

循环流化床锅炉飞灰含碳量影响因素及降低措施研究

李 利

国能亿利能源有限责任公司电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要: 循环流化床锅炉飞灰含碳量是影响燃烧效率与经济性的关键指标。研究表明, 燃料特性(如煤种、粒度、水分)、运行参数(床温、风速、氧量配比)、设备结构(炉膛高度、分离器效率)及负荷波动等因素显著影响含碳量。通过优化燃料预处理、精准调控床温与风量配比、提升分离器效率、延长燃料停留时间, 并应用富氧燃烧、飞灰再燃等先进技术, 可有效降低飞灰含碳量, 提升锅炉运行效率与环保性能。

关键词: 循环流化床锅炉; 飞灰含碳量; 影响因素; 降低措施

引言: 循环流化床锅炉作为高效清洁的燃烧技术代表, 在能源利用领域广泛应用, 但飞灰含碳量偏高问题突出, 直接降低锅炉热效率、增加运行成本并影响环保效益。其含碳量受燃料特性、流化状态、燃烧温度、分离器效率及运行调控等多重因素交互影响, 需通过系统性研究揭示关键作用机制。本文从多维度剖析飞灰含碳量的形成机理, 提出针对性优化措施, 为提升循环流化床锅炉经济性与环保性提供理论支撑。

1 循环流化床锅炉飞灰含碳量理论基础

1.1 飞灰含碳量的定义与形成机理

(1) 飞灰含碳量指循环流化床锅炉燃烧后, 飞灰中未燃尽碳元素占飞灰总质量的百分比, 是衡量燃烧效率的核心指标之一。常用检测方法为灼烧失重法, 即称取一定质量的飞灰试样, 经高温灼烧去除可燃物后, 通过灼烧前后质量差计算含碳量, 该方法操作简便、结果稳定, 广泛应用于工业检测。(2) 飞灰中未燃尽碳主要以固定碳和残留挥发分两种形态赋存。固定碳是煤中挥发分析出后剩余的碳质核心, 化学稳定性强, 需较高温度和充足氧气才能完全燃烧; 残留挥发分则是煤燃烧过程中未充分裂解和燃烧的轻质碳氢化合物, 常吸附于固定碳表面或分散于飞灰颗粒间隙, 二者共同影响飞灰含碳量高低。

1.2 CFB锅炉燃烧过程分析

(1) 循环流化床锅炉采用流态化燃烧技术, 炉膛内物料在高速气流作用下呈现气固两相流态化状态, 具有燃烧效率高、燃料适应性广的特点。流态化过程中, 物料剧烈混合、碰撞, 强化了气固间传热传质, 同时大量物料循环回流, 延长了燃料停留时间, 为燃烧反应提供了良好条件。(2) 煤颗粒在炉内的燃烧路径可分为三个阶段: 一是干燥阶段, 煤颗粒进入炉膛后, 吸收热量蒸发水分; 二是挥发分析出阶段, 水分蒸发后, 煤颗粒温

度升高, 有机质裂解析出挥发分; 三是焦炭燃烧阶段, 挥发分燃烧后, 残留的焦炭颗粒与氧气发生氧化反应, 释放大量热量, 若该阶段氧气不足或停留时间过短, 易形成未燃尽碳^[1]。

1.3 飞灰含碳量与燃烧效率的关系

(1) 飞灰含碳量与锅炉热效率呈负相关。未燃尽碳随飞灰排出会造成大量能源浪费, 每增加1%的飞灰含碳量, 锅炉热效率约降低0.5%~1%, 直接影响锅炉运行的经济性。降低飞灰含碳量可有效提升燃料利用率, 减少煤炭消耗。(2) 过量飞灰含碳量会加剧环境污染, 未燃尽碳在炉膛内不完全燃烧会生成大量CO气体, CO是有毒气体, 同时也是重要的温室气体, 排放超标会污染大气环境; 此外, 含碳量高的飞灰处置难度增加, 若直接排放或堆放, 还可能引发二次污染。

2 循环流化床锅炉飞灰含碳量影响因素分析

2.1 燃料特性

(1) 煤种是影响飞灰含碳量的核心因素, 挥发分含量高的煤种, 易快速析出挥发分并点燃, 为后续焦炭燃烧提供热量, 飞灰含碳量较低; 灰分过高会稀释可燃成分, 阻碍氧气与碳粒接触, 降低燃烧效率; 固定碳含量高的煤种, 燃烧反应速率慢, 若燃烧条件不足, 易残留形成未燃尽碳。(2) 煤粒度分布直接影响燃烧完全性, 粒度适中的煤颗粒能充分流化, 与氧气接触均匀, 燃烧更完全; 粒度过大的煤颗粒, 内部热量传递和氧气扩散受阻, 易出现“核心未燃尽”现象; 粒度过小则易被气流夹带, 在炉内停留时间不足, 未充分燃烧即排出, 导致飞灰含碳量升高。(3) 燃料水分含量会降低燃烧温度和反应速率, 水分蒸发需消耗大量热量, 导致炉膛局部温度下降, 抑制焦炭燃烧反应; 同时, 高水分会使燃料颗粒黏性增加, 影响流化效果, 间接降低燃烧效率, 最终使飞灰含碳量上升。

2.2 运行参数

(1) 床温对飞灰含碳量影响显著, 低温燃烧时, 焦炭燃烧反应速率慢, 易因反应不充分残留; 高温虽能促进燃烧反应, 降低含碳量, 但超过煤种灰熔点会引发结焦, 破坏流化状态, 反而导致燃烧恶化, 使飞灰含碳量异常升高。(2) 流化风速需控制在合理范围, 风速过低会导致流化不良, 物料混合不均, 局部氧气匮乏, 燃烧不完全; 风速过高则会增强气流夹带能力, 使大量未燃尽碳粒随飞灰排出, 同时缩短燃料在炉内停留时间, 二者均会导致飞灰含碳量上升。(3) 一次风与二次风比例影响炉内氧浓度分布, 一次风主导流化和底部燃烧, 二次风补充氧量并强化炉膛上部燃烧, 比例失衡会导致局部缺氧或氧气过剩(增加能耗), 均会降低燃烧效率, 使飞灰含碳量升高^[2]。(4) 循环倍率通过影响飞灰停留时间作用于含碳量, 循环倍率高时, 大量飞灰被分离器捕获并返回炉膛二次燃烧, 延长了未燃尽碳的停留时间, 可显著降低飞灰含碳量; 循环倍率过低则飞灰循环量不足, 未燃尽碳无法充分再燃烧。

2.3 设备结构与设计

(1) 炉膛高度与截面积的设计参数决定燃烧空间与反应条件, 炉膛高度不足会导致燃料颗粒在炉内的有效停留时间缩短, 未充分燃尽即排出; 炉膛截面积过大则会降低炉内气流速度, 削弱物料与气体的混合扰动效果, 导致氧传递效率下降, 局部缺氧燃烧, 两种设计缺陷均会使飞灰含碳量升高。(2) 分离器效率是保障飞灰循环燃烧的核心, 高效分离器能捕获更多细颗粒含碳飞灰, 确保其返回炉膛参与二次燃烧, 减少飞灰中未燃尽碳的逃逸量; 若分离器效率偏低, 大量细颗粒含碳飞灰无法被分离回收, 直接随烟气排出, 会显著提升飞灰含碳量, 同时降低燃料利用率。(3) 返料装置的设计合理性决定返料均匀性, 返料均匀能保证炉膛各区域床温分布稳定, 流化状态一致, 燃料燃烧工况均衡; 若返料装置存在结构缺陷, 易出现返料堵塞或偏析现象, 导致局部区域返料不足或过量, 引发床温波动和流化异常, 使局部燃料燃烧不充分, 进而升高飞灰含碳量^[3]。

2.4 其他因素

(1) 石灰石添加量需在脱硫需求与燃烧效率间寻求平衡, 石灰石作为脱硫剂会占据炉膛有效燃烧空间, 稀释可燃成分和氧浓度, 过量添加会显著抑制燃烧反应, 导致飞灰含碳量上升; 若添加量不足, 则无法满足环保脱硫要求, 需通过试验确定最佳添加比例, 实现脱硫与燃烧效率的协同优化。(2) 负荷变化通过扰动燃烧稳定性影响飞灰含碳量, 负荷骤升时, 若给煤量增加过快而

风量未及时匹配, 会导致炉内缺氧, 燃料燃烧不充分; 负荷骤降时, 给煤量减少易引发炉膛温度下降, 燃烧反应减弱, 两种工况均会破坏燃烧稳定性, 使飞灰含碳量短暂升高, 尤其在变负荷速率过快时影响更为明显。

3 循环流化床锅炉降低飞灰含碳量的技术措施

3.1 燃料预处理优化

(1) 通过煤种筛选与混配可有效改善燃料燃烧特性, 针对低挥发分、高固定碳的难燃煤种, 可按比例混入高挥发分煤种(如褐煤、气煤), 利用高挥发分煤快速燃烧释放的热量提升炉膛温度, 为低挥发分煤的焦炭燃烧提供充足能量, 同时优化可燃成分分布, 减少未燃尽碳残留。混配过程中需根据锅炉设计参数和燃烧特性, 通过试验确定最佳混配比例, 避免因混配不当导致燃烧稳定性下降。(2) 优化破碎与筛分工艺实现煤粒度精准控制, 结合锅炉流化特性确定合理的粒度范围(通常控制在0~10mm, 且粗细颗粒占比均衡)。通过升级破碎设备(如采用分级破碎工艺)减少过大颗粒(>10mm)和过细粉末(<0.1mm)的占比, 同时完善筛分系统, 确保入炉煤粒度分布均匀。均匀的煤粒度可提升流化质量, 使燃料颗粒与氧气充分接触, 避免大颗粒内部燃烧不充分、小颗粒被气流夹带逃逸的问题, 从而降低飞灰含碳量。(3) 采用燃料干燥技术降低入炉水分, 针对高水分燃料(水分含量>15%), 可增设前置干燥系统(如滚筒干燥机、气流干燥设备), 将入炉煤水分控制在8%~12%的合理范围。降低燃料水分可减少燃烧过程中水分蒸发消耗的热量, 避免炉膛局部温度降低抑制燃烧反应, 同时减少燃料颗粒黏性, 改善流化状态, 提升传热传质效率, 为燃料充分燃烧创造有利条件^[4]。

3.2 运行参数调整

(1) 床温优化需建立基于煤种特性的动态控制机制, 核心是维持850~950°C的最佳燃烧温度区间。通过精准调控给煤量和送风量实现床温稳定: 当床温偏低时, 适当增加给煤量或减少一次风量, 提升炉膛放热强度; 当床温偏高时, 加大一次风量或引入冷渣调节, 防止超过煤种灰熔点引发结焦。稳定的最佳床温可保障焦炭燃烧反应的动力学速率, 促进未燃尽碳充分燃尽, 同时避免结焦破坏流化状态。(2) 实施流化风速与氧量协同控制, 避免局部缺氧或过度流化问题。通过热态试验确定不同负荷下的最优流化风速, 确保床层处于良好流化状态, 既防止风速过低导致的床层沟流、物料混合不均, 又避免风速过高造成的飞灰夹带过量。同时, 实时监测炉膛出口氧浓度(控制在3%~5%), 根据氧浓度反馈调整总风量, 实现“风煤匹配”, 确保炉内氧气分布均匀, 为燃料

燃烧提供充足氧化剂,提升燃烧效率。(3)合理调节循环倍率,平衡飞灰夹带与燃烧时间的关系。循环倍率的调节通过调整分离器进出口压差、返料风量等参数实现,一般控制在30~60的最优范围。对于飞灰含碳量偏高的工况,适当提高循环倍率,增加飞灰在炉内的停留时间,使未燃尽碳颗粒获得充足的二次燃烧机会;若循环倍率过高导致炉膛温度下降,需适度降低,确保在提升燃烧效率的同时,维持床层燃烧稳定性。

3.3 设备改造与升级

(1)高效分离器改造是提升飞灰回收效率的核心措施。针对原有分离器效率不足的问题,可采用增加旋风分离器数量、优化内筒结构(如增设导向叶片、扩大分离空间)、提升设备气密性等改造方案。高效分离器能显著提高对细颗粒含碳飞灰的捕获效率,将更多未燃尽碳颗粒返回炉膛二次燃烧,减少飞灰中未燃尽碳的逃逸量,同时提升燃料利用率。(2)返料装置改进重点提升返料均匀性与稳定性。将传统返料器改造为流线型结构,减少返料通道内的积灰死角,降低堵塞风险;增设返料均匀分配器,通过优化布料结构确保返料灰均匀分布至炉膛各个区域,避免局部返料过多或不足导致的床温波动。稳定均匀的返料可保障炉膛燃烧工况均衡,防止局部区域燃料燃烧不充分,从而降低飞灰含碳量^[5]。(3)炉内受热面优化旨在强化传热与物料混合效果。通过增加翼形管束、在炉膛上部增设屏式受热面等方式,提升炉内传热效率,避免局部温度过低抑制燃烧反应;同时合理调整受热面间距,减少对气流和物料流动的阻碍,强化炉内气体与物料的混合扰动,提升氧传递效率,为燃料充分燃烧提供更有利的空间条件。

3.4 先进技术应用

(1)富氧燃烧技术通过提升局部氧浓度促进焦炭燃尽。该技术向炉膛内通入氧浓度>21%的富氧空气,减少氮气等惰性气体的稀释作用,提升燃烧温度与反应速率,尤其适用于低挥发分煤种和高负荷工况。应用过程中需配套氧浓度监测与调控系统,将氧浓度控制在合理范围,避免过高氧浓度导致结焦和设备高温腐蚀,同时

降低烟气排放量,便于后续污染物处理。(2)飞灰再燃技术实现未燃尽碳的回收利用。在锅炉尾部增设高效飞灰分离收集装置,通过气力输送系统将部分高含碳量飞灰返回炉膛上部或燃烧室,使其再次参与燃烧。返回的飞灰在炉内重新获得充足的燃烧时间和氧气,未燃尽碳充分燃尽,既能降低飞灰含碳量,又能回收利用未燃尽碳的热量,提升锅炉热效率。该技术需保障飞灰输送系统的稳定性,避免堵塞或输送不均问题。(3)智能控制与优化算法实现燃烧参数动态精准调控。基于大数据分析构建锅炉燃烧预测模型,实时采集给煤量、风量、床温、氧浓度、飞灰含碳量等多维度运行数据,通过机器学习、模糊控制等算法,动态优化调整燃烧参数。智能控制系统可快速响应煤种变化、负荷波动等工况,实现“按需供风、精准配煤”,维持最佳燃烧状态,从根本上降低飞灰含碳量,同时提升锅炉运行的经济性与稳定性。

结束语

循环流化床锅炉飞灰含碳量的控制是提升燃烧效率、降低运行成本与环保风险的核心环节。通过系统研究燃料特性、运行参数、设备结构及先进技术的影响机制,本文提出燃料预处理优化、参数动态调控、设备升级改造及富氧燃烧、智能控制等综合措施。实际应用中需结合锅炉特性与工况条件,统筹技术可行性与经济性,实现飞灰含碳量的精准控制,为循环流化床锅炉的高效清洁运行提供科学依据与技术支撑。

参考文献

- [1]王新钢.某75t/h循环流化床锅炉飞灰含碳量高的原因分析及验证[J].机电信息,2020,(32):70-71.
- [2]袁权.降低循环流化床(CFB)锅炉飞灰含碳量技术研究[J].科技与创新,2024,(18):78-80.
- [3]蒋丽,娄启贵.循环流化床锅炉飞灰含碳量偏高分析与调整[J].贵州电力技术,2016,19(04):8-10.
- [4]郑毅.基于降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的技术分析[J].建筑理论,2025,(05):56-58.
- [5]邵志杰.基于降低循环流化床锅炉飞灰含碳量的技术分析[J].建筑技术科学,2025,(05):98-100.