

燃烧场内多路径温度与H₂O浓度的在线检测

孙鹏帅^{1,2} 张志荣¹ 崔小娟¹ 吴 边¹ 夏 滑¹ 庞 涛^{1,2} 韩 萃^{1,2} 王 煜¹ 董凤忠^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031

²中国科学技术大学, 安徽 合肥 230022

摘要 可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术以其响应速度快、灵敏度高、非接触等优点得到了广泛应用。基于该技术以燃烧参数诊断为目标,使用一台窄线宽、波长可调谐的分布反馈式(DFB)激光器产生扫描 1395.51 nm 和 1395.69 nm 两条 H₂O 吸收谱线的激光,经 1×4 光纤分束器实现燃烧场内 4 条平行路径中温度和 H₂O 浓度的同时在线检测,采用分段温度梯度测量方法补偿低温段对高温区域测量的影响,使中心燃烧区域温度的测量精度由原来的 10% 提高到 3% 以内。通过控制空气流量,测量三种不同燃烧状态下中心燃烧区域的温度与 H₂O 浓度变化,结果表明,三种燃烧状态的中心燃烧区域温度差约为 80 K, H₂O 浓度与温度变化情况一致,验证了实验系统和数据处理方法的稳定性和可行性,为下一步燃烧层析诊断及燃煤锅炉燃烧效率优化提供了支持。

关键词 光谱学; 燃烧诊断; 可调谐二极管激光吸收光谱; 温度测量; 浓度测量

中图分类号 O433

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0915002

Multipath Real-Time Measurement of Temperature and H₂O Concentration for Combustion Diagnosis

Sun Pengshuai^{1,2} Zhang Zhirong¹ Cui Xiaojuan¹ Wu Bian¹ Xia Hua¹ Pang Tao^{1,2}
Han Luo^{1,2} Wang Yu¹ Dong Fengzhong^{1,2}

¹Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

²University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230022, China

Abstract Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) has been widely used in combustion diagnosis because of its excellent characteristics such as fast response, high sensitivity and non-intrusive feature. The system uses a pair of H₂O absorption lines (1395.51 nm and 1395.69 nm) by a narrow linewidth and tunable wavelength distributed feedback (DFB) laser. The laser is divided into four beams by a 1×4 optical fiber splitter to measure the temperature and H₂O concentration simultaneously. Sectional measurement is proposed to improve the temperature accuracy from 10% to 3% compared with K-type thermocouple. What's more, the temperature and H₂O concentration at combustion center position are measured while the ratio of air and fuel changes. The results show that combustion temperature of central area at the three kinds of combustion state has difference of about 80 K, and the H₂O concentration change is well consistent with temperature change, demonstrating the stability and feasibility of the experimental setup and the data processing method. This provides strong support for tomographic diagnosis and optimization of combustion efficiency of coal-fired boiler in the future.

Key words spectroscopy; combustion diagnosis; tunable diode laser absorption spectroscopy; temperature measurement; concentration measurement

OCIS codes 300.1030; 010.0280; 300.6260; 300.6360

收稿日期: 2015-03-02; 收到修改稿日期: 2015-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(11204320, 11204319, 41405034)、国家科技支撑计划(2014BAC17B03)、中国科学院科研装备研制项目(YZ201315)

作者简介: 孙鹏帅(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事气体检测与燃烧诊断方面的研究。

E-mail: sunpengshuai521@126.com

导师简介: 董凤忠(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事新型光纤传感器以及有毒有害气体的快速在线监测等方面的研究。E-mail: fzdong@aiofm.ac.cn(通信联系人)

1 引 言

燃烧是能源消耗的主要形式,主要应用于供热、发动机燃料以及工业发电等领域。为提高燃烧效率,减少污染物排放,需要对燃烧参数实时检测来控制和优化燃烧过程,而燃烧过程具有复杂性和瞬态性,目前激光诊断技术以快速、非接触、扰动小等优点成为燃烧诊断的主要选择之一^[1-2]。主要包括可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术、激光诱导荧光(LIF)技术、米散射(MS)技术、相干反斯托克斯拉曼散射(CARS)技术以及激光全息技术等。在上述技术中,TDLAS技术具有高响应速率、对流场无扰动、测量系统小巧紧凑等优势^[3-6],一方面可以用于燃烧场温度、组分浓度以及流场速度的测量^[7-8],另一方面也可以通过多路径同时实现燃烧场温度、组分浓度二维分布的实时测量^[9]。

由于TDLAS技术测得的温度和浓度值是路径积分的结果,对于非均匀燃烧场,低温边界层的影响使得测量结果与实际温度值有较大偏差,Xiang等^[10]理论模拟了边界层厚度对测量结果与路径算术平均温度的影响。为减小该部分对测量结果的干扰,1)可以利用非吸收气体对边界层进行吹扫,然而对于较大开放燃烧环境该方法不太适用;2)可以采用多光路交叉测量,获得温度场的二维分布^[11],但是该方法需要在燃烧现场周围设置较多的测量点,且数据处理算法较为复杂,对实验条件要求较高。

本文使用一台分布反馈式(DFB)激光器输出同时覆盖两条吸收谱线的激光,搭建了一套可以同时测量燃烧面内4条路径上温度和H₂O浓度的TDLAS实验系统以及实时在线数据处理软件,设计了分段温度梯度测量实验系统,补偿低温段对高温区域测量的影响,特别是在边界层与中心燃烧区温度梯度较大的工况下,使中心燃烧区域温度测量精度由原来的10%提高到3%以内,实现了平面火焰燃烧炉面内不同路径上内部温度和H₂O浓度的实时在线测量。同时,通过控制燃料与空气比例得到三种不同燃烧状态下的温度和H₂O浓度值,初步获得了温度和H₂O浓度与燃烧状态的关系,为下一步燃烧层析诊断及燃烧效率优化提供了支持。

2 TDLAS技术检测原理

2.1 温度测量原理

TDLAS技术采用窄线宽可调谐的二极管激光器作为光源,通过控制温度和电流来获得合适的激光输出波长,利用得到的特征吸收谱线的吸收光谱信号来反演气体的特征参数^[12-14],例如利用两条吸收光谱的积分面积比值反演气体温度,再通过该温度下的特征吸收光谱反演气体浓度。根据Lambert-Beer吸收定律,一束频率为 ν 的单色光通过气体吸收介质后,透射光强 I_1 可由入射光强 I_0 表示为

$$I_1 = I_0 \exp[-S(T)CPL\phi(\nu)], \quad (1)$$

式中 S 为气体的吸收线强, C 为气体的摩尔分数, L 为吸收路径长度, P 为总的气体压强并假设气体总压是均匀的, $\phi(\nu)$ 表示积分面积归一化的吸收线型函数。(1)式假设了沿光路路径温度、组分浓度及压强呈均匀分布,而对于非均匀分布的透射光强应表示为

$$I_1 = I_0 \exp\left\{-\int_0^L S_i[T(x)]PC(x)L\phi(\nu)dx\right\}, \quad (2)$$

整理(1)式并对光频率积分可得到直接吸收法所测量的吸收面积值为

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \left[-\ln \frac{I_1(\nu)}{I_0(\nu)}\right] d\nu = PC(x)LS[T(x)], \quad (3)$$

式中吸收线强 $S(T)$ 为温度的函数,与温度变化关系为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0) T_0}{Q(T) T} \exp\left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-h\nu_0}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-h\nu_0}{kT_0}\right)\right]^{-1}, \quad (4)$$

式中 $S(T_0)$ 为参考温度 T_0 下的吸收线强度; $Q(T_0)$ 、 $Q(T)$ 为吸收分子在温度为 T_0 和 T 时的配分函数,可拟合为温度的三阶多项式,其系数可利用HITRAN数据库得到; E'' 为跃迁的低能态能量; ν_0 为吸收线中心频率; h 为普朗克常量; c 为光速; k 为波尔兹曼常数;最后两项为激励辐射,在波长低于2.5 μm 和温度低于2500 K时可以忽略。

TDLAS技术的温度测量主要采用双吸收线法,即选用某一气体的两条具有不同低能态能量的吸收线^[15]。由于不同吸收线具有不同的温度响应关系,取两条吸收线的线强比值可以消去配分函数,由(4)式可近似得

到温度与吸收线强比值 $R(T)$ 的函数关系:

$$R(T) = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S_1(T_0)}{S_2(T_0)} \exp\left[-\frac{hc}{k}(E_1^* - E_2^*)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right], \quad (5)$$

式中 S_1 、 S_2 分别为吸收线 1 和吸收线 2 的线强, 通过测量获得吸收线强的比值即可反演得到温度值, 由(3)式可以得到两条吸收线的吸收面积比值即为线强的比值:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{PCLS_1(T)}{PCLS_2(T)} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = R(T), \quad (6)$$

式中 A_1 、 A_2 分别为两条吸收线的吸收面积, 由(5)、(6)式便可得到温度的反演公式为

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2^* - E_1^*)}{\ln \frac{A_1}{A_2} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{E_2^* - E_1^*}{T_0}}. \quad (7)$$

由(7)式可以看出, 用于双吸收线法进行温度测量的两条吸收线, 其低能态能量差越大, 对温度测量越灵敏。考虑到碳氢燃料的主要产物为 H_2O , 通过筛选近红外数据库谱线强度, 选取了 1395.51 nm 和 1395.69 nm 的两条 H_2O 吸收线为目标吸收谱线进行温度和 H_2O 浓度的测量。

2.2 边界层影响及修正方法

由 Lambert-Beer 定律可知, 气体分子对光的吸收是路径积分过程, 吸收谱线强度对温度响应又是非线性的, 且不同吸收线的谱线强度对温度的响应也不同, 按以上推导过程测量得到的温度结果不是激光传播路径上的算术平均值, 而是与谱线选择及具体的温度分布有关。在实际燃烧环境中很少有均匀的温度场, 通常是燃烧中心区域温度高于边界温度, 温度场近似为梯形分布。实验室中, 采用 K 型热电偶对长为 22 cm、宽为 18 cm 的长方形平焰炉距炉面 1 cm 处按照图 1(a) 所示的测量位置进行多点温度测量, 得到其温度分布情况如图 1(b) 所示。图 2(a) 描述了在 H_2O 浓度分布均匀情况下, 实验选用的 1395.51 nm 和 1395.69 nm 两条 H_2O 吸收线测量的路径积分温度与路径算术平均温度, 以及在不同温度范围内两条吸收线的线强值, 可以看出路径积分温度与算术平均温度有较大差异; 同时, 通过模拟计算得到了不同边界层厚度的路径积分与算术平均温度变化情况, 如图 2(b) 所示。结果表明, 直接对 TDLAS 测量结果进行反演得到的温度值不是沿激光

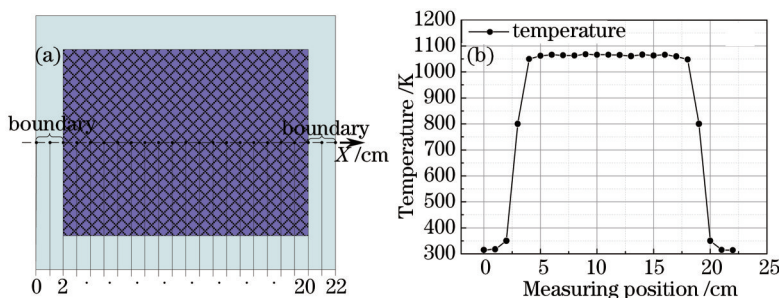


图 1 (a) 温度测量位置; (b) 路径温度分布

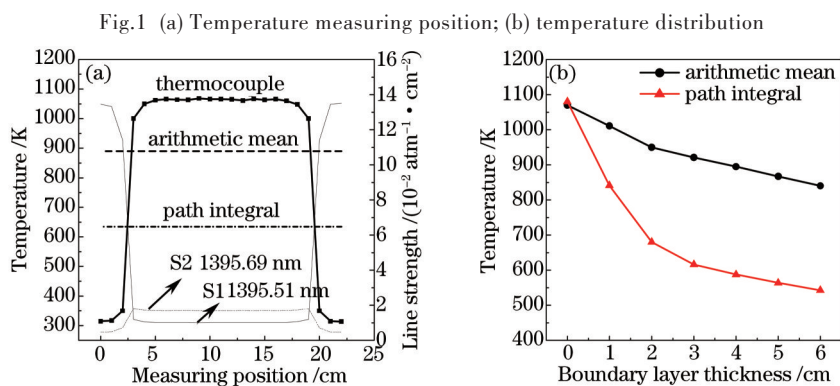


Fig.1 (a) Temperature measuring position; (b) temperature distribution

图 2 (a) 路径积分温度与算术平均温度; (b) 路径积分温度和算术平均温度随边界层厚度的变化

Fig.2 (a) Path integral temperature and arithmetic average temperature; (b) variation in temperature with different boundary layer thickness

传播路径的算术平均值,而是路径积分值,且受边界层厚度影响较大,边界层越宽,路径积分值与算术平均温度相差越大。

由于TDLAS技术的上述特性,使得运用层析成像方法测量非均匀燃烧场参数的二维分布,需要较多相互交叉的测量路径和与之相对应的反演算法,而在实际工业燃烧现场很难满足其测量要求。因此,采用有效路径积分方法测量燃烧场中心燃烧区域温度具有一定的实用研究价值。考虑到一般燃烧环境温度场近似梯形分布,可采用多路径分别对中心燃烧区域和边界层的吸收度进行测量,而测量得到的吸收面积又是路径上对光强吸收的积分值,因此,在实验中可采用去除边界层吸收度的方法,即有效路径积分法,对实验结果进行合理的修正并最终得到中心燃烧区域的温度值。对于具有较大温度梯度的非均匀燃烧场,如果继续使用(6)式来获得吸收度的比值会引入较大误差,若把近似梯形分布的温度场看作由低温段和高温段构成,(6)式中的吸光度可表示为

$$\begin{cases} A_1 = PC_1 S_1(T_1)L_1 + PC_h S_1(T_h)L_h = A_{1l} + A_{1h} \\ A_2 = PC_1 S_2(T_1)L_1 + PC_h S_2(T_h)L_h = A_{2l} + A_{2h} \end{cases} \quad (8)$$

式中 C_1, T_1, L_1, A_{1l} 分别是低温段的 H_2O 浓度、温度、长度和吸收面积; C_h, T_h, L_h, A_{2h} 分别是高温段的 H_2O 浓度、温度、长度和吸收面积。低温段的吸收面积 A_l 可由通过边界层的光路测得的吸收面积 A 得到,即

$$A_l = A \frac{L_l}{L} \quad (9)$$

而高温段的吸收面积比值可表示为

$$R(T) = \frac{A_{1h}}{A_{2h}} = \frac{A_1 - A_{1l}}{A_2 - A_{2l}} \quad (10)$$

结合(6)式,代入温度反演(7)式便可得到中心燃烧区域的温度值。由(4)式得到该温度下的线强,联立(3)式反演得到中心燃烧区域的 H_2O 浓度值为

$$C = \frac{A_{1h}}{PL_h S(T_h)} \quad (11)$$

3 实验设计与系统

3.1 系统说明

实验装置示意图如图3所示,测量系统由中心波长为1395.5 nm蝶形封装的DFB激光器、激光控制模块、信号发生器、探测器、MP420数据采集卡以及带有LabView软件的计算机组成。首先利用激光控制模块调节激光器的温度和驱动电流,并将信号发生器产生的10 Hz锯齿波形调谐电流加载到二极管激光器的电流控制板上,使激光器输出激光的波长在1395.40~1395.74 nm之间。出射激光用1×4光纤分束器均分为4路,经准直器后分布在距平焰炉面1 cm的平面内,分别通过边界层(路径1和4)和中心燃烧区域(路径2和3),最后由探测器同时测量穿过燃烧区域的4路激光光强变化情况,将其转化为电信号经数据采集卡输入到计算机中,通过计算机进行光谱反演运算和测量结果显示。

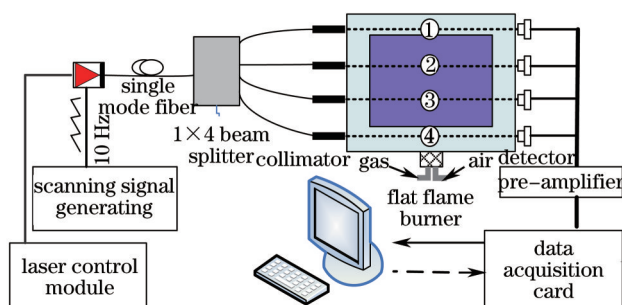


图3 实验系统示意图

Fig.3 Experimental system

3.2 输出波长标定

为实现数据的在线准确处理和波长的精确锁定,需要对激光器的输出波长进行标定。DFB激光器波长

扫描为电流调谐方式,激光器工作温度稳定,输出波长与驱动电流成近似线性关系^[6]。由此,在实验前用波长计测量激光器的输出波长与驱动电流的关系,以便得到实验过程中测量点对应的波数,结果如图4所示,通过线性拟合可得激光器输出波长与所加电流的对应关系为0.006 nm/mA。实验所用激光器中心波长为1395.52 nm,所加驱动电流扫描范围为63~118 mA,由此可得输出波长范围为1395.40~1395.74 nm,可以完全覆盖1395.51 nm(吸收线1)和1395.69 nm(吸收线2)两条实验所用的吸收线。采集卡一个周期内采样点数为2048,扫描电流为10 Hz的锯齿波形,其中上升点为1740,由此可以标定测量点对应的波长如图5所示。

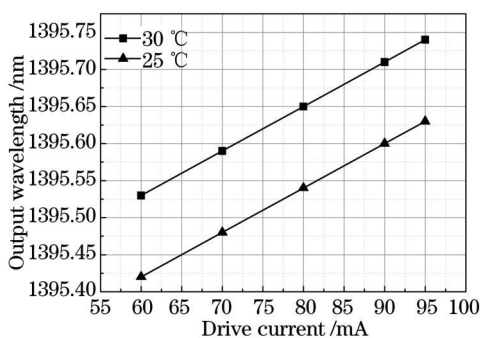


图4 输出波长与驱动电流关系

Fig.4 Relationship between output wavelength and drive current

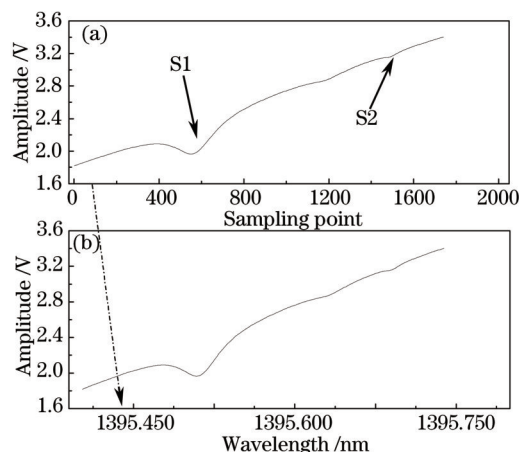


图5 标定输出波长

Fig.5 Calibration for output wavelength

4 实验结果与讨论

利用LabView软件编写数据处理程序以及结果在线显示界面,其主要功能是利用非吸收区域光强做三阶多项式拟合获得无吸收的光强基线 I_0 ,然后通过 $-\ln(I/I_0)$ 计算得到如图6所示的吸光度曲线,其中横坐标为实验前通过波长计标定的波数(cm^{-1}),然后对两个吸收峰进行Lorentz线型拟合,可以获得吸收线的积分吸光度、中心频率和展宽等信息,图6(a)是在室温下对选用的两条吸收线拟合的结果,图6(b)是在燃烧过程中路径2的两条吸收线的拟合结果,从图中可以看到在两条吸收线中间还有一个小的吸收峰,该峰值位置是另外一条吸收线1395.63 nm,其吸收线强度随温度变化不明显,且在高温时的吸收线强较弱,是所选吸收线S2的1/10,不适合作为温度测量选线标准,实验结果表明该吸收线对两边的吸收线拟合影响也很小,可以忽略。

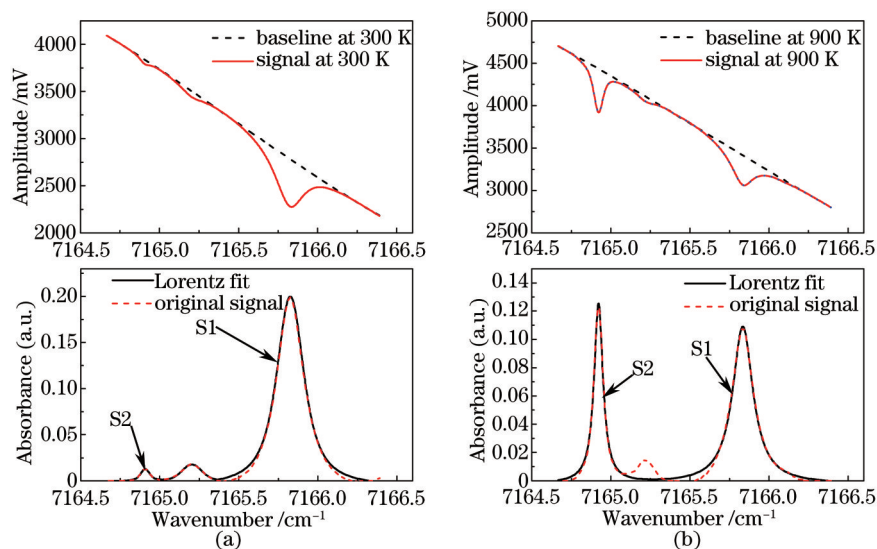


图6 (a) 燃烧前吸收信号及拟合结果; (b) 燃烧中吸收信号及拟合结果

Fig.6 (a) Absorption signal and fitting results before combustion; (b) absorption signal and fitting results during combustion

在实验过程中对4路平行光束同时进行信号采集和处理,并采用原理介绍中的有效路径积分方法对测量结果进一步处理,通过边界层路径获得的两条吸收线的积分面积分别为 $A_1=5.44 \times 10^{-3}$ 、 $A_2=2.56 \times 10^{-4}$,通过中心燃烧区域的路径总长为22 cm,低温边界层厚度为4 cm,所以(8)式中两条吸收线低温段的吸收面积分别为 $A_{11}=4.95 \times 10^{-4}$ 、 $A_{21}=2.33 \times 10^{-5}$ 。代入(10)式得到高温段的吸收面积进行温度反演,获得去除边界层影响后的中心燃烧区域的温度值。图7为热电偶、路径积分以及修正后的4条路径中心位置温度测量结果;表1为各路径修正前后测量温度值与热电偶的测量结果相比的误差。

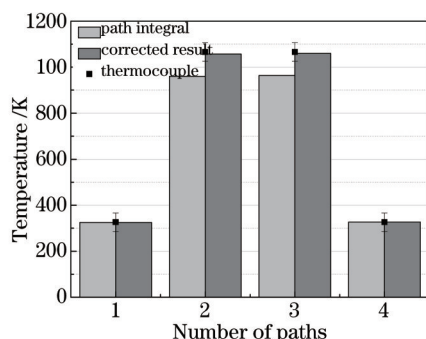


图7 4条路径上边界层修正前后温度值

Fig.7 Temperature of 4 paths before and after correction

表1 修正前后温度误差结果

Table 1 Result of temperature error before and after correction

Number	Thermocouple temperature /K	Temperature before correction /K	Error /%	Temperature after correction /K	Error /%
1	316	325	2.8	325	2.8
2	1066	960	9.9	1056	1.0
3	1066	964	9.5	1052	1.3
4	316	327	3.4	327	3.4

结果表明,修正前路径积分获得的温度误差在10%左右,是因为所选的吸收线S1在低温段吸收强度较大,而吸收线S2在低温段吸收很弱,因此低温段的吸收度会对整个路径积分有较大影响;通过两侧边界区域的路径1和4所得的温度误差在3%左右;经过路径积分修正后的燃烧区域路径2和3所测得的温度与热电偶测量结果误差在3%左右,相比修正前有非常明显的提高,同时也说明了对于非均匀场温度测量误差的主要来源是边界层的影响。另外,误差主要还由其他几方面造成:1)在拟合吸收度时两条吸收线中间有一条弱的吸收线,对拟合结果存在一定的影响,因此需要设定不同的拟合区间进行比较以期获取较好的测量结果;2)吸收光谱线型是各种展宽机制的综合,应该用高斯线型和洛伦兹线型函数的卷积形式,即Voigt函数表示,但该函数没有简单的解析解,不易得到实时反演结果,因此在数据处理过程中近似为较为合适的洛伦兹线型函数来拟合吸收光谱;3)修正边界层影响时,假设燃烧区域为两段温度分布,而实际低温区与高温区中间有一个较小的过渡段,使修正方法也存在一定的误差,但是过渡段温度变化剧烈、上升坡度陡,在实际计算过程中和以往的文献报道中均忽略了其带来的影响。

实验所用的平面火焰炉是以石油液化气为燃料的部分预混式燃烧情况,不同的燃料空气比会导致不同的燃烧状态。为了验证实验的稳定性,通过控制空气进气阀增大空气燃料比,使火焰处于不同的三个燃烧状态,同时检测三个燃烧状态下的火焰温度与 H_2O 浓度变化情况。图8所示为以中间第2条路径上中心燃烧区域的温度与 H_2O 浓度为例的测量结果。红色虚线为燃烧稳定时的热电偶测量结果,蓝色虚线为热电偶测量结果3%的误差范围,黑色实线是经修正后的测量结果。可以看出,增大空气流量时温度明显升高,燃烧趋于完全,三个燃烧状态的温度梯度约为80 K, H_2O 浓度变化较小。通过测量可得三个燃烧状态下温度的标准偏差分别为8.8、7.5、8.6,最大温度偏差分别为21 K、21 K、28 K, H_2O 浓度最大偏差分别为0.0013、0.0015、0.003。温度越高测量信号越不稳定,其原因可能是中心燃烧场的温度越高,温度梯度越大,使得燃烧场周围空气流动越剧烈,引起信号波动增大,导致信号不稳定性增加。但整个燃烧过程中的温度测量结果与热电

偶的测量结果相比,误差都在3%之内, H_2O 浓度变化趋势与温度变化趋势有较高的一致性。

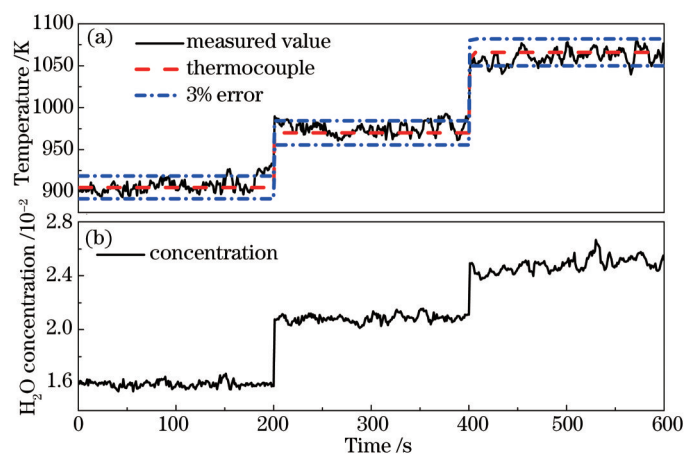


图8 测量结果

Fig.8 Measurement results

5 结 论

以一台DFB激光器为系统光源,选取两条具有不同低能态能量的吸收线,设计了基于TDLAS技术直接吸收法测量多路径温度和 H_2O 浓度的测量系统。考虑到测量的吸收面积为路径积分结果,且燃烧区域温度场近似为两个温度段,进而提出了一种去除边界层低温段吸收度的修正方法,以获得对燃烧场中心区域温度值更高精度的测量。实验结果表明,对于温度非均匀的燃烧场,可以通过该方法使高温区域的温度测量精度提高到3%以内,测量最大偏差小于30 K,同时该方法避免了实验中吹扫氮气的过程。通过控制空气进气阀改变燃烧状态,对其温度和 H_2O 浓度的实时稳定测量,验证了该TDLAS多路径在线测量系统和修正算法的稳定性和可行性。但该方法只适用于温度梯度较为明显且低温边界层吸光度容易测量的工况。TDLAS技术应用的关键是系统的稳定性和高响应度,该系统已在实际燃烧环境中进行了实验验证,为后续大面积非均匀燃烧场的在线检测和燃烧优化控制奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 C S Goldenstein, I A Schultz, R M Spearrin, *et al.*. Scanned-wavelength-modulation spectroscopy near 2.5 μm for H_2O and temperature in a hydrocarbon-fueled scramjet combustor[J]. *Appl Phys B*, 2014, 116(3): 717-727.
- 2 X Zhou, J B Jeffries, R K Hanson. Development of a fast temperature sensor for combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Appl Phys B*, 2005, 81(5): 711-722.
- 3 Xia Hua, Wu Bian, Zhang Zhirong, *et al.*. Stability study on high sensitive CO monitoring in near-infrared[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(21): 214208.
夏 滑, 吴 边, 张志荣, 等. 近红外波段CO高灵敏检测的稳定性研究[J]. *物理学报*, 2013, 62(21): 214208.
- 4 He Junfeng, Kan Ruifeng, Xu Zhenyu, *et al.*. Derivative spectrum and concentration inversion algorithm of tunable diode laser absorption spectroscopy oxygen measurement[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(4): 0430003.
何俊峰, 阚瑞峰, 许振宇, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱氧气测量中的导数光谱处理与浓度反演算法研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(4): 0430003.
- 5 S Anup, S Aman, P L Robert, *et al.*. Simultaneous CO concentration and temperature measurements using tunable diode laser absorption spectroscopy near 2.3 μm [J]. *Appl Phys B*, 2014, 117(1):7-18.
- 6 He Ying, Zhang Yujun, Wang Liming, *et al.*. Laser technology for CO_2 and H_2O on-line detection in large-scale region[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0115003.
何 莹, 张玉钧, 王立明, 等. 大尺度区域 CO_2 和 H_2O 的激光在线检测技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0115003.
- 7 Wang Guangyu, Hong Yanji, Pan Hu, *et al.*. Diode laser absorption sensor for measurements of temperature and velocity in supersonic flow[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(9): 0912009.

- 王广宇, 洪延姬, 潘 虎, 等. 二极管激光吸收传感器测量超声速流场的温度和速度[J]. 光学学报, 2013, 33(9): 0912009.
- 8 Yang Bin, He Guoqiang, Liu Peijin, *et al.*. TDLAS-based measurements of parameters for incoming flow hot-firing test of air-breathing rocket engine[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(5): 0508006.
- 杨 斌, 何国强, 刘佩进, 等. 利用TDLAS技术开展吸气式发动机来流热试实验参数测量[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0508006.
- 9 L Ma, W W Cai. Determination of the optimal regularization parameters in hyperspectral tomography[J]. Appl Opt, 2008, 47(23): 4186-4192.
- 10 X Ouyang, P L Varghese. Line-of-sight absorption measurements of high temperature gases with thermal and concentration boundary layers[J]. Appl Opt, 1989, 28(18): 3979-3984.
- 11 L Ma, W Cai, A W Caswell, *et al.*. Tomographic imaging of temperature and chemical species based on hyperspectral absorption spectroscopy[J]. Opt Express, 2009, 17(10): 8602-8613.
- 12 Qu Dongsheng, Hong Yanji, Wang Guangyu, *et al.*. Measurements of gas temperature and component concentration based on calibration-free wavelength-modulation spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(12): 1230001.
- 屈东胜, 洪延姬, 王广宇, 等. 基于免标定波长调制光谱技术的气体温度和组分浓度测量[J]. 光学学报, 2013, 33(12): 1230001.
- 13 Zhang Zhirong, Xia Hua, Dong Fengzhong, *et al.*. Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2771-2777.
- 张志荣, 夏 滑, 董凤忠, 等. 利用可调谐半导体激光吸收光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2771-2777.
- 14 Geng Hui, Liu Jianguo, Zhang Yujun, *et al.*. Measurement of ethanol vapor in air with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(8): 0830001.
- 耿 辉, 刘建国, 张玉钧, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱法测量空气中乙醇蒸气[J]. 光学学报, 2014, 34(8): 0830001.
- 15 Lan Lijuan, Ding Yanjun, Jia Junwei, *et al.*. Theoretical and experimental study of measuring gas temperature in vacuum environment using tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(8): 083301.
- 蓝丽娟, 丁艳军, 贾军伟, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱测量真空环境下气体温度的理论与实验研究[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 083301.
- 16 Yuan Song, Kan Rui Feng, He Yabai, *et al.*. Laser temperature compensation used in tunable diode-laser absorption spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0515002.
- 袁 松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0515002.

栏目编辑: 吴秀娟