

铜基负载型催化剂在甲醇水蒸气重整制气中的应用

程小华, 李文昱, 贾凤安, 何 峰, 俞委静

(杭州普菲科空分设备有限公司, 浙江 杭州 311404)

摘 要 为解决甲醇水蒸气重整制气中铜基负载型催化剂在工业规模化应用、长期稳定运行及催化性能提升等方面的核心瓶颈, 本文以铜基负载型催化剂为研究对象, 系统剖析其在实验室基础应用、工业规模化场景及多领域适配中的现状与价值, 聚焦催化性能不足、工业适配性差、长期运行失活三大关键问题, 从载体改性与助剂调控、工业化工艺适配、抗失活技术升级及再生技术优化等维度, 提出针对性解决对策, 以期铜基负载型催化剂高效应用于甲醇水蒸气重整制气领域提供理论参考, 进而推动该技术向绿色化、高效化、规模化方向发展。

关键词 铜基负载型催化剂; 甲醇水蒸气重整; 制氢技术; 催化性能

中图分类号: TQ426.6

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.23.040

0 引言

氢能作为清洁高效的二次能源, 是推动能源结构转型、实现“双碳”目标的关键载体。甲醇水蒸气重整制氢因原料易储运、反应条件温和、产氢纯度高, 成为分布式制氢与移动供氢的主流技术路线。铜基负载型催化剂凭借成本优势与良好的低温催化活性, 成为该领域的核心催化材料, 已在实验室研究与工业试点中展现出应用潜力。当前, 氢能产业规模化发展对制氢技术的效率、稳定性与经济性提出更高要求, 而铜基催化剂仍存在活性衰减、选择性不足、工业适配性弱及易失活等问题, 制约其大规模推广。本文立足于甲醇水蒸气重整制气技术发展需求, 梳理铜基负载型催化剂的应用现状, 剖析应用中的核心瓶颈, 探索性能优化与工业适配的可行路径。

1 铜基负载型催化剂在甲醇水蒸气重整制气中的应用现状

1.1 实验室层面应用场景

实验室场景中铜基负载型催化剂已实现基础应用, 为工业转化奠定基础。这类催化剂可精准适配小型甲醇水蒸气重整制气实验装置, 通过严格控制反应温度、压力、水醇比等关键条件, 系统完成催化活性、选择性、稳定性等核心性能的初步验证, 清晰明确不同制备参数与催化效果之间的内在关联的影响规律, 为后续性能优化提供精准的数据支撑。其核心应用价值集

中体现在催化参数优化与组分调控研究中, 科研人员可借助这一基础催化体系, 灵活调整铜基活性组分的负载量、载体的类型及粒径、助剂的掺杂比例与种类, 逐步挖掘催化剂性能提升的关键路径, 明确各组分间的协同作用机制, 为后续催化剂的性能升级提供清晰且具体的方向。同时, 铜基负载型催化剂作为甲醇水蒸气重整制气领域的基础催化体系, 可直接用于新型载体、新型助剂的应用测试与效果验证, 通过系统对比不同载体的比表面积、孔容结构、热稳定性及助剂的电子调控作用, 筛选出适配甲醇水蒸气重整反应的最优组分组合, 进一步完善催化剂的作用机理研究, 为催化剂的工业化升级提供坚实的理论与实验支撑, 有效搭建起实验室基础研究与工业规模化应用之间的核心桥梁, 推动催化技术从理论走向实践。

1.2 工业层面应用场景

工业场域里铜基负载型催化剂已经达成规模化运用, 配合不一样制气需要, 在大型甲醇水蒸气重整制氢设备里, 此类催化剂负担着核心催化角色, 可以在工业制造的常规反应状态下高效带动甲醇跟水蒸气的重整反应, 高效转化原料并产出高纯度氢气, 为化工合成里的加氢反应、能源生产中的燃料电池供电等范畴给出优质氢气原料, 直接支撑相关产业的平稳、高效运作, 针对分布式制氢、移动制氢等多样化工业场域, 铜基负载型催化剂能够依据不同场域的制气规模、空间限制、纯度要求等特征, 灵活调节自身形态与催

作者简介: 程小华 (1980-), 男, 专科, 高级工程师, 研究方向: 空分设备气体提纯设备制造和制氢设备领域。

化性能,准确配合小型化、移动化的制气装置,有效满足偏远地区工业制造、移动能源终端等特殊场域的氢气供应需要,弥补了传统制气技术在特殊场域中的运用空白^[1]。伴随绿色化工理念的普及与产业政策的引导,该类催化剂已广泛运用于低能耗、低排放的制气工艺里,借助优化催化效率减少反应过程中的能源损失,降低二氧化碳、一氧化碳等污染物排放,既符合工业制造的节能降耗、降本增效需要,也契合绿色低碳的产业导向,成为工业制气领域不可或缺的核心材料,推动甲醇水蒸气重整制气技术向绿色化、高效化方向升级。

1.3 不同领域适配应用

铜基负载型催化剂能够适应多个领域制气需求,应用价值多样且目标明确。在燃料电池方面,它依靠良好的催化选择性,可以准确控制甲醇水蒸气重整反应产物的纯净度,有效减少二甲醚、甲烷等副产物的产生,为燃料电池输送符合使用条件的高纯氢气,避免杂质对电池电极带来持久损伤,保证燃料电池高效、稳定地工作,直接支持燃料电池在新能源汽车、分散供电、便携能源设备等领域的推广使用,促进新能源产业的快速进步。化工合成领域内,该催化剂能够借助催化甲醇水蒸气重整反应高效制取氢气,为甲醇转变成甲醛、甲酸等产物的反应,以及各种有机化合物的加氢反应等化工流程供给充足且稳定的气体来源,有效改善反应速率与产物品质,降低副产物带来的原料损耗与环保负担,推动化工产业朝着质量提升、绿色高效的方向转变。能源存储方面,铜基负载型催化剂支撑氢气储能体系的建立与实际应用,能够配合太阳能、风能等可再生能源发电实现“制氢—储能—释能”的完整循环,有效应对可再生能源波动性、间歇性的难题,提高能源存储效果与利用效率,为能源结构从化石能源向可再生能源转换提供关键技术支撑,扩展了铜基负载型催化剂的应用范围与产业价值。

2 铜基负载型催化剂在应用中的核心问题

2.1 催化性能相关问题

催化性能不足制约应用效果,主要体现在活性、选择性与稳定性三个维度。铜基活性组分本身具有较高的表面能,在反应过程中易发生颗粒团聚现象,导致催化剂表面活性位点数量减少,催化活性下降,无法充分推动甲醇水蒸气重整反应的进行,降低反应转化率^[2]。反应选择性较差是另一核心问题,铜基催化剂表面酸碱位点分布不均衡,易引发二甲醚、甲烷等副反应,不仅消耗原料甲醇,还会降低氢气产物的纯度,

增加后续产物分离的难度与成本。长期运行中,催化剂的催化性能衰减较快,在高温、高湿度的反应环境下,铜基组分的结构稳定性不足,活性位点持续流失,难以满足工业生产中持续稳定制气的需求,间接增加了催化剂的更换频率与应用成本,限制其在长时间连续生产场景中的应用。

2.2 工业应用相关问题

工业应用存在适配性与经济性两方面不够充足的问题,阻碍了规模化推广。实验室做催化剂制备的时候,常常采用精细化操作来控制制备参数,能够保证催化剂性能的均一性,不过这类制备工艺很难直接转成工业规模化生产。工业生产里批量制备容易引起参数上下波动,会让催化剂性能出现差别,不能形成稳定的催化效果。催化剂跟工业反应装置的适配性表现欠佳,工业制气装置的体积、传质条件跟实验室装置有明显不同,铜基负载型催化剂的形态、尺寸很难完全匹配工业装置的结构需要,造成传质效率往下掉,影响整体制气效率,给工业生产带来更多能耗,铜基活性组分、优质载体还有助剂的原料成本偏高,加上规模化制备过程中能耗与损耗,使其缺乏市场竞争力,很难替代传统催化剂实现大规模推广应用^[3]。

2.3 长期运行相关问题

长期运行中的失活问题比较明显,带来应用成本与运维难度的上升。甲醇水蒸气重整反应所处的高温条件容易让铜基催化剂出现铜颗粒烧结现象,颗粒尺寸变大,同时反应进程里生成的积碳会堆在催化剂表面,堵住活性位点和孔径通道,两方面作用造成催化剂很快失活,失去催化功能。原料甲醇里面带有的硫、氯这类杂质,容易跟铜基活性组分发生化学反应,引起催化剂中毒,破坏催化剂的活性结构,明显缩短催化剂的使用寿命。目前,催化剂再生技术还不够成熟,再生过程复杂且能耗偏高,再生后的催化剂性能很难回到新鲜催化剂的程度,再生结果不理想,造成催化剂更换次数增多,不光提高了原料成本,还加大了工业生产的运维工作量跟难度,进一步限制铜基负载型催化剂的工业应用。

3 铜基负载型催化剂应用问题的解决对策

3.1 催化性能优化对策

组分与制备工艺调控可有效提升催化剂活性、选择性与稳定性,通过多维度、精准化的调控手段,针对性解决催化性能不足的问题,推动催化剂性能升级。优化载体改性与助剂掺杂策略,优先选择高比表面积、良好热稳定性与机械强度的载体,通过金属氧化物掺

杂、酸碱改性等方式精准调控载体表面结构,增强载体与铜基组分之间的相互作用,形成稳定的界面结构,有效抑制铜基组分在反应过程中的团聚现象,增加催化剂表面活性位点数量,显著提升催化活性,确保催化剂能够充分推动甲醇水蒸气重整反应进行^[4]。调控催化剂表面酸碱性质,通过精准调整制备参数优化表面酸碱位点的数量与分布,使酸碱位点比例达到适配甲醇水蒸气重整反应的最优状态,有效抑制二甲醚、甲烷等副反应的发生,提高氢气产物的选择性,减少原料浪费与后续产物分离的难度及成本,提升制气的经济性。优化制备工艺参数,合理控制浸渍时间、焙烧温度、还原条件等关键环节,强化载体与活性组分的相互作用,提升催化剂的晶体结构稳定性,减少长期运行中活性位点的流失,延长催化剂的有效使用周期,让催化性能持续稳定满足制气需求,为催化剂的工业应用提供性能保障。

3.2 工业应用适配对策

工艺和装置适配性得到改进、应用成本有所降低,能够有力推动催化剂规模化应用,破解工业应用里适配性和经济性两个难点,让铜基负载型催化剂工业价值得到充分发挥。实验室制备工艺进行工业化适配改造,简化复杂的操作环节,优化批量制备过程,结合工业生产实际需要,建立起完善的质量控制体系。借助实时监测制备过程中温度、压力、反应时间等关键参数,及时调整参数偏差,保证工业生产中不同批次催化剂性能保持一致,避免由于参数波动带来的催化效果差别,确保工业制气稳定性^[5]。根据铜基负载型催化剂形态、尺寸、孔径分布和催化特性,优化工业反应装置结构设计,合理调整催化剂填充方式和反应通道布局,减少反应物与产物在传质过程里的阻力,提高催化剂与装置适配性,加快反应物与产物传质速度,提升整体制气效率,降低工业生产能耗,选择低成本、容易获取的原料代替高价原料,在保证催化剂性能前提下,优化制备过程以减少能源消耗和原料损耗,有效减少催化剂制备成本,同时通过提高催化效率减少单位氢气产量催化剂消耗,进一步降低应用成本,增强其市场竞争力,打破传统催化剂垄断,推动铜基负载型催化剂实现规模化应用。

3.3 长期运行保障对策

针对性地应对失活问题,能够帮助延长催化剂的使用寿命,降低运行维护的花费,解决长期运转中的关键挑战,促进铜基负载型催化剂实现长期稳定的工业运用,借助载体改性与助剂掺杂,在载体表面形成稳定的结构保护层,增强催化剂的热稳定性,有效阻

止铜颗粒在高温反应环境里出现烧结现象,这样能够优化催化剂孔径构造,扩大孔径大小并调整孔径分布,减少积碳的堆积,加强催化剂的抗烧结、抗积碳能力,延缓催化剂失活速度,延长催化剂的有效使用时间,挑选抗中毒能力强的载体与助剂,建立抗杂质干扰的催化构造,增强催化剂对硫、氯等杂质的承受力,这样能够优化原料预处理工艺,借助过滤、吸附、精馏等多种方式去除甲醇原料里的硫、氯等杂质,从源头减少杂质对催化剂的中毒影响,进一步延长催化剂使用寿命。发展高效、低花费的催化剂再生技术,优化再生工艺参数,简化再生操作流程,降低再生过程中的能源消耗与成本,提高再生后催化剂的性能恢复率,使其可以再次投入工业生产,降低催化剂更换频率,减少运维工作量与原料消耗,提升资源利用率,从根本上降低长期运用成本,促进铜基负载型催化剂的可持续运用。

4 结束语

铜基负载型催化剂作为甲醇水蒸气重整制气领域的核心材料,其应用价值与发展潜力显著,但当前仍面临催化性能衰减、工业转化壁垒及长期运行失活等多重挑战。本研究围绕核心痛点构建的解决体系,为突破技术瓶颈提供了多元思路。未来,需结合工业生产实际持续优化组分设计与制备工艺,强化催化剂与装置的适配性,同时完善原料预处理与再生技术体系,从全流程降低应用成本、提升运行稳定性。随着绿色低碳产业需求的持续升级,铜基负载型催化剂的研究应进一步融合智能化监测与绿色化制备理念,不断突破技术局限,充分发挥其在氢能制取、能源转型及化工产业升级中的关键作用,助力甲醇水蒸气重整制气技术实现高质量、可持续发展。

参考文献:

- [1] 罗博文. 纳米金刚石负载铜基催化剂在炔类选择加氢中的应用[J]. 山西化工, 2024, 44(06): 158-159, 197.
- [2] 杨德强, 魏名卓, 李冀, 等. 三种惰性载体的负载型铜基催化剂对CO氧化活性的影响[J]. 化学工程师, 2023, 37(06): 101-103.
- [3] 程帅, 国海光, 孙兵. 负载型铜基催化剂的环己醇脱氢性能研究[J]. 石油化工, 2022, 51(12): 1388-1393.
- [4] 曹明玉, 王庆印, 曾毅, 等. 多孔碳氮材料负载铜基催化剂用于甲醇氧化羰基化合成碳酸二甲酯的研究[J]. 天然气化工—C1化学与化工, 2022, 47(04): 128-137.
- [5] 郝敏彤, 张超, 冯彬, 等. 甲醇水蒸气重整制氢铜基催化剂的研究进展[J]. 炼油与化工, 2022, 33(01): 9-12.