

doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2025. 01. 009

云南某细粒硫化铜矿选矿试验研究

魏清成^{1,2}, 刘殿文^{1,3}, 申培伦^{1,3}, 汪浩翔^{1,3}, 谢海云^{1,3}, 王 涵^{1,3}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 昆明金印环保科技有限公司, 昆明 650031;

3. 云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 昆明 650093)

摘 要: 铜是重要的战略性矿产资源, 是国民经济和社会发展的重要基础原材料, 因其优良的导电性、延展性及其耐腐蚀性被广泛应用于电力电气、电子设备、交通运输、空调制冷、建筑、家电、燃油汽车等各个领域。云南某露天铜矿, 铜品位为 1.43%、硫品位为 10.62%, 由于该矿石为表层矿石, 风化严重, 嵌布粒度细, 次生硫化铜矿含量较高, 含硫较高以及药剂制度不合理等因素, 导致铜精矿品位及回收率偏低。针对现场药剂制度不合理、强压强拉、细粒次生硫化铜矿回收效果不佳等问题及该矿石性质, 进行矿石多元素分析、物相分析、粒度筛分分析、选矿药剂优化试验、对比试验, 最终采用石灰与黄铁矿抑制剂 STY 组合抑制黄铁矿, 硫化钠活化次生硫化铜矿, 丁基黄药与螯合捕收剂 LS901 组合捕收, 在实验室条件下证明了采用该药剂制度能有效提高铜选矿指标, 并在实验室试验的基础上进行了工业试验, 工业试验的矿石经过混匀处理, 矿石品位、氧化率、次生硫化铜含量、嵌布粒度基本相同。工业试验结果表明, 当矿石铜品位为 1.49% 时, 新药剂制度铜回收率提高了 5.13 百分点, 铜精矿品位提高了 3.57 百分点。

关键词: 高硫铜矿; 次生硫化铜; 铜硫分离; 黄铁矿抑制剂**中图分类号:** TD923; TD952**文献标志码:** A**文章编号:** 1671-9492(2025)01-0081-07

Experimental Study on Beneficiation of a Fine-grained Copper Sulfide Ore in Yunnan

WEI Qingcheng^{1,2}, LIU Dianwen^{1,3}, SHEN Peilun^{1,3}, WANG Haoxiang^{1,3},XIE Haiyun^{1,3}, WANG Han^{1,3}

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China;

2. Kunming Jinyin Environmental Protection Technology Co., Ltd., Kunming 650031, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Mineral Resources,

Kunming 650093, China)

Abstract: Copper is an important strategic mineral resource and an important basic raw material for national economic and social development. It is widely used in electric power, electronic equipment, transportation, air conditioning and refrigeration, construction, home appliances, fuel vehicles and other fields because of its excellent electrical conductivity, ductility and corrosion resistance. An open-pit copper mine in Yunnan has a copper grade of 1.43% and a sulfur grade of 10.62%. Because the ore is a surface ore with severe weathering, fine disseminated particle size, high content of secondary copper sulfide, high sulfur content and unreasonable reagent system, the grade and recovery of copper concentrate are low. In view of the problems of unreasonable on-site reagent system, strong pressure pulling, poor recovery of fine-grained secondary copper sulfide ore and the properties of the ore, multi-element analysis, phase analysis, particle size screening analysis, optimization test of beneficiation reagents and comparative test were carried out. Finally, the combination of lime and pyrite inhibitor STY was used to inhibit pyrite, sodium sulfide activated secondary copper sulfide ore, and butyl xanthate and chelating collector LS901 were combined to collect.

收稿日期: 2024-07-16**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(52074138); 云南省重大科技计划项目(202202AG050015); 云南省基础研究专项项目(202001AS070030, 202201AU070099)**作者简介:** 魏清成(1988—), 男, 云南昭通人, 在职研究生, 工程师, 主要从事选矿药剂、选矿工艺开发及工程化应用研究。**通信作者:** 刘殿文(1973—), 男, 山东青岛人, 博士, 教授, 主要从事浮选理论与实践、固废资源二次利用等研究。

申培伦(1989—), 男, 山东沂水人, 博士, 硕士生导师, 主要从事浮选理论与实践、固废资源二次利用等研究。

Under laboratory conditions, it was proved that the reagent system could effectively improve the copper beneficiation index, and industrial tests were carried out on the basis of the laboratory. The ore in the industrial test was mixed evenly. The ore grade, oxidation rate, secondary copper sulfide content and disseminated particle size are basically the same. The industrial test results show that when the copper grade of the ore is 1.49%, the copper recovery of the new reagent system is increased by 5.13 percentage points, and the copper concentrate grade is increased by 3.57 percentage points.

Key words: high-sulfur copper ore; secondary copper sulfide; copper-sulfur separation; pyrite depressant

铜作为与人类关系极为密切的有色金属,因其优良的导电性、延展性以及耐腐蚀性被广泛应用于机械、建筑、国防等领域。我国是铜资源消费大国,自1949年以来,我国铜消费量呈现不断增长的趋势,从1.5万t/a增长到1388.5万t/a,累计消费量1.9亿t^[1]。当前提取铜的主要原料为自然界中的硫化铜矿物。自然界中的硫化铜矿物按铜相态可分为原生硫化铜矿物和次生硫化铜矿物,原生硫化铜基本为黄铜矿(CuFeS_2),次生硫化铜矿物的种类较多,一般有斑铜矿(Cu_5FeS_4)、辉铜矿(Cu_2S)、蓝辉铜矿($4\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{CuS}$)、铜蓝($\text{Cu}_2\text{S} \cdot \text{CuS}_2$)等^[2-3]。次生硫化铜主要为原生硫化铜矿物在自然界中经氧化、分解、还原、迁移等一系列复杂物理化学反应形成,由于形成机制受内生及外生两种作用影响,所以不同矿区、产地形成的次生硫化铜矿物的种类及含量均具有较大的差异性,进而导致了含次生铜矿物的矿石可选性波动性较大。一般来说,次生硫化铜矿较原生硫化铜矿难浮,其主要原因有:1)次生铜硫化矿床普遍存在着复杂的致密交代现象,结晶不完全及嵌布过细,矿石构造呈致密浸染态、单体矿物解离难度大等;2)在磨矿过程中,次生铜矿物间晶格断裂,易产生大量的游离态铜离子,导致容易被铜离子活化的黄铁矿、闪锌矿的可浮性增加,铜精矿品质下降,药剂成本增加^[4-5]。按照嵌布特征分类,可分为粗粒嵌布、细粒嵌布、微粒和次显微粒嵌布,其中微细粒矿石较难选,其主要原因有^[6-8]:1)微细粒矿物质量小、粒度小导致了疏水性矿粒在矿浆中的动量小,与气泡的碰撞概率小,难以克服矿粒与气泡之间的能垒而不能黏附于气泡表面,从而影响其浮选回收率;2)微细粒矿物比表面积大、表面能高、容易形成异相团聚,导致矿泥罩盖机械夹杂,造成其分选选择性差;3)在矿浆中的溶解

度高,产生难免离子与捕收剂发生竞争吸附或与捕收剂反应生成沉淀,影响药剂与矿物之间的相互作用;4)改变了矿浆的流变性,导致浮选矿浆黏度高、气泡过度稳定;5)细粒矿泥罩盖在目的矿物表面,改变矿物的亲疏水性,增大分选难度。因此,微细粒矿物的浮选回收是世界性难题和热点问题。国内外开展了大量针对微细粒矿物浮选的基础研究,通过对矿粒进行预处理、开发新型细粒浮选设备和高效浮选药剂,以达到回收有用组分,提高精矿回收率的目的^[9-13]。

目前,选别硫化铜矿的主要药剂有黄药、黑药、乙硫氨酯、松油醇等,但对含有微细粒次生硫化铜矿的难选矿石,选别指标较差,因此,开发高效的药剂及药剂制度对难选细粒硫化铜矿选矿具有重要意义。本文以某微细粒硫化铜矿为研究对象,对硫化铜矿矿石进行化学多元素分析、铜物相分析、粒度筛析等,根据矿石性质筛选细粒硫化铜矿的捕收剂,并开发相应的药剂制度,实现原生硫化铜矿、次生硫化铜矿的同步浮选,提高铜资源的综合利用率。

1 矿石性质

1.1 矿石化学多元素分析

以云南某露天铜矿床表层矿石为研究对象,进行化学多元素分析,分析结果见表1。由表1可知,该矿石铜品位为1.43%,硫含量10.62%,脉石主要以石英为主,其次为碳酸盐,主要回收的有价元素为铜。

1.2 矿石铜物相分析

为确定矿石中铜的赋存形式,对矿石进行了铜的物相分析,分析结果见表2。由表2可知,矿石中的铜主要以硫化铜的形式存在,占91.67%,其中次生硫化铜占36.81%,选矿时应考虑次生硫化铜对铜硫分离的影响。

表1 矿石化学多元素分析结果

Table 1 Results of multi-element analysis of the ore

/%

组分	Cu	Pb	Zn	S	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	$\text{Ag}^{1)}$
含量	1.43	0.03	0.13	10.62	45.87	4.56	1.30	9.11	<5.00

注:1)单位为g/t。

表 2 矿石中铜物相分析结果

Table 2 Results of copper phase analysis of the ore /%

铜相别	原生硫化铜	次生硫化铜	氧化铜	合计
含量	0.79	0.53	0.12	1.44
分布率	54.86	36.81	8.33	100.0

1.3 矿石中主要金属铜矿物的粒度组成

为查明铜金属的分布情况，取选矿工艺流程中的二段分级溢流，对其进行筛析，筛析结果见表 3。由表 3 可知，溢流细度为 -0.074 mm 占 91.69%，其中 $-37+19\text{ }\mu\text{m}$ 粒级中铜的分布率为 16.33%， $-19+10\text{ }\mu\text{m}$ 粒级中铜的分布率为 27.17%， $-10\text{ }\mu\text{m}$ 粒级中铜的分布率为 8.82%。

表 3 矿石中铜矿物粒度组成

Table 3 Particle size composition of copper minerals in the ore /%

粒级/ μm	产率	铜品位	铜金属分布率
+74	8.31	4.80	27.89
-74+37	20.36	1.39	19.79
-37+19	18.39	1.27	16.33
-19+10	25.39	1.53	27.17
-10	10.35	1.22	8.82
合计	100.0	1.43	100.0

2 结果与讨论

2.1 试验方案选择

浮选是处理铜硫矿最常见的方法，常用的浮选工艺流程主要有优先浮选、混合浮选、部分混合浮选、等可浮选及分支浮选等，选择合理的工艺流程才能获得最佳的选别技术指标和最低的生产成本。在各种浮选工艺流程中，优先浮选对矿石适应能力强且稳定性好，在处理铜硫矿的研究和应用中一直长盛不衰。在降低成本方面，主要是缩短主流程、优化装备、调整工艺与优化药剂制度^[14-15]。

云南某露天铜矿床表层矿石，现场采用二段闭路磨矿，入选细度为 -0.074 mm 占 91.69%，浮选流程为一粗二扫二精，中矿顺序返回，所用药剂为石灰、丁基黄药、松醇油，在高碱度($\text{pH}=12$)条件下进行铜矿浮选，获得了铜品位 13.19%、铜回收率 82.46% 的铜精矿。经考察，造成选矿指标偏低的原因主要是：1) 矿石含硫较高，采用石灰作为硫抑制剂，用量较大，泡沫发黏，铜二次富集效果差，其次石灰对黄铁矿的抑制效果差，导致精矿品位偏低；2) 矿石中次生硫化铜矿含量较高，且嵌布粒度较细，采用单一丁基黄药作为捕收剂，对细粒铜矿及次生硫化铜矿浮选效果差，导致精矿回收率偏低。因此，方案拟采用石灰与 STY 抑制剂组合对黄铁矿进行抑制，采用硫化钠活化次生硫化铜矿，采用丁基黄药与 LS901 捕收剂组合，强化细粒原生硫化铜矿和次生硫化铜矿回收，并提高

精矿质量。STY 抑制剂是一种带负电的亲水性聚合物，它可通过其活性位点吸附到黄铁矿表面，使黄铁矿表面亲水，从而抑制黄铁矿。LS901 捕收剂是一种含有巯基、亚氨基、酯基的复合药剂，能选择性地捕收细粒原生硫化铜及次生硫化铜。

2.2 优化试验

根据现场存在的问题以及矿石性质，采用石灰与 STY 抑制剂组合对黄铁矿进行抑制，采用硫化钠活化次生硫化铜矿，采用丁基黄药与 LS901 捕收剂组合，强化细粒原生硫化铜和次生硫化铜的回收。在现场药剂制度的基础上，开展了 STY 抑制剂、硫化钠和 LS901 等药剂种类及用量试验。根据现场工艺流程及药剂制度，进行开路试验，试验流程见图 1。试验矿样取自二段分级溢流，搅拌混匀后分装至 1.5 L 密闭瓶备用。

2.2.1 LS901 用量试验

现场采用丁基钠黄药作为捕收剂回收铜矿物，由矿石物相分析结果及筛析结果可知，该铜矿中含有较高的次生硫化铜且铜矿物嵌布粒度较细，故用 LS901 细粒次生硫化铜捕收剂与丁基黄药组合，强化细粒次生硫化铜矿回收，其余条件与现场条件相同，粗选+扫 I+扫 II 试验结果见表 4。

由表 4 可知，采用现场的药剂制度时，铜精矿铜品位为 7.99%，铜回收率为 82.58%。采用丁基黄药与 LS901 组合使用后，铜精矿铜品位和铜回收率皆优于单一使用丁基黄药作捕收剂的效果，且随着 LS901 用量的增加，铜精矿铜品位和铜回收率逐渐增加，到

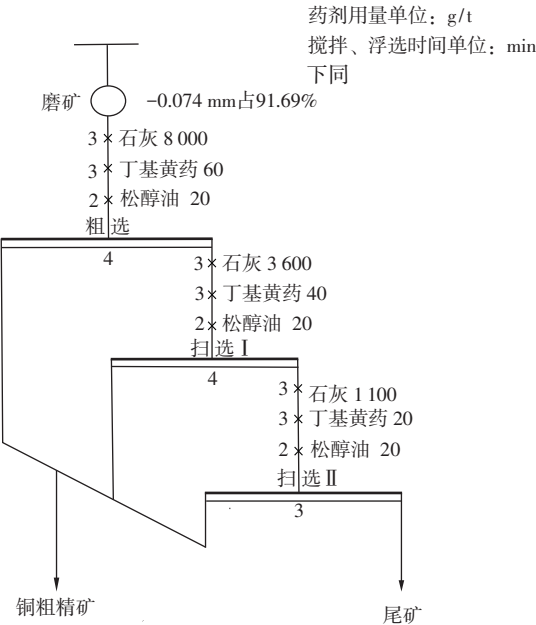


图1 现场工艺流程及药剂制度

Fig. 1 Flowsheet of site process and reagent system

达一定用量后,随着用量继续增大,铜回收率则出现降低趋势;综合考虑铜品位和铜回收率,LS901的最佳用量选择120 g/t。

2.2.2 硫化钠用量试验

由矿石铜的物相分析结果可知,矿石中含有较高的次生硫化铜,次生硫化铜较原生硫化铜难选,在2.2.1节条件试验的基础上,在磨机中加入硫化钠进一步强化对次生硫化铜的回收,硫化钠用量试验结果见表5。

由表5可知,随着硫化钠用量的增加,铜品位和铜回收率呈现先增后降趋势,综合考虑铜精矿铜品位、回收率及药剂成本,硫化钠的最佳用量选择800 g/t。

2.2.3 STY用量试验

现场采用石灰作为黄铁矿抑制剂,用量较大,pH=12,泡沫黏度较大,铜二次富集效果差,其次石灰对黄铁矿的抑制效果差,导致铜精矿品位偏低。因此,进行了(粗选+扫I+扫II)石灰与STY抑制剂的用量试验,试验结果见表6。

由表6可知,单独采用石灰作黄铁矿抑制剂时,铜精矿铜品位为8.51%、铜回收率为88.85%。采用石灰与STY联合使用,在低碱度条件下,选矿效果皆优于单一石灰,且随着STY用量的增加,铜品位逐渐增加,综合考虑铜品位、铜回收率及药剂成本,STY

表4 LS901用量试验结果

Table 4 Results of LS901 dosage tests

/%

LS901用量/(g·t ⁻¹)	产品名称	产率	Cu品位	Cu回收率
0+0+0	铜粗精矿	14.78	7.99	82.58
	尾矿	85.22	0.29	17.42
	原矿	100.0	1.43	100.0
40+30+20	铜粗精矿	14.53	8.32	84.54
	尾矿	85.47	0.26	15.46
	原矿	100.0	1.43	100.0
60+40+20	铜粗精矿	14.45	8.46	85.49
	尾矿	85.55	0.24	14.51
	原矿	100.0	1.43	100.0
80+40+20	铜粗精矿	14.79	8.15	84.29
	尾矿	85.21	0.26	15.71
	原矿	100.0	1.43	100.0

表5 硫化钠用量试验结果

Table 5 Results of sodium sulfide dosage tests

/%

硫化钠用量/(g·t ⁻¹)	产品名称	产率	Cu品位	Cu回收率
600	铜粗精矿	14.65	8.43	86.36
	尾矿	85.35	0.23	13.64
	原矿	100.0	1.43	100.0
800	铜粗精矿	14.93	8.51	88.85
	尾矿	85.07	0.19	11.15
	原矿	100.0	1.43	100.0
1 200	铜粗精矿	15.19	8.32	88.38
	尾矿	84.81	0.20	11.62
	原矿	100.0	1.43	100.0

表 6 石灰与 STY 用量试验结果

Table 6 Results of lime and STY dosage tests

/%

药剂种类及用量/(g·t ⁻¹)	产品名称	产率	Cu 品位	Cu 回收率
石灰 8 000+3 600+1 100	铜粗精矿	14.93	8.51	88.85
	尾矿	85.07	0.19	11.15
	原矿	100.0	1.43	100.0
石灰 2 000+1 000+500 STY 300+200+100	铜粗精矿	10.58	12.14	89.82
	尾矿	89.42	0.16	10.18
	原矿	100.0	1.43	100.0
石灰 2 000+1 000+500 STY 400+300+200	铜粗精矿	8.46	15.15	89.63
	尾矿	91.54	0.16	10.37
	原矿	100.0	1.43	100.0
石灰 2 000+1 000+500 STY 500+400+300	铜粗精矿	8.21	15.49	88.93
	尾矿	91.79	0.17	11.07
	原矿	100.0	1.43	100.0

的最佳用量选择 900 g/t。

2. 2. 4 闭路试验

在条件试验的基础上,进行新药剂制度与现场剂

制度的闭路试验对比。新药剂制度闭路试验流程见

图 2,新药剂制度去掉硫化钠、STY、LS901 三种药剂即为现场药剂制度,对比试验结果见表 7。

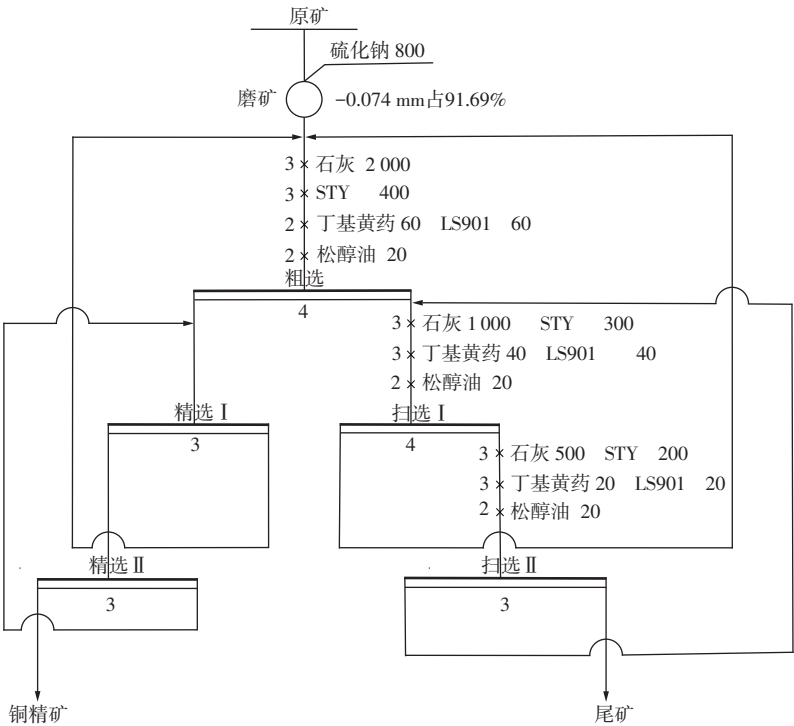


图 2 新药剂制度闭路试验流程

Fig. 2 Flowsheet of the locked-cycle tests of new reagent system

表 7 闭路试验结果

Table 7 Results of the locked-cycle tests

/%

药剂制度	产品名称	产率	Cu 品位	Cu 回收率
新药剂	铜精矿	6.97	18.15	88.47
	尾矿	93.03	0.18	11.53
	原矿	100.0	1.43	100.0
现场药剂	铜精矿	8.39	14.14	82.96
	尾矿	91.61	0.27	17.04
	原矿	100.0	1.43	100.0

由表7可知,采用STY抑制剂与石灰组合抑制黄铁矿,在低碱度条件下效果较单独使用石灰抑制效果好。同时,采用硫化钠+LS901强化次生硫化铜矿回收的方法行之有效,铜回收率较现场药剂制度提高了5.51百分点,铜精矿品位较现场药剂制度提高了4.01百分点。

2.2.5 工业试验

为了进一步确认实验室开发的新药剂制度的优越性,进行了规模为200 t/d的工业试验,工业试验矿样为露天铜矿床表层矿石,混合均匀后进行对比试

验。工业生产对比试验共进行了14 d,前7 d采用现场药剂制度,后7 d采用新开发的药剂制度。试验期间,生产操作稳定。新药剂工艺条件下最终所得平均生产指标及原药剂工艺条件下平均生产指标见表8,统计周期均为7 d。

工业试验结果表明,在氧化率、品位、次生硫化铜含量基本相同的条件下,新药剂制度铜回收率较现场药剂制度提高了5.13百分点,铜精矿品位较现场药剂制度提高了3.57百分点,进一步证明了新药剂制度的优越性。

表8 工业试验结果
Table 8 Results of industrial tests

/%

药剂制度	产品名称	产率	Cu品位	Cu回收率
新药剂	铜精矿	6.83	18.89	86.59
	尾矿	93.17	0.21	13.41
	原矿	100.0	1.49	100.0
现场药剂	铜精矿	7.71	15.32	81.46
	尾矿	92.29	0.29	18.54
	原矿	100.0	1.45	100.0

3 结论

1) 云南某细粒硫化铜矿,铜品位为1.43%,硫含量为10.62%,其中次生硫化铜含量占36.81%,—37 μm粒级中铜占52.32%。由于次生硫化铜矿含量较高、含硫较高、铜矿物嵌布粒度较细以及药剂制度不合理,导致现场选矿指标偏低。

2) 针对该矿石性质及现场存在的问题,采用硫化钠+LS901强化次生硫化铜矿的回收,提高了铜的回收率,同时采用石灰与STY组合抑制黄铁矿,在低碱度(pH=9)下实现了铜硫分离,提高了铜精矿的品位。

3) 工业试验结果表明,在氧化率、品位、次生硫化铜含量基本相同的条件下,采用新药剂制度后,铜精矿铜品位提高了3.57百分点,铜回收率提高了5.13百分点,提高幅度明显,经济效益显著。

4) 在工业试验中,无需对选矿工艺流程进行改造,只需优化药剂及工艺条件即可,易于操作和实施,指标先进,值得在同类矿山推广应用。

参考文献

[1] 魏清成,汪浩翔,苏超,等. 难处理氧化铜矿活化剂DX-2的合成及浮选实验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(5): 25-31.
WEI Qingcheng, WANG Haoxiang, SU Chao. Synthesis and flotation experimental study of DX-2 activator for

a refractory oxidized copper mine[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(5): 25-31.
[2] 王建安. 某高碳高次生铜铜矿选矿工艺优化[J]. 矿冶, 2022, 31(5): 32-41.
WANG Jian'an. Optimization of beneficiation process for a high carbon and high secondary copper ore[J]. Mining and Metallurgy, 2022, 31(5): 32-41.
[3] 陈代雄,肖骏,冯木,等. 越南某含次生铜的铅锌硫化矿浮选工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(增刊1): 98-103.
CHEN Daixiong, XIAO Jun, FENG Mu, et al. Research on flotation process of a lead zinc sulfide ore containing secondary copper in Vietnam[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(Suppl. 1): 98-103.
[4] 赵红波,王军,张雁生,等. 新型捕收剂CSU-21浮选赞比亚谦比希某铜矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2014, 34(2): 35-37, 41.
ZHAO Hongbo, WANG Jun, ZHANG Yansheng. Performance of collector CSU-21 in flotation of copper ores from Chambishi of Zambia[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34(2): 35-37, 41.
[5] 孙泰生. 对武山铜矿北矿带次生富集带选矿工艺的探讨[J]. 江西冶金, 1981(2): 33-38.
SUN Taisheng. Exploration of mineral processing technology for the secondary enrichment zone in the

- north ore belt of Wushan Copper Mine[J]. Jiangxi Metallurgy, 1981(2): 33-38.
- [6] 顾帼华, 李青柯, 巫鑫东, 等. 微细粒矿物浮选技术在磨矿-调浆-分选体系的研究进展[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 40-43.
- GU Guohua, LI Qingke, WU Luandong, et al. Progress in research of micro-fine mineral flotation technology in terms of grinding, pulping and separation system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(2): 40-43.
- [7] 姚伟, 李茂林, 崔瑞, 等. 微细粒矿物的分选技术[J]. 现代矿业, 2015, 31(1): 66-69, 152.
- YAO Wei, LI Maolin, CUI Rui, et al. Beneficiation technology for microfine disseminated minerals[J]. Modern Mining, 2015, 31(1): 66-69, 152.
- [8] MIETTINEN T, RALSTON J, FORNASIERO D. The limits of fine particle flotation[J]. Minerals Engineering, 2010, 23(5): 420. DOI: 10.1016/J.MINENG.2009.12.006.
- [9] 吴书明, 徐乾德, 李恒欠, 等. 高剪切搅拌调浆对细粒级黄铁矿的浮选强化研究[J]. 铜业工程, 2023(6): 160-165.
- WU Shuming, XU Qiande, LI Hengqian, et al. Flotation strengthening of fine-grained pyrite by high-shear stirring and slurry[J]. Copper Engineering, 2023(6): 160-165.
- [10] 郭桂荣, 许新跃, 赵硕, 等. 微泡浮选机在阿舍勒选矿厂的应用试验与实践[J]. 现代矿业, 2023, 39(10): 141-143.
- GUO Guirong, XU Xinyue, ZHAO Shuo, et al. Experimental application of micro-bubble flotation machine in Ashele concentrator[J]. Modern Mining, 2023, 39(10): 141-143.
- [11] 王伟之, 李东林. 浮选柱技术的应用现状及发展趋势[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(2): 19-29.
- WANG Weizhi, LI Donglin. Application status and development trend of flotation column technology[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(2): 19-29.
- [12] 肖遥, 韩海生, 孙伟, 等. 微细粒浮选技术与装备研究进展及其发展趋势[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(1): 20-31.
- XIAO Yao, HAN Haisheng, SUN Wei, et al. Research progress and trend of fine particle flotation technology and equipment[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(1): 20-31.
- [13] 常自勇, 李玉娇, 沈政昌, 等. 微细粒矿物浮选捕收剂的应用及其机理研究进展[J]. 工程科学学报, 2023, 45(11): 1807-1819.
- CHANG Ziyong, LI Yujiao, SHEN Zhengchang, et al. Advancements in the application and mechanism of fine-grained mineral flotation collectors[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(11): 1807-1819.
- [14] 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.
- [15] 余玮, 叶岳华, 王立刚. 某低品位铜矿短流程优化工艺技术及工业试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(6): 197-204.
- YU Wei, YE Yuehua, WANG Ligang. Short flowsheet optimization technology and industrial test of a low grade copper ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(6): 197-204.
- (本文编辑 刘水红)

(上接第 12 页)

- LIU Yun. Study on the application of magnetic coagulation process in the treatment of ore dressing wastewater[J]. Shanxi Chemical Industry, 2022, 42(8): 173-175.
- [58] 陆红羽, 刘润清, 朱阳戈, 等. 风化钨矿选矿废水回用对钨浮选影响研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6): 151-160.
- LU Hongyu, LIU Runqing, ZHU Yangge, et al. Research on the influence of reuse of weathered tungsten wastewater on flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(6): 151-160.
- [59] 苟敏刚, 于兴良. 提高锌浮选技术指标的研究与生产实践[J]. 湖南有色金属, 2020, 36(4): 17-19, 37.
- GOU Mingang, YU Xingliang. Research and production practice on improving technical index of zinc flotation[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2020, 36(4): 17-19, 37.
- (本文编辑 汪东芳)