

某高含镁铜硫矿石选矿试验研究^①

唐鑫^{1,2}, 简胜^{1,2}, 张晶^{1,2}, 张曙光^{1,2}, 吕向文^{1,2}, 刘玫华^{1,2}

(1.昆明冶金研究院有限公司, 云南 昆明 650031; 2.云南省选冶新技术重点实验室, 云南 昆明 650031)

摘要: 对某 MgO 品位 11.86%、S 品位 6.81% 的高含镁铜硫矿石进行了选矿试验研究。采用部分优先浮选铜、铜硫分离、铜精矿反浮选脱镁的浮选流程, 使用选择性强的铜捕收剂 SG-2 并配合使用镁质脉石抑制剂 HD, 获得了 Cu 品位 23.47%、MgO 品位 2.99%、Cu 回收率 81.10% 的合格铜精矿。

关键词: 铜硫矿; 氧化镁; 浮选; 脱镁; 捕收剂; 抑制剂; 铜精矿

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.016

文章编号: 0253-6099(2025)04-0090-05

Experimental Study on Mineral Processing of a High-Magnesium Copper-Sulfur Ore

TANG Xin^{1,2}, JIAN Sheng^{1,2}, ZHANG Jing^{1,2}, ZHANG Shuguang^{1,2}, LYU XiangWen^{1,2}, LIU Meihua^{1,2}

(1. Kunming Metallurgy Institute Co., Ltd., Kunming 650031, Yunnan, China; 2. Yunnan Key Laboratory for New Technology of Beneficiation and Metallurgy, Kunming 650031, Yunnan, China)

Abstract: An experimental study was carried out for mineral processing of a Cu-S ore with grade of MgO at 11.86%, grade of S at 6.81%. In the experiment, a flotation process, consisting of preferential flotation of copper, Cu-S separation and reverse flotation of copper concentrate for removal of magnesium, was adopted, with SG-2 as a copper collector in combination with HD as a depressant for magnesium-containing gangue, producing a standard copper concentrate grading 23.47% Cu and 2.99% MgO, with copper recovery at 81.10%.

Key words: copper sulfide ore; magnesium oxide; flotation; magnesium removal; collector; depressant; copper concentrate

铜矿床一般有斑岩型、矽卡岩型、层状型、火山沉积型和铜镍硫化物型 5 种类型^[1]。一般随着采矿深度增加, 部分矿床周边会出现蚀变, 如钾化、绢云母化、硅化、绿泥石化等, 多样的蚀变类型导致矿石分选难度加大, 如其中出现的滑石、蛇纹石、绿泥石等含镁硅酸盐矿物^[2]和黄铁矿会极大影响铜精矿品位。

高含镁铜硫矿浮选中, 影响铜精矿品位的原因主要有两个。一是含镁硅酸盐矿物(如滑石、蛇纹石、绿泥石等)本身疏水性强, 天然可浮性好, 不容易被抑制; 含镁硅酸盐矿石本身易磨易泥化, 容易形成矿泥罩盖在矿物表面, 影响捕收剂对矿物的吸附; 矿泥还易被浮选泡沫机械夹杂, 影响精矿品位^[3-6]。二是黄铁矿可浮性好, 易

上浮, 通常在高碱环境下抑制黄铁矿, 泡沫易发黏进而夹带其他矿物, 影响铜精矿质量; 黄铁矿受 Cu^{2+} 活化影响, 黄铜矿受 Fe^{2+} 抑制影响, 导致铜硫分离困难^[7-11]。

某高含镁铜硫矿属于斑岩型和矽卡岩型混合矿床, 原矿 MgO 品位 11.86%、S 品位 6.81%, 属于典型高硫高镁蚀变矿石, 铜精矿铜品位及回收率受滑石等易浮镁硅酸盐矿物及黄铁矿的影响较大, 难以获得理想的技术指标。本文采用部分优先浮选铜、铜硫分离、铜精矿反浮选脱镁的浮选工艺, 基于药剂与工艺协同, 小型闭路试验可获得 Cu 品位 23.47%、MgO 品位 2.99%、Cu 回收率 81.10% 的铜精矿, 极大改善了产品质量。研究成果对处理同类型矿石具有借鉴意义。

① 收稿日期: 2025-01-25

基金项目: 云南省科技人才与平台计划(202305AD160054)

作者简介: 唐鑫(1989—), 男, 云南昭通人, 硕士, 高级工程师, 主要从事选矿工艺、设备及药剂研究。E-mail: kmritang@163.com

通信作者: 张晶(1985—), 女, 湖北应城人, 硕士, 正高级工程师, 主要从事选矿工艺及药剂研发。E-mail: happy-jingle@163.com

1 矿石性质

矿石化学多元素、铜物相及矿物组成分析结果分别如表 1~3 所示。矿石中铜是选矿回收的主要对象,可能对铜精矿品位造成不利影响的杂质元素主要为硫与镁。铜主要以硫化铜形式存在,次生硫化铜分布率为 28.89%,次生硫化铜成矿过程中常产生难免金属离子,使黄铁矿等硫化矿物受到活化从而难以抑制。矿石中硫化矿物以铜矿物与黄铁矿为主,其中黄铁矿含量 13.07%。矿石中主要含镁矿物主要为蛇纹石(5.55%)、滑石(6.09%)、透闪石(9.44%)和绿泥石(3.52%),部分镁硅酸盐矿物属层状易浮矿物,与被活化的黄铁矿均可能对铜精矿造成污染。

表 1 试样化学多元素分析结果(质量分数)
Table 1 Multi-elemental analysis of sample %

Cu	S	As	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe
0.45	6.81	<0.10	48.53	8.69	10.14
Na ₂ O	Ag ¹⁾	CaO	MgO	P	Au ¹⁾
0.25	11.9	3.01	11.86	0.14	<0.10

1) 单位为 g/t。

表 2 铜物相分析结果
Table 2 Copper phase analysis results

铜物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
游离氧化铜	0.003 3	0.73
结合氧化铜	0.006 7	1.49
次生硫化铜	0.13	28.89
原生硫化铜	0.31	68.89
合计	0.45	100.00

表 3 矿物组成(质量分数)
Table 3 Mineral composition %

黄铜矿	硫砷铜矿	斑铜矿	辉铜矿	磁黄铁矿	黄铁矿	铜蓝
1.023	0.13	0.001	0.02	0.73	13.07	0.02
磁铁矿	褐铁矿	石英	斜长石	金/黑云母	高岭石	白云母
2.4	0.04	23.65	3.89	10.41	2.78	4.69
角闪石	透辉石	绿泥石	滑石	蛇纹石	透闪石	钾长石
1.43	1.37	3.52	6.09	5.55	9.44	6.71
磷灰石	菱铁矿	石膏	黄钾铁矾	金红石/板钛矿		
0.59	1.35	0.14	0.62	0.34		

2 试验结果与分析

基于矿石性质分析,选择部分优先浮选铜、铜硫分

离、铜精矿反浮选脱镁的选矿工艺,实现铜精矿与滑石的有效分离。

2.1 部分优先浮选铜粗选条件试验

根据前期试验经验,在棒磨机中添加石灰,以 24K(甲基异丁基甲醇混合物)为起泡剂,进行粗选条件试验,试验流程见图 1。

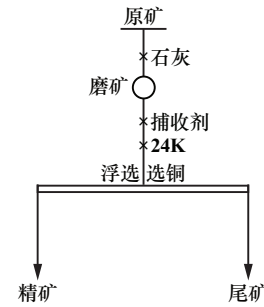


图 1 部分优先浮选铜粗选条件试验流程
Fig.1 Preferential flotation flowchart for Cu

2.1.1 捕收剂种类试验

粗选磨矿细度 -74 μm 粒级占 60%,石灰用量 3 000 g/t、起泡剂 24K 用量 40 g/t、捕收剂用量 40 g/t,按照图 1 所示流程进行了捕收剂种类试验,结果见表 4。其中 MCO 为烃油类捕收剂,SG-2 为酯类与烃类混合物(为昆明冶金研究院有限公司自主研发的捕收剂)。传统黄药类捕收剂对铜矿物捕收能力强,但黄铁矿与含镁脉石矿物上浮量亦较大,除了黄药本身无选择性地非目的矿物表面吸附外,黄药体系造成矿浆发黏也增加了含镁脉石矿物机械夹带的概率。Z-200、MCO、SG-2 具有较好的选择性,而 SG-2 可以同时获得较高的品位和回收率。确定使用 SG-2 为本次的捕收剂。

表 4 捕收剂种类对粗选选铜指标的影响
Table 4 Influence of collector types on Cu roughing

捕收剂种类	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	S	MgO	Cu	S	MgO
Z-200	精矿	9.27	3.89	13.21	13.64	79.04	17.87	10.83
	尾矿	90.73	0.11	6.20	11.47	20.96	82.13	89.17
	原矿	100.00	0.46	6.85	11.67	100.00	100.00	100.00
MCO	精矿	7.30	4.77	9.24	14.34	75.82	9.98	9.04
	尾矿	92.70	0.12	6.56	11.37	24.18	90.02	90.96
	原矿	100.00	0.46	6.76	11.59	100.00	100.00	100.00
异戊基黄药	精矿	24.36	1.53	12.31	13.55	83.58	43.07	28.18
	尾矿	75.64	0.10	5.24	11.12	16.42	56.93	71.82
	原矿	100.00	0.45	6.96	11.71	100.00	100.00	100.00
丁基黄药	精矿	22.30	1.71	12.21	13.60	83.37	39.98	26.21
	尾矿	77.70	0.10	5.26	10.99	16.63	60.02	73.79
	原矿	100.00	0.46	6.81	11.58	100.00	100.00	100.00
SG-2	精矿	10.88	3.54	11.15	12.80	83.07	17.78	12.06
	尾矿	89.12	0.09	6.30	11.40	16.93	82.22	87.94
	原矿	100.00	0.46	6.82	11.55	100.00	100.00	100.00

2.1.2 粗选药剂制度的确定

以 SG-2 为捕收剂,通过单因素试验,确定了粗选的药剂制度为:石灰用量 4 000 g/t(pH 值约 9.5),SG-2 用量 30 g/t,24K 用量 40 g/t。

2.1.3 粗选磨矿细度试验

根据前期工艺矿物学研究结果,部分铜矿物嵌布粒度相对较细,拟在相对粗粒级实现铜矿物的解离。石灰用量 4 000 g/t,SG-2 用量 30 g/t,24K 用量 40 g/t,按照图 1 所示流程,考察了磨矿细度对粗选指标的影响,结果如表 5 所示。随着磨矿细度增加,粗选铜回收率逐步增加后趋于稳定,而滑石等镁质矿物在磨矿过程中产生泥化,进入粗选精矿中。综合考虑,粗选磨矿细度-74 μm 粒级占 65%为宜。

表 5 磨矿细度对粗选选铜指标的影响

Table 5 Influence of grinding fineness on Cu roughing

-74 μm 粒级 占比/%	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	S	MgO	Cu	S	MgO
50	精矿	7.23	4.70	12.36	11.21	75.62	13.21	6.94
	尾矿	92.77	0.12	6.33	11.72	24.38	86.79	93.06
	原矿	100.00	0.45	6.77	11.68	100.00	100.00	100.00
55	精矿	8.13	4.39	12.08	12.24	79.01	14.62	8.59
	尾矿	91.87	0.10	6.25	11.52	20.99	85.38	91.41
	原矿	100.00	0.45	6.72	11.58	100.00	100.00	100.00
60	精矿	9.89	3.93	10.62	12.80	83.81	15.31	11.00
	尾矿	90.11	0.08	6.45	11.37	16.19	84.69	89.00
	原矿	100.00	0.46	6.86	11.51	100.00	100.00	100.00
65	精矿	10.01	3.83	10.57	12.68	84.41	15.49	11.03
	尾矿	89.99	0.08	6.41	11.38	15.59	84.51	88.97
	原矿	100.00	0.45	6.83	11.51	100.00	100.00	100.00
70	精矿	10.53	3.70	10.51	13.51	84.44	16.36	12.19
	尾矿	89.47	0.08	6.32	11.46	15.56	83.64	87.81
	原矿	100.00	0.46	6.76	11.67	100.00	100.00	100.00
80	精矿	11.02	3.42	10.44	13.71	84.60	17.17	13.03
	尾矿	88.98	0.08	6.24	11.33	15.40	82.83	86.97
	原矿	100.00	0.45	6.70	11.59	100.00	100.00	100.00

2.2 铜硫分离条件试验

对部分优先浮选铜获得的粗精矿进行铜硫分离。试验流程见图 2。

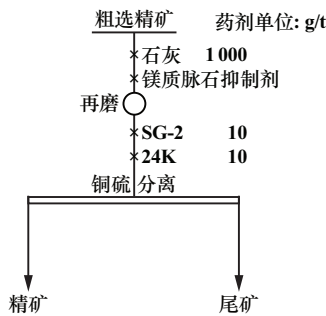


图 2 铜硫分离条件试验流程

Fig. 2 Flowchart of Cu/S separation

2.2.1 镁质脉石抑制剂种类试验

抑制剂用量 50 g/t,再磨细度-45 μm 粒级占 80%,按照图 2 所示流程进行了镁质脉石抑制剂种类试验,结果见表 6。结果表明,再磨时添加镁质脉石抑制剂可有效降低铜精矿中氧化镁含量。羧甲基纤维素钠(CMC)对镁质脉石矿物抑制效果极优,也会强烈抑制铜矿物;聚糖类混合物(HD)能在抑制镁质矿物的同时获得更高的铜回收率。选择 HD 作为镁质脉石抑制剂。

表 6 镁质脉石抑制剂对铜硫分离指标的影响

Table 6 Influence of Mg-containing gangue depressant on Cu/S separation

抑制剂种类	产品名称	作业产率/%	品位/%			作业回收率/%		
			Cu	S	MgO	Cu	S	MgO
糊精	精矿	21.53	11.87	25.44	10.59	61.43	51.82	18.70
	尾矿	78.47	2.04	6.49	12.63	38.57	48.18	81.30
	粗精矿	100.00	4.16	10.57	12.19	100.00	100.00	100.00
HD	精矿	23.23	11.67	25.27	9.81	65.01	55.80	18.63
	尾矿	76.77	1.90	6.06	12.96	34.99	44.20	81.37
	粗精矿	100.00	4.17	10.52	12.23	100.00	100.00	100.00
CMC	精矿	20.15	12.01	26.32	9.67	58.31	50.32	15.96
	尾矿	79.85	2.17	6.56	12.85	41.69	49.68	84.04
	粗精矿	100.00	4.15	10.54	12.21	100.00	100.00	100.00
不添加	精矿	28.65	9.31	23.59	13.69	63.81	63.70	32.10
	尾矿	71.35	2.12	5.40	11.63	36.19	36.30	67.90
	粗精矿	100.00	4.18	10.61	12.22	100.00	100.00	100.00

在相同条件下进行了 HD 用量试验,确定 HD 的适宜用量为 150 g/t。

2.2.2 再磨细度试验

抑制剂 HD 用量 150 g/t,按照图 2 所示流程进行了再磨细度试验,结果见表 7。随着再磨细度增加,精矿铜品位及铜回收率均出现少量增长后下降的情况,

表 7 再磨细度对铜硫分离指标的影响

Table 7 Influence of regrinding fineness on Cu/S separation

-45 μm 粒级 占比/%	产品名称	作业产率/%	品位/%			作业回收率/%		
			Cu	S	MgO	Cu	S	MgO
70	精矿	22.12	12.07	24.33	10.45	63.42	50.63	18.90
	尾矿	77.88	1.98	6.74	12.74	36.58	49.37	81.10
	粗精矿	100.00	4.21	10.63	12.23	100.00	100.00	100.00
75	精矿	20.77	12.88	25.67	8.98	64.15	50.68	15.33
	尾矿	79.23	1.89	6.55	13.01	35.85	49.32	84.67
	粗精矿	100.00	4.17	10.52	12.17	100.00	100.00	100.00
80	精矿	19.12	14.07	27.52	8.11	64.36	49.45	12.72
	尾矿	80.88	1.84	6.65	13.15	35.64	50.55	87.28
	粗精矿	100.00	4.18	10.64	12.19	100.00	100.00	100.00
85	精矿	19.23	13.87	27.39	8.12	63.50	49.78	12.73
	尾矿	80.77	1.90	6.58	13.26	36.50	50.22	87.27
	原矿	100.00	4.20	10.58	12.27	100.00	100.00	100.00
90	精矿	19.33	13.56	27.32	8.01	62.86	49.54	12.54
	尾矿	80.67	1.92	6.67	13.39	37.14	50.46	87.46
	粗精矿	100.00	4.17	10.66	12.35	100.00	100.00	100.00

可能与提升再磨细度增加了铜矿物解离度的同时也加剧了镁质脉石矿物泥化有关。适宜的再磨细度为-45 μm 粒级占 80%。

2.3 闭路试验

在条件试验基础上进行了小型闭路试验,试验流程见图 3,试验结果见表 8。相同流程下,现场使用的捕收剂丁基黄药+脉石抑制剂 CMC 获得的闭路试验结果亦列于表 8 中。结果表明,SG-2+HD 浮选药剂体系较原有丁基黄药+CMC 的强拉强压药剂体系更有利于提升铜精矿指标,但铜精矿中氧化镁含量还是较高,铜精矿 Cu 品位仅 18.62%,铜精矿中 MgO 品位为 6.93%。

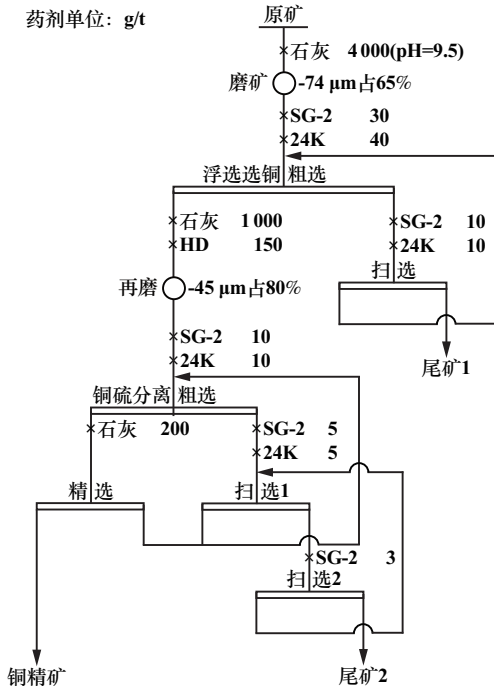


图 3 闭路试验流程

Fig.3 Closed-circuit test flowchart

表 8 不同药剂体系闭路试验结果

Table 8 Closed-circuit tests result with different reagent systems

药剂体系	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	S	MgO	Cu	S	MgO
SG-2 + HD	铜精矿	1.91	18.62	31.23	6.93	81.92	8.51	1.18
	尾矿 1	88.37	0.058	6.57	10.96	11.81	82.85	86.06
	尾矿 2	9.72	0.28	6.23	14.78	6.27	8.64	12.77
	给矿	100.00	0.43	7.01	11.25	100.00	100.00	100.00
丁基黄药 + CMC	铜精矿	2.01	17.03	32.77	8.12	80.19	9.43	1.48
	尾矿 1	85.66	0.057	6.01	10.39	11.44	73.74	80.46
	尾矿 2	12.33	0.29	9.53	16.21	8.38	16.83	18.07
	给矿	100.00	0.43	6.98	11.06	100.00	100.00	100.00

2.4 脱镁试验

对铜精矿进行显微镜镜下检测,结果如图 4 所示。在铜精矿中可以看到滑石及蛇纹石等镁质脉石矿物,

说明少量滑石等镁质脉石矿物天然可浮性极强,难以抑制。

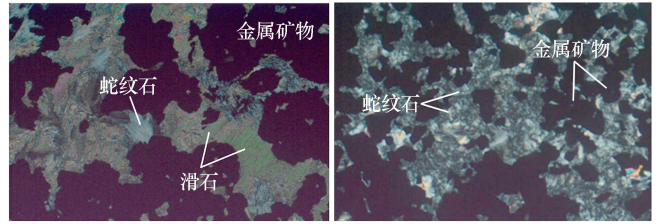


图 4 铜精矿显微镜照片

Fig.4 Microscopic images of copper concentrate

针对这种情况,对闭路试验获得的铜精矿进行了抑铜浮镁反浮选脱镁试验。采用常规浮选药剂,以硫化钠为铜抑制剂、煤油为镁质脉石捕收剂,试验流程见图 5,试验结果见表 9。结果表明,采用 SG-2+HD 浮选药剂体系,协同抑铜浮镁工艺,可显著提升铜精矿 Cu 品位,铜精矿 Cu 品位由 18.62% 提升至 23.47%,铜精矿中 MgO 品位由 6.93% 降至 2.99%,铜回收率损失可控。试验结果为矿山后续技改提供了技术支持。

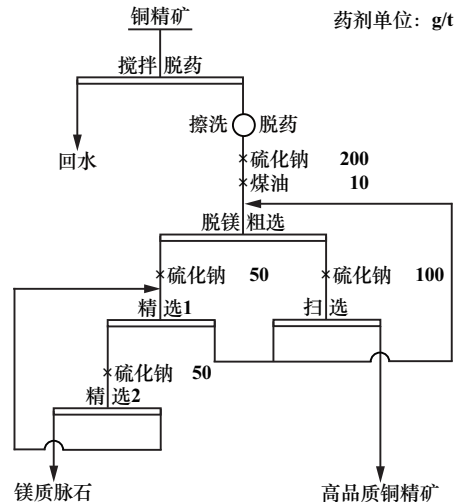


图 5 脱镁反浮选试验流程

Fig.5 Reverse flotation flowchart for magnesium removal

表 9 脱镁反浮选试验结果

Table 9 Test results of reverse flotation for magnesium removal

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Cu	S	MgO	Cu	S	MgO
高品质铜精矿	1.50	23.47	34.29	2.99	81.10	7.34	0.40
镁质脉石	0.41	0.87	20.03	21.34	0.82	1.17	0.78
铜精矿	1.91	18.62	31.23	6.93	81.92	8.51	1.18

3 结论

1) 某高含镁铜硫矿石铜矿物主要为黄铜矿、硫砷铜矿、辉铜矿、铜蓝等,次生硫化铜分布率为 28.89%,

黄铁矿及滑石等镁质脉石矿物含量较高,分离难度大。

2) 采用部分优先浮选铜、铜硫分离、铜精矿反浮选脱镁的流程,可获得 Cu 品位 23.47%、MgO 品位 2.99%、Cu 回收率 81.10%的铜精矿。

3) 铜捕收剂 SG-2 与镁质脉石抑制剂 HD 的组合药剂体系可在正浮选铜矿物过程中尽量减少氧化镁上浮;协同抑铜脱镁反浮选,在保障铜回收率的同时降低铜精矿中镁含量,达到了改善铜精矿品质的目的。

参考文献(References):

- [1] 应立娟,陈毓川,王登红,等. 中国铜矿成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014,88(12):2216-2226.
YING Lijuan, CHEN Yuchuan, WANG Denghong, et al. Metallogenic regularity of copper ore in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2014,88(12): 2216-2226.
- [2] 麦琼尹,欧乐明,王晨亮,等. 降低云南某硫化铜矿氧化镁含量试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):57-60.
MAI Qiongyin, OU Leming, WANG Chenliang, et al. Experimental study on reducing MgO content in copper sulfide ore from Yunnan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):57-60.
- [3] 范宛惠,谢蕾,郭泽,等. 某高硫低品位铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):185-188.
FAN Wanhui, XIE Lei, GUO Ze, et al. Investigation on flotation of low-grade high-sulfur copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):185-188.
- [4] 陈渊淦,杨思琦,汪惠惠,等. 胶类抑制剂对滑石的抑制行为及机理[J]. 非金属矿, 2020,43(4):1-3.
CHEN Yuangan, YANG Siqi, WANG Huihui, et al. The depression behavior and mechanisms of gum depressants to talc[J]. Non-metallic Mines, 2020,43(4):1-3.
- [5] 张曙光,简胜,唐鑫,等. 某含钼低品位硫化铜矿综合回收钼的选矿研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):48-51.
ZHANG Shuguang, JIAN Sheng, TANG Xin, et al. Comprehensive recovery of molybdenum resource from low-grade molybdenum-bearing copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(1):48-51.
- [6] 孟雨. 镁硅酸盐型铜硫矿浮选降镁试验研究[D]. 武汉:武汉理工大学, 2018.
MENG Yu. Study of flotation magnesium reduction on magnesium silicate copper-sulfide ore[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [7] 胡志凯,赵志强,罗思岗,等. 某微细粒难选铜矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):58-61.
HU Zhikai, ZHAO Zhiqiang, LUO Sigang, et al. Experimental study on mineral processing of fine refractory copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):58-61.
- [8] 曹玉川. 某硫化铜矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(4):82-84.
CAO Yuchuan. Experimental study on flotation processing of some copper sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4):82-84.
- [9] 刘璇遥,赵艳宾,于鸿宾,等. 某高硫砂卡岩型金铜矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(3):19-23.
LIU Xuanyao, ZHAO Yanbin, YU Hongbin, et al. Experimental research on Skarn gold-bearing copper with high sulphur content[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2020(3):19-23.
- [10] 王丰雨,徐晓衣,谢宝华,等. 马来西亚某高硫铜矿磁选-浮选工艺试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):61-64.
WANG Fengyu, XU Xiaoyi, XIE Baohua, et al. Magnetic separation and flotation technique for the high-sulfur copper ore from Malaysia[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(5):61-64.
- [11] 傅飞龙. 国外某低品位含金铜矿铜硫分选试验[J]. 矿产保护与利用, 2019,39(2):33-36.
FU Feilong. Study on separation copper from sulfur of a low-grade sulfide copper ore containing gold in foreign country[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019,39(2):33-36.
- 引用本文:唐鑫,简胜,张晶,等. 某高含镁铜硫矿石选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):90-94.
TANG Xin, JIAN Sheng, ZHANG Jing, et al. Experimental study on mineral processing of a high-magnesium copper-sulfur ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):90-94.