

# 超低排放燃煤电厂污染控制设备协同脱汞研究进展

曹晓满<sup>1</sup>, 刘亚文<sup>2</sup>, 张军梅<sup>1</sup>, 蒋鹭翔<sup>2</sup>, 郭娜<sup>2</sup>, 王祖武<sup>2</sup>

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 武汉大学 资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430000)

**摘要:**目前燃煤电厂烟气汞的治理主要依靠常规污染物净化装置协同脱除。为了解我国超低排放电厂污染物净化设施的协同脱汞能力,对电厂汞排放现场测试数据进行统计分析。研究发现相同类型的污染物净化设施对汞的脱除能力有很大差别,选择性催化还原法(SCR)的汞氧化效率在13.2%~91.1%,平均氧化效率为52.7%;不同类型除尘器对汞的去除效果差异很大,其中低低温电除尘器(LLT-ESP)>电袋除尘器(ESP+FF)>普通电除尘器(ESP)。湿式石灰石-石膏法(WFGD)脱汞系统脱汞平均脱汞效率为54.3%,大部分WFGD的脱汞效率主要由Hg<sup>2+</sup>的去除贡献得到。不同超低排放改造技术路线中以低低温电除尘器为核心的技术路线的平均脱汞效率最高,为91.3%。超低排放改造后机组的平均脱汞效率为80.1%,相比改造前提高约10%。

**关键词:**超低排放;燃煤电厂;污染物净化装置;脱汞效率

中图分类号:TK221

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2021)05-0098-08

## Research progress on collaborative mercury removal of pollution control equipment in ultra-low emission coal-fired power plants

CAO Xiaoman<sup>1</sup>, LIU Yawen<sup>2</sup>, ZHANG Junmei<sup>1</sup>, JIANG Luxiang<sup>2</sup>, GUO Na<sup>2</sup>, WANG Zuwu<sup>2</sup>

(1. Shandong Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China; 2. School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430000, China)

**Abstract:** The treatment of mercury in flue gas of coal-fired power plants mainly relies on the collaborative removal of conventional pollutant purification devices. In order to understand the collaborative mercury removal capacity of pollutant purification facilities in ultra-low emission power plants in China, the field test data of mercury emission from power plants were statistically analyzed. The results reveal that the same type of pollutant purification facilities also have very different mercury removal capabilities. The mercury oxidation efficiency of selective catalytic reduction(SCR) is between 13.2% and 91.1%, and the average mercury oxidation efficiency is 52.7%. Different kinds of dust collectors show different mercury removal efficiency. Among them, LLT-ESP has the best mercury removal efficiency, followed by ESP+FF and ESP. The average mercury removal efficiency of wet limestone gypsum desulfurization system(WFGD) is 54.3%, which is mainly derived from the removal of Hg<sup>2+</sup>. The technical route with LLT-ESP as the core has the highest average mercury removal efficiency in different routes, which is 91.3%. The average mercury removal efficiency of the unit after ultra-low emission transformation is 80.1%, which is about 10% higher than that before transformation.

**Key words:** ultra-low emission; coal-fired power plant; pollutant purification device; mercury removal efficiency

## 0 引言

大气中汞的富集会对自然界和人类造成潜在危害,而燃煤电厂排放的烟气汞是大气汞的重要来源。现有汞排放标准为0.03 mg/m<sup>3</sup>[1],在电厂进行超低

排放改造后,污染物净化装置协同脱汞效果发生了改变。国内学者对我国超低排放燃煤电厂的汞排放已进行了大量研究。华晓宇等[2]、陈璇[3]研究了超低排放改造对汞排放的影响,前者研究的机组进行了以低低温电除尘为核心的技术改造,改造后总汞

收稿日期:2020-08-05;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.20080501

基金项目:山东电力工程咨询院重点科技资助项目

作者简介:曹晓满(1981—),男,湖北当阳人,高级工程师,硕士,主要从事环保和新能源工程的设计和研究工作。E-mail:mondys825@126.com。通讯作者:王祖武,教授,博士,主要研究方向为大气复合污染控制。E-mail:zwwang@whu.edu.cn

引用格式:曹晓满,刘亚文,张军梅,等.超低排放燃煤电厂污染控制设备协同脱汞研究进展[J].洁净煤技术,2021,27(5):98-105.  
CAO Xiaoman, LIU Yawen, ZHANG Junmei, et al. Research progress on collaborative mercury removal of pollution control equipment in ultra-low emission coal-fired power plants[J]. Clean Coal Technology, 2021, 27(5): 98-105.



移动阅读

脱除效率提升了 13.9%;后者研究的机组污染物净化装置组合由 ESP+WFGD 改造为 SCR+ESP+WFGD+WESP,脱汞效率由改造前的 14.3% 增至 54.4%。以上研究表明超低排放改造有利于烟气协同脱汞,但不同改造技术路线对烟气脱汞性能的影响不同。陈磊等<sup>[4]</sup>对某一配置了 SCR+(ESP+FF)+WFGD 的机组进行了烟气汞排放的现场测试,结果表明,SCR 对  $Hg^0$  的氧化效率为 46.9%,ESP+FF 对  $Hg^I$  的脱除效率为 43.7%,烟气经过 WFGD 后  $Hg^0$  浓度上升 5.2%,部分  $Hg^{2+}$  在 WFGD 中可能被还原成  $Hg^0$ ;赵毅和韩立鹏<sup>[5]</sup>研究了低低温电除尘器的协同脱汞性能,发现低低温电除尘器总汞脱除率为 84.4%,出口烟气中  $Hg^0$  和  $Hg^{2+}$  质量浓度降低;车凯等<sup>[6]</sup>对燃煤电厂汞排放测试中发现,经过 WFGD 系统烟气中  $Hg^{2+}$  去除率为 85.8%, $Hg^0$  去除率为 12.4%。

对比前人研究发现污染物净化装置通过改变烟气汞的形态分布能有效提升烟气汞协同脱除效果,但由于各电厂实际运行情况不一,污染物净化设备表现出不同的协同脱汞性能。笔者通过整合现有超低排放燃煤电厂的相关数据,总结了我国 20 个超低排放电厂,48 个工况的汞排放数据,旨在探究不同污染物净化装置协同脱汞性能的一般水平,及不同超低排放改技术路线对烟气脱汞的影响,以期为后续机组脱汞需求改造提供数据支撑。

## 1 超低排放改造技术

现有超低排放改造遵循“一厂一策”的原则,根据每个电厂的煤种、锅炉、污染排放情况制定符合要求的超低排放改造技术。针对常规污染物的去除,目前主流的改造技术有 3 种:1 是以低低温电除尘器为核心的超低排放改造技术;2 是以湿式电除尘器为核心的超低排放改造技术;3 是以电袋除尘器为核心的超低排放改造技术<sup>[7]</sup>。但从非常规污染物汞及其化合物去除角度看,以湿式电除尘器为核心的超低排放改造技术路线,由于 WESP 位于机组净化装置的最末端,此时入口烟气中汞浓度已不高,且烟气经过 WFGD 后烟气中二价汞的浓度很低,WESP 对烟气中汞的脱除作用不强<sup>[8]</sup>,研究以湿式电除尘器为核心的超低排放改造技术的协同脱汞性能意义不大。因此本研究将超低排放机组分为以下 3 类,分别为:以低低温电除尘为核心的技术路线:LNB+SCR+LLT-ESP+WFGD+(WESP);以电袋除尘器为核心的技术路线:LNB+SCR+(ESP+FF)+WFGD+(WESP);以普通电除尘为核心的技术路

线:LNB+SCR+ESP+WFGD+(WESP)。

低低温电除尘技术(LLT-ESP)即在电除尘器前增设低温换热器,使除尘器入口烟气温度降到 90℃ 左右,降低烟尘的比电阻<sup>[9-10]</sup>,实现烟尘的高效脱除。研究表明<sup>[11]</sup>低低温电除尘器具有很好的烟气汞协同脱除性能,烟气经过低温换热器,温度迅速降低,这一过程有利于  $Hg^0$  向  $Hg^{2+}$  和  $Hg^p$  转化。

电袋复合除尘器(ESP+FF)结合了静电除尘器与布袋除尘器的优势,提高了对亚微米级粉尘的捕集效率,有利于提高烟气中  $Hg^p$  的脱除效率。电尘区捕集 80% 左右的粗粉尘,袋区捕集残余细颗粒粉尘<sup>[12]</sup>,滤袋表面形成均匀的细颗粒饼层,烟气通过时,汞与粉尘层接触,有利于飞灰对汞的捕集与对  $Hg^0$  的氧化。

对脱硝装置(SCR)的超低排放改造方案主要有 3 种:在反应器增加一层催化剂、增加催化剂量、加装 SNCR 装置<sup>[13]</sup>。其中前 2 种方案通过增加反应器内催化剂含量,达到  $NO_x$  超低排放的目的。研究表明反应器中催化剂含量对烟气中  $Hg^0$  氧化有影响,HOCQEL<sup>[14]</sup>研究催化剂中不同金属氧化物对模拟烟气中  $Hg^0$  的氧化,发现  $V_2O_5$  能显著增加烟气中  $HgCl_2$  含量;李永生等<sup>[15]</sup>通过增加催化剂层数, $Hg^0$  氧化率从 46.5% 提升至 55.5%,主要原因是烟气经过 SCR 催化剂床层的有效停留时间增加,催化氧化反应更充分。

燃煤电厂 WFGD 采用最多的是湿式石灰石-石膏法工艺(WFGD),目前主流的脱硫改造中多采用单塔技术(包括喷淋空塔、托盘塔、单塔双循环等技术)和串联塔技术<sup>[16]</sup>,这些改造技术有助于气液充分接触,强化气液传质,从而提高  $Hg^{2+}$  的去除效率。

## 2 超低排放电厂净烟气汞排放达标现状

本文所选电厂全部采用煤粉炉燃烧方式,机组负荷在 300~1 000 MW,烟气净化系统包含脱硝、除尘、脱硫装置,脱硝装置全部采用选择性催化还原装置(SCR),除尘装置包含普通电除尘器(ESP)、电袋除尘器(ESP+FF)、低低温电除尘器(LLT-ESP),脱硫装置全部采用湿式石灰石-石膏法(WFGD)。

44 组超低排放机组净烟气汞浓度数据如图 1 所示<sup>[2-6,15,17-29]</sup>,中美两国汞排放标准及我国超低排放电厂烟气汞排放浓度的达标情况见表 1。可知所有机组均满足我国燃煤电厂烟气汞排放标准。若按照美国低阶煤的汞排放标准,则有 70.5% 机组达到要求;若按照美国现役非低阶煤汞排放标准,仅有 45.5% 机组达到要求。随着人们对环境要求的日益

增长,国家标准向国际标准进一步靠拢,我国汞排放标准必将更加严格,因此对现有电厂烟气汞排放技术的改进十分必要。

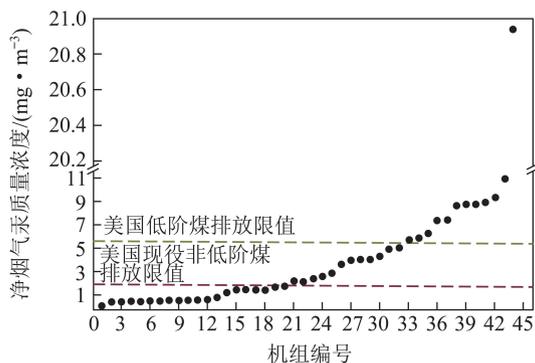


图1 不同机组汞排放质量浓度

Fig.1 Mercury emission concentration of different units

表1 烟气汞排放浓度在不同标准下的达标情况

Table 1 Compliance of flue gas mercury emission concentration under different standards

标准	汞排放限值/ ( $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )	达标 组数	达标 率/%
GB 13223—2011 《火电厂大气污染物排放标准》 <sup>[1]</sup>	30	44	100
《汞和有毒气体的排放标准》 简称(MATS) <sup>[30]</sup>	低阶煤:5.4 现役非低阶煤:1.76	32 20	72.7 45.5

表2 超低排放机组污染控制设备联合脱汞效率

Table 2 Mercury removal efficiency of pollution control equipment of ultra-low emission units

净化设施	汞氧化/脱除效率/%	平均氧化/脱汞效率/%	组数	文献
SCR	13.2~93.9	50.9	23	[2-6, 15, 18, 22, 24-26, 28]
LLT-ESP	67.0~89.3	77.0	8	[5, 11, 21]
ESP+FF	24.0~81.0	61.5	7	[4, 22, 24, 26]
ESP	3.3~93.9	38.3	19	[2, 6, 18-19, 22-23, 25, 28]
WFGD	5.6~97.6	53.4	33	[2, 4, 6, 18, 21-25, 28]

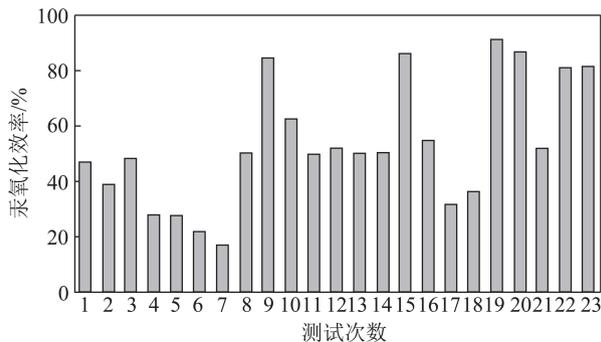


图2 SCR的汞氧化效率

Fig.2 Mercury oxidation efficiency of SCR

化效率大大降低。李永生等<sup>[15]</sup>、曲立涛等<sup>[33]</sup>研究了烟气中其他组分对汞氧化的影响,发现 $\text{NH}_3$ 、 $\text{SO}_2$ 含量对汞氧化的影响较大, $\text{NO}$ 在低浓度时对汞的氧化有促进作用,浓度较高时则表现为抑制作用。

### 3 不同污染物净化装置协同脱汞的影响

不同污染物净化设施联合脱汞的效率见表2。一般认为SCR对烟气总汞的去除效果不明显,研究SCR对 $\text{Hg}^0$ 的氧化率更有意义,其余污染物控制设备均研究烟气汞的脱除效率。由表2可知,汞氧化/脱除效率波动范围大,导致机组运行过程中无法对污染控制设备协同脱汞效率进行较精确预测。

#### 3.1 SCR协同脱汞现状

由表2可知,SCR过程对 $\text{Hg}^0$ 的氧化效率有较大影响,效率在13.2%~93.9%,平均氧化效率为50.9%。SCR对 $\text{Hg}^0$ 的氧化效率分布如图2所示,可知 $\text{Hg}^0$ 氧化效率在40%~60%的机组占比最大,约占全部机组的50%。GAO等<sup>[31]</sup>研究商用催化剂对汞的氧化和捕获,发现商用催化剂在反应温度350℃、烟气成分仅为 $\text{N}_2$ 和8% $\text{O}_2$ 时,气相中未检测出氧化汞,少量汞被吸附剂捕获,后向烟气中添加 $5 \times 10^{-6}$  HCl,汞氧化效率达到50.6%,HCl剂量增加到 $20 \times 10^{-6}$ 时,汞氧化效率升高到98.5%,说明气相中存在HCl能显著提升SCR对汞的氧化效率。LIU等<sup>[32]</sup>研究HCl和 $\text{O}_2$ 对 $\text{Hg}^0$ 氧化的影响时,也发现了与GaO相似的现象,而HCl和 $\text{O}_2$ 各自存在时,汞的氧

温度对催化剂催化氧化 $\text{Hg}^0$ 有很大影响,但为了保持催化剂较高的催化活性,烟气的温度控制在350℃左右,各机组SCR运行温度差异不大,因此实际运行过程中较少通过改变温度促进汞的氧化。

以上因素均能通过物理化学反应影响催化剂对汞的氧化效率,对现有现场测试数据分析比较,发现不同工况或对SCR相关改造技术,对汞氧化效率产生影响。测试编号8、9两组数据是同一机组在负荷分别为1000和500 MW下的测试,发现低负荷下能达到较高的汞氧化效率,这可能是由于低负荷下,烟气流速较低,增加了烟气在反应器内的停留时间,造成汞氧化效率增加。测试编号10在原有SCR反应器上新增一层催化剂,汞氧化效率达62.3%,相比改造前,提升约30%。测试编号15和23在SCR反

应器中投入了脱汞催化剂,均获得了80%以上的汞氧化效率。以上结果说明降低机组负荷、增加催化剂用量、投入脱汞催化剂均能起到较好的汞氧化效果。

### 3.2 除尘器协同脱汞现状

各燃煤电厂在超低排放改造中,多采用低低温电除尘器、电袋除尘器以及在电除尘器前增设低温省煤器或换热器等,这些改造方式通过降低烟气温度或增强气固接触,使单质汞更易向氧化汞和颗粒汞转化,提高了除尘装置的联合脱汞效率。ZHENG等<sup>[34]</sup>研究除尘器对痕量重金属的控制作用,发现低低温电除尘器和电袋除尘器对汞的脱除效果明显优于常规电除尘器,主要是由于烟气温度和飞灰粒径对汞的捕集有显著影响,除尘器入口烟温低,飞灰粒径小,有利于汞在飞灰中富集。吴小琴和王金星<sup>[26]</sup>对某一采用电袋除尘器的电厂进行汞排放的现场测试,发现袋区灰中的汞浓度普遍高于电区灰,汞浓度约为电区灰的4~9倍。与电区灰相比,袋区灰与烟气汞接触时间更长且粒度更细,对汞的吸附能力更强,袋区灰在滤料表面累积形成的飞灰层均匀致密,烟气通过时起到吸附床的作用,更有利于飞灰对汞

的氧化捕集。这些研究可以解释不同类型的除尘装置对汞去除能力的差异。

对此,本文研究了不同除尘器类型对脱汞的影响,结果如图3所示。图3(a)中该除尘器协同脱汞性能稳定,且平均脱汞效率最高,为77.0%;图3(b)表明电袋除尘也展现了较好的脱汞能力,平均脱汞效率为61.5%;图3(c)中改造后普通电除尘器的脱汞效率差异大,最低仅为3.3%,最高可达93.9%,这类除尘器平均脱汞效率仅为38.3%,大部分电除尘器脱汞效率在50%以下。孟磊<sup>[18]</sup>对几台典型超低排放机组汞排放特性进行了现场测试,发现机组负荷对电除尘器的协同脱汞效率有影响,负荷高时,电除尘器的脱汞效率普遍低于负荷低时的效率值,图3(c)中编号1~8为孟磊所测数据;编号12、13是在相同负荷不同煤种下进行的测试,发现不同煤种对电除尘器的脱汞效率有影响;编号9和17的脱汞效率高,分别为93.9%、73.6%,从除尘器改造技术看,2台机组均在电除尘器前增加低温省煤器。这些结果说明机组运行负荷、除尘器前换热装置、煤种等因素都能影响除尘器的脱汞效率。

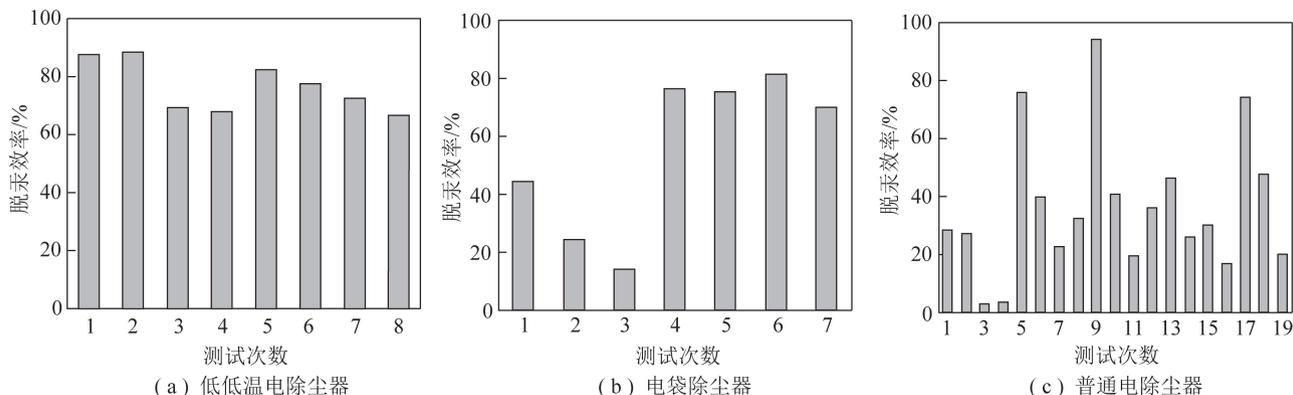


图3 不同类型的除尘装置对汞的协同脱除效率

Fig.3 Cooperative mercury removal efficiency by different types of dust removal devices

### 3.3 WFGD 协同脱汞现状

由表2可知,WFGD脱汞效率为5.6%~97.6%,平均脱汞效率为53.4%。WFGD协同脱汞效率如图4所示,脱汞效率在各效率阶段分布比较均匀,本文从价态汞对总汞脱除效率的贡献入手,分析WFGD价态汞之间的相互转化对脱汞效率的影响。

总汞的脱除效率由WFGD对 $Hg^{2+}$ 、 $Hg^0$ 、 $Hg^p$ 的去除能力3部分组成,但由于除尘后颗粒汞基本被去除,WFGD的协同脱汞效率等于 $Hg^{2+}$ 和 $Hg^0$ 的贡献值之和,为

$$\gamma_{Hg^T} = \gamma_{Hg^{2+}} + \gamma_{Hg^0}, \quad (1)$$

$$\gamma_{Hg^{2+}} = \frac{\rho_{Hg^{2+}}^{in} - \rho_{Hg^{2+}}^{out}}{\rho_{Hg^{2+}}^{T}}, \quad (2)$$

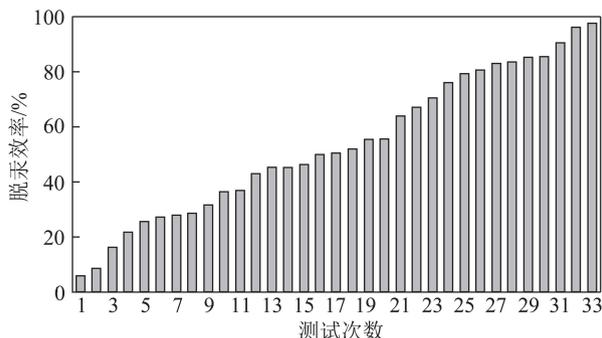


图4 WFGD 协同脱汞效率

Fig.4 Cooperative mercury removal efficiency of WFGD

$$\gamma_{Hg^0} = \frac{\rho_{Hg^0}^{in} - \rho_{Hg^0}^{out}}{\rho_{Hg^0}^{T}}, \quad (3)$$

式中： $\gamma_{\text{Hg}^{\text{T}}}$ 为脱硫前后总汞的脱除效率； $\gamma_{\text{Hg}^{2+}}$ 、 $\gamma_{\text{Hg}^0}$ 分别为 $\text{Hg}^{2+}$ 和 $\text{Hg}^0$ 对总汞脱除效率的贡献； $\rho_{\text{Hg}^{2+}_{\text{in}}}$ 、 $\rho_{\text{Hg}^0_{\text{in}}}$ 分别为WFGD入口烟气中 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$ 的质量浓度； $\rho_{\text{Hg}^{2+}_{\text{out}}}$ 、 $\rho_{\text{Hg}^0_{\text{out}}}$ 分别为WFGD出口烟气中 $\text{Hg}^{2+}$ 、 $\text{Hg}^0$ 的质量浓度； $\rho_{\text{Hg}^{\text{T}}_{\text{in}}}$ 为WFGD入口烟气中 $\text{Hg}^{\text{T}}$ 质量浓度。

$\text{Hg}^{2+}$ 易溶于水,因此在WFGD中易去除,而 $\text{Hg}^0$ 不溶于水,从理论上讲,总汞的脱除效率等于 $\text{Hg}^{2+}$ 的贡献值,但由于WFGD实际运行中物质组成复杂,往往会导致价态汞之间的相互转化,对WFGD的脱汞能力造成不定向影响。研究价态汞对总汞脱除效率的贡献值,可对WFGD脱汞特性有一定认识,也可了解现有WFGD中汞还原现象。

从现有的31组数据中选出了22组包含价态汞质量浓度的数据进行相关计算, $\text{Hg}^{2+}$ 的贡献值与总汞脱除效率之间的关系如图5所示,大部分WFGD总汞脱除效率与 $\text{Hg}^{2+}$ 的贡献值具有很好的线性关系, $R^2=0.9767$ ,且拟合直线斜率 $k=1.0466$ ,说明大部分WFGD的总汞脱除效率主要来源于 $\text{Hg}^{2+}$ 的贡献。此外,位于趋势线上部分偏离程度大的点, $\gamma_{\text{Hg}^{\text{T}}}>\gamma_{\text{Hg}^{2+}}$ ,表示烟气中一部分 $\text{Hg}^0$ 被去除,但由于 $\text{Hg}^{2+}$ 的贡献值太低,导致总汞去除效率不高;位于趋势线下部分偏离程度大的点, $\gamma_{\text{Hg}^{\text{T}}}<\gamma_{\text{Hg}^{2+}}$ ,表示WFGD中存在 $\text{Hg}^{2+}$ 还原现象,且有相当一部分 $\text{Hg}^{2+}$ 转化为 $\text{Hg}^0$ ,导致总汞脱除效率大幅下降。另外,约1/2数据存在汞还原现象,应引起重视。

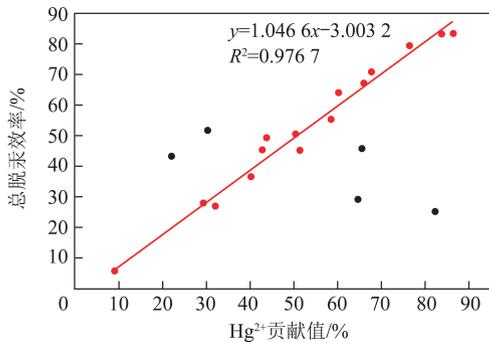


图5  $\text{Hg}^{2+}$ 的贡献值对总脱汞效率的影响

Fig.5 Effect of  $\text{Hg}^{2+}$  contribution on total mercury removal efficiency

为提高WFGD的总汞脱除效率,结合以上分

析, $\text{Hg}^{2+}$ 贡献值低的WFGD,可能是由于入口烟气中 $\text{Hg}^{2+}$ 占比低,或 $\text{Hg}^{2+}$ 脱汞效率较低。对于前者WFGD无法改变,后者可从加强气液传质改造,提高 $\text{Hg}^{2+}$ 脱效率。但由于目前为了实现 $\text{SO}_2$ 超低排放目标,WFGD超低排放改造很难进一步增大 $\text{Hg}^{2+}$ 脱除效率,因此很多学者尝试通过提高 $\text{Hg}^0$ 去除效率提高WFGD总汞的脱除效率。赵毅等<sup>[35]</sup>总结了不同类型添加剂对WFGD的脱汞效果及优缺点。其中气态添加剂中的臭氧、液态添加剂中的次氯酸和氯化钠稀溶液、黄磷乳浊液、氢硫化钠溶液及EDTA,不需改造脱硫塔即可直接添加,以氧化单质汞或阻止氧化汞再还原的方式同时控制 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 和汞。综合考虑脱汞效果与经济性则认为次氯酸和氯化钠稀溶液、黄磷乳浊液这2种添加剂较有发展前景。 $\text{Hg}^{2+}$ 贡献值高的脱硫机组可通过去除 $\text{Hg}^{2+}$ 提高脱汞效率。研究表明降低烟气温度和升高浆液pH对 $\text{Hg}^{2+}$ 的还原起抑制作用,另外增加烟气中 $\text{O}_2$ 和HCl浓度也可降低或缓解WFGD中 $\text{Hg}^0$ 的再释放,而随着 $\text{SO}_2$ 体积分数增加,浆液中的还原性物质亚硫酸盐和亚硫酸氢盐浓度增加,造成 $\text{Hg}^{2+}$ 还原程度增加<sup>[36-38]</sup>。

#### 4 不同技术路线超低排放电厂脱汞效率比较

不同超低排放改造技术路线协同脱汞效率见表3,可知不同超低排放改造技术路线均有较高的平均脱汞效率,尤其以低低温电除尘为核心的技术路线,其平均脱汞效率高达91.3%。以电袋除尘为核心的技术路线和以普通电除尘器为核心的技术路线脱汞能力相当,平均脱汞效率分别为78.5%和78.6%。现有超低排放机组的平均脱汞效率为80.1%。殷立宝等<sup>[39]</sup>和惠霖霖等<sup>[40]</sup>对超低排放改造前的研究数据进行整合,得到PC+SCR+ESP+WFGD组合的机组平均脱汞效率分别为71.5%、69%;许月阳等<sup>[41]</sup>对国内典型的4台煤粉炉进行汞排放现场测试,配置为SCR+ESP+WFGD时,平均脱汞效率为70.0%。与前人研究相比,超低排放改造机组的平均脱汞效率约提高了10%,说明各个污染物净化装置的超低排放改造措施有利于烟气汞的脱除。

表3 不同超低排放改造技术协同脱除效率

Table 3 Synergistic removal efficiency of different ultra-low emission retrofit technologies

技术路线	脱汞效率/%	平均脱汞效率/%	组数	文献
以低低温电除尘为核心	79.7~95.5	91.3	5	[5-6,17-21]
以电袋除尘器为核心	38.2~94.7	78.5	8	[4,22,24,26-27]
以普通电除尘为核心	55.4~97.8	78.6	31	[2,17-20,22-23,25,27-28]
SCR+除尘+WFGD+(WESP)	38.2~97.8	80.1	44	[2-6,14,17-21,22-29]

不同技术路线下的脱汞效率如图6所示。由图6(a)可知,以低低温电除尘器为核心的技术,5次测试中汞的脱除效率均在80%以上,与图3(a)低低温电除尘器对汞的脱除效率相比,二者均稳定且高效,说明低低温电除尘器是该技术路线下汞脱除的主要贡献单元。由图6(b)可知,以电袋除尘器为核心的改造技术脱汞效率不稳定,与图3(b)中电袋除尘器对汞的脱除效率具有相似的分布情况,说明以电袋除尘器为核心技术路线的机组中,电袋除尘器对汞

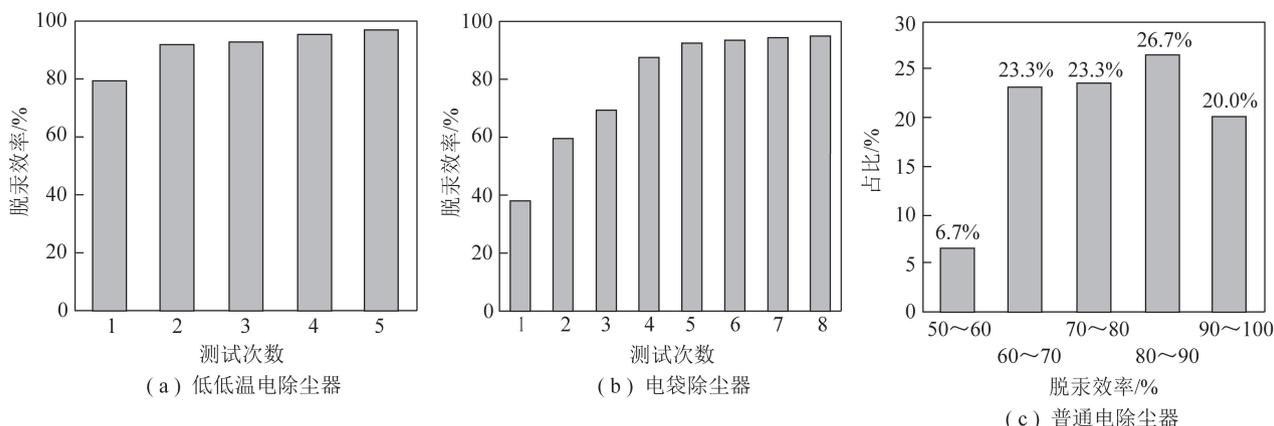


图6 不同技术路线下汞的脱除效率

Fig.6 Mercury removal efficiency under different technical routes

## 5 结语与展望

目前超低排放机组外排烟气中汞浓度均达到国家排放要求,但用美国 MATS 现役燃非低阶煤的标准看,达标率只有 45.5%,超过一半的机组不能达标。超低排放改造后 SCR 对汞的平均氧化效率为 52.7%,增加催化剂数量能在一定程度上提高汞的氧化效率,在 SCR 反应系统中增加脱汞催化剂能达到 80%以上的汞氧化效率。不同类型的除尘器协同脱汞能力有较大差异。从脱汞效率和脱汞稳定性来看,低低温电除尘器>电袋除尘器>普通电除尘器。主要是由于温度、飞灰颗粒粒径对除尘器脱汞的影响很大。湿法脱硫系统对汞的平均脱除效率为 54.3%,约 50%的脱硫系统出现汞还原现象,导致脱硫系统协同脱汞效率降低。后期在提高脱硫系统脱汞效率方面,应从抑制二价汞还原和提高零价汞脱除效率两方面考虑。不同的超低排放改造技术路线的汞排放特点不同,以低低温电除尘器和电袋除尘器为核心的 2 种改造技术的脱汞效率主要受除尘器脱汞效率的影响,以普通电除尘器为核心的改造技术的脱汞效率除与静电除尘器有关外,受脱硫系统的影响很大。相比这 3 种改造技术,以低低温电除尘器为核心的超低排放改造技术协同脱汞性能

的脱除有很大影响。由图 6(c)可知,以普通电除尘器为核心的技术路线在不同机组的 31 次测试中,脱汞效率均大于 50%,脱汞效率在 60%~100% 的占比 93.3%,且在各效率阶段分布均匀,说明此技术路线下的机组具有较好的脱汞效率,而图 3(c)中电除尘器的平均脱汞效率仅为 38.3%,说明以普通电除尘器为核心技术路线的机组,脱汞效率除受电除尘器影响外,脱硫系统的脱汞效率对整个机组脱汞效率的贡献很大。

最佳。

由于对燃煤电厂汞排放的现场测试较为困难,文献中出现的汞排放相关数据样本量不大,尤其是低低温电除尘器相关统计分析,难以对其协同脱汞特性有较全面认识。以普通电除尘器为核心技术路线的机组协同脱汞的特点是静电除尘器的脱汞效率低,脱硫系统依据烟气中汞的价态分布表现为不同脱汞效率。因此后续研究中应从经济和技术层面寻找合适的脱汞催化剂或在 WFGD 中添加汞氧化剂。

## 参考文献 (References):

- [1] 环境保护部. 火电厂大气污染物排放标准: GB 13223—2011 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [2] 华晓宇, 章良利, 宋玉彩, 等. 燃煤机组超低排放改造对汞排放的影响[J]. 热能动力工程, 2016, 31(7): 110-116, 139. HUA Xiaoyu, ZHANG Liangli, SONG Yucai, et al. Influence of the ultra low emission modification of a coal-fired unit on the mercury emissions [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(7): 110-116, 139.
- [3] 陈璇. 燃煤机组超低排放改造对汞排放的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [4] 陈磊, 段钰锋, 赵士林, 等. 350 MW 超低排放燃煤电厂污染物控制装置对汞的协同脱除[J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 187-193, 200. CHEN Lei, DUAN Yufeng, ZHAO Shilin, et al. Mercury co-removal by the air pollutant control devices in a 350 MW ultra-low

- emission coal-fired power plant [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35(2): 187-193, 200.
- [5] 赵毅, 韩立鹏. 660 MW 超低排放燃煤电站汞分布特征研究 [J]. *环境科学学报*, 2019, 39(3): 853-858.
- ZHAO Yi, HAN Lipeng. Distribution characteristics of mercury in 660 MW coal-fired power plant with ultra-low emission [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2019, 39(3): 853-858.
- [6] 车凯, 李振海, 韩忠阁, 等. 燃煤电厂汞脱除特性及迁移规律 [J]. *洁净煤技术*, 2018, 24(2): 114-118.
- CHE Kai, LI Zhenhai, HAN Zhongge, et al. Removal properties and migration patterns of mercury in coal-fired power plant [J]. *Clean Coal Technology*, 2018, 24(2): 114-118.
- [7] 史文峥, 杨萌萌, 张绪辉, 等. 燃煤电厂超低排放技术路线与协同脱除 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(16): 4308-4318, 4513.
- SHI Wenzheng, YANG Mengmeng, ZHANG Xuhui, et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(16): 4308-4318, 4513.
- [8] 周慎学. 超低排放系统中湿式电除尘器脱汞特性研究 [J]. *环境工程*, 2017(S2): 179-181, 150.
- ZHOU Shenxue. The research of wesp mercury removal characteristics in ule system [J]. *Environmental Engineering*, 2017(S2): 179-181, 150.
- [9] 陈坤洋, 郭婷婷, 王海刚, 等. 超低排放改造后燃煤烟气净化设备协同脱汞潜力分析 [J]. *中国电力*, 2018, 51(6): 160-165.
- CHEN Kunyang, GUO Tingting, WANG Haigang, et al. Analysis on the potential of synergistic mercury removal with coal-fired flue gas purification equipment after ultra-low emission retrofit [J]. *Electric Power*, 2018, 51(6): 160-165.
- [10] 刘含笑, 姚宇平, 郦建国, 等. 低低温电除尘技术适用性及污染物减排特性研究 [J]. *动力工程学报*, 2018, 38(8): 650-657.
- LIU Hanxiao, YAO Yuping, LI Jianguo, et al. Research on applicability and pollutant emission characteristics of a LLT-ESP [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, 38(8): 650-657.
- [11] 赵毅, 韩立鹏. 超低排放燃煤电厂低低温电除尘器协同脱汞研究 [J]. *动力工程学报*, 2019, 39(4): 319-323, 330.
- ZHAO Yi, HAN Lipeng. Synergistic removal of mercury by low-temperature ESP for ultra-low emission coal-fired power plants [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2019, 39(4): 319-323, 330.
- [12] 田田, 钱韵. 燃煤电厂除尘系统超低排放改造 [J]. *应用能源技术*, 2020(2): 36-39.
- TIAN Tian, QIAN Yun. Ultra-low emission retrofit of dust removal system in coal-fired power plant [J]. *Applied Energy Technology*, 2020(2): 36-39.
- [13] 胡永锋. 燃煤电厂烟气 NO<sub>x</sub> 超低排放改造方案对比分析 [J]. *石油石化节能与减排*, 2015, 5(6): 32-37.
- HU Yongfeng. Comparative analysis on retrofit schemes for ultra-low NO<sub>x</sub> emissions of coal power plant [J]. *Energy Conservation and Emission Reduction in Petroleum and Petrochemical Industry*, 2015, 5(6): 32-37.
- [14] HOCQUEL M. The behaviour and fate of mercury in coal-fired power plants with downstream air pollution control devices [EB/OL]. [2020-08-05]. [https://www.researchgate.net/publication/35215949\\_The\\_behaviour\\_and\\_fate\\_of\\_mercury\\_in\\_coal-fired\\_power\\_plants\\_with\\_downstream\\_air\\_pollution\\_control\\_devices](https://www.researchgate.net/publication/35215949_The_behaviour_and_fate_of_mercury_in_coal-fired_power_plants_with_downstream_air_pollution_control_devices).
- [15] 李永生, 许月阳, 薛建明. 630 MW 燃煤超低排放机组 SCR 对汞的协同作用研究 [J]. *动力工程学报*, 2018, 38(11): 914-918.
- LI Yongsheng, XU Yueyang, XUE Jianming. Study on mercury synergistic effect by SCR catalyst of a 630 MW coal-fired ultra-low emission power unit [J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2018, 38(11): 914-918.
- [16] 李兴华, 何育东. 燃煤火电机组 SO<sub>2</sub> 超低排放改造方案研究 [J]. *中国电力*, 2015, 48(10): 148-151, 160.
- LI Xinghua, HE Yudong. Study on modification of ultra-low SO<sub>2</sub> emission in coal-fired power plants [J]. *Electric Power*, 2015, 48(10): 148-151, 160.
- [17] 王树民, 余学海, 顾永正, 等. 基于燃煤电厂“近零排放”的大气污染物排放限值探讨 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(6): 975-984.
- WANG Shumin, YU Xuehai, GU Yongzheng, et al. Discussion of emission limits of air pollutants for 'near-zero emission' coal-fired power plants [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(6): 975-984.
- [18] 孟磊. 超低排放燃煤火电机组汞排放特性研究 [J]. *中国环保产业*, 2019(5): 41-44.
- MENG Lei. Study on mercury emission characteristic of ultra-low emission coal-fired power generator set [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2019(5): 41-44.
- [19] 宋畅, 刘钊, 汪涛, 等. 超低排放电厂 PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 及汞污染排放特征 [J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2017, 44(6): 93-99.
- SONG Chang, LIU Zhao, WANG Tao, et al. Emission characteristics of PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and Hg of ultra-low emission coal-fired power plant [J]. *Journal of North China Electric Power University*, 2017, 44(6): 93-99.
- [20] 张军, 郑成航, 张涌新, 等. 某 1 000 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 1 000 MW coal-fired power plant [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(5): 1310-1314.
- [21] 崔立明, 黄志杰, 莫华, 等. 不同超低排放技术路线的协同脱汞实测与研究 [J]. *中国电力*, 2017, 50(10): 136-139, 143.
- CUI Liming, HUANG Zhijie, MO Hua, et al. Test and study on synergic mercury removal performance of environmental protection facilities at ultra-low pollutants emission [J]. *Electric Power*, 2017, 50(10): 136-139, 143.
- [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] 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 Science*, 2017, 30(5): 672-677.
- [24] 于丽新, 曲莹军, 贾俊新, 等. 基于实测的燃煤电厂汞迁移转化规律研究分析[J]. *环境科学与技术*, 2014, 37(S2): 463-466, 470.
- YU Lixin, QU Yingjun, JIA Junxin, et al. Study and analysis of mercury migration and transformation from coal-fired power plants based on field tests [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(S2): 463-466, 470.
- [25] 陈瑶姬, 孟炜, 胡达清. 燃煤电厂汞的排放特性和脱汞技术分析[J]. *能源研究与管理*, 2016(1): 25-27, 44.
- CHEN Yaoji, MENG Wei, HU Daqing. Mercury emission characteristic and removal technical analysis in coal-fired power plant [J]. *Energy Research and Management*, 2016(1): 25-27, 44.
- [26] 吴小琴, 王金星. 燃煤电厂汞的迁移转化特性的分析[J]. *广东化工*, 2018, 45(14): 85-87.
- WU Xiaoqin, WANG Jinxing. Analysis on the migration and transformation characteristics of mercury in a coal-fired power plant [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(14): 85-87.
- [27] 郭静娟, 刘松涛, 张优, 等. 基于燃煤电厂超低排放的汞分布特性研究[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(1): 55-59.
- GUO Jingjuan, LIU Songtao, ZHANG You, et al. Impacts of ultra-low emission in coal-fired power plants on the distribution characteristics of mercury [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(1): 55-59.
- [28] 刘发圣, 钟用禄, 王潜, 等. 脱汞催化剂对燃煤电厂汞排放特性的试验研究[J]. *电站系统工程*, 2016, 32(5): 7-10.
- LIU Fasheng, ZHONG Yonglu, WANG Qian, et al. Test and research of mercury removal catalyst on mercury emission from coal-fired power plants [J]. *Power System Engineering*, 2016, 32(5): 7-10.
- [29] 陈瑶姬. 燃煤电厂超低排放系统中烟气汞的迁移规律研究[J]. *电力科技与环保*, 2017, 33(1): 9-11.
- CHEN Yaoji. Migration law of flue gas mercury from coal-fired plant ULE system [J]. *Electric Power Technology and Environmental Protection*, 2017, 33(1): 9-11.
- [30] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Mercury and air toxics standards. science and technology. cleaner power plants [EB/OL]. (2011-12-16) [2020-08-05]. <https://www.epa.gov/mats/cleaner-power-plants-controls>.
- [31] GAO Wei, LIU Qingcai, YU Chang, et al. Kinetics of mercury oxidation in the presence of hydrochloric acid and oxygen over a commercial SCR catalyst [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2013, 220: 53-60.
- [32] LIU R, XU W, TONG L, et al. Mechanism of Hg-0 oxidation in the presence of HCl over a commercial V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> SCR catalyst [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, 36: 76-83.
- [33] 曲立涛, 李彩亭, 陶莉. 商用SCR催化剂对单质汞(Hg<sup>0</sup>)的氧化作用研究[J]. *中国电力*, 2019, 52(4): 151-155, 160.
- QU Litao, LI Caiting, TAO Li. Oxidation of elemental mercury (Hg<sup>0</sup>) by commercial SCR catalysts [J]. *Electric Power*, 2019, 52(4): 151-155, 160.
- [34] ZHENG Chenghang, WANG Li, ZHANG Yongxin, et al. Co-benefit of hazardous trace elements capture in dust removal devices of ultra-low emission coal-fired power plants [J]. *Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering)*, 2018, 19(1): 68-79.
- [35] 赵毅, 陈周燕, 汪黎东, 等. 湿式烟气WFGD同时脱汞研究[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(1): 64-69.
- ZHAO Yi, CHEN Zhouyan, WANG Lidong, et al. Study on simultaneous removal of SO<sub>2</sub> and Hg in wet flue gas desulfurization [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2008, 2(1): 64-69.
- [36] JIANG Y Z, CHEN C M, JIANG L X, et al. Study of mercury re-emission from simulated wet flue gas desulfurization liquors [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 610-613: 2033-2037.
- [37] CHUANMIN C, SONGTAO L, YANG G, et al. Investigation on mercury reemission from limestone-gypsum wet flue gas desulfurization slurry [J/OL]. *The Scientific World Journal*; 1-6. [2014-03-04]. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/581724>.
- [38] KUNKUN H, GUOZHEN C, JIANJUN N. Simulation study on the demercuration performance of wet flue gas desulfurization system [M]//*Clean Coal Technology and Sustainable Development*. Germany: Springer Singapore, 2016.
- [39] 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): 1-10.
- 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): 1-10.
- [40] 惠霖霖, 张磊, 王书肖, 等. 中国燃煤部门大气汞排放协同控制效果评估及未来预测[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(1): 11-22.
- HUI Mulin, ZHANG Lei, WANG Shuxiao, et al. Evaluation of co-benefits on atmospheric mercury emission control for coal combustion in China and future projection [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(1): 11-22.
- [41] 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]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(23): 3924-3931.
- XU Yueyang, 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.