

循环流化床锅炉燃烧调整技术应用研究

张云鑫¹ 赵亚洁² 马成俊³ 张生旺⁴

1. 青海盐湖元品化工有限责任公司 青海 格尔木 816099

2. 青海盐湖元品化工有限责任公司 青海 格尔木 816099

3. 黄河上游水电开发有限责任公司西宁发电分公司 青海 西宁 810001

4. 青海盐湖元品化工有限责任公司 青海 格尔木 816099

摘要：循环流化床锅炉因其燃料适应性广、燃烧效率高、环保性能优越等特点，在电力生产和工业供热领域得到广泛应用。然而，实际运行中普遍存在燃烧效率偏低、床温分布不均、污染物排放超标等问题，其根源在于对燃烧调整技术的掌握不够系统和深入。本文从循环流化床锅炉的燃烧机理出发，系统分析了床温控制、床压控制、风煤配比优化、给煤量调节、排渣管理和启动停炉等关键调整环节的技术要点，提出了基于运行工况动态优化的燃烧调整策略。研究表明，科学合理的燃烧调整能够显著提高锅炉热效率、降低厂用电率、减少污染物排放，是循环流化床锅炉安全经济运行的保障。

关键词：循环流化床锅炉；燃烧调整；床温控制；风煤配比；运行优化

引言：循环流化床锅炉技术以其燃料适应性强、燃烧效率高和环保性能优异等优势，在燃煤发电和工业供热领域获得广泛应用。然而，大量现役机组实际运行中普遍存在床温波动大、飞灰含碳量偏高等问题，燃烧调整水平参差不齐严重制约了机组的经济性和安全性。燃烧调整作为连接锅炉设计与实际运行的枢纽环节，其技术质量直接决定设计性能能否转化为运行效益。本文从循环流化床燃烧机理出发，系统研究各关键调整环节的技术原理与操作要点，以期在现场燃烧优化提供技术参考。

1 循环流化床锅炉燃烧系统概述

1.1 循环流化床燃烧的基本原理

循环流化床燃烧技术建立在气固流态化原理之上。空气通过布风板进入炉膛后，床料和煤粒呈流态化状态，形成下部密相区和上部稀相区。燃料在炉膛内着火燃烧，部分细颗粒被烟气带出后经旋风分离器分离并返回炉膛，形成物料循环回路。该技术的核心优势包括三方面：燃料在炉膛内停留时间长、床料蓄热量大，有利于低热值燃料燃尽；强烈的气固混合使炉膛温度分布均匀，避免局部高温；床温控制在 850℃至 950℃，恰处石灰石脱硫最佳反应温度窗口，同时低于热力型氮氧化物大量生成阈值，赋予循环流化床锅炉优异的燃料适应性和环保性能。

1.2 循环流化床锅炉的主要系统构成

循环流化床锅炉由多个相互关联的系统组成。燃烧

系统包括炉膛、布风板、风室和点火燃烧器，是燃料燃烧的主要场所。物料循环系统由旋风分离器和回料阀构成，负责分离并送回高温颗粒，维持床料平衡和炉膛温度。给煤系统完成燃料制备、输送和播撒，多点给煤方式有利于燃料在炉膛截面均匀分布。风烟系统由一次风机、二次风机、引风机和空气预热器组成，一次风保证床料流化，二次风补充燃烧氧气。除渣除灰系统排出炉渣和飞灰，维持床层厚度稳定。各系统协同运行是锅炉安全经济运行的基础^[1]。

1.3 燃烧调整对锅炉运行的影响

燃烧调整是运行人员通过改变操作参数使燃烧过程维持在最佳状态的控制行为。合理有效的燃烧调整对锅炉运行有直接而显著的影响。在燃烧效率方面，优化风煤配比和床温控制可降低飞灰和炉渣含碳量，提高燃烧效率。在运行安全性方面，合理的床温控制防止结焦和高温腐蚀，适宜的一次风量避免布风板漏渣和风帽烧损。在环保方面，低氧燃烧和分级送风抑制氮氧化物生成，适宜床温提高脱硫效率。在经济性方面，合理风量配比降低风机能耗，稳定床压减少排渣热损失。

2 循环流化床锅炉关键燃烧调整技术

2.1 床温控制技术

床温是循环流化床锅炉运行中最重要的监控参数，正常运行一般控制在 850℃至 950℃之间：低于 850℃时脱硫效率下降、飞灰含碳量升高；高于 950℃时热力型

氮氧化物生成急剧增加,且存在结焦风险。床温控制手段包括给煤量调节、一次风量调节和排渣量调节三个方面。给煤量直接影响床温,但存在数分钟滞后,运行人员须根据床温变化趋势提前预判调节。一次风量变化直接影响流化质量和床层蓄热量,增加一次风量加强床层扰动和换热,通常使床温呈下降趋势——床温偏高时增加一次风量可降温,床温偏低时减少一次风量可提温。排渣量调节是辅助手段,当床温持续偏高而其他手段无效时,增加排渣量减少床层蓄热量,有助于床温回调。

2.2 床压控制技术

床压反映床层厚度和床料蓄积量,是影响流化质量和燃烧稳定性的关键参数。床压过低时蓄热量不足,燃烧稳定性差,易发生灭火;床压过高时布风板阻力增大、风机能耗增加,流化可能恶化。适宜床压通常控制在 6kPa 至 10kPa 之间,具体因炉型和煤种而异。床压控制主要通过排渣调节:床压超上限时加大排渣量,低于下限时减少或停止排渣,必要时补充床料。排渣过程中应注意排渣温度和渣粒外观,判断流化状况。床压控制还应考虑负荷变化影响——负荷升高时床压自然上升需适当排渣,负荷降低时床压下降需减少排渣,同时排渣调节应与风量调节协同进行^[2]。

2.3 风煤配比优化

风煤配比是燃烧调整中最核心的内容,涉及一次风、二次风比例和过量空气系数的确定。一次风保证床料流化和维持床温,风量过小导致流化不良,过大致使床温下降,通常占总风量 50% 至 70%,具体根据煤种和负荷确定。二次风从炉膛分层喷口进入,补充氧气、强化燃烧,并通过分级送风抑制氮氧化物生成。过量空气系数一般维持 1.15 至 1.25 之间,各层喷口分配根据炉膛温度分布动态调整——密相区上方引入大量二次风形成还原区以减少氮氧化物生成,炉膛出口补入少量二次风保证燃尽。风煤配比优化需在氧量、一氧化碳浓度、飞灰含碳量等指标间寻找平衡,通过取样分析和在线监测数据综合判断燃烧状况并针对性调整。

2.4 给煤量与给煤分布调节

给煤量决定锅炉负荷和床温水平,给煤调节的响应速度和控制精度直接影响锅炉的负荷跟踪能力和运行稳定性。循环流化床锅炉给煤调节不同于煤粉炉,由于炉膛热容量大,给煤量变化后床温响应存在较长时间滞后(一般为 3 至 8 分钟),运行人员须预见性操作,避免大幅度和频繁波动。负荷增加时应逐步增加给煤量并同步增加风量,待床温稳定后再评估;负荷降低时先减少

风量再减少给煤量,防止床温骤降。给煤分布均匀性直接影响燃烧效率,各给煤点应均衡给煤,否则会造成局部床温偏差、高温区结焦或低温区燃烧不完全。运行中通过床温测点数据判断分布均匀性并针对性校正。入炉煤粒径一般控制在 0 至 10mm,以 3 至 8mm 中颗粒为主导,0 至 1mm 细颗粒比例不宜过高,运行中应根据煤种变化及时调整破碎设备。

2.5 排渣系统运行调整

排渣系统承担着维持床层厚度稳定和排除床料中惰性物质的重要职能。排渣量控制的核心依据是床压信号,当床压升高至上限时应增加排渣量,床压降低至下限时应减少排渣量。排渣应遵循连续少量原则,避免大排大停造成床压大幅波动。连续少量排渣有利于维持床层厚度稳定,使床压控制更加平稳。排渣温度是判断床层燃烧状况的重要参考指标,正常排渣温度接近床温水平,若排渣温度明显偏低可能表明床层局部存在死区,若排渣温度明显偏高则可能预示床层存在局部超温或结焦前兆。

2.6 锅炉启动与停炉过程调整

启动过程中,从点火到并网需要经历床料流化、油枪预热、投煤升温、升负荷等多个阶段,每个阶段的控制要点各不相同。点火初期应先启动风机建立床料流化,然后投入点火油枪缓慢提升床温。床温升至 450℃ 至 500℃ 时开始脉冲投煤,观察床温上升趋势判断煤的着火情况。床温稳定升至 750℃ 以上时可逐步退出油枪,进入纯煤燃烧阶段,继续提升床温至 850℃ 至 950℃ 的正常运行范围。整个启动过程中应严格控制升温速率,一般要求床温升温速率不超过 100℃/h,防止耐火材料因热应力产生裂缝。停炉过程则与启动相反,先逐步降低负荷和减少给煤量,待床温降至一定水平后停止给煤,继续通风冷却一段时间防止床料结焦。停炉过程中的降温速率同样需要严格控制,避免降温过快造成炉墙和管道损伤。

3 燃烧调整中的典型问题及处理对策

3.1 床温偏高或偏低的原因及处理

床温偏高通常由给煤量过大、煤质低位发热量偏高、风量不足或排渣不畅等原因引起。运行中应首先核查给煤量是否与当前负荷匹配,如果给煤量偏大则适当减少给煤量。同时检查一次风量和二次风量是否满足燃烧需求,床温偏高时增加一次风量可有效降温。若排渣量偏小导致床层过厚、蓄热量过大,应适当增加排渣量。床温偏低则相反,通常由给煤量不足、煤质变差、风量过大或床压过低引起,处理方向与床温偏高相反。

3.2 飞灰与炉渣含碳量控制

飞灰含碳量和炉渣含碳量是衡量燃烧效率的关键指标。飞灰含碳量偏高通常表明细颗粒燃料在炉膛上部未能燃尽即被带出,或者分离器效率不足导致细颗粒未有效返回炉膛。处理措施包括:适当提高炉膛温度以加快细颗粒燃烧速率,调整二次风配比加强炉膛上部扰动,检查旋风分离器运行状况。炉渣含碳量偏高则表明床层底部燃烧状况不佳,可能的原因包括一次风量不足、给煤分布不均或排渣量过大^[3]。应相应增加一次风量改善流化质量,检查各给煤点给煤量的均匀性,适当减少排渣量增加床料停留时间。

3.3 结焦的预防与处理

结焦是循环流化床锅炉最严重的运行事故之一,按成因可分为高温结焦和低温结焦两类。高温结焦发生在床温超过 950℃至 1000℃时,床料中低熔点成分熔融并粘结形成大块焦块,通常由给煤量过大、风煤配比严重失调或局部流化不良引起。低温结焦发生在启动或低负荷运行时,床温虽然不高但局部还原性气氛导致灰熔点降低,或局部流化不良使未燃煤粒积聚引起局部高温。结焦的预防应从维持适宜床温、保证流化均匀、稳定床压、入炉煤粒径控制等方面入手。一旦发现床温异常升高或床压剧烈波动等结焦前兆,应立即采取降低负荷、增加风量等措施,必要时紧急停炉处理。

3.4 污染物排放控制

循环流化床锅炉的低污染排放优势需要通过燃烧调整来发挥。氮氧化物控制的主要手段包括控制床温不超过 950℃、实施分级送风、适当降低过量空气系数等。硫氧化物控制则通过炉内添加石灰石实现,其关键在于维持床温在 850℃至 900℃之间以保证脱硫反应效率,同时控制钙硫摩尔比在合理范围内。一氧化碳排放的控制则是保证燃烧完全的标志,一氧化碳浓度升高通常表明风煤配比不当、局部缺氧或燃烧温度不足,应及时调整风量和给煤量。

4 燃烧调整策略的工程应用

4.1 运行工况动态优化方法

循环流化床锅炉的燃烧调整应当从静态参数控制转向动态工况优化。所谓动态优化,是指根据锅炉负荷变化、煤质波动和设备状态实时调整各运行参数,使燃烧过程始终维持在最优状态。动态优化的核心是建立“监测—分析—调整—评估”的闭环机制:通过在线监测系统持续跟踪床温、床压、氧量、一氧化碳、氮氧化物等关键参数,通过数据分析判断当前工况的偏离方向,通

过调整操作使各参数回归最优范围,再通过调整后的效果评估确认调整措施的有效性。这种闭环机制要求运行人员具备系统思维,能够从多参数的协同变化中识别问题本质,而不是孤立地调节某一个参数。

4.2 基于煤质变化的燃烧调整策略

入炉煤质的变化是循环流化床锅炉运行中最常见的外部扰动,对煤质变化的适应能力是衡量燃烧调整水平的重要标志。当煤的挥发分发生变化时,应相应调整给煤量和风量配比——挥发分降低时应适当提高床温以保证着火稳定,挥发分升高时则可适当降低床温以减少氮氧化物生成。当煤的灰分发生变化时,灰分增加会使床层厚度自然增加、床压上升,应适当加大排渣量以维持床压在正常范围。当煤的水分发生变化时,水分增加会降低炉膛温度、增加烟气体积,需适当增加给煤量并调整风量配比^[4]。

4.3 燃烧调整与设备维护的协同管理

燃烧调整与设备维护之间存在紧密的相互作用关系,良好的燃烧调整能够减轻设备磨损、延长检修周期,而设备完好是燃烧调整有效实施的前提。运行中应重点关注受热面磨损与风煤配比的关系——风量过大特别是二次风速过高会加剧炉膛水冷壁和尾部受热面的磨损,运行中应在满足燃烧需求的前提下控制风速在合理范围。分离器效率与物料平衡密切相关,分离器效率下降会减少返回炉膛的物料量、造成床压下降和燃烧效率降低,运行中应定期检查分离器运行状况。空预器漏风和积灰会影响一二次风的风量和风压,运行中应保持合理的排烟温度,定期进行吹灰和漏风检查。

结束语

循环流化床锅炉的燃烧过程是气固流动、传热传质和化学反应多重物理化学现象耦合作用的复杂系统,其燃烧调整涉及床温、床压、风煤配比、给煤分布、排渣控制等多个相互关联的操作环节。

参考文献

- [1] 骆绍山. 循环流化床锅炉低氮燃烧技术研究 [J]. 中国设备工程, 2025(8): 202-204.
- [2] 李龙, 戴昕. 火电厂循环流化床锅炉脱硫脱硝系统运行调整方法研究 [J]. 电力系统装备, 2022(7): 101-104.
- [3] 胡启宁. 循环流化床锅炉运行问题和节能降耗优化 [J]. 自动化应用, 2023, 64(16): 114-116.
- [4] 罗旋. 循环流化床锅炉燃烧调整及其燃烧优化研究 [J]. 城市周刊, 2025(50): 172-174.