300MW 循环流化床锅炉低负荷稳燃技术研究与应用

任富强

内蒙古蒙泰不连沟煤业有限责任公司煤矸石热电厂　内蒙古　鄂尔多斯　017100

摘　要：在新型电力系统建设持续推进的背景下，风电光伏等间歇性新能源并网比例不断提升，电网负荷波动幅度持续增大，对火电机组的深度调峰能力提出了更高标准的要求。本文以 300MW 循环流化床锅炉为研究对象，系统分析机组低负荷运行过程中的各类稳燃缺陷与形成机理。针对性开展稳燃技术优化研究，通过优化床温智能调控策略、重新匹配高低负荷风量送风体系、精细化管控床压与物料循环状态、优化给煤方式与燃煤掺配方案等多项技术措施，构建适配深度低负荷工况的稳燃控制体系。

关键词：300MW；循环流化床锅炉；低负荷；稳燃技术

引言

300MW 循环流化床锅炉凭借燃烧稳定、煤种适应性广、负荷调节灵活等技术优势，被广泛应用于调峰发电领域。但在机组深度低负荷运行过程中，炉膛燃料投入量显著减少，炉内整体蓄热水平下降，物料循环强度减弱，原有设计工况与实际低负荷运行状态出现明显偏差。机组常规运行方式多适配中高负荷区间，固定的风量配比、床压控制和给煤模式，无法适配深度低负荷的弱燃烧环境。容易出现床温波动大、燃烧滞后、氧场分布不均、物料平衡失衡等一系列问题，造成燃烧稳定性下降，不仅增加助燃能耗，还会带来运行安全隐患。

1 300MWCFB 锅炉低负荷稳燃关键技术方案

1.1 优化床温控制策略提升基础稳燃能力

（1）床温控制策略的优化需要改变单一被动调节的传统思路，建立负荷联动的预判调控模式。传统调节大多在床温出现明显下降之后才调整给煤量或是风量，调节动作存在明显滞后，温度波动幅度偏大。新的控制策略可以依托负荷变化趋势提前开展干预，在机组降负荷的过程中，预先调整燃料供给与风量配比，维持床内物料的蓄热水平。这种前置调节方式能够缩小床温的波动范围，避免温度短时间内快速跌落，让炉膛始终处在适合燃料着火与持续燃烧的温度区间。（2）在调控过程中还需要兼顾炉膛不同区域的温度均衡状态。低负荷条件下炉膛内部热量分布容易出现偏差，局部区域温度偏低会造成燃烧反应减弱，进而扰动整体燃烧工况[1]。控制策略需要兼顾密相区与稀相区的温度变化，重点保障密相区维持足够的温度水平，为新入炉燃料提供稳定的着火热源。同时控制炉膛散热带来的热量损失，减少不必要的热量外泄，充分发挥循环物料的蓄热优势，依靠大量循环颗粒持续传递热量，支撑燃料稳定着火。（3）优化床温控制策略的同时，还要建立床温异常的预警机制。针对低负荷运行时容易出现的温度缓慢下降趋势，设置对应的监视指标，及时捕捉温度变化信号，提前采取调控手段。通过持续稳定维持炉膛床温，保证入炉燃料可以快速着火并且持续燃烧，减少燃烧波动的发生概率，从根本上提升锅炉在低负荷区间的稳燃性能。

1.2 优化高低负荷风量配比与送风调节方式

（1）风量配比优化的核心是区分一次风与二次风在不同负荷阶段的功能定位。一次风主要作用是支撑床料流化，维持密相区颗粒的持续扰动。二次风负责补充燃烧所需氧气，促进炉膛上部未燃尽颗粒与空气充分混合。高负荷工况下燃料量较大，需要更高的总风量满足燃烧与流化需求。当机组逐步降低负荷，燃料释放热量减少，总风量也需要同步下调，但不能简单按照负荷比例等比例缩减一次风。过低的一次风会造成床料流化不足，局部出现沉积，过高的一次风会增强炉膛散热，造成床温快速降低。（2）低负荷区间的送风调节需要优先保证一次风满足最低流化风量的基本要求，在此基础上削减多余的一次风总量，减少冷却效应。二次风的分配则需要结合炉膛燃烧区域的氧含量变化进行精细化调整，调整不同层二次风的投运状态与开度，让氧气可以输送至燃料集中反应的区域，避免局部缺氧或者过量空气带走热量。送风调节应当摒弃大幅度快速调整的操作习惯，采用小幅度连续调节的模式，避免风量突变带来的床温剧烈波动。（3）送风调节策略需要和负荷变动过程联动，建立预判式调节逻辑。在降负荷阶段提前缩减

多余送风量，避免过量冷风持续进入炉膛。升负荷阶段逐步增加风量匹配燃料释放的热量。持续监视炉膛内部氧含量，流化状态以及床温变化，动态修正风量配比。

1.3 精细化调整床压与物料循环控制

（1）精细化床压调控需要根据机组负荷区间划分对应的控制标准，摒弃全负荷统一参数的粗放调控模式。常规高负荷工况可维持较高床压数值，充分保障炉膛蓄热基数。低负荷工况下需要适当下调床压运行基准，将床压稳定维持在适配区间，既能规避床压过高引发的风量损耗与床温下降问题，又能避免床压过低造成床料层过薄、蓄热不足的缺陷。合理的床压管控能够让密相区始终保持均匀流化状态，杜绝局部床料堆积或流化不均的情况，为燃料持续稳定燃烧提供基础条件。（2）物料循环系统的精细化管控是低负荷稳燃的核心辅助手段。低负荷运行时，烟气流量随之降低，对循环物料的携带能力会出现明显衰减，分离器捕捉效率会出现 5%~10% 左右的小幅下滑，直接造成炉膛内循环物料流失量增加[2]。物料循环量不足会导致炉膛上下温度梯度变大，稀相区燃烧反应弱化，整体燃烧稳定性持续变差。通过精细化调整返料系统运行状态，稳定返料温度与返料流量，可以弥补低负荷工况下的物料损耗，保障炉内物料动态平衡。（3）在实际调控过程中，需要依托实时运行数据动态修正参数标准。结合负荷变化幅度同步调整床压设定值，将低负荷床压波动幅度控制在合理范围，避免参数大幅震荡。同时实时监测分离器压差、返料温度、炉膛温差等核心数据，及时调整运行策略，维持稳定的物料循环倍率。

1.4 优化给煤方式与燃煤掺配方案

（1）常规给煤方式多采用均匀等量给煤的控制逻辑，负荷降低后仍保持固定给煤频次。这种模式会造成瞬时入炉煤量波动偏大，单次入炉燃料过多时会出现吸热挥发量大增，造成床温短时下降幅度超过 8℃~12℃，直接抑制燃烧反应[3]。优化给煤策略需要改为分层渐进式的精准给煤模式，降低单次给煤增量，延长稳燃给煤时长。保持连续微量给煤的状态，避免炉内热负荷出现骤升骤降的情况。同时均衡两侧给煤量偏差，将两侧给煤差值控制在 5% 以内，保证炉膛整体热负荷分布均匀，杜绝局部燃烧偏弱的问题。（2）燃煤掺配优化是改善低负荷稳燃性能的关键举措，单一煤种往往存在热值不稳定、挥发分含量不达标的问题。低负荷工况对燃料着火性能要求更高，纯烧劣质煤时挥发分偏低，着火难度大幅提升，极易出现燃烧不稳的现象。通过科学掺配高低热值、高低挥发分煤种，可以有效平衡燃料综合燃烧特性。一般可将入炉煤综合挥发分稳定控制在 22%~28% 的合理区间，既能保障燃料入炉后快速析出挥发分、稳定着火，又能避免高挥发分煤占比过高引发的燃烧过快、热负荷集中等问题。（3）合理的掺配方案可以有效弱化煤质波动对低负荷工况的负面影响，提升炉膛燃烧的抗干扰能力。配合精细化给煤调节逻辑，能够持续维持平稳的炉内热环境，减少不完全燃烧损失。从燃料供给端补齐低负荷稳燃短板，大幅降低锅炉低负荷运行过程中的燃烧波动与熄火风险，保障机组深度低负荷工况下的安全稳定运行。

2 技术应用与效果分析

2.1 优化前后炉膛燃烧稳定性对比

（1）优化技术实施前，机组处于低负荷运行区间时，炉膛燃烧状态整体较差。床温、炉膛出口温度等关键参数波动幅度较大，炉内温度场分布紊乱，密相区与稀相区温差较为明显[4]。受煤质波动、送风不合理、物料循环不稳定等因素影响，炉内时常出现燃烧偏弱、着火不稳的情况，参数频繁大幅波动，极易触发燃烧异常预警，严重时会出现局部熄火的隐患，机组低负荷运行安全裕度整体偏低。（2）稳燃优化技术全面落地后，炉膛燃烧工况得到显著改善。通过精准调控床温、匹配合理风量、稳定物料循环以及标准化燃煤掺配，炉内蓄热能力保持稳定，温度场分布更加均匀。各类运行参数的波动幅度大幅收窄，彻底规避了以往参数骤升骤降的问题。炉内气固混合效果提升，燃料着火更加稳定，燃烧反应连续性显著增强。（3）机组低负荷运行的抗干扰能力大幅提升，面对小幅煤质波动与负荷调整时，燃烧工况不会出现明显变化。整体燃烧稳定性得到根本性提升，有效杜绝了低负荷工况下的燃烧不稳与熄火风险，大幅拓宽了机组安全低负荷运行区间，为机组深度调峰工况的安全稳定运行提供了有力保障。

2.2 低负荷工况床温、床压、风量参数变化分析

（1）床温参数在优化调控体系落地后改善效果最为明显。优化调整前，机组进入低负荷区间后炉内蓄热不足，加之送风调节粗放，床温整体呈现持续走低的趋势。参数波动范围较大，温度稳定性较差，容易出现局部低温燃烧区域，大幅削弱燃料着火稳定性。经过床温预判调控和风量配比优化后，炉内热量积蓄机制更加合理。床温整体维持在适配低负荷燃烧的合理区间，温度波动幅度明显收窄。整体温场均匀性大幅提升，有效避免了瞬时降温带来的燃烧扰动，让入炉燃料能够持续稳定完成着火和燃烧反应。（2）床压参数的运行状态

同样得到显著优化。传统运行模式下低负荷床压管控较为随意，物料存量控制不够精准。经常出现床压偏高造成送风阻力增大，或是床压偏低导致床料蓄热不足的问题。经过精细化物料循环与床压动态调整后，低负荷床压可以根据机组负荷水平自动匹配对应区间。床料厚度保持均匀稳定，炉内流化状态更加均衡，物料循环倍率维持在合理水平。彻底改善了以往物料堆积或物料流失过快的缺陷，为炉内稳定换热和持续燃烧提供了基础保障。（3）风量参数的调控优化进一步完善了低负荷燃烧环境。优化前高低负荷风量切换方式较为单一，一次风二次风配比缺乏动态调整逻辑。低负荷阶段容易出现过量送风带走炉内热量，或是送风不足造成氧含量分布不均的问题。经过送风调节方式优化后，一次风优先保障最低流化需求，二次风分层精准补给氧气。整体风量配比更加贴合低负荷燃烧需求，有效减少无效散热，提升炉内气固两相混合效率。三项核心参数的同步优化，共同构建了稳定的低负荷燃烧工况，全面提升机组低负荷运行的安全裕度与稳定性。

2.3 低负荷稳燃区间拓宽效果验证

（1）验证工作依托机组连续降负荷试验开展，全程持续采集炉膛温度，床压，烟气含氧量以及燃料相关运行数据，记录不同负荷水平下燃烧系统的响应状态。优化前锅炉稳定运行的最低负荷维持在额定负荷的 40% 左右。负荷进入这一区间附近时，床温下降速度加快，温度波动幅度增大，炉膛内部物料循环稳定性减弱，煤质的小幅波动都会直接传递至燃烧系统，引发参数震荡，继续降低负荷会带来较高的燃烧失稳风险。（2）在落实床温动态调控，风量配比优化，床压精细化管理和燃煤掺配等技术手段之后，锅炉燃烧系统抗扰动能力得到提升。机组可以稳定运行至额定负荷的 30% 区间[5]。在该负荷水平下，床温依旧能够维持在适合燃料着火的范围，炉膛温度波动幅度相比优化前下降 40% 左右。物料循环体系保持稳定，入炉燃料能够持续完成着火与燃尽过程，不会出现明显的燃烧滞后现象。面对小幅的煤质变化或是负荷小幅变动时，燃烧参数不会出现剧烈起伏，不需要频繁投用助燃设备维持燃烧。（3）稳燃区间拓宽不只是负荷下限数值的下移，还体现在低负荷工况下运行裕度的提升。优化后的系统拥有更强的热量储备能力与参数自平衡能力，能够在更长的低负荷持续运行时段内保持工况稳定。

结束语

综上所述，经过技术优化后的锅炉燃烧体系，炉膛蓄热能力得到有效提升，温度场与流场分布更加均匀。核心运行参数波动范围明显缩小，物料循环更加稳定，燃料着火与燃尽效果显著改善。机组稳燃负荷区间得到有效拓宽，低负荷工况下的抗扰动能力和运行安全裕度大幅提升，有效解决了传统运行模式下深度调峰稳燃困难的实际问题。

参考文献

[1] 汪瑞平.350MW 循环流化床锅炉燃烧特性与煤种适应性研究 [J]. 电力设备管理,2026,(5):64-66.

[2] 马良成, 于淼. 基于 300MW 机组循环流化床锅炉灵活性提升改造项目应用 [J]. 电力设备管理,2026,(9):240-242.

[3] 张宇飞, 刘敦禹. 燃煤锅炉低负荷稳燃技术研究进展 [J]. 广州化工,2025,53(9):4-9.

[4] 杨敬池, 王菁, 王鹏程, 等. 超临界 350MW 循环流化床锅炉宽负荷 NO_(x) 排放特性及控制技术 [J]. 洁净煤技术,2025,31(1):78-85.

[5] 张思海, 李超然, 万广亮, 等.330MW 循环流化床锅炉深度调峰技术 [J]. 发电技术,2024,45(2):199-206.