

某低品位钒钛磁铁矿粗粒抛废预选试验

余海钊¹, 杨卓^{1,2}, 赵强¹, 张鹏羽¹, 蒋权¹, 李文涛¹, 卢兴福¹
(1. 中冶长天国际工程有限责任公司 湖南长沙 410205; 2. 江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西赣州 341000)

摘要: 钒钛磁铁矿作为我国重要的战略性矿产资源,其综合利用面临越来越严峻的挑战,如何有效开发成为当前的迫切任务。某低品位钒钛磁铁矿中 TFe、TiO₂ 质量分数分别为 11.83%、2.77%,有价元素除铁、钒、钛外,其他元素均未达到可综合利用的程度。为此,本文基于该矿的性质特点,进行干式磁选抛废、湿式磁选抛废以及多级抛废等条件试验,并制定合理的抛废工艺流程和作业参数。结果表明:该矿的矿物组成复杂,金属矿物主要是 12.46% 的钛磁铁矿和 3.19% 的钛铁矿,以及少量磁黄铁矿、赤铁矿、镁铝尖晶石和黄铜矿等;脉石矿物主要为长石类、透辉石、绿泥石等;Ti 元素主要以钛铁矿、钛磁铁矿及榍石形式赋存,V 元素大部分赋存在钛磁铁矿中。最优的抛废预选工艺流程:将原矿破碎至 0~10 mm 粒度,在切向速度为 1.2 m/s、磁场强度为 3 500 GS 的条件下进行干式磁选抛尾;进一步将获得的粗选精矿破碎至 <3 mm 粒度,并在 3 500 GS 磁场强度下进行湿式精选。最终得到抛废精矿的产率为 44.30%、TFe 的质量分数和回收率分别为 19.44% 和 77.31%、TiO₂ 的质量分数和回收率分别为 4.64% 和 75.30%。通过该工艺流程可以抛掉产率为 55.70%、TFe 和 TiO₂ 质量分数分别为 4.54%、1.21% 的废石,抛废效果良好,且磨矿能源消耗降低,品位提高,有利于后续的选别作业。本文试验方法可为类似资源的开发利用提供借鉴,同时证明抛废预选技术用于低品位钒钛磁铁矿磨选作业前预处理的可行性和必要性。

关键词: 钒钛磁铁矿; 抛废预选; 干式磁选; 湿式磁选

中图分类号: TD951

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)03-0122-10

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.03.049

Test on pre-selection and waste ore discarding for a low grade vanadium titanomagnetite fag

YU Haizhao¹, YANG Zhuo^{1,2}, ZHAO Qiang¹, ZHANG Pengyu¹, JIANG Quan¹,
LI Wentao¹, LU Xingfu¹

(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410205, Hunan, China; 2. School of Resources and Environment Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: As an important strategic mineral resource in China, the comprehensive utilization of vanadium titanomagnetite is facing more and more severe challenges, and how to effectively develop it has become an urgent task at present. The mass fractions of TFe and TiO₂ in a low-grade vanadium titanomagnetite are 11.83% and 2.77% respectively. Except for iron, vanadium and titanium, other elements of valuable elements have not reached the level of comprehensive utilization. Therefore, based on the characteristic nature of the mine, the dry magnetic separation waste disposal, wet magnetic separation waste disposal and multi-stage waste disposal conditions are tested, and a reasonable waste disposal process and operation parameters are formulated. The results show that the mineral composition of the mine is complex, and

收稿日期: 2024-12-01; 修回日期: 2025-01-12

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC2902305); 湖南省培育世界一流湘版科技期刊建设工程资助项目(2024ZL6020&2023ZL8002); 湖南省科技创新计划资助项目(2022RC1049)

作者简介: 余海钊(1985—),男,副编审/高级工程师,从事铁矿烧结球团相关技术研究及论文编审工作。

通信作者: 杨卓(1994—),男,博士研究生,工程师,从事选矿、冶金及固废综合利用方面的研究工作。

the metal minerals are mainly 12.46% titanomagnetite and 3.19% ilmenite, as well as a small amount of pyrrhotite, hematite, magnesium-aluminum spinel and chalcopyrite. Gangue minerals are mainly feldspar, diopside, chlorite, etc.; Ti is mainly in the form of ilmenite, titanomagnetite and vinyl, and V is mostly deposited in titanomagnetite. The optimal technological process of pre-selection and waste ore discarding: the raw ore is crushed to a particle size of 0~10 mm and the dry magnetic separation discarding tailings is carried out under the conditions of tangential velocity of 1.2 m/s and magnetic field strength of 3 500 GS. The obtained coarse concentrate crushing is further crushed to a particle size of <3 mm and wet selection is performed at a magnetic field strength of 3 500 GS. Finally, the yield of waste ore discarding concentrate is 44.30%, the mass fraction and recovery rate of TFe are 19.44% and 77.31%, respectively, and the mass fraction and recovery rate of TiO₂ are 4.64% and 75.30%, respectively. Through this process, the waste rock with a yield of 55.70%, TFe and TiO₂ mass fractions of 4.54% and 1.21% can be discarded, respectively, and the waste ore throwing effect is good, and the grinding energy consumption is reduced and the grade is improved, which is conducive to the subsequent separation operation. The experimental method can provide a reference for the development and utilization of similar resources, and at the same time prove the feasibility and necessity of pre-selection and waste ore discarding technology for pretreatment of low-grade vanadium titanomagnetite grinding operations.

Key words: vanadium titanomagnetite; pre-selection and waste ore discarding; dry magnetic separation; wet magnetic separation

钒钛磁铁矿作为我国战略性矿产资源的重要组成部分,因富含铁、钒、钛等金属元素,在国防军事、冶金化工、航空航天、电子技术以及金属材料等多个领域发挥着举足轻重的作用^[1]。我国钒钛磁铁矿资源分布广泛、储量丰富,尤其在四川攀西与河北承德地区集中分布,同时在陕西、湖北、山西、广东、新疆、辽宁等地也有零散分布,其资源量在我国铁矿资源中占据领先地位^[2-4]。近年来,随着对钒钛磁铁矿的深入开发,富矿储量日益减少,矿石资源趋于贫、细、杂。矿石结构和性质的复杂性,使得对钒钛磁铁矿的综合利用面临越来越严峻的挑战。如何有效开发低品位钒钛磁铁矿也成为现阶段的迫切任务^[5]。

低品位钒钛磁铁矿中常伴随部分围岩,若对其进行直接磨选,不仅会增加磨选成本,还会影响分选效果。因此,在磨矿前进行抛废预选作业成为一种有效的技术途径^[6]。常用的抛废预选工艺主要包括干式磁选抛废和湿式磁选抛废^[7]。近年来,越来越多的铁矿选厂在磨选前设置了抛废预选环节,并取得了良好的效果。如贾雪梅等^[8]等采用重磁拉磁选机对给料粒度<5 mm的钒钛磁铁矿进行粗粒抛尾,使得抛出的尾矿中TiO₂质量分数仅为1.62%、抛尾率为36.36%;杨少燕等^[9]等对某低品位磁铁矿进行两段干选,使得总抛废率超过42%、废石中TFe质量分数低于1%;袁启东

等^[10]等针对某低品位含钛磁铁矿进行干抛预选作业,抛出产率为31.35%、铁质量分数为12.50%、磁性铁质量分数为4.32%的块状废石,且节能减排效果显著;余保良等^[11]针对某超贫磁铁矿,通过干式磁选抛废,在最优条件下可抛出产率为44.51%、Fe回收率为93.24%的废石,且磨矿消耗大幅减少,入选品位提升,有利于后续的选别作业。

抛废预选可以降低磨矿能耗和生产成本,提高后续选别品位和分选效果;抛出的废石也可以用于建材产品或井下充填与土地复垦^[12-13]。该方法在保证获得合格产品的前提下,可最大限度地提前抛除粗粒废石,减少最终尾矿的产出量,既符合当前的环保要求,又符合“能抛早抛”的选矿理念。然而,由于不同区域矿石性质具有差异性,如何有针对性地制定合理的综合回收工艺仍然需要加强研究^[14]。围绕上述问题和研究思路,本文对某低品位钒钛磁铁矿开展抛废预选试验研究,基于矿石的性质特点,进行干式磁选抛废、湿式磁选抛废以及多级抛废等条件试验,制定合理的抛废工艺流程和作业参数,实现该低品位钒钛磁铁矿的有效抛废,为类似资源的开发利用提供参考与借鉴。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 矿样加工制备

首先对试验样品进行破碎筛分,分别制备

<30、<10 mm 和 <3 mm 三个粒级的样品,用于进行干式及湿式抛尾试验研究。制备流程如图 1 所示。

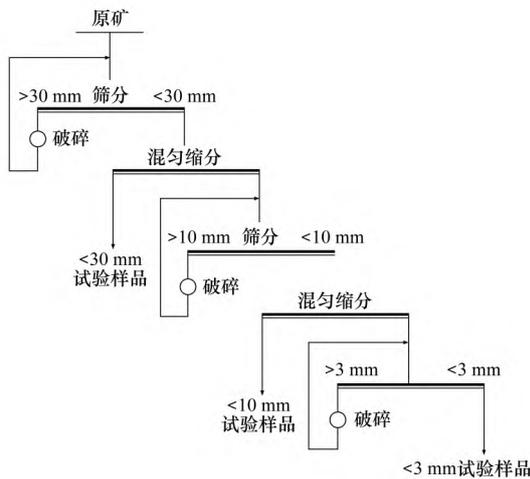


图 1 抛废预选试验样品制备流程

Fig. 1 Sample preparation process of the pre-selection and waste ore discarding test

1.1.2 矿样性质

对原矿进行矿石可选性前期技术分析,得到原矿的化学成分和矿物组成分析结果分别见表 1、2 所示。由表 1 可知,该原矿中 TFe、TiO₂ 质量分数分别为 11.83%、2.77%,硅、铝含量均较高。该矿属于偏酸性低品位钒钛磁铁矿,有价元素除铁、钒、钛外,其他元素均未达到可综合利用的

表 1 原矿的化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical multi-element analysis results of raw ore

Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SiO ₂	S	CaO	TFe	TiO ₂	V ₂ O ₅	Sc(钒)	MgO
9.04	0.22	44.46	0.22	8.94	11.83	2.77	0.10	0.002 5	6.14

表 2 原矿的矿物组成分析结果(质量分数)

Table 2 Mineral composition analysis results of raw ore

拉长石	钙长石	钛磁铁矿	透辉石	绿泥石	普通辉石	橄榄石	钠长石	钾长石	钛铁矿	石英
25.63	12.95	12.46	9.15	7.74	6.62	6.22	5.02	3.44	3.19	2.12
白云母	黑云母	铁铝榴石	榍石	方解石	磁黄铁矿	磷灰石	赤铁矿	硅灰石	磁铁矿	镁铝尖晶石
0.28	0.21	0.18	0.13	0.13	0.11	1.74	0.83	0.59	0.48	0.33
黑柱石	白云石	锆石	黄铜矿	黄铁矿+石英	三水铝石	金红石	钙钛矿	石膏	钙铁榴石	
0.09	0.04	0.04	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	

表 3 铁的化学物相分析结果(质量分数)

Table 3 Chemical phase analysis results of iron

项目	合计 TFe	钛磁铁矿中铁	碳酸铁中铁	硫化铁中铁	硅酸铁中铁	赤褐铁矿中铁
质量分数	11.72	4.97	0.39	0.09	5.68	0.59
占比	100.00	42.41	3.33	0.77	48.46	5.03

程度。由表 2 可知:该矿物样品中金属矿物主要是钛磁铁矿(12.46%)和钛铁矿(3.19%),以及少量磁黄铁矿、赤铁矿、镁铝尖晶石和黄铜矿等;脉石矿物主要是长石类(主要包括拉长石、钙长石、钠长石和钾长石)、透辉石、绿泥石、普通辉石、橄榄石、石英和白云母等,还包括少量黑云母、铁铝榴石、榍石、方解石、磷灰石等。

进一步对原矿中的有价元素铁和钛进行化学物相分析,结果如表 3、4 所示。由表 3 可知,原矿中 TFe 质量分数为 11.72%,钛磁铁矿、碳酸铁、硫化铁、硅酸铁、赤褐铁矿中的铁占全铁的比例分别为 42.41%、3.33%、0.77%、48.46%、5.03%。由表 4 可知,原矿中 TiO₂ 质量分数为 2.82%,钛磁铁矿、钛铁矿、榍石等含钛硅酸盐、金红石中的 TiO₂ 占全部 TiO₂ 的比例分别为 26.09%、39.44%、30.75%、3.72%。

1.2 试验方法

试验拟采用 CR 型干式永磁辊带式磁选机、GTGM418 型干式滚筒磁选机、CT 系列湿式永磁内筒式磁选机、ZC 系列组合式辊带磁选机等设备进行抛废预选试验,研究 0~3、0~10、0~30 mm 粒度的原矿样品在不同磁场强度及皮带速度(0.4、0.8、1.2 m/s)下的抛废效果,从而选择抛废效果更好的磁选机;并通过对比单级抛废和多级抛废

表4 钛的化学物相分析结果(质量分数)

Table 4 Chemical phase analysis results of titanium %

项目	合计 TiO ₂	钛磁铁矿	钛铁矿	榍石等含钛硅酸盐	金红石
质量分数	2.82	0.74	1.11	0.87	0.10
占比	100.00	26.09	39.44	30.75	3.72

的效果,确定适宜的抛废工艺参数。试验还用到 XMQ-67 型锥形球磨机、XTLZ 型多功能真空过滤机(∅260 mm×200 mm)、CS101-3EB 型电热鼓风干燥箱、XPM 型三头研磨机(∅120 mm×3 mm)等辅助设备。具体试验流程如图 2 所示。

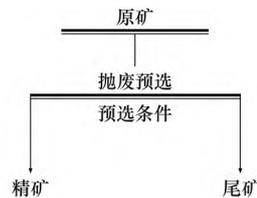


图2 抛废预选试验流程

Fig. 2 Test flow of pre-selection and waste ore discarding

2 试验结果与讨论

2.1 不同磁选机单级抛废试验

2.1.1 干式永磁辊带式磁选机

选用干式永磁辊带式磁选机,固定磁场强度为 2 700 GS,按照图 2 所示的流程进行抛废试验,研究不同粒度原矿样品在不同皮带速度下的抛废效果。试验结果如表 5 所示。由表 5 可知,采用该设备进行干抛试验,得到的精矿产率均不高。随着皮带速度的增加,不同粒度原矿的抛废精矿产率减少,精矿中 TiO₂、TFe 和 MFe 的质量分数均有提高,回收率缓慢降低。当皮带速度为 0.4 m/s 时,不同粒度原矿得到的抛废精矿产率和各产品的回收率最高,但精矿中的 TiO₂、TFe 和 MFe 质量分数最低;当皮带速度为 1.2 m/s 时,不同粒度原矿得到的抛废精矿中 TiO₂、TFe 和 MFe 质量分数最高,但精矿产率和各产品的回收率最低。

2.1.2 干式筒式磁选机

选用干式筒式磁选机,固定切向速度为 1.2 m/s,按照图 2 所示的流程进行抛废试验,研究不同粒度原矿样品在不同磁场强度下的抛废效果。试验结果如表 6 所示。由表 6 可知,在磁场

强度为 2 700 GS 条件下,不同粒度原矿的精矿产率偏低,TiO₂ 和 TFe 回收率未达到预期要求。进一步提高磁场强度至 3 500 GS 可知,在该磁场强度下,精矿产率较 2 700 GS 显著提升,同时随着粒度的降低,TiO₂、TFe 和 MFe 的质量分数和回收率均逐渐上升,说明适当提高磁场强度有利于钛和铁富集。进一步提高磁场强度至 4 000 GS 时,精矿产率虽进一步提升,但 TiO₂、TFe 和 MFe 的质量分数下降较多。

2.1.3 湿式永磁内筒式磁选机

由前面的干式抛尾情况可知,粒度越小,矿物的解离程度越高,抛废效果越好。因此,针对粒度 < 3 mm 的原矿样品,进行湿式永磁内筒式磁选机选铁抛废试验。通过调整磁极与筒的距离调节内筒工作面的磁场强度,研究不同磁场强度下的抛废效果。试验结果如表 7 所示。由表 7 可知,随着磁场强度的增大,精矿产率逐渐增大,精矿中 TiO₂、TFe 和 MFe 的质量分数逐渐降低,回收率逐渐增高。当磁场强度为 2 500 GS 时,精矿 TFe 质量分数为 16.52%,产率为 52.79%,磁性铁回收率为 94.60%。对比试验结果可知,采用湿抛滚筒抛尾可以实现 98% 以上磁性铁的回收,但精矿品位比干抛低。

2.1.4 组合式干式辊带磁选机

试验探索阶段,考虑采取组合式干式辊带磁选机开展试验,设置粗选磁场强度为 6 000 GS、扫选磁场强度为 7 500 GS。干抛试验流程如图 3 所示,试验结果如表 8 所示。由表 8 可知,组合式干式辊带磁选机抛废的精矿产率较高,但精矿中 TiO₂、TFe 和 MFe 的质量分数较低。当原矿粒度为 0~3 mm 时,在粗选磁场强度为 6 000 GS、扫选磁场强度为 7 500 GS 的条件下,可以得到 TFe 质量分数为 14.63%、TFe 回收率为 89.53% 的粗抛精矿。

对比四种不同磁选机单级抛废试验可知:干式筒式磁选机在原矿粒度为 0~10 mm 时的抛废效果较好,湿式永磁内筒式磁选机在原矿粒度为 0~3 mm 时的抛废效果较好。综合考虑,后续进行“一粗一精”组合抛废试验,进一步提高抛废预选效果。“一粗一精”组合干抛试验粗选选用筒式磁选机,精选选用永磁辊带式磁选机。

表 5 不同皮带速度下各粒度原矿样品抛废试验结果

Table 5 Waste ore discarding test results of raw ore of all particle sizes at different belt speeds

皮带速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	粒度/mm	产品名称	产率(质量 分数) /%	品位(质量分数) /%			回收率(质量分数) /%		
				TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
0.4	0~30	精矿	38.25	4.32	19.20	11.09	61.15	58.61	79.15
		尾矿	61.75	1.70	8.40	1.81	38.85	41.39	20.85
		原矿	100.00	2.70	12.53	5.36	100.00	100.00	100.00
	0~10	精矿	35.00	4.64	20.14	11.59	59.09	59.54	87.89
		尾矿	65.00	1.73	7.37	0.86	40.91	40.46	12.11
		原矿	100.00	2.75	11.84	4.62	100.00	100.00	100.00
	0~3	精矿	38.87	4.74	17.55	11.37	60.47	59.94	90.71
		尾矿	61.13	1.97	7.46	0.74	39.53	40.06	9.29
		原矿	100.00	3.05	11.38	4.87	100.00	100.00	100.00
0.8	0~30	精矿	34.35	4.50	19.34	11.68	57.90	54.81	81.88
		尾矿	65.65	1.72	8.35	1.35	42.10	45.19	18.12
		原矿	100.00	2.67	12.12	4.90	100.00	100.00	100.00
	0~10	精矿	31.25	4.76	19.95	12.57	55.43	52.70	85.87
		尾矿	68.75	1.74	8.14	0.94	44.57	47.30	14.13
		原矿	100.00	2.68	11.83	4.57	100.00	100.00	100.00
	0~3	精矿	31.31	5.10	22.89	15.60	54.26	57.25	89.66
		尾矿	68.69	1.96	7.79	0.82	45.74	42.75	10.34
		原矿	100.00	2.94	12.52	5.45	100.00	100.00	100.00
1.2	0~30	精矿	29.49	4.78	20.58	13.16	53.19	50.70	80.19
		尾矿	70.51	1.76	8.37	1.36	46.81	49.30	19.81
		原矿	100.00	2.65	11.97	4.84	100.00	100.00	100.00
	0~10	精矿	28.57	4.92	19.65	13.98	52.51	48.85	80.21
		尾矿	71.43	1.78	8.23	1.38	47.49	51.15	19.79
		原矿	100.00	2.68	11.49	4.98	100.00	100.00	100.00
	0~3	精矿	28.97	5.21	23.95	16.84	49.94	54.55	87.96
		尾矿	71.03	2.13	8.14	0.94	50.06	45.45	2.04
		原矿	100.00	3.02	12.72	5.55	100.00	100.00	100.00

表 6 不同磁场强度下各粒度原矿样品抛废试验结果

Table 6 Waste ore discarding test results of raw ore of all particle sizes at different magnetic field strengths

磁场强度/ GS	粒度/mm	产品名称	产率(质量 分数) /%	品位(质量分数) /%			回收率(质量分数) /%		
				TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
2 700	0~30	精矿	38.25	4.32	19.20	11.090	61.15	58.61	79.15
		尾矿	61.75	1.70	8.40	1.810	38.85	41.39	20.85
		原矿	100.00	2.70	12.53	5.360	100.00	100.00	100.00
	0~10	精矿	35.00	4.64	20.14	11.590	59.09	59.54	87.89
		尾矿	65.00	1.73	7.37	0.860	40.91	40.46	12.11
		原矿	100.00	2.75	11.84	4.620	100.00	100.00	100.00
	0~3	精矿	38.87	4.74	17.55	11.370	64.42	59.94	90.71
		尾矿	61.13	1.67	7.46	0.740	35.58	40.06	9.29
		原矿	100.00	2.86	11.38	4.870	100.00	100.00	100.00

表 6 (续)

磁场强度/ GS	粒度/mm	产品名称	产率(质量 分数) /%	品位(质量分数) /%			回收率(质量分数) /%		
				TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
3 500	0~30	精矿	51.87	4.07	16.06	9.490	77.33	72.12	96.52
		尾矿	48.13	1.29	6.69	0.370	22.67	27.88	3.48
		原矿	100.00	2.73	11.55	5.100	100.00	100.00	100.00
	0~10	精矿	52.10	4.30	18.26	8.890	80.59	76.78	98.13
		尾矿	47.90	1.13	6.01	0.180	19.41	23.22	1.87
		原矿	100.00	2.78	12.39	4.720	100.00	100.00	100.00
	0~3	精矿	48.69	4.66	18.63	10.780	80.75	67.25	99.22
		尾矿	51.31	1.05	5.77	0.082	19.25	32.75	0.78
		原矿	100.00	2.81	10.77	5.290	100.00	100.00	100.00
4 000	0~30	精矿	65.80	3.53	14.91	7.620	85.08	82.31	98.31
		尾矿	34.20	1.19	6.17	0.260	14.92	17.69	1.69
		原矿	100.00	2.73	11.92	5.100	100.00	100.00	100.00
	0~10	精矿	59.56	4.04	15.51	7.850	86.55	81.68	99.06
		尾矿	40.44	0.92	5.12	0.110	13.45	18.32	0.94
		原矿	100.00	2.78	11.31	4.720	100.00	100.00	100.00
	0~3	精矿	64.00	3.92	16.32	8.240	89.28	86.68	99.69
		尾矿	36.00	0.83	4.45	0.052	10.72	13.32	0.31
		原矿	100.00	2.81	12.05	5.290	100.00	100.00	100.00

表 7 不同磁场强度下 0~3 mm 原矿样品的湿式抛废试验结果

Table 7 Wet waste ore discarding test results of 0~3 mm raw ore samples at different magnetic field intensity

磁场强度/GS	产品名称	产率(质量 分数) /%	品位(质量分数) /%			回收率(质量分数) /%		
			TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
2 000	精矿	24.64	4.61	16.72	8.36	41.60	43.64	81.76
	尾矿	75.36	2.12	7.06	0.61	58.40	56.36	18.24
	原矿	100.00	2.73	9.44	2.52	100.00	100.00	100.00
2 500	精矿	52.79	4.16	16.52	8.87	77.87	75.21	94.60
	尾矿	47.21	1.54	6.48	0.57	22.13	24.79	5.40
	原矿	100.00	2.92	11.78	4.95	100.00	100.00	100.00
3 000	精矿	62.64	4.10	15.47	8.04	88.56	83.46	98.18
	尾矿	37.36	0.88	5.14	0.25	11.44	16.54	1.82
	原矿	100.00	2.90	11.61	5.13	100.00	100.00	100.00
4 000	精矿	64.34	3.72	13.93	7.53	90.19	82.60	98.76
	尾矿	35.66	0.73	5.30	0.17	9.81	17.40	1.24
	原矿	100.00	2.65	10.85	4.91	100.00	100.00	100.00

2.2 组合干抛试验

2.2.1 “一粗(30 mm)一精(10 mm)”组合干抛试验

为进一步优化抛尾流程,进行“一粗一精”干抛试验。采用 0~30 mm 原矿,在磁场强度为 4 000 GS、切向速度为 1.2 m/s 的条件下进行干式粗选;将粗选精矿破碎至 0~10 mm 粒度,在磁场强度为 3 500 GS、皮带速度为 1.36 m/s 条件下干

式精选。试验结果如表 9 所示。由表 9 可知,针对 0~30 mm 粒度原矿,通过“一粗一精”磁选,可获得精矿产率为 50.56%、TiO₂ 质量分数为 3.78%、TFe 质量分数为 16.03%、MFe 质量分数为 9.00%、MFe 回收率为 93.65% 的选别指标,表明“一粗一精”干式磁选工艺流程可以对铁实现较好的富集。

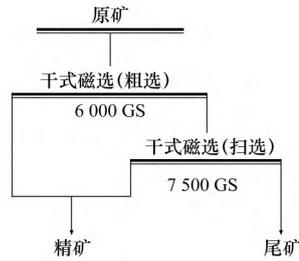


图 3 组合式辊带磁选机干式抛废试验流程

Fig. 3 Dry waste ore discarding test process of combined roller belt magnetic separator

2.2.2 “一粗(10 mm)一精(3 mm)”组合干抛试验

为进一步优化抛尾流程,进行更细粒度的“一粗一精”试验。采用 0~10 mm 粒度原矿进行粗选,在磁场强度为 3 500 GS、切向速度为 1.2 m/s 条件下进行干式磁选。将粗选精矿破碎至粒度 <3 mm,在皮带速度为 1.36 m/s 条件下进行干式精选(改变精选磁场强度)。所得试验结果如表 10 所示。由表 10 可知,采用“一粗(10 mm)一精(3 mm)”组合干抛工艺,在精选磁场强度为 3 500 GS 条件下 0~10 mm 粒度原矿的选别效果最佳。试验可获得精矿作业产率为 40.65%、TiO₂ 质量分数为 5.11%、TFe 质量分数为 19.71%、MFe 质量分数为 12.55% 的精矿。此时,TiO₂ 回收率为 74.09%、MFe 回收率为 97.51%,表明“一粗一精”干式磁

选工艺流程可以较好富集铁和钛。

2.2.3 “一粗(30 mm 干选)一精(3 mm 湿选)”试验

为进一步优化抛尾流程,进行“一粗(干选)一精(湿选)”试验,将 0~30 mm 粒度原矿在磁场强度为 4 000 GS、切向速度为 1.2 m/s 条件下进行干式磁选,然后将粗选精矿破碎至 <3 mm 粒度后在磁场强度为 3 500 GS 条件下进行湿式磁选。所得试验结果如表 11 所示。对照表 11 与表 9 中数据可知,针对 0~30 mm 粒度样品,通过“一粗一精”磁选,TiO₂、TFe、MFe 质量分数以及回收率等选别指标较差,该组合工艺的效果一般。

2.2.4 “一粗(10 mm 干选)一精(3 mm 湿选)”试验

为进一步优化抛尾流程,进行更细粒度的“一粗(干选)一精(湿选)”试验,将 0~10 mm 粒度原矿在磁场强度为 3 500 GS、切向速度为 1.2 m/s 条件下进行干式磁选,再将粗选精矿进一步破碎至 <3 mm 粒度进行湿式磁选(改变精选磁场强度)。试验结果如表 12 所示。由表 12 可知,针对 0~10 mm 原矿,通过干式抛尾,可以在粗粒的条件下抛除 50% 左右的脉石,此时钛的损失率约为 21%。采用对辊将粗抛精矿进一步破碎到 <3 mm,通过湿式磁选,可抛除解离的脉石矿物,进一步提高精矿品位。当湿抛磁场强度为 3 500 GS 时,精

表 8 组合式辊带磁选机干式抛废试验结果

Table 8 Dry waste ore discarding test results of combined roller belt magnetic separator

粒度/mm	产品名称	产率(质量分数)/%	品位(质量分数)/%			回收率(质量分数)/%		
			TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
0~1	精矿	71.95	3.38	14.51	6.52	90.31	86.70	98.88
	尾矿	28.05	0.93	5.71	0.19	9.69	13.30	1.12
	原矿	100.00	2.69	12.04	4.74	100.00	100.00	100.00
0~3	精矿	72.58	3.37	14.63	5.84	91.39	89.53	99.36
	尾矿	27.42	0.84	4.53	0.10	8.61	10.47	0.64
	原矿	100.00	2.68	11.86	4.27	100.00	100.00	100.00

表 9 固定磁场强度下“一粗一精”干式抛废试验结果

Table 9 Dry waste ore discarding test results of one coarse and one fine type under fixed magnetic field strength

产品名称	产率(质量分数)/%	品位(质量分数)/%			回收率(质量分数)/%		
		TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
0~30 mm 粗选尾矿	31.82	2.02	6.52	0.82	23.12	18.31	5.37
0~10 mm 精选尾矿	17.62	1.29	6.53	0.27	8.13	10.16	0.98
0~10 mm 精选精矿	50.56	3.78	16.03	9.00	68.75	71.53	93.65
原矿	100.00	2.78	11.33	4.86	100.00	100.00	100.00

表10 不同磁场强度下“一粗一精”干式抛废试验结果

Table 10 Dry waste ore discarding test results of one coarse and one fine type under different magnetic field strength

精选磁场强度/GS	产品名称	产率(质量分数)/%	品位(质量分数)/%			回收率(质量分数)/%		
			TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
2 500	0~10 mm 粗抛尾矿	47.20	1.21	5.75	0.18	19.88	23.46	1.63
	0~3 mm 精选尾矿	17.36	2.34	6.55	0.72	14.13	9.84	2.39
	0~3 mm 精选精矿	35.44	5.35	21.77	14.15	65.99	66.70	95.98
	原矿综合样	100.00	2.87	11.64	5.22	100.00	100.00	100.00
3000	0~10 mm 粗抛尾矿	46.92	1.18	5.86	0.20	19.69	24.61	1.82
	0~3 mm 精选尾矿	15.33	1.83	5.95	0.51	9.98	8.17	1.51
	0~3 mm 精选精矿	37.75	5.24	19.89	13.24	70.33	67.22	96.67
	原矿综合样	100.00	2.81	11.17	5.17	100.00	100.00	100.00
3 500	0~10 mm 粗抛尾矿	46.80	1.19	5.65	0.23	19.86	23.29	2.06
	0~3 mm 精选尾矿	12.55	1.35	5.55	0.18	6.05	6.14	0.43
	0~3 mm 精选精矿	40.65	5.11	19.71	12.55	74.09	70.57	97.51
	原矿综合样	100.00	2.80	11.35	5.23	100.00	100.00	100.00
4 000	0~10 mm 粗抛尾矿	47.12	1.24	5.72	0.19	20.68	24.11	1.82
	0~3 mm 精选尾矿	7.36	1.14	4.88	0.48	2.97	3.21	0.72
	0~3 mm 精选精矿	45.52	4.74	17.85	10.55	76.35	72.68	97.46
	原矿综合样	100.00	2.83	11.16	4.93	100.00	100.00	100.00

表11 固定磁场强度下“一粗(干选)一精(湿选)”抛废试验结果

Table 11 Waste ore discarding test of one coarse (dry) and one fine (wet) type under fixed magnetic field strength

产品名称	产率(质量分数)/%	品位(质量分数)/%			回收率(质量分数)/%		
		TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
0~30 mm 粗选尾矿	31.85	2.01	6.60	0.80	22.86	18.41	4.84
0~3 mm 精选尾矿	14.51	1.52	7.01	0.30	7.79	8.91	0.83
0~3 mm 精选精矿	53.64	3.62	15.47	9.25	69.35	72.68	94.33
原矿	100.00	2.80	11.42	5.26	100.00	100.00	100.00

表12 不同磁场强度下“一粗(干选)一精(湿选)”抛废试验结果

Table 12 Waste ore discarding test of a coarse (dry) and a fine (wet) under different magnetic fields

湿选磁场强度/GS	产品名称	产率(质量分数)/%	品位(质量分数)/%			回收率(质量分数)/%		
			TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
2 000	0~10 mm 粗抛尾矿	48.20	1.21	5.75	0.18	20.91	23.81	1.66
	0~3 mm 精选尾矿	20.58	2.64	7.03	0.80	19.45	12.44	3.13
	0~3 mm 精选精矿	31.22	5.33	23.77	15.95	59.64	63.75	95.21
	原矿综合样	100.00	2.79	11.64	5.23	100.00	100.00	100.00
2 500	0~10 mm 粗抛尾矿	47.60	1.08	5.93	0.18	18.90	24.80	1.71
	0~3 mm 精选尾矿	16.93	2.34	6.28	0.51	14.59	9.34	1.72
	0~3 mm 精选精矿	35.47	5.10	21.13	13.64	66.51	65.86	96.57
	原矿综合样	100.00	2.72	11.38	5.01	100.00	100.00	100.00
3 000	0~10 mm 粗抛尾矿	48.50	1.17	5.57	0.21	20.56	23.09	1.96
	0~3 mm 精选尾矿	7.15	1.88	5.83	0.96	4.88	3.56	1.32
	0~3 mm 精选精矿	44.35	4.64	19.35	11.34	74.56	73.35	96.72
	原矿综合样	100.00	2.76	11.70	5.20	100.00	100.00	100.00

表 12 (续)

湿选磁场 强度/GS	产品名称	产率(质量 分数) /%	品位(质量分数) /%			回收率(质量分数) /%		
			TiO ₂	TFe	MFe	TiO ₂	TFe	MFe
3 500	0~10 mm 粗抛尾矿	50.68	1.13	4.31	0.19	21.05	19.60	1.83
	0~3 mm 精选尾矿	5.02	1.99	6.86	0.58	3.65	3.09	0.70
	0~3 mm 精选精矿	44.30	4.64	19.44	10.35	75.30	77.31	97.47
	原矿综合样	100.00	2.73	11.14	4.94	100.00	100.00	100.00

矿的 TFe 质量分数可提高到 19.44%，回收率为 77.31%；磁性铁质量分数为 10.35%，回收率为 97.47%；精矿的钛质量分数可提高到 4.64%，钛回收率为 75.30%。

基于前期条件试验结果，推荐将矿石破碎到 0~10 mm 粒度，通过干式滚筒磁选机进行粗粒抛尾，然后将粗抛精矿通过对辊进一步破碎到 <3 mm 粒度，再通过湿式磁选机进行精选抛尾。

2.3 优化后的抛尾流程

基于前期条件试验，采用最优条件下的抛废流程进行验证试验。在 3 500 GS 的磁场强度条件下，对原矿综合样进行“一粗(<10 mm 干抛)一精(<3 mm 湿抛)”抛废试验，其中粗选切向速度为 1.2 m/s。试验流程如图 4 所示，结果如表 13 所示。

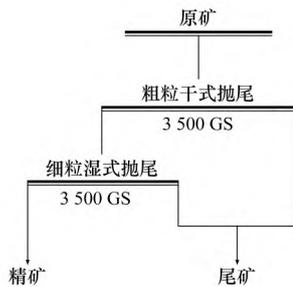


图 4 最优抛废试验流程

Fig. 4 Optimal flow of waste ore discarding test

表 13 最优抛废试验结果(质量分数)

Table 13 Optimal result of waste ore discarding test %

产品名称	产率 (质量分数) / %	品位 (质量分数) /%		回收率 (质量分数) /%	
		TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
精矿	44.30	19.44	4.64	75.29	44.30
尾矿	55.70	4.54	1.21	24.71	55.70
原矿	100.00	11.14	2.73	100.00	100.00

3 结论

(1) 该钒钛磁铁矿中的 TFe 和 TiO₂ 质量分数

分别为 11.83%、2.77%，Si、Al 含量均较高，属于偏酸性低品位钒钛磁铁矿。有价元素中除铁、钒、钛外，其他元素均未达到可综合利用的程度。该矿的矿物组成复杂，金属矿物主要是钛磁铁矿(12.46%)和钛铁矿(3.19%)，以及少量磁黄铁矿、赤铁矿、镁铝尖晶石和黄铜矿等。脉石矿物主要是长石类(主要包括拉长石、钙长石、钠长石和钾长石)、透辉石、绿泥石、普通辉石、橄榄石、石英和白云母等。矿石中 Fe 主要以钛磁铁矿、硅酸铁形式赋存；Ti 元素主要是以钛铁矿、钛磁铁矿及榍石赋存。V 元素大部分赋存在钛磁铁矿中。

(2) 基于该钒钛磁铁矿的矿石性质，通过系统的条件试验，最终确定抛废预选流程：将 0~10 mm 粒度原矿在切向速度为 1.2 m/s、磁场强度为 3 500 GS 干式条件下进行磁选抛尾，将获得的粗选精矿进一步破碎至 <3 mm 粒度，在磁场强度 3 500 GS 下进行湿式精选。最终得到的铁样品的产率为 44.30%，TFe 质量分数为 19.44%，TFe 回收率为 77.31%；TiO₂ 质量分数为 4.64%，TiO₂ 回收率为 75.30%。

(3) 针对该低品位钒钛磁铁矿，通过推荐的抛废预选工艺流程可以抛掉产率为 55.70%、TFe 和 TiO₂ 质量分数分别为 4.54% 和 1.21% 的废石，抛废效果良好，磨矿能源消耗降低，品位升高，有利于后续的选别作业。

参考文献:

[1] 严伟平 张博远 杨耀辉 等. 中国钒钛磁铁矿资源概况及综合利用技术进展[J]. 金属矿山, 2024(11): 70-80.

YAN Weiping, ZHANG Boyuan, YANG Yaohui, et al. Overview and progress in comprehensive utilization technology of vanadium titanium magnetite resources in

- China[J]. Metal Mine 2024(11):70-80.
- [2] 马玉波,张永生,陈伟,等.2023年新一轮找矿突破战略行动主要科研成果[J].矿床地质,2024,43(1):225-226.
MA Yubo,ZHANG Yongsheng,CHEN Wei,et al. Main scientific research achievements of the new round of strategic action of prospecting breakthrough in 2023[J]. Mineral Deposits 2024,43(1):225-226.
- [3] 梁孝伟,杨凡凡,韩飞.塔里木西北缘恰克南钒钛磁铁矿地质特征及找矿方向[J].新疆有色金属,2023,46(6):51-52.
LIANG Xiaowei,YANG Fanfan,HAN Fei. Geological characteristics and prospecting direction of vanadium-titanium magnetite in northwest margin of Tarim basin and south Qiawake[J]. Xinjiang Youse Jinshu,2023,46(6):51-52.
- [4] 杨绍利.钒钛磁铁矿综合利用技术手册[M].北京:冶金工业出版社,2021.
YANG Shaoli. Technical manual for comprehensive utilization of vanadium-titanium bearing magnetite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,2021.
- [5] 罗主平,杨璐,杨婷.我国铁矿石磁力粗粒预选抛废工艺研究与实践[J].现代矿业,2023,39(12):1-11.
LUO Zhuping,YANG Lu,YANG Ting. Research and practice of magnetic coarse-grained pre-selection and discarding process of iron ore in China[J]. Modern Mining 2023,39(12):1-11.
- [6] 常文利,祝彪,罗光明.预先抛废在贫磁铁矿选矿工艺中的应用[J].现代矿业,2014(9):93-95.
CHANG Wenli,ZHU Biao,LUO Guangming. Application of pre-discarding in beneficiation process of lean magnetite[J]. Modern Mining 2014,30(9):93-95.
- [7] 罗良烽,张勇,何荣权.预先抛废技术在低品位磁铁矿中的工业应用[J].有色设备,2021,35(4):57-60.
LUO Liangfeng,ZHANG Yong,HE Rongquan. Industrial application of pre-sorting technology in low-grade magnetite processing[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment 2021,35(4):57-60.
- [8] 贾雪梅,宫亮.重磁拉磁选机在某钒钛磁铁矿粗粒抛尾中的工业应用[J].现代矿业,2019,35(6):23-26;33.
JIA Xuemei,GONG Liang. Industrial application of heavy magnetic drawing magnetic separator in coarse-grained tailings of a vanadium-titanium magnetite[J]. Modern Mining 2019,35(6):23-26,33.
- [9] 杨少燕,米夏夏,程永维,等.干式预选技术在低品位磁铁矿选矿中的应用[J].矿冶,2022,31(6):60-63;86.
YANG Shaoyan,MI Xiaxia,CHENG Yongwei,et al. Application of dry pre-separation technology in beneficiation of low grade magnetite[J]. Mining and Metallurgy 2022,31(6):60-63;86.
- [10] 袁启东,李俊宁,陈洲.某低品位含钛磁铁矿选矿试验研究[C]//中国矿业科技文汇:2016.沈阳《金属矿山》杂志社,2016:69-72;75.
YUAN Qidong,LI Junning,CHEN Zhou. Beneficiation test of a low-grade titanium-bearing magnetite [C]// China Mining Science and Technology Review: 2016. Shenyang: Metal Mine 2016:69-72;75.
- [11] 余保良,王永全,先凤学.云南某超贫含钛磁铁矿预先抛废试验研究[J].科技创新与应用,2017,7(33):171-172.
YU Baoliang,WANG Yongquan,XIAN Fengxue. Experimental study on pre-discarding of an ultra-poor titanium-bearing magnetite in Yunnan[J]. Technology Innovation and Application 2017,7(33):171-172.
- [12] 罗小新,黄晓毅,马玄恒.多产品综合开发利用技术在低品位铁矿中的应用[J].现代矿业,2017,33(11):101-104.
LUO Xiaoxin,HUANG Xiaoyi,MA Xuanheng. Application of multi-product comprehensive development and utilization technology in low-grade iron mine[J]. Modern Mining 2017,33(11):101-104.
- [13] 王琦,王俊祥,张晓伟,等.某铁矿破碎筛分及干式预选工艺试验[J].现代矿业,2024,40(11):139-144.
WANG Qi,WANG Junxiang,ZHANG Xiaowei,et al. Experiment of crushing,screening and dry presorting system in an iron mine[J]. Modern Mining,2024,40(11):139-144.
- [14] 李俊,赵强.某低品位钛铁矿选矿工艺研究[J].矿业工程,2024,22(5):43-47.
LI Jun,ZHAO Qiang. Research on beneficiation process of a low-grade ilmenite ore[J]. Mining Engineering,2024,22(5):43-47.