

化工过程中节能降耗工艺

何俊岭 高琳昊

陕煤集团榆林化学有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘要：化工过程节能降耗工艺通过技术创新与系统优化实现能源高效利用。主要技术包括余热回收利用（高温烟气、低温余热、相变储能梯级利用）、能量集成与过程强化（换热网络优化、反应-分离耦合）、新型节能设备与材料（高效换热器、变频电机、纳米保温材料）及系统智能控制（全流程优化、动态调控）。工艺优化涵盖过程集成、绿色化学技术（绿色催化、无毒溶剂）及过程耦合协同（反应-分离耦合、能源梯级利用），可显著降低能耗、提升资源利用率，为化工行业绿色可持续发展提供技术支撑。

关键词：化工；节能降耗；工艺

引言：化工行业作为国民经济支柱产业，生产过程伴随高能耗与高污染，能源成本占比达30%-50%，且面临资源枯竭与“双碳”目标双重压力。传统工艺存在能源利用率低、余热浪费严重、设备能耗大等问题，制约行业可持续发展。因此，研发应用节能降耗工艺，通过余热回收、能量集成、设备升级及智能控制等技术路径，优化能源利用效率，对降低生产成本、减少污染物排放、推动产业绿色转型具有重要意义。

1 化工过程中节能降耗工艺的必要性

在当今全球能源紧张与环境问题日益严峻的背景下，化工过程中节能降耗工艺的实施具有极为重要的必要性。化工行业作为国民经济的支柱产业之一，其能源消耗量巨大，占全国能源消耗的相当比例。在生产过程中，从原料的预处理、化学反应的进行，到产品的分离与精制等各个环节，都离不开大量能源的投入。然而，传统化工生产工艺往往存在着能源利用效率低下、能源浪费严重的问题，这不仅导致了生产成本的增加，削弱了企业的市场竞争力，还加剧了对有限能源资源的过度依赖，不利于国家能源安全战略的实施^[1]。同时，化工生产过程中的高能耗也伴随着大量的污染物排放，如二氧化碳等温室气体以及各类有害物质，对环境造成了严重污染，给生态系统和人类健康带来了巨大威胁。面对这些挑战，推动化工过程中的节能降耗工艺，能够有效降低能源消耗，减少污染物排放，实现化工行业的可持续发展。通过采用先进的节能技术和工艺，如高效催化剂、优化的反应条件、余热回收系统等，可以显著提高能源利用效率，降低生产过程中的能源浪费，从而在保障化工产品稳定供应的同时，减少对环境的负面影响，为应对全球气候变化做出积极贡献。

2 主要节能降耗工艺技术

2.1 余热回收利用技术

2.1.1 高温烟气余热回收技术

针对化工窑炉、裂解炉等排放的高温烟气（温度250-1000℃），采用热管式换热器或余热锅炉进行热能回收。热管换热器利用相变传热原理，传热效率比普通换热器高数十倍，可将烟气温度从300℃降至120℃以下，回收热量用于加热工艺介质或产生蒸汽。例如，某炼化企业在催化裂化装置应用热管换热器，年回收余热折合标准煤8000吨，减少排烟热损失15%，同时降低脱硫系统负荷，实现节能与环保双重效益。

2.1.2 低温余热回收技术

针对温度30-150℃的低温余热（如循环冷却水、工艺废水、反应尾气），采用热泵技术提升热能品位后再利用。低品位余热回收热泵装置通过高效热力循环，可将30-50℃热源温度提升至55-75℃，用于生活热水供应或生产预热。某化工园区利用40℃化工废水余热，通过热泵系统年节约蒸汽2万吨，减少冷却塔用电6.9万度，解决了传统低温余热回收效率低、经济性差的难题。

2.1.3 相变储能与余热梯级利用技术

结合相变储能材料（如熔融盐、石蜡）对间歇性余热进行存储，实现热能的稳定输出。在合成氨工艺中，将造气炉吹风气余热通过余热锅炉产生蒸汽，驱动汽轮机发电，发电后的乏汽（150℃）再用于加热工艺水，形成“发电-供热”梯级利用系统。某企业应用该技术后，余热利用率从40%提升至75%，年节能折合标准煤1.2万吨，同时减少CO₂排放约3万吨，显著提升能源综合利用效率。

2.2 能量集成与过程强化

在化工领域的节能降耗实践中，能量集成与过程强化技术作为关键手段，正发挥着至关重要的作用，助力企

业实现高效、绿色生产，为可持续发展注入强大动力。

(1) 换热网络优化通过夹点技术实现能量梯级利用。采用AspenPlus软件模拟冷热流股匹配，优化换热器网络结构，减少公用工程消耗，某乙烯装置通过该技术使换热效率提升20%，年节约蒸汽3万吨。(2) 反应-分离耦合技术缩短工艺流程并减少能耗。如反应精馏一体化设备将化学反应与产物分离同步进行，甲醇制二甲醚工艺应用后，能耗降低35%，设备投资减少25%，且避免中间产物输送损失。(3) 设备强化技术提升传质传热效率。采用高效规整填料替代传统塔板，精馏塔分离效率提高40%，回流比降低25%；微通道反应器通过强化混合与传热，使反应时间缩短至传统设备的1/10，能耗降低50%。(4) 公用工程系统集成实现能源协同优化。整合蒸汽管网、电力系统与制冷单元，采用背压式汽轮机发电同时供汽，某化工园区综合能源利用率从65%提升至82%，年减少标煤消耗8万吨。(5) 过程模拟与智能调控动态优化用能。基于实时数据与机器学习算法，对反应温度、压力等参数动态调整，某聚烯烃装置应用后，单位产品能耗降低12%，生产波动减少30%，实现精准节能。

2.3 新型节能设备与材料应用

高效换热设备通过结构创新提升传热效率，如螺旋板式换热器采用螺旋流道设计，湍流程度提高50%，污垢热阻降低40%，某硝酸装置应用后换热面积减少30%，年节电12万度。变频调速电机实现动态能耗调控，在水泵、风机等负载设备中，通过实时调整转速匹配工况需求，空分装置压缩机应用后节电率达25%，启动电流降低70%，延长设备寿命。纳米保温材料突破传统保温瓶颈，纳米气凝胶导热系数低至 $0.018\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，厚度仅为传统材料的1/3，裂解炉管道应用后热损失减少60%，外表面温度降至 50°C 以下。磁悬浮离心式冷水机组取消机械轴承，摩擦损耗降低90%，COP值达7.5，较传统机组节能40%，某化工园区制冷系统改造后年节电450万度。新型催化剂降低反应能耗需求，如高效合成氨催化剂使反应温度从 450°C 降至 380°C ，压力降低1.5MPa，合成塔能耗减少15%，同时提升单程转化率8%。

2.4 系统优化与智能控制

全流程能量系统优化通过全局建模实现用能协同，采用夹点技术与数学规划方法，整合反应、分离、公用工程单元，某炼化企业优化后综合能耗降低8%，年节约标煤5万吨。动态过程控制技术实时调整工艺参数，基于模型预测控制(MPC)算法，对精馏塔回流比、反应温度等关键变量动态优化，乙烯装置应用后产品收率提升2.5%，能耗波动控制在 $\pm 3\%$ 以内^[2]。智能能源管理系统

实现用能可视化监控，集成物联网传感器与大数据分析平台，实时监测各单元能耗指标，某化工园区通过该系统发现蒸汽管网泄漏问题，年减少损失1200万元。设备负荷优化匹配生产需求，基于生产计划动态调整机组运行台数与负荷，空压站系统应用后平均负荷率从60%提升至85%，节电率达18%。数字孪生技术赋能全生命周期节能，构建工艺虚拟仿真模型，模拟不同工况下能耗变化，某煤化工项目通过虚拟调试优化开车方案，缩短调试周期30%，减少试生产能耗20%。

3 化工过程中节能降耗工艺的优化

3.1 基于过程集成的节能降耗工艺优化

3.1.1 全流程换热网络集成优化

通过夹点分析与数学建模，对化工装置内冷热流股进行全局匹配，打破单元间能量壁垒。例如，某炼油厂将常减压装置的高温原油与催化裂化装置的低温循环水进行跨单元换热，同时优化换热器串联/并联结构，使全厂换热网络总传热面积减少15%，公用工程蒸汽消耗降低22%，年节约标煤3.5万吨，解决了传统局部优化导致的“冷热抵消”能耗浪费问题。

3.1.2 反应-分离-公用工程多单元协同优化

以能量流、物质流耦合为核心，将反应单元的放热与分离单元的吸热需求直接匹配，同时整合蒸汽、电力、制冷等公用工程系统。某甲醇生产企业通过AspenPlus全流程模拟，将合成反应余热用于精馏塔再沸器加热，同时采用背压式汽轮机驱动压缩机并副产低压蒸汽，使综合能耗从 30GJ/t 降至 26GJ/t ，能源转化效率提升13%，实现多单元能量梯级利用。

3.1.3 间歇过程与连续过程能量集成

针对精细化工业间歇生产的波动性，采用蓄能设备与动态调度策略，实现间歇过程与连续公用工程的能量匹配。某医药中间体工厂通过设置相变储能罐存储间歇反应的余热，用于后续批次的原料预热，同时优化蒸汽管网压力等级，将间歇用汽峰谷差从40%降至15%，锅炉负荷率提升至88%，年减少燃料消耗8000吨，破解了间歇生产“高能耗、低效率”的行业难题。

3.2 绿色化学技术在化工节能降耗中的应用

绿色催化技术通过高效催化剂减少反应能耗，如采用纳米分子筛催化剂替代传统酸催化剂，使烷基化反应温度从 180°C 降至 80°C ，反应压力降低60%，同时减少副产物生成，某石化企业应用后单套装置年节能1.2万吨标煤。无毒无害溶剂替代技术降低分离能耗，超临界 CO_2 萃取技术替代有机溶剂，在天然产物提取中实现溶剂零排放，分离能耗较传统蒸馏法降低45%，且产物纯度提升至

99.2%。原子经济性反应技术提高资源利用率,采用“一步法”合成工艺替代多步反应,如环氧丙烷生产中通过过氧化氢直接氧化法,原子利用率从31%提升至76%,原料消耗减少30%,同时避免氯醇法的废水污染^[3]。可再生原料替代技术减少化石能源依赖,利用生物质发酵生产有机酸,替代石油基原料,某生物化工企业年减少原油消耗2万吨,产品碳排放降低55%,且原料成本波动风险显著降低。过程强化与绿色分离耦合技术缩短工艺流程,膜分离与反应耦合系统在乙醇脱水工艺中,替代传统共沸精馏,设备投资减少40%,能耗降低35%,且无夹带剂污染问题。

3.3 化工过程的耦合与协同优化

化工过程的耦合与协同优化是实现节能降耗的关键策略,通过整合不同生产环节,打破传统工艺的孤立性,实现资源与能量的高效利用,为化工行业的可持续发展提供创新路径。(1)反应-分离耦合实现能耗与流程双重优化。采用反应精馏技术将乙酸乙酯合成与产物分离同步进行,反应热直接用于精馏塔再沸,省去外置加热设备,能耗降低38%,工艺流程缩短40%,某企业应用后年减少蒸汽消耗2.3万吨。(2)能源梯级耦合提升综合利用效率。将燃气轮机发电尾气(500℃)通入余热锅炉产生中压蒸汽,驱动汽轮机二次发电后,乏汽(180℃)用于工艺加热,形成“发电-供热-余热再利用”三级能源链,某化工园区综合能效从62%提升至81%,年节约标煤6.8万吨。(3)多组分物料协同分离减少能耗冗余。针对多组分混合物,采用隔壁塔替代传统多塔序列分离,通过内部热集成减少中间冷凝器和再沸器,苯-甲苯-二甲苯

分离工艺应用后,设备投资降低25%,能耗减少30%,且操作弹性提升至 $\pm 20\%$ 。(4)公用工程系统协同优化降低整体能耗。整合蒸汽管网、循环水系统与空压站,基于实时负荷动态调整锅炉燃烧效率与水泵转速,某炼化企业通过该技术使公用工程综合能耗降低12%,蒸汽管网损失率从8%降至4.5%,年节电1500万度。(5)跨装置物料-能量协同实现系统节能。将乙烯装置的裂解汽油作为芳烃装置原料,同时利用芳烃装置的低温余热预热乙烯原料,形成物料与能量双向耦合,某一体化石化基地应用后,原料利用率提升18%,跨装置热集成节能折合标煤4.2万吨/年,减少CO₂排放10.5万吨。

结语

未来需深化材料科学、信息技术与化工工艺的跨学科融合,推动人工智能、数字孪生与低碳技术创新,构建全流程智能化调控系统。强化从原料到废弃处置的全生命周期能效管理,通过动态监测与优化提升能源利用效率。同时,加强产学研协同,加速新型节能材料、绿色催化剂与低碳工艺的研发应用,为化工行业绿色转型注入持续动力,助力实现资源高效利用与“双碳”目标的可持续发展。

参考文献

- [1]蒙健.化工工艺研发节能降耗技术的应用方法[J].化工管理,2020(36):155-156.
- [2]徐茂.传统化工工艺优化中节能减排措施分析[J].石化技术,2020,27(11):181-182.
- [3]吴风耀.化工工艺中节能降耗技术的应用特点分析[J].石化技术,2020,27(11):207-208.