

南非低品位铂钯尾矿选矿试验研究

邹坚坚, 胡 真, 王成行, 李汉文, 李 强, 杨凯志

(广东省科学院 资源利用与稀土开发研究所 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室

广东省矿产资源开发与综合利用重点实验室, 广州 510650)

摘 要: 南非某低品位铂钯尾矿, 其铂品位为 1.1 g/t, 钯品位为 0.5 g/t, Cr_2O_3 品位 17.96%。采用“强磁选预富集-细磨浮选高效富集”工艺流程进行处理, 以 SH 作抑制剂、硫酸铜作活化剂, 丁黄药+SAC 作铂钯捕收剂, 全流程实验获得铂品位 65.9 g/t, 钯品位 24.0 g/t, 铂回收率 60.93%, 钯回收率 48.72%, 铂+钯品位 89.9 g/t 的铂钯精矿, 同时获得 Cr_2O_3 品位 39.19%, 回收率 70.19%的铬精矿。实现了铂钯尾矿中铂钯的有效回收, 并综合回收了铬。

关键词: 低品位; 尾矿; 铂; 钯; 铬; 综合回收

中图分类号: TD923 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2022)03-0021-06

Study on the mineral processing experiment of a low-grade platinum palladium tailings in South Africa

ZOU Jian-jian, HU Zhen, WANG Cheng-hang, LI Han-wen, LI Qiang, YANG Kai-zhi

(Guangdong Provincial Key Laboratory Development and Comprehensive Utilization of Mineral Resources,

State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals,

Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

Abstract: A low-grade platinum palladium tailing from south Africa consists of 1.1 g/t of Pt, 0.5 g/t of Pd and 17.96% of Cr_2O_3 . Adopting the process of “pre-enrichment by strong magnetic separation - efficient enrichment by fine grinding flotation” and using SH as the inhibitor, copper sulfate as an activator, SAC + butyl xanthate as a high-efficiency platinum palladium collector, the obtained platinum-palladium concentrate has 65.9 g/t of Pt, 24.0 g/t of Pd, and the recovery rates of Pt and Pd are 60.93% and 48.72%, respectively. The Cr_2O_3 grade in the chromite concentrate is 39.19%, and its recovery rate is 70.19%. The comprehensive recovery goal of platinum, palladium and chromite in platinum palladium tailings is achieved.

Key words: low-grade; tailing; platinum; palladium; chromium; comprehensive recovery

铂族金属矿主要分为硫化型铂矿、砂铂矿、脉铂矿等, 其中硫化型铂矿石选矿通常采用浮选, 砂铂矿选矿通常采用重选, 脉铂矿选矿通常采用重选或重-浮联合。世界约 97%铂族金属主要来自硫化型铂矿石。铂、钯属稀有贵金属, 用途很广, 主要用于珠宝首饰、汽车工业、石油化工、电子等领域, 我国铂族金属矿产资源少, 主要是金川镍矿, 其他少数几个铂族金属矿均因品位低、矿石性质复杂等

因素尚未实现工业化开发利用。我国铂族金属产量远远满足不了经济发展的需要, 因此, 每年均需从南非、俄罗斯等国家进口大量的铂族金属。随着世界对铂族金属消耗量日益增大, 从尾矿中再回收铂族金属的研究显得意义重大^[1-7]。

本文针对南非某铂钯尾矿进行研究, 拟采用合理的选矿工艺流程及药剂制度, 获得铂钯精矿、铬铁精矿, 实现铂钯铬的综合回收。

收稿日期: 2021-08-18

基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目(2022GDASZH-2022010104)

第一作者: 邹坚坚, 男, 硕士, 高级工程师。研究方向: 选矿工艺研究。E-mail: zou19876557@126.com

1 实验部分

1.1 矿样性质

研究所用样品为南非某铂钯尾矿化学多元素分析结果列于表 1。由表 1 可知该矿含铂 1.1 g/t, 钯 0.5 g/t, Cr_2O_3 17.96%, 均具有回收价值。该矿含硫仅 0.023%, 说明矿石中硫化物含量非常少。根据矿石中铂、钯含量, 可以看出本矿石为低品位铂钯尾矿。利用光学显微镜、X 射线衍射、扫描电镜、能谱和 MLA 等综合手段, 查明了尾矿中的铂族矿物主要为硫铂矿、砷铂矿和铂-硫铜钴矿, 铬矿物主要为铬铁矿, 脉石矿物主要为钙长石、顽火辉石, 其次为透辉石。铂钯矿物种类多, 以极微细粒形式嵌

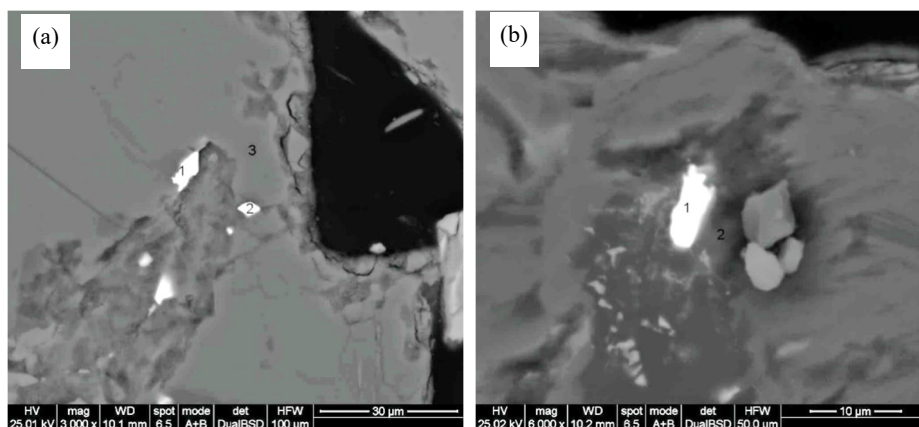
表 1 矿样化学多元素分析结果

Tab.1 Multi-elemental analysis results of the mineral

元素名称	Pt*	Pd*	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
含量/%	1.1	0.5	35.22	7.44	10.11	12.36
元素名称	Cr_2O_3	Fe	Cu	Ni	S	
含量/%	17.96	6.91	0.011	0.031	0.023	

*注: 单位为 g/t, 本文下同。

布于钙长石、顽火辉石等脉石矿物, 脉石矿物成为铂钯矿物的载体, 见图 1。铂钯矿物粒度极微细, 均在 $15\ \mu\text{m}$ 以下, 其中, $5\ \mu\text{m}$ 以下铂钯矿物分布率高达 53.17%。铬铁矿中铂钯矿物极少见, 铬铁矿粒度粗细不均, 基本以单体形式存在, 见图 2。

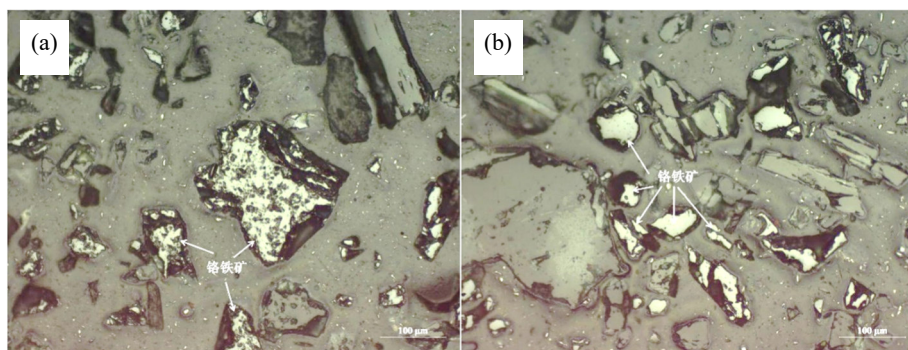


(a). 硫铂矿(1、2)分布在钙长石(3)与顽火辉石粒间(Sulfoplatinite (1, 2) is distributed between the anorthite (3) and enstatite grains);

(b). 硫铂矿(1)被包裹在钙长石(2)中 (Sulfoplatinite (1) encapsulated in anorthite (2))

图 1 铂钯矿物与脉石的嵌布特征关系

Fig.1 The relationship between Pt and Pd minerals and gangue inlaying characteristics



(a). 中粗粒铬铁矿单体(Medium-coarse-grained chromite monomer); (b). 细粒铬铁矿单体(Fine-grained chromite monomer);

图 2 铬铁矿与脉石的嵌布特征关系

Fig.2 The relationship between the embedded characteristics of chromite and gangue

1.2 试验方案

铂钯尾矿中有价矿物除了铂钯矿物外, 还有铬铁矿, 铬铁矿基本以单体形式存在。铬铁矿具有弱

磁性, 钙长石为非磁性矿物, 顽火辉石和透辉石也具有弱磁性, 但是磁性弱于铬铁矿。采用强磁选实现铬铁矿与钙长石、辉石之间的分离, 一方面实现

铬铁矿的回收，另一方面减少后续浮选铂钯的处理量。铂钯矿物以极微细粒嵌布于脉石矿物，因此，需要细磨实现铂钯矿物解离或暴露出铂钯矿物，从而实现铂钯矿物的浮选富集回收。结合矿石性质特点，综合考虑铂钯铬的回收，拟定试验方案见图 3。

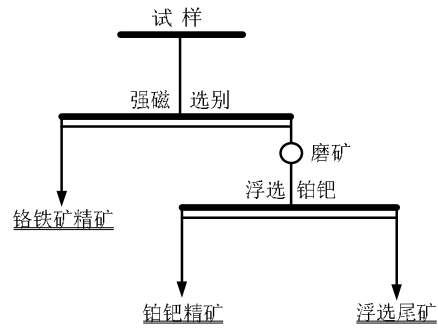


图 3 试验方案

Fig.3 The flow chart of testing program

1.3 仪器设备及试剂

仪器设备主要有 XFD 浮选机、XMQ240×90 实验室球磨机、SSS-1-145 周期式高梯度磁选机、实验室烘箱等；试剂主要有无机类抑制剂 SH、水玻璃、酸化水玻璃、酯类捕收剂 Z200^[8]、SAC^[9]、丁黄药、硫酸铜、硝酸铅等。

1.4 测定和计算

样品中铂、钯采用火试金富集-电感耦合等离子体发射光谱法测定，三氧化二铬采用滴定法测定。

表 2 强磁选铬铁矿试验结果

Tab.2 The results of chromite strong magnetic separation

产品名称	产率/%	品位			回收率/%		
		Cr ₂ O ₃ /%	Pt/(g/t)	Pd/(g/t)	Cr ₂ O ₃	Pt	Pd
铬铁矿精矿	32.16	39.19	0.3	0.2	70.19	7.58	14.07
强磁精选尾矿	8.29	15.16	1.1	0.5	7.00	8.19	7.75
强磁粗选尾矿	59.55	6.88	1.6	0.7	22.82	84.23	78.18
试样	100	17.96	1.1	0.5	100	100	100
非磁产品(粗选+精选尾矿)	67.84	7.89	1.5	0.6	29.81	92.42	85.93

2.2 铂钯浮选富集

2.2.1 细度影响

铂钯矿物以极微细粒嵌布于脉石矿物中，需磨矿至适宜细度，使铂钯矿物解离或暴露，才能通过浮选富集回收。试验条件为磨矿细度为变量，调整剂 SH 用量为 10 kg/t，活化剂硫酸铜用量为 120 g/t，捕收剂丁黄药+SAC 用量为 160+60 g/t，结果如图 5。

从图 5 可以看出，磨矿细度增加后，粗精矿铂钯品位得到提高，回收率也得到提高，但在细度超过-0.043 mm 占 92% (-0.025 mm 占 71%)后，回收率

回收率(R)如式(1)计算：

$$R=\frac{\text{精矿产率}\times\text{精矿品位}}{\text{精矿产率}\times\text{精矿品位}+\text{中矿产率}\times\text{中矿品位}+\text{尾矿产率}\times\text{尾矿品位}} \quad (1)$$

2 结果与讨论

2.1 强磁选铬铁矿(预富集铂钯矿物)

试验流程见图 4，结果列于表 2。表 2 结果表明，通过一粗一精强磁选别可以获得 Cr₂O₃ 品位 39.19%，回收率 70.19%的铬铁矿精矿。铂钯富集至强磁粗选尾矿和强磁精选尾矿，两者合并为非磁产品，其铂品位 1.5 g/t，回收率 92.42%，钯品位 0.6 g/t，回收率 85.93%，铂+钯品位 2.1 g/t。针对非磁产品进行铂钯浮选富集研究。

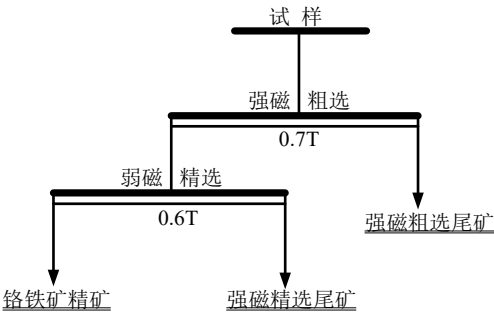


图 4 强磁选铬铁矿试验流程图

Fig.4 The flow chart of chromite strong magnetic separation

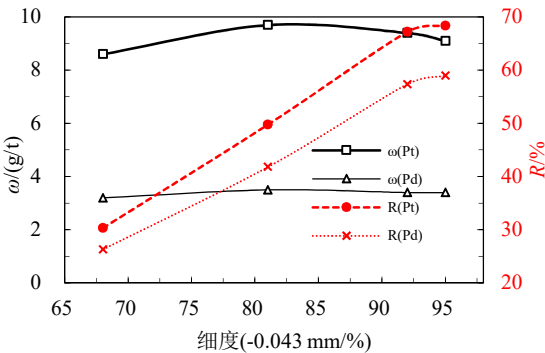


图 5 细度试验结果 Fig.5 Test result of fineness

不再有明显增加。因此,选择磨矿细度为-0.043 mm 占 92% (-0.025 mm 占 71%)。

2.2.2 抑制剂影响

给矿(非磁产品)铂钯品位均很低,铂钯矿物含量非常少,绝大部分矿物为脉石矿物。因此,必需有效抑制大部分脉石矿物,才能获得较高品位铂钯精矿,分别对水玻璃、酸化水玻璃和 SH 三种抑制剂进行研究。试验条件为磨矿细度 - 0.043 mm 占 92% (- 0.025 mm 占 71%),抑制剂为变量,活化剂硫酸铜用量为 120 g/t,铂钯捕收剂丁黄药+SAC 用量为 160+60 g/t,试验结果见图 6。

从图 6 可以看出,加入水玻璃后,铂和钯品位均得到提高,但是回收率明显下降,说明水玻璃在抑制脉石的同时对铂钯矿物也产生了明显抑制作用(图 6(a))。加入酸化水玻璃后,铂和钯品位也得到了明显提高,铂钯回收率明显下降,表明酸化水玻璃对脉石和铂钯矿物均有抑制作用(图 6(b))。加入 SH 后,铂钯品位明显提高,回收率并没有明显下降,说明 SH 对脉石具有较好选择性抑制作用(图 6(c))。因此,选择 SH 作为抑制剂用量为 10 kg/t。

2.2.3 活化剂影响

添加适宜的活化剂,通过金属离子作用在铂钯矿物表面,促进与捕收剂的作用,强化铂钯矿物回收,有利于提高铂钯浮选回收率。试验条件为磨矿细度-0.043 mm 占 92% (-0.025 mm 占 71%),抑制剂 SH 用量为 10 kg/t,活化剂为变量,铂钯捕收剂丁黄药+SAC 用量为 160+60 g/t,结果见图 7。

从图 7 可以看出,添加硫酸铜作活化剂后,铂和钯品位有所下降,但回收率得到明显提高,说明硫酸铜对铂钯矿物有明显活化作用,添加硫酸铜可以促进铂钯矿物回收(图 7(a)),添加硝酸铅作活化剂后,铂和钯品位没有明显变化,回收率有一定增加,但并不显著(图 7(b))。综合考虑,选择硫酸铜作活化剂,适宜用量为 120 g/t。

2.2.4 捕收剂影响

矿样中铂钯品位低,铂钯矿物量少,脉石矿物量占绝大多数,选择高效的捕收剂,选择性捕收铂钯矿物,有助于提高铂钯富集比,获得高品位铂钯精矿。试验条件为磨矿细度-0.043 mm 占 92% (-0.025 mm 占 71%),抑制剂 SH 用量为 10 kg/t,活化剂硫酸铜用量为 120 g/t,铂钯捕收剂为变量,结果见图 8。

从图 8 可以看出,采用丁黄药+Z200 组合,获得的粗精矿铂钯品位略有下降,回收率得到提高,

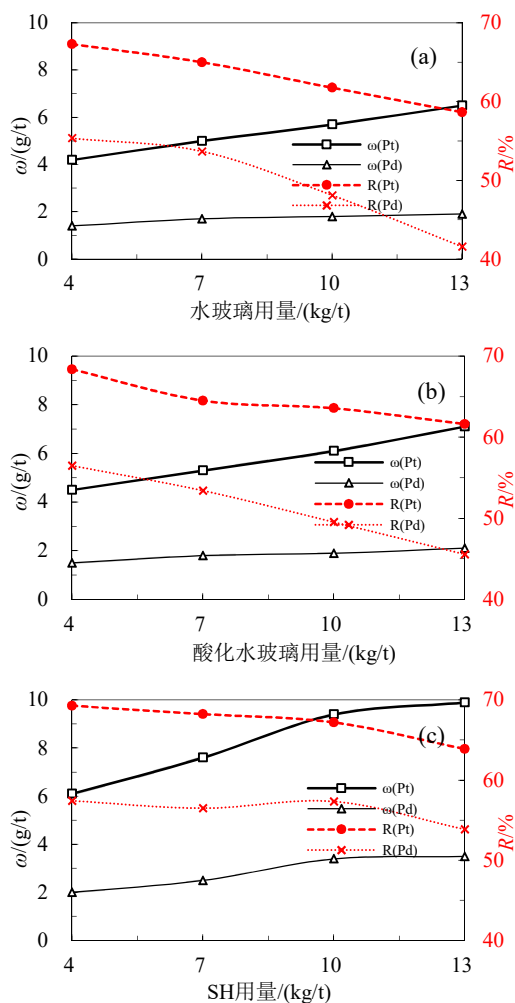


图 6 抑制剂试验结果 Fig.6 Test result of inhibitor

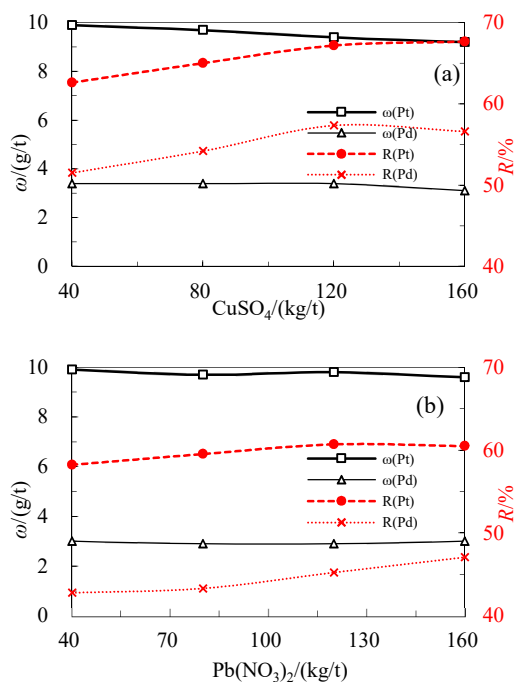


图 7 活化剂试验结果 Fig.7 Test result of activator

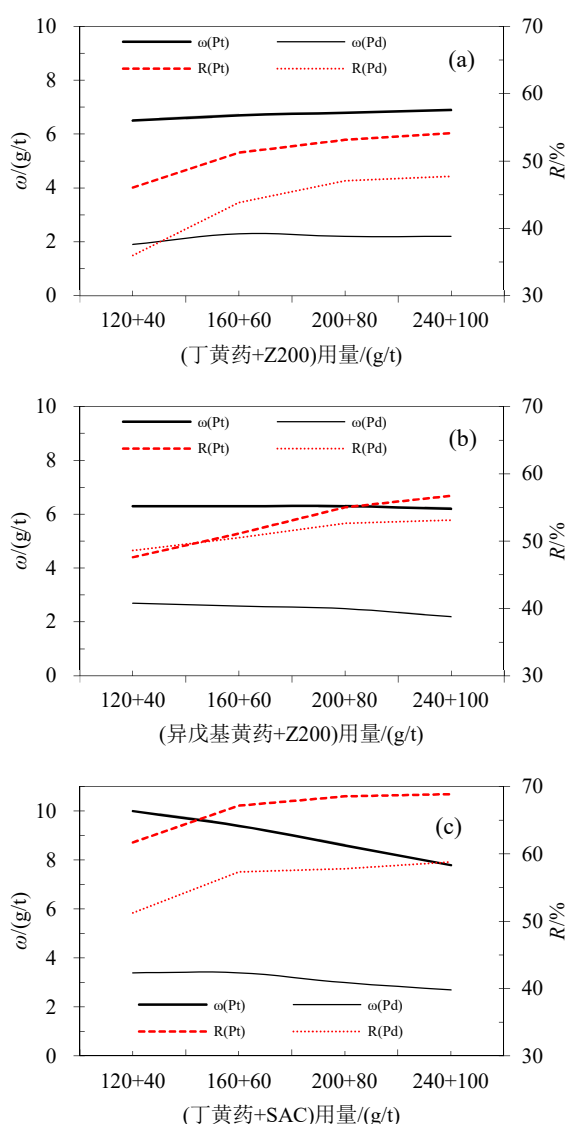


图8 捕收剂试验结果

Fig.8 Test result of collector

说明丁黄药+Z200 对铂钯矿物具有一定捕收能力(图 8(a))。采用异戊基黄药+Z200 组合,获得的粗精矿铂钯品位基本一致,回收率不断提高,表明异戊基黄药+Z200 对铂钯矿物具有一定捕收能力(图 8(b))。采用丁黄药+SAC 组合,粗精矿铂钯品位有所下降,铂钯回收率得到明显提高,表明丁黄药+SAC 组合对铂钯矿物具有较好的选择性捕收能力(图 8(c))。基于研究结果,选择丁黄药+SAC 作捕收剂,用量为 160 g/t+60 g/t。

2.3 全工艺流程实验研究

根据强磁选铬铁矿(预富集铂钯矿物)、细磨铂钯浮选试验研究结果,进行全流程实验研究,流程见图 9,结果列于表 3。

全流程实验结果表明,采用“强磁选预富集-

细磨浮选高效富集”工艺,可以获得铂品位 65.9 g/t,钯品位 24.0 g/t,铂+钯品位 89.9 g/t,铂回收率 60.93%,钯回收率 48.72%的铂钯精矿。同时获得 Cr_2O_3 39.19%,回收率 70.19%的铬铁矿精矿。实现了低品位铂钯尾矿中铂钯的回收,并综合回收了铬。

3 结论

1) 南非某铂钯尾矿,含铂 1.1 g/t,含钯 0.5 g/t,含 Cr_2O_3 17.96%,铂钯矿物以极微细粒形式嵌布于顽火辉石、长石等脉石矿物,而铬铁矿中基本不含有铂钯矿物,且铬铁矿基本以单体形式存在,根据铬铁矿与其他矿物的磁性差异,基于铂钯矿物的嵌布特征,采用强磁选-细磨浮选工艺方案。

2) 尾矿首先采用一粗一精强磁选铬铁矿-预富集铂钯矿物,可以获得 Cr_2O_3 品位 39.19%,回收率 70.19%的铬铁矿精矿,铂钯富集至强磁粗选尾矿和强磁精选尾矿,两者合并为非磁产品,其铂品位 1.5g/t,回收率 92.42%,钯品位 0.6 g/t,回收率 85.93%,铂+钯品位 2.1 g/t。针对非磁产品进行铂钯细磨浮选富集,以 SH 作抑制剂,硫酸铜作活化剂,丁黄药+SAC 作捕收剂,可以获得铂品位 65.9 g/t,钯品位 24.0 g/t,铂+钯品位 89.9 g/t,铂回收率 60.93%,钯回收率 48.72%的铂钯精矿。

3) 全流程采用“强磁选预富集-细磨浮选高效富集”工艺流程,获得了较高品位的铂钯精矿和铬铁矿精矿,实现了低品位铂钯尾矿中铂钯及铬的有效富集回收,为低品位铂钯尾矿的综合利用提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 吴良士,白鸽,袁忠信. 矿物与岩石[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [2] 《矿产资源工业要求手册》编委会. 矿产资源工业要求手册[M]. 北京: 地质出版社, 2012.
- [3] 刘时杰. 论原生铂矿的选矿和冶金[J]. 贵金属, 1999, 20(4): 51-56.
LIU S J. On the floatation and metallurgy of platinum ores[J]. Precious Metals, 1999, 20(4): 51-56.
- [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 Y Z, JIAN S, ZHANG X D, et al. Study on mineral processing technique of platinum-palladium ore in Jinbaoshan area[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2011, 31(5): 39-42.

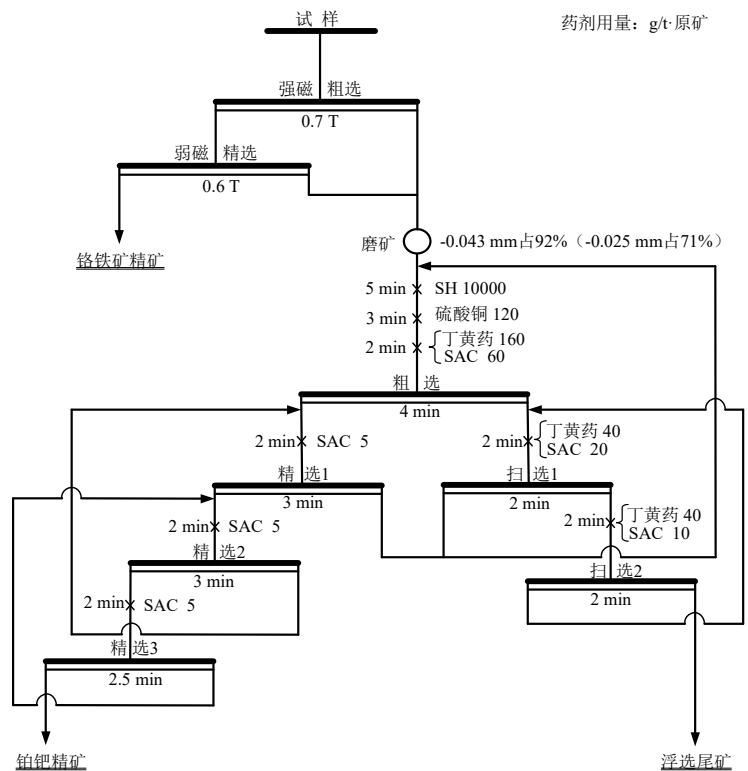


图 9 全工艺试验流程图

Fig.9 The flow chart of whole process test

表 3 全流程实验结果

Tab.3 The results of whole process test

产品名称	产率/%	品位			回收率/%		
		Pt/(g/t)	Pd/(g/t)	Cr ₂ O ₃ /%	Pt	Pd	Cr ₂ O ₃
铂钯精矿	1.02	65.9	24.0	2.36	60.93	48.72	0.13
浮选尾矿	66.82	0.5	0.3	7.98	31.49	37.21	29.68
铬铁矿精矿	32.16	0.3	0.2	39.19	7.58	14.07	70.19
试样	100	1.1	0.5	17.96	100	100	100

[5] 易小祥, 母传伟, 郭靖, 等. 红石砬铂钯矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(1): 55-60.
YI X X, MU C W, GUO J, et al. Study on mineral processing technique of platinum-palladium ore in Hongshila[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(1): 55-60.

[6] 胡显智, 张文彬. 云南某铂钯矿酸浸除镁及浸出液综合利用研究[J]. 矿产综合利用, 2003(2): 3-8.
HU X Z, ZHANG W B. Elimination of magnesium oxide in the platinum-palladium ore by acid leach and comprehensive utilization of the leach liquor[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2003(2): 3-8.

[7] 梁友伟. 内蒙某铂钯矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2010(4): 3-7.

LIANG Y W. Experimental research on beneficiation of a platinum palladium ore in Inner Mongolia [J]. Multi-purpose Utilization of Mineral Resources, 2010(4): 3-7.

[8] 高起方, 邹坚坚. 高铁富金铜硫多金属矿选矿实验研究[J]. 贵金属, 2019, 40(4): 47-53.
GAO Q F, ZOU J J. Study on the mineral processing experiment of a high Fe rich Au-Cu-S polymetallic ore[J]. Precious Metals, 2019, 40(4): 47-53.

[9] 邹坚坚, 胡真, 王成行, 等. 高砷富银铋硫多金属精矿综合回收实验研究[J]. 贵金属, 2021, 42(4): 41-46.
ZOU J J, HU Z, WANG C H, et al. Study on the mineral processing experiment of a high As rich Ag-Bi-S polymetallic concentrate [J]. Precious Metals, 2021, 42(4): 41-46.