某难选赤铁矿-磁铁矿混合矿分相分步高效回收试验研究①

孙大勇[1,2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012; 2.中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘　要: 以湖南某地 TFe 品位 34.31%的微细粒嵌布赤铁矿-磁铁矿混合矿石为研究对象,采用粗磨-弱磁选分离磁铁矿和赤铁矿,粗精矿经再磨和两段精选得到磁铁矿精矿,弱磁选尾矿经再磨-强磁选-反浮选提纯获得赤铁矿精矿。在条件试验基础上,开展了全流程试验,获得了 TFe 品位 62.08%、回收率 22.75%的磁铁矿精矿以及 TFe 品位 65.22%、回收率 47.87%的赤铁矿精矿,总铁精矿 TFe 品位 64.17%,总回收率达 70.62%,有害元素 P、S 含量均低于 0.05%。本工艺通过阶段磨矿与磁铁矿-赤铁矿分选实现了赤铁矿与磁铁矿协同回收,精矿指标满足炼铁原料要求。

关键词: 赤铁矿; 磁铁矿; 铁精矿; 细粒嵌布; 混合矿; 分相分步回收; 强磁选; 反浮选

中图分类号: TD92;TD951　　**文献标志码**: A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.02.013

文章编号: 0253-6099(2026)02-0089-06

Experimental Study on Phase-Separation and Stepwise Recovery for a Refractory Hematite-Magnetite Ore

SUN Dayong[1,2]

(1. *Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd.*, *Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2. *Central South University*, *Changsha* 410083, *Hunan*, *China*)

Abstract: The finely disseminated hematite-magnetite ore with a TFe grade of 34.31% from Hunan was taken in a research, and a process of rough grinding followed by low intensity magnetic separation (LIMS) was adopted to separate magnetite from hematite. The roughing concentrate was then subjected to regrinding and two-stage cleaning to obtain magnetite concentrate. And the obtained LIMS tailings were then subjected to regrinding, high intensity magnetic separation (HIMS) and reverse flotation for purification, generating hematite concentrate. Based on condition tests, a whole-process test was carried out, producing a magnetite concentrate grading 62.08% TFe at 22.75% recovery, and a hematite concentrate grading a 65.22% TFe at 47.87% recovery. The total iron concentrate was obtained grading 64.17% TFe at 70.62% recovery, and the contents of harmful elements P and S were lower than 0.05%. It is shown that this processing technique can achieve comprehensive recovery of hematite and magnetite through staged grinding and the separation between magnetite and hematite. The produced concentrate has its indicators up to the follow-up requirements for iron-making raw materials.

Key words: hematite; magnetite; iron concentrate; fine dissemination; mixed ore; phase-separation and stepwise recovery; high intensity magnetic separation (HIMS); reverse flotation

铁矿石作为钢铁工业的基础原料,其供给安全直接关系国家工业化和现代化进程[1]。我国铁矿石资源储量虽较丰富,但优质易选铁矿资源日趋枯竭,难选铁矿资源比例显著增加,国内铁矿石平均铁品位仅 30%左右[2]。然而,我国粗钢产量占全球 50%以上,导致我国铁矿石对外依存度常年高于 80%[3]。突破难选铁矿高效分选技术瓶颈、提升资源自给率,成为保障国家战略资源安全的关键难题[4-5]。

难选赤铁矿-磁铁矿混合矿矿物组成复杂、铁矿物与脉石嵌布紧密,且常伴生磷、硫等有害元素,造成选别困难、利用率低[6-7]。单一磁选或浮选难以实现赤铁矿与脉石的有效分离,导致精矿回收率低、杂质含量超

① **收稿日期**: 2025-10-10
基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC2905103)
作者简介: 孙大勇(1989—),男,河北唐山人,硕士,高级工程师,主要从事选矿工艺及药剂研发工作。E-mail:2418361338@qq.com

标。此外,针对含磁铁矿与赤铁矿的混合型难选矿石,如何通过分阶段回收实现两种铁矿物的协同增效,仍是亟待解决的技术难点[8-9]。近年来,我国“双碳”目标对钢铁行业绿色转型提出更高要求,开发低碳、低耗的联合选矿工艺已成为钢铁行业发展的必然选择[10-11]。

本文以湖南某难选赤铁矿-磁铁矿混合矿为研究对象,基于矿石工艺矿物学特性,进行详细的选矿试验研究。通过条件试验,确定了适宜的工艺流程和工艺参数,实现了磁铁矿与赤铁矿的分步高效回收,可为同类型难处理铁矿石的开发利用提供技术借鉴。

1 矿石性质

试验所用难选赤铁矿-磁铁矿混合矿取自湖南某地,其主要化学成分分析结果见表1,铁物相分析结果见表2。由表1可知,原矿中可供回收的有价金属元素主要为Fe,主要脉石成分为SiO_2、Al_2O_3、CaO、MgO、K_2O(五者合计含量达46.94%)。有害元素S含量较低,但P含量较高,需要在选矿过程中排除。由表2可知,矿石中铁主要以赤(褐)铁矿形式存在,其次以磁性铁形式存在。硅酸铁中铁分布率为3.15%,难以通过选矿回收;硫化铁中铁、碳酸铁中铁分布率很低,对选别过程影响较小。

表1 原矿主要化学成分分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical composition analysis of raw ore %

TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	C	P	S
34.31	38.77	4.44	1.57	1.14	1.02	0.32	0.062	0.45	0.015

表2 原矿铁化学物相分析结果

Table 2 Iron phase analysis of raw ore

铁物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
赤(褐)铁矿中铁	25.11	73.17
磁性铁中铁	8.07	23.53
硅酸铁中铁	1.08	3.15
硫化铁中铁	0.01	0.03
碳酸铁中铁	0.04	0.12
总铁	34.31	100.00

原矿矿物组成如表3所示。原矿中赤(褐)铁矿和磁铁矿含量分别为35.99%和11.16%。脉石矿物石英含量达31.05%,白(绢)云母、蒙脱石、钠长石等易泥化矿物会对选别作业产生不利影响。此外,(羟)磷灰石含量达到2.32%,需尽可能避免其进入铁精矿。

磁铁矿粒度一般处于0.026~0.15 mm之间,粗粒可达0.34 mm。大部分磁铁矿以自形粒状不均匀分布在脉石中,小部分磁铁矿呈浸染状分布,浸染的密集程度可由中等稠密浸染状过渡为稀疏~星散浸染状,而且随着浸染密度降低,分散程度增高,粒度也有变细的趋势。

表3 原矿矿物组成(质量分数)

Table 3 Mineral composition of raw ore %

黄铁矿	白(绢)云母	赤(褐)铁矿	磁铁矿	针铁矿	石英	钠长石
0.03	7.85	35.99	11.16	0.23	31.05	2.71
菱铁矿	斜绿泥石	蒙脱石-黏土	(羟)磷灰石	方解石	其他	合计
0.09	2.54	2.80	2.32	0.42	2.81	100.00

赤铁矿主要呈板状,少部分呈假象-半假象赤铁矿结构或不规则粒状或片状,粒度一般介于0.001~0.05 mm。小部分赤铁矿沿磁铁矿边缘、粒间及裂隙蚀变形成;少量赤铁矿发生褐铁矿化,主要呈浸染状嵌布在脉石中,以稀疏~中等稠密浸染状分布为主,少量呈稀疏~星散浸染状分布于脉石中。总体来看,赤铁矿粒度细小,且与脉石之间嵌布关系复杂,需要提高磨矿细度方可实现充分解离。

利用光学显微镜和MLA对破碎至-2 mm的原矿中磁铁矿和赤铁矿的嵌布粒度进行了分析,结果如表4所示。磁铁矿嵌布粒度明显粗于赤铁矿,以+0.026 mm粒级为例,该粒级磁铁矿和赤铁矿累计产率分别为94.14%和43.96%。结合磁铁矿、赤铁矿的嵌布特性与粒度组成,两者磨矿要求不同,需进一步分析。

表4 目的矿物嵌布粒度结果

Table 4 Particle size distribution of target minerals

粒径/mm	正累计产率/%	
	磁铁矿	赤铁矿
+0.105	5.32	—
-0.105+0.074	21.54	—
-0.074+0.052	51.99	—
-0.052+0.037	79.49	10.88
-0.037+0.026	94.14	43.96
-0.026+0.019	97.76	68.17
-0.019+0.014	99.36	79.69
-0.014+0.010	99.80	86.23
-0.010+0.005	99.95	95.42
-0.005	100.00	100.00

为考查入选矿石中磁铁矿和赤铁矿的解离情况,采用MLA及光学显微镜对磨矿细度-0.074 mm粒级占80%的磨矿产品进行了解离度测定,结果见表5。由表5可知,磨矿细度-0.074 mm粒级占80%时,原矿中磁铁矿和赤铁矿的单体解离度分别为74.02%和

45.14%,单体+富连生体占比分别为 85.28%和 57.30%。根据解离度分析结果,磁铁矿解离度较高,而赤铁矿解离度低,需要针对磁铁矿、赤铁矿的解离情况分别考虑磨矿细度。

表 5　目的矿物解离度

Table 5　Liberation degree of target minerals

矿物名称	单体/%	连生体/%				单体+富连生体/%
		>3/4	3/4~1/2	1/2~1/4	<1/4	
磁铁矿	74.02	11.26	7.09	3.98	3.65	85.28
赤铁矿	45.14	12.16	5.31	8.46	28.93	57.30

2　试验方法

根据工艺矿物学分析结果,磁铁矿易实现单体解离,赤铁矿主要呈浸染状嵌布在脉石中,粒度微细。因此,考虑以粗磨回收磁铁矿、细磨回收赤铁矿。原矿经粗磨-一段弱磁选实现磁铁矿与赤铁矿分离;弱磁选粗精矿再磨后经两段弱磁选精选获得磁铁矿精矿;一段弱磁选尾矿经强磁选粗选和扫选,所得尾矿与两段弱磁选精选尾矿合并后经再磨-磁选-反浮选获得赤铁矿精矿。考虑脉石矿物泥化对选别带来的不利影响,在适当阶段加入脱泥流程。试验原则流程如图 1 所示。

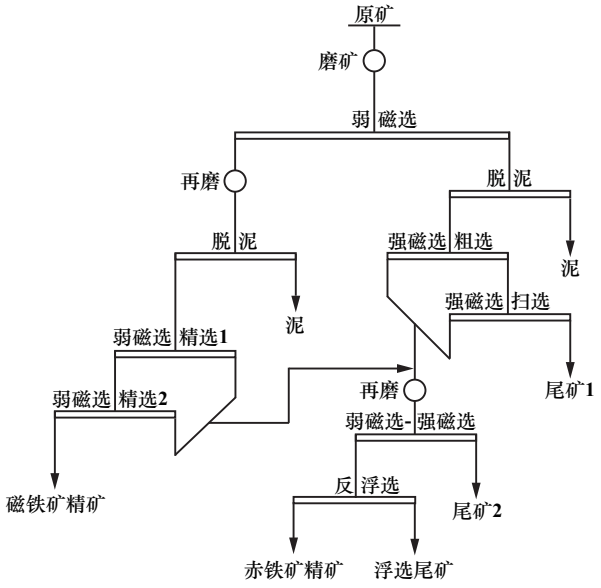


图 1　试验原则流程

Fig. 1　Basic flowchart for test

3　试验结果与讨论

3.1　磁铁矿-赤铁矿分离试验

3.1.1　粗磨细度条件试验

弱磁选磁场强度 0.30 T,磨矿细度对弱磁选粗选效果的影响如图 2 所示。由图 2 可知,随着磨矿细度提高,弱磁选粗精矿回收率逐渐下降,TFe 品位呈上升趋势,-0.074 mm 粒级占 80%左右时 TFe 品位达到了 44.09%。继续提高磨矿细度,弱磁选粗精矿品位提升幅度不明显,但回收率进一步降低;在磁铁矿-赤铁矿分选阶段,为获得较高的磁铁矿品位,适宜的粗磨细度为-0.074 mm 粒级占 80.32%。

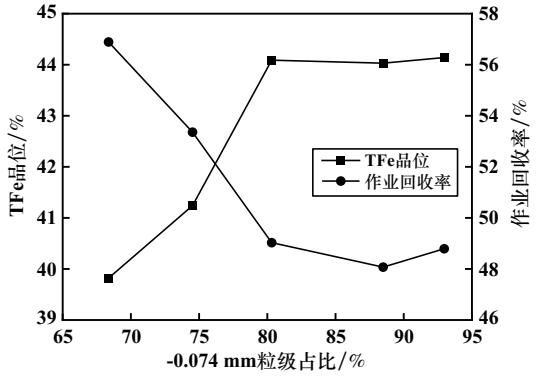


图 2　磨矿细度对弱磁选粗选效果的影响

Fig. 2　Effect of grinding fineness on roughing by LIMS

3.1.2　弱磁选粗选磁场强度条件试验

磨矿细度-0.074 mm 粒级占 80.32%,磁场强度对弱磁选粗选效果的影响见图 3。由图 3 可知,随着磁场强度从 0.10 T 提高到 0.35 T,弱磁选粗精矿 TFe 品位呈下降趋势,回收率则明显提高。磁场强度从 0.25 T 提高到 0.35 T,由于脉石夹杂,弱磁选粗精矿品位由 44.27%下降至 42.01%,回收率仅略微增加。综合考虑,确定适宜的弱磁选粗选磁场强度为 0.30 T。

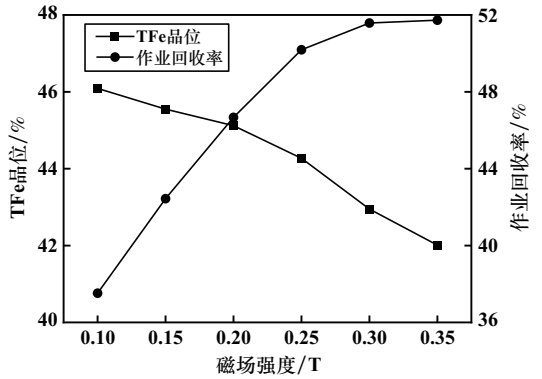


图 3　磁场强度对弱磁选粗选效果的影响

Fig. 3　Effect of magnetic field intensity of LIMS on roughing

3.2　磁铁矿选矿试验

3.2.1　再磨细度条件试验

对弱磁选粗精矿进行再磨-脱泥试验。脱泥方式为实验室沉降脱泥,矿浆在搅拌速度 1 200 r/min 条件下搅拌 5 min 后停止,沉降 5 min 后采用虹吸法将离槽

底超过 5 cm 的矿浆抽取后作为矿泥脱除,再磨细度对磁铁矿选别效果的影响如图 4 所示。由图 4 可知,随着再磨细度增加,铁矿物与脉石矿物解离,部分脉石矿物泥化后进入矿泥,沉砂中铁品位逐渐增加,但回收率有一定降低。再磨细度-0.037 mm 粒级产率由 63%增加至 76%时,沉砂 TFe 品位由 46.53%增加至 49.32%,作业回收率从 95.34%下降至 92.89%。继续提高磨矿细度,铁品位增加不明显,但回收率进一步降低。确定适宜的磁铁矿再磨细度为-0.037 mm 粒级占 76.12%。

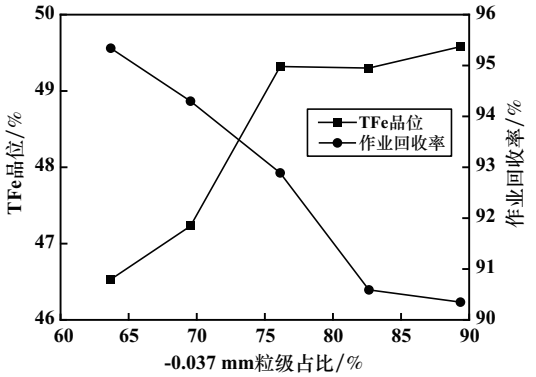


图 4 再磨细度对磁铁矿选别效果的影响

Fig.4 Effect of regrinding fineness on magnetite separation

3.2.2 精选磁场强度条件试验

磨矿细度-0.037 mm 粒级占 76.12%条件下,研究了精选磁场强度对选别效果的影响,结果如表 6 所示。由表 6 可知,随着精选磁场强度增加,磁极对细粒铁颗粒的捕获能力逐渐提高,作业回收率明显提高,但由于存在磁团聚,磁选精矿中夹杂的脉石含量也明显增加,铁品位逐渐降低。两段精选磁场强度分别为 0.15、0.10 T 时,弱磁选精矿(磁铁矿)TFe 品位为 62.85%、作业回收率为 49.55%。进一步提高精选磁场强度,精矿 TFe 品位大幅降低,而回收率提升不明显。适宜的两段弱磁选精选磁场强度分别为 0.15 T 和 0.10 T。

表 6 精选磁场强度对磁铁矿选别效果的影响

Table 6 Effect of magnetic field intensity of LIMS for cleaning on magnetite separation

两段精选磁场强度/T	TFe 品位/%	作业回收率/%
0.08,0.04	64.85	37.86
0.10,0.05	63.12	44.00
0.15,0.10	62.85	49.55
0.20,0.15	60.31	51.73
0.25,0.20	57.83	53.44

3.3 赤铁矿选矿试验

3.3.1 强磁选粗选磁场强度条件试验

一段弱磁选尾矿经实验室脱泥后,进行强磁选,研究了强磁选粗选磁场强度对脱泥沉砂选别效果的影响,结果如图 5 所示。由图 5 可知,随着粗选磁场强度提高,作业回收率呈上升趋势,精矿 TFe 品位先升高后逐渐降低。磁场强度由 0.6 T 提高到 0.8 T,精矿 TFe 品位由 46.24%提高到 48.35%,作业回收率由53.04%显著增加到 63.32%。进一步提高磁场强度,回收率略微增加,精矿铁品位明显降低。确定适宜的强磁选粗选磁场强度为 0.8 T。

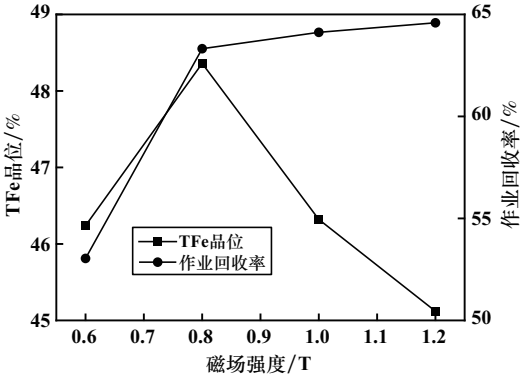


图 5 强磁选粗选磁场强度对赤铁矿选别效果的影响

Fig.5 Effect of magnetic field intensity of HIMS for roughing on hematite separation

3.3.2 强磁选扫选磁场强度条件试验

对强磁选粗选尾矿进行扫选,以确保弱磁性铁矿物得到有效回收。强磁选扫选磁场强度对选别效果的影响如图 6 所示。由图 6 可知,提高磁场强度,精矿 TFe 品位逐渐降低,作业回收率先增加后基本保持不变。扫选磁场强度 1.0 T 时,扫选精矿 TFe 品位 44.21%、作业回收率 45.67%。进一步提高磁场强度,回收率基本稳定,品位呈下降趋势。适宜的强磁选扫选磁场强度为 1.0 T。

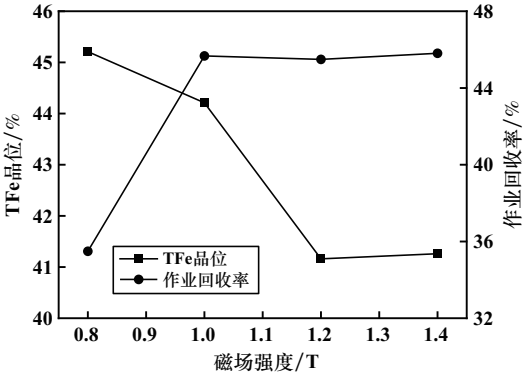


图 6 强磁选扫选磁场强度对赤铁矿选别效果的影响

Fig.6 Effect of magnetic field intensity of HIMS for scavenging on hematite separation

3.3.3 再磨细度条件试验

将弱磁选精选尾矿以及强磁选粗选和扫选精矿合并后进行再磨-磁选试验,磁选流程为弱磁选-强磁选,

磁场强度分别为 0.3 T 和 1.2 T,再磨细度对赤铁矿选别效果的影响如图 7 所示。由图 7 可知,随着再磨细度增加,精矿 TFe 品位先增加后降低,作业回收率则在 97%附近波动。再磨细度-0.025 mm 粒级占 90.39%时,精矿 TFe 品位和作业回收率分别为 49.90%和 97.11%。确定适宜的赤铁矿再磨细度为-0.025 mm 粒级占 90.39%。

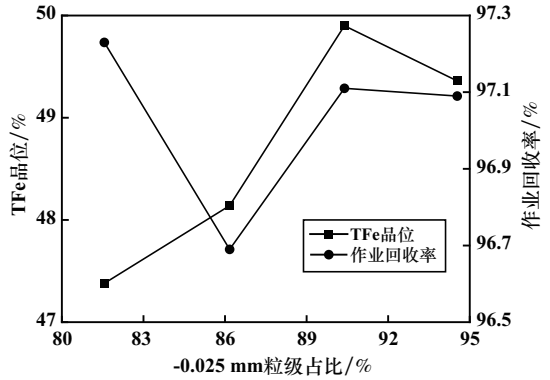


图 7　再磨细度对赤铁矿选别效果的影响

Fig. 7　Effect of regrinding fineness on hematite separation

3.3.4　反浮选试验

对赤铁矿磁选精矿进行反浮选试验研究,以获得合格赤铁矿精矿产品。以淀粉和石灰为抑制剂、自主研发的低温药剂 CK-T1 为捕收剂,在探索试验基础上,开展了反浮选闭路试验,试验流程如图 8 所示,试验结果见表 7。反浮选闭路试验获得了产率 62.15%、TFe 品位 64.93%、作业回收率 81.72%的赤铁矿精矿。

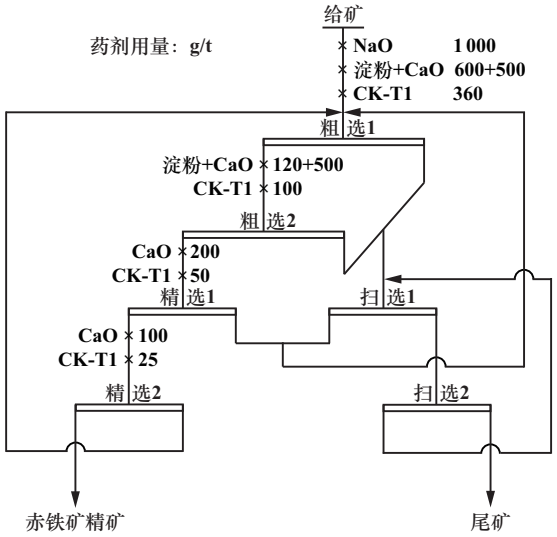


图 8　反浮选闭路试验流程

Fig. 8　Closed-circuit test flowchart of reverse flotation

3.4　全流程闭路试验

全流程闭路试验流程如图9所示,结果见表8。

表 7　反浮选闭路试验结果

Table 7　Test results of closed-circuit reverse flotation

产品名称	产率/%	TFe 品位/%	TFe 作业回收率/%
赤铁矿精矿	62.15	64.93	81.72
尾矿	37.85	23.85	18.28
给矿	100.00	49.38	100.00

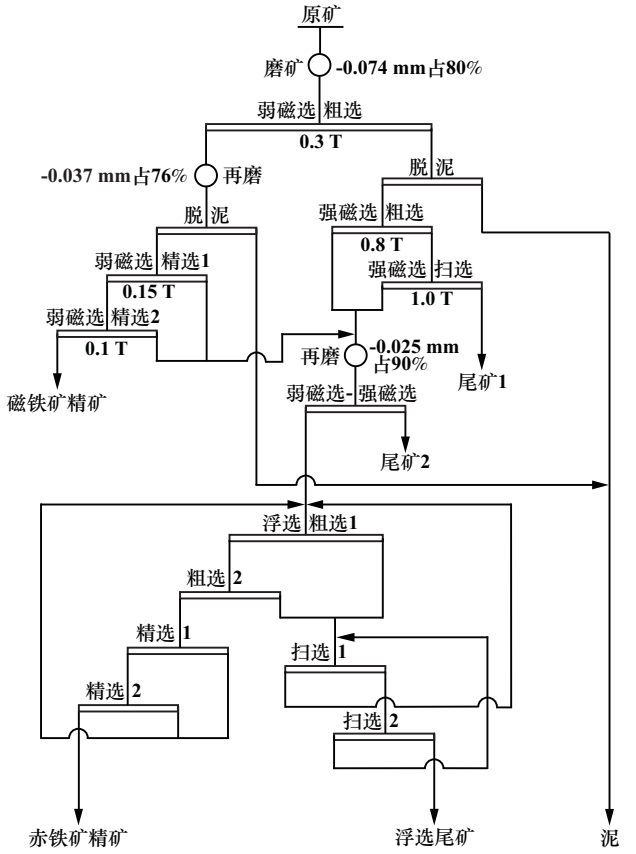


图 9　全流程闭路试验流程

Fig. 9　Whole-process flowchart of a closed-circuit test

表 8　全流程闭路试验结果

Table 8　Whole-process closed-circuit test results

产品名称	产率/%	TFe 品位/%	TFe 回收率/%
磁铁矿精矿	12.62	62.08	22.75
赤铁矿精矿	25.28	65.22	47.87
总精矿	37.90	64.17	70.62
泥	27.53	12.86	10.28
强磁选尾矿	19.82	15.84	9.11
浮选尾矿	14.75	23.34	9.99
总尾矿	62.10	16.30	29.38
原矿	100.00	34.44	100.00

采用磁铁矿-赤铁矿分离的工艺流程,获得了 TFe 品位 62.08%、回收率 22.75%的磁铁矿精矿;弱磁尾矿经强磁选-反浮选,获得了 TFe 品位 65.22%、回收率 47.87%的赤铁矿精矿。合计总铁精矿 TFe 品位为 64.17%,回收率为 70.62%,实现了难选赤铁矿的有效回收。

3.5 产品分析

对最终得到的磁铁矿精矿和赤铁矿精矿进行了化学成分分析,结果如表9所示。

表9 铁精矿主要化学成分分析结果(质量分数)

Table 9 Chemical composition analysis of iron concentrate %

产品名称	TFe	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	P	S
磁铁矿精矿	62.08	6.14	1.07	0.053	0.46	0.001	0.07
赤铁矿精矿	65.22	3.14	0.87	0.026	0.32	0.007	0.03

磁铁矿精矿 TFe 品位 62.08%,SiO_2 含量 6.14%,有害杂质 P、S 含量分别为 0.001%、0.07%;镜下观察显示,主要金属矿物为磁铁矿(78%~80%),含少量(磁)赤铁矿(7%~10%),微量褐铁矿、菱铁矿、黄铁矿及其他金属矿物,脉石矿物为石英、云母、绿泥石等。赤铁矿精矿 TFe 品位 65.22%,SiO_2 含量 3.14%,有害杂质 P、S 含量分别为 0.007%、0.03%;金属矿物主要为赤铁矿和少量磁铁矿,二者合计含量 90%~92%;脉石矿物为石英、云母、绿泥石等。

4 结论

1) 试验用原矿 TFe 品位 34.31%,铁主要以赤(褐)铁矿形式存在,其次以磁性铁形式存在;脉石矿物主要为石英、斜绿泥石、白(绢)云母、钠长石、方解石、(羟)磷灰石等。

2) 工艺矿物学分析结果显示,磁铁矿嵌布粒度粗、易解离,赤铁矿嵌布粒度细,解离难度大,因此采用了磁铁矿-赤铁矿分离的工艺流程。在磁铁矿再磨细度-0.037 mm 粒级占 76%、赤铁矿再磨细度-0.025 mm 粒级占 90% 条件下,全流程试验获得了 TFe 品位 62.08%、回收率 22.75% 的磁铁矿精矿以及 TFe 品位 65.22%、回收率 47.87% 的浮选精矿,合计得到总铁精矿 TFe 品位为 64.17%,回收率达到 70.62%,有害杂质 P、S 含量低,可作为炼铁优质原料。

参考文献(References):

[1] 崔志峰,上官方钦,马文略,等. 双碳背景下中国钢铁行业未来发展趋势探讨[J]. 工程科学学报, 2025,47(4):862-874.
CUI Zhifeng, SHANGGUAN Fangqin, MA Wenlue, et al. Discussion on the future development trend of China's iron and steel industry under the background of double carbon[J]. Chinese Journal of Engineering, 2025,47(4):862-874.

[2] 吴琪,仇巍巍,江拓,等. 中国铁矿勘探开发及供需形势[J]. 地质论评, 2024,70(增刊1):111-112.
WU Qi, QIU Weiwei, JIANG Tuo, et al. Exploration and development of iron mines in China and the supply and demand situation[J]. Geological Review, 2024,70(S1):111-112.

[3] 殷瑞钰,上官方钦,崔志峰. 钢铁行业低碳发展对策研究:回顾与展望[J]. 中国冶金, 2025,35(3):1-15.
YIN Ruiyu, SHANGGUAN Fangqin, CUI Zhifeng. Research on low-carbon development strategies in steel industry: Review and prospect[J]. China Metallurgy, 2025,35(3):1-15.

[4] 王涛,肖金雄,龙艳. 安徽某难选磁铁矿与镜铁矿混合矿选矿试验[J]. 矿冶工程, 2020,40(2):60-62.
WANG Tao, XIAO Jinxiong, LONG Yan. Beneficiation of refractory mixed ores of magnetite and specularite from Anhui[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(2):60-62.

[5] 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, et al. Study on magnetic separation-gravity separation-flotation combined beneficiation test for a refractory iron mine[J]. Metal Mine, 2024(7):99-103.

[6] 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.

[7] 张祖刚,许继龙,王秋林. 墨西哥某含硫铁矿石提质降杂选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(4):64-66.
ZHANG Zugang, XU Jilong, WANG Qiulin. Upgrading concentrate from mineral processing of Mexican sulfur-bearing iron ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(4):64-66.

[8] 李佩昱,高鹏,徐冬林, 等.贫赤铁矿石粗粒湿式强磁预选抛废试验[J]. 矿冶工程, 2019,39(4):47-49.
LI Peiyu, GAO Peng, XU Donglin, et al. Preconcentration of coarse lean hematite ore by wet high-intensity magnetic separation for tailings discard[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(4):47-49.

[9] 吴宇,张英,李小康,等. 微细粒矿物絮凝浮选研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2024,44(3):16-26.
WU Yu, ZHANG Ying, LI Xiaokang, et al. Advancements in studying the flocculation flotation of fine minerals[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024,44(3):16-26.

[10] 韩跃新,张小龙,高鹏,等. 中国铁矿石选矿技术发展与展望[J]. 金属矿山, 2024(2):1-24.
HAN Yuexin, ZHANG Xiaolong, GAO Peng, et al. Development and prospect of iron ore processing technologies in China[J]. Metal Mine, 2024(2):1-24.

[11] 袁晨光,黄自力,肖硕,等. 某铁矿强磁尾矿反浮选回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):71-73.
YUAN Chenguang, HUANG Zili, XIAO Shuo, et al. Experimental study on reverse flotation of high-intensity magnetic separation tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(6):71-73.

引用本文:孙大勇. 某难选赤铁矿-磁铁矿混合矿分相分步高效回收试验研究[J]. 矿冶工程, 2026,46(2):89-94.
SUN Dayong. Experimental study on phase-separation and stepwise recovery for a refractory hematite-magnetite ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(2):89-94.