

某细粒难选褐铁矿的分选研究

王建丽¹, 庑必阳²

(1. 湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412008; 2. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 对某褐铁矿进行了磁选、焙烧-磁选、重选及浮选实验研究, 研究结果表明, 采用强磁选工艺流程分选该褐铁矿可以获得较满意的指标。经正交试验优化后, 一次磁选可使褐铁矿品位从32.91%提高到58.64%, 回收率达90.87%, 产率达51%; 焙烧磁选工艺可获得铁精矿品位达61.16%, 回收率达67.39%, 产率达36%。从经济且环保的角度出发, 认为该细粒难选褐铁矿的分选采用强磁选工艺流程比较适宜。

关键词: 褐铁矿; 磁选; 正交实验

中图分类号: TF521+.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2010)04-0009-05

Study on Beneficiation of Fine-Grained Limonite

Wang Jianli¹, Tuo Biyang²

(1. School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412008, China;

2. School of Mining, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550003, China)

Abstract: Makes experimental study on Limonite's magnetic separation, roasting magnetic separation, gravitation separation and flotation. The results show that by strong magnetic separation process can obtain satisfactory limonite index. After optimized orthogonal experiment, the grade of limonite is increased from 32.91% to 58.64%, the recovery is 67.39% and the productive rate is 51% at one magnetic separation, and the grade of iron concentrate is 61.16%, recovery is 67.39% and productive rate is 36% by magnetic roasting process. From aspects of economic and environmental protection, it is recommended to use strong magnetic separation.

Keywords: limonite; magnetic separation; orthogonal test

0 引言

面对21世纪钢铁市场的激烈竞争, 钢铁企业要想提高其竞争力, 单靠提高烧结矿品位难度较大。在烧结生产过程中, 原料成本占烧结矿总成本的80%, 因此, 冶金工作者们开始研究多配加褐铁矿和廉价铁矿石的烧结技术和生产工艺, 以大幅度降低烧结矿成本, 从而达到进一步降低生铁成本的目的。世界铁矿的主要供应地——巴西南部矿区, 铁英岩矿物在增加, 澳大利亚低磷的布鲁克曼矿在减少, 这表明高磷化、针铁矿化现象不可避免, 从而导致褐铁矿开采量迅速增加^[1]。因此, 研究使用褐铁矿势在必行。此外,

开发利用低成本的烧结原料, 也是钢铁工业目前解决资源危机的一条有效途径。

国外褐铁矿研究报道不多, 研究者华人宋少先教授采用絮凝-强磁选对弱磁性褐铁矿细粉中的铁精矿进行富集, 可将品位为30.5%原矿富集到64%, 回收率达到82%^[2]。

国内对褐铁矿的研究报道也不多, 长沙矿冶研究院的陈雯, 采用絮凝-强磁选回收易泥化褐铁矿的试验研究, 可将褐铁矿铁矿石的金属回收率提高10~15个百分点^[3]。2005年, 王毓华等^[4]采用反浮选脱硅新工艺对褐铁矿进行了试验研究, 研究结果表明, 可将原

收稿日期: 2010-03-15

通信作者: 王建丽(1979-), 女, 河北石家庄人, 湖南工业大学讲师, 硕士, 主要从事炼铁原料及选矿工艺方面的研究,

E-mail: 75080894@qq.com

矿品位从45.95%富集到59.25%，全铁回收率为83.42%。张汉泉等^[5]通过对褐铁矿焙烧-磁选的研究，可将原矿品位从45%富集到精矿铁品位达60%以上，铁回收率达90%。余永富等^[6]于2005年也采用絮凝-强磁选对澳大利亚的褐铁矿进行富集研究，结果表明，在相同磁选条件下，絮凝-强磁选工艺能提高10~15个百分点的回率。

笔者通过查阅相关的文献，对某地褐铁矿进行了重选、磁选和浮选的工艺比较试验，并最终选定磁选为较好的工艺流程。由于焙烧褐铁矿会产生大量的挥发污染物并且浪费大量的能耗，而化学选矿过程中大量的化学药剂将给生态带来严重的污染，尤其是大量的化学污水排放到江河中，给水下生物带来致命的污染，同时由于褐铁矿属于弱磁性矿物以及物料颗粒之间的磁性差异，从环保、经济和矿石本身的性质考虑，可采用强磁选分选。磁选是利用磁性颗粒和非磁性颗粒在分选空间的运动行为差异进行分选的过程。磁选的全过程除用水电外，不加任何物质，而且水可以回收循环利用，因此，它不仅具有良好的经济效益，而且具有良好的环保效益。

1 矿石性质

1.1 矿物的物化性质

褐铁矿是含水氧化铁矿物，是由其它矿石风化后生成的，呈褐色。褐铁矿由针铁矿($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)、水针铁矿($2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$)和含不同结晶水的氧化铁及泥质物质的混合物组成^[7]。褐铁矿中绝大部分含铁矿物以 $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 形式存在。其比磁化率 $X=(40\sim 220) \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ ，属于弱磁性矿物，普通中低磁场强度的磁选机不能分选褐铁矿^[8]。褐铁矿石含铁量一般为37%~55%，褐铁矿经焙烧或入高炉受热后去掉游离水和结晶水会大大改善矿石的还原性，所以褐铁矿比赤铁矿和磁铁矿的还原性好；同时，由于去掉了水分，相应地提高了矿石的含铁量^[9]。但由于高温焙烧需要大量燃料，而且会产生大量挥发性物质，如磷的氧化物、硫化物等污染物，造成环境污染，故不是很理想的方法。

试验用样取自云南某地褐铁矿地表矿，原矿铁品位为32.91%，化学组成为 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。经矿相分析表明，原矿中金属矿物主要为褐铁矿，含微量的针铁矿；非金属矿物主要为石英和重晶石。褐铁矿呈网脉状和蜂窝状构造，结构疏松，孔隙度大，易泥化，属低品位难选褐铁矿。

表1是原褐铁矿经烘干后磨矿，到200目以下的化学分析结果。从表1中可看出，褐铁矿铁的质量分数为32.91%，属于低品位的褐铁矿；硫的含量也比较低，其质量分数为0.04%，脉石矿物主要有质量分数为

12.79%的 Al_2O_3 、质量分数为9.0%的 SiO_2 和质量分数为2.08%的CaO。

表1 褐铁矿原矿主要化学成份分析结果

Table 1 Analysis results of major chemical composition of limonite ore

| 成份 | Fe | SiO_2 | Al_2O_3 | CaO | MgO | S | P | As |
|------|-------|----------------|-------------------------|------|------|------|------|------|
| 质量分数 | 32.91 | 9.0 | 12.79 | 2.08 | 0.23 | 0.04 | 0.12 | 0.32 |

表2为试验用褐铁矿矿石的物相分析结果。

表2 褐铁矿物相分析结果

Table 2 Analysis results of limonite phase

| 矿物名称 | 铁质量分数 | 占有率 | 矿物名称 | 铁质量分数 | 占有率 |
|-------|-------|-------|------|-------|------|
| 赤、褐铁矿 | 31.41 | 95.44 | 碳酸铁 | 0.75 | 2.28 |
| 磁铁矿 | 0.45 | 1.37 | 硅酸铁 | 0.255 | 0.77 |
| 硫化铁 | 0.045 | 0.14 | 合计 | 32.91 | 100 |

由表2可以看出，该矿石主要由褐铁矿、赤铁矿、针铁矿和石英组成。金属矿物主要有褐铁矿、赤铁矿，其次有磁铁矿、镜铁矿等，脉石矿物主要为石英、绿泥石和粘土矿物等。

1.2 褐铁矿粒度分析

图1为褐铁矿进入磁选机前的粒度曲线，

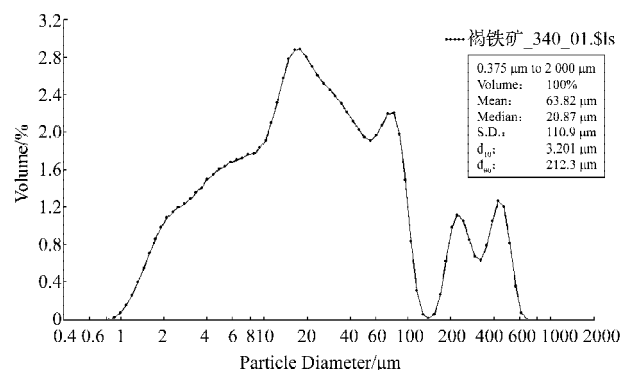


图1 褐铁矿粒度曲线

Fig. 1 Granularity curve of limonite

试验用激光粒度分析仪(LS13320)的分析范围是 $0.375 \sim 2000 \mu\text{m}$ 。从图1可看出，试验用褐铁矿粒度的平均粒径(mean)为 $63.82 \mu\text{m}$ ，粒度的中间值(median)为 $20.87 \mu\text{m}$ ，粒径小于 $3.20 \mu\text{m}$ 的颗粒的体积分数为10%左右，而粒径大于 $212.3 \mu\text{m}$ 的约为10%，而粒度为 $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 的颗粒所占的体积分数最大，从图中数据可以看出褐铁矿的粒径是比较小的，而且各粒度的分布是不均匀的，并且可看出粒度非常细的这部分(比如小于 200 nm)基本上为黄泥土见水泥化而成。

2 实验仪器及药剂

选用的实验设备主要有：LS13320激光粒度分析仪(美国贝克曼-库尔特公司)、XCSQ-50×70湿式强磁

选机(厦门市程功矿业设备有限公司)、XTLZ-Φ260/Φ200型真空过滤机(厦门市程功矿业设备有限公司)、数显干燥箱(鼓风)(北京市中西远大科技有限公司)、XMQ Φ240X90球磨机(河南益工重机责任公司)、XFD1.5L浮选设备(厦门市程功矿业设备有限公司)、单槽浮选机(厦门市程功矿业设备有限公司)、云锡型摇床(1030 mm×530 mm)(江西省石城县汇强选矿设备厂)。

浮选药剂主要采用脂肪酸类捕收剂(淳安县千岛湖油脂化工厂), pH调整剂采用碳酸钠(天津金汇太亚化学试剂有限公司)和硫酸(株洲市丰特贸易有限公司), 均为化学纯。

3 试验结果与分析

3.1 分选方案比较

3.1.1 褐铁矿磁选试验

磁选是在磁选设备所提供的非均匀磁场中进行的。被磁选矿石进入磁选设备的分选空间后, 受到磁力和机械力(包括重力、离心力、流体阻力等)的共同作用, 沿着不同的路径运动, 分别截取矿浆就可得到不同的产品。因此, 对较强磁性和较弱磁性颗粒在磁选机中成功分选的必要条件是: 作用在较强磁性矿石上的磁力, 必须大于所有与磁力方向相反的机械力的合力; 同时, 作用在较弱磁性颗粒上的磁力必须小于相应机械力之和。因此, 磁选的实质是利用磁力和机械力对不同磁性颗粒的不同作用而实现的。进入磁选机的矿浆将被分成2种或多种产品。在实际分选中, 磁性矿石、非磁性矿石不可能完全进入相应的磁选产品、非磁性产品和中矿中, 而是呈一定的随机性。

褐铁矿进入强磁选机的分选空间后, 颗粒受到磁力和机械力的作用。当磁选机给矿时, 由于磁场强度很高, 故弱磁性的褐铁矿被吸附在分选箱上, 当PLC运行到中冲时, 由于电流的减小, 磁选机的磁场相应减小, 故一部分被夹杂在弱磁性矿石之间非磁性物质将被水冲走; 随后当PLC运行到精冲时, 由于磁选机电流变为0, 导致磁性变为0, 故弱磁性铁精矿将被冲到精矿槽, 从而实现分选。

采用图2所示的磁选试验流程, 进行磁选初步探索试验。在磁场强度为 $\frac{10^7}{4\pi}$ A/m, 矿浆的质量浓度为10%, 给矿时间为12 s的条件下, 对已磨4 min的褐铁矿进行分选, 分选结果如表3所示, 铁精矿的品位为49.86%, 回收率为67.39%。

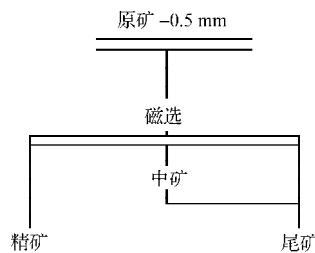


图2 褐铁矿磁选流程图
Fig. 2 The flowchart of Limonite magnetic separation

表3 褐铁矿经磁选结果

| 产品 | 品位 | 产率 | 回收率 |
|-----|-------|-------|-------|
| 精矿 | 49.86 | 44.48 | 67.39 |
| 中尾矿 | 19.33 | 55.52 | 32.61 |

3.1.2 褐铁矿焙烧、磁选实验

图3为褐铁矿经焙烧后磁选的工艺流程图。

取磨细的原矿配质量分数为6%的煤混匀后置于电炉中, 在温度为800℃的条件下焙烧60 min后自然冷却, 使褐铁矿变成磁性较强的磁性矿物, 从而使铁矿物和脉石矿物得到有效分离^[10-11]。将磁化焙烧后的褐铁矿磨细到-200目约占80%, 取100 g加入搅拌桶中, 加水调节矿浆质量浓度为10%后进行磁力分选。在给矿时间为14 s, 中冲时间为10 s, 精冲时间为10 s, 电流为14 A的条件下, 用XCSQ-50×70湿式强磁选机进行分选, 分选结果如表4所示, 铁精矿品位为61.61%, 产率为36%, 回收率为67.37%。

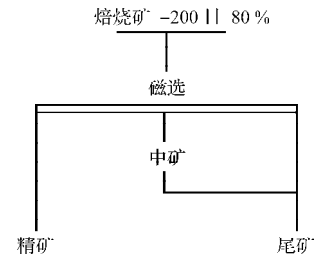


图3 褐铁矿经焙烧后磁选的工艺流程
Fig. 3 limonite magnetic separation process after roasting

表4 褐铁矿经焙烧后磁选结果

| 产品 | 品位 | 产率 | 回收率 |
|----|-------|----|-------|
| 精矿 | 61.61 | 36 | 67.39 |
| 尾矿 | 16.76 | 64 | 32.61 |

3.1.3 褐铁矿的重选试验

在磨矿细度为-0.075 mm占80%的条件下, 将其搅拌配成矿浆, 采用云锡型摇床进行分选, 调整好冲程、冲次、床面倾角、水量和给矿量等工艺参数, 分选结果如表5所示, 由表5中结果可看出精矿的品位仅为34.24%, 回收率仅为38.62%, 因此基本上不能实现分选, 显然云锡型摇床重选对褐铁矿不适合。

表5 褐铁矿的重选试验结果

| 产品 | 品位 | 产率 | 回收率 |
|----|-------|-------|-------|
| 精矿 | 34.24 | 40.18 | 38.62 |
| 中矿 | 30.66 | 26.94 | 30.54 |
| 尾矿 | 35.10 | 32.88 | 30.84 |

3.1.4 褐铁矿的浮选实验

褐铁矿的浮选机理是通过配加捕收剂或抑制剂, 使欲浮的矿物表面增加疏水性, 或使不欲浮的矿物表面变得更加亲水, 抑制它们上浮, 或促进气泡的形成

和分散(起泡剂)。矿浆和空气被旋转的叶轮同时吸入浮选槽内,空气被矿浆的湍流运动粉碎为许多气泡,起泡剂促进了微小气泡的形成和分散。在矿浆中,气泡与矿粒发生碰撞或接触,并按表面疏水性的差异决定矿粒是否在气泡表面上发生附着。结果为表面疏水性强的矿粒附着到气泡表面,并被气泡携带升浮至矿浆液面形成泡沫层,被刮出成为精矿;而表面亲水性强的颗粒不和气泡发生粘附,仍然留在矿浆中,最后随矿浆流排出格外,成为尾矿。

如图4分选流程图所示,将褐铁矿按2 kg/t配加碳酸钠进行磨矿,使褐铁矿粒度为-200目占80%,进行脱泥。往脱泥后的矿浆中按2.15 kg/t配入脂肪酸类捕收剂进行粗选,粗选尾矿再加入脂肪酸类捕收剂2.06 kg/t进行扫选,将粗选精矿和扫选精矿合并为精矿,分选结果见表6,铁精矿品位仅为45.12%,产率为50.25%,回收率为68.89%。

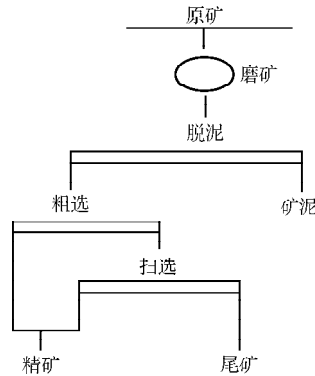


图4 弱碱性介质浮选流程
Fig. 4 Weakly alkaline medium flotation process

表6 弱碱性介质浮选结果

Table 6 Weakly alkaline flotation results %

| 产品名称 | 品位/TFe | 产率 | 回收率 |
|------|--------|-------|-------|
| 精矿 | 45.12 | 50.25 | 68.89 |
| 尾矿 | 21.24 | 49.75 | 32.11 |

3.2 褐铁矿的磁选正交实验

褐铁矿的磁选正交实验的实验流程见图2,在实验中笔者将磁场强度的值分别定为 $\frac{1}{4\pi} \times 10^7$ 和 $\frac{18.3}{4\pi} \times 10^6$ A/m;给矿的时间定为6和12 s;原料的质量分数分别为10%和20%;中矿因为特别少,500 g原矿仅约10 g,故并入尾矿一起考虑,而尾矿冲水时间力求把精矿冲干净,设定为10 s。

从褐铁矿正交实验结果(见表7)可看出,在3个因素对回收率的影响中,磁场的影响最大,其次是给矿时间,最后是原矿浓度;而对品位的影响为磁场的影响最大,其次是原矿浓度,最后是给矿时间。同时可看出,磁场强度为 $\frac{18.3}{4\pi} \times 10^6$ (14 A) A/m,给矿时间为6 s,原矿质量分数为10%时,褐铁矿的品位是58.64%,回收率为90.87%,产率为51%。在这个最佳条件下做一次验证试验,综合品位和回收率考虑,在最优条件磁场强度为 $\frac{18.3}{4\pi} \times 10^6$ A/m,给矿时间为6 s,原矿质量

分数为10%下,进行一次验证磁选试验,实验结果表明,铁精矿的品位达58.50%,回收率达90.65%。

表7 褐铁矿正交实验结果表

Table 7 Results of limonite orthogonal tests

| 试验号 | 影响因素 | | | | |
|-----|----------|---------|-----------|---------|--------|
| | 电流大小 /A | 给矿时间 /s | 原料质量浓度 /% | 回收率ε /% | 品位β /% |
| 1 | 1 (6) | 1 (6) | 2 (20) | 76.23 | 49.12 |
| 2 | 1 (6) | 1 (6) | 1 (10) | 77.55 | 50.04 |
| 3 | 1 (6) | 2 (12) | 2 (20) | 68.70 | 48.34 |
| 4 | 1 (6) | 2 (12) | 1 (10) | 74.24 | 49.86 |
| 5 | 2 (14) | 1 (6) | 2 (20) | 88.84 | 54.38 |
| 6 | 2 (14) | 1 (6) | 1 (10) | 90.87 | 58.64 |
| 7 | 2 (14) | 2 (12) | 2 (20) | 87.69 | 53.68 |
| 8 | 2 (14) | 2 (12) | 1 (10) | 89.40 | 58.26 |
| 回收率 | I 74.18 | 83.37 | 83.02 | | |
| | II 89.20 | 80.00 | 80.37 | | |
| | R 15.02 | 3.37 | 2.65 | | |
| 品位 | I 49.34 | 53.04 | 53.95 | | |
| | II 56.24 | 52.53 | 51.38 | | |
| | R 6.9 | 0.51 | 2.57 | | |

3.3 磁选优化方案再选试验

为了进一步提高铁精矿的全铁含量,采用图5所示的褐铁矿磁选优化再选工艺,选取在磁

场强度为 $\frac{18.3}{4\pi} \times 10^6$ A/m,给矿时间为6 s,原矿质量分数为10%的条件下进行一次验证磁选试验获得的铁精矿,进行二段磁选,考虑到磁场强度越高,磁选过程中磁团聚夹杂的脉石矿物就越多,精矿的品位就越低。因此,磁选的条件

为磁场强度 $\frac{1}{4\pi} \times 10^7$ A/m,给矿时间为6 s,矿浆质量分数为10%时进行强磁分选,分选结果如表8所示,铁精矿的品位为59.40%,仅仅比一段分选精矿的品位高0.9%,回收率为86.20%。

表8 磁选优化方案试验结果

Table 8 Test results of optimized magnetic separation plan

| 产品 | 品位 | 产率 | 回收率 |
|-----|-------|-------|-------|
| 精矿 | 59.40 | 84.89 | 86.20 |
| 中尾矿 | 13.80 | 15.11 | 13.80 |

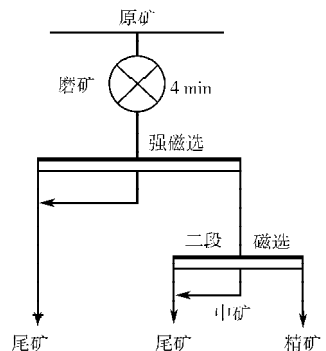


图5 褐铁矿磁选优化再选流程图

Fig. 5 Re-separating flow chart of optimized limonite magnetic separation process

6 结论

1) 通过对褐铁矿磁选、焙烧-磁选、重选以及浮选这4种方案进行分析比较, 并从经济和环保角度考虑, 磁选法是比较合理的方案。

2) 在磁场强度为 $\frac{18.3}{4\pi} \times 10^6$ A/m、给矿时间为6 s、原矿质量分数为10%的条件下, 可以实现褐铁矿中全铁质量分数从32.91%富集到58.64%, 回收率达到90.87%, 产率为51%的选矿指标; 在磁场强度为 $\frac{1}{4\pi} \times 10^7$ A/m, 其它条件和一段优化试验相同下进行二段磁选, 铁精矿的品位为59.40%, 仅比一段分选精矿的品位高0.9%, 回收率为86.20%。

参考文献:

- [1] 姜汀, 隋孝利, 王立涛, 等. 褐铁矿的应用现状及承钢的实验室研究[J]. 河北冶金, 2005(1): 9-11.
Jiang Ding, Sui Xiaoli, Wang Litao, et al. Application Situation of Limonite and Its Laboratory Research in Cheng Steel[J]. Hebei Metallurgy, 2005(1): 9-11.
- [2] Song S, Lu S, Lopez-Valdivieso A. Magnetic Separation of Hematite and Limonite Fines as Hydrophobic Floccs from Iron Ores[J]. Minerals Engineering, 2002, 15(6): 415-422.
- [3] 陈雯. 絮凝-强磁选回收易泥化褐铁矿的试验研究[J]. 金属矿山, 2003(6): 32-34.
Chen Wen. Experimental Research of Recovering Easy-to-Slime Limonite by Flocculation-High Intensity Magnetic Separation Technology[J]. Metal Mine, 2003(6): 32-34.
- [4] 王毓华, 陈兴华, 黄传兵, 等. 褐铁矿反浮选脱硅新工艺试验研究[J]. 金属矿山, 2005(7): 37-40.
Wang Yuhua, Chen Xinghua, Huang Chuanbing, et al. Research on Reverse Flotation for Removal of Silicate from Limonite[J]. Metal Mine, 2005(7): 37-40.
- [5] 张汉泉, 任亚峰, 管俊芳. 难选赤褐铁矿焙烧-磁选试验研究[J]. 中国矿业, 2006(5): 45-48.
Zhang Hanquan, Ren Yafeng, Guan Junfang. Experimental Study on Magnetic Roasting-Separation of Refractory Hematite Limonite[J]. China Mining Magazine, 2006(5): 45-48.
- [6] Luo Liqun, Zhang Jingsheng, Yu Yongfu. Recovering Limonite from Australia Iron Ores by Flocculation-High Intensity Magnetic Separation[J]. Journal of Central South University of Technology: English Edition, 2005, 12(6): 62-68.
- [7] 刘卫强, 张宗华. 云南某褐铁矿的选矿工艺研究[J]. 云南冶金, 2006(2): 18-20.
Liu Weiqiang, Zhang Zonghua. Study on the Beneficiation Technology of a Limonite Ore in Yunnan[J]. Yunnan Metallurgy, 2006(2): 18-20.
- [8] 李永聪, 孙福印. 新疆某褐铁矿的选矿工艺研究[J]. 金属矿山, 2002(6): 29-31.
Li Yongcong, Sun Fuying. Study on the Beneficiation Technology of a Limonite Ore in Xinjiang[J]. Metal Mine, 2002(6): 29-31.
- [9] 甘建华. 铁坑褐铁矿选矿工艺研究[J]. 金属矿山, 2006(5): 32-36.
Gan Jianhua. On Beneficiation Technology for Hematite Ore of Tiekeng Iron Mine[J]. Metal Mine, 2006(5): 32-36.
- [10] Liu Zhengping, Ma Jinming, Gao Ruifang, et al. Study and Production of Limonite Sinter[J]. Kang T'ieh/Iron and Steel: Peking, 2005, 40(2): 19-23.
- [11] Panychev A A. Potential for the Use of Low-Grade Limonite Ores from Dumps[J]. Metallurgist, 2006, 50(1/2): 45-48.

(责任编辑: 廖友媛)