doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.09.007

用新型药剂的某次生氧化型铜硫矿石浮选试验研究

黄春福[1],李鑫尧[2],许 冲[1],丁声强[1],胡文英[1],陈春林[1],韦天一[2],陈建华[2]
(1. 广东省大宝山矿业有限公司,广东 韶关 512127;
2. 广西大学 资源环境与材料学院,南宁 530004)

摘 要:某次生氧化型铜硫矿石中黄铁矿、磁黄铁矿等硫铁矿物占矿石矿物总量29.81%,硫化矿物表面易氧化,造成矿浆酸度偏高。矿石铜氧化率为4.28%,次生硫化铜占总铜42.86%,属于典型高硫次生氧化铜硫矿。现场原有药剂制度浮选指标波动大,铜回收率偏低,铜硫分离难度较大。矿石中黄铜矿嵌布粒度细,部分铜矿物被硫铁矿物包裹,磨矿解离困难,同时磁黄铁矿易消耗矿浆溶解氧,进一步干扰铜矿物浮选过程。针对上述矿石特性,本文开发新型硫抑制剂GS201与铜捕收剂2025A,开展系统浮选条件试验。矿石铜品位0.42%、硫品位16.49%,试验采用"铜优先浮选—铜粗精矿再磨再选—硫浮选"工艺流程,依次完成磨矿细度、调整剂、抑制剂、捕收剂、硫矿物活化等条件试验,确定各药剂适宜用量。全流程闭路试验结果表明,可获得铜品位19.50%、回收率84.42%的铜精矿,以及硫品位46.42%、回收率89.04%的硫精矿。相较于现场原有药剂制度,铜回收率提升4.13个百分点,硫回收指标维持在较高水平。本研究利用新型药剂实现该难处理矿石铜硫高效分选,为同类次生氧化型铜硫矿石的选矿开发与生产实践提供可靠技术参考。

关键词:次生氧化型;铜硫矿;抑制剂;捕收剂;优先浮选
中图分类号:TD923;TD952 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-9492(2026)09-0061-09

Experimental Study on Flotation of a Secondary-Oxidized Copper-Sulfur Ore Using Novel Reagents

Huang Chunfu[1], Li Xinyao[2], Xu Chong[1], Ding Shengqiang[1], Hu Wenying[1],
Chen Chunlin[1], Wei Tianyi[2], Chen Jianhua[2]
(1. Guangdong Dabaoshan Mining Co., Ltd., Shaoguan 512127, Guangdong, China;
2. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The pyrite, pyrrhotite and other iron-sulfur minerals account for 29.81% of the total minerals in a secondary-oxidized copper-sulfur ore. The surfaces of sulfide minerals are prone to oxidation, resulting in high pulp acidity. The copper oxidation rate of the ore is 4.28%, and secondary copper sulfide accounts for 42.86% of total copper, making it a typical high-sulfur secondary oxidized copper-sulfur ore. The original reagent system on-site leads to fluctuating flotation indexes, low copper recovery and great difficulty in copper-sulfur separation. Chalcopyrite in the ore has fine embedded grain size, part of copper minerals are encapsulated by iron-sulfur minerals and difficult to liberate during grinding. Meanwhile, pyrrhotite tends to consume dissolved oxygen in pulp, further interfering with the flotation of copper minerals. In view of the above ore characteristics, a novel sulfur depressant GS201 and a copper collector 2025A were developed in this paper, and systematic flotation condition tests were carried out. For the raw ore with 0.42% Cu and 16.49% S, the process of "copper selective flotation-regrinding and re-cleaning of copper rough concentrate-sulfur flotation" was adopted. Condition tests including grinding fineness, regulator, depressant, collector and sulfur mineral activation were performed in sequence to determine the optimal

收稿日期:2025-08-05
基金项目:国家自然科学基金面上项目(52374264)
作者简介:黄春福(1982—),女,广西都安人,学士,高级工程师,主要从事有色金属矿选矿生产技术研究。
通信作者:陈建华(1971—),男,四川西昌人,博士,教授,博士生导师,主要从事矿物分离、界面化学、半导体光催化、流体力学、电化学等领域的研究。

dosage of each reagent. The locked-cycle test results show that a copper concentrate with Cu grade of 19.50% and copper recovery of 84.42%, and a sulfur concentrate with S grade of 46.42% and sulfur recovery of 89.04% were obtained. Compared with the original on-site reagent system, the copper recovery increased by 4.13 percentage points, and the sulfur recovery remained at a high level. This study realizes efficient copper-sulfur separation of this refractory ore by using novel reagents, and provides a reliable technical reference for beneficiation development and production practice of similar secondary-oxidized copper-sulfur ores.

Key words: secondary oxidized type; copper-sulfur ore; depressant; collector; selective flotation

铜是支撑国民经济的重要基础材料,因其综合性能优异,在电气、交通运输、冶金建筑、电子信息、能源等诸多领域得到广泛应用,在有色金属材料消费中位居第二[1]。我国铜矿资源以硫化铜矿石为主,矿石常与黄铁矿、磁黄铁矿等硫铁矿物紧密共生,整体呈现出“贫、细、杂”的资源特征[2-3]。次生硫化铜矿物结晶完整性较差,本研究所处理矿石的次生硫化铜占总铜含量为42.86%,会恶化矿物可浮性,造成铜回收率降低[2],因此开展该类次生氧化型铜硫矿石的分选试验研究具有重要现实意义。

铜硫矿石浮选常用工艺主要有铜优先浮选、铜硫混合浮选—分离等[3],一般在粗选或精选作业添加抑制剂抑制硫铁矿物,以此实现铜硫分离[4-5]。次生硫化铜矿物结晶不完全且嵌布粒度微细,磨矿过程中易解离析出大量游离铜离子,活化部分硫化矿物,进一步恶化浮选分选条件[4-6]。为实现铜矿物充分解离、提升金属回收率,国内外常采用铜粗精矿再磨浮选工艺[5,7-9]。杨远坤等[7]针对塞尔维亚某高品位次生硫化铜矿石,采用铜优先浮选—铜粗精矿再磨再选的工艺流程,获得铜品位25.87%、回收率91.37%的铜精矿;武钊等[8]针对新疆某高次生铜硫化铜矿,采用相同工艺得到铜品位29.22%、回收率94.11%的铜精矿。

本试验矿石铜氧化率为4.28%,次生硫化铜占总铜的42.86%。现场使用原有药剂制度生产时,浮选指标波动大,铜回收率偏低。结合矿石工艺矿物学特征,本文开发新型硫抑制剂GS201与铜捕收剂2025A,采用“铜优先浮选—铜粗精矿再磨再选—硫浮选”工艺流程开展系统浮选试验,以期改善分选指标,为该次生氧化型铜硫矿石的分选利用提供有力的技术支撑。

1 矿石性质

1.1 矿石主要化学成分分析

对矿石进行主要化学成分和矿物组成分析,分析结果分别见表1、2。由表1可知,矿石中主要有价元素为铜(0.42%)、硫(16.49%)及微量钨(0.03%),其中硫含量高,属于典型高硫矿石。由表2可知,矿石中铜矿物以硫化铜为主,主要为黄铜矿、铜蓝-蓝辉铜矿,还含有少量氧化铜矿物;其他硫化矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿,其中磁黄铁矿含量达到9.86%,在浮选过程中易发生氧化,会对铜硫浮选分离造成严重干扰。

表1 矿石主要化学成分分析结果

Table 1 Results of chemical composition analysis of the ore /%

组分	SiO_2	Fe	S	Al_2O_3	MgO	CaO	K_2O
含量	50.58	13.32	16.49	9.81	5.51	3.94	3.29
组分	Cu	TiO_2	Zn	P_2O_5	MnO	Pb	Ba
含量	0.42	0.39	0.16	0.12	0.05	0.03	0.03
组分	WO_3	As	Bi	Rb_2O	V_2O_5	ZrO_2	Cr_2O_3
含量	0.03	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01

表2 矿石矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content of the ore /%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
黄铜矿	0.788 3	闪锌矿	0.282 4
石英	28.144 4	铜蓝-蓝辉铜矿	0.147 5
黄铁矿	22.475 7	水胆矾	0.014 6
磁黄铁矿	9.862 4	赤铜矿	0.000 5
白云母	8.913 5	其他	22.232 6
钾长石	7.138 1	合计	100.0

进一步对矿石中铜的化学物相进行分析,分析结果见表3。由表3可知,矿石中次生硫化铜含量达到42.86%,仅少量铜赋存于氧化矿物中,铜氧化率为4.28%。扣除氧化铜占比,铜的理论浮选回收率达到95.72%。综合上述分析,矿石内黄铁矿、磁黄铁矿含量均较高,在优先浮选流程中,实现黄铁矿与磁黄铁矿的同步抑制,是获得铜良好分选指标的关键。

1.2 矿石主要有用矿物的解离度测定

将不同磨矿细度产品进行筛分分析,显微镜下测定硫化铜矿物的单体解离度,测定结果见图1。由图1可知,随着磨矿细度增加,硫化铜矿物的解离度增加。当磨矿细度为-0.075 mm占77.00%时,硫

表 3　矿石中铜的化学物相分析结果

Table 3　Results of copper chemical phase analysis of the ore　/%

铜相别	次生硫化铜	原生硫化铜	结合氧化铜	自由氧化铜	合计
含量	0.180	0.222	0.010	0.008	0.420
占有率	42.86	52.86	2.38	1.90	100.0

化铜矿物的解离度为93.18%，继续增加磨矿细度，硫化铜矿物的解离度趋于稳定。

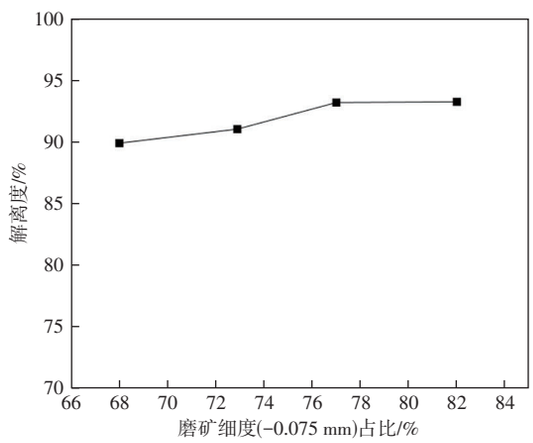


图 1　磨矿细度对硫化铜矿物解离度的影响

Fig. 1　Effect of grinding fineness on liberation degree of copper sulfide minerals

1.3　铜、硫矿物嵌布特征

对矿石中铜、硫矿物的嵌布特征进行分析，分析结果见图2。由图2可知，黄铜矿嵌布粒度较细，其中粒度小于10 μm的颗粒占黄铜矿总颗粒的27.98%；该矿物常与黄铁矿、磁黄铁矿、石英、绿泥石等矿物密切连生，部分黄铜矿以细粒-微细粒形式被包裹在黄铁矿、磁黄铁矿、闪锌矿以及石英等脉石矿物内部，磨矿阶段难以实现充分解离。黄铁矿与磁黄铁矿为矿石中主要硫化矿物。黄铁矿嵌布粒度相对较粗，多以自形-半自形粒状或粒状集合体产出，部分颗粒与石英、绿泥石、绢云母紧密连生，少量与黄铜矿、铜蓝发生交代连生，矿物解离性能较好，便于浮选回收。磁黄铁矿多为自形-半自形单体颗粒，常与黄铜矿、闪锌矿、石英、云母紧密连生，还有少量细粒磁黄铁矿被包裹于石英、长石矿物之中。上述复杂的嵌布包裹关系会增加铜硫矿物的分选难度[10]。

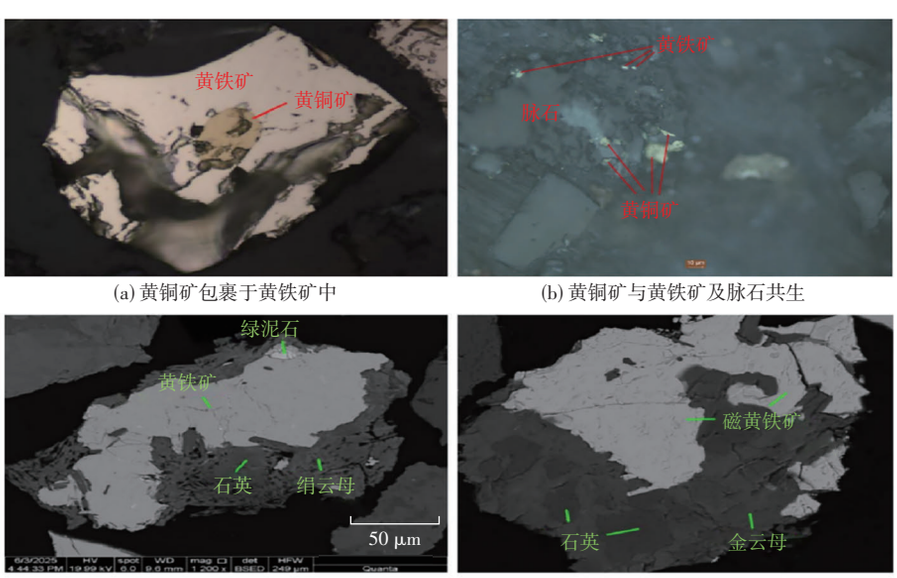
2　选矿试验及结果讨论

2.1　铜选别试验

针对矿石性质，通过单一条件试验寻求适宜的铜选别工艺参数，每次试验取矿样400 g，铜选别条件试验流程见图3。

2.1.1　磨矿细度试验

合适的磨矿细度是在实现矿物充分解离(提升品位与回收率)和避免过粉碎(降低能耗、成本与矿泥危害)之间取得平衡[11]。为确定最佳磨矿细度，进行了磨矿细度条件试验，磨矿细度以−0.075 mm粒级占比表征。以石灰(8 kg/t)作为调整剂，Z-200(粗选50 g/t、扫选Ⅰ 20 g/t)与丁基黄药(粗选15 g/t、扫选Ⅱ 10 g/t)组合作为捕收剂，考察不同磨矿细度条件下铜的选别效果，试验结果见图4。



(a) 黄铜矿包裹于黄铁矿中　(b) 黄铜矿与黄铁矿及脉石共生

(c) 黄铁矿与脉石、石英共生　(d) 磁黄铁矿与石英、云母共生

图 2　矿物嵌布特征

Fig. 2　Mineral embedding characteristics

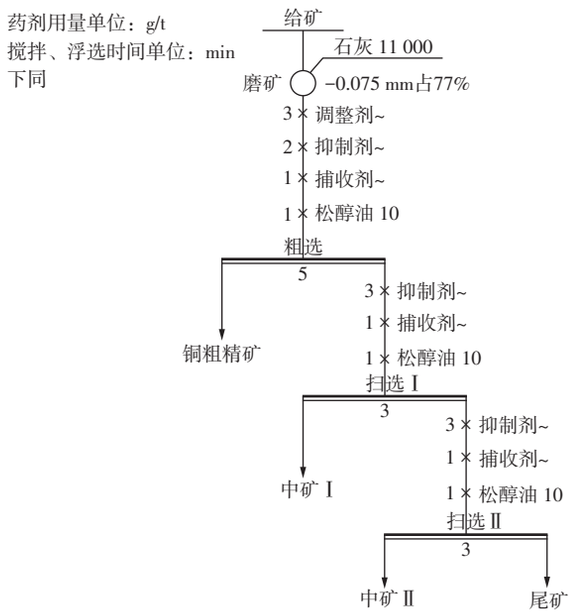


图3 铜选别条件试验流程

Fig. 3 Flowsheet of copper separation condition tests

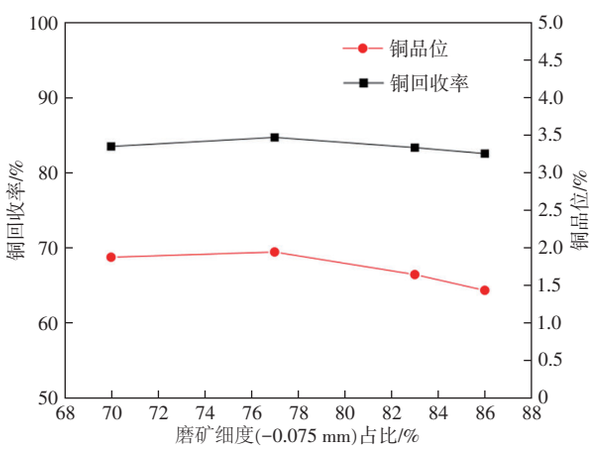


图4 磨矿细度试验结果

Fig. 4 Results of grinding fineness tests

由图4可知，当磨矿细度从－0.075 mm占70%提升至77%时，铜粗精矿品位与回收率同步提高，铜回收率达到84.74%；继续增加磨矿细度，铜粗精矿品位与回收率均逐步下降，磨矿细度过细会造成脉石矿物上浮，不利于铜浮选。因此，确定合适的磨矿细度为－0.075 mm占77%进行后续试验。

2.1.2 石灰用量试验

石灰是铜硫浮选中广泛使用的抑制剂，其作用不局限于矿浆pH调节，对浮选选择性具有显著影响[11]。适宜的石灰用量既可以构建良好的浮选环境，也能够改善药剂在目的矿物表面的吸附效果。在磨矿细度为－0.075 mm占77%、捕收剂采用Z-200(粗选50 g/t、扫选Ⅰ 20 g/t)与丁基黄药(粗选15 g/t、扫选Ⅱ 10 g/t)组合的条件下，进行石灰用量试验，试验结果见图5。

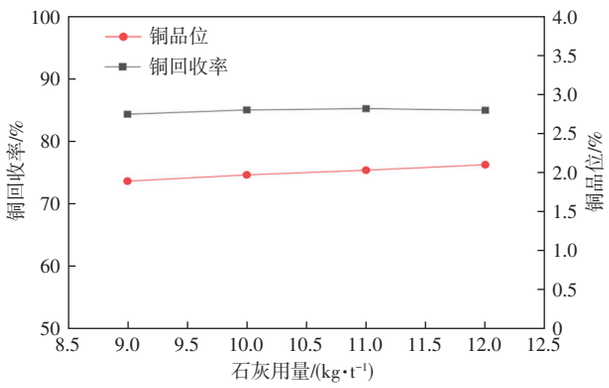


图5 石灰用量试验结果

Fig. 5 Results of lime dosage tests

由图5可知，当石灰用量从9 kg/t增至11 kg/t时，铜粗精矿品位、富集比及铜总回收率均得到提升；当石灰用量为11 kg/t时，矿浆pH值约为11，铜粗精矿品位为2.03%，铜回收率为85.26%；继续提高石灰用量，浮选指标无明显改善。综合考虑，确定石灰的适宜用量为11 kg/t。

2.1.3 调整剂用量试验

由上述试验可知，采用常规药剂制度，在保证铜粗精矿富集比前提下，铜尾矿中铜含量难以降至0.08%以下。试验过程发现，该次生氧化型铜硫矿浮选体系矿浆溶解氧仅为0.1 mg/L，远低于常规铜硫矿浮选的1.4 mg/L。矿浆溶解氧偏低会导致矿物表面电位升高，减少捕收剂在矿物表面的吸附量，抑制黄铜矿表面氧化还原反应，造成黄铜矿浮选受阻。结合矿物组成分析，原矿磁黄铁矿含量为9.86%，磁黄铁矿极易氧化，大量消耗矿浆溶解氧，干扰黄铜矿浮选电化学反应[12-13]。为此，引入调整剂A02以提高矿浆溶氧量、降低矿物表面电位。在石灰用量11 kg/t、其他药剂条件不变的基础上进行A02用量试验，试验结果见图6。

由图6可知，随着调整剂A02用量增至300 g/t，铜粗精矿品位由2.10%提高至2.27%，铜回收率提升至86.11%；继续增加A02用量，浮选指标变化不显著。由此可知，调整剂A02是有效的浮选电化学调整剂，后续试验A02的合适用量确定为300 g/t。

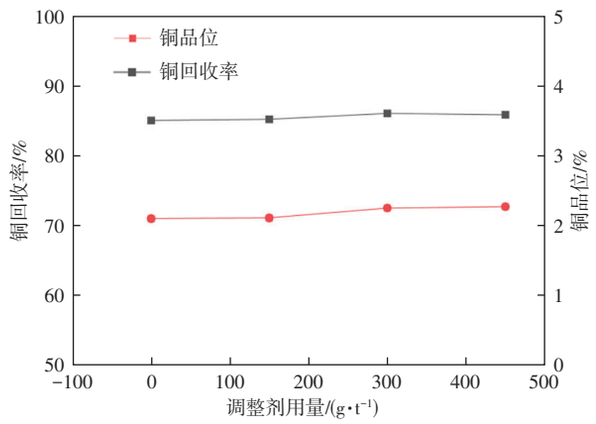


图 6　调整剂用量试验结果

Fig. 6　Results of regulator dosage tests

2.1.4　抑制剂种类和用量试验

抑制剂是浮选关键药剂，通过复杂物理化学作用降低非目标矿物的可浮性，提高捕收剂作用的选择性[14]。固定调整剂 A02 用量为 300 g/t，其他药剂用量不变，考察对比不同抑制剂的浮选效果，试验结果见图 7。

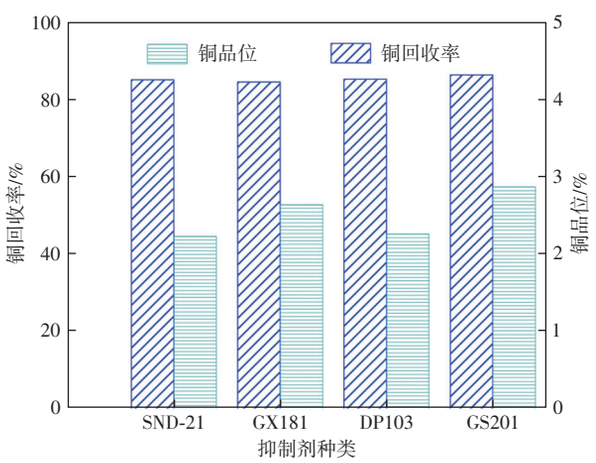


图 7　抑制种类剂试验结果

Fig. 7　Results of depressant type tests

由图 7 可知，SND-21、DP103 对硫铁矿物没有抑制作用，同时造成铜回收率下降；GX181 对硫铁矿物存在一定抑制作用，但同时会抑制铜矿物，铜回收率降低 1.49 个百分点；GS201 的分选效果最优，铜粗精矿品位达到 2.87%，铜回收率为 86.46%。因此，选择 GS201 作为硫铁矿物抑制剂。

为优化浮选效果，选定 GS201 为抑制剂，其他药剂用量不变，进行抑制剂 GS201 用量试验，试验结果见图 8。

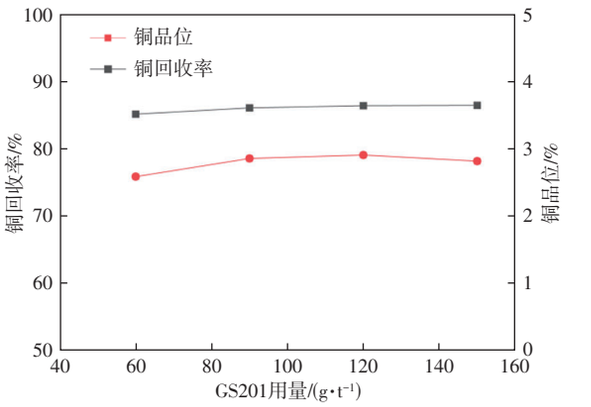


图 8　抑制剂 GS201 用量试验结果

Fig. 8　Results of depressant GS201 dosage tests

由图 8 可知，随着 GS201 用量增大，铜粗精矿品位与铜回收率同步升高；当 GS201 用量为 90 g/t 时，铜粗精矿品位为 2.86%，铜回收率为 86.12%；继续增加 GS201 用量，指标提升不明显。综合考虑，确定 GS201 的适宜用量为 90 g/t。

2.1.5　捕收剂筛选试验

捕收剂是决定浮选回收率的核心药剂，可选择性吸附于目标矿物表面，增大矿物疏水性，协同其他浮选药剂实现矿物分离[15-16]。在 GS201 用量为 90 g/t、其他条件不变的条件下进行捕收剂筛选试验，试验结果见图 9。

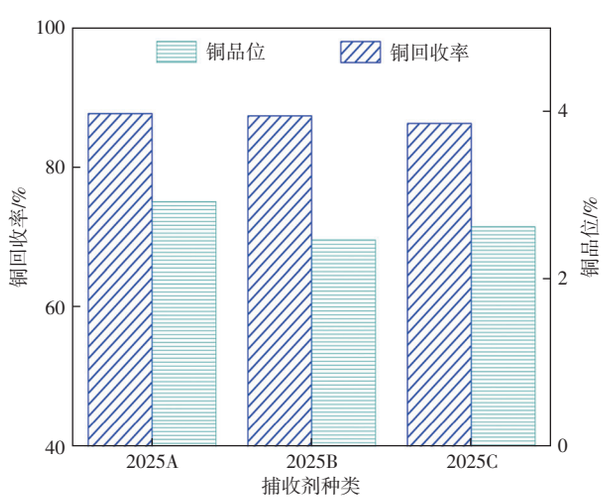


图 9　捕收剂种类试验结果

Fig. 9　Results of collector type tests

由图 9 可知，对比 2025A、2025B、2025C 三种捕收剂，2025A 分选效果最优；相较于前期 Z-200＋丁基黄药组合，铜回收率提升 1.5 个百分点，达到 87.67%。因此，选用 2025A 作为铜浮选捕收剂。

以2025A为捕收剂，进行捕收剂用量试验，试验结果见图10。由图10可知，随着捕收剂2025A用量增加，铜回收率逐步上升；当2025A用量为80 g/t时，铜粗精矿品位为2.87%，铜回收率为87.72%；继续增加2025A用量，铜回收率小幅上升，铜粗精矿品位下降。综合考虑，捕收剂2025A的适宜用量为80 g/t。

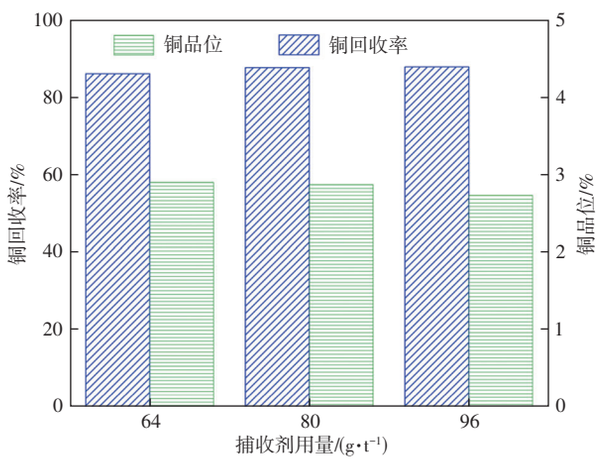


图10 捕收剂用量试验结果

Fig. 10 Results of collector dosage tests

2.2 硫选别试验

以铜浮选开路尾矿作为硫浮选给矿进行硫回收条件试验，试验流程见图11。

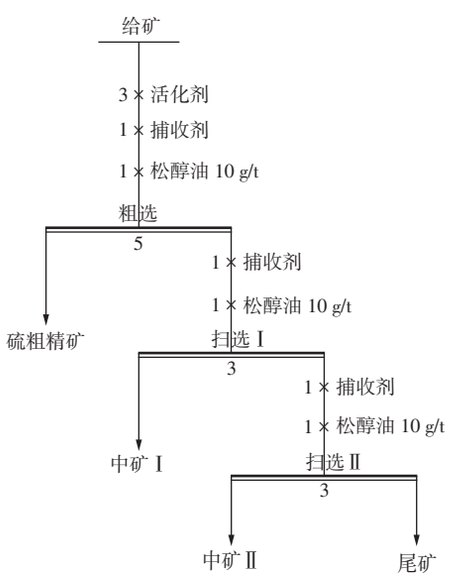


图11 硫选别条件试验流程

Fig. 11 Flowsheet of sulfur separation condition tests

2.2.1 硫酸用量试验

铜浮选作业中硫铁矿物表面吸附抑制剂，导致可浮性变差，需要活化剂去除矿物表面抑制剂吸附层，恢复硫矿物可浮性[16-19]。硫酸是经济高效的硫矿物活化剂，能够溶解矿物表面氧化膜、脱除吸附抑制剂，暴露出新鲜矿物表面，强化捕收剂作用效果。以硫酸作为活化剂，捕收剂采用GX89(粗选300 g/t、扫选Ⅰ 50 g/t、扫选Ⅱ 50 g/t)进行硫酸用量试验，试验结果见图12。

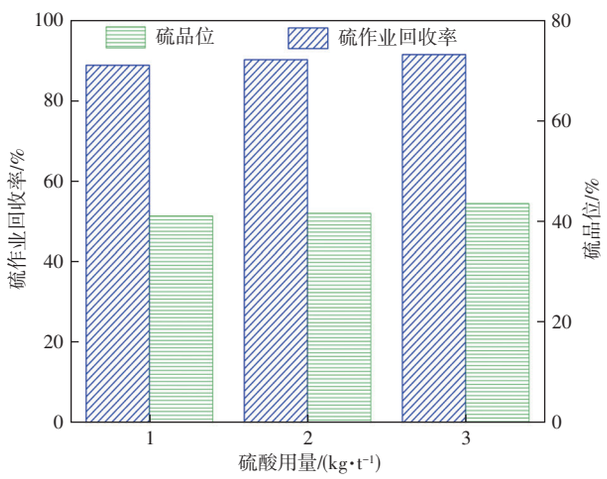


图12 硫酸用量试验结果

Fig. 12 Results of sulfuric acid dosage tests

由图12可知，随着硫酸用量增加，硫粗精矿品位与硫作业回收率同步上升；当硫酸用量为3 kg/t时，硫粗精矿品位为43.49%，硫作业回收率为91.41%，硫矿物得到有效活化回收。综合考虑，确定硫浮选活化剂硫酸用量为3 kg/t。

2.2.2 捕收剂种类试验

硫浮选捕收剂的作用是选择性提高硫矿物表面疏水性，实现硫矿物与脉石高效分离。在硫酸用量为3 kg/t的条件下，对比丁基黄药与GX89两种捕收剂的浮选性能，试验结果见图13。由图13可知，在同等药剂用量条件下，丁基黄药对硫矿物的捕收能力优于GX89，硫作业回收率达到92.92%，硫回收效果更好。因此，选用丁基黄药作为硫浮选捕收剂。

固定硫酸用量为3 kg/t，进行丁基黄药用量试验，试验结果见图14。由图14可知，随着丁基黄药用量增加，硫回收率逐步升高；当丁基黄药用量为300 g/t时，硫粗精矿品位为42.92%，硫作业回收率为93.16%；

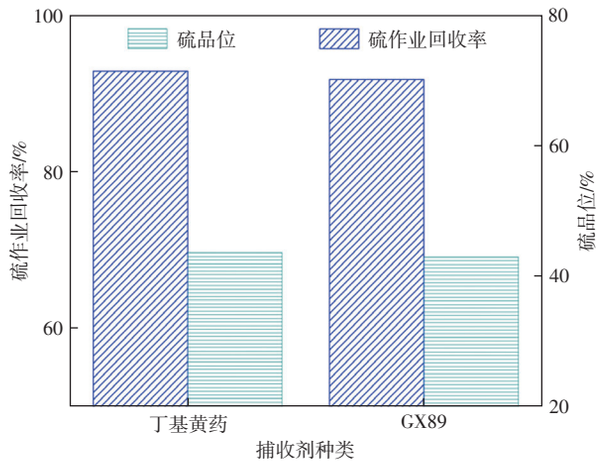


图 13　捕收剂种类试验结果

Fig. 13　Results of collector type tests

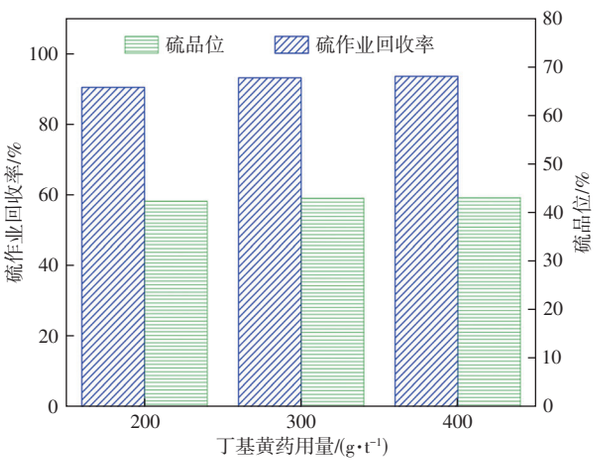


图 14　捕收剂用量试验结果

Fig. 14　Results of collector dosage tests

继续增加丁基黄药用量，分选指标无明显变化。综合考虑，确定硫浮选丁基黄药的适宜用量为 300 g/t。

2.3　全流程闭路试验

基于铜浮选、硫浮选条件试验确定的工艺参数，采用自研新型药剂开展铜优先浮选—铜粗精矿再磨再选—硫浮选全流程闭路试验[20]，并与选厂原有药剂制度（石灰＋硫化钠为调整剂、腐殖酸钠为抑制剂、乙硫氨酯＋丁基黄药组合捕收剂）进行对比，试验流程见图 15，试验结果见表 4。

由表 4 可知，针对铜品位 0.45%、硫品位 16.33%

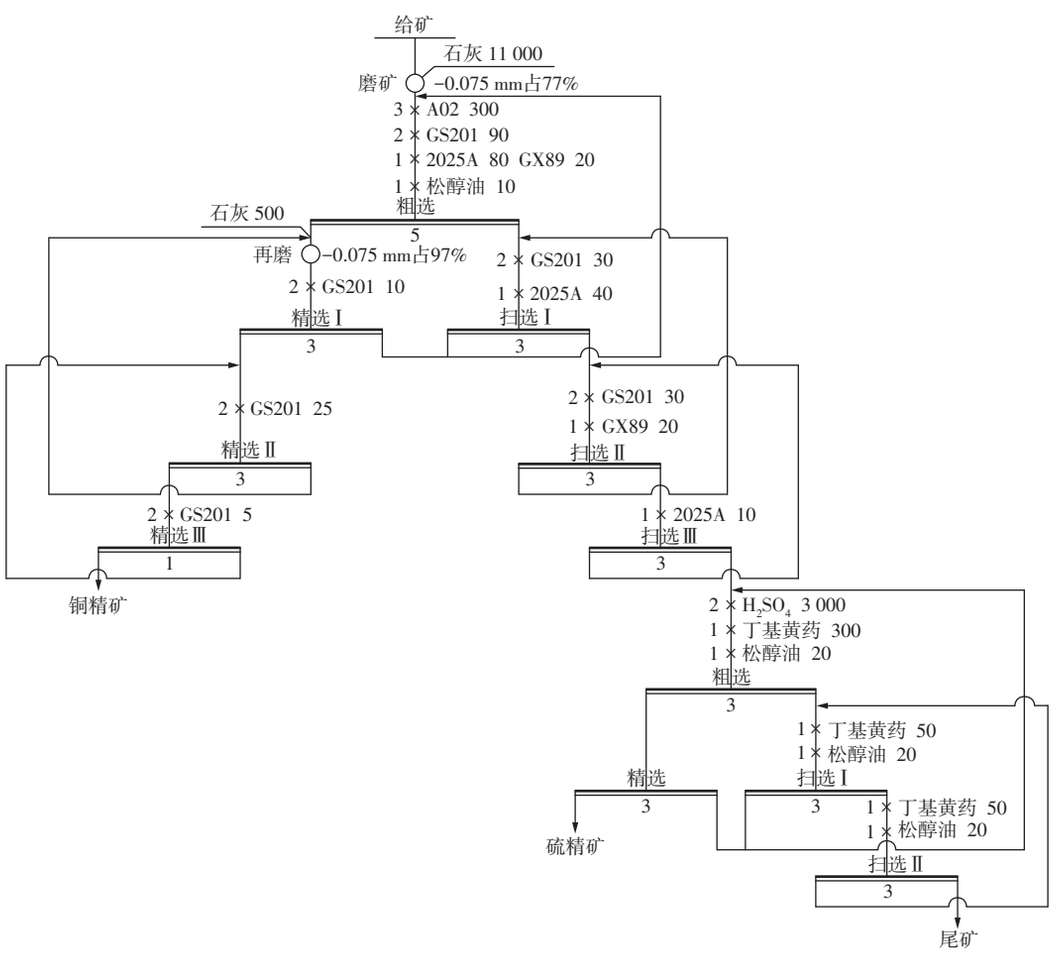


图 15　闭路试验流程

Fig. 15　Flowsheet of the locked-cycle tests

表4 闭路试验结果

Table 4 Results of the locked-cycle tests /%

药剂名称	产品名称	产率	品位		回收率	
			Cu	S	Cu	S
新型药剂	铜精矿	1.95	19.50	30.16	84.42	3.61
	硫精矿	31.33	0.06	46.42	4.17	89.04
	尾矿	66.72	0.077	1.80	11.41	7.35
	给矿	100.0	0.45	16.33	100.0	100.0
选厂药剂	铜精矿	2.20	16.50	30.26	80.29	4.04
	硫精矿	30.14	0.06	48.42	4.00	88.56
	尾矿	67.66	0.105	1.80	15.71	7.40
	给矿	100.0	0.45	16.48	100.0	100.0

的次生氧化型原矿,采用自研新型药剂,闭路试验可获得铜品位19.50%、回收率84.42%的铜精矿和硫品位46.42%、回收率89.04%的硫精矿。对比原有药剂制度指标(铜精矿品位16.50%、回收率80.29%,硫精矿硫品位48.42%、回收率88.56%),铜回收率提升4.04个百分点,硫回收指标基本持平。

综上,自研新型药剂性能优于选厂原有药剂制度,实现该次生氧化型铜硫矿石铜、硫高效浮选回收,可为该矿石的实际生产提供技术支撑。

3 结论

1)原矿铜品位0.42%,铜矿物以硫化铜为主,次生硫化铜占总铜42.86%,铜氧化率4.28%;硫矿物主要为黄铁矿、磁黄铁矿,磁黄铁矿含量达到9.86%,加剧了铜硫分离难度。

2)黄铜矿嵌布粒度微细,小于10 μm粒级占比27.98%,部分以包裹体形式赋存于黄铁矿、磁黄铁矿及脉石矿物内部,磨矿难以完全解离,会造成铜金属在尾矿中的损失。

3)针对该次生氧化型铜硫矿石,开发高效抑制剂GS201与捕收剂2025A,采用“铜优先浮选—铜粗精矿再磨再选—硫浮选”工艺,强化硫化铜与黄铁矿、磁黄铁矿的浮选分离;闭路试验得到铜品位19.50%、回收率84.42%的铜精矿和硫品位46.42%、回收率89.04%的硫精矿,指标显著优于原药剂制度,解决了该矿石铜硫分离困难、铜回收率偏低的问题,为同类矿石浮选提供参考。

参考文献

[1] 黄洁,邓思杨,马晓婷,等. 全球铜产业发展现状与建议[J]. 现代矿业,2021,37(6):1-5.
Huang Jie, Deng Siyang, Ma Xiaoting, et al. Development status and suggestions of global copper industry[J]. Modern Mining, 2021, 37(6): 1-5.

[2] 瞿俊男,魏志聪,谢海云,等. 某次生硫化铜矿石铜硫分离浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2024(2):45-51.
Qu Junnan, Wei Zhicong, Xie Haiyun, et al. Experimental study on copper-sulfur separation flotation of a secondary copper sulfide ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(2): 45-51.

[3] 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. Research progress and prospect of copper mine flotation collectors[J]. Copper Engineering, 2024(3): 69-84.

[4] 傅开彬,汤鹏成,秦天邦,等. 四川某微细粒次生硫化铜矿浮选工艺研究[J]. 矿冶工程,2018,38(6):48-50,54.
Fu Kaibin, Tang Pengcheng, Qin Tianbang, et al. Study on flotation process of a fine-grained secondary copper sulfide ore in Sichuan[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2018, 38(6): 48-50, 54.

[5] 谢峰,肖有明,李树勋,等. 四川某次生硫化铜矿选矿试验研究[J]. 云南冶金,2024,53(4):59-65.
Xie Feng, Xiao Youming, Li Shuxun, et al. Experimental study on a secondary copper sulfide ore in Sichuan[J]. Yunnan Metallurgy, 2024, 53(4): 59-65.

[6] 崔强,宋振国,郑桂兵,等. 某高硫铜铅锌矿选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分),2021(4):77-82.
Cui Qiang, Song Zhenguo, Zheng Guibing, et al. Study on the beneficiation process of a high-sulfur copper-lead-zinc ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(4): 77-82.

[7] 杨远坤,廖银英. 塞尔维亚某高品位次生硫化铜矿石选矿实验[J]. 矿产综合利用,2025,46(3):180-185,195.
Yang Yuankun, Liao Yinying. Beneficiation experiment of a high-grade secondary copper sulfide ore in Serbia[J]. Comprehensive Utilization of Minerals, 2025, 46(3): 180-185, 195.

[8] 武钊,肖骏. 某高次生铜硫化铜矿选矿工艺研究[J]. 铜业工程,2016(2):39-43.

Wu Zhao, Xiao Jun. Study on beneficiation technology of a high-grade secondary copper sulfide ore[J]. Copper Engineering, 2016(2): 39-43.

[9] 黄万抚，王宏．新型药剂浮选江西某难选铜矿的试验研究[J]．有色金属科学与工程，2013，4(3)：62-67.
Huang Wanfu, Wang Hong. Experimental study on flotation of a refractory copper mine in Jiangxi with a new reagent[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2013, 4(3): 62-67.

[10] 李嘉欣，聂光华，邓强，等．酸性体系下硫化矿浮选因素的交互影响研究[J]．有色金属(选矿部分)，2024(4)：113-123.
Li Jiaxin, Nie Guanghua, Deng Qiang, et al. Study on the interaction of flotation factors of sulfide ores in acidic systems[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(4): 113-123.

[11] 李生鹏，谢海云，曾鹏，等．低品位难选铜矿铜硫高效浮选分离试验研究[J]．有色金属(选矿部分)，2025(1)：88-96.
Li Shengpeng, Xie Haiyun, Zeng Peng, et al. Experimental study on high-efficiency flotation separation of copper and sulfur from low-grade refractory copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(1): 88-96.

[12] 程明亮，黄和平．云南某含磁黄铁矿铜矿石选矿试验研究[J]．有色金属(选矿部分)，2021(1)：47-51.
Cheng Mingliang, Huang Heping. Experimental study on the beneficiation of a pyrrhotite-bearing copper ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(1): 47-51.

[13] 毛国治，卢毅屏，冯其明，等．表面氧化磁黄铁矿的高效捕收研究[J]．中国矿业大学学报，2019，48(1)：182-187.
Mao Guozhi, Lu Yiping, Feng Qiming, et al. Study on efficient collection of surface oxidized pyrrhotite[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2019, 48(1): 182-187.

[14] 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 flotation separation technology and reagents[J]. Chemical Minerals and Processing, 2024, 53(1): 50-59.

[15] 吴熙群，胡志强，王立刚，等．我国硫化铜矿选矿技术现状及进展[J]．有色金属(选矿部分)，2019(5)：9-14.
Wu Xiqun, Hu Zhiqiang, Wang Ligang, et al. Status and progress of mineral processing technology for copper sulfide deposits in China[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5): 9-14.

[16] 余娟，章晓林，陈星予，等．云南腾冲微细粒铜锌硫化矿选矿试验研究[J]．有色金属(选矿部分)，2025(1)：64-74.
Yu Juan, Zhang Xiaolin, Chen Xingyu, et al. Experimental study on beneficiation of fine-grained copper-zinc sulfide ore in Tengchong, Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(1): 64-74.

[17] 陈旭波，刘万峰，于志超．非洲某次生硫化铜矿选矿试验研究[J]．中国矿业，2024，33(增刊2)：399-404.
Chen Xubo, Liu Wanfeng, Yu Zhichao. Experimental study on a secondary sulfide copper ore in Africa[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(S2): 399-404.

[18] 谢峰，肖有明，李树勋，等．四川某次生硫化铜矿选矿试验研究[J]．云南冶金，2024，53(4)：59-65.
Xie Feng, Xiao Youming, Li Shuxun, et al. Experimental study of beneficiation of one secondary copper sulfide in Sichuan[J]. Yunnan Metallurgy, 2024, 53(4): 59-65.

[19] 李向益，曾茂青，罗兴，等．云南某微细粒难选次生硫化铜矿选矿试验研究[J]．有色金属(选矿部分)，2015(6)：10-13.
Li Xiangyi, Zeng Maoqing, Luo Xing, et al. Experimental research on beneficiation of a superfine and refractory secondary copper sulphide ore from Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015(6): 10-13.

[20] 张洋，席欣月．铜硫浮选分离工艺及药剂研究进展[J]．黄金，2025，46(1)：47-55.
Zhang Yang, Xi Xinyue. Research progress of copper-sulfur flotation separation process and reagents[J]. Gold, 2025, 46(1): 47-55.

（本文编辑　刘水红）