津巴布韦某磁赤铁矿选矿试验研究*

何湛，肖舜元，冯程，宋水祥，陈巧妹，龙姓也

（长沙矿山研究院有限责任公司， 湖南 长沙 410012）

摘要：津巴布韦某磁赤铁矿TFe品位为42.01%，矿石嵌布粒度细且硅酸盐矿物含量高，为实现铁矿物与脉石的有效解离，提升铁资源回收率，采用弱磁-强磁-反浮选联合工艺进行试验研究。通过磨矿细度试验确定粗磨细度为-0.074 mm占比81%，弱磁精矿再磨至-0.037 mm占比90%，强磁精矿再磨至-0.037 mm占比85%。磁场强度试验表明，4次弱磁作业磁场强度分别为0.33 T、0.20 T、0.15 T、0.10 T，强磁作业磁场强度为1.0 T时，可获得Fe品位62.26%、Fe回收率12.25%的弱磁精矿和Fe品位51.32%、Fe回收率64.76%的强磁精矿。针对强磁精矿，通过反浮选条件试验优化药剂制度为矿浆pH=11.0，玉米淀粉用量500 g/t，CaO用量800 g/t，自研捕收剂CK-T1用量300 g/t。闭路试验采用“一粗两精两扫”流程，最终铁精矿Fe品位提升至65.95%，Fe回收率达81.45%。研究表明，细磨与弱磁-强磁-反浮选联合工艺的结合显著提高了微细粒磁赤铁矿的分选效率，为同类难选矿石的高效回收提供了技术参考。

关键词：磁赤铁矿；磁选；反浮选；磨矿细度；药剂制度

中图分类号：TD951.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1005-2763(2025)06-0255-08

Experimental Study on Beneficiation of a Maghemite Ore in Zimbabwe

HE Zhan, XIAO Shunyuan, FENG Cheng, SONG Shuixiang, CHEN Qiaomei, LONG Xingye

(Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: A certain magnetite ore in Zimbabwe has a TFe grade of 42.01%, with fine particle size and high content of silicate minerals. To achieve effective dissociation of iron minerals and gangue, as well as improve the recovery rate of iron resources, a combined process of weak magnetic-strong magnetic-reverse flotation was adopted for experimental research. Through the grinding fineness test, it was determined that the coarse grinding fineness was -0.074 mm, accounting for 81%. The weak magnetic concentrate was further ground to -0.037 mm, accounting for 90%, and the strong magnetic concentrate was further ground to -0.037 mm, accounting for 85%. The magnetic field strength test results show that magnetic field strengths of four weak magnetic operations are 0.33 T, 0.20 T, 0.15 T and 0.10 T, respectively. When the magnetic field strength of the strong magnetic operation is 1.0 T, weak magnetic concentrate with a Fe grade of 62.26% and a Fe recovery rate of 12.25% and strong magnetic concentrate with a Fe grade of 51.32% and a Fe recovery rate of 64.76% could be obtained. For the strong magnetic concentrate, the optimized reagent system through reverse flotation condition experiments is determined with slurry pH of 11.0, corn starch dosage of 500 g/t, CaO dosage of 800 g/t, and self-developed collector CK-T1 dosage of 300 g/t. The closed-circuit test adopts the process of one coarse, two fine, and two scans, and the final Fe grade of the iron concentrate is increased to 65.95%, with a Fe recovery rate of 81.45%. Research has shown that the combination of fine grinding and weak magnetic-strong magnetic-reverse flotation processes can significantly improve the sorting efficiency of fine-grained magnetite, providing a technical reference for the efficient recovery of similar refractory ores.

Key words: Maghemite, Magnetic separation, Reverse flotation, Grinding fineness, Reagent system

0 引言

随着全球经济的发展，矿产资源作为支撑现代工业体系的重要基石，其开发利用日益受到重视。铁矿作为重要的金属矿产资源，在冶金、建筑、机械制造等众多领域具有广泛的应用价值。然而，由于

* **收稿日期**：2024-08-09

作者简介：何湛(1996—)，男，江西赣州人，硕士，助理工程师，主要从事有色金属矿选矿技术研究。E-mail:253384473@qq.com

铁矿资源的分布不均、品位差异以及开采技术水平的不同,其开发利用过程面临着诸多挑战。目前,铁矿的选矿方法主要包括磁选、磁选与重选结合、磁选与浮选结合等方法。在众多铁矿石中,含有磁铁矿(Fe_3O_4)和赤铁矿(Fe_2O_3)的矿石因其丰富的铁含量和广泛的应用前景,成为了选矿研究的重要对象。磁铁矿和赤铁矿的物理化学性质存在差异:磁铁矿具有较强的磁性,适合通过单一磁选工艺流程进行分离;而赤铁矿则通常需要采用浮选法或者联合工艺进行处理,如磁选与浮选结合、磁选与重选结合等,以提高矿石的品位和回收率[1-7]。在实际的选矿过程中,这两种矿物的共生特性对选矿工艺的设计提出了挑战,尤其是在矿石品位下降和开采难度加大的背景下,开发高效、经济的选矿方法显得尤为重要。

本文针对津巴布韦某一尚未开发的铁矿进行深入研究,着重分析其矿石特点和选矿过程中的难点。该铁矿主要由磁铁矿(Fe_3O_4)和赤褐铁矿(Fe_2O_3)构成,铁含量高,但矿石的嵌布粒度细,粗磨难以高效分离出含铁的矿物,要获得较高品位的铁矿,只能进一步减小矿物磨矿细度,增加其单体解离度,但同时也会导致脉石矿物被磨细产生次生矿泥,影响后续赤铁矿的浮选。此外,矿石中高含量的硅酸盐矿物也给选矿带来了不利影响。硅酸盐矿物不仅会与铁矿物共生,影响矿物的分离效果,还可能给选矿过程中的浮选阶段增加难度。因此,该矿在药剂选择和工艺流程上需要进行更加细致的优化,以确保铁矿和硅酸盐矿物的有效分离。

为应对上述难点,本文提出弱磁-强磁-浮选的联合工艺流程[8-11],该工艺流程能够充分发挥各个选矿设备的优势,适应该矿石的特性。在弱磁选阶段,主要对具有强磁性的磁铁矿进行回收,尽可能高效地分离出磁铁矿;再对弱磁尾矿中的赤铁矿进行强磁选回收;浮选工艺则可以对含硅酸盐矿物的赤铁矿进行处理,通过适当的药剂选择,进一步提升赤铁矿的选矿指标。

1 矿石性质

1.1 矿样制备

研究矿样取自津巴布韦某铁矿。首先将矿样破碎至-2 mm,再依次进行混匀、缩分、取样和化验分析。具体制备流程如图1所示。

1.2 矿石的化学分析

通过X荧光光谱分析、化学多元素分析、物相分析对铁矿的化学成分、物相结构进行研究,分析结果分别见表1、表2和表3。

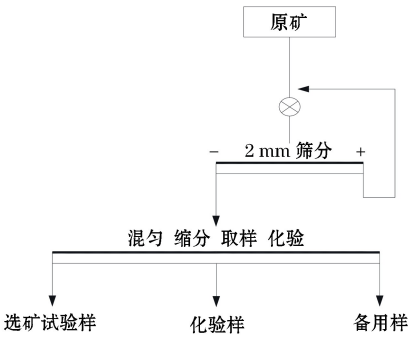


图1 试验原矿样制备工艺流程

Fig.1 Process flow for preparing raw ore samples of the test

表1 样品的X荧光光谱半定量分析结果

Table 1 Semi quantitative analysis results of X-ray fluorescence spectra of samples %

Fe	Mn	S	Pb	Ca	Sn*	Si	Na
40.26	0.04	0.43	0.01	0.08	81.00	15.72	0.02
Mg	K	Al	P	O	Cl	Zn	Ti*
0.14	0.04	0.14	0.02	36.12	0.06	0.05	9.00

注:*单位为10^{-6}。

表2 样品中主要化学多元素分析结果

Table 2 Main chemical multi-element analysis results in the sample %

TFe	K_2O	SiO_2	Na_2O	S	CaO
42.01	0.05	34.64	0.03	0.43	0.11
C	MgO	Al_2O_3	TiO_2*	P	
0.01	0.15	0.18	18.00	0.02	

注:*单位为10^{-4}。

表3 样品中铁的化学物相分析结果

Table 3 Analysis results of chemical phase of iron in the samples

相态	成分	检测结果/%	分布率/%
磁铁矿	Fe	4.77	11.35
赤铁矿	Fe	31.98	76.12
假象赤铁矿	Fe	4.35	10.35
硅酸铁	Fe	0.24	0.58
硫化铁	Fe	0.29	0.69
碳酸铁	Fe	0.38	0.91
总铁	TFe	42.01	100.00

由表1、表2和表3可知,矿石中可供选矿回收

的成分主要是 Fe,品位为 42.01%,其他元素不具综合回收利用价值。样品中的矿石组分主要是 TFe,其次为 SiO_2,且含有少量 Al_2O_3、MgO、CaO。有害杂质 P 含量较低,S 含量为 0.43%,选矿过程中需注意硫的富集趋势。铁化学物相结果显示矿石中铁主要赋存在赤铁矿、磁铁矿、假象赤铁矿中,少量赋存在其他矿物中。赤铁矿中的 Fe 含量约为 31.98%,分布率为 76.12%;磁铁矿中的 Fe 含量约为 4.77%,分布率为 11.35%。

2 选矿试验研究

2.1 探索试验

根据铁矿选矿经验,初步采用弱磁工艺选磁铁矿、强磁工艺选别赤铁矿的选矿工艺流程进行探索试验,试验流程如图 2 所示,试验结果见表 4,暂定磨矿细度为−0.074 mm 占比 60%。

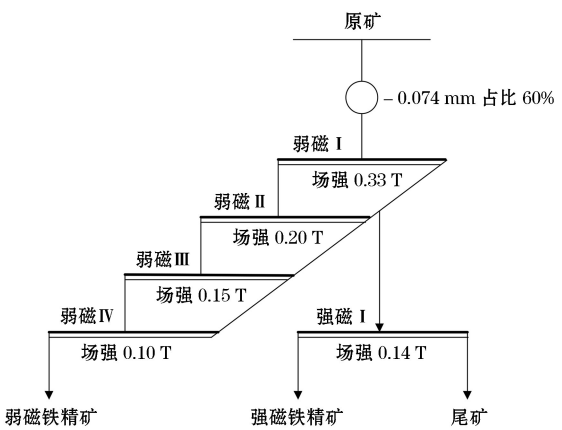


图 2 探索试验流程

Fig.2 Flow of exploratory test

表 4 探索试验结果

Table 4 Results of exploratory test %

产品	产率	Fe 品位	Fe 回收率
弱磁精矿	14.68	50.36	18.01
强磁精矿	51.26	46.58	58.18
尾矿	34.06	28.69	23.81
原矿	100.00	41.04	100.00

由试验结果可知,−0.074 mm 占比 60%的磨矿细度下,难以获得合格的磁铁矿、赤铁矿精矿产品,此时获得弱磁精矿产率为 14.68%,品位为 50.36%,强磁精矿产率为 51.26%,品位为 46.58%,表明该铁矿与脉石矿物嵌布粒度较细,需进行细磨才能将精矿品位提高至合格水平。

2.2 磨矿及再磨细度试验

细度参数直接影响矿物的分离效率和最终产品质量。复杂矿石,特别是细粒度和高硅酸盐含量的矿石,其合适的磨矿细度对于目的矿物与脉石解离至关重要。通过调节磨矿细度和再磨细度,可以优化矿物的颗粒分布,有效促进磁选分离和浮选过程,提高选矿效率[12-13]。本节探讨了粗磨、弱磁再磨、强磁再磨的磨矿细度对选矿效果的影响,试验流程见图 3。

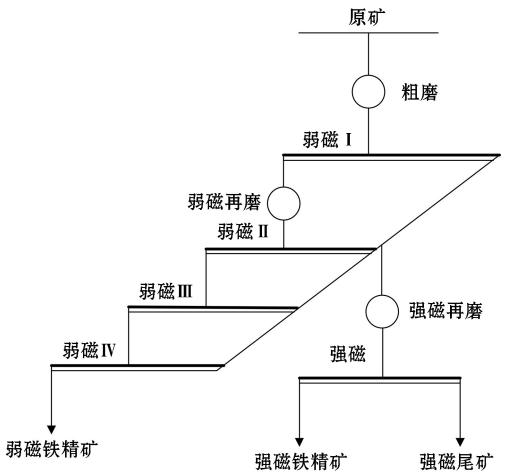


图 3 磨矿及再磨细度试验流程

Fig.3 Flow of grinding and regrinding fineness tests

2.2.1 粗磨细度试验

对原矿进行磨矿细度试验,研究了磨矿细度与选矿指标的关系,结果如图 4 所示。

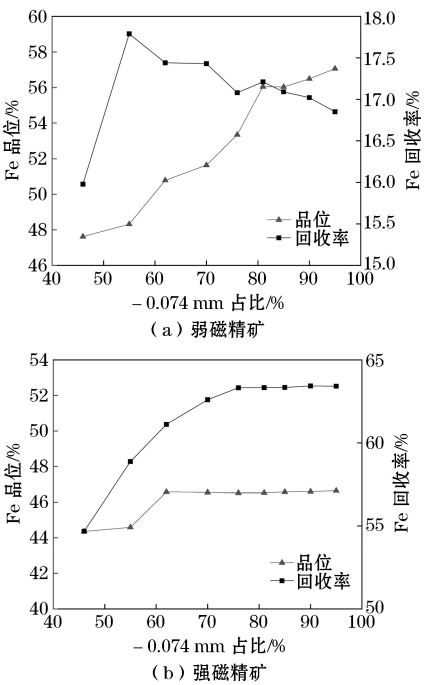


图 4 磨矿细度试验结果

Fig.4 Results of grinding fineness test

由图4试验结果可知,随着磨矿细度的增加,弱磁精矿的品位先急速上升后趋于平缓,回收率先升高后降低;强磁精矿的品位和回收率均呈先升高后平缓的趋势。整体上,当-0.074 mm占比大于81%后,弱磁精矿、强磁精矿品位无明显提升。综合考虑,将磨矿细度定为0.074 mm占比81%。

2.2.2 弱磁作业再磨细度试验

在一段磨矿-0.074 mm占比81%的条件下继续开展弱磁再磨细度试验,查明再磨细度与磁铁矿选矿指标的关系,结果如图5所示。

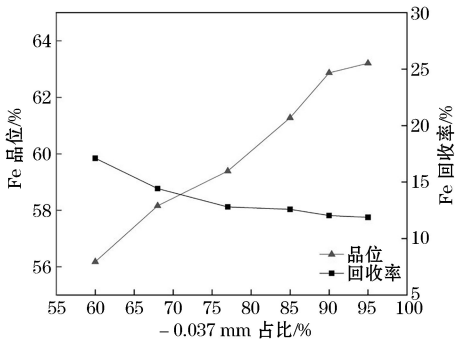


图5 弱磁作业再磨细度试验结果

Fig.5 Results of grinding fineness test for weak magnetic operation

由图5试验结果可知:当再磨细度达到-0.037 mm占比90%以上时,弱磁作业可获得品位超过62%的铁精矿产品。因此若需获得合格产品的弱磁铁精矿,粗精矿应再磨至-0.037 mm占比90%以上。

2.2.3 强磁作业再磨细度试验

对弱磁尾矿进行强磁再磨细度试验,结果如图6所示。

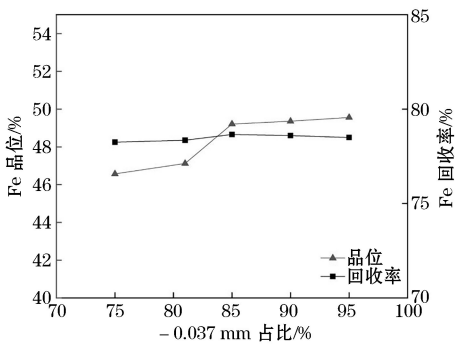


图6 赤铁矿再磨细度试验结果

Fig.6 Results of grinding fineness test for hematite

由图6试验结果可知:当再磨细度达到-0.037 mm占比85%以上时,强磁精矿品位提升幅度较小,因此将强磁给矿再磨细度定为-0.037 mm占比85%,在此条件下,可获得Fe品位为49.21%,Fe回收率为78.66%的强磁精矿。

2.3 磁场强度试验

通过磁场强度试验,可以探索不同磁场强度对矿物分离行为的影响,进一步调整工艺条件,以实现最佳的选矿指标。试验以磁铁矿、赤铁矿的磁场强度为变量,试验流程见图7。

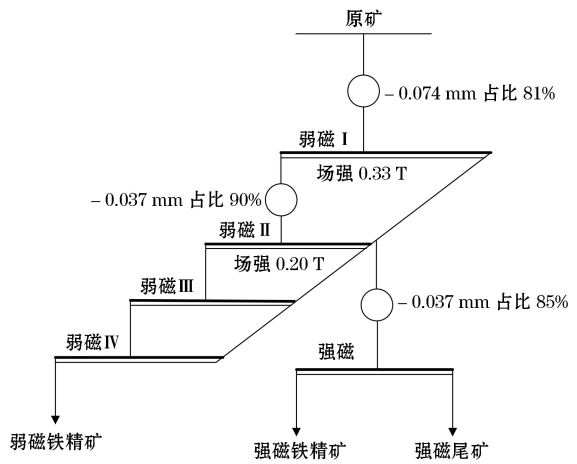


图7 磁场强度试验流程

Fig.7 Flow of magnetic field strength test

2.3.1 磁铁矿磁场强度试验

弱磁作业中的磁场强度直接影响磁铁矿物与杂质的分离效果。适当的磁场强度能够增强对磁性矿物的吸引力,从而提高铁矿的回收率和品位。对弱磁Ⅲ、弱磁Ⅳ作业开展磁铁矿磁场强度试验,结果如图8所示。

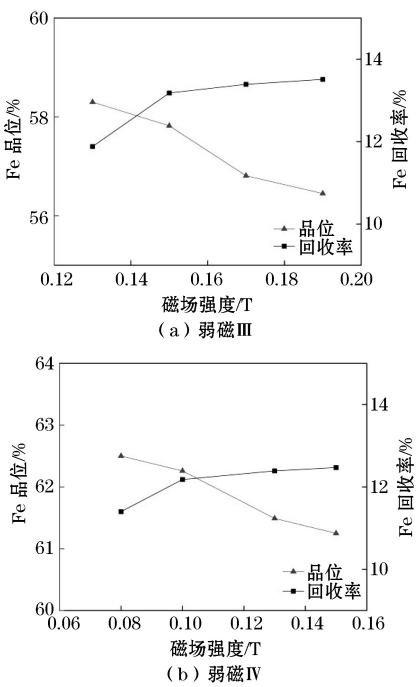


图8 磁铁矿磁场强度试验结果

Fig.8 Results of magnetic field strength test for magnetite

由图 8(a)可知,随着磁场强度的增加,Fe 品位逐渐降低,Fe 回收率逐渐升高,当磁场强度高于 0.15 T 时,Fe 回收率提升不明显,综合考虑品位和回收率,弱磁Ⅲ场强采用 0.15 T。由图 8(b)可知,随着磁场强度的增加,Fe 品位逐渐降低,Fe 回收率逐渐升高,当磁场强度高于 0.10 T 时,Fe 回收率提升不明显,此时弱磁精矿 Fe 品位为 62.26%,Fe 回收率为 12.25%。因此,弱磁Ⅳ磁场强度采用 0.10 T。

2.3.2 赤铁矿磁场强度试验

对再磨后的强磁尾矿进行磁铁矿磁场强度试验,结果如图 9 所示。

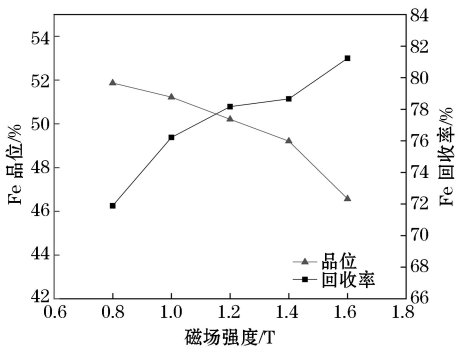


图 9 赤铁矿磁场强度试验结果

Fig.9 Results of magnetic field strength test for hematite

由试验结果可知:强磁精矿 Fe 品位随磁场强度的增加而逐渐降低,结合精矿品位、回收率进行综合评估,将强磁作业的磁场强度定为 1.0 T。

2.4 全流程磁选试验

根据以上条件试验结果,进行全流程磁选试验,试验流程如图 10 所示,结果见表 5。

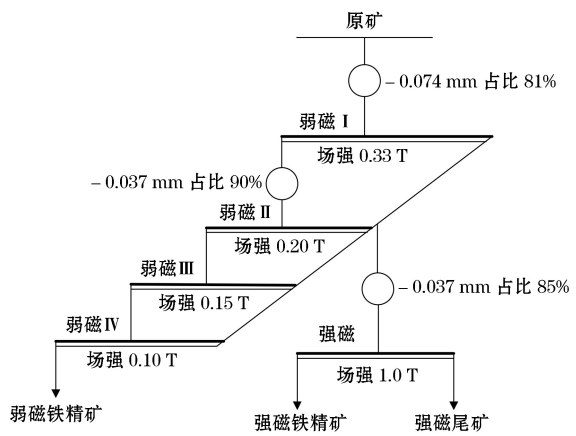


图 10 全流程磁选试验流程

Fig.10 Flow of full process magnetic separation test

由表 5 试验结果可知:根据选定的试验参数,进行全流程磁选试验,获得弱磁精矿 Fe 品位 62.29%、Fe 回收率 12.25%;强磁精矿 Fe 品位 51.32%、Fe 回收率 64.76%的选矿指标。强磁精矿 Fe 品位偏低,需再进行反浮选试验。

表 5 全流程磁选试验结果

Table 5 Results of full process magnetic separation test %

产品	产率	Fe 品位	Fe 回收率
弱磁精矿	8.16	62.29	12.25
强磁精矿	52.36	51.32	64.76
尾矿	39.48	24.16	22.99
原矿	100.00	41.49	100.00

2.5 赤铁矿反浮选试验

赤铁矿反浮选试验采用实验室 XFD 型单槽浮选机,称取强磁精矿干矿 600 g 放入 1.5 L 浮选槽内,搅拌速度为 1 992 r/min,依次加入 pH 调整剂、抑制剂、活化剂、捕收剂,每种药剂加入后搅拌 2 min。本研究采用长沙矿山研究院有限责任公司研发的捕收剂 CK-T1;pH 调整剂为 NaOH;抑制剂为玉米淀粉;活化剂为氧化钙(CaO)。条件试验流程见图 11。

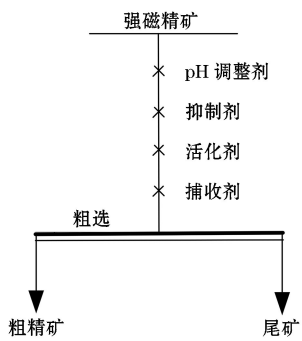


图 11 反浮选条件试验流程

Fig.11 Flow of reverse flotation condition test

2.5.1 矿浆 pH 试验

在浮选温度为 15 ℃,玉米淀粉用量为 500 g/t,CaO 用量为 500 g/t,CK-T1 用量为 300 g/t 的条件下,考察 pH 分别为 8.0, 9.0, 10.0, 11.0, 12.0 时对浮选指标的影响,试验结果见图 12。

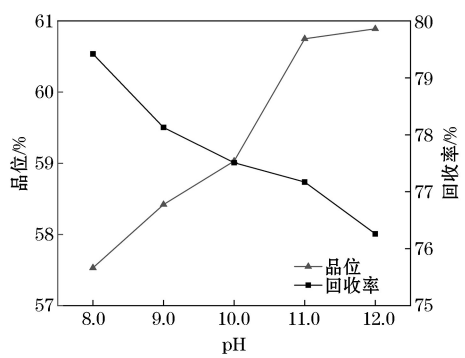


图 12 矿浆 pH 试验结果

Fig.12 Results of slurry pH test

由矿浆 pH 试验结果可知,随矿浆 pH 的增加,精矿中 TFe 品位随之增加,当 pH 增加至 11.0 时,精矿品位趋于平稳,若 pH 继续增加,精矿品位提升不明显且回收率有所下降,所以后续试验矿浆 pH 选用 11.0。

2.5.2 抑制剂用量试验

淀粉分子的结构中含有丰富的羟基(—OH),这些强极性的官能团具有双重功能:能够通过形成氢键的方式与水分子紧密结合,增强矿物的亲水性;另一方面,这些羟基还能在含有高电负性原子(特别是氧)的矿物表面上发生吸附作用,进一步促进矿物的亲水性[14]。在浮选温度为 15 ℃,pH 为 11.0,CaO 用量为 500 g/t,CK-T1 用量为 300 g/t 的条件下,考察抑制剂玉米淀粉对浮选指标的影响,试验结果见图 13。

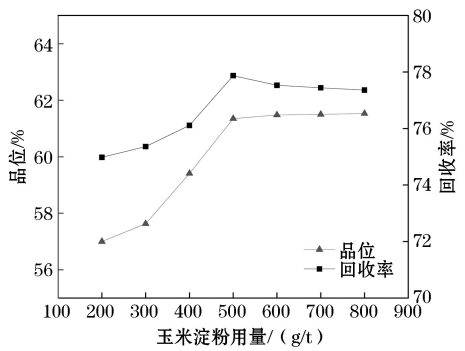


图 13 抑制剂用量试验结果

Fig.13 Results of inhibitor dosage test

由图 13 可知,随着玉米淀粉用量的增加,精矿品位呈先上升再平稳的趋势,但回收率先增加后下降。当玉米淀粉用量为 500 g/t 时,精矿品位为 61.35%,回收率为 77.87%,继续增加抑制剂用量精矿品位无明显变化,故后续试验淀粉用量取 500 g/t。

2.5.3 活化剂用量试验

在较高的 pH 下,氧化钙在溶液中产生的离子能够吸附在一些脉石矿物表面,增加其表面亲水性,显著提高石英等脉石矿物与赤铁矿之间的表面性质差异,捕收剂能够更有效地选择性吸附在脉石矿物上,从而实现赤铁矿与脉石矿物的有效分离[15-16]。在浮选温度为 15 ℃,pH 为 11.0,玉米淀粉用量为 500 g/t,CK-T1 用量为 300 g/t 的条件下,考察活化剂氧化钙对浮选指标的影响,试验结果见图 14。

由图 14 试验结果可知,随着氧化钙用量的增加,铁粗精矿的品位明显上升并逐渐趋于平稳,精矿回收率逐渐降低。当氧化钙用量达到 800 g/t 后,若继续增加用量未能显著提升精矿的铁品位,反而导致精矿回收率降低。综合考虑精矿品位和回收率,最终确定氧化钙用量为 800 g/t。

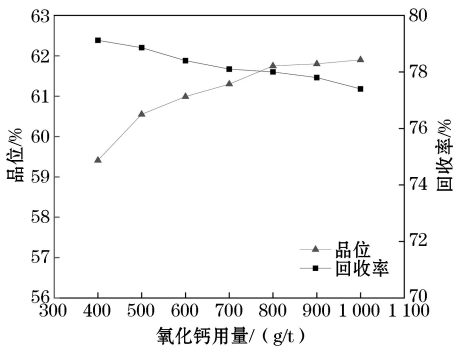


图 14 活化剂用量试验结果

Fig.14 Results of activator dosage test

2.5.4 捕收剂用量试验

在浮选温度为 15 ℃,pH 为 11.0,玉米淀粉用量为 500 g/t,CaO 用量为 800 g/t 的条件下,考察捕收剂 CK-T1 用量对浮选指标的影响,试验结果见图 15。

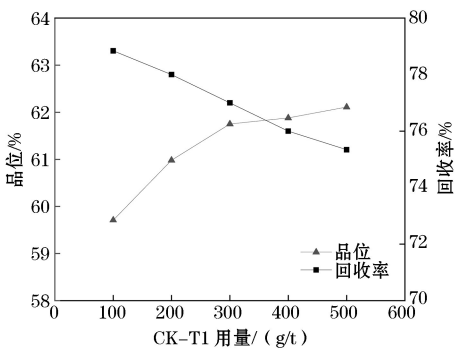


图 15 捕收剂用量试验结果

Fig.15 Results of collector dosage test

由图 15 试验结果可知,随着捕收剂用量的增加,铁精矿的品位先上升后趋于平稳,铁精矿的回收率逐渐降低,为保证铁精矿品位且综合考虑回收率,最终确定捕收剂 CK-T1 的用量为 300 g/t。

2.5.5 反浮选闭路试验

对赤铁矿强磁精矿进行反浮选闭路试验,采用 pH 为 11.0,玉米淀粉用量为 500 g/t,CaO 用量为 800 g/t,CK-T1 用量为 300 g/t。试验流程如图 16 所示,结果见表 6。

由表 6 可知,在反浮选闭路试验过程中,通过优化浮选条件和药剂配比,获得了良好的浮选指标,铁精矿的 Fe 品位由 51.69%提升至 65.95%,Fe 回收率为 81.45%。

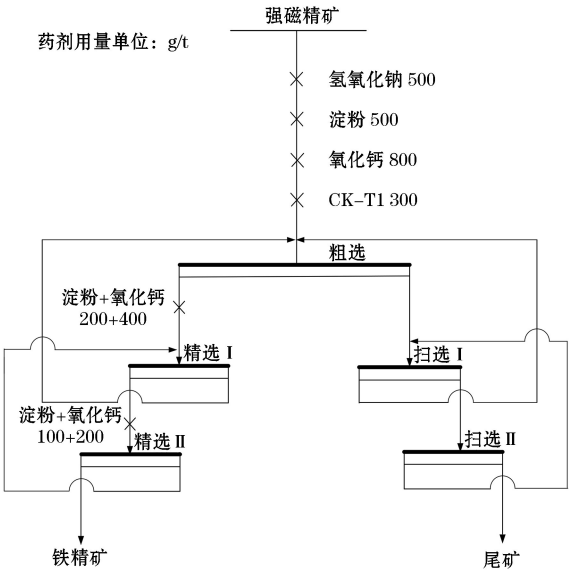


图 16 反浮选闭路试验流程

Fig.16 Flow of reverse flotation closed-civcuit test

表 6 反浮选闭路试验结果

Table 6 Results of reverse flotation closed-civcuit test %

产品	产率	Fe 品位	Fe 回收率
铁精矿	63.84	65.95	81.45
尾矿	36.16	26.52	18.55
给矿	100.00	51.69	100.00

3 结论

(1) 津巴布韦某铁矿石中可供选矿回收的成分主要是 Fe,品位为 42.01%,其他元素不具综合回收利用价值。铁化学物相结果显示矿石中铁主要赋存在赤铁矿、磁铁矿、假象赤铁矿中,少量赋存在其他矿物中。该矿石嵌布粒度较细,通过磨矿细度试验,确定一段磨矿细度为 -0.074 mm 占比 81%,弱磁作业需再磨至 -0.037 mm 占比 90%以上,强磁作业需再磨至 -0.037 mm 占比 85%以上,磨矿所需能耗较高。

(2) 磁选条件试验,在最佳磨矿细度条件下,当磁场强度为弱磁Ⅰ 0.33 T、弱磁Ⅱ 0.20 T、弱磁Ⅲ 0.15 T、弱磁Ⅳ 0.10 T、强磁 1.0 T 时,可获得弱磁精矿 Fe 品位为 62.29%、Fe 回收率为 12.25%;强磁精矿 Fe 品位为 51.32%、Fe 回收率为 64.76%的选矿指标。

(3) 对强磁精矿进行反浮选条件试验,反浮选流程为“一粗两扫两精”,适宜的药剂制度为:pH 11.0,玉米淀粉用量 500 g/t,CaO 用量 800 g/t,CK-T1 用量 300 g/t。在该最佳条件下反浮选闭路试验可获得铁精矿 Fe 品位 65.95%、Fe 回收率 81.45%的指标。

参考文献(References):

[1] 赵立群,王春女,张敏,等.中国铁矿资源勘查开发现状及供需形势分析[J].地质与勘探,2020,56(3):635-643.
ZHAO Liqun, WANG Chunnv, ZHANG Min, et al. Current exploration status and supply-demand situation of iron ore resources in China mainland[J]. Geology and Exploration,2020,56(3):635-643.

[2] 韩跃新,孙永升,李艳军,等.我国铁矿选矿技术最新进展[J].金属矿山,2015(2):1-11.
HAN Yuexin, SUN Yongsheng, LI Yanjun, et al. New development on mineral processing technology of iron ore resources in China[J].Metal Mine,2015(2):1-11.

[3] 罗云波,肖金熊,石云良,等.青海某低品位难选铁矿选矿试验研究[J].钢铁钒钛,2023,44(5):28-35.
LUO Yunbo, XIAO Jinxiong, SHI Yunliang, et al. Experimental study on beneficiation of a low-grade refractory iron ore in Qinghai Province [J]. Iron Steel Vanadium Titanium,2023,44(5):28-35.

[4] 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.

[5] 欧阳林莉.山东某低品位微细粒铁矿选矿试验[J].烧结球团,2022,47(2):81-87.
OUYANG Linli. Mineral processing test of a low-grade fine-grained iron ore in Shandong[J]. Sintering and Pelletizing, 2022,47(2):81-87.

[6] 肖婉琴,朱阳戈,胡晓星,等.某高铝高硅难选铁矿选矿试验研究[J].有色金属(选矿部分),2022(1):109-114.
XIAO Wanqin, ZHU Yangge, HU Xiaoxing, et al. Experimental study on beneficiation of a refractory iron ore with high aluminum and silicon [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(1):109-114.

[7] 王永刚,王素玲,周文波.M1033 铁矿微细嵌布贫磁铁矿高效选矿工艺研究[J].矿冶工程,2023,43(5):70-73.
WANG Yonggang, WANG Suling, ZHOU Wenbo. Efficient beneficiation process for fine-disseminated lean magnetitein M1033 iron mine[J].Mining and Metallurgical Engineering,2023,43(5):70-73.

[8] 施建军,杜艳清,余莹,等.辽宁某磁赤混合铁矿选矿工艺优化研究[J].现代矿业,2024,40(3):122-125.
SHI Jianjun, DU Yanqing, YU Ying, et al. Study on optimization of beneficiation process of a magnetie hematite mixed iron ore in Liaoning[J]. Modern Mining,2024,40(3): 122-125.

[9] 朱一民,葛婧,刘杰,等.鞍千磁赤铁矿石磁选-反浮选工艺优化研究[J].矿产保护与利用,2023,43(3):82-88.

ZHU Yimin, GE Jing, LIU Jie. Optimization study of magnetic separation-reverse flotation process for magnetic hematite ore in Anqian[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2023,43(3):82-88.

[10] 岳远行,高鹏,张小龙,等.酒钢尾矿工艺矿物学特性及资源化利用探索试验[J].有色金属(选矿部分),2024(5):73-80.
YUE Yuanxing, GAO Peng, ZHANG Xiaolong, et al. Process mineralogy characteristics and exploratory experimental on resource utilization of tailings from JISCO [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(5):73-80.

[11] 张斌,陈雪,张凛,等.某难选铁矿磁-重-浮联合选矿试验研究[J].金属矿山,2024(7):99-103.
ZHANG Bin, CHEN Xue, ZHANG Lin. Study on magnetic separation-gravity separation-flotation combined beneficiation test for a refractory iron mine[J].Metal Mine, 2024(7):99-103.

[12] 周凌志,谢贤,漆静,等.川西低品位钛铁矿磁-浮联合选别工艺试验研究[J].有色金属工程,2023,14(8):121-129.
ZHOU Lingzhi, XIE Xian, QI Jing, et al. Experimental study on magnetic-flotation combined separation process of low-grade llmenite in Western Sichuan [J]. Nonferrous Metals Engineering,2023,14(8):121-129.

[13] 邓中诚.不同介质对磁铁矿细磨的影响及其作用机理研究[D].包头:内蒙古科技大学,2023.
DENG Zhongcheng. Study on the effect and mechanism of different media on fine grinding of magnetite[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology,2023.

[14] 谢冬冬,侯英,黄贵臣,等.QCM-D研究淀粉和油酸钠与磁铁矿的吸附机理[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(7):1514-1520.
XIE Dongdong, HOU Ying, HUANG Guichen, et al. Adsorption mechanism of starch and sodium oleate on magnetite using QCM-D [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50 (7): 1514-1520.

[15] 李杰,朱一民,刘杰,等.辽宁某铁矿低温捕收剂浮选工艺试验[J].有色金属(选矿部分),2024(5):180-189.
LI Jie, ZHU Yimin, LIU Jie, et al. Low temperature collector experimental on flotation process of an iron ore in Liaoning province with low temperature collector [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2024(5): 180-189.

[16] 黄恩铭,宋宝旭,南楠,等.新型脂肪酸类捕收剂在鞍山式铁矿低温浮选脱硅中的实验研究[J].矿产保护与利用,2024,44(2):80-85.
HUANG Enming, SONG Baoxu, NAN Nan, et al. Novel fatty acid-based collector in low-temperature desilication of iron ore by flotation in Anshan City[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2024,44(2):80-85.