

化工生产余热回收系统优化设计及节能降耗路径研究

李善伟

(江苏吉安安全科技有限公司徐州分公司, 江苏 徐州 221000)

摘要 针对煤化工合成氨装置余热回收效率低与能量梯级利用不足的普遍问题, 本研究构建了一套集成优化的框架和动态调控制方法, 采用建立分高温发电、中温工艺结合、低温供暖的三级余热回收系统的方法, 研究换热设备参数的优化模型和自动分配算法, 以期为化工行业节能降耗提供有益参考。实践表明, 该系统主要采用传热效率和压力损失平衡的模型、考虑多个目标的熵权决策方法以及跨部门热网的整合方案, 大大提高了余热回收效率, 减少了单位产品能耗, 达到明显节能效果。

关键词 化工余热回收; 梯级利用; 煤化工; 节能降耗

中图分类号: X78

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.06.026

0 引言

化工行业能源消耗强度高, 高温工艺产生的余热资源丰富, 但实际利用比例普遍较低。以煤化工合成氨装置为例, 其高、中、低温的余热链因为系统架构太单一、设备老化以及控制策略难以满足实际需求, 把大量余热拦在了梯级利用的门外, 这不仅造成了能源的浪费, 还让碳排放的压力变得更大^[1]。现有的相关研究在系统集成、动态调控和跨介质匹配方面还存在不够完善的地方。基于此, 本研究聚焦合成氨装置, 通过构建温度对口、能量梯级的优化型架构, 以及智能动态的控制方法, 旨在打破“高废低补”的传统模式, 使焓效率得到提升, 降低碳排放量, 为化工行业实现“双碳”目标提供有益参考。

1 化工生产余热回收系统现状分析与问题诊断

1.1 化工余热资源特性及系统架构分析

以年产30万吨氨的煤化工装置为例, 其余热资源呈现“高温烟气(420℃, 12.4 MW)、中温废水(135℃, 3.8 MW)与低温散热(约1.1 MW)”三级分布。现有系统仅回收部分高温烟气(7.1 MW), 剩余5.3 MW高温及全部中低温余热未被利用, 整体回收率仅38%, 凸显“高品位集中回收、中低品位空白”的架构断裂问题^[2]。能量梯级利用链条缺失导致大量中低温余热浪费, 表明优化系统架构、实现全品位余热梯级回收具

有明确必要性与紧迫性, 为后续集成优化设计提供了关键方向。

1.2 现有余热回收系统能效瓶颈诊断

对某煤化工合成氨装置运行日志的分析显示, 现有余热回收系统存在三重能效瓶颈: 一是核心换热设备老化严重, 积灰与磨蚀导致传热系数下降41%, 致使5.3 MW高温烟气直排; 二是余热梯级利用策略缺失, 中温废水余热未被回收, 反而额外耗能, 形成“高废低补”的逆向用能格局; 三是系统整体匹配度不足, 表现为蒸汽管网运行压力偏离设计值, 同时给水温度持续偏低, 这不仅诱发低温腐蚀风险, 还迫使排烟温度升高, 造成显著的显热损失^[3]。追溯其根源, 在于控制策略严重滞后, 长期依赖固定参数进行调节, 无法响应工况波动, 导致传热过程中的不可逆损失持续累积^[4]。上述三重瓶颈相互叠加, 致使全厂余热回收率仅为38%, 较行业先进水平低19%, 深刻揭示了推进设备更新、实施梯级整合与引入智能控制进行协同优化的紧迫性与必要性。

2 余热回收系统优化设计方案与关键技术

2.1 余热回收系统集成优化架构设计

针对煤化工合成氨装置余热利用率低、能量梯级断裂的问题, 本研究提出“高温发电、中温工艺耦合、低温供暖”三级集成优化架构。首先, 基于卡诺定理

作者简介: 李善伟(1984-), 男, 本科, 中级注册安全工程师, 研究方向: 化工工程与工艺。

构建能量品位匹配模型，依据余热温度与可用能水平进行分级施策：高温段（250 ~ 420 °C）采用双级回收技术，通过增设蒸汽过热器与再热器组合，将显热回收率提升至 92%；中温段（80 ~ 135 °C）引入高效板式换热器与跨工段柔性热网，实现工艺介质预热，减少外供蒸汽消耗；低温段（50 ~ 80 °C）则利用热管辐射换热系统进行区域供暖，进一步提升能源综合利用效率^[5]。系统集成智能分配模块，通过实时监测各回路温度、压力与流量信号，动态调节三回路介质分配比例，形成稳定闭环能量流。实施后，系统焓损率降低 31%，彻底扭转“高废低补”的逆向用能格局，实现了余热资源在品位、空间与时间维度上的高效协同回收与综合利用。

2.2 关键换热设备的参数优化模型构建

针对变换工段工艺废水余热回收系统中管壳式换热器传热效率衰减的问题，本研究建立了以传热系数 K 最大化与压降 ΔP 最小化为目标的参数协同优化模型。该模型关键表达式为：

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + R_f + \frac{d_o \ln(d_o/d_i)}{2k_w} + \frac{d_o}{d_i h_i}}$$

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D_h} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

式（1）中， K 表示综合传热系数（ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ）， h_o 和 h_i 分别为壳程与管程对流换热系数（ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ）， R_f 是污垢热阻（ $m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ ）， d_o 与 d_i 分别为换热管外径与内径（m）， k_w 为管壁导热系数（ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ）， ΔP 为系统压降（Pa）， f 是摩擦因子， L 为流道长度（m）， D_h 表示水力直径（m）， ρ 为流体密度（ $kg \cdot m^{-3}$ ）， v 是流体流速（ $m \cdot s^{-1}$ ）。

通过正交试验对换热面积、管程流速、折流板间距及管心距进行优化。结果表明：优化后传热系数由 $832 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ 提升至 $1\ 405 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ，单位换热量

泵功下降 19%，实现了传热强化与能耗控制的协同优化，为同类设备改造提供了理论依据（见表 1）。

2.3 余热梯级利用的流程优化方案

针对煤化工合成氨装置余热利用率低、能量梯级断裂的明显问题，本研究提出了“高温发电、中温工艺耦合、低温供暖”的三级梯级利用改进框架，来达成余热资源在品位、空间与时间维度上的有效配合；基于卡诺定理建立的能量品位匹配模型会引导各温度区间余热的定向使用，防止出现“高废低补”的能源错配情况，这个架构再根据余热温度和焓值分布做细致划分：高温段（250 ~ 420 °C）使用双级回收的技术手段，加上蒸汽过热器和再热器的组合装置，使烟气显热的回收率提高到 92%，还用来带动背压发电；中温段（80 ~ 135 °C）加入高效的板式换热器和跨工段柔性热网，给工艺介质做预热处理，使外供蒸汽的消耗显著减少；低温段（50 ~ 80 °C）运用热管辐射换热的系统来做区域供暖，更一步提高能源综合利用的效率；同时，结合智能动态分配的策略方法，通过及时监控和反馈控制的方式灵活调整各个回路里介质的流量和换热负荷，构成稳定且闭环的能量流网络结构；应用之后，系统焓损率降低了 31%，不仅达成了余热回收率的明显提高，还为化工生产系统节能降耗提供了结构清楚、技术可行的梯级利用路径。

3 优化方案的节能降耗效果验证与路径总结

3.1 优化方案的能耗模拟与能效对比分析

采用 Aspen Plus 平台构建煤化工合成氨装置的全流程模型，把“高温发电、中温工艺耦合、低温供暖”三级余热回收优化架构嵌入模型中，开展 SRK 物性方法的热力学模拟工作，借助 Design Spec 完成负荷的动态跟踪任务。模拟结果显示，优化后的单位氨产品综合能耗从 $38.2 GJ \cdot t^{-1}$ 下降到 $30.7 GJ \cdot t^{-1}$ ，余热回收率从 38% 上升到 76%，每年能节约标煤大约 1.8 万吨。

表 1 管壳式换热器参数优化结果对比表

参数	优化前值	优化后值	变化率
传热系数 K ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	832	1 405	+68.9%
壳程压降 ΔP_o (kPa)	34.2	38.5	+12.6%
管程压降 ΔP_p (kPa)	28.7	32.1	+11.8%
总泵功 W_p (kW)	15.8	17.7	+12.0%
单位换热量泵功 ($kW \cdot MW^{-1}$)	4.16	3.37	-19.0%
污垢热阻 R_f ($m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$)	3.2×10^{-4}	2.1×10^{-4}	-34.4%

为了验证这个模型，还引入了余热回收率的定义式：

$$\eta_{rec} = \frac{\sum Q_{util}}{\sum Q_{avail}} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中， η_{rec} 表示余热回收率， Q_{util} 为被利用的余热总量， Q_{avail} 为系统可释放余热总量，计算得高温段发电蒸汽增0.42 t·t⁻¹ NH₃，中温段工艺蒸汽耗量降0.29 t·t⁻¹ NH₃，低温段供暖电耗降0.8 MW，整体节能效果与模拟偏差小于3%，证实了优化方案在提效降耗方面的显著潜力与工程可行性。

3.2 节能降耗效果的现场验证与数据采集

优化方案实施后，依托DCS系统部署64个采集点连续监测90天。数据显示：高温段蒸汽过热器出口温度由420℃降至312℃，对应蒸汽产量提升0.42 t·h⁻¹；中温段板换热端温差≤8℃，流量稳定于45 t·h⁻¹；低温段热管表面温度由78℃降至52℃，循环泵实现28~42 Hz自适应调节。实测高、中、低温段余热回

收量分别为5.1 MW、3.7 MW、1.0 MW，与模拟值偏差分别为3.8%、2.6%、9.1%，系统总回收率达74%，与模拟误差在3%，验证了模型可靠性。偏差主要源于环境风速、微量H₂S污垢及电网波动，通过加装挡风板、过滤器和预测控制等措施，可将偏差控制在2%以内，为方案推广提供了数据支撑与优化方向(见表2)。

3.3 化工生产余热回收节能降耗的推广路径

根据煤化工合成氨装置余热回收优化的实际经验，本研究总结提炼出“集成架构、参数优化、梯级利用”三大核心技术模块，搭建起一套层次清晰、可复制的节能降耗系统路径，其遵循“温度对口、能量梯级”的原则，先推动建立分行业的余热回收技术标准体系，把不同温区余热的最佳利用方式和能效评价指标明确下来，为企业系统改造提供规范依据，然后要配套制定并发布设备更新与技术改造的激励政策，通过财政补贴、税收优惠等方式把企业实施的门槛降低，加快

表2 复杂地形区城市规划实景三维融合技术节能降耗效果

项目	模拟值	实测值	偏差/%	数据来源
高温段余热回收量/MW	5.3	5.1	3.8	蒸汽流量计+温度传感器
中温段余热回收量/MW	3.8	3.7	2.6	板换两侧温压+电磁流量计
低温段余热回收量/MW	1.1	1.0	9.1	热管表面红外测温+泵功率
系统总回收率/%	76	74	2.6	能量平衡计算

高效换热设备和智能控制系统的推广使用，接着可以依托工业互联网平台，建立行业级的余热协同调和碳数据管理平台，让跨工段、跨厂区的余热资源优化配置和碳排放精准管控得以实现。在实施环节，提出采用“示范引领、迭代优化、全面推广”三阶段策略：首先在典型合成氨装置开展具体的工程示范项目，验证技术经济性，然后结合运行数据将模型和控制策略进行迭代优化，最后逐步推广到炼油、乙烯等高耗能行业，形成覆盖全行业的余热回收网络，预计全面推广之后，每年能为化工行业节约标煤大约1200万吨，减排二氧化碳3200万吨，明显推动行业朝着绿色低碳方向转变，为落实“双碳”目标提供切实可行的技术参考。

4 结束语

本研究构建的化工余热回收三级优化体系，在煤化工合成氨装置中实现余热回收率达76%。核心创新包括“温度一用途”精准匹配的梯级架构、传热与压降协同的设备优化模型，以及基于熵权法的动态分配策略。实践验证表明，该系统使高温余热发电效率提升

至42%，中温工艺耦合节能1.1 MW，低温供暖COP达3.8，投资回收期4.2年。将其推广至炼油、乙烯等行业，预计可实现年节煤约1200万吨、减排二氧化碳3200万吨，为化工行业节能降耗提供了一种可复制、效益显著的技术路径。

参考文献：

- [1] 陈杰. 化工过程中余热回收系统的设计与节能效益评估[J]. 化工管理, 2025(32):32-35.
- [2] 王如鹏, 刘霞, 于朝, 等. 溴素生产中余热回收系统的优化设计与应用效益分析[J]. 化工管理, 2025(26):135-138.
- [3] 刘勇, 王鹏. 化工生产余热回收系统优化与节能降耗协同提升的策略[C]//《中国招标》期刊有限公司. 新质生产力驱动第二产业发展与招标采购创新论坛论文集(三). 辽宁优创植物保护有限公司, 2025.
- [4] 赵麒麟. 化工企业节能与绿色化工生产技术研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2024, 05(09):5-6, 9.
- [5] 郑勇, 张青, 张宝财. 含硫化氢废气干法制硫酸余热回收系统优化设计[J]. 硫磷设计与粉体工程, 2021(01):11-14, 5.