

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, 张少华

(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 100190)

摘要: JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞内的高焓自由来流气体中含有因电离和离解等非平衡过程产生的微量组分。利用可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS),对自由流中 NO 微量组分的浓度和温度进行测量,有助于定量理解气体电离和离解这一非平衡过程。本实验中, JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞实验段内压力为百帕量级,在谱线加宽中多普勒加宽占据主导,多普勒半高宽可由分子平均热运动速度获得,其半高宽与温度的平方根成正比,因此选取一条吸收谱线并准确测定其多普勒半高宽即可得到温度和浓度。本实验中采用中红外量子级联激光器(Quantum Cascade Laser),选取 1909.7cm^{-1} 附近 6 条吸收线作为吸收线,在 2kHz 的扫描频率下,采用直接吸收-波长扫描法进行 NO 温度和浓度测量。实验测得自由流中 NO 平均分压约为 0.33Pa,自由流平均温度约为 600K。

关键词: 可调谐二极管激光吸收光谱;浓度;温度;测量;激波风洞

中图分类号: V231.2 文献标识码: A

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

Zeng Hui, Yu Xilong, Li Fei, Zhang Shaohua

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, JF-10 shock tunnel is driven by H_2/O_2 detonation and the free-stream contains some trace components which are generated by non-equilibrium processes such as ionization and dissociation. Tunable diode absorption spectroscopy (TDLAS) is used for temperature and concentration measurement of nitric oxide in the free-stream and this quantitative measurement is helpful to understand the non-equilibrium processes. In the experiments, the test section's static pressure of JF-10 shock tunnel is just several hPa. Thus, Doppler broadening dominates, which is caused by random thermal motion of the absorber species. The half width of Doppler broadening is temperature dependent and this functional relation provides a method for gas temperature and species concentration measurement. A mid-infrared quantum cascade laser of $5.2\mu\text{m}$ central wavelength is used and gas temperature and nitric oxide concentration are measured using a single line of 1909.7cm^{-1} wavelength by direct absorption-wavelength scanning method under 2kHz scanning frequency. The measured partial pressure of nitric oxide is about 0.33Pa which represents its concentration and the temperature is about 600K in the free-stream.

Keywords: TDLAS; concentration; temperature; measurement; shock tunnel

0 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。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,可以开展地面模拟实验^[1]。本实验中,激波风洞来流速度很高,达到马

收稿日期: 2014-04-15;修订日期: 2014-08-20

* 通信作者 E-mail: zenghui@imech.ac.cn

引用格式: Zeng H, Yu XL, Li F, et al. Nitric oxide concentration and temperature measurement for shock tunnel free stream using mid-infrared absorption spectroscopy. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2015, 29(2): 79-83. 曾 徽, 余西龙, 李 飞, 等. 中红外吸收光谱测量激波风洞自由流中 NO 浓度和温度. *实验流体力学*, 2015, 29(2): 79-83.

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非常高的时间响应, 吸收光谱技术可满足以上要求。同时, 吸收光谱诊断技术具有非接触式测量、对流场无干扰等优点, 因此得到了越来越多的研究^[2]。国外采用可调谐二极管激光吸收光谱技术 (TDLAS) 已经广泛应用于激波管、激波风洞等大型风洞设备中温度、组分浓度的定量测量, R. K. Hanson 等人利用 TDLAS 对 H_2O 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 等多种燃烧组分的浓度和温度进行了测量^[3-8], 准确获得燃烧组分浓度和气流温度, 这对于了解高超声速实验中气流状态有重要意义。国内中国科学院力学研究所利用 TDLAS 测量了超燃直联台燃烧室入口气流参数^[9-10], 可作为评估燃烧效率以及安排释热分布的定量指标。近年来, TDLAS 测量技术已经成为了国际上广泛应用的燃烧测量手段。本文的工作基于航天工程需求, 需要了解高超声速飞行器再入大气层中气体电离和离解所产生微量组分的浓度。因此, 本实验采用中红外量子级联激光器, 利用 TDLAS 诊断方法对 JF-10 高焓风洞地面模拟实验中自由流 NO 微量组分的浓度和自由流温度进行了测量。

1 试验方法

1.1 基本原理

吸收光谱的基本理论已经得到了深入的研究^[11-12]。其基本原理可以简述为: 一束频率为 ν 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 表示吸收长度 (cm), k_ν 为吸收系数。 k_ν 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 表示静压 (atm), X : NO 组分分数, 测量时用 PX 表示 NO 的分压, 浓度以分压的形式表示; $S(T)$ 表示吸收谱线的线强度 ($cm^{-2} \cdot atm^{-1}$); $\phi(\nu)$ 表示线型函数, 与温度和压力有关, $\phi(\nu)$ 满足 $\int \phi(\nu) d\nu = 1$ 。 α_ν 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, 试验段气流压力百帕

量级, 气流温度在 400~2500K 区间变化, 依据当前实验条件计算, Lorentz 半高宽仅为 Gauss 半高宽的 0.5%~3.6%, 加宽机制中多普勒加宽占据主导, 如图 1 所示。

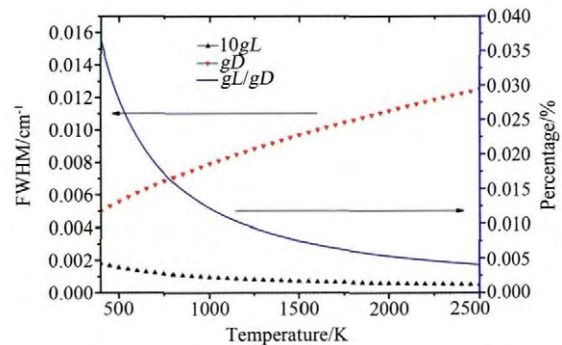


图 1 高斯加宽和洛伦兹加宽随温度变化
Fig. 1 Gauss and Lorentz broadening under temperature variation

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: $\Delta\nu_D$ 是谱线半高宽, 由于多普勒频移, $\Delta\nu_D$ 可通过热运动速度获得:

$$\Delta\nu_D = \nu_0 \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}} = 7.1623 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}} \quad (6)$$

ν_0 为吸收谱线中心频率 (cm^{-1}), T 为温度 (K), M 是吸收组分的摩尔质量 (a. m. u)。由公式(6)可见, 对单一组分的单一吸收线, 温度与多普勒半高宽之间满足如下函数关系:

$$T = M \left(\frac{\Delta\nu_D}{7.1623 \times 10^{-7} \nu_0}\right)^2 \quad (7)$$

实验时, 选取 1909.7 cm^{-1} 附近 6 条吸收线, 6 条吸收线的参数见表 1。从表 1 可以看到, 6 条吸收线之间非常接近, 实验条件下会相互叠加, 计算得到 6 条相互叠加吸收线的半高宽与单条吸收线的半高宽之间只有 2% 的差异, 带来的测温误差为 4%, 且低能级能量和自加宽系数几乎完全相同, 可等效为 1 条吸收线, 其吸收系数为 6 条吸收线系数的叠加。选取该吸收线, 对激波风洞自由流和已知浓度 (NO: 1.05%, 总压: 659 Pa) 和温度 (288 K) 的标准吸收池进

表 1 NO 吸收线及其参数

Table 1 NO line parameters

频率/ cm^{-1}	线强度/ $(cm^{-2} \cdot atm^{-1})$	低能级能量/ cm^{-1}	自加宽系数 γ
1909.78195	0.18193	289.95	0.0652
1909.78209	0.16527	289.95	0.0652
1909.78207	0.15014	289.95	0.0652
1909.78338	0.18193	289.95	0.0652
1909.78342	0.16527	289.95	0.0652
1909.78347	0.15014	289.95	0.0653

行吸收测量。对吸收谱线进行高斯拟合, 得到 2 组实验中谱线的多普勒半高宽, 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 2 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:

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T}\right) \exp\left[-\frac{hcE'}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \cdot [1 - \exp\left(-\frac{hc\nu_0}{kT}\right)][1 - \exp\left(\frac{hc\nu_0}{kT_0}\right)]^{-1} \quad (9)$$

$Q(T)$ 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见文献[1]。

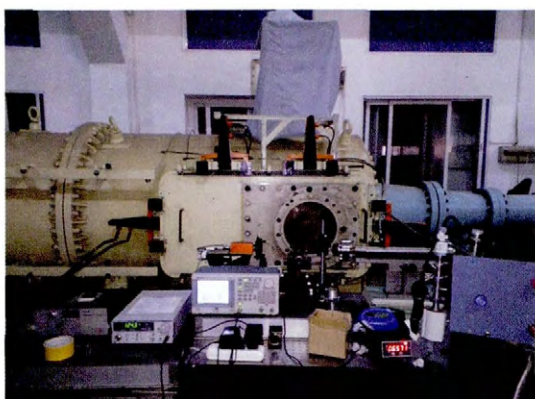


图 2 JF-10 激波风洞实验布局
Fig. 2 Experimental setup of JF-10 measurement

TDLAS 测量系统主要包括: $5.2\mu\text{m}$ 中心波长量子级联激光器和温度控制器(ALPES); 电流控制器: ILXLightwave, LDX-3232; 信号发生器(Tektronix); InGaAs 红外探测器(频率响应为 10MHz); 以及示波器(Tektronix, DPO4032)。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, 激光器控制器的参数为: 温度 -2.5°C , 初始电流 124.4mA, 信号发生器产生锯齿波信号输入激光器控制器, 改变电流对激光器输出波长进行调谐。

$5.2\mu\text{m}$ 附近吸收光谱的计算可以通过 HIT-RAN2008 数据库获得^[13]。温度分别选用 296 和 1000K, 压力 $p=1\text{kPa}$, 吸收长度 $L=20\text{cm}$, NO 的浓度 $X=0.01$, 吸收谱线如图 4 所示。

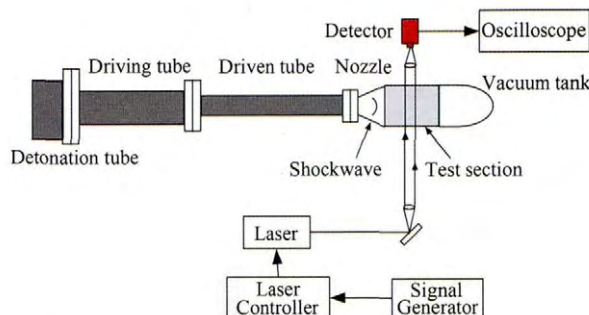


图 3 TDLAS 测量系统示意图
Fig. 3 Schematic of TDLAS experiment

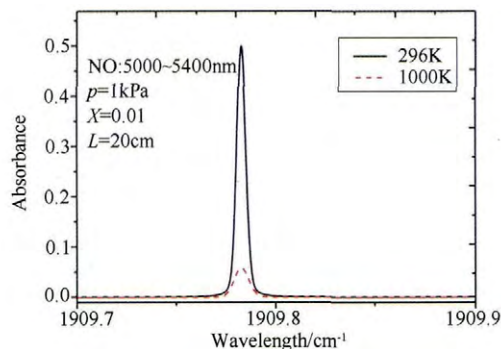


图 4 296K, 1000K 下谱线吸收率
Fig. 4 Line absorbance at 296K, 1000K

2 实验结果和分析

图 5 是在激波风洞和吸收池中分别获得的 1909.7cm^{-1} 附近吸收谱线原始吸收信号。信号发生器的输出频率为 2kHz, 电压为 500mV 的锯齿波信号。示波器采样频率为 10MHz。

图 6 是通过 Origin 软件手动处理后自由流中启动激波波后和有效运行时间内单个周期的吸收率和拟合曲线。图 6 中启动激波波后和有效运行时间内峰值吸收率分别为 1.5% 和 1%, 信噪比不高, 仅有 2~3。不过, 本实验是通过积分吸收率获得自由流量参数, 而多次实验得到的原始吸收信号可以拟合得到稳定的 Gauss 曲线, 能获得较好重复性的积分吸收率, 因此我们判断此信噪比下获得的实验结果仍能较好地反映激波风洞自由流的真实情况。分析造成这种波动的主要原因, 可以归纳为 2 点: (1) 激波风洞尺度大, 噪声信号很难抑制; (2) 自由流湍流脉动, 气流梯度引起光线偏折。实际上, 这种波动很难避免, 这也是 TDLAS 应用于大尺度、脉冲高超设备的通病。在实际数据处理中需要通过 F-P 腔进行标定, 将时域坐标转换为频域坐标, 如图 7(b) 所示。图 8 是自由流温度和 NO 浓度(分压)随时间的变化趋势, 实线代表温度和 NO 分压的实际变化值, 虚线代表 4~26ms 自由流平均温度和 NO 平均分压的走势, 图 8(b) 给出了 NO 分压的局部放大图。从图中可以看

到,激波波后的温度为 2500K 左右,激波过后,温度迅速降低。4~26ms 内自由流温度在 400~1000K 之间波动,特别在11~20ms这段时间气流平均温度

趋于稳定,维持在600K左右,之后气流温度逐步降低,可以判断激波风洞自由流有效运行时间内气流温度值在600K左右。图8(b)中NO分压在起动激波

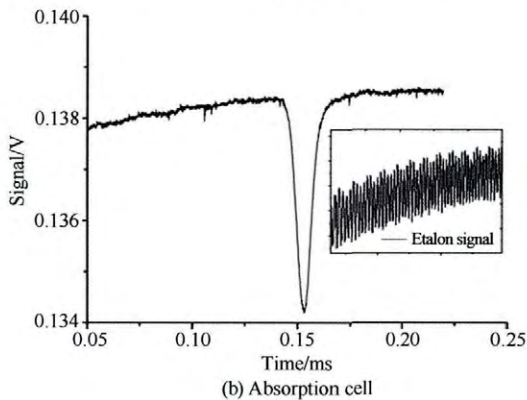
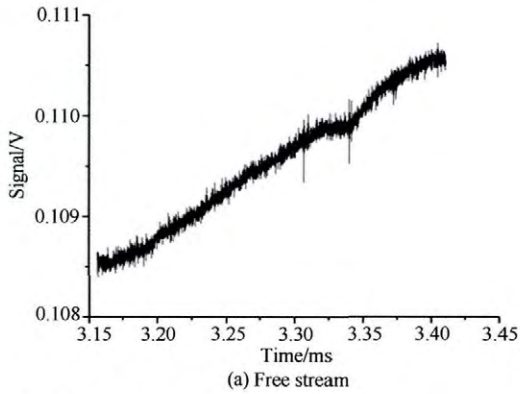


图 5 原始吸收信号
Fig. 5 Raw signal

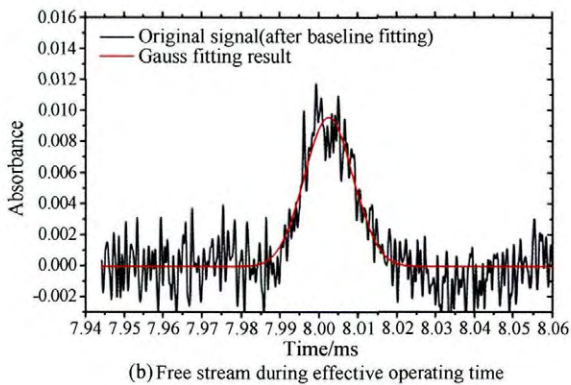
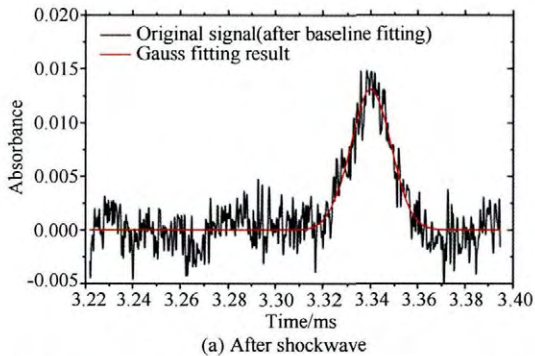


图 6 JF-10 实验吸收率
Fig. 6 Absorbance in JF-10

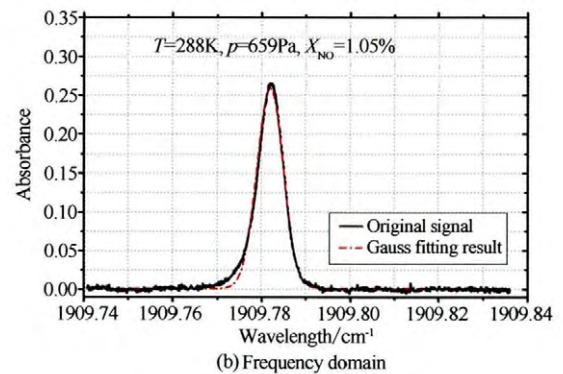
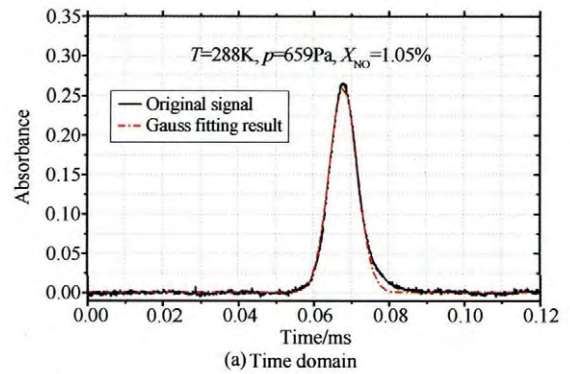


图 7 吸收池内吸收率
Fig. 7 Absorbance in absorption cell

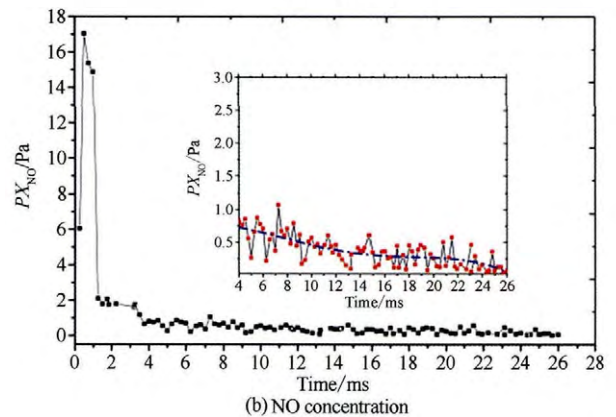
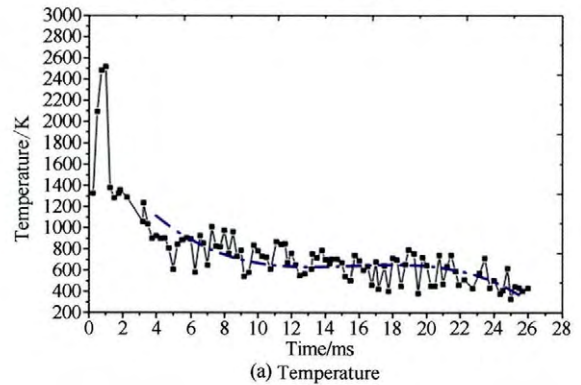


图 8 自由流温度和 NO 浓度
Fig. 8 Temperature and nitric oxide concentration profile

到达时达到最大值,约为 17Pa,之后迅速回落。从 4~26ms 内 NO 分压的局部走势图可以看到,自由流中 NO 分压逐渐降低,具体数值从 1.08Pa 降到 0.03Pa。通过数据统计,此段时间内自由流中 NO 分压平均值为 0.37Pa。进一步分析可以得到在 11~20ms 气流温度较稳定的这段时间,NO 分压的平均值为 0.33Pa。因此,气流平均温度 600K 和 NO 平均分压 0.33Pa 可以表征激波风洞有效运行时间内自由流的参数。

3 结 论

本实验采用 5.2 μ m 中红外量子级联激光器,利用 TDLAS 测量方法对 JF-10 激波风洞自由流中 NO 浓度和气流温度进行了测量。实验测量结果显示:

(1) 温度测量结果显示自由流平均温度在 11~20ms 时间内稳定在 600K 左右,之后逐渐降低,同时,实验测得的激波波后温度为 2500K 左右,低于实际温度值,造成温度值偏低的原因是因为吸收光谱测量获得的温度值是沿光程的线平均,激波风洞试验段中贴近壁面的冷流区会拉低平均温度值;

(2) NO 浓度(分压)测量结果显示了激波风洞有效运行时间内 NO 微量组分的变化趋势。自由流中 NO 分压逐渐降低,从 1.08Pa 降低到 0.03Pa,整段时间内 NO 分压平均值为 0.37Pa。同时,对应 11~20ms 自由流温度较稳定这段时间内 NO 分压平均值为 0.33Pa。

本实验的测量结果表明激波风洞有效运行时间内自由流参数可以用 600K 平均气流温度、NO 平均分压 0.33Pa 表征,实验结果能反映激波风洞自由流的真实情况,显示了中红外 TDLAS 技术对此类高超设备气流微量组分的测量能力以及应用前景。同时,从实验结果来看,除了激波风洞气流不均匀引起的湍流脉动,温度和 NO 分压测量值的脉动仍然较大,后续实验可以采用波长调制吸收光谱方法,此方法可以进一步提高弱吸收测量的信噪比,从而使测量值波动得到降低。

参考文献:

- [1] 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]. 流体力学实验与测量, 2000, 14(3): 12-17.
Lin Zhenbin, Guo Dahua, Zhu Naiyi, et al. The measurement

and diagnostics in free stream of JF-10 hydrogen oxygen detonation driven shock tunnel[J]. Experiments and Measurements in Fluid Mechanics, 2000, 14(3): 12-17.

- [2] Schulz C, Koch J D, Davidson D F, et al. Ultraviolet absorption spectra of shock-heated carbon dioxide and water between 900 and 3050K[J]. Chemical Physics Letters, 2002, 355(1): 82-88.
- [3] Arroyo M P, Birbeck T P, Baer D S, et al. Dual diode-laser fiber-optic diagnostic for water-vapor measurements[J]. Optics Letters, 1994, 19(14): 1091-1093.
- [4] Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K. CO₂ concentration and temperature sensor for combustion gases using diode-laser absorption near 2.7 μ m[J]. Applied Physics B, 2008, 90(3-4): 619-628.
- [5] Hanson R K. Shock tube spectroscopy: advanced instrumentation with a tunable diode laser[J]. Applied Optics, 1977, 16(6): 1479-1481.
- [6] Li H, Farooq A, Jeffries J B, et al. Near-infrared diode laser absorption sensor for rapid measurements of temperature and water vapor in a shock tube[J]. Applied Physics B, 2007, 89(2-3): 407-416.
- [7] Mihalcea R M, Baer D S, Hanson R K. Diode laser sensor for measurements of CO, CO₂, and CH₄ in combustion flows[J]. Applied Optics, 1997, 36(33): 8745-8752.
- [8] Sanders S T, Baldwin J A, Jenkins T P, et al. Diode-laser sensor for monitoring multiple combustion parameters in pulse detonation engines[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2000, 28(1): 587-594.
- [9] 余西龙,李飞,张少华,等. 利用可调谐二极管激光吸收光谱诊断超声速流动[C]. 第二届高超声速科技学术会议, 2009.
Yu Xilong, Li Fei, Zhang Shaohua, et al. Hypersonic flow measurement by means of TDLAS[C]. The 2nd Hypersonic Science and Technology Conference, 2009.
- [10] 李飞. 近红外吸收光谱诊断技术在超燃研究中的应用[D]. 中国科学院力学研究所, 2009.
Li Fei. Application of near-infrared absorption technology on supersonic combustion [D]. Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [11] Hanson R K, Falcone P K. Temperature measurement technique for high-temperature gases using a tunable diode laser[J]. Applied Optics, 1978, 17(16): 2477-2480.
- [12] Hanson R K. Tunable diode laser measurements in combustion gases[C]. 27th Annual Technical Symposium. International Society for Optics and Photonics, 1983: 75-83.
- [13] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2009, 110(9): 533-572.

作者简介:



曾 徽(1989-),男,湖南益阳人,博士研究生。研究方向:吸收光谱、发射光谱燃烧诊断。通信地址:北京市北四环西路 15 号中国科学院力学研究所(100190)。E-mail: zenghui@imech. ac. cn

(编辑:张巧芸)