黑龙江某银多金属矿银铁锰综合回收扩大连选试验研究*

孟显伟[1],张强[1],刘殿阁[1],冯程[2],孙大勇[2],刘佳燕[2]

(1.黑龙江省地矿投资集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要:黑龙江某银多金属矿中的银主要赋存于硫化物中,铁锰主要赋存于碳酸盐矿物中,少量铁赋存于磁铁矿中。为了高效回收该矿石的银、铁和锰,研究开发了银浮选-铁弱磁选-锰强磁选的浮磁联合工艺。全流程闭路试验获得选矿指标为:银精矿银品位3 287.35 g/t,回收率85.82%;铁精矿铁品位60.74%,磁性铁回收率79.85%;锰精矿锰品位15.03%,回收率76.65%。通过优化药剂用量和改进流程结构扩大连选试验,最终获得了银品位为4 120.36 g/t、回收率为88.75%的银精矿,铁品位为62.38%、磁性铁回收率为79.42%的铁精矿,以及锰品位为15.06%、回收率为73.97%的锰精矿。使用聚丙烯酰胺絮凝沉降之后的尾矿水回用至全流程,精矿指标波动小于3.0%。研究成果可为同类复杂矿产资源的综合利用提供借鉴。

关键词:银多金属矿;浮选-磁选联合工艺;连选试验;银回收;铁锰综合回收

中图分类号:TD952 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)04-0265-10

Pilot Continuous Separation Test on Comprehensive Recovery of Silver, Iron and Manganese from a Silver-Polymetallic Ore in Heilongjiang

MENG Xianwei[1], *ZHANG Qiang*[1], *LIU Diange*[1], *FENG Cheng*[2], *SUN Dayong*[2], *LIU Jiayan*[2]

(1.Heilongjiang Geology and Mineral Resources Investment Group Co., Ltd., Harbin, Heilongjiang 150090, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The silver in a certain silver-polymetallic ore in Heilongjiang Province mainly occurs in sulfide minerals, the iron and manganese mainly occur in carbonate minerals, and a small amount of iron occurs in magnetite. In order to efficiently recover silver, iron and manganese from the ore, a combined flotation-magnetic separation process of silver flotation-iron low-intensity magnetic separation-manganese high-intensity magnetic separation was developed. The beneficiation indexes obtained from the closed-circuit test of the whole process are as follows: the silver grade of the silver concentrate is 3 287.35 g/t, and the recovery rate is 85.82%. The iron grade of the iron concentrate is 60.74%, and the recovery rate of magnetic iron is 79.85%. The manganese grade of the manganese concentrate is 15.03%, and the recovery rate is 76.65%. By optimizing reagent dosage and improving the process configuration in the pilot continuous separation tests, a silver concentrate with a silver grade of 4 120.36 g/t and a recovery rate of 88.75%, an iron concentrate with an iron grade of 62.38% and a magnetic iron recovery rate of 79.42%, and a manganese concentrate with a manganese grade of 15.06% and a recovery rate of 73.97% were obtained. The tailings water after flocculation and sedimentation with polyacrylamide is reused in the whole process, and the fluctuation of concentrate indices is less than 3.0%. The research results can provide a reference for the comprehensive utilization of similar complex mineral resources.

Key words: Silver-polymetallic ore, Flotation-magnetic separation combined process, Continuous separation test, Silver recovery, Comprehensive recovery of iron and manganese

0 引言

银多金属矿是我国战略性资源的重要组成部分,其高效开发利用对保障资源安全和提升经济效益具有重要意义[1-3]。银是一种稀贵金属,其化学性质稳定、物理特性优异,在现代工业体系中具有十分

* **收稿日期**:2025-04-17
作者简介:孟显伟(1989—),男,内蒙古赤峰人,硕士,工程师,主要从事矿山采、选技术开发研究。E-mail:Mxw895764@163.com
通信作者:刘殿阁(1979—),男,黑龙江双鸭山人,高级工程师,主要从事金属和非金属矿选矿设计工作。E-mail:23017736@qq.com

重要的作用,是电子信息、智能制造、生物医疗、先进材料等战略新兴产业领域不可或缺的原材料,并广泛应用于国防科技和航天工程等尖端科技领域[4-7]。我国银矿资源总储量虽然较丰富,但约 88%的储量是以多金属矿床伴生成分为主,这使得银与其他共伴生资源的充分回收利用变得较为困难[8-11]。

黑龙江某银多金属矿石伴生有铁、锰等多种有价元素,其矿石组成复杂,银矿物嵌布粒度细(<10 μm),铁锰矿物赋存形式多样(菱锰铁矿、菱铁矿、菱铁锰矿、黄铁矿、铁白云石、磁铁矿、菱锰矿等)。工艺矿物学分析表明,该矿石中的银主要以辉银矿、深红银矿等硫化物形式存在,与黄铁矿共生密切;铁、锰主要分布于菱锰铁矿、黄铁矿、磁铁矿等磁性矿物中,需通过浮选-磁选联合工艺实现高效分离。试验过程中首先通过小型试验验证,构建了"银浮选-铁弱磁选-锰强磁选"的工艺流程,据此开展扩大连选试验,并在连选过程中不断优化流程结构。在日处理量 1.2 t 的连选系统中连续 72 h 稳定运行的结果表明,银回收率较实验室指标提升 2.93%,铁、锰精矿品位分别提高 1.64%和 0.03%,且回水利用对浮选指标无显著影响。本研究通过实验室试验和选矿连选试验,形成了可工业化的技术方案,为同类复杂银多金属矿的资源化开发提供了理论依据和技术支撑。

1 矿样性质及选矿原则方案的确定

试验矿样取自黑龙江某银多金属矿。将试验样品破碎至-3 mm 后,经混匀、缩分分别制得选矿试验样、化验样、工艺矿物学研究样及备用样。对矿样进行了化学分析及矿物学研究,分析结果见表 1 至表 4。

表 1 矿样的化学多元素分析结果

Table 1 Analysis results of multi-element chemical composition in ore sample %

Ag*	TFe	Mn	SiO_2	MgO	CaO	Au*	Cu
452.25	21.13	6.42	27.36	1.25	2.82	0.012	0.003 2
MFe	K_2O	Na_2O	有机碳	总 C	S	Al_2O_3	As
2.73	0.28	0.13	0.16	5.62	3.26	1.74	0.036

注:Ag 和 Au 的单位为 g/t。

由表 1 可知,矿样中银、铁、锰含量分别为 452.25 g/t、21.13%、6.42%,需要通过选矿除去的杂质主要为 SiO_2、CaO、MgO 和 Al_2O_3。

矿石中的主要矿物组分为石英、菱锰铁矿、菱铁矿、菱铁锰矿、黄铁矿、铁白云石、磁铁矿、菱锰矿、长石、绿泥石、高岭石等。物相分析结果表明,矿石中的银主要以硫化银形式存在,占总银的 87.75%;单质银分布率为 2.05%,1.35%的银以类质同象的形式赋存在金属硫化物中,三者合计含量为 91.15%,约 8.85%的银赋存在硅酸盐和氧化物中。矿石中的铁主要分布在碳酸盐矿物中,占总铁的 70.02%,仅 11.59%的铁赋存于磁铁矿和磁黄铁矿中。矿石中的锰主要分布在碳酸盐矿物中,占总锰的 98.72%,赋存于其他相中锰仅占 1.28%。

表 2 原矿中银的化学物相分析结果

Table 2 Chemical phase analysis results of silver in the raw ore

银相	含量/(g/t)	分布率/%
硫化银中银	396.85	87.75
单质银	9.27	2.05
硫化矿物中银	6.11	1.35
硅酸盐中银	39.03	8.63
氧化银中银	0.99	0.22
总银	452.25	100.00

表 3 原矿中铁的化学物相分析结果

Table 3 Chemical phase analysis results of iron in the raw ore

铁相	含量/%	分布率/%
硅酸铁中铁	0.70	3.31
赤褐铁矿中铁	0.79	3.72
磁铁矿中铁	2.45	11.59
黄铁矿中铁	2.40	11.36
碳酸铁中铁	14.80	70.02
总铁	21.13	100.00

表 4 原矿中锰的化学物相分析结果

Table 4 Chemical phase analysis results of manganese in the raw ore

锰相	含量/%	分布率/%
碳酸锰中锰	6.34	98.72
硅酸锰中锰	0.05	0.71
氧化锰中锰	0.04	0.57
总锰	6.42	100.00

矿石中的银主要赋存在硫化矿物中,占比达到 89.10%,这一部分银矿物可浮性较好,因此拟先进行浮选回收银矿物,然后回收矿石中的铁、锰矿物。锰的价值高于铁,为了实现经济效益的最大化,首先主要考虑锰的回收。锰主要赋存在菱锰矿之中,属于弱磁性矿物,可以使用强磁选的方法来进行回收,但在强磁选作业前需增加一次弱磁选作业,除去部分含铁高的强磁性矿物,以便在提升锰品位同时,也

能获得一些铁精矿,因此确定该矿石的选别原则流程为“银浮选-铁弱磁选-锰强磁选”。

2 连选矿样小型验证试验

在连选试验前对矿样进行小型验证试验,目的是摸清矿石性质,对药剂制度及流程的适应性进行验证,同时进一步为扩大连选试验提供支撑[12-13]。小型验证试验包括银浮选和铁锰磁选小型验证及优化试验。

2.1 银浮选闭路试验

银浮选的小型验证试验流程包括“一粗四精两扫”。粗选采用硫酸铜作为活化剂,用量为 50 g/t;捕收剂为丁黄药和丁铵黑药,用量分别为 60 g/t 和 20 g/t;起泡剂为 2# 油,用量为 30 g/t。试验流程如图 1 所示。在图 1 所示的银浮选闭路流程和药剂制度下,可以获得银精矿的品位和回收率分别为 3 287.35 g/t 和 85.82%的选矿指标。试验结果见表 5。

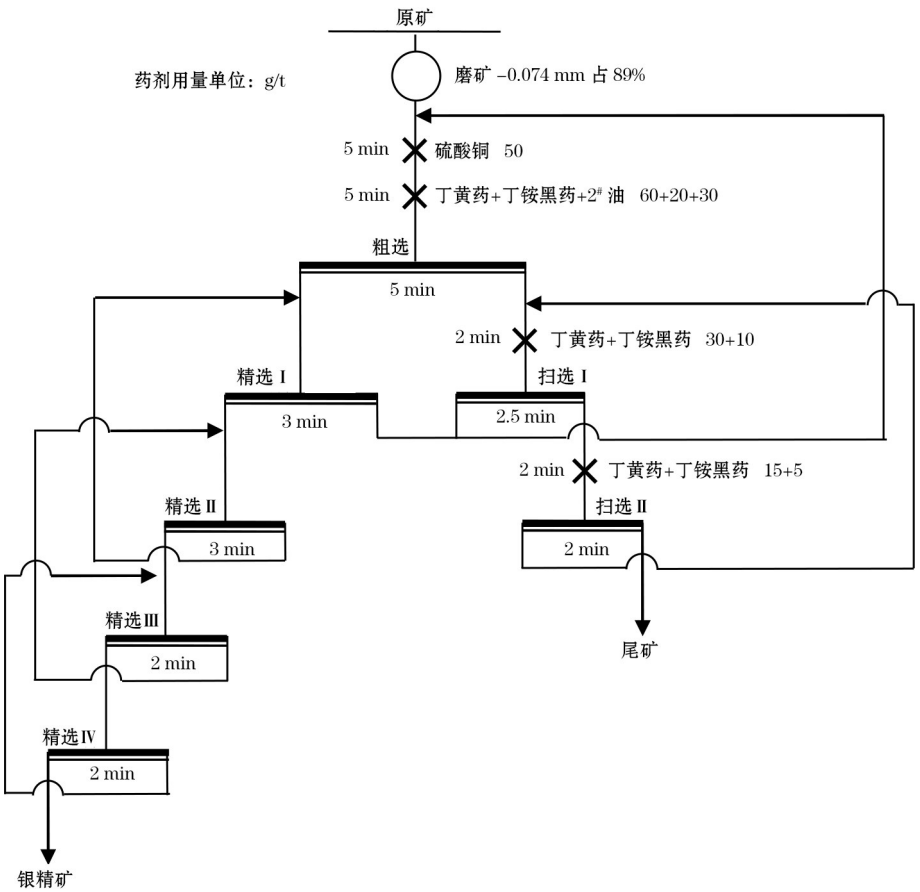


图 1 银浮选闭路试验流程

Fig.1 Closed-circuit test flow of silver flotation

表 5 银浮选闭路试验结果

Table 5 Closed-circuit test results of silver flotation

产品名称	产率/%	Ag 品位/(g/t)	Ag 回收率/%
银精矿	11.84	3 287.35	85.82
尾矿	88.16	72.92	14.18
合计	100.00	453.37	100.00

2.2 磁选试验研究

对银浮选尾矿开展了磁选试验研究,以充分回收浮选尾矿中的铁和锰。首先弱磁选回收浮选尾矿中的铁,然后对弱磁尾矿进行强磁试验以回收锰[14-15]。

2.2.1 弱磁粗选磁场强度试验

采用磁选管进行弱磁粗选回收铁的磁场强度试验,试验结果见图 2。试验结果表明,随着粗选磁场强度的增加,精矿铁品位逐渐下降,回收率逐渐增加。当磁场强度为 0.15 T 时,弱磁粗精矿铁品位较高,继续增加场强会导致粗精矿品位大幅下降,综合考虑,确定弱磁粗选的磁场强度为 0.15 T 较为合适,此时粗精矿铁品位和回收率分别为 49.16%和 17.34%。

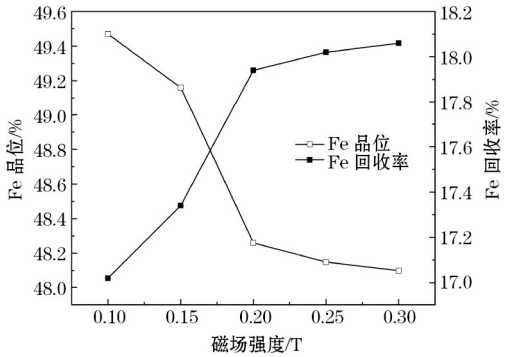


图 2 弱磁粗选的磁场强度对粗精矿指标的影响

Fig.2 Effect of magnetic field intensity in low-intensity magnetic roughing separation on indicators of rough concentrate

2.2.2 弱磁选再磨细度试验

弱磁粗选获得的粗精矿铁品位为 49.16%,距离合格的铁精矿尚有一定的差距。为提高铁精矿品位,对弱磁粗选精矿进行了未再磨和再磨细度 −0.025 mm 占 90%弱磁精选试验,试验流程见图 3,试验结果对比见表 6。试验结果表明,弱磁选粗精矿再磨至 −0.025 mm 占 90%,可以获得 Fe 品位为 60%的弱磁选精矿,能够有效提高弱磁精矿的铁品位。

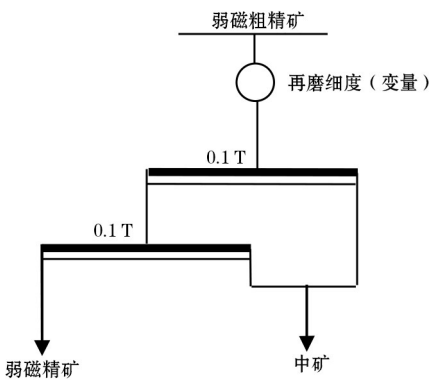


图 3 弱磁选粗精矿再磨再选试验流程

Fig.3 Test flow of regrinding and re-separation for rough concentrate of low-intensity magnetic separation

表 6 弱磁选粗精矿再磨再选试验结果

Table 6 Test results of regrinding and re-separation for rough concentrate of low-intensity magnetic separation

试验条件	产品名称	产率/%	Fe 品位/%	Fe 回收率/%
不磨	FeK	75.70	57.67	87.53
	中	24.30	25.60	12.47
	合计	100.00	49.88	100.00
−0.025 mm 占 90%	FeK	70.70	60.17	85.45
	中	29.30	24.72	14.55
	合计	100.00	49.78	100.00

2.2.3 强磁选磁场强度试验

由于碳酸锰具有弱磁性,可以采用强磁选的方法进行回收,进行了强磁选磁场强度试验,试验结果见图 4。试验结果表明,随着强磁粗选的磁场强度增加,粗精矿锰品位逐步下降,回收率先增加后减小。磁场强度为 1 T 时,强磁粗精矿锰回收率最高,为 82.53%,锰品位也较高,为 11.79%,继续增大磁场强度,强磁粗精矿的品位和回收率均降低,因此,选择强磁粗选的磁场强度为 1 T。

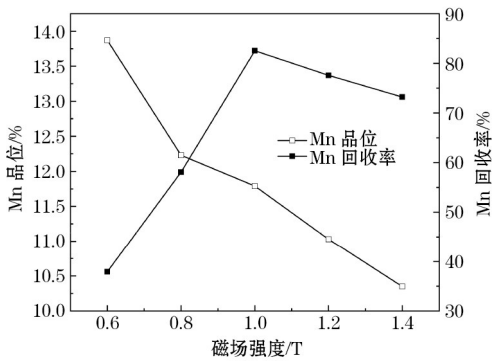


图 4 强磁粗选的磁场强度对粗精矿指标的影响

Fig.4 Effect of magnetic field intensity in high-intensity magnetic roughing separation on indicators of rough concentrate

2.2.4 强磁选再磨细度试验

强磁粗精矿锰的品位不高,因此对强磁粗精矿进行了再磨细度试验,试验流程见图 5,试验结果见图 6。试验结果表明,强磁粗精矿再磨至 −0.025 mm 占 95%,强磁精选两次可以获得 Mn 品位为 15.03%的强磁精矿,作业回收率为 54.83%,对原矿回收率为 44.77%。

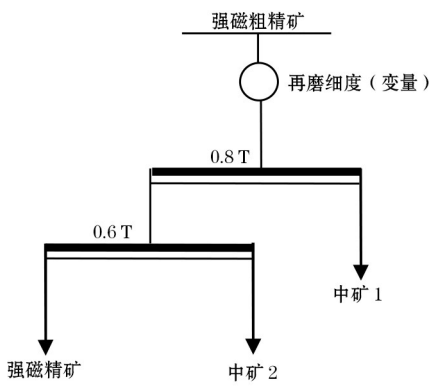


图 5 强磁选粗精矿再磨细度试验流程

Fig.5 Test flow of regrinding fineness for rough concentrate of high-intensity magnetic separation

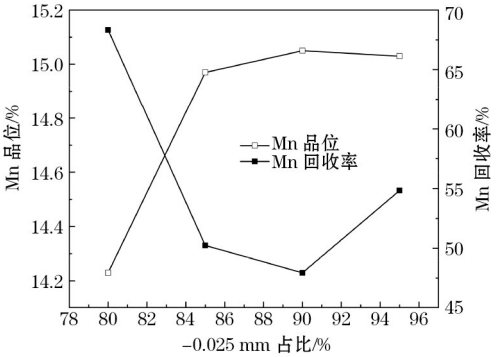


图 6 再磨细度对强磁选粗精矿选矿指标的影响

Fig.6 Effect of regrinding fineness on beneficiation indicators for rough concentrate of high-intensity magnetic separation

2.3 全流程试验研究

采用银浮选、浮选尾矿磁选回收铁锰的工艺进行了全流程闭路试验。由于弱磁粗精矿再磨至-0.025 mm 占 90%,弱磁选中矿粒度较小,故弱磁选的中矿直接与再磨后的强磁粗精矿一同进入强磁精选,以避免过磨。浮-磁联合工艺闭路试验流程见图 7,试验结果见表 7。由表 7 可知,全流程闭路试验可以获得银品位为 3 284.78 g/t、回收率为85.82%的银精矿,铁品位为 60.74%、磁性铁为60.04%、磁性铁回收率为 79.85%的铁精矿,以及锰品位为 15.03%、回收率为 76.65%的锰精矿。

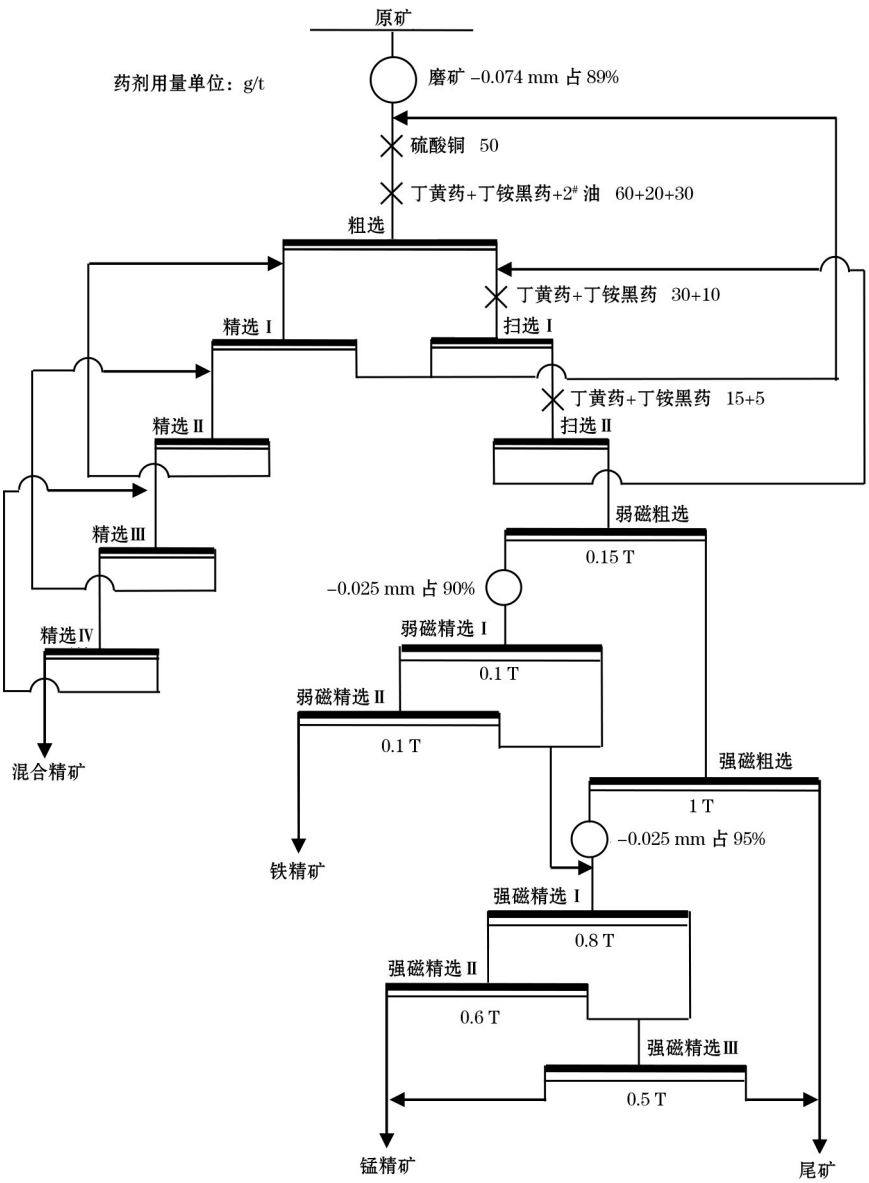


图 7 银铁锰综合回收选矿工艺流程

Fig.7 Beneficiation process flow for the comprehensive recovery of silver, iron, and manganese

表 7 银浮选-铁锰磁选全流程闭路试验结果

Table 7 Results of full-circuit closed-circuit test of silver flotation and iron/manganese magnetic separation %

产品名称	产率	品位				回收率			
		Ag*	TFe	MFe	Mn	Ag	TFe	MFe	Mn
银精矿	11.76	3 284.78	20.25	0.78	2.24	85.82	11.20	3.34	3.99
铁精矿	3.65	126.24	60.74	60.04	2.74	1.02	10.43	79.85	1.52
锰精矿	33.64	115.84	31.74	0.69	15.03	8.66	50.22	8.46	76.65
尾矿	50.95	39.78	11.75	0.45	2.31	4.50	28.15	8.35	17.84
合计	100.00	450.24	21.30	2.73	6.60	100.00	100.00	100.00	100.00

注:Ag 品位的单位为 g/t。

3 扩大连选试验研究

扩大连选试验是通过将实验室级分选流程进行系统化串联,构建出近似实际生产的运行体系,这种模拟化试验方法所获得的数据具有较高的可信度,能够为工业生产提供可靠的技术依据[16-18]。

3.1 试验系统与流程构建

基于小型试验确定的工艺流程,搭建日处理量为 1.2 t 的连续“银浮选-铁弱磁选-锰强磁选”选矿试验系统。原矿经塔磨机磨矿至 -0.074 mm 占 89%之后进入银浮选流程,主要包括“一粗四精两扫”的闭路浮选流程,中矿顺序返回,最终得到银精矿和浮选尾矿。浮选尾矿首先进入弱磁选回收铁的作业,弱磁选工艺为一粗两精,粗选设备为筒式磁选机,对粗精矿再磨后进行精选,精选设备为提质降杂永磁筒式磁选机,弱磁选尾矿进入强磁粗选,弱磁中矿进入强磁精选。强磁回收锰选矿工艺为一粗两精一精扫,均采用立环高梯度磁选机,对粗精矿再磨后进行精选,强磁选尾矿通过输送泵输送至尾矿浓缩过滤系统。

3.2 浮选流程改造

连选运行稳定一段时间后,取浮选段产品进行化验分析,结果见表 8。

表 8 精选泡沫品位分析结果

Table 8 Grade analysis results of selected cleaning froth

产品	银品位/(g/t)
精一泡沫	3 125.27
精二泡沫	5 291.72
精三泡沫	7 952.47
精四泡沫	8 635.24
浮选尾矿	65.14

由表 8 可知,精选二的泡沫产品其银品位为 5 291.72 g/t,已经超过小试精矿指标 3 284.78 g/t,精选四最终得到的银精矿银品位为 8 635.24 g/t,远高于小试银精矿的品位,且浮选尾矿银品位为 65.14 g/t,也高于小试跑尾指标 39.78 g/t。

在扩大连选试验的银浮选过程中,银精矿品位远超小试指标,但考虑到此时银精矿的回收率较低,为了提升银回收率,对浮选流程进行改进。将原有的 4 次精选减为 2 次精选,并且增加 1 次扫选作业,以降低跑尾。稳定运行一段时间后,取精选一、精选二产品和尾矿进行化验分析。分析结果表明,精选一、精选二泡沫和浮选尾矿的银品位分别为 2 405.83 g/t、4 247.76 g/t、55.24 g/t;精二泡沫产品的银品位高于小试指标 3 284.78 g/t,而浮选尾银矿品位低于小试指标(65.14 g/t)。由此可见,优化后的浮选流程较为合理。

3.3 磁选系统改进

3.3.1 弱磁选段优化

在磁强度为 0.15 T 的条件下,弱磁粗选段产品的品位化验分析结果见表 9。由表 9 可知,弱磁粗精矿的铁品位较高,考虑到筒式磁选机和提质降杂永磁筒式磁选机对磁铁矿的富集效果较好,因此对弱磁选粗精矿不再磨,直接进行精选。为充分回收铁精矿,提高铁精矿回收率,将弱磁粗选的磁场强度提升至 0.3 T 进行了试验,试验结果见表 9。

表 9 弱磁粗选产品的品位

Table 9 Grade of products obtained from low-intensity magnetic roughing separation %

磁场强度/T	弱磁粗精矿 TFe	弱磁精一精矿 TFe	弱磁精二精矿 TFe	弱磁精二精矿 MFe	弱磁选尾矿 TFe	弱磁选尾矿 MFe
0.15	54.26	59.52	62.75	60.72	20.35	0.72
0.30	53.54	59.06	62.34	60.51	19.47	0.51

由表 9 可知,在磁场强度由 0.15 T 增加至 0.3 T 时,弱磁粗精矿铁品位略有下降,由 54.26%降低至 53.54%,降低了 0.72 个百分点。最终获得的铁精矿 TFe 品位也略有下降,由 62.75%下降至 62.34%,仅降低了 0.41 个百分点。但有效降低了尾矿的铁品位,尾矿的全铁含量由 20.35%降低为 19.47%,降低了 0.88 个百分点,因此弱磁粗选的磁

场强度增加至 0.3 T 较为合适。

3.3.2 强磁选段优化

强磁选段产品的品位化验分析结果见表 10。

表 10 强磁选产品的品位

Table 10 Grade of products obtained from high-intensity magnetic separation %

锰粗精矿	锰精矿			强磁尾矿
Mn	Mn	TFe	MFe	Mn
10.25	13.46	33.65	1.03	3.78

由表 10 可知,强磁尾矿的锰品位为 3.78%,高于小试的结果 1.47 个百分点(小试强磁尾矿的锰含量为 2.31%),其原因可能是菱锰铁矿和菱锰矿等锰矿物相对于菱铁矿在再磨过程中更易被粉碎,导致其粒度过细,且在连选过程中,锰矿物在立环强磁选机中的停留时间较短,使得泥化的锰矿物容易被水流冲走,从而导致尾矿锰品位偏高,因此在后续连选中拟取消强磁粗精矿的再磨,以考察能否进一步降低尾矿的锰含量。

锰精矿中磁性铁品位为 1.03%,比小试的结果高出 0.34 个百分点(小试锰精矿的磁性铁含量仅为 0.69%)。对该锰精矿进行物相分析,发现里面含有部分含铁较高的菱铁矿,推测是这部分菱铁矿影响了锰精矿的品位,因此拟在弱磁选铁和强磁选锰之间增加一次强磁平板磁选机除铁的作业。为了验证该流程的可行性,先对强磁选锰精矿进行了磁场强度为 1.1 T 的强磁除铁试验,试验结果见表 11。

表 11 锰粗精矿强磁除铁试验结果

Table 11 Test results of iron removal of manganes rough concentrate by high-intensity magnetic separation

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Mn	Fe	Mn	Fe
精矿	46.14	12.35	36.46	43.34	49.99
尾矿	53.86	13.83	31.25	56.66	50.01
合计	100.00	13.15	33.65	100.00	100.00

由表 11 可知,对强磁选锰精矿进行一次强磁除铁后,获得的强磁精矿的锰品位和铁品位分别为 12.35%和 36.46%,强磁尾矿的锰品位和铁品位分别为 13.83%和 31.25%,锰品位相差 1.48 个百分点,铁品位相差 5.21 个百分点,铁的分离效果较好,而锰的分离效果较差,因此在弱磁选铁和强磁选锰之间增加一次强磁平板磁选机能够达到除去锰精矿中铁的目的。

由于用强磁平板磁选机除铁之后的锰精矿锰品位仅为 13.83%,与小试锰精矿的锰品位 15.03%相差较多。为进一步提升锰精矿的品位,拟对精选的磁场强度进行优化,试验流程如图 8 所示,试验结果见表 12。

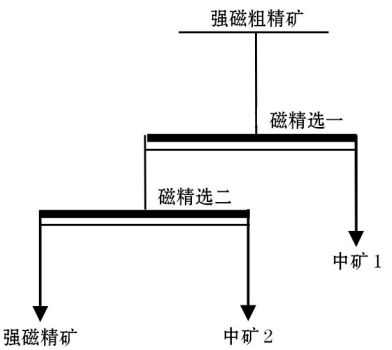


图 8 锰粗精矿精选磁场强度试验流程

Fig.8 Flow of magnetic field intensity test for cleaning of manganese rough concentrate

表 12 锰粗精矿精选场强试验结果

Table 12 Results of magnetic field intensity test for cleaning of manganese rough concentrate

试验条件	产品名称	作业产率/%	品位/%		作业回收率/%	
			Mn	Fe	Mn	Fe
精一场强:0.6 T 精二场强:0.3 T	MnK	50.13	15.37	31.93	67.21	59.59
	Mn 中 2	13.49	10.53	29.15	12.39	14.64
	Mn 中 1	36.38	6.43	19.03	20.40	25.77
	合计	100.00	11.46	26.86	100.00	100.00
精一场强:0.5 T 精二场强:0.3 T	MnK	49.01	14.93	31.05	64.52	57.83
	Mn 中 2	12.81	13.85	30.12	15.65	14.66
	Mn 中 1	38.18	5.89	18.96	19.83	27.51
	合计	100.00	11.34	26.31	100.00	100.00
精一场强:0.6 T 精二场强:0.4 T	MnK	52.38	15.04	31.31	70.65	63.02
	Mn 中 2	11.18	8.57	23.80	8.59	10.22
	Mn 中 1	36.44	6.35	19.11	20.75	26.76
	合计	100.00	11.15	26.02	100.00	100.00

由表 12 可知,当精一和精二的场强分别为 0.6 T 和 0.3 T 时,锰精矿的品位最高,为 15.37%,但此时锰的作业回收率最低,仅为 67.21%;当精一和精二场强分别为 0.6 T 和 0.4 T 时,锰精矿品位为 15.04%,此时锰的作业回收率最高,为 70.65%。综合考虑品位和回收率,选择精一和精二的场强分别为 0.6 T 和 0.4 T。

3.4 扩大连选试验稳定运行的平均指标

优化后的扩大连选流程如图 9 所示。连续 9 个班次共 72 h 的选矿指标平均值见表 13。由表 13 可知,最终获得的银精矿的银品位为 4 120.36 g/t、回收率为 88.75%;铁精矿铁品位为 62.38%,磁性铁为 60.67%,磁性铁回收率为 79.42%;强磁锰精矿锰品位为 15.06%,锰回收率为 73.97%。

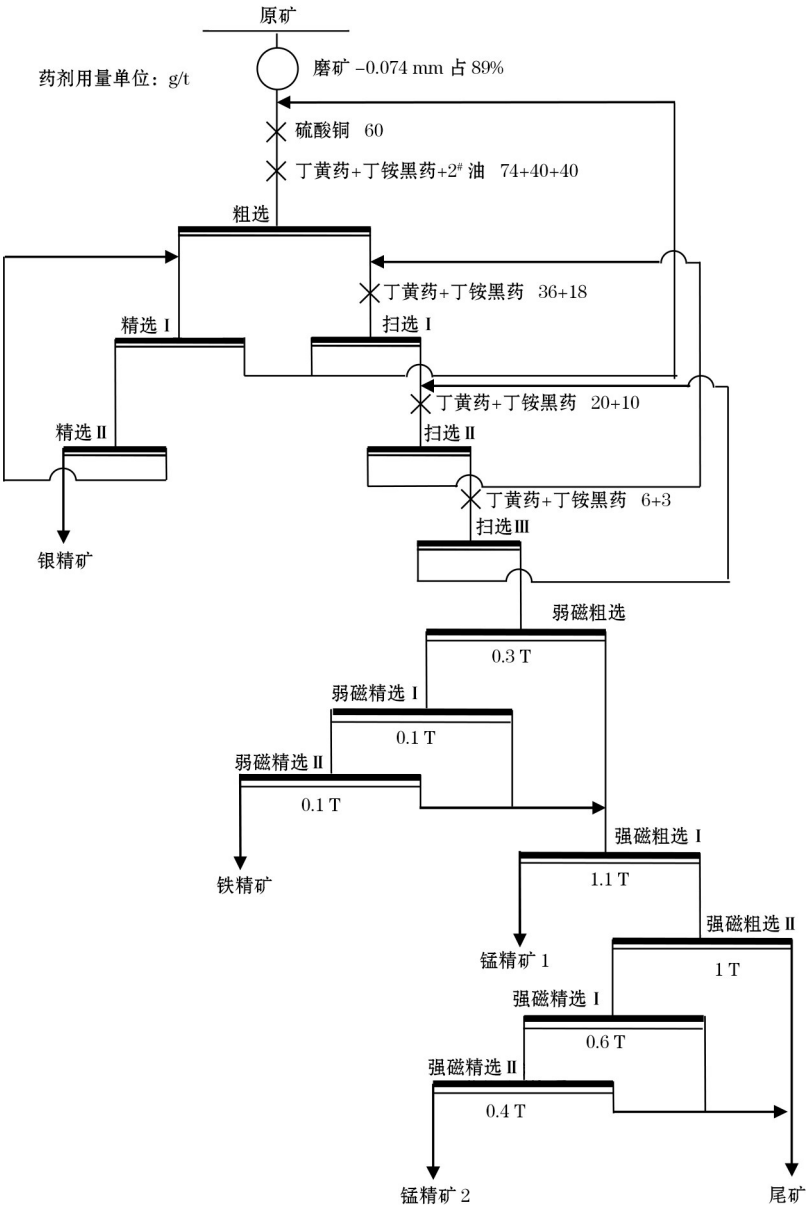


图 9 扩大连选试验流程

Fig.9 Process of expanded continuous beneficiation test

表 13 72 h 连选试验的平均指标

Table 13 Average indicators of continuous beneficiation test for 72 hours %

产品名称	产率	品位				回收率			
		Ag*	TFe	MFe	Mn	Ag*	TFe	MFe	Mn
银精矿	9.79	4 120.36	21.20	0.78	2.16	88.75	9.73	2.98	3.22
铁精矿	3.35	79.60	62.38	60.67	2.52	0.59	9.80	79.42	1.28
锰精矿 1	17.17	99.87	31.47	0.64	15.08	3.77	25.37	4.30	39.32
锰精矿 2	15.18	80.69	31.31	0.63	15.04	2.70	22.30	3.74	34.65
锰精矿	32.35	90.87	31.40	0.64	15.06	6.47	47.67	8.04	73.97
尾矿	54.51	34.96	12.83	0.45	2.60	4.19	32.80	9.58	21.52
原矿	100.00	456.57	21.17	2.56	6.52	100.00	100.00	100.00	100.00

注：Ag 品位的单位为 g/t。

3.5 回水对扩大连选试验的影响

在清水试验的基础上开展回水试验，向尾矿中加入絮凝剂聚丙烯酰胺，待尾矿沉降之后取上清液回用至全流程，并分别取浮选作业的流程样考察回

水的影响[13],结果见表14。由表14可以看出,相比于清水条件,使用回水后精矿指标的变化均小于3.0%,可见回水对该银精矿的浮选影响较小。

表14 清水与回水选矿指标对比

Table 14 Comparison of beneficiation indicators under fresh water and return water conditions

试验条件	银含量/(g/t)			银精矿产率/%	银精矿回收率/%
	原矿	银精矿	浮选尾矿		
清水	452.35	4 252.74	56.16	9.44	88.76
回水	453.14	4 147.05	55.85	9.71	88.87

4 结论

(1) 某银多金属矿石中的银主要以硫化物形式存在(辉银矿、深红银矿),铁、锰分布于磁铁矿、菱锰铁矿等矿物中,需通过浮选-磁选联合工艺实现综合回收。

(2) 小型试验验证采用"一粗四精两扫"浮选流程,获得的银精矿银品位为3 284.78 g/t,银回收率为85.82%;浮选尾矿磁选回收得到的铁精矿铁品位为60.74%,磁性铁品位为60.04%,磁性铁回收率为79.85%;锰精矿锰品位为15.03%,锰回收率为76.65%。

(3) 进行了日处理量为1.2 t的扩大连选试验,并优化了磨矿细度、磁选磁场强度及中矿处理流程,最终获得了银品位为4 120.36 g/t、回收率为88.75%的银精矿,铁品位为62.38%、磁性铁回收率为79.42%的铁精矿,以及锰品位为15.06%、回收率为73.97%的锰精矿。

参考文献(References):

[1] 韩玉光,方建军,尧章伟.硫化铅锌矿中伴生银回收研究进展[J].贵金属,2018,6(1):79-85.
HAN Yuguang, FANG Jianjun, YAO Zhangwei. Research progress of associated silver recovery in lead-zinc sulphide ores[J]. Precious Metals,2018,6(1):79-85.

[2] 叶富兴,宋宝旭,胡真,等.硫化铅锌矿中共伴生银的强化综合回收技术研究现状和发展概况[J].有色金属(选矿部分),2013(增刊1):15-18.
YE Fuxing, SONG Baoxu, HU Zhen, et al. Present situation and development of integrated recovery technology of associated silver in sulfide lead-zinc ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2013(Suppl.1):15-18.

[3] 戴自希.世界白银资源和开发利用现状[J].世界有色金属,2004(7):22-29.
DAI Zixi. World silver resources and development and their utilization status[J]. World Nonferrous Metals,2004(7):22-29.

[4] 冯博,朱贤文,彭金秀,等.有色金属硫化矿中伴生金银资源回收研究进展[J].贵金属,2016,37(2):70-76.
FENG Bo, ZHU Xianwen, PENG Jinxiu, et al. Research progress in recovering associated gold and silver from non-ferrous metal sulfide ores[J]. Precious Metals,2016,37(2):70-76.

[5] 张亮,杨卉芃,冯安生,等.全球银矿资源概况及供需分析[J].矿产保护与利用,2016(5):44-48.
ZHANG Liang, YANG Huipeng, FENG Ansheng, et al. Study on general situation and analysis of supply and demand of global sliver resource[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2016(5):44-48.

[6] 敖顺福.我国铅锌矿中伴生银的选矿特征及其强化浮选回收技术进展[J].中国矿山工程,2017,46(5):17-22.
AO Shunfu. Processing characteristics of associated silver in lead-zinc ores and technical progress of its strengthening flotation technology in China[J]. China Mining Engineering,2017,46(5):17-22.

[7] 张大权,江彪,王登红,等.中国银矿的资源特征及成矿规律概要[J].地质学报,2015,89(6):1008-1025.
ZHANG Daquan, JIANG Biao, WANG Denghong, et al. A summary of resources characteristic and metallogenic regularity of silver deposits in China[J]. Acta Geologica Sinica,2015,89(6):1008-1025.

[8] 王李鹏,任琳珠.某铅锌银多金属硫化矿选矿工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2019(1):43-47.
WANG Lipeng, REN Linzhu. Experimental study on beneficiation process of a lead-zinc-silver polymetallic ore[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2019(1):43-47.

[9] 雷阿丽,吴彩斌,江领培.某低品位伴生银铅锌多金属矿选矿工艺试验研究[J].黄金科学技术,2018,26(2):212-218.
LEI Ali, WU Caibin, JIANG Lingpei. Experiment research on beneficiation process of a low grade polymetallic lead-zinc ore with associated silver[J]. Gold Science and Technology,2018,26(2):212-218.

[10] 马忠臣,杨长颖,马延全.难选深度氧化铅银矿的浮选工艺研究[J].有色矿冶,2017,33(6):27-30.
MA Zhongchen, YANG Changying, MA Yanquan. Investigations on flotation process for a refractory silver bearing deeply oxidized lead ore[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy,2017,33(6):27-30.

[11] 李洁,李英,宁新霞.某含银铅锌矿强化铅锌分离和提高银回收率选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2015(5):20-23.
LI Jie, LI Ying, NING Xinxia. Beneficiation test research of strengthening lead-zinc separation and increasing the recovery of silver[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2015(5):20-23.

[12] 李沛原,颜江渊,伍红强,等.安徽某低品位硫化铜矿石选矿工艺连选试验研究[J].现代矿业,2021,37(9):134-138.

LI Peiyuan, YAN Jiangyuan, WU Hongqiang, et al. Continuous separation test research on a low grade copper sulfide ore in Anhui[J]. Modern Mining, 2021, 37(9): 134-138.

[13] 巩福贵,刘云龙.二道河矿区氧化矿综合利用扩大连选试验研究[J].矿业工程,2024,22(4):40-45.
GONG Fugui, LIU Yunlong. Experimental study on comprehensive utilization and scaled-up and continuous separation of oxidized ore in Erdaohe mining area[J]. Mining Engineering,2024,22(4):40-45.

[14] 李向益,杨社平,乐智广,等.云南某高磷高铁锰矿工艺矿物学与选矿工艺研究[J].有色金属(选矿部分),2024(12):34-42.
LI Xiangyi, YANG Sheping, LE Zhiguang, et al. Research on process mineralogy and mineral processing of a high phosphorus and high iron manganese ore in Yunnan[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(12): 34-42.

[15] 刘鹏飞,袁帅,李艳军,等.含铁锰矿石资源概述及开发利用研究现状[J].中国锰业,2021,39(1):5-12.
LIU Pengfei, YUAN Shuai, LI Yanjun, et al. A research status of development and utilization of iron-bearing manganese ore resources[J]. China Manganese Industry, 2021,39(1):5-12.

[16] 代献仁,王周和.铜陵有色某选厂硫粗精矿连选试验[J].现代矿业,2020,36(1):152-155.
DAI Xianren, WANG Zhouhe. Continuous concentration test of sulfur crude concentrate in a processing plant of Tongling Nonferrous Metals[J]. Modern Mining, 2020, 36(1):152-155.

[17] 郑桂兵,任爱军,李松清,等.低品位硅钙质胶磷矿扩大连选的试验研究[J].武汉工程大学学报,2018,40(5):550-554.
ZHENG Guibing, REN Aijun, LI Songqing, et al. Pilot test of low grade collophanite ore containing calcium and silicon[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology,2018,40(5):550-554.

[18] 冯运伟,邓海波,陈兴华,等.铝土矿梯度浮选脱硅半工业连选试验研究[J].轻金属,2016(2):1-4+14.
FENG Yunwei, DENG Haibo, CHEN Xinghua, et al. A pilot test study on bauxite gradient flotation desilication[J]. Light Metals,2016(2):1-4+14.