

燃煤锅炉脱硫脱硝除尘超低排放深度治理

徐 艇 吴 欣 周永华
浙江宜成环保设备有限公司 浙江 衢州 324400

摘 要: 本文围绕燃煤锅炉脱硫脱硝除尘超低排放深度治理展开研究, 阐述了SO₂、NO_x、颗粒物的排放特性、危害及影响因素, 解析了国家与地方超低排放标准。重点介绍脱硫、脱硝、除尘核心技术及协同治理方案, 结合工程案例验证治理效果, 分析当前治理中存在的技术、经济、管理难题, 提出针对性对策, 并展望未来智能化、协同化、低碳化发展趋势, 为燃煤锅炉超低排放改造提供理论支撑与实践借鉴。

关键词: 燃煤锅炉; 脱硫; 脱硝; 除尘; 超低排放; 深度治理

引言: 随着环保政策持续收紧及“双碳”目标推进, 燃煤锅炉作为大气污染物主要排放源, 其超低排放治理成为生态环境改善的关键举措。当前, 燃煤锅炉排放的SO₂、NO_x、颗粒物易引发酸雨、雾霾等环境问题, 危害生态与人体健康。为落实超低排放标准, 破解企业治理难题, 推动锅炉绿色低碳转型, 本文系统探讨其深度治理技术、工程实践及发展方向, 助力企业实现合规排放与可持续发展。

1 燃煤锅炉污染物排放特性及超低排放标准

1.1 燃煤锅炉主要污染物来源及危害

(1) 二氧化硫(SO₂)的来源及危害: 主要来自煤炭中硫分的燃烧氧化, 是形成酸雨的主要成因, 会腐蚀建筑设施、破坏土壤和水体, 同时刺激人体呼吸系统, 引发呼吸道疾病, 还会降低农作物产量和品质。(2) 氮氧化物(NO_x)的来源及危害: 源于高温燃烧时空气中氮气与氧气的反应及煤炭中氮分的转化, 会加剧酸雨形成, 诱发光化学烟雾, 损害人体呼吸系统和视觉系统, 还会加剧全球变暖。(3) 颗粒物(PM)的来源及危害: 主要是煤炭燃烧产生的飞灰和未燃尽碳颗粒, 细颗粒物(PM_{2.5})可穿透人体肺部, 引发肺部疾病和心血管问题, 还会降低大气能见度, 造成雾霾天气^[1]。

1.2 燃煤锅炉污染物排放影响因素

(1) 煤质特性对排放的影响: 煤中硫分、氮分越高, 污染物生成量越大; 灰分过高会增加颗粒物排放, 水分过高则降低燃烧效率, 间接增加污染物排放。(2) 锅炉运行参数对排放的影响: 燃烧温度过高会加剧NO_x生成, 氧气浓度不合理会导致燃烧不充分, 增加颗粒物和CO排放, 炉膛压力异常会影响污染物排放稳定性。(3) 燃烧方式对排放的影响: 传统燃烧方式易导致燃烧不充分, 污染物排放偏高; 分段燃烧、低氮燃烧等优化方式可有效抑制NO_x和颗粒物生成。

1.3 燃煤锅炉超低排放相关标准解析

(1) 国家超低排放标准核心要求: 明确燃煤锅炉SO₂、NO_x、颗粒物排放限值, 核心是将排放浓度大幅降低, 要求企业配套高效脱硫、脱硝、除尘设施, 确保稳定达标。(2) 地方超低排放标准补充规定: 结合区域环境容量, 在国家标准基础上进一步收紧限值, 新增无组织排放控制要求, 明确监测系统安装和联网要求。(3) 标准实施的约束与导向作用: 约束企业规范排污, 倒逼企业升级环保设施, 推动清洁煤替代和燃烧技术优化, 助力实现“双碳”目标和生态环境改善。

2 燃煤锅炉脱硫脱硝除尘超低排放核心技术

2.1 超低排放脱硫技术

(1) 石灰/石灰石-石膏法脱硫技术及优化: 作为应用最广泛的脱硫技术, 以石灰或石灰石为吸收剂, 与烟气中SO₂反应生成石膏, 实现资源化利用。优化方向聚焦于提升吸收剂利用率, 通过改进雾化喷嘴、优化反应塔流场, 减少结垢堵塞, 同时降低脱硫剂消耗和废水排放量, 确保脱硫效率稳定达到99%以上, 满足超低排放要求。(2) 其他高效脱硫技术应用: 氨法脱硫以氨水为吸收剂, 反应产物为硫酸铵, 可作为肥料回收, 适合高硫煤工况, 但需控制氨逃逸; 半干法脱硫采用石灰粉喷射+布袋除尘一体化工艺, 投资低、占地小, 适合中小型锅炉改造, 脱硫效率可达95%以上, 适配不同规模锅炉的环保需求。(3) 脱硫技术深度治理关键难点及突破方向: 难点在于低浓度SO₂深度去除、脱硫废水零排放及系统稳定性控制。突破方向为研发高效吸收剂和催化氧化技术, 优化系统集成设计, 实现脱硫废水资源化处理, 解决高湿烟气腐蚀和结垢问题, 提升系统长期稳定运行能力^[2]。

2.2 超低排放脱硝技术

(1) 选择性催化还原(SCR)脱硝技术优化: 核心

是通过催化剂作用,使 NO_x 与氨气在低温(280-420℃)下反应生成氮气和水,优化重点是研发低温高效催化剂,降低反应温度,减少催化剂失活,同时优化喷氨格栅设计,避免氨逃逸,确保脱硝效率稳定在90%以上。

(2) 选择性非催化还原(SNCR)及组合脱硝技术: SNCR无需催化剂,在850-1100℃高温下喷入氨水还原 NO_x ,投资低但脱硝效率有限(60%-80%);常与SCR组合使用,形成SNCR+SCR协同工艺,兼顾投资成本与脱硝效果,适配高 NO_x 排放锅炉的深度治理。(3) 低氮燃烧技术与末端脱硝协同治理:低氮燃烧通过优化燃烧方式、控制炉膛温度和氧气浓度,从源头减少 NO_x 生成,与末端SCR/SNCR脱硝协同,可大幅降低末端处理负荷,减少氨消耗和二次污染,实现 NO_x 排放浓度持续达标,是超低排放的经济高效路径。

2.3 超低排放除尘技术

(1) 袋式除尘、电袋复合除尘技术应用:袋式除尘通过滤袋过滤颗粒物,除尘效率可达99.9%以上,能有效去除 $\text{PM}_{2.5}$,适合低浓度颗粒物治理;电袋复合除尘结合电除尘和袋式除尘优势,前期用电除尘去除大颗粒,后期用滤袋拦截细颗粒,兼具处理量大、效率高、运行稳定的特点,广泛应用于大型燃煤锅炉。(2) 除尘系统高效运行调控方法:通过优化清灰周期和清灰强度,避免滤袋过度清灰或积灰堵塞,延长滤袋使用寿命;实时监测烟气流量、温度和颗粒物浓度,动态调整系统运行参数,确保除尘效率稳定,降低运行能耗^[3]。(3) 细微颗粒物深度去除技术:针对 $\text{PM}_{2.5}$ 等细微颗粒物,采用覆膜滤袋、静电凝聚等技术,通过改善滤袋过滤性能、促使细微颗粒凝聚成大颗粒,提升去除效率,确保颗粒物排放浓度控制在 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,满足超低排放限值。

2.4 脱硫脱硝除尘协同治理技术

(1) 协同治理技术原理与优势:原理是整合脱硫、脱硝、除尘工艺,利用各系统之间的协同作用,如脱硫过程中产生的碱性物质辅助去除部分 NO_x 和颗粒物,脱硝过程中抑制 SO_2 氧化,减少二次污染。优势在于简化工艺流程、降低投资和运行成本,提升整体治理效率,避免单一系统运行冲突^[4]。(2) 协同治理系统集成与优化:核心是优化工艺衔接,合理布局脱硫、脱硝、除尘设备顺序,减少烟气阻力和能量损耗;采用智能化控制系统,实现各系统参数联动调控,解决协同过程中氨逃逸、结垢等问题,确保整个系统高效、稳定运行,满足燃煤锅炉超低排放全面达标要求。

3 燃煤锅炉超低排放深度治理工程实践与案例分析

3.1 工程实践概况

(1) 工程背景与治理目标:随着环保政策不断收紧,燃煤锅炉超低排放成为企业合规运营的核心要求,本次工程针对某工业园区3台130t/h燃煤锅炉开展深度治理,核心目标是将 SO_2 、 NO_x 、颗粒物排放浓度分别控制在 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 、 $10\text{mg}/\text{m}^3$ 以下,实现长期稳定达标,同时降低治理能耗和运行成本,推动企业绿色转型。(2) 原排放现状与治理难点:原锅炉采用传统脱硫脱硝除尘工艺,运行年限较长,污染物排放浓度超标,其中 SO_2 排放浓度约 $120\text{mg}/\text{m}^3$ 、 NO_x 约 $180\text{mg}/\text{m}^3$ 、颗粒物约 $30\text{mg}/\text{m}^3$;治理难点在于设备老旧改造空间有限,需在不影响锅炉正常生产的前提下完成改造,同时解决高湿烟气腐蚀、氨逃逸控制及系统协同运行不稳定等问题。

3.2 深度治理方案设计与实施

(1) 脱硫脱硝除尘技术选型:结合工程实际,脱硫采用石灰/石灰石-石膏法优化工艺,提升吸收剂利用率;脱硝采用SNCR+SCR组合工艺,搭配低温高效催化剂,降低反应温度;除尘采用电袋复合除尘技术,兼顾处理效率与运行稳定性,实现多技术协同适配。(2) 系统改造与施工要点:施工前做好设备拆解与场地规划,优先改造老旧脱硫塔、脱硝反应器及除尘设备,优化管道布局减少烟气阻力;施工过程中严格控制焊接质量和设备安装精度,做好防腐、防结垢处理,避免施工对锅炉生产造成干扰,分阶段完成改造任务。(3) 调试与试运行过程:改造完成后,分阶段开展系统调试,优化脱硫剂用量、喷氨量及清灰周期等参数;试运行期间持续监测烟气指标、设备运行状态,及时排查结垢、泄漏等问题,调整运行参数,确保系统连续稳定运行,试运行周期累计达到30天。

3.3 治理效果检测与分析

(1) 污染物排放浓度检测结果:经第三方机构检测,试运行期间锅炉 SO_2 平均排放浓度 $28\text{mg}/\text{m}^3$ 、 NO_x 平均 $42\text{mg}/\text{m}^3$ 、颗粒物平均 $8\text{mg}/\text{m}^3$,均低于超低排放限值,检测数据稳定,无超标现象。(2) 治理效率与能耗分析:脱硫效率达到98.5%、脱硝效率92%、除尘效率99.9%,治理效率满足设计要求;系统运行能耗较改造前降低8%,脱硫剂、氨等耗材消耗减少10%,有效降低了企业运行成本。(3) 与超低排放标准的对比验证:各项污染物排放浓度均大幅低于国家及地方超低排放标准,其中 SO_2 、 NO_x 、颗粒物排放浓度分别较限值降低20%、16%、20%,验证了治理方案的可行性和有效性,实现了深度治理目标。

3.4 典型案例借鉴与启示

(1) 不同行业燃煤锅炉治理案例对比:工业锅炉案

例采用组合脱硝+电袋除尘工艺,适配高负荷运行需求;供暖锅炉案例采用半干法脱硫+低氮燃烧协同工艺,兼顾投资与治理效果;化工锅炉案例侧重废水零排放,实现脱硫废水资源化,不同案例技术选型贴合行业特性。

(2)案例中存在的问题与改进措施:部分案例存在氨逃逸超标、滤袋使用寿命短等问题;改进措施包括优化喷氨格栅设计、选用防腐耐磨滤袋,建立智能化监测系统,实时调控运行参数,加强设备日常运维,提升系统长期稳定运行能力,为同类工程提供借鉴。

4 燃煤锅炉超低排放深度治理的问题与对策建议

4.1 深度治理过程中存在的主要问题

(1)技术层面存在的问题:部分老旧锅炉改造适配性差,现有脱硫脱硝除尘技术存在协同性不足、低温工况效率衰减等问题,细微颗粒物深度去除技术不成熟,部分工艺易出现结垢、氨逃逸等二次污染隐患,技术适配性与稳定性有待提升。(2)经济层面存在的问题:深度治理前期设备改造投资额度大,中小规模企业难以承担;后期运维成本高,脱硫剂、催化剂等耗材消耗量大,设备检修维护费用偏高,部分企业因成本压力难以持续稳定运行治理系统。(3)管理与政策层面存在的问题:部分企业环保管理体系不完善,缺乏专业运维人员,监测数据弄虚作假现象偶有发生;区域政策执行标准不统一,部分地方配套扶持政策不到位,政策衔接不顺畅,影响治理工作推进。

4.2 针对性解决对策

(1)技术优化与创新对策:加大低温高效、协同治理技术研发投入,优化老旧设备改造方案,提升技术适配性;研发新型高效耗材,解决二次污染问题,推广智能化监测与调控技术,提升系统运行稳定性。(2)成本控制与效益提升对策:政府加大对中小企业的资金补贴与税收优惠,引导企业抱团改造降低投资成本;优化运维模式,推广耗材回收利用技术,提升资源利用率,降低运维成本,实现环保与效益双赢^[5]。(3)管理完善

与政策保障对策:完善企业环保管理制度,加强专业运维人员培训,强化监测数据监管,严厉打击弄虚作假行为;统一区域政策执行标准,完善配套扶持政策,加强政策衔接,为治理工作提供坚实保障。

4.3 未来发展趋势展望

(1)技术发展趋势:智能化方面,依托物联网、大数据实现系统精准调控;协同化方面,深化脱硫脱硝除尘及余热回收协同治理;低碳化方面,结合清洁煤替代、碳捕集技术,实现环保与减碳协同推进。(2)政策与行业发展趋势:政策层面将进一步收紧排放限值,强化全流程监管,完善激励与约束机制;行业层面将推动企业兼并重组与技术升级,培育专业化环保运维企业,推动燃煤锅炉超低排放治理向常态化、精细化发展。

结束语

燃煤锅炉脱硫脱硝除尘超低排放深度治理是一项系统性工程,需兼顾技术适配、成本控制与政策落实。本文通过梳理核心技术、分析工程案例、破解治理难题,明确了技术优化、成本管控与政策保障的重要性。未来,需持续推动技术创新与协同升级,完善政策体系与管理机制,强化企业主体责任,推动治理工作向常态化、精细化发展,助力实现生态环境保护与能源高效利用的双赢目标。

参考文献

- [1]闫书山,赵海燕.焦炉烟道废气脱硫脱硝技术在邢钢焦化厂的应用[J].煤化工,2021,24(5):65-67.
- [2]刘涛.循环流化床炉烟气脱硫的深度治理及优化[J].设备管理与维修,2024,44(2):174-177.
- [3]陈月莉."高温电除尘器+SCR脱硝"一体化技术之除尘器的设计与安装[J].新世纪水泥导报,2022,26(2):63-65.
- [4]倪少军,陈明辉,李双良.燃煤锅炉烟气脱硫除尘环保设施改造及应用[J].价值工程,2021,38(14):172-175.
- [5]史会堂,乔文广.燃煤锅炉的烟气治理和脱硫脱硝关键技术研究[J].资源节约与环保,2022,9(4):62-66.