

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2023.06.007

国外某高硫低锌尾矿锌强化回收试验研究

李 达¹ 刘 建^{1,3} 杨 东² 余晓光² 代龙富¹ 郝佳美¹ 秦晓艳¹ 高虎林¹

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 中铝秘鲁矿业公司, 秘鲁 15023;

3. 云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 昆明 650093)

摘 要: 国外某高硫低锌尾矿中含锌 2.69%、含硫 47.08%, 脉石矿物主要为滑石并且含有大量黄铁矿, 硫含量过高是导致该矿石浮选指标差的主要原因。实验室通过条件试验指出石灰用量不足、硫酸铜用量过大导致现场精矿 Zn 品位低, 并通过调整药剂用量、使用组合捕收剂以及添加黄铁矿辅助抑制剂 Kg-1 显著提高了精矿 Zn 品位。在最佳药剂制度下, 采用一粗三精一扫, 中矿按顺序返回的闭路流程, 其中扫选不添加石灰, 其他药剂减半, 三次精选均添加石灰 500 g/t 调节矿浆 pH 值, 最终试验获得的闭路锌精矿产品中 Zn 品位为 42.86%、Zn 回收率为 71.93%, 达到选厂要求浮选指标, 实现了对该高硫低锌尾矿锌的高效回收利用。通过闭路试验探究有无 Kg-1 的添加对闭路锌精矿 Zn 品位的影响, 试验结果指出 Kg-1 的引入能有效阻碍浮选过程中黄铁矿的上浮, 显著提高锌精矿 Zn 品位。相对于未加 Kg-1 的闭路试验, 锌精矿 Zn 品位提升 13.76%, 说明 Kg-1 是一种有效的黄铁矿抑制剂。Kg-1 是一种有机小分子抑制剂, 其分子头基有疏亲固原子, 通过水解产生 R-CSS⁻, 能与被硫酸铜活化的黄铁矿表面的 Cu²⁺ 和 Fe²⁺ 形成不溶性络合物, 阻碍捕收剂在黄铁矿表面的吸附, 实现对黄铁矿的抑制。

关键词: 高硫低锌尾矿; 锌硫分离; 黄铁矿辅助抑制剂; 浮选; 作用机理

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1005-7854(2023)06-0044-08

Experimental study on enhanced recovery of zinc from a high sulfur and low zinc tailings abroad

LI Da¹ LIU Jian^{1,3} YANG Dong² YU Xiaoguang² DAI Longfu¹ HAO Jiamei¹ QIN Xiaoyan¹ GAO Hulin¹

(1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650093, China;

2. Mineral Chinalco Peru S. A., Peru 15023;

3. Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Metallic Mineral Resources in Yunnan Province, Kunming 650093, China)

Abstract: A foreign high-sulfur and low-zinc tailings contains 2.69 % zinc and 47.08 % sulfur. The gangue minerals are mainly talc and contain a large amount of pyrite. The high sulfur content is the main reason for the poor flotation index of the ore. Through conditional tests in the laboratory, it is pointed out that insufficient lime dosage and excessive copper sulfate dosage lead to low Zn grade of concentrate in the field. The Zn grade of concentrate is significantly improved by adjusting the dosage of reagent, using combined collector and adding pyrite auxiliary inhibitor Kg-1. Under the optimal reagent system, a closed-circuit process of one roughing, three cleaning and one scavenging was adopted, and the middle ore was returned in sequence. Among them, lime was not added in the scavenging process, and other reagents were halved. Lime of 500 g/t was added in the three cleaning processes to adjust the pH of the pulp. The final closed-circuit zinc concentrate product obtained in the test had a Zn grade of 42.86 % and a Zn recovery

收稿日期: 2023-6-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52174251)

第一作者: 李达, 硕士研究生, 主要研究方向为浮选理论与工艺研究。E-mail: 18468204295@163.com

通信作者: 刘建, 博士, 教授, 博士生导师; E-mail: Jianliu@kust.edu.cn

rate of 71.93 %, which met the flotation index required by the concentrator, and realized the efficient recovery and utilization of zinc from the high-sulfur and low-zinc tailings. The effect of Kg-1 addition on the Zn grade of closed-circuit zinc concentrate was investigated by closed-circuit test. The test results showed that the introduction of Kg-1 could effectively hinder the flotation of pyrite in the flotation process and significantly improve the Zn grade of zinc concentrate. Compared with the closed-circuit test results without Kg-1, the Zn grade of zinc concentrate increased by 13.76 %, indicating that Kg-1 is an effective pyrite inhibitor. Kg-1 is an organic small molecule inhibitor. Its molecular head group has sulfur pro-solid atoms, which can produce R-CSS^- by hydrolysis. It can form insoluble complexes with Cu^{2+} and Fe^{2+} on the surface of pyrite activated by copper sulfate, which hinders the adsorption of collector on the surface of pyrite and realizes the inhibition of pyrite.

Key words: high sulfur and low zinc tailings; zinc sulfur separation; auxiliary inhibitor of pyrite; flotation; mechanism of action

锌作为重要的过渡元素在自然界占有重要地位^[1]。尽管地壳内锌的含量不高,但现代工业对其需求量极大,锌在抗腐蚀、耐磨以及延展特性等方面展现出较好的优势,在化工、军事、机电、冶金、医药等行业都有着重要的用途^[2]。现如今,工业生产中应用比较广泛的锌矿物有闪锌矿,菱锌矿和异极矿等,其中绝大部分的锌资源来源于闪锌矿(ZnS)^[3]。自然界中没有单一的锌金属矿床,通常锌与黄铜矿、方铅矿、黄铁矿等硫化矿紧密共生在一起形成复杂的铜铅锌多金属硫化矿,浮选是该类型资源回收的主要方法^[4-6]。

工业上,高硫低锌尾矿主要来源于富含黄铁矿的低品位铜铅锌多金属硫化矿优先浮选过程中的铜-锌(硫)分离、铅-锌(硫)分离、铜铅-锌(硫)分离等过程^[7-9]。高硫低锌尾矿中硫载体矿物主要是黄铁矿(FeS_2)、锌的载体矿物以闪锌矿为主^[10]。在浮选分离阶段,常添加大量闪锌矿和黄铁矿的抑制剂,将闪锌矿和黄铁矿选择性地抑制到尾矿中,分离后黄铁矿在尾矿中进一步富集,进而形成高硫低锌尾矿,尾矿中硫的含量往往高达 15% 以上,有的甚至超过 40%,而锌的含量通常小于 3%。由于前端药剂对闪锌矿的抑制、硫含量过高、黄铁矿在尾矿中的富集以及锌原始品位较低导致尾矿中闪锌矿难以回收利用。高硫低锌尾矿中锌的高效回收一直是矿物加工领域公认的难题。

某斑岩型-矽卡岩型铜矿,主要金属矿物是黄铁矿,其次为黄铜矿、闪锌矿、斑铜矿、赤铜矿、

偶见方铅矿、辉钼矿。针对该矿样现场采用铜锌混合粗选—混合粗精矿铜锌分离的工艺流程实现了铜锌分离,最终得到良好的浮选指标。该流程抑锌尾矿中硫大量富集,与锌形成高硫低锌尾矿,选厂使用常规浮选药剂制度无法获得高品位的锌精矿,精矿中仍含有大量黄铁矿,Zn 品位始终无法达到合格指标。为高效合理利用该高硫低锌尾矿,实验室对该矿石进行浮选试验研究,对难回收高硫低锌多金属矿资源的综合利用具有借鉴意义。

1 试验原料及试验方法

1.1 试验原料

为确定该高硫低锌尾矿中主要化学成分含量以及查明待分离矿物,取样送往分析检测中心进行化学多元素分析、X 射线衍射分析(XRD)和矿物相分析,分析结果如下。

结合表 1、2 分析可知,该高硫低锌尾矿中的主要组成成分有 Zn、Fe、S、 MgO 、 SiO_2 ,其中 Zn 含量为 2.69%,是本次试验主要回收元素,Zn 主要以硫化锌的形式存在,占有率为 82.34%,氧化锌及硫酸锌含量较低,不考虑回收。尾矿中 Fe 和 S 含量分别高达 39.40%、47.08%,脉石矿物中 MgO 含量为 1.32%、 CaO 含量为 0.46%、 SiO_2 含量为 5.96%,结合图 1 可知,该尾矿中矿物主要是闪锌矿,同时包含大量黄铁矿,脉石矿物主要为滑石。后续将开展浮选试验进行锌的回收。

表 1 高硫低锌尾矿化学多元素分析

Table 1 High sulfur and low zinc tailings chemical multi-element analysis

/%

成分	Zn	Mo	Fe	S	MgO	CaO	SiO_2
含量	2.69	0.09	39.40	47.08	1.32	0.46	5.96

表 2 高硫低锌尾矿锌物相分析

Table 2 Zinc phase analysis results of high sulfur and low zinc tailings

/%

物相	硫化锌	硫酸锌	氧化锌	锌铁尖晶石	总锌
含量	2.215	0.037	0.430	0.008	2.69
占有率	82.34	1.38	15.99	0.29	100.0

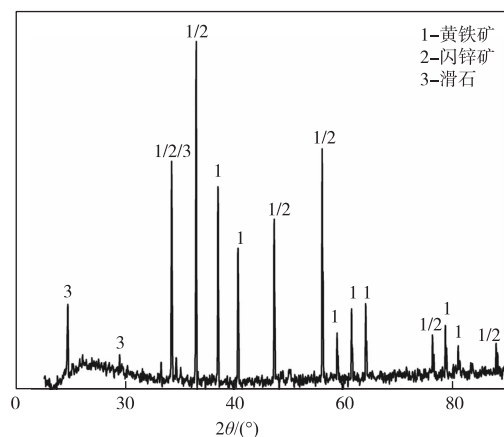


图 1 高硫低锌尾矿 XRD 分析

Fig. 1 XRD analysis of high sulfur and low zinc tailings

1.2 试验方法

浮选工艺在 XFD 单槽浮选机中进行,将相应的浮选药剂按不同顺序和用量加入浮选槽中,待药剂作用一定时间后开始充气并进行刮泡,所获得浮选产品过滤烘干并记录样品干重,采用九宫格法取样送往检测中心进行化验,通过精矿 Zn 品位化验结果计算精矿回收率,并对数据进行整理分析。

1.3 浮选药剂及设备

本次试验所用浮选药剂有:抑制剂石灰,活化剂硫酸铜,黄铁矿辅助抑制剂巯基乙酸钠,腐殖酸钠以及作者所在团队自主研发的有机小分子抑制剂 Kg-1、Kg-2,捕收剂丁基铵黑药、丁基黄药、乙基黄药以及 Z-200,起泡剂甲基异丁基甲醇(MIBC)。试验中所用到设备有 XFD 型单槽浮选机、pH 计、移液器、烧杯、微量注射器、滤纸、真空过滤机以及烘箱。

2 试验结果及分析

2.1 粗选条件试验

在粗选阶段主要研究了石灰用量、硫酸铜用量、抑制剂种类及用量、单一捕收剂种类和组合捕收剂种类及用量对 Zn 品位和回收率的影响。图 2 为粗选试验流程。

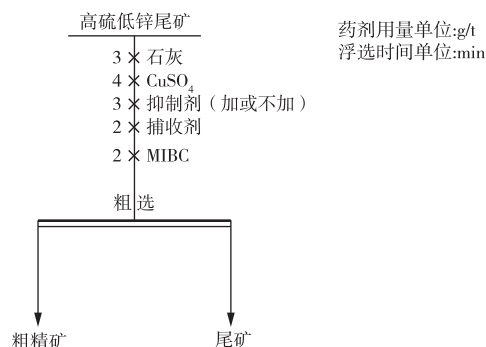


图 2 高硫低锌尾矿粗选流程

Fig. 2 Flowsheet of roughing of high sulfur and low zinc tailings

2.1.1 抑制剂石灰用量试验

由于该高硫低锌尾矿含有大量黄铁矿,在回收锌的同时黄铁矿也会伴随着上浮,从而影响粗精矿产品中锌的品位。在生产实践中常常通过添加石灰来抑制黄铁矿,石灰溶于水会产生大量 OH^- 离子,进一步生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等羟基化合物吸附于黄铁矿表面,阻碍捕收剂在其表面吸附^[11]。在本次试验中,鉴于该尾矿硫含量高,结合前期探索试验,决定采用较大用量的石灰来阻碍黄铁矿的上浮。在硫酸铜 100 g/t、丁基铵黑药 80 g/t、MIBC 12.5 g/t 的药剂制度下探究不同石灰用量对高硫低锌尾矿粗选粗精矿浮选指标的影响,所得试验结果见图 3。

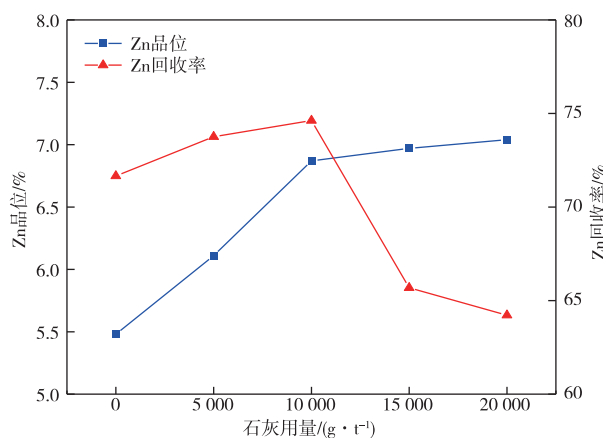


图 3 石灰用量对高硫低锌尾矿粗选指标的影响

Fig. 3 Effects of lime dosage on the roughing index of high sulfur and low zinc tailings

由石灰用量试验得出,当添加 5 000 g/t 石灰时,粗选粗精矿 Zn 品位从 5.48% 提升至 6.11%,石灰呈现出对黄铁矿较好的抑制作用,阻碍了部分黄铁矿的上浮。当石灰用量为 10 000 g/t (pH = 12.3) 时, Zn 回收率达到峰值,此时 Zn 回收率为 74.62%,品位为 6.87%。进一步提升石灰用量 Zn 品位无明显变化, Zn 回收率反而显著下降,说明过量的石灰也会对闪锌矿产生抑制,不利于锌的回收。因此,最终石灰用量确定为 10 000 g/t。通过分析石灰用量条件可初步断定,现场实际选矿流程中石灰用量不足 (6 000 g/t),导致黄铁矿大量上浮,是现场浮选精矿 Zn 品位较低的原因之一。

2.1.2 活化剂硫酸铜用量试验

在实际生产中,由于闪锌矿可浮性较差,因此常常需要活化剂进行预先活化,再通过捕收剂进行回收。硫酸铜可以通过 Cu^{2+} 直接与 Zn^{2+} 进行离子交换,生成易与捕收剂吸附的铜硫化化合物的方式活化闪锌矿。在石灰用量 10 000 g/t,丁基胺黑药用量 80 g/t, MIBC 用量 12.5 g/t 的浮选药剂制度下,探究硫酸铜用量对高硫低锌尾矿粗选粗精矿浮选指标的影响,所得试验结果见 4。

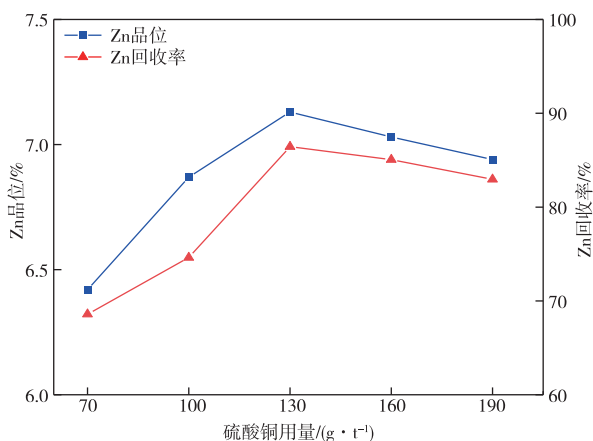


图 4 硫酸铜用量对高硫低锌尾矿粗选指标的影响

Fig. 4 Effects of copper sulfate dosage on the roughing index of high sulfur and low zinc tailings

由图 4 可知,在硫酸铜用量为 130 g/t 前,粗精矿 Zn 品位以及回收率与硫酸铜用量呈正相关的关系,并在 130 g/t 时 Zn 品位和回收率同时达到峰值,此时能得到 7.13%、86.44% 的浮选指标。进一步增大硫酸铜用量,此时粗精矿 Zn 品位和回收率均与硫酸铜用量呈负相关的关系,说明过量的硫酸铜不利于闪锌矿的回收。因此,最终确定硫酸铜用量为 130 g/t。根据硫酸铜用量条件试验可知,现场实际流程中硫酸铜用量过大 (300 g/t),过量

硫酸铜会对大量黄铁矿起到活化作用,降低石灰对黄铁矿抑制效果,影响浮选指标。

2.1.3 辅助抑制剂种类及用量试验

该抑锌尾矿中含有大量的黄铁矿,为减少浮选过程中黄铁矿的上浮,保证粗精矿产品中锌的浮选指标,实验室以及现场采用了石灰抑制黄铁矿,但根据石灰用量试验可知,当增加石灰用量并超过 10 000 g/t 时, Zn 品位无明显变化,回收率反而下降,此时石灰已无法进一步抑制黄铁矿并对锌回收产生不利影响,因此需要在添加石灰基础上使用额外的黄铁矿辅助抑制剂。巯基乙酸钠通过巯基与羧基在黄铁矿表面的吸附,能实现对黄铁矿的抑制^[12];腐殖酸钠是一种潜在黄铁矿抑制剂,矿浆中钙离子的存在促进了腐殖酸钠在黄铁矿表面的吸附,腐殖酸钠在黄铁矿表面的化学吸附主要是通过其羧基和钙原子实现^[13]。综上所述,此次锌回收试验选取了巯基乙酸钠、腐殖酸钠以及团队研发的抑制剂 Kg-1、Kg-2 进行抑制剂种类试验,验证这四种药剂在该高硫低锌尾矿中对黄铁矿的抑制效果,筛选出合适的辅助抑制剂来提高粗精矿中 Zn 的品位。

2.1.3.1 辅助抑制剂种类试验

进行辅助抑制剂种类条件试验,探究四种抑制剂对黄铁矿抑制效果。具体药剂制度为石灰 10 000 g/t、硫酸铜 130 g/t、抑制剂 80 g/t、丁基胺黑药 80 g/t、MIBC 12.5 g/t。所得试验结果见图 5。

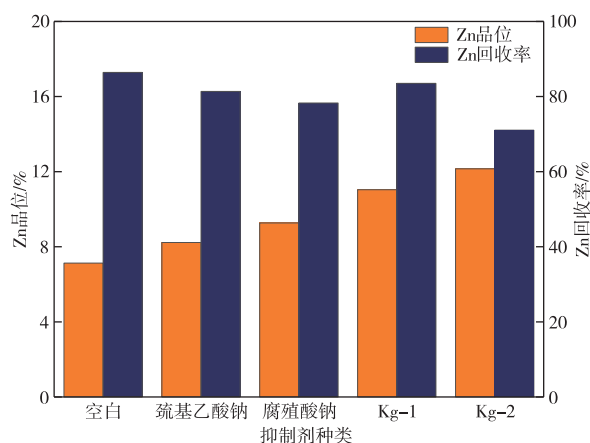


图 5 抑制剂种类对高硫低锌尾矿粗选指标的影响

Fig. 5 Effects of depressant types on the roughing index of high sulfur and low zinc tailings

由图 5 可知,单独使用石灰 (空白试验) 能获得 Zn 品位 7.13%,回收率 86.44% 的浮选指标。相较于空白试验而言,这四种抑制剂在提高 Zn 品位

上均有一定的效果,其中 Kg-1 和 Kg-2 对 Zn 品位提升效果明显,但 Kg-2 对 Zn 回收率影响较大,使粗精矿 Zn 回收率从 86.44% 降低至 71.05%。而 Kg-1 能在提升品位的同时保证较好的 Zn 回收率,最终能获得 Zn 品位为 11.04%、回收率为 83.51% 的粗精矿。综合考虑,选定 Kg-1 为黄铁矿辅助抑制剂。

2.1.3.2 Kg-1 用量试验

确定石灰用量为 10 000 g/t、硫酸铜 130 g/t、丁基铵黑药 80 g/t、MIBC 12.5 g/t。在此药剂制度下研究 Kg-1 用量对高硫低锌尾矿粗选粗精矿浮选指标的影响。所得试验结果见图 6。

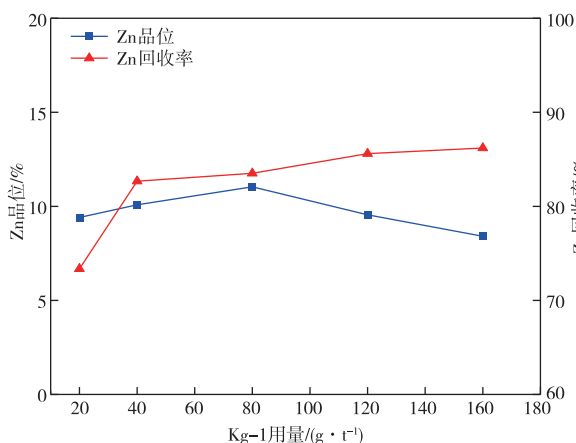


图 6 Kg-1 用量对高硫低锌尾矿粗选指标的影响

Fig. 6 Effects of Kg-1 dosage on the roughing index of high sulfur and low zinc tailings

从 Kg-1 用量对粗精矿指标的影响可以得出,随着 Kg-1 用量的增加,Zn 品位呈现出先上升后下降的趋势,在 Kg-1 用量为 80 g/t 时,Zn 品位达到最大值,能获得 Zn 品位 11.04% 的指标,继续增加 Kg-1 用量,Zn 品位下降,Zn 回收率无明显提升。为确保粗精矿 Zn 品位,最终选定 Kg-1 最佳用量为 80 g/t。

2.1.4 捕收剂种类、用量以及组合种类试验

闪锌矿常用捕收剂为黄药、黑药类以及硫氨脂类捕收剂^[14]。黄药类捕收剂生产简单、制作成本低,在工业生产中广泛用于处理多金属硫化矿,其中乙基黄药、丁基黄药较为常用;黑药类捕收剂同样具有良好的硫化矿捕收性能,相对于黄药类捕收剂具有更好的选择性,并且用途广泛、作用时间长、捕收能力较强;硫氨酯类捕收剂相对于其他硫化矿捕收剂,其具有良好的分散性,其中 Z-200 最为常用,对黄铜矿、闪锌矿等硫化矿物具有良好的选择性。因此选择丁基黄药、乙基黄药、丁基铵黑

药和 Z-200 进行捕收剂种类试验,筛选出适合该高硫低锌尾矿的捕收剂。

2.1.4.1 捕收剂种类试验

在石灰 10 000 g/t、硫酸铜 130 g/t、Kg-1 80 g/t、捕收剂 80 g/t、MIBC 12.5 g/t 的药剂用量基础上,对比四种捕收剂的捕收性能,所得试验结果见图 7。

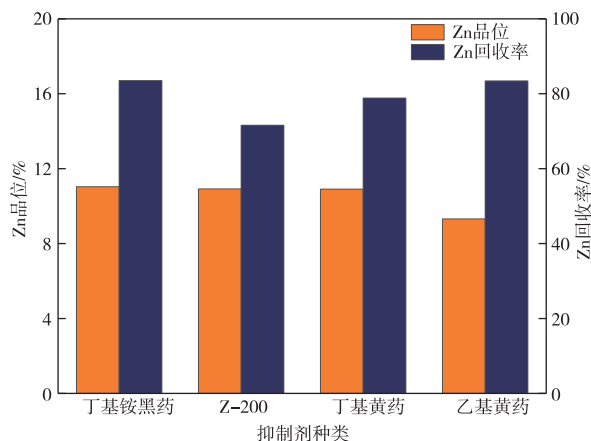


图 7 捕收剂种类对高硫低锌尾矿粗选指标的影响

Fig. 7 Effects of collector types on the roughing index of high sulfur and low zinc tailings

对比四种捕收剂的捕收效果,当采用丁基铵黑药作为锌粗选捕收剂时,粗精矿综合浮选指标最好,同时能保证较高的品位以及回收率,此时能获得 Zn 品位和回收率分别为 11.04%、83.51% 的粗精矿。因此,确定丁基铵黑药为粗选捕收剂。

2.1.4.2 丁基铵黑药用量试验

在石灰 10 000 g/t、硫酸铜 130 g/t、Kg-1 80 g/t、MIBC 12.5 g/t 的药剂用量基础上进行丁基铵黑药用量试验。所得试验结果见图 8。

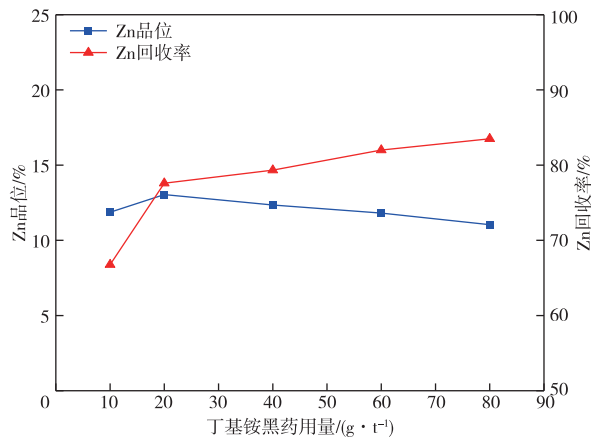


图 8 丁基铵黑药用量对高硫低锌尾矿粗选指标的影响

Fig. 8 Effects of ammonium dibutyl dithiophosphate dosage on the roughing index of high sulfur and low zinc tailings

由图 8 可知，粗精矿 Zn 回收率始终与丁基铵黑药用量呈正相关的关系，而 Zn 品位则随丁基铵黑药用量的增加先升高后降低，当丁基铵黑药用量从 20 g/t 增加至 80 g/t 时，品位从 13.04% 降低至 11.04%。综合考虑，为保证粗精矿 Zn 品位，最终选定丁基铵黑药用量为 20 g/t。

2.1.4.3 组合捕收剂种类试验

与单一捕收剂相比较，组合捕收剂具有适用范围大、选择性强、捕收效果好等特点，通过药剂之间的协同作用增强捕收剂性能，实现对目的矿物更好地回收^[15]。分别使用丁基黄药、乙基黄药、Z-200 与丁基铵黑药进行组合，并在 1:1 的组合比例下对比三种组合捕收剂的捕收性能。具体药剂制度为石灰 10 000 g/t、硫酸铜 130 g/t、Kg-1 80 g/t、组合捕收剂 20 g/t、MIBC 12.5 g/t，所得试验结果见图 9。

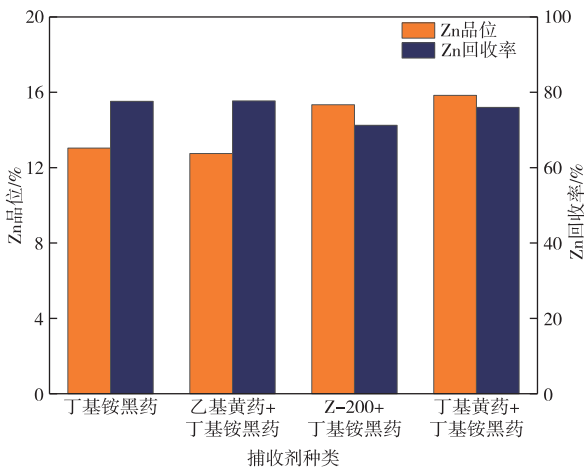


图 9 组合捕收剂种类对高硫低锌尾矿粗选指标的影响

Fig. 9 Effects of combined collector types on the roughing index of high sulfur and low zinc tailings

单独使用丁基铵黑药作为捕收剂时，能得到 Zn 品位为 13.04%，Zn 回收率为 77.6% 的指标。对比三种组合捕收剂对锌的捕收效果，当采用丁基铵黑药和丁基黄药组合作为捕收剂时，粗精矿锌浮选综合指标最好，Zn 品位和回收率分别为 15.84% 和 75.99%，因此确定丁基铵黑药和丁基黄药为闪锌矿粗选组合捕收剂，药剂 1:1 组合使用，总用量为 20 g/t。

2.2 闭路试验

根据条件试验确定最佳药剂制度，采用一粗三精一扫，其中扫选不添加石灰，其他药剂减半，三次精选均添加石灰 500 g/t 调节矿浆 pH 值，中矿按顺序返回的闭路工艺流程，进行两组闭路试验，

对比有无黄铁矿辅助抑制剂 Kg-1 对浮选指标的影响。闭路 1：粗选选用药剂分别为石灰、硫酸铜、Kg-1、丁基黄药+丁基铵黑药以及 MIBC，用量分别为 10 000、130、80、(10+10) 以及 12.5 g/t；闭路 2：不加 Kg-1，其他条件与闭路 1 相同。试验流程如图 10，试验结果见表 3、4。

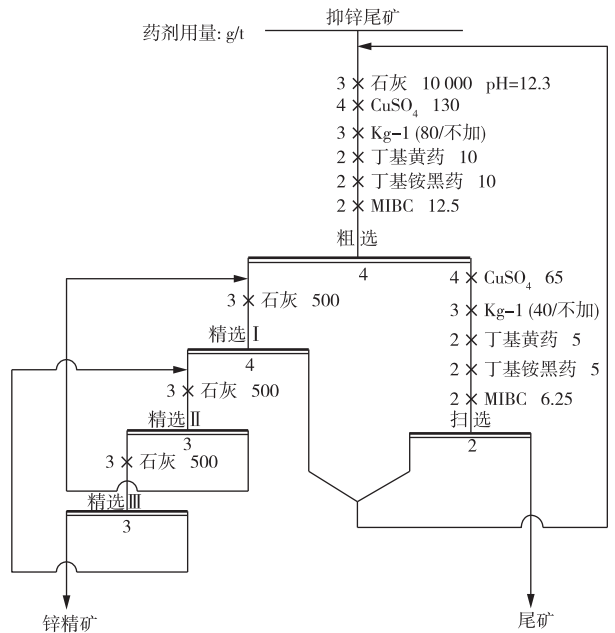


图 10 高硫低锌尾矿闭路试验流程图

Fig. 10 Flowsheet of closed-circuit test of high-sulfur and low-zinc tailings

表 3 高硫低锌尾矿闭路 1 浮选指标

Table 3 High sulfur and low zinc tailings closed

circuit 1 flotation index /%			
产品	产率	Zn 品位	Zn 回收率
锌精矿	4.51	42.86	71.93
尾矿	95.49	0.79	28.07
原矿	100.0	2.69	100.0

表 4 高硫低锌尾矿闭路 2 浮选指标

Table 4 High sulfur and low zinc tailings closed

circuit 2 flotation index /%			
产品	产率	Zn 品位	Zn 回收率
锌精矿	6.53	29.10	70.77
尾矿	93.47	0.84	29.23
原矿	100.0	2.69	100.0

由表 3、4 可知，在最佳药剂制度下采用所选浮选工艺流程，高硫低锌尾矿闭路浮选试验 1 最终可获得 Zn 品位为 42.86%，Zn 回收率为 71.93% 的锌精矿，达到选厂要求浮选指标，实现了对该高硫低锌尾矿锌的高效回收利用；相对于未使用 Kg-1 的闭路 2 试验结果，Zn 品位提升 13.76 个百分点，说明 Kg-1 是一种有效的黄铁矿抑制剂，通

过阻碍浮选过程中黄铁矿的上浮,提高了闭路最终精矿中 Zn 的品位。

3 机理分析

Kg-1 是一种性能优良的有机小分子抑制剂,其分子头基有硫亲固原子,当溶于水时会产生 $R-CSS^-$, 具有较强的络合能力,能与某些金属形成较为稳定的络合物。对于被硫酸铜活化的黄铁矿而言,能在黄铁矿表面与 Cu^{2+} 和 Fe^{2+} 形成不溶性络合物,阻碍了捕收剂在表面的吸附,降低了黄铁矿的疏水性。Kg-1 在黄铁矿表面吸附机理如图 11 所示,具体反应方程式如(1)、(2)所示:

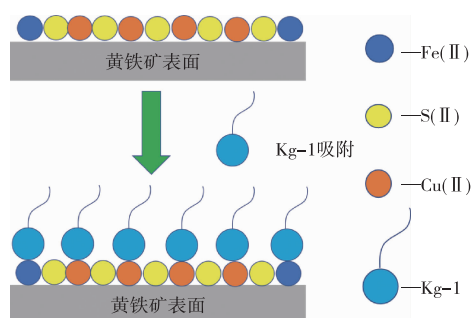
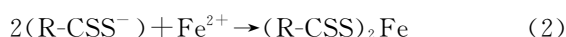
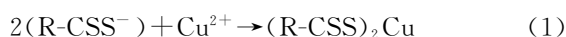


图 11 Kg-1 在黄铁矿表面的吸附机理示意图

Fig. 11 A schematic diagram of the adsorption mechanism of Kg-1 on the surface of pyrite

4 结论

1) 本试验尾矿中锌含量为 2.69%, S 含量高达 47.08%, 含有大量黄铁矿, 属于典型的高硫低锌尾矿。实验室通过条件试验确定最佳药剂制度, 采用一粗三精一扫的闭路工艺流程, 最终闭路试验获得 Zn 品位 42.86%、回收率 71.93% 的锌精矿, 达到选厂要求浮选指标, 实现了该高硫低锌尾矿中锌的高效回收利用。

2) 该高硫低锌尾矿现场通过常规石灰-硫酸铜-黄药体系无法获得较好浮选指标, 实验室通过条件试验指出石灰用量不足、硫酸铜用量过大导致现场精矿 Zn 品位较低, 通过调整药剂用量、使用组合捕收剂和添加黄铁矿辅助抑制剂 Kg-1 可提高精矿 Zn 品位; 闭路试验证明使用 Kg-1 是一种有效的黄铁矿抑制剂, 可以显著提高最终闭路精矿的 Zn 品位。

3) Kg-1 溶于水时会产生 $R-CSS^-$, 具有较

强的络合能力, 通过与被活化的黄铁矿表面的 Cu^{2+} 和 Fe^{2+} 反应产生不溶性络合物, 阻碍捕收剂的吸附实现对黄铁矿的抑制。

参考文献

- [1] 王跃, 朱祥坤. 锌同位素在矿床学中的应用: 认识与进展[J]. 矿床地质, 2010, 29(5): 843-852.
WANG Y, ZHU X K. Application of zn isotopes to study of mineral deposits: a review [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(5): 843-852.
- [2] 杨桂兰, 郭学平, 吕莉. 透明质酸锌的制备方法和用途[J]. 食品与药品, 2008, 10(11): 63-65.
YANG G L, GUO X P, LYU L. Preparation method and use of zinc hyaluronate [J]. Food and Drug, 2008, 10(11): 63-65.
- [3] 刘红召, 杨卉芃, 冯安生. 全球锌矿资源分布及开发利用[J]. 矿产保护与利用, 2017, 37(1): 113-118.
LIU H Z, YANG H P, FENG A S. The distribution and utilization of global zinc resource [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017, 37(1): 113-118.
- [4] GUNGOREN C, BAKTARHAN Y, DEMIR I, et al. Enhancement of galena-potassium ethyl xanthate flotation system by low power ultrasound [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1102-1110.
- [5] LOPEZ R, JORDAO H, HARTMANN R, et al. Study of butyl-amine nanocrystal cellulose in the flotation of complex sulphide ores [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 579 (C): 123655-123655. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2019.123655.
- [6] BARKER G J, GERSON A R, MENUGE J F. The impact of iron sulfide on lead recovery at the giant naven zn-pb orebody, ireland [J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 128: 16-24.
- [7] 乔吉波, 文书明, 王少东. 登高某铜铅矿选矿工艺试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2012, 32(4): 47-50.
QIAO J B, WEN S M, WANG S D. Experimental study on the beneficiation process of a copper-lead ore from Denggao [J]. Mining Research and Development, 2012, 32(4): 47-50.
- [8] 王可祥, 祁忠旭, 江旭, 等. 某低品位复杂难选铜锌矿选矿工艺研究[J]. 矿业研究与开发, 2021, 41(9): 137-140.
WANG K X, QI Z X, JIANG X, et al. Experimental research on beneficiation of a low-grade

- copper-zinc ore [J]. Mining Research and Development, 2021, 41(9): 137-140.
- [9] 肖骏, 陈代雄, 董艳红, 等. 青海某难选铜铅锌矿石选矿试验[J]. 现代矿业, 2015, 31(6): 80-83.
XIAO J, CHEN D X, DONG Y H, et al. Beneficiation technology on a refractory cu-pb-zn polymetallic ore in Qinghai[J]. Modern Mining, 2015, 31(6): 80-83.
- [10] 高恩霞, 张春, 李悦鹏, 等. 磨矿方式对闪锌矿和黄铁矿浮选动力学影响研究[J]. 金属矿山, 2022, 51(9): 100-106.
GAO E X, ZHANG C, LI Y P, et al. Effects of grinding methods on the flotation kinetics of sphalerite and pyrite[J]. Metal Mine, 2022, 51(9): 100-106.
- [11] 黄有成, 赵礼兵, 代淑娟. 黄铁矿浮选抑制剂研究现状[J]. 有色矿冶, 2011, 27(3): 24-29.
HUANG Y C, ZHAO L B, DAI S J. The research on the depressant of pyrite[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2011, 27(3): 24-29.
- [12] 吴桂叶, 刘龙利, 张行荣, 等. 计算机辅助研究黄铜矿抑制剂的分子结构特征[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(增刊1): 268-271.
WU G Y, LIU L L, ZHANG X R, et al. Computer aided study on molecular structure characteristics of chalcopyrite inhibitor [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2013(Suppl. 1): 268-271.
- [13] WEI Q, DONG L Y, JIAO F, et al. The synergistic depression of lime and sodium humate on the flotation separation of sphalerite from pyrite[J]. Minerals Engineering, 2021, 163: 106779. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106779.
- [14] 陈薇, 童雄. 浮选闪锌矿和铁闪锌矿的捕收剂研究现状及进展[J]. 国外金属矿选矿, 2007, 44(8): 25-27.
CHEN W, TONG X. Research status and progress of collectors for flotation of sphalerite and iron sphalerite[J]. Metallic Ore Dressing Abroad, 2007, 44(8): 25-27.
- [15] 徐龙华, 田佳, 巫侯琴, 等. 组合捕收剂在矿物表面的协同效应及其浮选应用综述[J]. 矿产保护与利用, 2017, 37(2): 107-112.
XU L H, TIAN J, WU H Q, et al. A review on the synergetic effect of the mixed collectors on mineral surface and its application in flotation[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017, 37(2): 107-112.

(编辑: 汪东芳)

(上接第 20 页)

- [6] 刘向峰, 郝国亮, 李喜林, 等. 侧限压缩试验下矽石充填材料的变形特性及其颗粒分布研究[J]. 实验力学, 2022, 37(3): 439-446.
LIU X F, HAO G L, LI X L, et al. Study on deformation characteristics and particle distribution of gangue filling materials under confinement compression test [J]. Experimental Mechanics, 2022, 37(3): 439-446.
- [7] 刘晓明. 采空区矽石充填控制覆岩变形破坏机理研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
LIU X M. Research on the deformation and failure mechanism of overlying rock controlled by gangue filling in goaf[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [8] TAI Y, HAO D Y, LI J M, et al. Study on deformation law of surrounding rock in overburden gateway with solids backfill coal mining [J]. Coal Science and Technology, 2016, 44(3): 33-38, 54.
- [9] 巨峰. 固体充填采煤物料垂直输送技术开发与工程应用[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2012.
JU F. Development and engineering application of vertical conveying technology for solid filling coal mining materials[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2012.
- [10] 肖金杰, 李帅, 杨小刚. 原生矽石置换开采建下压煤技术研究[J]. 煤炭技术, 2022, 41(6): 12-16.
XIAO J J, LI S, YANG X G. Research on coal pressing technology under the construction of primary gangue replacement mining [J]. Coal Technology, 2022, 41(6): 12-16.

(编辑: 周叶)