

热电锅炉烟气深度治理超超低排放节能技术研究

巫江成 周春光 余浩 姜建浩 叶振华

衢州东港环保热电有限公司 浙江 衢州 324022

【摘要】：针对传统热电锅炉烟气治理系统污染物排放量小、能耗大、工况适应性差的问题，本文对烟气深度治理超超低排放节能技术进行系统的研究。根据热电锅炉变负荷运行的特点，对炉内源头减排、烟气末端深度净化、余热高效回收进行一体化技术改造，创建起脱硫脱硝除尘协同治理工艺，采用智能调节优化策略。工程应用结果表明，经过优化的技术体系可以稳定达到烟尘、二氧化硫、氮氧化物超超低排放标准，并且大幅度减少系统的水、电、汽能耗，提高锅炉的综合运行效率，满足环保达标和节能增效的要求，可以给热电厂行业烟气治理升级改造提供技术参考。

【关键词】：热电锅炉；烟气深度治理；超超低排放；节能技术；协同治理

DOI:10.12417/2705-0998.26.09.001

引言

随着生态环保管控标准不断升级，热电行业烟气污染物排放要求越来越高，常规超低排放标准已经不能满足部分地区严于国标的超超低管控要求。超超低排放是在常规超低排放的基础上进行深度治理升级，核心就是实现污染物的极致减排和系统节能降耗的双管齐下。本文以热电锅炉实际运行工况为基础，将源头控制、末端净化、余热回收、智能调控等技术综合起来，创建出适合热电机组变负荷运行的烟气深度治理节能体系，经由工艺改良、设备更新和系统耦合来解决环保达标和节能运行之间的矛盾，改善热电锅炉烟气治理系统经济性和稳定性。

1 热电锅炉烟气排放与治理现状

1.1 烟气污染物排放特性

热电锅炉以燃煤、生物质耦合燃料为主，运行时的主要污染物为烟尘、二氧化硫、氮氧化物。不同于纯发电机组，热电锅炉受供热负荷的影响，昼夜、季节负荷的波动幅度大，经常处于低负荷、变负荷运行的状态。低负荷工况下，炉内燃烧温度低、氧量分布不均，容易引起不完全燃烧，氮氧化物生成规律紊乱，传统的脱硝系统催化效率大幅度降低。烟气的变化会引起脱硫塔气液比失衡，除尘设备的过滤负荷变化，造成污染物排放稳定性不合格。

1.2 现有治理技术存在的问题

目前我国热电锅炉主要采用 SCR 脱硝、湿法脱硫、布袋除尘的组合工艺来满足常规超低排放的要求，但是不能适应超超低排放标准的要求。一是炉内燃烧优化程度不高，源头污染物控制效果不佳，末端治理设备负荷大。二是 SCR 脱硝系统催化剂匹配度不高，低负荷烟温达不到要求造成脱硝效率下降，喷氨过多引起氨逃逸二次污染。三是湿法脱硫系统换热效率低，烟气除湿、除尘深度不够，细微颗粒物残留控制不好。四是烟气余热回收率低，脱硫后的低温烟气直接排放，大量的低温余热白白浪费掉，系统的能耗较高。第五，各个治理系统

调控独立，没有实现工况联动智能调节，运行的精准度和节能性差。

2 超超低排放节能技术

2.1 炉内燃烧源头减排优化技术

源头减排是削减末端治理压力、达成节能运行的前提。根据热电锅炉变负荷燃烧的特点，改善炉内温度场、氧量场、物料场的分布，采用低氮燃烧改造技术，对锅炉布风系统、风帽组件、燃尽风配比结构进行升级，精确控制炉膛燃烧温度，抑制热力型氮氧化物的产生。改进燃料配比和分层燃烧方式，削减不完全燃烧产物，缩减烟尘最初产生量。同时匹配烟气再循环技术，将部分低温烟气送入炉膛中去，使炉膛的温度分布更加均匀，降低燃烧峰值温度，从源头上减少氮氧化物的生成浓度。经由改造之后，炉内污染物产生的量大大减少，对于后面脱硝、除尘设备的运行负荷起到了很大的缓解作用，大大削减了辅机的能耗和药剂的消耗。

2.2 烟气末端协同深度治理技术

按照超超低排放控制的要求，对脱硝、脱硫、除尘一体化协同治理工艺进行升级，摒弃传统的单独运行方式，使各个系统的参数互相配合，提高治理精度的同时减少运行能耗。脱硝系统使用分层精准喷氨 SCR 技术，对喷氨格栅进行优化，根据锅炉负荷和入口氮氧化物浓度分区动态调节喷氨量，解决传统喷氨均匀性不好、氨逃逸超标的难题。更换适应宽温工况的高效催化剂，扩大催化剂的有效反应温度区间，适应锅炉低负荷烟温工况，保证全负荷工况下脱硝效率稳定。

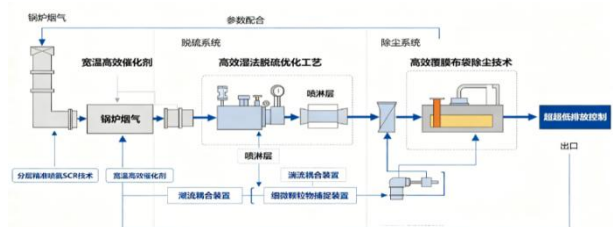


图1 烟气末端协同深度治理技术

脱硫系统采用高效湿法脱硫优化工艺，对脱硫塔喷淋层和湍流耦合装置进行升级，改善气液接触路径，提高脱硫反应效率。通过精确控制浆液的 PH 值、浆液循环量、液气比，在保证二氧化硫彻底脱除的同时，降低浆液循环泵的能耗。另外增加塔内细微颗粒物捕捉装置，协同脱除烟气中残留的粉尘和气溶胶。除尘系统使用高效覆膜布袋除尘技术，更换布袋材质、袋笼结构来提高细微粉尘过滤精度，减小设备运行阻力。对清灰周期和压力控制进行改进，防止由于清灰过度造成滤袋损伤和能耗过大，从而达到长时间稳定的低阻力、高效率运转。

2.3 烟气低温余热梯级回收节能技术

传统的烟气治理系统里，脱硫之后的低温烟气里面含有大量的可回收余热，直接排放造成能源的浪费。本文使用两级氟塑料低温余热回收装置，搭建烟气梯级换热系统，避免低温腐蚀问题，达到余热高效回收利用的目的。高温烟气先经过一级换热器加热锅炉补水，降低排烟温度，提高锅炉进水温度，减小锅炉燃煤消耗。低温烟气进入二级换热器，置换出的热水供给厂区供暖、辅机采暖和脱硫浆液加热，解决低温工况下脱硫浆液活性不足、治理效率下降的问题。余热回收系统同烟气治理系统深度耦合，一方面可以提高能源利用率，另一方面也可以改善烟气治理工况，达到节能和环保的双重效果。

2.4 全系统智能节能调控技术

根据热电厂负荷波动频繁的特性，创建烟气治理全流程智能调控系统，把锅炉负荷、烟气参数、设备运行参数等数据融合起来，创建多维联动调控模型。系统可以按照实时工况自动调节喷氨量、浆液循环量、引风机频率、清灰周期等主要参数，代替人工粗放的控制方式。利用智能调控使各个治理设备能够精准地匹配运行，避免出现设备冗余高负荷运行的情况，从而最大程度上减少系统电耗、药耗、水耗，保证全工况下污染物排放稳定达标，提高系统的稳定性以及经济性。

3 技术应用效果与效益分析

为了定量评价本文提出的超低排放一体化节能技术体系在工程应用中取得的效果，以某工业园区 130t/h 燃煤热电厂为例进行落地改造并进行长期运行监测。该锅炉配用纯低温余热发电系统，主要担负着园区工业生产供热、厂区供电的任务，机组全年的负荷波动范围在 20%到 100%之间，冬季一直在 30%到 50%的深度调峰状态，属于热电行业典型的变负荷运行机组。改造前的机组使用传统的 SCR 脱硝、湿法脱硫、布袋除尘的治理方式，存在低负荷时排放波动大、辅机能耗高、余热利用率低、运维成本高等问题。本次改造全面采用炉内低氮燃烧优化、协同烟气治理、梯级余热回收、智能调控系统全部技术，改造后连续稳定运行六个月，分工况、分时段采集污染物排放、设备能耗、设备运行阻力、运维损耗等主要数据，与改造前基准数据做全方位对比分析，具体应用效果如下。

3.1 多工况污染物排放治理效果分析

热电厂在不同的负荷工况下烟气温度、烟气量、燃料燃烧状态存在较大的差别，污染物的治理难度也存在着较大的差别。为了对技术体系的全工况适应性进行全方位的检验，本次监测将低负荷、中负荷、满负荷三种典型工况分为三组，分别获取改造前后烟尘、二氧化硫、氮氧化物、氨逃逸浓度数据，并按照火电行业烟气监测标准连续采样，数据取日均平均值，改造前后全工况污染物排放对比数据见图 2。

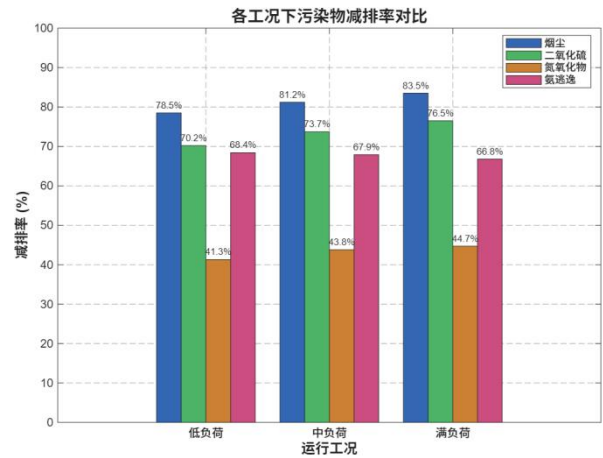


图 2 污染物减排率对比

3.2 系统能耗节能效益细化分析

本次技术改造从设备运行优化、余热回收利用、水资源精细化管理三个方面来实现节能降耗，主要的能耗指标有辅机电力消耗、机组燃煤消耗、生产用水消耗。为了正确计算节能效益，统计改造前后相同的运行负荷、相同的供热工况下每天耗电量数据，核算年综合节能收益，具体的能耗对比数据见图 3。

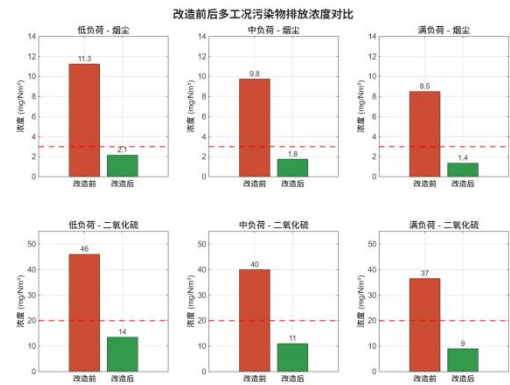


图 3 具体的能耗对比数据

经过改造后的新系统可以依据烟气量、污染物浓度以及锅炉负荷的实时情况来调节设备运行的频率，从而杜绝出现无效的能耗输出，每天可以节省 1165kWh 的电量，每年节省电量。机组煤耗降低的主要原因是梯级余热回收系统，低温烟气

余热回收后用作锅炉补水和脱硫浆液加热，锅炉进水温度平均提高 22℃，减少炉膛加热能耗，提高燃料燃烧效率。系统水耗优化用脱硫废水循环回用、精确喷淋的方法来减少浆液无序蒸发、废水外泄，大幅度提高水资源利用率。

3.3 设备运行阻力与稳定性分析

烟气治理设备长时间运转时的阻力属于重要的参数之一，如果阻力过大，则会引起引风机的负荷增大，进而加大设备的磨损。本次改造通过对脱硫塔流场进行优化、除尘滤袋进行升级、清灰策略进行改进等措施，使系统运行阻力得到降低，并且可以对全负荷工况下设备阻力的变化情况进行监测。从图 3 数据可知，改造后整套烟气治理系统运行阻力明显减小，总阻力减少 390Pa，各个系统的阻力波动很小，运行状态更加稳定。

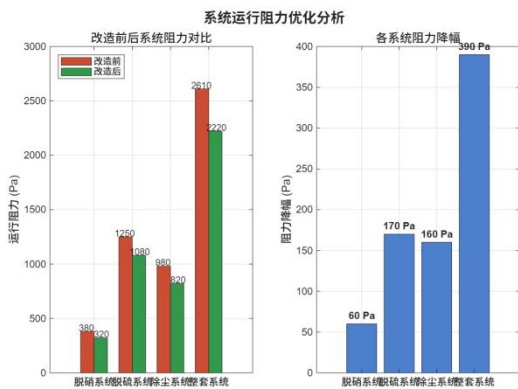


图 4 系统运行阻力优化

3.4 设备运维成本效益分析

传统的烟气治理系统存在着高氨逃逸、高阻力运行的状况，从而加快了催化剂中毒、设备腐蚀和滤袋的损坏速度，导致年度运维耗材费用较高。改造后系统的运行工况有了明显的

好转，设备的损耗速度大为减小，可以缩减耗材更换、设备维修等方面的支出，改造前后年度运维成本比较如下图所示。从运维数据可以看出，改造之后整个烟气治理系统年度运维成本降低很多，总节约比例为 31.8%。脱硫系统检修费用降幅最大，主要是由于系统阻力稳定、浆液反应均匀，塔内结垢、腐蚀、堵塞故障大大减少。

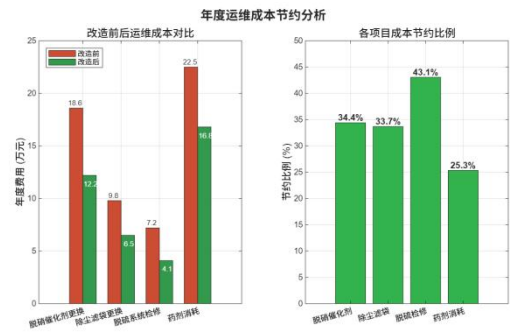


图 5 年度运维成本对比

4 结论

本文针对热电锅炉烟气治理存在的排放稳定性不够、系统能耗高、工况适应性差等状况，创建了炉内源头减排、末端协同深度治理、余热梯级回收、智能节能调控一体化的超超低排放节能技术体系。经过燃烧优化、工艺升级、设备改造和智能耦合，很好地解决了传统烟气治理工艺环保和节能难以兼顾的难题。工程应用实践证明，该技术体系可以达到烟尘、二氧化硫、氮氧化物污染物稳定超超低排放的目的，并且能大幅度降低机组的电耗、煤耗、水耗，提高设备运行的稳定性、寿命，具有较好的环保效益、经济效益和社会效益。该技术方案成熟可靠、适用性强，可以给热电厂行业烟气深度治理和节能降碳改造提供重要的技术支持，具有很高的工程推广价值。

参考文献:

- [1] 冯丽军. 脱硫脱硝除尘设备在烧结烟气超低排放改造中的应用[J]. 山西冶金, 2026, 49(2): 181-183+241.
- [2] 张伟. 烧结烟气超低排放改造在某钢厂的工程化应用[J]. 山西冶金, 2025, 48(12): 164-165+168.
- [3] 丁文胤, 胡金伟, 徐伟, 等. 高炉热风炉烟气超低排放改造实践[J]. 冶金动力, 2025, (6): 85-89.
- [4] 褚建灿, 陈吟悦, 王哲波, 等. 基于超低排放的烟气排放连续监测系统(CEMS)常见问题分析[J]. 冶金设备, 2025, (S1): 85-87+70.
- [5] 孙水孝. 线棒材加热炉烟气超低排放技术的研究[J]. 山西冶金, 2025, 48(7): 226-228.