

燃煤机组运行优化与技术改造

郭忠恺, 张玉江, 王鑫

国家电投集团内蒙古能源有限公司, 内蒙古 通辽 028000

DOI:10.61369/EPTSM.2026010007

摘 要 : 燃煤机组作为电力行业核心装备, 其高效清洁运行对能源安全与“双碳”目标实现至关重要。本文梳理燃煤机组从早期低参数到现代超临界、智能化的发展历程及各阶段技术特点, 系统阐述运行优化与技术改造核心路径, 运行优化涵盖燃烧调整、运行参数控制及设备维护与辅助设备优化; 技术改造聚焦锅炉、汽轮机及环保设施。研究表明, 科学的运行优化与技术改造可显著提升机组效率、降低煤耗及污染物排放, 为燃煤机组可持续发展提供技术支撑。

关 键 词 : 燃煤机组; 运行优化; 技术改造; 节能减排; 经济效益

Operation Optimization and Technological Transformation of Coal-Fired Units

Guo Zhongkai, Zhang Yujang, Wang Xin

State Power Investment Corporation Inner Mongolia Energy Co., Ltd., Tongliao, Inner Mongolia 028000

Abstract : As the core equipment in the power industry, the efficient and clean operation of coal-fired units is crucial for ensuring energy security and achieving the "dual carbon" goals. This paper reviews the development process of coal-fired units, from early low-parameter units to modern supercritical and intelligent units, along with the technical characteristics of each stage. It systematically elaborates on the core pathways for operation optimization and technological transformation, with operation optimization covering combustion adjustment, operational parameter control, equipment maintenance, and auxiliary equipment optimization, while technological transformation focuses on boilers, steam turbines, and environmental protection facilities. The research indicates that scientific operation optimization and technological transformation can significantly enhance unit efficiency, reduce coal consumption, and minimize pollutant emissions, providing technical support for the sustainable development of coal-fired units.

Keywords : coal-fired units; operation optimization; technological transformation; energy conservation and emission reduction; economic benefits

引言

电力行业是国民经济发展的能源基石, 燃煤机组因能源供应稳定性强、技术成熟度高, 长期占据我国电力系统主力地位。然而, 随着全球能源结构转型加速及“双碳”目标提出, 燃煤机组面临能效提升与污染物减排的双重挑战。早期燃煤机组存在能源利用率低、污染排放高的问题, 历经多阶段技术迭代后, 虽已发展至超临界、超超临界阶段, 但仍需通过系统的运行优化与技术改造突破瓶颈。

一、相关概述

(一) 燃煤机组发展历程

燃煤机组作为电力行业的重要组成部分, 其发展历程可追溯至工业革命时期。早期的燃煤机组以简单的蒸汽动力装置为核心, 主要依赖于低效的锅炉和汽轮机技术, 能源利用率较低且环境污染问题显著。随着技术的进步, 20世纪中期燃煤机组逐步向高温高压参数发展, 这一阶段引入了再热技术, 显著提升了机组的热效率和运行稳定性。进入21世纪后, 随着全球能源需求的增长以及对环保要求的日益严格, 燃煤机组开始向超临界和超超临界参数迈进, 同时结合先进的节能减排技术, 实现了高效、清洁

的发电模式。

(二) 燃煤机组各阶段特点

在燃煤机组的发展历程中, 不同阶段呈现出各异的技术特点与局限性。早期机组以低参数、小容量为主, 其技术特点在于结构简单、运行可靠, 但能源转化效率较低, 通常在30%以下, 且污染物排放控制手段匮乏。中期阶段, 随着高温高压参数的引入, 机组效率显著提升, 然而设备复杂性和维护成本也随之增加, 尤其是在锅炉和汽轮机的设计与制造方面面临诸多挑战。超临界的定义是指热力学中水的临界点(压力22.115MPa, 温度374.15℃), 高于临界点的蒸汽状态称为超临界, 从热力学上讲, 超临界是一种不区分液相和气相的状态。超超临界是

一个广泛使用的商业术语，指比一般超临界更高压力，与亚临界和超临界机组主要以蒸汽参数进行区分。在不同国家有着不同定义，如日本的蒸汽压力大于24.2MPa，或温度超过593℃。而我国关于超超临界参数的定义为：超过常规超临界参数（24.2MPa/556℃/556℃）的汽轮机参数，新蒸汽温度或/和再热蒸汽参数不低于580℃，新蒸汽压力大于28MPa^[1]。现代燃煤机组则更加注重高效、清洁与灵活性，超临界和超超临界技术的应用使机组效率突破45%，同时结合智能化配煤掺烧技术和环保设施改造，大幅降低了污染物排放。

二、燃煤机组运行优化

（一）燃烧调整优化

风煤配比与氧量控制是提升燃煤机组燃烧效率的核心关键，二者的精准调控直接决定锅炉热效率与污染物排放水平。合理风煤配比可保障燃料完全燃烧并降低热损失，过高风量会使烟气带走大量热量增加排烟损失，过低则导致燃料不完全燃烧产生一氧化碳，显著降低锅炉效率。通过在线监测系统结合智能算法可实现动态优化，如模糊控制策略能依据负荷与煤质特性实时调整配比，针对不同煤种制定个性化方案也可提升燃烧效能，有效减少化学不完全燃烧及排烟热损失^[2]。与此同时，氧量作为燃烧核心参数，对效率与污染物生成影响显著，适宜氧量既能保证充分燃烧，又能抑制氮氧化物生成。过高氧量会加剧过量空气系数导致排烟温度升高，过低则造成未燃尽碳粒增多降低效率。借助氧量在线监测与反馈控制系统可实时调节送风量，结合燃烧调整试验确定不同负荷最佳氧量范围，研究表明该优化可降低发电煤耗0.53 ~ 0.88g/(kW·h)，并显著减少氮氧化物排放。

（二）运行参数控制优化

汽轮机与锅炉运行参数优化是提升燃煤机组整体效率的关键环节，二者的精准调控直接关联设备性能、能耗及运行稳定性。汽轮机主蒸汽压力、温度等参数对焓降特性和循环热效率影响显著，额定负荷下维持参数接近设计值可充分发挥设备潜力，变负荷工况下合理调整则能降低热应力、延长使用寿命。采用滑压运行策略可随负荷动态调节主蒸汽压力，减少节流损失，结合机器学习算法实时优化参数，更能提升效率与可靠性，研究表明此举可降低发电煤耗0.65 ~ 1g/(kW·h)，经济性提升显著。锅炉运行参数优化同样关键，水位过高易导致蒸汽带水影响品质，过低可能引发干烧危及安全，汽压波动则直接关乎热效率与稳定性。针对不同负荷优化策略各异，低负荷时适当降压可减少散热损失，高负荷时保持较高汽压能提升蒸汽做功能力；结合先进自动化控制系统实现参数实时监测调整，可有效提升效率与稳定性，数据显示该优化可降低发电煤耗0.3 ~ 0.5g/(kW·h)^[3]。

（三）设备维护与优化

关键设备维护与辅助设备优化运行是燃煤机组高效稳定运行的重要支撑，二者协同发力可显著提升机组能效与经济性。关键设备定期维护是核心保障，设备老化或技术落后易致能效下降、维护成本攀升，需制定科学策略。锅炉维护聚焦受热面清理、燃烧器及制粉系统检查，通过空预器、风机等设备深度能耗诊断可及时排查问题；汽轮机需重点保障通流部分清洁度与密封性，减少泄漏损失。结合大数据分析实时监测设备运行数据，能提前预

警故障、降低非计划停机风险，科学维护可延长设备寿命并提升机组性能^[4]。辅助设备如风机、水泵的优化运行对降低用电率至关重要，虽单台能耗占比不高，但优化潜力显著。

三、燃煤机组技术改造

（一）锅炉技术改造

燃烧器与制粉系统改造是提升锅炉燃烧效能、控制污染物排放的关键技术路径，二者优化可协同实现效率提升与环保达标。燃烧器作为燃烧系统核心，其性能直接决定燃烧效率与NO_x排放，改造可优化炉内燃烧特性。旋流低氮燃烧技术应用广泛，调整喷口风量分配可显著降低NO_x，龚彦豪等研发的新型低氮燃烧器试验显示，NO_x排放可控制在212 ~ 231mg/m³，减轻脱硝系统压力。针对“W”火焰锅炉高原始排放问题，需采用组合方案，河北某660MW机组经改造后，炉膛出口NO_x降至约800mg/m³，为后续脱硝创造条件。制粉系统改造则聚焦提升煤粉细度与均匀性，增强燃烧稳定性。钢球磨可通过优化钢球配比、选用高耐磨衬板提效；中速磨可提升磨辊转速、采用陶瓷磨辊增出力。引入动态分离器等设备能改善煤粉细度分布，某330MW机组改造后，SCR入口NO_x降低约15%。两类改造不仅提升燃烧效率，更为环保设施高效运行提供有力支撑。

（二）汽轮机技术改造

汽轮机通流部分与冷端系统改造是提升机组热效率、实现节能降耗的关键途径，二者优化可显著增强机组整体性能与经济性。通流部分改造聚焦流道优化与泄漏损失控制，能有效提升高、中、低压缸效率，高负荷工况下效果尤佳。通过重新设计叶片型线可减少气流分离及二次流损失，优化汽封间隙能降低泄漏损失，某600MW超临界机组改造后，热耗率下降约50kJ/(kW·h)，年度节煤达数万吨，彰显其节能潜力^[5]。冷端系统含凝汽器、循环水泵等核心设备，性能直接影响热经济性。凝汽器改造可通过管束清洗、扩大换热面积、优化管束布置等实现提效，新型高效换热管束应用能降低背压、提升出力；循环水泵变频改造可按需调节流量，降低厂用电率。

（三）环保设施技术改造

脱硝与除尘系统改造，是燃煤机组实现超低排放、推动绿色发展的核心支撑。二者协同优化，既能高效达成环保目标，又能显著提升机组运行效能，形成“环保-效能”双重增益。

在脱硝系统改造方面，“低氮燃烧+SNCR+SCR”组合技术已成为主流方案。该技术通过三级递进式处理实现精准控排：先利用低氮燃烧器从源头初步控制NO_x生成，再经SNCR（选择性非催化还原）技术进一步削减排放量，最后通过SCR（选择性催化还原）完成深度脱硝，全程兼顾脱除效率与运行经济性。以河北某660MW机组为例，应用该组合技术后，其NO_x排放浓度稳定降至50mg/m³以下，完全满足超低排放标准；后续通过优化SNCR与SCR的运行参数，在确保脱硝效果不衰减的前提下，还能有效降低氨逃逸率，减少二次污染风险，同时提升系统应对工况变化的运行灵活性^[6]。

四、运行优化与技术改造案例分析

（一）不同规模机组案例

燃煤机组的运行优化与技术改造对提升能效和环保性能至关重要。某电厂1000MW大型燃煤机组通过深度能耗诊断，定制了锅炉燃烧优化、汽轮机滑压运行及辅助系统优化的集成改造方案，对制粉系统、空预器等关键设备优化运行方式并改进结构，结合低温省煤器优化设计解决了低温腐蚀问题^[7]。改造后机组发电煤耗降低约1.5g/(kW·h)，厂用电率下降0.2%，综合性能达到国内同类领先水平。实施中通过实时数据采集结合机器学习动态调整参数，保障了措施的科学性与有效性。中小型机组改造同样关键，某300MW机组针对深度调峰需求开展灵活性改造，优化锅炉燃烧策略后可在25%额定负荷下不投油稳定燃烧，基本满足电网调峰要求^[8]。不过中小型机组常面临设备老化、技术储备不足及改造方案针对性欠缺等挑战。

（二）不同类型机组案例

超临界与亚临界机组作为电力行业关键装备，其优化改造对提升能效与环保水平意义重大。某1000MW超临界机组经运行优化与技术改造后性能显著提升，运行中采用机器学习算法实时优化锅炉、汽轮机参数，动态调整风煤配比与氧量，提升燃烧效率并减少污染物生成，汽轮机通流改造也提高了热效率。环保方面，通过低氮燃烧+SNCR+SCR组合技术使脱硝效率大幅提升，氮氧化物排放降至50mg/m³以下，优化除尘系统后效率提高约10%，为同类机组提供借鉴。某330MW亚临界机组则兼顾经济性与环保性制定改造方案，运行优化中实施滑压运行试验，调整调门配汽特性，发电煤耗预计降低0.65~1g/(kW·h)；通过锅炉燃烧调整优化配风与氧量控制，排烟温度下降，折合煤耗再降0.53~0.88g/(kW·h)。技术改造重点优化低温省煤器，改进结构与材料解决低温腐蚀问题，延长设备寿命并提效^[9]。

五、燃煤机组运行优化与技术改造发展趋势

（一）智能化技术应用

随着人工智能、大数据和物联网等技术的快速发展，智能化技术在燃煤机组运行优化与技术改造中的应用前景日益广阔。智能化

技术能够通过实时监测与分析机组运行数据，显著提升燃烧控制的精度与效率。例如，在燃烧控制领域，基于稳态数据筛选的机组效率SBM动态评价模型已被提出，并结合余弦相似度搜索算法实现了配煤掺烧方案的智能决策。此外，智能化技术还能够在故障诊断中发挥重要作用，通过对历史运行数据的深度挖掘与模式识别，提前预警潜在设备故障，从而降低机组非计划停运的风险。

（二）多能源耦合发展

在新能源占比不断提升的背景下，燃煤机组与新能源的耦合发展成为提升电力系统灵活性和稳定性的重要途径。多能源耦合不仅能够缓解新能源间歇性与波动性带来的消纳难题，还可以充分发挥燃煤机组作为基础负荷电源的优势，实现能源结构的优化配置。此外，多能源耦合还具有显著的经济效益，例如通过热电联产与新能源的协同运行，可以提高能源综合利用效率并降低整体运行成本。

（三）绿色低碳发展

实现绿色低碳发展是燃煤机组技术创新的核心方向之一，也是应对全球气候变化和实现“双碳”目标的关键举措。燃煤机组在绿色低碳发展方面的技术创新主要包括高效低排放燃烧技术、碳捕集与封存（CCS）技术以及资源综合利用技术等。例如，通过优化燃烧器和制粉系统的设计，可以有效降低氮氧化物和颗粒物的排放，同时提高燃烧效率；而CCS技术则能够将燃煤机组排放的二氧化碳进行捕集并加以利用或封存，从而大幅减少温室气体排放^[10]。

六、结束语

面向未来，随着智能化技术的深度渗透、多能源耦合模式的创新突破以及绿色低碳技术的持续迭代，燃煤机组需进一步强化技术创新与系统集成，充分发挥基础负荷优势并提升灵活调节能力，在保障电力系统安全稳定的同时，为实现“双碳”目标与能源清洁低碳转型提供坚实支撑。后续研究可聚焦智能化与低碳技术的融合应用，为机组全生命周期优化提供更具针对性的解决方案。

参考文献

- [1] 柯劲平. 超超临界燃煤机组的现状与发展前景 [J]. 电力设备管理, 2024, (23): 69-72.
- [2] 崔乐, 秦强. 1000MW 燃煤火力发电机组启停及运行优化技术研究 [J]. 电力设备管理, 2023, (9): 61-64.
- [3] 杨凯旋, 封又琳, 刘明, 严俊杰. 燃煤机组烟气余热和水协回收系统多参数优化及运行策略 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(13): 4566-4575.
- [4] 王东光, 陈荣敏, 田景晨. 燃煤机组深度调峰灵活性改造技术及优化 [J]. 电力设备管理, 2023, (6): 90-92.
- [5] 齐力. 电厂节能技术改造分析 [J]. 中国设备工程, 2020, (13): 186-187.
- [6] 张海林, 杨博, 董玉亮, 张健, 袁家海. 面向燃煤机组高效灵活运行的智能化配煤掺烧优化决策方法 [J]. 热力发电, 2022, 51(4): 30-37.
- [7] 王丹. 火电厂节能环保现状及其技术改造研究 [J]. 山西化工, 2024, 44(2): 266-267.
- [8] 姜艳则. 低温省煤器在火力发电厂中的优化改造研究 [J]. 工业加热, 2022, 51(11): 7-10.
- [9] 周世亮, 何运业. 燃煤机组降氮改造与运行优化技术研究 [J]. 电力安全技术, 2020, 22(5): 45-51.
- [10] 陈柯, 李煜. 燃煤电厂集控运行中的节能降耗措施分析 [J]. 电气技术与经济, 2024, (5): 257-259.