

# 气相聚乙烯工艺清洁生产与经济可持续发展路径分析

张怀志 (中国石化天然气集团有限公司广西石化分公司, 广西 钦州 535000)

**摘要:** 气相聚乙烯工艺的清洁生产与可持续发展, 核心依托催化剂改良与工艺系统优化实现全流程资源利用效率的提升, 同时借助智能化生产管控技术, 从源头实现污染物的减量与排放的精准控制。想要达成经济效益与环境效益的协同共生, 需统筹推进生产技术的创新迭代、全产业链绿色供应链的体系化构建, 同时将政策科学引导与市场化激励手段有机结合, 通过多方协同发力, 推动行业逐步摆脱传统发展模式, 为聚烯烃产业的绿色高质量发展夯实核心基础。

**关键词:** 气相聚乙烯工艺; 清洁生产; 经济可持续发展

中图分类号: TQ325.12; X383

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 009-0073-03

## Analysis of Cleaner Production and Economic Sustainable Development Path of Vapor Phase Polyethylene Process

Zhang Huaizhi (PetroChina Guangxi Petrochemical Branch, Qinzhou Guangxi 535000, China)

**Abstract:** The cleaner production and sustainable development of gas-phase polyethylene process depend on catalyst improvement and process system optimization to improve the utilization efficiency of resources in the whole process, and at the same time, with the help of intelligent production management and control technology, the precise control of pollutant reduction and emission can be realized from the source. In order to achieve the synergistic symbiosis of economic benefits and environmental benefits, it is necessary to promote the innovation iteration of production technology and the systematic construction of green supply chain in the whole industry chain. At the same time, it is necessary to organically combine policy scientific guidance with market-oriented incentives, and push the industry to gradually get rid of the traditional development model through concerted efforts, laying a solid core foundation for the green and high-quality development of polyolefin industry.

**Key words:** gas phase polyethylene process; Cleaner production; Economic sustainable development

伴随环保法规日趋严格与资源约束持续加剧, 传统聚烯烃生产行业正面临迫切的绿色转型诉求。气相聚乙烯作为聚烯烃生产的主流工艺, 其清洁化升级与可持续发展能力, 不仅直接关乎企业核心竞争力的构建, 更是推动整个聚烯烃产业实现绿色转型的必由之路<sup>[1]</sup>。因此, 深入探讨该工艺清洁生产的可行路径, 具有重要的行业现实意义。

### 1 清洁生产在气相聚乙烯工艺中的体现

#### 1.1 原料利用效率的提升

原料利用效率的提升, 是气相聚乙烯工艺践行清洁生产的核心抓手。工业生产中, 高活性、高选择性新型催化剂体系的应用已成为主流, 这类催化剂不仅能显著提高乙烯单程转化率, 还可精准调控聚合物分子结构, 从源头削减原料单体的循环量与损耗率。借助先进过程控制技术, 反应器内温度、压力及气相组成得以精准调控, 最大程度抑制低聚物等副产物生成, 保障原料向目标产品高效转化。原料进料系统配套高精度计量仪表与实时监控平台, 实现乙烯、共聚单体及各类助剂的精细化按需配送, 有效规避因投加过量或配比失衡造成的物料浪费。

#### 1.2 废气、废渣的减量化措施

针对生产过程中产生的废气与废渣, 气相聚乙烯

工艺构建了源头削减与过程管控并重的治理体系。废气治理方面, 工艺自带密闭循环系统, 反应后未聚合的乙烯、丙烯等单体组分, 经深冷回收与膜分离组合技术高效捕集提纯, 直接回送反应系统复用, 大幅降低挥发性有机物直接排放量。对于无法回收需排放的尾气, 再通过催化氧化或吸附浓缩等末端处理装置完成净化。固废减量的核心聚焦废催化剂处置: 通过优化催化剂配方提升其机械强度与抗毒性, 延长服役周期; 针对失活催化剂, 优先通过专业再生技术恢复部分活性, 难以再生的则采用惰性化封装安全处置, 同时探索其中金属成分的资源化回收路径, 实现废渣减量化与无害化双重目标<sup>[2]</sup>。

#### 1.3 能源回收与循环利用实践

能源梯级回收与循环利用, 是该工艺实现节能降耗的核心路径。气相聚乙烯聚合反应伴随大量放热, 通过优化反应器撤热系统设计、配备高效换热设备, 这些反应余热被充分回收, 用于预热入塔原料气, 或转化为中低压蒸汽供给装置内其他工序, 显著降低对外部热源的依赖。公用工程系统中, 循环水系统完成智能化升级, 依据实际热负荷动态调整循环水量与水温, 搭配高频旁滤等水质稳定技术, 大幅提升水的循环利用率。与此同时, 对蒸汽管网凝结水实施密闭式

全量回收，经处理后用作锅炉补水或工艺用水，既减少新鲜水消耗，又降低废水排放，构建起能源与资源协同节约的内部循环体系。

## 2 当前清洁生产实施中存在的问题

### 2.1 技术更新与设备改造的滞后

技术更新与设备改造滞后，是制约行业清洁生产水平迭代升级的首要瓶颈。现有不少生产装置建成年代久远，核心反应与分离工艺均基于当时的技术条件及排放标准设计，先天存在能耗偏高、物耗偏大的短板。尽管行业内已涌现出高活性催化剂体系、高效分离技术及智能过程控制方案等先进成果，但将这些新技术落地工业化，往往需对现有装置进行大规模改造甚至整体重建。此举不仅需要巨额资本投入，还需面临漫长的停产改造周期与复杂的技术适配风险，使得企业在决策时顾虑重重、极为审慎。尤其在市场竞争加剧、经济效益波动的背景下，企业更倾向于维持现有设备稳定运行，进而推迟或缩减清洁生产重大技改项目，导致行业整体能效与环保指标同国际先进水平存在明显差距。

### 2.2 清洁生产管理机制不健全

清洁生产管理机制的不完善，使得诸多先进技术与措施难以落地生根、长效发力。多数企业尚未构建起覆盖项目规划、生产运营、设备维护至绩效评估全流程的系统化清洁生产管理制度，环境管理常独立于核心生产管理体系之外，形成生产部门侧重产量与质量、环保部门专注末端治理的割裂格局。缺乏量化的清洁生产指标体系，且该体系未与生产班组及个人绩效考核深度绑定，导致节能降耗减排要求难以转化为一线员工的日常操作准则<sup>[3]</sup>。此外，清洁生产审核多流于形式，未能形成“识别问题—实施方案—评估效果—持续改进”的闭环管理模式，不仅错失诸多优化机会，已实施措施的成效也无法得到有效跟踪与巩固。

### 2.3 人员环保意识与操作规范不足

工作人员环保意识薄弱、操作规范落实不到位，是拖了清洁生产实际效果后腿的根本问题。不少一线操作工和管理人员对清洁生产的理解，还停留在事后治理的层面，没能真正明白它在源头预防、过程管控以及提高资源利用率上的核心意义。实际操作时，不少人习惯凭经验调工艺参数，巡检和维护的规矩也没严格遵守，这很容易让反应条件偏离最佳状态，还可能出现物料轻微泄漏、设备运转效率下降的情况，时间一长，就会造成明显的资源浪费，污染物排放量也会随之增加。

与此同时，针对清洁生产的专项培训既没体系、不够深入，也做不到常态化，员工想掌握新技能、新

规范，都找不到靠谱的渠道。这种意识和技能的双重欠缺，就算引进了先进设备和工艺，也没法充分发挥它们的作用，甚至可能因为操作不当，引发新的能耗问题和环境隐患。

## 3 推动经济可持续发展的关键路径

### 3.1 优化工艺设计，降低单位产品资源消耗

优化工艺设计，是气相聚乙烯行业兼顾经济效益和环境可持续性的核心技术手段。要降低单位产品的资源消耗，核心就是要对工艺流程进行深度革新，做好全系统的整合优化。在基础设计环节，要重点研发并推广新一代低能耗聚合技术，打造能在更温和工况下保持高活性、高选择性的催化剂体系，这样既能大幅减少反应所需的能量投入，又能同步提高产品纯度。同时，把基于模型的模拟优化技术，适配用到大型装置全流程中，通过协同分析、调控反应、分离、循环及能量系统，从整体层面挖掘节能潜力，削减无效功和物料损耗。

过程强化上，可尝试引入微型化反应器与高效分离设备，借着传递效率的提升缩小设备体量、缩短物料停留时间，降低存量物料占用和能量需求。此外，设备健康管理和预测性维护也不能少，针对压缩机、大型泵群等关键动设备，实时监控能效并及时运维，确保设备长期稳定在高效运行区间，避免因性能衰减引发隐性的能耗增加。这种从微观反应机理到宏观系统布局的综合设计优化，能在提升产品质量与生产效率的同时，稳步降低新鲜原料、水资源及能源单耗，把环境效益转化为核心成本竞争优势，筑牢可持续发展的技术根基<sup>[4]</sup>。

### 3.2 强化绿色供应链协同管理

强化绿色供应链协同管理，是将清洁生产理念从单一生产厂区延伸至全产业链的关键抓手。经济可持续发展的内在要求，推动企业突破自身经营边界，与上下游伙伴构建以资源效率最大化为核心、环境影响最小化为导向的战略协作关系。上游端，企业需建立严苛的原材料绿色采购标准，优先选用环保达标、碳足迹低的单体、催化剂及化学品供应商，通过长期合作协议绑定与技术赋能，推动供应商同步开展环保升级改造。

生产环节内部，需实现物料与能源流的精细化、信息化管控，为产业链协同提供精准的数据支撑。下游端，应与客户、物流服务商及废弃物处理机构深度联动，重点搭建产品全生命周期绿色管理体系：设计易回收利用的产品牌号，协助客户优化加工工艺以降低能耗，构建高效低碳的产品运输分销网络，联合探索消费后废塑料的化学与物理回收路径，推动废弃物

回返生产环节再利用,逐步向循环经济模式转型。这种全链条协同管控模式,能系统性降低价值链整体成本与环境负荷,增强产业链绿色韧性与核心竞争力。

### 3.3 推进政策引导与企业内生动力结合

推动政策引导与企业内生动力深度融合,是保障可持续发展路径落地见效的制度与机制支撑。政府政策引导承担着关键的方向引领与初期驱动职能:一方面制定并动态升级行业能效、水耗及污染物排放的标杆限值标准,明确法规约束与发展预期;另一方面通过设立绿色技术研发与产业化专项基金、给予清洁生产技改投资税收抵免、实施差别化环境税征收等经济激励手段,直接降低企业绿色转型的成本与风险,同时完善绿色金融体系,引导资本市场向合规可持续项目倾斜,提供优惠融资支持。而行业长期可持续发展,根本上依赖企业内生动力的充分激发。

企业需从战略高度认知到,绿色发展不仅是合规底线,更是构筑长期竞争力、挖掘市场新机遇、吸引责任投资的核心抓手。为此,需将绿色发展战略深度融入企业愿景与商业规划,建立健全内部资源环境成本核算体系,把环境绩效明确纳入各部门及管理层的考核激励机制,让清洁生产与资源节约内化为全体员工的自觉行动<sup>[5]</sup>。

## 4 典型改进措施与可行建议

### 4.1 引入智能化监控系统提升运行效率

引入智能化监控系统,是气相聚乙烯工艺实现精细化管控、推动效率跃升的核心技术支撑。通过在生产装置全域部署高精度传感器与物联网终端设备,可实现对反应温度、压力、物料组分、设备振动及能耗等关键参数的实时采集与全域覆盖。另外,设备健康管理和预测性维护也不能忽视。针对压缩机、大型泵群这些关键动设备,要实时监控能效、及时开展运维,确保设备长期稳定在高效运行状态,避免因性能衰减导致隐性能耗上升。把这些数据上传到统一的大数据平台后,结合先进的过程机理模型和机器学习算法,就能搭建出全流程的智能化数字孪生体。这个数字孪生系统不光能实现工艺运行状态的实时可视化监控和智能预警,还能靠着模型预测和优化算法,动态推送最优的工艺参数组合,不断优化反应条件和分离效果。依托这套闭环优化与智能决策体系,能深度挖掘节能降耗的潜力,降低物耗能耗指标,显著提高装置运行效率和经济收益。

### 4.2 加强员工培训与清洁生产文化建设

抓好员工培训、培育清洁生产文化,是让绿色理念真正落地、变成全员自觉行动的基础保障。企业要搭建起分层分类的全员清洁生产培训机制,内容既要

涵盖清洁生产核心理念、工艺环保原理、设备节能操作规范,也要包括异常工况下环境风险的识别与处置方法。培训形式不能局限于单一的课堂讲授,要结合现场实操演练、仿真模拟操作和典型案例分析,让不同岗位的员工都能清楚知道,自己的操作和资源消耗、环境保护之间的密切关联。更关键的是,要把清洁生产要求融入企业管理制度和企业文化之中,设定明确的节能环保绩效指标,将其和部门、个人绩效考核、评优评先、薪酬分配直接挂钩起来,建立起既有正向激励、又有反向约束的完整机制。

### 4.3 探索副产物高值化利用新方向

探索副产物高值化利用路径,是拓展循环经济边界、挖掘潜在价值增长点的重要抓手。气相聚乙烯生产过程中副产物种类繁多,需突破传统简单处置、低价值回收的局限,聚焦精细分离与资源化高值利用开展技术攻关。针对反应系统生成的低聚物、蜡状物等重组分,可研发其作为特种蜡、高性能润滑剂基础油或聚合物加工助剂的提纯改性工艺,提升产品附加值。对于废气处理单元回收的轻烃组分,除常规返回反应系统复用外,可评估其作为优质化工原料的应用潜力,例如通过精制分离用于合成其他高附加值化学品。这些高值化利用路径的落地,不仅能大幅减少固体废物、危险废物的处置量与处置成本,更能实现“变废为宝”的价值跃升,培育新的利润增长点,提升企业资源生产率与综合经济效益,是清洁生产与经济效益深度融合的高级形态。

## 5 结语

推动气相聚乙烯工艺的绿色变革,绝非单一维度的技术升级,而是一项需依托技术持续迭代、管理全面革新与政策长期引导的系统性工程。唯有将环境效益深度内化为企业经济增长的内生动力,实现技术突破、管理优化与政策支撑的同频共振,才能真正推动聚烯烃产业迈向高质量可持续发展的新阶段。

### 参考文献:

- [1] 尚鹏. 气相流化床聚乙烯工艺乙烯单耗高的原因及调控措施 [J]. 山西化工, 2024,44(12):183-186.
- [2] 赵洋, 郭甜, 尚英强, 等. 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物基电缆屏蔽料的开发与加工工艺优化 [J]. 塑料工业, 2024,52(12):131-137.
- [3] 宋翔. 乙烯气相聚合工艺研究与技术进展 [J]. 化纤与纺织技术, 2024,53(07):40-42.
- [4] 顾恒昌. 炼化一体化乙烯装置清洁生产评估与优化 [J]. 当代石油石化, 2024,32(05):37-41.
- [5] 李伟彬. 茂金属催化剂在 Unipol 气相聚乙烯工艺中的应用 [J]. 广州化工, 2023,51(24):10-11+55.