

云南某钛铁矿选矿试验研究

胡渝杰, 叶国华*, 唐悦, 陶媛媛

(昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要:以云南某低品位钛铁矿为研究对象, 原矿含钛(TiO_2)仅为 5.67%, 大部分单独存在于钛铁矿中, 占矿石中 TiO_2 总量的 83.56%, 其余部分以类质同象的形式存在于磁铁矿和辉石中, 占 16.44%, 脉石矿物主要包括石英、绿泥石等。针对该钛铁矿开展选矿试验, 目的是通过选矿试验研究, 寻求合理的工艺流程, 对该资源的开发提供理论依据, 可以使钛矿资源得到充分利用。首先查明了该矿石的化学组分、矿物组成, 其次进行了磨矿细度、弱磁磁场强度、强磁磁场强度等工艺参数条件研究。在此基础上通过“磨矿-弱磁-强磁-强磁-分级摇床重选-中矿再磨再选”联合工艺流程, 最终可获得 TiO_2 品位为 45.06% 的钛精矿, 回收率(对原矿)为 53.73%; 指标较好, 实现了对目的矿物的有效回收。

关键词: 钛铁矿; 磁选; 重选; 品位; 回收率

中图分类号: TF823, TD924

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2021)04-0033-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.04.006

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 titaniferous iron ore in Yunnan

Hu Yujie, Ye Guohua*, Tang Yue, Tao Yuanyuan

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: A low-grade ilmenite ore in Yunnan province contains only 5.67% titanium (TiO_2), and most of Ti exists in ilmenite alone, occupying 83.56% of the total TiO_2 in the ore. The rest of 16.44% Ti exists in magnetite and pyroxene in a homogeneous form, and the vein minerals mainly include quartz and chlorite, etc. The beneficiation test for the ilmenite was carried out to seek a reasonable process flow and provide a theoretical basis for the development of this resource, which can make a sufficient use of titanium ore resources. Firstly, the chemical components and mineral compositions of the ore were identified. Then, the process parameters such as grinding fineness, weak magnetic field strength and strong magnetic field strength were studied. On this basis, the combined process of “grinding-weak magnetic separation-strong magnetic separation-strong magnetic separation-graded shaking table re-election-medium ore regrinding and re-election” was proposed. The titanium concentrate containing 45.06% TiO_2 can be finally obtained, with the recovery rate (for the original ore) of 53.73%. The proposed process realizes effective recovery of the target minerals with a well index.

Key words: ilmenite, magnetic separation, gravity separation, TiO_2 grade, recovery rate

收稿日期: 2021-05-19

作者简介: 胡渝杰(1997-), 男, 重庆长寿人, 硕士研究生, 主要研究方向: 钒钛提取, E-mail: lby1by@163.com; * 通讯作者: 叶国华(1981-), 男, 博士, 副教授, E-mail: ghye581@163.com。

0 引言

钛铁矿是自然界常见的含钛化合物,是冶炼钛金属的主要矿石之一,钛金属广泛用于军事、航天、航海、医药和建材等领域^[1]。我国钛铁矿的含量十分丰富,主要分布于攀西地区,其中的钛铁矿占全国总量的90%以上,其他地区偏少,具有贫矿多、富矿少、多金属共生的特点,也就是贫细杂,且大部分是共伴生矿,品位不高。目前钛铁矿进口量呈逐年上升趋势,对外依存度超过了60%。受当今国际政治经济环境的影响,未来相当长的时期内,国际钛铁矿资源贸易必然会受到影 响,因此加强我国钛矿资源的开发利用研究具有重要的战略意义^[2-6]。

目前钛铁矿的选矿工艺主要以强磁选-浮选流程应用较广泛。张元军^[7]、姚明燕^[8]等应用 SLon 系列磁选机在钛铁矿的磁选-浮选联合选别工艺上取得了成功,效果明显、指标稳定,钛精矿品位均在45%以上,回收率可达80%以上。但此类工艺对高浓度泥化物料松散不够,导致磁选效果并不理想,且会使难选低品位钛铁矿浮选时药剂种类增多、用量增大,工艺流程增长,因而分选成本较高。王洪彬^[9]等在钛铁矿预富集工艺研究中,比较了“强磁”“离心”“悬振”三种工艺对钛铁矿的预富集,认为“悬振”工艺可使微细粒级钛铁矿在浮选前被适宜地预富集,“悬振+浮选”流程指标优于其他工艺,浮选后最终可得到钛品位47.28%、回收率24.96%的精矿。高建安^[10]等经过大量试验研究发现,先采用悬振选矿机对微细粒级钛铁矿粗选,可以获得品位22.91%、回收率38.21%的钛粗精矿,再采用浮选提高精矿质量,最终可获得品位47.1%、回收率26.07%的钛精矿。该类工艺虽能达到钛品位47%以上,但步骤繁多复杂,且“悬振”预富集后回收率仅30%左右,浮选回收率仅20%左右。

鉴于此,笔者以云南某钛铁矿为矿样(原矿中含钛5.67%,属于低品位钛铁矿)。针对该矿石的性质特点,研究了磨矿细度,弱强磁场强度等各种工艺流程对钛精矿品位的影响程度,最终采用了磨矿-弱磁-强磁-强磁-分级摇床重选-中矿再磨再选联合工艺流程获得了合格的钛精矿,对该地区以外的钛铁矿选矿以及钒钛磁铁矿选钛具有借鉴意义。

1 试验材料及方法

1.1 原矿性质

原矿取自云南某钛铁矿选矿厂,矿样多为块样,

最大粒度约为600 mm左右,矿样表面呈黄绿色。肉眼观察,矿石呈灰绿色,风化表面呈黄绿色,多为粒径大小不等的球-椭球体状。镜下观察,钛铁矿、磁铁矿、磁赤铁矿均匀稀疏浸染状分布,构成矿石矿物的稀疏浸染状构造。混匀缩分后对原矿破碎至-2 mm进行粒度筛析、化学多元素分析、原矿矿物含量分析,其结果分别见表1~3。

表1 原矿破碎至-2 mm 粒级筛析结果
Table 1 Results of screen analysis of raw ore crushed to -2 mm of particle size

粒级/mm	产率/%	TiO ₂ 品位/%	回收率/%
2~1	28.49	5.48	27.79
1~0.45	21.16	5.75	21.65
0.45~0.2	18.25	7.68	24.95
0.2~0.074	7.79	8.02	11.12
0.074~0.037	9.6	6.36	10.86
0.037~0.019	5.05	2.12	1.90
0.019~0.010	2.84	1.52	0.77
0.010~0.005	0.94	1.32	0.22
-0.005	5.9	0.7	0.74
合计	100	5.67	100

表2 原矿主要化学成分
Table 2 Main chemical compositions of raw ore

%					
TiO ₂	Fe	Al ₂ O ₃	S	P	MgO
5.67	12.36	13.69	0.009	0.18	5.33
CaO	SiO ₂	V ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	As
9.10	45.87	0.093	1.48	0.73	<0.1

表3 原矿矿物含量分析
Table 3 Mineral content of raw ore

矿物	矿物含量/%	矿物中钛(TiO ₂)的分布率/%
钛铁矿	8.5	83.56
磁铁矿	2.1	5.55
脉石矿物	89.4	10.89

由表1可知,TiO₂金属主要分布在粗粒级中,细粒级中含量极少,从产率和品位来看,主要是集中在-2 mm至+0.037 mm,此外,小于0.037 mm粒级的矿物使用摇床重选的选别效果不好,所以,选别的主要目标在粗粒级矿物中。从表2、3结果可知,原矿中钛的品位为5.67%,硅、铝含量较高,属于酸性

矿石。含钛矿物主要有磁铁矿、钛铁矿及脉石矿物, 大部分都以独立形式赋存于存在于钛铁矿中, 少部分以类质同象形式于存在于磁铁矿和脉石矿物中, 脉石矿物主要以石英、绿泥石、辉石为主。

1.2 试验方法

由图 1 可知, 矿石中的钛铁矿部分呈它形粒状, 部分呈半自形板状, 或独立颗粒, 或与磁铁矿 (磁赤铁矿) 连生, 充填于斜长石搭成的格架之间, 钛铁矿与磁铁矿呈固溶体分离结构构造, 偶见为客晶, 叶片状于已蚀变为磁赤铁矿的磁铁矿中。由图 2 可知, 钛铁矿主要呈稀疏浸染状分布的半自形板状结构, 且其内部存在杂质, 会影响钛精矿的品位。

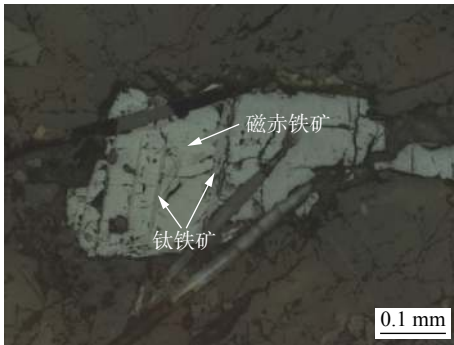


图 1 钛铁矿与磁赤铁矿紧密连生

Fig. 1 Microstructure of ilmenite closely associated with magnetite and hematite

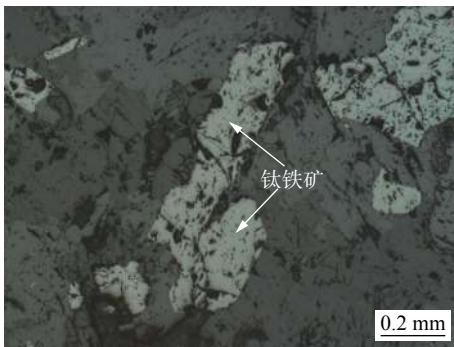


图 2 钛铁矿内部杂质

Fig. 2 Impurities in ilmenite

原矿工艺矿物学的研究表明: 钛铁矿与磁赤铁矿连生且原矿样为岩矿, 首先需要破碎、磨矿达到充分解离的效果。原矿中目的矿物为钛铁矿, 脉石矿物主要为石英和绿泥石, 主要非金属矿物有斜长石和辉石, 原矿含 TiO_2 品位为 5.67%, 钛铁矿矿物量为 8.5%, 要使矿样中的钛铁矿得到富集。首先要抛弃大量的脉石矿物, 其中除铁是关键, 同时在使用高梯度强磁机时为了防止磁场强度过高而导致的磁介质堵塞所以要在选钛预先除铁。根据上述矿

物间的比重差异和磁性差异, 采用和磁选工艺 (包括弱磁和强磁) 对矿样进行预处理, 最后使用重选进行若干段精选, 此此达到良好的指标和效果。

2 试验结果与讨论

2.1 弱磁场强条件试验研究

表 1、2 表明 TiO_2 除了存在于钛铁矿中还存在于磁铁矿中, 同时根据各矿物之间的磁性差异, 为了下一步强磁选的顺利进行, 因此需要使用弱磁选就进行预处理除铁。原矿中主要矿物为钛铁矿 (矿物量为 8.5%)、辉石 (矿物量为 48%)、斜长石 (矿物量为 30%)、磁铁矿 (矿物量为 2.1%) 等。根据原矿工艺矿物学研究表明, 在磨矿细度为 -0.074 mm 占 70% 时, 目的矿物的单体解离度较高为 95% 以上, 所以在进行弱磁选的场强条件时采用的磨矿细度为 -0.074 mm 70%, 试验结果见图 3、表 4。

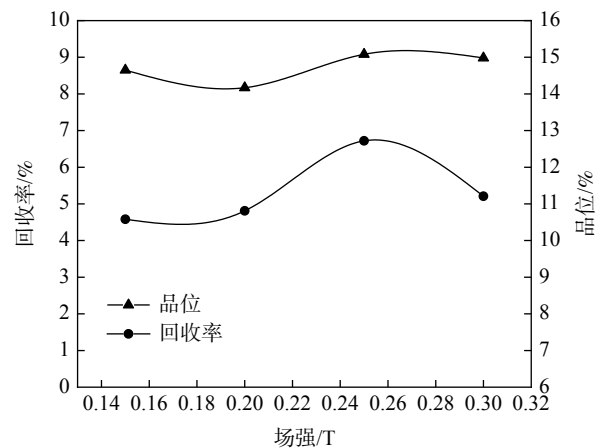


图 3 弱磁精矿试验结果

Fig. 3 Weak magnetic concentrate test results

表 4 弱磁场强条件试验结果

Table 4 Weak magnetic field strength test results

弱磁场强/T	产品名称	产率/%	TiO_2 品位/%	TiO_2 回收率/%
0.15	精矿	1.79	14.65	4.58
	尾矿	98.21	5.57	95.42
0.20	精矿	1.82	14.17	4.81
	尾矿	98.18	5.58	95.19
0.25	精矿	2.62	15.08	6.72
	尾矿	97.38	5.64	93.28
0.30	精矿	2.04	14.98	5.21
	尾矿	97.96	5.67	94.79

从图 3 和表 4 的结果来看: 随着磁场强度的提高, 弱磁选精矿产率增加, 在 0.25 T 的时候, 回收率

和品位最高,然后逐渐降低。在 0.25 T 的强度上产率最高,说明 TiO₂ 金属损失在弱磁精矿中越多。比较 0.2 T 和 0.15 T,在 0.2 T 的强度下,虽然尾矿的产率稍低一点,但是品位反而更高,说明有价金属含量高,所以从指标综合来看弱磁选的磁场强度为 0.2 T。

2.2 磁选磨矿细度条件试验探究

钛铁矿粒度很细,但其中的钛矿物大部分仍然呈细粒、微粒包裹体嵌布在脉石中或与脉石矿物毗邻形成紧密连晶结构,单体解离情况较少且原矿中钛铁矿的单体解离较差。另外,钛矿物与脉石矿物互相浸染、共生关系复杂。在进入磁选前进行细磨,使铁矿物单体解离更充分,有利于下一步的磁选,提高精矿品位与回收率。由此可见需要进行磨矿,采用磨矿预处理方式来使矿石中的各矿物单体解离。进行磨矿细度曲线试验,试验结果见图 4,表 5。

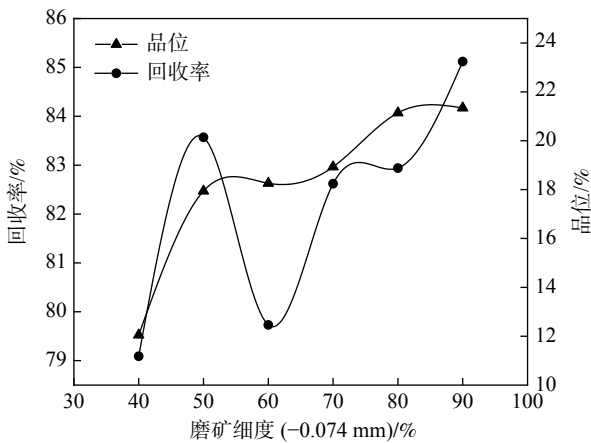


图 4 磁选磨矿细度试验

Fig. 4 Magnetic separation grinding fineness test results

表 5 磁选磨矿细度试验结果

Table 5 Magnetic separation grinding fineness test results

细度/%	产品/%	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
	强磁精矿	31.81	17.94	83.57
50	强磁尾矿	68.19	1.03	16.43
	给矿	100	6.83	100

从图 4 结果来看:细度在 40% 时,由于没有充分解离,所以回收率和回收率指标都不高,随着磨矿细度变细,解离更彻底,强磁精矿中 TiO₂ 品位逐渐增加。50% 的细度时,回收率为 83.57%,品位为 17.94%,相比 60% 时的品位有一定的下降,但 60% 的回收率相对来较低,随后的回收率又逐渐升高,在 90% 时达到最高点。细度为-200 目占 90% 时,

品位最高,但是粒度过细不利于最终的摇床精选试验的选别效果。根据经验,摇床重选对粒度小于 0.037 mm 的颗粒几乎选不出来。所以从生产实际和回收率综合考虑,磨矿细度选择为-200 目 50%。

2.3 强磁磁场强度条件试验

高梯度磁选段数由微细粒极钛铁矿的性质、最终精矿的品位要求等决定,一般二段开路磁选即可满足要求。对强磁选工艺的磁场强度条件进行试验研究,结果见图 5 和表 6。

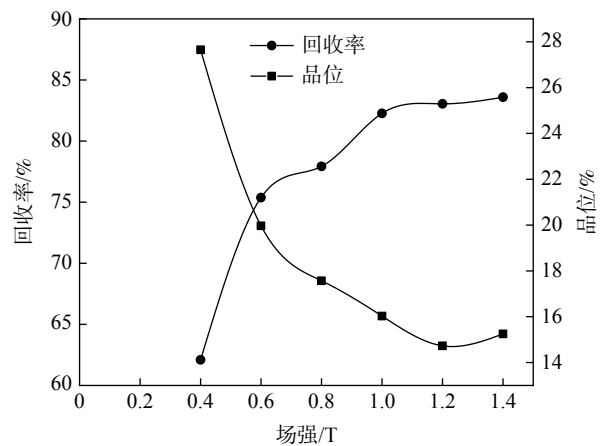


图 5 强磁磁场强度条件试验

Fig. 5 Strong magnetic field strength test results

表 6 强磁磁场强度条件试验结果

Table 6 Test results of strong magnetic field strength condition

强磁选场强/T	产品	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
	强磁精矿	31.73	16.03	82.27
1.0	强磁尾矿	68.27	0.95	17.73
	给矿	100	6.18	100

从图 5 结果来看:随着强磁选工艺的磁场强度提高,强磁钛粗精矿 TiO₂ 品位逐渐降低,在 0.4 T 时品位最高,但回收率过低。随着磁场强度的提升,回收率逐渐增加;当磁场强度为 1.0 T 时,回收率相对较高,为 82.27%。综合考虑,故强磁选的磁场强度选择 1.0 T。

上面的试验探究确立了单流程如弱磁磁场强度、磨矿细度、强磁磁场强度。采用以上弱-强磁抛尾工艺预处理流程进行试验探究,可得到钛粗精矿品位为 17.94%,回收率为 83.57%,其指标较好,所以确定采用该工艺进行原矿预处理。

2.4 原矿两次强磁粗选抛尾验证矿试验研究

由于第一段强磁粗选精矿难免会有杂质会被磁选机吸附住一起进入粗精矿里,为了保险起见也是

为了后续精选流程的顺利进行, 所以决定使用两次强磁粗选进行抛尾, 场强在强磁场强条件试验中已经确定, 两次粗选都用 1.0 T。根据经验这难免会有指标的下降, 所以从原矿开始进行, 结果见表 7。

表 7 两段强磁粗选抛尾试验结果

Table 7 Two-stage strong magnetic roughing tailing test results

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
弱磁精矿	1.9	14.16	4.71
钛粗精矿	28.69	15.81	79.59
中矿	6.16	5.18	5.6
尾矿	63.25	0.91	10.1
给矿	100	5.7	100

从表 7 可知, 最终钛粗精矿可以富集到 15.81%, 回收率达 79.59%, 较一段强磁粗选指标稍有下降, 但在可接受的范围内, 同时对以后的摇床精选程有益。

通过以上所有流程, 确定前期的预处理流程工艺为: 磨矿-弱磁除铁-两段强磁粗选抛尾。

2.5 摇床精选试验

通常情况下, 摇床精选对矿的粒度有要求, 直接摇床精选效果不好, 所以摇床前需进行分级。粗精矿分级后摇床重选, 摇床出来的中矿再磨, 再选试验结果见表 8。

表 8 强磁粗精矿进行分摇床精选的试验结果

Table 8 Experimental results of sub-shaker selection of strong magnetic coarse concentrate

产品名称	产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 回收率/%
精矿合计	7.02	45.14	55.54
中矿合计	16.23	7.34	20.98
尾矿	5.64	4.29	4.25
强磁粗精矿	28.89	15.92	80.77

各类产品均为合计计算且都是针对原矿来计算, 不是针对单个流程。通过表 8 可知, 摇床精选得到最终的钛精矿合计品位为 45.14%, 回收率 55.54% (对于整个原矿而言)。

2.6 全流程工艺试验

分流程条件试验目前为止, 各段流程指标较好, 达到预期要求。通过上述试验研究, 该矿采用“磨矿-弱磁-强磁-强磁-分级摇床重选-中矿再磨再选”联合工艺, 精矿品位及回收率相对较高, 从原矿开始

采用该工艺进行验证试验及全工艺试验研究, 具体流程和结果见图 6, 表 9。

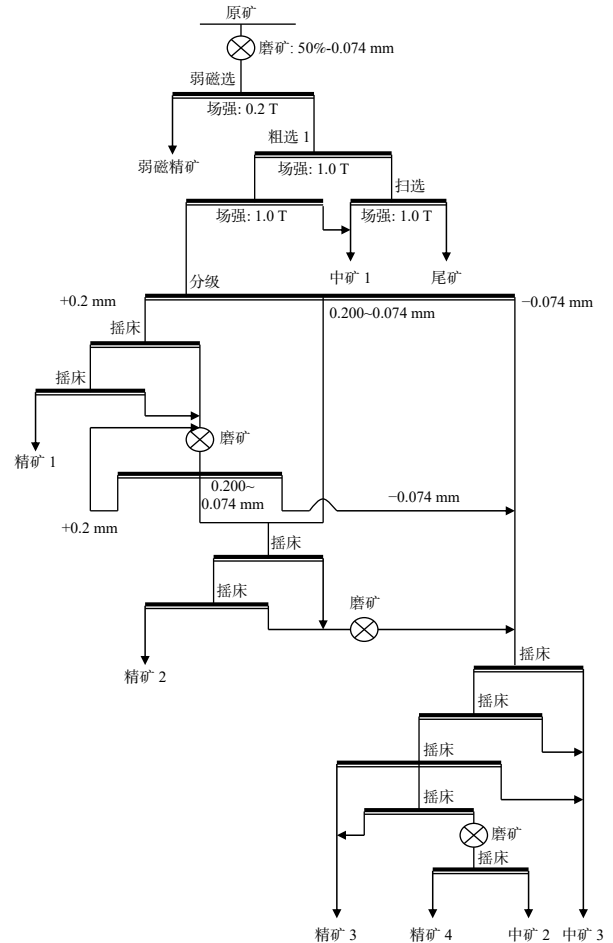


图 6 全流程工艺试验

Fig. 6 Full-flow process testing

表 9 全流程工艺结果

Table 9 Full process test results

样品名称	产率	TiO ₂ 品位	TiO ₂ 回收率	%
精矿合计	8.63	45.06	58.43	
中矿合计	27.77	6.24	30.57	
尾矿	63.6	0.98	11.00	
原矿	100	5.67	100	

通过表 9 可知, 最终的钛精矿合计品位可以达到 45.06%, 回收率达 53.73%。与单流程的条件试验研究指标相符。所以根据此流程进行作业是可行的。

3 产品质量检测

肉眼观察, 钛铁矿精矿产品呈黑色, 半金属光泽, 为粒度-1 mm 的破碎砂粒状。少量颗粒具强磁性。

对获得的钛精矿进行化学多元素分析,结果见表10。钛精矿中 TiO₂ 品位为 45.06%,钛精矿里含杂质硅、

铝、钙、镁含量较低,有害元素磷、硫、砷含量较低符合冶炼要求。

表 10 钛精矿化学多元素分析结果
Table 10 Chemical compositions of titanium concentrate

Fe	Al ₂ O ₃	S	MgO	CaO	P	SiO ₂	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	As
35.97	1.01	0.009 6	1.85	3.05	0.014	4.08	45.06	0.049	0.049	<0.10

4 结论

1)原矿含钛(TiO₂)品位很低,仅有 5.67%,有两种赋存状态:一种以独立矿物的形式赋存在钛铁矿中,占矿石中钛(TiO₂)的 83.56%;一种以类质同象的形式赋存在脉石矿物及磁铁矿中,占矿石中钛(TiO₂)的 16.44%,但是脉石矿物辉石里的钛没有选别的价值,部分磁铁矿与钛铁矿内部还含有杂质。

2)根据前期工艺矿物学的研究基础,采用磨矿工艺充分解离目的矿物,再采用弱磁除铁,两段强磁抛尾的工艺来进行与预处理,最后进行分级摇床中选,中矿再磨再选来进行多段精选来选别 TiO₂。

3)原矿通过“磨矿-弱磁-强磁-强磁-分级摇床重选-中矿再磨再选”联合工艺,此流程不仅经济合理而且环保。最后得到钛精矿 TiO₂ 品位为 45.06%,回收率(对原矿)为 53.73%;指标较好。

参考文献

- [1] El-Sadek M H, Morsi M B, El-Barawy K, *et al.* Mechanochemical synthesis of Fe-TiC composite from Egyptian ilmenite ore[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 120: 39-42.
- [2] Tao Tao, Li Peng, Hu Huiping, *et al.* Synthesis of titanium-based nanostructures from ilmenite[J]. *Journal of Central South University*, 2016, 47(2): 401-407.
(陶涛,李鹏,胡慧萍,等.利用钛铁矿制备纳米钛基功能材料[J].*中南大学学报(自然科学版)*, 2016, 47(2): 401-407.)
- [3] 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, 42(2): 205-212.
(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, 42(2): 205-212.)
- [4] Liu Jun. Development status and future of titanium dioxide[J]. *Modern Salt and Chemical Industry*, 2019, 46(4): 3-4.
(刘军.钛白粉发展现状与未来[J].*现代盐化工*, 2019, 46(4): 3-4.)
- [5] Bian Huan, Cao Xiaojing. Reaserarch status of ilmenite in minerals processing[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2018, (3): 3-5, 29.
(卞煊,曹小晶.钛铁矿矿物加工研究现状[J].*四川有色金属*, 2018, (3): 3-5, 29.)
- [6] Li Zheng, Chen Congxi, Ge Zhenhua, *et al.* Discussion on the development and utilization of titanium resources in China[J]. *Homeland Resources Intelligence*, 2020, (10): 75-80.
(李政,陈从喜,葛振华,等.中国钛矿资源开发利用形势探讨[J].*国土资源情报*, 2020, (10): 75-80.)
- [7] Zhang Yuanjun, Xiong Dahe. Experimental study on the sorting of ultrafine-grained ilmenite by SLon magnetic separator[J]. *Journal of Jiangxi University of Technology*, 2009, 30(5): 18-20.
(张元军,熊大和. SLon磁选机分选超细粒级钛铁矿的试验研究[J].*江西理工大学学报*, 2009, 30(5): 18-20.)
- [8] Yao Mingyan, Bai Limei, Jiang Jianguo. Industrial test of SLon vertical ring strong magnet machine in ilmenite mine in Montenegro[J]. *Modern Mining*, 2011, 27(6): 45-46.
(姚明燕,白丽梅,江建国. SLon立环强磁机在黑山钛铁矿的工业试验[J].*现代矿业*, 2011, 27(6): 45-46.)
- [9] Wang Hongbin, Li Lijia, Shen Shuaiping. Pre-enrichment process study of micron-sized ilmenite[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2016, 36(5): 37-40.
(王洪彬,李丽匣,申帅平.微细粒级钛铁矿预富集工艺研究[J].*矿冶工程*, 2016, 36(5): 37-40.)
- [10] Gao Jianan, Zhang Yutian, Ji Cuicui. New process research on recovery of micro-fine grained ilmenite from Pan steel titanium processing plant[J]. *Mining Machinery*, 2016, (11): 58-62.
(高建安,张雨田,纪翠翠.攀钢选钛厂微细粒级钛铁矿回收新工艺研究[J].*矿山机械*, 2016, (11): 58-62.)