

医药化工绿色合成工艺优化与全生命周期经济效益提升研究

冯亚楠 (信联电子材料科技股份有限公司, 河北 黄骅 061108)

摘要: 在“双碳”目标与绿色发展理念引领下, 医药化工行业面临传统合成工艺高污染、高能耗与全生命周期效益失衡的双重挑战。绿色合成工艺优化是破解此困境的核心路径, 但其与全生命周期经济效益的协同机制尚未完善。本文系统分析医药化工绿色合成工艺与全生命周期经济效益提升的现存困境, 从工艺优化、评估体系、技术创新、政策保障四个维度提出实践路径。

关键词: 医药化工; 绿色合成工艺; 全生命周期; 经济效益

中图分类号: TQ460.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0061-03

Research on Optimization of Green Synthesis Process in Pharmaceutical and Chemical Industry and Improvement of Economic Benefits throughout the Whole Life Cycle

Feng Yanan (Xinlian Electronic Materials Technology Co., Ltd., Huanghua Hebei 061108, China)

Abstract: Under the guidance of the “dual carbon” goal and the concept of green development, the pharmaceutical and chemical industry is facing the dual challenges of high pollution, high energy consumption, and imbalanced life cycle benefits from traditional synthesis processes. The optimization of green synthesis process is the core path to solve this dilemma, but its synergistic mechanism with the economic benefits of the entire life cycle is not yet perfect. This article systematically analyzes the existing difficulties in the green synthesis process of pharmaceutical and chemical industry and the improvement of economic benefits throughout the entire life cycle, and proposes practical paths from four dimensions: process optimization, evaluation system, technological innovation, and policy guarantee.

Keywords: pharmaceutical and chemical industry; Green synthesis process; Full lifecycle; economic benefits

1 核心概念

医药化工绿色合成工艺, 即在开展药物活性成分以及中间体的合成进程时, 运用无毒无害的原料、高效的催化剂、环境友好的溶剂, 通过对反应路径予以优化, 减少副产物以及污染物的生成, 达成“原子利用率最大化、环境污染最小化”的工艺模式。其核心技术涵盖酶催化合成、连续流反应、光催化合成等方面, 该工艺与传统工艺不同, 传统工艺存在依赖有毒溶剂、反应步骤繁杂的特性。

医药化工全生命周期产生的经济效益, 将医药化工产品从原料开采开始, 历经工艺生产、仓储运输、使用消费直至废弃物处置的整个流程作为研究对象, 对各个环节的成本投入以及价值产出进行综合核算。其核心内容包含生产成本、环境成本、资源成本以及收益水平等方面, 着重强调短期效益和长期效益、经济收益与生态价值的统一, 并非仅聚焦在生产环节获取的利润。

2 现存困境

2.1 绿色合成工艺应用浅层化, 成本控制不足

工艺改造仍局限于“末端治理”范畴, 部分企业

仅借助增添环保设备处理污染物, 并未从合成路径的起始端进行优化。例如, 依旧运用传统的硝化反应生产医药中间体, 虽然企业利用尾气处理设备减少污染物排放, 但该反应本身的原子利用率较低, 原料被大量浪费, 致使全生命周期内资源成本始终维持在较高水平^[1]。

绿色技术的成熟度与经济性呈现失衡状态, 如酶催化、连续流等具备显著环保优势的先进绿色技术, 其核心催化剂需要依赖进口, 且设备投资成本较高。例如, 连续流反应装置的投资额度为传统间歇反应装置的3-5倍, 同时该技术的操作复杂, 使得中小医药化工企业难以承受成本与难度, 造成绿色工艺的推广受到阻碍。

此外, 部分绿色工艺存在反应效率低下的问题, 比如在光催化合成某药物中间体时, 其反应周期长达传统工艺的2倍, 对生产效率以及所获得的收益产生不良影响。

2.2 全生命周期评估体系缺失, 效益核算片面

评估范畴存在局限性, 对隐性成本以及价值忽视。大多数企业仅核算生产环节中的直接成本, 如原料成

本、人工成本等,并未将全生命周期中的隐性成本纳入考虑范围内。例如,因原料开采而造成的生态破坏成本、废弃物长时间降解产生的环境成本,以及资源循环利用蕴含的潜在价值。此种不全面的核算使得企业对绿色工艺的经济效益做出错误判断,认为“绿色就意味着高成本”^[2]。

评估手段和衡量指标缺乏一致性,在该行业领域,尚未构建起标准化的全生命周期经济效益评估手段。众多企业倾向于运用自主设计的核算体系,侧重的衡量指标多聚焦在经济收益层面,例如产值、利润等,却对环境效益转化而来的经济价值忽视,如碳减排带来的收益、废物回收产生的收益等。

2.3 技术创新与转化滞后,支撑能力薄弱

核心技术面临瓶颈情况,如高效生物催化剂制备、环境友好溶剂研发等绿色合成工艺的关键技术,依旧对国外存在依赖。国内自行开展研发技术大多还处于实验室阶段,比如新型酶催化剂,其催化活性仅达到国际先进水平的60%,并且稳定性欠佳,难以符合工业化生产的要求。连续流反应的过程控制技术尚未成熟完善,容易出现反应参数的波动现象,造成产品质量处于不稳定的状态^[3]。

产学研转化机制存在不通畅的情况,高校以及科研机构在绿色技术研发方面,较多将关注重点放在理论突破上,却忽略企业在实际生产过程中的具体需求。例如,研发的光催化合成技术,并未对工业化生产中的放大效应予以考虑,造成在进行技术转化时面临产能较低、成本较高的难题。企业与科研机构间的合作缺少长效机制,技术对接并不顺畅,研发成果难以迅速落地并转化为实际的生产力。

2.4 政策与市场激励不足,转型动力匮乏

政策扶持呈现出“着重约束而轻视激励”的态势,环保相关政策大多以罚款、限产等约束性举措作为主要手段,如绿色技术补贴、税收减免等激励性政策的实施力度不够充分,并且申请流程繁杂琐碎、覆盖范围较为狭窄,难以切实削减企业开展绿色转型成本。碳交易市场在医药化工行业的覆盖程度并不完善,企业通过碳减排获取的收益难以得到切实兑现,削弱企业进行绿色转型的动力^[4]。

市场所起到的导向作用并不显著,消费者对于“绿色药品”的了解程度较低,市场尚未构建起清晰明确的绿色产品溢价机制,运用绿色工艺的企业难以在产品价格方面获取优势,造成“环保投入量大、收益却未提升”的失衡情况。行业内部缺少绿色信用评价体系,企业绿色转型成果并未与融资、招投标等事项相互关联,市场的激励功效难以得到有效发挥。

3 实践路径

3.1 深化绿色合成工艺优化,实现成本与环保双赢

从起始处对合成路径予以优化,将“原子经济性”作为核心要素对反应体系进行重新构建,运用合成方式替换多步合成,减少副产物的产生。例如,将抗生素合成原本的三步反应优化成一步酶催化反应,原子的利用效率从百分之四十提高到百分之九十,原料的消耗降低百分之五十。积极推广运用可再生的原料,如生物质基原料来替代石油基原料,以此降低对不可再生资源的依赖程度,与此同时减少碳的排放。

积极推广具备高效特性的绿色技术以及相关设备,按照不同阶段逐步推动连续流反应、微通道反应等技术在工业化领域的实际运用,为中小微企业量身打造“小型化且低成本”的设备解决方案,以此降低投资门槛。着力开发价格低廉的绿色催化剂,例如借助工业废渣制备催化剂,削减催化剂的成本;运用离子液体、超临界流体等对环境较为友好的溶剂替换传统的有毒溶剂,减少污染治理所需的成本。搭建工艺参数的优化模型,借助大数据分析的手段对反应温度、压力等参数予以调整,提高反应的效率以及产品的收率^[5]。

搭建资源循环运用体系,针对合成过程中的副产物、废弃物开展资源化处置。例如,将反应产生的副产物转变为医药中间体或者化工原料,将经过处理的废水运用到生产循环水中,达成“化废为宝”的目标。构建企业间的资源协同循环模式,比如让医药化工企业的废弃物成为其他企业的生产原料,构建起产业生态链条,削减全生命周期的资源耗费。

3.2 构建全生命周期评估体系,精准核算经济效益

对评估范围以及核心指标予以明确,使评估范围涵盖“原料开采、仓储运输、生产制造、使用回收、废弃物处置”完整流程,搭建起“经济成本、环境成本、收益水平、资源价值”的四维指标体系。其中,经济成本包含原料采购费用、设备投资资金、人工成本等;环境成本涉及污染治理花费、生态修复的支出、碳减排的成本;资源价值包含资源循环利用的收益、节能收益;收益水平涵盖产品销售所得、政策补贴款项等。

构建标准化的评估手段以及数据平台,由行业协会作为主导,拟定《医药化工全生命周期经济效益评估标准》,使评估流程与核算办法达成统一。搭建具备行业层面的全生命周期数据共享平台,将原料供应商、生产企业、物流企业等各个环节的数据进行整合,达成数据的实时收集以及精确核算。引入生命周期评估软件,增强评估的科学性与效能,为企业给予数据支撑与决策的参考。

促使环境效益像经济收益方向转变,将碳减排量、

污染物削减量等环境效益以量化的方式转化为经济价值，并纳入全生命周期的经济效益核算中。通过利用碳交易市场，将企业在碳减排方面获得的收益纳入利润的核算体系；构建绿色产品认证的体系，推动“绿色药品”产生市场溢价，使企业在环保投入可以转化为实实在在的收益。

3.3 强化技术创新与转化，提升核心支撑能力

打破核心技术瓶颈，大幅增加针对绿色合成关键技术开展研发的投入，将关注点集中在高效催化剂、环境友好型溶剂、过程控制技术等相关领域，构建产学研相结合的联合攻关团队。例如，开展对具备高活性以及高稳定性特点的生物催化剂的研发工作，提高催化的效率并且延长其使用的寿命；研制连续流反应的精确控制技术，确保产品的质量可以保持稳定。激励企业积极参与国家重点研发计划，努力争取政策以及资金支持，加速技术的突破。促使产学研协同转化机制更为完备，构建“企业抛出问题、高校解答问题、市场检验问题”的合作范式。企业依照生产需求抛出技术难题，高校与科研机构有针对性开展研发工作，研发成果由企业承担工业化转化以及市场推广的任务。设立用在产学研合作的专门资金，将其运用于技术中试、成果转化等环节，以降低转化过程中的风险。搭建技术转化服务平台，提供技术评估、专利转化、人才对接等服务，加快研发成果实现落地。

强化人才队伍的构建工作，高校开设如医药化工绿色合成、全生命周期评估等相关专业，培育具备化学工程知识以及环境经济知识的综合型人才。企业与高校展开校企合作，借助实习基地搭建、订单式人才培养等途径，增强学生的实际操作能力。开展针对在职人员的培训活动，邀约行业内的专家讲解绿色技术以及评估方法，提高现有技术人员的专业素养。

3.4 完善政策与市场激励，增强转型动力

对政策支持体系予以优化，强化激励性政策的力度，拓宽绿色技术补贴、税收减免的覆盖范畴，将申请流程予以简化。针对采用绿色合成工艺的企业，给予设备投资补贴以及增值税减免。使碳交易市场更为完善，将医药化工行业全部纳入其中，对碳配额分配标准进行细化，让碳减排收益兑现的渠道保持畅通。构建绿色信贷与绿色债券机制，降低企业在进行绿色转型时的融资成本。

加强市场导向的功能，营造“绿色药品”的消费市场环境，借助科普宣传推广，提高消费者对于绿色产品的了解程度。促使医疗机构以及药店优先采购经过绿色认证的药品。构建医药化工企业的绿色信用评估体系，将评估的最终结果与融资活动、招投标项目、

政府采购事宜等相互关联起来，使得实施绿色转型的企业可以获取市场竞争中的有利地位。组织开展“绿色标杆企业”的评选活动，发挥其示范引领的效用，带动整个行业实现转型。

3.5 构建保障机制，确保路径落地

构建行业监管与自律的相关机制，行业协会拟定绿色发展公约，以此规范企业的生产活动；环保部门强化对医药化工企业的常规化监管工作，运用在线监测的技术手段对污染物排放情况予以实时监测，针对违法进行排污的企业提升处罚的强度，以此确保绿色工艺可以得到有效的施行。

强化国际间的合作与交流，引入国际上处于前沿水平的绿色合成技术以及涵盖全生命周期的管理经验，与国外的企业、科研机构展开技术合作以及联合进行研发工作。积极参与国际绿色医药相关标准的制定工作，以此提升我国医药化工企业在国际领域的话语权，为产品成功进军国际市场提供助力。

4 结语

医药化工领域中，绿色合成工艺的优化以及全生命周期经济效益的提升，二者协同达成的发展态势是该行业达成绿色转型以及实现高质量发展的必要途径。当下，存在绿色工艺运用程度不够深入、评估体系缺失、技术转化进度滞后、激励措施不够充分等情况。针对上述问题，可以借助工艺的优化、评估体系的构建、技术的创新、政策激励以及保障机制的完善等办法进行解决。此种协同发展的模式，不仅可以削减企业在环境成本，提高经济效益，而且可以增强企业在市场中的竞争能力，推动整个产业的升级。

参考文献：

- [1] 谢晓灵. 生物医药化工废弃物资源化利用技术探索与实践 [J]. 广东化工, 2024, 51(24): 100-102.
- [2] 赵梦飞, 张许文琦, 郭华, 仇珍珍, 杨悦. 医药化工园区环保数字化体系构建——以浙江某典型园区为例 [J]. 广东化工, 2024, 51(23): 108-110.
- [3] 章柳超, 李玉章. 医药化工企业安全管理问题及对策研究 [J]. 现代职业安全, 2024, (12): 50-53.
- [4] 徐超, 陈咏梅. 基于“双碳”背景下医药化工绿色技能人才培养的策略研究 [J]. 塑料工业, 2024, 52(11): 168+170.
- [5] 尹健, 张治国, 吉远辉, 薛亚平, 傅俊杰, 王雪, 董亮亮, 张国俊, 陈坚, 郑裕国. 医药化工领域研究现状和发展态势 [J]. 中国科学基金, 2023, 37(01): 120-125.

作者简介：

冯亚楠，女，汉族，河北沧州人，本科，工程师，研究方向：化工与制药工程。