

660 MW 燃煤机组汞迁移转化特性研究

陈崇明¹, 党志国², 车凯¹, 韩忠阁¹, 张立军¹

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021; 2. 河北国华沧东发电有限责任公司, 河北 沧州 061003)

摘要:燃煤电厂是我国汞排放的主要源头。为表征燃煤电厂中汞的脱除性能,以某 660 MW 燃煤机组为例,系统研究了 500 MW 和 600 MW 工况下,汞在选择性催化还原脱硝装置(SCR)、静电除尘器(ESP)、湿法脱硫(FGD)以及湿式除尘器(WESP)等设施中的迁移特性。结果表明,各测试位置的汞质量平衡率分别为 72.01%~90.05%、79.14%~96.36%,验证了测试准确性;烟气汞是主要的排放形式,其次为排灰、石膏,脱硫废水和炉渣排放占比很小;脱硝催化剂促进单质汞向氧化汞和颗粒汞的转化率超过 40%,但对总汞减排不明显;ESP 可以去除全部颗粒态汞,但因对单质汞和氧化汞的脱除率较低,总汞脱除率最高仅为 33.73%;600 MW 工况下因浆液中 HSO₃⁻还原氧化汞作用更强,导致单质汞浓度增加更明显,FGD 和 WESP 对氧化汞的累计脱除率达 91%以上。沿程环保设施对总汞的脱除效率高于 59%,SCR 下游设施对单质汞和氧化汞的协同脱除率最低分别为 6.16%、94.12%,表明 SCR 对单质汞的氧化是降低汞排放的关键。机组排放的烟气总汞质量浓度最高为 3.66 μg/m³,小于国家排放标准。

关键词:燃煤机组;汞;迁移转化;脱硝催化剂;静电除尘器;湿法脱硫

中图分类号:X501

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)04-0157-07

Research on migration and transformation characteristics of mercury in 660 MW coal-fired unit

CHEN Chongming¹, DANG Zhiguo², CHE Kai¹, HAN Zhongge¹, ZHANG Lijun¹

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Hebei Guohua Cangdong Generation Co., Ltd., Cangzhou 061003, China)

Abstract: Coal-fired power plants is the main source for mercury emission. In order to characterize the removal characteristics of mercury, a 660 MW coal-fired unit was taken as an example. The migration and transformation characteristics of mercury in selective catalytic reduction equipment(SCR), electrostatic precipitator(ESP), flue gas desulfurization (FGD) and wet electrostatic precipitator(WESP) was systematically studied under 500 MW and 600 MW. The results show that the mercury mass balance rate in test locations are 72.01%–90.05% and 79.14%–96.36% respectively, which verify the accuracy of test results. Flue gas mercury is the main discharge form, followed by ash and gypsum. The proportions of mercury emission from FGD waste water and slag account for a small proportion. The conversion rate elemental mercury to oxidized mercury and particulate mercury by SCR catalysts is beyond 40%, but the total mercury reduction is insignificant, and higher ammonia consumption can reduce the conversion rate. ESP can remove all particulate mercury, but the total mercury removal efficiency is less than 33.73% because of lower removal of elemental and oxidized mercury. Because reduction effect of HSO₃⁻ is stronger for oxidized mercury to element, the elemental mercury concentration increases more obviously under 600 MW condition. And the cumulative removal efficiency of oxidized mercury by FGD and WESP reaches over 91%. Total mercury reduction by all the environmental protection facilities is more than 59%. However, collaborative lowest removal efficiency of elemental and oxidized mercury are 6.16% and 94.12% by downstream facilities of SCR, which indicate that mercury oxidation by SCR is the key to reducing mercury emission. Finally, the total mercury concentration in exhaust gas is less than 3.66 μg/m³, which is below the national emission standard.

Key words: coal-fired unit; mercury; migration and transformation; SCR catalysts; ESP; FGD

收稿日期:2021-03-31;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.CE21033102

作者简介:陈崇明(1983—),男,河北衡水人,高级工程师,硕士,从事燃煤电厂汞、硫、氮等多种污染物迁移规律研究和脱除技术开发。E-mail:15081890569@163.com

引用格式:陈崇明,党志国,车凯,等.660 MW 燃煤机组汞迁移转化特性研究[J].洁净煤技术,2021,27(4):157-163.

CHEN Chongming, DANG Zhiguo, CHE Kai, et al. Research on migration and transformation characteristics of mercury in 660 MW coal-fired unit[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(4): 157-163.



移动阅读

0 引言

汞是环境中毒性最强的金属元素之一,也是自然界中能唯一实现完整循环的重金属,其通过食物链可以在生物圈中汞累计,对人类和野生生物造成极大伤害。汞因具有长距离跨界污染的属性,联合国环境规划署将其列为全球性污染物。然而,过去十几年,世界范围内环境中汞的浓度仍持续上升,汞污染已经成为继气候变化问题后的又一个全球环境问题。2013年,联合国规划署发布的《The UNEP global mercury assessment》显示,我国对全球人为汞排放量的贡献达到了1/3^[1],其中燃煤电厂是国内最主要的汞排放源头之一,因此燃煤电厂汞的排放必须加以控制^[2-4]。煤燃烧后烟气中汞的存在形式包括气态单质汞、气态氧化汞和颗粒汞3种形式,并可能通过下游环保装置的影响迁移至烟气、石膏、灰渣以及废水中。不同形态汞在环境中迁移转化过程差异非常大,以烟气汞为例,颗粒态汞和氧化汞易沉降在污染源附近区域,产生局部影响,而零价汞则会远距离传输,对更广泛区域产生影响^[5-6]。GB 13223—2011《火电厂大气污染物排放标准》和DL/T 997—2006《火电厂石灰石-石膏湿法脱硫废水水质控制指标》对烟气和废水中汞及其化合物排放限值做出了规定,分别为30 μg/m³和0.05 mg/L。

汞在电厂环保设施中的脱除与转化已有一定进展。Deepak等^[7]研究发现,脱硝装置对电厂汞的氧

化效率为7%~74%;刘珺等^[8]研究了静电除尘器对汞排放的影响,结果表明汞脱除率为30%~40%,且脱汞效率与颗粒汞含量关系明显;Ito等^[9]指出湿法脱硫装置对汞去除效果明显,但汞排放率仍然高于其他痕量元素。虽然针对烟气汞的脱除研究已有不少结论,但大部分处于电厂环保改造以前,且主要集中于单台环保设备影响,缺乏整个烟气流程过程的系统研究。我国电厂的常规污染物已经达到超低排放水平,燃煤特性和环保设施控制与国外和先前相比存在较大差异。因此,本文以某火电厂为例,对汞在气液固三相中的迁移规律进行研究,掌握汞的沿程脱除特性和排放特征,以期为燃煤机组汞污染排放政策制定、汞脱除工艺设计以及石膏等副产品安全利用提供参考。

1 电厂及煤质情况

某电厂2号机组装机容量为660 MW,已于2017年完成超低排放改造。在锅炉尾部,沿烟气流序布置的环保设施包括选择性催化还原脱硝装置(SCR)、静电除尘器(ESP)、湿法烟气脱硫装置(WFGD)以及湿式静电除尘器(WESP)。机组燃烧神木大柳塔烟煤,试验在500、660 MW负荷下进行,期间煤质的工业分析和元素分析结果见表1。煤样中汞的质量浓度为0.081 mg/kg,略低于国内煤中汞平均质量浓度0.220 mg/kg^[10]。锅炉给煤量分别为201、255 t/h。

表1 机组燃煤工业分析和元素分析

Table 1 Proximate and ultimate analyses of coal fired in unit

负荷/MW	工业分析/%				元素分析						
	M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	$C_{ar}/\%$	$H_{ar}/\%$	$O_{ar}/\%$	$N_{ar}/\%$	$S_{ar}/\%$	$Hg_{ar}/10^{-6}$	
500	15.21	10.84	27.97	45.98	57.99	3.69	11.01	0.80	0.41	0.080	
600	16.08	15.17	26.67	42.09	54.04	3.22	10.25	0.96	0.39	0.081	

2 测试过程及方法

烟气汞取样点位置分布如图1所示,分别为①SCR前、②SCR后、③ESP后、④WFGD后、⑤WESP后。烟气取样采用美国国家环境保护局推荐使用的Ontario Hydro Method(OHM)方法,现场采样系统如图2所示。样品从污染源以等速采样法采样,其中颗粒汞由位于取样枪前端的石英玻璃管内的纤维滤筒捕获,然后经回收消解后合并,稀释定容成颗粒物试样溶液;氧化汞由3个盛有KCl溶液的吸收瓶收集;单质汞由1个装有5% HNO₃+10% H₂O₂和3个装有40 g/L KMnO₄+10% H₂SO₄溶液的吸收瓶收集。烟气采样同时对锅炉底渣、ESP灰、

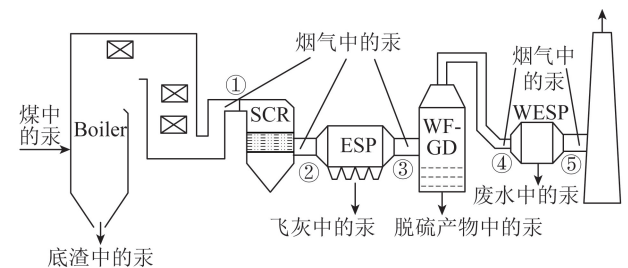


图1 烟气中汞浓度取样位置

Fig.1 Sampling locations for mercury concentrations measurement in flue gas

WFGD新鲜浆液、WFGD脱硫石膏、WFGD脱硫废水、WESP给水、WESP废水进行取样。取样后,使用LUMEX RA-915M型汞分析仪测试固体样品,

Hydra AA 全自动测汞仪分析消解液;使用北京吉天

AFS-933 型原子荧光分光光度计测试液体样品。

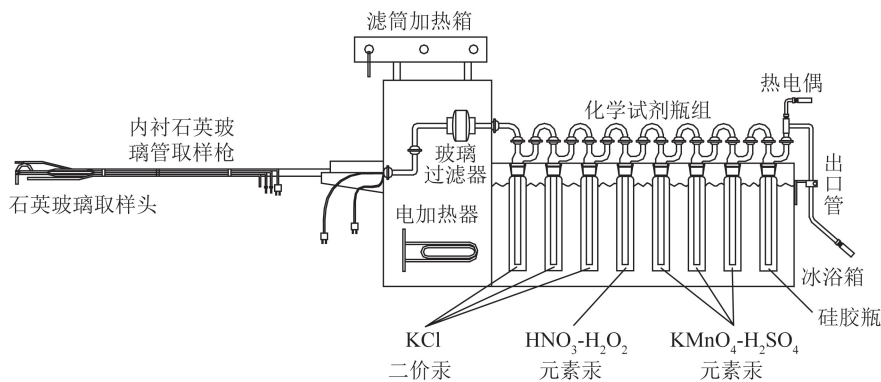


图 2 烟气中汞浓度采样系统

Fig.2 Sampling system for mercury concentrations measurement in flue gas

3 测试结果及分析

3.1 汞的平衡计算

汞的平衡计算是验证汞测试结果准确性的主要手段,通常采用质量平衡率作为判断依据,即系统排出汞与进入汞之比。根据燃煤锅炉机组运行参数和汞浓度测试数据,获得烟气中气态单质汞、氧化汞以及颗粒汞的质量;通过入炉煤量和汞含量,获得进入锅炉系统的总汞质量;结合烟气体积、ESP 排灰、底渣的质量和汞含量,计算得到脱硫前汞排放量;进一步通过石灰石、工艺水、石膏、脱硫废水质量和汞含量,获得包含脱硫系统的汞平衡数据。由质量守恒原理,不同位置的汞质量平衡公式为:入炉总汞=入炉煤中汞+SCR 前烟气总汞+炉渣中汞=SCR 后烟气总汞+炉渣中汞=ESP 前烟气总汞+炉渣中汞=ESP 后烟气总汞+ESP 排灰汞+炉渣汞=WFGD 后烟气总汞+脱硫石膏中汞+脱硫废水中汞+ESP 排灰汞+炉渣中的汞-石灰石浆液中汞-脱硫工艺水中汞=WESP 后烟气中总汞+ESP 排灰中汞+炉渣中的汞+脱硫石膏中汞+脱硫废水中汞-WESP 给水中汞-石灰石浆液中汞。

汞质量平衡数据如图 3 所示。可知汞绝大多数来源于燃煤,石灰石浆液和工艺水的汞引入量基本可以忽略。从 SCR 入口到 WESP 出口共 6 个测试位置,500、600 MW 工况下,各取样点汞平衡率分别为 72.01%~90.05%、79.14%~96.36%。由于试验期间,机组燃煤汞含量偏低,尾部烟气浓度逐渐偏低,且脱硫石膏和废水的排放并非连续,造成测量误差。研究表明所有位置的汞平衡率均在 70%~130% 的可接受范围内^[11-12],表明本次现场汞取样测试结果有效,可作为锅炉汞排放数据参考。

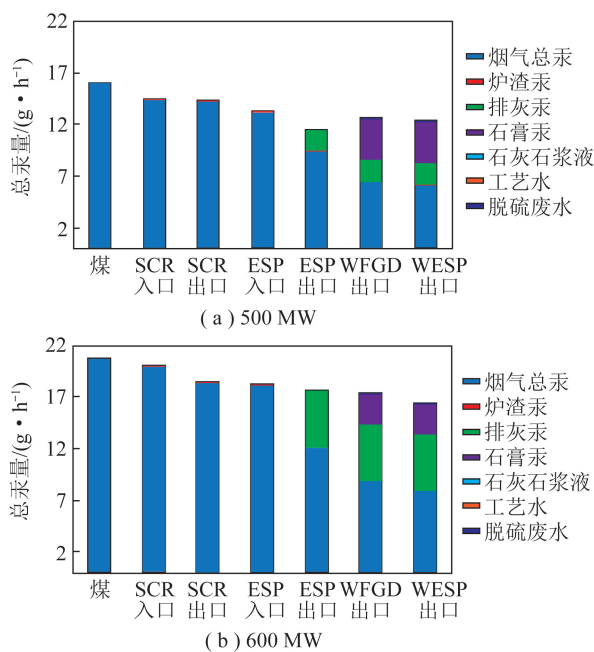


图 3 各污染物控制单元汞质量平衡

Fig.3 Mass balance of mercury in pollutants control units

3.2 汞的排放分布特性

汞以烟气、石膏、灰渣、废水等形式的排放量分布及占比见表 2。煤燃烧后,汞几乎全部释放,进入炉渣的占比仅为 0.12%~0.26%,这主要是由于汞单质以及氧化物的沸点均低于 400 °C^[13],而试验期间炉膛内部温度达 900~1 150 °C,大部分汞的化合物发生分解,导致其无法在渣中稳定存在。

产生的汞大多以烟气形式进入下游系统,并通过环保设施的脱除作用部分转移到飞灰、石膏中。然而,从机组排放汞的最终形式看,烟气汞排放占比最大,达 48.72%~50.08%,飞灰和石膏次之,脱硫废水最少。对于飞灰和石膏 2 种固体副产物,500 MW 时汞在二者中的浓度分别为 0.108、0.922 mg/kg; 600 MW 时分别为 0.155、0.544 mg/kg。研究表明,

HgS 和 HgO 是飞灰中汞的主要赋存形态;石膏汞则主要以 HgS 形式存在,并伴有少量 HgCl₂、HgO 和 HgSO₄^[14-17]。目前电厂固体副产物主要用于生产水泥、装饰材料等,虽然二次利用过程中会经历高温处

理,因特性差异也可能导致汞的二次释放,但由于目前我国未规定灰和石膏中汞含量,因此重点对电厂的一次释放特征进行研究,进一步分析 SCR、ESP、FGD 等环保设施对占比最大的烟气汞迁移影响。

表 2 不同形式汞排放量分布

Table 2 Distribution of mercury emissions in different forms

负荷/MW	项目	烟气	炉渣	飞灰	石膏	脱硫废水
500	排放量/(g·h ⁻¹)	6.17	0.03	2.12	3.85	0.17
	占比/%	50.08	0.24	17.21	31.25	1.38
600	排放量/(g·h ⁻¹)	7.97	0.02	5.39	2.86	0.12
	占比/%	48.72	0.12	32.94	17.48	0.73

3.3 SCR 对烟气汞迁移的影响

烟气脱硝装置进出口烟气汞的形态分布变化如图 4 所示。可知经过 SCR 后,烟气中汞的形态分布发生明显变化。500 和 600 MW 工况下,单质汞浓度显著下降,占比分别由 77.14%、79.93% 降至 46.80%、40.59%;氧化汞浓度大幅增加,所占比率由 14.64%、10.78% 升至 41.84%、43.42%;颗粒汞浓度略有上升,占比由 8.21%、9.30% 增至 11.37%、15.99%。说明电厂所用 SCR 催化剂对单质汞具有一定的氧化作用,转化效率分别为 40.28%、53.29%,略低于其他学者 60%~80% 的氧化效率^[18]。催化剂对烟气中汞形态转化与 HCl 浓度、氨氮摩尔比以及催化剂投运时间有关^[19-20]。研究表明,Cl 可以吸附在催化剂的钒活性位上,形成活性 Cl*, 然后通过 Cl* 与气相汞的反应实现汞的氧化;而氨与 HCl 会在催化剂活性位竞争吸附,其吸附平衡常数大且浓度高,能抑制 HCl 的吸附,从而降低单质汞的氧化;投运时间的影响主要表现在催化剂比表面积逐年下降,表面活性中心减少,从而不利于单质汞和 HCl 在活性位上的化学吸附反应。脱硝催化剂表面汞的非均相氧化反应方程为

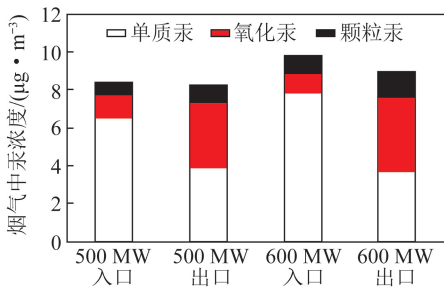
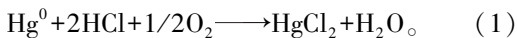


图 4 SCR 入出口烟气汞浓度分布

Fig.4 Inlet and outlet gas mercury concentration distribution of SCR system

测试时,电厂氨氮摩尔比为 0.79、0.68;但烟气中 HCl 浓度相对偏低,分别为 17.49、16.33 mg/m³,

同时催化剂累计投运时间由于超过 20 000 h,比表面积由 45.33 降至 33.84 m²/g。与其他研究相比,HCl 浓度和比表面积相对较小是造成氧化效率不高的主要原因。另外,相对于 600 MW,500 MW 工况下的单质汞转化率偏低,这主要是由于低负荷时,喷氨量增加抑制 HCl 吸附。试验过程中,500、600 MW 时脱硝系统入口 NO_x 浓度(折算至 6% O₂)平均值分别为 166、133 mg/Nm³,出口 NO_x 浓度(折算至 6% O₂)平均值分别为 39、45 mg/Nm³,喷氨量计算值分别为 84、67 kg/h。

SCR 入出口总汞浓度基本保持不变,表明 SCR 装置本身并不能脱汞,但能将其转变为相对容易脱除的颗粒汞和氧化汞,从而增加后续环保设施对汞的脱除率。

3.4 ESP 对烟气汞迁移的影响

ESP 对汞的迁移影响主要有两方面:一是飞灰对单质汞和氧化汞的吸附作用,二是除尘器本体对飞灰的捕捉作用。ESP 前后的汞形态及浓度变化见表 3。从汞的形态分布看,经过 ESP 后,3 种形态的汞浓度均下降,颗粒汞更是降至检出限以下。ESP 对单质汞、氧化汞和颗粒汞的脱除率分别为 13.31%~16.23%、19.08%~29.15% 和 100%,总汞的脱除率仅为 29.16%~33.73%。由于除尘器无法直接脱除气态汞,单质汞和氧化汞的浓度下降,应是由于部分被粉尘吸附成为颗粒汞,通过静电除尘方式被捕获至灰斗中。本厂 ESP 配有四级电场,采用高频电源供电,对烟气中粉尘具有较好的脱除作用,除尘效率达 99.89%~99.92%,可以在高效降低出口粉尘浓度的同时去除烟气中的颗粒汞。

500 和 600 MW 工况条件下,对比单质汞和颗粒汞的浓度变化,单质汞因沸点较低,更难被飞灰捕捉去除。研究表明,飞灰对气态汞的吸附能力与其中碳含量相关,未燃尽碳由于孔径丰富和比表面积大,对气态汞在飞灰上的吸附有促进作用,碳含量相

对较低时,吸附能力与碳含量基本成正比,而后汞吸附量随着碳含量增加而逐步减缓,碳含量在10%左右达到峰值^[21]。试验期间,锅炉燃烧较充分,飞灰中碳含量处于较低水平,仅为0.44%~0.57%,飞灰

对汞的吸附能力相对较差,因此飞灰中汞含量最高为0.155 mg/kg,低于其他研究结果。然而,飞灰碳含量升高会提高机组运行煤耗,降低粉煤灰品质,应研究其他方法改善单质汞向颗粒汞的转化。

表3 ESP前后汞浓度分布

Table 3 Concentration distribution of gas mercury at the inlet and outlet of ESP

负荷/MW	ESP 入口汞浓度				ESP 出口汞浓度			
	单质汞	氧化汞	颗粒汞	总汞	单质汞	氧化汞	颗粒汞	总汞
500	3.45	3.19	0.63	7.27	2.89	2.26	0	5.15
600	3.38	3.25	1.76	8.39	2.93	2.63	0	5.56

3.5 FGD 及 WESP 对烟气汞迁移的影响

烟气顺序流经 FGD 和 WESP 系统后,各形态汞浓度变化如图 5 所示。FGD 尾部,烟气汞主要以单质汞为主,占比达 91.71%~94.65%,且与入口相比,单质汞浓度增加了 0.47~0.83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,增长率为 16.26%~28.33%,这是由于浆液中的 Fe^{3+} 、 Mn^{2+} 、 HSO_3^- 等离子使氧化汞发生了还原反应变成单质汞,且单质汞较难溶于水所致^[22-23]。

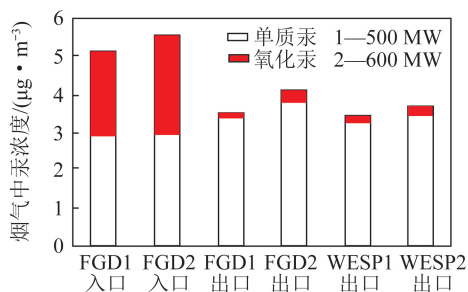
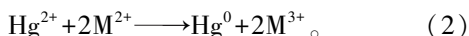


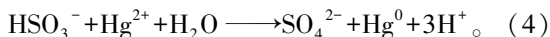
图5 FGD 出口和 WESP 出口烟气汞浓度分布

Fig.5 Concentration distribution of gas mercury at the outlet of FGD and WESP

金属离子 M^{2+} (铁、锰、钴等) 与 Hg^{2+} 反应为



亚硫酸氢盐与 Hg^{2+} 反应式为



同时,氧化汞较易溶于水,经吸收塔的喷淋作用后部分迁移至浆液中,还原和吸收 2 种联合作用使其浓度大幅下降,脱除效率达 87.07%~92.92%。由表 2 可知,石膏和脱硫废水的汞排放量分别为 2.86~3.85、0.12~0.17 g/h,表明大部分吸收的氧化汞以固体形式排出系统,这是由于浆液中存在大量 SO_4^{2-} ,氧化汞会进一步与其反应形成硫酸汞沉淀被石膏晶体吸附所致。脱硫废水中的汞浓度为 0.011~0.016 mg/L,低于 DL/T 997—2006 对汞排放 0.05 mg/L 的限值要求,无需进一步处理。另外,与 500 MW 相比,600 MW 工况下脱硫出口单质汞的增

加量大,而氧化汞的脱除率和石膏汞排放量低。这是由于后者的二氧化硫脱除量大,还原反应(3)和(4)起主导作用,有利于氧化汞的还原,且烟气量大造成液气比相对更低,不利于氧化汞的吸收。

经过 WESP 后,单质汞和氧化汞的绝对浓度仅略有下降,分别为 0.12~0.33、0.03~0.11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,二者脱除效率分别为 3.57%~8.78%、18.75%~32.35%。其中,氧化汞的脱除效率下降是由于其 WESP 入口浓度已经较小(0.16~0.34 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),喷淋的传质吸收作用不明显所致。同时,由于湿除排放废水再进入吸收塔回用,无需对其中汞浓度进行测试。综合上述分析,除尘器尾部设备对氧化汞有较高的去除效果,累计脱除率达到 91.25%~94.25%,对单质汞则不仅没有脱除作用,甚至导致其浓度略有增加。

3.6 环保设施协同脱汞效率分析

对比 SCR 入口与总排口汞浓度,脱硝、除尘、脱硫、湿除等环保设施对烟气汞的协同脱除效果见表 4。经过所有环保设施后,单质汞、氧化汞、颗粒汞和总汞的脱除率分别为 50.00%~56.17%、78.20%~89.43%、100%和 59.88%~62.61%,且烟囱入口单质汞的比例达 93%以上。其中,颗粒汞完全脱除主要是由于静电除尘器的高效除尘作用,将其转化到排灰中,使除尘器出口位置的颗粒汞低于检出限。然而,如果以 SCR 出口计算,单质汞的脱除效率下降至 6.16%~16.28%,氧化汞的脱除效率则增加至 94.12%~96.24%。两者对比看出,氧化汞和颗粒汞都易脱除,单质汞的去除主要依靠 SCR 装置的氧化作用将其转变为氧化汞。最终,机组排放的总汞质量浓度为 3.37~3.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,远低于国家标准 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的排放限值要求,无需单独加装烟气脱汞处理设备。然而,为适应国家未来出台的更严环保排放标准,应深入研究单质汞的氧化方法,充分利用现有环保设施进一步降低汞浓度。

表4 环保设施协同脱汞效率

Table 4 Collaborative mercury removal efficiency by environmental protection facility

负荷/MW	脱汞效率(以 SCR 入口计)/%				脱汞效率(以 SCR 出口计)/%			
	单质汞	氧化汞	颗粒汞	总汞	单质汞	氧化汞	颗粒汞	总汞
500	50.00	89.43	100	59.88	16.28	96.24	100	59.25
600	56.17	78.20	100	62.61	6.16	94.12	100	59.36

4 结 论

1) 500 MW 和 600 MW 工况下, SCR、ESP、FGD、WESP 等环保设施上下游的汞平衡率为 72.01%~90.05%、79.14%~96.36%, 均在可接受范围内。炉渣汞占比仅为 0.12%~0.24%, 大量汞以烟气的形式进入环保设施并部分转移到飞灰、石膏中。烟气汞是主要的排放形式, 占比达到 48.72%~50.08%。

2) SCR 对烟气总汞没有明显脱除作用, 但催化剂可以促进单质汞向颗粒汞和氧化汞的转化, 转化效率超过 40%, 500 MW 工况下因喷氨量较高抑制了 HCl 吸附而降低了转化率。ESP 因较高的除尘效率, 可以去除全部颗粒态汞, 但因含碳量较低, 粉尘吸附作用有限, 对单质汞和氧化汞的脱除率相对较低。经过 FGD 和 WESP 后, 600 MW 工况下因亚硫酸盐还原氧化汞作用更强, 单质汞浓度甚至略有增加, 而氧化汞因喷淋吸收和离子还原作用, 脱除率达 91% 以上。

3) SCR+ESP+FGD+WESP 对单质汞、氧化汞和颗粒汞的协同脱除率分别为 50.00%~56.17%、78.20%~89.43% 和 100%, 且烟囱入口单质汞的比例达到 93% 以上。SCR 下游设施对单质汞的协同脱除率仅为 6.16%, 对氧化汞的协同脱除率高达 96.24%, SCR 对单质汞的氧化是降低烟气汞排放的关键。机组最终排放的总汞浓度最高为 3.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 低于国家排放限值要求。

参考文献 (References):

[1] FUTSAETER G, WILSON S, PIRRONI N. The UNEP global mercury assessment: Sources, emissions and transport [C]. E3S Web of Conferences, Proceedings of the 16th International Conference on Heavy Metals in the Environment. 2013.

[2] 史晓宏, 张翼, 赵瑞, 等. 燃煤电厂烟气汞减排技术研究与实践 [J]. 中国电力, 2016, 49(8): 135-139.

SHI Xiaohong, ZHANG Yi, ZHAO Rui, et al. Research and practice of flue gas mercury reduction technology in coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2016, 49(8): 135-139.

[3] 赵毅, 薛方明, 董丽彦, 等. 燃煤锅炉烟气脱汞技术研究进展 [J]. 热力发电, 2013, 42(1): 9-14.

ZHAO Yi, XUE Fangming, DONG Liyan, et al. Flue gas mercury

removal technology for coal-fired boiler [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(1): 9-14.

- [4] 张静怡. 燃煤电站烟气中汞脱除与减排技术 [J]. 中国电力, 2012, 45(9): 76-79.
- ZHANG Jingyi. Technology of mercury removal and reduction for flue gas of coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2012, 45(9): 76-79.
- [5] FU Xuewu, FENG Xinbin, JONAS Sommar, et al. A review of studies on atmospheric mercury in China [J]. Science of the Total Environment, 2012, 421/422: 73-81.
- [6] 王凤阳. 工业烟气汞形态转化机制研究 [D]. 北京: 清华大学, 2016.
- WANG Fengyang. Mercury speciation and transformation in industrial flue gas [D]. Beijing: Tsinghua University, 2016.
- [7] DEEPAK Pudasainee, LEE S J, LEE S H, et al. Effect of selective catalytic reactor on oxidation and enhanced removal of mercury in coal-fired power plants [J]. Fuel, 2010, 89(4): 804-809.
- [8] 刘珺, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电厂静电除尘器协同控制汞排放 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(11): 4853-4857.
- LIU Jun, XUE Jianming, XU Yueyang, et al. Control of mercury emission in coal fired plants by electrostatic precipitator synergy [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2014, 8(11): 4853-4857.
- [9] ITO S, YOKOYAMA T, ASAKURA K. Emissions of mercury and other trace elements from coal-fired power plants in Japan [J]. Science of the Total Environment, 2006, 368(1): 397-402.
- [10] 马英. 典型燃煤电厂烟气汞协同控制研究 [J]. 热力发电, 2013, 42(3): 11-14.
- MA Ying. Mercury cooperative control for a typical coal-fired power plants [J]. Thermal Power Generation, 2013, 42(3): 11-14.
- [11] 唐念, 盘思伟. 大型煤粉锅炉汞的排放特性和迁移规律研究 [J]. 燃料化学学报, 2013, 41(4): 484-490.
- TANG Nian, PAN Siwei. Study on mercury emission and migration from large scale pulverized coal-fired boiler [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2013, 41(4): 484-490.
- [12] 殷立宝, 嵇玉群, 徐齐胜, 等. 中国燃煤电厂汞排放规律 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(29): 1-9.
- YIN Libao, ZHUO Yuqun, XU Qisheng, et al. Mercury emission from coal-fired power plants in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(29): 1-9.
- [13] BELEVI H, MOENCH H. Factors determining the element behavior in municipal solid waste incinerators. 1. Field studies [J]. Environmental Science & Technology, 2000, 34(12): 2501-2506.
- [14] 张晓茹. 燃煤电站典型固废中汞形态分析方法 [D]. 北京: 华

- 北电力大学,2018.
- ZHANG Xiaoru. The method for analyzing mercury form in typical solid waste of coal-fired power plants [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [15] RALLO M, LOPEZ-ANTON M A, PERRY R, et al. Mercury speciation in gypsums produced from flue gas desulfurization by temperature programmed decomposition [J]. Fuel, 2010, 89(8): 2157-2159.
- [16] ZHU Zhenwu, ZHUO Yuqun, FAN Yaming, et al. Fate of mercury in flue gas desulfurization gypsum determined by temperature programmed decomposition and sequential chemical extraction [J]. Journal of Environmental Science, 2016, 43: 169-176.
- [17] DÍAZ-SOMOANO M, LÓPEZ-ANTÓN M A, OCHOA-GONZÁLEZ R, et al. Temperature programmed desorption as a tool for the identification of mercury fate in wet-desulphurization systems [J]. Fuel, 2015, 148: 98-103.
- [18] 王靓, 黄亚继, 关正文, 等. 商用 SCR 催化剂氧化汞性能实验研究 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(7): 147-151.
- WANG Liang, HUANG Yaji, GUAN Zhengwen, et al. Experimental study on mercury oxidation efficiencies of commercial SCR catalyst [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(7): 147-151.
- [19] 许月阳, 薛建明, 王宏亮, 等. 燃煤烟气常规污染物净化设施协同控制汞的研究 [J]. 中国电力电机工程学报, 2014, 34(23): 3924-3931.
- XU Yuyang, XUE Jianming, WANG Hongliang, et al. Research on mercury collaborative control by conventional pollutants purification facilities of coal-fired power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(23): 3924-3931.
- [20] 陶莉, 张旭楠, 李彩亭, 等. 选择性催化还原催化剂氧化脱除烟气中单质汞 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(6): 2925-2932.
- TAO Li, ZHANG Xunan, LI Caiting, et al. Oxidation and capture of elemental mercury over SCR catalyst in simulated flue gas [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(6): 2925-2932.
- [21] 王运军. 燃煤烟气汞形态转化及汞吸附机理研究 [D]. 南京: 东南大学, 2010.
- WANG Yunjun. Study on mercury transformation in coal-fired flue gas and mercury adsorption on mechanism [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [22] 刘发圣, 夏永俊, 徐锐, 等. 燃煤电厂污染控制设备脱汞效果及汞排放特性试验 [J]. 中国电力, 2017, 50(4): 162-166.
- LIU Fasheng, XIA Yongjun, XU Rui, et al. Experimental study on mercury removal effect and mercury emission characteristics of pollution control equipment in coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2017, 50(4): 162-166.
- [23] WANG Yunjun, LIU Yue, WU Zhongbiao, et al. Experimental study on the absorption behaviors of gas phase bivalent mercury in Ca-based wet flue gas desulfurization slurry system [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 183(1): 902-907.