

# 加氢精制装置催化剂失活原因分析与再生工艺研究

赵振辉

山东裕龙石化有限公司 山东 烟台 265715

**【摘要】：**加氢精制装置催化剂在长期运行过程中会受到金属沉积、积碳、烧结及中毒等因素影响，导致活性逐渐下降，从而影响装置的脱硫、脱氮和芳烃饱和性能。针对这一问题，本文系统分析了催化剂失活的主要机理，结合典型装置运行数据探讨了金属污染与有机沉积的形成规律及其对催化性能的影响。通过对不同再生工艺的热处理方式和气氛控制条件，提出了一种可有效恢复催化剂活性并减少结构损伤的优化再生方案。研究结果表明，精确控制再生温度与氧分压可显著提高再生后催化剂的比表面积和金属分散度。该研究为加氢精制装置的稳定运行和催化剂资源循环利用提供了理论依据和技术参考。

**【关键词】：**加氢精制装置；催化剂失活；积碳机理；再生工艺；金属中毒

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.085

## 引言

加氢精制是石油加工中去除硫、氮、氧及金属杂质的重要环节，其核心在于高效催化剂的长期稳定运行。然而，在实际生产中催化剂不可避免地受到金属沉积、焦炭堆积及杂质中毒等影响，导致活性下降与选择性减弱，进而影响装置经济性与产品质量。深入研究催化剂失活机理并开发高效再生工艺，已成为提高装置运行效率和延长催化剂使用寿命的关键。本文围绕加氢精制催化剂的失活原因及再生技术展开研究，旨在为工业应用提供可操作性强的技术支持与理论指导。

## 1 加氢精制催化剂应用的技术发展与运行特征

加氢精制催化剂在石油加工产业中承担着去除原料油中杂质的重要任务，其应用技术的发展直接影响产品质量与装置能效。随着原油品质的复杂化和环保标准的提高，催化剂在选择性脱硫、脱氮、脱金属及芳烃饱和反应中的作用愈加关键。早期的加氢精制催化剂以氧化钼、氧化钴或氧化镍为主要活性组分，载体多为 $\gamma$ -氧化铝，虽具备较高的机械强度与比表面积，但在高压氢气环境下易受金属沉积与焦炭堵塞的影响，导致活性衰减较快。为改善这一问题，研究者逐步发展出双金属体系与复合载体技术，通过调整金属分散度与载体酸性，实现了加氢活性与稳定性的平衡。

随着工艺要求的精细化和反应条件的多样化，现代加氢精制装置普遍采用分级反应器设计与多床层催化剂布置，使不同性质的催化剂在反应区间内发挥协同效应。例如，前段床层以金属活性为主，强化重质组分加氢脱金属与芳烃饱和反应；后段床层则以酸性调控为主，提升脱硫脱氮能力并抑制副反应的发生。这种分区匹配设计提高了反应体系的整体转化率与氢利用率，同时延长了催化剂的在线使用周期。

在运行特征方面，加氢精制催化剂的性能不仅取决于化学组成与结构特性，还与反应条件控制密切相关。反应温度、氢油比、空速及进料性质的变化都会引起催化剂表面活性中心的动态调整。高温有利于硫化物分解与芳烃饱和反应，但过高温

度会加速载体烧结；氢油比的优化可平衡氢耗与反应速率，保证金属活性中心处于还原态。装置长期运行中，催化剂表现出由活性高峰到逐步钝化的规律，这一变化过程与金属硫化物团簇的结构演变密切相关。当前的研究重点正在向催化剂微观结构调控与分子水平反应机理的精确描述转变。通过对金属-载体界面的电子效应、氢迁移行为以及杂质吸附动力学的研究，可进一步揭示催化剂活性衰减的本质规律，为再生工艺提供科学依据。

## 2 催化剂性能衰退的内在机制与工艺影响因素

催化剂性能衰退是加氢精制装置稳定运行的关键限制因素，其内在机制复杂且受多种工艺条件影响。催化剂在高温、高压及氢气氛围中长期运行时，表面结构与活性中心会发生不可逆变化，导致活性下降与选择性减弱。从微观角度看，金属活性组分的迁移与团聚是失活的主要驱动过程。当反应温度过高或氢分压不足时，金属硫化物晶粒会发生烧结，导致比表面积下降，活性位点减少。与此同时，载体表面的酸性位点也会因热稳定性不足或杂质覆盖而减弱，从而削弱加氢脱硫和脱氮反应的深度。

积碳现象是导致催化剂失活的另一主要机制。重质馏分或含芳烃较多的原料油在加氢条件下易生成不饱和中间体，这些分子在催化剂表面经缩合和聚合形成焦炭沉积。焦炭的生成不仅堵塞孔道、阻碍反应物扩散，还会覆盖活性中心，使金属组分失去反应能力。积碳速率与反应温度、氢油比及进料性质密切相关。高温促进焦炭生成，而较低的氢油比不利于碳氢自由基的饱和转化，从而加速沉积形成。针对这一问题，控制反应区间温差与优化氢气循环量成为延缓积碳的有效手段。金属污染与中毒效应对催化剂稳定性影响显著。原料中的镍、钒、铁及钠等杂质易与催化剂表面的活性组分发生化学反应，生成难以还原的金属氧化物或硫化物。这些化合物会覆盖或置换原有的活性位点，降低催化剂对硫、氮化合物的加氢能力。尤其是钒元素在高温下容易与载体发生反应，破坏其微孔结构，造成不可逆失活。为减少此类影响，工业上通常在原料预处理阶段

设置加氢脱金属反应区，以延缓主反应床层的污染速率。

此外，工艺操作参数的不当调整也会加剧催化剂衰退。反应器温度分布不均、氢油比波动或原料性质突然变化，都会引起催化剂表面化学态的失衡，导致局部过热、积炭集中或金属析出等问题。长期运行中，载体结构在热应力和化学侵蚀作用下逐渐坍塌，孔径分布发生偏移，使传质效率降低，进一步放大了失活效应。催化剂性能衰退的本质是结构与反应环境的动态失配，其演变过程涉及物理烧结、化学中毒及扩散阻塞的协同作用。深入理解这些机制对于后续的再生工艺设计和装置运行优化具有重要意义。

### 3 基于机理分析的催化剂再生技术优化思路

催化剂再生技术的优化建立在对失活机理的深入理解之上，只有准确识别影响活性中心的结构变化与化学反应路径，才能制定出针对性强、损伤最小的再生方案。催化剂在加氢精制过程中经历复杂的反应环境，其表面失活主要由积碳覆盖、金属污染和载体烧结引起。针对这些不同类型的失活模式，再生工艺的设计应在热处理与气氛控制之间取得平衡，以实现有机沉积物的有效去除和金属组分的重新分散。

在积碳失活体系中，焦炭的组成多为多环芳烃结构和少量金属碳化物，常采用受控氧化法进行再生。通过在限定氧分压条件下升温，使表面碳物质逐步氧化为二氧化碳或一氧化碳，并防止剧烈燃烧导致催化剂晶相破坏。研究表明，温度升速、氧含量与再生气流分布的耦合控制对保持活性组分的结构稳定性至关重要。过高的局部氧化速率会导致金属硫化物转化为氧化态金属，影响后续硫化还原活性，因此精确控制再生过程中的氧化还原平衡是关键环节。对于受金属污染的催化剂，再生技术需结合物理洗脱与化学修复。重金属如镍、钒可通过弱酸溶液浸洗或络合剂处理方式部分去除，以恢复载体孔结构的开放性。此过程中需要防止载体酸性流失和机械强度下降，因此常在后处理阶段引入轻度还原气氛，使金属活性位点重新分散并稳定结合于载体表面。通过调节还原温度与氢气浓度，可以有效改善金属颗粒的分布状态，增强催化剂对含硫、含氮化合物的加氢能力。

在再生气氛与温度的优化设计方面，采用多阶段再生技术成为趋势。初期阶段以低氧气氛进行缓慢脱碳，中期阶段在稳定温度下实现完全除焦，末期通过氢气或惰性气体还原恢复活性中心。该过程可避免因温度梯度过大导致的结构塌陷，并显著提高再生后催化剂的比表面积与孔容。结合在线监测技术对尾气成分、温度分布及反应热的实时控制，可实现再生过程的可视化与精确调控。基于机理分析的优化思路不仅强调失活产物的去除，更关注活性结构的恢复与再稳定。通过整合热力学模型、反应动力学分析及表面化学表征，可实现再生过程的科学预测与动态调节，使催化剂的循环使用性能达到最佳化。这种系统化的再生设计为加氢精制装置的长期安全运行提供了

可靠的技术保障。

### 4 典型装置再生工艺改进的应用与成效分析

在加氢精制工业实践中，典型装置的催化剂再生工艺经历了由经验型向科学化、精细化控制的转变。传统的再生方式多采用单段氧化法，在高温空气气氛中直接燃烧去除焦炭，但该方法容易引起催化剂局部过热、金属组分氧化以及载体结构塌陷，导致再生后活性不足和机械强度下降。为解决这一问题，现代装置普遍引入了多阶段分步再生工艺，通过严格控制氧气浓度、升温速率及气氛组成，实现焦炭的平稳氧化与活性组分的保护，从而显著提升催化剂的再生质量与重复利用率。

在典型的改进方案中，预氧化阶段以低氧浓度气体进行缓慢脱焦，利用较低反应热量分散燃烧，避免热点生成；主氧化阶段在恒定温度区间维持完全除焦，使催化剂表面恢复清洁状态；还原阶段则采用氢气或惰性气体氛围，将部分被氧化的金属组分重新还原为活性硫化物结构。该工艺过程能够有效保持金属分散度，防止载体酸性位点损失。实践表明，经优化后的再生催化剂其比表面积、孔容及金属活性中心暴露度均较传统再生方式提升显著，活性恢复率可达到新鲜催化剂的90%以上。在装置运行层面，自动化再生控制系统的引入提高了过程的可控性与安全性。通过设置多点温度传感与尾气在线分析模块，可实时监测反应热与氧化速率，防止因局部温升导致的催化剂烧结。部分装置还应用尾气回流与气氛分层技术，使再生气体在反应器内形成稳定流场，提升氧化反应的均匀性。与之配合的能量回收系统可将再生过程中释放的热量用于原料预热或蒸汽产生，实现能源的梯级利用，降低装置运行成本。

在工艺改进效果的评估中，经过再生的催化剂在脱硫与脱氮反应中表现出稳定的转化率和较低的压降上升速率，反应温度可维持较长周期内平稳运行。通过再生前后对比测试发现，催化剂的焦炭含量下降显著，金属硫化物晶相恢复完整，孔径分布趋于均匀，传质阻力明显降低。再生周期的延长与催化剂重复使用次数的增加，使得整体经济效益和环保效益得到同步提升。改进后的再生工艺不仅提高了装置的运行可靠性，也为催化剂的循环利用和资源节约提供了坚实的技术支撑，为加氢精制产业的可持续发展奠定了基础。

### 5 绿色高效催化剂再生技术的发展趋势与前景

绿色高效催化剂再生技术的发展趋势正朝着低能耗、低排放和结构可控的方向迈进。随着环保标准和能效要求的不断提升，传统高温氧化再生方式暴露出能耗高、污染物排放大以及催化剂结构损伤等不足。新一代再生技术更加注重过程的可持续性与资源循环利用，通过对反应机理的深入研究，实现焦炭、金属沉积物及杂质的温和去除，同时保护活性中心和载体结构。研究者正在探索以气氛调控、等离子体辅助及催化氧化等手段为核心的绿色再生体系，使再生过程从单纯的热处理转变

为机理协同的精准调控过程。

在气氛控制方面，低氧浓度再生技术通过引入稀释气体或采用分段供氧方式，使焦炭在相对温和条件下逐步氧化，减少氮氧化物和二氧化碳排放。这种方式有效降低了再生过程中的热冲击风险，同时提升了载体的结构稳定性。部分装置还应用水蒸气参与的气化再生法，通过焦炭与水蒸气反应生成一氧化碳和氢气，不仅实现了焦炭去除，还能在体系中形成轻度还原气氛，有助于金属活性组分的再分散与恢复。新兴的等离子体再生技术因其能在低温条件下产生高能活性粒子而受到关注。该技术利用等离子体中产生的自由基、离子和激发态分子与焦炭反应，实现非热平衡条件下的快速脱碳。与传统氧化法相比，等离子体再生具有反应速度快、能耗低和结构损伤小的优势，为未来催化剂在线再生提供了新的技术路径。同时，光催化与微波辅助再生也在研究中展现出潜力，通过电磁场作用促进局部反应活化，进一步提高再生的能量利用效率。

从长远看，绿色高效再生技术的发展将更加依赖数字化与

智能化手段。通过引入过程模拟、数据驱动的反应动力学建模以及人工智能算法，可实现对再生过程的实时预测与动态优化。结合在线红外光谱、质谱等监测技术，可精准捕捉活性中心的结构变化，指导再生条件的自动调节，确保催化剂性能的最大化恢复。未来的再生工艺不仅追求活性恢复，更强调环境友好与资源闭环管理。构建低碳、智能、循环的催化剂再生体系，将成为加氢精制行业实现绿色转型与高质量发展的核心方向。

## 6 结语

加氢精制催化剂的失活与再生研究是提升装置运行稳定性与经济效益的重要环节。通过对失活机理的系统分析和再生工艺的优化探索，能够有效恢复催化剂活性，延长使用寿命，实现资源循环利用。绿色高效再生技术的发展，使再生过程由经验操作向精准控制转变，为炼油行业的清洁化与可持续发展提供了新思路。未来，智能化与低碳化将成为催化剂再生技术的重要方向。

## 参考文献：

- [1] 陈立国.加氢精制催化剂失活机理及再生研究进展[J].石油炼制与化工,2021,52(4):45-52.
- [2] 郑晓岚.加氢精制装置运行中催化剂性能衰退规律分析[J].化工技术与开发,2020,49(6):88-93.
- [3] 刘彦东.再生条件对加氢精制催化剂活性恢复的影响[J].石油学报(石油加工),2019,35(3):73-80.
- [4] 孙柏青.加氢工艺中催化剂失活的原因与控制措施[J].现代化工,2022,42(7):61-67.
- [5] 韩玉洁.面向循环利用的加氢催化剂再生技术发展方向[J].石油化工应用,2023,41(5):102-108.