

循环流化床锅炉长周期运行技术的研究应用

武培珍

国能亿利能源有限公司责任公司电厂 内蒙古 鄂尔多斯 014300

摘要：循环流化床锅炉长周期运行对能源利用效率与稳定性意义重大。本文阐述了运行技术基础，分析了影响长周期运行的关键因素，包括设备、燃烧与物料、操作调控等方面，介绍了设备优化、燃烧与物料管理、运行调控等关键技术，并提出状态监测、维护检修、技术协同等保障措施，为循环流化床锅炉长周期运行提供理论支撑与实践指导。

关键词：循环流化床锅炉；长周期运行；关键技术；保障措施；协同优化

引言：循环流化床锅炉凭借高效燃烧、污染物排放低等优势，在能源领域应用广泛。然而，实现其长周期运行面临诸多挑战。深入探究循环流化床锅炉长周期运行技术，剖析影响运行的关键因素，提出有效的技术措施与保障策略，对于提升锅炉运行稳定性、降低运行成本、提高能源利用效率，推动能源行业可持续发展具有重要意义。

1 循环流化床锅炉运行的技术基础

1.1 核心概念与工作原理

循环流化床锅炉由多个关键部件构成。炉膛作为主要燃烧空间，其内部特殊的结构设计为燃料与物料的充分反应提供场所。分离器位于炉膛出口，承担分离高温烟气中固体颗粒的重要任务，分离出的颗粒通过返料装置重新送回炉膛，形成物料循环系统。这一系统中，返料装置控制着物料的回送量与回送速度，保障循环过程稳定^[1]。流化燃烧与物料循环的运行机制紧密相连。燃料与床料混合后进入炉膛，一次风从布风板底部送入，使床料与燃料呈流化状态，这种状态下燃料与空气充分接触，促进燃烧反应。燃烧产生的高温烟气携带大量固体颗粒上升，在炉膛内完成部分燃烧与传热过程。离开炉膛的气固两相流进入分离器，颗粒被分离后经返料装置返回炉膛，继续参与燃烧与传热，未被分离的细小颗粒随烟气排出。如此循环，实现燃料的高效燃烧与热量传递。

1.2 长周期运行的内涵与特征

长周期运行指循环流化床锅炉在较长时间内保持连续稳定运行，且各项运行指标符合效能要求。这一运行模式对设备可靠性、系统稳定性、操作精准度均提出更高标准。在连续稳定运行时长方面，需远超常规运行周期，减少非计划停机次数；效能要求上，不仅要维持较高的燃烧效率与热效率，还要确保污染物排放达标。与常规运行模式相比，长周期运行的技术要求更为严苛。

常规运行模式下，设备可能因临时调整、故障检修频繁启停，而长周期运行要求最大限度降低启停频率，减少因热应力变化对设备造成的损伤。在参数控制上，长周期运行需更精准调控风煤配比、床温、物料浓度等关键参数，避免因参数波动引发运行故障，保障系统始终处于最佳工况。

1.3 相关理论支撑

气固两相流理论对物料循环过程起着关键指导作用。在循环流化床锅炉内，气体与固体颗粒相互作用，形成复杂的两相流动。该理论揭示了气固两相在不同条件下的流动特性，如颗粒的悬浮、输送与分离规律。依据此理论，可优化分离器结构与返料装置设计，提升颗粒分离效率与循环稳定性，减少物料循环过程中的堵塞、结团等问题。燃烧动力学理论深入解释了稳定燃烧的内在机制。该理论研究燃料燃烧过程中的化学反应速率、反应机理及影响因素。在循环流化床锅炉中，通过燃烧动力学分析，可明确不同燃料特性下的最佳燃烧条件，如温度、氧气浓度与颗粒粒径要求。据此调整运行参数，促进燃料充分燃烧，降低不完全燃烧损失，避免因燃烧不稳定导致的结焦、熄火等故障，为长周期稳定运行奠定理论基础。

2 影响长周期运行的关键因素

2.1 设备系统因素

核心部件的磨损与腐蚀直接威胁循环流化床锅炉的运行周期。炉膛受热面长期处于高温、高颗粒冲刷环境，表面易出现磨损减薄现象，尤其在烟气转向区域与物料浓度较高的部位，磨损更为严重。随着磨损加剧，管壁厚度降低，承压能力减弱，可能引发爆管事故，迫使锅炉停机检修。分离器同样面临严峻考验，其内部的高速气固两相流使内壁承受强烈冲刷，耐磨层一旦破损，分离效率会快速下降，导致大量未分离颗粒进入尾

部烟道，加剧后续设备磨损，影响物料循环平衡，干扰燃烧稳定。辅机系统的稳定性是保障锅炉持续运行的重要支撑。风机作为提供流化风与二次风的关键设备，其叶片磨损、轴承故障或电机异常，都会导致风量不足或波动，影响流化状态与燃烧效率。给料设备的稳定运行同样关键，给料不均或设备卡死，会造成燃料供应中断或波动，使床温失控，甚至引发结焦。任一辅机故障都可能打破系统平衡，导致锅炉被迫降负荷或停机，缩短整体运行周期。

2.2 燃烧与物料因素

煤种适应性与燃料特性波动对锅炉运行影响显著。不同煤种的发热量、挥发分、灰分差异较大，当实际燃用煤种偏离设计煤种时，燃烧特性改变，可能出现燃烧不充分、床温异常等问题。挥发分过低，点火困难且燃烧不稳定；灰分过高，会增加床料总量，影响流化质量，还可能加剧设备磨损。燃料特性的频繁波动，如水分含量变化，会导致给料不畅，影响燃烧放热量，使运行参数难以稳定控制，增加运行风险^[2]。床料特性直接影响流化状态。床料粒径分布不合理，细颗粒过多易导致沟流现象，粗颗粒占比过大则增加流化阻力，使床料难以达到良好的流化状态。床料密度异常，会改变所需的流化风量，风量不足时床料无法充分流化，可能引发局部结焦；风量过大则增加风机能耗，且加剧设备磨损。床料特性的细微变化，都可能破坏稳定的流化燃烧条件，干扰锅炉长周期运行。

2.3 操作与调控因素

运行参数的稳定性控制是长周期运行的关键。床温是反映燃烧状态的核心参数，床温过高易引发结焦，过低则导致燃烧效率下降，甚至熄火。风量与压力的精准调控同样重要，一次风量不足会影响流化质量，二次风量分配不当会造成燃烧不充分；压力波动过大，会破坏系统密封性，导致漏风或正压喷火，威胁设备安全与运行稳定。参数控制稍有偏差，就可能引发连锁反应，降低锅炉运行可靠性。负荷波动与变工况运行对锅炉适应性提出挑战。当锅炉负荷快速变化时，燃料量、风量需同步调整，若调整不及时或幅度不当，会导致床温、压力剧烈波动，破坏燃烧稳定。变工况运行时，物料循环量、炉膛温度分布都会改变，若不能及时优化运行参数，设备各部件承受的热应力与机械应力也会随之变化，加速部件老化与损坏，缩短设备使用寿命，影响长周期运行目标的实现。

3 长周期运行的关键技术

3.1 设备优化技术

循环流化床锅炉核心部件长期处于高温、高磨损环境，设备优化技术从防护与可靠性两方面提升其耐用性。受热面防护采用复合技术手段，在易磨损区域，通过超音速火焰喷涂工艺将碳化钨等耐磨材料附着于金属表面，形成硬度高、抗冲刷的涂层，有效抵御固体颗粒的持续撞击。材料升级选用高铬镍合金钢制造受热面管件，这类材料在高温、高硫环境下抗氧化与抗腐蚀性能显著增强，能延缓管壁减薄速度，降低爆管风险。辅机系统可靠性提升依赖冗余设计与监测改进。对风机、给料机等关键辅机实施冗余配置，当主设备突发故障时，备用设备自动无缝切换投入运行，维持系统供风、给料稳定。在设备关键部位加装振动、温度传感器，实时采集轴承、叶片等部件运行数据，借助数据分析算法，提前识别部件磨损、失衡等潜在故障，使运维人员可在故障发生前介入检修，确保辅机持续稳定运转，为锅炉长周期运行提供动力保障。

3.2 燃烧与物料管理技术

宽煤种适应性燃烧调控通过燃料预处理与配风优化实现。针对高水分、高灰分煤种，采用破碎、干燥等预处理工艺，降低水分含量，改善燃料流动性与燃烧性能；对挥发分低的煤种，引入预燃装置提高着火稳定性。运行中依据煤质特性动态调整配风方案，燃用低挥发分煤时，增加一次风穿透能力，强化燃料与氧气混合；燃用高挥发分煤时，精准控制二次风送入时机与风量，避免燃烧速率过快导致床温骤升，确保不同煤种均能充分燃烧。床料平衡与循环系统优化聚焦返料效率与床压稳定。改进返料装置结构，采用非机械阀替代传统机械阀，减少运行中因卡塞、磨损导致的返料不畅问题，提升物料循环效率。建立床压动态调控模型，根据负荷变化与床料特性，自动调节排渣量，维持床压稳定在合理区间。当床料粒径变粗引发流化阻力增大时，及时排出大颗粒床料并补充细颗粒物料，优化床料粒径分布，保障流化状态稳定，为稳定燃烧创造条件。

3.3 运行调控技术

多参数协同控制策略基于智能算法实现床温、风量、负荷动态匹配。控制系统实时采集关键运行参数，通过建立数学模型分析各参数间耦合关系，当负荷增加时，优先增大一次风量确保流化状态稳定，同步按比例增加燃料量与二次风量，维持床温平稳；负荷降低时，有序减少各参数输入，避免床温骤降。通过参数间协同调节，有效减少运行波动，提升锅炉运行稳定性。变工况平滑过渡技术保障负荷变化时参数稳定^[3]。制定分段式变负荷控制方案，负荷变化初期缓慢调整燃料量与风

量，降低参数波动幅度；待系统初步响应后，根据参数变化速率动态调整调节量。引入预测控制算法，提前预判负荷变化对床温、压力等参数影响，预先调整相关参数，如升负荷前增加返料量维持物料循环平衡，降负荷时优化配风防止燃烧不稳定，实现变工况过程的平滑过渡，保障锅炉安全稳定运行。

4 技术应用的保障措施

4.1 状态监测与预警体系

关键参数实时监测技术通过高精度传感器实现对设备运行状态的精准感知。在炉膛、分离器等核心部位布置温度传感器，监测各区域温度分布，掌握燃烧与传热情况；压力传感器安装于风道、管道关键节点，实时反馈风压与压力变化，保障流化风与烟气输送稳定；流量传感器对燃料、空气及循环物料的流量进行不间断监测，为运行调控提供数据基础。这些传感器具备高灵敏度与稳定性，可快速捕捉参数微小波动，将数据实时传输至控制系统，确保运行参数的动态可视化。故障预警机制基于运行数据的深度分析构建异常识别模型。系统对采集的温度、压力、流量等数据进行多维度关联分析，结合历史运行数据与设备性能曲线，设定合理的参数阈值与变化趋势判断规则。当参数偏离正常范围或变化速率超出预设值时，系统自动识别异常并触发预警。针对不同类型故障，建立分级预警体系，轻微异常以提示信息通知运维人员关注，严重异常则发出紧急警报，并同步推送故障可能原因及初步处理建议，为故障预判与快速响应争取时间。

4.2 维护与检修策略

预防性维护技术依据设备状态制定提前检修计划。通过状态监测数据评估设备健康状况，运用大数据分析与寿命预测模型，对关键部件（如风机轴承、返料阀密封件）的剩余使用寿命进行预估。结合设备运行工况与负荷变化规律，制定个性化维护方案，在部件性能下降至临界值前安排检修，更换磨损部件、补充润滑油脂，避免因突发故障导致停机。定期对设备进行全面性能检测，优化运行参数，延长设备整体使用寿命。在线检修与快速恢复技术旨在减少停机时间。对于部分非关键设备或可隔离部件，采用在线检修方式，在不影响锅炉整体运行的前提下，对磨损的给料机链条、轻微泄漏的阀门等进行更换或修复。开发快速检修工具与工艺，如模

块化安装的受热面管件，便于快速拆装更换。建立备件快速响应机制，确保常用备件库存充足，故障发生时可立即调用，配合高效的检修流程，缩短故障处理时间，保障锅炉连续运行。

4.3 技术协同与集成

设备、燃烧、调控技术的联动机制实现系统整体优化。将设备优化技术中的耐磨防护、辅机监测数据，与燃烧管理技术的煤种调控、物料循环参数，以及运行调控技术的多参数控制策略进行整合。当监测到分离器磨损加剧时，系统自动关联调整返料量与配风方案，降低气固两相流对分离器的冲击；在进行宽煤种燃烧调控时，同步优化辅机运行参数与设备冷却系统，保障设备适应燃烧工况变化。通过技术间的数据交互与协同响应，提升系统整体稳定性与运行效率。与其他系统的适配性优化聚焦脱硫脱硝、热控系统的协同运行。对脱硫脱硝系统与锅炉燃烧系统进行接口优化，根据锅炉负荷与燃烧工况调整脱硫脱硝药剂投加量与反应条件，确保污染物达标排放的同时减少药剂浪费。在热控系统中嵌入锅炉运行调控逻辑，使温度、压力控制指令与锅炉燃烧特性相匹配，避免因热控系统响应延迟或控制偏差影响锅炉运行。通过系统间的参数共享与控制联动，消除各系统运行冲突，实现循环流化床锅炉与外围系统的高效协同运行。

结束语

循环流化床锅炉长周期运行技术涉及多方面内容，从技术基础到关键因素，再到关键技术与保障措施，各环节紧密相连。通过设备优化、燃烧与物料管理、运行调控等关键技术，以及状态监测、维护检修、技术协同等保障措施，可有效提升锅炉长周期运行能力。未来，需进一步深化研究，推动技术创新，为循环流化床锅炉长周期运行提供更坚实保障。

参考文献

- [1]李光玉,朱鸿滨.热电厂循环流化床锅炉长周期运行技术应用研究[J].百科论坛电子杂志,2022(2):302-304.
- [2]韩方东,王传玉,王伟国,等.75t/h循环流化床锅炉节能环保改造研究[J].节能,2024,43(8):70-72.
- [3]徐俊红,张红建.240t/h循环流化床锅炉节能提效及低氮燃烧优化改造[J].煤化工,2022,50(5):115-118.