

锅炉与换热器能效提升的经济效益分析

贺昭霞 (陕西延长石油(集团)有限责任公司炼化公司, 陕西 延安 716000)

摘要: 炼化企业在绿色转型的当今社会面临严峻的能源成本与环保压力, 突破瓶颈的关键在提升热力系统能效。本文以YC集团炼化公司为案例, 系统分析了热力炼化企业关键设备: 锅炉与换热器在运行中存在的能效瓶颈, 阐述了燃烧优化、强化传热、系统集成及智能控制等可以提升效能的关键技术路径, 并对实施该路径的经济效益进行了量化核算与综合评估。研究表明, 本文所提出的技术改造能带来较好的经济回报和综合效益, 本文为同类企业推进节能降耗提供了具参考价值的实践范式。

关键词: 锅炉; 换热器; 能效提升; 经济效益

中图分类号: TK223

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 008-0079-03

Economic benefit analysis of energy efficiency improvement for boilers and heat exchangers

He Zhaoxia (Refining and Chemical Company of Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Co., Ltd., Yan'an Shaanxi 716000, China)

Abstract: In today's society undergoing green transformation, refining and chemical enterprises face severe energy cost and environmental protection pressures. The key to breaking through bottlenecks lies in enhancing the energy efficiency of thermal systems. This paper takes YC Group Refining and Chemical Company as a case study, systematically analyzes the energy efficiency bottlenecks of key equipment in thermal refining and chemical enterprises: boilers and heat exchangers during operation, and expounds on key technical paths such as combustion optimization, enhanced heat transfer, system integration, and intelligent control that can improve efficiency. It also conducts quantitative calculation and comprehensive evaluation of the economic benefits of implementing these paths. The research shows that the technological transformation proposed in this paper can bring good economic returns and comprehensive benefits. This paper provides a practical paradigm with reference value for similar enterprises to promote energy conservation and consumption reduction.

Keywords: boiler; heat exchanger; energy efficiency improvement; economic benefits

“双碳”目标引领当今社会能源市场高质量发展。众所周知, 对与能源消耗占生产成本比重较高的能源炼化行业, 节能降耗已经成为当今时代转型必由之路。热力系统作为炼化企业主要能耗单元, 其运行效率直接影响着全厂的能耗水平和运营成本。目前, 许多炼化厂的热力系统普遍存在设备效率衰减、热能利用不充分、管理水平粗放等问题。解决这些问题需要通过系统性的诊断与技术升级来挖掘节能潜力。炼化厂核心能耗设备为锅炉和换热器, 结合实际生产案例, 深入挖掘这两类设备的能效提升路径可在一定程度上实现炼化厂经济效益。

1 炼化企业热力系统能效现状分析

1.1 锅炉热效率偏低与排烟温度过高

目前, 炼化企业自备电站及工艺供热锅炉, 普遍存在热效率偏低的问题, 运行热效率一般在 85% 至 92% 之间, 和设计值、行业先进水平相比都有明显差距。排烟温度过高是造成这一现状的核心原因之一, 不少装置的排烟温度长期维持在 150℃ 至 180℃, 远超出理论最佳范围。过高的排烟温度, 让大量高温烟气的显热未得到有效回收就直接排入大气, 造成了不

小的热能损耗。

除此之外, 过剩空气系数调控不当、炉体保温性能逐步衰减, 再加上吹灰操作不及时等问题, 进一步加重了燃烧不充分现象与散热损失。这些因素相互叠加影响, 不仅使锅炉燃料消耗率上升, 还直接拉高了全厂的整体运营成本。

1.2 换热器结垢严重与传热效能下降

在炼化生产过程中, 换热设备结垢是一个长期存在且严重影响能效的难题。无论是工艺物流间的换热器, 还是锅炉给水加热器, 其管程或壳程内壁常会沉积由盐分、腐蚀产物、有机物或生物粘泥构成的污垢层。这层污垢的热阻极大, 可导致总传热系数 K 值下降 20% 至 40%, 严重时甚至超过 50%。传热效能的衰减迫使系统通过提高介质流量或增大传热温差来维持工艺要求, 进而增加了泵与风机的动力消耗。研究表明, 换热表面附着仅 0.5mm 厚的水垢, 就可使传热效率降低 10% 以上, 同时流通截面的减少还会引起压降显著上升。尽管定期清洗是恢复效能的必要手段, 但非计划性的停车清洗本身也带来了生产中断与维护成本的双重损失。

1.3 系统热联合不足与低温热大量浪费

从全厂系统层面来看,不少炼化装置在热能梯级利用上仍有优化余地,最突出的问题就是装置间热联合程度不够。本可通过热交换直接复用的物流,往往要经过分别冷却、加热处理,形成“高热低用”的浪费情况。比如部分高温馏分油、反应产物的热量未被充分回收,反而要依靠空冷器或冷却水系统降温,消耗掉大量电能与水资源。更普遍的是,80℃至150℃的低温位热源——像常减压装置塔顶油气、催化裂化装置低温油浆等,热量回收率普遍不高,通常有30%至50%的潜热未被利用就直接废弃。这些低温热的流失,不仅造成高品质能量的贬值损耗,还让工厂对新鲜蒸汽等外部热源的需求始终居高不下,进而制约了整体能源利用率的提升。

1.4 运行操作粗放与能效监测缺失

制约能效提升的关键同样存在于运行管理层面。部分生产单元里,操作调整精细度不足,锅炉负荷与蒸汽压力常被处于大幅波动状态,偏离了设计的最佳工况点。换热网络的旁路阀开度、循环水温度等参数,没能结合生产负荷与环境温度动态优化,系统长期处于“亚健康”运行状态。与之相伴的是,关键能耗设备的在线能效监测体系往往不够健全,很多时候还得依赖人工抄表和定期核算,数据存在明显滞后性与误差。由于缺乏对单位热负荷能耗、换热器端差等能效指标的实时精准监控及报警,操作人员难以快速发现并纠正能效劣化趋势,不少本可通过调节消除的损耗被长期固化。所以,提升运行操作的标准化与智能化水平,搭建完善的能效感知系统,是从管理层面挖掘节能潜力的必由之路。

2 关键能效提升技术与实施路径

2.1 燃烧优化、余热回收与燃料适应性改造

改进锅炉热效率低下与排烟温度过高的问题,应实施燃烧优化措施。首先应安装或升级先进的燃烧器,并搭配精准的氧量控制系统,这样可以将过剩的空气系数稳定控制在最佳范围(通常是1.1-1.5),从而实现燃料的完全燃烧,还可以减少排烟量。同时,高温烟的余热也需要进行回收。如,在尾部烟道加装省煤器来给锅炉给水预热,或增设一个空气预热器来加热燃烧用的空气。对于那些排烟温度仍有潜力的系统,可安装冷凝式的换热器来回收烟气中水蒸气的汽化潜热,该举措可以将排烟温度将至酸露点附近(约50-60℃),从而提升锅炉的热效率。除此之外,燃料来源和性质可能会存在变化,所以对锅炉进行适应性改造,如调整配风方式、改造燃料器的喷口,可以在保证不同燃料工况的情况下继续维持高效稳定的燃烧。

2.2 在线清洗、强化传热与高效元件更换

为直接应对换热器结垢导致的传热效能衰减,需采用主动干预与被动强化相结合的技术组合。在线化学清洗或物理清洗(如海绵球、高压水射流)技术能够在不停车的情况下抑制污垢增长或部分清除沉积物,维持传热面的相对清洁。从强化传热本身出发,采用螺纹管、波纹管、翅片管等高效传热元件,或是在壳程引入折流杆、螺旋折流板等改进结构,可以显著增大传热面积、破坏边界层并诱导湍流,从而提升总传热系数。当换热器因腐蚀、老化或技术落后而效能严重不足时,直接更换为新型高效紧凑式换热器(如板式、板壳式换热器)成为根本性解决方案。例如,在适宜工况下以板式换热器替代管壳式换热器,其传热系数可提高2-4倍,在达成相同热负荷的前提下,能大幅减小设备体积与压降,实现节能与节材的双重收益。

2.3 换热网络优化与热泵集成应用

系统性的热能浪费,必须通过系统级的优化技术来根治。基于夹点分析原理对全厂或装置群的换热网络进行综合优化,是识别“热联合不足”瓶颈、设计最优热能匹配方案的科学方法。通过重新匹配热源与热阱,取消不必要的公用工程加热与冷却,可构建出能效显著提升的新型换热网络。对于无法通过直接换热回收的低温热(如80-120℃的物流),机械式热泵或吸收式热泵技术提供了升级利用的路径。热泵通过消耗一部分高品位能量(电能或高温热),将低温废热提升到可利用的温位(如用于工艺加热或产生低压蒸汽)。以某炼厂利用吸收式热泵回收催化裂化装置低温油浆热量为例,该系统每年可回收热量折合标煤数千吨,投资回收期通常在2-4年。这两项技术的结合,是挖掘系统级节能潜力的核心。

2.4 智能控制系统与能效在线优化

解决运行操作粗放与监测缺失的问题,最终需依靠自动化与数字化技术。部署基于先进过程控制(APC)或模型预测控制(MPC)的智能控制系统,能够自动、精准地调节锅炉的燃料-空气配比、负荷以及换热网络的阀门与泵组,使系统始终运行在动态最优工况点,避免人为操作波动带来的损失。与之相配套的,是构建一套覆盖全厂热力关键绩效指标(KPI)的能效在线监测与优化平台。该平台实时采集温度、压力、流量、成分等数据,自动计算并显示锅炉效率、换热器端差、系统用能成本等关键指标,一旦偏离设定阈值便立即报警。更进一步,平台可集成基于热力学模型的实时优化(RTO)模块,通过滚动计算为操作人员或APC系统提供最优设定值指导。这一技术路径的实施,不仅将能效管理从事后核算转变为事前预测与事

中控制，更为持续改进建立了数据驱动的决策基础。

3 能效提升项目综合效益分析

为具体量化能效提升技术的经济效益，本文以陕西 YC 集团下属某炼油厂的热力系统综合改造项目为案例进行分析。该公司作为陕西省内规模最大的炼化企业之一，拥有超过千万吨/年的原油加工能力及配套的化工装置，其热力系统规模庞大，包含数台中压燃煤锅炉、蒸汽管网及覆盖常减压、催化裂化、加氢等多套装置的复杂换热网络。改造前，该系统面临若干突出挑战：锅炉平均排烟温度高达 160℃，部分换热器因结垢导致传热效率下降超过 30%，全厂热能利用缺乏系统性的集成优化，且主要依赖人工经验进行运行调节，整体能效水平存在较大提升空间。

3.1 节能效益与直接经济收益核算

针对上述能效瓶颈，该炼油厂重点实施了四项关键改造措施：为两台主力锅炉加装冷凝式烟气余热回收系统；对常减压装置换热网络进行夹点分析与局部重构，更换三台关键换热器为高效板式换热器；在锅炉系统部署智能燃烧优化控制系统。这些技术的应用产生了直接且可量化的节能效果，主要体现在燃料、电力及蒸汽消耗的降低。各项措施的年化节能收益如表 1 所示。

以上核算可以看出，针对性的技术改造可以使该项目每年产生直接经济效益 530 万元。其中锅炉烟气余热回收和换热网络优化占比最大。该改造充分体现了源头回收和高效传递两个维度节能潜力开发的可行性和有效性。

3.2 投资回报与长期运营效益综合评估

该技改项目总投资约 1680 万元，按年化直接经济效益 530 万元测算，静态投资回收期约 3.2 年，内部收益率（IRR）超 25%，具备较好的财务可行性。从长期运营来看，项目带来了多维度综合效益：设备可靠性得到显著提升，排烟温度降低有效缓解低温腐

蚀，高效换热器减少了非计划停车情况；环保成效突出，年节约 4000t 标煤，可协同减排二氧化碳约 1.05 万 t；管理模式实现根本性转变，智能控制系统与在线监测平台推动运营从经验驱动升级为数据驱动，为能效持续优化与精细化管理筑牢数字化根基。可见，该项目不只是一项高回报的节能投资，更是提升企业核心竞争力的战略性举措。

4 结语

本文通过分析炼化企业热力系统能效及提出技术路径与经济评估，较为全面的阐明了炼化企业热力系统的能效提升，不仅仅是设备改造，更是融合技术创新、系统优化与精细管理的系统工程的核心论点。实践证明，基于先进数据技术的针对性的节能技术，可以有效破解炼化企业效率难题，在获得良好的经济回报的同时，可以有效增强企业的环保竞争力。未来，随着人工智能与数字孪生技术的进一步的发展，热力系统的运行将步入更深层次的实时优化与智能管理阶段，为炼化行业实现绿色低碳与智能化发展提供持续动力。

参考文献：

- [1] 戴江涛. 火电厂锅炉燃烧优化与能效提升 [J]. 能源新观察, 2025, (11): 74-75.
- [2] 仇凤和. 低温供热技术在市政热力工程中的应用与能效分析 [J]. 建材发展导向, 2025, 23(21): 130-132.
- [3] 叶旭放, 陈志刚, 许崇涛, 等. 工业锅炉能效分析与节能降碳路径探讨 [J]. 节能技术, 2025, 43(05): 449-453.
- [4] 左伟伟. 某电厂供热系统优化调度方式及经济性分析 [J]. 节能, 2025, 44(03): 22-24.
- [5] 蒋胜蓝. 热泵式锅炉能效测试及能效特性研究 [D]. 南华大学, 2024.

作者简介：

贺昭霞 (1992-), 女, 汉族, 本科, 工程师, 研究方向: 化工设备。

表 1 热力系统改造项目主要措施及年化直接效益明细表

| 主要改造措施 | 具体内容与关键参数 | 年节能量 | 年经济效益(万元) |
|-----------------|---|---|-----------|
| 锅炉烟气余热深度回收 | 加装冷凝式换热器，将排烟温度从 160℃ 降至 65℃，回收显热与潜热。 | 节约标煤 3,100 t | 279.3 |
| 换热网络优化与高效设备更换 | 依据夹点分析重构部分物流，采用 3 台板式换热器替换原管壳式换热器，平均传热系数提升 2.5 倍。 | 节约 1.0MPa 蒸汽 6500 t | 117.1 |
| 锅炉智能燃烧优化控制 | 安装在线氧量监测与自动调控系统，将平均过剩空气系数从 1.25 稳定控制在 1.12。 | 节约标煤 900 t | 81.7 |
| 循环水系统运行优化(伴随效益) | 因换热效率提升，降低循环水总量与输送功率。 | 节约电能 80 万 kWh | 52.2 |
| 合计 | | 标煤 4,000 t 蒸汽 6,500 t 电能 80 万 kWh | 530.3 |

*注：经济效益核算依据为：标煤 900 元/t，1.0MPa 蒸汽 180 元/t，工业电价 0.65 元/kWh。