

# TDLAS测量甲烷/空气预混平面火焰温度和 H<sub>2</sub>O浓度

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重点实验室, 北京市北四环西路15号, 100190)

(中国科学院高超声速科技中心, 北京市北四环西路15号, 100190)

**摘要** 基于可调谐二极管激光器吸收光谱技术(TDLAS)建立了温度和H<sub>2</sub>O浓度测量系统, 利用光谱数据库Hitran2004在1393nm附近选择了在500-1300K有很高测温灵敏度两条水吸收线: 7168.437 cm<sup>-1</sup>, 7185.597 cm<sup>-1</sup>。在1KHz的扫描频率下, 利用直接吸收-扫描波长法对甲烷/空气预混平面火焰进行测量, 并进行边界层修正, 与热电偶的对比结果显示, 在温度区间1100-1350K, 两者最大相差80K(6.7%); 水蒸气组分浓度与计算值平均相差小于0.02(10%)。

**关键词** 可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS), 温度测量, 浓度测量, 预混平面火焰, Hitran2004

## 引言

在带有燃烧的流场中, 气体温度和组分浓度测量是研究燃烧现象的重要手段。传统的热电偶和采样探针等手段响应慢, 并会干扰流场, 难以适用于复杂环境。因此需要寻找更有效的测量手段。

可调谐二极管激光器吸收光谱技术(TDLAS)是一种很有潜力的新型测量手段, 它以其高灵敏、响应快、造价低廉等优点已引起广泛关注和研究<sup>[1,2,3]</sup>。在国内由于起步较晚, TDLAS在燃烧测量中的应用, 还未见报导。在以氢气或碳氢化合物为燃料的燃烧中, H<sub>2</sub>O是重要的燃烧产物之一。故本文以H<sub>2</sub>O为目标组分, 设计了一套基于直接吸收-波长扫描法的适合燃烧测量的TDLAS系统。

预混平面火焰是一种具有一维特征的稳定的标准火焰, 其火焰温度和燃烧产物浓度具有很高的时间和空间均匀性<sup>[4]</sup>。为对TDLAS测量系统进行验证, 我们建立一套CH<sub>4</sub>/Air预混平面火焰系统, 通过改变当量比和总的质量流量改变平面炉温度。利用该系统进行了TDLAS测量并与热电偶进行比较, 得到了较为满意的结果。

## 1 基本原理

当一束频率为 $\nu$ 的激光通过火焰, 其出射光强和入射光强满足Beer-Lambert关系式:

$$(I/I_0)_\nu = \exp(-K_\nu \times L) \quad (1)$$

其中,  $I_0$ 为入射光强,  $I$ 为出射光强,  $K_\nu$ 为吸收率,  $L$ 为吸收长度。而吸收率是静压 $P$ , 水蒸气组分浓度 $X_{H_2O}$ , 吸收谱线线强度 $S(T)$ , 线型函数 $\phi(\nu)$ 的函数:

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

其中线型函数满足 $\int \phi(\nu) d\nu \equiv 1$ 。如果采用波长扫描-直接吸收的方法, 通过积分整个吸收线型得到的积分吸收率就只是温度和组分浓度的函数。在均匀流场中, 静压和组分浓度可以认为是沿光程的不变量, 这样就可以选取两个吸收线, 列出两个吸收方程解出 $T$ 和 $X_{H_2O}$ 这两个未知数。

由(1)式可得:

$$K_\nu = -1/L \ln(I/I_0)_\nu \quad (3)$$

根据(3)式可以将实验中探测器得到的光强信号 $I$ , 变换为吸收率随着频率的变化。两条孤立吸收线的积分吸收比 $R$ :

$$R \sim f(T) \quad (4)$$

$R$ 是 $T$ 的单值函数,通过测量积分吸收比定出温度,进而由式(2)可以得到组分浓度 $X_{H_2O}$ 。

在1.3-1.5  $\mu\text{m}$ 近红外区,通讯用分布反馈式激光器(DFB)可以以数千赫兹的扫描频率扫过2-3个波数的光谱范围,这为扫描波长法奠定了基础。对于很多弱吸收的燃烧环境,TDLAS需要提高探测信噪比,常用两种方法:平衡探测和二次谐波分析(2f探测)。而对于较强吸收(>5%),直接吸收测量就足以胜任,并且其结构相对简单,易于实现;特别是对于超燃冲压发动机(Scramjet)这种 $H_2O$ 组分浓度较大的燃烧环境尤为适合。因此直接吸收-波长扫描法仍具有广泛的应用前景。

## 2 吸收线的选择

吸收线的选择至关重要: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。本文利用实验室现有的中心波长为1393nm可调谐二极管激光器,根据光谱数据库Hitran2004<sup>[5]</sup>,调谐至中心频率分别为 $7168.437\text{ cm}^{-1}$ 和 $7185.597\text{ cm}^{-1}$ 的两条吸收线。

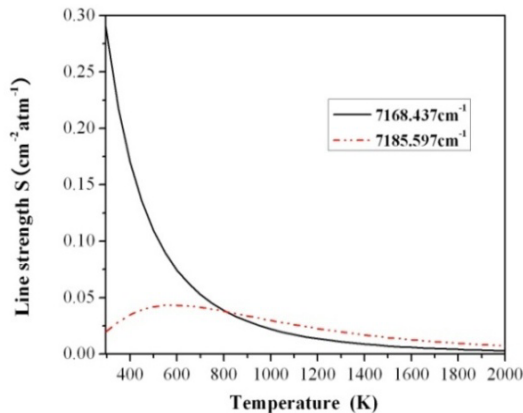


图1 两线线强度随温度的变化

图1为两谱线在300-2000K范围内的线强度。在500-1300K范围两线均有较强吸收,并且线强度比较接近(两倍以内)。在500K以下, $7168.437\text{ cm}^{-1}$ 线吸收远强于 $7185.597\text{ cm}^{-1}$ 线,而吸收信号相差太大不合同光路测温。图2为此吸收线对在300-2000K范围的测温灵敏度,可见在300-

1300K温度范围此线对具有很高的测温灵敏度。因此利用此线对搭建的同光路TDLAS测温系统适合测量500-1300K温度范围。当然具体的测温区间还需综合考虑吸收长度 $L$ 和水蒸气分压( $PX_{H_2O}$ )。

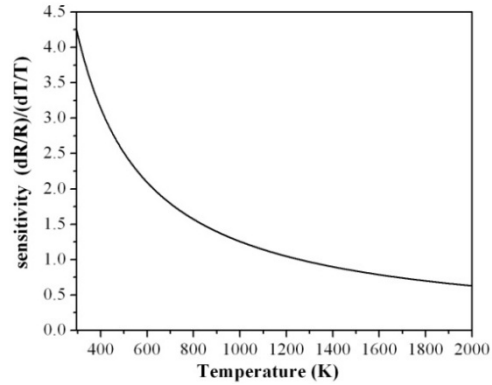


图2 测温灵敏度随温度的变化

## 3 实验装置

### 3.1 $CH_4$ /Air预混平面炉系统

图3和图4分别为 $CH_4$ /Air预混平面火焰炉系统和平面炉结构图。平面炉外径100mm,高50mm的主体由黄铜制成,直径50mm的多孔板由直径 $20\ \mu\text{m}$ 的青铜粉末材料结而成。腔体中填满直径3mm的玻璃球以均匀气流,盘绕在多孔板中的内径3mm的冷却水管用于冷却多孔板以稳定火焰面<sup>[4]</sup>。空气和甲烷在进入燃烧炉前在预混池中充分混合。氮气环绕预混燃气,主要起到隔离环境空气和减少燃烧尾流与空气对流传热的作用。甲烷、空气、氮气均由高压气瓶提供,三种气体的流量分别由流量计读出。

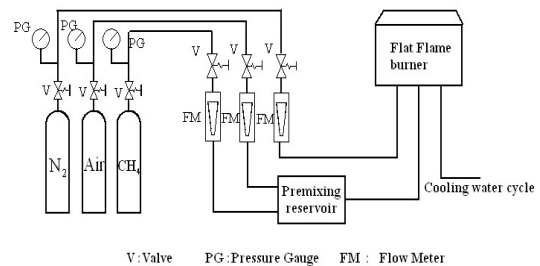


图3  $CH_4$ /Air预混平面炉系统示意图

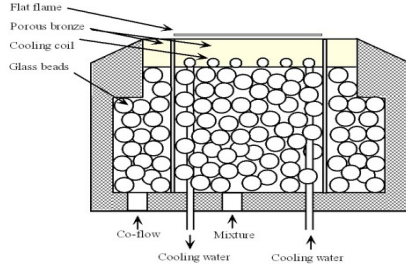


图4 预混平面炉结构示意图

### 3.2 TDLAS测量系统

本 TDLAS 测量系统由两台可调谐二极管激光器和激光控制器(ILX Lightwave; LDC-3700B)、信号发生器(Tektronix; AFG3021B)、频响为 10MHz 的 InGaAs 红外探测器和示波器(Tektronix; TDS 2024B)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。激光器典型输出功率 10mW，激光谱线半宽小于 20MHz。首先经标定确定所选谱线对应的控制器控制温度，然后通过锯齿波信号发生器输出电压信号调制控制器输出电流以改变激光器输出光频率。

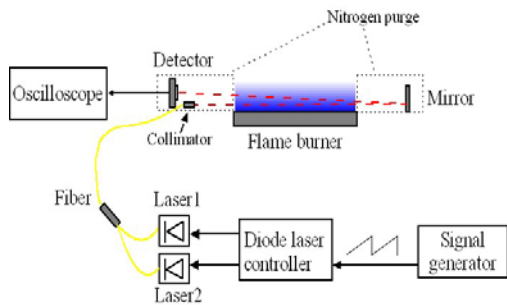


图5 预混平面炉TDLAS测量系统示意图

将两台激光器输出激光用一根50:50分束比光纤耦合器耦合到一根单模光纤中，此光纤另一端为光纤准直器，输出光束直径小于1mm，光束中心距离炉面3.5mm。为保证吸收为较强吸收(>5%)，应增加吸收长度 $L$ 。于是在对面放置一小面积反射镜将光线返回准直器同侧，如图5所示。感光面 $\Phi 2\text{mm}$ 的InGaAs探测器位于准直器之后，使用示波器记录探测器输出信号。为使加倍的吸收长度不会改变原定测量区间，反射镜处入射和反射光的夹角应尽可能小，本实验中约为 $0.72^\circ$ 。

为检验测量结果，每次实验均使用热电偶测量沿光程不同位置处的气体温度。同时为了避免环境空气中水蒸气对吸收测量的影响，反射镜、准直器、探测器用氮气隔离。

### 4 实验结果及分析

对于本文使用的这种水冷式平面火焰炉，可以通过调节当量比和总流量两种方式改变火焰温度。由于 $\text{CH}_4/\text{Air}$ 火焰传播速度较低，流量过大时燃烧不稳定，故实验中对流量加以控制：甲烷流量0.6–1.5L/M，空气流量8–20L/M，当量比0.6–1.2。在该条件下获得的温度范围为1100–1350K，刚好位于所选线对的高灵敏度范围内。

图6为两线原始吸收扫描记录数据。由于信号发生器输出1KHz，4Vpp的锯齿波信号扫描波长，图中所示的相对时间对应着不同的激光频率，每1ms对应约0.48nm的光谱范围。使用示波器记录探测器电压信号，每扫描周期记录多达2500个数据点，便于拟合基线。

图7为典型的沿光程温度分布图。可以看出，平面炉分为核心区 and 边界层区两部分，核心区温度几乎相同，边界层区温度沿光程近似线性分布，于是炉面温度分布可以用等腰梯形拟合(见图7)。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<sup>[6]</sup>。每次实验中，使用热电偶记录沿光程炉面温度分布，以此作为边界层修正的依据。

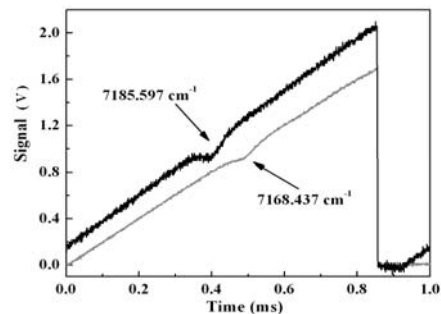


图6 原始吸收数据

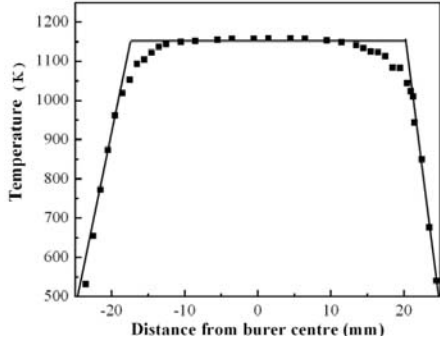


图 7 热电偶测量平面炉沿光程温度

在实验对应的1100–1350K温度区间，7185.597  $\text{cm}^{-1}$  线吸收强度明显大于7168.437  $\text{cm}^{-1}$  线。经过直线拟合、反演计算、Voigt线型拟合等一系列数据处理过程后，典型吸收线型如图8所示。可以看出7168.437  $\text{cm}^{-1}$  线峰值吸收约9%，7185.597  $\text{cm}^{-1}$  线约13%。这满足强吸收要求，适合使用直接吸收-波长扫描法。

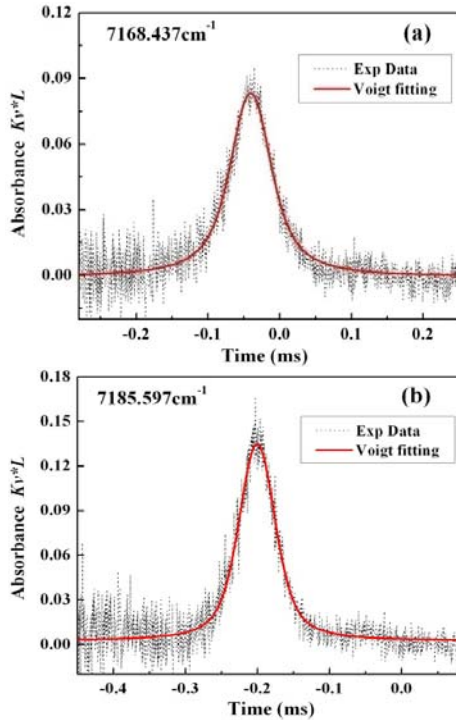


图 8 典型的吸收信号及其Voigt拟合线型：(a) 7168.437  $\text{cm}^{-1}$  线；(b) 7185.597  $\text{cm}^{-1}$  线

由式(4)，通过计算双线的积分吸收比  $R$  可以得到平均温度  $T$  (见图9中 \* 数据；横坐标热电偶温度为平面炉核心区温度)。可见TDLAS平均温度明显低于热电偶，这个差值正是边界层引起的。经边界层修正后的TDLAS温度结果见图9中的三角形数据

点。在实验对应的1100-1350K温度区间，TDLAS与热电偶温度的最大偏差为80K(6.7%)，平均相差小于30K(2.5%)。对于此种直接吸收测量法，基线拟合误差是温度测量的最大误差来源。

TDLAS温度测定以后，可以由线对中任一吸收线的积分吸收率，结合静压  $P$ 、吸收长度  $L$  得到火焰中水蒸气的组分分压  $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 。而由甲烷/空气当量比，根据TDLAS所测温度和局部热力学平衡假设，利用软件Gaseq可计算得到水蒸气的理论组分分压，实验中实现的水蒸气分压范围0.1–0.19atm。图10为水蒸气组分浓度测量值和计算值的比较。两者最大相差0.03(30%)，平均相差小于0.02(10%)以内。由于随预混气和氮气流量比变化，火焰形状会发生变化，这就给吸收长度  $L$  的测量增加了难度。温度测量误差、吸收长度测量误差、流量计读数误差为组分浓度测量的三大误差来源。

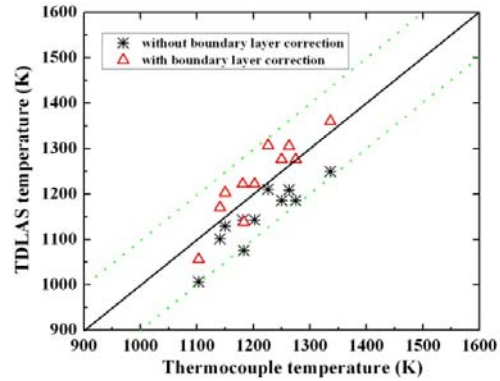


图 9 TDLAS 与热电偶测温结果的比较

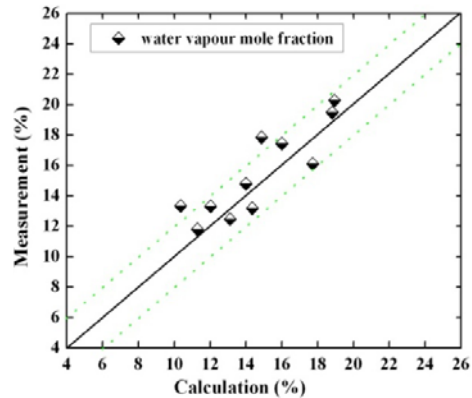


图 10 TDLAS 浓度测量结果与 Gaseq 计算值的比较

## 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。在1KHz的扫描频率下,对甲烷/空气预混平面火焰炉进行测量,并进行边界层修正,与热电偶测量结果进行比较,两者平均相差小于30K(2.5%);水蒸气组分浓度与计算值平均相差小于0.02(10%)。此实验为下一步利用TDLAS测量各种复杂燃烧奠定了基础。当然,本文所用的这种吸收光谱法得到的是流场参数的一个沿光程的平均值,它具有很高的时间分辨率,但空间分辨率不高,若要将其应用于非均匀流场诊断,仍需进一步探索。

本项目受到国家自然科学基金No.10772188资助,在此表示感谢。

## 参考文献

- 1 Griffiths Alan D, Houwing A Frank P, Diode laser absorption spectroscopy of water vapour in a scramjet combustor, 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, 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CO<sub>2</sub>的方法, 高技术通讯, 2006,16(9): 980-984
- 4 杨仕润, 赵建荣, 俞刚, 韩百. 氢/空气预混平面火焰CARS温度测量, 激光技术, 2000, 24(5):277-280.
- 5 Rothman LS, Jacquemart D, Barbe A, Benner DC, Birk M, Brown LR, et al. The HITRAN 2004 molecular spectroscopic database, JQSRT, 2005, 96(2):139-204.
- 6 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. Measurement Science and Technology, 2003, 14(8): 1459-1468

# TEMPERATURE AND WATER VAPOR CONCENTRATION MEASUREMENTS OF CH<sub>4</sub>/AIR PREMIXED FLAT FLAME BASED ON TDLAS

Yu Xilong, Li Fei, Chen Lihong, Zhang Xinyu

(Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)  
(Hypersonic Research Center CAS, No.15 Beisihuanxi Road, Beijing 100190, China)

**Abstract** A sensor based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) was constructed for temperature and water vapor concentration measurement. Absorption lines were selected and analysed using spectrum database Hitran2004. Two fiber-coupled near infrared distributed feedback lasers was used to probe two water vapor absorption features (7168.437 cm<sup>-1</sup> and 7185.597 cm<sup>-1</sup>) near 1393nm which has high sensitivity of temperature measurement in 500-1300K. Successful experiments were performed in a CH<sub>4</sub>/Air premixed flat flame burner using direct absorption wavelength scanned method at a 1KHz scan rate. Because of the cooler shear layer in the flat flame, mixing layer theory was applied to correct TDLAS results. Comparison with thermocouple measurements, the max difference of both methods is less than 80K (6.7%). Comparison with calculation, the average water mole fraction difference is less than 0.02(10%).

**Key words** tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), temperature measurement, concentration measurement; premixed flat flame, Hitran2004