

循环流化床锅炉烟气脱硝工艺探究

刘 军

内蒙古华电乌达热电有限公司 内蒙古 乌海 016000

摘要: 针对循环流化床锅炉烟气高尘、低温、 NO_x 初始排放浓度波动大的特性,结合热电公司实际应用场景,探究其烟气脱硝工艺的选型、应用及优化方法。首先分析锅炉烟气生成特性与 NO_x 生成机理,明确燃料型 NO_x 为主要控制对象;随后分类阐述炉内、炉外及联合脱硝工艺的特点,深入探究SNCR、SCR及联合工艺的现场配置与运行细节;最后提出运行优化策略及常见故障处理方案。研究表明,联合脱硝工艺能兼顾脱硝效率与成本,适配不同规模机组需求,可为循环流化床锅炉脱硝系统的高效、稳定运行提供实践参考。

关键词: 循环流化床锅炉; 烟气脱硝; 工艺分类; 工艺探究

引言: 随着环保政策日趋严苛,火电厂 NO_x 排放管控标准不断提高,循环流化床锅炉因燃烧效率高、燃料适用性广,在热电行业应用广泛,但其烟气特性给脱硝工艺带来特殊挑战。当前脱硝技术种类繁多,不同工艺的适配性、投资及运维成本差异较大,热电公司需结合自身机组规模与排放要求,选择合适的脱硝方案。基于此,本文系统探究循环流化床锅炉烟气脱硝基础理论、主流工艺及运行优化方法,解决实际应用中工艺选型、故障处理等问题,助力热电行业实现环保达标与节能降耗。

1 循环流化床锅炉烟气特性及脱硝基础理论

1.1 循环流化床锅炉工作原理与烟气生成

循环流化床锅炉以气固两相流化燃烧为核心,燃料与床料在炉膛内被一次风、二次风协同流化,形成“炉膛燃烧-分离器分离-返料器回送”的闭环系统,床温稳定控制在 $850\sim 950^\circ\text{C}$ 。其工作原理核心是利用流化态强化燃料燃烧与传热,燃料在炉膛内充分燃尽的同时,伴随烟气生成。烟气主要源于燃料氧化反应,成分以 NO_x 、 SO_2 、粉尘、 CO_2 为主,还含微量 HCl 、 HF 等污染物,其中 NO_x 初始排放浓度 $200\sim 800\text{mg}/\text{m}^3$,烟气含尘量高($1000\sim 3000\text{mg}/\text{m}^3$)、湿度较高,且烟气流速波动较小,这些特性直接决定脱硝工艺的选型与运行参数。

1.2 烟气中氮氧化物(NO_x)的生成机理

循环流化床锅炉烟气中 NO_x 主要分为三类,其中燃料型 NO_x 占比 $70\%\sim 90\%$,是核心控制对象。燃料型 NO_x 由燃料中含氮有机化合物(如吡啶、喹啉)在燃烧中分解为 NH_3 、 HCN 等中间产物,再经氧化生成,受床温、过量空气系数影响显著。热力型 NO_x 由空气中 N_2 在高温下与 O_2 反应生成,因炉膛温度低于 1000°C ,其生成量占比不足 15% 。快速型 NO_x 由 CH 自由基与 N_2 快速反应生成,占比低于 5% ,对整体排放影响可忽略,其生成速率与燃料燃

烧强度正相关。

1.3 脱硝工艺核心原理

脱硝工艺核心是通过物理或化学作用将 NO_x 转化为无害的 N_2 和 H_2O ,主流分为还原法与氧化法。还原法是工业主流,核心原理是在特定温度、催化剂(或无催化剂)条件下,利用 NH_3 、尿素等还原剂,与 NO_x 发生还原反应,其中选择性催化还原(SCR)、选择性非催化还原(SNCR)应用最广。氧化法核心是利用氧化剂(如 NaClO_2 、 O_3)将 NO_x 氧化为高价态氮氧化物,再通过吸收、吸附等方式去除,适用于低浓度 NO_x 处理,两种工艺均需适配循环流化床锅炉烟气高尘、低温的特性^[1]。

2 循环流化床锅炉主流烟气脱硝工艺分类及特点

2.1 炉内脱硝工艺

炉内脱硝是循环流化床锅炉脱硝的基础环节,无需增设独立脱硝装置,直接整合于锅炉燃烧系统,适配低成本、易运维的运行需求,应用最为普遍。(1)低氮燃烧脱硝工艺:主流采用分级配风+床温精准调控模式,将二次风分2-3级送入炉膛,严格控制过量空气系数在 $1.1\sim 1.2$ 之间,同时稳定床温在 $850\sim 900^\circ\text{C}$,有效抑制燃料型 NO_x 生成。该工艺无额外设备投资,无需消耗任何药剂,运维成本极低,是所有循环流化床锅炉的基础脱硝手段,可适配不同负荷工况下的稳定运行需求。(2)炉内喷氨(尿素)脱硝工艺:针对 NO_x 初始排放较高的锅炉,在炉膛上部布置专用喷射装置,喷入尿素溶液,利用炉膛高温完成热解还原反应。其设备投资低、操作流程简单,无需专人值守,可快速提升脱硝效果,但需精准控制喷氨量,避免氨逃逸腐蚀后续省煤器、空气预热器,多用于中小型锅炉脱硝改造场景。

2.2 炉外脱硝工艺

炉外脱硝用于 NO_x 深度治理,需配套独立脱硝系统,

满足环保排放达标要求 ($\text{NO}_x \leq 50\text{mg}/\text{m}^3$), 是大型锅炉脱硝的核心方式。(1) 选择性非催化还原 (SNCR) 脱硝工艺: 应用广泛, 无需催化剂, 在锅炉出口烟道喷射尿素或氨水溶液, 控制反应温度在 $800\text{--}1100^\circ\text{C}$ 。其设备投资中等, 运维操作简单, 脱硝效率可达 $60\%\text{--}80\%$, 但氨氮比控制难度较大, 易出现氨逃逸现象, 多用于对脱硝效率要求中等的锅炉场景。(2) 选择性催化还原 (SCR) 脱硝工艺: 大型锅炉主流选择, 配套专用催化剂模块, 反应温度控制在 $300\text{--}400^\circ\text{C}$, 需在烟道中增设催化剂反应器。该工艺脱硝效率可达 $85\%\text{--}95\%$, 排放指标稳定, 能满足严苛环保要求, 但设备投资较高, 催化剂需定期更换 (每3-5年一次), 运维成本偏高, 多用于大型联产项目。

3.3 联合脱硝工艺

联合脱硝是应对严格环保标准的优选方案, 结合炉内与炉外工艺优势, 兼顾成本与脱硝效率, 适用于 NO_x 排放要求严苛的场景。(1) SNCR-SCR联合脱硝工艺: 应用最广泛, 采用炉内低氮燃烧+炉外SNCR预处理+SCR深度脱硝的组合模式, 既控制初始投资成本, 又能保障脱硝效率, 整体脱硝效率可达 90% 以上, 氨逃逸可控制在 3ppm 以内, 适配大多数锅炉达标需求。(2) 炉内喷氨+SNCR联合工艺: 适用于中小型锅炉, 投资成本低, 运维难度小, 脱硝效率可达 $75\%\text{--}85\%$, 无需更换大量现有设备, 可利用原有炉内喷射系统改造升级, 性价比突出, 是中小型锅炉脱硝改造的优选方案。此外, 部分大型锅炉还会采用低氮燃烧+SNCR-SCR联合模式, 进一步提升脱硝稳定性, 降低运维成本^[2]。

3 循环流化床锅炉主流烟气脱硝工艺深入探究

3.1 循环流化床锅炉SNCR脱硝工艺深入探究

SNCR脱硝工艺是现场应用广泛的炉外脱硝技术, 适配中低浓度 NO_x 治理, 改造难度低、投资适中, 贴合现场实际运行需求, 无需复杂运维, 在中小型机组中应用尤为普遍。(1) 工艺现场配置: 现场多选用尿素作为还原剂, 配套储存罐、计量泵、多点喷射格栅等设备, 喷射格栅多布置在锅炉出口烟道与省煤器入口衔接处, 无需额外占用场地, 可利用现有烟道改造, 改造周期短, 不影响机组正常运行。还原剂选用质量分数 $20\%\text{--}30\%$ 的尿素溶液, 避免结晶堵塞管道, 适配连续运行工况, 储存罐配备加热装置, 防止冬季低温结晶, 同时配套过滤装置, 过滤溶液中的杂质, 避免堵塞计量泵和喷射喷嘴。(2) 现场运行控制: 反应温度严格控制在 $800\text{--}1100^\circ\text{C}$, 贴合循环流化床锅炉尾部烟气温度, 无需额外增设加热设备, 可通过烟道温度监测仪表实时监控, 若温度波动超出范围, 可通过调整烟气旁路开度进行微调。氨氮比

控制在 $1.0\text{--}1.3$, 通过在线监测仪表实时采集 NO_x 浓度数据, 自动调整计量泵转速, 精准控制喷射量, 避免氨逃逸超标, 同时配备手动调节备用模式, 应对在线监测故障时的应急调控。(3) 现场应用细节: 设备运维简单, 无需专人专职值守, 仅需定期检查喷射格栅堵塞情况、补充尿素溶液, 定期清理管道积垢, 检查计量泵运行稳定性。脱硝效率受烟气流量、温度波动影响较大, 现场多配套氨逃逸在线监测仪, 实时监控数据, 及时调整参数, 同时定期校验监测仪表, 确保数据精准, 避免因仪表误差导致参数失控^[3]。

3.2 循环流化床锅炉SCR脱硝工艺深入探究

SCR脱硝工艺是深度脱硝的核心技术, 适配严苛环保排放要求, 多用于大型机组, 运行稳定、脱硝效率高, 贴合现场深度达标需求, 是大型机组的首选深度脱硝工艺。(1) 工艺现场配置: 配套催化剂模块、反应器、还原剂喷射系统及预处理装置, 催化剂多选用蜂窝式或板式低温型催化剂, 布置在除尘器之后, 避免粉尘磨损催化剂, 延长使用寿命, 催化剂模块采用模块化设计, 便于现场更换和检修。反应器采用立式布置, 节省场地, 适配现场设备布局, 还原剂喷射系统布置在反应器入口前端, 确保还原剂与烟气充分混合, 同时配套静态混合器, 提升混合效果。(2) 运行参数控制: 反应温度稳定控制在 $300\text{--}400^\circ\text{C}$, 通过烟气旁路调节温度, 确保催化剂活性, 若烟气温度过低, 可开启旁路加热装置应急调控。氨氮比控制在 $0.9\text{--}1.1$, 精准控制还原剂喷射量, 氨逃逸可稳定在 3ppm 以内, 符合现场设备保护要求。现场定期检测催化剂活性, 采用取样检测法, 及时发现失活、老化的催化剂模块, 避免影响脱硝效率。(3) 现场应用特点: 设备投资较高, 单台大型锅炉改造费用偏高, 运维成本高于SNCR工艺, 需配备专业运维人员, 定期清理反应器积灰, 检查催化剂磨损、堵塞情况, 催化剂使用寿命 $3\text{--}5$ 年, 更换时需停机作业, 提前制定停机检修计划, 避免影响机组正常供能。同时配套催化剂再生装置, 对轻度失活的催化剂进行再生处理, 降低运维成本。

3.3 循环流化床锅炉联合脱硝工艺探究

联合脱硝工艺结合各类工艺优势, 兼顾成本与效率, 是应对严苛环保标准的优选方案, 适配不同规模机组需求, 贴合现场实际改造和运行需求。(1) SNCR-SCR联合脱硝工艺应用最广泛, 采用“炉内低氮燃烧+SNCR预处理+SCR深度脱硝”模式, 可利用原有系统整合升级, 改造周期短、烟气阻力小, 不影响机组负荷, 整体脱硝效率达 90% 以上, 氨逃逸控制在 3ppm 以内, 配套在线监测系统实时调控参数。(2) 炉内喷氨+SNCR联合工艺适

用于中小型机组,可依托原有炉内喷射系统改造,投资低、运维简单、性价比高,通过优化喷射点位与联动控制,避免氨逃逸叠加,脱硝效率75%~85%,改造可不停机,减少对机组运行的影响。(3)低氮燃烧+SNCR-SCR联合工艺多用于大型机组,强化炉内预处理抑制NO_x初始生成,联动控制炉内与炉外参数,实现全工况稳定达标,满足NO_x ≤ 50mg/m³要求,同时减少还原剂消耗与催化剂损耗,延长设备寿命,适配大型机组长期连续运行需求^[4]。

4 脱硝工艺运行优化与故障处理

4.1 脱硝工艺运行优化策略

优化策略以精准调控、降低运维成本为核心,适配锅炉不同负荷运行需求,无需复杂改造。(1)参数适配优化:根据锅炉负荷变化,同步调整还原剂喷射量,低负荷时将氨氮比下调至0.9~1.1,高负荷时调整为1.1~1.3,避免氨逃逸与脱硝效率不足;SNCR工艺重点稳定反应温度在850~1050℃,SCR工艺控制温度在320~380℃,确保催化剂活性。(2)设备运维优化:定期清理喷射格栅、管道积垢,避免堵塞影响喷射效果;SCR工艺定期检测催化剂活性,及时更换失活模块,SNCR工艺定期校准计量泵精度,减少参数偏差。

4.2 常见运行故障及处理措施

聚焦现场高频故障,给出简洁可行的处理方案,避免影响机组连续运行。(1)氨逃逸超标:立即降低还原剂喷射量,检查喷射格栅是否堵塞、雾化效果是否良好,校准氨氮比参数,同时清理空气预热器积灰,防止腐蚀加剧;若监测仪表异常,及时校准或更换。(2)脱硝效率下降:排查还原剂喷射均匀性,清理堵塞的喷射喷嘴,检查催化剂(SCR工艺)活性,若活性不足则更换;调整烟气流量、温度参数,确保还原剂与烟气充分混合。(3)设备堵塞与腐蚀:定期清理管道、喷射格栅积垢,选用耐腐蚀材质配件;冬季做好尿素溶液保温,防止结晶堵塞,发

现腐蚀部位及时修补或更换。

4.3 运行维护与节能降耗措施

贴合现场运维实际,简化流程、降低成本,适配热电厂连续运行需求。(1)日常维护:建立定期巡检制度,重点检查还原剂储存罐、计量泵、反应器等设备运行状态,及时补充还原剂,排查泄漏隐患。(2)节能降耗:优化还原剂用量,避免浪费;SCR工艺合理控制烟气旁路开度,减少能耗;利用锅炉余热,无需额外增设加热装置,降低运行成本^[5]。

结束语:本文围绕循环流化床锅炉烟气脱硝工艺展开全面探究,明确了烟气特性与NO_x生成规律,梳理了各类脱硝工艺的现场应用特点,提出了针对性的运行优化与故障处理措施。实践表明,SNCR工艺适配中小型机组低成本需求,SCR工艺满足大型机组深度脱硝要求,联合工艺是兼顾效率与成本的优选方案。结合热电厂实际工况,合理选型、精准调控,可实现脱硝系统稳定高效运行。未来可进一步优化催化剂性能与工艺组合模式,降低运维成本,为循环流化床锅炉脱硝技术的升级与推广提供更多实践支撑。

参考文献:

- [1]贾晓斌.循环流化床锅炉烟气脱硝技术改造与应用[J].今日自动化,2022(7):23-25.
- [2]孟祥胜.烟气循环流化床脱硫脱硝一体化技术研究[J].山西化工,2025,45(4):138-141.
- [3]臧俊荣.循环流化床锅炉烟气脱硝工艺研究[J].电力系统装备,2023(2):86-88.
- [4]周启.循环流化床锅炉烟气脱硝工艺探究[J].当代化工研究,2021(7):136-137.
- [5]蔡晋,吴玉新,张纛,马强强,刘青,吕俊复,杨海瑞.循环流化床锅炉脱硝工艺经济性分析[J].洁净煤技术,2021,27(4):97-104.