南方某低品位铅锌矿工艺矿物学分析与浮选试验研究*

练和信[1,2]，邹松[1]

（1. 江西理工大学 矿业工程学院， 江西 赣州市 341000；
2. 江西漂塘钨业有限公司， 江西 赣州市 341515）

摘要：工艺矿物学分析表明，我国南方某低品位铅锌硫化矿中的有价矿物为方铅矿、闪锌矿和伴生的银矿物，其他金属硫化物以磁黄铁矿和黄铁矿为主。为实现铅、锌、银资源的高效综合利用，针对该矿石开展系统浮选试验，通过磨矿细度、铅浮选及锌浮选条件试验，确定了适宜的磨矿条件和药剂制度。采用铅锌优先浮选流程，铅、锌浮选均采用一次粗选、二次精选和一次扫选的流程结构。闭路试验结果表明，在磨矿细度为－0.074 mm 占 56.6%条件下，获得了铅品位为 65.08%、铅回收率为 91.32%、银品位为 1 323.80 g/t、银回收率为 79.28%的铅精矿，以及锌品位为 41.70%、锌回收率为 85.96%的锌精矿。该工艺实现了低品位铅锌银硫化矿中有价元素的有效回收，对同类资源的开发利用具有借鉴意义。

关键词：铅锌矿；低品位；矿物学分析；浮选分离；药剂制度

中图分类号：TD923　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2026)07-0293-08

Process Mineralogical Analysis and Experimental Study on Flotation of a Low-Grade Lead-Zinc Ore in Southern China

Lian Hexin[1,2], *Zou Song*[1]

(1.School of Minging Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;
2.Jiangxi Piaotang Tungsten Industry Co., Ltd., Ganzhou, Jiangxi 341515, China)

Abstract: Process mineralogical analysis indicates that the valuable minerals in a low-grade lead-zinc sulfide ore in southern China are galena, sphalerite and associated silver minerals, while other metal sulfides are predominantly pyrrhotite and pyrite. To achieve the efficient comprehensive utilization of lead, zinc and silver resources, systematic flotation tests were conducted on the ore. Through conditional tests on grinding fineness, lead flotation and zinc flotation, the suitable grinding conditions and reagent regime were determined. A preferential lead-zinc flotation flowsheet was adopted, in which both the lead and zinc flotation circuits consist of one roughing, two cleanings and one scavenging stage. Closed-circuit test results demonstrate that at a grinding fineness of 56.6% passing －0.074 mm, a lead concentrate with a Pb grade of 65.08% and a recovery of 91.32%, alongside an Ag grade of 1 323.80 g/t and a recovery of 79.28% was obtained. Additionally, a zinc concentrates with a Zn grade of 41.70% and a recovery of 85.96% was produced. This process realizes the effective recovery of valuable elements from the low-grade Pb-Zn-Ag sulfide ore, providing a reference for the development and utilization of similar resources.

Key words: Lead-zinc ore, Low grade, Mineralogical analysis, Flotation separation, Reagent regime

0 引言

铅、锌金属广泛应用于国防工业、钢铁冶金、化学化工、机械电子、新能源及新材料等领域，在现代工业体系中具有至关重要的地位[1-3]。我国铅锌矿资源丰富，总储量位居全球第二，仅次于澳大利亚，但人均占有量却低于世界平均水平[4-5]。我国铅锌矿资源空间分布呈现明显的区域聚集性，南方地区为核心产区，其中云南、广东、广西、湖南等省区的铅锌矿总储量占全国总量的 50%以上[6-8]。

我国铅锌矿资源中，低品位、高氧化率难处理矿石约占保有储量的 60%。硫化矿是铅锌矿的主要矿物类型，占比超 90%，其主要矿物组成为方铅矿与铁闪锌矿，常与黄铁矿、磁黄铁矿及硫化铜矿等共

* **收稿日期**：2025-07-18
基金项目：国家自然科学基金项目(52404280)；江西省自然科学基金项目(20242BAB20188，20252BAC240382)
作者简介：练和信(1989—)，男，江西赣州人，选矿工程师，主要从事选矿生产及研究工作。E-mail：1174122022@qq.com
通信作者：邹松(1990—)，男，江西赣州人，博士，副教授，博士/硕士研究生导师，主要从事关键矿产资源开发利用研究工作。E-mail：13077306354@163.com

生[9-10]。值得注意的是,银作为重要的贵金属元素,常赋存于铅锌矿床中,据统计,我国约 60%的银资源来自铅锌矿床[10]。然而,长期以来铅锌矿中伴生银资源的综合回收率偏低,贵金属流失严重,因此,强化铅锌矿伴生银的高效回收利用具有重要的资源价值。在选矿工艺上,浮选是分离与富集铅锌银硫化矿中应用最广泛的核心技术之一[3,11]。

低品位铅锌矿资源利用面临诸多技术难点[12-14]:其一,矿石品位低、有用矿物嵌布粒度细、共生关系复杂,导致单体解离困难;其二,含铁闪锌矿和磁黄铁矿的矿石分选难度大,磁黄铁矿存在同质多象变体,可浮性差异显著,且易泥化氧化,消耗矿浆溶解氧,干扰其他矿物浮选;其三,铁闪锌矿兼具闪锌矿与硫铁矿特性,在高碱条件下受抑制会降低锌回收率,低碱条件下则难以有效抑制黄铁矿等硫铁矿,影响锌精矿品质。

针对低品位硫化铅锌矿的浮选回收难题,国内外学者已开展了大量研究工作。李敏等[15]针对内蒙古某低品位硫化铅锌矿,采用"优先选铅-铅尾选锌"流程并应用新型捕收剂 8230 与活化剂 X-46,显著降低了石灰用量,成功获得了优良的精矿指标,有效缓解了高碱工艺带来的管道堵塞和废水难处理问题。敖顺福等[2]针对某低品位复杂共伴生硫化铅锌矿,采用"铅粗精矿再磨"及阶段精选流程,配合石灰、硫酸锌与乙硫氮等药剂,最终获得了指标优异的含银铅精矿和锌精矿,实现了铅、锌及银的高效综合回收。Li 等[16]提出"预浮选脱碳-铅浮选-锌浮选"工艺处理贵州某低品位铅锌矿,采用甲基异丁基甲醇(MIBC)与煤油协同预脱碳,使铅、锌回收率损失分别降低了 1.94 个百分点和 1.14 个百分点,最终获得了铅回收率为 87.64%、锌回收率为 94.09%的优异指标,为低品位铅锌矿的经济高效回收提供了有效的解决方案。Wei 等[17]开发了一种低碱无脱泥浮选新工艺,创新使用 WS 与 MA 系列复合药剂及组合抑制剂,成功实现了复杂铅锌矿的低碱环境浮选和无需脱泥的氧化锌回收,工业应用中铅回收率最高提升 4.09 个百分点。

虽然已有研究取得了显著进展,但针对低品位含银铅锌硫化矿,特别是如何同步实现铅、锌高效回收的同时提高伴生银的回收率,仍是需要深入研究的课题。银通常以类质同象或其他形式分布于方铅矿中,其回收率与铅回收率密切相关。综上,以南方某低品位铅锌硫化矿为研究对象,通过系统工艺矿物学研究,确定了矿石化学与矿物组成,以及关键矿物嵌布特征,深入剖析了影响选矿效果的矿物学因素。在此基础上,科学制定了选矿原则流程,并开展了系统的浮选条件试验,最终确定了适宜的磨矿条件与药剂制度,形成了针对该矿石有价金属高效回收的选矿工艺流程。

1 工艺矿物学分析

1.1 矿石的化学组成

原矿矿石的化学多元素分析结果见表 1。表 2、表 3、表 4 分别为矿石的铅、锌和银元素的物相分析结果。由表 1 至表 4 可知,该矿石属于低品位的原生铅锌硫化矿,主要可回收金属元素为铅和锌,品位分别为 2.72%和 2.28%;伴生元素铜和银可考虑综合回收,含量分别为 0.021%和 65 g/t。矿石主要脉石组分为 SiO_2,其次为 Al_2O_3、K_2O、Na_2O,合计为 78.10%。原矿铅主要以硫化铅的形式存在,占比为 89.34%,其次为硫酸铅,占比为 7.72%,说明矿石中的铅已发生了小部分氧化;锌的赋存形式较为简单,主要为闪锌矿(硫化锌),占比高达 95.61%;银矿物主要以硫化银形式存在,少量为自然银及呈类质同象赋存于金属硫化物中的银。

表 1 矿石的化学多元素分析结果

Table 1 The results of chemical multielement analysis of the ore %

Pb	Zn	Cu	S	TFe	FeO	Fe/S^{2+}
2.72	2.28	0.021	2.51	5.35	3.94	1.27
SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	Na_2O	K_2O
59.37	12.25	1.38	0.18	1.07	2.62	3.86
TiO_2	P	C	F	As	Ag*	其他
0.062	0.021	0.43	0.49	0.023	65	0.15

注:* 代表单位为 g/t。

表 2 矿石中铅(Pb)的物相分析结果

Table 2 The phase analysis results of Pb in the ore

铅相别	含量/%	分布率/%
硫化铅	2.43	89.34
硫酸铅	0.21	7.72
铅铁矾	0.05	1.84
碳酸铅	0.03	1.10
合计	2.72	100.00

表 3 矿石中锌(Zn)的物相分析结果

Table 3 The phase analysis results of Zn in the ore

锌相别	含量/%	分布率/%
硫化锌	2.18	95.61
碳酸锌	0.05	2.19
锌铁尖晶石	0.04	1.76
硫酸锌	0.01	0.44
合计	2.28	100.00

表 4 矿石中银(Ag)的物相分析结果

Table 4 The phase analysis results of Ag in the ore

银相别	含量/(g/t)	分布率/%
硫化银	42.69	65.68
硫化物中银	12.21	18.78
自然银	7.35	11.31
脉石中银	1.97	3.03
氯化银	0.78	1.20
合计	65.00	100.00

1.2 矿石的矿物组成

对矿石中的矿物种类及含量进行测定,得到矿石中的矿物含量见表 5。由表 5 可知,方铅矿、闪锌矿与黄铁矿为该矿石中主要的金属矿物,并含有少量的铅矾、白铅矿、铅铁矾、砷铝铅矾、毒砂、黄铜矿、赤铁矿和褐铁矿、辉银矿;主要脉石矿物为石英、钾长石、斜长石和绿泥石,其次为绢云母、黑云母和萤石,微量矿物包括方解石、阳起石、透辉石、磷灰石等。

表 5 矿石中的矿物含量

Table 5 The mineral contents in the ore %

方铅矿	铅矾	白铅矿	砷铝铅矾	闪锌矿	银矿物	黄铁矿
2.75	0.13	0.02	0.01	3.39	0.01	2.48
毒砂	赤铁矿、褐铁矿	石英	钾长石	斜长石	绢云母、黑云母	绿泥石
0.05	1.03	34.79	19.80	16.35	3.41	10.60
方解石	菱锰矿	萤石	高岭石	磷灰石	阳起石、透辉石	其他
0.41	2.84	1.20	0.12	0.14	0.06	0.41

1.3 主要矿物的嵌布特征

矿石中主要有价元素的载体矿物(方铅矿、闪锌矿和辉银矿)及主要脉石矿物(石英、长石、绿泥石等)的嵌布特征直接决定了矿物单体解离的难易程度与选矿工艺的选择。采用 DM4P 型光学显微镜及矿物自动分析系统 MLA650,系统查明了各主要矿物的嵌布特征。

1.3.1 方铅矿的嵌布特征

方铅矿是铅矿物的主要产出矿物,呈现形式主要为三种:(1)呈不规则团块状或粒度相对较粗的粒状分布在脉石中,粒径一般为 0.30～1.50 mm;(2)呈不规则粒状、短脉状、蠕虫状等,以浸染状嵌布在脉石基底中,粒度极不均匀,细小者小于 0.01 mm,通常介于 0.02～0.30 mm 之间;(3)呈微细粒状、细脉状、微脉状或网脉状,沿粒间、孔洞、裂隙充填交代闪锌矿或黄铁矿,常构成穿插或包裹镶嵌等较为复杂的交生关系,其中闪锌矿包裹方铅矿的现象较为常见,粒度较细小,部分甚至小于 0.01 mm,一般为 0.02～0.20 mm。铅矾分布较为分散,主要赋存于方铅矿边缘、裂隙及孔洞中,呈细脉状、网脉状或不规则状充填-交代产出,局部可见交代闪锌矿,其粒度范围一般为 0.02～0.20 mm。

1.3.2 闪锌矿的嵌布特征

作为锌的主要载体矿物,闪锌矿常因类质同象作用富含铁元素,形成铁闪锌矿变种,并含有一定量的镉元素,基本不含银(极个别晶粒除外),其平均化学组成为:含 Zn 57.31%、含 Fe 9.39%、含 Cd 0.41%。闪锌矿主要呈粒状或团块状,以浸染状嵌布于脉石中,粒度粗细极不均匀,粗者大于 2.50 mm,细小者小于 0.02 mm,一般为 0.04～2.00 mm。闪锌矿可被方铅矿交代,部分因内部包含极微细的方铅矿包裹体,致使两者镶嵌关系复杂。另有部分闪锌矿呈不规则的粒状、细脉状、网脉状与方铅矿紧密镶嵌,构成极为复杂的镶嵌关系,其粒度相对细小,一般变化于 0.02～0.30 mm 之间,部分甚至小于 0.01 mm。部分闪锌矿颗粒核部发育有固溶体分离析出的乳滴状黄铜矿和微细磁黄铁矿包裹体,粒度普遍小于0.01 mm。

1.3.3 银矿物的嵌布特征

辉银矿是矿石中银的主要赋存矿物,多呈不规则微粒或微细粒,粒度为 0.002～0.015 mm,不均匀分布在部分方铅矿的边缘,局部富集;少数与方铅矿毗连镶嵌,构成连晶包裹在闪锌矿内部,而在闪锌矿、黄铁矿和脉石中极少见辉银矿单独出现。

1.3.4 脉石矿物的嵌布特征

矿石中最主要的脉石矿物是石英、长石和绿泥石等。石英和长石主要呈微细粒状,与长石、绢云母、绿泥石等混杂镶嵌,共同构成金属硫化物的嵌布基底。绿泥石为细小的鳞片状,分布不均匀,部分作为胶结物沿石英、长石粒间填充。

1.4 影响选矿效果的主要矿物学因素分析

矿石中复杂的矿物共伴生嵌布关系是制约铅锌银多金属矿高效分离与回收的关键矿物学因素。主要矿物的嵌布特征结果表明,方铅矿、闪锌矿、黄铁矿及辉银矿等主要金属矿物间普遍存在密切且多样的连生与交代结构。

(1) 方铅矿与其他金属硫化物的镶嵌关系较为复杂。即使经细磨处理,部分微细粒方铅矿仍难以避免与闪锌矿、黄铁矿形成连生体,这可能导致铅精矿中锌、铁、硫等杂质元素含量偏高,同时导致铅矿物损失于锌精矿或尾矿中。

(2) 方铅矿和闪锌矿常因交代作用而呈现复杂的镶嵌关系。在适宜的磨矿细度条件下,可较易获得铅锌混合粗精矿,但难以产出独立的高品位铅精

矿或锌精矿。这种镶嵌关系直接导致锌精矿中铅的含量偏高,同时也影响锌的回收率。

(3) 与辉银矿镶嵌关系最密切的矿物是方铅矿,其次为闪锌矿。虽通过选矿工艺可使辉银矿在铅精矿中得到较大程度富集,但仍有部分随闪锌矿进入锌精矿。

2 选矿试验流程

铅锌硫化矿浮选工艺主要包括优先浮选、混合浮选、等可浮浮选及异步浮选。其中,优先浮选工艺因具有操作简单、指标稳定、适应性广等特点,在我国铅锌矿山选矿实践中应用最为广泛[18-19]。本试验矿样的铅、锌氧化程度均较低,若采用混合浮选工艺,虽可得到铅锌混合粗精矿,但受方铅矿与闪锌矿嵌布关系复杂及混合浮选后残余选矿药剂的影响,后续铅锌分离难度较大。因此,在前期探索性试验的基础上,本试验优先在高碱条件下浮选铅,以获得高品位铅精矿,后浮铅尾矿再进行选锌得到锌精矿。铅锌浮选工艺原则流程如图 1 所示。

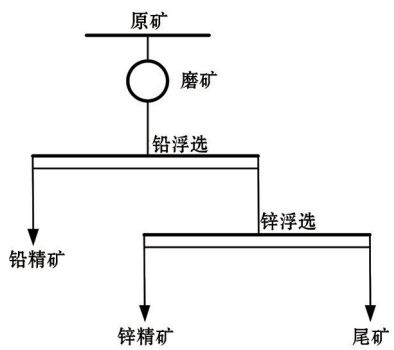


图 1 铅锌浮选工艺原则流程

Fig.1 The principle process of lead-zinc flotation process

试验每次称取原矿样 500 g,经锥形球磨机磨矿后,将矿浆转移至 1.5 L 的 XFD 型单槽浮选机进行粗选和扫选,矿浆粗选浮选质量浓度控制为约 40%。精选作业根据精矿量选用不同规格的浮选机,扫选仍采用 1.5 L 浮选机。

3 试验结果与讨论

3.1 磨矿细度试验

适宜的磨矿细度能使铅锌矿物充分单体解离,且能减少矿泥的干扰。磨矿细度试验工艺流程如图 2 所示,试验结果见表 6。由表 6 可知,随着矿石磨矿细度(−0.074 mm 粒级含量)的增大,铅粗精矿中铅回收率呈先增大后减小的变化趋势,表明磨矿细度不足时,方铅矿单体解离不充分,存在大量与闪锌矿、黄铁矿的连生体,导致铅回收率偏低且精矿质量较差;当磨矿细度为−0.074 mm 占 56.6%时,大部分复杂连生体解离,铅回收率提升至 94.05%;当磨矿细度进一步提高至−0.074 mm 占 61.2%时,铅回收率略有下降,为 93.87%,这可能是由于过磨产生的矿泥罩盖在矿物表面或恶化浮选环境,进而影响了方铅矿的有效回收,印证了前述矿物嵌布微细所带来的挑战。

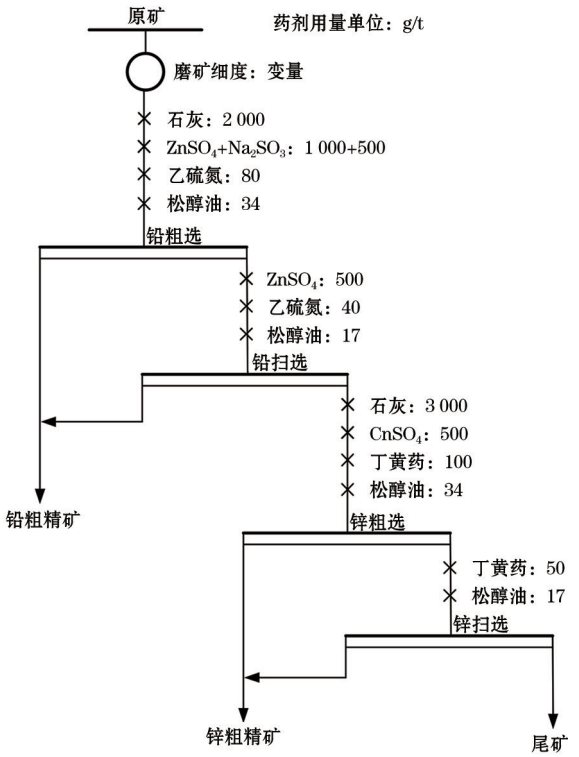


图 2 磨矿细度试验流程

Fig.2 The test process of grinding fineness

表 6 磨矿细度试验结果

Table 6 The test results of grinding fineness

−0.074 mm 含量/%	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			Pb	Zn	Pb	Zn
41.4	铅粗精矿	6.10	41.58	4.80	91.06	13.05
	锌粗精矿	6.29	2.01	29.06	4.54	81.48
	尾矿	87.61	0.14	0.14	4.40	5.47
	合计	100.00	2.79	2.24	100.00	100.00
50.0	铅粗精矿	6.50	38.55	4.89	92.25	14.31
	锌粗精矿	7.28	1.35	24.62	3.62	80.65
	尾矿	86.22	0.13	0.13	4.13	5.04
	合计	100.00	2.72	2.22	100.00	100.00
56.6	铅粗精矿	6.74	37.74	4.55	94.05	13.78
	锌粗精矿	6.18	1.25	29.22	2.86	81.13
	尾矿	87.08	0.10	0.13	3.09	5.09
	合计	100.00	2.70	2.23	100.00	100.00
61.2	铅粗精矿	6.23	40.72	4.88	93.87	13.53
	锌粗精矿	6.19	1.32	29.56	3.02	81.41
	尾矿	87.58	0.10	0.13	3.11	5.06
	合计	100.00	2.70	2.25	100.00	100.00

锌回收率在试验磨矿细度变化范围内波动不明显，表明相对于方铅矿，闪锌矿的解离行为对磨矿细度变化不敏感，或其本身解离较易实现。综合可知，确定矿石磨矿细度为－0.074 mm 占 56.6%。值得注意的是，在此条件下，铅粗精矿中锌回收率为 13.78%，说明方铅矿与闪锌矿的复杂嵌布关系导致了不可避免的金属互含，即便在适宜的磨矿细度条件下也难以完全消除。

3.2　铅浮选条件试验

研究表明，采用单一硫酸锌或亚硫酸钠作为抑制剂，对硫化锌浮选抑制效果有限，而采用硫酸锌＋亚硫酸钠（$ZnSO_4+Na_2SO_3$）作为组合抑制剂抑制效果较好。同时，在碱性条件下，闪锌矿和黄铁矿受到抑制，但方铅矿仍保持较好的可浮性。因此，选择对铅捕收能力较强的乙硫氮为捕收剂。本次试验铅粗选工艺中，石灰用量为 2 000 g/t，矿浆 pH 为 10.0，松醇油用量为 34 g/t，采用 $ZnSO_4+Na_2SO_3$ 为锌矿物的组合抑制剂，采用乙硫氮为捕收剂，浮铅扫选药剂用量为粗选时各药剂用量的一半，铅浮选试验流程如图 3 所示。

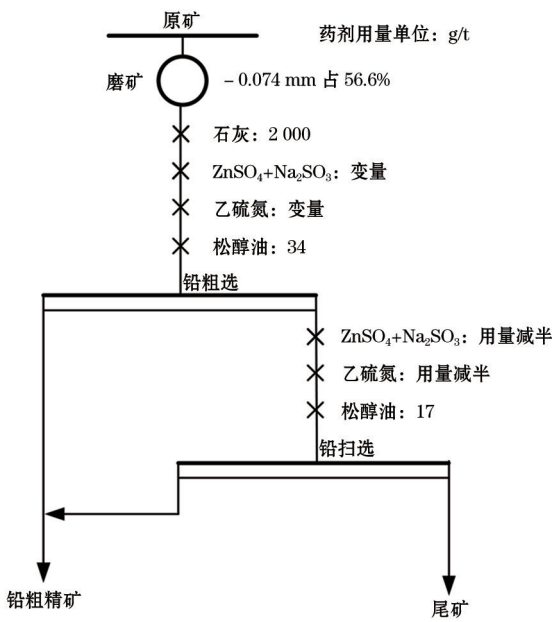


图 3　铅浮选条件试验流程

Fig.3　The process of lead flotation test

3.2.1　硫酸锌＋亚硫酸钠用量试验

硫酸锌＋亚硫酸钠用量试验结果如图 4 所示。由图 4 可知，随 $ZnSO_4+Na_2SO_3$ 用量的增加，铅粗精矿中铅与锌回收率均呈现下降趋势。当 $ZnSO_4+Na_2SO_3$ 用量从 3 000 g/t＋1 500 g/t 增加至 4 000 g/t＋2 000 g/t 时，铅回收率由 94.07%降至 89.99%，说明过量使用抑制剂会抑制铅的浮选效果。同时，考虑铅粗精矿中锌含量问题，最终选用 $ZnSO_4+Na_2SO_3$ 用量为 3 000 g/t ＋1 500 g/t。

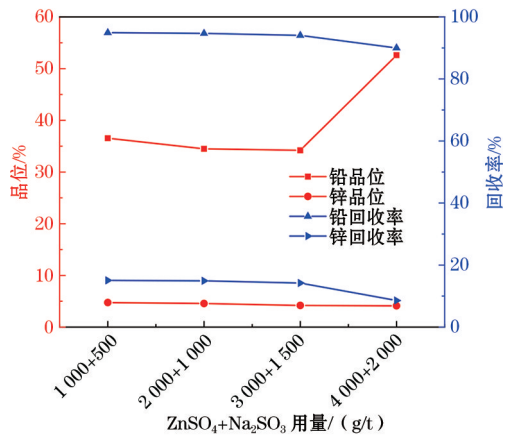


图 4　硫酸锌＋亚硫酸钠用量试验结果

Fig.4　The test results of dosages of $ZnSO_4+Na_2SO_3$

3.2.2　乙硫氮用量试验

乙硫氮用量试验结果如图 5 所示。由图 5 可知，随乙硫氮用量增加，铅粗精矿铅品位逐渐降低，铅回收率则逐渐上升，锌品位和锌回收率也随之增加。当乙硫氮用量增大至 80 g/t 时，铅和锌的回收率分别为 94.07%和 14.21%，继续增大乙硫氮用量不仅对铅回收率的影响不大，而且会增大铅粗精矿的锌回收率，导致铅锌互含较高，不利于后续分离。综合考虑，确定乙硫氮用量为 80 g/t。

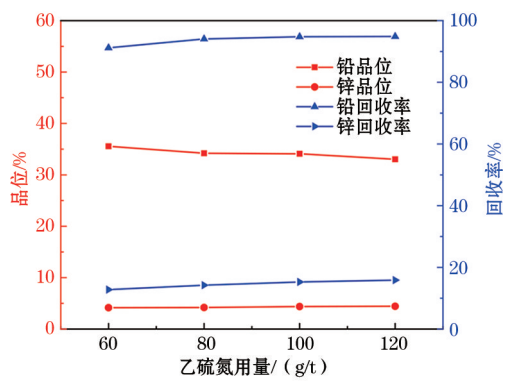


图 5　乙硫氮用量试验结果

Fig.5　The test results of dosages of sodium diethyldithiocarbamate

3.3　锌浮选条件试验

锌浮选采用石灰抑硫，在较高 pH 条件下黄铁矿可浮性差；采用硫酸铜作为闪锌矿活化剂；采用丁黄药作为闪锌矿的捕收剂，锌浮选条件试验流程如图 6 所示。通过改变石灰、硫酸铜、丁黄药用量来考察各药剂对锌浮选指标的影响，其中，松醇油用量为

34 g/t,浮锌扫选药剂用量为粗选作业的一半。

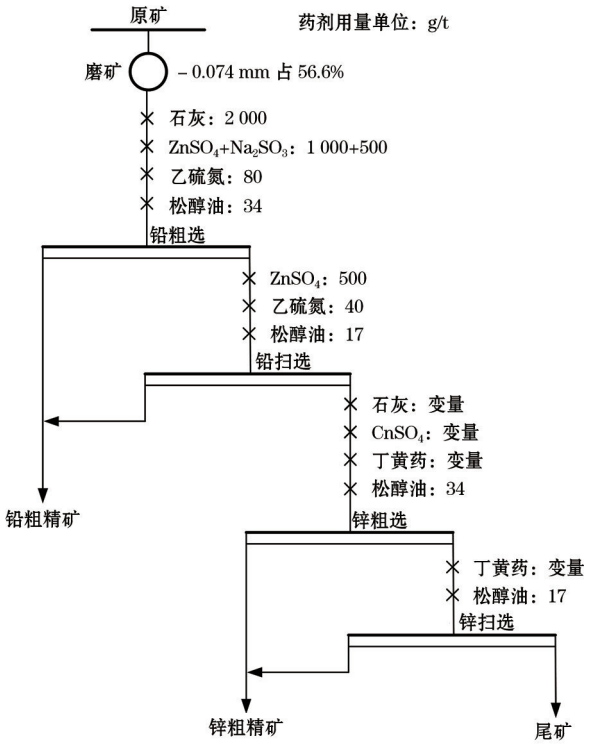


图 6 锌浮选条件试验流程

Fig.6 The process of zinc flotation test

3.3.1 石灰用量试验

固定硫酸铜用量为 500 g/t,丁黄药用量为 100 g/t,石灰用量试验结果如图 7 所示。结果表明,随石灰用量增加,锌粗精矿中锌回收率变化不大,锌品位呈先增大后减小的变化趋势,这归因于过量石灰对闪锌矿产生了抑制作用。当石灰用量为 2 000 g/t(矿浆 pH 为 11.5)时,锌粗精矿中铅和锌回收率分别为 4.24%和 81.10%。综合考虑,确定石灰用量为 2 000 g/t。

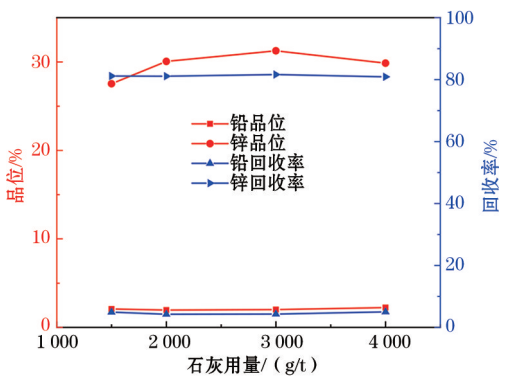


图 7 石灰用量试验结果

Fig.7 The test results of dosages of lime

3.3.2 硫酸铜用量试验

固定石灰用量为 2 000 g/t,丁黄药用量为 100 g/t,硫酸铜用量试验结果如图 8 所示。结果表明,随着硫酸铜用量的增加,锌粗精矿的锌回收率逐渐提高;当硫酸铜用量增加至 500 g/t 时,继续增大硫酸铜用量,锌回收率增幅趋缓,同时锌品位开始下降。这是由于过多的硫酸铜会活化其他硫化矿,从而引起锌粗精矿锌品位的下降。因此,确定硫酸铜用量为 500 g/t。

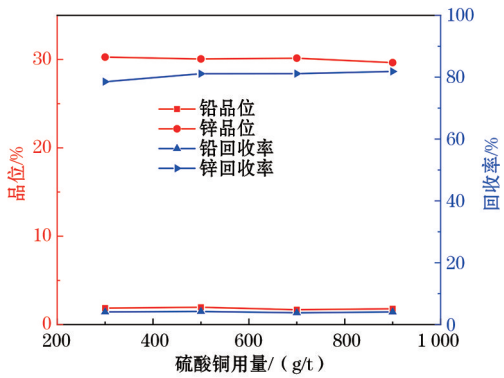


图 8 硫酸铜用量试验结果

Fig.8 The test results of dosages of $CuSO_4$

3.3.3 丁黄药用量试验

固定石灰用量为 2 000 g/t,硫酸铜用量为 500 g/t,丁黄药用量试验结果如图 9 所示。结果表明,随丁黄药用量的增加,锌粗精矿锌品位呈先增大后减小的变化趋势,锌回收率则持续缓慢上升;铅品位和铅回收率变化较小。这表明增加丁黄药用量可增强对锌的捕收能力,但用量过多时对其他硫化矿的捕收能力也较强,导致锌粗精矿锌品位下降。因此,综合考虑精矿质量,确定丁黄药用量为 100 g/t。

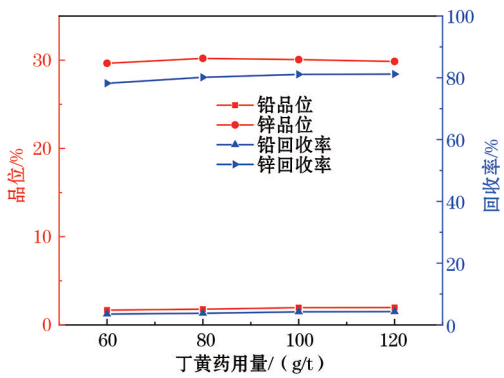


图 9 丁黄药用量试验结果

Fig.9 The test results of dosages of sodium *n*-butyl xanthate

3.4 全流程闭路试验

基于上述试验确定的条件,开展铅锌浮选的全流程闭路试验,试验流程和药剂条件如图 10 所示,

试验结果见表 7。由表 7 可知,闭路试验获得铅品位为 65.08%、铅回收率为 91.32%,锌品位为 3.03%、锌回收率为 5.37%的铅精矿;银主要富集于铅精矿中,含量达 1 323.80 g/t,银回收率为 79.28%;同时,获得锌品位为 41.70%、锌回收率为 85.96%的锌精矿。

闭路试验结果表明,铅精矿中锌品位较高,为 3.03%,主要原因如下:(1) 工艺矿物学研究表明,方铅矿与闪锌矿因交代作用嵌布关系复杂、密切,部分闪锌矿难以充分解离而被机械夹带;(2) 精选作业中闪锌矿抑制剂的种类与用量仍有优化空间,后续可重点探索其他抑制剂(如次氯酸钙、腐殖酸钠等)及优化添加方式,以强化抑制效果。铅精矿中银的回收率为 79.28%,表明当前药剂制度对伴生银回收效果较好,但仍有一定的提升空间。鉴于黑药类捕收剂对银螯合性能优异,后续研究将优化捕收剂制度,重点考察乙硫氮与不同黑药类捕收剂(如丁铵黑药、25# 黑药等)的组合使用,通过不同药剂组合的协同效应进一步提高银的回收率,提升资源综合回收价值。

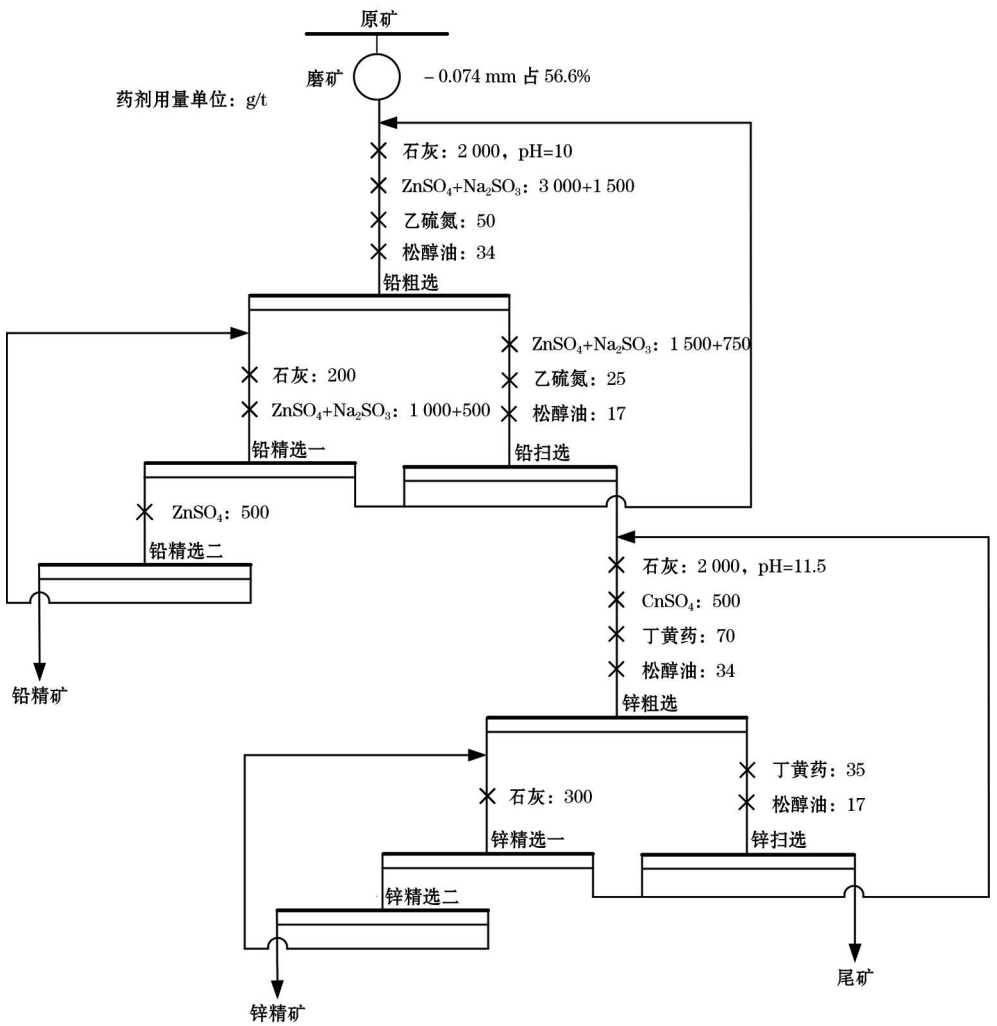


图 10 铅锌浮选闭路试验流程

Fig.10 The process of closed-circuit test of lead-zinc flotation

表 7 铅锌浮选闭路试验结果

Table 7 Closed-circuit test results of lead-zinc flotation

产品名称	产率/%	品位/%			回收率/%		
		Pb	Zn	Ag*	Pb	Zn	Ag
铅精矿	3.93	65.08	3.03	1 323.80	91.32	5.37	79.28
锌精矿	4.57	2.92	41.70	183.65	4.76	85.96	12.79
尾矿	91.50	0.12	0.21	5.69	3.92	8.67	7.93
原矿	100.00	2.80	2.22	65.62	100.00	100.00	100.00

注:* 代表单位为 g/t。

4 结论

(1) 工艺矿物学研究表明,矿石为低品位含银铅锌多金属硫化矿。原矿铅品位 2.72%、锌品位 2.28%、银含量 65 g/t。矿石中主要的铅、锌矿物分别为方铅矿和闪锌矿,脉石矿物以石英、辉石等硅酸盐矿物为主。方铅矿、闪锌矿及伴生的银矿物是该

矿石中最具回收价值的主要有价金属矿物。

(2)通过磨矿细度、铅浮选及锌浮选条件试验,确定了适宜的磨矿条件和药剂制度。试验采用铅锌优先浮选工艺,铅、锌浮选回路均采用“一粗二精一扫”流程。闭路试验获得了铅品位为65.08%、铅回收率为91.32%的铅精矿,其中含银1 323.80 g/t、银回收率为79.28%;同时获得了锌品位为41.70%、锌回收率为85.96%的锌精矿,实现了该低品位含银铅锌矿中主要有价金属的高效回收,为同类矿石的选矿工艺设计提供了参考。

参考文献(References):

[1] 夏丛,张志伟,杨珺婷,等.2024年我国铅锌资源发展趋势及展望[J].中国矿业,2025,34(4):153-162.
Xia Cong, Zhang Zhiwei, Yang Junting, et al. Development trends of China's lead-zinc resources in 2024 and prospect [J]. China Mining Magazine,2025,34(4):153-162.

[2] 敖顺福,王春光,胡红喜,等.某含银低品位铅锌矿石选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2019(4):32-39.
Ao Shunfu, Wang Chunguang, Hu Hongxi, et al. Processing experimental study on a low-grade lead zinc ore containing silver[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2019(4):32-39.

[3] 冯程,祁忠旭,孙大勇,等.某低品位铅锌矿高效利用的选矿试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(3):1-5.
Feng Cheng, Qi Zhongxu, Sun Dayong, et al. Experimental study on high-efficient utilization of a low-grade lead-zinc ore [J]. Mining Research and Development,2019,39(3):1-5.

[4] U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2025 [R]. Reston: National Minerals Information Center,2025.

[5] 刘洋,童雄,吕晋芳,等.硫化铅锌矿物浮选分离研究进展[J].矿产保护与利用,2022,42(3):106-114.
Liu Yang, Tong Xiong, Lyu Jinfang, et al. Research progress on flotation separation of lead-zinc sulfide minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022,42(3):106-114.

[6] 蔡拓.甘肃地区李家沟铅锌矿储量分析[J].世界有色金属,2023(15):79-81.
Cai Tuo. Reserve analysis of Lijiagou lead-zinc deposit in Gansu Province[J]. World Nonferrous Metals,2023(15):79-81.

[7] 周艳飞,王建安,沈发明,等.某高氧化率硫化铅锌矿混合浮选试验研究[J].矿冶工程,2023,43(4):78-81+88.
Zhou Yanfei, Wang Jian'an, Shen Faming, et al. Experimental study on bulk flotation of highly oxidized lead-zinc sulfide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(4):78-81+88.

[8] 梁家荣,杨业国,丘海峰,等.广西某硫化铅锌矿浮选分离试验研究[J].矿冶工程,2024,44(6):46-49+53.
Liang Jiarong, Yang Yeguo, Qiu Haifeng, et al. Flotation separation of lead-zinc sulfide ore in Guangxi[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2024,44(6):46-49+53.

[9] 史巾,卜显忠,翁存建,等.四川某硫化铅锌矿选矿工艺试验研究[J].矿业研究与开发,2021,41(1):141-145.
Shi Jin, Bu Xianzhong, Weng Cunjian, et al. Experimental research on beneficiation process of a lead-zinc sulfide ore in Sichuan Province[J]. Mining Research and Development, 2021,41(1):141-145.

[10] 李凯旋,冷成彪,任志,等.铅锌矿伴生的稀散元素研究进展[J].矿物学报,2021,41(3):225-233.
Li Kaixuan, Leng Chengbiao, Ren Zhi, et al. Progresses of researches on the dispersed elements associated with lead-zinc deposits[J]. Acta Mineralogica Sinica,2021,41(3):225-233.

[11] Zou Song, Lin Qiyang, Wang Shuai, et al. A novel surfactant O, O'-bis (2-butoxyethyl) ammonium dithiophosphate: synthesis, selective flotation and adsorption mechanism towards galena[J]. Minerals Engineering,2022,179:107466.

[12] 方夕辉,丛颖,朱冬梅,等.青海某低品位难选铅锌矿石合理选矿流程的探索[J].有色金属科学与工程,2013,4(2):56-60.
Fang Xihui, Cong Ying, Zhu Dongmei, et al.The exploration of rational dressing flow sheet of a certain low-grade refractory lead-zinc-ores in Qinghai Province[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering,2013,4(2):56-60.

[13] 罗仙平,杜显彦,赵云翔,等.内蒙古某低品位难选铅锌矿石选矿工艺研究[J].金属矿山,2013(10):58-62.
Luo Xianping, Du Xianyan, Zhao Yunxiang, et al. Experimental study on beneficiation for a refractory low-grade lead-zinc ore of Inner Mongolia[J]. Metal Mine,2013(10):58-62.

[14] 邱廷省,何元卿,余文,等.硫化铅锌矿浮选分离技术的研究现状及进展[J].金属矿山,2016(3):1-9.
Qiu Tingsheng, He Yuanqing, Yu Wen, et al. Research status and development of the lead-zinc sulfide ore flotation separation[J]. Metal Mine,2016(3):1-9.

[15] 李敏,许宏图,原新宇,等.内蒙古某低品位硫化铅锌矿选矿试验研究[J].化工矿物与加工,2024,53(10):18-25.
Li Min, Xu Hongtu, Yuan Xinyu, et al. Research on beneficiation test of a low-grade lead-zinc sulfide ore in Inner Mongolia[J]. Industrial Minerals & Processing,2024,53(10):18-25.

[16] Li Guanghui, Zhang Zheyi, Wei Qian, et al. Study on flotation recovery of typical carbon-bearing lead-zinc sulphide ore in Guizhou with pre-decarbonization [J]. Geochemistry,2024,84(2):126096.

[17] Wei Qian, Dong Liuyang, Qin Wenqing, et al. Efficient flotation recovery of lead and zinc from refractory lead-zinc ores under low alkaline conditions[J]. Geochemistry,2021, 81(4):125769.

[18] 曹飞,曹进成,吕良,等.内蒙古某富银铅锌硫化矿浮选分离试验研究[J].矿冶工程,2023,43(3):67-71.
Cao Fei, Cao Jincheng, Lyu Liang, et al.Experimental study on flotation of Ag-rich Pb-Zn sulfide ore from Inner Mongolia[J]. Mining and Metallurgical Engineering,2023, 43(3):67-71.

[19] 李俊旺,石云良,孙志健,等.某含碳铅锌硫化矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2022(6):65-71.
Li Junwang, Shi Yunliang, Sun Zhijian, et al. Experimental study on beneficiation of a lead-zinc sulfide ore containing carbon [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(6):65-71.