

文章编号: 0253-2409(2013)07-0839-06

## 300 MW 燃煤电站砷、汞排放特征研究

张凯华<sup>1</sup>, 张 锴<sup>1</sup>, 潘伟平<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院 热电生产过程污染物监测与控制北京市重点实验室, 北京 102206;

2. Institute for Combustion Science and Environmental Technology, Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky 42101, USA)

**摘要:** 对某 300 MW 燃煤电站煤、底灰和静电除尘器(ESP)飞灰进行采样并测定了其中的砷、汞含量,同时应用 Ontario Hydro Method (OHM) 标准方法和设备对 ESP 前后烟气中的砷、汞分布进行了直接采样和测试。对砷的检测结果表明,ESP 飞灰中砷含量约  $6.68 \times 10^{-6}$ , 是原煤中砷含量的 2.5 倍左右,而底灰中砷含量仅为  $1.70 \times 10^{-6}$ , ESP 前烟气中砷含量约  $153.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , ESP 后砷含量急剧降低为  $41.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 对汞的检测结果表明,原煤中汞含量约  $2.5 \times 10^{-7}$ , 飞灰、底灰中的汞含量分别约  $1.9 \times 10^{-7}$ 、 $1.5 \times 10^{-7}$ ; ESP 前后烟气中总汞含量分别为  $5.49$ 、 $5.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。砷在飞灰中明显富集,而汞在飞灰和底渣中均不具有富集效果。ESP 单元具有明显的协同脱砷效果,平均脱除率约在 71% 左右,而对汞的协同脱除效果不明显。

**关键词:** 砷; 汞; 排放; 烟气; 飞灰

**中图分类号:** X773 **文献标识码:** A

### Emission characteristics of arsenic and mercury from a 300 MW coal-fired power plant

ZHANG Kai-hua<sup>1</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, PAN Wei-ping<sup>1,2</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of Emission Surveillance and Control for Thermal Power Generation, Department of Energy Power & Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute for Combustion Science and Environmental Technology, Western Kentucky University, Bowling Green, Kentucky 42101, USA)

**Abstract:** An emissions studies for arsenic and mercury were conducted at a 300 MW coal-fired power plant. The solid streams such as coal, bottom ash and ESP ash were collected, and the arsenic and mercury in the flue gas around ESP were also directly sampled using Ontario Hydro Method and then tested. The results show that the arsenic concentration in fly ash is about  $6.68 \times 10^{-6}$ , which is almost 2.5 times as that in coal, nevertheless that in bottom ash is only  $1.70 \times 10^{-6}$ . Its concentration in the flue gas is  $153.27$  and  $41.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$  before and after ESP, respectively. The mercury concentration in coal, fly ash and bottom ash is about  $2.5 \times 10^{-7}$ ,  $1.9 \times 10^{-7}$  and  $1.5 \times 10^{-7}$  respectively, its concentration in the flue gas before and after ESP was about  $5.49$  and  $5.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Arsenic is significantly concentrated in fly ash, whereas mercury is not. ESP unit has obvious synergistic effect on arsenic removal up to 71%, while it is not obvious for mercury removal.

**Key words:** arsenic; mercury; emission; flue gas; fly ash

砷、汞由于具有极强的生物累积性和致癌致畸性等而成为威胁人类健康和生态安全的重要环境问题<sup>[1,2]</sup>。由于世界范围内大量煤炭的消耗,使得燃煤成为砷、汞最主要的人为排放源<sup>[3~6]</sup>。以中国为例,2007年火电用煤总量超过  $1.3 \times 10^9$  t, 燃烧后排放入大气中的砷约为 550 t、汞约为 132 t<sup>[7,8]</sup>, 分别占中国总砷排放量的 50% 以上、总汞排放量的 30% 以上、总砷排放是汞的四倍多。因此,控制燃煤过程砷、汞排放刻不容缓。

目前,有关电厂重金属污染物的检测、排放等相关工作仍主要集中在汞的研究上,而对大气排放量更多、危害性可能更大的砷元素的关注相对较少。

一些学者对煤中砷的含量及赋存规律<sup>[9~11]</sup>、燃烧产物中砷的分布等开展了部分研究<sup>[12~15]</sup>, 但多局限于砷在固体燃烧产物包括底灰、飞灰、石膏等中的分布,通过质量平衡间接获得砷在烟气和飞灰中的分配比例,而很少对烟气中痕量砷的排放特征进行直接采样和测试<sup>[4]</sup>。

基于以上原因,本实验以某装备有静电除尘器的燃煤电站为研究对象,不仅对燃烧产物中汞的分布进行采样分析,同时对砷的排放特征进行研究。在研究砷的排放特征时,一方面,对各固体燃烧产物进行了采样检测;另一方面,应用 Ontario Hydro Method (OHM) 标准方法和设备对烟气中砷的含量

收稿日期: 2013-06-01; 修回日期: 2013-06-24。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(13QN11)。

联系作者: 张凯华, E-mail: myzkh2@126.com; Tel: 010-61772969。

进行直接采样和测试,根据实验结果直接计算砷在气固相产物中的释放特征。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品采集

样品采集包括烟气采样及固体采样两种,图1为选定的采样点的布置示意图。其中,烟气采样点位于ESP前与后的烟道内。汞的采样方法采用美国环保署(Environment Protection Agency, EPA)推荐的OHM法,对ESP前后烟气中汞进行同步采样,采样设备为美国APEX Instruments公司的安大略汞等速采样仪,主要由取样探枪、过滤器、过滤器箱、吸收瓶组(共八组,放置于水浴中)和主控制箱(包括干气流量计、真空表、抽气泵等设备)组成,具体见图2。在采样过程中,烟气由探枪从烟道取出后先经过加热的石英纤维滤膜、冰浴中的吸收瓶,再到达控制箱,由于干气流量计计量干烟气体积。其中,烟气中的颗粒汞( $\text{Hg}^{\text{P}}$ )被吸附于滤膜上,气态二价汞( $\text{Hg}^{2+}$ )和单质汞( $\text{Hg}^0$ )先后由三瓶KCl吸收液、一瓶酸化的 $\text{H}_2\text{O}_2$ 吸收液和三瓶酸化的 $\text{KMnO}_4$ 吸收液收集,最后用一瓶装有硅胶的吸收瓶来干燥烟气<sup>[16]</sup>。

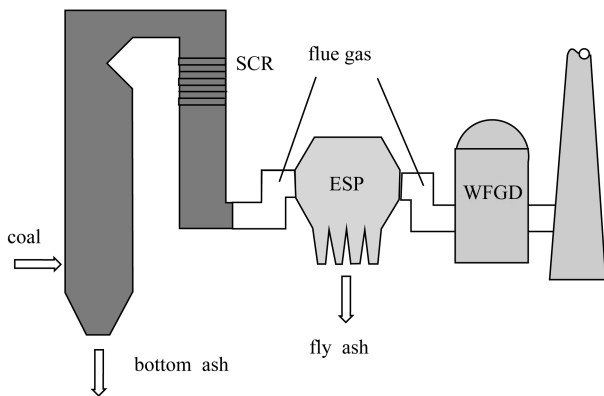


图1 取样点布置示意图

Figure 1 Points of sampling layout

根据作者之前的研究结果<sup>[17]</sup>,烟气中砷的采样也可应用OHM标准方法及设备,其中,烟气中颗粒态砷被吸附于滤膜上,气态砷的存在形态主要为砷氧化物( $\text{AsO}$ 、 $\text{As}_2\text{O}_3$ 、 $\text{As}_2\text{O}_5$ 等)<sup>[18,19]</sup>,这些砷氧化

物能够被OHM的八组吸收瓶完全吸收。因此,本研究应用OHM方法和设备进行一次采样,能够同时用于汞和砷两种重金属元素含量的测定。

表1 煤样的工业分析与元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of coal samples

Proximate analysis $w_{\text{ad}}/\%$				Ultimate analysis $w_{\text{ad}}/\%$					Content $w_{\text{ad}}/10^{-6}$
M	A	V	FC	C	H	N	S	O	Cl
6.52	15.34	26.44	51.70	64.34	4.06	0.84	0.42	8.41	143.95

物能够被OHM的八组吸收瓶完全吸收。因此,本研究应用OHM方法和设备进行一次采样,能够同时用于汞和砷两种重金属元素含量的测定。

固体采样为人工手动,包括入炉煤、锅炉底灰、ESP飞灰,采样点依次位于入炉前的煤粉分离器、锅炉底部出渣机皮带上和ESP底部。

采样连续进行多天,每天上午和下午各采样一次,本实验以工况稳定、采样熟练的至少连续三次采样为例进行分析。

### 1.2 固体样品中砷和汞的测定

采集的煤样、底灰、飞灰样品经均匀磨碎至粒径 $<0.2\text{ mm}$ ,采用四分法制得分析用样品。

三种样品中砷的含量采用微波消解与氢化物发生-原子荧光光谱法测定。微波消解仪为德国Berghof公司的SpeedWave MWS-4型,消解溶液为浓硝酸和氢氟酸混和酸,通过设置不同的消解温度、升温速率、压力、时间等程序分别消解煤、飞灰和底灰样品。消解完成后,采用PSA公司的10.055 Millennium Excalibur自动氢化物发生原子荧光光谱仪进行砷的分析。

汞的含量采用微波消解与冷原子荧光光谱法测定。微波消解仪型号同上,消解溶液为王水( $\text{HNO}_3$ - $\text{HCl}$ 混合酸),设置不同的消解温度、升温速率、压力、时间等程序分别消解煤、飞灰和底灰样品。消解完成后,采用PSA公司10.025 Millennium Merlin冷原子荧光光谱仪进行汞的分析。

为了确保砷、汞含量测试结果的准确性,每组样品测试三次,相对偏差位于 $\pm 10\%$ 以内认为数据有效;每隔五个样品测试一个已知浓度的标液,用于验证仪器的运行误差,标液测试结果位于 $\pm 10\%$ 以内认为仪器运行良好,测试数据有效;同时每隔五个样品测试一个加标样品,用于验证样品中各组分对砷测试的干扰,加标回收率位于 $80\% \sim 120\%$ 认为无干扰,测试数据有效。本实验取三次有效测试数据

的平均值作为测试结果。

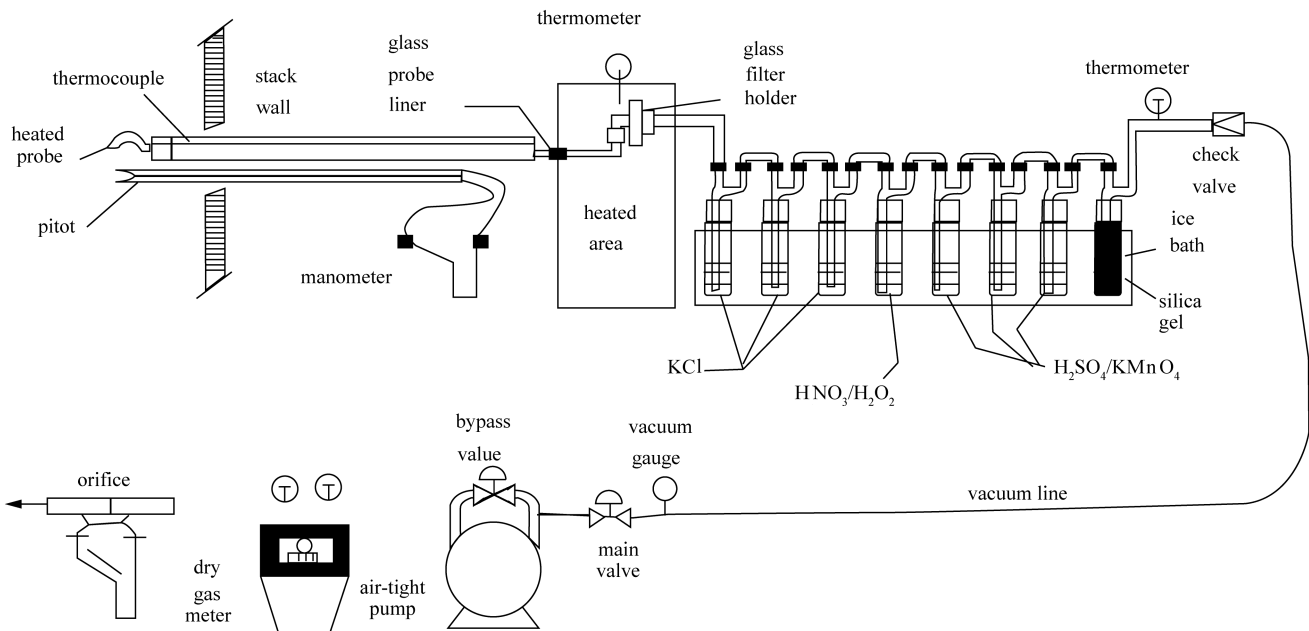


图2 OHM 采样方法示意图  
Figure 2 OHM schematic diagram

### 1.3 烟气中砷和汞的测定

OHM 吸收瓶中的溶液经稀释定容后采用氢化物发生-原子荧光法测定砷的含量。由于烟气中存在有机砷的可能性较低,因此,吸收瓶中的溶液不需要消解,直接采用 PSA 公司的 10.055 Millennium Excalibur 自动氢化发生原子荧光光谱仪进行测定。所采集的滤膜上固体样品采用 1.2 节的消解方法进行消解后再测试。

汞的含量采用安大略“Standard Test Method for Elemental, Oxidized, Particle-Bound, and Total Mercury in Flue Gas Generated from Coal-Fired Stationary Sources”<sup>[20]</sup> 标准方法进行恢复、消解,然后用 PSA 公司 10.025 Millennium Merlin 冷原子荧光光谱仪进行汞的测定。

同样采用 1.2 节的质量保证措施来确保测试结果的准确性。

## 2 结果与讨论

### 2.1 砷、汞在固体样品中的分布特征

图 3 是采集的固体样品煤、底灰和 ESP 飞灰中的砷含量。由图 3 可知,原煤中砷含量平均值为  $2.66 \times 10^{-6}$ , 低于中国煤中平均砷含量,属于低砷煤。与原煤相比,砷在飞灰中的浓度测试平均值为  $6.68 \times 10^{-6}$ , 是原煤中砷含量的 2.5 倍左右,而在底灰中的含量很低,平均值约为  $1.70 \times 10^{-6}$ 。说明在煤燃

烧过程中,煤中的砷发生了明显的迁移和重新分配,在飞灰中大量富集,而仅有少部分残留在底灰中。其原因可以说明如下:根据 Clarke 等<sup>[21]</sup>对煤中痕量元素挥发性行为的研究,砷属于 II 类易挥发、同时易冷凝型元素,在煤高温燃烧过程中砷几乎全部发生气化释放,而气态砷又于  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右开始冷凝,并且极易富集在细小颗粒上,因此,随着烟道气外逸过程中温度的不断降低,气态砷发生自身凝结或向周围飞灰颗粒表面凝结等物理变化,同时伴随物理吸附、化学吸附及与飞灰表面组分的化学反应等复杂作用,最终形成由烟气相向飞灰颗粒相的大量转移和富集<sup>[22~24]</sup>。目前,有关气态砷由烟气相向飞灰相转移的微观作用机理,研究尚不明确,还有待进一步研究。

根据 1974 年 Zoller 等<sup>[25]</sup>提出的对富集因子的定义,即样品中污染元素浓度与参考元素浓度的比值与背景区中两者浓度比值的比率,本研究参考文献<sup>[16]</sup>对富集因子的计算式进行调整,即采用如下公式进行计算:

$$F = \frac{w(M)_{\text{sample}}}{w(M)_{\text{coal}}} \quad (1)$$

式(1)中,  $w(M)$  为样品中污染物的含量 ( $10^{-6}$ ), 样品包括底灰、飞灰;  $w(M)_{\text{coal}}$  为煤中污染物含量 ( $10^{-6}$ )。

根据上述公式获得砷在各固体产物中的富集因

子,具体见图4。由图4可知,底灰中砷富集因子小于1,表明砷在底灰中亏损,飞灰对砷的富集因子平均为2.82,表明砷在飞灰中富集,即飞灰具有明显的砷捕获效果。

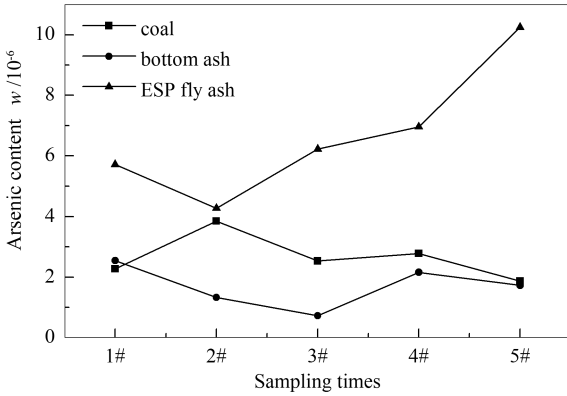


图3 固体样品中砷含量

Figure 3 Concentrations of arsenic in solid samples

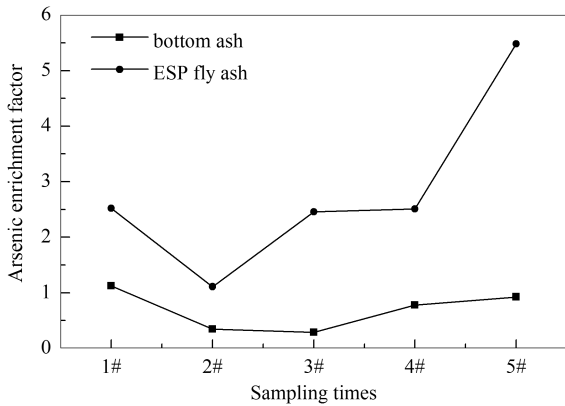


图4 固体样品中砷富集因子

Figure 4 Arsenic enrichment factor in solid samples

图5是采集的固体样品煤、底灰和ESP飞灰中的汞含量。

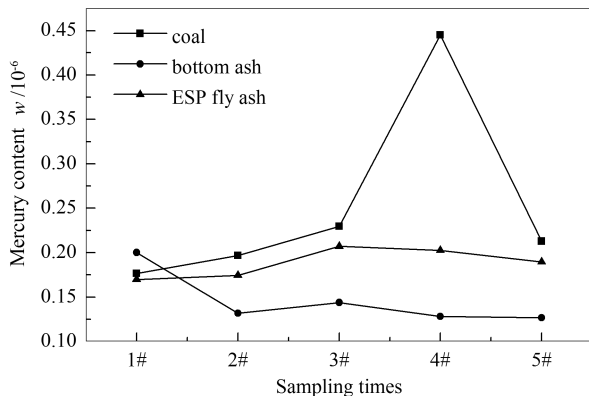


图5 固体样品中汞含量测试结果

Figure 5 Concentrations of mercury in solid samples

由图5可知,原煤中汞含量平均值为 $2.5 \times 10^{-7}$ ,

接近于中国煤中平均汞含量 $2.2 \times 10^{-7}$ 。飞灰中汞含量平均值为 $1.9 \times 10^{-7}$ ,底灰中汞含量平均值约为 $1.5 \times 10^{-7}$ 。汞作为强挥发性痕量元素在炉膛燃烧温度下,能够全部气化释放到烟气中;然而在炉膛底部排渣口,随温度的降低,周围气化的汞会少部分凝结在底灰颗粒表面,其余绝大部分随烟气排出,在经过ESP装置时,颗粒汞和部分气态汞被飞灰颗粒捕获,剩余汞随烟气排出。

图6为汞在各固体产物中的富集因子。汞在底灰和飞灰中的富集因子基本上都小于1,说明飞灰和底灰对汞均没有富集效果,汞绝大部分随ESP后的烟气排出。

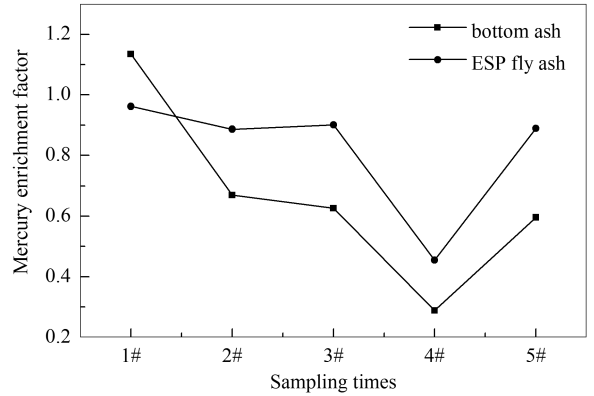


图6 固体样品中汞富集因子

Figure 6 Mercury enrichment factor in solid samples

### 2.2 砷、汞在烟气中的分布特征

图7为ESP前后烟气中的砷含量。由图7可知,ESP前烟气中砷含量很高,平均值约 $153.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;ESP后烟气中砷含量急剧下降,平均值约 $41.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,说明ESP飞灰捕获了大量的砷。由ESP进出口烟气中砷含量的差值计算飞灰对砷的捕获率,三次采样计算结果依次为58%、78%、78%,平均捕获率约为71%左右,表明ESP在控制粉尘污染的同时,具有明显的协同脱砷效果。这一结果与世界各国相关研究结果一致。锥昆利等<sup>[26]</sup>的研究表明,煤中砷在燃烧过程中大部分都可释放出来,释放出来的砷大部分又可被飞灰俘获(约92.3%左右),进而随飞灰被除尘设备俘获;Tang等<sup>[27]</sup>研究指出,除尘器对烟气中砷的捕获效率约为83%。这些研究中,除尘器对砷的协同捕获效率的具体数值有所差异,这是由除尘器类型、烟气温度的因素决定,但电站的除尘器在砷污染控制上起到关键的决定性作用。

虽然 ESP 具有明显的协同脱砷效果,然而 ESP 后烟气中砷的含量仍较高,如果电厂 ESP 后没有 WFGD 脱硫装置或其他脱砷措施而直接排放入大气,则会对人体及环境造成严重的危害。

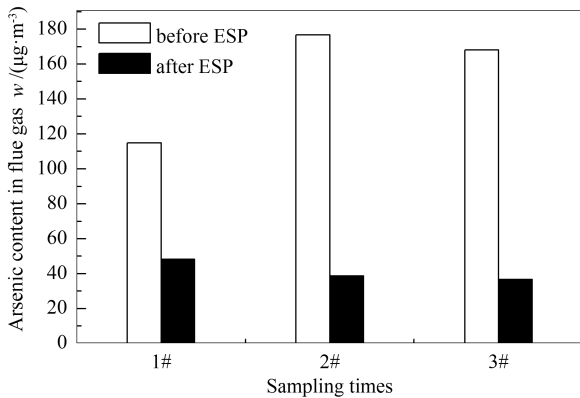


图7 烟气中的砷含量

Figure 7 Concentrations of arsenic in flue gas

图8为ESP前后烟气中汞的含量。ESP前烟气中总汞含量平均值约 $5.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,ESP后总汞含量平均值约 $5.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,大约有5%的总汞被ESP飞灰捕获,基本上变化不是很大。王运军等<sup>[28]</sup>认为,ESP单元对汞的捕获效果与煤中的氯含量有关,氯含量越高,ESP的脱汞效率越高,原因是此时ESP不仅可以脱除烟气中的颗粒汞,同时,煤中的氯通过催化氧化作用将烟气中的 $\text{Hg}^0$ 氧化成 $\text{Hg}^{2+}$ ,因而易于附着于细颗粒物上而被除去。然而,在本研究中,原煤中氯的含量较低,约 $1.44 \times 10^{-4}$ 左右(见表1),不足以对 $\text{Hg}^0$ 产生明显的氧化作用<sup>[29]</sup>,因此,

ESP单元对汞的捕获效率较低。

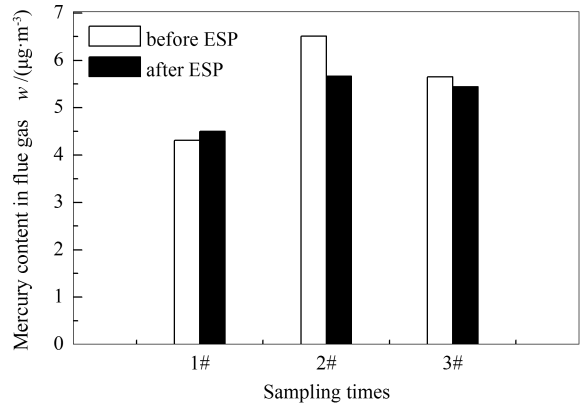


图8 烟气中的汞含量

Figure 8 Concentrations of mercury in flue gas

### 3 结论

对燃煤电站固体产物及ESP前后烟气中的砷、汞进行了直接、同步采样。对砷的检测结果表明,ESP飞灰中砷含量约 $6.68 \times 10^{-6}$ ,是原煤中砷含量的2.5倍左右,而底灰中砷含量仅为 $1.70 \times 10^{-6}$ ;ESP前烟气中砷含量约 $153.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,ESP后烟气中砷含量急剧降低为 $41.13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。对汞的检测结果表明,原煤中汞含量约 $2.5 \times 10^{-7}$ ,飞灰中汞含量约 $1.9 \times 10^{-7}$ ,底灰中汞含量约为 $1.5 \times 10^{-7}$ ;ESP前后烟气中总汞含量分别为 $5.49, 5.21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。砷在飞灰中明显富集,汞在飞灰和底渣中均不具有富集效果。燃煤电站ESP单元在控制粉尘污染的同时,具有明显的协同脱砷效果,平均脱除率约在71%左右,而对总汞的协同脱除效果不明显。

### 参考文献

- [1] 张军营,任德贻,许德伟,赵峰华. 煤中汞及其对环境的影响[J]. 环境科学进展, 1999, 7(3): 100-104. (ZHANG Jun-ying, REN De-yi, XU De-wei, ZHAO Feng-hua. Mercury in coal and its effect on environment [J]. Advances in Environmental Science, 1999, 7(3): 100-104.)
- [2] NG J C, WANG J P, SHRAIM A. A global health problem caused by arsenic from natural sources[J]. Chemosphere, 2003, 52(9): 1353-1359.
- [3] 蒋靖坤,郝吉明,吴焯,STREETS D G,段雷,田贺忠. 中国燃煤汞排放清单的初步建立[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 34-39. (JIANG Jing-kun, HAO Ji-ming, WU Ye, STREETS D G, DUAN Lei, TIAN He-zhong. Development of mercury emission inventory from coal combustion in China[J]. Environmental Science, 2005, 26(2): 34-39.)
- [4] 郭欣,郑楚光,陈丹. 300MW煤粉锅炉砷排放特征的实验研究[J]. 环境科学, 2006, 27(4): 631-634. (GUO Xin, ZHENG Chu-guang, CHEN Dan. Characterization of arsenic emissions from a coal-fired power plant[J]. Environmental Science, 2006, 27(4): 631-634.)
- [5] 胡长兴,周劲松,何胜,骆仲泮,岑可法. 我国典型电站燃煤锅炉汞排放量估算[J]. 热力发电, 2010, 39(3): 1-4. (HU Chang-xing, ZHOU Jin-song, HE Sheng, LUO Zhong-yang, CEN Ke-fa. Estimation of mercury emission from coal-fired boilers in typical power plants of China[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3): 1-4.)
- [6] 王起超,沈文国,麻壮伟. 中国燃煤汞排放量估算[J]. 中国环境科学, 1999, 19(4): 318-321. (WANG Qi-chao, SHEN Wen-guo, MA Zhuang-wei. The estimation of mercury emission from coal combustion in China[J]. China Environmental Science, 1999, 19(4): 318-321.)
- [7] TIAN H Z, WANG Y, XUE Z G, QU Y P, CHAI F H, HAO J M. Atmospheric emissions estimation of Hg, As, and Se from coal-fired power plants in China, 2007[J]. Sci Total Environ, 2011, 409: 3078-3081.
- [8] 田贺忠,曲益萍. 2005年中国燃煤大气砷排放清单[J]. 环境科学, 2009, 30(4): 956-962. (TIAN He-zhong, QU Yi-ping. Inventories of atmospheric arsenic emissions from coal combustion in China, 2005 [J]. Environmental Science, 2009, 30(4): 956-962.)
- [9] 王明仕,郑宝山, FINKELMAN R B, 胡军, 吴代赦, 李社红. 煤中砷赋存状态与其脱洗率的关系[J]. 燃料化学学报, 2005, 33(2): 253-256.

- (WANG Ming-shi, ZHENG Bao-shan, FINKELMAN R B, HU Jun, WU Dai-she, LI She-hong. Relationship between occurrence mode of arsenic in coal and its washing rate[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2005, **33**(2): 253-256.)
- [10] 陈萍, 旷红伟, 唐修义. 煤中砷的分布和赋存规律研究[J]. 煤炭学报, 2002, **27**(3): 259-263.  
(CHEN Ping, KUANG Hong-wei, TANG Xiu-yi. Research on the distribution and occurrence of arsenic in coal[J]. Journal of China Coal Society, 2002, **27**(3): 259-263.)
- [11] 郑刘根, 刘桂建, CHOU Chen-lin, 高连芬, 彭子成. 中国煤中砷的含量分布、赋存状态、富集及环境意义[J], 地球学报, 2006, **27**(4): 355-366.  
(ZHENG Liu-gen, LIU Gui-jian, Chou Chen-lin, GAO Lian-fen, PENG Zi-cheng. Arsenic in Chinese coals: Its abundance, distribution, modes of occurrence, enrichment processes, and environmental significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, **27**(4): 355-366.)
- [12] ZIELINSKI R A, FOSTER A L, MEEKER G P. Mode of occurrence of arsenic in feed coal and its derivative fly ash, Black Warrior Basin, Alabama[J]. Fuel, 2007, **86**: 560-572.
- [13] HUGGINS F E, SENIOR C L, CHU P. Selenium and arsenic speciation in fly ash from full-scale coal-burning utility plants[J]. Environ Sci Technol, 2007, **41**(9): 3284-3289.
- [14] 郭瑞霞, 杨建丽, 刘东艳, 刘振宇. 热处理条件对大同煤中微量有害元素变迁规律的影响[J]. 化工学报, 2003, **54**(11): 1603-1607.  
(GUO Rui-xia, YANG Jian-li, LIU Dong-yan, LIU Zhen-yu. Influence of thermal treatment conditions on transformation of trace elements in Datong coal[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2003, **54**(11): 1603-1607.)
- [15] 李扬, 张军营, 赵永椿, 吴幼青, 高晋生, 郑楚光. 热解条件对煤中微量元素挥发性影响的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2007, **28**(2): 189-192.  
(LI Yang, ZHANG Jun-ying, ZHAO Yong-chun, WU You-qing, GAO Jin-sheng, ZHENG Chu-guang. Influence of pyrolysis conditions on volatility of trace elements in coals[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, **28**(2): 189-192.)
- [16] 王运军, 段钰峰, 杨立国, 孟素丽, 黄治军, 吴成军, 王乾. 湿法烟气脱硫装置和静电除尘器联合脱除烟气中汞的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, **28**(29): 64-69.  
(WANG Yun-jun, DUAN Yu-feng, YANG Li-guo, MENG Su-li, HUANG Zhi-jun, WU Cheng-jun, WANG Qian. Experimental study on mercury removal by combined wet flue gas desulphurization with electrostatic precipitator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, **28**(29): 64-69.)
- [17] 张凯华, 孙喆, 曹晏, 潘伟平, 张镨. 能源高效清洁利用及新能源技术, 2012 动力工程青年学术论坛论文集[C]. 杭州: 浙江大学出版社, 2012: 77-82.  
(ZHANG Kai-hua, SUN Zhe, CAO Yan, PAN Wei-ping, ZHANG Kai. Clean and efficient utilization of energy and new energy technology, 2012 youth academic forum for power engineering[C]. Hangzhou: Zhejiang University press, 2012: 77-82.)
- [18] THOMPSON D, ARGENT B B. Prediction of the distribution of trace elements between the product streams of the Prenflo gasifier and comparison with reported data[J]. Fuel, 2002, **81**(5): 555-570.
- [19] ARGENT B B. Thermodynamic equilibrium study of trace element mobilization under air blown gasification conditions[J]. Fuel, 2002, **81**(1): 75-89.
- [20] ASTM D 6784-02, Standard test method for elemental, oxidized, particle-bound and total mercury in flue gas generated from coal-fired stationary sources (Ontario Hydro Method)[S]. 2008.
- [21] CLARKE L, SLOSS L. Trace elements-emissions from coal combustion and gasification[M]. London: IEA Coal Research, 1992.
- [22] LOPEZ-ANTON M A, DIAZ-SOMOANO M, SPEARS D A. Arsenic and selenium capture by fly ashes at low temperature[J]. Environ Sci Technol, 2006, **40**(12): 3947-3951.
- [23] TANAPOM S, JAMES C H. Arsenic and mercury partitioning in fly ash at a kentucky power plant[J]. Energy Fuels, 2003, **17**: 1028-1033.
- [24] CONSTANCE L S, HELBLE J J. Emissions of mercury, trace elements, and fine particles from stationary combustion source[J]. Fuel Process Technol, 2000, **65-66**: 263-288.
- [25] ZOLLER W H, GLADNEY E S, DUCE R A. Atmospheric concentrations and sources of trace metals at the South Pole[J]. Science, 1974, **183**(4121): 198-200.
- [26] 雒昆利, 张新民, 陈昌和, 陆毅伦. 我国燃煤电厂砷的大气排放量初步估算[J]. 科学通报, 2004, **49**(19): 2014-2019.  
(LUO Kun-li, ZHANG Xin-min, CHEN Chang-he, LU Yi-lun. Estimation of arsenic emission from coal-fired power plants of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, **49**(19): 2014-2019.)
- [27] TANG Q, LIU G J, YAN Z C, SUN R Y. Distribution and fate of environmentally sensitive elements (arsenic, mercury, stibium and selenium) in coal-fired power plants at Huainan, Anhui, China[J]. Fuel, 2012, **95**: 334-339.
- [28] 王运军, 段钰峰, 杨立国, 江贻满, 吴成军, 王乾, 杨详花. 燃煤电站布袋除尘器和静电除尘器脱汞性能比较[J]. 燃料化学学报, 2008, **36**(1): 23-29.  
(WANG Yun-jun, DUAN Yu-feng, YANG Li-guo, JIANG Yi-man, WU Cheng-jun, WANG Qian, YANG Xiang-hua. Comparison of mercury removal characteristic between fabric filter and electrostatic precipitators of coal-fired power plants[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2008, **36**(1): 23-29.)
- [29] 钟丽萍, 曹晏, 李文英, 潘伟平, 谢克昌. 燃煤电厂污染控制单元对汞释放的控制作用[J]. 燃料化学学报, 2010, **38**(6): 641-646.  
(ZHONG Li-ping, CAO Yan, LI Wen-ying, PAN Wei-ping, XIE Ke-chang. Effect of the existing air pollutant control devices on mercury emission in coal-fired power plants[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2010, **38**(6): 641-646.)