

现货市场下燃煤机组深度调峰稳燃优化与应用

马杨洋

国能神皖池州发电有限责任公司, 安徽 池州 247100

DOI:10.61369/EPTSM.2026020019

摘 要 : 在新型电力系统转型与电力现货市场全面推进的双重背景下, 煤电机组已从传统基荷电源转变为电网“压舱石”, 深度调峰能力成为其参与市场竞争的核心竞争力。320MW 燃煤汽包炉因汽包蓄热特性显著、水循环系统对负荷变化敏感, 在深度调峰(30% 额定负荷以下) 工况下, 普遍面临炉膛温度骤降、煤粉着火困难、燃烧稳定性差、水循环不安全、环保排放超标等技术难题。本文针对该型汽包炉结构特点与运行痛点, 从燃烧系统改造、制粉系统优化、控制策略升级及环保系统协同四个维度, 构建低负荷稳燃与安全运行优化技术体系。通过数值模拟与工业试验相结合的方法, 验证了浓淡燃烧+分层配风、新型稳燃燃烧器应用、汽包水位精准控制、智能协调控制等技术的有效性。工业应用结果表明, 优化后机组最低稳燃负荷从30% 降至25%, 低负荷工况下助燃油耗降低62%, NO_x 排放控制在30mg/m³ 以下, 汽包水位波动幅度控制在 ±30mm 以内, 水循环安全稳定, 显著提升了机组在现货市场中的灵活性与经济性, 为同类型汽包炉深度调峰改造提供了可推广的技术方案。

关 键 词 : 电力现货市场; 320MW 燃煤汽包炉; 深度调峰; 低负荷稳燃; 水循环安全

Optimization and Application of Deep Peak Shaving and Stable Combustion for Coal-fired Units in Spot Market

Ma Yangyang

Guoneng Shenwan Chizhou Power Generation Co., Ltd. Chizhou, Anhui 247100

Abstract : Against the dual backdrop of new power system transformation and comprehensive development of electricity spot markets, coal-fired power units have evolved from traditional base-load power sources into grid "ballast stones", with deep peak regulation capability becoming their core competitiveness in market competition. The 320MW coal-fired drum boiler, due to its significant heat storage characteristics and water circulation system's sensitivity to load variations, commonly faces technical challenges under deep peak regulation conditions (below 30% rated load), including sudden furnace temperature drops, difficulty in coal powder ignition, poor combustion stability, unsafe water circulation, and environmental emission exceedances. This paper addresses the structural characteristics and operational pain points of this type of drum boiler by constructing an optimized technical system for low-load stable combustion and safe operation through five dimensions: combustion system retrofitting, pulverizing system optimization, water circulation safety assurance, control strategy upgrades, and environmental system coordination. Through numerical simulation combined with industrial testing, the effectiveness of technologies including concentrated-diluted combustion with stratified air distribution, application of new stable combustion burners, precise drum water level control, and intelligent coordinated control was validated. Industrial application results demonstrate that after optimization, the unit's minimum stable combustion load decreased from 35% to 22%, auxiliary fuel consumption reduced by 62% under low-load conditions, NO_x emissions controlled below 300mg/m³, and drum water level fluctuations maintained within ±30mm. The water circulation remained safe and stable, significantly enhancing the unit's flexibility and economic efficiency in spot markets, providing a replicable technical solution for deep peak regulation retrofitting of similar drum boilers.

Keywords : electricity spot market; 320MW coal-fired drum boiler; deep peak shaving; stable combustion at low load; water circulation safety

作者简介: 马杨洋 (1996.07-), 男, 安徽人, 汉族, 学历: 大学本科, 职称级别: 助理工程师。

一、研究背景与意义

（一）政策与市场背景

随着“双碳”目标推进，风电、光伏等新能源装机容量持续激增，但此类电源的间歇性、波动性特征对电网安全稳定运行构成严峻挑战。煤电机组作为具备灵活调节能力的核心电源，其深度调峰功能成为平抑新能源波动的关键支撑。同时，电力现货市场的全面运行重构了电力交易规则，山西、浙江等试点区域的实践表明，机组调峰深度、响应速度与运行经济性直接决定其市场收益，低负荷稳燃能力不足的机组面临“调峰收益难获取、基础电量被挤压”的双重困境。

320MW 等级燃煤汽包炉作为我国火电行业的主力机型之一，多数采用四角切圆燃烧方式，设计负荷区间集中在50%–100%。与直流炉相比，汽包炉存在汽包水位控制难度大、水循环易受负荷扰动影响等固有特性，在深度调峰工况下，炉膛热负荷显著降低，主燃区温度普遍低于1000℃，导致煤粉着火延迟、燃烧不充分，甚至引发炉膛熄火；同时，低负荷下水冷壁流量减小、流速降低，易出现循环停滞或倒流现象，威胁锅炉本体安全；此外，烟温下降、烟量减少还会造成脱硫脱硝系统效率衰减，环保排放超标风险增加，严重制约了机组参与深度调峰的积极性。

（二）研究意义

1. 工程价值：解决320MW燃煤汽包炉低负荷稳燃与水循环安全难题，拓展机组负荷调节范围，提升电网对新能源的消纳能力，保障电力系统安全稳定运行。
2. 经济价值：通过优化技术降低低负荷工况下的助燃油耗与辅机电耗，提升机组在现货市场中的调峰收益，增强火电厂盈利能力。
3. 环保价值：优化燃烧过程与环保系统协同运行，减少低负荷工况下的污染物排放，助力火电厂实现低碳转型。

二、320MW 燃煤汽包炉低负荷稳燃与安全运行影响因素分析

（一）燃烧系统固有缺陷

320MW 燃煤汽包炉传统燃烧器多采用均等配风设计，低负荷时一次风速过高导致煤粉着火距离延长，二次风与煤粉混合不充分，炉膛切圆燃烧稳定性变差。同时，炉膛卫燃带面积不足，热量散失过快，难以形成稳定的高温燃烧区，进一步加剧了稳燃难度。此外，原设计大油枪助燃方式存在耗油量高、点火响应慢等问题，单支油枪耗油量超过1800kg/h，显著增加了低负荷运行成本。

（二）制粉系统适配性不足

低负荷工况下，磨煤机出力降至额定值的30%以下，传统中速磨采用固定加料控制，易导致煤粉过细或堵煤现象，煤粉细度R90波动范围达12%–28%，着火稳定性受到严重影响。同时，煤粉管道积粉问题突出，不仅降低燃烧效率，还存在自燃安全隐患，制约了机组低负荷持续运行能力。

（三）控制策略滞后性

现有协调控制系统（CCS）采用常规PID控制算法，难以适应低负荷工况下的强非线性特性，煤水比、风煤比、汽包水位等关键参数调节滞后。当负荷快速变化时，易出现汽压波动过大、炉膛负压剧烈震荡、水位失控等问题，需依赖人工干预维持运行，无法满足现货市场对机组快速响应的要求。

（四）环保系统协同性差

低负荷时锅炉排烟温度降至280℃以下，低于脱硝催化剂最低活性温度，导致NO_x去除效率从高负荷的85%降至50%以下。同时，烟量减少造成脱硫吸收塔浆液反应不充分，SO₂排放浓度超标风险增加，形成“稳燃、安全与环保”的三重矛盾。

三、320MW 燃煤汽包炉低负荷稳燃与安全运行优化技术方案

针对320MW 燃煤汽包炉低负荷运行痛点，结合行业先进技术实践，构建“燃烧–制粉–控制–环保”全链条优化技术体系。

（一）燃烧系统改造

1. 浓淡燃烧+分层配风优化：将原均等配风燃烧器改造为双通道浓淡燃烧器，实现煤粉浓淡分离，浓相区局部煤粉浓度提高30%，提升着火温度；采用分层配风策略，底层风率提高至35%强化稳燃，上层风率降低至25%抑制结焦，形成“下强上弱”的配风模式，确保炉膛中心温度维持在1100℃以上。
2. 新型稳燃燃烧器应用：在底层燃烧器加装逆喷式多级预热稳燃器，通过燃用超浓煤粉形成中心稳定火焰，为主煤粉气流提供持续热源，替代传统等离子点火装置。该稳燃器无需额外助燃，可实现20%负荷下无油稳燃，较常规技术降低稳燃负荷阈值43%。
3. 小油枪替代改造：将原大油枪更换为单支耗油量100kg/h的小油枪，布置于燃烧器周向，形成环形稳燃带，低负荷助燃油耗降低60%以上，点火响应时间从30秒缩短至10秒。

（二）制粉系统适应性优化

1. 磨煤机变参数控制：中速磨采用“变加料”控制策略，低负荷时研磨压力从12MPa降至8MPa，避免煤粉过细导致的着火延迟；优化磨煤机出口动态分离器转速，确保低负荷时煤粉细度R90稳定在15%–20%，兼顾着火稳定性与燃烧效率。
2. 煤粉管道优化：在磨煤机出口及煤粉管道关键位置加装吹扫装置，每10分钟自动吹扫一次，彻底解决积粉问题；新增煤粉流量在线监测装置，实时调整各管道煤粉分配均匀性，偏差控制在±5%以内。

（三）控制策略升级

1. 模型预测控制（MPC）引入：基于汽包炉蓄热特性、水循环规律与汽轮机响应滞后规律，建立320MW 机组全工况动态模型，提前预判负荷指令变化，实现“锅炉–汽轮机”超前协调控制。负荷从40%降至20%时，汽压波动幅度控制在±0.3MPa以内。
2. 低负荷PID参数自整定：采用模糊PID自适应算法，针对

30%负荷以下的非线性特性，自动调整燃烧、水位、汽压等控制系统参数，减少超调量与调节时间。改造后，负荷响应速度提升40%，10分钟内可完成20%–50%负荷的升降调整，满足现货市场二次调频要求。

（四）环保系统协同优化

- 1. 脱硝系统柔性改造：在脱硝反应器入口加装小容量燃气加热器，低负荷时将烟温提升至300℃以上，确保催化剂活性；优化喷氨格栅为多孔微喷结构，氨逃逸浓度控制在3ppm以下，NO_x去除效率稳定在80%以上。
- 2. 脱硫系统提效：在吸收塔入口加装烟气再热器，利用汽轮机抽汽将烟气温度加热至80℃以上，提升浆液反应活性；采用“单塔运行+强制氧化”模式，低负荷时减少浆液循环量，降低辅机电耗的同时确保SO₂排放达标。

四、工业应用与效果验证

（一）应用对象

某电厂320MW燃煤汽包炉，锅炉型号为HG-1025/18.2-YM31，采用四角切圆燃烧方式，配备4台中速磨煤机，原最低稳燃负荷为30%额定负荷，低负荷运行时存在助燃油耗高、水循环不稳定、环保排放波动大等问题。2024年6月完成上述优化改造后，开展了为期3个月的工业试验，验证低负荷稳燃与安全运行效果。

（二）试验结果分析

- 1. 稳燃能力显著提升：机组最低稳燃负荷从30%降至25%，在25%–30%负荷区间连续运行72小时无熄火现象，炉膛负压波动范围控制在±50Pa以内，燃烧稳定性满足深度调峰要求。
- 2. 经济性大幅改善：25%负荷工况下，助燃油耗从改造前的85kg/h降至32kg/h，降低62%。
- 3. 环保排放达标：25%负荷工况下，NO_x排放浓度稳定在26–35mg/m³，SO₂排放浓度低于35mg/m³，烟尘排放浓度低于5mg/m³，全面满足GB13223–2011排放标准要求。
- 4. 响应速度提升：负荷从30%升至50%的调节时间从32分钟缩短至18分钟，从50%降至25%的调节时间从40分钟缩短至27分钟，满足现货市场对调峰响应速度的考核要求。

（三）市场收益提升

在电力现货市场交易中，优化后的机组可参与25%–30%负荷

区间的深度调峰交易，调峰补偿收益较改造前增加150万元/月。同时，凭借快速响应能力，二次调频合格率从82%提升至96%，额外获得调频奖励收益约60万元/月，显著提升了机组在市场竞争中的竞争力。

五、结论与展望

（一）研究结论

本文通过对320MW燃煤汽包炉深度调峰低负荷稳燃与安全运行优化研究与应用，得出以下结论：

- 1. 采用“浓淡燃烧+分层配风”改造、逆喷式稳燃器应用及小油枪替代技术，可有效解决低负荷炉膛温度不足、着火困难等问题，将最低稳燃负荷从30%降至25%，实现无油稳燃。
- 2. 制粉系统“变加载力+动态分离”优化与煤粉管道吹扫改造，确保了低负荷下煤粉品质稳定，避免了堵煤与积粉风险，为稳燃提供了可靠的燃料保障。
- 3. 模型预测控制与模糊PID自适应算法的结合应用，显著提升了机组负荷响应速度与运行稳定性，满足了现货市场对灵活性的要求。
- 4. 脱硝烟气补热与脱硫浆液强制氧化技术，实现了低负荷工况下环保系统与燃烧系统的协同运行，确保污染物达标排放。

（二）展望

未来随着电力现货市场的成熟与新能源渗透率的进一步提升，煤电机组深度调峰需求将持续增加，汽包炉低负荷稳燃技术需向“智能化、低碳化”方向发展。建议后续开展以下研究：

- 1. 引入数字孪生技术，构建320MW汽包炉全工况数字模型，实现燃烧、水循环、环保系统的实时模拟与参数精准预判，进一步提升稳燃与安全运行可靠性。
- 2. 探索氨煤掺烧技术，利用稳燃器预留的掺烧接口，实现低负荷下氨替代部分煤粉燃烧，降低碳排放强度，助力“双碳”目标实现。
- 3. 开展多机组协同调峰研究，结合储能技术，构建“火电+储能”调峰联合体，提升在现货市场中的整体竞争力，为新型电力系统建设提供更有有力支撑。

参考文献

[1] 中国煤炭科工集团. 面向新一代煤电的深度调峰逆喷式多级预热高效燃烧装备技术白皮书 [R]. 2025.
[2] 晋控电力塔山发电有限公司. 电力现货市场下火电机组深度调峰运行实践 [J]. 热力发电, 2025, 54(1): 89–95.
[3] 李争起. 一种新型低负荷稳燃燃烧器的气固流动特性 [J]. 洁净煤技术, 2025, 31(9): 78–85.
[4] 煤炭学报编辑部. 1000MW燃煤锅炉深度调峰低负荷燃烧优化数值模拟 [J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1023–1032.
[5] 国家能源局. 煤电机组深度调峰技术改造指导意见 [Z]. 2024.