含磁黄铁矿高硫型铜矿低碱度选矿试验研究*

黄春福[1],祁忠旭[2,3],江旭[2,3],丁声强[1],陈春林[1],李杰[2,3]

(1.广东省大宝山矿业有限公司, 广东 韶关市 512000;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.湖南省矿山固废综合利用工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:广东某铜硫矿生产采用"高碱选铜-弱酸选硫"的工艺和药剂体系,针对现场酸碱消耗量大、浮选效率低、安全环保风险高等问题,进行了矿石性质和选矿工艺试验研究,确定了"低碱-无酸"的工艺方案,研发了基于矿石性质的低碱铜硫绿色高效分选药剂体系。结果表明,采用B18捕收铜矿物、CD-S2替代部分石灰抑硫,硫酸铜替代硫酸活化、丁基黄药捕收浮硫的方案可有效替代现场"高碱-弱酸"药剂体系,全流程闭路试验获得Cu品位20.84%、Cu回收率88.11%的铜精矿和S品位46.12%、S回收率94.68%的综合硫精矿。与"高碱-弱酸"工艺相比,"低碱-无酸"工艺铜精矿中铜品位和铜回收率分别提高了2.59个百分点和1.94个百分点,综合硫精矿指标相当,闭路试验粗选矿浆pH由11降低至8.5,实现了"低碱-无酸"环境中铜硫的清洁高效分选与回收。

关键词:优先浮选;铜硫分离;低碱工艺;硫抑制剂

中图分类号:TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0265-08

Experimental Study on Beneficiation of High-Sulfur Copper Ore Containing Pyrrhotite Under Low-Alkalinity Conditions

HUANG Chunfu[1], *QI Zhongxu*[2,3], *JIANG Xu*[2,3], *DING Shengqiang*[1], *CHEN Chunlin*[1], *LI Jie*[2,3]

(1.Guangdong Dabaoshan Mining Co., Ltd., Shaoguan, Guangdong 512000, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.Hunan Engineering and Technology Research Center for Comprehensive Utilization of Mine Solid Waste, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: A copper-sulfur ore processing plant in Guangdong employed a "high-alkali copper extraction-weak-acid sulfur extraction" process and reagent system. To address the problems of high on-site alkali consumption, low flotation efficiency, and elevated safety and environmental risks, experimental studies were conducted on ore properties and mineral processing techniques. This led to the identification of a "low-alkali, acid-free" process scheme and based on the ore characteristics, the development of a tailored, low-alkali reagent system for the green and efficient separation of copper-sulfur. Results indicate that a scheme employing B18 to collect copper minerals and CD-S2 to partially replace lime for sulfur suppression, with copper sulfate replacing sulfuric acid for activation, and butyl xanthate for sulfur floation, is effective. The closed-circuit test achieved a copper concentrate with Cu grade of 20.84% and Cu recovery of 88.11%, along with a comprehensive sulfur concentrate with S grade of 46.12% and S recovery of 94.68%. Compared to the "high-alkali-weak-acid" process, the "low-alkali-acid-free" process can increase the copper grade and recovery in copper concentrate by 2.59 percentage points and 1.94 percentage points respectively, while maintaining comparable overall sulfur concentrate indicators. The pH of the roughing pulp in closed-circuit tests decreases from 11 to 8.5, achieving clean and efficient separation and recovery of copper and sulfur in a low-alkali-acid-free environment.

Key words: Priority flotation, Copper-sulfur separation, Low-alkali process, Sulfur inhibitor

* **收稿日期**:2025-01-10
基金项目:中国五矿集团有限公司科技专项计划项目(2022ZXB04-4);抚州市重大"揭榜挂帅"项目(2024JCA02)
作者简介:黄春福(1980—),女,广西都安人,高级工程师,主要从事有色金属矿选矿生产技术研究。E-mail:23986310@qq.com
通信作者:江旭(1993—),男,江苏徐州人,工程师,主要从事有色金属矿选矿技术研究。E-mail:572799454@qq.com

0 引言

铜硫矿是我国铜、硫金属产出的主要来源,其中高硫型铜矿是该类矿石中较为复杂的一种,一般有用矿物种类较多,含硫矿物除黄铁矿外,通常还含有大量的磁黄铁矿,磁黄铁矿因结晶状态不同,可浮性和磁性也有所不同[1-3]。目前,针对复杂高硫型铜矿常用的分离回收方法主要是优先浮选工艺,即优先抑硫浮铜,铜尾矿再活化选硫,该方法的关键在于强化(磁)黄铁矿的有效抑制[4-6]。对于磁黄铁矿性质复杂、多种晶体结构并存的高硫型铜矿,常在浮选工艺中加入磁选作业,即通过磁选回收部分磁性较强的磁黄铁矿,浮选回收黄铁矿[7-8]。该工艺的特点是强拉强压,在优先浮铜过程中添加大量的石灰抑制(磁)黄铁矿,后续再通过加入大量硫酸调节矿浆pH进行活化,这就使得整个浮选矿浆环境处于一个酸碱失衡的状态,不利于流程的稳定,指标波动较大;另外,大量酸碱消耗不仅增加了药剂成本,还会腐蚀选矿设备、堵塞管道,并且存在一定的安全环保风险,对环境造成污染[9-12]。因此"低碱-无酸"浮选技术的发展在铜硫矿中的应用具有十分重要的意义。

广东某高硫型铜矿中铜矿物以黄铜矿为主,少量次生硫化铜,硫以黄铁矿和磁黄铁矿为主,目前现场生产采用"高碱选铜-弱酸选硫"的工艺和药剂体系,存在酸碱消耗量大、浮选效率低、安全环保风险高等问题。鉴于此,本文研发了一套基于该矿石性质特性的低碱铜硫绿色高效分选药剂体系,通过优化各浮选作业关键技术参数,取得了较好的选矿指标,实现了"低碱-无酸"环境中铜硫的清洁高效分选,同时为该类型复杂铜硫矿的低碱度清洁选矿提供了新的技术方法。

1 矿石性质

1.1 主要化学成分和矿物含量

矿石的化学多元素分析结果见表1,主要矿物的含量统计结果见表2。

表1 矿石的化学多元素分析结果

Table 1 Chemical multi-element analysis results of the ore %

Cu	SiO_2	S	Al_2O_3	Fe	CaO	MgO	WO_3
0.43	37.51	16.00	6.52	20.84	5.10	3.67	0.084
Zn	Pb	Na_2O	As	Au*	Co	C	
0.078	0.045	0.067	0.025	0.05	0.004 8	0.37	

注:带"*"标识单位为g/t。

表2 矿石中主要矿物的含量

Table 2 Contents of the main minerals in the ore %

黄铜矿	辉铜矿	(砷)黝铜矿	斑铜矿	铜蓝	辉钼矿	黄铁矿	菱铁矿
0.99	0.001	0.073	0.05	0.001	0.01	20.06	0.24
磁铁矿	赤铁矿/褐铁矿	磁黄铁矿	毒砂	方铅矿	黄钾铁钒	闪锌矿	白钨矿/黑钨矿
0.73	0.72	11.72	0.05	0.051	0.24	0.06	0.06
辉铋矿	砷铅铁矾	石英	正长石	透闪石-铁阳起石	钙铁辉石-透辉石	白云母	方解石
0.01	0.05	18.33	6.18	4.18	3.45	8.05	2.72

由表1和表2可知,矿石中可供选矿回收的主要元素是Cu和S,含量分别为0.43%和16.00%,伴生贵金属Au含量0.05 g/t,Co含量0.004 8%,二者含量较低,未达到综合回收边界品位要求;含铜矿物种类较多,主要包括黄铜矿、辉铜矿、(砷)黝铜矿、斑铜矿和铜蓝等,硫矿物主要为黄铁矿和磁黄铁矿,脉石种类较多,主要由石英、白云母、正长石、透闪石、铁阳起石、钙铁辉石、透辉石和方解石等组成。

1.2 铜、硫物相分析

矿石的铜物相分析结果见表3,硫物相分析结果见表4。

表3 铜物相分析结果

Table 3 Copper phase analysis results %

物相	含量	分布率
原生硫化铜	0.340	79.07
次生硫化铜	0.070	16.28
自由氧化铜	0.007	1.63
结合氧化铜	0.013	3.02
总铜	0.430	100.00

表4 硫物相分析结果

Table 4 Sulfur phase analysis results %

物相	含量	分布率
元素硫中硫	0.01	0.06
硫化物中硫	15.73	98.31
硫酸盐中硫	0.26	1.63
总硫	16.00	100.00

物相分析结果表明,铜主要以原生硫化铜形式存在,次生硫化铜次之,占比分别为79.07%和16.28%,合计占比为95.35%,微量以结合铜和自由氧化铜形式存在;硫主要赋存在硫化物中。

1.3 铜、硫矿物嵌布特征

矿石中,黄铜矿主要呈它形粒状或不规则粒状,少量呈半自形粒状,粒度多处于0.019～0.6 mm,大部分黄铜矿嵌布关系较为复杂,小部分黄铜矿嵌布粒度小,或以微细粒浸染状嵌布在脉石中或充填在磁黄铁矿或黄铁矿孔洞中,充分解离难度大;黄铁矿多为自形-半自形粒状,少量为它形粒状或碎裂状,粒度多处于0.105～1.2 mm,常见粒间、裂隙或孔洞中充填黄铜矿、磁黄铁矿等,与铜矿物相比,黄铁矿嵌布粒度更粗、结晶程度更高,更易解离;磁黄铁矿以不规则粒状或它形粒状为主,粒度多处于0.05～1.2 mm,主要与黄铁矿连生,少部分与黄铜矿或其他矿物等连生;少部分呈碎裂状或浸染状分布在脉石中,嵌布关系复杂,难以充分解离。

1.4 铜硫选矿的主要矿物学影响因素

(1) 赋存状态。硫(黄铁矿和磁黄铁矿)高、铜(黄铜矿等)低,铜硫高效分离难度大;磁黄铁矿含量高、易氧化,会消耗溶液中对硫化矿浮选有益的活性氧,不利于铜矿物与捕收剂有效作用,对铜浮选造成不利影响;铜矿物种类较多,原生与次生硫化铜可浮性跨度大且易波动,对铜浮选药剂体系的适应性提出更高要求。

(2) 嵌布粒度。黄铁矿和磁黄铁矿的粒度整体粗于黄铜矿,且分布范围跨度较大,特定磨矿细度下存在硫矿物"过磨"和铜矿物仍需要进一步解离的情况,粒度问题影响铜、硫的充分回收。

(3) 嵌连关系。部分铜、硫矿物呈微细粒紧密连生,充分解离难度较大,将对铜、硫精矿品位和回收率造成一定影响。

2 试验结果与讨论

矿石性质分析结果表明,原矿硫(黄铁矿和磁黄铁矿)高、铜(黄铜矿等)低,根据"抑多浮少"的原则,本次试验研究在现场工艺的基础上,采用"优先浮铜—铜尾矿弱磁选磁性硫—磁硫尾矿活化浮非磁性硫"的方案,研发选择性适宜的铜捕收剂和高效的硫抑制剂,一方面提高对铜矿物的选择性,加快铜上浮速率,提升铜粗选富集比;另一方面减少石灰用量,降低矿浆碱度,降低浮选泡沫黏度。

2.1 铜粗选条件试验

2.1.1 磨矿细度试验

合适的磨矿细度对实现硫化铜矿物的充分解离至关重要,尤其是对于部分在脉石矿物中嵌连的细粒铜矿物,若不能充分解离,将直接损失在尾矿中。为考察磨矿细度对铜粗选指标的影响,在仅改变磨矿细度、其他条件不变的情况下进行试验,磨矿细度试验流程如图1所示,试验结果如图2所示。

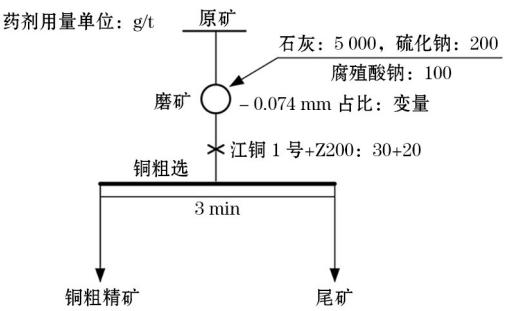


图1 磨矿细度试验流程

Fig.1 Process of grinding fineness test

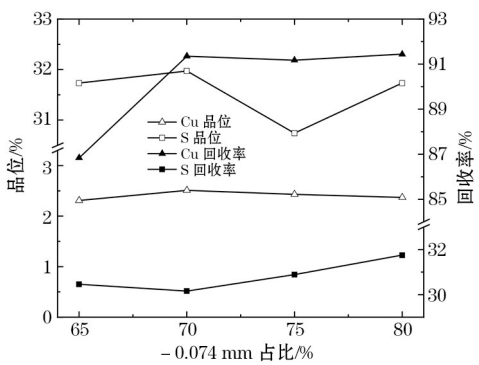


图2 磨矿细度试验结果

Fig.2 Grinding fineness test results

由图2可知,随着磨矿细度的增加,铜矿物逐步解离,铜回收率逐渐提高;继续增大磨矿细度,铜回收率波动不大,且粗精矿中硫的回收率有所提高,这是因为较高的磨矿细度增大了黄铁矿的解离面,通过药剂吸附与黄铜矿一起上浮。综合考虑,选取粗选磨矿细度为-0.074 mm占比70%进行后续试验。

2.1.2 高碱条件下铜捕收剂种类试验

黄药和酯类是硫化铜常用的捕收剂,固定磨矿细度为-0.074 mm占比70%,石灰用量为5 000 g/t,硫化钠用量为200 g/t,腐殖酸钠用量为100 g/t,仅改变铜捕收剂种类,试验结果见表5。

表 5 铜捕收剂种类试验结果

Table 5 Copper collector types test results

铜捕收剂种类	铜捕收剂用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
				Cu	S	Cu	S
江铜 1 号+Z200	30+20	铜粗精矿	13.79	2.920	27.30	91.44	23.46
		尾矿	86.21	0.044	14.25	8.56	76.54
		原矿	100.00	0.440	16.05	100.00	100.00
乙基黄药	50	铜粗精矿	3.32	8.550	13.65	61.74	2.79
		尾矿	96.68	0.182	16.33	38.26	97.21
		原矿	100.00	0.460	16.24	100.00	100.00
丁基黄药	50	铜粗精矿	12.76	3.090	27.13	89.63	21.49
		尾矿	87.24	0.052	14.50	10.37	78.51
		原矿	100.00	0.440	16.11	100.00	100.00
B18	50	铜粗精矿	8.61	4.750	24.80	90.94	13.28
		尾矿	91.39	0.045	15.26	9.06	86.72
		原矿	100.00	0.450	16.08	100.00	100.00
Z200	50	铜粗精矿	8.21	4.870	28.34	88.94	14.39
		尾矿	91.79	0.054	15.08	11.06	85.61
		原矿	100.00	0.450	16.17	100.00	100.00

由表 5 可知,相较于单一捕收剂,现场组合捕收剂江铜 1 号+Z200 获得的铜粗精矿产率最高,铜的富集比最低,说明该捕收剂体系对铜的选择性较差;使用单一捕收剂时,乙基黄药、B18 和 Z200 对铜的选择性较好,丁基黄药次之,但乙基黄药和 Z200 的回收率较低,综合药剂的捕收能力和选择性,选择 B18 作为铜的粗选捕收剂。

2.1.3 铜捕收剂 B18 用量试验

本文研究了铜捕收剂 B18 用量对铜粗选指标的影响,固定磨矿细度为−0.074 mm 占比 70%,石灰用量为 5 000 g/t,硫化钠用量为 200 g/t,腐殖酸钠用量为 100 g/t,仅改变 B18 用量,试验结果如图 3 所示。

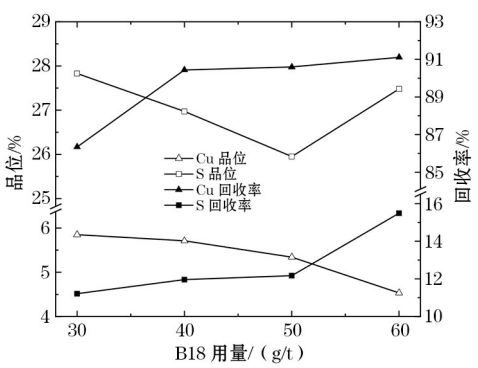


图 3 B18 用量试验结果

Fig.3 B18 dosage test results

由图 3 可知,随着 B18 用量的增加,铜的回收率先增加后趋于平稳,铜品位逐渐降低,硫的回收率不断增加,这是因为 B18 具有一定的起泡性能,其用量过大时部分微细粒黄铁矿会随着泡沫一起夹带上浮,经综合考虑,选取铜粗选 B18 用量为 40 g/t。

2.1.4 石灰用量试验

矿石中存在大量(磁)黄铁矿是此次选矿富集回收铜需要去除的主要杂质,也是回收硫的主要矿物,石灰是硫化矿抑制剂中常用的药剂,在高碱矿浆环境下可实现对(磁)黄铁矿的有效抑制。在确定铜捕收剂为 B18 的基础上,进一步研究了降低石灰用量的可行性,固定磨矿细度为−0.074 mm 占比 70%,硫化钠用量为 200 g/t,腐殖酸钠用量为 100 g/t,B18 用量为 40 g/t,仅改变石灰用量,试验结果如图 4 所示。

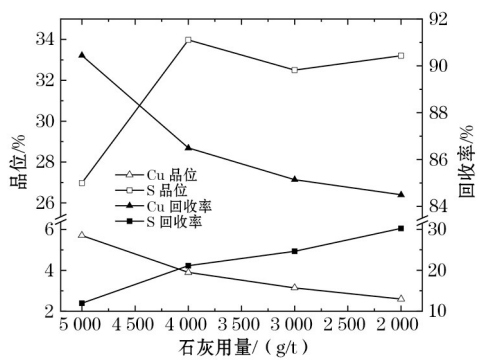


图 4 石灰用量试验结果

Fig.4 Lime dosage test results

由图 4 可知,随着石灰用量的降低,pH 由 11 降低至 7.5,铜的品位和回收率逐渐降低,而硫的品位和回收率急剧增加,说明该矿石中硫的可浮性较好,在低碱矿浆环境下,(磁)黄铁矿没有得到较好的抑制,铜的浮选也受到了干扰。

2.1.5 低碱条件下硫抑制剂 CD-S2 用量试验

上述试验结果表明,该矿石中硫可浮性较好,在低碱矿浆环境下,仅添加单一石灰无法实现对(磁)黄铁矿的有效抑制,因此,要想实现铜硫的高效清洁分选,还需要采用其他抑制剂与石灰组合抑制(磁)黄铁矿。目前,在低碱环境下常用的硫抑制剂主要是与矿浆中的氧气结合形成氧化自由基,通过在氧化黄铁矿表面形成亲水性物质,从而降低其可浮性[13]。因此,在石灰用量为 3 000 g/t 的情况下,研究了新型硫抑制剂 CD-S2 用量对铜硫分选指标的影响,此时矿浆 pH 为 8.5,固定磨矿细度为 −0.074 mm 占比 70%,硫化钠用量为 200 g/t,腐殖酸钠用量为 100 g/t,B18 用量为 40 g/t,仅改变 CD-S2 用量,试验结果如图 5 所示。

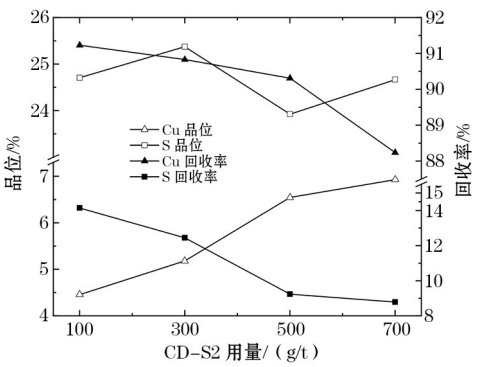


图 5 CD-S2 用量试验结果

Fig.5 CD-S2 dosage test results

由图 5 可知,随着 CD-S2 用量的增加,粗精矿中硫的回收率急剧下降,说明(磁)黄铁矿得到了有效抑制;铜的品位先升高后趋于平稳,回收率逐渐降低,经综合考虑,选取 CD-S2 用量为 500 g/t。

2.2 硫粗选条件试验

矿石中含有一定量的磁黄铁矿,因晶体结构不同,可浮性和磁性均存在较大的差异,为充分回收矿石中的硫元素,试验采用磁-浮联合的工艺方案,通过磁选回收磁性较强的磁黄铁矿,浮选回收黄铁矿。

2.2.1 硫活化剂种类试验

常用的黄铁矿活化剂有硫酸、草酸和硫酸铜等,本文研究了不同种类活化剂对黄铁矿的活化效果,硫活化剂种类试验流程如图 6 所示,试验结果见表 6。

由表 6 可知,草酸和硫酸铵对硫的活化效果较差,尾矿中硫跑尾较高;硫酸铜作为(磁)黄铁矿活化剂可有效替代硫酸,且用量较小,当硫酸铜用量为 150 g/t 时,粗精矿整体指标与硫酸用量(2 000 g/t)相当,经综合考虑,选取硫酸铜作为选硫活化剂。

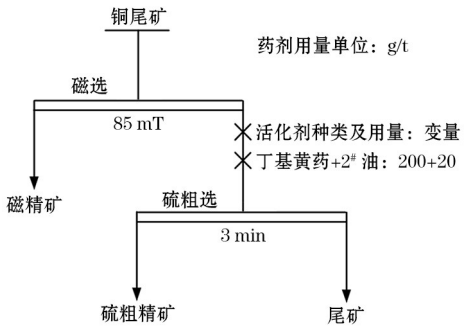


图 6 硫活化剂种类试验流程

Fig.6 Sulfur activator types test process

表 6 硫活化剂种类试验结果

Table 6 Sulfur activator types test results

硫活化剂种类	硫活化剂用量/(g/t)	产品名称	产率/%	S 品位/%	S 回收率/%
硫酸	2 000	磁精矿	6.46	35.55	13.72
		硫粗精矿	27.76	47.05	78.03
		尾矿	65.78	2.10	8.25
		合计	100.00	16.74	100.00
草酸	2 000	磁精矿	6.32	34.54	13.19
		硫粗精矿	24.53	47.54	70.46
		尾矿	69.15	3.91	16.35
		合计	100.00	16.55	100.00
硫酸铵	1 000	磁精矿	6.59	33.46	13.42
		硫粗精矿	21.11	48.61	62.46
		尾矿	72.30	5.48	24.12
		合计	100.00	16.43	100.00
硫酸铜	150	磁精矿	6.82	33.16	13.56
		硫粗精矿	28.01	46.75	78.50
		尾矿	65.17	2.03	7.94
		合计	100.00	16.68	100.00

2.2.2 丁基黄药用量试验

丁基黄药是硫铁矿的常用捕收剂,对黄铁矿的捕收性能较好,本文研究了丁基黄药用量对硫粗选指标的影响,硫酸铜用量为 150 g/t,2# 油用量为 20 g/t,仅改变丁基黄药用量,试验结果如图 7 所示。

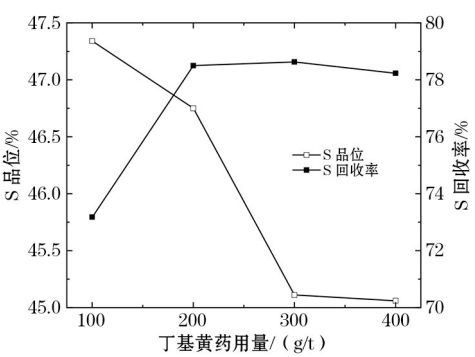


图 7 丁基黄药用量试验结果

Fig.7 Butyl xanthate dosage test results

由图 7 可知,随着丁基黄药用量的增加,硫的回收率先增大后趋于平稳,硫品位逐渐降低,经综合考虑,确认硫粗选丁基黄药适宜用量为 200 g/t。

2.3 闭路对比试验

在条件试验的基础上,分别进行了“高碱-弱酸”工艺和“低碱-无酸”工艺的闭路试验,闭路试验流程如图 8 所示,试验结果见表 7。

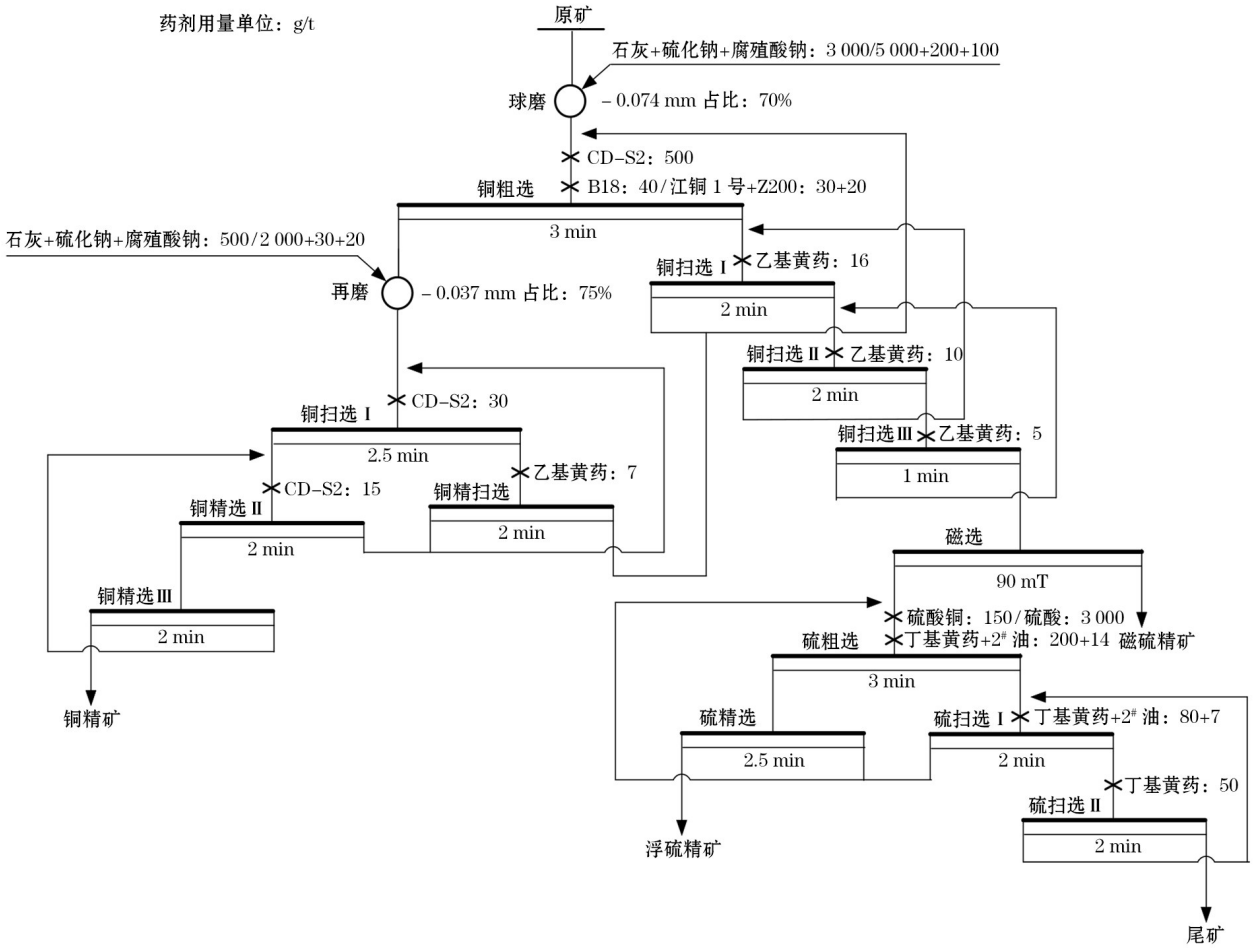


图 8 闭路试验流程

Fig.8 Closed-circuit test process

表 7 闭路试验结果

Table 7 Closed-circuit test results

工艺名称	pH	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
				Cu	S	Cu	S
“低碱-无酸”工艺	8.5	铜精矿	1.86	20.840	30.29	88.11	3.48
		浮硫精矿	27.64	0.082	49.25	5.14	84.08
		磁硫精矿	5.60	0.079	30.65	1.01	10.60
		尾矿	64.90	0.039	0.46	5.74	1.84
		原矿	100.00	0.440	16.19	100.00	100.00
		综合硫精矿	33.24	0.081	46.12	6.15	94.68
“高碱-弱酸”工艺	11.0	铜精矿	2.03	18.250	32.24	86.17	4.01
		浮硫精矿	27.21	0.079	49.75	4.97	82.95
		磁硫精矿	5.44	0.089	32.37	1.13	10.79
		尾矿	65.32	0.051	0.56	7.73	2.25
		原矿	100.00	0.430	16.32	100.00	100.00
		综合硫精矿	32.65	0.080	46.86	6.10	93.74

由表 7 可知,在－0.074 mm 占比 70%的磨矿细度条件下,石灰用量降至粗选 3 000 g/t,采用 B18 捕收铜矿物、CD-S2 替代部分石灰抑硫,以硫酸铜为活化剂、丁基黄药为捕收剂浮选矿物,全流程闭路试验获得了铜品位 20.84%、铜回收率 88.11%的铜精矿,硫品位 46.12%、硫回收率 94.68%的综合硫精矿。相较于“高碱-弱酸”工艺,“低碱-无酸”工艺铜精矿中铜品位和铜回收率分别提高了 2.59 个百分点和 1.94 个百分点,综合硫精矿指标相当,闭路试验粗选矿浆 pH 由 11 降低至 8.5,实现了低碱环境中铜硫的清洁高效分离与回收。

3 结论

(1) 矿石中可供选矿富集回收的元素主要为铜和硫,含量分别为 0.43%和 16.00%。铜矿物以黄铜矿为主,少量次生硫化铜;硫以黄铁矿和磁黄铁矿为主,脉石主要为石英、长石和云母类矿物,黄铁矿和磁黄铁矿的粒度整体粗于黄铜矿,且分布范围跨度较大,特定磨矿细度下存在硫矿物“过磨”与铜矿物未充分解离的情况,部分铜、硫矿物呈微细粒紧密连生,充分解离难度较大,将对铜、硫精矿品位和回收率造成一定影响。

(2) 采用 B18 捕收铜矿物、CD-S2 替代部分石灰抑硫,硫酸铜替代硫酸活化、丁基黄药捕收浮硫的方案可有效替代现场“高碱-弱酸”药剂体系,全流程闭路试验获得 Cu 品位 20.84%、Cu 回收率 88.11%的铜精矿和 S 品位 46.12%、S 回收率 94.68%的综合硫精矿。

(3) 与“高碱-弱酸”工艺相比,“低碱-无酸”工艺铜精矿中铜品位和铜回收率分别提高了 2.59 个百分点和 1.94 个百分点,硫精矿指标相当,闭路试验粗选矿浆 pH 由 11 降低至 8.5,实现了“低碱-无酸”环境中铜硫的清洁高效分离与回收,可为同类型复杂难选铜硫资源高效回收提供技术参考。

参考文献(References):

[1] 高希宇,王立刚,叶岳华.某复杂铜硫矿选矿工艺流程研究[J].中国矿业,2022,31(增刊 1):413-418.
GAO Xiyu, WANG Ligang, YE Yuehua. A study on mineral processing technology of a complex copper-pyrite ore[J].China Mining Magazine,2022,31(Suppl.1):413-418.

[2] 付广钦,周晓彤,邓丽红,等.某含磁黄铁矿铜硫矿的磁选试验研究[J].材料研究与应用,2017,11(4):278-282.
FU Guangqin, ZHOU Xiaotong, DENG Lihong, et al. Magnetic separation research on copper sulfur ore containing high-content of pyrrhotine[J]. Materials Research and Application,2017,11(4):278-282.

[3] 王嘉乐,严华山,谢泽政.单斜磁黄铁矿在不同捕收体系下的浮选行为[J].江西冶金,2024,44(5):361-366.
WANG Jiale, YAN Huashan, XIE Zezheng. Flotation behavior of monoclinic pyrrhotite on different collector systems[J]. Jiangxi Metallurgy,2024,44(5):361-366.

[4] 王鹏程.西藏玉龙铜矿铜硫矿选矿工艺及机理研究[D].赣州:江西理工大学,2017.
WANG Pengcheng. Study on mineral processing technology and mechanism copper-sulphur ore of Yulong Copper Mine in Xizang[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2017.

[5] 敖顺福.某含银高硫铜矿的选别流程对比试验研究[J].有色金属(选矿部分),2023(1):78-84.
AO Shunfu. Comparative experiment study on beneficiation process of a high-sulfur copper ore containing silver[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2023(1):78-84.

[6] 张晶,唐鑫,吕向文,等.某矽卡岩型铜硫矿资源综合回收工艺[J].矿产综合利用,2024,45(3):150-156.
ZHANG Jing, TANG Xin, LYU Xiangwen, et al. Comprehensive recovery process of skarn type copper-sulfur ore resources[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024,45(3):150-156.

[7] 郭艳华,杨俊龙,柏亚林,等.含磁黄铁矿型硫铁矿选矿技术研究[J].甘肃冶金,2024,46(5):1-5.
GUO Yanhua, YANG Junlong, BAI Yalin, et al. Research on mineral processing technology of pyrite containing pyrrhotite[J].Gansu Metallurgy,2024,46(5):1-5.

[8] 刘群,钟国建,冯宁,等.广东某高硫铁矿石脱硫工艺试验[J].现代矿业,2024,40(6):159-162.
LIU Qun, ZHONG Guojian, FENG Ning, et al. Test of desulfurization process of a high-sulfur iron ore in Guangdong[J]. Modern Mining,2024,40(6):159-162.

[9] 邱廷省,杨雯慧,邱仙辉,等.复杂多金属硫化矿低碱浮选分离技术研究进展[J].有色金属(选矿部分),2024(11):1-11+32.
QIU Tingsheng, YANG Wenhui, QIU Xianhui, et al. Research progress of low-alkali flotation separation technology of complex polymetallic sulfide ores[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(11):1-11+32.

[10] 胡振,韩远燕,江旭,等.微细粒高碳铜铅混合精矿环保高效分离试验研究[J].矿业研究与开发,2024,44(7):246-250.
HU Zhen, HAN Yuanyan, JIANG Xu, et al. Experimental study on environmental protection and efficient separation of copper-lead mixed concentrate with fine-grained high-carbon[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(7): 246-250.

[11] 王鹏.复杂铜硫矿清洁工艺生产优化研究[D].武汉:武汉工程大学,2017.
WANG Peng. The production of complex pyrite clean process optimization [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology,2017.

[12] 张洋,崔毅琦,童雄,等.低碱条件下新型抑制剂实现铜硫高效分离的试验研究[J].有色金属工程,2024,14(5):81-87.
ZHANG Yang, CUI Yiqi, TONG Xiong, et al. Experimental study of novel inhibitors to achieve efficient separation of copper and sulfur under low alkali conditions [J].Nonferrous Metals Engineering,2024,14(5):81-87.

[13] MU Y F, PENG Y J. The role of sodium metabisulphite in depressing pyrite in chalcopyrite flotation using saline water [J]. Minerals Engineering,2019,142:105921.