

渣油加氢催化剂技术创新与成本控制研究

吴士雷 乔 威 张坤宇 (山东省质量技术监督评价中心有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 近年来, 全球原油重质化、劣质化特征愈发显著, 近十年间重质原油在全球原油总产量中的占比持续攀升。作为将重质、劣质渣油转化为轻质油品及优质化工原料的核心技术, 渣油加氢处理技术在炼油工业中的战略地位不断凸显, 而渣油加氢催化剂作为该技术的关键核心, 其性能直接影响加氢装置的运行效率、产品质量稳定性与综合生产成本。本文围绕渣油加氢催化剂的技术创新与成本控制展开深入研究, 系统分析活性相结构调控、载体材料革新、制备工艺升级等技术创新方向, 探讨原材料优选、生产流程优化、催化剂寿命延长等成本控制策略, 并阐释二者协同推进的内在逻辑, 旨在为提升渣油加氢催化剂综合效益提供兼具理论性与实用性的参考, 助力炼油行业在应对原油品质波动与市场竞争压力中实现可持续发展。

关键词: 渣油加氢催化剂; 技术革新; 成本管控; 协同机制; 炼油产业

中图分类号: TE624.93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0073-03

Study on Technological Innovation and Cost Control of Residue Hydrotreating Catalysts

Wu Shi lei, Qiao Wei, Zhang Kunyu (Shandong Quality and Technical Examination Assessment Center Co., Ltd. Jinan Shandong 250000, China)

Abstract: In recent years, the characteristics of global crude oil becoming heavier and poorer in quality have become increasingly prominent, with the proportion of heavy crude oil in the total global crude oil output rising continuously over the past decade. As a core technology for converting heavy and poor-quality residue into light oil products and high-quality chemical raw materials, residue hydrotreating technology has been increasingly prominent in the strategic position of the refining industry. As the key core of this technology, residue hydrotreating catalysts directly affect the operation efficiency, product quality stability and comprehensive production cost of hydrogenation units. This paper conducts in-depth research on the technological innovation and cost control of residue hydrotreating catalysts, systematically analyzes the technological innovation directions such as active phase structure regulation, carrier material innovation and preparation process upgrading, explores cost control strategies including raw material optimization, production process improvement and catalyst service life extension, and explains the internal logic of their coordinated advancement. It aims to provide a theoretical and practical reference for improving the comprehensive benefits of residue hydrotreating catalysts, and help the refining industry achieve sustainable development in the face of fluctuations in crude oil quality and market competition pressure.

Keywords: residue hydrotreating catalysts; technological innovation; cost control; coordination mechanism; refining industry

1 渣油加氢催化剂技术创新

1.1 活性相结构优化

活性相是渣油加氢催化剂实现催化功能的核心部分, 其化学组成、晶体结构、分散状态等直接影响催化剂对加氢脱硫、加氢脱氮、加氢脱金属以及加氢裂化等反应的催化活性、选择性和稳定性。在新型活性相设计与合成方面, 传统的渣油加氢催化剂活性相主要为过渡金属硫化物, 近年来, 过渡金属碳化物和氮化物因其独特性能成为研究热点, 以碳化钼 (Mo_2C) 为例, 实验数据表明, 在相同的反应温度 (380–420°C)、压力 (15–20MPa) 条件下, 以 Mo_2C 为活性相的渣油加氢催化剂, 其加氢脱硫活性比传统 MoS_2 基催化剂提高 20%–30%, 尤其对噻吩类难脱除硫化物的脱除效率提升更为明显; 氮化物如氮化镍 (Ni_3N) 在加氢脱氮反应中表现出色, 通过高温氮化法制备的 Ni_3N

活性相, 表面活性位点数量比传统镍基硫化物活性相增加 15%–25%, 在处理喹啉、吡啶等含氮化合物时, 脱氮率可提高 10%–18%; 复合活性相的设计与应用也很关键, 例如, $\text{MoS}_2\text{-Co}_9\text{S}_8$ 复合活性相, 通过精确调控 Mo 与 Co 的摩尔比 (通常为 3:1 至 5:1), 可实现协同催化, 工业试验数据显示, 采用该复合活性相的催化剂, 稳定性提升 25% 以上, 单程运行周期延长 300–500h。在活性相负载与分散技术改进方面, 离子交换法能使活性金属离子均匀分布在载体的表面和内部, 以 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为载体为例, 在特定条件下进行离子交换反应, 制备的催化剂活性相分散度比传统浸渍法提高 30%–40%, 加氢活性提升 15%–20%; 原子层沉积 (ALD) 技术可在原子尺度上精确控制活性相的厚度和分布, 采用该技术制备的催化剂, 活性相粒径分布偏差小于 5%, 在相同活性金属负载量下, 加氢

裂化活性提高 50% 以上，轻质油收率增加 8%–12%；此外，在浸渍过程中添加表面活性剂或采用超声辅助浸渍，也能有效改善活性相分散效果，活性相分散度可提高 10%–20%^[1]。

1.2 载体材料创新

载体材料的物理和化学性质对催化剂性能影响重大，传统的 γ - Al_2O_3 载体在处理劣质渣油时存在局限，新型载体材料的研发和表面改性成为重要方向。新型载体材料中，介孔材料如 MCM-41 具有高度有序的六方介孔结构，孔径可在 2–10nm 范围内调控，实验数据显示，以 MCM-41 为载体的催化剂，处理沥青质含量为 15%–20% 的渣油时，加氢脱金属率比传统 γ - Al_2O_3 载体催化剂提高 15%–20%，加氢裂化反应中大分子烃类转化率提升 10%–15%，轻质油 (<350℃) 收率增加 8%–12%；SBA-15 介孔分子筛孔径更大 (5–30nm)，热稳定性和水热稳定性更优，在反应温度 400–450℃、压力 18–22MPa 的条件下，其结构稳定性比 MCM-41 载体催化剂提高 20%–25%，使用寿命延长 200–300h；碳材料如活性炭，比表面积可达 800–1500m²/g，抗积炭性能比 γ - Al_2O_3 载体催化剂提高 30% 以上，焦炭沉积速率降低 25%–35%；碳纳米管具有一维管状结构，将活性金属负载其上，加氢脱硫率比传统催化剂提高 15%–20%，磨损率降低 10%–15%，适用于对催化剂强度要求较高的反应体系；复合载体材料如 Al_2O_3 - SiO_2 ，通过调控二者质量比，比表面积可达 350–450m²/g，表面酸性位点数量比纯 γ - Al_2O_3 载体增加 20%–30%，轻质油收率提高 5%–8%。载体表面改性与功能化方面，酸碱处理可优化载体性能，用硝酸处理 γ - Al_2O_3 ，比表面积增加 10%–15%，轻质油收率提高 8%–10%，用稀氨水处理，催化剂使用寿命延长 20%–30%；表面接枝技术如在介孔分子筛表面接枝氨基官能团，可提高活性相负载牢固度，活性相流失率降低 10%–15%^[2]。

1.3 制备工艺革新

制备工艺是连接催化剂配方设计与实际性能表现的关键桥梁，其革新程度直接影响活性组分的分散状态、载体微观结构及最终催化效能，遵循“工艺参数—微观结构—宏观性能”的内在关联规律。先进的制备

工艺可提高催化剂性能稳定性和重现性，其中溶胶—凝胶法能实现活性组分均匀分散，制备的催化剂比表面积增加 20%–30%，活性提高 15%–20%；微波辅助合成技术可缩短制备时间 50%–60%，能耗降低 30%–40%，活性相粒径减小 20%–30%，分散度提高 15%–25%；超临界流体干燥技术可避免孔结构塌陷，催化剂比表面积比传统真空干燥方法提高 25%–35%，孔隙增加 15%–20%。

2 渣油加氢催化剂成本控制

2.1 原材料成本控制

原材料成本作为生产制造环节的基础支出，其占比高低直接决定了产品的成本敏感度与市场竞争力，在渣油加氢催化剂的生产体系中，原材料成本占总成本的 60%–70%，可通过优化原材料的选型、用量及循环利用模式，在保证产品核心性能的前提下降低单位成本，是实现“功能—成本”平衡的关键路径。在活性金属成本控制方面，优化配方可减少贵重金属用量，如采用复合活性相可减少 Mo 的用量 10%–15%，用 Fe 部分替代 Ni，原材料成本可降低 20%–25%；载体材料成本控制上，以工业级 γ - Al_2O_3 替代试剂级，价格降低 30%–40%，介孔材料采用工业级硅源，成本降低 50%–60%；原材料回收与循环利用可提高利用率 10%–15%，成本降低 5%–8%，能回收 80%–90% 的 Mo、Ni 等金属^[3]。

2.2 生产工艺成本控制

生产工艺成本的控制的过程需遵循过程系统工程中“整体最优”原则，即通过各环节的协同改进，实现综合成本的最小化。其本质在于通过工艺参数优化、设备效能提升与生产模式革新，降低单位产品的能源消耗、设备分摊及人工投入。在能源消耗控制上，采用连续式焙烧炉替代传统间歇式焙烧炉，能让能源利用率提高 30%–40%，减少能源浪费；同时，引入余热回收系统，可将生产过程中产生的余热进行二次利用，进一步降低能耗 15%–20%。设备利用率的提升同样关键，通过优化生产调度，将设备利用率提高至 80%–90%，能使单位产品的设备折旧成本降低 10%–15%。

此外，自动化生产技术的应用效果显著，它不仅

表 1: 不同载体材料核心性能对比表

载体类型	关键物理参数	核心性能优势	成本优势 (相对传统 γ - Al_2O_3)
传统 γ - Al_2O_3	比表面积约 200-300m ² /g	通用性强	-
MCM-41 介孔材料	孔径 2-10nm, 有序六方结构	加氢脱金属率 +15%-20%	工业级成本降低 10%-15%
SBA-15 分子筛	孔径 5-30nm, 高热稳定性	寿命延长 200-300 小时	规模化应用后成本持平
活性炭	比表面积 800-1500m ² /g	抗积炭性能 +30% 以上	原料成本降低 20%-25%
Al_2O_3 - SiO_2 复合	比表面积 350-450m ² /g	轻质油收率 +5%-8%	工业级配比成本降低 15%-20%

※ 补充说明：表格中成本数据基于工业规模化生产场景（单批次 10 吨以上），性能参数对应原文所述特定反应条件，为载体材料选型提供量化参考。

能让生产效率提高 50%–60%，还能大幅减少人工操作，使人工成本降低 40%–50%。

2.3 使用过程成本控制

在渣油加氢工艺中，催化剂的使用过程是成本构成的重要环节，其成本控制需基于催化剂失活机理与资源高效利用的学术逻辑展开。催化剂的服役周期直接关联设备运行的连续性与经济性，失活速率的快慢、再生性能的优劣以及操作条件的合理性，共同决定了使用阶段的成本支出规模。延长催化剂使用寿命、提高利用率是控制使用成本的关键，改进催化剂性能，引入稀土元素可使催化剂对 Ni、V 等金属的容垢量提高 20%–30%，使用寿命延长 30%–40%，抗积炭涂层技术可使单程运行周期延长 500–800h；催化剂再生利用，活性可恢复至新鲜催化剂的 70%–80%，再生成本仅为新催化剂的 30%–40%，装置催化剂消耗成本降低 20%–30%；优化反应工艺条件，如控制反应温度在 400–410℃，可减少积炭生成，使催化剂失活速率降低 15%–20%，从而减少更换频率，降低因停工带来的损失，据估算，合理控制工艺条件可使装置年停工损失减少 20%–30%^[4]。

3 技术创新与成本控制的协同发展

3.1 技术创新对成本控制的促进

技术创新能通过提升催化剂性能实现单位成本的降低，在原材料成本控制上，新型活性相和载体材料的应用可提高活性相利用率，减少其用量，例如 ALD 技术能提高活性金属利用率，在相同催化效果下使金属用量减少 15%–20%，从而降低原材料成本；在使用成本方面，延长催化剂使用寿命可减少更换次数和停工损失，像抗积炭催化剂延长了更换周期，使年催化剂消耗成本降低 25%–30%；同时，先进制备工艺能提高生产效率，降低能耗和人工成本，如微波辅助合成技术可降低能耗 30%–40%。

3.2 成本控制对技术创新的支撑

有效的成本控制能够释放更多可支配资源，为技术研发提供稳定的资金保障，支撑创新活动的持续性深化；同时，成本约束所形成的压力可转化为技术创新动力，使研发方向更贴合产业实际需求，加速创新成果向经济价值的转化。通过原材料采购优化、生产工艺改进等环节节省的成本，可专项投入到催化剂研发，充实研发资金池，从而加快新型催化剂的研发速度，缩短实验室成果到工业化应用的周期。此外成本压力还会倒逼技术突破——例如对低成本原料的需求，推动科研人员探索新型载体材料与替代金属，催生出更经济高效的催化剂配方及制备技术，最终形成成本控制与技术创新相互促进的良性循环。

3.3 技术创新与成本控制的协同发展的路径

第一，构建技术创新与成本控制一体化的评估机制，在项目启动初期，就将成本因素纳入成本维度，与性能指标同步评估，对不同技术方案的成本效益进行分析，在确保催化剂核心性能达标的基础上，筛选出性价比最优的方案，实现性能与成本的动态平衡。第二，深化产学研协同，企业联合高校、科研机构共享实验设备与技术数据，借助外部研发力量降低自身投入，同时加速技术成果向产业化转化，提高创新效率，缩短从实验室到生产线的周期^[5]。第三，推动催化剂回收与再生技术的创新，通过高效回收工艺与再生方法，提升失活催化剂中活性金属的回收率及再生催化剂的性能稳定性，形成“生产–使用–再生”的闭环循环模式，降低全生命周期成本，实现资源高效利用。

4 结论与展望

渣油加氢催化剂技术创新在活性相、载体材料和制备工艺方面取得显著进展，提升了催化剂的活性、稳定性和选择性，成本控制从原材料、生产工艺和使用过程入手，有效降低了催化剂的综合成本，且技术创新与成本控制协同发展能实现催化剂综合效益最大化；未来应进一步加强新型低成本高性能催化剂的研发，深化催化剂再生技术研究，利用智能化技术优化生产和使用过程，通过持续的技术创新和有效的成本控制，使渣油加氢催化剂更好地满足炼油工业应对原油劣质化和市场竞争的需求，为行业可持续发展提供有力支撑。

参考文献：

- [1] 吴孟德, 李广慈, 李明时, 等. 重质油悬浮床加氢技术和相关催化剂的研究进展 [J]. 工业催化, 2020, 28(12): 1-11.
- [2] 蔡绍峰. 试析化工企业成本核算与控制措施 [J]. 财经界, 2023, (28): 66-68.
- [3] 中科院大连化物所发现可替代贵金属的加氢催化剂 [J]. 浙江化工, 2019, 50(01): 43.
- [4] 夏民, 王振. 工业长周期运行后固定床渣油加氢失活催化剂研究 [J]. 石油炼制与化工, 2025, 56(06): 14-19.
- [5] 朱慧红, 刘璐, 刘鹏, 等. 劣质渣油加氢催化剂构筑及其催化性能提升机制 [J]. 化工进展, 2025, 44(05): 3009-3016.

作者简介：

吴士雷 (1989-) 男, 汉族, 山东阳谷人, 硕士研究生, 中级工程师, 研究方向: 石油化工。

乔威 (1989-) 男, 汉族, 山东嘉祥人, 本科, 研究方向: 石油化工。

张坤宇 (1989-) 男, 汉族, 山东青岛人, 本科, 工程师, 研究方向: 石油化工。