

某含碳金矿选矿试验研究及工业实践

孙大勇^{1,2}, 李杰¹, 祁忠旭^{1,2}, 朱志伟¹, 徐世红², 马鹏程³

(1. 长沙矿山研究院有限责任公司; 2. 中南大学资源加工与生物工程学院; 3. 山东招金科技有限公司)

摘要:针对某含碳金矿进行了深入的工艺矿物学分析,揭示了影响选矿效率的关键因素。通过选矿试验,成功降低了磨矿细度,并选择了一种高效的碳抑制剂,有效解决了有机碳对金浮选过程的干扰问题。在原矿金品位1.84 g/t的条件下,通过实验室全流程闭路试验,获得了金精矿金品位37.81 g/t、金回收率91.20%的优异指标。基于小型试验结果,进一步进行了工业试验,对磨矿细度、药剂制度等工艺参数进行了优化。试验结果表明:生产指标显著提升,金精矿金加权平均品位从24.31 g/t提高至40.25 g/t,金加权平均回收率从88.02%提高至91.42%。此外,磨矿细度的降低显著减少了生产成本。

关键词:含碳金矿;有机碳;细度;抑制剂;生产成本;工业实践

中图分类号:TD953

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)02-0034-06

doi:10.11792/hj20250206

引言

金作为一种珍贵的金属元素,不仅具备货币属性,而且在农业、高新技术材料、航空航天、信息技术、新能源及新兴工业等多个领域中扮演着关键的角色^[1]。长期以来,研究人员致力于金矿的高效回收技术研究,其中,针对含有机碳难处理金矿的高效浮选技术研究尤为引人注目^[2]。

本研究涉及的金矿床属中—低温热液型矿床,其矿体中存在脉石矿物夹层,该夹层富含有机碳和黏土矿物。由于矿体厚度较小,在采矿过程中不可避免地会有有机碳等脉石矿物混入矿石。该矿石中的金主要以自然金形态存在^[3],其粒度分布极为微细,主要载金矿物为黄铁矿^[4],而少量的金则被包裹于黄铜矿中。由于有机碳等易于浮选和泥化的脉石矿物干

扰^[5],选矿厂的浮选流程表现出不稳定性,频繁出现淤槽现象和尾矿品位偏高的问题,导致生产指标长期不理想^[6]。针对该矿石特性,本研究通过工艺矿物学分析,揭示了影响选矿效率的关键因素^[7]。在选矿试验中,重点从磨矿细度、高效碳抑制剂的选择、现有选矿药剂用量的优化等关键方面入手,通过实验室全流程闭路试验,取得了优异的指标^[8-9],并将这些科研成果成功应用于工业实践,显著提升了生产指标。

1 矿石性质

1.1 化学成分及金物相

对原矿进行化学成分分析和金物相分析,为后续选矿研究提供化学分析基础。原矿化学成分分析结果见表1,金物相分析结果见表2。

由表1、表2可知:矿石中可回收的主要元素为金,

表1 原矿化学成分分析结果

Table 1 Chemical composition analysis results of raw ore

成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	Hg ³⁾	Pb
w/%	1.84	1.02	66.55	11.31	6.59	4.19	3.11	1.92	0.015
成分	S	MgO	Na ₂ O	Mn	P	As	Zn	Cu	TOC
w/%	2.58	2.04	0.32	0.055	0.048	0.021	0.017	0.003 6	1.27

注:1)w(Au)/(g·t⁻¹); 2)w(Ag)/(g·t⁻¹); 3)w(Hg)/(g·t⁻¹)。

其品位达1.84 g/t。金主要以硫化物矿物包裹金的形式存在其中,载金硫化物矿物以黄铁矿为主,黄铜矿中亦包裹少量金。在选矿过程中,主要回收载金矿物黄铁矿、黄铜矿,以及少量单体金,适宜采用浮选法进

行回收。该矿石中TOC(总有机碳)含量较高,对金的浮选产生不利影响。生产过程中,浮选精矿中夹杂有机碳现象较为严重,有机碳在中矿不断累积,导致淤槽现象频繁发生,使得浮选流程稳定性较差,生产指

收稿日期:2024-08-05; 修回日期:2024-10-08

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC2905103)

作者简介:孙大勇(1989—),男,高级工程师,硕士,从事选矿和环保新技术、新工艺研究工作;E-mail:2418361338@qq.com

表2 金物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of gold

相别	$w(\text{Au})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	分布率/%
单体金	0.07	3.80
硫化物矿物包裹金	1.58	85.87
铁等氧化物矿物包裹金	0.11	5.98
硅酸盐矿物包裹金	0.08	4.35
总金	1.84	100.00

标有待提高^[10-13]。

1.2 矿物组成

采用 MLA 矿物自动分析仪,对原矿中的矿物组成进行测定,结果见表 3。

表3 矿物组成分析结果

Table 3 Mineral composition analysis results

矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%
金矿物	0.01	方解石	1.91
黄铁矿	4.71	高岭石	1.84
黄铜矿	0.06	有机碳	1.27
闪锌矿	0.03	绿泥石	0.50
方铅矿	0.02	黑云母	0.35
赤/褐铁矿	2.50	石膏	0.21
菱铁矿	0.41	磷灰石	0.21
石英	49.64	金红石	0.15
白/绢云母	24.68	榍石	0.10
白云石/铁白云石	7.12	其他	0.23
钾/钠/钙长石	4.05		

由表3可知:矿石中脉石矿物相对含量较高,其中,白/绢云母相对含量 24.68 %、白云石/铁白云石相对含量 7.12 %、有机碳相对含量 1.27 %。在浮选过程中,脉石矿物如有机碳、白/绢云母、白云石/铁白云石、方解石、高岭石、绿泥石等对浮选效果产生显著影响。这些矿物在磨矿阶段易发生泥化现象,泥化后的矿物颗粒通过异相凝聚或覆盖作用干扰载金矿物的浮选过程,从而降低浮选回收率。有机碳等泥质脉石矿物对金浮选的干扰是制约该金矿高效浮选回收的主要难题^[14]。

2 选矿试验研究

2.1 磨矿细度

磨矿作业是为后续浮选过程提供原料的重要环节。适宜的磨矿细度不仅能够确保目的矿物有效单体解离,而且能满足浮选设备的进料要求,对提升后续浮选作业的效率具有决定性作用,是影响金回收率的关键技术参数之一。因此,在碳酸钠用量 500 g/t,硫酸铜用量 200 g/t,2 号油用量 30 g/t,丁基黄药+丁铵黑药用量 100 g/t+10 g/t条件下开展磨矿细度试验,试验流程见图 1,试验结果见图 2。

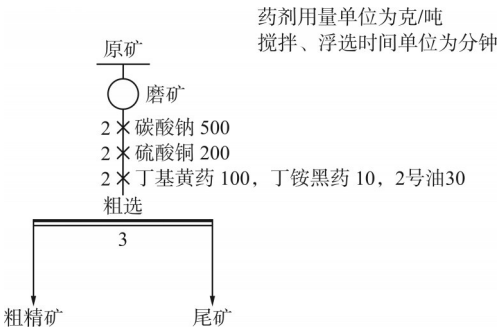


图1 磨矿细度试验流程

Fig. 1 Flowchart of grinding fineness test

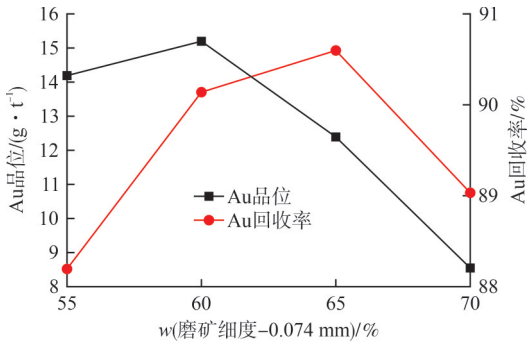


图2 磨矿细度试验结果

Fig. 2 Grinding fineness test results

由图2可知:随着磨矿细度的增加,粗精矿中金品位呈先上升后下降的趋势,金回收率也呈相似的波动模式。当磨矿细度-0.074 mm 占比达到 60 %时,可以观察到载金矿物黄铁矿达到较为理想的单体解离状态。然而,当磨矿细度进一步提升至-0.074 mm 占比 70 %,原矿中所含有机碳及泥质脉石矿物因磨矿作用产生大量次生泥,干扰了黄铁矿的有效浮选,导致金回收率下降。当磨矿细度较细时,有机碳和泥质脉石矿物的上浮量增加,浮选泡沫的金属光泽减弱,粗精矿产率上升,品位则相应降低^[15]。综合考虑试验指标,适宜的磨矿细度为-0.074 mm 占比 60 %。

为进一步验证磨矿细度-0.074 mm 占比 60 %的适宜性,利用 MLA 矿物自动分析仪对主要载金矿物黄铁矿和黄铜矿进行了单体解离度测定,结果见表 4。

表4 载金矿物单体解离度分析结果

Table 4 Monomer dissociation degree analysis results of gold-bearing minerals

矿物名称	单体/%	连生体/%			
		>3/4	1/2 ~ 3/4	1/4 ~ 1/2	<1/4
黄铁矿	85.64	9.86	1.97	1.50	1.03
黄铜矿	81.11	13.04	1.47	0.00	4.38

由表4可知:当磨矿细度达到-0.074 mm 占比 60 %时,黄铁矿单体解离度为 85.64 %,黄铜矿单体解离度为 81.11 %。主要载金矿物已实现有效解离,

表明该磨矿细度适宜于金的高效浮选回收。

2.2 药剂制度

浮选技术主要依赖于选矿药剂的选择性作用,通过使目的矿物与脉石矿物表面产生疏水性差异,实现矿物分离。在此过程中,载金矿物颗粒会附着于气泡上,并在矿浆表面富集,形成泡沫产品,即金精矿;而脉石矿物颗粒则不与气泡发生作用,从而保留在矿浆中,形成浮选尾矿^[16-17]。针对该含碳金矿的浮选药剂制度确定,关键在于2个方面:①高效碳抑制剂的研发;②现场适宜药剂用量的精确控制。

2.2.1 捕收剂种类及用量

1)捕收剂种类。在磨矿细度-0.074 mm 占比60%,碳酸钠用量500 g/t,硫酸铜用量200 g/t,2号油用量30 g/t,丁铵黑药(用量10 g/t)与其他捕收剂(用量100 g/t)配合使用条件下,进行捕收剂种类试验。试验流程见图1,试验结果见图3。

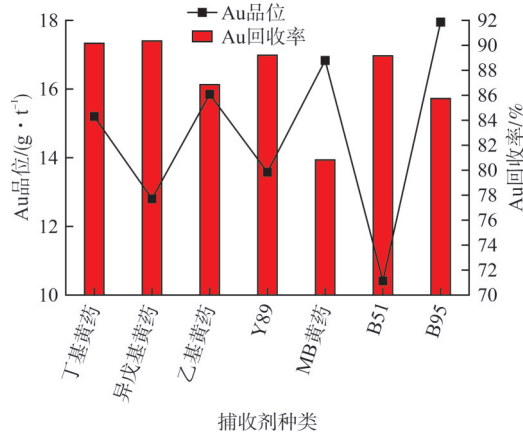


图3 捕收剂种类试验结果

Fig. 3 Collector type test results

由图3和浮选试验泡沫现象可知:丁基黄药在浮选过程中对金的捕收效果较好,能够显著提升粗精矿中金品位和金回收率;异戊基黄药对金展现出较强的捕收能力,但存在脉石矿物夹带问题;MB黄药与B95在金的选择性方面表现优异,粗精矿中金品位较高,但金回收率相对较低;B51起泡性较强,浮选泡沫层较厚,导致粗精矿产率增加,但金品位较低,金回收率亦不及丁基黄药;Y89作为捕收剂时,其粗精矿中金回收率和金品位均低于丁基黄药。综合考虑,最终选定丁基黄药+丁铵黑药作为捕收剂。

2)捕收剂用量。在磨矿细度-0.074 mm 占比60%,碳酸钠用量500 g/t,硫酸铜用量200 g/t,2号油用量30 g/t,捕收剂选用丁基黄药+丁铵黑药条件下,进行捕收剂用量试验。试验流程见图1,试验结果见图4。

由图4可知:丁基黄药用量为100 g/t时,随着丁

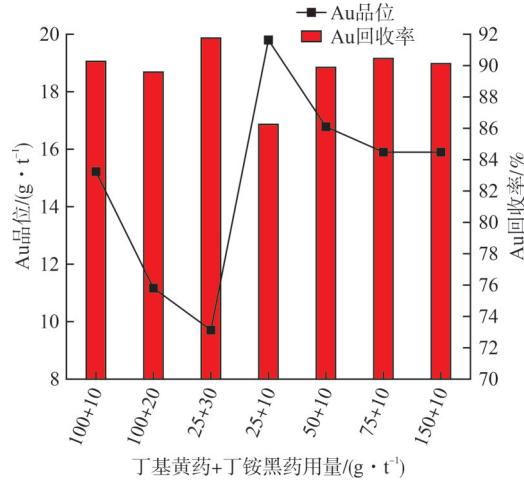


图4 捕收剂用量试验结果

Fig. 4 Collector dosage test results

铵黑药用量的增加,粗精矿中金回收率变化较小,而金品位则逐步下降,因此确定丁铵黑药的最佳用量为10 g/t;当丁铵黑药用量为10 g/t时,在丁基黄药用量达到50 g/t后,粗精矿中金品位及金回收率趋于稳定状态,故选定丁基黄药的最佳用量为50 g/t。综合考量产率、金品位和金回收率之间的相互作用,最终确定丁基黄药+丁铵黑药用量为50 g/t+10 g/t。

2.2.2 抑制剂种类及用量

在该含碳金矿中,有机碳等脉石矿物含量较高,严重干扰了目的矿物的浮选回收^[9]。在原选矿工艺中,由于未添加针对性的抑制剂,未能有效抑制有机碳等脉石矿物,影响了金的高效回收。因此,应用具有强抑制能力和良好选择性的有机碳等脉石矿物抑制剂,是稳定浮选流程、提高金品位和回收率的关键。在磨矿细度-0.074 mm 占比60%,碳酸钠用量500 g/t,硫酸铜用量200 g/t,2号油用量30 g/t,丁基黄药+丁铵黑药用量50 g/t+10 g/t条件下,进行抑制剂种类及用量试验。试验流程见图1,试验结果见图5。

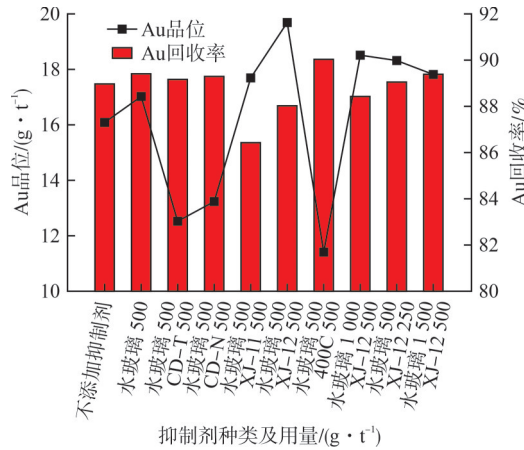


图5 抑制剂种类及用量试验结果

Fig. 5 Test results for inhibitor types and dosages

由图 5 和浮选试验泡沫现象可知：不添加抑制剂，浮选泡沫中能明显看到有机碳，黄铁矿浮游速度较慢；添加水玻璃、XJ-11、XJ-12 等抑制剂后，能够有效抑制有机碳及泥质脉石矿物的浮选，进而提升粗精矿金品位。其中，水玻璃与 XJ-12 的组合抑制效果更为显著，实现了对有机碳及泥质脉石矿物的有效抑制，使得浮选泡沫的金属光泽增强，金属上浮速率显著提升，同时减少了浮选泡沫中有机碳的夹带。基于此，最终选定水玻璃与 XJ-12 作为组合抑制剂，其用量分别为 500 g/t 和 250 g/t。

2.2.3 起泡剂种类及用量

对于含泥量较大的矿石，起泡剂的选择对浮选泡沫也有较大的影响。在磨矿细度 -0.074 mm 占比 60%，碳酸钠用量 500 g/t，硫酸铜用量 200 g/t，水玻璃+XJ-12 用量 500 g/t+250 g/t，丁基黄药+丁铵黑药用量 50 g/t+10 g/t 条件下，进行起泡剂种类及用量试验。试验流程见图 1，试验结果见图 6。

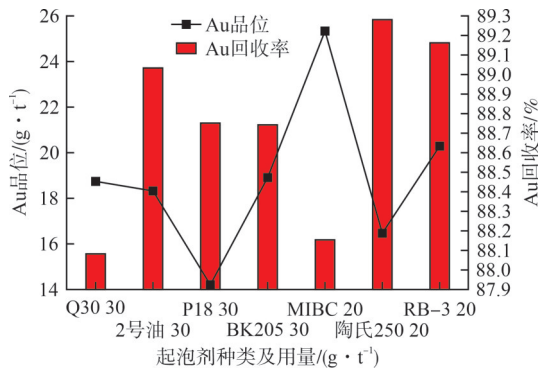


图6 起泡剂种类及用量试验结果

Fig. 6 Test results for frother types and dosages

由图 6 可知：Q30、BK205、MIBC 及 RB-3 均能显著降低泥夹带现象，进而提升粗精矿金品位。综合考量后，决定选用目前选矿厂正在使用的 RB-3 作为起泡剂，用量为 20 g/t。

2.3 全流程闭路试验

在上述条件试验的基础上，采用一次粗选、三次扫选、三次精选，进行全流程闭路试验研究。试验流程见图 7，试验结果见表 5。

由表 5 可知：全流程闭路试验可获得金品位为 37.81 g/t、金回收率为 91.20% 的金精矿。结合现场浮选情况可以观察到，在全流程闭路试验过程中，金属上浮速率快，粗选阶段金属光泽显著。整个闭路试验的浮选过程表现平稳，选矿指标优异，为工业生产提供了坚实的技术支持和试验基础。

3 工业试验及应用

基于前期实验室试验的研究成果，本研究实施了

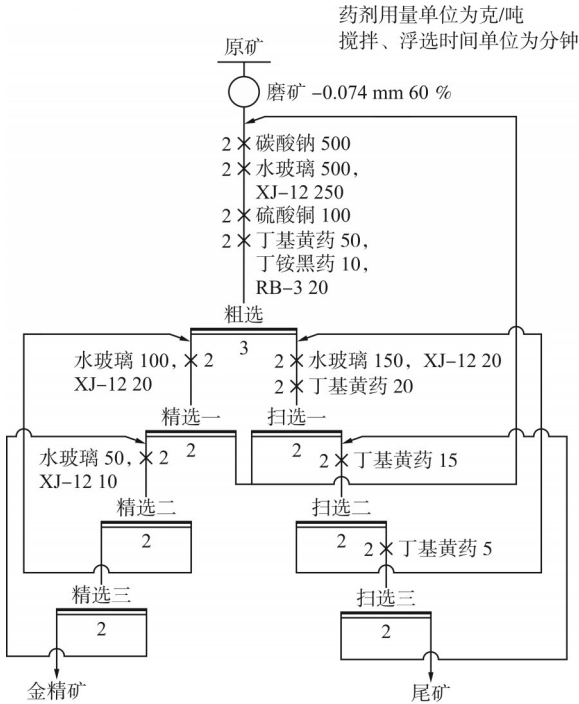


图7 全流程闭路试验流程

Fig. 7 Flowchart of whole-process closed-circuit test

表5 全流程闭路试验结果

Table 5 Whole-process closed-circuit test results

产物	产率/%	Au品位/(g·t ⁻¹)	Au回收率/%
金精矿	4.45	37.81	91.20
尾矿	95.55	0.17	8.80
原矿	100.00	1.84	100.00

日处理量 2 000 t 原矿的工业试验，旨在将科研成果转化为工业生产实践，进而提升选矿指标。

3.1 矿样化学成分

根据采矿生产计划，对井下开采的矿石进行配矿作业，以备 40 000 t 矿石用于工业试验。完成配矿作业后，对矿石进行分点采样，并将矿样送至化验室进行化验分析。工业试验矿样化学成分分析结果见表 6。

表6 工业试验矿样化学成分分析结果

Table 6 Chemical composition analysis of industrial test ore samples

成分	Au ¹⁾	S	TOC
w/%	2.13	2.87	1.35

注：1) w(Au)/(g·t⁻¹)。

3.2 应用效果

磨矿细度由原生产 -0.074 mm 占比 68% 降低至 -0.074 mm 占比 60%；将抑制剂更换为水玻璃+XJ-12，实现有机碳及泥质脉石矿物的高效抑制；结合小型试

验结果,对现场药剂用量进行调整。

在工业试验阶段,通过将抑制剂更替为水玻璃与XJ-12的组合,实现了对有机碳等脉石矿物的有效抑制。该变化使得泡沫黏度降低,同时黄铁矿、黄铜矿等载金矿物在泡沫层中的富集程度显著提升。浮选泡沫现象的改变最初给现场操作工人带来了操作上的困难。然而,经过一段时间的调整与优化,现场操作人员逐渐熟悉了药剂用量、泡沫特性与选矿

指标之间的相互关系。随之,金精矿金品位与金回收率均得到了逐步提升,最终得到了优异的选矿效果。

在为期7个月的工业试验及其后续跟踪过程中,首月作为调试阶段,主要任务包括降低磨矿细度和调整药剂制度。经过1个月的调整,工业生产流程及各项指标达到稳定状态。随后,将该阶段的生产指标与前一年度的工业指标进行对比分析,结果见表7。

表 7 优化前后选矿指标对比结果

Table 7 Comparison of beneficiation indices before and after optimization

试验阶段	原矿 Au 平均品位/(g·t ⁻¹)	w(TOC)/%	金精矿 Au 加权平均品位/(g·t ⁻¹)	Au 加权平均回收率/%
优化前(2022年3月—2023年3月)	2.18	1.24	24.31	88.02
优化后(2023年4—10月)	2.13	1.31	40.25	91.42

由表7可知:相较于优化前,在原矿金品位下降、TOC含量上升的情况下,金精矿中金品位及金回收率均实现了显著提升。具体而言,金精矿中金加权平均品位从24.31 g/t增加至40.25 g/t,而金加权平均回收率则从88.02 %增长至91.42 %。此外,磨矿细度的降低有效缓解了泥化现象的发生,并显著减少了生产成本。

4 结 论

1)某含碳金矿金品位1.84 g/t,主要载金矿物包括黄铁矿和黄铜矿,同时矿石中存在有机碳、白/绢云母、白云石/铁白云石、方解石、高岭石、绿泥石等脉石矿物。

2)针对矿石特性,开展了系统的选矿试验研究。通过降低磨矿细度有效解决了有机碳和泥质脉石矿物对金浮选的干扰问题。在全流程闭路试验研究中,获得了金品位37.81 g/t、金回收率91.20 %的金精矿指标。

3)工业试验将磨矿细度从原生产的-0.074 mm 占比68 %调整为-0.074 mm 占比60 %,并采用水玻璃+XJ-12作为抑制剂。优化后,金精矿中金加权平均品位从24.31 g/t提升至40.25 g/t,金加权平均回收率从88.02 %提高至91.42 %。此外,磨矿细度的降低显著减少了生产成本。

【参 考 文 献】

[1] 张红新,李洪潮,郭珍旭.利用组合抑制剂提高高硫低品位金矿浮选精矿品位的研究[J].矿业研究与开发,2015,35(1):43-46.

[2] 刘振辉,谢建宏,张崇辉.陕西某金矿选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2012,32(3):55-57,88.

[3] 张红梅,杨金林.某难选金矿石浮选工艺试验研究[J].黄金,2006,27(5):39-41.

[4] 龚明辉,高起方,尹福兴,等.老挝某金矿选矿工艺试验研究[J].黄金,2019,40(1):54-58.

[5] 王勇,祁忠旭,李杰,等.提高哈图含泥难选金矿金回收率选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(10):121-126.

[6] 张晓民,李恒,李越,等.碳质物对高含碳金矿浮选影响的试验研究[J].有色金属工程,2020,10(2):74-81.

[7] 刘金亭.丹东凤银金矿浮选试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2016.

[8] 库建刚,王安理,蔡圣锋,等.灵宝石英脉金矿石的浮选试验研究[J].矿业研究与开发,2009,29(2):49-51,75.

[9] 李杰,王龙,祁忠旭,等.新疆某围岩蚀变型含泥金矿选矿试验[J].有色金属工程,2023,13(8):94-101.

[10] 康健,姚泽钰,胡良训,等.湖北某低品位含碳质金矿碱性加压预氧化—氰化浸出试验研究[J].黄金,2024,45(6):37-40.

[11] 张磊,郭学益,田庆华,等.难处理金矿预处理方法研究进展及工业应用[J].黄金,2021,42(6):60-68.

[12] 蔡创开.黔西南某碳质含金矿提金工艺试验研究[J].黄金科学技术,2014,22(4):124-128.

[13] 简永军,陈玉明,彭晓,等.某含碳高砷微细粒金矿提金工艺研究[J].黄金,2016,37(10):67-70.

[14] 乔江晖,宋翔宇,李翠芬,等.某碳质氧化金矿矿石性质及可选性试验研究[J].矿冶工程,2010,30(5):49-51.

[15] 许晓阳,熊明,蔡创开,等.某碳质金矿石加压预氧化—氰化工艺研究[J].黄金,2017,38(11):50-53,67.

[16] 郭平.难处理金矿超声强化预处理研究[D].昆明:昆明理工大

学,2020.

[17] 陈勃伟,蔡缪璐,周成英,等.某含砷含碳微细粒难处理金精

矿预氧化—氰化提金工艺研究[J].稀有金属,2018,42(12):
1 339-1 344.

Experimental study on the beneficiation of a carbonaceous gold ore and its industrial practice

Sun Dayong^{1,2}, Li Jie¹, Qi Zhongxu^{1,2}, Zhu Zhiwei¹, Xu Shihong², Ma Pengcheng³

(1. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd.;

2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University;

3. Shandong Zhaojin Technology Co., Ltd.)

Abstract: An in-depth process mineralogical analysis of a carbonaceous gold ore was conducted, identifying key factors affecting beneficiation efficiency. With the beneficiation tests, the grinding fineness was successfully reduced, and an efficient carbon inhibitor was selected, effectively mitigating the interference of organic carbon in the gold flotation process. Under the condition of a raw ore gold grade of 1.84 g/t, the whole-process closed-circuit test achieved outstanding indices with a gold concentrate grade of 37.81 g/t and a gold recovery rate of 91.20 %. Based on the small-scale test results, industrial-scale trials were conducted to optimize process parameters, including grinding fineness and reagent regime. The test results demonstrated significant improvements in production indices, with the weighted average gold grade in the concentrate increasing from 24.31 g/t to 40.25 g/t and the weighted average gold recovery rate rising from 88.02 % to 91.42 %. Moreover, the reduction in grinding fineness substantially lowered production costs.

Keywords: carbonaceous gold ore; organic carbon; fineness; inhibitor; production cost; industrial practice

(上接第 33 页)

[11] 曹锋,符元飞,杨思军.四方金矿解吸电解装置改造实践[J].黄金,2016,37(8):50-51.

[12] 巫太云.载金炭酸洗除钙槽优化[J].矿山机械,2021,49(7):55-58.

[13] 郭晓亮,吕超飞,张绍辉,等.载金炭焚烧冶炼回收金生产实践[J].黄金,2020,41(12):72-75.

[14] 梁佑贵.诺芮特载金炭解吸控制参数生产实践探索[J].中国金属通报,2020(5):51-52.

[15] 李洪松,乔天强,尚朝表.载金炭解吸电解设备的技术研究[J].山西冶金,2014,37(3):12-13,84.

Optimization and application of desorption electrolysis equipment

Miao Tengfei

(Inner Mongolia Pacific Mining Co., Ltd.)

Abstract: The cyanide leaching is a representative method in gold production, with the desorption electrolysis stage being crucial as it directly affects gold output. Inner Mongolia Pacific Mining Co., Ltd. employs a beneficiation process of crushing-heap leaching-activated carbon adsorption-desorption electrolysis-smelting. However, during production, excessive carbon powder frequently clogs the desorption electrolysis equipment, reducing production efficiency and gold yield. This study examines the application of desorption electrolysis equipment in the gold production process and its associated challenges. By analyzing the effects of process parameters such as temperature, pressure, and sodium hydroxide concentration on desorption electrolysis performance, and addressing issues observed during equipment operation, a series of targeted optimization measures were proposed. These include adjusting desorption solution dosage, reducing circulation flow, enlarging the carbon rod mesh openings, and increasing the filtration area and meshes of filters. These measures effectively solved clogging and efficiency limitations, providing valuable insights for optimizing similar equipment.

Keywords: desorption electrolysis; sodium hydroxide; filter; optimization measures; carbon powder; clogging