

燃煤锅炉高温腐蚀气体激光在线监测设备研究

李龙 师帅 宫廷 田亚莉 郭古青 邱选兵 熊小鹤 李传亮

Research on laser online monitoring equipment for high-temperature corrosive gas in coal-fired boilers

LI Long, SHI Shuai, GONG Ting, TIAN Ya-li, GUO Gu-qing, QIU Xuan-bing, XIONG Xiao-he, LI Chuan-liang

引用本文:

李龙, 师帅, 宫廷, 田亚莉, 郭古青, 邱选兵, 熊小鹤, 李传亮. 燃煤锅炉高温腐蚀气体激光在线监测设备研究[J]. *中国光学*, 2024, 17(5): 1060–1067. doi: 10.37188/CO.2023–0209

LI Long, SHI Shuai, GONG Ting, TIAN Ya-li, GUO Gu-qing, QIU Xuan-bing, XIONG Xiao-he, LI Chuan-liang. Research on laser online monitoring equipment for high-temperature corrosive gas in coal-fired boilers[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(5): 1060–1067. doi: 10.37188/CO.2023–0209

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0209>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

可见光通信中正交频分复用调制技术

Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 516 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0051>

静态干涉型高温温度场成像探测方法研究

Imaging and detection method for static interferometric high-temperature temperature field

中国光学 (中英文). 2023, 16(4): 796 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0168>

基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究

Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 151 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0029>

光纤法布里-珀罗干涉仪高温传感器研究进展

Research progress of optical fiber Fabry-Perot interferometer high temperature sensors

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 609 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0219>

GFC-IFC技术在多组分微量气体分析中的应用

Applications of GFC-IFC in trace multi-component gas analysis

中国光学 (中英文). 2021, 14(6): 1378 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0064>

氨气高精度激光光谱检测装置的设计及实现

Design and achievement of a device for high-precision ammonia gas detection based on laser spectroscopy

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1129 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0023>

文章编号 2097-1842(2024)05-1060-08

燃煤锅炉高温腐蚀气体激光在线监测设备研究

李龙¹, 师帅¹, 官廷¹, 田亚莉¹, 郭古青¹, 邱选兵¹, 熊小鹤², 李传亮^{1*}

(1. 太原科技大学应用科学学院 山西省精密测量与在线检测装备工程研究中心, 山西省光场调控与融合应用技术创新中心, 山西太原 030024;

2. 西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西西安 710049)

摘要:燃煤锅炉燃烧场的经济性、安全性和环保性对于智慧电厂建设具有重要意义。H₂S 和 CO 是燃煤锅炉燃烧场的两种主要高温腐蚀气体, 它们不仅腐蚀锅炉近壁面, 尾气对大气环境的危害也极其严重。基于近红外可调谐半导体激光吸收光谱技术, 结合波长调制光谱技术和频分复用技术, 研制了一款无人值守的燃煤锅炉主燃区的 H₂S 和 CO 气体浓度实时在线监测设备。仿真模拟了 6335~6341 cm⁻¹ 范围内的气体吸收光谱, 并选定 1.5 μm 附近的近红外激光器作为激光光源。研制了一套耐高温耐腐蚀的 Herriott 型多光程池, 使激光与气体相互作用的有效光程达 15 m; 开发了硬件电路及相应的固件程序, 实现了 H₂S 和 CO 吸收光谱信号的二次解调与浓度反演。线性度和 Allan 方差实验表明, 其线性拟合相关系数分别为 0.9998 和 0.9995, 在 73 s 和 53 s 的积分时间下, H₂S 和 CO 的最低检测极限分别为 0.2×10⁻⁶ mol/mol 和 0.344×10⁻⁶ mol/mol。最后, 将研制的设备在某 300 MW 电负荷的四角切圆燃煤锅炉主燃区燃烧气氛场进行应用示范, 对水冷壁附近的 H₂S 和 CO 进行同步测量。结果表明, 锅炉中 H₂S 和 CO 的浓度呈正相关, 厌氧燃烧会导致两种气体的含量增加, 造成对水冷壁的腐蚀。

关键词: 锅炉水冷壁腐蚀; 波长调制光谱; 频分复用; 高温多光程吸收池; 长期在线监测

中图分类号: O433.5

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2023-0209

收稿日期: 2023-11-23; 修订日期: 2023-12-13

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2023YFF0718100); 国家自然科学基金(No. 52076145, No. 12304403); 山西省科技创新人才团队专项资助(No. 202304051001034); 山西省留学人员科技活动项目(No. 20230031); 山西省省筹资金资助回国留学人员科研资助项目(No. 2023-151); 山西省基础研究计划(No. 202203021222204, No. 202303021212224)

Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFF0718100); National Natural Science Foundation of China (No. 52076145, No. 12304403); the Special Fund for Science and Technology Innovation Teams of Shanxi Province (No. 202304051001034); Fund Program for the Scientific Activities of Selected Returned Overseas Professionals in Shanxi Province (No. 20230031); Shanxi Scholarship Council of China (No. 2023-151); Fundamental Research Program of Shanxi Province (No. 202203021222204, No. 202303021212224)

Research on laser online monitoring equipment for high-temperature corrosive gas in coal-fired boilers

LI Long¹, SHI Shuai¹, GONG Ting¹, TIAN Ya-li¹, GUO Gu-qing¹, QIU Xuan-bing¹,
XIONG Xiao-he², LI Chuan-liang^{1*}

(1. Shanxi Engineering Research Center of Precision Measurement and Online Detection Equipment, Shanxi
Center of Technology Innovation for Light Manipulations and Applications, School of Applied Science,

Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. MOE Key Laboratory of Thermo-fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University,
Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: clli@tyust.edu.cn

Abstract: The coal-fired boiler combustion process's economic, safety, and environmental performance holds great significance when constructing smart power plants. In coal-fired boiler combustion, H₂S and CO are the two main high-temperature corrosive gases. They not only corrode the boiler near the wall surface but also pose severe harm to the atmospheric environment through their exhaust gases. Based on the near-infrared tunable diode laser absorption spectroscopy technology, combined with wavelength modulation spectroscopy and frequency division multiplexing technology, an unstaffed online real-time monitoring instrument for H₂S and CO gas concentrations in the main combustion zone of coal-fired boilers was developed. Gas absorption spectroscopy in the 6335~6341 cm⁻¹ range was simulated, and two near-infrared lasers near 1.5 μm were selected as the laser source. A high-temperature resistant and corrosion-resistant Herriott-type multi-pass cell was developed to attain an effective optical path length of 15 m for the interaction between laser and gas. Hardware circuits and corresponding firmware programs were developed to attain secondary demodulation of the absorption spectroscopy signals of H₂S and CO and concentration inversion. The linearity and Allan variance experiments showed linear fitting correlation coefficients of 0.9998 and 0.9995. At 73 s and 53 s integration times, the minimum detection limits for H₂S and CO were 0.2×10⁻⁶ mol/mol and 0.344×10⁻⁶ mol/mol, respectively. Finally, the developed instrument was applied in the combustion atmosphere of the main combustion zone of a 300 MW tangential four-corner coal-fired boiler, and synchronous measurements of H₂S and CO near the water-cooled wall were conducted. The results indicated a positive correlation between the concentrations of H₂S and CO in the boiler, with anaerobic combustion leading to an increase in the content of these gases and causing corrosion to the water-cooled wall.

Key words: corrosion of water cooled wall in boiler; wavelength modulation spectroscopy; frequency division multiplexing; high-temperature multi-pass absorption cell; long-term online monitoring

1 引 言

为了提高燃煤利用率、实现超低排放^[1],燃煤电厂多采用低氮燃烧和空气分级燃烧技术^[2]。然而,这会导致煤粉在锅炉富燃料区进行缺氧燃烧,

从而产生大量 H₂S 和 CO 等还原性气体。这些气体的排放除了会对人体健康造成危害以外,还会对锅炉水冷壁近壁面产生腐蚀^[3],严重时会产生“爆管”现象。

以化学方法检测为主的电化学法^[4]和以光学方法检测为主的可调谐半导体激光吸收光谱技

术 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 常用来进行气体种类的甄别和气体浓度的检测^[5]。其中, 电化学法是通过与待测气体发生反应并产生电信号实现检测的^[6]。虽然检测精度高、反应速度快, 但是存在检测距离有限、抗干扰性差、环境适应性不强等缺点^[7]。TDLAS 是一种可以用于连续在线监测痕量气体浓度的光学检测技术^[8]。该技术具有灵敏度高、分辨率高及响应速度快的优点^[9], 被广泛应用于工业现场原位实时监测^[10]。然而, 由于燃烧产生的气体种类较多, 若想实现多种气体的同时测量, 需要选择相邻的吸收谱线或者使用多台设备。这两种方法要么待测气体的种类受限, 要么增加了实验成本。在实际测量中, 通常采用光学方法与多路复用技术相结合的方式来实现多种气体的同时检测^[11]。如 TDLAS 与时分多路复用 (time division multiplexing, TDM) 技术相结合、TDLAS 与频分多路复用 (frequency division multiplexing, FDM) 技术相结合^[12]。南昌航空大学的吴涛^[13]等人利用直接吸收光谱技术结合 TDM 技术, 开发了近红外 CO₂ 和 CH₄ 传感器系统, 实现了大气中 CO₂ 和 CH₄ 的同时检测。其检测极限分别为 0.55×10^{-6} mol/mol 和 0.00578×10^{-6} mol/mol。然而该系统存在响应时间较长 (~1000 s)、且信号不同步的问题。吉林大学郑传涛^[14]等人采用波长调制 (wavelength-modulation spectroscopy, WMS) 技术并结合 FDM 技术, 建立了 C₂H₂ 和 CH₄ 的双气体传感系统, 两种气体的检测极限分别为 0.7×10^{-6} mol/mol 和 0.85×10^{-6} mol/mol, 响应时间大约为 150 s, 然而由于光学反射单元与待测气体直接接触, 导致反射镜容易被污染, 无法实现锅炉现场原位测量。

本文将 FDM 与 TDLAS 技术相结合, 辅以波长调制技术, 研发了一套 H₂S 与 CO 原位在线监测设备, 并将其应用于工业现场。该设备已在高温高尘的工业现场连续稳定监测了一年多, 为水冷壁近壁面高温腐蚀提供了重要数据来源。

2 测量原理

2.1 吸收谱线的选择

为了降低成本和增加实用性, 实验选择近红外波段的激光器来检测 H₂S 和 CO 气体。谱线选择要求为相邻谱线之间互不干扰并且谱线吸收强

度需满足测量需求。基于 HITRAN 数据库^[15], 提取了符合上述条件的吸收谱线, 其中 H₂S 选取的谱线波数在 6336~6337 cm⁻¹ 之间^[16], CO 选取的谱线波数在 6338~6339 cm⁻¹ 之间^[17], 如图 1 (彩图见期刊电子版) 所示。

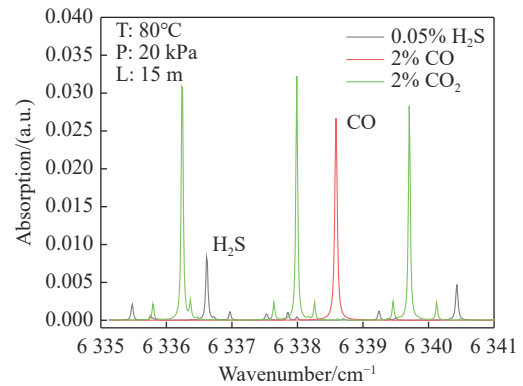


图 1 H₂S、CO 及 CO₂ 吸收谱线

Fig. 1 Absorption lines of H₂S, CO and CO₂

考虑到实际应用背景下待测气体中混有高浓度 CO₂^[18], 而 CO₂ 的吸收强度比 H₂S 高一个数量级, 为了便于分辨谱线, 选取 2% 浓度的 CO₂ 进行模拟, 同时将气压控制在低压 20 kPa, 防止 CO₂ 对测量造成干扰。

2.2 测量原理

气体分子在气室中传输时遵循朗伯比尔定律^[19]:

$$\tau(\nu) = \frac{I_t(\nu)}{I_0(\nu)} = \exp(-\alpha(\nu)L) \quad (1)$$

式中, I_0 为入射光强, I_t 为出射光强, $\alpha(\nu)$ 为气体分子吸收系数, L 为有效吸收光程^[20]。

常采用波长调制光谱技术将激光器的注入电流进行高频正弦调制^[8, 21]。激光光强经过正弦调制后的变化可以表示为:

$$I_0(t) = \bar{I}_0[1 + i_1 \cos(\omega t + \varphi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \varphi_2)] \quad (2)$$

式中, \bar{I}_0 为入射光的光强, i_a (a 为 1 和 2) 表示的是调制系数; ω 为正弦调制信号的角频率; φ_a (a 为 1 和 2) 为谐波信号的相位。

将参考光的瞬时入射光强与干扰信号相乘后得到受干扰的光强参考信号, 将其分别与频率为 f_{ref} 的正弦参考信号和余弦参考信号相乘, 得到两个低频信号, 得到的信号再进行低通滤波处理。由于一阶项的幅值较大, 所以这里使用一次谐波的 X 分量和 Y 分量表示。

$$X_{1f} = \frac{1}{2} \bar{I}_{ref} i_{1,ref} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{j,noise} t + \varphi_{j,noise}) + \frac{1}{2} \bar{I}_{ref} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{ref} t + \omega_{j,noise} t + \varphi_{1,noise} + \varphi_{j,noise}) + \frac{1}{2} \bar{I}_{ref} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \cos(\omega_{ref} t - \omega_{j,noise} t + \varphi_{1,noise} - \varphi_{j,noise}) \quad (3)$$

Y 分量为:

$$Y_{1f} = \frac{1}{2} \bar{I}_{ref} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \sin(\omega_{ref} t + \omega_{j,noise} t + \varphi_{1,ref} + \varphi_{j,noise}) - \frac{1}{2} \bar{I}_{ref} \sum_{j=1}^{+\infty} A_j \sin(\omega_{ref} t - \omega_{j,noise} t + \varphi_{1,ref} - \varphi_{j,noise}) \quad (4)$$

$$\begin{cases} \omega_{ref} t + \omega_{j,noise} t \geq \omega_{j,noise} t \\ \omega_{ref} t - \omega_{j,noise} t \geq \omega_{j,noise} t \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \omega_{ref} \geq 0 \\ \omega_{ref} \geq 2\omega_{j,noise} \end{cases} \quad (5)$$

式中 \bar{I}_{ref} 为参考光的光强, $i_{1,ref}$ 为光强的一阶幅值, $\omega_{j,noise} = 2\pi f_{j,noise}$, $\omega_{j,noise}$ 为干扰信号角频率, $f_{j,noise}$ 为干扰信号的频率, $\varphi_{j,noise}$ 为某一干扰频率下对应的干扰相位; $\varphi_{1,ref}$ 为电流引起光强度变化的第 1 阶相位; A_j 表示干扰信号频率 $f_{j,noise}$ 对应的幅值, ω_{ref} 为参考信号的角频率。

当式(3)、式(4)满足式(5)所示条件时,参考信号和干扰信号便不会发生重叠,进而实现频分复用^[22]:

3 设备关键技术与实现

3.1 设备总体设计

监测设备由光路、机械和信号处理单元三部分组成,如图 2 所示。光路部分中,两个 DFB 激光器(RXG-DFB-1578-BF)作为光源^[23],其输出的激光通过光纤合束器耦合至准直器,然后进入有效光程为 15 m 的 Herriott 型高温多光程池^[10],经过多次反射后由被探测器(PDA220905)接收,探测器将接收到的光信号转化为电信号^[24],并传输到电路系统进行解调,随后将得到的解调信号进行浓度反演、存储、显示和发送^[25]。

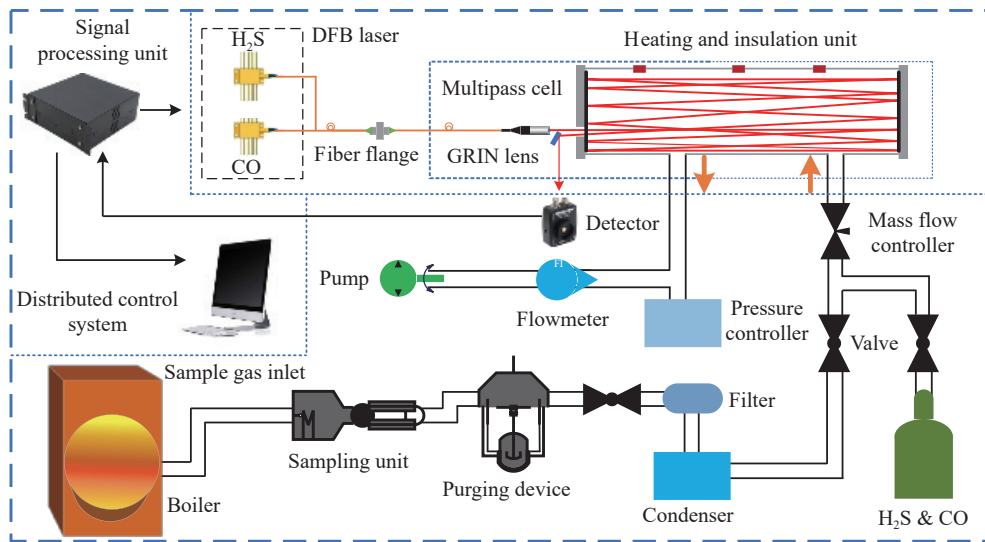


图 2 气体测量设备框图

Fig. 2 Block diagram of gas measurement equipment

机械部分由取样装置、反吹装置以及制冷系统组成。取样装置由特殊材料制成,用于将炉膛中产生的烟气实时抽入设备。该装置具有耐高温耐腐蚀的特性。由于主燃区的燃烧反应剧烈,会产生大量飞尘,而炉膛内气压低于大气压,因此有部分飞灰会吸附在取样装置上,造成取样管堵塞,

这就需要对取样管进行吹扫。进入装置的烟气中含有大量水蒸气,需要对气体进行冷凝,防止水蒸气对测量造成影响^[26]。值得注意的是,为了减弱 H₂S 的吸附,进入气室前的气管外还装有伴热装置,用来对待测气体进行加热。

信号处理单元主要采用 WMS 与 FDM 相结

合, 激光的调制和扫描通过自制电路板实现, 其中 H_2S 出光对应的调制频率为 8 kHz, CO 出光对应的调制频率为 3 kHz, 两者之间的关系可以由公式(5)得出。不同浓度的气体分别对应不同幅度的谐波信号^[27]。在对设备进行标定后, 通过分析该谐波信号即可得到待测气体的浓度信息。最终将该浓度信息显示在监测设备的触摸显示屏上。

3.2 设备校准与分析

为了验证设备精度, 使用不同浓度的 H_2S 和 CO 标准气体来对设备进行校准。其中 H_2S 的测量范围为 $0\sim 2000\times 10^{-6}$ mol/mol, CO 的测量范围为 $0\sim 30\%$ 。该标准气体的浓度是通过评估炉膛内气体的实际浓度来选取的^[28]。两种气体通过流量计控制流速后均匀进入气室, 测量得到了 $2f$ 信号和标定浓度的关系, 并对测量结果进行线性拟合, 如图 3 实线所示, 其拟合相关系数 R^2 分别为 0.9998 和 0.9995。

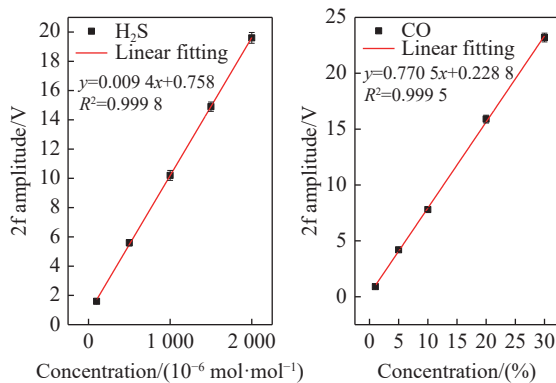


图 3 H_2S 和 CO 吸收信号的幅度与标准气体浓度的关系
Fig. 3 The relationship between the amplitude and standard gas concentration for H_2S and CO absorption signals

为了对设备的稳定性和最小检测极限进行评估, 分别测量了 1000 s 内 10×10^{-6} mol/mol H_2S 和 100×10^{-6} mol/mol CO 的光谱信号, 对数据进行 Allan 方差计算^[29], 如图 4 所示。

由图 4 可知, 积分时间在 100 s 前白噪声占据主导; 而在 100 s 后, 由于长期测量的不稳定性和设备的温度、机械漂移等会对传感器的稳定性造成影响, 信号震荡较为严重。如图 4 所示, H_2S 和 CO 分别在 73 s 和 53 s 时达到最低检测极限, 最低检测浓度分别为 0.2×10^{-6} mol/mol 和 0.344×10^{-6} mol/mol。

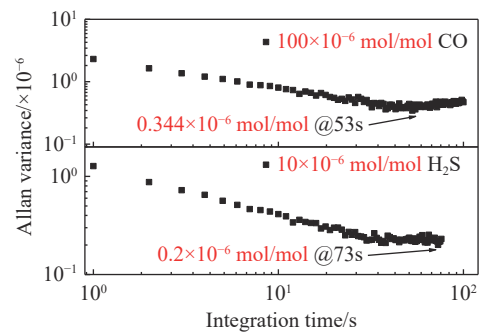


图 4 10×10^{-6} mol/mol 的 H_2S 和 100×10^{-6} mol/mol 的 CO 吸收信号的 Allan 方差随积分时间的变化情况

Fig. 4 Allan variance of 10×10^{-6} mol/mol H_2S and 100×10^{-6} mol/mol CO absorption signals varying with integration time

4 设备现场应用

将研发的设备安装至某电厂 300 MW 电负荷的四角切圆燃煤锅炉附近, 该设备对主燃区所处高度锅炉近壁面的 H_2S 和 CO 进行了实时同步测量。由于锅炉气氛场中烟尘较大且湿度较高, 即使加了过滤装置也会有一部分烟尘颗粒进入管道, 造成采样探头头部结焦, 所以进行一段时间测量后, 就需要将取样管中的烟尘颗粒物吹扫出去。

设备安装完成后连续测量 48 h 的浓度数据信息, 如图 5(彩图见期刊电子版) 所示。其中红色为 H_2S 浓度信息, 黑色为 CO 浓度信息。根据图 5 数据可以看出, 这段时间内该测点两种气体的浓度变化较为剧烈, H_2S 浓度主要分布在 $0\sim 0.05\%$ 的范围内, 峰值可达 0.075% ; 而 CO 的浓度主要分布在 $1\%\sim 20\%$ 的范围内, 最高可达 24% 。图中每隔 20 min 会出现两种气体浓度剧烈波动的情况, 这是因为设备在进行吹扫时会有大量 O_2 涌入测点周围, 导致 O_2 浓度在短时间内偏高, 此时过量的 O_2 会与附近的 H_2S 和 CO 发生反应, 使得两种气体的浓度骤降。但在 3~5 min 后, 两种气体的浓度便会恢复正常, 不会影响整体浓度的变化趋势。对吹扫时两种气体的浓度变化进行分析可得, O_2 浓度与 H_2S 和 CO 的浓度呈现负相关。

通过对图 5 数据进行分析发现, 该时间段内主燃区所处测点的 H_2S 浓度水平较高。这是因为锅炉主燃区氧量较低, 炉内主要进行缺氧燃烧, 而缺氧燃烧便导致了炉膛内 H_2S 浓度增加, 使 H_2S

浓度一直处于较高水平。与之相对应的,该测点CO浓度水平整体偏高,平均浓度为12%,这就导致水冷壁处于很强的还原性氛围下^[29]。在该还原性氛围下,煤燃烧时产生的硫元素会有一大部分以H₂S的形式存在。这表明CO的浓度会影响到H₂S的生成,两者之间呈明显正相关。此外,现场停炉检修结果表明,主燃区所处测点处水冷壁腐蚀较为严重,证实了设备测量所得数据的准确性。

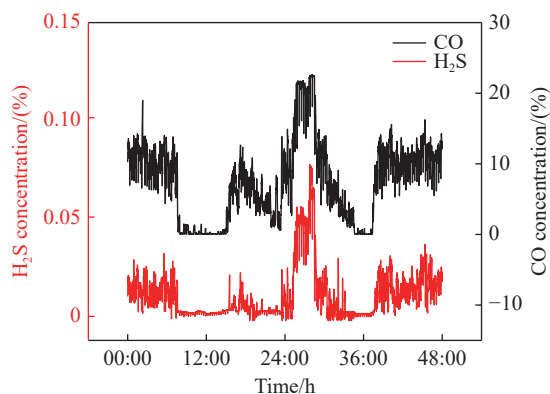


图5 现场测量48h的H₂S和CO浓度数据

Fig. 5 On-site measurement data of H₂S and CO concentrations for 48 hours

通过分析测量结果,火电厂可以对一二次风

的配风方式,以及煤粉和氧气的比例进行及时调整,同时引入合适的技术,改善水冷壁附近的氛围场,降低其还原性,又或者根据产出的H₂S量改变锅炉温度、优化燃烧方式、减少燃烧用煤的含硫量,从而有效降低高温腐蚀对水冷壁造成的影响。

5 结 论

本文基于WMS技术与FDM技术,研制了一款无人值守的H₂S和CO气体浓度在线实时监测设备。同时开发了硬件电路以及响应的固件程序,将光机电集成为一体,实现了H₂S和CO的光谱测量与浓度反演。Allan方差实验结果表明,其检测极限分别为 0.2×10^{-6} mol/mol、 0.344×10^{-6} mol/mol,对应的积分时间分别为73 s、53 s。将研制的设备安装在某300 MW电负荷的燃煤锅炉附近,对锅炉主燃区水冷壁附近的H₂S和CO进行48 h同步测量。结果表明,锅炉中H₂S和CO的浓度呈正相关,厌氧燃烧会导致两种气体的含量增加,加速高温腐蚀的速率。该监测设备为火电厂超低排放的实现和水冷壁高温腐蚀的预警提供了重要数据支持。

参考文献:

- [1] 陈颖,胡天丁,刘云利,等. 二氧化硫在化学资源化利用中的研究进展[J]. 应用化学, 2022, 39(2): 223-234. CHEN Y, HU T D, LIU Y L, et al.. Research progress on chemical resource utilization of sulfur dioxide[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(2): 223-234. (in Chinese).
- [2] XIONG X H, CHEN F L, LI L Y, et al.. Water wall tubes' high temperature corrosion root cause investigation: a 300 MW level boiler case[J]. *Energies*, 2023, 16(4): 1767.
- [3] CAO L T, PENG R, DENG ZH Y. Optimization study on high-temperature corrosion prevention of the water wall of a 1000 MW dual circle tangential boiler during operation[J]. *Energy Reports*, 2021, 7: 915-925.
- [4] 齐骥,相佳雯,林栋,等. 微流控技术在海洋分析监测中的应用研究[J]. 分析化学, 2023, 51(10): 1545-1556. QI J, XIANG J W, LIN D, et al.. Applications of microfluidic technology in marine analysis and monitoring[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(10): 1545-1556. (in Chinese).
- [5] 曲艺. 大气光学遥感监测技术现状与发展趋势[J]. 中国光学, 2013, 6(6): 834-840. QU Y. Technical status and development tendency of atmosphere optical remote and monitoring[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(6): 834-840. (in Chinese).
- [6] 刘明言,石秀顶,李天国,等. 电化学分析方法检测重金属离子研究进展[J]. 应用化学, 2023, 40(4): 463-475. LIU M Y, SHI X D, LI T G, et al.. Research progress in detection of heavy metal ions by electrochemical analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(4): 463-475. (in Chinese).
- [7] XIONG X H, LV ZH M, YU SH L, et al.. Coke preheating combustion study on NO_x and SO₂ emission[J]. *Journal of the Energy Institute*, 2021, 97: 131-137.
- [8] 杨舒涵,乔顺达,林殿阳,等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(1): 151-157.

- YANG SH H, QIAO SH D, LIN D Y, *et al.*. Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 151-157. (in Chinese).
- [9] 黄慧, 周亦辰, 彭宇, 等. 基于量子级联激光器中红外光谱技术的幽门螺旋杆菌呼气诊断的可行性研究[J]. *分析化学*, 2022, 50(9): 1328-1335.
- HUANG H, ZHOU Y CH, PENG Y, *et al.*. Feasibility study of breath diagnosis in helicobacter pylori based on quantum cascade laser mid-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(9): 1328-1335. (in Chinese).
- [10] GUO Y CH, QIU X B, LI N, *et al.*. A portable laser-based sensor for detecting H₂S in domestic natural gas[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2020, 105: 103153.
- [11] 谢耀, 华道柱, 齐宇, 等. GFC-IFC 技术在多组分微量气体分析中的应用[J]. *中国光学*, 2021, 14(6): 1378-1386.
- XIE Y, HUA D Z, QI Y, *et al.*. Applications of GFC-IFC in trace multi-component gas analysis[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(6): 1378-1386. (in Chinese).
- [12] RAZA M, XU K, LU ZH M, *et al.*. Simultaneous methane and acetylene detection using frequency-division multiplexed laser absorption spectroscopy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2022, 154: 108285.
- [13] 李文婷, 吴涛, 闫宏达, 等. 基于射频白噪声的离轴积分腔输出光谱的大气 CH₄ 和 CO₂ 的监测[J]. *光学学报*, 2023, 43(24): 2401013.
- LI W T, WU T, YAN H D, *et al.*. Monitoring of atmospheric CH₄ and CO₂ by off-axis integrating cavity output spectra based on RF white noise[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(24): 2401013. (in Chinese).
- [14] ZHENG K Y, ZHENG CH T, YAO D, *et al.*. A near-infrared C₂H₂/CH₄ dual-gas sensor system combining off-axis integrated-cavity output spectroscopy and frequency-division-multiplexing-based wavelength modulation spectroscopy[J]. *Analyst*, 2019, 144(6): 2003-2010.
- [15] POGÁNY A, WERHAHN O, EBERT V. Measurement of ammonia line intensities in the 1.5 μm region by direct tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2021, 276: 107884.
- [16] 彭志敏, 杜艳君, 贺拴玲, 等. 350 MW 四角切圆锅炉水冷壁高温腐蚀及 H₂S 在线监测预警[J]. *锅炉技术*, 2022, 53(6): 1-7.
- PENG ZH M, DU Y J, HE SH L, *et al.*. High temperature corrosion of water wall of 350 MW tangentially fired boiler and H₂S online monitoring and early warning[J]. *Boiler Technology*, 2022, 53(6): 1-7. (in Chinese).
- [17] YU B, WU X, ZHANG M H, *et al.*. Tunable diode laser absorption spectroscopy for open-path monitoring gas markers in fire combustion products[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2023, 131: 104690.
- [18] 朱晓睿, 卢伟业, 饶雨舟, 等. TDLAS 直接吸收法测量 CO₂ 的基线选择方法[J]. *中国光学*, 2017, 10(4): 455-461.
- ZHU X R, LU W Y, RAO Y ZH, *et al.*. Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO₂ measurement[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 455-461. (in Chinese).
- [19] 龙江雄, 张玉钧, 邵立, 等. 基于可调谐二极管激光吸收光谱的气池光程可溯源测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, 42(11): 3461-3466.
- LONG J X, ZHANG Y J, SHAO L, *et al.*. Traceable measurement of optical path length of gas cell based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, 42(11): 3461-3466. (in Chinese).
- [20] 袁志国, 马修真, 刘晓楠, 等. 利用可调谐激光吸收光谱技术的柴油机排放温度测试研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(2): 281-289.
- YUAN ZH G, MA X ZH, LIU X N, *et al.*. Testing on diesel engine emission temperature using tunable laser absorption spectroscopy technology[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(2): 281-289. (in Chinese).
- [21] 钟笠, 宋迪, 焦月, 等. 具有复杂光谱特征的丙烯气体的 TDLAS 检测技术研究[J]. *中国光学*, 2020, 13(5): 1044-1054.
- ZHONG L, SONG D, JIAO Y, *et al.*. TDLAS detection of propylene with complex spectral features[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(5): 1044-1054. (in Chinese).
- [22] 连久翔, 周宾, 王一红, 等. 基于高频参考光的频分复用技术实现强干扰下的气体浓度测量[J]. *光学学报*, 2020, 40(16): 1630001.
- LIAN J X, ZHOU B, WANG Y H, *et al.*. Measurement of gas concentration under strong interference by frequency multiplexing based on high-frequency reference signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(16): 1630001. (in Chinese).

- [23] 刘倩倩, 郑玉权. 超高分辨率光谱定标技术发展概况[J]. 中国光学, 2012, 5(6): 566-577.
LIU Q Q, ZHENG Y Q. Development of spectral calibration technologies with ultra-high resolutions[J]. *Chinese Optics*, 2012, 5(6): 566-577. (in Chinese).
- [24] 任颀杰, 颜昌翔, 徐嘉蔚. 增强吸收光谱技术的研究进展及展望[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(6): 1273-1292.
REN Y J, YAN CH X, XU J W. Development and prospects of enhanced absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1273-1292. (in Chinese).
- [25] QIU X B, WEI Y B, LI J, *et al.*. Early detection system for coal spontaneous combustion by laser dual-species sensor of CO and CH₄[J]. *Optics & Laser Technology*, 2020, 121: 105832.
- [26] LIAO K X, QIN M, YANG N, *et al.*. Corrosion main control factors and corrosion degree prediction charts in H₂S and CO₂ coexisting associated gas pipelines[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2022, 292: 126838.
- [27] FANG B, YANG N N, WANG CH H, *et al.*. Highly sensitive portable laser absorption spectroscopy formaldehyde sensor using compact spherical mirror multi-pass cell[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2023, 394: 134379.
- [28] 彭志敏, 贺拴玲, 周佩丽, 等. 基于 TDLAS 的煤粉锅炉水冷壁近壁面 CO/H₂S 同步在线监测[J]. 热力发电, 2022, 51(10): 145-152.
PENG ZH M, HE SH L, ZHOU P L, *et al.*. TDLAS-based synchronous on-line measurement of CO/H₂S near water wall of a pulverized coal boiler[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(10): 145-152. (in Chinese).
- [29] 许伟刚, 谭厚章, 刘原一, 等. 水冷壁高温腐蚀倾向判断及 H₂S 近壁面许用浓度研究[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 113-119.
XU W G, TAN H ZH, LIU Y Y, *et al.*. Research on determination of high temperature corrosion tendency of water walls and limiting concentration range of H₂S near walls[J]. *Electric Power*, 2018, 51(7): 113-119. (in Chinese).

作者简介:



李传亮(1983—), 男, 山东沂源人, 博士, 教授, 博士生导师, 2011 年于华东师范大学获得博士学位, 主要从事激光光谱学及应用、材料无损检测、光电传感装备等方面的研究。E-mail: clli@tyust.edu.cn