

化工工程催化技术原理与创新

侯 嘉

宁夏瑞泰科技股份有限公司 宁夏 中卫 755000

摘 要：本文围绕化工工程催化技术展开研究，系统阐述催化反应热力学、动力学等基础原理，剖析均相、多相、酶催化等主流技术与催化剂构成机制。重点探究催化材料、反应工艺、领域应用及智能化技术的创新成果，梳理当前高端催化剂研发不足、工业化适配性差等发展瓶颈，并结合绿色低碳、精细化发展趋势，提出行业创新发展对策，为化工催化技术升级与产业化应用提供理论参考。

关键词：化工工程；催化技术原理；创新

引言：催化技术是现代化工产业的核心支撑技术，广泛应用于石油、煤化工、精细化工等关键领域，直接决定化工生产的效率、能耗与环保水平。随着化工行业绿色低碳、智能化转型提速，传统催化技术的弊端逐渐凸显。为推动催化技术迭代升级，本文梳理化工催化基础理论与技术体系，总结各类创新应用成果，分析行业现存瓶颈，预判未来发展趋势，助力化工产业高质量、可持续发展。

1 化工工程催化技术基础原理

1.1 催化反应基本理论

（1）催化反应的热力学与动力学原理：热力学决定催化反应的反应限度与自发趋势，催化剂无法改变反应吉布斯自由能变，不能突破反应平衡极限，仅能调控反应路径。动力学聚焦反应速率，催化剂通过降低反应活化能，加快正逆反应速率，缩短体系达到平衡的时间，是化工催化高效反应的核心动力。（2）催化剂参与反应的作用机制：催化剂并非单纯辅助介质，会全程参与化学反应，通过与反应物结合形成中间络合物，重构原有化学键断裂与生成路径，规避高活化能反应步骤。反应结束后，催化剂会脱附产物、恢复自身结构与性质，实现循环复用，全程无净消耗。（3）催化反应选择性、活性与稳定性核心机理：活性体现催化剂加速反应的能力，由活性位点数量与反应适配性决定；选择性是催化剂定向催化目标反应、抑制副反应的特性，核心源于活性位点的结构特异性；稳定性指催化剂抗损耗、保性能的能力，决定其工业使用寿命^[1]。

1.2 主流化工催化技术分类及原理

（1）均相催化技术原理及适用场景：催化剂与反应物处于同一相态，分子接触充分、活性均匀，反应条件温和，多用于精细化工合成、液相酯化反应等对反应均匀性要求高的场景。（2）多相催化技术原理与反应过

程：催化剂与反应物为不同相态，以固-液、固-气反应为主，反应包含吸附、反应、脱附三步，分离便捷、适配工业化连续生产，是石油炼化、煤化工的主流技术。

（3）酶催化技术的生物催化基础原理：以生物酶为催化剂，依托酶分子特异性空间结构，精准匹配底物分子，具备高效、低能耗、高选择性的特点，适用于生物医药、食品化工等绿色精细生产领域。

1.3 催化剂核心构成与作用机制

（1）催化剂活性组分的催化作用：是催化剂的核心功能部分，负责提供活性位点，直接参与反应物活化与化学键断裂、生成过程，决定催化剂的基础催化活性与定向反应能力。（2）载体与助剂的辅助催化机理：载体用于分散活性组分、增大比表面积，提升活性位点利用率，同时增强催化剂机械强度与热稳定性；助剂不直接催化反应，可调控活性组分结构，优化选择性，抑制副反应。（3）催化剂失活、再生与修复原理：催化剂会因积碳、中毒、结构烧结、活性组分流失等出现失活。工业中可通过高温焙烧、溶剂清洗、还原活化等方式去除杂质、修复活性结构，实现催化剂再生，降低生产成本。

2 化工工程催化技术创新类型与应用

2.1 新型催化剂材料创新

（1）纳米催化材料的制备与催化优势创新：纳米催化材料主要通过溶胶凝胶法、水热合成法、气相沉积法等工艺制备，可精准调控材料粒径、形貌与表面结构。相较于传统催化材料，纳米材料比表面积更大、表面活性位点数量显著增多，能够有效降低反应活化能。同时其量子尺寸效应与表面界面效应，可优化反应物吸附与脱附性能，大幅提升催化反应活性与选择性，解决了传统催化剂反应效率低、物料浪费严重的行业痛点。

（2）多孔复合催化剂的结构优化创新：多孔复合催化剂以多级孔道结构设计为核心创新点，整合微孔、介孔、

大孔的结构优势,突破单一孔道催化剂传质阻力大、大分子底物难以反应的局限。通过结构优化,可实现活性组分的均匀负载,避免活性颗粒团聚失活,同时畅通物料传输通道,提升反应传质、传热效率。该结构兼具高活性、高稳定性,适配多类复杂化工催化反应场景^[2]。

(3) 环保型无重金属催化剂研发创新:传统化工催化剂多含重金属,易造成环境污染、产物残留等问题。无重金属催化剂以非金属、生物基、稀土低毒材料为核心,摒弃铅、汞、铬等有害组分,依托改性碳材料、非金属氧化物等体系实现催化功能。其核心创新在于兼顾催化性能与绿色环保属性,反应过程无重金属溶出,废弃物可降解,契合化工行业绿色低碳的发展需求。

2.2 催化反应工艺创新

(1) 低温低压高效催化工艺优化:传统催化反应多依赖高温高压条件,能耗高、设备损耗大、安全风险高。低温低压催化工艺通过筛选适配新型催化剂、优化反应体系配比,降低反应活化门槛,在温和工况下实现高效催化。该工艺有效降低生产能耗与设备运维成本,同时减少高温高压下的副反应,提升产物纯度与原料利用率。(2) 连续化催化反应工艺创新应用:传统间歇式催化工艺存在效率低、产物稳定性差、人工成本高的问题。连续化催化工艺通过流水线式反应设计,实现原料持续进料、反应持续进行、产物连续出料,精准控制反应时长、温度、压力等参数。工艺稳定性强、生产效率高,可适配大规模工业化量产,大幅提升化工生产的自动化与规模化水平^[3]。(3) 耦合催化新工艺的开发与原理:耦合催化工艺是将两种及以上催化反应或工艺过程有机结合,打破单一催化体系的性能局限。常见的氧化-还原耦合、吸附-催化耦合等工艺,可实现反应过程协同增效,同步完成原料转化、杂质去除、产物提纯等工序,简化生产流程,缩短反应链路,实现提质、增效、降本的多重效果。

2.3 催化技术在重点化工领域创新应用

(1) 石油化工催化提质增效创新应用:在石油化工领域,新型催化技术主要应用于原油精炼、油品提质、尾气处理等环节。通过新型加氢催化、裂化催化材料与工艺,提升重油转化率,降低油品硫、氮杂质含量,提升汽油、柴油品质。同时优化催化反应过程,减少炼厂副产物排放,实现石油化工生产的提质增效与清洁化改造。(2) 精细化工绿色催化技术应用创新:精细化工产品纯度要求高、副反应管控严格,绿色催化技术替代了传统高污染、高损耗的酸碱催化工艺。依托高选择性催化材料,实现精细化学品的定向合成,大幅减少副产物

生成,降低溶剂、原料消耗,减少三废排放,适配医药中间体、高端助剂等精细产品的绿色生产需求^[4]。(3) 煤化工催化转化技术创新实践:煤化工核心是煤炭清洁高效转化,创新催化技术可实现煤制烯烃、煤制油、煤制乙二醇等关键反应的高效转化。新型耐温、抗中毒煤化工催化剂,可适配煤炭转化的复杂工况,提升煤炭转化效率与目标产物收率,降低煤化工生产能耗,推动传统煤化工向高端化、清洁化、精细化转型。

2.4 智能化催化技术创新发展

(1) AI辅助催化剂筛选与设计技术:传统催化剂研发依赖人工试错,周期长、成本高、效率低。AI智能技术可通过大数据建模,模拟催化剂组分、结构与催化性能的关联规律,快速筛选最优活性组分、载体与配比方案,精准设计新型催化材料,大幅缩短研发周期,降低实验成本,为催化剂创新研发提供智能化支撑。(2) 智能化催化反应过程调控技术:依托传感器、大数据与智能算法,对催化反应的温度、压力、流速、物料配比等核心参数进行实时监测与动态调控。可根据反应工况变化自动优化反应条件,及时规避反应波动,保障催化反应始终处于最优状态,提升反应稳定性与产物合格率。

(3) 自动化催化生产控制系统创新:自动化控制系统整合数据采集、智能分析、自动执行功能,实现催化生产全流程无人化、精准化管控。系统可自动完成进料、反应、出料、催化剂再生等工序的调控,实时排查设备故障与工艺异常,提升化工催化生产的安全性、稳定性与智能化水平,助力现代化工产业智能制造升级。

3 化工催化技术发展瓶颈与未来发展趋势

3.1 当前化工催化技术应用瓶颈

(1) 高端催化剂自主研发能力不足问题:我国常规催化剂已实现国产化,但高端、特种催化剂仍存在短板,其分子设计、精准合成、结构调控等核心技术长期被国外垄断,国内自主研发体系不完善。传统试错式研发模式效率偏低,高选择性、耐苛刻工况的高端催化剂性能与进口产品存在差距,严重制约我国高端化工产业自主化发展进程。(2) 催化剂使用寿命与再生技术短板:工业复杂工况下,催化剂易出现积碳、中毒、高温烧结及活性组分流失等问题,使用寿命较短。现有再生技术手段单一,常规焙烧、清洗工艺仅能恢复部分催化活性,无法修复催化剂微观结构损伤,再生后性能衰减显著,多次再生后基本报废,大幅增加企业生产与耗材成本。(3) 大规模工业化催化应用适配性难题:新型催化技术多在实验室理想工况研发,难以适配复杂工业化生产场景。工业生产杂质较多、工况波动频繁、传质传

热条件受限,会导致催化剂活性与选择性大幅下降。同时部分新型催化工艺与生产设备匹配度不足,工艺放大难度大,难以实现规模化工业落地。

3.2 绿色低碳催化技术发展方向

(1) 零污染绿色催化体系构建:以无重金属、低能耗、零排放为核心发展目标,摒弃传统高污染催化体系,重点研发非金属、生物基及复合环保催化材料。通过优化催化反应路径,规避有毒助剂与溶剂使用,从源头减少三废产生,构建全过程清洁、高效、安全的绿色催化生产体系。(2) 二氧化碳资源化催化转化技术:该技术是化工低碳发展的核心方向,依托高效催化体系,将工业排放的二氧化碳转化为甲醇、烯烃、碳酸盐等化工原料。通过催化活化二氧化碳稳定化学键,实现温室气体资源化利用,助力化工行业实现碳减排、碳循环,推动产业低碳转型^[5]。(3) 废弃物高效催化降解技术发展:针对化工废水、废气、固废等污染物,研发专用高效催化降解技术。利用催化氧化、光催化等技术,将有机污染物、有害气体彻底分解为无害物质,解决化工生产污染治理难题,提升工业废弃物资源化、无害化处理水平。

3.3 高端精细化催化技术发展趋势

(1) 高选择性、高稳定性催化剂迭代升级:未来催化剂研发将聚焦精准改性 with 结构优化,通过调控催化剂孔道结构、活性位点分布,大幅提升反应定向选择性,抑制副反应。同时优化材料耐热、抗中毒性能,延长催化剂使用寿命,适配高端精细化工的高精度生产需求。(2) 微尺度催化、光电催化新型技术突破:微尺度催化依托微型反应设备强化传质效率,实现精准可控的催化反应;光电催化整合光能、电能与催化优势,可在温和条件下完成复杂反应,突破传统热催化能耗高、局限性大的问题,成为新型化工催化技术的重要突破方向。(3) 催化技术与新能源化工深度融合:催化技术将与氢能、光伏、储能等新能源领域深度结合,推动电催化制氢、新能源原料合成等技术发展。依托新能源清洁优势,替代传统高能耗催化工艺,构建新能源化工一体化

生产模式,助力化工产业绿色高端升级。

3.4 行业发展对策与展望

(1) 强化核心催化技术自主创新研发:聚焦高端催化剂短板,搭建产学研协同研发平台,深化催化机理基础研究,突破核心配方、精准制备、改性再生等关键技术,打造自主可控的催化技术体系,摆脱国外技术垄断。(2) 完善催化技术工业化应用体系:建立实验室研发、中试放大、工业化落地的完整体系,优化技术放大工艺,解决新型催化剂工业适配性差、稳定性不足等问题,加快新型催化技术的产业化落地与推广应用。(3) 未来化工催化技术整体发展展望:未来化工催化将朝着绿色化、智能化、精细化、一体化方向持续发展。依托智能技术、新能源技术与催化技术的融合创新,逐步解决行业发展瓶颈,实现高效、低碳、低成本、智能化的现代化工生产模式,助力化工产业高质量可持续发展。

结束语

综上,化工催化技术依托理论革新与工艺创新,实现了高效化、绿色化、智能化的多元突破,成为化工产业转型升级的核心动力。当前行业仍面临核心技术短板、工业化适配不足等诸多难题。未来需聚焦自主创新、工艺优化与产业融合,深耕绿色低碳、精细智能催化领域,突破技术发展瓶颈,推动新型催化技术规模化落地,助力现代化工产业实现提质增效与低碳发展的双重目标。

参考文献

- [1]田川东.化工工艺中节能降耗技术应用[J].化工管理,2023,13(4):108-112.
- [2]陈科,曾琦斐,唐琼.化工工艺手性催化剂技术研究[J].中国高新技术企业,2022,20(15):219-223.
- [3]孙立喆.化工工艺手性催化技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2022,33(11):148-151.
- [4]张凯.化学工程与工艺中催化剂的选择、作用原理及工程应用创新[J].工程与管理科学,2026,8(1):45-51.
- [5]陈磊,周明宇.绿色催化技术原理及其在化工节能减排中的创新应用[J].化工环保,2023,43(5):589-595.