

青海某多金属矿综合利用回收工艺研究^①

梁溢强^{1,2,3}, 张宇⁴, 徐安勋^{1,2,3}, 洪梦婷^{1,2,3}

(1.昆明冶金研究院有限公司, 云南 昆明 650031; 2.云南省选冶新技术重点实验室, 云南 昆明 650031; 3.有色金属强化冶金新技术全国重点实验室, 云南 昆明 650031; 4.青海鸿鑫矿业有限公司, 青海 格尔木 850099)

摘要: 青海某多金属硫化矿铅品位 1.45%, 锌品位 2.64%, 伴生有铜、硫、铁及稀贵金属金和银。采用化学多元素分析、物相分析、MLA 分析等手段对该矿进行细致的工艺矿物学分析, 并在此基础上开展系统的条件试验后进行闭路试验。针对一般硫化铅锌矿选矿需要全流程添加石灰、不利于铜金银综合利用回收的问题, 开发了自然 pH 值下优先选铅、选铅尾矿抑硫浮锌、选锌尾矿脱硫后再选铁的工艺流程, 综合利用矿石中的有价元素。结果表明, 将矿石细磨至 -0.074 mm 粒级占 70%, 通过铜铅浮选-铅铜尾矿选锌-锌尾矿选硫-硫尾矿选铁的浮选磁选联合流程, 能综合回收矿石中的有价元素, 其中铅精矿铅品位 60.12%、铅回收率 94.72%, 锌精矿锌品位 46.99%、锌回收率 88.26%, 铁精矿铁品位 67.22%、铁回收率 9.33%。

关键词: 多金属硫化矿; 铜铅混合浮选; 磁选; 粗精矿再磨; 硫化铅锌矿; 铅精矿; 锌精矿

中图分类号: TD95; TD923

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.05.014

文章编号: 0253-6099(2025)05-0082-06

Comprehensive Utilization and Recovery of Polymetallic Ore in Qinghai

LIANG Yiqiang^{1,2,3}, ZHANG Yu⁴, XU Anxun^{1,2,3}, HONG Mengting^{1,2,3}

(1. Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming 650031, Yunnan, China; 2. Yunnan Key Laboratory of New Technologies for Mineral Processing and Metallurgy, Kunming 650031, Yunnan, China; 3. State Key Laboratory of New Technologies for Enhanced Metallurgy of Nonferrous Metals, Kunming 650031, Yunnan, China; 4. Qinghai Hongxin Mining Co., Ltd., Golmud 850099, Qinghai, China)

Abstract: A polymetallic sulfide ore in Qinghai assays 1.45% lead and 2.64% zinc, and is associated with copper, sulfur, iron, plus rare and precious metals (gold and silver). Process mineralogy of the ore was studied by multi-elemental analysis, phase analysis, and MLA (Mineral Liberation Analyzer) analysis. A closed-circuit test was performed after condition tests on this basis. In the general mineral processing of lead-zinc sulfide ores, lime is added through the whole flow, which is not conducive to comprehensive utilization and recovery of copper, gold and silver. Aiming at this problem, a processing concept was proposed for comprehensive utilization of the valuable elements therein, which consists of preferential flotation of lead under natural pH value, zinc flotation by inhibiting sulfur from the obtained lead flotation tailings, and finally iron recovery after sulfur removal of the tailings from the previous step. Results show that with the polymetallic sulfide ore ground to a fineness of -0.074 mm 70%, the valuable elements therein can be recovered for comprehensive utilization by adopting a combined flotation and magnetic separation process, consisting of copper-lead flotation, zinc recovery from the obtained copper-lead flotation tailings, sulfur recovery from the obtained zinc flotation tailings, and finally iron separation from the obtained tailings. It is shown that the lead concentrate grading 60.12% at recovery of 94.72%, zinc concentrate grading 46.99% Zn at recovery of 88.26% and iron concentrate grading 67.22% Fe at recovery of 9.33% are produced.

Key words: polymetallic sulfide ore; copper-lead bulk flotation; magnetic separation; regrinding of roughing concentrate; lead-zinc sulfide ore; lead concentrate; zinc concentrate

① 收稿日期: 2025-03-20

基金项目: 云南省重大科技专项计划(202302AB080012)

作者简介: 梁溢强(1982—), 男, 广东佛山人, 正高级工程师, 主要从事多金属复杂矿物绿色分离工艺研究。E-mail: 644783704@qq.com

通信作者: 张宇(1971—), 男, 云南宣威人, 高级工程师, 主要从事选矿生产工艺技术研究。E-mail: 1141723964@qq.com

铅、锌矿物在自然界中通常共生在一起^[1-2]。铅、锌矿物物理化学性质相似,且与石英、长石等脉石矿物致密共生,选矿过程中需要开发高效的分离工艺,对铅、锌矿物进行提质降杂^[3-4]。近年来,随着经济不断发展,工业上对铅锌的需求大幅增长,导致国内易选矿石日渐减少。工业上通常将铅锌品位低于3%的铅锌矿石视为低品位矿石,该类矿石通常含有银、铜、铁等,这些元素的含量和分布对后续的金属冶炼工艺影响巨大,为此需要对伴生金属进行不同方式的分离并加以回收。

工业上铅锌矿石的综合利用主要采用优先浮选、混合浮选、等可浮选和异步浮选等工艺流程^[5-7]。传统铅锌选矿普遍采用“强压强拉”浮选工艺进行优先浮选分离,该工艺虽具有适应性强、生产管理简便等优点,但存在药剂种类繁多、降解周期长、药剂用量大等问题,导致生产回水中重金属离子和化学药剂残留严重,处理难度大,对环境造成多重负面影响^[8-10]。本文立足于复杂铅锌矿资源特点,致力于研发绿色高效回收关键技术,对青海某多金属矿进行了综合利用回收工艺研究。

1 原矿性质

青海某多金属矿主要化学多元素分析结果见表1,铅、锌、铜、铁化学物相分析结果见表2。

表1 矿样主要化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of raw ore %

Zn	Pb	S	Fe	Cu	Au ¹⁾	Ag ¹⁾
2.64	1.45	3.94	26.81	0.045	0.10	10.8
SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	As	Ge ¹⁾	In ¹⁾
31.25	1.99	0.39	11.70	0.082	10.3	55.3

1) 单位为 g/t。

矿样为铅锌多金属硫化矿,主要有价元素为铅、锌、铁,伴生有金、银、铜、钨等。经偏光显微镜下观察、X射线衍射分析、MLA分析,查明矿石中存在硫化物、氧化物、硅酸盐、硫酸盐、磷酸盐等5类共23种矿物,主要有方铅矿、铁闪锌矿、磁铁矿、黄铁矿/白铁矿、磁黄铁矿、黑柱石、钙铁辉石、铁滑石、石英、方解石等。

方铅矿嵌布粒度0.001~1.37 mm,集合体呈粒状、致密块状,多与铁闪锌矿、磁铁矿、黄铁矿共生关系密切,多为连生或相互包裹,其中,部分方铅矿与磁铁矿共生关系尤为复杂,这部分方铅矿呈细粒状包裹于磁铁矿中,不易单体解离。方铅矿的自由表面积比例为86.50%。

表2 原矿主要物相分析结果

Table 2 Phase analysis of raw ore

元素	物相	质量分数/%	占有率/%
铅	铅矾	<0.005	<0.35
	白铅矿	0.10	6.95
	方铅矿	1.29	89.65
	铅铁矾及其他	0.044	3.05
	合计	1.44	100.00
锌	硫酸锌	0.007 8	0.29
	氧化锌	0.08	2.96
	硫化物	2.58	95.49
	锌铁尖晶石及其他	0.034	1.26
	合计	2.70	100.00
铜	游离氧化铜	0.001	2.33
	结合氧化铜	0.001	2.33
	次生硫化铜	0.024	55.81
	原生硫化铜	0.017	39.53
	合计	0.043	100.00
铁	磁铁矿	3.57	13.15
	磁黄铁矿	1.52	5.62
	菱铁矿等碳酸盐	5.38	19.84
	硅酸铁	14.00	51.62
	黄铁矿等硫化物	1.94	7.15
	赤铁矿及其他	0.71	2.62
	合计	27.12	100.00

铁闪锌矿嵌布粒度0.005~4.75 mm,呈它形粒状,多分布于黑柱石、钙铁辉石等透明矿物之间,部分包裹于黑柱石、钙铁辉石中,与方铅矿、磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿均有部分连生或包裹,其中,部分方铅矿、磁铁矿、黄铜矿呈细粒状或乳浊状包裹于铁闪锌矿中,可能会部分进入锌精矿中,影响锌精矿品级。铁闪锌矿的自由表面积比例为93.89%。

黄铜矿嵌布粒度0.001~1.00 mm,呈它形粒状,多与铁闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿连生,部分呈细粒状、乳浊状包裹于铁闪锌矿中;少数呈星点状分布于透明矿物之间。

磁黄铁矿嵌布粒度0.005~0.55 mm,呈它形粒状,多与黄铁矿、白铁矿、磁铁矿、铁闪锌矿、方铅矿镶嵌连生;部分被白铁矿、磁铁矿交代,与其相间分布或混杂分布。磁黄铁矿的自由表面积比例为92.54%。

黄铁矿/白铁矿嵌布粒度0.005~6.00 mm,多呈自形-半自形-它形粒状,多呈散浸染状分布于黑柱石、钙铁辉石等透明矿物之间;多与铁闪锌矿、磁黄铁矿、方铅矿等连生;黄铁矿部分被白铁矿、磁铁矿交代,与其混杂分别。黄铁矿的自由表面积比例为91.18%。

磁铁矿嵌布粒度0.005~1.25 mm,呈它形粒状,多与赤铁矿、方铅矿、铁闪锌矿、黄铁矿共生关系密切,部分充填于针状、板状赤铁矿晶粒之间,部分与方铅矿镶

嵌连生或相互包裹、部分与铁闪锌矿和黄铁矿简单连生;少量磁铁矿被赤铁矿交代、少量磁铁矿交代黄铁矿。磁铁矿的自由表面积比例为 85.34%。

2 选矿试验研究

2.1 选矿方法

矿石中铅的载体矿物仅方铅矿、锌的载体矿物仅铁闪锌矿,均为独立硫化矿物,有利于浮选独立回收。铁闪锌矿中 Fe 仅通过物理选矿方法无法去除,因此,锌精矿的品级上限属 VI 级品。矿石中大部分铁闪锌矿中包裹细粒状、乳浊状黄铜矿,磨矿难以将其解离,可能会进入锌精矿中,影响锌精矿品级。部分方铅矿与铁闪锌矿共生关系紧密,可能导致铁闪锌矿随方铅矿一起进入铅精矿中,影响铅精矿品级。矿石中铁的载体矿物种类较多,其中仅磁铁矿为铁的有用矿物。结合各矿物的表面特性和磁性,采用先浮选后磁选的联合工艺流程。细粒级方铅矿多包裹于磁铁矿中,可采用选择性强的捕收剂将其预先富集到粗精矿后再磨,既可防止原矿细磨成本过高,也可降低目的矿物过磨。由于矿石中可回收的矿物种类多样,试验的难点在于如何充分高效回收各种矿物及获得高品质的精矿。由于原矿铜含量极低,直接优先浮选经济性不高,初步拟定铜铅混合浮选-锌浮选-硫浮选-铁磁选的原则流程,如图 1 所示。

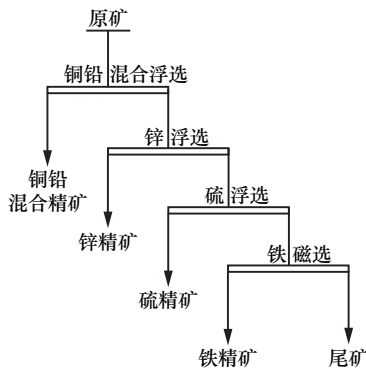


图 1 试验原则流程

Fig. 1 Testing principle flowchart

2.2 铜铅捕收剂种类试验

浮选机搅拌速度 2 000 r/min、浮选机充气量 0.4 m³/h,给矿磨矿细度-0.074 mm 粒级占 60%、浮选矿浆浓度(质量分数)30%、自然 pH 值条件下,进行了铜铅捕收剂种类对比试验,试验流程见图 2,结果见表 3。其中 Pa 为改性黑药(由青海鸿鑫矿业有限公司提供),Pb-1、F5B、GTB-1 均为昆明冶金研究院有限公司合成的药剂。5 种捕收剂在自然 pH 值下基本不捕收硫铁矿。单独采用 Pa 为铜铅捕收剂时,粗精矿铅品

位高、铅铜回收率低;Pb-1 与 F5B 组合,尾矿铅损失率低,但铜损失率高达 52.54%;25#黑药与 GTB-1 组合,粗精矿铅和铜回收率高。为了综合回收铜铅矿物,选择 25#黑药与 GTB-1 组合作为铜铅捕收剂。25#黑药与 GTB-1 均具有较好的选择性,以它们为捕收剂,既强化了铜铅矿物的回收、提升了铜铅回收率,也能有效降低磁黄铁矿、黄铁矿和铁闪锌矿的捕收,降低后续精选抑制剂的用量,提升精矿品质。

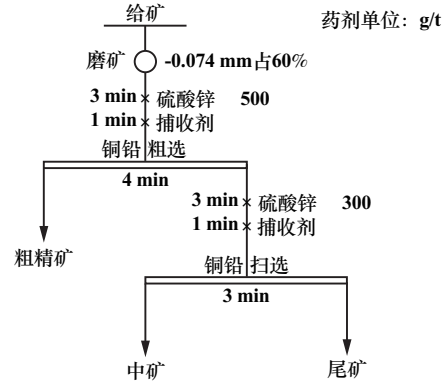


图 2 铜铅捕收剂种类试验流程

Fig. 2 Testing flowchart for Cu-Pb collector type

表 3 铜铅捕收剂种类试验结果

Table 3 Cu-Pb collector type test results

捕收剂种类及用量/(g·t ⁻¹)	产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
			Cu	Pb	Zn	Cu	Pb	Zn
25#黑药 30+20	粗精矿	3.42	0.320	40.03	9.79	24.29	93.49	12.34
	中矿	0.90	0.605	4.46	14.68	12.02	2.73	4.84
	尾矿	95.68	0.030	0.06	2.35	63.69	3.78	82.82
Pa 30+20	粗精矿	2.56	0.210	48.66	7.74	12.68	86.23	7.49
	中矿	0.88	0.590	13.20	13.80	12.21	8.02	4.58
	尾矿	96.56	0.033	0.09	2.41	75.11	5.75	87.93
Pb-1 30+20	粗精矿	3.87	0.450	34.61	11.34	36.01	93.32	16.30
	中矿	0.68	0.620	5.11	12.94	8.76	2.43	3.28
	尾矿	95.45	0.028	0.06	2.27	55.23	4.25	80.42
Pb-1 20+10 F5B 10+10	粗精矿	3.54	0.320	40.03	9.79	25.92	94.53	13.67
	中矿	0.90	1.050	4.46	14.68	21.53	2.67	5.19
	尾矿	95.56	0.024	0.04	2.15	52.55	2.80	81.14
25#黑药 20+10 GTB-1 10+5	粗精矿	3.02	0.530	45.04	11.28	40.80	93.58	12.52
	中矿	0.38	1.780	6.21	18.76	17.36	1.64	2.64
	尾矿	96.60	0.017	0.07	2.39	41.84	4.78	84.84
	给矿	100.00	0.039	1.45	2.72	100.00	100.00	100.00

2.3 选锌硫铁矿抑制剂种类试验

经 X 射线能谱分析,铁闪锌矿中含 Zn 53.54%、Fe 12.69%。随着铁闪锌矿含铁量升高,铁离子表面性质发生改变,可浮性逐步下降。为了获得高品质的锌精矿,需要采用硫铁矿抑制剂对白铁矿/黄铁矿和磁黄铁

矿进行抑制。对比了抑制剂石灰(用量3 000 g/t)、无机抑制剂 LY1(用量 2 000 g/t)和有机抑制剂 LY2(用量 600 g/t)的锌硫分离效果,试验流程见图 3,结果见图 4。其中 LY1 为弱还原性无机盐,LY2 为分子量小于 1 000 的有机物,均为昆明冶金研究院有限公司研发的硫铁矿抑制剂。采用石灰为白铁矿/黄铁矿和磁黄铁矿的抑制剂,效果较好,通过一段锌粗选一段锌扫选,获得的泡沫产品(锌粗精矿和锌中矿合并)锌品位达 29.64%,锌回收率为 85.39%。

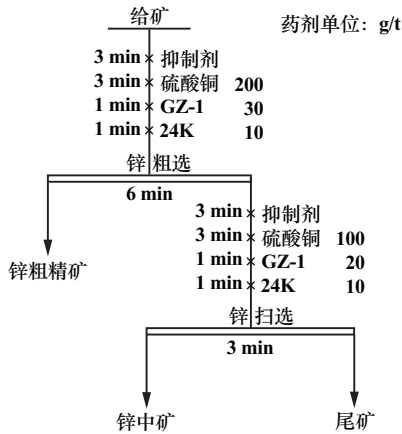


图 3 选锌硫铁矿抑制剂种类试验流程

Fig. 3 Testing flowchart for pyrite depressant type in zinc flotation

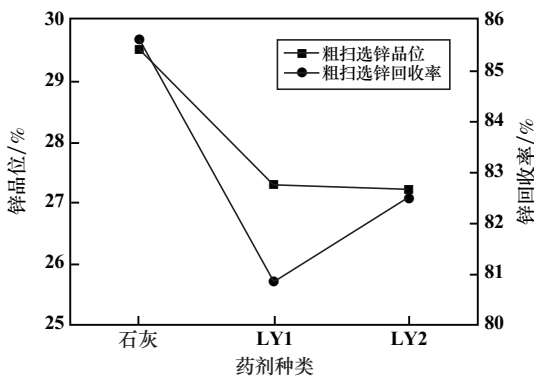


图 4 选锌硫铁矿抑制剂种类试验结果

Fig. 4 Testing results of pyrite depressant type in zinc flotation

2.4 锌捕收剂种类试验

矿石中的有价矿物硫铁矿和铁滑石等脉石矿物容易与捕收剂发生反应,干扰浮选过程。合适的锌捕收剂既可显著提高锌矿物的浮选效率,又能减少药剂消耗,是实现锌高效、低耗浮选的重要前提。分别采用适应性广及捕收能力强的丁基黄药及乙硫氮与选择性好的硫代氨基甲酸酯类捕收剂 A2(由青海鸿鑫矿业有限公司提供)及 GZ-1(由昆明冶金研究院有限公司提供,主要为异丁基硫氨酯和黄原酸丙烯酯的组合物)进行对比,开展锌捕收剂种类试验,试验流程见图 3,结果

见图 5。由图 5 可知,采用 GZ-1 和丁基黄药为捕收剂时,尾矿锌损失率都在 3%左右,但 GZ-1 获得的尾矿硫回收率高于丁基黄药,表明丁基黄药捕收能力强,将较多的硫铁矿捕收进入锌粗精矿及锌中矿中,但 GZ-1 兼具较强的捕收能力和较好的选择性,能为后续的精选提质提供更好的原料;A2 和乙硫氮捕收性能基本相近,尾矿中锌损失率和硫回收率较为相近。为了获得更高的锌回收率且尽量减少硫铁矿进入锌粗精矿及锌中矿中,捕收剂选择 GZ-1 较为适合。

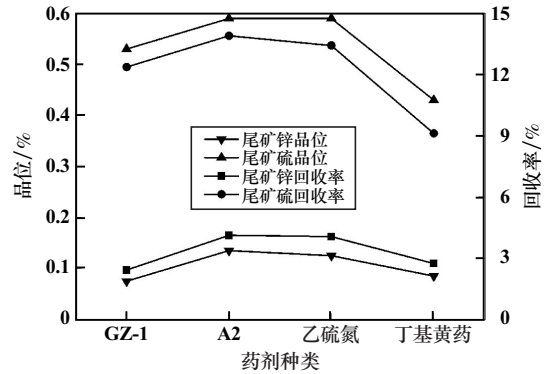


图 5 选锌捕收剂种类试验结果

Fig. 5 Testing results of zinc collector type

2.5 锌次精矿提质降杂试验

对锌粗精矿进行精选发现,分别添加石灰进行 3 次精选,精选 1 精矿锌品位从 29.76%提高至 36.26%,提升了 6.50 百分点,精选 2 精矿锌品位从 36.26%提高至 39.12%,提升了 2.86 百分点,提升幅度较小,精选 3 精矿(即锌次精矿)锌品位从 39.12%提高至 41.36%,提升了 2.24 百分点,提升幅度较小,继续进行第 4 次精选,锌精矿锌品位提升仅 1.50 百分点,但锌损失率大幅增长,且锌精矿锌品位难以提升至 45%以上。对精选 3 精矿进行镜下检查发现,铁闪锌矿呈它形粒状,多数为单体解离颗粒,部分闪锌矿中包裹有细粒黄铜矿,部分闪锌矿与透明矿物、磁黄铁矿、黄铁矿等连生;磁黄铁矿呈它形粒状,多数为单体解离颗粒,部分与闪锌矿等连生;黄铁矿呈它形粒状,多与闪锌矿连生;黄铜矿呈它形粒状,多包裹于闪锌矿中。结果表明,影响锌精矿锌品位的矿物主要为磁黄铁矿及黄铁矿。该部分磁黄铁矿及黄铁矿可浮性较好,添加石灰难以抑制,且过量添加石灰将对铁闪锌矿造成明显抑制。因此对锌次精矿开展添加分散剂辅助石灰的浮选提质降杂试验,以及锌次精矿磁选脱杂试验,结果见表 4。考虑到磁黄铁矿容易磁团聚包裹铁闪锌矿,添加六偏磷酸钠和硅酸钠作为分散剂。结果表明,采用磁选进行锌精矿的提质降杂,锌作业回收率在 99%以上;采用磁场强度 0.25 T 对

锌次精矿进行磁选,可获得锌品位 45.77%、锌作业回收率 99.04%的锌精矿。添加分散剂浮选提升锌精矿锌品位,锌损失率较大。综合考虑,采用磁场强度0.25 T磁选对锌次精矿进行脱杂较为适宜。

表 4 锌次精矿提质降杂试验结果

Table 4 Testing results of quality improvement and impurity reduction for third-stage cleaning concentrate

精选方式	品位/%		回收率/%	
	Zn	Fe	Zn	Fe
0.15 T 磁选	44.48	17.65	99.44	32.24
0.25 T 磁选	45.77	16.83	99.04	31.87
添加硅酸钠浮选	44.00	18.82	97.14	33.01
添加六偏磷酸钠浮选	43.51	19.02	90.45	31.87

2.6 全流程闭路试验

在条件试验基础上进行了全流程闭路试验,考察铜铅精矿、锌精矿、硫精矿、铁精矿和尾矿中各目的矿物的分选回收情况、各作业中矿的金属分布情况。铜铅混合浮选采用一次粗选两次扫选三次精选获得铜铅混合精矿;选锌作业采用两次粗选三次精选两次扫选后得到锌次精矿,锌次精矿采用 0.25 T 磁选获得锌精矿;选锌尾矿采用一次粗选两次精选一次扫选获得硫精矿 1;选硫尾矿采用磁选获得铁粗精矿及尾矿 1,铁粗精矿再磨后一次脱硫粗选一次脱硫精选一次脱硫扫选获得硫精矿 2 及脱硫铁精矿,脱硫铁精矿采用 0.15 T 磁选获得最终铁精矿。试验流程见图 6,结果见表 5。

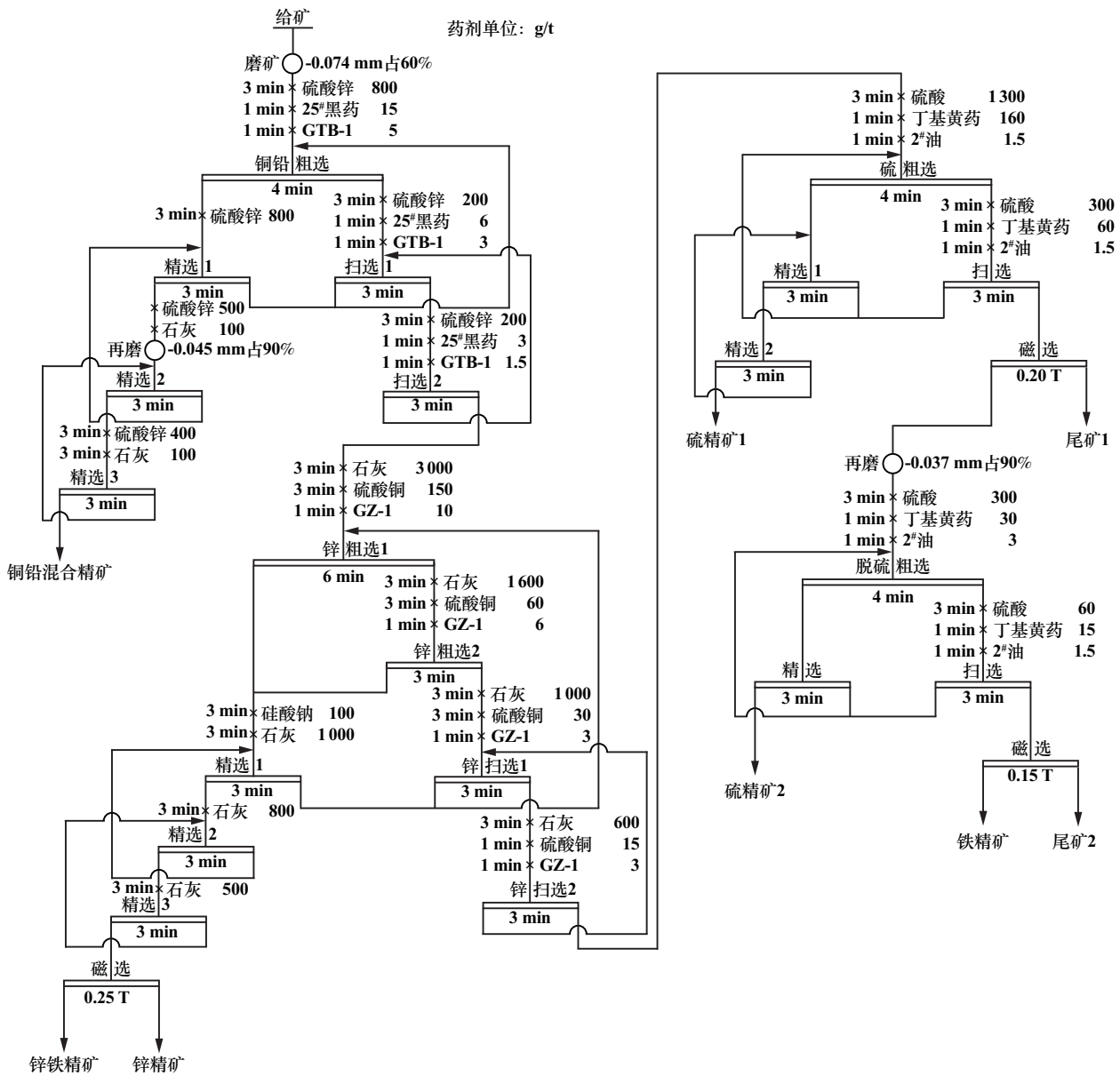


图 6 闭路试验流程

Fig. 6 Closed-circuit test flowchart

表5 闭路试验结果

Table 5 Closed-circuit test results

产品名称	产率/%	品位/%							回收率/%						
		Cu	Pb	Zn	Fe	S	Ag ¹⁾	Au ¹⁾	Cu	Pb	Zn	Fe	S	Ag	Au
铜铅混合精矿	2.18	0.73	60.12	6.89	7.44	15.00	369.0	0.09	33.36	94.72	5.53	0.62	8.81	73.92	2.42
锌精矿	5.12	0.28	0.43	46.99	15.55	35.56	23.8	0.08	30.34	1.58	88.26	3.02	48.92	11.22	5.00
锌铁精矿	0.45	0.10	0.21	13.89	45.89	20.13	14.7	0.02	0.89	0.07	2.29	0.78	2.43	0.61	0.12
硫精矿1	3.25	0.07	0.21	0.24	47.21	38.36	14.7	0.15	4.57	0.50	0.29	5.83	33.53	4.40	6.03
硫精矿2	0.19	0.08	2.32	0.36	56.10	20.84	28.9	0.26	0.31	0.31	0.02	0.40	1.04	0.49	0.61
铁精矿	3.66	0.01	0.09	0.09	67.22	0.13	2.3	0.01	0.46	0.23	0.11	9.33	0.13	0.77	0.64
尾矿1	84.33	0.02	0.04	0.11	24.67	0.23	1.1	0.08	29.84	2.56	3.46	78.96	5.10	8.52	84.46
尾矿2	0.82	0.01	0.05	0.11	34.31	0.20	1.0	0.07	0.23	0.03	0.04	1.06	0.04	0.07	0.72
给矿	100.00	0.048	1.39	2.73	26.35	3.72	12.9	0.08	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

1) 单位为 g/t。

试验获得的铜铅混合精矿铅品位 60.12%、铅回收率 94.72%，铜品位 0.73%、铜回收率 33.36%，影响铜铅混合精矿品质的因素主要是黄铁矿和铁闪锌矿。由于铜伴生品位极低，且黄铜矿多与铁闪锌矿、方铅矿、黄铁矿、磁黄铁矿连生，铜铅混合精矿中铜回收率偏低。鉴于铜铅混合精矿中铜品位较低，后续进行铜铅分离的经济性不足，因此不建议进行铜铅分离作业。值得注意的是，铜铅混合精矿中锌品位高达 6.89%，这主要与方铅矿和铁闪锌矿的致密共生有关，这一现象值得进一步深入研究以提高铅锌分离效率。锌精矿锌品位 46.99%、锌回收率 88.26%，部分黄铜矿呈细粒状、乳浊状包裹于铁闪锌矿中，导致铜金属损失在锌精矿中多达 30.34%。硫精矿 1 和硫精矿 2 合并为硫精矿，硫品位 37.41%、铁品位 47.69%，硫回收率 34.57%、铁回收率 6.23%。矿石中黄铁矿/白铁矿与磁黄铁矿质量比为 1:1.76，该矿石可获得的硫精矿极限理论硫品位 48.38%、铁品位 51.62%。结果表明，部分黄铁矿/白铁矿损失在铜铅混合精矿和锌精矿中，造成硫精矿硫品位较低。硫扫选 1 尾矿经磁选后，获得的铁粗精矿铁品位 61.00%、硫品位 0.97%、铁回收率 10.79%，为了获得铁品位大于 65%、硫品位少于 0.5% 的优质铁精矿，需要对铁粗精矿再磨后再浮选脱硫、磁选脱杂。最终铁精矿铁回收率为 9.33%，结合物相分析及 MLA 分析结果可知，磁铁矿中铁占总铁的 13.15%，表明铁精矿中磁铁矿回收率为 70.95%，对尾矿进行铁单体解离度分析可知，损失在尾矿中的磁铁矿大部分未解离，该部分磁铁矿难以经济回收。

3 结论

1) 青海某多金属矿主要有价元素为 Pb、Zn、Fe，其他伴生有价元素 Au、Ag、Cu、In 和 S。矿石共由 5 大类共 23 种矿物组成，铜铅锌独立矿物分别为黄铜矿、

方铅矿和铁闪锌矿，铁主要以独立矿物形式赋存于黑柱石、钙铁辉石、磁铁矿中，仅磁铁矿中的铁具有回收价值。

2) 在确保铅回收率不低于 94% 的前提下，采用 GTB-1 强化铜的回收，能提升铜回收率 10 个百分点以上；由于白铁矿/黄铁矿和磁黄铁矿等硫化物可浮性优于铁闪锌矿，采用兼具较强捕收能力和较好选择性的锌捕收剂 GZ-1，高效回收铁闪锌矿；为了获得高品质的锌精矿，对锌粗精矿采用浮选-磁选联合流程，提升锌精矿品质。最终采用铜铅混合浮选-锌浮选-硫浮选-铁磁选，获得铜铅混合精矿铅品位 60.12%、铜品位 0.73%，铜回收率 33.36%、铅回收率 94.72%，锌精矿锌品位 46.99%、锌回收率 88.26%，铁精矿铁品位 67.22%、铁回收率为 9.33%。铜铅混合精矿锌含量偏高与黄铜矿、铁闪锌矿、方铅矿三者间的嵌布关系密切相关。铜铅浮选阶段采用选择性较好的捕收剂，减少石灰使用量，为银矿物的伴生回收提供了条件，最终铜铅混合精矿银回收率达 73.92%，实现了银矿物的综合回收。金主要赋存在硅酸盐脉石中，综合回收情况较差。

参考文献 (References):

- [1] 孙传尧,宋振国,朱阳戈,等. 中国铜铝铅锌矿产资源开发利用现状及安全供应战略研究[J]. 中国工程科学, 2019,21(1):133-139. SUN Chuanyao, SONG Zhenguo, ZHU Yangge, et al. Exploitation and utilization status and safe supply strategy of copper, aluminum, lead, and zinc resources in China[J]. Strategic Study of CAE, 2019, 21(1):133-139.
- [2] 罗仙平,杨思琦,何坤忠,等. “十三五”期间我国铅锌硫化矿选矿技术进展[J]. 有色金属科学与工程, 2022,13(3):117-129. LUO Xianping, YANG Siqi, HE Kunzhong, et al. Progress in beneficiation technology of lead-zinc sulfide ore in China during the 13th Five-Year Plan period[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022,13(3):117-129.

(下转第 92 页)

- 进展[J]. 金属矿山, 2019(2):2-9.
- LI Yanjun, YU Jianwen, HAN Yuexin, et al. Recent progress in magnetic reduction roasting of refractory iron ore via fluidized bed[J]. Metal Mine, 2019(2):2-9.
- [8] 高恩霞, 钟国万, 蒋曼, 等. 硫酸渣与高炉灰共还原-磁选回收铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(4):95-99.
- GAO Enxia, ZHONG Guowan, JIANG Man, et al. Research on recovery of iron from sulfuric acid residue and blast furnace ash by co-reduction followed by magnetic separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(4):95-99.
- [9] 万军营, 陈铁军, 周仙霖, 等. 细粒级镜铁矿造球-磁化焙烧试验研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5):119-123.
- WAN Junying, CHEN Tiejun, ZHOU Xianlin, et al. Experimental study on pelletizing and magnetization roasting process for fine-grained specularite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(5):119-123.
- [10] 姜亚雄, 黄丽娟, 黄恩旭, 等. 难选褐铁矿流态化磁化焙烧—弱磁选工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(1):64-70.
- JIANG Yaxiong, HUANG Lijuan, HUANG Enxu, et al. Study on fluidized magnetizing roasting-low intensity magnetic separation process for refractory limonite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(1):64-70.
- [11] 张小龙, 韩跃新, 李艳军, 等. 綦江菱-赤混合型铁矿石磁化焙烧动力学研究[J]. 金属矿山, 2018(2):70-75.
- ZHANG Xiaolong, HAN Yuexin, LI Yanjun, et al. Research on kinetics of magnetization roasting for siderite and hematite iron mixtures from Qijiang[J]. Metal Mine, 2018(2):70-75.
- [12] 彭泽友, 刘旭, 陈雯, 等. 大西沟菱褐铁矿表面磁化焙烧-强磁选新工艺研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6):93-100.
- PENG Zeyou, LIU Xu, CHEN Wen, et al. New technology of surface magnetization roasting and high intensity magnetic separation for Daxigou siderite and limonite ores[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021, 41(6):93-95.
- [13] ZHANG Q, SUN Y S, HAN Y X, et al. Reaction behavior and non-isothermal kinetics of suspension magnetization roasting of limonite and siderite[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2023, 30(5):824-833.
- 引用本文: 陈志新, 彭先淦, 陆斌刚, 等. 细粒难选红土镍矿废渣回收铁的试验研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):88-92.
- CHEN Zhixin, PENG Xiangan, LU Bingang, et al. Experimental study on iron recovery from smelting slag of fine-grained refractory nickel laterite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):88-92.
- (上接第87页)
- [3] 李潇煜, 姜丽帅, 韩百岁, 等. 硫化铅锌矿浮选药剂研究进展[J]. 矿产综合利用, 2023(6):63-70.
- LI Xiaoyu, JIANG Lishuai, HAN Baisui, et al. Research progress on flotation reagents of lead-zinc sulfide ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023(6):63-70.
- [4] 鱼博, 王宇斌, 王妍, 等. 某铜铅锌多金属硫化矿工艺矿物学研究[J]. 中国铝业, 2021, 45(1):34-38.
- YU Bo, WANG Yubin, WANG Yan, et al. Process mineralogy of a copper-lead-zinc polymetallic sulphide ore[J]. China Molybdenum Industry, 2021, 45(1):34-38.
- [5] 周华荣, 许永伟, 张慧婷, 等. 青海某硫化铅锌矿选矿工艺优化研究[J]. 金属矿山, 2019(7):103-107.
- ZHOU Huarong, XU Yongwei, ZHANG Huiting, et al. Optimization research of a lead-zinc sulfide ore beneficiation process in Qinghai[J]. Metal Mine, 2019(7):103-107.
- [6] 苏振华, 刘兵, 钟旭群, 等. 铅锌矿无石灰分支快速浮选回收铅[J]. 矿冶, 2024, 33(3):416-422.
- SU Zhenhua, LIU Bing, ZHONG Xuqun, et al. Rapid flotation recovery of lead from lead-zinc ore without lime branching[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(3):416-422.
- [7] 文涵睿, 李利娟. 四川某混合铅锌矿优先浮选试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(6):121-126.
- WEN Hanrui, LI Lijuan. Experimental study on preferential flotation of a mixed lead-zinc deposit in Sichuan[J]. Mining Research and Development, 2021, 41(6):121-126.
- [8] 董艳红, 陈代雄, 杨建文, 等. 某铜铅锌多金属硫化矿石的浮选试验[J]. 金属矿山, 2019, 48(7):92-96.
- DONG Yanhong, CHEN Daixiong, YANG Jianwen, et al. Research on flotation tests of a Cu-Pb-Zn polymetallic sulfide ore[J]. Metal Mine, 2019, 48(7):92-96.
- [9] 梁溢强, 刘鹏, 宋涛, 等. 低碱度下高硫铅锌矿的无钙浮选分离工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2019, 43(5):71-75.
- LIANG Yiqiang, LIU Peng, SONG Tao, et al. Study on calcium-free ion flotation process for separation of high sulfur lead-zinc ores at low basicity[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(5):71-75.
- [10] 魏宗武, 杨谦, 黄涛, 等. 某低品位难选铜铅锌硫化矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5):58-61.
- WEI Zongwu, YANG Qian, HUANG Tao, et al. Flotation of low-grade refractory copper-lead-zinc sulfide ore for mineral separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(5):58-61.
- 引用本文: 梁溢强, 张宇, 徐安勳, 等. 青海某多金属矿综合利用回收工艺研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(5):82-87.
- LIANG Yiqiang, ZHANG Yu, XU Anxun, et al. Comprehensive utilization and recovery of polymetallic ore in Qinghai[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(5):82-87.