

化学工程过程优化与节能降耗及其经济效益研究

王 敏 (阳煤丰喜肥业(集团)有限责任公司平陆分公司, 山西 运城 044300)

摘要: 化学工业规模近年来持续扩大, 为了促进化工行业可持续发展, 需优化化学工程过程, 做好节能降耗。本研究专门针对化工生产过程, 对工艺参数优化、系统集成与过程强化、先进控制与自动化、数字化建模与虚拟仿真, 以及化工废水再生回用、绿色工艺及能源管理等技术路径进行梳理。将多种优化技术结合用, 可显著提高系统能效。另外, 通过废水再生、余热回收以及智能能源管理, 物料和能源能实现高效循环, 可促进企业经济效益的提高。

关键词: 化学工程; 工艺优化; 节能降耗

中图分类号: TQ021.8

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0034-03

Research on Chemical Engineering Process Optimization, Energy Conservation and Consumption Reduction, and Their Economic Benefits

Wang Min (Yangmei Fengxi Fertilizer Industry (Group) Co., Ltd. Pinglu Branch, Yuncheng Shanxi 044300, China)

Abstract: In recent years, the scale of the chemical industry has continued to expand. In order to promote the sustainable development of the chemical industry, it is necessary to optimize the chemical engineering process and do a good job in energy conservation and consumption reduction. This study specifically focuses on the chemical production process, sorting out technical paths such as process parameter optimization, system integration and process enhancement, advanced control and automation, digital modeling and virtual simulation, as well as chemical wastewater regeneration and reuse, green processes, and energy management. Combining multiple optimization techniques can significantly improve system energy efficiency. In addition, through wastewater regeneration, waste heat recovery, and intelligent energy management, materials and energy can achieve efficient circulation, which can promote the improvement of enterprise economic benefits.

Keywords: Chemical Engineering; Process optimization; Energy conservation and consumption reduction

在现代工业体系中, 化学工业为高能耗、高资源消耗产业。传统的化工生产过程中, 能量浪费严重, 资源利用率偏低, 对环境的负担较重, 可直接影响企业的经济效益, 而且限制企业的可持续发展。现如今, 能源价格持续变化, 环境政策严格, 化工行业亟需提高化学工程过程的能效, 减少能耗和排放。

1 化学工程过程优化技术路径

1.1 工艺参数优化

为实现化学工程过程的节能降耗, 提高生产效率, 需优化工艺参数, 通过科学的方法调整反应条件、操作参数以及设备运行状态, 提高反应速率、转化率和能量利用率。但化工过程有复杂的非线性关系, 多个变量之间还相互影响, 不能随便调整, 需有依据, 要基于反应动力学方程、传热传质机理模型, 还有数据驱动算法, 搭建系统的优化框架。在实际操作中, 工作人员需分析实验数据, 再结合 AspenPlus、CHEMCAD、PRO/II 等过程模拟软件, 构建机理模型, 对反应温度、压力、物料配比、流量以及停留时间等关键参数, 做灵敏度分析和全局优化。现在现代智能优化算法逐渐得到推广和应用, 操控遗传算法 (GA)、

模拟退火 (SA)、粒子群优化 (PSO)、贝叶斯优化 (BO) 等, 能在有多个约束、多个目标的情况下, 找到全局最优解, 实现“能耗最低、产率最高、稳定性最强”的目标^[1]。

DCS 和 SCADA 等在线监测与反馈控制系统发挥着重要作用, 能实时收集反应器和管网的温度、压力、能耗数据, 构建工艺运行与能量消耗之间的动态映射模型。依托该模型, 工艺参数可实现自适应调节和在线闭环优化, 提升系统运行的精确性和经济性。

1.2 系统集成与过程强化

系统集成优化以整体能量平衡为核心, 通过协调各单元操作间的物料与热能流动, 实现能量的高效回收与再利用。化工过程中的反应、蒸馏、吸收、萃取等单元都存在显著的热能传递潜力, 通过系统集成将高温单元的余热有效传递至低温单元, 可大幅减少外部蒸汽供热与冷却水消耗。Pinch 分析 (瓶颈点分析) 是系统集成优化的常用方法, 通过绘制复合曲线识别热力学最小冷热负荷, 据此优化换热网络结构, 实现换热器布局与热流匹配的全局最优。过程强化 (PI) 技术则是把提高反应和分离效率作为目标, 缩短传质

路径、提高能量利用率，将多个功能的操作单元整合，使得化工系统更高效，能耗更低。比如反应-分离一体化装置，在一个设备中能同时完成反应和分离，提高转化率，降低能耗，减少设备投资；膜反应器技术利用自身的选择性透过性，能将分离和反应结合，效率较高；微通道反应器能强化传热和传质，反应速度快，热量分布也均匀，有利于实现小型化、模块化生产。

1.3 先进控制与自动化优化

现在人工智能、大数据和工业互联网技术发展迅速，先进控制系统成为化学工程过程优化的重要支撑。基于模型的预测控制（MPC）其以数学模型为基础，能预测过程未来的状态，而且能进行滚动优化，实时调节多变量系统，降低能耗。与传统的PID控制对比，MPC处理复杂耦合和时滞问题的能力更强，适用于大型连续化装置。在自动化方面，工业物联网（IIoT）平台作用较大，能实时收集设备运行的数据，通过边缘计算和云端分析，实现能耗预测、异常检测以及能效预警。除此之外，人工智能算法还能和工艺建模结合，形成“自适应决策引擎”，对生产过程进行全生命周期的节能管理^[2]。

1.4 数字化建模与虚拟仿真优化

当下，数字化建模与虚拟仿真技术在化学工程过程优化中的重要性突出。通过构建数字孪生系统，能在虚拟环境里还原真实装置的运行状态，对反应、传热、流动和分离等过程，进行全生命周期的监测和预测。在工艺设计阶段，可做虚拟调试，提前判断操作参数变化会给系统能耗和产能的影响，及时对设备结构和操作策略进行优化。结合计算流体力学模拟、分子动力学仿真以及动态过程模拟技术，可对反应器内部的流场、温度场和浓度场做分析。比如，采用动态模拟分析系统启停过程中的能耗分布，能减少启动阶段浪费的能源。数字化仿真在安全管理和人员培训方面也能发挥很大作用。操作人员可以在虚拟场景里练习节约能耗、处理异常工况，提高能源管理意识，增强应急处理能力，让以往靠经验做决策的模式，转变成靠模型支撑的科学决策模式^[3]。

1.5 能源管理与绿色工艺设计

化工企业为持续做好节能降耗，需建立能源管理体系。通过搭建企业级的能源管理系统（EMS），可以对电力、蒸汽、冷却水、压缩空气等各种能源介质进行统一监控和优化调度。EMS系统能实时收集关键设备的能耗数据，然后利用能效基准模型和能耗绩效指标，对能量使用效率进行评估和分级管理，使得能源管理实现可视化、精细化和智能化。在工艺设计上，绿色理念现在越来越受重视，其核心是从源头减少能

耗，减轻对环境的负担。比如，开发能耗低的反应路径，选用效率高的催化剂和绿色溶剂，还有用过阳能、氢能、生物质能这些可再生能源替代传统能源，能明显改善系统能效，提升环境绩效。如用电化学合成替代热化学反应，在常温常压下就能生产出目标产物；引入超临界流体反应技术，减少溶剂使用，提高反应速率；另外，按照循环经济的理念，对副产物进行回收再利用，能实现“零废弃”和闭路循环的清洁生产。将能源管理和绿色工艺设计结合优化，可促进化学工程过程朝向高效、低碳、可持续的方向发展。

2 化学工程过程节能降耗技术

2.1 余热回收与能量梯级利用

在化学工程过程中，可将热量回收，进行梯级利用，可通过高效的换热设备和系统集成设计，将低品位的热能转化成能再次利用的热源或者动力。比如，用板式换热器、热管换热器，或者利用有机朗肯循环系统，将低温余热用于为工艺环节预热、蒸发溶剂，或者再生蒸汽。同时，利用热泵和热电转换装置，将低温热能转化成中高温热能，实现梯级利用。

2.2 高效分离与节能分馏技术

分离过程在化工过程中的能耗损失较大，需对分离技术进行创新。对于传统的精馏塔，可以采用热耦合精馏、分隔壁精馏以及热集成双效精馏等方式，减少加热时的负荷。如果体系分离难度较大，可引入膜分离技术，将萃取精馏、反应精馏结合。而且，还可以通过过程模拟和优化的方法，对精馏塔的塔板数、回流比以及进料位置等参数进行全局优化^[4]。

2.3 催化与反应强化节能技术

为了提高反应的选择性和能量利用效率，需优化催化剂和强化反应器设计，高比表面积催化剂、金属有机框架以及介孔材料，在多相催化中的应用广泛，能加快反应速率，降低反应的活化能。在过程强化方面，微通道反应器、膜反应器，还有反应-分离耦合系统，是常用的技术，能缩短传质路径。除此之外，电化学和光催化反应技术也有应用前景，用电能或者光能替代高温热能，在温和的条件下就能完成反应，可实现低能耗生产。

2.4 化工废水再生回用技术

废水再生回用技术是化工节能与资源循环的重要环节，其核心在于“减量化、分质处理、资源化利用”，通过物理、化学和生物方法实现废水中能量与物质的高效回收。膜分离技术可去除有机物、重金属及盐分，高级氧化工艺能分解难降解有机物，生物处理单元则可在低能耗条件下稳定运行。经过深度处理的废水可回用作冷却水、清洗水或反应稀释水，实现资源循环

利用。

2.5 绿色溶剂与过程替代技术

绿色溶剂技术主要是用离子液体、深共熔溶剂、超临界流体等新型介质，实现高选择性、低能耗的反应或者萃取，新型溶剂的挥发性低，能循环使用，可减轻对环境的负担。另外，还可采用过程替代技术，如干法合成、无溶剂反应以及固相催化等，从生产源头减少对加热和冷却的需求，实现低能耗生产。

2.6 能源集成与智能能耗管理

为了促进工厂的能源得到高效调度，需好能源集成优化，协调热、电、气、水等各个能源系统。企业级的能源管理系统和工业物联网平台，可实时监测关键设备的能耗，结合能效模型进行优化控制。人工智能算法可用于多目标调度和动态调整，降低生产过程中的能耗。

3 化学工程过程优化与节能降耗经济效益

3.1 降低能源消耗与生产成本

化学工程过程的优化和节能降耗，最直观的经济效益是高效利用能源，降低生产成本。比如，对工艺参数进行精准调节，使得设备始终处在最佳运行状态，再应用合理的热能回收系统，减少加热、冷却设备还有各种动力装置的能耗，并且还可降低电力、蒸汽以及燃料等能源开支。另外，通过强化反应过程、优化整个生产系统，还能减少原料浪费，降低副产物的生成量，提高反应转化率和产品收率^[5]。

3.2 提高资源利用率与生产效率

优化化学工程过程可节约能源，提高资源利用率和生产效率。现在很多企业会引入高效的分离技术和节能分馏技术，使得物料循环会变得更顺畅，反应单元和分离单元之间还能形成很好的能量互补，减少物料损耗。而且优化后的工艺流程能充分发挥设备的作用，缩短生产周期，使得生产一直保持稳定高效的状态。采用自动化和智能化系统控制生产，能实时监测各种生产参数，一旦发现能耗和产出比例不合适，并及时调整，提升整体的生产效率和资源利用水平。

3.3 延长设备寿命与降低维护成本

在优化工艺、强化反应的过程中，设备的运行环境会得到改善，整个生产系统运行起来也更平稳。以节能型分离设备和换热器为例，采用这类设备可减轻热应力对设备的影响，减少机械冲击，降低腐蚀作用，延长关键设备的使用寿命。设备能稳定运行，不会突然停机，减少维护的次数，节约更换备件的费用。除此之外，优化工艺条件，能量传递会更高效，操作更温和，不会因为温度突然飙升或者压力大幅波动而对设备造成损耗。

3.4 实现能量循环与余热利用价值

在化工企业生产中，需降低能耗，提高经济效益，回收余热，并进行能量梯级利用。化工生产过程中会产生大量废气、废液，对此，需创建热能回收系统，对热能进行回收利用，用于发电或者给厂房供暖，实现能源的循环使用。另外，还可利用热泵、热电转换等技术，将低温热能转化为中高温热能，提高能量的利用率，缓解企业能源不足的问题。

3.5 促进废水资源化与附加价值创造

现如今，化工企业高度重视废水再生回用技术，将节能降耗和资源回收利用结合，通过膜分离、高级氧化再加上生物处理等好几道工艺，能从废水中提取出有机物、氮、磷等元素，然后加工成化工原料或者肥料产品。另外，经过深度处理的废水，能循环用于设备冷却、车间清洗或者工艺稀释，减少新鲜水的使用量，减少污水排放量。

3.6 推动绿色工艺转型与环境绩效提升

为了促进化工行业实现可持续发展，需推广绿色溶剂和过程替代技术。比如，采用离子液体、深共熔溶剂还有超临界流体等绿色溶剂，降低生产系统的能耗，减少有害物资排放。同时，采用干法合成、无溶剂反应以及固相催化等替代技术，从生产源头减少加热、冷却以及蒸馏环节的负荷，实现低能耗的清洁生产。企业实施绿色工艺，可提升环保绩效，树立社会责任形象，促进企业朝向高效、低碳、绿色的方向转型。

4 结语

综上所述，本研究对化学工程过程优化与节能降耗的相关技术进行梳理，包括工艺参数优化、系统集成与过程强化、先进控制与自动化、数字化建模与虚拟仿真、化工废水再生回用、绿色工艺及能源管理等。通过将多种化工生产优化技术与节能降耗技术相结合，有利于提高化学工程过程的能量和物料利用效率，减少能源消耗和环境负荷，提升企业的经济效益。

参考文献：

- [1] 胡利珍,孙扬.节能降耗减污集成新工艺在工业园区污水处理厂的应用及标准[J].大众标准化,2025,(07):142-144.
- [2] 牟红海.化工工程中的节能降耗工艺技术研究[J].化工管理,2025,(23):56-58.
- [3] 张玮.化工工艺中常用的节能降耗技术措施[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(18):152-153+156.
- [4] 韦倩.绿色化学工程与工艺在化学工业节能减排中的应用研究[J].现代工程科技,2025,4(16):109-112.
- [5] 郝金鹏.化学工程过程优化与节能降耗策略探索[J].化纤与纺织技术,2025,54(07):130-132.