

doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2025. 08. 007

甘肃某低品位硫化铅锌矿高效浮选分离试验研究

于鹏泽^{1,2}, 马原琳^{1,2}, 肖 云³, 童 雄^{1,2}, 李庆恒³

- (1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;
2. 金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 昆明 650093;
3. 金徽矿业股份有限公司, 甘肃 陇南 742300)

摘 要: 甘肃某硫化铅锌矿中铅、锌品位分别为 1.42%、3.62%, 铅锌主要以硫化物形式存在, 造岩组分 CaO、SiO₂ 含量较高, 分别为 23.72%、45.86%, 脉石矿物以石英(含量 49.09%)、方解石(含量 28.21%)为主, 方铅矿和闪锌矿存在明显的相互包裹和连生现象, 针对其矿物嵌布紧密、脉石矿物含量高、铅锌高效分离困难的特点, 为实现铅锌高效分离, 采用优先浮选流程, 铅锌浮选流程皆为一粗二扫三精, 铅浮选以石灰为抑制剂、添加在磨机中, 乙硫氮为捕收剂, 新型巯基类有机抑制剂 TZ-3 添加在铅精选作业; 锌浮选以硫酸铜为活化剂、戊基黄药为捕收剂, 全流程闭路试验获得了铅品位和回收率分别为 63.87%、92.66% 的铅精矿, 其中含锌 2.00%、含银 335.10 g/t, 以及锌品位和回收率分别为 55.36%、97.33% 的锌精矿, 其中含铅 0.48%。石灰在磨矿前添加, TZ-3 在精选段靶向抑制降低锌夹杂, 显著提升铅回收率并减少药剂消耗, 以及硫酸铜与戊基黄药协同优化实现了该矿石中方铅矿和闪锌矿的高效分离与富集, 为同类型矿石资源的绿色高效回收利用提供了重要借鉴和参考。

关键词: 硫化铅锌矿; 优先浮选; 铅锌分离; 抑制剂; TZ-3

中图分类号: TD952

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2025)08-0065-08

Experimental Study on High-Efficiency Flotation Separation of a Low-grade Lead-Zinc Sulfide Ore in Gansu

YU Pengze^{1,2}, MA Yuanlin^{1,2}, XIAO Yun³, TONG Xiong^{1,2}, LI Qingheng³

- (1. School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;
2. National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Mine Tailings Resources, Kunming 650093, China;
3. Jinhui Mining Co., Ltd., Longnan 742300, Gansu, China)

Abstract: In a certain lead-zinc sulfide mine in Gansu province, the lead and zinc grades are 1.42% and 3.62%, respectively. Lead and zinc primarily exist in the form of sulfides. The rock-forming components CaO and SiO₂ have relatively high contents, at 23.72% and 45.86%, respectively. The gangue minerals are primarily quartz (49.09%) and calcite (28.21%). Galena and sphalerite exhibit significant intergrowth and symbiotic occurrence. Given the characteristics of tight mineral distribution, high gangue mineral content, and difficulties in achieving efficient lead-zinc separation, a priority flotation process was adopted to achieve efficient lead-zinc separation. The lead-zinc flotation process consists of one roughing, two scavengings, and three cleanings. Lead flotation uses lime as an inhibitor added to the grinding mill, ethyl thiocyanate as a collector, and the new thiol-based organic inhibitor TZ-3 added during lead concentration. Zinc flotation uses copper sulfate as an activator and pentyl xanthate as a collector. The locked-cycle test of the whole process yielded lead concentrate with a grade of 63.87% and a recovery of 92.66%, containing 2.00% zinc and 335.10 g/t silver, as well as zinc concentrate with a grade of 55.36% and a recovery of 97.33%, containing 0.48% lead. The addition of lime before grinding, the targeted inhibition of

收稿日期: 2024-11-27

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项(2024ZD1004006); 甘肃省科技重大专项计划项目(22ZD6GK065)

作者简介: 于鹏泽(2000—), 男, 云南祥云人, 硕士研究生, 主要从事有色金属硫化矿方向的浮选研究。

通信作者: 马原琳(1992—), 女, 河南中牟人, 博士, 讲师, 主要从事资源综合利用方向的研究。

zinc inclusion by TZ-3 in the selective flotation stage, significantly improved lead recoveries and reduced reagent consumption. Additionally, the synergistic optimization of copper sulfate and pentyl xanthate achieved efficient separation and concentration of galena and sphalerite in the ore, providing important references and insights for the green and efficient recovery and utilization of similar ore resources.

Key words: lead-zinc sulfide ore; selective flotation; lead-zinc separation; depressant; TZ-3

铅、锌金属具有极其重要的地位,广泛应用于电气、机械、军事、冶金、化学、建筑、医药等众多领域^[1-3]。我国的铅锌资源十分丰富,是我国的优势矿产资源之一,其总储量约占世界总量的24%^[4-5],主要集中在云南、内蒙古、甘肃、广东、湖南、四川、广西7个省区,具有贫矿多富矿少、矿石类型复杂、共伴生组分多等特点^[6-7]。硫化铅锌矿是铅锌矿的主要矿石类型,占铅锌矿总储量的90%左右^[8-9],主要金属矿物是方铅矿和闪锌矿,一般会伴生有少量的黄铜矿、黄铁矿和磁黄铁矿,以及稀贵金属金、银等;选别工艺主要包括浮选、重选、磁选、重—磁—浮联合等工艺,通常采用抑锌浮铅的优先浮选流程^[10-11]。

浮选药剂是铅锌浮选分离的关键,在铅锌优先浮选流程中,闪锌矿的抑制剂尤为重要,主要分为无机抑制剂和有机抑制剂两类:无机抑制剂包括氰化物类、硫酸锌、高锰酸钾、石灰等;有机抑制剂则有刺槐豆胶^[12]、阳离子瓜尔胶^[13]、壳聚糖^[14]等。与传统抑制剂相比,有机抑制剂具有高效、绿色的优势。近年来,新型高效抑制剂的研究与应用备受关注^[15]。例如,YANG等^[16]采用新型闪锌矿抑制剂HPAA(2-羟基膦酸乙酸)开展微浮选试验,结果表明其可选择性抑制闪锌矿;ZHU等^[17]在铅锌分离浮选试验中,将HEDP(1-羟乙基-1,1-二膦基)用作闪锌矿抑制剂,发现其在异丁基黄原酸钠体系中能有效抑制闪锌矿浮选,而对方铅矿浮选几乎无影响。

甘肃某硫化铅锌矿存在铅锌矿物嵌布紧密、浮选

精矿中铅锌互含严重、分离难度大等问题。本研究以该矿石为对象,在工艺矿物学特性分析的基础上,开发出适用于铅锌分离的新型高效抑制剂TZ-3,最终确定了合理的选矿工艺流程及药剂制度,实现了该铅锌资源的高效回收。

1 矿石性质

1.1 矿石中主要化学多元素分析

对矿石进行了主要化学多元素分析,分析结果见表1。由表1可知,主要有用组分为铅、锌,含量分别为1.42%、3.62%,伴生组分金、银含量分别为0.078、13.10 g/t,造岩组分CaO、SiO₂含量较高,分别为23.72%、45.86%。

1.2 矿石中主要金属化学物相分析

对矿石中主要金属铅、锌进行了化学物相分析,分析结果见表2、3。结果表明,铅、锌主要以硫化物的形式存在,方铅矿分布率为95.89%,硫化锌分布率为98.32%。

1.3 矿石中主要矿物组成及含量

采用MLA、扫描电镜、X射线能谱仪对矿石中的矿物颗粒进行了分析和统计,以确定其矿物组成和含量,结果表明,矿石中主要金属硫化矿物是方铅矿、闪锌矿、黄铁矿,含量分别为1.67%、5.68%、2.45%,微量黄铜矿;脉石矿物主要是石英和方解石,含量分别为49.09%、28.21%。此外,还有少量重晶石、高岭石、白云石、铁白云石、钾长石等。

表1 矿石主要化学多元素分析结果

Table 1 Results of main chemical multi-element analysis of the ore

/%

组分	Pb	Zn	Cu	S	Fe	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	C
含量	1.42	3.62	0.016	4.59	1.78	0.078	13.10	0.66	23.72	1.72	45.86	4.06

注:1)单位为g/t,下同。

表2 铅化学物相分析结果

Table 2 Results of lead chemical phase

analysis of the ore

/%

铅相别	方铅矿	白铅矿	铅铁钒及其他	铅钒	总铅
含量	1.40	0.037	0.021	0.002	1.46
分布率	95.89	2.53	1.44	0.14	100.0

表3 锌化学物相分析结果

Table 3 Results of zinc chemical phase

analysis of the ore

/%

锌相别	硫化锌	硫酸锌	锌铁尖晶石及其他锌	氧化锌	总锌
含量	3.52	0.016	0.019	0.025	3.58
分布率	98.32	0.45	0.53	0.70	100.0

1.4 矿石中主要目的矿物的嵌布特征

矿物的嵌布特征对确定磨矿细度、选择选矿方法、预估选矿指标等具有重要作用。矿石中方铅矿和闪锌矿的嵌布特征见图1、2。

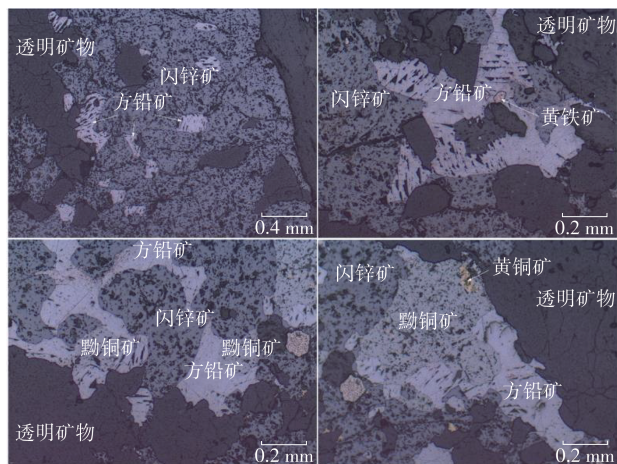


图1 方铅矿的嵌布特征

Fig. 1 Disseminated characteristics of galena

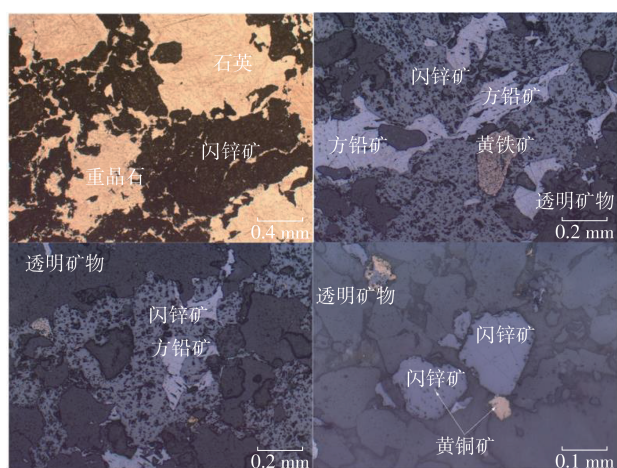


图2 闪锌矿的嵌布特征

Fig. 2 Disseminated characteristics of sphalerite

由图1、2可知,方铅矿和闪锌矿存在明显的相互包裹和连生现象,与黄铁矿、石英、方解石等其他矿物连生较少;此外,方铅矿和闪锌矿的嵌布关系紧密,且嵌布粒度较粗,分别为0.010~2、0.010~4 mm,对二者的分离具有较大的影响。

2 选矿试验及结果讨论

经浮选流程对比探索试验后,确定铅锌优先浮选流程,并重点考察新型高效的闪锌矿抑制剂TZ-3对铅锌分离指标的影响。

2.1 方铅矿浮选条件试验

2.1.1 石灰添加方式和用量试验

石灰是硫化矿优先浮选中最常用的pH调整剂,常通过调节矿浆pH值改善浮选环境,以实现目的矿物的有效分离^[18-19]。固定试验条件:磨矿细度-0.074 mm占75%、石灰用量8 000 g/t、捕收剂乙硫氮用量100 g/t、起泡剂松醇油用量20 g/t,进行了磨矿细度试验,试验结果与矿石性质中方铅矿和闪锌矿嵌布粒度较粗的结论一致,表明粗磨即可实现目的矿物的单体解离。

工业生产中,石灰可直接加入磨机。为考察石灰添加方式对浮选结果的影响,分别设置石灰加入磨机和石灰加入浮选槽两种方案,试验结果见图3。图3(a)结果显示,在相同浮选条件下,石灰加入磨机时,铅粗精矿的产率和回收率均高于加入浮选槽的情况。因此,确定采用石灰加入磨机的添加方式。由图3(b)

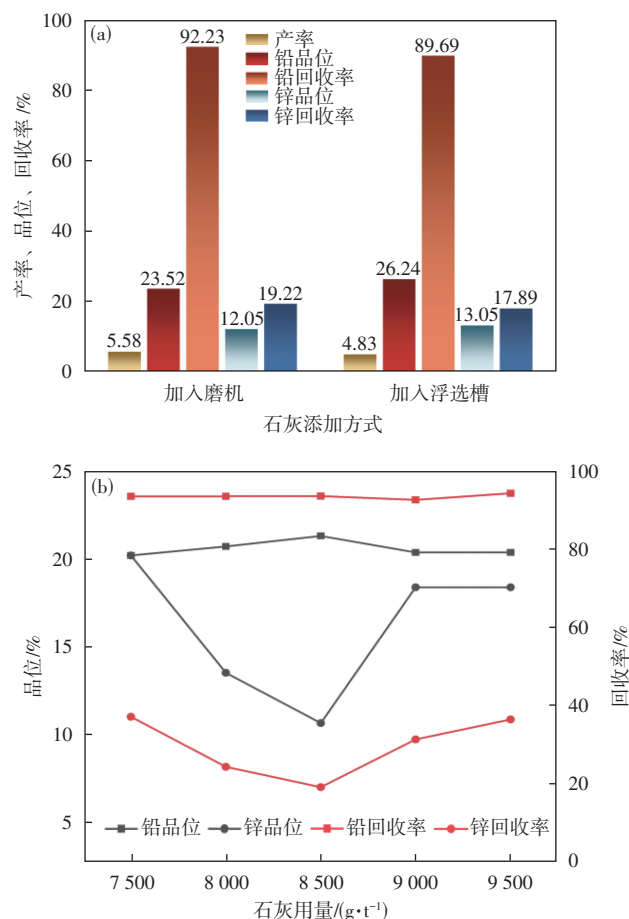


图3 石灰添加方式及石灰用量试验结果

Fig. 3 Results of lime addition method and lime dosage tests

可知,随着石灰用量增加,铅粗精矿的品位和回收率变化较小,而锌回收率呈先降低后升高的趋势;当石灰用量为8 500 g/t时,铅粗精矿中锌品位和回收率均达到最低值,表明该条件下铅锌矿物的分离效果最佳。因此,确定石灰的适宜用量为8 500 g/t,对应矿浆pH值为12。

2.1.2 捕收剂种类及用量试验

方铅矿常用的捕收剂主要有黄药类和黑药类,其中黑药类捕收剂的捕收能力相对较强。固定磨矿细度—0.074 mm占75%、石灰用量8 500 g/t,选取25[#]黑药、乙硫氮、丁铵黑药、乙基黄药四种药剂作为捕收剂进行捕收剂种类试验,捕收剂用量均为100 g/t。由于黑药类捕收剂自身具有起泡性能,因此采用25[#]黑药和丁铵黑药作为捕收剂时松醇油用量为10 g/t,试验结果见图4(a)。

由图4(a)可知,在相同用量条件下,以25[#]黑药、丁铵黑药为捕收剂时,铅粗精矿产率较高但回收率偏低;且试验中观察到黑药类捕收剂的浮选泡沫存在虚、多、黏的问题,导致粗精矿产率偏大,铅品位和回收率降低。以乙硫氮和乙基黄药为捕收剂时,铅粗精矿产率相近,但乙硫氮对应的铅粗精矿品位和回收率均更高。因此,乙硫氮是最适宜的铅矿物捕收剂。为确定乙硫氮的最佳用量,进行了用量为90、100、110、120、130、140 g/t的浮选试验,试验结果见图4(b)。由图4(b)可知,随着乙硫氮用量增加,铅粗选回收率逐渐上升;当乙硫氮用量为90~110 g/t时,对铅矿物的捕收效果不佳,铅粗选回收率均低于95%;当乙硫氮用量达120 g/t时,铅粗选回收率为96.24%,且锌回收率降至最低。继续增加乙硫氮用量至130、140 g/t,铅粗选回收率增长显著放缓,而铅粗精矿中锌的损失率却有所上升。综合考虑,乙硫氮的适宜用量为120 g/t。

2.1.3 抑制剂种类和添加位置试验

闪锌矿常用的抑制剂包括石灰、硫酸锌等,而TZ-3作为新型巯基类有机抑制剂,具有无毒无害的特点,对闪锌矿的选择性抑制效果较好。考虑到在石灰(8 500 g/t)和乙硫氮(120 g/t)最佳用量条件下,铅粗精矿中锌的品位和回收率仍较高,为利于后续锌的回收,考察了不同抑制剂组合对铅浮选的影响,试验结果见图5。由图5可知,当单独使用石灰或采用石灰+TZ-3组合时,铅粗精矿中损失的锌回收率较高;而采用石灰+硫酸锌+亚硫酸钠、石灰+腐殖酸钠、石灰+YK-Zn组合时,铅粗精矿中损失的锌回收率

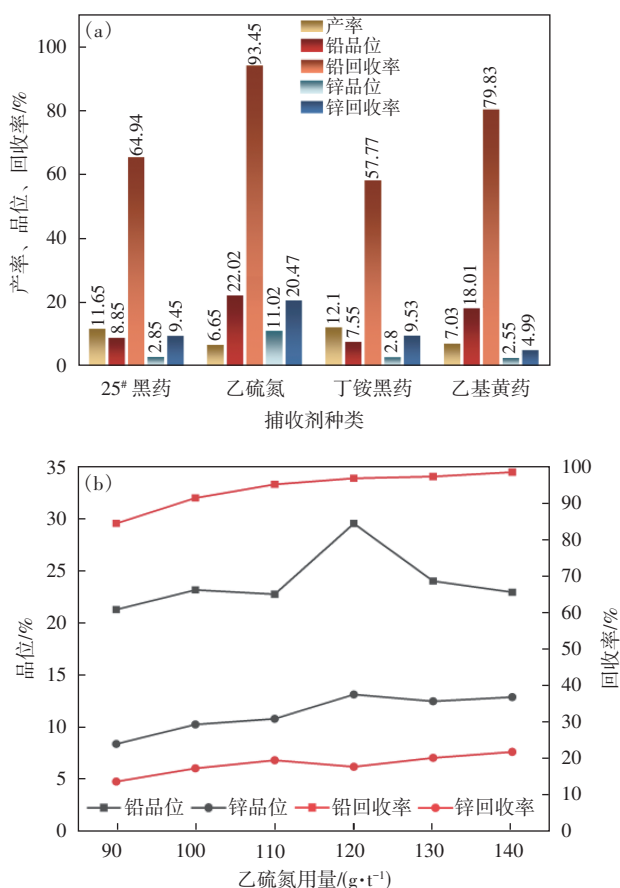
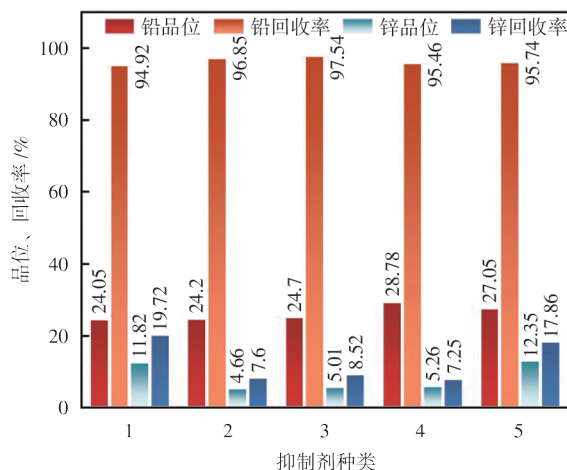


图4 捕收剂种类及用量试验结果

Fig. 4 Results of collector type and dosage tests



注: 1—石灰(8 500 g/t); 2—石灰+硫酸锌+亚硫酸钠(8 500+500+250 g/t); 3—石灰+腐殖酸钠(8 500+500 g/t); 4—石灰+YK-Zn(8 500+500 g/t); 5—石灰+TZ-3(8 500+500 g/t)。

图5 抑制剂种类试验结果

Fig. 5 Results of depressant type tests

较低,其中以石灰+YK-Zn的抑锌效果最佳,损失在选铅作业中的锌回收率最低。

考虑到若将抑制剂添加于铅精选作业,可减少抑制剂及锌活化剂的用量,从而降低药剂成本,因此选取铅粗选阶段抑锌效果最佳的YK-Zn和TZ-3,在铅精选环节开展对比试验,试验流程见图6,试验结果见图7。由图7可知,在相同用量(500 g/t)条件下,TZ-3和YK-Zn加入铅精选时均表现出较好的抑锌效果,铅粗选仅添加石灰时,损失的锌回收率约为20%,而两种抑制剂对闪锌矿的抑制效果(将其抑制至中矿)相当。不过,采用TZ-3时,铅精矿的铅品位和回收率均高于YK-Zn,说明TZ-3对方铅矿回收的影响更小。综上,将TZ-3作为抑制剂并仅在铅精选时添加,可获得较好的分选效果,且有利于降低药剂成本,故最终选择该方案。

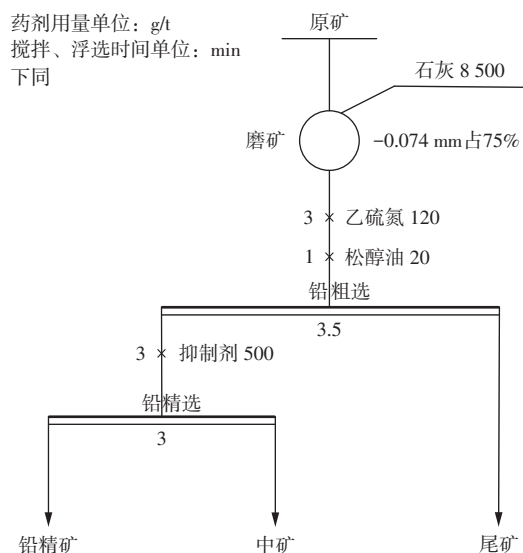


图6 抑制剂添加位置试验流程

Fig. 6 Flowsheet of depressant addition position tests

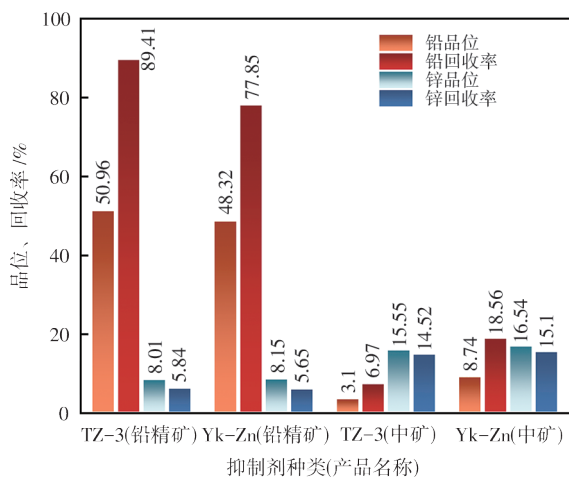


图7 抑制剂添加位置试验结果

Fig. 7 Results of depressant addition position tests

2.1.4 TZ-3用量试验

为确定铅精选时最佳的TZ-3用量,进行了TZ-3用量分别为300、400、500、600 g/t的用量试验,试验结果见图8。由图8可知,随着TZ-3用量的逐渐增加,铅精矿锌的回收率不断降低,说明增加抑制剂用量能够增强抑锌效果。当TZ-3用量小于400 g/t时,铅精矿的铅回收率变化很小;当TZ-3用量大于400 g/t后,铅精矿的铅回收率随着TZ-3用量的增加而显著降低,说明TZ-3用量过高,会对方铅矿回收产生不利影响。当TZ-3用量为400 g/t时,铅精矿回收率最高,损失的锌回收率也较低,因此,TZ-3适宜的用量为400 g/t。

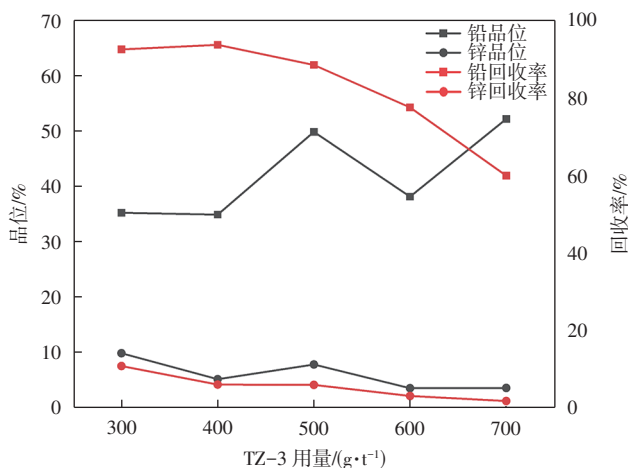


图8 TZ-3用量试验结果

Fig. 8 Results of TZ-3 dosage tests

2.2 闪锌矿浮选条件试验

2.2.1 活化剂种类和用量试验

在铅锌优先浮选试验流程中,锌浮选阶段需先将被抑制的闪锌矿重新活化再进行捕收,硫酸铜是闪锌矿最常用的活化剂。为确定锌粗选时硫酸铜的最佳用量,进行了硫酸铜用量分别为300、350、400、450 g/t的试验,试验结果见图9。由图9可知,随着硫酸铜用量增加,锌粗精矿的品位和回收率整体呈先升高后降低的趋势;当硫酸铜用量为350 g/t时,锌粗精矿的品位和回收率均达到最高。因此,确定活化剂硫酸铜的适宜用量为350 g/t。

2.2.2 捕收剂种类和用量试验

黄药是应用最广泛且经济性较好的硫化矿捕收剂。为考察不同种类的黄药对锌浮选结果的影响,选取乙基黄药、丁基黄药、戊基黄药和异戊基黄药四种药剂作为捕收剂,用量均为100 g/t,进行捕收剂种类试验,试验结果见图10。

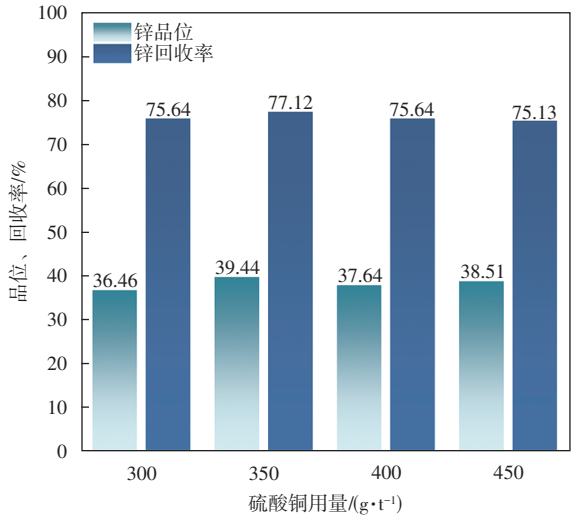


图9 硫酸铜用量试验结果

Fig. 9 Results of copper sulfate dosage tests

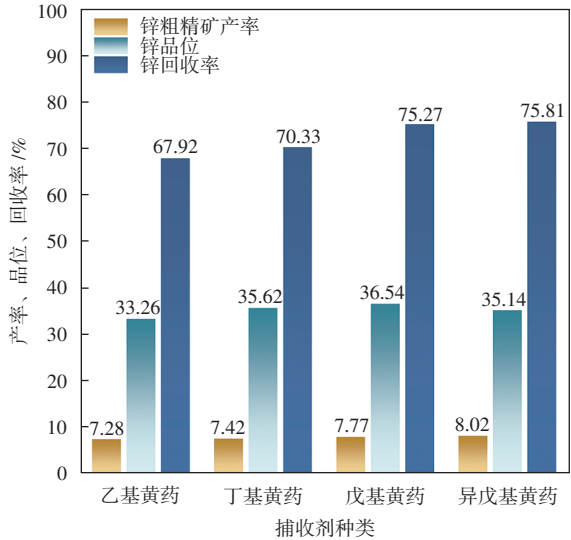


图10 捕收剂种类试验结果

Fig. 10 Results of conector type tests

由图10可知,随着黄药碳链增长,锌粗精矿产率依次增加,锌品位呈先升后降趋势,锌回收率持续升高但增速放缓。其中,戊基黄药与异戊基黄药作为捕

收剂时锌回收率相差不大;在相同用量条件下,戊基黄药的捕收效果更优,锌粗精矿品位和回收率都较高,且其成本低于异戊基黄药,因此,确定采用戊基黄药作为锌浮选捕收剂。

为确定戊基黄药的最佳用量,进一步开展了90、100、110、120 g/t的用量试验,试验结果见图11。由图11可知,随着戊基黄药用量增加,锌粗精矿产率逐渐上升,锌品位基本呈降低趋势,锌回收率则不断升高。当戊基黄药用量为100 g/t时,锌粗精矿品位最高,且经两次扫选后尾矿中锌回收率仅为1.59%。综合考虑,确定锌浮选作业中戊基黄药的适宜用量为100 g/t。

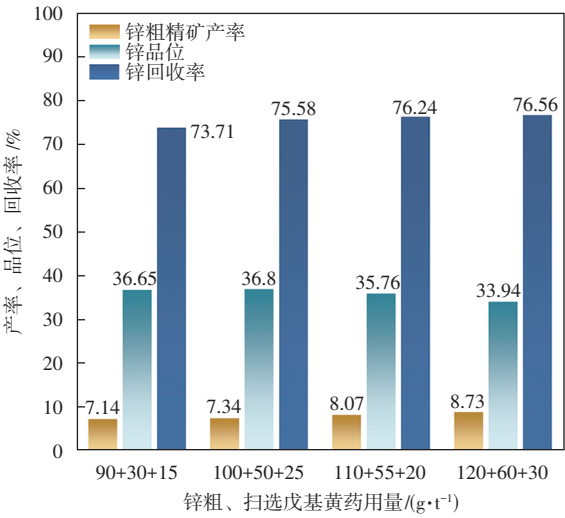


图11 戊基黄药用量试验结果

Fig. 11 Results of amylxanthine dosage tests

2.3 全流程闭路试验

在最佳药剂制度条件下进行全流程闭路试验,试验流程见图12,试验结果见表4。由表4可知,闭路试验获得了铅品位、回收率分别为63.87%、92.66%的铅精矿,其中锌含量2.00%、银含量335.10 g/t;锌品位、回收率分别为55.36%、97.33%的锌精矿,其中含铅0.48%。

表4 闭路试验结果

Table 4 Results of the locked-cycle tests

/%

产品名称	产率	品位				回收率	
		Pb	Zn	Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Pb	Zn
铅精矿	2.05	63.87	2.00	0.22	335.10	92.66	1.14
锌精矿	6.33	0.48	55.36	0.07	28.40	2.15	97.33
尾矿	91.62	0.08	0.06	—	—	5.19	1.53
原矿	100.0	1.41	3.60	—	—	100.0	100.0

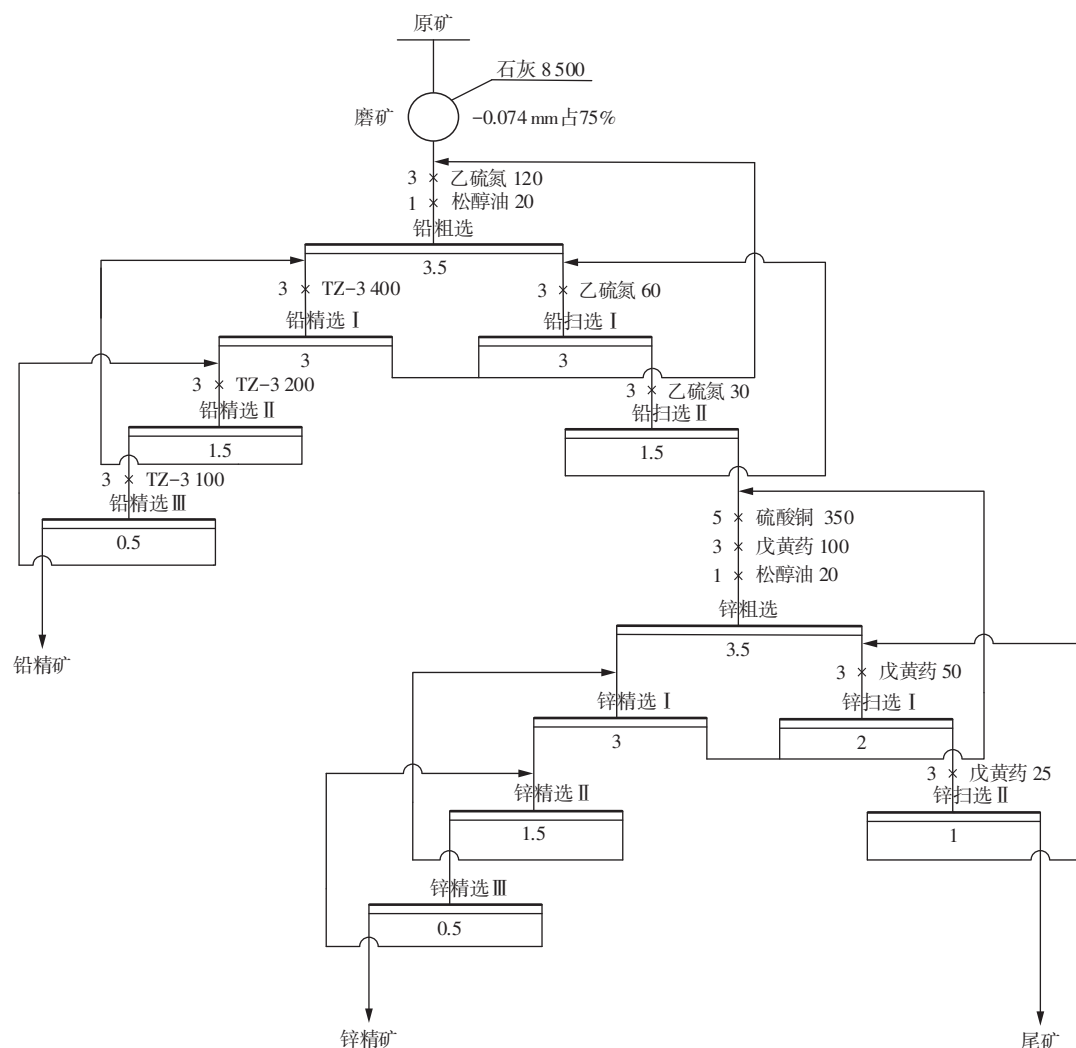


图 12 闭路试验流程

Fig. 12 Flowsheet of the locked-cycle tests

3 结论

1) 矿石主要组分Pb、Zn含量分别为1.42%、3.62%。其中,铅以方铅矿形式存在,分布率达95.89%;锌以闪锌矿形式存在,分布率达98.32%。主要脉石矿物为石英(49.09%)和方解石(28.21%)。由于方铅矿与闪锌矿普遍存在相互包裹和连生现象,二者高效分离难度较大。

2) 试验采用铅锌优先浮选流程,在磨矿细度为-0.074 mm占75%的条件下,以石灰作为黄铁矿抑制剂并添加于磨机中;以TZ-3作为闪锌矿抑制剂并添加于铅精选作业;乙硫氮、戊黄药分别作为方铅矿、闪锌矿的捕收剂;硫酸铜作为闪锌矿的活化剂。在最佳药剂制度下进行闭路试验,可获得铅品位63.87%、回收率92.66%,含锌2.00%、含银335.10 g/t的铅精矿和锌品位55.36%、回收率97.33%,含铅0.48%的锌精矿。

3) 开发的新型闪锌矿抑制剂TZ-3具有绿色环保、药剂成本低等优势。本研究突破了铅锌矿物嵌布紧密、难以分离的技术瓶颈,实现了方铅矿与闪锌矿的高效分离及富集。

参考文献

- [1] 江少卿,徐毅,孙尚信,等. 全球铅锌矿资源分布[J]. 地质与资源, 2020, 29(3): 224-232.
JIANG Shaoqing, XU Yi, SUN Shangxin, et al. Global distribution of lead-zinc resources[J]. Geology and Resources, 2020, 29(3): 224-232.
- [2] 刘永团,许磊,杜青松. 铅锌矿资源分布现状及中资企业开发建议[J]. 资源与产业, 2017, 19(5): 71-77.
LIU Yongtuan, XU Lei, DU Qingsong. Distribution of lead-zinc resources and proposals for Chinese mining companies[J]. Resources & Industries, 2017, 19(5): 71-77.
- [3] 杨俊龙,郭艳华,马立成,等. 氧化铅锌矿浮选尾矿回

- 收氧化锌技术攻关[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(12): 84-90.
- YANG Junlong, GUO Yanhua, MA Licheng, et al. Research on recovery technology of zinc oxide from flotation tailings of lead-zinc oxide mine[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2024(12): 84-90.
- [4] 张明超, 李景朝, 李鹏远, 等. 国内外铅锌矿资源及分布概述[J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊1): 41-45, 103.
- ZHANG Mingchao, LI Jingchao, LI Pengyuan, et al. Summarize on the lead and zinc ore resources of the world and China[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(Suppl. 1): 41-45, 103.
- [5] SUBHONQUL S, 刘全军, 董敬申. 云南某硫化铅锌矿选矿试验研究[J]. 有色金属工程, 2021, 11(4): 78-87.
- SUBHONQUL S, LIU Quanjun, DONG Jingshen. Experimental study on beneficiation of a lead zinc sulfide ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(4): 78-87.
- [6] 杨荣林. 浅析我国铅锌矿资源开发现状及可持续发展建议[J]. 世界有色金属, 2018(01): 148, 150.
- YANG Ronglin. Analysis of the current situation of lead and zinc mine resources development and suggestions for sustainable development in China[J]. World Nonferrous Metals, 2018(1): 148, 150.
- [7] 刘晓, 张宇, 王楠, 等. 我国铅锌矿资源现状及其发展对策研究[J]. 中国矿业, 2015, 24(增刊1): 6-9.
- LIU Xiao, ZHANG Yu, WANG Nan, et al. Pb-Zn metal resources situation and suggestion for Pb-Zn metals industry development in China[J]. China Mining Magazine, 2015, 24(Suppl. 1): 6-9.
- [8] 赵家林, 刘进, 张红英. 云南某难选铅锌矿选矿新工艺试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5): 81-86.
- ZHAO Jialin, LIU Jin, ZHANG Hongying. Experimental study on a new process for beneficiation of a difficult lead-zinc ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2023(5): 81-86.
- [9] 邹光旭, 吴雪兰, 郭争争, 等. 铅锌矿铅锌浮选的研究进展[J]. 安徽化工, 2017, 43(3): 13-18.
- ZOU Guangxu, WU Xuelan, GUO Zhengzheng, et al. Research status of lead and zinc from lead-zinc ore[J]. Anhui Chemical Industry, 2017, 43(3): 13-18.
- [10] 邱芝莲, 方建军, 何海洋, 等. 硫化铅锌矿浮选分离研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2024, 53(3): 72-79.
- QIU Zhilian, FANG Jianjun, HE Haiyang, et al. Research progress on flotation separation of lead-zinc sulfide[J]. Industrial Minerals & Processing, 2024, 53(3): 72-79.
- [11] 常伟华, 余涛, 苏超, 等. 云南某硫化铅锌矿工艺矿物学及选矿试验研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(11): 94-101.
- CHANG Weihua, YU Tao, SU Chao, et al. Study on technological mineralogy and flotation recovery technology of a lead zinc sulfide ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(11): 94-101.
- [12] 胡盘金, 郑永兴, 包凌云, 等. 硫化铅锌矿物浮选药剂应用研究进展[J]. 矿冶, 2021, 30(3): 123-128.
- HU Panjin, ZHENG Yongxing, BAO Lingyun, et al. Research development in the application of flotation reagent for the lead-zinc sulfide ore[J]. Mining and Metallurgy, 2021, 30(3): 123-128.
- [13] TAN X, ZHU Y G, SUN C Y, et al. Adding cationic guar gum after collector: a novel investigation in flotation separation of galena from sphalerite[J]. Minerals Engineering, 2020, 157: 106542. DOI: 10.1016/j.mineng.2020.106542.
- [14] HUANG P, CAO M L, LIU Q. Selective depression of sphalerite by chitosan in differential Pb-Zn flotation[J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 122: 29-35.
- [15] 胡尚军, 谢贤, 李博琦, 等. 贵州某硫化铅锌矿选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(3): 68-75.
- HU Shangjun, XIE Xian, LI Boqi, et al. Experimental study on mineral processing of a lead-zinc sulfide ore in Guizhou[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2024(3): 68-75.
- [16] YANG B Q, ZHU H Y, ZENG L Y, et al. An environmental-friendly sphalerite depressant (2-hydroxyphosphonoacetic acid) for the selective flotation separation of sphalerite from galena[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 343: 117614. DOI: 10.1016/j.molliq.2021.117614.
- [17] ZHU H Y, YANG B Q, FENG J C, et al. Evaluation of 1-hydroxyethylidene-1, 1-diphosphonic acid as an efficient and low-toxic sphalerite depressant in the selective flotation of galena from sphalerite[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 329. DOI: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.129612.
- [18] 邹勤, 龙冰, 雷小明, 等. 国外某低品位铜锌硫化矿浮选分离试验研究[J]. 金属矿山, 2020, 49(9): 111-117.
- ZOU Qin, LONG Bing, LEI Xiaoming, et al. Experimental study on flotation of a low-grade copper-zinc sulphide ore in abroad[J]. Metal Mine, 2020, 49(9): 111-117.
- [19] 卜显忠, 史娟娟, 王朝. 磨矿过程中添加石灰对铜锌硫化矿浮选的影响[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(7): 88-92.
- BU Xianzhong, SHI Juanjuan, WANG Zhao. The influences of adding lime in the grinding process on flotation of copper-zinc-sulfide ore[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(7): 88-92.