

超低排放燃煤电厂引风机叶片 硫酸盐沉积分析

王毅斌¹, 谭厚章¹, 萧嘉繁¹, 董 琨², 张俊杰²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 神华集团国华(北京)电力研究有限公司, 北京 100052)

[摘 要] 针对燃煤电厂采用选择性催化还原(SCR)技术及低低温电除尘技术实现污染物超低排放, 使得低温省煤器后烟气温度过低, 引起引风机叶片表面硫酸盐沉积, 严重影响引风机出力 and 锅炉带负荷等问题, 本文以某污染物超低排放燃煤电厂引风机叶片表面厚达 10 mm 的结垢样品为研究对象, 详细分析了结垢灰样的元素、矿物构成与微观形貌。结果表明: 引风机叶片表面灰样主要由硫酸钙、二水合硫酸钙、铵明矾(十二水硫酸铝铵)、硫酸铵和二氧化硅等结晶矿物质组成; 灰样中氮、氢和硫元素质量分数高达 22%, 样品灼烧质量损失可达到 60% 以上; 含硅铝元素球形颗粒完全被絮状硫酸盐裹覆; SCR 脱硝系统出口氨逃逸量较高与低温省煤器后烟温过低是造成引风机叶片表面硫酸盐沉积的主要原因。建议应根据不同燃用煤种, 结合氨逃逸水平、烟气含湿量、灰浓度等因素, 进行低温省煤器出口温度设计。

[关 键 词] 超低排放; 硫酸盐; 积灰; 引风机; 低温省煤器; SCR; 氨逃逸; 燃煤电厂

[中图分类号] X773; TK05 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1002-3364(2016)12-0009-05

[DOI 编号] 10.3969/j.issn.1002-3364.2016.12.009

Analysis of sulfates deposition on induced draft fan blade in a coal-fired power plant with ultra-low emission

WANG Yibin¹, TAN Houzhang¹, XIAO Jiafan¹, DONG Kun², ZHANG Junjie²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute Co. Ltd, Beijing 100052, China)

Abstract: Currently, most power plants apply the selective catalytic reduction (SCR) technology and low temperature electrostatic precipitator to realize ultra-low emission. However, it will result in a much lower flue gas temperature behind the low temperature economizer and sulfates deposition on the induced draft fan blade, which seriously affects the working output of induced draft fan and boiler load. To solve this problem, ash deposits with thickness of 10 mm were collected from the induced draft fan blade in a coal-fired power plant with ultra-low emission. The physical and chemical properties of the ash deposits were analyzed by several techniques, such as the element analysis, the mineral matter composition analysis and microstructure analysis. The results show that, the ash samples consisted of calcium sulfate, calcium sulfate dehydrate, aluminium ammonium sulfate (twelve water ammonium aluminum sulfate), ammonium sulfate and silicon dioxide, the mass fraction of nitrogen, hydrogen and sulfur in ashes was about 22%, after burning the loss mass of unprocessed ash samples was about 60%. The high ammonia concentration escaping

收稿日期: 2016-08-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(91544108, 51376147, 51306142)

作者简介: 王毅斌(1990-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为固体燃料燃烧过程中受热面结焦、积灰防治技术。

E-mail: wyb6639@163.com

from the SCR reactor and the low flue gas temperature behind the low temperature economizer were the main reason for deposition of sulfates on the induced draft fan. So it was suggested that the design of flue gas temperature at the low temperature economizer outlet need further study considering different kinds of coal, ammonia escape, flue gas humidity and ash content.

Key words: ultra-low emission, sulfates, deposition, induced draft fan, low temperature economizer, SCR, ammonia escape, coal-fired power plant

大型燃煤电厂污染物排放是造成我国多地区雾霾频发的原因之一。目前,我国颁布的燃煤机组排放标准要求,重点地区各省市燃煤机组要达到与燃气机组相同的烟气污染物排放水平(烟尘质量浓度 $<10\text{ mg/m}^3$, SO_2 质量浓度 $<35\text{ mg/m}^3$, NO_x 质量浓度 $<50\text{ mg/m}^3$, 标况)^[1-2]。

我国燃煤发电机组主要是采用炉内低氮燃烧技术和烟气脱硝技术相结合的方法实现 NO_x 超低排放^[3]。选择性催化还原法(SCR)作为目前最成熟的脱硝技术之一,已广泛应用于燃煤机组。SCR 脱硝系统主要采用高活性钒钛基催化剂。现有 SCR 脱硝技术配置主要采用 2 层且预留 1 层备用层催化剂的方式。为了实现更高效的烟气脱硝效率,大多数污染物超低排放改造方案均采用启用备用层催化剂脱硝的方法。在燃煤电厂污染物超低排放运行工况下,催化剂用量的增加必然会提高烟气中 SO_3 的转化率,另外在 NO_x 超低排放目标严格执行的情况下,SCR 脱硝系统出口氨逃逸量增加的风险也较高,这 2 个因素均会增加锅炉尾部其他设备的运行故障。此外,燃煤电厂为了提高静电除尘器的除尘

效率,均在其进口安装了低温烟气换热器。该技术具有提高除尘效率、降低煤耗和后续脱硫系统耗水等优点,但烟气温度大幅降低至酸露点以下所带来的问题仍未见报道。我国燃煤电厂实施污染物超低排放的时间较短,其可能存在的问题还未及时显现,因此需持续关注火电厂污染物超低排放改造工作,保证机组安全、稳定、经济运行。

对此,本文以某污染物超低排放燃煤机组引风机叶片表面 10 mm 厚的结垢灰样为研究对象,采用缓慢灰化法对其进行灼烧处理;然后采用 X 射线荧光光谱、元素分析仪、X 射线衍射仪(XRD)和电子扫描电镜分别对积灰灰样的元素成分、矿物组分及形貌进行分析;并基于分析结果,讨论了结垢灰样中元素的富集特点以及矿物组分的形成原因;同时结合电厂所采用的污染物超低排放升级改造方法,深入分析了风机叶片积灰结垢的原因。

1 火电厂污染物超低排放改造技术路线

表 1 为我国部分燃煤电厂污染物超低排放的改造方案及排放效果。

表 1 我国部分燃煤电厂污染物超低排放改造方案及排放效果

Table 1 Technical plan of ultra-low emission reformation for some coal-fired power plants in China

电厂名称	机组容量/MW	超低排放改造方案	SO_2 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	NO_x 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)	粉尘质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)
浙江浙能嘉华电厂	2×1 000	低 NO_x 燃烧器+SCR+配高频电源静电除尘器+双托盘塔脱硫+湿式静电除尘器	—	—	2.00
神华国华舟山电厂	2×350	高效低氮燃烧+SCR+旋转电极除尘+海水脱硫+湿式静电除尘器	2.76	19.8	2.46
国华三河电厂	350	高效低氮燃烧+SCR脱硝+低温省煤器+静电除尘器+湿法脱硫+湿式静电除尘器	9.00	35.0	5.00
广州恒运电厂	2×300	低氮燃烧+SCR+电袋除尘+单塔双循环脱硫+湿式静电除尘器	4.00	25.0	1.94
华能白杨河电厂	300	低氮燃烧器改造+4 层催化剂技术+增加二级串塔+湿式静电除尘器	22.00	46.0	5.00

由表 1 可见,这 5 个燃煤电厂所采用的污染物超低排放改造方案差别较小。一般来讲,控制烟气中 NO_x 排放主要是通过优化炉内低氮燃烧技术与

启用 SCR 系统备用层催化剂相结合,也有电厂采用 4 层催化剂的方法^[4],实施改造后,烟气中 NO_x 排放均可满足超低排放标准(低于 50 mg/m^3)。

脱硫技术主要以石灰石-石膏湿法脱硫为主;此外,还包括托盘塔技术、单塔双循环、双塔串脱硫、干法/半干法脱硫、海水脱硫、有机胺脱硫、氨法脱硫、双碱法等多种脱硫方法^[1,5-7]。为达到 SO₂ 排放质量浓度低于 50 mg/m³、甚至 35 mg/m³ 的标准,国内燃煤电厂主要考虑增设喷淋层、吸收塔、托盘等技术方案,改造后脱硫效率可达到 98% 以上^[8];但应考虑自身条件、当地环保排放标准、预投资成本等因素,选择合理可行的改造方案。

目前,超低排放燃煤电厂的高效除尘主要是采用湿式静电除尘与低低温静电除尘、电袋复合除尘、高频电源除尘、旋转电极除尘等除尘方式联合脱除的技术路线^[4,8-9]。湿式静电除尘与干式静电除尘的区别在于极板的除尘方式不同,湿式静电除尘不受烟尘比电阻影响,且无二次扬尘。大部分燃煤电厂为实现粉尘超低排放,需采用湿式静电除尘器作为其“近零排放”的最终精细化处理设备。对于粒径在 0.1~1.0 μm 之间的微细颗粒物,现有脱除设备也较难脱除,可通过一种安装于湿法脱硫系统出口的微细颗粒相变凝聚装置,有效促进该粒径范围内颗粒的团聚长大,从而更便于湿式静电除尘器对其进行脱除^[10]。该技术已经在 1 台 660 MW 燃煤机组上建立了示范工程,其耦合湿式静电除尘器可使烟气中粉尘质量浓度稳定降至 2 mg/m³ 左右。

2 引风机叶片结垢积灰现象

某污染物超低排放燃煤电厂 1 号机组锅炉的 11 号与 12 号引风机叶片表面结垢严重、坚硬,厚度达 8~10 mm(图 1)。



图 1 某电厂引风机叶片表面结垢积灰情况
Fig. 1 The ash deposited on induced draft fan blade of a pauler plant

此外,引风机进出口风道内支撑杆等迎风面也存在严重结垢现象。为此,采集了 12 号引风机叶片表面的灰样进行分析。

3 灰样分析

3.1 灰样成分与矿物组分

实验中将一定质量灰样放置于称量瓶中,并在空气干燥箱中干燥 2 h,冷却至室温后计算得到样品平均含水率为 15.85%。然后,将冷却至室温的灰样放入马弗炉中继续灼烧,初始温度为 25 °C,以 15 °C/min 的加热速率升至 500 °C,停留 0.5 h,再以相同的加热速率升至目标温度 815 °C,停留 1 h,最后冷却至室温。热处理后的灰样颜色由灰黑色变为土黄色。经过计算灰样灼烧质量损失可达 60% 以上,干燥后灰样的平均烧失率为 48.9%。

表 2 为由元素分析仪测试得到的原始灰样的元素组分,其他为含量小于 1% 元素的总和,包括 Ti、K、Na、P、Cl 等。由灰样的高质量损失率可知,原始灰样灼烧所释放的组分主要由 S、N、H 和 O 元素构成。

表 2 原始灰样元素组成分析

Si	Al	Ca	S	Fe	
6.75	5.85	3.88	13.96	1.57	
Mg	Ti	N	O	H	其他
0.33	0.39	4.43	56.92	3.45	2.45

图 2 为风机叶片原始灰样的 XRD 图谱。

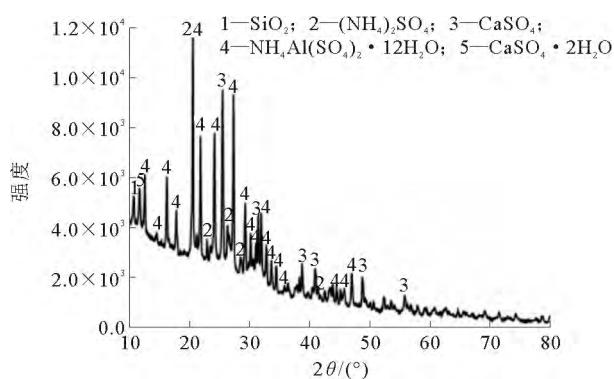


图 2 引风机叶片表面原始灰样 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of the original ash samples

采用 Jade5.0 软件,对比标准矿物质卡片发现,原始灰样主要由硫酸铵、铵明矾(十二水硫酸铝铵)、硫酸钙、二水合硫酸钙和二氧化硅等矿物晶体组成。结合表 2 可知,灰样含有较多的 N、H 和 S 元素,其质量分数总和约为 22%。分析结垢位置,认为灰样中的 N 元素主要来源于 SCR 反应器出口逃逸的氨

气。为实现更低的 NO_x 排放值,需喷入高比例的还原剂,这必将增大氨逃逸量。

灰样中的硫酸铵含量较高,表明该机组运行过程中 SCR 脱硝系统出口氨逃逸量较高。因为烟气中硫酸铵或硫酸氢铵的生成与 NH_3/SO_3 摩尔比存在密切联系,若其摩尔比大于 2,则烟气中主要生成产物为硫酸铵。有报道指出当脱硝系统氨逃逸量超过 0.000 3% 时,空气预热器运行半年后系统阻力将显著增加,同时也会严重影响引风机的正常运转^[11]。此外,第 3 层或第 4 层催化剂的增设将进一步增加烟气中 SO_3 的质量浓度。现场测试发现, SO_3 质量浓度在 SCR 脱硝系统出口达到最高值^[12]。虽然硫酸铵具有较高的熔点,不易造成铵盐熔融黏附,但当烟气温度大幅降低导致水蒸气含量增加时,可溶性硫酸铵也会影响颗粒之间或颗粒与壁面之间的黏附特性。

灰样中的铵明矾主要是硫酸铵与硫酸铝在水蒸气存在条件下形成的硫酸盐二聚物。由于低温省煤器的投运,烟气温度显著降低导致烟气中硫酸酸雾浓度升高,硫酸易与灰颗粒中含铝结晶矿物质反应生成硫酸铝。此外,可能在 SCR 催化剂表面生成部分硫酸铝,在高湿烟气环境下硫酸铵同硫酸铝相互反应生成了铵明矾。

灰样中硫酸钙主要来自燃烧过程。该燃煤机组尾部烟气净化装置采用了低低温静电除尘器,其将烟气温度降低至酸露点以下,烟气中的水蒸气和 SO_3 会形成硫酸酸雾,凝结于微细颗粒物表面,严重影响灰颗粒的黏附特性和物化特性。

3.2 灰样形貌

图 3 为原始灰样颗粒微观形貌。

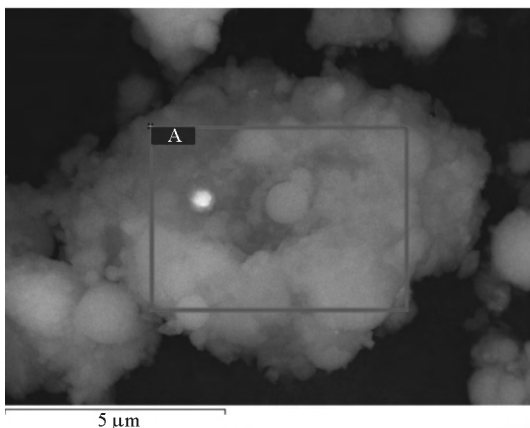


图 3 原始灰样颗粒微观形貌

Fig. 3 Micro-morphology of the original ash samples

由图 3 可知,大量亚微米球形颗粒被絮状物质包裹形成粒径较大颗粒。由原始灰样的元素组成分析和 XRD 分析可知,灰样中存在较高含量的硫酸盐,该絮状物质主要由硫酸盐组成,它不仅改变了灰颗粒表面的物化性质,同时也提高了灰颗粒与积灰层的黏附能力。对图 3 中选择面区域(A)进行 EDS 元素分析,其结果如图 4 所示。由图 4 可见,分析区域存在高含量的 S 元素,同时还包含 N 元素,这也再次证明灰样中硫酸盐的存在。

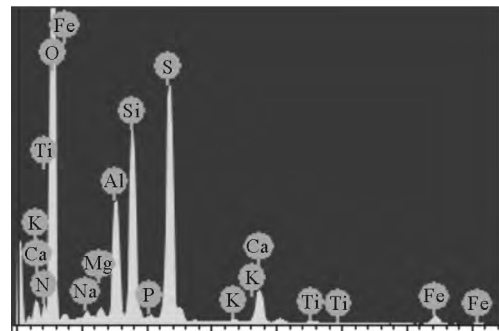


图 4 原始灰样 EDS 元素分析

Fig. 4 EDS analysis of the original ash samples

4 硫酸盐沉积原因分析与建议

风机叶面积灰样品中存在高含量 N、H 和 S 元素,它们构成的硫酸铵和铵明矾均为易分解的结晶物。样品中 N 元素以铵根的形式存在,证明了 SCR 脱硝系统出口逃逸氨逃逸量较高,并以硫酸盐的形式黏附于风机叶片表面。较高氨逃逸量是硫酸盐形成与造成叶片表面硫酸盐沉积的重要原因之一。电厂引风机一般布置在静电场除尘器与脱硫系统之间,主要用于克服燃烧烟气的沿程阻力。由于静电除尘器增设了低温换热器,使得进入引风机的烟气温度降低至 $90\sim 100\text{ }^\circ\text{C}$,甚至 $85\sim 90\text{ }^\circ\text{C}$,造成风机叶片表面产生灰垢的主要原因是过低的烟气温度使得烟气中含水量增大,并与烟气中的 SO_3 结合生成硫酸酸雾,冷凝于灰颗粒表面,增加了其黏附力^[13]。当烟气温度降低时,烟气中的水蒸气极易凝结于叶片或灰颗粒表面,凝结液滴可吸附亚微米硫酸盐,进一步增加了壁面对灰颗粒以及颗粒自身的黏附能力,在运行过程中壁面连续沉积进而发展为一定厚度的灰垢。Wang C 等^[14]在某台 660 MW 燃煤机组安装低温省煤器的静电除尘器进出口进行了颗粒物取样,检测分析发现 S 元素和 Cl 元素富集于亚微米颗粒表面。

综合分析可知,造成风机叶片硫酸盐沉积的主要原因如下。

1) 脱硝反应器前喷氨混合器均匀性较差,脱硝进口烟气流场存在较大偏差,SCR 反应器中部催化剂老化、中毒失效,部分催化剂层通道被硫酸钙或三氧化铝颗粒堵塞等原因,均会导致 SCR 反应器中 NO_x 还原氧化反应不均匀,造成脱硝系统出口氨逃逸量高于 0.000 3%。逃逸的氨气同烟气中 SO_3 反应生成硫酸铵或硫酸氢铵,在空气预热器、干式静电除尘器和引风机中烟气的直接接触面上黏附,造成表面积灰结垢。

2) SCR 脱硝反应器出口氨逃逸测量仪表未能准确显示实际运行工况下的氨逃逸量,导致长时间持续增大喷氨量,从而造成氨逃逸量较高。

3) 火电厂在满足 NO_x 超低排放的情况下,继续追求 NO_x 的超超低排放,以至于氨氮摩尔比严重偏离合理范围,造成氨逃逸量超高。

4) 在静电除尘器进口增设低温换热器,将烟气温度降至酸露点以下,烟气温度降幅过大,造成烟气含湿量与硫酸酸雾增加,从而反应生成硫酸盐,硫酸盐易溶解于冷凝液滴从而增强液滴和灰颗粒的黏附能力,进一步加剧了各设备和烟道支撑面的结垢速率。

我国实施燃煤发电机组污染物超低排放运行年限较短,未来应着重关注 SCR 脱硝系统出口氨逃逸量测点的代表性与真实性,研究 SCR 脱硝系统出口截面在线氨逃逸量监测,以及合理控制超低排放条件下氨氮摩尔比的合理性。尤其是针对燃用高硫煤种的机组,应特别关注 SCR 脱硝系统出口 SO_3 质量浓度,研究相关固体吸附 SO_3 的喷射技术。此外,设计低温省煤器烟气降温幅度时,仍需考虑燃用煤质特性、氨逃逸水平、烟气含湿量、灰浓度等因素。

5 结 论

1) 污染物超低排放燃煤电厂引风机叶片表面结垢灰样主要由硫酸铵、十二水硫酸铝铵、硫酸钙、二水合硫酸钙以及含硅铝元素的矿物质构成,含硅铝颗粒主要被絮状硫酸盐包裹。

2) 燃煤锅炉污染物超低排放运行过程中,SCR 脱硝系统氨逃逸水平高与低低温除尘器烟气降温幅度过大,是造成风机叶片硫酸盐富集和颗粒团聚积灰结垢的主要原因。

3) 设计低温省煤器烟气降温幅度时,仍需考虑燃用煤质特性、氨逃逸水平、烟气含湿量、灰浓度等因素。

[参 考 文 献]

- [1] 张东辉,庄焯,朱润儒,等. 燃煤烟气污染物超低排放技术及经济分析[J]. 电力建设,2015,36(5):125-130. ZHANG Donghui, ZHUANG Ye, ZHU Runru, et al. Ultra-low air pollutant control technologies for coal-fired flue gas and its economic analysis[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(5): 125-130.
- [2] 姚明宇,聂剑平,张立欣,等. 燃煤电站锅炉烟气污染物一体化协同治理技术[J]. 热力发电,2016,45(3):8-12. YAO Mingyu, NIE Jianping, ZHANG Lixin, et al. Integrative flue-gas pollutants removal technology for coal-fired utility boilers[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(3): 8-12.
- [3] 帅伟,莫华. 我国燃煤电厂推广超低排放技术的对策建议[J]. 中国环境管理干部学院学报,2015,25(4):49-52. SHUAI Wei, MO Hua. Proposals on the development of ultra-low emission coal-fired power plants[J]. Journal of the Environmental Management College of China-EMCC, 2015, 25(4): 49-52.
- [4] 李穹. 燃煤机组超低排放技术路线探讨[J]. 科技资讯, 2015, 13(16): 85-86. LI Qiong. Study on ultra-low emission technical route in coal-fired power plants[J]. Science & Technology Information, 2015, 13(16): 85-86.
- [5] 周焯. 燃煤电厂新型脱硫技术对比[J]. 科技资讯, 2013, 11(36): 103-104. ZHOU Ye. Contrast on new desulfuration technologies for coal-fired power plants[J]. Science & Technology Information, 2013, 11(36): 103-104.
- [6] 李娜. 石灰石-石膏法单塔双循环烟气脱硫工艺介绍[J]. 硫酸工业, 2014(6): 45-48. LI Na. Technology of flue gas desulphurization utilizing single desulphurization tower and double cycling of desulphurizing solution by limestone-gypsum method[J]. Sulphuric Acid Industry, 2014(6): 45-48.
- [7] 庄敏. 某 600 MW 燃煤机组超低排放改造技术及应用效果[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(3): 78-80. ZHUANG Min. Ultralow emission transform technology and application for one 600 MW coal-fired unit[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015, 34(3): 78-80.
- [8] 王树民,宋畅,陈寅彪,等. 燃煤电厂大气污染物“近零排放”技术研究及工程应用[J]. 环境科学研究, 2015, 28(4): 487-494. WANG Shumin, SONG Chang, CHEN Yanbiao, et al. Technology research and engineering applications of near-zero air pollutant emission coal-fired power plant[J]. Research of Environmental Science, 2015, 28(4): 487-494.

(下转第 24 页)

- [7] 王乐乐,周健,姚友工,等. 烟气脱硝 SCR 氨喷射系统调整效果评估[J]. 中国电力,2015,48(4):16-22.
WANG Lele,ZHOU Jian,YAO Yougong,et al. Evaluation on effects of SCR ammonia injection system modification for flue gas[J]. Electric Power,2015,48(4):16-22.
- [8] 王乐乐. 华能济宁运河发电有限公司 5 号机组 SCR 催化剂性能检测报告[R]. 西安:西安热工研究院有限公司,2015:7-9.
WANG Lele. Test report of unit 5 from Huaneng Yunhe Power Plant[R]. Xi'an:Xi'an Thermal Power Research Institute Co.,Ltd. 2015:7-9(in Chinese).
- [9] SVACHULA J, ALEMANY L J, FERLAZZO N, et al. Oxidation of SO₂ to SO₃ over honeycomb deNO_xing catalysts[J]. Industry Engineering Chemistry Research,1993,33(6):1644-1644.
- [10] 武宝会,崔利. 火电厂 SCR 烟气脱硝控制方式及其优化[J]. 热力发电,2013,42(10):116-119.
WU Baohui,CUI Li. SCR flue gas denitrification control and optimization in thermal power plants [J]. Thermal Power Generation,2013,42(10):116-119.
- [11] 马双忱,金鑫,孙云雪,等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制[J]. 热力发电,2010,43(8):12-17.
MA Shuangchen,JIN Xin,SUN Yunxue,et al. The formation mechanism of ammonium bisulfate in SCR flue gas denitrification process and control [J]. Thermal Power Generation,2010,43(8):12-17.
- [12] 马双忱,郭蒙,宋卉卉,等. 选择性催化还原工艺中硫酸氢铵形成机理及影响因素[J]. 热力发电,2014,43(2):75-78.
- MA Shuangchen, GUO Meng, SONG Huihui, et al. Formation mechanism and influencing factors of ammonium bisulfate during the selective catalyst reduction process[J]. Thermal Power Generation,2014,43(2):75-78.
- [13] 刁利,李光,吴思竹. 基于燃煤清洁技术的脱硝技改工程投资估算及财务分析[J]. 电网与清洁能源,2014,30(7):58-61.
DIAO Li,LI Guang,WU Sizhu. Investment estimation and financial analysis of denitration renovation projects based on clean coal-fired technology[J]. Power System and Clean Energy,2014,30(7):58-61.
- [14] 罗江勇,吕新乐. 锅炉低负荷工况下脱硝系统投运率提高的改造技术[J]. 中国电力,2015,48(11):138-141.
LUO Jiangyong,LV Xinle. Retrofit for SCR equipment operation rate improvement under low load conditions on 600 MW supercritical boiler[J]. Electric Power,2015,48(11):138-141.
- [15] PRITCHARD S. Long-term catalyst health care[J]. Power,2006,150(1):1-5.
- [16] 李德波,廖永进,徐齐胜,等. 燃煤电站 SCR 脱硝催化剂更换策略研究[J]. 中国电力,2014,47(3):155-159.
LI Debo,LIAO Yongjin,XU Qisheng,et al. Investigations on the strategy of changing of catalyst of SCR systems[J]. Electric Power,2014,47(3):155-159.

(责任编辑 杨嘉蕾)

(上接第 13 页)

- [9] 赵永椿,马斯鸣,杨建平,等. 燃煤电厂污染物超净排放的发展及现状[J]. 煤炭学报,2015,40(11):2629-2640.
ZHAO Yongchun,MA Siming,YANG Jianping,et al. Status of ultra-low emission technology in coal-fired power plant[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(11):2629-2640.
- [10] 谭厚章,熊英莹,王毅斌,等. 湿式相变凝聚技术协同湿式电除尘器脱除微细颗粒物研究[C]. 2015 年中国工程热物理学会燃烧学学术年会,2015:3.
TAN Houzhang,XIONG Yingying,WANG Yibin,et al. Investigation on fine particulate matters removal by using wet phase transition agglomeration technology cooperated with wet electrostatic precipitator [C]. China National Symposium on Combustion,2015:3.
- [11] 马双忱,金鑫,孙云雪,等. SCR 烟气脱硝过程硫酸氢铵的生成机理与控制[J]. 热力发电,2010,39(8):12-17.
MA Shuangchen,JIN Xin,SUN Yunxue,et al. The formation mechanism of ammonium bisulfate in SCR flue gas denitrification process and control thereof [J]. Thermal Power Generation,2010,39(8):12-17.
- [12] 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,ZHEN Chenghang,ZHANG Yongxin,et al. Experimental investigation of ultra-low pollutants emission characteristics from a 1 000 MW coal-fired power plant[J]. Proceeding of the CSEE,2016,36(5):1310-1314.
- [13] ECK B. Ventilatoren[M]. Berlin:Springer Verlag,1962:33-58.
- [14] WANG C,LIU X,LI D,et al. Measurement of particulate matter and trace elements from a coal-fired power plant with electrostatic precipitators equipped the low temperature economizer[J]. Proceedings of the Combustion Institute,2015,35(3):2793-2800.

(责任编辑 杨嘉蕾)