

某低品位金矿石机柱联合浮选试验研究

岳增俭

(山东烟台鑫泰黄金矿业有限责任公司)

摘要: 有色金属硫化矿矿石性质复杂,且含有多种有价元素,使用单一捕收剂难以获得理想指标。而组合捕收剂能够发挥协同作用,有利于实现复杂多金属硫化矿资源的高效分离与综合回收。针对某低品位金矿石开展了详细的工艺矿物学分析,并进行提金试验研究。研究表明,该矿石中金矿物粒度细且分散分布于载金矿物中。采用机柱联合浮选工艺处理该低品位难选矿石,添加组合捕收剂XTB和组合起泡剂XTQ可显著提高金的浮选指标。在闭路试验中,磨矿细度为-0.074 mm条件下,获得精矿金品位为38.00 g/t、金回收率为76.41%。该工艺实现了矿石中有价元素的高效回收和矿产资源的综合利用。

关键词: 机柱联合浮选;低品位;组合药剂;浮选柱;浮选机;捕收剂

中图分类号:TD952

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)10-0080-05

doi:10.11792/hj20251012

引言

黄金是重要的战略资源,兼具商品与金融双重属性,同时还广泛应用于航空航天、国防、饰品、电气等领域,在国民经济建设和社会进步中扮演着重要的角色^[1-2]。中国金矿资源主要表现出“贫矿多,富矿少;共伴生矿床多,单一矿床少;中小型矿多,大型矿少;难选矿多,易选矿少”的特征^[3-4]。因此,提高金矿资源的综合利用率,将有助于增强中国在金矿资源领域的竞争力。

目前,从含金矿物原料中提取金的方法有多种,主要包括浮选、重选、全泥氰化浸出、浮选—浸出、重选—浮选等工艺。其中,浮选是当前常用的提金方法,其原理是通过捕收剂与矿物之间相互作用,改变矿物表面的物理化学性质,实现目标矿物的浮选分离^[5]。例如:金与黄铁矿等硫化矿物共生时,硫化矿物是金良好的载体矿物,均具有良好的可浮性,采用浮选方法将金富集到硫化矿物中,再进一步加工提炼^[6-10]。

以胶东地区某低品位金矿石为研究对象,该矿石主要含有载金黄铁矿与载金磁黄铁矿。该矿山选矿厂采用机柱联合浮选工艺流程,金精矿金回收率为78%~79%,金品位为38~40 g/t。本研究旨在通过系统的工艺矿物学分析及提金试验,实现矿石中有价元素的高效回收,为矿产资源的综合利用提供技术支持^[11-14]。

1 矿石性质

1.1 矿石成分

首先对矿石试样进行混匀和缩分,然后对主要成分进行分析,试样的化学成分分析结果见表1。由表1可知:试样中主要有价元素为Au,Au品位为1.60 g/t,含SiO₂为31.25%、Al₂O₃为10.26%、S为1.86%,属于低硫型金矿石。

表1 试样化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of chemical composition in the sample

成分	Au ¹⁾	Ag ²⁾	S	Cu	Pb	Zn
w/%	1.60	1.21	1.86	0.18	0.17	0.12
成分	As	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe
w/%	0.01	12.74	7.51	31.25	10.26	5.03

注:1) $w(\text{Au})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$; 2) $w(\text{Ag})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$ 。

1.2 矿物组成

矿物组成测定结果见表2。由表2可知:试样中主要金属硫化矿物为黄铁矿和磁黄铁矿,分别占2.40%和0.96%,属于典型的复杂硫铁矿型金矿石。此外,还含有微量以自然金和金银矿为主的游离金矿物。脉石矿物主要为石英、方解石、钠长石、正长石等,分别占17.46%、12.19%、11.27%和8.20%。

1.3 金赋存状态

试样中金赋存状态分析结果见表3。由表3可知:金以游离金矿物、铜铅锌硫化矿载体金、黄铁矿载

表 2 矿物组成测定结果

Table 2 Mineral composition determination results

矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%	矿物名称	相对含量/%
黄铁矿	2.40	磁铁矿	0.38	磷灰石	0.20	白云石	8.98
磁黄铁矿	0.96	铁硅灰石	0.06	高岭石	0.04	菱镁矿	0.69
正长石	8.20	绿帘石	2.23	锆钙矾石	0.02	镁橄榄石	0.32
绿泥石	1.46	斜绿泥石	4.68	自然金	<0.01	钙铝榴石	0.04
方解石	12.19	钛铁矿	0.17	透辉石	1.96	萤石	0.01
钠长石	11.27	黄铜矿	0.13	黑云母	2.44	菱铁矿	0.03
石英	17.46	钙铁辉石	3.04	斜长石	0.17	金红石	0.04
富铁辉石	0.07	橄榄石	0.16	歪长石	0.07	钙镁闪石	0.23
榍石	0.53	伊利石	2.14	钙镁非石	0.02	方铅矿	0.10
苏辉石	1.39	拉长石	5.08	刚玉	0.04	闪锌矿	0.00
角闪石	10.11	金银矿	<0.01	锑铁矿	0.06	其他	0.43

体金和磁黄铁矿载体金为主,分布率分别为 19.69 %、10.71 %、44.35 %和 12.55 %,属于典型的复杂硫铁矿型金矿石。考虑到铜铅锌硫化矿主要以包裹体形式赋存于黄铁矿和磁黄铁矿中,将随黄铁矿与磁黄铁矿一并富集。综合分析,金的回收效果主要取决于游离金、载金黄铁矿和载金磁黄铁矿的回收优劣。

表 3 金赋存状态分析结果

Table 3 Analysis results of gold occurrence states

矿物种类	相对含量/%	$w(\text{Au})/(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	分布率/%
游离金矿物	—	—	19.69
铜铅锌硫化矿载体金	0.23	75.00	10.71
黄铁矿载体金	2.40	29.75	44.35
磁黄铁矿载体金	0.96	21.05	12.55
氧化铁载体金	0.38	0.03	0.01
脉石矿物(方解石等碳酸盐)	12.19	0.85	6.44
其他脉石矿物	83.84	0.12	6.25
合计	100.00		100.00

1.4 粒度测定

原矿粒度分布及主要矿物的嵌布粒度测定结果见表 4。由表 4 可知:原矿中-0.020 mm 粒级产率接近 16 %,主要是原生矿泥,属于高含泥矿石。对于黄铁矿,嵌布粒度主要集中在-0.075 mm 粒级,其中,-0.020 mm 粒级产率接近 36 %,属于微细粒嵌布粒度。对于磁黄铁矿,嵌布粒度主要集中在-0.043 mm 粒级,较黄铁矿嵌布粒度更细,其中,-0.020 mm 粒级产率更是高达 52 %,属于微细粒嵌布粒度。

2 试验方法及药剂

2.1 试验方法

为保证金矿的回收率,采用浮选柱进行粗选、扫

表 4 粒度测定结果

Table 4 Particle size and liberation degree determination results

粒级/mm	产率/%			
	原矿	黄铁矿	磁黄铁矿	方解石
+0.25	44.88			0.73
-0.25 ~ +0.15	8.40			4.12
-0.15 ~ +0.100	5.87	4.24		8.79
-0.10 ~ +0.075	5.97	14.82	4.64	9.17
-0.075 ~ +0.043	9.12	19.51	18.09	17.67
-0.043 ~ +0.020	9.83	25.79	25.31	20.12
-0.020 ~ +0.010	7.14	17.83	27.15	16.80
-0.010	8.78	17.81	24.81	22.60

选作业。粗选精矿与扫选精矿合并进入浮选机浮选,浮选机粗选、扫选均使用 XFD-1.5L 浮选机,精选使用 XRF-1.0L 浮选机。

2.2 试验药剂

浮选药剂采用选矿厂原有的药剂制度,即以 XTB 为捕收剂,XTQ 为起泡剂。其中,XTB 和 XTQ 为辽宁科技大学研发的组合捕收剂和组合起泡剂,对金矿的捕收能力有显著的提高。

3 机柱联合浮选试验结果与分析

3.1 磨矿细度

有用矿物单体解离是矿石有效分选的先决条件,合适的磨矿细度对选别指标有决定性的影响,未完全解离或过度解离,会增加浮选难度^[15-16]。因此,对矿石进行了磨矿细度试验研究,试验结果见图 1。

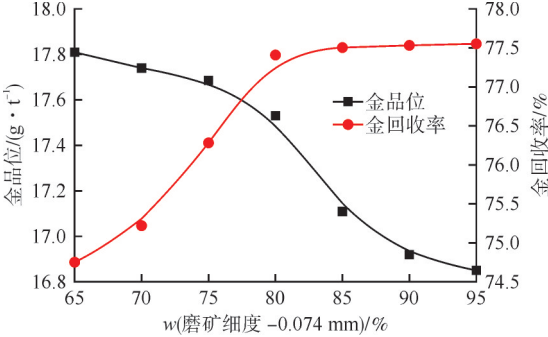


图 1 磨矿细度试验结果

Fig. 1 Results of grinding fineness tests

试验结果表明:磨矿细度-0.074 mm 占 65 % ~ 80 %时,金品位呈缓慢下降趋势,金回收率呈上升趋势;磨矿细度-0.074 mm 占 80 % ~ 95 %时,金品位呈快速下降趋势,金回收率趋于平稳。综合考虑,适宜的磨矿细度为-0.074 mm 占 80 %。

3.2 活化剂种类及用量

Cu²⁺是浮选生产中常用于浮选黄铁矿的活化剂。对于磁黄铁矿,可以考虑加入 Cu²⁺活化剂或在酸性介质条件下进行强化浮选回收^[17-18]。基于此,分别选择

硫酸铜和硫酸作为活化剂,进行了活化剂种类及用量的对比试验,试验结果见图2和图3。

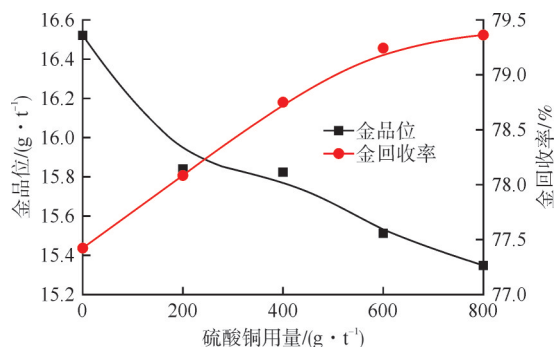


图2 硫酸铜用量试验结果

Fig. 2 Results of copper sulfate dosage test

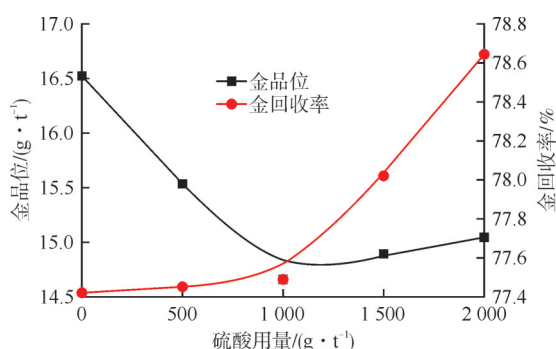


图3 硫酸用量试验结果

Fig. 3 Results of sulfuric acid dosage test

由图2可知:当硫酸铜用量为0~600 g/t时,金品位呈快速下降趋势,金回收率呈上升趋势;当硫酸铜用量超过600 g/t时,金回收率呈缓慢上升。酸性条件下,Cu²⁺活化矿物过程中仅吸附在矿物表面的活性位点,而不会渗透到黄铁矿晶体内部。综合考虑,不使用硫酸铜为活化剂。

由图3可知:硫酸作为活化剂时,用量为0~1000 g/t时,金品位呈急速下降趋势,金回收率无明显变化;用量超过1000 g/t时,金品位无明显变化,金回收率呈上升趋势。综合考虑,不使用硫酸为活化剂。无论是硫酸铜还是硫酸作活化剂,浮选尾矿中的金、硫品位并未有明显降低,这也从侧面表明该矿石中的磁黄铁矿属于难浮选磁黄铁矿,不建议加入活化剂。

3.3 捕收剂种类及用量

与单一捕收剂相比,组合捕收剂往往表现出更优异的性能,这主要归因于组合捕收剂组分之间产生的协同效应^[19-22]。在各类捕收剂中,黄药类捕收剂因其较强的捕收性能,在国内外得到了广泛研究。XTB是以黄药类为主合成的组合捕收剂,考察捕收剂种类及用量对指标的影响。固定试验条件:磨矿细度-0.074 mm占80%,起泡剂XTQ用量40 g/t,试验结果见图4和图5。

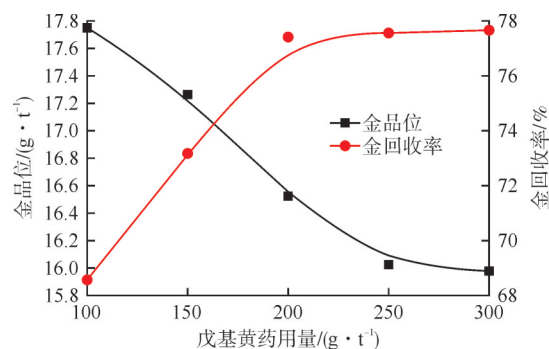


图4 戊基黄药用量试验结果

Fig. 4 Results of amyl xanthate dosage test

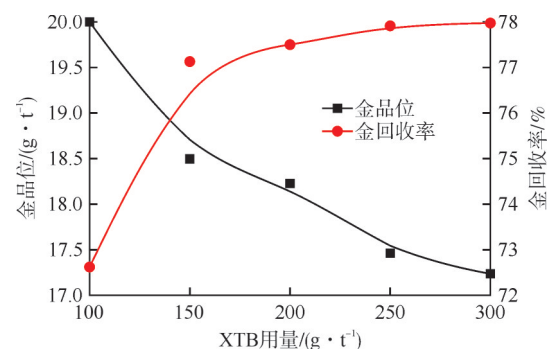


图5 XTB用量试验结果

Fig. 5 Results of the XTB dosage test

由图4、图5可知:单一捕收剂戊基黄药的用量从100 g/t增加到200 g/t时,金回收率呈明显上升趋势,金品位呈下降趋势;当增加到200~300 g/t时,金回收率趋于稳定,而金品位呈下降趋势。组合捕收剂XTB的用量从100 g/t增加到200 g/t时,金回收率呈快速上升趋势;用量为100~150 g/t时,金品位下降较为明显;用量为150~200 g/t时,金品位下降缓慢,当用量为200 g/t时出现上升的一个拐点。综合考虑,选择组合捕收剂XTB用量为200 g/t。

3.4 起泡剂种类及用量

起泡剂的结构、用量及其组合方式不仅对泡沫性能有显著影响,还会直接影响浮选指标。为探究起泡剂种类对磁黄铁矿回收效果的影响,研究分别选用2号油与XTQ作为起泡剂,开展了种类与用量的对比试验(固定试验条件:磨矿细度-0.074 mm占80%,捕收剂XTB用量为200 g/t)。试验结果见图6和图7。

由图6、图7可知:从金回收率角度来看,当使用2号油作为起泡剂时,随着用量从20 g/t增加至40 g/t,金回收率呈上升趋势,而金品位则快速下降;当用量从40 g/t继续增加至100 g/t时,金回收率趋于稳定,金品位仍呈下降趋势。相比之下,当采用XTQ作为起泡剂,用量从20 g/t增加至40 g/t时,金回收率快速上升,金品位缓慢提高;而当起泡剂用量从40 g/t增加至100 g/t时,金回收率趋于平稳,金品位则出现快速下降。为后续浮选过程中获得更高品位的金精矿,综合

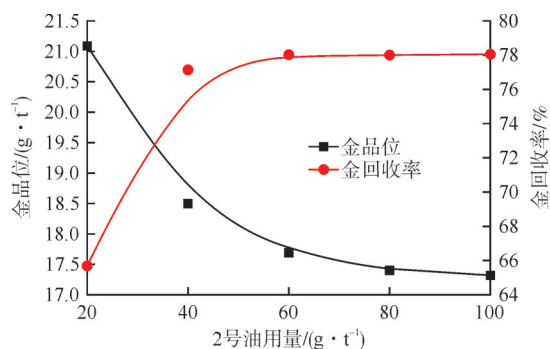


图6 2号油用量试验结果

Fig. 6 Results of No. 2 oil dosage test

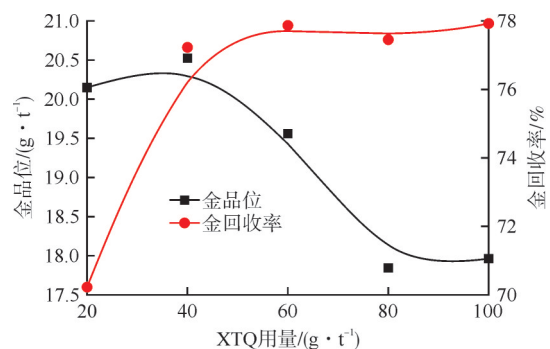


图7 XTQ 用量试验结果

Fig. 7 Results of the XTQ dosage test

考虑,采用起泡剂 XTQ,用量为 40 g/t。

3.5 矿浆浓度

合适的矿浆浓度不仅可以提高浮选效率,还能保证浮选精矿的品位和回收率。矿浆浓度过高,容易导致浮选夹带严重,影响精矿品位;而矿浆浓度过低,不利于粗颗粒矿物的浮选回收,导致回收率下降。为了确定最佳矿浆浓度,在上述最佳捕收剂和起泡剂的条件 下,进一步考察了不同矿浆浓度对金矿浮选的影响,试验结果见图 8。

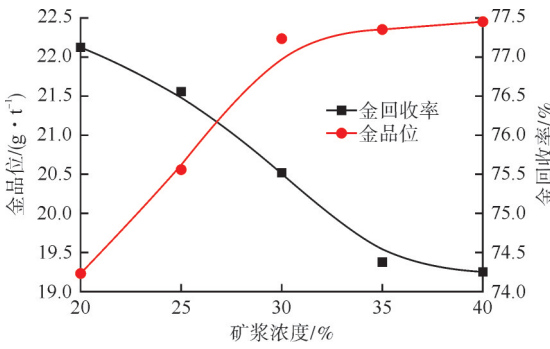


图8 矿浆浓度对浮选指标的影响

Fig. 8 Effect of pulp concentration on flotation performance

试验结果表明:随着矿浆浓度的增加,金品位呈上升趋势,金回收率呈下降趋势。当矿浆浓度达到 30 %时,金品位趋于稳定,金回收率呈快速下降趋势。综合考虑,适宜的矿浆浓度为 30 %。

3.6 闭路试验

在条件试验的基础上,开展了全流程机柱联合闭路试验。为保证金回收率,采用浮选柱进行粗选和扫选作业,所得粗选精矿和扫选精矿合并后,进入浮选机进行再选。试验固定磨矿细度为-0.074mm 占 80 %,捕收剂 XTB 用量为 200 g/t,起泡剂 XTQ 用量为 40 g/t,矿浆浓度为 30 %。试验流程见图 9。

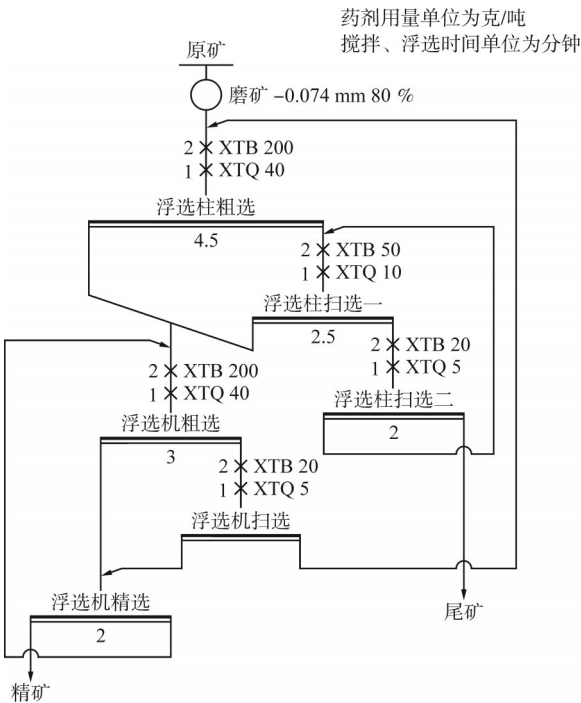


图9 浮选闭路试验流程

Fig. 9 Flowchart of closed-circuit flotation test

受现场条件限制,浮选柱试验与浮选机试验分开进行,完成浮选柱部分试验,将其精矿合并后,再开展浮选机试验。浮选机试验同样将粗选与扫选所得精矿合并后,再进入精选作业。在机柱联合浮选试验过程中,共采集 10 组精矿、尾矿样品,化验结果的平均值见表 5。由表 5 可知:最终获得的浮选精矿金品位为 38.00 g/t,金回收率为 76.41 %;浮选尾矿金品位为 0.39 g/t,金回收率为 23.59 %。

表5 浮选试验结果

Table 5 Flotation test results

产品名称	产率/%	金品位/(g·t ⁻¹)	金回收率/%
精矿	3.22	38.00	76.41
尾矿	96.78	0.39	23.59
原矿	100.00	1.60	100.00

3.7 不同浮选工艺对比试验

在给矿量相同及最佳浮选试验条件下,分别对比了“浮选机工艺”“浮选柱工艺”和“机柱联合浮选工艺”的分选效果,试验结果见表 6。由表 6 可知:浮选机与浮选柱工艺所获精矿的金品位均低于机柱联合

浮选工艺,且金回收率也显著降低。采用机柱联合浮选工艺最终获得的精矿金品位为 38.00 g/t,金回收率为 76.41 %。

表 6 不同浮选工艺对比试验结果

浮选工艺	金品位/%		金回收率/%
	精矿	尾矿	
浮选机	25.14	0.35	66.49
浮选柱	26.24	0.34	69.13
机柱联合	38.00	0.39	76.41

4 结 论

1)单一捕收剂在金浮选过程中存在选择性差等问题,以黄药为主的组合捕收剂具有无毒等优势。黄药类捕收剂聚焦金矿物与脉石矿物表面性质的差异性,开发了金浮选专属高效组合捕收剂,优化黄药类组合捕收剂的性能,同时降低黄药类组合捕收剂的合成成本。

2)在金浮选条件试验基础上进行机柱联合浮选工艺流程的闭路试验,最终获得精矿金品位为 38.00 g/t、金回收率为 76.41 %。试验整体效果较好,实现了矿石中资源的综合利用。

3)对比不同工艺的试验结果,单一浮选工艺的金品位和金回收率低于联合浮选工艺的金品位和金回收率。联合浮选工艺稳定性较好,可以得到高质量的金精矿产品,为金矿开发利用提供了一条可靠的技术途径。

[参 考 文 献]

[1] 姜绍军,陈晓东,栾晓刚,等.某金矿尾矿再磨再选半工业试验研究[J].黄金,2024,45(6):55-59.
[2] 常超,金永朋,赵晓康,等.旋流-静态微泡浮选柱在金精矿浮选中的半工业试验研究[J].黄金,2023,44(11):39-43.

[3] 高恩霞,周宇照,闫平科,等.离子沉淀浮选法回收废水中的Cu²⁺[J].山东理工大学学报(自然科学版),2022,36(5):1-7.
[4] 杨宁,黄宇林,徐启云,等.精锐微泡浮选机在上官金矿的试验应用[J].黄金,2021,42(4):67-70.
[5] 熊召华.某低品位金矿半工业性浮选柱探索试验研究[J].金属矿山,2020(8):114-118.
[6] 蒯慧杰.活化剂KT-51在锡石浮选中的作用机理研究及应用[D].昆明:昆明理工大学,2020.
[7] 白俊智.高含泥金矿石选矿工艺技术改造[J].黄金,2019,40(7):54-58.
[8] 李晓波,徐宝金,夏国进.某金矿尾矿浮选柱提金试验[J].现代矿业,2019,35(6):6-8,16.
[9] 肖俊,董艳红,张笃,等.机柱联合重晶石浮选扩大连续试验研究[J].化工矿物与加工,2018,47(8):9-12,17.
[10] 王晴,马子龙,曹亦俊,等.柱机联合浮选在某含金硫化矿中的应用[J].矿产综合利用,2018(3):52-56.
[11] 牛会群.低硫金矿石尼尔森重选-浮选联合试验研究[D].沈阳:东北大学,2018.
[12] 蒋元力,刘焦萍,李壮,等.低品位铝土矿高效分选工艺研究[J].轻金属,2018(4):4-7.
[13] 王晴.某金尾矿二次回收试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
[14] 赵敏捷,方建军,李国栋,等.旋流-静态微泡浮选柱的应用及研究进展[J].矿产综合利用,2016(4):6-10.
[15] 盖艳武.河南低品位铝土矿机-柱联合分选试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2014.
[16] 黄裕卿,李广,纪婉颖,等.贵州某氰化尾渣金回收试验研究[J].黄金,2024,45(9):46-51.
[17] 张书超,代定,盛涛.刚果(金)某锂辉石选矿试验研究[J].黄金,2024,45(9):52-56.
[18] 高迟明,梁毅,王卫军,等.河南某微细粒复杂难选金矿高效回收技术研究[J].黄金,2024,45(9):41-45.
[19] 周天瑜,张鑫,聂兴信,等.某铅锌浮选厂颗粒物浓度分布及其影响研究[J].黄金,2024,45(9):87-91.
[20] 孙文祥.西藏某次生铜矿铜铅分离试验研究[J].黄金,2024,45(8):75-80.
[21] 马鹏程,王乐译,姜桂鹏,等.氰渣有价金属浮选回收试验研究与应用[J].黄金,2024,45(7):51-59.
[22] 周生海.福建某锌精矿铜铅综合回收试验研究[J].黄金,2024,45(6):31-36.

Experimental study on combined machine-column flotation of a low-grade gold ore

Yue Zengjian

(Shandong Yantai Xintai Gold Mining Co., Ltd.)

Abstract: Non-ferrous metal sulfide ores exhibit complex mineralogical properties and contain multiple valuable elements, making it difficult to achieve ideal indicators using a single collector. Combined collectors can produce synergistic effects, facilitating the efficient separation and comprehensive recovery of complex polymetallic sulfide ore resources. In this study, a detailed process mineralogy analysis was conducted on a low-grade gold ore, followed by experimental research on gold extraction. Results indicate that the gold minerals in the ore are fine-grained and dispersed within gold-bearing minerals. By employing a combined machine-column flotation process to treat this low-grade refractory ore, along with the addition of the combined collector XTB and the combined frother XTQ, the flotation performance of gold is significantly improved. In closed-circuit tests with a grinding fineness of -0.074 mm, a gold concentrate with a grade of 38.00 g/t and a recovery of 76.41 % is obtained. This process achieves efficient recovery of valuable elements and maximizes the utilization of mineral resources.

Keywords: combined machine-column flotation; low grade; combined reagent; flotation column; flotation machine; collector