

基于波长调制技术的温度实时测量方法研究

孙鹏帅 张志荣 夏滑 庞涛 吴边 崔小娟 沈凤娇 王煜 董凤忠

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

摘要 可调谐二极管激光吸收光谱技术(TDLAS)以其响应速度快、灵敏度高、非接触等优点已被广泛应用于气体浓度、温度的原位在线测量。基于波长调制吸收光谱技术,理论分析和推导了二次谐波温度反演公式。并采用分时锯齿波扫描形式使两个激光器分别产生覆盖中心波长为760.21 nm和760.88 nm的两条氧气吸收谱线的激光,经 2×1 光纤耦合器耦合为一束光束,通过测量管式炉内同一区域的二次谐波信号来反演有氧环境中的平均温度值。为了修正谱线线型和光强对实验所得的二次谐波信号峰值比值的影响,采用室温下标定温度反演公式中所需参数的方法,有效地简化了实验过程,提高了测量精度。温度在300 K~900 K范围内变化的测量结果与管式炉的平均温度值具有较高的一致性,误差在 ± 20 K以内。

关键词 光谱学;温度测量;波长调制吸收光谱技术;分时锯齿;二次谐波信号

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201535.0230001

Study on Real-Time Temperature Measurement Based on Wavelength Modulation Technology

Sun Pengshuai Zhang Zhirong Xia Hua Pang Tao Wu Bian Cui Xiaojuan
Shen Fengjiao Wang Yu Dong Fengzhong

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

Abstract Tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) has been widely used in the gas concentration and temperature online monitoring because of its excellent characteristics such as fast response, high spectral resolution and non-contact feature. In order to reduce error values and simplify experimental equipments, the temperature inversion theory and derivation formula based on wavelength modulation absorption spectroscopy are analyzed. Two distributed feed back (DFB) lasers with output wavelengths of 760.21 nm and 760.88 nm generate laser covering two oxygen absorption lines with time-sharing sawtooth scanning, respectively. Only one laser beam passes through the same optical path after coupling by a 2×1 fiber coupler. Average temperature in the tube-furnace is obtained by the peak-ratio of second harmonic signals. A method to calibrate required parameters for temperature inversion at indoor temperature is used to correct the impact of line-shape and spectral intensity. The experimental results show that the measured temperatures and the preset values within the temperature of 300 K~900 K are consistent, and the measurement error is within ± 20 K.

Key words spectroscopy; temperature measurement; wavelength modulation absorption spectroscopy; time-share sawtooth wave; second harmonic signal

OCIS codes 300.6260; 200.4560; 280.4788

收稿日期: 2014-08-18; 收到修改稿日期: 2014-09-25

基金项目: 国家自然科学基金(11204320)、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,硕士研究生,主要从事气体检测与燃烧诊断等方面的研究。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)

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

1 引 言

目前,煤、石油和天然气在我国能源结构中占主要地位,这类化石类燃料中通常含有大量的硫和碳元素,在燃烧利用时会产生对环境有严重污染的 SO_2 、 CO 、 CO_2 、 NO_x 等气体。为提高燃烧效率,减少污染物排放,需要能过燃烧参数的实时检测来进行燃烧过程的优化控制^[1-2]。因此,燃烧场的温度、气体组分的浓度同时在线测量近年来已成为一个研究热点。

可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS),是利用分布反馈式(DFB)激光器波长的可调谐特性,通过电流控制输出波长,获得被测气体的特征吸收谱,以其灵敏度高、选择性强、非接触等优点广泛应用于低浓度气体检测、汽车尾气检测以及工业污染源排放在线检测等领域^[3-6]。该技术可以同时实现气体温度、浓度的在线测量,并且系统具有较好的环境适应性、抗干扰能力和快速检测能力,近几年来已发展成为燃烧参数诊断的主要技术之一^[7-8]。TDLAS技术包括直接吸收光谱和波长调制吸收光谱,直接吸收光谱技术具有装置简便,易于操作,能够直接反演出吸收信号等优点,是最常用的温度测量方法之一^[9-10]。但是直接吸收光谱技术在数据处理过程中需要对基线和吸收线型进行拟合,这样就会引入较大的误差。特别是在吸收强度较弱或目标气体浓度较低的情况下,拟合误差会更大。而波长调制吸收光谱技术不需要对基线进行拟合,测量极限比直接吸收光谱技术高上百倍,可有效提高信号的信噪比^[11]。

本文以波长调制吸收光谱技术为基本原理,对其温度反演公式进行了较为详细的理论分析和推导。由于实验所用的窄线宽可调谐DFB激光器调谐范围最大为2 nm,需要通过调节温控才可以实现最大调谐范围,在实验过程中的调谐范围通过扫描电流获得,其调谐幅度为0.006 nm/mA,调谐范围较小,通常只有0.3 nm。所以一台激光器不易完成双谱线同行扫描。文中提出了分时锯齿技术,采用两台激光器扫描得到两条吸收谱线,该方法扩大了选线的范围。用该方法同时调制产生待测气体的两条吸收线的二次谐波信号,利用这两条吸收线的二次谐波峰值比来反演所测区域的温度值,可以有效地避免直接吸收所引入的基线提取和吸收线型拟合的误差。同时为了简化该公式测量温度的复杂性,提出了一种简便的温度反演所需参数的标定方法,有效地改善了过程的复杂性以及测量精度。选择中心吸收波长为760.21 nm和760.88 nm的两条氧气吸收谱线,在实验室中以管式炉为高温环境,进行了300 K~900 K温度变化情况下的实验验证和结果分析。结果证明利用波长调制技术,采用分时锯齿扫描技术以及所提出的参数标定方法进行温度的实时测量是完全可行的,扩大了谱线选择范围,提高了温度测量精度,为后续在燃烧诊断中的应用奠定了基础。

2 测温基本原理

2.1 波长调制理论

可调谐半导体激光吸收光谱的理论以Beer-Lambert定理为基础,即一束频率为 ν 的单色光通过混合气体吸收介质,透射光强 I_1 与入射光强 I_0 的比率 $\tau(\nu)$ 与该频率处吸收气体的线强 S 、摩尔分数 X 、吸收路径长度 L 、总的气体压强 P 以及线型函数 $\phi(\nu)$ 的乘积成指数关系:

$$\tau(\nu) = \frac{I_1}{I_0} = \exp[-S(T)XPL\phi(\nu)], \quad (1)$$

通常令 $\alpha(\nu)$ 为吸收系数, $\alpha(\nu) = SP\phi(\nu)$ 。

调制信号是在中心频率 $\bar{\nu}$ 的二极管激光器上,加一角频率为 ω 的正弦调制电流,则调制后的激光输出频率 $\nu(t)$ 和强度 $I_0(t)$ 可表示为

$$\nu(t) = \bar{\nu} + a \cos(\omega t), \quad (2)$$

$$I_0(t) = \bar{I}_0 + i_0 \cos(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

式中 φ 为强度调制与波长调制的相位差, a 和 i_0 分别为频率和强度的调制幅度,默认为激光强度和波长的变化与所加的驱动电流值呈线性关系^[12]。经调制后的透射率 $\tau(\nu) = \tau[\bar{\nu} + a \cos(\omega t)]$,是一个周期为 ωt 的偶函数,通过傅里叶级数展开为

$$\tau[\bar{\nu} + a \cos(\omega t)] = \sum_{k=0}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, a) \cos(k\omega t), \quad (4)$$

式中 $H_k(\bar{\nu}, a)$ 为透射级数 k 的傅里叶系数, 可表示为

$$H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) d\theta, \quad (5)$$

$$H_k(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cos(k\theta) d\theta, \quad (6)$$

将(1)、(3)、(4)式联立, 可以得到透射光强的二阶表达式为

$$V_{\text{sig-2}} = \bar{I}_0 H_2 \cos(2\omega t) + \frac{i_0}{2} H_1 [\cos(2\omega t + \varphi) + \cos \varphi] + \frac{i_0}{2} H_3 [\cos(2\omega t - \varphi) + \cos(4\omega t + \varphi)]. \quad (7)$$

探测器将接收的光信号转换为电信号输入锁相放大器, 将得到的信号与参考信号输入相敏检波器, 再通过低通滤波器得到直流信号。若所加参考信号角频率为 2ω , 便可得到二次谐波信号为

$$S_2(\bar{\nu}) = \bar{I}_0 H_2(\bar{\nu}, a) + \frac{i_0}{2} H_1(\bar{\nu}, a) + \frac{i_0}{2} H_3(\bar{\nu}, a). \quad (8)$$

该表达式忽略了光强调制和频率调制的相位差, 因为通过调节相敏检波器可以使该相位差趋近于零; 同时也去掉了调制引起光强的非线性项, 因为该项在低调制深度时没有很大意义, 一般情况下可以通过扣除背景的方法去掉^[13]。这样(8)式即为实验所得调制信号的二次谐波表达式。

由于傅里叶级数展开的奇数项在谱线中心频率处的值为零, 偶数项在中心频率处达到最大值, 图1为洛伦兹线型下对锁相放大器输出的二次谐波波形的数值仿真结果, 包含了一阶、三阶的和频、差频分量的贡献, 但二次谐波信号在中心频率处的值只有 H_2 贡献。因此, 二次谐波信号在谱线中心频率处的值可以表达为

$$S_{2-\text{peak}}(\bar{\nu}) = \bar{I}_0 H_2(\bar{\nu}, a). \quad (9)$$

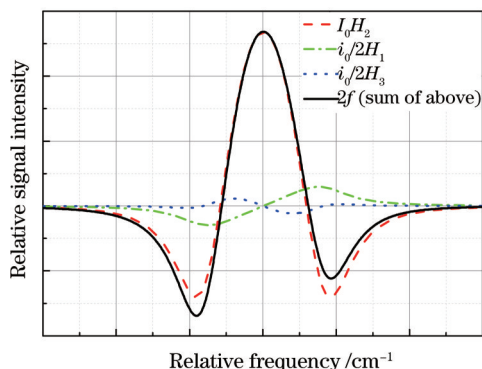


图1 二次谐波信号的构成

Fig.1 Harmonic component of 2f signal

2.2 温度反演

在所测目标气体吸光度较小的情况下, 即 $\alpha(\nu)L \ll 1$ 时, 光强透射率[(1)式]可以用泰勒级数展开为

$$\tau(\nu) = \exp(-SXLP\phi) \approx 1 - SXLP\phi. \quad (10)$$

(9)式中傅里叶级数的二阶系数可以表达为

$$H_2(\bar{\nu}, a) = -\frac{SPLX}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \phi(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cos 2\theta d\theta. \quad (11)$$

本文所述气体温度测量采用的是双吸收线方法, 使覆盖吸收线的两束激光沿同一路径同时通过测量区域, 得到两条吸收线的吸收信号, 根据两条吸收谱线强度 $S(T)$ 的比值是温度的单调函数来反演温度值。由(8)式和(11)式即可得到两个二次谐波峰值比值 R_{2f} 为

$$R_{2f} = \frac{I(\bar{\nu}_1)H_2(\bar{\nu}_1, a_1)}{I(\bar{\nu}_2)H_2(\bar{\nu}_2, a_2)} = \frac{I(\bar{\nu}_1)S_1 \int_{-\pi}^{\pi} \phi_1(\bar{\nu}_1 + a_1 \cos \theta) \cos 2\theta d\theta}{I(\bar{\nu}_2)S_2 \int_{-\pi}^{\pi} \phi_2(\bar{\nu}_2 + a_2 \cos \theta) \cos 2\theta d\theta}, \quad (12)$$

由(12)式可以很明显地看到 R_{2f} 除了与线强 S 有关外, 还与中心频率处的激光强度 $I(\bar{\nu})$ 、线型函数 ϕ 有关, 为

方便叙述,令线型函数的积分结果为 $A = \int_{-\pi}^{\pi} \phi(\bar{\nu} + a \cos \theta) \cos 2\theta d\theta$, 要研究线型函数对 A 的影响, 需先引入调制系数 $m = \frac{a}{\Delta\nu}$, 其中 $\Delta\nu$ 为吸收谱线的半峰半宽, 通过数值计算可以得到高斯线型、洛伦兹线型以及福依特线型对应的 A 值与 m 的关系^[14]。图2说明了不同的线型对应的 m 值改变对谐波幅值影响也不相同, 而吸收谱线线型主要受温度变化的影响, 进而引起 A 值的变化^[15]。除了与温度有关外, 谱线线型还受压强的影响, 但是当调制系数在 2.2 附近时, 压强改变为 $\pm 5\%$, 两个二次谐波的比值几乎不变, 不影响测量结果^[16]。所以 A 值之比需要通过已知温度、压强等条件进行理论计算准确获得。因此在实验过程中, 通过调节调制系数使二次谐波信号达到最优程度, 此时 m 值在 2.2 附近, 不同线型函数的 A 值此时均达到最大, 且随 m 变化最小, 可以有效提高二次谐波的信号强度并降低实验环境变化对线型的影响。

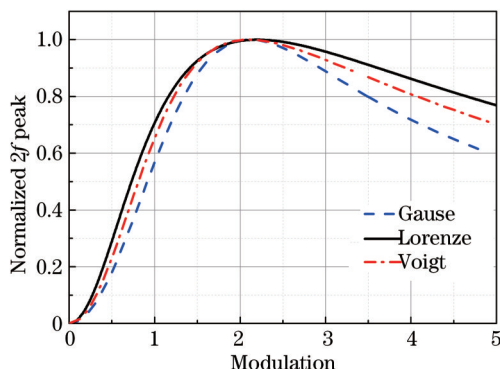


图2 不同线型 2f 峰值随调制系数的变化

Fig.2 Normalized 2f peak height versus m for three line shapes

谱线的吸收线强 S 是表示吸收线强弱的一个物理量, 是跃迁频率、温度、跃迁的低能态能量和配分函数的函数。在温度 T 下, 对于第 i 个吸收谱线的线强 $S_i(T)$ 可由参考温度 T_0 时的吸收线强 $S_i(T_0)$ 得到:

$$S_i(T) = S_i(T_0) \frac{Q(T_0) T_0}{Q(T) T} \exp\left[-\frac{hcE_i^*}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_{0,i}}{kT}\right)\right] \left[1 - \exp\left(\frac{-hc\nu_{0,i}}{kT_0}\right)\right]^{-1}, \quad (13)$$

将(13)式代入(12)式, 且令两条吸收线的 A 值之比为 K , 则可得到温度表达式为

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2^* - E_1^*)}{\ln R_{2f} + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k} \times \frac{E_2^* - E_1^*}{T_0} + \ln \frac{1}{K} + \ln \frac{I(\bar{\nu}_2)}{I(\bar{\nu}_1)}}, \quad (14)$$

式中 $S_i(T_0)$ 是在参考温度 T_0 下的吸收线强度; $Q(T_0)$ 为吸收分子配分函数; E^* 为跃迁的低能态能量; $\bar{\nu}_0$ 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; R_{2f} 通过测量获得; K 值和 $I(\bar{\nu}_2)/I(\bar{\nu}_1)$ 可以通过谱线参数计算和测量参考光得到, 相对比较复杂, 因此本文提出了在已知温度条件下进行标定获得该值的方法, 如 3.3 节所述。

3 实验设计

3.1 谱线选择

由于氧气普遍存在于工业过程中, 是燃烧的必需气体, 而且通常含量较高, 在测量温度的同时容易实现对氧气浓度的测量, 在燃烧诊断中, 通过对氧气温度和浓度的同时测量, 可以实时检测燃烧状态, 对提高燃烧效率、节约能源和减少污染气体排放具有非常重要的意义。实验中选择中心波长为 760.21 nm 和 760.88 nm 的两条氧气吸收谱线。由 HITRAN2008 数据库中查得两条谱线的光谱参数如表 1 所示^[17]。

选择这两条谱线主要考虑到该谱线对在整个测温范围内具有较大的线强, 在实验中可以得到较高信噪比的吸收信号, 从而得到较好的温度测量精度。该谱线对的线强比值对温度具有较高的灵敏度, 图 3 所示为

两条吸收谱线的线强及其比值在测量温度范围内随温度变化的关系,可以满足温度测量对谱线吸收强度以及温度灵敏度的要求^[18]。

表 1 两条吸收线的基本参数

Table 1 Basic spectroscopic parameters of the two absorption lines

No.	Wavenumber /cm ⁻¹	Wavelength /nm	Line strength /(cm ⁻² ·atm ⁻¹) (300 K)	Low state energy/cm ⁻¹
1	13154.3	760.21	1.0587×10 ⁻⁴	345.85
2	13142.7	760.88	2.144×10 ⁻⁴	79.56

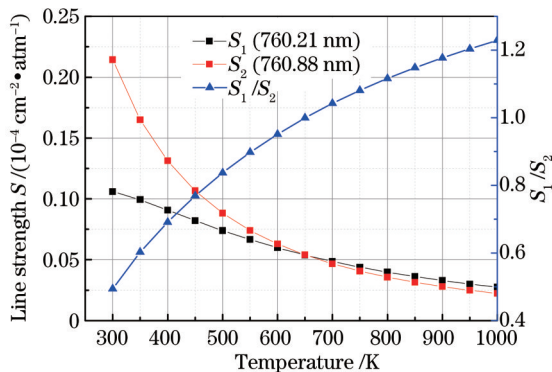


图 3 两条谱线的线强及比值与温度变化的关系(HITRAN2008 数据)

Fig.3 Variation in line strength of the line pair and their ratio with temperature (HITRAN2008 database)

3.2 实验装置

实验主要进行基于波长调制吸收光谱技术及参数标定方法对温度测量的验证,实验室中由高温管式炉提供长度约为 700 mm 的稳定高温环境,测量区域的温度值和加热速率可以通过高温炉内置程序进行设置,误差约为±5 K。实验装置示意图如图 4 所示,实验中使用两个 DFB 激光器,分别由两套激光器驱动系统控制,采用分时锯齿波扫描形式使两个激光器分别产生覆盖 760.21 nm 和 760.88 nm 两个中心波长的激光,即将加在激光器电控板上的锯齿扫描信号的一个周期分为两部分,第一个激光器的扫描锯齿波前半部分为扫描状态,后半部分为直流输出,使其覆盖中心波长为 760.21 nm 的氧气吸收谱线,第二个激光器所加的锯齿波前半部分为直流输出,后半部分为扫描状态,使其覆盖中心波长为 760.88 nm 的氧气吸收谱线;两个扫描锯齿波的频率均为 10 Hz,同时在两个激光器上加载频率为 10 kHz 的高频正弦调制电信号,使得激光器输出波长和能量同时发生调制。调制后的激光经过 2×1 光纤耦合器耦合为一束光,经光纤准直器后,通过高温炉的温度测量区域,经氧气吸收后的光信号由光电探测器转化为电信号,输入到锁相放大器进行解调,得到两个吸收谱线的二次谐波信号,由 LabVIEW 软件控制数据采集卡进行数据的在线采集与处理。

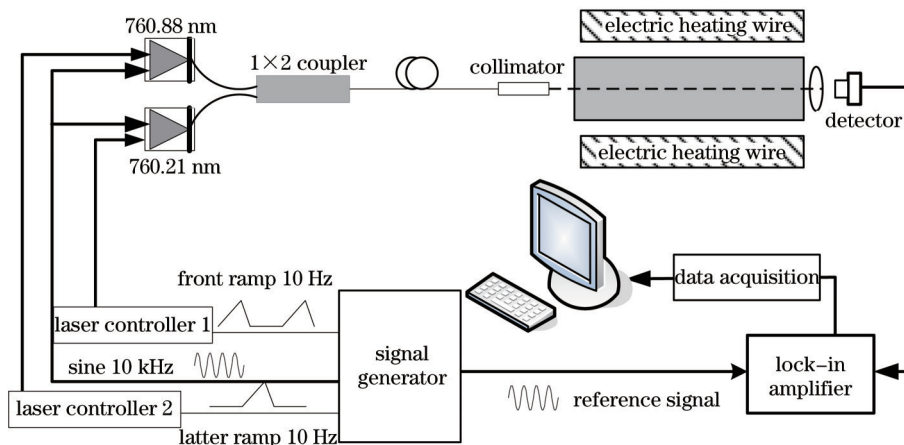


图 4 实验装置示意图

Fig.4 Schematic of experimental setup

3.3 标定方法

由温度的反演公式(14)式可以看到,进行温度计算时需要已知中心频率处光强的比值 $I(\bar{\nu}_2)/I(\bar{\nu}_1)$ 和 K 值。中心频率处的光强值可通过分束器测量无吸收时的光强变化得到,由于实验在静态的温度场中进行,因此在实验过程中,中心频率处光强的比值保持很小的变化范围,可以看作是一个定值。 K 值与吸收谱线线型有关,上文已做详细分析,除了可以通过理论计算得到准确的 K 值外,还可以通过实验获得。在已知温度和压强下,准确测量两个吸收谱线的二次谐波峰值对比 K 值进行标定,这样既简化了反演过程的复杂度,也可以修正实际实验过程中其他因素的影响。实验中将这两项看作一个参数 ξ [令 $\xi = \ln \frac{1}{K} + \ln \frac{I(\bar{\nu}_2)}{I(\bar{\nu}_1)}$], 在实验加热之前,通过热电偶温度计多点测量管式炉内温度,均为 296 K。激光器稳定工作一段时间后,得到两条吸收谱线的二次谐波信号,此时通过修正参数 ξ 使得实验系统反演得到的温度值为 (296 ± 5) K,最终得到参数 $\xi = -0.39$, 在第 4 节实验过程中测量得到的管式炉内温度值均保持该参数值不变。

4 实验结果与分析

为了验证分时锯齿波以及所采用的标定方法的可靠性,进行不同温度下的测量实验验证。采用上述实验装置,将耦合后的光束通过高温炉测温区,高温炉内保持一个大气压,吸收光程长度为 700 mm。第一组实验为升温过程中的温度测量值与设置值的对比:温度设置为最高温度 700 K,以每分钟升高 10 K 的速率从室温开始升高,温度达到 700 K 时,使高温炉内温度在 700 K 状态下维持 10 min,使其达到管内温度稳定状态,然后停止加热,使其自然降温,并继续记录测量数据,图 5 为得到的实验结果。为了验证系统的稳定性,进行第二组实验:温度分别设置在 500 K、700 K、900 K 三个温度状态,并持续一段时间,保证高温炉内温度混合均匀,再进行实验数据采集和处理。图 6 为三个稳定温度状态下的测量值、设置值与平均温度值的结果对比。

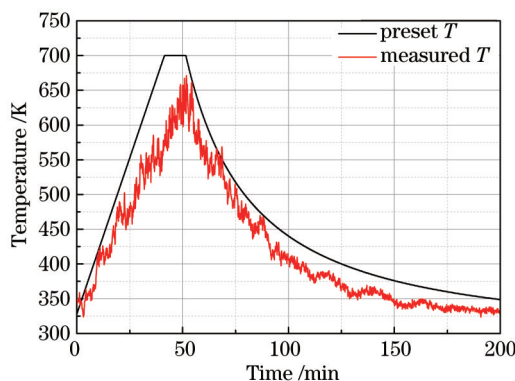


图 5 加热过程测量温度与设置温度

Fig.5 Measured and preset temperatures in heating process

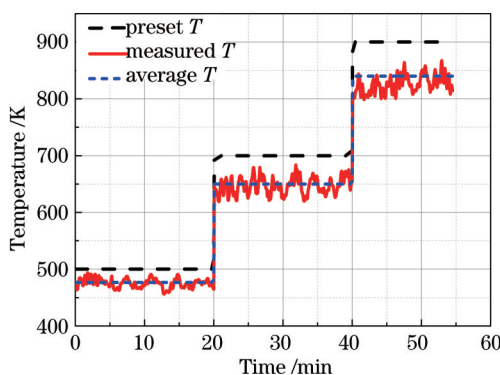


图 6 不同状态下测量温度、设置温度与平均温度的对比

Fig.6 Measured, preset and average temperatures at different states

图5中实验结果表明,测量温度能够很好地反映加热过程中温度变化的趋势,但是测量温度均低于设置温度。其原因是使用的高温炉加热区域只在炉子中间一段,两端与外界联通,因此两端温度低于中间温度,而高温炉的设置温度值是由加在中间段的热电偶测量得到的,因此,平均温度显然低于设置温度。为得到实验时测量区域的平均温度,待温度稳定后用热电偶温度计测量两端多点的温度值,然后通过计算得到炉内三个温度状态下的大致平均温度(图6中蓝线所示)比温度设定值(图6中黑线所示)分别低20 K、50 K和60 K。结果表明测量值(图6中红线所示)与炉内的平均温度值(图6中蓝线所示)很接近,误差在 ± 20 K左右,测温系统验证符合预期结果,满足要求。为了避免空气以及低温段中氧气的吸收对测量结果的影响,后续实验会对系统做进一步改进,用高纯 N_2 对该区域进行完全覆盖吹扫或设计多区域吸收池光学系统实现在管式炉中心部位进行测量,隔绝相邻区域的影响,以获得更高的测量精度。

5 结 论

对TDLAS技术中波长调制技术理论和温度反演公式做了较为详细的分析和推导;并采用分时锯齿波扫描技术结合管式炉高温系统,设计了一套基于波长调制技术的温度实时测量装置。分时锯齿波技术实现了一个锁相放大器同时得到两个激光器所产生的谐波吸收信号,有效地减小了波长调制吸收光谱技术用于温度测量实验装置的复杂性和非同时性,降低了系统成本。实验结果证明,波长调制吸收光谱技术及提出的标定方法进行温度测量具有准确性与可靠性。下一步工作在提高测量精度的同时,结合波长调制技术中的浓度测量原理,进行浓度与温度的同时在线检测实验,为实现利用波长调制技术对燃烧环境下的温度场、气体浓度场分布的同时在线监测奠定基础。

参 考 文 献

- 1 M P Arroyo, R K Hanson. Absorption measurements of water-vapor concentration, temperature, and line-shape parameters using a tunable InGaAsP diode laser [J]. *Appl Opt*, 1993, 32(30): 6104-6116.
- 2 Wang Xifen, Luo Zixue, Zhou Huaichun. Influence of boiler combustion regulation on furnace temperature distribution and NO_x emission [J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2009, 32(3): 318-323.
王浙芬, 罗自学, 周怀春. 燃烧调整对炉内温度分布及 NO_x 排放的影响[J]. *武汉科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 32(3): 318-323.
- 3 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.
- 4 Zhang Zhirong, Dong Fengzhong, Wang Yu, *et al.*. On-line monitoring of industrial toxic gases with a digital-control module [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(s1): s100304.
张志荣, 董凤忠, 王 煜, 等. 基于数字控制模块的工业有毒气体在线监测仪[J]. *光学学报*, 2011, 31(s1): s100304.
- 5 Qu Dongsheng, Hong Yanji, Wang Guangyu, *et al.*. Measurement 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.
- 6 Cui Xiaojuan, Dong Fengzhong, Chen Weidong, *et al.*. Nitrous acid measurement based on room-temperature continuous wave quantum cascade laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0430002.
崔小娟, 董凤忠, 陈卫东, 等. 基于室温连续量子级联激光器的HONO气体检测[J]. *光学学报*, 2013, 33(4): 0430002.
- 7 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.
- 8 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.
- 9 Xu Zhenyu, Liu Wenqing, Liu Jianguo, *et al.*. Temperature measurements based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J].

- Acta Physica Sinica, 2012, 61(23): 234204.
许振宇, 刘文清, 刘建国, 等. 基于可调谐半导体激光器吸收光谱的温度测量方法研究[J]. 物理学报, 2012, 61(23): 234204.
- 10 B Tao, X Ye, Z Hu, *et al.*. On-line measurement of temperature and water vapor in CH₄/air premixed flame using near-infrared diode laser [J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(11): 1098-1101.
- 11 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.
- 12 J T C Liu, J B Jeffries, R K Hanson. Wavelength modulation absorption spectroscopy with $2f$ detection using multiplexed diode lasers for rapid temperature measurements in gaseous flows [J]. Appl Phys B, 2004, 78(3-4): 503-511.
- 13 Hu Yajun, Zhao Xuehong, Zhang Rui, *et al.*. Research on the effect of light intensity modulation on the line shape of the second harmonic in the wavelength modulation technology [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(11): 1130002.
胡雅君, 赵学珏, 张 锐, 等. 波长调制技术中光强调制对二次谐波线型的影响研究[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 1130002.
- 14 J Reid, D Labrie. Second-harmonic detection with tunable diode lasers—comparison of experiment and theory [J]. Appl Phys B, 1981, 26(3): 203-210.
- 15 Zhang Zhirong, Wu Bian, Xia Hua, *et al.*. Study on the temperature modified method for monitoring gas concentrations with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(23): 234204.
张志荣, 吴 边, 夏 滑, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱技术的气体浓度测量温度影响修正方法研究[J]. 物理学报, 2013, 62(23): 234204.
- 16 G B Rieker, J B Jeffries, R K Hanson. Calibration-free wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments [J]. Appl Opt, 2009, 48(29): 5546-5560.
- 17 L S Rothman, I E Gordon, A Barbe, *et al.*. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. J Quant Spectrosc Ra, 2009, 110(9): 533-572.
- 18 X Zhou, X Liu, J B Jeffries, *et al.*. Development of a sensor for temperature and water concentration in combustion gases using a single tunable diode laser [J]. Meas Sci Technol, 2003, 14(8): 1459-1468.

栏目编辑: 吴秀娟