

高银铅铜混合精矿选矿试验研究

林辉¹, 邹坚坚^{2*}, 王成行², 汪志平¹, 李强²

(1. 江西萍乡钨业有限公司, 江西 大余 341500; 2. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东省矿产资源开发与综合利用重点实验室, 广州 510650)

摘要: 某高银铅铜混合精矿为铜铅混浮产品, 表面受到浮选药剂严重污染, 导致铜矿物与铅矿物可浮性差异微小, 给铜铅分离带来非常不利的影响, 其银品位达到 4208.0 g/t, 铅品位 43.28%, 铜品位 3.39%, 98.80% 的银赋存于方铅矿。采用“活性炭脱药-抑铅浮铜”工艺流程处理, 环保高效的方铅矿抑制剂 GYC, 高效铜捕收剂 SAC, 全流程试验获得银品位 4839.2 g/t, 银回收率 97.36%, 铅品位 50.05%, 铅回收率 97.90% 的银铅精矿; 铜品位 20.16%, 铜回收率 91.23%, 银品位 724.6 g/t, 银回收率 2.64% 的铜精矿, 实现了混合精矿中银铅与铜的高效回收。

关键词: 银; 脱药; 方铅矿; 黄铜矿; 环保

中图分类号: TD923 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2024)02-0069-06

Experimental study on the mineral processing of a high Ag-Pb-Cu mixed concentrate

LIN Hui¹, ZOU Jianjian^{2*}, WANG Chenghang¹, WANG Zhiping², LI Qiang²

(1. Jiangxi Dangping Tungsten Industry Co. Ltd., Dayu 341500, Jiangxi, China;

2. Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metals, Guangdong Provincial Key Laboratory Development and Comprehensive Utilization of Mineral Resources, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Ag-Pb-Cu mixed concentrate is a product of copper and lead floating and contains a silver grade of 4208.0 g/t, along with 3.3% of copper and 43.28% of lead. And 98.80% of silver is deposited in galena. The surface of the concentrate has been heavily contaminated with the flotation reagents, leading to a little difference in the floatability between galena and chalcopyrite. Consequently, separating chalcopyrite from galena is very difficult. In this experimental study, a combined process of removing the flotation reagents by activated carbon and flotating copper by the suppression of lead was adopted to treat the concentrate. By using a high-efficiency galena inhibitor (GYC) and chalcopyrite collector (SAC), an effective recovery of silver, lead and copper from the mixed concentrates was achieved. After the treatment of the mixed concentrate, the silver grade in obtained silver-lead concentrate was 4839.2 g/t with a recovery rate of 97.36% and the grade of lead was 50.05% with a recovery rate is 97.90%. In obtained copper concentrate, the silver grade was 724.6 g/t with a recovery rate of 2.64% and the copper grade was 20.16% with a recovery rate of 91.23%.

Key words: silver; drug removal; galena; chalcopyrite; environmental protection

银是传统贵金属, 随着科技的发展, 应用于 电子、通讯、航空航天、计算机等行业。铅是人类

收稿日期: 2022-04-13

基金项目: 云南省基础研究和应用基础研究重大项目(202302AO370002); 云南贵金属实验室有限公司开放课题(YPML-2023050277); 广东省科学院高端领军人才培养培养资助专项项目(2017GDASCX-0301)

第一作者: 林辉, 男, 工程师; 研究方向: 矿产资源综合利用研究; E-mail: 344732527@qq.com

*通信作者: 邹坚坚, 男, 硕士, 高级工程师; 研究方向: 选矿工艺研究; E-mail: zou19876557@126.com

较早利用的金属之一，在冶金、机械、化学、核工业等领域得到广泛应用。铜是电气、机械、化学等行业广泛应用的金属，消费量仅次于钢铁和铝^[1-3]。银铜铅均属于亲硫元素，在成矿过程中三者常常聚集在一起，形成高银的铅矿物和铜矿物，相对来说，银与铅的性质更相近，因此，方铅矿中银的含量普遍高于黄铜矿中银的含量，方铅矿通常是银的载体矿物，银的含量能达到上万克/吨，甚至更高，在铜铅锌矿床中，银通常优先赋存于硫化铅矿物，其次是硫化铜矿物，再次是硫化锌矿物和其他硫化矿，通过回收方铅矿即可实现银的回收^[4-6]。

本文对某高银铅铜混合精矿进行了试验研究，筛选出高效环保的铅抑制剂和高选择性铜捕收剂，实现载银方铅矿与黄铜矿分离，获得了银铅精矿和铜精矿。

1 试验部分

1.1 试样性质

高银铅铜混合精矿试样为江西某钨多金属矿在硫化矿选别作业产出的混合精矿，针对混合精矿进行了化学多元素分析、矿物定量检测、银赋存状态查定等性质研究，结果分别见表 1~3。由表 1 可知，试样中有价元素众多，最有价元素为银，含量高达 4208.0 g/t，其次为铅，含量达到 43.28%，铜含量为 3.39%，锌含量为 2.18%；由表 2 可知，试样中方铅矿含量最高，达到 49.265%，其次是磁黄铁矿，含量 25.160%，黄铜矿含量 9.287%，黄铁矿含量 8.180%，脉石矿物含量较少，基本为硫化矿物；由表 3 可知，方铅矿银含量达到 8439.3 g/t，银分配率达到 98.80%，表明银基本赋存于方铅矿，方铅矿是银的主要载体矿物，黄铜矿含银 329.2 g/t，银分配率仅 0.73%，赋存于黄铜矿中的银很少。

1.2 试验方案的确定

试样中的银绝大部分赋存在方铅矿，方铅矿作为银的最主要载体矿物，黄铜矿虽然也含有银，但含量较低，银的占比很少，实现铜铅分离，即实现银铅与铜分离。通过镜下鉴定发现，试样中的黄铜矿与方铅矿基本呈单体形式存在，黄铜矿解离度达到 95%以上，方铅矿解离度达到 90%以上，未解离的方铅矿主要与磁黄铁矿、黄铁矿连生，不影响铜铅分离。由于试样为铜铅混合浮选获得的样品，表面粘附有大量浮选药剂，导致黄铜矿与方铅矿可浮性差异进一步缩小，为恢复黄铜矿与方铅矿表面性质，首先，需对混合精矿进行脱药处理，再添加高

效的药剂抑制方铅矿，高选择性捕收剂浮选黄铜矿，从而实现载银方铅矿与黄铜矿分离，即银铅与铜分离。综合考虑矿石性质特点，拟定试验方案为“脱药-抑银铅浮铜”，见图 1。

1.3 试剂和设备

实验使用的试剂主要有活性炭、硫化钠、酯类捕收剂 SAC、Z200、ZA、组合铅抑制剂 GYC、重

表 1 试样化学多元素分析结果

Tab.1 Multi-elemental analysis results of the sample

元素	Cu	Pb	Zn	Ag	S	Fe
含量	3.39%	43.28%	2.18%	4208.0 g/t	24.91%	22.68%

表 2 试样矿物定量分析结果

Tab.2 The results of mineral quantitative analysis

矿物	含量%	矿物	含量%	矿物	含量%
方铅矿	49.265	石英	1.425	萤石	0.458
黄铜矿	9.287	钠长石	0.367	钙铁榴石	0.168
黄铁矿	8.180	斜长石	0.235	铁次透辉石	0.242
磁黄铁矿	25.160	钾长石	0.895	钙铁辉石	0.168
闪锌矿	3.180	白云母	0.128	其它	0.741
毒砂	0.017	伊利石	0.084	合计	100

表 3 试样银的平衡分布结果

Tab.3 The results of silver equilibrium distribution

矿物	矿物含量/%	银含量/(g/t)	分配率/%
方铅矿	49.265	8439.3	98.80
黄铜矿	9.287	329.2	0.73
磁黄铁矿	25.160	46.2	0.28
黄铁矿	8.180	57.8	0.11
闪锌矿	3.180	92.4	0.07
其他	4.928	10.6	0.01
合计	100	4208.0	100

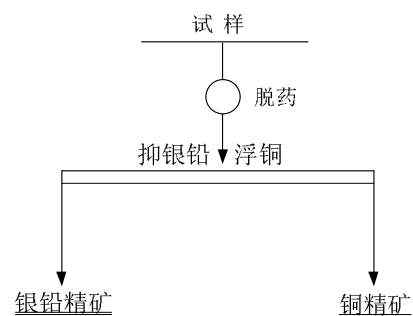


图 1 试验方案

Fig.1 The flow chart of testing program

铬酸钾、亚硫酸钠、羧甲基纤维素、水玻璃等^[7-8]。仪器设备主要有 XFD 浮选机、XMQ240×90 实验室球磨机、实验室烘箱等。

1.4 测定和计算

样品中的低含量银、铜、铅采用原子吸收法测定, 高含量银、铜、铅采用滴定法测定。回收率计算式为:

$$\frac{\text{精矿}(\text{产率} \times \text{品位})}{\text{精矿}(\text{产率} \times \text{品位}) + \text{中矿}(\text{产率} \times \text{品位}) + \text{尾矿}(\text{产率} \times \text{品位})}$$

2 结果与讨论

2.1 脱药的影响

分别开展了活性炭脱药与硫化钠脱药研究, 试验条件为脱药后的试样加入 GYC 作银铅抑制剂, 用量为 4000 g/t, SAC(以酯类为主的合成药剂, 兼有起泡性能)作捕收剂, 用量为 50 g/t, 结果见表 4。从表 4 可以看出, 随着脱药剂用量增加, 银铅与铜的分离效果得到明显改善, 采用活性炭脱药获得的铜粗精矿银和铅品位较低, 铜回收率较高, 适宜的活性炭用量为 4000 g/t 左右; 采用硫化钠脱药, 银铅粗精矿铜品位较高, 铜回收率较低, 表明硫化钠脱药, 对铜矿物具有较强的抑制效果, 不利于铜的回收。

2.2 银铅抑制剂的影响

根据银的赋存状态结果, 方铅矿是银的载体矿物, 试样中方铅矿矿物量达到 49.265%, 远超黄铜矿矿物量 9.287%, 根据抑多浮少的原则, 适宜采用抑银铅浮铜工艺。采用重铬酸钾、羧甲基纤维素+水玻璃+亚硫酸钠^[7-8]、组合抑制剂 GYC 作银铅抑

制剂进行研究。试验条件为用 4000 g/t 活性炭进行脱药, 脱药后的试样加入银铅抑制剂, 搅拌 3 min 后, 再加入 50 g/t SAC 作铜捕收剂, 结果列于表 5。从表 5 可以看出, 加入重铬酸钾、羧甲基纤维素+水玻璃+亚硫酸钠、GYC 三种银铅抑制剂, 对载银方铅矿均表现出较好的抑制效果, 相对来说重铬酸钾与 GYC 抑铅的效果较好, 考虑到重铬酸钾具有剧毒, 选择环保无毒的组合抑制剂 GYC 作为银铅抑制剂, 适宜用量为 4000 g/t。

2.3 捕收剂的影响

载银方铅矿的可浮性与黄铜矿相近, 浮选分离十分困难, 需要采用高选择性的捕收剂与黄铜矿表面作用, 提高铜铅分离效果。用 Z200、SAC(硫氨基酯类组合药剂)、ZA 等 3 种铜捕收剂进行对比试验研究^[9-10]。用 4000 g/t 活性炭进行脱药, 脱药后的试样加入 GYC 作银铅抑制剂, 用量为 4000 g/t, 搅拌 3 min 后, 再加入铜捕收剂, 试验结果见表 6。从表 6 可以看出, SAC 对黄铜矿表现出较好的选择性捕收效果, 同等药剂用量下, 获得的铜粗精矿品位和回收率均较高; Z200 对黄铜矿的选择性也较好, 获得的铜粗精矿品位也较高, 但是捕收能力较弱, 导致铜粗精矿回收率较低; ZA 对黄铜矿的捕收能力强, 获得的铜粗精矿回收率最高, 但是对载银方铅矿的捕收能力也很强, 选择性较差, 导致铜粗精矿品位较低。综合考虑铜粗精矿品位和回收率, 选择 SAC 作捕收剂, 用量为 50 g/t。

2.4 全工艺流程试验研究

通过详细的条件试验研究, 确定适宜的药剂条件后, 开展全流程试验研究, 流程见图 2, 结果列于表 7。

表 4 脱药试验结果

Tab.4 The results of removal of the flotation reagents

脱药剂	用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位			回收率/%		
				Ag/(g/t)	Pb/%	Cu/%	Ag	Pb	Cu
活性炭	2000	铜粗精矿	33.01	3605.2	39.26	9.67	28.29	29.94	94.83
		银铅粗精矿	66.99	4503.5	45.26	0.26	71.71	70.06	5.17
	3000	铜粗精矿	25.18	2892.3	30.91	12.71	17.30	18.01	94.06
		银铅粗精矿	74.82	4651.6	47.36	0.27	82.70	81.99	5.94
	4000	铜粗精矿	24.12	2065.8	21.91	13.15	11.84	12.22	93.72
		银铅粗精矿	75.88	4888.6	50.02	0.28	88.16	87.78	6.28
	5000	铜粗精矿	19.92	2165.8	24.51	15.45	10.26	11.28	91.22
		银铅粗精矿	80.08	4712.3	47.95	0.37	89.74	88.72	8.78

续表4 (Tab.4 continued)

脱药剂	用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位			回收率/%		
				Ag/(g/t)	Pb/%	Cu/%	Ag	Pb	Cu
硫化钠	4000	铜粗精矿	39.16	3358.9	36.26	8.05	31.25	32.81	93.84
		银铅粗精矿	60.84	4756.5	47.79	0.34	68.75	67.19	6.16
	6000	铜粗精矿	32.15	2961.2	31.26	9.55	22.61	23.21	90.77
		银铅粗精矿	67.85	4803.5	49.01	0.46	77.39	76.79	9.23
	8000	铜粗精矿	25.16	2426.2	27.18	11.57	14.49	15.79	85.68
		银铅粗精矿	74.84	4812.8	48.73	0.65	85.51	84.21	14.32
	10000	铜粗精矿	18.29	2165.3	25.16	14.62	9.42	10.63	79.19
		银铅粗精矿	81.71	4659.5	47.34	0.86	90.58	89.37	20.81

表5 银铅抑制剂试验结果

Tab.5 The results obtained with different silver-lead inhibitor dosages

抑制剂	用量 g/t	产品名称	产率/%	品位			回收率/%			
				Ag/(g/t)	Pb/%	Cu/%	Ag	Pb	Cu	
重铬酸钾	400	铜粗精矿	41.28	3715.2	38.95	7.86	36.40	37.17	95.51	
		银铅粗精矿	58.72	4562.5	46.29	0.26	63.60	62.83	4.49	
	600	铜粗精矿	32.16	2913.5	32.16	9.86	22.27	23.88	93.78	
		银铅粗精矿	67.84	4820.5	48.61	0.31	77.73	76.12	6.22	
	800	铜粗精矿	25.16	2651.5	28.56	12.49	15.86	16.61	92.71	
		银铅粗精矿	74.84	4729.5	48.19	0.33	84.14	83.39	7.29	
	1000	铜粗精矿	23.16	2495.6	26.92	13.46	13.73	14.39	91.64	
		银铅粗精矿	76.84	4726.8	48.26	0.37	86.27	85.61	8.36	
	羧甲基纤维素 +水玻璃 +亚硫酸钠	250+500+500	铜粗精矿	51.26	4968.5	51.56	6.37	60.47	61.12	96.81
			银铅粗精矿	48.74	3416.2	34.49	0.22	39.53	38.88	3.19
500+1000+1000		铜粗精矿	42.16	4659.8	48.55	7.71	46.70	47.29	95.90	
		银铅粗精矿	57.84	3876.2	39.45	0.24	53.30	52.71	4.10	
1000+2000+2000		铜粗精矿	34.16	3826.5	38.36	9.37	31.07	30.33	94.74	
		银铅粗精矿	65.84	4405.2	45.72	0.27	68.93	69.67	5.26	
1500+3000+3000		铜粗精矿	29.86	3165.3	31.79	10.61	22.43	21.94	93.58	
		银铅粗精矿	70.14	4659.5	48.16	0.31	77.57	78.06	6.42	
GYC		2000	铜粗精矿	35.91	3201.2	34.26	9.05	27.33	28.43	95.66
			银铅粗精矿	64.09	4768.9	48.32	0.23	72.67	71.57	4.34
	3000	铜粗精矿	31.19	2634.2	27.65	10.32	19.51	19.91	94.93	
		银铅粗精矿	68.81	4925.1	50.41	0.25	80.49	80.09	5.07	
	4000	铜粗精矿	24.12	2065.8	21.91	13.15	11.84	12.22	93.72	
		银铅粗精矿	75.88	4888.6	50.02	0.28	88.16	87.78	6.28	
	5000	铜粗精矿	22.87	1869.2	19.34	13.69	10.16	10.22	92.48	
		银铅粗精矿	77.13	4901.2	50.39	0.33	89.84	89.78	7.52	

表 6 捕收剂试验结果

Tab.6 Test results obtained with different collector dosages

捕收剂	用量/(g/t)	产品名称	产率/%	品位			回收率/%		
				Ag/(g/t)	Pb/%	Cu/%	Ag	Pb	Cu
SAC	30	铜粗精矿	15.95	1624.5	17.92	16.93	6.16	6.60	79.86
		银铅粗精矿	84.05	4696.8	48.12	0.81	93.84	93.40	20.14
	40	铜粗精矿	20.39	1935.2	19.35	14.83	9.38	9.12	89.20
		银铅粗精矿	79.61	4791.2	49.39	0.46	90.62	90.88	10.80
	50	铜粗精矿	24.12	2065.8	21.91	13.15	11.84	12.22	93.72
		银铅粗精矿	75.88	4888.6	50.02	0.28	88.16	87.78	6.28
60	铜粗精矿	29.83	2491.3	25.37	10.81	17.67	17.49	95.23	
	银铅粗精矿	70.17	4935.1	50.88	0.23	82.33	82.51	4.77	
Z200	30	铜粗精矿	16.35	1839.2	19.23	16.34	7.14	7.26	78.59
		银铅粗精矿	83.65	4672.2	48.01	0.87	92.86	92.74	21.41
	40	铜粗精矿	22.16	2163.9	23.16	13.13	11.40	11.86	85.77
		银铅粗精矿	77.84	4789.8	49.01	0.62	88.60	88.14	14.23
	50	铜粗精矿	27.16	2401.2	26.16	11.41	15.50	16.41	91.60
		银铅粗精矿	72.84	4881.2	49.69	0.39	84.50	83.59	8.40
60	铜粗精矿	32.16	2803.6	29.72	9.86	21.43	22.08	93.41	
	银铅粗精矿	67.84	4872.2	49.72	0.33	78.57	77.92	6.59	
ZA	30	铜粗精矿	18.10	2031.1	21.26	16.01	8.74	8.89	85.71
		银铅粗精矿	81.90	4690.2	48.15	0.59	91.26	91.11	14.29
	40	铜粗精矿	24.26	2316.2	24.83	12.71	13.35	13.91	91.67
		银铅粗精矿	75.74	4816.9	49.22	0.37	86.65	86.09	8.33
	50	铜粗精矿	29.68	2713.5	27.93	10.83	19.13	19.15	94.42
		银铅粗精矿	70.32	4840.1	49.76	0.27	80.87	80.85	5.58
60	铜粗精矿	35.28	3105.2	31.82	9.18	26.04	25.93	95.61	
	银铅粗精矿	64.72	4807.5	49.55	0.23	73.96	74.07	4.39	

药剂用量: g/t·原矿

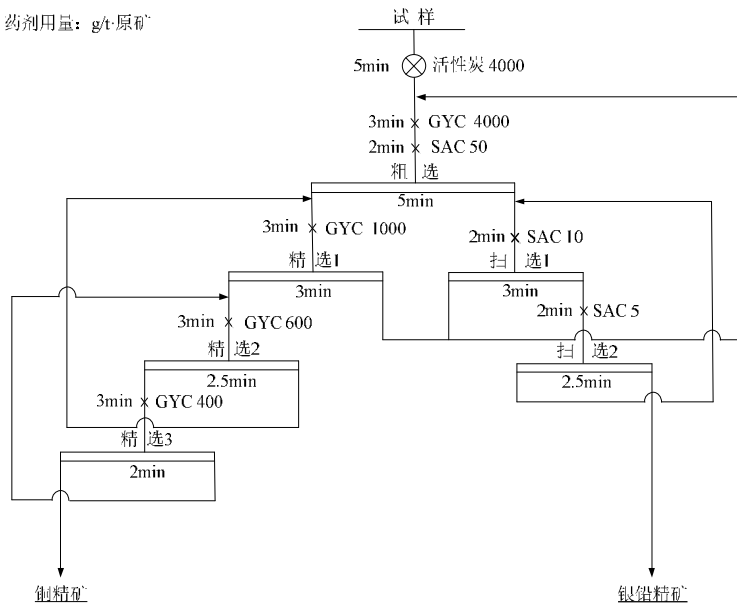


图 2 全流程试验流程图

Fig.2 The flow chart of the whole process test

表7 全流程试验结果

Tab.7 The results of the whole process test

产品	产率 /%	品位			回收率/%		
		Cu/%	Pb/%	Ag(g/t)	Cu	Pb	Ag
铜精矿	15.34	20.16	5.92	724.6	91.23	2.10	2.64
银铅精矿	84.66	0.35	50.05	4839.2	8.77	97.90	97.36
银铅铜 混合精矿	100	3.39	43.28	4208.0	100	100	100

由表7可见, 全流程试验可获得银铅精矿银品位4839.2 g/t, 铅品位50.05%, 银回收率97.36%, 铅回收率97.90%, 含铜0.35%; 铜精矿铜品位20.16%, 银品位724.6 g/t, 铜回收率91.23%, 银回收率2.64%, 含铅5.92%, 有效实现了载银方铅矿与黄铜矿浮选分离。

3 结论

1) 江西某高银铜铅混合精矿, 主要有价矿物为载银方铅矿和黄铜矿, 需通过脱药处理, 采用高效的抑制剂和高选择性的捕收剂实现铜铅分离。

2) 混合精矿采用活性炭脱药, 恢复矿物表面性质, 采用组合抑制剂 GYC 抑制载银方铅矿, 硫氨酯类药剂 SAC 捕收黄铜矿, 高效实现银铅与铜浮选分离, 获得银品位4839.2 g/t, 铅品位50.05%, 银回收率97.36%, 铅回收率97.90%, 含铜0.35%的银铅精矿; 铜品位20.16%, 银品位724.6 g/t, 铜回收率91.23%, 银回收率2.64%, 含铅5.92%的铜精矿。

3) 全流程采用“活性炭脱药-银铅与铜浮选分离”工艺, 实现了高银铜铅混合精矿中载银方铅矿与黄铜矿高效分离, 为高银铜铅混合精矿的高效利用提供了技术依据。

参考文献:

- [1] 吴良士, 白鸽, 袁忠信. 矿物与岩石[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
WU L S, BAI G, YUAN Z X. Minerals and rocks [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [2] 冯博, 朱贤文, 彭金秀, 等. 有色金属硫化矿中伴生金银资源回收研究进展[J]. 贵金属, 2016, 37(2): 70-76.
FENG B, ZHU X W, PENG J X, et al. Research progress in recovering associated gold and silver from non-ferrous metal sulfide ores[J]. Precious Metals, 2016, 37(2): 70-76.
- [3] 韩玉光, 方建军, 尧章伟. 硫化铅锌矿中伴生银回收研

究进展[J]. 贵金属, 2018, 39(1): 79-85.

- HAN Y G, FANG J J, YAO Z W. Research progress of associated silver recovery in lead-zinc sulphide ores[J]. Precious Metals, 2018, 9(1): 79-85.
- [4] 蒋万君, 王皓, 王珊, 等. 铜铅混合精矿浮选分离铜铅试验研究[J]. 金属矿山, 2020, 533(11): 100-105.
JIANG W J, WANG H, WANG S, et al. Experimental study on Cu-Pb separation of a copper-lead mixed concentrate by flotation[J]. Metal Mine, 2020, 533(11): 100-105.
- [5] 赵开乐, 顾幅华, 马超. 铜铅浮选分离无毒抑制剂机理研究及应用实践[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(3): 56-61.
ZHAO K L, GU G H, MA C. Study on the mechanism of nontoxic depressant in copper-lead flotation and its application[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(3): 56-61.
- [6] 郭芸杉, 朱艳芬, 刘遍洲, 等. 铜铅混合精矿铜铅分离抑制剂试验研究[J]. 云南冶金, 2022, 51(3): 61-67.
GUO Y S, ZHU Y F, LIU B Z, et al. Experimental study on inhibitor depressor for copper lead separation from copper-lead blended concentrate[J]. Yunnan Metallurgy, 2022, 51(3): 61-67.
- [7] 杨绍晶, 刘全军, 罗帅. 云南某含银铜铅混合精矿分离试验研究[J]. 贵金属, 2019, 40(2): 19-25.
YANG S J, LIU Q J, LUO S. Experimental study on separation of a silver-bearing Cu-Pb mixed concentrate in Yunnan[J]. Precious Metals, 2019, 40(2): 19-25.
- [8] 郎淳慧, 邢洪波, 韩治纬. 某铜铅混合精矿铜铅分离试验研究[J]. 黄金, 2015, 36(2): 69-72.
LANG C H, XING H B, HAN Z W. Experimental research on separation of copper and lead in mixed concentrates of copper and lead[J]. Gold, 2015, 36(2): 69-72.
- [9] 邹坚坚, 胡真, 王成行, 等. 富银铜锌多金属矿选矿试验研究[J]. 贵金属, 2022, 43(2): 63-68.
ZOU J J, HU Z, WANG C H, et al. Study on the mineral processing experiment of a silver-rich copper-zinc polymetallic ore[J]. Precious Metals, 2022, 43(2): 63-68.
- [10] 邹坚坚, 胡真, 王成行, 等. 高砷富银铋硫多金属精矿综合回收试验研究[J]. 贵金属, 2021, 42(4): 41-46.
ZOU J J, HU Z, WANG C H, et al. Study on the mineral processing experiment of a high As rich Ag-Bi-S polymetallic concentrate[J]. Precious Metals, 2021, 42(4): 41-46.