

利用波长调制光谱的燃烧场温度原位测量

邵 欣*

(天津中德应用技术大学 智能制造学院, 天津 300350)

摘 要: 针对高炉煤气成分复杂、燃烧效率低、燃烧稳定性差的问题, 提出了基于波长调制光谱 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS) 的高炉煤气燃烧场温度测量方法。WMS 具有抗噪声能力强、测量精度高和灵敏度好的特点, 适用于高炉煤气燃烧场的温度测量。基于可调谐二极管激光吸收光谱技术的测量特点, 以 H_2O 为目标气体, 选取波长位于 1 391.67 nm 和 1 397.75 nm 的吸收谱线, 通过两个激光器时分复用的方式获取两条目标吸收谱线, 对黑体炉和平面火焰燃烧炉进行温度测量, 达到了实验验证的目的。实验结果表明, 所提检测方案对高炉煤气所在 500~2 000 K 温度范围内都有较高的测量灵敏度, 检测结果线性度优于 99%。现场实验验证系统可满足高炉煤气的温度场测量等原位在线测量的应用, 为后续的燃烧优化和节能减排奠定了基础。

关键词: 吸收光谱; 波长调制; 时分复用; 温度测量

中图分类号: O353.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0717001

In-situ temperature measurement for combustion field based on wavelength modulation spectroscopy

Shao Xin*

(Intelligent Manufacturing College, Tianjin Sino-German University of Applied Sciences, Tianjin 300350, China)

Abstract: Aiming at the problems of composition complexity, low combustion efficiency and poor combustion stability of blast furnace gas, a temperature measurement method of blast furnace gas combustion field based on wavelength modulation spectroscopy (WMS) was proposed. WMS method has the characteristics of strong anti-noise ability, high measurement accuracy and high sensitivity. It was suitable for temperature measurement of blast furnace gas combustion field. Based on the measurement characteristics of tunable diode laser absorption spectroscopy, H_2O was taken as the target gas, and its absorption spectral lines at 1 391.67 nm and 1 397.75 nm were selected. Two target absorption lines spectra were obtained by time division multiplexing of two lasers. The temperature measurement of blackbody furnace and flat flame combustion furnace were measured respectively for the experimental verification. The results show that the proposed detection scheme has high sensitivity to the temperature range of 500–2 000 K, and the linearity of the detection results is better than 99%. The field test verified that the system can meet the application of in-situ on-line measurement of blast furnace gas temperature,

收稿日期: 2019-02-05; 修订日期: 2019-03-03

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2012YQ06016501); 天津市自然科学基金(17JCYBJC16800); 天津中德应用技术大学科技培育重点项目(zdkt2016-001)

作者简介: 邵欣(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事可调谐光谱测量技术方面的研究。Email: shaoxinme@126.com

which lays a foundation for subsequent combustion optimization and energy saving and emission reduction.

Key words: absorption spectroscopy; wavelength modulation; time division multiplexing; temperature measurement

0 引言

钢铁行业是现代工业的基础产业,在国内的国民经济中占有举足轻重的地位。随着经济的结构转型和持续增长,中国逐渐成为全球制造业中心,工业化发展的潜力很大,进一步促进了钢铁行业的发展^[1]。高炉煤气是钢铁行业中炼铁环节产生的副产品^[2],主要组成成分包括 O₂、H₂、CH₄、CO₂、N₂ 等,其中 H₂ 和 CH₄ 的含量比较少,CO 作为主要成分含量比较高,约占 25%左右。高炉煤气不可燃成分 CO₂ 和 N₂ 的总含量达到 70%,热值仅为约 3 500 kJ/m³ 左右。高炉煤气的不可燃成分既不参与燃烧也不能助燃,不仅不能产生热量,还会吸收大量燃烧过程中产生的热量,导致高炉煤气相比于其他燃料具有较低的理论燃烧温度。加之高炉煤气的燃烧量巨大,混合气体的升温过程耗时较长,导致温度偏低,同时降低了燃烧稳定性^[3]。因此,高炉煤气燃烧场中,温度测量对于改善燃烧效率、增强燃烧稳定性很有必要。

可调谐二极管激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)发展于 20 世纪 70 年代,适用于工业炼铁环境高炉煤气燃烧场的温度测量,具有高灵敏度、高谱分辨率、响应时间快,同时又不会干扰待测流场等优点^[4-6]。TDLAS 测量方法主要有波长扫描直接吸收法(Scanned-Wavelength Direct Absorption Spectroscopy, SDAS)和波长调制吸收法(Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS)^[6]。波长扫描直接吸收法通过对光谱扫描测得的吸收峰值分析实现对待测介质温度、成分等参数的测量,但由于分子吸收光谱峰值、线宽等参数会受到环境温度和压强的影响^[7],致使波长扫描直接吸收法的测量灵敏度较低,容易受到背景噪声的干扰^[8-10]。波长调制吸收法则是基于锁相放大器检测的原理进行检测,在抗背景噪声能力方面有了很大的提高,在保证检测频段灵敏度的同时能够有效抑制其它频段噪声影响,获得了更高的测量精度,适用于复杂环境的燃烧流场的温度测量^[11-13]。

文中基于 TDLAS 波长调制吸收法,依据双线测温谱线的选择原则,选取两条位于 1 391.67 nm 和 1 397.75 nm 的水蒸气吸收谱线,基于高速数据采集单元对信号进行采集与处理能力,搭建了调制激光吸收谱实验测量系统,实时在线测量燃烧场温度,并分别用黑体炉和平焰炉进行了实验验证。

1 测量原理

TDLAS 波长调制吸收法,激光器输出的波长会受到待测介质吸收系数影响,且是非线性的,激光光强变化的频率将包含很多谐波成分^[14],早有实验结果表明,多谐波成分中,二次谐波信号属于信噪比最高且位于吸收线中心峰值处,最适合实现对燃烧温度等参数的测量。根据二极管激光器工作原理,其输出波长和输出光强与其注入的电流呈线性关系。因此,二次谐波信号可表示为:

$$S_2(a, \nu) = -\frac{i_0}{2} I(\nu) H_1(a, \nu) + I(\nu) H_2(a, \nu) - \frac{i_0}{2} I(\nu) H_3(a, \nu) \quad (1)$$

式中: ν 表示输入激光波长; a 表示波长调制深度; $I(\nu)$ 表示激光光强; i_0 表示光强调制深度。

其中

$$H_n(\nu, a) = \frac{pXS(T)L}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \phi(\nu + a \cos \theta) \cos n \theta d\theta, n \geq 1 \quad (2)$$

式中: p 为气体压强; L 为激光光程长; X 为吸收气体的摩尔分数; ϕ 为吸收谱线的线型函数; $S(T)$ 为吸收谱线的强度。

实验表明,在谱线的中心频率处, H_1 和 H_3 的值为零, H_2 的值达到最大。因此,二次谐波信号在谱线中心频率处的值可以表示为:

$$S_2(a, \nu) = I(\nu) H_2(a, \nu) \quad (3)$$

采用双线法测量燃烧场温度,两条吸收线的二次谐波信号中心频率处峰值的比值可表示为:

$$R_2 = \frac{I(\nu_1) H_2(\nu_1, a_1)}{I(\nu_2) H_2(\nu_2, a_2)} = \frac{I(\nu_1) S_1(T) \int_{-\pi}^{\pi} \phi_1(\nu_1 + a_1 \cos 2\theta) d\theta}{I(\nu_2) S_2(T) \int_{-\pi}^{\pi} \phi_2(\nu_2 + a_2 \cos 2\theta) d\theta} \quad (4)$$

式中: ν_1 和 ν_2 分别为两条吸收线的二次谐波信号中心频率处的激光波长。

令 $A = \int_{-\pi}^{\pi} \phi(\nu + a \cos 2\theta) d\theta$, 两条吸收线的 A 值之比为 K , 则波长调制吸收法温度计算公式为:

$$T = \frac{\frac{hc}{k}(E_2'' - E_1'')}{\ln R_2 + \ln \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} + \frac{hc}{k} \frac{E_2'' - E_1''}{T_0} + \ln \frac{1}{K} + \ln \frac{I(\nu_2)}{I(\nu_1)}} \quad (5)$$

式中: $S_2(T_0)$ 为参考温度 T_0 下的谱线强度; h 为普朗克常量; c 为光速; k 为波耳兹曼常数; E'' 为吸收谱线下能级的能量; R_2 为需要通过实验测量的参数; K 为通过具体的谱线参数计算获得的参数; $I(\nu_2)/I(\nu_1)$ 需要通

过参考光测量实验获得。

2 实验

2.1 谱线选择

高炉煤气管道中的温度一般为 500 K, 燃烧温度约为 1 000~1 600 K, 因此, 测温范围可相应扩大为 300~2 000 K。以水蒸气为目标气体, 根据测温谱线选择原则^[15], 选取 H_2O 位于近红外波段 1 391.67 nm 和 1 397.75 nm 处的吸收线为测温谱线对, 其谱线参数见表 1。

表 1 所选谱线 n_{air} 的谱线参数

Tab.1 Parameters of selected spectral lines n_{air}

Wavelength λ/cm^{-1}	Wavenumber ν/cm^{-1}	Line strength $S(296K)$ / $cm^{-2} \cdot atm^{-1}$	Energy E''/cm^{-1}	Self broadening coefficient γ_{air} / $cm^{-1} \cdot atm^{-1}$	Air broadening coefficient γ_{self} / $cm^{-1} \cdot atm^{-1}$	Temperature-dependence exponent for γ_{air} (n_{air})	Air pressure-induced line shift (δ_{air})
1 391.67	7 185.60	1.91E-2	1 045.1	0.041 3	0.195	0.19	-0.013 46
1 397.75	7 154.35	3.67E-4	1 789.0	0.032 5	0.215	0.03	-0.014 59

利用 HITEMP2010 数据库^[16]对所选谱线在不同温度下的吸收光谱进行模拟, 如图 1 所示, 吸光度受

温度的影响较大, 使用波长调制二次谐波技术可保证在整个温度范围内测量信号的信噪比。

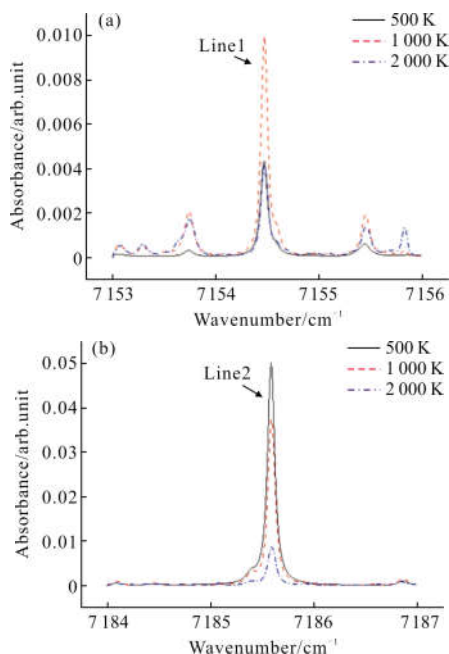


图 1 根据 HITEMP2010 对不同温度下两条谱线的吸收光谱仿真结果, $P=1 \text{ atm}$, 1% H_2O in air, $L=15 \text{ cm}$ (a) 1 391.67 nm 谱线 (b) 1 397.75 nm 谱线

Fig.1 According to the simulation results of HITEMP2010 absorption spectra of two spectra at different temperatures, $P=1 \text{ atm}$, 1% H_2O in air, $L=15 \text{ cm}$ (a) 1 391.67 nm spectral line (b) 1 397.75 nm spectral line

图 2(a) 为所选两条吸收谱线的吸收线强随温度

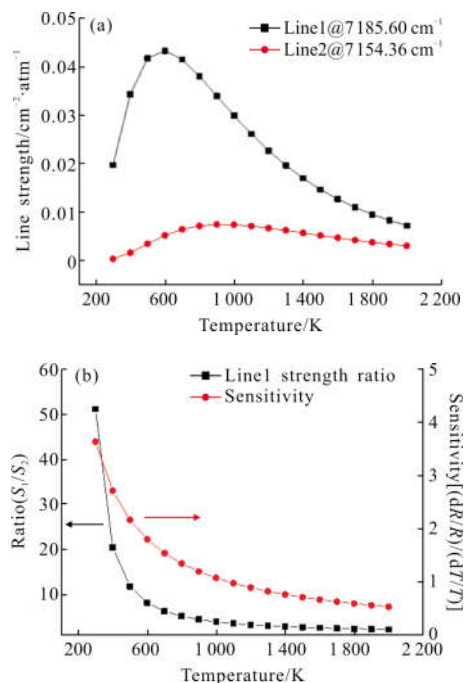


图 2 所选两条测温谱线, (a) 谱线吸收线强随温度的变化, (b) 线强之比以及测温灵敏度随温度的变化

Fig.2 Two selected temperature lines, (a) variation of absorption line intensity with temperature, (b) line strength ratio and temperature sensitivity change with temperature

的变化曲线, 两条谱线吸收线强都随温度的升高先增大后减小, 不同的是高温谱线 Line2(1 397.75 nm) 的吸收线强比低温谱线 Line1(1 391.67 nm) 小得多。

图 2(b)为线强比及其对温度检测的灵敏度随温度的变化情况, 从图中可以看出, 随着温度的升高线强比和检测灵敏度都呈下降趋势, 但在 300~2 000 K 的温度范围内都保持了较高的灵敏度(>0.5)。

2.2 实验系统

图 3 为该实验系统的示意图, 系统包括多通道函数发生器(Tektronix, AFG3000), 激光控制器(ILX Lightwave LDC3908), 激光器(NLK1E5EAAA), 准直器(Thorlabs, FC220), 燃烧器(Burner), 探测器(Thorlabs, PDA10CS), 锁相放大器(Stanford Research, SR830), 数据采集计算机系统(NI, USB7458)。

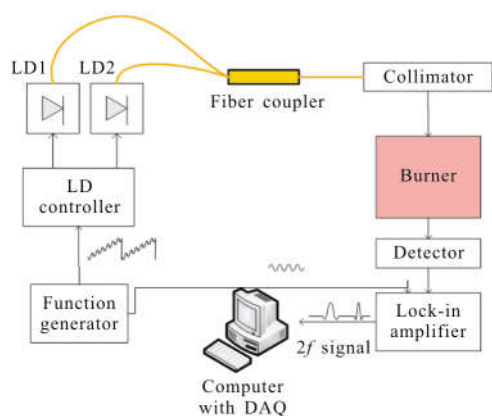


图 3 准连续调制激光吸收谱实验测量系统

Fig.3 Experimental measurement system of quasi continuous modulation laser absorption spectrum

如图 3 所示, LD1 和 LD2 两个激光器采用时分复用的工作方式^[7], 使用激光控制器使得激光器交替轮流工作的同时, 对激光器实现双重电流调制。采用多通道函数发生器生成电流调谐所需要的锯齿波 ($f_1=1$ kHz, $V_{pp}=3.6$ V) 叠加正弦波 ($f_m=200$ kHz, $V_{pp}=0.8$ V) 调制信号, 对应于调制幅度为 0.059 cm^{-1} 。锯齿波信号通过反复调谐激光输出波长地扫过选定的两条水吸收线, 其频率较低; 正弦波信号主要作用是在每个扫描周期内调制激光输出波长, 选择的频率较高。根据激光器工作温度需要, 采用控制器来直接设置温度调谐参数。两个激光器在电流与温度双重控制下控制激光输出波长为 $1\ 391.6$ nm 和 $1\ 397.75$ nm。两路激光经过光纤合束后经光纤准直器准直, 光路

经过燃烧器, 由探测器进行激光光强检测。探测器将经过燃烧器的光信号转换为电信号输入到锁相放大器, 生成二次谐波信号, 输出到数据采集卡进行处理、存储和分析, 并将测量结果进行显示。

3 实验结果与分析

3.1 黑体炉实验验证

首先使用黑体炉对系统的性能进行了验证, 将空心石墨管放入黑体炉的加热腔内作为气体池, 石墨管中为空气^[18,7], 先用直接吸收光谱提前测得 H_2O 浓度为 1.34% 。然后, 用 WMS- $2f$ 系统对其进行加温测量实验。图 4 为 3 个典型温度下两个激光器的 $2f$ 信号。

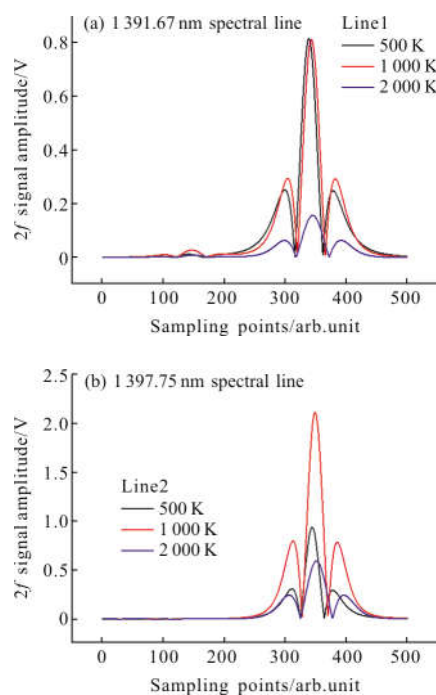


图 4 黑体炉设置在不同温度下两个波长的二次谐波信号

Fig.4 Two WMS- $2f$ signals at different temperatures of the blackbody furnace

图 4 比较了不同温度下黑体炉处于 500、1 000、2 000 K 温度时在 $1\ 391.67$ nm 和 $1\ 397.75$ nm 处二次谐波信号的变化曲线。同图 4(a)中可以看出, 不同温度下二次谐波信号的幅值有差别, 这种差别在图 4(b)中更加明显, 具有很高的区分度, 说明二次谐波信号中包含了温度信息。

图 5 比较了红外辐射测温仪与 WMS- $2f$ 系统测量的温度(带宽 1 kHz, 平均 16 次)。从 WMS- $2f$ 传感器测得的温度与测温仪读数(标准偏差=2%)在 500~

2 000 K 的整个温度范围内很好地吻合。 H_2O 摩尔分数的测量值为 1.4%，与之前直接吸收测量值相吻合。因此，测量值和实际值之间的一致性证实了 WMS-2f 传感器对温度和 H_2O 浓度测量的准确性。图 5 中的误差主要来自测量光谱数据中的不确定性、红外测温仪的温度测量不确定性、以及在数据处理过程中的误差。

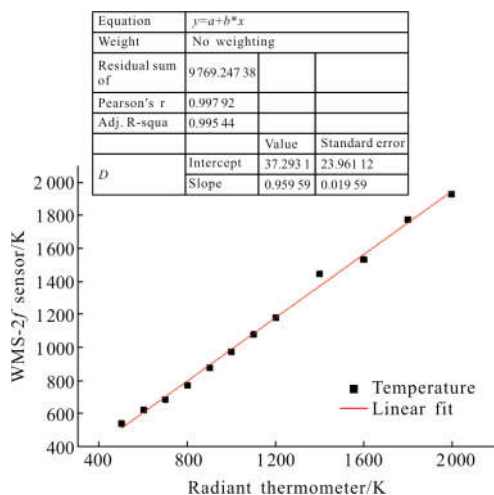


图 5 利用温度可控的黑体炉对 WMS-2f 测温的实验验证，

$P=1\text{ atm}, L=50\text{ cm}, x=1.34\%$

Fig.5 Experimental verification of WMS-2f temperature measurement using a blackbody furnace controlled by temperature, $P=1\text{ atm}, L=50\text{ cm}, x=1.34\%$

3.2 燃烧炉实验结果

利用平面火焰燃烧炉进行了实际的燃烧场测量。结果如图 6 所示，燃烧炉的燃料气体为 CH_4 ，与空气的比为 15:200 时，WMS-2f 传感器测量的结果约为 1 525 K，与热电偶的结果相吻合。

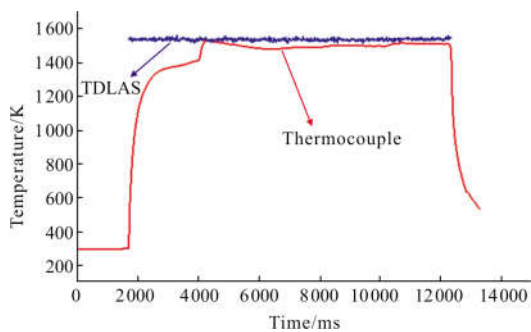


图 6 燃气比 $\varphi=15/200$ 时热电偶的测量结果与 WMS-2f 测量结果比较

Fig.6 Comparison of measurement results of thermocouple with WMS-2f measured when gas ratio is $\varphi=15/200$

3.3 现场实验

在宝钢某电厂 150 mW 高炉煤气燃气轮机 (GT11N2), 利用该实验系统进行了测量, 现场安装示意图如图 7 所示, 高炉煤气从母管引出, 经除尘除湿处理后进入低压煤气压缩机升压, 经中间冷却器冷却, 进入高压煤气压缩机升压, 升压后的高炉煤气进入单筒式燃烧室, 与经过滤和升压后的空气在燃烧室中混合燃烧。光路布置在距燃烧室顶约 0.86 m 处, 燃烧温度和水蒸气的浓度分别在 1 400 K 和 9.8% 附近波动, 测量结果如图 8 所示, 与 CFD 计算值和经验值吻合, 验证了该系统对于实际燃烧测量的可行性和有效性。后期的工作将燃烧产物气体标志物 (如 CO) 的排放与燃烧温度相结合, 对燃烧的整个过程进行优化, 为节能减排提供技术支持和解决方案。

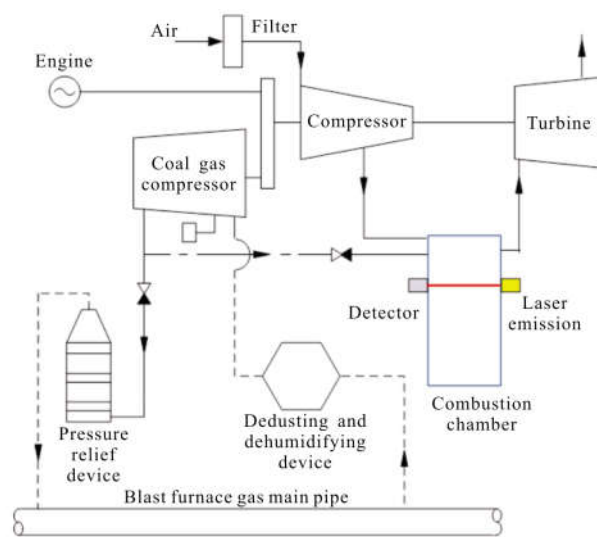


图 7 高炉煤气燃气轮机燃烧测量示意图

Fig.7 Schematic diagram of combustion measurement for blast furnace gas turbine

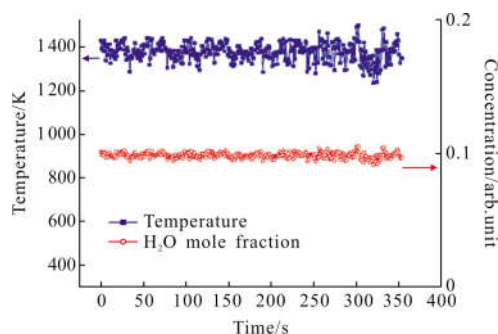


图 8 高炉煤气燃气轮机燃烧室测量结果

Fig.8 Measurement results of blast furnace gas turbine combustor

4 结论

在燃烧场的温度测量中,以 H_2O 为目标气体,选其位于1391.67 nm和1397.75 nm的吸收谱线进行分析,利用两个激光器时分复用的方案获取两条目标吸收谱线,采用波长调制一次谐波归一化的二次谐波(WMS-2f/1f)检测方案建立了激光吸收谱实验测量系统,利用黑体炉和平面火焰燃烧炉进行了实验验证。结果表明,利用波长调制光谱的燃烧场温度原位测量方法对高炉煤气所在温度范围为500~2000 K时具有较高的测量灵敏度,线性度优于99%,对于黑体炉静态温度场标定本测量系统测温的不确定度小于60 K。对平焰炉动态火焰其温度测量结果与热电偶有很好的一致性。最后将系统用于宝钢某电厂150 mW高炉煤气燃气轮机燃烧室的燃烧测量,结果表明该系统可满足高炉煤气的温度场测量等测温应用。该研究为后续的燃烧优化和节能减排奠定了基础。

参考文献:

- [1] Zhang Bo, Chen Hongbo. Study on sustainable development of China's iron and steel industry CDM project [D]. Beijing: Institute of Urban Development and Environment, Chinese Academy of Social Sciences; Chinese Academy of Social Sciences; Center for Urban Development and Environment, Chinese Academy of Social Sciences, 2009. (in Chinese)
- [2] Wang Feng, Tang Yuxuan. Recognition of types of blast furnace gas pipelines based on fuzzy control [J]. *Journal of Hebei United University Natural Science Edition*, 2018, 40(1): 98-103. (in Chinese)
- [3] Sun Hao, Zhou Dayong, Zhang Hongchao, et al. Simulation of single-junction GaAs photovoltaic cell output characteristics by continuous wave laser irradiation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(10): 1003006. (in Chinese)
- [4] Wei Jifeng, Hu Xiaoyang, Zhang Kai, et al. Technologies and development trends of directly measuring high energy laser energy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(7): 0706004. (in Chinese)
- [5] Cui Haibin, Wang Fei, Li Meiyi. Measurements of CO_2 temperature and concentration in high temperature environment based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 420-426. (in Chinese)
- [6] Nie Wei, Kan Ruifeng, Xu Zhenyu, et al. Measuring spectral parameters of water vapor at low temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(20): 204204. (in Chinese)
- [7] Qu Dongsheng, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Wavelength-modulation spectroscopy for measurements of gas pressure, temperature and H_2O concentration in high-temperature environment [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(5): 1339-1344. (in Chinese)
- [8] Jia Haoyue, Liu Shuping, Wei Jilin. The application of boltzmann distribution in gas temperature measurement by spectral method [J]. *Journal of Taiyuan University of Science and Technology*, 2017, 38(6): 71-74. (in Chinese)
- [9] Xiong Yongquan, Zhou Bin, Wang Yihong, et al. Calibration-free one-line method based on wavelength modulation spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(9): 0930002. (in Chinese)
- [10] Qu Dongsheng, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Study on mass flux measurement methods of gas based on scanningwavelength modulation spectroscopy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(9): 0904006. (in Chinese)
- [11] Zhang Liang. On the methodology of measuring high-speed flows using tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(3): 355-367. (in Chinese)
- [12] Lins B, Zinn P, Engelbrecht R, et al. Simulation-based comparison of noise effects in wavelength modulation spectroscopy and direct absorption TDLAS [J]. *Applied Physics B*, 2010, 100(2): 367-376.
- [13] Qu Dongsheng, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Measurement of multi-parameters of gas based on the wavelength modulation spectroscopy [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2016, 35(4): 470-476. (in Chinese)
- [14] Shao Xin, Wang Feng, Zhang Xinghui, et al. CO gas system of quasi-continuous laser modulation absorption spectroscopy [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(5): 0506006. (in Chinese)
- [15] Zhou Xin, Liu Xiang, Jeffries J B, et al. Development of a sensor for temperature and water concentration in combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Measurement Science and Technology*, 2003, 14(8): 1459-1468.
- [16] Rothman L S, Gordon I E, Barber R J, et al. HITEMP, the high-temperature molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2010, 111(15): 2139-2150.
- [17] Li Jinyi, Du Zhenhui. Temperature sensing using direct absorption spectroscopy combined with time division multiplexing [J]. *Laser Journal*, 2015, 36(8): 58-62. (in Chinese)
- [18] Sun Qi, Wang Guangyu, Qu Dongsheng. Measurement of gas temperature based on H_2O absorption spectroscopy in wavelength range of 1397 nm [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2017, 30(2): 80-83. (in Chinese)