

文章编号: 0258-1825(2009)增刊-0095-06

可调谐二极管激光吸收光谱诊断燃烧参数

余西龙, 李飞, 陈立红, 张新宇

(中国科学院力学研究所高温气体动力学实验室, 北京, 100190)

摘要: 近红外二极管激光吸收光谱诊断技术以其高灵敏、响应快、结构相对简单、造价低廉等优点已成为测量准均匀燃烧场和流动场温度和组分分压的有效手段。本文介绍我们所建立的可调谐二极管激光吸收光谱诊断系统以及利用此系统进行燃烧产物 H_2O 浓度和温度的实验结果。作者还介绍了所发展的高敏感的探测技术 - 波长调制光谱 (WMS, Wavelength Modulation Spectroscopy) 的 2f 诊断技术。可调谐二极管激光吸收光谱技术可望应用于动态燃烧过程的诊断与控制。

关键词: 近红外吸收光谱技术; 可调谐二极管激光器 (TDL); 燃烧诊断

中国分类号: V211.7

文献标识码: A

0 引言

吸收光谱是一种非接触的光谱诊断技术。早期吸收光谱技术主要用于化学物理分析, 应用于高超声速实验主要在 80 年代。1984 年, Chang 等人通过测量 O_2 和 H_2 的吸收谱线, 获得入射激波后的温度随时间的变化; 其后, 他们利用快速调谐激光器, 测量了反射激波温度中 OH 基的含量和温度; 1991 年, Di. Rosa 等人也是采用吸收光谱测量了入射激波中 NO 的含量、温度、压力和气流的速度。在测量气流速度时, 利用分束镜将激光分为夹角成 30° 的两束, 通过比较这两束激光的频移 (多普勒频移) 获得气流的速度。1991 年, Davidson 等人对激光吸收光谱技术进行了全面的总结, 指出可以应用于飞行实验。应该特别指出, 以上的工作大部分由斯坦福大学高温气体动力学实验室完成, 所以在激光吸收光谱技术方面应密切注意他们的研究进展。美国现已将红外激光吸收技术应用与高超声速风洞的研究中。Hanson 还和美国空军研究实验室 (AFRL) 合作, 将激光吸收光谱技术应用与脉冲爆轰发动机的爆轰过程的研究。同时 Hanson 还把他们的工作扩展到民用领域, 如半导体芯片蚀刻的气体组分控制等。

近十余年来, 由于半导体激光器技术的飞速发展, 可调谐二极管激光器吸收光谱技术 (TDLAS) 快速发展, 它以其高灵敏、响应快、结构相对简单、造价低廉等优点已引起广泛关注。一般是使用两台可调谐二极管激光器 (TDL), 通过测量两条孤立吸收线的积分吸收比定出沿光程平均温度, 进而计算出组分浓度。目前, 国外已经开始尝试将这种新型测量技术应用与汽轮机、脉冲爆震发动机 (PDE) 和超燃冲压发动机 (Scramjet) 等燃烧场诊断和流场测量^[1,2,5]。在国内, 中科院安徽光机所等单位以大气环境和发动机尾气检测为背景对 CO 、 CO_2 、 CH_4 等组分的吸收光谱技术进行了广泛的研究^[3], 而以 TDLAS 测量燃烧温度, 由于谱线选择和数据后期处理较为复杂, 还未见报导。

在以氢气或碳氢化合物为燃料的燃烧中, H_2O 无疑是最重要的燃烧产物。因此本文选取 H_2O 为研究组分, 以光谱数据库 Hitran2004 为依据在 1393nm 附近选择两条适合室温至 1300K 区间温度测量的吸收线, 分析此线对测温灵敏度, 成功搭建一套吸收光谱测温系统, 给出在室温中的测量结果并进行分析。为下一步应用此系统测量燃烧温度打下基础^[4]。

1 吸收光谱诊断燃烧参数的基本原理

当一束频率为 ν 的激光通过火焰, 其出射光强和

* 收稿日期: 2008-05-31; 修订日期: 2009-01-22.

基金项目: 国家自然科学基金 (10772188, 10525212) 资助.

作者简介: 余西龙, (1971-), 博士, 副研究员, 研究方向为超声速燃烧、非平衡流动与光谱诊断技术.

入射光强满足 Beer - Lambert 关系式^[2]：

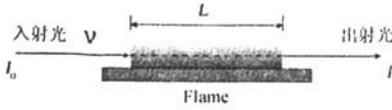


图1 吸收光谱原理示意图
Fig.1 Schematic of typical absorption measurement

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

$$R = \frac{\int_{\nu_1}^{\nu_1'} P \cdot X_{H_2O} \cdot L \cdot S_1(T) \cdot \phi_1(\nu - \nu_{01}) d\nu}{\int_{\nu_2}^{\nu_2'} P \cdot X_{H_2O} \cdot L \cdot S_2(T) \cdot \phi_2(\nu - \nu_{02}) d\nu} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp\left[-\left(\frac{hc}{k}\right)(E_1' - E_2')\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (3)$$

它是 T 的单值函数, 这样通过测量积分吸收比定出温度, 进而可以得到组分浓度 X_{H_2O} 。

吸收线的选择是至关重要的, 选择孤立、吸收率合适的吸收线可以简化计算, 提高测量精度。于是本文使用 Hitran2004 来辅助分析选择合适的吸收线。编写一个小程序用于筛选吸收线, 其中吸收线型使用 Voigt 线型。

本次实验的设计要求是建立一套能测量室温至 1000K 区间的测温系统。给定吸收长度 10cm。利用实验室现有可调谐二极管激光器, 其波长调节范围为 1389 - 1397nm, 这样总共有 313 条可能的吸收线, 仔细考虑了谱线是否有邻线干扰、吸收线强度和吸收灵敏度等诸多因素以后, 选择的频率为 7185 和 7168 两条吸收线。下图给出了两条吸收线在不同温度下的线强度和由此确定的温度标定曲线。图 2 为两线线强度随着温度的变化, 在室温 - 1300K 的温度区间, 双线的吸收都比较强, 便于探测器探测。而图 3 为积分吸收比 R 随着温度的变化, 在 400 - 1300K 以下, $0.5 < R < 5$, 两线有相似的吸收和近似的信噪比, 因此测量精度会很高。在 400K 以下的近似室温测量, 可以通过改变两吸收线的吸收距离 L 来调节积分吸收比 R 。见下面的初步实验。

一般认为好的吸收线对的选择要求在整个温度区间内, 灵敏度都大于 1, 从图 4 看此线对满足此条件。假设积分吸收比的测量误差为 5%, 则在整个室温 - 1300K 的温度范围内, 温度测量结果的误差都将小于 5%。

其中, I_0 为入射光强, I 为出射光强, K_ν 为吸收率 (cm^{-1}), L 为吸收长度 (cm)。而吸收率则可以表达为:

$$K_\nu = P \cdot X_{H_2O} \cdot S(T) \cdot \phi(\nu) \quad (2)$$

其中 P 为静压, X_{H_2O} 为水蒸气组分浓度, $S(T)$ 为谱线线强度, $\phi(\nu)$ 为线型函数, 满足 $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\nu) d\nu = 1$ 。如果采用扫描波长、直接吸收方法的方法, 通过积分整个线型得到的积分吸收率就只是温度和组分浓度的函数。而两条独立吸收线的积分吸收比 R :

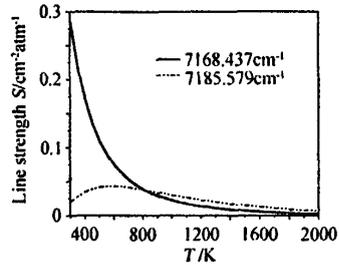


图2 两线线强度随温度的变化
Fig.2 Line strenghen of selected line pair versus temperature

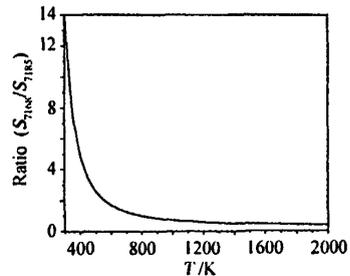


图3 积分吸收比 R 随温度的变化
Fig.3 Intergration absorption ratio of selected line pairs versus temperature

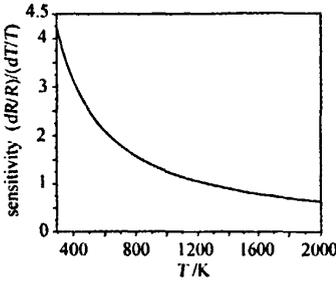


图4 测温灵敏度随温度的变化

Fig. 4 Temperature measurement sensitivity versus temperature

3 实验系统以及初步实验

我们所建立的 TDALS 温度和 H₂O 浓度测量系统

如下图 5 所示为。测温系统由激光器和激光控制器、信号发生器、探测器 and 示波器组成。激光器控制器通过改变温度和电流来调节激光器输出波长和功率。激光器为 NEL 公司蝶形封装 DFB 半导体激光器,典型功率 10mW,激光谱线半宽小于 20MHz。通过标定确定所需谱线对应的控制器设定温度,然后固定激光器温度,通过信号发生器输出三角波调制控制器输出电流来改变激光器波长。在实验中采用两只激光器,利用快速响应的 InGaAs 探测器测量激光器经过标准甲烷/空气平面火焰燃烧器的信号衰减量来确定吸收轮廓。通过公式(3)来确定燃烧温度。同时我们还利用热电偶测量火焰温度。通过改变甲烷/空气的当量比,来改变燃烧温度和 H₂O 含量,并将 TDALS 测量精度和热电偶测量结果、理论计算 H₂O 浓度结果进行比较。

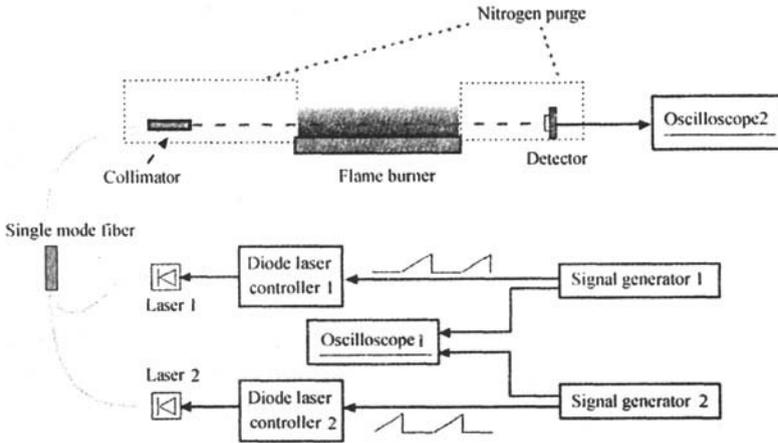


图5 所建立的 TDALS 燃烧参数诊断系统

Fig. 5 Schematic diagram of TDALS combustion measurement system

在实验对应的 1100 - 1350K 温度区间,7185 线吸收强度明显大于 7168 线。经过直线拟合,反演计算,Voigt 拟合一系列数据

处理过程后,吸收线型如图 6 所示。若认为沿光程温度均为分布,通过双线的积分吸收比 R 可以得到平均温度 T 。见图 7 中星型数据点。图中热电偶温度为平面炉核心区温度。可见 TDALS 测量温度明显低于热电偶,均匀温度假设并不适用。同时需要强调的是,经计算,在温度低于 1300K 时,由辐射造成的热

电偶测量误差小于 10K,可以认为热电偶测量值不需要修正。

热电偶测量结果表明,平面燃烧炉分为核心区和边界层,核心区温度几乎不变。边界层对温度测量的影响可以用剪切层理论来分析和修正。修正后结果见图 7 中的三角形数据点。对修正后的 TDALS 温度进行分析,发现在实验对应的 1100 - 1350K 温度区间,TDALS 与热电偶温度的最大偏差为 80K(6.7%)。

TDALS 温度测定以后,可以根据任一吸收线的积

分吸收率计算得到 H₂O 的组分分压。而由所测当量比,根据 TDLAS 所测温度和局部热力学平衡假设,利用软件 Gaseq 计算得到 H₂O 的理论组分分压。测量和计算值的比较如图 8 所示。可见大部分实验两者相差 10% 以内,有个别相差较大,主要是因为对应流量非常小,流量计读数误差带来的当量比不确定性引起的。

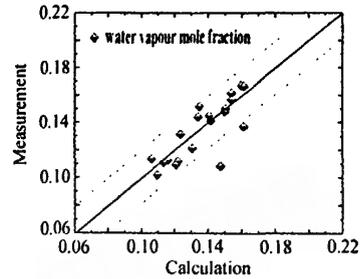


图 8 TDLAS 水浓度测量结果和计算结果比较
Fig. 8 Comparison of calculation and TDLAS water concentration measurement

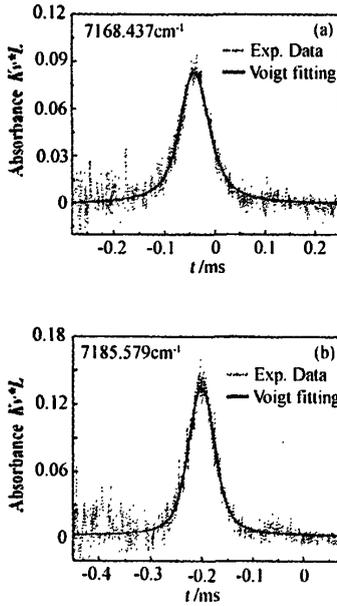


图 6 典型的处理后的吸收信号和其 Voigt 拟合线型:(a) 7168 线;(b) 7185 线
Fig 6 Typical absorption line shape of selected transitions and corresponding Voigt fitting

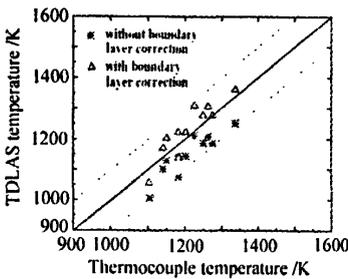


图 7 TDLAS 与热电偶测温结果的比较
Fig. 7 Comparison of TDLAS temperature and thermocouple measurement

4 一种高灵敏度的吸收测量方式 - 波长调制光谱

虽然近红外波段的可调谐二极管激光吸收光谱技术被广泛用于分子吸收光谱研究,但在此波长范围,一般分子的吸收强度较弱,因而探测灵敏度很低。为了提高探测灵敏度,有多种方法可以选择,如利用增加吸收长度等。我们目前采用波长调制光谱(WMS, Wavelength Modulation Spectroscopy)就是这诸多方法中的一种。设探测光频率(波长)为 ν , 调制频率为 Ω , 调制深度为 $\Delta\nu_L$, 则当激光被吸收介质吸收时,其透射光强也将以调制频率 Ω 作周期性变化。若调制幅度 $\Delta\nu_L$ 足够小,透射光强的变化幅度可用泰勒级数展开。我们可以通过相敏检波,由锁相放大器选择所需的谐波频率,可以得到透射光强中按频率 $n\Omega$ 排列的频谱信号 $S(n\Omega)$, 相当于得到了吸收系数 $k(\nu)$ 的各阶导数信号(或导数光谱)。这种探测方式可以克服我们前面所采用的直接吸收法容易受背景噪声的干扰的缺点,是一种高灵敏度的探测技术,可以应用于微弱信号的测量。这种方式在实际应用中,通常采用二次谐波技术,即 $n=2$ 。图 9 给出了我们所建立的 WMS 系统的组成。图 10 是所获得的 H₂O 的 7185cm⁻¹ 的 2f 信号,对应于图 9 所采用的锯齿波信号为 100Hz,正弦调制信号为 25kHz。我们拟采用此技术进行高焓流动中主要的氧分子的测量。氧分子的吸收带波长在 760nm 附近,属于比较弱的禁带跃迁。因此,应用 WMS 技术可以很大程度提高吸收灵敏度。

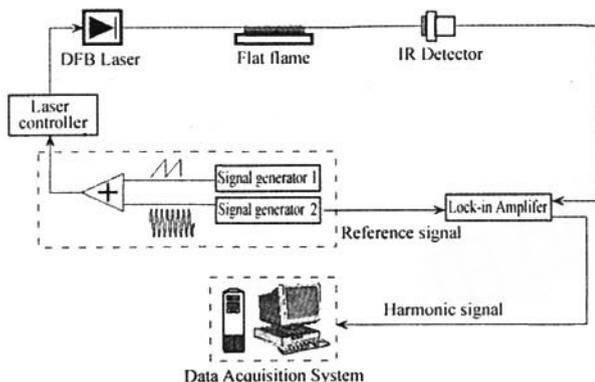


图9 波长调制光谱实验系统组成
Fig. 9 Schematic of WMS TDLAS system

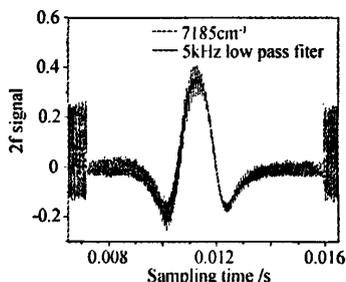


图10 所获得的2f吸收线型
Fig. 10 The second harmonic absorption curve of H_2O $7185cm^{-1}$ line

5 结论

本文设计建立一套基于直接吸收、波长扫描法的TDLAS测量系统。并对甲烷/空气预混平面火焰炉进行测量,与热电偶测量结果进行比较,两者最大相差80K(6.7%),水蒸气组分浓度与计算值相差10%。此实验为下一步利用TDLAS测量各种复杂燃烧奠定了基础。同时本文还介绍了我们获得的WMS调制光谱的初步结果。

致谢

本课题在申请之初,就得到俞先生的指导和支持。本文的第一作者在读博士期间,有幸在俞先生的

爆轰驱动激波风洞上从事研究工作。俞先生对后辈的教诲令学生受益良多。值此先生八十华诞之际,谨以此微不足道之工作祝先生身体健康、生日快乐!感谢中国科学院力学研究所三期创新项目和国家自然科学基金(项目批准号10772188和10525212)资助。

参 考 文 献:

[1] GRIFFITHS ALAN D, HOUWING A FRANK P. Diode laser absorption spectroscopy of water vapour in a scramjet combustor[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(31): 6653 - 6659.

[2] ZHOU X, LIU X, JEFFRIES J B, HANSON R K, HINCKLEY K M, WOODMANSEE M A. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, 82(4): 469 - 478.

[3] 涂兴华, 刘文清, 董凤忠等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱技术在线监测机动车尾气排放CO和CO₂的方法[J]. *高技术通讯*, 2006, 16(9): 980 - 984.

[4] ROTHMAN LS, JACQUEMART D, BARBE A, BENNER DC, BIRK M, BROWN LR, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database[J]. *JQSRT*, 2005, 96(2): 139 - 204.

[5] ZHOU X, LIU X, JEFFRIES J B, HANSON R K. Development of a sensor for temperature and water vapor concentration in combustion gases using a single tunable diode laser[J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(8): 1459 - 1468.

Combustion diagnostics by using tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS)

YU Xi-long, LI Fei, CHEN Li-hong, ZHANG Xin-yu
(*Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract: Near-infrared absorption spectroscopy technique is an effective method for measuring gas temperature and concentration in many quasi-uniform flow fields and combustion flows due to its advantages of high sensitivity and quick response. In this paper, the tunable diode laser absorption spectroscopy system is set up and results about water vapor absorption measurement is reported. An ultra-sensitive absorption spectroscopy - Wavelength Modulation Spectroscopy (WMS) and related system are also introduced. The technique is very valuable for future combustion diagnostics and fluid measurement.

Key words: near-infrared absorption spectroscopy technology; tunable diode lasers (TDL); combustion diagnostics