

新型环保化工工艺设计优化研究

李金娥 练 峰 毛军国

浙江丽水有邦新材料有限公司 浙江 丽水 323000

摘 要: 化工行业绿色转型发展进程中,传统工艺设计模式存在能耗偏高、污染产出量大等诸多短板,难以适配现代生态生产的发展需求。本文围绕环保化工工艺的设计逻辑、核心技术与优化策略展开系统性梳理,结合绿色化工理论体系,剖析化工生产流程的污染生成机制与多目标协同设计逻辑。聚焦绿色介质替代、过程强化、反应路径重构等关键技术,从能量集成、水网络调控、废弃物资源化维度搭建完整优化体系,结合工程实施要点完善工艺落地管控体系,为化工工艺绿色化升级提供系统化的设计参考。

关键词: 环保化工工艺;绿色催化;过程强化;能量集成;清洁生产

引言: 化工生产长期面临高能耗与高污染的双重困境,传统末端治理模式已难以适配日益严格的环保约束。随着绿色化学与清洁生产理念的持续渗透,工艺设计正经历从被动治污向主动预防的范式转变。如何在保障经济效益的前提下,通过催化剂革新、过程强化、能量与质量集成等手段系统性降低环境负荷,成为当前化工领域亟需回应的核心命题。

1 环保化工工艺设计的理论基础与技术逻辑

1.1 化工工艺设计中环保理念的融入机制

现代化工工艺设计工作在方案构思的初始阶段,便将环境友好属性纳入核心设计约束范畴,彻底转变传统化工生产末端治理的被动治理模式^[1]。绿色化学构建的系统性设计原则,为化工工艺路线整体规划提供了完整的理论指引,覆盖原子利用率提升、无毒无害原料选用、绿色溶剂匹配等多个设计维度。清洁生产核心思想推动工艺方案从生产源头控制污染产出总量,依托原料体系迭代更新、化学反应路径重构、生产能量梯级分配等方式,全面降低化工生产全流程的环境负荷。化工工艺设计工作需要统筹生产运行的经济适配性与生态发展的环境适配性,建立动态平衡的设计思维。设计人员需要将各类环保管控标准,贯穿于反应设备选型、物料分离方案制定、生产能量集成调配等全部设计环节的决策流程。环境保护属性不再独立于化工工艺主体设计体系之外,而是成为推动工艺体系创新迭代、结构优化的核心内在驱动力,实现化工生产效益与生态保护效益的深度融合。

1.2 化工工艺流程中的污染产生机理

化工生产体系内部的污染物质生成,源于反应体系内非定向副反应生成的各类副产物,物料分离运作过程中溶剂自然损耗与生产能量无效消耗,以及物料存储

输送环节中密封结构失效、运行参数波动引发的物质逸散问题。传统化工生产体系常用的有机溶剂,在蒸馏回收的连续运作中,会持续产生挥发性尾气排放。含氯、含氮类化工中间体的合成体系,会伴随高毒性物质的持续生成,增加生产污染治理难度。换热网络结构布局的不合理布局,会造成大量低品位余热直接排放至自然环境,造成能源资源浪费的同时,加剧生产区域的热污染问题。化工物料输送与仓储环节的密封结构老化,以及生产运行参数的不稳定波动,会引发无组织污染物排放,这类污染排放形式已经成为化工生产区域大气污染的主要来源之一,也是现代化工环保设计需要重点管控的核心环节。

1.3 工艺设计优化的多目标协同逻辑

现代化环保化工工艺设计优化工作,需要兼顾原料转化效率提升、生产能源消耗管控、污染废物总量削减、生产运行安全保障等多项核心发展目标。各类优化目标之间存在相互制衡的内在关联,生产原料转化效率的提升需要匹配高强度的反应运行条件,这类运行条件会造成能源消耗总量上涨,也会提升副反应的发生概率,增加副产物生成数量。多目标优化设计体系可以依托前沿优化算法,在目标平衡区间内探寻各类设计指标的最优适配方案,规避单一指标优化引发的生产体系失衡问题,消除片面优化带来的各类负面生产影响。工艺运行参数的精细化调控与生产设备结构模式的科学匹配,是实现多目标均衡发展的核心路径。工艺设计阶段需要搭建完整的变量关联分析体系,梳理各类设计参数、设备结构、生产指标之间的内在关联,为化工工艺体系的精细化优化提供完善的量化分析支撑。多目标协同的核心是打破单一维度优化桎梏,统筹生产、能耗、环保、安全多维需求,构建适配工业化稳定运行的均衡

设计体系。

2 新型环保化工工艺的关键技术路径

2.1 绿色催化剂与反应介质替代技术

传统化工工艺采用的均相催化体系具备良好的催化活性，但物料分离回收的操作难度较高，残留的金属催化组分不仅会影响成品物料的纯净度，还会提升废液处理的整体压力。固体酸性催化、生物酶催化、光催化等新型催化体系，能够在温和稳定的运行条件下完成物料的高选择性转化，催化载体可以实现循环复用，简化后续物料分离回收的操作流程^[2]。离子液体与超临界流体属于新型绿色反应介质，具备饱和蒸气压数值低、循环复用性能稳定、溶解适配范围灵活等诸多应用优势，能够全面替代传统有机溶解介质，大幅削减挥发性污染物质的排放总量。催化载体内部孔道结构的精准调控、表面活性反应位点的定向改造，能够有效改善化学反应的选择性，提升原料转化利用效率，是现代化化工工艺环保优化的核心改造方向。

2.2 过程强化与微反应技术应用

过程强化技术依托设备结构尺度优化、反应接触比表面积提升、传质传热效率强化等方式，全面提升化工反应整体效率，压缩生产设备的占地空间。微通道反应设备内部的物料混合效率与能量交换效率，显著优于传统釜式反应设备，能够精准把控反应体系的温度区间与物料停留时长，抑制各类副反应的发生，提升成品物料的回收产量，减少生产过程中废弃物料的生成数量。膜反应设备将化学反应过程与物料分离过程整合至同一设备单元，突破传统热力学平衡条件的限制，在控制生产能耗的基础上，缩减中间物料的循环输送体量。反应精馏、萃取精馏等耦合型工艺技术，整合化学反应与物料分离两类核心操作，精简生产设备的整体配置结构，降低生产全程的能量消耗水平。

2.3 原子经济性反应路径重构

原子经济性设计理念追求原料分子资源的最大化利用，让更多原料组分参与目标反应并融入成品结构，从源头控制副产物的生成规模。加成反应、分子重排反应、催化偶联反应的原子利用水平，显著优于传统取代反应与消除反应，能够有效提升原料资源的利用效率。依托原料分子内部官能团的直接转化模式，省去传统合成流程中官能团保护与脱保护的冗余步骤，减少化学试剂的投入总量，控制废弃物料的产出规模。生物基原料对传统石化原料的替换改造，能够有效降低化工生产的碳排放强度，工艺设计过程中需要重点把控生物原料供给稳定性与转化高效性两类核心指标。化学反应路径的

全新构建需要融合多领域专业知识，从分子反应机理层面拆解传统工艺的短板问题，以此为基础完成工艺路径的升级重构。

3 环保化工工艺设计的优化方法与策略

3.1 能量集成与热网络优化设计

传统化工生产体系中，独立设置的加热单元与冷却单元会造成大量生产能源的无效损耗，无法实现能源资源的高效复用^[3]。夹点分析理论可以精准界定生产系统内部热源与热阱的最小适配温差，为换热网络拓扑结构的科学规划提供理论支撑。热能无序消耗成为过往工艺普遍弊病，统筹调配可以盘活内部闲置热能资源。能量集成优化方案通过合理匹配高温工艺流股与低温工艺流股，充分回收生产过程中产生的低品位余热，将余热资源应用于原料预热、单元辅助操作等生产环节，提升能源循环利用水平。蒸汽动力循环体系与有机朗肯循环体系的融合搭配，可将中低温余热资源转化为可利用动力能源，提升整套化工生产系统的能源利用上限。换热网络的优化设计需要兼顾设备结垢发展趋势与常规清洗维护周期，规避换热效率持续衰减引发的能源消耗上升问题，保障生产体系能耗水平的长期稳定性。

3.2 质量集成与水网络优化设计

质量集成优化聚焦工艺流股内部水资源与溶剂资源的循环复用，通过水质等级分类、梯级复用的设计思路，降低新鲜工业用水的投入体量，缩减生产废水的排放总量。源阱分析方法与水夹点技术可以精准界定水循环系统的最小用水基数，为全厂水循环回用网络的搭建提供科学依据。高纯度工业用水仅应用于水质要求严苛的核心生产工序，低品质再生回用水用于设备冲洗、单元冷却等常规操作环节，实现水资源的分级适配与高效利用。含盐废水与有机废水的分类收集模式，能够适配差异化的废水处理工艺，避免不同属性废水混合后提升处理难度、增加处理成本。水网络整体优化需要结合全厂给排水体系的运行特征，统筹规划用水、回水与排水体系的整体布局，维持水资源循环体系的动态平衡状态。

3.3 废弃物最小化与资源化利用策略

废弃物最小化改造立足工艺生产源头，通过提升化学反应选择性、优化原料转化效率等方式，从根源减少副产物的生成数量。生产流程中无法完全规避的副产物，需要挖掘系统内部的循环利用渠道，将单一工序产生的废弃物料转化为其他工序的生产原料，搭建完整的物质闭环循环体系。废酸废碱的中和再生复用、废有机溶剂的精馏提纯回收，是现代化工生产体系中应用成熟的资源化改造模式。固体化工废弃物可以通过热解、气

化等工艺技术,将高分子废弃物转化为可燃气体与炭黑物料,实现物质资源与能量资源的双重回收利用^[4]。废弃物资源化方案的设计搭建,需要综合考量工艺技术的落地可行性与生产运营的经济适配性,保障资源化改造模式的长期稳定运行。

4 环保化工工艺优化的实施保障与发展方向

4.1 工艺设计阶段的环保指标管控

化工工艺设计初期需要搭建全方位、系统化的环保指标管控体系,将废水排放体量、废气污染浓度、固体废弃物产出规模、生产综合能耗等核心管控指标,细化落实至各个生产工艺单元。物料衡算与能量衡算工作需要设计初期完成,为各类环保管控指标的精细化管控提供完整的数据支撑。工艺设计审查工作需要增设环保专项审查内容,针对工艺路线的环境友好程度开展独立审核,避免环保设计内容在后续工艺调整优化过程中被弱化删减。工艺安全设计与环保设计的融合统筹,能够有效规避生产安全隐患引发的环境污染问题,提升化工生产装置整体的运行稳定性与生态安全性。前置化、精细化的环保指标管控,可从设计源头规范工艺布局,杜绝后期整改带来的资源损耗与环保隐患问题。

4.2 新型环保工艺的工程化实施要点

实验室阶段成熟的环保化工新工艺,在工业化装置放大落地过程中,会因传质传热环境的整体变化,出现反应运行状态偏离实验室数据的情况。新工艺工程化落地过程中,需要重点关注反应设备放大效应、催化材料失效规律、分离设备处理体量匹配度等核心问题。新型催化材料的装填方式与更换方案、离子液体介质的设备防腐防护机制、微反应设备的工业化放大路径,均需要通过中试生产阶段完成全面调试优化。工程设计环节需要预留环保设施的扩容改造空间,适配后续工艺参数的优化调整以及环保管控标准的升级迭代,为工艺体系的长期优化预留发展空间。严格把控工程化落地的各类细节,做好中试调试与预留设计,能够有效缩短新工艺工业化适配周期,保障工艺稳定落地运行。

4.3 环保化工工艺的持续改进路径

环保化工工艺体系的优化升级不属于单次完成的设计工作,而是贯穿生产装置全运行周期的持续性改良过程^[5]。生产运行数据的长期积累与深度分析,能够梳理实际生产运行状态与设计预期的偏差问题,为工艺体系的精细化调优提供改良方向。新型催化材料、高效分离技术的持续更新迭代,为传统化工工艺的绿色升级改造储备了充足的技术资源。数字化设计分析工具的深度应用,能够加快工艺优化方案的对比筛选效率,缩短工艺参数迭代寻优的周期,提升工艺改良的整体效率。工艺设计从业人员与环保工程从业人员的深度协作,能够搭建常态化的工艺优化工作机制,持续推动环保化工工艺体系的创新升级与完善。依托技术迭代与数据赋能的持续改良模式,可让化工工艺始终适配绿色生产标准,持续挖掘降耗减污的优化空间。

结束语

环保化工工艺设计优化是一项贯穿装置全生命周期的系统工程,绝非单次设计所能穷尽。从绿色催化体系的引入到过程强化技术的落地,从能量与水网络的集成到废弃物的闭环利用,每一环节均需在多目标间寻求动态平衡。工艺设计人员与环保工程人员的深度协作,辅以数字化工具的持续赋能,方能推动化工生产体系走向更高效、更清洁的运行状态,助力产业实现经济效益与生态效益的协同提升。

参考文献

- [1]王伟,李宾祥.化工污水处理中的新型脱氮工艺设计与应用[J].化纤与纺织技术,2025,54(5):58-60.
- [2]黄承龙.化工工艺设计节能环保与安全对策探讨[J].化工设计通讯,2024,50(2):125-127.
- [3]马吉.化工工艺设计中的典型安全问题与节能环保技术[J].化纤与纺织技术,2025,54(11):72-74.
- [4]黄昊.化工工艺设计安全与节能环保对策研究[J].化工设计通讯,2022,48(12):64-66.
- [5]鲜银铸.新时期化工工艺设计节能环保与安全措施研究[J].当代化工研究,2025(13):152-154.