

# 低碳目标下精细化工行业节能与碳减排协同路径研究

祖海利

宁夏宝丰能源集团股份有限公司 宁夏回族自治区 750200

**摘要:** 在低碳目标下,精细化工行业节能与碳减排协同路径研究聚焦工艺革新、能源替代、数字化管理及产业链协同。通过连续流工艺、密闭式设计等提升能效,采用生物质原料与工业副产气体替代化石原料,引入AI算法实现碳排放智能监控,同时构建贯穿产业链的碳足迹管理平台。研究强调政策引导、技术标准统一及跨行业协同,形成“工艺优化—能源转型—数字赋能—全链协同”的低碳发展范式。

**关键词:** 低碳目标;精细化工行业;节能;碳减排;协同路径

**引言:** 在全球碳中和浪潮与我国“双碳”目标约束下,精细化工行业作为能源密集型产业,其高能耗、高排放特性与低碳发展要求矛盾凸显。当前行业面临工艺路线冗长、能源结构单一、碳管理粗放等瓶颈,传统节能或减排手段难以实现系统性降碳。本研究以协同增效为导向,聚焦技术升级、管理优化与产业链整合,探索节能与碳减排的耦合路径,为行业低碳转型提供科学依据与可行方案。

## 1 理论基础与文献综述

### 1.1 核心概念界定

(1) 精细化工行业范围: 涵盖专用化学品(如催化剂、食品添加剂)、涂料(建筑涂料、工业涂料)、染料(活性染料、分散染料)、胶粘剂、化妆品及日用化学品等子行业,产品具有技术密集、附加值高、应用场景细分的特点,生产流程涉及多步反应,能源消耗与碳排放环节复杂。(2) 节能与碳减排的协同内涵: 包括技术协同(如节能设备与碳捕集技术联用)、管理协同(通过生产流程优化同步降低能耗与碳排放)、政策协同(节能补贴与碳配额政策联动),核心是实现节能与碳减排目标的相互促进、成本共摊。

### 1.2 理论支撑

(1) 能源梯级利用理论: 基于能量品质差异,将高品位能源用于高需求环节,低品位余热回收用于供暖、预热等,减少能源浪费,为精细化工多温区生产提供节能路径。(2) 碳足迹核算与全生命周期管理理论: 从原料开采、生产、运输到废弃全流程核算碳排放,识别关键减排节点,指导行业精准控碳。(3) 产业生态学与循环经济理论: 通过物料循环(如副产品回收再利用)、能源循环(如余热发电),构建“资源-产品-再生资源”体系,降低行业碳足迹。

### 1.3 国内外研究现状

(1) 国外精细化工低碳技术进展: 聚焦绿色化学(如无溶剂合成工艺)、生物基原料替代(如植物油脂制备表面活性剂),部分技术已实现工业化应用,减排效率达30%以上。(2) 国内行业节能减排政策与典型实践: 出台《“十四五”原材料工业发展规划》等政策,推动企业开展余热回收、光伏供电等改造,长三角地区部分企业单位产值碳排放下降20%。(3) 现有研究的不足: 多单独研究节能或碳减排技术,缺乏协同路径量化分析;对中小精细化工企业协同方案关注不足,难以指导行业整体减排。

## 2 精细化工行业碳排放与能源消耗特征分析

### 2.1 行业现状与碳排放结构

(1) 全球及中国精细化工行业规模与碳排放占比: 2024年全球精细化工市场规模超2.8万亿美元,中国占比达35%,成为全球最大生产基地。从碳排放看,全球化工行业碳排放占工业领域总排放的14%,其中精细化工占化工行业碳排放的22%;中国精细化工行业年碳排放超3.2亿吨,占全国工业碳排放的4.1%,且随产能扩张,年均碳排放增速达2.3%,高于化工行业整体增速。(2) 子行业碳排放强度差异: 不同子行业因工艺、原料差异,碳排放强度差距显著。农药行业因合成过程需多步高温反应,单位产值碳排放达8.6吨/万元;涂料行业受溶剂挥发与烘烤工艺影响,碳排放强度为5.2吨/万元;助剂行业生产流程相对简化,且部分采用生物基原料,碳排放强度较低,约2.1吨/万元,三者碳排放强度差值最高达6.5吨/万元。

### 2.2 能源消耗关键环节识别

(1) 原料生产: 精细化工原料80%以上源于石油、天然气等化石资源,原料生产阶段能源消耗占行业总能耗的38%。例如,苯、甲醇等基础化工原料制备需大量化石燃料裂解,每吨原料平均消耗标准煤1.2吨,化石燃料依赖度高导致源头碳排放难降低。(2) 反应过程: 聚合、

硝化等核心反应多需高温高压条件,如聚氨酯合成反应温度需控制在180–220℃,压力达1.5–3MPa,该环节能耗占总能耗的32%,且能源利用效率仅35%–45%,大量能量以余热形式浪费<sup>[1]</sup>。(3)分离提纯:蒸馏、结晶等分离工艺需持续加热或制冷,其中蒸馏单元能耗占分离环节总能耗的65%,例如溶剂回收蒸馏过程每吨产品需消耗标准煤0.8吨,且部分企业仍采用传统间歇式分离设备,能耗较连续化设备高20%–30%。

### 2.3 碳减排瓶颈分析

(1)技术层面:行业内40%以上中小企业仍采用20世纪末的传统工艺,如间歇式反应釜,能耗较先进连续工艺高40%;清洁能源替代率不足15%,光伏、风电等可再生能源仅用于辅助供电,核心生产环节仍依赖燃煤、燃气,清洁能源替代技术成熟度低。(2)管理层面:70%中小精细化工企业未建立完整的碳核算体系,仅统计生产环节碳排放,忽视原料采购、产品运输等间接排放;行业缺乏统一的能效对标标准,企业难以精准定位能耗短板,部分企业能效管理仍停留在人工记录层面,数据准确性差。(3)政策层面:当前全国碳市场仅覆盖发电、钢铁等行业,精细化工尚未纳入,企业碳减排缺乏市场驱动;绿色金融支持有限,针对精细化工节能改造的专项贷款占比不足5%,且融资利率较普通贷款高1.2–1.5个百分点,企业减排技改资金压力大。

## 3 低碳目标下精细化工行业节能与碳减排协同路径

### 3.1 技术协同路径

(1)工艺优化:催化技术升级可大幅降低反应能耗与碳排放,例如酶催化替代传统化学催化,在医药中间体合成中反应温度从150℃降至50℃,能耗减少40%,且无有害副产物;离子液体催化应用于染料合成,溶剂回收率提升至95%以上,减少挥发性有机物排放的同时降低原料损耗。微反应器凭借高效传质传热特性,在硝化、磺化等危险反应中,反应时间从数小时缩短至分钟级,单位产品能耗下降35%,且可实现连续化生产,避免间歇式生产的能源浪费<sup>[2]</sup>。(2)能源替代:绿电替代方面,通过建设分布式光伏电站或外购风电、光伏电力,满足精细化工企业生产用电需求,某涂料企业接入100%绿电后,年碳排放量减少2.3万吨。氢能耦合工艺适用于高温反应环节,如氢能替代天然气用于聚氨酯固化剂生产加热,碳排放降低90%以上,同时氢能燃烧产物为水,无污染物排放。余热回收系统可针对反应釜、蒸馏塔等设备产生的中低温余热,通过热泵技术提升品位后用于原料预热、车间供暖,某农药企业安装余热回收系统后,年节约标准煤8000吨,对应减排二氧化碳2万吨。(3)数字化赋能:

AI优化生产调度可基于实时能耗、碳排放数据动态调整生产参数,某助剂企业应用AI调度系统后,生产负荷波动减少15%,能源利用效率提升8%。数字孪生技术通过构建工厂虚拟模型,模拟不同工况下的能效与碳排放情况,提前识别节能潜力,某精细化工园区借助数字孪生模拟,优化蒸汽管网布局,蒸汽损耗率降低20%,年减排二氧化碳1.2万吨。

### 3.2 管理协同路径

(1)建立全生命周期碳足迹核算体系:运用生命周期评价(LCA)方法,覆盖精细化工产品从原料开采、生产、运输、使用到废弃的全流程,量化各环节碳排放。例如在涂料产品核算中,不仅统计生产环节碳排放,还纳入树脂原料种植、溶剂运输等间接排放,明确关键减排节点。通过LCA核算,企业可针对性制定减排方案,某胶粘剂企业通过LCA分析发现原料运输碳排放占比达18%,随后优化运输路线并采用新能源物流车,该环节碳排放降低30%。(2)推行能效对标与碳交易机制:企业以行业先进水平为基准开展能效对标,通过设备更新、工艺改进缩小与标杆企业的差距,例如某染料企业对标行业龙头,将反应釜加热效率从60%提升至85%,单位产品能耗降至行业先进水平。积极参与全国碳市场,通过碳交易倒逼企业减排,未来精细化工行业纳入全国碳市场后,企业可将节能改造产生的碳配额盈余出售,获取收益反哺减排技改,形成“减排–收益–再减排”的良性循环<sup>[3]</sup>。(3)构建绿色供应链管理体系:建立供应商碳绩效评价,从原料碳排放强度、生产能耗水平、环保认证等维度筛选绿色供应商,推动供应链整体减排。例如某精细化工企业要求原料供应商提供碳足迹报告,优先采购生物基原料,使上游原料环节碳排放降低25%;同时与供应商共享节能技术,协助其进行设备改造,实现供应链上下游协同减排。

### 3.3 政策协同路径

(1)碳税与补贴政策组合设计:针对精细化工行业,实施差异化碳税政策,对单位产值碳排放量超基准值的企业征收高额碳税,倒逼高碳企业减排;同时加大节能技术研发补贴力度,对酶催化、氢能耦合等前沿技术研发项目,给予研发费用50%的补贴,加速技术产业化落地。对高碳产品如传统溶剂型涂料、高能耗农药产品征收消费税,而对水性涂料、生物农药等低碳产品免征消费税,引导市场消费方向,推动行业产品结构升级。(2)行业标准制定:制定细分领域单位产品能耗限额标准,例如规定农药行业杀虫剂单位产品能耗不超过80千克标准煤/吨,涂料行业建筑涂料单位产品能耗不超过50千克

标准煤/吨,对超限额企业实施限产、停产处罚。明确各子行业碳强度基准值,如染料行业碳强度基准值设定为4.5吨二氧化碳/万元产值,作为碳税征收、碳市场配额分配的依据,规范企业减排行为<sup>[4]</sup>。(3)区域协同减排机制:在精细化工产业集聚区域,建设循环经济试点园区,推动企业间物料、能源循环利用。例如园区内某石化企业将副产物氢气供给精细化工企业作为燃料,某染料企业将废水处理产生的沼气用于发电,为园区内企业提供部分电力,实现资源梯级利用。同时建立区域碳排放监测平台,统一核算园区总碳排放,制定区域减排目标,通过企业间减排任务分配,实现区域整体减排。

#### 4 精细化工行业节能与碳减排协同发展的挑战与对策建议

##### 4.1 主要挑战

(1)技术层面:部分清洁技术成熟度低、成本高昂。如氢能耦合精细化工工艺,虽碳排放降低显著,但氢能储运技术尚未完全成熟,且设备改造单套成本超千万元,中小化工企业难以承担;酶催化技术在复杂化合物合成中转化率仅60%-70%,与工业化要求的90%以上存在差距,技术稳定性不足制约大规模应用。(2)市场层面:绿色产品溢价能力不足、消费者认知有限。生物基涂料等绿色产品生产成本比传统产品高15%-20%,但市场售价仅高5%-8%,企业利润空间被压缩;消费者对绿色精细化工产品的低碳属性认知不足,选购时更关注价格而非环保性能,导致绿色产品市场渗透率不足10%。(3)政策层面:跨部门协调机制缺失、碳数据真实性风险。行业监管涉及环保、工信、税务等多部门,政策执行标准不统一,如节能补贴申请需多部门审批,流程耗时超3个月;企业碳核算多依赖自主申报,部分企业存在数据造假、漏报问题,碳数据核查缺乏统一监管平台,真实性难以保障。

##### 4.2 对策建议

(1)加大研发投入:设立行业低碳技术联盟,整合高校、科研机构与龙头企业资源,聚焦氢能储运、酶催

化等关键技术攻关,联盟内企业共同分摊研发成本,降低单个企业负担;政府给予联盟研发专项补贴,对技术突破项目额外奖励,加速技术成熟与成本下降,目标3年内将清洁技术应用成本降低30%。(2)完善碳市场机制:扩大全国碳市场覆盖范围,将农药、涂料等重点子行业纳入,通过市场交易倒逼企业减排;引入碳期货、碳期权等碳金融工具,为企业提供碳资产风险管理渠道,同时设立绿色信贷专项,对低碳产品生产企业给予利率优惠,提升绿色产品市场竞争力<sup>[5]</sup>。(3)强化国际合作:与欧盟、日本等精细化工低碳技术领先地区建立合作机制,引进生物基原料制备、高效催化等先进技术,缩短技术研发周期;积极参与全球碳规则制定,推动中国精细化工行业碳核算标准与国际接轨,助力企业规避国际贸易碳壁垒,提升国际市场话语权。

##### 结束语

低碳目标下,精细化工行业节能与碳减排协同发展是实现绿色转型的必由之路。本研究通过剖析行业现状,提出技术革新、管理优化及产业链协同等路径,为行业低碳实践提供了理论支撑与实操方案。未来,需进一步强化政策引导、深化跨领域合作,推动创新技术成果转化应用。唯有如此,方能实现经济效益与生态效益的统一,助力行业在全球低碳竞争中占据先机,迈向可持续发展新征程。

##### 参考文献

- [1]陈庭强,何雯,刘梦,等.碳中和背景下绿色化工的技术创新路径研究[J].生态经济,2023,39(12):72-78.
- [2]匡绪辉,冷成英.长江经济带绿色技术创新的碳减排作用:效应与机制[J].江汉论坛,2024(11):19-22.
- [3]李华,王健.化工行业低碳减排技术应用现状与发展趋势[J].化工进展,2021,40(11):87-88.
- [4]赵硕婧,刘媛媛.“双碳”目标下化工企业环境成本控制[J].中国乡镇企业会计,2025,(01):60-62.
- [5]赵丽娜.“双碳”背景下化工企业节能减排策略研究[J].塑料工业,2024,52(06):189-190.