

高耗能化工单元梯级用能优化及系统能效提升机制

李志超

广安前峰玖源电子材料有限公司 四川 广安 638000

摘要：针对精馏、换热及反应单元存在的热量品位错配与系统用能失衡问题，本文以降低全系统烟损（Exergy Destruction）为核心目标，基于夹点分析与热力学第二定律，构建了“单元内品位适配-单元间热流耦合”的梯级用能优化模型。对 NSGA-II 算法进行改进，引入自适应交叉、自适应变异算子，通加快多目标 Pareto 最优前沿收敛速度并改善解集分布均匀性。依托 Aspen Plus 与 gPROMS 联合仿真平台进行验证，结果表明：优化后系统总公用工程消耗降低31.2%，系统烟效率由41.6%提升至53.8%。研究揭示了“精馏-反应”热闭环与“换热网络一热多用”的协同增效机制，明确了热泵压缩比与换热夹点温差为能效提升的关键敏感因子，为高耗能化工过程的深度节能降碳提供了可工程化的理论依据。

关键词：高耗能化工单元；梯级用能；烟效率；夹点分析；能效提升机制

0 引言

高耗能化工单元（如精馏、换热与反应器）的能耗占化工生产总能耗的60%以上，其核心痛点并非单纯的热量不足，而是热量供应品位与需求品位的严重错配。传统“粗放供给、按需加热”的模式导致大量高品位热能被降级使用，高温烟气与冷凝潜热大量散失，造成系统烟损居高不下。

现有研究多集中于单一单元的局部节能，如精馏热泵技术或换热网络 pinch 优化，缺乏从系统层级审视多单元之间热量“源-阱”匹配关系的视角。这种割裂的优化方式往往导致一个单元的节能措施成为另一个单元的负担，整体能效提升受限。

为此，本文聚焦于烟损的精准溯源与梯级阻断，核心科学问题在于：如何通过跨单元的品位匹配与热量复用，将分散的烟损回收并加以利用？本研究将热力学分析与数学规划相结合，构建耦合精馏、换热与反应单元

的系统能效模型，旨在阐明梯级用能对系统能效的提升机制，并为工程改造提供具体的操作路径。

1 高耗能化工单元用能特性与能效机理分析

1.1 典型单元能耗特征与品位错配溯源

本研究选取甲醇精馏三塔、乙烯急冷换热网络及催化裂化反应-再生系统作为典型对象。能耗审计显示，其能量输入以蒸汽（占比约65%）和电力（占比约25%）为主，损耗形式集中体现为三个方面：（1）精馏塔：塔顶冷凝热（品位约80-120℃）大量被循环水带走，而塔底再沸需消耗高品位蒸汽（>150℃），造成塔内“塔顶弃热、塔底买热”的内部品位矛盾；（2）换热网络：夹点温差过大（约18℃）导致跨温区传热不可逆损失剧增；（3）反应单元：强放热反应释放的高温热能（>300℃）未优先用于驱动精馏或预热，而是直接通过产汽降温，存在外部热量降级利用问题。如图1。

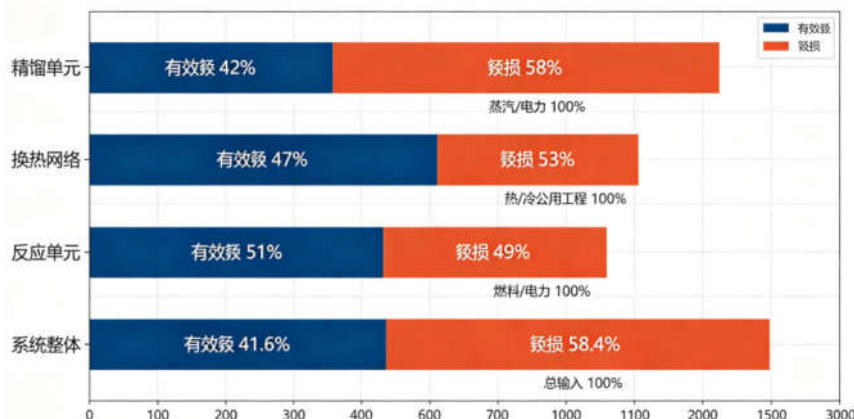


图1 典型高耗能化工单元能量输入与烟损分布对比

1.2 梯级用能的“温度对口”机理与约束界定

梯级用能的核心在于遵循热力学第二定律，即“高品质高用、低质低用”。理论计算表明，当热源与热阱温差低于 10°C 时，传热驱动力不足且换热面积趋于无穷，因此工程上需设定最小传热温差（ $\Delta T_{\min}$ ）约束。基于夹点分析理论，本研究确定各单元的热流温焓曲线，识别系统夹点位置。关键判定标准包括：热源温度必须高于热阱需求温度（ $> \Delta T_{\min}$ ），且回收焓损需大于回收设备（如压缩机、泵）的额外功耗^[1]。这构成了后续优化模型的热力学可行域边界。

1.3 系统能效的多参数耦合影响机制

系统能效并非单元能效的线性叠加。通过焓平衡分析发现，设备结构参数（塔板数、换热面积）与运行参数（回流比、反应空速）通过改变物流的进出温位，直接影响跨单元的热流品质。例如，降低精馏塔回流比虽能减少塔底加热蒸汽消耗，但会使塔顶冷凝热负荷显著下降，导致余热总量不足以供给反应单元预热，仍需额外补充外部燃料；同时塔顶产品纯度降低还可能影响下游反应性能，间接增加分离或转化成本。这种“此消彼长”的负外部性，正是系统耦合优化的核心切入点，单变量调整无法实现全局最优。

2 高耗能化工单元梯级用能优化模型构建

2.1 总体优化架构与多目标设定

针对上述耦合矛盾，本文提出“三层递进、全局统筹”的优化架构：

第一层（单元内部）：各单元通过调整操作参数，实现自身余热的最大化内部分级回收（如精馏侧线取热）。

第二层（单元间耦合）：以焓损最小为目标，建立单元间热流匹配矩阵，决定将精馏塔顶余热输往反应预热，还是反应余热输往精馏再沸。

第三层（系统全局）：协调公用工程（蒸汽、电力）的补充量。

优化目标函数设定为三个冲突目标的权衡：（1）总能耗最小（以标准煤当量计）；（2）系统焓效率最大；（3）年度化总成本最小（涵盖设备投资与运行能耗）。采用加权求和法将其转化为单目标进行求解，权重系数根据企业实际用能成本确定^[2]。

2.2 关键单元梯级用能子模型建立

（1）精馏塔冷热双效复用模型。引入热泵技术，将塔顶低温蒸汽压缩升温至高于塔底温度（ $10\text{--}15^{\circ}\text{C}$ ）后作为再沸热源。决策变量为压缩机压缩比（ R_c ）与侧线采出量（ F_s ），二者决定压缩功与回收热。约束条件为压缩机功耗小于回收热量增益，确保净焓损

为负。（2）换热网络多温位余热回收模型。基于改进的温焓曲线（Composite Curves），将换热网络划分为高温段（ $> 300^{\circ}\text{C}$ ）、中温段（ $150\text{--}300^{\circ}\text{C}$ ）和低温段（ $< 150^{\circ}\text{C}$ ）。模型强制规定：高温余热优先用于反应物预热，中温余热用于精馏进料加热，低温余热用于锅炉补水预热。决策变量为各段换热器的匹配面积与旁路开度^[3]。（3）反应单元自热平衡模型。构建反应动力学与热平衡联立方程，以反应器入口温度（ T_{in} ）和冷激水量（ Q_c ）为决策变量，目标为在满足转化率约束下，最大化反应热对进料预热的贡献率，减少外部加热炉负荷。

2.3 系统能效耦合联动模型与约束处理

将上述三个子模型通过热流连接方程进行耦合。构建系统热流关联矩阵，定量描述“精馏冷凝热→反应预热”与“反应生成物热→换热网络”的传递量。约束条件除工艺安全限值外，特别强调了压降约束：热流在跨单元长距离输送时，压降导致的温度损失不可忽视，需确保到达热阱时仍满足最小温差驱动要求。参数校准采用生产现场历史数据回归，确保模型稳态误差小于 $\pm 5\%$ 。

2.4 改进型NSGA-II算法求解与验证策略

由于模型包含连续变量（温度、流量）与整数变量（塔板数、换热器台数），属于混合整数非线性规划（MINLP）。选用带精英策略的NSGA-II算法进行求解。针对标准NSGA-II易早熟的缺陷，本研究做了两处改进：（1）引入自适应交叉概率，当种群陷入局部最优时增大交叉概率以增加多样性；（2）嵌入局部搜索算子，对Pareto前沿附近的个体进行小步长扰动，提高解集的精确度^[4]。

验证策略采用“三步法”：第一步，将优化解代入严格的Aspen Plus稳态模型进行物料与能量衡算校验；第二步，利用gPROMS进行动态扰动模拟，检验方案在进料波动10%时的稳定性；第三步，通过与实际生产月报表数据对比，量化优化方案的实际节能量。

3 仿真验证与系统能效提升机制阐释

3.1 仿真平台搭建与基础数据设定

基于某大型化工企业实际运行数据建立基准工况（Base Case）。在Aspen Plus中选用NRTL-RK物性包确保非理想体系精度，gPROMS负责求解含微分代数方程的动态模型。评价体系涵盖三个维度：经济性（节能率）、焓经济性（单位产品焓损）与可持续性（ CO_2 减排折算）。

3.2 单元级优化效果分析

仿真结果显示：

精馏单元：实施热泵提温后，塔顶废热复用率达62.3%，再沸蒸汽消耗下降28.6%；

换热网络：夹点温差由18℃收窄至10℃，最小公用工程加热负荷降低19.7%；

反应单元：利用高温余热预热原料后，外部燃料节省率达23.4%。

值得注意的是，烟损分布发生显著转移：虽然压缩机新增了部分电耗（外部烟损），但排斥冷凝热导致的内生烟损大幅下降，单元总烟损削减25.7%，证明了“以电代热”在烟经济性上的合理性。如图2。



图2 优化前后各单元烟损对比柱状图

3.3 系统级协同增效机制与敏感性分析

当单元间热流打通后，系统出现显著的“协同增效”现象：

机制一（闭环效应）：精馏塔顶热经热泵提温至140℃供给反应预热，反应生成热再返回精馏塔底再沸，形成“精馏→反应→精馏”的热闭环，大幅削减了对外部蒸汽的依赖。

机制二（梯级链效应）：反应器出口高温烟气（350℃）驱动导热油系统，依次为换热网络中温段、精馏低温段服务，实现了“一热到底”的串联利用。

敏感性分析定量表明：热泵压缩比（ R_c ）的灵敏度系数高达0.38，是最强正相关因子，但受限于压缩机材质，目前 R_c 不宜超过3.0；换热夹点温差（ ΔT_{min} ）的灵敏度系数为-0.31，每缩小1℃，全系统烟效率提升约0.8%，但会急剧增加换热面积投资。如图3。

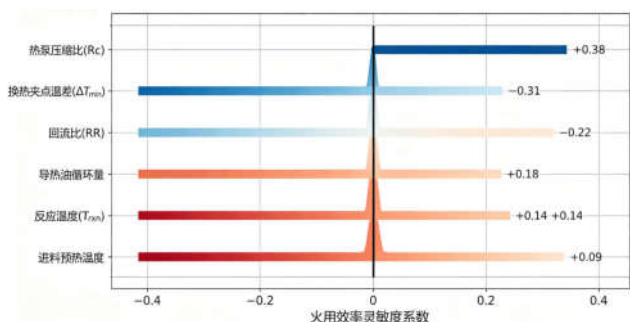


图3 系统关键参数对烟效率的敏感性分析

3.4 工程适配性分析与改进路线

适配性评估：优化方案对现有主工艺流程改动小，核心改造（增加热泵、重布换热器）可利用年度大修窗口期实施。经济效益测算显示，静态投资回收期约2.6年^[5]。

局限性讨论：当前模型对非理想物系的相平衡预测存在偏差，导致低温段余热回收量被高估约5%；此外，模型基于稳态设计，对启停工况的动态能量调度尚缺乏考虑。

实施策略：建议采用“三步走”路线——一期（0-6月）完成仪表校准与模型在线标定；二期（6-18月）实施换热网络改造，预期中期节能15%；三期（18-30月）推进精馏热泵改造与在线实时优化（RTO）系统部署，最终实现全厂能效智能管控。

4 结束语

本研究系统剖析了高耗能化工单元热量品位错配的根源，构建了以烟损最小化为核心的梯级用能双层优化模型。通过改进型NSGA-II算法求解与严格仿真验证，明确了“单元内部挖潜、单元间闭环互供”的协同增效机制。研究表明，跨单元的热闭环与梯级链效应是突破系统能效瓶颈的关键路径。后续研究将着力于引入动态负荷预测模型，提升变工况下的优化控制精度，并探索基于数字孪生的全生命周期能效管理方案，为化工行业深度脱碳提供技术支撑。

参考文献

- [1]冯梁俊,彭星煜.基于烟分析的天然气处理厂增压系统节能优化[J].石油与天然气化工,2025,54(04):112-118.
- [2]李善伟.化工生产余热回收系统优化设计及节能降耗路径研究[J].科海故事博览,2026,17(02):56-60.
- [3]姚少博.合成氨工艺中变换工段能耗影响因素分析与节能改造方案研究[J].建筑与施工,2025,4(17):28-32.
- [4]刘扬,赵宁,陈晨.高耗能化工过程热集成梯级优化与能效提升机制[J].现代化工,2024,44(07):189-194.
- [5]张磊,王浩.基于能量梯级利用的化工多单元耦合节能优化研究[J].化工进展,2023,42(11):5892-5900.