内径 100 mm, 长 12 m; 喉道直径 18 mm, 喷管为锥形  $7^\circ 7'$ ; 出口直径 860 mm. 实验段与喷管相接, 内径 1200 mm, 长 3.5 m.

图 5 提供了这次实验运行状态在爆轰模式参数关系图中的位置. 图 6 提供了驻室压力 ( $P_5$ ) 随时间动态响应曲线. 从图上可以看到气流驻室压力较平坦的时间可以约为 1.5 ms. 表 1 列出本次实验高焓激波风洞运行状态各有关参数.

本次实验用直径为 50 mm 的石英紫外光学窗口. 光源 Te 空心阴极灯发射的紫外光经石英透镜形成平行光穿过实验段, 再将光线聚焦到 OMA 系统的 SP-275 光栅狭缝上, 光谱仪出口对准 ICCD 探头的敏感区. 本次实验光谱仪采用 600 groove/mm 光栅.

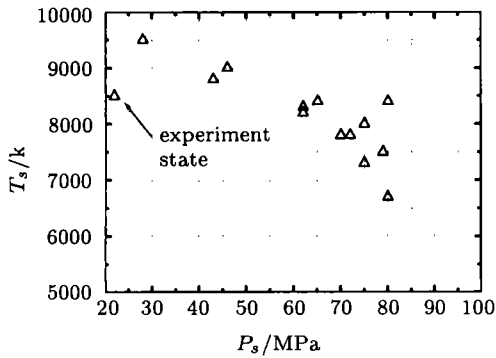


图 5 前向爆轰模式的  $P_5$ - $T_5$  关系图

Fig.5  $P_5$  versus  $T_5$  of forward detonation driven mode

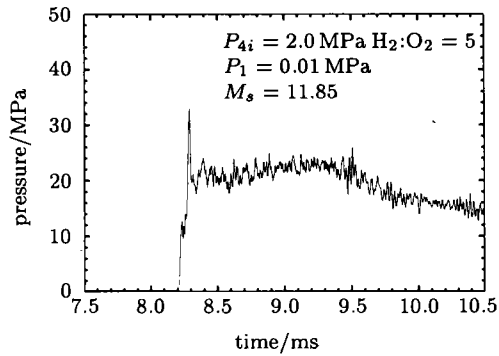


图 6 缝合贮室压力  $P_5$ - $T$  图

Fig.6  $P_5$  versus time at stagnation chamber

实验开始后，风洞被驱动段的压力传感器给出信号，经脉冲信号发生器形成一规则的触发信号，经适当延时后，在  $P_5$  压力的平台段，触发 OMA 系统的 PG-10 高压脉冲发生器，输出一高压脉冲，打开 ICCD 的电子快门，对气流曝光，曝光后由计算机控制采集光谱曲线，曝光时间为  $400 \mu s$ 。触发、延时与运行参数要配合好以取得高温、高压持续时间内的有效光谱信号。实验装置如图 7 所示。

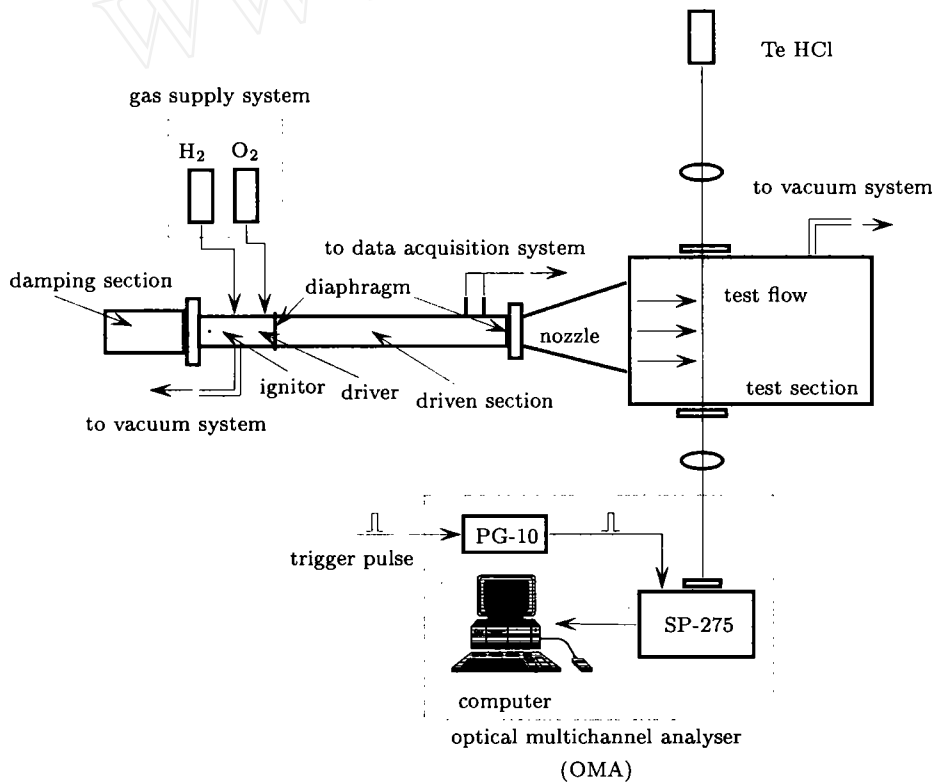


图 7 JF-10 氢氧爆轰激波风洞和一氧化氮浓度测量装置

Fig.7 JF-10 shock tunnel and nitric oxide concentration measurement system

表 1 氢氧爆轰驱动激波风洞实验运行状态参数

Table 1 Experimental running parameter of oxyhydrogen detonation driven shock tunnel

Parameters	Unit	Value
ratio of hydrogen to oxygen in gas mixture	-	4:1
initial pressure of oxygen-hydrogen mixture	MPa	2.0
initial pressure of driven gas	MPa	0.01
shock mach number in driven section	-	11.85
total pressure in stagnation chamber	MPa	21.6
total temperature in stagnation chamber	K	8500
total enthalpy in stagnation chamber	MJ/kg	19.7
useable test time	ms	1.5

## 5 实验结果

图 8, 图 9 是一组典型实验结果. 其中图 8 为 Te 灯实验前的两条发射谱线 214 nm 和 225.9 nm, 图 9 为吸收光谱扣除气流自发光后得到的实际吸收曲线. 图 9 与图 8 相比两个峰值幅度都有所下降, 这是因为: 爆轰风洞运行过程中, 自由流中含有有机物烟尘, 这是由尼龙膜片在高温下汽化引起的, 也许还有其他粒子存在. 实验后从试验段窗口的轻度污染可以看出, 烟尘对光线的衰减增加了“吸收”量. 它引起的衰减率对各波长应该是一样的.

为了避免上述因素的影响, 采取“差比法”处理数据. 计入实验段通光长度与标定时差别, 得到气流中 NO 浓度.

由图 8, 图 9 得到的数据利用“差比法”反推出的结果如表 2 所示.

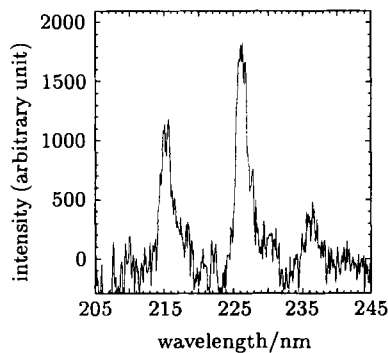


图 8 Te 灯的发射谱线

Fig.8 The emission spectrum of Te HCL

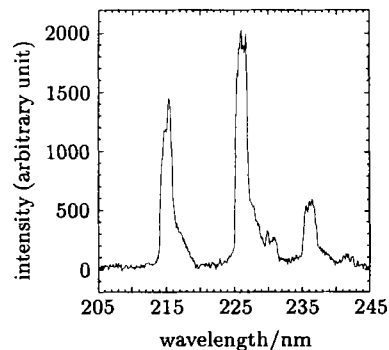


图 9 Te 灯的吸收光谱减去气流的发射光谱得到的光谱曲线

Fig.9 The spectrum curve which is obtained from the absorptive spectrum of gas flow to selected lines of Te HCL minus the emission spectrum of gas flow at nozzle exit

这一结果表明, 在 JF-10 爆轰驱动高焓激波风洞这一运行状态下, 虽然我们使用较低的总压, 自由流中残存的 NO 浓度还是很低. 这样微量的 NO 含量包含的能量与流体总能量相比很小, 不会对今后的模拟实验产生太大的影响. 考虑到风洞实验通常运行的总压比

表 2 风洞实验结果

Table 2 Experimental result of JF-10 shock tunnel operation

Selected lines of Te HCL	Normalized incident light intensity	Normalized transmission light intensity	Number density of nitric oxide molecule/cm <sup>3</sup>
214 nm	0.70	0.60	< 4.0 × 10 <sup>14</sup>
225.9 nm	1.00	0.88	

现在提高几倍, 自由流更加接近于平衡状态.

## 6 结 论

(1) 采用双谱线差比的测量方法, 把吸收光谱技术用于高焓风洞自由流非平衡程度的诊断是可行的.

(2) 用“差比法”处理在爆轰风洞上测得的光谱数据, 给出自由流中一氧化氮的含量. 在该实验状态下, 小于  $4 \times 10^{14}$  分子/cm<sup>3</sup>. 它表明该风洞自由流处于化学准平衡态.

到目前为止, 这项工作未能考虑自由流温度对测量结果的影响, 今后如果进一步提高光谱仪的分辨率, 同时测量含量和温度两个参数, 可能有助于解决这个问题.

**致谢** 这项任务在开展过程中得到学术带头人俞鸿儒院士的多方指导. 本课题组负责设备的同志林建民、赵伟、李仲发、谷家华四位副研究员在设备配套、状态调试和风洞运行中做出富有成效的贡献. 这一切是顺利开展风洞自由流测量、诊断的必不可少的前提条件. 本届 863 专家组成员王发民研究员、上届 863 专家组成员马家欢研究员对这项课题始终给予关心, 本实验室的技术人员王杰、王书庆、张小鹏三位同志为这项任务付出了艰辛的劳动. 在此表示由衷的感谢.

## 参 考 文 献

- 1 林贞彬, 郭大华, 竺乃宜, 葛学真, 余西龙, 杨乾锁, 姜乃波. 爆轰驱动激波风洞自由流的测量和诊断. IMCAS Report, STR99.005, 1999 (Lin Zhenbin, Guo Dahua, Zhu Naiyi, Ge Xuezheng, Yu Xilong, Yang Qiansuo, Jiang Naibo. Diagnostics and measurements of free stream in a detonation driven shock tunnel. IMCAS Report, STR99.005, 1999 (in Chinese))
- 2 俞鸿儒, 林建民, 赵伟, 李仲发, 谷家华等. 真实气体效应实验研究. (863-2-6-3-11) 项目研制报告 (二), 1998 (Yu Hongru, Li Jianmin, Zhao Wei, Li Zhongfa, Gu Jiahua, et al. Experimental investigation of real gas effect. 863-2-6-3-11 Project Report No.2, 1998 (in Chinese))
- 3 俞鸿儒, 林建民, 赵伟, 李仲发, 谷家华等. 真实气体效应实验研究. (863-2-6-3-11) 项目研制报告 (三), 1998 (Yu Hongru, Lin Jianmin, Zhao Wei, Li Zhongfa, Gu Jiahua, et al. Experimental Investigation of Real Gas Effect. 863-2-6-3-11 Project Report No.3, 1998 (in Chinese))
- 4 林贞彬, 郭大华, 葛学真, 竺乃宜, 余西龙, 杨乾锁, 姜乃波. 一氧化氮紫外吸收动态测量技术研究. 中科院力学所报告, STR98.008, 1998 (Lin Zhenbin, Guo Dahua, Ge Xuezheng, Zhu Naiyi, Yu Xilong, Yang Qiansuo, Jiang Naibo. Investigation of Absorptive spectroscopy technique for transient measurement of nitric oxide concentration. IMCAS Report, STR98.008, 1998 (in Chinese))
- 5 Albert YC, Edward Jr CR, Ronald KH. Temperature measurements in shock tubes using a laser-based absorption technique. *Applied Optics*, 1987, 26(5): 885~891
- 6 Mcgregor WK, Few JD. Resonance line absorption method for determination of nitric oxide concentration. AEDC-TR-73-182, 1973

7 Albert YC, Michael DR, David FD, Ronald KH. Rapid tuning CW laser technique for measurements of gas velocity, temperature, pressure, density, and mass flux using NO. *Applied Optics*, 1984, 30(21): 1691~1698

## THE NITRIC OXIDE CONCENTRATION DIAGNOSTICS IN FREE STREAM OF A HIGH ENTHALPY SHOCK TUNNEL <sup>1)</sup>

Lin Zhenbin      Ge Xuezheng      Yu Xilong      Zhu Naiyi      Jiang Naibo

Yang Qiansuo      Guo Dahua

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

**Abstract** The paper is concerned with ultraviolet absorptive spectroscopy measurement system for concentration measurement of nitric oxide in free stream of a high enthalpy shock tunnel and test result. Our system employs Te hollow cathode lamp as light source and OMAIV as detection device. The absorptive properties of NO  $\gamma$  band ( $A^2\Sigma^+ \leftarrow X^2\Pi$  transition) versus selected lines of Te HCL (214 nm and 225 nm) are measured on static condition. The static investigation shows that difference between two absorptive coefficients is remarkable and nonlinear when the density of nitric oxide is less than  $2.42 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ . The scheme is used to process data which were acquired during operation of JF-10 shock tunnel and concentration of nitric oxide in free stream is determined. The concentration of nitric oxide in free stream is less than  $4.0 \times 10^{14}$  molecular/cm<sup>3</sup> when total temperature is 8500 K and total pressure is 21.6 MPa. It is concluded that property of free stream can satisfy future real gas effect simulation test.

**Key words** NO  $\gamma$  band, absorptive spectroscopy, concentration of nitric oxide, free stream

Received 13 September 1999, revised 9 June 2000.

1) The project supported by the Fundamental Research Foundation of CAS and the National Natural Science Foundation of China (19982005, 10032050).