

QDB-04催化剂在低温变换工况下的性能优化

刘博群

伊犁新天煤化工有限责任公司 新疆 伊犁哈萨克自治州 835000

摘要: 低温变换反应是合成氨、甲醇、制氢等工业领域的关键环节, QDB-04催化剂作为该反应的常用催化剂, 在低温工况下存在低温活性不足、稳定性较差、抗中毒能力弱等性能短板, 严重制约其工业应用效果。本文针对QDB-04催化剂的核心性能短板, 开展系统性的性能优化研究。通过分析催化剂低温活性不足、稳定性与寿命短板及抗中毒性能不足的成因, 从活性组分、载体、制备工艺、抗中毒改性四个维度设计优化方案, 优化活性组分种类与配比、改善载体结构、调整制备工艺参数、构建抗毒防护体系。

关键词: QDB-04催化剂; 低温变换; 性能优化

引言

QDB-04催化剂凭借其制备成本较低、催化选择性较好等优势, 在低温变换反应中得到一定应用, 但在实际低温工况运行过程中, 其性能短板日益凸显。基于此, 深入对QDB-04催化剂在低温变换工况下的性能优化的讨论具有重要的现实意义。

1 QDB-04 催化剂低温工况下的性能短板分析

1.1 低温活性不足问题分析

低温环境不仅会影响催化反应的热力学和动力学过程, 还会导致催化剂自身结构和性能发生变化, 进而引发活性持续衰减, 无法满足低温变换反应的高效催化需求, 深入分析其衰减规律及影响因素, 是实现催化剂性能优化的前提。(1) 低温下QDB-04催化剂的催化活性衰减呈现明显的规律性。随着反应温度降低, 催化剂活性逐渐下降, 且低温停留时间越长, 活性衰减速率越快, 最终趋于稳定在较低活性水平。这种衰减并非不可逆, 温度回升后活性会有一定程度的恢复, 但长期处于低温工况下, 活性衰减会逐渐加剧并呈现不可逆趋势。

(2) 活性组分的分散性和价态, 是影响QDB-04催化剂低温活性的核心内在因素。活性组分分散性不足, 会导致其在催化剂表面形成团聚现象, 减少有效活性位点数量, 降低反应物与活性组分的接触概率, 进而影响低温催化效率。活性组分的价态直接决定其催化活性, 低温工况下, 活性组分易发生价态变化, 导致其活化反应物的能力下降, 无法有效打破反应物化学键, 使得催化反应难以高效进行。此外, 活性组分的分散性与价态相互影响, 分散性不佳会加剧价态变化, 进一步恶化低温活性。(3) 载体结构与活性组分的相互作用, 对催化剂低温性能起到重要制约作用。载体作为活性组分的负载基底, 其比表面积、孔结构直接影响活性组分的分散效果

和反应物的扩散速率^[1]。若载体比表面积不足、孔结构不合理, 会限制活性组分的负载量和分散性, 并阻碍反应物和产物在催化剂内部的传递, 导致低温下催化反应受阻。此外, 载体与活性组分之间的相互作用过弱或过强, 都会影响活性组分的电子结构和催化活性, 过弱则无法有效稳定活性组分, 过强则会抑制活性组分的催化活性, 共同制约QDB-04催化剂的低温性能。

1.2 稳定性与寿命短板分析

(1) 长期低温工况下, QDB-04催化剂的失活机制具有多样性, 且多种失活方式相互叠加, 加速催化剂性能衰减。积碳是低温工况下常见的失活形式, 低温下反应速率缓慢, 反应物易在催化剂表面吸附堆积, 形成积碳覆盖活性位点, 阻碍反应物与活性组分的接触, 同时堵塞催化剂孔隙, 进一步降低催化效能。活性组分烧结也是重要失活原因, 长期低温环境会导致活性组分颗粒逐渐聚集长大, 分散性下降, 有效活性位点减少, 催化活性持续降低。此外, 原料气中微量杂质会导致催化剂中毒, 毒物吸附在活性位点上, 破坏活性组分的结构和电子状态, 使其失去催化活性, 且这种中毒失活往往难以逆转。(2) 工况波动对QDB-04催化剂的稳定性有着显著影响, 进一步加剧其性能衰减。温度波动会破坏催化剂的结构稳定性, 频繁的升降温会导致催化剂内部产生热应力, 引发载体开裂、活性组分脱落, 并影响活性组分的价态稳定性, 导致催化活性波动。原料气组分变化则会改变催化反应的进程, 当原料气中反应物浓度、杂质含量发生波动时, 催化剂表面的吸附和活化过程受到干扰, 不仅会降低催化效率, 还会加速积碳和中毒失活的速度, 导致催化剂稳定性下降, 难以维持长期稳定运行。(3) 现有QDB-04催化剂存在明显的寿命瓶颈, 其成因与失活机制、工况影响及自身结构特性密切相关

关。当前催化剂的寿命远无法匹配工业生产的长期运行需求，核心成因在于其抗积碳、抗烧结、抗中毒能力不足，长期低温工况下易发生不可逆失活。

1.3 抗中毒性能短板分析

抗中毒性能不足，是QDB-04催化剂在低温变换工况下的重要短板，也是限制其工业化广泛应用的关键因素之一。（1）低温工况下，常见的毒物种类较多，不同毒物对QDB-04催化剂的影响方式和程度存在差异，但都会显著削弱催化性能。毒物易与催化剂的活性组分发生反应，形成稳定的化合物，导致活性组分失去催化活性，这种中毒作用具有不可逆性，会持续破坏催化剂的核心功能。氯类毒物则会吸附在催化剂表面，不仅覆盖活性位点，阻碍反应物与活性组分的接触，还会破坏催化剂的载体结构，导致载体孔隙堵塞、机械强度下降，进一步加剧催化性能衰减。重金属毒物会沉积在催化剂内部，改变活性组分的电子结构和分散状态，抑制催化反应的进行，同时加速活性组分的烧结和失活，缩短催化剂的使用寿命。（2）QDB-04催化剂抗中毒能力不足，有着其核心内在原因，并非单一因素导致。从催化剂自身结构来看，其活性组分的抗毒能力较弱，缺乏有效的抗毒保护机制，容易与毒物发生反应而失去活性。载体的孔结构和表面性质也存在不足，无法有效过滤和吸附原料气中的微量毒物，难以阻止毒物与活性组分接触。并且，催化剂制备过程中，活性组分与载体的相互作用不够稳定，无法形成有效的抗毒屏障，当遇到微量毒物时，极易发生中毒失活，这也是其抗中毒能力不足的核心症结所在。（3）抗中毒性能的短板，对QDB-04催化剂的工业应用形成了严重制约^[2]。工业生产中，原料气中的毒物含量虽低，但长期积累会持续破坏催化剂性能，导致催化剂频繁更换，不仅增加了工业生产成本，还会影响生产的连续性和稳定性。此外，中毒后的催化剂难以再生，废弃后还会造成资源浪费和环境压力，进一步制约了QDB-04催化剂在低温变换工况下的工业化推广和应用。

2 QDB-04 催化剂性能优化方案设计与实施

2.1 活性组分优化

（1）在QDB-04钴钼催化剂表面引入适量的钝化剂（有机包覆剂或选择性氧化膜），其核心作用是辅助工业装置导气过程中的二次硫化反应。具体机理为：在装置开工升温及导气初期，催化剂表面的钝化剂在工艺气氛（含 H_2 、 H_2S 的煤气）中发生分解或转化反应，释放出局域反应热，该热量可精准作用于催化剂表层，促使催化剂中残余的氧化态活性组分（ CoO 、 MoO_3 ）与煤气中

的 H_2S 发生更充分、更快速的二次硫化反应。（2）活性组分种类调整与配比优化，核心是筛选适配低温变换工况的活性组分，优化组分间的协同作用。结合低温变换反应的动力学特性，筛选活性更高、低温适配性更强的组分，替代原有活性组分中低温活性较弱的成分，提升催化剂在低温环境下的活化能力。同时，优化不同活性组分的配比，让各组分之间形成协同催化效应，避免单一组分催化的局限性，进一步强化低温催化活性，确保催化剂在低温工况下能高效推动反应进行，缓解低温活性衰减问题。

2.2 载体优化

（1）核心是提升载体比表面积、改善孔结构，并强化实际工况下的装填与预处理适应性。首先，在载体几何形态上选用 $\Phi 3.7$ mm长2厘米圆柱形颗粒，该规格兼具良好的机械强度与床层通透性，可有效降低变换反应器的床层压降。其次，针对低温变换工况需求，筛选比表面积大、孔结构合理、热稳定性强的载体种类，替代原有适配性不足的载体，为活性组分的高效分散提供充足空间。对筛选后的载体进一步实施物理或化学改性处理，以优化孔道尺寸与分布、减少孔道堵塞现象，并显著提升载体的吸附能力与反应物扩散速率，为活性组分充分发挥催化作用创造有利条件。在载体成型与后处理环节，严格通过过筛与除尘工艺，去除细粉与机械杂质，避免细粉堵塞催化剂床层或污染下游设备。最后，将合格载体采用氮气密封封存，防止储存及运输过程中吸附水分或杂质，确保载体表面洁净度与初始活性，为后续活性组分负载奠定可靠基础。（2）载体与活性组分的相互作用调控，是优化载体性能的核心环节，目的是强化二者协同作用，提升催化剂稳定性和低温活性。不合理的相互作用会导致活性组分脱落、团聚，削弱催化性能，通过调控载体表面性质，调整活性组分与载体之间的结合强度，既避免结合过弱导致活性组分脱落，又防止结合过强抑制活性组分催化活性^[3]。

2.3 选材优化使用QDB-04(S)预硫化态催化剂

（1）QDB-04(S)预硫化催化剂以氧化铝、氧化镁和氧化钛的复合物为载体，活性组分包括钴和钼的硫化物。其主要物化性能指标载体由 Al_2O_3 - MgO - TiO_2 复合物组成，操作温度范围210-450℃，操作压力2.6-8.0MPa。该催化剂具有比表面积大、活性组分分散均匀、机械强度高特点，能够适应现代煤化工高 CO 浓度、高空速、宽温区的苛刻工况。（2）QDB-04(S)预硫化态催化剂重点聚焦提升催化剂的机械强度与孔隙结构，优化成型工艺参数改善催化剂的颗粒形态，提升其机械强度，避免在

工业应用中因搬运、气流冲击发生破碎^[4]。同时,通过工艺调整优化催化剂孔隙结构,让孔隙分布更合理,提升反应物与产物的扩散速率,适配低温工况下反应速率较慢的特点,进一步强化催化剂的低温活性与使用寿命。

2.4 抗中毒改性优化

(1) 抗毒助剂添加与配比优化是提升抗中毒性能的基础措施。筛选适配低温工况的抗毒助剂,这类助剂能与原料气中的毒物(如卤素、砷、磷化物等)优先发生作用,避免毒物接触催化剂活性位点。合理优化助剂配比,既能保证抗毒效果,又不会影响催化剂的低温催化活性,同时可促进抗毒助剂与活性组分、载体形成协同作用,进一步强化抗毒能力,减少不可逆中毒现象的发生。(2) 催化剂表面改性核心是构建有效的抗毒保护层。通过表面改性处理,在催化剂表面形成一层致密且透气的保护层,既能阻挡毒物分子进入催化剂内部接触活性组分,又不会阻碍反应物和产物的扩散^[5]。这种保护层还能增强催化剂表面的稳定性,减少毒物吸附,延长催化剂在含毒工况下的有效运行周期。

2.5 工艺操作规范优化

通过规范操作行为和优化工艺参数,可从源头上降低毒物对催化剂的影响程度,具体包括以下方面:(1) 稳定运行工况。尽量减少开停车次数,避免频繁的升温降温循环对催化剂结构造成热冲击;同时减少系统负荷的剧烈波动,保持装置在相对平稳的工况下运行,因为负荷的频繁变化会导致床层温度波动,加速催化剂的老化与失活。(2) 严格控制温度参数。保证入炉煤气温度与催化剂床层温度在设计范围内,严禁超温运行。超温会加速活性组分的烧结和晶粒长大,导致不可逆的活性下降;同时也要避免长时间低温运行,防止因水汽冷凝造成催化剂机械强度降低或活性组分流失。(3) 禁止超负荷运行。严格按照设计负荷组织生产,超负荷运行会导致空速过高、停留时间不足,不仅影响变换反应深度,还会加剧催化剂表层的磨损和毒物冲刷积累,缩短

催化剂使用寿命。(4) 严控入炉煤气质量。禁止带氧、带毒、带水入炉:带氧入炉会引发剧烈氧化反应,造成床层飞温甚至催化剂烧结报废;带毒入炉(如高浓度卤素、砷化物、磷化物等)会使催化剂迅速中毒失活;带水入炉(液态水)会导致催化剂骤冷破裂或水热烧结,严重影响催化剂的机械强度和活性。通过上述工艺操作规范的严格执行,合理调整反应条件,可减少毒物在催化剂表面的吸附和积累,缓解毒物对活性组分的破坏,并优化反应氛围,提升催化剂的抗毒稳定性,确保QDB-04催化剂在复杂工况下仍能维持稳定的催化性能,适配工业生产需求。

结语

总之,基于短板成因设计的优化方案成效显著,活性组分优化提升了催化剂低温催化活性,选材使用预硫化态催化剂进一步强化低温活性与使用寿命,制备工艺优化改善了催化剂性能结构,抗中毒改性有效提升了催化剂对各类毒物的抵御能力,工艺操作规范优化从源头降低工况对催化剂的使用影响。优化后的QDB-04催化剂,其低温活性、稳定性及抗中毒能力均得到明显提升,使用寿命显著延长,可有效适配低温变换工况的工业需求。

参考文献

- [1] 变换催化剂的使用总结. 刘小龙;孙浪;苏晓勇. 氮肥技术,2025(04)
- [2] 李明慧. 催化剂结构与电子环境协同优化性能调控研究[J]. 中国轮胎资源综合利用,2026(1):160-162.
- [3] 肖杰飞,王利军,孙盈聪,等. QDB-03x型耐硫变换催化剂在轴径向反应器上的应用[J]. 煤化工,2021,49(4):19-22.
- [4] 刘令. 钒催化剂失活机制及再生工艺在硫酸工业低温位SO₂转化中的优化研究[J]. 当代化工研究,2025(20):164-166.
- [5] 刘洁,于杨,袁浩然. 乙酸甲酯加氢制乙醇铜基催化剂性能调控研究进展[J]. 低碳化学与化工,2024,49(4):44-50.