

移与分布规律^[15]。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_x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^[16]。

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 $A_{ar}/\%$	27.37	24.53
挥发分质量分数 $V_{ad}/\%$	12.28	12.80
硫分质量分数 $S_{t, ad}/\%$	1.68	1.72
低位发热量 $Q_{net, ar}/(MJ/kg)$	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_x 浓度改变逃逸氨浓度，出口 NO_x 质量浓度在 10~15 mg/m³ 为工况 1，在 35~45 mg/m³ 为工况 2。文中除特别说明外，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^[17-19]。图 1 为烟气中逃逸氨采

表 2 试验工况

Tab. 2 Test conditions

机组编号	负荷/MW	SCR 入口 NO _x 质量浓度/(mg/m ³)	SCR 出口 NO _x 质量浓度/(mg/m ³)
1	300	632	12
		617	36
2	550	696	11
		688	41

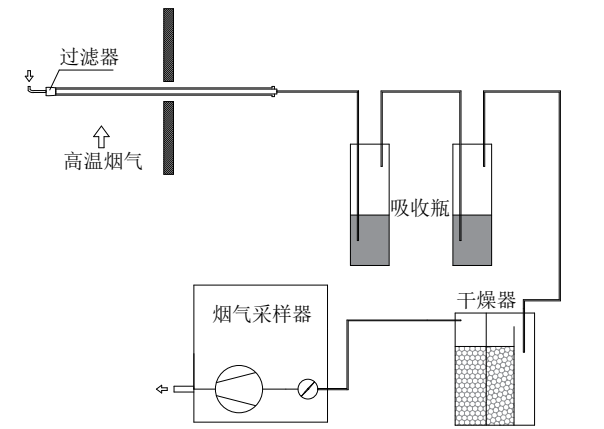


图 1 烟气中逃逸氨采样系统

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_x 浓度改变逃逸氨浓度，分别在工况 1、2 条件下测试，每个烟

微信搜一搜

舜业之声

1. 扫描左侧微信二维码关注“舜业之声”公众号，在公众号对话框输入关键词即可查询相关内容。
2. 进入公众号“舜业之声”找到左下角“会员中心”，点击注册会员。注册会员后可享受更多权益，如下载全文、参与互动等。
3. 未加入神州热电、天下热力、设计圈、神州热电产业联盟的朋友，请加神州热电产业联盟微信（微信号：shenzhouthermoelectricity）。



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

机组编号	工况	采样点位置			
		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_x质量浓度从10 mg/m³上升到40 mg/m³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NH₃、HCl及SO₃含量变化情况如图2所示。

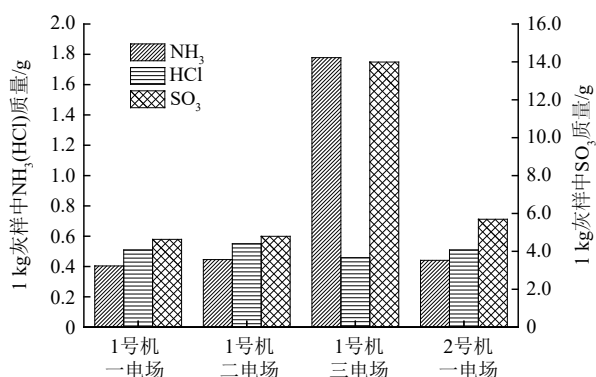


图2 灰样中吸附NH₃、HCl及SO₃含量

Fig. 2 Content of NH₃, HCl and SO₃ adsorbed in ash

通过测试灰样中可溶性NH₄⁺、SO₄²⁻及Cl⁻离子的浓度来计算吸附的NH₃、SO₃及HCl含量，其中SO₃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NH₃及SO₃含量变化大，三电场灰样中NH₃含量可达一电场的4.39倍，SO₃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NH₃与SO₃摩尔比分别为2.43、2.28与1.67。2号机组一电场灰样中NH₃、SO₃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。

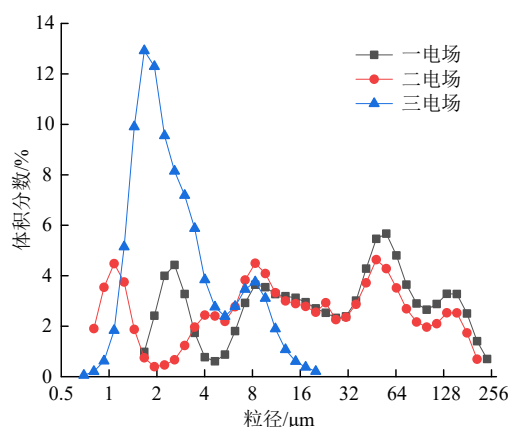


图3 1号机组ESP灰样粒径体积分布

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⁺含量

Tab. 4 WFGD external displacement and NH₄⁺ content in seriflux

机组编号	废水排放量/ (t/h)	石膏带水量/ (t/h)	浆液NH ₄ ⁺ 质量浓度/ (mg/L)
1	4.33	2.14	687
2	6.24	3.15	656





Tab. 5 Estimation factors

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



- 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 denitrification 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 spectrophotometry: 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. $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{NH}_4\text{HSO}_4$ 作用下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 $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{NH}_4\text{HSO}_4$ [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_3 和 NH_3 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_3 and NH_3 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

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)



1. 用微信扫描识别上图中左上角舜业之声二维码或在微信中搜索公众号“舜业之声”关注神州热电、天下热力设计圈、神州热电家属群公众号。
2. 进入舜业之声“舜业之声”找到下方“会员中心”，点击注册会员，注册注册会员时信息尽可能详尽，专业职称长把电厂、热力公司、设计院、设计院所等填写自己目前从事的专业或者不学习专业的专业，神州热电产业联盟的友邦企业填写自己单位的主营业务或产品，群办事后后期会组织会员注册信息建立群成员通讯录、行业专家库及行业厂家推荐目录。
3. 未加入神州热电、天下热力、设计圈、神州热电产业联盟群的朋友申请加群请联系群创办人张锦18325411666

