

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.19072

燃煤电厂烟气中 Hg 的生成、治理、测试及排放特征研究

陈招妹¹, 刘含笑¹, 崔盈¹, 刘志波², 郭高飞¹, 孟银灿¹, 刘美玲¹

(1. 浙江菲达环保科技股份有限公司, 浙江省 诸暨市 311800;

2. 绥中发电有限责任公司, 辽宁省 葫芦岛市 125222)

Study on Generation, Treatment, Testing and Emission Characteristics of Hg in Flue Gas of Coal-fired Power Plants

CHEN Zhaomei¹, LIU Hanxiao¹, CUI Ying¹, LIU Zhibo², GUO Gaofer¹, MENG Yincan¹, LIU Meiling¹

(1. Zhejiang Feida Environmental Science & Technology Co., Ltd., Zhuji 311800, Zhejiang Province, China;

2. Suizhong Power Generation Co., Ltd., Huludao 125222, Liaoning Province, China)

摘要: 燃煤电厂是大气 Hg 排放的主要来源之一, 基于文献调研, 分析了燃煤电厂烟气中 Hg 的来源及生成、燃烧后现有设备协同脱 Hg 技术和吸附剂喷射脱 Hg 技术、主要离线测试方法、超低排放实施前后燃煤电厂烟气 Hg 排放特征等, 指出燃煤电厂实施更严格的烟气 Hg 排放控制是非常有必要的, 且改性活性炭、改性飞灰喷射脱 Hg 技术将是未来应对更严格 Hg 排放限值的主流技术。研究结果可为燃煤电厂烟气 Hg 排放控制提供参考。

关键词: 燃煤电厂; 汞排放; 超低排放; 脱汞技术; 测试方法

ABSTRACT: Coal-fired power plants is one of the main stationary sources of atmospheric Hg emissions. Based on literature research, source and generation of Hg in flue gas from coal-fired power plants, the existing equipment collaborative Hg removal technology and adsorbent injection Hg removal technology after combustion, the off-line test method of flue gas Hg in coal-fired power plants, the Hg emission characteristics of flue gas from coal-fired power plants before and after the implementation of ultra-low emission were summarized. It is necessary for coal-fired power plants to implement stricter Hg emission control of flue gas. Modified activated carbon and modified fly ash injection Hg removal technology will be the mainstream technology to cope with stricter Hg emission

limits in the future. It provides a reference for the Hg emission control of flue gas in coal-fired power plants.

KEY WORDS: coal-fired power; Hg emission; ultra-low emission; Hg removal technology; test method

0 引言

燃煤电厂烟气超低排放全面实施以来, 颗粒物、SO₂、NO_x 等常规大气污染物的排放已经得到了有效控制^[1], 相应的治理技术也达到了国际领先水平, 城市雾霾天数, 尤其是重雾霾天数已呈明显减少趋势。而 Hg 等有毒重金属因其更强的生物毒性、生物体内积聚及全球迁移特性等特点, 成为当下关注的热点^[2]。中国目前已经成为全球大气 Hg 排放第一大国^[3], Hg 的排放控制迫在眉睫。

燃煤电厂是大气 Hg 排放的主要固定源之一, 2014 年中国燃煤电厂烟气 Hg 排放量为 82 t, 仅次于水泥行业(145 t)和燃煤工业锅炉(116 t)^[4]。美国是世界上最早对 Hg 进行排放控制的国家, 其排放限值为 2~5 μg/m³。国内对燃煤电厂 Hg 等有毒重金属的排放尚未采取针对性的控制措施,《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011)规定的燃煤电厂 Hg 及其化合物的排放限值为 30 μg/m³, 较美国宽松许多。

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0209107); 浙江省“万人计划”课题(2017R52034)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2016YFC0209107); Zhejiang "Ten Thousand People Plan" Project (2017R52034).

1 燃煤电厂烟气中 Hg 的生成

燃煤电厂烟气中的 Hg 主要来源于煤的燃烧, 根据形态不同, 有气态 Hg^0 、氧化态 Hg^{2+} 和颗粒态 Hg^p 3 种形态。烟气中 Hg 的形态分布主要与煤种、燃烧方式、运行条件等因素有关^[5-6], 如图 1 所示, 大部分 Hg 的化合物在温度高于 800 °C 时处于热不稳定状态, 它们将分解成 Hg^0 , 其中, 部分会被催化氧化或氯化氧化为 Hg^{2+} , 被飞灰吸附的部分将以 Hg^p 形态存在。

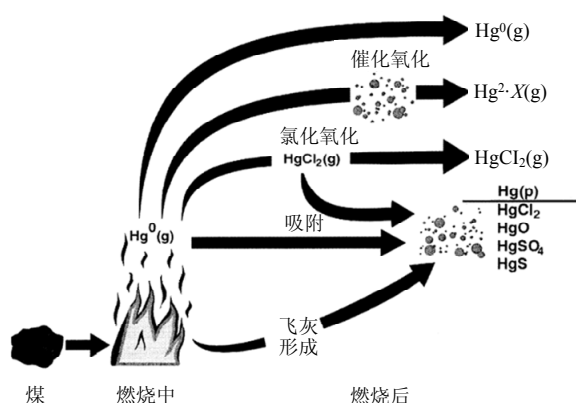


图 1 燃煤过程中 Hg 的释放与形态转化

Fig. 1 Hg release and morphological transformation during coal burning

中国煤种中的 Hg 含量在 0~45 000 ng/g, 算术平均值为 200 ng/g, 高于美国的平均值(170 ng/g), 是澳大利亚(60 ng/g)的 3 倍多, 为世界平均水平(100 ng/g)的 2 倍^[7-14]。中国不同地域、不同煤种中 Hg 含量差异较大, 吉林、北京、山西、安徽、内蒙、河南、云南、贵州 8 个省份的煤种 Hg 含量超过了全国平均水平, 且云南、贵州最高, 分别达 380、552 ng/g, 如图 2 所示。煤种 Hg 含量排序: 褐煤<石煤<烟煤<无烟煤, 其中无烟煤的 Hg 含量均值达 840 ng/g, 如图 3 所示。

2 燃煤电厂烟气中 Hg 的治理

2.1 Hg 排放控制技术分类

目前, 燃煤电厂 Hg 排放控制技术主要有 4 类, 分别为燃烧前脱 Hg 技术、燃烧中脱 Hg 技术、燃烧后现有设备协同脱 Hg 技术和燃烧后吸附剂喷射脱 Hg 技术, 如图 4 所示。本文主要分析燃烧后的 2 类脱 Hg 技术。

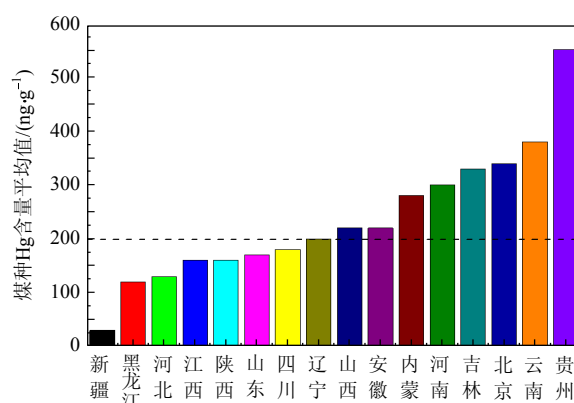


图 2 我国部分省份的煤种 Hg 含量

Fig. 2 Hg content of coal in some provinces of China

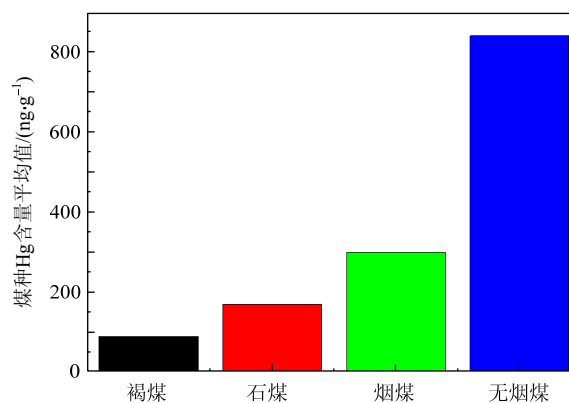


图 3 不同煤种 Hg 含量

Fig. 3 Hg content of different types of coal

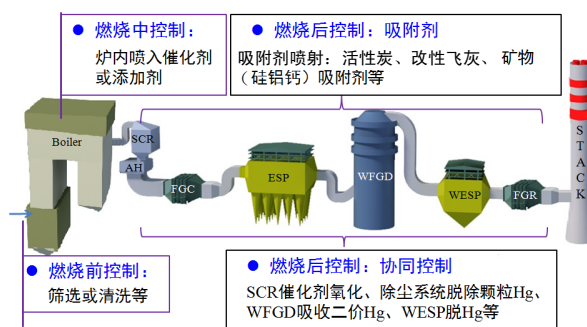


图 4 燃煤电厂 Hg 排放控制技术

Fig. 4 Hg emission control technology for coal-fired power plants

2.2 燃烧后现有设备协同脱 Hg 技术

燃煤电厂现有烟气治理设备主要有脱硝、除尘、脱硫, 根据各设备的功能、原理等不同, 其协同脱 Hg 能力也有较大差异, 如表 1 所示。

SCR 脱硝装置能促进烟气中 Hg^0 向 Hg^{2+} 的催化氧化, 有利于后续设备协同脱除。车凯等^[15] 通过对 2 台 600 MW 机组 SCR 脱硝前后烟气中 Hg

表 1 燃煤电厂现有设备协同脱 Hg 能力
Tab. 1 Synergistic Hg removal capability of existing equipment in coal-fired power plants

装置	主要功能	协同脱 Hg 能力
SCR 脱硝	NO _x 脱除效率约 50%~90%	可将部分 Hg ⁰ 催化氧化为 Hg ²⁺
干式 ESP	除尘效率约为 99.20%~99.85%	对 Hg ^p 有一定的脱除效果
除尘器 EF 或 FF	除尘效率约为 99.50%~99.99%	对 Hg ^p 脱除效果优于电除尘器
湿法脱硫(WFGD)	脱硫效率约 95.0%~99.7%	对 Hg ²⁺ 有一定的脱除效果, 但部分 Hg ²⁺ 会被脱硫浆液还原为 Hg ⁰
湿式电除尘 (WESP)	除尘效率约为 70%~90%	对 Hg ^p 、Hg ²⁺ 有一定的脱除效果

进行现场实测,发现烟气中 Hg⁰ 分别减少了 46.70%和 50.69%,与此同时, Hg²⁺ 分别增加了 269.46%和 119.50%, Hg^p 分别增加了 12.62%和 43.30%,而总 Hg 量变化不大,说明部分 Hg⁰ 转化成了 Hg²⁺和 Hg^p。刘发圣等^[16]对江西省某 4 个项目进行实测,发现 SCR 脱硝系统对 Hg⁰ 氧化率分别为 50.64%、44.01%、50.98%和 86.66%(安装了 Hg 氧化催化剂)。吕太等^[17]通过测试某 350 MW 机组发现,SCR 脱硝设备前后烟气中 Hg⁰ 的质量浓度有明显减少,由 6.87 μg/m³ 降至 5.26 μg/m³。郑逸武等^[18]采用 Ontario Hydro 方法对某 100 MW 燃煤机组进行了烟气 Hg 取样测试,发现 SCR 对 Hg⁰ 的氧化率与燃煤氯含量正相关,Cl 含量为 500 mg/kg 时,氧化率高达 96.18%。

电除尘器能有效地捕获烟气中的颗粒物,从而高效去除 Hg^p。但一般认为,以颗粒态形式存在的 Hg 占煤燃烧中 Hg 排放总量的比例小于 5%(在炉内高温下,这个比例还要小得多),且这部分 Hg 大多存在于亚微米颗粒中,而一般电除尘器对这部分粒径范围的颗粒脱除效率很低,所以电除尘器的除 Hg 能力有限^[19-20]。

袋式除尘器或电袋复合除尘器对 Hg 的脱除能力一般优于电除尘器,主要是由于在滤袋表面形成的灰层与 Hg 发生非均相氧化和催化氧化作用。井鹏等^[21]对国内某 300 MW 机组袋式除尘器前后烟气中 Hg 的浓度及形态分布特性进行测试,袋式除尘器对 Hg^p 脱除率较高,达 99.92%;对

Hg⁰ 和 Hg²⁺ 的去除效率分别达 30.30%和 51.18%;对总 Hg 的去除效率达 55.62%。

WFGD 对烟气中的可溶性 Hg²⁺ 具有较高的脱除作用,但对于不溶于水的 Hg⁰ 的捕捉效果较差,且部分 Hg²⁺ 会被脱硫浆液还原为 Hg⁰。杨宏旻等^[22]对 2 台 500 MW 机组 WFGD 进行了现场测试,其 Hg²⁺ 脱除效率可达 89.24%~99.1%,WFGD 对烟气中总 Hg 的脱除效率可达 50%以上。王运军^[23]对 8 个典型燃煤电厂的实测结果表明,烟气中 Hg²⁺ 浓度较高时,WFGD 对 Hg²⁺ 的脱除效率为 90%。湿式电除尘(WESP)与常规静电除尘的除尘原理相同,美国第一能源公司所属的 BMP 电厂在烟气脱硫之后安装了一台 WESP,并测试了该 WESP 对 Hg 的脱除性能,经过 WESP 脱除后,Hg⁰、Hg²⁺ 和 Hg^p 脱除效率分别为 6%、96%和 95%,总 Hg 脱除效率为 41%^[24]。

2.3 燃烧后吸附剂喷射脱 Hg 技术

2.3.1 干粉活性炭喷射吸附脱 Hg 技术

干粉活性炭一般采用喷射吸附的方式对烟气中的 Hg 进行高效捕集,即活性炭(AC)喷射脱汞技术(ACI),ACI 是目前燃煤电厂烟气脱汞应用最多的一种技术,典型工艺路线如图 5 所示。

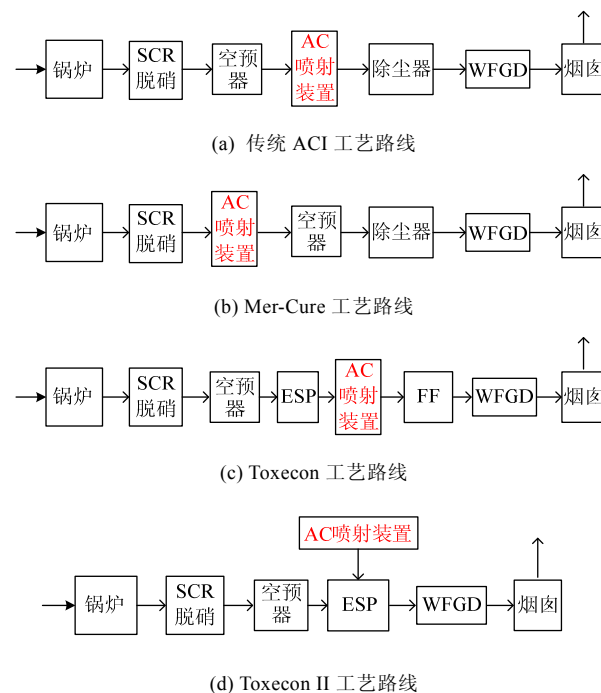


图 5 干粉活性炭喷射吸附脱 Hg 技术路线

Fig. 5 Dry activated carbon injection adsorption Hg technology route

传统的 ACI 工艺路线：干粉活性炭经喷射装置喷入除尘前置烟道内，吸附 Hg 之后，被后续除尘设备高效脱除，从而达到烟气脱 Hg 的目的。该技术结构简单，投资成本低，但活性炭消耗量较大，运行成本较高。吸附 Hg 后的活性炭混入飞灰，在环境中可能存在二次释放，会在一定程度上影响飞灰的综合利用。

为解决活性炭停留时间短及影响飞灰综合利用的问题，ALSTOM Power 公司开发了 Mer-Cure 工艺路线^[25]。首先，对干粉活性炭吸附剂进行改性，提高其吸附性能的同时促进 Hg⁰ 向 Hg²⁺ 转化，防止 Hg 的逃逸。然后将改性后的干粉活性炭喷入空气预热器前的烟道，增加其停留时间。该技术可使活性炭的喷射量大大减少，即使少量的活性炭混入，也不影响飞灰的资源化利用。

另外，美国电科院(EPRI)开发了 Toxecon 工艺路线。该技术是在原电除尘器后增设一个气布比较高的袋式除尘器，并将干粉活性炭的喷射点设置在电除尘器与袋式除尘器之间的烟道。该技术可使电除尘器出口烟尘浓度大幅降低，后级袋式除尘器收集的灰量也大幅减少，可循环利用或处置，但需增加较多的设备投资^[26]。

为了进一步降低工程造价，EPRI 对 Toxecon 工艺路线进行了升级优化，形成了 Toxecon II 工艺路线，即在电除尘器末级电场前增设干粉活性炭喷射格栅，电除尘器后级 10% 的飞灰与活性炭混合后可作循环利用或处置。但值得注意的是，电场内烟气流速较低，要实现活性炭粉末喷射的均匀性，需在电场横截面上布置大量喷点^[27]。

2.3.2 改性飞灰喷射吸附脱 Hg 技术

飞灰具有一定的吸附能力，飞灰对 Hg 的吸附主要是通过物理吸附、化学吸附和化学反应 3 种方式进行。飞灰对 Hg 的吸附能力与其自身的物理特性有关，如比表面积、粒径分布、孔隙率等。美国 CONSOL 实验室研究表明，飞灰中的未燃尽碳含量越高，飞灰的吸附 Hg 能力越强^[28]。为进一步提高飞灰对 Hg 的脱除性能，需对其进行适当改性，如采用 Cl、Br 等卤族元素，Mn、Fe、Cu 等金属及其化合物等进行改性^[29]。

典型的改性飞灰吸附脱 Hg 技术路线^[30-32]如

图 6 所示。采用电除尘器第 1 电场的粗灰作为原始灰样，经物理、化学改性后提高其物理吸附能力和 Hg 氧化能力。飞灰具有成本优势，在达到相同的脱 Hg 性能情况下，成本不到 ACI 的 1/3。目前，三河电厂采用了该技术路线。

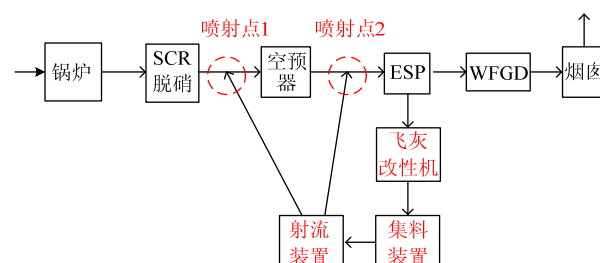


图 6 改性飞灰吸附脱 Hg 技术路线

Fig. 6 Modified fly ash adsorption technology route for Hg removal

2.3.3 燃烧后吸附剂喷射脱 Hg 技术对比

活性炭喷射及改性飞灰喷射脱 Hg 技术对比如表 2 所示。鉴于近年来活性炭价格攀升，且改性飞灰脱 Hg 技术具有较好的技术经济优势，建议优先考虑采用改性飞灰脱 Hg 技术，当其脱 Hg 性能无法满足排放要求时(0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)，再考虑采用改性活性炭脱 Hg 技术。

表 2 不同吸附脱 Hg 技术对比

Tab. 2 comparison of different Hg adsorption technologies

对比项目	活性炭	改性飞灰
投资费用	一台 600 MW 机组配套的总投资费用约 500~700 万元	较活性炭喷射投资费用略高，主要取决于飞灰在线改性设备的价格
运行费用	常规活性炭每脱 1kg Hg 约需 5.5~15.5 万美元；改性活性炭每脱 1kg Hg 约需 0.4~4.4 万美元	< 改性活性炭的 1/3
技术性能	可实现 2~5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的排放指标，改性活性炭可达 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	可实现 2~5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的排放指标

3 燃煤电厂烟气中 Hg 测试

燃煤电厂烟气中 Hg 的离线测试方法主要有湿化学法和固体吸附法 2 类。湿化学法是最常用和最准确的烟气 Hg 测试技术，采用具有选择性的吸附剂来捕集烟气中不同形态的 Hg，最主要的标准方法是安大略法(OHM)。采样系统主要应包

括恒温采样管、恒温过滤箱、吸收瓶箱、采样抽气泵、控制测量箱、脐带电线等，如图 7 所示。采样石英玻璃管及过滤系统需要控制采样温度为 120℃，主要为了防止因烟气中的水蒸气凝结而使烟气中的 Hg 没有完全进入 Hg 的采样收集系统，以及防止 Hg 在石英玻璃管吸附冷凝和在滤膜上发生形态转化。

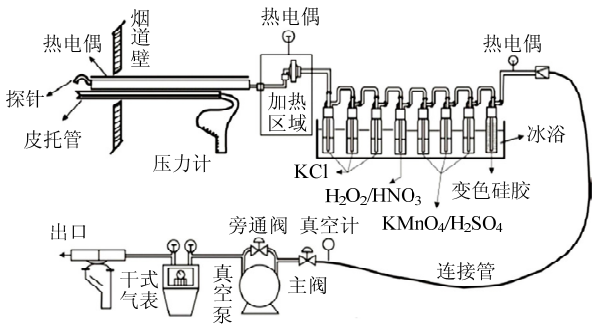


图 7 OHM 采样系统
Fig. 7 OHM sampling system

固体吸附法主要是采用改性活性炭作为固体吸附剂，对烟气中的 Hg 进行吸附采集。EPA 30B 属于该方法，采样系统如图 8 所示，主要包括活性炭吸附管、采样探头、温度传感器、除湿装置、采样控制器、采样泵等。采样探头应具备加热功能，加热温度不低于 120℃，以防止烟气冷凝。2 种测试方法对比如表 3^[33-34]所示。

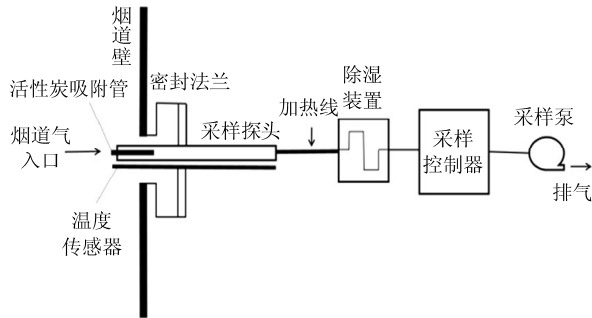


图 8 30B 采样系统
Fig. 8 30B sampling system

表 3 2 种燃煤电厂烟气 Hg 离线测试方法对比

Tab. 3 Comparison of two off-line Hg test methods for flue gas in coal-fired power plants

项目	OHM 法	30B 法
测量范围/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.5~100	0.1~50
采样时间/min	>120	>30
优点	测量精度高，用来标定校准其他监测方法；适用于不同烟道位置的手工采样监测；可以测量烟气中 3 种不同形态的 Hg 和总 Hg；可用于粉尘浓度相对较高烟气情况下各种形态 Hg 的测定	操作简单；测量精度高，是 Hg-CEMS 的标准参比方法
缺点	采样分析过程复杂，易引入人为误差；对采样人员技术要求较高，不适合大规模采用	仅适用于颗粒物浓度相对较低的烟道位置；取样监测位置需设置在高效除尘装置之后；不适用于监测 Hg 的形态

4 燃煤电厂烟气中 Hg 的排放特征

统计文献[35-38]中的数据，得到燃煤电厂中 Hg 的排放数据如图 9 所示。在超低排放实施之前，燃煤电厂烟气中 Hg 的排放浓度平均值为 6.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，虽满足 GB 13223—2011 的要求，但如按美国现役机组低阶煤(1.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)、非低阶煤(5.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)的 Hg 排放限值要求，其达标率分别仅为 15.2%、45.5%。

超低排放实施之后，燃煤电厂烟气中 Hg 排放浓度较超低排放实施前的排放水平有明显下降，平均值为 4.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ，如按美国低阶煤、非低阶煤的排放限值要求，其标率分别为 25.8%、70.9%。为更好保护大气环境，使我国燃煤电厂

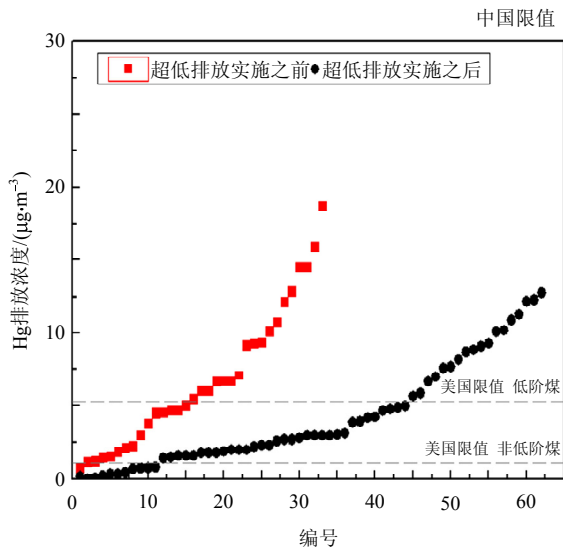


图 9 燃煤电厂 Hg 排放数据统计
Fig. 9 Hg emission statistics of coal-fired power plants

的重金属排放标准与国际接轨, 对燃煤电厂实施更严格的烟气 Hg 排放控制是非常有必要的。

5 结论

1) 燃煤电厂烟气中的 Hg 主要来源于煤的燃烧, 中国煤种 Hg 含量平均值为 200 ng/g, 普遍高于其他国家; 各煤种中褐煤 Hg 含量最低, 无烟煤 Hg 含量最高。

2) 燃煤电厂现有烟气治理设备, 如脱硝、除尘、脱硫对不同价态的 Hg 有一定的协同脱除能力, 干粉活性炭喷射脱 Hg 技术是目前最成熟可行的技术, 但其使用成本较高, 因此, 采用改性活性炭并提高其利用率, 是该技术研究的重点。

3) 燃煤电厂烟气 Hg 的离线测试方法主要有固体吸附和湿化学法 2 类。湿化学方法中的安大略法最为准确, 但操作繁琐。固体吸附法中 30B 法操作简单, 测量精度高, 目前应用较多。

4) 超低排放实施之后, 中国燃煤电厂烟气 Hg 排放均满足 GB 13223—2011 规定, 但按美国现役机组低阶煤、非低阶煤的 Hg 排放限值要求, 达标率分别仅为 25.8%、70.9%。因此, 对燃煤电厂实施更严格的烟气 Hg 排放控制非常必要。

参考文献

- [1] 孙雪丽, 朱法华, 王圣, 等. 燃煤电厂颗粒物超低排放技术路线选择[J]. 环境工程技术学报, 2018, 8(2): 129-136.
- [2] Zhang Y, Yang J P, Yu X H, et al. Migration and emission characteristics of Hg in coal-fired power plant of China with ultra low emission air pollution control devices[J]. Fuel Processing Technology, 2017, 8(2): 378-382.
- [3] 蔡天忠, 刘含笑, 王建忠, 等. 燃煤电厂烟气中汞的控制技术及需求分析[J]. 山东化工, 2018, 47(5): 1-3.
- [4] Wu Q R, Wang S X, Li G L, et. Temporal trend and spatial distribution of speciated atmospheric mercury emissions in China during 1978-2014[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50: 13428-13435.
- [5] 刘迎晖, 郑楚光, 游小清, 等. 氯元素对烟气中汞的形态和分布的影响[J]. 环境科学学报, 2001, 21(1): 69-73.
- [6] 赵毅, 马双忱, 华伟. 电厂燃煤过程中汞的迁移转化及控制技术研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, 4(11): 59-63.
- [7] 杨爱勇, 严智操, 惠润堂, 等. 中国煤中汞的含量、分布与赋存状态研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 32(15): 93-99.
- [8] 郑刘根, 刘桂建, 齐翠翠, 等. 中国煤中汞的环境地球化学研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2007, 37(8): 953-963.
- [9] 任德贻, 赵峰华, 代世峰, 等. 煤的微量元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 268-279.
- [10] 唐修义, 黄文辉. 中国煤中微量元素[M]. 北京: 商务印书馆, 2004: 8-9.
- [11] 张军营, 任德贻, 许德伟, 等. 煤中汞及其对环境的影响[J]. 环境科学进展, 1999, 7(3): 100-104.
- [12] Finkelman R B. Trace and minor elements in coal[M]. Organic Geochemistry. New York: Plenum, 1993: 10-12.
- [13] Swaine D J, Goodarzi F. Environmental aspects of trace elements in coal[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995: 23-28.
- [14] Yudovich Y E, Ketris M P. Mercury in coal: a review part 1 [J]. International Journal of Coal Geology, 2005, 62: 107-134.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 吕太, 冯银行, 索利慧, 等. 燃煤电厂现有烟气净化设备脱汞特性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(3): 59-69.
- [18] 郑逸武, 段钰锋, 汤红健, 等. 燃煤烟气污染物控制装置协同脱汞特性研究[J]. 中国环境科学, 2018, 38(3): 862-870.
- [19] Kolker A, Senior C L, Quick J C. Mercury in coal and the impact of coal quality on mercury emissions from combustion systems[J]. Applied Geology Technology, 2006, 21: 18-21.
- [20] 刘迎晖, 郑楚光. 燃煤烟气中汞的形态及其分析方法[J]. 燃料化学学报, 2000, 28(5): 463-467.
- [21] 井鹏, 王凡, 朱金伟, 等. 300 MW 燃煤机组烟气控制装置对气态汞去除效果[J]. 环境工程学报, 2015, 9(1): 307-311.
- [22] 杨宏旻, 刘坤磊. 电站烟气脱硫装置的脱汞特性试验[J]. 动力工程, 2006, 26(4): 554-557.
- [23] 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.
- [24] 田贺忠. 利用湿式静电除尘器脱除汞[J]. 国际电力, 2005, 9(6): 62-64.

- [25] Kang S G, Edberg C D, Rebula E. Demonstration of Mer-Cure technology for enhanced mercury control [C]//DOE/NETL Mercury Control Technology Conference, Pittsburgh, 2007.
- [26] Derenne S, Sartorelli P, Bustard J. Toxecon clean coal demonstration for mercury and multi-pollutant control at the Presque Isle Power Plant[J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90(11): 1400-1405.
- [27] Dombrowski K. Mercury control for plants firing Texas lignite and equipped with ESP-wet FGD[R]. Palo Alto: Final Project Report, 2010.
- [28] Li Y H, Lee C W, Gullett B K. Importances of activated carbons oxygen surface functional groups on elemental mercury adsorption[J]. Fuel, 2003, 82(4): 451-458.
- [29] 顾永正, 王树民. 改性燃煤飞灰吸附氧化脱汞机理研究进展[J]. 化工进展, 2017, 36(11): 4257-4264.
- [30] 张永生. 燃煤电厂飞灰在线改性吸附脱汞[C]//第十七届中国电除尘技术交流会, 合肥, 2017.
- [31] 徐旭东, 寿志毅, 李文华, 等. 燃煤电厂飞灰改性吸附剂脱汞技术[J]. 山东化工, 2018, 47(18): 175-176.
- [32] 胡小鑫, 蔡锡锋, 刘含笑, 等. 燃煤电厂烟道喷射吸附剂脱 Hg 技术[J]. 环保科技, 2018, 24(6): 51-53.
- [33] 刘含笑, 郭滢, 章培南, 等. 燃煤电厂烟气中 Hg 的测试方法研究[J]. 中国环保产业, 2017, 39(12): 59-62.
- [34] 陈招妹, 沈敏超, 刘含笑, 等. 燃煤电厂烟气中 Hg 的测试方法研析[J]. 山东化工, 2019, 48(6): 240-242.
- [35] Wang S M, Zhang Y S, Gu Y Z, et al. Using modified fly ash for mercury emissions control for coal-fired power plant applications in China[J]. Fuel, 2016, 181: 1230-1237.
- [36] Zhang Y S, Shang P F, Wang J W, et al. Trace element (Hg, As, Cr, Cd, Pb) distribution and speciation in coal-fired power plants[J]. Fuel, 2017, 208: 647-654.
- [37] Zhang Y S, Zhang Z S, Zhao L, et al. Study on the mercury captured by mechanochemical and bromide surface modification of coal fly ash[J]. Fuel, 2017, 200: 427-434.
- [38] Tao Y, Zhuo Y, Zhang L, et al. Mercury transformation across various air pollution control devices in a 200 MW coal-fired boiler of China[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2010, 5(5): 756-762.

收稿日期: 2019-05-08。

作者简介:



陈招妹

陈招妹(1969), 女, 硕士, 教授级高级工程师, 研究方向为工业烟气重金属及 SO₃ 脱除技术, czmfd@126.com;

刘含笑(1987), 男, 硕士, 工程师, 从事电力环保技术研发工作, 本文通信作者, gutounan@163.com。

(责任编辑 辛培裕)