

DOI: 10.19666/j.rlfed.202209206

基于 TDLAS 和恒流稀释取样的磨煤机出口 痕量 CO 体积分数在线监测技术研究

彭志敏¹, 李启正², 贺拴玲¹, 王振¹, 杜艳君³, 丁艳军¹, 吕俊复¹

(1.清华大学能源与动力工程系, 北京 100084; 2.中国科学院力学研究所, 北京 100083;

3.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

[摘要] 磨煤机运行参数直接影响着燃煤机组的运行安全和燃烧性能, 实时在线监测磨煤机出口 CO 体积分数并基于监测数据进行安全预警具有重要意义。首先基于可调谐二极管激光吸收光谱 (TDLAS) 和赫里奥特 (Herriott) 多次反射池开展波长调制-直接吸收光谱 (WM-DAS) 法测量精度及检测限验证实验。实验结果表明, 在 1~10 $\mu\text{L/L}$ 内 CO 测量值与配气值一致且检测限可低至 $5.2 \times 10^{-3} \mu\text{L/L}$ (300 s), 具有极高的灵敏度和测量精度。随后基于原理实验研制痕量 CO 体积分数在线测量系统, 并结合烟气恒流稀释高保真预处理技术, 将研制的痕量 CO 体积分数在线监测系统应用于火电机组磨煤机现场, 采用多点轮测方式实现了单台火电机组 5 台磨煤机出口 CO 在线监测及安全预警。最后结合磨煤机出口温度等监测数据对一次风温进行调整, 可在确保磨煤机安全运行基础上提高锅炉效率。

[关键词] 波长调制-直接吸收光谱 (WM-DAS); 磨煤机; 痕量 CO; 稀释取样

[引用本文格式] 彭志敏, 李启正, 贺拴玲, 等. 基于 TDLAS 和恒流稀释取样的磨煤机出口痕量 CO 体积分数在线监测技术研究[J]. 热力发电, 2023, 52(5): 1-7. PENG Zhimin, LI Qizheng, HE Shuanling, et al. On line monitoring technology of trace CO volume fraction at the outlet of coal mill based on TDLAS and constant-flow dilution sampling[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(5): 1-7.

On line monitoring technology of trace CO volume fraction at the outlet of coal mill based on TDLAS and constant-flow dilution sampling

PENG Zhimin¹, LI Qizheng², HE Shuanling¹, WANG Zhen¹, DU Yanjun³,
DING Yanjun¹, LYU Junfu¹

(1. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China;

3. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The operating parameters of coal mills directly affect the safety and combustion performance of coal-fired units. Therefore, it is of great significance to carry out real-time monitoring of CO volume fraction at the outlet of coal mills and accordingly have safety early warning based on the monitored data. In this work, the measurement accuracy and detection limit of wavelength modulation direct absorption spectroscopy(WM-DAS) method were verified based on tunable diode laser absorption spectroscopy(TDLAS) and Herriott multi-pass cell. The experimental results showed that the measured CO volume fraction agree very well with the preset values in the range of 1 to 10 $\mu\text{L/L}$, and the detection limit can be as low as $5.2 \times 10^{-3} \mu\text{L/L}$ (300 s), which suggests the extremely high measurement sensitivity and accuracy of this method. Subsequently, based on this prototype experiment, an on-line monitoring system for the trace CO volume fraction was developed. Then, combined with the high-fidelity pretreatment technology of fuel gas based on the principle of constant-flow dilution, an on-line monitoring system

收稿日期: 2022-09-16 网络首发日期: 2022-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFB2006002); 清华大学山西研究院种子基金(041509005); 中国华能集团有限公司总部科技项目(HNKJ20-H50)

Supported by: National Key Research and Development Program(2019YFB2006002); Seed fund of Shanxi Research Institute for Clean Energy, Tsinghua University(041509005); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd.(HNKJ20-H50)

第一作者简介: 彭志敏(1981), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为火电机组超低排放污染物监测与燃烧优化控制技术, apspect@tsinghua.edu.cn.

for trace CO volume fraction was developed and applied to the outlet of coal mill of thermal power unit. The on-line CO monitoring and safety warning at the outlet of 5 coal mills of a single thermal power unit were realized by using multi-point alternating measurement strategy. With the monitored CO volume fraction and temperature of the coal mill outlet, the temperature of the primary air is adjusted to improve the boiler efficiency while ensuring safe operation of coal mill.

Key words: wavelength modulation-direct absorption spectroscopy(WM-DAS); coal mill; trace carbon monoxide; dilution sampling

目前我国电力结构仍以火力发电为主,而磨煤机作为火力发电机组重要的辅助设备,其参数控制(出口温度、CO体积分数等)对机组的经济安全运行至关重要。为进一步提高锅炉燃烧效率,电厂需尽可能降低煤粉细度,但煤粉越细,与空气的接触面积越大,越容易转变为一种对明火极其敏感的易燃易爆性混合气体,此时一旦接触到明火或者磨煤机内某一局部温度升高到煤粉的燃点以上,便会导致爆炸事故发生,轻者将造成设备破坏和生产过程中断,重者则可能造成人员伤亡^[1-2]。此外,在磨煤机运行过程中,块状煤炭在研磨成煤粉过程中与热空气接触发生氧化反应生成CO气体;与此同时,反应产生的热量进一步加快煤粉氧化速率,从而产生更多的CO气体,导致磨煤机内可燃物质着火点降低,严重时可导致自燃^[3-4]。张子蒙等^[5]研究表明,CO气体体积分数增加往往发生在可视烟火前1.5 h左右,即局部温度开始发生明显变化前。因此,在线监测磨煤机出口CO气体体积分数是防止磨煤机着火或爆炸的有效手段,同时还可作为火电机组优化运行参数提供数据支撑。

根据《火力发电厂煤和制粉系统防爆设计技术规程》(DL/T 5203—2005)要求^[6],目前大部分磨煤机都配备CO监测系统^[7-10],监测点一般位于磨煤机出口出粉管或磨煤机分离器上。由于测点工况的特殊性(高湿、高尘、高流动性等),目前采用的伴热抽取式取样方式极易出现滤芯、取样管堵塞和磨损等问题,因此亟需开发一种兼具耐磨和防堵性能的取样系统。与此同时,目前磨煤机出口CO监测采用的非分散红外吸收光谱法(NDIR)^[11-12]由于容易受到其他气体干扰尤其是水分子干扰,一般需要通过伴热抽取、冷凝除水等一系列复杂的取样流程,在实际应用中不仅存在测量精度低、样气失真,同时还存在测量系统维护量大等缺点,因此目前采用的伴热抽取结合NDIR测量技术难以适用于磨煤机出口痕量CO体积分数在线高精度监测。

考虑伴热抽取取样方式及NDIR测量技术的局限性,本文拟采用可调谐二极管激光吸收光谱

(TDLAS)中免标定、高信噪比的波长调制-直接吸收(WM-DAS)方法^[13-15],结合赫里奥特(Herriott)多次反射池及恒流稀释预处理技术实现磨煤机出口痕量CO体积分数连续在线监测。首先在实验室条件下验证该方法的信噪比和测量精度;然后结合有效吸收光程44 m的Herriott池开展0~10 μL/L痕量CO体积分数动态测量实验研究,同时基于原理实验研制CO在线监测仪表;最后结合恒流稀释预处理装置开发适用于大型火电机组磨煤机出口CO在线监测系统,并为磨煤机安全经济运行提供技术支撑。

1 痕量CO体积分数在线监测技术

1.1 WM-DAS原理及验证实验

与直接吸收法(DAS)^[16-17]采用三角波(或锯齿波)和波长调制法(WMS)^[18-20]采用正弦波叠加三角波不同,WM-DAS方法仅采用频率为 ω 的高频正弦信号扫描气体分子吸收谱线,激光瞬时频率和瞬时光强分别为:

$$v(t) = v_0 + a_1 \cos(\omega t + \eta) + a_2 \cos[2(\omega t + \eta) + \varphi_2] \quad (1)$$

$$I(t) = \sum_{k=0}^{\infty} [X_k \cos(k\omega t) - Y_k \sin(k\omega t)] \quad (2)$$

式中: v_0 为激光中心频率; a_1 和 a_2 为调制深度; t 为扫描时间; ω 为扫描频率; η 为基频初始相位; φ_2 为2倍频初始相位角; X_k 和 Y_k 为透射光强 $I(t)$ 的傅里叶系数实部和虚部。

令:

$$x = \cos(\omega t + \eta), x \in [-1, 1] \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)和式(2)中,可得到激光频率 $v(t)$ 和激光光强 $I(t)$ 与系数 x 之间的关系:

$$v(x) = v_0 + a_1 x + a_2 [(2x^2 - 1) \cos \varphi_2 \pm 2x \sin \varphi_2 \sqrt{1 - x^2}] \quad (4)$$

$$I(x) = \sum_{k=0}^{\infty} X_k \cdot \cos[k(\arccos x \pm \eta)] \pm \sum_{k=0}^{\infty} Y_k \cdot \sin[k(\arccos x \pm \eta)] \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)便可建立激光透射光强信号

与激光瞬时频率之间的关系。首先通过波长标定, 得到参数 a_1 、 a_2 、 η 和 φ_2 , 代入式(4)得到 $v(x)$; 然后对激光光强进行傅里叶变换得到 X_k 和 Y_k , 代入式(5)得到 $I(x)$; 最后基于 Beer-Lambert 定律和式(2)对 $v(x)$ 和 $I(x)$ 进行同步拟合, 复现气体吸收率函数, 进而得到气体体积分数、温度等参数。

为了验证 WM-DAS 方法的测量精度和检测限, 本文选用 CO 气体分子 $4\ 297.7046\ \text{cm}^{-1}$ 特征吸收谱线开展实验研究, 其测量方案如图 1 所示。激光光源采用中心波长 $2\ 327\ \text{nm}$ 的半导体激光器, 激光经光纤分束器后一束进入 F-P 标准具 (Thorlabs SA200-18C) 用于波长标定, 另一束进入 Herriott 池; Herriott 池由一对间隔约 $0.4\ \text{m}$ 、曲率半径 $1\ \text{m}$ 的镀金反射镜组成, 激光光束在 Herriott 池内经过多次反射, 有效吸收光程约 $44\ \text{m}$; 出射激光由探测器接收并通过工控机 (装有高速采集卡, 12 位) 采集, 随后基于 WM-DAS 方法利用 Labview 软件对采集的数据进行实时在线处理, 得到 CO 气体体积分数等参数。

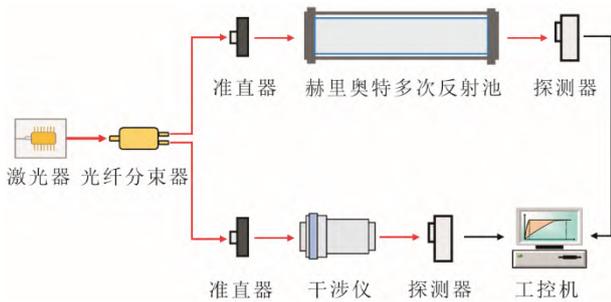


图 1 WM-DAS 测量方案

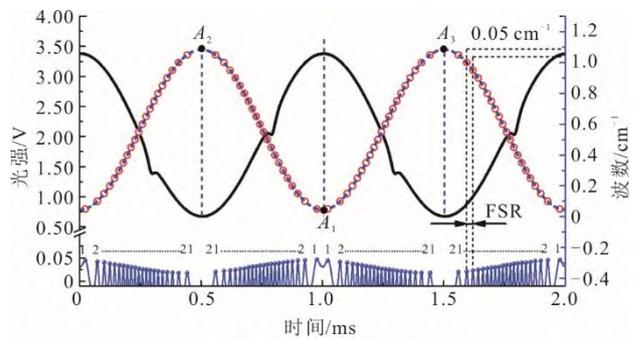
Fig.1 Schematic of WM-DAS measurement scheme

1.2 实验结果分析

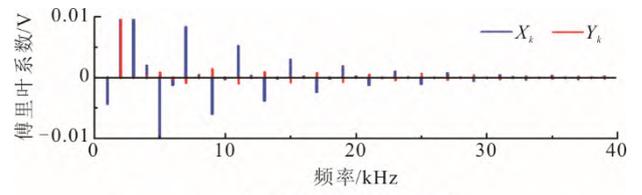
为精确标定激光频率, 将 $1\ \text{kHz}$ 、 $20\ \text{mA}$ 的正弦信号输入到激光控制器中, 激光器输出激光经过 F-P 干涉仪产生的干涉信号, 如图 2a) 中蓝色实线所示。根据干涉仪自由光谱范围 ($\text{FSR}=0.05\ \text{cm}^{-1}$) 可以得到各干涉峰 (“•” 标记) 对应的相对频率值 (“○” 标记), 然后根据式(1)对其进行拟合即可得到激光频率与时间的关系曲线如图 2a) 中蓝色虚线所示。拟合得到的激光参数 ν_0 、 a_1 、 a_2 、 η 和 φ_2 分别为 $0.569\ 2\ \text{cm}^{-1}$ 、 $0.519\ 2\ \text{cm}^{-1}$ 、 $0.005\ \text{cm}^{-1}$ 、 $0.998\ 6\pi$ 和 $-0.925\ 6\pi$ 。

为重构出激光光强与频率间的关系曲线, 需要对透射光强进行傅里叶变换 (FFT) 得到系数 X_k 和 Y_k 。实验前首先将测量气室抽至真空 ($10^{-2}\ \text{Pa}$) 状态;

然后通入体积分数为 $25\ \mu\text{L/L}$ 的 CO 气体至 $101.3\ \text{kPa}$ 。在该条件下, 对测得的经 CO 吸收后的透射光强信号 (图 2a) 中黑色曲线) 进行 FFT 分析得到其频谱信号 (图 2b))。由于蕴含谱线吸收信息的透射光强频谱 X_k 和 Y_k 分布在 kf ($k=0,1,2,\dots$) 整数倍频率处, 因此可滤除与调制频率无关的干扰信号, 使得重构的透射光强信号具有更高的信噪比; 最后将其系数 X_k 和 Y_k 代入式(5)中, 同时结合式(4)可重构激光透射光强信号与频率间的关系曲线如图 3 所示。由图 3 可见, A_1A_2 和 A_1A_3 两侧频率区间内光强整体呈椭圆形结构, 其中 A_1A_2 侧光强先略增大再减小, 而 A_1A_3 侧光强先减小再略增大。



a) WM-DAS 波长标定结果



b) 透射光强傅里叶系数

图 2 WM-DAS 波长标定及透射光强傅里叶系数
Fig.2 Wavelength calibration and Fourier coefficient of transmitted light intensity

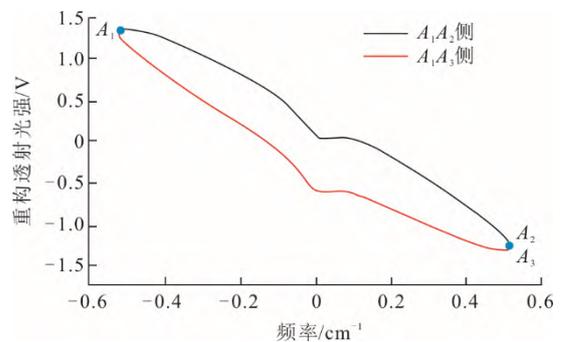


图 3 重构得到的透射光强与频率间的关系曲线
Fig.3 The relation curve between transmitted light intensity and frequency is reconstructed

为分析 WM-DAS 方法的测量精度, 在常温常压条件下, 开展痕量 CO 体积分数动态测量实验研

究。痕量 CO 体积分数动态测量结果及 Allan 标准差如图 4 所示。通过质量流量计精确配比 CO 体积分数（背景气为氮气）在 1~10 $\mu\text{L/L}$ 动态变化，并控制气体流量为 1 L/min，在每个体积分数下稳定约为 3~5 min，利用采集卡结合 Labview 程序实现透射光强实验数据采集和处理，其测量结果如图 4a) 所示。在动态配气范围内，WM-DAS 方法测量值与配气值一致，其线性度达到 0.99 以上，测量结果准确度高且稳定性好。在验证实验中，CO 体积分数变化时由于配气操作及 Herriott 池气体更新导致响应时间约为 1 min，而实际应用中可通过增加样气流量、减小测量池体积等手段提高气体更新速率，从而实现痕量 CO 的快速动态在线测量。

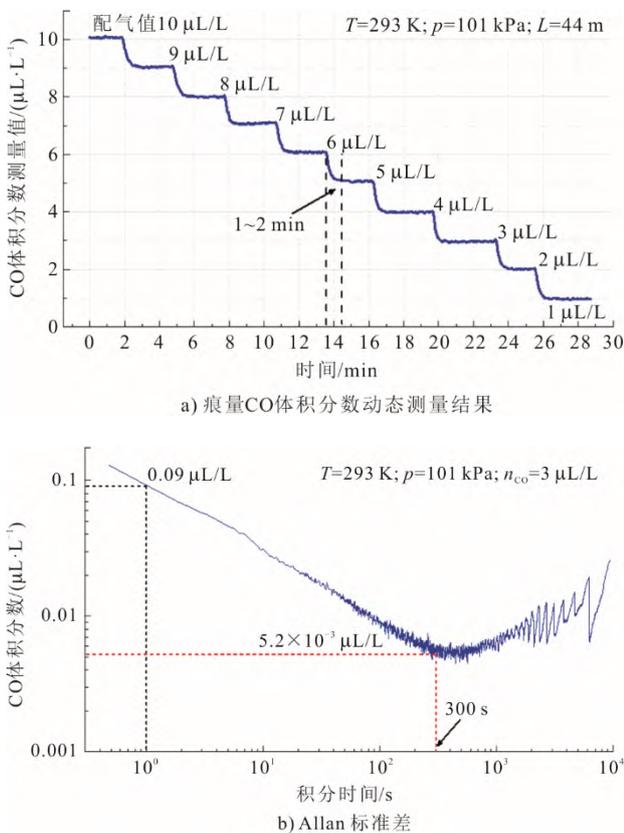


图 4 痕量 CO 体积分数动态测量结果及 Allan 标准差
Fig.4 Dynamic measurement results of trace CO volume fraction and Allan standard deviation

为进一步分析 WM-DAS 方法的检测限，针对图 4a) 中 3 $\mu\text{L/L}$ 工况进行长时间测量，并采用 Allan 标准差对测得的数据进行检测限分析，其实验结果如图 4b) 所示。由 4b) 可见：当积分时间为 1 s 时，CO 检测限约为 0.09 $\mu\text{L/L}$ ；而当积分时间达到 300 s 时，CO 检测限低至 5.2×10^{-3} $\mu\text{L/L}$ 。这充分验证了该方法具有极高的稳定性和极低的检测限，同

时也证明本文采用的长光程 Herriott 池结合 WM-DAS 方法可以满足磨煤机出口痕量 CO 稀释取样高精度测量需求。

2 磨煤机出口痕量 CO 体积分数在线监测

2.1 CO 在线监测仪表

在分析了 WM-DAS 方法测量 CO 可靠性及准确度的基础上，对基于 WM-DAS 原理的痕量 CO 在线测量仪表进行了开发研究，其分析仪表结构如图 5 所示。分析仪表主要包括供电/通信模块、激光器驱动模块、光电探测模块、Herriott 多次反射池、温度和压力传感模块及数据处理模块等核心部件，其中数据处理采用本文提出的 WM-DAS 测量方法。研制出的痕量 CO 分析仪量程为 0~10 $\mu\text{L/L}$ 、0~100 $\mu\text{L/L}$ （量程可切换）、精度为 $\pm 1\% \text{F.S.}$ 、响应时间 ≤ 15 s，适用于磨煤机出口等复杂工业现场痕量 CO 气体体积分数高精度在线测量。

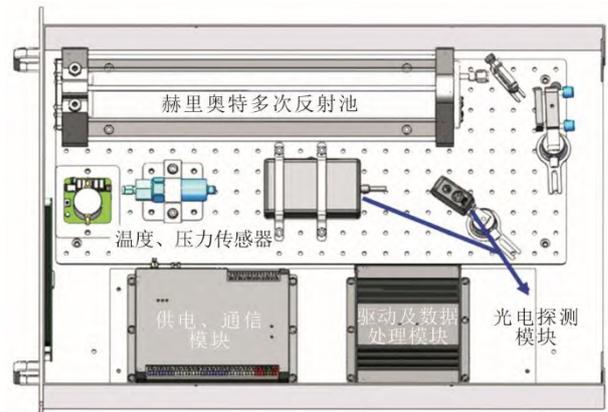


图 5 痕量 CO 体积分数分析仪
Fig.5 Trace CO volume fraction analyzer

2.2 CO 在线监测方案

将上述集成后的分析仪表应用于某燃煤电厂 350 MW 锅炉磨煤机运行现场，其监测方案如图 6 所示。该电厂 1 号机组共配备 5 台磨煤机，分别在每台磨煤机出粉管旁布置 1 个测点，并在选好的各测点处垂直安装 1 套防堵型恒流稀释预处理装置，稀释比例可根据测量需求在 20~50 内进行选择，本套装置 5 个测点稀释比约为 25。如磨煤机出口 CO 体积分数为 50 $\mu\text{L/L}$ ，则经过恒流稀释预处理装置后约为 2 $\mu\text{L/L}$ 。另外，同时搭建 CEMS 小间并安装 1 台痕量 CO 体积分数在线分析仪，5 个测点采用分时轮测方式共用 1 台分析仪，单点测量时间 2 min，5 台磨煤机单轮测量周期 10 min。每个测点的烟气

经恒流稀释预处理后进入分析仪以实现痕量 CO 高精度在线测量，其测量结果显示于系统界面并上传至 DCS，结合温度等测量值，提出安全预警方案，为磨煤机稳定运行提供有效监测数据。

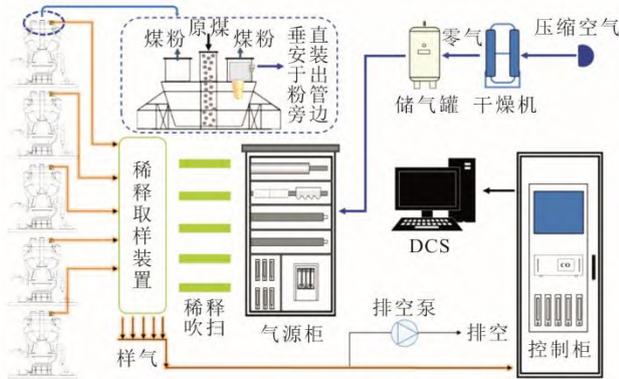


图 6 磨煤机出口痕量 CO 体积分数在线监测方案
Fig.6 Online monitoring scheme of trace CO volume fraction at the outlet of coal mill

考虑到磨煤机 CO 监测点高尘、高湿等特殊工况，本文提出一种防堵型恒流稀释烟气高保真预处理技术^[21]，其装置结构如图 7 所示。装置主要由取样探头、气动驱动装置、不锈钢滤芯、箱体及稀释取样模块部分等构成。为了防止探头堵塞，在取样探头内部装有一级不锈钢滤芯，采用多层金属编织不锈钢网，通过特殊的叠层压制与真空烧结等工艺制造而成，其各层丝网的网孔相互交错，克服了普通金属丝网强度低、刚性差、网孔形状不稳定等不足，具有优良的过滤精度、过滤阻抗、机械强度、耐磨性和耐热性。不锈钢滤芯过滤精度为 5 μm，可满足磨煤机 CO 监测点位工况需求。

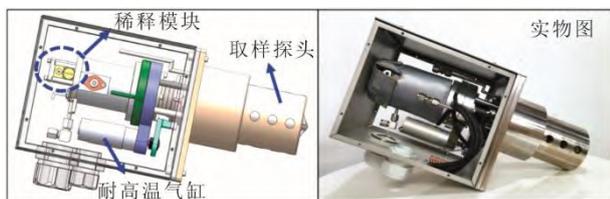


图 7 防堵型恒流稀释烟气高保真预处理装置
Fig.7 Anti blocking constant current diluted flue gas high fidelity pretreatment device

方案采用恒流稀释预处理技术可以极大地减小烟气取样量（约 100 mL/min），进而有效缓解探头堵塞问题。稀释之后样气露点可低至-15 °C，取样管线无需伴热且不易堵塞。另外，取样装置具有多路内外吹扫、气动清理防堵等功能，可针对性解

决磨煤机现场取样堵塞等难题，为磨煤机 CO 监测系统安全、稳定运行提供技术支持。

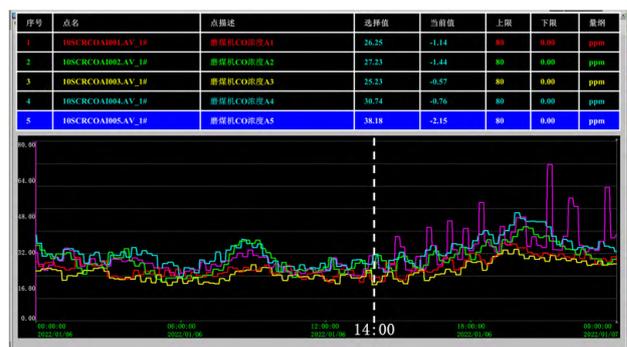
基于上述研究成果，在某电厂 350 MW 锅炉磨煤机运行现场开展了应用示范研究，示范现场如图 8 所示。在 1 号机组每台磨煤机出粉管旁安装取样装置，并在旁边设置气源柜和零气处理装置，其作用是给探头提供干燥洁净的压缩空气进行烟气稀释取样和内外吹扫除尘。稀释后样气在正压条件下经取样管线输送至测量系统，从而实现烟气高保真取样，解决了高尘、高湿等恶劣工况下烟气预处理难题，最终实现磨煤机出口痕量 CO 体积分数高精度在线测量。



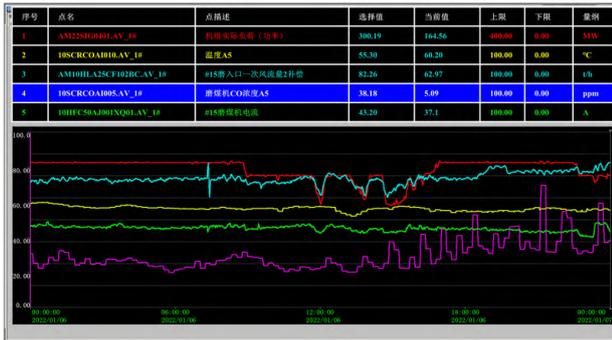
图 8 350 MW 磨煤机 CO 在线监测现场应用示范
Fig.8 Field application demonstration of 350 MW Coal Mill CO online monitoring

2.3 CO 在线监测结果分析

经过整体安装、调试后，磨煤机痕量 CO 高精度测量系统投入正式运行，目前已在现场无故障连续运行 1 年多时间，磨煤机出口 CO 体积分数 24 h 连续监测数据如图 9 所示。图 9a)为该系统 5 个测点在此期间某 24 h 测量曲线，其中红色、绿色、黄色、蓝色、紫色曲线分别表示 1—5 号磨煤机出口 CO 体积分数测量值；图 9b)为 5 号磨煤机的详细运行参数，包括机组实际负荷（红色）、温度（黄色）、一次风补偿（蓝色）、电流（绿色）以及 CO 体积分数（紫色）。



a) 1—5 号磨煤机 CO 体积分数测量结果



b) 5号磨煤机详细运行参数

图9 磨煤机出口CO体积分数24h连续监测数据
Fig.9 24-hour continuous monitoring data of CO volume fraction at the outlet of coal mill

由图9a)可见:在0—14:00时,1—5号磨煤机CO体积分数均在16~40 $\mu\text{L/L}$ 内波动,说明不同磨煤机内的CO体积分数分布均匀且变化趋势大致相等;14:00后,5台磨煤机CO体积分数均有上升趋势,其中1—4号磨煤机CO体积分数变化较小,最大不超过48 $\mu\text{L/L}$,而5号磨煤机CO体积分数波动较大,最高则可达到70 $\mu\text{L/L}$,这可能是由于磨煤机内部局部煤粉被氧化,从而产生较多CO导致其体积分数上升;但1—5号磨煤机CO体积分数总体均小于报警值80 $\mu\text{L/L}$,表明目前该机组制粉系统尚无煤粉自燃的隐患。与此同时,由图9b)可见,当机组负荷发生变化时,5号磨煤机CO体积分数也未超过80 $\mu\text{L/L}$,而且其他运行参数也没有发生较大波动,这也进一步说明当前制粉系统运行良好。此外,与温度曲线相比,CO体积分数曲线具有波动明显、响应速度快等特征,进而间接证明了在防止磨煤机煤粉自燃或爆炸的效果上,CO体积分数监测具有更高的灵敏性。

从图9b)中还可看出,磨煤机出口风粉混合物的温度在50.0~62.5 $^{\circ}\text{C}$ 内变化。该厂一次风设计温度为70.0 $^{\circ}\text{C}$,因此,当磨煤机出口CO体积分数和温度较低时,可根据煤种变化等实际情况适当调整一次风温^[22-24],同时结合CO体积分数、磨煤机电流等监测数据反馈,实现在确保安全运行的基础上,进一步提高燃烧效率。

3 结 论

本文基于WM-DAS方法和恒流稀释预处理技术开展火电机组磨煤机出口痕量CO体积分数高精度在线测量研究并进行工程应用示范。研究首先在室温常压下验证了WM-DAS测量方法的精度及检

测限,并利用该方法结合44 m长光程Herriott池开展痕量CO体积分数在线测量仪表研制;然后结合恒流稀释烟气高保真预处理技术和分时多点轮测方式,将研制的CO在线监测系统应用于工业现场;最终实现了火电机组磨煤机出口CO体积分数在线监测及安全预警。

研究表明:该厂1—5号磨煤机内的CO体积分数分布较为均匀且变化趋势大致相等,说明该机组制粉系统目前运行良好,无安全隐患;由于磨煤机出口温度曲线波动平缓,将其作为单一安全预警指标存在一定滞后性,因此将反应灵敏的CO体积分数曲线同步作为安全预警指标具有重要意义,同时还可以优化磨煤机运行参数,提高锅炉燃烧效率。

[参 考 文 献]

- [1] 唐忠顺,王海秀.磨煤机一次风口爆燃原因及控制措施[J].中国电力,2011,4(5):49-51.
TANG Zhongshun, WANG Haixiu. Reasons of deflagration in primary air inlet of coal pulverizer and its control measures[J]. Electric Power, 2011, 4(5): 49-51.
- [2] 田勇,张安明.新型煤化工煤粉环境着火爆炸危险分析及防治方法探讨[J].矿业安全与环保,2016,43(6):92-94.
TIAN Yong, ZHANG Anming. Analysis on ignition and explosion hazard of coal powder preparation system and discussion on control methods in new coal chemical industry[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2016, 43(6): 92-94.
- [3] 郑海明,郭铁桥.磨煤机火灾探测预警系统的设计与应用[J].工矿自动化,2009,35(3):58-60.
ZHENG Haiming, GUO Tieqiao. Design and application of coal mill fire detection and early warning system[J]. Industry and Mine Automation, 2009, 35(3): 58-60.
- [4] 董勇卫,周潇,胡佳,等.磨煤机CO气体检测仪的应用分析[J].分析仪器,2013(3):54-57.
DONG Yongwei, ZHOU Xiao, HU Jia, et al. Application of coal pulverizer Cogas detector[J]. Analysis Instrument, 2013(3): 54-57.
- [5] 张子蒙,章家岩,冯旭刚.CO在线监测装置在磨煤机防爆中的应用[J].化学工程与装备,2019(11):197-199.
ZHANG Zimeng, ZHANG Jiayan, FENG Xugang. Application of CO on-line monitoring device in coal mill explosion prevention[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2019(11): 197-199.
- [6] 火力发电厂煤和制粉系统防爆设计技术规程:DL/T 5203—2005[S].北京:中国电力出版社,2005:1.
Technical code for explosion proof design of coal and pulverized coal system in thermal power plants: DL/T 5203—2005 [J]. Beijing: China Electric Power Press, 2005: 1.
- [7] 路昆,徐春兴,王永佳,等.一种用于防爆的磨煤机出口CO在线监测装置及使用方法:ZL 201910049983.0[P].2019-04-30[2022-07-20].
LU Kun, XU Chunxing, WANG Yongjia, et al. An on-line CO monitoring device for explosion-proof coal mill outlet and its application method: ZL 2019 1 0049983.0[P].

- 2019-04-30[2022-07-20].
- [8] 梁聚齐, 章家岩, 冯旭刚. 一种磨煤机安全运行检测系统及其检测方法: ZL 2018 1 0057316.2[P]. 2018-07-03[2022-07-20].
LIANG Juqi, ZHANG Jiayan, FENG Xugang. A coal mill safe operation detection system and its detection method: ZL 2018 1 0057316.2[P]. 2018-07-03[2022-07-20].
- [9] 张海龙, 李钊, 王邦行, 等. 一种基于CO监测的磨煤机出口温度控制系统及方法: ZL 2020 1 1097822.8[P]. 2020-12-22[2022-07-20].
ZHANG Hailong, LI Zhao, WANG Bangxing, et al. A coal mill outlet temperature control system and method based on CO monitoring: ZL 2020 1 1097822.8[P]. 2020-12-22[2022-07-20].
- [10] 王海涛, 张磊, 鲍中剑. 一种磨煤机CO浓度在线检测系统: ZL2021 2 2170725.3[P]. 2022-02-08[2022-07-20].
WANG Haitao, ZHANG Lei, BAO Zhongjian. An on-line detection system of CO concentration in coal mill: ZL 2021 2 2170725.3[P]. 2022-02-08[2022-07-20].
- [11] 郝剑, 周佩丽, 彭志敏, 等. 火电机组烟气中CO在线测量方法对比研究[J]. 洁净煤技术, 2019, 25(6): 152-157.
HAO Jian, ZHOU Peili, PENG Zhimin, et al. Comparative and research on on-line measurement of CO in flue gas of thermal power unit[J]. Clean Coal Technology, 2019, 25(6): 152-157.
- [12] DINH T V, AHN J W, CHOI I Y, et al. Limitations of gas filter correlation: a case study on carbon monoxide non-dispersive infrared analyzer[J]. Sensors and Actuators B Chemical, 2017, 243: 684-689.
- [13] DU Yanjun, PENG Zhimin, DING Yanjun. Wavelength modulation spectroscopy for recovering absolute absorbance[J]. Optics Express, 2018, 26(7): 9263-9272.
- [14] PENG Zhimin, DU Yanjun, DING Yanjun. Highly sensitive, calibration-free WM-DAS method for recovering absorbance-part I: theoretical analysis[J]. Sensors, 2020, 20(3): 681.
- [15] PENG Zhimin, DU Yanjun, DING Yanjun. Highly sensitive, calibration-free WM-DAS method for recovering absorbance-Part II: experimental analysis[J]. Sensors, 2020, 20(3): 616.
- [16] SANE A, SATIJA A, LUCHT R P, et al. Simultaneous CO concentration and temperature measurements using tunable diode laser absorption spectroscopy near 2.3 μm [J]. Applied Physics B, 2014, 117: 7-18.
- [17] 侯佳佳, 赵刚, 谭巍, 等. 基于压电陶瓷与光纤光电调制器双通道伺服反馈的激光相位锁定实验研究[J]. 物理学报, 2016, 65(23): 234204-1-8.
HOU Jiajia, ZHAO Gang, TAN Wei, et al. Experimental researches of laser phase lock with dual-servo feedbacks based on the piezoelectric transducer and fiber electrooptic phase modulator[J]. Acta Physica Sinica, 2016, 65(23): 234204-1-8.
- [18] SUN K, CHAO X, SUR R, et al. Wavelength modulation diode laser absorption spectroscopy for high-pressure gas sensing[J]. Applied Physics B, 2013, 110(4): 497-508.
- [19] LAN Lijuan, DING Yanjun, PENG Zhimin, et al. Multi-harmonic measurements of line shape under low absorption conditions[J]. Applied physics B, 2014, 117(2): 543-547.
- [20] PENG Zhimin, DING Yanjun, CHE Lu, et al. Calibration-free wavelength modulated TDLAS under high absorbance conditions[J]. Optics Express, 2011, 19(23): 23104-23110.
- [21] 李染生, 彭志敏, 张奇, 等. 磨煤机用取样装置以及取样方法: ZL 2022 1 0173949.6[P]. 2022-07-12[2022-07-20].
LI Ransheng, PENG Zhiming, ZHANG Qi, et al. Sampling device and sampling method for coal mill: ZL 2022 1 0173949.6[P]. 2022-07-12[2022-07-20].
- [22] 李文华, 杨建国, 崔福兴, 等. 提高中速磨煤机出口温度对锅炉运行的影响[J]. 中国电力, 2010, 43(10): 27-30.
LI Wenhua, YANG Jianguo, CUI Fuxing, et al. Influence of improving medium-speed pulverizer outlet temperature on the operation of boiler[J]. Electric Power, 2010, 43(10): 27-30.
- [23] 吕洪坤, 常毅君, 裘立春, 等. 提升1000 MW机组磨煤机进出口温度的措施研究[J]. 浙江电力, 2013, 34(4): 30-34.
LYU Hongkun, CHANG Yijun, QIU Lichun, et al. Study on increasing inlet and outlet temperature of pulverizer of 1 000 MW units[J]. Zhejiang Electric Power, 2013, 34(4): 30-34.
- [24] 沈跃良, 陈谋万, 刘亚明, 等. 提高HP983中速磨煤机出口温度对锅炉运行的影响[J]. 热力发电, 2013, 42(4): 9-13.
SHEN Yueliang, CHEN Mouwan, LIU Yaming, et al. Effect of enhancing outlet temperature of HP983 pulverizer on boiler operation[J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(4): 9-13.

(责任编辑 邓玲惠)