

Optimization Strategies for Boiler Thermal Economy under Low Load Operation by

Qiang Wang

State Grid Energy Xinjiang Zhundong Coal Power Co., Ltd., Zhundong, Xinjiang, 831100, China

Abstract

Low-load operation of boilers is a common scenario in power system peak regulation and industrial load fluctuation. Particularly under the background of large-scale renewable energy integration leading to surging demand for deep peak regulation in thermal power and flexible industrial transformation, boilers often require long-term operation within the 30%-50% rated load range. However, issues such as reduced combustion efficiency, increased flue gas heat loss, and higher auxiliary equipment energy consumption not only significantly impair overall thermal economy but also exacerbate risks like heat transfer surface corrosion and pollutant emission exceedances. This paper systematically analyzes key influencing factors of boiler thermal economy under low-load conditions from four dimensions: combustion system, thermal system, auxiliary equipment operation, and operational control. Targeted optimization strategies are proposed to provide technical references for improving boiler operational efficiency and reducing energy consumption under low-load conditions.

Keywords

boiler; low-load operation; thermal economy; optimization strategies; combustion adjustment

低负荷运行下锅炉热经济性优化策略

王强

国网能源新疆准东煤电有限公司, 中国·新疆 准东 831100

摘要

锅炉低负荷运行是电力系统调峰、工业负荷波动场景下的常见工况,尤其在新能源大规模并网导致火电深度调峰需求激增、工业生产柔性化转型的背景下,锅炉常需在30%-50%额定负荷区间长期运行。但其燃烧效率下降、排烟热损失增加、辅机能耗占比升高等问题,不仅显著降低整体热经济性,还可能加剧受热面腐蚀、污染物排放超标等风险。本文从燃烧系统、热力系统、辅机运行及运行调控四个维度,系统分析低负荷工况下锅炉热经济性的关键影响因素,提出针对性优化策略,为提升低负荷工况下锅炉运行效率、降低能耗提供技术参考。

关键词

锅炉; 低负荷运行; 热经济性; 优化策略; 燃烧调整

1 引言

随着新能源发电占比提升与工业生产柔性化发展,锅炉频繁处于50%额定负荷以下的低负荷工况成为常态。低负荷运行时,锅炉炉膛温度降低、烟气流动特性改变、热力参数偏离设计值,导致热效率较额定负荷下降3%-8%,同时增加了污染物排放控制难度。因此,围绕低负荷工况的热经济性优化,成为保障能源高效利用与系统稳定运行的核心课题。

2 低负荷运行下锅炉热经济性的关键影响因素

低负荷工况下,锅炉热经济性下降源于燃烧、传热、

辅机运行等多环节的协同失衡,核心影响因素可归纳为三类。

首先是燃烧效率降低。低负荷时,燃料供应量减少导致炉膛热负荷下降,火焰中心温度降低500-800K,煤粉着火延迟、燃尽时间延长,未燃尽碳损失增加;同时,为保证燃烧稳定性,过量空气系数需提高10%-15%,多余空气不仅带走炉膛热量,还会加剧受热面氧化腐蚀,进一步恶化热经济性。

其次是热力系统传热效率下降。低负荷工况下,锅炉蒸汽流量减少,水冷壁、过热器、省煤器等受热面的热流密度降低,传热温差缩小;同时,烟气速度下降导致受热面积灰、结渣风险升高,传热热阻增加,排烟温度通常升高15-30℃,排烟热损失占比从额定负荷的5%-8%升至10%-15%,成为热损失的主要来源。

【作者简介】王强(1988-),男,中国安徽人,本科,助理工程师,从事热能与动力研究。

最后是辅机能耗占比升高。锅炉辅机（送风机、引风机、给水泵等）多为定速运行，低负荷时其输出功率未随负荷同比下降，导致辅机电耗在总能耗中的占比从额定负荷的3%-5%升至8%-12%；此外，低负荷下脱硝系统需维持较高喷氨量以控制NO_x排放，也间接增加了能耗成本。

3 低负荷运行下锅炉热经济性优化策略

针对低负荷工况的核心问题，需从燃烧优化、热力系统改进、辅机节能与运行调控四个层面，构建系统性优化方案。

3.1 燃烧系统优化：提升燃尽效率与稳定性

燃烧系统是锅炉能量转换的核心环节，低负荷工况下炉膛热强度降低、气流场紊乱等问题，直接导致燃烧稳定性下降与燃尽效率不足，因此燃烧系统优化需从“设备适配性改造”与“参数精准化调控”双路径入手，在保障火焰稳定的前提下，最大限度减少未燃尽损失与排烟热损失，为热经济性提升奠定基础。

一是燃烧器结构改造：强化局部燃烧条件

燃烧器作为燃料与空气混合燃烧的关键设备，其结构设计直接决定低负荷下的着火性能与燃烧均匀性，需通过针对性改造优化局部流场与温度场，破解低负荷“着火难、燃不尽”的核心问题。传统燃烧器在低负荷时煤粉浓度均匀分布，易因局部燃料密度不足导致着火延迟，而浓淡分离燃烧器通过内置旋流叶片或隔板，将一次风煤粉气流分为“浓相区”与“淡相区”。浓相区煤粉浓度提升至常规工况的1.5-2.0倍，局部燃料热释放速率加快，着火温度降低100-200K，可在炉膛温度下降500-800K的低负荷环境下快速形成稳定火源；淡相区则通过补充空气保证燃尽，同时避免局部氧量不足导致的不完全燃烧。该改造可使煤粉着火提前0.2-0.3秒，未燃尽碳损失初步降低0.3%-0.6%，为后续参数优化创造条件。四角切圆锅炉低负荷时易出现“气流偏斜”或“火焰贴壁”现象，导致局部温度过低、燃尽效率下降。针对该问题，可在二次风喷嘴增设偏置导流板，将二次风气流方向向炉膛中心偏置5°-10°，增强炉内气流的旋转强度与混合效果，使煤粉颗粒在高温区的停留时间延长0.5-1秒；同时，调整相邻角二次风的风速差，避免气流相互干扰导致的流场紊乱。改造后，炉膛内高温区体积占比提升15%-20%，未燃尽碳损失可进一步降低0.2%-0.6%，综合降幅达0.5%-1.2%，同时减少因火焰贴壁导致的水冷壁结渣风险。低负荷启动或稳燃阶段，传统大油枪油耗高且易造成局部污染，可将燃烧器配套的点火系统升级为高能等离子点火或微油点火系统。等离子点火系统通过电弧将空气电离形成高温等离子体，直接点燃煤粉，点火油耗较传统油枪降低90%以上；微油点火系统则通过雾化技术将燃油转化为微米级油雾，与煤粉充分混合后点燃，单支油枪油耗可从150kg/h降至20-30kg/h。两类系统均能在30%额定负荷以下实现无油

稳燃，既减少燃油消耗带来的额外成本，又避免油煤混合燃烧导致的未燃尽碳损失增加。

二是燃烧参数动态调整。基于负荷变化建立过量空气系数动态调控模型，低负荷时将过量空气系数控制在1.15-1.25，通过氧量在线监测系统实时修正风门开度，减少排烟热损失；同时，调整一次风温与风速，将一次风温提高至300-350℃，风速控制在20-25m/s，保证煤粉在燃烧器出口快速着火，避免火焰脱稳。传统运行中过量空气系数多固定为1.3-1.4，低负荷时多余空气不仅带走大量炉膛热量，还会加剧受热面氧化腐蚀。基于此，可构建“负荷-氧量”关联模型，将过量空气系数按负荷区间分段调控：30%-40%额定负荷时控制在1.25-1.30，40%-50%额定负荷时控制在1.15-1.25，较传统固定值降低0.1-0.15。同时，在炉膛出口安装高精度氧量传感器，实时采集烟气氧量数据，通过DCS系统自动修正二次风门开度，确保过量空气系数稳定在目标区间。该调控方式可使排烟热损失减少0.8%-1.2%，同时避免因氧量不足导致的CO浓度升高。

一次风温与风速协同优化：一次风温过低会延长煤粉着火时间，过高则可能导致燃烧器结焦，一次风速不当易造成火焰脱稳或煤粉冲刷水冷壁。低负荷时，需通过调整空气预热器旁路风门或利用暖风器，将一次风温提升至300-350℃，确保煤粉进入炉膛后能快速达到着火温度；同时，根据煤粉细度调整一次风速，当煤粉较细时控制在20-22m/s，较粗时提升至22-25m/s，既保证煤粉在一次风管内不沉积，又避免风速过高导致火焰被“吹离”高温区。通过风温与风速的协同优化，煤粉着火距离可缩短0.3-0.5米，火焰中心位置稳定在炉膛中上部，未燃尽碳损失进一步降低0.2%-0.3%。低负荷时给粉机出力下降，易出现煤粉细度波动或给粉量不均，导致局部燃烧工况恶化。可在给粉机出口加装煤粉细度在线监测装置，当监测到煤粉细度超标时，自动调整磨煤机加载力或分离器转速，将细度控制在目标范围；同时，对多台给粉机采用“流量均衡控制”，通过调整给粉机转速偏差，确保各燃烧器给粉量偏差≤5%，避免因局部煤粉供应过多导致的不完全燃烧，或供应过少导致的火焰强度不足。

3.2 热力系统优化：降低传热损失与排烟温度

实现全负荷精准适配

低负荷工况下，固定的燃烧参数无法匹配燃料供应量与炉膛热环境的变化，需建立基于负荷动态变化的参数调控模型，通过实时监测与反馈调整，优化过量空气系数、一次风参数等关键指标，平衡燃尽效率与热损失。

一是受热面优化设计。针对低负荷下受热面传热效率下降问题，在省煤器出口增设低温省煤器，利用烟气余热加热凝结水，可将排烟温度降低20-40℃，排烟热损失减少2%-3%；同时，采用螺旋鳍片管替代光管作为空气预热器换热元件，增强烟气扰动，降低积灰风险，空气预热器换热效

率提升 5%-8%。

二是蒸汽参数协同调控。低负荷时，通过汽轮机调门节流与锅炉蒸汽压力协同控制，避免蒸汽参数大幅偏离设计值：将主蒸汽压力维持在额定压力的 60%-80%，主蒸汽温度偏差控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 内，减少因参数波动导致的热力循环效率损失；同时，优化给水温度，通过调整高压加热器投入数量，使给水温度与负荷匹配，避免省煤器入口水温过低导致的传热温差失衡。

3.3 辅机系统节能：降低能耗占比

辅机能耗优化的核心是实现“按需供能”，通过变频改造与运行方式调整，减少低负荷下的无效能耗。

一是辅机变频改造。对送风机、引风机等核心辅机进行变频调速改造，根据负荷变化动态调整转速：低负荷 50% 时，送风机、引风机转速可降至额定转速的 60%-70%，电耗降低 40%-50%，辅机总能耗占比可回落至 5% 以内。

二是辅机运行方式优化。采用“小负荷单台运行”模式，低负荷 40% 以下时，停运一台送风机或引风机，通过调整挡板开度维持炉膛负压与风量需求，避免多台辅机低效率运行；同时，优化脱硝系统喷氨逻辑，基于烟气 NO_x 浓度与负荷的耦合关系，建立喷氨量动态模型，减少过量喷氨导致的还原剂浪费与后续设备腐蚀。

3.4 运行调控优化：实现全工况动态适配

运行调控优化通过智能化手段，实现负荷、参数、设备状态的协同管理，保障低负荷工况下的热经济性稳定。

一是建立负荷-参数优化数据库。基于锅炉历史运行数据，构建不同负荷下的“燃烧参数-热力参数-能耗”关联模型，形成优化运行数据库：当负荷变化时，系统自动调用对应工况下的最优参数（如过量空气系数、一次风温、辅机转速），实现参数快速适配，避免人工调整的滞后性。

二是引入智能监测与诊断系统。通过部署炉膛火焰成像监测、受热面积灰在线监测、辅机振动监测等传感器，实时获取设备运行状态：当监测到炉膛火焰不稳定时，自动调整二次风门开度；当受热面积灰超标时，启动吹灰系统，避免因设备异常导致的热经济性下降；同时，通过大数据分析预测设备故障，减少非计划停机带来的能耗损失。

4 优化策略应用效果验证

以某 600MW 煤粉锅炉为研究对象，在 40% 额定负荷工况下应用上述优化策略，验证热经济性提升效果。

应用燃烧系统优化后，通过浓淡分离燃烧器改造与过量空气系数动态调整，炉膛火焰中心温度提升 300K，未燃尽碳损失从 1.8% 降至 0.7%，燃烧效率提升 1.1%；热

力系统优化中，低温省煤器投用后排烟温度从 160°C 降至 125°C ，排烟热损失减少 2.3%；辅机变频改造后，送风机、引风机电耗降低 45%，辅机总能耗下降 42%。综合优化后，锅炉热效率从低负荷优化前的 84.2% 提升至 88.5%，供电煤耗降低 $28\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ，按年运行 3000 小时、上网电价 0.4 元 $/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 计算，年节约标煤 2520 吨，年经济效益约 33.6 万元，同时 NO_x 排放浓度稳定控制在 $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下，实现了效率提升与环保达标双赢。

5 结语

低负荷运行下锅炉热经济性优化需从燃烧、热力、辅机、调控四个维度协同发力：燃烧系统优化通过结构改造与参数调整提升燃尽效率，热力系统优化通过受热面改造与余热回收降低传热损失，辅机系统优化通过变频改造与运行方式调整减少能耗占比，运行调控优化通过智能化手段实现全工况适配。

实际应用表明，上述策略可有效解决低负荷工况下燃烧不稳定、传热效率低、辅机能耗高的问题，锅炉热效率提升 4%-5%，供电煤耗显著降低，为电力系统调峰与工业锅炉柔性运行提供了可行的技术路径。未来需进一步结合数字孪生技术，构建锅炉全生命周期热经济性优化模型，实现更精准的工况适配与能耗管控。

参考文献

- [1] 600 MW超临界对冲锅炉燃烧优化调整试验[J]. 武生;张志强;姚力;刘曼.洁净煤技术,2023(S2)
- [2] 660 MW超临界机组对冲燃烧锅炉节能优化调整研究[J]. 刘法志;李沙;吴桂福;金李;丁文龙.节能,2021(07)
- [3] 基于 CO/O_2 在线监测的锅炉燃烧优化系统开发与试验研究[J]. 史义明;姚友工;蔡正春;常寿兵;江紫薇;吴运凯;任强强;苏胜;向军.广东电力,2020(11)
- [4] 基于代理模型的锅炉燃烧优化不确定性可视分析. 张熹;刘梓彤;石金磊;王建锋;田彬;纪连恩.浙江大学学报(理学版)
- [5] 氨煤混烧对墙式切圆锅炉燃烧的影响分析. 杨琨;张涛;泮浩翔;丁士发.动力工程学报,2025(06)
- [6] 复杂煤种条件下的锅炉燃烧优化控制方法研究. 黄剑文.中国新技术新产品,2025(22)
- [7] 机组深度调峰中的锅炉燃烧调控策略设计及应用. 王文斌.凿岩机械气动工具,2025(11)
- [8] 电站锅炉燃烧智能优化控制策略研究. 王鹏飞;陆梦园;付昊.电子元器件与信息技术,2025(08)
- [9] 电力企业锅炉燃烧智能优化控制策略探讨. 高兴;王鹏飞;王伟杰;赵鑫;陆梦园.仪器仪表用户,2025(06)
- [10] 基于参数软测量和机器学习的锅炉燃烧模型优化. 焦景云;钱澄浩;周飞燃;李相君;黄永军.电力设备管理,2025(16)