火电机组烟气中 CO 在线测量方法对比研究

郝 剑¹,周佩丽²,彭志敏²,丁艳军²

(1. 三河发电有限责任公司,河北 三河 065201;2. 清华大学 能源与动力工程系,北京 100084)

摘 要:目前火电机组一般采用氧含量作为燃烧效率监测的参考量,而氧含量无法准确反映燃烧过程 中风煤的混合情况,且氧含量的测量受空气影响较大,因此,在测量烟气中氧含量的基础上,结合对不 完全燃烧产物 CO 的浓度测量,可提高燃烧效率监测的可靠性。针对目前常用的 2 种技术路线的 CO 监测仪进行了对比,即基于非分散红外(NDIR)取样式测量和基于可调谐激光二极管吸收光谱(TD-LAS)原位式测量。NDIR 取样式测量仪表将取样杆安装于省煤器出口后烟道内部,取样后的气体经 过多级过滤、冷凝除水等预处理后进入分析仪进行 NDIR 测量;TDLAS 原位式测量仪表将测量腔体安 装于省煤器出口后烟道内部,烟气经过测量腔体前端过滤器后进入测量腔体内部进行 TDLAS 测量。 测量结果表明:火电机组烟气中 CO 浓度具有变化幅度大、变化速度快等特点,基于 NDIR 的取样式测 量由于取样路径原因导致延时时间长,而且其多级过滤、冷凝除水等预处理装置复杂导致系统维护量 大,同时该仪表取样过程中由于气体的吸附或反应特性易引起测量结果失真;而基于 TDLAS 的原位 式测量由于将测量腔体安装于烟道内部,取样路径短,响应速度快,能够及时响应 CO 浓度瞬时变化, 而且该仪表采用一体式结构设计,系统稳定性高,维护量小,同时由于该仪表测量腔体在烟道内部,测 量环境与烟道环境一致,可实现高保真测量。

Comparative and research on on-line measurement of CO in flue gas of thermal power unit

HAO Jian¹, ZHOU Peili², PENG Zhimin², DING Yanjun²

(1. Sanhe Power Co., Ltd., Sanhe 065201, China; 2. Department of Energy and Power Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China) **Abstract**: At present, oxygen content is generally used as the reference quantity for combustion efficiency monitoring in thermal power units. However, oxygen content can't accurately reflect the mixing situation of wind coal in the combustion process, and the oxygen measurement in flue gas is greatly affected by the oxygen in air. Therefore, on the basis of oxygen measurement, and combined with the CO concentration measurement of incomplete combustion, the reliability of combustion efficiency monitoring can be improved. A comparative study of two kinds of CO measuring instruments was carried out, which were realized based on NDIR technology with sampling mode and TDLAS technology with in-suit mode, respectively. The sampling probe rod of NDIR-based with sampling mode instrument was installed in the flue behind the economizer, and the sample gas entered the analyzer for NDIR measurement after the pretreatments which included multistage filtration and condensation and water removal. The measurement chamber of TDLAS-based with in-situ mode instrument was installed in the flue after the economizer, and the flue gas entered the chamber to realize TDLAS measurement after passing through the filter which was installed on the chamber front end. The measurement results show that CO concentration in the flue gas of thermal power units has the characteristics of large variation range and fast change speed. The NDIR-based with sampling mode instrument has a long-time delay due to the sampling path, and it has the shortcoming of large maintenance because of the complex pretreatment such as multi-stage

引用格式: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.



收稿日期:2019-10-21;责任编辑:张晓宁 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.19102110

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFC0201100)

作者简介:郝 剑(1973—),男,河北大厂人,高级工程师,从事燃煤清洁发电技术研究工作。E-mail:16040113@ chnenergy. com.cn

filtration, condensation and water removal, at the same time, the measurement results are easy to be untrue due to the adsorption or reaction characteristics of the gas during the sampling process. The TDLAS-based with in-suit mode instrument is able to respond to the instantaneous change of CO concentration in time due to the short sampling path and fast response speed when the measurement chamber is installed in the flue, and the instrument adopts the integrated structure design, which has high system stability and small maintenance, at the same time, the instrument can realize the high fidelity measurement because the measurement chamber is installed in the flue which can ensure that the measurement environment is consistent with the flue environment.

Key words: thermal power units; CO concentration measurement; TDLAS; NDIR; combustion optimization

0 引 言

燃烧过程中生成的 CO 含量是判断燃烧是否充 分的重要参数,也是检测大气污染的重要指标之 一^[1],对锅炉内燃烧工况的监测和控制具有重要意 义。目前锅炉主要通过监测烟气中氧含量来判断燃 料的送风比例是否恰当、是否充分燃烧,而氧含量只 能反映炉膛总体过量空气系数,无法准确得到空气 和煤粉混合状况,同时由于空气中氧含量的影响,使 监测的氧含量难以精确表征锅炉燃烧情况。不完全 燃烧产物 CO 含量可直接反映燃料的燃烧情况,且 在低氮燃烧中,虽然降低了氮氧化物的生成,但由于 缺氧燃烧造成 CO 浓度急剧增加,加大了不完全燃 烧的热损失。因此在氧含量测量的基础上结合 CO 在线测量,可提高燃烧效率监测的可靠性和准确性。

目前市场上 CO 气体检测仪表种类繁多,其技 术原理主要包括电学法^[2-4]、电化学法、化学法、气 相色谱法和非分散红外法。电学法利用与气体浓度 有关的电学性质设计,具有稳定性强、电路简单易行 等优点,但存在寿命较短、辨气体能力差等问题。电 化学法根据氧化反应或还原反应设计,其优点在于 通用性好、技术成熟、操作简单、便于携带,可实现低 浓度测量,但无法对未知气体进行定性分析,传感器 寿命较短且不可超量程测量。化学法采用燃烧原 理,通过测量燃烧过程中释放的热量检测气体浓度, 该方法存在其他可燃气体的干扰。气相色谱法根据 不同气体通过色谱柱的速度差异原理设计,灵敏度 高,可靠性好,其缺点是系统复杂,须采用准确的分 析方法,选择合适的操作条件和操作技术,且需要多 次重复试验,不适合在线监测^[5-6]。

目前火电机组烟气中 CO 监测仪表主要采用非 分散红外(non-dispersive infrared,NDIR)原理结合 取样式测量,但非分散红外在测量时需要全程伴热 和冷凝,测量系统复杂,维护量较大,且还存在较大 的延时,难以及时响应烟气中 CO 浓度的快速动态 变化。与基于 NDIR 的 CO 监测仪表不同,可调谐二 极管吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy,TDLAS)作为一种新兴的光谱测量技术,其 采用窄带激光扫描待测气体分子吸收谱线,可消除 其他气体成分的干扰,具有极高的波长选择性和灵 敏度,已成为气体在线监测技术的重要发展方向。 本文拟基于 TDLAS 测量原理研发可适用于火电机 组 CO 原位在线监测设备,并将其与传统的 NDIR 取 样式 CO 仪表测量结果进行比较。测量结果表明, 基于 TDLAS 的原位取样式仪表测量灵敏度高,响应 速度快,适用于火电机组 CO 浓度波动剧烈的特点, 其测量环境与烟道环境一致,可实现高保真测量,同 时本文在此基础上初步提出了基于 CO 测量的锅炉 燃烧优化控制策略。

1 NDIR 和 TDLAS 测量方法对比

1.1 NDIR 测量方法

非分散红外测量原理如图 1 所示,利用红外光 通过待测气体时气体分子对特定波长的红外光吸收 作用实现气体参数的测量,其吸收关系满足 Beer-Lambert 定律,透射光强随浓度和长度按指数规律衰 减。基于 NDIR 原理的烟气分析仪一般采用传统抽 取测量方式,其测量装置主要包括烟气预处理装置、 光源、滤光片、测量气室、参比气室、探测器和数据处 理单元。烟气经过取样探头前端的过滤器滤除粉 尘,以降低粉尘对测量的影响;然后,经过预处理装 置的伴热、冷凝等后进入测量气室;最后光源发出的 光经过滤光片选择后,透过测量气室被气体吸收后 的信号作为透射光强,经过参比气室后的信号作为 参考光强,数据处理单元通过对测量气室和参考气 室的探测器信号进行处理得到待测气体浓度^[7-11]。



Fig.1 NDIR measurement schematic diagram

基于 NDIR 技术的烟气 CO 浓度监测仪一般选用 4.6 µm 波长附近的强吸收谱线,该波段谱线吸收

洁净煤技术

强度较高,但由于该技术采用广谱光源测量,对预处 理要求较苛刻,在仪表使用过程中存在以下问题: ① 为避免烟气中 H₂O 分子对测量谱线的干扰以及 对测量仪表模块的影响,需在取样过程中做冷凝处 理,取样过程复杂,维护量大;② 取样路径的存在会 造成测量延时,无法及时反映烟气中 CO 浓度的快 速变化过程:③ 经预处理后的气样中残留的水汽会 造成气室镜片污染,需经常擦拭;④ 在取样过程中, 传统的抽取测量方式由于气体的物理化学特性会出 现化学反应及吸附现象,易改变样气成分,造成测量 结果失真,无法实现高保真测量。

1.2 TDLAS 测量方法

TDLAS 测量方法是利用窄带激光扫描待测气 体分子的特征吸收谱线,具有无需预处理、选择性 强、灵敏度高、响应速度快等优点。该技术作为吸收 光谱的一个分支,遵循 Beer-Lambert 定律,通过分 析被气体分子吸收前后激光光强的变化得到气体的 温度、压强和浓度等参数,其原理如图2所示。频率 为v的激光穿过被测气体介质时被气体选择性吸 收,透射光强 I,和入射光强 I。满足 Beer-Lambert 定 律,其表达式[12-16]如下:

$$\tau(v) = \frac{I_t}{I_0} = \exp\left[-PS(T)XL\varphi(v)\right] = \exp\left[-\alpha(v)\right]$$
(1)

式中, $\tau(v)$ 为激光透射率; I_0 为入射光强; I_1 为透射光 强;P为气体压力;X为气体浓度;L为激光在气体 中传输距离,即吸收光程,cm;S(T)为气体吸收谱线 的线强度,仅与气体温度 T 有关; $\alpha(v)$ 为气体吸收 率, $\alpha(v) = PS(T) XL\varphi(v), \varphi(v)$ 为线型函数,在整 个频率上线型函数满足 $\int \varphi(v) dv = 1, cm_o$





TDLAS 自提出以来,形成了以直接吸收光谱技 术和波长调制光谱技术为主的2种主要测量方法。 直接吸收光谱技术根据 Beer-Lambert 吸收定理,通 过透射光强和入射光强的比值直接拟合气体吸收率 函数, 拟合得到的气体吸收率函数不仅包含气体温 度、浓度和压力等,而且还可根据其确定特征谱线的 光谱常数。因此,直接吸收光谱技术具有物理概念 清晰、操作简单、可直接测量气体温度、浓度和压力 等优点。但随着 TDLAS 的发展以及对气体检测精 度和灵敏度要求的提高,尤其是越来越多的恶劣环 境出现在实际测量中,传统的直接吸收光谱技术在 测量中由于易受到颗粒物浓度、激光强度波动和高 压下谱线重叠等因素的影响,无法精确拟合气体吸 收率函数,进而导致测量误差甚至出现错误的测量 结果。另外,直接吸收光谱技术一般只能在强吸收 条件下应用的缺点也制约了其进一步发展,如在峰 值吸收为1%的弱吸收测量中,1%的基线拟合误差 可能会引起 100%的浓度测量误差[17-18]。为了提高 TDLAS 的测量精度和灵敏度,解决恶劣环境以及弱 吸收条件下气体温度、浓度和压力的测量难题,20 世纪 80 年代, Reid 将波长调制光谱技术引入到 TD-LAS 测量系统中。波长调制光谱技术的优点在于: 测量过程中通过对目标信号进行高频调制,而非目 标信号由于没有经过调制在后续的谐波检测过程中 被除去,因此可有效降低测量系统中背景信号的干 扰,提高 TDLAS 的测量精度和灵敏度^[19]。

基于 TDLAS 的 CO 监测仪采用波长调制光谱 技术结合原位测量方式实现,其测量方案和仪表结 构如图3所示,主要包括激光发射接收单元、测量探 杆和数据采集处理单元。整个测量腔安装在烟道内 部,其主要部件包括镀金反射镜、滤芯以及烟气预处 理系统等,在抽气装置作用下,烟气经过定制滤芯过 滤后进入测量腔。激光二极管在激光器驱动器作用 下,发出波长2 326.83 nm 的激光,激光经过准直器 准直后入射到测量腔中,到达测量腔顶端被角锥反 射镜反射后再次经过待测烟气,透射光强被发射接 收单元中光电探测器接收并转化为电信号,并传输 至数据采集处理单元进行谐波检测和浓度反演。



图 3 基于 TDLAS 的 CO 监测仪表结构示意图 Fig.3 Structure sketch of CO monitoring instrument based on TDLAS

郝 剑等:火电机组烟气中 CO 在线测量方法对比研究

本文 CO 监测方法采用 TDLAS 中的波长调制 法(WMS),利用 4 次谐波信号进行测量,通过调节 激光控制模块的温度和电流,使激光二极管发出 2 326.82 nm 波长的激光,并调节加载于激光控制模 块的正弦信号幅值和频率,使激光二极管发出的激 光在谱线中心频率处实现波长调制。测量中由 FPGA 控制 D/A 产生 1.25 kHz 的正弦信号,一路对 激光二极管进行调制,另一路进行 A/D 采集作为锁 相检测的参考信号,同时 FPGA 控制 A/D 采集光电 探测器信号作为锁相放大器的测量信号,FPGA 将 采集的信号送入 DSP 进行锁相检测。锁相检测时, 为了去除参考信号噪声,对参考信号进行 FFT 得到 其初始相位角,同时内部产生与参考信号同相位的 4 倍频数字信号与测量信号相乘、低通滤波后得到 4 次谐波信号。

与基于 NDIR 原理的取样式 CO 监测仪相比,基 于 TDLAS 原理的原位式 CO 监测仪表具有以下优 势:① 测量精度高、响应速度快。该仪表采用原位 测量方式,取样时经过滤芯过滤有效去除烟气中杂 质,提高激光透过率、信噪比和测量精度,烟气流经 路径仅为几厘米,测量腔内气体更新速度快,测量温 度与烟道中烟气温度一致,不会因为温度变化导致 烟气组分改变,可实现快速动态测量,适用于 CO 剧 烈波动的特点。② 系统稳定性高,维护量小。激光 发射接收单元安装在测量腔体外侧的法兰上,入射 光束到达腔体前端后通过自行设计加工的高精度角 锥反射镜返回,该反射镜不仅反射率高、耐高温、耐 腐蚀,可消除光路中激光干涉等因素的影响,还可确 保反射光束与入射光束平行且不会因为腔体变形、 机械振动、反射镜位移而发生光路改变。同时,该方 法不需要对烟气进行伴热和冷凝等预处理,并设有 定时反吹管路,系统简单,维护量小。

2 TDLAS 与 NDIR 测量结果

将基于 TDLAS 技术的原位式 CO 在线监测仪 安装于省煤器后竖直烟道中,测量浓度通过 2~ 20 mA 模块传输至 DCS,与现有的基于 NDIR 技术 的 CO 在线监测仪数据进行对比。图 4 为基于 TDLAS 的 CO 监测仪连续 93 h 的测量曲线,可以看 出,CO 测量结果与氧含量具有很强的相关性,当氧 含量大于 3.5%左右时,CO 浓度很低,在 20×10⁻⁶~ 30×10⁻⁶范围内波动;当氧含量低于 3.5%左右时,CO 含量急剧增加。由于氧含量测量误差较大,因此通 过测量结果对比可以看出,单纯依靠氧含量对风量 进行调节易偏离最佳燃烧工况,而将 CO 与氧含量 测量结果相结合调节风量,则可得到更优的燃烧效率。由图4可知,烟气中CO浓度波动剧烈。



图 4 基于 TDLAS 原理的 CO 监测仪表连续测量结果 Fig.4 Continuous measurement results of CO monitoring instrument based on TDLAS

图 5 为基于 TDALS 技术和基于 NDIR 技术的 测量数据的局部放大图,其中 NDIR 仪表取样路径 约为 70 m。可以看出,当氧含量降低后,NDIR 仪表 的 CO 测量峰值比 TDLAS 仪表的 CO 测量峰值出现 时间延时约 50 s。



3 基于 CO 测量的燃烧优化控制策略

在锅炉的燃烧控制中,首先根据风煤比确定 总风量,再根据当前最佳氧含量设定对总风量进 行闭环校正。为防止在燃烧过程中氧含量过低造 成 CO 急剧增加,可基于 CO 测量值,对氧含量设 定值进行进一步闭环校正,本文提出的控制策略 如图 6 所示。

由于 CO 波动剧烈且变化幅度很大,因此不宜 直接采用 PID 算法对氧含量设定进行闭环校正。 本文建议采用基于 CO 测量氧含量校正的模糊算 法,即根据过去 30 s 的 CO 测量平均值与 CO 限制 之间的偏差大小,给出下一步氧含量设定值的调 整幅度、校正系数以及控制周期,调整参数需要根 据不同锅炉机组的燃烧特性并结合现场试验确 定,目前基于该原理的燃烧控制正在现场 600 MW 机组上进行。



图 6 基于 CO 测量的燃烧优化控制策略



4 结 论

1) NDIR 仪表采用取样方式进行测量, TDLAS 仪表采用原位方式进行测量,烟气中 CO 浓度具有 波动剧烈的特点, NDIR 取样式测量仪表存在测量 延时,对比结果显示,实际测量在 70 m 取样路径下 比 TDLAS 原位测量仪表延时约 50 s, TDLAS 测量仪 烟气更新速度快,可更快速地得到测量数据,更适用 于火电机组 CO 波动剧烈的特点。

2) NDIR 仪表取样系统相对复杂,冷凝处理后烟气中残留的水分易污染测量镜片,引起测量误差,需要后期经常擦拭,维护量大,且取样过程中由于气体的物理化学特性会出现吸附或化学反应,进而造成测量结果失真;而TDLAS 仪表直接将测量探头安装在测量烟道内部,烟气经过滤后进入测量腔体,测量环境与烟气环境一致,可实现高保真在线监测,且测量系统相对简单,机械结构具备高稳定性光路,不仅消除了激光干涉,且在机组启停炉时光路可自行恢复,后期维护量较小。

参考文献(References):

- [1] 梁斌,刘忠攀,武琼,等.循环流化床锅炉燃烧改性高硫煤的污染物排放特性[J].洁净煤技术,2017,23(6):94-100.
 LIANG Bin, LIU Zhongpan, WU Qiong, et al. Pollutant emission performance of additive-upgraded high-sulfur coal in CFB combustion[J]. Clean Coal Technology,2017,23(6):94-100.
- [2] 许传凯.燃煤锅炉燃烧优化技术:烟气中一氧化碳的检测[J].
 热力发电,1989(2):55-60.
 XU Chuankai. Combustion optimization technology of coal-fired boiler, detection of carbon monoxide in flue gas [J]. Thermal Power Generation,1989(2):55-60.
- $\label{eq:started} \begin{array}{l} \mbox{EBERT V,TEICHERT H,STRAUCH P,et al. Sensitive in situ detection of CO and O_2 in a rotary kiln-based hazardous waste incinerator using 760 nm and new 2.3 <math display="inline">\mu m$ diode lasers[J].Proc. Combust. Inst.,2005,30(1):1611-1618. \end{array}
- [4] SEPMAN A, GREN Y, GULLBERG M, et al. Development of TD-LAS sensor for diagnostics of CO, H₂O and soot concentrations in reactor core of pilot-scale gasifier[J]. Applied Physics B, 2016,

122(2)**:**29.

[5] 张海庆,刘炎,王鸿建. 电化学气体测量压力补偿方法的研究 [C]//低碳智能,持续创新——煤矿机电一体化新技术 2014 年学术年会.2014:143-146.

ZHANG Haiqing, LIU Yan, WANG Hongjian. Research on pressure compensation method in electrochemical gas measurement [C]//Low carbon intelligence, continuous innovation-2014 annual conference on new technology of coal mine mechanical – electrical integration.2014;143-146.

- [6] 牛小民,李世伟,张广来,等. 温度对催化燃烧式气体传感器影 响研究[J].现代计算机(专业版),2015(27);3-5.
 NIU Xiaomin,LI Shiwei,ZHANG Guanglai, et al. Researchon the influence of temperature on the catalytic combustion gas sensor
 [J]. Modern Computer,2015(27):3-5.
- [7] 胡欢.基于 NDIR 的电厂锅炉排烟 CO 分析系统设计[D].上 海:上海交通大学,2015.

HU Huan. CO analysis system foe power plant boiler combustion exhaust gas based on non-dispersive infrared [D]. Shanghai; Shanghai Jiaotong University, 2015.

- [8] 李小伟,车晓波,马建辉. 基于 NDIR 原理的红外 CO 浓度检测 仪[J].山东煤炭科技,2009(4):86-88.
 LI Xiaowei, CHE Xiaobo, MA Jianhui. Based on the principle of NDIR infrared CO concentration detector [J]. Shandong Coal Science and Technology,2009(4):86-88.
- [9] 孙亦鹏,曹红加,张清峰. 电厂烟气 CO 检测技术的应用[J].电 站系统工程,2012,28(6):41-43. SUN Yipeng,CAO Hongjia,ZHANG Qingfeng. Application of CO detection technology in power plant flue gas[J]. Power System Engineering,2012,28(6):41-43.
- BARRITAULT P, BRUN M, LARTIGUE O, et al. Low power CO₂ NDIR sensing using a micro-bolometer detector and a micro-hotplate IR-source[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2013, 182 (6):565-570.
- [11] ZHAO Zhengjie, LIU Dongxu, ZHANG Jilong, et al. Design of non-dispersed infrared (NDIR) methane gas sensor [J]. Spectroscopy & Spectral Analysis, 2011, 31(2):570-573.
- [12] 王超,王飞,邢大伟,等.利用可调谐半导体激光吸收光谱技术对燃烧环境中的 CO 在线测量[J].燃烧科学与技术,2014,20(2):176-180.

Wang Chao, WANG Fei, XING Dawei, et al. In situ measurements of CO Concentration in combustion environment based on tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Journal of Combus-

郝 剑等:火电机组烟气中 CO 在线测量方法对比研究

tion Science and Technology, 2014, 20(2): 176-180.

- [13] POGÁNY A, KLEIN A, EBERT V. Measurement of water vapor line strengths in the 1.4–2.7 μm range by tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. J. Quant. Spectrosc. RA., 2015, 165: 108–122.
- [14] JIA Hui, ZHAO Weixiong, CAI Tingdong, et al. Absorption spectroscopy of ammonia between 6 526 and 6 538cm⁻¹ [J]. Journal of quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer, 2009, 110:347-357.
- [15] DUY J, LANL J. Measurement of the absolute absorbance based on wavelength modulation spectroscopy [J]. Appl. Phys. B, 2017, 123:205.
- [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 $\mu m[J]$. Applied Physics B,2014,117(1):7–18.

- WAGNERS, FISHER B T, FLEMINGJW, et al. TDLAS based in situ measurement of absolute acetylene concentrations in laminar 2D diffusion flames [J]. Proc. Combust. Inst., 2009, 32: 839-846.
- [18] SHIMURA M,TANAHASHI M,MIYAUCHI T,et al. Combustion measurement of thermoacoustic oscillating flames by diode-laser absorption spectroscopysensors [J]. Thermochim. Acta, 2009, 495: 95-100.
- [19] REID J, LABRIED D. Second harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory[J]. Appl. Phys. B, 1981, 26:203-210.