

火电厂锅炉燃烧效率优化技术研究与应用

黄 杰

申能吴忠热电有限责任公司 宁夏 吴忠 751100

摘 要：随着能源结构转型与环保要求升级，火电厂需在保证供电稳定的同时，实现节能与减排协同。本文围绕火电厂锅炉燃烧效率优化展开研究，结合燃烧原理与效率影响因素分析，系统探讨了燃烧器结构优化、运行参数调控及智能化控制等关键技术。通过分析亚临界机组、超临界机组、灵活性调峰工况及循环流化床锅炉的应用场景，阐述了不同技术在燃烧稳定性提升、热偏差控制及能耗降低中的实践路径。研究表明，燃烧器改造与智能算法结合优化方案，可有效适配不同煤质与负荷条件，为火电厂锅炉高效、环保运行提供技术支撑，对推动电力行业节能降耗具有实践意义。

关键词：火电厂锅炉燃烧效率优化；关键技术；具体应用

引言：锅炉作为火电厂核心设备，其燃烧效率直接影响机组经济性与环保性。当前煤质波动、负荷变化及设备老化等问题，导致燃烧效率优化面临多重挑战。国内外研究多聚焦单一技术应用，缺乏对原理、技术与场景的系统性整合。本文基于燃烧机理分析，梳理关键优化技术，结合不同机组类型的应用案例，构建“原理-技术-应用”的完整体系，为火电厂锅炉效率提升提供理论与实践参考。

1 火电厂锅炉燃烧原理及效率影响因素

1.1 火电厂锅炉燃烧基本原理

火电厂锅炉燃烧是燃料（主要为煤粉）在炉膛内与氧气发生剧烈氧化反应并释放热能的过程，其核心是通过可控的化学反应将燃料的化学能转化为热能，为后续蒸汽循环提供热源。燃烧过程需满足燃料、氧气、高温三个基本条件，且三者需保持动态平衡：燃料需被粉碎至一定细度以增大反应表面积，氧气需通过送风系统持续供给以维持反应持续，高温环境则为反应提供初始活化能并维持链式反应。从热力学角度看，燃烧过程可分为预热、挥发分燃烧、焦炭燃烧和燃尽四个阶段。预热阶段，煤粉吸收炉膛热量完成干燥与热解，释放挥发分；挥发分与氧气混合后率先着火燃烧，释放的热量为焦炭燃烧提供能量；焦炭燃烧是放热的主要阶段，其反应速率受氧气扩散与化学反应本身共同控制；燃尽阶段则针对未完全反应的残碳，需足够的停留时间与氧气接触以减少损失。整个过程需维持炉膛内温度、气流速度等参数的稳定，确保能量转化效率最大化。

1.2 燃烧效率主要影响因素分析

燃烧效率的高低取决于燃料转化为热能的完全程度，受以下多因素共同作用，主要可分为燃料特性与运行条件两大类。（1）燃料特性中，煤质特性是核心因素。煤

的挥发分含量直接影响着火难度与燃烧速度，挥发分高的煤易着火但燃尽时间短，挥发分低的煤则需更高温度才能稳定燃烧；固定碳含量决定了放热总量，但其燃烧速率较慢，易造成未燃尽损失；灰分与水分含量属于惰性成分，灰分增加会导致吸热增多且可能阻碍氧气接触，水分过高则需消耗更多热量用于蒸发，两者均会降低有效热量利用。（2）运行条件方面，空气系数是关键参数，即实际送风量与理论所需风量的比值。空气系数过低时，燃料因缺氧无法完全燃烧，增加化学不完全燃烧损失；过高则会带入过多冷空气，降低炉膛温度并增加排烟热损失。（3）煤粉细度也会影响燃烧效果，细度不足会导致大颗粒煤粉难以燃尽，过细则会增加制粉电耗并可能引发爆燃风险。（4）炉膛内温度场分布是否均匀、气流扰动是否适中，以及受热面结渣积灰导致的热交换效率下降，都会间接影响燃烧效率的稳定性^[1]。

2 火电厂锅炉燃烧效率优化关键技术

2.1 燃烧器结构优化技术

燃烧器是锅炉燃烧系统的核心设备，其结构设计直接影响燃料与空气的混合效果、着火稳定性及燃烧均匀性，是燃烧效率优化的基础环节。燃烧器结构优化的核心方向是通过改进流场组织与燃料分配方式，强化燃烧过程的可控性。低氮燃烧器改造是当前主流技术之一，通过采用空气分级、燃料分级等设计，将燃烧区域划分为不同的氧浓度区间，既抑制氮氧化物生成，又避免局部缺氧导致的不完全燃烧。浓淡燃烧技术通过将煤粉气流分离为浓相和淡相，浓相区域因燃料集中易形成稳定火源，淡相区域则通过充分配风减少燃尽损失，两者协同提升燃烧效率。

燃烧器的布置方式优化也至关重要。角式燃烧器通过调整喷口角度与间距，可增强炉膛内气流的旋转强度，

促进煤粉与空气的湍流混合；墙式燃烧器则通过优化单只燃烧器的功率分配与相邻燃烧器的协同配风，避免局部高温或低温区域的形成。燃烧器喷嘴的几何参数优化，如出口截面形状、扩张角等，可改变气流速度分布，减少回流区过大或过小带来的燃烧不稳定问题^[2]。

2.2 运行参数优化技术

运行参数的合理调控是在设备既定条件下提升燃烧效率的关键，其核心是通过动态调整各项参数，使燃烧过程始终处于最优状态。风煤配比优化是运行参数调整的核心内容。过量空气系数是衡量风煤配比的关键指标，需根据燃料特性实时调节：对于挥发分高的煤种，可适当降低过量空气系数以减少排烟热损失；对于固定碳含量高的煤种，则需保证充足的氧气供应以避免化学不完全燃烧。二次风的分级调节技术通过将二次风分为上、中、下多层，精准控制各燃烧阶段的供氧量，在着火阶段减少供风以维持高温，在燃尽阶段增加供风以促进残碳燃烧。

煤粉制备参数的优化同样重要。煤粉细度需与煤质特性匹配，挥发分低的煤种需更细的煤粉以增大反应表面积，而挥发分高的煤种则可适当放宽细度要求以降低制粉电耗。煤粉均匀性通过改进磨煤机分离器结构实现，避免因煤粉颗粒度差异过大导致的局部燃烧速度不一致。炉膛温度场的调控通过调整燃烧器倾角与二次风旋流强度实现，维持炉膛中心区域的高温环境以加速燃烧反应，同时避免局部温度过高引发结渣。

2.3 智能化燃烧控制技术

智能化技术通过融合实时监测数据与算法模型，实现燃烧过程的自适应调节，是应对复杂工况波动的高效手段。自适应控制技术基于燃烧过程的动态特性构建控制模型，通过实时采集炉膛温度、烟气成分、炉膛负压等参数，与预设的最优目标值进行对比，自动调整给煤量、送风量等执行参数。其核心在于模型的自学习能力，可根据煤质变化、设备老化等因素动态修正控制策略，避免人工调节的滞后性与经验依赖性。

模糊控制技术在燃烧调节中具有独特优势，尤其适用于难以建立精确数学模型的复杂燃烧系统。通过将操作人员的经验转化为模糊规则，对“风煤配比偏差”“炉膛温度波动”等模糊变量进行量化处理，实现非线性、大滞后系统的稳定控制。神经网络算法则通过多层非线性映射，拟合燃烧效率与多参数之间的复杂关系，可对未经历的工况进行预测性调节，提前规避效率下降风险。

智能监控系统的集成应用是智能化控制的基础，通过布置在炉膛内的红外测温装置、烟道内的激光气体分析仪等设备，实时获取燃烧过程的关键数据，为智能算法提供输入支持，形成“监测-分析-决策-执行”的闭环优化体系^[3]。

环优化体系^[3]。

3 火电厂锅炉燃烧效率优化技术的具体应用

3.1 亚临界机组锅炉燃烧效率优化技术应用

亚临界机组锅炉以自然循环为主要特征，燃烧系统多采用四角切圆燃烧方式，其优化技术应用需围绕燃烧稳定性与参数协调性展开。燃烧器结构优化常采用低氮燃烧与浓淡燃烧结合的方式。通过将原有直流燃烧器改造为分级配风式结构，实现煤粉气流的浓淡分离，浓相气流集中于炉膛下部以强化着火条件，淡相气流分布于上部以保障燃尽过程。调整二次风喷口角度与风速，增强炉膛内气流的旋转强度，促进煤粉与空气的均匀混合。二次风的分层配置需与燃烧阶段匹配，下层二次风侧重维持着火区域的高温环境，上层二次风则注重为燃尽阶段补充氧气，中层二次风根据燃烧状态灵活调节，形成阶梯式供风模式。

运行参数调控聚焦于风煤配比与煤粉特性的适配。基于煤质在线监测数据，通过智能系统动态调整过量空气系数，依据挥发分含量差异设定不同区间的控制值，确保燃料燃烧时氧气供应的合理性。煤粉细度通过磨煤机分离器进行调节，结合煤种特性确定适宜的颗粒度范围，在满足着火需求的同时，避免过细煤粉导致的制粉能耗增加。炉膛温度场的监控通过红外测温装置实现，实时反馈温度分布状态，为燃烧器倾角与二次风调节提供数据支持，维持温度场的均匀性。

智能化控制体系构建以数据融合为核心。在现有DCS系统基础上，整合炉膛温度、烟气成分、煤质参数等多维度数据，建立基于神经网络的燃烧效率预测模型。模型通过持续学习优化控制参数，实现给煤量、送风量等执行机构的自动调节。当煤质出现波动时，系统能快速响应并修正参数，减少人工干预的滞后影响，保持燃烧过程的稳定性。

3.2 超临界机组锅炉燃烧效率优化技术应用

超临界机组锅炉采用直流式结构，参数水平较高，燃烧系统多为前后墙对冲燃烧形式，优化技术需着重解决热偏差与高温腐蚀问题。燃烧器布置优化注重火焰形态的均匀性。将燃烧器按多排多层方式布置于前后墙，通过调整相邻燃烧器的间距与倾角，使火焰在炉膛内形成对称分布的热负荷区域。燃烧器内部采用浓淡分离与分级配风设计，浓相煤粉经中心通道进入炉膛，淡相煤粉通过外环通道输送，配合不同旋流强度的内、外二次风，形成向火焰根部回流的气流，强化高温烟气对煤粉的预热作用。

运行参数优化围绕热流分布与腐蚀预防展开。通过调节前后墙燃烧器的负荷分配比例，平衡炉膛两侧的热负荷，结合侧二次风的调整，控制炉膛出口烟温偏差在

合理范围内。针对高温腐蚀问题,严格控制燃烧器区域的过量空气系数,避免还原性气氛的形成。借助水冷壁壁温监测系统,实时调整燃烧器摆角,当壁温超出设定值时,通过改变火焰位置减少局部热流密度。

智能化控制技术应用体现在全工况的自适应调节。基于数字孪生技术构建锅炉虚拟模型,将实时运行数据与模型计算结果进行比对,实现对燃烧状态的预判。在负荷变化过程中,系统提前调整磨煤机出力与燃烧器参数,按预定策略分配各区域燃烧负荷,配合二次风的动态调节,维持炉膛温度的稳定,确保不同负荷下燃烧过程的连贯性。

3.3 灵活性调峰工况下的燃烧效率优化技术应用

灵活性调峰要求机组能够适应负荷的快速变化与煤质的频繁切换,燃烧效率优化技术需具备较强的适应性与响应性。低负荷稳燃技术通过燃烧器改造与参数调整实现。将部分下层燃烧器改造为稳燃型结构,内置辅助点火装置,在低负荷时投入使用以增强着火稳定性。同时,提高一次风煤粉浓度,增加局部燃料密度,配合二次风的配比调整,在炉膛下部形成集中的高温燃烧区,为煤粉着火提供持续的能量支持。

煤质混烧优化依赖智能配煤与燃烧调整的协同。建立入厂煤煤质数据库,通过算法优化混配方案,将不同特性的煤种按比例混合,使混合煤的挥发分、热值等参数保持在适宜范围。燃烧系统根据混合煤特性自动调整运行参数,包括一次风速、煤粉细度与过量空气系数等,通过参数的动态适配应对煤质波动。

快速变负荷过程中的优化聚焦于风煤协同响应。当负荷变化时,智能控制系统采用超前调节策略,依据负荷指令提前调整给煤量与送风量,遵循风煤动态匹配原则,确保燃烧所需的空气量与燃料量同步变化。通过炉膛压力与烟气氧量的实时反馈,修正二次风挡板开度,维持炉膛压力的稳定,避免气流扰动对燃烧过程的影响。

3.4 循环流化床锅炉燃烧效率优化技术应用

循环流化床锅炉以固态物料循环为特点,燃烧效率优化需兼顾物料流化状态与燃烧均匀性。炉膛结构优化

主要针对流化风速与物料循环系统。通过调整布风板风帽结构与布置方式,使一次风在炉膛底部形成均匀的气流分布,保证床料的稳定流化。分离器的分离效率通过结构参数优化得到提升,确保未燃尽的固体颗粒能够有效回送炉膛,延长燃料的停留时间。

运行参数调控围绕床温与过量空气系数展开。床温控制通过一次风量与给煤量的协同调节实现,维持在适宜的燃烧温度区间,既保证燃料的充分燃烧,又避免床料结焦。二次风的分级送入需与炉膛高度匹配,在不同区域补充燃烧所需氧气,合理控制过量空气系数,减少不必要的热损失。

智能化控制技术应用体现在物料平衡与燃烧状态的精准调控。通过床压、床温、烟气成分等参数的实时监测,建立物料循环与燃烧效率的关联模型,实现给煤量、风量、返料量的自动调节。当煤质或负荷变化时,系统快速调整各参数,维持流化状态与燃烧过程的稳定性,确保不同工况下燃烧效率的一致性^[4]。

结束语:本文通过对火电厂锅炉燃烧效率优化技术的系统研究,明确了燃烧原理与影响因素的基础作用,验证了燃烧器结构改进、运行参数优化及智能化控制技术的有效性,并在多类型机组中形成针对性应用方案。研究显示,技术适配性是效率提升的关键,需根据机组特性与工况需求动态调整策略。未来可进一步探索数字孪生与多目标协同优化技术,为火电厂实现“高效、低碳、灵活”运行提供持续技术支持。

参考文献

- [1]张耀明.智能算法下火电厂锅炉燃烧优化技术探析[J].电力设备管理,2025(8):77-79.
- [2]温浩.火电厂锅炉燃烧优化技术研究[J].今日自动化,2024(7):98-100.
- [3]郝美.火电厂锅炉燃烧优化关键技术研究[J].现代工业经济和信息化,2020,10(9):16-17,73.
- [4]杨建兴.火电厂锅炉燃烧优化技术探讨[J].中国设备工程,2020(11):147-149.