

# 微细粒浸染型难选金矿石浮选新工艺研究<sup>①</sup>

吕子虎<sup>1,2,3</sup>, 梁延龙<sup>4</sup>, 赵登魁<sup>1,2,3</sup>, 王守敬<sup>1,2,3</sup>, 吕良<sup>1,2,3</sup>, 吴东印<sup>1,2,3</sup>, 程宏伟<sup>1,2,3</sup>

(1.中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所, 河南 郑州 450006; 2.自然资源部多金属矿综合利用评价重点实验室, 河南 郑州 450006; 3.河南省黄金资源综合利用重点实验室, 河南 郑州 450006; 4.四川建筑职业技术学院, 四川 德阳 618000)

**摘要:** 对某微细粒浸染型难选金矿石进行了浮选试验研究。采用自主研发的捕收剂 ZHS-3, 并采用中矿再磨再选工艺协同强化细粒金捕收, 获得了金品位 43.70 g/t、回收率 74.29% 的金精矿及金品位 15.60 g/t、回收率 4.28% 的次精矿, 两者合计金品位 39.79 g/t、回收率 78.57%, 相比常规浮选工艺, 金品位和回收率均有所提高, 实现了微细粒金的高效回收, 提高了资源利用率。

**关键词:** 金矿; 微细粒; 黄铁矿; 浮选; 强化捕收; 超细磨; 捕收剂

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.015

文章编号: 0253-6099(2025)03-0094-05

## New Flotation Process for Finely Disseminated Gold Ore

LYU Zihu<sup>1,2,3</sup>, LIANG Yanlong<sup>4</sup>, ZHAO Dengkui<sup>1,2,3</sup>, WANG Shoujing<sup>1,2,3</sup>, LYU Liang<sup>1,2,3</sup>,  
WU Dongyin<sup>1,2,3</sup>, CHENG Hongwei<sup>1,2,3</sup>

(1. Zhengzhou Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Zhengzhou 450006, Henan, China; 2. Key Laboratory for Polymetallic Ores' Evaluation and Utilization, Ministry of Natural Resources, Zhengzhou 450006, Henan, China; 3. Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Gold Resource in Henan Province, Zhengzhou 450006, Henan, China; 4. Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, Sichuan, China)

**Abstract:** A refractory ore characterized by ultra-fine gold particles disseminated therein was taken for flotation test. A technique of re-grinding and re-flotation of the middlings, together with the self-developed collector of ZHS-3, was adopted to enhance the collection of fine-grained gold, resulting in a gold concentrate grading 43.70 g/t Au at 74.29% recovery, and a secondary concentrate grading 15.60 g/t Au at 4.28% recovery. Two obtained products had a total gold grade of 39.79 g/t and recovery of 78.57%. It is shown that both gold grade and recovery are improved compared with conventional flotation processes. This processing technique can achieve efficient recovery of fine-grained gold, thus improving resource utilization.

**Key words:** gold ore; fine-grained; pyrite; flotation; enhanced collection; ultrafine grinding; collector

黄金是国家重要的战略储备物资<sup>[1]</sup>。我国是黄金产出大国, 随着我国黄金资源的持续开发利用, 难处理金矿逐渐占据主导地位。微细粒浸染型金矿石是我国金矿的重要组成部分, 主要分布在大兴安岭、东南沿海、滇黔桂、陕川甘等地<sup>[2]</sup>。该类矿石中金主要呈显微-次显微状赋存于黄铁矿、毒砂等载体矿物中<sup>[3-4]</sup>, 且载体矿物粒度细, 与其他矿物嵌布关系复杂, 金选别难度大, 是目前研究的重点和难点<sup>[5-6]</sup>。

浮选是处理微细粒浸染型金矿的主要方法之

一<sup>[7-11]</sup>, 通常根据具体矿石性质采用合适的药剂、工艺或设备等强化金的回收。某低温热液型微细粒浸染型金矿床储量丰富, 价值巨大, 其主要载金矿物黄铁矿粒度微细, 且与石英、白云石、方解石等脉石矿物紧密共生, 解离难度大, 极大影响黄铁矿的浮选效果和技术指标。为促进该类难选冶原生金矿石的高效开发利用, 本文对其开展浮选试验研究, 强化微细粒黄铁矿的回收, 并对含载金贫连生体的中矿进行选择性的再磨再选, 降低尾矿品位, 提高金回收率。

① 收稿日期: 2024-12-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20230353); 河南省重点研发专项项目 (221111320300)

作者简介: 吕子虎 (1980—), 男, 河南罗山人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事矿产资源调查与综合利用研究工作。E-mail: 58681269@qq.com

通信作者: 程宏伟 (1990—), 男, 河南唐河人, 硕士, 工程师, 主要从事矿产资源综合利用、浮选理论与工艺等方面研究工作。E-mail: chw217@163.com

### 1 矿石性质

原矿化学多元素分析结果见表1,金物相分析结果见表2,主要矿物组成及含量见表3。矿石中主要回收元素为金;矿石中主要金属矿物为黄铁矿、菱铁矿,少量方铅矿、黝铜矿、白钨矿等;脉石矿物主要有石英、白云母、铁白云石及方解石等。金主要以硫化物包裹金形式存在,其次以硅酸盐包裹金形式存在,少量以碳酸盐包裹金、铁氧化物包裹金及裸露和半裸露金形式存在。金主要赋存在黄铁矿中,少量赋存在石英、铁白云石等脉石矿物中。黄铁矿是主要的载金矿物,也是主要的目的矿物。

表1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis results of raw ore %

Au <sup>1)</sup>	S	Fe	As	C	K <sub>2</sub> O
2.41	0.65	3.91	0.036	4.31	2.97
Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	
0.092	10.43	42.91	15.17	2.61	

1) 单位为 g/t。

表2 原矿金物相分析结果

Table 2 Analysis results of Au phase in raw ore

相别	含量/(g·t <sup>-1</sup> )	分布率/%
裸露和半裸露金	0.10	4.15
碳酸盐包裹金	0.11	4.56
硫化物包裹金	1.82	75.52
铁氧化物包裹金	0.11	4.56
硅酸盐包裹金	0.27	11.21
合计	2.41	100.00

表3 原矿主要矿物组成及含量(质量分数)

Table 3 Main mineral composition and content of raw ore %

黄铁矿	石英	白云母	铁白云石	方解石	菱铁矿	角闪石
1.09	29.83	27.98	20.08	16.87	1.38	0.85
高岭石	斜长石	钾长石	磷铝铈矿	磷灰石	黑云母	金红石
0.63	0.28	0.2	0.16	0.15	0.13	0.09
电气石	重晶石	方铅矿	石榴子石	黝铜矿	白钨矿	
0.08	0.03	0.01	0.14	0.01	0.01	

采用矿物解离分析仪确定矿石中主要矿物的嵌布粒度和单体解离度。矿石中主要矿物粒度均较细,其中方解石、绢云母、石英和铁白云石粒度相对较粗,主要分布在-150 μm 粒级;主要载金矿物黄铁矿粒度极细,主要分布在-19 μm 粒级,占比 90.17%,其中-9.6 μm 粒级占比 62.25%,紧密嵌布在石英、铁白云石等脉石

矿物中,金难以解离暴露,将会影响金浮选回收率和浸出率。矿石中黄铁矿单体解离度较低,仅 46.89%,未解离部分主要以贫连生体形式存在,对黄铁矿选矿影响很大。

### 2 试验及结果讨论

#### 2.1 试验方法

矿石中主要载金矿物为黄铁矿,其粒度微细,且与其他矿物紧密共生,单体解离困难,不利于金的选矿回收。黄铁矿常用的选矿方法有重选法、浮选法、重选-浮选联合法。根据该金矿的矿石性质、主要目的矿物黄铁矿的嵌布特征以及探索试验结果,宜采用浮选法回收金矿物。试验流程见图1。

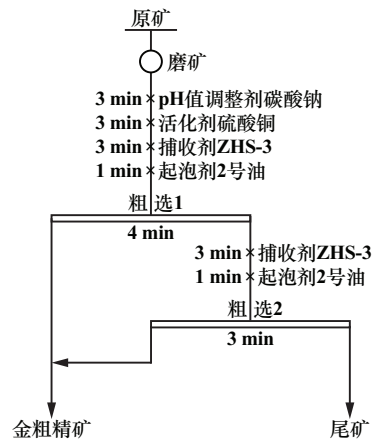


图1 试验流程

Fig.1 Flowchart in experiment

#### 2.2 粗选磨矿细度试验

选矿过程中磨矿细度是影响矿物分选指标的主要因素之一,只有确定适宜的磨矿细度,使载金矿物与脉石矿物充分解离,才能获得较好的选别指标。按照图1所示流程,在 pH 值调整剂碳酸钠 2 000 g/t、活化剂硫酸铜用量 200 g/t、捕收剂 ZHS-3 用量 120 g/t、起泡剂 2 号油用量 20 g/t 条件下,开展了磨矿细度条件试验,结果见图2。由图2可见,随着磨矿细度增加,粗精矿 Au 品位逐渐降低、回收率先增加后减少。磨矿细度-0.074 mm 粒级占 76%时,粗精矿中金品位 13.70 g/t、回收率 78.69%,尾矿金品位 0.57 g/t、回收率 21.31%,此时粗精矿金回收率达到峰值,尾矿金品位低,分选指标好。适宜的磨矿细度为-0.074 mm 粒级占 76%。

#### 2.3 粗选捕收剂种类及用量试验

磨矿细度-0.074 mm 粒级占 76%,其他条件不变,考察了捕收剂种类对金浮选指标的影响,结果见表4。

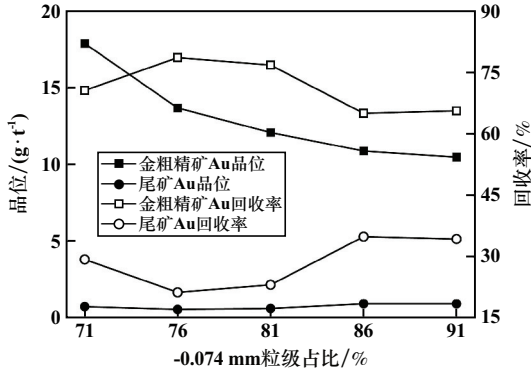


图2 磨矿细度试验结果

Fig.2 Grinding fineness test results

表4 捕收剂种类试验结果

Table 4 Collector type test results

捕收剂种类及用量/(g·t <sup>-1</sup> )	产品名称	产率/%	Au 品位/(g·t <sup>-1</sup> )	回收率/%
乙基黄药 120+60	粗精矿	12.64	12.70	69.20
	尾矿	87.36	0.82	30.80
	原矿	100.00	2.32	100.00
丁基黄药 120+60	粗精矿	14.38	12.00	74.40
	尾矿	85.62	0.69	25.60
	原矿	100.00	2.32	100.00
戊基黄药 120+60	粗精矿	14.73	12.10	76.85
	尾矿	85.27	0.63	23.15
	原矿	100.00	2.32	100.00
硫醇 120+60	粗精矿	17.11	9.73	71.74
	尾矿	82.89	0.79	28.26
	原矿	100.00	2.32	100.00
MA 120+60	粗精矿	16.14	10.70	74.43
	尾矿	83.86	0.71	25.57
	原矿	100.00	2.32	100.00
ZHS-1 120+60	粗精矿	8.27	19.24	68.57
	尾矿	91.73	0.79	31.43
	原矿	100.00	2.32	100.00
ZHS-2 120+60	粗精矿	11.69	14.60	73.58
	尾矿	88.31	0.69	26.42
	原矿	100.00	2.32	100.00
ZHS-3 120+60	粗精矿	13.33	13.70	78.69
	尾矿	86.67	0.57	21.31
	原矿	100.00	2.32	100.00

其中捕收剂 ZHS-1、ZHS-2、ZHS-3 均为中国地质科学院郑州矿产综合利用研究所自主研发的新型药剂,主要成分为高级黄药和中性油;MA 为市售捕收剂。由表 4 可以看出,黄药类捕收剂获得的粗精矿金回收率较高,但金品位较低(约 12 g/t);硫醇和 MA 获得的粗精矿金品位低且回收率一般;ZHS-1 获得的粗精矿金品位高,回收率较低;ZHS-2、ZHS-3 获得的金粗精矿品位适中,回收率较高。综合考虑,选择 ZHS-3 为该矿的捕收剂。

相同条件下,进行了 ZHS-3 用量试验,结果见图 3。

由图 3 可知:随着捕收剂 ZHS-3 用量增加,粗精矿中 Au 品位、回收率均先升后降,尾矿金品位基本不变。综合考虑粗精矿金品位、金回收率及尾矿金品位,ZHS-3 用量 160 g/t 为宜。

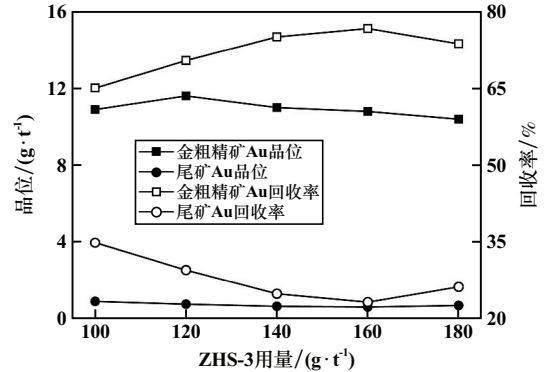


图3 ZHS-3 用量试验结果

Fig.3 ZHS-3 dosage test results

### 2.4 碳酸钠用量试验

在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 76%,硫酸铜用量 200 g/t、捕收剂 ZHS-3 用量 160 g/t、起泡剂 2 号油用量 20 g/t 条件下,考察了碳酸钠用量对选别指标的影响,结果见表 5。由表 5 可知,随着碳酸钠用量增加,粗精矿产率和金回收率逐渐提高,碳酸钠用量 2 000 g/t 时,粗精矿金回收率达到 70.63%,随后继续增加碳酸钠用量,粗精矿金回收率下降。适宜的碳酸钠用量为 2 000 g/t。

表5 碳酸钠用量试验结果

Table 5 Sodium carbonate dosage test results

碳酸钠用量/(g·t <sup>-1</sup> )	产品名称	产率/%	Au 品位/(g·t <sup>-1</sup> )	回收率/%
0	粗精矿	11.68	14.30	64.74
	尾矿	88.32	1.03	35.36
	原矿	100.00	2.58	100.00
1 000	粗精矿	13.01	13.20	66.60
	尾矿	86.99	0.99	33.40
	原矿	100.00	2.58	100.00
1 500	粗精矿	14.31	12.40	68.78
	尾矿	85.69	0.94	31.22
	原矿	100.00	2.58	100.00
2 000	粗精矿	15.73	11.60	70.63
	尾矿	84.27	0.90	29.37
	原矿	100.00	2.58	100.00
2 500	粗精矿	16.53	11.00	70.54
	尾矿	83.47	0.91	29.46
	原矿	100.00	2.58	100.00

### 2.5 硫酸铜用量试验

碳酸钠用量 2 000 g/t,其他条件不变,考察了硫酸铜用量对选别指标的影响,结果见表 6。由表 6 可知,

随着硫酸铜用量增加,粗精矿产率和金回收率先逐渐提高后降低。硫酸铜用量 200 g/t 时,粗精矿金回收率达到 70.63%。随后继续增加硫酸铜用量,粗精矿金回收率下降。适宜的硫酸铜用量为 200 g/t。

表 6 硫酸铜用量试验结果

Table 6 Copper sulfate dosage test results

硫酸铜用量/ (g·t <sup>-1</sup> )	产品名称	产率/%	Au 品位/ (g·t <sup>-1</sup> )	Au 回收率/%
0	粗精矿	12.32	14.20	67.75
	尾矿	87.68	0.95	32.25
	原矿	100.00	2.58	100.00
100	粗精矿	14.95	11.80	68.37
	尾矿	85.05	0.96	31.63
	原矿	100.00	2.58	100.00
200	粗精矿	15.73	11.60	70.63
	尾矿	84.27	0.90	29.37
	原矿	100.00	2.58	100.00
300	粗精矿	13.79	12.30	65.63
	尾矿	86.21	1.03	34.37
	原矿	100.00	2.58	100.00

2.6 浮选闭路试验

在条件试验和开路试验基础上,进行了浮选闭路试验,试验流程见图 4,结果见表 7。闭路试验获得了产率 5.10%、金品位 38.20 g/t、金回收率 73.24%的金精矿,尾矿金品位 0.75 g/t,金损失率为 26.76%。MLA 检测结果表明,尾矿和中矿中载金矿物多以贫连生体形式存在,矿物单体解离度较低。

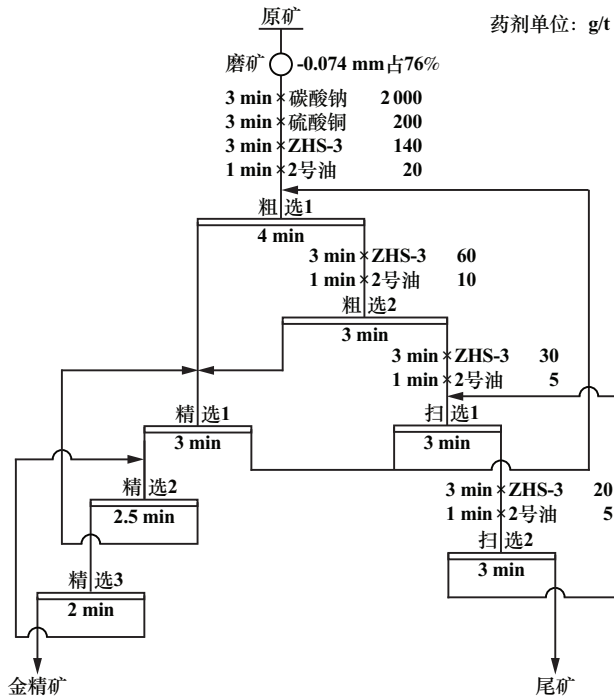


图 4 浮选闭路试验流程

Fig. 4 Closed-circuit flotation flowchart

表 7 浮选闭路试验结果

Table 7 Closed-circuit flotation test results

产品名称	产率/%	Au 品位/(g·t <sup>-1</sup> )	Au 回收率/%
金精矿	5.10	38.20	73.24
尾矿	94.90	0.75	26.76
原矿	100.00	2.66	100.00

2.7 金矿石浮选新工艺研究

根据矿石性质及金的赋存特性,进行流程结构优化:一方面提高粗选磨矿细度,增加一段扫选作业;另一方面对富含贫连生体的中矿进行选择性再磨再选,降低尾矿品位,提高金回收率。首先开展了中矿集中再磨再选的闭路流程试验,试验流程见图 5,结果见表 8。采用磨矿-强化捕收-中矿再磨再选的浮选工艺流程,获得了金品位 43.70 g/t、回收率 74.29%的金精矿及金品位 15.60 g/t、回收率 4.28%的次精矿,两者合

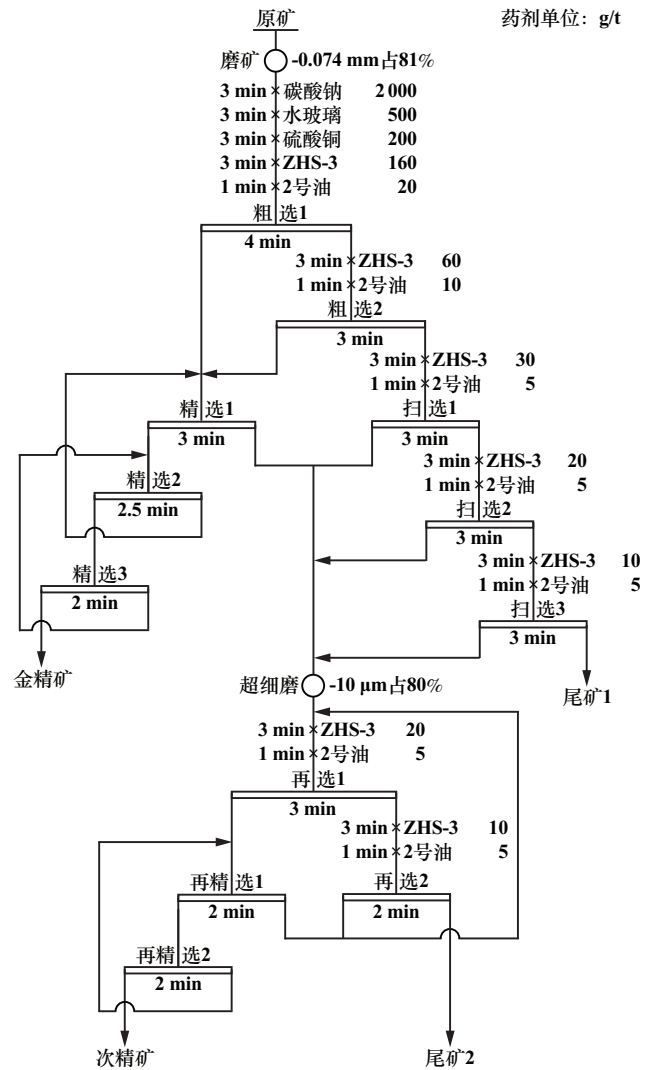


图 5 中矿再磨再选闭路试验流程

Fig. 5 Closed-circuit test flowchart with re-grinding and re-flotation of middlings

表8 中矿再磨再选闭路试验结果  
Table 8 Results of closed-circuit test with re-grinding and re-flotation of middlings

产品名称	产率/%	Au 品位/(g·t <sup>-1</sup> )	Au 回收率/%
金精矿	4.52	43.70	74.29
次精矿	0.73	15.60	4.28
尾矿 1	82.38	0.51	15.80
尾矿 2	12.37	1.21	5.63
原矿	100.00	2.66	100.00

计金品位 39.79 g/t、回收率 78.57%，相比常规浮选工艺，金品位和回收率都有所提高，实现了微细粒金的高效回收，提升了资源的利用效率。

### 3 结论

1) 矿石中主要有用元素是金，金主要赋存在黄铁矿中，少量赋存在石英、铁白云石等脉石矿物中。矿石中主要金属矿物为黄铁矿、菱铁矿及少量方铅矿、黝铜矿、白钨矿等，主要脉石矿物有石英、白云母、铁白云石及方解石等。黄铁矿是主要的载金矿物，粒度微细，主要分布在-19 μm 粒级，其中-9.6 μm 粒级占 62.25%。黄铁矿紧密嵌布在石英、铁白云石等脉石矿物中，解离困难，不利于黄铁矿的浮选；此外，黄铁矿单体解离度低，未解离部分主要以贫连生体形式存在，对金的浮选回收率和浸出率影响较大。

2) 根据矿石性质及金的赋存特性，采用自主研发的高效捕收剂 ZHS-3，并采用中矿再磨再选流程协同强化细粒金捕收，富含贫连生体的中矿集中单独处理，不影响主流程，分选指标稳定。磨矿-强化捕收-中矿再磨再选闭路试验最终获得金品位 43.70 g/t、回收率 74.29%的金精矿及金品位 15.60 g/t、回收率 4.28%的次精矿，两者合计金品位 39.79 g/t、回收率 78.57%，相比常规工艺流程，金品位和回收率都有所提高，实现了微细粒金的高效回收，提升了资源利用率，有望盘活呆滞金资源，促进该类型难选黄金资源的开发利用。

### 参考文献(References):

[1] 张生辉,王振涛,李永胜,等. 中国关键矿产清单、应用与全球格局[J]. 矿产保护与利用, 2022,42(5):138-168.  
ZHANG Shenghui, WANG Zhentao, LI Yongsheng, et al. List, application and global pattern of critical minerals of China[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022,42(5):138-168.

[2] 吕子虎,刘红召,卞孝东,等. 黄金矿床的分类及其综合利用技术现状[J]. 矿产保护与利用, 2018(4):135-141.  
LYU Zihu, LIU Hongzhao, BIAN Xiaodong, et al. The classification of the gold deposit and its status of comprehensive utilization technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(4):135-141.

[3] 郭桂荣,童伟,李建康,等. 艾砂磨机在灵宝黄金某冶炼厂焙烧金矿细磨中的应用[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):97-99.  
GUO Guirong, TONG Wei, LI Jiankang, et al. Application of ALC mill in fine grinding of roasted gold ore in a smelter of Lingbao gold group[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):97-99.

[4] 李宜昌,唐云,李国辉,等. 纳米铁粉—过硫酸铵氧化预处理对某微细浸染型金矿非氰浸出的影响及量子化学计算[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(1):50-56.  
LI Yichang, TANG Yun, LI Guohui, et al. Effect of nano iron powder-ammonium persulfate oxidation pretreatment on non-cyanide leaching of a fine disseminated gold ore and quantum chemical calculation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(1):50-56.

[5] 赵杰,赵志强,罗思岗,等. 某含砷金矿浮选提金降砷试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(2):63-65.  
ZHAO Jie, ZHAO Zhiqiang, LUO Sigang, et al. Optimization of flotation process of arsenic-bearing gold ore for gold enrichment and arsenic reduction[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(2):63-65.

[6] 黄长峰,曹玉川. 湖南某金矿浮选工艺研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):68-70.  
HUANG Changfeng, CAO Yuchuan. Flotation technique for the gold ore from Hunan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(5):68-70.

[7] 黄庆柒,廖幸锦,韦连军. 广西含碳型卡林金矿组合药剂高效浮选回收金试验研究[J]. 湖南有色金属, 2022,38(5):16-19.  
HUANG Qingqi, LIAO Xingjin, WEI Lianjun. Study on high efficiency flotation recovery of gold by combination reagent in Guangxi carbon-bearing carlin gold mine[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2022,38(5):16-19.

[8] 赵艳宾,刘璇遥,于鸿宾,等. 某微细粒含砷含碳难处理金矿浮选试验研究[J]. 矿冶, 2019,28(5):32-37.  
ZHAO Yanbin, LIU Xuanyao, YU Hongbin, et al. Study on flotation test of a tiny refractory gold ore containing arsenic and carbon[J]. Mining and Metallurgy, 2019,28(5):32-37.

[9] 吴天骄,曹欢,牛芳银,等. 某含碳微细粒难处理金矿浮选提金工艺研究[J]. 黄金科学技术, 2021(5):761-770.  
WU Tianjiao, CAO Huan, NIU Fangyin, et al. Study on gold extraction from a carbon-bearing fine-grained refractory gold ore by flotation process[J]. Gold Science and Technology, 2021(5):761-770.

[10] 王灿荣. 贵州某难选卡林型金矿浮选试验[J]. 现代矿业, 2018,34(5):78-83.  
WANG Canrong. Experiment on flotation of a refractory Carlin-type gold ore in Guizhou Province[J]. Modern Mining, 2018,34(5):78-83.

[11] 彭科淇,周瑞仙. 贵州某卡林型金矿精锐微泡浮选生产实践[J]. 黄金科学技术, 2023,31(4):689-697.  
PENG Keqi, ZHOU Ruixian. Production practice of JRF micro-bubble flotation on Carlin types gold ore in Guizhou[J]. Gold Science and Technology, 2023,31(4):689-697.

引用本文:吕子虎,梁延龙,赵登魁,等. 微细粒浸染型难选金矿石浮选新工艺研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):94-98.  
LYU Zihu, LIANG Yanlong, ZHAO Dengkui, et al. New flotation process for finely disseminated gold ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):94-98.