

铁钛平行分选对微细粒钛铁矿强磁选的影响

郭小飞^{1,2}, 袁致涛¹, 申帅平¹, 李丽匣¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 辽宁科技大学 矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘 要: 采用“铁钛平行分选”工艺对高压辊磨超细碎的-3.2 mm 钒钛磁铁矿进行选别实验,研究了强磁选对钛铁矿的分选效果.当磨矿细度为-74 μm 粒级占80%时,辊压产品选钛给矿的单体解离度较颚破产品高0.58%,辊压产品-19 μm +11 μm 粒级中铁氧化物的单体含量较颚破产品低1.38%.与颚破产品采用“阶段磨矿-阶段分选”工艺相比,“铁钛平行分选”得到的强磁精矿中 TiO_2 的回收率提高5.11%, -19 μm 粒级的含量降低2.62%.不同粒级钛铁矿在分选空间中的受力分析表明,当粒度降低时,钛铁矿所受的比阻力急剧增加,而比磁力却有所降低,这增加了钛铁矿颗粒被磁场捕获的难度.“铁钛平行分选”能够降低选别过程中微细粒钛铁矿的新生成量,改善钛铁矿的强磁选别效果.

关 键 词: 铁钛平行分选;微细粒钛铁矿;强磁选;回收率;磁特性

中图分类号: TD 921

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2016)02-0253-06

Effect of Parallel Separation of Fe and Ti on High-Intensity Magnetic Separation of Micro-fine Ilmenite

GUO Xiao-fei^{1,2}, YUAN Zhi-tao¹, SHEN Shuai-ping¹, LI Li-xia¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China. Corresponding author: GUO Xiao-fei, E-mail: gxf0957@hotmail.com)

Abstract: The separation test of -3.2 mm V-Ti magnetite ore ultra-finely crushed by HPGR was carried out with the process of parallel separation of Fe and Ti. The effect of high-intensity magnetic separation on ilmenite was investigated. When the crushed ores with grind fineness of -74 μm accounted for 80%, the liberation degree of the product crushed by HPGR increased by 0.58% and the number of iron oxide in the ores with fineness of -19 μm +11 μm decreased by 1.38%, compared with that by Jaw crusher. The TiO_2 recovery could increase by 5.11% and the content of the product with -19 μm could reduce by 2.62% in high-intensity magnetic concentrate, compared with the product crushed by Jaw crusher and separated by the process of stage-grinding and stage-separating. The force analysis on ilmenite with different sizes in the separation space show that, as the particle size decreases gradually, the specific resistance on ilmenite increases sharply and the specific magnetic force reduces, so ilmenite particle is more difficult to be captured by magnetic field. The process of parallel separation of Fe and Ti can reduce the amount of newly formed micro-fine ilmenite in the separation, improving the performance of high-intensity magnetic separation of ilmenite.

Key words: parallel separation of Fe and Ti; micro-fine ilmenite; high-intensity magnetic separation; recovery; magnetic property

攀西钒钛磁铁矿是我国典型的伴生型铁矿石,目前主要采用“阶段磨矿-阶段磁选选铁、尾

矿再磨-强磁-脱硫-浮选钛铁矿”的工艺对矿石中的钛磁铁矿和钛铁矿进行回收.工艺矿物学

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(2012AA062301); 钒钛资源综合利用国家重点实验室开放课题.

作者简介: 郭小飞(1985-),男,河南洛阳人,东北大学博士研究生,辽宁科技大学讲师; 袁致涛(1971-),男,湖北大冶人,东北大学教授.

研究表明,攀西地区的钛铁矿主要以中粗粒嵌布,一般粒度为 0.2 ~ 0.8 mm,粒度为 -0.2 mm 的钛铁矿累积分布率为 92.03%,粒度为 -0.5 mm 的脉石矿物的累积分布率达 90.43%。钛铁矿与脉石矿物实现单体解离的过程,经过了三段或以上的磨矿作业,产生了大量的微细粒产品,而微细粒钛铁矿的回收一直是选矿领域的难题(-19 μm 粒级钛铁矿的回收难度更大)^[1-3]。目前更多的研究集中于如何解决微细粒级钛铁矿的回收问题,对于如何降低微细粒级钛铁矿新生成量却鲜有报道。

作者在研究攀西钒钛磁铁矿高压辊磨超细碎矿石的基础上^[4-6],进一步研究了“铁钛平行分选”对钛铁矿强磁选的影响。铁钛平行分选是指使用弱磁场磁选机对超细碎后的钒钛磁铁矿直接进行选别,粗精矿作为选铁原料进行选铁,而弱磁选尾矿和选铁后的最终尾矿混合进行选钛的工艺流程。本文测试了不同分选工艺中选钛给矿的单体解离度,详细考察了强磁选过程中钛精矿 TiO₂ 品位和回收率以及各产物中 -19 μm 粒级含量的变化规律,分析了不同粒级钛铁矿在强磁场中的磁选行为,并在相同的实验条件下与现有工艺的选别指标进行对比,为进一步提高钛铁矿的回收率提供了新的研究思路。

1 实 验

1.1 实验原料

实验原矿为攀枝花密地选矿厂的最终破碎产品($d_{95}=15.5\text{ mm}$)。利用 CLM-25-10 型实验室高压辊磨机进行超细碎,采用控制粒度为 3.2 mm 的闭路破碎工艺。用于对比实验的矿样利用 XFC-150×200 颚式破碎机闭路破碎至 -3.2 mm。高压辊磨机粉碎产品(简称辊压产品)的 P_{80} 为 1.02 mm,颚式破碎机粉碎产品(简称颚破产品)的 P_{80} 为 1.45 mm。

本文实验的矿样为“铁钛平行分选”中选铁的最终尾矿和粗粒磁选尾矿的混合矿。为了进行对比实验,采用选矿厂的“阶段磨矿-阶段选别”工艺对颚式破碎产品进行分选实验,选铁尾矿作为选钛给矿。

1.2 实验方法

钛铁矿的强磁选实验采用 Slon-500 立环脉动高梯度磁选机进行,背景磁场强度根据励磁电流进行调整。实验采用自动矿物分析仪(mineral liberation analyser,MLA)对实验中重要矿物的粒

度和解离度进行测定。比磁化系数测定设备为 Modl-7404 振动样品磁强计。

2 结果与讨论

铁钛平行分选的选择给矿 TiO₂ 品位为 11.47%,粒度筛析如表 1 所示。结果表明,-74 μm 粒级的含量占 44.5%,-19 μm 粒级的含量占 2.02%,其中 -154 μm 粒级中 TiO₂ 累计分布率为 80.48%。

表 1 选钛给矿粒度筛析结果			
Table 1 Sieve analysis of ore for separating ilmenite			
粒级/μm	累计产率/%	TiO ₂ 品位/%	TiO ₂ 累计分布率/%
+500	100.00	2.11	100.00
-500+200	94.05	5.33	98.92
-200+154	77.87	11.71	91.42
-154+100	67.14	12.62	80.48
-100+74	56.02	16.37	68.29
-74+38	44.50	14.51	51.89
-38+19	12.68	11.66	11.74
-19	2.02	5.29	0.93
合计		11.50	

2.1 铁钛平行分选中的钛铁矿强磁选实验

2.1.1 磨矿细度对强磁选钛结果的影响

将选钛给矿球磨至 -74 μm 粒级占 45% ~ 90% 的不同细度,使用弱磁选机(磁场强度为 95.4 kA/m)回收磨细后矿石中解离出的强磁性矿物,弱磁选的精矿返回选铁流程中进行再选,弱磁选尾矿进行强磁选钛实验。背景磁感应强度为 0.3 T 时,不同磨矿细度对强磁精矿 TiO₂ 品位和回收率的影响如图 1 所示。

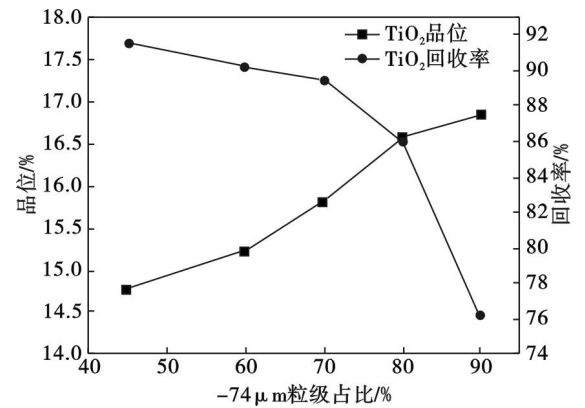


图 1 磨矿细度对强磁精矿 TiO₂ 品位和回收率的影响
Fig. 1 Effect of grinding fineness on TiO₂ grade and recovery of the titanium concentrate

结果表明,随着 -74 μm 粒级的含量由 45%

上升到 90% ,强磁精矿 TiO_2 品位由 14. 78% 上升到 16. 85% ,回收率由 91. 6% 降低至 75. 86% . 当 $-74\text{ }\mu\text{m}$ 粒级的含量占 80% 时,强磁精矿 TiO_2 品位达到 16. 58% ,回收率为 86. 02% ,尾矿 TiO_2 品位为 3. 99% . 当磨矿细度继续增大时,精矿中 TiO_2 回收率迅速下降,因此确定钛铁矿选别的适宜磨矿细度为 $-74\text{ }\mu\text{m}$ 粒级占 80% .

2. 1. 2 背景磁感应强度对强磁选钛结果的影响

在磨矿细度为 $-74\text{ }\mu\text{m}$ 粒级占 80% 的情况下,其他条件不变,不同背景磁感应强度对强磁精矿 TiO_2 品位和回收率的影响结果如图 2 所示^[7-8]. 结果表明,随着背景磁感应强度由 0. 2 T 增加到 0. 5 T,强磁精矿中 TiO_2 的回收率由 57. 76% 迅速上升到 93. 49% . 当背景磁感应强度为 0. 3 T 时,精矿 TiO_2 品位达 16. 60% ,回收率为 85. 95% ,尾矿 TiO_2 品位为 4. 14% . 当背景磁感应强度继续升高时,精矿中 TiO_2 品位迅速下降,因此确定强磁选的适宜背景磁感应强度为 0. 3 T.

2. 2 阶段磨矿 - 阶段选别中的钛铁矿强磁选实验

颚破产品在经过阶段磨矿 - 阶段选别工艺分选后,对其选铁尾矿进行分析, $-74\text{ }\mu\text{m}$ 粒级占约 53. 5% . 将尾矿球磨至 $-74\text{ }\mu\text{m}$ 粒级占 80% 时进行选钛实验.

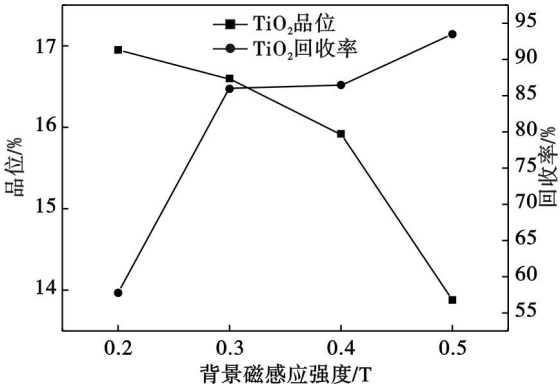


图 2 背景磁感应强度对强磁精矿 TiO_2 品位和回收率的影响

Fig. 2 Effect of intensity of back-ground magnetic field on TiO_2 grade and recovery of the titanium concentrate

对球磨后的两种选钛给矿进行了 MLA 单体解离度分析^[9],其中 $-19+11\text{ }\mu\text{m}$ 的分析结果如图 3 所示. 结果表明,在 $-74\text{ }\mu\text{m}$ 粒级占 80% 的情况下,辊压产品的单体解离度为 91. 25% ,颚破产品为 90. 72% . 辊压产品 $-19+11\text{ }\mu\text{m}$ 粒级中铁氧化物的单体含量为 90. 66% ,颚破产品为 91. 91% . 辊压产品选钛给矿的单体解离度较颚破产品高 0. 58% ,但辊压产品中 $-19+11\text{ }\mu\text{m}$ 粒级中铁氧化物的单体含量较颚破产品低 1. 38% .

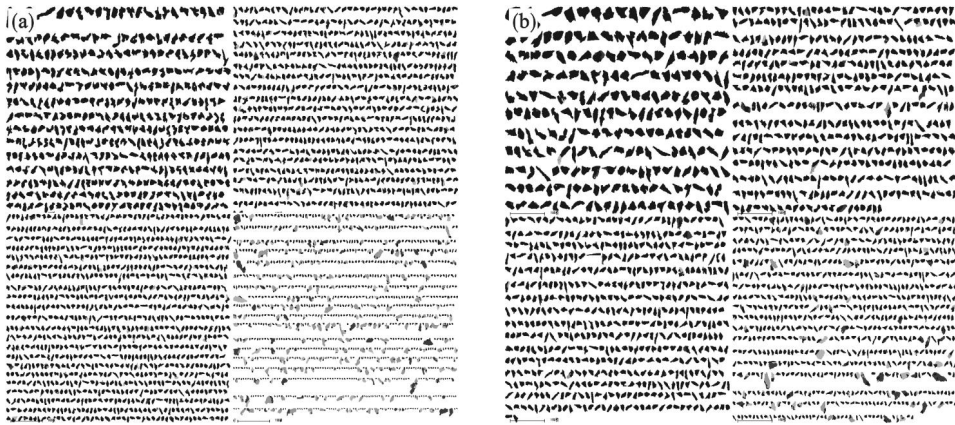


图 3 不同产品中 $-19+11\text{ }\mu\text{m}$ 粒级 MLA 单体解离度分析

Fig. 3 Liberation degree analysis results of $-19+11\text{ }\mu\text{m}$ in different products by MLA

(a) — 辊压产品; (b) — 颚破产品.

对颚破产品进行阶段磨矿 - 阶段选别实验,其中强磁选钛(背景磁感应强度为 0. 3 T)实验结果如表 2 所示. 结果表明,在选别条件相同的情况下,与辊压产品铁钛平行分选获得的强磁精矿相比,颚破产品阶段磨矿 - 阶段分选获得的强磁精矿中 TiO_2 品位变化不大,但 TiO_2 回收率为 81. 77% ,降低了 5. 11% .

表 2 颚破产品阶段磨矿 - 阶段选别中的强磁选钛实验结果
Table 2 Separation results of ilmenite by HGMS in the process of stage-grinding and stage-separating for product crushed by jaw crusher

产品	产率/%	TiO_2 品位/%	TiO_2 回收率/%
钛粗精矿	58. 17	16. 39	81. 77
尾矿	41. 83	5. 08	18. 23
给矿	100. 00	11. 66	100. 00

对两种分选工艺得到的强磁精矿进行了粒度分析和 TiO₂ 分布率的检测,结果如表 3 所示.

表 3 不同分选工艺中强磁精矿粒度分析结果

Table 3 Size sieve analysis results of high-intensity magnetic concentrate by different processes												%
粒级/μm	铁钛平行分选						阶段磨矿－阶段分选					
	精矿中 TiO ₂			尾矿中 TiO ₂			精矿中 TiO ₂			尾矿中 TiO ₂		
	产率	品位	分布率	产率	品位	分布率	产率	品位	分布率	产率	品位	分布率
+154	1.31	12.49	0.98	0.56	2.05	0.28	0.95	12.55	0.72	0.30	1.99	0.12
－154+74	19.35	16.35	19.02	16.33	1.86	7.43	18.77	16.60	18.92	15.13	2.18	6.52
－74+38	41.24	17.46	43.30	35.72	3.70	32.31	39.60	17.22	41.40	32.83	4.22	27.38
－38+19	14.67	16.25	14.33	20.89	4.38	22.37	14.63	16.26	14.44	20.53	5.26	21.34
－19	23.43	15.88	22.37	26.50	5.82	37.71	26.05	15.50	24.52	31.21	7.24	44.66
累计	100.00	16.63	100.00	100.00	4.09	100.00	100.00	16.47	100.00	100.00	5.06	100.00

由表 3 可以看出,铁钛平行分选中强磁精矿的 -19 μm 粒级的产率为 23.43%,TiO₂ 分布率为 22.37%;阶段磨选中强磁精矿的 -19 μm 粒级的产率为 26.05%,TiO₂ 分布率为 24.52%,分别较前者高 2.62% 和 2.15%.铁钛平行分选中强磁尾矿的 -19 μm 的产率和 TiO₂ 分布率分别较后者低 4.71% 和 6.95%.

出现这种结果的主要原因在于阶段磨选流程中的部分钛铁矿在强磁选之前经过了三次磨矿作业,产生了更多的微细粒钛铁矿,增加了强磁选的难度,从而使部分微细粒钛铁矿进入强磁尾矿.

2.3 钛铁矿在高梯度磁场中的磁选行为分析

微细粒钛铁矿在高梯度磁选中的磁场特性变化,是铁钛平行分选工艺中强磁选钛精矿的 TiO₂ 回收率发生变化的根本原因.

在高梯度强磁选的过程中,使弱磁性矿粒吸附于聚磁介质表面而非磁性矿粒分离的主要条件是磁力大于机械竞争力^[10].矿浆进入磁选区域后,单位质量矿石颗粒主要受比磁力、比阻力(与比磁力方向相反)、有效重力等的的作用,具有弱磁性的钛铁矿颗粒被磁力吸引并被聚磁介质吸附(如图 4 所示),随着聚磁介质的移动被携带至精矿区.下面以不同粒度的钛铁矿球形颗粒为例,计算它们所受到的力.本文的研究设定以下参数,分选区聚磁介质间距 $l=0.002\text{ m}$,分选区高度 $h=0.3\text{ m}$,钛铁矿的密度 $\rho=4.3\times10^3\text{ kg/m}^3$.

1) 比磁力:在磁选过程中,比磁力为单位质量矿物颗粒所受到的磁力,即

$$F_m=\mu_0\chi_0H_0\text{grad}H_0.$$
 (1)

式中: μ_0 为真空磁导率, $\mu_0=4\pi\times10^{-7}\text{ H/m}$; χ_0 为钛铁矿比磁化率, m^3/kg ; $H_0\text{grad}H_0$ 为磁场力, A^2/m^3 .

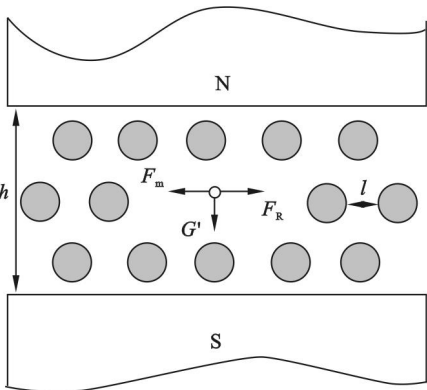


图 4 矿物颗粒在磁场中的受力分析
Fig. 4 Force analysis of particles in magnetic field

2) 比阻力:单位质量钛铁矿沿磁力方向运动时所受到的阻力为比阻力,即

$$F_R=\frac{3\pi d v \eta}{m}=\frac{3\pi d v \eta}{\frac{\pi}{6}d^3\rho}=\frac{18 v \eta}{d^2\rho}.$$
 (2)

式中: d 为颗粒的直径, m ; η 为矿浆黏滞系数,取 $1.25\times10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ (矿浆浓度为 20%); v 为钛铁矿进入分选作业区的速度,取 0.5 m/s .

3) 有效重力:

$$G'=g\frac{\rho-\rho_{\text{水}}}{\rho}=g\frac{\rho-1}{\rho}.$$
 (3)

式中: $\rho_{\text{水}}$ 为水的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 .

假设钛铁矿的运动为等加速度运动,则

$$l=at^2,$$
 (4)

$$t=h/v.$$
 (5)

式中 a 为钛铁矿沿磁力线方向运动的加速度, m/s^2 .

使单位质量钛铁矿颗粒沿磁力线方向运动,具有速度 v 时所需要的合力:

$$F_{\tau}=a=l v^2/h^2.$$
 (6)

当矿粒朝聚磁介质运动时,比磁力 F_m 与比阻力 F_R 方向相反,合力 F_T 朝向磁介质.有效重力 G' 的方向与比磁力和比阻力方向相互垂直.因此,弱磁性钛铁矿颗粒能够被高梯度强磁场捕获所需的比磁力大小 F_m 应满足:

$$F_m \geq F_R + F_T = \frac{lv}{h} \left(\frac{v}{h} + \frac{18\mu}{d^2\rho} \right). \quad (7)$$

为分析不同粒级钛铁矿在强磁选过程中的磁选行为,在磁感应强度为 0.3 T 时,测试了不同粒级钛铁矿的比磁化系数,结果如图 5 所示.

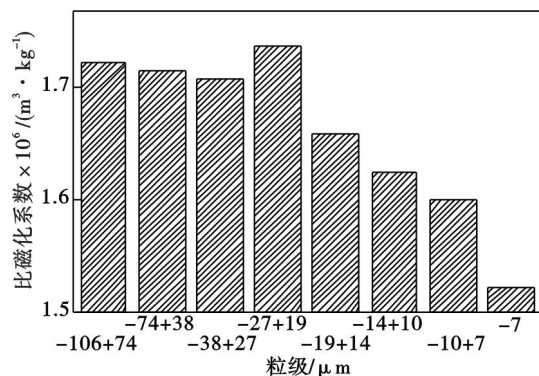


图5 不同粒级钛铁矿的比磁化系数

Fig. 5 Specific susceptibility of ilmenite with different size fractions

由图 5 可以看出,随着钛铁矿粒度的减小,各粒级钛铁矿的比磁化系数逐渐变小,最大为 -27 + 19 μm 粒级的 $1.735 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$,最小为 -7 μm 粒级的 $1.522 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$. 当矿石颗粒小于 19 μm 时,比磁化系数的降低更加迅速.

随着矿物颗粒的减小,矿浆对矿物颗粒产生的比阻力增大,弱磁性矿物颗粒被磁场捕获所需的比磁力也增大.由式(1)可知,比磁力大小取决于矿物颗粒的比磁化系数和磁选机的磁场特性.利用以上公式,并结合图 5 中的检测结果,计算不同粒度钛铁矿颗粒在分选过程中所受的比阻力和比磁力,结果如图 6 所示.

由图 6 可以看出,不同粒度钛铁矿所受比阻力的变化规律可以分为三个阶段:由 106 μm 减小到 38 μm 时的缓慢增加阶段,由 38 μm 减小到 19 μm 时的迅速增加阶段和由 19 μm 减小到 7 μm 时的急剧增加阶段.当钛铁矿粒度由 106 μm 减小到 7 μm 时,钛铁矿所受到的比阻力增大了 661 倍,回收钛铁矿所需的比磁力却降低了 12.3%.由式(7)可知,在磁选条件一定的情况下,当粒度降低时,钛铁矿被磁场捕获的难度急剧增加.

上述分析进一步说明了微细粒钛铁矿含量的增加将导致强磁选难度的增加,尤其是 -19 μm 粒级含量的增加将会导致强磁选过程中钛铁矿回收率的降低.

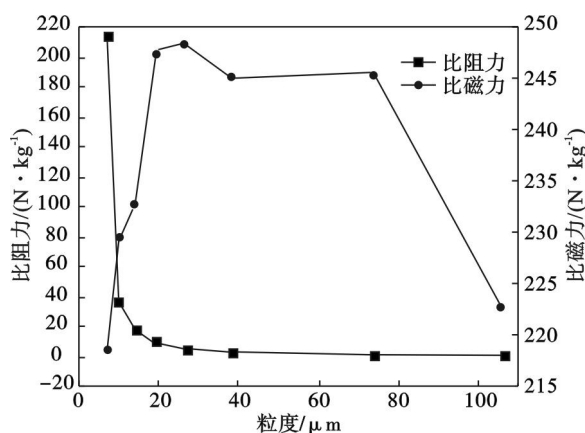


图6 不同粒级钛铁矿在强磁场中的受力分析

Fig. 6 Force analysis of ilmenite with different fractions in high intensity magnetic field

3 结 论

1) 在磨矿细度为 -74 μm 粒级的含量占 80% 的情况下,辊压产品选钛给矿的单体解离度较颞破产品选钛给矿高 0.58%,辊压产品中 -19 + 11 μm 粒级中铁氧化物的单体含量较颞破产品低 1.38%.

2) 与颞破产品采用“阶段磨矿-阶段分选”工艺相比,采用“铁钛平行分选”工艺获得的强磁精矿中 TiO_2 回收率提高了 5.11%, -19 μm 粒级的含量降低了 2.62%.

3) 当粒度小于 19 μm 时,钛铁矿在分选场中所受的比阻力急剧增加,而比磁力却有所降低,这是铁钛平行分选中钛铁矿强磁选的回收率得以提高的重要原因.

4) “铁钛平行分选”能够在一定程度上减少分选过程中微细粒级钛铁矿的新生成量,有利于钛铁矿的强磁选别,可以减少钛铁矿的金属流失.

参考文献:

- [1] Zhu Y G, Zhang G F, Feng Q M, et al. Effect of surface dissolution on flotation separation of fine ilmenite from titanite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(5): 1149 - 1154.
- [2] Xiong D H. Research and commercialization of treatment of fine ilmenite with Slon magnetic separators[J]. *Magnetic and Electrical Separation*, 2000, 4(10): 121 - 127.

(下转第 262 页)