

低浓度微细粒级钛铁矿高效回收工艺对比探析^①

吴雪红¹, 王洪彬², 安登极³, 张愚¹, 王建平¹

(1.攀钢集团有限公司设计研究院, 四川 攀枝花 617063; 2.攀钢集团有限公司, 四川 攀枝花 617000; 3.长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012)

摘要: 攀西地区每年产生的低浓度微细粒级钛铁矿大约在100万吨以上, 由于该矿石粒度微细、体积量大、浓度低, 不利于后续浮选工艺选钛。针对该资源开展“SLon强磁选+浮选”和“新型旋流器浓缩脱泥+浮选”两大流程对比试验, 最终得出“新型旋流器浓缩脱泥+浮选”流程药剂消耗量更低, 所获得的钛精矿指标更优(钛精矿产率20.22%、TiO₂品位47.06%、TiO₂回收率59.03%)。

关键词: 浮选; 微细粒; 钛铁矿; 旋流器; 钛精矿; 脱泥; 工艺对比; 工业回收

中图分类号: TD92; TD952

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.017

文章编号: 0253-6099(2025)02-0097-05

Comparative Analysis of Efficient Recovery Processes of Low-Concentration Fine-Grained Ilmenite

WU Xuehong¹, WANG Hongbin², AN Dengji³, ZHANG Yu¹, WANG Jianping¹

(1. Mining Company's Designing Research Institute, Pangang Group Co., Ltd., Panzhihua 617063, Sichuan, China; 2. Pangang Group Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China; 3. Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: Although the annual production of low-concentration microfine-grained ilmenite in Pan-Xi region attains over 1 million tons, it is not conducive to adopt flotation process for the subsequent titanium selection due to the microfine particle size, large volume and low concentration of this ore. For this resource, comparative experiments were conducted based on two major flowsheets, including “SLon high-intensity magnetic separation + flotation” and “desliming using new type of cyclone + flotation”. The results show that the latter process flowsheet has a lower consumption of reagents, and the obtained titanium concentrate has better indicators, with a titanium concentrate grading 47.06% TiO₂ at 59.03% recovery with the yield of 20.22%.

Key words: flotation; microfine grained; ilmenite; cyclone; titanium concentrate; desliming; process comparison; commercial recovery

攀西地区是中国最大的钛资源基地, 钛资源量占全国钛储量的90%。该地区钛资源主要赋存在钒钛磁铁矿中, 其中含有8%~10%的二氧化钛^[1-5]。该类资源开发一般采用先选铁后选钛工艺^[6-7]。钛铁矿性脆, 经过选铁、选钛多段磨选后, 极易过粉碎。过粉碎的钛铁矿严重影响后续浮选作业, 为了确保钛精矿质量、降低药剂耗量, 当前常采用斜板浓密机将其脱除并作为矿泥丢弃。攀西地区每年通过斜板浓密机脱

除的矿泥量(溢流)超过100万吨, 造成钛资源的极大浪费。

斜板浓密机溢流中微细粒级钛铁矿具有粒度微细、体积量大、浓度低等回收难点, 长期制约该资源的工业回收。本文针对回收难点, 开展2种工艺对比试验, 其中采用新型旋流器浓缩脱泥+浮选流程获得了钛精矿TiO₂品位大于47%、TiO₂回收率59%以上的微细粒级钛铁矿。

① 收稿日期: 2024-10-11

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC2908303)

作者简介: 吴雪红(1976—), 女, 湖南新化人, 高级工程师, 长期从事选矿工艺研究工作。E-mail: 563468745@qq.com

通信作者: 王洪彬(1979—), 男, 四川仁寿人, 正高级工程师, 主要从事钒钛磁铁矿选矿设计及研究。E-mail: 41666722@qq.com

1 试样性质

试样为攀西某选矿厂的斜板浓密机溢流,浓度(质量分数)5%左右。试样化学多元素和钛物相分析结果分别见表1和表2,主要矿物组成及含量见表3,全粒级筛析结果见表4。

表1 试样化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Chemical multi-element analysis of sample %

TiO ₂	TFe	Fe ₂ O ₃	FeO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaO
16.12	18.90	3.07	21.55	28.02	9.82	8.01	8.10
Na ₂ O	MnO	K ₂ O	Co	Cu	S	P	C
0.602	0.353	0.098	0.012	0.013	0.505	0.010	0.024

表2 试样中钛化学物相分析结果

Table 2 Phase analysis results of titanium in sample

钛物相	含量(质量分数)/%	分布率/%
钛铁矿中 TiO ₂	15.08	92.15
钛磁铁矿中 TiO ₂	0.19	1.01
榍石及其他 TiO ₂	1.29	6.84
合计	16.56	100.00

表3 主要矿物组成及含量(质量分数)

Table 3 Main mineral composition and contents of sample %

钛铁矿	钛磁铁矿	钙钛矿	榍石	磁黄铁矿、黄铁矿	硫钴矿
33.22	0.58	0.02	1.15	1.18	0.04
长石	辉石	闪石	绿泥石	方解石	石榴石
5.41	34.08	3.83	18.54	0.03	1.16
云母	蛇纹石	尖晶石	磷灰石	一水铝石	其他
0.07	0.32	0.23	0.07	0.05	0.02

表4 试样全粒级筛析结果

Table 4 Sieve analysis results of sample

粒级/mm	产率/%	TiO ₂ 品位/%	分布率/%
+0.074	0.31	6.73	0.13
-0.074+0.038	6.43	5.01	2.00
-0.038+0.020	34.74	13.78	29.72
-0.020+0.010	30.19	20.32	38.09
-0.010+0.005	16.13	23.12	23.15
-0.005	12.20	9.12	6.91
合计	100.00	16.11	100.00

从表1~3可知,试样中有益矿物主要为钛铁矿,其次还有少量钛磁铁矿和金属硫化物。钛主要赋存在钛铁矿中,其次赋存于榍石中。脉石矿物主要为辉石和绿泥石,次为长石和闪石。

由表4可知,试样粒度微细,-0.038 mm 粒级产率达到了93.26%。TiO₂ 品位随着粒度变细而整体呈增加趋势,但-0.005 mm 粒级反而出现了明显贫化,TiO₂ 品位降低。由于目前采用常规选矿方法难以高效回收-0.010 mm 粒级钛矿物,且它的存在严重影响选钛指标,有必要预先将其抛除。

2 试验方案

根据斜板浓密机溢流中微细粒级钛铁矿矿石性质,考虑常规强磁选设备具有脱泥和富集钛铁矿效果,而新型旋流器适合于极低浓度、极大体积量微细粒级钛铁矿的浓缩和脱泥^[8],拟开展两大流程对比试验,探寻高效回收该钛铁矿资源适宜的工业应用工艺流程。流程1(见图1):先采用 SLon 强磁选对斜板浓密机溢流进行预富集、再对预富集的强磁选精矿进行浮选得到钛精矿;流程2(见图2):先采用 CZ100 新型旋流器对斜板浓密机溢流进行浓缩脱泥,再对旋流器沉砂进行浮选得到钛精矿。

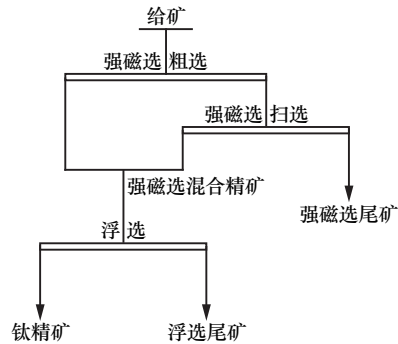


图1 流程1

Fig. 1 Flowchart of process 1

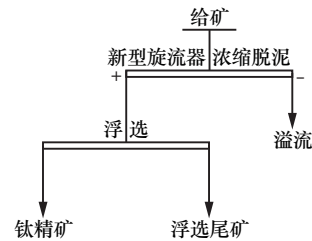


图2 流程2

Fig. 2 Flowchart of process 2

3 试验结果与分析

3.1 流程1(SLon 强磁选 + 浮选) 试验

3.1.1 SLon 强磁选试验

采用 SLon 强磁选机^[9-11]对斜板浓密机溢流进行了一次粗选、一次扫选预富集试验(粗选和扫选磁场

强度分别为 800 和 720 kA/m),结果见表 5。采用 SLon 强磁选机对斜板浓密机溢流进行一次粗选和一次扫选预富集,可获得产率 72.24%、TiO₂ 品位 18.96%、TiO₂ 回收率 84.97%的强磁选混合精矿。

表 5 强磁选预富集试验结果

Table 5 Results of preconcentration test with high intensity magnetic separation

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
强磁选粗精矿	60.61	19.35	73.34
强磁选扫精矿	11.63	16.12	11.63
强磁选混合精矿	72.24	18.96	84.97
强磁选尾矿	27.76	8.73	15.03
给矿	100.00	16.12	100.00

3.1.2 浮选试验

对 SLon 强磁选预富集所得混合精矿进行了浮选试验,试验流程见图 3,试验结果见表 6。SLon 强磁选预富集混合精矿经脱硫-浮钛浮选作业,可获得作业产率 11.30%、TiO₂ 品位 47.21%、TiO₂ 作业回收率 28.12%的钛精矿。

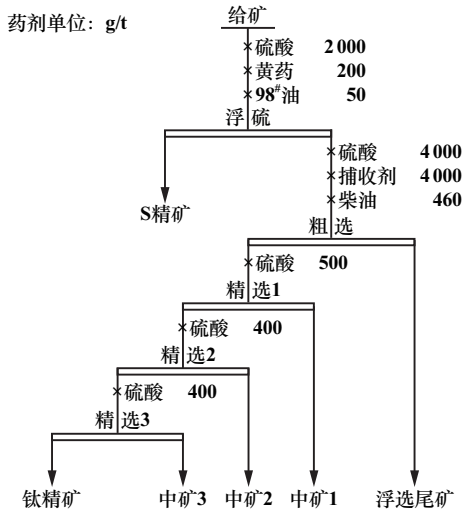


图 3 强磁选混合精矿浮选试验流程

Fig. 3 Flotation test flowchart of high intensity magnetic separation of bulk concentrate

表 6 强磁选混合精矿浮选试验结果

Table 6 Flotation test results of high intensity magnetic separation of bulk concentrate

产品名称	作业产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 作业回收率/%
S 精矿	14.62	20.12	15.51
钛精矿	11.30	47.21	28.12
中矿 1	9.19	19.81	9.60
中矿 2	4.32	26.57	6.06
中矿 3	2.72	33.76	4.83
浮选尾矿	57.86	11.76	35.88
给矿	100.00	18.96	100.00

3.1.3 强磁选-浮选闭路试验

在条件试验和开路试验基础上,对斜板浓密机溢流进行了 SLon 强磁选-浮选闭路试验,试验流程见图 4,结果见表 7。强磁选-浮选闭路试验可获得产率 9.17%、TiO₂ 品位 47.09%、TiO₂ 回收率 26.79%的钛精矿。

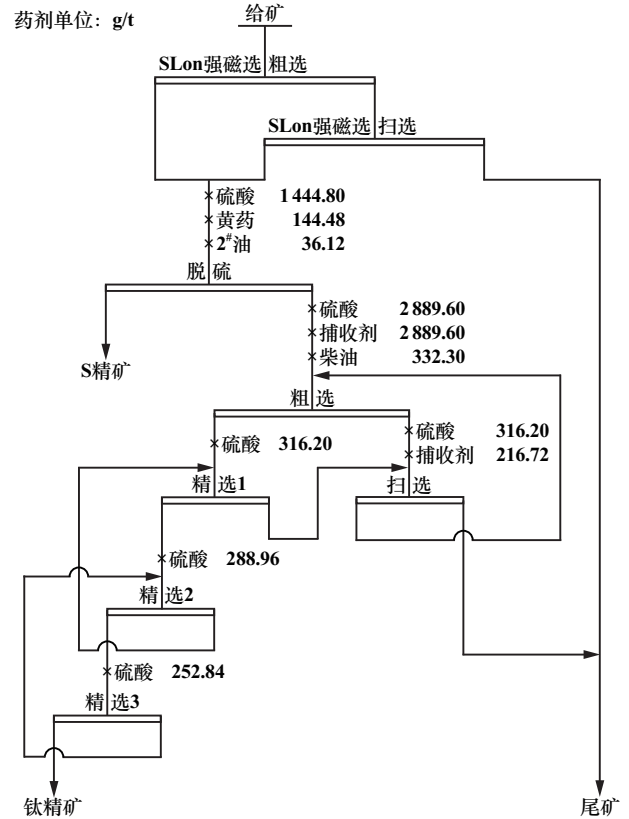


图 4 强磁选-浮选闭路试验流程

Fig. 4 Flowchart of closed-circuit test with high intensity magnetic separation and flotation

表 7 强磁选-浮选闭路试验结果

Table 7 Results of closed-circuit test with high intensity magnetic separation and flotation

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
S 精矿	10.56	21.95	14.38
钛精矿	9.17	47.09	26.79
尾矿	80.27	11.82	58.83
给矿	100.00	16.12	100.00

3.2 流程 2 (新型旋流器浓缩脱泥+浮选) 试验

3.2.1 新型旋流器浓缩脱泥试验

采用长沙矿冶研究院有限责任公司生产的 CZ100 新型旋流器对斜板浓密机溢流进行浓缩脱泥试验(锥角 10°,给料压力 0.12~0.20 MPa,溢流管直径 30~40 mm,沉砂口直径 5~10 mm),结果见表 8。CZ100 新型旋流器采用双圆弧设计入矿口,以理想耐磨材料模压整体烧结成型。采用 CZ100 新型旋流器对斜板浓密机溢流进

行浓缩脱泥处理,可获得产率 66.05%、TiO₂ 品位 18.68%、TiO₂ 回收率 76.49%的分级沉砂。

表 8 新型旋流器浓缩脱泥试验结果

Table 8 Test results of desliming by concentration with cyclone

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
沉砂	66.05	18.68	76.49
溢流	33.95	11.17	23.51
给矿	100.00	16.13	100.00

3.2.2 浮选试验

进一步对 CZ100 新型旋流器沉砂进行浮选试验,试验流程见图 5,结果见表 9。旋流器沉砂经浮选,可获得作业产率 26.21%、TiO₂ 品位 47.13%、TiO₂ 作业回收率 66.14%的钛精矿。

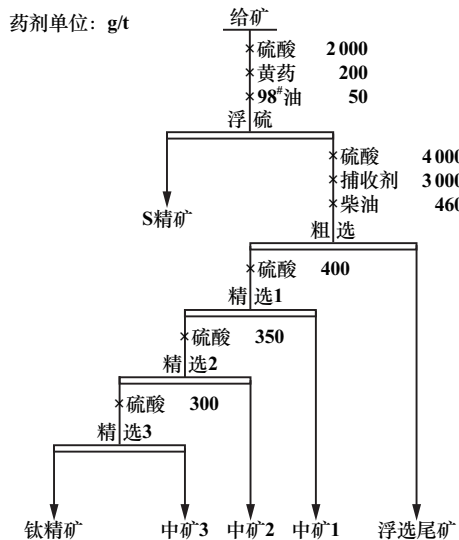


图 5 新型旋流器沉砂浮选试验流程

Fig. 5 Flowchart for flotation test of cyclone sand

表 9 新型旋流器沉砂浮选试验结果

Table 9 Flotation test results of cyclone sand

产品名称	作业产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 作业回收率/%
S 精矿	14.04	21.27	15.99
钛精矿	26.21	47.13	66.14
中矿 1	8.16	7.87	3.44
中矿 2	4.55	21.48	5.24
中矿 3	2.14	24.45	2.80
浮选尾矿	44.90	2.66	6.40
给矿	100.00	18.68	100.00

3.2.3 新型旋流器浓缩脱泥-浮选闭路试验

在条件试验和开路试验基础上,对斜板浓密机溢流进行了新型旋流器浓缩脱泥-浮选闭路试验,试验流程见图 6,结果见表 10。新型旋流器浓缩脱泥-浮选闭

路试验可获得产率 20.22%、TiO₂ 品位 47.06%、TiO₂ 回收率 59.03%的钛精矿。

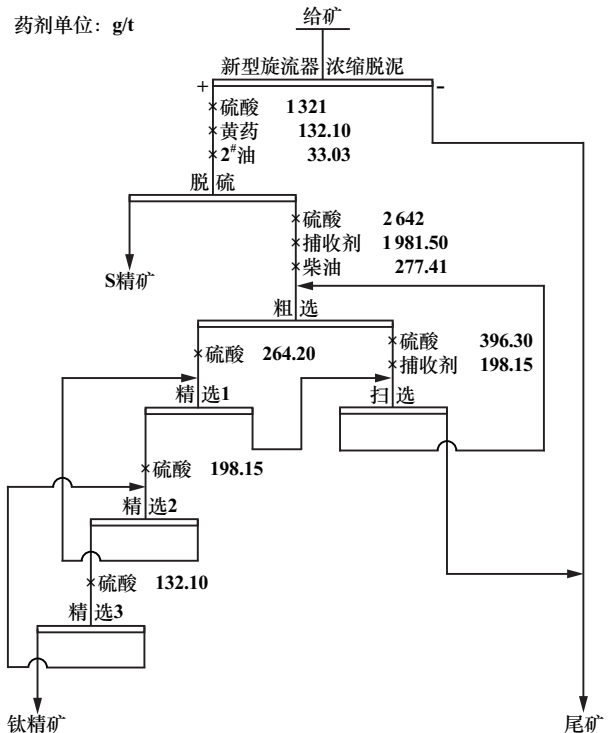


图 6 脱泥-浮选闭路试验流程

Fig. 6 Flowchart of desliming and flotation for closed-circuit test

表 10 脱泥-浮选闭路试验结果

Table 10 Results of closed-circuit test with desliming and flotation

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
S 精矿	9.27	21.27	12.23
钛精矿	20.22	47.06	59.03
尾矿	70.51	6.57	28.74
给矿	100.00	16.12	100.00

3.3 对比分析

3.3.1 钛精矿产品对比

将以上两种流程所得钛精矿指标进行综合对比,结果见表 11。从表 11 可知,两种流程均可获得 TiO₂ 品位大于 47%的钛精矿,但流程 2 所获得的钛精矿产率和回收率指标更高。

表 11 两种流程回收钛精矿指标对比

Table 11 Indices comparison of titanium concentrate from two flowsheets

流程	钛精矿产率/%	精矿 TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
流程 1	9.17	47.09	26.79
流程 2	20.22	47.06	59.03

3.3.2 浮选作业药剂用量对比

浮选作业主要的药剂为调整剂硫酸和浮选捕收剂。两种流程所用主要药剂用量对比结果见图7。从图7可知,流程2(新型旋流器浓缩脱泥-浮选)的硫酸和选钛捕收剂药耗比流程1(强磁选-浮选)的药耗低。

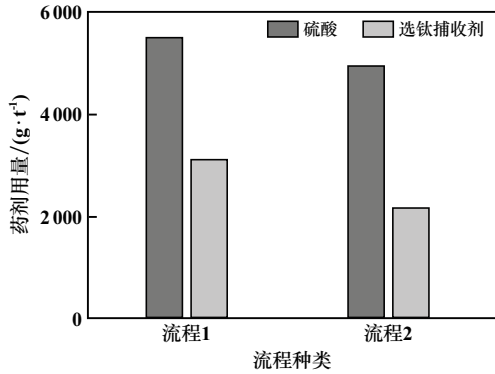


图7 两种流程浮选主要药剂用量对比

Fig.7 Comparison of main reagent dosage in two flowsheets

3.3.3 浮选给矿对比

由以上对比分析可知,流程2的浮选药耗明显低于流程1的浮选药耗,且流程2所获得的最终钛精矿指标更优,说明流程2的浮选给矿更利于浮选。为分析原因,将两种流程获得的浮选给矿进行全粒级筛析对比,结果见表12。从表12可知,流程2的浮选给矿(新型旋流器沉砂)中(-0.010+0.005)mm粒级中TiO₂品位超过30%,说明新型旋流器对此粒级钛铁矿有较好的富集作用。流程2的浮选给矿中-0.005mm粒级矿物产率不到1%,明显低于流程1的浮选给矿,说明-0.005mm粒级矿物是制约目前浮选回收的主要原因,新型旋流器能将这部分矿泥有效脱除,降低了浮选药剂用量、提高了浮选效率。

表12 两种流程浮选给矿筛析结果对比

Table 12 Sieve analysis results of flotation feed in two flowsheets

产品名称	粒级/mm	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 分布率/%
流程1 浮选给矿	+0.038	9.47	4.93	2.46
	-0.038+0.020	43.03	16.66	37.80
	-0.020+0.010	22.84	26.15	31.49
	-0.010+0.005	15.90	28.36	23.78
	-0.005	8.76	9.67	4.47
	合计	100.00	18.96	100.00
流程2 浮选给矿	+0.038	8.47	4.03	1.82
	-0.038+0.020	43.74	14.25	33.32
	-0.020+0.010	34.13	23.81	43.44
	-0.010+0.005	12.90	30.31	20.90
	-0.005	0.76	12.75	0.52
	合计	100.00	18.71	100.00

3.3.4 综合分析结果

综上所述,在品位相近的情况下,流程2即“新型旋流器浓缩脱泥+浮选”流程指标更优,推荐该流程为斜板浓密机溢流中微细粒级钛铁矿高效回收工艺流程。

4 结论

攀西地区某选矿厂斜板浓密机溢流中钛铁矿粒度微细,-0.038mm粒级产率达93.26%,钛主要赋存在钛铁矿中,其次赋存于榍石中,脉石矿物主要为辉石和绿泥石,次为长石和闪石。浮选药剂用量和钛精矿产品指标综合比较结果表明,在品位相近的情况下,新型旋流器浓缩脱泥+浮选流程所获得的指标更优,可获得产率20.22%、TiO₂品位47.06%、TiO₂回收率59.03%的钛精矿。采用新型旋流器浓缩脱泥+浮选流程能实现低浓度微细粒级钛铁矿的高效工业回收。

参考文献(References):

[1] 张延军,李宏.攀枝花某钒钛磁铁矿选矿工艺设计[J].有色金属工程,2011,1(4):46-50.
ZHANG Yanjun, LI Hong. Design of the beneficiation process of a vanadium-titanium magnetite in Panzhuhua[J]. Nonferrous Metal Engineering, 2011,1(4):46-50.

[2] 中国自然资源部.中国矿产资源报告[M].北京:地质出版社,2019.
Ministry of Natural Resources of China. China mineral resources report[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019.

[3] 郑涪麟,安登极.攀西地区某生产细泥中钛铁矿的可选性研究[J].矿冶工程,2023,43(3):84-88.
ZHENG Fuling, AN Dengji. Reclaiming ilmenite resources from flotation slime in titanium concentrator of Pan-Xi Region[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(3):84-88.

[4] 陈攀,翟计划,王洪彬,等.微细粒钛铁矿浮选捕收剂改性试验研究[J].稀有金属,2018(2):205-212.
CHEN Pan, ZHAI Jihua, WANG hongbin, et al. Experimental study on modification of collector for fine grained ilmenite[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2018(2):205-212.

[5] KANG Y M, ZHANG C F, WANG H B, et al. A novel sodium trans-2-nonene hydroxamate for the flotation separation of ilmenite and forsterite: Superior collecting and selectivity[J]. Separation and Purification Technology, 2024,333:125830.

[6] 吴雪红.攀西某超细粒级钛铁矿选矿试验[J].金属矿山,2015(7):56-56.
WU Xuehong. Beneficiation experiments on an ultra fine grained ilmenite in western Panzhuhua[J]. Metal Mine, 2015(7):56-56.

[7] 安登极.攀西钒钛磁铁矿细泥中钛铁矿的可选性研究[J].矿冶工程,2020,40(1):69-72.
AN Dengji. Floatability of ilmenite in slime generated from vanadium-titanium magnetite in Panzhuhua[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(1):69-72.

(下转第107页)

- [3] 刑凯,朱清,任军平,等. 全球锂资源特征及市场发展态势分析[J]. 地质通报, 2023,42(8):1402-1421.
XING Kai, ZHU Qing, REN Junping, et al. Research on the characteristics and market development trend of global lithium resources[J]. Geological Bulletin of China, 2023,42(8):1402-1421.
- [4] 王核,黄亮,白洪阳,等. 中国锂资源的主要类型、分布和开发利用现状:评述和展望[J]. 大地构造与成矿学, 2022,46(5):848-866.
WANG He, HUANG Liang, BAI Hongyang, et al. Types, distribution, development and utilization of lithium mineral resources in China: Review and prespective[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2022,46(5):848-866.
- [5] 孔会磊,李文渊,任广利,等. 伟晶岩型锂矿床研究现状及其在中国西部的找矿前景[J]. 西北地质, 2023,56(1):11-30.
KONG Huilei, LI Wenyuan, REN Guangli, et al. Research status of pegmatite-hosted Li deposits and their exploration prospect in west China[J]. Northwestern Geology, 2023,56(1):11-30.
- [6] WANG W N, PAN M, DUAN C L, et al. Dry deep screening of spodumene and its mineral processing technology[J]. Minerals Engineering, 2022,179:107445.
- [7] 汪泰,邹坚坚,王威,等. 伟晶岩型锂辉石矿碱溶蚀-浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):57-60.
WANG Tai, ZOU Jianjian, WANG Wei, et al. Test on pegmatite spodumene ore with alkali dissolution and flotation process[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):57-60.
- [8] COOK B K, GIBSON C E. A review of fatty acid collectors: Implications for spodumene flotation[J]. Minerals, 2023,13(2):212.
- [9] 赵志辉,谢瑞琦,童雄,等. 硬岩型锂辉石浮选药剂研究进展[J]. 化工矿物与加工, 2023,32:1492-1503.
ZHAO Zhihui, XIE Ruiqi, TONG Xiong, et al. Research progress on flotation reagents for hard rock type spodumene[J]. Industrial Minerals & Processing, 2023,32:1492-1503.
- [10] 周贺鹏. 微细粒锂辉石聚团浮选特性及矿物表面反应机理[D]. 徐州:中国矿业大学, 2020.
ZHOU Hepeng. Agglomeration flotation characteristics of micro-fine spodumene and the reaction mechanism on mineral's surface[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [11] 赵悦豪,王毓华,郑海涛,等. 四川某锂辉石矿磨矿产品粒级优化试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(1):49-53.
ZHAO Yuehao, WANG Yuhua, ZHENG Haitao, et al. Optimization of particle size distribution of grinding products of spodumene ore from Sichuan[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(1):49-53.
- 引用本文:康金星,王鑫,姜志学,等. 复杂嵌布低品位锂辉石矿浮选工艺的方案比较[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):102-107.
KANG Jinxing, WANG Xin, JIANG Zhixue, et al. Comparison of flotation schemes for low-grade spodumene ore with complex mineral dissemination[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):102-107.

(上接第 101 页)

- [8] 徐晓衣,王丰雨,张超达,等. 螺旋溜槽回收某细粒级钛铁矿的试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(5):45-48.
XU Xiaoyi, WANG Fengyu, ZHANG Chaoda, et al. Optimization of gravity separation flowsheet with spiral chute for collecting fine ilmenite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(5):45-48.
- [9] 张元军. SLon 磁选机分选超细粒级钛铁矿的试验研究[D]. 赣州:江西理工大学, 2009.
ZHANG Yuanjun. Research on the tiny particle ilmenite experiment by SLon magnetic separator[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2009.
- [10] 李丽匣,申帅平,袁致涛,等. 微细粒钛铁矿磁选回收率低原因分析[J]. 中国矿业, 2018(11):138-144.
LI Lixia, SHEN Shuaiping, YUAN Zhitao, et al. Loss mechanism of fine-grained ilmenite in magnetic separation[J]. China Mining Magazine, 2018(11):138-144.
- [11] 刘能云,陈超,张裕书,等. 从尾矿中回收钛铁矿的试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(1):65-68.
LIU Nengyun, CHEN Chao, ZHANG Yushu, et al. Experimental study on recovery of ilmenite from tailings[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(1):65-68.
- 引用本文:吴雪红,王洪彬,安登极,等. 低浓度微细粒级钛铁矿高效回收工艺对比探析[J]. 矿冶工程, 2025,45(2):97-101.
WU Xuehong, WANG Hongbin, AN Dengji, et al. Comparative analysis of efficient recovery processes of low-concentration fine-grained ilmenite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):97-101.