

基于横向塞曼效应的烟气汞在线监测系统

张 勇^{1,2,3}, 司福祺^{1*}, 李传新¹, 曾 议¹, 刘文清¹, 周海金¹

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;

²中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026;

³淮北师范大学物理与电子信息学院, 安徽 淮北 235000

摘要 为了解决燃煤烟气汞监测困难的问题, 搭建了基于横向塞曼效应的烟气汞在线监测系统。当自然汞灯光源处于磁感应强度为 1.5 T 强磁场中时, 塞曼效应使得 253.65 nm 共振吸收线分裂为 π 和 σ^\pm 线偏振光。利用汞原子吸收 π 线偏振光但不吸收 σ^\pm 线偏振光的特性, 可实现对干扰气体和颗粒物等干扰背景的精确校正, 系统的探测下限为 66.3 ng/m³。当烟气中二氧化氮气体的体积分数不高于 5.09×10^{-4} 、二氧化硫的体积分数不高于 1.83×10^{-4} 时, 系统的汞检测不受影响。对燃煤电厂的烟气汞排放进行了连续 8 d 的监测, 得到烟气汞的平均质量浓度为 8.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 质量浓度最大值为 19.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 均低于国家标准的规定值。实验结果表明, 烟气汞在线监测系统可对烟气中的干扰气体以及颗粒物等进行精确背景校正, 实现烟气汞的准确测量, 满足复杂烟气环境下对汞的长期在线监测。

关键词 大气光学; 塞曼效应; 烟气汞; 原子吸收法; 干扰气体

中图分类号 X831; O433 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0501002

Flue Gas Mercury Online Monitoring System Based on Transverse Zeeman Effect

Zhang Yong^{1,2,3}, Si Fuqi¹, Li Chuanxin¹, Zeng Yi¹, Liu Wenqing¹, Zhou Haijin¹

¹ Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

² Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China;

³ School of Physics and Electronic Information, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000, China

Abstract In order to solve the problem of coal flue gas mercury monitoring, an online monitoring system for flue gas mercury is established based on transverse Zeeman effect. When a mercury lamp is placed in magnetic field with magnetic induction intensity of 1.5 T, the resonant absorption line at 253.65 nm is split into π and σ^\pm linearly polarized light because of Zeeman Effect. Mercury atom can absorb π linearly polarized light but can not absorb σ^\pm linearly polarized light, so the system can realize the accurate correction for interference background including the interference gases, particulate matter and so on. The low detection limit of this system is 66.3 ng/m³. The mercury detection is not affected when the volume fraction of NO₂ gas is not larger than 5.09×10^{-4} and the volume fraction of SO₂ gas is not larger than 1.83×10^{-4} . The monitoring for flue gas mercury in coal-fired power plant lasts 8 days. The average mass concentration of 8.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and maximum mass concentration of 19.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ of flue gas mercury are obtained, and they are lower than that in national standard. The experimental results show that the flue gas mercury online monitoring system can realize accurate correction for background interference which is

收稿日期: 2016-12-16; 收到修改稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家自然科学基金(41275037)、安徽省自然科学基金(1408085MKL49)、安徽省高校自然科学研究项目(KJ2013B240)

作者简介: 张 勇(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事环境光学监测方面的研究。E-mail: yongzhang@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘文清(1954—), 男, 博士, 研究员, 主要从事环境光学、有害痕量气体光学监测、环境监测技术等方面的研究。

E-mail: wqliu@aiofm.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: sifuqi@aiofm.ac.cn

caused by interference gases and particulate matter, and realize accurate measurement for flue gas mercury. The system is proper to be used for long-term online monitoring of flue gas mercury.

Key words atmospheric optics; Zeeman effect; flue gas mercury; atomic absorption method; interference gases

OCIS codes 010.1120; 120.1880; 230.0040

1 引 言

汞作为常温下唯一的液态重金属,是人们熟知的环境污染物,具有很高的毒性,能通过呼吸、接触及饮食等进入人体,并在人体内累积^[1-3],对神经系统等有很大的伤害^[4]。汞主要通过自然过程和人为活动等渠道进入环境,目前人为活动中煤炭燃烧已经成为最大的污染源^[5]。汞作为全球性污染物,对汞的监测与防治受到了全球重视,2013年签署《水俣公约》,2016年4月中国批准《水俣公约》,这都标志着我国开始全面进行汞污染的防治^[6]。

我国众多发电厂大都以燃煤电厂为主,煤炭的燃烧不仅向外界释放粉尘、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物等有害污染物,还会释放汞,从而对环境造成严重的污染^[7]。SO₂在烟气中所占成分较大,可通过成像差分光谱等技术对SO₂进行测量^[8]。在燃煤烟气中元素汞占气态汞总量的52%~83%,二价汞仅占17%~48%,元素汞占气态汞的大部分。元素汞不能随雨水沉降,但会随着大气运动漂移,在大区域范围内形成严重的汞污染^[9-10]。针对该情况,国家编制《火电厂大气污染物排放标准》,并要求从2015年1月全面正式执行该标准^[11]。根据《火电厂大气污染物排放标准编制说明》中对标准实施前后的汞产生量及排放量进行的统计及预测,汞产生量随着工业进程的发展呈逐年上升的趋势,同时新标准的实施要求汞排放量大幅下降,因此需对烟气汞进行高精度监测,以督促燃煤电厂对生产设备进行改进,降低烟气汞的排放。

目前测量烟气汞的方法主要有:1)冷原子荧光法;2)冷原子吸收法;3)纵向塞曼原子吸收法。冷原子荧光法和冷原子吸收法均需对待测气体进行前期的预富集,使用的补汞管需要高温解析汞,配备载气需要高精度扣除背景,这会造成整体装置复杂、设备昂贵、维护困难等问题^[12];纵向塞曼原子吸收法采用的是同位素汞灯(Lumex专利技术),存在光源不易获取的问题。本文基于横向塞曼效应背景校正法进行了烟气汞检测研究,该方法将低压汞灯作为光源,不需要进行前期预富集,整体装置简单,可直接抽取烟气进行监测,探测下限低,能满足烟气汞连续在线监测的要求。

2 方法和原理

2.1 塞曼原子吸收法原理

塞曼原子吸收是一种基于原子吸收光谱法原理且背景校正环节采用塞曼效应的技术。汞原子蒸气可选择性地吸收253.65 nm的紫外光,在一定体积分数范围内,汞原子蒸气的吸光度与汞的体积分数成正比,将含汞气体通入样品池,根据含汞气体对谱线的吸收可计算得到气体中汞的体积分数。在烟气环境中,SO₂、NO_x等气体浓度高,对汞含量检测造成一定的干扰。横向塞曼效应背景校正技术采用塞曼效应对干扰气体以及颗粒物进行背景精确校正,从而可实现烟气汞的准确测量^[13]。

处于强磁场中的汞灯光源,垂直于磁场方向发射出与偏振方向相互垂直的 π 和 σ^\pm 线偏振光。使用电光调制器对两线偏振光进行选择透过,以实现对 π 和 σ^\pm 线偏振光的交替、连续监测。当 π 线偏振光通过检测池时,探测光中包含有背景吸收和汞吸收;当 σ^\pm 线偏振光通过检测池时,探测光中只包含有背景吸收,对两探测信号进行处理,扣除背景后可获得精确的汞含量^[14-16]。图1为横向塞曼效应谱线吸收原理图。

本课题组之前的研究表明,随着磁场强度的增加, σ^- 、 σ^+ 线偏振光分别向自然汞吸收带两侧移动,当磁感应强度达到1.5 T以后, σ^- 、 σ^+ 线偏振光的分裂间隙约为10 pm, σ^- 、 σ^+ 偏振谱线均处于吸收带宽之外,且 π 线偏振光一直维持在原发射谱线位置,吸收系数达到最大值,此时分裂光基本无汞原子吸收,因此选择磁感应强度为1.5 T的强磁场^[15]。

磁场中汞灯发出的谱线分裂为 π 、 σ^+ 、 σ^- 线偏振光,使用 σ^+ 、 σ^- 线偏振光作为背景光, π 线偏振光作为吸收光^[17]。根据朗伯比尔定律,可得(把 I_{σ^-} 和 I_{σ^+} 合并成 I_{σ^\pm} , $I_{\sigma_0^-}$ 和 $I_{\sigma_0^+}$ 合并成 $I_{\sigma_0^\pm}$)

$$I_{\sigma^-} = I_{\sigma_0^\pm} \exp[-l(n_h \epsilon_{\sigma^-}^h + n_m \epsilon_{\sigma^-}^m + n_p \epsilon_{\sigma^-}^p)], \quad (1)$$

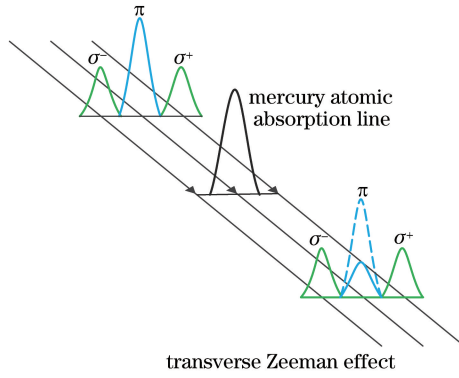


图 1 横向塞曼效应吸收过程

Fig. 1 Absorption process of transverse Zeeman effect

$$I_{\sigma^+} = I_{\sigma_0^+} \exp[-l(n_h \epsilon_{\sigma^+}^h + n_m \epsilon_{\sigma^+}^m + n_p \epsilon_{\sigma^+}^p)], \quad (2)$$

$$I_{\pi} = I_{\pi_0} \exp[-l(n_h \epsilon_{\pi}^h + n_m \epsilon_{\pi}^m + n_p \epsilon_{\pi}^p)], \quad (3)$$

式中 I_{σ^-} 、 I_{σ^+} 、 I_{π} 为经烟气汞吸收后的出射光强, $I_{\sigma_{\pm}} = I_{\sigma^-} + I_{\sigma^+}$; $I_{\sigma_0^-}$ 、 $I_{\sigma_0^+}$ 、 I_{π_0} 为原始光强, $I_{\pi_0} = I_{\sigma_0^-} + I_{\sigma_0^+}$, 其中 $I_{\sigma_0^-} = I_{\sigma_0^+}$; n_h 为汞质量浓度; $\epsilon_{\sigma^-}^h$ 、 $\epsilon_{\sigma^+}^h$ 、 ϵ_{π}^h 分别为 σ^- 、 σ^+ 、 π 线偏振光的汞吸收系数, 其中 $\epsilon_{\sigma^+}^h = \epsilon_{\sigma^-}^h$; n_m 为干扰气体的总质量浓度; $\epsilon_{\sigma^-}^m$ 、 $\epsilon_{\sigma^+}^m$ 、 ϵ_{π}^m 分别为干扰气体在 σ^- 、 σ^+ 、 π 线偏振光中的吸收系数。横向塞曼效应谱线分裂的 10 pm 范围内, 干扰气体的质量浓度低于一定值时, 同一浓度下干扰气体的线偏振光中的吸光度基本一致, 此时吸收系数 $\epsilon_{\sigma^-}^m = \epsilon_{\sigma^+}^m = \epsilon_{\pi}^m$; n_p 为颗粒物总质量浓度, $\epsilon_{\sigma^-}^p$ 、 $\epsilon_{\sigma^+}^p$ 、 ϵ_{π}^p 分别为颗粒物在 σ^- 、 σ^+ 、 π 线偏振光中的散射及吸收系数, 且 $\epsilon_{\sigma^-}^p = \epsilon_{\sigma^+}^p = \epsilon_{\pi}^p$ [18]。由(1)~(3)式可得

$$\ln\left(\frac{I_{\pi}}{I_{\pi_0}}\right) - 0.5\ln\left(\frac{I_{\sigma^+}}{I_{\sigma_0^+}}\right) - 0.5\ln\left(\frac{I_{\sigma^-}}{I_{\sigma_0^-}}\right) = -l \cdot [n_h \cdot (\epsilon_{\pi}^h - 0.5\epsilon_{\sigma^-}^h - 0.5\epsilon_{\sigma^+}^h) + n_m \cdot (\epsilon_{\pi}^m - 0.5\epsilon_{\sigma^+}^m - 0.5\epsilon_{\sigma^-}^m)]. \quad (4)$$

(4)式可简化为 $\ln(I_{\pi}/I_{\sigma_{\pm}}) = -l \cdot n_h \cdot (\epsilon_{\pi}^h - \epsilon_{\sigma_{\pm}}^h)$, 通过光电倍增管采集分别得到通过样品池后的 π 和 σ^{\pm} 线偏振光的光强, 可计算得到相应的汞质量浓度。

2.2 汞标定原理

使用汞标定装置, 对烟气汞监测系统周期性地定期进行标定, 以保证系统测量的准确性。目前汞的标定方法主要有: 汞标气瓶标定法、汞蒸气压力和汞渗透管法 [19-21]。

汞标气瓶标定法的成本较高; 汞蒸气压力的使用注意事项繁多, 仅能手动操作, 并且对于操作者的个人技能要求很高, 否则很容易造成汞蒸气的泄漏 [22]。因此本系统采用汞渗透管法进行汞标气的生成。

渗透管的渗透率和温度的关系可表示为 [21]

$$\lg P_1 = \lg P_0 + \alpha(T_1 - T_0), \quad (5)$$

式中 P_0 为温度为 T_0 时的释放率, P_1 为温度为 T_1 时的释放率, α 为温度系数。

3 烟气汞检测系统结构

3.1 烟气汞检测系统结构

烟气汞检测系统主要包括磁感应强度为 1.5 T 的强永磁体、光路调制模块、标气产生模块、烟气前期处理模块、检测池、信号采集模块和信号处理与控制模块, 如图 2 所示。

放置于强永磁体中的低压汞灯发出的光的原子谱线发生塞曼效应分裂, 分裂成 π 线偏振光和 σ^{\pm} 线偏振光; 分裂后的谱线经过准直透镜进入电光调制晶体, 控制模块通过电光调制晶体控制电路对塞曼效应分裂后的线偏振光进行调制, 使 π 线偏振光和 σ^{\pm} 线偏振光交替通过光路。 π 线偏振光位于自然汞吸收带峰值处, 可作为吸收光; σ^{\pm} 线偏振光位于自然汞吸收带宽两侧, 自然汞原子对其没有吸收, 可作为背景光 [23]。

两线偏振光进入光路池, 对烟气中的干扰气体成分进行背景精确校正, 并对烟气汞进行高灵敏度测量; 利用信号采集模块将光信号转化成电信号, 并将电信号送入处理单元; 处理单元根据标志位对数据进行处理, 最终得到待测气体的质量浓度。

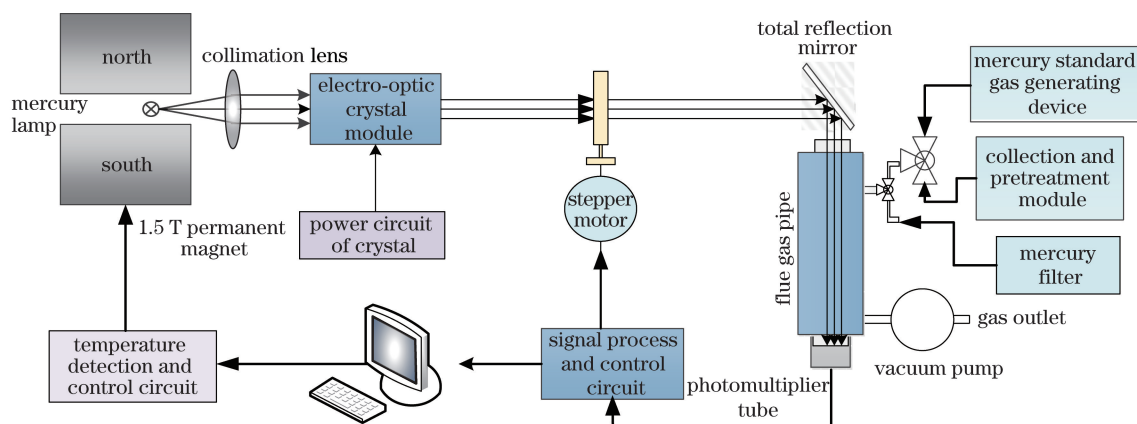


图 2 烟气汞检测系统结构示意图

Fig. 2 Structural diagram of detection system for flue gas mercury

3.2 汞标气产生装置

采用汞渗透管法生成固定质量浓度的汞标气,将汞标气通入烟气汞监测系统中进行系统标定,以保证系统的测量精度。如图 3 所示,将汞渗透管置入带有特氟龙镀层的不锈钢渗透腔内,在渗透腔外围环绕着内径为 2 mm、外径为 3 mm 的铜管,渗透腔被放置在恒温保温材料内部。通过温度探测器和温度控制器将不锈钢渗透腔和铜管的温度控制在 50 °C。将流量为 30 mL/min 的高纯氮气(N₂)作为载气,氮气在铜管中被加热到 50 °C 后进入渗透腔。氮气通过渗透腔的同时将腔内的汞气带出,并与流量为 2 L/min 的稀释空气混合,生成质量浓度为 7600 ng/m³ 的汞标气,通过调节稀释气体的流量可设置汞标气的质量浓度。

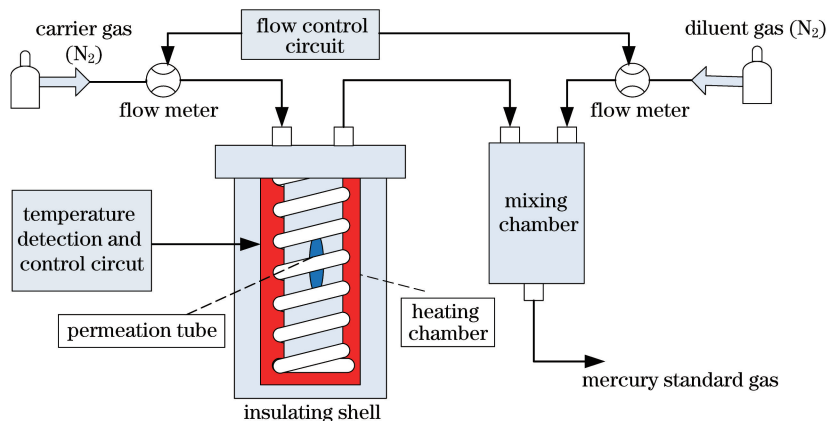


图 3 汞标气产生装置

Fig. 3 Device for producing mercury standard gas

4 烟气汞监测系统性能研究及现场应用

4.1 系统探测下限分析

在进气口处加入一个汞过滤器,将空气过滤成不含汞的零气。通过 62 h 连续测量,获得的零气测量数据如图 4 所示。

测量时间为 62 h,计算得到零气测量数据的标准偏差为 22.1 ng/m³,根据分析仪器检测限公式 $C_L = k \cdot S_b$ (C_L 为检测限; k 为系数,常取值为 3; S_b 为标准偏差),计算得到该系统的探测下限为 66.3 ng/m³。目前国内外采用金汞齐富集的方式测量烟气汞,测量仪器的最佳探测下限能够低于 10 ng/m³,但是整体系统复杂,配套设施较多。采用直接采样测量烟气汞,检测仪器的探测下限为 50 ng/m³,而实际测量中的探测下限大部分为 100 ng/m³,甚至更高。该系统相较国内外其他同类型仪器具有更高的测量精度。

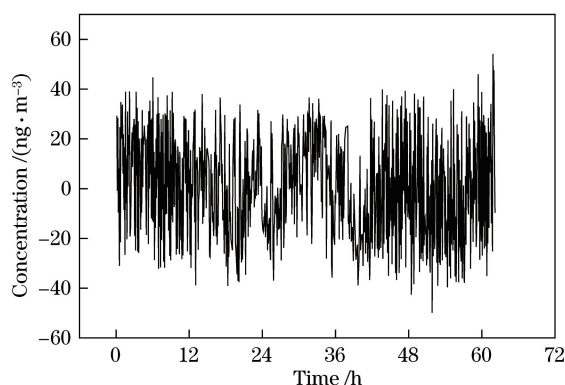


图 4 62 h 零气测量数据

Fig. 4 Zero gas measurement data in 62 h

4.2 干扰气体背景校正

烟气中存在多种气体成分,其中主要的气态混合物成分(氮气、氧气、水蒸气等)^[7]在 253.65 nm 汞共振线波段附近不会被大量吸收,因此不会影响汞的检测结果。但是烟气中包含一些在 253.65 nm 波段有很强吸收的污染气体,如二氧化氮(NO₂)、SO₂、一氧化氮(NO)等^[24]。仪器系统直接抽取烟气测量,当这些干扰气体质量浓度较高时,可能会对整个检测系统产生一定的背景干扰。针对这种情况,选取了相应体积分数的干扰气体进行干扰分析实验。

图 5 为 NO₂ 和 SO₂ 气体在 253.65 nm 波段的吸收截面谱线图,NO₂ 和 SO₂ 吸收截面较小,截面谱线波动不大。干扰气体的吸收理论上始终是始终存在的,当磁感应强度大于 1.5 T 时,干扰气体的 π 线偏振光和 σ^+ 线偏振光的透射率基本相同,吸收系数差值非常小;随着磁感应强度继续增加, σ^+ 与 σ^- 线偏振光均处于汞原子吸收带外,从而吸收系数均为 0。但是,烟气中 NO₂ 和 SO₂ 质量浓度较高,导致吸光度变大,从而存在一定干扰,并会对烟气汞检测系统的检测结果产生一定影响,因此需分析干扰气体体积分数变化对应的干扰情况。分别选用不同体积分数的 SO₂ 标准气体和 NO₂ 标准气体进行测试,实验结果如图 6 所示。

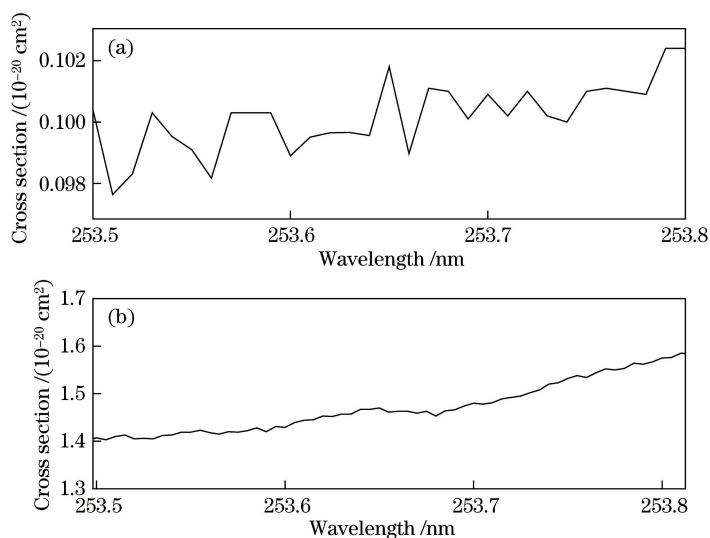
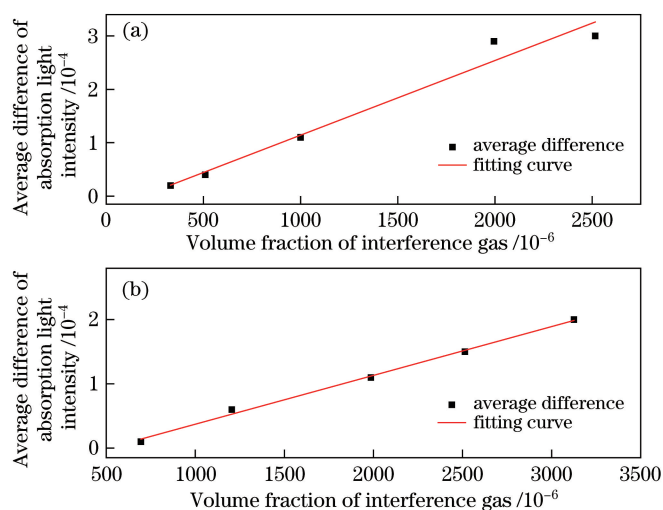


图 5 干扰气体的吸收截面谱线。(a)NO₂; (b)SO₂

Fig. 5 Spectral lines of absorption cross section for interference gases. (a) NO₂; (b) SO₂

图 6 为对应不同体积分数的干扰气体造成系统汞检测的干扰体积分数值,图中的纵坐标为不同浓度的干扰气体吸收光强与零气时吸收光强的平均差,干扰下限是该拟合直线在 x 轴上的截距,当体积分数低于该干扰下限时,干扰气体的吸收光强和零气的吸收光强趋近相同,处于系统信号探测噪声处,对检测不会造成影响。从图中可以看出,SO₂ 的干扰下限为 1.83×10^{-4} ,NO₂ 的干扰下限为 5.09×10^{-4} ,高于国标规定的排放限值(SO₂ 的排放限值为 1.40×10^{-4} ,NO₂ 的排放限值为 0.97×10^{-4})。实际燃煤电厂超低排放中 SO₂

图 6 干扰气体的测量结果。(a)SO₂; (b)NO₂Fig. 6 Measurement results of interference gases. (a) SO₂; (b) NO₂

和 NO₂ 的体积分数均小于该排放限值,因此本系统在对烟气中汞含量检测时,干扰气体造成的影响可以忽略不计。

4.3 系统稳定性测量

利用自主设计的汞标气产生装置产生质量浓度为 7.6 μg/m³ 的汞标气(汞气和氮气的混合物),汞标气产生装置的内部加热温度设置为 50 °C,混合气体流量设置为 2 L/min,载气流量设置为 30 mL/min。将该固定质量浓度的汞标气接入烟气汞监测系统的进气口端进行连续 48 h 测量,数据如图 7 所示。

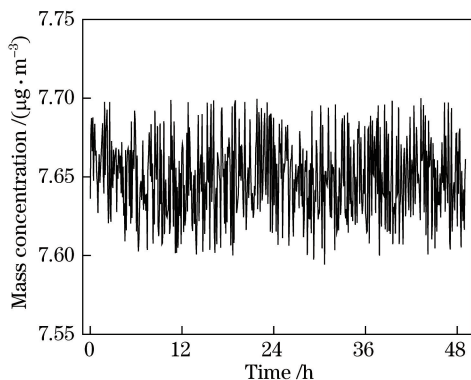


图 7 汞标气 48 h 检测结果

Fig. 7 Measured result of mercury standard gas in 48 h

在 48 h 的连续测量中,测量结果稳定在 7.65 μg/m³ 左右,质量浓度测量标准偏差为 0.025 μg/m³,系统长期测量稳定性较好,可对烟气汞进行连续在线监测。

4.4 烟气汞质量浓度测量

2016 年 6 月,在某燃煤电厂连续进行了 8 d 在线汞质量浓度监测,该电厂共有两台功率为 630 MW 的超临界机组和两台功率为 660 MW 的超临界机组用于商业运行,同时实现烟气超低排放,在超低排放脱硫脱硝出口端的测量数据如图 8 所示,整体烟气汞质量浓度在 4~19.4 μg/m³ 之间变化,平均质量浓度为 8.3 μg/m³,低于国家标准中对汞及其化合物的限值(30 μg/m³)要求。

5 结 论

研究了烟气汞质量浓度的塞曼原子吸收测量方法,为烟气汞的连续在线监测提供了新的技术方法,并在此基础上搭建了烟气汞在线监测系统。通过 24 h 零气测量,得到系统的探测下限为 66.3 ng/m³,所搭建的系统相较国内连续在线监测仪器精度得到了提升。对含有高质量浓度气体(如 NO₂、SO₂)的烟气进行干扰

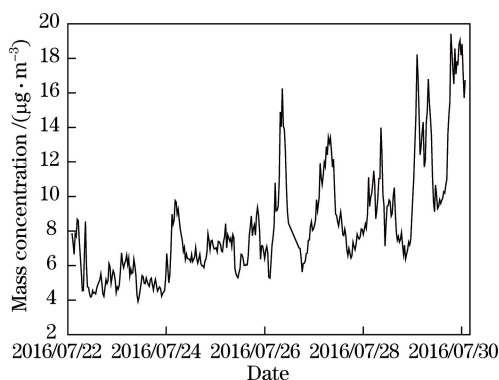


图 8 烟气汞质量浓度的监测结果

Fig. 8 Monitoring results of mass concentration of flue gas mercury

气体测量实验,测量结果表明,烟气中的 NO_2 、 SO_2 气体对烟气汞在线监测系统的测量没有影响,测量时无需额外设备对烟气中的干扰气体进行前期预处理。于 2016 年夏季对电厂排放烟气进行了长时间监测,发现监测结果符合国家规定标准,表明该系统可以长期应用于发电厂排放烟气汞质量浓度的监测。该系统测量灵敏度高且不受烟气中其他干扰气体的影响,无需进行前期预富集和烟气的复杂前处理,适用于烟气汞质量浓度的实时在线监测。

参 考 文 献

- [1] Feng Xinbin, Qiu Guangle, Fu Xuewu, *et al.* Mercury pollution in the environment[J]. Progress in Chemistry, 2009, 21(2-3): 436-457.
冯新斌, 仇广乐, 付学吾, 等. 环境汞污染[J]. 化学进展, 2009, 21(2-3): 436-457.
- [2] Ivannikova N V, Shiryaeva O A, Karpov Y A. Atomic absorption determination of mercury in solid samples of placer[J]. Inorganic Materials, 2010, 46(14): 1499-1502.
- [3] Zhang Y L, Adeloju S B. Speciation of mercury in fish samples by flow injection catalytic cold vapour atomic absorption spectrometry[J]. Analytica Chimica Acta, 2012, 721: 22-27.
- [4] Pacyna E G, Pacyna J M, Steenhuisen F, *et al.* Global anthropogenic mercury emission inventory for 2000[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(22): 4048-4063.
- [5] Wang Sheng, Wang Huimin, Zhu Fahua, *et al.* Mercury emission characteristics from coal-fired power plants based on actual measurement[J]. Environmental Science, 2011, 32(1): 33-37.
王 圣, 王慧敏, 朱法华, 等. 基于实测的燃煤电厂汞排放特性分析与研究[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 33-37.
- [6] Yin Libao, Gao Yuqun, Xu Qisheng, *et al.* Mercury emission from coal-fired power plants in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(29): 1-9.
殷立宝, 嵯玉群, 徐齐胜, 等. 中国燃煤电厂汞排放规律[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(29): 1-9.
- [7] Yang Xianghua, Duan Yufeng, Yang Linjun, *et al.* The measurement of mercury in flue gases from coal-fired power plants[J]. Energy Research and Utilization, 2005(5): 25-29.
杨祥花, 段钰锋, 杨林军, 等. 燃煤电厂烟气中的汞浓度测量[J]. 能源研究与利用, 2005(5): 25-29.
- [8] Liu Jin, Si Fuqi, Zhou Haijin, *et al.* Estimation of sulfur dioxide emission from power plant using imaging differential optical absorption spectroscopy technique[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(6): 0630003.
刘 进, 司福祺, 周海金, 等. 基于成像差分吸收光谱技术测量电厂 SO_2 排放方法研究[J]. 光学学报, 2015, 35(6): 0630003.
- [9] Qiao Linqin, Zhang Jun, Zhu Zejun, *et al.* Online monitoring status of mercury in the flue gas and performance evaluation of instrument[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2014, 26(5): 61-63.
乔琳庆, 张 军, 朱泽军, 等. 烟气汞在线监测现状及仪器性能评估初探[J]. 环境监测管理与技术, 2014, 26(5): 61-63.
- [10] Zhang Jie. The online monitoring technology and application of atmosphere mercury in coal-fired power plants[J]. Huadian Technology, 2011, 33(7): 72-76.
张 洁. 燃煤电厂大气汞排放在线监测技术及应用[J]. 华电技术, 2011, 33(7): 72-76.
- [11] Sang Qi, Le Yuanyuan, Xu Han. Emission standards, current situation and reduction technology of air pollutants for

- thermal power plants[J]. Zhejiang Electric Power, 2011(12): 42-46.
- 桑 绮, 乐园园, 徐 晗. 火电厂大气污染物排放标准、现状及减排技术[J]. 浙江电力, 2011(12): 42-46.
- [12] Deng Bo, He Huakun. Atomic absorption spectral analysis[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- 邓 勃, 何华焜. 原子吸收光谱分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [13] Yang Minzhen, Du Zonglu. Zeeman effect atomic absorption spectroscopy[J]. Journal of Liaoning Normal University (Natural Science Edition), 1987(3): 32-38.
- 杨铭珍, 杜宗鲁. 偏振塞曼效应原子吸收光谱分析法[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 1987(3): 32-38.
- [14] Li Zhonggen, Feng Xinbin, Zheng Wei, *et al.* Sampling and determination of different mercury species in atmosphere[J]. Environmental Monitoring in China, 2007, 23(2): 19-25.
- 李仲根, 冯新斌, 郑 伟, 等. 大气中不同形态汞的采集和分析方法[J]. 中国环境监测, 2007, 23(2): 19-25.
- [15] Li Chuanxin, Si Fuqi, Zhou Haijin, *et al.* New transverse Zeeman effect method for mercury detection based on common mercury lamp[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(7): 074202.
- 李传新, 司福祺, 周海金, 等. 基于普通汞灯光源的横向塞曼效应背景校正大气汞检测方法研究[J]. 物理学报, 2014, 63(7): 074202.
- [16] Pandey S K, Kim K H, Brown R J C. Measurement techniques for mercury species in ambient air[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2011, 30(6): 899-917.
- [17] Pan L, Chai T F, Carmichael G R, *et al.* Top-down estimate of mercury emissions in China using four-dimensional variational data assimilation[J]. Atmospheric Environment, 2007, 41: 2804-2819.
- [18] Edner H, Sunesson A, Svanberg S, *et al.* Differential optical absorption spectroscopy system used for atmospheric mercury monitoring[J]. Applied Optics, 1986, 25(3): 403-409.
- [19] Chen Zhijun, Zeng Limin. Calibration methods for an on-line atmospheric mercury analyzer using a permeation tube[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(6): 1192-1197.
- 陈积君, 曾立民. 在线大气汞分析仪渗透管标定方法研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1192-1197.
- [20] Huber M L, Laesecke A, Friend D G. Correlation for the vapor pressure of mercury[J]. Industrial and Engineering Chemistry Research, 2006, 45(21): 7351-7361.
- [21] Zhou Zeyi, Liang Jianping, Gai Liangjing. Study of diffusion tube calibration gases preparation and dynamic volumetric method[J]. Acta Metrologica Sinica, 2004, 25(1): 81-84.
- 周泽义, 梁建平, 盖良京. 扩散管标准气体及其动态配气方法的研究[J]. 计量学报, 2004, 25(1): 81-84.
- [22] Byun Y, Shin D N, Ham S W, *et al.* Calibration of mercury analysers: Assessment of agreement between four methods[J]. Analytical Methods, 2012, 4: 3841-3848.
- [23] Yang Kai. Flue gas mercury monitoring technology and equipment in stationary pollution source[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- 杨 凯. 固定污染源烟气汞监测技术与设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [24] Yu Minjie, Liu Minghui, Dong Zuoren, *et al.* Study on measuring concentration of ammonia and sulphur dioxide by differential optical absorption spectrometry based on fast Fourier transform[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0915001.
- 郁敏捷, 刘铭晖, 董作人, 等. 基于傅里叶变换的差分吸收光谱法测量 NH_3 和 SO_2 浓度的实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0915001.