

# 中红外吸收光谱测量激波风洞自由流中 NO 浓度和温度

曾徽, 余西龙, 李飞, 林鑫, 张少华, 张新宇

(中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京海淀区 100190)

**摘要:** 针对 JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞内的高焓来流, 利用可调谐二极管吸收光谱技术 (TDLAS), 对自由流中一氧化氮浓度和温度进行测量。利用  $1909.782019\text{ cm}^{-1}$  吸收线, 在  $2\text{ kHz}$  的扫描频率下, 采用直接吸收-波长扫描法进行温度和浓度测量。

**关键词** 可调谐二极管吸收光谱 (TDLAS), 浓度测量, 温度测量, 激波风洞

## 引言

高超声速飞行器再入大气层, 与大气发生强烈摩擦作用, 使得飞行器周围流场温度剧烈升高, 引起气体部分电离和离解, 此时飞行器周围存在非平衡化学效应。为次, 利用 JF-10 高焓激波风洞, 采用氢氧爆轰的驱动方式产生高焓、高速气流, 以开展地面模拟实验。目前, 对于激波风洞内气流参数的测量中, 光学诊断技术由于其非侵入测量、对流场无干扰的优点得到了广泛的应用。本实验中, 激波风洞来流速度很高, 达到马赫 8, 试验段有效运行时间为毫秒量级, 因此要求测量手段有很高的时间响应, 吸收光谱技术可满足以上要求。采用可调谐二极管吸收光谱技术 (TDLAS) 已经广泛应用于激波管、激波风洞等大型风洞设备, 对温度、浓度进行测量[1]。

本实验使用  $1909.782019\text{ cm}^{-1}$  吸收线组成直接吸收-波长扫描 TDLAS 测量吸收。扫描频率为  $2\text{ kHz}$ , 测量总时间为  $99\text{ }\mu\text{s}$ 。

## 试验方法

### 1.1 基本原理

直接吸收光谱的基本理论已经得到研究者的深入研究[2,3]。一束频率为  $\nu$  的激光通过待测流场, 前后光强发生变化, 入射光强和出射光强满足 Beer-Lambert 定律:

$$\left(\frac{I}{I_0}\right)_\nu = \exp(-k_\nu L) \quad (1)$$

其中  $I_0$  为入射光强,  $I$  为出射光强,  $L(\text{cm})$  表示吸收长度,  $k_\nu$ : 吸收系数,  $k_\nu$  满足:

$$k_\nu = PX \cdot S(T) \cdot \phi(\nu) \quad (2)$$

$$\alpha_\nu = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = k_\nu L \quad (3)$$

$P[\text{atm}]$  表示静压,  $X$ : NO 组分浓度, 测量时用  $PX$  表示 NO 的分压;  $S(T)[\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}]$  表示吸收谱线的线强度;  $\phi(\nu)$  表示线型函数, 与温度和压力有关,  $\phi(\nu)$  满足  $\int \phi(\nu) d\nu = 1$ 。

$\alpha_\nu$  表示光谱吸收率。既然线型函数  $\phi(\nu)$  满足积分为 1, 对公式 (3) 积分, 可得积分吸收率  $A$ :

$$A = \int \alpha_\nu d\nu = PX \cdot S(T) \cdot L \quad (4)$$

本实验中试验段压力较低, 加宽机制中多普勒加宽占据主导, 因此, 线型函数可以高斯线型函数表示:

$$\phi(\nu) = \frac{2}{\Delta\nu_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \exp\left\{-4 \ln 2 \left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2\right\} \quad (5)$$

其中  $\Delta v_D$  是谱线半宽，由于多普勒频移， $\Delta v_D$  可通过热运动速度获得：

$$\Delta v_D = v_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}} = 7.1623 \times 10^{-7} v_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (6)$$

$v_0 [cm^{-1}]$  为吸收谱线中心频率， $T[K]$  为温度， $M[a.m.u]$  是吸收组分的摩尔质量。由公式 (6) 可见，对单一组分的单一吸收线，温度与多普勒半宽之间满足线性函数关系：

$$T = M \left( \frac{\Delta v_D}{7.1623 \times 10^{-7} v_0} \right)^2 \quad (7)$$

实验时，选取  $1909.782019 \text{ cm}^{-1}$  吸收线，分别对激波风洞自由流和已知浓度 (NO: 1.05%, 总压: 659Pa) 和温度 (288K) 的吸收池进行吸收测量。对吸收谱线进行高斯拟合，得到两组实验中谱线的多普勒半宽，结合自由流和吸收池的多普勒加宽之比与吸收池的温度 (288K)，即可得到自由流的温度。

浓度测量中采用与温度测量同样的办法，高斯拟合后得到两组实验的积分吸收率，由公式 (4) 可知：

$$\frac{A_f}{A} = \frac{(PX)_f \cdot S(T_f) \cdot L_f}{PX \cdot S(288K) \cdot L} \quad (8)$$

$A_f, A$  分别表示自由流和吸收池的积分吸收率 (积分面积)，谱线强度  $S(T)$  是温度的单值函数：

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left( \frac{T_0}{T} \right) \exp \left[ -\frac{hcE'}{k} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \cdot$$

$$\left[ 1 - \exp \left( \frac{-hcv_0}{kT} \right) \right] \left[ 1 - \exp \left( \frac{-hcv_0}{kT_0} \right) \right]^{-1}$$

$Q(T)$  是组分的配分函数，可用温度的三次多项式表示。因此，确定温度后即可得到线强度的值，最后即可得到 NO 的分压。

## 1.2 实验装置

本实验是在 JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞试验段内完成，JF-10 激波风洞的运行参数参数见文献[5]。

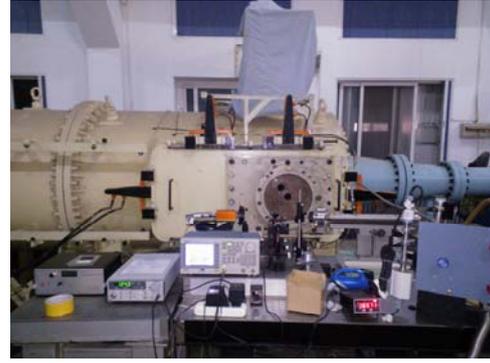


图 1 激波风洞 TDLAS 实验布局

TDLAS 测量系统主要包括：5.2  $\mu\text{m}$  中心波长激光器和温度控制器 (ALPES)，电流控制器型号是 ILXLightwave, LDX-3232。信号发生器 (Tektronix)。频率响应为 10MHz 的 InGaAs 红外探测器和示波器 (Tektronix; DPO 4032)。激光器控制器通过改变温度和电流来调节激光器的输出波长和功率。本实验中，通过标定确定所选谱线，对于激光器控制器的参数：温度  $-2.5^\circ\text{C}$ ，电流  $124.4 \text{ mA}$ ，然后锯齿波信号发生器通过衰减器衰减信号，输出电压信号进行调制。

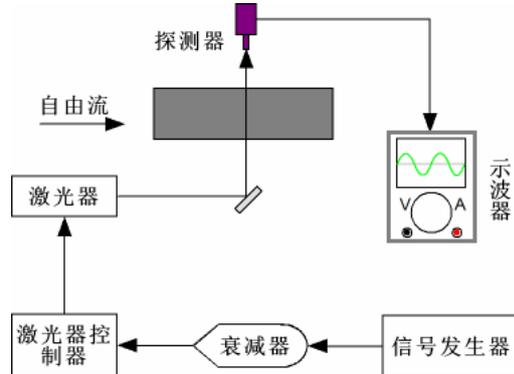


图 2 TDLAS 测量系统示意图

5.2  $\mu\text{m}$  附近吸收光谱的计算可以通过 HITRAN 数据库获得[4]。温度分别用 296K 和 1000K, 压力  $P = 1 \text{ kPa}$ ，吸收长度  $L = 20 \text{ cm}$ ，NO 的浓度为  $X = 0.01$ ，吸收谱线见图3：

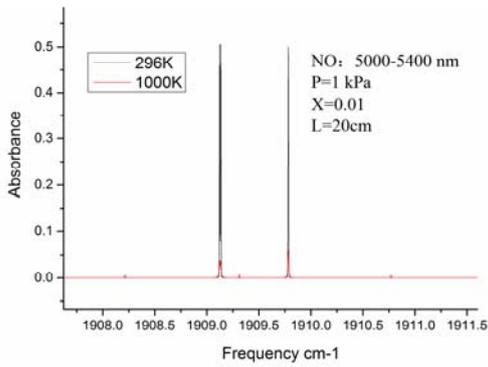


图 3 296K, 1000K 下谱线吸收率

### 实验结果和分析

图 4 是在激波风洞和吸收池中分别获得的 1909.782019  $cm^{-1}$  线原始吸收扫描数据。信号发生器的输出频率为 2kHz，电压为 500mV 的信号，通过 100 倍衰减器衰减，输出仅为 5mV 的信号。示波器采样频率为 10MHz，每个扫描周期可记录 5000 个数据点。鉴于自由流原始吸收信号信噪比不高，可对数据进行 5 次平均，从而获得更高的信噪比。

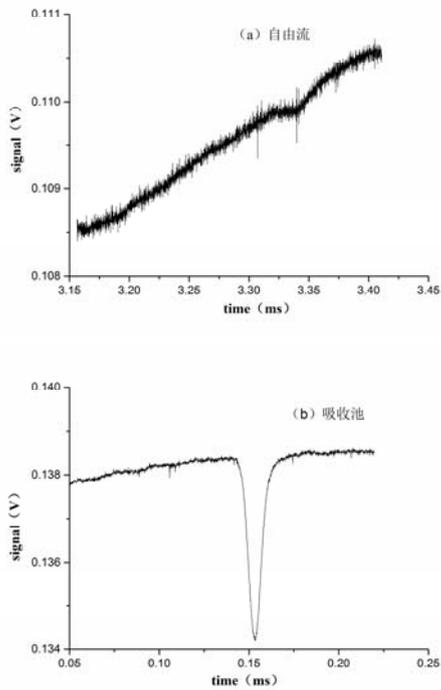


图 4 原始吸收信号(a) 自由流；  
(b) 吸收池

拟合并扣除基线，对谱线进行高斯拟合，图 5 和图 6 分别是自由流中起激波波后和有效运行时间内谱线的拟合图：

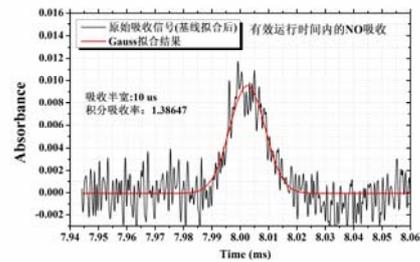
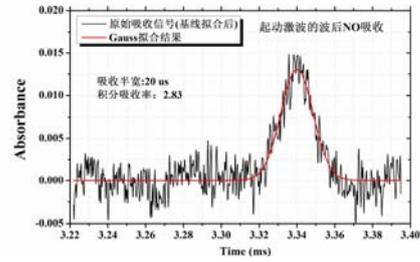


图 5 自由流吸收谱线高斯拟合

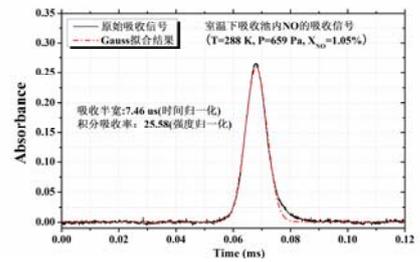


图 6 吸收池吸收谱线高斯拟合

图 5 中起激波波后和有效运行时间内吸收线的峰值分别为 15% 和 10%，图 6 中吸收池谱线峰值吸收为 25%，都满足强吸收的要求，也显示出波长扫描法可以满足实验要求。对多个时间点进行数据处理，获得了自由流温度和 NO 浓度随时间的变化趋势。见图 7。从图 (7a) 中可以得到激波波后的温度为 2516K，激波过后，自由流温度迅速降低，在 500K 附近震荡；图 (7b) 中 NO 的浓度在起激波抵达时达到最大值，约为 17Pa，之后迅速降为 0，激波过后约 3ms 后，自由流逐步达到稳定状态。

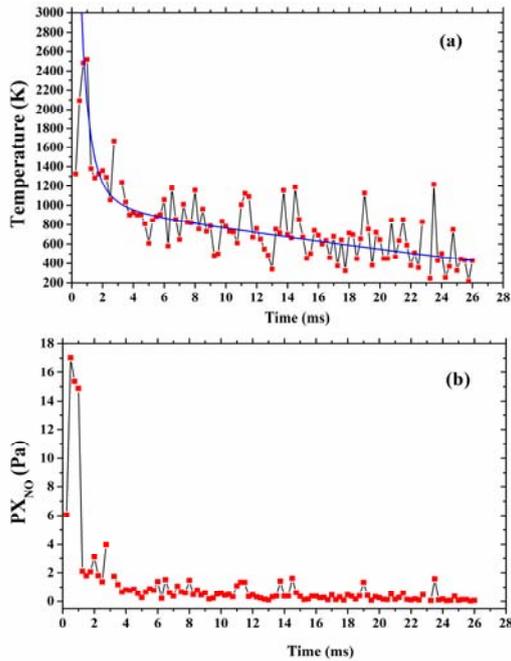


图 7 (a)温度变化；(b) NO 浓度变化

## 结论

本实验应用  $5.2 \mu\text{m}$  中心波长中红外激光器建立一套 TDLAS 测量系统。采用波长扫描法，在  $2\text{kHz}$  的扫描频率，对 JF-10 激波风洞自由流的温度和 NO 的浓度进行了测量，得到了自由流温度和 NO 浓度随时间的变化。实验测量的结果可以有如下结论：

- (1) 温度随时间的变化显示了试验段内自由流的变化趋势。但是激波过后，温度仍然有明显的上下震荡，有较大的测温误差，后续实验有进一步改进的空间。同时，测得的激波波后温度低于实际的温度值，这是因为采用吸收光谱测得温度值是沿光程的平均值，自由流的冷流区造成测量的温度值偏小；
- (2) 本实验测得了激波波后自由流中 NO 的浓度，约为  $17\text{Pa}$ ，有助于定量理解激波过后气体电离、离解过程。同时，激波过后，NO 浓度迅速降为 0，且保持稳定，显示出该套 TDLAS 测量系统已经可以满足风洞内组分的浓度测量。

## 参考文献

- 1 李飞. 近红外吸收光谱诊断技术在超燃研究中的应用[D]. 北京. 中国科学院力学研究所. 2009
- 2 Baer, D. S., V. Nagali, E. R. Furlong, R. K. Hanson, and M. E. Newfield. "Scanned-and fixed-wavelength absorption diagnostics for combustion measurements using multiplexed diode lasers." *AIAA journal* 34, no. 3 (1996): 489-493.
- 3 Nagali, V., S. I. Chou, D. S. Baer, R. K. Hanson, and J. Segall. "Tunable diode-laser absorption measurements of methane at elevated temperatures." *Applied optics* 35, no. 21 (1996): 4026-4032.
- 4 Rothman, Laurence S., Iouli E. Gordon, Alain Barbe, D. Chris Benner, Peter F. Bernath, Manfred Birk, Vincent Boudon et al. "The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database." *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 110, no. 9 (2009): 533-572.
- 5 林贞彬, 郭大华, 竺乃宜, 等. JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞自由流的测量和诊断[J], 2000

**Nitric oxide concentration and temperature measurement for shockwave tunnel free stream using mid-infrared absorption spectroscopy**

Zeng Hui Yu Xilong Li Fei Lin Xin Zhang Shaohua Zhang Xinyu

(1 Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, C A S, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

**Abstract :** Tunable diode absorption spectroscopy(TDLAS) is used for temperature and concentration measurement of nitric oxide in the free-stream yielded by the JF-10 shock tunnel which is driven by detonation. Using direct absorption-wavelength scanning method measure the temperature and concentration under 2kHz scanning frequency .

**Key words :** TDLAS, temperature measurement, concentration measurement, shockwave tunnel