

# 基于工艺节能改造的化工生产减排与制造成本优化研究

何玉龙 王忠成 (重庆民丰化工有限责任公司, 重庆 402660)

**摘要:** 化工行业作为高能耗、高排放、高成本的传统产业, 工艺节能改造是实现减排降本、推动产业绿色低碳转型的核心路径。本文结合化工生产实际工艺特点, 针对性设计节能改造方案, 结果表明, 所采用的工艺节能改造方案可有效降低化工生产综合能耗, 减少二氧化碳、氮氧化物等污染物排放, 制造成本较改造前显著下降, 且改造工艺成熟、可操作性强, 能够为化工企业实现绿色低碳与经济效益协同发展提供技术参考。

**关键词:** 工艺节能改造; 化工生产; 减排; 制造成本优化; 经济效益

中图分类号: TQ083; F407.7 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167 (2026) 010-0007-03

## Research on Emission Reduction and Manufacturing Cost Optimization in Chemical Production through Process Energy Efficiency Improvement

He Yulong, Wang Zhongcheng (Chongqing Minfeng Chemical Co., Ltd., Chongqing 402660, China)

**Abstract:** The chemical industry is a traditional industry with high energy consumption, high emissions, and high costs. Process energy efficiency improvement is the core path to achieve emission reduction and cost reduction, and promote the green and low-carbon transformation of the industry. This paper, based on the actual production process characteristics of the chemical industry, designs targeted energy efficiency improvement plans. The results show that the adopted process energy efficiency improvement plans can effectively reduce the comprehensive energy consumption of chemical production, reduce the emissions of pollutants such as carbon dioxide and nitrogen oxides, and significantly decrease the manufacturing cost compared to before the improvement. Moreover, the improved process is mature and highly operable, which can provide technical references for chemical enterprises to achieve the coordinated development of green low-carbon and economic benefits.

**Keywords:** Process Energy Efficiency Improvement; Chemical Production; Emission Reduction; Manufacturing Cost Optimization; Economic benefits

化工产业是国民经济的支柱产业, 在工业生产、民生保障等领域发挥着不可替代的作用, 但同时其生产过程具有能耗高、污染物排放量大、生产成本偏高的突出问题, 与当前绿色低碳发展理念和企业高质量发展需求存在差距。工艺节能改造区别于单纯的设备替换, 聚焦生产全流程的工艺优化, 通过技术创新、参数调整、能量循环利用等方式, 在减少能源消耗的同时, 从源头降低污染物产生, 进而实现减排与降本的协同推进。

### 1 化工生产工艺节能改造核心技术路径

#### 1.1 反应工序节能改造

反应工序是化工生产的核心环节, 也是能耗与污染物排放的主要来源, 其能耗占生产总能耗的 40%-55%, 主要消耗蒸汽、电力等能源, 同时反应不完全易产生副产物, 增加污染物排放与原料消耗。本次改造重点优化反应工艺参数与催化剂性能, 减少反应过程中的能源损耗与副产物生成。

##### 1.1.1 反应参数优化

传统生产中, 反应温度控制采用恒定模式, 存在升温过快、保温不均匀的问题, 导致能源消耗偏高, 且副产物生成量占比达 8%-12%。改造后, 采用精准

温控系统, 实现反应温度的梯度控制, 根据反应不同阶段的需求动态调整温度, 同时优化原料配比, 提升主反应转化率<sup>[1]</sup>。改造后, 反应温度波动控制在  $\pm 2^\circ\text{C}$ , 反应压力稳定在 0.3-0.5MPa, 反应时间缩短 15%-20%, 主反应转化率从 70% 提升至 95% 以上, 副产物生成量减少 60% 以上, 有效降低了后续分离工序的能耗与污染物处理压力。

##### 1.1.2 高效催化剂应用

替换传统低效催化剂, 选用新型高效、环保型催化剂, 降低反应活化能, 减少反应过程中的能源消耗, 同时抑制副反应发生, 提升原料利用率。传统催化剂活性较低, 需在较高温度、压力条件下才能保证反应正常进行, 且催化剂使用寿命短, 更换频率高, 不仅增加了催化剂成本, 还因频繁停车导致能源浪费。新型催化剂活性提升 30% 以上, 可在较低温度、压力条件下实现高效反应, 催化剂使用寿命延长至 8-10 个月, 更换频率降低 60% 以上。同时, 新型催化剂无有毒有害成分, 废弃后可回收处理, 避免了传统催化剂废弃后产生的固体废弃物污染, 实现了反应工序的节能与环保双重提升。

#### 1.2 精馏分离工序节能改造

### 1.2.1 精馏塔结构优化

对传统精馏塔进行结构改造, 更换塔内件, 采用高效导向浮阀塔盘替代传统浮阀塔盘, 提升塔内气液接触效率, 减少塔内压降, 降低精馏过程中的蒸汽消耗。传统精馏塔塔内件气液接触面积小, 传质效率低, 塔内压降达 0.08–0.12MPa, 蒸汽消耗量大, 且易出现液泛、漏液等问题, 影响分离效果<sup>[2]</sup>。改造后, 高效导向浮阀塔盘的气液接触面积提升 40% 以上, 传质效率提升 25%–30%, 塔内压降降低至 0.03–0.05MPa, 蒸汽消耗减少 20%–28%。同时, 优化精馏塔回流比, 通过实验确定最优回流比, 将传统回流比从 3.5 : 1 调整为 2.2 : 1, 在保证分离纯度 (≥ 99.5%) 的前提下, 进一步减少蒸汽消耗与电力消耗。

### 1.2.2 热泵精馏技术应用

引入热泵精馏技术, 回收精馏塔塔顶气相余热, 用于塔底再沸器加热, 实现能量的循环利用, 替代部分蒸汽消耗, 降低能源浪费。传统精馏工艺中, 塔顶气相余热直接通过冷凝器冷却排放, 不仅浪费大量热能, 还需消耗电力用于冷却, 能耗损失严重。热泵精馏系统通过压缩机将塔顶气相余热加压升温后, 送入塔底再沸器, 与塔底物料进行热交换, 实现余热回收利用, 同时减少冷凝器的冷却负荷。改造后, 热泵系统可回收塔顶余热的 70% 以上, 替代 40%–50% 的塔底蒸汽消耗, 精馏工序总能耗降低 30% 以上, 同时减少了冷却水的消耗, 进一步降低了电力消耗与水资源消耗。

### 1.3 余热回收利用改造

化工生产过程中会产生大量富余余热, 包括反应余热、精馏塔顶余热、设备散热等, 传统生产中这些余热大多直接排放, 造成能源浪费。本次改造重点构建余热回收利用系统, 对不同温度等级的余热进行分级回收, 实现余热的梯级利用, 提升能源利用效率。

针对反应工序产生的高温余热 (250℃–350℃), 采用余热锅炉回收热量, 产生高压蒸汽, 用于驱动蒸汽轮机发电或作为生产用蒸汽, 替代外购蒸汽; 针对精馏塔顶等中温余热 (100℃–200℃), 采用板式换热器回收热量, 用于预热原料或工艺用水, 减少加热环节的能源消耗; 针对设备散热等低温余热 (50℃–100℃), 采用余热回收风机, 用于车间供暖或热水供应, 实现余热的充分利用<sup>[3]</sup>。改造后, 企业余热回收利用

率从原来的 25% 提升至 65% 以上, 有效减少了外购能源的消耗, 降低了能源成本。

## 2 工艺节能改造的减排效果分析

### 2.1 主要污染物减排原理

CO<sub>2</sub> 排放主要来源于化工生产过程中化石能源 (煤炭、天然气、柴油等) 的燃烧, 工艺节能改造通过降低蒸汽、电力等能源消耗, 减少化石能源的燃烧量, 进而减少 CO<sub>2</sub> 排放; 同时, 余热回收利用减少了外购电力和蒸汽的需求, 间接减少了电力生产和蒸汽供应过程中的 CO<sub>2</sub> 排放。

氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 排放是窑炉生产工艺的特征性污染问题, 主要来源于无钙焙烧回转窑的高温燃烧环节, 燃料中的氮元素与空气中氧气在高温条件下发生氧化反应生成 NO<sub>x</sub>。通过优化反应温度梯度控制, 采用低氮燃烧技术, 降低回转窑内局部高温区的温度, 抑制 NO<sub>x</sub> 生成; 同时, 依托余热回收系统减少化石燃料消耗量, 降低氮氧化物产生基数<sup>[4]</sup>。

固体废弃物主要来源于废弃催化剂、反应副产物等, 改造后采用新型环保催化剂, 减少废弃催化剂的产生量, 且废弃催化剂可回收再利用; 同时, 优化反应工艺, 减少副产物生成, 副产物经进一步处理后可作为副产品回收, 减少固体废弃物的排放量<sup>[5]</sup>。

### 2.2 减排效果量化分析

以重庆民丰化工年产 100kt 铬盐生产工艺为例, 对工艺节能改造前后的污染物排放数据进行对比分析, 改造完成后稳定运行 6 个月, 采集改造前后的日均排放数据, 计算减排量与减排率, 具体数据见表 1。

由表 1 数据可知, 工艺节能改造后, 各类污染物排放量均实现显著下降。其中, CO<sub>2</sub> 日均减排 4600kg, 减排率达 35.9%, 主要得益于反应工序与精馏工序能耗的降低, 减少了化石能源的燃烧量; 固体废弃物日均减排 62kg, 减排率达 70.5%, 主要是因为新型催化剂使用寿命延长, 且副产物回收利用率提升; 废水 COD 日均减排 210kg, 减排率达 95.5%, 主要是因为反应副产物减少, 降低了废水处理负荷; 氮氧化物减排 100mg/Nm<sup>3</sup>, 减排率达 66.7%, 实现了从达标排放到超低排放的跨越。

改造后, 企业污染物排放均达到国家《石油化学工业污染物排放标准》(GB 31571–2015) 要求, 其

表 1 工艺节能改造后污染物排放情况

污染物类型	改造前排放量	改造后排放量	减排量	减排率 (%)
二氧化碳 (CO <sub>2</sub> , kg/d)	12800	8200	4600	35.9
固体废弃物 (kg/d)	88	26	62	70.5
废水 (COD, kg/d)	220	10	210	95.5
氮氧化物 (NO <sub>x</sub> , mg/Nm <sup>3</sup> )	150	≤ 50	100	66.7

表2 节能改造成本优化的经济效益

成本类型	改造前单位成本 (元 /t 产品)	改造后单位成本 (元 /t 产品)	单位成本节约 (元 /t 产品)	节约率 (%)
原料成本	6800	6350	450	6.6
能源成本 (蒸汽 + 电力 + 水资源)	1520	980	540	35.5
设备运维成本	380	290	90	23.7
污染物处理成本	420	180	240	57.1
单位制造成本合计	9400	7920	1480	15.7

中氮氧化物排放浓度远低于标准限值,实现了化工生产的绿色减排,同时通过减排成本的降低,构建了“环保-效益”双向提升的良性循环。

### 3 工艺节能改造后经济效益分析

结合上述企业生产数据,对改造前后的制造成本进行对比分析,量化成本优化后的经济效益,具体数据见表2。

#### 3.1 各成本类型优化分析

①原料成本优化。原料成本是化工生产制造成本的主要组成部分,占总成本的70%以上。工艺节能改造通过优化反应工艺参数、提升主反应转化率,减少副产物生成,提升原料利用率,进而降低原料消耗。改造前,原料利用率为88%,改造后提升至96%以上,单位产品原料消耗减少6.8%,单位原料成本节约450元/t产品,节约率达6.6%。同时,反应副产物回收利用率提升至85%以上,部分副产物经处理后可作为原料再次投入生产,进一步降低了原料采购成本。②能源成本优化。能源成本是制造成本的第二大组成部分,改造前占总成本的16.2%。工艺节能改造通过反应参数优化、精馏技术升级、余热回收利用等方式,显著降低了蒸汽、电力、水资源的消耗。改造后,单位产品蒸汽消耗减少32%,电力消耗减少28%,水资源消耗减少45%,单位能源成本从1520元/t产品降至980元/t产品,节约540元/t产品,节约率达35.5%,是成本优化的主要贡献点。其中,余热回收系统每年可回收余热折合标准煤1200t以上,减少外购蒸汽和电力费用约580万元。③设备运维成本优化。改造后,设备运行稳定性提升,减少了设备故障发生率与维修频率,进而降低了设备运维成本。新型高效精馏塔塔内件磨损减少,设备检修周期从原来的3个月延长至8个月,检修费用减少40%以上;反应釜温控系统优化后,设备运行负荷稳定,设备损耗降低,单位产品设备运维成本节约90元/t产品,节约率达23.7%。④污染物处理成本优化。改造后,各类污染物排放量显著下降,减少了污染物处理的药剂消耗、电力消耗与人工成本。废水处理量减少57.1%,COD去除药剂消耗减少60%以上;氮氧化物原始排放浓度大幅降低,脱硝系统运行负荷随之下降,液氨等脱硝药剂消耗量

减少60%以上,电力消耗减少45%;固体废弃物排放量减少70.5%,减少了废弃物运输与处置成本。综合来看,单位产品污染物处理成本从420元/t产品降至180元/t产品,节约240元/t产品,节约率达57.1%,每年可减少污染物处理成本约240万元。

#### 3.2 成本优化综合效果

工艺节能改造后,单位制造成本从9400元/t产品降至7920元/t产品,单位成本节约1480元/t产品,节约率达15.7%。按企业年产10000t产品计算,每年可节约制造成本约1480万元,经济效益显著。同时,成本结构得到优化,能源成本、污染物处理成本占比显著下降,原料成本占比略有下降,企业抗成本波动能力提升,为企业长期稳定发展提供了保障。

### 4 结语

本文围绕工艺节能改造在化工生产减排与制造成本优化中的应用展开研究,结合精细化工生产实际的节能改造方案,通过优化工艺参数、应用新型技术与设备、回收利用富余能量等技术手段,实现了减排与降本的协同推进。研究结果表明,所采用的工艺节能改造方案技术成熟、可操作性强,改造后企业各类污染物排放量显著下降,CO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、固体废弃物减排率分别达35.9%、66.7%、70.5%,均达到国家污染物排放标准;单位制造成本节约1480元/t产品,每年可节约制造成本约1480万元,经济效益与环境效益显著。

#### 参考文献:

- [1] 王佩琼. 化工设计中节能减排技术的应用与评估 [J]. 山西化工, 2025, 45(07): 211-213+222.
- [2] 曲淑玲. 化工设计中节能减排技术的研究与实践 [J]. 化学工程与装备, 2024, (06): 165-167.
- [3] 王伟. 化工生产工艺的节能降耗技术探讨 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2024, 44(10): 181-183.
- [4] 张仁杰, 吴雷雷, 刘福彬. 化工生产工艺的节能降耗技术分析 [J]. 化纤与纺织技术, 2023, 52(03): 62-64.
- [5] 尹晓娟, 丁文涛. 化工生产过程中的能耗管理与节能减排技术分析 [J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(07): 145-147.