

火电厂锅炉燃烧技术的优化调整研究

郝旺荣

国电内蒙古东胜热电有限公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000

摘要: 火电厂作为电力供应的核心设施, 其锅炉燃烧效率与污染物排放水平直接影响能源利用效率与环境可持续性。本文系统梳理锅炉燃烧基本原理及常见燃烧方式, 深入分析当前火电厂锅炉在燃烧效率、污染物排放及运行稳定性方面存在的关键问题, 提出多维度优化调整策略与技术手段, 旨在为火电厂节能减排与高效运行提供理论支撑。

关键词: 火电厂锅炉; 燃烧技术; 优化调整

DOI: 10.63887/fet.2025.1.3.13

1 火电厂锅炉燃烧的基本原理

火电厂锅炉燃烧的本质是通过氧化反应将燃料的化学能转化为热能, 这一过程涉及复杂的物理化学机制与能量传递规律。燃料(以煤炭为主)在炉膛内经历干燥、热解、挥发分燃烧及固定碳燃尽四个阶段, 各阶段的动态耦合决定了燃烧效率与污染物生成特性。燃料特性是燃烧过程的物质基础, 挥发分含量直接影响燃烧初期的火焰稳定性, 高挥发分燃料易于快速点火并形成稳定的气相燃烧, 而低挥发分燃料则需依赖更高的炉温与更长的停留时间以维持燃烧连续性^[1]。

空气动力学条件为燃烧反应提供氧化剂并调控反应进程, 过量空气系数的合理控制是平衡燃烧效率与污染物排放的核心参数。过量空气不足将导致不完全燃烧热损失增加, 而过量空气系数过剩则稀释炉膛温度、降低反应速率并增加排烟热损失^[2]。

燃烧反应动力学揭示了温度场与化学反应速率的非线性关系。燃烧温度需维持在燃料着火点以上以确保反应自持, 但高温环境同时加速热力型氮氧化物(NO_x)的生成。炉膛内温度梯度分布受辐射传热与对流换热的共同影响, 火焰中心区的高温辐射可强化燃料热解, 但近壁面区域的低温区易因散热过快形成还原性气氛, 诱发结焦与还原性气体(CO、H₂S)生成^[3]。

燃料、空气与燃烧环境的协同作用构成了锅炉燃烧的“三要素”, 其动态平衡决定了能量转换效率与

环境兼容性。任何单一要素的偏离均可能引发燃烧效率衰减、污染物排放上升或运行稳定性恶化, 因此燃烧优化需从多物理场耦合的角度出发, 系统性协调热力学、流体力学与化学反应的相互作用机制, 为后续技术改进提供理论依据^[4]。

2 常见的锅炉燃烧方式

2.1 层燃燃烧

层燃燃烧是一种基于固体燃料分阶段燃烧的传统技术, 其核心在于燃料在炉排上的分层布置与逐步燃烧过程^[5]。燃料通过机械或重力作用均匀铺设在固定或移动炉排表面, 形成稳定的燃烧层。在燃烧初期, 燃料受热后释放挥发分, 形成可燃气体向上扩散并与二次风混合燃烧; 随后, 剩余固定碳在高温环境下与一次风接触完成氧化反应, 最终灰渣通过炉排间隙或末端排出。层燃燃烧的优势在于设备结构简单、燃料适用性较强, 尤其适用于块状或颗粒状生物质燃料及低挥发分煤种。然而, 由于燃料与空气的接触面积有限, 燃烧强度较低, 易出现局部缺氧或燃烧不完全现象, 导致飞灰和炉渣含碳量升高。此外, 炉排的机械运动部件在高温环境下易发生变形或磨损, 需频繁维护以保证燃烧连续性。

2.2 室燃燃烧(悬浮燃烧)

室燃燃烧以煤粉燃烧为代表, 是现代大型火电厂锅炉的主流技术之一。其核心原理是通过制粉系统将

原煤破碎为微米级颗粒，并借助高速气流将煤粉与空气混合后喷入炉膛，形成气固两相悬浮燃烧。煤粉颗粒在炉膛高温环境中迅速升温、热解，挥发分与焦炭依次燃烧，释放的热量通过辐射与对流传递至受热面。室燃燃烧的显著优势在于燃烧反应剧烈且均匀，热效率显著高于层燃方式，同时可通过调节煤粉细度与风量配比灵活适应负荷变化。然而，悬浮燃烧对燃料特性及燃烧器设计要求极高，煤粉细度过粗或分布不均会导致不完全燃烧热损失增加；此外，高温燃烧环境虽提升效率，却加剧了热力型氮氧化物（NO_x）的生成，需额外配置脱硝设施以控制排放。

2.3 流化床燃烧

流化床燃烧技术通过气流动力学实现燃料颗粒的流态化运动，兼具燃烧与传热过程的双重优化。在流化床炉膛底部，高速空气流经布风板向上输送，使燃料颗粒与惰性床料（如石英砂）形成类似流体的动态悬浮层。燃料在流化状态下与空气充分接触，燃烧反应在较低温度（800 - 950℃）下完成，有效抑制 NO_x 生成并提高脱硫效率。流化床燃烧对燃料适应能力极强，可处理高灰分、高水分或低热值的劣质煤、矸石及生物质燃料，且负荷调节范围宽泛。然而，流化床燃烧面临颗粒磨损与设备腐蚀的挑战，高速气流携带的固体颗粒对炉膛内壁及尾部受热面造成持续性冲刷，需采用耐磨材料或优化流场设计以延长设备寿命。此外，床温控制精度直接影响燃烧稳定性，床料结块或流化不均可能导致局部熄火或传热恶化。

2.4 旋风燃烧

旋风燃烧是一种基于离心力强化的高效燃烧技术，尤其适用于高灰分、低挥发分燃料的稳定燃烧。其核心结构为圆柱形或锥形旋风燃烧室，燃料与空气通过切向入口高速喷入后形成强烈旋转气流。在离心力作用下，燃料颗粒被甩向燃烧室壁面，与二次风充分混合并沿螺旋轨迹缓慢沉降，延长了燃料在高温区的停留时间，确保灰分中残碳的完全燃尽。旋风燃烧的突出优势在于对灰分的高耐受性，灰渣在离心力作用下富集于燃烧室底部集中排出，有效减少飞灰夹带。同时，燃烧室内的高温湍流环境可提升燃烧强度与热负

荷密度。然而，该技术对燃料粒径分布要求严苛，颗粒过细易被气流直接带出，而过粗则难以维持稳定旋转流场；此外，燃烧室结构复杂、制造成本高，且需配置高效除尘设备以应对出口烟气中的颗粒物浓度波动。

3 火电厂锅炉燃烧存在的问题分析

3.1 燃烧效率问题

火电厂锅炉燃烧效率的损失主要表现为不完全燃烧热损失与排烟热损失的双重叠加效应。燃料与空气的混合均匀性是决定燃烧完全性的首要因素，但在实际燃烧过程中，受限于燃烧器结构设计或配风策略的不足，燃料颗粒与氧化剂的接触面积往往无法达到理想状态。未燃尽碳不仅以飞灰或炉渣形式排出，还因碳颗粒的包裹作用阻碍灰分中矿物质的充分氧化，进一步降低热值释放效率。与此同时，过量空气系数的控制失衡会导致排烟热损失显著增加，过量空气虽能促进燃料燃尽，但过量冷空气的引入会稀释炉膛温度，降低燃烧反应速率，并增加烟气体积，最终使排烟温度升高带走大量显热。此外，炉膛内温度场分布的局部不均现象同样制约整体燃烧效率，高温区域可能因过度氧化加速耐火材料老化，而低温区域则因燃料热解不彻底形成还原性气氛，加剧结焦与积灰问题，形成恶性循环。

3.2 污染物排放问题

火电厂锅炉燃烧过程中污染物的生成与排放是制约其环境兼容性的核心矛盾。氮氧化物（NO_x）的生成与燃烧温度、氧浓度及燃料含氮量密切相关，高温燃烧环境下热力型 NO_x 占比显著升高，而燃料型 NO_x 则源于燃料中氮元素的氧化路径。由于炉膛内温度梯度与氧浓度分布难以实现完全均质化，局部高温富氧区域成为 NO_x 生成的“热点”，需依赖燃烧后处理技术进行额外脱硝。硫氧化物的排放则直接关联燃料硫分含量，尽管煤质预处理可部分降低硫分，但硫元素在燃烧过程中仍会转化为 SO₂ 和 SO₃，不仅加剧酸露点腐蚀风险，还需配置高成本湿法脱硫装置以满足排放标准。此外，未完全燃烧产物如 CO 和碳氢化合物的排放，既反映燃烧组织的不完善，又因其化学活性参与

大气光化学反应，形成二次污染物。飞灰中的细颗粒物（PM_{2.5}）则因吸附重金属及多环芳烃等有毒物质，对生态环境与人体健康构成长期威胁。

3.3 运行稳定性问题

锅炉燃烧系统的运行稳定性受燃料特性波动、热力状态失衡及设备老化等多重因素干扰。燃料品质的波动（如热值、水分、灰分的变化）会直接打破燃烧参数与炉内热平衡的匹配关系，当燃料挥发分突然降低时，点火延迟可能导致燃烧中断，而灰分骤增则加剧受热面积灰与传热效率衰减。结焦与结渣现象是高温燃烧的衍生问题，熔融灰分在受热面的沉积不仅削弱传热能力，还会改变炉内流场分布，诱发局部高温或低温区，进一步加剧结渣的恶性循环。在负荷调节过程中，燃烧系统惯性导致的响应滞后问题尤为突出，燃料供给量与风量配比的动态调整若无法同步，可能引发炉膛压力波动或火焰形态失稳，甚至触发保护性停炉。此外，长期运行中燃烧器喷嘴磨损、风门执行机构卡涩等设备老化问题，逐渐削弱燃烧系统的可控性，增加非计划停机的概率。

4 火电厂锅炉燃烧技术优化调整策略

4.1 燃料预处理优化

燃料预处理是提升燃烧效率与污染物控制的基础环节，其核心在于通过物理或化学手段改善燃料的均质性与反应活性。破碎与筛分工艺可调整燃料粒径分布，缩小颗粒尺寸差异，确保燃料在炉膛内受热均匀性，减少尾部再燃烧风险。干燥处理能够降低燃料水分含量，避免水分蒸发消耗过多炉膛热量，同时抑制燃烧初期因水蒸气分压升高导致的挥发分释放延迟。针对高硫或高灰分燃料，掺混低硫煤或生物质燃料可有效稀释有害成分，降低硫氧化物生成潜力与灰渣熔融温度。此外，通过表面改性或添加剂引入（如氧化钙），可在预处理阶段部分固定硫元素或催化燃烧反应，减少后续脱硫负荷并提升燃料燃尽率。预处理工艺的精细化设计需结合燃料特性与燃烧设备条件，在能耗与经济性间寻求平衡。

4.2 配风系统分级调控

配风系统的分级调控策略通过优化空气供给的时

空分布，解决燃烧强度与污染物生成的矛盾。一次风作为燃料输送与初期燃烧的主要氧源，其流速与温度需精确匹配燃料挥发分析出速率，避免过早或过晚供氧导致的燃烧滞后或碳层过厚。二次风的分阶段注入则强化了燃烧后期的氧化环境，通过旋流强度与喷射角度的调整，形成覆盖燃料颗粒的湍流场，延长可燃气体在高温区的停留时间，促进未燃尽碳的二次燃烧。对于大型锅炉，采用分区域配风技术能够根据炉膛截面热负荷差异动态调整风量分配，抑制局部高温区的NO_x生成，同时补偿边壁区域的氧气不足。分级配风需与燃烧器结构协同优化，确保气流穿透深度与扩散范围满足不同燃烧阶段的动态需求。

4.3 低氮燃烧技术集成

低氮燃烧技术的核心在于通过燃烧过程重构抑制氮氧化物的生成路径。空气分级技术将总风量分为主燃区与还原区，主燃区维持缺氧燃烧以限制燃料氮向NO_x的转化，而还原区补充剩余空气完成燃尽过程，同时利用CO与碳氢化合物对已生成NO_x的还原作用。燃料分级技术则通过多级燃烧器错位布置，在主燃区下游引入富燃料气氛，形成局部还原环境进一步分解NO_x。烟气再循环技术通过将部分低温烟气混入助燃空气，稀释氧浓度并降低燃烧温度，削弱热力型NO_x的生成动力学条件。上述技术的集成应用需结合炉膛结构与燃料特性，通过数值模拟与实验验证确定最佳分级比例与再循环率，在保证燃烧效率的同时实现源头减排。

4.4 智能燃烧控制系统

智能燃烧控制系统依托数据驱动模型与实时反馈机制，实现燃烧过程的自适应优化。通过部署传感器网络实时采集炉膛温度、烟气成分、风压等关键参数，结合模糊逻辑或神经网络算法构建燃烧状态预测模型，动态解析燃烧效率、污染物排放与运行稳定性之间的耦合关系。控制系统根据负荷变化与燃料特性波动，自动调节送风量、燃料供给速率及燃烧器倾角，维持炉内温度场与氧浓度分布的动态平衡。此外，基于机器学习的故障诊断模块可提前识别结焦、积灰或设备劣化趋势，触发预防性维护指令，减少非计划停机风险。智能控制系统的核心优势在于突破传统PID控制

的线性局限，通过非线性映射与多目标优化，实现复杂工况下的全局最优控制。

4.5 余热梯级利用

余热梯级利用通过多级能量回收装置挖掘尾部烟气的余热潜力，提升全系统能效。高温烟气余热优先用于预热助燃空气或锅炉给水，降低燃料消耗并提高理论燃烧温度；中温段余热可通过有机朗肯循环（ORC）发电或驱动吸收式制冷机组，实现热能向电能或冷能的转化；低温余热则用于厂区供暖或除湿，减少辅助能源需求。在系统集成层面，需优化换热器布置与工质选择，避免因温差过小导致的传热不可逆损失，同时通过热力学分析确定余热回收的能级匹配原则。此外，烟气余热的深度利用需与脱硫脱硝工艺协同设计，例如在湿法脱硫前设置余热回收装置，避免烟气温度

骤降引发的腐蚀问题。

结语

综上所述，火电厂锅炉燃烧技术的优化调整是一个复杂且系统的工程，涉及到燃料特性、空气供给、燃烧过程控制以及余热利用等多个方面。本文通过对火电厂锅炉燃烧基本原理的阐述、常见燃烧方式的分析以及现存问题的深入探讨，提出了一系列具有针对性的优化调整策略。在实际应用中，还需要结合火电厂的具体情况，如锅炉类型、燃料特性、运行工况等，对优化调整策略进行进一步的细化和完善。同时，随着技术的不断发展和环保要求的日益提高，火电厂锅炉燃烧技术的研究仍需持续深入，不断探索新的理论和方法，以实现火电厂的可持续发展和绿色转型。

参考文献

- [1]陈鸿. 基于改进遗传算法的火电厂锅炉燃烧优化技术[J]. 自动化应用, 2025 (3): 258-260, 264.
- [2]张强, 何陆灿, 方亚雄. 火电厂锅炉低氮燃烧改造与运行优化调整探究[J]. 中国设备工程, 2023 (4): 130-132.
- [3]樊兴宇. 锅炉燃烧调整及优化技术的研究[J]. 百科论坛电子杂志, 2021 (17): 2242.
- [4]陈学进, 韩纪层, 林海晴. 某锅炉引风机叶片断裂原因分析[J]. 理化检验 (物理分册), 2020 (5): 66-70.
- [5]李晓宇, 岳增武, 荆象阳. 发电厂锅炉引风机叶片断裂原因分析[J]. 山东工业技术, 2023 (6): 104-107.

作者简介: 郝旺荣 (1991.9-), 男, 本科, 热能与动力工程