

国外某原生钛铁矿选矿工艺试验研究

钟森林^{1,2,3}, 谢宝华^{1,2,3*}, 王丰雨^{1,2,3}, 梁焘茂^{1,2,3}, 张超达^{1,2,3}

(1. 广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广东 广州 510651; 2. 稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510651; 3. 广州粤有研矿物资源科技有限公司, 广东 广州 510651)

摘要: 国外某原生钛铁矿中 TiO_2 品位 8.23%、 Fe_2O_3 品位 16.47%; 主要含钛矿物为钛铁矿、少量金红石和榍石, 微量含钛的磁铁矿, 脉石矿物主要是角闪石、长石, 其次绿泥石、金云母、石英、高岭土等。有价矿物之间嵌布关系复杂, 且钛铁矿嵌布粒度细, 同时钛铁矿和磁铁矿包裹体包含于角闪石间, 增强角闪石磁性, 不利于钛铁矿磁选分离。试验采用磁选-粗精矿再磨-浮选工艺流程获得 TiO_2 品位为 47.41%、回收率为 50.32% 的钛精矿。

关键词: 钛铁矿; 磁选; 角闪石; 浮选

中图分类号: TD922

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)03-0098-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.03.016

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Experimental study on beneficiation of a foreign primary ilmenite ore

Zhong Senlin^{1,2,3}, Xie Baohua^{1,2,3*}, Wang Fengyu^{1,2,3}, Liang Taomao^{1,2,3}, Zhang Chaoda^{1,2,3}

(1. Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Separation and Comprehensive Utilization of Rare Metal, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 3. Guangzhou Yueyouyan Mineral Resources Technology Co., Ltd., Guangzhou 510651, Guangdong, China)

Abstract: A primary ilmenite ore from overseas has a TiO_2 grade of 8.23% and a Fe_2O_3 grade of 16.47%. The mainly titanium-containing minerals contain ilmenite, a small amount of rutile and sphene, and a trace amount of titanium-containing magnetite. The gangue minerals are mainly hornblende and feldspar, followed by chlorite, flogopite, quartz and kaolinite. There exist complex embedded relationship among the valuable minerals and fine disseminated grain size of ilmenite. Ilmenite and magnetite inclusions are contained in hornblende resulting in enhancing the magnetism of hornblende, which is not conducive to the magnetic separation of the ilmenite. In this paper, a flow chart of magnetic separation-rougher concentrate regrinding-flotation was adopted to obtain ilmenite concentrate with a TiO_2 grade of 47.41% as well as a recovery of 50.32%.

Key words: ilmenite, magnetic separation, hornblende, flotation

0 引言

钛及其合金具有强度高、密度小、耐高温、耐

腐蚀等诸多优点, 已经在航天航空工业、海洋工程、热能工程、化工和石化工业、冶金工业、汽车工业、建筑业、医疗及日常生活等领域获得了广泛的应用,

收稿日期: 2022-03-29

基金项目: 广东省科学院发展专项资金项目(2020GDASZH-2022010104)。

作者简介: 钟森林(1984—), 男, 汉, 工程师, 主要从事选矿工艺、设备开发及资源综合利用方面的研究, E-mail: 13316129197@qq.com; *通讯作者: 谢宝华(1989—), 男, 汉, 工程师, 主要从事矿物加工工程及资源综合利用方面的研究, E-mail: xie19890411@qq.com。

被称为“太空金属”、“海洋金属”^[1-2]。世界上具有开采价值的钛矿有原生矿(岩浆钛矿)和钛砂矿两种, 原生矿主要有钛铁矿、钛磁铁矿和钛赤铁矿等不同类型的共生矿^[3]。我国正处在国民经济高速发展的阶段, 对钛资源的需求呈几何倍数增长, 近年来, 我国钛、铁等矿产进口量居高不下, 研究开发钛矿资源的回收利用技术具有重要的意义^[4-5]。

我国原生钛铁矿主要分布于攀枝花-西昌地区以及河北承德地区, 钛铁矿选矿普遍采用重选-磁选-浮选、重选-电选、单一浮选、磁选-浮选流程^[6-8]。国外某地含丰富的钛铁矿资源, 为开发利用该资源, 寻求经济、合理的工艺流程, 笔者针对该钛铁矿石开展了多元素分析、矿物组成分析、钛的分布情况等一系列工艺矿物学研究, 该矿石主要可回收矿物为钛铁矿, 脉石矿物主要为角闪石、长石和绿泥石; 因角闪石中含钛铁矿或磁铁矿包裹体, 使角闪石磁性增强, 采用常规磁选工艺难以获得高品位的钛精矿; 根据该矿石性质特点, 原矿先粗磨后经强磁选抛尾, 既提高精选入选品位, 又减少精选再磨矿量, 粗精矿再磨后, 采用新型高效浮钛捕收剂 YTB 进行浮选精选, 取得了较好的试验指标。

1 矿石性质及试验方法

1.1 矿石性质

矿石性质是开展选矿试验的基础, 试验前对原矿进行工艺矿物学研究, 原矿多元素分析结果见表 1, 采用 MLA 自动矿物定量测定该样品各矿物含量, 测定结果见表 2。由表 1、2 可见, 该矿中有用矿物主要为钛铁矿, 其次为少量金红石, 脉石矿物主要为角闪石和长石, 其次为绿泥石、金云母、石英、高岭土等。

结合扫描电镜和显微镜观察, 矿石中钛铁矿粒度主要分布范围在 0.03~0.32 mm, 属细、微细粒嵌布类型, 呈自形、半自形粒状镶晶集合体或单晶充填于角闪石缝隙中; 金红石粒度较细, 大多小于 0.074 mm, 属微细粒嵌布类型, 常与钛铁矿伴生或连生, 呈不规则粒状分布在钛铁矿边缘; 榍石嵌布粒度介于钛铁矿与金红石之间, 主要粒度分布范围在 0.02~0.32 mm, 属细、微细粒嵌布类型, 多与钛铁矿连生, 沿钛铁矿裂隙充填交代, 呈粒状分布在钛铁矿边缘或呈微脉状充填于钛铁矿缝中; 磁铁矿嵌布粒度也较细。

表 1 原矿多元素分析
Table 1 Spectral analysis results of run-of-mine

TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Mn	Cu	Zn	Pb	Bi	CaF ₂	%	
8.23	16.47	0.026	0.011	0.006	0.012	0.004 7	0.32		
SiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	P	S		
36.83	5.59	6.53	1.92	0.47	16.87	0.076	0.13		

表 2 原矿的矿物组成及含量
Table 2 Mineral compositions and contents in run-of-mine

钛铁矿	金红石	榍石	磁铁矿	斜长石	白云母	金云母	角闪石	绿泥石	绿帘石	%	
10.44	0.09	1.00	0.12	25.00	0.51	5.45	38.38	9.79	0.44		
高岭石	石英	方解石	萤石	黄铁矿	褐铁矿	磷灰石	锆石	其他	合计		
2.90	5.24	0.02	0.01	0.01	0.30	0.07	0.02	0.21	100.00		

采用扫描电镜能谱仪对钛铁矿化学成分进行检测, 本样品中钛铁矿有三种类型: 其一, 正常钛铁矿, 一般呈自形、半自形粒状嵌布在角闪石中, TiO₂ 含量在 52.6% 左右; 其二, FeTiO₃-Fe₂O₃ 固溶体分解, 钛铁矿中析出赤铁矿片晶或赤铁矿包裹体, 见图 1,

这种钛铁矿含钛量偏低而含铁量高, TiO₂ 含量在 48%~50%, FeO 含量 49% 以上; 其三, 富钛钛铁矿, 铁因氧化作用而流失, 含 TiO₂ 量在 53% 以上最高达 57%。从矿石中提取钛铁矿单矿物进行分析, TiO₂ 含量为 51.25%。

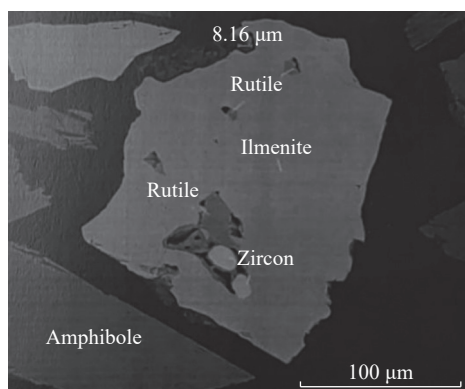


图1 钛铁矿中赤铁矿片晶
Fig. 1 Hematite lamellae in ilmenite

钛在各矿物中的分配见表3,原矿中65.01%的钛赋存于钛铁矿中,4.40%赋存于榍石中,1.06%赋存于金红石中,微量赋存于磁铁矿与褐铁矿中。此外,17.69%以微细包裹体的形式赋存于角闪石中,其余赋存于石英、长石、绿泥石、高岭土等脉石矿物中。可见,钛的赋存较为分散,理论回收率只有65.01%。

表3 钛在主要矿物中的分配
Table 3 Phase analysis of titanium in run-of-mine

矿物	含量/%	含TiO ₂ 量/%	分配率/%
钛铁矿	10.44	51.25	65.01
金红石	0.09	96.97	1.06
榍石	1.00	36.18	4.40
磁铁矿	0.12	1.35	0.02
石英/长石等	30.29	0.98	3.61
角闪石	38.82	3.75	17.69
绿泥石/高岭土	12.69	4.17	6.43
金云母	5.96	2.35	1.70
褐铁矿	0.30	0.35	0.01
其他	0.29		0.07
合计	100.00		100.00

1.2 试验方法

本试验主要回收钛铁矿,矿石中相当部分脉石为非磁性矿物,为减少磨矿量,先粗磨进行磁选粗选试验,以抛去部分脉石矿物,分别进行了磨矿细度、磁场强度条件试验;为获得合格钛精矿产品,对粗精矿再磨矿后分别进行磁选精选和浮选试验,磁选精选进行了磨矿细度和磁场强度条件试验,浮选精选试验进行了捕收剂用量和调整剂用量条件试验以及闭路试验。

2 试验结果与讨论

2.1 磁选粗选试验

原矿经磨矿后采用SSS-I-145高梯度磁选机进行一次磁选试验,得到粗精矿和尾矿。分别进行了磨矿细度、磁场强度条件试验。

2.1.1 磁选粗选磨矿细度试验

将原矿磨矿至不同细度后,在0.5 T磁场强度条件下进行磁选粗选试验,试验结果见图2。

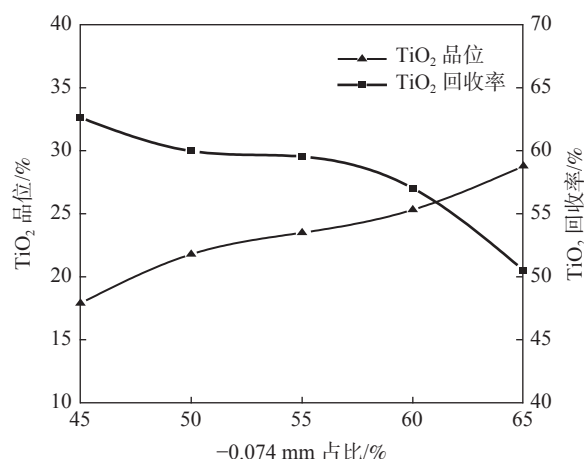


图2 磁选粗选磨矿细度条件试验结果
Fig. 2 Results of grinding fineness condition test in rough magnetic separation

由试验结果可知,随着磨矿细度增加,磁选精矿钛品位越高,但回收率随之降低,并且在磨矿细度-0.074 mm含量超过60%后,精矿回收率快速下降;选择-0.074 mm占60%为最佳磨矿细度。

2.1.2 磁选粗选磁场强度条件试验

在-0.074 mm占60%的磨矿细度下进行磁场强度条件试验,试验结果见图3。

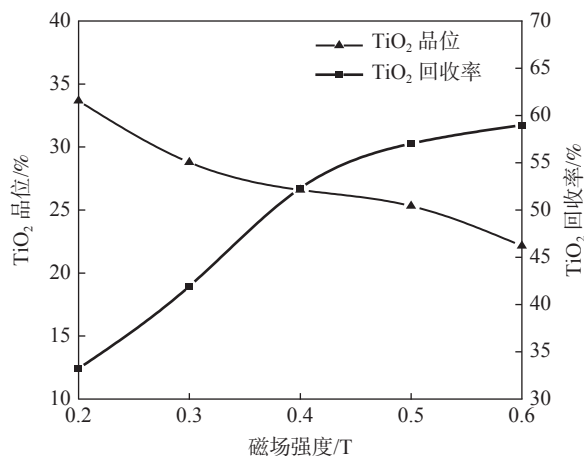


图3 粗选磁场强度条件试验结果
Fig. 3 Results of magnetic field intensity condition test in rough magnetic separation

由试验结果可知,随着磁场强度的升高,精矿 TiO_2 回收率升高,品位逐渐降低,综合考虑精矿品位和回收率,选用 0.5 T 为磁选粗选最佳磁场强度。

在磨矿细度为 -0.074 mm 占 60%, 磁场强度为 0.5 T 条件下,磁选粗选获得 TiO_2 品位 25.31%, 回收率 57.02% 的粗精矿。

2.2 磁选精选试验

为获得合格钛精矿产品,对粗精矿进行两段磁选精选试验,分别进行了粗精矿再磨矿细度和精选磁场强度试验,试验流程见图 4。

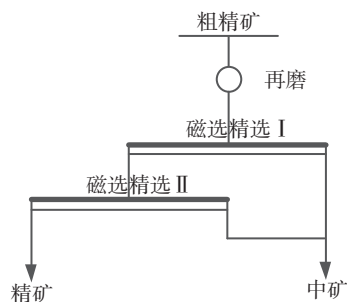


图 4 粗精矿再磨磁选精选试验流程

Fig. 4 Flow chart of regrinding-cleaner magnetic separation test

2.2.1 粗精矿再磨细度条件试验

粗精矿经再磨矿至不同细度后,进行磁选精选试验,精选 I 和 II 的磁场强度为 0.5 T,再磨细度条件试验结果见图 5。

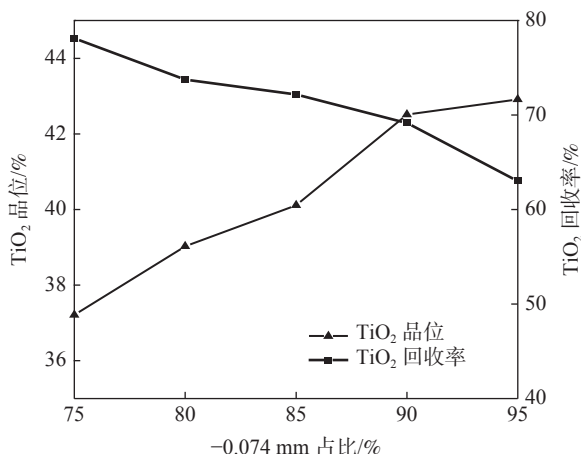


图 5 粗精矿再磨矿细度试验结果

Fig. 5 Results of regrinding fineness condition test in cleaner magnetic separation

随着再磨细度增加,精矿品位越高,回收率越低,当磨至 -0.074 mm 占 90% 后,精矿品位提高不明显,为获得较高品位精矿,粗精矿最佳再磨细度选取 -0.074 mm 占 90%。

2.2.2 粗精矿精选磁场强度条件试验

将粗精矿再磨至 -0.074 mm 占 90% 细度下进行精选磁场强度条件试验,精选 I 和精选 II 采用相同的磁场强度,结果见图 6,精选磁场强度越高,磁性产品的 TiO_2 品位越低,回收率越高;当精选 I,精选 II 磁场强度为 0.1 T 时,可取得 TiO_2 品位为 46.54%, 对粗精矿回收率为 42.60% (对原矿回收率为 24.29%) 的钛精矿。

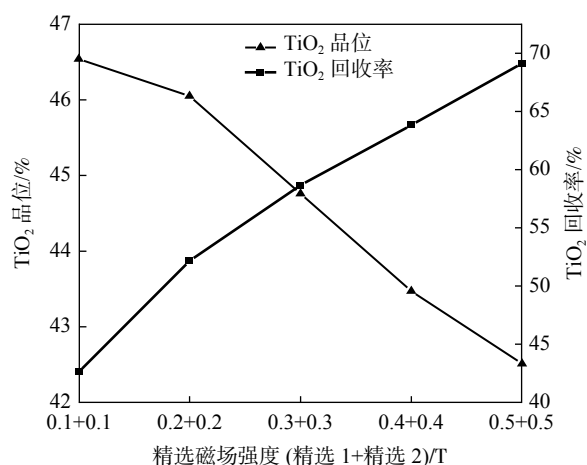


图 6 精选磁场强度试验结果

Fig. 6 Results of background magnetic field intensity test in cleaner magnetic separation

2.3 浮选精选试验

浮选试验给矿为粗选精矿,采用硫酸和水玻璃为调整剂, YTB 为自研浮钛铁矿捕收剂,对再磨矿至 -0.074 mm 占 90% 的粗精矿进行浮选精选试验,流程见图 7,并分别考察 YTB 和水玻璃用量对浮选效果的影响。

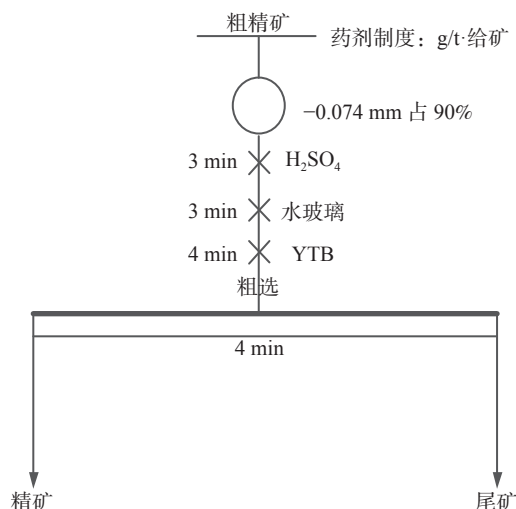


图 7 浮选条件试验流程

Fig. 7 Flow chart of flotation condition test

2.3.1 捕收剂 YTB 用量试验

粗精矿磨矿至 -0.074 mm 占90%,为确定合适的捕收剂 YTB 用量,在硫酸用量 $1\ 000\text{ g/t}$,水玻璃用量 600 g/t 条件下进行了 YTB 用量条件试验,试验结果见图8。

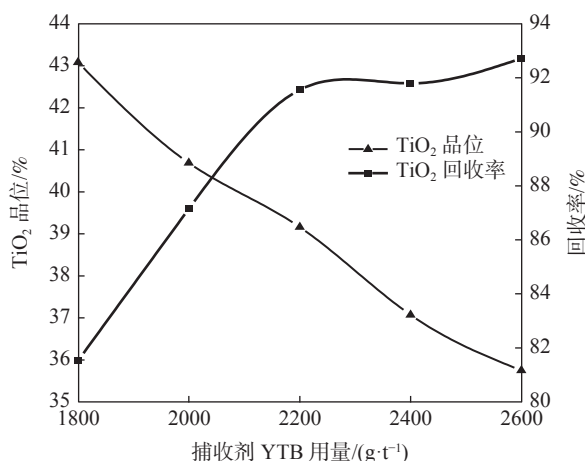


图8 捕收剂用量试验结果

Fig. 8 Results of dosage of YTB collector condition test

由图8可知,随着捕收剂用量增加,粗选钛精矿回收率增加,而品位一直下降,当 YTB 用量达到 $2\ 200\text{ g/t}$ 后,回收率增加较少,确定 YTB 最佳用量为 $2\ 200\text{ g/t}$ 。

2.3.2 水玻璃用量试验

水玻璃对脉石矿物有较好的抑制作用,同时有利于矿浆的分散,在粗精矿磨矿至 -0.074 mm 占

80%,硫酸用量为 $1\ 000\text{ g/t}$,YTB 用量 $2\ 200\text{ g/t}$ 的条件下进行水玻璃用量条件试验,试验结果见图9。

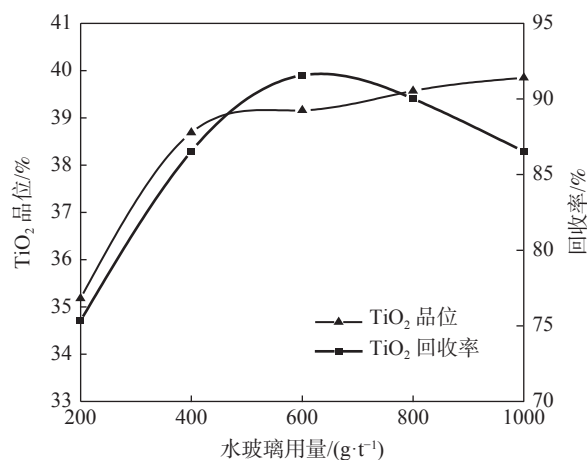


图9 水玻璃用量试验结果

Fig. 9 Results of dosage of water glass condition test

由图9可知,随着水玻璃用量增加,粗选钛精矿品位逐步增加,而回收率先增加后下降,当水玻璃用量达到 600 g/t 时,精矿 TiO₂ 回收率最大,继续增加水玻璃用量,精矿品位有小幅提升,但精矿回收率大幅下降。综合考虑,选择 600 g/t 为水玻璃最佳用量条件。

2.3.3 浮选闭路试验

在条件试验确定捕收剂和水玻璃用量的基础上开展实验室小型闭路试验,试验流程见图10,试验结果见表4。

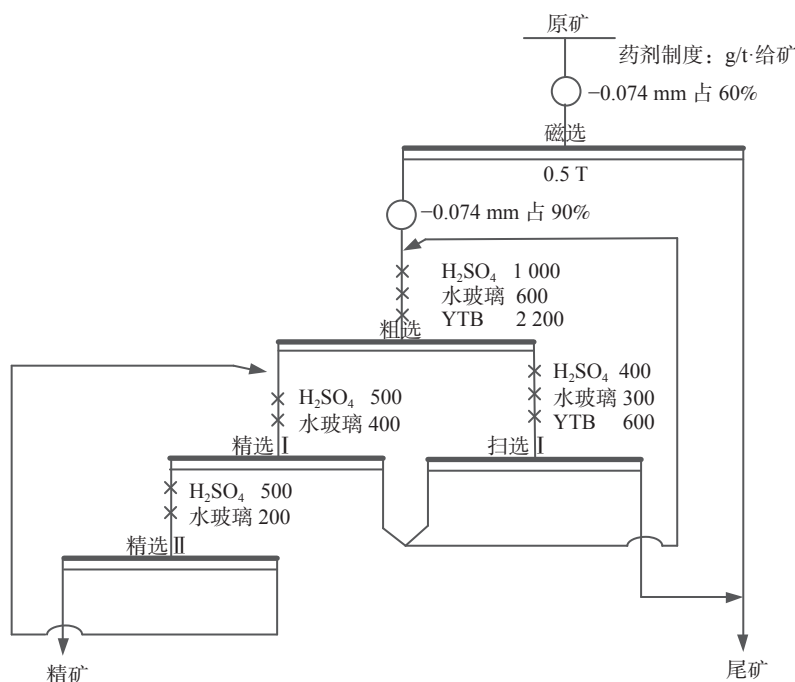


图10 全流程闭路试验流程

Fig. 10 Flow chart of closed-circuit flotation test

表4 全流程闭路试验结果
Table 4 Results of closed-circuit flotation test

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
精矿	8.74	47.41	50.32
尾矿	91.26	4.48	49.68
原矿	100.00	8.23	100.00

从表4试验结果可知,原矿粗磨后经磁选取得粗精矿,粗精矿再磨经一粗一扫两精选浮选闭路试验,可以获得产率8.74%,TiO₂品位47.41%,回收率50.32%的钛精矿。

3 结论

1) 原矿中有用矿物主要为钛铁矿,其次为少量的金红石,脉石矿物主要为角闪石、长石和绿泥石。钛的赋存状态查定表明,钛铁矿中钛占总钛65%左右,金红石中钛占原矿总钛的1%,硅酸盐矿物-榍石

中的钛占原矿总钛的4%~5%。以微细包裹体存在于角闪石、绿泥石、长石等脉石矿物中的钛占原矿总钛的30%左右,钛的理论回收率只有65.01%,钛铁矿单矿物分析结果表明,钛精矿的理论品位为TiO₂51.25%。

2) 角闪石中含钛铁矿或磁铁矿包裹体,这些包裹体包含于角闪石中,引起角闪石磁性增强,并与钛铁矿磁性相近或相同,影响磁选分离富集钛铁矿。

3) 在磨矿细度为-0.074 mm占60%,磁场强度为0.5 T条件下,磁选粗选获得TiO₂品位25.31%,回收率57.02%的粗精矿。

4) 对粗精矿采用两段磁选精选只能获得TiO₂品位46.54%,回收率24.29%的钛精矿;采用磨矿-磁选-粗精矿再磨-浮选一粗二精一扫工艺流程,可以获得TiO₂品位为47.41%、回收率50.32%的钛精矿。

参考文献

- [1] Dong Tiansong. Beneficiation process of titanium[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
(董天颂. 钛选矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.)
- [2] Chen Lulu. Current situation of vanadium-titanium magnetite resource utilization[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2015, 33(10): 37-39.
(陈露露. 我国钒钛磁铁矿资源利用现状[J]. 中国资源综合利用, 2015, 33(10): 37-39.)
- [3] Wang Hongbin, Meng Changchun. Study on the new recovery technology of coarse ilmenite in Panzhihua Midi titanium concentrator[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2011, 31(4): 51-52.
(王洪彬, 孟长春. 攀枝花密地选钛厂粗粒钛铁矿回收新工艺研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(4): 51-52.)
- [4] Yi Yunlai, Wei Qian, Liu Zhongrong. Experimental reearch on mineral processing of some complicated ilmenite ore from abroad[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34(1): 41-43.
(易运来, 魏茜, 刘忠荣. 国外某复杂钛铁矿的选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2014, 34(1): 41-43.)
- [5] Wang Fengyu, Yang Zhaojun, Luo Rongfei, et al. Recovery increase of -38 μm ultra fine ilmenite using ZQS high gradient magnetic separator[J]. Metal Mine, 2019, (8): 93-97.
(王丰雨, 杨招君, 罗荣飞, 等. 采用ZQS高梯度磁选机提高超细粒级(-38μm)钛铁矿回收效果[J]. 金属矿山, 2019, (8): 93-97.)
- [6] Wang Hongbin, Li Jin, Zhang Guohua. Efficient recovery of ilmenite from vanadium bearing titanomagnetite in Panxi area[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2020, 41(3): 23-29.
(王洪彬, 李金, 张国华. 攀西钒钛磁铁矿中钛铁矿高效回收工艺研究[J]. 钢铁钒钛, 2020, 41(3): 23-29.)
- [7] Liu Chao, Chen Zhiqiang, Lv Haozi, et al. Experimental study on beneficiation of a weathered V-Ti iron from abroad[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2021, 42(2): 117-124.
(刘超, 陈志强, 吕昊子, 等. 国外某风化型钒钛铁矿选矿试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2021, 42(2): 117-124.)
- [8] 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.
(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.)