某尾矿中铂族金属的富集研究①

苏晓晖[1]，许炜光[2,3]，李文娟[2,3]，陆斌刚[1]，罗春华[1]，王淼[2,3]，代启航[2,3]，宋永胜[2,3]，温建康[2,3]，周虎英[1]
（1.金川集团股份有限公司 镍钴共伴生资源开发与综合利用全国重点实验室，甘肃 金昌 737103；2.中国有研科技集团有限公司高品质有色金属绿色特种冶金国家工程研究中心，北京 100088；3.有研资源环境技术研究院（北京）有限公司，北京 100088）

摘　要：金川铜镍矿中伴生铂族金属，浮选铜、镍时一并回收铂族金属，但仍有大量铂族金属损失于尾矿中，尾矿中 Pt、Pd 品位分别为 0.07、0.06 g/t，还含有 Au 0.074 5 g/t，Ag 5.54 g/t。铂、钯主要以铋钯矿、铋碲钯矿、含钯或含铂铋碲矿物赋存，嵌布粒度极细，多被硅酸盐脉石、墨铜矿、磁黄铁矿等包裹。针对该尾矿特性，进行了多次循环铺布溜槽富集回收铂族金属的试验研究，结果表明，经铺布溜槽 5 次循环重选后磨矿-再选，最终尾矿中 Pt、Au 品位分别降至 0.02、0.05 g/t，Pt、Au 回收率分别为 74.48%、53.04%。铺布溜槽重选-摇床重选-弱磁选联合选别结果表明，Pd 主要富集于磁性产品中，Au 主要富集于摇床精矿中，这为该类尾矿中铂族金属高效回收利用提供了可行的技术思路与研发方向。

关键词：铂族金属；细粒级；铺布溜槽；尾矿综合利用；铂；金；重选；弱磁选
中图分类号：TD92　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.018
文章编号：0253-6099(2026)04-0127-04

Enrichment of Platinum-Group Metals in a Certain Tailings

SU Xiaohui[1], XU Weiguang[2,3], LI Wenjuan[2,3], LU Bingang[1], LUO Chunhua[1], WANG Miao[2,3], DAI Qihang[2,3], SONG Yongsheng[2,3], WEN Jiankang[2,3], ZHOU Huying[1]
(1.*State Key Laboratory of Ni & Co Associated Minerals Resources Development and Comprehensive Utilization, Jinchuan Group Co., Ltd., Jinchang* 737103, *Gansu, China*; 2.*National Engineering Research Center for Green Special Metallurgy of High-Quality Nonferrous Metals, China GRINM Group Co., Ltd., Beijing* 100088, *China*; 3.*GRINM Resources and Environment Technology Research Institute (Beijing) Co., Ltd., Beijing* 100088, *China*)

Abstract: Platinum group metals (PGMs) occurs as associated elements in Jinchuan copper-nickel ores and are always recovered together with copper and nickel by flotation. Nevertheless, substantial amounts of PGMs are still lost into tailings, leading to tailings containing 0.07 g/t Pt, 0.06 g/t Pd, alongside 0.074 5 g/t Au and 5.54 g/t Ag. It is found that platinum and palladium mainly exist in the forms of michenerite, merenskyite, and Pd- and Pt-bearing bismuthotelluride minerals, finely disseminated and mostly encapsulated by silicate gangue, valleriite, pyrrhotite and other minerals. With those features taken into consideration, experimental investigations on PGM enrichment were carried out by multi-cycle gravity concentration with fabric-lined sluice. The results show that after five cycles of gravity concentration via fabric-lined sluice followed by grinding and re-concentration, the final tailings are obtained with the grades of Pt and Au decreased to 0.02 g/t and 0.05 g/t at recoveries of 74.48% and 53.04%, respectively. A combined separation process consisting of gravity concentration with fabric-lined sluice, shaking table concentration and low-intensity magnetic separation can lead to Pd primarily enriched into magnetic products, while Pt and Au concentrated in shaking table concentrates. This provides a feasible technical idea and research direction for the efficient recovery and utilization of PGMs in this type of tailings.

Key words: platinum group metals (PGMs); fine grain; fabric-lined sluice; comprehensive utilization of tailings; platinum; gold; gravity concentration; low-intensity magnetic separation

① **收稿日期**：2026-02-25
基金项目：甘肃省联合科研基金重大项目(25JRRC005)
作者简介：苏晓晖(1979—)，男，甘肃武威人，硕士，高级工程师，主要从事选矿技术研究。E-mail:xiaohui.su@jnmc.com
通信作者：李文娟(1983—)，女，山西文水人，正高级工程师，博士研究生导师，主要研究方向为难处理有色金属绿色选冶。E-mail:juanzi88888@126.com

铂族金属广泛应用于汽车尾气催化、电子电气、医疗化工等领域[1],自然开采的铂族金属仅能满足全球铂族金属需求的3/4。全球铂族金属主要分布于南非、俄罗斯等地,其中南非的铂族金属储量占全球储量的90%以上。我国铂族金属储量匮乏[2],针对自身资源禀赋不佳、本土供应能力有限等问题,需整合矿产资源开发、回收再利用等,保障铂族金属供应安全[3]。

甘肃金川某大型铜镍矿床是以镍、铜元素为主的大型多金属硫化镍矿床,不仅铜、镍金属含量丰富,矿石中还含有钴及金、银、铂、钯、锇、铱、钌、铑等稀贵金属元素。尼尔森重力选矿系统的工程化应用实现了部分贵金属的回收,但该工艺仅对铜镍浮选过程中上浮的部分贵金属进行提前富集,对于细粒、微细粒包裹或与硫铁矿物共生的部分贵金属回收效果不明显。存在于尾矿中的未解离的铂族金属常呈细粒级嵌布,回收难度大[4-5]。有研究发现,铂族元素具有亲硫、亲铁的性质,尾矿中的铂钯矿物绝大多数与铁矿物结合[6],因此常用重选法和磁选法对含铂、钯、金、银的矿物进行选别,提高其回收率[7-10]。本文以某铜镍矿浮选尾矿为研究对象,查明尾矿中流失铂族金属的赋存特征,依托重选工艺开展铂族金属富集试验探索,开展前瞻性方向研究,旨在为该类尾矿中铂族金属高效回收利用提供可行技术思路与研发方向。

1 实验

1.1 实验样品

实验样品为甘肃金川某铜镍硫化矿浮选尾矿,其化学成分分析结果见表1。该尾矿样品中Pt和Pd品位分别为0.07 g/t和0.06 g/t,含量均很低,其他铂族元素含量均低于检测线。金品位为0.074 5 g/t,含量也很低。主要金属元素Cu和Ni含量分别为0.26%和0.19%。

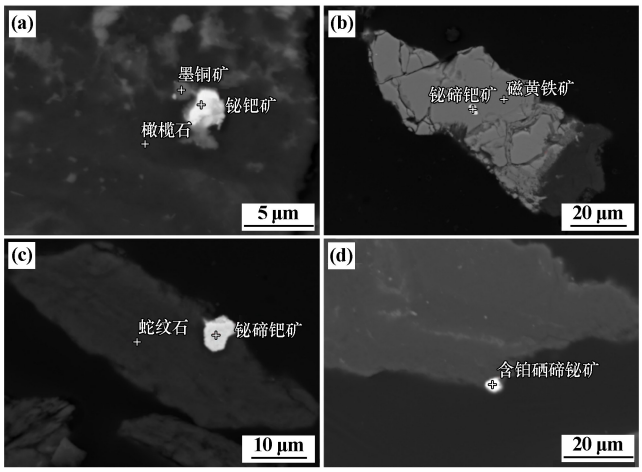
表1 实验样品化学成分分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical composition of experimental samples %

Pt[1)]	Pd[1)]	Au[1)]	Ag[1)]	Ru[1)]	Rh[1)]	Os[1)]	Ir[1)]	Ni	Cu
0.07	0.06	0.074 5	5.54	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	0.19	0.26
Fe	S	As	Co	Mg	Ca	K	Al	Si	
10.33	1.94	0.001 4	0.013	16.72	2.33	0.35	1.88	14.92	

1) 单位为g/t。

利用扫描电镜和工艺矿物学自动分析仪对实验样品进行了工艺矿物学分析,发现含铂钯矿物主要为铋钯矿、铋碲钯矿、含钯或含铂铋碲矿物等,包裹在硅酸盐脉石、墨铜矿、磁黄铁矿等矿物中,其粒度均小于0.01 mm,部分为纳米级。实验样品含铂钯矿物嵌布特征见图1。由图1可见,该尾矿中主要为微细粒难选的铂钯碲铋化合物,且粒度细,绝大部分包裹在硅酸盐脉石矿物中,少量包裹在磁黄铁矿中。



(a) 铋钯矿和墨铜矿交代共生,包裹在橄榄石中;(b) 铋碲钯矿包裹在磁黄铁矿中;(c) 铋碲钯矿包裹在蛇纹石中;(d) 含铂硒碲铋矿与硅酸盐脉石连生

图1 实验样品含铂钯矿物嵌布特征

Fig. 1 Dissemination characteristics of Pt-Pd-bearing minerals in experimental samples

1.2 实验方法

现场尾矿产生量较大,考虑经济成本问题后,采用铺布溜槽对现场尾矿进行初步重选。每次取现场尾矿矿浆50 L,加入搅拌桶后调整浓度至15%,给矿速度调整至35 L/min,循环给矿10 min后停止给矿,冲出精矿产品,尾矿再次回到搅拌桶进行下一次搅拌和选别,经过多次循环选别,得到多个精矿产品。铺布溜槽选矿流程如图2所示。

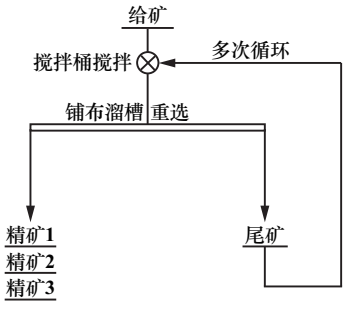


图2 铺布溜槽选矿流程

Fig. 2 Flowchart of separation via fabric-lined sluice

2 结果与讨论

2.1 铺布溜槽循环选别

对该浮选尾矿进行5次循环铺布溜槽重选,对比了尾矿直接重选和尾矿先磨矿至-0.044 mm粒级占

85%后再重选的试验结果,详见表 2。磨矿-重选流程如图 3 所示。表 2 结果显示,多次循环铺布溜槽对铂族金属富集效果显著。直接铺布溜槽重选效果优于磨后再选,这可能是磨矿后,物料太细,铂族金属矿物与脉石矿物密度差异难以拉开,导致在铺布溜槽重选过程中含有铂族金属的矿石颗粒难以停留在溜槽布面上。不磨条件下,经过 5 次循环铺布溜槽重选,可以获得 Pt 回收率 64.95%、Pd 回收率 32.69%的铂族金属粗精矿。

表 2　铺布溜槽多次循环重选试验结果

Table 2　Results of multi-cycle gravity concentration via fabric-lined sluice

试验条件	产品名称	产率/%	品位/(g·t^{-1})				回收率/%			
			Au	Ag	Pd	Pt	Au	Ag	Pd	Pt
不磨	精矿 1	9.69	0.16	9.83	0.09	0.34	21.67	17.22	15.07	49.40
	精矿 2	4.18	0.14	6.44	0.09	0.07	8.18	4.87	6.50	4.39
	精矿 3	3.90	0.14	6.01	0.08	0.10	7.63	4.24	5.39	5.85
	精矿 4	3.19	0.14	6.43	0.08	0.07	6.24	3.71	4.41	3.35
	精矿 5	1.09	0.12	6.75	0.07	0.12	1.83	1.33	1.32	1.96
	尾矿	77.95	0.05	4.87	0.05	0.03	54.45	68.63	67.31	35.05
	给矿	100.00	0.07	5.53	0.06	0.07	100.00	100.00	100.00	100.00
磨矿	精矿 1	6.18	0.23	10.21	0.06	0.25	19.21	11.48	6.90	18.05
	精矿 2	4.77	0.18	7.45	0.06	0.11	11.60	6.46	5.42	5.97
	精矿 3	3.79	0.13	6.24	0.03	0.07	6.66	4.30	2.49	3.30
	精矿 4	3.23	0.14	6.21	0.07	0.05	6.11	3.65	4.60	2.10
	精矿 5	0.92	0.13	5.49	0.08	0.09	1.62	0.92	1.40	0.96
	尾矿	81.11	0.05	4.96	0.05	0.07	54.80	73.19	79.19	69.62
	给矿	100.00	0.07	5.50	0.05	0.08	100.00	100.00	100.00	100.00

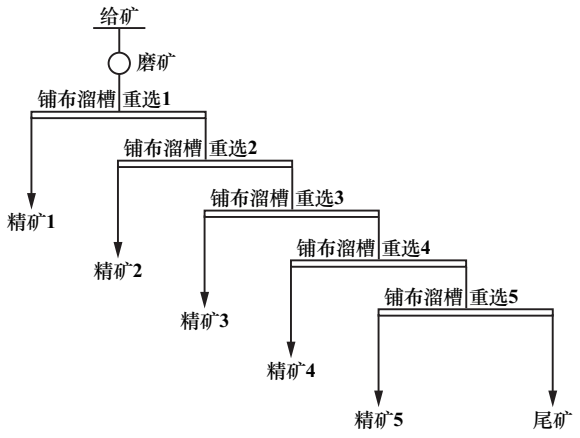


图 3　磨矿-重选流程

Fig. 3　Flowchart of grinding - gravity concentration

为了进一步回收铂族金属,对铺布溜槽 5 次循环重选后的尾矿进行磨矿至-0.044 mm 粒级占 85%后再次进行 3 次铺布溜槽重选,试验流程见图 4,结果见表 3。由表 3 可以发现,铺布溜槽尾矿磨矿-再选仍能进一步富集铂族金属,尤其是 Pt 和 Au。经过磨矿-再选,最终尾矿 Pt、Au 品位分别为 0.02、0.05 g/t,Pt、Au 回收率分别为 74.48%、53.04%,相较于不磨矿 5 次铺布溜槽循环重选,尾矿中 Au 损失率降低了 7.49 百分点,Pt 损失率降低了 9.53 百分点。

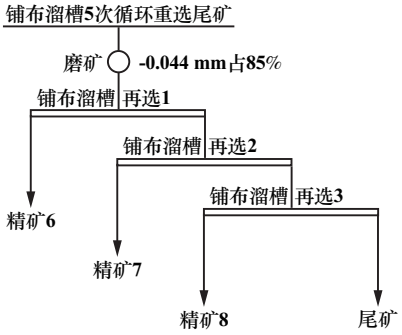


图 4　磨矿-再选流程

Fig. 4　Flowchart of grinding and re-concentration

表 3　磨矿-再选试验结果

Table 3　Results of grinding and re-concentration

产品名称	产率/%	品位/(g·t^{-1})				回收率/%			
		Au	Ag	Pd	Pt	Au	Ag	Pd	Pt
精矿 6	1.18	0.18	8.71	0.08	0.23	2.97	1.86	1.63	4.07
精矿 7	1.30	0.12	8.12	0.07	0.16	2.18	1.91	1.57	3.12
精矿 8	1.12	0.15	7.75	0.07	0.14	2.34	1.56	1.35	2.34
尾矿	74.35	0.05	4.71	0.05	0.02	46.96	63.30	62.76	25.52
给矿	77.95	0.05	4.87	0.05	0.03	54.45	68.63	67.31	35.05

2.2　铺布溜槽重选-摇床重选-弱磁选联合选别

由铺布溜槽重选结果可以发现,经过一次选别得到的精矿 1 品位和回收率最高,大部分易回收的铂族金属都富集于此。因此选择将该浮选尾矿先进行一次铺布溜槽重选,再将得到的铺布溜槽重选精矿进行摇床重选和弱磁选进一步富集,探索铂族金属在各选别中的富集走向,试验流程见图 5,试验结果见表 4。结果显示,摇床选别主要富集了 Au,精矿 1、精矿 2、尾矿 1 中 Au 品位分别为 0.48、0.39、0.66 g/t;摇床精矿经弱磁选后,Pd 主要富集于磁选精矿中,精矿 1 和精矿 2 中 Pd 品位分别为 0.22、0.24 g/t。

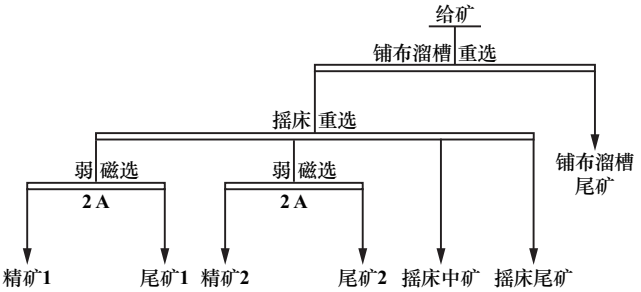


图 5　铺布溜槽重选-摇床重选-弱磁选联合流程

Fig. 5　Flowchart of gravity concentration with fabric-lined sluice - shaking table concentration - LIMS

表4 铺布溜槽重选-摇床重选-弱磁选联合流程试验结果

Table 4 Test results of gravity concentration with fabric-lined sluice - shaking table concentration - LIMS

产品名称	产率/%	品位/(g·t^{-1})				回收率/%			
		Au	Ag	Pd	Pt	Au	Ag	Pd	Pt
精矿1	0.26	0.48	6.50	0.22	0.16	1.44	0.27	0.80	0.64
精矿2	0.29	0.39	2.60	0.24	0.11	1.29	0.12	0.96	0.49
尾矿1	0.23	0.66	5.30	0.09	0.34	1.73	0.19	0.29	1.19
尾矿2	0.42	0.12	12.90	0.18	0.12	0.55	0.81	1.00	0.73
摇床中矿	4.00	0.16	10.00	0.10	0.14	7.29	6.23	5.52	8.53
摇床尾矿	6.26	0.10	12.80	0.07	0.08	7.12	12.47	6.04	7.62
铺布溜槽尾矿	88.54	0.08	5.80	0.07	0.06	80.58	79.91	85.39	80.80
给矿	100.00	0.09	6.43	0.07	0.07	100.00	100.00	100.00	100.00

铺布溜槽重选-摇床重选-弱磁选联合流程探索试验结果可为该类尾矿中铂族金属高效回收利用提供可行的技术思路与研发方向。

3 结论

1）某铜镍矿浮选尾矿中Pt、Pd品位分别为0.07、0.06 g/t，还含有Au 0.074 5 g/t、Ag 5.54 g/t。工艺矿物学研究结果显示，该浮选尾矿中铂钯矿物主要为铋钯矿、铋碲钯矿、含钯或含铂铋碲矿物等，多呈微细粒级且被包裹于硅酸盐脉石和墨铜矿、磁黄铁矿等矿物中。

2）多次循环铺布溜槽重选能有效富集铂族金属。经铺布溜槽5次循环重选后磨矿-再选，可以获得Pt回收率74.48%、Au回收率53.04%的铂族金属粗精矿。

3）铺布溜槽重选-摇床重选-弱磁选联合流程选别结果表明，Pd主要富集于磁性产品中，Au主要富集于摇床精矿中，为该类尾矿中铂族金属高效回收利用提供了可行的技术思路与研发方向。

参考文献(References)：

[1] 邢正杰，常雨乐，吴王平. 铂族金属的应用、供需和循环利用[J]. 贵金属，2023，44(增刊1)：40-45.
Xing Zhengjie，Chang Yule，Wu Wangping. Applications，supply，demand and recycling of platinum group metals[J]. Precious Metals，2023，44(S1)：40-45.

[2] 赵新迪，王芳，刘贵清，等. 稀贵多金属物料中铂、钯、金的分离研究现状[J]. 中国资源综合利用，2025，43(11)：116-119.
Zhao Xindi，Wang Fang，Liu Guiqing，et al. Research status of the separation of platinum，palladium，and gold from rare and precious multi-metal residues[J]. China Resources Comprehensive Utilization，2025，43(11)：116-119.

[3] 黄胜忠，张灿. 中国铂族金属资源安全：建立产业循环型战略储备机制的思考与启示[J]. 贵金属，2024，45(增刊1)：86-96.
Huang Shengzhong，Zhang Can. China's platinum group metals resource security：reflections and insights on building a circular industry strategic reserve mechanism[J]. Precious Metals，2024，45(S1)：86-96.

[4] 吉强，李光胜，朱幸福，等. 基于工艺矿物学分析提高金浮选尾矿选矿回收率的研究[J]. 贵金属，2023，44(3)：31-34.
Ji Qiang，Li Guangsheng，Zhu Xingfu，et al. Study on improving floatation tailings of a gold mineral recovery based on process mineralogy analysis[J]. Precious Metals，2023，44(3)：31-34.

[5] 杨玉珠，简胜，张旭东，等. 金宝山铂钯矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程，2011，31(5)：39-42.
Yang Yuzhu，Jian Sheng，Zhang Xudong，et al. Study on mineral processing technique of platinum-palladium ore in Jinbaoshan area[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2011，31(5)：39-42.

[6] 韩伟. 回收云南某尾矿贵金属铂钯的试验研究[J]. 矿冶，2012，21(4)：30-32.
Han Wei. Experimental study on recycling Pt and Pd from tailings in Yunnan province[J]. Mining and Metallurgy，2012，21(4)：30-32.

[7] 邹坚坚，胡真，王成行，等. 南非低品位铂钯尾矿选矿试验研究[J]. 贵金属，2022，43(3)：21-26.
Zou Jianjian，Hu Zhen，Wang Chenghang，et al. Study on the mineral processing experiment of a low-grade platinum palladium tailings in South Africa[J]. Precious Metals，2022，43(3)：21-26.

[8] 丁亚文，方棋，赵国锋. 津巴布韦某铂族金属矿选矿技术研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2024(7)：110-118.
Ding Yawen，Fang Qi，Zhao Guofeng. Study on recovery of precious metals from PGMs polymetallic ore in Zimbabwe[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2024(7)：110-118.

[9] 韩敏. 某浸染型低硫低镍铂钯矿石选矿试验研究[J]. 黄金，2012，33(9)：40-44.
Han Min. Experimental study on disseminated platinum-palladium ore with low sulfur and nickel content[J]. Gold，2012，33(9)：40-44.

[10] 吴维新. 南非某铂族多金属矿综合回收选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2024(10)：81-87.
WU Weixin. Experimental study on comprehensive recovery and beneficiation of a platinum group polymetallic ore in South Africa[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)，2024(10)：81-87.

引用本文：苏晓晖，许炜光，李文娟，等. 某尾矿中铂族金属的富集研究[J]. 矿冶工程，2026，46(4)：127-130.
Su Xiaohui，Xu Weiguang，Li Wenjuan，et al. Enrichment of platinum-group metals in a certain tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2026，46(4)：127-130.