

云南某高硫铅锌矿浮选分离工艺研究

胡陈强¹, 郎召有², 高连启², 崔艳芳¹, 魏茜¹, 焦芬¹

- (1. 中南大学资源加工与工程学院, 湖南 长沙 410083;
2. 驰宏科技工程股份有限公司, 云南 曲靖 655000)

摘要: 对云南某高硫铅锌矿进行选矿实验研究。原矿铅品位 2.98%、锌品位 2.79%、银品位 114.95 g/t, 在磨矿细度为-0.074 mm 76.19% 条件下, 采用优先浮选工艺流程, 以硫酸锌+碳酸钠作为组合抑制剂, 以新型捕收剂 HQ-Pb 作为铅捕收剂, 最终获得铅品位 56.62%、银品位 1915.38 g/t 的铅精矿, 铅回收率 82.36%, 银回收率 73.44%; 获得锌品位 45.92%、银品位 171.38 g/t 的锌精矿, 锌回收率 82.29%, 银回收率 7.58%。

关键词: 铅锌分离; 优先浮选; 捕收剂

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.05.027

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 05-0159-06

我国铅锌矿资源十分丰富, 以硫化矿为主, 但贫矿多富矿少, 矿石类型复杂, 伴生成分多^[1-2]。高硫铅锌矿是一种常见的铅锌矿床类型, 在我国分布广泛, 工业生产中通常采用优先浮选的方法来分离铅锌, 并回收贵金属^[3-4], 但由于矿物共生复杂, 许多因素会对矿物分离产生影响, 产品分选往往达不到理想的效果。因此, 研究高效分选浮选药剂对于矿物分选十分重要。目前, 选择性好的绿色高效浮选捕收剂一直是选矿工作者们的研究热点, 常见的铅锌捕收剂有乙硫氮、丁铵黑药和丁黄药, 一些新型捕收剂有 BK906、BK90G、3418A 和 LW-01 等^[5-7]。本文以云南某高

硫铅锌矿为研究对象, 采用由硫代甲酸盐和羧酸酯组成的铅捕收剂 HQ-Pb 和由硫代磷酸盐和硫脲组成的锌捕收剂 HQ-Zn 进行浮选实验研究, 实验取得了良好的分选效果, 为铅锌分离浮选生产提供一定的参考依据。

1 矿石性质

矿石中的金属矿物主要为黄铁矿 (含少量白铁矿)、毒砂、雄黄、方铅矿、闪锌矿, 脉石矿物主要为高岭石、石英、绿泥石、绢云母等, 以及长石、菱铁矿、方解石等。矿石的多元素化学分析结果见表 1, 铅、锌化学物相分析结果见表 2。

表 1 主要化学成分分析/%
Table 1 Analysis of main chemical components

Cu	Zn	Pb	Fe	As	S	Au*	Ag*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	In*	K ₂ O
0.09	2.79	2.98	24.83	0.55	27.79	0.40	114.95	18.62	11.05	2.01	3.99	31.80	1.16

*单位为 g/t。

由表 1 可知, 矿石中最具回收价值的元素是 Pb 和 Zn, 含量分别为 Pb 2.98%、Zn 2.79%; 贵金属有 Ag、Au 和 In, 其中 S 含量高达 27.79%。在所有化学组分中含量最高, 矿石属于高硫矿石;

Fe 含量高达 24.83%, 排名第二。

由表 2 可知, 铅主要赋存于硫化物方铅矿中, 约占总铅的 79.86%; 其次为铅矾等硫酸铅, 约占总铅的 5.49%; 白铅矿等碳酸铅约占 9.82%;

收稿日期: 2020-10-12

基金项目: 浮选体系硫砷硫化物电极过程动力学研究 (51974364)

作者简介: 胡陈强 (1995-), 男, 硕士, 主要研究方向为硫化矿浮选药剂与工艺。

铅铁矾约占总铅的 4.83%。按可以回收的方铅矿算, 铅的理论最大回收率为 79.86%。锌主要以硫化锌的形式存在, 约占总锌的 86.11%; 其次为锌铁尖晶石等难溶锌, 约占总锌的 6.50%; 再次为硫

酸锌和砷酸锌, 分别约占总锌的 5.77%; 氧化锌的含量和占比都较低, 按可以回收的闪锌矿来算, 锌的理论最大回收率为 86.11%。

表 2 原矿铅物相和锌物相结果
Table 2 Results of lead phase and zinc phase of raw ore

名称	硫酸铅中的铅	白铅矿中的铅	方铅矿中的铅	铅铁矾及其他	总铅
含量/%	0.16	0.29	2.39	0.14	2.98
分布率/%	5.49	9.82	79.86	4.83	100.00

名称	硫化锌	氧化锌	硫酸锌和砷酸锌中的锌	硅酸盐及锌铁尖晶石中的锌	总锌
含量/%	2.400	0.045	0.162	0.180	2.790
分布率/%	86.11	1.62	5.77	6.50	100.00

2 实验方法

高硫铅锌矿浮选流程主要有优先浮选、混合-优先浮选、部分混合浮选、等可浮浮选等^[2,8]。根据矿石性质, 结合现场实际生产和前期方案探索实验结果, 考虑到优先浮选流程简单, 且精矿产品中的互含低等优点, 本文采用优先浮选的原则流程, 按铅、锌顺序优先浮选, 其中铅两次粗选, 分段抑制黄铁矿, 合并粗精矿进行三次精选, 锌一次粗选三次精选。

3 结果与讨论

3.1 磨矿细度实验

铅锌优先浮选磨矿细度实验流程见图 1, 实验结果见图 2。

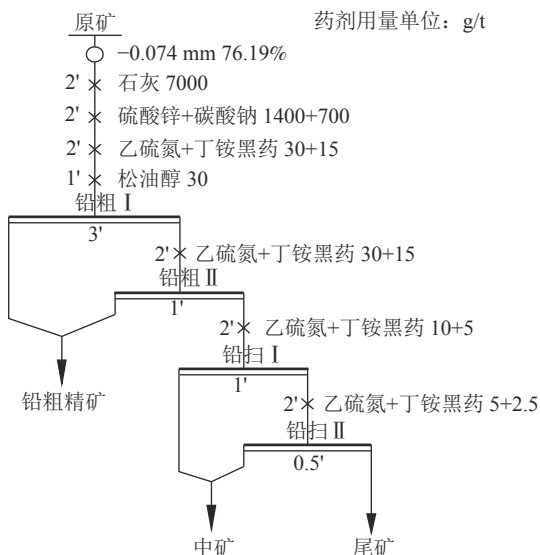


图 1 磨矿细度实验流程
Fig.1 Test process of grinding fineness

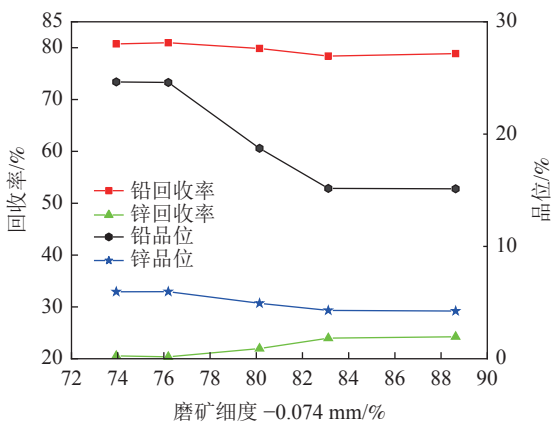


图 2 磨矿细度实验结果
Fig.2 Test results of grinding fineness

由图 2 可知, 随着磨矿细度的增加, 铅粗精矿中铅回收率和品位先逐渐下降, 后基本保持不变, 锌回收率逐渐上升, 锌品位逐渐下降。由于铅粗精矿中铅回收率和含锌量差别较小, 确定磨矿细度为-0.074 mm 76.19%。

3.2 铅粗选条件实验

3.2.1 铅粗选石灰用量

按图 1 流程, 磨矿细度为-0.074 mm 76.19%, 考查铅粗选石灰用量, 结果见图 3。随着石灰用量的增加, 矿浆碱性逐渐增强, 对黄铁矿的抑制作用增强, 硫回收率逐渐下降, 铅回收率基本不变, 硫品位逐渐下降, 铅品位逐渐上升。石灰用量从 7000 g/t 增加到 9000 g/t, 效果不大, 因此选择石灰用量为 7000 g/t。

3.2.2 铅粗选捕收剂种类和比例

在磨矿细度为-0.074 mm 76.19%, 石灰用量为 7000 g/t, 锌抑制剂为硫酸锌+碳酸钠 (1400+700) g/t 的条件下, 考查铅捕收剂种类。由图 4 可

知, 分别采用乙硫氮+丁铵黑药 (40+20) g/t、HQ-Pb+丁铵黑药 (40+20) g/t、乙黄药+丁铵黑药 (40+20) g/t、乙黄药+乙硫氮+丁铵黑药 (20+20+20) g/t 为铅捕收剂时, 铅粗精矿中铅回收率分别为 80.14%、83.60%、40.54%、81.77%, 锌回收率分别为 20.69%、22.36%、9.99%、24.69%。由于乙黄药捕收能力较弱, 乙黄药+丁铵黑药作为铅捕收剂时, 铅粗精矿中铅、锌回收率极低。相比之下, 使用 HQ-Pb+丁铵黑药作为铅捕收剂时, 铅回收率最高, 捕收能力较好。结合浮选现象, 使用 HQ-Pb+丁铵黑药时, 铅上浮速度明显加快, 含硫量低。

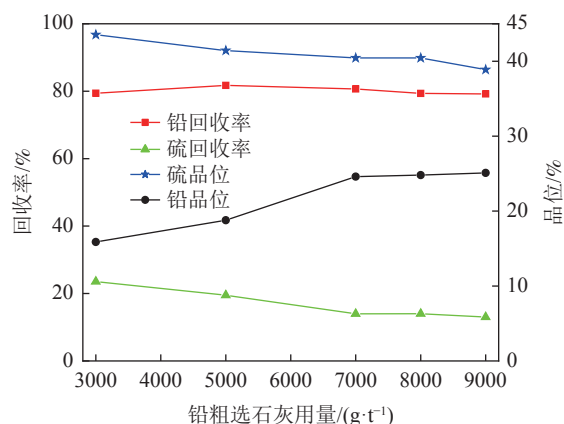


图3 铅粗选石灰用量实验结果

Fig.3 Test results of lime dosage for rough selection of lead

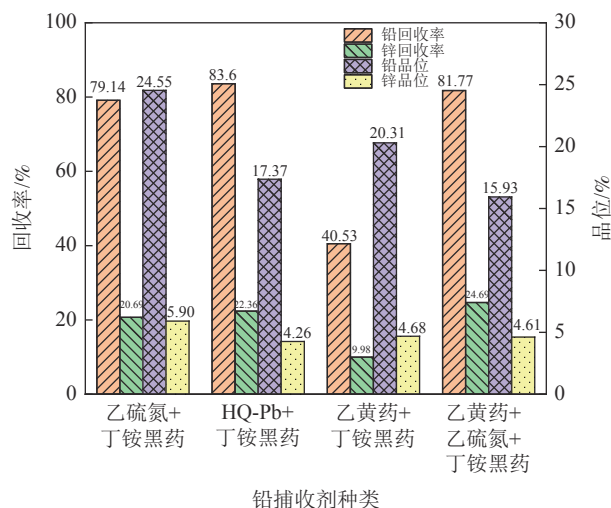


图4 铅捕收剂种类实验结果

Fig.4 Test results of lead collector types

固定铅捕收剂用量为 30 g/t, 考查铅捕收剂中 HQ-Pb 和丁铵黑药的比例。由图 5 可知, 当 HQ-Pb 占比分别为 33%、50%、67%、100% 时, 铅粗精矿中铅回收率分别为 77.61%、80.12%、82.36%、

79.63%, 铅粗精矿中锌回收率分别为 18.23%、19.58%、17.44%、16.81%。随着捕收剂中 HQ-Pb 占比增加, 铅、锌回收率先增大后减小, 铅品位略微上升, 表现出 HQ-Pb 对铅良好的捕收能力。当铅捕收剂剂为中 HQ-Pb 占比 67% 时, 铅粗精矿中铅回收率较高、含锌较低, 故确定 HQ-Pb:丁铵黑药比例为 2:1。

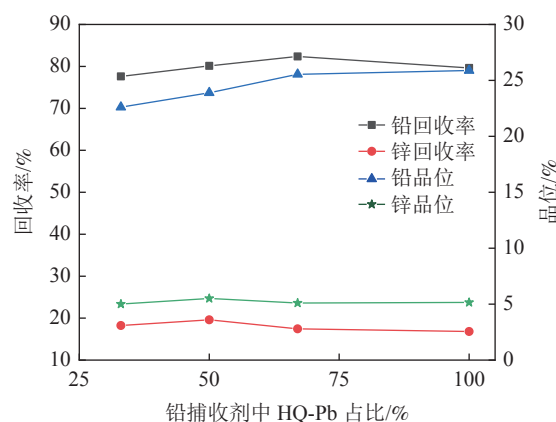


图5 铅捕收剂中 HQ-Pb 占比实验结果

Fig.5 Test results of the proportion of HQ-Pb in lead collectors

3.2.3 铅粗选捕收剂用量实验

其他条件不变, 考查铅捕收剂 HQ-Pb+丁铵黑药用量。由图 6 可知, 随着 HQ-Pb+丁铵黑药用量的下降, 粗精矿产率呈下降趋势, 铅粗精矿中铅回收率基本持平, 而锌回收率明显下降。当 HQ-Pb+丁铵黑药总用量为 30 g/t 时, 铅粗精矿中铅回收率较高、含锌较低。因此, 确定 HQ-Pb+丁铵黑药总用量为 30 g/t。

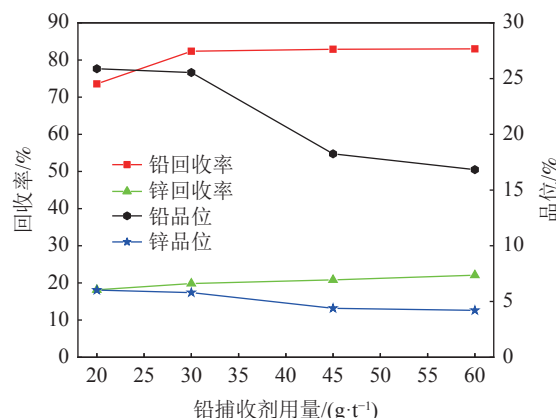


图6 铅捕收剂用量实验结果

Fig.6 Test results of lead collector dosage

3.2.4 铅粗选锌抑制剂比例和用量实验

参考现场生产的药剂制度和相关文献^[9], 采用

硫酸锌+碳酸钠 (2:1)、硫酸锌+碳酸钠 (1:1)、硫酸锌+亚硫酸钠 (2:1)、硫酸锌作为锌抑制剂, 用量均为 2100 g/t 时, 实验结果见图 7, 铅粗精矿中铅回收率分别为 82.70%、82.76%、80.43%、80.48%, 铅粗精矿中锌回收率分别为 20.51%、24.17%、23.22%、24.48%。当抑制剂为硫酸锌与碳酸钠组合, 比例为 2:1 时, 铅粗精矿中铅回收率较高、含锌较低, 表现出较好的抑制作用, 选择该组合抑制剂作为最终锌抑制剂。

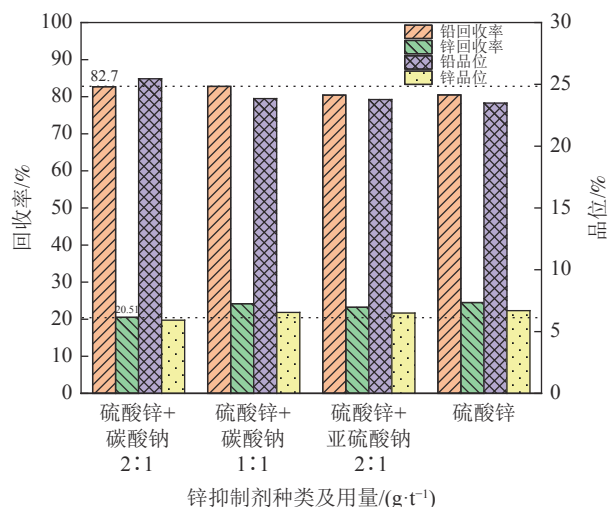


图 7 锌抑制剂种类实验结果

Fig.7 Test results of zinc inhibitor types

其他条件不变, 考查锌抑制剂硫酸锌+碳酸钠 (比例为 2:1) 用量。由图 8 可知, 随着硫酸锌+碳酸钠总用量的增加, 铅粗精矿中锌回收率和锌品位逐渐下降, 铅回收率略有下降, 铅品位逐渐上升, 综合考虑选择硫酸锌+碳酸钠总用量为 2100 g/t。

3.3 锌粗选条件实验

3.3.1 锌粗选活化剂用量实验

锌粗选需添加硫酸铜活化被抑制的闪锌矿。为提高锌精矿质量, 仍需添加石灰抑制黄铁矿。通过实验确定锌粗选石灰用量为 1000 g/t, 在此条件下考查锌硫酸铜用量。由图 9 可知, 随着硫酸铜用量的增加, 锌粗精矿中锌品位逐渐下降, 锌回收率逐渐增高, 当硫酸铜用量高于 500 g/t 时, 锌回收率基本保持不变。因此选择硫酸铜用量 500 g/t。

3.3.2 锌粗捕收剂用量实验

相对于乙硫氮、丁铵黑药和丁黄药, 新型锌捕收剂 HQ-Zn 具有选择性好、上浮速度快等优

点, 因此选锌部分使用 HQ-Zn 作为捕收剂, 并考查其用量。由图 10 可知, 随着捕收剂用量的上升, 锌回收率和品位先增加后降低再增加, 当捕收剂用量达到 60 g/t 后捕收作用相当, 回收率和品位相差不大, 为降低药剂成本, 最终选择锌捕收剂 HQ-Zn 用量为 60 g/t。

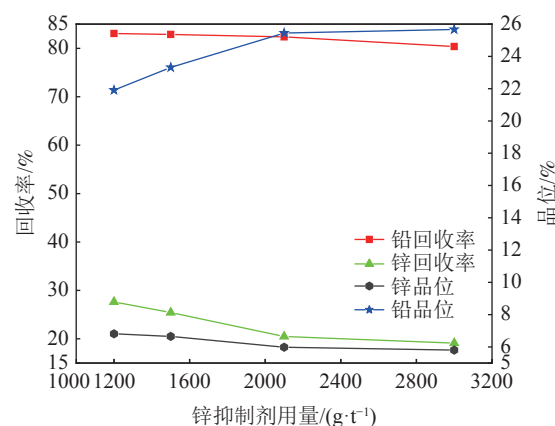


图 8 锌抑制剂用量实验结果

Fig.8 Test results of zinc inhibitor dosage

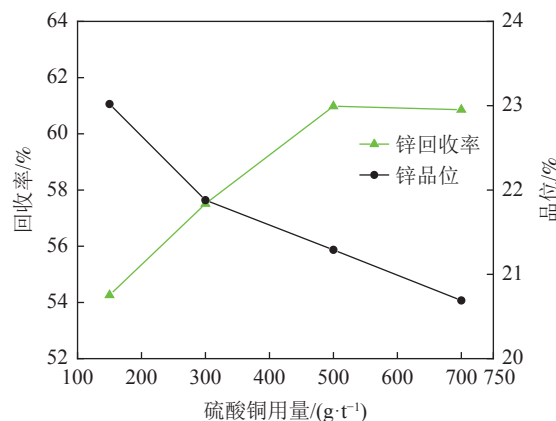


图 9 硫酸铜用量实验结果

Fig.9 Test results of copper sulfate dosage

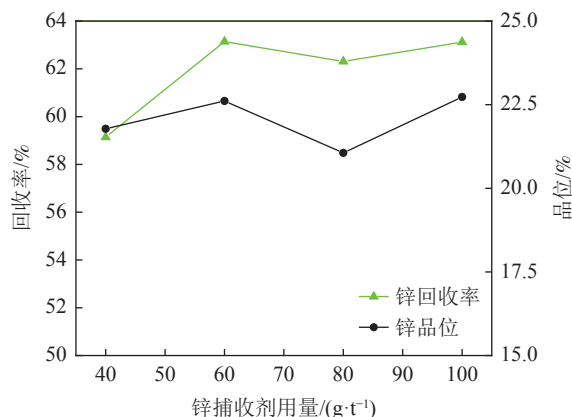


图 10 锌捕收剂用量实验结果

Fig.10 Test results of zinc collector dosage

3.4 全流程实验

根据前述条件，进行全流程开路实验，流程见 图 11，结果见 表 3。在开路实验结果的基础上

进行优化药剂制度，采用中矿依次返回上段作业，进行闭路实验，结果见 表 4。

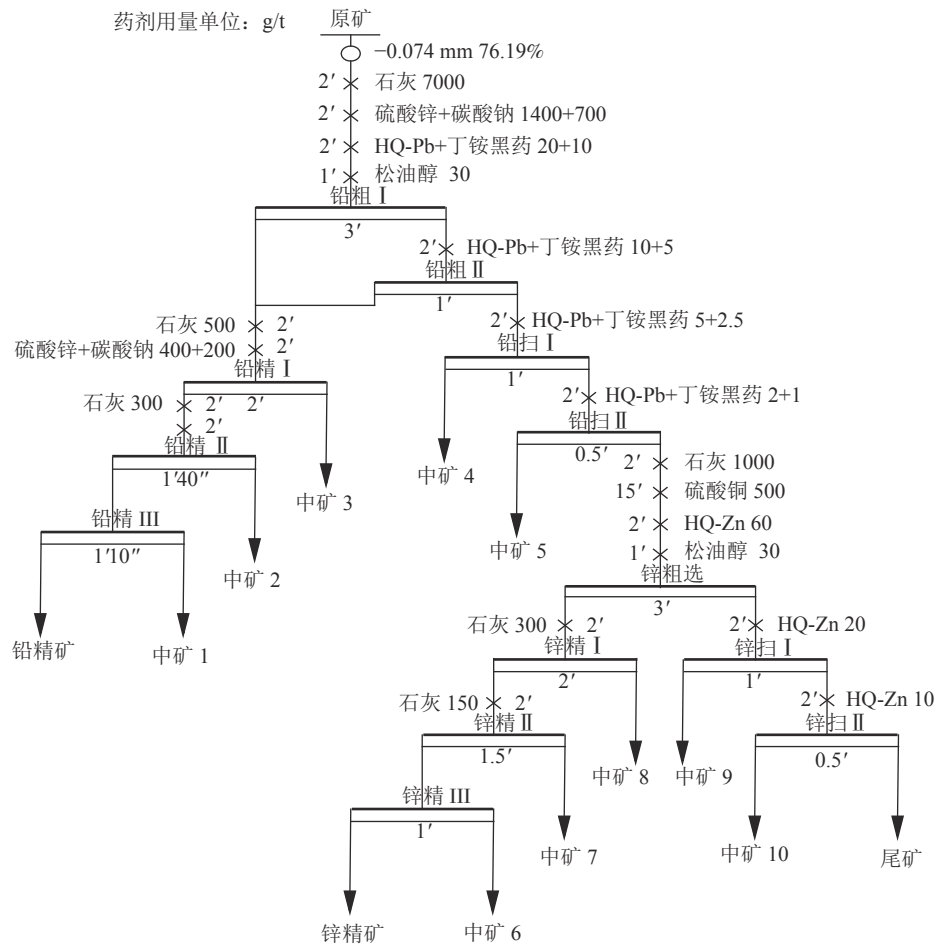


图 11 开路实验流程
Fig.11 Open circuit experiment flow chart

表 3 开路实验结果
Table 3 Open circuit test results

产品	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Pb	Zn	Pb	Zn
铅精矿	3.11	59.32	2.66	62.38	2.93
锌精矿	3.08	1.65	46.70	1.72	50.80
中矿 1	0.93	24.72	3.36	7.80	1.11
中矿 2	1.47	13.29	9.42	6.61	4.91
中矿 3	5.54	2.13	7.21	3.99	14.12
中矿 4	2.16	3.87	5.98	2.83	4.57
中矿 5	0.88	2.98	5.42	0.88	1.68
中矿 6	0.71	2.43	14.39	0.58	3.59
中矿 7	0.95	1.82	7.89	0.59	2.66
中矿 8	3.36	1.08	3.98	1.23	4.73
中矿 9	1.22	1.02	2.91	0.42	1.26
中矿 10	0.56	1.01	1.48	0.19	0.29
尾矿	76.02	0.42	0.27	10.79	7.35
给矿	100.00	2.96	2.83	100.00	100.00

表 4 闭路实验结果
Table 4 Closed circuit test results

产品	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Ag*	Pb	Zn	Ag	Pb	Zn
铅精矿	4.38	1915.38	56.62	3.34	73.44	82.36	5.19
锌精矿	5.05	171.38	1.72	45.92	7.58	2.89	82.29
尾矿	90.57	23.83	0.49	0.39	18.98	14.75	12.52
原矿	100.00	114.13	3.01	2.82	100.00	100.00	100.00

*单位为g/t。

由表 3 可知, 该开路实验获得了铅品位为 59.32% 的铅精矿, 铅回收率为 62.38%, 获得了锌品位为 46.7% 的锌精矿, 锌回收率为 50.8%。

由表 4 可知, 该闭路实验获得铅品位 56.62%、银品位 1915.38 g/t 的铅精矿, 铅回收率 82.36%, 银回收率 73.44%; 获得锌品位 45.92%、银品位 171.38 g/t 的锌精矿, 锌回收率 82.29%, 银回收率 7.58%。

4 结 论

(1) 矿石中最具回收价值的元素是 Pb 和 Zn, 含量分别为 Pb 2.98%、Zn 2.79%; 可综合回收的元素贵有 Ag、Au、In, 其中 S 含量高达 27.79%。

(2) 采用新型铅捕收剂 HQ-Pb 和锌捕收剂 HQ-Zn, 闭路实验获得铅品位为 55.93%、银品位 1934.92 g/t 的铅精矿, 铅回收率 85.20%, 银回收率 77.71%; 获得锌品位为 48.93%、银品位 165.32 g/t 的锌精矿, 锌回收率 82.37%, 银回收率 6.80%。实验效果较好。

参考文献:

- [1] 温 凯, 陈建华. 某含银复杂铜铅锌多金属硫化矿浮选试验[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):28-32.
- WEN K, CHEN J H. Experimental study on flotation of copper, lead and zinc polymetallic sulfide ore containing silver[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):28-32.
- [2] 肖 炜, 田小松. 云南迪庆铜铅锌硫化矿浮选分离研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(1):65-70.
- XIAO W, TIAN X S. Study on flotation separation of copper-lead-zinc sulfide ore in Diqing Yunnan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(1):65-70.
- [3] 何云广. 某含银铜铅锌多金属硫化矿选矿工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2016(5):47-52.

HE Y G. Study on the beneficiation process of a silver-indium-lead-zinc polymetallic sulfide ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(5):47-52.

[4] 张松, 王宇, 陈婷. 铅锌矿伴生金、银、铜、锗和镓综合利用回收综述[J]. *贵金属*, 2019, 40(S1):111-114.

ZHANG S, WANG Y, CHEN T. Overview of the comprehensive recovery and utilization of gold, silver, indium, germanium and gallium associated with lead-zinc mines[J]. *Precious Metals*, 2019, 40(S1):111-114.

[5] 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 J, TAN X, WANG Z M, et al. Experimental research on beneficiation of a lead-zinc-silver polymetallic ore in Shanxi[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(1):44-48.

[6] 王洋, 赵彦杰, 范松, 等. BK906 及 MB 在铅锌矿浮选生产中的应用[J]. *矿冶*, 2019, 28(4):65-69.

WANG Y, ZHAO Y J, FAN S, et al. Application of BK906 and MB in the flotation production of lead-zinc ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 2019, 28(4):65-69.

[7] 温凯, 陈建华. 云南某含银低品位硫化铅锌矿浮选试验[J]. *金属矿山*, 2019(4):71-75.

WEN K, CHEN J H. Flotation test of a low-grade lead-zinc sulfide ore containing gold and silver in Yunnan[J]. *Metal Mine*, 2019(4):71-75.

[8] 唐平宇, 田江涛, 金之易, 等. 河北某低品位铅锌矿选矿工艺试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(2):32-36.

TANG P Y, TIAN J T, JIN Z Y, et al. Research on beneficiation technology of a low-grade lead-zinc ore in Hebei[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(2):32-36.

[9] 陈启如, 孙广周, 黄斌, 等. 云南某地硫化铅锌矿优先浮选分离试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(4):62-66.

CHEN Q R, SUN G Z, HUANG B, et al. Experimental study on preferential flotation separation of lead-zinc sulfide ore in a certain area of Yunnan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(4):62-66.

(下转第 185 页)