

燃煤机组调峰过程中污染物排放特性及控制技术

魏厚俊¹, 谢研¹, 孙亚坤¹, 韩玉鑫¹, 宋民航^{2,✉}

(1. 河南理工大学化学化工学院, 河南焦作 454003;

2. 中国科学院过程工程研究所多相复杂系统国家重点实验室, 北京 100190)

摘要: [目的] 随着可再生能源在电网中发电比例的逐年提高, 火电机组实际运行参数大幅偏离设计运行参数, 将造成烟气中的污染物生成量增加, 影响尾部烟气处理设备的正常运行, 降低污染物的去除效率及机组运行经济性。[方法] 文章聚焦于机组调峰过程中的典型污染物排放规律分析及相应排放控制策略, 对氮氧化物、硫化物、挥发性有机物、重金属、颗粒物等排放特性的已有研究成果及进展进行分析总结, 具体包括选择性催化还原法脱硝技术、湿法脱硫技术、静电除尘技术、催化氧化技术、吸附控制技术等。[结果] 在此基础上, 得出当下灵活调峰过程中所采用的控制技术 & 控制策略, 并对各类污染物控制技术的经济性进行对比分析, 得出灵活调峰过程中影响污染物排放性能及控制成本的因素。[结论] 在燃煤机组灵活调峰的实际需求下, 应基于各类污染物自身特性, 构建合理的污染物停留时间、工作温区、流动及反应过程, 开发适用于多污染物脱除的高效、低成本、适应性强的污染物协同脱除技术及工艺。期望文章内容可以为火电机组灵活调峰过程中的污染物排放控制措施提供一定参考。

关键词: 燃煤机组; 灵活调峰; 污染物排放; 控制技术; 经济性

中图分类号: TK16; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)03-0050-12

开放科学(资源服务)二维码:



Emission Characteristics and Control Technology of Flue Gas Pollutants During Peak Regulation of Coal-Fired Units

WEI Houjun¹, XIE Yan¹, SUN Yakun¹, HAN Yuxin¹, SOMG Minhang^{2,✉}

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, Henan, China; 2. State Key Laboratory of Multiphase Complex Systems, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: [Introduction] With the gradual increase in the proportion of renewable energy generation in the power grid, the actual operating parameters of thermal power units deviate significantly from the design parameters, which will increase the amount of pollutants in the flue gas, and affect the regular operation of the flue gas treatment equipment, thus reducing the pollutant removal efficiency and the operating economy. [Method] The analysis of typical pollutant emission characteristics and corresponding control strategies during the peak shaving process of the unit was concerned. The current research results and progress of emission characteristics of NO_x, sulfides, volatile organic compounds, heavy metals, and particulate matter were analyzed and summarized, including selective catalytic reduction technology, wet flue gas desulfurization technology, electrostatic precipitator technology, catalytic oxidation technology, gypsum absorption technology, adsorption control technology, etc. [Result] On this basis, the control technology and control strategy used in the current flexible peak shaving process is put forward, the economics of various pollutant control technologies are compared and analyzed, and the factors influencing the pollutant control performance and costs are obtained. [Conclusion] Under the actual demand for flexible peaking of coal-fired units, it is concluded that under the demand of flexible peak regulation, reasonable pollutant residence time, working temperature range, flow, and reaction process should be constructed based on the characteristics of various pollutants, and pollutant synergistic removal technology characterized by efficient, low-cost, adaptable and suitable for multi-pollutant removal should be developed. It is expected that this paper can provide some reference for the pollutant emission control

收稿日期: 2022-05-18 修回日期: 2022-06-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“变负荷运行下旋流煤粉燃烧稳定性及 NO_x 生成特性研究”(52006120)

measures in the flexible peak shaving process of thermal power units.

Key words: coal-fired unit; flexible peak regulation; pollutant emission; control technology; economy

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

近年来,为全面保障能源安全及生态环境,各国都在大力发展新能源,旨在充分利用可再生能源促进经济可持续及平稳健康发展^[1]。在此背景下,中共中央国务院在所印发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》中,进一步指明了新型电力系统的发展方向,明确了以消纳可再生能源为主的增量配电网、微电网和分布式电源的市场主体地位^[2]。随着国家能源结构优化转型的深入推进,以风力发电、光伏发电为代表的新能源电力正在实现跨越式发展,然而其显著的间歇性、随机性特点同时也引发了突出的能源消纳问题。在该技术背景下,煤电中长期功能定位正在发生重大转变,即由过去的提供主体电量任务转变为提供可靠电力、调峰调频能力的基础性电源,其电源侧调节能力的全面、有序提升尤为重要^[3]。然而目前,火电机组的整体调节能力有限,且难以满足调峰过程中的环保性需求,造成火电机组主体与市场机制不能满足电力系统灵活性调节的问题^[4],因此,在兼顾环保、经济、运行可靠性的条件下,提升火电机组灵活调峰性能就显得愈发重要。

随着生态文明建设的不断推进,煤炭燃烧过程中污染物的排放受到了广泛关注^[5]。在燃煤机组运行过程中,煤炭燃烧利用将产生较多的烟气污染物^[6-7],除氮氧化物(Nitrogen Oxides, NO_x)、硫化物(Sulphur Oxides, SO_x)、颗粒物等常规污染物外,还伴随有挥发性有机污染物(Volatile Organic Compounds, VOCs)、重金属污染物等^[8]。由于机组调峰过程中,实际运行参数大幅偏离满负荷下的设计运行参数,将造成烟气中的污染物生成量增加,影响尾部烟气处理设备的正常运行,降低了污染物的去除效率,同时增加了污染物的控制成本。因此,研究燃煤机组变工况下的污染物生成规律及其控制方法,对适应煤电调峰需求和烟气污染物排放高效控制具有重要意义。

基于以上背景需求,本文聚焦于燃煤机组灵活调峰过程中的烟气污染物排放特性及控制策略,对

已有研究成果及进展进行概括和总结,重点分析了氮氧化物、硫化物、颗粒物、VOCs、重金属污染物等五种典型污染物的排放规律,并相应分析了当下灵活调峰过程中所采用的控制技术。具体包括选择性催化还原脱硝技术(Selective Catalytic Reduction, SCR)、湿法脱硫技术(Wet Flue Gas Desulfurization, WFGD)、静电除尘技术(Electrostatic Precipitator, ESP)^[9]、催化氧化技术、吸附控制技术等。最后,得出当下灵活调峰过程中所采用的控制技术及管理策略,并对各类污染物控制技术的经济性进行对比分析,得出灵活调峰过程中影响污染物排放性能及控制成本的影响因素。

1 燃煤机组变负荷下污染物排放特性

1.1 NO_x的排放特性

NO_x一直是燃煤机组运行过程中所关注的重要污染物,国家和电力行业也分别出台了逐渐严格的燃煤机组NO_x排放限值。在机组调峰过程中的NO_x排放方面,张双平等^[10]采用可支持热力系统网络级仿真的GSE软件,搭建了某660 MW超临界机组模型,对该机组的稳态变工况特性进行了模拟研究,得到SCR脱硝效率随负荷变化曲线如图1(a)所示。在机组负荷从50%THA升高至BMRC(Boiler Maximum Continue Rate)工况过程中,由于SCR催化剂活性受温度影响,机组在升负荷过程中的SCR反应温度逐渐升高,使得催化剂的活性增强,对应脱硝效率由78.90%升高至86.98%。针对300 MW及600 MW燃煤机组,董玉亮等^[11]基于运行数据分析,获得了两个机组在启动、正常调峰(50%~100%额定负荷)和深度调峰(30%~50%额定负荷)阶段的NO_x排放特性,并定义了净烟气NO_x排放因子 $E_{INO_x} = Q_{smd} C_{NO_x} / P_{el}$,其中, Q_{smd} 为标态下干烟气排放量, C_{NO_x} 为净烟气NO_x浓度, P_{el} 为机组电功率。在机组启动和运行调峰阶段,两台机组的净烟气NO_x排放因子 E_{INO_x} 随负荷的变化关系分别如图1(b)和1(c)所示,图中给出了负荷变化对NO_x排放的影响规律,并对比了机组启动与调峰阶段的NO_x排放情况。其中,由于机组自身特性及运行参数存在小幅波动,使数据分布呈现

一定的离散化。可见,两台机组的 NO_x 排放因子随负荷变化规律大体接近。在300 MW和600 MW机组下,35%负荷时的 NO_x 排放因子比100%负荷时分别提高了10%和100%附近。并且,两台机组分别在85%负荷和65%负荷时, NO_x 排放因子达到了最低值。此外,根据图中拟合曲线可以看出,机组启

动阶段的 NO_x 排放因子要远大于调峰运行阶段。分析原因主要是由于低负荷运行阶段下脱硝装置的工作效率要低于满负荷运行。

1.2 SO_x 的排放特性

在 SO_x 排放方面, SO_x 主要包括 SO_2 和 SO_3 两大类。在 SO_2 研究方面,以采用石灰石-石膏法脱硫技术的亚临界300 MW和亚临界600 MW机组为对象,董玉亮等^[11]研究获得了两台机组在启动、正常调峰和深度调峰阶段的 SO_2 排放特性,并定义了净烟气 SO_2 排放因子 $E_{\text{SO}_2} = Q_{\text{SO}_2} C_{\text{SO}_2} / P_{\text{el}}$,其中, Q_{SO_2} 为标态下干烟气排放量, C_{SO_2} 为净烟气 SO_2 浓度, P_{el} 为机组电功率。在机组启动和运行调峰阶段,两台机组的净烟气 SO_2 排放因子 E_{SO_2} 随负荷的变化关系分别如图2(a)和2(b)所示。可以看出,随着机组负荷率的降低, SO_2 排放因子稍有下降,其排放规律符合 SO_2 排放因子的定义, SO_2 排放因子与机组功率呈正相关,且启动阶段的 SO_2 排放因子较调峰阶段略小。

聚焦于中小型的循环流化床锅炉(Circulating Fluidized Bed, CFB),洪方明^[12]通过对3台150 t/h CFB锅炉的运行数据对比,分析了CFB锅炉常用的两种脱硫技术性能,获得了不同工况下炉内添加石灰石脱硫和石灰石-石膏湿法脱硫两类技术的脱硫效率。研究得到炉内脱硫效率约在50%~60%,能够有效降低硫排放,并缓解对低低温省煤器的腐蚀问题。而在除尘器尾部安装WFGD情况下,脱硫效率能够达到96.5%~99.1%,对应 SO_2 排放浓度小于 20 mg/m^3 。图2(c)对比了不同负荷下两种方法的脱硫效率变化趋势,可见,随着锅炉负荷的升高,两者脱硫效率均有小幅提升。相比之下,WFGD的整体脱硫效率及提升趋势更为显著。

在 SO_3 研究方面,李文华等^[13]针对采用低低温静电除尘器(Low-low Temperature Electrostatic Precipitator, LLT-ESP)+烟气脱硫技术(Flue Gas Desulfurization, FGD)+湿式静电除尘器(Wet Electrostatic Precipitator, WESP)超低排放路线的某660 MW燃煤机组,研究了负荷变化对 SO_3 浓度的影响,其变化规律如图3所示。可见,随着负荷的升高,不同位置的 SO_3 浓度均呈现出逐渐增大的趋势。这可归因于增大锅炉负荷后烟温升高,促进越来越多的 SO_2 转化为 SO_3 。因此,在机组升负荷过程中,应尤其注意 SO_3 的生成问题。目前,针对变负荷下 SO_3 排放特性研究的文献报道较少,有待后续的深入研究。

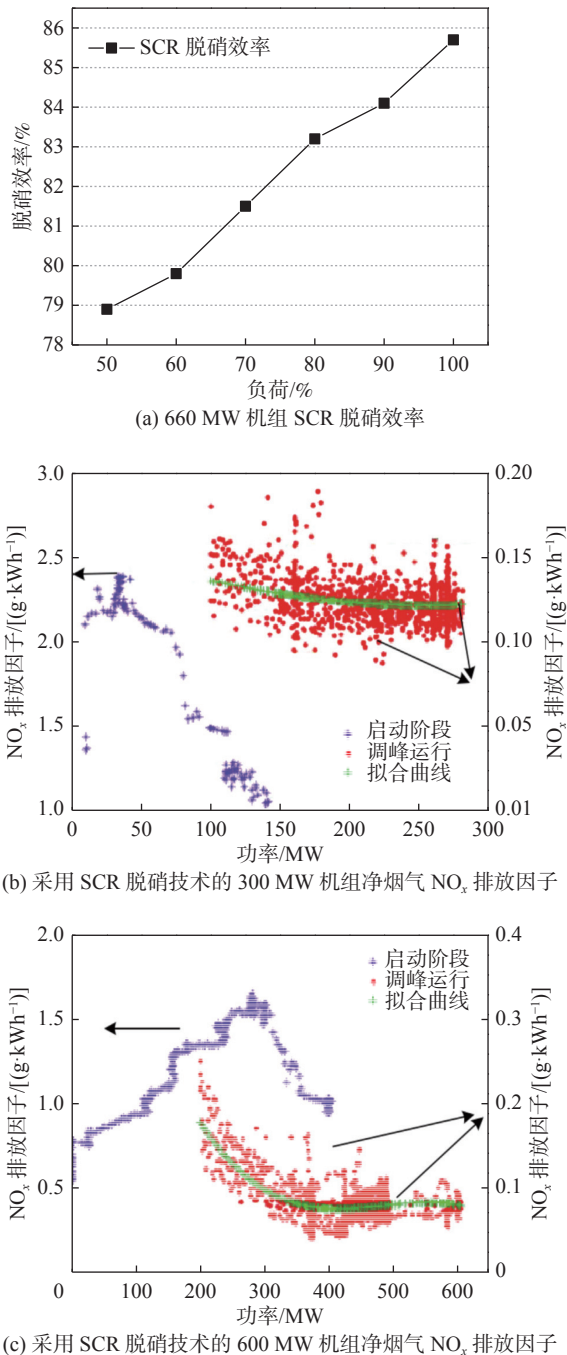


图1 燃煤机组变负荷对脱硝效率的影响

Fig. 1 Influence of variable load of coal-fired unit on denitrification efficiency

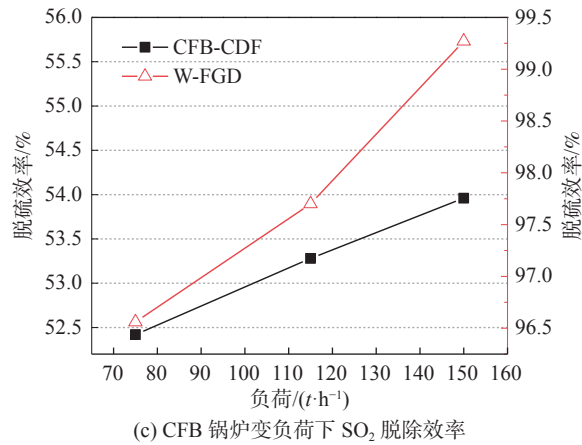
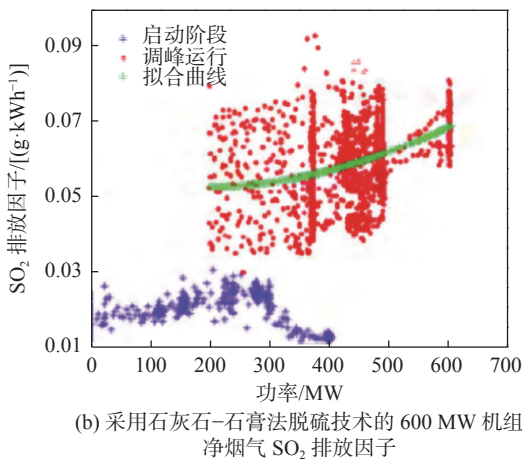
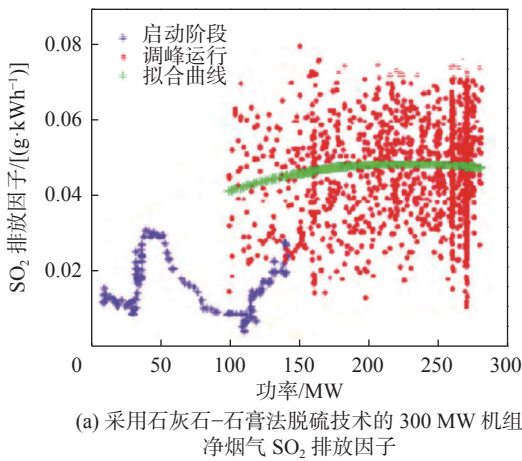


图 2 燃煤机组变负荷对脱硫效率的影响

Fig. 2 Effect of variable load on desulfurization efficiency of coal-fired units

1.3 VOCs 的排放特性

电力及化工企业的烟(废)气排放中常含有 VOCs 挥发性有机物, 其直接排放将对环境及人体健康造成较大危害。聚焦于多种典型 VOCs 排放情况, 史晓宏等^[14] 对某电厂 300 MW 亚临界燃煤机组烟气中

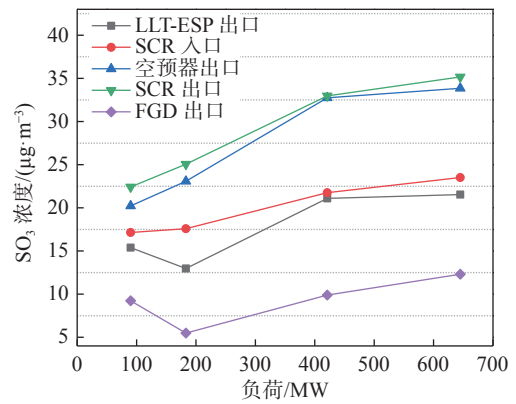


图 3 SO₃ 浓度随负荷变化情况^[13]

Fig. 3 The variation of SO₃ concentration with boiler load^[13]

的 VOCs 进行全流程浓度监测, 研究分析了选择性催化还原脱硝、静电除尘和湿法脱硫等污染物治理设备对 VOCs 浓度的协同控制规律。图 4 给出了该机组典型 VOCs 的质量浓度变化情况。由图中可见, 烟气流首先经过 SCR 脱硝装置的协同处理后, VOCs 质量浓度产生了明显下降, 而后, 剩余的 VOCs 依次流入 ESP 和 FGD 装置内, 由于烟气温度进一步下降导致部分 VOCs 冷凝或溶于脱硫废水, 使 VOCs 的总排放量进一步降低。同时可见, 在 SCR 前端, 100% 负荷下的 VOCs 浓度要高于 50% 负荷下 2~3 倍。分析原因是燃煤机组低负荷运行时, 烟气流速较低使 VOCs 在炉内滞留时间延长, 参与燃烧反应的时间增加, 从而降低了 VOCs 排放量。

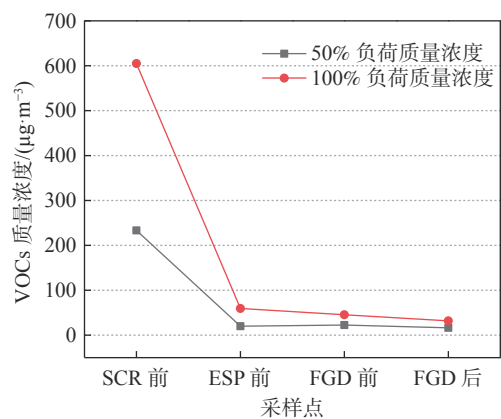


图 4 300 MW 燃煤机组 VOCs 质量浓度变化

Fig. 4 VOCs mass concentration of a 300 MW coal-fired unit

表 1 详细给出了该燃煤机组变负荷下的典型 VOCs 质量浓度^[14]。可知, 在 50% 负荷条件下, SCR

入口端的烟气中苯、甲苯及苯甲醛浓度分别为 $127.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $39.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。经污染治理设备的协同处理后,其脱除效率能够分别达到 95.9%、95.2% 和 74.4%。当运行负荷升高至 100% 时,SCR 入口端的烟气中苯、甲苯及苯甲醛浓度分别升高至 $437.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $73.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $60.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$,说明烟气中的有机污染物浓度随着燃煤机组运行负荷的

增加而大幅升高。相比于 50% 负荷运行,100% 负荷条件下 WFGD 后端的苯、甲苯和苯甲醛排放浓度有部分提升。但经过已有污染治理设备的协同脱除作用,100% 负荷下对以上三种污染物的脱除效率与 50% 负荷条件下接近,并且其余 9 种 VOCs 的脱除效率均能够保持在 40%~99% 之间,排放浓度均远低于我国目前的工业源废气 VOCs 排放标准限值^[14]。

表 1 300 MW 燃煤机组典型 VOCs 质量浓度分布

Tab. 1 Typical VOCs mass concentration distribution of a 300MW coal-fired unit

$\mu\text{g}/\text{m}^3$

项目	50%负荷					100%负荷				
	SCR前	ESP前	FGD前	FGD后	脱除效率	SCR前	ESP前	FGD前	FGD后	脱除效率
正己烷	17.05	0.82	2.08	—	—	6.20	0.27	0.35	0.56	90.97%
乙酸乙酯	1.19	0.59	3.96	0.65	45.38%	—	0.10	0.17	0.13	—
苯	127.43	10.38	6.21	5.18	95.94%	437.28	48.54	32.47	19.59	95.52%
正庚烷	3.33	0.07	0.23	0.08	97.60%	4.71	0.05	0.03	0.05	98.94%
甲苯	39.30	0.65	1.48	1.88	95.22%	73.53	0.66	0.56	1.57	97.86%
乙苯	7.17	0.23	0.58	0.52	92.75%	7.87	0.14	0.12	0.2	97.46%
对/间二甲苯	3.96	0.30	0.70	0.68	82.83%	4.03	0.19	0.15	0.26	93.55%
苯甲醛	22.81	5.57	5.56	5.84	74.40%	60.44	9.09	11.19	8.84	85.37%
苯乙烯	2.59	0.34	0.67	0.45	82.63%	3.82	0.14	0.13	0.23	93.98%
邻二甲苯	6.89	0.27	0.65	0.60	91.29%	6.10	0.16	0.13	0.22	96.39%
2-壬酮	0.18	0.29	0.28	0.43	-138.89%	0.20	0.13	0.11	0.12	40.00%
十二烯	1.34	0.54	0.19	0.18	86.57%	0.74	0.11	0.05	0.24	67.57%
合计	233.24	20.05	22.59	16.49	92.93%	604.92	59.58	45.46	32.02	94.71%

注:—表示低于检出限

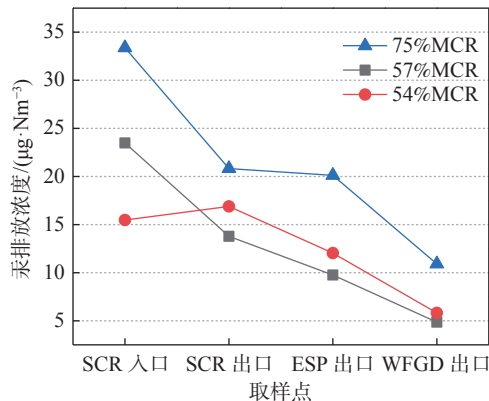
1.4 重金属的排放特性

煤炭燃烧过程中产生的重金属也是一种主要大气污染物,重金属污染物主要包括 Hg、Cd、Pb、Cr 和 As 等元素^[15]。其中,汞是一种具有剧毒且易挥发的污染物,对环境和人体健康危害极大,国家标准规定燃煤电厂汞及其化合物的排放浓度应控制在 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以内^[16]。目前,重金属污染物排放的相关研究,主要以汞的排放特性及控制策略研究为主。研究表明,燃煤烟气中的汞形态主要为气态氧化汞和气态单质汞,气态氧化汞约占 80%,而颗粒态汞的占比较少。针对采用 SCR+WFGD+ESP 技术路线的 3 台典型超低排放燃煤火电机组,孟磊^[17]测试了烟气污染物中气态单质汞、氧化汞以及颗粒汞的排放特征,并研究了各类污染物排放控制设备(SCR 脱硝技术、淋喷空塔+高效除雾器型脱硫塔、静电除尘器)对各类汞的协同脱除效果。测试过程中,采用安大略法分别对 SCR 前后和 WFGD 前后的烟气进行取样、恢复、消解等处理,并使用全自动测汞仪 (Hydra

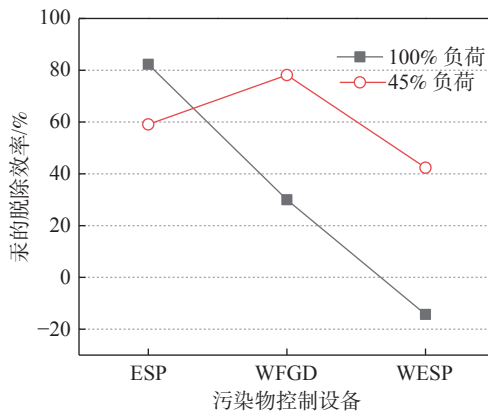
AA) 对消解后烟气中的汞含量进行分析。同时,针对 WFGD 中的新鲜浆液、脱硫废水及脱硫石膏,采用原子荧光分光光度计检测液体样品中的汞含量。测量得到锅炉最大连续蒸发量分别在 54%、57% 和 75%,三种工况下汞的脱除效果如图 5(a) 所示。根据孟磊的研究可以得出,各类污染物控制设备均能够对汞的脱除起到不同程度的作用,其中,SCR 可以协同氧化烟气中的单质汞,也就是经 SCR 脱硝装置后,由于催化剂对单质汞具有氧化作用,使气态氧化汞的占比增加。而 ESP 能够对烟气中的颗粒汞进行脱除,WFGD 能够很好地脱除烟气中的氧化汞。并且,随着机组负荷的降低,汞的排放浓度也呈明显降低的趋势。

针对某 1 000 MW 超超临界燃煤机组,张翼等^[16]同样使用了安大略取样分析方法测定了烟气中的汞含量,并利用全自动测汞仪对废液中的汞含量进行分析。经测试得到 45% 负荷和 100% 负荷下的汞脱除效率如图 5(b) 所示。100% 负荷下 ESP 对汞的脱

除效率为 82.32%, 远大于 45% 负荷下的 59.09%, 分析原因是 100% 负荷下 SCR 对汞的氧化率要远高于 45% 负荷下的氧化率。而在 ESP 后, 45% 负荷下的汞脱除效率要整体高于 100% 负荷, 这主要归因于二价汞易溶于水, 在经过 WFGD 和 WESP 后, 高湿环境下促进了对二价汞的脱除。此外, 可以看到图 5(b) 中出现一处负值点, 这可能是由于高电压使汞再次释放到烟气中或烟气中汞含量少, 使测量存在一定误差。



(a) 变负荷下不同取样点处的汞浓度分布



(b) 变负荷下不同设备的汞脱除效率

图 5 燃煤机组变负荷运行对汞排放浓度的影响

Fig. 5 Effect of variable load on mercury emission concentration of coal-fired units

1.5 颗粒物的排放特性

在燃煤颗粒物核化机制方面, 王翔等^[18]研究了尾部湿烟气中颗粒物的核化机制, 得到烟气中粒径大于 2 μm 的颗粒浓度对核化速率影响显著, 为低低温电除尘器优化设计提供了一定的理论支撑。在燃煤机组实际运行中的颗粒物排放方面, 翁卫国等^[19]对某电厂 1 000 MW 燃煤机组的颗粒物排放情况进

行监测, 获得了不同负荷下静电除尘器和脱硫塔的除尘效率。该机组采用了四电场静电除尘器和双托盘石灰石-石膏湿法脱硫技术。颗粒物测试过程中采用烟尘取样仪测试除尘器入口烟气中的颗粒物含量, 使用 PM_{10} 撞击器测试除尘器出口及脱硫塔出口烟气中的颗粒物分级质量浓度。图 6(a) 为测量得到的不同负荷下除尘效率。可见, 不同负荷下静电除尘器均能实现较优的颗粒捕集效果, 但是总除尘效率随着机组负荷的下降略有上升。锅炉负荷变化对除尘效率的影响主要体现在由于负荷下降后, 烟气流量及对应流速发生较大幅度的下降, 增加了颗粒物在除尘器内的停留时间, 从而提高了对颗粒物的捕集效果。由图 6(a) 中脱硫塔的除尘效率曲线可见, 机组负荷在 50% 到 100% 间, 脱硫塔能够达到 42.6% ~ 49.3% 的除尘效率, 并且在机组负荷下降过程中, 除尘效率呈明显增加趋势。脱硫塔除尘效率的增加原因与静电除尘器类似, 主要是由于变负荷条件下不同烟气量所引起的, 低负荷下延长了烟气在脱硫塔中的停留时间, 进而提高了脱硫塔的除尘效率。

李洋等^[20]研究了某电厂 1 000 MW 超超临界燃煤机组不同负荷下的颗粒物排放情况, 在使用低压撞击器测量颗粒物质量浓度的同时, 采用 X 射线荧光探针对颗粒物的化学成分进行分析。研究得到, 尽管负荷变化对 ESP 前颗粒物的生成浓度基本没有影响, 但由于负荷降低使矿物交互作用减弱, 导致煤中矿物, 包括 Na、Ca 和 S 等, 向细颗粒物 (PM_{10}) 的迁移比例增加, 将一定程度上增加电厂除尘的难度。同时, 分析对比了变负荷下静电除尘器以及湿法脱硫和湿电系统两种不同技术路线的除尘效果。其除尘效率分别如图 6(b) 和 6(c) 所示。由图 6(b) 可知, 机组高负荷运行 (70% 以上) 时, 负荷变化对 ESP 除尘效率的影响不大, 但低负荷运行下的 ESP 除尘效率大幅降低。该规律与图 6(a) 不同, 在负荷降低至 600 MW 时, ESP 除尘效率也相应降低。根据文献分析, 该机组低负荷下的飞灰未燃尽碳含量大幅降低 (由 4% 降低至 0.3%), 相应提高了飞灰比电阻, 导致低负荷下 ESP 除尘效率略有降低。如图 6(c) 所示, 在机组结合湿法脱硫和湿电系统情况下, 可进一步有效脱除烟气中的颗粒物, 同时机组运行负荷降低可延长烟气在两者内部的停留时间, 减少二次携带颗粒物的生成, 进一步提高整体的除尘效率。

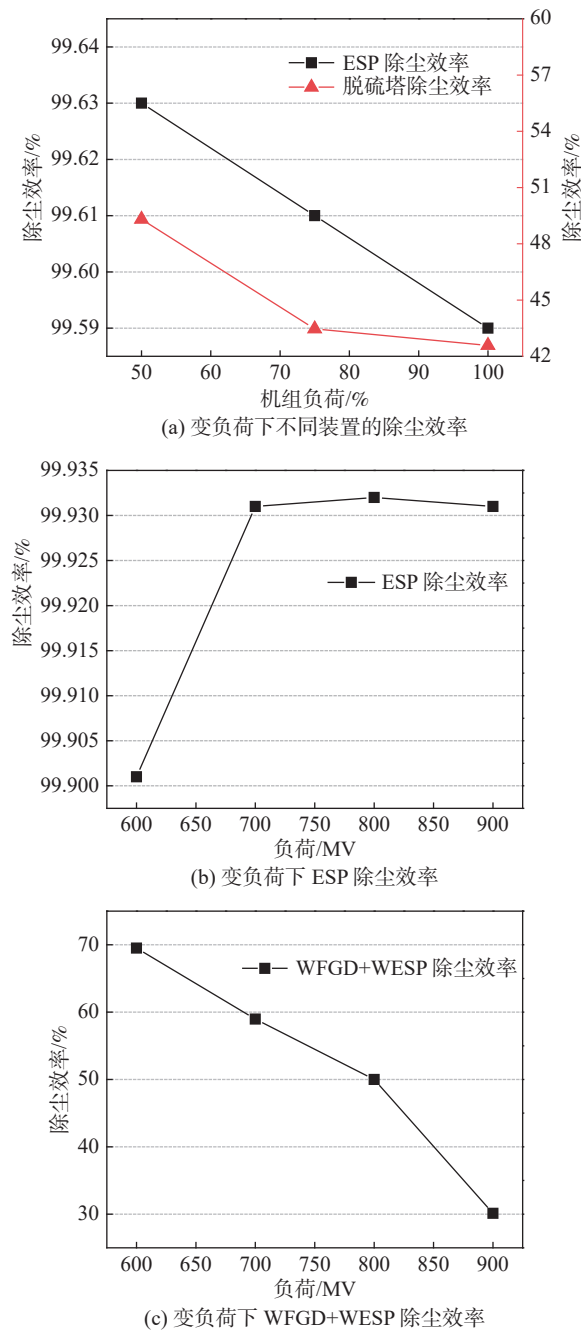


图6 燃煤机组变负荷对颗粒物生产的影响

Fig. 6 Effect of variable load of coal-fired units on particulate matter production

2 污染物控制技术对比

灵活调峰过程中烟气污染物排放不仅浪费了大量资源,而且造成了环境的严重破坏,直接影响到生态文明建设。随着大气污染物排放标准的日益严格^[21],对污染物控制技术水平提出了更高的要求,应分层次、系统和全面地考虑相关污染物的自身性质

并结合上下游工艺路线,科学、合理地设定相关污染物排放控制的最佳工艺指标^[22]。为了便于对几类污染物处理技术原理的理解,图7分别给出了SCR脱硝机理、WFGD系统反应机理、ESP电除尘器原理及有机物催化氧化技术原理的示意图。

为了详细对比各类污染物控制技术的特点及性能,满足机组变负荷下污染物控制设备的运行需求,表2详细分析对比了不同类型污染物及其控制技术的工作原理、应用效果及适用温度区间,从表中可以看出,对于氮氧化物排放的控制、硫的脱除、重金属汞的吸收及颗粒物的脱除,相应的控制效率均可达到90%以上,脱除效果显著。但对于有机污染物的排放控制,其净化技术的应用效果相对来说不尽理想,因此,对于有机污染物控制技术的性能优化及研究创新,就显得尤为重要和紧迫。

另外,由于各类污染物往往不是以单一类型存在于烟气中的,通常需要结合多种污染物控制技术来实现污染物的全面脱除净化,因此,对污染物的协同控制技术已成为我国燃煤机组降低排放污染物的主流技术路线及发展趋势。例如,通过SCR及选择性非催化还原技术(Selective Non-Catalytic Reduction, SNCR)的协同耦合,能够在低成本前提下提高NO_x的去除效率,同时也能够促进对颗粒物、重金属等的协同脱除。采用低温省煤器耦合电除尘器技术,能够降低粉尘颗粒物排放浓度至20 mg/m³以下,同时对SO₃的脱除效率达到70%~95%,实现细颗粒物及SO₃的协同高效脱除^[36]。以及,通过低低温电除尘器、SCR、SNCR及WFGD技术的深度协同作用,不仅能脱除烟气中的含氮、含硫颗粒物,还能对含有重金属和有机物的颗粒物进行脱除,其成本和效益要明显优于单独技术应用。

3 经济性分析

除了上述内容所关注的污染物脱除技术自身性能外,各类污染物控制技术的投资成本、运行费用及回收效益等技术经济性问题,也是影响并制约技术推广应用的重要因素。而经济性则是通过对设备的购置、安装费用和项目建设费用等的静态费用,以及设备的运行费用和回收费用等的动态费用来进行分析。通过对污染物控制技术的静态总投资和动态总投资分析,表3给出了5种常用污染物脱除技术的经济性分析,详细对比了低低温静电除尘器、选择性催化还原脱硝装置、选择性非催化还原脱硝技术、

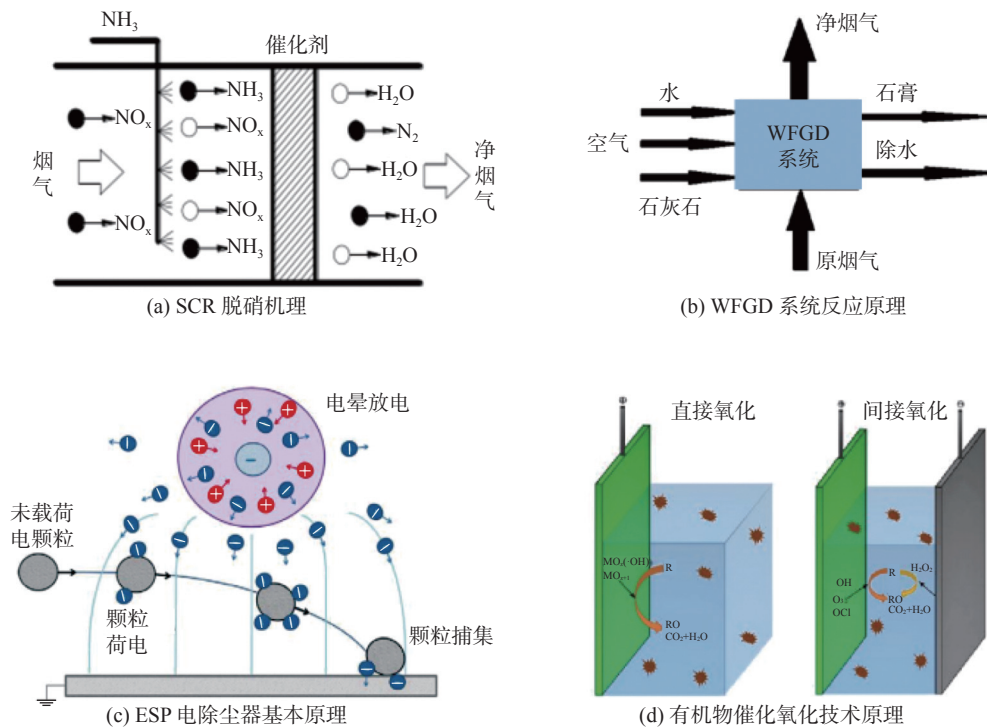


图7 几种典型污染物控制技术的原理

Fig. 7 Principles of several typical pollutant control technologies

石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置等的设备投资及运行成本。

由表3可见, 600 MW 机组安装 LLT-ESP 时, 除尘器出口粉尘浓度低于 15 mg/m^3 情况下, 其总费用大概为 8 114 万元, 年运行费用为 514 万元, 与该设备配套的烟气冷却器设备约为 3 000 万元, 年运行费用大概为 420 万元^[37]。对于 660 MW 超临界燃煤发电机组单独采用 SCR 技术时, 其静态投资费用大致为 7 522 万元, 动态投资费用为 7 568 万元^[38]。对于 660 MW 燃煤机组单独采用 SNCR 技术时, 其静态投资费用约为 7 000 万元, 动态总投资则需要根据实际情况而定^[39]。在 WFGD 方面, 以某 330 MW 燃煤机组为例, 其脱硫设备大概在 20 901 万元, 其中不包含折旧费用 1 324 万元, 该设备年运行费用在 7 730 万元左右, 该技术静态总投资在 22 363 万元, 其动态总投资在 15 886 万元上下^[40]。通过以上的技术经济性对比, 能够为各类技术的实际工程应用及选择提供一定参考。

4 结论

本文聚焦于机组调峰过程中的典型污染物排放规律分析及相应排放控制策略, 对氮氧化物、硫化物、

VOCs、重金属、颗粒物等排放特性的已有研究成果及进展进行分析总结, 具体包括 SCR 脱硝技术、湿法脱硫技术、静电除尘技术、催化氧化技术、吸附控制技术。在此基础上, 得出当下灵活调峰过程中所采用的控制技术, 并对各类污染物控制技术的经济性进行了对比分析, 得出灵活调峰过程中影响污染物排放控制性能及成本的影响因素。

在灵活调峰需求下, 针对不同类型的燃煤机组, 应结合实际运行情况, 基于机组烟气量、排烟温度、污染物类型及含量等的差异性, 综合考虑各类污染物停留时间、工作温区、流动及反应过程, 耦合多种污染物治理技术, 开发适用于多污染物脱除的高效、低成本、适应性强的污染物协同脱除技术及工艺。通过本文内容, 重点分析总结了燃煤机组变负荷下, 各类污染物的排放特性及相应控制技术, 期望为火电机组灵活调峰过程中的污染物排放控制措施及运行经济性提供一定指导。后续工作可进一步针对不同类型燃煤机组, 聚焦于常规调峰和深度调峰运行情况, 在满足较低负荷下锅炉和汽水系统安全性的前提下, 开展针对性的多污染物协同治理技术路线及方案研究, 并给出更加具体的污染物排放控制策略。

表2 几类典型污染物控制技术对比
Tab. 2 Comparison of some typical pollutant control technologies

污染物种类	技术名称	工作原理	应用效果	适应温度区间
NO _x 的脱除	NO _x 协同脱除(低氮燃烧技术和烟气SCR脱硝技术协同) ^[23]	对低氮燃烧器进行改造,耦合SCR催化剂的再生或更换	改造后脱硝效率可达到93.86%	300 ~ 400 °C
	选择性非催化还原脱硝技术(SNCR脱硝) ^[24]	不使用催化剂,将含氨基的还原剂(如氨水、尿素溶液等)喷入炉内,将烟气中的NO _x 还原脱除	SNCR与SCR联用NO _x 的脱除效率可达到70%~92%,单独使用可达到30%~45%	NO _x 的还原率最大的温度范围为870~1 000 °C
	高分子非催化还原脱硝法 ^[25]	通过气力输送将脱硝剂喷入焚烧炉,脱硝剂受热分解,与烟气中的NO _x 反应	脱硝效率高于SNCR,低于SCR	800 ~ 950 °C
硫化物的脱除	石灰石-石膏湿法脱硫工艺 ^[26]	石灰石磨成粉状加水制成吸收剂浆液,与烟气中的硫反应吸收脱除	脱硫效率超99%	40 ~ 80 °C
	半干法脱硫工艺 ^[27]	在有水或水蒸气存在的条件下,Ca(OH) ₂ 与SO ₂ 具有很高的反应活性	半干法脱硫工艺结合了湿法脱硫工艺和干法脱硫工艺优势,SO ₂ 脱除效率可达90%	55 ~ 160 °C
	干法脱硫工艺 ^[28]	在干燥环境下,采用吸收剂,通过化学反应把含有硫和硝的气体转变为干粉状产物,然后进行清除	不会产生对锅炉机组设备具有腐蚀作用的废硫和水蒸气等物质	120 ~ 180 °C
	流化床炉内石灰石脱硫 ^[29]	石灰石发生煅烧反应生成CaO, CaO与SO ₂ 、O ₂ 反应生成CaSO ₄	脱硫效率达到90%以上	850 ~ 900 °C
有机物的吸收	吸附控制技术 ^[30]	利用吸附剂较高的比表面积及较发达的孔结构,吸附排放物中的有机气体	挥发性有机物平均脱除效率可达到54.17%	—
	催化氧化技术 ^[30]	该技术将挥发性有机物氧化成水和二氧化碳等无害物质	V-W-Ti催化剂对苯的去除效率可达到75%以上	—
重金属Hg的脱除	利用石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置(WFGD)脱除有机物中多环芳烃 ^[31]	WFGD烟温降低,多环芳烃冷凝能够促使可凝结颗粒物中多环芳烃含量降低	可凝结颗粒物中多环芳烃的脱除效率为30.86%	50 ~ 130 °C
	石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置(WFGD) ^[16]	WFGD对汞的综合协同脱除	对Hg的脱除效率可达到97.07%	120 ~ 340 °C
	燃煤机组掺烧污泥 ^[32]	生物质燃烧过程释放较多的氯离子以及碱金属化合物,有效改善烟气中Hg ⁰ 的氧化气氛	汞的脱除效率最高可达98.8%	—
颗粒物的脱除	选择性催化还原脱硝装置(SCR)	SO ₂ 与NH ₃ 反应形成颗粒物,PM ₁₀ 在SCR中沉淀	PM ₁ 增加10%,PM _{1-2.5} 和PM _{2.5-10} 分别降低19%和17%	120 ~ 350 °C
	低低温静电除尘器(LLT-ESP) ^[33]	飞灰与SO ₃ 发生凝结或硫酸盐化	对PM ₁₀ 脱除效率可达到99.9%	90 ~ 120 °C
	静电除尘技术(ESP) ^[34]	利用电晕放电建立高压电场捕获烟气中的灰尘颗粒	除尘效率可达99%。	300 ~ 900 °C
	湿式静电除尘技术(WESP) ^[35]	通过水使粉尘聚集,并对其进行清除	除尘量达50%以上	40 ~ 70 °C

表3 部分污染物脱除技术的经济性对比

Tab. 3 Economic comparison of some pollutant removal technologies

技术类型	设备投资/万元	年运行费用/万元	静态总投资/万元	动态总投资/万元	脱除的污染物类型
低低温静电除尘器(LLT-ESP) ^[37]	7 600	514	10 600	914	脱除粉尘颗粒物
选择性催化还原脱硝装置(SCR) ^[38]	4 983	1 195	7 522	7 568	脱除污染物中的NO _x
选择性非催化还原脱硝技术(SNCR) ^[39]	2 580.2	1 405	7 000	1 739	
石灰石-石膏湿法烟气脱硫装置(WFGD) ^[40]	20 901	7 730	22 363	15 886	脱除污染物中硫化物

参考文献:

- [1] 刘安仓, 林楚伟, 江永. 新形势下的煤电企业转型思路探索 [J]. 中国电力企业管理, 2021(10): 78-79.
LIU A C, LIN C W, JIANG Y, et al. Exploration of transformation ideas of coal power enterprises under the new situation [J]. China Power Enterprise Management, 2021(10): 78-79.
- [2] 张勋奎. 以新能源为主体的新型电力系统发展路线图 [J]. 分布式能源, 2021, 6(6): 1-8. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2106606.
ZHANG X K. A roadmap for developing a new power system with new energy as the main body [J]. Distributed Energy, 2021, 6(6): 1-8. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2106606.
- [3] 孙杨. 基于储能的燃煤电站运行灵活性优化及其热力学评价 [D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000084.
SUN Y. Enhancing the operational flexibility of coal-fired power plants via energy storage and the thermodynamic evaluation thereof [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2020. DOI: 10.27140/d.cnki.ghbbu.2020.000084.
- [4] 吴珊, 边晓燕, 张菁娟, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的国内外辅助服务市场研究综述 [J/OL]. 电工技术学报: 1-17. (2022-03-08) [2022-07-21]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211730.
<https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-DGJS20220302006.htm>.
WU S, BIAN X Y, ZHANG J X, et al. A review of domestic and foreign ancillary services market for improving the flexibility of new power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-17. (2022-03-08) [2022-07-21]. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.211730.
<https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTOTAL-DGJS20220302006.htm>.
- [5] 徐静颖, 卓建坤, 姚强. 燃煤有机污染物生成排放特性与采样方法研究进展 [J]. 化工学报, 2019, 70(8): 2823-2834. DOI: 10.11949/0438-1157.20190287.
XU J Y, ZHUO J K, YAO Q. Research progress on formation, emission characteristics and sampling methods of organic compounds from coal combustion [J]. CIESC Journal, 2019, 70(8): 2823-2834. DOI: 10.11949/0438-1157.20190287.
- [6] 姜延灿, 邓彤天, 张颖, 等. 600 MW火电机组低负荷调峰的经济运行方式分析 [J]. 汽轮机技术, 2015(1): 61-64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2015.01.018.
JIANG Y C, DENG T T, ZHANG Y, et al. Analysis on economic operation mode of 600 MW fossil-fired generating during peak shaving low load operation [J]. Turbine Technology, 2015(1): 61-64. DOI: 10.3969/j.issn.1001-5884.2015.01.018.
- [7] ZHU J, ZHANG X, CHEN W, et al. Electrostatic precipitation of fine particles with a bipolar pre-charger [J]. Journal of Electrostatics, 2010, 68(2): 174-178. DOI: 10.1016/j.elstat.2009.12.005.
- [8] 武宝会, 李帅英, 牛国平, 等. 燃煤机组烟气污染物协同脱除技术及应用 [J]. 热力发电, 2017, 46(11): 103-107. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2017.11.103.
WU B H, LI S Y, NIU G P, et al. Synergistic removal technologies for flue gas pollutants and their engineering applications in coal-fired units [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(11): 103-107. DOI: 10.3969/j.issn.1002-3364.2017.11.103.
- [9] WANG X, CHANG J C, XU C Y, et al. Collection and charging characteristics of particles in an electrostatic precipitator with a wet membrane collecting electrode [J]. Journal of Electrostatics, 2016, 83: 28-34. DOI: 10.1016/j.elstat.2016.07.007.
- [10] 张双平, 李冰心, 赵凯, 等. 660 MW机组负荷对脱硝及除尘影响研究 [J]. 工程热物理学报, 2017, 38(6): 1144-1149.
ZHANG S P, LI B X, ZHAO K, et al. Simulation on the influence of a 660 MW unit load-up processes on denitrification and particle removal [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2017, 38(6): 1144-1149.
- [11] 董玉亮, 袁家海, 马丽荣. 面向灵活性发电的燃煤机组大气排放特性分析 [J]. 发电技术, 2018, 39(5): 425-432. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.2018.065.
DONG Y L, YUAN J H, MA L R. Air emissions characteristics of coal-fired power unit for flexibility generation [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 425-432. DOI: 10.12096/j.2096-4528.pgt.2018.065.
- [12] 洪方明. 中小型循环流化床锅炉SO₂超低排放技术研究及应用 [J]. 电力学报, 2020, 35(1): 82-90. DOI: 10.13357/j.dlxb.2020.013.
HONG F M. Research and application of SO₂ ultra-low emission technique for small and medium circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(1): 82-90. DOI: 10.13357/j.dlxb.2020.013.
- [13] 李文华, 吴贤豪, 陈彪, 等. 超低排放燃煤机组SO₃和NH₃生成及迁移规律研究 [J]. 浙江电力, 2021, 40(8): 91-95. DOI: 10.

- 19585/j.zjdl.202108014.
- LI W H, WU X H, CHEN B, et al. Research on the formation and migration characteristics of SO₃ and NH₃ in ultra-low emission coal-fired units [J]. *Zhejiang Electric Power*, 2021, 40(8): 91-95. DOI: 10.19585/j.zjdl.202108014.
- [14] 史晓宏, 刘俊, 廖海燕, 等. 燃煤电厂烟气中挥发性有机物的分布规律及排放特性研究 [J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(4): 405-410. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.04.001.
- SHI X H, LIU J, LIAO H Y, et al. Study on the distribution and emission characteristics of volatile organic pollutants in the flue gas from coal-fired power plants [J]. *Environmental Pollution and Control*, 2021, 43(4): 405-410. DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2021.04.001.
- [15] 左朋莱, 王晨龙, 佟莉, 等. 小型燃煤机组烟气重金属排放特征研究 [J]. *环境科学研究*, 2020, 33(11): 2599-2604. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.06.07.
- ZUO P L, WANG C L, TONG L, et al. Emission characteristics of heavy metal in flue gas of small coal-fired units [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(11): 2599-2604. DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2020.06.07.
- [16] 张翼, 叶云云, 顾永正, 等. 1 000 MW超超临界燃煤机组汞排放特征 [J]. *中国电机工程学报*, 2021.
- ZHANG Y, YE Y Y, GU Y Z, et al. Mercury emission characteristics of 1 000 MW ultra supercritical coal-fired units [J]. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, 2021.
- [17] 孟磊. 超低排放燃煤火电机组汞排放特性研究 [J]. *中国环保产业*, 2019(5): 41-44. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2019.05.013.
- MENG L. Study on mercury emission characteristic of ultra-low emission coal-fired power generator set [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2019(5): 41-44. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2019.05.013.
- [18] 王翔, 王述浩, 段璐, 等. 相变凝聚器内湿烟气核化特性模拟研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(2): 574-582. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190034.
- WANG X, WANG S H, DUAN L, et al. Nucleation characteristics simulation of wet flue gas in phase-change agglomerator [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(2): 574-582. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190034.
- [19] 翁卫国, 周灿, 王丁振. 1 000 MW燃煤机组变负荷条件下颗粒物排放特性研究 [J]. *能源工程*, 2018(2): 1-6. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2018.02.001.
- WENG W G, ZHOU C, WANG D Z. Study on particle emission in a 1 000 MW coal-fired unit under varying loads [J]. *Energy Engineering*, 2018(2): 1-6. DOI: 10.16189/j.cnki.nygc.2018.02.001.
- [20] 李洋, 罗林, 吴建群, 等. 1 000 MW燃煤机组负荷变化对颗粒物排放特性影响 [J]. *洁净煤技术*, 2021, 27(6): 115-120. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21041602.
- LI Y, LUO L, WU J Q, et al. Effect of load change of an 1 000 MW coal-fired unit on particulate matter emission [J]. *Clean Coal Technology*, 2021, 27(6): 115-120. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21041602.
- [21] 柏发桥. 1 000 MW燃煤机组超低排放控制及节能优化技术 [J]. *能源科技*, 2020, 18(12): 93-96.
- BAI F Q. Ultra-low emission control and energy-saving optimization technology for 1 000 MW coal-fired unit [J]. *Energy Science and Technology*, 2020, 18(12): 93-96.
- [22] 专家观点. 燃煤烟气多种污染物控制技术发展到超低排放阶段, 加强氨的使用和排放控制十分必要 [J]. *中国环保产业*, 2021(5): 12-13. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2021.05.003.
- Expert Opinion. The development of various pollutant control technologies for coal-fired flue gas has reached the stage of ultra-low emission, and it is necessary to strengthen the use and emission control of ammonia [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2021(5): 12-13. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2021.05.003.
- [23] 蒋志浩, 杜宇航, 邱佳俊, 等. 660 MW燃煤机组污染物协同脱除技术的应用 [J]. *发电设备*, 2021, 35(3): 167-171. DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2021.03.004.
- JIANG Z H, DU Y H, QIU J J, et al. Application of synergistic removal technology for flue gas pollutants in a 660 MW coal-fired unit [J]. *Power Equipment*, 2021, 35(3): 167-171. DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2021.03.004.
- [24] 王烁, 王玮, 李治国, 等. SNCR脱硝技术应用的要点及探索 [J]. *价值工程*, 2019, 38(27): 191-193. DOI: 10.14018/j.cnki.cn131085/n.2019.27.075.
- WANG S, WANG W, LI Z G, et al. Key points and exploration of application of SNCR denitration technology [J]. *Value Engineering*, 2019, 38(27): 191-193. DOI: 10.14018/j.cnki.cn131085/n.2019.27.075.
- [25] 张焕亭. PNCr脱硝技术及其试验研究 [J]. *锅炉技术*, 2021, 52(4): 65-68. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4763.2021.04.013.
- ZHANG H H. PNCr denitration technology and its experimental research [J]. *Boiler Technology*, 2021, 52(4): 65-68. DOI: 10.3969/j.issn.1672-4763.2021.04.013.
- [26] 蒋奕锋, 王家伟, 汪涛, 等. 1 000 MW超低排放燃煤机组湿法脱硫和湿式电除尘运行性能及废水排放工艺研究 [J]. *现代化工*, 2021, 41(增刊1): 324-327. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.S.067.
- JIANG Y F, WANG J W, WANG T, et al. Operating performance and wastewater emission situation of wet desulfurization unit and wet electrostatic precipitator in a 1 GW ultra-low emission coal-fired plant [J]. *Modern Chemical Industry*, 2021, 41(Supp. 1): 324-327. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2021.S.067.
- [27] 付瑞超, 罗春欢, 苏庆泉. 钙基半干法燃煤烟气脱硫技术的影响因素 [J]. *环境工程学报*, 2022, 16(4): 1248-1255. DOI: 10.12030/j.cjee.202109130.
- FU R C, LUO C H, SU Q Q. Influencing factors of coal-fired flue gas desulfurization by calcium-based semi-dry method [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2022, 16(4): 1248-1255. DOI: 10.12030/j.cjee.202109130.
- [28] 鲁晓强, 鲁韵. 电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术 [J]. *电力*

- 设备管理, 2021(3): 114-116+121.
- LU X Q, LU Y. Power plant boiler desulfurization, denitrification and flue gas dust removal technology [J]. *Electric Power Equipment Management*, 2021(3): 114-116+121.
- [29] 宋晓刚, 刘琦. 炉内石灰石脱硫技术在大型循环流化床锅炉的应用 [J]. *吉林电力*, 2013, 41(3): 14-16. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2013.03.005.
- SONG X G, LIU Q. Application of limestone desulfurization technique in the furnace of large scale CFB boiler [J]. *Jilin Electric Power*, 2013, 41(3): 14-16. DOI: 10.3969/j.issn.1009-5306.2013.03.005.
- [30] 李津津, 陈扉然, 马修卫, 等. 燃煤有机污染物排放及其控制技术展望 [J]. *化工进展*, 2019, 38(12): 5539-5547. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2019-0380.
- LI J J, CHEN F R, MA X W, et al. Emission of coal-fired VOCs and prospect of control technology [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2019, 38(12): 5539-5547. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2019-0380.
- [31] 林国辉, 杨富鑫, 李正鸿, 等. 燃煤机组颗粒物排放特性及其有机成分分析 [J]. *洁净煤技术*, 2022, 28(2): 145-151. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21070401.
- LIN G H, YANG F X, LI Z H, et al. Analysis of emission characteristics of particulate matter and organic pollutants from coal-fired power plant [J]. *Clean Coal Technology*, 2022, 28(2): 145-151. DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.21070401.
- [32] 王宏亮, 许月阳, 薛建明, 等. 燃煤机组烟气汞污染物全过程综合控制技术研究 [J]. *电力科技与环保*, 2020, 36(6): 18-22. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8069.2020.06.005.
- WANG H L, XU Y Y, XUE J M, et al. Research on whole-process control technologies of gaseous mercury from coal-fired units [J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2020, 36(6): 18-22. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8069.2020.06.005.
- [33] 李洋, 刘芳琪, 周俊波, 等. 1 000 MW超低排放燃煤机组SCR和LLT-ESP对颗粒物排放特性的影响 [J]. *煤炭转化*, 2022, 45(3): 71-79. DOI: 10.19726/j.cnki.ebcc.202203009.
- LI Y, LIU F Q, ZHOU J B, et al. Effects of SCR and LLT-ESP on PM emission properties from a 1 000 MW coal-fired unit [J]. *Coal Conversion*, 2022, 45(3): 71-79. DOI: 10.19726/j.cnki.ebcc.202203009.
- [34] 王岳. 热源厂燃煤烟尘低排放控制技术研究 [J]. *建筑技术开发*, 2022, 49(8): 116-118. DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2022.08.038.
- WANG Y. Research on low emission control technology of coal combustion in heat source plant [J]. *Building Technique Development*, 2022, 49(8): 116-118. DOI: 10.3969/j.issn.1001-523X.2022.08.038.
- [35] 安恩政, 何仙平. 探究电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术 [J]. *天津化工*, 2021, 35(1): 83-85. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1267.2021.01.029.
- AN E Z, HE X P. Research on desulfurization, denitration and flue gas dust removal technology of power plant boilers [J]. *Tianjin Chemical Industry*, 2021, 35(1): 83-85. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1267.2021.01.029.
- [36] 段璐, 王述浩, 李水清. 基于群平衡模拟的低低温电除尘器协同脱除PM_{2.5}和SO₃研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(12): 3721-3728. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190541.
- DUAN L, WANG S H, LI S Q. Study on the ultralow cold-side electrostatic precipitation for synergistic removal of PM_{2.5} and SO₃ by the population balance model [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(12): 3721-3728. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.190541.
- [37] 马占海, 徐超, 赵海宝, 等. 低低温电除尘器与电袋除尘器的技术经济对比分析 [J]. *中国环保产业*, 2022(1): 59-65. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2022.01.014.
- MA Z H, XU C, ZHAO H B, et al. Technical and economic comparison and analysis between LLT-ESP and electrostatic fabric filter [J]. *China Environmental Protection Industry*, 2022(1): 59-65. DOI: 10.3969/j.issn.1006-5377.2022.01.014.
- [38] 张恒. 燃煤电厂氮氧化物减排技术方案选择研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2015. DOI: 10.7666/d.D760039.
- ZHANG H. The selection of Nitrogen Oxide emissions reduction technology solutions for coal-fired power plant [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015. DOI: 10.7666/d.D760039.
- [39] 胡小刚. 燃煤电厂烟气脱硝工艺的技术经济评价研究 [D]. 西安: 西北大学, 2015.
- HU X G. The research of technical and economic evaluation on the flue gas technologies of coal-fired power plants [D]. Xi'an: Northwest University, 2015.
- [40] 张胜寒, 张彩庆, 胡文培. 电厂湿法烟气脱硫系统费用效益分析 [J]. *华东电力*, 2011, 39(2): 195-197.
- ZHANG S H, ZHANG C Q, HU W P. Benefit-cost analysis of wet flue gas desulfurization system in power plant [J]. *East China Electric Power*, 2011, 39(2): 195-197.

作者简介:



魏厚俊

魏厚俊 (第一作者)

2001-, 男, 江苏徐州人, 本科在读, 研究方向为火电机组灵活调峰及系统建模参数优化设计(e-mail)358737709@qq.com。



宋民航

宋民航 (通信作者)

1986-, 男, 黑龙江绥化人, 博士, 中国科学院过程工程研究所副研究员, 主要研究方向为燃料低碳清洁高效燃烧及储热系统优化集成(e-mail)songminhang@126.com。

(编辑 叶筠英)