

# 新型浮选药剂提高青海某铅锌矿金属回收率的研究<sup>①</sup>

林悦<sup>1,2</sup>, 邹松<sup>1,2</sup>, 余新阳<sup>1,2</sup>, 何桂春<sup>1,2</sup>, 郭舒政<sup>1,2</sup>, 吴锋<sup>1,2</sup>

(1.战略金属矿产资源低碳加工与利用江西省重点实验室, 江西 赣州 341000; 2.江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 对青海某铅锌矿进行了浮选药剂制度优化研究。结果表明,采用新型螯合剂 PT-8 配合常规 25<sup>#</sup>黑药可有效强化铜铅硫化矿物的浮选回收,新型捕收剂 SXF-10 可以在低用量条件下高效回收矿石中的铁闪锌矿,明显提高铜、铅和锌金属的浮选回收率;在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%条件下,铅浮选采用 25<sup>#</sup>黑药+PT-8,锌浮选采用 SXF-10,闭路试验可获得 Cu 品位 3.52%、Cu 回收率 70.08%、Pb 品位 62.53%、Pb 回收率 93.75%的含铜铅精矿以及 Zn 品位 48.19%、Zn 回收率 87.97%的锌精矿。

**关键词:** 方铅矿; 铁闪锌矿; 铅锌矿; 浮选; 浮选药剂; 螯合剂; 捕收剂; 铜铅精矿; 锌精矿

中图分类号: TD923

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.013

文章编号: 0253-6099(2025)05-0077-05

## Improvement of Metal Recovery from Lead-Zinc Ore in Qinghai by New Flotation Reagents

LIN Yue<sup>1,2</sup>, ZOU Song<sup>1,2</sup>, YU Xinyang<sup>1,2</sup>, HE Guichun<sup>1,2</sup>, GUO Shuzheng<sup>1,2</sup>, WU Feng<sup>1,2</sup>

(1. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Low-Carbon Processing and Utilization of Strategic Metallic Mineral Resources, Ganzhou 341000, Jiangxi, China; 2. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** The flotation reagent system was optimized for a lead-zinc ore in Qinghai based on experimental studies. It is shown that a new chelating agent (PT-8) combined with the conventional 25<sup>#</sup> xanthate can effectively enhance the flotation recovery of copper-lead sulfide minerals. A new collector (SXF-10) at a low dosage can efficiently recover marmatite from the ore, significantly improving the recoveries of Cu, Pb and Zn from flotation process. With raw ore at a grinding fineness of -0.074 mm 70%, 25<sup>#</sup> xanthate and PT-8 are used for Pb flotation, and SXF-10 is used for Zn flotation. A closed-circuit test with such process flow can produce a Cu-Pb concentrate grading 3.52% Cu and 62.53% Pb at corresponding recoveries of 70.08% and 93.75%, respectively, and a Zn concentrate grading 48.19% Zn at 87.97% recovery.

**Key words:** galena; marmatite; lead-zinc ore; flotation; flotation reagent; chelating agent; collector; Cu-Pb concentrate; Zn concentrate

铅和锌是不可缺少的工业原料和主要矿产资源,在有色金属工业中具有举足轻重的地位,广泛应用于钢铁冶金、国防工业、机械电子、化学化工、新能源等领域<sup>[1-3]</sup>。世界铅锌矿资源分布广泛,截至 2023 年底,全球已查明的铅和锌资源储量分别达到了 20 亿 t 和 19 亿 t,我国铅锌矿资源非常丰富,居世界第二位,总储量仅次于澳大利亚<sup>[4-5]</sup>。我国铅锌矿资源总体呈现分布广泛且集中、贫矿多富矿少、共伴生组分多、矿石

类型复杂等特征<sup>[6-7]</sup>。铅和锌均属于亲硫元素,铅锌矿物在自然界中往往以硫化物形式存在,其中 95% 以上的铅锌金属是从硫化铅锌矿中提取出来的。在硫化铅锌矿中,重要的铅锌矿物分别为方铅矿和(铁)闪锌矿,其常与硫化铁、硫化铜等矿物共伴生<sup>[8-10]</sup>。对于硫化铅锌矿的分离和富集,浮选是目前应用广泛的有效方法<sup>[11-12]</sup>。硫化铅锌矿中,方铅矿的自然可浮性优于闪锌矿,铅锌矿浮选分离一般采用铅锌优先浮选,因此

① 收稿日期: 2025-03-14

基金项目: 江西省自然科学基金(20242BAB20188); 国家自然科学基金(52404280); 江西理工大学博士科研启动项目(205200100692)

作者简介: 林悦(2004—),女,广东揭西人,主要研究方向为矿物加工。E-mail:1670263065@qq.com

通信作者: 邹松(1990—),男,江西赣州人,博士,内聘副教授,硕士研究生导师,主要从事低碳浮选理论与工艺、绿色选矿药剂研发等工作。E-mail:19307978978@163.com

高效的浮选捕收剂在铅锌分离与回收中起着至关重要的作用。

青海某铅锌矿浮选铅时,以 25<sup>#</sup>黑药为铅捕收剂、常规硫酸锌+亚硫酸钠组合药剂为锌硫矿物抑制剂。25<sup>#</sup>黑药选择性好,但存在对铜铅矿物捕收能力有限等缺点;另一方面,选矿厂锌浮选采用硫酸铜为活化剂、乙硫氮为捕收剂,生产中硫酸铜用量达到了500~700 g/t,乙硫氮用量更高达 100 g/t,药剂成本高,且回收效果不理想。基于以上问题,本文以青海某低品位铅锌硫化矿为研究对象,通过引入新型靶向螯合剂 PT-8 与常规 25<sup>#</sup>黑药组合使用,有效强化铜铅硫化矿物的浮选回收;采用新型特效捕收剂 SXF-10 在低用量条件下高效回收锌矿物;并探究降低硫酸铜用量的可能性;通过对比试验确定了适宜的新药剂浮选条件及其对铅锌矿物浮选指标的影响,实现了该矿石中有价金属的综合回收与利用。研究成果可为类似有色金属矿产资源开发利用提供借鉴。

## 1 矿石性质

矿石主要化学多元素分析结果见表 1。该矿石化学成分较为复杂,可供选矿回收的元素主要是铅、锌和铁;铜和银有综合回收价值。需要注意的是,S 含量高达 13.23%,Fe 含量高达 32.75%,说明矿石中有大量硫化铁矿物存在。

表 1 矿石化学多元素分析结果(质量分数)

Cu	Pb	Zn	S	Fe	Ag <sup>1)</sup>
0.10	1.35	2.96	13.23	32.75	15.11

1) 单位为 g/t。

矿石主要矿物含量分析结果见表 2。矿石中铅矿物和锌矿物分别主要为方铅矿和铁闪锌矿;其他金属硫化物以磁黄铁矿和黄铁矿为主,还含有少量菱铁矿等。主要脉石矿物为石英和辉石,其次为方解石、绿泥石、高岭石等。

表 2 矿石主要矿物含量分析结果(质量分数)

石英	黄铁矿	磁黄铁矿	方铅矿	铁闪锌矿	辉石	方解石
12.96	7.11	30.97	2.93	5.12	19.53	2.12
绿泥石	高岭石	云母	闪石	菱铁矿	烧石膏	
6.53	4.66	1.89	1.58	3.47	1.13	

## 2 试验方法

铅锌浮选工艺流程<sup>[13-15]</sup>主要有优先浮选、部分混合优先浮选、等可浮选、异步浮选等。试验先浮选铅,浮选尾矿再浮选锌。浮选试验原则流程见图 1。

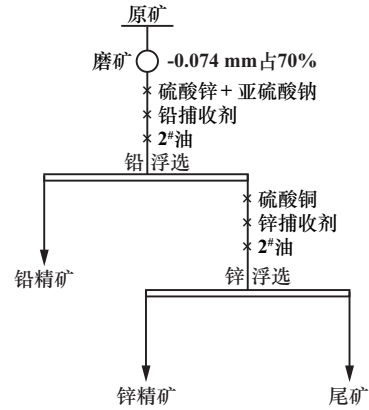


图 1 浮选试验原则流程

Fig.1 Basic flotation flowchart in test

试验药剂包括硫酸锌、亚硫酸钠、硫酸铜、25<sup>#</sup>黑药、乙硫氮、乙基黄药、PT-8、2<sup>#</sup>油、SXF-10 等。其中 PT-8 是一种含有硫脲官能团的有机螯合物,SXF-10 是一种环境友好型的小分子有机化合物,均为江西理工大学自主研发的新型药剂。

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 铅捕收剂对比试验

磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%,硫酸锌、亚硫酸钠用量分别为 600、300 g/t,2<sup>#</sup>油用量 5 g/t 条件下,按照图 1 所示流程,考察和对比了铅捕收剂种类对铅浮选指标的影响,结果见表 3。结果表明,采用单一乙硫氮、乙硫氮+乙黄药混合药剂为捕收剂(用量均为 40 g/t),浮选指标均不理想,铅粗精矿 Pb 回收率均低于 70%;采用现场生产所使用的 25<sup>#</sup>黑药为捕收剂(用量 40 g/t),铅粗精矿中 Cu 回收率和 Pb 回收率分别为 50.54%和 91.67%;以 25<sup>#</sup>黑药+PT-8 为捕收剂时,铅粗精矿中 Cu 回收率和 Pb 回收率分别可达 71.52%和 96.21%,较单一 25<sup>#</sup>黑药 Cu 回收率提高了 20.98 百分点,Pb 回收率提高了 4.54 百分点。新型螯合剂 PT-8 能明显强化铜铅硫化矿物的浮选回收。

### 3.2 PT-8 用量试验

PT-8 在浮选过程中能有效强化传统捕收剂(如本文中的 25<sup>#</sup>黑药)对铜铅矿物的吸附作用,从而提高目标矿物的浮选回收率。25<sup>#</sup>黑药用量 40 g/t,其他条件不变,进行了粗选 PT-8 用量试验,结果见表 4。结果

表3 铅捕收剂种类试验结果

Table 3 Lead collector type test results

铅捕收剂种类及用量/(g·t <sup>-1</sup> )	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
25#黑药 40	铅粗精矿	3.52	1.43	33.20	4.97	50.54	91.67	6.12
	尾矿	96.48	0.051	0.11	2.78	49.46	8.33	93.88
	原矿	100.00	0.099	1.27	2.86	100.00	100.00	100.00
乙硫氮 40	铅粗精矿	2.97	1.85	22.04	2.88	52.57	56.91	3.00
	尾矿	97.03	0.051	0.51	2.85	47.43	43.09	97.00
	原矿	100.00	0.104	1.15	2.85	100.00	100.00	100.00
乙硫氮+乙黄药 20+20	铅粗精矿	4.41	1.36	20.05	1.82	60.50	67.78	2.99
	尾矿	95.59	0.041	0.44	2.73	39.50	32.22	97.01
	原矿	100.00	0.10	1.31	2.69	100.00	100.00	100.00
25#黑药+PT-8 40+10	铅粗精矿	7.30	1.02	18.68	4.18	71.52	96.21	10.17
	尾矿	92.70	0.032	0.058	2.91	28.48	3.79	89.83
	原矿	100.00	0.104	1.42	3.00	100.00	100.00	100.00

表4 PT-8 用量试验结果

Table 4 PT-8 dosage test results

PT-8 用量/(g·t <sup>-1</sup> )	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
0	铅粗精矿	3.52	1.43	33.20	4.97	50.54	91.67	6.12
	尾矿	96.48	0.051	0.11	2.78	49.46	8.33	93.88
	原矿	100.00	0.099	1.27	2.86	100.00	100.00	100.00
5	铅粗精矿	5.01	1.22	28.37	4.65	58.85	93.15	7.85
	尾矿	94.99	0.045	0.11	2.88	41.15	6.85	92.15
	原矿	100.00	0.104	1.53	2.97	100.00	100.00	100.00
10	铅粗精矿	7.30	1.02	18.68	4.18	71.52	96.21	10.17
	尾矿	92.70	0.032	0.058	2.91	28.48	3.79	89.83
	原矿	100.00	0.104	1.42	3.00	100.00	100.00	100.00
20	铅粗精矿	9.77	0.68	12.06	2.50	64.80	93.55	8.38
	尾矿	90.23	0.040	0.090	2.96	35.20	6.45	91.62
	原矿	100.00	0.103	1.26	2.92	100.00	100.00	100.00

表明,未添加 PT-8 时,铅粗精矿中 Cu 回收率仅 50.54%、Pb 回收率为 91.67%,25#黑药对矿物的捕收能力较弱,Cu 回收率还有很大提升空间。在 25#黑药基础上添加 PT-8,铅粗精矿中 Cu 回收率 58%~72%、Pb 回收率 93%~97%。由此可知,添加 PT-8 后,铅粗精矿中 Cu 及 Pb 回收率均明显提升;随着 PT-8 用量增大,铅粗精矿中铅回收率先增大后有所降低。综合考虑,PT-8 适宜用量为 10 g/t。

3.3 锌捕收剂对比试验

在磨矿细度-0.074 mm 粒级占 70%,硫酸锌、亚硫酸钠用量分别为 600、300 g/t,25#黑药、PT-8 用量分别为 40、10 g/t,2#油用量 5 g/t 条件下选铅,选铅尾矿再浮选锌。按照图 1 所示流程,在硫酸铜用量 500 g/t、2#油用量 5 g/t 条件下,进行了锌捕收剂种类对比试验,结果见表 5。SXF-10 是一种硫化锌矿高效捕收剂,其分子中同时具有 C=S 和 P=S 基团,对矿物兼具捕收能力和选择性。从表 5 可知,100 g/t 乙硫氮(现场生产用捕收剂)为锌捕收剂时,可获得 Zn 品位 18.88%、Zn 回收率 81.11%的锌粗精矿;100 g/t 复配

黄药为锌捕收剂时,可获得 Zn 品位 15.90%、Zn 回收率 87.79%的锌粗精矿;而 10 g/t SXF-10 为锌捕收剂时,可获得 Zn 品位 18.34%、Zn 回收率 83.44%的锌粗精矿,Zn 回收率比乙硫氮时高 2.33 百分点,比复配黄药略低,但 SXF-10 用量是常规乙硫氮和复配黄药的 1/10,药剂用量大幅度下降。新型捕收剂 SXF-10 是锌矿物的一种特效捕收剂,可作为下一步试验的选锌捕收剂。

表5 锌捕收剂种类试验结果

Table 5 Zn collector type test results

锌捕收剂种类及用量/(g·t <sup>-1</sup> )	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Pb	Zn	Pb	Zn
乙硫氮 100	铅粗精矿	9.20	14.23	4.90	92.34	15.20
	锌粗精矿	12.74	0.24	18.88	2.16	81.11
	尾矿	78.06	0.10	0.14	5.50	3.69
	原矿	100.00	1.42	2.97	100.00	100.00
复配黄药 100	铅粗精矿	10.90	11.66	2.63	89.15	9.38
	锌粗精矿	16.88	0.36	15.90	4.26	87.79
	尾矿	72.22	0.130	0.12	6.59	2.83
	原矿	100.00	1.43	3.06	100.00	100.00
SXF-10 10	铅粗精矿	8.19	18.09	5.21	91.78	12.86
	锌粗精矿	15.10	0.32	18.34	2.99	83.44
	尾矿	76.71	0.11	0.16	5.23	3.70
	原矿	100.00	1.61	3.32	100.00	100.00

3.4 SXF-10 用量试验

SXF-10 对闪锌矿/铁闪锌矿捕收能力强,而对黄铁矿/磁黄铁矿浮选能力微弱,能有效提高精矿品位和回收率。相同条件下,考察了 SXF-10 用量对锌矿物浮选指标的影响,结果见图 2。结果表明,随着 SXF-10 用量增大,锌粗精矿中 Zn 回收率先逐渐增大后略微下降。综合考虑,确定 SXF-10 的适宜用量为 10~15 g/t。

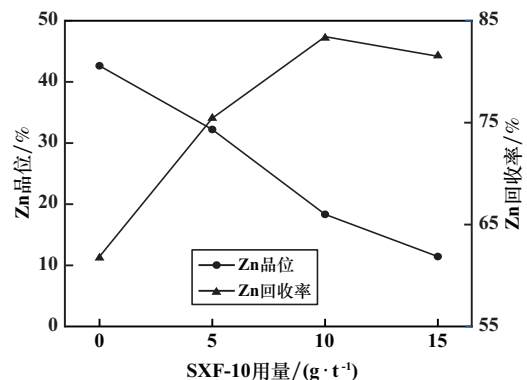


图2 SXF-10 用量试验结果

Fig.2 SXF-10 dosage test results

3.5 硫酸铜用量试验

硫酸铜是铁闪锌矿优良的活化剂。SXF-10 用量

10 g/t,其他条件不变,进行了硫酸铜用量试验,结果如图3所示。由图3可知,随着硫酸铜用量增大,锌粗精矿中Zn回收率先缓慢增大再逐渐降低,适宜的硫酸铜用量为400 g/t,此时锌粗精矿中Zn回收率为84.93%。

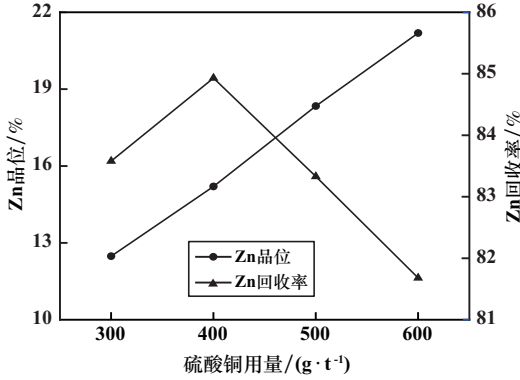


图3 硫酸铜用量试验结果  
Fig.3 CuSO<sub>4</sub> dosage test results

### 3.6 铅锌全流程闭路试验

在条件试验基础上,进行了新药剂体系下的铅锌闭路试验,试验结果见表6,试验流程如图4所示。铅浮选以25#黑药+PT-8为捕收剂,锌浮选以SXF-10为捕收剂,采用一粗三精三扫选铅和一粗三精三扫选锌,最终可获得Cu品位3.52%、Cu回收率70.08%、Pb品位62.53%、Pb回收率93.75%的铅精矿以及Zn品位48.19%、Zn回收率87.97%的锌精矿,浮选指标优异。

表6 闭路试验结果

Table 6 Closed-circuit test results

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
铅精矿	1.89	3.52	62.53	3.58	70.08	93.75	3.07
锌精矿	4.03	0.45	0.092	48.19	19.04	0.29	87.97
尾矿	94.08	0.011	0.08	0.21	10.88	5.96	8.96
原矿	100.00	0.095	1.26	2.21	100.00	100.00	100.00

## 4 结语

1) 原矿为含铜银的铅锌原生多金属硫化矿。矿石中铅矿物主要为方铅矿,锌矿物基本为铁闪锌矿,其他金属硫化物以磁黄铁矿和黄铁矿为主,二者均有较高含量,此外含有少量菱铁矿矿物等。脉石矿物以硅酸盐型脉石为主,主要为石英和辉石,其次为方解石、绿泥石、高岭石等。

2) 进行了详细的药剂对比及优化试验,发现添加新型螯合剂PT-8能有效强化常规25#黑药对铜铅矿物的浮选回收;对于锌浮选,采用新型特效捕收剂SXF-10,

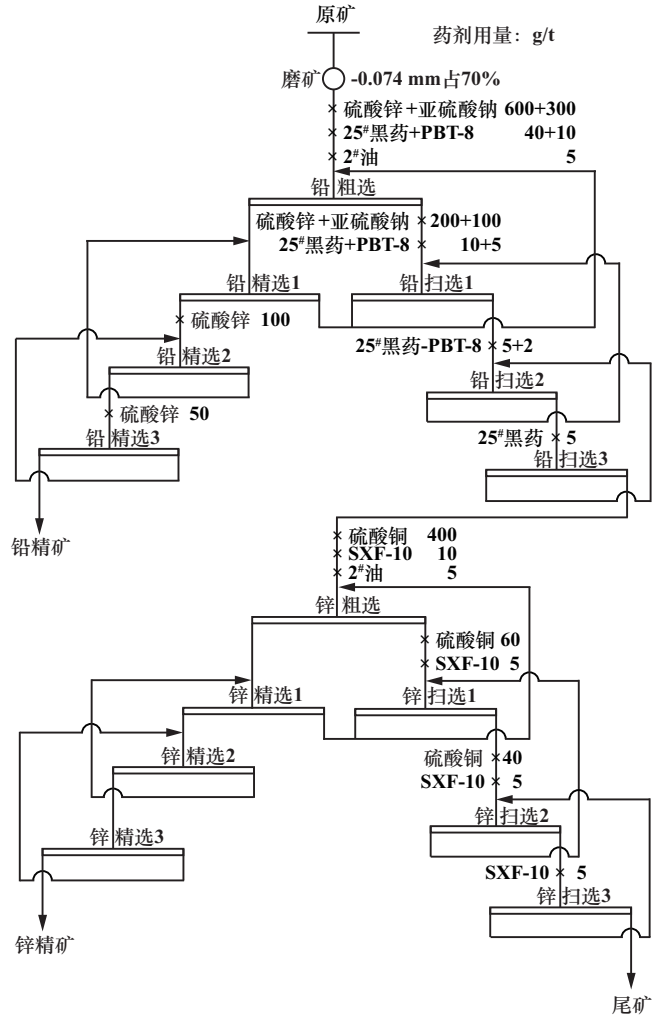


图4 闭路试验流程

Fig.4 Closed-circuit test flowchart

在用量10 g/t条件下,其浮选指标接近或优于常规的100 g/t黄药或乙硫氮为捕收剂的指标,药剂用量大幅度下降,有利于降低药剂成本。

3) 闭路试验结果表明,铅浮选采用常规25#黑药+PT-8,锌浮选采用SXF-10,最终可获得Cu品位3.52%、Cu回收率70.08%、Pb品位62.53%、Pb回收率93.75%的含铜铅精矿以及Zn品位48.19%、Zn回收率87.97%的锌精矿。

### 参考文献 (References):

[1] 梁治安. 某复杂铅锌矿锌精矿降碳试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(2): 71-73.  
LIANG Zhan. Experimental study on reducing carbon content in zinc concentrate of complex lead-zinc ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(2): 71-73.

[2] 邹松. 新型铜铅硫化矿捕收剂的合成、浮选特性与机理[D]. 长沙: 中南大学, 2023.  
ZOU Song. Synthesis, flotation characteristics and mechanism of novel

- copper-lead sulfide mineral collectors [D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [3] XU S T, QIAN L D, LIU J, et al. Study of selective collecting capacity and mechanism of novel collector PPB1 in the separation of cerussite and smithsonite [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 356: 129840.
- [4] U S. Geological Survey. Mineral Commodity Summaries [R]. 2024.
- [5] 蔡拓. 甘肃地区李家沟铅锌矿储量分析 [J]. 世界有色金属, 2023(15): 79-81.  
CAI Tuo. Reserve analysis of Lijiagou lead-zinc deposit in Gansu Province [J]. World Nonferrous Metals, 2023(15): 79-81.
- [6] 冯程, 祁忠旭, 孙大勇, 等. 某低品位铅锌矿高效利用的选矿试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(3): 1-5.  
FENG Cheng, QI Zhongxu, SUN Dayong, et al. Experimental study on efficient utilization of a low-grade lead-zinc ore [J]. Mining Research and Development, 2019, 39(3): 1-5.
- [7] 周艳飞, 王建安, 沈发明, 等. 某高氧化率硫化铅锌矿混合浮选试验研究 [J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 78-81.  
ZHOU Yanfei, WANG Jian'an, SHEN Faming, et al. Experimental study on bulk flotation of highly oxidized lead-zinc sulfide ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4): 78-81.
- [8] 邓圣为, 曹健. 某铅锌尾矿的锌硫综合回收选矿试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(1): 32-37.  
DENG Shengwei, CAO Jian. Mineral processing study on comprehensive recovery of zinc and sulphur from the lead-zinc tailings [J]. Mining Research and Development, 2018, 38(1): 32-37.
- [9] 汪志平, 邹坚坚, 王成行, 等. 高银低铅低锌多金属矿浮选试验研究 [J]. 金属矿山, 2022(3): 118-123.  
WANG Zhiping, ZOU Jianjian, WANG Chenghang, et al. Study on the flotation experiment of a high-silver, low-lead and low-zinc polymetallic ore [J]. Metal Mine, 2022(3): 118-123.
- [10] SUN X S, YU J W, LI Y J, et al. A novel selective collector MI-BATC and its performance on flotation separation of chalcopyrite from sphalerite and pyrite [J]. Minerals Engineering, 2024, 216: 108875.
- [11] 刘洋, 童雄, 吕晋芳, 等. 硫化铅锌矿物浮选分离研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(3): 106-114.  
LIU Yang, TONG Xiong, LYU Jinfang, et al. Research progress on flotation separation of lead-zinc sulfide minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(3): 106-114.
- [12] ZOU S, LIN Q, WANG S, et al. A novel surfactant O, O'-bis(2-butoxyethyl) ammonium dithiophosphate: Synthesis, selective flotation and adsorption mechanism towards galena [J]. Minerals Engineering, 2022, 179: 107466.
- [13] 邱芝莲, 方建军, 何海洋, 等. 硫化铅锌矿浮选分离研究进展 [J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(3): 72-79.  
QIU Zhilian, FANG Jianjun, HE Haiyang, et al. Research progress on flotation separation of lead-zinc sulfide [J]. Industrial Minerals & Processing, 2024, 53(3): 72-79.
- [14] 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.  
LIANG Jiarong, YANG Yeguo, QIU Haifeng, et al. Flotation separation of lead zinc sulfide ore in Guangxi [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(6): 46-49.
- [15] 曹飞, 曹进成, 吕良, 等. 内蒙古某富银铅锌硫化矿浮选分离试验研究 [J]. 矿冶工程, 2023, 43(3): 67-71.  
CAO Fei, CAO Jincheng, LYU Liang, et al. Experimental study on flotation of Ag-rich Pb-Zn sulfide ore from Inner Mongolia [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(3): 67-71.
- 引用本文:** 林悦, 邹松, 余新阳, 等. 新型浮选药剂提高青海某铅锌矿金属回收率的研究 [J]. 矿冶工程, 2025, 45(5): 77-81.
- LIN Yue, ZOU Song, YU Xinyang, et al. Improvement of metal recovery from lead-zinc ore in Qinghai by new flotation reagents [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5): 77-81.

(上接第 76 页)

- [5] 赖桂华. 提高某铜矿伴生金回收率的试验研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2021(4): 83-87.  
LAI Guihua. Experimental study on improving the recovery of associated gold in a copper mine [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(4): 83-87.
- [6] 张铃, 蒋太国, 方建军, 等. 铜矿中伴生金银综合回收研究进展 [J]. 贵金属, 2020, 41(1): 85-91.  
ZHANG Ling, JIANG Taiguo, FANG Jianjun, et al. Research progress of associated gold and silver recovery in copper ores [J]. Precious Metals, 2020, 41(1): 85-91.
- [7] 陈贵民, 陈桥, 张福生, 等. 闪速浮选回收磨矿-分级回路中金矿物试验研究 [J]. 中国资源综合利用, 2019, 37(9): 1-4.  
CHEN Guimin, CHEN Qiao, ZHANG Fusheng, et al. Experimental study on gold minerals in flash flotation recovery grinding-classification circuit [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2019, 37(9): 1-4.
- [8] 李飞, 明平田. 某难选金矿高效浮选工艺可行性研究 [J]. 有色金属(选矿部分), 2019(6): 50-57.  
LI Fei, MING Pingtian. Feasibility study of high efficiency flotation process for a refractory gold ore [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(6): 50-57.
- [9] 沈发明, 徐寒冰, 曾志飞. 闪速浮选机在广东某铅锌矿回收伴生金的应用 [J]. 湖南有色金属, 2023, 39(6): 21-24.  
SHEN Faming, XU Hanbing, ZENG Zhifei. Application of flash flotation machine in the recovery of associated gold from a lead zinc mine in Guangdong Province [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023, 39(6): 21-24.
- [10] 付浩. 闪速浮选工艺在某金矿选矿厂的应用 [J]. 世界有色金属, 2018(12): 94.  
FU Hao. Application of flash flotation process in a gold ore dressing plant [J]. World Nonferrous Metals, 2018(12): 94.
- 引用本文:** 张福亚, 陈延, 申滔, 等. 闪速浮选回收硫化铜矿中伴生金的试验研究 [J]. 矿冶工程, 2025, 45(5): 73-76.
- ZHANG Fuya, CHEN Yan, SHEN Tao, et al. Experimental study on recovery of associated gold from copper sulfide ore by flash flotation [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5): 73-76.