

# 化工技术研发中绿色合成工艺的创新研究

杨 斌

青海盐湖蓝科锂业股份有限公司 青海 格尔木 816000

**摘要:** 在化工技术研发领域,绿色合成工艺的创新研究至关重要。本文聚焦绿色合成工艺,阐述了以原子经济性为核心的研发理论基础,从新型催化体系、绿色溶剂、可再生原料等多方面剖析创新方向,分析反应选择性控制等关键技术挑战及突破路径,并探讨智能化与自适应控制、极端条件反应探索等发展趋势,为推动化工产业绿色转型提供理论支持与实践参考。

**关键词:** 绿色合成工艺; 创新研究; 技术挑战; 发展趋势

引言: 化工产业作为国民经济重要支柱,传统合成工艺存在资源消耗大、环境污染严重等问题。随着可持续发展理念深入人心,绿色合成工艺成为化工领域研究热点。以绿色化学原则为指引,通过优化反应路径、选用绿色原料等手段,降低对环境的影响。研究绿色合成工艺创新,不仅能提升化工生产效率与产品质量,还能缓解资源压力、减少污染排放,对化工产业可持续发展意义重大。

## 1 绿色合成工艺的理论基础

### 1.1 绿色化学原则的核心内涵

原子经济性由美国化学家Trost于1991年提出,核心是设计化学反应使反应物原子最大限度转化为目标产物,降低乃至消除副产物生成,是绿色合成工艺研发的核心理论支撑。催化反应作为绿色化学的关键技术路径,通过调控反应速率、优化反应选择性,规避高温高压等苛刻反应条件,降低反应过程中的能源消耗与环境负荷<sup>[1]</sup>。可再生原料的选用遵循绿色化学可持续发展理念,优先选取生物质、天然产物等可循环再生的物质,替代传统不可再生化石原料,缓解资源枯竭压力。绿色溶剂与无毒试剂的选择需契合环境相容性理论,优先选用低毒、无毒、可降解或可回收的溶剂与试剂,规避挥发性有机溶剂与有毒试剂对生态环境和人体健康的潜在危害,实现反应体系与环境的友好适配。这些核心内涵相互支撑、有机统一,共同构成绿色合成工艺研发的理论根基,为后续工艺设计、技术创新提供明确的方向指引,确保绿色理念贯穿工艺研发的全流程。

### 1.2 绿色合成工艺的设计框架

反应路径优化以原子经济性原则为导向,通过简化反应步骤、重构反应历程,减少中间产物生成,提升原料利用率,从反应源头降低废弃物排放。能量输入最小化依托新型催化技术发展,引入光催化、电催化、生物

催化等新型能源驱动方式,替代传统热驱动反应,降低反应过程中的能耗需求,实现能量的高效利用。闭环系统设计遵循物质循环利用理论,将反应过程中产生的废弃物通过分离、转化等手段进行资源化处理,使其重新进入反应体系,形成“原料-产物-废弃物-再生原料”的闭环循环,实现无废或少废的工艺目标,契合绿色合成工艺可持续发展的核心诉求。

## 2 绿色合成工艺的创新方向

### 2.1 新型催化体系开发

非均相催化剂开发聚焦稳定性与可回收性提升,基于多相催化理论优化活性组分负载方式与载体结构设计,解决传统非均相催化剂易失活、难分离的技术瓶颈,推动催化体系与反应体系的高效适配。生物酶催化依托酶工程技术发展,利用生物酶自身独特的空间结构实现反应专一性调控,提升反应转化率与产物纯度,降低反应过程中的环境负荷,契合绿色合成工艺高效清洁的研发诉求。光催化与电催化技术依托光电化学理论,可在常温常压等温和条件下驱动化学反应进行,无需苛刻反应条件即可实现目标转化,有效降低反应能耗,拓展绿色合成工艺的应用场景,是新型催化体系创新的重要发展路径。

### 2.2 绿色溶剂与反应介质革新

离子液体、超临界流体作为新型绿色溶剂,依托绿色介质理论替代传统挥发性有机溶剂,离子液体具有不挥发、热稳定性好、溶解性可调等优势,超临界流体兼具气体与液体的物理特性,均可有效减少溶剂挥发带来的环境污染<sup>[2]</sup>。水相反应体系优化与拓展遵循环境相容性原则,通过调控反应体系酸碱度、添加助催化剂等方式,改善水相反应中的传质传热效率,拓展水相体系在绿色合成中的应用范围。无溶剂反应可行性研究基于原子经济性理论,通过优化反应物料接触方式、调控反应

条件,实现无溶剂环境下的高效反应,彻底消除溶剂使用带来的污染问题,简化反应后处理流程,提升工艺绿色化水平。

### 2.3 可再生原料的整合利用

生物质资源高值化转化路径依托生物质化学转化理论,通过水解、氧化、加氢等工艺手段,将秸秆、木质素、纤维素等生物质原料转化为高附加值化工产品,实现生物质资源的高效利用。二氧化碳、工业废气等温室气体的化学固定基于碳捕获与转化理论,通过设计特异性反应路径,将温室气体转化为可用化工原料或产品,既能减少温室气体排放,又能实现碳资源的循环利用。城市固废中有价组分的提取与合成应用遵循废弃物资源化理论,通过物理分离、化学转化等技术,提取城市固废中蕴含的有价组分,将其应用于化工合成过程,实现固废减量化与资源化利用的双重目标。

### 2.4 过程强化与连续化技术

微反应器、膜分离等新型设备应用依托过程强化理论,微反应器通过缩小反应空间提升物料混合效率与反应速率,膜分离技术实现反应与分离过程的同步优化,两者结合可显著提升反应效率与产物纯度,降低工艺能耗。连续流工艺与自动化控制的集成设计基于过程系统工程理论,通过优化工艺流程布局,将连续流反应与自动化控制技术深度融合,实现反应过程的精准调控,减少人为操作误差,提升工艺稳定性与生产效率。模块化生产系统设计遵循化工过程模块化理论,通过拆分工艺单元、构建标准化模块,提升生产系统的灵活性,可根据生产需求灵活调整模块组合,拓展工艺应用范围,同时降低工艺升级与改造的成本。制定模块化生产系统的标准化规范,优化模块间的衔接工艺,开发可灵活适配不同反应体系的通用模块,推动绿色合成工艺生产模式的多元化与便捷化。

### 2.5 绿色合成工艺的集成化平台构建

集成化平台构建依托系统集成与协同优化理论,旨在将新型催化体系、绿色溶剂、可再生原料及过程强化技术等绿色合成工艺的核心要素进行有机整合。通过构建统一的研发与生产平台,实现各技术模块之间的数据共享与流程协同,提升工艺开发的效率与整体性能。搭建产学研协同创新平台,整合高校、科研机构与企业的技术资源,聚焦集成化平台的核心技术攻关,开发标准化的技术模块与流程体系,解决各技术模块协同适配性差的问题。集成化平台不仅可加速绿色合成工艺从实验室到工业化的转化进程,还能通过模块化设计降低工艺升级与改造的成本,为绿色合成工艺的规模化应用提供有力支撑<sup>[3]</sup>。引入大数据

与人工智能技术,构建工艺参数优化与预测模型,实现平台运行的智能化调控,提升平台的运行效率与工艺适配能力,推动绿色合成工艺向高效化、规模化、智能化方向发展,助力化工行业绿色转型。

## 3 绿色合成工艺的技术挑战与突破路径

### 3.1 反应选择性控制难题

立体选择性与区域选择性的精准调控是绿色合成工艺研发中的核心技术难题,依托立体化学与反应动力学理论,精准调控策略聚焦催化体系结构修饰与反应路径调控。通过优化催化剂活性中心微观结构,调控反应物分子吸附方式与反应历程,实现立体构型与区域位点的定向控制,解决选择性不足导致的副产物增多、原料浪费等问题。动态反应条件对选择性的影响机制基于反应热力学理论,温度、压力、反应时间及体系浓度等动态参数的细微变化,均会改变反应势能面与反应路径优先级。需通过系统的反应机理研究,明确动态条件与选择性之间的构效关系,建立动态参数的精准调控机制,实现反应过程中选择性的稳定维持,为绿色合成工艺的高效实施提供理论与技术支撑。

### 3.2 多尺度过程耦合优化

反应-分离-纯化的一体化设计思路依托化工过程集成理论,打破传统工艺中反应、分离、纯化单元的独立布局,实现各单元流程的深度融合与协同优化。通过优化流程衔接方式,减少单元间物料转运损耗与能耗消耗,缩短工艺路线,提升工艺整体绿色化与高效化水平,契合原子经济性与无废化原则。跨学科技术的融合应用是多尺度过程优化的重要突破路径,人工智能技术依托大数据分析机器学习算法,可实现反应条件、工艺参数的精准预测与优化设计,降低研发成本与周期。材料科学与绿色合成工艺的深度融合,可开发适配特定反应体系的新型功能材料,提升催化效率、分离效果与介质稳定性,推动多尺度过程耦合优化水平的提升,突破传统工艺的技术局限。

### 3.3 规模化放大与工业适配性

实验室成果向工业生产的转化瓶颈主要源于实验室小规模反应与工业规模化生产之间的工艺差异,依托化工放大理论,需解决传质、传热效率不匹配及工艺参数难以同步适配的问题。实验室反应多处于理想条件下,工业生产中物料处理量、反应环境复杂性显著提升,易导致反应效率下降、选择性波动等问题,成为制约成果转化的关键因素。设备材质、操作参数与安全性的协同优化遵循化工安全工程与设备工程理论,设备材质需适配绿色合成反应体系的腐蚀性、反应温度与压力要求,

避免材质损耗导致的工艺故障与安全隐患。通过优化操作参数,实现反应效率、产品质量与生产安全性的协同提升,建立规模化生产的标准化工艺体系,降低工业适配难度,推动绿色合成工艺从实验室走向工业化应用,实现技术的产业化落地。

#### 4 绿色合成工艺的未来发展趋势

##### 4.1 智能化与自适应控制

人工智能在工艺参数动态调整中的潜力依托化工过程智能化理论与机器学习算法发展,可通过对反应过程中多维度数据的实时采集与分析,精准识别参数变化与反应效果之间的内在关联,实现工艺参数的动态自适应调整,规避人为调控的滞后性与误差,提升工艺运行的稳定性与高效性,尤其在复杂反应体系中表现突出<sup>[4]</sup>。数字孪生技术在过程优化中的前瞻应用基于虚拟仿真与过程系统工程理论,通过构建绿色合成工艺全流程的虚拟孪生模型,复刻反应、分离、纯化等各单元的运行状态,提前预判工艺运行过程中可能出现的问题,优化工艺设计与参数配置,降低研发与生产过程中的试错成本,为工艺优化提供精准的理论和技术支撑,加速绿色合成工艺的迭代升级。

##### 4.2 极端条件下的反应探索

低温/高压反应的工业化可行性研究依托极端条件化学与化工设备工程理论,聚焦设备耐压、耐低温性能的提升与工艺参数的精准调控,突破极端条件下反应传质传热效率低、设备损耗大等技术瓶颈,拓展绿色合成工艺的应用边界,实现传统温和条件下难以实现的化学反应转化,尤其在特殊功能材料合成中潜力巨大。等离子体/电化学等新型能量输入方式依托等离子体化学与电化理论,可通过调控能量输入形式与强度,激活反应物分子活性,降低反应活化能,无需苛刻的反应条件即可实现高效转化,减少反应过程中的能源消耗与环境负荷,成为绿色合成工艺能量利用创新的重要方向,尤其在能源转化与环境保护领域应用前景广阔。

##### 4.3 生物基路线的深度开发

生物质资源的高值化利用路径依托生物质转化工程与绿色化学理论,聚焦生物质原料的定向转化与组分分离技术优化,突破生物质原料利用率低、转化产物附

附加值不高的技术局限,实现生物质资源向高附加值化工产品、能源产品的高效转化,推动资源利用模式向可持续化转型,助力农业与化工产业的协同发展。合成生物学在分子设计中的颠覆性影响基于合成生物学与分子工程理论,可通过设计与改造生物合成途径及相关功能基因,构建高效合成目标产物的生物体系,替代传统化学合成路径,降低反应过程中的环境负荷,实现分子层面的绿色合成创新,推动生物基绿色合成工艺的跨越式发展,尤其在天然产物合成中表现突出。

##### 4.4 全球技术标准的协同制定

绿色合成工艺的通用性评价体系构建依托绿色化工评价理论,聚焦工艺绿色化、资源利用效率、环境影响等核心维度,建立科学、统一的评价指标与评价方法,规范绿色合成工艺的研发与应用,避免不同评价标准带来的技术壁垒。国际合作在技术迭代中的推动作用基于全球绿色化工协同发展理念,通过加强各国在绿色合成工艺研发、技术成果共享等方面的深度合作,整合全球优质研发资源,加速技术迭代升级,破解单一国家难以突破的技术难题,推动绿色合成工艺实现全球化普及与应用,助力全球化工产业向绿色低碳转型。

#### 结束语

绿色合成工艺的持续创新需依托跨学科技术融合与全产业链协同优化。通过智能化控制实现工艺参数动态适配,利用极端条件反应拓展转化边界,结合生物基路线开发提升资源利用效率,可显著降低化工生产的环境负荷。同时,全球技术标准的协同制定与开放合作,将加速绿色工艺的普及应用,推动化工行业向低碳化、循环化方向转型,为全球可持续发展贡献力量。

#### 参考文献

- [1]吕则思.可再生能源驱动的绿色合成工艺开发与优化[J].化工设计通讯,2025,51(11):133-135.
- [2]魏义兰,张旭,王宇,等.噻虫嗪绿色合成工艺[J].河南化工,2023,40(9):24-26,32.
- [3]李合平,常帅军,宋士杰,等.对称性硫脲的绿色合成工艺[J].精细化工,2023,40(6):1386-1392.
- [4]汪洋,程建明,阚建伟,等.硬脂醇甘草亭酸酯绿色合成工艺[J].化学研究与应用,2024,36(3):681-688.