

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.7
第41卷 第7期

目次

中国钢铁行业大气环境影响	汤铃, 薛晓达, 伯鑫, 贾敏, 郭静, 田军, 黄满堂, 崔维庚, 王彤, 李时蓓, 敬红, 甄瑞卿, 孙露, 成国庆 (2981)
华北地区大气细颗粒物 (PM _{2.5}) 年际变化及其对土地利用/覆被变化的响应	杨伟, 姜晓丽 (2995)
郑州市民运会期间大气 PM _{2.5} 改善效果评估	王申博, 姜亚敏, 徐艺斐, 袁明浩, 苏方成, 张瑞芹 (3004)
成都夏冬季 PM _{2.5} 中水溶性无机离子污染特征	冯炎鹏, 张军科, 黄小娟, 刘琴, 张巍, 张建强 (3012)
川南自贡市大气颗粒物污染特征及传输路径与潜在源分析	雷雨, 张小玲, 康平, 王浩霖, 青泉, 欧奕含, 卢宁生, 邓中慈 (3021)
四川省典型行业挥发性有机物源成分谱	徐晨曦, 陈军辉, 韩丽, 王继钦, 王波 (3031)
成都市工业挥发性有机物排源成分谱	周子航, 邓也, 周小玲, 吴柯颖, 谭钦文, 尹代娟, 宋丹林, 陈秋宇, 曾文斌 (3042)
郑州市典型工业企业 VOCs 排放特征及风险评估	齐一谨, 倪经纬, 赵东旭, 杨艺, 韩丽岩, 李博伟 (3056)
阳泉市区夏季挥发性有机物污染特征、来源解析及其环境影响	牛月圆, 刘倬诚, 李如梅, 高千卓, 邓萌杰, 闫雨龙, 胡冬梅, 吴婧, 彭林 (3066)
典型光化学污染期间杭州大气挥发性有机物污染特征及反应活性	景盛翱, 叶旭红, 高雅琴, 彭亚荣, 李英杰, 王倩, 沈建东, 王红丽 (3076)
华北地区典型重工业城市夏季近地面 O ₃ 污染特征及敏感性	欧盛菊, 魏巍, 王晓琦, 姚森, 周志博, 关攀博, 段文娇, 姚诗音 (3085)
稳定同位素模型解析大气氨来源的参数敏感性	顾梦娜, 潘月鹏, 何月欣, 田世丽, 王彦君, 吕雪梅, 倪雪, 孙杰, 吴电明, 方运霞 (3095)
苏州市大气中汞的形态分布特征及来源分析	卢仁杰, 吴也正, 张晓婕, 沈莹, 吴福全, 薛媛媛, 邹强, 麻春艳 (3102)
轻型汽油车稳态工况下的尾气排放特征	谢岩, 廖松地, 朱曼妮, 王怡然, 王日超, 张立航, 余飞, 钟庄敏, 白莉, 黄江荣, 刘俊文, 郑君瑜 (3112)
非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO _x 排放特征对比分析	李辉, 朱法华, 孙雪丽, 王宗爽, 王圣, 裴杰, 谭玉菲, 薛峰, 郭敏, 郑桂博 (3121)
邢台市区道路可悬浮灰尘重金属污染特征及来源识别	宋怡, 卢新卫, 周潇, 葛子赫 (3130)
叶片微观结构变化对其颗粒物滞纳能力的影响	魏文俊, 王兵, 牛香 (3136)
关中平原降水氢氧稳定同位素特征及其水汽来源	赵明华, 陆彦玮, Rachana Heng, 司炳成 (3148)
岩溶流域不同水体硝酸盐的来源解析	田永著, 韩志伟, 赵然, 李耕, 曾祥颖, 黄家琰 (3157)
木沥河流域氮素污染及其污染源解析	齐冉, 徐菲菲, 杨帆, 颜昌宙 (3165)
辽河口沉积物环境要素时空动态及影响因素分析	齐玥, 孙永光, 马恭博, 吴楠, 付元宾 (3175)
鄱阳湖多尺度流域磷源输送特征及其生态效应	王朔月, 高扬, 陆瑶, 贾珺杰, 李兆喜, 马明真, 温学发 (3186)
象山港流域入湾河流水体中重金属风险评价及其来源解析	王磊, 汪文东, 刘懂, 李刚, 于红梅, 黄沙, 徐耀阳 (3194)
乐安河河流水体典型全氟化合物的浓度及其前体物的污染贡献	张慧, 王世亮, 余杨 (3204)
连云港海州湾海域表层水体和沉积物中微塑料的分布特征	李征, 高春梅, 杨金龙, 吴立珍, 张硕, 刘艳华, 靳迪迪 (3212)
茅洲河流域民用井中耐药基因的分布特征与健康风险	吴黛灵, 邹海燕, 何璐茜, 高方舟, 应光国, 何良英 (3222)
金盆水库沉积物铁锰释放规律	路林超, 黄廷林, 李楠, 齐允之, 张晗, 王晨旭, 司凡 (3231)
城市湖泊沉积物微塑料污染特征	王璇, 牛司平, 宋小龙, 饶竹, 战楠 (3240)
西藏尼洋河沉积物中微生物群落结构特征分析	刘晓丹, 黄毅, 王永花, 汪贝贝, 吴兵, 陆光华 (3249)
海水中的红毒素与营养盐对微藻的复合影响	王娜, 赵卫红, 苗辉 (3257)
梯级电站作用下牡丹江底栖动物沿程变化规律	温佳琦, 王皓冉, 陈永灿, 刘昭伟 (3266)
宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析	徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 王洋, 程军蕊, 王侃 (3275)
分层型水库藻类垂直演替的水质与细菌种群调控	闫苗苗, 陈胜男, 黄廷林, 贾克宇, 刘凯文, 苗雨甜, 宗容容 (3285)
长距离供水系统中消毒副产物分布特征及二次加氯的影响	毕薇薇, 叶胜, 于建全, 杨玉龙, 陈晨, 李青松, 马晓雁 (3297)
供水管网终端消毒副产物分布特征及预测模型	刘俊萍, 陈镜吉, 宋亚丽, 杨玉龙, 李青松, 马晓雁 (3307)
碱和磁复合改性小麦秸秆生物炭对水体中镉的吸附特性及机制	崔志文, 任艳芳, 王伟, 张黎明, 张陆云, 王曦玥, 何俊瑜 (3315)
弱磁场强化氧化石墨烯负载纳米零价铁 (GO-nFe ⁰ /WMF) 对水中Cr(VI) 的去除特性及机制	计盟, 鲍建国, 朱晓伟, 杜江坤, 郑汉 (3326)
一硫代肟在针铁矿上的吸附及影响因素	廖丹雪, 单慧娟, 张进贤, 彭三曦, 黄健, 陈辉, 赵超然, 曾春芽 (3337)
生物滤池快速启动 ANAMMOX 运行策略及菌群特征	王晓瞳, 杨宏, 苏杨, 刘旭妍 (3345)
低碳源条件下供氧模式对活性污泥系统脱氮性能的影响	张欣瑞, 池玉蕾, 王倩, 金鑫, 石炬, 金鹏康 (3356)
羟胺对厌氧氨氧化污泥群落的影响	邢崇阳, 范禹辰, 陈璇, 郭劲松, 申渝, 晏楠, 方芳, 陈猷鹏 (3365)
低温下丝状菌膨胀污泥的微生物多样性	高春娣, 张娜, 韩微, 任浩, 李悦, 侯春艳, 王传德, 彭永臻 (3373)
我国剩余污泥厌氧消化的主要影响因素及强化	董滨, 高君, 陈思思, 杨殿海, 戴晓虎 (3384)
城镇河流 CO ₂ 及 CH ₄ 排放与市政排水管网污水输入的关联影响	李磊, 陈浩, 朱奔, 王宇晖, 聂云汉, 赵昕, 贾其隆, 叶建峰 (3392)
控释尿素对黄河故道沙性潮土 N ₂ O 排放的影响	姜右锦, 袁俊吉, 丁维新, 刘阳, 张松林 (3402)
我国典型露地蔬菜生产中的温室气体排放	张芬, 程泰鸿, 陈新平, 王孝忠 (3410)
不同母质发育土壤 Cd 环境行为对水分管理模式的响应差异	黄敬, 李欣阳, 文沙, 蒋凯, 龙坚, 彭佩钦, 侯红波 (3418)
锰基改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤团聚体结构以及 Cd 含量特征的影响	孙彤, 付宇童, 李可, 徐应明, 孙约兵 (3426)
钝化与叶面阻控对不同基因型红菜苔镉累积的影响	曹坤坤, 李成成, 胡学玉, 郭晓, 黄洋 (3434)
叶面喷施 2,3-二巯基丁二酸对水稻幼苗镉吸收转运及抗氧化系统的影响	杨晓荣, 黄永春, 刘仲齐, 黄益宗, 程六龙, 张长波 (3441)
《环境科学》征订启事 (3011) 《环境科学》征稿简则 (3084) 信息 (3174, 3185, 3391)	

非超低与超低排放煤电机组启动过程 NO_x 排放特征对比分析

李辉^{1,2}, 朱法华^{1,2}, 孙雪丽², 王宗爽³, 王圣², 裴杰¹, 谭玉菲³, 薛峰¹, 郭敏³, 郑桂博⁴

(1. 国电科学技术研究院有限公司, 南京 210023; 2. 国电环境保护研究院有限公司, 南京 210031; 3. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 4. 国电龙源电力技术工程有限责任公司, 北京 100039)

摘要: 通过采集 671 台燃煤火电机组 NO_x 排放实时监控数据, 对非超低排放与超低排放机组总体及相应各等级机组启动过程中 NO_x 排放特征进行了对比分析. 结果表明, 非超低排放机组启动阶段 NO_x 超标率为 81.53%, 平均超标小时数为 2.64 h, 平均最大排放小时均值为 $284.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 超低排放机组启动阶段 NO_x 超标率为 79.86%, 平均超标小时数为 2.52 h, 平均最大排放小时均值为 $231.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$; 非超低与超低排放机组总体及相应各等级机组间 NO_x 超标率和平均超标时长无统计学意义上的差异, 但平均最大排放小时均值浓度存在显著差异; 非超低排放机组中, 除 300 MW 等级机组平均最大排放小时均值浓度显著低于 200 MW 等级机组外, 其余对比组在超标率、超标小时数及平均最大排放小时均值浓度上均无显著差异; 不同等级超低排放机组之间在超标率、超标小时数和最大排放小时均值浓度上都有统计学意义上差异的情况, 600 MW 等级机组超标时长控制最优, 1000 MW 等级机组排放浓度控制较好.

关键词: 超低排放; 煤电机组; 启动; NO_x ; 排放特征

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)07-3121-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201910188

Comparative Analysis of NO_x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process

LI Hui^{1,2}, ZHU Fa-hua^{1,2}, SUN Xue-li², WANG Zong-shuang³, WANG Sheng², PEI Jie¹, TAN Yu-fei³, XUE Feng¹, GUO Min³, ZHENG Gui-bo⁴

(1. Guodian Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 210023, China; 2. State Power Environmental Protection Institute, Nanjing 210031, China; 3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Guodian Longyuan Power Technology Engineering Co., Ltd., Beijing 100039, China)

Abstract: Based on the NO_x emission information of 671 coal-fired power units, the NO_x emission characteristics of non-ultra-low-emission (non-ULE) and ultra-low-emission (ULE) coal-fired power units during the start-up process were compared and analyzed. The results showed that in the start-up stage of non-ULE units, the exceeding standard rate (ESR) of NO_x emission concentration was 81.53%, the average exceeding standard hours (ESHs) was 2.64 h, and the average maximum emission hourly mean concentration (MEHC) was $284.06 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. The NO_x ESR of ULE units was 79.86%, the average ESHs was 2.52 h, and the average MEHC was $231.61 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$. There was no significant difference in the ESR and the average ESHs between non-ULE and ULE units, but the difference in the average MEHC was significant. There was no significant difference in the ESR, average ESHs, and average MEHC between different grades of non-ULE units, except that the average MEHC of 300 MW units was significantly lower than that of 200 MW units. There was statistical difference in the ESR, average ESHs, and average MEHC among different grades of ULE units, and 600 MW units performed best in the ESHs control, whereas 1000 MW units performed best in the emission concentration control.

Key words: ultra-low emission; coal-fired power unit; start-up process; NO_x ; emission characteristics

截止到 2017 年底, 全国煤电装机容量已达约 9.8 亿 kW, 其中已投运烟气脱硝机组容量约 9.5 亿 kW^[1, 2], 6.4 亿 kW 容量机组已实现超低排放^[3, 4]. 在 2017 年, 非超低排放机组与超低排放机组大量并存, 且具有一定数量的机组改造前与改造后在本年度均有运行, 为对比研究非超低与超低排放机组 NO_x 排放特征提供了良好的条件.

随着排放标准的不断加严^[5, 6], 我国火电行业 NO_x 排放得到了有效控制, 电力 NO_x 排放总量从 2010 年的 1 073 万 t 降至 2016 年的 155 万 t, 下降了约 85%^[7], 2017 年超低排放改造的全面实施^[8],

NO_x 排放总量进一步降低至 114 万 t. 但是, 火电厂烟气脱硝广泛采用的选择性催化还原法 (SCR), 其催化剂受烟气温度条件的制约问题, 仍是 NO_x 控制难以获得稳定脱除效率的主要原因^[9~13], 尤其在火电机组启动阶段, SCR 脱硝设施无法像脱硫和除尘^[14] 系统一样立即正常投入运行, NO_x 排放浓度超标现象仍普遍存在, 导致 NO_x 控制的相关管理政策

收稿日期: 2019-10-25; 修订日期: 2020-01-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0208100)

作者简介: 李辉 (1985 ~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力环境保护技术与管理, E-mail: lihui850627@126.com

也扣除了这一时段^[15],成为管理空白.目前,围绕火电机组烟气 NO_x 排放特征及超低与非超低排放机组的对比研究主要集中在机组稳定运行期间,以研究论证稳定运行期间排放浓度控制、达标率和系统性能水平等^[16~20],尚未有针对火电机组开机启动过程中 NO_x 的排放特征及机组运行情况进行分析,更无基于大样本的统计学分析,而全时段脱硝及其达标管理是未来火电机组烟气 NO_x 排放控制的研究重点和发展方向.

本文通过采集大样本量的燃煤火电机组 NO_x 排放实时监控数据,系统分析和对比非超低与超低排放机组在启动过程中的 NO_x 排放特征,探究超低排放的实施及超低排放改造对火电机组启动阶段 NO_x 控制与排放的影响、原因及进一步改善的空间,探索实施全时段脱硝的可行性,以期对火电企业及环保部门

提高 NO_x 排放管控的科学性和有效性提供参考.

1 材料与方法

1.1 数据获取

1.1.1 机组分布情况

本文主要对燃煤火电机组启动过程中 NO_x 排放特征进行研究.通过调取机组实时监控数据,获取了2017年全年671台次机组启动过程中的 NO_x 排放信息,机组分布情况如表1所示.其中超低排放机组422台次,非超低排放机组249台次.经数据识别,剔除排放浓度监测值超过仪表量程、超过设定的异常判定逻辑值或空气过程系数高导致折算浓度失真等因素显示为异常的信息,采集到 NO_x 排放浓度有效的机组为629台次,其中超低排放机组400台次,非超低排放机组229台次.

表1 调研机组分布情况/台次
Table 1 Distribution of investigated units

机组等级	超标小时数 有效样本量	浓度有效 样本量	非超低机组		超低机组	
			超标小时数 有效样本量	浓度有效 样本量	超标小时数 有效样本量	浓度有效 样本量
200 MW 等级及以下	67	59	49	44	18	15
300 MW 等级	377	356	118	108	259	248
600 MW 等级	198	185	82	77	116	108
1 000 MW 等级	29	29	0	0	29	29
总计	671	629	249	229	422	400

1.1.2 超标小时数及排放浓度分布情况

超标率可对不同组别机组开机过程中 NO_x 的控制水平进行整体情况定性判断,而超标时长和最大排放小时均值浓度是进一步定量分析开机过程

NO_x 控制水平及超标严重程度的重要指标.671台次机组启动事件样本 NO_x 超标小时数及621台次机组启机过程 NO_x 最大排放浓度分布统计情况如表2所示.

表2 NO_x 超标小时数及最大排放小时均值浓度分布台次统计

Table 2 Statistics of the average ESHs and MEHC of NO_x during the start-up process

类型	机组等级	超标小时数范围/台次数				最大排放小时均值浓度范围/台次			
		0 h	1~4 h	5~8 h	>8 h	$x \leq 50$	$50 < x \leq 100$	$100 < x \leq 200$	$200 < x$
非超低机组	200 MW 等级及以下	8	27	13	1	0	1	9	34
	300 MW 等级	24	77	10	7	3	11	17	77
	600 MW 等级	14	58	7	3	6	5	14	52
	总计	46	162	30	11	67	17	40	163
超低机组	200 MW 等级及以下	6	10	0	2	5	0	2	8
	300 MW 等级	39	178	34	8	31	13	38	166
	600 MW 等级	33	73	10	0	28	9	10	61
	1 000 MW 等级	7	15	6	1	7	0	6	16
	总计	85	276	50	11	71	22	56	251

1.2 分析方法

1.2.1 超标率分析

为比较各类机组在开机过程中 NO_x 超标率的差异性,本文采用四格表 χ^2 检验对非超低与超低排放机组及其各等级机组之间分别进行两两对比.根据分析需要首先提出样本所属总体的理论超标率 P_1 和 P_2 的假设.

$$H_0: P_1 = P_2; \quad H_1: P_1 \neq P_2$$

再计算各样本观测值的理论数(T),其公

式为:

$$T_{ij} = \frac{n_i \times n_j}{n} \quad (1)$$

式中, T_{ij} 为第*i*行(组)第*j*列(类)样本观测值的理论数,*i*为1、2,*j*为1、2; n_i 为第*i*行(组)的观测样本总量; n_j 为第*j*列(类)的观测样本总量; n 为总样本量.

以非超低机组与超低机组总体为例,计算结果如表3所示.

表 3 非超低机组及超低机组总体超标率情况比较¹⁾
Table 3 Comparisons of the ESR of non-ULE and ULE units

类型	超标台次	未超标台次	合计	超标率/%
非超低机组	203(200.39)	46(48.61)	249	81.53
超低机组	337(339.61)	85(82.39)	422	79.86
合计	540	131	671	80.48

1) 表格中括号内为理论数

计算统计量 χ^2 值或其矫正值 χ'^2 , 其中当样本含量 $n > 40$, 但 $1 < T < 5$ 时, 需进行矫正, 计算公式如下:

$$\chi^2 = \sum \frac{(A_{ij} - T_{ij})^2}{T_{ij}} \quad (2)$$

$$\chi'^2 = \sum \frac{(|A_{ij} - T_{ij}| - 0.5)^2}{T_{ij}} \quad (3)$$

式中, χ^2 为假设检验统计量; χ'^2 为假设检验统计量的矫正值; A_{ij} 为第 i 行(组)第 j 列(类)观测值, i 为 1 和 2, j 为 1 和 2.

最后, 将 χ^2 或 χ'^2 计算值与 $\chi^2_{0.05}(1) = 3.841$, $\chi^2_{0.01}(1) = 6.635$ 进行比较, 若 $\chi^2 \leq 3.841$, 则不拒绝假设 H_0 , 即说明两组观测对象超标率的差异无统计学意义, 若 $\chi^2 > 3.841$ 和 $\chi^2 > 6.635$, 则拒绝假设 H_0 , 接受假设 H_1 , 分别表示差异具有统计学意义和具有显著的统计学意义, 即分别在 $\alpha = 0.05$ 和 $\alpha = 0.01$ 水平上具有显著差异.

1.2.2 超标程度分析

为比较各类机组在开机过程中 NO_x 平均超标时长和最大排放小时均值浓度的差异性, 本文采用两总体均值假设检验, 对非超低、超低排放机组及其各等级机组之间分别进行逐对分析, 按总体方差 σ_1^2 和 σ_2^2 未知, 且 $\sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$ 情形进行检验, 当样本含量 $n > 30$ 时, 采用 u -检验法, 当样本含量 $n \leq 30$ 时, 采用 t -检验法, 其修正自由度为 f_d . 根据分析需要提出两个样本所属总体的均值 X_1 和 X_2 的两个原假设如下.

表 4 u -检验或 t -检验对应界值与统计结论

Table 4 Boundary values of u -test or t -test and their statistical conclusions

α	双/单侧 检验	t -检验界值											结论
		界值	$f_d = 15$	$f_d = 16$	$f_d = 17$	$f_d = 18$	$f_d = 19$	$f_d = 25$	$f_d = 28$	$f_d = 35$	$f_d = 37$	$f_d = 59$	
0.05	双侧	<1.96	<2.13	<2.12	<2.11	<2.10	<2.09	<2.06	<2.05	<2.03	<2.03	<2.00	不拒绝 H_0 , 差异无 统计学意义
	单侧	<1.65	<1.75	<1.75	<1.74	<1.73	<1.73	<1.71	<1.70	<1.69	<1.69	<1.67	
0.05	双侧	≥ 1.96	≥ 2.13	≥ 2.12	≥ 2.11	≥ 2.10	≥ 2.09	≥ 2.06	≥ 2.05	≥ 2.03	≥ 2.03	≥ 2.00	拒绝 H_0 , 接受 H_1 , 差异有统计学意义
	单侧	≥ 1.65	≥ 1.75	≥ 1.75	≥ 1.74	≥ 1.73	≥ 1.73	≥ 1.71	≥ 1.70	≥ 1.69	≥ 1.69	≥ 1.67	
0.01	双侧	≥ 2.58	≥ 2.95	≥ 2.92	≥ 2.90	≥ 2.88	≥ 2.86	≥ 2.79	≥ 2.76	≥ 2.72	≥ 2.72	≥ 2.66	拒绝 H_0 , 接受 H_1 , 差 异有高度统计学意义
	单侧	≥ 2.33	≥ 2.60	≥ 2.58	≥ 2.57	≥ 2.55	≥ 2.54	≥ 2.49	≥ 2.47	≥ 2.44	≥ 2.43	≥ 2.39	

2 结果与讨论

2.1 超标率

根据表 2, 统计 249 台次非超低排放机组涉及

$$H_0: X_1 = X_2; \quad H_1: X_1 \neq X_2$$

$$H_0: X_1 \leq X_2; \quad H_1: X_1 > X_2$$

式中, 样本平均超标时长为 $\bar{X}_1$ 和 $\bar{X}_2$.

计算统计量 u 值或 t 值:

$$u = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^{*2}}{n_1} + \frac{S_2^{*2}}{n_2}}} \quad (4)$$

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\sqrt{\frac{S_1^{*2}}{n_1} + \frac{S_2^{*2}}{n_2}}} \quad (5)$$

$$S_i^{*2} = \frac{n_i}{n_i - 1} S_i^2 \quad (6)$$

$$f_d = \frac{\left(\frac{S_1^{*2}}{n_1} + \frac{S_2^{*2}}{n_2}\right)^2}{\frac{\left(\frac{S_1^{*2}}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^{*2}}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}} \quad (7)$$

式中, u 为 u -检验统计量; t 为 t -检验统计量; S_i^2 为样本方差, i 为 1 和 2, 即 S_1^2 和 S_2^2 为两个对比组的样本方差; S_i^{*2} 为样本方差的无偏值, 即 S_1^{*2} 和 S_2^{*2} 为两个对比组的样本方差的无偏值; n_i 为样本量, 即 n_1 和 n_2 为两个对比组的样本量; f_d 为 t -检验的修正自由度.

再将计算得到的 u 或 t 值取绝对值, 即 $|u|$ 或 $|t|$ 值, 与通过查 u -检验或 t -检验界值表获得的对应值进行比较, 得到相应的检验结论. 本文所需的 u -检验或 t -检验界值如表 4 所示.

到执行的排放标准包括 $100 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $200 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 启动过程中超标时长分别按该机组执行的标准统计, 共有 46 台次未出现 NO_x 浓度小时均值超标, 占到样本数的 18.47%, 即超标率为 81.53%.

422 台次超低排放机组中除 11 台次 W 火焰锅炉机组执行 $100\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 排放标准外,均执行 $50\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的排放标准,在其启动过程中共有 85 台次未出现 NO_x 浓度小时均值超标,占样本数的 20.14%,即超标率为 79.86%。从各等级机组来看,非超低机组和

超低机组 200 MW 等级及以下、300 MW 等级、600 MW 和 1 000 MW 等级机组均有不超标的情况。按照 1.2.1 节的假设,算得非超低与超低排放机组及其各等级机组对比样本的统计量 χ^2 或其矫正值 χ'^2 如表 5 和表 6 所示。

表 5 非超低与超低机组总体之间及其各同等级机组之间超标率检验统计量 χ^2 或其矫正值 χ'^2

Table 5 The χ^2 or its correction values χ'^2 for the ESR of non-ULE and ULE units

		超低机组			
	总体	200 MW 等级及以下	300 MW 等级	600 MW 等级	
非超低机组	总体	0.28	— ¹⁾	—	—
	200 MW 等级及以下	—	1.39	—	—
	300 MW 等级	—	—	1.62	—
	600 MW 等级	—	—	—	3.43

1) “—”表示表格中没有相关数据,下同

表 6 非超低及超低机组组内各等级机组之间超标率统计量 χ^2 或其矫正值 χ'^2

Table 6 The χ^2 or its correction values χ'^2 for the ESR of different grades non-ULE and ULE units

		200 MW 等级及以下	300 MW 等级	600 MW 等级	1 000 MW 等级
非超低机组	200 MW 等级及以下	—	0.36	0.01	—
	300 MW 等级	0.36	—	0.34	—
	600 MW 等级	0.01	0.34	—	—
超低机组	200 MW 等级及以下	—	2.90	0.18	0.12
	300 MW 等级	2.90	—	9.26	1.00
	600 MW 等级	0.18	9.26	—	0.05
	1 000 MW 等级	0.12	1.00	0.05	—

根据表 5 中的检验结果可看出,非超低与超低排放机组总体及对应各等级机组超标率统计量 χ^2 或其矫正值 χ'^2 均小于 $\chi^2_{0.05}(1) = 3.841$, $P > 0.05$, 不拒绝原假设 H_0 ,即在 $\alpha = 0.05$ 水平上无显著差异(差异不具有统计学意义)。

同理,表 6 中的检验结果表明,非超低机组各等级机组间超标率也无统计学意义上的差异,超低机组间除 600 MW 等级机组超标率低于 300 MW 等级机组在 $\alpha = 0.01$ 水平上具有显著差异外($\chi^2 = 9.26 > \chi^2_{0.01}(1)$,差异具有高度的统计学意义),其他各对比组均无具有统计学意义上的优劣之别。

根据上述检验结果,不同等级的非超低排放机组之间超标率并未表现出明显差异,主要原因在于:建设较早未同步建设烟气脱硝的低等级机组,均已经历过一次或多次低氮燃烧、新增烟气脱硝系统的改造^[21],建设较晚的机组都同步建设了烟气脱硝系统,并预留了排放标准进一步加严的改造空间,通常建设或改造较晚的机组其采用的脱硝技术更为成熟先进,但无论是何种等级机组及采用何种脱硝技术(组合),均以达标排放为前提,具有相对稳定的匹配性^[10,22],因此在不同等级的非超低排放机组之间开机过程 NO_x 超标率未呈现出随机组规模变化而有显著差异的情况。

在不同等级超低排放机组之间的比较,除在超低排放技术路线上各等级机组均选择了与各自实际情况具有适应性、匹配性的方案外,也都会在投运后对脱硝系统,从流场模拟、浓度监控与预测、喷氨控制、催化剂管理等方面进行持续的优化^[23~26],从而保证了脱硝效果和相对的稳定性。而 600 MW 等级机组超标率显著低于 300 MW 等级机组,主要是 600 MW 等级机组中新建机组的比例更高,从服役预期来说,其寿命将更长且未来将是我国火电机组中的主力机型,因此无论在新建还是超低改造的设计中,会考虑更为长久的稳定可靠,甚至应对将来更低的排放要求,而 300 MW 等级机组中更多的是达标机组进行超低改造后实现的超低排放,部分机组已处于预期寿命的后期,在其改造设计中,只需考虑在其服役期内能够满足当前控制需求。除此之外,电厂的综合管理及机组运行水平也是造成开机阶段 NO_x 超标率差异的主要因素之一,这在各等级的超低排放机组上也有实际体现。

2.2 超标时长

根据文献[15]中关于火电机组启停机过程 NO_x 稳定运行达标判定的有关规定:启动后出力达到额定的 50% 开始到机组解列前出力降到额定的 50% 为止,启动时间原则上并网后不得超过 4 h,如

企业可提供 1 a 以上在线监测数据等证明实际启动时间超过 4 h 的,可适当延长,最高可延长至 8 h。

根据表 2,在获取的机组开机事件样本中,249 台非超低排放机组 NO_x 超标时长在 0~16 之间,平均为 2.64 h,标准差为 2.47 h,而 422 台超低排放机组超标时长在 0~23 h 之间,平均为 2.52 h,标准差为 2.37 h,其各等级机组超标时长情况如图 1 所示。

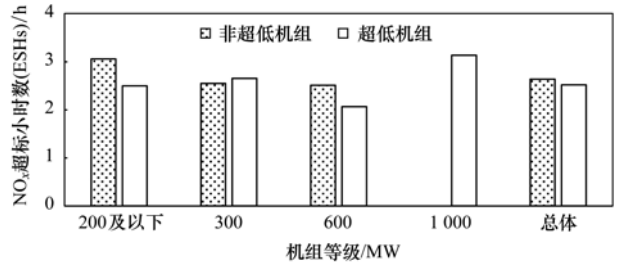


图 1 NO_x 平均超标时长

Fig. 1 NO_x average ESHs of non-ULE and ULE units

非超低排放机组超标小时数在 1~4 h 之间的台次数达到总台次的 65.06%,各等级机组超标时长

在 1~4 h 范围内的台次数都占到各自比例的半数以上,其中 600 MW 等级机组达到 70.73%;超标小时数在 5~8 h 之间的台次数为总台次的 12.05%,只有 200 MW 及以下机组超标时长在此范围内的超过两成,300 MW 和 600 MW 等级机组均未超过 10%;超标达 8 h 以上的台次数占总数的 4.42%,各等级机组超标 8 h 以上的台次数均较少。

超低排放机组超标小时数在 1~4 h 之间的台次数达到总台次的 65.40%,各等级机组超标时长也均过半数集中在 1~4 h 范围内;超标小时数在 4~8 h 之间的台次数为总台次的 11.85%,其中 200 MW 及以下机组在该范围内无样本记录;超标达 8 h 以上的台次数占总数的 2.61%,200 MW 及以下较其他等级机组多,达到 11.11%,1 000 MW 等级机组在该范围内无样本记录。

根据表 2 数据及 1.2.2 的检验假设,算得各样本统计量 $|u|$ 或 $|t|$ 值如表 7 和表 8 所示。

表 7 非超低与超低机组总体之间及其各等级机组之间超标时长检验统计量 $|u|$ 或 $|t|$ 值

Table 7 The $|u|$ or $|t|$ values for the NO_x average ESHs of non-ULE and ULE units

		超低机组			
	总体	总体	200 MW 等级及以下	300 MW 等级	600 MW 等级
非超低机组	200 MW 等级及以下	$ u = 0.60$	—	—	—
	300 MW 等级	—	$ t = 0.67 (f_d = 25)$	—	—
	600 MW 等级	—	—	$ u = 0.38$	—
	总体	—	—	—	$ u = 1.37$

表 8 非超低及超低机组组内各等级机组之间超标时长检验统计量 $|u|$ 或 $|t|$ 值

Table 8 The $|u|$ or $|t|$ values for the NO_x average ESHs of different grades of non-ULE and ULE units

		200 MW 等级及以下	300 MW 等级	600 MW 等级	1 000 MW 等级
非超低机组	200 MW 等级及以下	—	$ u = 1.23$	$ u = 1.24$	—
	300 MW 等级	$ u = 1.23$	—	$ u = 0.11$	—
	600 MW 等级	$ u = 1.24$	$ u = 0.11$	—	—
超低机组	200 MW 等级及以下	—	$ t = 0.20 (f_d = 18)$	$ t = 0.55 (f_d = 19)$	$ t = 0.73 (f_d = 28)$
	300 MW 等级	$ t = 0.20 (f_d = 18)$	—	$ u = 2.54$	$ t = 1.04 (f_d = 35)$
	600 MW 等级	$ t = 0.55 (f_d = 19)$	$ u = 2.54$	—	$ t = 2.28 (f_d = 37)$
	1 000 MW 等级	$ t = 0.73 (f_d = 28)$	$ t = 1.04 (f_d = 35)$	$ t = 2.28 (f_d = 37)$	—

经对照表 4 中对应的检验值,表 7 中的检验结果表明,无论进行双侧检验还是单侧检验,非超低机组与超低机组总体及对应各等级机组平均超标小时数并无统计学意义上的差异,说明超低排放的改造或执行,在排放标准(限值)降低的情况下并未明显影响机组从并网到 NO_x 达标排放的所需耗时。

表 8 中的检验结果表明,非超低机组各等级机组间也无统计学意义上的差异,即从超标时长上来看各等级机组之间在开机过程中 NO_x 的超标严重程度并无明显差异;只在超低排放机组中的 600 MW 等级与 300 MW 等级、1 000 MW 等级机组之间

体现出统计学意义上的差异,从双侧检验来看,600 MW 等级机组平均超标时长低于 300 MW 等级和 1 000 MW 机组具有统计学意义,而从单侧检验来看,600 MW 等级机组平均超标时长甚至在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著优于 300 MW 等级机组。

在实际调研中发现,机组启动过程 NO_x 排放超标时长主要与机组启动前后的状态密切相关,如冷态、温态和热态点火启动,以及启动后是否出现设备故障,如锅炉燃烧系统、脱硝及其制氨供氨系统缺陷,或需进行系统调试、试验等其他因素导致并网后较长时间处于非正常或低负荷运行状态^[26]等。一般情

况下,热态点火启动,且无故障、无调峰或调试和试验需要时,机组能够较快并网并快速提升负荷,烟气温度迅速升高到 SCR 脱硝系统投运条件,缩短 NO_x 超标排放的时长.另外,还有部分机组除对脱硝系统本身进行升级之外,还对燃烧系统、空预器、省煤器、热控系统等也进行了综合优化^[27, 28],以进一步加强对 NO_x 排放的控制,这种系统性的协同优化对缩短机组启动过程中 NO_x 超标排放时长具有重要意义.

2.3 最大排放小时均值浓度

根据表 2 统计情况,启机过程 NO_x 最大排放浓度有效机组 629 台次.其中:229 台次非超低排放机组中 NO_x 最大排放小时均值浓度范围在 10.90 ~ 597.32 mg·m⁻³ 之间,平均值为 284.06 mg·m⁻³; 400 台次超低排放机组中 NO_x 最大排放小时均值浓度范围在 1.26 ~ 548.69 mg·m⁻³ 之间,平均值为 231.61 mg·m⁻³.各等级机组排放浓度分布情况如图 2 所示.

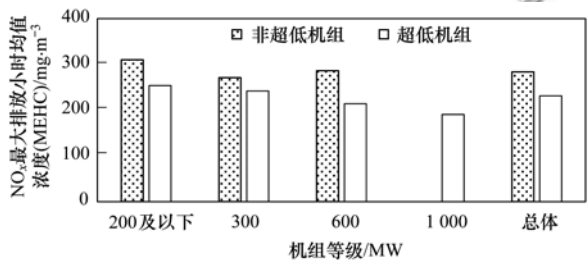


图 2 NO_x 平均最大排放小时均值浓度
Fig. 2 NO_x average MEHC of non-ULE and ULE units

各等级非超低机组启动 NO_x 最大排放小时均值浓度范围占比情况如图 3 所示.非超低排放机组中最大排放小时均值浓度范围在 200 mg·m⁻³ 以上的共有 163 台次,占到总数的 71.18%,各等级机组处于该范围的台次比例在本等级机组中均占 60% 以上,其中 200 MW 等级及以下机组比例最高;最大排放小时均值浓度范围在 100 ~ 200 mg·m⁻³ 之间的有 52 台次,占总数的 17.47%,其中也是 200 MW 等级及以下机组比例最高;最大排放小时均值浓度范围在 50 ~ 100 mg·m⁻³ 之间的有 17 台次,所占比例为 7.42%,其中 300 MW 等级机组比例最高.只有 3.93% 的机组台次将启动过程 NO_x 最大浓度控制在 50 mg·m⁻³ 以下,其中无 200 MW 等级及以下机组.

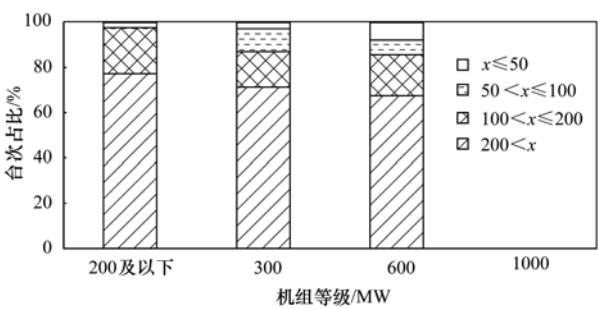


图 3 非超低机组启动 NO_x 最大排放小时均值浓度范围占比
Fig. 3 Statistical proportion of the NO_x MEHC range during start-up of non-ULE units

各等级超低机组启动 NO_x 最大排放小时均值浓度范围占比情况如图 4 所示.超低排放机组中最大排放小时均值浓度范围在 200 mg·m⁻³ 以上的达 251 台次,占到总数的 62.75%,各等级机组台次比例均在 50% 以上,其中 300 MW 等级机组比例最高;最大排放浓度小时均值范围在 100 ~ 200 mg·m⁻³ 之间的有 56 台次,占 14.00%,其中 1000 MW 等级机组比例最高,600 MW 等级机组比例最低;最大排放浓度小时均值范围在 50 ~ 100 mg·m⁻³ 之间的有 22 台次,占总数比例最低,为 5.50%,其中,200 MW 及以下、1000 MW 等级机组启动阶段 NO_x 排放最大浓度无在此范围内的.将启动过程 NO_x 最大浓度控制在 50 mg·m⁻³ 以下共 71 台次,占总数的 17.75%,其中 200 MW 等级及以下机组启动过程未超标的比例最高,达到 33.33%.

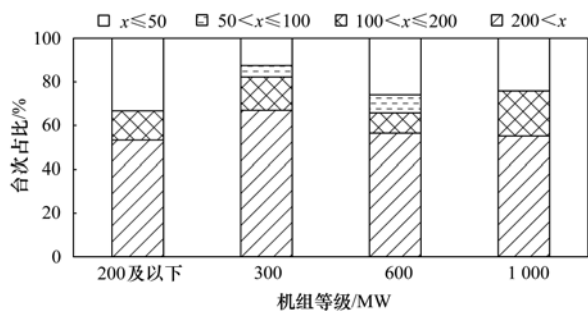


图 4 超低排放机组启动 NO_x 最大排放小时均值浓度范围占比
Fig. 4 Statistical proportion of the NO_x MEHC range during start-up of ULE units

按照 1.2.2 节的检验假设,计算得到各组样本统计量结果 $|u|$ 或 $|t|$ 值如表 9 和表 10 所示.

表 9 非超低与超低机组总体之间及其各等级机组之间最大排放小时均值浓度统计量 $|u|$ 或 $|t|$ 值

		超低机组			
		总体	200 MW 等级及以下	300 MW 等级	600 MW 等级
非超低机组	总体	$ u = 4.47$	—	—	—
	200 MW 等级及以下	—	$ t = 0.93 (f_d = 17)$	—	—
	300 MW 等级	—	—	$ u = 1.89$	—
	600 MW 等级	—	—	—	$ u = 3.02$

表 10 非超低及超低机组组内各等级机组之间最大排放小时均值浓度统计量 $|u|$ 或 $|t|$ 值
Table 10 The $|u|$ or $|t|$ values for the NO_x average MEHC of different grades of non-ULE and ULE units

		200 MW 等级及以下	300 MW 等级	600 MW 等级	1 000 MW 等级
非超低机组	200 MW 等级及以下	—	$ u = 1.80$	$ u = 0.95$	—
	300 MW 等级	$ u = 1.80$	—	$ u = 0.69$	—
	600 MW 等级	$ u = 0.95$	$ u = 0.69$	—	—
超低机组	200 MW 等级及以下	—	$ t = 0.20(f_d = 15)$	$ t = 0.67(f_d = 16)$	$ t = 1.03(f_d = 18)$
	300 MW 等级	$ t = 0.20(f_d = 15)$	—	$ u = 1.57$	$ t = 2.16(f_d = 37)$
	600 MW 等级	$ t = 0.67(f_d = 16)$	$ u = 1.57$	—	$ t = 0.87(f_d = 59)$
	1 000 MW 等级	$ t = 1.03(f_d = 18)$	$ t = 2.16(f_d = 37)$	$ t = 0.87(f_d = 59)$	—

经对照表 4 中对应的检验值,表 9 中的检验结果表明,无论进行双侧检验还是单侧检验,超低机组总体最大排放小时均值浓度低于非超低机组具有高度统计学意义上的差异($\alpha = 0.01$ 水平上显著),其中 600 MW 等级的超低排放机组平均最大排放小时均值浓度在 $\alpha = 0.01$ 水平上显著低于非超低排放机组.从单侧检验结果来看,300 MW 等级的超低排放机组平均最大排放小时均值浓度低于非超低排放机组也具有统计学意义,而单从样本浓度数据来看,200 MW 等级机组也存在这一现象.

从表 10 中的检验结果来看,双侧检验显示非超低机组各等级机组之间平均最大排放小时均值浓度并无统计学意义上的差异,但单侧检验显示 300 MW 等级平均最大排放小时均值浓度低于 200 MW 等级机组具有统计学意义;超低排放机组中,平均最大排放小时均值浓度最低的为 1 000 MW 等级机组,其双侧检验和单侧检验都在 $\alpha = 0.05$ 水平上低于 300 MW 等级机组,其余各等级机组之间均无统计学意义上的差异.

3 结论

(1) 超低排放机组执行的排放标准虽然低至非超低排放机组的一半,甚至四分之一,但各等级超低排放机组开机过程中 NO_x 的达标难度,即超标率并未增加,新建及升级改造的超低排放机组采用的 NO_x 控制新技术或升级措施,使得机组对启动初期的 NO_x 控制能力也有明显提升,超标率与是否执行超低排放限值及机组规模本身并无必然关联,差异主要来自于相应等级机组个体间采用的 NO_x 控制技术(路线)及运行管理水平.

(2) 排放限值的加严和机组规模大小也不是影响机组启动过程中 NO_x 超标时长的主要因素,更主要的影响因素是机组启动前后的状态及火电企业综合管理及机组锅炉、脱硝等各系统整体运行水平等,作为我国目前重点及未来的主力机型,已执行超低排放的 600 MW 及以上等级机组在总体技术先进性与管理水平上优于低等级机组.

(3) 执行超低排放及进行超低排放改造,对有效控制机组开机过程中的 NO_x 排放有明显增强,显著降低了最大排放小时均值浓度,且机组规模越大差异越显著;而各等级机组之间排放浓度差异性未体现出与机组规模相关的特定规律,本文研究样本所体现出的差异性主要来自于相应等级机组个体间采用的 NO_x 控制技术及机组运行管理水平上的差异.

(4) 《火电行业排污许可证申请与核发技术规范》中关于火电机组启机过程 NO_x 达标判定及超标豁免的有关规定,符合我国当前火电机组烟气脱硝的总体情况,在当前技术水平下,尚不具备出台全时段脱硝政策的条件,但随着烟气脱硝技术的发展和火电企业综合管理、机组整体运行水平的提升,豁免条件还有一定收缩的空间.

4 建议

随着我国经济发展进入新常态,全社会电力需求趋缓,同时因大力发展清洁能源并优先上网,燃煤发电机组年利用小时数有所下降,且受电网深度调峰需求,煤电机组启停机更为频繁,部分地区中小容量机组(300 MW 等级及以下)在此次调研期间的启停机周期甚至小于 1 个月,频繁的启停机对 NO_x 排放控制带来了巨大的挑战.燃煤火电机组在保证正常运行时实现 NO_x 稳定达标(超低限值)排放的同时,也应加强对机组启停阶段 NO_x 排放的控制,结合前述分析,现从火电厂 NO_x 超低排放技术路线选择、运行管理、技术研发与应用、相关政策等方面提出如下建议.

(1) 新建及改造机组应采用与执行排放限值相适应的 NO_x 控制技术路线,优先选用成熟技术,保证工程建设与设备安装质量、脱硝催化剂及制氨系统等核心部件质量,以及还原剂品质等,进行充分的调试和性能试验,并在运行过程中持续优化、改进,不仅可保证机组能在稳定运行期间 NO_x 实现稳定的超低排放,也可在启动期间具有良好的 NO_x 控制能力.

(2)加强对机组脱硝系统的日常监管和持续优化,对脱硝系统及相关配套设施进行定期检查、维护,重视机组停运期间设备设施、仪器仪表的检查,在机组启动前对生产运行各环节做好充分的协调、准备工作,可有效缩短 NO_x 超标时长、降低排放浓度;积极应对调峰需求,合理安排本厂各机组的运行负荷分配,尽量降低机组启停频率。

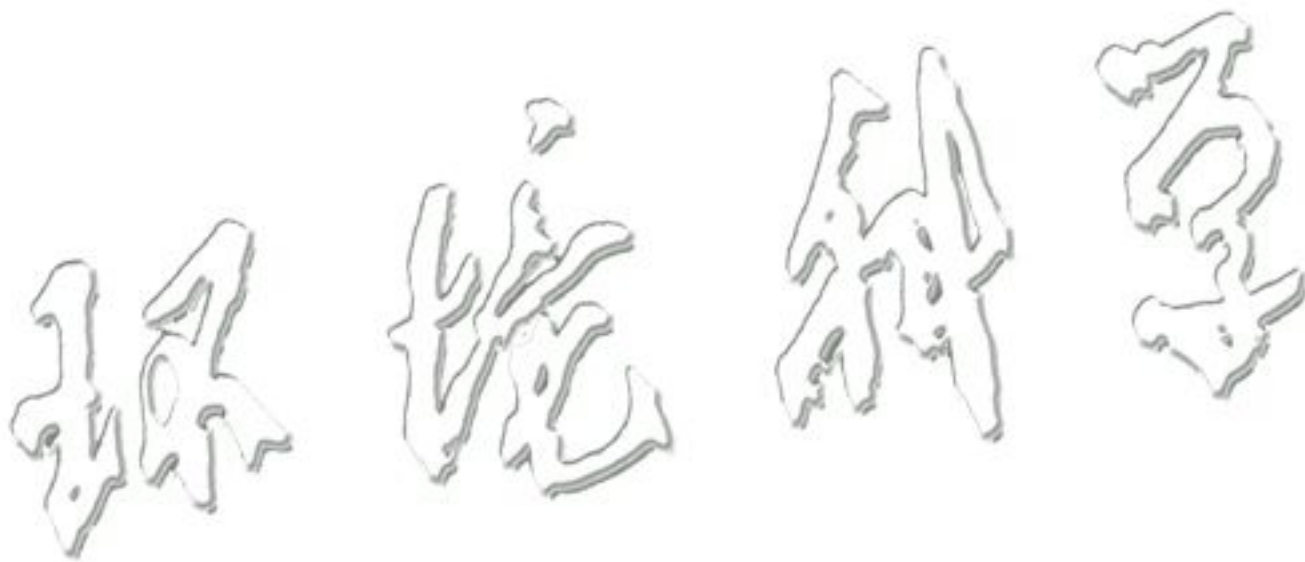
(3)进一步加强烟气脱硝提效技术的研发与应用,为我国火电进入机组全覆盖、生产全时段的全面超低排放时代做好技术储备。将全负荷、全时段脱硝技术的突破口瞄准机组启动阶段,发展锅炉-风烟-脱硝系统整体联合、协同优化的技术升级思路,加快宽温催化剂的研发,拓宽 SCR 催化剂的反应温度窗口,实现低负荷条件下 SCR 脱硝系统运行。

(4)开展火电机组全负荷、全时段脱硝工程试点示范,建议环保部门制定出台相关激励政策,对开展探索、实施全负荷、全时段脱硝的火电企业给予支持、优惠等,用以奖促改、以奖励代豁免等措施推动技术的升级与推广应用。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告-2018 [M]. 北京: 中国市场出版社, 2018. 78-83, 175-177.
- [2] 国家能源局. 能源清洁发展 | 超低排放异军突起 节能改造稳步推进 [EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-10/17/c_136685136.htm, 2017-10-17.
- [3] 国家能源局. 清洁能源消纳难题明显缓解 [EB/OL]. http://blog.sina.com.cn/s/blog_64d114ec0102xb8s.html, 2017-12-29.
- [4] 朱法华. 超低排放: 国家专项行动下的技术突破 [J]. 中国电力, 2017, 50(3): 9-10.
- [5] GB 13223-2011, 火电厂大气污染物排放标准 [S].
- [6] 朱法华, 王圣, 赵国华, 等. GB 13223-2011《火电厂大气污染物排放标准》分析与解读 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013. 24-28.
- [7] 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 等. 2010~2015 年中国燃煤电厂 NO_x 排放特征 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(8): 2903-2910.
Jiang C L, Song X H, Zhong Y Z, et al. Characteristics of NO_x emissions from coal-fired power plants in China from 2010 to 2015 [J]. China Environmental Science, 2018, 38(8): 2903-2910.
- [8] 环境保护部, 国家发展和改革委员会, 国家能源局. 关于印发《全面实施燃煤电厂超低排放和节能改造工作方案》的通知 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201512/t20151215_319170.htm, 2015-12-11.
- [9] 孙献斌, 时正海, 金森旺. 循环流化床锅炉超低排放技术研究 [J]. 中国电力, 2014, 47(1): 142-145.
Sun X B, Shi Z H, Jin S W. Research on ultra-low emission technology for CFB boilers [J]. Electric Power, 2014, 47(1): 142-145.
- [10] 朱法华. 火电厂污染防治技术手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2017. 74-97, 189-197.
- [11] 张杨, 杨用龙, 冯前伟, 等. 燃煤电厂 SCR 烟气脱硝改造工程关键技术 [J]. 中国电力, 2015, 48(4): 32-35.
Zhang Y, Yang Y L, Feng Q W, et al. Key Technical issues of SCR denitrification from coal-fired boiler flue gas [J]. Electric Power, 2015, 48(4): 32-35.
- [12] 王圣, 朱法华, 王慧敏, 等. 燃煤电厂氮氧化物产生浓度影响因素的敏感性和相关性研究 [J]. 环境科学学报, 2012, 32(9): 2303-2309.
Wang S, Zhu F H, Wang H M, et al. Sensitivity and correlation analysis on influence factors of NO_x generated concentration from coal-fired power plant [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(9): 2303-2309.
- [13] 李辉, 徐小波, 王圣, 等. 燃煤火电机组启动 NO_x 排放特征分析 [A]. 见: 2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集 [C]. 北京: 中国环境科学学会, 2017. 1428-1432.
- [14] 王润芳, 马大卫, 姜少毅, 等. 超低排放改造后燃煤电厂细颗粒物排放特征 [J]. 环境科学, 2020, 41(1): 98-105.
Wang R F, Ma D W, Jiang S Y, et al. Fine particulate emission characteristics of an ultra-low emission coal-fired power plant [J]. Environmental Science, 2020, 41(1): 98-105.
- [15] 环境保护部. 关于开展火电、造纸行业和京津冀试点城市高架源排污许可证管理工作的通知 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/bwj/201701/t20170105_394016.htm, 2016-12-28.
- [16] 冯前伟, 张杨, 王丰吉, 等. 600 MW 燃煤机组脱硝超低排放性能对比评估 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(S2): 117-120.
Feng Q W, Zhang Y, Wang F J, et al. Comparison and evaluation of ultra-low emission performance of 600 MW coal-fired unit [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(S2): 117-120.
- [17] 马大卫, 何军, 王正风, 等. 超低排放改造前后 SCR 脱硝装置性能评价分析 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(4): 143-148.
Ma D W, He J, Wang Z F, et al. Comparative research the performance of SCR denitrification device before and after the ultra-low emission retrofit in coal-fired Units [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 143-148.
- [18] 苗永旗, 刘海秋, 周凯, 等. 某 330 MW 机组烟气脱硝系统超低排放性能诊断与分析 [J]. 中国电力, 2018, 51(4): 124-129.
Miao Y Q, Liu H Q, Zhou K, et al. Diagnosis and Analysis on ultra-low emission performance of flue gas denitrification system for a 330 MW unit [J]. Electric Power, 2018, 51(4): 124-129.
- [19] 晏敏, 张杨, 朱跃, 等. 超低排放形势下 SCR 脱硝工程改造现状的调查 [J]. 中国电力, 2018, 51(11): 163-167.
Yan M, Zhang Y, Zhu Y, et al. Investigation on the status of the reconstructive projects for SCR de- NO_x under the condition of ultra-low emission [J]. Electric Power, 2018, 51(11): 163-167.
- [20] 李清毅, 孟炜, 吴国潮, 等. 超低排放脱硝运行状态及稳定性评估 [J]. 浙江大学学报 (工业版), 2016, 50(12): 2303-2311.
Li Q Y, Meng W, Wu G C, et al. Evaluation on operation state and stability for denitrification of ultra low emission [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 50(12): 2303-2311.
- [21] Zhou C Y, Wang Y Q, Jin Q Y, et al. Mechanism analysis on the pulverized coal combustion flame stability and NO_x emission in a swirl burner with deep air staging [J]. Journal of the Energy Institute, 2019, 92(2): 298-310.
- [22] 朱法华. 燃煤电厂烟气污染物超低排放技术路线的选择

- [J]. 中国电力, 2017, **50**(3): 9-16.
- Zhu F H. Methodologies on choosing appropriate technical route for ultra low emission of flue gas pollutants from coal-fired power plants[J]. Electric Power, 2017, **50**(3): 9-16.
- [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 C J, Lu C Z, Bai X L. Study on operation optimization of SCR denitrification with ammonia-injection for ultra-low emission [J]. Electric Power, 2018, **51**(2): 143-148.
- [24] Liang X Y, Zhang F, Yang P J, *et al.* Structure optimization for SCR reactor based on RSM method[J]. Energy Procedia, 2019, **158**: 4529-4535.
- [25] Xie P R, Gao M M, Zhang H F, *et al.* Dynamic modeling for NO_x emission sequence prediction of SCR system outlet based on sequence to sequence long short-term memory network [J]. Energy, 2020, **190**: 116482.
- [26] Zhou H, Guo X T, Zhou M X, *et al.* Optimization of ammonia injection grid in hybrid selective non-catalyst reduction and selective catalyst reduction system to achieve ultra-low NO_x emissions[J]. Journal of the Energy Institute, 2018, **91**(6): 984-996.
- [27] 杨希刚. 燃煤电厂超低排放下的智慧脱硝技术[J]. 电力科技与环保, 2018, **34**(3): 19-22.
- Yang X G. Intelligent denitrification technology of coal-fired power plant under ultra low emission [J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2018, **34**(3): 19-22.
- [28] 梁俊杰, 张战峰, 周健, 等. SCR 烟气脱硝系统运行全过程数据分析[J]. 热力发电, 2018, **47**(12): 93-99.
- Liang J J, Zhang Z F, Zhou J, *et al.* Analysis on whole process operation data of SCR flue gas denitration system[J]. Thermal Power Generation, 2018, **47**(12): 93-99.



CONTENTS

Contribution of Emissions from the Iron and Steel Industry to Air Quality in China	TANG Ling, XUE Xiao-da, BO Xin, <i>et al.</i> (2981)
Interannual Characteristics of Fine Particulate Matter in North China and Its Relationship with Land Use and Land Cover Change	YANG Wei, JIANG Xiao-li (2995)
Evaluation of the Reduction in PM _{2.5} Concentration During the National Traditional Games of Ethnic Minorities in Zhengzhou	WANG Shen-bo, LOU Ya-min, XU Yi-fei, <i>et al.</i> (3004)
Pollution Characteristics of Water-soluble Inorganic Ions in Chengdu in Summer and Winter	FENG Yan-peng, ZHANG Jun-ke, HUANG Xiao-juan, <i>et al.</i> (3012)
Analysis of Transport Pathways and Potential Sources of Atmospheric Particulate Matter in Zigong, in South of Sichuan Province	LEI Yu, ZHANG Xiao-ling, KANG Ping, <i>et al.</i> (3021)
Source Composition Spectrum of Volatile Organic Compounds in Typical Industries in Sichuan	XU Chen-xi, CHEN Jun-hui, HAN Li, <i>et al.</i> (3031)
Source Profiles of Industrial Emission-Based VOCs in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, ZHOU Xiao-ling, <i>et al.</i> (3042)
Emission Characteristics and Risk Assessment of Volatile Organic Compounds from Typical Factories in Zhengzhou	QI Yi-jin, NI Jing-wei, ZHAO Dong-xu, <i>et al.</i> (3056)
Characteristics, Source Apportionment, and Environmental Impact of Volatile Organic Compounds in Summer in Yangquan	NIU Yue-yuan, LIU Zhuo-cheng, LI Ru-mei, <i>et al.</i> (3066)
Characteristics and Reactivity of VOCs in Hangzhou During a Typical Photochemical Pollution Episode	JING Sheng-ao, YE Xu-hong, GAO Ya-qin, <i>et al.</i> (3076)
Pollution Characteristics and Sensitivity of Surface Ozone in a Typical Heavy-Industry City of the North China Plain in Summer	OU Sheng-ju, WEI Wei, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (3085)
Source Apportionment of Atmospheric Ammonia; Sensitivity Test Based on Stable Isotope Analysis in R Language	GU Meng-na, PAN Yue-peng, HE Yue-xin, <i>et al.</i> (3095)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Atmospheric Mercury Speciation in Suzhou	LU Ren-jie, WU Ye-zheng, ZHANG Xiao-jie, <i>et al.</i> (3102)
Emission Characteristics of Light-Duty Gasoline Vehicle Exhaust Based on Acceleration Simulation Mode	XIE Yan, LIAO Song-di, ZHU Man-ni, <i>et al.</i> (3112)
Comparative Analysis of NO _x Emission Characteristics of Non-Ultra-Low- and Ultra-Low-Emission Coal-Fired Power Units During the Start-Up Process	LI Hui, ZHU Fa-hua, SUN Xue-li, <i>et al.</i> (3121)
Source Identification and Pollution Characteristics of Heavy Metals in Suspended Particles of Urban Road Dust from Xingtai City	SONG Yi, LU Xin-wei, ZHOU Xiao, <i>et al.</i> (3130)
Impacts of Leaf Surface Micromorphology Variation on the Ability to Capture Particulate Matter	WEI Wen-jun, WANG Bing, NIU Xiang (3136)
Analysis of Hydrogen and Oxygen Stable Isotope Characteristics and Vapor Sources of Precipitation in the Guanzhong Plain	ZHAO Ming-hua, LU Yan-wei, Rachana Heng, <i>et al.</i> (3148)
Analysis of Nitrate Sources in Different Waters of a Karst Basin	TIAN Yong-zhu, HAN Zhi-wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (3157)
Analysis of Nitrogen Pollution and Its Pollution Sources in the Muli River Basin	QI Ran, XU Fei-fei, YANG Fan, <i>et al.</i> (3165)
Temporal and Spatial Variation Patterns of the Environmental Elements in the Sediments of the Liaohu Estuary and the Related Influencing Factors	QI Yue, SUN Yong-guang, MA Gong-bo, <i>et al.</i> (3175)
Transport Characteristics of Phosphorus Sources at the Multi-scale Watershed and the Associated Ecological Effects on Poyang Lake	WANG Shuo-yue, GAO Yang, LU Yao, <i>et al.</i> (3186)
Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in the River of a Typical Bay Watershed	WANG Lei, WANG Wen-dong, LIU Dong, <i>et al.</i> (3194)
Concentrations of Typical Perfluoroalkyl Acids and Contributions of Their Precursors in the Water of the Le'an River in China	ZHANG Hui, WANG Shi-liang, YU Yang (3204)
Distribution Characteristics of Microplastics in Surface Water and Sediments of Haizhou Bay, Lianyungang	LI Zheng, GAO Chun-mei, YANG Jin-long, <i>et al.</i> (3212)
Profiles and Risk of Antibiotic Resistance Genes in Domestic Wells in the Maozhou River Basin	WU Dai-ling, ZOU Hai-yan, HE Lu-xi, <i>et al.</i> (3222)
Release Mechanisms of Iron and Manganese from Sediments in Jinpen Reservoir	LU Lin-chao, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (3231)
Characterization of Microplastic Pollution of Sediments from Urban Lakes	WANG Xuan, NIU Si-ping, SONG Xiao-long, <i>et al.</i> (3240)
Structural Characteristics of Microbial Communities in the Sediments of the Niyang River in Tibet	LIU Xiao-dan, HUANG Yi, WANG Yong-hua, <i>et al.</i> (3249)
Combined Effects of Erythromycin and Nutrients on Microalgae in Seawater	WANG Na, ZHAO Wei-hong, MIAO Hui (3257)
Longitudinal Distribution of Benthic Macroinvertebrates Affected by a Hydropower Plant Cascade in the Mudan River	WEN Jia-qi, WANG Hao-ran, CHEN Yong-can, <i>et al.</i> (3266)
Analysis of Rainwater Runoff Pollution Characteristics of Various Typical Underlying Surfaces in Ningbo	XU Yu-jie, GONG Yue-min, BI Jun-peng, <i>et al.</i> (3275)
Water Quality and Bacterial Population Driving Mechanism of Algae Vertical Succession in Stratified Reservoir	YAN Miao-miao, CHEN Sheng-nan, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (3285)
Distribution Characteristics of Disinfection By-Products and the Effects of Booster Chlorination in Long-Distance Water Supply Systems	BI Wei-wei, YE Sheng, YU Jian-quan, <i>et al.</i> (3297)
Occurrence and Prediction Model of Disinfection By-Products in Tap Water	LIU Jun-ping, CHEN Jing-ji, SONG Ya-li, <i>et al.</i> (3307)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cadmium in Water by Alkali and Magnetic Composite Modified Wheat Straw Biochar	CUI Zhi-wen, REN Yan-fang, WANG Wei, <i>et al.</i> (3315)
Enhanced Chromate (VI) Removal Characteristics and Mechanism Using Graphene Oxide Immobilized Nanoscale Zero-Valent Iron Coupled with a Weak Magnetic Field (GO-nFe ⁰ /WMF)	JI Meng, BAO Jian-guo, ZHU Xiao-wei, <i>et al.</i> (3326)
Characteristics and Influencing Factors of Monothioarsenate Adsorption on Goethite	LIAO Dan-xue, SHAN Hui-mei, ZHANG Jin-xian, <i>et al.</i> (3337)
Fast Start-Up ANAMMOX Operation Strategy and Flora Characteristics of a Biofilter	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, <i>et al.</i> (3345)
Effects of Aeration Strategy on Denitrifying Performance of Activated Sludge Processes in Treating Low-Carbon-Source Municipal Wastewater	ZHANG Xin-ni, CHI Yu-lei, WANG Qian, <i>et al.</i> (3356)
Effect of Hydroxylamine on Community of ANAMMOX Sludge	XING Chong-yang, FAN Yu-chen, CHEN Xuan, <i>et al.</i> (3365)
Microbial Diversity of Filamentous Sludge Bulking at Low Temperature	GAO Chun-di, ZHANG Na, HAN Hui, <i>et al.</i> (3373)
Main Influencing Factors and Strengthening of Anaerobic Transformation of Excess Sludge in China	DONG Bin, GAO Jun, CHEN Si-si, <i>et al.</i> (3384)
Relationship Between CO ₂ and CH ₄ Emissions in Urban Rivers and Sewage Discharging from a Municipal Drainage Network	LI Lei, CHEN Hao, ZHU Yi, <i>et al.</i> (3392)
Effects of Controlled-Release Urea Application on N ₂ O Emission in Maize-Cultivated Sandy Loam Soil	JIANG You-jin, YUAN Jun-ji, DING Wei-xin, <i>et al.</i> (3402)
Greenhouse Gas Emissions for Typical Open-Field Vegetable Production in China	ZHANG Fen, CHENG Tai-hong, CHEN Xin-ping, <i>et al.</i> (3410)
Effects of Water Management on Soil Properties and Cd Behavior of Typical Paddy Soils	HUANG Jing, LI Xin-yang, WEN Sha, <i>et al.</i> (3418)
Effect of Mn-Modified Biochar on the Characteristics of Aggregate Structure and the Content of Cd in Weakly Alkaline Cd-Contaminated Soil	SUN Tong, FU Yu-tong, LI Ke, <i>et al.</i> (3426)
Effects of the Immobilization of Cadmium in Soil Alone or Combined with Foliar Application of Selenium on Cadmium Accumulation in the Plants of Different Genotypes of Tsai-tai	CAO Kun-kun, LI Cheng-cheng, HU Xue-yu, <i>et al.</i> (3434)
Effects of Foliar Spraying of 2,3-dimercaptosuccinic Acid on Cadmium Uptake, Transport, and Antioxidant System in Rice Seedlings	YANG Xiao-rong, HUANG Yong-chun, LIU Zhong-qi, <i>et al.</i> (3441)