第44卷第3期 2023年6月 发电技术 Power Generation Technology Vol.44 No.3 Jun. 2023

DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.21127

中图分类号: TK 09

## 燃煤电厂烟气中氨脱除及分布机理研究

吉攀

(中国大唐集团科学技术研究院有限公司西北电力试验研究院,陕西省 西安市 710021)

## Study on Removal and Distribution Mechanism of Ammonia in Flue Gas of Coal-fired Power Plant

JI Pan

(Northwest Electric Power Test Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710021, Shaanxi Province, China)

摘要:在燃煤电厂选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)脱硝高浓度逃逸氨条件下,对氨在脱硝下游设备中的脱除效率、粉煤灰和浆液中的富集浓度及其分布机理进行研究。对350 MW及600 MW机组分别进行取样分析,结果表明:空预器、电除尘器和湿法脱硫系统对述逸氨的脱除效率分别为3.37%~6.63%、75.14%~83.28%和36.36%~46.38%,这些下游环保设备对氨的脱除效率高,烟囱入口氨浓度相对脱硝出口氨浓度下降明显;飞灰中的氨含量与飞灰粒径成反比;脱硫净烟气中的氨浓度随原烟气中氨浓度的增大而增大;脱硫系统对氨的脱除效率随浆液pH值的增大而降低。研究结果对机组的环保和经济运行具有重要意义。

关键词: 燃煤电厂; 选择性催化还原(SCR); 逃逸氨

**ABSTRACT:** The removal efficiency of ammonia in denitrification downstream equipment, concentration and distribution mechanism of ammonia in fly ash and slurry were studied under the condition of high concentration of ammonia escaping from denitrification by selective catalytic reduction (SCR) in coal-fired power plants. Through sampling analysis of 350 MW and 600 MW units, the results show that: the escaping ammonia removal efficiencies of air preheater, electrostatic precipitator and wet desulphurization system are 3.37%-6.63%, 75.14%-83.28% and 36.36%-46.38%, respectively. The ammonia removal efficiencies of these downstream environmental protection equipment are high, and the ammonia concentration at chimney entrance decreases obviously compared with that at denitrification outlet. The ammonia content in fly ash is inversely proportional to the

基金项目: 国家自然科学基金项目(51906076)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China



 國際管理開展上型中在了臺灣公共二層局或者在集份中使素公共9 "舜之之声"关注并用為电、天下為力 21代書, 中利為金粱爾普公共9、 21代書, 中利為金粱爾普公共9 (現金之声、食品日本), 点自由是一点, 主要理要会設訂最美可要的完, 专家 25年20年2月、19月3日, 25年3月、25年5月、25年31月、25年3月、25年3月、25年31,2574,25744,25744,25744,25744,25744,25744,25744,25744,25744,25744,25744,25744,25744,2 particle size of fly ash. Ammonia concentration in desulfurized flue gas increases with the increase of ammonia concentration in original flue gas. The removal efficiency of ammonia in desulphurization system decreases with the increase of slurry pH value. The results have great significance to the units' environmental protection and economic running.

**KEY WORDS:** coal-fired power plant; selective catalytic reduction (SCR); ammonia slip

## 0 引言

燃煤电厂多采用选择性催化还原(selective catalytic reduction, SCR)脱硝工艺,利用氨作为还原剂降低烟气中NO<sub>x</sub>浓度<sup>[1-3]</sup>。此工艺中经过催化剂但未反应的氨(以下简称"逃逸氨")在脱硝下游设备的不同位置富集,会影响燃煤电厂的经济安全运行。

目前,针对烟气中的逃逸氨已开展大量研究, 如: 文献[4-6]研究了烟气中逃逸氨的反应产物生 成规律; 文献[7]探究了硫酸氢铵生成温度及空预 器(air pre-heater, APH)堵塞时间的影响因素; 文 献[8-10]研究了飞灰对氨的吸附机理; 文献[11]研 究了硫酸氢铵对空预器的影响; 文献[12]研究了飞 灰中的氨对混凝土性能的影响; 文献[13-14]研究 了逃逸氨对湿法脱硫(wet flue gas desulfurization, WFGD)系统的影响。以上研究多着眼于逃逸氨在 烟气及其脱硝下游单个设备中的反应机理及影响 规律,以及低浓度逃逸氨在下游设备系统中的迁





#### 第44卷 第3期

#### 发电技术

移与分布规律<sup>[15]</sup>。然而,现有燃煤电厂因催化剂 超期服役、配煤掺烧、负荷升降速率快、NO<sub>x</sub>特 别排放限值等因素,导致脱硝实际运行情况恶劣, 高浓度逃逸氨现象普遍<sup>[16]</sup>。

本文通过对锅炉烟气系统不同位置的烟气、 飞灰及浆液进行取样分析,测试样品的氨含量, 研究了高浓度逃逸氨在脱硝下游设备中的脱除效 率、粉煤灰和浆液中的富集浓度及其分布机理, 为电厂实际运行提供技术支撑。

## 1 机组概况及试验方法

#### 1.1 机组概况

1号机组容量为350 MW,2号机组容量为 600 MW,均为亚临界一次中间再热、前后墙对冲 燃烧、W型火焰锅炉,配有三分仓式空预器。采 用目前应用最广泛的"SCR 脱硝+静电除尘器 (electrostatic precipitator, ESP)+石灰石-石膏湿法 脱硫+湿式电除尘器(wet electrostatic precipitator, WESP)"的超低排放改造路线。入炉煤质参数如 表1所示。

表1 入炉煤质参数 Tab.1 Parameters of burning coal quality

参数	1号机组	2号机组
灰分质量分数A <sub>ar</sub> /%	27.37	24.53
挥发分质量分数 V <sub>ad</sub> /%	12.28	12.80
硫分质量分数S <sub>t, ad</sub> /%	1.68	1.72
低位发热量Q <sub>net, ar</sub> /(MJ/kg)	20.21	20.77

### 1.2 试验位置及工况

试验分2个工况,运行人员通过调整SCR出口NO<sub>x</sub>浓度改变逃逸氨浓度,出口NO<sub>x</sub>浓度改变逃逸氨浓度,出口NO<sub>x</sub>质量浓度在10~15 mg/m<sup>3</sup>为工况1,在35~45 mg/m<sup>3</sup>为工况2。文中除特别注明外,所述气体浓度均已按标准状态干烟气和过剩空气系数为1.4进行折算。工况稳定时对SCR反应器下游4个位置处烟气中总氨浓度进行测试,测试位置分别为2台机组的SCR出口、空预器出口、ESP出口及WESP出口。具体工况如表2所示。

## 1.3 取样与分析方法

烟气中逃逸氨采样方法根据 DL/T 260—2012 中所列方法改进而来<sup>[17-19]</sup>。图1为烟气中逃逸氨采



表2	试验工况

Tab. 2 Test conditions

393

扣扣护旦	名 古 A OV	SCR入口NO <sub>x</sub> 质量	SCR出口NO <sub>x</sub> 质量
们组细与	贝何/1411W	浓度/(mg/m³)	浓度/(mg/m³)
1 300	632	12	
	300	617	36
2	550	696	11
	550	688	41



Fig. 1 Ammonia slip sampling system in flue gas

样系统。气态氨通过烟气恒流采样,采样流量为 5 L/min,取样管前设置玻璃纤维过滤器,连接管 道材质为聚四氟乙烯,采用浓度为0.05 mol/L的 稀硫酸作为吸收液。采样结束后,需用除盐水彻 底冲洗吸收瓶前所有的连接管路至样品瓶中,消 除硫酸氢铵低温下的结露吸附等影响。SCR 出口 只对气态氨进行取样。在空预器出口对气态氨及 飞灰分别进行取样后同时测定,合并折算结果即 为烟气中氨浓度。ESP 出口及WESP 出口测试时, 烟气中烟尘浓度低,去除取样管前玻璃纤维过滤 器,同时吸收烟气中所有形式的氨。

在工况1运行条件下,对1号机组ESP一、 二、三电场灰样,2号机组ESP一电场灰样,以 及1、2号机组WFGD系统浆液进行取样。对所取 样品按种类分别经过溶解、过滤、取上清液、定 容等预处理后,参照文献[20]中的方法进行测试。

## 2 测试结果

## 2.1 烟气中逃逸氨测试结果

测试期间通过调整 SCR 出口 NO<sub>x</sub>浓度改变逃 逸氨浓度,分别在工况1、2条件下测试,每个烟



吉攀: 燃煤电厂烟气中氨脱除及分布机理研究

Vol.44 No.3

气采样点均进行3次取样,测试结果取平均值, 具体结果见表3。

## 表3 烟气中逃逸氨质量浓度 Tab. 3 Ammonia slip concentration in flue gas

					mg/m
扣佣炉旦	<u>т и</u>		采样。	点位置	
机组细石	上196	SCR出口	APH出口	ESP出口	WESP 出口
1	1	17.83	17.23	2.88	1.72
	2	7.91	7.59	1.65	1.05
2	1	16.44	15.41	3.04	1.63
	2	5.73	5.35	1.33	0.75

测试期间2台机组催化剂均处于寿命末期, SCR出口氨逃逸率高,空预器堵塞严重。测试结 果表明,当烟囱入口NO<sub>x</sub>质量浓度从10 mg/m<sup>3</sup>上 升到40 mg/m<sup>3</sup>时,1、2号机组SCR出口逃逸氨浓 度分别降低了55.64%与65.15%。

由表3可见:随烟气流动,烟气中的氨浓度 逐渐降低,1、2号机组空预器出口氨浓度比SCR 出口氨浓度平均分别降低了3.71%与6.45%,ESP 出口氨浓度比空预器出口氨浓度平均分别降低了 80.77%与77.71%,WESP出口氨浓度比ESP出口 氨浓度平均分别降低了38.32%与45.00%。脱硝后 下游设备对氨的总脱除效率约为88.52%,其中电 除尘器对烟气中氨的脱除贡献最大,WESP出口 氨浓度相对SCR出口氨浓度下降明显。

## 2.2 飞灰测试结果

机组在工况1条件下稳定运行时,对1号机组 ESP一、二、三电场灰样和2号机组ESP一电场灰 样分别进行取样分析,灰样中NH<sub>3</sub>、HCl及SO<sub>3</sub>含 量变化情况如图2所示。



Fig. 2 Content of NH<sub>3</sub>, HCl and SO<sub>3</sub> adsorbed in ash



通过测试灰样中可溶性 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>及 Cl<sup>-</sup>离 子的浓度来计算吸附的 NH<sub>3</sub>、SO<sub>3</sub>及 HCl 含量, 其中 SO<sub>3</sub>含量包括硫酸氢铵及三氧化硫酸性气体 2部分。对1号机组的测试结果表明: ESP 各电场 捕集的灰样中 NH<sub>3</sub>及 SO<sub>3</sub>含量变化大,三电场灰 样中 NH<sub>3</sub>含量可达一电场的 4.39 倍, SO<sub>3</sub>含量可 达一电场的 3.01 倍;各电场灰样中 HCl 含量基本 不变;一、二、三电场灰样的 NH<sub>3</sub>与 SO<sub>3</sub>摩尔比 分别为 2.43、2.28 与 1.67。2 号机组一电场灰样 中 NH<sub>3</sub>、SO<sub>3</sub>及 HCl 含量与 1 号机组一电场灰样中 含量相似。

图3为1号机组ESP一、二、三电场灰样的粒 径体积分布。测试结果表明:一、二电场灰样的平 均粒径为43.949、32.914 µm,粒径分布范围为0~ 200 µm;三电场灰样的平均粒径为3.274 µm,粒径 分布范围为0~20 µm。通过对比可知,三电场灰样 的平均粒径较一、二电场小很多。



图3 1号机组ESP 灰样粒径体积分布

## Fig. 3 Particle size distribution of ESP ash in No.1 unit

### 2.3 浆液测试结果

机组在工况2条件下稳定运行时,对1、2号 机组脱硫浆液进行取样,测试浆液中氨含量,此 时1、2号机组浆液的pH值分别为5.56、5.17。表 4为脱硫系统外排水量及浆液中NH4\*含量。

表4 脱硫系统外排水量及浆液中 NH₄<sup>+</sup>含量 Tab. 4 WFGD external displacement and NH₄<sup>+</sup> content in seriflux

机组编号	废水排放量/	石膏带水量/	浆液NH4+质量浓度/
	(t/h)	(t/h)	(mg/L)
1	4.33	2.14	687
2	6.24	3.15	656





#### 第44卷 第3期

## 3 结果讨论

### 3.1 燃煤电厂中氨的分布

国内燃煤电厂脱硝下游设备中存在的氨来源 主要包括2个方面:一是锅炉为调节炉水pH值添 加的氨水或联氨;二是SCR或者选择性非催化还 原(selective non-catalytic reduction, SNCR)脱硝工 艺产生的逃逸氨。炉水中的铵根离子会随锅炉排 污水进入电厂废水处理系统,最终进入脱硫系统, 极少进入烟气,因此,燃煤机组烟气中的氨主要 分布在脱硝下游烟道及设备中,其存在形式为烟 气中逃逸氨的不同形态沉积物。图4为燃煤机组 氨流程图。



1,2,3,4,5一烟气中氨流程;6一锅炉补给水氨;7一随空预器一二次
 风重新进入锅炉的氨;8,9一空预器及除尘器灰分吸附氨;
 10一脱硫系统外排氨。

#### 图4 燃煤机组氨流程图

#### Fig. 4 Ammonia flow chart of coal-fired power plant

#### 3.2 空预器对氨的影响

烟气在流经空预器的过程中,空预器烟气侧 温度从310~370 ℃下降到120~160 ℃,空气侧一 二次风温度从室温上升到约300 ℃,氨会经历如 下过程<sup>[21-23]</sup>:

1)烟气冷却过程中,烟气侧中的SO<sub>3</sub>与NH<sub>3</sub>反应生成硫酸氢铵(ABS)。

 2)空预器受热面温度在147~220℃区域内, 硫酸氢铵呈液态黏性,黏附飞灰沉积于空预器波 纹板上,NH,被飞灰吸附。

3) 空气侧中,吸附在灰中的硫酸氢铵分解或 NH<sub>3</sub>解吸,析出的NH<sub>3</sub>被一二次风重新带入锅炉 内,此部分氨约为空预器吸附总量的20%。

由表2、3结果可知,空预器对NH<sub>3</sub>的绝对脱 除量随入口NH<sub>3</sub>浓度升高而增大,但脱除效率随 入口NH<sub>3</sub>浓度升高变化不大。根据硫酸氢铵形成 规律<sup>[24]</sup>,硫酸氢铵的生成温度受NH<sub>3</sub>与SO<sub>3</sub>浓度的



2.01篇、行用的型型型型公式为5。 进入教会人等"理论之声"找到这下角"会员中心"。点由注册会员、注意注册会员封信显尽可能许尽、专业 或物长把包一、约六公司、电利税、设计做好过成写自己目前发示制的专业或者大学年习的专业。利利他也不要 理想好发达是其实自己与单心的注册业务成产品。新为全规图使利用会供注册信息意立就成为通常系、行业专 某样及方型(工業務有目录。 二 专为之油间也。不不告人、印刷) 通知机构产业规则教师们专业当时需要重要的人们经路1952(21)664)



影响,当SO<sub>3</sub>浓度不变、NH<sub>3</sub>浓度升高时,硫酸氢 铵生成温度升高,空预器内能够沉积硫酸氢铵的 区域前移,空预器对NH<sub>3</sub>脱除能力提高。根据硫 酸氢铵生成趋势模型<sup>[25-26]</sup>,硫酸氢铵的生成概率与 空预器综合排烟温度成反比。测试期间1号机组 空预器对NH<sub>3</sub>的脱除效率较2号机组低,此现象 可能是由空预器出口烟温不同导致的。虽然1、2 号机组煤种及逃逸氨浓度相似,但1号机组空预 器冷端综合温度比2号机组高约15℃,因此1号 机组硫酸氢铵生成概率较2号机组低,导致1号机 组空预器NH<sub>3</sub>脱除效率低。

### 3.3 除尘器对氨与SO<sub>3</sub>的影响

烟气中的 SO<sub>3</sub>与 NH<sub>3</sub>会根据体积分数比及反 应温度的不同生成不同的反应产物,当体积分数 比大于1时,无论反应温度高低,均生成硫酸氢 铵;当体积分数比小于1时,高温时生成硫酸氢 铵,低温时生成硫酸铵,此温度主要由 SO<sub>3</sub>与 NH<sub>3</sub> 的浓度决定。硫酸氢铵能被吸附在空预器或飞灰 上;硫酸铵在高温烟气下为白色颗粒;烟气中的 气态游离氨能被飞灰吸附,且温度越低,氨的被 吸附量越大;除尘器通过捕集颗粒而拥有对任何 形态氨的脱除能力。

由图2、3测试结果可知,飞灰中的NH3与 SO3含量随粒径变化大,飞灰平均粒径越小,其 NH,与SO,含量越高。此现象主要是由于硫酸氢铵 在形成以后,容易首先被吸附在飞灰颗粒的孔隙 中,仅当液态硫酸氢铵较多时,飞灰颗粒内部孔 隙吸附达到饱和,多余的液态硫酸氢铵才开始黏 附在颗粒表面,飞灰粒径越小,飞灰可供硫酸氢 铵沉积的比表面积越大,飞灰吸附能力就越强, 灰中硫酸氢铵的浓度越高。因此结合以往研究可 知,NH,含量与粒径成反比的现象仅在高逃逸氨 浓度条件下成立,当逃逸氨质量浓度较小(小于 1.52 mg/m<sup>3</sup>)时,小粒径飞灰中NH,含量与大粒径 飞灰中含量基本一致。飞灰表面积与飞灰中NH, 含量相关性弱,由于飞灰矿物组成、烟温、粒径、 烟气流场、停留时间、脱硝设计及实际运行情况 都会影响飞灰对氨的吸附能力,飞灰粒径仅是影 响因素中的一个,且飞灰粒径与飞灰内部孔隙率 并没有直接关系。飞灰对NH。的吸附机制相互竞



395

吉攀: 燃煤电厂烟气中氨脱除及分布机理研究

争,除硫酸氢铵在飞灰上物理沉积与化学反应外,还包括对游离氨的直接吸附。某些机制在特定条件下比其他机制影响更大,从而可对灰中氨浓度的高低起到控制作用。

测试结果也表明,ESP各电场捕集的灰样中 NH<sub>3</sub>与SO<sub>3</sub>摩尔比变化大。随烟气流动,一、二、 三电场灰样中NH<sub>3</sub>与SO<sub>3</sub>摩尔比逐渐减小,其中 一、二电场的摩尔比大于2,说明灰样中除硫酸 氢铵及硫酸铵以外,还吸收了游离态SO<sub>3</sub>。飞灰 中含有大量金属氧化物(如CaO、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>等)<sup>[27]</sup>,表面大多呈碱性,当烟温降低时,烟 气中的SO<sub>3</sub>等酸性气体会凝结形成酸雾,飞灰中 的碱性氧化物或普通氧化物与酸雾发生中和反应, 生成硫酸盐,进而沉积于飞灰颗粒上。

### 3.4 湿法脱硫对氨的影响

经除尘器处理后的燃煤烟气进入脱硫系统, 其带入的氨主要分为2部分:未被脱除的飞灰中 吸附的氨以及烟气中未被飞灰吸附的氨。超低排 放改造后,除尘器出口粉尘质量浓度一般小于 30 mg/m<sup>3</sup>,通过飞灰带入的氨浓度比烟气携带的 氨浓度小得多,烟气中的氨进入脱硫塔后,由于 飞灰及烟气中氨或氨盐易溶于水的特性,极易被 脱硫浆液溶解,吸收塔内的氨离子主要来源于烟 气携带氨,并随脱硫废水排出。

由表2、3测试结果可知,脱硫净烟气氨浓度 随原烟气氨浓度增大而增大;脱硫系统对氨的脱 除效率随浆液pH值的增大而减小。上述测试结果 与文献[14]的研究结果相符,正常运行的脱硫系 统中,原烟气氨浓度对脱硫系统的氨量影响最大, 其可决定净烟气氨浓度及浆液氨浓度。当逃逸氨 浓度确定时,浆液pH值越小,浆液对逃逸氨的捕 集效率越高;脱硫废水排放量增大也能促进氨吸 收,但影响程度小于原烟气氨浓度与浆液pH值。

## 4 燃煤电厂氨分布浓度估算

针对脱硝出口高浓度逃逸氨的工况,结合测 试结果,提出了空预器、电除尘器和湿法脱硫系 统对逃逸氨的脱除系数,如表5所示,进一步利 用氨的物料守恒规律对燃煤机组各工艺流程中的 氨沉积量进行估算。锅炉排污携带氨量通过锅炉



补给水带入氨量进行计算,一般认为,锅炉补给水需通过添加氨水将水质pH值从6调整到9.5<sup>[28]</sup>。

## 表5 估算系数 Tab.5 Estimation factors

序号	系数	数值
1	空预器氨脱除系数	0.04
2	返回炉膛氨量系数	0.2
3	除尘器氨脱除系数	0.8
4	湿法脱硫氨脱除系数	0.4

注:脱硝出口逃逸氨质量浓度小于1.52 mg/m<sup>3</sup>时,空预器氨脱除系数取0。

根据试验确定的相关系数及现场测试结果, 对某 300 MW 机组的全厂氨分布浓度进行估算, 结果如表 6 所示。由估算结果可知,当脱硝出口 逃逸氨质量浓度为 5.62 mg/m<sup>3</sup>时,1 kg 灰样中氨 质量为 176 mg,此时灰样已带有明显氨味,会对 粉煤灰的销售与利用造成影响<sup>[12]</sup>。

#### 表6 燃煤机组氨分布估算

## Tab. 6 Estimation of ammonia distribution of coal-fired power plant

	1 1	
序号	参数	数值
1	脱硝出口逃逸氨质量浓度/(mg/m³)	5.62
2	烟气量(标干,6%O2)/(m3/h)	1 186 312
3	燃煤量/(t/h)	133
4	灰分/%	27.9
5	锅炉补给水流量/(t/h)	11.2
6	脱硝出口氨量/(g/h)	6 667.1
7	空预器出口氨量/(g/h)	6 300.4
8	除尘器出口氨量/(g/h)	1 071.1
9	脱硫塔出口氨量/(g/h)	482.0
10	锅炉补给水携带氨量/(g/h)	61.8
11	空预器飞灰携带氨量/(g/h)	293.4
12	除尘器飞灰携带氨量/(g/h)	5 229.3
13	脱硫系统排放氨量/(g/h)	650.9
14	1 kg除尘器灰样中氨质量/mg	176

## 5 结论

 1)通过实际测试与分析得到脱硝出口高浓度 逃逸氨工况下空预器、电除尘器、湿法脱硫系统对 逃逸氨的脱除效率分别为3.37%~6.63%、75.14%~
 83.28%和36.36%~46.38%,表明各设备对逃逸氨 的脱除效率基本稳定。脱硝后的烟气处理系统对 氨的脱除效率高,烟囱入口氨浓度相对脱硝出口 氨浓度下降明显。





#### 第44卷 第3期

发电技术

2)在脱硝出口高浓度逃逸氨工况下,飞灰中的氨含量与飞灰粒径成反比,NH<sub>3</sub>、SO<sub>3</sub>摩尔比与 飞灰粒径成正比,HCl的含量与飞灰粒径不相关; 脱硫净烟气氨浓度随原烟气氨浓度增大而增大; 脱硫系统对氨的脱除效率随浆液pH值的增大而 降低。

## 参考文献

- 夏刚,吴其荣,周川雄,等. 燃煤电厂超低排放要 求下的技术经济性分析[J]. 能源环境保护,2020, 34(4): 68-75.
   XIA G, WU Q R, ZHOU C X, et al. Technology and economic analysis of coal-fired power plants under the quirements of ultra-low emission[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(4): 68-75.
- [2] 秦刚华,童小忠,陈彪,等. 燃煤电厂实际烟气脱 硝催化剂性能检测中试平台建设与应用[J]. 浙江电 力,2021,40(6):99-102.
  QIN G H, TONG X Z, CHEN B, et al. Construction and application of pilot-scale experiment platform for performance testing of flue gas denitrification catalyst in coal-fired power plants[J]. Zhejiang Electric Power, 2021,40(6):99-102.
- [3] 冯前伟,朱仁涵,徐思达,等.1000 MW 燃煤机组
   SCR 超低排放关键参数性能评估与分析[J].发电技术,2022,43(1):168-174.

FENG Q W, ZHU R H, XU S D, et al. Performance evaluation and analysis of key parameters of SCR ultralow emission for 1 000 MW coal-fired unit[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(1): 168-174.

- [4] MENSASHA J, DUNN R D, MUZIO L, et al. Ammonium bisulfate formation temperature in a benchscale single-channel air preheater[J]. Fuel, 2011, 90: 2445-2453.
- [5] 卿梦霞, 张鑫, 刘亮, 等. 燃煤烟气脱硝副产物硫酸 氢铵/硫酸铵沉积与分解特性研究[J]. 化工学报, 2021, 72(02): 1132-1141. QING M X, ZHANG X, LIU L, et al. Study on the deposition and decomposition characteristics of ammonium bisulfate/ammonium sulfate as the byproduct of denitration in coal-fired[J]. CIESC Journal, 2021, 72(2): 1132-1141.
- [6] SI F Q, CARLOS E, YAO Z, et al. Inferential sensor for on-line monitoring of ammonium bisulfate formation temperature in coal-fired power plants[J].

echnology, 2009, 90(1): 56-66.



## 术\_\_\_\_\_

[7] 马双忱,邓悦,吴文龙,等. SCR脱硝过程中硫酸 氢铵形成特性实验研究[J].动力工程学报,2016, 36(2): 143-150.
MASC, DENGY, WUWL, et al. Experimental research on she formation sharestaristics in SCD

research on abs formation characteristics in SCR denitrification process[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(2): 143-150.

- [8] BRENDEL G F, BONETTI J E, RATHBONE R F, et al. Investigation of ammonia adsorption on fly ash due to installation of selective catalytic reduction systems [R]. Washington: US Department of Energy, 2000.
- [9] MAJ I, KALISZ S, GADEK W. Ammonia desorption from fly ash[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 82: 1-10.
- [10] 石磊,牛国平,马强,等. 燃煤电厂烟气飞灰吸附氨变化规律[J]. 热力发电, 2019, 48(6): 53-57.
  SHI L, NIU G P, MA Q, et al. Ammonia adsorption by fly ash in flue gas of a coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(6): 53-57.
- [11] 罗闽. SCR 脱硝改造后空气预热器受热面积灰特性的数值研究[D].南京:东南大学,2016.
  LUO M. Study on numerical simulation of deposition characteristics of art preheater regenerator after SCR denitrification reform[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [12] 贺云飞. 脱硝粉煤灰氨释放与留存对水泥混凝土性能的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
  He Y F. Effects of ammonia release and retention of ammoniated fly ash on the performance of cement concrete[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [13] TOMASZ B, RENATA K. Effect of ammonia and ammonium compounds on wet-limestone flue gas desulfurization process from a coal-based power plant: preliminary industrial scale study[J]. Fuel, 2020, 281: 118564.
- [14] 马文杰,孙道华.火电厂脱硝逃逸氨对脱硫系统及环境影响分析研究[J].环境科技,2019,32(5):24-27.
  MAWJ, SUNDH. Analysis and research of effect on ammonia slip from denitrification to gas desulfurization system and environment in power plant[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 32(5): 24-27.
- [15] 赵宏,张发捷,马云龙,等.燃煤电厂SCR脱硝氨
   逃逸迁移规律试验研究[J].中国电力,2021,54(1):
   196-202.

ZHAO H, ZHANG F J, MA Y L. Test study on the migration characteristics of slip ammonia from the SCR





吉攀: 燃煤电厂烟气中氨脱除及分布机理研究

system in the coal-fired power plant[J]. Electric Power, 2021, 54(1): 196-202.

[16] 黄权浩,赵光耀,兰艳旭,等.脱硝系统流场优化在330 MW机组上的实践[J].浙江电力,2021,40(8):102-106.

HUANG Q H, ZHAO G Y, LAN Y X, et al. The practice of flow field optimization in denitration system of a 330 MW unit[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(8): 102-106.

[17] 中国电力企业联合会. 燃煤电厂烟气脱硝装置性能验 收试验规范: DL/T 260—2012[S]. 北京: 中国电力 出版社, 2012.

China Electricity Council. Performance checkup test code for flue gas denitration equipment of coal-fired power plants: DL/T 260—2012[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.

 [18] 李允超,赵大周,李凯,等.内蒙古某电厂逃逸氨浓 度测试与灰分影响分析[J].中国电力,2017,50(2): 135-138.

LI Y C, ZHAO D Z, LI K, et al. Ammonia escape testing and ash impact analysis for an inner mongolia power plant[J]. Electric Power, 2017, 50(2): 135-138.

- [19] 潘栋, 牛国平, 丁嘉毅. 火电厂 SCR 脱硝装置氨逃 逸测试方法对比研究[J]. 中国电力, 2014, 47(9): 149-152.
  PAN D, NIU G P, DING J Y. Comparative study on ammonia slip measurement of SCR denitrafication equipment in power plant[J]. Electric Power, 2014, 47(9): 149-151.
- [20] 中华人民共和国生态环境部.环境空气和废气 氨的 测定 纳氏试剂分光光度法: HJ 533-2009[S].北京: 中国环境科学出版社, 2010.

Ministry of Ecology and Environment, PRC. Air and exhaust gas determination of ammonia Nessler's reagent spetcrophotometry: HJ 533—2009[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010.

- [21] O'CONNOR D. Ammonia/fly ash interactions[R]. Palo Alto: EPRI, 2005, 1008310.
- [22] 刘建民,陈国庆,黄启龙,等. 燃煤脱硝机组空气预 热器蓄热片表面飞灰沉积板结机理研究[J]. 中国电机 工程学报, 2016, 36(S1): 132-139.
  LIU J M, CHEN G Q, HUANG Q L, et al. Study on mechanism of fly ash deposition and hardening on the air preheater regenerative piece surface of the coal-fired and denitration unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 132-139.

### [23] 韩高岩, 吕洪坤, 谢娜, 等. H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/NH<sub>4</sub>HSO<sub>4</sub>作用下



进入群会众号"概亚之声"找到左下角"会员中心",点击注册会员。注意注册会员时信息尽可能讲尽,专 或特征之电广、然力公司、结构、"过行程序支强"与自己目前从事的学业或是"大学不习的专业,将从他也完 整理方友的过程了自己单位的言意之效效产品。并为多处理局的会被感受力把信息意定考虑或通道法、行业 家库及行业"家情看目录。 本口》来情绪目录。

锅炉尾部受热面积灰成垢机理[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 78-85.

HAN G Y, LYU H K, XIE N, et al. Scaling mechanism of fly ash on rear heating surfaces under  $H_2SO_4/NH_4HSO_4[J]$ . Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 78-85.

- [24] 李文华, 吴贤豪, 陈彪, 等. 超低排放燃煤机组 SO<sub>3</sub>和 NH<sub>3</sub>生成及迁移规律研究[J]. 浙江电力, 2021, 40(8): 91-95.
  LI W H, WU X H, CHEN B, et al. Research on the formation and migration characteristics of SO<sub>3</sub> and NH<sub>3</sub> in ultra-low emission coal-fired units[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(8): 91-95.
- [25] BRUKE J M, JOHNSON K L. Ammonium sulfate and bisulfate formation in air preheaters[R]. US: EPA 1982.
- [26] 何梦漪. 燃煤机组烟气脱硝系统硫酸铵盐生成机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2020.
  HE M Y. Study on the formation mechanism of ammonium sulfate salt in flue gas denitrification process of coal-fired units[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020.
- [27] 颜鲁. 脱硝伴生硫酸氢铵与飞灰相互作用机制及对空预器堵塞影响的研究[D]. 济南:山东大学,2020.
  YAN L. Study on the interaction mechanism between ammonium bisulfate and fly ash in denitration process and its effect on air preheater blockage[D]. Jinan: Shandong University, 2020.
- [28] 国家标准化管理委员会.火力发电机组及蒸汽动力设备水汽质量: GB/T 12145-2016[S].北京:中国标准出版社,2016.

Standardization Administration. Quality criterion of water and steam for power plant and steam-generating equipment: GB/T 12145—2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.

收稿日期: 2022-03-01。 作者简介:



吉攀(1990),男,硕士,工程师, 从事火电厂污染治理设施故障诊断与技 术服务研究,790568102@qq.com。

(责任编辑 尚彩娟)

