

化工锅炉 – 汽机系统能效优化与经济效益研究

袁利维（中海壳牌石油化工有限公司，广东 惠州 516086）

摘要：本文研究了化工行业锅炉 – 汽机系统的能效优化与经济效益。通过分析系统能效现状、优化技术路径及经济效益评估方法，提出了提升系统能效的综合策略。研究表明，通过热力系统优化、余热回收利用和智能控制技术应用，可显著提高能源利用效率，降低运行成本，实现经济效益与环境效益的双赢。

关键词：化工行业；锅炉 – 汽机系统；能效优化；经济效益；余热回收；智能控制

中图分类号：TK11+5；TQ083 文献标识码：A 文章编号：1674-5167 (2025) 018-0058-03

Research on Energy Efficiency Optimization and Economic Benefits of Chemical Boiler Steam Turbine System

Yuan Liwei (CNOOC & Shell Petrochemical Co., LTD., Huizhou Guangdong 516086, China)

Abstract: This paper studies the energy efficiency optimization and economic benefits of the boiler-steam engine system in the chemical industry. By analyzing the current situation of the system energy efficiency, optimizing the technical path and the economic benefit evaluation method, the comprehensive strategy of improving the system energy efficiency is put forward. The research shows that through the optimization of thermal system, waste heat recovery and utilization and intelligent control technology application, the energy utilization efficiency can be significantly improved, the operation cost can be reduced, and the win-win situation of economic benefits and environmental benefits can be achieved.

Keywords: chemical industry; Boiler turbine system; Energy efficiency optimization; economic performance; Waste heat recovery; intelligent control

化工行业作为国民经济的重要支柱，其能源消耗与生产效率直接影响企业的经济效益与环境可持续性。锅炉 – 汽机系统作为化工生产中的核心能源转换单元，其能效水平直接决定了企业的运营成本与碳排放强度。在全球能源结构调整与“双碳”目标背景下，如何通过技术与管理手段提升锅炉 – 汽机系统的能效，已成为化工企业实现绿色转型的关键课题。本文从原因分析、系统优化路径及经济效益三个维度展开分析，探讨化工行业锅炉 – 汽机系统的能效提升策略及其对企业的综合价值。

1 锅炉 – 汽机系统的能效影响因素分析

锅炉 – 汽机系统作为化工企业能源转换的核心装置，其能效水平受到设备性能、工艺特性和运行管理等多维度因素的复杂影响。深入理解这些影响因素及其相互作用机制，是开展系统能效优化的基础前提。

从设备层面来看，锅炉与汽机的本体性能构成了系统能效的物理基础。锅炉的热效率主要受燃烧效率、传热效率和机械效率的共同制约。其中，燃烧效率与燃料特性、空气系数和燃烧器设计密切相关，不完全燃烧不仅造成燃料浪费，还会产生污染物排放。传热效率则取决于受热面布置、换热管材质和积灰结垢状况，这些因素直接影响烟气与工质之间的热量传递效果。机械效率则反映了锅炉辅助设备的能耗水平，如风机、水泵等设备的运行效率。汽机方面，其等熵效

率受到通流部分设计、蒸汽参数和运行工况的显著影响。蒸汽初参数（压力和温度）的提升虽然能够改善循环效率，但受限于材料性能和设备成本。凝汽器真空间度的维持对汽机效率至关重要，而回热系统的优化设计则直接影响给水温度和系统热经济性。

在工艺耦合方面，化工生产的特殊性为系统能效带来独特挑战与机遇。化工过程往往伴随着大量化学反应热的释放，这些余热资源具有温度梯度大、分布分散的特点。传统的能源利用方式常常忽视这些低品位热能的回收价值，造成显著的能源浪费。通过构建科学的热集成网络，可以实现能量的梯级利用。例如，采用夹点技术对全厂热流进行分析和优化，能够识别出最佳的余热回收路径。高温余热可用于产生工艺蒸汽，中温余热适合用于给水预热，而低温余热则可用于驱动吸收式制冷系统。这种系统化的能量整合不仅可以降低锅炉负荷，还能显著提升全厂能源利用效率。

运行管理因素对系统能效的影响同样不可忽视。负荷调节的灵活性直接关系到系统对生产波动的适应能力。在化工生产中，蒸汽需求往往呈现周期性变化，如何实现锅炉 – 汽机系统的变工况高效运行是重要课题。水质管理是另一个关键环节，给水品质不良会导致锅炉受热面结垢和汽机通流部分积盐，这些沉积物会显著恶化传热效果并增加流动阻力。此外，定期维护的质量直接影响设备的长期性能，包括受热面清洁

度、阀门密封性和仪表准确性等。建立完善的预防性维护体系，采用状态监测和故障诊断技术，可以及时发现并解决潜在问题，确保系统持续高效运行。

2 能效优化的技术路径

锅炉 – 汽机系统的能效优化需要从锅炉侧、汽机侧以及系统协同三个维度进行整体考量，通过技术创新和系统集成实现能源利用效率的全面提升。

在锅炉侧优化方面，燃烧技术的革新是提高能效的关键突破口。低氮燃烧技术的应用不仅能够降低污染物排放，还能通过优化燃烧组织方式提高燃烧效率。富氧燃烧技术通过提高助燃气体中的氧浓度，显著改善燃烧反应动力学条件，减少排烟热损失。对于煤粉锅炉而言，精细化配煤技术通过建立燃料特性数据库和优化掺配模型，实现入炉煤质的最优控制，确保燃烧稳定性。流化床锅炉则通过精确控制床层温度和流化速度，在保证燃烧效率的同时降低机械不完全燃烧损失。此外，新型燃烧器设计如分级燃烧、旋流燃烧等技术的应用，进一步提升了燃烧过程的控制精度。

余热深度回收系统的构建是锅炉能效提升的另一重要途径。通过合理配置空气预热器、省煤器和余热锅炉等换热设备，建立多级余热回收网络，实现烟气热量的梯级利用。其中，空气预热器通过回收烟气余热来提高燃烧空气温度，既提高了炉膛温度水平又降低了排烟温度。省煤器则利用烟气余热预热给水，减少锅炉的热负荷。在余热深度利用过程中，需要特别注意低温腐蚀的防控，通过材料选择、温度控制和防腐涂层等手段确保设备安全运行。此外，采用热管技术、相变换热等新型换热方式，可以进一步提高余热回收效率。

智能控制系统的引入为锅炉运行优化提供了新的技术支撑。基于分布式控制系统（DCS）的先进控制策略，结合人工智能算法，实现了燃烧过程的实时优化调控。通过建立多变量预测模型，系统能够动态调整风煤比、二次风配比等关键参数，确保燃烧过程始终处于最佳状态。机器学习技术的应用使得系统具备自学习和自适应能力，能够根据燃料特性变化和负荷需求自动调整运行策略。数字孪生技术的引入更进一步提升了系统的预测和优化能力，为锅炉安全高效运行提供了智能化保障。

在汽机侧优化方面，热力循环的改进是提高能量转换效率的核心。多级回热系统的应用通过增加给水加热级数，显著提高了循环热效率。每增加一级回热，都能有效减少汽机的冷源损失，提高系统的热经济性。再热循环的实施则通过降低低压缸排气湿度，既提高了汽机内效率，又改善了末级叶片的工作环境。在汽机选型方面，背压式汽轮机特别适合具有稳定热负荷

的化工装置，能够实现能量的完全利用。抽汽式汽轮机则通过灵活的抽汽调节，满足化工生产对多参数蒸汽的需求，实现能量的精准匹配。

低品位乏汽的利用是提升系统能效的重要环节。热泵技术的应用可以将低温乏汽的热量提升至可用温度，用于工艺加热或其他热需求。有机朗肯循环（ORC）系统则专门针对低温热源设计，通过低沸点工质实现热能向电能的转换。这些技术的应用不仅提高了能源利用率，还为化工生产提供了额外的能源供给。在乏汽利用过程中，需要特别注意工质选择、系统匹配和运行控制等关键技术问题，确保系统的高效稳定运行。

系统协同优化是能效提升的最高层次。热电联产（CHP）系统通过能源的梯级利用，将燃料化学能先用于发电，再利用余热满足工艺需求，实现能源的综合高效利用。在化工企业中，根据热负荷特性设计合适的热电比，是确保 CHP 系统高效运行的关键。蒸汽管网的优化则通过采用新型保温材料如纳米气凝胶等，大幅降低管道散热损失。同时，通过建立完善的疏水系统和泄漏监测网络，减少蒸汽输送过程中的能量损失。减压阀的合理设置和优化运行，可以避免不必要的节流损失，提高蒸汽能量的利用效率。

此外，系统整体的优化还需要考虑负荷分配的合理性、运行参数的匹配性以及设备配置的协调性。通过建立全系统的能量平衡模型，分析各环节的能量流动和转换过程，找出能效瓶颈并提出针对性的改进措施。数字孪生技术的应用为系统级优化提供了新的工具，通过虚拟仿真和实时优化，实现整个锅炉 – 汽机系统的最佳运行状态。这些技术的综合应用，使得化工企业的能源利用效率得到全面提升，为实现绿色低碳发展奠定坚实基础。

3 能效优化的经济效益分析

化工行业锅炉 – 汽机系统的能效优化不仅能够降低能源消耗，还能显著提升企业的经济效益。从投资回报、运营成本节约及政策红利三个维度来看，能效优化具有长期的经济价值。

投资回报分析方面，能效优化项目虽然需要前期投入，但其带来的长期收益往往远超初始投资。设备升级改造涉及锅炉本体优化、汽机通流部分改进、控制系统智能化等多个方面，这些技术改造虽然需要投入大量资金，但通过精细化的成本效益分析可以发现，其投资回收周期通常处于合理范围内。随着节能技术的不断成熟和规模化应用，相关设备的采购成本和安装费用呈现下降趋势，这使得投资回收周期进一步缩短。值得注意的是，不同能效优化措施的投资回报特征存在差异，燃烧系统改造等项目的回收期相对较短，

而涉及整体工艺优化的项目则需要更长时间才能收回投资。企业在规划能效优化项目时，需要综合考虑技术可行性、资金状况和预期收益，制定科学合理的投资策略。

运营成本节约是能效优化最直接的经济效益体现。燃料成本在化工企业生产成本中占据重要比重，通过提高锅炉热效率和汽机内效率，可以显著降低单位产品的能源消耗。燃烧效率的提升直接减少了燃料采购支出，而余热回收系统的完善则进一步降低了能源需求。系统运行稳定性的提高带来了额外的经济效益，设备故障率的下降减少了维修费用和生产中断损失。同时，优化后的系统通常具有更好的负荷适应能力，能够更灵活地应对生产波动，这在一定程度上降低了运营管理的难度和成本。此外，能效提升还带来了人力成本的节约，自动化控制水平的提高减少了对熟练操作人员的依赖，智能监测系统的应用降低了日常巡检的工作强度。

政策红利与碳交易收益构成了能效优化的第三重经济效益。在“双碳”战略背景下，各级政府出台了一系列鼓励能效提升的政策措施。节能技术改造补贴、环保税收优惠、绿色信贷支持等政策工具，有效降低了企业的改造成本和财务压力。碳排放权交易市场的建立为能效优化创造了新的价值实现渠道，通过节能降耗产生的减排量可以转化为可交易的碳资产。随着碳价机制的逐步完善，这部分收益有望持续增长。能效领先的企业在项目审批、要素保障等方面往往能够获得政策倾斜，这种竞争优势带来的间接经济效益同样不容忽视。此外，良好的能效表现有助于提升企业形象，增强市场竞争力，这对企业的长期发展具有重要意义。

综合来看，锅炉-汽机系统能效优化带来的经济效益具有多元性和持续性的特点。虽然不同企业的具体收益情况会因工艺特点、能源结构和管理水平而有所差异，但总体而言，科学合理的能效优化措施能够为企业创造可观的经济价值。随着能源价格的波动上涨和环保要求的日益严格，能效优化的经济效益还将进一步凸显。企业在推进能效优化时，应当建立全面的经济评价体系，既要考虑直接的能源成本节约，也要关注间接的政策收益和竞争优势，这样才能做出最优的投资决策。

4 结论

化工行业锅炉-汽机系统的能效优化是推动企业高质量发展、实现绿色低碳转型的战略性举措。在当前全球能源格局深刻变革和我国“双碳”目标持续推进的大背景下，能效提升已从单纯的节能降耗需求，

逐步演变为关乎企业生存发展的核心竞争力。通过系统性的技术创新、精细化的管理优化以及有力的政策支持，化工企业能够在降低能源消耗强度的同时，实现经济效益与环境效益的协同提升。

从技术发展路径来看，未来锅炉-汽机系统的能效优化将呈现三个显著特征：首先是智能化程度的持续深化，人工智能、数字孪生等新一代信息技术将与能源系统深度融合，实现运行状态的实时感知、动态优化和自主决策；其次是系统集成度的不断提升，从单一设备优化向全流程协同优化转变，构建更加高效、灵活的能量梯级利用体系；最后是低碳化转型的加速推进，可再生能源耦合、氢能利用等创新技术将逐步成熟，推动传统能源系统向低碳零碳方向演进。

在管理层面，能效优化需要建立长效机制，将节能理念融入企业生产经营的全过程。这包括完善能源管理体系、强化能效对标管理、培育专业人才队伍等方面。同时，要注重将能效提升与安全生产、设备管理、工艺优化等工作有机结合，形成协同推进的良好局面。

政策环境方面，随着碳定价机制的完善和绿色金融体系的发展，能效优化的外部驱动力将持续增强。企业应当密切关注政策动向，主动把握发展机遇，将能效管理纳入长期发展战略。通过参与碳排放权交易、申请绿色认证等方式，将能效优势转化为市场竞争优势。

总体而言，锅炉-汽机系统的能效优化是一项系统工程，需要技术、管理、政策多管齐下，短期措施与长期规划统筹兼顾。对于化工企业而言，持续推进能效提升不仅是履行社会责任的需要，更是实现提质增效、增强核心竞争力的必然选择。随着相关技术的不断突破和应用实践的持续深入，能效优化必将为化工行业的可持续发展注入新的动力，为构建清洁低碳、安全高效的能源体系作出重要贡献。

参考文献：

- [1] 邓世敏, 迟全虎, 金红光. 汽轮机通流部分改造后机组的回热系统优化 [J]. 动力工程, 2004, 24(2):4.
- [2] 刘中良, 王远亚, 张克舫, 等. 基于夹点技术的烟气处理系统的优化与评价 [J]. 化工进展, 2014, 33(10):5.
- [3] 黄彪, 高禹顺. 浅谈工业锅炉的节能减排技术 [J]. 数字化用户, 2018(06):34-36.
- [4] 王建军, 张红梅. 化工业企业热电联产系统能效优化与碳排放分析 [J]. 化工学报, 2021(09):2768-2777.
- [5] 李志强. 基于数字孪生的锅炉燃烧多目标优化控制 [J]. 自动化学报, 2022(02):689-700.
- [6] 肖云汉. 燃气-蒸汽联合循环在石化企业的集成应用 [J]. 石油学报, 2021(06):886-895.