

某钛铁矿磁选-重选联合工艺回收钛、铁试验研究^①

史耘澎, 梁斌, 李世维, 路漫漫, 张汉泉

(武汉工程大学 资源与安全工程学院, 湖北 武汉 430205)

摘要: 为综合回收某低品位钛铁矿中的钛、铁资源,在矿石性质研究基础上,进行了弱磁选-再磨再选回收铁、钛的选矿试验研究。结果表明,磨矿细度-0.074 mm 粒级占 84.78%时进行弱磁选,所得铁精矿 TFe、TiO₂ 品位分别为 62.82%和 3.62%,铁回收率为 51.32%,磁性铁回收效果良好;对弱磁选尾矿进行一粗一精强磁选-摇床重选联合流程试验,得到 TiO₂ 品位 40.81%、钛回收率 18.47%的钛精矿,铁和钛均得到综合回收。

关键词: 钛铁矿; 钛磁铁矿; 磁选; 重选; 联合流程; 铁精矿; 钛精矿

中图分类号: TD92

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.012

文章编号: 0253-6099(2025)04-0068-05

Experimental Study on Combined Process of Magnetic Separation and Gravity Separation for an Ilmenite Ore

SHI Yunpeng, LIANG Bin, LI Shiwei, LU Manman, ZHANG Hanquan

(School of Resources & Safety Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: In order to comprehensively recover titanium resources and iron resources from a low-grade ilmenite ore, an experimental study was performed for the ore by a process of low intensity magnetic separation (LIMS) followed by regrinding and re-concentration to recover Ti and Fe therein. The results show that LIMS with ore at a grinding fineness of -0.074 mm 84.78% can yield an iron concentrate grading 62.82% TFe and 3.62%TiO₂ with iron recovery of 51.32%, presenting a good recovery of magnetic iron; the obtained LIMS concentrate is subjected to high-intensity magnetic separation (HIMS) consisting of one roughing and one cleaning, followed by gravity separation with a shaking table, resulting in the obtained Ti concentrate grading 40.81% TiO₂ at 18.47% recovery. It is shown that both Fe and Ti therein can be comprehensively recovered.

Key words: ilmenite; titanomagnetite; magnetic separation; gravity separation; combined flowsheet; Fe concentrate; Ti concentrate

钛被广泛应用于航空航天、国防、医疗、化工等领域^[1-3]。钛资源的主要经济矿物为钛铁矿和金红石,其次是白钛矿、锐钛矿和红钛铁矿^[4]。我国是世界上钛铁矿储量最多的国家,钛储量占全球储量的 27.03%。由于长期开发利用,我国高品位钛铁矿资源不断减少,目前国内钛铁矿呈现贫、细、杂的特点,钛组分和铁组分以复合矿相形式交织在一起,难以分选。因此,开展低品位钛铁矿资源的高效综合利用具有重要的战略意义^[5-6]。

目前,钛铁矿的选别方法主要有单一重选、磁选、浮选以及多工艺联合流程,如重选-磁选-浮选、重选-电

选、磁选-浮选工艺等^[7-15]。传统浮选工艺虽然可以较好地回收钛矿物,但耗水量大、流程复杂、生产成本低。本文针对钛铁矿传统分选流程中存在的问题,提出磁选-重选联合新工艺,以某低品位钛铁矿为原料,开展钛矿物回收试验研究,以期为高效低成本开发利用此类钛铁矿提供技术支撑和理论指导。

1 矿石性质及试验方法

1.1 矿石性质

试样取自河南新县,破碎至-2 mm 后待用。采用

① 收稿日期: 2025-02-14

基金项目: 国家自然科学基金(52204276)

作者简介: 史耘澎(1999—),男,内蒙古呼伦贝尔人,硕士,主要研究方向为化工固废资源化利用。E-mail:510695451@qq.com

通信作者: 路漫漫(1989—),男,安徽铜陵人,博士,副教授,主要研究方向为化工固废资源化利用、化工矿物综合利用。E-mail:lummwit@wit.edu.cn

X射线荧光光谱仪和化学物相分析对钛铁矿原料进行检测,结果见表1和表2。

表1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis results of raw ore %

TFe	MFe	TiO ₂	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO	V ₂ O ₅	S	烧失
23.93	11.01	8.02	32.67	4.66	10.07	5.32	0.23	0.51	0.092

表2 原矿铁物相和钛物相分析结果

Table 2 Analysis results of iron and titanium phase in raw ore

元素	铁物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
铁	碳酸铁中铁	0.20	0.84
	硫化铁中铁	0.40	1.67
	赤褐铁矿中铁	2.62	10.95
	硅酸铁中铁	4.83	20.18
	钛磁铁矿中铁	11.01	46.01
	钛铁矿中铁	4.87	20.35
	合计	23.93	100.00
钛	钛磁铁矿中钛	0.72	8.98
	榍石中钛	0.78	9.72
	钛铁矿及金红石中钛	6.52	81.30
	合计	8.02	100.00

从表1可以看出,矿石中主要有价组分为铁和钛,需要分选去除的主要脉石组分为SiO₂、MgO和Al₂O₃。由表2可以看出,原矿中铁主要赋存于钛磁铁矿中,其次赋存于钛铁矿和硅酸铁中,剩余铁主要分布于赤褐铁矿、硫化铁和碳酸铁中。钛主要分布在钛铁矿及金红石中,为可利用钛物相;剩余钛分布在榍石和钛磁铁矿中。

X射线衍射分析和光学显微镜观察结果表明:原矿中主要有价矿物为钛铁矿和磁铁矿,需要选矿去除的脉石矿物为石英和长石类矿物;矿石中铁矿物嵌布粒度复杂,可采用阶磨阶选工艺处理。

1.2 研究方法 with 仪器

根据矿石性质,拟采用弱磁选-强磁选-重选联合流程回收铁和钛,试验原则流程见图1。

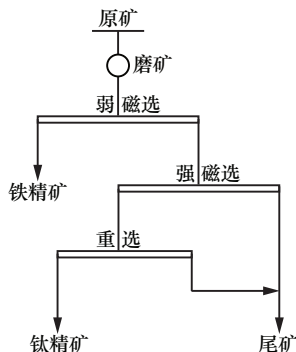


图1 试验原则流程

Fig. 1 Principle flowchart of test

试验仪器和设备包括RK/ZQM(BM)系列智能球磨机、RK/CRS 400×300 逆流式弱磁选机、XPM-120×3 三头研磨机、XCSQ-50×70 湿式强磁选机、LY1100×500 摇床等。

2 试验结果与分析

2.1 铁回收试验

2.1.1 磨矿细度的影响

分析矿石性质可知,磁铁矿、钛铁矿嵌布粒度基本一致,多数在0.05~0.35 mm,钛铁矿更细。实际选矿过程中,磁铁矿选别要求更细的粒度才能获得高品质精矿。弱磁选磁场强度120 kA/m时,研究了磨矿细度对磁选指标的影响,结果见表3。从表3可以看出,磨矿-0.074 mm 粒级占84.78%时,磁选精矿铁品位达到60.21%,精矿产率为20.94%,回收率为52.69%。磨矿细度过细,磨矿成本高,综合考虑,一段磨矿细度选择-0.074 mm 粒级占84.78%。

表3 磨矿细度对磁选指标的影响

Table 3 Effect of grinding fineness on magnetic separation indices

-0.074 mm 粒级含量/%	产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
69.90	精矿	22.45	51.84	4.21	48.63	11.78
	尾矿	77.55	15.87	9.12	51.37	88.22
	给矿	100.00	23.95	8.02	100.00	100.00
75.43	精矿	23.41	53.20	3.92	52.04	11.44
	尾矿	76.59	14.98	9.27	47.96	88.56
	给矿	100.00	23.93	8.02	100.00	100.00
84.78	精矿	20.94	60.21	3.60	52.69	9.41
	尾矿	79.06	14.32	9.19	47.31	90.59
	给矿	100.00	23.93	8.02	100.00	100.00

2.1.2 再磨再选试验

对弱磁选粗精矿进行再磨再选试验。再磨细度-0.074 mm 粒级占89.00%和-0.045 mm 粒级占76.50%,弱磁选粗选磁场强度120 kA/m、精选磁场强度96 kA/m,再磨再选试验结果如表4所示。由表4可知,粗精矿经过再磨后,单体解离程度更高;随着再磨细度更细,铁回收率及精矿产率下降,铁品位提高;再磨细度-0.074 mm 粒级占89.00%时,精选精矿作业产率93.36%,精矿TFe品位62.82%,TFe作业回收率97.41%;再磨细度-0.045 mm 粒级占76.50%,精矿作业产率下降到79.59%,精矿TFe品位达到了66.15%,TFe作业回收率下降到了93.46%。综合考虑铁品位、回收率及能耗等因素,再磨细度选择-0.074 mm 粒级占89.00%。

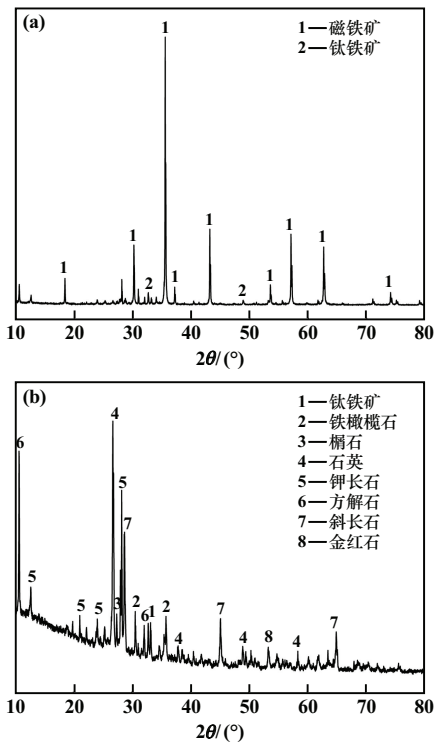
将弱磁选精选尾矿与弱磁选粗选尾矿合并为弱磁选混合尾矿,其产率为80.45%,TFe、TiO₂品位分别为

14.48%和9.09%, TFe、TiO₂回收率分别为48.68%和91.18%。对弱磁选精矿和混合尾矿进行了X射线衍射(XRD)分析,结果见图2。从图2可以看出,弱磁选精矿的衍射峰出现在2θ为18.29°、30.08°、32.43°、37.09°、43.05°、53.41°、56.94°、62.52°和73.96°处,与Fe₃O₄的X射线衍射标准卡图谱特征峰一致,其中FeTiO₃的X射线衍射标准卡的图谱特征峰在2θ为32.53°、48.73°处。此现象表明,经过弱磁选,原矿中的磁铁矿和钛铁矿富集在弱磁选精矿中。弱磁选混合尾矿主要矿物为石英、方解石、长石类矿物、钛铁矿、榍石、铁橄榄石、金红石,其中钛矿物赋存在钛铁矿和金红石中,石英、长石类矿物、方解石、铁橄榄石等为脉石矿物。

表4 再磨再选试验结果

Table 4 Re-grinding and re-separation test results

再磨细度	产品名称	作业产率/%	品位/%		作业回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
-0.074 mm 占89.00%	精矿	93.36	62.82	3.62	97.41	93.88
	尾矿	6.64	23.55	3.36	2.59	6.12
	给矿	100.00	60.21	3.60	100.00	100.00
-0.045 mm 占76.50%	精矿	79.59	66.15	2.82	93.46	62.35
	尾矿	20.41	18.04	8.60	6.54	37.65
	给矿	100.00	60.21	3.60	100.00	100.00



(a) 弱磁选精矿; (b) 弱磁选混合尾矿

图2 弱磁选铁精矿和混合尾矿 XRD 图谱

Fig. 2 XRD patterns of iron concentrate and mixed tailings from LIMS

2.2 钛回收试验

结合矿物工艺学分析结果,原矿经弱磁选回收磁性矿物后,尾矿中 useful 矿物主要为钛铁矿,其密度为4.5~5.0 g/cm³,斜长石、钾长石、石英等脉石矿物密度一般为2.8~3.5 g/cm³;钛铁矿比磁化系数为(400~1000)×10⁻⁶ cm³/g,属于弱磁性矿物,脉石矿物大多为非磁性矿物,因此可以根据密度、磁性差异,将钛铁矿富集。可采用环境友好、低碳节能的重选、磁选及其联合流程来分选。

2.2.1 重选试验

采用摇床进行重选试验。摇床床面横向坡度1°、2°、3°时的重选试验结果见表5。摇床重选共得到5个产品,编号1~5。编号越大,表示矿石密度越大,选择5号产品为精矿。由表5可知,随着摇床床面横向坡度增大,5号产品TiO₂回收率降低。对于该钛铁矿,摇床床面横向坡度1°为宜,但单一重选得到的钛精矿品位较低,达不到冶炼要求,且回收率较低。主要原因是进入重选的弱磁选混合尾矿-0.074 mm 粒级占83.10%,而摇床重选对-0.074 mm 粒级物料回收率低下。

表5 摇床床面横向坡度试验结果

Table 5 Test results of lateral inclination angle of shaking table surface

床面横向坡度/(°)	产品编号	作业产率/%	品位/%		回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
1	1	7.55	3.34	3.72	1.74	3.09
	2	10.01	8.02	4.33	5.54	4.77
	3	41.94	14.65	4.45	42.43	20.55
	4	38.72	17.69	15.47	47.90	65.95
	5	1.78	24.36	28.76	2.99	5.64
2	1	17.54	3.80	5.86	4.60	11.30
	2	27.20	15.22	6.94	28.59	20.77
	3	39.74	17.03	8.69	46.74	37.99
	4	14.18	18.62	16.95	18.23	26.44
	5	1.34	19.83	23.76	1.84	3.50
3	1	26.31	8.07	5.86	14.66	16.96
	2	38.71	16.24	7.83	43.42	33.34
	3	29.36	17.16	11.63	34.79	37.56
	4	5.30	18.26	19.30	6.68	11.25
	5	0.32	20.29	24.97	0.45	0.88

2.2.2 强磁选试验

钛铁矿是一种弱磁性矿物,在颗粒粒度合适时,可以通过强磁选初步分离钛铁矿和脉石组分,减少后续作业的物料量,提高进入后续作业矿物的TiO₂品位,降低成本。采用强磁选机对选铁尾矿进行分选,强磁

选磁场强度对钛铁矿分选效果的影响如表6所示。由表6可知:磁场强度360 kA/m时,精矿铁和钛品位高,但精矿产率以及铁和钛回收率低;随着磁场强度逐渐增大,钛铁矿颗粒被磁场吸引进入精矿,铁、钛回收率增加,但品位下降,主要是因为一些未解离的脉石矿物随着钛铁矿颗粒一起进入精矿产品中。单一的强磁选无法得到高品位合格钛精矿。

表6 强磁选磁场强度对钛铁矿分选效果的影响

Table 6 Effect of magnetic field intensity of HIMS on ilmenite separation

磁场强度/ (kA·m ⁻¹)	产品名称	作业 产率/%	品位/%		作业回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
360	精矿	14.28	25.90	26.32	25.54	41.35
	尾矿	85.72	12.57	6.22	74.46	58.65
	给矿	100.00	14.48	9.09	100.00	100.00
560	精矿	19.58	23.76	22.18	32.13	47.78
	尾矿	80.42	12.22	5.90	67.87	52.22
	给矿	100.00	14.48	9.09	100.00	100.00
800	精矿	27.86	22.30	19.25	42.91	59.00
	尾矿	72.14	11.46	5.17	57.09	41.00
	给矿	100.00	14.48	9.09	100.00	100.00
960	精矿	34.54	21.91	18.73	52.26	71.17
	尾矿	65.46	10.56	4.00	47.74	29.83
	给矿	100.00	14.48	9.09	100.00	100.00

2.2.3 强磁选-重选联合流程

采用强磁选-重选联合流程从弱磁选混合尾矿中回收钛铁矿。强磁选粗选磁场强度分别为560和960 kA/m,摇床床面横向坡度为1°,试验结果见表7。结果表明,强磁选-重选精矿品位较单一重选精矿品位有较大幅度提升,强磁选粗选磁场强度560 kA/m时,重选入选TiO₂品位为22.18%,重选可以得到TiO₂品位34.95%、作业回收率28.67%、对原矿回收率15.55%的选

表7 强磁选-重选试验结果

Table 7 Test results with combined process of HIMS and gravity separation

磁场强度/ (kA·m ⁻¹)	重选 产品	作业 产率/%	品位/%		作业回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
560	1	2.08	9.72	9.96	0.85	0.88
	2	7.72	20.45	11.68	6.49	3.84
	3	17.65	21.53	12.65	14.88	9.52
	4	54.31	27.02	24.65	54.90	54.00
	5	19.24	28.26	34.95	22.88	28.67
960	1	6.02	6.10	7.56	1.68	2.43
	2	14.49	15.8	11.33	10.45	8.77
	3	34.44	19.63	14.51	30.86	26.68
	4	31.24	26.16	22.17	37.30	36.98
	5	13.82	31.26	34.08	19.72	25.15

别指标。强磁选粗选磁场强度960 kA/m时,重选入选TiO₂品位为18.73%,重选可以获得TiO₂品位34.08%、作业回收率25.15%、对原矿回收率17.90%的选别指标。综合考虑TiO₂回收率和TiO₂品位,强磁选磁场强度选择960 kA/m。

2.2.4 一粗一精强磁选-重选试验

对于弱磁选尾矿提钛,采用强磁选-重选流程选别指标较好,但精矿TiO₂品位仅34.08%,仍然达不到冶炼要求。采用一粗一精强磁选工艺,进一步提高重选流程的入选品位,以期得到高品位钛精矿产品。强磁选粗选磁场强度960 kA/m、精选磁场强度560 kA/m,对强磁选精矿再进行摇床重选,摇床床面水平坡度1°,一粗一精强磁选-重选试验结果见表8~9。一粗一精强磁选-重选可获得作业产率26.46%、TiO₂品位40.81%、TiO₂回收率43.16%的钛铁矿精矿。

表8 一粗一精强磁选试验结果

Table 8 Test results of HIMS (one roughing and one cleaning)

磁场强度/ (kA·m ⁻¹)	产品名称	作业 产率/%	品位/%		作业回收率/%	
			TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
960	粗选精矿	34.54	21.91	18.73	52.26	71.17
	粗选尾矿	65.46	10.56	10.56	47.74	28.83
	粗选给矿	100.00	14.48	9.09	100.00	100.00
560	精选精矿	48.27	23.39	25.02	51.53	64.48
	精选尾矿	51.73	20.53	12.86	48.47	35.52
	精选给矿	100.00	21.91	18.73	100.00	100.00

表9 重选试验结果

Table 9 Gravity separation test results

产品编号	作业 产率/%	品位/%		作业回收率/%	
		TFe	TiO ₂	TFe	TiO ₂
1	12.57	8.92	5.45	4.79	2.74
2	15.89	13.44	8.76	9.13	5.56
3	17.25	18.08	22.79	13.33	15.71
4	27.91	25.62	29.43	30.57	32.83
5	26.46	37.28	40.81	42.17	43.16

2.3 全流程试验

弱磁选-强磁选-重选全流程试验数质量流程图见图3。原矿经弱磁选,可以得到产率19.55%、TFe品位62.82%、TiO₂品位3.62%的铁精矿产品,TFe回收率为51.32%;弱磁选尾矿经强磁选-重选,可以得到产率3.63%、TFe品位37.28%、TiO₂品位40.81%的钛精矿产品,TiO₂回收率为18.47%。

3 结论

1) 河南新县钛铁矿矿石中 有用矿物主要为钛磁铁矿,脉石矿物主要为石英和长石类矿物。矿石中有

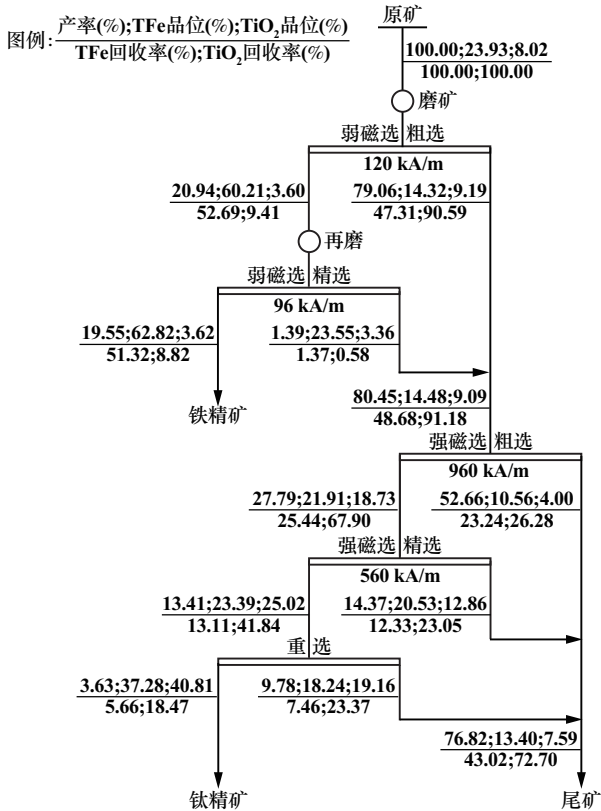


图3 弱磁选-强磁选-重选全流程试验数质量流程图

Fig.3 LIMS-HIMS-gravity separation process flow diagram with mass balance

用成分为铁和钛, TFe 和 TiO_2 品位分别为 23.93% 和 8.02%, 磁性铁占 46.01%, 有用矿物嵌布粒度较为复杂。

2) 原矿磨矿至 -0.074 mm 粒级占 84.78%, 经弱磁选流程可初步分离铁和钛, 其中弱磁选精矿 TFe 和 TiO_2 品位分别为 60.21% 和 3.60%, 通过再磨再选后, 再磨细度为 -0.074 mm 粒级占 89.00% 时, 得到铁精矿 TFe 和 TiO_2 品位分别为 62.82% 和 3.62%, 产率为 19.55%, 铁回收率为 51.32%, 磁性铁回收效果显著。

3) 弱磁选尾矿经强磁选流程处理, 强磁选粗选磁场强度为 960 kA/m, 精选磁场强度为 560 kA/m, 可初步实现 TiO_2 的富集, 此时强磁选精选精矿 TFe 和 TiO_2 品位分别为 23.39% 和 25.02%; 强磁选精选精矿采用摇床重选, 能使 TiO_2 得到较好的富集, 重选精矿 TiO_2 品位 40.81%, 钛回收率为 18.47%。

参考文献 (References):

- [1] DENG L Q, ZHU L D, FEI L Y, et al. Froth flotation of ilmenite by using the dendritic surfactant 2-decanoylamino-pentanedioic acid[J]. Minerals Engineering, 2021, 165:106861.
- [2] 唐舒扬, 郭宇峰, 郑富强, 等. 钛白粉的制备方法现状及展望[J]. 无机盐工业, 2022, 54(7):27-34.

TANG Shuyang, GUO Yufeng, ZHENG Fuqiang, et al. Present situation and prospects of preparation methods of titanium dioxide[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2022, 54(7):27-34.

- [3] 张崇辉, 高晨鑫, 卜显忠, 等. 钛铁矿粗精矿直接还原分离钛铁试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):99-102.
- ZHANG Chonghui, GAO Chenxin, BU Xianzhong, et al. Experimental study on separation and recovery of iron and titanium from ilmenite rough concentrate by direct reduction[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(4):99-102.
- [4] ZHENG X Y, DU L, LI S J, et al. A novel method for efficient recovery of ilmenite by high gradient magnetic separation coupling with magnetic fluid[J]. Minerals Engineering, 2023, 202:108279.
- [5] 官长平, 翟计划, 陈攀. 钛铁矿选矿工艺及表面改性强化浮选研究现状[J]. 四川有色金属, 2023(4):41-44.
- GUAN Changping, ZHAI Jihua, CHEN Pan. Research status of ilmenite mineral processing technology and surface modification enhanced flotation[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2023(4):41-44.
- [6] LI P Y, YU J W, ZHU W G, et al. An innovative process for recovery of ilmenite using mineral phase transformation followed by magnetic separation[J]. Advanced Powder Technology, 2024, 35(7):104540.
- [7] 王利珍, 姜楚灵, 朱家祥, 等. 攀西某钒钛磁铁矿中钛的赋存状态研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(5):84-88.
- WANG Lizhen, JIANG Chuling, ZHU Jiexiang, et al. Occurrence state of titanium in vanadium-titanium magnetite ore from Panxi region[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024, 44(5):84-88.
- [8] 费泽通, 袁致涛, 孟庆有. 新疆某钛铁矿重选粗精矿工艺矿物学及分选可行性研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(1):61-64.
- FEI Zetong, YUAN Zhitao, MENG Qingyou. Process mineralogy and separation feasibility of rough concentrate from gravity separation of ilmenite ore from Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(1):61-64.
- [9] 高煜, 卢东方, 刘振强, 等. 某选钛厂入库尾矿选矿工艺研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(6):74-78.
- GAO Yu, LU Dongfang, LIU Zhenqiang, et al. Beneficiation of tailings in tailings pond of titanium processing plant[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(6):74-78.
- [10] 谢琪春. 攀西选钛尾矿中再回收钛铁矿工艺研究与应用[J]. 矿冶工程, 2018, 38(3):40-42.
- XIE Qichun. Reclaiming ilmenite from titanium tailings of Pan-xi area: Technical study and commercial application[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2018, 38(3):40-42.
- [11] 钟森林, 谢宝华, 王丰雨, 等. 国外某原生钛铁矿选矿工艺试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2022, 43(3):98-103.
- ZHONG Senlin, XIE Baohua, WANG Fengyu, et al. Experimental study on beneficiation of a foreign primary ilmenite ore[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2022, 43(3):98-103.
- [12] 郭小飞, 代淑娟, 宋巨建, 等. 高压辊磨超细粉碎对钒钛磁铁矿分选的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(5):1013-1020.
- GUO Xiaofei, DAI Shujuan, ZHU Jujian, et al. Influence of ultra-fine comminution by high pressure grinding rolls on separation of vanadium titanium magnetite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(5):1013-1020.

(下转第 78 页)

- IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2018,427(1):012002.
- [3] 孙若凡,刘丹,杜钰,等.黄铜矿、方铅矿分离研究现状及进展[J].矿产综合利用,2021(4):80-86.
SUN Ruofan, LIU Dan, DU Yu, et al. Research status and development of separation of chalcopyrite and galena[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4):80-86.
- [4] 刘子源,代淑娟,李鹏程,等.氧化对闪锌矿可浮性的影响及机理[J/OL].矿产综合利用,1-10[2024-11-12].
LIU Ziyuan, DAI Shujuan, LI Pengcheng, et al. Effect of oxidation on floatability of sphalerite and its mechanism[J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 1-10[2024-11-12].
- [5] 陈瑜,代淑娟,李洪祥,等.黄铁矿的氧化特性及氧化对其可浮性的影响[J].金属矿山,2024(2):163-170.
CHEN Yu, DAI Shujuan, LI Hongxiang, et al. Study on the oxidation of pyrite and its effect on mineral floatability[J]. Metal Mine, 2024(2):163-170.
- [6] 李洪祥,代淑娟,赵英杰.氧化对毒砂可浮性的影响[J].矿冶工程,2021,41(6):10-12.
LI Hongxiang, DAI Shujuan, ZHAO Yingjie. Effect of oxidation on floatability of arsenopyrite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):10-12.
- [7] 牛晓鹏.方铅矿、黄铜矿和黄铁矿表面氧化与可浮性研究[D].北京:中国科学院大学(中国科学院过程工程研究所),2019.
NIU Xiaopeng. Correlation of surface oxidation of galena, chalcopyrite and pyrite with their floatability[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences), 2019.
- [8] 华晓鸣.黄铜矿在氨性溶液中氧化浸出机理研究[D].沈阳:东北大学,2019.
HUA Xiaoming. Mechanism for oxidative leaching of chalcopyrite in ammonia-ammonium chloride solution[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.
- [9] 黄鹏亮,杨丙桥,胡杨甲,等.氧化预处理对铜钼浮选分离效果的影响[J].矿冶工程,2021,41(3):46-50.
HUANG Pengliang, Yang Bingqiao, HU Yangjia, et al. Influence of oxidation pretreatment on chalcopyrite-molybdenite flotation separation efficiency[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(3):46-50.
- [10] 程平轩.某大型铜钼矿提高微细粒铜回收率试验研究[J].矿冶工程,2023,43(2):78-80.
CHENG Pingxuan. Improving flotation recovery of fine copper minerals in large copper-molybdenum mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(2):78-80.
- [11] 王进明,董发勤,王肇嘉,等.四川某微细粒铜铁矿选矿试验研究[J].矿冶工程,2021,41(2):48-51.
WANG Jinming, DONG Faqin, WANG Zhaojia, et al. Beneficiation of fine-grained copper-iron ore in Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(2):48-51.
- [12] 范宛惠,谢蕾,郭泽,等.某高硫低品位铜矿浮选试验研究[J].矿冶工程,2024,44(4):185-188.
FAN Wanhui, XIE Lei, GUO Ze, et al. Investigation on flotation of low-grade high-sulfer copper ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(4):185-188.
- 引用本文:董丽鑫,代淑娟,李鹏程,等.氧化对黄铜矿可浮性的影响及机理分析[J].矿冶工程,2025,45(4):73-78.
DONG Lixin, DAI Shujuan, LI Pengcheng, et al. Effect and mechanism of oxidation for floatability of chalcopyrite [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):73-78.

(上接第72页)

- [13] 王运敏,田嘉印,王化军,等.中国黑色金属矿选矿实践[M].北京:科学出版社,2008.
WANG Yunmin, TIAN Jiayin, WANG Huajun, et al. Beneficiation practice of ferrous metal ore in China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [14] 张汉泉.烧结球团理论与工艺(第2版)[M].北京:化学工业出版社,2018.
ZHANG Hanquan. Theory and technology of sintered pellets[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2018.
- [15] WANG Z X, ZHENG Y X, HUANG X, et al. Gravity separation tests of a complex rutile ore[J]. Minerals, 2024,14(1):68.
- 引用本文:史耘澎,梁斌,李世维,等.某钛铁矿磁选-重选联合工艺回收钛、铁试验研究[J].矿冶工程,2025,45(4):68-72.
SHI Yunpeng, LIANG Bin, LI Shiwei, et al. Experimental study on combined process of magnetic separation and gravity separation for an ilmenite ore [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):68-72.