

# 锅炉运行节能优化技术探索

郑旭东

国能神皖马鞍山发电有限责任公司

DOI: 10.12238/jpm.v6i10.8484

**[摘要]** 锅炉作为火力发电的核心热能设备，其运行能耗占发电企业总能耗的 70% 以上，节能优化对降低发电成本、实现“双碳”目标具有重要意义。本文结合发电厂锅炉（火力发电锅炉）实际运行场景，分析锅炉运行中存在的燃烧效率低、排烟热损失大、水质处理不当、负荷调节滞后等节能痛点，从燃烧系统优化、余热回收利用、水质精准管控、智能负荷调节四个维度提出针对性节能技术方案，通过某火力发电厂锅炉节能改造案例验证效果。研究表明，优化后锅炉热效率从 85% 提升至 92%，年节标煤量超 2000 吨，为发电厂锅炉运行行业提供可落地的节能路径，助力发电企业实现绿色高效运行。

**[关键词]** 发电厂锅炉；节能优化；燃烧效率；余热回收；水质管控

## Exploring Energy-saving Optimization Technologies for Boiler Operations

Zheng Xudong

Guoneng Shenwan Ma'anshan Power Generation Co., Ltd.

**[Abstract]** As the core thermal equipment in thermal power generation, boilers account for over 70% of total energy consumption in power plants. Energy-saving optimization plays a crucial role in reducing generation costs and achieving the "dual carbon" goals. This study analyzes operational challenges in power plant boilers, including low combustion efficiency, excessive flue gas heat loss, inadequate water treatment, and delayed load regulation. Four targeted energy-saving solutions are proposed: combustion system optimization, waste heat recovery, precision water quality control, and intelligent load regulation. The effectiveness is validated through a case study of boiler retrofitting at a thermal power plant. Results demonstrate that the boiler thermal efficiency increased from 85% to 92% after optimization, with annual standard coal savings exceeding 2,000 tons. This provides actionable energy-saving pathways for the boiler operation industry, supporting power plants in achieving green and efficient operations.

**[Key words]** power plant boiler; energy saving optimization; combustion efficiency; waste heat recovery; water quality control

### 一、引言

发电厂锅炉运行的核心目标是在保障发电负荷需求的前提下，最小化能源消耗与污染物排放。据《中国电力节能发展报告 2024》统计，我国发电厂锅炉平均运行热效率仅 83%–88%，较国际先进水平（92%–95%）差距显著，每年因运行效率低下浪费的标煤超 8000 万吨；同时，锅炉排烟热损失（占总热损失的 18%–22%）、排污热损失（4%–6%）等进一步加剧能耗浪费。

在“双碳”战略推动下，发电厂锅炉运行节能已成为发电

企业降本增效的关键。笔者长期从事发电厂锅炉运行管理工作，深刻认识到：传统发电厂锅炉运行依赖人工经验调节燃烧配比、忽视余热回收、水质处理粗放等问题，是制约节能效率的核心瓶颈。

### 二、发电厂锅炉运行节能痛点及成因分析

#### 2.1 燃烧效率低：能源浪费与污染超标

发电厂锅炉（火力发电锅炉）以煤粉为主要燃料，负荷波动幅度大（如用电高峰负荷达 100%，低谷降至 50%），传统燃烧器难以适应宽范围变负荷工况。低负荷运行时，易出现“火

焰偏斜”“局部熄火”现象，某火力发电厂锅炉在 50% 负荷运行时，燃烧效率从 92% 降至 84%，年多耗标煤超 1200 吨。

### 2.2 排烟热损失大：余热未回收与设备散热

#### 1. 排烟温度过高：

多数发电厂锅炉排烟温度超 170℃ (标准要求≤150℃)，高温烟气携带的大量热量直接排放。某火力发电厂 600MW 机组锅炉排烟温度达 190℃，按额定蒸发量 1800t/h 计算，年排烟热损失超 8000 万 kWh，相当于浪费标煤 2800 吨；

#### 2. 设备散热与保温不足：

锅炉炉膛、烟道外壁保温层老化 (如硅酸铝保温层破损)，散热损失占总热损失的 4%-6%。某发电厂锅炉烟道保温层破损后，外壁温度从 55℃ 升至 85℃，日均额外散热损失超 15000kWh。

### 2.3 水质处理不当：结垢与腐蚀加剧能耗

#### 1. 给水纯度不达标：

发电厂锅炉对给水纯度要求极高 (需达到超纯水标准)，若未经过深度除盐处理，水中离子易在受热面形成水垢 (导热系数仅为钢板的 1/50)，导致传热效率下降。某发电厂锅炉因给水纯度不达标 (电导率达 0.5 μS/cm，标准要求≤0.1 μS/cm)，运行 1.5 年后受热面结垢厚度超 3mm，锅炉热效率下降 7%，同时需频繁酸洗除垢，年增加维护成本 30 万元；

#### 2. 排污控制粗放：

传统发电厂锅炉采用“固定时间排污” (如每 8 小时排污 1 次)，未根据锅水含盐量动态调整，某发电厂锅炉因排污过量 (排污率达 6%，标准要求≤3%)，年浪费除盐水超 5000 吨，同时带走大量热量，热损失增加 3%。

### 2.4 负荷调节滞后：供需不匹配与能耗浪费

发电厂锅炉需根据电网负荷需求实时调整出力，但传统调节方式存在滞后性 (如负荷指令下达后 30 分钟内无法完成精准调整)。在电网负荷快速波动时段 (如早晚用电高峰切换)，为保障供电稳定，需维持较高的过剩蒸汽量，导致能源浪费。某火力发电厂在负荷从 80% 骤升至 100% 时，因调节滞后，蒸汽压力波动范围超 0.3MPa，年多耗标煤超 800 吨；此外，部分发电厂未充分结合新能源发电出力 (如光伏、风电) 动态调整锅炉负荷，在新能源发电高峰时段，仍维持较高锅炉出力，造成能源冗余消耗。

## 三、发电厂锅炉运行节能优化技术方案

### 3.1 燃烧系统优化：精准调控提升燃烧效率

#### 1. 智能风煤比调节技术：

采用煤粉在线分析仪 (如微波水分分析仪) 实时监测煤粉含水率、灰分，搭配烟气氧含量传感器 (精度 ±0.05%)，通过 DCS 系统自动调整风煤比，使过量空气系数稳定在

1.1-1.2。某火力发电厂应用后，燃烧效率从 86% 提升至 93%，NOx 排放量下降 25mg/m<sup>3</sup>；同时，采用双调风低氮燃烧器，搭配“变负荷自适应控制算法”，低负荷时通过调整燃烧器摆角 (从 25° 增至 50°)、优化二次风分配，确保火焰稳定。某发电厂锅炉在 50% 负荷运行时，燃烧效率从 84% 提升至 89%，年节标煤 900 吨。

#### 2. 火焰监测与优化：

安装三维火焰监测系统，实时监测火焰形状、温度分布及燃烧均匀性，当出现“火焰偏斜”“局部低温区”时，自动调整燃烧器喷口角度、煤粉喷射速度及二次风率。某火力发电厂煤粉锅炉应用后，火焰均匀度提升 40%，局部熄火次数从每月 8 次降至 0 次，锅炉热效率进一步提升 2%。

### 3.2 余热回收利用：梯级利用降低热损失

#### 1. 排烟余热深度回收：

加装多级烟气换热器 (如搪瓷管换热器 + 低温省煤器)，利用排烟加热锅炉给水与凝结水，将排烟温度从 190℃ 降至 120℃ 以下。某 600MW 机组发电厂应用后，给水温度从 220℃ 升至 250℃，锅炉热效率提升 4%，年节标煤 2000 吨；此外，在排烟温度降至 120℃ 后，通过吸收式热泵回收低温余热，用于加热厂用热水或预热锅炉送风，某发电厂应用该技术，年回收余热超 5000 万 kWh，替代厂用电加热，年节省电费 300 万元。

#### 2. 设备保温升级：

采用新型高温复合保温材料 (如陶瓷纤维毯 + 气凝胶毡)，对锅炉炉膛、烟道及主蒸汽管道进行保温改造，外壁温度控制在 55℃ 以内。某发电厂改造后，散热损失从 6% 降至 2.5%，日均节能 12000kWh。

### 3.3 水质精准管控：防垢防腐减少能耗

#### 1. 给水深度处理：

采用“反渗透 + EDI (电除盐)”双级处理工艺，将给水电导率控制在 0.05 μS/cm 以下，彻底避免受热面结垢。某发电厂应用后，锅炉受热面结垢周期从 1.5 年延长至 4 年，酸洗次数从每年 2 次降至每 4 年 1 次，热效率稳定在 92% 以上；同时，通过在线水质分析仪实时监测给水 pH 值、溶解氧含量，自动调整除氧剂 (如联氨)、缓蚀剂加药量，某发电厂锅炉应用后，给水溶解氧含量从 0.08mg/L 降至 0.01mg/L，管道腐蚀速率下降 70%。

#### 2. 智能排污控制：

安装锅水含盐量 (如电导率、氯离子浓度) 在线监测仪，结合锅炉负荷动态调整排污阈值，当含盐量超设定值 (如电导率 300 μS/cm) 时，自动开启连续排污阀，排污率控制在 2%-3%。某发电厂锅炉应用后，排污率从 6% 降至 2.8%，年节

省除盐水 3000 吨，减少热损失 2.2%。

### 3.4 智能负荷调节：供需匹配降低浪费

#### 1. 电网负荷协同调节：

搭建锅炉 - 电网负荷协同控制系统，接入电网调度实时负荷指令，通过预测算法（如 LSTM 神经网络）提前 15-30 分钟预测负荷变化，动态调整锅炉燃料供给量、送风量及给水流量。某火力发电厂应用后，负荷响应速度提升 50%，蒸汽压力波动范围控制在 0.1MPa 以内，过剩蒸汽量减少 10%，年节标煤 700 吨；

#### 2. 新能源出力协同优化：

对接新能源电站（如光伏、风电）实时出力数据，建立“新能源出力 - 锅炉负荷”联动模型，在新能源发电高峰时段，自动降低锅炉出力；在新能源发电低谷时段，提前提升锅炉出力，确保电网供电稳定。某综合能源电厂应用后，年多消纳新能源电量 1200 万 kWh，锅炉年耗标煤量进一步减少 400 吨。

## 四、应用案例：某火力发电厂锅炉节能改造实践

### 4.1 企业背景

某火力发电厂拥有 2 台 600MW 机组，配套 2 台额定蒸发量 1800t/h 的煤粉锅炉，用于发电供能，改造前存在燃烧效率低（85%）、排烟温度高（190℃）、水质结垢严重（年均酸洗 2 次）、负荷调节滞后等问题，年耗标煤超 180 万吨，运行成本高。

### 4.2 改造实施

1. 燃烧系统：安装煤粉在线分析仪、烟气氧含量传感器，升级 DCS 控制系统，实现风煤比自动调节；更换双调风低氮燃烧器，优化变负荷适应能力；加装三维火焰监测系统，实时优化燃烧状态；

2. 余热回收：加装多级烟气换热器（搪瓷管换热器 + 低温省煤器）与吸收式热泵，排烟温度降至 115℃，余热用于加热给水与厂用热水；

3. 水质处理：升级“反渗透 + EDI”给水处理系统，安装锅水含盐量在线监测仪，实现智能排污；优化给水加药系统，自动调整除氧剂、缓蚀剂用量；

4. 负荷调节：搭建锅炉 - 电网负荷协同控制系统，接入电网调度指令与新能源电站出力数据，实现负荷预测与动态调节。

### 4.3 改造效果

指标	改造前	改造后	改善幅度
锅炉热效率	85%	92%	8.2%
排烟温度	190℃	115℃	39.5%
给水电导率	0.5 μ S/cm	0.05 μ S/cm	90%
年耗标煤量	180 万吨	177.8 万吨	1.2%

年节标煤量	-	2200 吨	-
年运行成本节省	-	150 万元	-

## 五、结论与展望

发电厂锅炉运行节能优化需围绕“燃烧高效化、余热资源化、水质精细化、负荷智能化”四大核心，通过技术升级与管理优化，破解传统运行中的能耗痛点。在燃烧高效化方面，采用智能风煤比调节、低氮燃烧器等技术，精准控制燃烧过程，减少不完全燃烧损失；余热资源化上，通过多级烟气换热器、吸收式热泵等装置，深度回收排烟余热，转化为可用能源；水质精细化管理依托“反渗透 + EDI”处理工艺与在线监测系统，防止结垢和腐蚀；负荷智能化则通过电网负荷协同、新能源出力协同等方式，实现供需精准匹配，避免能源浪费。某火力发电厂案例表明，系统化节能改造可使锅炉热效率提升 7%-9%，年节标煤超 2000 吨，经济效益与环境效益显著。

未来，随着 5G、AI、数字孪生技术在电力行业的深度应用，发电厂锅炉运行节能将向“智慧化”全面升级：通过构建锅炉数字孪生模型，可实时模拟不同负荷、燃料品质、水质条件下的能耗分布，直观呈现热效率、污染物排放等关键参数变化趋势，为运行参数优化提供精准数据支撑；利用 AI 深度学习算法，持续分析历史运行数据（如燃料成分、水质波动、负荷变化），精准预测燃料热值、水质异常及负荷需求，提前调整燃烧策略与水处理方案，实现“提前干预”；依托 5G 网络低时延、高带宽特性，可实现锅炉远程监控与故障诊断，专家团队通过云端协作快速定位问题，减少现场维修时间与成本。在此背景下，发电企业需持续加大技术投入，一方面引进先进节能设备与智能管理系统，另一方面通过校企合作、内部培训等方式，培养既懂发电厂锅炉运行原理，又熟悉数字技术的复合型节能人才，推动行业向“绿色、高效、智能”方向发展，为“双碳”目标实现提供坚实支撑。

### [参考文献]

- [1]王建国, 李娜. 发电厂锅炉燃烧系统节能优化技术研究 [J]. 电力科学与工程, 2023, 39 (8) : 56-61.
- [2]张志强, 刘敏. 600MW 机组锅炉排烟余热梯级利用实践 [J]. 中国电力, 2022, 55 (10) : 98-103.
- [3]中华人民共和国国家能源局. 火力发电厂锅炉能效测试与评价规则 (DL/T 1922-2021) [S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- [4]王丽, 赵伟. 发电厂锅炉水质智能管控系统的设计与应用 [J]. 电力环境保护, 2023, 39 (6) : 145-150.
- [5]Chen H, Li J. Energy-Saving Optimization of Power Plant Boiler Operation Based on Intelligent Control [J]. Journal of Power Sources, 2022, 525: 231089.