

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.10.010

南非某铂族多金属矿综合回收选矿试验研究

吴维新^{1,2}

(1. 低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 厦门 361101;

2. 厦门紫金矿冶技术有限公司, 福建 厦门 361101)

摘 要: 南非某铂族多金属矿中主要金属品位分别为 Pt 1.923 g/t, Pd 0.986 g/t, Au 0.276 g/t, Rh 0.113 g/t, Ru 0.316 g/t, Ir 0.047 g/t, 另含 Cu 0.071%, Ni 0.180%, 含 Cr_2O_3 仅 0.58%, 主要脉石成分 SiO_2 、 MgO 、 Al_2O_3 和 CaO 含量分别为 52.59%、22.4%、5.06% 和 4.27%。矿石中硫化物合计 0.94%, 主要是磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿, 其次黄铁矿, 微量辉铜矿、闪锌矿等; 硅酸盐矿物合计 97.91%, 以古铜辉石为主, 其次为次透辉石, 少量的斜长石、斜黧帘石、方柱石、金云母、绿泥石等。铂族金属主要赋存在硫铂矿、砷铂矿、自然铂、硫镍钼铂矿、自然金、银金矿等矿物中, 铜、镍金属主要赋存在黄铜矿和镍黄铁矿中。矿石在磨矿细度为 $-74\ \mu\text{m}$ 占 55% 的条件下, 铂钼铑矿物单体解离度达 96.6%, 裸露金及硫化物包裹金占比为 69.21% 和 20.67%。为综合回收铂族金属及铜镍等有价值元素, 进行了选矿试验研究。结果表明, 在“一粗两扫三精”工艺流程下, 以碳酸钠、CMC 和硫酸铜为调整剂, 戊基黄药为捕收剂, 松醇油为起泡剂, 可获得精矿含 Pt 57.562 g/t, Pd 34.836 g/t, Au 5.201 g/t, Rh 3.266 g/t, Cu 2.270%, Ni 3.830%, 回收率分别为 Pt 90.57%、Pb 93.80%、Au 51.63%、Rh 88.13%、Cu 87.03%、Ni 63.16%。精矿中主要杂质成分为 SiO_2 42.28%、 MgO 19.82%、 Al_2O_3 1.68%、 CaO 1.89% 和 Fe 18.79%。本研究可为同类矿产资源的开发利用提供技术参考。

关键词: 铂族多金属矿; 镍黄铁矿; 黄铜矿; 磁黄铁矿; 浮选

中图分类号: TD953

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2024)10-0081-07

Experimental Study on Comprehensive Recovery and Beneficiation of a Platinum Group Polymetallic Ore in South Africa

WU Weixin^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Ores,

Xiamen 361101, Fujian, China;

2. Xiamen Zijin Mining & Metallurgy Technology Co., Ltd., Xiamen 361101, Fujian, China)

Abstract: The main metals contents in a platinum group polymetallic ore in South Africa are Pt 1.923 g/t, Pd 0.986 g/t, Au 0.276 g/t, Rh 0.113g/t, Ru 0.316 g/t, Ir 0.047 g/t, Cu 0.071% and Ni 0.180%. The content of Cr_2O_3 is only 0.58%, and the contents of main gangue components SiO_2 , MgO , Al_2O_3 and CaO are 52.59%, 22.4%, 5.06% and 4.27% respectively. The total sulfide content in the ore is 0.94%, presenting mainly in pyrrhotite, nickelpyrite, chalcopyrite, followed by pyrite, trace chalcocite, sphalerite, and so on. The total amount of silicate minerals is 97.91%, mainly bronze-pyroxene, followed by secondary diopside, a small amount of plagioclase, plagiozoisite, quadrigalite, phlogopite, chlorite, and so on. Platinum group metals are mainly found in sulfide platinite, arsenic platinite, natural platinum, sulfide nickel palladium platinite, natural gold, silver gold and other minerals, while copper and nickel metals are mainly found in chalcopyrite and nickel pyrite. Under the condition of grinding fineness of $-74\ \mu\text{m}$ accounting for 55%, the liberation degree of PPD rhodium minerals is 96.6%, the proportion of exposed gold and sulfide wrapped gold are 69.21% and 20.67% respectively. In order to comprehensively recover the platinum group metals and valuable elements such as copper and nickel, beneficiation experiments were carried out. The results showed that under the process of

收稿日期: 2024-02-19

基金项目: 福建省对外合作项目(2021H01012)

作者简介: 吴维新(1993—), 福建龙岩人, 硕士, 选矿工程师, 主要从事矿物加工技术研究工作。

“one roughing, two scavengings and three cleanings”, with sodium carbonate, CMC and copper sulfate as regulators, amyl xanthoxanthate as collector, and terpeneol oil as frother, the concentrate obtained contained Pt 57.562 g/t, Pd 34.836 g/t, Au 5.201 g/t, Rh 3.266 g/t, Cu 2.270% and Ni 3.830%. The metal recoveries were Pt 90.57%, Pb 93.80%, Au 51.63%, Rh 88.13%, Cu 87.03% and Ni 63.16%. The main impurities in the concentrate were SiO₂ 42.28%, MgO 19.82%, Al₂O₃ 1.68%, CaO 1.89% and Fe 18.79% respectively. This study can provide technical reference for the exploitation and utilization of similar mineral resources.

Key words: platinum group polymetallic ore; nickel pyrite; chalcopyrite; pyrrhotite; flotation

铂族金属矿常与铜、镍和铁金属矿共生,铂族金属作为贵金属,广泛应用于化学、电子和汽车等工业领域,我国已探明的铂族金属资源约占世界的 3%,资源相对稀缺,主要依赖进口^[1-4]。因此,针对国外铂族金属矿开展选矿研究工作具有现实意义。

南非某铂族金属矿中含铂、钯、金、铑、钌和铱等贵金属,另含铜、镍等可回收金属,铂族金属矿物主要与镍黄铁矿、磁黄铁矿和黄铜矿共生,铂族金属矿物包含硫铂矿、砷铂矿、自然铂、硫镍钯铂矿、自然金、银金矿等。针对此类矿石,采用浮选的方法回收铂族金属及其共生资源,获得了较好的试验指标,对

该类矿石的开发和综合利用具有一定参考意义。

1 矿石性质

1.1 矿石主要化学成分分析

对矿石进行了主要化学成分分析,分析结果见表 1。由表 1 可知,矿石中含 Pt 1.923 g/t、Pd 0.986 g/t、Au 0.276 g/t、Rh 0.113 g/t、Ru 0.316 g/t、Ir 0.047 g/t,另含 Cu 0.071%、Ni 0.180%,含 Cr₂O₃ 仅 0.58%。主要杂质 SiO₂、MgO、Al₂O₃ 和 CaO 含量分别为 52.59%、22.4%、5.06%和 4.27%。

表 1 矿石主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition analysis of the ore /%

组分	Pt*	Pd*	Au*	Rh*	4E*	Ru*	Ir*	Ag*	Cu	Ni
含量	1.923	0.986	0.276	0.113	3.298	0.316	0.047	<0.2	0.071	0.18
组分	S	SiO ₂	Fe	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cr ₂ O ₃	—
含量	0.35	52.59	9.43	5.06	22.4	4.27	0.58	0.1	0.58	—

注: * 单位为 g/t,下同。

1.2 矿石矿物组成及相对含量

矿石主要矿物组成及含量分析结果见表 2。由表 2 可知,矿石中硫化物含量为 0.94%,主要是磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿,其次黄铁矿,微量辉铜矿、闪锌矿等;硅酸盐矿物含量为 97.91%,以古铜辉石

为主,其次为次透辉石,少量的斜长石、斜黝帘石、方柱石、金云母、绿泥石等;铂族金属矿物种类繁多,以硫铂矿、砷铂矿、自然铂、硫镍钯铂矿、自然金、银金矿为主。

表 2 矿石矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content of the ore /%

矿物名称	含量	矿物名称	含量	矿物名称	含量
磁黄铁矿	0.40	铬铁矿	0.71	金云母	1.01
镍黄铁矿	0.29	白云石	0.04	绿泥石	0.71
黄铁矿	0.05	方解石	0.02	石英	0.69
黄铜矿	0.20	古铜辉石	77.52	白云母	0.05
辉铜矿	<0.01	次透辉石	10.87	钾长石	0.03
闪锌矿	<0.01	斜长石	2.84	硅灰石	0.03
钛铁矿	<0.01	斜黝帘石	2.22	金红石	0.02
磁铁矿	0.05	方柱石	1.94	氯磷灰石	0.04
褐铁矿	0.27	硫铂矿、砷铂矿、自然铂、硫镍钯铂矿、自然金、银金矿等	<0.01		

1.3 矿石中金的化学物相分析

对矿石中金的化学物相进行了分析,分析结果

见表 3。由表 3 可知,裸露金及硫化物包裹金的占比分别为 69.21%和 20.67%。

表 3 矿石中金的化学物相分析结果

Table 3 Results of gold chemical phase analysis of the ore /%

金相别	裸露金	碳酸盐及氧化物包裹金	硫化物包裹金	硅酸盐及其他包裹金	合计
含量*	0.19	0.02	0.058	0.007	0.28
占有率	69.21	7.77	20.67	2.36	100.0

1.4 矿石粒度组成与解离分析

在矿石磨矿细度为-74 μm 占 55%的条件下,进行了矿石粒度筛析与解离情况分析,分析结果见表 4、5。由表 4 可以看出,铂钯金铑在各粒级分布不

均,但在-25 μm 粒级有一定的富集。由表 5 可以看出,矿石中铂钯铑矿物的单体解离度和富连生体分别为 96.60%和 0.84%,贫连生体仅占 1.07%,未解离的矿物主要与硫化物连生。

表 4 矿石粒度组成与金属分布

Table 4 Particle size composition and metal distribution of the ore /%

粒级/mm	产率	品位				金属分布			
		Pt*	Pd*	Au*	Rh*	Pt*	Pd*	Au*	Rh*
+0.15	12.31	0.486	0.141	0.208	0.011	3.29	1.87	9.56	1.68
-0.15+0.10	14.67	0.473	0.145	0.186	0.013	3.81	2.29	10.18	2.37
-0.10+0.074	18.73	0.757	0.510	0.243	0.036	7.79	10.27	16.99	8.37
-0.074+0.045	23.25	1.617	0.869	0.210	0.090	20.67	21.73	18.22	25.97
-0.045+0.038	5.63	2.286	1.400	0.260	0.121	7.08	8.48	5.47	8.46
-0.038+0.025	5.30	2.819	1.669	0.260	0.129	8.22	9.52	5.15	8.49
-0.025	20.10	4.446	2.120	0.459	0.179	49.14	45.84	34.44	44.66
合计	100.0	1.819	0.930	0.268	0.081	100.0	100.0	100.0	100.0

表 5 矿石铂钯铑矿物的粒度及解离情况

Table 5 Particle size and liberation degree of platinum,palladium and rhodium minerals in the ore /%

解离情况	含量	连生				粒度/μm			
		与硫化物	与脉石	0~10	10~20	20~38	38~75	75~150	150~200
$x=100$	96.60	—	—	0.96	11.72	41.41	33.47	7.38	1.66
$80\leq x<100$	0.84	0.57	0.27	0.00	0.02	0.38	0.38	0.06	0.00
$50\leq x<80$	1.49	1.12	0.37	0.00	0.10	0.66	0.55	0.18	0.00
$x<50$	1.07	0.62	0.45	0.26	0.43	0.31	0.07	0.00	0.00
合计	100.0	2.31	1.09	1.22	12.27	42.76	34.47	7.62	1.66

2 选矿试验与结果讨论

矿物学研究表明,铂族金属主要以硫化矿物及伴生硫化矿物的形式存在,铜和镍主要以硫化矿物的形式存在,可通过浮选富集综合回收铂族金属及铜镍金属。条件试验采用两次粗选流程,调整剂碳酸钠和 CMC 仅在第一次粗选前添加,调整剂硫酸铜、捕收剂和起泡剂分段添加,第二次粗选药剂用量均为第一次粗选的 1/2,目的是通过浮选方法综合回收有价金属。

2.1 磨矿细度试验

磨矿细度是有用矿物与脉石矿物能否有效分离

的关键因素。磨矿细度过粗会使矿物解离效果差,磨矿细度过细,易造成过磨,会影响选矿指标、增加生产成本。选取磨矿细度为-74 μm 占 35%、45%、55%、65%和 75%时进行了浮选试验,考察不同磨矿细度对选矿指标的影响,试验结果见图 1。

由图 1 可以看出,磨矿细度从-74 μm 占 35%提升至 55%,铂钯金铑回收率逐渐提升,当磨矿细度由-74 μm 占 55%继续提升时,铂钯金铑回收率开始逐渐下降。随着磨矿细度的增加,精矿品位会有所降低。铜、镍金属的回收率受磨矿细度的影响与铂族金属的趋势相当。后续试验将采用磨矿细度为-74 μm 占 55%。

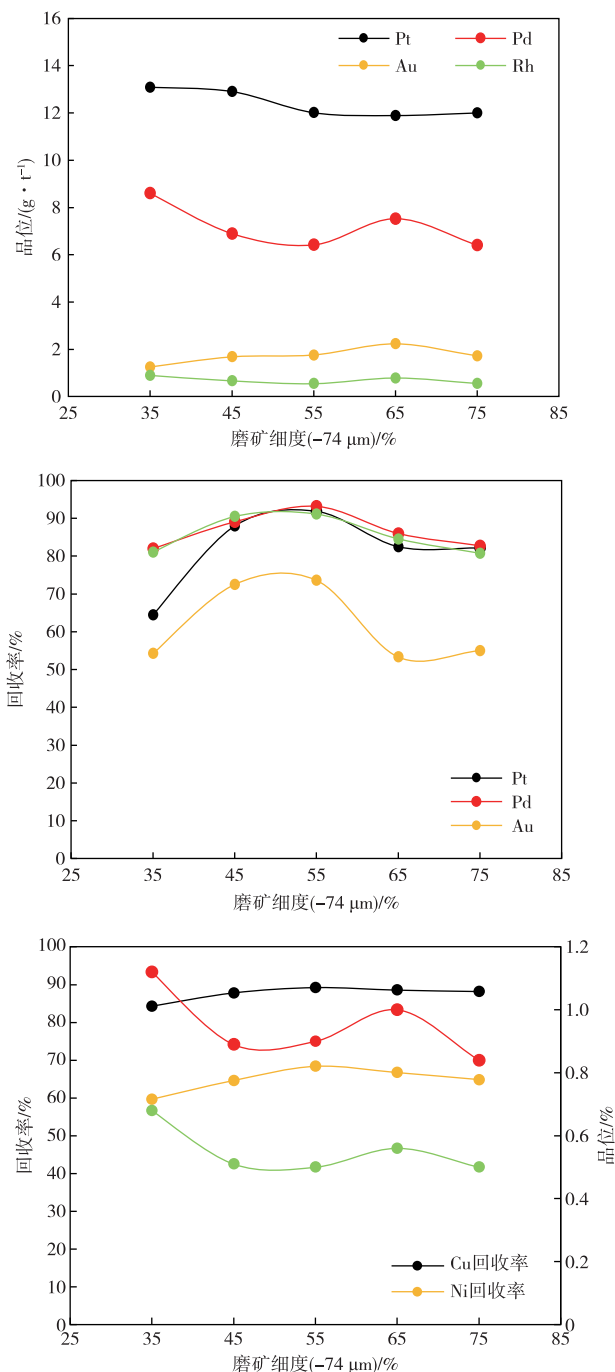


图 1 磨矿细度对铂族金属及铜镍选别指标的影响
Fig. 1 Effects of grinding fineness on the separation indexes of platinum group metals and Cu-Ni

2.2 调整剂试验

2.2.1 碳酸钠用量试验

碳酸钠是一种重要的碱性调整剂,可以稳定 pH 值的范围;碳酸钠解离出来的碳酸根可以消除矿浆中的钙镁离子,改善浮选过程中的选择性;碳酸钠还是良好的分散剂,能防止矿浆中微细粒颗粒的凝聚,提高浮选的选择性。碳酸钠用量试验结果见图 2。由图 2 可以看出,不添加碳酸钠,精矿品位相对较低,随着碳酸用量从 0 添加至 500 g/t,精矿品位逐

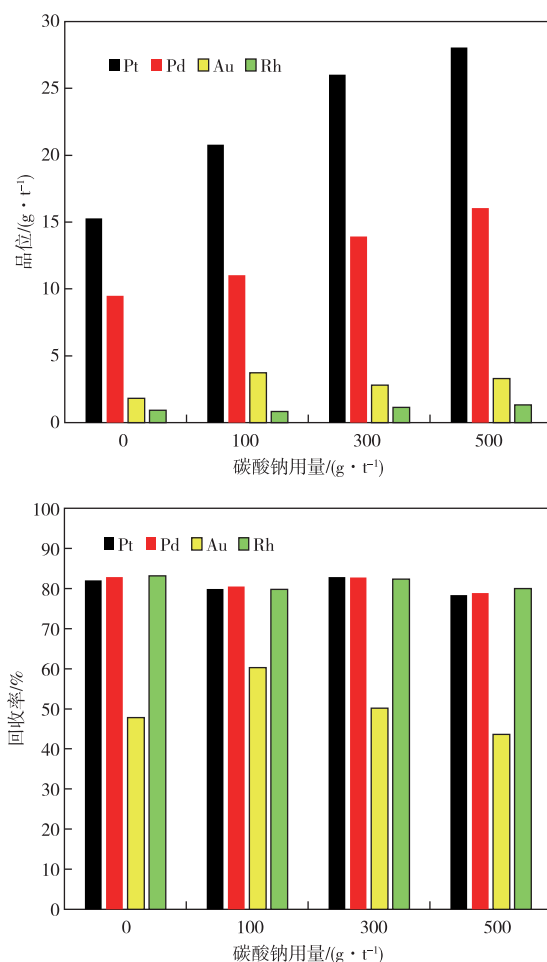


图 2 碳酸钠用量对铂族金属选别指标的影响
Fig. 2 Effects of sodium carbonate dosage on platinum group metals sorting indexes

渐增加,当碳酸钠用量添加至 300 g/t 后,继续添加碳酸钠会对精矿回收率造成不良影响。因此,确定后续试验添加碳酸钠 300 g/t。

2.2.2 CMC 用量试验

大多数铂族金属选矿厂都使用抑制剂以降低矿石中存在的天然可浮性脉石矿物的可浮性,应用较多的两种多糖抑制剂为古尔胶和羧甲基纤维素(CMC)^[5-6]。本次试验开展了 CMC 用量试验,考察 CMC 的用量对铂族金属回收的影响,试验结果见图 3。由图 3 可以看出,CMC 用量从 0 添加至 100 g/t 的过程中,精矿金属回收率增加明显,同时精矿品位变化不大,随着 CMC 用量进一步增加至 200 g/t,精矿金属回收率开始下降。因此,后续试验确定 CMC 用量采用 100 g/t。

2.2.3 硫酸铜用量试验

由表 2 可以看出,矿石中待回收贵金属的矿物主要为硫化矿或伴生硫化矿,调整剂硫酸铜的适当添加有利于提升选矿指标^[5],硫酸铜用量试验结果见图 4。

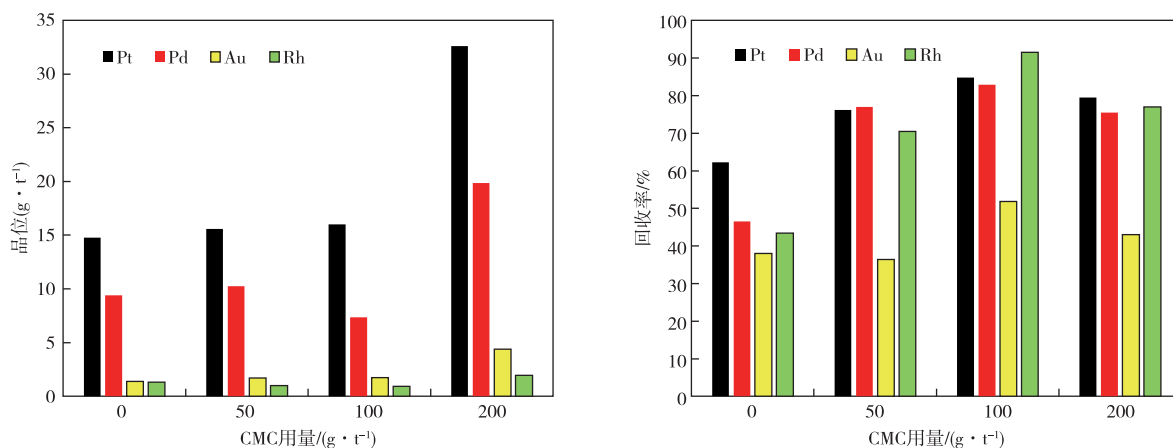


图 3 CMC 用量对铂族金属选别指标的影响

Fig. 3 Effects of CMC dosage on platinum group metals selection indexes

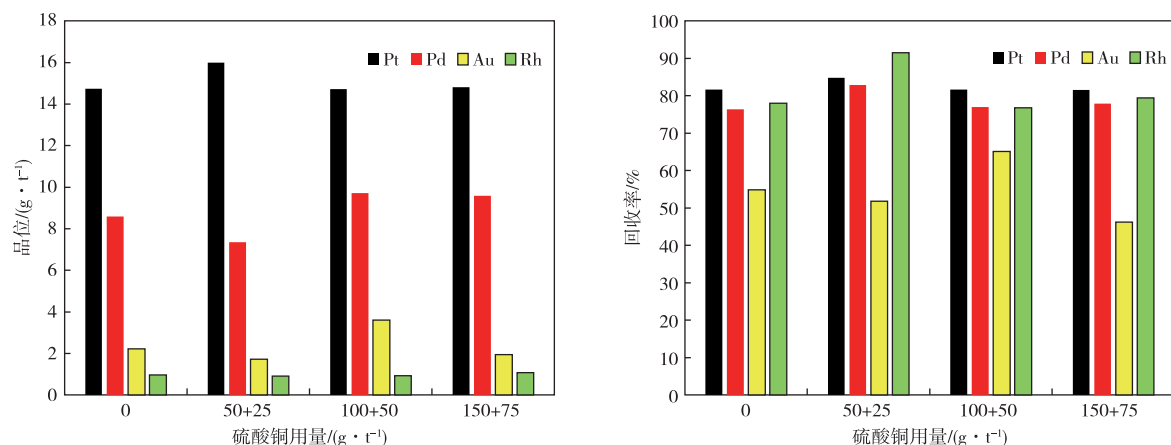


图 4 硫酸铜用量对铂族金属选别指标的影响

Fig. 4 Effects of copper sulfate dosage on platinum group metals sorting indexes

由图 4 可以看出,适当添加硫酸铜有利于 Pt、Pd、Au、Rh 回收率及品位的提升,过量的硫酸铜会影响金属回收,当硫酸铜用量为(50+25) g/t 时,选矿指标最优。因此,确认硫酸铜用量为(50+25) g/t 开展后续试验。

2.3 捕收剂种类试验

铂族金属紧密与硫化矿物连生,在整个矿脉中

硫化矿物和脉石矿物的组成一般都是固定的,所用的主要捕收剂是黄药,辅助捕收剂是黑药^[5]。开展了采用一种捕收剂或几种捕收剂混合使用对铂族金属选别指标的影响,捕收剂分别为丁基黄药、戊基黄药、丁铵黑药及丁基黄药+丁铵黑药互配,捕收剂种类及用量试验结果见图 5。

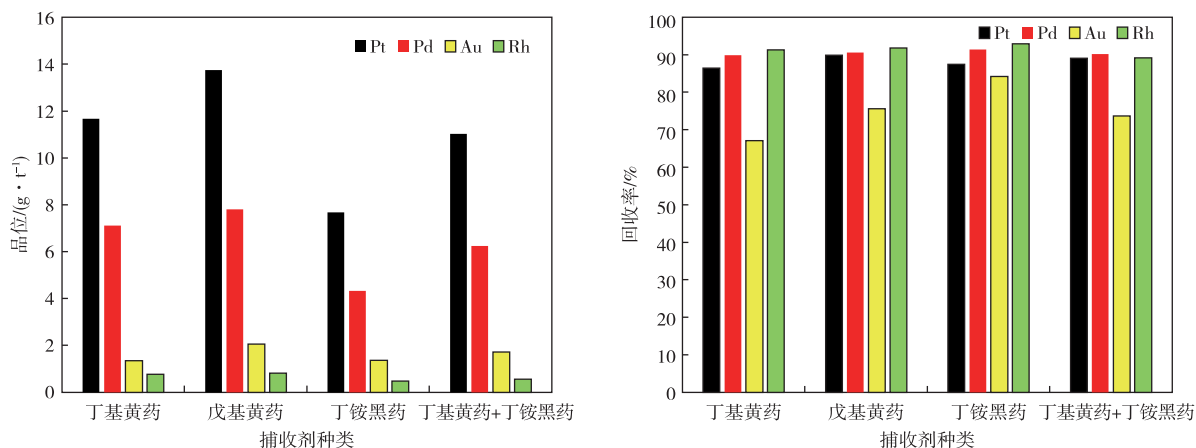


图 5 捕收剂种类对铂族金属选别指标的影响

Fig. 5 Effects of collector type on platinum group metals separation indexes

由图 5 可以看出,采用戊基黄药作捕收剂,铂族金属回收率和精矿品位高,采用丁铵黑药作捕收剂,金属回收率跟戊基黄药相当,但精矿品位低,丁基黄药及丁基黄药与丁铵黑药互配指标较低。综合考虑,采用戊基黄药作浮选回收铂族金属的捕收剂。

2.4 浮选闭路试验

基于条件试验,开展了浮选回收铂族金属的闭

路试验,试验流程见图 6,试验结果见表 6。从表 6 可以看出,采用“一粗两扫三精”工艺流程获得了精矿含 Pt 57.562 g/t、Pd 34.836 g/t、Au 5.201 g/t、Rh 3.266 g/t、Cu 2.270%、Ni 3.830%,回收率分别为 Pt 90.57%、Pb 93.80%、Au 51.63%、Rh 88.13%、Cu 87.03%、Ni 63.16% 的选别指标。

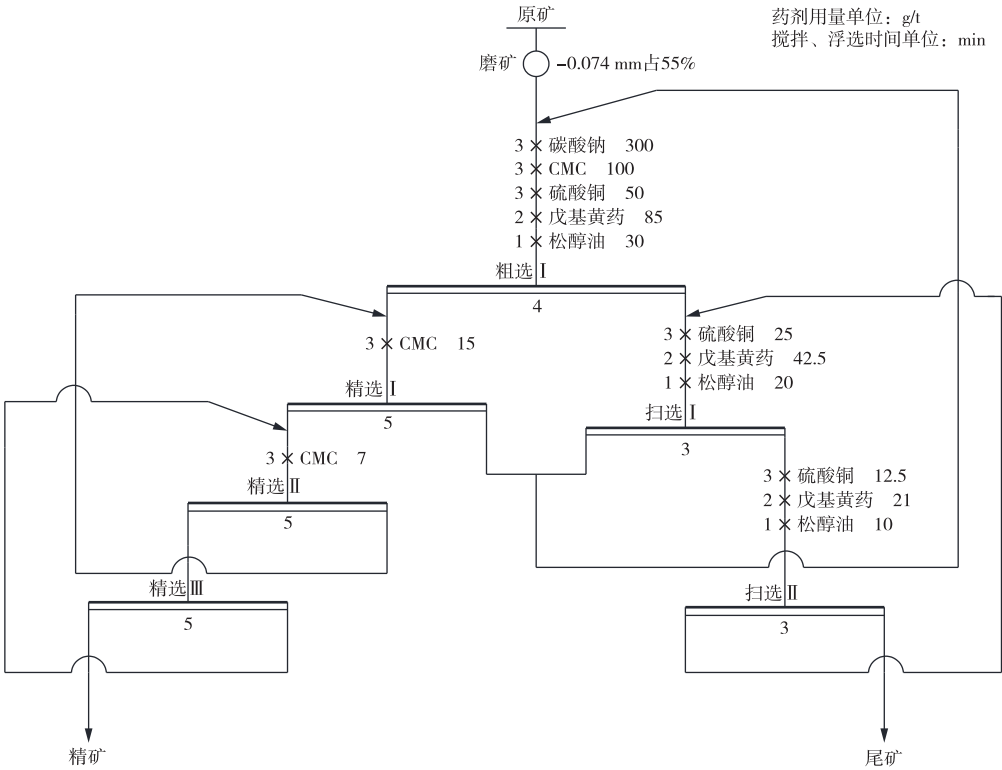


图 6 浮选闭路试验流程

Fig. 6 Flowsheet of the flotation locked-cycle tests

表 6 浮选闭路试验结果

Table 6 Results of the flotation locked-cycle tests

产品名称	产率	品位						回收率					
		Pt*	Pd*	Au*	Rh*	Cu	Ni	Pt	Pd	Au	Rh	Cu	Ni
精矿	2.87	57.562	34.836	5.201	3.266	2.270	3.830	90.57	93.80	51.63	88.13	87.03	63.16
尾矿	97.13	0.177	0.068	0.144	0.013	0.010	0.066	9.43	6.20	48.37	11.87	12.97	36.84
原矿	100.0	1.824	1.066	0.289	0.106	0.075	0.174	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

2.5 产品考查

精矿化学多元素分析结果见表 7。由表 7 可以看出,浮选精矿中主要金属元素品位分别为 Pt 57.562 g/t、Pd 34.836 g/t、Au 5.201 g/t、Rh

3.266 g/t、Cu 2.270%、Ni 3.830%,另含 Ru 7.093 g/t 和 Ir 1.100 g/t,主要杂质成分为 SiO₂ 42.28%、MgO 19.82%、Al₂O₃ 1.68%、CaO 1.89% 和 Fe 18.79%。

表 7 浮选精矿化学多元素分析结果

Table 7 Results of chemical multi-element analysis of the flotation concentrate

组分	Pt*	Pd*	Au*	Rh*	Ru*	Ir*	Cu	Ni
含量	57.562	34.836	5.201	3.266	7.093	1.100	2.270	3.830
组分	S	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Cr ₂ O ₃	—
含量	8.09	18.79	42.28	1.68	19.82	1.89	0.28	—

3 结论

1)南非某铂族多金属中主要金属品位分别为 Pt 1.923 g/t、Pd 0.986 g/t、Au 0.276 g/t、Rh 0.113 g/t、Ru 0.316 g/t、Ir 0.047 g/t,另含 Cu 0.071%、Ni 0.180%,铂族金属主要赋存在硫铂矿、砷铂矿、自然铂、硫镍钯铂矿、自然金、银金矿等矿物中,铜、镍金属主要赋存在黄铜矿和镍黄铁矿中。矿石在磨矿细度为 $-74\mu\text{m}$ 占55%的条件下,铂钯铑矿物单体解离度达96.6%,裸露金及硫化物包裹金占比为69.21%和20.67%。

2)采用浮选工艺回收铂族金属,在“一粗两扫三精”工艺流程下获得精矿含 Pt 57.562 g/t、Pd 34.836 g/t、Au 5.201 g/t、Rh 3.266 g/t、Cu 2.270%、Ni 3.830%,回收率分别为 Pt 90.57%、Pb 93.80%、Au 51.63%、Rh 88.13%、Cu 87.03%、Ni 63.16%。

参考文献

- [1] 赫尔伯特. 铂族元素的地质环境[M]. 北京:地质出版社,1991.
HULBERT. Geological environment of platinum group elements[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [2] I·肖,张兴仁,肖力子. 铂族矿物性质研究和回收方法综述(Ⅰ)[J]. 国外金属矿选矿,2004(12):4-12.
XIAO I, ZHANG Xingren, XIAO Lizi. Review on properties and recovery methods of platinum group

minerals (Ⅰ)[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2004(12):4-12.

- [3] I·肖,张兴仁,肖力子. 铂族矿物性质研究和回收方法综述(Ⅱ)[J]. 国外金属矿选矿,2005(1):5-12.
XIAO I, ZHANG Xingren, XIAO Lizi. Review on properties and recovery methods of platinum group minerals (Ⅱ)[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2005(1):5-12.
- [4] 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. Research on beneficiation technology of Jinbaoshan platinum palladium ore[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2011, 31(5):39-42.
- [5] J·威斯,李长根,崔洪山. 药剂制度对从 Merensky 矿脉矿石中浮选铂族金属矿物的影响[J]. 国外金属矿选矿,2008(11):19-24.
WEISS J, LI Changgen, CUI Hongshan. Effect of chemical regime on flotation of platinum group metal minerals from Merensky vein ore[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2008(11):19-24.
- [6] 邢方丽,肖宝清. 新疆某低品位铜镍矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2010(1):20-25.
XING Fangli, XIAO Baoqing. Experimental study on a low-grade copper-nickel ore in Xinjiang[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2010(1):20-25.

(本文编辑 刘水红)