

# 化学工程与工艺中的绿色化工技术及经济效益分析

张树康 李艳华 (山东祥瑞药业有限公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 本文系统阐述了化学工程与工艺领域中绿色化工技术的核心内涵与实施路径, 深入剖析原料替代、清洁催化、过程强化与资源循环等关键技术对企业生产方式的革新机制, 通过成本结构、要素效率、市场地位与战略价值四个维度的经济效益解析, 揭示了绿色技术投资在短期利润增厚与长期竞争力提升方面的双重价值变现逻辑, 论证了环境约束强化背景下化工企业通过技术升级实现经济效益与环境效益协同改进的可行性与必要性。

**关键词:** 绿色化工技术; 技术经济评价; 全要素生产率; 实物期权价值

**中图分类号:** TQ02 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 010-0079-03

## Analysis of Green Chemical Engineering Technology and Economic Benefits in Chemical Engineering and Technology

Zhang Shukang Li Yanhua (Shandong Xiangrui Pharmaceutical Co., Ltd., Tai'an Shandong 271000, China)

**Abstract:** This paper systematically expounds the core connotation and implementation path of green chemical engineering technology in the field of chemical engineering and technology, deeply analyzes the innovative mechanisms of key technologies such as raw material substitution, clean catalysis, process intensification, and resource recycling on the production mode of enterprises. Through the economic benefit analysis from four dimensions of cost structure, factor efficiency, market position, and strategic value, it reveals the dual value realization logic of green technology investment in increasing short-term profits and enhancing long-term competitiveness. It also demonstrates the feasibility and necessity of chemical enterprises achieving coordinated improvement of economic and environmental benefits through technological upgrading under the background of intensified environmental constraints.

**Keywords:** Green Chemical Engineering Technology; Technical Economic Evaluation; Total Factor Productivity; Option Value of Physical Goods

化工行业在全球制造业碳排放总量中所占比例接近两成, 并且受到越来越严格的环境规制压力, 传统的末端治理方式已不能满足碳中和目标下减排的要求, 推动行业从污染控制向清洁生产的范式转变成为必然选择。已有研究大多集中于单项绿色技术的环境效益评价, 缺少对技术投资经济回报机制的系统分析框架, 造成企业在选择技术时陷入环保合规性与盈利能力之间的决策困境。

### 1 绿色化工技术的基本概念

绿色化工技术是在化工全生命周期内贯彻“预防优于治理”理念的综合性技术体系。其技术内核主要从原子经济性、过程强化、系统集成等方面展开, 包括清洁原料替代、高效催化剂设计、绿色溶剂开发等单元技术, 同时重视通过流程重构、能量耦合实现物质、能源的梯级利用<sup>[1]</sup>。从工程角度来说, 绿色化工技术体系利用微反应、超重力、膜分离等过程强化手段来提高传递和反应效率, 用智能化控制系统实现污染物源头削减和资源闭环循环。从产业角度看, 绿色化工技术是化工行业由末端治理向过程控制转变的主要驱动力, 把环境成本内部化为企业竞争力, 形成经济效益和生态效益同步增长的新型生产范式。

### 2 化学工程与工艺中的关键绿色化工技术

#### 2.1 原料替代与绿色化技术

通过分子结构的重构, 使碳资源流动的路径发生根本性的改变, 生物质平台化合物转化体系是以糖类分子选择性断键、重组为基础, 木质纤维素经酸催化脱水生成的呋喃类中间体, 经过加氢还原、氧化开环、缩合聚合等多元反应通道, 可以构建起通往二元酸、二元醇、芳香族化合物的分子桥梁, 该路径依托生物质碳骨架的化学转化, 摆脱了传统石化工艺对碳链长度和官能团位置的依赖<sup>[2]</sup>。工业废弃物的原料化利用则面临复杂组分选择性解聚与杂质深度脱除的双重技术挑战, 废旧聚酯的醇解反应需在催化剂表面活性位与反应温度窗口之间寻求平衡点以抑制副产物生成并保持单体纯度, 而 CO<sub>2</sub> 催化加氢制甲醇技术的核心在于 Cu 基催化剂表面氢溢流效应与碳物种吸附构型的协同匹配, 反应压力与温度的精确调控决定了目标产物选择性与催化剂抗烧结稳定性之间的动态平衡。

#### 2.2 清洁催化与反应工艺优化技术

通过催化剂活性中心的精准设计来降低反应的活化能垒、提高目标产物的选择性, 纳米尺度催化材料因为具有高比表面积和丰富的边界位点, 可以在较低

的温度和压力下激活惰性的化学键,分子筛骨架中酸性位点的空间排布和孔道尺寸的协同设计,利用择形效应实现反应物分子的定向转化路径,催化剂微观结构与反应机理的耦合调控,使很多传统的高温高压反应可以在接近常温常压的条件下完成<sup>[3]</sup>。生物酶催化体系由于具有手性识别能力、底物专一性,在不对称合成领域表现出化学催化无法达到的立体选择性,固定化酶技术利用载体材料的孔隙调控和表面修饰,在保持酶活性的同时赋予其循环使用、连续操作的工程适用性。反应工艺优化的系统方法论是以传质传热强化、反应动力学匹配为理论基础,微通道反应器通过微米级流道内层流场分布,实现反应物分子的快速混合、瞬时传热,传递过程的时空尺度压缩,抑制了副反应的发生概率,通过反应温度的精确控制,避免了局部过热造成的催化剂失活、产物分解,超重力旋转床技术利用离心力场强化气液传质过程,将传统填料塔的总体积缩减到原来的十分之一,实现了反应装置的紧凑化和能耗的大幅降低。

### 2.3 节能降耗与过程强化技术

节能降耗技术的系统实现依靠能量流网络拓扑优化和品位梯级匹配,夹点分析方法通过建立温焓图来识别工艺流程中冷热物流的换热潜力,在最小传热温差约束下确定系统理论最小公用工程需求,以热泵系统压缩式循环的方式把低温废热提升到工艺需要的温度等级,从而实现蒸发浓缩工序中冷凝潜热的跨单元循环利用<sup>[4]</sup>。精馏过程的节能改造聚焦于分离序列重构与塔内件结构创新的协同推进,热耦精馏技术利用高压塔塔顶蒸汽作为低压塔再沸器热源建立起塔间能量自循环回路,而分隔壁精馏塔通过纵向隔板将三元或多元混合物的分离任务整合于单一塔体内完成,这种塔设备数量的减少直接削减了冷凝器与再沸器的能量输入输出环节。膜分离技术由于具有非相变分离的特性,在溶剂回收和产物提浓方面表现出明显的能耗优势,陶瓷膜的高温稳定性使它可以直接处理反应器出料的高温物流,省去冷却降温的过程,有机溶剂渗透汽化膜利用选择性透过机制,在常压操作下实现共沸体系的破除,比传统的萃取精馏工艺节省了萃取剂循环再生的能量消耗。

### 2.4 废弃物减量化与资源循环利用技术

废弃物减量化的根本途径是从源头上削减非目标产物生成的驱动力,即在反应路径的分子层面进行设计,在串联反应体系中利用中间产物原位转化技术,消除分离纯化过程中的溶剂使用和物料损失,在一锅法多步骤反应中,通过反应物浓度梯度的动态调节,在一个反应器内实现多个化学转化单元的时序整合,

从反应工程学层面实现流程简化,传统多釜串联工艺产生的母液废水、洗涤废液在新工艺中不再存在。副产物高值化利用的技术逻辑,是以废弃物组分的化学活性再激活为前提的,氯碱工业电解过程中副产的氢气经过变压吸附提纯后,可作为加氢反应的氢源或燃料电池的原料气,对苯二甲酸生产中氧化反应生成的4-羧基苯甲醛,通过选择性加氢可以转化为对羟甲基苯甲酸等精细化学品,副产物向下游产品链的嵌入,改变其作为废弃物处置的经济属性。高浓度有机废水的厌氧消化技术,利用产甲烷菌群的代谢作用,将废水中化学需氧量转化为可燃性沼气,沼气经脱硫净化后的热值可以满足锅炉燃烧或者内燃机发电的需求,废水厌氧处理后的沼液经过好氧生化 and 膜过滤深度净化后,可达到工艺用水水质标准,实现废水的内部回用,废水处理装置与能源动力系统耦合集成,形成物质-能量双循环的自维持运行模式<sup>[5]</sup>。

## 3 绿色化工技术的经济效益分析

### 3.1 成本降低效益

利用绿色化工技术对生产函数参数进行优化、成本曲线系统性下移,原料成本科目的收缩不单表现在单位产品物耗绝对量的减少上,更在于高选择性反应体系提高目标产物收率,从而使得相同产出规模下投料量需求降低,当催化剂改进使反应转化率从原来的水平提高到接近完全转化时,未反应原料循环分离系统可以简化甚至取消,由此节省下来的分离设备折旧、循环泵动力消耗、溶剂损耗构成隐性成本节约的重要部分。能源成本边际改善是投资强度和运行费用此消彼长的动态平衡过程,热集成改造增加了换热网络的设备投资和管道铺设费用,但缩短投资回收期3至4年左右的水平证实其经济性,膜分离装置代替传统蒸馏塔,既减少了蒸汽消耗,也降低了设备占地面积,进一步减少厂房建设和土地征用的固定资产投资。废弃物处理成本的消减效应具有非线性放大的特点,当企业通过工艺改进将废水产生量减半之后,废水处理装置的处理负荷就会降低,从而减少了药剂投加量和污泥产生量的比例成本,并且使原有的处理设施可以承担未来产能增加而产生的新增废水量,而不需要再追加环保设施的投资。

### 3.2 资源利用效率提升效益

企业生产可能性边界的外移、要素投入产出弹性的结构性改善,效益的本质是打破资源供给刚性约束后企业获得的战略扩张空间、要素成本粘性减弱,当技术进步使单位产出所需资源投入量降低时,企业面对的不只是可变成本的即期节约,更重要的是固定资产投资强度的降低带来的资本回报率提升,因为相同

产能规模下所需要的原料储罐容积、管道输送能力、公用工程配套设施都可以按比例缩减,资本密集度的降低直接改善了企业的资产负债表结构和现金流状况。效率提升的价值变现路径同企业所处的市场竞争格局、产能利用率水平相关,在产能过剩的买方市场里,资源投入削减引发的边际成本缩减,让企业降价空间变大,市场份额拓展能力增强,在供不应求的卖方市场当中,资源瓶颈的破解直接体现为产量提升,收入规模扩大,两种情境下的效益实现途径不同,不过都是企业盈利能力提升的途径。从长期视角来看,资源效率的改善为企业抵御要素价格上涨风险提供内生缓冲机制,能源或者原材料价格出现周期性上涨的时候,低资源消耗强度的企业成本曲线上移的幅度要明显小于行业平均水平,成本结构的韧性在经济周期波动中就体现为利润波动率下降、企业价值稳定性提高。

### 3.3 市场竞争力增强效益

市场竞争力增强的经济效益本质上是绿色技术给企业产品带来的差异化能力、市场准入优势在定价权、客户粘性上的变现,当产品获得环境标志认证或者碳足迹标签时,企业面向欧美市场的出口贸易可以规避日益严苛的技术性贸易壁垒,合规性优势不仅避免了产品被拒于目标市场之外造成的销售损失,还使企业在供应链选择中获得跨国采购商的优先考虑地位,由此带来的订单稳定性、议价话语权的提升直接转化为销售收入的持续性、毛利率的改善空间。绿色产品的溢价能力根植于消费者支付意愿的结构性分化与企业品牌资产的积累效应,在环保意识较强的细分市场中,生物降解材料或低碳产品可以突破传统产品的价格上限约束获得超额利润,溢价空间的大小取决于目标客户群体的环保支付溢价率与竞争对手的技术跟进速度,而企业通过持续的绿色技术创新维持的领先优势则构成了溢价能力的护城河。产业链地位的重构效应是绿色技术领先企业对下游客户、对上游供应商的双重议价能力同时增强,当企业掌握某项绿色工艺的核心专利时,下游客户为了获得产品的环保属性,必须接受相对严格的合同条款,而企业扩大采购规模又使企业在原料谈判中获得批量折扣和账期优惠,产业链双向挤压带来的利润空间扩张就是竞争力提升的显性收益。

### 3.4 长期投资回报效益

长期投资回报效益的核心在于绿色技术投资对企业无形资产的累积效应与战略选择权价值的创造,收益超越了传统财务报表所能捕捉的会计利润范畴而体现为企业估值倍数的系统性提升与融资成本的结构下降,当资本市场将 ESG 评级纳入投资决策框架时,绿色技术领先企业获得的机构投资者青睐直接转化为

股价的估值溢价与债券发行时的利率优惠,资本成本的降低使企业在进行大规模扩张投资时具备更低的融资门槛与更充裕的资金来源。政策红利的持续获取形成绿色投资的期权价值,当政府对清洁生产企业给予税收减免、财政补贴或者排污权豁免等激励政策的时候,提前完成技术改造的企业可以在政策窗口期内得到超额收益,由于政策性收益的不确定性,因此它具有金融期权的特性,需要使用实物期权定价模型来衡量它的价值。技术专利与工艺诀窍的积累成为企业知识资本的储备,绿色技术的研发支出尽管会减少当期利润,但沉淀下来的技术资产可以通过专利许可、技术转让或者合资合作等方式变现,知识产权的货币化能力,在技术密集型行业里成为企业长期盈利能力的重要支撑。

## 4 结语

绿色化工技术的经济效益评价要冲破传统成本收益分析的静态框架,把技术革新对企业的生产函数重塑效应,产业生态位的动态演进纳入考虑范畴,其价值不只是财务报表上可以观察到的利润增量,更在于企业应对环境规制趋严、资源约束加强的战略适应能力提升,技术投资的期权特性决定其回报评价要采用动态规划方法,捕捉不确定性环境下的决策灵活性价值。化工企业推进绿色技术转型的关键就是建立包含技术经济评价、风险管理、政策响应的集成决策体系,用敏感性分析找出影响投资回报的关键参数并制定相应的对冲策略,在环境约束越来越刚性的产业格局中占据竞争优势,实现经济效益和环境效益的帕累托改进。

### 参考文献:

- [1] 张德强,陆健,庄顺江.绿色化工技术在化学工程与工艺中的应用[J].化纤与纺织技术,2025,54(04):60-62.
- [2] 周慧娟.绿色化工技术在化学工程与工艺中的应用[J].产业与科技论坛,2022,21(06):38-39.
- [3] 罗琴芳,屠欢欢,李海峰.绿色化工技术在化学工程与工艺中的运用[J].云南化工,2022,49(03):110-112.
- [4] 朱礼旺,徐珍.绿色化工技术在化学工程与工艺中的应用思考[J].中国石油和化工标准与质量,2021,41(22):135-136.
- [5] 隋冲.化学工程与工艺中绿色化工技术的应用分析[J].山东化工,2023,52(13):131-132,136.

### 作者简介:

张树康(1998.10—),男,汉族,山东泰安人,本科,研究方向:化学工程与工艺。

李艳华(1998.10—),女,汉族,山东泰安人,本科,研究方向:化学工程与工艺。