

燃煤机组超低排放改造对汞排放的影响

华晓宇¹ 章良利² 宋玉彩³ 吕洪炳³

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司 浙江 杭州 310052; 2. 浙江浙能兰溪发电有限公司 浙江 金华 321100;
3. 浙江浙能富兴燃料有限公司 浙江 杭州 310005)

摘要: 针对超低排放课题下汞排放的研究,采用标准安大略法对浙江某发电厂两台燃煤机组实施烟气超低排放改造并对改造前后进行汞排放测试,着重分析了超低排放改造后污染控制设备的协同脱汞作用。结果表明总汞脱除率得到了显著提高,主要是改变了烟气汞形态分布,提升了 Hg^{2+} 比例; SCR(催化还原脱硝)影响汞的形态分布,但不改变总汞含量; ESP(电除尘)能够大量地降低汞浓度; WFGD(湿法脱硫)对气相中氧化汞的脱除效果较好, WFGD 对 Hg^0 没有脱除效果。从测试结果来看,两台机组总汞脱除率平均提升了 13.9%, Hg^{2+} 比例平均提升 153.9%。证实了利用超低排放技术改造后污染物控制设备(除尘装置、脱硝装置、脱硫装置)协同脱汞是比较经济有效的措施。

关键词: 燃煤机组; 超低排放; 汞排放
中图分类号: X773 文献标识码: B

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.07.018

引言

重金属污染物汞对人体造成永久性伤害,引起了研究者的关注。燃煤是最大的人为汞排放源,虽然燃煤烟气中汞浓度很低,但燃煤消耗量大。随着 GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》的颁布,汞排放问题正式列入了控制目标,这必将对我国涉汞工业环保设施提出新的更高的要求。超低排放课题下汞排放的研究越来越受到重视。本研究通过测试超低排放改造后机组脱硝装置进出口、干式电除尘器进出口、脱硫装置出口、湿式电除尘器进出口与烟囱总排放口的烟气参数情况,开展了重金属污染物 Hg 的排放研究,验证了机组尾部环保设备对汞的综合处理效果,为电厂处理重金属汞提供很好的借鉴价值。

1 汞形态分布

工业所排放烟气中汞主要有三种形态:元素汞

(Hg^0)、氧化汞(Hg^{2+})和颗粒汞(Hg^P)。各种汞形态的物理、化学性质不同, Hg^0 在空气污染物控制设备和除尘设备操作温度和高压下具有较高的饱和蒸汽压力,极易挥发且难溶于水,因而湿法脱硫系统和颗粒物控制设备系统很难捕获元素态汞,元素汞几乎全部排放到大气中; Hg^{2+} 有多种化合物,较稳定,多数易溶于水(HgS 不溶),易附着在颗粒物上,因此排放到大气中的氧化态汞可以被常规的污染物控制设备除去,例如湿式烟气脱硫装置、惯性除尘器、静电除尘器和布袋除尘器; Hg^P 通常与颗粒物绑定,也易于被除尘设备收集且其在大气中的停留时间很短^[1-2]。汞在燃烧过程和烟气中的转化过程如图 1 所示。

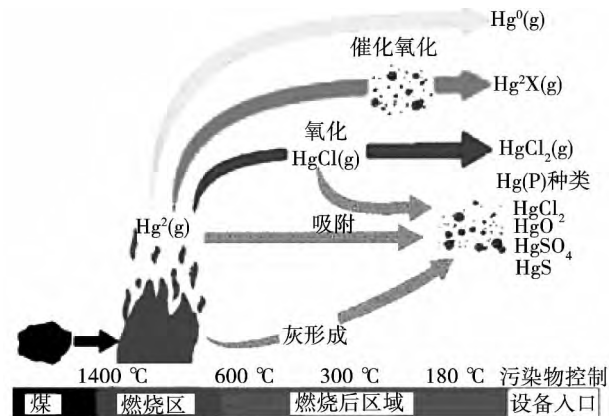


图 1 汞在燃烧过程和烟气中的转化过程

Fig. 1 Conversion process of mercury in the combustion process and flue gases

2 汞测试试验

2.1 燃煤机组(7号、8号)改造概况

测试机组为 1 000 MW 超超临界燃煤机组,同步

收稿日期: 2016-03-14; 修订日期: 2016-04-14

作者简介: 华晓宇(1984-),女,浙江杭州人,浙江浙能技术研究院有限公司高级工程师。

配套建有 SCR 脱硝系统、干式静电除尘器及石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统。脱硝系统改造: 对锅炉低氮燃烧系统做了初步调整及 SCR 装置增加一层催化剂; 除尘系统改造: 增设 GGH (两段式管)、低温电除尘器改造及高频电源改造、增设湿式静电除尘器等技

术措施; 脱硫系统改造: 新增 1 层托盘, 同时将喷淋系统改造为交互式喷淋层。7、8 号机组实施超低排放后, 污染物排放浓度比原设计指标和重点地区排放标准大大降低, 如表 1 所示。

表 1 超低排放目标值与原设计指标和重点地区排放标准对比表

Tab.1 Table of the comparison of the target value of ultra low emissions and the original design index with the emissions standard for important areas

污染物项目	设计基准	环保系统原设计排放指标	重点地区排放标准	超低排放目标值
烟尘	含灰量 18% , 烟尘浓度 23.4 mg/Nm ³	≤30 mg/Nm ³	≤20 mg/Nm ³	≤5 mg/Nm ³
二氧化硫	含硫量 0.8% , SO ₂ 浓度 1 745 mg/Nm ³	≤108 mg/Nm ³	≤50 mg/Nm ³	≤35 mg/Nm ³
氮氧化物	SCR 入口 NO _x 浓度 300 mg/Nm ³	≤70 mg/Nm ³	≤100 mg/Nm ³	≤50 mg/Nm ³
汞及化合物	原煤含汞 0.2 ng/g , 出口 25 μg/Nm ³	—	≤30 μg/Nm ³	≤5 μg/Nm ³

2.2 汞测试方法、标准及测点位置

本次测试主要关注了脱硝装置进出口、干式电除尘器进出口、脱硫装置出口、湿式电除尘器进出口与烟囱总排放口等几个主要位置的烟气参数情况如图 2 (a)、图 2 (b) 所示, 开展了重金属污染物 Hg 的测试工作。监测点位置为图 2 中 1 ~ 7 号点。

采样设备与汞的分析设备采用 XC - 30B 自动汞污染源采样器 (0.5 ~ 100 000 ng) 与 RA - 915M 测汞仪 (0.01 ~ 2 000 ug/L) 。XC - 30B 使用碘化碳吸附管进行的汞排放采样, 烟道气经由吸附管引入, 并且出现于气流中的任何汞都被吸附剂捕获。这些吸附管是部分地装满激活的木炭 (碳) 并被玻璃纤维或玻璃棉绝缘分隔成 2 个或多个区段。 “前” 区段经设计用于捕获所有出自来源处的汞, 第二区段是个缓冲区, 其经设计用于捕获在第一区段未捕获到的任何汞。SCR 后和 ESP 前因为烟尘含量较大, 采样过程抽气流量采用 300 ml/min 的流量。ESP 后的各点采用 500 ml/min 的流量。

汞测试对象为气态总汞, 测量分析方法为冷原子吸收光谱法, 测试方法为《吸附管法测定燃煤污染源中气态汞排放测试方法》(EPA Method 30B) 和《固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法》(GB/T 16157 - 1996) [3~4]; 汞采样系统图如图 3 所示, 测试系统主要由吸附管、采样探头、除湿器、真空泵、气体流量计、样品流量计和控制器、气压表、数据记录器、吸附管加入气态汞系统和样品分析

仪等组成 [5]; 测试阶段进出炉各测点所样品汞含量如表 2 所示, 汞平衡率在 80% ~ 120% 范围内即可认为此次采样结果可以接受 [6~7]。

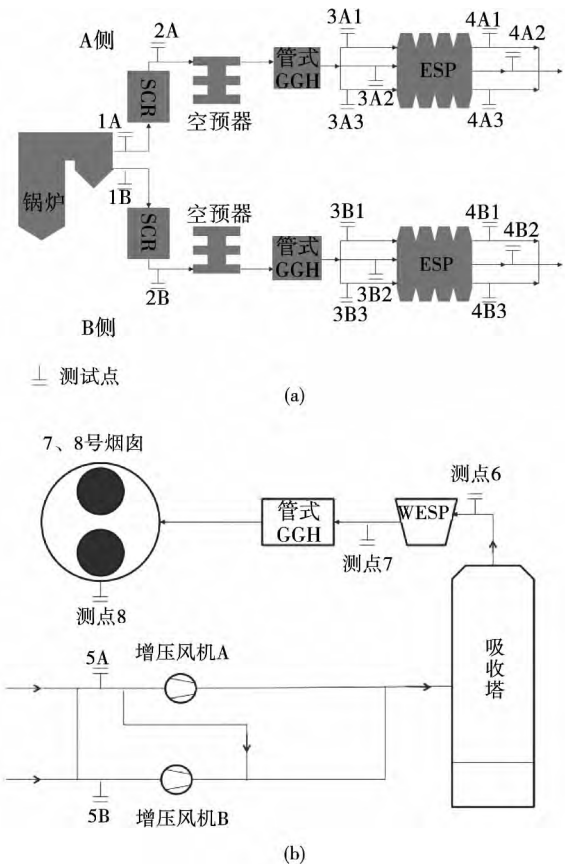


图 2 测试点位置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the locations of the test and measuring points

表 2 各测点样品汞含量

Tab.2 Mercury contents of the samples at various measuring points

	入炉汞	出炉汞	汞平衡率 ^[6-7]	FGD 后 Hg ^T	飞灰	石膏	废水
7 号炉改造前 1 000 MW	13.5	11.39	84.4%	2.89	8.2	0.1	0.2
7 号炉改造后 1 000 MW	45.9	37.79	82.3%	6.29	30.2	1.2	0.1
8 号炉改造前 1 000 MW	11	11.1	100.9%	1.5	9.2	0.3	0.1
8 号炉改造后 1 000 MW	10.3	9.89	96%	0.59	8.4	0.7	0.2
8 号炉改造后 500 MW	8.8	8	90.9%	0.4	7.4	0.1	0.1

2.3 计算公式

总汞脱除率计算公式:

$$Y_1 = (C_1 - C_2) / C_1 \quad (1)$$

式中: Y_1 —总汞脱除率, %; C_1 —SCR 前汞浓度, $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$; C_2 —WFGD 后汞浓度, $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。

汞平衡率计算公式:

$$Y_2 = C_3 / C_4 \quad (2)$$

式中: Y_2 —汞平衡率, %; C_3 —出炉汞浓度; C_4 —入炉汞浓度, $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$ 。

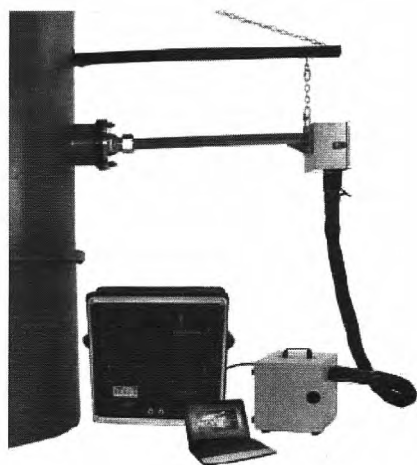


图 3 汞采样系统图

Fig.3 Diagram of a mercury sampling system

3 结果与讨论

3.1 气态汞排放测试结果

机组汞输入输出值如表 2 所示,根据式(2)计算得到汞平衡率均在可接受范围内。经过计算后各测点处烟气中的汞形态测试结果如表 3 所示,该测试结果中的烟气汞浓度均已折算至标准状况(0 °C、760 mmHg)干烟气条件,且氧量(取 DCS 中空预器

后平均氧量)折算至标准氧量 6%。此次对 8 号机组的汞排放测试分别选择了 500 MW 和 1 000 MW 两个工况。比较表 3 ~ 表 5 可知,改造前 WFGD 后测点处 Hg^{P} 、 Hg^0 和 Hg^{2+} 浓度分别为 0.58、0.57 和 0.02 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$,共计 1.17 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$,总汞脱除率为 88.4%,改造后对应浓度为 0.06、0.06 和 0.03 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$,共计 0.12 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$,总汞脱除率为 97.7%,超低排放改造后总汞脱除率提升了 9.3%,当机组运行在 500 MW 工况期间对应的浓度为 0.024、0.21 和 0.03 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$,共计 0.48 $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$,总汞脱除率为 96% 提升了 7.7%。

8 号机组改造后尾部烟道中汞浓度得到明显降低,1 000 MW 工况下设备改造对汞的去除效果显著优于 500 MW 工况时。超低排放改造后 SCR 装置增加催化剂使得 SCR 后测试点处的 Hg^{2+} 比例呈现增加的现象, Hg^{2+} 比例由 67.5% 提高到 153%。7 号机组改造后总汞浓度远大于改造前的总汞浓度,可能是由于改造后燃用的煤种发生了变化,该煤种含汞量比改造前使用的煤种含汞量要大很多。7 号机组改造前 SCR 后测点处的 Hg^{2+} 比例为 8.2%,改造后为 163%, Hg^{2+} 比例提升了 154.8%,总汞脱除率提升了 18.55%,提高了飞灰吸附 Hg^{2+} 的可能性。

表 3 改造前电厂 8 号机组尾部烟道汞浓度($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

Tab.3 Mercury concentration in the flue gas duct in the tail portion of No.8 unit in a power plant before the reconstruction($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

	SCR 前	SCR 后	ESP 前	ESP 后	WFGD 后
Hg^{P}	5.03	4.78	5.06	0.40	0.58
Hg^0	2.81	1.06	0.60	0.10	0.57
Hg^{2+}	2.22	3.72	4.46	0.29	0.02
合计	10.06	9.56	9.58	0.79	1.17

表 4 改造后电厂 8 号机组尾部烟道汞浓度
($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

Tab4 Mercury concentration in the flue gas duct in the tail portion of No. 8 unit in a power plant after the reconstruction($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

	SCR 前	SCR 后	WFGD 后
Hg ^p	2.68	2.68	0.06
Hg ⁰	2.02	1.01	0.03
Hg ²⁺	0.66	1.67	0.03
合计	5.36	5.36	0.12

表 5 改造后 500 MW 电厂 8 号机组尾部烟道汞浓度
($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

Tab.5 Mercury concentration in the flue gas duct in the tail portion of No. 8 unit in a power plant at a load of 500 MW after the reconstruction($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

	SCR 前	SCR 后	ESP 前	ESP 后	WFGD 后
Hg ^p	6.15	5.22	5.83	3.07	0.24
Hg ⁰	4.42	0.69	0.87	0.38	0.21
Hg ²⁺	1.73	4.53	4.96	2.69	0.03
合计	12.3	10.44	11.66	6.14	0.48

表 6 改造前电厂 7 号机组尾部烟道汞浓度
($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

Tab.6 Mercury concentration in the flue gas duct in the tail portion of No. 7 unit in a power plant before the reconstruction($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

	SCR 前	SCR 后	ESP 前	ESP 后	WFGD 后
Hg ^p	5.16	4.56	4.28	2.38	1.43
Hg ⁰	2.37	1.53	1.41	0.92	1.28
Hg ²⁺	2.79	3.02	2.87	1.45	0.15
合计	10.32	9.11	8.56	4.75	2.86

表 7 改造后电厂 7 号机组尾部烟道汞浓度
($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

Tab.7 Mercury concentration in the flue gas duct in the tail portion of No. 7 unit in a power plant after the reconstruction($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$)

	SCR 前	SCR 后	WFGD 后
Hg ^p	13.96	15.49	1.99
Hg ⁰	9.41	3.55	1.89
Hg ²⁺	4.54	11.95	0.10
合计	27.91	30.99	3.98

3.2 燃烧产物中汞的分布

图 4 为电厂 7 号机组排放产物中汞排放量,汞在底渣、ESP 灰、脱硫石膏及烟气中的分布情况。比较图 4(a)、图 4(b)可知,底渣中的汞很少,改造前后均不到 0.1%,这是因为锅炉底渣温度很高;汞在 ESP 飞灰中分布最多,改造前后分别为 42.9% 和 72.7%,改造后 SCR 氧化 Hg⁰使其转化为 Hg²⁺比例增大,烟气中 Hg²⁺被烟道中飞灰所吸附并在除尘器中随着飞灰的被捕集而去除,有利于整体机组中总汞的脱除;其次是分布在石膏浆液或石膏和废水中,改造前后分别为 18% 和 4.2%,因为 Hg²⁺极易溶于水溶液中,该部分汞含量主要形态为 Hg²⁺,改造后 Hg²⁺含量相比于改造前减少了 76.6%;烟气排放分别主要形态为 Hg⁰,改造前后分别占 39.1% 和 22.6%,改造后 Hg⁰含量均比改造前少,而 Hg^p含量明显增加,改造后机组设备整体效果表现为促进 Hg⁰转化为 Hg²⁺的反应。

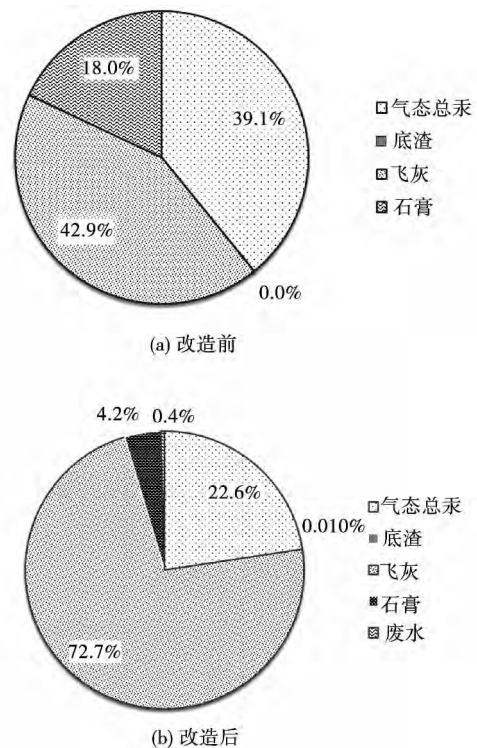


图 4 改造前、后 7 号机组排放产物中汞排放量
Fig.4 Mercury emissions in the emission products from unit No. 7 before and after the reconstruction

图 5 为 1 000 MW 负荷和 500 MW 负荷下,电厂 8 号机组排放产物中汞在底渣、ESP 灰、脱硫石膏及烟气中的分布情况。比较图 5(a)、图 5(b)、图 5

(c) 可知,底渣中的汞很少,改造前后均低于 0.1%,底渣中汞几乎不存在;汞在 ESP 底灰中分布最多,改造前后分别为 81.1% 和 89.9%,改造后汞含量增加了 10.8%,500 MW 工况下为 86.6%,改造后增加了 6.8%,机组改造后相较于 500 MW 工况,1 000 MW 负荷工况下颗粒态汞含量增加明显,高负荷工况有利于改造后的 8 号机组中 Hg^0 转化为 Hg^{2+} 的进程;其次是分布在石膏和废水中,改造前后分别为 7.3% 和 9.6%,改造后增加了 31.5%,改造后机组设备促进 Hg^{2+} 的生成,有利于烟气中汞的脱除;烟气排放主要形态为 Hg^0 ,改造前后分别占 11.5% 和 2.5%,改造后减少了 78.3%,500 MW 工况下为 8.7%,改造后减少了 24.3%,改造后烟气出口处气态总汞含量减少,减少了电厂向大气中排放汞总量。

3.3 烟气净化设施的影响

烟气中的汞浓度及其形态分布受到多种因素的影响,如煤的性质、燃烧的工况等,烟气中汞的形态分布极大地影响了现有污染物控制装置(如 SCR、ESP 和 WFGD 等)对汞的脱除率^[8-9]。

3.3.1 脱硝装置 SCR 的影响

SCR 脱硝系统对烟气中汞的总量影响不大^[8],但由于 SCR 脱硝系统催化剂中 V_2O_5 和 TiO_2 产生的作用,当烟气通过催化剂层时,部分元素态汞与烟气中的酸性气体(如 HCl、HF 等)、氯气反应,被氧化成了氧化态汞^[9]。SCR 工艺本身虽然不能除汞,但能将 Hg^0 氧化成相对容易脱除的 Hg^{2+} ,从而增加后续烟气除尘、脱硫系统对汞的脱除率,达到协同脱汞的效果^[10-11]。7 号、8 号机组改造前后 SCR 对 Hg^0 氧化率和现有污染物控制装置的汞脱除率如表 4 所示。由表 8、表 9 可知,改造之后总 Hg 脱除率分别增加了 9.2% 和 13.3%,SCR 对 Hg^0 氧化率分别增加了 4% 和 32%。8 号机组 500 MW 工况时总 Hg 脱除率和 SCR 对 Hg^0 氧化率分别增加了 7.7% 和 25%,高负荷工况不利于 SCR 对 Hg^0 氧化,降低了总 Hg 脱除率。

表 8 8 号机组烟气净化设施的影响
Tab.8 Influence of the flue gas purification facility in unit No. 8

	改造前	改造后	改造后(500 MW)
总 Hg 脱除率/%	88.4	97.6	96.1
SCR 对 Hg^0 氧化率/%	34	38	59

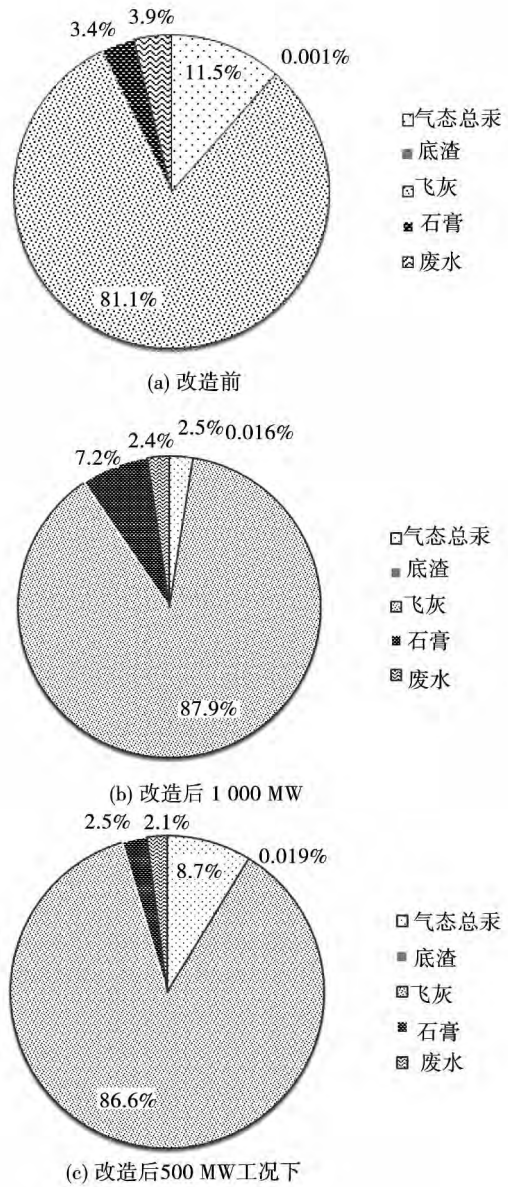


图 5 汞在 8 号机组排放产物中的分布
Fig.5 Distribution of mercury in the emission products from No. 8 unit

表 9 7 号机组烟气净化设施的影响
Tab.9 Influence of the flue gas purification facility in unit No. 7

	改造前	改造后
总 Hg 脱除率/%	72.4	85.7
SCR 对 Hg^0 氧化率/%	12	44

3.3.2 除尘器的影响

现有的除尘器分为静电除尘器(ESP)和布袋除尘器(FF)2 种,除尘器对汞的脱除主要是将烟气中

大部分颗粒态汞捕获,同时部分氧化态汞由于吸附在细颗粒物表面也被除尘器捕获,但是除尘器对元素态汞仍然无法脱除^[12-13]。由表 3、表 5 的数据分析可得,8 号机组改造前 ESP 对总 Hg 脱除率为 92%,改造后 500 MW 工况下汞脱除率为 50%,ESP 捕获飞灰直接造成颗粒汞的比例降低,颗粒汞比例越大,ESP 对尾部烟气汞形态的影响越大;由表 6 可知 7 号机组改造前 ESP 对总 Hg 脱除率为 44%,改造后 7 号机组汞颗粒比例增加较大,ESP 对汞形态影响相对显著。

8 号机组超低排放改造后 1 000 MW 负荷下 SCR 后测点 Hg⁰氧化率为 38%,500 MW 负荷下 Hg⁰氧化率为 59%,低负荷下 Hg⁰氧化率更高一些。ESP 后总汞含量降低了 50% 左右,其中各形态汞浓度均有所下降。电厂中 SCR 主要是改变了烟气中汞的形态分布及其含量,基本不影响总汞含量^[8,11]。ESP 主要是降低了烟气中总汞浓度,对汞形态分布影响较小^[14-15]。

3.3.3 脱硫装置 WFGD 的影响

WFGD 对气相中氧化汞的脱除效果较好,主要是因为 Hg²⁺ 具有水溶性,易于在脱硫过程中被吸收液吸收并富集到脱硫剂上而脱除。WFGD 的 Hg²⁺ 脱除效率可达 80% ~ 95%,WFGD 的总汞脱除率主要由烟气中 Hg²⁺ 占总汞的比例决定,优化协同脱汞的主要策略是防止 Hg²⁺ 的还原在 10% ~ 90% 范围内^[13-14]。WFGD 对 Hg⁰非但没有脱除能力,反而由于亚硫酸盐的作用使得脱硫浆液中的 Hg²⁺ 部分被还原,导致 Hg⁰浓度在 WFGD 设备出口有上升的趋势^[15]。由表 3 ~ 表 5 可知,8 号机组改造前 WFGD 对 Hg²⁺ 脱除率为 99%,改造后 Hg²⁺ 脱除率 95.5%,改造后 500 MW 工况时 Hg²⁺ 脱除率为 98.2%;由表 5、表 6 可知,7 号机组改造前 WFGD 对 Hg²⁺ 脱除率为 94.6%,改造后 Hg²⁺ 脱除率 97.8%。

殷立宝^[8,13-14] 等人曾探讨了 SCR、ESP/FF、WFGD 这三种设备的联合脱汞效率。此三种技术若原厂已安装,则除汞效率可观,成本也较合算,可以进行推广使用,并且因 Hg²⁺ 溶于水,WFGD 能脱除烟气中约 81.25% 的 Hg²⁺,ESP + WFGD 的组合平均脱汞率约为 44.41%;而 SCR + ESP/FF + WFGD 组合的平均脱汞率约为 71.48%。

4 结 论

利用超低排放改造后污染物控制设备(除尘装置、脱硝装置、脱硫装置)协同脱汞经济有效,是当前超低排放课题中汞控制研究的重点。该电厂机组经超低排放改造后总汞脱除率提升了 13.9%,主要由于烟气汞形态分布发生了变化,其中 Hg²⁺ 比例提升 153%。SCR 影响汞的形态分布,但不改变总汞含量,高负荷工况不利于 SCR 对 Hg⁰ 氧化。ESP 能够大量地降低汞浓度,超低排放改造后 7 号机组汞颗粒比例显著增大,ESP 对汞含量影响尤为突出,有利于整体机组中总汞的脱除。WFGD 对气相中氧化汞的脱除效果较好,WFGD 对 Hg⁰ 没有脱除效果,由于亚硫酸盐的作用使得 Hg⁰ 浓度在 WFGD 设备出口有上升的趋势。为满足国家未来更严格的环保要求,可考虑开发一些廉价的汞脱除技术与 SCR + ESP/FF + WFGD 相结合,在较低的设备投资和运行成本下,获得较高的综合汞脱除效率。

参考文献:

- [1] WANG Yunjun. Comparison of mercury removal performance of bag filter and electrostatic precipitator in coal fired power plant [J]. Journal of fuel chemistry. 2008, 36(1): 23-30.
- [2] WU Chengli. Study on mercury reprecipitation and inhibition in coal fired flue gas [D]. Hefei: Anhui University of Science and Technology environmental engineering. 2010: 1-144.
- [3] US EPA. Method 30b-determination of total vapor phase mercury emissions from coal fired combustion sources using carbon sorbent traps [S].
- [4] National Environmental Protection Agency. GBPT 16157-1996 Particulate matter determination in exhaust gas of stationary pollution source and sampling method of gaseous pollutant [S].
- [5] ZHAO Shibin. Analysis of mercury emissions from flue gas of coal fired power plant based on 30B method [J]. Resource Saving and Environmental Protection 2014(05): 71-72.
- [6] Zhou Z J, Liu X W, Bo Z, et al. Effects of existing energy saving and air pollution control devices on mercury removal in coal-fired power plants [J]. Fuel Processing Technology, 2015, 131: 99-108.
- [7] 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(1-3): 97-103.
- [8] 胡长兴, 周劲松, 何胜, 等. SCR 氮氧化物脱除系统对燃煤烟气汞形态的影响 [J]. 热能动力工程 2009, 24(4): 499-502.

HU Chang-xing ,ZHOU Jin-song ,HE Sheng ,et al. Influence of the SCR (Selective Catalytic Reduction) -based NOx removal system on the mercury morphology in coal-fired flue gases [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power. 2009 ,24 (4) : 499 - 502.

[9] YIN Libao ,GAO Yuqun. Mercury emissions from coal fired power plants in China [N]. Chinese Journal of Electrical Engineering. 2013 33(29) : 1 - 11.

[10] YIN Deshi ,LI Jianguo ,YUAN Jianguo. Analysis of atmospheric mercury emission characteristics of typical coal fired power plants in China [J]. Power Station System Engineering. 2014(05) : 50 - 54.

[11] ZHANG Jun ,LI Zhichao ,DUAN Yufeng. Emission and removal of mercury from coal fired power plant [J]. Combustion Science and Technology 2015 21(5) : 415 - 420.

[12] 胡长兴 ,周劲松 ,何 胜 ,等. 静电除尘器和湿法烟气脱硫装置对烟气汞形态的影响与控制 [J]. 动力工程学报 ,2009 ,29 (4) : 400 - 404.

HU Chang-xing ,ZHOU Jin-song ,HE Sheng ,et al. Influence of electrostatic precipitators and wet-method flue gas desulfurization devices on the mercury morphology in flue gases and its control [J]. Journal of Power Engineering. 2009 29(4) : 400 - 404.

[13] 王运军 ,段钰锋 ,杨立国 ,等. 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.

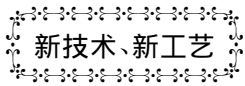
WANG Yun-jun ,DUAN Yu-feng ,YANG Li-guo ,et al. Experimental study of mercury removed by using wet-method flue gas desulphurization devices in combination with electrostatic precipitators [J]. Proceedings of China Electric Machinery Engineering. 2008 28(29) : 64 - 69.

[14] Srivastava R K ,Nick H ,Blair M ,et al. Control of mercury emissions from coal-fired utility boilers [J]. Environmental Science & Technology 2006 40(5) : 1385 - 93.

[15] 徐 玮 ,王 娟 ,王文华. 燃煤烟气的除尘脱硫处理对不同形态汞的去除效果初探 [J]. 华东电力 2010 38(1) : 47 - 50.

XU Wei ,WANG Juan ,WANG Wen-hua. Exploratory study of mercury removal effectiveness in various morphology and states during the dust removal and desulphurization treatment of coal-fired flue gases [J]. East China Electric Power. 2010 38(1) : 47 - 50.

(刘 瑶 编辑)



DCNS 将提供埃及海军 1 艘多用途护卫舰

据《Warship Technology》2015 年 5 月刊报道 ,DCNS 与埃及国防部签订合同 ,向埃及海军提供 1 艘 FREMM 多用途护卫舰。

FREMM 多用途护卫舰是由意大利和法国共同研制的高性能护卫舰。按照计划 ,从 2013 年首舰服役起 , 2914 年至 2022 年法国海军每年将入役 1 艘 FREMM 护卫舰 ,共计入役 11 艘。意大利海军也于 2012、2013 和 2015 年每年入役 1 艘 FREMM 护卫舰 ,共计入役 3 艘。

FREMM 多用途护卫舰的满载排水量为 6 096 t ,长度为 142.2 m ,航速为 27.5 节 ,15 节航速下的续航力为 6 000 海里 ,定员 108 人。

FREMM 护卫舰将由 CODLOG(柴油机电力推进或燃气轮机联合) /CODLAG(柴油机电力推进和燃气轮机联合) 推进装置驱动。燃气轮机作为全速机组 ,柴油机 - 电力装置作为巡航机组。

该推进装置采用燃气轮机是世界上最先进船舶燃气轮机 LM2500 + G4。

航改型船舶燃气轮机 LM2500 + G4 的技术规范和规定性能:

研制厂商	推出年份	功率/kW	耗油率/kJ · kWh ⁻¹	效率/%	约重/kg	总体尺寸 长 × 宽 × 高/m
GE Marine	2005	35 338	0.214	39.5	5 237	6.7 × 2.1 × 2.1

(吉桂明 摘译)

pump having a large flow rate $1.4Q_d$, the magnitude of the returning flow vortices at the inlet was 0.45. It has been found that with an increase of the flow rate, the magnitude of the returning flow vortices will decrease and the image and numerical values can show the structure and magnitude of the vortices in a comprehensive way. The influence of the returning flow vortices on the pressure and speed on the inducer wheel was also simulated and analyzed. Due to the hydraulic losses arisen from the returning flow vortices, the pressure at the leading edge of the inlet of the inducer wheel went down and a small part of the low pressure zone emerged at the leading edge of the inlet of the inducer wheel, thus enhancing the possibility of cavitation on the inducer wheel. On the basis of an analysis of the unfavorable flow at the inlet of a high speed pump, the foregoing can offer theoretical reference for design and optimization of high speed centrifugal pumps. **Key words:** high speed centrifugal pump, returning flow vortex, inducer wheel, numerical simulation

燃煤机组超低排放改造对汞排放的影响 = **Influence of the Ultra Low Emission Modification of a Coal-fired Unit on the Mercury Emissions** [刊, 汉] HUA Xiao-yu (Zhejiang Zheneng Technology Research Institute Co. Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310052), ZHANG Liang-li (Zhejiang Zheneng Lanxi Power Generation Co. Ltd., Jinhua, China, Post Code: 321100), SONG Yu-cai, LU Hong-bing (Zhejiang Zheneng Fuxing Fuel Co. Ltd., Hangzhou, China, Post Code: 310005) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2016, 31 (7). - 110 ~ 116

It is fully understood that the law governing the distribution and morphology of mercury in the ultra low emission technology is critical for studying the mercury control problem when the new ultra low emission technology is applied in coal-fired power plants. In order to study the mercury emissions given in the ultra low emission tasks, the standard Ontario method was employed to measure and test the mercury emissions before and after the flue gas ultra low emission reconstruction was carried out in two coal-fired units in a power plant in Zhejiang province with its emphases being given to analyzing the cooperative mercury removal action of the pollution control equipment items after the ultra low emission reconstruction had been made. It has been found that the total mercury removal rate obtains a remarkable improvement, which mainly changes the distribution of mercury morphology in flue gases and increases the Hg^{2+} proportion. The selective catalytic reduction will influence the distribution of mercury morphology, however, will not change the total mercury content. The electrostatic precipitators can lower the mercury concentration by a great margin. The wet-method flue gas desulfurization can achieve a relatively good result in removing the mercury oxide in the gas phase but have no removal effect on the Hg^0 . It can be seen from the measuring and testing results that the total mercury removal efficiency of the two units has averagely enhanced by 13.9% and the Hg^{2+} proportion by 153.9%, therefore, verifying that the use of pollution control equipment items (dust removal devices, denitrification devices and desulfurization devices) to cooperatively remove the mercury after an ultra low emission reconstruction is regarded as an comparatively economic and effective measure. **Key words:** coal-fired unit, ultra low emission, mercury emissions