国外某高硫赤褐铁矿选矿试验研究*

杨含蓄[1,2],高春庆[1,2],王海亮[1,2],骆洪振[1,2],张凛[1,2],徐健[1,2]

(1.中钢集团马鞍山矿山研究总院股份有限公司, 安徽 马鞍山市 243000;
2.金属矿山安全与健康国家重点实验室, 安徽 马鞍山市 243000)

摘要:国外某高硫赤褐铁矿含硫5.68%、含铁45.95%,铁主要赋存在赤褐铁矿中,硫主要以硫化物的形式存在。为了合理开发利用该矿石,在研究原矿性质的基础上,采用磨矿-浮选选硫-强磁选选铁的工艺流程进行了试验。在磨矿细度-0.074 mm含量占80%的条件下,试验获得了硫品位为41.31%、硫回收率为69.74%的硫精矿,铁品位为60.84%、铁回收率为76.92%的铁精矿。铁精矿的含硫量符合质量标准的要求,实现了高硫赤褐铁矿石资源的综合回收利用。

关键词:高硫赤褐铁矿;浮选;磁选;硫精矿;铁精矿

中图分类号:TD951 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)05-0231-06

Experimental Study on Beneficiation of a Foreign High-Sulfur Hematite-Limonite Ore

YANG Hanxu[1,2], *GAO Chunqing*[1,2], *WANG Hailiang*[1,2], *LUO Hongzhen*[1,2], *ZHANG Lin*[1,2], *XU Jian*[1,2]

(1.Sinosteel Maanshan General Institute of Mining Research Co., Ltd., Ma'anshan, Anhui 243000, China;
2.State Key Laboratory of Safety and Health for Metal Mines, Ma'anshan, Anhui 243000, China)

Abstract: A foreign high-sulfur hematite-limonite ore contains 5.68% of sulfur and 45.95% of iron. Iron mainly occurs in hematite-limonite, and sulfur mainly exists in the form of sulfide. In order to rationally develop and utilize the ore, based on the study of the properties of the raw ore, the process flow of grinding-flotation sulfur separation-high intensity magnetic separation of iron was tested. Under the condition of grinding fineness of -0.074 mm accounting for 80%, the sulfur concentrate with sulfur grade of 41.31% and sulfur recovery of 69.74% was obtained, and the iron concentrate with iron grade of 60.84% and iron recovery of 76.92% was obtained. The sulfur content of iron concentrate meets the requirements of quality standards, and the comprehensive recovery and utilization of high-sulfur hematite-limonite ore resources are realized.

Key words: High-sulfur hematite-limonite, Flotation, Magnetic separation, Sulfur concentrate, Iron concentrate

0 引言

随着经济的快速发展和工业化程度的不断提高,我国作为全球最大的铁资源消耗国,对铁矿石的需求量呈现爆炸式增长,导致对外依存度极高。此外,我国的铁矿资源普遍具有“贫、细、杂”的特征[1-2],开采与处理成本相对较高,进一步影响了国内铁矿的市场竞争力。为应对这一局面,我国钢铁企业加快在全球范围内进行矿产资源配置和产能布局,从而能够获取更多的铁矿产资源。随着铁矿资源长期的开采利用,高品质的资源逐渐减少,因而低品质铁矿资源的开发利用愈发重要[3-6]。

高硫赤褐铁矿资源储量巨大,但实际利用率远不及其资源量所显示的潜力[7-8]。该类矿石利用的主要难点体现在铁精矿中硫含量是否超标,高含量的硫不仅影响钢材的物理和化学性能、提高冶炼成本,还会导致环境污染。为解决这一问题,国内外学者进行大量研究并提出了一系列的分选回收工艺。这些工艺普遍以浮选、磁选为主,以及结合冶金在内的分选方法,旨在实现铁、硫矿物的高效回收[9-12]。

田小松等[13]以硫酸为pH调整剂、丁基黄药为捕收剂、2号油为起泡剂,采用先浮选选硫后磁选的工艺流程,获得铁品位为65.21%、含硫0.05%的铁精矿,硫品位为46.35%的硫精矿,选别指标较佳。本文对国外某含硫量高的赤褐铁的原矿性质进行了分析,并开展了详细的选矿试验研究,旨在实现铁矿

* **收稿日期**:2024-06-28
作者简介:杨含蓄(1996—),女,安徽安庆人,硕士研究生,工程师,主要从事选矿工艺研究。E-mail:1776734130@qq.com
通信作者:高春庆(1982—),男,山东潍坊人,博士研究生,正高级工程师,主要从事选矿工艺研究。E-mail:94178234@qq.com

物的高效回收,为后期选矿厂的建设、经济评价以及类似矿石的处理提供技术支撑。

1 矿石性质

试验矿样取自国外某赤褐铁矿石,对该矿样分别进行了化学多元素分析以及铁、硫物相分析,分析结果见表 1、表 2 和表 3,-2 mm 矿石粒度筛析结果见表 4。

表 1 原矿化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multielement analysis of raw ore

%

Fe	S	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O
45.950	5.680	3.020	5.150	3.920	0.274	0.429
Na_2O	P	CuO	ZnO	MnO	TiO_2	V_2O_5
0.067	0.919	0.014	<0.005	0.086	0.123	0.263

表 2 原矿铁物相分析结果

Table 2 Analysis results of the iron phase of raw ore %

铁物相	含量	分布率
磁铁矿	0.35	0.76
菱铁矿	3.45	7.51
赤褐铁矿	35.06	76.30
黄铁矿	3.04	6.62
硅酸铁	1.95	4.24
磁黄铁矿	2.10	4.57
合计	45.95	100.00

表 3 原矿硫物相分析结果

Table 3 Analysis results of the sulfur phase of raw ore %

硫物相	含量	分布率
硫化物之硫	4.32	76.14
硫酸盐之硫	1.35	23.72
单体硫	0.01	0.14
合计	5.68	100.00

表 4 矿石筛析结果

Table 4 Results of sieve analyses of the ores

粒级/mm	产率/%	品位/%		分布率/%	
		Fe	S	Fe	S
>1.5	3.96	46.32	3.67	4.00	2.59
1.0~1.5	9.35	52.78	4.58	10.76	7.62
0.8~1.0	10.65	44.15	5.09	10.25	9.65
0.5~0.8	21.11	50.94	7.44	23.44	27.96
0.3~0.5	11.65	38.60	7.59	9.80	15.74
0.15~0.3	7.32	44.76	5.68	7.14	7.40
0.1~0.15	8.22	40.09	4.15	7.18	6.07
0.074~0.1	7.11	46.29	3.92	7.18	4.96
0.038~0.074	7.52	43.64	4.56	7.15	6.10
0.01~0.038	8.41	48.65	5.80	8.92	8.68
<0.01	4.70	40.67	3.86	4.17	3.23
合计	100.00	45.87	5.62	100.00	100.00

由表 1 至表 3 可知,矿石中主要成分为 Fe、S,含量分别为 45.95%、5.68%,属于高硫铁矿石,其次为 Al_2O_3、CaO、SiO_2 等。矿石中铁矿物主要为赤褐铁矿,占比达 76.30%,属于较难回收的铁矿物,其次为菱铁矿和黄铁矿形式存在的铁。硫主要以硫化物的形式存在,占比为 76.14%。从矿石性质可以看出,有效分离和回收赤褐铁矿和硫化物是研究该矿石选别工艺的重点。

由表 4 可知,原矿中铁分布粒度粗细较均匀,富集规律不明显,硫主要分布在粗、中粒级范围内,需要通过适当磨矿使单体解离充分,才能达到较佳的分选效果。

2 试验结果与讨论

2.1 流程选择试验

硫铁矿的可浮性较好,可用浮选方法回收;赤褐铁矿为弱磁性矿物,可用脉动高梯度强磁选机进行富集。该矿石中含硫量较高且主要以黄铁矿、磁黄铁矿等硫化物形式存在,因此在回收硫精矿的同时需要保证铁精矿的品质。对于含有硫化物的铁矿石,常规选矿方法主要有“先浮后磁”和“先磁后浮”两种[14-15]。分别采用该两种流程进行试验,通过对比试验结果,选出最佳试验工艺流程。浮硫流程采用一粗一扫,浮选精矿合并为硫精矿;强磁选铁流程采用一粗一精,强磁精矿合并为铁精矿。试验流程如图 1 和图 2 所示,试验结果见表 5。

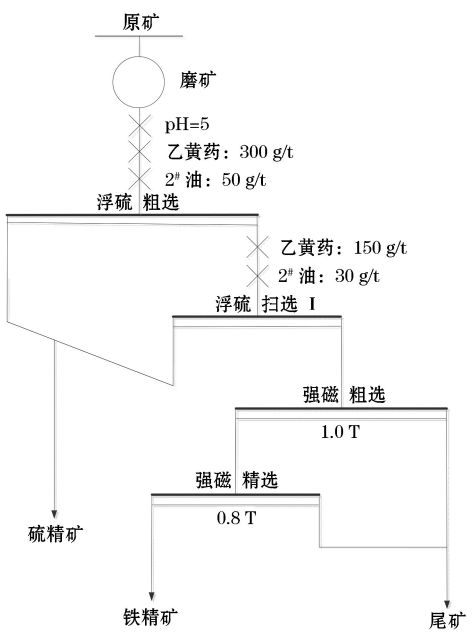


图 1 先浮后磁流程

Fig.1 Flow chart of flotation before magnetic separation

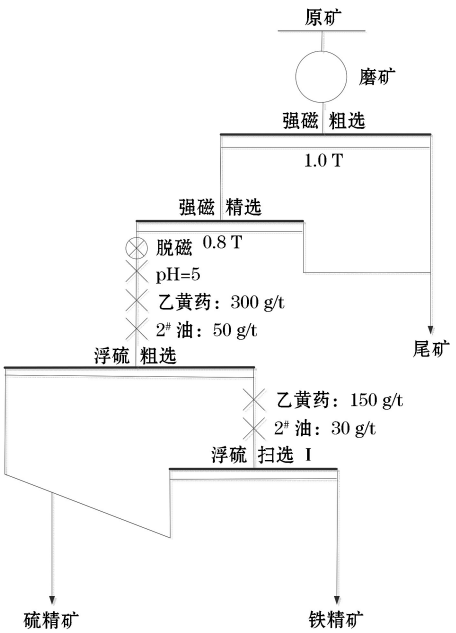


图 2　先磁后浮流程

Fig.2　Flow chart of magnetic separation before flotation

表 5　不同流程试验结果

Table 5　Test results of different processes

工艺	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			S	Fe	S	Fe
先浮后磁	硫精矿	13.42	28.12	43.26	66.87	12.67
	铁精矿	57.66	0.65	53.84	6.64	67.73
	尾矿	28.92	5.17	31.06	26.49	19.60
	原矿	100.00	5.64	45.83	100.00	100.00
先磁后浮	硫精矿	5.57	30.65	38.53	31.03	4.67
	铁精矿	60.58	1.32	56.62	14.53	74.71
	尾矿	33.85	8.85	27.97	54.44	20.62
	原矿	100.00	5.50	45.91	100.00	100.00

由表 5 可知，采用先磁后浮试验流程时，铁精矿中铁回收率较高，但含硫高达 1.32%。采用先浮后磁试验流程时，铁精矿中硫含量仅为 0.65%，且先磁后浮流程中磁选产品需要浓缩才能进入后续浮选，流程更加繁杂，综合考虑，选用先浮后磁工艺进行后续试验。

2.2　磨矿细度试验

为减少赤褐铁矿和硫铁矿连生体的含量，增加矿物单体解离度，通过改变磨矿时间进行先浮后磁试验，确定不同磨矿细度对硫、铁指标的影响，试验流程见图 1，试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知，随着磨矿细度－0.074 mm 占比由 60%增加至 90%，硫精矿的硫品位逐渐降低，铁精矿的铁品位由 56.21%增加至 56.88%，当磨矿细度达到－0.074 mm 占比 80%时，铁精矿的 Fe 品位为 56.83%，铁精矿的硫品位较低，为 0.69%，因此，选择磨矿细度－0.074 mm 占比 80%较适宜。

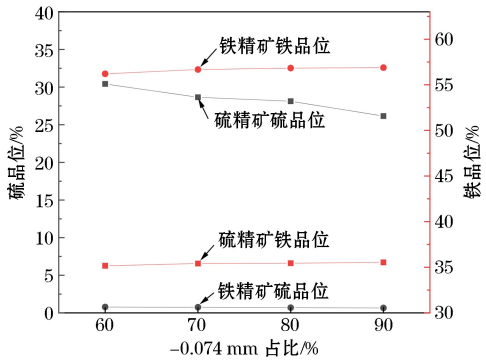


图 3　磨矿细度试验结果

Fig.3　Results of grinding fineness test

2.3　浮选选硫试验

2.3.1　矿浆 pH 试验

矿浆 pH 对于浮选效果有着重要的影响，特别是在铁矿脱硫的过程中尤为明显。当 pH 过低时，黄药易分解影响其稳定性，捕收效果下降；pH 过高时，硫铁矿表面更易氧化形成氧化铁层覆盖其表面，降低可浮性。在弱酸条件下更有利于溶解硫铁矿表面的氧化铁层，使黄药易于附着其表面，提高浮选效果[16-18]。试验选用稀硫酸为 pH 调整剂，考察 pH 对浮选的影响。试验流程为一次粗选，乙基黄药用量为 300 g/t，2# 油用量为 50 g/t，浮选时间为 6 min。试验结果见图 4。

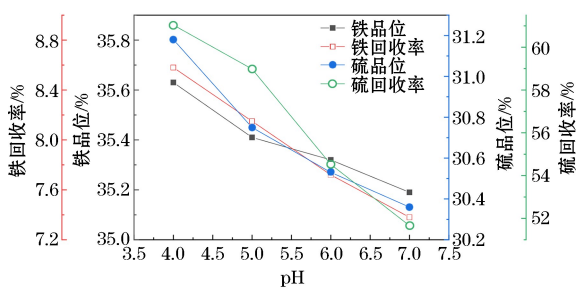


图 4　矿浆 pH 试验结果

Fig.4　Results of pulp pH test

由图 4 可知，随着矿浆 pH 的升高，硫精矿的硫品位由 31.18%降低至 30.36%、铁品位由 35.63%降低至 35.19%。这表明在适当的弱酸性环境中，pH 越低，越有利于硫的回收，但酸性过高易腐蚀设备。综合考虑，选择 pH 为 5.0 左右。

2.3.2　捕收剂用量试验

乙基黄药是选硫的常用捕收剂之一[19]，试验选

用乙基黄药为捕收剂,考察乙基黄药用量对浮选选硫的影响。试验流程为一次粗选,矿浆 pH=5,2# 油用量为 50 g/t,浮选时间为 6 min。试验结果见图 5。

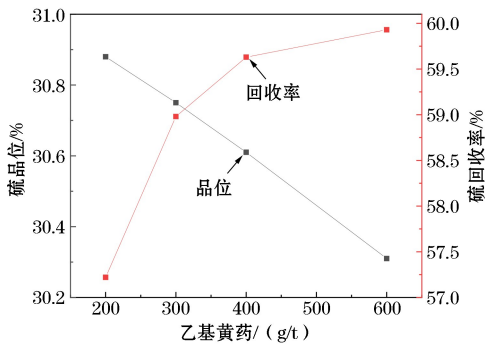


图 5 乙基黄药用量试验结果

Fig.5 Test results of the dosage of ethyl xanthate

由图 5 可知,随着捕收剂用量从 200 g/t 增加至 600 g/t,硫精矿的硫品位从 30.88%逐渐降低至 30.31%,硫回收率从 57.22%增加至 59.93%。综合考虑,选择乙基黄药的用量为 300 g/t。

2.3.3 起泡剂用量试验

通过试验考察起泡剂松醇油用量对选硫的影响。浮选流程为一次粗选,矿浆 pH=5,捕收剂乙基黄药用量为 300 g/t,浮选时间为 6 min,试验结果见图 6。

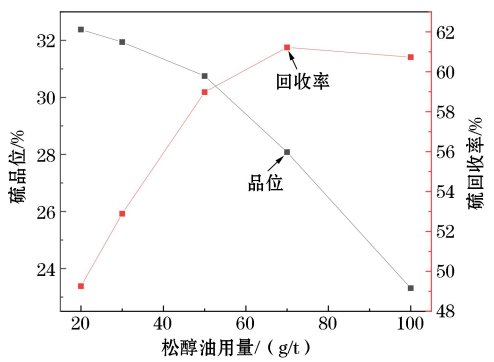


图 6 起泡剂用量试验结果

Fig.6 Test results of the dosage of foaming agent

由图 6 可知,在其他条件不改变的情况下,随着起泡剂松醇油用量的增加,硫精矿的硫品位降低,而硫回收率先升高后降低。在松醇油用量达到 70 g/t 时,精矿产品中硫回收率最高且硫品位适中,因此,确定粗选的松醇油用量为 70 g/t。

2.4 强磁选铁试验

2.4.1 强磁粗选试验

对浮选选硫尾矿进行强磁选铁试验,采用一粗一扫选铁,粗选磁场强度试验结果见图 7。

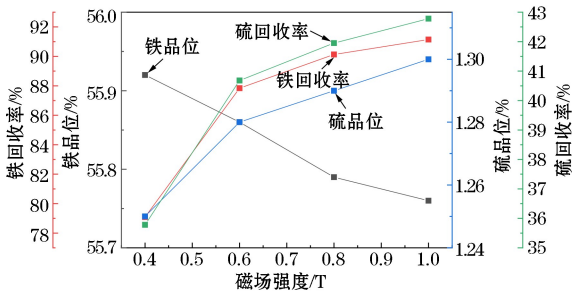


图 7 强磁粗选试验结果

Fig.7 Test results of high magnetic roughing

由图 7 可知,随着磁场强度的升高,铁粗精矿的铁品位逐渐下降,而铁回收率逐渐上升,铁精矿的硫品位差别较小,综合考虑,选择磁场强度为 1.0 T。

2.4.2 强磁精选试验

在不同场强条件下,对强磁粗选精矿进行精选试验,结果见图 8。

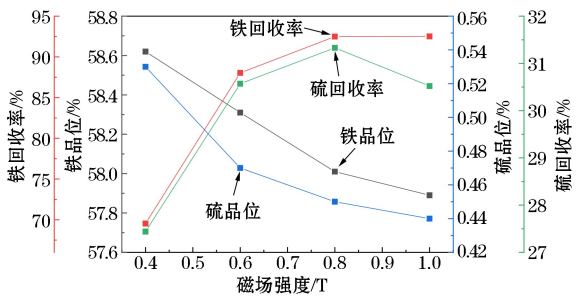


图 8 强磁精选试验结果

Fig.8 Test results of intense magnetic selection

由图 8 可知,随着强磁精选场强由 0.4 T 增加至 1.0 T,铁精矿的铁品位逐渐下降,而铁回收率逐渐上升,硫品位由 0.53%逐渐降低至 0.44%,铁精矿的硫含量对铁指标的影响较大,综合考虑,选择精选磁场强度为 0.8 T。

2.5 全流程试验

在上述条件试验的基础上,进行了全流程工艺试验,药剂制度及流程见图 9,试验结果见表 6。首先在矿浆 pH=5、捕收剂乙基黄药用量为 300 g/t、起泡剂松醇油用量为 70 g/t 的条件下,进行一次粗选二次精选一次扫选选硫。然后对选硫尾矿进行强磁一粗一精选铁。最终可获得硫品位为 41.31%、硫回收率为 69.74%的硫精矿,铁品位为 60.84%、铁回收率为 76.92%、含硫 0.45%的铁精矿。铁精矿的硫含量符合铁精矿质量标准,实现了铁、硫的综合回收。

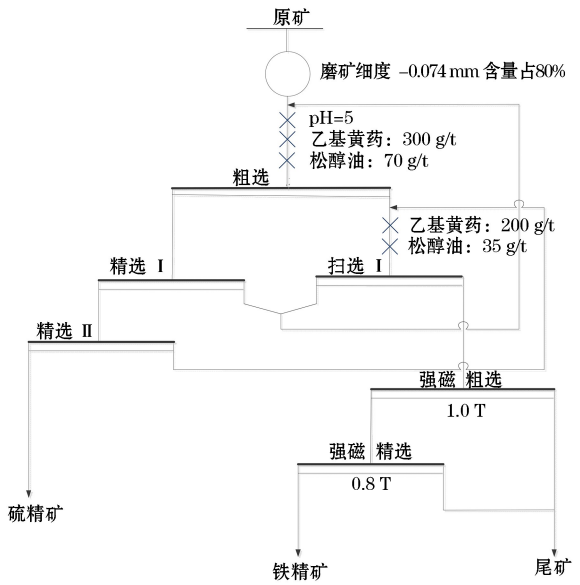


图 9　浮选选硫、强磁选选铁的工艺流程

Fig.9　Process flow of sulfur selection by flotation and iron selection by high intensity magnetic separation

表 6　全流程试验结果

Table 6　Results of the whole process test

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		S	Fe	S	Fe
硫精矿	9.17	41.31	36.26	69.74	7.30
铁精矿	57.62	0.45	60.84	4.77	76.92
尾矿	33.21	4.17	21.66	25.49	15.78
合计	100.00	5.43	45.57	100.00	100.00

3　结论

(1) 国外某高硫赤褐铁矿石的铁含量为 45.95%，绝大部分为赤褐铁矿，占比为 76.30%，其次以菱铁矿和黄铁矿的形式存在；硫含量为 5.68%，主要为硫化物中的硫，占比为 76.14%；脉石成分主要为 Al_2O_3、CaO、SiO_2，含量较低；铁在粒度分布中较均匀，硫主要分布在粗、中粒度矿物中，需要通过适当磨矿使单体解离充分，才能达到较佳的分选效果。

(2) 根据硫铁矿具有较好的可浮性以及赤褐铁矿为弱磁性矿物的特点，通过流程对比后选择采用先浮选后磁选的工艺流程。在条件试验的基础上，采用磨矿-浮选选硫-强磁选铁工艺流程进行了试验，试验获得硫品位为 41.31%、硫回收率为 69.74% 的硫精矿，铁品位为 60.84%、铁回收率为 76.92%、含硫 0.45% 的铁精矿，铁精矿品质达到了质量标准的要求，较好地实现了铁、硫的回收，为赤褐铁矿这类低品质铁矿资源的综合利用提供了新的技术途径。

参考文献(References)：

[1] 马崇振.国外某高硫铁矿提铁降硫试验研究[J].矿冶工程，2022，42(3)：76-79.
MA Chongzhen. Experimental research on desulfurization of overseas high-sulfur lron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2022，42(3)：76-79.

[2] 罗帅，刘全军，杨绍晶.云南某高硫铁矿脱硫试验研究[J].矿业研究与开发，2019，39(3)：15-19.
LUO Shuai，LIU Quanjun，YANG Shaojing. Experimental study on desulfurization of a high sulfur lron ore in Yunnan [J]. Mining Research and Development，2019，39(3)：15-19.

[3] 王嫱.2018 年全球铁矿资源供需形势分析[J].中国国土资源经济，2020(3)：59-68.
WANG Qiang. Analysis of global supply and demand situation of iron ore resources in 2018[J]. Natural Resource Economics of China，2020(3)：59-68.

[4] 雷永顺，程国华.低品位难选铁矿资源综合利用研究[J].甘肃冶金，2021(2)：13-15.
LEI Yongshun，CHENG Guohua. Study on comprehensive utilization of low-grade difficult lron ore resources[J].Gansu Metallurgy，2021(2)：13-15.

[5] 于娱，马代鹏，王贤梅.国际铁矿资源全产业链产品的贸易网络韧性[J].资源科学，2022，44(10)：2006-2021.
YU Yu，MA Daipeng，WANG Xianmei. International trade network resilience for products in the whole industrial chain of iron ore resources[J]. Resources Science，2022，44(10)：2006-2021.

[6] 肖婉琴，郑桂兵.某微细粒难选铁矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分)，2017(5)：46-50.
XIAO Wanqin，ZHENG Guibing. Experimental research on mineral processing of a micro-fine particle refractory iron ore [J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)，2017 (5)：46-50.

[7] 孙朋，胡宜斌.山东某褐铁矿磁化焙烧-磁选试验研究[J].矿冶工程，2019，39(2)：61-64.
SUN Peng，HU Yibin. Magnetizing roasting-magnetic separation technology for a Shandong limonite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering，2019，39(2)：61-64.

[8] 武丹宇，庄故章，冯艳虎.老挝某褐铁矿抛尾矿选矿试验研究[J].矿冶，2023，32(1)：38-43.
WU Danyu，ZHUANG Guzhang，FENG Yanhu. Experimental study on beneficiation of a limonite tailings in Laos[J].Mining and Metallurgy，2023，32(1)：38-43.

[9] 冯艳虎.老挝孟昆褐铁矿焙烧-重磁联合选矿工艺研究[D].昆明：昆明理工大学，2024.
FENG Yanhu. Research on roasting and gravity magnetic combined beneficiation technology of Mengkun limonite in Laos[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2024.

[10] 朱海龙,张铃,伍红强.海南某选厂磁-赤褐铁矿选矿工艺试验研究[J].现代矿业,2022,38(7):115-118.
ZHU Hailong, ZHANG Ling, WU Hongqiang. Experimental study on beneficiation process of magnetic-hematite ore dressing in a processing plant in Hainan[J]. Modern Mining,2022,38(7):115-118.

[11] 魏延涛,杨昌龙.广西某褐铁矿选矿工艺试验研究[J].现代矿业,2021,37(9):153-154+162.
WEI Yantao, YANG Changlong. Experimental study on beneficiation process of a limonite ore in Guangxi[J]. Modern Mining,2021,37(9):153-154+162.

[12] 黄武胜,袁启东,林小凤,等.国外某赤褐铁矿选矿试验研究[J].现代矿业,2021,37(11):125-129.
HUANG Wusheng, YUAN Qidong, LIN Xiaofeng, et al. Experimental study on beneficiation of a foreign hematite ore[J]. Modern Mining,2021,37(11):125-129.

[13] 田小松,武立伟,赵洵,等.缅甸某低品位复杂难选铁锡矿石综合回收试验研究[J].金属矿山,2024(4):135-141.
TIAN Xiaosong, WU Liwei, ZHAO Xun, et al. Experimental study on comprehensive recovery of a low-grade complex refractory iron and tin ore in Myanmar[J]. Metal Mine,2024(4):135-141.

[14] 杨晖,于蕾,魏明安.高硫磁铁矿脱硫的意义及脱除法研究现状[J].矿冶,2022,31(2):35-39.
YANG Hui, YU Lei, WEI Ming'an. Significance of desulfurization of high sulfur magnetite and research status of desulfurization methods[J]. Mining and Metallurgy, 2022,31(2):35-39.

[15] 张洋洋,吴雪兰,陈意帆,等.某铁精矿浮选脱硫探究试验[J].科技视界,2020(28):115-118.
ZHANG Yangyang, WU Xuelan, CHEN Yifan, et al. Exploration experiment on flotation desulfurization of a certain iron concentrate[J]. Science & Technology Vision, 2020(28):115-118.

[16] 吴宁.攀西某钒钛磁铁精矿浮选脱硫实验[J].矿产综合利用,2022(3):126-131.
WU Ning. Experimental study on the flotation desulfurization of vanadium titanium magnetite concentrate in Panxi[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3): 126-131.

[17] 程万里.黄铁矿浮选过程中硫酸铜与丁基黄药的交互作用研究[D].贵阳:贵州大学,2021.
CHENG Wanli. Study on the interaction between copper sulfate and butyl xanthate in the flotation process of pyrite[D]. Guiyang:Guizhou University,2021.

[18] 郑鹏华,王倩,边美华,等.典型选矿设备腐蚀磨损案例分析[J].材料保护,2018,51(9):141-148.
ZHENG Penghua, WANG Qian, BIAN Meihua, et al. Analysis on corrosion and wear case of typical mineral processing equipment[J]. Materials Protection,2018,51(9):141-148.

[19] 杨波,王晓,谢贤,等.提高云南某选铜尾矿中硫回收率的试验研究[J].云南冶金,2024,53(2):40-45.
YANG Bo, WANG Xiao, XIE Xian, et al. Experimental study of improvement of sulfur recovery from one Yunnan copper tailings beneficiation[J]. Yunnan Metallurgy,2024,53(2):40-45.