

宋畅,张翼,郝剑,等. 燃煤电厂超低排放改造前后汞污染排放特征[J]. 环境科学研究, 2017, 30(5): 672-677.

SONG Chang, ZHANG Yi, HAO Jian, et al. Mercury emission characteristics from coal-fired power plant before and after ultra-low emission retrofitting[J]. Research of Environmental Sciences, 2017, 30(5): 672-677.

## 燃煤电厂超低排放改造前后汞污染排放特征

宋 畅<sup>1</sup>, 张 翼<sup>2</sup>, 郝 剑<sup>2</sup>, 刘更生<sup>2</sup>, 王家伟<sup>1</sup>, 安连锁<sup>1</sup>, 张永生<sup>1\*</sup>

1. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206

2. 三河发电有限责任公司, 河北 廊坊 065200

**摘要:** 针对 300 MW 燃煤机组, 基于 US EPA(美国国家环境保护局)的 30 B 汞监测方法, 通过多点监测对比了实施低氮燃烧器改造、SCR 脱硝改造、新增低温省煤器、静电除尘器高频电源改造、湿法脱硫塔脱硫提效并增加管式除雾、新增湿式静电除尘器技术路线开展的超低排放改造前后汞排放及分布特征。研究表明: 超低排放改造前, 神华煤  $w(\text{Hg})$  为  $49 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 烟囱入口  $\rho(\text{Hg})$  测量值为  $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 煤燃烧及经过污染物控制单元后, 有 35.0% 的汞存在于灰中, 有 29.5% 的汞存在于石膏中, 有 35.4% 的汞从烟囱排出。超低排放改造后, 神华煤中  $w(\text{Hg})$  为  $30 \mu\text{g}/\text{kg}$ , 烟囱入口  $\rho(\text{Hg})$  测量值为  $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 脱硫进水及湿式除尘器进水对汞平衡几乎没有影响, 煤燃烧及经过污染物控制单元后, 有 36.1% 的汞存在于灰中, 有 55.2% 的汞存在于石膏中, 有 8.7% 的汞从烟囱排出。超低排放改造后, 污染物控制设备的烟气综合脱汞效率提高了 1.5 倍左右, 表明超低排放脱硝增强了对汞的催化氧化, 而脱硫增强了对二价汞的吸收结果。湿式电除尘器对脱汞没有明显效果。

**关键词:** 燃煤电厂; 超低排放; 汞排放

中图分类号: X705

文章编号: 1001-6929(2017)05-0672-06

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2017.01.96

## Mercury Emission Characteristics from Coal-Fired Power Plant Before and After Ultra-Low Emission Retrofitting

SONG Chang<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>, HAO Jian<sup>2</sup>, LIU Gengsheng<sup>2</sup>, WANG Jiawei<sup>1</sup>, AN Liansuo<sup>1</sup>, ZHANG Yongsheng<sup>1\*</sup>

1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China

2. Sanhe Power Generation Co. Ltd., Langfang 065200, China

**Abstract:** Based on the 30 B mercury monitoring methods provided by the US EPA, mercury emissions and distribution of a 300 MW coal-fired power plant were compared before and after conversion to ultra-low emissions, which include retrofitting with a low  $\text{NO}_x$  burner, SCR, ESP with high frequency power source, FGD with tubular mist eliminator and adding low temperature economizer and WESP. The mercury content of the coal was  $49 \mu\text{g}/\text{kg}$ , and the mercury concentration at the stack entrance was  $1.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$  before retrofitting. After the air pollutant control devices, 35% of the mercury from coal combustion remained in ashes, 29.5% of the mercury in gypsum, and 35.4% of the mercury was discharged from the stack. After ultra-low emissions retrofitting, mercury content of the coal was  $30 \mu\text{g}/\text{kg}$ , and the mercury concentration at the stack entrance was  $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . After coal combustion and pollutant control devices, 36.1% of the mercury remained in ashes, 55.2% of the mercury in gypsum, and 8.7% of the mercury was discharged from the stack. After retrofitting, a big proportion was captured by APCD system compared with before retrofitting. The capture efficiency was increased 1.5 times. This might be due to the higher oxidation rate from elemental mercury to oxidized mercury in the SCR system and better capture of oxidized mercury in the WFGD system. WESP did not show any significant effect on the mercury capture efficiency.

**Keywords:** coal-fired power plant; ultra-low emission; mercury emission

收稿日期: 2016-08-24

修订日期: 2017-01-03

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAA05B02)

作者简介: 宋畅(1965-), 男, 四川合江人, 高级工程师, 主要从事电力生产技术管理和燃煤电站污染物控制技术及应用研究, 16040479@shenhua.cc.

\* 责任作者, 张永生(1975-), 男, 山西大同人, 副教授, 主要从事燃烧及污染物控制研究, yszhang@ncepu.edu.cn

燃煤发电是我国电力供应的主要来源, 但发电过程的煤炭燃烧也是造成大气环境污染的重要原因。2013 年以来, 中国发电企业主动倡导、推动了燃煤电站“近零排放”“超低排放”<sup>[1]</sup>, 通过对烟尘、二氧化

硫、氮氧化物等常规污染物控制单元的改造升级或采用相关新技术、新设备,实现了对这些污染物的减排,并逐渐得到国家、社会的认可和推广<sup>[2]</sup>. 燃煤发电超低排放的目标,基本是燃煤电厂锅炉烟尘、二氧化硫及氮氧化物排放浓度限值看齐或接近 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》中天然气燃气轮机机组排放标准,从实施的效果来看,新建或改造的超低排放电厂达到了预期目标<sup>[1,3-6]</sup>.

另一方面,中国大气汞排放占全球汞排放的25%~40%<sup>[7-8]</sup>. 惠霖霖等<sup>[9]</sup>以2010年为基准,得出我国电厂燃煤在当年共输入271.7 t(147.1~403.6 t)汞,煤炭在电厂燃烧一次排放到大气中的汞为101.3 t(44.0~167.1 t). 2011年颁布的GB 13223—2011首次对燃煤电厂烟气中汞及其化合物给出了排放限值. 从电厂减排的角度来看,实现烟气中汞污染减排基本上有两类较为成熟的控制技术,一种是采用专门的脱汞吸附剂吸附技术<sup>[10-13]</sup>,另一种是利用现有除尘、脱硫、脱硝等技术协同脱除<sup>[10,14-16]</sup>. 传统污染物控制设备中,选择性催化还原(SCR)脱硝催化剂具有催化氧化气相零价汞( $\text{Hg}^0$ )的作用<sup>[10,16]</sup>,静电除尘器(ESP)能够捕集颗粒汞( $\text{Hg}^p$ )<sup>[10,15]</sup>,湿式脱硫塔(WFGD)能够吸收二价汞( $\text{Hg}^{2+}$ )<sup>[10,15,17]</sup>,这些设备的共同作用会有效促使烟气中汞污染浓度降低. 烟尘、二氧化硫、氮氧化物常规污染物控制单元的提效能够有效促进汞污染物的减排<sup>[18]</sup>.

实施中的燃煤电厂超低排放有不同的技术路线,总的来说包括<sup>[1,19-22]</sup>:炉内低氮燃烧改造,催化脱硝增效,采用低温省煤器、静电除尘器实施高频电源改造或三相电源改造,强化脱硫塔脱硫及除尘效果,以及采用湿式电除尘器(WESP)等. 具体实施中,不同的电厂根据自己的厂情选择相应技术或技术组合. 但超低排放改造后,这些污染物控制单元对汞污染物有何影响尚缺乏足够的认识. 超低排放对我国大气汞污染减排的影响尚缺乏相关的数据. 基于此,该研究针对实施了超低排放改造的某燃煤机组开展监测,考察超低排放改造前后汞污染排放特征和变化.

## 1 测试现场及方法

### 1.1 电厂情况

研究中的机组为神华国华三河发电有限责任公司300 MW亚临界自然循环燃煤机组,超低排放改造前污染物控制单元包括低氮燃烧器、SCR脱硝反应器用于脱除氮氧化物、静电除尘器用于脱除粉尘及湿法脱硫塔用于脱除二氧化硫,如图1所示. 其中,低氮

燃烧器主要是通过控制锅炉内的氧化还原气氛降低燃料型的氮氧化物,静电除尘器通过吸附收集荷电的粉尘颗粒降低烟气中粉尘浓度,湿法脱硫是利用石灰石和烟气中的二氧化硫反应生成石膏从而实现对其固化. 此外,SCR反应器和静电除尘器间的烟道中还装有空气预热器. 超低排放改造中实施的低氮燃烧器改造,增加了燃尽风、一次风采用上下浓淡煤粉组合方式等进一步改善炉膛的氧化还原条件,新增了低温省煤器主要用于降低烟气温度提高静电除尘器效率,实施了静电除尘器高频电源改造提高静电除尘器效率,实施了湿法脱硫塔脱硫提效并增加管式除雾,新增了刚性极板湿式静电除尘器用于去除细颗粒物,系统如图2所示.

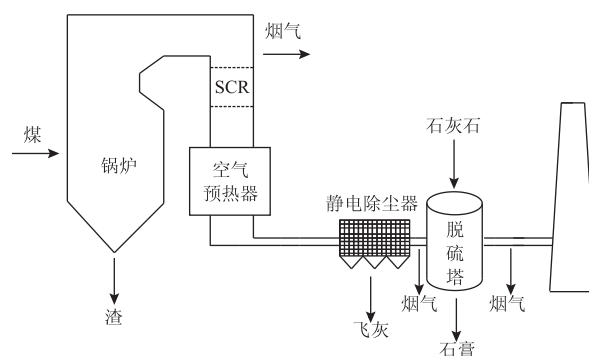


图1 超低排放改造前污染物控制单元及取样位置

Fig. 1 APCD's and sampling locations before ultra-low emission retrofitting

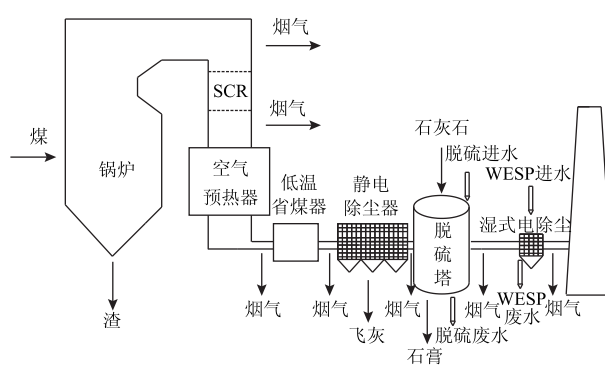


图2 超低排放改造后污染物控制单元及取样位置

Fig. 2 APCD's and sampling locations after ultra-low emission retrofitting

### 1.2 取样测试分析方法

试验中对研究机组烟气、固体及液体样品取样. 取样期间,机组设备运行良好,并保持在满负荷85%以上. 2013年8月开展超低排放改造前取样,包括ESP前、ESP后、FGD后烟气样品,固体、液体样品包括给煤机煤样、除尘器灰样、锅炉排渣机渣样、脱硫塔

石膏样、工艺水样(WFGD 进口水样)、脱硫废水样和石灰石样,如图1所示。2015年12月开展超低排放改造后取样,包括SCR前、SCR后、低省前、ESP前、ESP后、FGD后、WESP后烟气样品,固体液体样品包括给煤机煤样、除尘器灰样、锅炉排渣机渣样、脱硫塔石膏样、工艺水样(WFGD 进口水样、WESP 进口水样)、脱硫废水样、WESP 出口水样和石灰石样,如图2所示。

试验中烟气取样采用30 B 吸附法,基于US EPA (美国国家环境保护局) Method 30 B 标准开展<sup>[23]</sup>,用以测量烟气中的气态总汞浓度。为了保证数据的一致性,超低排放改造前三套取样器同时取样,超低排放改造后先通过四套取样器针对SCR前、SCR后、低省前、ESP前同时取样,然后再通过这四套取样器针对ESP前、ESP后、FGD后、WESP后同时取样。质控方面,取样过程中30 B 取样枪中通过A、B 两根平行取样管取样。当 $\rho(\text{Hg}) > 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,相对偏差(RD)  $\leq 10\%$ 通过;当 $\rho(\text{Hg}) \leq 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,相对偏差(RD)  $\leq 20\%$ 通过。每根吸附管装填两段活性炭,当 $\rho(\text{Hg}) > 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,第二段活性炭的穿透率(T)  $\leq 10\%$ ;对于当 $\rho(\text{Hg}) \leq 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,穿透率 $\leq 20\%$ 。固体、液体样品通过手动采样法取得。

烟气取样仪器为Apex Instruments 公司的烟气汞仪。吸附管中汞及煤、灰渣等固体样品中汞通过Lumex RA915 固体汞分析仪分析,液体样品中汞通过Leman Hydra IIA 液相汞分析仪分析。

### 1.3 平衡计算

由于重金属汞为痕量元素,取样及测量分析等过程存在误差,为了考察最终数据的准确性及可靠性,通常通过物料平衡来验证数据,同时平衡计算也有利于了解煤中重金属汞的去向和分布。该研究基于物质的输入、输出开展平衡计算,基本公式:

$$\text{RI} = M_{\text{输出}}/M_{\text{输入}} \quad (1)$$

式中,RI 为燃煤电厂汞总体的输出值与输入值的比值,称为平衡系数。当汞在电厂中处于完全平衡时,平衡系数的数值为1<sup>[24]</sup>。一般来说,针对汞等重金属的现场监测平衡系数在0.7~1.3是可以接受的<sup>[25]</sup>。

$M_{\text{输入}}$ 是电厂系统中输入物质中汞的总量,理论上,超低排放改造前,包括煤、石灰石等固体中汞量及脱硫塔进口工艺水汞量等;超低排放改造后,还要包括湿式电除尘进口工艺水中汞量等,如式(2)所示。 $M_{\text{输出}}$ 为电厂系统中输出物质中汞的总量,理论上,超低排放改造前,包括烟道气、渣、灰、石膏、脱硫废水等

物质中汞的总量;超低排放改造后,还要包括湿式电除尘出口工艺水中汞量等,如式(3)所示。平衡计算中,每种物质的 $M_{\text{输入}}$ 和 $M_{\text{输出}}$ 为其质量和汞浓度的乘积,不同物质中汞浓度数据通过取样及分析测试获得,质量数据可以基于电厂的实际运行数据或基于煤质分析计算。

$$M_{\text{输入}} = M_{\text{煤}} + M_{\text{石灰石}} + M_{\text{脱硫进水}} + M_{\text{湿式电除尘进水}} \quad (2)$$

$$M_{\text{输出}} = M_{\text{烟气}} + M_{\text{底渣}} + M_{\text{飞灰}} + M_{\text{脱硫石膏}} + M_{\text{脱硫废水}} + M_{\text{湿式电除尘排水}} \quad (3)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 超低排放改造前汞排放及分布特征

超低排放改造前煤的元素分析及工业分析如表1所示,煤、灰、渣、石灰石及石膏中 $w(\text{Hg})$ 如表2所示。由表2可见,煤中 $w(\text{Hg})$ 为49  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,对照文献<sup>[17]</sup>中国煤中 $w(\text{Hg})$ ,属于 $w(\text{Hg})$ 较低的煤种<sup>[26]</sup>。燃烧后汞在飞灰颗粒中有一定的富集,飞灰中 $w(\text{Hg})$ 大概是煤中 $w(\text{Hg})$ 的2倍。由于煤中汞在炉膛高温燃烧阶段基本全部释放,渣中 $w(\text{Hg})$ 很低。尽管石灰石中 $w(\text{Hg})$ 低于煤中 $w(\text{Hg})$ ,但由于湿法脱硫过程液相对烟气中二价汞的吸收,脱硫石膏中 $w(\text{Hg})$ 在500  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 左右。

表1 超低排放改造前煤样元素分析及工业分析

Table 1 Proximate and elemental analysis before ultra-low emission retrofitting

| 元素及工业分析 | C     | H    | N    | S    | O     | 挥发分   | 灰分    | 固定碳   | 水分   |
|---------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| $w/\%$  | 64.34 | 4.06 | 0.84 | 0.42 | 14.93 | 27.69 | 15.41 | 50.78 | 6.12 |

表2 超低排放改造前固体样品中的 $w(\text{Hg})$

Table 2 Mercury content of solid samples before ultra-low emission retrofitting

| 固体样品                                   | 煤  | 灰  | 渣 | 石膏  | 石灰石 |
|----------------------------------------|----|----|---|-----|-----|
| $w(\text{Hg})/(\mu\text{g}/\text{kg})$ | 49 | 97 | 2 | 509 | 17  |

烟气中汞测试表明,脱硝前烟气中 $\rho(\text{Hg})$ 为5.02  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,除尘后烟气中 $\rho(\text{Hg})$ 为3.56  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,脱硫塔后 $\rho(\text{Hg})$ 为1.87  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,如图3所示。从SCR前算起,脱硝、除尘、脱硫等污染物控制单元使得 $\rho(\text{Hg})$ 在原来基础上降低了62.7%。该研究所采用的30 B 取样方法不能监测烟气中的颗粒汞,但一般烟气中颗粒 $w(\text{Hg})$ 相对较少,例如文献<sup>[19]</sup>报道中颗粒汞小于2%<sup>[27]</sup>,尤其在脱硫后烟气中的汞基本都是零价汞。总体上由于煤中 $w(\text{Hg})$ 低导致烟气中 $\rho(\text{Hg})$ 较低,该电厂汞排放值远小于GB 13223—2011 中规定

的燃煤电厂汞排放限值.

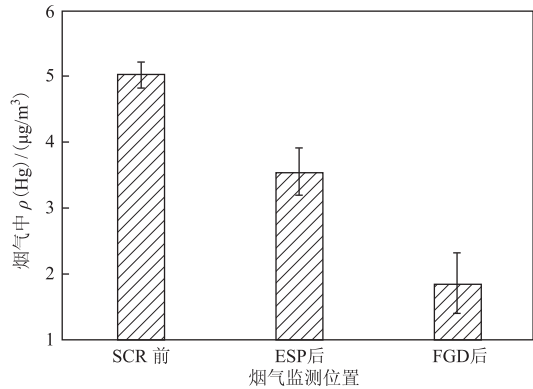


图3 超低排放改造前烟气中  $\rho(\text{Hg})$

Fig. 3 Mercury concentration of flue gas before ultra-low emission retrofitting

基于固体及烟气中汞的监测,针对超低排放改造前机组开展了汞平衡计算并给出汞分布,结果如表3所示.由表3可见,系统中的汞主要来源于燃煤,石灰石的输入占了很小一部分.煤燃烧及经过污染物控制单元后,35.0%的汞存在于灰中,29.5%的汞存在于石膏中,35.4%的汞从烟囱排出.

表3 超低排放改造前汞分布及平衡

Table 3 Mercury distribution and balance before ultra-low emission retrofitting

| 分类   | 项目  | w/%  |
|------|-----|------|
| 输入   | 煤   | 99.6 |
|      | 石灰石 | 0.4  |
|      | 灰   | 35.0 |
| 输出   | 渣   | 0.1  |
|      | 石膏  | 29.5 |
|      | 烟气  | 35.4 |
| 平衡系数 |     | 0.73 |

2.2 超低排放改造后汞排放及分布特征

超低排放改造后煤的元素分析及工业分析如表4所示,煤、灰、渣、石灰石及石膏等固体样品中  $w(\text{Hg})$  如表5所示.此次试验煤及石灰石中  $w(\text{Hg})$  都更低,分别为  $30, 3 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,但飞灰中  $w(\text{Hg})$  较高,约是煤中  $w(\text{Hg})$  的5倍.液体样品中  $\rho(\text{Hg})$  如表6所示,经过脱硫塔后水中  $\rho(\text{Hg})$  一定增加,脱硫废水中  $\rho(\text{Hg})$  为  $0.153 \mu\text{g}/\text{L}$ ,湿式电除尘进口、出口水中  $\rho(\text{Hg})$  基本一致,分别为  $0.098, 0.099 \mu\text{g}/\text{L}$ .

超低排放改造后,烟气中  $\rho(\text{Hg})$  如图4所示,由于煤中  $w(\text{Hg})$  更低,此次试验中 SCR 前烟气  $\rho(\text{Hg})$  也只有  $3.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,湿式电除尘后排放到大气中的  $\rho(\text{Hg})$  为  $0.46 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .从 SCR 前算起,催化脱硝反应

表4 超低排放改造后煤样元素分析及工业分析

Table 4 Proximate and Elemental analysis after ultra-low emission retrofitting

| 煤样元素分析及工业分析 | C     | H    | N    | S    | O     | 挥发分   | 灰分    | 固定碳   | 水分    |
|-------------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| w/%         | 66.35 | 4.56 | 1.12 | 0.70 | 16.19 | 26.77 | 10.96 | 49.09 | 13.18 |

表5 超低排放改造后固体样品  $w(\text{Hg})$

Table 5 Mercury content of solid samples after ultra-low emission retrofitting

| 固体样品          | 煤  | 灰   | 渣 | 石膏  | 石灰石 |
|---------------|----|-----|---|-----|-----|
| w(Hg)/(μg/kg) | 30 | 147 | 3 | 601 | 3   |

表6 超低排放改造后液体样品中  $\rho(\text{Hg})$

Table 6 Mercury content of liquid samples after ultra-low emission retrofitting

| 液体样品                                     | 脱硫塔入口水 | 脱硫废水  | 湿式电除尘入口水 | 湿式电除尘出口水 |
|------------------------------------------|--------|-------|----------|----------|
| $\rho(\text{Hg})/(\mu\text{g}/\text{L})$ | 0.078  | 0.153 | 0.098    | 0.099    |

器、空气预热器、低温省煤器、静电除尘器、湿法脱硫塔、湿法静电除尘器等污染物控制单元及换热单元等使得  $\rho(\text{Hg})$  比 SCR 前降低了 86.1%.但气相  $\rho(\text{Hg})$  在脱硝反应塔、空气预热器和低温省煤器中降低明显,静电除尘器中气相汞也有一定降低.静电除尘器后烟气  $\rho(\text{Hg})$  为  $0.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,脱硫塔后烟气  $\rho(\text{Hg})$  为  $0.50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,结果表明此次试验脱硫塔对汞的影响不明显,湿式电除尘对汞基本没有脱除效果.

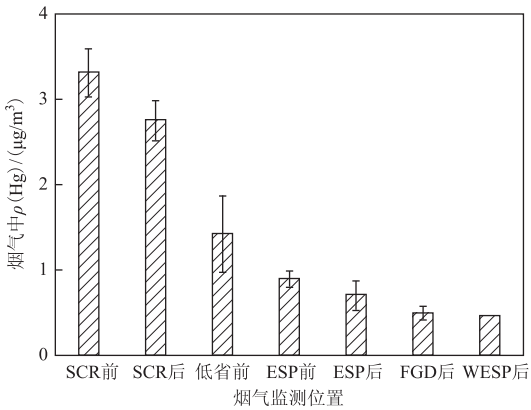


图4 超低排放改造后烟气中  $\rho(\text{Hg})$

Fig. 4 Mercury concentration of flue gas after ultra-low emission retrofitting

如图2所示,空气预热器安装在脱硝反应塔和低温省煤器之间,图5表明由于空气预热器较强的换热能力,从脱硝反应塔出口到低温省煤器入口烟气温度降低了  $220^\circ\text{C}$  左右,同时低温省煤器前后温度也发生

了一定的下降,而温度下降有利于促进烟气中飞灰对汞的物理吸附<sup>[28-29]</sup>. SCR 改造后催化氧化能力增强,会促进汞的氧化,但另一方面催化剂会同时促进 SO<sub>2</sub> 对 SO<sub>3</sub>的转化<sup>[30]</sup>,烟气中的飞灰也会吸附 SO<sub>3</sub>,SO<sub>3</sub>和汞在飞灰中的吸附存在竞争关系<sup>[31]</sup>,有可能导致飞灰对汞吸附能力下降. 烟气中 ρ(Hg)的变化是多方面因素的综合反映.

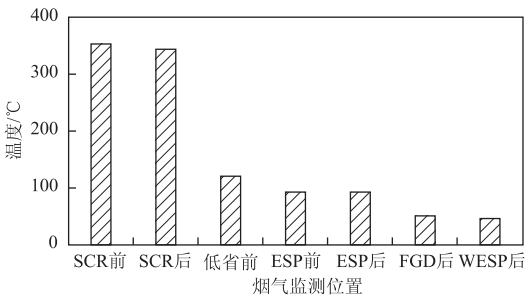


图 5 烟道中不同位置温度

Fig. 5 Temperatures of different locations after ultra-low emission retrofitting

基于固体、液体及烟气中汞的监测,针对超低排放改造后机组开展了汞平衡计算及汞分布分析,结果如表 7 所示. 同样烟气系统中的汞主要来源于燃煤,脱硫进水及湿式除尘器的进水对汞平衡几乎没有影响,煤燃烧及经过污染物控制单元后,36.1%的汞存在于灰中,55.2%的汞存在于石膏中,8.7%的汞从烟囱排出. 对比超低排放改造前后汞的分布,可见超低排放改造后,飞灰中汞比例基本不变,而石膏中汞比例增加,应该是超低排放改造增强了 SCR 对汞的催化氧化能力,并进一步在脱硫塔中吸收的原因导致的结果<sup>[7]</sup>.

表 7 超低排放改造后汞分布及平衡

Table 7 Mercury distribution and balance after ultra-low emission retrofitting

| 分类   | 项目   | w/%   |
|------|------|-------|
| 输入   | 煤    | 98.2  |
|      | 石灰石  | 1.8   |
|      | 脱硫进水 | <0.01 |
|      | 湿除进水 | <0.01 |
| 输出   | 灰    | 36.1  |
|      | 渣    | 0.1   |
|      | 石膏   | 55.2  |
|      | 脱硫废水 | <0.01 |
|      | 湿除排水 | <0.01 |
|      | 烟气   | 8.7   |
| 平衡系数 |      | 1.14  |

3 结论

a) 由于燃煤中汞含量较低,该电厂大气汞污染排放浓度较低,超低排放改造前试验测量值为 1.87 μg/m<sup>3</sup>,超低排放改造后试验测量值为 0.46 μg/m<sup>3</sup>.

b) 超低排放改造前,煤燃烧及经过污染物控制单元后,35.0%的汞存在于灰中,29.5%的汞存在于石膏中,35.4%的汞从烟囱排出.

c) 超低排放改造后脱硫进水及湿式除尘器进水对汞平衡几乎没有影响,煤燃烧及经过污染物控制单元后,36.1%的汞存在于灰中,55.2%的汞存在于石膏中,8.7%的汞从烟囱排出.

参考文献 (References):

[1] 王树民,宋畅,陈寅彪,等. 燃煤电厂大气污染物近零排放技术研究及工程应用[J]. 环境科学研究,2015,28(4):487-494.  
WANG Shumin, SONG Chang, CHEN Yinbiao, et al. Technology research and engineering application of near-zero air pollutant emission coal-fired power plants[J]. Research of Environmental Sciences,2015,28(4):487-494.

[2] 国家发展和改革委员会,环境保护部,国家能源局. 煤电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)[EB/OL]. 北京:国家发展和改革委员会,2014. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/gwy/201409/t20140925\\_289556.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/gwy/201409/t20140925_289556.htm).

[3] 张军,郑成航,张涌新,等. 某 1000 MW 燃煤机组超低排放电厂烟气污染物排放测试及其特性分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(5):1310-1314.  
ZHANG Jun, ZHENG Chenghang, ZHANG Yongxin, et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1000 MW coal-fired power plant[J]. Proceeding of the CSEE,2016,36(5):1310-1314.

[4] 王树民,刘吉臻. 燃煤电厂烟气污染物近零排放工程实践分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(22):6140-6147.  
WANG Shumin, LIU Jizhen. Investigation of near-zero air pollutant emission characteristics from coal-fired power plants[J]. Proceeding of the CSEE,2016,36(22):6140-6147.

[5] 王树民,张翼,刘吉臻. 燃煤电厂细颗粒物控制技术集成应用及“近零排放”特性[J]. 环境科学研究,2016,29(9):1256-1263.  
WANG Shumin, ZHANG Yi, LIU Jizhen. Integrated application of fine particulate matter control technologies and their ‘near-zero emission’ characteristics in coal-fired power plants[J]. Research of Environmental Sciences,2016,29(9):1256-1263.

[6] SUI Z F, ZHANG Y S, PENG Y, et al. Fine particulate matter emission and size distribution characteristics in an ultra-low emission power plant[J]. Fuel,2016,185:863-871.

[7] 吴晓云,郑有飞,林克思. 我国大气环境中汞污染现状[J]. 中国环境科学,2015,35(9):2623-2635.  
WU Xiaoyun, ZHENG Youfei, LIN Kesi. Chinese atmospheric mercury pollution status[J]. China Environmental Science,2015,35(9):2623-2635.

[8] HU D, ZHANG W, CHEN L, et al. Mercury emissions from waste

- combustion in China from 2004 to 2010[J]. *Atmospheric Environment*, 2012, 46(2):359-366.
- [9] 惠霖霖, 张磊, 王祖光, 等. 中国燃煤电厂汞的物质流向与汞排放研究[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(8):2241-2250.
- HUI Mulin, ZHANG Lei, WANG Zuguang, *et al.* The mercury mass flow and emissions of coal-fired power plants in China[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(8):2241-2250.
- [10] 潘伟平, 张永生, 李文瀚, 等. 燃煤汞污染监测及控制技术[J]. *科技导报*, 2014, 32(33):57-60.
- PAN Weiping, ZHANG Yongsheng, LI Wenhan, *et al.* Mercury monitoring and controlling technologies for coal power plants[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(33):57-60.
- [11] LUO Z Y, HU C X, ZHOU J S, *et al.* Stability of mercury on three activated carbon sorbents[J]. *Fuel Processing Technology*, 2006, 87(8):679-685.
- [12] CAO Y, GAO Z Y, ZHU J S, *et al.* Impacts of halogen additions on mercury oxidation, in a slipstream selective catalyst reduction (SCR), reactor when burning sub-bituminous coal[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(1):256-261.
- [13] FABRIZIO S, RICCARDI C, AMEDEO L. Elemental mercury vapor capture by powdered activated carbon in a fluidized bed reactor[J]. *Fuel*, 2011, 90(6):2077-2082.
- [14] TAO Y, ZHUO Y Q, ZHANG L, *et al.* Impact of flue gas species and temperature on mercury oxidation[J]. *Tsinghua Science & Technology*, 2010, 15(4):418-425.
- [15] PAVLISH J H, SONDRAL E A, MANN M D, *et al.* Status review of mercury control options for coal-fired power plants[J]. *Fuel Processing Technology*, 2003, 82(2):89-165.
- [16] DRANGA B A, KOESER H. Increased co-oxidation activity for mercury under hot and cold site coal power plant conditions; preparation and evaluation of Au/TiO<sub>2</sub>-coated SCR-DeNO<sub>x</sub> catalysts[J]. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2015, 166/167:302-312.
- [17] ZHU Z W, ZHUO Y Q, FAN Y M, *et al.* Fate of mercury in flue gas desulfurization gypsum determined by Temperature Programmed Decomposition and Sequential Chemical Extraction[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2016, 4:169-176.
- [18] 程轲, 王艳, 薛志钢, 等. 《火电厂大气污染物排放标准》实施对燃煤电厂大气汞减排的影响[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(9):1369-1374.
- CHENG Ke, WANG Yan, XUE Zhigang, *et al.* Impacts of implementation of *Emission Standard of Air Pollutants for Thermal Power Plants* on reduction of atmospheric mercury emissions from coal-fired power plants[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9):1369-1374.
- [19] 赵磊, 周洪光. 超低排放燃煤火电机湿式电除尘器细颗粒物脱除分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(2):468-473.
- ZHAO Lei, ZHOU Hongguang. Particle removal efficiency analysis of WESP in an ultra-low emission coal-fired power plant[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(2):468-473.
- [20] 王仕龙, 陈英, 韩平, 等. 燃煤电厂电除尘 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 的排放控制: I. 电除尘选型及工业应用[J]. *科技导报*, 2014, 32(33):23-33.
- WANG Shilong, CHEN Ying, HAN Ping, *et al.* PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> emission control by Electrostatic Precipitator (ESP) for coal-fired power plants: I. ESP sizing and applications[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(33):23-33.
- [21] 崔占忠, 龙辉, 龙正伟, 等. 低低温高效烟气处理技术特点及其在中国的应用前景[J]. *动力工程学报*, 2012, 32(2):152-158.
- CUI Zhazhong, LONG Hui, LONG Zhengwei, *et al.* Technical features of lower temperature high efficiency flue gas treatment system and its application prospects in China[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2012, 32(2):152-158.
- [22] 中国环境保护产业协会电除尘委员会. 燃煤电厂烟气超低排放技术[M]. 北京:中国电力出版社, 2015.
- [23] US EPA. Method 30 B, Determination of total vapor phase mercury emissions from coal-fired combustion sources using carbon sorbent traps [EB/OL]. Washington DC: US EPA, 2016. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2016-06/documents/meth30b.pdf>.
- [24] CHENG C M, HACK P, CHU P, *et al.* Partitioning of mercury, arsenic, selenium, boron, and chloride in a full-scale coal combustion process equipped with selective catalytic reduction, electrostatic precipitation, and flue gas desulfurization systems[J]. *Energy Fuels*, 2009, 23(10):4805-4816.
- [25] YOKOYAMA T, ASAKURA K, MATSUDA H, *et al.* Mercury emissions from a coal-fired power plant in Japan[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 259(1/2/3):97-103.
- [26] 郑楚光, 张军营, 赵永椿, 等. 煤燃烧汞的排放及控制[M]. 北京:科学出版社, 2010.
- [27] TANG S L, WANG L N, FENG X B, *et al.* Actual mercury speciation and mercury discharges from coal-fired power plants in Inner Mongolia, Northern China[J]. *Fuel*, 2016, 180(15):194-204.
- [28] HOWER J C, SENIOR C L, SUUBERG E M, *et al.* Mercury capture by native fly ash carbons in coal-fired power plants[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2010, 36(4):510-529.
- [29] 陈义珍, 柴发合, 薛志钢, 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.
- CHEN Yizhen, CHAI Fahe, XUE Zhigang, *et al.* Study on mercury emission factors for coal-fired power plants[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, 19(2):49-52.
- [30] HALSTEAD J A, ARMSTRONG R, POHLMAN B, *et al.* Nonaqueous heterogeneous oxidation of sulfur dioxide[J]. *Journal of Physical Chemistry*, 2002, 94(8):3261-3265.
- [31] ZHUANG Y, MARTIN C, PAVLISH J, *et al.* Cobenefit of SO<sub>3</sub> reduction on mercury capture with activated carbon in coal flue gas[J]. *Fuel*, 2011, 90(10):2998-3006.