

合成氨催化剂的生产工艺优化与经济性分析

郭忠宝 常文波 苏 振 吴世锋 李文涛 (山东盛发焦化有限公司, 山东 济宁 272300)

摘要: 合成氨工业是支撑现代农业与基础化工的关键环节, 铁基催化剂的性能在很大程度上决定了生产过程的能耗与装置运行周期。本文围绕铁基合成氨催化剂的生产工艺展开研究, 分析当前工艺中存在的活性组分微观结构不均、高温抗烧结能力不足、助剂添加方式粗放以及生产过程能耗高等突出问题, 并提出包括共沉淀-熔铁耦合工艺、纳米技术与载体改性、助剂添加路径优化以及绿色节能工艺开发在内的多维度优化策略, 以期提升催化剂的综合性能与制备过程的经济性。

关键词: 合成氨; 铁基催化剂; 工艺优化; 共沉淀; 经济性分析

中图分类号: TQ426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 006-0040-03

Process Optimization and Economic Analysis of Ammonia Synthesis Catalysts

Guo Zhongbao, Chang Wenbo, Su Zhen, Wu Shifeng, Li Wentao (Shandong Shengfa Coking Co., Ltd., Jining Shandong 272300, China)

Abstract: The ammonia synthesis industry is a key link supporting modern agriculture and basic chemical engineering. The performance of iron-based catalysts largely determines the energy consumption of the production process and the operation cycle of the equipment. This paper focuses on the research of the production process of iron-based ammonia synthesis catalysts, analyzing the prominent problems existing in the current process, such as uneven microstructure of active components, insufficient high-temperature anti-sintering ability, rough addition of additives, and high energy consumption during the production process. And multi-dimensional optimization strategies including co-precipitation - molten iron coupling process, nanotechnology and carrier modification, optimization of additive addition path, and development of green energy-saving process were proposed, with the aim of improving the comprehensive performance of the catalyst and the economy of the preparation process.

Key words: Synthetic ammonia Iron-based catalyst Process optimization Co-precipitation Economic analysis

在保障粮食安全与推动化工产业可持续发展的背景下, 合成氨作为氮肥生产的核心原料及多种重要有机与无机化学品的基础中间体, 其战略地位日益突出。工业上广泛采用的哈伯-博施法需在较高温度与压力下运行, 导致能耗水平偏高, 并对催化剂的活性、稳定性与寿命提出了严苛要求。铁基催化剂因其原料来源广泛、成本相对低廉而在工业实践中占据主导地位, 但其现有生产工艺在微观结构调控、抗烧结能力、助剂利用效率及能耗控制等方面仍存在明显不足, 难以完全适应节能减排和绿色低碳发展的需求。鉴于此, 有必要从催化剂制备的全流程出发, 系统梳理影响催化剂性能与制造成本的关键工艺环节, 构建兼顾活性、稳定性与经济性的优化方案。

1 合成氨催化剂生产工艺现存问题

1.1 活性组分微观结构不均

现阶段, 工业合成氨催化剂在活性组分微观结构控制上仍面临显著挑战。传统熔铁催化剂多以磁铁矿为前驱体, 经还原形成 α -Fe 活性相, 但其晶粒尺寸、晶面取向及内部缺陷在空间上分布不均, 导致不同区域对氮气的吸附与解离能力差异明显。尽管通过引入 $Fe_{1-x}O$ 基前驱体或调控助剂可改善还原行为, 但在放

大生产中, 前驱体结晶过程、还原气氛梯度及载体孔道分布等因素叠加, 使得活性相的均匀性难以稳定复现。这种微观结构的不均一性直接造成催化剂表观活性偏低、初期活性释放缓慢, 并影响其在高负荷运行下的稳定性与寿命, 成为制约催化剂性能进一步提升的关键瓶颈^[1]。

1.2 高温抗烧结能力弱

在合成氨高温高压的工况条件下, 催化剂的热稳定性是决定其长周期运行的核心指标。现有铁基及钨基催化剂在高温下易发生烧结, 导致活性组分晶粒长大、比表面积下降, 进而使氨合成速率衰减。尽管通过添加氧化铝、氧化铈等助剂可在一定程度上抑制晶粒粗化, 但在实际反应器内, 温度与压力的频繁波动、局部过热以及开停车过程中的氧化还原循环, 仍会加速活性相的重构与团聚。尤其在钨基催化剂中, 高分散的金属纳米粒子在高温氢气气氛下易发生迁移聚集, 削弱了其本征高活性优势。

1.3 助剂添加方式粗放

合成氨催化剂的性能高度依赖于助剂的种类和配比, 但现有生产工艺在助剂添加环节仍较为粗放。多数装置采用简单的机械混合或共沉淀方式将氧化铝、

氧化钾、碱土金属氧化物等助剂引入前驱体，难以在原子或纳米尺度上实现均匀分散。助剂分布的不均，一方面削弱了其对活性相晶粒的“隔离”与“锚定”作用，降低了抗烧结与抗中毒能力；另一方面，部分助剂在颗粒表面形成偏析层，反而阻碍反应物与活性位点的接触。此外，不同批次原料的波动及操作参数的微小变化，都会放大助剂分布的不稳定性，使得催化剂性能难以实现可预期的精细调控。

1.4 生产过程能耗高

合成氨催化剂的生产过程涉及高温焙烧、还原活化等多个高能耗环节，其能耗水平直接影响装置的综合经济性。传统熔铁催化剂需在空气或富氧环境中经高温长时间焙烧以形成适宜孔结构和物相组成，随后在高压氢气下进行缓慢还原，整个过程能耗巨大。对于钌基等贵金属催化剂，虽然用量较少，但其负载、还原及后处理步骤同样伴随着高能耗。此外，现有生产流程在热能梯级利用、余热回收及设备匹配等方面存在不足，导致大量低品位热能未被有效利用。在能源价格上行和“双碳”目标约束下，这种高能耗的生产模式不仅压缩了企业的利润空间，也增加了碳排放压力，迫切需要通过工艺优化与装备升级实现绿色低碳转型。

2 合成氨催化剂的生产工艺优化策略

2.1 采用共沉淀-熔铁耦合工艺

为从工艺源头改善合成氨催化剂活性组分微观结构的均匀性并提升其高温稳定性，生产企业可采用共沉淀与熔铁工艺深度耦合的制备路线。该策略的核心是在熔铁前驱体形成阶段引入液相共沉淀步骤，使铁源、助剂前驱体及结构调节组分在同一反应体系内完成原子或分子级的混合与成核。在具体实施过程中，生产人员首先将可溶性铁盐、铝盐、钾盐及稀土盐按设计配比精确称量并溶解于去离子水中，在严格控制的pH值和温度下缓慢加入沉淀剂，通过并流或分段加料方式诱导形成高度分散的氢氧化物或草酸盐前驱体。此阶段需重点调控离子浓度、搅拌强度、加料速率及老化时间，以确保形成粒度细小且分布窄的胶体颗粒，为后续获得均匀固溶体奠定基础。随后，生产人员通过固液分离、多级洗涤和低温干燥获得复合氧化物前驱体粉末，再将其与高熔点氧化物助剂一同加入电弧炉或中频感应炉，在惰性气氛下进行程序控温熔炼。熔炼过程中，各组分在液相中充分扩散并形成均一的熔融相，经冷却、破碎、整形后获得催化剂中间体^[2]。

在工艺放大和连续化生产中，生产企业需将共沉淀-熔铁耦合工艺与精细的过程控制相结合。首先，

应建立从前驱体溶液配制、沉淀反应、过滤洗涤及干燥的全流程自动化控制系统，通过在线监测pH、电导率、浊度及粒度分布等参数，实现工艺条件的实时优化与稳定复现。其次，熔炼过程可以采取分段式加热以及程序升温/降温方案，在保证各组分完全熔化的基础上，通过对冷却速度的控制来调整晶粒大小及缺陷结构，防止淬冷造成的微小残余应力及显微裂痕的形成。另外，为了进一步提高产品的机械强度以及床层流体力学特性，操作者还可以在熔铁前驱体中添加一定量的暂时性粘结剂，而后在熔炼结束后经一定的热解工艺将其除去，在保留高活性的基础上增强粒子的坚固性并减少磨损。

2.2 引入纳米技术与载体改性

针对现阶段合成氨催化剂朝着更高活性、更稳定、更低压的方向发展的情况，生产厂家可以借助引入纳米技术和载体改性对催化剂的性能进行全方位优化。其中，运用纳米技术的关键就是通过对活性组分以及助剂的粒径和形态进行调控，在纳米层次构建密集化的活性位点以及合理的孔隙结构。而对于铁系催化剂而言，研发人员可以通过水热法、微乳液法和超声辅助还原法制备纳米级别的 Fe_3O_4 或 Fe_{1-x}O 颗粒，让其更容易在低温时发生还原，生成富含晶界和缺陷的活性 $\alpha\text{-Fe}$ 相。并且，借助引入一定的可控表面配体或者保护膜，能够避免纳米微粒在后续工序以及反应过程中出现聚集长大现象。再者，针对钌系等贵金属催化剂，可以通过胶体化学手段制备大小处于1-5nm范围内的Ru纳米晶体，并高度分散在导电炭黑或者改性的金属氧化物担体表面上，进而充分暴露出更多B5类活性位置，以便在较低温度、压力下进行高效的合成氨反应。

载体改性的目的是通过调整载体的物理化学性能，在给活性组分提供稳定骨架的同时，也能调节好反应微环境。一方面，厂家可以选择高比表面积以及孔结构可控的多孔材料作为载体，比如介孔 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 、有序介孔碳或者功能化的分子筛等，通过孔径大小及孔道连接方式的设计来提升催化剂对反应气体的传质性能，同时也可以减轻内扩散阻力的影响^[3]；另一方面，可以对载体本身的表面进行化学变化处理，比如说负载一些酸性/碱性基团，或是构筑氧缺陷，甚至是掺入一些外来异质原子等，都能使得载体同活性组分之间的相互作用力发生改变，从而引起催化剂电子性能以及表面酸碱特性的变化。

2.3 优化助剂添加路径

由于助剂作为调整剂，对合成氨催化剂电子结构的调整、表面酸碱性的优化、晶粒长大的抑制以及抗

毒性能的提高等方面起着举足轻重的作用,生产厂家必须优化其添加方法,来提高催化剂活性及使用寿命。传统的添加方法过于粗糙,无法保证助剂能够在合成氨催化剂颗粒内部均匀分散,会造成聚集或匮乏,从而降低其应有的作用,因此,生产厂家需要使用更为精细可控的方法对其添加。一种可行的方式就是采取分批添加结合共沉淀法,依次向体系内加入结构辅助剂、电子调变剂、稳定剂。如先在共沉淀初期添加 Al_2O_3 、 SiO_2 这些结构助剂,它们可以优先生成骨架结构;再在过程中加入 K_2O 、 Cs_2O 这类碱性助剂,以调节表面酸碱度;最后在过程后期添加钨系氧化物这类助剂,利用表面外排作用固定活性组分。

为了进一步提高助剂添加的一致性和再现性,生产厂家可以引入先进的材料合成及工艺控制手段。比如,使用溶胶-凝胶法或者微乳液法制备时,将助剂前驱体预先限制在纳米尺寸的反应区内,在随后的加热步骤中缓慢析出并均匀化;采用离子液体、深共熔溶剂等新型反应基质,调控离子间的配位状态及反应机理,在分子尺度上实现均匀掺混。在放大生产环节,生产车间应当建立基于在线监控和反馈控制的助剂添加装置,通过对前驱体溶液组分、粒径以及流变性的即时检测,对加料速度及次序进行及时调整,以达到各批量催化剂间助剂分布的高度均一性。

2.4 开发绿色节能工艺

为适应国际能源结构调整与“双碳”战略的落实,生产厂家需要研发绿色节能型合成氨催化剂生产方法,才能使行业健康有序的发展下去。合成氨催化剂的传统制造方法中,涉及到的高温煅烧、高压活化等环节费能严重,并产生大量的二氧化碳,必须加以改革,走向绿色低碳型的道路。对于绿色节能工艺的研发,要从根本减少、过程节约以及末端治理三个方面着手开展。在根本上减少,就是要尽可能选择低碳甚至是零碳的原料及能源使用,可以利用清洁能源电解水得到的绿氢,代替以往使用的化石燃料转化来制得的氢气;同时,也可以通过调整催化剂组分与制造手段,以求降低对高温焙烧等高能耗工序的需求,可以使用低温固相法或者水热法制备催化剂前驱体,避免因为高温带来的能耗与 CO_2 排放问题;除此之外,也要注重原料的再次利用,比如回收利用生产过程中产生的余热、废气以及废料,并将这些物质转换成可以继续被利用的能源或者物料,形成资源循环使用的绿色生产模式^[4]。

3 经济性分析

对企业而言,合成氨催化剂生产技术的进步可以大幅度增强经济性。而以共沉淀-熔铁耦合、纳米技

术和载体改性为代表的生产工艺革新,可以从最根本处提升催化剂本身的活性和稳定性。这也就意味着下游合成氨设备能够在更低的温度和压力下进行反应,节省了压缩机电耗和蒸汽用量。并且,更长的催化剂寿命也意味着更少的因频繁更换而导致的非计划停车以及装卸费用,提升了装置整体的开工率。此外,优化助剂添加路线提升了贵金属和重要助剂利用率,在性能达标的情况下,减少单位催化剂上的贵金属负载量,直接削减了原料投入成本^[5]。

从宏观战略性角度来看,对绿色节能工艺的应用有着更加长远的经济效益。一方面,研发低温固相反应、水热合成等柔性化生产工艺,并结合余热回用及热能阶梯式应用,能够显著削减产品的制造环节碳足迹。在日趋严峻的碳限制形势下,不仅可以避免公司未来可能面临的高额碳税成本以及环境罚款损失,还可以使其在碳排放交易市场上通过出让结余指标而取得额外收入。另一方面,伴随绿氢、绿氨等低排放产品需求市场的逐渐确立,使用先进工艺制备的高品质催化剂,也将提升公司在未来绿色环保型产品供给链中的议价能力。

4 结束语

总之,本文基于铁系合成氨催化剂生产制备过程中存在的微孔分布不够均匀、高温下易烧结失活、助剂添加方式相对粗糙以及能源消耗量大的一系列问题,提出了一系列包括但不限于共沉淀-熔铁耦合法、纳米技术和载体修饰、助剂添加路线调控以及绿色节能新工艺开发在内的综合解决方案。通过经济性评价发现,这些工艺方案不仅有助于提高公司的成本竞争优势,还有利于企业进一步适应并迎接绿色低碳化转型升级的发展大趋势,在日趋严峻的行业竞争环境中占据有利的竞争地位。未来,需围绕相关技术,整合过程强化和智能控制方法,在工业装置上加速推广应用工作,为推动合成氨产业高质量发展和助力国家达成“碳达峰、碳中和”的战略目标作出积极贡献。

参考文献:

- [1] 何璐红,贺素姣,赵扬,等.催化剂在合成氨中的研究与应用现状[J].盐科学与化工,2025,54(11):21-24.
- [2] 廖新文.合成氨催化剂的应用比较及选择[J].大氮肥,2025,48(05):350-353.
- [3] 房丽丽,房铄,刘存宝.合成氨催化剂的再生机理与工艺优化研究[J].山东化工,2025,54(20):95-97+100.
- [4] 赵汝燕.合成氨催化剂中毒原因分析[J].山西化工,2025,45(08):138-140.
- [5] 姜秋伶.低维碳材料合成氨催化剂的结构调控与机理研究[D].合肥:中国科学技术大学,2025.