超低排放煤电机组主要大气污染物排放分析

曲立涛,于洪海,李 超,何凤元,杜 佳,齐晓辉,王德鑫,王 健 (华电电力科学研究院有限公司,辽宁 沈阳 110180)

[摘 要]以30家发电企业64台已实施超低排放改造的煤电机组为研究对象,调查研究了超低排放 燃煤机组主要大气污染物(颗粒物、SO2、NO_x)年均排放质量浓度、单位发电量排放强度、 达标排放率以及环保设施运行情况,多维度对比分析了各机组环保水平。研究结果显示: 参与调查机组的颗粒物、SO2、NO_x年度达标排放率分别为99.987%、99.978%、99.927%, 能够稳定实现超低排放;SO2排放质量浓度均值仅达到排放限值的48.02%,颗粒物排放质 量浓度均值仅达到排放限值的29.00%,表明SO2、颗粒物排放质量浓度限值还有一定提升 空间;启停机时段颗粒物、NO_x、SO2超标排放时长在各类污染物超标时长中占比分别为 60%、63%、35%,表明启停机时段各类污染物超标时间较长,通过技术措施减缓启停机对 环保设施的影响是下步工作重点;各容量等级机组超低排放技术装备水平基本一致的前提 下,按机组容量划分时,颗粒物、SO2、NO_x的实际排放强度较为接近,受制于机组整体负 荷率较低,大容量机组的清洁生产水平未完全体现。

[关 键 词] 超低排放; 燃煤机组; 环保设施; 污染物; 排放强度 [中图分类号] X511; TM621.9 [文献标识码] A [DOI 编号] 10.19666/j.rlfd.202109183

[引用本文格式] 曲立涛,于洪海,李超,等. 超低排放煤电机组主要大气污染物排放分析[J]. 热力发电,2022,51(1):196-202. QU Litao, YU Honghai, LI Chao, et al. Emission analysis of main air pollutants from ultra-low emission coal-fired power units[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 196-202.

Emission analysis of main air pollutants from ultra-low emission coal-fired power units

QU Litao, YU Honghai, LI Chao, HE Fengyuan, DU Jia, QI Xiaohui, WANG Dexin, WANG Jian (Huadian Power Science Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110180, China)

Abstract: By taking 64 coal-fired power units in 30 power generation enterprises that have implemented ultra-low emission transformation as the research objects, the average annual emission mass concentration of air pollutants (particulate matters, SO_2 , NO_x) of ultra-low emission coal-fired units, emission intensity per unit power generation, emission rate up to standard and the operation of environmental protection facilities were investigated, and the environmental protection level of each unit was compared in multiple dimensions. The research results show that, the annual emission compliance rates of particulate matters, SO_2 , and NO_x of the surveyed units are 99.987%, 99.978%, and 99.927%, respectively, which can realize ultra-low emissions stably. The average emission mass concentration of SO₂ only reaches 48.02% of the emission limit, and that of particulate matters only reaches 29.00% of the emission limit, indicating that there is still some potential for improvement of SO₂ and particulate matters emission limit. The over standard emission time of particulate matters, NO_x and SO_2 during the unit startup and shutdown accounts for 60%, 63% and 35% of the sum of all pollutants respectively, indicating that the overtandard emission time of various pollutants during startup and shutdown is relatively long. Mitigating the impact of startup and shutdown on environmental protection facilities through technical measures is the focus of the future work. On the premise that the level of ultra-low emission technical equipment of units at all capacity levels is basically the same, when divided according to the unit capacity, the actual emission intensity of particulate matters, SO_2 and NO_x is relatively close, subjected to the low overall load rate of the unit, the clean production level of large capacity units is not fully reflected.

Key words: ultra-low emission; coal-fired unit; environmental protection facility; pollutant; emission intensity

收稿日期: 2021-09-04

基 金 项 目: 中国华电集团有限公司 2021 年科技项目(CHDKJ21-02-179)

Supported by: 2021 Science and Technology Project of China Huadian Group Co., Ltd. (CHDKJ21-02-179)

第一作者简介:曲立涛(1982),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为发电企业环境保护技术,litao-qu@chder.com。

颗粒物、SO₂、NO_x是燃煤电厂排放的主要大气 污染物[1-2],也是造成环境空气质量下降的主要污染 物[3-4]。为控制燃煤机组大气污染物排放水平以改善 环境空气质量,我国密集出台一系列针对燃煤电厂 节能减排政策。2014年,国家三部委联合发布了《煤 电节能减排升级与改造行动计划(2014—2020年)》, 要求东部地区新建机组基本达到燃机排放限值,中 部地区原则上接近或达到燃机排放限值,鼓励西部 地区接近或达到燃机排放限值,稳步推进东部地区 现役燃煤发电机组实施大气污染物排放浓度基本 达到燃机排放限值的环保改造[5]。2015年,为贯彻 落实第114次国务院常务会议精神,三部委联合发 布《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方 案》,明确提出燃煤电厂超低排放工作具体要求[6]。 燃煤机组超低排放改造技术中,通常采用低(低) 温静电除尘器、电袋除尘器、布袋除尘器、湿式静 电除尘装置控制颗粒物;采用脱硫装置增容改造、 单塔双循环、双塔双循环等更高效率脱硫设施实现 SO2 超低排放;采用低氮燃烧、高效率选择性催化 还原(SCR)脱硝等技术实现 NO_x 超低排放^[7-9]。截 至 2019 年底,达到超低排放限值的煤电机组约 8.9 亿 kW,约占全国煤电总装机容量 86%^[10],颗粒 物、SO2、NOx 排放量分别为 18 万 t、89 万 t、93 万 t, 与 2013 年超低排放改造前 142 万 t、780 万 t、 834 万 t 相比, 分别相应降低了 87.3%、88.6%、 88.8%[11],可见实施超低排放带来的污染物减排效 果十分显著。

为掌握超低排放燃煤机组环保设施实际运行 状态与大气污染物排放水平,进一步评估、挖掘减 排潜力,对 30家电厂共 64 台已完成超低排放改造 并运行 1 年以上机组的环保设施运行现状进行对 比,分析了颗粒物、SO₂、NO_x排放强度水平,研究 超低排放条件下燃煤电厂环保设施运行状态与大 气污染物超标原因。为超低排放机组运行调整提供 参考与借鉴,同时为研究制定下一步污染物排放标 准提供数据支撑。

1 研究方法与内容

本次研究共选择 30 家发电企业 64 台已实施 超低排放改造并达标排放的煤电机组,总装机容量 18 614 MW。机组主要分布在黑龙江、辽宁、内蒙 古、天津、河北等省市,机组概况见表 1。其中,颗 粒物、SO₂、NO_x质量浓度数据来源于总排口烟气排 放连续监测系统(CEMS)统计数据,机组年运行时间、发电量数据来源于各厂生产报表统计数据,氨、 石灰石耗量来源于年度采购数据。为保证数据准确,统计周期设定为2020年度。为掌握大气污染物 实际排放水平,选择颗粒物、SO₂、NO_x年均排放质 量浓度,单位发电量排放强度,达标排放情况等维 度比较各机组环保水平。

表 1 机组概况 Tab.1 Unit overview

单机容量	台数/台	装机容量/MW	台数占比/%	容量占比/%
200 MW 级及以下	27	4 184	42.2	22.5
300 MW 级	27	8 310	42.2	44.6
600 MW 级及以上	10	6 174	15.6	32.9

2 结果分析与讨论

2.1 颗粒物排放质量浓度与排放强度

调查超低排放机组总排口颗粒物年均排放质 量浓度以及其分布情况,结果如图 1、图 2 所示。 图 1 中,横坐标"机组编号"为参与调查的机组编 号,共 64 台。



图 1 颗粒物年均排放质量浓度 Fig.1 The annual average emission mass concentration of particulate matters



图 2 颗粒物年均排放质量浓度分布 Fig.2 Distribution of annual average emission mass concentration of particulate matters

由图 1、图 2 可知:超低排放机组总排口颗粒 物年均排放质量浓度最大值 8.3 mg/m³、最小值 1.0 mg/m³,均值 2.9 mg/m³,表明调查机组颗粒物年 均排放质量浓度能够满足不大于 10 mg/m³的超低 排放标准要求(图 1 中横线);颗粒物年均排放质量 浓度值主要分布在 0~5 mg/m³范围内,若以 5 mg/m³ 作为颗粒物排放质量浓度标准限值,当前调查机组 中颗粒物年均排放质量浓度值不大于 5 mg/m³的占 89.06%;另外,调查机组颗粒物排放质量浓度均值 仅达到排放限值的 29.00%。上述数据均表明颗粒物 排放质量浓度限值还有一定提升空间。

污染物排放强度是燃煤发电企业清洁生产评价重要指标^[12-13]。图 3 列出了超低排放机组单位发电量颗粒物排放量。由图 3 可见,当前机组单位发电量颗粒物排放量最大值 33.30 mg/(kW h),最小值 4.16 mg/(kW h),平均值 11.53 mg/(kW h)。



按机组容量划分,200 MW 级及以下、300 MW 级、600 MW 级及以上机组单位发电量颗粒物排放 量均值分别为 11.38、10.05、15.95 mg/(kW h)。可 见,各容量等级机组间颗粒物实际排放强度相差不 大。其主要原因在于:1)各等级机组超低排放技术 装备水平一致;2)机组整体负荷率较低,导致大容 量机组的清洁生产水平未完全体现。另外,颗粒物 排放浓度受除尘器+脱硫装置协同去除性能的影响 较大,通过运行参数调整控制总排口颗粒物排放浓 度的手段有限。这是因为颗粒物采用物理性质的高 效电、袋除尘设施脱除,与依靠化学机理脱除的 SO₂ 和 NO_x 相比,后者更易受到控制参数(反应温度、 接触时间、还原剂用量等)的影响^[14-15]。

2.2 SO2 排放质量浓度与排放强度

图 4、图 5 分别为 SO2 年均排放质量浓度及其

分布。由图 4、图 5 可知:参与调查的超低排放机 组 SO₂年均排放质量浓度最大值 28.39 mg/m³、最 小值 2.91 mg/m³,均值 16.81 mg/m³,表明调查机组 SO₂年均排放质量浓度能够满足不大于 35 mg/m³的 超低排放标准要求(图 4 中横线); SO₂年均排放质 量浓度值主要分布在 10~25 mg/m³,若以 25 mg/m³ 作为 SO₂排放质量浓度标准限值,当前调查机组中 SO₂年均排放质量浓度值不大于 25 mg/m³的占 87.50%; 另外,调查机组 SO₂排放质量浓度均值仅 达到排放限值的 48.02%。上述数据均表明 SO₂排放 质量浓度限值还有一定提升空间。



Fig.4 The annual average emission mass concentration of SO₂



Fig.5 Distribution of annual average emission mass concentration of SO₂

此外,参与调查机组中有 27 台机组 SO₂ 年均 排放质量浓度小于 15 mg/m³,占全部调查机组的 48.19%,这部分机组 SO₂年均排放质量浓度远低于 超低排放限值。脱除 SO₂依靠化学反应机理,受烟 气接触时间、气液比、脱除剂耗量影响较大^[16-18]。 SO₂年均排放质量浓度控制过低的机组在节能降耗 方面有一定潜力,在运行中应根据 SO₂排放质量浓 度及时调整设备运行状态及浆液 pH、密度等主要工 艺参数,以达到节能降耗的目的。

http://rlfd.tpri.com.cn

图 6 列出了超低排放机组 SO₂ 排放强度。由 图 6 可见:调查机组单位发电量 SO₂ 排放量最大值 112.47 mg/(kW h),最小值 11.63 mg/(kW h),平均 值 67.26 mg/(kW h);按机组容量划分,200 MW 级 及以下、300 MW 级、600 MW 级及以上机组单位 发电量 SO₂ 排放量均值分别为 63.50、69.88、 70.35 mg/(kW h),各容量等级机组间 SO₂ 实际排放 强度相近。



Fig.6 The emission intensity of SO2 per unit power

单位发电量石灰石耗量在一定程度上能够反 映发电企业环保设施运行成本。图7为单位发电量石 灰石耗量。由图7可知,调查机组单位发电量石灰石 耗量最大值 122.93 g/(kW h),最小值 3.24 g/(kW h), 平均值 21.87 g/(kW h)。



Fig.7 The limestone consumption per unit of power

2.3 NO_x 排放质量浓度与排放强度

图 8、图 9 分别为 NO_x 年均排放质量浓度及其 分布情况。由图 8 可以看出,参与调查的超低排放 机组 NO_x 年均排放质量浓度最大值 45.56 mg/m³、 最小值 8.23 mg/m³,均值 34.24 mg/m³,表明调查机 组 NO_x年均排放质量浓度能够满足不大于 50 mg/m³ 的超低排放标准要求(图 8 中横线)。





由图 9 可以看出,调查机组 NO_x年均排放质量 浓度值主要分布在 30~45 mg/m³, NO_x 排放质量浓 度均值达到排放限值的 68.48%。但各机组彼此之间 差距仍然较大。部分机组为了提高脱硝效率,将出 口 NO_x 质量浓度控制在较低的排放水平。与颗粒 物、SO₂ 不同,SCR 脱硝工艺特性决定在现有设备 基础上控制过低的 NO_x 排放浓度将会导致喷氨量 及氨逃逸量的增大,增加运行成本的同时还会造成 硫酸氢铵生成加剧,进而降低催化剂性能并对下游 设备产生不利影响^[19-21]。因此,应当合理调整运行 控制方式、优化喷氨系统,在实际运行过程中将出 口 NO_x 质量浓度控制在 80%排放限值或低于排放 限值 5~10 mg/m³运行较为合理^[22-23]。

图 10 列出了超低排放机组 NO_x 排放强度。由图 10 可见:调查机组单位发电量 NO_x 排放量最大值 182.36 mg/(kW h),最小值 32.90 mg/(kW h),平均值 136.96 mg/(kW h);按机组容量划分,200 MW 级及以 下、300 MW 级、600 MW 级及以上机组单位发电量 NO_x 排放量均值分别为 129.56、136.88、157.18 mg/(kW h),各容量等级机组间 NO_x 实际排放强度相近。图 11 为单位发电量氨耗量情况。由图 11 可知,调查机

组单位发电量氨耗量最大值 2.9 g/(kW h),最小值 0.2 g/(kW h),平均值 0.8 g/(kW h)。其中,单位发电量氨耗量最大值为平均值 3.6 倍。因此,以该单位发电量氨耗量最大的机组为研究对象,研究分析氨耗量 偏高的原因。主要有以下方面:1)反应器入口边界条件偏离设计值,入口 NO_x质量浓度超设计值 49.43%,满负荷工况入口烟气温度偏高(410 ℃);2)反应器 出口 NO_x质量浓度分布不均匀,A 侧 NO_x质量浓度 相对标准偏差 65.7%,B 侧 NO_x质量浓度相对标准偏差 92.3%;3)燃煤砷含量高造成催化剂砷中毒,以反应器 A 侧为例,其上、中、下3 层催化剂 As 质量分







图 12a)统计了调查机组 2020 年度各类污染物 累计超标时间。由图 12a)可知: NO_x累计超标时间 最长,为 322 h, NO_x达标排放率 99.927%; 颗粒物、 SO₂累计超标时间相近,分别为 53、98 h,达标排 放率分别为 99.987%、99.978%。

图 12b)统计了调查机组颗粒物累计超标时间 中各类超标原因时长占比。由图 12b)可知,各类超 标原因中,启停机占 60%,CEMS 故障占 26%,除 尘器故障、主机故障及其他分别占 4%、4%、6%。



图 12 各类污染物累计超标时间 Fig.12 The cumulative exceeding time of various pollutants

图 12c)统计了调查机组 NO_x 累计超标时间中各 类超标原因时长占比。由图 12c)可知,各类超标原因 中,启停机占 63%,设备故障占 18%,主机故障占 4%,CEMS 故障占 1%,负荷低占 1%,其他占 13%。

图 12d)统计了调查机组 SO₂ 累计超标时间中各 类超标原因时长占比。由图 12d)可知,各类超标原

http://rlfd.tpri.com.cn

因中, 启停机占 35%, 硫份超设计占 31%, 设备故障占 12%, CEMS 故障占 9%, 浆液中毒占 2%, 主机故障占 1%, 其他占 10%。

从各类污染物累计超标原因统计结果可知,启停 机时段颗粒物、NO_x、SO₂超标排放时长在各类污染 物超标时长中占比较高,分别为60%、63%、35%。 其主要原因为,锅炉启动初期需要投油点火或稳燃, 采用电除尘器或电袋除尘器的机组在启动初期除尘 设施无法投运,导致颗粒物超标排放。SCR 脱硝工艺 的技术特性决定了其正常工作温度区间在320~ 420℃^[24-25]。燃煤机组在启停机时段或低负荷期间, SCR 脱硝入口烟气温度较低。当温度低于300℃时, SCR 脱硝系统将被迫退出运行,NO_x因此超标排放。

3 结论与展望

1)参与调查的超低排放煤电机组主要大气污染物(颗粒物、SO₂、NO_x)年度达标排放率均高于 99.9%,能够稳定实现超低排放。SO₂、颗粒物排放 限值还有一定提升空间。

2) 启停机时段颗粒物、NO_x、SO₂超标排放时 长在各类污染物超标时长中占比最高,应通过技术 措施减缓启停机对环保设施的影响。

3) 在超低排放技术装备水平基本一致的前提 下,各容量等级机组污染物实际排放强度较为接 近,未完全体现大容量机组的清洁生产水平。

4) 能源结构清洁化变更对火电机组灵活性以 及深度调峰能力提出了更高要求,环保设施应在宽 负荷脱硝技术、脱硝智能控制技术、多污染物协同 治理及其他节能降耗方面加大研究力度,解除环保 设施对火电机组灵活性以及深度调峰能力限制,推 动火电机组绿色发展。

[参考文献]

- [1] 郦建国,朱法华,孙雪丽.中国火电大气污染防治现状及挑战[J].中国电力,2018,51(6):2-10.
 LI Jianguo, ZHU Fahua, SUN Xueli. Current status and challenges of atmospheric pollution prevention and control of thermal power plants in China[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 2-10.
- [2] 刘艳梅,闫静,徐文帅,等.超低排放改造后燃煤电厂 常规大气污染物排放特征[J].环境科学学报,2020, 40(6): 1967-1975.
 LIU Yanmei, YAN Jing, XU Wenshuai, et al. Emission characteristics of conventional air pollutants in coal-fired power plants after ultra-low emission transformation[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, 40(6): 1967-1975.
 [3] 张金亭,赵玉丹,田扬戈,等.大气污染物排放量与颗
- [15] 东亚亭, 赵玉门, 田初文, 亭. 人 (75采初讯放重与秋 粒物环境空气质量的空间非协同耦合研究——以武汉 市为例[J]. 地理科学进展, 2019, 38(4): 612-624. ZHANG Jinting, ZHAO Yudan, TIAN Yangge, et al. Spatial non-coupling of air pollutant emissions and

particulate matter-related air quality: a case study in Wuhan City, China[J]. Progress in Geography, 2019, 38(4): 612-624.

- 【4】张菊, 苗鸿, 欧阳志云, 等. 近 20 年北京市城近郊区 环境空气质量变化及其影响因素分析[J]. 环境科学学 报, 2006(11): 1886-1892.
 ZHANG Ju, MIAO Hong, OUYANG Zhiyun, et al. Ambient air quality trends and driving factor analysis since 1980's in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006(11): 1886-1892.
- [5] 国家能源局.关于印发《煤电节能减排升级与改造行动 计划(2014—2020年)》的通知[EB/OL].(2014-09-12) [2021-10-28]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201409/ t20140919_1840.htm. National Energy Administration. Notice on printing and distributing the action plan for upgrading and transfor-mation of coal power energy conservation and emission reduction. (2014—2020) [EB/OL] (2014-09-12) [2021-10-28]. http:// zfxxgk.nea.gov.cn/auto84/201409/ t20140919_1840.htm.
- [6] 《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》[J]. 节能与环保, 2016(1): 32. Comprehensive implementation of ultra-low emission and energy-saving transformation work plan for coal-fired power plants[J]. Energy Conservation & Environmental Protection, 2016(1): 32.
- [7] 朱法华.《火电厂污染防治可行技术指南》(HJ 2301—2017)解读[J]. 环境影响评价, 2018, 40(2): 1-4.
 ZHU Fahua. Interpretation of *Guideline on Available Technologies of Pollution Prevention and Control for Thermal Power Plants*[J]. Environmental Impact Assessment, 2018,40(2): 1-4.
- [8] 孙智滨, 常俊, 康英伟. 大型燃煤火电机组超低排放 环保岛技术综述[J]. 热能动力工程, 2019, 34(5): 1-8. SUN Zhibin, CHANG Jun, KANG Yingwei. A review of ultra-low emission environmental protection island technologies for large coal-fired power plants [J] Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(5): 1-8.
- [9] 史文峥,杨萌萌,张绪辉,等. 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, et al. Ultra-low emission technical route of coal-fired power plants and the cooperative removal[J]. Proceedings of the
- CSEE, 2016, 36(16): 4308-4318. [10] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告 2020[M].北京:中国建材工业出版社, 2020: 1. China Electricity Council. Annual development report of China's electric power industry 2020[M]. Beijing: China Building Materials Industry Press, 2020: 1.
- [11] 朱法华,许月阳,孙尊强,等.中国燃煤电厂超低排放和 节能改造的实践与启示[J].中国电力,2021,54(4):1-8. ZHU Fahua, XU Yueyang, SUN Zunqiang, et al. Practice and enlightenment of ultra-low emission and energysaving retrofitof coal-fired power plants in China[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 1-8.
- [12] 张慧敏. 电力行业(燃煤发电企业)清洁生产评价指标体系的分析与应用[D]. 合肥: 安徽工业大学, 2016: 1.
 ZHANG Huimin. Analysis and application of cleaner production evaluation index system for electric power industry (coal-fired power plant)[D]. Hefei: Anhui University of Technology, 2016: 1.
- [13] 刘志强, 赵毅, 潘荔. 中外火电节能减排效率分析与

比较[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 9-18.

LIU Zhiqiang, ZHAO Yi, PAN Li. Analysis and comparison of energy saving efficiency and emission reduction efficiency of thermal power between China and foreign countries [J] Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 9-18.

- [14] 张道军,马子然,孙琦,等.选择催化还原(SCR)反应 机理研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(4): 1611-1623.
 ZHANG Daojun, MA Ziran, SUN Qi, et al. Progress in the mechanism of selective catalytic reduction (SCR) reaction[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(4): 1611-1623.
- [15] 霍旺. 石灰石-石膏湿法脱硫过程的吸收、氧化及结晶 机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009: 8-11.
 HUO Wang. Mechanism research on the absorption, oxidation and crystallization in the process of limestonegypsum WFGD[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009: 8-11.
- [16] 石少晴, 余琬冰, 蒋惠梦, 等. 湿法脱硫系统中二水硫 酸钙结晶特性分析[J]. 环境工程, 2019, 37(3): 104-108. SHI Shaoqing, YU Wanbing, JIANG Huimeng, et al. Study on crystalline properties of calcium sulfate dihydrate in wet desulfurization system[J]. Environmental Engineering, 2019, 37(3): 104-108.
- [17] 牛拥军, 宦宣州, 李兴华. 燃煤电厂烟气脱硫系统运行 优化与经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(12): 26-32.
 NIU Yongjun, HUAN Xuanzhou, LI Xinghua. Operation optimization and economic analysis for WFGD system of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(12): 26-32.
- [18] 余昭,何育东,李兴华,等.石灰石-石膏法串联脱硫 塔系统[J]. 热力发电,2016,45(2):91-95.
 YU Zhao, HE Yudong, LI Xinghua, et al. Design and operation characteristics of limestone-gypsum desulfurization double-tower series system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(2): 91-95.
- [19] 冯前伟,张杨,王丰吉,等. 燃煤机组 SCR 脱硝超低 排放改造前后性能对比分析[J].中国电机工程学报, 2020,40(20):258-267.
 FENG Qianwei, ZHANG Yang, WANG Fengji, et al. Performance comparison and analysis before and after

SCR ultra-low emission transformation of coal-fired units[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 258-267.

- [20] 赵虹,何梦漪,杨建国,等. SCR 脱硝的硫酸铵生成机 理及其定量计算模型[J].中国电机工程学报,2020, 40(10): 3214-3221.
 ZHAO Hong, HE Mengyi, YANG Jianguo, et al. Formation mechanism and quantification model of ammonium sulfate in SCR denitrification system[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3214-3221.
- [21] 姚燕, 马云龙, 杨晓宁, 等. 高砷煤 SCR 脱硝催化剂 中毒失活研究[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 195-200.
 YAO Yan, MA Yunlong, YANG Xiaoning, et al. Deactivation of honeycomb SCR catalysts in higharseniccoal-fired power plant[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 195-200.
- [22] 曲立涛,李超,王德鑫,等. SCR 脱硝超低排放 NO_x均匀性 优化及安全策略分析[J].中国电力,2019,52(7):161-167.
 QU Litao, LI Chao, WANG Dexin, et al. Optimization on the ultra-low NO_x emission uniformity and analysis on the safety strategy of SCR denitration system[J]. Electric Power, 2019, 52(7):161-167.
- [23] 方朝君, 卢承政, 白晓龙. SCR 脱硝系统超低排放运行 优化技术研究[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 143-148.
 FANG Zhaojun, LU Chengzheng, BAI Xiaolong. Study on operation optimization of SCR denitrification with ammonia-injection for ultra-low emission[J]. Electric Power, 2018, 51(2): 143-148.
- [24] 胡冬. 脱除烟气 SO3 实现 SCR 宽负荷脱硝的可行性分析[J]. 中国电力, 2019, 52(3): 49-55.
 HU Dong. Feasibility analysis on the application of SO3 removal technology incoal-fired power units at low load SCR operation[J]. Electric Power, 2019, 52(3): 49-55.
- [25] 徐昶, 徐良, 胡杰, 等. 600 MW 火电机组提高 SCR 入口烟温方案研究[J]. 锅炉技术, 2015, 46(1): 61-64.
 XU Chang, XU Liang, HU Jie, et al. Research on improving the temperature of SCR entrance gas in 600 MW thermal power units[J]. Boiler Technology, 2015, 46(1): 61-64.

(责任编辑 刘永强)



《热力发电》	封三
哈尔滨兴隆锅炉有限公司	后彩插1
广州科宝水处理科技有限公司	后彩插2
浙江顺豪科技有限公司	后彩插3
西安热工研究院有限公司	后彩插 4—7
《热力发电》订阅宣传页	后彩插 8
北京柏兰达环境工程有限公司	后彩插9
南京苏夏工程设计有限公司	后彩插 10
上海冠龙阀门机械有限公司	后彩插 11
北京培瓦克机械有限公司	后彩插 12

http://rlfd.tpri.com.cn