

# 某微细粒嵌布复杂铁矿的选矿工艺流程研究

周少珍, 刘建远

(北京矿冶研究总院, 北京 100044)

**摘 要:** 矿石中铁矿物主要以不规则状产出, 粒度以微、细粒为主, 嵌布关系复杂, 且矿物种类繁多, 主要为赤铁矿、假象赤铁矿, 其次为磁铁矿、褐铁矿、针铁矿及少量菱铁矿, 尚有微量磁赤铁矿、自然铁、磷铁矿等; 脉石矿物主要为石英, 其它是辉石、绿泥石、云母、长石、黏土矿物等; 本研究采用合理多段、适当细磨工艺, 强化微、细粒赤铁矿及假象赤铁矿的回收。试验推荐重选—磁选—反浮选联合流程, 获得品位为 67.79%、回收率为 83.23% 的铁精矿。

**关键词:** 重选; 磁选; 反浮选; 赤铁矿; 褐铁矿; 针铁矿

**中图分类号:** TD951.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-9492 (2008) 01-0019-00

## 1 矿样性质

### 1.1 主要成分含量分析

原矿主要化学成分分析结果见表 1。

表 1 原矿主要化学成分分析结果

Table 1 Chemical analysis results of run-of-mine ore

| 化学成分   | TFe   | SiO <sub>2</sub> | CaO  | MgO  | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn    | P     | S     | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O |
|--------|-------|------------------|------|------|--------------------------------|-------|-------|-------|------------------|-------------------|
| 质量分数/% | 37.24 | 46.94            | 0.21 | 0.41 | 0.089                          | 0.023 | 0.033 | 0.019 | 0.22             | 0.19              |

### 1.2 化学物相分析

矿石中主要元素铁的化学物相分析结果见表 2。

表 2 原矿铁化学物相分析结果

Table 2 The analysis results Fe-distribution among mineralogical phase

| 相别     | 赤铁矿中铁 * | 磁性铁中铁 | 褐铁矿中铁 | 硫化铁中铁 | 硅酸铁中铁 | 碳酸铁中铁 | 总铁    |
|--------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 质量分数/% | 26.48   | 8.40  | 0.89  | 0.21  | 0.63  | 0.80  | 37.41 |
| 分布率/%  | 70.78   | 22.45 | 2.38  | 0.56  | 1.68  | 2.13  | 100.0 |

\* 包括假象赤铁矿中铁

为黄铜矿, 有害杂质成分磷的独立矿物为磷灰石。

脉石矿物主要为石英, 其它尚有很少量辉石、绿泥石、黑云母、白云母、绢云母、长石、黏土矿物、金红石等。

### 1.5 主要矿物的嵌布特征

赤铁矿: 矿石中最主要的金属矿物, 也是最主要的回收对象。主要呈不规则状、粒状嵌布于脉石矿物集合体及其间隙中, 其次呈自形、半自形晶结构, 这部分赤铁矿粒度细, 一般为 5~10 $\mu$ m, 嵌布关系复杂, 难以充分单体解离; 在粗粒赤铁矿中有时可见页片双晶, 有时还可见赤铁矿呈细脉状穿插于脉石矿物中。在部分粗粒赤铁矿中, 常可见脉石

### 1.3 矿石的构造和结构

矿石的构造主要有浸染状构造、条带状构造、块状构造、角砾状构造、似层状构造。矿石的结构主要有细粒状结构、它形晶结构、自形晶结构、半自形晶结构、不等粒结构、镶边结构、残余结构、脉状结构、网脉状结构等, 矿石中铁矿物主要以不规则状产出, 嵌布关系复杂。

### 1.4 矿石的矿物组成

矿石中铁矿物种类繁多, 主要为赤铁矿、假象赤铁矿, 其次为磁铁矿、褐铁矿、针铁矿, 尚有微量磁赤铁矿、自然铁、磷铁矿、菱铁矿等, 硫的独立矿物

包体, 包体粒度一般为 5~20 $\mu$ m, 如果磨矿细度不够, 则这部分脉石易进入铁精矿而影响铁精矿品位。赤铁矿的嵌布粒度较细, 一般为 5~295 $\mu$ m。赤铁矿的扫描电镜能谱分析结果表明, 赤铁矿中铁的含量为 69.05%~70.63%, 平均为 69.91%。

假象赤铁矿: 矿石中主要铁矿物之一, 是由赤铁矿交代磁铁矿而形成, 并呈磁铁矿的形态特征, 在假象赤铁矿中常可见磁铁矿残留体, 这部分假象赤铁矿在弱磁选作业中易进入弱磁选精矿中, 对铁的选矿回收有利。

磁铁矿: 矿石中常见的铁矿物, 主要呈不规则状产出, 磁铁矿与赤铁矿关系十分密切, 常以集合

体的形式嵌布于脉石矿物中,赤铁矿多沿磁铁矿边缘和裂隙交代磁铁矿呈现镶边结构、交代残余结构,这种结构特征,对铁矿的磁选回收有利。少量磁铁矿呈自形、半自形晶结构,这部分磁铁矿嵌布粒度都比较细,一般为 $5\sim 20\mu\text{m}$ 。磁铁矿的嵌布粒度较细,一般为 $5\sim 58\mu\text{m}$ 。磁铁矿的扫描电镜能谱分析结果表明,磁铁矿中铁的含量为 $71.34\%\sim 73.07\%$ ,平均为 $72.27\%$ 。

**褐铁矿:**矿样中常见的铁矿物之一。主要呈不规则状、蜂窝状嵌布于脉石矿物中,有时具环带结构,褐铁矿与针铁矿、赤铁矿关系较密切,常以集合体的形式产出。有时还可见褐铁矿呈脉状、网脉状穿插于脉石矿物中,矿石中褐铁矿较松散,空穴较多,因此在磨矿作业中易过磨,直接影响矿石中铁的选矿指标。扫描电镜能谱分析结果表明,褐铁矿中铁含量为 $59.80\%\sim 63.29\%$ ,平均为 $61.46\%$ ,并含有少量钙、磷杂质成分。

**石英:**矿石中最主要的脉石矿物,主要呈不规则粒状产出,有时呈角砾状,赤铁矿、假象赤铁矿、磁铁矿等铁矿物主要嵌布于石英颗粒间隙中,铁矿物与石英接触界线较简单,这就是为什么在同样磨矿条件下,铁矿物的单体解离度比其它矿样高得多的主要原因,当然还有少量铁矿物以包体形式嵌布于石英集合体中,这部分铁矿物嵌布粒度很细,一般为 $5\sim 30\mu\text{m}$ 。由于石英是矿石中最主要的脉石矿物,因此它也就是影响铁精矿品位的主要杂质成分,为提高矿石中铁的选矿指标及铁精矿品位,其技术关键就是细粒铁矿物与石英的分选。

其它矿物还有磁赤铁矿、磷铁矿、自然铁、菱铁矿、黄铁矿、黄铜矿、辉石、绿泥石、磷灰石、黑云母、白云母、绢云母、长石、黏土矿物、金红石等,但它们含量都很少,其嵌布特征在此不一一叙述。

### 1.6 矿石中主要金属矿物的粒度组成及特性

矿石中赤铁矿的嵌布粒度比较细而且不均匀,大部分以细粒产出,在 $+74\mu\text{m}$ 粒级中,赤铁矿的占有率只有 $46.56\%$ ,而在 $-15\mu\text{m}$ 粒级中,赤铁矿的占有率高达 $9.99\%$ ,显然,要提高矿石中铁的选矿指标,细磨是必须的,而且要特别注意细粒铁矿物与脉石矿物的分离和回收。

对不同磨矿细度产品中铁矿物的解离度进行了系统的测定,结果见表3,随着磨矿细度的不断提高,铁矿物的解离度不断增加,当磨矿细度为 $55\%\sim 74\mu\text{m}$ 时,铁矿物的解离度只有 $65.10\%$ ;当磨矿细度达到 $85\%\sim 74\mu\text{m}$ 时,铁矿物的解离度为 $91.58\%$ ,也就是说,此时,铁矿物才基本解离,显然,要提

高矿石中铁的选矿指标,特别是获得高品位的铁精矿,进一步细磨是必要的。

表3 铁矿物解离度分析结果

Table 3 Results of liberation analysis for Fe-minerals

| 磨矿细度/%- $74\mu\text{m}$ | 铁矿物单体/% | 与脉石连生/% | 总计/%  |
|-------------------------|---------|---------|-------|
| 55                      | 65.10   | 34.90   | 100.0 |
| 65                      | 81.22   | 18.78   | 100.0 |
| 75                      | 84.69   | 15.31   | 100.0 |
| 85                      | 91.85   | 8.15    | 100.0 |

### 1.7 矿石中铁的赋存状态

铁是矿石中最主要的金属元素,也是唯一的选矿回收对象。矿石中铁品位为 $39.71\%$ ,矿石中铁主要以独立矿物存在,其中主要为赤铁矿和假象赤铁矿,其次为褐铁矿、针铁矿、磁铁矿,尚有少量铁与硫结合以黄铁矿的形式存在,还有微量铁以菱铁矿、自然铁、磁赤铁矿、磷铁矿的形式产出,在硅酸盐矿物中仍含少量铁,为了查明铁在各矿物中的分布情况,根据矿石中各矿物含量及各矿物中铁含量进行了铁元素平衡计算,铁的元素平衡计算结果表明,赤铁矿、假象赤铁矿中的铁占矿石中总铁的 $82.06\%$ ,磁铁矿中的铁占 $6.82\%$ ,褐铁矿(包括针铁矿)中的铁占 $9.14\%$ ,赋存在其它矿物中的铁都很少,显然,要回收矿石中的铁最主要的就是要回收矿石中赤铁矿及假象赤铁矿,由于磁铁矿的存在,应增加弱磁选别,以保障磁选流程的通畅。

## 2 选矿试验

### 2.1 重选试验

考察当磨矿细度为 $55\%、65\%、70\%\sim 74\mu\text{m}$ 时,采用重选获得最终铁精矿及预先抛弃部分尾矿的可能性。由重选结果显示,磨矿细度为 $65\%\sim 74\mu\text{m}$ 时摇床可获得的合格铁精矿,品位为 $68.19\%$ 、回收率为 $11.42\%$ 。当磨矿细度从 $65\%\sim 74\mu\text{m}$ 增至 $70\%\sim 74\mu\text{m}$ 时,合格铁精矿回收率提高了约 $3.5\%$ 。

### 2.2 磁选试验

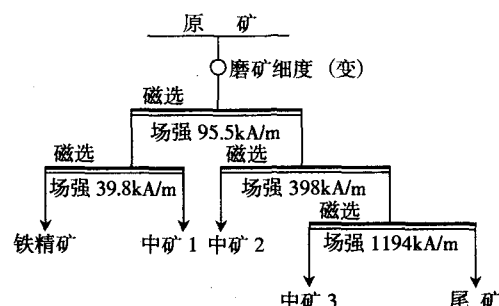


图1 磁选探索试验流程

Fig. 1 Flowsheet of preliminary tests

## 2.2.1 磁选探索试验

在不同磁场强度下, 进行磁选试验, 试验条件见图 1, 试验结果见表 4。

表 4 磁选探索试验结果

Table 4 Results of preliminary tests

| 试验矿样           | 产品名称  | 产率/%  | 铁品位/% | 铁回收率/% |
|----------------|-------|-------|-------|--------|
| 85%-74 $\mu$ m | 铁精矿   | 1.28  | 65.81 | 2.25   |
|                | 铁中矿 1 | 1.76  | 62.23 | 2.92   |
|                | 铁中矿 2 | 42.32 | 64.79 | 73.10  |
|                | 铁中矿 3 | 9.60  | 55.89 | 14.30  |
|                | 尾矿    | 45.04 | 6.19  | 7.43   |
|                | 原矿    | 100.0 | 37.51 | 100.0  |

由表 4 结果可知, 经过一次弱磁选、一次强磁选, 获得铁精矿品位 65.81%, 强磁可丢弃约 45% 的尾矿, 铁的损失率低于 10%。

## 2.2.2 磁选条件优化试验

### 2.2.2.1 磨矿细度及磁场强度试验

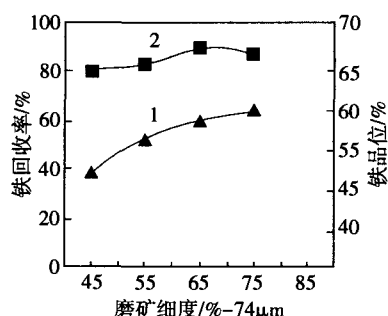


图 3 磨矿细度对弱磁选的影响

Fig. 3 Results of magnetic separation at varying grinding fineness

1-回收率; 2-品位; 下同

矿样中含有少量磁性矿物, 首先用场强为 95.5 kA/m 的弱磁脱去强磁性铁矿, 然后在场强为 636 kA/m 时进行不同磨矿细度的强磁选试验, 试验结果见图 3。由图 3 结果可见, 磨矿细度为 55%-74 $\mu$ m 比较适宜。

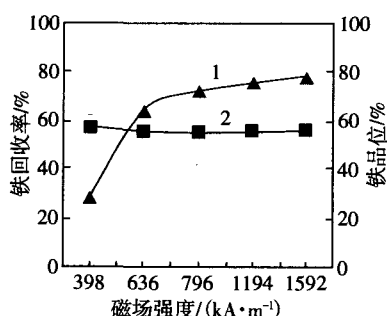


图 4 磁场强度对磁选的影响

Fig. 4 Results of test of magnetic intensity on magnetic separation tailings

当磨矿细度为 65%-74 $\mu$ m 时, 弱磁选尾矿强磁选试验结果见图 4。

由图 4 结果可知, 当场强大于 796 kA/m 时强磁尾矿中铁的损失率低于 15%。

综合以上磁选试验结果可以看出, 磨矿细度为 65%-74 $\mu$ m、磁场强度 1194 kA/m 较为合理。

### 2.2.2.2 磁精选再磨细度试验

为了提高精矿铁品位, 同时使铁矿物与脉石矿物实现有效解离, 对矿样弱磁及强磁精矿即磁选精矿进行再磨细度试验, 试验结果见图 5。

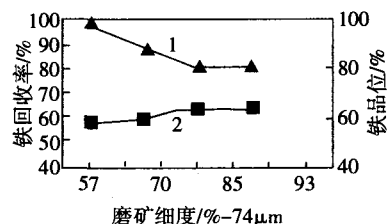


图 5 磁精选再磨细度试验结果

Fig. 5 Results of test of regrinding fineness of magnetic separation concentrate

由图 5 结果可见, 当磁选精矿再磨细度大于 85%-74 $\mu$ m 时, 铁精矿品位能达到 62%。

### 2.2.2.3 磁精选磁场强度试验

试验考察了再磨细度 85%-74 $\mu$ m 时, 磁场强度变化对精矿品位及作业回收率的影响, 结果见图 6。

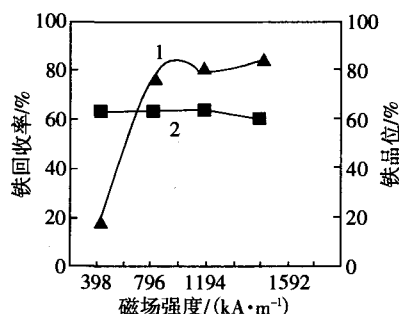


图 6 磁精选磁场强度试验结果

Fig. 6 Results of test of magnetic intensity on magnetic separation concentrate

由图 6 结果可见, 当磨矿细度 85%-74 $\mu$ m 时, 磁场强度 796 kA/m 为宜。

### 2.2.2.4 磁选条件的确定

当磨矿细度为 65%-74 $\mu$ m 时, 经一次弱磁 (场强为 95.5 kA/m)、一次强磁 (场强为 1194 kA/m) 抛弃部分尾矿; 磁选精矿再磨至 85%-74 $\mu$ m 后强磁选 (场强为 796 kA/m) 获得品位为 62.56% 铁精矿, 对原矿回收率为 84.49%。

### 2.3 磁选精矿反浮选试验

在进行了相关的反浮选捕收剂、调整剂种类和粗选、精选药剂条件试验后,进行了开路 and 闭路试验,闭路试验结果见表5。

表5 磁选精矿反浮选闭路试验结果

Table 5 Results of locked cycle test of reverse flotation

| 产品名称 | 作业<br>产率/% | 对原矿<br>产率/% | 铁品位/% | 作业<br>回收率/% | 对原矿<br>回收率/% |
|------|------------|-------------|-------|-------------|--------------|
| 精矿   | 84.28      | 34.65       | 68.49 | 93.13       | 63.60        |
| 尾矿   | 15.72      | 6.47        | 27.08 | 6.87        | 4.69         |
| 给矿   | 100.0      | 41.12       | 61.98 | 100.0       | 68.29        |

### 2.4 全流程试验

在完成了详细的条件试验后,进行重选—磁选—反浮选全流程试验,试验结果见表6。由表6结果可见,试验获得品位为68.27%、回收率为85.50%的铁精矿。

## 3 结语

1) 矿石的构造主要有浸染状构造、条带状构造、块状构造、角砾状构造、似层状构造。矿石的结构主要有细粒状结构、它形晶结构、自形晶结构、半自形晶结构、不等粒结构、镶边结构、残余结构、脉状结构、网脉状结构等,矿石中铁矿物主要以不规则状产出,嵌布关系复杂。

2) 矿石的铁矿物种类繁多,主要为赤铁矿、假象赤铁矿,其次为磁铁矿、褐铁矿、针铁矿及少量菱铁矿,尚有微量磁赤铁矿、自然铁、磷铁矿等,脉石矿物主要为石英,其它是辉石、绿泥石、云母、长石、黏土矿物等;铁的含量为39.77%~

表6 重选—磁选—反浮选全流程试验结果

Table 6 Results of full flowsheet (gravity concentration—magnetic separation—reverse flotation)

| 产品名称  | 产率/%  | 铁品位/% | 占有率/% |
|-------|-------|-------|-------|
| 溜槽精矿  | 8.60  | 68.13 | 15.67 |
| 反浮选精矿 | 34.65 | 68.49 | 63.60 |
| 磁选尾矿  | 50.28 | 11.93 | 16.04 |
| 反浮选尾矿 | 6.47  | 27.08 | 4.69  |
| 总铁精矿  | 43.25 | 68.42 | 79.27 |
| 总尾矿   | 56.75 | 13.66 | 20.73 |
| 原矿    | 100.0 | 37.34 | 100.0 |

37.24%, SiO<sub>2</sub>含量为44.64%~46.94%。

3) 矿石中铁矿物嵌布粒度主要以微、细粒为主,赤铁矿、假象赤铁矿的微、细粒占有率为71.14%;在磨矿细度为85%~74μm时,铁矿物单体解离度为91.85%;为了获得良好的选矿指标,需适当细磨,合理进行多段磨矿,采用重选—磁选—反浮选联合流程,强化微、细粒赤铁矿及假象赤铁矿的回收,为获得高品位的铁精矿,采用了反浮选技术。

4) 采用重选—磁选—反浮选联合工艺流程获得品位为68.27%、铁回收率为85.50%的铁精矿。

### 参考文献

- [1] 朱俊士.选矿试验研究与产业化[M].北京:冶金工业出版社,2004.
- [2] 朱玉霜,朱建光.浮选药剂的化学原理[M].长沙:中南工业大学出版社,1987.
- [3] 孙传尧,印万忠.硅酸盐矿物浮选原理[M].北京:科学出版社,2001.

## LABORATORY SCALE MINERAL PROCESSING RESEARCH ON A COMPLEX IRON ORE WITH Fe-MINERALS FINELY DISTRIBUTED

ZHOU Shaozhen, LIU Jianyuan

(Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100044, China)

### ABSTRACT

The structures of the ore are complex, and grains of Fe-minerals are finely distributed in the ore. The species of Fe-bearing minerals are firstly hematite, martite and secondly magnetite, limonite, goethite, with minor amount of siderite and trace amount of magnetic hematite, natural iron, and phosphosiderite. There are pyrite and chalcopyrite as sulphide minerals, and apatite as harmful impurity occurring as independent mineral. The gangue minerals are mainly quartz, secondly are pyroxene, chlorite, mica, feldspar, and clay minerals. Moderate fine grinding, reasonable regrinding and the combination of gravity concentration, magnetic separation and flotation are necessary for improving the recovery of fine and ultra fine particles of hematite and martite. Besides this, reverse flotation should be employed for reaching high grade of concentrate. Test on the ore through gravity concentration, magnetic separation and reverse flotation produced an iron concentrate grading 68.27% Fe with a recovery of 85.50%

**Key words:** gravity concentration; magnetic separation; reverse flotation; hematite; limonite; goethite