废钒催化剂的湿法回收工艺研究进展

师兆忠[1,2,3],崔伟娜[2,3,4]

(1. 开封大学 材料与化学工程学院,河南 开封　475004;
2. 河南省先进材料与绿色过程工程技术研究中心,河南 开封　475004;
3. 开封市化工清洁生产技术重点实验室,河南 开封　475004;
4. 开封大学 功能材料研究中心,河南 开封　475004)

摘要:废钒催化剂主要来源于石油化工行业,属于危险废物,但其中含有高于天然矿石品位的钒、钨、钼、镍等有价金属,也是重要的二次资源。本文综述了近年来废钒催化剂湿法回收工艺研究进展,重点分析了酸浸、碱浸和焙烧—浸出提钒工艺的原理、试验条件及优缺点,总结了从中回收钒并制备钒电解液(用于液流电池)、VO_2(B)和 $K_{0.51}V_2O_5$(用于水系锌/钾离子电池正极)及 Ag_3VO_4 基光催化剂等高附加值产品的技术路线,并展望了未来废钒催化剂资源化回收利用的研究方向。

关键词:废钒催化剂;钒;回收;资源化;高值化;研究进展

中图分类号:TF803.21;TF841.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)05-0646-12

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.05.004

钒因具有优异的理化性质,在钢铁冶金、航空航天、石油化工及储能材料等领域应用广泛。废钒催化剂(SVC)主要来源于石油化工行业,是指因各种原因导致失活的催化剂,主要包括烟气治理行业用的选择性脱硝(SCR)废催化剂[1-4]、石油炼制过程中产生的废加氢脱硫(HDS)催化剂和催化裂化(FCC)催化剂,以及生产硫酸时产生的废催化剂。据统计,全球每年产生废钒催化剂约 80 万 t[5]。这些废催化剂属于危险废物,已被列入《国家危险废物名录》(HW50 类);但这些废催化剂中含有一定量钒元素,通常以 V_2O_5 形式存在,品位为 4%~8%,远高于天然矿石品位[6],其中以硫酸生产用钒催化剂中钒含量最高。因此,从中回收钒,不仅能够解决危险废物带来的环境污染问题,还可缓解战略性金属钒的资源短缺问题。

本文介绍了废钒催化剂的来源与组成,综述了酸浸、碱浸和焙烧—浸出等主要提钒工艺的研究进展,重点分析了各工艺原理、优化参数及优缺点,并总结了从中回收钒并制备高附加值产品的技术路线,最后对现有研究进行评述并展望了未来发展方向。

1　废钒催化剂的来源与组成

1.1　废钒催化剂的来源

在采用选择性催化技术处理烟气中的氮氧化物过程中,常用的 SCR 脱硝催化剂主要包括 V_2O_5-WO_3/TiO_2、V_2O_5-MoO_3/TiO_2 两种类型,催化剂失活的主要原因包括碱金属(K、Na)和重金属(As、Pb)中毒、SO_2 氧化导致的硫酸盐沉积,以及高温烧结引起的 TiO_2 晶型转变[7]。

在石油炼制过程中,HDS 和 FCC 催化剂本身不含钒,但在使用过程中,由于 Ni、V、Fe 的沉积而失活,因此废 HDS 和 FCC 催化剂成为了钒的重要二次资源[8]。HDS 催化剂主要包括 Ni-Mo/Al_2O_3 和 Co-Mo/Al_2O_3 两种类型,FCC 催化剂主要由沸石分子筛、基质和黏结剂 3 部分组成。Yang Y. 等[9]的研究表明,沉积的 Ni 对催化剂结构和活性的破坏最小,而 V 对催化剂活性影

收稿日期:2026-04-24;**修订日期**:2026-06-02

基金项目:河南省科技攻关计划项目(242102320142);河南省自然科学基金项目(222300420500)。

第一作者简介:师兆忠(1968—),男,博士,教授,主要研究方向为工业固体废弃物资源化利用。

响最大，Fe 则通过形成表面结瘤降低比表面积和酸性位点。Fu H. H. 等[10]对国内 7 套未添加锑基钝化剂催化裂化装置产生的废催化剂进行了危害特性识别，结果表明，除个别装置外，大多数废 FCC 催化剂不具有浸出毒性、毒性物质含量超标和急性毒性等危险特性。

在硫酸生产过程中，钒催化剂分子结构类型为 V_2O_5/SiO_2，在使用过程中因化学中毒、热烧结等原因失去活性。这些废催化剂以硅藻土为载体的 $V_2O_5 \cdot K_2SO_4$ 体系为主[11]。由于硫酸生产中使用含铯促进剂的钒催化剂，因此在活性下降后，对铯的回收更为重要[12]。

1.2　废钒催化剂的组成

废钒催化剂因来源不同，组成也存在差异。常见废钒催化剂的组成见表 1。可以看出：硫酸用废催化剂以硅藻土为载体，含 V_2O_5 5%～10%[13-14]；废 SCR 催化剂以 TiO_2 为载体，含 WO_3 2%～7%、V_2O_5 0.5%～2%[15-17]；废 HDS 催化剂以 γ-Al_2O_3 为载体，含 Mo 4%～12%、V 0.5%～15%、Ni 1%～5%[18-20]；废 FCC 催化剂以硅铝分子筛为载体，含 W 5%～16%、Mo 2%～10%、稀土元素 2%～3%[21-23]。这些废催化剂中金属品位普遍高于原生矿物，是极具回收价值的二次资源。

表 1　常见废钒催化剂的组成

Table 1　Composition of common spent vanadium catalysts

催化剂类型	原料产地	主要载体	关键有价金属或氧化物及含量	其他主要成分	参考文献
硫酸用废催化剂	白俄罗斯（Grodno Azot JSC）	硅藻土（SiO_2）	V 7.5%	K 9.1%，Si 23.2%，Fe 1.4%	[13]
	中国（开封某公司）		V_2O_5 5%～6%	K_2SO_4 20%～27%，SiO_2 65%～70%，Fe_2O_3 1.1%	[14]
废 SCR 催化剂	中国攀枝花电厂	TiO_2	WO_3 5.40%，V_2O_5 1.03%	TiO_2 83.20%，SiO_2 6.69%	[15]
	中国江苏靖江		WO_3 4.39%，V_2O_5 0.832%	TiO_2 85.56%，SiO_2 6.38%	[16]
	中国（某电厂）		WO_3 2.58%，V_2O_5 0.35%	TiO_2 86.00%，SiO_2 2.40%	[17]
废 HDS 催化剂	意大利（Orim S. R. L.）	γ-Al_2O_3	Mo 4～12%，V 0.5%～15%，Ni 1%～5%	Al 15%～30%	[18]
	中国南京（金陵石化）		MoO_3 7.04%，V_2O_5 24.32%	Al_2O_3 32.52%，NiO 6.15%	[19]
	中国（某石化企业）		V_2O_5 12.55%，MoO_3 5.38%	Al_2O_3 55.17%，NiO 4.52%	[20]
废 FCC 催化剂	中国江西宜春（江西钨业）	硅铝分子筛	W 16.61%，Mo 1.96%	Al 26.89%，Ni 6.12%	[21]
	中国武汉（中韩石化）		V_2O_5 0.78%	SiO_2 37.63%，Al_2O_3 55.29%	[22]
	中石化某分公司		La 2.65%，Ce 0.65%	V 0.65%，Ni 1.79%，Fe 2.05%	[23]

2　废钒催化剂提钒工艺研究

废钒催化剂提钒工艺可分为湿法和火法。湿法工艺以浸出为主，根据浸出剂不同，可分为酸浸和碱浸两种工艺，火法工艺以焙烧为主。

2.1　酸浸提钒工艺

酸浸提钒工艺是在酸性条件下，将五价钒溶解为钒氧根离子，之后再加入还原剂或者络合剂浸出钒的方法。根据酸浸剂不同，可分为无机酸浸法、有机酸浸法和混合酸浸法。

2.1.1　无机酸浸法

无机酸浸出废钒催化剂采用的酸主要是硫酸。由于废钒催化剂中部分钒以难溶于酸的 V^{5+} 形式存在，因此在浸出前，需添加还原剂将 V^{5+} 还原为可溶的 V^{4+}（VO^{2+}），之后再将其溶解为钒氧根离子。常用的无机还原剂包括 Fe^{2+}、SO_3^{2-}、H_2O_2 等。涉及到的主要反应方程式如下：

$$V_2O_5 + 2H^+ \longrightarrow 2VO_2^+ + 2H_2O \quad (1)$$

$$Fe^{2+} + VO_2^+ + 2H^+ \longrightarrow Fe^{3+} + VO^{2+} + H_2O \quad (2)$$

$$SO_3^{2-}+2VO_2^{+}+2H^{+}\longrightarrow 2VO^{2+}+SO_4^{2-}+H_2O \quad (3)$$

$$2VO_2^{+}+2H_2O_2+2H^{+}\longrightarrow 2VO^{2+}+O_2+2H_2O \quad (4)$$

Wen J. W. 等[24]系统对比了 H_2SO_4、$H_2SO_4+H_2O_2$、$H_2SO_4+Na_2SO_3$ 和 $H_2SO_4+NaHSO_3$ 四种体系对废 SCR 催化剂中钒的浸出效果。结果表明，$H_2SO_4+NaHSO_3$ 体系效果最佳，在优化条件下(0.5 mol/L H_2SO_4、$n(NaHSO_3):n(V_2O_5)=3:1$、温度 80 ℃、液固体积质量比 10 mL/1 g、4 h)，钒浸出率达 93.6%，浸出渣中钒质量分数低于 0.04%。戴超等[25]采用 $FeSO_4$-H_2SO_4 溶液从硫酸厂废钒催化剂中浸出钒和钾，在搅拌时间 5 min、常温、液固体积质量比 6 mL/1 g、Fe^{2+} 质量浓度 0.028 g/mL 条件下，钒、钾浸出率分别达 88% 和 70%。该方法以 Fe^{2+} 作为还原剂，避免了 SO_2 或 Na_2SO_3 的二次污染问题。Hua Q. X. 等[26]研究了水热酸浸 SCR 催化剂工艺，并采用响应曲面法优化了浸出条件。结果表明，在 H_2SO_4 浓度 2.13 mol/L、液固体积质量比23.85 mL/1 g、温度 143 ℃、89 min 最佳条件下，钒浸出率达 99.76%。相较于传统火法或常压湿法工艺，该法避免了有毒气体排放和高能耗问题，实现了钒高效、环保回收。Wang Z. X. 等[27]提出了从钒钛磁铁矿焙烧球团中选择性循环浸出钒的新方法。研究结果表明，在硫酸浓度 3.0 mol/L、液固体积质量比 4∶1、温度 90 ℃、浸出时间100 h条件下，钒浸出率达80.28%，铁和钛浸出率仅分别为1.39%和1.72%；浸出后的球团经二次焙烧后抗压强度达 2 200 N，可满足高炉炼铁要求。该法对钒的选择性和提取率较高，铁、钛损失率较低，具有循环性和环保潜力，但浸出时间较长，能耗较高，仍需改进。

无机酸浸法提钒技术成熟、效率高，还原剂的引入可突破 V_2O_5 难溶瓶颈。水热酸浸虽需高压设备，但浸出近乎完全，极具工业潜力。$FeSO_4$ 还原体系成本低、速度快，适合短流程处理。今后的研究方向应兼顾高效、低耗与绿色环保，减少废水排放并实现有价金属协同回收。

2.1.2 有机酸浸法

单一有机酸浸出法常用的酸是草酸。草酸能对钒具有络合性和还原性，能促进钒的浸出，同时还对铁具有络合性，能促进铁的浸出。主要的化学反应方程式[28]为：

$$VO_2^{+}+HC_2O_4^{-}+H^{+}\longrightarrow VO_2(C_2O_4)^{-}+H_3O^{+} \quad (5)$$

$$2VO_2(C_2O_4)^{-}+HC_2O_4+5H_3O^{+}\longrightarrow 2VOC_2O_4+5H_2O+2CO_2 \quad (6)$$

$$Fe_3O_4+7HC_2O_4^{-}+H_3O^{+}\longrightarrow 3Fe(C_2O_4)_2^{2-}+5H_2O+2CO_2 \quad (7)$$

Wu W. F. 等[28]采用草酸选择性还原浸出废 SCR 催化剂中的钒。研究结果表明，在草酸浓度 1 mol/L、液固体积质量比 20 mL/1 g、温度 90 ℃、浸出时间 3 h 条件下，钒和铁浸出率分别为 86.3% 和 96.66%，而钨浸出率仅为 20.2%，说明草酸对钒具有良好的选择浸出性。Mazurek[29]采用草酸浸出—沉淀—离子交换联合工艺回收硫酸厂废钒催化剂中的钒、钾和铁。研究结果表明：在草酸浓度 2%、反应温度 323 K、液固体积质量比 25 mL/1 g、反应时间 4 h 条件下，钒、钾和铁浸出率分别为 91%、92% 和 63%；采用沉淀和离子交换两种方式分离浸出液中的铁，可制备高纯度的钒产品。Zheng D. L. 等[30]采用微波辅助草酸/过氧化氢体系从废 FCC 催化剂中同步浸出钒和镍。研究结果表明：在草酸浓度 1.8 mol/L、浸出时间 91 min、微波功率 500 W、H_2O_2 浓度 1.1 mol/L 条件下，钒、镍浸出率分别为 91.36%、46.35%；微波辅助可使浸出时间缩短 75%，并显著增大浸出渣比表面积，强化金属溶出。

有机酸浸法较无机酸浸法更绿色环保、选择性更好，能为废催化剂提钒提供高效、低污染的替代路径；但草酸成本较高、易分解，且铁等杂质会同步浸出，增加后续净化难度。

2.1.3 混合酸浸法

为提高复杂废催化剂中钒回收率，近年来，一些研究者提出采用混合酸浸出工艺，利用无机酸的强酸性和有机酸的还原络合特性，协同提升浸出效果。Erust 等[31]对比研究了枸橼酸、草酸和硫酸在 H_2O_2 体系下对硫酸生产用废催化剂中钒的浸出效果。结果表明，0.1 mol/L 枸橼酸＋0.1 mol/L H_2O_2 体系在温度 50 ℃、反应时间 120 min 条件下，钒浸出率可达 95%，优于草酸体系(68%)和硫酸体系(92.5%)；相较于草酸和硫酸体系，枸橼酸体系在较低温度下即可获得较高的钒浸出率，其原理是枸橼酸起到了络合剂的作用，促进了钒的浸出。Zhao C. 等[32]采用 H_2SO_4-$H_2C_2O_4$ 浸出—水解工艺从废 SCR 催化剂中回收钒、钨和钛，在

H_2SO_4 浓度 20%、$H_2C_2O_4$ 浓度0.3 mol/L、反应温度 140 ℃、反应时间 7 h 条件下，钒浸出率可达 95.65%，钛和钨可通过水解实现共沉淀回收。

王博[33]采用 H_2SO_4-抗坏血酸体系还原酸浸废弃 SCR 催化剂，在抗坏血酸用量为理论量 2 倍、浸出温度 70 ℃、浸出时间 5 h、H_2SO_4 浓度 10 mol/L、液固体积质量比 10 mL/1 g 最佳条件下，钒浸出率可达 98.21%。动力学研究表明，该过程受固膜扩散控制，活化能为 4.49 kJ/mol，抗坏血酸通过单电子转移机制，将 V_2O_5 和 V_2O_4 逐步还原为 V^{3+}，使反应活化能降低。其主要化学反应方程式为：

$$V_2O_5+2C_6H_8O_6+3H_2SO_4 \longrightarrow 2C_6H_6O_6+V_2(SO_4)_3+5H_2O \quad (8)$$

$$V_2O_4+C_6H_8O_6+3H_2SO_4 \longrightarrow C_6H_6O_6+V_2(SO_4)_3+4H_2O \quad (9)$$

田向阳等[34]采用 0.6 mol/L 草酸＋3 mol/L 硫酸混合浸出废脱硝催化剂中的钒，在 90 ℃条件下，钒浸出率达 81.91%；处理后浸出渣中 TiO_2 质量分数从 85.99%增至 88.98%，比表面积增大 18.3%，可作为催化剂原料循环使用。李扬等[35]系统对比了盐酸、硝酸、硫酸分别与枸橼酸、酒石酸、草酸组成的混合酸对废脱硝催化剂的浸出效果，发现硫酸-草酸组合最优；在液固体积质量比 20 mL/1 g、硫酸浓度 20%、草酸浓度 0.3 mol/L、浸出温度 140 ℃、浸出时间 7 h 条件下，钒浸出率最高可达 95.65%。浸出渣比表面积增大 13.5%，表明混合酸处理对载体有扩孔作用。

混合酸浸提钒利用无机酸的强酸性与有机酸的还原络合特性，可显著提高废脱硝催化剂中钒浸出率。该法兼具高效与选择性，是废催化剂提钒的绿色可行路径。

综上所述，酸浸提钒工艺能有效提取废钒催化剂中的有价金属，但不同方法各有优劣。无机酸浸法技术成熟、效率高，但酸耗大、设备腐蚀严重、废水处理量大；有机酸浸法选择性好、相对绿色，但草酸成本高、易分解，反应时间较长；混合酸浸法协同酸性与还原性，浸出率高、渣可资源化，但体系复杂，后续分离难度增加。总体而言，酸浸工艺仍需在降低腐蚀与废水排放、提高浸出剂循环利用方面进一步改进。酸浸提钒工艺流程如图 1 所示。

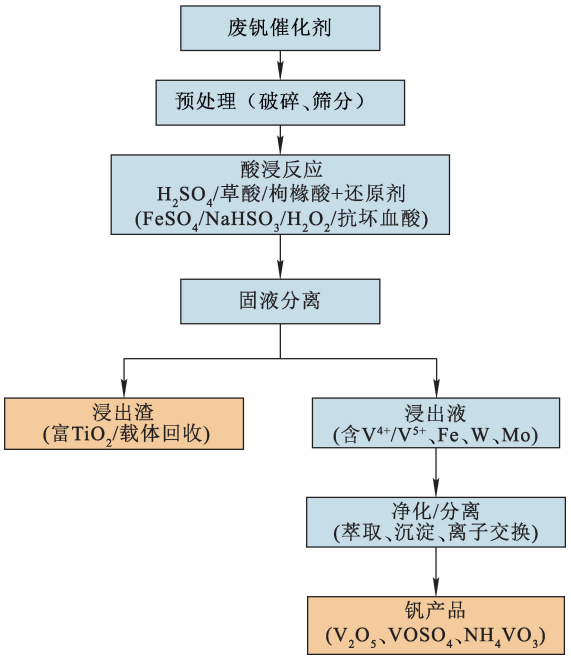


图 1　酸浸提钒工艺流程

Fig. 1　Process flowchart of acid extraction of vanadium

2.2　碱浸提钒工艺

碱浸提钒的原理是利用钒和钨的两性性质，在碱性条件下形成可溶性钒酸盐和钨酸盐，TiO_2 载体则保留在渣相中，实现选择性分离。该法可分为氢氧化钠浸出和铵盐浸出，根据反应条件不同，氢氧化钠浸出又可分为常压浸出和加压浸出。

2.2.1　NaOH 常压浸出

NaOH 常压浸出是从废钒催化剂中回收钒的常用方法之一，具有选择性好、杂质溶出率低等优点。

常皓宇[17]系统研究了采用 NaOH 常压浸出废 SCR 催化剂中 V、W，并结合 Medusa 软件模拟了碱性条件下 V/W 的离子形态。主要反应方程式为：

$$2NaOH+V_2O_5 \xlongequal{} 2NaVO_3+H_2O \quad (10)$$

$$2NaOH+WO_3 \xlongequal{} Na_2WO_4+H_2O \quad (11)$$

$$2NaOH+TiO_2 \xlongequal{} Na_2TiO_3+H_2O \quad (12)$$

研究结果表明：在 pH＞9 时，V(Ⅴ)以 VO_4^{3-} 和 VO_3OH^{2-} 存在，W 以 WO_4^{2-} 存在；在液固体积质量比 6 mL/1 g、NaOH 浓度 0.4 mol/L、温度60 ℃、浸出时间 3 h 条件下，V 浸出率达 90.6%，W 浸出率为 40.0%；动力学分析结果表明，V_2O_5 和 WO_3 浸出活化能分别为 20.87 和37.29 kJ/mol，过程受固膜扩散控制；在温和碱浸条件下，该法对 V 的浸出率超过 90%，而 W 仅部分浸出，实现了 V 与 W 的高效分离，而未被浸出的 W 可与 TiO_2 载体协同利用，制备

为 W/Ti 复合粉末。Wu W. C. 等[36]采用 NaOH 直接浸出—离子交换工艺回收废 SCR 催化剂中的钨和钒，在矿浆密度 3%、NaOH 用量0.3 kg/kg 催化剂、温度 70 ℃、反应时间 30 min 条件下，钒和钨浸出率分别为 87%和 91%。

NaOH 常压浸出提钒工艺是基于钒的两性性质，在碱性条件下将 V_2O_5 转化为可溶性钒酸盐。该法具有条件温和、选择性较好等优点，但存在钨共浸出以及高碱高温破坏 TiO_2 载体等问题，因此须控制碱度，以实现钒高效浸出与载体回收的兼顾。

2.2.2 NaOH 强化浸出

近年来，研究人员通过采用焙烧、机械球磨、微波辅助等强化手段，开发了多种 NaOH 强化浸出工艺，并在铝、钒、钛、钨等金属的回收方面取得了较好效果。Kim 等[37]开发了加压碱浸工艺并从废 SCR 催化剂中回收钒、钨，在 NaOH 浓度2 mol/L、Na_2CO_3 浓度 0.2 mol/L、温度 300 ℃条件下，钒、钨浸出率分别达 99.9%和 88.6%。Choi 等[38]研究了采用 NaOH 强化浸出工艺从废 SCR 催化剂中回收钒、钨，在 NaOH 浓度3 mol/L、温度 250 ℃、压力 3.8 MPa、液固体积质量比 2.5 mL/1 g 条件下，钒和钨浸出率达91.5%和 87%。该工艺通过加压增强了扩散控制，提高了浸出率，但需高温高压设备，能耗较高，碱液废水量较大。Su Q. F. 等[39]研究了采用 NaOH 常压浸出废 SCR 催化剂，在温度 100 ℃、NaOH/催化剂质量比 0.9、液固体积质量比 15/1、搅拌速度900 r/min、浸出时间240 min最优条件下，钒和钨浸出率分别达 68.3%和 50.1%，但钨/硅浓度比仅为 1.4，分离选择性差；而通过 NaOH 与催化剂预混合预处理，在常温(25 ℃)、常压条件下仅需 20 min，即可在保持相近浸出率(钒 67.7%、钨56.3%)的同时，将钨/硅浓度比提高至 7.0，实现钒钨高效浸出与低硅共浸出的协同控制。

曾玲等[40]研究了采用微波辅助 NaOH 浸出废 SCR 催化剂中的钒、钨。结果表明：在微波功率600 W、温度 60 ℃、NaOH 浓度 40%、液固体积质量比7.5 mL/1 g、浸出时间 1 h 条件下，钨和钒浸出率分别达 89.96%和 96.32%；该法的浸出时间比传统水浴加热时间(240 min)缩短 75%；碱浸渣经 4 mol/L HCl 浸出 1 h，可制得纯度 98.76%的 TiO_2 产品。

Zeng F. 等[41]对比研究了机械化学预处理与机械化学浸出两种方法对废 SCR 催化剂中钒和钨碱浸的强化效果。结果表明，机械化学活化可在温和条件下将钒提取率提升至 100%、钨提取率提升至 62%；而采用机械化学浸出(搅拌转速 1 000 r/min、磨球直径 1 mm、NaOH 浓度4 mol/L、时间 2 h)时，钒和钨提取率分别达 99%和 66%。可见，机械强化能显著降低反应温度与能耗，提高金属提取效率，尤其对钒效果突出，但钨提取率仍偏低(66%)。Hu W. B. 等[42]研究了采用机械球磨辅助碱浸工艺从废脱硝催化剂中回收钒。结果表明，在球磨时间 60 min、NaOH 与催化剂质量比 1∶3、NaOH 浓度 10%、浸出温度 90 ℃、浸出时间 2 h 条件下，钒浸出率达 97%，砷去除率大于 99%，同时约 76.6%的钨以 Na_2WO_4 形式稳定保留于 TiO_2 载体中，避免了载体结构的破坏。

NaOH 强化浸出法可通过加压微波和机械活化等方式实现从废 SCR 催化剂中提取钒。这些方法通过升高反应温度、改善加热效率或破坏晶体结构显著提升钒浸出率，是废 SCR 催化剂中钒的高效、绿色回收的有效途径。但目前该法在选择性方面仍面临钨、硅等杂质共浸出的问题；在能耗方面，部分工艺需要较高温度或较长时间，在环境友好性方面，高浓度碱液的使用也增加了废液处理负担。因此，进一步优化强化浸出条件、提高过程选择性并降低能耗与碱耗，将是该技术走向工业化应用的关键研究方向。

2.2.3 铵盐浸出

与 NaOH 浸出相比，铵盐浸出体系具有选择性高、腐蚀性低、废液易处理等优势，可在温和条件下实现钒和钨的高效同步提取，同时避免 TiO_2 载体结构的破坏，有利于浸出渣的再生利用，是一种更具环境友好特征的碱浸替代路线。Cao Y. J. 等[3]研究了采用 $(NH_4)_2CO_3$ 和 H_2O_2 体系同步回收废 SCR 催化剂中的钒和钨。其主要反应方程式如下：

溶解过程：

$$WO_3+(NH_4)_2CO_3 \longrightarrow (NH_4)_2WO_4+CO_2 \quad (13)$$

$$V_2O_5+(NH_4)_2CO_3 \longrightarrow 2NH_4VO_3+CO_2 \quad (14)$$

氧化过程：催化剂中难溶的 V^{4+}(如 $VOSO_4$)被 H_2O_2 氧化为 V^{5+}：

$$2VO^{2+}+H_2O_2+10OH^- \longrightarrow 2VO_4^{3-}+6H_2O \quad (15)$$

在 1.5 mol/L H_2O_2 + 2.0 mol/L $(NH_4)_2CO_3$ 体系下、当温度为 70 ℃、液固体积质量比为

25 mL/1 g、浸出时间为 30 min 时，钒和钨浸出率分别达 98%和 99%。该工艺可在温和条件下（常压、70 ℃）实现高选择性浸出，且浸出渣（TiO_2）的晶型结构未被破坏，可直接用作催化剂载体再生。

Zhao Z. P. 等[43]采用氨水从废柴油机尾气催化剂（V_2O_5-MoO_3/TiO_2）中提取钼和钒，在 $NH_3 \cdot H_2O$浓度 4.5 mol/L、温度 413 K、浸出时间 2 h、H_2O_2 浓度 1.0 mol/L、液固体积质量比 20 mL/1 g 优化条件下，钼和钒浸出率分别为 95.13%和 46.25%；动力学和热力学分析表明，MoO_3 比 V_2O_5 更易与氨反应。

铵盐浸出法能高效同步浸出钒、钨、钼等多种有价金属，具有良好的选择浸出性能。但为实现较高的浸出率，通常对液固体积质量比要求较大，直接导致浸出液用量过大，不仅增加了试剂消耗与废液处理负担，也提高了工艺整体运行成本。因此，浸出液的循环利用成为提升该工艺经济性与环境友好性的关键环节。

综上所述，碱浸提钒工艺选择性好，可抑制硅和铁的浸出，同时还可实现钒和钨的同步回收；其缺点是碱消耗量大、反应条件较苛刻、处理后废渣碱性较强，存在二次污染风险。碱浸提钒工艺流程如图 2 所示。

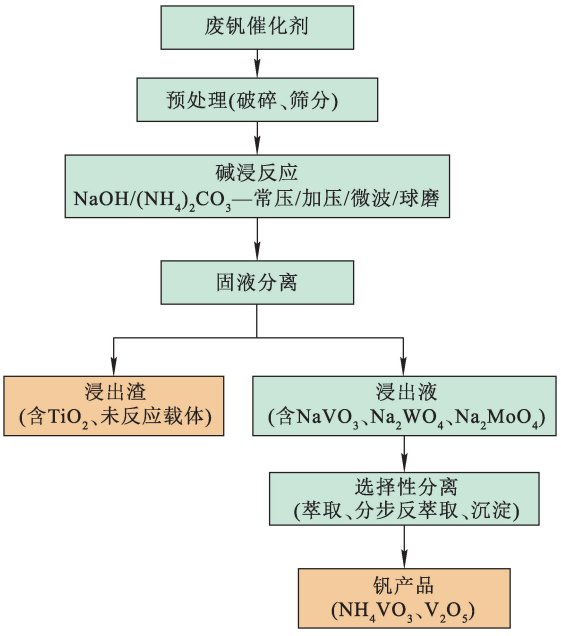


图 2　碱浸提钒工艺流程

Fig. 2　Process flowchart of vanadium extraction by alkaline leaching

2.3　焙烧—浸出提钒工艺

焙烧—浸出法通过高温固相反应将钒转化为可溶性盐，再经水浸或酸浸提取废钒催化剂中的钒。根据添加剂的不同，可分为氢氧化钠焙烧—浸出法和碳酸钠焙烧—浸出法。

2.3.1　氢氧化钠焙烧—浸出

氢氧化钠焙烧—浸出法是在高温状态下，使氢氧化钠与废催化剂进行固相熔融反应，然后采用浸出法实现钒与其他元素的分离。

李化全等[44]采用碱熔盐法回收废 SCR 催化剂中的钛、钒、钨，将催化剂与氢氧化钠按质量比 1∶1.5混合，在温度 500 ℃条件下熔融 60 min 后通过水浸，使钛转化为偏钛酸沉淀、钒和钨进入溶液，再将溶液煮沸使钒沉淀，实现钒与钨的有效分离，钛、钒、钨回收率分别达 94.94%、97.63%、95.15%。Wang B. 等[45]以 NaCl-NaOH 为复合钠添加剂，采用焙烧—水浸工艺从废 SCR 催化剂中高效提取钒和钨。研究结果表明：添加低熔点 NaOH 可促进传质，在焙烧温度 750 ℃、焙烧时间 2.5 h、钠盐/催化剂质量比 2.5、NaCl/NaOH 质量比 1.5 的最佳条件下，钒和钨浸出率分别达 93.25%和 99.17%；XRD 分析表明，$VOSO_4$ 分解生成的 VO_2 先氧化为 V_2O_5，再与钠盐反应生成 $NaVO_3$；随焙烧温度升高，TiO_2 转化为 $Na_2Ti_3O_7$，催化剂主体结构被破坏，同时偏钒酸钠和钨酸钠的特征峰增多，从而强化了钒和钨的浸出。该工艺在相对较低的焙烧温度下实现了较高的钒、钨浸出率，为废 SCR 催化剂中钒和钨的高效绿色回收提供了一种可行策略。此外，该研究采用正交试验与权重矩阵分析法优化多指标反应条件的方法，可为同类工艺的参数优化提供参考。

张凯龙等[46]系统对比了 Na_2CO_3 焙烧—水浸、NaOH 焙烧—水浸、NaOH 常压浸出和 NaOH 加压浸出四种工艺对废 V_2O_5-MoO_3-WO_3/TiO_2 催化剂中 V、Mo、W 的回收效果。结果表明，NaOH 焙烧—水浸效果最优，在 m(NaOH)/m(催化剂)=0.3、焙烧温度 750 ℃、焙烧时间30 min、浸出温度 25 ℃、液固体积质量比3 mL/1 g、浸出时间 6 min 条件下，V、Mo、W 浸出率分别高达 97.29%、99.33%和 87.57%，浸出渣主要物相为 $Na_2Ti_6O_{13}$。

氢氧化钠焙烧—浸出工艺具有钒浸出率高（93%～97%）、可同步回收钨、钼等有价金属等优点。但该法对设备腐蚀较严重，焙烧后易产生大

量高盐碱性废水，后续处理成本较高；此外，部分工艺中钨浸出率偏低，且钛载体转化为钛酸钠后回收利用仍需进一步处理。

2.3.2 碳酸钠焙烧—浸出

Moon 等[7]研究采用 Na_2CO_3 焙烧—水浸—酸浸工艺从废 SCR 催化剂中回收钛、钨和钒。首先将废催化剂与碳酸钠(Na_2CO_3)在 1 273 K 下进行碱熔，使钨、钒和钛转化为可溶性钠盐；随后采用水浸，在 303～373 K 温度、固液质量体积比 1∶50～1∶5 条件下，钨和钒浸出率均可达 99.2%以上；水浸渣再经盐酸浸出回收钛，研究发现盐酸浓度与温度对钛浸出效率具有显著相关性；在优化条件下(8 mol/L HCl，353 K，固液质量体积比 1∶10，3 h)，钛浸出率达 98.3%。该工艺实现了废 SCR 催化剂中 3 种主要有价金属的高效分步回收，其中钨和钒在水浸阶段即可几乎完全浸出，钛则需通过后续酸浸提取。

俞子铉等[47]采用碱式焙烧—水浸工艺处理废 SCR 脱硝催化剂，在焙烧温度 875 ℃、焙烧时间 1.5 h、Na_2CO_3 与废催化剂质量比 1∶1、水浸温度 80 ℃、水浸时间 2 h 条件下，V 和 W 浸出率分别达 91.33%和 96.34%；XRD 分析表明，焙烧过程中 V 转化为易溶性的 NaV_6O_{15}，W 转化为 Na_2WO_4。

朱靓等[48]研究了在微波辅助条件下，采用 Na_2CO_3 焙烧—水浸工艺从废脱硝催化剂中回收钒、钨，在微波焙烧温度 600 ℃、焙烧时间50 min、Na_2CO_3 与催化剂质量比 1∶1 条件下，钒和钨浸出率分别为 87.87%和 90.80%；与传统焙烧相比，微波焙烧使钒浸出率提高约 16%，且焙烧温度和能耗显著降低。

碳酸钠焙烧提钒工艺的优点在于浸出率极高，W 和 V 浸出率均可达 99%以上，且水浸过程迅速；微波辅助焙烧可显著降低焙烧温度和能耗，使钒浸出率得到明显提升。该工艺的缺点是需较高焙烧温度(传统工艺约 1 000 ℃)、碳酸钠用量大；同时 Al、Si 等杂质在碱性条件下共浸出严重，最高达98.6%和 93.1%，增加后续净化负担；焙烧过程还可能产生 CO_2 废气。

综上所述，焙烧提钒工艺浸出率高，可实现钒和钨的同步回收，但存在能耗高，高盐碱性废水处理量大等缺点。

2.4 提钒工艺对比

目前，酸浸和碱浸提钒工艺是废钒催化剂的主流回收工艺，而焙烧—浸出工艺虽具有金属回收率高等优点，但能耗较大，且碳排放较高，限制了其应用发展。不同提钒工艺在浸出效率、选择性、能耗及环境友好性等方面各有优劣，优缺点对比见表 2。

表 2 各提钒工艺的优缺点对比

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of various vanadium extraction processes

工艺分类	具体方法	优点	缺点
酸浸	无机酸浸	技术成熟，浸出率高(93%～99%)	设备腐蚀严重，废水处理成本高
	有机酸浸	选择性好(钒/钨分离)，绿色环保，微波辅助可缩短时间	草酸成本高、易分解，铁等杂质同步浸出，浸出率相对较低(约 91%)
	混合酸浸	兼具强酸性与还原络合能力，浸出率可达 98%以上，载体可回收	体系复杂，后续分离难度大，酸耗量高
碱浸	NaOH 常压浸出	条件温和(60～90 ℃)，选择性分离钒与钛，操作简单	钨浸出率低(仅 40%)，高碱度可能破坏 TiO_2 载体
	NaOH 强化浸出	钒浸出率高(>97%)，可同步回收钨、砷，处理时间短	加压/微波设备投资大，能耗高，强碱腐蚀严重，废水处理难
	铵盐浸出	温和常压(70 ℃)，选择性好(钒、钨、钼)，载体结构保留	液固体积质量比大，浸出液用量高，循环利用困难
焙烧—浸出	NaOH 焙烧—浸出	浸出率高(钒 93%～97%，钨 99%)，可回收钨、钼，传质好	碱耗量大，设备腐蚀严重，产生高盐碱性废水，钛转化为钛酸钠难回收
	Na_2CO_3 焙烧—浸出	浸出率极高(钒、钨均大于 99%)，水浸迅速，微波辅助节能	焙烧温度高(1 000 ℃)，Al、Si 共浸出严重(>93%)，产生 CO_2 废气

3　高附加值产品的制备研究

鉴于提钒工艺中存在的不足，研究者已不再满足于单一金属的回收，而是致力于将回收产物直接转化为功能材料。

3.1　钒电解液的制备

钒氧化还原液流电池（VRFB）是大规模储能的重要技术，而钒电解液成本占 VRFB 总成本的 30%～40%。从废催化剂中回收钒制备电解液是实现资源高值化利用的有效途径。

Hsiao Y. S. 等[49]以石油化工废催化剂为原料，经 Na_2CO_3 焙烧（700 ℃，m（废催化剂）：$m(Na_2CO_3)=1:1.2$）、水浸、NH_4Cl 沉淀制得 NH_4VO_3，再煅烧得高纯 V_2O_5，随后通过电解还原直接获得 V^{3+}/VO^{2+} 混合电解液：

$$V_2O_5+8H^++3e^-\longrightarrow V^{3+}+VO^{2+}+4H_2O \tag{16}$$

所制电解液在 40 mA/cm² 下能量效率达 83.75%，经 200 次循环后，放电比容量保持率为 80.7%，性能满足商业产品要求。

胡千[50]采用还原酸浸（$H_2SO_4+Na_2SO_3$）从硫酸工业废钒催化剂中提取钒（浸出率 96.54%），酸浸液经低温结晶除铝后，以 P_2O_4 为萃取剂进行三级逆流萃取（10% P_2O_4，皂化 40%，pH=1，$V_o/V_a=1/3$）和反萃取（5 mol/L H_2SO_4，$V_o/V_a=6/1$），获得钒质量浓度为 90.1 g/L 的高纯电解液，性能接近标准要求。

“焙烧—电解”与“酸浸—萃取”两条技术路线，为废催化剂资源化制备钒电解液提供了可行方案；但这两种方法均存在流程较长、能耗或物耗较高等问题，尚未实现废催化剂中硅、铝等多组分高效协同回收。

3.2　钒基电池材料的制备

除 VRFB 外，钒基材料在锂离子电池和锌离子电池中也有重要应用。Wen J. W. 等[24]以废 SCR 催化剂还原酸浸液为原料，经 P204 萃取—分步反萃取纯化得到高纯 $VOSO_4$（纯度＞99.9%），再经水热法制备 VO_2(B)纳米棒，用于水系锌离子电池正极，研究结果表明：在 0.1 A/g 电流密度下，首次放电比容量达 204.6 mAh/g；经 100 次循环后，放电比容量仍保持在 172.5 mAh/g，保持率为 84.31%。

Wu J. Y. 等[51]将废 SCR 催化剂中回收的钒用于制备层状 $K_{0.51}V_2O_5$，作为水系钾离子电池正极材料。研究结果表明，在 3 mol/L KOTf（三氟甲磺酸钾）电解液中，该材料在 0.1 A/g 下放电比容量达109.7 mAh/g。通过分子动力学模拟和光谱分析揭示，高浓度 KOTf 中 K^+ 与 OTf^- 的强相互作用形成了阴离子衍生的固态电解质界面，抑制了水分解，提升了电池性能。主要化学反应如下：

$$V_2O_5+K^+\xrightarrow{\text{水热}}K_{0.51}V_2O_5 \tag{17}$$

$$VOSO_4\xrightarrow{NH_3\cdot H_2O,\ pH=7}VO(OH)_2\xrightarrow{180\ ℃,\ 12\ h}VO_2(B) \tag{18}$$

综上可知，相关研究提供了从废钒催化剂到高性能电池材料的技术路线，体现了“以废制材”的循环经济理念。但目前，相关研究仍停留在实验室阶段，未来应强化材料设计与杂质容限研究，推动其向实际应用转化。

3.3　光催化材料的制备

TiO_2 是废 SCR 催化剂的主要组分，回收后可制备光催化材料。Lee 等[52]以石油化工废催化剂为钒源，经 Na_4CO_3 焙烧（700 ℃）、水浸、NH_4OH 沉淀得到 NH_4VO_3，再通过微波辅助水热法合成了 $BiVO_4$（BVO）、$InVO_4$（IVO）和 Ag_3VO_4（AVO），并构建了双 Z 型 AVO-BVO/IVO-0.75 三元异质结光催化剂。该催化剂在可见光下对亚甲基蓝（MB）的降解速率常数达 0.051 min^{-1}，是二元 BVO/IVO 的 1.42 倍、纯 AVO 的 5.1 倍；同时能高效降解四环素、还原 Cr(Ⅵ)及灭活大肠杆菌（3 h 内失活率 83.3%）。其机制是双 Z 型电荷转移路径有效抑制了光生电子-空穴复合，并产生了 ·OH、$\cdot O_2^-$ 和 h^+ 等活性物种。

Zhou X. 等[53]利用废 SCR 催化剂中的钛，通过 NaOH 熔盐（500 ℃）提取钛酸钠，再经 H_2SO_4 溶解得到 $TiOSO_4$ 溶液，然后将其沉淀负载到 MnFe 混合金属氧化物上，制得 MnFeTi-22 低温 NH_3-SCR 脱硝催化剂。该催化剂在 100～300 ℃ 内 NO 转化率＞96%，且抗 H_2O 和 SO_2 性能优异（200 ℃下 5% H_2O 中 NO 转化率保持 95%）。TiO_2 的引入增加了 Lewis 酸位点、表面吸附氧和 Mn^{4+} 比例，促进了电子转移。

$$Mn^{4+}+Fe^{2+}\rightleftharpoons Mn^{3+}+Fe^{3+} \tag{19}$$

Na_2CO_3 焙烧—水热法[52]实现了钒的高值化利用，构建的异质结构光催化效率高、广谱降解能

力强;但合成步骤复杂(多步沉淀、微波水热),成本较高。NaOH 熔盐法[54]将废催化剂中的钛直接转化为高性能脱硝催化剂,工艺相对简单,并解决了危废处置问题;但产物仅适用于烟气脱硝,普适性较窄。两者均体现了“以废制材”的循环经济理念。

综上所述,废钒催化剂制备高值化产品为其资源化利用提供了新的路径,有利于废钒催化剂二次成材,工艺流程如图 3 所示。

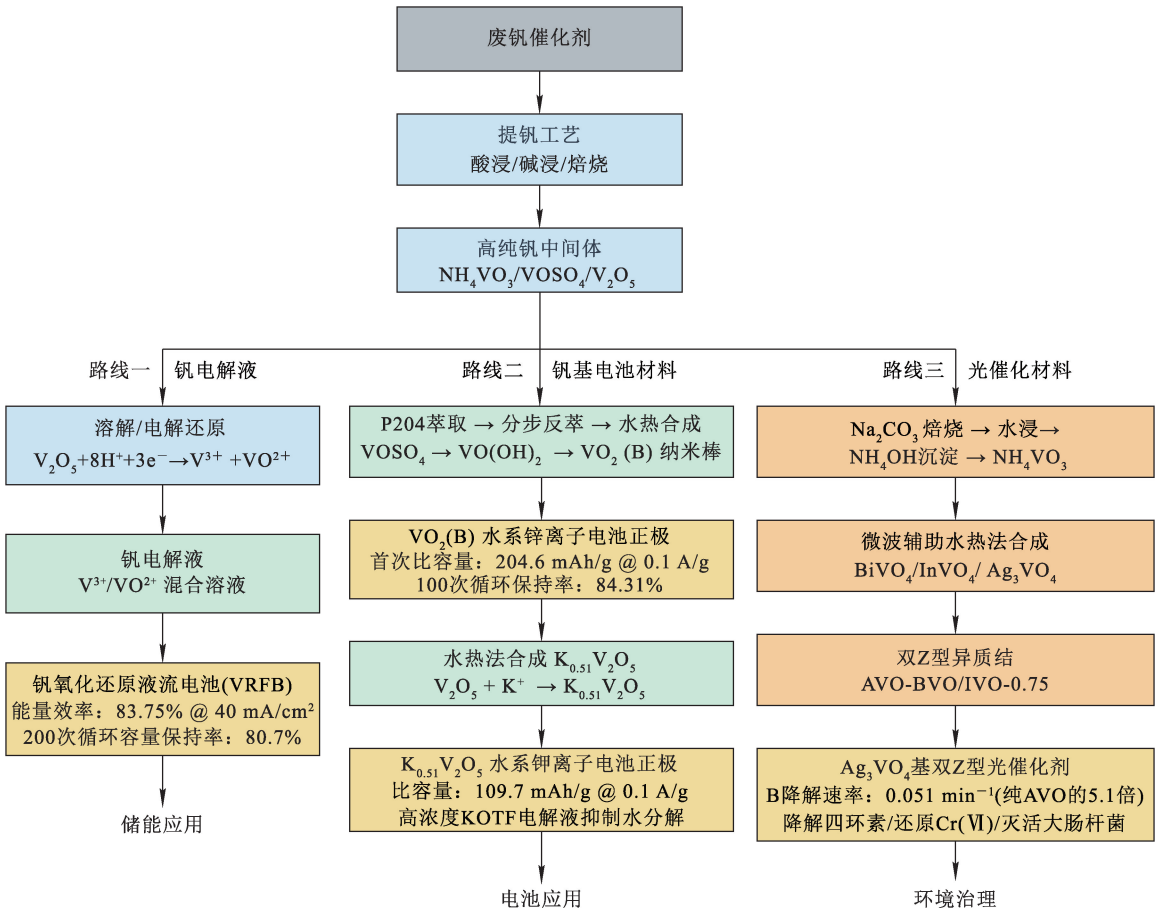


图 3 高附加值产品的制备流程

Fig. 3 Preparation flowchart of high value-added product

4 结论与展望

废钒催化剂是石油化工、冶金等生产过程中的副产物,含有钒、钨、钼、镍等有价金属,其含量通常高于天然矿石的品位,属于重要的二次资源。近年来,对于该废催化剂的资源化回收利用的研究主要集中在有价资源回收和高附加值产品制备两方面。目前,关于有价资源回收的主要方法是酸浸、碱浸和焙烧—浸出。酸浸工艺技术相对成熟、浸出效率高,但存在设备腐蚀和二次污染的隐患;碱浸工艺选择性好、条件温和,但后续分离纯化、钨共浸出及载体破坏问题有待解决;焙烧—浸出工艺浸出率较高,但存在碱消耗大、能耗高、杂质共溶出严重等问题。这几种回收工艺各有利弊,目前还无法兼顾高效、低耗、高选择性与环境友好性。在高附加值产品制备方面,主要是从回收钒制备钒电解液、钒基电池材料和光催化材料等高附加值产品。钒电解液、钒基新材料在电池中应用表现出良好的电化学性能;制备的双 Z 型异质结光催化剂在废水处理中亦显示出高效催化活性。这些研究虽体现了“以废制材”的循环经济理念,但大多仍处于实验室阶段,距离工业化应用尚有距离。

建议今后废钒催化剂资源化利用的研究重点围绕以下几个方面开展:

1)开发高选择性、短流程、低能耗清洁提钒工

艺，最大限度降低酸/碱耗、减少废水排放，并实现资源循环利用；

2）强化钒与钨、钼、钛等多组分的协同回收，突破单一提钒模式，实现全组分资源化；

3）拓展高值化产品制备的研究，结合材料设计与杂质容限分析，推动从“回收金属”向“直接制材”转变，实现废催化剂的“二次上岗”。

参考文献：

[1] Dong Cheng, Yao Junxuan, Shi Jianqiang, et al. Resource utilization strategy based on the deactivation mechanism of V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalyst[J]. Fuel, 2025, 381: 133311.

[2] 吴荫南. 燃煤烟气 NH_3-SCR 催化剂研究进展[J]. 现代化工, 2025, 45(增刊 1): 29-35.
Wu Yinnan. Research progress in NH_3-SCR catalysts for coal-fired flue gas[J]. Modern Chemical Industry, 2025, 45(S1): 29-35.

[3] Cao Yijun, Yuan Junfan, Du Hao, et al. A clean and efficient approach for recovery of vanadium and tungsten from spent SCR catalyst[J]. Minerals Engineering, 2021, 165: 106857.

[4] Zhang Qijun, Wu Yufeng, Yuan Haoren. Recycling strategies of spent V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalyst: a review[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161: 104983.

[5] 赵备备，李兰杰，祁健，等. 废钒系催化剂回收利用技术路径分析及选择[J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(2): 85-93.
Zhao Beibei, Li Lanjie, Qi Jian, et al. Analysis and selection of technical paths for recycling and utilization of waste vanadium catalysts[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2024, 45(2): 85-93.

[6] Tarasov V P, Gorelikov E S, Komelin I M, et al. Efficient leaching extraction of vanadium oxide from spent petrochemical catalysts[J]. Russian Metallurgy, 2022, 10: 2-8.

[7] Moon G, Kim J H, Lee J Y, et al. Leaching of spent selective catalytic reduction catalyst using alkaline melting for recovery of titanium, tungsten, and vanadium[J]. Hydrometallurgy, 2019, 189: 105132.

[8] Chen Rongrong, Feng Chenlü, Tan Jun, et al. Stepwise separation and recovery of molybdenum, vanadium, and nickel from spent hydrogenation catalyst[J]. Hydrometallurgy, 2022, 213: 105910.

[9] Yang Yong, Liu Chaowei, Ma Xueli, et al. Multiple performances of metal contamination for nickel, vanadium and iron on FCC catalysts[J]. Catalysis Letters, 2023, 154: 1-11.

[10] Fu Haihui, Chen Yan, Liu Tingting, et al. Research on hazardous waste removal management: Identification of the hazardous characteristics of fluid catalytic cracking spent catalysts[J]. Molecules, 2021, 26: 2289.

[11] 于群. 废钒催化剂提取钒工艺优化研究[J]. 有色矿冶, 2021, 37(1): 27-29.
Yu Qun. Optimization of vanadium extraction from waste vanadium catalyst[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2021, 37(1): 27-29.

[12] Lee D, Joo S H, Shin D J, et al. Recovery of vanadium and cesium from spent sulfuric acid catalysts by a hydrometallurgical process[J]. Green Chemistry, 2021, 23: 790-799.

[13] Romanovskaia E, Romabivski V, Kwapinski W, et al. Selective recovery of vanadium pentoxide from spent catalysts of sulfuric acid production: sustainable approach[J]. Hydrometallurgy, 2021, 200: 105568.

[14] 郝喜才，石海洋. 废钒催化剂综合利用的实验研究[J]. 无机盐工业, 2014, 46(5): 58-61.
Hao Xicai, Shai Haiyang. Study on comprehensive utilization of waste vanadium catalyst[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2014, 46(5): 58-61.

[15] Yang Bi, Zhou Jiabei, Wang Weiwen, et al. Extraction and separation of tungsten and vanadium from spent V_2O_5-WO_3/TiO_2 SCR catalysts and recovery of TiO_2 and sodium titanate nanorods as adsorbent for heavy metal ions[J]. Colloids and Surfaces: A, 2020, 598: 124963.

[16] Zhang Qijun, Wu Yufeng, Zuo Tieyong. Titanium extraction from spent selective catalytic reduction catalysts in a naoh molten-salt system: thermodynamic, experimental, and kinetic studies[J]. Metallurgical and Materials Transactions: B, 2019, 50: 471-479.

[17] 常皓宇. 废弃 SCR 催化剂碱性浸出条件下 V/W/Ti 溶出行为研究[D]. 太原：山西大学, 2024.

[18] Adavodi R, Rahmati S, Mancini A, et al. Mechanochemical versus stirred alkaline leaching for sustainable recovery of vanadium and molybdenum from spent Hydrodesulfurization catalysts[J]. Separation and Purification Technology, 2026, 363: 132020.

[19] Rui Guofen, Guo Hujuan, Chen Dong, et al. Stepwise recycling of Mo and V from spent HDS catalysts by water-vapor enhanced sublimation and H_2O_2 leaching process[J]. Separation and Purification Technology, 2025, 379: 134861.

[20] 李聪聪，王晨晔，李会泉，等. 电化学法浸出废 HDS 催化剂中关键金属研究[J]. 有色金属（冶炼部分）, 2025(4): 106-115.
Li Congcong, Wang Chenye, Li Huiquan, et al. Study on Electrochemical Leaching of Key Metals in Spent HDS Catalysts[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(4): 106-115.

[21] Zhao Jianying, Mu Panpan, Liu Hao, et al. Extraction and response surface methodology optimization of tungsten and molybdenum from spent fluidized catalytic cracking catalysts[J]. Tungsten, 2025, 7: 273-287.

[22] 张若冰，张一敏，刘涛，等. 废 FCC 催化剂提钒及制备无危害地聚合物工艺研究[J]. 中国有色冶金, 2023, 52(5): 60-67.
Zhang Ruobing, Zhang Yimin, Liu Tao, et al. Research on

vanadium recovery and non-hazardous geopolymerproduction from spent FCC catalysts[J]. China Nonferrous Metallurgy,2023,52(5):60-67.

[23] 韩雪,秦伟,王钧伟,等.废 FCC 催化剂中稀土元素的浸出及动力学分析[J].井冈山大学学报(自然科学版),2023,44(1):32-39.
Han Xue, Qin Wei, Wang Junwei, et al. Leaching and kinetic study of rare earth elements from waste FCC catalysts[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science),2023,44(1):32-39.

[24] Wen Jiawei, Hou Xuejun, Yao Mingdi, et al. Tuning of vanadium valence for value-added recycling and utilization of vanadium from spent selective catalytic reduction catalysts[J]. Journal of Cleaner Production,2023,419:138151.

[25] 戴超,吴六顺,闫柏军,等.用 $FeSO_4$-H_2SO_4 溶液从废钒催化剂中浸出钒钾试验研究[J].湿法冶金,2019,38(4):291-295.
Dai Chao, Wu Liushun, Yan Baijun, et al. Leaching of vanadium and potassium from waste vanadium catalyst using $FeSO_4$-H_2SO_4 solution [J]. Hydrometallurgy of China,2019,38(4):291-295.

[26] Hua Quanxian, Ma Junyang, Xu Pin, et al. Hydrothermal acid leaching process with ultra-high efficiency for vanadium from spent catalyst[J]. Minerals Engineering, 2025, 224:109777.

[27] Wang Zhixiang, Peng Zhonghui, Li Yang, et al. Selective sulfuric acid cyclic leaching of vanadium from the calcification roasting pellets of vanadium titanomagnetite[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23:778-790.

[28] Wu Wenfeng, Wang Chenye, Bao Weijun, et al. Selective reduction leaching of vanadium and iron by oxalic acid from spent V_2O_5-WO_3/TiO_2 catalyst[J]. Hydrometallurgy,2018,179:52-59.

[29] Mazurek K. Recovery of vanadium, potassium and iron from a spent vanadium catalyst by oxalic acid solution leaching, precipitation and ion exchange processes[J]. Hydrometallurgy,2013,134/135:26-31.

[30] Zheng Dalong, Zhang Yimin, Liu Tao, et al. Research on leaching of V and Ni in spent FCC catalyst using oxalic acid/H_2O_2 under microwave-assisted conditions[J]. Minerals,2022,12:834.

[31] Erust C, Akcil A, Bedelova Z, et al. Recovery of vanadium from spent catalysts of sulfuric acid plant by using inorganic and organic acids: laboratory and semi-pilot tests[J]. Waste Management,2016,49:455-461.

[32] Zhao Chen, Wang Chenye, Wang Xingrui, et al. Recovery of tungsten and titanium from spent SCR catalyst by sulfuric acid leaching process[J]. Waste Management, 2023, 155:338-347.

[33] 王博.废弃 SCR 脱硝催化剂中有价金属资源化回收工艺研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2024.

[34] 田向阳,李扬,于毅,等.混合酸浸法回收废脱硝催化剂的研究[J].河南化工,2024,41(2):1-4.
Tian Xiangyang, Li Yang, Yu Yi, et al. Study on recovery of waste denitrification catalyst by mixed acid leaching method[J]. Henan Chemical Industry,2024,41(2):1-4.

[35] 李扬,李杰,程文婷.混酸协同浸出火电行业废脱硝催化剂中钒的实验研究[J].电力科技与环保,2024,40(3):304-312.
Li Yang, Li Jie, Cheng Wenting. Experimental study on mixed acid synergistic leaching of vanadium from spentdeNOx catalysts[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection,2024,40(3):304-312.

[36] Wu Wencheng, Tsai Tangyi, Shen Yunhwei. Tungsten recovery from spent SCR catalyst using alkaline leaching and ion exchange[J]. Minerals,2016,6:1-10.

[37] Kim J W, Lee W G, Hwang I S, et al. Recovery of tungsten from spent selective catalytic reduction catalysts by pressure leaching[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry,2015,28:73-77.

[38] Choi I H, Moon G, Lee J Y, et al. Extraction of tungsten and vanadium from spent selective catalytic reduction catalyst for stationary application by pressure leaching process [J]. Journal of Cleaner Production,2018,197:163-169.

[39] Su Qingfa, Miao Jifa, Li Huirong, et al. Optimizing vanadium and tungsten leaching with lowered silicon from spent SCR catalyst by pre-mixing treatment[J]. Hydrometallurgy,2018,181:230-239.

[40] 曾玲,于明明,杨德龙,等.微波辅助氢氧化钠浸出废 SCR 催化剂中的钨和钒[J].湿法冶金,2024,43(2):134-139.
Zeng Lin, Yu Mingming, Yang Delong, et al. Microwave-assisted leaching of tungsten and vanadium from spent SCR catalyst using sodium hydroxide[J]. Hydrometallurgy of China,2024,43(2):134-139.

[41] Zeng Fei, Caneghem J V, Granata G. Alkaline leaching of spent SCR catalysts: mechanochemical activation vs mechanochemical leaching[J]. Separation and Purification Technology,2026,390:136806.

[42] Hu Wenbin, Li Congcong, Wang Chenye, et al. Alkali-activated mechanochemical decontamination of spent SCR catalysts: phase reconstruction for selective arsenic removal and vanadium recovery[J]. Resources, Conservation and Recycling,2025,198:108829.

[43] Zhao Zhipeng, Guo Min, Zhang Mei. Extraction of molybdenum and vanadium from the spent diesel exhaust catalyst by ammonia leaching method[J]. Journal of Hazardous Materials,2015,286:402-409.

[44] 李化全,郭传华.废弃脱硝催化剂中有价元素钛钒钨的综合利用研究[J].无机盐工业,2014,46(5):52-54.
Li Huaquan, Guo Chuanhua. Comprehensive recovery of valuable elements vanadium, titanium, andtungsten from abandoned denitration catalyst [J]. Inorganic Chemicals

Industry，2014，46(5)：52-54.

[45] Wang Bo，Yang Qiaowen. Optimization of roasting parameters for recovery of vanadium and tungsten from spent SCR catalyst with composite roasting[J]. Processes，2021，9：1923.

[46] 张凯龙，陈良，王正豪，等. 废 SCR 脱硝催化剂中 V、Mo、W 与 Ti 的选择性分离研究[J]. 钢铁钒钛，2025，46(4)：18-26.
Zhang Kailong，Chen Liang，Wang Zhanghao，et al. Study on selective separation of V，Mo，W from Ti in spent SCR denitrification catalyst[J]. Iron Steel Vanadium Titanium，2025，46(4)：18-26.

[47] 俞子铉，李奇勇，李强，等. 废 SCR 脱硝催化剂碱式焙烧—水浸提取钒和钨[J]. 有色金属(冶炼部分)，2025(2)：140-146.
Yu Zixuan，Li Qiyong，Li Qiang，et al. Extraction of vanadium and tungsten from waste SCR denitrification catalyst by alkaline roasting and water leaching process[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2025(2)：140-146.

[48] 朱靓，李强，林瑞豪，等. 废 SCR 脱硝催化剂微波焙烧-水浸试验研究[J]. 有色金属(中英文)，2025，15(6)：972-978.
Zhu Liang，Li Qiang，Liu Ruihao，et al. Experimental study on microwave roasting and water leaching of spent SCR catalysts[J]. Nonferrous Metals (Chinese & English)，2025，15(6)：972-978.

[49] Hsiao Yusheng，Huang Jenhsien，Lin Hongyu，et al. Recovery of V_2O_5 from spent catalysts and its application in vanadium electrolytes for vanadium redox flow batteries [J]. Journal of Energy Storage，2025，116：115990.

[50] 胡千. 从废钒催化剂中回收钒和硅的研究[D]. 武汉：武汉工程大学，2025.

[51] Wu Junyi，Ouyang Xinyue，Wang Wweiwei，et al. The utilization of vanadium from spent catalysts for preparation of layered $K_{0.51}V_2O_5$ as aqueous-based potassium ion cathodes[J]. Materials Science & Engineering：B，2025，314：118392.

[52] Lee K C，Hsu S C，Huang J H，et al. Construction of dual Z-scheme Ag_3VO_4-$BiVO_4$/$InVO_4$ photocatalysts using vanadium source from spent catalysts for contaminated water treatment and bacterial inactivation [J]. Chemosphere，2024，363：142746.

[53] Zhou Xia，Pfeiffer H，Zhou Jiahui，et al. A green approach for preparation of MnFeTi low-temperature NH_3-SCR catalysts：utilizing spent V_2O_5-WO_3/TiO_2 Catalysts [J]. Resources，Conservation and Recycling，2024，202：107479.

Research Progress on Hydrometallurgical Recovery Processes of Spent Vanadium Catalysts

SHI Zhaozhong[1,2,3]，CUI Weina[2,3,4]

(1. *School of Material and Chemical Engineering，Kaifeng University，Kaifeng* 475004，*China*；
2. *Henan Engineering Research Center of Advanced Materials and Green Process，Kaifeng* 475004，*China*；
3. *Key Laboratory of Chemical Industry Clean Production Technology，Kaifeng* 475004，*China*；
4. *Functional Materials Research Center，Kaifeng University，Kaifeng* 475004，*China*)

Abstract：Spent vanadium catalysts，mainly generated from the petrochemical industry，are classified as hazardous waste. However，they also serve as important secondary resources due to their higher contents of valuable metals such as vanadium，tungsten，molybdenum，and nickel compared to natural ores. This paper reviews the recent research progress in hydrometallurgical recovery processes of spent vanadium catalysts. It focuses on analyzing the principles，experimental conditions，advantages，and disadvantages of acid leaching，alkali leaching，and roasting－leaching processes for vanadium extraction. Furthermore，the technical routes for preparing high value-added products from recovered vanadium are summarized，including vanadium electrolyte for vanadium redox flow batteries，VO_2(B) and $K_{0.51}V_2O_5$ as cathode materials for aqueous zinc/potassium-ion batteries，and Ag_3VO_4-based photocatalysts. Finally，future research directions for the resource utilization and recycling of spent vanadium catalysts are proposed.

Key words：spent vanadium catalysts；vanadium；recovery；resource utilization；high-value utilization；research progress