

基于高效除雾器的燃煤电厂颗粒物超低排放

李润平¹, 王凤阳², 杨志勇³, 吕海生², 江建忠², 肖平²

(1. 中国华电煤业集团有限公司, 北京 100035; 2. 中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京 102209;

3. 内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司 煤矸石热电厂, 内蒙古 鄂尔多斯 010303)

摘要: 为了深入研究评估高效除雾器对于燃煤电厂颗粒物超低排放的影响, 对某 200 MW 燃煤电厂加装高效除雾器前后脱硫塔出口的颗粒物排放浓度、粒径分布等进行测试。结果表明, 加装高效除雾器前, 脱硫塔出口颗粒物不能稳定实现超低排放达标。120 MW 和 200 MW 负荷下, 颗粒物排放浓度平均值为 12 mg/m^3 和 18 mg/m^3 。负荷越高, 排放浓度越高; 颗粒物粒径越小, 排放的粒数浓度越高。加装高效除雾器后, 150、180 和 200 MW 三种不同负荷下均能实现稳定超低排放达标, 排放浓度均值分别为 3.25 、 2.24 和 1.82 mg/m^3 , 高效除雾器对 PM_{10} 的去除效率可达到 90%。粒径分析表明, 高效除雾器对细颗粒物 $\text{PM}_{0.1}$ 的去除效果达 90%。高效除雾器可作为湿式静电除尘器的替代, 对燃煤电厂超低排放改造起关键作用。

关键词: 高效除雾器; 燃煤电厂; 颗粒物; 超低排放

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2018)05-0136-06

High-efficiency demister to realize ultra-low emission of particulate matters in coal-fired power plant

LI Runping¹, WANG Fengyang², YANG Zhiyong³, LYU Haisheng², JIANG Jianzhong², XIAO Ping²

(1. China Huadian Coal Industry Group Co., Ltd., Beijing 100035, China; 2. China Huaneng Clean Energy Research Institute, Beijing 102209, China;

3. Coal Gangue Thermal Power Plant, Inner Mongolia Mengtai Coal Industry Co., Ltd., Ordos 010303, China)

Abstract: In order to assess the effects of High-efficiency demister to realize ultra-low emission of particulate matters in coal-fired power plant, the particle emission concentration and particle size distribution of a 200 MW coal-fired power plant with and without installing high-efficiency demister were tested in this study. The test results show that the ultra-low emission standards cannot be achieved steadily without the installation of high-efficient demister. Under the load of 120 MW and 200 MW, the average concentration of particulate matter emission are 12 mg/m^3 and 18 mg/m^3 , respectively. The higher the load of the boiler, the higher emission concentration of particulate matter is. Meanwhile, the smaller the particle size, the higher the concentration of the particle number concentration emitted. However, after the installation of the high-efficiency demister, the ultra-low emission standard can be achieved under three different loads. Specifically, the average emission concentration of 150, 180 and 200 MW are 3.25 , 2.24 and 1.82 mg/m^3 , respectively. And the removal efficiency of PM_{10} by high-efficiency demister can reach 90%. Particle size analysis results show that the removal efficiency of $\text{PM}_{0.1}$ can also reach 90%. The high-efficiency demister can be used as a substitute for the wet electrostatic precipitator, which plays a key role in the ultra-low emission transformation of coal-fired power plants.

Key words: high-efficiency demister; coal-fired power plants; particulate matters; ultra-low emission

0 引言

燃煤电厂超低排放改造工程是我国电力行业积

极响应国家和社会对于环境保护工作的高标准、严要求, 坚决履行企业社会责任的重要举措^[1-3]。根据相关规定, 燃煤电厂超低排放改造需要达到烟囱

收稿日期: 2018-04-27; 责任编辑: 张晓宁 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18042701

基金项目: 中国华能集团科技资助项目(HNKJ17-H04)

作者简介: 李润平(1971—), 男, 山西代县人, 工程师, 主要研究火力发电厂节能技术。E-mail: 15877569168@163.com

引用格式: 李润平, 王凤阳, 杨志勇, 等. 基于高效除雾器的燃煤电厂颗粒物超低排放[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 136-141.

LI Runping, WANG Fengyang, YANG Zhiyong, et al. High-efficiency demister to realize ultra-low emission of particulate matters in coal-fired power plant[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 136-141.

出口处烟气颗粒物浓度、SO₂浓度和NO_x浓度分别不超过10、35、50 mg/m³。这些排放标准的提出对当前燃煤电厂的污染控制设施产生了巨大的压力,在不进行大规模改造的情况下实现3项污染物的同时达标几乎不可能。

我国燃煤电厂普遍采用静电除尘器捕集烟气中的颗粒物,静电除尘器的除尘效率可达99%以上。但细颗粒物,特别是PM_{2.5}在静电除尘器中的捕集效率不高。有研究表明,目前颗粒物排放浓度超过超低排放标准的主要原因为烟气中的细颗粒物占比过高^[4-5]。因此,燃煤电厂要实现颗粒物的超低排放,需要重点控制烟气中的细颗粒物浓度。

目前,燃煤电厂普遍通过低低温静电除尘器和电袋复合除尘器改造方式来提高除尘器的捕集效率,以高效率脱除细颗粒物。但烟气在流经湿法脱硫塔进行脱硫反应时,部分石膏晶体、石灰石浆液液滴被烟气携带进入烟囱,排入大气;部分烟气中的细颗粒物在脱硫塔高湿、高浆液含量的情况下生长增大,提高了脱硫塔后细颗粒物浓度^[6-11]。因此,燃煤电厂超低排放改造工程在烟气进入烟囱前还需再增加湿式静电除尘器,用以脱除烟气中携带的脱硫浆液、石膏晶体以及烟气中的细颗粒物^[4-5,8,10,12-15]。该种技术路线超低排放改造的成本

高,施工难度大,现场布置困难,湿法静电除尘器本身水耗量、电耗量较大。此外,也可以通过对原湿法脱硫塔内的除雾器进行改造,采用高效除雾器协同除尘满足超低排放要求^[16-17]。目前国内已有工程实践表明,以管束式、离心式为代表的高效除雾器可以实现颗粒物超低排放。但是,目前的研究主要停留在数值模拟和选型对比等方面^[18-19],缺乏从颗粒物层面进行现场测试获得的评估数据。

本文采用一种新型高效除雾器取代湿法静电除尘器,并对新型高效除雾器安装前后燃煤电厂颗粒物排放情况进行测试,比较新型高效除雾器在实现燃煤电厂超低排放改造方面的相关特点,为我国燃煤电厂超低排放改造降低成本提供参考。

1 试验

1.1 燃煤电厂基本情况

本试验在某200 MW循环流化床锅炉燃煤电厂进行。该锅炉为无锡华光锅炉厂设计制造,型号为UG-745/13.7-M型。该燃煤电厂除尘装置采用电袋复合除尘器,布袋经过超低排放改造已更换为超低滤袋;脱硝装置采用SNCR(选择性非催化还原装置),还原剂为尿素;脱硫装置为石灰石-石膏湿法脱硫装置。燃煤煤质特性分析见表1。

表1 锅炉燃煤煤质分析
Table 1 Analysis results of coal sample

$w(S_{ar})/\%$	$M_t/\%$	$M_{ad}/\%$	$A_{ar}/\%$	$V_{daf}/\%$	$Q_{net,ar}/(MJ \cdot kg^{-1})$
0.51	27.00	3.00	19.07	47.85	12.16

1.2 测试仪器

采样点布置在湿法脱硫塔出口,烟囱之前。测试分2次:第1次测试在电厂超低排放改造后进行;第2次测试在新型高效除雾器安装完成后进行。2次测试在高、中、低3种不同负荷下进行,负荷和排烟温度见表2。

表2 负荷和排烟温度

Table 2 Boiler load and exhaust gas temperature

项目	负荷/MW	排烟温度/℃
第1次测试	120	120
	200	120
第2次测试	150	130
	180	132
	200	135

测试仪器为荷兰Dekati公司生产的Dekati[®]荷电低压撞击器(ELPI+),通过预荷电器将气流中颗粒荷电后,测量撞击到采集板上的颗粒导出的电流值反算颗粒数量。关闭ELPI+的荷电器后,即为传统的惯性撞击器,可通过称重的方式得到不同粒径颗粒的质量浓度。ELPI+共有14个撞击级,实现PM₁₀以下颗粒物的14级分级,切割粒径6~10 μm。ELPI+采样用膜采用梅特勒XP6微量天平进行称重,精度可以达到10⁻⁶ g。

1.3 新型高效除雾器

燃煤电厂在脱硫塔顶部除雾区加装一层新型除雾器。该除雾装置由中国华能集团清洁能源技术研究院研发^[20],其技术原理如图1所示。

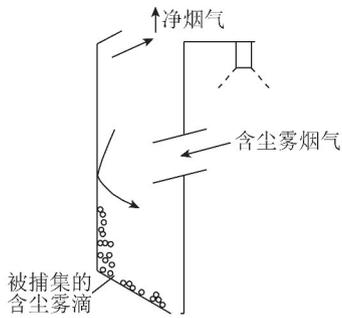


图1 高效除雾器技术原理示意

Fig. 1 Technical principles of high-efficiency demister

新型高效除雾器采用离心力作为颗粒物去除的驱动力,通过烟气在除雾器结构的作用下实现内外2层高速旋转,颗粒物在离心力作用下被除雾器壁捕集,在冲洗水的作用下被洗脱进入脱硫塔内。新型高效除雾器不仅对细颗粒物有较高的捕集效率,且对脱硫塔内进入烟气中的石膏晶体、脱硫浆液液滴、水雾等亦有明显的脱除作用。

2 结果和讨论

2.1 高效除雾器安装前颗粒物排放情况

在高效除雾器安装前对脱硫塔出口处烟气中的颗粒物浓度及粒径分布进行测量。120、200 MW 工况下,烟气颗粒物累积质量浓度随粒径的变化如图2所示。可以看到,高负荷(200 MW)时,PM₁₀ 累积质量浓度可达约 18 mg/m³,低负荷(120 MW)时,PM₁₀ 累积质量浓度约为 12 mg/m³。在2种负荷下,排放浓度均未达到超低排放标准(10 mg/m³)。高负荷时烟气流速增大,携带更多的颗粒物排入大气,除尘器和除雾器的颗粒物捕集效率均下降。

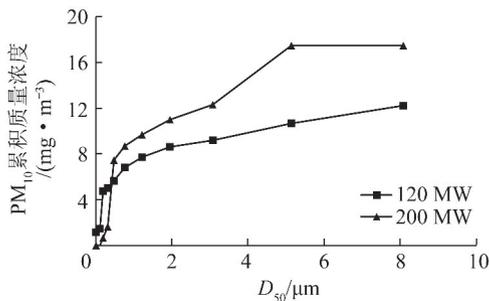
图2 不同负荷下 PM₁₀ 颗粒物累积质量浓度分布

Fig. 2 Distribution of particle cumulative mass concentration under different boiler loads

图3为200 MW下,颗粒物浓度随时间的变化。可以看到,颗粒物浓度随时间变化范围较大,最小值为 2.78 mg/m³,最大值为 52.5 mg/m³,均值约为

15.3 mg/m³。在线测量结果与累积质量浓度测量结果较一致,不能稳定达到超低排放标准。

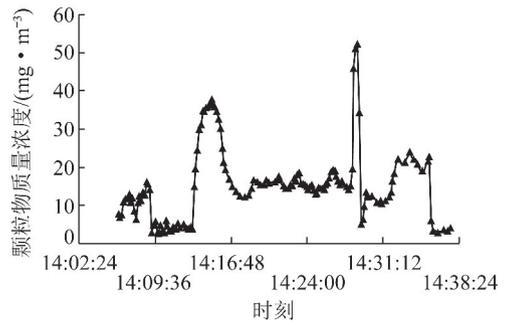


图3 颗粒物浓度随时间的变化(200 MW)

Fig. 3 Variation of particle mass concentration with time(200 MW)

烟气中的颗粒物粒数浓度和质量浓度的粒径分布如图4所示。可以看到,200 WM 负荷下,烟气中颗粒物粒数浓度在<0.01 μm 时达到最大值,>1 μm 的粒数浓度很低。随粒径增大,颗粒物粒数浓度变小,表明颗粒物粒径越小,除尘器和除雾器等污染控制设备对颗粒物的捕集效率越低,也有可能是由于脱硫塔中细小的循环浆液、脱硫石膏晶体等被携带进入烟气,使烟气中细颗粒物浓度升高。颗粒物质量浓度在 0.48 和 5.13 μm 时达到最大值,这是颗粒物粒数浓度、颗粒物密度等因素共同作用的结果。

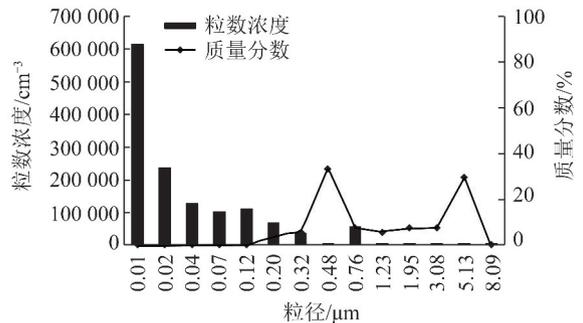


图4 颗粒物粒数浓度和质量浓度的粒径分布

Fig. 4 Distribution of particle number concentration and mass concentration with diameter

2.2 高效除雾器安装后颗粒物排放情况

安装高效除雾器后,不同负荷下的烟气颗粒物累积质量浓度如图5所示。150、180和200 MW 负荷下,烟气颗粒物质量浓度最高分别可达到 3.25、2.24 和 1.82 mg/m³。可见,即使按照最严格的颗粒物超低排放浓度标准(5 mg/m³),在3种负荷下,烟气颗粒物排放浓度亦能实现达标排放。此外,随着负荷的提高,颗粒物排放浓度逐渐降低,这与安装高效除雾器前不同。安装高效除雾器前,随着负荷增

高,烟气颗粒物排放浓度升高,这可能与高效除雾器的工作原理有关,高效除雾器依靠离心力脱除烟气中的颗粒物,随着负荷升高,烟气流速增大,在高效除雾器中的流速增大,相应的离心力增大,对颗粒物的捕集效果提高。粗略估计,高效除雾器对颗粒物的捕集效率可达到90%左右(200 MW)。

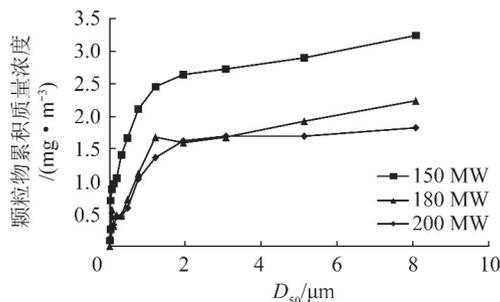


图5 不同负荷下颗粒物累积质量浓度分布

Fig. 5 Distribution of particle cumulative mass concentration under different boiler loads

烟气中的颗粒物排放浓度如图6所示。以200 MW为例,颗粒物排放浓度基本稳定在 5 mg/m^3 以下,大部分情况下为 $1 \sim 4 \text{ mg/m}^3$,平均 3.44 mg/m^3 ,测量值与累积质量浓度较接近。

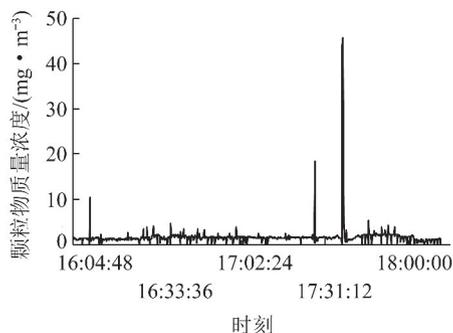
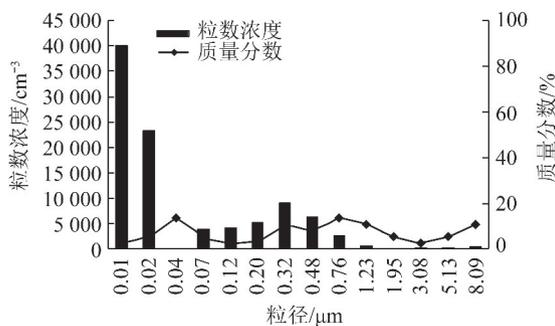


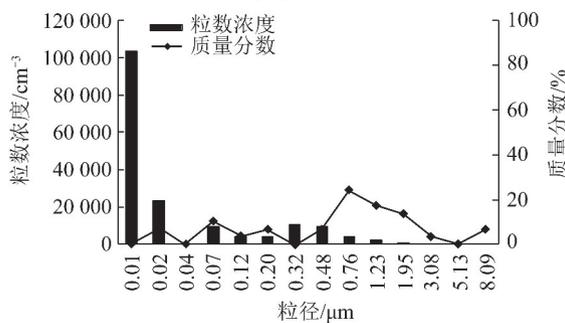
图6 颗粒物浓度随时间变化情况

Fig. 6 Variation of particle mass concentration with time

烟气中颗粒物粒数浓度和质量分数随粒径的变化如图7所示。可以看到,2种负荷下,颗粒物的粒数浓度与安装高效除雾器前相比均发生了大幅降低,最高粒数浓度仅为安装前的 $1/10 \sim 1/5$,这与质量分数的下降相吻合。颗粒物粒数浓度仍在小粒径时达到最大,随粒径增大,粒数浓度迅速降低。从粒数浓度随着粒径的变化看,高效除雾器对烟气中颗粒物的去除效果随粒径的增大而提高,较大粒径的颗粒物粒数浓度下降超过90%,说明高效除雾器不仅对较大粒径颗粒物具有显著的脱除作用,对细颗粒物($<0.1 \mu\text{m}$)也具有较高的脱除效率,这也是高效除雾器高颗粒物脱除率的根本原因。



(a) 150 MW



(b) 200 MW

图7 颗粒物粒数浓度和质量分数的粒径分布

Fig. 7 Distribution of particle number concentration and mass fraction with diameter

2.3 高效除雾器和湿式静电除尘器对比

经过近5年的大规模建设,我国燃煤电厂超低排放改造已接近尾声。由于除尘装置改造不彻底,脱硫塔中的循环浆液和脱硫石膏晶体被携带进入烟气中,部分燃煤电厂的颗粒物排放浓度不能稳定达到超低排放的要求,特别是在要求更严格(5 mg/m^3)的地区。很多电厂为了彻底解决这一问题,在湿法脱硫塔与烟囱之间加装了湿式静电除尘器。但是湿式静电除尘器无论从固定投资、运行成本、操作难度、安全性等方面均存在明显的问题。在脱硫塔中加装高效除雾器替代湿式静电除尘器,是稳定实现达标排放的途径。

高效除雾器与湿式静电除尘器对比分析结果见表3。可以看出,高效除雾器相关性能均优于湿式静电除尘器。

3 结论

1)在加装高效除雾器之前,脱硫塔出口颗粒物不能稳定实现超低排放达标。120、200 MW负荷下,颗粒物排放浓度平均值为 12 mg/m^3 和 18 mg/m^3 。负荷越高,排放浓度越高。颗粒物粒径越小,排放的粒数浓度越高。

表3 高效除雾器和湿式静电除尘器对比

Table 3 Comparison of high-efficiency demister and wet electrostatic precipitator

参数	高效除雾器	湿式电除尘器
二次污染	收集下来的尘、酸雾等返回脱硫塔内,无二次污染	收集下来的尘、酸雾等返回脱硫塔内,无二次污染
耗水量	每塔喷淋水小于1 m ³ /h,回流至塔内,无废水排放	脱硫岛补充水2~5 m ³ /h(水耗)
布置方式	立式,烟气下进上出	立式,烟气下进上出卧式,水平进气水平出气
除尘除雾效率	90%以上	90%以上
最大允许烟气流速	最大可达7.0 m/s	烟气流速一般选择<3.2 m/s,当塔直径不变时,速度高影响湿电除雾效果
喷淋水	连续喷水冲洗,水膜分布均匀,采用进口微喷	采用间断水冲洗,隔天清洗一次,水耗小,但易积灰
设备布置	布置在脱硫塔顶部,高度700 mm	布置在脱硫塔顶部,高度5~6 m
运行成本	无耗电,无水循环系统,无化学药剂,易损件少。以一台直径12 m脱硫塔为例,电功率0,年运行成本0	耗电小,耗水量小,无化学药剂,易损件较多,极板布需定期更换。以一台直径12 m脱硫塔为例,电功率400 kW,年利用5 000 h,年运行成本100万元
阻力/Pa	400	350
投资	远低于湿式电除尘器	高

2) 加装高效除雾器后,3种负荷下均能实现稳定超低排放达标,150、180和200 MW下,排放浓度均值分别为3.25、2.24和1.82 mg/m³。高效除雾器对PM₁₀的去除效率可达到90%。

3) 粒径分析结果表明,高效除雾器对细颗粒物(粒径<0.1 μm)的去除效果亦能达到90%。

4) 高效除雾器可以作为湿式静电除尘器的替代,对燃煤电厂超低排放改造起到关键作用。

参考文献(References):

- [1] 张洁,孙卫民,舒泽萍.发电集团应对燃煤电厂超低排放的思考[J].电力科技与环保,2015,31(4):38-40.
ZHANG Jie, SUN Weimin, SHU Zeping. Discussion on technical routes of coal-fired power generation group of ultra-low emission [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2015, 31(4): 38-40.
- [2] 赵金龙,胡达清,单新宇.燃煤电厂超低排放技术综述[J].电力与能源,2015,36(5):701-708.
ZHAO Jinlong, HU Daqing, SHAN Xinyu. Overview of ultra-low emission technology in coal-fired power plants[J]. Power & Energy, 2015, 36(5): 701-708.
- [3] 朱法华,许月阳,王圣.燃煤电厂超低排放技术重大进展回顾及应用效果分析[J].环境保护,2016,44(6):59-63.
ZHU Fahua, XU Yueyang, WANG Sheng. Reviewing the ultra-low emissions technology major progress of coal-fired power plants and analyzing its application effect [J]. Environmental Protection, 2016, 44(6): 59-63.
- [4] 胡永锋.燃煤电厂烟尘超低排放改造方案对比分析[J].华电技术,2015,37(12):55-58.

HU Yongfeng. Contrastive analysis of particulate matters ultra-low emission from coal-fired power plants [J]. Huadian Technology, 2015, 37(12): 55-58.

- [5] 王婀娜,朱林,姜艳靓.燃煤电厂烟尘超低排放技术措施研究[J].电力科技与环保,2015,31(4):47-49.
WANG Xianna, ZHU Lin, JIANG Yanliang. Measures of ultra-low emission technology of coal-fired power plant smoke [J]. Electric Power Environmental Protection, 2015, 31(4): 47-49.
- [6] 蒯继玺.脱硫塔高效除雾技术的研究[D].保定:华北电力大学,2014.
- [7] 马良,陈超.常规燃煤电厂超低排放技术路线分析[J].山西建筑,2014(28):218-219.
MA Liang, CHEN Chao. Analysis on ultra low emission technology route of conventional coal-fired power plants [J]. Shanxi Architecture, 2014(28): 218-219.
- [8] 陈牧,胡玉清,桂本.利用协同治理技术实现燃煤电厂烟尘超低排放[J].中国电力,2015,48(9):146-151.
CHEN Mu, HU Yuqing, GUI Ben. Synergistic control technology for ultra-low PM emission from coal-fired power plants and its application [J]. Electric Power, 2015, 48(9): 146-151.
- [9] 肖创英.燃煤600 MW等级机组烟气超低排放的环保改造实践[C]//发电厂“超净排放”烟气治理技术及脱硫、脱硝、除尘技术改造经验交流研讨会.2015.
- [10] 李博,赵锦洋,吕俊复.燃煤电厂超低排放技术方案应用[J].中国电力,2016,49(8):135-139.
LI Bo, ZHAO Jinyang, LYU Junfu. Application of ultra-low emission technical roadmaps of coal-fired power plants [J]. Electric Power, 2016, 49(8): 135-139.
- [11] 陈浩,骆仲洪,江建平.电厂湿法烟气脱硫颗粒物排放特性的实验研究[J].动力工程学报,2017,37(11):925-930.
CHEN Hao, LUO Zhongyang, JIANG Jianping. Experimental study

- on emission characteristics of particulate matters from wet flue gas desulfurization system of a coal-fired power plant[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(11): 925-930.
- [12] 舒英钢, 郦建国. 燃煤电厂烟气超低排放技术路线研究[C]//中国电除尘学术会议. 武汉[s. n.], 2015.
- [13] 郦建国, 姚宇平, 李卫东. 燃煤电厂烟气“超低排放”技术路线研究[C]//SO₂、NO_x、PM_{2.5}、Hg 污染控制技术研讨会. 杭州[s. n.], 2016.
- [14] 史文峥, 杨萌萌, 张绪辉. 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. SHI Wenzheng, YANG Mengmeng, ZHANG Xuhui. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(16): 4308-4318.
- [15] 王鑫. 燃煤电厂超低排放改造除尘工艺探讨[J]. 工程技术, 2016(12): 243-244. WANG Xin. Discussion on ultra-low emission and de-dusting process of coal-fired power plant[J]. Engineering Technology Magazine, 2016(12): 243-244.
- [16] 曹宾. 高效除雾器使用研究[J]. 科技与创新, 2014(18): 14-15. CAO Bin. Demister efficient use of research[J]. Science and Technology & Innovation, 2014(18): 14-15.
- [17] 尤良洲, 王丰吉, 胡旭, 等. 高效除尘除雾器在超低排放中应用的技术经济分析[J]. 中国电力, 2018, 48(8): 1-6. YOU Liangzhou, WANG Fangji, HU Da, et al. Technical and economic analysis on the application of high efficiency dust precipitator in ultra-low emission units[J]. Electric Power, 2018, 48(8): 1-6.
- [18] 李瞳. 燃煤电厂脱硫系统高效除雾器选型研究与应用[C]//中国电机工程学会年会. 南京[s. n.], 2016.
- [19] 邱桂芝, 张志刚, 宋寅, 等. 管束式除雾器结构优化数值模拟及高效除雾器研制[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 134-140. QIU Guizhi, ZHANG Zhigang, SONG Yin, et al. Numerical Simulation on tube bundle demister and development of high efficiency demister[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 134-140.
- [20] 吕海生, 江建忠, 陈爱民, 等. 一种风帽式除雾器: ZL20162030817.2[P]. 2016-09-14.

(上接第 135 页)

- [9] 张忠梅, 盛洪产, 林孝鑫, 等. KMnO₄ 氧化复合 NaOH 液相吸收同时脱硫脱硝的实验研究[J]. 环境工程, 2017, 35(8): 102-107. ZHANG Zhongmei, SHENG Hongchan, LIN Xiaoxin, et al. Experimental study on simultaneous desulfurization and denitrification by KMnO₄ oxidation combining NaOH liquid absorption[J]. Environmental Engineering, 2017, 35(8): 102-107.
- [10] 吴华成. 燃煤火电厂烟气污染物排放对大气 PM_{2.5} 的影响[J]. 华北电力技术, 2014(5): 1-4. WU Huacheng. Influence of flue gas emission of coal-fired power plant on atmospheric PM_{2.5} [J]. North China Electric Power, 2014(5): 1-4.
- [11] 王宏亮, 薛建明, 许月阳, 等. 燃煤电站锅炉烟气中 SO₃ 的生成及控制[J]. 电力科技与环保, 2014, 30(5): 17-20. WANG Hongliang, XUE Jianming, XU Yueyang, et al. Formation and control of SO₃ from coal-fired power plants[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2014, 30(5): 17-20.
- [12] 王运军, 段钰锋, 杨立国, 等. 600 MW 燃煤电站烟气汞形态转化影响因素分析[J]. 热能动力工程, 2008, 23(4): 399-403. WANG Yunjun, DUAN Yufeng, YANG Liguang, et al. An analysis of the factors exercising an influence on the morphological transformation of mercury in the flue gas of a 600 MW coal-fired power plant[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2008, 23(4): 399-403.
- [13] 张晓鲁. 燃煤电站烟气污染物深度脱除技术的分析[J]. 中国工程科学, 2014, 16(10): 47-51. ZHANG Xiaolu. Analysis of flue gas pollutants deep removal technology for coal-fired power plant[J]. Strategic Study of CAE, 2014, 16(10): 47-51.
- [14] 胡冬, 王海刚, 郭婷婷, 等. 燃煤电厂烟气 SO₃ 控制技术的研究及进展[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(35): 92-99. HU Dong, WANG Haigang, GUO Tingting, et al. Research and development of mitigating technology of SO₃ in flue gas from coal power plants[J]. Science Technology and Engineering, 2015, 15(35): 92-99.
- [15] 杨建平, 赵永椿, 张军营, 等. 燃煤电站飞灰对汞的氧化和捕获的研究进展[J]. 动力工程学报, 2014, 34(5): 337-345. YANG Jianping, ZHAO Yongchun, ZHANG Junying, et al. Research process on mercury oxidation and capture with fly ash of coal-fired power plant[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2014, 34(5): 337-345.