

余热锅炉热力系统优化与焓效率提升探讨

雷 进

翱华工程技术股份有限公司 内蒙古自治区 呼和浩特 010000

【摘要】：余热锅炉在工业热力系统中广泛应用，但普遍存在能量利用率低、热损失大等问题。通过对热力系统的运行特性、热交换过程及参数配置进行系统分析，提出了结构优化与运行控制改进方案，实现热量回收最大化和热效率提升。优化措施包括蒸汽温度与压力调整、余热回收管网改造及控制策略优化。实践结果表明，系统整体热效率提高显著，同时降低燃料消耗，实现经济与节能效益的双重提升。

【关键词】：余热锅炉；热力系统优化；热效率提升；余热回收；运行控制

DOI:10.12417/2705-0998.26.06.008

引言

余热锅炉是工业热力系统中重要的能量回收设备，其运行效率直接影响燃料消耗和系统经济性。高温废气或蒸汽在传热过程中存在显著的热损失，导致系统能量利用率下降。通过系统分析和优化设计，可有效改善热力参数配置和热交换效率，实现能量回收最大化。研究表明，合理调整蒸汽压力与温度、优化管网布局及运行控制策略，可显著提升热效率，减少资源浪费。热力系统优化不仅带来经济效益，也提升工业能源利用水平，为能源高效管理提供可行方案。

1 余热锅炉系统运行现状分析

1.1 热力系统结构与运行参数评估

余热锅炉热力系统主要由烟气换热器、蒸汽发生器、循环泵及控制阀等组成，其运行特性对能量回收效率具有直接影响。系统结构布局决定热流分布和传热效率，换热器传热面积与管束排列形式对热交换性能起到关键作用。蒸汽压力、温度及流量的运行参数决定热量转移速率及锅炉负荷响应能力。系统运行过程中存在参数波动，如蒸汽过热度不足、循环流量不均及局部温差偏大，均会导致潜在热损失和能量浪费。通过对各单元运行状态的精细化监测与分析，可以评估热力系统整体性能，为后续优化设计提供数据支撑和科学依据，实现热能利用率提升的精确路径。

1.2 热量损失来源及影响因素

余热锅炉在能量传递过程中存在多种热损失途径，包括烟气出口带走的未回收热量、锅炉壁面和管道表面散热损失，以及循环流体传输过程中的摩擦和湍流引起的能量消耗。热量损失受烟气温度、流速、锅炉结构材质及绝热性能等多重因素影响^[1]。以宝钢三烧结环冷机余热锅炉为例，经热平衡测试发现，该炉热效率仅为 52.70%，废气带入热量虽占热收入 92%以上，但排烟温度偏高、系统漏风及热管积灰导致大量热量损失。测试表明，排烟温度每降低 5℃，余热利用效率提升约 1%；热管清灰后锅炉热效率提高 5%~8%。此外，锅炉护板开焊、人孔门密封不严等漏风点风速达 15~18.5m/s，严重影响传热效

率。对各类损失进行定量分析，有助于明确系统性能瓶颈，为优化热回收途径提供科学依据。

1.3 现有系统效率测算方法与结果

余热锅炉热力系统效率多采用热平衡法与能量利用率分析法测算，通过精准计量进出口蒸汽、烟气热量及附属设备能耗，核算整体热效率。测算过程需综合考虑蒸汽物性参数、工况波动、潜热回收及附加能耗等影响因素。选取三种典型运行工况开展效率测试(见图 1)。数据表明，系统高负荷工况热效率最优，低负荷及变工况运行时效率明显下滑，排烟热损失同步升高；过热器等核心换热单元利用效率较设计值偏低 4~5 个百分点，能源浪费突出。国内在役余热锅炉热效率普遍低于国际先进水平，节能优化空间可观，测算结果可为后续系统优化及效果对比提供可靠数据支撑。

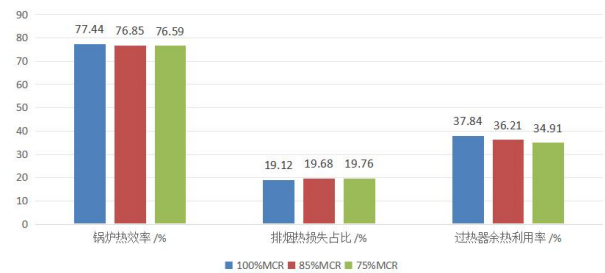


图 1 不同负荷下余热锅炉热效率测算图

2 关键热力参数优化设计

2.1 蒸汽压力与温度调整策略

蒸汽压力和温度是影响余热锅炉热力效率的核心参数，其优化直接关系到热量回收率和锅炉负荷适应性。通过精确控制蒸汽压力，可提高热能转化效率，使蒸汽焓值最大化，同时降低燃料消耗和系统排放。温度调节应确保蒸汽过热度适中，既避免过热导致热损失增加，又防止低温蒸汽降低热利用率。优化过程中需考虑系统动态负荷变化、热传导路径及管网阻力对压力和温度分布的影响，通过多点温度与压力监测实现局部调节，保障蒸汽参数均匀性和稳定性。采用先进控制算法对蒸汽参数进行实时优化，可在不同工况下实现能量利用最优化，同

时提升余热锅炉适应波动负荷的能力。结合热力学模型对蒸汽热平衡进行分析,可精确确定压力与温度调整的最佳区间,为提升系统整体热效率提供科学依据,并可在节能和经济性之间实现最优平衡。

2.2 热交换器传热效率提升方案

热交换器是余热锅炉热量转移的核心环节,其传热效率直接决定系统整体性能。通过优化管束排列、管径及流道设计,可增强湍流强度、提高传热系数并降低局部热阻。针对不同运行工况,需进行技术比选:螺旋翅片管换热面积大但易积灰,适用于低含尘烟气;H型翅片管具备自清洁特性,适合钢铁、水泥等高含尘场景;针肋管换热器兼顾高传热系数与低流动阻力,在空间受限的改造工程中优势明显。运行中控制烟气与蒸汽流量比,确保热量梯度合理分布,是提升换热效率的重要手段。结合热力学模拟与数值分析,可精确指导管束布置与流量优化。在维持结构安全的前提下,适当增加换热面积或采用多级传热设计,可进一步提高热量回收率。表面强化与流动扰动设计相结合,有助于降低结垢影响,实现长期稳定高效运行。

2.3 循环流体分配优化方法

循环流体在余热锅炉系统中承担热量传递和能量回收的核心功能,其分配合理性直接决定传热效率和系统稳定性。通过优化循环流体流量分配,可实现各换热段的热负荷均衡,减少局部过热或过冷现象,防止热损失增加。管网设计需考虑阻力均衡与流体流速匹配,避免出现短路流动或滞流区域,同时通过分流控制阀和流量传感器实现精细调节。结合热力学计算和流体动力学模拟,可预测不同负荷下的流体分布变化,优化分配策略以适应负荷波动。管网优化不仅包括流量调节,还涉及循环泵功率匹配与节能控制,确保系统能量消耗最小化。多级分配和分段控制策略能够在不同运行工况下动态调节流体分布,保障热量回收最大化。

3 余热回收管网改造方案

3.1 管网布局与流动优化

管网布局直接影响余热锅炉的热量回收效率和流体流动均衡性。优化布局需确保主干管与支管的合理分布,使流体流动路径最短且均匀,避免局部流速过快或滞流区域形成,减少摩擦损失和局部压降^[2]。分流节点设计需采用科学的流量分配方法,通过计算阻力平衡,实现各支路热负荷的合理分配。流体动压与静压的匹配可以保障循环泵功率最小化,同时提升系统稳定性。应用计算流体动力学(CFD)模拟管网内部流动特性,可精确识别高阻和低效率区域,为布局改进提供数据支撑。管网优化应结合余热回收重点区域的温度梯度,调整流量优先顺序,提高热量梯度利用效率。在确保安全与耐久性的前提下,多级分支与回路设计可实现局部热回收最大化,为余热锅炉整体系统效率提升提供基础支撑。

3.2 换热面积与材料选择改进

换热面积和材料性能是决定热回收效率的关键因素。通过增加有效传热面积,可提升换热器的热负荷承载能力,使余热充分转化为可用蒸汽或热水。优化管材导热性能和耐高温腐蚀特性,可降低热阻和热损耗,实现高效传热。材料选择应兼顾机械强度、耐腐蚀性和导热系数,确保长期稳定运行^[3]。换热器布置与管径匹配需结合流体流速和压力损失控制,通过结构优化增强湍流程度,提高热传递系数。在满足系统安全和运行寿命要求下,可采用多级换热或组合换热模式,提高余热回收效率。通过精确计算换热面积与材料性能参数,可为热力系统优化提供科学依据,实现热量利用最大化,同时降低系统能耗和运行成本。

3.3 管网保温及热损失控制措施

管网保温是减少热量损失、提升系统热效率的重要环节。管道及换热器表面通过高性能保温材料覆盖,可有效阻断热量向环境散失,降低外部热损耗。保温层厚度和导热系数应根据管道温度和外部环境条件进行科学设计,以确保热量传递效率最优。接口、弯头及阀门处的保温处理需加强,防止局部热损失集中发生。管网表面温度监测与动态调控可实现保温效果实时评估和调整,保障长期稳定运行。结合热力学分析,对管网热损失量进行量化评估,可指导保温材料选择与施工方案优化。在降低热损耗的同时,保温设计还应兼顾系统维护便捷性和安全性,使热力系统在全负荷运行和波动工况下均能保持高效的热量利用。

4 运行控制策略优化

4.1 智能监测与控制系统设计

智能监测与控制系统通过对余热锅炉各运行参数的实时采集,实现对蒸汽温度、压力、流量及烟气温度的连续监控。系统采用多点传感器布局与高精度数据采集技术,可精确反映锅炉各区域的热力状态,为控制策略提供可靠依据。结合先进的数据处理和分析算法,可对异常波动和潜在热损失进行预警,保证系统在不同负荷下的安全稳定运行。通过控制系统与执行机构的联动,优化阀门开度和泵速,实现流体动态分配的精细调节,同时可对换热器负荷和循环回路进行实时优化,提高热量利用效率和系统响应速度,推动余热锅炉高效运行与节能目标的实现。

4.2 动态负荷调节与优化调度

动态负荷调节通过对锅炉运行负荷变化进行实时响应,确保热力系统在不同工况下保持稳定传热和热能回收效率^[4]。调节策略以负荷波动监测为基础,通过流量调节、蒸汽分配优化及温度梯度控制,实现各回路负荷平衡,避免局部过载或低效运行。优化调度结合预测模型,可提前调整循环流体分布和换热器负荷,使系统在波动工况下保持高效运行状态。通过多目

标调度算法协调蒸汽生成、回收和分配,可最大化余热利用率,同时降低泵功及附加能耗,实现热效率和经济效益的协同优化。

4.3 自动化控制对热效率提升的作用

自动化控制系统通过闭环调节和智能反馈,精确控制蒸汽压力、温度及循环流量,实现热力系统运行参数的最优匹配。高精度控制可减少能量波动对热量回收的影响,降低局部损失,提升整体系统热效率。自动化控制结合负荷预测与动态调节策略,使锅炉在不同工况下保持传热均衡,优化余热回收效果。控制系统还可实现故障快速诊断与运行异常处理,保障设备长期稳定运行,减少非计划停机及能耗损失,为热力系统高效运行提供可靠保障,并推动余热锅炉系统智能化发展。

5 优化效果评估与应用验证

5.1 热效率提升量化分析

优化后的余热锅炉系统通过对蒸汽温度、压力和流量的精细化控制,实现热量回收最大化。量化分析基于热平衡计算和实际运行数据采集,对比优化前后锅炉热输入与有效热输出的差值,明确系统热效率提升幅度。分析涵盖各负荷工况下的热能分布、换热器传热系数及管网流量匹配情况,揭示参数优化对热效率提升的贡献。通过对热效率提升的数据化评估,可明确各优化措施的作用强度,为进一步优化提供科学依据,同时支持系统整体性能调优和长期能效监控,实现高精度的热力系统管理。

5.2 燃料消耗及经济效益对比

燃料消耗量与经济效益密切相关,通过优化前后燃料使用量的系统监测,可准确量化节能效果^[5]。热效率提升直接降低

单位热量燃料消耗,减少燃料开支与排放负荷。以宝钢项目为例,热效率提升 7.1 个百分点后,年节约燃料成本约 120 万元,投资回收期约 2.5 年;淮北芦岭矿项目总投资 260 万元,年节约运营费用 200 万元以上,回收期约 1.3 年;华能北京热电厂单个供暖季节约天然气近 5700 万 m³,直接经济效益约 2 亿元。优化管网布局、热力参数调节及控制策略协同作用,使节能效果在全负荷范围内保持稳定,形成可持续的经济回报机制,为工业余热锅炉高效运行提供可量化的经济评估依据。

5.3 系统稳定性及长期运行评价

优化后的余热锅炉系统在长期运行中表现出高水平的热力稳定性,关键运行参数保持在合理波动范围内,降低了热冲击风险。通过长期监测可动态评估热效率、热损耗及负荷响应能力,确保优化措施持续发挥作用。以晋能控股成庄矿为例,采用三级梯级回收架构和 AI 智能控制后,系统连续运行 120 天以上,蒸汽压力波动由 $\pm 0.15\text{MPa}$ 收窄至 $\pm 0.05\text{MPa}$,烟气温度稳定控制在 90°C 以下,未出现换热效率衰减。这证明优化措施有效提高了负荷波动适应性,为余热锅炉运行管理、维护周期规划及能效提升提供了科学依据。

6 结语

蒸汽压力与温度精准调控可最大化蒸汽焓值,降低热损失。热交换器选用 H 型翅片管优化管束排列,能显著提升传热系数。循环流体经分流控制阀与管网阻力平衡实现动态分配,消除局部过热。管网布局采用计算流体动力学模拟优化,配合高性能保温材料,有效阻断热量散失。智能监测与动态负荷调节可保障系统稳定运行。上述措施协同作用,使系统热效率显著提升,燃料消耗有效降低。未来应融合人工智能预测控制,推动余热回收向更高能效、更低排放的智能化发展。

参考文献:

- [1] 陈科含,范铭杰,龚强.燃气轮机联合循环系统中余热锅炉热力特性优化研究[J].科技视界,2025,15(33):92-94.
- [2] 张思朝.热电锅炉热效率提升的技术应用研究[J].灯与照明,2025,49(1):164-166.
- [3] 熊鹏,汪林峰.9F 等级联合循环余热锅炉给水系统优化配置[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2025(7):136-139.
- [4] 侯超阳.锅炉余热回收系统的高效换热器设计与性能提升研究[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2025(7):042-045.
- [5] 蒙永兵,王学锋.锅炉除氧器余热回收系统优化设计[J].设备管理与维修,2025(1):115-118.