

放标准的限值要求；结果与标准不匹配；标准文本结构要素缺失；在《环境监测分析方法标准制订技术导则》发布实施之后制定的标准在文本要素内容也是不尽相同。

4.2 同一项目的多种监测方法缺乏适用范围或场景限定描述

为推动科技水平进步，促进国产仪器设备的研发，对同一项目发布了基于不同原理的监测标准，例如 SO_2 、 NO_x 和 CO 就有定电位、非分散红外、紫外和傅里叶红外等方法标准。不同方法的设备在分析原理、方法检出限、预热时间、烟气传感器响应时间、线性误差、重复性和漂移均能满足标准的要求，但各项指标的差异也很明显。烟气湿度、烟气干扰气对不同分析原理的设备会产生不同的正负干扰。虽然新方法的研制中开展了不同方法标准的比对工作（包含在征求意见稿的编制说明中），仅对不同行业和多种浓度的样品判定多种方法监测结果的显著性差异，或者计算出相对准确度。标准未说明适用范围或场景限定。

不同分析原理的设备对同一样品会产生结果差异，差异会造成结果不可比，超标判定不一致等，给环境管理造成困难。

4.3 标准文本要素具体内容的不一致

随着 HJ 168 及修订版的发布，之后编制的监测标准文本结构要素相对完整，其中，便携式监测标准中的文本要素增加了 HJ168 缺失的“采样位置和采样点”（HJ 1240-2021（傅里叶红外）无此文本要素），具体到每个要素内容仍有差异：差异较大的部分包括“质量保证和质量控制”和“说明（注意事项）”，部分条文相互交叉，未形成统一的文本要素条文设计。

4.4 标准制订技术导则（HJ 168）缺乏便携式监测标准特有的规范要求

近年来随着环境监测技术、监测设备的发展更新、环境管理的进一步要求，生态环境部和地方生态环境部门陆续出台了更多的便携式监测分析标准。除了本文提及的常规废气污染物（ SO_2 、 NO_x 、CO），还包括了废气中的非甲烷总烃、氨、氯化氢现场测定和挥发性有机物、水中挥发性有机物和无机有害气体的应急测定。

从标准文本内容来看，同一项目同一方法原理，实验室标准和便携式标准部分文本要素差异较大，这其中就包括“试剂和材料”、“仪器和设备”和“分析步骤”。HJ 168 中的规范要求仅适用于实验室分析标准，缺乏便携式监测标准特有的规范要求。

5 常规污染物（ SO_2 、 NO_x 、CO）便携式监测标准修订工作建议

5.1 进一步完善相关法律、法规和标准制定技术规范

国家及部级层面的标准化相关法律法规及规范性文件中已明确提出标准评估的要求。例如部颁《生态环境标准管

理办法》中第九章要求生态环境标准实施评估工作可制定实施细则：包括评估周期、程序、方法、以及具体要求、如何选择评估单位等；此外，生态环境部标准主管部门可按照国家层面的要求，制定本领域更详尽的标准验证工作程序，对标准验证的选择、验证数据、验证报告的格式等提出更加翔实的要求^[4]；标准制定技术规范增加针对便携式监测标准的规范要求。

5.2 引入第三方标准评估机构参与标准验证、复审工作

部主管司局可指定系统外（包括社会机构）标准评估机构，对标准技术内容是否规范合理，指标参数是否准确，验证结果是否真实可靠等方面进行确认。通过第三方标准验证、复审的参与将进一步提高标准的自身质量和标准的适用性和公正性。

5.3 培养标准验证复审相关人才

标准评估相关人才包括标准文本复审人员和标准复审工作审核专家两个方面。生态标准管理部门环境管理要求定期开展不同层次、规模的标准验证、复审方面的讲座等活动，持续培养掌握本标准相关专业发展状况、精通标准复审（评估）管理与技术、熟悉标准工作的复合型技术人才，构建标准复审评估专家库，进一步提高标准编制的水平。

标准验证特别是监测标准的验证，第三方检测机构的加入在近几年也越来越普遍。

5.4 严格执行周期性标准复审工作并形成机制

应建立基本工作流程包括制定工作计划、确定复审基本周期、复审大致范围、标准复审机构及职责、复审结论并公布等。复审结论为继续有效的，标准再次出版时注明复审信息，复审结论为修订或整合修订，同步申报修订计划；复审结论为废止，公布标准废止过渡期等。

5.5 加大生态环境分析标准编制经费投入

分析标准验证工作编制经费少辄十几万元起步，多辄几十万甚至上百万，单靠编制单位支出经费，远远不够。但是经费是维系标准编制工作不可或缺的因素，也是保证标准编制质量的主要因素之一。应该以相关行政主管部门和科技主管部门财政拨款为主要来源，标准起草单位自筹经费为辅助经费来保障标准编制经费。

参考文献

- [1] 曹宇 王江飞等 我国生态环境监测标准现状、问题及建议[J]环境监测与预警 2023/4
- [2] 空气和废气监测分析方法（第四版）（国家环境保护总局编）.
- [3] 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法 GB/T 16157-1996.
- [4] 许莉莉 汤海荣等 海洋标准验证工作分析与建议[J]中国质量与标准导报 2023/1

Discussion on Flue Gas Desulfurization, Denitrification, and Dust Removal Technologies in Thermal Power Plants and Their Development Trends

Shilin Chang¹ Yan Fang² Kan Wang³

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

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

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

Abstract

With the deepening implementation of China's "Dual Carbon" strategy and comprehensive strengthening of ecological environmental protection, flue gas pollution control in thermal power plants has become a critical component in driving the clean and low-carbon energy transition. Sulfur dioxide, nitrogen oxides, and particulate matter in flue gas pose multiple hazards to atmospheric environment, ecosystems, and public health, making efficient treatment imperative. Currently, mainstream technologies such as wet flue gas desulfurization (WFGD), selective catalytic reduction (SCR) denitrification, and electrostatic-bag combined dust removal systems are being continuously optimized. Meanwhile, dry/dry-process technologies and integrated multi-pollutant control processes are rapidly advancing. Future developments will focus more on ultra-low emissions, energy conservation, intelligent control, and deeper integration with carbon capture and utilization technologies. This paper systematically reviews the characteristics, challenges, and new advancements of existing technologies, while also forecasting future trends to provide references for industry green upgrades.

Keywords

Thermal power plants; Flue gas purification; Desulfurization technology; Denitrification technology; Dust removal technology

火力发电厂烟气脱硫脱硝除尘技术与发展趋势探讨

常仕林¹ 方颜² 王侃³

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

2. 贵州省远达环保有限公司, 中国·贵州 六盘水 553531

3. 贵州远达烟气治理有限公司 中国·贵州 遵义 564600

摘 要

随着我国“双碳”战略的深入推进和生态环境保护的全面加强, 火力发电厂烟气污染控制已成为推动能源清洁低碳转型的关键环节。烟气中的二氧化硫、氮氧化物和颗粒物对大气环境、生态系统及公共健康造成多重危害, 高效治理势在必行。目前, 湿法脱硫、SCR脱硝和电袋复合除尘等主流技术不断优化, 同时干法、半干法技术和多污染物协同控制一体化工艺也在迅速发展。未来, 烟气净化将更聚焦超低排放、节能降耗与智能化控制, 并逐步与碳捕集利用技术深度融合。本文系统梳理了现有技术的特点、挑战与新进展, 并对技术发展趋势作出展望, 以期为行业绿色升级提供参考。

关键词

火力发电; 烟气净化; 脱硫技术; 脱硝技术; 除尘技术

1 引言

近年来, 国家持续推进生态文明建设, 密集出台多项环保政策与法规, 如《大气污染防治行动计划》《“十四五”节能减排综合工作方案》等, 明确提出对燃煤电厂实行更严

格的大气污染物排放限值, 推动实施超低排放改造。在“双碳”目标引领下, 火力发电作为能源供应主力, 面临着绿色转型和减排降碳的双重压力。烟气中的 SO_2 、 NO_x 和颗粒物不仅污染环境, 还危及公众健康, 因此发展高效、经济、可靠的烟气净化技术已成为行业亟需。在此背景下, 系统分析现有技术路线并把握未来创新方向, 对实现环保目标与能源可持续发展具有重要意义。

2 火力发电厂烟气污染控制的重要性

火力发电厂在燃烧化石燃料过程中会产生大量烟气污

【作者简介】常仕林(1989-), 男, 中国重庆人, 本科, 助理工程师, 从事电力工程系统自动化, 火电厂环保, 火电厂脱硫、脱硝、除尘施工管理、安全技术监督等研究。

染物,主要包括二氧化硫(SO_2)、氮氧化物(NO_x)和烟尘颗粒物(PM),对生态、气候和公众健康构成严重威胁。二氧化硫是形成酸雨的主要成因,导致土壤与水体的酸化,破坏农作物生长及水生生态系统。氮氧化物不仅会生成光化学烟雾,还是PM_{2.5}和臭氧的重要前体物,加剧大气污染和雾霾天气(如图1)。可吸入颗粒物尤其是PM_{2.5}能够深入人体呼吸系统与血液循环,引发哮喘、心血管疾病等多种健康问题。此外,这些污染物还会造成发电设备腐蚀、积灰和效率下降,显著增加运行与维护成本。随着国家“双碳”战略的深入推进和环保政策的持续收紧,实施高效的烟气净化措施已成为火力发电企业履行环保责任、实现绿色转型的关键任务。推广应用先进的脱硫、脱硝和除尘技术,不仅可大幅削减污染物排放,改善环境空气质量,还能提升能源利用效率,推动副产资源化利用,为构建清洁、低碳、可持续的能源体系提供重要保障。

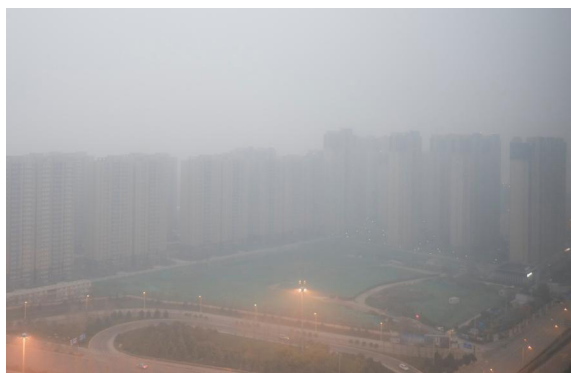


图1 氮氧化物污染引起的城市雾霾

3 火力发电厂烟气脱硫脱硝除尘技术的分析

3.1 湿法烟气脱硫技术及其应用特点分析

湿法烟气脱硫技术是目前全球范围内应用最为广泛且工艺最为成熟的脱硫方法,其中以石灰石-石膏法为代表的技术路线占据市场主导地位。该技术的核心机理是利用石灰石(CaCO_3)配制而成的浆液,在吸收塔内与烟气中的二氧化硫(SO_2)发生化学反应,生成亚硫酸钙(CaSO_3)并进一步氧化为硫酸钙($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$,即石膏)。这一过程不仅实现了二氧化硫的高效脱除,脱硫效率普遍可稳定达到95%–99%,同时产生的石膏副产物具备良好的资源化利用价值,可作为建筑材料中的石膏板、水泥缓凝剂等原材料,有效推动循环经济的发展。然而,该技术也存在一些显著缺点:系统运行中产生的酸性环境和氯离子易导致设备腐蚀,特别是吸收塔、喷淋系统和烟道部位的腐蚀问题较为突出;大量废水需要专门处理以达标排放(如图2),增加了运行成本与复杂性;此外,制浆、喷淋及氧化风机等环节能耗较高,直接影响电厂的经济性。近年来,为提升系统综合性能,行业陆续引入多种技术创新,例如采用双循环工艺以增强脱硫效率和适应负荷变化,运用先进的pH值与液气比精确控

制系统以优化反应条件、减少物料消耗,并开发高效防腐材料(如高合金衬里和玻璃鳞片树脂)以延长设备寿命。



图2 工业废水的处理图

3.2 选择性催化还原脱硝技术原理分析

选择性催化还原(Selective Catalytic Reduction, SCR)技术是当前电站锅炉烟气脱硝领域公认最成熟且应用最广泛的方法,其基本原理是在催化剂作用下,利用还原剂将烟气中的氮氧化物选择性还原为无害的氮气(N_2)和水(H_2O)。该技术脱硝效率高,通常在80%–90%之间,并可依据环保要求通过调整运行参数进一步提升,尤其适用于大型燃煤机组的高效脱硝需求。SCR系统的核心组成部分包括催化剂、反应器、喷氨格栅以及吹灰系统,其中催化剂多以钒基(如 $\text{V}_2\text{O}_5\text{-WO}_3/\text{TiO}_2$)或钛基金属氧化物为主体,具有较高的活性与机械强度。然而,SCR技术也面临一些挑战:催化剂的最佳活性温度窗口较窄(一般介于300°C至400°C之间),当烟气温度超出此范围时脱硝效率显著下降;此外,催化剂易因烟气中的砷(As)、碱金属(如K、Na)、碱土金属等物质发生化学中毒或物理堵塞,导致活性衰减与使用寿命缩短。近年来,SCR技术的研究与开发取得多方面重要进展。在催化剂方面,低温SCR催化剂的开发成效显著,其活性温度可拓宽至150°C–300°C,使得SCR系统可布置于低烟温区域(如除尘后),增强了工艺灵活性;同时,抗中毒催化剂的研发通过改进载体结构与活性组分,显著提升了催化剂的耐硫、耐碱及抗水性能,延长其更换周期。

3.3 干法及半干法脱硫技术优缺点比较分析

干法与半干法脱硫技术是湿法脱硫的重要补充,在特定场景优势显著。该类技术包括循环流化床(CFB)法、喷雾干燥法(SDA)、活性焦(或活性炭)吸附法等。其共同特点是反应无需大量水,副产物为干态粉末,易处理且无废水排放,适用于缺水地区、中小型锅炉及环保要求严的场合。喷雾干燥法用雾化石灰浆液与高温烟气接触,蒸发干燥时完成 SO_2 化学吸收,脱硫效率80%–85%,系统简单、投资低,但石灰利用率和脱硫效率略低于湿法。循环流化床脱硫技术让吸收剂(常用消石灰)在流化状态下与烟气充分接触,脱硫效率最高超90%,负荷适应性好。活性焦(炭)吸附法利用活性焦吸附与催化特性,可同时高效脱除 SO_2 、 NO_x 和