

广西某硫化铅锌矿浮选分离试验研究^①

梁家荣¹, 杨业国², 丘海峰³, 周芸^{4,5}, 郑其方^{4,5}

(1.广西华锡有色金属股份有限公司, 广西 河池 547000; 2.柳州华锡有色设计院有限责任公司, 广西 柳州 545000; 3.广西德保铜矿有限责任公司, 广西 百色 533000; 4.昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 5.云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 云南 昆明 650093)

摘要: 以广西某多金属硫化铅锌矿为研究对象, 针对其“锌高铅低”、铅锌分离困难的问题, 采用新型高效抑制剂 JFR-1, 经一粗两精两扫铅锌混合浮选和一粗两精两扫铅锌分离, 最终获得了 Pb 品位 21.00%、回收率 72.82% 的铅精矿和 Zn 品位 6.96%、回收率 94.21% 的锌硫化矿, 尾矿中 Pb、Zn 品位及对应的回收率分别为 0.04%、0.13% 及 10.85%、4.79%, 实现了铅锌的富集和分离。

关键词: 硫化铅锌矿; 混合浮选; 铅锌分离; 抑制剂; JFR-1; 铅精矿; 锌硫化矿

中图分类号: TD952

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.06.010

文章编号: 0253-6099(2024)06-0046-04

Flotation Separation of Lead-Zinc Sulfide Ore in Guangxi

LIANG Jiarong¹, YANG Yeguo², QIU Haifeng³, ZHOU Yun^{4,5}, ZHENG Qifang^{4,5}

(1. Guangxi Huaxi Nonferrous Metal Co., Ltd., Hechi 547000, Guangxi, China; 2. Liuzhou Huaxi Nonferrous Design and Research Institute Co., Ltd., Liuzhou 545000, Guangxi, China; 3. Guangxi Debao Copper Mine Co., Ltd., Baise 533000, Guangxi, China; 4. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China; 5. Yunnan Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Mineral Resources, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: A kind of polymetallic lead-zinc sulfide ore in Guangxi was taken for experimental research. In view of its characteristics of high zinc and low lead, as well as difficulty in the separation between zinc and lead, a new type of efficient inhibitor JFR-1 was adopted in the experiment. It is shown that the lead-zinc sulfide ore was subjected to a lead-zinc bulk flotation, consisting of one roughing, two cleaning and two scavenging, followed by a separation of lead and zinc, consisting of one roughing, two cleaning and two scavenging, finally resulting in a lead concentrate grading 21.00% pb at 72.82% recovery, a zinc sulfide ore grading 6.96% Zn at 94.21% recovery, and a tailings grading 0.04% Pb and 0.13% Zn with a lead recovery of 10.85% and a zinc recovery of 4.79%. Thus, the enrichment and separation of lead and zinc can be actualized.

Key words: lead-zinc sulfide ore; bulk flotation; separation of lead and zinc; inhibitor; JFR-1; lead concentrate; zinc sulfide ore

铅锌是国际经济发展工业生产中不可或缺的原
料,金属消耗量仅次于铁、铝、铜等常规金属^[1]。中国
是主要的铅锌资源生产及出口国之一,铅和锌主要以
硫化矿形式存在^[2]。铅金属主要应用于铅酸蓄电池、
铅管、铅合金等,而锌主要用于镀锌、锌合金等^[3-4]。铅
锌矿产资源主要分布在我国云南、四川、湖南、广西、广

东、甘肃、青海、陕西等地,具有低品位矿多、富矿少、矿
石类型复杂、开采难度大^[5-6]等特点。我国铅锌资源丰
富,但也存在开采瓶颈,需要通过科技创新,实现地质
勘探技术、采掘技术等突破,缓解供需矛盾^[7]。

铅锌浮选技术的发展主要还依赖于捕收剂、抑制
剂、活化剂创新以及工艺流程优化^[8]。在多金属硫化

① 收稿日期: 2024-06-15

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1904202); 云南省重大科技项目(202202AG050015)

作者简介: 梁家荣(1993—), 广西桂平人, 助理工程师, 主要从事选矿技术研究工作。E-mail: 1395330186@qq.com

通信作者: 郑其方(1994—), 云南昭通人, 博士, 主要从事有色金属选矿研究。E-mail: zhengqifangYN@163.com

铅锌浮选分离研究中,开发高效选择性抑制剂对提高选矿指标有重要意义。抑制剂包括无机抑制剂和有机抑制剂两类。无机抑制剂有氰化钠、硫酸锌、亚硫酸钠、硫化钠、硫代硫酸钠等。有机抑制剂具有数量多、来源广、选择性强、灵活适用等优点^[9-11],可以从浮选体系的实际需要,选择性设计有机抑制剂分子结构以及特定的官能团^[12-14]。

本文以广西某硫化铅锌矿为研究对象,针对“锌高铅低”矿石性质,采用新型高效抑制剂 JFR-1,开展了铅锌混合浮选和铅锌浮选分离的条件试验和闭路试验,以期解决锌在后续作业中难以活化的问题。

1 原矿性质

原矿经破碎、混匀、缩分获得试验样品。试验样品化学多元素分析结果见表1。样品为多金属硫化矿,矿物种类繁多,矿物组成复杂。矿石中有工业回收价值的元素主要有 Pb、Zn,其次为 S、As、Sb、Fe 等,脉石矿物主要为 CaO、SiO₂、MgO、Al₂O₃ 等钙镁铝硅酸盐矿物。

表1 试验样品化学多元素分析结果(质量分数) %

Pb	Zn	Sb	S	As	Fe	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO
0.17	1.36	0.11	5.53	0.85	6.53	14.14	50.78	2.21	1.66

试验样品矿物组成分析结果如表2所示。原矿中金属矿物主要有铁闪锌矿、硫锑铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿等,脉石矿物主要有石英和方解石等。

表2 试验样品矿物组成分析结果(质量分数) %

硫锑铅矿	铁闪锌矿	黄铁矿	磁黄铁矿	毒砂
0.32	2.25	6.78	2.21	1.85
石英	方解石	菱铁矿	其他	
55.20	25.25	1.77	3.94	

对试验样品进行了粒度组成及金属分布分析,+0.074 mm 粒度采用水筛法,-0.074 mm 粒度采用水析法,结果见表3。结果表明,-0.074 mm 粒度产率61.96%,-0.010 mm 微细粒度产率10.49%;各粒度中,0.019~0.037 mm 粒度 Pb 和 Zn 金属分布率最高,分别为23.97%和24.11%。

2 试验方法

每次试验称取500 g 试样进行球磨机磨矿,达到粒度要求后,将试样倒入1.5 L 挂槽式浮选机中,依次

表3 粒度组成及金属分布结果

粒度/mm	产率/%	品位/%		金属分布率/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
+0.150	2.70	0.15	1.19	1.70	1.63
-0.150+0.074	28.40	0.16	1.84	19.11	26.57
水析+0.074	6.94	0.63	4.67	18.38	16.46
-0.074+0.037	14.30	0.24	2.58	14.43	18.73
-0.037+0.019	24.78	0.23	1.92	23.97	24.11
-0.019+0.010	12.39	0.21	1.10	10.94	6.90
-0.010	10.49	0.26	1.05	11.47	5.60
合计	100.00	0.24	1.97	100.00	100.00

添加活化剂、捕收剂和起泡剂,进行一次粗选、两次精选和两次扫选的铅锌混合浮选,获得铅锌粗精矿和尾矿;铅锌粗精矿再倒入0.5 L 挂槽式浮选机中,依次添加抑制剂、捕收剂和起泡剂进行一次粗选、两次精选和两次扫选的铅锌分离,最终获得铅精矿和锌硫化矿。将产品过滤、烘干、送样分析,计算回收率。试验原则流程图见图1。

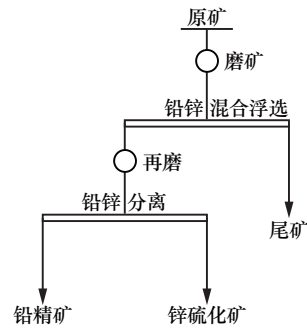


图1 试验原则流程

3 试验与结果

3.1 磨矿细度试验

捕收剂丁基黄药用量200 g/t、活化剂硫酸铜用量200 g/t、起泡剂2#油用量24 g/t,进行了铅锌混合浮选磨矿细度条件试验,结果如图2所示。随着磨矿细度增加,混合精矿中 Pb 和 Zn 品位先升高后下降,回收率

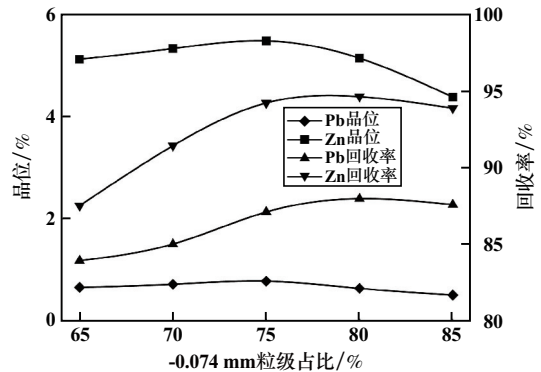


图2 磨矿细度对铅锌混合浮选指标的影响

逐渐升高然后趋于平稳; -0.074 mm 粒级占 75% 时 Pb 和 Zn 品位达到峰值 0.78% 和 5.48%, 对应的回收率分别为 86.39% 和 94.69%; 继续增加磨矿细度至 -0.074 mm 粒级占 80%, 两种矿物回收率趋于平稳, 而品位开始大幅下降。磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 75% 为宜。

3.2 捕收剂种类及用量试验

为进一步提高铅回收率, 在磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 75%、活化剂硫酸铜用量 200 g/t 条件下, 以丁基黄药、乙硫氮、丁铵黑药捕收剂组合, 进行了铅锌混合浮选捕收剂种类试验, 结果如表 4 所示。结果表明: 乙硫氮+丁基黄药、乙硫氮+丁铵黑药、丁基黄药+丁铵黑药 3 种捕收剂组合均能提高铅回收率; 增加药剂组合中丁铵黑药用量, 可以有效提高铅回收率。综合考虑, 选择丁基黄药和丁铵黑药按质量比 3:1 组合作为铅锌混合浮选的捕收剂。因丁铵黑药具有起泡性, 使用该组合捕收剂时, 起泡剂 2[#]油用量可以适当减少。

表 4 捕收剂种类试验结果

药剂及用量/ (g · t ⁻¹)	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Pb	Zn	Pb	Zn
丁基黄药 200 2 [#] 油 24	混合精矿	32.81	0.78	5.48	86.39	94.69
	尾矿	67.19	0.06	0.15	13.61	5.31
	给矿	100.00	0.30	1.90	100.00	100.00
乙硫氮 150 丁基黄药 50 2 [#] 油 24	混合精矿	35.60	0.60	5.34	86.11	96.23
	尾矿	64.40	0.05	0.12	13.89	3.77
	给矿	100.00	0.25	1.98	100.00	100.00
乙硫氮 150 丁铵黑药 50 2 [#] 油 12	混合精矿	35.98	0.62	5.43	90.16	96.27
	尾矿	64.02	0.04	0.12	9.84	3.73
	给矿	100.00	0.25	2.03	100.00	100.00
丁铵黑药 50 丁基黄药 150 2 [#] 油 12	混合精矿	39.16	0.60	4.96	90.64	96.67
	尾矿	60.84	0.04	0.11	9.36	3.33
	给矿	100.00	0.26	2.01	100.00	100.00

在磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 75%、活化剂硫酸铜用量 200 g/t、起泡剂 2[#]油用量 12 g/t 条件下, 以丁基黄药与丁铵黑药质量比 3:1 组合作为铅锌混合浮选的捕收剂, 进行了组合捕收剂用量试验, 结果见图 3。

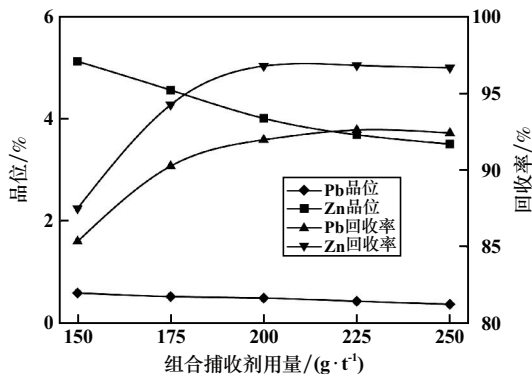


图 3 组合捕收剂用量对铅锌混合浮选指标的影响

结果表明, 组合捕收剂对 Pb、Zn 有较好的捕收性能, 随着组合捕收剂用量增加, Pb、Zn 回收率均上升, 组合捕收剂用量 200 g/t 时, Pb 和 Zn 回收率趋于平稳; 随着组合捕收剂用量增加, Pb、Zn 品位均逐渐降低。综合考虑, 选择组合捕收剂用量 200 g/t, 此时获得的混合精矿 Pb 和 Zn 品位分别为 0.51% 和 4.01%, 回收率分别为 91.97% 和 96.76%。

3.3 活化剂用量试验

磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 75%、组合捕收剂用量 200 g/t、起泡剂 2[#]油用量 12 g/t, 研究了活化剂硫酸铜用量对铅锌混合浮选指标的影响, 结果如图 4 所示。随着硫酸铜用量增加, Pb 回收率明显增加, 但 Zn 品位显著下降。混合浮选流程以保证两种矿物的回收率为主, 综合分析, 确定硫酸铜用量 350 g/t 为宜, 此时获得的混合精矿 Pb 和 Zn 品位分别为 0.44% 和 3.41%, 回收率分别为 94.44% 和 97.37%。

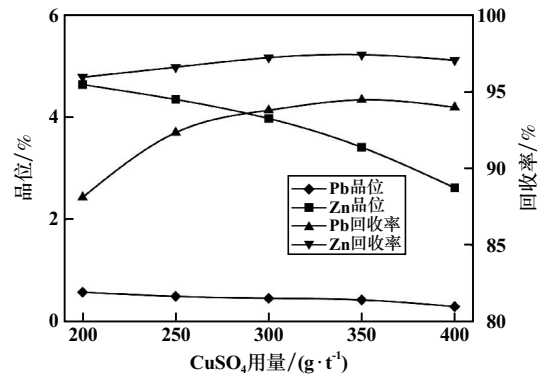


图 4 活化剂 CuSO₄ 用量对铅锌混合浮选指标的影响

3.4 铅锌分离新型抑制剂 JFR-1 用量试验

JFR-1 为华锡有色设计研究院研发的一种以 ZnSO₄、Na₂SO₃ 等为主的新型组合抑制剂, 对闪锌矿有较好的选择性抑制效果, 可以实现铅锌分离, 应用前景广阔。乙硫氮对铅有较好的选择性捕收作用, 故选择乙硫氮作为铅锌分离的捕收剂^[15-16]。将混合浮选获得的铅锌粗精矿产品二次磨矿至 -0.074 mm 粒级占 90%, 依次加入乙硫氮 80 g/t、2[#]油 12 g/t, 开展铅锌分离新型抑制剂 JFR-1 用量条件试验, 结果如图 5 所示。随着 JFR-1 用量增加, Pb 品位和回收率均先上升后下降, JFR-1 用量过大时, 其对铅矿物也会产生抑制; 抑制剂对锌矿物选择性抑制效果较好, 随着 JFR-1 用量增大, Zn 品位和回收率都呈下降趋势, 铅锌分离效果较好。综合考虑, JFR-1 用量 1 600 g/t 为宜, 此时 Pb 损失率最小, 铅精矿中 Pb、Zn 品位和回收率分别为 5.75%、3.95% 和 86.72%、12.97%。

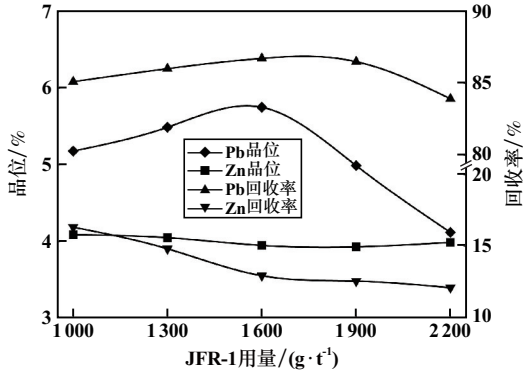


图5 新型抑制剂 JFR-1 用量对铅锌分离效果的影响

3.5 闭路试验

在条件试验基础上开展了全流程闭路试验。铅锌混合浮选和铅锌分离均使用一粗两精两扫流程,铅锌混合浮选磨矿细度-0.074 mm 粒级占 75%,铅锌分离磨矿细度-0.074 mm 粒级占 90%,闭路试验流程如图 6 所示,试验结果见表 5。

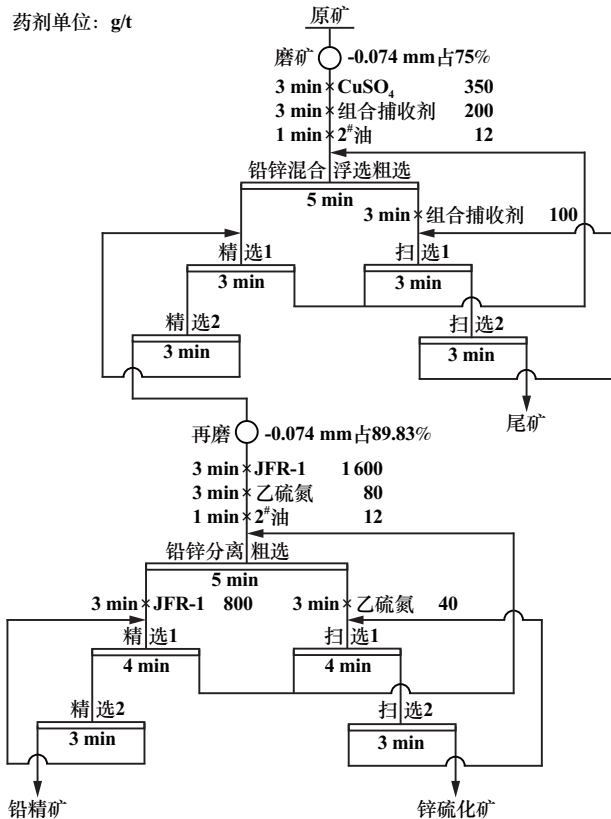


图6 闭路试验流程

经铅锌混合浮选和铅锌分离浮选,最终获得了 Pb 品位 21.00%、回收率 72.82% 的铅精矿和 Zn 品位 6.96%、回收率 94.21% 的锌硫化矿,尾矿中 Pb、Zn 品位和回收率分别为 0.04%、0.13% 和 10.85%、4.79%,铅锌分离效果较好。

表5 闭路试验结果

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
铅精矿	0.88	21.00	2.24	72.82	1.00
锌硫化矿	26.67	0.14	6.96	16.33	94.21
尾矿	72.45	0.04	0.13	10.85	4.79
给矿	100.00	0.25	1.97	100.00	100.00

4 结语

1) 广西某铅锌矿为多金属富锌硫化矿,呈现“锌高铅低”的特点,铅锌分离较为困难。矿石中有工业回收价值的元素主要有 Pb 和 Zn,其次为 S、As、Sb、Fe 等。金属矿物主要有铁闪锌矿、硫锑铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿等,脉石矿物主要为石英和方解石。

2) 采用铅锌混合浮选工艺先抛除石英、方解石等亲水性脉石,以降低工艺生产成本,再采用铅锌分离作业获得铅精矿和锌硫化矿。铅锌混合浮选和铅锌分离均采用一粗两精两扫流程,铅锌分离中采用新型抑制剂 JFR-1,最终获得了 Pb 品位 21.00%、回收率 72.82% 的铅精矿和 Zn 品位 6.96%、回收率 94.21% 的锌硫化矿,尾矿中 Pb、Zn 品位和回收率分别为 0.04%、0.13% 和 10.85%、4.79%,铅锌分离效果较好。

3) 新型抑制剂 JFR-1 不仅无毒、绿色环保,而且生产成本低,避免了重复加药的问题,对锌矿物有较好的选择性抑制效果。

参考文献:

- [1] 江少卿,徐毅,孙尚信,等. 全球铅锌矿资源分布[J]. 地质与资源, 2020,29(3):224-232.
- [2] PAN Z C, XIONG J J, CUI Y F, et al. Effect mechanism of carbonaceous materials on the flotation separation of lead-zinc ore[J]. Separation and Purification Technology, 2022,294:121101.
- [3] 陈喜峰,彭润民. 中国铅锌矿资源形势及可持续发展对策[J]. 有色金属, 2008(3):129-132.
- [4] 张明超,李景朝,李鹏远,等. 国内外铅锌矿资源及分布概述[J]. 中国矿业, 2016(增刊1):41-45.
- [5] 葛振华. 我国铅锌资源现状及未来的供需形势[J]. 世界有色金属, 2003(9):4-7.
- [6] 雷力,周兴龙,文书明,等. 我国铅锌矿资源特点及开发利用现状[J]. 现代矿业, 2007,23(9):1-4.
- [7] 张长青,吴越,王登红,等. 中国铅锌矿床成矿规律概要[J]. 地质学报, 2014,88(12):2252-2268.
- [8] 赵福刚. 我国铅锌矿选矿技术现状[J]. 有色矿冶, 2007(6):20-25.
- [9] 魏宗武,杨谦,黄涛,等. 某低品位难选铜铅锌硫化矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):58-61.
- [10] 蔡锦鹏,苏超,申培伦,等. 某含泥高银铅锌硫化矿高效综合利用研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):55-58.

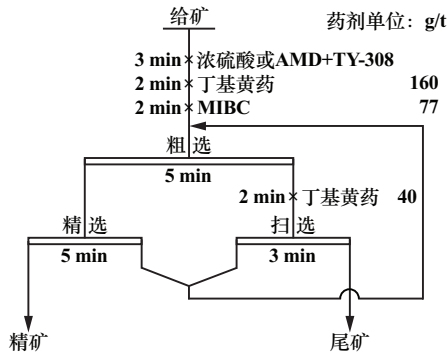


图 6 闭路试验流程

表 3 闭路试验结果

药剂制度	产品名称	产率/%	硫品位/%	硫回收率/%
浓硫酸 3 000 g/t	精矿	54.56	49.32	96.59
	尾矿	45.44	2.09	3.41
	给矿	100.00	27.58	100.00
AMD+TY-308 0.2 m ³ /t+100 g/t	精矿	56.87	48.73	97.93
	尾矿	43.13	1.36	2.07
	给矿	100.00	27.86	100.00

3 结论

1) 采用矿山酸性废水 (AMD) 活化浮选被高碱抑制的黄铁矿, 配合使用矿浆调整剂 TY-308, 有利于矿浆中沉淀物的分散和脉石的抑制, 可提高浮选指标。

2) 采用 AMD 为活化剂、TY-308 为调整剂、丁基黄药为捕收剂、MIBC 为起泡剂, 一粗一精一扫闭路浮选试验获得了硫品位 48.73%、回收率 97.93% 的黄铁矿精矿; 相比于浓硫酸作为活化剂组, 硫回收率提高了 1.34 个百分点。

3) 以 AMD 配合 TY-308 活化被石灰抑制的黄铁矿, 可获得与浓硫酸为活化剂相近的浮选指标, AMD 用量 0.2~0.6 m³/t 时对黄铁矿浮选指标的影响较小, 浮选药剂制度具有较高的适用性; 同时, 使用 AMD 代

替浓硫酸后, 可大幅降低 AMD 处理成本, 且避免了使用浓硫酸带来的安全隐患。

参考文献:

[1] 李懋, 曾娟, 李立. 湖南某含铜酸性废水资源化处理实验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(2): 125-129.

[2] 吴权佳, 王锋, 叶涛, 等. 剩余污泥裂解灰陶粒吸附酸性矿山废水中 Zn²⁺、Cu²⁺、Pb²⁺ 性能及机理[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(8): 149-158.

[3] 袁加巧, 柏少军, 毕云霄, 等. 国内外矿山酸性废水治理与综合利用研究进展[J]. 有色金属工程, 2022, 12(4): 131-139.

[4] 冯泽平, 李国利, 杨紫洋, 等. 某含金铜硫矿浮选分离试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 112-119.

[5] 何小民, 徐其红, 杨政国, 等. 新型抑制剂 HXM-2 在铜硫分离中的应用研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(4): 41-44.

[6] 冉金城, 邱显扬. 铜硫分离中银的选择性导向回收[J]. 矿冶工程, 2020, 40(5): 33-38.

[7] 张曙光, 简胜, 唐鑫, 等. 某低品位细粒嵌布硫化铜矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 77-80.

[8] 王李鹏, 叶雪均, 江皇义. 被石灰抑制的黄铁矿活化浮选技术进展[J]. 有色金属科学与工程, 2011, 2(4): 67-70.

[9] 尹启华, 冯其明. 高碱高钙介质中黄铁矿活化机理的研究[J]. 有色金属(选矿部分), 1997(3): 18-21.

[10] 苏超, 申培伦, 李佳磊, 等. 黄铁矿浮选的抑制与解抑活化研究进展[J]. 化工进展, 2019, 38(4): 1921-1929.

[11] KEFENI K K, MSAGATI T A M, MAMBA B B. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 151: 475-493.

[12] ZHANG F, ZHANG C Y, ZHANG H L, et al. Selective adsorption mechanism of ferric ions on the surfaces of chalcopyrite and pyrite in flotation[J]. JOM, 2023, 75: 4435-4445.

[13] ZHANG X L, HAN Y X, GAO P, et al. An investigation into the effects of grinding media on grinding products characteristics and flotation performance of pyrite[J]. Mineral Processing Extractive Metallurgy Review, 2020, 42(6): 367-373.

引用本文: 曾勇, 申滔, 华中宝, 等. 矿山酸性废水与矿浆调整剂组合活化浮选高碱抑制的黄铁矿[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6): 50-53.

(上接第 49 页)

[11] 郑其方, 刘殿文, 李佳磊, 等. 锡石浮选捕收剂机理研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(3): 785-795.

[12] 陈志强, 胡真, 叶威. 广东某铅锌矿铅锌分离试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(2): 8-11.

[13] 李希掌, 曾娜, 向平, 等. 湖南某铅锌矿无碱浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(3): 75-78.

[14] 王阳, 卜显忠, 翁存建. 新型有机抑制剂对铅锌分离的影响及其作用机理[J]. 矿业研究与开发, 2017, 37(5): 94-97.

[15] 许洪峰, 牛艳萍. 黑龙江某矽卡岩型铅锌伴生银矿石选矿试验[J]. 金属矿山, 2022(10): 101-106.

[16] 毛志丹, 谢克强, 孔德全, 等. 云南某复杂硫、氧混合铅锌矿浮选实验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 34-37.

引用本文: 梁家荣, 杨业国, 丘海峰, 等. 广西某硫化铅锌矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6): 46-49.