

引文格式:路文,施善林,舒方霞,等. 废三元催化剂铁捕集物电解分离及阴极铁制备工艺研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(3): 19-27.

LU Wen, SHI Shanlin, SHU Fangxia, et al. Research on the electrolytic separation process of iron catchers of waste three-way catalysts and preparation of cathode iron[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(3): 19-27.

废三元催化剂铁捕集物电解分离及阴极铁制备工艺研究

路 文, 施善林, 舒方霞, 赵宣泊, 梁家奇

(沈阳有色金属研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110141)

[摘 要] 目前,采用铁捕集工艺富集废三元催化剂中贵金属已得到行业共识,但铁捕集物 Fe-PGMs 合金中含有耐腐蚀性极强的硅铁合金,采用酸浸的方法处理会消耗大量酸,且产生大量废液,难以处理达到环保要求。针对此问题,本文采用球磨磁选-电解工艺处理三元废催化剂铁捕集物,研究以球磨磁选后的 Fe-PGMs 合金为研究对象,进行了电解工艺单因素试验,考察了关键工艺参数对阳极溶解速率与阴极电流效率的影响,并在最优条件下进行了验证试验,得到以下主要结论。电解工艺参数调控机制:温度与电流密度主要影响反应速率及阳极铁溶解与阴极 Fe^{2+} 还原的动力学过程;pH 与 Fe^{2+} 浓度核心保障 Fe^{2+} 存在形态稳定及电极反应环境适宜,为电解分离反应的高效进行提供基础。试验最优工艺参数为温度 50°C 、电解液 pH=5.0、 Fe^{2+} 浓度 120 g/L、电流密度 350 A/m^2 ,同时搭配 15 g/L 柠檬酸钠、2 g/L 抗坏血酸、10 g/L 硫酸铵的复合电解液;该条件下,电解分离性能表现优异,阳极泥中铂、钯、铑含量分别为 2.23%、18.32%、2.03%,富集倍数达 20 倍,回收率均超 99%,实现了贵金属高效富集回收。该体系条件下,可协同抑制 Fe^{2+} 水解氧化及阴极析氢副反应,实现了阳极铁均匀、稳定溶解,无明显钝化现象,所制备阴极铁产物纯度较高,满足钢厂生产合金钢需求。本研究结果为汽车尾气催化剂、废旧电子元器件等含铂钯铑废料的资源高效回收开辟了新路径,并提供了理论与技术支撑,具有重要现实意义与工程应用价值。

[关键词] 废三元催化剂;铂钯铑回收;铁回收;铂钯铑-铁合金;电解分离;贵金属阳极泥;阴极铁

[中图分类号] TF83; TF804.4 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6103(2026)03-0019-09

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.03.003

0 引言

铂族金属(Platinum group metals, PGMs)作为现代工业的战略性关键资源,其应用领域覆盖石化、汽车、国防军工等多个核心产业。在石化行业,PGMs 是催化裂化、加氢精制工艺的核心活性组分,直接决定油品加工质量与炼化工艺效率;在汽车产业,铂、钯、铑组成的三元催化体系是三元转化器的

核心,可实现尾气污染物的高效转化,满足严格的排放标准要求;在国防军工领域,PGMs 所具备的耐高温、抗腐蚀等优异理化特性,使其成为航空发动机、精密仪器等关键装备中不可替代的材料。我国 PGMs 供需矛盾异常突出。作为全球最大的 PGMs 消费国,年消费量占全球 30% 以上,并且随着新能源汽车、高端制造等产业的快速发展,消费量呈持续增长趋势。但我国 PGMs 矿产资源极度匮乏,储量不足全球 0.4%,且多为低品位伴生矿,开采成本高,导致对外依存度长期超过 90%。这种“高需求、低储备、强依赖”的资源格局,已成为制约我国相关产业高质量发展的瓶颈^[1-4]。在此背景下,废催化剂作为 PGMs 二次资源的核心来源,其回收价值日益凸显。数据显示,催化剂领域消耗的 PGMs 占总消

[收稿日期] 2025-11-08 [修订日期] 2025-12-26

[录用日期] 2025-12-29 [出版日期] 2026-06-01

[第一作者] 路文,辽宁新民人,硕士研究生,初级工程师,主要从事有色金属冶金工艺研究。

[通信作者] 施善林,安徽池州人,硕士研究生,高级工程师,主要从事有色金属冶金工艺研究。

[基金项目] 中国有色集团科技计划项目(2024KJQN07)。

费量的60%以上,2023年报废PGM催化剂达4万t,预计2025年将增至5万t^[5,6]。从废催化剂中实现PGMs的绿色再生回收,不仅能缓解资源短缺、降低对外依存度,保障国家资源安全,还能减少废弃催化剂的环境污染问题,具有显著的经济、生态与社会效益。

铂钯铑-铁捕集物作为废催化剂回收工艺中的关键中间产物,其处理工艺直接决定贵金属的回收率与资源综合利用率。传统工艺多采用硫酸等强酸溶解铁基体,再通过化学沉淀和溶剂萃取实现铂钯铑的分离纯化,但该工艺存在明显的技术与环境短板:一方面,强酸试剂消耗量巨大,导致生产综合成本偏高;另一方面,工艺产生的高浓度含酸废液既含有多种重金属污染物,又赋存大量难处理的酸根离子,废液处理难度大且易引发二次污染,与可持续发展的环保理念存在根本性冲突^[7-10]。因此,开发兼具经济性与环境友好性的电解回收工艺,实现铂钯铑的高效富集与铁基材料的资源化利用,已成为该领域最具前景的研究方向。

本文通过系统研究铂钯铑-铁合金电解热力学特性、优化分离工艺参数体系以及开发阴极铁制备技术,构建了电解富集PGMs的完整技术体系。本技术可突破传统酸溶法回收率低、环境污染严重等技术瓶颈,为PGMs绿色回收提供新的解决方案。

1 试验介绍

1.1 仪器与试剂

YHBJ-262型pH测定仪(上海仪电科仪公司);D8 Advance型X射线衍射仪、ICAP6300型电感耦合

等离子体原子发射光谱仪(德国布鲁克公司)。自制有机玻璃材质电解槽,有效容积为500 mL,配备可拆卸的密封盖,防止电解液挥发。电解槽内设置阳极支架和阴极固定夹,确保电极位置固定且平行,极间距可调节范围为10~50 mm,试验默认极间距为20 mm。为保证电解液温度均匀,槽体外部设置恒温水浴循环夹层,采用超级恒温水浴锅(精度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$)控制温度。

试验所用试剂均为国产分析纯,包括七水硫酸亚铁、硫酸、柠檬酸钠、抗坏血酸、硫酸铵等。柠檬酸钠为 Fe^{2+} 络合剂,避免 Fe^{2+} 水解生成氢氧化物沉淀,同时稳定电解液体系,还能辅助提升电解液导电性能、调节电解液黏度;抗坏血酸作为还原剂,可以防止 Fe^{2+} 被空气氧化 Fe^{3+} ,保障 Fe^{2+} 有效参与阴极还原反应。硫酸铵用于提升电解液导电能力,降低槽压与生产能耗,同时维持电解液离子强度稳定,辅助抑制 Fe^{2+} 的水解反应。

1.2 电极材料

以废三元催化剂的铁捕集物为原料,先对其进行球磨处理,通过机械研磨使铂钯铑-铁捕集物与其他杂质充分分离;采用磁场强度为0.1~0.3 T的电磁磁选机对球磨产物进行磁选,针对性收集铂钯铑-铁捕集物,经两次磁选提纯后,最终获得磁精矿样品;将磁精矿样品进行熔化铸造处理,制备成铂钯铑-铁合金电极板。

采用感耦合等离子体原子发射光谱(ICP)对铂钯铑-铁合金原料的主要元素进行定量分析,结果见表1,原料中铂、钯、铑和铁的含量分别为0.118%、0.845%、0.114%和45.700%。

表1 铂钯铑-铁合金的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of platinum-palladium-rhodium-iron alloys (mass fraction) %

元素	Fe	Al	Ca	Si	Mg	Mn	Pd	Cu	Pt	Rh
含量	45.700	10.130	8.250	7.890	4.390	0.882	0.845	0.835	0.118	0.114

铂钯铑-铁合金原料的X射线衍射仪(XRD)分析结果如图1所示,主要存在 Fe_3O_4 、 Fe_5Si_3 、 Al_2O_3 物相。

铂钯铑-铁合金原料的SEM-EDS表征结果见图2,此原料表面粗糙,质地致密,为氧化物和合金的复合体系,这与XRD分析结果相互验证。能谱分析表明,硅与钙元素主要呈共生分布,硅与铁形成的合金相占比偏低,铂、钯、铑紧密伴生共生、极少

单独赋存,整体富集在铁合金基体中。

将铂钯铑-铁合金熔炼造模,制成尺寸为50 mm×20 mm×3 mm的阳极材料薄片,对其表面进行打磨及抛光处理,采用乙醇超声清洗15 min,去除表面油污和杂质,烘干备用。

采用工业纯钛板(纯度 $\geq 99.5\%$,尺寸为60 mm×30 mm×2 mm)作为阴极板,对其表面进行打磨及抛光处理,采用50%(V/V)HCl溶液浸泡10 min,去除

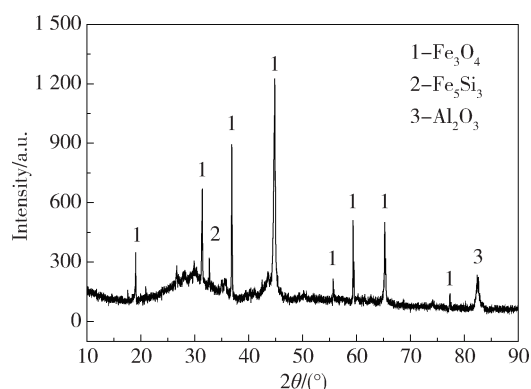


图1 铂钯铑-铁合金原料的XRD图

Fig. 1 XRD pattern of platinum-palladium-rhodium-iron alloy raw materials

氧化膜,再用去离子水冲洗,烘干备用。

1.3 试验原理

利用Factsage热力学分析软件,353.15 K时Fe (Pt, Pd, Rh)-H₂O系E-pH优势区如图3所示,在pH

值-2~4范围内,电位介于-0.2~0.80 V(图3阴影区域),Fe处在Fe²⁺的稳定区域,Pt、Pd和Rh以金属单质的形式存在。在此条件下进行电解,铂钯铑-铁合金中的Fe将不断溶解进入电解液中,而Pt、Pd和Rh以固相富集在阳极泥中。

铂钯铑-铁合金电解工艺通过电化学过程实现铁与铂、钯、铑的高效分离。该工艺以铂钯铑-铁合金为阳极,工业纯钛板为阴极,硫酸亚铁溶液为电解液。在直流电场作用下,阳极中的铁发生氧化溶解生成Fe²⁺进入到电解液中,并在阴极还原成单质铁沉积;铂、钯、铑因具有更高的氧化电位,在电解过程中保持金属态而形成阳极泥,从而实现与铁的高效电化学分离。

1.4 试验方法

将预处理后的铂钯铑-铁合金阳极和选定的阴极材料固定在电解槽内,加入硫酸亚铁电解液。连接直流电源并开启恒温水浴,待电解液温度稳定至

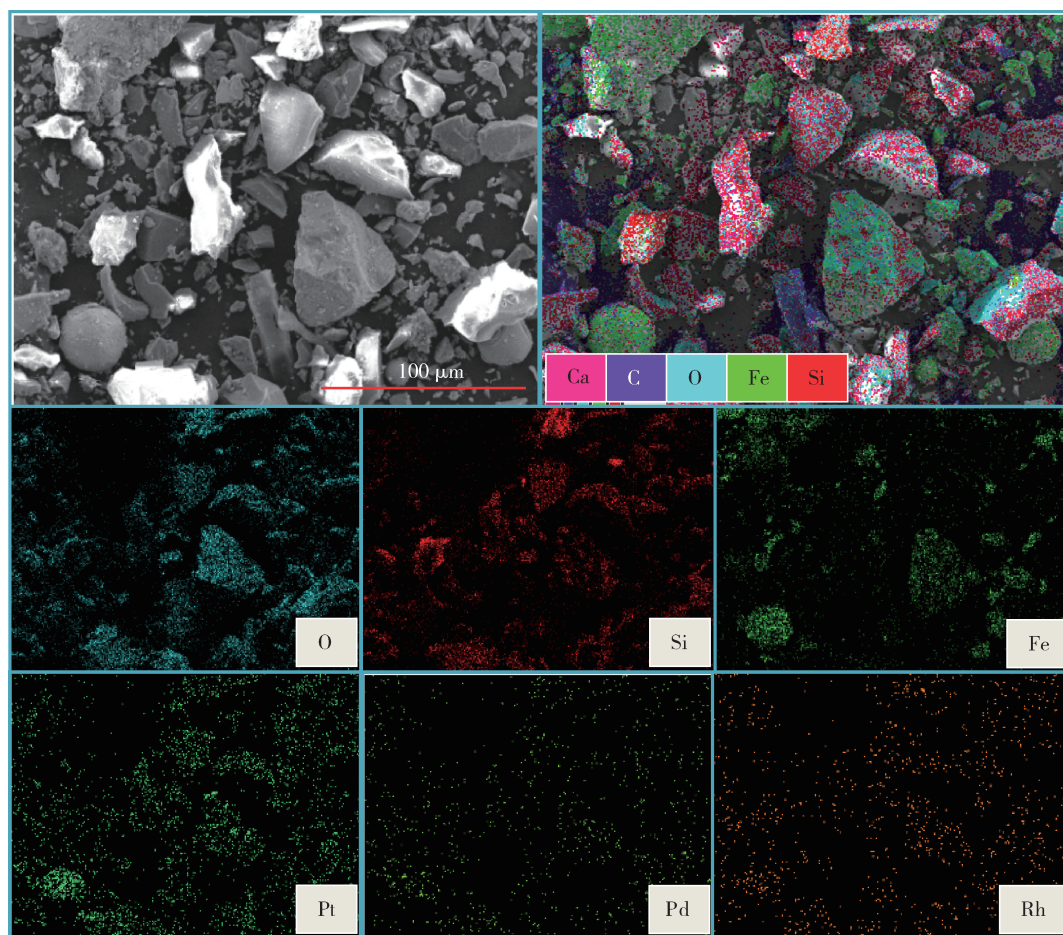


图2 铂钯铑-铁合金原料形貌及元素分布情况

Fig. 2 Morphology and elemental distribution of platinum-palladium-rhodium-iron alloy raw materials

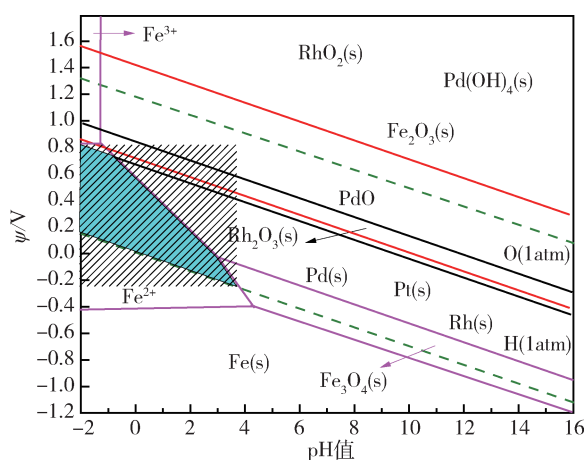


图3 353.15 K时Fe(Pt, Pd, Rh)-H₂O系E-pH优势区图

Fig. 3 E-pH advantage zone diagram of Fe(Pt, Pd, Rh)-H₂O system at 353.15 K

设定值后启动电解试验。试验过程中每30 min记录一次电压、电流、温度和pH值等参数。电解结束后,依次取出阴极沉积物和阳极材料,阴极沉积物经去离子水冲洗后烘干称重并标记;阳极表面的阳极泥用软毛刷小心收集,称重后进行成分分析。

采用式(1)计算阳极溶解速率。

$$\nu = \frac{m_1 - m_2}{At} \quad (1)$$

式中: ν 为阳极溶解速率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; m_1 为电解前阳极板的质量, g ; m_2 为电解后阳极板的质量, g ; A 为浸入电解液中阳极板的面积, m^2 ; t 为电解时间, h 。

采用式(2)计算阴极电流效率。

$$\eta = \frac{m_4 - m_3}{ItK} \quad (2)$$

式中: η 为阴极电流效率, %; m_3 为电解前阴极板的质量, g ; m_4 为电解后阴极板的质量, g ; I 为电流强度, A ; K 为 Fe^{2+} 还原为金属铁的电化学当量, $1.042 \text{ g}/(\text{A} \cdot \text{h})$ 。

2 试验结果与讨论

2.1 反应温度对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响

在电流密度 $400 \text{ A}/\text{m}^2$ 、电解液 $\text{pH}=4.5$ 、 Fe^{2+} 浓度 $100 \text{ g}/\text{L}$ 、柠檬酸钠浓度 $15 \text{ g}/\text{L}$ 、抗坏血酸浓度 $2 \text{ g}/\text{L}$ 、硫酸铵浓度 $10 \text{ g}/\text{L}$ 的条件下,考察电解过程中反应温度对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响,结果如图4所示。

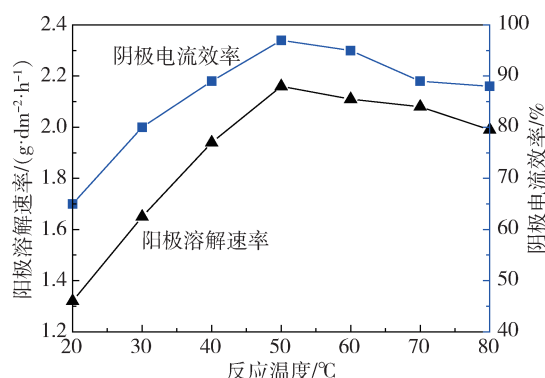


图4 反应温度对阳极溶解速率及阴极电流效率的影响

Fig. 4 Effect of reaction temperature on anode dissolution rate and cathode current efficiency

反应温度由 20°C 升至 80°C , 阳极溶解速率和阴极电流效率均呈先上升后下降的趋势。在反应温度由 20°C 升至 50°C 过程中, 电极表面金属键断裂的活化能显著降低, 阳极活性位点反应频率加快; 同时, 电解液离子迁移速率同步提升, 能够及时补充阳极反应所需的离子, 避免了因离子供应不足导致的反应受限, 使阳极溶解速率持续提高。当反应温度高于 50°C 时, 过高温度会破坏阳极表面的稳定反应层, 导致膜结构疏松或脱落; 同时, 电解液过度升温可能使离子扩散速率过快, 造成阳极表面反应物种浓度波动增大, 反应均匀性下降, 最终导致阳极溶解速率回落。

在 $20\sim 50^\circ\text{C}$ 温度区间内, 阴极沉铁反应的动力学速率远高于析氢和析氧反应, 因副反应的活化能较高, 其反应速率相对缓慢, 消耗的电流占比极低, 大部分电流用于沉铁反应, 因此电流效率逐步升高。反应温度超过 50°C 后, 析氢反应的活化能障碍被大幅突破, 反应速率呈指数级增长, 此时副反应消耗的电流占比快速超过目标反应; 即使总电流不变, 用于目标产物生成的有效电流也大幅减少, 导致电流效率明显下降^[11-13]。综合考虑阳极溶解速率与阴极电流效率, 本研究确定最优电解反应温度为 50°C , 此条件下阳极溶解速率为 $215.23 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 阴极电流效率为 96.20% 。

2.2 电解液 pH 值对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响

在电解反应温度 50°C 、电流密度 $400 \text{ A}/\text{m}^2$ 、 Fe^{2+} 浓度 $100 \text{ g}/\text{L}$ 、柠檬酸钠浓度 $15 \text{ g}/\text{L}$ 、抗坏血酸浓度

2 g/L、硫酸铵浓度 10 g/L 的条件下,考察电解过程中电解液 pH 值对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响,结果如图 5 所示。

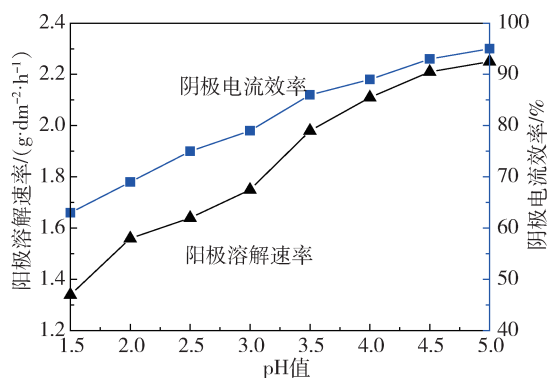


图 5 电解液 pH 值对阳极溶解速率及阴极电流效率的影响

Fig. 5 Effect of electrolyte pH on the anode dissolution rate and cathode current efficiency

由图 5 可知,随着电解液 pH 值增大,阳极溶解速率及阴极电流效率均呈现上升趋势,原因主要是 pH 值对电极反应环境和反应路径具有调控作用。在阳极方面,酸性条件下金属表面易形成致密氧化/氢氧化物钝化膜,阻碍溶解过程;pH 升高时,溶液中的 OH⁻会与钝化膜发生反应生成可溶性羟基络合物,或抑制钝化膜稳定形成,从而暴露出更多活性位点;同时,OH⁻还可辅助金属离子形成易溶解的中间产物,进一步加速阳极铁的溶解反应。在阴极反应方面,酸性条件下高浓度的 H⁺会促进析氢副反应,大量消耗电流,降低目标反应有效电流占比;随着 pH 值增大,溶液中 H⁺浓度逐渐降低,析氢反应的热力学驱动力减弱、反应速率变慢,更多的电流被用于阴极沉铁反应,从而显著提高了阴极电流效率^[14]。当电解液 pH 值增至 5.0 时,阳极溶解速率为 223.84 g/(m²·h),阴极电流效率为 95.31%。当 pH 超过 5.0 后电解液中铁离子极易发生水解生成氢氧化铁絮状沉淀,影响电解分离,故确定电解液最优 pH 值为 5.0。

2.3 Fe²⁺浓度对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响

在电解反应温度 50℃、电流密度 400 A/m²、电解液 pH=5.0、柠檬酸钠浓度 15 g/L、抗坏血酸浓度 2 g/L、硫酸铵浓度 10 g/L 的条件下,考察电解液 Fe²⁺浓度对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响,结果

如图 6 所示。

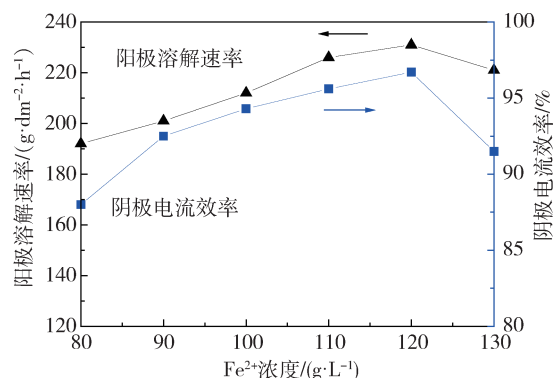


图 6 电解液 Fe²⁺浓度对阳极溶解速率及阴极电流效率的影响

Fig. 6 Effects of electrolyte Fe²⁺ concentration on anode dissolution rate and cathode current efficiency

由图 6 可知,随着电解液中 Fe²⁺浓度增加,阳极溶解速率及阴极电流效率均呈现先上升后下降的趋势。当 Fe²⁺浓度为 120 g/L 时,阳极溶解速率为 231.03 g/(m²·h),阴极电流效率为 96.07%,为最优浓度条件。在低浓度条件下,Fe²⁺供应不足会限制阳极表面活性位点的反应频率;随 Fe²⁺浓度升高,其向阳极表面的迁移速率加快,能及时与阳极溶解产生的金属离子或中间产物反应,减少反应瓶颈,推动阳极溶解速率持续上升。当 Fe²⁺浓度过高时,电解液黏度增大,导致离子扩散阻力增加,反而使阳极表面 Fe²⁺的有效接触浓度降低;同时,高浓度 Fe²⁺在阳极表面形成疏松的沉积物,覆盖部分活性位点,削弱阳极溶解的持续进行,导致反应速率回落。

阴极铁还原反应以 Fe²⁺为核心反应物,低浓度下 Fe²⁺在阴极表面的吸附量不足,导致目标反应速率缓慢,部分电流会被析氢副反应消耗;随着 Fe²⁺浓度升高,其在阴极表面的吸附与反应优先级显著提升,标准沉铁反应的速率增速远高于析氢副反应,有效电流占比增加,阴极电流效率随之上升。当 Fe²⁺浓度超过 120 g/L 后,过量 Fe²⁺可能在阴极发生非目标还原,消耗额外电流;同时,电解液黏度增大会使 H⁺等副反应物种更易在阴极表面富集,析氢副反应速率加快。额外电流消耗与析氢副反应共同作用,导致用于还原铁反应的有效电流占比下降,阴极电流效率随之降低^[15]。因此,选择 Fe²⁺浓度为 120 g/L 比较适宜。

2.4 电流密度对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响

在电解反应温度 50℃、Fe²⁺浓度 120 g/L、电解液 pH=5.0、柠檬酸钠浓度 15 g/L、抗坏血酸浓度 2 g/L、硫酸铵浓度 10 g/L 条件下,考察电流密度对阳极溶解速率和阴极电流效率的影响,结果如图 7 所示。

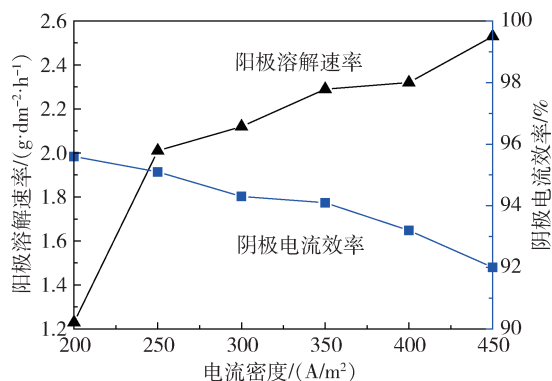


图 7 电流密度浓度对阳极溶解速率及阴极电流效率的影响

Fig. 7 Effect of current density concentration on anode dissolution rate and cathode current efficiency

由图 7 可知,随着电流密度增大,阳极溶解速率呈上升趋势,而阴极电流效率呈下降趋势。高电流密度通过增强阳极反应的驱动力,加速金属键断裂和金属离子脱离电极表面的速率;同时,电流密度增大可激活阳极更多潜在活性位点,减少反应闲置区域,即使电解液离子供应存在短暂滞后,阳极的整体溶解反应速率仍会随电能输入的增加持续上升。阴极电流效率取决于铁还原反应电流占总电流的比例,而电流密度增大会显著增加阴极副反应的竞争优势。铁离子还原的反应速率随电流密度上升呈线性增长。当电流密度超过临界值后,副反应的活化能障碍更易被突破,且高电流密度会导致阴极表面局部 pH 值和离子浓度剧烈波动,进一步促进副反应发生。此时,总电流中用于副反应的占比大幅提升,用于目标反应的有效电流占比下降,最终导致阴极电流效率随电流密度增大而降低。综合权衡阳极溶解速率与阴极电流效率的变化规律,本研究最终选定电流密度为 350 A/m²。

2.5 验证试验

在电解反应温度 50℃、Fe²⁺浓度 120 g/L、电解液 pH=5.0、柠檬酸钠浓度 15 g/L、抗坏血酸浓度 2 g/L、硫酸铵浓度 10 g/L、电流密度 350 A/m² 的条件下进

行电解反应,成功获得阴极铁及阳极泥,对其进行成分与物相表征分析,结果见表 2。

表 2 阳极泥的主要化学成分(质量分数)

Table 2 Main chemical components of anode mud (mass fraction) %

元素	Fe	Pd	Pt	Rh
含量	2.31	18.32	2.23	2.03

由表 2 可知,阳极泥中仍有 2.31% 的铁,该现象主要归因于阳极板中含有少量硅铁合金所致。阳极泥中铂、钯、铑和铁的含量分别为 2.23%、18.32%、2.03% 和 2.31%,经计算,PGMs 的富集倍数约为 20 倍且回收率均达 99% 以上。这一关键数据不仅直观证明了目标贵金属在阳极泥中实现了高效富集,更从实践层面验证了本研究采用的电解工艺在铂、钯、铑分离与提纯方面的优异性能,具有显著的技术可行性与应用价值。

采用 XRD 对阴极铁样品的晶体结构进行表征分析,结果如图 8 所示,阴极铁的出峰位置与标准卡(PDF 01-087-0721)保持一致,在 44.26°、65.02° 和 82.34° 处出现与纯铁的一系列特征峰^[16],未检测到其他单相,表明本工艺成功制备出高纯度阴极铁。

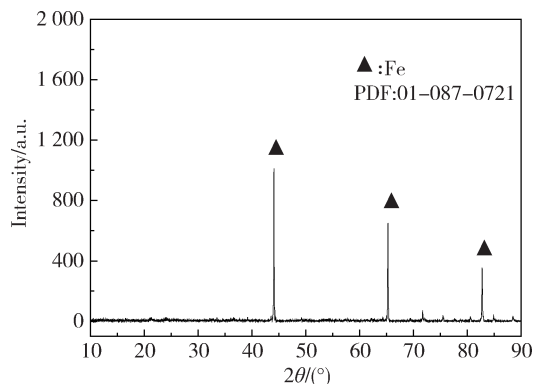


图 8 阴极铁 XRD 分析

Fig. 8 XRD analysis of the cathode iron

采用 SEM 表征电解后阴极铁,探究其形貌及其微观结构,结果如图 9 所示,表明阴极铁呈不规则几何体。

3 结论

针对传统酸浸工艺回收废三元催化剂中贵金属存在的问题,本研究采用球磨磁选-电解工艺处

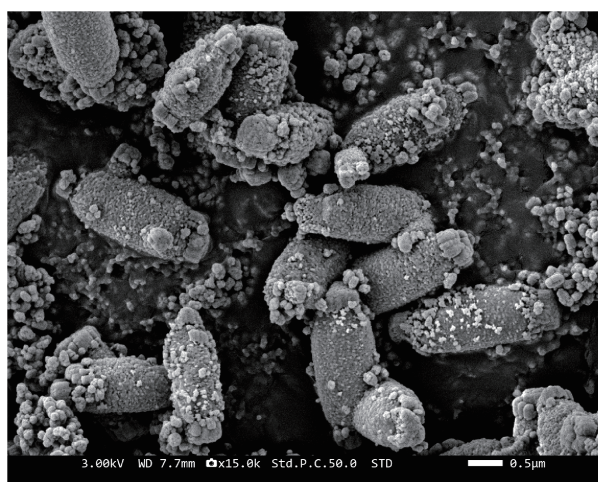


图9 阴极铁SEM分析

Fig. 9 SEM analysis of the cathode iron

理三元废催化剂,考察了关键参数对阳极溶解速率与阴极电流效率的影响,并在最优条件下进行了验证试验,对阳极泥和阴极产物进行了表征分析,得到以下主要结论。

1)电解温度、电解液pH、 Fe^{2+} 浓度及电流密度对铂钯铑-铁合金的电解分离效果起决定性作用,各参数的调控机制各有侧重:温度与电流密度主要影响反应速率及阳极铁溶解与阴极 Fe^{2+} 还原的动力学过程;pH与 Fe^{2+} 浓度核心保障 Fe^{2+} 存在形态稳定及电极反应环境适宜,为电解分离反应的高效进行提供基础。

2)兼具稳定性与高效性的最优电解体系为温度 50°C 、电解液pH=5.0、 Fe^{2+} 浓度120 g/L、电流密度 350 A/m^2 ,同时搭配15 g/L柠檬酸钠、2 g/L抗坏血酸、10 g/L硫酸铵的复合电解液;该条件下,电解分离性能表现优异,阳极泥中铂、钯、铑含量分别为2.23%、18.32%、2.03%,富集倍数达20倍,回收率均超99%,实现了贵金属高效富集回收。

3)该体系条件下,可协同抑制 Fe^{2+} 水解氧化及阴极析氢副反应,实现了阳极铁均匀、稳定溶解,无明显钝化现象,所制备阴极铁产物纯度较高,满足相关质量应用需求。

4)本研究提出的电解分离工艺具备显著的实用价值与应用前景,为汽车尾气催化剂、废旧电子元器件等含铂钯铑废料的资源化处理提供高效、可行的技术方案,同时为高纯度铁制备开辟了新路径,兼顾环境效益与经济效益。

5)该工艺仍存在一定的优化空间,当前工艺中存在阳极表面微量金属氧化物附着、阴极沉积产物有贵金属残留未达超高纯铁标准的问题,后续需聚焦电极表面改性、电解液体系优化等方向深化研究,进一步提升工艺稳定性与产物纯度。

[参考文献]

- [1] 吴喜龙,贺小塘,李红梅.含铂钯铑的铁合金富集物溶解试验研究[J].有色金属(冶炼部分),2025,3(3):52-54.
WU Xilong, HE Xiaotang, LI Hongmei. Dissolution research of platinum, palladium and rhodium enriched ferroalloy [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2025, 3(3): 52-54.
- [2] 郭梁希,孙树臣,肖发新,等.火法铁捕集汽车失效催化剂中铂、钯、铑的研究[J].贵金属,2025,46(1):41-47.
GUO Liangxi, SUN Shuchen, XIAO Faxin, et al. Research on the capture of Pt, Pd, and Rh in spent automotive catalysts by pyrometallurgical iron [J]. Precious Metals, 2025, 46(1): 41-47.
- [3] 施善林,路文,张跃宏,等.铁捕集熔炼-渣磁选法深度回收废三元催化剂中铂族金属[J].中国有色冶金,2025,54(4):60-68.
SHI Shanlin, LU Wen, ZHANG Yuehong, et al. Deep recovery of platinum group metals from spent ternary catalysts by iron collection smelting-sludge magnetic separation method [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025, 54(4): 60-68.
- [4] 裴忠治,王政华,冯亚平,等.铂族金属火法冶炼技术研究进展[J].中国有色冶金,2023,52(6):16-25.
PEI Zhongye, WANG Zhenghua, FENG Yaping, et al. Research progress of platinum group metals pyrometallurgy technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(6): 16-25.
- [5] 谢文义,万双.超高电流密度铜电解技术的开发及应用[J].中国有色冶金,2021,50(4):36-42.
XIE Wenyi, WAN Shuang. Development and application of ultra-high current density copper electrolysis technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(4): 36-42.
- [6] 李涛,张杰磊,彭少君.从含钯废催化剂中回收钯的工艺设计[J].中国有色冶金,2020,49(3):44-48.
LI Tao, ZHANG Jielei, PENG Shaojun. Process design of recovering palladium from spent catalyst containing palladium [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(03): 44-48.
- [7] 董海刚,赵家春,陈家林,等.固态还原铁捕集法回收铂族金属二次资源[J].中国有色金属学报,2014,24(10):2692-2697.
DONG Haigang, ZHAO Jiachun, CHEN Jialin, et al. Recovery of platinum group metal secondary resource by iron trapping method based on solid state [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(10): 2692-2697.
- [8] 杨鹏飞,陈燕萌,张秋连,等.用抗坏血酸+琥珀酸浸出废三元锂电池中的镍锂[J].湿法冶金,2023,42(5):480-484.

- YANG Pengfei, CHEN Yanmeng, ZHANG Qiulian, et al. Leaching nickel and lithium from waste ternary lithium batteries using ascorbic acid succinate [J]. Hydrometallurgy of China, 2023, 42(5): 480-484.
- [9] ZHANG F C, TANG Z H, ZHENG L R. Edge-distributed iron single-atom moiety with efficient trapping-conversion for polysulfides driving high-performance of Li-S battery [J]. Applied Catalysis B: Environmental, 2023, 334(21): 120-128.
- [10] 郑环东, 丁银贵, 游韶玮, 等. 铁捕集铂族金属合金的电化学回收工艺研究[J]. 稀有金属, 2025, 49(3): 378-388.
- ZHENG Huandong, DING Yingui, YOU Shaowei, et al. Electrochemical recovery process of Fe-PGMs alloy from iron capture method [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2025, 49(3): 378-388.
- [11] DÍAZ A, ZAFRA A, MARTÍNEZ-PAÑEDA E. Simulation of hydrogen permeation through pure iron for trapping and surface phenomena characterisation [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020, 110: 102818.
- [12] WANG Q L, JEONG S W, CHOI H. Removal of trichloroethylene DNAPL trapped in porous media using nanoscale zerovalent iron and bimetallic nanoparticles: direct observation and quantification [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 213: 299-310.
- [13] 肖力, 孙峙. 铂钯铑分离提纯过程及铑的分布规律[J]. 有色金属(冶炼部分), 2024(8): 86-93.
- XIAO Li, SUN Zhi. Distribution pattern of rhodium in the separation and purification process of platinum, palladium and rhodium [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2024(8): 86-93.
- [14] 赵家春, 崔浩, 保思敏, 等. 铜捕集法回收铂族金属的理论及实验研究[J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(12): 2819-2825.
- ZHAO Jiachun, CUI Hao, BAO Simin, et al. Theoretical and experimental study on platinum group metal recovery by copper precipitation method [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(12): 2819-2825.
- [15] 李勇, 贺小塘, 熊庆丰, 等. 熔炼法从失效汽车尾气催化剂中富集回收铂钯铑[J]. 有色金属(冶炼部分), 2017(8): 40-43.
- LI Yong, HE Xiaotang, XIONG Qingfeng, et al. Recovery of platinum group metals from spent auto-catalysts by smelting [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2017(8): 40-43.
- [16] 龙腾发, 金尧, 唐文丽, 等. 基于还原焙烧-酸浸法的电解锰阳极泥中锰铅分离研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6): 128-132.
- LONG Tengfa, JIN Yao, TANG Wenli, et al. Separation of manganese and lead from electrolytic manganese anode slime by reduction roasting and acid leaching process [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(6): 128-132.

Research on the electrolytic separation process of iron catchers of waste three-way catalysts and preparation of cathode iron

LU Wen, SHI Shanlin, SHU Fangxia, ZHAO Xuanbo, LIANG Jiaqi

(Shenyang Research Institute of Nonferrous Metals Co., Ltd., Shenyang 110141, China)

Abstract: The iron collector product of spent three-way catalysts (PGMs-iron alloy) is a typical intermediate product from precious metal smelting tailings and scrapped catalyst treatment. The large amount of iron present not only severely interferes with the purification accuracy of precious metals but also reduces the processing efficiency of subsequent refining processes while increasing energy consumption and costs. This study takes PGMs-iron alloy as the research object, focusing on the efficiency and controllability of electrolytic separation technology. Anodic dissolution rate (reflecting the stability and sustainability of alloy dissolution) and cathodic current efficiency (characterizing the selectivity of target ion reduction and energy utilization efficiency) were selected as key evaluation indicators. The synergistic effects of process parameters such as electrolysis temperature, electrolyte pH, Fe^{2+} concentration, and current density, as well as the composite electrolyte system composed of sodium citrate (15 g/L), ascorbic acid (2 g/L) and ammonium sulfate (10 g/L) on separation efficiency, were systematically investigated. Key operating conditions were optimized through single-factor variable experiments and mechanism analysis. Experimental results show that under the optimal conditions of temperature 50°C , pH=5.0, Fe^{2+} concentration 120 g/L, current density 350 A/m^2 , the enrichment factor of platinum, palladium and rhodium in anode slime is 20 times, and the recovery rate exceeds 99%; The peak position of cathode iron is consistent with the standard card (PDF 01-087-0721), and no other single phase is detected; The waste electrolyte produced in

the process can be used to prepare ferrous sulfate by dissolution crystallization; Under the optimum operating conditions, there is no obvious passivation phenomenon in the anode, and there is no obvious side reaction of hydrogen evolution in the cathode. The purity and current efficiency of the product are at a high level. This study not only provides a solid theoretical basis and a direct reference technical scheme for the industrial efficient separation of PGMs-iron alloy, but also provides a new idea for the utilization of PGMs containing waste.

Key words: waste ternary catalyst; platinum-palladium-rhodium recycling; iron recycling; platinum-palladium-rhodium-iron alloy (PGMs-iron alloy); electrolytic separation; concentration of precious metals; anode sludge; cathodic iron

标准领航 人才筑基 《钛冶炼工》国家职业标准启动会召开

为落实国家职业技能标准化建设的重要专项工作,补齐钛行业职业标准短板、完善有色金属冶炼标准体系,6月26日,《钛冶炼工》国家职业标准启动会在四川省攀枝花市召开。中国有色金属工业协会钛钒分会副会长兼秘书长安仲生,有色金属工业人才中心党委副书记、纪委书记、副总经理王南出席会议;中国就业培训技术指导中心职业分类与标准处副处长张韶华以线上方式参会。宝钛集团有限公司、攀钢集团有限公司、贵州遵钛(集团)有限责任公司、洛阳双瑞万基钛业有限公司、新疆湘润新材料科技有限公司、云南国钛金属股份有限公司、朝阳金达钛业股份有限公司等参编单位的领导及专家参加会议。会议由中国有色金属工业协会钛钒分会常务副秘书长陈岩主持。

安仲生指出,近年来,我国钛产业蓬勃发展,已构建起体系完备、链条完整的产业格局,产业迈入关键转型期,对钛冶炼一线从业人员的综合素养与专业技能提出了更高、更新的要求。启动《钛冶炼工》国家职业标准修编工作,是深入落实国家人才强国战略、持续深化产业工人队伍建设改革的重要实践,更是规范行业人才评价体系、夯实产业高质量发展根基的基础性工程。经过科学修订、完善迭代后的国家职业标准,将为我国钛冶炼行业高质量发展搭建全方位、系统化的人才支撑体系,发挥明晰从业人员职业成长路径、夯实产教融合育人权威依据、提供企业育人用人精准标尺、强化行业监管与政策赋能支撑等四大核心作用。

王南表示,编制《钛冶炼工》国家职业标准,是破解当前钛冶炼行业技能人才队伍建设瓶颈的关键举措,也是“队伍建设、任重道远,人才培养、标准先行”理念的具体实践。该标准的制定与实施,将系统性地推动后续的培训、评价、竞赛等一系列工作,对整个钛产业链技能人才生态的构建产生深远而积极的影响。王南对后续标准编制工作提出4点期望:一是严格遵循技术规程,确保编写的标准完全符合国家规范;二是深度结合产业实践,体现行业技术发展成果,使标准内容贴合企业生产实际和岗位能力需求;三是凝聚共识、精益求精,各参编单位要密切协作,达成广泛共识,确保标准经得起实践与行业检验;四是发扬专业精神,以高度的责任担当和严谨的工匠精神推进各项工作,保质保量按期完成各阶段编制任务。

据悉,《钛冶炼工》国家职业标准正式发布实施后,将为钛冶炼工种的职业教育培训、技能等级认定、人才评价聘用、行业规范管理提供国家级权威依据,对推动钛冶炼行业标准化、规范化、专业化发展,夯实产业人才根基、助力钛产业高质量升级具有重大而深远的意义。

(资料来源:中国有色金属报)