

# 600 MW 煤粉锅炉汞排放的试验研究

周劲松, 王光凯, 骆仲泱, 岑可法

(浙江大学 能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为了评估大型燃煤锅炉汞排放水平, 在对某 600 MW 燃煤电站锅炉用煤以及燃烧产物烟气、飞灰、底渣在满负荷及 70% 左右负荷调峰运行时完成取样后, 测定样品中的汞含量, 通过研究不同工况下燃烧产物中汞的含量分布以及 ESP(Electro Static Precipitators)前后汞形态的变化等, 获得了 600 MW 煤粉锅炉汞的排放特性。试验发现 600 MW 燃煤锅炉中汞主要以气态形式排出, 烟气中气态汞的总量在 4.99~14.79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  之间, 且零价汞百分比含量较高, ESP 前后气态汞形态变化不大, 颗粒汞的脱除率达 90% 以上。

**关键词:** 600 MW; 煤粉锅炉; 汞; 排放特性

中图分类号: TQ534.9 文献标识码: A

## 1 前言

汞及其化合物是环境污染物控制的主要污染物, 煤燃烧是大气汞污染的主要来源之一。目前, 燃煤电站汞排放控制的研究已成为各国研究的前沿及热点。特别是 2005 年 3 月, 美国 EPA (Environmental Protection Agency) 第一次颁布了燃煤电厂汞的排放标准 CAMR(The Clean Air Mercury Rule)<sup>[1]</sup>, 新标准基于之前颁布的 CAIR(Clean Air Interstate Rule)来严格规范燃煤电厂的汞排放<sup>[2]</sup>, 标准要求至 2018 年将美国国内汞的排放量由现在的 48 t/a 降低到 15 t/a, 降幅达 70%。

汞是全球性循环污染元素, 由燃煤烟气排出的汞绝大部分为气态零价和二价汞, 前者在大气中停留时间长而成为最难控制的形态, 后者停留时间短而一般在释放点附近沉积。对于煤炭消耗大户的中国来说, 其燃煤汞的排放已经引起广泛关注。然而, 国内对于实际电厂烟气汞排放的研究才刚刚起步, 对大型燃煤锅炉汞排放方面的相关认识较少。

根据国家优化发展煤电的电源可持续发展思路, 600 MW 及以上大功率机组已经逐渐成为火力发

电的主流。特别是在建的火电项目, 较多为 600 MW 的大功率发电机组。因此, 对于 600 MW 火电机组污染物排放方面的研究有相当的现实意义。本文主要研究了在 600 MW 燃煤电厂锅炉的各种燃烧产物中汞的含量、形态分布以及 ESP 前后汞形态分布的变化情况, 并分析了不同锅炉负荷下燃烧产物中汞分布的变化趋势及排放特性。

## 2 样品采集与回收测定

### 2.1 600 MW 煤粉锅炉简介

选取的汞排放测试机组为 600 MW 亚临界燃煤机组, 自然循环, 一次再热、汽包型式锅炉, 前后对冲燃烧方式, 并配置有双调风燃烧器, 燃用神华混煤。装有静电除尘器, 除尘器有四个电场, 但无脱硫装置。

### 2.2 采样方式介绍

分别在机组全负荷和 70% 负荷左右调峰时完成取样。在同一工况下, 同时对煤、底渣、飞灰和烟气进行采集, 保证各个样品的一致性和可比性。烟气中汞采样根据美国 EPA 的 Ontario Hydro 方法进行, 该方法是美国燃煤电站烟气中单质态、氧化态、粒子态及总汞的标准测试方法<sup>[3]</sup>。本次测试的 600 MW 机组有 4 个并行的尾部烟道(见图 1), 按照美国烟尘等速取样方法 Method 5 的要求, 根据采样点位置 1、2、3、4 及已固定的采样口, 对截面为 4 m $\times$ 4.2 m 的烟道进行了等截面划分, 将矩形烟道断面均布 36 个采样点, 每个采样点取样 5 min。对于飞灰的取样, 除了等速取样获得外, 还分别从除尘器的 4 个电场进行了采集。所有采集的固体样品及液体样品均用硅酸盐玻璃瓶密封保存。

收稿日期: 2006-04-03; 修订日期: 2006-06-19

基金项目: 国家 863 计划基金资助项目(2005AA 520080); 国家自然科学基金资助项目(50476056); 教育部博士点基金资助项目(20050335057)

作者简介: 周劲松(1970-), 男, 江苏海门人, 浙江大学教授, 博士生导师。

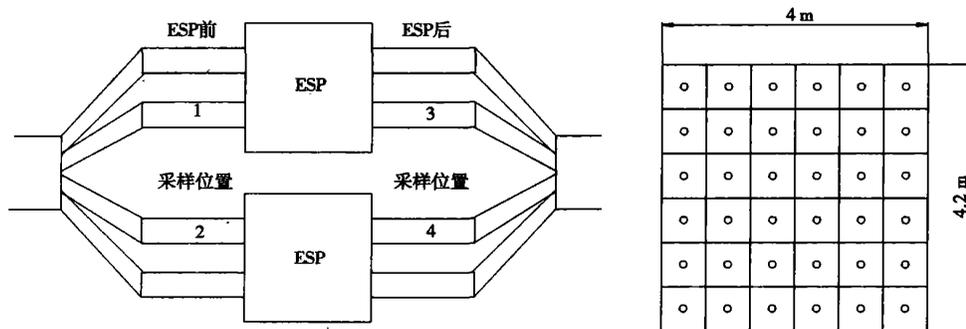


图 1 尾部烟道及采样点分布情况

2.3 样品测定及数据处理

取样结束后, 烟气汞吸收液按照 Ontario Hydro 方法进行样品恢复、消解, 消解后得到的样品采用 XGY-1011A 型原子荧光光谱仪测定汞含量。为保证测量数据可靠, 在样品测定过程中, 进行重复测量 3 次以上, 测量结果取平均值。本实验吸收、消解和分析所用的主要化学试剂为优级纯。

煤样、底渣样、飞灰样均采用日本仪器公司(简称 NIC)MA-2000 全自动测汞仪测定样品中的汞含

量。煤样中的氯含量采用 Methrohm 792 Basic IC 型离子色谱仪测定。

3 结果与讨论

3.1 电厂燃煤样分析

所选测试机组燃用神华混煤, 该用煤的工业、元素分析见表 1。

表 1 煤种工业、元素分析

工业分析 / %						元素分析 / %				
$M_{ad}$	$A_{ad}$	$V_{ad}$	$FC_{ad}$	$C_{ad}$	$H_{ad}$	$N_{ad}$	$S_{t,ad}$	$O_{ad}$	$Cl_{ad}$	$Hg_{ad} / (mg \cdot kg^{-1})$
5.02	8.07	32.38	54.53	68.02	4.16	0.9	0.43	13.4	0.067	0.161

该燃用煤种挥发份含量为 32.38%, 属烟煤, 另外硫含量较低, 为特低硫煤( $St, ad \leq 0.50\%$ )<sup>[4]</sup>, 氯、汞平均含量均不高(我国煤炭的平均汞含量为 0.22 mg kg<sup>-1</sup>), 烟煤中氯元素含量为 0.004 8% ~ 0.273%,

其平均含量为 0.103 3%<sup>[9]</sup>。

3.2 对测试工况的描述

共选取了 4 组有效测试工况, 工况具体参数描述如表 2 所示。

表 2 测试工况

	锅炉负荷 / MW	给煤量 / t·h <sup>-1</sup>	炉内氧含量 / %	尾部烟气 SO <sub>2</sub> 含量 / (mg·m <sup>-3</sup> )	烟气含水量 / %	烟气含尘量 / (mg·m <sup>-3</sup> )
工况一	453	177	5.18	2779.6	8.5	5 509
工况二	450	173	5.41	2830.9	8.6	16
工况三	601	224	3.09	2417.9	8.7	4 797
工况四	600	223	2.99	2514.7	8.3	12

工况一和 2 况二是在锅炉 70% 左右负荷调峰过程中进行采样, 工况三和 2 况四是在锅炉满负荷运行中抽气两小时完成取样的, 而且工况一和 2 况三位于 ESP 前, 工况二和 2 况四位于 ESP 后, 具有较

好的代表性。

3.3 汞的质量平衡

表 3 中, 4 组工况的质量平衡整体上显示出一致性, 虽然锅炉负荷不尽相同, 但汞的分布情况变化

不大,具有比较明显的规律性,燃烧产物气态汞所占比例较大,而颗粒物以及底渣中汞的百分比含量较小,总体质量平衡达到 $(100 \pm 22)\%$ 。总平衡计算中误差受到很多因素的影响,包括给煤量、排灰渣量、

烟气流速的波动和取样测量中间的误差。很难估算出每种因素带来的误差。因此认为质量平衡达到 $70\% \sim 130\%$ 就是可以接受的<sup>7</sup>。

表3 汞的质量平衡

	汞 <sub>in</sub>		汞 <sub>out</sub>		质量平衡/%
	给煤/ $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	气态汞/ $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	颗粒汞/ $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	底渣/ $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$	
工况一	25.38	13.87	5.84	0.17	78.329
工况二	24.56	17.73	5.28 <sup>(1)</sup>	0.11	94.137
工况三	35.42	25.32	5.59	0.16	87.719
工况四	34.47	29.51	5.44 <sup>(1)</sup>	0.16	101.857

注:(1)本测试点即除尘器后的颗粒汞由除尘器静电场内飞灰携带颗粒汞和烟气中颗粒汞之和组成。

### 3.4 典型工况下燃烧产物中汞的分布

#### 3.4.1 不同工况下烟气、飞灰、底渣中汞含量及气态汞形态分布

经多次测试,煤中汞含量均值为 $0.161 \text{ mg/kg}$ ,底渣中汞含量均值为 $0.0043 \text{ mg/kg}$ ,飞灰样因采样地点不同,汞含量变化比较大,汞浓度范围在 $0.155 \sim 0.290 \text{ mg/kg}$ 之间。不同工况下燃烧产物中汞的分布以及气态汞形态分布情况如图2所示。

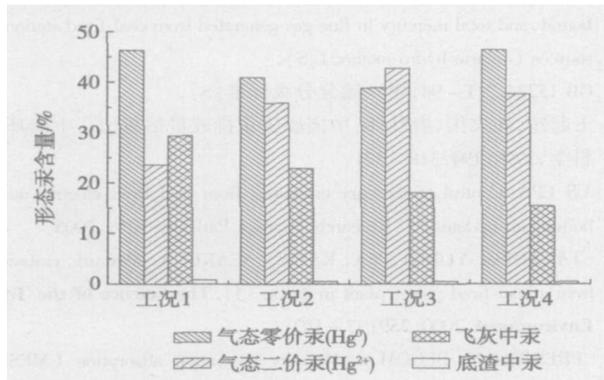


图2 不同工况燃烧产物汞含量分布图

从图2可以看出,在各工况下,气态汞(零价和二价气态汞)占了绝大部分,总体范围在 $69\% \sim 84\%$ ;其次是飞灰中的汞,大概在 $15\% \sim 29\%$ ;底渣中汞最少,含量基本小于 $0.2\%$ 。同时,工况的改变对汞在燃烧产物中形态的总体分布没有大的影响。另外气态汞中 $\text{Hg}^0$ 和 $\text{Hg}^{2+}$ 的含量从图2结果来看,随着工况的变化,有所不同,但一般 $\text{Hg}^0$ 要多于 $\text{Hg}^{2+}$ 。

#### 3.4.2 产物中汞浓度分布情况的分析

参照以上4个试验工况,随着锅炉负荷的降低,燃烧产物烟气、飞灰、底渣中汞的排放总量有减少的

趋势(见表3),而且,燃烧产物中气态汞的含量也明显降低(见图2)。

整体上,虽然随着锅炉负荷的改变,入炉煤量增大带来的进入炉膛汞总量的上升,但汞在燃烧产物中的分布趋势是相对稳定的。烟气所含汞总量(包括气态汞和飞灰中的汞)最大,占燃烧产物的 $99\%$ 以上,其中以气态汞为主。烟气中气态汞总含量在 $4.99 \sim 14.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,其中气态汞中二价汞含量为 $33.8\% \sim 52.4\%$ ,零价汞含量略高,约为 $47.6\% \sim 66.2\%$ 。

这种燃烧产物中以气态汞为主的燃煤汞排放形式对燃煤电厂的汞排放控制造成了比较大的困难。因为气态汞中的单质零价汞 $\text{Hg}^0$ 具有较低的水溶性,也不易被飞灰等颗粒物所吸附,因此极易随烟气排入大气,并在大气中通过长距离的大气输送形成全球性的汞污染。虽然气态二价汞 $\text{Hg}^{2+}$ 易溶于水,但是由于目前国内绝大多数电厂没有安装湿法烟气处理装置,即使未来几年部分电厂将安装湿法脱硫装置,但对于国内众多电厂而言,燃煤形成的二价汞 $\text{Hg}^{2+}$ 还是会由烟囱排向大气,与 $\text{Hg}^0$ 所不同的是, $\text{Hg}^{2+}$ 排入大气后很快沉降在排放源附近,直接对电厂附近地区形成汞污染。

飞灰中的汞大多数是由烟气中的颗粒汞随飞灰被ESP捕获,在飞灰中富集后又在底灰中分散开,少量由于飞灰颗粒直径较小而随烟气通过烟囱排向大气。极少量汞随底渣排出,形成环境污染源或造成二次污染。

由图2可见,零价汞的百分比含量普遍较高。Prestbo在14个电站进行的现场实验结果表明<sup>8</sup>:零价汞和二价汞在燃煤电站烟气中的相对含量分别为

6%~60%和40%~94%。和 Prestbo 的数据相比,本次测试中  $Hg^{2+}$  的含量偏低。其可能原因是,入炉煤中的氯对于零价汞向二价汞的氧化转变有明显的促进作用,是该氧化过程进行的主因。但是该煤种中氯含量较低,仅为 0.067%,在低浓度情况下烟气中的氯对零价汞向二价汞的转化影响不大<sup>[9]</sup>。另外,烟气中  $SO_2$  的存在也会在一定程度上抑制零价汞向二价汞的转化<sup>[10]</sup>。

### 3.5 静电除尘器前后汞形态分布

典型工况下静电除尘器前后汞形态分布的试验结果,如图 3 所示。

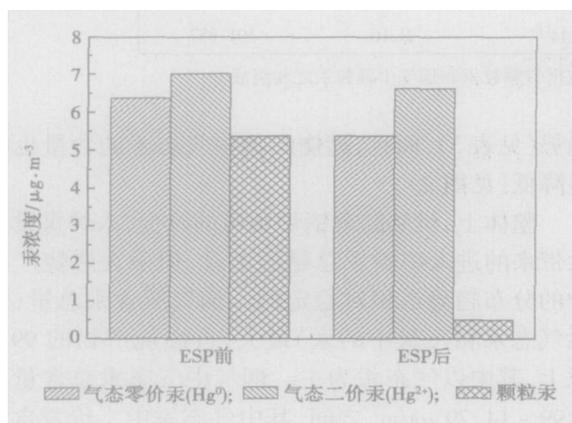


图 3 ESP 前后烟气中形态汞分布图

ESP 前后变化最明显的是颗粒汞,90%以上的颗粒汞被 ESP 除掉。气态汞总量上有所增加,但变化不大,测试等不确定因素带来的实验误差原因不得而知。但总体而言,气态总汞在 ESP 前后变化并不明显的原因可能是在 ESP 中气态汞和飞灰的接触几率比较小,烟气中的气态汞未能大量附着于飞灰上而被 ESP 除掉。同时,ESP 前后零价汞浓度上升的原因可能是由 Ontario Hydro 法测量本身存在的误差造成的:ESP 前飞灰颗粒较多,采用该法取样时容易在装有石英纤维滤纸的飞灰过滤器的滤纸上积上一层“灰饼”,烟气通过“灰饼”时,飞灰中的矿物成份和表面活性基团会氧化烟气中的零价汞,使得 ESP 前零价汞数值偏小,而 ESP 后不存在这样的问题<sup>[11]</sup>。

零价汞较二价汞变化更为显著,零价汞在 ESP 内的进一步氧化过程并不明显。由于烟气中汞的氧化过程在燃烧烟气流动过程主要受到烟气成份、冷却速率、飞灰量与组成、燃烧温度、煤中汞的含量、烟气温度、组成烟气中颗粒碳的含量、电站使用的空气污染控制装置、流道结构与表面性质等诸多因素的影响<sup>[12]</sup>,因而其可能存在的氧化机理有待进一步探究。

## 4 结 论

(1) 600 MW 燃煤电站锅炉机组煤中的汞主要以气态形式排出,少量富集在固态物中。同时,锅炉负荷的变化对燃烧产物汞含量整体的分布趋势影响不大。

(2) 烟气中气态汞浓度由于工况不同变化较大,范围在 4.99~14.79  $\mu g \cdot m^{-3}$  之间,而且零价汞百分比含量较大,约为 47.6%~66.2%,二价汞占 33.8%~52.4%。

(3) 在工况条件下 ESP 后颗粒汞绝大部分被除去,气态汞形态变化并不明显,但零价汞含量较二价汞仍偏高,ESP 内零价汞的氧化过程对形态分布的影响较小,但测量时滤纸上形成“灰饼”对测量结果有较大影响。

### 参考文献:

- [1] EPA RIN 2060-AJ65-05, Standards of performance for new and existing stationary sources electric utility steam generating units[S].
- [2] EPA RIN 2060-AL76-03, Rule to reduce interstate transport of fine particulate matter and ozone (clean air interstate rule)[S].
- [3] ASTM D6784-02 Standard test method for elemental, oxidized, particle-bound, and total mercury in flue gas generated from coal-fired stationary sources (ontario-hydro method)[S].
- [4] GB 15224.2-94, 煤炭硫分分级标准[S].
- [5] 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.
- [6] US EPA. Control of mercury emissions from coal fired electric utility boilers; an update[R]. Research Triangle Park; US EPA, 2005.
- [7] TAKAHISA YOKOYAMA, KAZUO ASAKURA. Mercury emissions from a coal-fired power plant in Japan[J]. *The Science of the Total Environment*, 2000, 259: 97-103.
- [8] PRESTBO M, BLOOM S. Mercury speciation adsorption (MESA) method for combustion flue gas; methodology, artifacts, inter-comparison, and atmospheric implications[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1995, 80: 145-148.
- [9] MEIJ R, VREDENBREGT L H J, WINKEL H T. The fate and behavior of mercury in coal-fired power plants[J]. *J Air Waste Manage*, 2002, 52: 912-917.
- [10] GHORISHI S B, LEE C W, KILGROE J D. Mercury speciation in combustion systems; studies with simulated flue gases and model fly ashes[A]. *The 92<sup>nd</sup> Annual Meeting of Air & Waste Management Association*[C]. Louis: A & WMA, 1999. 20-24.
- [11] 石祥建. 飞灰对烟气中汞转化的影响及测量技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [12] US EPA. Control of mercury emissions from coal-fired electric utility boilers; interim reports[R]. Research Triangle Park; US EPA, 2002.

(辉 编辑)

端壁附面层抽吸对扩压叶栅内分离结构的影响= **Impact of End-wall Boundary Layer Suction on the Separation Structure in a Diffuser Cascade**[刊, 汉] / ZHANG Hua-liang, WANG Song-tao, WANG Zhong-qi (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 565 ~ 568

An odd-point topological criterion appropriate for cascade surfaces is proposed on the basis of a topology theory. Moreover, also conducted is a numerical simulation of flow fields featuring compressor guide vanes of large turning angle and meridian expanding type. To compare the impact of end-wall suction on radial secondary flows in the blades, end-wall suction has been performed on two sets of cascades with their aspect ratios being 2.53 and 0.3 respectively under the condition that the upper and lower end-walls have a same suction rate of 1%. On the basis of the calculation results, the change in separation configuration in cascades before and after the boundary layer suction has been analyzed by using the cascade-surface odd point law and their topological structures are also given. The results show that the end-wall boundary layer suction near the suction surfaces has changed the separation configuration of the flow fields, restrained the separation at the end-wall corner zone and delayed and diminished the separation on suction surfaces. As a result, the blade loss along a majority of blade height has been reduced and tends to assume a uniform distribution along the radial direction. **Key words:** end-wall suction, topology, separation configuration

600 MW 煤粉锅炉汞排放的试验研究= **An Experimental Study of Mercury Emissions from a 600 MW Pulverized Coal-fired Boiler**[刊, 汉] / ZHOU Jin-song, WANG Guang-kai, LUO Zhong-yang, et al (National Key Laboratory on the Clean Utilization of Energy Resources under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 569 ~ 572

To evaluate the emission level of mercury from large-sized pulverized coal-fired boilers, the mercury content was determined from samples of coal, combustion product flue gas, fly ash and bottom slag taken from a 600 MW coal-fired utility boiler. The boiler has been operating at full load and also about 70% load under peak-shaving conditions. Through a study of the distribution of mercury content in combustion products under different operating conditions and of the change of mercury configuration before and after the ESP (Electro-static Precipitators) etc., the mercury emission characteristics of a 600 MW pulverized coal-fired boiler have been obtained. Through the experiments one can discover that the mercury in the 600 MW boiler has been emitted mainly in the form of gas with the total amount of gaseous mercury in the flue gas varying from 4.99 to 14.79  $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ . Moreover, the percentage content of zero-valence mercury is relatively high and there is little change in gaseous mercury configuration before and after the ESP. The removal rate of particle mercury amounts to over 90%. **Key words:** 600 MW, pulverized coal-fired boiler, mercury, emission characteristics

220 t/h 锅炉冷态数值试验研究= **Numerical Experimental Study of the Cold State of a 220 t/h Boiler**[刊, 汉] / HENG Li-jun, DUAN Kun-jie, HE Chang-zheng (Construction Department, Pingdingshan Engineering Institute, Pingdingshan, China, Post Code: 467001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 573 ~ 577

With a 220 t/h tangentially corner-fired boiler serving as a prototype, a realizable  $k-\epsilon$  mathematical model has been established to cope with the limitations of traditional cold and hot-state performance tests of boilers. In combination with cold-state performance tests of boilers, in-furnace aerodynamic fields were simulated by using software FLUENT of computational fluid dynamics. The basic agreement of the numerical simulation results with those of cold-state performance tests and comparatively good coincidence of the distribution tendency of both results indicate that the numerical simulation method under discussion can relatively well reflect the true characteristics of in-furnace flow fields. Hence, the foregoing has demonstrated the correctness and reliability of the mathematical model, providing more comprehensive data and information for further improving boiler cold-state performance tests and for performing hot-state numerical tests. **Key words:** boiler, cold state performance test, numerical simulation