国外某铅锌矿伴生银在铅精矿中的强化回收试验研究①

刘忠荣[1,2]，赵俊峰[1,2]，肖金雄[3]，周钰沣[1,2]

（1.湖南有色金属研究院有限责任公司，湖南 长沙 410014；2.复杂铜铅锌共伴生金属资源综合利用湖南省重点实验室，湖南 长沙 410014；3.长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012）

摘 要：为了提高国外某铅锌矿共伴生贵金属 Ag 的回收率，在原矿工艺矿物学研究基础上进行了选矿试验研究。结果表明，Ag 主要以裸露硫化银、硫化物包裹银形式存在；采用脱碳、无石灰铅浮选工艺，以苯胺黑药为捕收剂，铅粗选阶段添加锌抑制剂 CB-1、锌辅助抑制剂 W-1，可以获得铅品位 56.70%、锌品位 8.93%、银品位 1 432.30 g/t，Pb、Zn、Ag 回收率分别为 80.73%、2.13%、59.07%的铅精矿。与原石灰工艺相比，Pb、Ag 回收率分别提高了 2.80、4.83 百分点，铅精矿中 Zn 品位降低了 1.30 百分点，Ag 品位提高了 35.80 g/t。

关键词：铅锌矿；伴生银；浮选；抑制剂；银；铅；铅精矿；CB-1；W-1

中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.04.016

文章编号：0253-6099(2026)04-0116-04

Experimental Study on Enhanced Recovery of Associated Silver from Lead Concentrate in an Overseas Lead-Zinc Ore

LIU Zhongrong[1,2], ZHAO Junfeng[1,2], XIAO Jinxiong[3], ZHOU Yufeng[1,2]

(1.*Hunan Research Institute for Non-ferrous Metals Co., Ltd., Changsha* 410014, *Hunan, China*; 2.*Hunan Provincial Key Laboratory for Comprehensive Utilization of Complex Copper-Lead-Zinc Associated Metal Resources, Changsha* 410014, *Hunan, China*; 3.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha* 410012, *Hunan, China*)

Abstract: To improve the recovery of associated precious metal Ag from an overseas lead-zinc ore, mineral processing tests were carried out based on raw ore process mineralogy. The results show that silver mainly occurs as exposed silver sulfide and encapsulated silver in sulfides. A process consisting of decarbonization and lime-free lead flotation was adopted, with aniline dithiophosphate as a collector, and zinc depressant CB-1 and auxiliary zinc depressant W-1 added in the roughing of lead flotation. As a result, a lead concentrate grading 56.70% Pb, 8.93% Zn and 1 432.30 g/t Ag was obtained, with corresponding recoveries of 80.73%, 2.13% and 59.07%, respectively. It is concluded that compared with the original lime-based process, the recoveries of Pb and Ag can be increased by 2.80 and 4.83 percentage points respectively, while in the lead concentrate, Zn grade can be decreased by 1.30 percentage points and Ag grade up by 35.80 g/t.

Key words: lead-zinc ore; associated silver; flotation; depressant; silver; lead; lead concentrate; CB-1; W-1

铅锌金属广泛应用于电气、军工、冶金、机械和化工等领域，铅金属在核工业、石油等领域也具有广阔的应用前景[1-3]。银是一种贵金属，具有很好的导热性、延展性、可塑性、耐酸碱性等，主要应用于工业、摄影、首饰、制币等，且在金融领域中发挥着重要作用。银矿多以有色金属和贵金属矿床的共(伴)生形式产出，独立银矿床数量相对较少；共(伴)生银资源储量占银总资源储量的 42%，且其中绝大部分与铅锌矿共(伴)生，其余主要与铜矿、金矿、镍矿等共(伴)生[4-5]。开展铅锌矿共(伴)生稀贵金属银高效强化回收，可提高矿产资源综合利用率及增加矿产资源利用效益[6-10]。

国外某铅锌矿已探明铅锌金属储量超过 1 000 万 t，

① **收稿日期**：2026-02-15
基金项目：国家重点研发计划(2022YFC2904605)
作者简介：刘忠荣(1966—)，男，湖南郴州人，高级工程师，主要从事选矿技术研究工作。E-mail:z18801279785@163.com

该矿为典型的接触交代型硫化铅锌矿矿床,采用传统的预先脱碳-铅优先浮选的高碱流程选铅。该地区铅锌矿原矿矿石种类多、性质波动大、碳质和白云母含量高、方铅矿含量低、闪锌矿含量高、铅矿物和银矿物嵌布粒度细、现场浮选设备适用性较差,致使实际铅锌生产过程中存在回收率偏低、生产流程指标波动大等问题。

为了进一步提高铅精矿中 Ag 回收率、增加企业经济效益,并满足下一步矿石采选的整体布局需求,以该铅锌选矿厂给矿为研究对象,开展工艺矿物学研究和选矿试验研究。

1　矿石性质

矿石化学多元素分析结果见表 1。矿石中铅、锌品位分别为 1.69%、10.38%,银品位为 59.70 g/t。

表 1　矿石化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1　Multi-elemental analysis of ore　　%

Pb	Zn	Cu	Fe	Ag[1)]	Au[1)]	S	Mo	Cd	C
1.69	10.38	0.024	11.05	59.70	<0.10	13.85	0.001 3	0.022	4.06

Mn	Ba	SiO_2	K_2O	Na_2O	Al_2O_3	MgO	CaO	TiO_2	P_2O_5
0.80	0.098	37.42	3.96	0.23	7.33	0.77	3.26	0.25	0.25

1) 单位为 g/t。

对-0.074 mm 粒级占 100%样品中的银进行了化学物相分析,结果见表 2。银主要以裸露硫化银、硫化物包裹银形式存在。

表 2　银化学物相分析结果

Table 2　Chemical phase analysis results of silver

相别	银含量/(g·t^{-1})	分布率/%
裸露自然银	3.46	5.84
裸露硫化银	40.00	67.46
硫化物包裹银	11.33	19.11
脉石包裹银	4.50	7.59
合计	59.29	100.00

矿石中银元素的分布特征如表 3 所示。总体看,47.29%的银矿物分布于方铅矿中,31.15%的银矿物分布于闪锌矿中,其余银则分布于硫化铁矿物、脉石矿物中。

通过化学分析、X 射线衍射、偏光显微镜、扫描电镜、电子探针等手段研究发现,矿石中的银主要以独立银矿物形式存在,主要为银黝铜矿,其次为深红银矿,少量硒银矿、自然银、锑银矿、辉银矿、硫银锗矿、脆银矿、硫锑铅银矿等。银元素平衡表如表 4 所示。

表 3　银元素分布特征

Table 3　Distribution characteristics of silver

分布特征	相关矿物	银占有率/%
裂隙	硫化铁矿物	6.70
	脉石	3.03
	闪锌矿	0.63
	方铅矿	0.05
粒间	方铅矿与脉石	20.18
	方铅矿与闪锌矿	14.82
	方铅矿与闪锌矿、脉石	1.21
	方铅矿与硫化铁矿物、脉石	0.21
	方铅矿与闪锌矿、硫化铁矿物	0.12
	方铅矿与硫化铁矿物	5.39
	闪锌矿与脉石	11.12
	闪锌矿与硫化铁矿物	4.29
	硫化铁矿物与脉石	4.87
	硫化铁矿物与黄铜矿	0.22
包裹银	闪锌矿	15.11
	方铅矿	5.31
	脉石	5.30
	硫化铁矿物	1.44

表 4　银元素平衡表

Table 4　Silver element balance

矿物名称	矿物含量/%	银分布率/%
银黝铜矿	50.81	35.97
深红银矿	23.05	26.58
硒银矿	7.84	12.13
自然银	3.41	6.53
锑银矿	3.66	5.48
辉银矿	3.07	5.10
硫银锗矿	1.59	2.47
脆银矿	1.66	2.18
硫锑铅银矿	3.39	1.69
碲银矿	1.00	1.26
辉锑铅银矿	0.52	0.61

综上,银主要以独立银矿物形式存在,其中与方铅矿连生的 47.29%的银矿物易随方铅矿进入铅精矿中,而 31.15%的银矿物与闪锌矿连生,易进入锌精矿中。另有少量银与脉石连生,这部分银难解离,易损失于尾矿中。

2　实验室试验研究

根据现场选矿工艺流程,本次试验在铅浮选段使用锌抑制剂 CB-1、锌辅助抑制剂 W-1 替代传统抑制剂石灰,开展无石灰选铅工艺研究。

2.1　抑制剂对比试验

按照图 1 所示流程,进行了铅浮选抑制剂种类试验,结果见表 5。采用石灰作抑制剂,可以获得铅品位 19.52%、锌品位 12.64%的铅粗精矿,Pb、Zn 回收率分别为 75.64%、7.85%;采用 CB-1 作锌抑制剂,可以获得

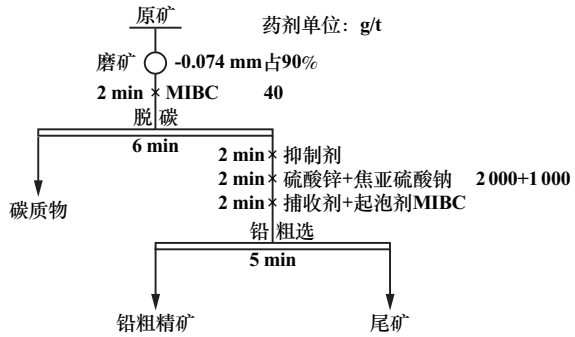


图 1 抑制剂种类试验流程

Fig. 1 Flowchart for depressant type test

表 5 抑制剂种类试验结果

Table 5 Test results of depressant type

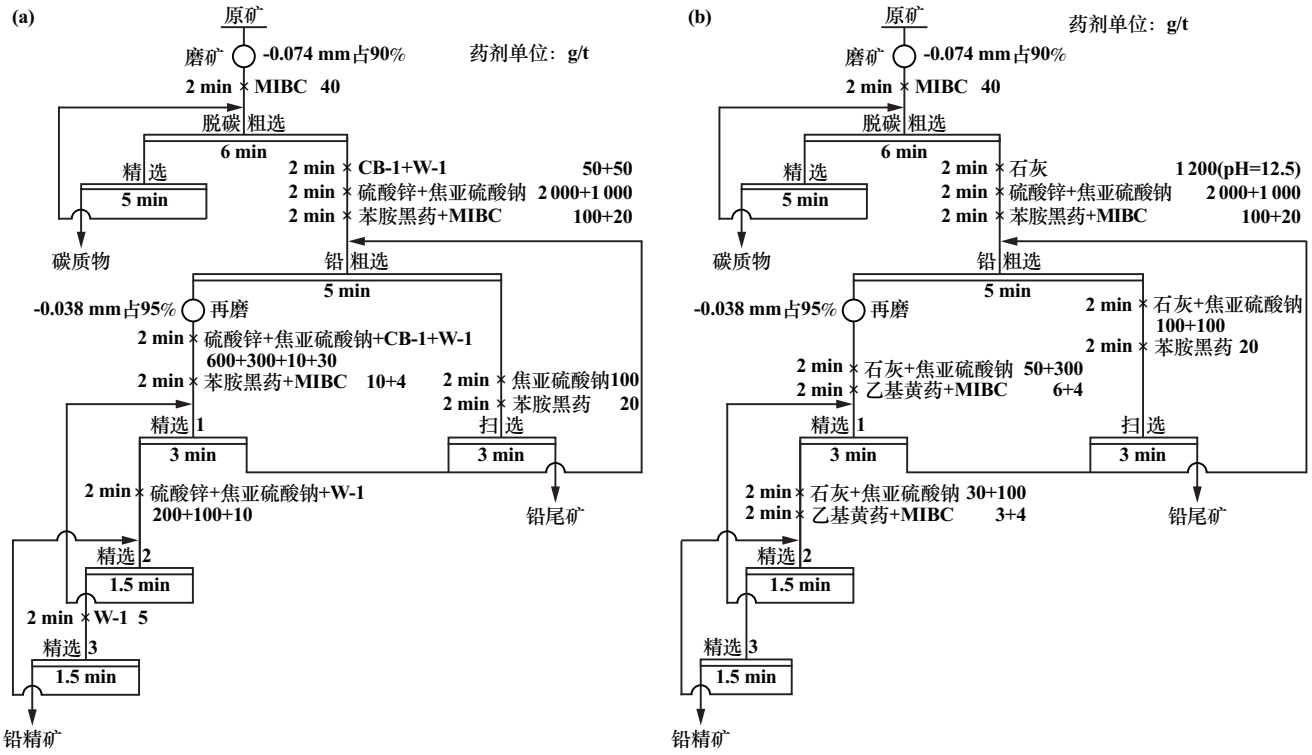
药剂种类及用量/(g·t^{-1})		产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
				Pb	Zn	Pb	Zn
石灰	1 200	碳质物	14.84	1.00	4.82	8.77	6.78
乙基黄药	80	铅粗精矿	6.55	19.52	12.64	75.64	7.85
MIBC	28	尾矿	78.61	0.34	11.45	15.59	85.37
		原矿	100.00	1.69	10.54	100.00	100.00
CB-1	50	碳质物	14.69	0.99	4.78	8.61	6.66
苯胺黑药	100	铅粗精矿	6.44	19.69	12.78	75.05	7.81
MIBC	20	尾矿	78.87	0.35	11.43	16.34	85.53
		原矿	100.00	1.69	10.54	100.00	100.00
CB-1	50	碳质物	14.62	0.99	4.78	8.57	6.63
W-1	50	铅粗精矿	6.32	20.57	12.01	76.93	7.20
苯胺黑药	100	尾矿	79.06	0.31	11.49	14.50	86.17
MIBC	20	原矿	100.00	1.69	10.54	100.00	100.00

铅品位 19.69%、锌品位 12.78%的铅粗精矿，Pb、Zn 回收率分别为 75.05%、7.81%；采用 CB-1 作锌抑制剂、W-1 作辅助抑制剂，可以获得铅品位 20.57%、锌品位 12.01%的铅粗精矿，Pb、Zn 回收率分别为 76.93%、7.20%。

对比分析可知：与石灰体系相比，以 CB-1 为锌抑制剂，铅、锌回收率较为接近，但铅粗精矿中互含锌方面并无明显优势；以 CB-1 为锌抑制剂、W-1 为辅助抑制剂，既在铅、锌回收率上有优势（铅回收率更高、锌回收率更低），又能明显降低铅粗精矿中锌的互含。

2.2 闭路对比试验

在抑制剂对比试验基础上进行了无石灰铅浮选工艺和石灰体系铅浮选工艺闭路试验，试验流程见图 2，试验结果见表 6。采用以 CB-1 为锌抑制剂、W-1 为辅助抑制剂的无石灰铅浮选工艺，可以获得铅品位 56.70%、锌品位 8.93%、银品位 1 432.30 g/t 的铅精矿，Pb、Zn、Ag 回收率分别为 80.73%、2.13%、59.07%；采用石灰为抑制剂的石灰工艺，可以获得铅品位 59.13%、锌品位 10.23%、银品位 1 396.50 g/t 的铅精矿，Pb、Zn、Ag 回收率分别为 77.93%、2.09%、54.24%。以 CB-1 为锌抑制剂、W-1 为辅助抑制剂替代石灰实现无石灰浮选，与石灰浮选工艺相比，铅精矿中 Pb、Ag 回收率分别提高了 2.80、4.83 百分点，铅精矿中 Zn 品位降低了 1.30 百分点，铅精矿中Ag品位提高了 35.80 g/t。



（a）无石灰铅浮选；（b）石灰体系铅浮选

图 2 铅浮选闭路试验流程

Fig. 2 Flowchart for closed-circuit tests of lead flotation

表 6　闭路试验结果

Table 6　Closed-circuit test results of different processes

试验条件	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Pb	Zn	Ag[1)]	Pb	Zn	Ag
无石灰	碳质物	10.30	1.05	4.01	27.93	6.34	4.05	4.88
	铅精矿	2.43	56.70	8.93	1 432.30	80.73	2.13	59.07
	铅尾矿	87.27	0.26	10.95	24.34	13.13	93.82	36.05
	原矿	100.00	1.71	10.19	58.92	100.00	100.00	100.00
石灰体系	碳质物	10.80	0.98	3.95	27.36	6.37	3.98	5.24
	铅精矿	2.19	59.13	10.23	1 396.50	77.93	2.09	54.24
	铅尾矿	87.01	0.30	11.56	26.25	15.60	93.93	40.52
	原矿	100.00	1.66	10.71	56.38	100.00	100.00	100.00

1) 单位为 g/t。

以 CB-1 为锌抑制剂、W-1 为辅助抑制剂的无石灰铅浮选工艺,可以明显提高铅精矿中铅、银回收率以及银品位,同时还能降低铅精矿中锌的互含。

3　作用机理分析

3.1　抑制剂 CB-1

试验中使用的抑制剂 CB-1 是湖南有色金属研究院有限责任公司参与研发的新型闪锌矿组合抑制剂[11]。CB-1 以硫酸锌、三聚氰酸钠、硫脲、聚合氯化铁和碳酸钠为主成分。

CB-1 的作用机理为:聚合氯化铁可有效抑制脉石中的 Fe^{2+}、Fe^{3+}等铁离子,而铁离子往往以铁闪锌矿形式存在于矿物中,因此聚合氯化铁能强化抑制闪锌矿;三聚氰酸钠($C_3H_4N_3NaO_3$)具有还原性,它能使锌矿物表面发生化学反应,促进锌矿物表面与硫酸锌作用而改善抑制效果;硫脲(CH_4N_2S)是硫化促进剂;碳酸钠起到调节 pH 值的作用。CB-1 中的硫酸锌、三聚氰酸钠、硫脲、聚合氯化铁之间产生协同效应,能有效抑制脉石中离子共生锌。

3.2　辅助抑制剂 W-1

辅助抑制剂 W-1 是湖南有色金属研究院有限责任公司自主合成的硫化锌矿物有机抑制剂[12]。W-1 以硫酸锌、二聚氰酸钠、双巯基乙酸钠、硫脲为主成分,主要配合其他抑制剂一起使用,达到强化抑制效果和降低其他抑制剂用量的目的。

W-1 的作用机理为:二聚氰酸钠、双巯基乙酸钠、硫脲均具有较强的还原性,硫酸锌则可以靶向选择含锌矿物。以上 4 种药剂与水互配后的螯合物对含锌矿物具有很好的选择性强还原作用,致使吸附在含锌矿物表面的黄药类捕收剂失效,含锌矿物受到强烈抑制,从而实现铅锌分离。

4　结论

1) 国外某铅锌矿石中富含铅、锌、银,对应品位分别为 1.69%、10.38%、59.70 g/t。银主要以裸露硫化银的独立银矿物形式存在。

2) 实验室闭路试验结果表明,采用现场的工艺流程,以 CB-1 为抑制剂、W-1 为辅助抑制剂的无石灰铅浮选工艺可以获得铅品位 56.70%、锌品位 8.93%、银品位 1 432.30 g/t 的铅精矿,Pb、Zn、Ag 回收率分别为 80.73%、2.13%、59.07%。与原石灰铅浮选工艺相比,铅精矿中 Pb、Ag 回收率分别提高了 2.80、4.83 百分点,铅精矿中 Zn 品位降低了 1.30 百分点,铅精矿中 Ag 品位提高了 35.80 g/t。无石灰铅浮选工艺具有较好的工业应用及推广前景。

参考文献(References):

[1] 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.
Li Xizhang, Zeng Na, Xiang Ping, et al. Experimental study for lime-free beneficiation of a lead-zinc ore from Hunan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):75-78.

[2] 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.

[3] 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.
Cai Jinpeng, Su Chao, Shen Peilun, et al. High-efficient comprehensive utilization of mud-bearing high-silver lead-zinc sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(1):55-58.

[4] 王妍,王旭,薛凯,等. 内蒙古某含银多金属硫化矿强化选别试验研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(5):49-52.
Wang Yan, Wang Xu, Xue Kai, et al. Intensified separation of silver-bearing polymetallic sulfide ores from Inner Mongolia[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):49-52.

[5] 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 Zhian. Experimental study on reducing carbon content in zinc concentrate of complex lead-zinc ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(2):71-73.

[6] 聂世华. 某铅锌矿床伴生金银在精矿产品中的分布及药剂制度优化试验[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):79-83.
Nie Shihua. Distribution of gold and silver associated with lead-zinc deposit in concentrate products and optimization of flotation reagent system[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(3):79-83.

(下转第 126 页)

展[J]. 现代矿业, 2023,39(5):5-8.
Li Jianhong, Xue Qingyuan, Wang Guifang, et al. Research status and progress on desilication of bauxite with high silica[J]. Modern Mining, 2023,39(5):5-8.

[8] 蓝柳佳,王丽,孙伟,等. 某高铝高硅铝土矿提质试验研究[J]. 非金属矿, 2022,45(2):59-62.
Lan Liujia, Wang Li, Sun Wei, et al. Study on upgrading of a high-alumina and high-silicon bauxite ore[J]. Non-Metallic Mines, 2022, 45(2):59-62.

[9] 任锦婷,张素红,邵秀峰. Gemini 12-3-12 浮选分离一水硬铝石与高岭石的机理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5):153-161.
Ren Jinting, Zhang Suhong, Shao Xiufeng. Mechanism of flotation separation of diaspore and kaolinite by using Gemini 12-3-12[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(5):153-161.

[10] 罗溪梅,姜伯昭,黄仁杰,等. 阴阳离子组合捕收剂在非硫化矿浮选及其泡沫调控中的研究进展[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2025,42(3):1-13.
Luo Ximei, Jiang Bozhao, Huang Renjie, et al. Research progress of the use of cation-anion combined collectors in non-sulfide ore flotation and foam control[J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences), 2025,42(3):1-13.

[11] 施雨航,宋宝旭,王帅,等. 新型组合捕收剂浮选回收某铜尾矿中的微细粒锡石[J]. 矿产保护与利用, 2025,45(2):102-107.
Shi Yuhang, Song Baoxu, Wang Shuai, et al. Flotation recovery of fine-grained cassiterite from a copper tailings using a novel combined collector[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025,45(2):102-107.

[12] 刘安荣,彭伟,王振杰,等. 贵州某低铝硅比铝土矿石浮选脱硅试验研究[J]. 现代矿业, 2020,36(7):131-133.
Liu Anrong, Peng Wei, Wang Zhenjie, et al. Experimental study on flotation desilication of a low alumina silica ratio bauxite in Guizhou[J]. Modern Mining, 2020,36(7):131-133.

[13] 孔春朋,王军,侯玉茂,等. 表面活性剂提高尾煤泥脱水效率的研究与应用[J]. 煤炭加工与综合利用, 2023(3):34-36.
Kong Chunpeng, Wang Jun, Hou Yumao, et al. Research and application of surfactant to improve the dewatering efficiency of tailing slime[J]. Coal Processing & Comprehensive Utilization, 2023(3): 34-36.

引用本文: 郭吉东,翟益庆,庹必阳,等. 组合捕收剂与表面活性剂强化高硅铝土矿浮选及其机理研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):120-126.
Guo Jidong, Zhai Yiqing, Tuo Biyang, et al. Enhanced flotation of high-silicon bauxite with combined collectors and surfactants and its mechanism[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):120-126.

(上接第119页)

[7] 郭灵敏. 缅甸某铅锌银多金属氧硫混合矿选矿技术开发研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):81-85.
Guo Lingmin. Development of mineral processing technology for Pb-Zn-Ag polymetallic ore from Myanmar[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(5):81-85.

[8] 唐攀科,王春艳,梅友松,等. 中国铅锌矿产资源成矿特征与资源潜力评价[J]. 地学前缘, 2018,25(3):31-49.
Tang Panke, Wang Chunyan, Mei Yousong, et al. Characteristics and potential evaluation of lead zinc mineral resources in China[J]. Earth Science Frontiers, 2018,25(3):31-49.

[9] 叶家笋,曾茂青,王世涛,等. 云南某地铅锌银多金属硫化矿的浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(1):31-37.
Ye Jiasun, Zeng Maoqing, Wang Shitao, et al. Flotation test for lead-zinc-silver polymetallic sulfide ore of Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2020(1):31-37.

[10] 谭欣,王中明,肖巧斌,等. 银铅无碱混选工艺分选含银低品位铅锌硫化矿石[J]. 矿产保护与利用, 2021,41(2):89-98.
Tan Xin, Wang Zhongming, Xiao Qiaobin, et al. Separation of Ag-Pb alkali-free bulk flotation process on a silver-bearing low-grade lead & zinc sulfide ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(2):89-98.

[11] 昆明理工大学,豫光(成都)科技有限公司,甘洛县尔呷地吉铅锌矿业有限公司,等. 一种难选混合铅锌矿的浮选分离方法: CN119456213B[P]. 2025-11-11.
Kunming University of Science and Technology, Yuguang (Chengdu) Technology Co., Ltd., Ganluo County Erxia Diji Lead-Zinc Mining Co., Ltd., et al. A flotation separation method for refractory mixed lead-zinc ore: CN119456213B[P]. 2025-11-11.

[12] 湖南有色金属研究院. 一种用于铅精矿浮选工艺中的组合抑制剂: CN201710566505.8[P]. 2017-11-24.
Hunan Research Institute for Nonferrous Metals. A combined inhibitor used in the flotation process of lead concentrate: CN201710566505.8[P]. 2017-11-24.

引用本文: 刘忠荣,赵俊峰,肖金雄,等. 国外某铅锌矿伴生银在铅精矿中的强化回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(4):116-119.
Liu Zhongrong, Zhao Junfeng, Xiao Jinxiong, et al. Experimental study on enhanced recovery of associated silver from lead concentrate in an overseas lead-zinc ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(4):116-119.