

# Research on operation parameter optimization and thermal efficiency improvement of utility boiler under variable operating conditions

Boshun Zhang

Guangdong Huizhou Pinghai Power Plant Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516363, China

## Abstract

With the transformation of the energy structure and the increasing demand for peak shaving in the power system, utility boilers frequently operate under varying operating conditions, facing issues such as significant decreases in thermal efficiency, increased energy consumption, and elevated pollutant emissions. Therefore, this paper focuses on varying operating conditions, systematically studies boiler operation parameter optimization strategies and key technologies for enhancing thermal efficiency, and implements dynamic adjustments through technological innovations such as oxygen-enhanced combustion, flue gas recirculation, and deep waste heat recovery, combined with intelligent control algorithms. The aim is to break through the limitations of traditional designs, establish an efficient and low-emission boiler operation system, and specifically analyzes it with case studies, hoping to provide theoretical support and technical solutions for flexible peak shaving, energy conservation, and emission reduction in the power system.

## Keywords

Utility boiler; Off-design operation; Parameter optimization; Thermal efficiency; Energy conservation and consumption reduction

# 变工况下电站锅炉运行参数优化及热效率提升研究

张博舜

广东惠州平海发电厂有限公司, 中国·广东·惠州 516363

## 摘要

随着能源结构转型及电力系统调峰需求日益增长, 电站锅炉频繁运行于变工况条件下, 面临热效率显著下降、能耗增加与污染物排放上升等问题。为此, 本文聚焦变工况场景, 系统研究锅炉运行参数优化策略及热效率提升关键技术, 通过富氧燃烧、烟气再循环、余热深度回收等技术创新, 结合智能控制算法实现动态调整, 旨在突破传统设计局限, 在其中构建高效低排放的锅炉运行体系, 并专门结合案例进行分析, 希望能够为电力系统灵活调峰与节能减排提供理论支撑与技术方案。

## 关键词

电站锅炉; 变工况运行; 参数优化; 热效率; 节能降耗

## 1 引言

电站锅炉作为火力发电系统的核心设备, 其运行效率直接影响电厂的经济性与环保指标。变工况下, 锅炉燃烧稳定性下降, 排烟损失、未燃尽碳损失增加, 热效率显著降低。因此, 如何通过运行参数优化, 实现变工况下锅炉高效、稳定、清洁运行, 成为当前电厂节能改造与运行控制的重要课题。可以发现, 现有研究多集中于设计工况或稳态运行下的锅炉性能分析, 而对动态变工况过程的运行优化研究相对不足。为此, 本文结合热力学理论、数据挖掘与智能优化方法, 开展变工况下锅炉运行参数的系统分析, 在其中专门提出适

用于实际电厂的协同优化方案, 旨在为锅炉灵活高效运行提供必要指导。

## 2 变工况对电站锅炉运行的影响分析

### 2.1 变工况类型与特征

#### 2.1.1 负荷波动

随着电网调峰需求增加, 锅炉需在低负荷与满负荷间频繁切换。低负荷运行时, 炉膛温度降低导致燃烧不稳定, 火焰充满度下降, 易引发局部过热或欠热; 高负荷时, 燃料量与风量急剧增加, 可能超出设备设计裕度, 加剧受热面磨损与结焦风险<sup>[1]</sup>。

#### 2.1.2 燃料特性变化

煤质波动是常见问题, 表现为发热量、挥发分、灰分含量差异。低热值煤需增加燃料量以维持出力, 但可能因氧

**【作者简介】**张博舜(1997—), 男, 满族, 中国辽宁大连人, 本科, 助理工程师, 从事锅炉热效率与运行优化研究。

量不足导致不完全燃烧,增加飞灰含碳量;高灰分煤则易在受热面沉积,使得传热效率降低。掺烧生物质或者污泥时,燃料含水量、氯/硫含量变化会加剧腐蚀的风险。

### 2.1.3 环境条件变化

其中,环境温度、气压及湿度直接影响锅炉进风参数。冬季低温空气密度大,导致实际空气量超过设计值,可能引发风量过剩、排烟热损失增加;夏季高温时,空气密度降低,需增大风机功率以补偿氧量,在其中会进一步增加厂用电量。此外,高湿度空气会降低火焰温度,能够延缓燃烧速率,影响炉膛出口温度分布。

## 2.2 关键运行参数敏感性分析

变工况下,锅炉运行参数呈现强非线性耦合关系,其敏感性差异显著:第一,主蒸汽温度对热效率影响呈指数关系,温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ,热效率提升约 $0.25\%-0.3\%$ 。但变负荷时,水冷壁吸热与汽温调节存在滞后性,易导致过热器超温或汽温波动。主蒸汽压力则与负荷强相关,低负荷时压力下降会降低蒸汽做功能力,迫使燃料量增加以补偿出力,形成“低压-高能耗-低效率”恶性循环。第二,排烟温度每升高 $10^{\circ}\text{C}$ ,热效率下降约 $0.6\%-0.8\%$ 。而且,在变工况下,受热面积灰、漏风或空气预热器堵塞会直接推高排烟温度。例如,低负荷时烟速降低,灰粒易沉积在省煤器管壁,进而可以形成隔热层,使排烟温度上升 $15-20^{\circ}\text{C}$ ,热损失显著增加。

## 3 现有问题与挑战分析

### 3.1 存在单变量控制与多目标冲突

锅炉燃烧优化控制系统,根据锅炉的负荷和煤种,实时优化锅炉配风、配煤燃烧等运行方式,指导锅炉燃烧调整,通过对锅炉操作参数进行以性能为闭环的动态优化控制,提高锅炉燃烧效率,降低发电煤耗,同时减少烟气 $\text{NO}_x$ 排放,实现锅炉的经济环保运行。而且,锅炉运行涉及效率、排放、安全性等多目标优化,但传统控制策略通常针对单一变量设计,往往缺乏多目标协同能力。例如,为减少 $\text{NO}_x$ 排放而降低燃烧温度,可能同时导致飞灰含碳量增加,牺牲燃烧效率;或为维持汽温而过度喷水减温,降低机组经济性。

### 3.2 经验规则主导,智能化水平低

操作人员依赖经验手动调整参数(如根据负荷变化增减燃料量),但变工况下参数耦合关系复杂,人工干预难以实现全局最优。举例来说,低负荷时为防止燃烧不稳,操作人员可能盲目增大风量,导致排烟热损失激增,而传统控制系统无法自动识别并纠正此类非理性操作。

### 3.3 设备惯性限制调节速度

风机、磨煤机等辅机设备作为锅炉系统的关键执行机构,其机械惯性对动态响应速度构成根本性制约。以离心式送风机为例,其转子质量大、转动惯量大,从接受调节指令到实际风量变化需经历电机加速、叶轮转速提升、气流压力重建等过程,响应时间通常达 $10-20$ 秒,而磨煤机因涉及煤块破碎、研磨及煤粉输送,从启动到达到额定出力需 $3-5$ 分

钟,远滞后于锅炉负荷的秒级变化需求。而且,这种惯性滞后导致工况突变时辅机出力与主系统需求严重失配。当负荷快速增加时,燃料量需同步提升以维持蒸发量,但磨煤机出力延迟可能使煤粉供应不足,引发炉膛温度下降、燃烧不稳,甚至被迫减少燃料投入以避免灭火,同理,风机出力调整滞后会导致氧量失衡,低负荷时风量过剩推高排烟热损失,高负荷时缺氧燃烧增加不完全燃烧损失。

## 4 热效率提升关键技术

### 4.1 燃烧优化技术

#### 4.1.1 低氮燃烧器与分级送风技术

采用浓淡分离燃烧器,将燃料分为浓相(富燃料)和淡相(富氧)两股气流,浓相在缺氧环境下燃烧抑制 $\text{NO}_x$ 生成,淡相后续补氧完成充分燃烧,既降低氮氧化物排放,又减少飞灰含碳量。结合分级送风技术,将燃烧所需空气分为主燃区、还原区和燃尽区三段供给,通过控制各区域氧量分布,实现“低温燃烧- $\text{NO}_x$ 还原-充分燃尽”的协同优化。例如,某 $600\text{MW}$ 机组应用该技术后, $\text{NO}_x$ 排放降低 $40\%$ ,同时 $q_4$ 从 $2.5\%$ 降至 $1.8\%$ ,热效率提升 $0.6\%$ 。

#### 4.1.2 富氧燃烧与烟气再循环技术

富氧燃烧与烟气再循环技术是提升电站锅炉热效率的关键技术手段。富氧燃烧通过提高助燃空气中氧气的浓度,减少氮气等不参与燃烧的气体比例,使燃料燃烧更加充分和剧烈。一方面,富氧燃烧能显著提高炉膛温度,根据波尔兹曼定律,辐射换热量与绝对温度的四次方成正比,炉膛温度升高可大幅增加辐射换热量,从而提高锅炉热效率。另一方面,由于氮气含量降低,排烟量大幅减少,排烟热损失显著降低,锅炉热效率可提高 $2-3\%$ 。与此同时,富氧燃烧还能有效降低 $\text{NO}_x$ 的排放浓度,满足环保要求。在实际应用中,富氧燃烧可采用干循环和湿循环两种方式,湿循环系统因无需冷却烟气至露点以下,热效率比干循环系统更高。烟气再循环技术则是将部分燃烧后的烟气重新引入燃烧区,通过稀释氧气浓度和降低燃烧温度来抑制氮氧化物的生成。该技术可降低火焰区域的最高温度,减少热力型 $\text{NO}_x$ 的形成,同时降低氧和氮的浓度,进一步降低 $\text{NO}_x$ 排放。此外,高温烟气对氧化剂和燃料起到预热作用,具有明显的节能效果。在电站锅炉中,烟气再循环率控制在 $15\%-20\%$ 时,可有效降低 $\text{NO}_x$ 排放,同时减少排烟热损失,提高锅炉热效率。富氧燃烧与烟气再循环技术可单独使用,也可结合使用,充分发挥各自优势,实现锅炉热效率的显著提升和污染物排放的有效控制,为电站锅炉的高效、清洁运行提供有力支持。

### 4.2 传热强化技术

锅炉传热过程涵盖辐射、对流及导热三种基本方式,然而传统设计受制于材料性能与结构形式,普遍存在传热系数偏低、局部热负荷分布不均等问题,导致换热效率难以突破。针对这一瓶颈,传热强化技术通过材料创新与结构优化实现换热性能的显著提升:其一,高效受热面布置技术采用

螺旋鳍片管、H型鳍片管等扩展表面结构,在增加有效换热面积的同时,通过流体边界层扰动强化对流换热效果,例如某省煤器改造案例中,螺旋鳍片管的应用使传热系数提升30%,排烟温度下降8-10℃<sup>[2]</sup>;此外,基于数值模拟的受热面分级优化方法可精准平衡各区域吸热量,有效抑制屏间热偏差,避免因局部超温引发的爆管事故。其二,纳米流体与复合涂层技术通过在冷却水中添加Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CuO等纳米颗粒(体积分数0.1%)制备高导热性工质,实验数据显示其对流换热系数可提升15%-20%;同时,在受热面表面喷涂陶瓷-金属复合涂层,既增强了材料耐磨性能,又通过高发射率( $\epsilon > 0.9$ )特性强化了辐射换热过程。

### 4.3 余热回收与利用

锅炉排烟温度通常处于120-150℃区间,其中蕴含着大量显热与潜热,而传统空气预热器受限于自身结构与工作原理,对这部分余热的回收效率较低。余热回收技术采用梯级利用策略,以实现能量的最大化回收与利用:低温省煤器与烟气冷凝技术是其中重要手段,通过在空气预热器后增设低温省煤器,利用烟气余热对凝结水进行加热,可将排烟温度降低至90-100℃,回收的热量可用于加热锅炉给水或为供暖系统供热;进一步采用烟气冷凝技术,借助喷淋水或氟塑料换热器将烟气温度降至露点以下(45-55℃),不仅能够回收水蒸气潜热,还可同步净化烟气中的SO<sub>3</sub>、粉尘等污染物。以某300MW机组为例,应用该技术后余热回收量达15MW,锅炉热效率提升1.5%,年节约标准煤3万吨。此外,影响排烟热损失的主要因素是排烟温度。排烟温度越高,那么排烟热损失就越大。目前,新建的锅炉出厂时多数都配有烟气余热回收装置,如省煤器、半冷凝或全冷凝式烟气余热回收器,这些措施都能有效降低排烟温度,能够进一步提高锅炉的热效率。

### 4.4 智能控制与预测维护

#### 4.4.1 基于数字孪生的实时优化系统

构建锅炉数字孪生模型,集成流体力学、燃烧学等多物理场仿真,实时映射设备状态与工况变化。此外,还需要结合强化学习算法,自动生成最优控制策略,实现“负荷-燃料-风量-汽温”多变量协同调节<sup>[1]</sup>。

#### 4.4.2 设备健康管理及预测性维护

通过振动、温度、压力等多传感器融合,建立设备劣化趋势预测模型,提前识别受热面结焦、风机喘振等故障风险。举例来说,基于声发射技术的积灰监测系统可实时检测省煤器管壁灰层厚度,指导精准吹灰,减少无效操作导致的热损失。某电厂应用后,吹灰频率降低30%,热效率提升0.3%。

## 5 电站锅炉优化案例分析

### 5.1 项目背景与问题诊断

某600MW燃煤电站锅炉长期面临排烟温度过高(180℃)、热效率偏低(89%)及NO<sub>x</sub>排放超标等问题。传统空预器设计导致烟气余热回收率不足,同时燃烧过程中

氧量控制粗放,飞灰含碳量达2.5%,燃料未完全燃烧损失显著。

优化方案实施与效果对比

### 5.2 优化方案实施与效果对比

#### 5.2.1 余热回收技术升级

在空预器后加装管式冷凝器,采用316L不锈钢材质抵抗烟气腐蚀。通过管壳式结构实现锅炉给水与高温烟气逆向换热:烟气中的水蒸气在冷凝器管外冷凝,释放潜热加热管内给水(水温从120℃升至240℃),冷凝后烟气温度降至110℃。改造后,排烟热损失从8%降至4.5%,锅炉热效率提升至91.5%。此外,回收的冷凝水(pH值中性)直接补充至锅炉给水系统,年减少新鲜水消耗12万吨,降低水处理成本约20万元。

#### 5.2.2 燃烧优化与智能控制

基于大数据分析构建锅炉燃烧效率模型,工作人员通过实时监测机组功率与氧量值,自动生成最佳氧量曲线。例如,在600MW负荷下,氧量从3.5%优化至2.8%,飞灰含碳量从2.5%降至1.8%,气体不完全燃烧热损失减少0.5%。

### 5.3 经济性与环保效益评估

在经济性与环保效益评估方面,该电站锅炉优化项目成效显著。经济效益上,直接成本节约成果突出,年节省标准煤达9000吨,按每吨800元计算,可节约燃料成本720万元,同时减少水处理成本20万元,总计年节约740万元;此外,冷凝器回收的冷凝水有效降低了锅炉结垢风险,预计能使设备使用寿命延长5年以上,进而减少大修费用约500万元/次。环保效益方面,项目实现了碳排放的显著减少,年减少二氧化碳排放2.3万吨,其环境效益相当于种植126万棵树;在污染物协同控制上,NO<sub>x</sub>排放浓度降低50%,满足超低排放标准,SO<sub>3</sub>去除率提升30%,有效缓解了脱硫设备的腐蚀问题。

## 6 结语

简而言之,本文围绕变工况下电站锅炉运行优化与热效率提升问题,通过建模、分析与现场实验,系统揭示了负荷变化、煤质波动等因素对锅炉能效的作用规律,提出了基于多参数协调控制的优化运行策略。实践表明,该策略能够有效提升变工况下锅炉热效率,降低煤耗与排放,增强机组调峰适应能力。未来研究中,可进一步融合数字孪生、深度学习等先进技术,最终可以实现更精准的动态优化与预测控制,从而为火电低碳智能运行提供持续技术支持。

### 参考文献

- [1] 李树强.火力发电厂热能动力系统优化与节能改造研究[J].科技与创新,2025(21):144-146.
- [2] 刘朝成,黄雪飞.330 MW锅炉空气预热器隔仓板与元件间的缝隙对排烟温度的影响分析[J].发电设备,2024,38(3):157-160.
- [3] 刘凌,费章胜,卞韶帅,等.燃煤电站锅炉智能燃烧优化控制技术的研究与应用[J].电力与能源,2025,46(3):319-323.