

例如可借助有效数据获取率衡量数据完整性，与标准方法的比对偏差评估准确性，以此形成客观且可量化的质量评价维度。实施这些标准化技术规范和质量评价标准，让质量管理工作真正达成有章可守、有据可凭，各级监测机构可依据统一标准开展监测工作，保障不同地区、不同时段所获数据具备可比性与可靠性，这既为环境管理决策提供了高质量的数据支持，又为构建全国性环境质量评价体系筑牢根基，最终助力环境监测工作朝规范化、标准化、科学化方向前行^[4]。

4.2 强化技术支撑与创新

推进仪器设备自动诊断、远程校准与异常预警技术的推广应用，是现代环境监测体系建设的关键走向，借助植入智能诊断模块，监测仪器能实时开展自检，快速识别传感器漂移、部件老化等问题；凭借物联网技术达成远程校准功能，降低人工现场作业的成本与误差；构建智能预警机制，对设备出现的异常状态提前给出警示，保障监测数据连贯且可靠。

借助大数据与人工智能技术研发智能化数据审核算法，是增强数据质量监管效力的关键办法。这些算法可自动甄别异常数据模式以及疑似造假行径，像数据重复异常、突变点异常、相关性异常等。通过机器学习持续优化识别模型，系统能精准找出因人为干预、设备故障等各类因素引发的数据质量问题，显著提高数据审核的效率与精准度。同时应积极促进传感器等核心部件实现国产化并提升其性能，提升研发投入力度，打破高精度传感器、精密分析模块等关键技术壁垒，构建具备自主知识产权的核心部件。通过技术创新与工艺改良，持续提高国产设备测量精度、稳定性并延长使用寿命，削减运维开支，逐步达成进口设备的替代，为我国环境监测网络的可靠运转和可持续进步提供坚实的技术后盾和设备支撑。

4.3 优化全流程质量管理

严格执行“监测前准备-监测中控制-监测后审核”的闭环质量管理机制，是保障环境监测数据真实可靠的关键做法。监测前的准备阶段，需制订细致的工作方案，包含仪器校准、试剂验证、人员培训等准备事宜，保证各环节均达规范标准。质量控制在监测过程中极为关键，需借助标样核查，实际样品比对，加标回收等手段，保障监测操作规范和数据精准。

做好试剂耗材溯源管理是保障质量控制的基础要点。设立全面的采购、验收、存储、使用记录体系，达成每批试剂耗材的可追溯效果。同时深化运维过程的痕迹管控，利用视频监控系统留存关键操作环节影像，运用电子化操作日志实时记录运维人员的工作事项，保证所有操作均有迹可循。

构建“线上+线下”融合的飞行检查与交叉审核机制，是保障质控措施落实的有效办法。利用大数据分析在线上对各站点运行状态与数据质量开展实时监控，线下安排专家开展非定期现场突击检查，同时设立跨区域的交叉审查制度，安排不同地区技术人员开展互检工作。该机制既能找出潜在隐患，又可推动技术沟通，最终营造全员聚焦质量、全过程管控质量的良好工作氛围，保障环境监测数据真实可靠^[5]。

4.4 加强专业化人才队伍建设

构建常态化的分级、分类培训与考核体系是增强环境监测运维团队专业素养的关键支撑，不同岗位和技术等级的运维人员，需定制有差异的培训方案。针对新入职人员，重点开展基础操作规范和仪器使用培训，技术人员强化故障诊断与维修技能，管理人员突出质量管理与团队建设能力培育。定期开展理论考试与实操考核，保证每个运维人员都拥有相应专业技术水准，持续强化职业道德教育，养成严谨精细的工作习惯。

主动依照操作规程行事，积极保障数据质量，进而为环境监测工作的规范开展提供可靠人力支撑，保障监测数据精准可靠，为环境管理决策筑牢坚实基础。

5 结语

水质自动监测所得的数据是国家水环境管理的珍贵财富，数据质量是其核心要素。本文创建的以全生命周期为基础的数据质量评价架构，为系统性、客观性地评估数据质量提供了架构与手段，对硬件、运维、质控和环境等关键因素展开深度分析，挖掘出数据质量问题的根源。最终提出从制度、技术、管理和人才四个维度出发的优化策略，形成了一套系统的解决方案。伴随物联网、人工智能等新技术的深度融合运用，水质自动监测数据质量评价与保障体系将朝着智能化、精细化、自动化程度更高的方向迈进，为守护绿水青山筑牢更坚实可靠的数据根基。

参考文献

- [1] 李世维,刘晓娟,韩佰辉,莫晓聪,王峰.水质自动监测数据审核中异常数据判定及处置机制[J].水利信息化,2025,(01):69-74.
- [2] 袁小琴,蓝兰.水质自动监测站运行中的质量控制研究[J].广西水利水电,2024,(04):142-144.
- [3] 张振萍,李永蓉,龚长凌,田文娟.水质自动监测系统运维风险及防控措施探讨[J].资源节约与环保,2023,(06):57-60.
- [4] 刘博文,王亮.水质自动监测各环节对数据准确性的影响分析[J].资源节约与环保,2022,(03):38-40+44.
- [5] 杨雅楠.工业废水水质手工监测与自动监测设备数据对比分析[J].供水技术,2021,15(05):9-12.

Technical Research on Desulfurization, Denitrification and Flue Gas Dust Removal in Large Thermal Power Plant Boilers

Yan Fang¹ Kan Wang² Shilin Chang³

1. Guizhou Yuanda Environmental Protection Co., Ltd., Guizhou, Liupanshui, 553531, China

2. Guizhou Yuanda Flue Gas Treatment Co., Ltd., Guizhou, Zunyi, 564600, China

3. Chongqing Yuanda Flue Gas Treatment Franchise Operation Co., Ltd., Datong Branch, Qinghai, Xining, 810100, China

Abstract

With the acceleration of industrialization and continuous growth in energy demand, large thermal power plants, as crucial pillars of electricity supply, pose significant environmental and health risks due to the massive emissions of sulfur dioxide, nitrogen oxides and soot during production. In recent years, increasingly stringent environmental regulations have compelled thermal power plants to adopt efficient and reliable desulfurization, denitrification and dust removal technologies to achieve ultra-low emission targets. Currently, technologies such as wet desulfurization, selective catalytic reduction (SCR) denitrification and electrostatic-bag combined dust removal systems have been widely implemented and continuously optimized through practical applications. This paper systematically analyzes the working principles, application effectiveness and existing issues of current technologies, explores integrated technical strategies and collaborative control mechanisms, providing theoretical foundations and engineering references for the green and low-carbon transformation of thermal power plants.

Keywords

Thermal power plant boilers; Desulfurization technology; Denitrification technology; Flue gas dust removal

大型火电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘的技术研究

方颜¹ 王侃² 常仕林³

1. 贵州省远达环保有限公司, 贵州省六盘水市 553531

2. 贵州远达烟气治理有限公司, 贵州省遵义市 564600

3. 重庆远达烟气治理特许经营有限公司青海省大通分公司, 青海省西宁市 810100

摘要

随着工业化进程加速和能源需求持续增长, 大型火电厂作为电力供应的重要支柱, 其生产过程中产生的大量二氧化硫、氮氧化物及烟尘对环境与人体健康构成严重威胁。近年来, 环保法规日趋严格, 推动火电厂必须采用高效可靠的脱硫、脱硝及除尘技术以实现超低排放目标。目前, 湿法脱硫、选择性催化还原脱硝及电袋复合除尘等技术已广泛应用, 并在实践中不断优化创新。本文系统分析现有技术的工作原理、应用效果及存在问题, 探讨技术集成与协同控制策略, 为火电厂实现绿色低碳转型提供理论依据与工程参考。

关键词

火电厂锅炉; 脱硫技术; 脱硝技术; 烟气除尘

1 引言

能源结构以煤炭为主是我国现阶段的基本国情, 火电厂在保障电力稳定供应方面发挥着不可替代的作用。然而,

【作者简介】方颜(1991-), 男, 中国重庆人, 专科, 助理工程师, 从事电力系统自动化技术, 火电厂环保, 火电厂脱硫、脱硝、除尘施工管理、工程安全质量监督及其技术管理等研究。

燃煤锅炉在运行过程中会排放大量污染物, 包括二氧化硫、氮氧化物以及烟尘颗粒物, 这些物质是形成酸雨、光化学烟雾和细颗粒物的重要前体, 对大气环境、生态系统和公共健康造成严重影响。为应对这一挑战, 国家相继出台《火电厂大气污染物排放标准》(GB13223-2011)和《煤电节能减排升级与改造行动计划》等政策, 要求火电厂加快环保设施改造, 实现二氧化硫、氮氧化物和烟尘的超低排放。在此背景下, 开发和应用高效、经济、可靠的脱硫、脱硝及除尘技术已成为火电厂环保工作的核心任务。

2 电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术的应用现状与环境影响

当前,我国电厂锅炉大气污染物治理体系趋于成熟,绝大多数燃煤机组完成超低排放改造,实现二氧化硫、氮氧化物和颗粒物排放浓度分别不超 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 和 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 的严格限值。这一成效得益于国家强化环保政策、推行强制性排放标准,也反映出污染控制技术水平提升。脱硫方面,石灰石-石膏湿法脱硫成主流工艺;脱硝上,选择性催化还原技术被广泛采用;除尘领域多技术并行,电除尘、袋式除尘及其复合式技术灵活配置以达最优效果。从环境效益看,这些技术规模化应用降低了电厂一次污染物排放总量,对区域大气环境质量有积极影响,在酸雨和雾霾突出地区,减少了酸雨频率、改善了能见度、防护了公众健康(如图1)。不过,污染治理存在次生环境问题,如脱硫废水等处理与资源化利用,需在循环经济框架下推进全过程治理,协同环保与绿色发展。



图1 酸雨危害图

3 火电厂锅炉脱硫脱硝技术深度剖析与应用评估

3.1 湿法烟气脱硫技术及其化学反应机理探究

湿法烟气脱硫技术,尤其是石灰石-石膏法,因其技术成熟、适应性强和脱除效率高,在全球范围内成为火电厂二氧化硫控制的主流选择。从理论层面分析,该技术主要基于气-液相传质与化学反应动力学原理。其核心过程为:以石灰石(CaCO_3)浆液作为吸收剂,在吸收塔内与烟气中的 SO_2 发生多级反应。首先, SO_2 溶于水生成亚硫酸(H_2SO_3),随即电离产生 HSO_3^- 和 SO_3^{2-} ;其后,在强制氧化空气的作用下, HSO_3^- 被氧化成 SO_4^{2-} ,进而与溶液中的 Ca^{2+} 结合生成二水硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),即石膏。这一连串反应涉及吸收、解离、氧化和结晶等多个物理化学阶段,其反应速率受pH值、液气比、停留时间及氧化效率等多因素共同制约。

该技术的核心设备吸收塔通常设计为喷淋空塔或填料塔结构,以最大限度提高气液接触面积和传质效率。从热力学角度看,低温有利于 SO_2 溶解,但实际运行需在反应速率与设备成本间取得平衡。湿法脱硫效率普遍可达95%以上,甚至超过99%,对不同硫份煤质均表现出良好适应性,副产物石膏可资源化利用于建材行业,体现出一定的循环经济特征。

3.2 选择性催化还原脱硝技术及其催化剂特性分析

选择性催化还原(SCR)技术是当前应用最广泛的高效脱硝手段,其原理是在催化剂作用下,以氨(NH_3)或尿素为还原剂,在特定温度窗口内将烟气中的 NO_x 选择性还原为 N_2 和 H_2O 。该技术理论基础涉及催化化学与表面反应机理。在催化剂活性位点上, NH_3 吸附后与气相中的 NO 和 O_2 发生反应,主要遵循Eley-Rideal机理,即气态 NO 与吸附态 NH_3 反应生成 N_2 和 H_2O 。其主反应为: $4\text{NO} + 4\text{NH}_3 + \text{O}_2 \rightarrow 4\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$,同时伴随一系列副反应。

SCR系统通常布置于省煤器与空气预热器之间的高尘区域,此处烟气温度约 $300\text{-}400^\circ\text{C}$,符合常规钒基催化剂的最佳活性温度区间。催化剂作为SCR系统的核心,其性能直接决定脱硝效率与运行成本。目前商用催化剂多以 TiO_2 为载体,负载 V_2O_5 作为主活性组分, WO_3 或 MoO_3 为助剂,以此提高催化活性、热稳定性及抗中毒能力。催化剂多制成蜂窝式、板式或波纹板式结构以兼顾高比表面积和低阻特性。SCR脱硝效率通常在80%-90%之间,可通过增加催化剂体积或层数提升至95%以上。然而,催化剂寿命受多种因素影响:飞灰中碱金属(K 、 Na)与砷(As)可引起活性位点永久中毒;飞灰冲刷导致物理磨损与堵塞; SO_2 氧化生成 SO_3 易与 NH_3 反应生成硫酸氢铵,造成空预器堵塞与腐蚀。

3.3 臭氧氧化协同脱硫脱硝一体化技术探索

臭氧氧化协同脱硫脱硝技术是一种前沿的多污染物协同控制方法,其理论基础建立在臭氧的高效氧化特性与气液相平衡原理之上。该技术利用臭氧(O_3)的强氧化性,将烟气中难溶于水的 NO 氧化为易溶于水的高价态氮氧化物,如 NO_2 、 N_2O_5 等。这些高价氮氧化物随后与 SO_2 一同在后续碱液洗涤塔中被吸收脱除,最终形成硫酸盐与硝酸盐溶液。

从反应机制看,臭氧与 NO 的反应为快速气相反应,主要路径为: $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2 + \text{O}_2$;进而可进一步发生 $\text{NO}_2 + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_3 + \text{O}_2$ 及 $\text{NO}_2 + \text{NO}_3 \rightarrow \text{N}_2\text{O}_5$ 等连锁反应。其氧化效率关键取决于 O_3/NO 摩尔比、反应温度及停留时间。工程中臭氧通常由现场高压放电式臭氧发生器制备,其单位产量能耗较高,是影响运行经济性的主要因素。该技术最大优势在于实现 SO_2 和 NO_x 的一体化脱除,系统结构紧凑,占地小,特别适用于现有厂区的改造项目。实践表明,当 O_3/NO 摩尔比控制在1.0-1.5时, NO 氧化率可达90%以上,结合湿法吸收,系统总脱硝效率可超过85%,脱硫效率仍可维持在95%以上。然而,该技术仍存在明显瓶颈:臭氧制备能耗高,导致运行成本显著;副产硝酸盐溶液浓度低、处理难度大,需开发高效资源化处置技术;过量臭氧残留可能造成环境二次污染,需确保尾气臭氧彻底分解(如图2)。

4 火电厂锅炉烟气除尘技术深度剖析与应用评估

4.1 电袋复合除尘技术及其协同过滤机制解析

电袋复合除尘器是静电除尘与布袋过滤技术有机结合