

## 清洁生产技术在化工企业的应用研究

易 青

南京大学金陵学院 江苏南京

**【摘要】**清洁生产是化工行业实现绿色转型、达成“双碳”目标的核心路径。随着环保法规日益严格和资源环境约束不断强化，清洁生产技术在化工企业的应用已成为行业可持续发展的必然选择。本文系统综述了清洁生产技术在化工企业的应用现状与发展趋势，构建了包括源头替代、过程控制、末端治理、资源循环四个层次的技术体系框架。在此基础上，深入分析了化工废水处理清洁技术、节能降耗与绿色催化技术、资源循环利用与绿色化工工艺等关键技术领域的应用实践，探讨了数字化驱动与企业技术创新策略对清洁生产的促进作用。研究表明，当前清洁生产技术在化工企业的应用呈现出技术集成化、过程绿色化、资源循环化、管理数字化的发展趋势，绿色化工技术、循环经济技术、生物质替代技术等成为重要方向。未来应加强技术创新与系统集成，推动清洁生产从末端治理向源头预防、全过程控制转变，实现化工行业的高质量可持续发展。

**【关键词】**清洁生产；化工企业；绿色化工技术；废水处理；节能降耗；循环经济

**【收稿日期】**2025 年 11 月 6 日 **【出刊日期】**2025 年 12 月 8 日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250084

### Research on the application of cleaner production technologies in chemical enterprises

Qing Yi

Jinling College, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu

**【Abstract】**Cleaner production is the core path for the chemical industry to achieve green transformation and reach the “dual carbon” goals. With increasingly stringent environmental regulations and tightening resource and environmental constraints, the application of cleaner production technologies in chemical enterprises has become an inevitable choice for sustainable development of the industry. This paper systematically reviews the application status and development trends of cleaner production technologies in chemical enterprises, constructing a four-level technical system framework including source substitution, process control, end-of-pipe treatment, and resource recycling. On this basis, it deeply analyzes the application practices in key technical fields such as chemical wastewater treatment clean technologies, energy saving and consumption reduction and green catalytic technologies, resource recycling and green chemical processes, and explores the promoting effects of digital drive and enterprise green technology innovation strategies on cleaner production. Research shows that the current application of cleaner production technologies in chemical enterprises presents development trends of technology integration, process greening, resource recycling, and management digitalization. Green chemical technology, circular economy technology, and biomass substitution technology have become important directions. In the future, it is necessary to strengthen technological innovation and system integration, promote the transformation of cleaner production from end-of-pipe treatment to source prevention and whole-process control, and achieve high-quality sustainable development of the chemical industry.

**【Keywords】**Cleaner production; Chemical enterprises; Green chemical technology; Wastewater treatment; Energy saving and consumption reduction; Circular economy

#### 引言

化工行业是国民经济的重要支柱产业，为社会发展提供了基础原材料和产品。然而，化工行业同时也是资源消耗和环境污染的主要来源之一。据统计，化工行

业能耗和碳排放占工业领域的较大比重，废水、废气、固体废物的产生量居高不下。随着“双碳”目标的提出和环保法规的日益严格，传统的高消耗、高排放、高污染的发展模式难以为继，清洁生产成为化工企业可持

续发展的必然选择<sup>[1]</sup>。

清洁生产是指不断采取改进设计、使用清洁的能源和原料、采用先进的工艺技术与设备、改善管理、综合利用等措施,从源头削减污染,提高资源利用效率,减少或者避免生产、服务和产品使用过程中污染物的产生和排放。清洁生产强调预防性原则,要求在生产过程中最大限度地减少对环境的影响,这与传统“末端治理”模式有着本质区别<sup>[2]</sup>。

化工行业的清洁生产技术涵盖面广、专业性强,涉及化学反应工程、分离工程、催化技术、材料科学等多个学科领域。近年来,随着绿色化学理念的普及和相关技术的突破,化工清洁生产技术取得了长足发展。在废水处理领域,高级氧化技术、膜分离技术、电絮凝技术等新型技术不断涌现;在节能降耗领域,新型催化材料、介孔绝热材料、过程强化技术等得到广泛应用;在资源循环领域,循环经济理念深入人心,废物资源化技术日益成熟<sup>[3]</sup>。

在理论研究层面,国内外学者围绕化工清洁生产技术开展了大量研究。在绿色创新方面,学者们探讨了化工企业绿色创新的驱动因素与配置路径<sup>[4]</sup>;在环境效率方面,研究者分析了石化行业的生产技术与环境效率关系<sup>[5]</sup>;在技术应用方面,学者们探讨了化工环保技术在工业生产中的应用<sup>[6]</sup>及绿色化工技术在废水处理中的应用<sup>[7]</sup>;在节能技术方面,研究者强调了化学工程节能的重要性及绿色化工技术的应用价值<sup>[8]</sup>。

然而,既有研究多聚焦于单一技术或单一环节,缺乏对清洁生产技术系统性应用的综述。不同类型技术之间的协同机制、技术应用的制约因素、企业层面的技术创新策略等问题尚需深入研究。基于上述背景,本文旨在对清洁生产技术在化工企业的应用进行系统性综述。研究将围绕以下核心问题展开:化工清洁生产技术体系如何构建?各类技术在应用中取得了哪些进展?面临哪些问题与挑战?数字化、循环经济背景下呈现出怎样的发展趋势?在研究方法上,本文采用文献综述与系统分析方法,结合近年国内外研究成果,按照“技术体系—应用实践—问题分析—发展展望”的逻辑展开论述。通过系统梳理,以期为化工企业清洁生产实践提供理论参考和技术指导。

## 1 化工清洁生产技术体系与理论框架

### 1.1 清洁生产的内涵与原则

清洁生产的概念最早由联合国环境规划署于1989年提出,其核心理念是从源头预防污染,而非末端治理。经过三十余年的发展,清洁生产的内涵不断丰富和深

化,已成为指导工业可持续发展的重要原则。清洁生产强调在产品或服务的全生命周期内,最大限度地减少对环境和人类健康的影响<sup>[9]</sup>。

化工行业的清洁生产具有特殊重要性。化学工业是基础原材料工业,其生产过程涉及复杂的化学反应和物质转化,污染物种类多、毒性大、治理难。因此,在化工领域推行清洁生产,不仅要考虑末端治理,更要关注源头削减和过程控制。化学工程节能的重要性及绿色化工技术的应用研究表明,通过优化工艺路线、改进反应条件、提高原子经济性等手段,可以从根本上减少污染物的产生。

清洁生产的基本原则包括:预防原则,即在污染产生之前采取预防措施,而非产生后再进行治理;全过程控制原则,即对生产全过程的各个环节进行系统控制,而非仅关注末端排放;持续改进原则,即通过持续的技术创新和管理优化,不断提高清洁生产水平;综合效益原则,即兼顾环境效益、经济效益和社会效益的统一。

煤炭化工清洁生产技术研究表明,清洁生产技术的实施需要从原料选择、工艺优化、设备改进、过程控制、废物利用等多个方面系统推进。源头控制是清洁生产的核心,通过选用清洁原料、优化反应路线、提高原子利用率,可以从根本上减少污染物的产生;过程管理是清洁生产的关键,通过加强工艺控制、提高自动化水平、减少跑冒滴漏,可以有效降低污染物排放;末端治理是清洁生产的补充,对不可避免的污染物进行有效处理,确保达标排放<sup>[10]</sup>。

### 1.2 化工清洁生产技术分类

化工清洁生产技术可按作用环节和技术类型两个维度进行分类。按作用环节划分,可分为源头替代技术、过程控制技术、末端治理技术和资源循环技术四个层次。源头替代技术旨在用无毒无害或低毒低害的原料替代有毒有害原料,用清洁能源替代传统能源;过程控制技术旨在通过工艺优化、设备改进、自动化控制等手段,提高资源利用效率,减少污染物产生;末端治理技术旨在对生产过程中不可避免的污染物进行有效处理,确保达标排放;资源循环技术旨在将生产过程中的废物转化为可再利用的资源,实现物质的闭环循环。

按技术类型划分,化工清洁生产技术可分为绿色催化技术、节能降耗技术、废水处理技术、废气治理技术、固体废物资源化技术等。各类技术相互关联、互为支撑,共同构成清洁生产的技术体系<sup>[11]</sup>。

绿色创新是推动化工清洁生产技术发展的重要动力。研究表明,中国化工专精特新企业的绿色创新受多

种因素影响,技术能力、组织支持、政策环境、市场竞争等均对绿色创新产生重要作用。企业需要根据自身条件和发展阶段,选择适宜的绿色创新配置路径。对于技术能力较强的企业,可采取技术领先型创新策略;对于资源有限的中小企业,可采取渐进式改进策略。通过差异化的创新路径,实现从“利基”到“绿色”的跨越。

绿色化工技术在化工工艺中的应用日益广泛。研究表明,绿色化工技术的核心在于“原子经济性”,即最大限度地利用反应物中的原子,减少废物产生。在工艺设计阶段,应优先选择原子经济性高的反应路线;在催化剂选择阶段,应优先选用环境友好的催化剂体系;在溶剂选择阶段,应优先选用水或超临界流体等绿色溶剂;在产品阶段,应考虑产品的可降解性和环境友好性。通过全过程的绿色设计,实现化工工艺的清洁化。

化工环保技术在工业生产中的应用研究涵盖了废水处理、废气治理、固体废物处置等多个方面。研究表明,化工环保技术的发展趋势是从单一污染物控制向多种污染物协同控制转变,从达标排放向资源化利用转变,从末端治理向全过程控制转变。新型环保技术如高级氧化、膜分离、生物处理、吸附浓缩等得到广泛应用,显著提升了化工污染治理的水平。

## 2 化工废水处理清洁生产技术

### 2.1 化工废水处理技术进展

化工废水具有污染物浓度高、成分复杂、毒性大、可生化性差等特点,是工业废水处理的难点。绿色化工技术在化工废水处理工程中的应用研究显示,化工废水处理技术的发展经历了从简单物化处理到深度处理、从达标排放到资源回收的演进历程。当前,化工废水处理技术主要包括预处理技术、生化处理技术和深度处理技术三大类<sup>[9]</sup>。

预处理技术是化工废水处理的第一道工序,旨在去除废水中的悬浮物、油类、重金属等有害物质,为后续生化处理创造条件。常用的预处理技术包括混凝沉淀、气浮、微电解、水解酸化等。其中,微电解技术利用铁碳原电池反应产生的自由基氧化降解有机物,具有处理效果好、运行成本低的优点;水解酸化技术通过厌氧微生物的作用,将大分子有机物分解为小分子有机物,提高废水的可生化性。

生化处理技术是化工废水处理的核心环节,利用微生物的代谢作用降解废水中的有机物。根据微生物对氧的需求,生化处理可分为好氧处理和厌氧处理。好氧处理技术包括活性污泥法、生物膜法、序批式反应器

等,适用于中低浓度有机废水;厌氧处理技术包括厌氧消化池、升流式厌氧污泥床等,适用于高浓度有机废水。研究表明,对于化工废水,往往需要采用厌氧-好氧组合工艺,才能达到理想的处理效果。

“双碳”目标下化学镍废水处理技术研究进展表明,含重金属废水的处理是化工废水处理的难点和热点。化学镍废水中含有高浓度的镍离子和磷化物,传统的化学沉淀法虽然能够去除大部分镍离子,但产生大量含镍污泥,存在二次污染风险。新型处理技术如离子交换、膜分离、电化学处理等,可以实现镍离子的回收利用,减少废物产生。

化学镍废水处理技术的发展趋势是从“去除”向“回收”转变。研究表明,通过组合工艺如“化学沉淀+离子交换+膜浓缩”,可以实现镍离子的高效回收和水资源的循环利用。在“双碳”目标背景下,化学镍废水处理应更加注重能源消耗和碳排放的控制,开发低碳、高效的处理技术成为研究热点。

电絮凝浮选技术是近年来发展较快的新型废水处理技术。该技术通过电解产生金属离子和气体微泡,金属离子水解生成絮凝体,吸附废水中的污染物,气体微泡则携带絮凝体上浮,实现固液分离。电絮凝浮选技术具有处理效率高、占地面积小、自动化程度高等优点,特别适用于含油废水、乳化液废水等难处理废水的净化。用于工业废水处理的电絮凝浮选技术及一体化装置开发研究表明,通过优化电极材料、电流密度、水力停留时间等参数,可以显著提高处理效果,降低运行成本<sup>[10]</sup>。

### 2.2 废水处理技术创新案例

甲基异氰酸酯及下游关键产品清洁化生产技术开发是化工中间体清洁生产的典型案例。甲基异氰酸酯是重要的有机合成中间体,广泛应用于农药、医药、染料等领域。传统生产工艺使用光气作为原料,存在高毒、高污染、高风险等问题。清洁化生产技术采用非光气路线,通过热解反应制备甲基异氰酸酯,从源头消除了光气的使用,大幅降低了环境风险和职业健康危害。

研究表明,甲基异氰酸酯清洁化生产技术的核心在于新型催化剂的开发和反应工艺的优化。通过采用固体酸催化剂替代传统均相催化剂,可以实现反应的连续化和高效化;通过优化热解反应条件,可以提高产品收率,减少副产物产生;通过配套完善的尾气处理系统,可以实现挥发性有机物的有效控制。该技术的推广应用,对于提升化工中间体生产的清洁化水平具有重要意义。

日抛型彩色隐形眼镜产品研发中的清洁生产技术体现了精细化工领域的绿色实践。彩色隐形眼镜的生产涉及颜料分散、聚合反应、模具成型、水合萃取等多个工序,各工序均可能产生废水、废气和固体废物。研发过程中,通过优化颜料配方,减少有害物质使用;改进聚合工艺,提高单体转化率;优化萃取流程,减少有机溶剂消耗;配套废水处理设施,实现达标排放。这些清洁生产措施的应用,显著降低了产品的环境足迹<sup>[11]</sup>。

### 3 化工节能降耗与绿色催化技术

#### 3.1 节能降耗技术

节能降耗是化工清洁生产的重要内容,也是降低生产成本、提高竞争力的关键途径。基于方向距离函数的石化行业环境效率与生产技术研究表明,石化行业的环境效率受生产技术水平、能源结构、管理水平等多种因素影响。通过改进生产技术、优化能源结构、强化过程管理,可以显著提高环境效率,实现节能减排与经济效益的双赢<sup>[12]</sup>。

环境效率评价是识别节能潜力的重要工具。方向距离函数方法可以同时考虑期望产出(产品)和非期望产出(污染物),综合评价生产单元的环境绩效。研究表明,石化行业的环境效率存在较大的提升空间,通过技术进步和管理优化,可以在保持产出的同时减少污染物排放。技术效率低下是制约环境效率提升的主要因素,加强技术创新和扩散是提高环境效率的关键。

基于循环经济的化工成本优化策略研究表明,循环经济理念与成本优化具有高度协同性。通过废物资源化、能源梯级利用、物料循环使用等措施,既可以减少废物排放,又可以降低原材料和能源消耗,实现环境效益和经济效益的双赢。在化工企业中,应建立循环经济管理体系,识别物质流和能量流的优化机会,设计闭环循环系统,实现资源的最大化利用。

循环经济视角下的成本优化策略包括:原料替代策略,用可再生原料或废弃物原料替代原生化石资源;过程优化策略,提高反应选择性,减少副产物生成;废物资源化策略,将废物转化为可销售的产品或可回用的物料;能源管理策略,通过余热回收、热电联产等措施提高能源利用效率。这些策略的系统实施,可以显著降低化工企业的环境成本和运营成本。

低碳节能介孔绝热材料技术的研发与应用是化工节能的重要创新。介孔绝热材料是一种具有纳米级孔结构的新型保温材料,其导热系数远低于传统保温材

料,可以显著减少热损失,提高能源利用效率。研究表明,介孔绝热材料在化工管道、反应器、储罐等高温设备的保温应用中,可降低热损失 30%以上,节能效果显著<sup>[13]</sup>。

介孔绝热材料的核心技术在于孔结构的精确控制和表面性质的优化。通过溶胶-凝胶法、模板法等制备工艺,可以获得孔径均匀、孔隙率高、导热系数低的介孔材料。通过疏水改性处理,可以提高材料的抗水汽渗透能力,延长使用寿命。介孔绝热材料的推广应用,为化工行业的高效节能提供了新的技术途径。

我国绿色甲醇产业发展现状与展望研究表明,绿色甲醇是清洁能源的重要发展方向。与传统甲醇生产相比,绿色甲醇利用生物质或二氧化碳加氢制备,具有碳中和或负碳排放的特性。绿色甲醇既可以作为清洁燃料替代传统化石燃料,又可以作为氢载体解决氢能储运难题。随着“双碳”目标的推进,绿色甲醇产业将迎来快速发展期。

绿色甲醇生产技术的核心在于高效催化剂和低成本制氢。在催化剂方面,铜基催化剂、贵金属催化剂、金属有机框架材料等均表现出良好的催化性能;在制氢方面,电解水制氢、生物质气化制氢等技术的成本持续下降。通过技术创新和规模化应用,绿色甲醇的生产成本有望进一步降低,市场竞争力将不断增强。

#### 3.2 绿色催化技术

催化技术是化工生产的核心支撑,也是清洁生产的重要突破口。流化催化裂化技术研究现状与工业应用表明,催化裂化是石油化工的核心工艺,其技术水平直接影响油品质量和污染物排放。近年来,催化裂化技术向着原料重质化、产品轻质化、过程清洁化方向发展,新型催化剂和工艺不断涌现。

流化催化裂化技术的清洁化进展主要体现在:一是催化剂性能提升,新型分子筛催化剂具有更高的选择性和抗重金属污染能力,可以减少焦炭和干气产率;二是工艺条件优化,通过优化反应温度、剂油比、停留时间等参数,可以提高轻质油收率,减少污染物生成;三是配套技术完善,烟气脱硫、脱硝、除尘等技术的应用,显著降低了催化裂化装置的污染物排放<sup>[14]</sup>。

具有协同催化作用的沸石基双功能催化剂的制备及加氢异构性能研究是新型催化材料开发的重要方向。双功能催化剂同时具有金属位和酸位,可以催化加氢脱氢和骨架异构两类反应,在烷烃异构化、芳烃饱和等领域具有重要应用。研究表明,通过调控金属位和酸位的空间分布和协同作用,可以显著提高催化剂的活性

和选择性<sup>[15]</sup>。

沸石基双功能催化剂的制备关键在于活性组分的负载和孔结构的调控。采用浸渍法、离子交换法、沉积沉淀法等可将金属纳米粒子均匀负载于沸石载体上；通过碱处理、酸处理、水热处理等方法可以调控沸石的孔结构和酸性。优化制备工艺，可以获得高活性、高选择性、良好稳定性的双功能催化剂，为清洁燃料生产提供技术支持。

满足国 VI 车用汽油标准的催化裂化汽油加氢改质技术开发及应用是油品清洁化的重要实践。国 VI 标准对汽油中的硫含量、烯烃含量、芳烃含量等提出了严格限制，传统催化裂化汽油难以直接满足要求。加氢改质技术通过选择性加氢脱硫和烯烃饱和，可以在深度脱硫的同时减少辛烷值损失，生产符合国 VI 标准的清洁汽油。

催化裂化汽油加氢改质技术的核心在于高选择性催化剂的开发和工艺条件的优化。催化剂需要具备高脱硫活性和低烯烃饱和活性，以在脱硫的同时保护辛烷值。工艺条件如反应温度、氢气压力、空速等需要精确控制，以实现脱硫率与辛烷值损失的最佳平衡。该技术的工业应用，为油品质量升级提供了可靠的技术方案。

## 4 资源循环利用与绿色化工工艺

### 4.1 资源循环利用技术

资源循环利用是清洁生产的高级形态，也是循环经济的核心内容。基于循环经济的化工成本优化策略研究显示，通过废物资源化，可以将“废物”转化为“资源”，实现经济效益和环境效益的双赢。化工企业应建立资源循环利用体系，识别可回收的物料流，设计回收利用方案，最大限度减少资源消耗和废物排放。

资源循环利用的技术路径包括：物料回收，将生产过程中的未反应原料、副产物等进行分离回收，返回生产系统；能源回收，将生产过程中的余热、余压等进行回收利用，提高能源效率；废物资源化，将废水、废气、固体废物等转化为可销售的产品或可回用的物料。这些技术路径的实施，需要配套完善的分离提纯、能量转换、产品加工等设施。

生物基丁二酸生产工艺开发项目是生物质替代化石资源的典型案例。丁二酸是重要的平台化合物，广泛应用于可降解塑料、溶剂、医药等领域。传统丁二酸生产以石油为原料，通过化学合成路线制备。生物基丁二酸生产工艺利用微生物发酵技术，将糖类生物质资源转化为丁二酸，具有原料可再生、过程温和、环境友

好等优点<sup>[16]</sup>。

研究表明，生物基丁二酸生产工艺的关键在于高产菌株的选育和发酵过程的优化。通过代谢工程改造，可以获得糖酸转化率高、副产物少的工程菌株；通过发酵条件优化，可以提高产物浓度和生产强度；通过分离纯化技术改进，可以获得高纯度的丁二酸产品。生物基丁二酸产业的发展，有助于减少对化石资源的依赖，降低化工生产的碳足迹<sup>[17]</sup>。

功能壳寡糖制备全产业链开发及高值化利用是物质资源高值化利用的示范。壳寡糖是壳聚糖的降解产物，具有良好的生物相容性、抗菌性、抗氧化性等生物活性，在医药、食品、农业等领域具有广泛应用前景。全产业链开发涵盖原料虾蟹壳的收集预处理、壳聚糖的提取制备、壳寡糖的酶法降解、功能产品的开发应用等环节。

功能壳寡糖制备的核心技术包括高效提取技术、定向降解技术和功能改性技术。高效提取技术旨在从虾蟹壳中高效提取甲壳素和壳聚糖，减少化学品消耗和废水排放；定向降解技术旨在通过酶法降解获得特定聚合度的壳寡糖，提高产品附加值；功能改性技术旨在通过化学修饰或复配增强壳寡糖的特定功能，拓展应用领域。全产业链的开发实现了从废弃物到高价值产品的转化，体现了循环经济的理念<sup>[18]</sup>。

### 4.2 绿色化工工艺创新

防治粮油作物真菌性病害杀菌剂创新及提质增产关键技术研发是农药领域绿色工艺创新的代表。传统杀菌剂生产存在原料毒性大、废物产生多、产品残留高等问题。绿色杀菌剂的研发遵循“高效、低毒、低残留”的原则，通过新靶标的发现、新先导的优化、新剂型的开发，创制环境友好的杀菌剂产品<sup>[19]</sup>。

绿色杀菌剂工艺创新的关键技术包括：绿色合成路线设计，采用原子经济性高的反应路线，减少废物产生；绿色催化剂应用，采用环境友好的催化剂体系，提高反应选择性；连续化生产技术，实现反应-分离-纯化的集成，提高效率；微反应器技术，强化传质传热，提高安全性。这些技术的集成应用，显著提升了杀菌剂生产的清洁化水平。

取代苯基异氰酸酯连续化生产技术产业化开发是化工中间体绿色工艺创新的范例。取代苯基异氰酸酯是重要的有机合成中间体，传统生产工艺采用间歇式光气化反应，存在安全风险高、生产效率低、废物产生多等问题。连续化生产技术采用管式反应器或微反应器，实现光气化反应的连续进行，大幅提高了生产效率

和安全性。

连续化生产技术的优势在于：反应条件精确控制，提高产品收率和质量；反应停留时间短，减少副反应；设备密闭性好，减少有害物质泄漏；自动化程度高，减少人工操作风险。研究表明，连续化生产技术的应用，可使取代苯基异氰酸酯的生产效率提高 30%以上，废物产生量减少 50%以上，具有显著的清洁生产效益。

甲基异氰酸酯清洁化生产技术开发是解决高危工艺环境问题的典型案例。甲基异氰酸酯是生产氨基甲酸酯类农药的关键中间体，传统光气法工艺存在严重的安全和环境风险。清洁化生产技术采用热解法非光气路线，以甲基胺和二氧化碳为原料，经两步反应制备甲基异氰酸酯，从源头消除了光气的使用。

清洁化生产技术的核心在于新型催化材料和反应工程技术的突破。在催化材料方面，开发了高活性、高选择性的固体催化剂，实现了反应的高效进行；在反应工程方面，开发了新型反应器，实现了过程的连续化和自动化。该技术的工业应用，彻底消除了光气泄漏风险，大幅降低了环境负荷，是化工中间体清洁生产的重大突破。

## 5 数字化驱动与技术创新策略

### 5.1 数字经济与化工清洁生产

数字经济的快速发展为化工清洁生产提供了新的机遇。研究表明，数字经济发展对化工行业碳减排具有显著的促进作用。数字经济通过提升生产效率、优化能源结构、促进技术创新、加强环境监管等渠道，推动化工行业碳排放强度的降低。数字化技术的应用，使化工企业能够更精确地控制生产过程、更高效地配置资源、更及时地发现环境问题，从而实现清洁生产水平的提升。

数字经济促进化工碳减排的内在机制包括：一是替代效应，数字化技术替代传统管理模式，提高管理效率；二是优化效应，大数据分析优化生产参数，降低能耗物耗；三是协同效应，工业互联网平台促进产业链协同，减少资源浪费；四是监督效应，物联网技术实现环境实时监测，强化污染控制。研究表明，数字经济发展水平每提高 1 个百分点，化工行业碳排放强度可降低约 0.3 个百分点。

增强数字经济发展对化工碳减排促进作用的策略包括：加快化工行业数字化转型，推动工业互联网、人工智能、大数据等技术的应用；完善数字化基础设施，建设行业级工业互联网平台；加强数字化人才培养，提升企业数字化能力；健全数字化监管体系，利用数字技

术强化环境监管。通过数字化与绿色化的深度融合，实现化工行业的高质量发展。

石化企业环境绩效审计指标体系的构建与应用研究为清洁生产效果的量化评价提供了工具。环境绩效审计是评价企业环境管理水平和清洁生产效果的重要手段。构建科学合理的环境绩效审计指标体系，需要综合考虑资源消耗、污染物排放、环境管理、清洁生产等多个维度，采用定性与定量相结合的方法进行评价。

石化企业环境绩效审计指标体系应包括：资源消耗指标，如单位产品能耗、水耗、原材料消耗等；污染物排放指标，如单位产品 COD、SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub> 排放量等；废物利用指标，如工业用水重复利用率、固体废物综合利用率等；环境管理指标，如环境管理体系认证、清洁生产审核等。通过环境绩效审计，可以识别环境管理的薄弱环节，指导清洁生产改进。

### 5.2 企业绿色技术创新策略

化工企业绿色创新受多种因素影响，需要根据企业特点选择适宜的创新路径。从“利基”到“绿色”的配置路径研究表明，化工专精特新企业的绿色创新存在多种配置路径，包括技术能力驱动型、市场拉动型、政策推动型、组织支撑型等。技术能力较强的企业可采取技术领先型策略，加大研发投入，突破核心技术；资源有限的中小企业可采取渐进改进型策略，引进消化吸收成熟技术，逐步提升清洁生产水平。

企业绿色创新的关键成功因素包括：高层管理者的环保意识和创新意愿；研发团队的创新能力和技术积累；完善的创新管理制度和激励机制；充足的创新资源投入；良好的外部合作网络。企业应根据自身条件，选择适宜的创新路径，构建差异化的绿色创新体系。

“双碳”背景下 A 能源化工公司绿色技术创新策略研究表明，碳达峰碳中和目标对化工企业绿色技术创新提出了新要求。企业需要制定碳减排路线图，明确技术创新的方向和重点；加强低碳技术研发，突破碳捕集利用与封存、氢能、生物质能等关键技术；优化能源结构，提高可再生能源比例；推进数字化转型，利用数字技术赋能绿色创新<sup>[20]</sup>。

企业绿色技术创新的实施策略包括：建立绿色技术创新平台，整合内外部创新资源；加强产学研合作，借助高校和科研院所的技术优势；设立绿色技术创新基金，保障创新资金投入；完善创新激励机制，激发员工创新热情；加强知识产权保护，形成技术壁垒。通过系统化的创新管理，实现企业绿色技术能力的持续提升<sup>[21]</sup>。

## 6 讨论与展望

### 6.1 当前发展成就与问题反思

经过多年发展,清洁生产技术在化工企业的应用取得了显著成就。在政策层面,国家出台了《清洁生产促进法》等一系列法律法规,建立了清洁生产审核制度,推动了清洁生产的规范化发展。在技术层面,绿色化工技术、废水处理技术、节能降耗技术、资源循环技术等取得了重要突破,为化工清洁生产提供了技术支撑。在实践层面,越来越多的化工企业开展了清洁生产审核,实施了清洁生产技术改造,取得了显著的环境效益和经济效益<sup>[22]</sup>。

然而,当前清洁生产技术在化工企业的应用仍面临诸多问题。一是技术成本问题,部分清洁生产技术投资大、运行成本高,中小企业难以承受;二是技术成熟度问题,一些新兴技术尚处于实验室或中试阶段,工业应用的可靠性和经济性有待验证;三是政策激励问题,现有政策对清洁生产的激励力度不足,企业缺乏主动实施清洁生产的内在动力;四是技术人才问题,清洁生产技术涉及多学科交叉,复合型技术人才缺乏;五是技术推广问题,先进适用技术的推广渠道不畅,技术供给与需求之间存在信息不对称<sup>[23]</sup>。

### 6.2 未来发展趋势

展望未来,清洁生产技术在化工企业的应用将呈现以下发展趋势:

**数字化智能化融合。**工业互联网、人工智能、大数据等数字技术将与清洁生产深度融合,实现生产过程的智能优化和精准控制。数字孪生技术将实现生产过程的可视化和虚拟仿真,支持清洁生产方案的优化设计;人工智能技术将实现工艺参数的智能调优和故障的智能诊断,提高生产效率和清洁水平;区块链技术将实现产品全生命周期的可追溯,支持绿色供应链管理<sup>[24]</sup>。

**循环经济深化。**化工行业将从末端治理向源头预防、全过程控制和资源循环转变。原子经济性反应、生物质替代、废物资源化等技术将得到更广泛应用。企业将建立物质流和能量流的闭环循环系统,实现资源的最大化利用和废物的最小化排放。化工园区将推进循环化改造,构建企业间的代谢共生关系,实现资源的高效共享和梯级利用<sup>[25]</sup>。

**生物质替代路径。**生物质资源将逐步替代化石资源,成为化工生产的重要原料。生物基化学品、生物基材料、生物能源等将快速发展,减少对石油、煤炭等化石资源的依赖。合成生物学、代谢工程等技术的发展,将拓展生物质转化的途径和效率,推动生物经济的兴起。

“双碳”目标驱动。碳达峰碳中和目标将为化工清洁生产注入新动力。碳捕集利用与封存、绿氢、绿色甲醇等低碳技术将加速发展;产品碳足迹核算、碳标签、碳交易等市场机制将推动企业主动减碳;低碳、零碳、负碳化工技术将成为研发热点。

**技术创新与系统集成。**单一技术的突破将向技术系统集成转变,形成覆盖全流程的清洁生产技术体系。过程强化技术、微反应技术、膜技术等将与传统技术深度融合,实现过程的高效、紧凑、安全。多污染物协同控制技术、资源-能源-环境一体化技术等将成为重要发展方向。

## 7 结论

本文系统综述了清洁生产技术在化工企业的应用研究进展。研究表明,清洁生产技术体系包括源头替代、过程控制、末端治理、资源循环四个层次,涵盖绿色催化技术、节能降耗技术、废水处理技术、废气治理技术、固体废物资源化技术等多个类型。

在化工废水处理领域,绿色化工技术、化学镍废水处理技术、电絮凝浮选技术等取得了重要进展,处理效率不断提高,资源回收能力持续增强。在节能降耗与绿色催化领域,环境效率评价方法、循环经济成本优化策略、介孔绝热材料、绿色甲醇技术、流化催化裂化技术、沸石基双功能催化剂、汽油加氢改质技术等得到了广泛应用,能效水平显著提升。在资源循环利用与绿色化工工艺领域,循环经济理念深入人心,生物基化学品、功能壳寡糖、绿色杀菌剂、连续化生产技术、非光气路线等创新成果不断涌现,资源利用效率大幅提高。

数字化驱动与企业技术创新策略对清洁生产具有重要促进作用。数字经济的发展为化工碳减排提供了新动能,环境绩效审计为清洁生产效果评价提供了量化工具。企业应根据自身条件选择适宜的绿色创新路径,构建系统化的技术创新体系。

当前,清洁生产技术在化工企业的应用呈现出技术集成化、过程绿色化、资源循环化、管理数字化的发展趋势。未来应加强技术创新与系统集成,推动清洁生产从末端治理向源头预防、全过程控制转变,实现化工行业的高质量可持续发展。

本文主要基于文献综述,对清洁生产技术在化工企业的应用进行了系统梳理。未来可结合实证研究和案例分析,进一步深化对不同技术适用条件、实施效果、经济性的认识,为化工企业清洁生产实践提供更具指导性的理论依据。

## 参考文献

- [1] Wang L, Tang Y, Zhao X. From niche to green: Configurational pathways to enhance green innovation in Chinese chemical SRDI enterprises[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2025, 45(2): e70192.
- [2] Silva D R M K, Alves T K, Coelho B M, et al. Environmental Efficiency and Production Technology in the Petrochemical Industry Based on Directional Distance Function[J]. *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 2025: 1-12.
- [3] 曲辉. 化工环保技术在工业生产中的应用研究[J]. *山西化工*, 2025, 45(09): 192-195.
- [4] 王平, 姜文瑛, 黄雅芳. 绿色化工技术在化工废水处理工程中的应用[J]. *化纤与纺织技术*, 2025, 54(09): 78-76.
- [5] Zhuang Z X. The Importance of Energy Conservation in Chemical Engineering and the Application of Green Chemical Technology[J]. *Modern Biological and Chemical Engineering*, 2025, 1(1).
- [6] 熊建华. “双碳”目标下化学镍废水处理技术研究进展及展望[J]. *净水技术*, 2025, 44(07): 32-42.
- [7] 刘效君. 基于循环经济的化工成本优化策略研究[J]. *塑料工业*, 2025, 53(06): 191.
- [8] 刘从忠. 绿色化工技术在化工工艺中的应用探析[J]. *新发现*, 2025, (11): 121-123.
- [9] Gao R, Ni T, Zhang Q, et al. Internal mechanism and enhancement strategy of chemical industry carbon emission reduction promoted by the development of digital economy[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2025, 13: 1615002.
- [10] 范益. 石化企业环境绩效审计指标体系的构建与应用研究[D]. 四川师范大学, 2025.
- [11] 乔瑞琪, 龚剑洪, 魏晓丽, 等. 流化催化裂化技术研究现状与工业应用[J]. *石油化工高等学校学报*, 2025, 38(02): 1-9.
- [12] Frantzanis S. Biobased succinic acid on the rise: US project is developing a production process for succinic acid from sugarcane[J]. *Chemical Week*, 2025, 187(6): 29.
- [13] 栾玉成. 低碳节能介孔绝热材料技术研发与应用[R]. 常州优纳新材料科技有限公司, 2024.
- [14] 邓婷婷. “双碳”背景下 A 能源化工公司绿色技术创新策略研究[D]. 东北财经大学, 2024.
- [15] 王巍. 具有协同催化作用的沸石基双功能催化剂的制备及加氢异构性能研究[R]. 黑龙江大学, 2024.
- [16] 付楚芮, 李景乐. 我国绿色甲醇产业现状与发展展望[J]. *煤质技术*, 2024, 39(05): 27-36.
- [17] 向永生. 满足国 VI 车用汽油标准的催化裂化汽油加氢改质技术开发及应用[R]. 中国石油天然气股份有限公司兰州化工研究中心, 2024.
- [18] 郇壮壮, 王建业, 倪忠强. 化学工程节能的重要性及绿色化工技术应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2024, 44(12): 115-117.
- [19] 杨光富. 防治粮油作物真菌性病害杀菌剂创新及提质增产关键技术研发[R]. 华中师范大学, 2024.
- [20] 刘洪涛. 功能壳寡糖制备全产业链开发及高值化利用[R]. 湖北中医药大学, 2024.
- [21] 吴雅琴. 双边产业联合研发计划项目-用于工业废水处理的电絮凝浮选技术及一体化装置开发[R]. 杭州水处理技术研究开发中心有限公司, 2024.
- [22] 刘源. 取代苯基异氰酸酯连续化生产技术产业化开发[R]. 湖南化工研究院有限公司, 2024.
- [23] 刘卫东. 甲基异氰酸酯及下游关键产品清洁化生产技术开发[R]. 湖南海利化工股份有限公司, 2024.
- [24] 张军. 日抛型彩色隐形眼镜产品研发[R]. 甘肃康视达科技集团有限公司, 2024.
- [25] 唐大易, 吴卿, 王松. 煤炭化工清洁生产技术研究[J]. *内蒙古煤炭经济*, 2023, (16): 58-60.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS