河南某银铅多金属矿选矿试验研究及工业应用①

孙景敏[1]，杨宁[2]，黄业豪[3]，李翠芬[1]

（1.河南省地质局地质灾害防治中心，河南 郑州 450012；2.洛阳坤宇矿业有限公司，河南 洛阳 471000；3.超纯矿物新材料产业技术研究院，河南 郑州 450016）

摘　要：为提高河南某银铅多金属矿选矿厂的经济效益，基于工艺矿物学对银赋存状态及载体矿物共生关系的解析，系统开展了浮选流程重构与药剂制度研究。结果表明，采用两粗三精三扫浮选流程，以水玻璃-CMC 组合抑制剂替代传统硫化钠，工业生产连续运转稳定，成功实现了铅精矿品质的显著跃升，同时提高了伴生金属元素的计价系数，可获得 Ag 品位和回收率分别为 14 876.15 g/t 和 87.77%，Pb 品位和回收率分别为 15.28%和 73.34%的铅精矿。相比原药剂制度，精矿 Ag 品位提高了约 4 923 g/t，回收率降低了 0.80 百分点；Pb 品位提高了 5.05 百分点，回收率增加了 1.93 百分点。

关键词：银铅多金属矿；浮选；抑制剂；计价系数；铅精矿；银

中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2026.03.023

文章编号：0253-6099(2026)03-0165-05

Beneficiation Experimental Research and Industrial Application of a Silver-Lead Polymetallic Ore in Henan Province

SUN Jingmin[1], YANG Ning[2], HUANG Yehao[3], LI Cuifen[1]

(1.*Geological Disaster Prevention Center of Henan Geological Bureau*, *Zhengzhou* 450012, *Henan*, *China*; 2.*Luoyang Kunyu Mining Co.*, *Ltd.*, *Luoyang* 471000, *Henan*, *China*; 3.*Ultrapure Minerals and New Materials Industrial Technology Research Institute*, *Zhengzhou* 450016, *Henan*, *China*)

Abstract: To enhance the economic benefits of a silver-lead polymetallic ore concentrator in Henan Province, a systematic study was conducted on flotation process optimization and reagent system innovation based on the analysis of silver occurrence state and the paragenetic relationship among carrier minerals through process mineralogy. The research outcomes demonstrate that by implementing a process flow consisting of two roughers, three cleaners and three scavengers, and substituting the conventional sodium sulfide with a composite depressant system consisting of sodium silicate and CMC (carboxymethyl cellulose), the industrial production operates stably and continuously. As a result, the quality of lead concentrate is significantly improved, and the pricing coefficients of associated metallic elements are also enhanced simultaneously. The lead concentrate is obtained with Ag grade of 14 876.15 g/t at recovery of 87.77%, and Pb grade of 15.28% at recovery of 73.34%. Compared to the original reagent system, the Ag grade of the concentrate increases by about 4 923 g/t, while the recovery decreased slightly by 0.80 percentage points. The Pb grade of the concentrate increases by 5.05 percentage points and the corresponding recovery increases by 1.93 percentage points.

Key words: silver-lead polymetallic ore; flotation; depressant; pricing coefficient; lead concentrate; silver

银铅多金属矿作为国家战略资源体系的关键组成部分，其高效开发对保障关键金属供应链安全、驱动区域产业升级具有重大战略意义[1-3]。此类矿石普遍存在多金属共(伴)生特征，除主元素银、铅外，常赋存铜、锌、金等具经济价值的有价组分[4-5]。伴生元素的资源化需依据工业指标建立分级处置策略：当元素含量达到综合利用标准时，应通过协同提取技术实现资源最大化利用[6-8]；若未达到经济回收阈值，则需重点优化选矿流程，显著提升其在精矿产品中的富集比，进而通过提升计价系数创造增量经济效益[9-11]。富集比

① **收稿日期**：2025-12-10
作者简介：孙景敏(1978—)，男，吉林省吉林市人，硕士，高级工程师，主要从事矿产综合利用研究工作。E-mail：sunjm2005@sina.com
通信作者：黄业豪(1990—)，男，河南郑州人，博士，高级工程师，主要从事矿物加工与矿物新材料方面的研究工作。E-mail：huangyehao1688@163.com

的提升需以工艺矿物学研究为基础,系统解析目标元素的赋存状态、嵌布粒度及矿物相嵌关系,常见的方法包括增加精选次数、通过磨矿降低物料粒度、优化药剂制度等,其中,优化药剂制度具有成本可控、响应迅速、无需大规模改造等优点,是一种便捷、高效的方法。

河南某银铅多金属矿主要有价金属为银,含有部分铜、铅、锌、金等,生产采用两段磨矿-浮选的闭路流程,目前生产规模 800 t/d。其主要坑口 Ag 平均品位约 220 g/t,伴生 Pb 品位约 0.70%、Cu 品位 0.05%~0.20%、Au 品位 0.1~0.3 g/t、Zn 品位 0.05%~0.20%。产品为银精矿,银精矿中 Pb 品位约 7%、Cu 品位约 1%、Au 品位约 0.9 g/t、Zn 品位约 1%,精矿中 Pb、Cu、Au、Zn 元素均未达到计价标准或计价系数较低。为突破这一技术困境,提高选矿厂经济效益,本文立足该矿床工艺矿物学特性,优化选矿工艺流程和药剂制度,引入高效组合抑制剂,成功实现了铅精矿品质的显著跃升,同时提高了伴生金属元素的计价系数,并将研究成果进行了工业转化应用,验证了技术的可靠性与高效性,可为国内外同类型复杂银铅多金属矿的绿色、高效开发提供极具价值的理论支撑与实践范例。

1 原矿性质

原矿化学多元素分析结果见表 1。由表 1 可知,原矿中主要有价元素为 Ag,品位为 250.85 g/t,回收 Ag 的同时需要关注 Pb、Au、Cu、Zn 等有价元素的富集情况。

表 1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of raw ore %

Ag[1)]	Pb	Au[1)]	Cu	Zn	S	TFe
250.85	0.34	0.058	0.051	0.12	0.17	7.27
SiO_2	Al_2O_3	CaO	K_2O	MgO	Na_2O	
56.6	14.60	4.16	4.11	3.23	1.65	

1) 单位为 g/t。

银和铅化学物相分析结果分别见表 2 和表 3。由表 2~3 可知,Ag 主要以自然银形式存在,硫化银、方铅矿包裹银、闪锌矿包裹银、黄铁矿包裹银等其他易回收银合计占比为 20.25%;Pb 主要以方铅矿形式存在,这增加了铅的回收难度。

原矿中以硫化物形式存在的银大多沿石英脉裂隙发育,多分布在矿石的石英脉中,呈细脉状分布,常与其他金属矿物连生,与银密切相关的金属矿物主要有铜蓝、黄铜矿及方铅矿。方铅矿主要粒径范围为 0.282~3.692 mm,多与脉石矿物连生,磨矿时容易解离。铅嵌布特征分析结果见表 4。

表 2 银化学物相分析结果

Table2 Chemical analysis of silver phase

相别	含量/(g·t^{-1})	分布率/%
银盐相	22.40	8.69
铁锰氧化物吸附银	11.95	4.64
自然银	157.88	61.26
硫化银	20.24	7.86
方铅矿包裹银	10.86	4.21
闪锌矿包裹银	15.98	6.20
黄铁矿包裹银	5.12	1.99
脉石包裹银	13.28	5.15
合计	257.71	100.00

表 3 铅化学物相分析结果

Table 3 Chemical analysis of lead phase

相别	Pb 含量/%	Pb 分布率/%
铅钒	0.068	21.93
白铅矿	0.008	2.58
方铅矿	0.174	56.13
磷砷钒氯铅	0.053	17.10
铁铅钒及其他	0.007	2.26
合计	0.310	100.00

表 4 铅嵌布特征分析结果

Table 4 Analysis of lead dissemination characteristics

粒径/mm	近似面积含量/%	累计含量/%
+3.692	1.36	1.36
-3.692+1.651	28.17	29.53
-1.651+0.833	28.82	58.35
-0.833+0.282	31.38	89.73
-0.282+0.147	7.06	96.79
-0.147+0.074	2.68	99.47
-0.074+0.038	0.48	99.95
-0.038	0.05	100.00

2 试验方法

矿样取自生产线球磨机皮带给矿,每 0.5 h 截取一次,连续取样 24 h 以确保样品的代表性。原矿破碎至-3 mm,缩分混匀得到试验样品。每次试验准确称取试验样品 500 g,与 500 mL 水一并加入锥形球磨机,磨至设定的磨矿时间,转移至单槽浮选机,分别加入抑制剂、捕收剂、起泡剂,充气,刮出泡沫,精矿、尾矿分别烘干称重制样,经化验分析后,计算选矿指标。试验原则流程见图 1。试验所用试剂包括水玻璃(工业纯)、羧甲基纤维素(CMC,分析纯)、硫化钠(分析纯)、丁基黄药(工业纯)、丁铵黑药(工业纯)、2 号油(工业纯)

等。试验仪器设备包括锥形球磨机(XMQ-240×90)、单槽浮选机(XFD-1.5/1.0/0.5)、电子天平(LT3002E)、真空过滤机(Φ260/200)、三头制样机(Φ120×3)等。

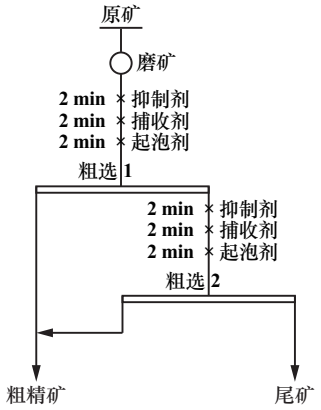


图 1　试验原则流程

Fig. 1　Basic flowchart for test

3　试验结果与讨论

3.1　磨矿细度试验

按照图 1 所示流程,粗选 1 捕收剂丁基黄药+丁铵黑药用量(200+30) g/t、起泡剂 2 号油用量 20 g/t,粗选 2 捕收剂丁基黄药+丁铵黑药用量(100+15) g/t、起泡剂 2 号油用量 10 g/t 时,磨矿细度对粗精矿指标的影响见图 2。由图 2 可知,随着磨矿细度增加,粗精矿中 Pb、Ag 品位呈逐渐降低趋势,回收率呈逐渐升高趋势,磨矿细度-0.074 mm 粒级占比达到 80%后,再增加磨矿细度,Pb 回收率趋于平衡,Ag 回收率略有降低。综合考虑,磨矿细度-0.074 mm 粒级占 80%为宜,此时粗精矿中 Pb 品位为 3.11%、Ag 品位为 1 917.12 g/t,Pb 回收率为 91.83%、Ag 回收率为 85.73%。

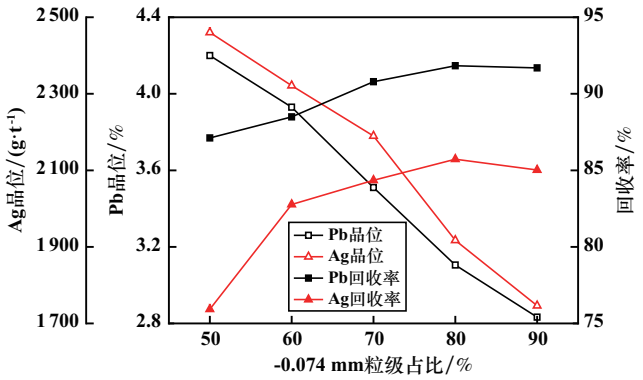


图 2　磨矿细度对粗精矿指标的影响

Fig. 2　Influence of grinding fineness on indicators of rough concentrate

3.2　抑制剂比例及用量试验

磨矿细度-0.074 mm 粒级占 80%,其他条件不变,以水玻璃+CMC 为抑制剂,总用量为 600 g/t,考察了水玻璃与 CMC 配比(质量比)对粗精矿指标的影响,结果见图 3。随着水玻璃用量增加,粗精矿 Pb 和 Ag 品位整体呈升高趋势,回收率呈先升高后降低的趋势;水玻璃与 CMC 配比为 2∶4(即水玻璃用量 200 g/t)时,粗精矿中 Pb 和 Ag 回收率最高,适宜的水玻璃与 CMC 配比为 2∶4。

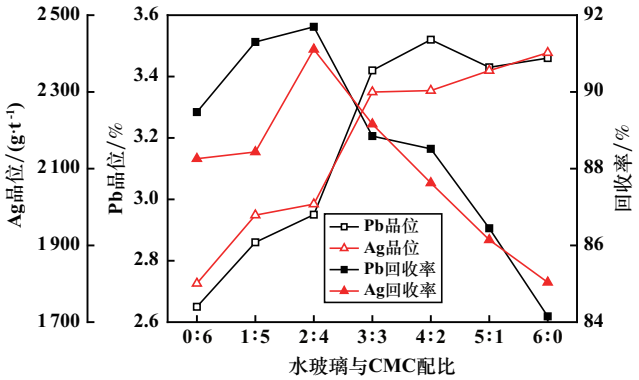


图 3　水玻璃与 CMC 配比对粗精矿指标的影响

Fig. 3　Influence of sodium silicate/CMC ratio on indicators of rough concentrate

固定水玻璃与 CMC 配比为 2∶4,其他条件不变,抑制剂用量对粗精矿指标的影响见图 4。随着抑制剂用量增加,粗精矿 Pb 和 Ag 品位整体呈升高趋势,回收率呈先升高后降低的趋势;抑制剂总用量 600 g/t 时,粗精矿中 Pb 品位为 2.95%、Ag 品位为 2 007.62 g/t,Pb 回收率为 91.70%、Ag 回收率为 91.11%。适宜的抑制剂用量为 600 g/t。

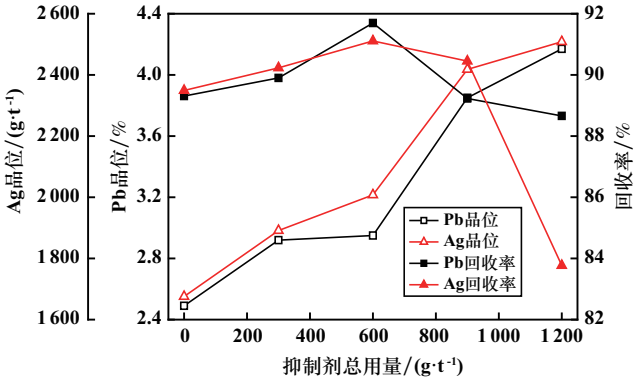


图 4　抑制剂总用量对粗精矿指标的影响

Fig. 4　Influence of depressant dosage on indicators of rough concentrate

3.3　捕收剂种类及用量试验

磨矿细度-0.074 mm 粒级占 80%,粗选 1 抑制剂水玻璃+CMC 用量(200+400) g/t、2 号油用量 20 g/t,粗选 2 中 2 号油用量 10 g/t,粗选 2 捕收剂用量是粗

选 1 的一半,粗选 1 捕收剂种类对粗精矿指标的影响见表 5。由表 5 可知,以 MA+丁铵黑药为捕收剂时得到的粗精矿 Pb 和 Ag 品位最高,以丁基黄药+丁铵黑药为捕收剂时得到的粗精矿 Pb 和 Ag 回收率最高。Ag 的回收率对经济效益影响更显著,需优先选择较高的 Ag 回收率,选择丁基黄药+丁铵黑药为该银铅多金属的捕收剂。

表 5 粗选 1 捕收剂种类对粗精矿指标的影响

Table 5 Influence of collector type for rougher 1 on indicators of rough concentrate

捕收剂种类及用量/(g·t^{-1})	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Pb	Ag[1)]	Pb	Ag
MA+丁铵黑药 200+30	粗精矿	8.41	3.28	2 089.54	83.39	85.57
	尾矿	91.59	0.06	32.36	16.61	14.43
	给矿	100.00	0.33	205.37	100.00	100.00
乙基黄药+丁铵黑药 200+30	粗精矿	8.87	3.14	2 055.78	83.59	87.34
	尾矿	91.13	0.06	29.01	16.41	12.66
	给矿	100.00	0.33	208.78	100.00	100.00
丁基黄药+丁铵黑药 200+30	粗精矿	9.13	2.95	2 007.62	88.11	89.11
	尾矿	90.87	0.04	24.65	11.89	10.89
	给矿	100.00	0.31	205.70	100.00	100.00

1) 单位为 g/t。

以丁基黄药和丁铵黑药为捕收剂,其他条件不变,考察了捕收剂用量对粗精矿指标的影响,结果见图 5。随着捕收剂用量增加,Pb 和 Ag 品位均逐渐降低,Pb 和 Ag 回收率均逐渐升高。综合考虑,选择捕收剂丁基黄药+丁铵黑药用量(200+30) g/t,此时粗精矿 Pb 品位为 2.95%、Ag 品位为 2 007.62 g/t,Pb 回收率为 88.11%,Ag 回收率为 90.86%。

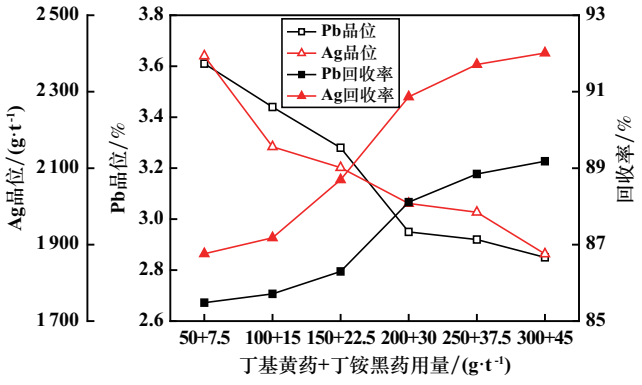


图 5 捕收剂用量对粗精矿指标的影响

Fig. 5 Influence of collector dosage on indicators of rough concentrate

3.4 工业试验

在粗选条件试验基础上,进行了扫选、精选条件试验,最终确定的闭路试验流程如图 6 所示。与原药剂制度相比,取缔了活化剂硫化钠,添加水玻璃+CMC 为抑制剂。10 天 30 班的生产统计指标对比结果见表 6。以水玻璃+CMC 为抑制剂,采用两粗三精三扫浮选流程,连续运转稳定,可获得 Ag 品位和回收率分别为 14 876.15 g/t和 87.77%,Pb 品位和回收率分别为 15.28% 和 73.34%的铅精矿;与原药剂制度相比,精矿中 Ag 品位提高了约 4 923 g/t,回收率降低了 0.80 百分点;Pb 品位提高了 5.05 百分点,回收率增加了 1.93 百分点。

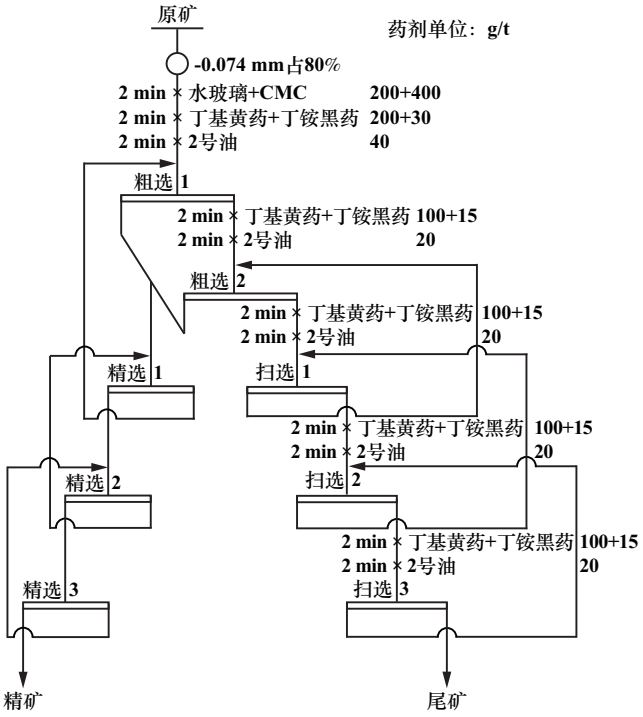


图 6 闭路试验流程

Fig. 6 Flowchart for closed-circuit test

表 6 闭路试验结果

Table 6 Test results of closed-circuit

药剂制度	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Pb	Ag[1)]	Pb	Ag
优化前	精矿	2.15	10.23	9 952.53	71.41	88.57
	尾矿	97.85	0.09	28.23	28.59	11.43
	原矿	100.00	0.31	241.60	100.00	100.00
优化后	精矿	1.42	15.28	14 876.15	73.34	87.77
	尾矿	98.58	0.08	29.87	26.66	12.23
	原矿	100.00	0.30	240.69	100.00	100.00

1) 单位为 g/t。

4 结论

1) 原矿中主要有价回收元素为 Ag,品位为 250.85 g/t,回收 Ag 的同时需关注 Pb、Au、Cu、Zn 等有价元素的富集情况。

2) 在实验室工艺流程与药剂制度优化基础上,工

业试验采用两粗三精三扫浮选流程,取缔了活化剂硫化钠,添加水玻璃+CMC 为抑制剂,连续运转稳定,可获得 Ag 品位和回收率分别为 14 876.15 g/t 和 87.77%,Pb 品位和回收率分别为 15.28%和 73.34%的铅精矿。与原药剂制度相比,精矿 Ag 品位提高了约 4 923 g/t,回收率降低了 0.80 百分点,Pb 品位提高了 5.05 百分点,回收率增加了 1.93 百分点。

参考文献(References):

[1] 谭金彪,周晓文. 浙江某银矿矿石性质及选矿流程试验研究[J]. 矿物学报, 2024,44(4):579-588.
TAN Jinbiao, ZHOU Xiaowen. Experimental study on properties and beneficiation process of ores from a silver deposit in Zhejiang Province[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2024,44(4):579-588.

[2] 敖顺福. 有色金属矿中伴生金银选矿进展[J]. 贵金属, 2024, 45(3):83-92.
AO Shunfu. Research progress in the mineral processing of associated gold and silver in nonferrous metal mines[J]. Precious Metals, 2024, 45(3):83-92.

[3] 鲁新州,林东建,曲思思,等. 某铅锌银多金属矿浮选试验研究[J]. 黄金, 2023,44(8):58-62.
LU Xinzhou, LIN Dongjian, QU Sisi, et al. Experimental research on the flotation of a lead-zinc-silver polymetallic ore[J]. Gold, 2023, 44(8):58-62.

[4] 李翠芬,黄业豪,孙景敏,等. 河南某低品位银铅锌多金属矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(4):66-73.
LI Cuifen, HUANG Yehao, SUN Jingmin, et al. Experimental study on mineral processing of a low-grade Ag-Pb-Zn polymetallic ore in Henan Province[J]. Nonferrous Metals Mieral Processing Section, 2023(4):66-73.

[5] 赵杰,罗思岗,赵志强,等. 云南某含砷铅锌银多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶, 2022,31(5):49-55.
ZHAO Jie, LUO Sigang, ZHAO Zhiqiang, et al. Experimental study on beneficiation of a Pb-Zn-Ag polymetallic ore containing arsenic in Yunnan[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(5):49-55.

[6] 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.

[7] 陈杜娟,郭海宁,苗梁,等. 某铜金银硫多金属矿综合回收选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(3):83-87.
CHEN Dujuan, GUO Haining, MIAO Liang, et al. Experimental study on comprehensive recovery of a copper-gold-silver-sulfur polymetallic ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(3):83-87.

[8] 赵杰,谭欣,王中明,等. 山西某铅锌银多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程,2019,39(1):44-48.
ZHAO Jie, TAN Xin, WANG Zhongming, et al. Experimental study on beneficiation of a polymetallic Pb-Zn-Ag ore in Shanxi[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(1):44-48.

[9] 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,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.

[10] 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.

[11] 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.

引用本文:孙景敏,杨宁,黄业豪,等. 河南某银铅多金属矿选矿试验研究及工业应用[J]. 矿冶工程, 2026,46(3):165-169.

SUN Jingmin, YANG Ning, HUANG Yehao, et al. Beneficiation experimental research and industrial application of a silver-lead polymetallic ore in Henan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(3):165-169.