

# 基于过程强化的化工工艺节能降耗技术研究

杨少飞

内蒙古宝丰煤基新材料有限公司宁夏分公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17186

**[摘要]** 化工工艺节能降耗面临传统生产模式高能耗、低效率的挑战,难以满足绿色低碳发展需求。本文基于过程强化技术体系,从传递过程、反应过程及能量集成三大理论出发,明确设备强化、工艺优化及材料升级的技术路径,通过微尺度传质传热强化、反应-分离耦合、智能调控等手段解决核心痛点,同时为能源效率提升、资源循环利用及清洁生产提供支撑,助力化工生产实现高效低耗运行,推动行业绿色低碳转型。

**[关键词]** 过程强化; 化工工艺; 节能降耗; 技术路径; 系统优化

**中图分类号:** TQ021.8 **文献标识码:** A

## Research on Energy-saving and Consumption-reduction Technology in Chemical Processes Based on Process Intensification

Shaofei Yang

Ningxia Branch of Inner Mongolia Baofeng Coal-based New Material Co., Ltd.

**[Abstract]** Energy conservation and consumption reduction in chemical processes face challenges from the high energy consumption and low efficiency of traditional production models, making it difficult to meet the demands of green and low-carbon development. Based on the process intensification technology system, this study starts from three major theories—transport processes, reaction processes, and energy integration—to define technical pathways for equipment intensification, process optimization, and material upgrades. By employing methods such as micro-scale mass and heat transfer intensification, reaction-separation coupling, and intelligent regulation, core pain points are addressed. Simultaneously, support is provided for improving energy efficiency, resource recycling, and clean production, helping chemical production achieve efficient and low-consumption operation and promoting the green and low-carbon transformation of the industry.

**[Key words]** Process Intensification; Chemical Process; Energy Saving and Consumption Reduction; Technical Pathway; System Optimization

### 引言

化工行业作为能源密集型产业,面临资源约束与环保压力。传统工艺能耗高、污染大,难以满足可持续发展需求。过程强化技术通过优化反应与传递过程,成为节能降耗关键。研究该技术,可提升化工生产效率、降低能耗与排放。系统分析过程强化理论基础,构建技术体系,提出节能降耗路径,为化工工艺绿色转型提供技术支撑与理论指导。

#### 1 过程强化技术理论基础

##### 1.1 传递过程强化理论

传递过程强化理论聚焦物质与能量在化工体系内的高效转移机制。传质强化通过微尺度下相界面更新机制,利用微结构表面改变流体边界层发展规律,促进相界面处溶质快速迁移。微通道内流体流动形成层流主导的均匀速度分布,分子扩散距离缩

短至微米级别,显著提升传质速率。界面湍流调控技术诱导局部流动不稳定性,加速物质跨越相界面的传质过程。传热强化探索超重力场中的热流迁移规律<sup>[1]</sup>。旋转填充床产生强离心力场,高剪切速率环境下流体微元形成微尺度涡旋结构,显著增加传热面积与扰动强度。流体在超重力环境中形成薄层液膜与微米级液滴,热边界层厚度大幅减小,热量传递效率显著提升。多相流控制着眼气液/液固体体系流动特性优化。调控流速与几何结构改变气泡尺寸分布,流体力学条件决定固体颗粒分布状态与接触效率。界面张力调控技术优化相界面形态与分布特征,改善气液接触效率与固液传质性能。

##### 1.2 反应过程强化理论

反应过程强化理论围绕化学反应本征特性与反应器设计原理展开。反应动力学优化通过催化剂活性位点调控改变反应路

径与能垒高度。活性组分分散度与载体结构影响活性位点暴露程度, 电子结构调控制约反应中间体吸附强度。反应器设计深入研究微反应器内流体动力学模型。微尺度通道内层流流动形成抛物线型速度分布, 分子扩散距离控制在微米级别, 停留时间分布均匀性消除返混效应。微反应器内流体流动特性与反应物混合效率直接影响反应转化率。过程耦合探索反应-分离一体化协同机制。反应产物即时移除打破化学平衡限制, 膜反应器集成催化与分离功能, 吸附-反应耦合系统富集反应物, 热耦合技术整合放热与吸热反应能量需求。反应与分离过程的协同强化, 提升整体反应效率与目标产物选择性。

### 1.3 能量集成与转换理论

能量集成与转换理论研究化工过程中能量的高效利用与转换机制。热集成网络拓扑优化通过夹点技术分析能量流动路径, 识别能量利用瓶颈与优化机会。能量流网络的结构设计与优化配置, 实现热量从高温位向低温位的梯级利用。余热梯级利用能量流分析研究不同温度品位余热的回收利用途径。高温余热优先用于驱动热功转换过程, 中温余热预热工艺流体, 低温余热维持系统保温。余热回收系统的层级化设计与能量品质匹配, 提升能源利用效率。清洁能源替代路径设计探索可再生能源与化工过程的融合方式。太阳能热利用系统为反应过程提供热量, 生物质能转化技术将有机废弃物转化为原料, 电能驱动电化学反应, 多能互补系统整合不同清洁能源优势。能源结构的多元化与优化配置, 降低化工生产过程中的碳排放与能源消耗, 实现过程强化与绿色低碳发展目标。

## 2 过程强化技术体系构建

### 2.1 设备强化技术

设备强化技术通过革新反应与分离设备的结构设计, 显著提升化工过程的传质传热效率。微化工设备以微通道反应器、微换热器为核心, 基于微尺度流动与传递原理构建高效反应体系。微通道反应器利用毫米级以下流道结构, 使流体在层流状态下形成均匀速度分布, 分子扩散距离缩短至微米量级, 反应时间从传统反应器的小时级压缩至秒级, 同时精准控制反应温度与停留时间。微换热器采用高比表面积三维结构设计, 单位体积传热面积较常规设备提升数十倍, 配合微通道内流体高湍流特性, 实现热量精准传递与温度梯度控制<sup>[2]</sup>。超重力设备依托旋转床内传质系数提升机制, 通过转子高速旋转产生超重力环境, 流体在强离心力场中形成微米级液滴与薄层液膜, 气液接触面积较传统塔设备增加百倍以上, 传质效率显著提高。膜分离设备聚焦选择性膜材料开发与应用, 通过分子级孔径精准调控与表面功能化修饰, 实现对特定组分的高效分离, 膜材料抗污染性能与机械强度提升, 延长使用寿命并降低分离过程能耗。

### 2.2 工艺强化技术

工艺强化技术从生产流程与控制模式层面推动系统优化。连续化生产实施间歇工艺向连续流转型策略, 通过微反应器与连续搅拌釜组合应用, 消除批次生产中的质量波动与能量损耗, 物料停留时间分布趋于均一, 生产速率与产品质量同步提升。过程

耦合聚焦反应-结晶/萃取耦合工艺设计, 将反应过程与下游分离单元集成于同一体系, 反应产物即时移除推动化学平衡正向移动, 多相反应与传质过程协同强化, 减少中间储运环节的能量损失。智能控制引入基于数字孪生的动态优化系统, 实时采集温度、压力、流量等生产数据构建虚拟映射模型, 通过机器学习算法预测工艺参数变化趋势, 动态调整操作条件实现全流程最优运行状态, 提升生产过程的稳定性与资源利用率。

### 2.3 材料强化技术

材料强化技术从微观层面提升设备性能与服役寿命。纳米催化剂通过活性组分分散度控制, 优化金属颗粒在载体表面的分布均匀性, 调控电子结构与表面能态, 增强反应物吸附与转化能力, 抑制副反应发生, 提升催化反应的选择性与效率。高导热材料应用于换热器表面改性技术, 通过石墨烯复合涂层或金属基复合材料制备, 提升换热表面热传导效率, 降低高温工况下的热阻累积, 改善设备温度均匀性, 减少局部过热现象。耐腐蚀材料研发极端工况下设备寿命延长方案, 针对强酸强碱、高温高压等严苛环境, 通过陶瓷基复合材料、合金表面涂层等技术手段, 增强材料抗腐蚀与抗磨损性能, 减少设备维护频率与更换成本, 保障生产装置长期稳定运行, 为化工过程强化提供可靠的硬件支撑。

## 3 节能降耗技术路径

### 3.1 能源效率提升路径

能源效率提升路径通过设备升级与系统优化实现能源高效利用。高效设备选型聚焦变频电机与节能泵类应用, 变频电机通过调节转速精准匹配负载需求, 显著降低电力消耗, 节能泵类采用流体动力学优化设计, 有效减少流动阻力与能量损失<sup>[3]</sup>。系统优化实施供热网络拓扑重构, 分布式能源站布局与智能管网设计消除传统供热系统冗余环节, 热量输送路径得以缩短, 系统热损失率明显下降。智能调控引入基于人工智能的能耗预测与动态调整机制, 机器学习算法分析历史能耗数据与生产参数, 构建能源需求预测模型, 实时优化设备运行参数与工艺流程, 实现能源供给与生产需求的精准匹配。

### 3.2 资源循环利用路径

资源循环利用路径构建水、物料与能量的多层次循环体系。水循环系统实施废水梯级利用与零排放设计, 生产工艺废水经分级处理后, 高浓度废水用于设备清洗, 低浓度废水经深度净化回用于冷却系统, 最终实现水资源循环利用率最大化。膜分离技术与高级氧化工艺结合, 有效去除废水中难降解有机物, 保障循环水水质稳定。物料循环聚焦反应副产物原位转化技术, 通过催化反应将副产物转化为目标产物或中间体, 减少废弃物产生量, 未转化物料返回反应系统重新参与反应, 提升原料利用率。副产物分离与提纯技术优化, 确保循环物料的品质符合生产要求。能量回收应用低温余热发电与热泵技术, 有机朗肯循环与斯特林发动机将低品位余热转化为电能, 热泵系统通过逆卡诺循环提升低温热能品位, 用于工艺加热或建筑供暖。余热梯级利用网络设计, 将不同温度品位的余热精准匹配至相应应用环节, 减少能源转换过程中的损失。

### 3.3 清洁生产实施路径

清洁生产实施路径从源头削减污染物产生与排放。原料替代开发生物基原料应用,利用可再生生物质资源制备平台化合物,替代传统化石原料,降低生产过程中的碳排放与生态毒性。生物基材料的结构改性技术提升其反应活性与加工性能,拓展在化工领域的应用范围。工艺革新设计原子经济性反应路线,通过催化剂精准调控反应路径,使原料分子中的原子最大限度转化为目标产物,减少副产物与废弃物生成。微反应器与连续流技术应用,提升反应选择性与原子利用率。末端治理采用挥发性有机物催化燃烧技术,贵金属与过渡金属氧化物催化剂在较低温度下将挥发性有机物分解为二氧化碳与水,催化剂的抗中毒性能与热稳定性保障长期高效运行。吸附-催化耦合技术集成物理吸附与化学转化功能,实现挥发性有机物的高效去除与资源化利用,保障生产过程的环境友好性。

## 4 技术集成与系统优化

### 4.1 多技术协同机制

多技术协同机制建立过程强化技术与节能技术的深度耦合模式,通过功能互补与协同作用提升整体系统效能。过程强化技术聚焦微观尺度传质传热效率提升,通过微通道结构设计、超重力场调控等手段强化反应与分离过程,节能技术侧重能源梯级利用与损耗降低,借助热集成网络、余热回收系统实现能量高效转化<sup>[4]</sup>。两者结合形成从微观反应到宏观流程的贯通式优化路径,微尺度下的高效传递与宏观层面的系统节能相互支撑,构建多层次协同体系。不同尺度强化技术的匹配原则确立分级调控策略,纳米级催化反应与工厂级管网布局的协同运行,微反应器内流体动力学特性与车间级能量管理系统的联动设计,确保不同层级技术间的无缝衔接。全生命周期成本-效益分析模型量化评估技术组合的长期价值,综合考虑设备投资、运行维护、能源节约与环境影响等要素,建立动态优化决策框架,通过量化指标筛选最优技术组合方案。

### 4.2 数字化赋能平台

数字化赋能平台构建工业互联网架构下的数据采集系统,分布式传感器网络实时捕获温度、压力、流量等关键参数,边缘计算节点执行本地数据预处理,降低云端计算负荷,确保海量生产数据的实时性与可靠性。基于大数据的工艺参数优化算法挖掘历史运行数据中的潜在规律,机器学习模型识别参数间的非

线性关联,预测工艺波动趋势并自动调整操作条件,实现生产过程的自主优化与异常预警。虚拟现实辅助的远程运维系统创建设备与工艺的数字孪生体,三维可视化界面实时映射生产现场状态,技术人员通过沉浸式交互界面诊断故障并制定维护方案,缩短响应时间并降低现场作业风险,提升运维效率与安全性。

### 4.3 标准化体系构建

标准化体系构建制定过程强化设备性能评价标准,明确微反应器、超重力设备等核心装备的传质系数、能量效率与安全运行阈值,为设备选型与性能验证提供统一依据,确保技术实施的可靠性与一致性。节能降耗技术实施规范规定变频电机、余热回收系统等装置的安装调试流程与能效监测方法,规范技术应用的操作流程与评价指标,确保节能效果符合预期目标<sup>[5]</sup>。绿色化工工艺认证体系建立环境友好型生产流程的评价准则,从原料选择、反应路径到末端治理的全链条管控,制定碳排放、资源利用率等关键指标的认证要求,推动行业向低碳化、循环化方向转型发展。三项标准体系相互支撑,形成覆盖技术研发、工程应用与产业推广的完整规范框架,为技术集成与系统优化提供标准化保障。

## 5 结束语

过程强化技术为化工工艺节能降耗提供了系统解决方案。通过理论创新、技术体系构建与路径实施,实现了能源高效利用、资源循环利用与清洁生产。多技术协同、数字化赋能与标准化体系构建,进一步提升了系统效能与可靠性。未来,需持续深化研究,推动技术落地应用,助力化工行业向高效、绿色、可持续方向转型,实现经济效益与环境效益双赢。

### [参考文献]

- [1]周良莲,朱浩,朱翼虹.化工工艺中的新型节能降耗技术及其应用分析[J].智库时代,2025(2):239-241.
- [2]张雷.化工工艺中节能降耗技术的实践研究[J].石化技术,2022,29(09):123-124.
- [3]赵隆颖.化工工艺中节能降耗技术应用与优化策略研究[J].化工设计通讯,2022,48(08):70-72.
- [4]牛利霞.化工工艺中节能降耗技术应用与优化策略[J].化工设计通讯,2022,48(02):49-51+54.
- [5]樊龙,刘艳,董养林.化工工艺中节能降耗技术应用与优化研究[J].产业创新研究,2024,(24):78-80.