复杂斑铜矿铜硫浮选分离试验研究*

梁溢强[1,2,3],武鲁庆[4],刘玫华[1,2,3],阚赛琼[1,2,3],张文杰[1,2,3]

(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;
3.有色金属强化冶金新技术全国重点实验室, 云南 昆明 650031;
4.云南驰宏锌锗股份有限公司会泽矿业分公司, 云南 曲靖市 655011)

摘要:某复杂斑岩型铜硫矿石含铜0.45%、含硫3.61%,具有较高的开发利用价值。工艺矿物学研究表明,该矿石具有构造多样、铜矿物种类多、脉石矿物易泥化、目的矿物粒度嵌布不均匀等特征,致使铜硫高效回收难度大。基于矿物学研究,研发了原矿粗磨—铜硫混合浮选—粗精矿细磨—铜硫分离的浮选工艺流程,同时采用选择性好的铜捕收剂GTB1和GTB3进行了试验,小型闭路试验获得了铜品位为25.145%、铜回收率为90.90%的铜精矿和含硫42.51%、硫回收率66.24%的硫精矿。

关键词:复杂斑铜矿;混合浮选;铜硫分离;综合回收
中图分类号:TD952;TD923 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0255-08

Test Study on Copper-Sulfur Flotation Separation from Complex Bornite Ore

LIANG Yiqiang[1,2,3], *WU Luqing*[4], *LIU Meihua*[1,2,3], *KAN Saiqiong*[1,2,3], *ZHANG Wenjie*[1,2,3]

(1.Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650031, China;
2.Yunnan Key Laboratory for New Technology of Beneficiation and Metallurgy, Kunming, Yunnan 650031, China;
3.State Key Laboratory of Advanced Metallurgy for Non-ferrous Metals, Kunming, Yunnan 650031, China;
4.Huize Mining Branch, Yunnan Chihong Zn & Ge Co., Ltd., Qujing, Yunnan 655011, China)

Abstract: A complex porphyry copper-sulfur raw ore contains 0.45% copper and 3.61% sulfur, with high development and utilization value. Research on process mineralogy shows that the ore has diverse structures, multiple types of copper minerals, easy mudification of gangue minerals, and uneven distribution of target mineral particle sizes, which makes it difficult to efficiently recover copper and sulfur. Based on mineralogical research, a flotation process flow with rough grinding of raw ore, copper-sulfur mixed flotation, fine grinding of coarse concentrate, and copper-sulfur separation was developed. At the same time, copper collectors GTB1 and GTB3 with good selectivity were used for tests. In a small-scale closed-circuit test, a copper concentrate with a copper grade of 25.145% and a copper recovery rate of 90.90% is obtained, as well as a sulfur concentrate with a sulfur content of 42.51% and a sulfur recovery rate of 66.24%.

Key words: Complex bornite ore, Mixed flotation, Copper-sulfur separation, Comprehensive recovery

0 引言

自然界中铜主要以硫化铜和氧化铜的形式存在。由于硫化铜疏水性强,易采用浮选工艺富集,一直是金属铜的主要来源[1]。近些年,随着易选硫化铜矿资源的逐渐匮乏,新开发的铜矿资源表现出贫、细、杂等特性,对浮选技术提出了更高的要求[2-3]。李超等[4]以BK305作铜捕收剂,在矿浆pH=9.9时浮选分离回收铜硫,闭路试验获得的铜精矿品位和回收率分别为22.59%、84.17%。针对复杂难处理铜矿,一般通过优化药剂和工艺流程来实现铜的有效回收。张立刚等[5]采用新型捕收剂CYC-20浮选

* **收稿日期**:2024-09-25
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC2904603)
作者简介:梁溢强(1982—),男,广东佛山人,硕士,正高级工程师,主要研究方向为多金属复杂矿物绿色分离工艺。E-mail:644783704@qq.com
通信作者:武鲁庆(1990—),男,山东泰安人,硕士,工程师,主要从事铅锌选矿、稀贵金属选矿工艺研发和生产管理工作。E-mail:1321615400@qq.com

回收某复杂伴生铜矿,在最佳工艺参数条件下,铜精矿品位和回收率分别为20.33%、73.03%,并有效解决了浮选作业中回水黄原酸根超标的问题。氧化铜矿的溶解度大、亲水性强,浮选回收较困难[6-7]。在硫化铜矿中易出现氧硫混合矿床,往往需要采用先硫后氧的异步浮选工艺处理。张锦仙等[8]针对云南某复杂氧硫混合铜矿,采用"铜硫混合浮选—混合精矿铜硫分离—浮选尾矿再选氧化铜"的工艺流程,结合新型捕收剂KM23和起泡剂730A,在最佳条件下,获得了70.09%的铜综合回收率。除此之外,斑岩型铜硫共(伴)生矿石存在铜品位低、成分复杂、伴生现象严重的特性,导致其综合利用较为困难[9-10]。大量研究证实该类矿物的结晶状态、颗粒表面性质、伴生赋存状态与黄铜矿存在较大差异,需要更为精准的药剂和工艺流程进行处理[11-12]。李博琦等[13]对某高硫铜矿开展了试验研究,通过响应曲面法分析了抑制剂等药剂在矿浆中的相互作用,最终采用铜硫混选再分离的流程获得了最佳试验指标。浮选作业中,强碱环境下黄药类捕收剂在斑铜矿表面吸附量呈断崖式下降,使得斑岩铜矿的铜硫清洁高效分离成为选矿领域的难点和热点。为了提高多相硫化铜矿物的浮选回收率,研发出了多种酯类组合协同工艺,显著提升了铜矿物的回收效果[14-16]。

本文以西藏某复杂斑岩型铜硫矿为研究对象,该矿石中的铜矿物种类多,可浮性差异大,铜矿物与黄铁矿、石英、高岭石、白云母共生关系紧密,高效分离难度大。对于斑岩铜矿中铜矿物和硫铁矿的回收,常见的浮选方案主要有先铜后硫顺序优先浮选和铜硫混浮再分离浮选[17-19]。作者团队通过研究发现,对复杂斑岩型铜硫矿采用原矿粗磨—铜硫混合浮选—粗精矿细磨—铜硫分离的浮选工艺流程处理,可获得较好的浮选效果。该浮选方案先在中性低碱的矿浆环境下通过铜硫混合浮选获得铜硫混合精矿,最大限度地回收铜硫矿物,提升伴生钼、金、银的回收;对铜硫混合精矿再磨增加矿物解离度后添加石灰抑制黄铁矿,既可以提升铜精矿的品质,又可以达到综合回收矿石中的稀贵金属的目的。

1 矿石性质研究

1.1 矿石成分及矿物组成

矿样的主要化学元素分析结果见表1,铜物相分析结果见表2。

表1 矿样主要化学元素分析结果

Table 1 Analysis results of main chemical elements in the ore sample %

Cu	S	Mo	Fe	SiO_2	Al_2O_3	K_2O	Ti	MgO	CaO	Na_2O
0.45	3.61	0.004 9	6.28	63.52	14.10	1.44	0.67	0.18	0.10	0.085
As	Pb	Zn	Sb	Au*	Ag*	Ge*	P	Bi*	Hg*	F
0.021	0.019	0.000 8	<0.005	0.11	1.4	6.2	0.048	54	<5	0.073

注:*的单位为g/t。

表2 矿样铜物相分析结果

Table 2 Analysis results of copper phases in the ore sample

相别	含量/%	占有率/%
游离氧化铜	<0.002	0.44
结合氧化铜	0.011	2.42
次生硫化铜	0.391	87.00
原生硫化铜	0.046	10.14
总铜	0.450	100.00

试验矿样为复杂硫化铜共生矿,主要有价元素为铜,其含量为0.45%,其他伴生有价元素Au 0.11 g/t、Ag 1.4 g/t、钼0.004 9%、铁6.28%和硫3.61%。经偏光显微镜下观察、X射线衍射分析、MLA分析,查明矿石中存在有硫化物、氧化物、硅酸盐、硫酸盐、磷酸盐等5类29种矿物,其中铜矿物主要有辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、铜蓝、砷黝铜矿、硫砷铜矿、锑黝铜矿,辉铜矿和斑铜矿的含量相对较高,分别为0.30%和0.19%。透明脉石矿物主要有石英、白云母、高岭石、叶腊石、明矾石等,石英、白云母和高岭石的含量相对较高,分别为56.05%、21.90%、9.88%。

1.2 主要矿物的嵌布特征

辉铜矿在矿物分析中将蓝辉铜矿与辉铜矿合并为一类矿物,成分取其平均值。新鲜表面呈铅灰色,风化表面呈黑色。如图1、图2所示,辉铜矿与黄铁矿共生关系密切,部分辉铜矿与黄铁矿连生或相互包裹,部分分布于黄铁矿的晶粒之间和黄铁矿的裂隙、孔洞中,少数以反应边状分布于黄铁矿周围,大多分布在-0.1 mm粒级,辉铜矿与黄铁矿共有的表面积比例为11.92%;少量辉铜矿呈稀疏-星散浸染状分布于岩石中,部分与石英、高岭石、白云母等透明矿物连生。辉铜矿的自由表面积比例为62.95%。矿石中部分辉铜矿粒度较细,其中21.25%分布在

－19 μm 的粒级。

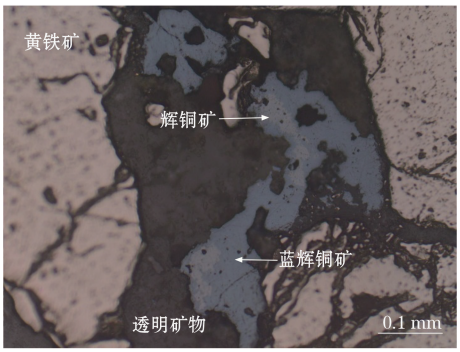


图 1　辉铜矿分布于黄铁矿和透明矿物孔隙中

Fig.1　Chalcocite distributed in crevices of pyrite and hyaline minerals

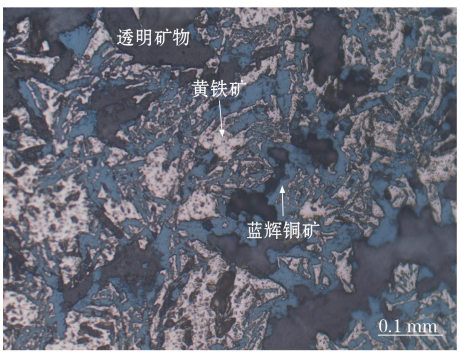


图 2　蓝辉铜矿和黄铁矿混杂分布

Fig.2　Mixed distribution of digenite and pyrite

斑铜矿新鲜表面呈暗铜红色，风化表面常被蓝紫斑状锖色所覆盖。如图 3、图 4 所示，斑铜矿与黄铁矿连生或包裹于黄铁矿中，大多粒径小于 0.20 mm。部分斑铜矿与辉铜矿连生，或残余状包裹于辉铜矿中。斑铜矿主要与黄铁矿、石英、白云母共生，与这些矿物共有的表面积比例分别为 19.21%、7.85%、4.67%。矿石中部分辉铜矿粒度较细，其中 28.14%分布在－19 μm 粒级。

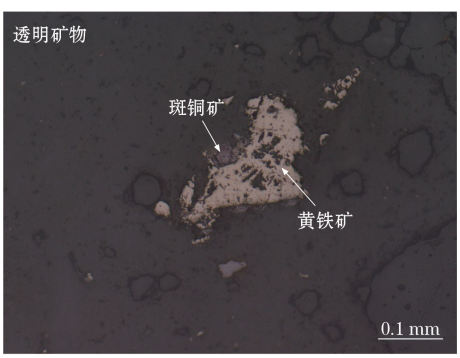


图 3　斑铜矿与黄铁矿连生

Fig.3　The coexistence of bornite and pyrite

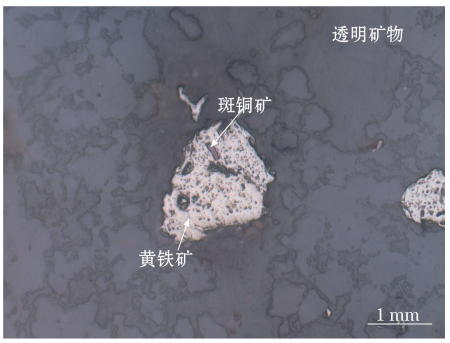


图 4　斑铜矿包裹于黄铁矿中

Fig.4　Bornite encapsulated in pyrite

黄铜矿主要呈它形粒状，主要与黄铁矿连生或包裹于黄铁矿中(见图 5)，少量与辉铜矿连生或残余状包裹于辉铜矿中，偶见包裹于砷黝铜矿(见图 6)或星点状分布于岩石中，粒径小于 0.05 mm。黄铜矿主要与斑铜矿、黄铁矿、石英、白云母共生，与这些矿物共有的表面积比例分别为 8.06%、16.92%、7.76%、5.53%。

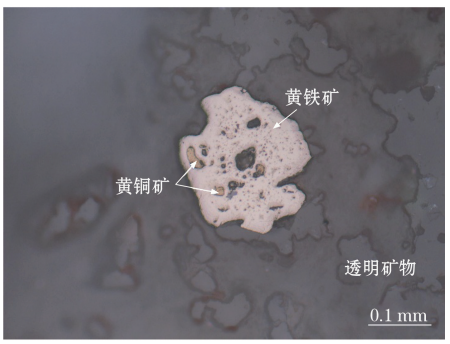


图 5　黄铜矿包裹于黄铁矿中

Fig.5　Chalcopyrite encapsulated in pyrite

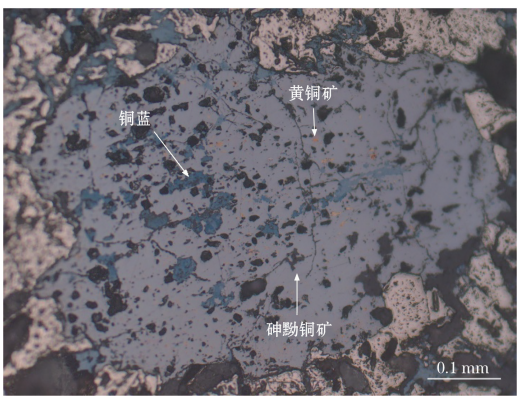


图 6　黄铜矿、铜蓝包裹于砷黝铜矿中

Fig.6　Chalcopyrite and covellite encapsulated in tennantite

矿石中黄铁矿主要呈集合体块状－次块状、稠密－稀疏浸染状分布于岩石中，粒径多在 0.005～1.0 mm。黄铁矿常与辉铜矿、斑铜矿、砷黝铜矿、硫砷铜矿等铜矿物连生或相互包裹，偶见包裹黄铜矿，

粒径多在 0.01～1.0 mm。黄铁矿的自由表面积比例为 81.65%。黄铁矿主要与白云母共生,与其共有的表面积比例为 4.64%,其次与辉铜矿、斑铜矿、石英、高岭石共生,与这些矿物共有的表面积比例分别为 1.37%、2.08%、3.23%、3.09%。矿石中黄铁矿粒度较粗,其中只有 6.81%分布在－19 μm 粒级。

矿石中的铜主要以独立矿物的形式赋存于辉铜矿/蓝辉铜矿和斑铜矿中,其铜分配率分别为 49.24%和 24.79%。部分铜以独立矿物的形式赋存于黄铜矿、铜蓝、砷黝铜矿、硫砷铜矿中,这些矿物中的铜分配率分别为 11.33%、8.96%、3.46%、2.22%。铜的主要载体矿物嵌布特征复杂,且辉铜矿/蓝辉铜矿和斑铜矿的硬度较低,相对易磨,在磨矿的过程中容易过磨,不利于铜的回收。

1.3 主要矿物的解离特征

当磨矿细度为－0.074 mm 占 70%时,辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿完全解离的颗粒分别占 54.13%、46.55%和 30.89%,未解离的辉铜矿主要与黄铁矿、石英和白云母连生;完全解离的黄铁矿颗粒占65.12%,黄铁矿解离较为充分,较少与脉石连生。

2 试验结果与讨论

2.1 铜硫混选试验研究

2.1.1 磨矿细度对混选指标的影响

由于矿石中含有较多的泥质脉石,适宜的磨矿细度既能提升有用矿物单体解离度,又不至于造成过粉碎而恶化浮选矿浆环境[20]。采用 28%的矿浆浓度进行浮选试验,考查磨矿细度对混选指标的影响。试验中设定浮选机叶轮转速为 2 000 r/min,充气量为 0.4 m^3/h,使用丁黄药作为硫化铜的捕收剂,使用 2# 油作为起泡剂。磨矿细度试验流程见图 7,试验结果见图 8。

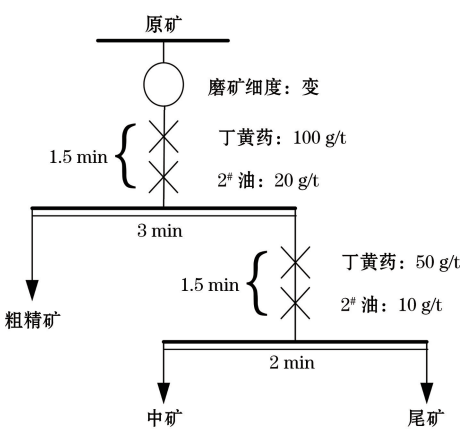


图 7 磨矿细度试验流程

Fig.7 Flowsheet of grinding fineness test

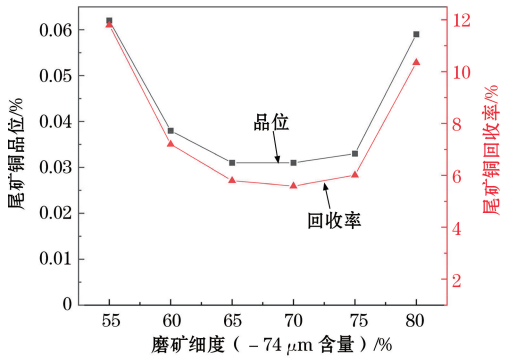


图 8 磨矿细度试验结果

Fig.8 Results grinding fineness test

由图 8 可知,随着磨矿细度的增加,通过一次粗选和一次扫选后,尾矿铜品位与铜损失率先下降后升高,当磨矿细度－74 μm 占 65%时,尾矿中的铜损失率趋于稳定,当磨矿细度－74 μm 占 75%时,尾矿铜损失率明显增加。综合考虑,选择－74 μm 占 65%的磨矿细度较为适宜。后续试验的磨矿细度条件为－74 μm 占 65%。

2.1.2 捕收剂种类对混选指标影响

矿石中不同铜矿物的天然可浮性差异较大,且在矿石破碎及磨矿过程中,铜矿物表面受到一定程度的污染和氧化,会导致其可浮性的差异性进一步加大。添加适量的选择性好的捕收剂,可以提高不同铜矿物的浮选效果[21],因此开展了捕收剂种类试验,试验流程见图 7,试验结果见图 9。其中新型捕收剂 GTB1 是选择性较佳的组合捕收剂,其主要成分为异构硫氨酯和硫醇,对表面可浮性较差的次生硫化铜及微细粒铜矿物捕收能力较好。

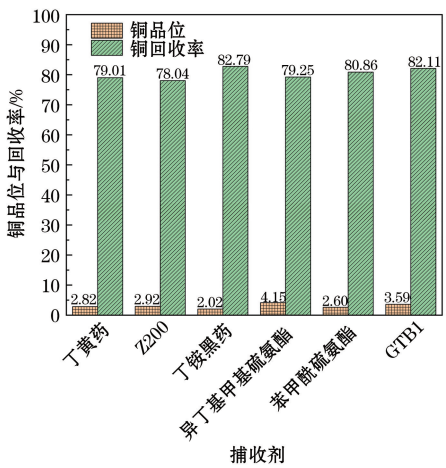


图 9 捕收剂种类试验结果

Fig.9 Test results of collector types

由图 9 可知,丁黄药、丁胺黑药、苯甲酰硫氨酯

及 GTB1 均具有较好的捕收能力，其中采用丁铵黑药获得的粗精矿含铜品位最低(2.02%)，铜回收率最高(82.79%)，但大量的脉石上浮将导致流程稳定性差，铜精矿品位难以提升。异丁基甲基硫氨酯和 GTB1 具有较好的选择性，粗精矿铜品位较高，特别是异丁基甲基硫氨酯获得的粗精矿含铜品位最高(4.15%)，但其捕收能力较弱，导致铜回收率偏低。综合考虑，选择 GTB1 作为捕收剂进行后续试验。

2.1.3　GTB1 用量对混选指标影响

过量的捕收剂将会破坏浮选过程中目的矿物的药剂选择性，即使可小幅提升泡沫产品铜回收率，但最终产品的铜品质会明显下降。为此，开展了捕收剂用量试验，考查 GTB1 用量对混合浮选指标的影响，试验流程见图 7，试验结果见图 10。

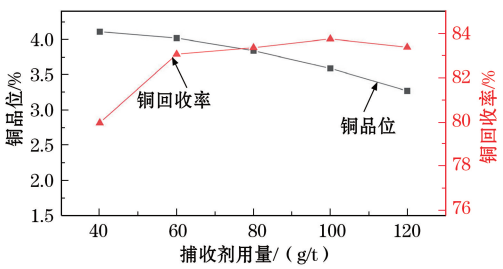


图 10　捕收剂 GTB1 用量试验结果

Fig.10　Test results for the dosage of collector GTB1

由图 10 可知，随着 GTB1 用量的增加，粗精矿铜品位逐步下降，铜回收率总体呈上升趋势，当 GTB1 用量大于 60 g/t 后，铜回收率逐渐趋于稳定。考虑到捕收剂过量会增大矿浆的残余药剂浓度，给后续铜硫分离和精选带来困难，且增加铜硫分离药剂成本，因此，确定粗选的 GTB1 用量为 60 g/t。

2.1.4　石灰用量对混选指标影响

添加少量石灰可提升矿浆的稳定性，中和矿浆中部分难免离子，因此，开展了石灰用量试验，考查浮选前不同地点添加石灰对铜硫矿物浮选效果的影响。试验采用－74 μm 占 65%的磨矿细度，粗扫的 GTB1 用量为 60 g/t＋30 g/t，2# 油用量为 20 g/t＋10 g/t，试验流程见图 7，试验结果见图 11。

由图 11 可知，将石灰添加到浮选槽时，随着石灰用量的增加，粗精矿铜品位有小幅提高，铜回收率有明显增长；当石灰用量增加至 2 000 g/t 时，粗精矿铜回收率明显下降。当石灰添加在磨机内，粗精矿铜品位最高，铜硫浮选效果最好。将石灰添加到浮选槽时，尾矿中的硫品位下降至 0.35%左右，与不添加石灰时基本相当，表明添加少量的石灰有利于减少脉石上浮，而且不会抑制黄铁矿。综合考虑，在磨矿过程中添加 500 g/t 的石灰。

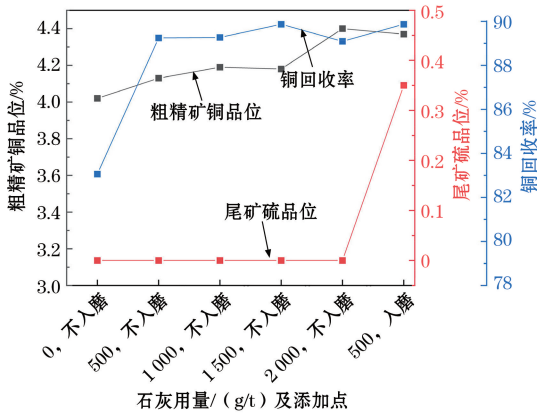


图 11　石灰用量试验结果

Fig.11　Test results for the dosage of lime

2.2　铜硫分离试验研究

2.2.1　再磨细度对铜硫分离的影响

由于粗精矿的脉石含量较高，直接再磨不但会增加磨矿负荷，而且会导致脉石泥化而干扰浮选，因此，在进行铜硫分离浮选前，将粗精矿空白精选一段后再磨，精选一次的粗精矿细度为－45 μm 占 57.13%，再磨细度试验流程见图 12，试验结果如图 13 所示。其中，GTB3 是一种选择性高的铜捕收剂，主要成分为异构酸酯，对黄铁矿的捕收能力较差，适用于铜硫高效分离。

试验结果表明，随着再磨细度的提升，铜精矿的铜品位和铜回收率逐步提升，当－45 μm 含量大于 80%后，铜回收率有所下降。为了提高铜精矿品质，综合考虑选择再磨细度为－45 μm 占 75%～80%较为适宜。

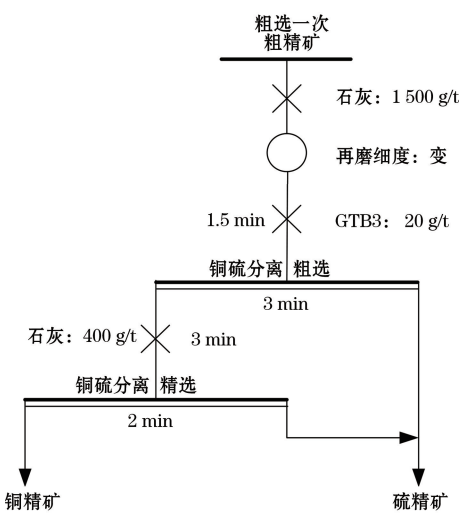


图 12　再磨细度试验流程

Fig.12　Flowsheet of regrind fineness test

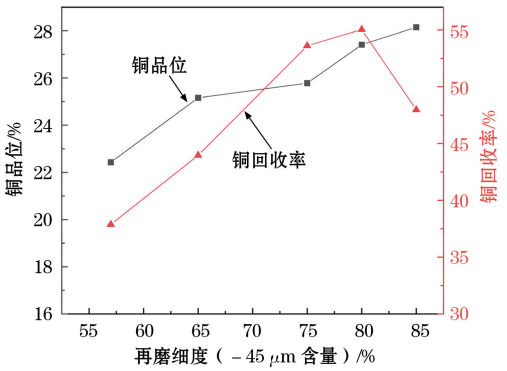


图 13 再磨细度对铜硫分离效果的影响

Fig.13 Influence of regrind fineness on the separation effect between copper minerals pyrite

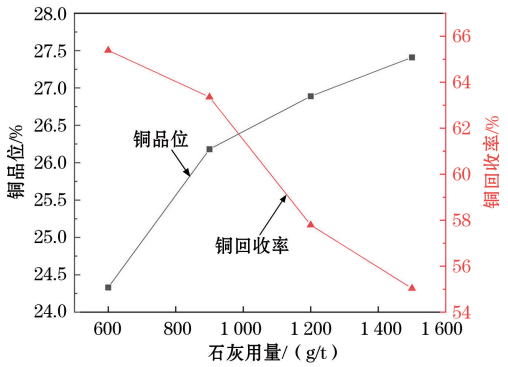


图 14 铜硫分离的石灰用量试验结果

Fig.14 Test results of lime dosage for copper mineral-pyrite coarse separation

2.2.2 分离粗选石灰用量对铜硫分离的影响

按照图 12 所示的流程开展铜硫分离粗选石灰用量试验,考查石灰对铜硫分离的影响,试验结果见图 14。由图 14 可知,随着石灰用量的加大,铜精矿铜品位逐步增加,铜回收率逐步下降,表明石灰对斑铜矿等次生铜矿物产生抑制作用,不宜大量添加。综合考虑,铜硫分离的石灰用量选择 900～1 000 g/t 较为适宜。

2.3 全流程闭路试验

根据前述条件试验结果对流程进行优化后,开展全流程闭路试验,试验流程见图 15,试验结果见表 3。通过该工艺流程,可获得铜品位 25.145%、硫品位 36.64%、钼品位 0.26%、金品位 2.62 g/t、铜回收率 90.90%、硫回收率 17.88%、钼回收率 78.48%和金回收率 47.38%的铜精矿,含铜 0.185%、含硫 42.51%、铜回收率 2.13%、硫回收率 66.24%的硫精矿。

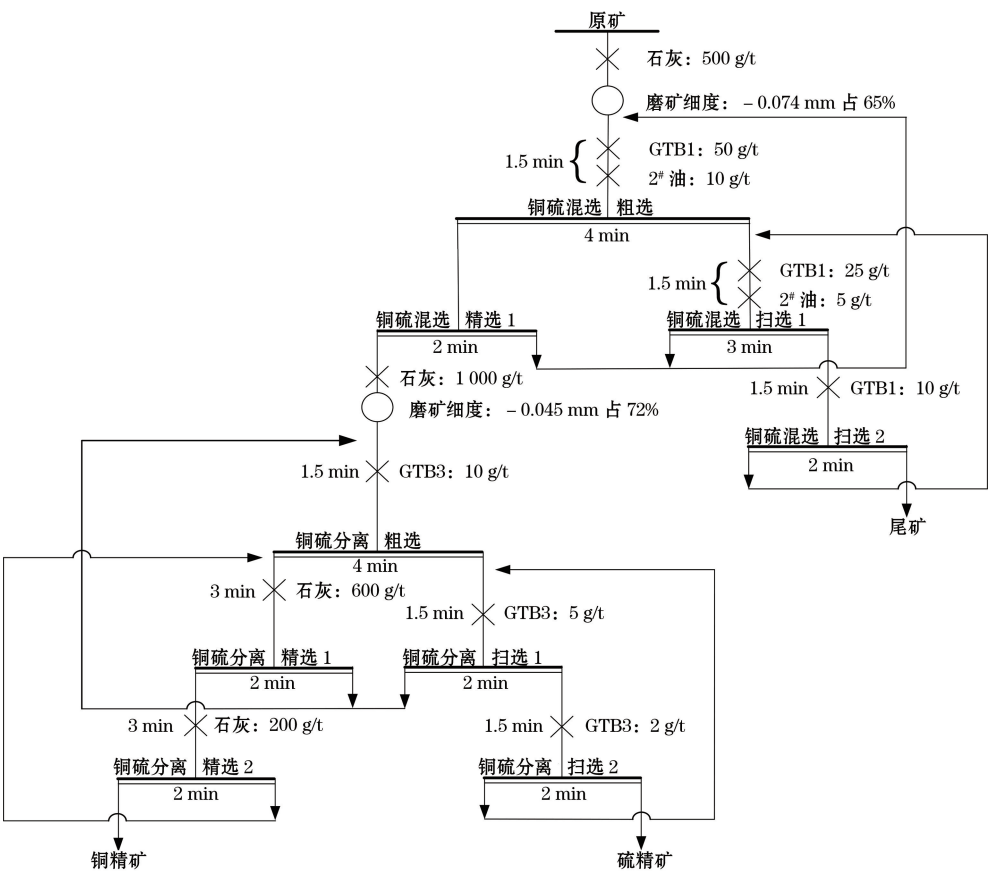


图 15 闭路试验流程

Fig.15 Flowsheet of closed-circuit test

表 3 全流程闭路试验结果

Table 3 Results of full process closed-circuit test %

产品名称	产率	品位		回收率	
		Cu	S	Cu	S
铜精矿	1.64	25.145	36.64	90.90	17.88
硫精矿	5.25	0.185	42.51	2.13	66.24
尾矿	93.11	0.034	0.57	6.97	15.88
原矿	100.00	0.455	3.37	100.00	100.00

3 结论

(1) 试验矿样为次生斑岩型铜硫矿，主要有价元素为铜，其含量为 0.45%。铜矿物主要有辉铜矿、斑铜矿、黄铜矿、铜蓝、砷黝铜矿、硫砷铜矿、锑黝铜矿，其中辉铜矿和斑铜矿的含量最多，分别为 0.30% 和 0.19%。脉石矿物主要有石英、白云母、高岭石、叶腊石、明矾石等。辉铜矿主要与黄铁矿、石英、高岭石、白云母共生。斑铜矿主要与黄铁矿连生或包裹于黄铁矿中，部分斑铜矿与辉铜矿连生或残余状包裹于辉铜矿中。两种矿物嵌布粒度较细，－19 μm 粒级分布率超过 20%。

(2) 少量添加石灰有利于减少脉石上浮，提升粗精矿的铜品位，但需要控制石灰的用量，过量添加石灰会对次生铜矿物产生显著的抑制作用。对矿样进行了浮选流程方案对比试验，试验结果表明，采用粗磨铜硫混合浮选—细磨铜硫分离的浮选工艺流程能最大限度地回收铜、硫矿物，并可提高伴生钼、金的回收率。闭路试验取得了较好的选别指标，获得了含铜 25.145%、含硫 36.64%、含钼 0.26%、铜回收率 90.90%、硫回收率 17.88%、钼回收率 78.48% 的铜精矿，含铜 0.185%、含硫 42.51%、铜回收率 2.13%、硫回收率 66.24% 的硫精矿。

(3) 采用原矿粗磨—粗精矿细磨的流程，一方面可以减少磨矿成本，另一方面尾矿的粒度也较粗，可满足尾矿充填的要求。采用昆明冶金研究院有限公司研制的 GTB 系列铜捕收剂，实现了矿石中铜硫的高效分离，也有利于钼、金、银的伴生回收。

参考文献(References)：

[1] 薛季玮.铜矿物及黄铁矿浮选动力学及药剂作用机理研究[D].沈阳：东北大学，2019.
XUE Jiwei. Research on flotation kinetics of copper-bearing minerals and pyrite and the action mechanism with reagents [D]. Shenyang：Northeastern University，2019.

[2] 王璐瑶，刘胜，刘广义，等.铜矿浮选捕收剂研究进展与展望[J].铜业工程，2024(3)：69-84.
WANG Luyao，LIU Sheng，LIU Guangyi，et al. A crucial review on research progress forcopper ore flotation collectors [J]. Copper Engineering，2024(3)：69-84.

[3] 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.

[4] 李超，凌石生.内蒙古某铜矿低碱度铜硫分离浮选试验研究[J].矿冶，2024，33(1)：39-45.
LI Chao，LING Shisheng. Experimental study on low basicity Cu-sulfur separation flotation of a copper mine in Inner Mongolia[J]. Mining and Metallurgy，2024，33(1)：39-45.

[5] 张立刚，欧阳崇钟，李文风.新型捕收剂浮选山东某伴生铜矿试验研究[J].矿冶工程，2022，42(2)：70-72.
ZHANG Ligang，OUYANG Chongzhong，LI Wenfeng. Experimental study on flotation of an associated copper mine in Shandong with a new collector[J]. Mining and Metallurgy Engineering，2022，42(2)：70-72.

[6] 苟浩然，曾海鹏，黄红军，等.湖北某复杂低品位铜矿浮选试验研究[J].矿冶工程，2023，43(4)：85-88.
GOU Haoran，ZENG Haipeng，HUANG Hongjun，et al. Experimental study on flotation separation of low-grade copper ore from Hubei [J]. Mining and Metallurgical Engineering，2023，43(4)：85-88.

[7] 李悦，谢贤，李加文，等.铜硫浮选分离技术与药剂研究进展[J].化工矿物与加工，2024，53(1)：50-59.
LI Yue，XIE Xian，LI Jiawen，et al. Research progress of copper-sulfur flotationseparation technology and reagents [J].Industrial Minerals and Processing，2024，53(1)：50-59.

[8] 张锦仙，马原琳，杨林，等.云南某难选氧硫混合铜矿石的新型药剂浮选试验研究[J].金属矿山，2024(5)：258-263.
ZHANG Jinxian，MA Yuanlin，YANG Lin，et al. Experimental study on new reagent flotation of a refractory oxy-sulfur mixed copper ore in Yunnan[J]. Metal Mine，2024(5)：258-263.

[9] 吴明海，刘万峰，加永泽仁.西藏玉龙铜矿斑岩型铜矿浮选药剂优化试验研究[J].中国矿业，2024，33(增刊 1)：432-437＋442.
WU Minghai，LIU Wanfeng，JIAYONG Zeren. Experimental study on optimization of flotation reagents for porphyrycopper ore of Yulong Copper Mine in Tibet[J]. China Mining Magazine，2024，33(Suppl.1)：432-437＋442.

[10] 杨虎.硫化钠强化回收次生斑铜矿的浮选试验及作用机理研究[D].昆明：昆明理工大学，2022.
YANG Hu. Flotation test for enhanced recovery of secondary bornit with sodium sulphide and study on its mechanism of action[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2022.

[11] 李硕夫，朱律，朱景和.巴西某多金属铜矿石工艺矿物学研究及可选性分析[J].矿业研究与开发，2024，44(9)：227-232.

LI Shuofu, ZHU Lyu, ZHU Jinghe, et al. Process mineralogical study and selectability analysis on a polymetallic copper ore in Brazil[J]. Mining Research and Development,2024,44(9):227-232.

[12] 姜美光,梁泽跃,吕向文,等.云南某低品位斑岩型铜矿浮选回收试验研究[J].矿冶,2024,33(1):46-51.
JIANG Meiguang, LIANG Zeyue, LYU Xiangwen, et al. Experimental study on flotation recovery of a low-grade porphyry copper mine in Yunnan [J]. Mining and Metallurgy,2024,33(1):46-51.

[13] 李博琦,纪翠翠,谢贤,等.响应曲面法优化铜硫浮选分离试验研究[J].矿物学报,2022,42(2):154-162.
LI Boqi, JI Cuicui, XIE Xian, et al. Experimental study on optimization of copper-sulfur flotation separation by response surface method[J]. Acta Mineralogica Sinica,2022,42(2):154-162.

[14] 孙乾予,印万忠,朱张磊,等.丁基钠黄药浮选斑铜矿的吸附热力学和动力学研究[J].东北大学学报(自然科学版),2019,40(4):574-579.
SUN Qianyu, YIN Wanzhong, ZHU Zhanglei, et al. Adsorption thermodynamics and kinetics of bornite using sodium butyl xanthate as collector in flotation[J]. Journal of Northeastern University,2019,40(4):574-579.

[15] 李志婷,彭华锋,汪庶明,等.提升某高硫低铜品位铜硫矿铜浮选回收指标试验研究[J].有色金属工程,2024,14(5):88-94.
LI Zhiting, PENG Huafeng, WANG Shuming, et al. Improving copper flotation recovery from a copper-sulfur ore with high sulfur and low copper[J]. Nonferrous Metals Engineering,2024,14(5):88-94.

[16] 逄军武,张玲,达娃卓玛,等.某选矿厂处理角岩型铜硫矿选铜浮选实验[J].矿产综合利用,2021(4):139-143.
PANG Junwu, ZHANG Ling, DAWA Zhuoma, et al. Treatment of breccia in a concentrator copper sulphur ore flotation test of copper separation [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2021(4):139-143.

[17] 方雨,骆忠,朱有军.云南某铜矿浮选流程工艺矿物学分析[J].有色金属(选矿部分),2022(3):15-19.
FANG Yu, LUO Zhong, ZHU Youjun. Mineralogical analysis of flotation process of a copper mine in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(3):15-19.

[18] 王树锋,李凤久,孔亚然.某含金硫化铜矿浮选试验研究[J].现代矿业,2021,37(5):142-144.
WANG Shufeng, LI Fengjiu, KONG Yaran. Experimental study on flotation of a gold-bearing copper sulphide ore[J]. Modern Mining,2021,37(5):142-144.

[19] 刘海林,刘四清,王丹,等.云南楚雄铜矿浮选试验研究[J].矿产综合利用,2015(6):19-21+37.
LIU Hailin, LIU Siqing, WANG Dan, et al. Research on flotation test of copper ore in Chuxiong, Yunnan [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2015(6):19-21+37.

[20] 李国栋,陈梁,高利坤,等.某含滑石硫化铜矿浮选试验研究[J].矿产保护与利用,2015(1):37-40.
LI Guodong, CHEN Liang, GAO Likun, et al. Research on the flotation of copper sulphide containing talcum [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2015(1):37-40.

[21] 冯媛媛,卜显忠,翁存建,等.响应曲面法优化青藏高原某铜矿浮选工艺研究[J].金属矿山,2020(2):88-95.
FENG Yuanyuan, BU Xianzhong, WENG Cunjian, et al. Optimization of flotation process of a copper mine in Qinghai-Tibet Plateau by response surface[J]. Metal Mine,2020(2):88-95.