

# 绿色化工技术在提升生产安全性中的应用与展望

李志超

广东 清远 511500

DOI:10.61369/ME.2025100018

**摘要：**绿色化工技术对提升生产安全性意义重大，其清洁生产原理、过程强化等技术降低风险，危险反应替代、生物基原料替代等发挥关键作用，在线监控、数字孪生等助力安全控制。但产业化面临催化剂成本、设备改造等挑战，需技术与标准协同推进，智能绿色化工范式潜力巨大。

**关键词：**绿色化工技术；生产安全性；产业化挑战

## Application and Prospect of Green Chemical Technology in Improving Production Safety

Li Zhichao

Qingyuan, Guangdong 511500

**Abstract :** Green chemical technology is of great significance in improving production safety. Its principles of clean production, process strengthening, and other technologies reduce risks. Hazardous reaction substitution, biobased raw material substitution, and online monitoring and digital twins play a key role in assisting safety control. However, industrialization faces challenges such as catalyst costs and equipment upgrades, requiring the coordinated promotion of technology and standards. The potential of the intelligent green chemical paradigm is enormous.

**Keywords :** green chemical technology; production safety; industrialization challenge

## 引言

2021 年颁布的《“十四五”工业绿色发展规划》着重强调推动工业绿色转型，为绿色化工技术发展提供有力支撑。绿色化工技术围绕清洁生产、过程强化等多方面，通过原子经济性、零排放等原则，以及微反应器等技术提升生产安全性。然而，其产业化面临新型催化剂成本、设备改造升级等挑战。需企业与科研机构合作、政府政策扶持，优化安全管理与本质安全标准，培养复合型人才，推进生物基原料替代、氢能耦合等技术，构建产业链协同生态与循环经济体系，以实现化工行业可持续发展。

## 一、绿色化工技术理论基础

### (一) 清洁生产核心原理

绿色化工技术中的清洁生产核心原理，着重阐述原子经济性和零排放原则的技术内涵，以及绿色化学评估指标在安全生产中的应用价值。原子经济性强调化学反应中原料原子尽可能多地转化为目标产物，这不仅提高了资源利用率，减少副产物生成，还降低了后续处理的安全风险。零排放原则旨在杜绝生产过程中废弃物向环境排放，从源头上避免了废弃物对环境和人员可能造成的危害。而 E 因子作为重要的绿色化学评估指标，用于衡量化工过程产生的废弃物量，通过监测 E 因子，可直观了解生产过程的绿色程度，优化工艺，提升生产安全性，使企业能及时发现潜在的安全隐患并采取相应措施，为安全生产提供有力保障<sup>[1]</sup>。

### (二) 过程强化理论基础

过程强化理论致力于通过对化工过程的本质变革，显著提升

设备效率与过程效能，从而实现绿色、安全生产。以微反应器为例，其具有极大的比表面积和良好的传热、传质性能，能精确控制反应条件，减少热点和失控反应风险，有效消除工艺放大风险。超重力分离技术则借助超重力场，强化相间传质与分离过程，使得分离设备小型化，降低了因设备庞大带来的安全隐患。这些过程强化技术从根本上改变了传统化工过程的操作方式，通过提升反应和分离效率，降低了工艺复杂性和潜在风险，为提高化工生产的本质安全提供了有力的理论与技术支撑<sup>[2]</sup>。

## 二、工艺安全提升应用分析

### (一) 危险反应替代技术

在绿色化工技术提升生产安全性的进程中，危险反应替代技术发挥着关键作用。以离子液体催化技术为例，传统高危反应往往需在极端条件下进行，如高温、高压，这极大增加了爆炸事故

风险。而离子液体因其独特的物理化学性质，可作为高效催化剂，使反应能在温和条件下发生。在某些有机合成反应中，传统方法需高温高压且使用大量有毒溶剂，借助离子液体催化，不仅降低了反应温度和压力，还减少了有毒溶剂的使用，从根本上降低爆炸隐患。光化学合成技术亦是如此，利用光能激发反应，实现温和转化。例如在一些精细化学品合成中，光化学反应可避免传统热反应引发的高风险，通过精准的光子能量控制，促使反应高效进行，有效降低爆炸事故风险<sup>[3]</sup>。

## （二）在线监控系统集成

在绿色化工生产中，在线监控系统集成对于提升工艺安全至关重要。通过将各类监测设备与软件系统集成，能够实现对化工生产过程参数的全面、实时监测。该系统可融合温度、压力、流量等多参数数据，运用先进算法实现对过程参数的实时诊断。例如，结合流程模拟与微流控技术，利用模拟模型对生产流程进行预演，为实时监控提供参考标准，当实际参数偏离模拟预期时，系统迅速发出警报，以便及时调整。同时，微流控技术助力获取微观层面的反应信息，进一步完善监控体系。这种集成系统为构建预测性安全防护体系奠定基础，能够在事故萌芽阶段及时发现并处理，保障化工生产安全、稳定进行，从而推动绿色化工技术在提升生产安全性方面发挥更大作用<sup>[4]</sup>。

## 三、产业化实施挑战与对策

### （一）技术经济性壁垒

#### 1. 新型催化剂成本制约

在绿色化工技术的产业化实施进程中，新型催化剂成本构成显著制约因素。贵金属催化剂替代方案的研发成本高昂，这不仅源于新型催化剂研发需投入大量人力、物力用于实验研究与技术攻关，还因要探索新的催化材料与反应机理，不确定性强，失败风险大，进一步拉高成本。同时，从产业化投资回报周期看，较长的周期使得企业资金回笼缓慢，投资积极性受挫。新型催化剂从实验室走向工业化生产，需进行多轮中试放大，建设配套生产设施，资金持续投入，短期内却难见明显效益。企业还需承担市场接受度不确定风险。面对这些，企业和科研机构应加强合作，整合资源，降低研发成本，政府也应出台扶持政策，如税收优惠、研发补贴等，助力新型催化剂产业化推进<sup>[5]</sup>。

#### 2. 设备改造升级阻碍

在绿色化工技术产业化实施中，设备改造升级是一大阻碍。传统化工装置的数字化改造存在诸多工程风险，例如设备老化、适配性差等。一些老旧设备难以兼容新的绿色化工技术所需的数字化控制系统，若要改造，不仅要对设备硬件进行更换或升级，还需对相关软件及接口进行调整，这一过程技术难度大，稍有不慎便可能导致生产停滞<sup>[6]</sup>。从经济承受能力来看，设备改造升级成本高昂，包括新设备采购、安装调试、人员培训等费用，对于部分企业尤其是中小企业而言，这是一笔巨大开支，可能超出其经济承受范围，使得企业在面对设备改造升级时望而却步，严重影响绿色化工技术的产业化推进。因此，需寻求降低技术难度、

减少改造成本的解决方案，如政府提供补贴或技术支持，企业间开展合作研发，共担风险。

### （二）安全管理体适配

#### 1. 本质安全标准重构

在安全管理体适配方面，传统安全管理体系往往难以完全契合绿色化工技术的独特要求。绿色化工技术强调从源头上减少或消除危险化学品的使用，这与常规安全管理以末端治理为主的思路存在差异。因此，需深入分析绿色化工技术的工艺流程、物料特性等，对现有安全管理体系进行针对性调整与优化，以确保两者无缝衔接。

本质安全标准重构也面临挑战。传统本质安全标准主要基于常规化工生产制定，而绿色化工技术所采用的新原料、新工艺等，使得其本质安全要求有别。比如新型催化剂的使用，其活性、稳定性等因素对本质安全的影响需重新考量。应结合绿色化工技术的特点，制定涵盖原料选用、工艺设计、设备运行等全流程的本质安全标准，充分考虑其对环境和人员的潜在影响，为绿色化工技术产业化实施筑牢本质安全防线<sup>[7]</sup>。

#### 2. 人员技能转型需求

在绿色化工技术产业化实施中，人员技能转型需求极为关键。随着新型工艺控制系统在绿色化工中的应用，传统化工人员技能面临诸多挑战。绿色化工技术要求人员不仅掌握基础化工知识，还需熟悉绿色化学原理、新型环保工艺设备操作等。现有人员对新型控制系统的操作熟练度不足，对绿色技术的理解也局限于表面，难以有效应用于生产实践<sup>[8]</sup>。因此，应提出复合型人才培养策略。一方面，开展针对性培训，包括理论知识与实践操作，如设置绿色化工专项课程，让人员学习最新绿色工艺；另一方面，鼓励人员自主学习和参与行业交流，及时了解绿色化工前沿技术，从而全面提升人员技能，更好地适配绿色化工新型工艺控制系统，推动绿色化工技术产业化进程。

## 四、创新驱动发展路径

### （一）工艺路线创新

#### 1. 生物基原料替代

在绿色化工技术提升生产安全性的进程中，生物基原料替代扮演着关键角色。传统化工生产常依赖化石基原料，其开采与使用不仅增加危化品库存，还带来诸多环境与安全隐患。而生物基原料，如植物油、淀粉、纤维素等，来源广泛且可再生，以其替代部分传统原料，可有效降低对化石资源的依赖。例如，以植物油为原料制备生物柴油，不仅过程相对温和，还减少了传统柴油生产中涉及的多种危化品使用。同时，生物基原料在自然界可降解，从源头上减少了潜在的环境污染风险，进而提升生产安全性。此外，随着生物技术的发展，生物基原料的性能不断优化，能够更好地满足化工生产需求<sup>[9]</sup>。

#### 2. 氢能耦合技术

氢能耦合技术为硝化、氯化等高危工艺的本质安全化改造带来新契机。绿氢供给系统与这些高危工艺耦合，能从源头上降低

危险化学品的使用量与反应剧烈程度。例如在硝化工艺中，传统方法使用大量强氧化性的硝酸，存在较高爆炸风险。而氢能耦合技术可通过温和的加氢还原步骤，部分替代传统硝化试剂，在保证产品质量的同时，大幅降低反应体系的能量密度，减少爆炸隐患。在氯化工艺里，氢气与氯气可在特定条件下预先反应生成氯化氢，以更稳定的氯化氢参与后续反应，避免直接使用高毒、强腐蚀性的氯气带来的安全风险。通过氢能耦合技术对高危工艺的改造，不仅提升了生产安全性，还契合绿色化工理念，为化工行业可持续发展提供有效途径<sup>[10]</sup>。

## （二）智能控制创新

### 1. 数字孪生应用

在绿色化工生产中，数字孪生应用于智能控制创新意义重大。通过构建化工生产过程的数字孪生模型，可精确映射真实系统的物理特性、运行状态及性能指标。利用实时数据驱动，实现对生产流程的动态模拟与监控，提前预测潜在安全风险，如设备故障、泄漏隐患等。借助数字孪生，能在虚拟环境中对不同控制策略进行测试和优化，进而制定出更安全高效的控制方案，确保化工生产始终处于最佳运行状态。同时，数字孪生体还可作为操作人员的培训平台，模拟各类事故场景，提升人员应急处理能力，从源头降低事故发生概率，全方位提升绿色化工生产的安全性。

### 2. 区块链溯源系统

在绿色化工生产安全性提升方面，区块链溯源系统可发挥重要作用。该系统以其分布式账本、不可篡改等特性，为物料追踪提供坚实保障。从原材料采购环节开始，详细记录物料来源、质量检测等信息，确保源头可追溯。在生产过程中，实时记录物料流转与使用情况，每一次操作都被精准记录，便于发现潜在风险。当出现安全问题时，能迅速定位问题环节及相关物料批次，实现风险精准防控。同时，区块链的加密技术保证了数据的安全性与隐私性，使不同环节的参与者可以放心共享与查询信息。通过这种方式，区块链溯源系统助力绿色化工技术建立起更加透明、高效、安全的全生命周期物料追踪体系，有力提升生产安全性。

## （三）模式创新

### 1. 产业链协同生态

在绿色化工领域，构建产业链协同生态对提升生产安全性至关重要。一方面，化工企业应加强与上下游企业的合作，实现资源的高效利用与共享。例如，上游企业产生的某些废弃物，可能是下游企业的生产原料，通过这种协同，减少废弃物排放的同时，降低原料采购成本与运输风险。另一方面，企业间可共同开展安全技术研发，针对危险中间产物，合力探索更安全的转化与处理方式。以设计工业园区共生网络为依托，促进危险中间产物就地转化，不仅缩短运输距离，降低运输过程中的安全隐患，还能提升整个产业链的资源循环利用率，推动绿色化工产业朝着更安全、高效、可持续的方向发展，形成互利共赢的良好局面。

源的高效利用与共享。例如，上游企业产生的某些废弃物，可能是下游企业的生产原料，通过这种协同，减少废弃物排放的同时，降低原料采购成本与运输风险。另一方面，企业间可共同开展安全技术研发，针对危险中间产物，合力探索更安全的转化与处理方式。以设计工业园区共生网络为依托，促进危险中间产物就地转化，不仅缩短运输距离，降低运输过程中的安全隐患，还能提升整个产业链的资源循环利用率，推动绿色化工产业朝着更安全、高效、可持续的方向发展，形成互利共赢的良好局面。

## 2. 循环经济体系

构建绿色化工循环经济体系，是降低废弃物存储运输风险、提升生产安全性的关键路径。以废弃物资源化利用为核心，搭建上下游企业间紧密的资源共享网络。通过技术创新与产业协同，将化工生产过程中的各类废弃物精准分类、高效转化，使其成为其他生产环节的原料或可利用资源。比如，将废弃催化剂经过特殊工艺处理，提取其中的有价金属，用于新催化剂的制备。这样不仅减少废弃物大量堆积带来的安全隐患，还能降低因长途运输废弃物而引发的泄露、爆炸等风险。同时，构建智能化的循环经济管理平台，对废弃物的产生、收集、运输、处理及再利用全过程进行实时监控与数据分析，及时发现潜在风险点并迅速采取应对措施，实现绿色化工生产过程中废弃物管理的科学化、高效化与安全化。

## 五、总结

绿色化工技术在提升生产安全性方面意义重大。从分子设计环节，它便能从源头上规避潜在危险，确保反应物质和过程更为安全。在系统集成阶段，进一步优化生产流程，降低风险。这一系列应用，不仅保障了人员安全，还减少了对环境的危害。要实现绿色化工技术产业化，需技术研发与标准建设协同推进。技术研发不断创新，突破关键瓶颈，标准建设则提供规范与指引，让新技术得以更好落地。展望未来，智能绿色化工新范式潜力巨大，尤其在重特大事故预防领域，有望凭借智能化监测、精准控制等手段，构建更严密的安全防线，为化工行业的可持续发展奠定坚实基础。

## 参考文献

- [1] 李雅静.损失规避下考虑生产安全性的退役动力电池第三方回收商评价 [D].燕山大学, 2023.
- [2] 徐名勇.绿色技术创新、绿色生产与绿色消费耦合协调及演化博弈 [D].河南农业大学, 2023.
- [3] 王蕾.多自主体协同控制及其在化工生产线中的应用 [D].淮阴工学院, 2021.
- [4] 宋谨标.BIM技术在节能设计与绿色建筑评价中的应用研究 [D].华北水利水电大学, 2022.
- [5] 陈波.土壤改良培肥基质在海岸带稻田土壤地力提升和绿色生产中的应用 [D].南京农业大学, 2022.
- [6] 贾素改.绿色化工技术在化工工程中的应用研究 [J].当代化工研究, 2021,(11):119-120.
- [7] 袁旭宏.绿色化工技术在化工处理废水工程中的应用 [J].当代化工研究, 2021,(15):128-129.
- [8] 张祖波.绿色化工技术在化工工程中的应用 [J].数码设计 (下), 2021.
- [9] 罗超然.化工工作中绿色化工技术的应用 [J].化工设计通讯, 2021,47(09):72-73.
- [10] 丁全有.绿色化工环保技术在工业生产中的应用与发展 [J].现代盐化工, 2022,49(06):79-81.