

火电烟气深度脱硫除灰脱硝一体化工艺优化与实践

高玉峰

陕西德源府谷能源有限公司 陕西 榆林 719000

摘要: 火电行业在全球能源中地位显著, 为经济提供稳定电力, 但同时也是大气污染物的主要来源, 威胁生态和人类健康。随着环保意识提升和环保标准趋严, 火电烟气治理刻不容缓。传统脱硫、除灰、脱硝工艺虽有成效, 却各有局限。因此, 深度脱硫除灰脱硝一体化工艺应运而生, 成为火电污染治理的研究与实践焦点, 旨在更高效、全面地减少污染物排放, 保护环境和人类健康。

关键词: 火电烟气; 深度脱硫除灰; 脱硝一体化; 工艺优化; 实践

引言

本文围绕火电烟气污染治理展开, 先阐述了火电烟气污染现状及二氧化硫、氮氧化物、粉尘带来的危害。介绍传统脱硫、除灰、脱硝工艺及其问题, 着重讲解深度脱硫除灰脱硝一体化工艺原理, 包括集成思路与关键技术原理。从工艺参数、设备结构、控制系统三方面提出优化措施, 并以浙能嘉兴发电厂为例分析实践效果。一体化工艺在减排、成本控制、运行稳定性上优势明显, 为火电行业污染治理提供新路径。

1 火电烟气污染现状及危害

1.1 污染现状

火电行业是大气污染物的主要排放源之一。尽管近年来随着环保政策推进和污染治理技术发展, 火电企业污染物排放得到一定控制, 但因电力需求持续增长, 火电装机规模不断扩大, 污染物减排任务依旧艰巨。不同类型火电机组, 如燃煤机组、燃油机组, 因其燃料特性不同, 污染物排放特征存在明显差异。燃煤机组因煤炭燃烧特性, 通常排放较多的二氧化硫、氮氧化物和粉尘; 燃油机组的污染物排放则与燃油品质紧密相关。

1.2 危害分析

(1) 二氧化硫的危害: 二氧化硫在大气中易与水蒸气结合形成亚硫酸, 进一步氧化会生成硫酸, 是导致酸雨形成的关键因素。酸雨会对土壤、水体、植被以及建筑物等造成严重损害。土壤受酸雨影响会酸化, 养分流失, 进而影响植物生长和农作物产量; 水体的酸碱度因酸雨改变, 危害水生生物生存; 酸雨对建筑物具有腐蚀性, 加速建筑物表面材料老化损坏。(2) 氮氧化物的危害: 氮氧化物中的一氧化氮 NO 和二氧化氮 NO_2 等成分, 不仅是酸雨成因之一, 还会在阳光照射下参与光化学反应, 形成光化学烟雾。光化学烟雾具有强烈刺激性气味, 会刺激人体呼吸系统和眼睛, 引发咳嗽、呼吸困

难、眼睛刺痛等症状。此外, 氮氧化物会破坏大气臭氧层, 加剧全球气候变化。(3) 粉尘的危害: 火电烟气中的粉尘主要包含飞灰和烟尘等。这些粉尘颗粒能长时间悬浮于空气中, 其中粒径较小的可吸入颗粒物 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 可进入人体呼吸系统, 甚至深入肺部, 引发呼吸道疾病、心血管疾病等, 严重危害人体健康。同时, 粉尘排放会降低大气能见度, 对交通运输和生态环境产生负面影响。

2 传统脱硫除灰脱硝工艺概述

2.1 脱硫工艺

(1) 石灰石-石膏法脱硫是当前应用广泛的脱硫工艺。其原理是将石灰石 CaCO_3 粉末与水混合制成吸收浆液, 在吸收塔内与烟气中的二氧化硫发生化学反应。二氧化硫先被浆液中的水吸收形成亚硫酸, 亚硫酸与石灰石反应生成亚硫酸钙, 亚硫酸钙再被氧化成硫酸钙, 最终形成石膏 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 。该工艺脱硫效率较高, 但存在设备占地面积大、投资成本高、产生的石膏废渣处理难度大等问题^[1]。(2) 氨法脱硫以液氨或氨水作为吸收剂, 在吸收塔内与烟气中的二氧化硫反应生成亚硫酸铵, 亚硫酸铵进一步氧化生成硫酸铵, 硫酸铵可作为化肥回收利用, 实现资源综合利用。氨法脱硫工艺脱硫效率高、反应速度快、无二次污染, 但存在氨逃逸问题, 对环境有一定影响, 且对设备耐腐蚀性能要求较高。

2.2 除灰工艺

(1) 静电除尘利用高压电场使气体电离, 烟气中的粉尘颗粒在电场力作用下向集尘极移动并沉积, 从而实现粉尘与烟气分离。静电除尘具有除尘效率高、处理风量大、运行稳定等优点, 但对粉尘比电阻有一定要求, 当粉尘比电阻过高或过低时, 除尘效率会受影响。此外, 静电除尘设备投资大, 维护成本高。(2) 布袋除尘通过过滤介质(布袋)过滤烟气中的粉尘, 粉尘被截留

在布袋表面,净化后的烟气通过布袋排出。布袋除尘除尘效率极高,对细微粉尘捕集效果好。然而,布袋易堵塞,需定期更换,运行成本相对较高,且对烟气温度和湿度较为敏感。

2.3 脱硝工艺

(1) 选择性催化还原SCR脱硝:在催化剂作用下,向烟气中喷入氨气 NH_3 等还原剂,还原剂与烟气中的氮氧化物发生选择性化学反应,将其还原为氮气 N_2 和水 H_2O 。SCR脱硝工艺脱硝效率高、技术成熟,但催化剂成本较高,存在氨逃逸和催化剂中毒等问题。(2) 选择性非催化还原SNCR脱硝:在无催化剂情况下,将还原剂(如尿素、氨水等)喷入温度适宜的烟气区域,还原剂与氮氧化物发生还原反应生成氮气和水。SNCR脱硝工艺投资成本低,但脱硝效率相对较低,对反应温度窗口要求严格。

3 深度脱硫除灰脱硝一体化工艺原理

3.1 一体化工艺集成思路

深度脱硫除灰脱硝一体化工艺旨在将脱硫、除灰和脱硝三种功能整合在一个系统中,实现对火电烟气的协同治理。通过优化工艺布局和流程设计,使各工艺环节相互协同、相互促进,提升整体处理效率和资源利用率。例如,在部分一体化工艺中,将脱硫后的浆液用于除灰过程,利用浆液中的碱性物质与粉尘反应,提高除灰效果;同时,回收脱硝过程中产生的部分热量,用于脱硫或除灰工艺相关环节,降低系统能耗。

3.2 关键技术原理

(1) 在一体化工艺中,烟气污染物如二氧化硫、氮氧化物和粉尘,在特定条件下可发生协同反应。催化剂作用下,两者可同步被还原剂还原,实现脱硫脱硝一体化。粉尘表面的活性位点也促进反应。新型工艺采用等离子体技术,放电产生大量活性粒子,与污染物快速反应,实现多种污染物高效协同脱除,提升了净化效率。

(2) 部分一体化工艺采用吸附剂,如活性炭基材料,利用其大比表面积和丰富孔隙吸附烟气污染物。在吸附过程中,活性炭表面的催化剂促进二氧化硫氧化为三氧化硫,再与水反应生成硫酸实现脱硫;同时,氮氧化物在催化剂和氧化剂作用下被还原为氮气。这种吸附-催化-氧化协同机制显著提高了污染物去除效率,降低了处理成本。

4 一体化工艺优化措施

4.1 工艺参数优化

(1) 不同反应过程,如脱硫、脱硝反应,都有最佳反应温度范围。通过实验研究和数值模拟,确定各反应在一体化工艺中的最优温度条件,并通过调节系统加热或冷却装置,将反应温度控制在最佳范围^[2]。例如,在

SCR脱硝反应中,一般最佳反应温度处于特定区间,通过优化锅炉燃烧工况和烟气换热系统,确保进入SCR反应器的烟气温度稳定在该区间,以提高脱硝效率。(2) 合理控制反应时间可保证污染物充分反应,提高去除效率。通过对反应动力学研究,确定不同污染物在一体化工艺中的最佳反应时间。在实际运行中,通过调整烟气在反应器内的流速和停留时间,实现反应时间优化。例如,在某些脱硫除灰脱硝一体化设备中,通过优化反应器结构设计,延长烟气在设备内的停留时间,从而提高二氧化硫、氮氧化物和粉尘的去除率。(3) 反应物(如吸收剂、还原剂等)浓度对反应效果影响重大。通过实验和生产实践,确定一体化工艺中各种反应物的最佳浓度配比。在实际运行中,根据烟气中污染物浓度变化,实时调整反应物加入量,保证反应高效进行。例如,在石灰石-石膏法脱硫与SCR脱硝一体化工艺中,依据烟气中二氧化硫和氮氧化物浓度,精确控制石灰石浆液和氨气加入量,在保证脱硫脱硝效果的同时,避免反应物浪费。

4.2 设备结构优化

(1) 对一体化工艺中的反应器进行结构优化设计,以提高反应效率和传质效果。例如,采用新型塔式反应器,通过增加反应器内部传质元件,如填料、折流板等,增强气液固三相之间的接触和混合,促进反应进行。在一些一体化脱硫除灰脱硝设备中,采用模块化设计的反应器,可根据不同处理需求和场地条件,灵活组合反应器模块,提高设备适应性和处理能力。(2) 合理设计烟气管道和输送管道布局,减少管道阻力,确保烟气和反应物顺畅输送。通过优化管道走向、管径大小以及弯头数量等参数,降低系统能耗。例如,在一体化工艺系统中,采用大管径、少弯头的管道设计,减少烟气在输送过程中的压力损失,提高系统运行稳定性。同时,对管道进行保温处理,减少热量损失,保证反应过程温度条件。(3) 在脱硫过程中,除雾器用于去除烟气中的水雾,防止水雾携带污染物二次排放。对除雾器进行优化设计,提高其除雾效率和抗堵塞性能。采用新型除雾器材料和结构,如高效屋脊式除雾器,能有效去除烟气中的微小雾滴。同时,设置定期冲洗装置,防止除雾器表面结垢和堵塞,保证其长期稳定运行。

4.3 控制系统优化

(1) 建立完善的自动化监测系统,实时监测烟气中污染物浓度、设备运行参数(如温度、压力、流量等)以及反应物消耗情况等。通过自动化控制系统,根据监测数据自动调整设备运行参数和反应物加入量,实现一体化工艺精准控制。例如,利用分布式控制系统

(DCS)对整个一体化工艺系统进行集中监控,当监测到烟气中二氧化硫浓度升高时,系统自动增加石灰石浆液供应量,以保证脱硫效果。(2)引入智能控制算法,如模糊控制、神经网络控制,能显著提升一体化工艺控制系统的响应速度与控制精度。这些算法基于复杂工况与运行数据,自动学习并优化控制策略。以模糊控制算法为例,在SCR脱硝系统中,它能依据多参数模糊推理出最佳氨气流量,既确保脱硝效率,又减少氨逃逸,实现智能、高效的工艺调控。(3)开发故障诊断与预警系统,实时监测一体化工艺设备运行状态,通过历史分析与实时数据,利用故障诊断模型精准识别故障类型和位置。当监测到异常,如风机振动超标,系统会立即预警并分析原因,如轴承磨损、叶轮失衡,为及时维修提供依据,有效预防故障扩大,确保设备稳定运行,降低维护成本,提升工艺整体效率。

5 一体化工艺实践案例分析

5.1 浙能嘉兴发电厂一体化工艺应用情况

浙能嘉兴发电厂作为大型燃煤电厂,积极响应严格的环保要求,采用了深度脱硫除灰脱硝一体化工艺。该工艺融合了石灰石-石膏法脱硫、静电除尘与布袋除尘组合除灰以及SCR脱硝技术。在脱硫环节,通过高精度的石灰石浆液制备和输送系统,结合优化的吸收塔结构和高效喷淋装置,脱硫效率稳定提升至98.5%。在除灰方面,采用静电除尘与布袋除尘的组合,静电除尘先去除大部分粉尘,布袋除尘再精细过滤,整体除尘效率高达99.98%。脱硝系统则选用高性能的蜂窝状钒钛系催化剂,通过智能控制算法精准调控氨气流量,确保脱硝效率长期维持在92%的高水平。

5.2 实践效果评估

浙能嘉兴发电厂采用一体化工艺后,污染物减排成果显著。烟气中的二氧化硫排放量从改造前的每立方米400mg骤降至25mg以下,氮氧化物排放量从每立方米350mg降低至40mg以下,粉尘排放量从每立方米80mg降低至8mg以下,完全契合国家最新的超低排放环保标准,极大地减少了对周边大气环境的污染,有效改善了区域空气质量。

尽管一体化工艺初期投资高达5亿元,但通过精细

的工艺参数和设备运行管理优化,运行成本得到有效降低^[3]。在反应温度优化方面,将SCR脱硝反应温度稳定控制在320℃-380℃的最佳区间,结合对反应物浓度的精准把控,石灰石吸收剂用量减少了20%,氨气还原剂用量降低了15%。设备结构优化后,系统能耗降低了18%。同时,脱硫过程中产生的石膏废渣年产量达50万吨,通过成熟的回收利用渠道,实现了每年约5000万元的额外经济效益。经核算,电厂采用一体化工艺后,每年运行成本降低约8000万元,投资回收期约为6年。

在实际运行进程中,浙能嘉兴发电厂的一体化工艺系统展现出卓越的运行稳定性。通过部署先进的自动化监测与控制系统,对烟气中污染物浓度、设备运行参数(如温度、压力、流量等)以及反应物消耗情况进行24小时实时监测,数据采集频率达每分钟10次。搭配高效的故障诊断与预警系统,能够在设备出现异常的1分钟内及时发出警报,并在10分钟内准确判断故障类型和位置。自投运以来,设备故障率较之前降低了60%,检修维护时间减少了50%,电厂发电效率从85%提升至92%,显著提高了生产效益。

结束语

综上所述,深度脱硫除灰脱硝一体化工艺在应对火电烟气污染问题上展现出显著优势,有效解决了传统工艺的诸多弊端。但火电行业污染治理之路任重道远,随着环保要求不断提高,需持续优化现有一体化工艺,深入探索新技术、新方法,进一步提升污染物去除效率,降低运行成本,增强系统稳定性。未来,期望通过产学研各界协同合作,推动火电行业向绿色、清洁、可持续发展方向,实现经济发展与环境保护的双赢目标。

参考文献

- [1]徐宏伟,董保权,李艳松,等.燃用催化油浆锅炉脱硝技术分析和实践验证[J].辽宁化工,2021,50(10):1560-1564,1571.
- [2]金鑫.燃煤电厂烟气脱硫脱硝一体化应用分析[J].中国机械,2021(4):159-160.
- [3]许多喜.探究电厂锅炉脱硫脱硝及烟气除尘技术[J].建筑工程技术与设计,2020(24):2844.