

精细化工绿色合成技术趋势与效益提升研究

刘怀新（山西大同大学 化学与化工学院，山西 大同 037009）

摘要：精细化工绿色合成技术的应用中，发挥催化技术的作用，采用生物合成方法，并对整个的技术操作过程不断强化，以达到节能降耗的效果，避免污染环境。随着数字技术的发展以及智能技术崛起，该技术在应用领域要获得良好效果，就要做到技术集成创新，进行全生命周期评估，实现政策-产业协同，整个的产业链闭环运行，采用成本分摊模式且注重市场导向研发，以充分发挥其经济价值。

关键词：化工；精细化；绿色合成技术；趋势；效益

中图分类号：TQ086

文献标识码：A

文章编号：1674-5167(2025)030-0013-03

Research on Trends and Efficiency Enhancement of Green Synthesis Technology in Fine Chemicals

Liu Huaixin (College of Chemistry and Chemical Engineering, Shanxi Datong University, Datong Shanxi 037009, China)

Abstract: In the application of green synthesis technology in fine chemicals, the role of catalytic technology is exerted, biosynthesis methods are adopted, and the entire technical operation process is continuously strengthened to achieve the effect of energy conservation and consumption reduction and avoid environmental pollution. With the development of digital technology and the rise of intelligent technology, to achieve good results in the application field of this technology, it is necessary to carry out integrated technological innovation, conduct full life cycle assessment, realize policy-industry coordination, operate the entire industrial chain in a closed loop, adopt a cost-sharing model and focus on market-oriented research and development, so as to fully leverage its economic value.

Key words: Chemical Engineering; Refinement; Green synthesis technology; Trend; Benefit

高端化学品生产领域，精细化是重点。随着我国绿色发展战略的持续深入落实，如果依然采用传统合成技术，不仅造成资源严重浪费，而且造成严重的环境污染。如此环境背景下，绿色合成技术应运而生。精细化绿色合成技术的核心是提高效率，降低能源消耗量，且发挥环境保护价值。该技术通过原子经济性反应以及绿色溶剂等，对可持续发展起到推动作用。下面分析精细化绿色合成技术发展趋势并提出提升效益有效策略。

1 精细化工绿色合成技术发展趋势

1.1 原子经济性反应

现代绿色合成技术所设计的反应路径不仅选择性高，而且原子效率也高，使得原料转化率大幅度提升。为获得良好的原子经济性反应，当前需要实现的重要目标是催化不对称合成与串联反应。比如，钯催化的C-H键直接活化，应用绿色合成技术，省去了传统预官能团化环节，而是将功能基团引入惰性碳氢键，使得合成路线简化。

生物基化学品的生产规模不断扩大，对原子经济性技术产业化发展潜力进一步验证^[1]。比如，生物基乙醇酸(Glycolic Acid)合成，应用新型绿色催化路径，就是将甘油脱氢氧化法合理应用，贵金属催化剂发挥作用，选择性氧化得以实现，所使用的副产物局限于水和少量没有反应的甘油，而且能够循环利用，由此

降低成本。

从原子经济性的未来发展情况来看，更加注重系统集成与跨学科融合。多功能催化剂设计对多步反应的“一锅化”操作起到促进作用，生命周期评估(LCA)工具被用于工艺评价体系中，从而在源头到终端的整个过程中均可对环境影响量化分析。高通量实验平台的应用以及自动化合成机器人的普及，原子经济性户籍成为精细化领域的标准范式，以实现“零废弃”。

1.2 绿色溶剂替代

绿色溶剂替代以超临界流体、生物基溶剂和离子液体这三个新型介质为核心展开。超临界二氧化碳的特点是临界温度比较低，通常为31.1℃，7.38 MPa的压力比较适中，没有毒且不可燃烧，很容易回收。这就意味着，其在萃取、聚合以及催化加氢等领域的发展潜力巨大。此外，生物基溶剂也备受关注，其是从玉米或者木质纤维素等可再生生物质资源中提取出来，生物降解性非常好，生态毒性比较低。比较具有代表性的是乳酸乙酯，BOD(可生化有机物含量)/COD(所有有机物含量)比值(废水可生化降解性)接近0.7，在涂料、清洁剂和制药行业广泛应用。

1.3 连续流化学技术

连续流化学技术及时应用微反应器或者管式反应器精准传输反应物并实时控制。微反应器的内部通道尺寸介于微米至毫米级，使得单位体积内的表面积/

体积比增加传质与传热效率大幅度提升。通常而言，在反应条件相同的情况下，连续流系统热传导速率是非常快的，可超过传统釜式反应的 10 倍之多，反应时间可缩短至一半，而且副产物生成量减少，降低爆炸风险，由此实现安全化生产。

此外，连续流化学技术还可提高选择性且获得更高的收率。该技术的停留时间分布窄且能够精准控制参数，反应条件可动态调节且达到毫秒级，避免发生副反应发生。连续流系统还可实现自动化与模块化集成，可放大生产而创造更高经济效益。

1.4 生物合成技术

生物合成技术的应用，有毒试剂使用量减少，温室气体排放量降低。生物合成技术的应用，生物催化剂开发起到重要的推动作用。随着 CRISPR–Cas9 等基因编辑工具的日渐成熟，加之结构生物学发展以及计算酶学研究的突破，科学家开始定向净化微生物，并进行理性设计。比如，某抗肿瘤药关键中间体，采用工程化放线菌之后，整个反应均在水相中完成，产物收率提升幅度超过 85%，副产物产量减少大约 70%，不仅实现原子经济性，还做好了过程清洁化。

循环经济发展中，废弃物资源化转型成为新动能，此为应用生物合成技术的成果。比如秸秆转化技术使得秸秆这种废弃物变成了资源，应用木质纤维素降解酶系以及糖转运系统，使得秸秆经过预处理之后成为乳酸等。经过进一步聚合，即可获得生物基聚乳酸，用于降解包装材料。这样，就不会对石油产生过度依赖，废弃生物质能够获得新的经济价值。

1.5 能源低碳化

能源低碳化是将可再生能源融入到化学反应体系中，碳足迹给大幅度削减，有助于规避碳关税壁垒，在国际市场上获得先机。最具有代表性的就是摒弃传统化石能源驱动，取而代之的是电催化，从而降低能源消耗量^[2]。比如，合成氨，多年以来采用哈伯–博什法，对现代农业起到重要支撑作用，但是对于运行条件有严格要求，要求高度达到 400–500 °C，压力达到 15–25 MPa，所消耗的能源占全球能源消耗量的 1.8%，而且平均每年所排放的二氧化碳超过 4 亿 t。应用电催化方法，采用其中的“绿色氨合成”技术，有效解决这方面的问题。进行操作的过程中，氮素得以循环利用，反应过程中的能源消耗量降低幅度超过 60%，同时还可避免氢气制备环节排放出大量的碳。

1.6 过程强化与智能化

过程强化与智能化可在更小空间和更短时间内获得更高的产出其质量更好。过程强化技术操作已经从单一设备转向系统级集成创新，比较具有代表性的是微反

器技术，所应用的微通道反应器比表面积非常大，超过 10,000 m²/m³，使得传质与传热效率显著增强。当放热反应非常剧烈的时候，应用微反应器，采用毫秒级热交换方式就可以将热量移除，保证温度均匀稳定。

智能化方面，精细化工领域普遍应用的是数字孪生技术和人工智能技术。这些智能技术的应用，通过部署海量传感器，用于实时采集数据信息，诸如温度、流量、压力等，结合使用机理模型和机器学习算法，系统就可以对操作参数系统调整，对原料波动或者设备老化问题以应对^[3]。更为前沿的是催化剂动态监测技术，使用的主要设备是原位电子显微镜，结合 X 射线吸收光谱，研究人员在反应的过程中即可对催化剂表面原子排列的变化情况实时观察。

2 提升应用效益的有效策略

2.1 技术集成创新

技术集成创新需要将系统化、智能化的技术生态体系构建起来，实现生物技术、人工智能与新材料科学交汇，由此将精细化工底层逻辑塑造。以酶催化为例，其作为一种反应方式，不仅效率高，而且专一，不会污染环境，应用于医药中间体、香料以及功能化学品合成中，发展潜力巨大^[4]。与传统的金属催化剂相比较，当处于温和条件下，酶能够实现高选择性转化，可减少副产物生成，避免使用有毒溶剂。某制药企业进行 β– 内酰胺类抗生素前体生产的过程中，通过引入微生物菌株进行发酵合成，减少 70% 的有机溶剂使用量，原子经济性提高到 92%。

2.2 全生命周期评估（LCA）

全生命周期评估为环境影响评价工具，可运用量化的方法全面分析原料从开采到最终废弃处理中各个环节的能源消耗量、资源利用率以及污染物排放量，企业对于环境热点能够准确识别。企业采用这种评估模式，可从单一产品向整个产品组合扩展，直到达到企业战略层面。部分跨国企业已经将其纳入到年度可持续发展报告中，作为环境责任重要指标展示给投资者和社会公众。部分企业具有前瞻性，将评估所获得的结果与客户共享，实现供应链透明化，使得自身的品牌社会信任度提升^[5]。由此可见，将全生命周期评估体系构建起来并不断健全，除了履行社会责任之外，也可以视为一种战略投资，使得企业快速抢占绿色市场。

2.3 政策 – 产业协同

政府启动专项资金扶持政策，促使技术快速落地，具体而言，可激动专门的基金用以支持实验室成果转化向工业化生产，以创造经济价值^[6]。考虑到精细化工绿色合成技术的应用需要投入大量的资金，且具有很

高的风险，中小企业难以承受，政府可以采用财政拨款的方式，将贷款利息降低，可承担企业的部分创新成本，帮助企业缓解压力。

加大产学研协同平台建设力度。单一企业研究开发能力不足，只有将高校、科研院所与产业链上下游资源整合起来，才能实现技术突破与快速转化。比如，某高校团队研究开发出一种新型离子液体绿色溶剂，原本停留在理论研究阶段，加入区域产学研联盟之后，与本地染料企业快速对接，开展应用测试，最终成功替代传统苯系溶剂，使企业 VOCs 排放削减 85% 以上。

2.4 产业链闭环

现在的精细化工行业面临着巨大的环保压力和转型，运行“产业链闭环策略”，对推动绿色合成技术的有效应用起到推动作用。产业链闭环的本质是采用系统性设计方式，将原本被视为没有应用价值的副产物重新纳入到生产流程中，将原料输入到产品输出再到资源回流的全生命周期循环体系构建起来，真正意义地实现“变废为宝”。这不仅契合联合国可持续发展目标（SDGs）中的清洁生产和负责任消费理念，也与中国“双碳”战略对工业领域提出的刚性要求相符合。

2.5 成本分摊模式

成本分摊模式创新是通过重新构建利益分配机制，将原本由单个企业承担的风险与支出转化为多方共担、共赢共享的合作格局，从而有效降低个体负担，激发技术创新活力。中国政府持续加大对绿色化学领域的支持力度，设立专项资金，为企业提供强有力的财政托底。面对复杂的技术链与供应链关系，上下游企业开始打破壁垒，形成联合攻关体。在此基础上，动态成本优化机制进一步强化了绿色技术的商业可持续性。

2.6 市场导向研发

需求精准识别机制是整个体系的起点。现代消费品市场对化学品的功能性与环保属性提出更高要求，比如，日化行业普遍推行“无磷、可降解、低刺激”标准，医药客户则高度关注手性分子的光学纯度与杂质谱控制。为此，领先企业纷纷建立客户环保指标数据库，整合全球主要市场的法规清单、认证要求与消费者偏好数据。某跨国洗涤剂原料商基于该数据库分析发现，东南亚市场对生物降解率 >90% 的非离子表面活性剂需求年均增长 17%，随即启动椰油基葡萄糖苷绿色合成工艺研发，并在一年内完成商业化量产，迅速占领细分市场。在医药领域，手性合成效率直接影响药物活性与安全性。比如，某 CDMO 企业针对客户对左旋氨氯地平中间体纯度 ≥ 99.5% 的要求，引入微反应器技术替代传统釜式氢化反应，通过精确控温与

高效传质，使副产物生成率下降 60%，催化剂寿命延长十倍以上，最终赢得国际药企长期订单。

新型“实验室—中试—客户试用”三级反馈闭环大幅压缩了这一时间。第一阶段聚焦快速验证，要求在 6 个月内完成小试并交付样品；第二阶段联合行业头部客户开展性能测试，收集真实工况下的反馈数据；第三阶段根据意见优化工艺参数，特别是关键催化剂的稳定性与重复使用次数。某企业在开发新型负载型钯催化剂时，初始批次仅能循环使用 5 次即失活，经三轮客户试用反馈后，通过载体改性和表面修饰技术将其使用寿命提升至 50 次以上，显著降低了客户单位生产成本。整个流程平均耗时不足 14 个月，较行业平均水平缩短近一半。

绿色品牌溢价策略赋予产品差异化竞争力。通过权威机构进行生命周期评价（LCA），获取如中国 GB/T 32001、欧盟 ECOPROFILE 等生态标签认证，不仅能增强消费者信任，还能支撑价格上浮。数据显示，获得绿色认证的特种化学品平均溢价空间达 15%-30%，部分高端电子化学品甚至可达 50% 以上。某江苏企业凭借其全生命周期碳足迹低于行业均值 40% 的优势，在出口欧洲市场时顺利通过绿色关税审查，并以单价高出同行 20% 仍获大批订单。由此可见，市场导向不仅是技术方向的选择，更是商业模式的重塑。

3 结束语

通过研究明确，精细化工推动高端化学品生产走上绿色发展道路，通过探究精细化工绿色合成技术趋势，了解其生产高端化学品的过程中所发挥的价值，以及技术进展。随着该技术不断升级，尤其是新技术的持续引进以及政策的支持，使得工艺链持续优化且扩大应用规模，不仅环境效益显著，而且提高经济效益。

参考文献：

- [1] 王苑, 刘婧. PCR 技术在食品微生物检测中的应用分析 [J]. 中国食品工业, 2024(21):110-112.
- [2] 彭大顺. 精细化工实验改革之路——引入绿色化学理论与有机合成技术 [J]. 2021(6):179-180.
- [3] 段美林. 用于醇转化的氧化物纳米半导体光催化剂的结构设计与机理研究 [D]. 中国科学技术大学, 2022.
- [4] 赵倩倩, 孙树波, 江洲. 绿色化工技术在精细化工中的应用及市场前景分析 [J]. 中国化工贸易, 2024(16):37-39.
- [5] 史开银. 若干精细化学品的新型绿色合成工艺研究 [J]. 中国化工贸易, 2020(24):113-114.
- [6] 曹卫国. 绿色化工技术在精细化工中的应用研究 [J]. 市场周刊·理论版, 2020(85):146-147.