

高效换热器在化工生产中的热能回收应用及经济性分析

罗 昕（江西省化学工业设计院，江西 南昌 330000）

摘要：化工生产过程伴随大量中低温余热与工艺过程热排放，高效回收此类热能是行业实现节能降耗与“双碳”目标的核心路径。高效换热器凭借高传热系数、低能耗、紧凑型结构等优势，成为突破传统换热技术瓶颈、提升化工热能回收效率的关键设备。为此，以某炼油厂常减压装置为案例，深入分析高效换热器在化工生产中的热能回收应用及经济性，旨在提升化工热能回收效率，为化工行业绿色转型提供技术支撑。

关键词：高效换热器；化工生产；热能回收；经济性

中图分类号：TQ051.5 文献标识码：A 文章编号：1674-5167(2025)032-0061-03

Application and Economic Analysis of High-Efficiency Heat Exchangers in Heat Recovery for Chemical Production

Luo Xin (Jiangxi Chemical Industry Design Institute, Nanchang Jiangxi 330000, China)

Abstract: Chemical production processes generate a large amount of medium and low-temperature waste heat and process heat emissions. Efficient recovery of this type of heat energy is a core path for the industry to achieve energy conservation and consumption reduction, as well as the “dual carbon” goal. High-efficiency heat exchangers, with their advantages of high heat transfer coefficient, low energy consumption, and compact structure, have become key equipment to break through the bottleneck of traditional heat exchange technology and improve the efficiency of chemical heat energy recovery. Therefore, this article takes a refinery's atmospheric and vacuum distillation unit as a case study, and conducts an in-depth analysis of the application and economics of high-efficiency heat exchangers in chemical production for heat energy recovery. The aim is to improve the efficiency of chemical heat energy recovery and provide technical support for the green transformation of the chemical industry.

Keywords: high-efficiency heat exchanger; chemical production; heat recovery; Economy

化工行业作为一个典型的能源密集型行业，其生产过程中会有大量的中低温余热和工艺热不断地排放出来，这种余热如果不进行有效回收利用，既造成了能源的严重浪费，又加重环境热负荷，有悖于产业节能降耗的方向。而高效换热器以其特有的技术优势在打破传统换热瓶颈中显示出显著的效果。深入剖析高效换热器回收化工生产热能的价值对促进化工行业绿色转型，提高能源利用水平至关重要。

1 高效换热器在化工生产中的热能回收应用中的价值

1.1 提升能源利用效率，降低能耗成本

化工生产流程中，能源消耗贯穿每一个环节，余热高效回收是提升能源整体使用效率的重点方式。高效换热器由于具有高传热性能，能更全面捕捉生产过程中产生的废热并减少传递过程中能量的损耗，从而将原本可能被浪费的热能重新导入生产系统，使得能量的二次利用又显著地提升整个生产体系的能量利用效率。从成本控制角度来看，能源消耗是化工企业成本的主要组成部分，高效换热器通过换热流程优化减少了对附加能量的依赖，进而直接降低了企业能耗支出。

1.2 助力“双碳”目标实现，减少环境排放

当前，“双碳”目标已成为行业发展的重要导向，

化工行业作为碳排放重点领域，减少环境排放是实现绿色发展的必然要求。化工生产中的能源消耗与碳排放、污染物排放直接关联，高效换热器通过提升余热回收效率，减少了生产过程中对化石能源等额外能源的燃烧需求，从而降低了温室气体的排放总量，也减少了因能源燃烧产生的氮氧化物、硫化物等污染物的排放，对缓解大气污染压力具有积极作用。化工生产中产生的部分余热载体（如高温污水）若直接排放，会对周边水体造成热污染，破坏生态环境。高效换热器能够对这类余热载体进行处理，回收其中的热能后再进行排放，降低了高温载体对环境的热负荷，减少了后续处理过程中的冷却能耗，进一步减轻了环境负担，助力化工企业更好践行环保责任。

1.3 保障生产工艺稳定性，提升装置运行可靠性

化工生产对于工艺参数稳定性有极高要求，而温度是核心工艺参数，温度的波动将直接影响产品质量和生产流程连续性。传统换热设备由于结构设计上的限制，容易产生介质流动死区现象，造成结垢现象频发，不但使换热效率下降，而且需要定时停运进行清理，扰乱了正常生产节奏并影响设备持续运行。高效换热器经优化结构设计后，可促使介质形成湍流流动进行换热，从而有效抑制结垢产生和延长设备维修周期。

期，本实用新型降低了停机清洗导致生产中断的情况，确保生产流程连续进行。

2 高效换热器在化工生产中的热能回收应用场景

2.1 常减压装置塔顶油气余热回收场景

某炼油厂常减压装置塔顶油气（主要成分为汽油、煤油馏分及水蒸气）温度约 110–130℃，流量为 80–100t/h，改造前采用传统管壳式换热器回收余热，仅能将油气温度降至 85–90℃，余热回收量约 12MW，用于预热原油（原油进口温度 25℃，预热后温度 45℃）。改造后，该场景选用高效不锈钢板式换热器（型号 M10-B，板片面积 0.5m²/片，总板片数 120 片），通过优化流道设计，使塔顶油气与原油呈逆流换热，油气出口温度降至 55–60℃，余热回收量提升至 28MW，原油预热后温度升至 70℃。

2.2 常减压装置中段回流油余热回收场景

常减压装置中段回流油（温度 220–250℃，流量 150–180t/h）是重要的中温余热来源，改造前采用传统浮头式管壳换热器回收余热，用于加热锅炉给水（锅炉给水的入口温度为 100℃，受热后为 150℃），余热回收率仅为 62%，换热后中段回流油温度降至 180–190℃。为提升余热回收效率，该场景选用高效螺旋板式换热器（机型为 LSLB-1000，螺旋板的直径为 1000mm，板间距为 20mm，换热总面积为 500m²），螺旋板材质为 Q345R 碳钢，耐温可达到 300℃，达到中段回流油温度。

利用螺旋流道的设计方法，中段回流油与锅炉给水之间的换热系数从传统换热器的 1200W/(m²·K) 增加到了 3500W/(m²·K)，余热的回收效率增加至 90%，经换热处理后，中段回流油的温度下降至 140–150℃，锅炉给水在加热后的温度则上升至 210℃。改造后，锅炉燃煤消耗量从原来的 80t/天降至 55t/天（燃煤单价以 1200 元/t 计），每天减少燃煤成本 3 万元，在减少锅炉烟气排放量的前提下，大气污染得到进一步的减轻。

2.3 常减压装置低温含油污水余热回收场景

某炼油厂常减压装置产生的低温含油污水（温度 65–80℃，流量 200–220t/h）含油量约 50–100mg/L，改造前直接排入污水处理系统，污水中的余热未得到回收，且高温污水需污水处理系统消耗电能进行冷却（冷却水泵功率 55kW，每天运行 24h），每年冷却能耗成本约 47.5 万元（电价按 0.6 元/kWh 计算）。为回收该部分余热，该场景选用高效板壳式换热器（型号 BKH-800，壳程直径 800mm，板束换热面积 600m²），板束采用钛材材质，具备优异的耐腐蚀性，可适应含油污水的腐蚀环境。含油污水在板壳式换热

器壳程流动，与管程的空气（用于加热炉助燃空气，进口温度 25℃）进行换热，污水出口温度降至 40–45℃，空气加热后温度升至 55–60℃。改造后，加热炉助燃空气温度提升，使加热炉热效率从原来 88% 提升至 92%，每年减少加热炉天然气消耗 25 万 Nm³，节省成本 100 万元。

3 提升高效换热器在化工热能回收中的应用策略

3.1 优化高效换热器选型，匹配工艺需求

高效换热器的选型需结合化工装置的工艺参数（介质的温度，压力，流量，腐蚀性等）及余热回收目标，避免选型不当导致换热效率低下或设备损坏。某炼油厂对常减压装置进行改造时，根据不同余热来源特点准确选择：塔顶油气含水蒸气高，容易发生相变，选择可拆装板式换热器方便处理相变过程中可能出现的结露和腐蚀等现象；中段回流油温高且粘度大，选择螺旋板式换热器并利用自身长流道和高湍流特性增强传热效率；低温含油污水腐蚀性强，含有杂质，选择钛材板壳式换热器同时考虑耐腐蚀性和结构强度。同时利用 Aspen Plus 软件对换热系统进行建模，对不同换热器类型进行换热效果仿真，并计算最佳换热面积和流道设计参数，例如，塔顶油气板式换热器的板片波纹角度被设定为 30°，中段回流油螺旋板式换热器的螺旋升角被设定为 15°，这样是为了确保换热器的性能能够与工艺需求高度匹配。经过改进，各种场景的换热器都没有因为选择不恰当而出现问题，其换热效率已经超过设计值的 98%。

3.2 强化运行维护管理，延长设备寿命

高效换热器的长期稳定运行依赖于科学的维护管理，某炼油厂制定了完善的高效换热器维护制度：一是定期清洗，根据不同换热器类型采用针对性清洗方式，板式换热器每 12 个月采用化学清洗（采用 2%–5% 的盐酸溶液，确保温度维持在 40–50℃ 范围内，并进行 4h 的清洁），螺旋板式换热器每 18 个月采用高压水射流清洗（水压 30MPa，射流角度 45°），板壳式换热器每 24 个月采用在线化学清洗（通过清洗液循环系统，达到不停机清洗的目的），避免结垢影响传热效率；其次是定期检查，每天对换热器进出口的压力，温度，流量和密封等进行检查，并利用超声波检测技术对板片或者板束腐蚀和泄漏进行月度检测，发现异常情况及时处理，例如 2023 年 5 月份巡检时发现塔顶油气板式换热器密封垫陈旧，随即停运更换，从而避免介质串混事故的发生；应建立设备台账记录换热器投用时间，检修数量，故障种类和更换部件等信息，并通过数据分析对设备寿命进行预测，可以提前做好更换方案，以免突然停机。通过加强维

护和管理，该装置的高效换热器的平均无故障运行时间从改造初期的 180 天增加至 360 天，设备的使用寿命也延长了 30%。

3.3 推进换热系统集成，构建余热回收网络

单一高效换热器的应用难以实现全装置余热的最大化回收，需将高效换热器与工艺系统集成，构建多层次余热回收网络。某炼油厂以常减压装置为核心，将塔顶油气、中段回流油、低温含油污水的高效换热器与原油预热系统、锅炉给水系统、加热炉助燃空气系统集成：塔顶油气换热器预热的原油直接进入中段回流油换热器进一步升温，中段回流油换热器加热的锅炉给水输送至锅炉产生蒸汽，低温含油污水换热器加热的助燃空气送入加热炉，形成“余热 - 工艺介质 - 能源介质”的梯级利用网络。

积极引入余热锅炉与蒸汽轮机，将未被高效换热器回收的高温余热（如减压炉烟气温度 300–350℃）转化为蒸汽，驱动蒸汽轮机发电，每年发电量达 150 万 kWh，补充装置用电需求。通过系统集成，该装置的整体余热回收率从改造前的 58% 提升至 85%，形成“热能回收 - 能源转化 - 自用补充”的闭环系统，每年额外减少外购电能成本 90 万元（电价按 0.6 元 / kWh 计算）。

4 高效换热器在化工生产中的热能回收应用中的经济性分析

某炼油厂常减压装置高效换热器改造项目的经济性分析以 5 年为评估周期，从初始投资、运行成本节约、投资回收期及长期收益四方面展开。项目初始投资包括高效换热器设备采购费用、安装调试费用及系统集成费用：高效板式换热器（塔顶油气场景）采购成本 80 万元，螺旋板式换热器（中段回流油场景）采购成本 120 万元，板壳式换热器（低温含油污水场景）采购成本 150 万元，新型螺纹管板壳式换热器（渣油场景）研发与采购成本 200 万元；安装调试费用（含管道改造、电气控制改造）100 万元；系统集成费用（含 DCS 控制系统、余热锅炉与蒸汽轮机配套）350 万元，总初始投资合计 1000 万元，较传统换热器改造方案（总投资 600 万元）增加 400 万元。

运行成本节约主要包括能耗成本节约、维护成本节约及产量损失减少：能耗方面，每年减少天然气消耗 155 万 Nm³（塔顶油气场景 95 万 Nm³ + 中段回流油场景 40 万 Nm³ + 渣油场景 20 万 Nm³），节省成本 620 万元（天然气单价 4 元 /Nm³）；减少燃煤消耗 9000t（中段回流油场景，燃煤单价 1200 元 /t），节省成本 1080 万元；减少外购电能消耗 150 万 kWh，节省成本 90 万元；冷却水泵能耗减少，节省成本 23.75

万元，每年能耗成本合计节约 1813.75 万元。维护方面，高效换热器清洗周期延长，每年减少维护费用 50 万元（传统换热器年维护费用 80 万元，高效换热器年维护费用 30 万元）；设备故障率降低，每年减少故障维修费用 30 万元，维护成本合计节约 80 万元。产量方面，减少停机清洗次数，每年避免产量损失 1.5 万 t，挽回经济损失 450 万元（原油加工利润 300 元 /t）。每年总运行成本节约与损失挽回合计 2343.75 万元。

投资回收期计算采用静态回收期法，计算公式为：投资回收期 = 初始投资 / 年净收益。年净收益 = 年运行成本节约与损失挽回 - 年设备折旧费用（按 5 年折旧，残值率 5%，年折旧费用 = $1000 \times (1-5\%) / 5 = 190$ 万元），即年净收益 = $2343.75 - 190 = 2153.75$ 万元。投资回收期 = $1000 / 2153.75 \approx 0.46$ 年，即约 5.5 个月，远低于化工行业平均投资回收期（3–5 年），投资回收速度快。从长期收益来看，项目运行 5 年，总净收益 = $2153.75 \times 5 = 10768.75$ 万元，扣除初始投资 1000 万元，累计净收益达 9768.75 万元，同时减少二氧化碳排放 10450t，具备显著的经济与环境双重效益。

5 结论

高效换热器可显著提升能源利用效率、减少环境排放、保障工艺稳定，在化工生产热能回收中具有不可替代的作用，未来化工行业应进一步推广高效换热器的应用，结合智能化技术（如 AI 预测维护、数字孪生）优化换热系统运行，针对更多特殊工况开展技术研发，推动化工行业向高效、节能、低碳的绿色方向转型，为实现“双碳”目标提供有力支撑。

参考文献：

- [1] 叶露阳, 董梁. 热泵技术在化工生产低位热能回收中的研究应用 [J]. 化工设计通讯, 2024, 50(02):99-100+106.
- [2] 樊丽梅, 石香玉. 双碳目标下化工设备助力化工生产低碳转型研究 [J]. 焦作大学学报, 2022, 36(02):99-102.
- [3] 牛晓娟, 潘线伟, 李天罡. 高效换热器换热管失效的原因及对策分析 [J]. 当代化工研究, 2021(09):21-22.
- [4] 李秋杰, 齐敏, 朱兵成, 等. 螺旋折流板高效换热器的结构特点及应用案例 [J]. 化工管理, 2020(29):157-158.
- [5] 周峰. 新型高效换热器在石油化工生产中的应用 [J]. 设备管理与维修, 2019(12):248-249.

作者简介：

罗昕（1990.8—），男，汉族，江西抚州人，硕士研究生，研究方向：化工设计。