

doi:10.3969/j.issn.2095-1744.2024.05.012

提升某高硫低铜品位铜硫矿铜浮选回收指标试验研究

李志婷¹, 彭华锋², 汪庶明², 先永骏¹, 李豪¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 铜陵化工集团新桥矿业有限公司, 安徽 铜陵 244000)

摘要: 安徽铜陵某铜硫矿浮选厂处理的原矿含铜0.34%, 其中硫化铜占近93%, 含硫31.26%, 属于高硫低铜硫化矿。选厂铜回收率长期维持在82%~84%, 明显低于原矿中硫化铜理论回收率。为提升该矿石中铜的回收, 开展磨矿细度优化以及复合酯类捕收剂强化铜浮选的试验研究。结果表明, 在磨矿细度 $-74\mu\text{m}$ 占75%, 使用复合酯类捕收剂的条件下, 小型闭路试验获得铜精矿铜品位为16.43%, 铜回收率达到94.07%的指标, 较现场指标分别提高1个和9个百分点; 通过对小试和现场产品的粒级组成深入分析, 得出现场磨矿细度不足, 磨矿产品粒度组成不均匀是造成铜损失在尾矿的关键原因。同时, 小试结果证明使用新型复合酯类捕收剂可强化微细粒铜矿物的回收。为选厂在实际生产中提升指标提供了科学的方向和依据。

关键词: 铜硫矿; 低铜品位; 浮选; 粒级分布; 复合酯类捕收剂

中图分类号: TD952; TD923

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2024)05-0088-07

Improving Copper Flotation Recovery from a Copper-Sulfur Ore with High Sulfur and Low Copper

LI Zhiting¹, PENG Huafeng², WANG Shuming², XIAN Yongjun¹, LI Hao¹

(1. College of Land and Resources and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. TCIGCL Xin Qiao Mining Corporation Ltd., Tongling 244000, China)

Abstract: A copper-sulfur ore from Tongling of Anhui Province contains 0.34% copper and 31.26% sulfur, in which the copper mainly occurs in form of sulfides(93%), and thus it can be defined as sulfide ore of high sulfur and low copper. The copper recovery in the flotation practice has been maintained at 82%—84% in the past years, which is significantly lower than the theoretical recovery of copper sulfides in the raw ore. In order to improve the copper recovery, in this work, bench-scale flotation tests were performed for investigating the effects of grinding fineness and multiple esters combination collector on the copper flotation recovery. Under the optimized conditions of 75%—74 μm grinding fineness and using multiple esters combination collector, a copper concentrate assaying 16.43% Cu with 94.07% Cu recovery was obtained, which were respectively increased by 1 and 9 percentage point than that of produced from industrial production. Through in-depth analysis of the size fraction distributions of products from the tests and industrial production, we found that the insufficient grinding fineness and the uneven particle size distribution in the grinding products are the key reasons for the copper loss in the tailings. In addition, the tests results indicated that the multiple esters combination collector can effectively enhance the recovery of ultra-fine copper minerals. These would provide a scientific guidance and basis for improving the copper recovery in industrial production.

Key words: copper sulfide ore; low copper grade; flotation; size fraction distribution; multiple esters combination collector

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52264027); 云南省万人计划青年拔尖人才项目(YNWR-QNBJ-2019-051)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(52264027); Top-Notch Young Talents Project of Ten Thousand Program of Yunnan Province(YNWR-QNBJ-2019-051)

作者简介: 李志婷(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方为资源综合利用、浮选理论与实践。

通信作者: 先永骏(1984—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为资源综合利用、浮选理论与实践。

引用格式: 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.

铜广泛应用于电力行业,金属用量排名第三,仅次于铁和铝^[1]。在过去近四十年,我国经济高速发展,已成为全球最大的铜消费国^[2-3]。同时,中国铜矿选矿、铜冶炼、铜加工的装备水平、生产工艺和技术都已经进入世界先进行列^[4]。但当前,国内高品质、易处理铜资源大量消耗,每年需进口大量铜精矿等原料^[5],铜资源对外依存度常年持续大幅增加。在复杂的国际形势下,高效利用国内低品位复杂铜矿石对我国社会发展和国家安全具有重要意义。

相比其他有色资源,我国铜矿资源矿床规模虽然相对比较集中,但普遍品质低,即铜品位低、粒度细、矿物共伴生关系复杂等特点^[6-8],很大程度上增加资源高效、经济利用的难度。为此,前人开展了大量针对性研究。例如,王中明^[9]针对原矿中黄铁矿矿物量为 67.7%,金属硫化物总量达 69.15%,采用以石灰为主的组合抑制剂,丁胺黑药和乙黄药为混合捕收剂,优先选铜工艺流程获得铜精矿品位含 Cu 17.04%,铜回收率 85.15% 的较好指标。王军民^[10]采用新型 Y-89 作铜捕收剂,石灰和硫化钠作黄铁矿抑制剂及氧化铜矿的硫化剂进行抑硫浮铜,实现在工艺上不增加任何设备,仅改变药剂种类、加药点及用量使铜回收率提高 4 个百分点。

安徽铜陵某选矿厂在上世纪 90 年代开始处理高硫低品位铜矿石。原矿含硫 32%~35%,铜品位仅为 0.3%~0.4%,采用铜优先浮选—再浮硫分别回收铜和硫。选厂建成初期,铜回收率普遍在 70%~75%。通过公司科技人员持续研究攻关,对生产工艺的流程结构和药剂制度进行大量的优化,大幅提升了铜的回收率^[11]。直至目前,铜回收率提升至 82%~84%。根据该铜资源储量报告中铜的赋存状态(超过 90% 为硫化矿),结合处理类似资源

的选厂指标,如云南大红山铜矿,北衙金矿等选厂铜回收率普遍超过 90%,该选厂的铜浮选指标仍有一定提升的潜力。但是,由于该选厂建厂较早,厂房布置陈旧,且前期进行大量改造,当前不具备大幅调整工艺流程的条件,如增加中矿再磨,流程长度等。通过我们前期对选厂的调研,分析认为通过磨矿优化和高效药剂更新来改善铜浮选指标,具有较大的可能性。因此,本文在选厂现有工艺流程结构基础上,开展小型试验研究,结合前人的研究成果,主要评估调整磨矿细度和新捕收剂对进一步提升该矿石铜回收效率的可行性;并对浮选产品的粒级组成进行深入分析,找到当前指标不理想的原因,为生产指标提升的调试和改造提供方向和理论指导。同时,为提升类似低品位难选资源利用效率提供一定的参考。

1 矿石性质

矿石试样取自安徽铜陵某选矿厂最终碎矿产品的运输皮带。将样品破碎至 -2 mm 后,混匀缩分制备样品,进行原矿性质研究。原矿多元素分析及铜物相分析结果分别列于表 1 和表 2。由表 1 可知,原矿硫和铁品位分别为 31.26% 和 32.21%,主要是黄铁矿,铜品位含量为 0.34%,其他常见有价金属品位不高;脉石主要为石英,少量碳酸盐,属于高硫低铜品位铜硫矿石。由表 2 可知,原矿中氧化铜含量极低,铜主要以原生硫化铜形式存在,易选铜的理论回收率 92.95%。

矿物组成及含量分析结果如表 3 所示,矿石主要金属矿物有黄铁矿和磁铁矿等,其次为褐铁矿,少量黄铜矿、辉铜矿、闪锌矿和方铅矿;脉石矿物主要有石英、绢云母、方解石、绿泥石及白云石等。

表 1 原矿多元素分析结果

Table 1 Multielement analysis results of the raw ore

/%

Composition	Cu	Au*	Ag*	Pb	Zn	Fe	S
Content	0.34	0.12	7.04	0.09	0.16	32.21	31.26
Composition	As	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	MgO
Content	0.01	14.08	1.44	0.46	0.03	4.4	2.07

Note: * unit is g/t.

表 2 原矿铜物相分析结果

Table 2 Copper phase analysis results of the raw copper

/%

Phase name	Primary copper sulfide	Secondary copper sulfide	Combined copper oxide	Free copper oxide	Total copper
Content	0.33	0.005	0.01	0.01	0.355
Distribution rate	92.95	1.41	2.82	2.82	100.0

表3 原矿矿物组成分析结果/%

Table 3 Mineral composition analysis results of the raw ore

Composition	Chalcopyrite	Pyrite	Quartz	Sericite	Chlorite	Calcite	Dolomite
Content	1.28	67.01	10.80	4.35	1.32	2.30	0.75
Composition	Magnetite	Limonite	Pyroxene	Xenotime	Corundum	Sphalerite	Galena
Content	1.20	0.23	0.40	0.002	0.32	Occasionally	Occasionally

2 浮选试验

选厂常年生产的铜精矿铜回收率在82%~84%。根据矿石的物相分析,仍有近10%左右的硫化铜矿物损失,结合选厂的情况,分析原因如下:1)原矿石中黄铁矿、黄铜矿与磁铁矿嵌布关系密切,即硫化矿物以单体或集合体的形式沿磁铁矿裂隙或粒间充填胶接交代,现场生产磨矿产品的细度和粒度组成可能存在不合理;2)现场浮铜捕收剂(乙硫氨酯80 g/t+丁基黄药100 g/t)过于传统,可能对细粒铜矿物或铜矿物连生体捕收性能偏弱,采用新型复合型捕收剂强化捕收有望提升铜选别指标^[12]。因此,针对上述分析,重点考察磨矿细度和组合捕收剂对铜回收的影响,并分析在适宜磨矿条件下,磨矿产品的粒度组成与铜回收之间的关系,为生产技改提供有效的科学依据。粗选条件试验流程见图1。

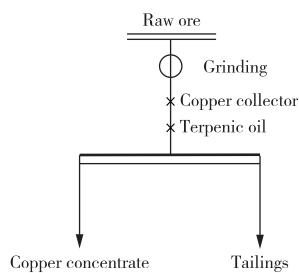


图1 粗选条件试验流程

Fig. 1 Flowsheet of roughing condition experiments

2.1 磨矿细度对浮选指标的影响

有用矿物单体解离是矿石有效分选的先决条件,未完全解离或者过分解离,均会增加浮选难度,因此,磨矿细度对选别指标有决定性的影响^[13],故首先对该矿石进行了磨矿细度试验研究,产品磨矿细度以-74 μm 粒级的质量百分比表示,考察不同磨矿细度条件下,精矿产品铜品位和回收率的变化,结果见图2。可知,随着磨矿细度的增加,铜粗精矿铜品位和回收率呈现增加的趋势,但当磨矿细度大于75%时,铜粗精矿铜品位和回收率有所减少,主要是由于黄铜矿过磨导致在浮选时不容易被捕获。可见,该矿石磨矿细度过粗不利于有用矿物和脉石矿物的解离,粒度过细又会一定程度上造成矿石泥

化,损失微细粒有用矿物。综上,磨矿细度宜选择-74 μm 占75%。

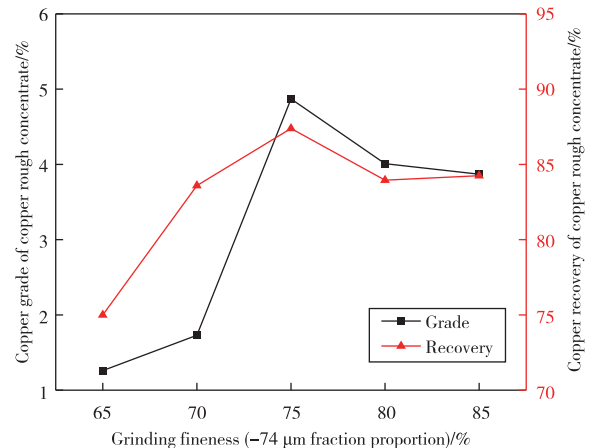


图2 磨矿细度对铜浮选的影响

Fig. 2 Effects of grinding fineness on copper flotation

2.2 石灰用量对浮选指标的影响

该矿石黄铁矿含量高,含硫含量高达31.26%。有效的铜硫分离决定了铜精矿产品的质量^[14]。尽管现场生产中,确定5 000 g/t 的石灰用量最佳。但由于交互影响的存在,即随着磨矿细度的变化,石灰最佳用量也存在相应差异。因此,本研究仍对石灰用量进行考察。

在磨矿细度-74 μm 占75%,乙硫氨酯用量80 g/t,丁基黄药用量100 g/t,松醇油用量20 g/t的条件下按照图1 流程进行试验,结果如图3 所示。结果表

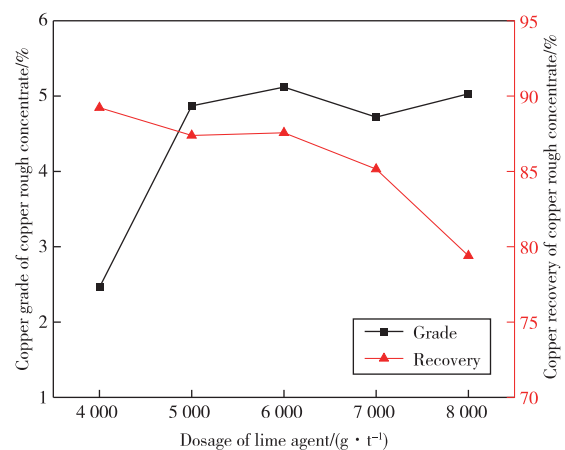


图3 石灰药剂用量对铜浮选的影响

Fig. 3 Effect of lime agent dosage on copper flotation

明,随着石灰用量由 4 000 g/t 增加到 6 000 g/t,铜粗精矿的回收率呈缓慢下降的趋势,品位呈先上升后趋于平稳的趋势。当石灰用量从 6 000 g/t 增加到 8 000 g/t 时,铜粗精矿铜回收率快速下降,铜品位也有所降低。说明对于该矿石,石灰用量超过 6 000 g/t 时存在过量现象,导致矿浆中大量羟基钙化合物的在微细粒单体黄铜矿表面聚集或吸附,对其上浮产生不利影响^[15]。综上,后续试验选用石灰用量为 6 000 g/t。

2.3 复合酯类捕收剂试验

两种或多种捕收剂按照一定比例组合之后形成的组合捕收剂,其捕收和选择性能往往会显著优于单一组分。有报道指出^[16],这主要是由于组合捕收剂产生共协同、互补效应所致。例如,陈明波等^[17]以云锡某低品位单铜硫化矿为研究对象,在低碱条件下以 MA-1/MOS-2 配比为 1:1 的组合捕收剂,相比单一捕收剂,闭路试验获得铜精矿回收率明显提升,降低生产成本,实现增效生益目标。

高硫铜矿铜捕收剂中,酯类捕收剂相比传统的黄药类,通常具有更高的选择性,和相对弱的捕收性能。为弥补酯类捕收剂捕收能力较弱的不足,根据前人使用组合捕收剂的经验,课题组前期提出复合酯类捕收剂的使用思路,即采用 3~4 种酯类捕收剂为原料,按不同的比例混合形成 LE 系列高效复合酯类铜捕收剂,其中阿拉伯数字代表核心黄原酸酯的比例,其捕收基本原理是通过中、小分子的黄原酸酯协同吸附,增大微细粒铜矿物表面能降低的程度,从而强化其捕收。为评估复合酯类捕收剂对该矿石铜的分选效果,选择现场药剂(乙硫氨酯+丁基黄药)、LE501、LE502、LE503 这四种药剂作为捕收剂种类试验,其中 LE501、LE502 和 LE503 为不同黄原酸酯比例的组合药剂。在磨矿细度 $-74\ \mu\text{m}$ 占 75%,石灰用量 6 000 g/t 条件下按照图 1 流程试验,结果如图 4 所示。结果表明,现场捕收药剂下获得的精矿具有较好的铜品位,但回收率低,验证了之前的分析。三种捕收剂的精矿回收率均高于现场药剂,这也证实复合酯类捕收剂对该矿石铜矿物强化捕收的有效性。其中,LE501 捕收剂选择性偏弱,表现为对硫铁矿的捕收性能强,因此精矿铜品位偏低;LE502 捕收剂综合性最优,获得了最佳的铜品位及回收率;LE503 捕收性能略弱。因此认为,LE502 更适合该高硫低铜矿石。

接下来,进行了捕收剂用量试验,结果如图 5 所示。结果表明,LE502 捕收剂用量为 80、90 g/t 时

铜粗精矿铜品位相差不大,用量为 90、100 g/t 时铜粗精矿铜回收率差不多。综合考虑,铜粗选 LE502 用量选择 90 g/t。以上试验结果说明,新药剂在用量更低的情况获得了更好的分选指标,分选效率显著增加。对于该年份较久的选厂,预进一步提升指标,捕收剂更新通常是很有必要的。

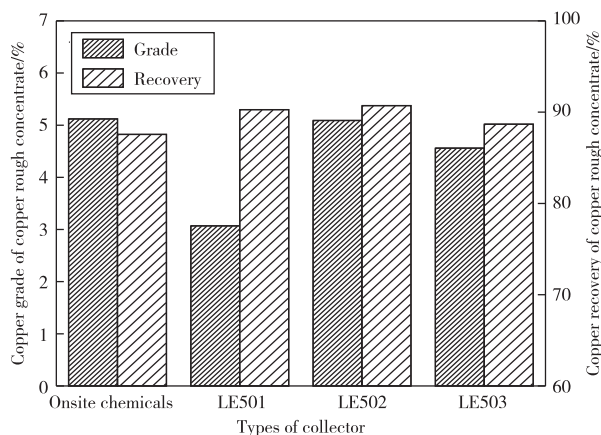


图 4 捕收剂种类对铜浮选的影响

Fig. 4 Effect of collector types on copper flotation

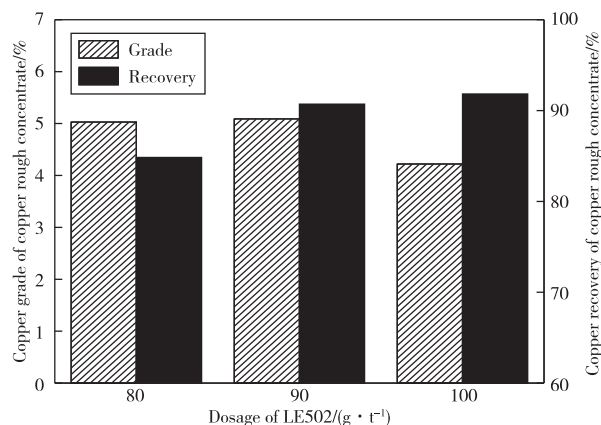


图 5 LE502 用量对铜浮选的影响

Fig. 5 Effect of LE502 dosage on copper flotation

2.4 闭路试验

根据磨矿细度、石灰用量和捕收剂浮选等条件试验确定的最佳操作参数,以图 6 为流程进行闭路试验,结果见表 4,并将现场工艺下的小型试验结果和现场指标列于表中,进行对比。可见,优化后的流程最终获得铜精矿铜品位 16.43%,铜回收率 94.07%的良好指标,与现场药剂制度下的小型试验相比,精矿铜回收率高 3.32%,这说明优化捕收剂具有提高铜回收的可行性。另一方面可以看出,在相同的药剂制度下,小型试验与现场的指标具有明显的差距,即小型试验精矿在给矿品位更低的情况下,铜回收率比现场高 6 个百分点。这说明现场的某些参数也存在不合理之处,分析认为这可能是两

表 4 闭路试验结果与生产指标对比

Table4 Comparison of locked-cycle tests results with production indicators

Index	Product	Weight/%	Grade/%		Recovery/%	
			Cu	S	Cu	S
Bench-scale test (LE502 Collector)	Copper concentrate	1.95	16.43	45.12	94.07	2.81
	Tailings	98.05	0.02	30.98	5.93	97.19
	Feed	100.0	0.34	31.26	100.0	100.0
Bench-scale test (Collectors using in industrial production)	Copper concentrate	1.90	16.20	45.34	90.75	2.76
	Tailings	98.10	0.032	30.99	9.25	97.24
	Feed	100.0	0.34	31.26	100.0	100.0
Industrial production	Copper concentrate	2.26	15.37	45.34	84.72	3.15
	Tailings	97.74	0.064	32.24	15.28	96.85
	Feed	100.0	0.41	32.54	100.0	100.0

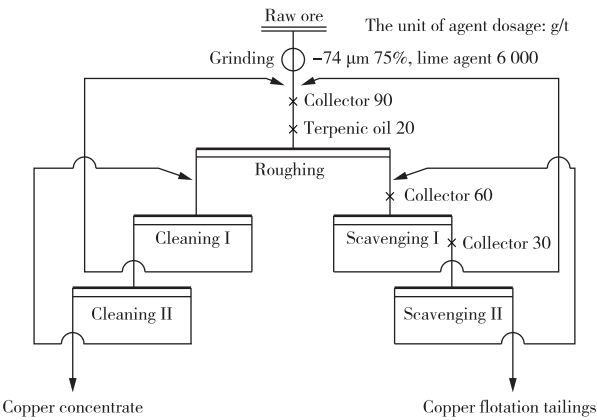


图 6 闭路试验流程

Fig. 6 Flowsheet of the locked-cycle tests

者磨矿产品的细度和粒度组成不一致引起的。

2.5 粒度分析

对现场生产以及小型优化闭路试验的磨矿产品和铜精矿进行粒度组成分析,分析结果分别见表 5 (现场生产)和表 6(小型优化试验),分析结果如下。

1)以 $-74\text{ }\mu\text{m}$ 粒级质量百分比计,75%磨矿细度是推荐的磨矿细度,而现场的磨矿细度为 71.54%,未达到试验推荐的最优值;

2)生产现场:磨矿产品中 $+74\text{ }\mu\text{m}$ 粗粒级铜品位最低,这可能是由于铜矿物在该粒级中未充分解离造成的,即部分铜矿物以与硫铁矿物连生^[18],精矿中该粒级的铜粒级回收率也最低,为 74.94%。此外可以看出精矿中 $-74+43\text{ }\mu\text{m}$ 和 $-43+37\text{ }\mu\text{m}$ 两个粒级的铜粒级回收率最高,分别达到 94.87%和 97.16%,因此认为这两个粒级为铜的“易选粒级”。但给矿中 $+74\text{ }\mu\text{m}$ 和 $-19\text{ }\mu\text{m}$ 粒级含量最高,分别达到 28.44%和 23.51%,铜分布率也最高。因此,认为生产现场存在磨矿不均匀的情况,即相当部分铜矿物未充分解离或者过磨,而出现中间易选粒级少,两头难选粒级多的现象。

3)优化后的小型试验:相比现场,易选粒级 $-43+37\text{ }\mu\text{m}$ 和 $-74+43\text{ }\mu\text{m}$ 产率显著提高,分别为 23.37%和 31.59%,因此认为这是改善浮选指标

表 5 现场生产的磨矿产品和铜精矿粒度分析结果

Table 5 Size fraction analysis of grinding output and copper concentrate produced from industrial production

Product	Size fraction/ μm	Weight/%	Cu Grade/%	Cu Distribution/%	Copper recovery in the fraction/%
Copper concentrate	$+74$	23.45	14.88	22.70	74.94
	$-74+43$	21.45	15.12	21.10	94.87
	$-43+37$	20.37	15.87	21.03	97.16
	$-37+19$	12.16	15.10	11.95	79.43
	-19	22.57	15.81	23.22	80.59
	Total	100.0	15.37	100.0	84.72
Feed	$+74$	28.44	0.37	25.67	—
	$-74+43$	17.56	0.44	18.84	—
	$-43+37$	18.34	0.41	18.34	—
	$-37+19$	12.15	0.43	12.74	—
	-19	23.51	0.43	24.41	—
	Total	100.0	0.41	100.0	—

表6 小型优化试验的磨矿产品和铜精矿粒度分析结果

Table 6 Size fraction analysis of grinding output and copper concentrate from optimizing batch-scale test

Product	Size fraction/ μm	Weight/%	Cu grade/%	Cu distribution/%	Cu recovery in the fraction/%
Copper concentrate	+74	21.34	16.48	21.40	88.33
	-74+43	31.59	16.78	32.26	97.20
	-43+37	23.37	16.33	23.23	98.56
	-37+19	12.16	17.10	12.66	96.81
	-19	11.54	14.88	10.45	85.34
	Total	100.0	16.43	100.0	94.07
Feed	+74	25.00	0.31	22.79	—
	-74+43	32.17	0.33	31.22	—
	-43+37	22.84	0.33	22.17	—
	-37+19	12.67	0.33	12.30	—
	-19	7.32	0.53	11.52	—
	Total	100.0	0.34	100.0	—

主要因素之一。另一方面,精矿中细粒级-37+19 μm 和-19 μm 的铜粒级回收率明显高于现场精矿,分析认为这主要是复合酯类捕收剂强化捕收微细粒铜矿的结果。细粒级中铜矿物单体颗粒一般更多,因此,精矿铜品位也有一定提升。

3 结论与建议

1)安徽铜陵某高硫低铜硫化矿含铜0.34%,硫31.26%。在优化的磨矿细度、石灰药剂用量和复合酯类捕收条件下,采用一粗两精两扫,小型闭路试验获得了铜精矿含铜16.43%,铜回收率94.07%的指标。相比使用现场药剂制度的闭路试验,铜品位和回收率分别提升0.23%和3.32%。复合酯类捕收对提升该矿石的铜浮选回收率具有较大潜力。

2)采用现场捕收剂,小型闭路试验获得了铜精矿铜品位和铜回收率分别为16.20%和90.75%的指标,分别较生产指标高0.83%和6.03%;对现场生产和小型优化试验的磨矿产品和铜精矿粒级分析得到,现场磨矿细度不足,磨矿不均匀,即中间易选粒级少,两头难选粒级多,是造部分硫化铜损失在尾矿的重要因素之一。建议选厂进一步开展磨矿一分级研究,优化磨矿产品粒级组成,为浮选提供更适宜的分选条件。

参考文献:

- [1] 董敬申,刘全军,纪慧超,等.硫化铜、砷矿物浮选分离的研究进展[J].有色金属工程,2020,10(7):74-81.
DONG Jingshen, LIU Quanjun, JI Huichao, et al. Research progress on flotation separation of copper sulfide and arsenic sulfide minerals[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(7): 74-81.
- [2] 张亮,杨卉芃,赵军伟,等.世界铜矿资源系列研究之一:资源概况及供需分析[J].矿产保护与利用, 2015(5):63-67.
ZHANG Liang, YANG Huipeng, ZHAO Junwei, et al. Series study on copper resource in world: general situation and analysis of supply and demand [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2015(5):63-67.
- [3] 羊建波,许志斌,彭浩,等.全球铜资源供需格局趋势分析[J].中国矿业,2015,24(6):1-5.
YANG Jianbo, XU Zhibin, PENG Hao, et al. Global copper resources supply and demand trends[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(6): 1-5.
- [4] 王赤卫.中国铜工业发展的机遇与挑战[J].有色金属工程,2013,3(6):5-6.
WANG Chiwei. Opportunities and challenges for the development of China's copper industry[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2013, 3(6): 5-6.
- [5] 纪慧超.高硫铜矿高效分选技术研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.
JI Huichao. Research on efficient separation technology of high sulfur copper ore [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [6] 田尤,杨为民,申俊峰,等.中国铜资源产业形势分析及发展对策建议[J].资源与产业, 2015, 17(4): 100-105.
TIAN You, YANG Weimin, SHEN Junfeng, et al. Situation and suggestions of China's copper resources industry[J]. Resources & Industries, 2015, 17(4): 100-105.
- [7] 吴荣庆.我国铜矿的资源特点与综合开发利用的成绩和不足[J].中国金属通报,2008(6):33-34.
WU Rongqing. Characteristics of copper resources in China and the achievements and shortcomings of comprehensive development and utilization[J]. China

- Metal Bulletin, 2008(6):33-34.
- [8] 徐凯, 徐慧. 世界铜冶炼发展趋势及我国铜工业发展对策[J]. 有色金属, 2003, 55(2):129-131.
XU Kai, XU Hui. Tendency of world copper industry development and countermeasures of Chinese copper industry[J]. Nonferrous Metals, 2003, 55(2):129-131.
- [9] 王中明. 新桥硫铁矿矿石选矿工艺研究[J]. 有色矿山, 2000, 29(3):32-34.
WANG Zhongming. Study on mineral processing technology of Xinqiao pyrite mine ore[J]. Nonferrous Mines, 2000, 29(3):32-34.
- [10] 王军民. Y-89 在新桥矿选铜厂的应用实践[J]. 化工矿物与加工, 2002(9):19-20.
WANG Junmin. Application of Y-89 collector in copper concentrator[J]. Industrial Minerals & Processing, 2002(9):19-20.
- [11] 赵宏, 曾清华. 新桥硫铁矿选矿工艺研究[J]. 矿产保护与利用, 1996, 16(3):33-35, 55.
ZHAO Hong, ZENG Qinghua. Research on the processing technique for Xinqiao sulphur-iron mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 1996, 16(3):33-35, 55.
- [12] 张谦, 文书明, 丰奇成, 等. 某难处理铜铅锌混合矿浮选试验及机理分析[J]. 有色金属工程, 2022, 12(8):108-118.
ZHANG Qian, WEN Shuming, FENG Qicheng, et al. Flotation experiments of mixed ore of copper-lead-zinc and the mechanisms analysis[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(8):108-118.
- [13] 王立新, 王青才. 某高硫低品位金矿石浮选试验研究[J]. 黄金, 2019, 40(11):52-55.
WANG Lixin, WANG Qingcai. Experimental study on the flotation of a low grade gold ore with high sulfide content[J]. Gold, 2019, 40(11):52-55.
- [14] 刘万峰, 徐连华, 谭鑫. 选择性捕收剂 BK404 在某铜硫矿低碱浮选新工艺中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(4):80-83.
LIU Wanfeng, XU Lianhua, TAN Xin. Application of selective collector BK404 on the low alkali flotation new technology of certain copper-sulphur ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2015(4):80-83.
- [15] 曾海鹏, 邵志东, 黄红军. 湖北某铜矿回水对浮选影响研究[J]. 矿山工程, 2022, 10(4):392-404.
ZENG Haipeng, SHAO Zhidong, HUANG Hongjun. Research of effect of backwater on flotation of a copper mine in Hubei province[J]. Mine Engineering, 2022, 10(4):392-404.
- [16] WANG L, SUN W, HU Y H, et al. Adsorption mechanism of mixed anionic/cationic collectors in muscovite-quartz flotation system [J]. Minerals Engineering, 2014, 64:44-50.
- [17] 陈明波, 郑其方, 赵荣, 等. 云锡某硫化铜新型组合捕收剂浮选试验研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(6):130-134.
CHEN Mingbo, ZHENG Qifang, ZHAO Rong, et al. Experimental study on flotation of Yunnan tin kafang copper sulfide with a new combined collector [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(6):130-134.
- [18] 朱一民, 周玉才, 李天霞, 等. 某高硫难选铜矿的选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2014(5):22-25.
ZHU Yimin, ZHOU Yucai, LI Tianxia, et al. Study on ore dressing and commercial test of a high-sulfur refractory copper ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2014(5):22-25.