

基于可持续发展的化工工程设计理念探讨

张广伟¹ 邓成果¹ 陈启龙²

1. 山东泓辰化学科技有限公司 山东济宁 273500

2. 山东蔚扬药业有限公司 山东济宁 273500

摘要: 随着全球环境问题日益严峻和资源约束加剧, 化工工程设计亟需融入可持续发展理念, 本文深入分析了可持续发展理念在化工工程设计中的核心内涵, 探讨了清洁生产技术集成、绿色工艺创新和循环利用系统等关键技术路径; 通过典型行业案例分析, 评估了可持续设计的环境经济效益, 识别了实施过程中的主要挑战。研究表明, 基于可持续发展的化工工程设计能够有效降低环境负荷, 提升资源利用效率, 但需要在技术成熟度、经济可行性和政策支持方面进一步完善; 未来应加强数字化技术应用, 建立完善的评价标准体系, 推动多学科交叉融合的设计方法创新。

关键词: 可持续发展; 化工工程设计; 清洁生产; 绿色工艺; 循环经济

引言

当前全球面临的气候变化、资源枯竭和环境污染等挑战, 使得传统化工工程设计模式面临深刻变革的迫切需求。化工行业作为国民经济的重要支柱产业, 同时也是能源消耗和污染排放的重点行业, 其工程设计理念的转变对实现可持续发展目标具有重要意义。将可持续发展理念融入化工工程设计, 不仅是响应国家“双碳”战略和绿色发展要求的必然选择, 更是化工行业自身转型升级、提升竞争力的内在需要。通过构建环境友好、经济高效、社会责任并重的设计理念体系, 化工工程设计正在从单纯追求技术先进性和经济效益向兼顾环境保护和社会可持续发展的综合目标转变。这一转变不仅涉及技术路径的创新, 更需要在设计理念、评价标准、实施机制等方面进行系统性重构, 为化工行业的可持续发展提供坚实的理论基础和实践指导。

一、可持续发展理念在化工工程设计中的内涵

(一) 可持续发展理念的核心要素与化工工程设计的融合

可持续发展的三重底线理念在化工工程设计中的融合体现为环境保护、经济效益与社会责任的协调统一。环境友好性要求设计过程中优先选择低毒低害原料, 最大限度减少废物产生和能源消耗, 降低对生态系统的负面影响; 经济效益性强调通过技术创新和工艺优化实现成本控制和利润最大化, 确保项目的市场竞争力和投资回报; 社会责任性则关注职业健康安全、社区影响和就

业创造等因素。全生命周期思维的应用使设计师能够从原料获取、生产制造、产品使用到废物处置的全过程进行系统考量, 避免局部优化带来的整体环境负担转移。循环经济理念的引入促使传统线性“资源-产品-废物”模式向“资源-产品-再生资源”的闭环模式转变, 通过物质流和能量流的循环利用实现资源效率的最大化, 从根本上改变了化工工程设计的思维范式。

(二) 可持续化工工程设计的基本原则与评价标准

绿色化学十二原则为化工工程设计提供了具体的技术指导框架, 包括防止废物产生胜于处理废物、原子经济性最大化、减少有毒化学品合成和使用、设计更安全的化学品、使用更安全的溶剂和助剂、提高能效、使用可再生原料、减少不必要的衍生化反应、优先使用催化剂、设计可降解产品、实时监控预防污染以及选择本质安全的工艺路线。资源效率最大化与废物最小化的设计准则要求在工程设计中采用物料平衡和能量平衡的优化方法, 通过过程集成技术实现多股物流的合理配置, 提高原料转化率和产品收率, 同时建立副产品回收利用体系。可持续性评价指标体系的构建需要综合考虑技术、经济、环境和社会四个维度, 采用生命周期评价、环境影响评价、技术经济分析等量化方法, 建立包括资源消耗强度、污染物排放强度、能源利用效率、经济效益指标和社会影响指标在内的多层次评价框架, 为设计方案的比选和优化提供科学依据。

二、可持续化工工程设计的技术路径与方法

(一) 清洁生产技术在化工工程设计中的集成应用

清洁生产技术的集成应用以源头减排为核心, 通

过工艺路线的重新设计和关键技术的系统集成实现污染预防和资源节约。源头减排技术的选择与优化策略包括采用无毒无害或低毒低害的替代原料、开发高选择性的催化反应体系、设计温和反应条件的工艺路线,从根本上减少有害物质的产生和使用^[1]。过程强化技术通过微反应器、超重力技术、膜分离、超临界流体技术等先进设备和工艺的应用,显著提高传质传热效率和反应选择性,实现设备小型化和过程集约化,大幅降低能耗和物耗。清洁能源与可再生能源在化工过程中的应用涉及太阳能、风能、生物质能等绿色能源的直接利用,以及通过电化学、光化学、生物化学等途径实现化学反应的驱动,替代传统的高温高压条件,减少化石燃料消耗和温室气体排放,推动化工生产向低碳化和零碳化方向发展。

(二) 绿色工艺技术与装备的设计创新

绿色工艺技术与装备的设计创新以提高反应效率和产品质量为目标,通过催化技术、分离技术和反应器技术的协同优化实现工艺过程的绿色化改造。催化技术在减少副产物生成中发挥关键作用,通过开发高活性、高选择性、高稳定性的催化剂体系,实现反应条件的温和化和反应过程的高效化,特别是酶催化、光催化、电催化等新兴催化技术的应用为传统化工反应提供了绿色替代路径。分离纯化技术的绿色化改进方向集中在膜分离、吸附分离、结晶分离等低能耗分离技术的开发应用,以及分离剂的绿色化替代,如离子液体、深共晶溶剂等绿色溶剂的使用,减少有机溶剂的消耗和废液的产生。反应器设计的节能减排优化策略包括微通道反应器、连续流反应器、多功能反应器等新型反应设备的应用,通过强化传递过程和优化反应条件实现能源消耗的大幅降低,同时提高反应的安全性和可控性。

(三) 废物资源化与循环利用的系统设计

废物资源化与循环利用的系统设计构建了化工园区或产业集群内部的物质循环网络,通过企业间的协同合作实现废物的最小化和资源的最大化利用。工业共生网络的构建与优化基于物质流分析和能量流分析,识别不同企业间副产品与原料需求的匹配关系,建立跨企业的物质交换和能量共享体系,形成“一家企业的废物是另一家企业的原料”的循环发展模式。副产品与废料的高值化利用途径涉及化学转化、生物转化、物理加工等多种技术手段,将低价值的废物转化为高附加值的产品,如废酸的资源化利用、废盐的提纯回收、有机废液的溶

剂回收等,实现废物处理成本向经济收益的转变^[2]。闭环循环系统的设计原理与实施方案要求在化工装置内部建立物料和能量的多级循环利用体系,通过工艺流程的系统集成和设备配置的合理优化,实现水循环、溶剂循环、催化剂循环等关键物质的闭路循环,最大限度减少新鲜原料的补充和废物的外排。

三、可持续化工工程设计的实践案例与效果分析

(一) 典型化工行业的可持续设计实践

石油化工行业的绿色炼化技术应用主要体现在清洁汽油生产工艺、催化裂化技术升级和炼厂废气资源化利用等方面,中石化镇海炼化通过采用先进的加氢脱硫技术和催化重整工艺,实现了硫含量大幅降低和辛烷值显著提升,同时建立了炼厂干气制氢联合装置,将原本作为燃料气的副产品转化为高价值的氢气产品。精细化工领域的清洁生产工艺改造以医药中间体和农药原药生产为重点,浙江某农药企业通过引入连续流合成技术替代传统间歇反应工艺,不仅大幅缩短了反应时间和提高了产品纯度,还减少了溶剂用量和废液产生量,实现了生产效率与环境效益的双重提升。新材料产业中的环境友好型设计案例包括生物基材料的开发应用和传统材料的绿色制备工艺改进,某聚合物生产企业采用生物质原料替代石化原料,开发出性能优异的生物基聚酯产品,同时采用酶催化聚合技术实现了聚合反应的温和化条件,显著降低了能耗和碳排放。

(二) 可持续设计的环境效益与经济效益评估

污染物减排效果的定量分析表明,实施可持续设计的化工项目在主要污染物排放方面取得了显著成效,以某大型化工园区为例,通过推广清洁生产技术和循环经济模式,COD排放量降低了45%,SO₂排放量减少了38%,固体废物产生量下降了52%,这些减排成果不仅改善了区域环境质量,还为企业节省了大量的环保治理成本。资源消耗降低的经济价值评估显示,可持续设计带来的资源节约效应非常明显,通过工艺优化和循环利用技术的应用,单位产品的水耗降低了30-50%,能耗减少了20-35%,原材料利用率提高了15-25%,仅资源节约一项每年就为企业创造经济效益数千万元。长期运营成本与初期投资的综合效益分析表明,虽然可持续设计项目的初期投资通常比传统设计高出10-20%,但通过运营期间的能源节约、原料节省、废物减量和环保费用降低等方面的收益,投资回收期一般在3-5年,全生命周期的净现值显著为正,体现了良好的经济可行性^[3]。

（三）可持续设计实施过程中的挑战与解决方案

技术成熟度与工程化应用的差距是制约可持续化工设计推广应用的主要技术障碍，许多绿色化工技术仍处于实验室研发或中试阶段，在工业化放大过程中面临工艺稳定性、设备可靠性和操作复杂性问题，需要通过产学研合作建立技术转化平台，加强中试放大研究和工程化验证，建立技术风险分担机制。经济可行性与环境效益的平衡策略要求在项目决策中建立多目标优化评价体系，通过技术经济分析工具科学评估不同设计方案的综合效益，同时探索绿色金融、碳交易等市场化机制将环境效益转化为经济收益，降低绿色技术的应用成本。政策支持与市场机制的协调配套需要完善绿色化工发展的政策环境，建立健全环保标准体系、财税优惠政策、绿色认证制度等支撑体系。

四、可持续化工工程设计的发展趋势与展望

（一）新兴技术对可持续化工设计的推动作用

数字化技术通过大数据分析、智能算法和数字孪生技术的融合应用，建立化工过程的数字化模型和智能优化系统，实现生产参数实时调优和工艺条件精确控制，显著提升资源利用效率和产品质量。人工智能在催化剂设计、反应路径预测和工艺参数优化方面展现巨大潜力，通过机器学习挖掘化学数据规律，加速绿色催化剂发现和合成路线设计，大幅缩短开发周期并降低成本^[4]。新材料技术在耐腐蚀材料、高效传质材料和智能响应材料的应用为化工装备升级提供物质基础，提高设备寿命和运行可靠性，推动化工装备向高性能化和智能化发展。

（二）政策导向与标准体系的完善路径

国内外环保法规日趋严格，REACH法规、TSCA法案及我国新化学物质环境管理办法对化学品环境安全性提出更高要求，推动设计理念从末端治理向源头预防转变。碳中和目标下化工行业明确指向低碳化发展，要求工程设计将碳排放作为重要约束，优先选择低碳工艺和可再生能源，积极开发CCUS技术和生物基化学品。国际合作机遇与挑战并存，全球绿色发展共识促进技术合作，但技术封锁和贸易保护主义制约技术获取，需加强自主创新和合作机制建设^[5]。

（三）可持续化工工程设计的未来发展方向

多学科交叉融合将催生新的设计理论和方法，化学

工程与环境科学、材料科学、生物技术、信息技术等深度融合，系统工程和复杂性科学的应用为解决可持续设计问题提供新思路。产业链协同发展模式要求从全局视角进行系统设计，通过上下游企业合作和资源共享，构建循环型产业发展模式。化工工程师培养需更新教育模式，强化可持续发展理念和跨学科知识结构，培养复合型人才，建立继续教育体系提供人才保障。

结语

本文系统探讨了基于可持续发展的化工工程设计理念，深入分析了其核心内涵、技术路径、实践效果和发展趋势。研究表明，可持续发展理念已成为现代化工工程设计的基本要求，通过融合环境友好、经济效益和社会责任三重目标，化工工程设计正在实现从传统的技术导向向可持续发展导向的根本性转变。清洁生产技术和绿色工艺创新和循环利用系统构成了可持续化工设计的核心技术体系，为实现污染预防和资源高效利用提供了有效途径。实践案例分析证实了可持续设计在环境保护和经济效益方面的显著成效，但也揭示了技术成熟度、经济可行性和政策支持等方面仍存在的挑战。未来，数字化技术、人工智能等新兴技术的发展，以及更加严格的环保法规和碳中和目标的推动，将进一步加速可持续化工工程设计的创新发展。化工行业应抓住历史机遇，加强多学科交叉融合，构建产业链协同发展模式，培养高素质专业人才，推动可持续化工工程设计理念在更大范围和更深层次的应用，为建设资源节约型和环境友好型社会作出应有贡献。

参考文献

- [1]胡鹏飞.绿色制药理念下的医药化工设备可持续发展策略[J].进展, 2024(7): 162-164.
- [2]谷艾婷.基于低碳节能理念的煤化工产业发展[J].能源与节能, 2022(8): 75-78.
- [3]任冰洁.关于化工工程工艺中的绿色化工技术探析[J].数码设计(上), 2021(006): 010.
- [4]张雅茹.化工工业发展中关于绿色化工理念的开发与应用探讨[J].区域治理, 2021(16): 2.
- [5]陈树兰.基于绿色经济理念的化工建筑节能设计[J].化学工程, 2024, 52(10): I0017.