选矿与原料预处理

湖北某铁硫共生矿石中磁性铁矿物分选试验

周 超[1]，陈 萱[1]，谭 青[1]，赵 强[2]，张鹏羽[2]，杨 卓[2]，李 啸[2]
（1. 武钢资源集团金山店矿业有限公司，湖北 大冶 435100；
2. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410205）

摘要：湖北某铁硫共生矿石中金属矿物主要为磁铁矿和黄铁矿，脉石矿物主要为透辉石、长石、云母、绿泥石、碳酸盐、石英等。矿石中的硫化物及脉石与磁铁矿密切连生，需较高的磨矿细度才能获取合格铁精矿。针对 w(TFe)为 39.90%、w(S)为 2.57%的原矿，采用“破碎分级－粗粒干抛－阶段磨磁－淘洗精选”联合工艺进行分选。结果表明，在粗粒干抛(磁场强度为 4 000 Oe、转速为 80 r/min)、一段磨矿细度 <74 μm 占 65%、磁场强度为 1 200 Oe，二段磨矿细度 <74 μm 占 85%、磁场强度为 1 200 Oe，三段磁场强度为 1 000 Oe 及淘洗机精选条件下，可以获得铁精矿产率为 52.59%，w(TFe)为 65.56%、回收率为 86.41%的良好指标，且 w(S)低于 0.6%。此外，产出含硫中矿 w(S)为 5.83%、回收率为 82.87%，为硫资源的综合回收创造了条件。该工艺参数匹配合理、运行稳定可靠，较好地解决了磁铁矿与硫化物、脉石紧密共生的分选难题，形成了系统可行的技术路线。

关键词：磁铁矿；黄铁矿；磁选干抛；阶段磨磁；淘洗精选
中图分类号：TD951 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)03－0100－12
doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.052

Separation test of magnetic iron minerals from an iron-sulfur symbiotic ore in Hubei province

ZHOU Chao[1], CHEN Xuan[1], TAN Qing[1], ZHAO Qiang[2], ZHANG Pengyu[2], YANG Zhuo[2], LI Xiao[2]
(1. WISCO Resources Group Jinshandian Mining Co., Ltd., Daye 435100, Hubei, China;
2. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China)

Abstract: In a certain iron-sulfur symbiotic ore in Hubei, the main metallic minerals are magnetite and pyrite, while the gangue minerals are mainly diopside, feldspar, mica, chlorite, carbonate, quartz. Sulfides and gangues in the ore are closely linked to magnetite, requiring high grinding fineness to obtain qualified iron concentrate. For the raw ore with w(TFe) of 39.90% and w(S) of 2.57%, a combined process consisting of “crushing and classification-rough-grained dry dressing-stage-by-stage grinding and magnetic separation-elutriation selection” is used for separation. Results show that under coarse-grained dry blasting (magnetic field strength 4 000 Oe, rotational speed 80 r/min), first-stage grinding fineness < 74 μm accounting for 65%, magnetic field strength 1 200 Oe, second-stage grinding fineness < 74 μm accounting for 85%, magnetic field strength 1 200 Oe, three-stage magnetic field strength 1,000 Oe, and elutriation selection, favorable indicators can be obtained: iron concentrate yield of 52.59%, w(TFe) of 65.56%, recovery rate of 86.41%, and w(S) below 0.6%. In addition, the output sulfur-bearing medium ore w(S) is 5.83%, with a recovery rate of 82.87%, creating conditions for comprehensive recovery of sulfur resources. This process has reasonable parameter matching and stable and reliable operation, effectively solving the problem of close symbiosis of magnetite with sulfides and gangue, forming a feasible technical route.

Key words: magnetite; pyrite; magnetic separation and dry processing; staged magnetic grinding; elutriation selection

收稿日期：2025－08－04；**修回日期**：2025－09－28

作者简介：周 超(1985—)，男，工程师，从事选矿技术研究工作。

钢铁作为重要的金属材料和战略金属资源，被广泛应用于建筑、铁路、家电和汽车等行业领域，对国家经济发展具有重要作用[1]。近三十年，中国是钢铁第一大生产国和消费国。虽然中国铁矿资源储量丰富，但多为品位低的贫矿，分选利用率低，且随着国内经济的快速发展，铁矿资源无法满足国内钢铁生产需求[2-4]。目前，中国作为第一大铁矿石进口国，对外依存度高[5]。因此，为强化中国铁矿资源保障能力，合理有效地开发利用国内铁矿石资源具有重要的战略意义[6-8]。

现阶段选矿工作者结合铁矿石的工艺矿物学特性，开展了一系列分选研究。目前，国内铁矿石中以磁铁矿为主的选别技术主要依赖于干式磁选抛尾和阶段磨矿阶段选别的湿式磁选富集提质[9-10]。沈斌等[11]针对粒度 <30 mm 的破碎铁矿石进行干式磁选抛尾试验，可以获得抛出产率为 85.96%、磁性铁品位为 0.86% 的尾矿，能大幅降低后续作业成本。刘缘等[12]针对高弓长岭某贫磁铁矿的工艺矿物学研究发现，该铁矿石 w(TFe) 为 25.01%，磁性铁质量分数为 74.88%，另含有硅酸铁和碳酸铁，整体为细粒不均匀嵌布的贫磁铁矿石；基于矿石基础性质研究，采用了一段磨矿 – 磁选机弱磁选 – 磁选柱磁选 – 二段磨矿 – 磁选机弱磁选 – 磁选柱磁选的工艺流程，获得了铁精矿 w(TFe) 为 66.67%、回收率为 80.78% 的良好指标。李庚辉等[13]针对以磁铁矿为主的铁矿石，采用干式抛尾、高压辊磨、湿式弱磁(两次阶段磨矿阶段弱磁)等方法，可以获得铁精矿 w(TFe) 为 68.20%、回收率为 86.66% 的良好指标。

本文以湖北某磁铁矿为研究对象，该矿石中约 92% 的 Fe 分布于磁铁矿中，其余 Fe 主要以硫化物(约 5%)和硅酸盐矿物(约 3%)形式赋存；由于矿石破碎至 <3 mm 时磁铁矿单体解离度仍较低，难以直接获得合格精矿，需依赖后续磨矿 – 弱磁选作业进一步处理。为此，针对该矿粗粒阶段单体解离不足、后续磨矿负荷较大的特点，拟采用“粗粒磁干抛 – 细粒阶段磨矿 – 阶段湿式磁选”的联合工艺流程开展系统试验，通过预先抛废降低入磨矿量，并在不同阶段逐级提高磁铁矿单体解离度与回收效率，进而确定磁铁矿高效分选工艺及关键技术指标，为同类型铁矿石的分选利用提供技术支撑。

1　试验原料与方法

1.1　矿石化学成分

原矿经过颚式破碎机破碎后，采用堆锥四分法混匀缩分，得到具有代表性的破碎综合矿样，其主要化学成分如表 1 所示。

表 1　矿样主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of iron ore　%

TFe	S	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O
39.90	2.57	18.75	6.46	5.03	4.27	1.20
P_2O_5	TiO_2	V_2O_5	MnO	Na_2O	CuO	MoO_3
0.397	0.316	0.113	0.088	0.060	0.020	0.013

由表 1 可知，铁矿石试样包含 Fe、S、P、Ti、V 等元素。其中，矿样中 w(TFe) 为 39.90%，w(S) 为 2.57%，其余有用元素含量均较低。Fe 和 S 具有综合回收利用价值。

1.2　矿石矿物成分

矿样主要矿物成分见表 2，铁在各组成矿物的分布率见表 3。由表 2 和表 3 可知，矿样中分布的金属矿物质量分数约为 64%，其中磁铁矿约为 59%，金属硫化物约为 5%，以黄铁矿为主、微量黄铜矿、闪锌矿。脉石矿物质量分数约为 36%，透辉石、长石、绿泥石、云母约为 26%，碳酸盐约为 6%，少量及微量石英、帘石、石膏、磷灰石、榍石、石榴石等。矿样中的铁矿物主要为磁铁矿，约 92% 的 Fe 分布在磁铁矿中，约 5% 以硫化物的形式赋存，约 3% 分散于硅酸盐矿物中；矿石中的硫主要分布于金属硫化物中；Al、Ca、Mg、K、Na、Si 主要分布于透辉石、黑云母、绿泥石和长石中。

1.3　磁铁矿和黄铁矿矿物的 SEM-EDS 分析

试验对矿石中主要矿物(磁铁矿和黄铁矿)进行了 SEM-EDS 分析，结果见图 1。由图 1 可知：矿石中磁铁矿多为半自形 ~ 它形粒状[图 1(a)]，常聚集形成不规则它形集合体，集合体粒度较粗；矿石中可见个别赤铁矿，沿磁铁矿粒边缘和微裂隙侵蚀交代分布[图 1(b)]；矿石中黄铁矿分布较多，部分为半自形 ~ 它形粒状颗粒，部分为不规

则它形集合体，粒状黄铁矿伴生于磁铁矿集合体周围，且多分布于磁铁矿集合体内形成的网格中，或沿矿石裂隙分布[图1(c)、(d)]。

表2 矿样中主要矿物成分分析(质量分数)

Table 2 Analysis results of main mineral components in crushed comprehensive samples %

矿物组	矿物名称	相对含量
金属矿物	磁铁矿	58.54
	钛铁矿	0.03
	黄铁矿	5.55
	黄铜矿	0.01
	闪锌矿	0.01
	小计	64.14
硅酸盐矿物	透辉石	7.95
	绿泥石	3.02
	黑云母	6.67
	白云母	0.10
	石英	1.65
	长石	7.96
	斜帘石	0.89
	石榴石	0.17
	蛇纹石	微量
	高岭土	微量
	小计	28.41
碳酸盐和硫酸盐	方解石	5.96
	白云石	0.18
	石膏	0.59
	小计	6.73
其它	磷灰石	0.33
	金红石	0.01
	榍石	0.38
	小计	0.72
合计		100.00

1.4 磁铁矿和黄铁矿的嵌布情况

破碎综合矿样中磁铁矿、黄铁矿的单体解离及连生体分布情况见表4，连生体中矿物分布分别见表5、6，不同粒度范围磁铁矿单体和连生体分布见表7。

由表4~7可知：破碎后完全单体解离的磁铁矿仅为32%；占比>3/4的富连生体约为50%，其中硫化物仅为0.14%；3/4~1/4之间的连生体中硫化物约为2%，长石、黑云母、绿泥石、碳酸盐含量较高，这部分颗粒Si、Al、Mg、Ca含量较高；完全解离的黄铁矿仅为37%；占比>3/4的富连生体约为47%，其中磁铁矿仅为2%；占比<3/4的连生体中，磁铁矿质量分数为12%~55%，需要提高单体解离度。当破碎粒度<3 mm时，制约磁铁矿回收的主要影响因素是脉石矿物；此时，磁铁矿精矿理论硫品位仅为0.1%，硫化物影响较小。后续工艺需通过提高磨矿细度，进一步改善磁铁矿单体解离度，从而降低硫化物及脉石对精矿质量的不利影响。

1.5 试验方法

矿样中磁铁矿和黄铁矿为主要的可回收金属矿物，磁选是回收磁铁矿的有效手段，为实现磁铁矿与黄铁矿、脉石矿物的有效分离，需要进行分级、磨矿、磁选等方法。为降低后续磨矿负荷，本研究采用“破碎分级-粗粒干抛-阶段磨磁选”联合工艺开展试验，旨在实现磁铁矿高效分选并获得合格铁精矿，同时其磁尾矿可作为浮硫原料。

2 试验结果与讨论

2.1 干抛试验

干抛试验包含破碎分级、粗粒磁干抛试验、细粒筛分及干抛粗精矿细碎，最终获取磁干抛废石、细粒矿(<3 mm)和粉矿(<1 mm)3种产品。磁干抛试验工艺流程如图2所示。

2.1.1 破碎分级试验

将铁矿石破碎分级出70~20 mm、20~3 mm和<3 mm的3种不同粒度的矿样，破碎后不同粒级矿样铁元素金属粒级分布如表8所示。

由表8可知：矿样粒度中70~20 mm粒级含量高，产率为54.13%，w(TFe)为39.62%，TFe金属分布率为53.75%；矿样粒度中20~3 mm粒级中w(TFe)为39.53%；矿样粒度中<3 mm粒级含量相对低，产率为21.49%，但w(TFe)为41.01%，w(S)为2.70%，TFe金属分布率为22.09%。品位相对较低的70~20 mm和20~3 mm粗粒级试样，拟采用干选机抛出采矿过程的难免废石，减少后续矿石处理量；品位相对较高的<3 mm细粒级试样，拟进行细粒筛分-弱磁选铁试验。

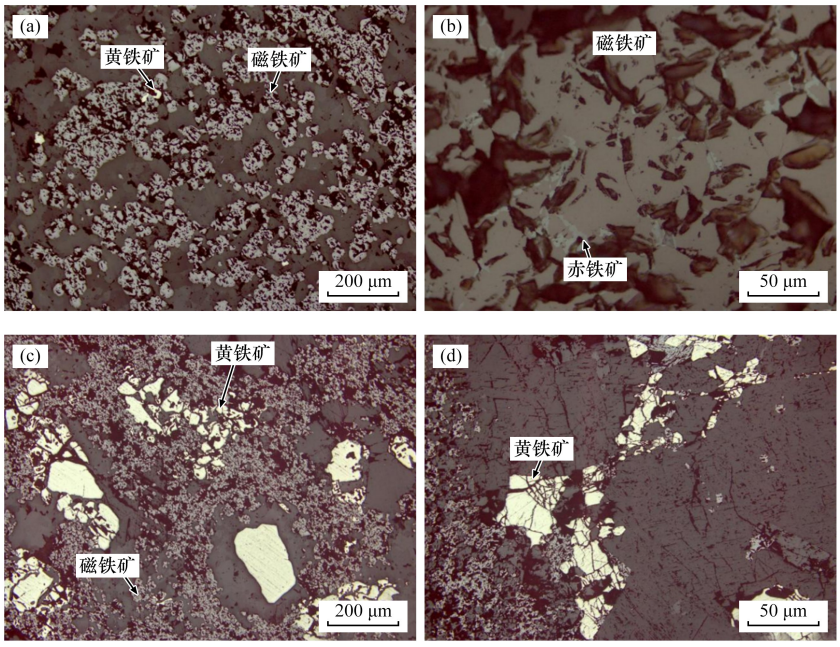
2.1.2 破碎粗粒产品磁干抛预选条件试验

[70,20] mm和(20,3] mm粒级破碎产品分别

表 3　主要元素在矿物中的分布(质量分数)

Table 3　Distribution of major elements in minerals　　%

矿物	Fe	S	Ti	Al	Ca	Mg	K	Na	Si
磁铁矿	91. 74	0	0	0	0	0	0	0	0
钛铁矿	0. 03	0	9. 54	0	0	0	0	0	0
黄铁矿	5. 35	95. 06	0	0	0	0	0	0	0
黄铜矿	0. 01	0. 14	0	0	0	0	0	0	0
闪锌矿	0	0. 15	0	0	0	0	0	0	0
透辉石	0. 90	0	0	0	29. 59	35. 26	0	0	30. 85
黑云母	0. 44	0	0	29. 42	0	51. 97	80. 17	0	21. 64
绿泥石	1. 53	0	0	12. 52	0	11. 77	0	0	7. 21
钾长石	0	0	0	5. 09	0	0	19. 83	0	4. 82
钠长石	0	0	0	12. 77	0	0	0	100	12. 10
钠钙长石	0	0	0	31. 44	10. 82	0	0	0	9. 93
斜帘石	0	0	0	8. 76	4. 02	0	0	0	2. 77
方解石	0	0	0	0	47. 14	0	0	0	0
白云石	0	0	0	0	0. 79	1. 00	0	0	0
石英	0	0	0	0	0	0	0	0	9. 97
金红石	0	0	4. 22	0	0	0	0	0	0
榍石	0	0	86. 24	0	1. 57	0	0	0	0. 71
石膏	0	4. 65	0	0	3. 46	0	0	0	0
磷灰石	0	0	0	0	2. 61	0	0	0	0
合计	100	100	100	100	100	100	100	100	100



（a）磁铁矿为较小的半自形～自形粒状颗粒；（b）赤铁矿沿磁铁矿边缘和微裂隙交代；（c）黄铁矿沿磁铁矿矿石内部裂隙分布；（d）黄铁矿沿脉石粒间隙充填分布

图 1　磁铁矿和黄铁矿 SEM-EDS 分析

Fig. 1　SEM-EDS analysis of magnetite and pyrite

利用CTG-4576型干式永磁筒式磁选机进行干式预选试验，试验流程如图2所示。

（1）[70,20] mm粒级破碎产品磁干抛预选条件试验。选取[70,20] mm粒级破碎产品进行干式预选机相关的磁场强度条件试验和辊筒表面转速条件试验。试验流程分别如图3、4所示，试验结果分别如表9、10所示。

由表9可知，当辊筒表面转速为80 r/min时，随着磁场强度增加，磁精矿w(TFe)降低、作业回收率增加。在磁场强度为2 000 Oe时，磁精矿w(TFe)较高，为47.54%，但尾矿w(TFe)高达14.11%；继续提高磁场强度至4 000 Oe时，磁精矿w(TFe)基本维持在44.00%左右，磁精矿TFe作业回收率最高，为98.54%，尾矿w(TFe)最低，为5.09%。因此，后续选择磁场强度为4 000 Oe为宜。

由表10可知，当磁场强度为4 000 Oe时，随着辊筒表面转速增加，磁精矿w(TFe)先增加后趋于稳定，磁精矿TFe作业回收率先基本保持稳定后降低，尾矿w(TFe)先保持稳定后增加。在辊筒表面转速为60 r/min时，精矿w(TFe)为43.13%、

表4 破碎综合矿样中磁铁矿、黄铁矿的单体解离及连生体分布情况(质量分数)

Table 4 Liberation and association of magnetite and pyrite in the crushed composite sample %

矿物名称	单体	目的矿物在连生体中占比			
		>3/4	3/4~2/4	2/4~1/4	<1/4
磁铁矿	31.85	49.78	10.10	6.31	1.96
	31.85	81.63	91.73	98.04	100.00
黄铁矿	37.27	46.88	5.99	3.88	5.98
	37.27	84.15	90.15	94.02	100.00

表5 破碎综合矿样中磁铁矿连生体组成矿物分布(质量分数)

Table 5 Mineral distribution of magnetite intergrowth in crushed comprehensive sample %

矿物名称	磁铁矿在连生体中占比			
	>3/4	3/4~2/4	2/4~1/4	<1/4
磁铁矿	93.00	63.14	38.56	7.77
黄铁矿	0.12	1.51	1.53	15.89
黄铜矿	0.01	0.01	—	0.03
闪锌矿	0.01	—	—	0.04
钛铁矿	0.06	0.05	—	0.01
透辉石	0.78	6.00	13.19	20.03
长石	0.15	1.83	9.96	26.16
黑云母	2.29	7.77	11.92	10.30
绿泥石	1.30	4.43	8.84	4.02
碳酸盐	1.43	11.24	10.86	10.98
石英	0.40	2.74	3.69	1.93
石榴石	0.00	0.01	0.04	0.94
石膏	0.09	0.70	0.74	1.23
其它矿物	0.36	0.57	0.67	0.67
合计	100.00	100.00	100.00	100.00

表6 破碎综合矿样中黄铁矿连生体组成矿物分布(质量分数)

Table 6 Mineral distribution of pyrite intergrowth in crushed comprehensive sample %

矿物名称	黄铁矿在连生体中占比			
	>3/4	3/4~2/4	2/4~1/4	<1/4
黄铁矿	92.88	62.15	37.75	2.43
黄铜矿	0.07	0.11	0.14	0.03
闪锌矿	0.02	0.00	0.65	0.01
磁铁矿	2.20	11.55	24.89	55.20
透辉石	1.25	3.64	8.10	6.26
长石	0.09	1.95	3.75	8.58
黑云母	1.57	7.03	10.61	10.25
绿泥石	0.52	8.19	3.16	3.90
碳酸盐	0.87	2.64	7.05	9.20
石英	0.21	2.04	2.21	2.96
石榴石	0.00	0.01	0.02	0.79
石膏	0.09	0.58	0.56	0.07
其它矿物	0.23	0.11	1.11	0.32
合计	100.00	100.00	100.00	100.00

表7 不同粒度范围磁铁矿单体和连生体分布(5%公差)(质量分数)

Table 7 Distribution of magnetite monomer and intergrowth in different particle size ranges (5% tolerance) %

粒度范围/mm	嵌布类型		
	单体解离	二元连生体	三元连生体
>0.9	30.18	43.14	26.68
(0.45,0.9]	49.88	37.39	12.73
(0.18,0.45]	63.61	30.07	6.32
[0.074,0.18]	81.03	15.78	3.19
<0.074	89.67	9.21	1.12

回收率基本维持在 98% 以上；增加辊筒表面转速至 80 r/min 时，磁精矿 w(TFe)为 44.03%、作业回收率为 98.54%；继续增加辊筒表面转速时，磁精矿 w(TFe)增加不明显，磁精矿 TFe 作业回收率降低，且尾矿 w(TFe)不断增加。因此，后续选择辊筒表面转速为 80 r/min 为宜。

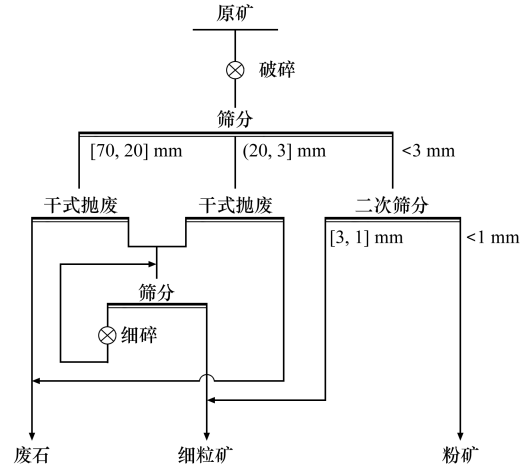


图 2　磁干抛试验工艺流程

Fig. 2　Process flow of dry magnetic separation for pre-concentration

表 8　矿样铁元素金属粒度分布

Table 8　Particle size distribution of iron element metal in mineral samples

粒度范围/mm	产率/%		w(TFe)/%	TFe 分布率/%	
	个别	负累积		个别	负累积
[70,20]	54.13	100.00	39.62	53.75	100.00
(20,3]	24.38	45.87	39.53	24.16	46.25
<3	21.49	21.49	41.01	22.09	22.09
合计	100.00		39.90	100.00	

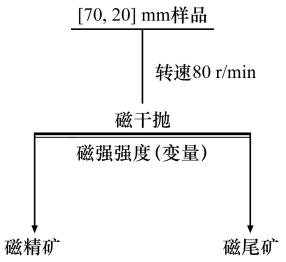


图 3　[70,20] mm 粒级破碎产品干式预选磁场强度条件试验流程

Fig. 3　Flowsheet of condition test for magnetic field intensity in dry pre-concentration of [70,20] mm crushed product

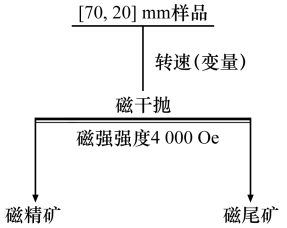


图 4　[70,20] mm 粒级破碎产品干式预选转速条件试验流程

Fig. 4　Flowsheet of rotational speed condition test for dry pre-concentration of [70,20] mm crushed product

表 9　[70,20] mm 粒级破碎产品干式预选磁场强度条件试验结果

Table 9　Results of magnetic field intensity condition test for dry pre-concentration of [70,20] mm crushed product

磁场强度/Oe	转速/(r·min^{-1})	样品名称	产率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
2 000	80	磁精矿	76.34	47.54	91.58
		磁尾矿	23.66	14.11	8.42
		合计	100.00	39.63	100.00
3 000	80	磁精矿	87.36	44.31	97.81
		磁尾矿	12.64	6.87	2.19
		合计	100.00	39.58	100.00
4 000	80	磁精矿	88.67	44.03	98.54
		磁尾矿	11.33	5.09	1.46
		合计	100.00	39.62	100.00

表 10　[70,20] mm 粒级破碎产品干式预选转速条件试验结果

Table 10　Results of rotational speed condition test for dry pre-concentration of [70,20] mm crushed product

磁场强度/Oe	转速/(r·min^{-1})	样品名称	产率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
4 000	60	磁精矿	90.72	43.13	98.82
		磁尾矿	9.28	5.04	1.18
		合计	100.00	39.59	100.00
4 000	80	磁精矿	88.67	44.03	98.54
		磁尾矿	11.33	5.09	1.46
		合计	100.00	39.62	100.00
4 000	100	磁精矿	88.10	44.10	98.38
		磁尾矿	11.90	5.37	1.62
		合计	100.00	39.49	100.00
4 000	120	磁精矿	86.99	44.35	97.70
		磁尾矿	13.01	6.98	2.30
		合计	100.00	39.49	100.00

（2）（20,3］mm 粒级破碎产品磁干抛预选条件试验。选取（20,3］mm 粒级破碎产品进行干式预选机相关的磁场强度条件试验和辊筒表面转速条件试验。试验流程分别如图 5、6 所示，结果分别如表 11、12 所示。

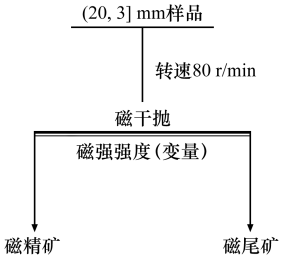


图 5 （20,3］mm 粒级破碎产品干式预选磁场强度条件试验流程

Fig. 5 Flowsheet of magnetic field intensity condition test for dry pre-concentration of（20,3］mm crushed product

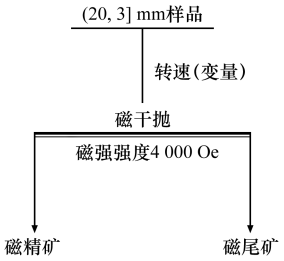


图 6 （20,3］mm 粒级破碎产品干式预选转速条件试验流程

Fig. 6 Flowsheet of rotational speed condition test for dry pre-concentration of（20,3］mm crushed product

表 11 （20,3］mm 粒级破碎产品干式预选磁场强度条件试验结果

Table 11 Results of magnetic field intensity condition test for dry pre-concentration of（20,3］mm crushed product

磁场强度/Oe	转速/（r·min^{-1}）	样品名称	产率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
2 000	80	磁精矿	71.34	48.94	88.40
		磁尾矿	28.66	15.98	11.60
		合计	100.00	39.49	100.00
3 000	80	磁精矿	82.06	46.62	96.76
		磁尾矿	17.94	7.14	3.24
		合计	100.00	39.54	100.00
4 000	80	磁精矿	84.14	45.77	97.42
		磁尾矿	15.86	6.43	2.58
		合计	100.00	39.53	100.00

由表 11 可知，当辊筒表面转速为 80 r/min 时，随着磁场强度增加，磁精矿 w(TFe)降低、作业回收率增加。在磁场强度为 2 000 Oe 时，磁精矿 w(TFe)较高，为 48.94%，但尾矿 w(TFe)高达 15.98%；继续提高磁场强度至 4 000 Oe 时，磁精矿 w(TFe)基本维持为 46.00% 左右，磁精矿 TFe 作业回收率最高，为 97.42%，尾矿 w(TFe)最低，为 6.43%。因此，后续选择磁场强度为 4 000 Oe 为宜。

表 12 （20,3］mm 粒级破碎产品干式预选转速条件试验结果

Table 12 Results of rotational speed condition test for dry pre-concentration of（20,3］mm crushed product

磁场强度/Oe	转速/（r·min^{-1}）	样品名称	产率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
4 000	60	磁精矿	85.59	44.93	97.67
		磁尾矿	14.41	6.37	2.33
		合计	100.00	39.37	100.00
4 000	80	磁精矿	84.14	45.77	97.42
		磁尾矿	15.86	6.43	2.58
		合计	100.00	39.53	100.00
4 000	100	磁精矿	83.85	45.93	97.32
		磁尾矿	16.15	6.57	2.68
		合计	100.00	39.57	100.00
4 000	120	磁精矿	81.87	46.60	96.66
		磁尾矿	18.13	7.28	3.34
		合计	100.00	39.47	100.00

由表 12 可知，当磁场强度为 4 000 Oe 时，随着辊筒表面转速增加，磁精矿 w(TFe)缓慢增加，磁精矿 TFe 作业回收率先基本保持稳定后降低，尾矿 w(TFe)先保持稳定后增加。在辊筒表面转速为 60 r/min 时，磁精矿 w(TFe)为 44.93%、作业回收率为 97.67%；增加辊筒表面转速至 80r/min 时，磁精矿 w(TFe)为 45.77%、作业回收率为 97.42%；继续增加辊筒表面转速时，磁精矿 TFe 品位增加不明显，磁精矿 TFe 作业回收率降低，且尾矿 w(TFe)不断增加。因此，后续选择辊筒表面转速为 80 r/min 为宜。

2.1.3 细粒筛分及干抛粗精矿细碎

在最佳磁干抛条件下，进行细粒筛分及干抛粗精矿细碎（破碎 + 高压辊）。预先筛分获得的 < 3 mm 铁矿石二次筛分得到粉矿（< 1 mm），用于

直接湿式磁选；预先筛分获得的(3,1) mm 铁矿石和粗粒干抛粗精矿闭路细碎后 <3 mm 铁矿石合并为细粒矿(<3 mm)，作为阶段磨矿磁选的入选原料。干抛试验获得磁干抛废石、细粒矿(<3 mm)和粉矿(<1 mm)3 种产品，分析试验结果如表 13。

表 13　细粒筛分及干抛粗精矿细碎的试验结果

Table 13　Results of fine screening and dry pre-concentration of coarse concentrate followed by fine crushing

样品名称	产率/%	w(S)/%	S 作业回收率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
细粒矿	78.29	2.70	82.40	42.84	84.07
粉矿	11.71	2.89	13.17	49.48	14.52
废石	10.00	1.14	4.42	5.61	1.41
合计	100.00	2.57	100.00	39.90	100.00

由表 13 可知，铁矿样品经破碎分级、粗粒磁干抛试验、细粒筛分及干抛粗精矿细碎等试验研究，获得了细粒矿产品，其产率为 78.29%，w(TFe)为 42.84%、回收率为 84.07%，w(S)为 2.70%、回收率为 82.40%；获得了粉矿产品，其产率为 11.71%，w(TFe)为 49.48%、回收率为 14.52%，w(S)为 2.89%、回收率为 13.17%；获得了废石产品，其产率为 10.00%，w(TFe)为 5.61%、回收率为 1.41%，w(S)为 1.14%、回收率为 4.42%。

2.2　磨矿 – 弱磁选试验

本部分作为选铁试验的核心环节，通过开展阶段磨矿 – 阶段弱磁选及工艺优化试验，确定最佳流程与参数，为工程设计提供依据，并考察最终铁精矿品质。

2.2.1　一段磨矿 – 磁选试验

细粒矿(<3 mm)样品 w(TFe)(42.84%)较高、粒度偏粗，进行分级 – 磨矿 – 弱磁选试验，以期将磁性铁矿物有效富集和脉石抛尾。本试验采用 RK/CRS∅400 × 300 型磁辊筒，分别选取磨矿细度 <0.074 mm 质量分数为 45%、55%、65%和 75%，磁场强度为 1 200 Oe，考查一段磁选中磁铁矿的富集效果和脉石抛尾效果。试验流程如图 7 所示，试验结果见表 14。

由表14可知，在磁场强度1 200 Oe条件下，

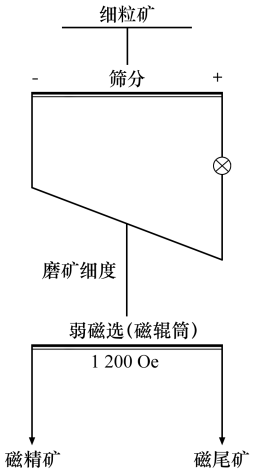


图 7　不同磨矿细度条件下一段弱磁选铁试验流程

Fig. 7　Test process of one-stage weak magnetic iron separation under different grinding fineness conditions

表 14　不同磨矿细度条件下一段弱磁选铁试验结果

Table 14　Test results of one-stage weak magnetic iron separation under different grinding fineness conditions

磨矿细度 <0.074 mm 占比/%	样品名称	产率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
45	磁精矿	69.34	56.36	91.22
	磁尾矿	30.66	12.27	8.78
	总计	100.00	42.84	100.00
55	磁精矿	67.07	57.81	90.53
	磁尾矿	32.93	12.31	9.47
	总计	100.00	42.83	100.00
65	磁精矿	64.96	59.37	90.02
	磁尾矿	35.04	12.20	9.98
	总计	100.00	42.84	100.00
75	磁精矿	64.13	59.58	89.21
	磁尾矿	35.87	12.89	10.79
	总计	100.00	42.83	100.00

随着磨矿细度增加，一段磁精矿 TFe 品位逐渐增加，磁精矿 TFe 作业回收率缓慢降低。当磨矿细度 <74 μm 质量分数为 45% 时，可获得磁精矿 w(TFe)为 56.36%、TFe 作业回收率为 91.22%；增加磨矿细度 <74 μm 质量分数至 65% 时，可获得磁精矿 w(TFe)为 59.37%、TFe 作业回收率为 90.02%；继续增加磨矿细度时，磁精矿 w(TFe)变化不明显、回收率降低。因此，一段磨矿细度选择 <74 μm 质量分数为 65% 为宜。

分别选取磁场强度为 400、800、1 200 Oe 和 1 500 Oe，磨矿细度 < 74 μm 质量分数为 65%，考查一段磁选中磁铁矿的富集效果和脉石抛尾效果。试验流程如图 8 所示，试验结果见表 15。

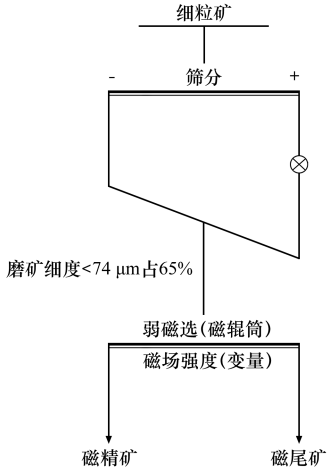


图 8 不同磁场强度条件下一段弱磁选铁试验流程

Fig. 8 Test process of one-stage weak magnetic iron separation under different magnetic field strength conditions

表 15 不同磁场强度条件下一段弱磁选铁试验结果

Table 15 Test results of one-stage weak magnetic iron separation under different magnetic field strength conditions

磁场强度/Oe	样品名称	产率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
400	磁精矿	53.53	64.89	81.08
	磁尾矿	46.47	17.44	18.92
	合计	100.00	42.84	100.00
800	磁精矿	62.24	60.13	87.40
	磁尾矿	37.76	14.29	12.60
	合计	100.00	42.82	100.00
1 200	磁精矿	64.96	59.37	90.02
	磁尾矿	35.04	12.20	9.98
	合计	100.00	42.84	100.00
1 500	磁精矿	65.90	59.02	90.78
	磁尾矿	34.10	11.58	9.22
	合计	100.00	42.84	100.00

由表 15 可知，在磨矿细度 < 74 μm 质量分数为 65% 时，随着磁场强度增加，一段磁精矿 w(TFe)降低，磁精矿 TFe 作业回收率先增加后趋于稳定。当磁场强度为 400 Oe 时，磁精矿 w(TFe)为 64.89%、TFe 作业回收率为 81.08%；当磁场强度为 1 200 Oe 时，磁精矿 w(TFe)为 59.37%、TFe 作业回收率为 90.02%；继续增加磁场强度时，磁精矿 w(TFe)降低，且回收率基本不变。因此，一段磁场强度选择 1 200 Oe 为宜。

2.2.2 二段磨矿 – 磁选试验

针对 < 1 mm 的粉矿产品，采用 RK/CRS ∅400 mm × 300 mm 型磁辊筒，进行弱磁选分选试验。参考一段磨矿 – 磁选试验结果，磁场强度选择 1 200 Oe。试验流程如图 9 所示，试验结果见表 16。

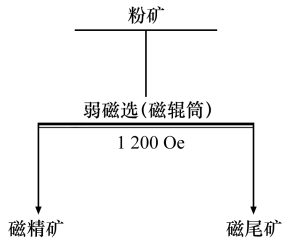


图 9 粉矿弱磁选铁试验流程

Fig. 9 Test process of low intensity magnetic separation of iron ore fines

表 16 粉矿弱磁选铁试验结果

Table 16 Test results of low intensity magnetic separation of iron ore fines

样品名称	产率/%	w(S)/%	S 作业回收率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
磁精矿	80.24	1.43	41.27	59.23	96.05
磁尾矿	19.76	8.26	58.73	9.89	3.95
总计	100.00	2.78	100.00	49.48	100.00

由表 16 可知，粉矿样品经弱磁选铁后，可以获得 w(TFe) 为 59.23% 磁精矿，与一段磁选获得的磁精矿 w(TFe)相近。因此，将一段磁精矿和粉矿磁精矿混合为二段磁选入料。二段磁选入料 w(TFe)为 59.35%，w(S)为 1.08%。

针对混合的二段磁选入料，分别选取磨矿细度 < 0.074 mm 质量分数为 75%、85%、95% 和 98%，磁场强度为 1 200 Oe，考查二段磁选中磁铁矿的富集效果和脉石抛尾效果。试验流程如图 10 所示，试验结果见表 17。

由表 17 可知，在磁场强度 1 200 Oe 条件下，随着磨矿细度增加，二段磁精矿 w(TFe)缓慢增加，磁精矿 TFe 作业回收率缓慢降低。当磨矿细度 < 74 μm 质量分数为 75% 时，可获得磁精矿

w(TFe)为 62.88%、TFe 作业回收率为 98.27%；增加磨矿细度 <74 μm 质量分数至 85% 时，可获得磁精矿 <74 μm 质量分数为 63.58%、TFe 作业回收率为 97.81%；继续增加磨矿细度，磁精矿 <74 μm 质量分数能达到 64% 以上，回收率 97% 以上。经不同细度磁精矿的嵌布情况观察，发现在磨矿细度 <74 μm 质量分数至 85% 时，已基本完全解离；随着磨矿细度增加，磁精矿w(TFe)增加并不明显，可能原因是存在磁性夹杂情况。

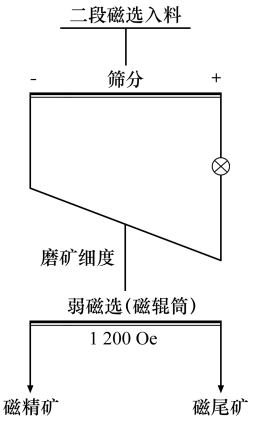


图 10　不同磨矿细度条件下二段弱磁选铁试验流程

Fig. 10　Test process of two-stage weak magnetic iron separation under different grinding fineness conditions

表 17　不同磨矿细度条件下二段弱磁选铁试验结果

Table 17　Test results of two-stage low intensity magnetic separation of iron under different grinding fineness conditions

磨矿细度 <0.074 mm 占比/%	样品名称	产率/%	w(S)/%	S 作业回收率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
75	磁精矿	92.78	0.90	77.64	62.88	98.27
	磁尾矿	7.22	3.33	22.36	14.25	1.73
	总计	100.00	1.08	100.00	59.37	100.00
85	磁精矿	91.30	0.71	60.53	63.58	97.81
	磁尾矿	8.70	4.88	39.47	14.92	2.19
	总计	100.00	1.08	100.00	59.35	100.00
95	磁精矿	89.90	0.68	56.09	64.22	97.34
	磁尾矿	10.10	4.74	43.91	15.59	2.66
	总计	100.00	1.09	100.00	59.31	100.00
98	磁精矿	89.25	0.62	50.76	64.63	97.17
	磁尾矿	10.75	4.99	49.24	15.63	2.83
	总计	100.00	1.09	100.00	59.36	100.00

2.2.3　三段磁选试验

试验考查三段磁选对磁性铁矿物分选指标的影响，为获得高品质的铁精矿，选择三段磁选场强为 1 000 Oe，以二段磁选获得的磁精矿(磨矿细度 <74 μm 占 85% 条件下获取)的二段磁精矿作为三段磁选入料，试验流程如图 11 所示，试验结果见表 18。

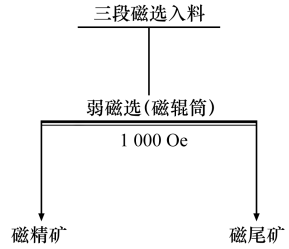


图 11　三段弱磁选铁试验流程

Fig. 11　Three-stage low-intensity magnetic iron separation test process

表 18　三段弱磁选铁试验结果

Table 18　Test results of three-stage low-intensity magnetic iron separation

样品名称	产率/%	w(S)/%	S 作业回收率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
磁精矿	97.27	0.61	83.57	64.89	99.27
磁尾矿	2.73	4.27	16.43	16.90	0.73
总计	100.00	0.71	100.00	63.58	100.00

由表 18 可知，在磁场强度为 1 000 Oe 条件下，可以获得三段磁精矿w(TFe)为 64.89%、TFe 作业回收率为 99.27%。磁精矿w(TFe)有所提升，但未获得w(TFe)大于 65% 的磁精矿，可能原因仍是存在部分磁性夹杂情况。

2.2.4　淘洗机试验

为进一步获取w(TFe)大于 65% 的高品质铁精矿，本试验考查淘洗机设备对三段磁精矿分选指标的影响。试验流程如图 12 所示，试验结果见表 19。

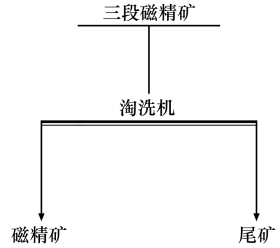


图 12　淘洗机选铁试验流程

Fig. 12　Iron selection test process of elutriation machine

表 19 淘洗机选铁试验结果

Table 19 Iron selection test results of elutriation machine

样品名称	产率/%	w(S)/%	S 作业回收率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
磁精矿	98.27	0.57	91.83	65.56	99.28
尾矿	1.73	2.88	8.17	26.83	0.72
总计	100.00	0.61	100.00	64.89	100.00

由表 19 可知，经淘洗机分选后，可获得 w(TFe)为 65.56% 的磁精矿，指标合格。

2.3 全流程磁性铁矿物分选试验

基于阶段磨矿阶段磁选选别的试验结果，当第一段磁选磁场强度为 1 200 Oe(磨矿细度 < 74 μm 质量分数为 65%)、第二段磁选磁场强度为 1 200 Oe(磨矿细度 < 74 μm 质量分数为 85%)、第三段磁选磁场强度为 1 000 Oe 和淘洗机分选试验时，铁分选试验流程图及结果分别如图 13 和表 20 所示。

由表 20 可知，经破碎分级 – 粗粒磁干抛、细粒筛分及干抛粗精矿细碎 – 阶段磨磁(两段磨矿 – 磁选 + 一段磁选) – 一段淘洗的工艺流程，可获得高品质铁精 w(TFe)为 65.56%、回收率为 86.41%，其中 w(S)为 0.57%、回收率为 11.67%；获得 w(S)为 5.83%、回收率为 82.87% 的含硫中矿，后续可以用于硫的分选回收。

3 结 论

(1) 铁矿石样品中 w(TFe)为 39.90%，w(S)为 2.57%。矿样中金属矿物主要为磁铁矿和黄铁矿；脉石矿物主要为透辉石、长石、云母、绿泥石、碳酸盐、石英等；金属矿物占比约为 64%，其中磁铁矿约为 59%，金属硫化物约为 5%，以黄铁矿为主，脉石矿物约为 36%；磁铁矿回收的主要影响因素是脉石矿物，磁铁矿精矿理论含硫量约为 0.1%；为获得高品质铁精矿，需要更高的磨矿细度，用于减少脉石的影响。

(2) 基于工艺矿物学特征，采用“破碎分级 – 粗粒磁干抛 – 细粒筛分及干抛粗精矿细碎 – 阶段磨磁 – 一段淘洗”联合工艺，最终获得 w(TFe)为 65.56%、回收率为 86.41%、w(S) < 0.6% 的高品质铁精矿，并产出 w(S)为 5.83%、回收率为 82.87% 的中矿用于后续浮硫。

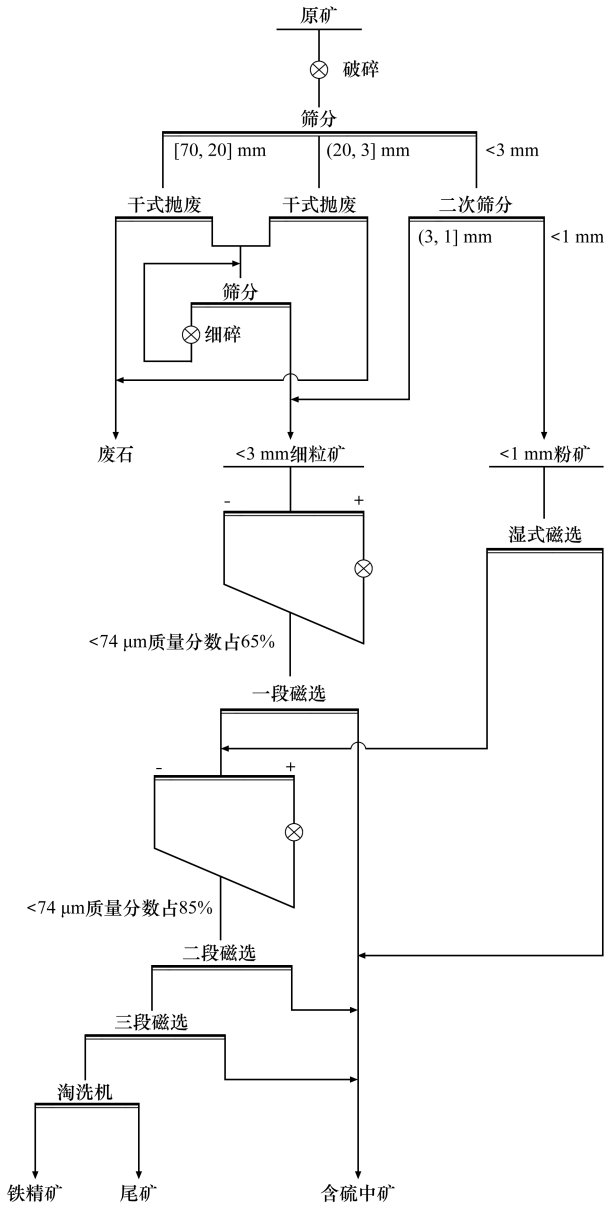


图 13 铁分选试验流程

Fig. 13 Iron separation test process

表 20 铁分选试验结果

Table 20 Iron separation test results

样品名称	产率/%	w(S)/%	S 作业回收率/%	w(TFe)/%	TFe 作业回收率/%
铁精矿	52.59	0.57	11.67	65.56	86.41
尾矿	0.93	2.88	1.04	26.83	0.62
含硫中矿	36.49	5.83	82.87	12.64	11.56
废石	10.00	1.14	4.42	5.61	1.41
合计	100.00	2.57	100.00	39.90	100.00

参考文献：

[1] 马莉,侯颖. 铁矿资源领域技术发展现状与趋势研究[J]. 工业技术创新,2014(3):354－361.
MA Li,HOU Ying. Research on current status and future development of technology in the field of iron ore resource[J]. Industrial Technology Innovation, 2014(3):354－361.

[2] 吴新春. 中国铁矿石资源供应安全研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.
WU Xinchun. The research of China's iron ore resources supply security[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2011.

[3] 孙炳泉. 近年我国复杂难选铁矿石选矿技术进展[J]. 金属矿山,2006(3):11－13.
SUN Bingquan. Progress in China's beneficiation technology for complex refractory iron ore[J]. Metal Mine,2006(3):11－13.

[4] 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 Chunnü, 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.

[5] 张松波,张磊,蔡启端,等. 中国钢铁工业演化和铁矿石供需展望[J]. 中国矿业,2025,34(2):204－211.
ZHANG Songbo, ZHANG Lei, CAI Qiduan, et al. China's iron and steel industry evolution and iron ore supply and demand outlook[J]. China Mining Magazine, 2025,34(2):204－211.

[6] 陈超,张裕书,李潇雨,等. 钛磁铁矿选矿技术研究进展[J]. 矿产综合利用,2021,42(3):99－105.
CHEN Chao,ZHANG Yushu,LI Xiaoyu,et al. Research progress in titanium-magnetite beneficiation technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021,42(3):99－105.

[7] 张凛,骆洪振,徐健,等. 国外某多金属伴生铁矿综合回收试验研究[J]. 中国矿业,2024,33(11):229－236.
ZHANG Lin, LUO Hongzhen, XU Jian, et al. Experimental study on comprehensive recovery of a polymetallic associated iron ore abroad[J]. China Mining Magazine,2024,33(11):229－236.

[8] 张礼,王长福. 钒钛磁铁矿资源选矿技术及综合利用研究进展[J]. 矿产保护与利用,2023,43(5):127－137.
ZHANG Li, WANG Changfu. Research progress on separation technology and comprehensive utilization of vanadium-titanium magnetite resources[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(5): 127－137.

[9] 王耀,于海丰. 某超大型磁铁矿选矿厂碎磨工艺流程选择[J]. 矿业工程,2022,20(6):20－24.
WANG Yao, YU Haifeng. Selection of crushing & grinding process flow in a super-large magnetite mineral processing plant[J]. Mining Engineering,2022,20(6): 20－24.

[10] 郭丽东,朱磊. 某磁铁矿选矿工艺试验研究[J]. 包钢科技,2018,44(3):27－30.
GUO Lidong, ZHU Lei. Experimental study on beneficiation process of a magnetite[J]. Science & Technology of Baotou Steel,2018,44(3):27－30.

[11] 沈斌,王荣林,陆虎,等. 白象山选矿厂磁铁矿选别工艺优化试验[J]. 现代矿业,2022,38(11):154－157.
SHEN Bin,WANG Ronglin,LU Hu,et al. Experiment on optimization of magnetite separation process in baixiangshan concentrator plant[J]. Modern Mining, 2022,38(11):154－157.

[12] 刘缘,孟令轩,赵博,等. 弓长岭某贫磁铁矿磁选短流程工艺试验[J]. 现代矿业,2023,39(11):133－136.
LIU Yuan, MENG Lingxuan, ZHAO Bo, et al. Test on short process of magnetic separation of a lean magnetite ore in Gongchangling[J]. Modern Mining, 2023, 39(11):133－136.

[13] 李庚辉,肖启飞. 南芬选矿厂选别工艺流程试验[J]. 现代矿业,2023,39(3):180－183.
LI Genghui, XIAO Qifei. Experimental study on separation process of Nanfen concentrator[J]. Modern Mining,2023,39(3):180－183.