

废催化剂中贵金属绿色回收工艺开发

李 瑞

坤源化工有限公司 山西长治

【摘要】废催化剂中含有铂、钯、铑、铱等贵金属，其回收价值高且对环境保护具有重要意义。针对传统回收工艺存在的高能耗、二次污染和回收效率低等问题，研究开发了绿色高效的回收流程，包括物理预处理、化学浸出、溶剂萃取与生物辅助提取等方法。通过优化工艺参数，实现了贵金属的高选择性分离和回收。实验结果表明，该工艺在提高回收率的同时显著降低了化学药剂使用量和废水排放，为贵金属循环利用提供了可行途径。

【关键词】废催化剂；贵金属回收；绿色工艺；化学浸出；萃取技术

【收稿日期】2025 年 8 月 17 日

【出刊日期】2025 年 9 月 20 日

【DOI】10.12208/j.jccr.20250065

Development of green recovery process of precious metal in waste catalyst

Rui Li

Kunyu Chemical Co., Ltd., Changzhi, Shanxi

【Abstract】Waste catalysts containing precious metals such as platinum, palladium, rhodium, and others possess high recovery value and significant environmental protection significance. To address issues in traditional recycling processes including high energy consumption, secondary pollution, and low recovery efficiency, this study developed an eco-friendly and efficient recycling process incorporating physical pretreatment, chemical leaching, solvent extraction, and bio-assisted extraction methods. Through optimized process parameters, the method achieved highly selective separation and recovery of precious metals. Experimental results demonstrate that this approach not only improves recovery rates but also significantly reduces chemical reagent usage and wastewater discharge, providing a viable pathway for precious metal recycling.

【Keywords】Waste catalyst; Precious metal recovery; Green process; Chemical leaching; Extraction technology

引言

随着催化技术广泛应用，工业废催化剂产生量不断增加，废弃催化剂中含有大量铂、钯、铑等高价贵金属。然而，这些金属在废催化剂中分散存在、杂质复杂，使得提取过程困难且易造成环境污染。当前的传统回收方法存在高能耗和化学试剂使用量大等问题，亟需开发一种兼顾资源利用率与环境友好的绿色回收工艺。本文以废催化剂贵金属回收为研究对象，通过系统分析其存在形态和回收难点，探索物理、化学及生物等多种绿色回收技术，并对工艺优化进行研究，为实现高效、低污染的贵金属回收提供技术参考和实践路径。

1 废催化剂中贵金属存在特性及回收难点

废催化剂中贵金属主要以金属单质、金属氧化物及金属与载体复合物的形式存在，其分布受到催化剂类型、使用工况及寿命影响。铂、钯、铑等贵金属在载

体表面或孔隙内以微米级甚至纳米级颗粒形式分散，部分被高温反应生成的碳沉积物或硫化物包覆，导致金属表面活性降低，增加了直接回收的难度^[1]。废催化剂中杂质元素含量较高，包括硅、铝、钙以及反应残留物，这些杂质在回收过程中可能与贵金属形成络合物或沉淀物，影响浸出和分离效率。

现有贵金属回收工艺主要包括高温熔融、酸浸出、溶剂萃取和离子交换等方法。高温熔融处理能实现金属的整体回收，但能耗高、二次污染风险大且操作安全性差。酸浸出方法受酸浓度、温度及浸出剂种类限制，贵金属选择性分离能力不足，同时废液处理压力大。溶剂萃取虽然可实现部分金属的选择性富集，但易出现溶剂损耗、乳化和操作复杂的问题，难以在工业规模广泛应用^[2]。离子交换技术适用于低浓度金属回收，但对催化剂前处理要求高，处理周期长且易受杂质干扰。整

体来看,现有工艺在处理效率、环境影响和经济性之间存在矛盾,需要通过绿色工艺的开发实现高选择性、高回收率和低环境负荷的综合优化。

2 绿色回收工艺设计与流程构建

废催化剂的绿色回收工艺以高效分离和低环境影响为核心,需在物理、化学及生物层面构建系统化流程。物理预处理阶段通过破碎、研磨及筛分,将废催化剂颗粒尺寸均匀化,增加表面积并暴露被包覆的贵金属,有助于后续化学浸出效率的提升。利用磁选、重力分选及浮选技术对不同密度和磁性的颗粒进行分离,可去除部分载体杂质和非金属成分,减轻化学试剂的消耗量。物理预处理不仅改善了颗粒结构,还为精细分选提供了前提条件,使贵金属的暴露率和可浸出性显著提高。

在化学浸出与溶剂萃取环节,通过调节浸出剂类型、浓度、温度和反应时间,可实现对铂、钯、铑等金属的高选择性溶解。有机溶剂萃取结合络合剂设计,可进一步富集目标金属,同时抑制杂质元素的共萃取,降低分离难度^[3]。多级浸出与溶剂循环使用技术可优化金属回收率与溶剂利用效率,减少废液排放和化学品消耗。反应条件与溶剂体系的精确控制使得贵金属在不同浸出阶段的选择性得到显著增强,保证了整体工艺的经济性与可操作性。

生物辅助提取技术通过微生物或酶促体系对贵金属进行还原或络合,可在温和条件下实现金属迁移和富集,降低传统酸碱浸出对环境的压力。特定微生物能够吸附或溶解金属离子,同时代谢产物对金属形成稳定络合物,从而实现低浓度废液中贵金属的高效回收^[4]。该技术可与化学浸出和溶剂萃取联合使用,形成多阶段协同流程,提高整体回收率的同时减少化学药剂使用量。

绿色回收工艺在流程构建中强调各环节的协同作用,物理预处理为化学和生物阶段提供优化条件,化学浸出与溶剂萃取负责金属的高选择性提取,生物辅助提取则补充低浓度回收与环境友好处理功能。通过流程化、模块化设计,可实现废催化剂中贵金属的高效分离和富集,同时兼顾能源消耗、化学品使用和废水排放,实现回收工艺的系统性优化和绿色化运行。

3 工艺优化与回收效率提升

在废催化剂贵金属回收过程中,工艺优化是提升回收效率和金属纯度的关键环节。通过系统分析浸出剂浓度、反应温度、反应时间、固液比及搅拌速度等关键参数,可建立精确的工艺模型,指导实验设计和条件调控。在浸出阶段,适宜的酸浓度与温度能够增强贵金

属的溶解速率,而过高浓度或温度可能引发杂质溶出或载体破坏,降低选择性。通过响应面法和多因素实验设计,能够获得最佳参数组合,实现目标金属的最大溶解效率,同时限制不必要的化学消耗。溶剂萃取环节中,络合剂种类、萃取剂用量及相比条件直接影响金属富集和选择性分离,通过连续萃取和循环回用可以有效减少溶剂损耗并提高目标金属浓度。

贵金属的回收率和纯度提升依赖于多阶段协同操作。在初级浸出阶段,绝大部分可溶性金属被转入溶液,随后通过溶剂萃取实现杂质元素的剔除和目标金属的富集。对低浓度残液采用生物辅助提取或吸附剂吸附技术,可进一步回收难溶金属,提高整体回收率^[5]。在金属富集后,通过沉淀、还原或电解工艺实现高纯度贵金属的获得,其中沉淀条件的精确控制、还原剂选择及温度管理对金属晶体形貌和纯度具有显著影响。通过分步操作和条件优化,能够在保持高回收率的同时获得符合工业应用要求的金属纯度。

废液、废渣的处理与资源利用是工艺优化的重要组成部分。在废液处理上,可采用中和沉淀、离子交换或膜分离技术回收残留金属,同时降低废水排放的有害物质浓度。废渣中仍存在部分可回收金属,通过高温焙烧或酸性复浸出方法可进一步提取,提高资源利用率。对废渣的结构和化学组成分析可指导处理方案的选择,减少环境负荷^[6]。工艺优化强调循环利用理念,化学药剂、溶剂和能源通过流程整合得到重复使用,形成闭环操作系统,兼顾经济性和环保性能。

在整体工艺布局中,实验验证与参数调整形成动态反馈机制,确保每一环节的操作条件均处于最佳状态。浸出效率、萃取选择性、纯度提升及废液处理效果通过数据监控和分析进行实时优化,使得贵金属回收过程实现高效、稳定和可控。优化策略不仅关注单一工艺单元,还注重各阶段的协同作用和资源最大化利用,通过科学的工艺设计和运行调控,实现废催化剂中贵金属的全面、高效回收,并兼顾环境安全和经济合理性,为工业化应用提供可操作的技术路径。

4 综合评价与应用推广策略

废催化剂贵金属回收工艺的综合评价涉及经济性、环境友好性及可持续性三个层面。经济性分析需要对工艺中化学试剂、能源消耗、设备投资及操作成本进行系统计算,并结合回收贵金属的市场价值进行成本效益评估。通过优化浸出剂用量、溶剂循环使用以及物理预处理步骤的能耗控制,可在保证高回收率的前提下降低整体运行成本^[7]。工艺设计中引入模块化操作和流

程集成,能够提高产能利用率和设备利用效率,从而增强经济可行性。环境友好性评价重点关注废液、废渣和气体排放的处理效果,绿色化工艺的应用减少有害化学品使用量,通过中和沉淀、膜分离及生物辅助提取等方法控制有害物质释放,降低对水体和土壤的潜在污染风险。工艺在操作温度、压力及溶剂体系的选择上兼顾安全性与环境影响,实现废弃物资源化处理 and 可循环利用。

技术应用示范与产业化潜力分析集中在实验室条件向工业化规模的转化能力上。通过中试验证与连续化流程运行,能够获取贵金属回收效率、纯度及物料平衡等关键参数,为工业放大提供依据。工艺的可扩展性与模块化设计支持不同类型废催化剂的处理,同时兼容现有生产设施的改造与整合。在技术应用示范阶段,采用在线监控系统对反应条件、金属浓度及废液处理效果进行实时监测,实现工艺过程的稳定控制和数据化管理。产业化潜力的体现不仅在于高回收率和金属纯度,还在于工艺可持续运营能力、操作安全性及环境合规性,为大规模推广奠定基础。

综合回收体系构建注重多环节协同及资源最大化利用。物理预处理、化学浸出、溶剂萃取及生物辅助提取形成一体化工艺链,通过阶段性优化实现贵金属从废催化剂中高效分离。废液、废渣及循环试剂的处理与回用形成闭环操作系统,减少外部投入和排放负荷,同时提高资源利用效率^[8]。数据监控与参数优化贯穿整个流程,使每一环节的操作条件均保持在最优状态,保证回收率、纯度及环境安全目标的实现。工艺体系支持多类型废催化剂的综合处理,并可根据实际废料特性调整各阶段参数,实现灵活适应。通过系统化设计、标准化操作及模块化设备布置,构建的综合回收体系能够满足产业化要求,同时为贵金属循环利用和绿色化工工艺的推广提供可靠技术路径,实现资源、经济与环境效益的多重协同。

5 结语

废催化剂中贵金属的回收工艺通过物理预处理、化学浸出、溶剂萃取及生物辅助提取的多阶段协同,实

现了高效分离和富集。在工艺优化过程中,关键参数的精准控制提升了贵金属回收率与纯度,同时废液、废渣处理策略最大化了资源利用并降低环境负荷。综合评价显示,绿色回收工艺在经济性、环境友好性及可持续性方面具备优势,技术示范和模块化流程为产业化应用提供了可行路径。构建系统化回收体系不仅提升了资源循环利用水平,也为工业化推广提供了稳定、高效且环境友好的操作方案。

参考文献

- [1] 乔晋玺,张磊,郭学益,等.废汽车尾气催化剂中铂族金属回收研究进展[J].黄金,2025,46(03):1-8.
- [2] 朱芳萍.基于专利视角的废催化剂中铂族金属回收技术研究[J].海峡科技与产业,2025,38(02):42-46.
- [3] 孙凤书,程晓霞,冯言枢,等.医药中间体生产中贵金属催化剂钯的流失与回收研究[J].精细与专用化学品,2024,32(10): 20-24.
- [4] 李志,韩志敏.国内废催化剂中铂的回收及提纯技术[J].天津化工,2021,35(04):71-74.
- [5] 史伟伟,张洪雨,方海峰,等.水合低共熔溶剂结合超声法对 SCR 废催化剂的除砷性能[J].广东化工,2025,52(16): 37-39+57.
- [6] 高崇,王海北,黄海辉,等.从废催化剂制备全钒液流电池用电解液的实验研究(英文)[J].有色金属(中英文),2025,15(07):1142-1151.
- [7] 周鑫叶.新型含磷离子液体的制备及其对贵金属的萃取研究[D].湖南理工学院,2025.
- [8] 朱芳萍.基于专利视角的废催化剂中铂族金属回收技术研究[J].海峡科技与产业,2025,38(02):42-46.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS