

# 绿色化工工艺开发与节能减排效果评价

张恩齐

山东石油化工学院信息科学与工程学院 山东 东营 257061

**摘要:** 在全球可持续发展浪潮与“双碳”目标的双重驱动下,绿色化工已成为化学工业转型升级的核心路径。本文系统阐述了绿色化工工艺开发的理论基础、核心原则与关键技术,并构建了一套科学、全面的节能减排效果评价体系。文章首先回顾了绿色化学的十二项基本原则,将其作为工艺开发的指导思想;其次,重点剖析了原子经济性反应设计、绿色催化技术(包括生物催化与新型催化剂)、可再生原料利用以及过程强化与集成等关键开发策略。在效果评价方面,本文提出了涵盖能效提升、资源节约、污染物减排及温室气体核算的多维度指标体系,并介绍了基于生命周期评价(LCA)和物质流分析(MFA)的综合评估方法。研究表明,将先进的绿色工艺开发理念与严谨的量化评价体系相结合,不仅能有效推动化工过程向环境友好、资源高效的方向演进,更能为企业实现经济效益与环境效益的双赢提供坚实支撑。

**关键词:** 绿色化工; 工艺开发; 节能减排; 原子经济性; 生命周期评价

## 引言

化学工业是国民经济支柱,但高能耗、高排放、高风险特性使其饱受诟病。传统化工依赖不可再生化石资源,生产中能源消耗大、温室气体排放多,还产生有毒有害废弃物,给生态环境带来严峻挑战。在资源环境约束加剧和全球气候变化压力下,探索可持续发展新路径成为化工行业生死攸关的战略命题。“绿色化工”应运而生,它不是简单的末端治理,而是从源头重新设计化学产品和工艺,减少化学品全生命周期对人类和环境的危害,核心是通过技术创新实现资源高效利用、能源低消耗、废物趋零化。“绿色化学十二原则”提出后,该理念获全球广泛认同,催生诸多颠覆性技术工艺。不过,绿色化工工艺的开发推广面临难题,既需要基础研究支撑与跨学科技术融合,又缺乏统一、客观、量化的节能减排效果评价标准,这阻碍了其在产业界的规模化应用。因此,深入探讨绿色化工工艺开发范式,建立科学有效的评价体系,对引导行业投资、优化政策资源配置、加速绿色转型意义重大,本文将围绕这两大议题展开论述。

## 1 绿色化工工艺开发的核心原则与策略

绿色化工工艺的开发是一项系统工程,其成功与否取决于是否严格遵循一系列核心原则,并在此基础上采用恰当的技术策略。

### 1.1 绿色化学十二原则的指导作用

绿色化学十二原则是绿色化工工艺开发的理论基石和行动指南。这十二条原则由Paul Anastas和John Warner于1998年正式提出,涵盖了从原料选择、反应设计到产

品处置的全过程,其精髓可概括为“预防优于治理”和“设计决定未来”。其中,防止废物产生(Prevention)被列为首要原则,强调在设计阶段就应考虑如何避免废物的生成,而非依赖事后的处理。原子经济性(Atom Economy)则要求化学家在设计合成路线时,应尽可能使反应物中的所有原子都进入最终产品,从而最大化原料利用率,减少副产物。设计更安全的化学品(Designing Safer Chemicals)和使用更安全的溶剂与助剂(Safer Solvents and Auxiliaries)直接指向产品的环境友好性,倡导开发低毒、无毒、可生物降解的产品,并用水、超临界二氧化碳或离子液体等绿色介质替代传统的有机溶剂。此外,能源效率设计(Energy Efficiency)、使用可再生原料(Use of Renewable Feedstocks)、催化(Catalysis)以及设计可降解产品(Design for Degradation)等原则,共同构成了一个完整的、前瞻性的设计理念框架,为工艺开发者提供了清晰的思路和明确的目标。

### 1.2 原子经济性与反应路径创新

原子经济性是衡量一个化学反应绿色程度的关键量化指标。一个理想的原子经济性反应,其所有反应物原子都应转化为目标产物,原子利用率为100%。传统的取代反应、消除反应往往伴随大量副产物的生成,原子经济性低下。因此,绿色工艺开发的首要任务就是通过反应路径创新,用高原子经济性的反应(如加成反应、重排反应、周环反应)来替代低效的传统反应<sup>[1]</sup>。例如,在环氧乙烷的生产中,传统工艺采用氯醇法,涉及氯气和石灰乳,不仅原子经济性差,还产生大量含氯废水和废

渣。现代绿色工艺则普遍采用乙烯直接氧化法，仅以乙烯和氧气为原料，在银催化剂作用下高选择性地生成环氧乙烷，原子经济性接近100%，从根本上解决了环境污染问题。又如，在药物中间体的合成中，通过巧妙设计串联反应或多组分反应，可以在一个反应器中连续完成多个转化步骤，显著减少中间体的分离纯化过程，从而提高整体原子经济性和生产效率。

### 1.3 绿色催化技术的应用

催化剂被誉为化工生产的“芯片”，在绿色化工中扮演着无可替代的角色。绿色催化技术的核心在于开发高活性、高选择性、长寿命且环境友好的催化剂，以降低反应活化能、减少副反应、简化工艺流程。（1）新型催化剂的开发：包括负载型金属催化剂、分子筛催化剂、纳米催化剂等。例如，在丙烯环氧化制环氧丙烷（HPPO）工艺中，采用钛硅分子筛（TS-1）为催化剂，以过氧化氢为氧化剂，反应条件温和，选择性高，副产物仅为水，彻底摒弃了传统氯醇法的污染问题。（2）生物催化技术的崛起：酶作为一种天然的生物催化剂，具有反应条件温和（常温常压）、专一性强、环境友好的突出优势。近年来，随着蛋白质工程和代谢工程的发展，生物催化在手性药物合成、生物基材料制备等领域展现出巨大潜力<sup>[2]</sup>。例如，利用基因工程改造的微生物或酶，可以将可再生的葡萄糖高效转化为1,3-丙二醇，进而生产出性能优异的生物基聚酯PTT，实现了从“石油基”到“生物基”的绿色跨越。

### 1.4 可再生原料与二氧化碳资源化利用

摆脱对化石资源的依赖，转向可再生生物质资源和废弃碳资源，是绿色化工实现可持续发展的根本出路。（1）生物质资源利用：以淀粉、纤维素、木质素、油脂等为代表的生物质，是地球上最丰富的可再生有机碳源。通过热化学转化（如气化、热解）或生物化学转化（如发酵），可以将其转化为平台化合物（如糠醛、5-羟甲基糠醛、乳酸），再进一步合成燃料、塑料、溶剂等多种化工产品。例如，聚乳酸（PLA）就是以玉米淀粉发酵得到的乳酸为单体聚合而成的全生物降解塑料，其生产和使用过程的碳足迹远低于传统石油基塑料。（2）二氧化碳（CO<sub>2</sub>）资源化：将CO<sub>2</sub>视为一种宝贵的碳资源而非废物，通过催化加氢、电化学还原、矿化等方式，将其转化为甲醇、甲酸、碳酸酯、聚合物等高附加值化学品，是实现“负碳”或“碳中和”的重要途径。例如，利用铜基催化剂将CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>直接合成甲醇，不仅消耗了温室气体，还生产出重要的化工原料和清洁燃料，具有显著的环境和经济效益。

### 1.5 过程强化与系统集成

绿色化工不仅关注单一反应的优化，更强调整个生产系统的集成与强化。过程强化旨在通过技术创新，使生产设备小型化、生产过程连续化、能量利用高效化。

（1）微反应器技术：利用微米级通道内的高效传质传热特性，可以精确控制反应条件，提高反应选择性和安全性，特别适用于强放热、快速、危险的反应。（2）反应-分离耦合：将反应与分离（如精馏、萃取、膜分离）过程集成在一个单元操作中，可以打破化学平衡限制，提高转化率，并大幅降低能耗。例如，反应精馏技术在酯化、醚化等可逆反应中已得到广泛应用<sup>[3]</sup>。（3）能量梯级利用与系统集成：通过对全厂进行热集成分析（如夹点分析），优化换热网络，实现高温位热能发电、中温位热能驱动工艺、低温位热能预热原料的梯级利用，可显著降低系统总能耗。

## 2 节能减排效果的综合评价体系

对绿色化工工艺的节能减排效果进行科学、客观的评价，是验证其优越性、指导其优化升级、促进其推广应用的关键环节。一个完善的评价体系应具备多维度、全生命周期和可量化的特点。

### 2.1 核心评价指标的构建

评价指标是衡量效果的具体标尺，应覆盖能源、资源、环境三大维度。（1）能效指标：包括单位产品综合能耗（kgce/t）、能量利用效率（%）、节能率（%）等。这些指标直接反映了工艺在能源利用方面的先进性。（2）资源利用指标：主要包括原子经济性（%）、原料转化率（%）、产品收率（%）、水资源重复利用率（%）等。它们衡量了工艺对原材料和水资源的利用效率。（3）污染物减排指标：涵盖单位产品废水产生量（t/t）、COD/氨氮等特征污染物排放浓度与总量、固体废物产生量（t/t）、VOCs（挥发性有机物）排放量等。这些指标量化了工艺对环境的直接影响。（4）温室气体排放指标：即碳足迹（Carbon Footprint），通常以单位产品二氧化碳当量（kg CO<sub>2</sub>e/t）表示。根据《化工生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》等规范，核算范围应包括燃料燃烧排放、生产过程排放以及购入电力和热力的间接排放（即“范围一”和“范围二”），有条件的企业还应核算价值链上下游的“范围三”排放。

### 2.2 生命周期评价（LCA）方法

生命周期评价（Life Cycle Assessment, LCA）是一种系统性的、量化的环境影响评估方法，它从“摇篮到坟墓”（Cradle-to-Grave）的角度，全面考察产品或工艺在整个生命周期（包括原材料获取、生产制造、运输分

销、使用维护直至废弃处置)中所消耗的资源 and 造成的环境影响。在绿色化工工艺评价中, LCA能够揭示那些被传统“围墙内”评价所忽略的上游(如原料开采、运输)和下游(如产品使用、废弃)环境负荷, 从而避免“污染转移”的误区<sup>[4]</sup>。例如, 一种生物基塑料虽然在生产阶段能耗较低, 但如果其原料种植过程中大量使用化肥农药, 或废弃后难以降解, 则其整体环境表现可能并不优于传统塑料。通过LCA, 可以对不同工艺路线进行全面的环境绩效对比, 为决策提供科学依据。

### 2.3 物质流分析(MFA)与能流分析

物质流分析(Material Flow Analysis, MFA)和能流分析(Energy Flow Analysis)是LCA的重要补充工具, 侧重于对系统内部物质和能量流动的精细化追踪。MFA通过建立详细的物料平衡表, 可以清晰地展示输入、输出以及各环节的损失情况, 精准定位物料浪费和污染物产生的节点, 为工艺优化提供直接线索。能流分析则通过绘制能流图, 揭示能量在系统中的转换、利用和损失路径, 是进行热集成和能量优化设计的基础。将MFA与能流分析相结合, 可以构建一个清晰、透明的工艺“代谢”模型, 为实现资源能源的闭环循环和近零排放提供数据支撑。

### 2.4 经济-环境综合效益评估

绿色化工工艺的最终目标是实现经济可行与环境友好的统一。因此, 评价体系还需引入经济性指标, 进行综合效益评估。这包括对绿色工艺的投资成本、运行成本、产品收益进行详细测算, 并与传统工艺进行对比, 计算其投资回收期、内部收益率(IRR)等。同时, 结合前述的环境效益(如碳减排收益、排污费节省), 可以构建成本-效益分析(Cost-Benefit Analysis, CBA)模型或生态效率(Eco-efficiency)指标(如单位环境影响的经济

产出)。这种综合评估有助于企业全面认识绿色工艺的价值, 增强其投资信心, 也有利于政府制定更有针对性的激励政策。

### 3 结语

绿色化工工艺的开发与节能减排效果评价, 是推动化学工业迈向高质量、可持续发展的两大支柱。前者着眼于“如何做”, 通过遵循绿色化学原则, 运用原子经济性设计、绿色催化、可再生原料利用和过程强化等策略, 从源头上构建环境友好的生产方式; 后者着眼于“做得如何”, 通过建立涵盖能效、资源、环境、经济的多维度评价指标体系, 并借助LCA、MFA等先进工具, 对工艺的综合绩效进行科学、客观的量化评估。未来, 绿色化工的发展将呈现以下趋势: 一是与人工智能、大数据深度融合, 实现工艺的智能设计与优化; 二是向分子层面的精准合成迈进, 进一步提升原子经济性和选择性; 三是构建更加开放的产业生态, 推动化工园区内企业间的物质能量循环, 形成区域性的循环经济网络。唯有持续创新并辅以科学的评价与引导, 绿色化工才能真正肩负起时代赋予的重任, 为建设美丽中国和实现全球可持续发展目标贡献核心力量。

### 参考文献

- [1]董海鹏,徐学风.化工工程工艺中的绿色化工技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(19):178-180.
- [2]董宏祯.探究化工生产工艺中绿色化工技术的开发与应用[J].当代化工研究,2020,(22):109-110.
- [3]董黛,曹家琪,魏菲宇,等.化学工程工艺中绿色化工技术的开发与应用[J].清洗世界,2020,36(11):118-119.
- [4]张宏,孟伟.浅析绿色化工技术在化学工程与工艺中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2026,46(03):178-180.