

# 基于实测的燃煤电厂汞排放特性分析与研究

王圣<sup>1,2</sup>, 王慧敏<sup>2</sup>, 朱法华<sup>1</sup>, 陈辉<sup>1</sup>, 孙雪丽<sup>1</sup>, 左漪<sup>1</sup>, 刘钢<sup>2</sup>

(1. 国电环境保护研究院, 南京 210031; 2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

**摘要:**选取我国 6 个有代表性的燃煤电厂进行现场实测, 依据现场监测的汞排放浓度数据计算得出每个燃煤电厂汞的脱除率和汞平均排放因子, 从而得出这 6 个燃煤电厂汞排放特性, 为将来我国汞排放控制提供支持和依据. 6 个燃煤电厂的汞排放浓度为 4.72 ~ 14.54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 汞脱除效率为 20.89% ~ 70.63%, 汞排放因子为 14.09 ~ 56.08  $\mu\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ . 将 6 个燃煤电厂汞的排放特性与美国燃煤电厂汞的排放特性比较, 得到烟气中汞的排放浓度远大于美国的排放浓度, 汞脱除率远小于美国国家标准所要求的脱除率. 分析得到汞平均排放因子随装机规模、发电负荷增大呈变小的趋势, 通过综合模拟给出燃煤电厂汞平均排放因子和机组装机容量、发电负荷、煤中含汞量、除尘、脱硫设备运行水平等因子的函数关系.

**关键词:** 实测; 燃煤电厂; 汞排放特征; 汞脱除率; 汞平均排放因子; 模式; 修正系数

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)01-0033-05

## Mercury Emission Characteristics from Coal-Fired Power Plants Based on Actual Measurement

WANG Sheng<sup>1,2</sup>, WANG Hui-min<sup>2</sup>, ZHU Fa-hua<sup>1</sup>, CHEN Hui<sup>1</sup>, SUN Xue-li<sup>1</sup>, ZUO Yi<sup>1</sup>, LIU Gang<sup>2</sup>

(1. State Power Environmental Protection Research Institute, Nanjing 210031, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resource and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** To sample and test mercury emission characteristics in different power plants, six representative coal-fired power plants were selected. And based on the data of mercury emission concentration from actual measurement, mercury removal rate and mercury average emission factor of every plant can be calculated, and mercury emission characteristics about every level capacity can be given, so as to provide support and foundation for the mercury control in China. The mercury emission concentration is about 4.72-14.54  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mercury removal rate is about 20.89%-70.63%, and mercury average emission factor is about 14.09-56.08  $\mu\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ . To compare the mercury emission characteristics with mercury emission characteristics from coal-fired power plants in USA, it is shown that the concentration of mercury emission from coal-fired power plants in China is far higher than those in USA, and the mercury removal rate is much lower than removal rate required by American national standard. To get conclusion that mercury average emission factor can come down with installed capacity and power generation load went up. And the function relation have been provided through comprehensive simulation between mercury average emission factor and installed capacity, generation load, mercury content in coal, the environmental protection equipment running level, and so on.

**Key words:** actual measurement; coal-fired power plants; mercury emission characteristics; mercury removal rate; mercury average emission factor; mode; correction factor

联合国环境规划署 2008 年报告, 估计 2005 年人为汞排放总量约为 1960 t, 分布于多种类别之中. 大气汞排放的最大来源为化石燃料, 尤其是煤在公共、工业与居民燃炉中的使用. 2005 年全球人为汞排放总量中, 46.5% 源自于化石燃料的燃烧, 而火电厂用煤又是燃煤消耗重要的组成部分. 根据美国环保署 (EPA) 1997 年给美国国会的汞研究报告<sup>[1]</sup>, 燃煤电站是对人体造成危害最大的汞排放污染源. 与燃油相比, 燃煤产生的汞排放要高出 10 ~ 100 倍<sup>[2,3]</sup>.

美国国家能源部 (DOE) 和国家能源技术实验室 (NETL) 联合美国电力科学研究院 (EPRI) 对各州 1 043 个燃煤电厂进行了测量, 获得了大量关于燃煤电厂汞排放的基础数据<sup>[4,5]</sup>, 这些数据为美国环保署 (EPA) 估算全美国燃煤电厂汞排放量在美国汞排

放总量中所占份额提供了很大帮助. 国内对燃煤电厂汞排放的研究主要还是以实验室数据为基础<sup>[6~11]</sup>或采用国外的汞排放因子<sup>[12,13]</sup>, 国内基于现场测试的燃煤电厂汞排放资料还非常少. 对燃煤电厂锅炉汞排放特性进行实测研究可以了解燃煤电厂汞排放特性, 为进一步探索全国燃煤电厂汞排放量、将来汞排放标准的制定和对燃煤电厂烟气汞控制技术提供可靠资料. 本研究在我国首次基于现场实测的要求, 以我国某地区 6 个典型燃煤电厂为对象, 依据现场实测数据计算分析其汞排放特性, 并得出燃

收稿日期: 2009-12-30; 修订日期: 2010-02-10

基金项目: 国家能源局基金项目 (20090417)

作者简介: 王圣 (1973 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力环评、规划环评、电力环境保护等, E-mail: wangsheng9999@126.com

煤电厂汞脱除率和汞平均排放因子,通过拟合得到燃煤电厂汞排放因子和机组装机容量、发电负荷、环保设备运行等参数的函数关系。

## 1 测试及分析方法

采样点均设在各电厂脱硫出口,测量数据代表受除尘装置及脱硫装置控制后排入大气的汞排放浓度,同时收集电厂原煤中的含汞量,可以分析得出燃煤电厂中汞排放及脱除情况。

测试采用原子荧光分光光度法,测试仪器为原子荧光分光光度仪(型号为 AFS-3100)。烟气中汞含量的检测原理为:通过等速采样,将颗粒物从固定污染源中抽取到滤筒中,所采集的样品用  $\text{HNO}_3\text{-HCl}$  的混合酸消解处理。在酸性介质中,加热消解使样品中的汞以二价汞的形式存在,再被硼氢化钾还原成单质汞,形成汞蒸气,被引入原子荧光分光光度计进行测定。根据所测的荧光强度值,得出样品溶液和空白溶液中汞的浓度,并由式(1)计算烟气中排放汞的浓度( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )<sup>[14]</sup>。

$$\text{Hg}(\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{50 \times (c - 1/2c_0)}{V_{\text{nd}} \times 1000} \times \frac{S_t}{S_a} \quad (1)$$

式中, $c$  为样品溶液中汞的浓度, $\mu\text{g}/\text{L}$ ;  $c_0$  为空白溶液中汞浓度, $\mu\text{g}/\text{L}$ ;  $50$  为样品溶液体积, $\text{mL}$ ;  $V_{\text{nd}}$  为标

准状态下采样体积, $\text{m}^3$ ;  $S_t$  为样品滤膜总面积, $\text{cm}^2$ ;  $S_a$  为测定时所取样品滤膜面积, $\text{cm}^2$ 。

汞脱除率是指燃煤机组燃料中的汞经过各种方式净化排入大气后被脱除的百分比,由式(2)计算得到。

$$\eta_{\text{Hg脱除}} = \frac{M_{\text{Hg}}^{\text{T}} - M_{\text{Hg}}^{\text{E}}}{M_{\text{Hg}}^{\text{T}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中, $M_{\text{Hg}}^{\text{T}}$  为原煤中汞含量(根据 GB/T 16659-2008《煤中汞的测定方法》,采用冷原子吸收分光光度法进行测定), $\mu\text{g}$ ;  $M_{\text{Hg}}^{\text{E}}$  为由烟囱排放的烟气中汞含量(根据烟气量和实测的汞排放浓度进行计算), $\mu\text{g}$ 。

汞排放因子是指燃煤机组每发一度电直接排放到环境中的汞量,由式(3)计算得到。

$$\text{EF}_{\text{Hg}} = \frac{M_{\text{Hg}}^{\text{E}}}{\text{EG} \times 1000} \times 100\% \quad (3)$$

式中, $\text{EF}_{\text{Hg}}$  为汞排放因子, $\mu\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;  $\text{EG}$  为机组发电量, $\text{MW}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

## 2 汞的排放特性分析

对现场实测的 6 个电厂编号依次为 A~F, 6 个电厂均装有湿法脱硫及静电除尘设备,没有 SCR 脱硝装置。现场对各个电厂燃煤煤质进行了分析,分析结果见表 1。

表 1 各个电厂燃煤煤质分析

Table 1 Coal quality analysis of all coal-fired power plants

电厂	煤种	全水分 /%	收到基灰分 /%	干基挥发份 /%	全硫(干基) /%	固定碳 /%	低位收到基发热量 /MJ·kg <sup>-1</sup>
A	淮南煤	12.6	23.85	30.56	0.92	45.53	20.85
B	大同煤	11.9	21.98	36.55	1.08	48.02	19.60
C	富动 24(内蒙)	12.0	16.17	32.95	0.96	53.06	22.23
D	澳大利亚(澳煤)	10.5	16.56	29.67	0.65	52.31	24.02
	山西平三(平三煤)		26.55	28.12	1.20	43.52	19.47
E	神混 1 号(山西+陕西)	16.7	11.66	33.11	0.94	49.43	22.72
F	山西神木煤	15.8	13.56	32.89	1.02	46.32	21.23

对各个电厂燃煤煤中含汞量、汞排放浓度进行多次采样,每隔 15 min 采样并记录一次数据。选取测试过程中汞平均脱除率和平均排放浓度的全部

20 组数据平均值作为测试结果,6 个电厂现场测试数据及煤中含汞量、排放浓度、脱除率和平均排放因子等汞排放特性见表 2。

表 2 各个电厂现场测试数据及汞排放特性

Table 2 Actual measurement data and mercury emission characteristics of all coal-fired power plants

电厂	燃煤量 /t·h <sup>-1</sup>	装机容量 /MW	发电负荷 /MW	烟气量 /m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup>	煤中含汞量 /mg·kg <sup>-1</sup>	排放浓度 /μg·m <sup>-3</sup>	烟气中汞 含量/μg	脱除的汞 量/μg	脱除效率 /%	汞平均排放因子 /μg·(kW·h) <sup>-1</sup>
A	35	125	100	4.35 × 10 <sup>5</sup>	0.202 50	12.86	5.61 × 10 <sup>6</sup>	1.48 × 10 <sup>6</sup>	20.89	56.08
B	90	215	198	7.50 × 10 <sup>5</sup>	0.183 35	14.54	10.90 × 10 <sup>6</sup>	5.60 × 10 <sup>6</sup>	33.93	55.07
C	100	300	250	10.01 × 10 <sup>5</sup>	0.220 00	6.74	6.74 × 10 <sup>6</sup>	15.26 × 10 <sup>6</sup>	69.35	26.97
D	205	600	490	17.91 × 10 <sup>5</sup>	0.140 35	4.72	8.45 × 10 <sup>6</sup>	20.32 × 10 <sup>6</sup>	70.63	17.25
E	200	600	600	17.35 × 10 <sup>5</sup>	0.139 19	6.08	10.55 × 10 <sup>6</sup>	17.29 × 10 <sup>6</sup>	62.10	17.58
F	250	1 000	850	21.69 × 10 <sup>5</sup>	0.185 50	5.52	11.97 × 10 <sup>6</sup>	34.40 × 10 <sup>6</sup>	74.18	14.09

## 2.1 汞的排放浓度分析

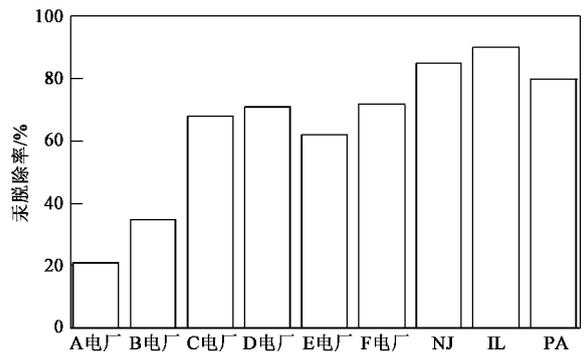
Meij 等<sup>[15]</sup>在荷兰燃煤电厂进行的烟气中汞浓度测试的结果在  $0.3 \sim 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之内,平均浓度为  $4.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ;美国伊利诺斯州 Springfield 市 20 个燃煤电厂的汞排放浓度为  $0.5 \sim 6.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,平均汞排放浓度为  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ <sup>[16]</sup>;美国第一能源公司所属的 BMP 电厂的排放汞浓度是  $2.85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . 由表 2 可以看出,6 个电厂中 B 电厂的汞排放浓度最大为  $14.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,D 电厂的排放浓度最小为  $4.72 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . 与国外发达国家相比,B 电厂的汞排放浓度是荷兰燃煤电厂平均排放浓度的 3.55 倍,是美国伊利诺斯州 Springfield 市的 2.42 倍,是 BMP 电厂排放浓度的 5.10 倍;D 电厂的汞排放浓度略高于荷兰燃煤电厂的排放浓度,低于美国伊利诺斯州 Springfield 市 20 个燃煤电厂的排放浓度,但远高于美国 BMP 电厂,是 BMP 电厂排放浓度的 1.66 倍;其余 4 个电厂的排放浓度均大于国外发达国家的排放浓度.

通过上面分析,可以得到该 6 个燃煤电厂烟气中汞的排放浓度远大于一些发达国家的排放浓度.

## 2.2 汞的脱除率分析

煤中的汞分为有机汞和无机汞,烟气中汞的形态是气态单质汞、氧化态汞、颗粒汞,这三者称为总汞.煤在炉膛中燃烧时,煤中的汞将会挥发,以气态单质汞(零价汞)的形式存在于烟气中.在烟道中随着烟气温度的降低,气态单质汞会有 2 个转化趋势:单质汞与烟气中的成分发生均相反应生成二价汞;还会与飞灰颗粒发生吸附作用,转化成颗粒汞<sup>[17,18]</sup>.燃煤电厂的电除尘器和湿法脱硫系统都可以脱除烟气中的汞,经过电除尘器烟气中的大部分颗粒汞会被除尘器吸附富集在飞灰中.氧化态汞容易溶于水,当烟气经过湿法脱硫系统时,烟气中的大部分氧化态汞会被湿法脱硫系统脱除而残留在脱硫产物中<sup>[19,20]</sup>.煤在炉膛中燃烧产生的灰渣中也存在一部分汞,根据汞平衡原理可知,剩余的汞存在烟气中,最终排入大气中<sup>[21]</sup>.

2005 年 3 月 15 日美国 EPA 颁布了汞排放控制标准(clean air mercury rule, CAMR),美国是世界上首个针对燃煤电厂汞排放实施限制标准的国家. New Jersey、Massachusetts、Connecticut 州政府要求境内燃煤电厂在 2008 年汞的脱除率达到 85%; Illinois 州政府要求燃煤电厂在 2009 年汞的脱除率达到 90%; Pennsylvania 州政府要求燃煤电厂在 2010 年汞的脱除率达到 80%<sup>[22]</sup>.图 1 列出了我国 6 个典型燃煤电厂与美国各个州汞的脱除率比较.



图中 NJ、IL、PA 分别是 New Jersey、Illinois、Pennsylvania 的缩写  
图 1 我国燃煤电厂和美国一些州的燃煤电厂汞的脱除率比较

Fig. 1 Mercury removal rate comparison of coal-fired power plants between some states of U. S. A and China

由图 1 可以得到,与美国 3 个州的燃煤电厂汞的脱除率比较,我国 6 个燃煤电厂汞的脱除率远低于美国 3 个州,A 电厂和 B 电厂汞的脱除率还不到 Pennsylvania 州的一半.这说明我国燃煤电厂汞的脱除率还需要进一步提高,逐渐缩小与美国的差距.

## 2.3 汞排放因子分析

6 个典型燃煤电厂汞平均排放因子比较见图 2.

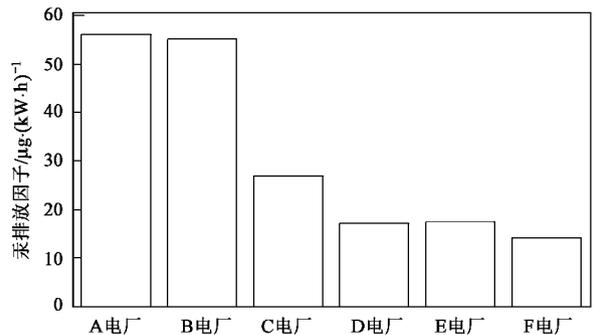


图 2 我国 6 个典型燃煤电厂汞排放因子比较

Fig. 2 Mercury emission factor comparison for 6 typical coal-fired power plants in China

文献[23~25]中介绍了锅炉容量、机组负荷与汞在锅炉灰渣、除尘器飞灰中的富集因子之间的关系,但对汞平均排放因子与机组负荷之间的变化关系缺少研究.由图 2 可以看出:①6 个典型燃煤电厂中 F 电厂汞平均排放因子最小,A 电厂的平均排放因子最大,是 F 电厂排放因子的 3.98 倍;②由表 2 可以看出,装机容量顺序为:F 电厂 > E 电厂 = D 电厂 > C 电厂 > B 电厂 > A 电厂,发电负荷顺序为:F 电厂 > E 电厂 ≈ D 电厂 > C 电厂 > B 电厂 > A 电厂,而对应的汞平均排放因子顺序为:汞排放因子(F 电厂) < 汞排放因子(E 电厂 ≈ D 电厂) < 汞排放因子

(C 电厂) < 汞排放因子(B 电厂) < 汞排放因子(A 电厂), 从而说明装机容量、发电负荷越大, 汞平均排放因子呈变小趋势, 见图 3。

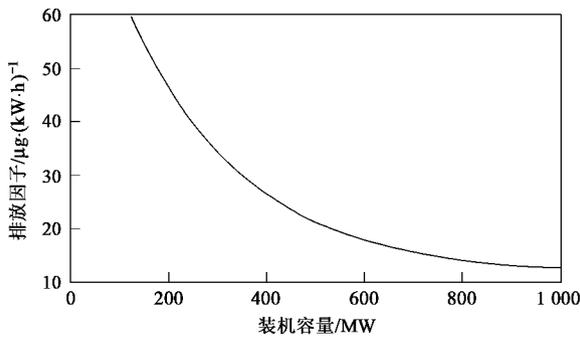


图 3 汞平均排放因子与机组装机容量之间的变化关系

Fig. 3 Change relation of mercury average emission factor and installed capacity

汞的平均排放因子不仅与机组装机容量、发电负荷因素有关, 还与煤中含汞量、除尘设备和湿法脱硫设备的运行水平等因素有关。通过非线性回归模型模拟可以得到燃煤电厂汞平均排放因子和机组装机容量、发电负荷、煤中含汞量、除尘、脱硫设备运行水平等因素的综合负指数模式:

$$f(x) = \varepsilon_1 \times \varepsilon_2 \times (74.45e^{\frac{-\alpha x}{230.19}} + 11.00)$$

$$(0 < x \leq 1000 \text{ MW})$$

式中,  $f(x)$  为机组汞平均排放因子  $\mu\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ;  $\alpha$  为机组负荷率,  $0 < \alpha \leq 1$ ;  $x$  为机组装机容量, MW;  $\alpha x$  为机组的发电负荷, MW;  $\varepsilon_1$  为煤中含汞量对汞平均排放因子的修正系数,  $1 < \varepsilon_1 \leq 1.2$ ;  $\varepsilon_2$  为除尘、脱硫设备运行水平对汞平均排放因子的修正系数,  $0.8 < \varepsilon_2 \leq 1$ 。

可见燃煤机组汞平均排放因子与机组装机容量及发电负荷呈负指数关系, 同时还与煤中汞含量和除尘、脱硫设备运行水平有关。当机组装机容量越大, 发电负荷越高时, 除尘、湿法脱硫设备的运行水平相对较好, 除尘和湿法脱硫系统脱除烟气中的汞相对较多, 公式中的修正系数  $\varepsilon_2$  取值相对较小; 当煤中含汞量相对较大, 公式中的修正系数  $\varepsilon_1$  取值相对较大。

### 3 结论

(1) 燃煤电厂汞平均排放因子不仅与机组装机容量、发电负荷因素有关, 还与煤中含汞量、除尘设备和湿法脱硫设备的运行水平等因素有关。

(2) 燃煤电厂装机容量、发电负荷越大, 汞平均

排放因子呈变小趋势, 之间呈负指数关系。

(3) 我国 6 个典型燃煤电厂烟气汞排放浓度远大于一些发达国家的排放浓度。

(4) 我国 6 个典型燃煤电厂汞的脱除率远低于美国, 汞的脱除率还需要进一步提高, 逐渐缩小与美国燃煤电厂汞脱除率的差距。

(5) 我国燃煤电厂通过电除尘器、湿法脱硫系统和其他一些先进的脱汞技术可以达到以较高脱除率脱除烟气中的汞, 最终实现汞的排放浓度和排放因子的降低。

### 参考文献:

- [1] U. S. EPA. Mercury Study Report to Congress, EPA-452/R-97-003. U. S. EPA Office of Air Quality Planning and Standard[R]. Washington, DC: U. S. Government Printing Office, 1997.
- [2] 况敏, 杨国华, 胡文佳, 等. 燃煤电厂烟气脱汞技术现状分析与展望[J]. 能源科学与技术, 2008, 31(5): 65-69.
- [3] 赵毅, 马双忱, 华伟, 等. 电厂燃煤过程中汞的迁移转化及控制技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(11): 59-63.
- [4] 周劲松, 张乐, 岑可法, 等. 300 MW 机组锅炉汞排放及控制研究[J]. 热力发电, 2008, 37(4): 22-27.
- [5] Galbreath K C, Zygarlicke C J. Mercury transformation in coal combustion flue gas[J]. Fuel Processing Technology, 2000, 65-66: 289-310.
- [6] 周劲松, 王光凯, 骆仲泱, 等. 600 MW 煤粉锅炉汞排放的试验研究[J]. 热能动力工程, 2006, 21(6): 569-572.
- [7] 卢平, 吴江, 潘伟平, 等. 860 MW 煤粉锅炉汞排放及其形态分布的研究[J]. 动力工程, 2009, 29(11): 1067-1072.
- [8] 杨立国, 段钰峰, 杨祥花, 等. 燃煤电厂汞排放特性实验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(5): 817-821.
- [9] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 燃煤电站汞排放分布及控制研究的进展[J]. 电站系统工程, 2006, 22(1): 44-46.
- [10] 陈义珍, 柴发和, 薛志刚, 等. 燃煤火电厂汞排放因子测试设计及案例分析[J]. 环境科学研究, 2006, 19(2): 49-52.
- [11] 高洪亮, 杨德红, 周劲松, 等. 循环流化床燃煤过程汞控制性能的实验研究[J]. 锅炉技术, 2006, 37(5): 28-31.
- [12] 蒋靖坤, 郝吉明, 吴焯, 等. 中国燃煤汞排放清单的初步建立[J]. 环境科学, 2005, 26(2): 34-39.
- [13] 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 燃煤电站汞排放量的预测模型[J]. 动力工程, 2005, 25(4): 587-592.
- [14] 国家环境保护总局. 空气和废气监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [15] Meji R. The fate of mercury in coal-fired power plants and the influence of wet flue-gas desulphurization[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1991, 56: 21-33.
- [16] Sharp R L, Glassburn W E. A transformer differential relay with second-harmonic restraint[J]. Power Apparatus and Systems, Part III, Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1958, 77(3): 913-918.
- [17] 杨振宇, 羌宁, 季学李. 美国燃煤电厂锅炉烟气中汞的研究进展[J]. 能源环境保护, 2003, 17(5): 3-7.

- [18] 孙丽梅,白艳英. 电厂煤燃烧过程中汞的形态分布及迁移转化行为分析[J]. 洁净煤技术,2008,14(5):93-95.
- [19] 江贻满,段钰峰,杨祥花,等. ESP 飞灰对燃煤锅炉烟气汞的吸附特性[J]. 东南大学学报(自然科学版),2007,37(5):436-440.
- [20] 王乾,段钰峰,吴成军,等. 燃煤电厂脱硫系统的脱汞特性研究[J]. 锅炉技术,2008,39(1):69-78.
- [21] 魏国强,何伯述,王丽俐. 燃煤电厂烟气汞排放控制技术[J]. 环境保护,2007,(4A):61-65.
- [22] 刘昕,蒋勇. 美国燃煤火力发电厂汞控制技术的发展及现状[J]. 高科技与产业化,2009,(3):92-95.
- [23] 朱珍锦,薛来,谈仪,等. 负荷改变对煤粉锅炉燃烧产物中汞的分布特性影响研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(7):87-94.
- [24] 杨立国,段钰峰,王运军,等. 锅炉容量对汞富集规律的影响[J]. 动力工程,2008,28(2):302-307.
- [25] 王起超,马如龙. 煤及其灰渣中的汞[J]. 中国环境科学,1997,17(1):76-79.