

doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2025.01.015

新型二硫代磷酸盐在铜铅锌多金属硫化矿中的应用研究

张军庆¹, 吴斌杰¹, 柏杨¹, 张佰通¹, 蔡锦鹏^{2,3},
谢海云^{2,3}, 刘殿文^{2,3}

(1. 锡林郭勒盟山金阿尔哈达矿业公司, 内蒙古 锡林郭勒盟 026300;

2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

3. 云南省绿色分离与富集重点实验室, 昆明 650093)

摘 要: 铜铅锌多金属硫化矿因可浮性相近、难免产生离子活化、嵌布粒度细等问题, 导致易浮难分, 且常伴生有贵金属, 其综合回收一直是选矿的技术难题。二硫代磷酸盐因其在低碱矿浆环境中的良好选择性被广泛应用于铜铅锌金属硫化矿浮选中。我国用于浮选生产的二硫代磷酸盐捕收剂以丁铵黑药和25[#]黑药为主, 捕收性能相对较弱, 难以满足日益复杂的矿石性质。内蒙某多金属硫化矿中主金属铜、铅、锌品位分别为0.30%、2.13%、2.89%, 伴生银品位为60.75 g/t。通过对比新型二硫代磷酸盐(代号LS-701)、25[#]黑药、丁铵黑药、乙基黄药和乙硫氮, 试验发现低碱矿浆环境中LS-701在保证选择性的前提下对微细粒含银方铅矿表现出更强的捕收能力, 协同异丙基乙基硫氨酯(Z-200)在铜铅混浮作业能较好地回收铜铅银。经粗精矿再磨再选得到的铜铅混合精矿, 以组合药剂过硫酸铵与腐殖酸钠(质量浓度比为1:2)为抑制剂、Z-200为捕收剂抑铅浮铜, 分离效果显著。锌作业采用常规浮选工艺, 以石灰为黄铁矿抑制剂、硫酸铜为活化剂、丁基黄药为捕收剂。经铜铅混浮—粗精矿再磨—分离—尾矿选锌工艺流程, 得到的铜精矿铜品位为21.59%、铜回收率为65.60%, 铅精矿铅品位为69.10%、铅回收率为92.12%, 锌精矿锌品位为51.06%、锌回收率为90.54%, 银在铜精矿和铅精矿中的总回收率为75.48%, 实现了有价元素铜铅锌银的高效综合利用。

关键词: 铜铅锌硫化矿; 新型二硫代磷酸盐; 微细粒含银方铅矿; 组合药剂; 综合利用

中图分类号: TD952 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2025)01-0131-08

Application Research of a Novel Dithiophosphate in a Copper-Lead-Zinc Polymetallic Sulfide Ore

ZHANG Junqing¹, WU Binjie¹, BAI Yang¹, ZHANG Baitong¹, CAI Jinpeng^{2,3},
XIE Haiyun^{2,3}, LIU Dianwen^{2,3}

(1. Xilingol League A'er Hada Mine Smelting Co., Ltd., Xilingol League 026300, Inner Mongolia, China;

2. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650093, China;

3. Yunnan Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Metal Resources,
Kunming 650093, China))

Abstract: Copper, lead and zinc polymetallic sulfide ore was easy to float and difficult to separate due to similar floatability, unavoidable ion activation, fine distribution and other problems, and often associated with precious metals, and its comprehensive recovery had been a technical problem in mineral processing. Dithiophosphate was widely used in flotation of copper, lead and zinc sulfide ores because of its good selectivity in low alkali pulp environment. The main collectors of dithiophosphate used in flotation production were butylamine dithiophosphate and dimethylphenyl dithiophosphate, which had the weak collection ability

收稿日期: 2024-07-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52064027)

作者简介: 张军庆(1990—), 男, 山东荣成人, 学士, 助理工程师, 主要从事铜铅锌硫化矿浮选分离及应用研究。

通信作者: 蔡锦鹏(1993—), 男, 湖北黄冈人, 博士, 讲师, 主要从事铜铅锌浮选理论与工艺、二次资源综合利用等方面的研究。

and are difficult to meet the increasingly complex ore properties. The main metal copper, lead and zinc grades in a polymetallic sulfide ore in Inner Mongolia were 0.30%, 2.13% and 2.89%, respectively, and the associated silver grade was 60.75 g/t. Through comparing modified dithiophosphate(LS-701), dimethylphenyl dithiophosphate, butylamine dithiophosphate, ethyl xanthate and diethyl dithiocarbamate, it was found that LS-701 showed a stronger ability to collect fine silver galena in low alkali pulp environment under the premise of ensuring selectivity. Copper, lead and silver can be recovered well in co-flotation with O-isopropyl-N-ethyl thionocarbamate. For copper-lead bulk concentrate obtained by regrinding and recleaning, the combination of ammonium persulfate and sodium humate as inhibitors (the mass concentration ratio is 1 : 2), Z-200 as collector to suppress lead floating copper, the separation effect was remarkable. In zinc operation, the conventional flotation process was adopted, with lime as pyrite inhibitor, copper sulfate as activator and butyl xanthate as collector. Through the flotation process “copper-lead bulk flotation-rough concentrate regrinding-copper-lead separation-zinc beneficiation”, a copper concentrate was obtained with the grade of 21.59% Cu and the recovery of 65.60%, a lead concentrate was obtained with the grade of 69.10% Pb and the recovery of 92.12% and a zinc concentrate was obtained with the grade of 51.06% Zn and the recovery of 90.54%. The total recovery of silver in copper concentrate and lead concentrate was 75.48%. An efficiently comprehensive utilization of valuable metals copper, lead, zinc and silver was achieved.

Key words: copper-lead-zinc sulfide ore; novel dithiophosphate; fine silver-bearing galena; combined reagents; comprehensive utilization

铜铅锌多金属硫化矿因可浮性相近、难免离子活化、嵌布粒度细等问题,导致易浮难分,且常伴生有贵金属,其综合回收一直是选矿的技术难题^[1-4]。在传统的铜铅锌硫化矿浮选分离中,往往需要加入大量有毒有害抑制剂来达到分离的目的,比如氰化物、重铬酸钾等,其会对环境造成严重污染^[5-6]。因此,绿色高效浮选药剂的开发与应用对于提高铜铅锌金属的资源利用率具有重要意义^[7-9]。

二硫代磷酸盐,由于其在低碱矿浆环境中具有良好的选择性,在铜铅锌金属硫化矿浮选中被大量应用,仅次于黄药^[10]。目前,我国用于浮选生产的二硫代磷酸盐捕收剂以丁铵黑药和25#黑药(甲酚黑药的一种)为主,捕收性能相对较弱,难以满足日益复杂的矿石性质。邹松^[11]以醚醇、五硫化二磷、氨水为原料直接反应制成了三种烷基醚基二硫代磷酸铵,并对其捕收性能进行了单矿物及实际矿石试验研究,最大限度综合回收了铜铅锌矿石中的有价金属。江锋等^[12]采用改性黑药类捕收剂CY-1,配合抑制剂亚硫酸钠与硫酸锌,在无碱条件下实现了铅锌的有效分离,强化了伴生银的综合回收。由此可见,新型二硫代磷酸

盐的开发是高效浮选铜铅锌硫化矿以及提高伴生贵金属的有效途径之一。

以内蒙某铅锌铜硫化矿为研究对象,在铜铅混浮选阶段引入一种新型二硫代磷酸盐(代号LS-701)替代常规捕收剂,协同异丙基乙基硫氨酯(Z-200),兼顾了捕收能力与选择性,配合铜铅分离作业绿色有机抑制剂的应用,实现了有价金属铜铅锌银的高效浮选分离与回收。

1 矿石性质

试验矿样来源于内蒙某铜铅锌硫化矿,化学多元素分析结果见表1,铜、铅、锌物相分析结果分别见表2~4,矿石X射线衍射分析结果见图1。表1~4结果显示,矿石中主要金属铜、铅、锌品位分别为0.30%、2.13%、2.89%,且主要以硫化物形式存在,占比分别为90.36%、95.27%、95.14%,伴生贵金属银的品位为60.75 g/t,价值占比高,因此在综合回收铜铅锌的同时,需重点关注银的走向。

由图1可知,目的金属铅锌主要存在于方铅矿、闪锌矿中,影响精矿品质的非目的金属矿物主要为黄

表1 矿石化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multi-element of the ore

/%

组分	Pb	Zn	Cu	Ag ¹⁾	Au	S	Fe	As	CaO	MgO	SiO ₂
含量	2.16	2.89	0.30	60.75	0.07	7.39	4.87	0.31	0.49	0.48	50.34

注:1)单位为g/t,下同。

表 2 铜物相分析结果

Table 2 Results of copper phase of the ore

/%

铜相别	原生铜	次生铜	游离铜	结合铜	总铜
含量	0.27	0.02	0.004	0.002	0.30
分布率	90.36	7.78	1.30	0.56	100.0

表 3 铅物相分析结果

Table 3 Results of lead phase of the ore

/%

铅相别	方铅矿	白铅矿	铅矾	其他	总铅
含量	2.06	0.01	0.01	0.08	2.16
分布率	95.27	0.25	0.59	3.89	100.0

表 4 锌物相分析结果

Table 4 Results of zinc phase of the ore

/%

锌相别	硫化锌	碳酸锌	硅酸锌	硅酸锌	总锌
含量	2.75	0.06	0.01	0.07	2.89
分布率	95.14	2.05	0.49	2.32	100.0

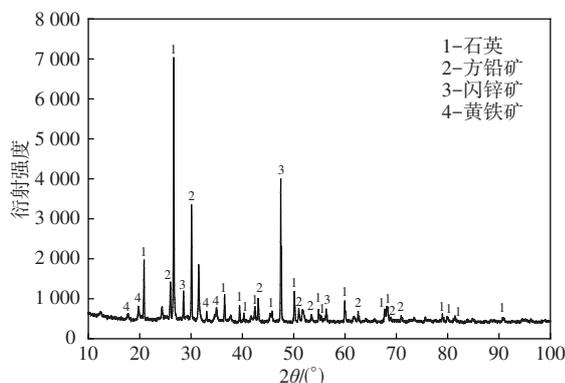


图 1 矿石 X 射线衍射谱图

Fig. 1 X-ray diffraction pattern of the ore

铁矿, 脉石矿物以石英为主, 硫化铜矿物因含量较低, X 射线衍射未能检测出其赋存形式。根据主金属铜铅锌分布以及其相应矿物可浮性特点, 采用铜铅混浮—分离—尾矿选锌工艺流程综合回收矿石中的铜铅锌银等有价值金属。

2 结果与讨论

2.1 铜铅混浮条件试验

2.1.1 磨矿细度对铜铅混浮指标的影响

铜铅混浮作业为兼顾伴生银的富集, 在低碱条件下进行, 捕收剂采用对铜铅选择性较好的 Z-200 与 25[#]黑药, 试验流程见图 2, 试验结果见图 3。由图 3 可知, 随着磨矿细度的增加, 铜铅混合粗精矿中铜、铅的回收率呈现增大的趋势, 尤其是铜的变化最为明显, 当磨矿细度达到 -0.074 mm 占 65% 时, 铜铅粗精矿中铅的回收率基本趋于稳定, 继续增大磨矿细度有助于铜回收率的进一步提

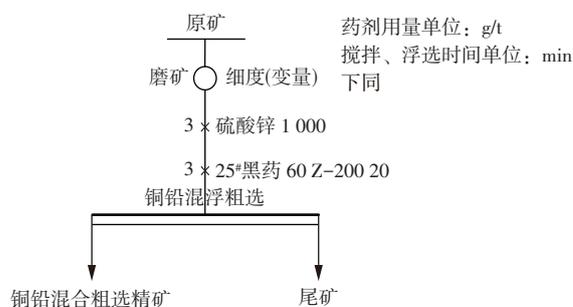


图 2 磨矿细度试验流程

Fig. 2 Flowsheet of grinding fineness tests

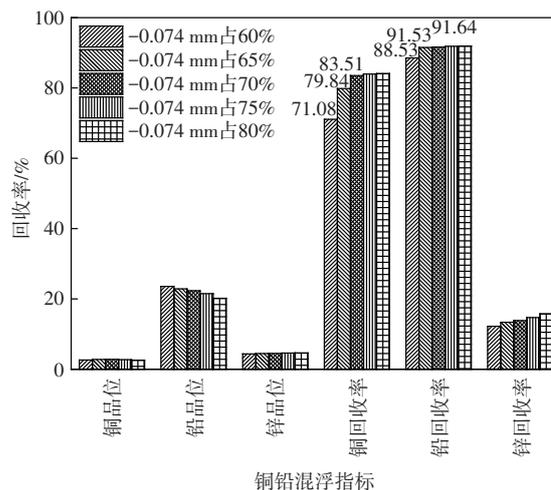


图 3 磨矿细度对铜铅混浮指标的影响

Fig. 3 Effects of grinding fineness on the copper-lead bulk flotation indexes

高, 说明铜矿物的嵌布较铅矿物细, 为兼顾铜铅的回收, 磨矿细度确定为 -0.074 mm 占 70% 较为合适。

2.1.2 石灰用量对铜铅混浮指标的影响

在铜铅混浮作业,加入石灰提高矿浆的pH可降低黄铁矿的可浮性。此外,提高矿浆的pH有利于促进胶体Zn(OH)₂的形成,增强硫酸锌对锌矿物的抑制作用。试验流程与磨矿试验一致,石灰添加在磨机中,试验结果见图4。由图4可知,少量的石灰可适当提高矿浆的碱度,有利于浮选泡沫的稳定,对铜铅的回收都具有一定的积极作用,但当石灰用量≥1 000 g/t时,铜回收率明显下降。研究表明,在pH≤10.5时,Z-200对黄铜矿均有良好的捕收能力,本次试验铜矿物可浮性的快速下降可能是与铜硫连生体相

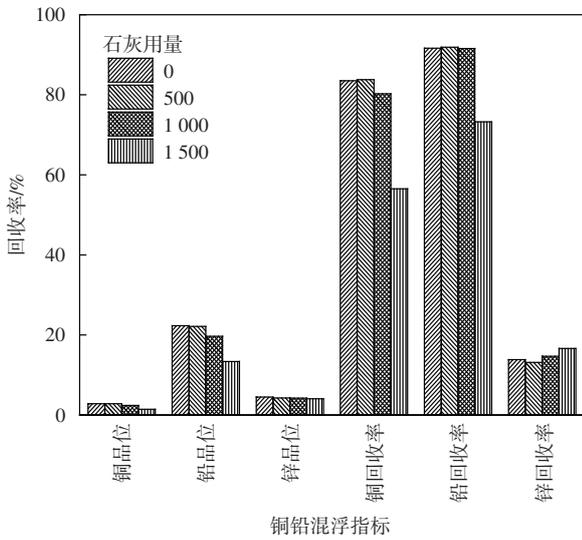


图4 石灰用量对铜铅混浮指标的影响

Fig. 4 Effects of lime dosage on the copper-lead bulk flotation indexes

关。另外,试验结果显示,铅的回收率在石灰用量为1 500 g/t时显著降低,过高的pH不利于黑药类捕收剂发挥捕收性能,综合考虑石灰用量为500 g/t。

2.1.3 铜铅混浮捕收剂对比试验

对比了25[#]黑药、丁铵黑药、乙基黄药、乙硫氮和

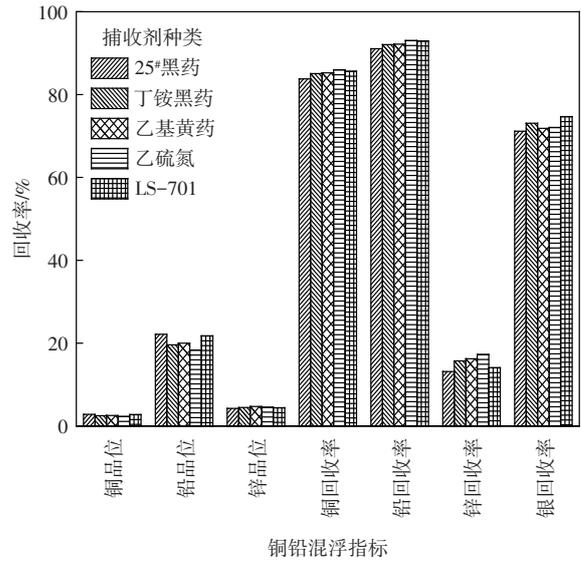


图5 捕收剂种类对铜铅混浮指标的影响

Fig. 5 Effects of collector type on the copper-lead bulk flotation performance

新型捕收剂LS-701配合Z-200对铜铅混浮指标的影响,试验结果见图5。由图5可知,新型捕收剂LS-701协同Z-200在铜铅混浮作业中表现出较好的捕收能力和选择性。低碱条件下,通过五种捕收剂进行对比,捕收剂LS-701的捕收能力仅次于乙硫氮,选择性优于丁铵黑药、乙基黄药和乙硫氮,且对银捕收效果较好。相比25[#]黑药,采用LS-701,经一次粗选得到的铜铅混合粗精矿中铜铅的品位下降幅度较小,铜、铅和银的回收率分别提高了近2、2和3.5个百分点。

为进一步了解捕收剂LS-701的捕收性能,对一次混浮粗选的尾矿进行了金属分布率分析,结果如表5所示。试验结果表明,对比25[#]黑药,LS-701在保持选择性的同时对含银方铅矿的捕收优势主要体现在微细粒上,铅尾矿-0.038 mm 粒级中的铅和银的分布率分别降低了10.12、13个百分点。

表5 混浮尾矿中铅锌银金属分布率

Table 5 Distribution rate of lead, zinc and silver in bulk flotation tailings

捕收剂	粒级/mm	产率/%	品位/%			分布率/%		
			Pb	Zn	Ag	Pb	Zn	Ag
25 [#] 黑药	+0.038	55.34	0.17	2.61	13.07	45.34	52.42	37.58
	-0.038+0.019	26.18	0.21	3.60	23.71	26.07	34.16	32.26
	-0.019	18.48	0.32	2.00	28.97	28.59	13.42	30.16
	合计	100.0	0.21	2.76	19.24	100.0	100.0	100.0
LS-701	+0.038	57.02	0.17	2.59	15.03	55.46	54.03	50.58
	-0.038+0.019	25.13	0.13	3.59	19.05	19.74	33.09	28.26
	-0.019	17.85	0.24	1.97	22.30	24.80	12.88	21.16
	合计	100.0	0.17	2.73	16.94	100.0	100.0	100.0

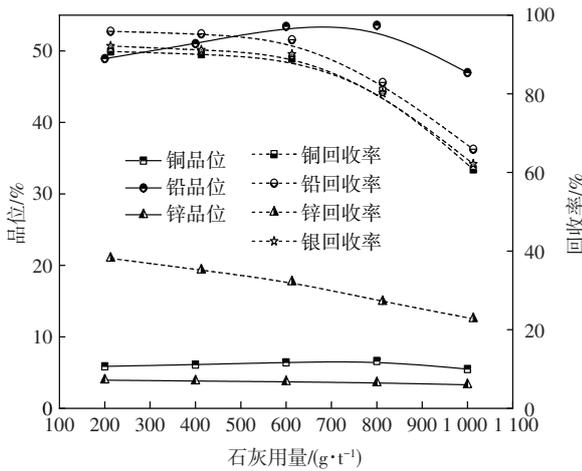


图 6 石灰用量对铜铅混浮精选指标的影响

Fig. 6 Effects of lime dosage on the copper-lead bulk cleaning flotation performance

2. 1. 4 pH对铜铅混浮精选指标的影响

为提升铅铜混合精矿的品质,降低后续分离的难度,铜铅混合精矿经再磨,通过石灰调节矿浆pH加强对黄铁矿的抑制,试验结果见图6。由图6可知,随着石灰用量的增加,铜铅混合精矿中铜铅的品位呈现上升的趋势,但当石灰用量超过600 g/t时(pH约10.2),铅银的作业回收率急速下降。结果表明,以LS-701为捕收剂时,较高的碱度不利于铅银矿物的浮选,矿浆pH值应控制在10以下。此时,铜铅混合精矿中铜品位为6.12%、铅品位为51.02%、含锌3.82%。

2. 2 铜铅分离条件试验

基于浮选“抑多浮少”的原则,针对铜铅混合精矿开展了抑铅浮铜试验研究。传统的重铬酸钾工艺,因环境污染大,限制了其在工业的应用。相关文献已报道,对于铜铅混合精矿,氧化剂配合腐殖酸钠可选择性抑制方铅矿,其抑制机理是氧化作用可增加方铅矿表面的活性位点PbOH⁺,促进腐殖酸根的吸附,进而增大腐殖酸钠作为抑制剂的选择性^[13-14]。因此,本次抑铅浮铜试验采用无毒无害新型组合抑制剂过硫酸铵和腐殖酸钠。

2. 2. 1 过硫酸铵用量对铜铅分离指标的影响

本次铜铅分离的对象是铜铅混合精矿(铜铅混浮粗精矿经一次精选所得),经活性炭脱药后,添加抑制剂,以Z-200为铜矿物捕收剂,图7所示为过硫酸铵用量对铜铅分离指标影响的试验结果。结果显示,随着过硫酸铵用量的增加铜精矿中铜品位逐渐提高,铜的作业回收率一直呈下降趋势,含铅降低,当过硫酸铵用量为750 g/t时,经过一次铜铅分离粗选,所得的铜粗精矿中铜的品位为16.72%、铜作业回收率为

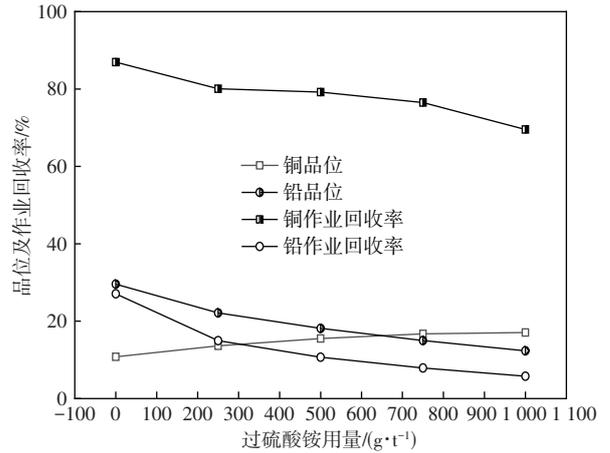


图 7 过硫酸铵用量对铜铅分离指标的影响

Fig. 7 Effects of ammonium persulphate dosage on the copper-lead flotation separation performance

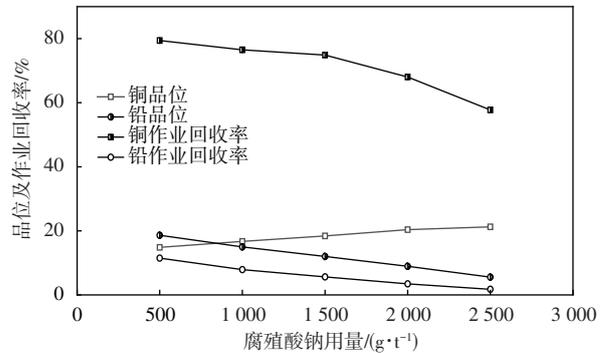


图 8 腐殖酸钠用量对铜铅分离指标的影响

Fig. 8 Effects of sodium humate dosage on the copper-lead flotation separation performance

76.50%、含铅14.99%。

2. 2. 2 腐殖酸钠用量对铜铅分离指标的影响

图8所示为腐殖酸钠用量对铜铅分离指标影响的试验结果。结果显示,当腐殖酸钠用量由500 g/t增加到1500 g/t时,铜精矿中铜品位由14.84%提高到18.40%,继续增大腐殖酸钠用量,铜作业回收率大幅度下降,综合考虑,铜铅分离粗选腐殖酸钠用量为1500 g/t。

2. 3 全流程试验

在条件试验的基础上,考察了中矿循环返回对铜铅锌银浮选指标的影响,铜铅混浮作业采用LS-701与Z-200组合捕收铜铅银,经粗精矿再磨,铜铅分离采用组合药剂过硫酸铵和腐殖酸钠(1:2)抑铅浮铜,锌浮选采用常规浮选工艺,采用石灰抑制黄铁矿、硫酸铜为活化剂、丁基黄药为捕收剂,试验全流程见图9,试验结果见表6。结果显示,经铜铅混浮—粗精矿再磨—分离—尾矿选锌工艺流程,得到的铜精矿铜品位为21.59%、铜回收率为65.60%、银品位为329.96 g/t、

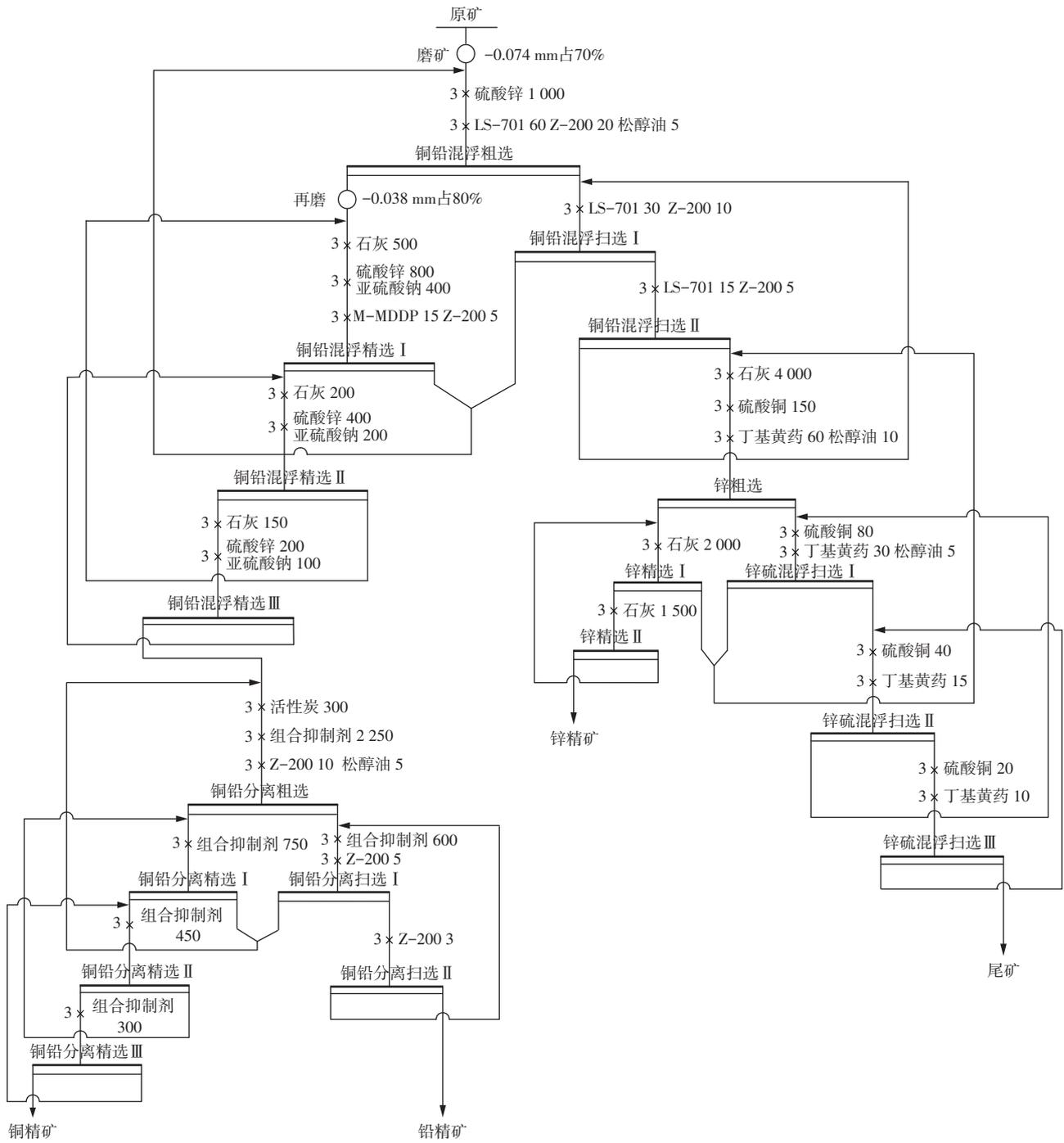


图9 铜铅锌银硫化矿闭路试验流程

Fig. 9 Flowsheet of the locked-cycle test of a copper-lead-zinc-silver sulfide ore

表6 某铜铅锌银硫化矿闭路试验结果

Table 6 Results of the locked-cycle tests of a copper-lead-zinc-silver sulfide ore

/%

产品名称	产率	品位				回收率			
		Cu	Pb	Zn	Ag ¹⁾	Cu	Pb	Zn	Ag
铜精矿	0.79	21.59	5.31	9.07	329.96	65.60	1.94	2.48	4.29
铅精矿	2.88	2.19	69.10	1.86	1501.94	21.05	92.12	1.85	71.19
锌精矿	5.12	0.47	0.55	51.06	188.25	8.11	1.31	90.54	15.88
尾矿	91.21	0.02	0.11	0.16	5.75	5.24	4.63	5.13	8.64
原矿	100.0	0.30	2.16	2.89	60.75	100.0	100.0	100.0	100.0

银回收率为4.29%,铅精矿铅品位为69.10%、铅回收率为92.12%、银品位为1501.94 g/t、银回收率为71.19%,锌精矿锌品位为51.06%、锌回收率为90.54%,有价金属铜铅锌银得到有效回收。

3 结论

1) 矿石中主金属铜、铅、锌品位分别为0.30%、2.13%、2.89%,主要以硫化物形式存在,占比分别为90.36%、95.27%、95.14%,伴生银的品位为60.75 g/t;目的金属铅锌主要存在于方铅矿、闪锌矿中,非目的金属矿物主要为黄铁矿,脉石矿物以石英为主。

2) 对比25[#]黑药,新型二硫代磷酸盐LS-701在保证选择性的前提下对微细粒含银方铅矿表现出更强的捕收能力。

3) 对于铜铅分别以黄铜矿和方铅矿为主的混合精矿,以组合药剂过硫酸铵与腐殖酸钠为抑制剂、Z-200为捕收剂抑铅浮铜,可实现有效分离。

4) 经铜铅混浮—粗精矿再磨—分离—尾矿选锌工艺流程,实现了该矿石中有价元素铜铅锌银的高效综合利用。铜精矿铜品位为21.59%、铜回收率为65.60%、铅精矿铅品位为69.10%、铅回收率为92.12%、锌精矿锌品位为51.06%、锌回收率为90.54%、银在铜精矿和铅精矿中的总回收率为75.48%。

参考文献

[1] 李佳磊,宋凯伟,刘殿文,等. 闪锌矿浮选的活化与去活化研究进展[J]. 过程工程学报, 2018, 18(1): 11-19.
LI Jialei, SONG Kaiwei, LIU Dianwen, et al. Research progress on activation and deactivation of sphalerite flotation[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2018, 18(1): 11-19.

[2] CHETTIBI M, ABRAMOV A A. Development of sphalerite activation regularity by copper sulphate[J]. Journal of Mining Science, 2016(5): 1003-1010.

[3] 王越,宋宝旭,孙晓研,等. 银含量对方铅矿浮选行为的影响及捕收机理研究[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(7): 2104-2114.
WANG Yue, SONG Baoxu, SUN Xiaoyan, et al. Effect of Ag content on flotation behavior of Ag-bearing galena and study on collecting mechanism[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(7): 2104-2114.

[4] 邱廷省,杨雯慧,邱仙辉. 复杂多金属硫化矿低碱浮选分离技术研究进展[J]. [J/OL]. 有色金属(选矿部

分), 1-25 [2024-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1840.TF.20241101.1429.014.html>.

QIU Tingsheng, YANG Wenhui, QIU Xianhui. Research progress of low-alkali flotation separation technology of complex polymetallic sulfide ores[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 1-25 [2024-11-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1840.TF.20241101.1429.014.html>.

[5] 马明辉,苏超,贾晓东,等. 铜铅混合精矿浮选分离抑制剂研究进展[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(4): 94-98.
MA Minghui, SU Chao, JIA Xiaodong, et al. Research progress on flotation separation depressant of copper-lead mixed concentrate[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2019(4): 94-98.

[6] QIN W Q, WEI Q, JIAO F, et al. Utilization of polysaccharides as depressants for the flotation separation of copper/lead concentrate[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2013, 23(2): 179-186.

[7] 谭欣,孙传尧. Z-200作捕收剂时大分子有机抑制剂对铜铅锌硫化矿物浮选的影响[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(10): 124-132.
TAN Xin, SUN Chuanyao. Effect of macromolecular organic depressants on flotation of copper, lead and zinc sulfide minerals with Z-200 as collector[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2024(10): 124-132.

[8] LIU J, WANG Y, LUO D Q, et al. Use of ZnSO₄ and SDD mixture as sphalerite depressant in copper flotation[J]. Mineral Engineering, 2018, 121: 31-38.

[9] 梁治安,李国尧,邹东,等. 新型环保抑制剂在某铜铅混合精矿浮选分离中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(1): 134-138.
LIANG Zhi'an, LI Guoyao, WU Dong, et al. Application of new environment-friendly depressant in flotation separation of copper-lead bulk concentrate[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(1): 134-138.

[10] 梁爽,路亮,吴桂叶. 硫化矿捕收剂的研究进展[J]. 中国矿业, 2018, 27(增刊2): 156-158.
LIANG Shuang, LU Liang, WU Guiye. Research status on the sulfide ore collectors[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(Suppl. 2): 156-158.

[11] 邹松. 新型铜铅硫化矿捕收剂的合成、浮选特性与机理[D]. 长沙:中南大学, 2023.
ZOU Song. Synthesis, flotation characteristics and mechanism of novel copper-lead sulfide mineral collectors[D]. Changsha: Central South University,

- 2023.
- [12] 江锋, 何帅, 唐鸿鹄, 等. 改性黑药类捕收剂强化浮选玉龙铅锌矿中伴生银的无碱工艺研究[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(1): 67-73.
- JIANG Feng, HE Shuai, TANG Honghu, et al. Alkali-free process for enhancing the flotation of associated silver in Yulong lead-zinc ore with modified dithiophosphate-type collector[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(1): 67-73.
- [13] LIU R Z, QIN W Q, JIAO F, et al. Flotation separation of chalcopyrite from galena by sodium humate and ammonium persulfate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26: 265-271.
- [14] LÓPEZ-VALDIVIESOSA A, LOZANO-LEDESM-ABLA, ROBLEDO-CABRERAA A, et al. Carboxymethylcellulose (CMC) as PbS depressant in the processing of Pb-Cu bulk concentrates: adsorption and floatability studies[J]. Minerals Engineering, 2017, 112: 77-83.
- (本文编辑 刘水红)

~~~~~

(上接第 120 页)

- [17] SHEN P L, LIU D W, ZHANG X L, et al. Effect of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  on eliminating the depression of excess sulfide ions in the sulfidation flotation of malachite[J]. Minerals Engineering, 2019, 137: 43-52.
- [18] ZHANG H L, ZHOU Q Q, LIN S Y, et al. Surface modification of malachite with tetraamminecopper (II) and its effect on sulfidation flotation[J]. Minerals Engineering, 2022, 189: 107882. DOI: 10.1016/j.mineng.2022.107882.
- [19] MARION C J, ADAM L, RONGHAO R, et al. An evaluation of hydroxamate collectors for malachite flotation[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 183: 258-269.
- [20] LI F X, ZHOU X T, LIN R X. Flotation performance and adsorption mechanism of novel 1-(2-hydroxyphenyl) hex-2-en-1-one oxime flotation collector to malachite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(10): 2792-2801.
- (本文编辑 汪东芳)