**某低品位钛铁矿选矿试验研究**

程仁举1,2 李成秀1,2 刘 星1,2 刘飞燕1,2 张俊辉1,2

（1.中国地质科学院矿产综合利用研究所，四川 成都 610041；

2.中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心，四川 成都 610041；

3.国土资源部钒钛磁铁矿综合利用重点实验室，四川 成都 610041）

**摘 要：**某低品位钛铁矿TFe含量为10.20%、TiO2品位为 4.55%，属于低铁低钛等级矿石。矿石成分简单，主要工业矿物为钛铁矿和磁铁矿，主要脉石矿物为角闪石、长石。针对该矿石，首先进行了重磁拉抛尾，获得了TFe含量为12.31%，TiO2品位为5.81%的抛尾粗精矿；抛尾粗精矿经磨矿—选铁处理后，采用“螺旋溜槽+干式磁选”工艺，获得了TiO2品位为46.17%的钛精矿产品，回收率为46.72%。实现了矿石中铁、钛矿物的高效回收。

**关键词：**钛铁矿；选矿；抛尾；重磁拉；螺旋溜槽；干式磁选

钛铁矿传统的分选工艺主要有强磁—浮选、强磁—电选、强磁—重选以及重选—浮选[1-6]。但近年来，随着选矿设备的不断改进和创新，也产生了一些新的钛铁矿综合回收利用工艺。本研究针对原矿石泥化严重，铁、钛含量低的特性，首先采用了近年来长沙矿冶研究院新开发的重磁拉分选设备，进行了原矿石的抛尾处理；然后对抛尾粗精矿进行磨矿—选铁处理，得到铁精矿产品；选铁尾矿采用传统的螺旋溜槽进行预富集，然后进入最新开发的铁钛联合磁选机，获得合格的钛精矿产品。本研究为低品位钛铁矿开发了一种简单、高效的分选工艺。

**1 矿石性质**

**1.1 原矿组成分析**

首先对破碎后的试验样品进行了化学多项分析，分析结果见表1。

**表1 原矿化学多项分析结果/%**

**Table 1 Chemical composition of the raw ore %**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 元素 | TFe | FeO | TiO2 | Sc2O3\* | V2O5 | SiO2 | Al2O3 | CaO | MgO |
| 含量 | 10.20 | 8.68 | 4.55 | 55.6 | 0.073 | 43.73 | 11.40 | 12.56 | 6.17 |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 元素 | P | S | Na2O | K2O | MnO | Co\* | Cr\* | Ga\* | Ce\* |
| 含量 | 0.11 | 0.037 | 2.56 | 0.15 | 0.17 | 60.1 | 50.9 | 17 | 14 |

备注： \*含量单位为g/t，下同。

化学多项分析结果表明，本样品的主要金属成分为Fe﹑Ti，其含量分别为TFe 10.20%和TiO2 4.55%，属于低铁低钛等级矿石。除铁、钛外，Sc2O3含量为55.6g/t，可作为伴生元素考察回收。其他稀有元素含量极低，不具备回收利用价值；矿石中S含量为0.037%，P含量为0.11%，含量均较低。因此，该矿石应主要以回收钛矿物为主，综合考察铁、钪有价矿物的综合利用。

然后对原矿中铁、钛进行物相分析，考察其赋存矿物的主要形式，分析结果分别见表2、表3。

**表2 原矿铁物相分析结果/%**

**Table 2 Results of iron phase analysis of raw ore %**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 相 别 | 磁性铁  中铁 | 钛铁矿  中铁 | 菱铁矿  中铁 | 赤褐铁矿中铁 | 硫化物  中铁 | 硅酸盐  中铁 | 合计 |
| 含量 | 1.83 | 2.25 | 0.20 | 0.48 | 0.14 | 5.32 | 10.22 |
| 占有率 | 17.90 | 22.02 | 1.96 | 4.70 | 1.37 | 52.05 | 100.00 |

由表2铁物相分析结果可知，矿石中可供回收利用的铁主要为磁性铁，含量较低，仅占铁总量的17.90%，属于低铁型矿石。因此，再进行选钛时，可考虑将该部分的磁性铁优先选出作为一个铁精矿。

**表3** **原矿钛物相分析结果/%**

**Table 3 Results of titanium phase analysis of raw ore %**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 相 别 | 钛铁矿中TiO2 | 钛磁铁矿中TiO2 | 硅酸盐中TiO2 | 其他TiO2 | 合计 |
| 含量(%) | 3.14 | 0.16 | 1.14 | 0.11 | 4.55 |
| 占有率(%) | 69.01 | 3.52 | 25.05 | 2.42 | 100.00 |

由表3钛物相化学分析结果可知，钛主要赋存在钛铁矿和硅酸盐脉石中，钛铁矿中TiO2占总量的69.01%，原则上只有钛铁矿中的钛可以通过选矿回收；钛磁铁矿中TiO2占总量的3.52%，钛磁铁矿中的钛在进行磁选时进入铁精矿，因此获得的铁精矿会含有一定量的TiO2；其余的钛主要是赋存在硅酸盐矿物中，进入尾矿。

**1.2 矿石的矿物成分**

原矿首先进行了磨片制样测定。在镜下研究测定的同时，采用了电镜分析、X射线衍射分析等手段以确定样品中各矿物种类，并分级磨制砂光片进行了定量。结果显示：矿石中主要工业矿物为钛铁矿和磁铁矿，主要脉石矿物为角闪石、长石，其次为辉石。

**2 选矿试验**

由工艺矿物学分析可知，该矿成分相对简单，以回收铁、钛矿物为主，矿石嵌布粒度相对较粗，具备粗粒抛尾条件，因此首先进行粗粒抛尾试验。抛尾后的粗精矿先进行了磨矿—选铁处理，选铁尾矿再进行重选（螺旋溜槽）预富集。最后将螺旋预富集的粗精矿进行干式磁选，得到合格的钛精矿产品。

**2.1 粗粒抛尾试验**

本研究的矿石样品含泥量较大，同时铁、钛品位均较低。因此，首先考虑对破碎后的矿石样品进行抛尾处理，考察早丢的可能性。

对-20mm、-12mm、-6mm三种不同粒度级别的矿样，分别进行了干式磁选抛尾试验，永磁滚筒湿式抛尾试验和重磁拉湿式抛尾试验。研究发现，原矿破碎至-6mm，采用重磁拉进行抛尾效果最好。然后进行了主要工艺参数的优化试验。筒体倾角依次采用5°、7°、9°、11°，背景场强为0.68T，试验筒体转速为14r/min。试验结果见表4。

**表4 工艺优化试验结果/%**

**Table 4 Results of process optimization test %**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 倾角 | 产品  名称 | 产率 | 品位 | | 回收率 | |
| TFe | TiO2 | TFe | TiO2 |
| 5° | 粗抛精矿 | 72.33 | 11.88 | 5.59 | 84.13 | 88.65 |
| 粗抛尾矿 | 27.67 | 5.86 | 1.87 | 15.87 | 11.35 |
| 原矿 | 100.00 | 10.21 | 4.56 | 100.00 | 100.00 |
| 7° | 粗抛精矿 | 69.59 | 12.31 | 5.81 | 82.90 | 88.08 |
| 粗抛尾矿 | 30.41 | 5.81 | 1.80 | 17.10 | 11.92 |
| 原矿 | 100.00 | 10.33 | 4.59 | 100.00 | 100.00 |
| 9° | 粗抛精矿 | 67.59 | 12.35 | 5.91 | 81.05 | 87.01 |
| 粗抛尾矿 | 32.41 | 6.02 | 1.84 | 18.95 | 12.99 |
| 原矿 | 100.00 | 10.30 | 4.59 | 100.00 | 100.00 |
| 11° | 粗抛精矿 | 64.52 | 12.59 | 5.88 | 78.93 | 83.26 |
| 粗抛尾矿 | 35.48 | 6.11 | 2.15 | 21.07 | 16.74 |
| 原矿 | 100.00 | 10.29 | 4.56 | 100.00 | 100.00 |

由表4试验结果分析可知，随着筒体倾角的增大，抛除尾矿的产率逐渐增大，由27.67%增加到35.48%，铁、钛矿物的损失率分别由15.87%和11.35%增加至21.07%和16.74%。综合考虑单位矿石抛尾量和铁、钛矿物的损失率，确定筒体倾角为7°较适宜，此时抛除尾矿产率为30.41%，铁、钛矿物的损失率分别为17.10%和11.92%，得到TFe含量为12.31%，TiO2品位为5.81%的抛尾粗精矿。

**2.2 螺旋溜槽富集钛试验**

螺旋溜槽作为一种常用的重选设备，具有结构简单、处理能力大，本身不消耗动力的优点[7-8]。由工艺矿物学研究知，该矿石中二氧化钛的嵌布粒度较粗，在磨矿细度为-0.074mm含量为32%时，已基本解离。因此，首先对抛尾粗精矿进行了粗磨—选铁处理，得到的选铁尾矿作为螺旋溜槽的给矿。

选铁尾矿的TFe品位为10.56%，TiO2品位为5.73%，Sc2O3含量为62.7g/t。螺旋溜槽参数为：螺旋直径D为900mm，螺距h为540mm，h/D为0.6。试验设备联系图见图1，试验结果见表5。

四圈双头螺旋

摆式给矿机

料斗

搅拌桶

**图1 螺旋溜槽试验设备联系图**

**Fig. 1 Equipment contact diagram of spiral chute test**

缓冲罐

砂泵

螺旋钛

粗精矿

螺旋

尾矿

粗 选

精选Ⅰ

精选Ⅱ

精选Ⅲ

扫 选

**表5 螺旋溜槽试验结果/%**

**Table 5 Results of spiral chute test %**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 产品  名称 | 产率 | 品位 | | | 回收率 | | |
| TFe | TiO2 | Sc2O3\* | TFe | TiO2 | Sc2O3 |
| 螺旋钛粗精矿 | 11.69 | 26.89 | 28.56 | 84.5 | 29.76 | 58.25 | 15.76 |
| 螺旋尾矿 | 88.31 | 8.40 | 2.71 | 59.8 | 70.24 | 41.75 | 84.24 |
| 给矿 | 100.00 | 10.56 | 5.73 | 62.7 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

螺旋溜槽试验结果表明：对给矿TiO2品位5.73%，含TFe 10.56%，含Sc2O3 62.7g/t的钛铁矿，经一粗三精一扫的螺旋闭路工艺，最终获得了TiO2品位28.56%、含TFe 26.89%、含Sc2O3 84.5g/t，TiO2回收率58.25%、TFe回收率29.76%、Sc2O3回收率15.76%的螺旋钛粗精矿。

**2.3 干磁选钛试验**

对螺旋溜槽试验制得的钛粗精矿进行烘干处理，然后混匀缩分制取50kg矿样进行了干磁选钛试验。干磁选试验设备采用最新LH-5铁钛联合干磁机（此设备为一种复合永磁设备，对粗粒钛铁矿分选效果比较理想），预分选段场强为0.15T，弱磁选铁段场强为0.10T，强磁选钛段场强为0.80T。试验流程见图2，试验结果见表6，

钛粗精矿

**铁钛联合干磁选**

**图2 干磁选钛试验流程图**

**Fig. 2 Flow sheet of dry magnetic separation test**

铁尾矿

铁粗精矿

弱 磁

钛尾矿

钛精矿

强 磁

预 分选

钛中矿

**表6 干磁选钛试验结果/%**

**Table 6 Results of dry magnetic separation test %**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 产品  名称 | 产率 | 品位 | | | 作业回收率 | | |
| TFe | TiO2 | Sc2O3\* | TFe | TiO2 | Sc2O3 |
| 钛精矿 | 57.94 | 34.89 | 46.17 | 64.6 | 75.18 | 93.66 | 44.29 |
| 钛中矿 | 9.17 | 17.42 | 3.38 | 111.0 | 5.94 | 1.09 | 12.04 |
| 钛尾矿 | 28.09 | 10.41 | 2.09 | 124.4 | 10.88 | 2.06 | 41.35 |
| 铁粗精矿 | 2.91 | 54.52 | 10.96 | 18.5 | 5.90 | 1.12 | 0.64 |
| 铁尾矿 | 1.89 | 29.89 | 31.53 | 75.1 | 2.10 | 2.09 | 1.68 |
| 给矿 | 100.00 | 26.89 | 28.56 | 84.5 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

由表6干磁选钛试验结果可知，在给矿TiO2品位28.56%，含TFe 26.89%，含Sc2O3 84.5g/t的条件下，经一段干磁选，可获得TiO2品位为46.17%、含Sc2O3 64.6g/t的钛精矿，其TiO2作业回收率为93.66%。同时，钛中矿可返回至螺旋溜槽扫选作业，进一步分选提升最终钛精矿回收率；铁粗精矿和铁尾矿均可返回至弱磁精选前磨矿作业，然后进一步细磨后提质降杂，获得TFe品位60%以上的铁精矿，有利于提高最终铁精矿的回收率。

**2.4 全流程试验**

由于三段作业要求给矿的干湿不一致，因此，整个试验被分成上述三段进行。现将三段作业合并计算，得到全流程的选矿技术指标，全流程试验结果见表7，

**表7 全流程试验结果/%**

**Table 7 Results of whole process test %**

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 产品名称 | 产率 | 品位 | | | 回收率 | | |
| TFe | TiO2 | Sc2O3\* | TFe | TiO2 | Sc2O3 |
| 铁精矿 | 2.20 | 60.78 | 4.76 | 8.3 | 13.10 | 2.30 | 0.33 |
| 钛精矿 | 4.61 | 34.89 | 46.17 | 64.6 | 15.76 | 46.72 | 5.35 |
| 钛中矿 | 0.73 | 17.42 | 3.38 | 111 | 1.25 | 0.54 | 1.46 |
| 铁粗精矿 | 0.23 | 54.52 | 10.96 | 18.5 | 1.23 | 0.56 | 0.08 |
| 铁尾矿 | 0.15 | 29.89 | 31.53 | 75.1 | 0.44 | 1.04 | 0.20 |
| 总尾矿 | 92.08 | 7.56 | 2.41 | 55.9 | 68.22 | 48.84 | 92.58 |
| 原矿 | 100.00 | 10.20 | 4.55 | 55.6 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |

由表7全流程试验结果分析可知，原矿经粗粒重磁拉抛尾，抛尾精矿弱磁选铁，选铁尾矿螺旋预富集，螺旋精矿干磁选工艺，最终可得到铁精矿和钛精矿两个产品。分别为TFe含量为60.78%的铁精矿，回收率为13.10%，和TiO2品位为46.17%的钛精矿，回收率为46.72%。最终总尾矿的TFe含量仅为7.56%、TiO2品位为2.41%。该工艺流程简单，选矿成本低。

**3 结 论**

（1）该钛铁矿主要工业矿物为钛铁矿和磁铁矿，主要脉石矿物为角闪石、长石。

（2）该矿采用粗粒（-6mm）重磁拉抛尾，可抛除30.41%的尾矿，为后续回收铁、钛作业创造了良好条件。

（3）选铁尾矿采用“螺旋—干磁”流程，可获得TiO2品位为46.17%的钛精矿，回收率为46.72%。

**参考文献**

[1] 刘建国，张军，于丽丽，等. 陕西某难选原生钛铁矿选矿工艺研究[J]. 矿产综合利用，2014，06：24-27.

[2] 刘星，李成秀，刘飞燕，等. 甘肃大滩某低品位钛铁矿石选矿试验[J]. 金属矿山，2014，12：75-78.

[3] 蒋昊，朱树生，孙忠诚，等. 云南某低品位钛铁矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程，2015，3504：40-43+47.

[4] 朱阳戈，郑桂兵，肖婉琴，等. 某超贫磁铁矿中钛铁矿回收试验研究[J]. 有色金属（选矿部分），2013，05：20-24.

[5] 黄思捷，叶志勇，游蔓莉. 陕西某钛铁矿选矿试验[J]. 金属矿山，2012，09：48-51.

[6] 陈晓鸣，严鹏，陈力行. 磁性螺旋溜槽回收细粒钛铁矿试验[J]. 金属矿山，2014，03：132-135.

[7] 张建文. 甘肃某低品位难选钛铁矿磁电选矿试验研究[J]. 矿产保护与利用，2016，06：21-25.

[8] 魏德洲. 固体物料分选学[M]. 北京：冶金工业出版社，2009：246-248.

**Research on Beneficiation of a Low Grade Ilmenite Ore**

CHENG Renju1,2,3, LI Chengxiu1,2,3, LIU Xing1,2,3, Liu Feiyan1,2,3, Zhang Junhui1,2,3

（1.Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, Chengdu 610041, China：

2.Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu 610041，China：

3. Key Laboratory of Multipurpose Utilization of Vanadium-titanium Magnetite of Ministry of Land and Resources, Chengdu 610041，China：)

**Abstract：**The limonite ore with 10.20% total iron grade and 4.55% TiO2 grade is a kind of low iron and low titanium ore. The mainly industrial minerals of the ore are limonite and magnetite, while the mainly gangue minerals are hornblende and feldspar. In this paper, the rough concentrate with 12.31% TFe grade and 5.81% TiO2 grade can be obtained with ZCLA concentration machine used to discarding tailing. After gridding and iron separation processing, the final titanium concentrate with 46.17% TiO2 grade and 46.72% TiO2 recovery could be got by the spiral chute and dry magnetic separation to furtherly separate the titanium minerals from the rough concentrate.

**Keywords：**ilmenite；benefication；drop tailings；ZCLA；spiral chute；dry magnetic separation

**基金项目：**四川省应用基础计划项目“极贫钒钛磁铁矿综合经济利用关键技术研究”（2016JY0095）资助

**作者简介：**程仁举（1986-），男，硕士，工程师，矿物加工工程专业，研究方向：主要从事复杂难选矿产的综合利用研究工作。