



## 鞍千磁铁矿工艺矿物学研究

王长艳<sup>1</sup>, 徐冬林<sup>1</sup>, 史达<sup>2</sup>, 韦文杰<sup>1</sup>, 张玲<sup>1</sup>, 刘杰<sup>2</sup>

(1. 鞍钢集团鞍千矿业责任有限公司, 辽宁 鞍山 114043; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 难采选铁矿资源高效开发利用技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:**近年来鞍千地区采出矿石性质变化较大,为给该矿石选矿工艺流程的制定提供依据,有必要对其进行详尽的工艺矿物学研究。本文借助光学显微镜、化学分析、X射线衍射等分析检测手段,对鞍千区域矿石样本的化学组成、矿物组成、浸染粒度及嵌布特性施行了综合而系统的研究。研究表明:矿石中铁品位为29.25%,主要含铁矿物为磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、黄铁矿,其中磁铁矿含量31.65%,赤铁矿含量6.53%,为磁铁矿型铁矿石;脉石以石英为主,含量达45.44%,其次为角闪石。矿石中赤铁矿中自形晶结构较为多见,磁铁矿中半自形晶结构较为多见,个别磁铁矿为两种及两种以上矿物间的交代构造。磁铁矿与赤铁矿的粒度不均,可择取多段磨矿多段磁选选别工艺。

**关键词:**矿物学;嵌布特征;磁铁矿;矿物组成

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.033

中图分类号:TD951 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2022)04-0193-07

铁矿资源作为钢铁行业进步的基础、基石,是我国重要的战略性矿产资源。其在国家的资源安全、国防安全和战略新兴产业进步方面均发挥了关键性的作用<sup>[1-3]</sup>。当前,工艺矿物学的研究技术、研究目标和研究方向不断发展,其在选矿行业所扮演的角色也更加重要<sup>[4]</sup>。对工艺矿物学的探讨可以从更深层次对矿物的组成、含量、嵌布关系、元素赋存特质、有用组分的单体解离等方面进一步了解,对于选矿原理、策划科学的选矿方案、改进选矿流程等可给出关键性的矿物学根据<sup>[5-6]</sup>。鞍千铁矿石是我国重要的铁矿资源,但随着近十几年开采深度的逐渐加大,矿石性质已经发生较大变化,目前选厂的工艺流程并不能很好的适应现在新开采的矿石性质,因此有必要对目前新开采入选矿石进行工艺矿物学研究,重新认识矿石组成和构造,进而有针对性的设计相应的分选工艺流程以及对现有工艺流程进行改造,对鞍山式铁矿石的分选也有一定的借鉴价值。

### 1 矿石性质

#### 1.1 矿石化学多元素分析

对矿石进行化学成分分析,结果见表1。

表1 矿石化学成分分析/%

Table 1 Analysis of chemical composition of ore

TFe	FeO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	S	P
29.25	10.93	47.07	0.36	2.82	2.63	0.083	0.044

由表1可知,矿石TFe品位为29.25%,FeO含量为10.93%,磁性率为37.36%;主要脉石元素SiO<sub>2</sub>,其次CaO、MgO、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,有害元素S、P的含量较少。据此可初步确定主要脉石矿物为石英和钙、镁闪石。

#### 1.2 矿石铁物相分析

矿石中铁物相分析结果见表2。

由表2可知,该矿石试样中大部分的铁由磁铁矿的形式赋存,其铁的分布率达79.02%,是首要的回收目标;赤(褐)铁矿为次要回收矿物,

收稿日期:2020-06-21; 改回日期:2020-07-15

作者简介:王长艳(1975-),女,高级工程师,主要从铁矿选矿研究工作。

通信作者:史达(1994-),男,汉,博士研究生,主要从事铁矿及非金属矿分选研究工作。

铁的分布率为 13.55%，磁铁矿及赤褐铁矿所含铁的总分布率可达到 92.57%，因此，磁铁矿和赤（褐）铁矿为该矿石试样回收的主要目标。

表 2 铁物相分析

名称	磁铁矿 中铁	赤（褐）铁 矿中铁	碳酸铁 中铁	硅酸铁 中铁	硫化铁 中铁	总铁
含量/%	23.70	4.06	1.03	0.97	0.23	29.99
分布率/%	79.02	13.55	3.43	3.23	0.77	100.00

### 1.3 矿石的矿物组成

为进一步验证矿石试样中矿物的类别，运用 X 射线衍射分析对矿样的矿物构成进行探讨，XRD 结果见图 1。借助光学显微镜对矿石的矿物构成进行探究，矿物组成及含量见表 3。

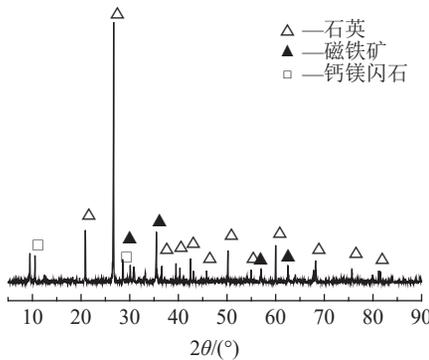


图 1 矿石 XRD 分析  
Fig.1 XRD analysis of the ore

表 3 矿石中主要矿物组成及含量/%

磁铁矿	赤铁矿	褐铁矿	黄铁矿	黄铜矿	石英
31.65	6.53	0.35	0.66	微量	45.44
角闪石	碳酸盐矿物	辉石	绢云母	绿泥石	合计
9.56	3.04	1.52	0.71	0.54	100.00

注：碳酸盐矿物主要有方解石、石灰石、白云石、菱镁矿等。

由图 1 可以看出，矿石中主要有用矿物为磁铁矿，赤褐铁矿含量较少，故未出现明显的衍射峰，石英半峰宽较窄，峰形尖锐，为主要的脉石矿物，其次为钙镁闪石。

由表 3 可知，矿石试样的矿物构成较为单一，铁矿物总计占 39.19%，其中铁矿物大部分以磁铁矿、赤铁矿和褐铁矿形式存在；非金属矿物占比 60.81%，主要包括石英、角闪石、辉石、绢云母、绿泥石，占比依次为 45.44%、9.56%、1.52%、0.71%、0.54%，另有少量方解石、石灰石、白云石、菱镁矿等碳酸盐矿石。

## 2 矿石构造和矿物结构

矿石的构造在选矿工艺中发挥着关键性的作用。通常情况下，矿石的构造大体可以解释为矿物及其集合体在空间上散布的特质，而结构则大体可以解释为矿物及集合体各自的形态特点<sup>[7]</sup>。

### 2.1 矿石构造

#### 2.1.1 浸染状构造

磁铁矿和赤铁矿在矿石试样中表现为不规则的排列，脉石矿物中可见较多不同大小的颗粒浸染嵌布于内，呈现出浸染状结构。

#### 2.1.2 条纹状构造

局部磁铁矿和赤铁矿集合体与脉石矿物相间排布，且呈条纹状存在于矿石试样，形成条纹状结构。

### 2.2 矿物结构

矿石中多种矿物颗粒本身的构造特点在矿物的解离中发挥着各自重要的作用<sup>[7]</sup>，在这种矿石试样中赤铁矿大体体现为自形晶构造，磁铁矿大体体现为半自形晶构造和两种及两种以上矿物间的交互构造等。

#### 2.2.1 自形晶结构

磁铁矿主要通过自形粒状出现，赤铁矿在矿石试样中主要通过片状、板状出现，结晶形态相对更完整，形成自形晶结构。

#### 2.2.2 半自形晶结构

局部磁铁矿和赤铁矿颗粒晶体形态并不完备，部分晶面维持较好，构成半自形晶构造。

#### 2.2.3 交代结构

赤铁矿沿磁铁矿的边界和裂隙组成交代，使得磁铁矿晶边产生了凹陷，呈港湾状结构，组成交代构造。

## 3 矿石中主要矿物的嵌布特征

### 3.1 磁铁矿

磁铁矿多数为自形、半自形粒状，少数表现为粒状集合体模式，表现为浸染或星散状排布于脉石内，粒度不一致，些许磁铁矿集合体于脉石内表现为条纹状嵌布（见图 2（a）、图 2（b））。大部分磁铁矿被赤铁矿沿边部、裂隙及内部交替，形成不混溶连晶颗粒（见图 2（c）、图 2（d））。磁铁矿及赤铁矿嵌布交互共生，互为围裹，同时浸染状排布于脉石内，少部分细粒赤铁矿顺边界

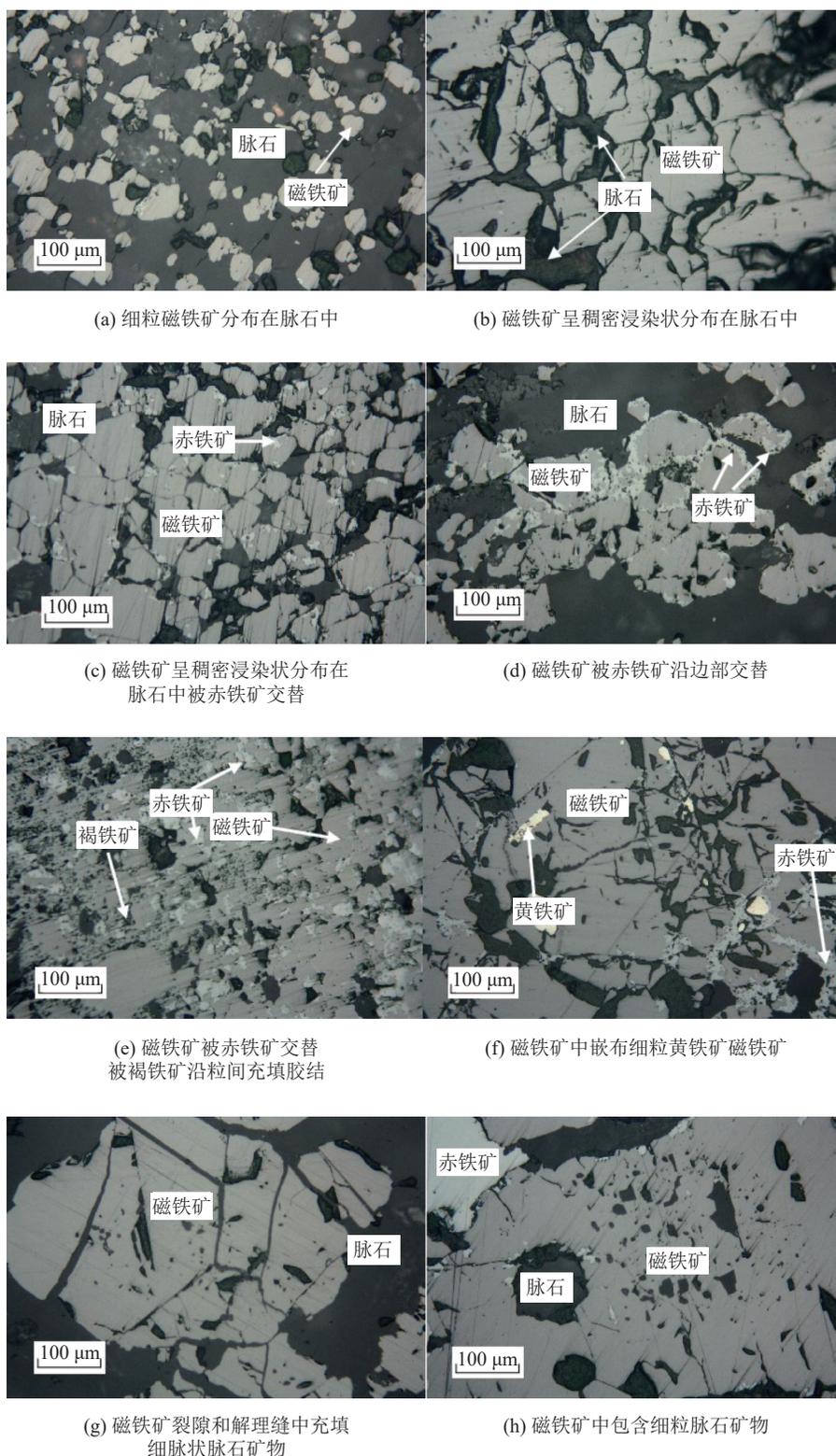


图2 磁铁矿的嵌布特征

Fig.2 Dissemination characteristics of magnetite

与磁铁矿共生，些许赤铁矿嵌布在磁铁矿集合体内（见图2（c）、图2（d））。褐铁矿颗粒十分细小，部分褐铁矿充填胶结于磁铁矿间（见

图2（e））。磁铁矿和黄铁矿有十分紧密的相互嵌布关系，细粒黄铁矿嵌布于磁铁矿集合体中，同时在黄铁矿晶粒中镶嵌也有少量细粒磁铁矿

(见图 2 (f))。部分粗粒磁铁矿的裂隙和孔洞分布较广泛，裂隙和孔洞中充填细脉状、细粒状的脉石矿物(见图 2 (g)、图 2 (h))。

### 3.2 赤铁矿

矿石试样中的赤铁矿含量稍低，含有原生赤铁矿及次生赤铁矿，原生赤铁矿多数为自形-半自形的粒状及粒状集合体模式，少部分为自形的板状、片状或针状，表现为星点状排布于脉石内，粒度不一致，些许赤铁矿集合体及脉石矿物固定

排序，表现为互相嵌布(见图 3 (a)、图 3 (b))。常见赤铁矿和磁铁矿颗粒相互嵌布共生，部分赤铁矿呈条带状沿磁铁矿边缘嵌布，一起分布在脉石中(见图 2 (c)、图 2 (d))。次生赤铁矿为磁铁矿氧化蚀变产物，沿边部、裂隙和内部交替磁铁矿，二者形成不混溶连晶颗粒(见图 3 (c)、图 3 (d))。些许矿石中的赤铁矿由细脉状褐铁矿顺着粒间填满胶结，少数赤铁矿围裹于褐铁矿内(见图 2 (e)、图 2 (f))。

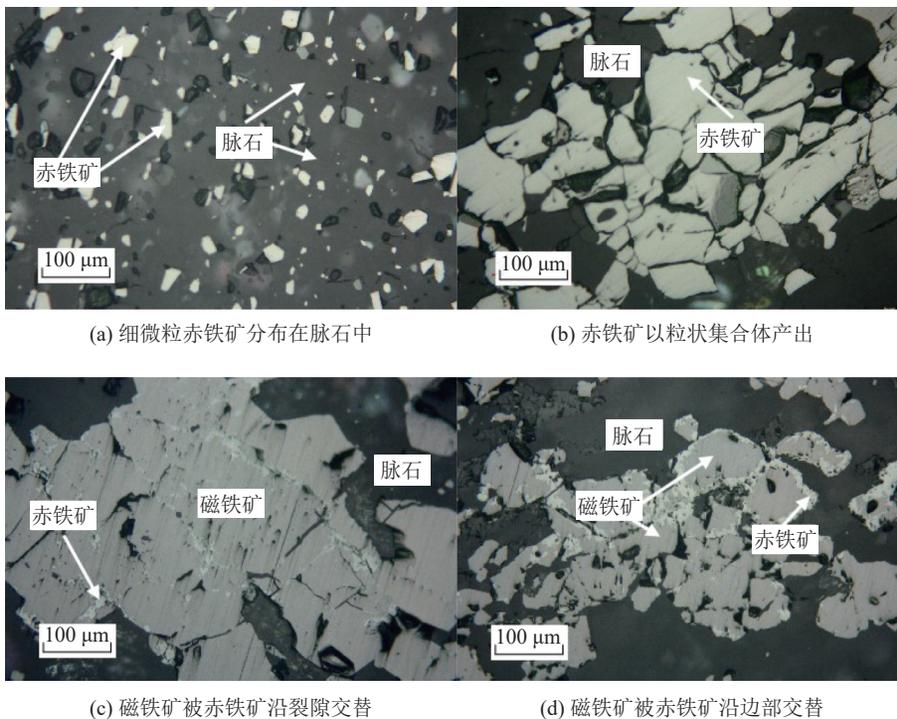


图 3 赤铁矿的嵌布特征

Fig.3 Dissemination characteristics of hematite

### 3.3 褐铁矿

褐铁矿在矿石中含量较少，主要以粒状产出，且颗粒较细小，与磁铁矿、赤铁矿毗连共生

(见图 4 (a))，一些褐铁矿以细脉状的形式呈现，同时填充胶结于磁铁矿及赤铁矿粒间，细粒磁铁矿及赤铁矿围裹于内(见图 4 (b))。

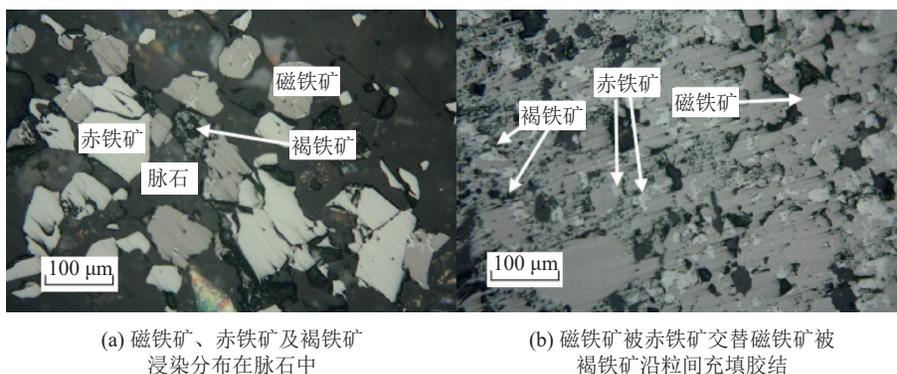


图 4 褐铁矿的嵌布特征

Fig.4 Dissemination characteristics of limonite

### 3.4 黄铁矿

黄铁矿含量较少，仅在部分标本中观测到。黄铁矿以自形-半自形粒状产出，常镶嵌在赤铁矿、磁铁矿颗粒中（见图2（f））。

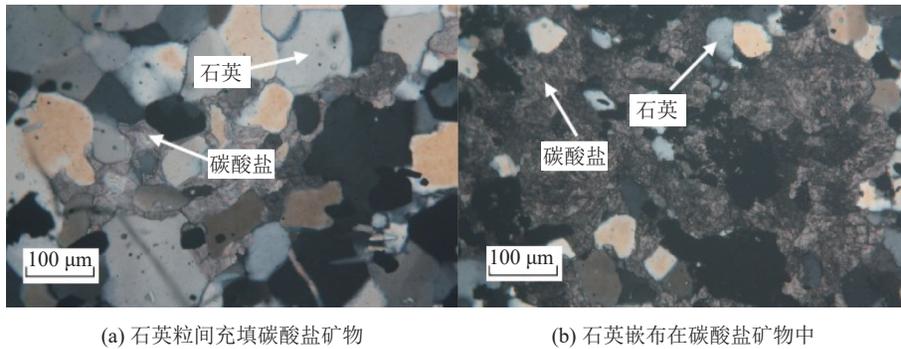
### 3.5 石英

石英在矿石试样中含量相对较高，粒度相对细密，大部分为自形粒状集合体。石英集合体内常嵌布角闪石及辉石等硅酸盐矿物（见图6（a）、

图7），粒间常填充形状不规则的碳酸盐矿物，少数细粒石英嵌布于碳酸盐矿物内（见图5（a）、图5（b））。

### 3.6 角闪石

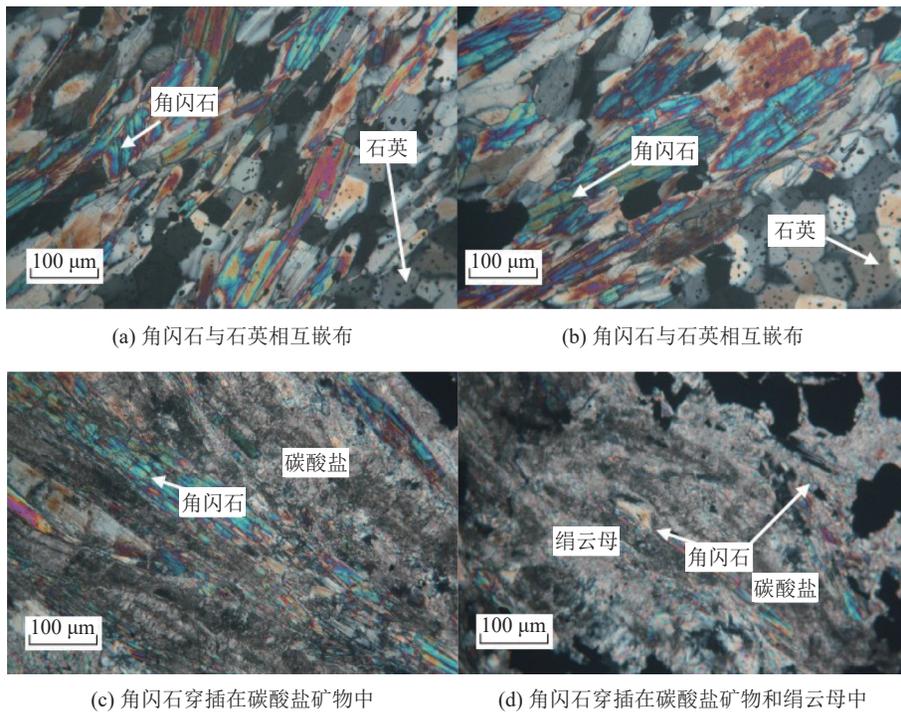
角闪石以长柱状产出，粒度细小，较分散分布在石英集合体中，且多呈定向排列（见图6（a）、图6（b）），部分角闪石穿插在碳酸盐矿物和绢云母中（见图6（c）、图6（d））。



(a) 石英粒间充填碳酸盐矿物 (b) 石英嵌布在碳酸盐矿物中

图5 石英的嵌布特征

Fig.5 Dissemination characteristics of quartz



(a) 角闪石与石英相互嵌布 (b) 角闪石与石英相互嵌布  
(c) 角闪石穿插在碳酸盐矿物中 (d) 角闪石穿插在碳酸盐矿物和绢云母中

图6 角闪石的嵌布特征

Fig.6 Dissemination characteristics of hornblende

### 3.7 碳酸盐矿物

碳酸盐矿物在矿石试样中含量较少，粒度分布不均匀，主要以不规则状产出，部分包含细粒石英和角闪石，少数碳酸盐矿物及绢云母紧密同

生（见图5（a）、图5（b）、图5（c）、图6（d））。

### 3.8 辉石

辉石在矿石试样中含量较少，主要以板状、柱状产出，粒度相对较细小，于石英集合体中分

散嵌布，石英、角闪石、辉石三种矿物常常相互嵌布共生（见图 7）。

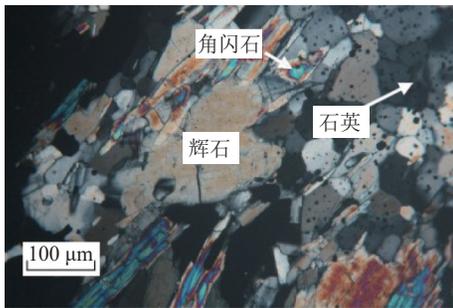


图 7 辉石产出特征

Fig.7 Dissemination characteristics of pyroxene

### 3.9 绢云母

绢云母集中产于少量围岩中，与碳酸盐矿物有密切的伴生关系，内部穿插有部分角闪石（见图 6（d））。

## 4 主要矿物浸染粒度

矿物浸染粒度对选矿工艺流程的确定有十分重大的影响。矿石中主要回收矿物为磁铁矿和赤铁矿，分别对其嵌布粒度进行测定，结果见表 4。

表 4 粒度统计结果

Table 4 Grain dissemination results

粒度/mm	磁铁矿 分布率/%	累计 分布率/%	赤铁矿 分布率/%	累计 分布率/%
+0.15	29.45	29.45	8.67	8.67
-0.15+0.1	13.88	43.33	20.23	28.90
-0.1+0.075	16.30	59.63	11.48	40.38
-0.075+0.053	12.47	72.10	14.90	55.28
-0.053+0.038	14.99	87.09	15.36	70.64
-0.038	12.91	100.00	29.36	100.00

由表 4 可知，磁铁矿+0.075 mm 粒度中的分布率占比 59.63%，-0.038 mm 12.91%，因此磁铁矿的粒度分布不均，粒度大多数为中粒嵌布。

赤铁矿 +0.075 mm 40.39%，-0.038 mm 粒度 29.35%，因此赤铁矿的粒度分布不均，粒度相比于磁铁矿更细小，于细粒度中分布率较高。

参考矿物浸染粒度分析发现，该矿石中磁铁矿及赤铁矿的粒度分布不均，可运用阶段磨矿、阶段磁选选别的工艺。

鞍千矿在早期主要为贫赤铁矿石，磁性率较低，主要含铁组分为赤、褐铁矿，FeO 含量 1.62%，磁性率仅为 6.79%<sup>[10]</sup>。本文经过上述工艺矿物学研究发现，目前鞍千矿主要含铁组分为磁铁矿，且

矿石磁性率高达 37.36%，这主要是因为随着矿山开采的逐渐深入，矿石性质发生变化，FeO 含量逐渐增大，磁铁矿含量也随之增加。

## 5 结 论

(1) 鞍千矿中的金属矿物主要为磁铁矿，其次是赤铁矿，非金属矿物主要是石英和角闪石。

(2) 矿石中磁铁矿和赤铁矿主要为浸染状分布于脉石内，二者间的嵌布关系紧密，交互嵌布，二者互含现象普遍，大多数为磁铁矿由赤铁矿替换，二者混合成不混溶颗粒，所以磁铁矿与赤铁矿间无法解离充分。部分磁铁矿与黄铁矿相互嵌布关系复杂，彼此之间若不进一步解离，将严重影响铁的回收。

(3) 有用矿物的粒度分布不均匀，可选择多段磨矿。微细粒赤铁矿（-0.038 mm）含量较高，难以从脉石中解离出来，易损失于尾矿中。

(4) 依据工艺矿物学研究的结果，选用磨矿-磁选流程可将大部分磁铁矿回收，但部分细粒级赤铁矿采用传统工艺难以分选到较高品位。

### 参考文献：

[1] 韩继康, 梁冰, 李国峰, 等. 某含磷铁矿的可选性实验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(2):49-54.  
 HAN J K, LIANG B, LI G F, et al. Preparability test of a phosphorus-bearing iron ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(2):49-54.  
 [2] 瞿思思. 大西沟某铁矿选矿工艺矿物学研究[J]. 矿冶工程, 2019, 39(3):70-72.  
 QU S S. Mineralogy research on the beneficiation process of a certain iron ore in Daxigou[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019, 39(3):70-72.  
 [3] 张亚明, 王雪峰, 李文超. 铁矿资源综合利用效益评价体系研究[J]. 中国国土资源经济, 2019, 32(4):43-48.  
 ZHANG Y M, WANG X F, LI W C. Research on the benefit evaluation system of comprehensive utilization of iron ore resources[J]. *China Land Resource Economics*, 2019, 32(4):43-48.  
 [4] 杨耀辉, 惠博, 严伟平, 等. 攀西微细粒钛铁矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2020(3):131-135.  
 YANG Y H, HUI B, YAN W P, et al. Research on process mineralogy of fine ilmenite in Panxi area[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):131-135.  
 [5] 韩跃新, 孙永升, 李艳军, 等. 我国铁矿选矿技术最新进

展[J]. 金属矿山, 2015(2):1-11.

HAN Y X, SUN Y S, LI Y J, et al. Latest development of iron ore dressing technology in China[J]. Metal Mine, 2015(2):1-11.

[6] 王彦, 李艳军. 某菱锰矿石工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 2019(2):188-191.

WANG Y, LI Y J. Research on process mineralogy of a

rhodochrosite Ore[J]. Metal Mine, 2019(2):188-191.

[7] 宫贵臣, 韩跃新, 李艳军. 辽宁某铁矿石工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2018(2):77-80.

GONG G C, HAN Y X, LI Y J. Research on technological mineralogy of an iron ore in Liaoning[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2018(2):77-80.

## Research on Process Mineralogy of Anqian Magnetite Ore

Wang Changyan<sup>1</sup>, Xu Donglin<sup>1</sup>, Shi Da<sup>2</sup>, Wei Wenjie<sup>1</sup>, Zhang Ling<sup>1</sup>, Liu Jie<sup>2</sup>

(1. Anqian Mining Co., Ltd., Anshan Iron and Steel Group, Anshan, Liaoning, China; 2. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, National-Local Joint Engineering Research Center of Refractory Iron Ore Resources Efficient Utilization Technology, Shenyang, Liaoning, China)

**Abstract:** In recent years, the properties of the ore mined in the Anqian area have changed greatly. In order to provide a basis for the formulation of the ore beneficiation process, it is necessary to carry out detailed process mineralogical research. In this paper, with the help of optical microscope, chemical analysis, X-ray diffraction and other analysis and detection methods, a comprehensive and systematic study on the chemical composition, mineral composition, dissemination particle size and inlay characteristics of the ore samples in the Anqian area was carried out. Research results show that the iron grade in the ore is 29.25%, and the main iron-bearing minerals are magnetite, hematite, limonite, and pyrite. The magnetite content is 31.65% and the hematite content is 6.53%. Iron ore type iron ore; gangue is mainly quartz, with a content of 45.44%, followed by hornblende. The automorphic crystal structure is more common in hematite in the ore, and the semi-automorphic crystal structure is more common in the magnetite. Individual magnetite is an alternate structure between two or more minerals. The particle size of magnetite and hematite is uneven, and the multi-stage grinding and multi-stage magnetic separation process can be selected.

**Keywords:** Mineralogy; Dissemination characteristics; Magnetite ore; Mineral composition

////////////////////////////////////  
(上接第 187 页)

## Experimental Study on Iron Removal and Whitening of a Kaolin in South China

Guo Chunlei, Ma Ying, Zhao Tuo, Da Zongyang

(State Key Laboratory of Bayan Obo Rare Earth Resource Researchers and Comprehensive Utilization, Baotou, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** Taking a certain kaolin in the south as the object, based on the study of sample properties, the influence of factors such as pH value, sodium sulfonate dosage, oxalic acid dosage, pulp concentration, temperature and other factors on the whiteness of kaolin was systematically investigated. The results show that the kaolin belongs to sandy kaolin, and the iron-containing minerals that affect the whiteness are mainly hematite, magnetite and rutile; under the optimal test conditions for iron removal and whitening, the Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content is 0.46%. Kaolin product with a brightness of 80.82%; Provide technical support for the development and utilization of the kaolin mine.

**Keywords:** Kaolin; Iron removal; Iron removal and whitening