硝酸选择性浸出—络合沉淀法从银阳极泥中回收铂与钯

袁　彬,滕年高,杨　博

(深圳市中金岭南有色金属股份有限公司 丹霞冶炼厂,广东 韶关　512325)

摘要:针对银阳极泥中铂、钯资源回收过程中存在的流程复杂、杂质共沉淀严重及环境污染等问题,研究了采用硝酸选择性浸出—络合定向沉淀法从电解银阳极泥中提取铂、钯。试验结果表明:在硝酸浓度 40%、温度 90 ℃、液固体积质量比 4∶1 的优化条件下,银、铜、铋等杂质可几乎完全浸出,铂、钯浸出率分别达 89.97%和 99.17%;之后,在温度 70 ℃、pH=0.5、丁二酮肟添加量为理论添加量 2.5 倍条件下进行定向沉淀,铂、钯沉淀率分别为 88.45%和 99.78%,实现了铂、钯的高选择性富集,并有效抑制了银、铜等杂质的共沉淀。扩大试验结果表明,该工艺的铂、钯直收率分别为 78.32%和 99.05%,并能获得铂、钯品位分别为 11.43%和28.56%的精矿。该方法通过络合剂的高选择性结合作用,实现了铂、钯的高效富集,且无废水排放,为银阳极泥中铂钯资源的清洁、高效回收提供了一种新策略。

关键词:电解银阳极泥;硝酸;浸出;络合沉淀;铂;钯;回收

中图分类号:TF803.21;TF83　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)05-0668-08

DOI:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.05.006

铂族金属在氢能、尾气净化、电子化工等绿色科技与高端制造领域具有不可替代的战略价值[1-2]。其资源主要以砷铂矿、碲铂矿等形式与铜镍硫化物共生[3],或呈微细包裹体嵌布其中。全球铂钯资源高度集中于南非、俄罗斯和津巴布韦[4-5],我国探明储量仅占全球 0.2%,对外依存度极高,资源安全面临严峻挑战[6-8]。目前,从铂钯精矿中提取金属的主流工艺包括火法-湿法联合工艺和全湿法工艺[9]。火法-湿法联合工艺以火法造锍熔炼为核心,将贵金属捕集于锍相中初步富集,再经湿法工序分离提纯;全湿法工艺适用于低品位、难处理矿石,主要有加压氧化酸浸—加压氰化、王水浸出、氯化浸出等方法[10-15]。当前,铂、钯的回收原料主要为汽车尾气催化剂、电子产品和首饰等,其处理普遍采用成熟且已实现产业化的火法-湿法联合工艺[16-19]。

针对不同类型的资源,所采用的回收工艺各具优势。对于失效重整催化剂,主要采用火法熔炼工艺[20],铂回收率达 99.27%,所得铜合金中铂品位为 1.95%～1.98%;对于微量贵金属废液,采用溶剂萃取法,在优化条件下,钯萃取率可达 99.90%以上,同时从萃余液中可高效萃取铂,铂萃取率达 99.95%以上,能实现铂与钯的有效分离[21];对于铜阳极泥,采用 $HCl-H_2O_2$ 体系协同浸出贵金属并诱导银相转变工艺,有效解离了贵金属包裹,为后续金、铂、钯高效浸出与分离创造了有利条件[22];对于低浓度铂钯硝酸体系[23],采用 pH 调控-络合沉淀法,辅以絮凝手段,可实现铂、钯离子的相态转化与定向沉淀,经高温煅烧后获得高品位铂钯精矿。

银阳极泥是银电解过程中产生的重要二次资源[24],高度富集金、银及微量铂、钯等贵金属,并含铜、铋等杂质,从中高效回收贵金属具有重要意义。传统工艺多采用硝酸浸出脱除银、铜、铋、碲等杂质,但铂、钯、金等贵金属会共同溶于王水,导致金产品纯度不足及铂、钯分散损失。虽有研究提出“硝酸全溶—分级沉淀”工艺,解决了传统工艺存在的铂钯直收率低、难以彻底开路等问

收稿日期:2026-04-15;**修订日期**:2026-05-23

第一作者简介:袁彬(1989—),男,本科,工程师,主要研究方向为稀贵金属冶金。

通信作者简介:杨博(1999—),男,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向为湿法冶金。E-mail:1207689435@qq.com。

题[25]；但该工艺仅适用于铜、铋、碲等贱金属含量较低的银阳极泥，而银电解阳极泥中铜、铋、碲含量较高，不适宜用该法处理。因此，研究了采用硝酸选择性浸出—络合沉淀法从银电解阳极泥中回收铂与钯。先通过优化硝酸浸出条件，在保证金不溶解的前提下，显著提升铂、钯的选择性浸出效率，再以丁二酮肟为选择性沉淀剂、2，4-戊烷二酮二肟为协同络合剂[23]，实现高效分离与定向回收铂、钯，以期为银阳极泥中有价金属的资源化回收利用提供一种高效、绿色的方案。

1　试验部分

1.1　试验原料

银电解阳极泥：取自某银电解厂，在 60 ℃下干燥 24 h。其化学成分和 XRD 物相分析结果分别见表 1、图 1。

表 1　银阳极泥的主要化学成分

Table 1　Main chemical components of silver anode slime　%

Au	Ag	Cu	Pt	Pd	Bi	Te
9.77	48.69	4.28	0.081	0.189	8.56	0.38

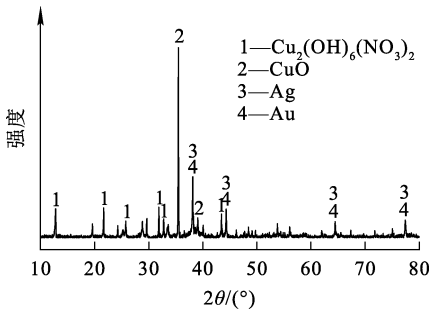


图 1　银阳极泥的 XRD 图谱

Fig. 1　XRD pattern of silver anode slime

由表 1 可知，银阳极泥中 Au、Ag 质量分数分别为 9.77%和 48.69%，Pt 和 Pd 质量分数分别为 0.081%和 0.189%，铜、铋和碲杂质质量分数分别为 4.28%、8.56%和 0.38%，含量较高。由图 1 可知，金、银以化学惰性的单质形式富集，而铜以可溶性的 CuO 和 $Cu_2(OH)_6(NO_3)_2$ 形态赋存，意味着铜在酸性介质中可被优先浸出，从而实现其与贵金属的高效分离。

1.2　试验流程与原理

从银阳极泥中回收铂、钯试验主要分为硝酸选择性浸出和丁二酮肟定向沉淀两个步骤，具体工艺流程如图 2 所示。

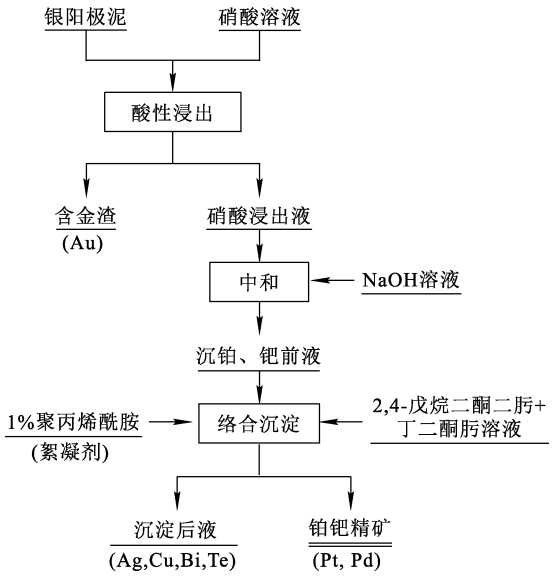


图 2　从银阳极泥中回收铂、钯的工艺流程

Fig. 2　Process flowchart for recovering Pt and Pd from silver anode slime

1.2.1　硝酸浸出

称取 40 g 干燥银阳极泥样品并置于 500 mL 烧杯中，按预设液固体积质量比加入特定浓度的硝酸溶液。将反应体系置于通风橱内的恒温水浴锅中，加热至设定温度，并于恒定搅拌速度下反应 2 h。反应结束后，采用布氏漏斗进行固液分离。浸出渣在 60 ℃条件下恒温干燥后回收金，硝酸浸出液则经化学分析后，用于后续的铂、钯沉淀试验。硝酸对银阳极泥中的 Cu、Ag 等元素具有极强的浸蚀能力，可使其几乎全部以离子形态进入溶液；钯因化学性质相对活泼，也同步高效浸出；铂虽具有极强的化学惰性，但在该体系中仍有相当一部分突破了热力学限制，由固相迁移至液相。

在硝酸体系下，银阳极泥中 Cu、Ag 可能发生的化学反应如下：

$$Ag+2HNO_3(浓)\longrightarrow AgNO_3+H_2O+NO_2\uparrow \quad (1)$$

$$3Ag+4HNO_3(稀)\longrightarrow 3AgNO_3+2H_2O+NO\uparrow \quad (2)$$

$$CuO+2HNO_3\longrightarrow Cu(NO_3)_2+H_2O \quad (3)$$

铂和钯在硝酸中的浸出行为差异显著。钯的

化学性质相对活泼，能够直接溶解于硝酸；而大部分铂在高温、高浓度硝酸环境下也能被浸出。化学反应式如下：

$$Pd+4HNO_3 \longrightarrow Pd(NO_3)_2+2NO_2\uparrow+2H_2O \quad (4)$$

$$Pt+4HNO_3 \longrightarrow Pt(NO_3)_2+2NO_2\uparrow+2H_2O \quad (5)$$

1.2.2 铂、钯络合沉淀

量取 200 mL 上述硝酸浸出液，用 NaOH 溶液调节体系 pH 至设定值。以丁二酮肟(90%)为主要沉淀剂，并添加 2,4-戊烷二酮二肟(10%)作为协同络合剂反应一定时间[24]。试验结束前，加入适量絮凝剂(1%聚丙烯酰胺溶液)促使沉淀物聚凝，以利于过滤。铂、钯以络合沉淀物形式从溶液中析出，将该沉淀进行分离、烘干后，进行化学成分分析与物相表征。测定沉淀后液主要元素浓度，计算铂、钯回收率。

在低酸度环境下，丁二酮肟分子中含有 2 个肟基氮原子，可作为双齿配体。当其与金属离子配位时，2 个配体分子形成分子间氢键同时脱氢，带有电负性，诱导中心离子发生 dsp^2 内轨型杂化，形成平面正方形构型的螯合物[26]。在元素周期表中，仅电子构型为 $3d^8$ 的 Ni(Ⅱ)、$4d^8$ 的 Pd(Ⅱ) 及 $5d^8$ 的 Pt(Ⅱ)能够满足该杂化对轨道排布的特定要求，实现轨道能级与几何构型的精准匹配。这种电子结构与空间构型的双重契合，是丁二酮肟对上述 3 种离子表现出特异性识别与沉淀分离的根本原因。而 2,4-戊烷二酮二肟与丁二酮肟均具备相同的官能团，即 α-二肟结构单元，故与铂、钯、镍等金属离子反应时，遵循相同的配位机制，即通过肟基上的氮、氧原子提供孤对电子，与金属离子形成稳定的五元螯合环沉淀。因此，采用丁二酮肟与 2,4-戊烷二酮二肟协同沉淀铂钯，利用后者较大的空间位阻和疏水碳链，起到修饰沉淀晶体结构、防止胶体化，以及共沉淀捕集游离贵金属微粒的作用，从而显著提升铂、钯沉淀速率与过滤效率。但酸度越高，溶液中 H^+ 浓度越大，会质子化这些氮原子，竞争性地阻碍其与 Pd^{2+} 的结合，导致沉淀不完全。适宜的酸度既能保证钯的沉淀，又能抑制其他杂质金属离子的干扰，提高选择性，具体化学反应[26]如下：

$$Pd^{2}++2C_4H_8N_2O_2 \longrightarrow Pd(C_4H_7N_2O_2)_2\downarrow+2H^+ \quad (6)$$

$$Pt^{2+}+2C_4H_8N_2O_2 \longrightarrow Pt(C_4H_7N_2O_2)_2\downarrow+2H^+ \quad (7)$$

1.3 分析检测方法

固体样品的成分采用化学分析法进行定量分析；溶液中的元素含量采用美国热电元素公司(Thermo Fisher Scientific)的 Intrepid II XSP 型电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)进行测定；固体产物的物相组成则借助日本理学(Rigaku)的 D/max-TTR III 型 X 射线衍射仪(XRD)进行分析，扫描速度设定为 1°/5 min，扫描角度(2θ)范围覆盖 10°～80°，获得的衍射图谱通过与标准粉末衍射文件(PDF)卡片库进行比对，完成物相鉴定。

2 试验结果与讨论

将银电解产出的阳极泥干燥后，借助硝酸浸出与络合沉淀的实验室模拟，精确测定滤液及渣相的质量、体积与物相组成；渣相经高温煅烧脱除有机质后，制得铂钯精矿，通过计量计算和成分分析，阐明各类金属的走向分布规律，为铂、钯金属后续综合回收工艺的优化奠定理论基础和实验前提。

2.1 硝酸浸出铂、钯

2.1.1 硝酸浓度对贵金属浸出率的影响

在浸出温度为 90 ℃、液固体积质量比为 4∶1、搅拌转速为 300 r/min 条件下，探究硝酸浓度对银阳极泥中贵金属浸出率的影响，结果如图 3 所示。

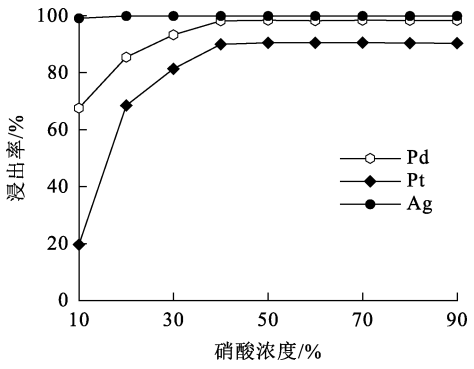


图 3 硝酸浓度对贵金属浸出率的影响

Fig. 3 Effect of nitric acid concentration on leaching rates of precious metals

由图 3 可知：铂、钯浸出率均随硝酸浓度升高先升高后趋于稳定，而银浸出率变化不大，始终保持在 99.0%以上，硝酸浓度的升高对铂、钯浸出

反应的促进效果显著；当硝酸浓度由 10%升至 40%时，钯浸出率由 67.54%升至 99.17%，铂浸出率由 19.85%升至 89.97%，此时浸出反应已接近热力学平衡；进一步升高硝酸浓度，铂、钯浸出率仅有小幅提升，变化不大，说明此时硝酸浓度对推动反应正向进行的贡献微乎其微。因此，从工艺经济性角度综合考量，确定将硝酸浓度控制在 40%为宜，此时可实现浸出效率与试剂消耗成本的最佳平衡。

2.1.2　浸出温度对贵金属浸出率的影响

在硝酸浓度为 40%、液固体积质量比为 4∶1、搅拌转速为 300 r/min 条件下，探究浸出温度对银阳极泥中贵金属浸出率的影响，结果如图 4 所示。

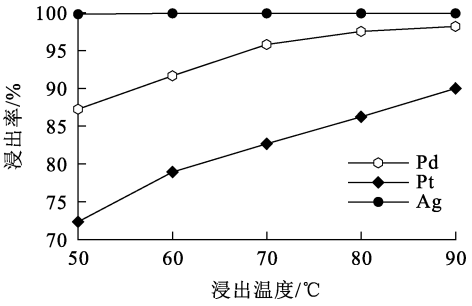


图 4　浸出温度对贵金属浸出率的影响

Fig. 4　Effect of leaching temperature on leaching rates of precious metals

由图 4 可知：浸出温度在 50～90 ℃考察范围内，银浸出率始终维持 99.90%以上，这表明在 50 ℃时银浸出反应即可达到或接近热力学平衡，继续升高温度对其浸出率提升作用不明显；浸出温度由 50 ℃升至 90 ℃时，铂浸出率由 72.33%升至 89.97%，钯浸出率由 87.24%升至99.17%，这表明浸出温度对铂、钯浸出率的影响显著，升高浸出温度提升了分子热运动动能与有效碰撞频率，促使更多反应物分子跨越铂、钯溶解过程固有的高能垒，从而显著加速了固-液界面的化学反应速率，大幅提升了表面化学反应速率。因此，确定适宜的浸出温度为 90 ℃。

2.1.3　液固体积质量比对贵金属浸出率的影响

在浸出温度为 90 ℃、硝酸浓度为 40%、搅拌转速为 300 r/min 条件下，探究液固体积质量比对银阳极泥中贵金属浸出率的影响，结果如图 5 所示。

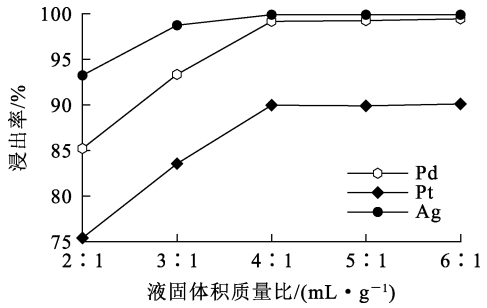


图 5　液固体积质量比对贵金属浸出率的影响

Fig. 5　Effect of liquid volume to solid mass ratio on leaching rates of precious metals

由图 5 可知：银、钯、铂浸出率随液固体积质量比增大而升高，液固体积质量比由 2∶1 增至 4∶1时，银浸出率由 93.24%升至 99.93%，铂浸出率由75.40%升至89.97%，钯浸出率由85.22%升至99.17%；继续增大液固体积质量比，3 种金属浸出率只有小幅提升，变化不大。这是因为在低液固体积质量比条件下，反应体系两相传质受限，导致有效传质面积不足；而随液固体积质量比增大，液相体积和硝酸总用量增加，流动性显著增强，不仅降低了传质阻力，也增大了硝酸与固体颗粒的接触概率与反应驱动力，从而强化了金属的浸出动力学。银因具有高反应性，对液固体积质量比变化不敏感，易于浸出；而铂、钯的浸出则需更大的液固体积质量比以提供充分的反应推动力。当液固体积质量比大于 4∶1 时，传质条件虽在微观上有所改善，但浸出率已无明显提升，且过大的液固体积质量比会大幅增加后续液固分离、溶液输送与处理的成本和能耗。因此，综合考虑，确定适宜的液固体积质量比为 4∶1。

2.2　丁二酮肟沉淀铂、钯

2.2.1　初始 pH 对钯、铂沉淀率的影响

硝酸是一种强氧化性酸，当浓度过高时，其会氧化并分解丁二酮肟分子，使其失去与钯离子配位的能力，导致钯离子无法被定量沉淀。因此，在沉淀温度为 70 ℃、丁二酮肟添加量为理论添加量的 2.5 倍条件下，考察硝酸浸出液初始 pH 对丁二酮肟沉淀钯、铂率的影响，结果如图 6 所示。可知：硝酸浸出液初始 pH 对 Pd、Pt 沉淀率具有显著且规律性的影响，在未调节浸出液酸度条件下，浸出液含游离硝酸 22 141.0 mg/L，此时

铂、钯沉淀率分别为 8.15%和 22.16%，原因是高浓度硝酸会氧化分解丁二酮肟；当溶液 pH 升高至 0.5 左右时，铂、钯沉淀率分别为 88.45%和 99.78%，继续调节溶液 pH 至 1.0 左右时，铂、钯沉淀率分别降至 87.27%和 94.50%，原因是硝酸体系下的酸电离能力较弱，此时溶液中的部分金属离子开始发生水解反应，造成了铂、钯沉淀率降低；对比铂、钯沉淀率可知，相较于铂，丁二酮肟对钯的配位能力更强，选择性也更高。因此，将沉淀时的硝酸浸出液初始 pH 控制在 0.5 左右较为适宜。

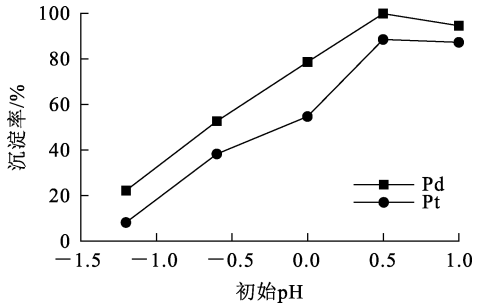


图 6 初始 pH 对铂、钯沉淀率的影响

Fig. 6 Effect of initial pH on precipitation rates of Pt and Pd

2.2.2 沉淀温度对钯、铂沉淀率的影响

在丁二酮肟添加量为理论添加量的 2.5 倍、硝酸浸出液初始 pH=0.5 左右条件下，考察沉淀温度对丁二酮肟沉淀钯、铂沉淀的影响，结果如图 7 所示。

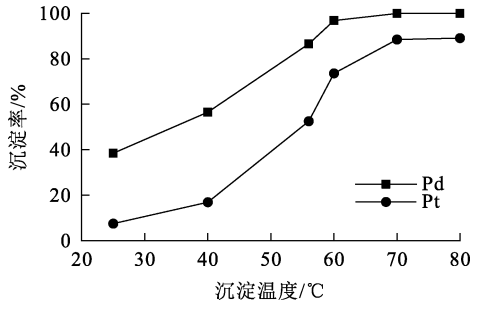


图 7 沉淀温度对 Pt、Pd 沉淀率的影响

Fig. 7 Effect of precipitation temperature on precipitation rates of Pt and Pd

由图 7 可知，温度由 25 ℃升至 70 ℃时，钯沉淀率由38.46%升至99.90%，铂沉淀率由 7.54%升高至 90.16%，此时溶液中残留的钯、铂离子质量浓度分别为 0.49、22.41 mg/L；继续升高温度，2 种金属沉淀率均无明显提升。这说明升高温度对沉淀反应动力学有明显促进作用，增强了反应物分子的热运动频率与动能，促进了钯、铂络离子中金属中心离子的活化或配体交换速率，既加速了丁二酮肟与金属离子的配位反应速率，也促进了沉淀晶核的形成与生长，从而使反应更趋完全。考虑到温度过高可能导致试剂部分分解，且增加能耗，因此，确定适宜的沉淀温度为 70 ℃。

2.2.3 丁二酮肟添加量对钯、铂沉淀率的影响

在沉淀温度为 70 ℃、硝酸浸出液初始 pH=0.5 左右条件下，考察丁二酮肟添加量对钯、铂沉淀率的影响，结果如图 8 所示。

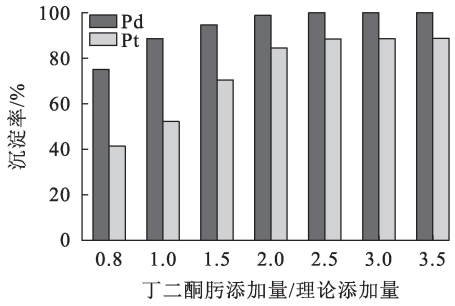


图 8 丁二酮肟添加量对铂、钯沉淀率的影响

Fig. 8 Effect of dimethylglyoxime addition on precipitation rates of Pt and Pd

由图 8 可知：当丁二酮肟添加量由理论添加量的 0.8 倍增至 2.5 倍时，铂沉淀率由 41.32%升至90.86%，钯沉淀率由75.10%升至99.90%，说明在该考察范围内，沉淀反应受试剂浓度影响较大；当丁二酮肟添加量超过理论添加量的 2.5 倍后，铂、钯沉淀率没有明显提升，趋于平稳，说明过量添加丁二酮肟仅能确保反应彻底和促进平衡右移，而对沉淀率没有显著影响。因此，确定丁二酮肟添加量以理论添加量的 2.5 倍为宜。

2.3 扩大试验

为进一步验证该工艺的稳定性和放大适应性，开展扩大试验。在银阳极泥浸出实验室小试最优工艺条件基础上确定最佳试验条件及步骤：取 1 kg 烘干研磨后的银阳极泥于烧杯中，加入 4 000 mL的 40% HNO_3 溶液，在温度为 90 ℃条件下反应 2 h，之后固液分离，测定硝酸浸出液中主要化学成分，结果见表 2。

表 2　银阳极泥硝酸浸出液的化学成分

Table 2　Chemical composition of nitric acid leaching solution from silver anode slime　　mg/L

Ag	Cu	Bi	Pt	Pd	Te	HNO_3
13 097.1	11 586.1	22 123.9	211.1	496.7	1 024.6	22 141.0

由表 2 可知，铋、银、铜元素质量浓度分别为 22 123.9、13 097.1、11 586.1 mg/L，基本完全溶解进入溶液中，浸出率均大于 99.90%；碲质量浓度为 1 024.6 mg/L，浸出率为 98.43%；铂、钯质量浓度分别为211.1和496.7 mg/L，浸出率分别为89.78%和98.56%；浸出液中游离硝酸质量浓度为22 141.0 mg/L。上述数据表明，在高温硝酸浸出体系中，3 种金属的耐硝酸溶解性能由弱到强依次为：Ag＜Pd＜Pt，可知银最易浸出，铂最难浸出。铂、钯主要以离子形式进入溶液，实现了铂族金属的高效活化与转移；未被完全浸出的少量铂（约 10%）和钯（约 1.4%）与化学性质稳定的金共同富集于渣相，可后续回收利用。扩大试验结果表明，在高温环境下，采用硝酸浸出法实现了铂、钯元素从固相阳极泥向液相的高效转移与富集，为其后续的湿法分离与回收奠定了坚实基础。

在前期实验室小试确定的最优条件下，以上述扩大试验硝酸浸出液为原料，进一步调节 pH，开展丁二酮肟＋2，4-戊烷二酮二肟协同沉淀铂、钯扩大试验。试验结束后测定沉淀液主要化学成分，结果见表 3。沉淀过程中溶液中铂、钯离子质量浓度变化如图 9 所示。

表 3　沉淀液的化学成分

Table 3　Chemical composition of Pt and Pd precipitation solution　　mg/L

Ag	Cu	Bi	Pt	Pd	Te
13 847.2	11 834.4	23 223.1	23.12	0.10	1 032.6

由图 9 可知，沉淀时间由 0 延长至 40 min 时，溶液中铂质量浓度由 211.0 mg/L 降至 41.30 mg/L，钯质量浓度由 496.7 mg/L 降至 61.23 mg/L；反应 120 min 时，溶液中铂、钯质量浓度进一步降至 23.12 和 0.10 mg/L，沉淀率分别为 89.05%和 99.65%，此时，银、铜、铋和碲等元素均留在溶液中，结合表 3 可知，其质量浓度分别为 13 847.2、11 834.4、23 223.1 和 1 032.6 mg/L。

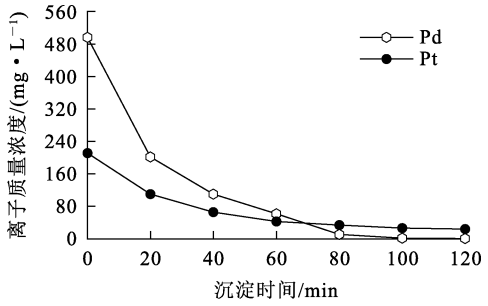


图 9　沉淀反应过程中溶液中铂、钯离子质量浓度变化

Fig. 9　Mass concentration changes of Pt and Pd ions in solution during precipitation reaction process

经计算，沉淀渣经高温煅烧后，铂、钯质量分数分别为 11.43%和 28.56%，该工艺的钯直收率达 99.05%，铂直收率为 78.32%。说明采用硝酸浸出—络合剂定向沉淀法能从银阳极泥中高效分离出富含铂、钯的精矿。沉淀后液中有价金属（如 Ag、Cu、Bi、Te）可进一步通过分步沉淀法回收，工艺流程末端产生的滤液也可返回银阳极泥浸出过程实现母液循环，从而提升资源利用率并减少废物排放。

3　结论

以银电解阳极泥为原料，采用硝酸浸出—络合剂定向沉淀工艺，可高选择性分离与富集铂、钯。在硝酸浓度为 40%、温度为 90 ℃、液固体积质量比为 4∶1 条件下，银、铜、铋几乎完全浸出，铂、钯浸出率分别为 89.97%和 99.17%；硝酸浸出液初始 pH＝0.5 时，采用丁二酮肟和 2，4-戊烷二酮二肟定向沉淀，在温度为 70 ℃、丁二酮肟添加量为理论添加量 2.5 倍条件下，铂、钯沉淀率分别达 88.45%和 99.78%。该工艺的铂、钯直收率分别为 78.32%和 99.05%，可获得铂、钯含量分别为 11.43%和 28.56%的精矿。该工艺通过硝酸浸出—络合沉淀实现了从银阳极泥浸出液这一复杂多金属体系中，成功剔除贱金属杂质干扰，高效分离并回收铂和钯金属，为银阳极泥中铂、钯的高效、清洁回收提供了一条新路径。

参考文献：

[1]　彭映林，马亚赟，张福元，等. 双氧水氧化碱浸分离铂钯精矿中硒碲热力学及实验研究[J]. 中国有色金属学报，2017，27(2)：430-438.
Peng Yinglin，Ma Yayun，Zhang Yuanfu，et al. Thermodynamic and experimental study on selenium and tellurium separation

from platinum and palladium concentrate by oxidative alkaline leaching with hydrogen peroxide[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2017,27(2):430-438.

[2] 李春侠.铂钯精矿处理的工艺实践[J].中国有色冶金,2009,38(4):42-45.
Li Chunxia. Practice of platinum and palladium concentrates treatment[J]. China Nonferrous Metallurgy,2009,38(4):42-45.

[3] 刘志强,周向前,张魁芳,等.某铂钯精矿氯化浸出工艺[J].中国有色金属学报,2017,27(6):1280-1288.
Liu Zhiqiang, Zhou Xiangqian, Zhang Kuifang, et al. Chloride leaching of Pt-Pd concentrates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2017,27(6):1280-1288.

[4] 董海刚,汪云华,范兴祥,等.近年全球铂族金属资源及铂、钯、铑供需状况浅析[J].资源与产业,2012,14(2):138-142.
Dong Haigang, Wang Yunhua, Fan Xingxiang, et al. Global supply-demand status of platinum group metals resource and Pt, Pd and Rh[J]. Resources & Industries, 2012, 14(2):138-142.

[5] David W R, Donald B I. Platinum group metals-world supply and demand[R]. Reston: U. S. Geological Survey, 2004.

[6] 陈喜峰,彭润民.中国铂族金属资源形势分析及可持续发展对策探讨[J].矿产综合利用,2007,28(2):27-30.
Chen Xifeng, Peng Runmin. Analysis of platinum metals resources conditions and strategy for sustainable development of platinum metals industry in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2007,28(2):27-30.

[7] 李鹏远,周平,齐亚彬,等.中国主要铂族金属供需预测及对策建议[J].地质通报,2017,36(4):676-683.
Li Pengyuan, Zhou Ping, Qi Yabin, et al. The supply and demand prediction and suggestions of platinum-group metals in China[J]. Geological Bulletin of China,2017,36(4):676-683.

[8] 邓雨晴,张福元,张金池,等.铂钯精矿湿法分离 Bi、Fe 富集贵金属工艺[J].中国有色金属学报,2021,31(1):141-150.
Deng Yuqing, Zhang Yuanfu, Zhang Jinchi, et al. Enrichment of precious metals by hydrometallurgical separation of Bi and Fe from platinum palladium concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2021,31(1):141-150.

[9] 汪云华,吴晓峰,童伟锋.铂族金属催化剂回收技术及发展动态[J].贵金属,2011,32(1):76-81.
Wang Yunhua, Wu Xiaofeng, Tong Weifeng. Present research status and developments on recycling technology of renewable resources of platinum group metals[J]. Precious Metals,2011,32(1):76-81.

[10] 黄昆,陈景,陈奕然,等. 加压碱浸处理-氰化浸出法回收汽车废催化剂中的贵金属[J].中国有色金属学报,2006,16(2):363-369.
Huang Kun, Chen Jing, Chen Yiran, et al. Recovery of precious metals from spent auto-catalysts by method of pressure alkaline treatment-cyanide leaching[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals,2006,16(2):363-369.

[11] 王靖坤,汪云华,赵家春,等. 从铂钯精矿中回收 Au、Pt、Pd[J].湿法冶金,2012,31(1):13-15.
Wang Jingkun, Wang Yunhua, Zhao Jiachun, et al. Recovery of gold, platinum and palladium from platinum-palladium concentrate[J]. Hydrometallurgy of China,2012,31(1):13-15.

[12] 张晓春,范秀凤.王水提金工艺在峪耳崖黄金公司的应用实践[J].黄金,2013,34(11):58-60.
Zhang Xiaochun, Fan Xiufeng. Application of flocculant sedimentation of powdered carbon in cyanide leaching[J]. Gold,2013,34(11):58-60.

[13] Baghalha M, Gh H K, Mortahe H R. Kinetics of platinum extraction from spent reforming catalysts in aquaregia solutions[J]. Hydrometallurgy,2009,95(3/4):247-253.

[14] 赵家春,汪云华,王靖坤,等. 从铂钯精矿中氯化浸出 Au、Pt、Pd[J].贵金属,2012,22(1):45-48.
Zhao Jiachun, Wang Jingkun, Wang Yunhua, et al. Chloridizing leaching of Au, Pt and Pd from platinum and palladium concentrate[J]. Precious Metals,2012,22(1):45-48.

[15] 曹耀华,彭大源,张勤,等.响应曲面法优化废铂催化剂中难溶颗粒 HCl-DCEA 体系回收工艺[J].中国有色冶金,2024,53(3):37-45.
Cao Yaohua, Peng Dayuan, Zhang Qin, et al. Optimization of recovery process for insoluble particles from waste platinum catalyst by HCl-DCEA system using response surface methodology[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(3):37-45.

[16] 戴雨彤,刘建朋,冯绍平,等.从汽车尾气废催化剂浸出液中提取钯试验研究[J].湿法冶金,2023,42(3):252-257.
Dai Yutong, Liu Jianpeng, Feng Shaoping, et al. Extraction of palladium from leaching solution of automobile exhaust waste catalyst[J]. Hydrometallurgy of China,2023,42(3):252-257.

[17] 丁龙,杨建广,闫万鹏,等.从堇青石型失效汽车尾气催化剂中富集铂族金属试验研究[J].湿法冶金,2018,37(5):376-383.
Ding Long, Yang Jianguang, Yan Wanpeng, et al. Enrichment of platinum group metals from cordierite-type automotive exhaust catalyst[J]. Hydrometallurgy of China, 2018,37(5):376-383.

[18] 刘继凯,李奇勇,廖靖华,等.从废 Pd/Al_2O_3 催化剂中湿法回收钯工艺研究进展[J].湿法冶金,2023,42(5):450-457.
Liu Jikai, Li Qiyong, Liao Jinghua, et al. Research progress on hydrometallurgical recovery process of palladium from spent Pd/Al_2O_3 catalyst[J]. Hydrometallurgy of China, 2023,42(5):450-457.

[19] 吴晓峰,汪云华,童伟锋.湿-火联合法从汽车尾气失效催化剂中提取铂族金属新工艺研究[J].贵金属,2010,31(4):24-29.
Wu Xiaofeng, Wang Yunhua, Tong Weifeng. A novel extraction process of PGM from spent automobile catalyst converters by wetfire metallurgical technique combined method[J]. Precious Metals,2010,31(4):24-29.

[20] 张金池，刘贵清，张帆，等. 火法熔炼回收失效重整催化剂中铂的试验研究[J]. 中国资源综合利用，2024，42(6)：26-28.
Zhang Jinchi，Liu Guiqing，Zhang Fan，et al. Experimental study on the recovery of platinum from spent reforming catalysts by pyrometallurgical smelting[J]. China Resources Comprehensive Utilization，2024，42(6)：26-28.

[21] 白向林，杨泉，吴喜龙，等. 溶剂萃取法从含微量贵金属废液中回收铂钯[J]. 有色金属(冶炼部分)，2023(2)：82-85.
Bai Xianglin，Yang Quan，Wu Xilong，et al. Recovery of platinum and palladium from waste solution containing trace precious metals by solvent extraction[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2023(2)：82-85.

[22] 程郅璇，张福元，徐娟，等. 脱铜阳极泥 H_2O_2 高效浸出金铂钯新工艺[J]. 中国有色金属学报，2025，35(3)：929-939.
Cheng Zhixuan，Zhang Yuanfu，Xu Juan，et al. Novel process for highly efficient leaching of Au，Pt and Pd from decoppered anode slime by acide H_2O_2 system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2025，35(3)：929-939.

[23] 刘远，李耀山，李金琼，等. 一种从低浓度铂钯硝酸体系溶液中高效富集铂钯的方法：202010564137.5[P]. 2021-10-12.

[24] 王俊娥，衷水平，张焕然，等. 银阳极泥硝酸浸出液中铂和钯的还原富集[J]. 贵金属，2017，38(3)：1-4.
Wang Jun'e，Zhong Shuiping，Zhang Huanran，et al. A study on the process of recovering platinum-palladium from the nitric acid leaching solution of silver anode[J]. Precious Metals，2017，38(3)：1-4.

[25] 衷水平，王俊娥，吴健辉，等. 从银阳极泥中回收银、铂、钯新工艺[J]. 中国有色冶金，2017，46(4)：44-47.
Zhong Shuiping，Wang june，Wu Jianhui，et al. New process of recovering silver，platinum and palladium from silver anode slime[J]. China Nonferrous Metallurgy，2017，46(4)：44-47.

[26] 周晓明，陈景. 丁二酮肟与 Ni(Ⅱ)、Pd(Ⅱ)、Pt(Ⅱ)的螯合反应及 FT-IR 光谱研究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2001(1)：32-35.
Zhou Xiaoming，Chen Jing. Chelation reaction of diketone with Ni(Ⅱ)，Pd(Ⅱ)，and Pt(Ⅱ) and FT-IR spectral study[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)，2001(1)：32-35.

Recovery of Platinum and Palladium from Silver Anode Slime by Nitric Acid Selective Leaching—Complexation Precipitation Method

YUAN Bin，TENG Niangao，YANG Bo

(*Danxia Smelter，Shenzhen Zhongjin Lingnan Nonfemet Co.，Ltd.，Shaoguan*　512325，*China*)

Abstract：Aiming at the complex process，severe co-precipitation of impurities，and environmental pollution problems existing in the recovery process of platinum and palladium from silver anode slime，extracting platinum and palladium from electrolytic silver anode slime by selective nitric acid leaching—complexation directional precipitation was studied. The test results show that under the optimized conditions of nitric acid concentration of 40%，temperature of 90 ℃，and liquid volume to solid mass ratio of 4∶1，almost all impurities such as silver，copper，and bismuth are completely leached，and the leaching rates of platinum and palladium reach 89.97% and 99.17%，respectively. Subsequently，under conditions of temperature of 70 ℃，pH＝0.5，and dimethylglyoxime addition amount of 2.5 times the theoretical addition amount，directional precipitation is carried out，and the precipitation rates of platinum and palladium are 88.45% and 99.78%，respectively，achieving high selectivity enrichment of platinum and palladium and effectively inhibiting the co-precipitation of impurities such as silver and copper. The expanded test results show that the direct recovery rates of platinum and palladium by this process are 78.32% and 99.05%，respectively，and a concentrate with platinum and palladium contents of 11.43% and 28.56% can be obtained. This method achieves efficient enrichment of platinum and palladium through the high selectivity interaction of the complexing agent，and there is no wastewater discharge，providing a new strategy for the clean and efficient recovery of platinum and palladium resources from silver anode slime.

Key words：electrolytic silver anode slime；nitric acid；leaching；complex precipitation；platinum；palladium；recovery