

新型催化剂在CO₂资源化利用中的应用研究

刘利付

浙江巴陵恒逸己内酰胺有限责任公司 浙江 杭州 311228

摘要: 为推进双碳目标落地、解决CO₂减排与资源化利用难题,本文系统梳理金属基、碳基、MOFs及光电解耦等新型催化剂的制备原理与性能特点,总结其在CO₂加氢制化学品、光电还原、矿化固碳、共聚合成材料等领域的应用现状。同时剖析催化剂稳定性差、制备成本高、选择性不足及产业化适配性弱等核心问题,针对性提出结构调控、界面改性、参数优化等改进策略,并展望多场耦合催化、智能化集成体系的未来发展方向。

关键词: 新型催化剂; CO₂资源化利用; 应用

引言: 温室气体过量排放引发的气候问题日益严峻,CO₂减排与资源化利用已成为绿色化工与双碳领域的研究热点。传统CO₂转化技术存在能耗高、转化率低、产物杂乱等短板,而新型催化剂是突破该技术瓶颈的核心关键。为明确各类催化剂的应用优势与现存短板,本文分类阐述新型CO₂催化材料的类型与制备原理,全面分析其多元应用场景,剖析技术痛点并给出优化方案,为CO₂资源化催化技术的迭代升级与工业化落地提供参考。

1 CO₂资源化利用新型催化剂的类型与制备原理

1.1 金属基新型催化剂

(1) 贵金属基催化剂以Pt、Pd、Au为核心,具备优异的导电性与催化选择性,活化CO₂分子能力强、反应稳定性好,适配低温催化还原场景,主要通过浸渍法、溶胶-凝胶法制备,可精准调控金属负载量提升催化活性。

(2) Cu、Ni、Fe等非贵金属基催化剂成本低廉、储量丰富,纯相催化剂活性与稳定性有限,常通过形貌调控、载体负载、离子掺杂等改性技术,优化表面活性位点,改善CO₂吸附与转化效率。(3) 双金属复合催化剂依托两种金属的电子转移与结构互补效应,形成协同催化机理,可有效规避单金属催化剂的缺陷,优化反应能垒,大幅提升CO₂转化效率与产物选择性。

1.2 碳基新型催化剂

(1) 石墨烯、碳纳米管具有比表面积大、导电性优异、结构稳定的特点,可暴露大量催化活性位点,同时加速电子传输,为CO₂催化反应提供优质载体环境。

(2) 多孔活性炭基催化剂通过高温活化、酸碱改性等工艺优化孔隙结构,增大比表面积,强化CO₂吸附富集能力,提升界面催化反应效率。(3) 杂原子掺杂碳基催化剂通过N、S、P等杂原子掺杂,调控碳材料表面电子分布与官能团结构,优化反应物吸附活化机制,实现催化性能的精准优化^[1]。

1.3 金属有机框架(MOFs)及衍生催化剂

(1) MOFs催化剂具有孔隙规整、比表积极高、结构可设计的特点,主要通过溶剂热法、水热法合成,可精准调控微观结构。(2) 通过高温煅烧、热解改性等技术,可将MOFs转化为金属碳化物、氧化物衍生催化剂,保留前驱体结构优势,提升结构稳定性。(3) 通过调控孔径尺寸与表面官能团,可优化反应物扩散与吸附过程,有效改善催化剂的催化效率与抗失活性能。

1.4 新型光、电催化催化剂

(1) 半导体光催化剂依据带隙结构选型,通过掺杂、复合改性调整光响应范围,提升光子利用率,实现光能向化学能的高效转化。(2) 高效电催化催化剂以多级孔、纳米化结构设计为核心,增加活性位点,降低电催化反应过电位。(3) 光电耦合催化剂整合光、电催化优势,通过光电协同作用加速电荷分离与传输,规避单一催化方式的短板,显著提升CO₂资源化转化效果。

2 新型催化剂在CO₂资源化利用中的具体应用

2.1 催化CO₂加氢制备高值化学品

(1) 新型催化剂可高效催化CO₂加氢制备甲醇、乙醇等高值醇类化学品,解决了传统合成技术转化率低、能耗高的问题。该体系核心材料为金属基复合催化剂与改性碳基催化剂,可精准活化稳定的CO₂分子、断裂碳氧双键。相较于传统催化剂,其可优化反应界面、降低反应活化能,在中低温条件下实现CO₂高效转化,同时提升醇类产物选择性、减少副产物,为醇类化学品绿色合成筑牢技术基础。(2) 在烃类燃料合成领域,新型催化剂可助力CO₂加氢制备甲烷、烯烃等清洁能源燃料。改性铁基、铜基催化剂可调控碳链增长反应路径,精准生成短链烃类产物,抑制长链副产物产生。该工艺以工业废气CO₂为原料替代传统化石原料,兼具碳减排与资源循环利用价值,可适配工业燃料补给、清洁能源生产等场景^[2]。

(3) 反应温度、压力、氢碳比及空速等工艺参数,对加氢催化性能影响极大。参数优化可平衡 CO_2 转化率与目标产物选择性,高温易诱发副反应、降低产物纯度,低压会弱化 CO_2 吸附活化效果。不同催化剂适配工艺区间不同,通过对比试验确定最优参数体系,可有效提升催化体系稳定性与工业化适配性。

2.2 光/电催化 CO_2 还原资源化应用

(1) 光催化 CO_2 还原技术依托半导体光催化剂、杂原子掺杂碳基催化剂,在常温常压下利用太阳能驱动 CO_2 转化,制备甲醛、甲酸、甲醇等低碳有机物。新型光催化剂可拓宽可见光响应范围,加速光生电荷分离,抑制电荷复合失效问题,有效提升光能利用率与催化反应效率。该技术全程绿色无污染,能耗极低,是实现 CO_2 温和资源化转化的核心技术之一。(2) 电催化 CO_2 还原技术适配工业化规模化应用场景,借助高效电催化催化剂,可将 CO_2 精准转化为碳酸盐、甲酸、草酸等高附加值无机、有机产物。金属复合电催化剂、多孔碳基电催化剂可降低电催化过电位,减少电能损耗,同时通过调控活性位点结构,定向引导反应路径,提升单一产物的选择性,解决传统电催化产物杂乱、利用率低的问题。(3) 光电耦合催化体系整合光催化与电催化的双重优势,弥补单一催化技术的短板。光照可辅助激发催化剂活性、降低电催化能耗,电场可加速电荷传输、提升光催化反应速率。通过调控光照强度、外加电压、电解液浓度等参数,可实现对反应效率与产物分布的精准调控,大幅提升 CO_2 还原的整体转化效率与产物可控性^[3]。

2.3 CO_2 催化矿化与固碳应用

(1) 新型催化剂可有效加速 CO_2 矿物碳酸化反应,实现二氧化碳永久性固碳。天然矿物碳酸化反应速率极慢,新型金属基、碱性催化剂可活化矿物表面活性位点,促进硅酸盐、钙镁基矿物与 CO_2 、水的反应,快速生成稳定碳酸盐矿物,实现 CO_2 固化封存。该固碳方式稳定性强、无二次排放,可实现长期碳封存。(2) 工业固废基催化剂是低成本、资源化的新型催化材料,以钢渣、粉煤灰、矿渣等工业固废为原料,经活化改性后制备复合催化剂,可协同实现工业固废资源化与 CO_2 矿化固碳。固废中富含的钙、镁氧化物可作为活性组分,在催化作用下与 CO_2 发生反应,既解决工业固废堆存污染问题,又大幅降低 CO_2 矿化催化成本,适配工业低碳改造场景^[4]。(3) CO_2 矿化反应生成的碳酸钙、碳酸镁等产物具备极高资源化价值,可广泛应用于建筑建材、化工填料、土壤改良等领域。精制碳酸盐可作为新型环保建材原料,替代传统水泥辅料;高纯碳酸盐可用于化工生产与工业

填料,实现 CO_2 从废气到资源的闭环利用,提升固碳技术的经济价值。

2.4 催化 CO_2 共聚制备高分子材料

(1) 新型配位催化剂是 CO_2 共聚反应的核心材料,可高效催化 CO_2 与环氧丙烷、环氧乙烷等环氧化物发生共聚反应。相较于传统催化剂,新型金属配位催化剂、MOFs衍生催化剂配位能力更强,可精准调控聚合反应路径,降低聚合反应活化能,提升共聚反应效率,实现 CO_2 的高效固定与高分子材料合成。(2) 在可降解聚碳酸酯材料合成中,通过优化催化剂结构与聚合工艺条件,可改善聚碳酸酯的分子量分布、结晶度与力学性能。新型催化剂可有效调控共聚单元比例,减少副产物环状碳酸盐生成,提升聚合物纯度与稳定性。制备的聚碳酸酯材料具备良好的生物降解性,可有效缓解塑料污染问题。(3) CO_2 共聚催化技术具备显著的产业化应用优势,该技术以工业废气 CO_2 为核心原料,原料来源广泛、成本低廉,可有效降低高分子材料的生产成本。同时,合成的聚碳酸酯材料绿色可降解,适配包装、医用、日用塑料制品等多个领域,契合双碳政策与绿色化工发展趋势,兼具环保效益、经济效益与产业化推广价值^[5]。

3 新型催化剂在 CO_2 资源化利用中应用的现存问题、优化策略与发展展望

3.1 新型催化剂应用现存核心问题

(1) 当前多数新型催化剂存在稳定性不足、易失活、使用寿命较短的问题。在连续催化反应过程中,催化剂表面易出现积碳覆盖活性位点、金属组分氧化、结构坍塌以及活性组分脱落等现象,导致催化活性快速衰减。尤其在高温加氢、高压矿化及长时间光电催化体系中,催化剂结构损毁问题更为突出,需要频繁更换与再生,大幅增加系统运维成本,制约连续化稳定运行。(2) 高活性贵金属、精细MOFs衍生等新型催化剂制备工艺复杂,原料价格昂贵,合成过程对设备、温度、气氛要求严苛,制备成本居高不下。同时实验室小试合成工艺难以直接放大,批量制备时容易出现活性不均、结构偏差等问题,规模化生产稳定性差,难以适配工业大规模应用需求。(3) 现有催化剂普遍存在催化选择性不足的缺陷, CO_2 还原、加氢共聚等反应过程反应路径复杂,极易生成多种副产物。产物体系组分复杂、目标产物纯度偏低,后续需要配套复杂的精馏、分离、提纯工序,不仅增加设备投入与能耗成本,还降低了整体碳资源利用效率,限制工艺经济性。

3.2 新型催化剂性能优化与改性策略

(1) 结构调控是提升催化性能的核心手段,通过多

孔结构构筑、纳米化形貌调控等优化设计,可有效增大催化剂比表面积,暴露更多活性位点,同时优化孔道结构,加快反应物扩散与产物脱附速率。规整的多级孔结构能够缓解积碳堆积问题,纳米化改性可缩短电荷传输路径,显著提升反应活性与结构稳定性。(2)界面改性技术可从本质上优化催化剂界面特性,主要包括杂原子掺杂、载体负载、多组分复合改性等方式。掺杂改性可调控催化剂表面电子分布,优化CO₂吸附活化能力;负载与复合改性可锚定活性组分、抑制颗粒团聚,利用多材料协同效应提升催化选择性与抗失活能力。(3)反应工艺参数的精细化调控能够最大化发挥催化剂性能优势,通过优化反应温度、系统压力、氢碳比、反应氛围及空速等参数,可精准调控反应热力学与动力学过程,抑制副反应发生。匹配催化剂特性设置最优工艺区间,可有效平衡CO₂转化率与目标产物选择性,提升整体催化效率。

3.3 CO₂催化资源化技术产业化瓶颈

(1)目前CO₂催化资源化技术多停留在实验室小试与中试阶段,规模化制备工艺尚不成熟,催化剂批量合成均匀性难以保障。同时现有工业设备多针对传统化工工艺设计,与新型催化体系的反应条件、物料传输、工况适配性不足,缺乏专用成套化反应设备,限制技术工业化落地。(2)各类CO₂催化转化过程普遍存在能耗偏高的问题,光电催化、高压加氢体系能耗成本较高,加之催化剂制备、设备运维成本叠加,导致整体项目运行经济性较差。在无专项政策补贴的情况下,商业化推广动力不足,难以实现市场化普及。(3)产业配套技术体系不完善,现有产物分离提纯技术效率低、能耗高,针对多组分混合产物的精细化分离设备匮乏。前端催化转化与后端提纯工序匹配度不足,一体化配套工艺缺失,导致整体生产流程繁琐、成本偏高,制约产业化进程。

3.4 技术发展趋势与未来研究展望

(1)低成本、长寿命复合型催化剂是未来核心研发方向,重点聚焦非贵金属、固废基、碳基复合催化材

料,通过简单改性工艺实现高活性、高稳定性适配,降低催化剂制备与更换成本,解决传统催化剂寿命短、成本高的痛点。(2)光-电-热耦合协同催化技术是重要发展趋势,通过多场耦合打破单一催化技术的性能局限,利用多能源协同降低反应能耗,加速电荷与物质传递,大幅提升CO₂转化效率与产物调控精度,实现温和条件下高效碳转化。(3)一体化、智能化CO₂资源化催化体系将成为产业化主流,未来将推动催化剂制备、催化反应、产物分离全流程集成化发展,构建规模化、连续化的成套工艺系统,结合智能调控技术优化运行工况,逐步实现CO₂资源化利用技术的大规模工业化应用,助力双碳目标落地。

结束语

本文全面探究了各类新型催化剂在CO₂资源化利用中的应用价值,明确不同催化材料的性能优势与适用场景,梳理了当前技术存在的性能、成本、产业化等多维度问题。后续需重点研发低成本、长寿命复合催化材料,突破多场耦合催化核心技术,完善产业配套体系,推动催化工艺智能化、集成化发展。以期彻底解决CO₂资源化转化痛点,助力绿色低碳产业发展与双碳战略高效落地。

参考文献

- [1]丁超民.二氧化碳还原反应中不同催化技术的研究进展[J].计量科学与技术,2024,12(2):91-95.
- [2]梁泽龙.负载银颗粒金属有机框架催化剂的合成及其电催化CO₂还原性能[J].无机化学学报,2025,41(1):165-173.
- [3]王海涛.钴掺杂铈纳米片催化剂用于无电解液体系电催化CO₂还原制甲酸[J].电化学,2024,30(4):89-98.
- [4]王倩茹.双金属纳米催化剂的精细调控在电催化二氧化碳还原中的研究进展[J].无机化学学报,2024,40(7):201-206.
- [5]张博文.二氧化碳电催化还原高选择性催化剂调控机制研究综述[J].化工进展,2023,42(9):412-418.