

IECM 模型在燃煤电站汞污染控制及经济性预测中的应用

杨宏旻, 李大伟, 侯文慧, 赵 亮, 贾晓丽

(南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 对现有电站污染物控制装置基础上进行技术改造, 协同实现汞污染控制是行之有效的技术方案, 汞污染控制系统的技术经济性评估是燃煤电站管理者面临的首要问题. 用 Integrated Environmental Control Modeling (IECM) 软件模拟了温度、煤种及空气污染控制装置的配置对活性炭吸附电站燃煤烟气汞效果的影响, 并对不同条件下, 活性炭的喷射量进行了模拟和经济性分析. 结果表明活性炭捕获汞的效果是与排烟温度成反比的. 对于燃烧烟煤的电厂, 加入烟气脱硫装置 (FGD) 后活性炭的喷射量将大大减少, 再结合选择性催化还原装置 (SCR) 后, 可以达到很高的汞脱除效果; 对于无烟煤和褐煤, 加入烟气脱硫装置 (FGD) 可减少约 27% 的活性炭喷射量, 但再加入催化还原装置 (SCR) 后, 对活性炭的注入量几乎没有影响.

[关键词] 集成环境控制模型 (IECM), 活性炭喷射, 预测, 经济性分析

[中图分类号] X511 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010) 01-0031-05

Application of IECM in Mercury Pollution Control and Economic Forecast for Coal-Fired Power Plant

Yang Hongmin, Li Dawei, Hou Wenhui, Zhao Liang, Jia Xiaoli

(School of Power Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract The technological upgrading based on the existing pollution control devices is an effective solution to mercury pollution control in coal-fired power plants. The most important issue facing managers is the technical and economic evaluation for mercury pollution control devices. The effects of the operating temperature, coal type and configuration of the air pollution control devices on the mercury adsorption by activated carbon injection for coal-fired flue gas were predicted in this paper. The simulation and economic analysis on the injection of activated carbon under different operation conditions were also carried out with the software of Integrated Environmental Control Modeling (IECM). The results show that the effect of activated carbon on mercury removal is in inverse proportion to the temperature of flue gas. For the bituminous coal-fired power plant, the flue gas desulfurization (FGD) system reduces the amount of the injection of activated carbon significantly. Combined with the selective catalytic reduction (SCR) system, the higher removal efficiency for mercury in flue gas can be achieved. For anthracite and lignite-fired boilers, the activated carbon injection could be reduced by about 27% by flue gas desulfurization (FGD) system, and there is no obvious impact of configuration combined with the selective catalytic reduction (SCR) on the injection of activated carbon.

Key words integrated environmental control modeling (IECM), activated carbon injection, prediction, economic analysis

燃煤烟气是汞污染的主要人为排放源. 根据美国环保署的数据, 大气环境中约 31% 的汞来自于燃煤电厂的煤燃烧, 居人为汞排放源第一位^[1], 已经在世界范围引起广泛关注. 据估算, 1995 年中国燃煤汞排放总量为 30 219 t, 其中向大气排放的汞量为 21 318 t. 1978~1995 年平均增长速度为 418%^[2]. 对于燃煤过程, 汞主要是以气态单质汞的形式排放. 脱除汞的难易取决于汞的形态分布, 而烟气中汞的形态分布与飞灰成分、温度、烟气成分等的影响有很大关系^[3]. 利用活性炭吸附控制烟气中的汞是目前美国最常用的

收稿日期: 2009-10-10
基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (国家 973 计划) (2006CB200302)、国家自然科学基金 (50976049)、教育部留学回国人员科研启动基金.
通讯联系人: 杨宏旻, 工学博士, 教授, 研究方向: 燃烧与污染物控制. E-mail: yanghongmin@njnu.edu.cn

汞污染控制技术, 美国环保署曾对活性炭喷射技术成本作过估计, 按目前的技术水平可以达到 90% 的脱汞效率, 然而每脱除 1 kg 汞需花费一万多美金^[4], 价格较为昂贵。

随着我国环保标准日益严格, 越来越多的燃煤电厂在不久的将来需要安装脱汞装置. 在现有电站污染物控制装置基础上进行技术改造, 协同实现汞污染控制是行之有效的技术方案. 电厂的改造方案既受到脱汞效果的限制, 又受到改造资金的制约. 如何选择评估合理的汞污染控制技术, 既能达到较高的脱汞效率, 又可以降低净化成本, 预测并了解汞污染控制技术的技术经济性是面临的首要问题. 本文利用 IECM 软件模拟燃煤电厂加入不同脱除装置后对活性炭除汞的影响并对脱汞装置的经济性进行了研究.

1 IECM 模型

1.1 IECM 简介

IECM (Integrated Environmental Control Modeling) 是美国 CMU (Carnegie Mellon University) 为能源部和联邦能源技术中心开发的一个通用软件, 具有模拟和预测燃煤电站常规和先进的空气污染物排放控制技术的能力, 主要用来评价当电站采用多种可选择的环境控制方法时的运行、排放和投资情况.

IECM 的模型框架由两部分组成, 即技术运行模型和技术投资模型. 技术运行模型采用质量和能量平衡方法来定量模拟预测整个系统的物质流. 每一个技术模块所需要的能量同样可以模拟并用于计算电站的整体效率. 目前每一个模块的运行过程都有 10~ 20 个输入参数控制. 对每一个技术模块都有一个投资分析模块与其配套, 可以用来预测资本投资, 变因素运行投资和固定投资^[5, 6]. 其中汞脱除模块:

汞脱除基准效率是对现有污染物控制装置的进出口所测量的烟气中全汞的脱除效率, 如公式 1 所示. 污染物控制装置包括静电除尘器、布袋除尘器、湿法 FGD、半干法 FGD 和选择性催化还原装置等. 此部分测量数据来自美国环保署 ICR 数据库. 包括了在不同煤种、温度条件下污染物控制装置的汞脱除效率.

$$\eta_{baseline} = \frac{Emission_{in} - Emission_{out}}{Emission_{in}} \times 100\%.$$

(1)

在汞脱除基准效率的基础上, 建立了活性炭喷射汞吸附模型, 将相互关联的因素 (包括活性炭喷射量、烟气温度、含水量等) 进行数据拟合, 最终得出由拟合参数 a、b、c 表示的活性炭喷射吸附汞的效率, 如公式 2 所示.

$$\eta_{ACI} = 100 - \frac{\eta_{baseline} \times a}{[ACI + b]^c} \%.$$

(2)

1.2 IECM 模拟方法

在 IECM 电厂配置中, 可选锅炉类型有切圆燃烧方式锅炉、屏式锅炉和气旋式锅炉. 汞的控制方法有活性炭喷射法和水加活性炭碳喷射法、颗粒物控制装置有静电除尘和袋式除尘法、SO_x 的控制方法有湿法和干法等等. 在参数设置中, 可以在煤种特性、基本电站参数、多污染物控制、资金成本、可变成本等各个模块中根据需要设置参数, 运行软件后便可直观的得出污染物排放情况和整体投资.

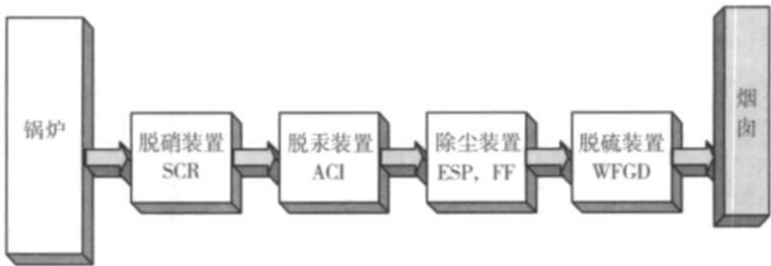


图 1 IECM 模型中燃煤电站污染物控制装置的基本配置

Fig.1 Basic configuration of the pollution control devices of coal-fired power plant in IECM model

为了研究燃煤电厂各装置对脱汞效果的影响, 本例采用烟煤、无烟煤和褐煤作为研究煤种. 设置好选用煤种后, 在脱除过程中分别增加静电除尘装置 (ESP); 静电除尘装置和催化还原装置 (SCR + ESP); 静电除尘装置和湿法脱硫装置 (ESP + FGD); 选择性催化还原装置、静电除尘装置和湿法脱硫装置; 干法脱硫装置 (SD) 和袋式除尘装置 (FF); 催化还原装置 (SCR)、干法脱硫装置 (SD) 和袋式除尘装置 (FF), 运行

ECM 软件,可以模拟出加入不同装置后不同煤种脱汞效果 (见表 1)。

2 IECM 模拟活性炭汞吸附特性及经济分析

2.1 活性炭吸附法

目前用活性炭吸附烟气中的汞可以通过两种方式,一种是向烟气中喷入粉末状活性炭 (PAC),另一种是将烟气通过颗粒活性炭吸附床 (GAC)。PAC 将活性炭直接喷入烟气中,粉末活性炭吸附汞后由其下游的除尘器 (如静电除尘器或布袋除尘器) 除去,此法投资小,但活性炭与飞灰混杂在一起,不能再生,且汞浓度很低,汞与活性炭颗粒接触机会少,活性炭利用率低、耗量大,脱汞成本很高。由于水分对单质汞的吸附有重要作用,所以水加碳喷射系统可以有效减少活性炭的喷射量并将产生对其他脱除装置除汞效率的影响。因此,电厂已经配备的湿法烟气脱硫系统可以实现在汞排放量减少的前提下大大降低成本。GAC 一般安排于脱硫装置 (FGD) 和除尘器后,除汞效果较好,但需要增加设备、占地和初投资比较大。有实验数据^[7]表明汞脱除效率受温度影响很大,在 40℃ ~ 120℃ 范围内,飞灰对汞的吸附主要是物理吸附。飞灰对汞的吸附效率随着温度的上升而下降。喷雾冷却烟气是一种有效降低烟气流温度的方法,在大多数情况下,这种方法减少了汞吸附捕捉的能力,因此汞的处理成本得到控制。

2.2 IECM 模拟活性炭汞吸附特性

2.2.1 活性炭吸附汞中活性炭喷射量的研究

选定 500MW 的燃煤电站,燃煤选择低硫烟煤 (参数见表 2) 并选用冷端的电除尘器作为除尘装置。通过 IECM 模拟可以得到不同温度下活性炭的喷射率与脱汞效率的曲线如图 2 所示。

表 1 各种电站配置汞最低脱除率

Table 1 Baseline mercury removal efficiency in different power plants

技术	汞脱除率 %		
	烟煤	无烟煤	褐煤
ESP	31.0	31.0	31.0
SCR+ESP	31.0	31.0	31.0
ESP+FGD	79.3	48.3	48.3
SCR+ESP+FGD	96.2	54.3	54.3
SD+FF	39.0	39.0	39.0
SCR+SD+FF	39.0	39.0	39.0

表 2 IECM 模型输入参数

Table 2 Input parameters in IECM model

煤参数	数值
发热量 / (kJ/kg)	33 085
硫含量 %	1.0
灰分含量 %	3.8
水分含量 %	2.2
电站发电功率 / MW	500
热耗率 / (kJ/kWh)	8 310
空气预热器出口烟温 / °C	166

从图中可以得出活性炭捕获汞的效率是与排烟温度成反比的; 活性炭喷射量为 0.08 g/m³ 时汞脱除率达到较高水平, 继续注入活性炭后, 汞脱除效果不明显。水加碳喷射系统不但可以降低烟气的温度, 而且活性炭表面水分对汞的吸附有促进作用, 活性炭表面的水分对单质汞的吸附起重要作用, 水可以和活性炭表面的碳氧官能团发生互相作用形成新的活性位, 形成二次活化中心, 改变活性炭表面得吸附条件, 有利于汞的吸附脱除^[8], 这可以减少脱除同样质量汞时活性炭的注入量。在 IECM 中设置水加碳喷射系统后模拟出注水效果的基本情况如图 3 所示。活性炭喷射率由 1.09 g/m³ 减少至 0.608 g/m³。

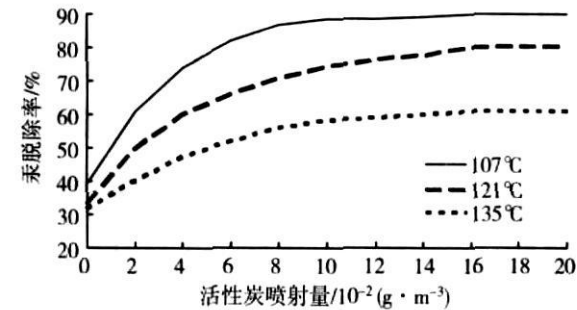


图 2 不同温度下活性炭喷射量与脱汞效率的影响
Fig.2 Effect of amount of carbon injection on mercury removal efficiency under various operating temperatures

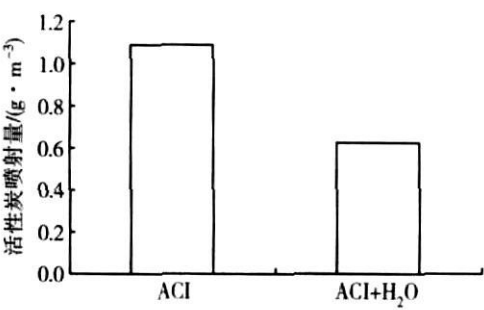


图 3 活性炭与水加活性炭喷射系统所需炭喷射量的比较 (达到 90% 汞脱除效率)
Fig.3 Comparison of carbon injection requirement between ACI and ACI+water systems with 90% mercury removal

加入水以后可大大减少活性炭喷射率,但是水的加入会对其他装置脱汞效果产生影响. 为了具体分析水加碳喷射系统对不同装置和不同煤种汞脱除效果, 采用了 IECM 模型对静电除尘 (ESP)、湿法烟气脱硫 (FGD)和选择性催化还原 (SCR)等技术进行模拟, 同时选用了 4 种不同类型的煤相比较: 低硫烟煤 (0.6% 的 S)、高硫烟煤 (3% 的 S)、无烟煤和褐煤, 设置汞的脱除率为 90%. 因此对于燃烧烟煤的电厂, 加入烟气脱硫装置 (FGD)后活性炭的喷射量将大大减少, 再增加催化还原装置 (SCR)后基本无需喷射活性炭. 而对于无烟煤和褐煤, 加入烟气脱硫装置 (FGD)可减少约 27% 的活性炭喷射量, 再加入催化还原装置 (SCR)后, 对活性炭的注入量几乎没有影响. 根据 IECM 的运行数据可以做出不同装置和不同煤种对活性炭喷射量的影响如图 4 所示.

2.2.2 活性炭吸附汞的经济性分析

安装和使用一个去除汞的活性炭喷射系统的成本, 取决于电厂大小、汞去除效率、吸附剂成本、吸附剂处理成本等方面. IECM 预测结果发现, 利用活性炭喷射控制汞排放技术中, 活性炭喷射系统的成本仅占汞控制系统总费用的 20% ~ 25%, 活性炭喷射的运行和维护费用在整个除汞费用模块中比重最大, 大概占到 75%, 如表 3 所示.

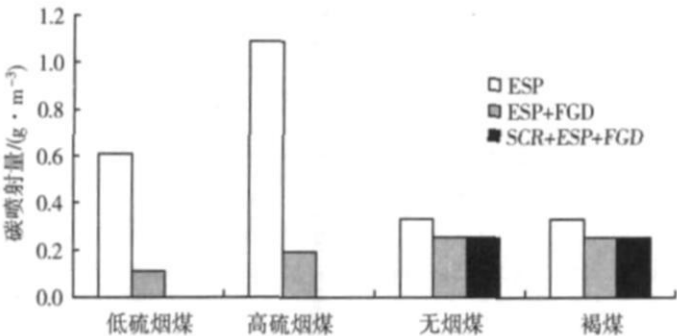


图 4 不同装置配置和不同煤种对活性炭喷射量的影响
Fig.4 Effects of power plant configurations and coal types on carbon injection requirement

表 3 汞模块的运行、维护成本
Tab 3 Operation and maintenance costs for mercury module

项目	费用 / ¥
活性炭	11 000 / ton
垃圾处理	114 4 / ton
水	5 / ton
劳动力	50 / h

图 5 为采用低硫烟煤的电站利用不同改造技术的技术经济型比较. 第一系列为电站只安装 ESP 情况下, 增加活性炭喷射系统后的运行费用. 可见, 仅使用活性炭喷射去除汞的费用与水加碳喷射系统去除汞的费用比较, 从 55.4 ¥ MWh 减少至 35.6 ¥ MWh 而增加了 SCR 系统后, 喷射的活性炭费用变化不大, 而总费用大大增加, 说明增加了 SCR 系统后, 通过添加水来提高汞脱除效率是不经济的, 主要原因在于 SCR 会将烟气中 SO₂ 氧化为 SO₃, 使得烟气酸露点提高, 水的添加会使尾部受热面的腐蚀加剧. 第二系列为电站安装 ESP 和 FGD 情况下, 增加活性炭喷射系统后的运行费用. 可见, 烟气脱硫系统可以使活性炭喷射费用大大减少, 在增加喷水装置和 SCR 系统后, 活性炭喷射的费用可以降低到最小. 图中所示误差为预测值与美国俄亥俄州 3 所电站脱汞技术改造的经济性差异, 可见, 预测误差均控制在 15% 以内, 考虑到脱汞装置改造中存在的诸如煤种、电站原有污染物控制装置的新旧程度等不确定因素, 这样的预测结果是能接受的.

3 结论

随着我国环保标准日益严格, 越来越多的燃煤电厂需要安装脱汞装置. 电厂的改造方案既受到脱汞效果的限制, 又受到改造资金的制约, 活性炭吸附法是目前研究中最集中且较为成熟的一种方法. 如何在

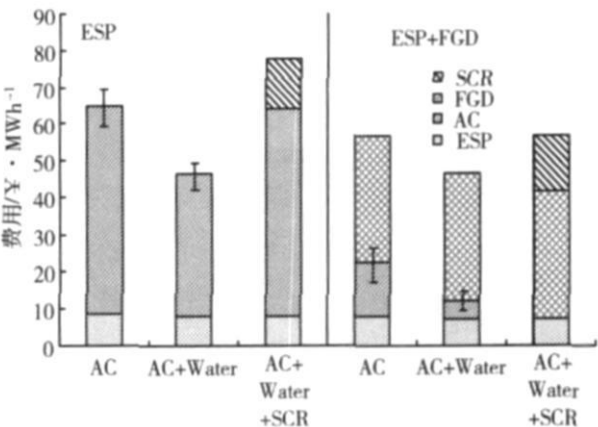


图 5 低硫烟煤电厂不同改造技术的脱汞费用比较
Fig.5 Comparison of the cost between various retrofit technologies for mercury removal in a low-sulfur bituminous coal-fired power plant

燃煤电站设备、煤种等不同的情况下选择合理的活性炭吸附系统是燃煤电站面临的首要问题.

ECM 模型简单易行, 并有较好的投资向导作用. ECM 模型为电力管理与投资部门提供了有力的预测燃煤电站除汞技术经济性的工具, 并对寻求经济合理的除汞装置具有重要指导意义. 因而 ECM 模型是一种值得大力推广的和进一步研究改进的预测模型, 值得在电站建设和改造工程中广泛应用.

[参考文献] (References)

- [1] US EPA (US Environmental Protection Agency). Feb. 27th, 2008. Clean Air Mercury Rules[EB/OL]. <http://www.epa.gov/camr/basic.htm>.
- [2] Wang Qichao, Shen Wenguo, Ma Zhuangwei. The estimation of mercury emission from coal combustion in China[J]. China Environmental Science, 2000, 19(4): 318-321.
- [3] 杨宏旻, 曹旻, 潘伟平. 吸附剂的汞吸附特性实验[J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(6): 486-490.
Yang Hongmin, Cao Yan, Pan Weiping. Experimental investigation on elemental mercury adsorption characteristics of sorbents[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(6): 486-490. (in Chinese)
- [4] Pavlish JH, Sondreal EA, Mann MD, et al. Status review of mercury control options for coal fired power plants[J]. Fuel Processing Technology, 2003, 82(2/3): 89-165.
- [5] Rubin ES, Kalagnanam JR, Frey HC. Integrated environmental control modeling of coal fired power systems[J]. Journal of Air and Waste Management Association, 1997, 47(11): 1180-1188.
- [6] Rubin ES, Salento JS, Frey HC, et al. Modeling of integrated environmental control systems for coal fired power plants[R]. Pittsburgh: US Department of Energy, 1991: 57-86.
- [7] 孟素丽, 段钰锋, 黄治军, 等. 燃煤飞灰吸附气态汞影响因素的试验研究[J]. 动力工程, 2009, 29(5): 487-491.
Meng Sulì, Duan Yufeng, Huang Zhijun, et al. Experimental study on factors influencing adsorption of mercury vapor by coal fired fly ash[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(5): 487-491. (in Chinese)
- [8] 曾汉才, 王欣, 李松柳, 等. 活性炭纤维脱除燃煤烟气中汞的试验研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(7): 1-4.
Zeng Hancái, Wang Xìn, Lì Songliu, et al. Experimental research of removing mercury from flue gas by activated carbon fibers[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2006, 34(7): 1-4. (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]