

化学工程工艺中的绿色化工技术要点探究

王 森

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃二分公司 宁夏 银川 750000

摘 要：化学工程工艺中，绿色化工技术通过原料绿色化、催化剂优化、溶剂革新等基础要点，从源头减少污染。在工艺创新上，优化原子效率与反应路径，实现能量高效利用和物质闭路循环。其应用于清洁生产、生物技术融合及智能化领域。发展趋势呈现多学科交叉创新与全生命周期管理特点。该技术对化工行业可持续发展意义重大，助力实现资源高效利用与生态环境保护。

关键词：绿色化工；原子经济性；生物催化；可持续发展

引言：化工行业快速发展伴随资源消耗与环境污染问题。传统化工技术弊端凸显，难以满足可持续发展需求。绿色化工技术凭借其独特优势，成为化工行业转型升级的关键。探究其技术要点，明确应用方向与发展趋势，对推动化工行业绿色变革、平衡经济发展与环境保护关系具有重要现实意义。

1 绿色化工技术基础要点

1.1 原料绿色化

绿色化工技术的发展根基在于原料的绿色化变革。传统化工生产长期依赖化石原料，其不可再生性导致资源逐渐枯竭，开采与加工过程更伴随大量污染物排放。替代性原料选择聚焦无毒无害、可再生资源，生物质原料成为重要突破口。从农业生产产生的秸秆、稻壳，到林业加工剩余的枝桠材，这些生物质富含纤维素、木质素等成分，经预处理后，可通过发酵、热解等技术转化为生物燃料、生物基化学品，有效替代传统石化产品。废弃物资源化进一步拓展原料绿色化路径^[1]。工业生产中产生的副产物或废弃物，并非真正意义上的“废物”，通过化学转化技术，能赋予其新的价值。例如钢铁冶炼产生的高炉渣，经过研磨、改性等处理，可作为水泥生产的优质掺合料；废弃塑料通过热裂解技术，可转化为小分子烃类物质，作为化工原料重新投入生产。这种将废弃物变原料的方式，既解决了固废处理难题，又实现资源循环利用。

1.2 催化剂优化

催化剂性能直接影响化工反应效率与环境友好性。绿色催化剂开发致力于寻找高选择性、低毒性品种。生物催化剂中的酶具有高度特异性，能在常温常压下催化特定反应，避免传统催化剂所需的高温高压条件，大幅降低能耗与污染。无机催化剂凭借稳定的化学性质与低毒性，同样成为绿色化工的理想选择，在各类有机合成

反应中展现出良好的催化活性。催化效率提升依赖分子设计与纳米技术创新。分子设计通过精准调控催化剂的分子结构，优化活性中心与反应物的结合方式，增强催化反应的选择性与效率。纳米技术则从材料尺度入手，制备具有特殊结构与性能的纳米催化剂。纳米催化剂的高比表面积与量子效应，使其能显著降低反应活化能，在低温条件下实现高效催化，减少副产物生成，降低后续分离与处理成本，推动化工反应向绿色高效方向发展。

1.3 溶剂革新

溶剂革新是绿色化工技术突破的重要环节。传统挥发性有机溶剂在使用过程中易挥发到大气中，不仅造成空气污染，还对人体健康产生危害。超临界流体、离子液体与水基溶剂逐渐取代传统有机溶剂。超临界流体在临界点附近，其密度、粘度等性质可通过温度和压力灵活调节，既能作为反应溶剂提高传质效率，又能在反应后通过简单降压实现分离回收。离子液体具有低蒸气压、可设计性强的特点，通过改变阴阳离子结构，可定制适用于不同反应体系的溶剂。水基溶剂以水为介质，来源广泛、价格低廉且环境友好，在众多有机合成与分离过程中展现出独特优势。溶剂回收与循环通过建立闭路循环系统实现。该系统对使用后的溶剂进行收集、提纯与再利用，形成完整的循环链条。首先通过蒸馏、萃取等技术对使用过的溶剂进行初步分离，去除其中的杂质；再利用吸附、膜分离等手段进一步提纯，使溶剂达到重复使用标准。这种循环模式大幅降低溶剂消耗，减少其向环境中的排放，提升绿色化工生产的可持续性。

2 绿色化工工艺创新要点

2.1 原子效率与反应路径优化

绿色化工工艺的创新，首先聚焦于原子效率与反应路径的深度优化。原子经济性反应设计以逆合成分析为核心工具，从目标产物出发逆向拆解合成路线，摒弃传

统低效的多步骤合成模式。传统化工合成常伴随大量中间体生成,这些中间体不仅占用额外资源,还会产生难以处理的废弃物。而高原子利用率的合成路线,将原料原子尽可能多地转化为目标产物,减少甚至避免非必要副产物的产生,让每一份原料都能在产品中实现价值,从源头上降低资源浪费与环境污染。串联反应集成进一步提升原子利用效率。通过对多步反应进行时空耦合设计,使中间产物无需分离即可在同一体系或连续设备中直接转化为后续反应的原料。这种集成模式打破传统分步反应的孤立状态,构建起连续化、一体化的反应链条^[2]。不同反应在特定的温度、压力等条件下有序衔接,中间产物在生成的瞬间即被消耗,既节省了中间产物分离、提纯所需的能耗与设备,又缩短了整体工艺流程,减少物料在传输与处理过程中的损耗,显著提高化工生产的整体效率与绿色化水平。

2.2 能量高效利用

能量高效利用是绿色化工工艺创新的关键方向。化工生产过程中常伴随大量热量释放,无论是放热反应产生的高温气体,还是冷却环节的热水,若直接排放将造成能源浪费。通过合理规划流程,将这些余热收集并分级利用,可有效提升能源使用效率。高温余热可用于蒸馏、蒸发等高热需求环节,低温余热则可用于物料预热或其他辅助工序。这种热能梯级回收方式构建了工艺内部的能量循环体系,减少对外部能源的依赖,降低运行成本与碳排放。新型反应器设计也为能量高效利用提供了新思路。微反应器采用微米级别通道结构,具有极大的比表面积,显著增强传质与传热效率。在微反应器内,反应物混合更均匀迅速,反应速率提高,使原本需高温高压条件的反应可在温和环境下进行,大幅降低能耗。光催化反应器则利用光能驱动化学反应,通过半导体材料在光照下激发电子跃迁,产生强氧化性活性物种,引发特定反应。以光作为清洁能源替代传统加热方式,不仅减少能源消耗,还能实现常规条件下难以进行的反应,推动化工过程向节能、环保方向发展。

2.3 物质闭路循环

物质闭路循环是绿色化工工艺实现可持续发展的关键。废水零排放依靠膜分离、吸附和生物处理等技术协同实现。膜分离技术利用不同材质膜的选择透过性,对废水中的污染物进行截留与分离,无论是大分子有机物、重金属离子还是细小颗粒,都能通过合适的膜材料实现精准分离,使废水得到初步净化。吸附技术则通过特殊吸附剂的表面吸附作用,进一步去除废水中残留的微量污染物。生物处理技术借助微生物的代谢活动,将

废水中的有机污染物分解为无害物质。经过这些技术的深度处理,净化后的废水达到生产用水标准,可回用于工艺环节,减少新鲜水资源的取用,真正实现废水的零排放。废气资源化则将化工生产中的尾气变废为宝。反应尾气中常含有二氧化碳、氮氧化物等对环境有害的气体成分。通过化学转化技术,二氧化碳可与氢气在特定催化剂作用下合成甲醇、甲烷等燃料,或参与聚合反应制备可降解塑料;氮氧化物可通过还原反应转化为无害的氮气,也可作为原料用于合成硝酸等化工产品。这种废气资源化处理方式,不仅消除了废气对大气环境的污染,还将原本的污染物转化为具有经济价值的资源,实现物质在化工生产体系内的循环利用,让绿色化工工艺在资源利用与环境保护方面达到更高水平。

3 绿色化工技术应用方向

3.1 清洁生产体系构建

清洁生产体系构建是绿色化工技术落地的关键实践。工艺模块化集成将催化氧化、膜分离等绿色技术单元转化为标准化模块。催化氧化模块可高效处理有机污染物,在温和条件下实现有害物质无害化转化;膜分离模块凭借选择性分离能力,能将混合物中的不同组分有效分离回收。这些标准化模块如同工业生产的功能组件,可依据生产需求灵活组合拼接,简化工艺流程设计,降低企业应用绿色技术的门槛。模块化设计便于设备安装调试与维护升级,缩短项目建设周期。过程强化技术从微观层面提升清洁生产效能^[3]。高频振动通过机械外力打破传质壁垒,促使反应物分子充分接触,加速反应进程。超声波产生的空化效应,在液体中形成微小气泡,气泡破裂瞬间释放能量,创造局部高温高压环境,显著提升反应速率与选择性。微波场利用微波与反应物分子相互作用,实现选择性加热,让反应在温和条件下高效进行。这些技术无需大幅改动现有设备,通过引入外部物理场即可提升反应效率,减少能耗与副产物生成,推动化工生产绿色转型。

3.2 生物技术深度融合

生物技术与化工领域深度融合开辟绿色生产新路径。生物催化与转化借助酶或微生物的特异性催化功能,实现手性合成、功能材料制备等绿色过程。酶作为天然催化剂,能在常温常压下精准催化特定化学反应,在药物合成中高效制备特定构型手性分子,避免传统化学合成中繁琐拆分步骤,降低原料消耗与污染排放。微生物可利用简单碳源,通过发酵过程合成生物可降解塑料、生物基高分子材料,替代传统石化基产品,减少对化石资源依赖。合成生物学通过代谢工程改造微生物,

使其成为绿色化工生产的微型工厂。科研人员重新设计微生物代谢途径,将其改造成生产高附加值化学品的细胞工厂。这些改造后的微生物以糖类等可再生资源为原料,在发酵罐中大量合成香料、氨基酸、药物中间体等产品。该过程无需高温高压条件,且微生物生长可吸收二氧化碳,实现碳减排,为绿色化工产品可持续生产提供创新方案。

3.3 智能化与数字化赋能

智能化与数字化技术为绿色化工注入新动能。实时监测与优化依托物联网技术,在化工生产关键节点部署传感器,实时采集温度、压力、浓度等数据。AI算法深度分析海量数据,依据预设工艺参数动态调控反应条件。当系统检测到参数偏离标准范围,自动调整设备运行状态,确保反应始终在最优条件下进行,避免人为操作失误或环境波动导致的能源浪费与污染物排放,提升工艺稳定性与生产安全性。虚拟仿真与预测借助数字孪生技术,构建与实际化工流程一致的虚拟模型。在虚拟环境中模拟各种工况与操作,观察工艺流程运行效果,提前识别潜在环境风险点与工艺瓶颈。通过对虚拟模型参数优化与流程改进,可在实际生产前验证方案可行性,避免设计缺陷导致的资源浪费与环境污染,为绿色化工技术开发应用提供可靠预研平台,推动化工生产向智能化、绿色化发展。

4 绿色化工技术发展趋势

4.1 多学科交叉创新

多学科交叉融合正重塑绿色化工技术发展格局。化学、生物、材料学科的协同突破,催生新型技术形态。自然界生物催化系统展现出无与伦比的高效性与选择性,借鉴生物酶的结构与催化原理,仿生催化体系应运而生。这种体系通过化学合成手段模拟生物活性中心,在常温常压下即可推动复杂化学反应,避免传统高温高压工艺带来的高能耗与污染。自修复材料的研发同样依托学科协同,将化学分子间作用力原理与材料微观结构设计相结合,使材料在受到损伤时,内部化学键或分子链可自发重组,实现性能恢复,减少资源重复消耗与废弃物产生。纳米技术与绿色化学的深度融合为化工反应带来革新。纳米催化剂因具有极大的比表面积和独特的量子效应,能显著降低反应活化能。相较于传统催化剂,纳米级别的催化活性中心可使反应物分子更易吸附

并发生转化,从而实现在低温条件下的高效反应。这种特性不仅降低了能源消耗,还能精准控制反应路径,提高目标产物选择性,减少副产物生成,从源头上提升化工生产的绿色化水平。

4.2 全生命周期管理

绿色化工的发展趋势向全生命周期管理延伸。绿色产品设计与评价构建起系统化框架,从原料端优先选择可再生、低毒物质,生产环节采用清洁工艺降低污染排放,使用阶段注重产品的节能与安全性能,回收阶段则通过优化设计提升产品循环利用率。通过建立覆盖原料、生产、使用、回收全流程的环境影响评估体系,对每个环节进行精细化把控,确保产品在全生命周期内最大限度降低对环境的负面影响。碳足迹追踪与减碳技术成为绿色化工关键发展方向。区块链技术凭借分布式账本与加密特性,为化工生产碳排放追踪提供可靠手段。从原材料开采、加工制造到产品运输、终端使用,每一个环节的碳排放量都被实时记录在不可篡改的区块链系统中,实现碳排放信息的透明化与可追溯。与此同时,碳捕获与利用技术不断迭代,将化工生产过程中产生的二氧化碳进行分离、富集,并通过化学转化技术将其制成燃料、建材或化工原料,既减少大气中温室气体含量,又实现碳资源的循环利用,推动绿色化工迈向低碳可持续发展道路。

结束语

绿色化工技术是化学工业可持续发展的必由之路。通过原料绿色化、催化剂革新及工艺集成优化,可显著降低环境影响;生物技术与智能化赋能则推动技术向高效、精准方向演进;多学科交叉与全生命周期管理进一步夯实技术根基。未来需持续深化基础研究,强化跨领域协同,以绿色化工技术驱动产业转型升级,助力生态文明建设。

参考文献

- [1]王聪.绿色化工技术在化学工程工艺中的应用研究[J].化纤与纺织技术,2024,53(08):82-84.
- [2]周恩生.绿色化工技术在化工工程工艺中的应用[J].清洗世界,2024,40(07):58-60.
- [3]杜婧.化工工程工艺中的绿色化工关键技术[J].清洗世界,2023(01):91-93.