

锅炉燃烧优化与节能技术研究

张玉江, 王鑫, 张义

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.2026020001

摘 要 : 本文系统阐述了锅炉燃烧优化与节能技术的核心内容、面临挑战及未来趋势。在燃烧优化技术方面, 从先进控制策略、燃烧器结构改进、燃烧过程监测与调整三个维度展开; 在节能技术方面, 重点分析余热回收利用、保温材料优化、设备运行优化的技术路径与实践效果。同时, 指出技术应用中存在的技术成本高、设备兼容性差、运行维护难等挑战, 并提出政府补贴、企业合作、逐步改造、人员培训等应对策略。

关 键 词 : 锅炉燃烧; 燃烧优化; 节能技术; 污染物排放; 能源效率

Research on Boiler Combustion Optimization and Energy-Saving Technologies

Zhang Yujang, Wang Xin, Zhang Yi

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

Abstract : This paper systematically expounds on the core content, challenges, and future trends of boiler combustion optimization and energy-saving technologies. In terms of combustion optimization technologies, it explores three dimensions: advanced control strategies, improvements in burner structures, and monitoring and adjustment of the combustion process. Regarding energy-saving technologies, it focuses on analyzing the technical pathways and practical effects of waste heat recovery and utilization, optimization of insulation materials, and optimization of equipment operation. Simultaneously, it points out challenges in technology application, such as high technological costs, poor equipment compatibility, and difficulties in operation and maintenance, and proposes countermeasures including government subsidies, corporate collaboration, gradual transformation, and personnel training.

Keywords : boiler combustion; combustion optimization; energy-saving technologies; pollutant emissions; energy efficiency

引言

锅炉作为工业生产与电力供应中的核心能源转换设备, 其运行效率、污染物排放水平直接关系到能源利用效益与生态环境质量。当前, 随着能源短缺问题加剧与环保要求趋严, 传统锅炉普遍存在的燃烧效率低、能耗高、NO_x等污染物排放超标的问题日益突出, 亟须通过技术革新实现优化升级。在此背景下, 锅炉燃烧优化与节能技术成为解决上述问题的关键路径——前者通过精准控制燃烧过程、改进燃烧器结构、实时监测调整参数, 平衡效率与排放的矛盾; 后者通过余热回收、保温升级、设备优化, 最大限度减少能量损耗。

一、锅炉燃烧优化技术

(一) 先进控制策略

智能控制算法在锅炉燃烧优化中的应用已成为提升燃烧效率与降低污染物排放的重要手段。神经网络作为一种强大的非线性建模工具, 能够通过训练学习锅炉燃烧过程中的复杂映射关系, 从而实现对燃烧参数的精准预测与控制。例如, 徐文韬、黄亚继等^[1]人提出了一种基于 BP 神经网络的燃烧优化模型, 该模型通过建立 NO_x排放质量浓度和锅炉热效率的预测模型, 显著提高了燃烧过程的多目标优化能力。此外, 遗传算法作为一种全局优化

方法, 能够在多变量、多约束条件下搜索最优解, 为锅炉燃烧系统的参数调整提供了新的解决方案。杨力瑞^[2]指出, 通过结合神经网络与遗传算法, 可以构建动态闭环控制系统, 进一步优化锅炉燃烧过程。这些智能控制算法的应用不仅提高了燃烧控制的精度, 还为复杂工况下的实时优化提供了技术支持。

多目标优化控制方法在锅炉燃烧优化中具有重要意义, 其核心在于平衡燃烧效率与污染物排放之间的矛盾。一种基于改进非支配排序遗传算法 (INSGA-II) 的多目标优化模型, 可以降低 NO_x排放质量浓度和提高锅炉热效率为目标, 实现了对燃烧系统的全局优化。该方法通过引入精英保留策略和自适应交叉变异

机制，显著提升了算法的收敛速度与解的质量。实验结果表明，基于 BP-INSGA-II 算法的优化模型可使 NO_x 排放质量浓度平均降低 15.42%，同时锅炉热效率平均提高 0.1058%。这一成果验证了多目标优化控制在锅炉燃烧优化中的有效性^[1]。此外，多目标优化方法还能够综合考虑经济性、环保性和安全性等多个维度，为锅炉燃烧系统的整体性能提升提供了理论支持。

（二）燃烧器结构改进

新型燃烧器的设计是提升锅炉燃烧效率的关键技术之一，其核心在于促进燃料与空气的充分混合，从而实现高效燃烧。通过重新分配点火来实现火焰几何形状和位置控制的方法，这种方法不仅能够确保火焰焦点远离锅炉壁，还能减少燃烧副产物的生成量。此外，新型燃烧器通常采用高效燃烧器和先进的控制系统，以增强燃料与空气的混合效果。通过优化燃料与空气的混合比例以及应用低氮燃烧技术，可以显著降低 CO₂ 排放量并提高燃烧效率。

燃烧器在锅炉内的布局优化对燃烧稳定性和均匀性具有重要影响。合理的燃烧器布局能够改善炉膛内的流场分布，从而提高燃烧效率并减少污染物排放。通过控制燃烧温度和氧量分布，可以实现燃烧过程的优化调整。例如，在某 600MW 临界主机机组锅炉的优化调整中，通过对燃烧器布局的改进，成功解决了燃烧器易损坏的问题，并显著降低了排烟温度。

（三）燃烧过程监测与调整

在线监测技术在锅炉燃烧过程中的应用为实时调整燃烧参数提供了重要依据。通过基于尾部 CO/O₂ 双参量在线监测技术的燃烧优化系统，该系统通过建立 CO 体积分数与锅炉效率及 NO_x 质量浓度的关联模型，实现了对燃烧过程的精准控制。实验结果表明，通过调节尾部 CO 体积分数至优化值，锅炉在各个典型运行负荷下均实现了效率的提高和 NO_x 质量浓度的降低^[3]。此外，在线监测技术在燃烧优化中的作用，通过实时监测 CO 和 O₂ 等关键参数，可以有效指导燃烧调整，从而提升锅炉的整体性能。基于在线监测数据的实时调整策略是锅炉燃烧优化的重要环节，其核心在于根据监测结果动态调整燃烧参数，从而实现燃烧过程的最优控制。实验结果表明，调整后的控制系统不仅降低了机组的发电能耗，还显著减少了脱硝系统的喷氨量。此外，通过构建 CO/O₂ 双参量在线监测的燃烧优化系统，可以为锅炉运行提供实时调整建议，从而满足低氮排放与高效燃烧的双重需求。

二、锅炉节能技术

（一）余热回收利用

烟气余热回收是锅炉节能的核心环节，核心是通过余热锅炉、换热器等高效热交换设备，将高温烟气热量转化为可再利用能源，减少热能浪费。在火力发电厂中，这类设备能有效降低排烟温度、提升能源利用率，比如余热锅炉吸收烟气热量产生蒸汽或热水，可用于供暖、发电等；换热器则通过优化设计强化烟气与其他介质的热量传递，减少损失。同时，还可通过调整燃烧空燃比降低烟气含氧量，结合先进监测技术实时采集烟气温度、流量等参数，动态调整系统运行，进一步提升回收效率^[4]。除烟气

外，炉渣和冷凝水余热也具有回收价值。炉渣是燃煤锅炉产物，温度高，直接排放会浪费热量，引入炉渣冷却装置可将其热量传递至水等介质，用于供暖或余热锅炉给水，减少燃料消耗；高温冷凝水含大量热能，设置回收系统将其重新引入锅炉给水，既能节水，又能显著降低燃料消耗。

（二）保温材料优化

新型保温材料是锅炉节能的关键技术支撑，相比传统材料，它具备导热系数低、耐高温、耐腐蚀的核心优势。例如，纳米孔保温材料依托独特微观结构可有效抑制热传导，大幅减少热量损失；部分复合材料通过添加陶瓷纤维或气凝胶，既能提升隔热性能，又能增强机械强度与耐久性。经济性与环保性上，新型材料的低导热系数意味着相同保温效果下，所需材料厚度更小，可减少用量并降低施工成本；其良好耐腐蚀性能延长使用寿命，减少因频繁更换保温层产生的废弃物，符合绿色发展需求。

合理的保温结构设计是发挥材料效能的核心。设计需结合锅炉各部位温度分布与运行环境：高温区域采用多层复合保温结构，借不同材料协同强化隔热；低温区域选用单层结构以控制成本^[5]。同时，施工质量与密封性至关重要，需严格控制材料拼接缝隙，并用专用密封材料处理，防止热量泄漏。此外，设计还需兼顾维护便利，如在易损部位设置可拆卸式保温层，既方便日常维护，也能减少设备检修对保温层的破坏。

（三）设备运行优化

辅机设备节能是锅炉系统整体优化的关键，其中风机、水泵作为主要耗电设备，其效率直接影响能耗。引入变频调速技术可动态调整二者转速，避免固定转速的能量浪费：低负荷时，降低风机转速能减少送、引风量以降电耗；水泵则可依实际流量调节电机功率，减少无用损耗。辅机节能还需结合智能控制系统，通过实时监测、分析运行参数，自动调整设备状态至最佳工况。例如，基于神经网络算法的控制策略，能根据锅炉负荷变化预测辅机需求，提前调整参数实现高效节能。

锅炉系统各设备的整体协调，是节能的重要保障。锅炉本体、辅机及附属系统的匹配度，直接影响运行效率，若负荷变化时辅机未及时调整，易导致能源浪费或设备损坏^[6]。具体策略包括：优化燃烧与蒸汽系统耦合，平衡燃料供应与蒸汽需求；借助先进传感器和通信技术，实现设备参数实时共享，为优化提供数据支持；定期全面评估系统，识别节能改进点并通过技术或管理改造落实。

四、燃烧优化与节能技术面临的挑战与应对策略

（一）技术成本问题

燃烧优化与节能技术的研发、设备购置以及安装调试等环节均涉及较高的初始投入，这成为其在工业领域广泛应用的主要障碍之一。研发过程需要大量的资金支持，尤其是在智能控制算法和多目标优化技术的开发中，高昂的研发成本限制了技术的普及。新型燃烧器和余热回收设备的购置费用较高，例如高效换热器和先进监测系统的引入往往需要企业承担较大的经济压力。为降低技术成本，政府补贴和企业合作是两种有效的解决方案。政

府可以通过提供税收优惠、专项补贴和技术扶持政策，鼓励企业采用先进的燃烧优化与节能技术^[7]。同时，企业间的合作也能够有效分摊技术研发和应用的成本。通过联合研发或共享技术成果，企业可以在技术推广过程中实现资源共享和优势互补，从而减轻单个企业的经济压力。

（二）设备兼容性问题

新燃烧优化与节能技术与现有锅炉设备之间的兼容性问题是一个亟待解决的技术难题。一方面，接口不匹配的问题尤为突出，特别是在老旧锅炉系统中，新型燃烧器或检测设备的安装往往需要重新设计接口结构，这不仅增加了改造成本，还可能影响系统的整体稳定性。另一方面，控制系统的差异也构成了技术应用的障碍。为解决设备兼容性问题，企业可以采取逐步改造和定制化设计的策略。首先，在引入新技术时，应优先选择能够与现有设备部分兼容的解决方案，例如通过增加适配器或中间转换装置来实现新旧设备的协同工作。其次，针对控制系统差异问题，可以通过升级现有控制系统的硬件和软件模块，使其具备支持先进控制算法的能力。

（三）运行维护难题

燃烧优化与节能技术的应用虽然能够显著提升锅炉的运行效率，但也带来了运行维护方面的诸多挑战。新技术的引入通常伴随着设备故障率的增加，特别是在智能检测系统和高效燃烧器的使用过程中，复杂的电子元件和精密机械部件容易出现故障，从而影响系统的正常运行。维护技术要求的提高也是一个突出问题^[8]。

为应对运行维护难题，企业需要从人员培训和维护体系建设两方面入手。加强技术人员的专业培训是提高维护能力的关键措施。通过组织定期的技术培训和实操演练，可以提升维护人员对新技术的学习能力和操作熟练度，从而更好地应对设备故障。建立完善的维护体系也是不可或缺的一环。企业应制定详细的维护计划和应急预案，明确各环节的负责人和 workflows，确保在设备出现故障时能够迅速响应并解决问题。

五、未来发展趋势展望

（一）智能化燃烧控制

随着工业自动化和信息技术的快速发展，智能化技术在锅炉燃烧控制中的应用前景愈发广阔。大数据分析和人工智能决策作

为智能化技术的核心手段，为实现更精准、高效的燃烧控制提供了新的可能性。通过大数据分析，可以全面采集和处理锅炉运行过程中的多维数据，包括燃烧温度、氧气浓度、污染物排放等关键参数，从而揭示燃烧过程的潜在规律，并为优化控制策略提供科学依据。此外，人工智能决策系统能够基于深度学习算法对复杂工况进行实时建模与预测，进而实现对燃烧过程的动态调整。

（二）新型节能材料研发应用

新型节能材料的研发与应用是推动锅炉节能技术进步的重要方向之一。高性能保温材料和高效换热材料的研究正受到广泛关注，这些材料在提升锅炉热效率、减少能量损失方面展现出巨大潜力^[9]。例如，采用低导热系数的纳米复合材料作为保温层，可以显著降低锅炉表面热损失，同时具备耐高温和耐腐蚀的特性，从而延长设备使用寿命。此外，高效换热材料的开发也为烟气余热回收提供了新的解决方案^[10]。通过引入具有高传热系数和抗结垢性能的新型换热器，可以进一步提高余热回收系统的效率，从而减少燃料消耗和碳排放。

（三）多技术融合发展

燃烧优化与节能技术的发展正逐步呈现出与其他相关技术深度融合的趋势，这种多技术融合为提升锅炉整体性能带来了新的机遇与挑战。一方面，新能源技术与锅炉燃烧技术的结合为降低化石能源依赖提供了可行路径。另一方面，污染物处理技术的进步也为锅炉燃烧优化提供了有力支持。因此，未来的研究应着重探索多技术融合的优化方案，建立统一的技术标准和评价体系，以促进各技术领域的协同发展，最终实现锅炉燃烧系统的高效、清洁运行。

六、结束语

综上，尽管当前技术推广仍面临成本高、兼容性差、维护难等挑战，但通过政府政策扶持、企业协同合作、技术逐步迭代等方式，这些障碍正逐步被突破。未来，随着智能化技术与锅炉控制的深度融合、新型节能材料的产业化应用，以及新能源与污染物处理技术的跨界融合，锅炉系统将朝着更高效、更清洁、更智能的方向发展，为推动能源结构转型与“双碳”目标实现注入关键动力。

参考文献

- [1] 徐文韬；黄亚继；曹歌瀚；陈波；金保昇. 基于 BP-改进 NSGA-II 锅炉燃烧多目标优化 [J]. 东南大学学报（自然科学版），2022, 52(5): 943-952.
- [2] 杨力瑞. 大型火电主机设备节能技术的分析 [J]. 清洗世界，2020, 0(1): 9-10.
- [3] 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. 基于 CO/O₂ 在线监测的锅炉燃烧优化系统开发与试验研究 [J]. 广东电力，2020, 33(11): 135-142.
- [4] 尹逸昊. 火力发电厂燃煤锅炉燃烧优化及节能技术探究 [J]. 电力设备管理，2024, (10): 265-267.
- [5] 李晓艳. 浅析燃煤锅炉的节能环保改造技术 [J]. 能源与节能，2024, (4): 79-82.
- [6] 张正樵. 火力发电厂锅炉节能降耗的对策与措施探究 [J]. 中国高新科技，2024, (3): 104-106.
- [7] 金伟. 电厂锅炉燃烧系统的优化 [J]. 电气传动自动化，2024, 46(2): 76-80.
- [8] 陈明明. 锅炉领域煤炭燃烧节能优化研究 [J]. 内蒙古煤炭经济，2023, (1): 46-48.
- [9] 郭占春. 探讨火电厂锅炉汽轮机系统的节能环保问题 [J]. 应用能源技术，2023, (7): 34-37.
- [10] 徐侠；牛志岗. 1000 MW 超超临界锅炉燃烧与脱硝过程优化 [J]. 电力科技与环保，2024, 40(2): 152-159.