

内蒙某铁矿石的工艺矿物学研究

蔡明明, 张文平, 于淙权, 李光胜, 黄发波, 朱幸福

(山东黄金矿业科技有限公司选冶实验室分公司, 山东 烟台 261441)

摘要: 为了探索内蒙某铁矿石的工艺矿物学性质, 对该矿石开展了较为全面的工艺矿物研究, 结果表明: 该矿石全铁品位为 23.52%, 矿石中的铁主要以磁性铁的形式存在, 占总铁的 85.60%, 其次是赤铁矿、褐铁矿中的铁, 占总铁的 7.35%, 以硅酸盐形式存在的铁占总铁的 6.33%, 只有微量的铁在硫化矿物中, 占总铁的 0.72%; 矿石的主要金属矿物为磁铁矿, 含有少量的赤铁矿、黄铁矿, 可见微量的黄铜矿和闪锌矿, 脉石矿物主要有石英、长石(钾长石、钠长石、斜长石)、角闪石(阳起石、绿钠闪石等)、云母(黑云母、白云母等)、绿泥石、方解石、磷灰石等; 通过对该矿石开展系统的工艺矿物学研究, 为该类资源的综合开发利用提供了主要的基础数据支撑。

关键词: 工艺矿物学; 铁矿石; 化学分析; 矿物组成; 嵌布特征; 粒度; 连生

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.034

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2022)04-0200-05

虽然我国的铁矿资源比较丰富, 但是随着矿产资源的开采难度系数逐渐变大, 工艺矿物学研究在矿产资源开发过程中的作用越来越重要^[1-4]。通过工艺矿物学研究明确矿石的性质特点, 查明影响选矿指标的主要因素, 可为矿产资源的综合开发利用和选矿指标的优化调整提供重要的数据支撑^[5-6]。本文通过对该矿石开展系统性的工艺矿物学参数研究, 为后续该矿产资源的高效开发打

下了坚实的基础。

1 矿石组分

1.1 化学成分

某铁矿石的化学成分分析结果见表 1。从表 1 可以看出, 该矿石中全铁含量为 23.52%, 主要的可回收元素。

表 1 矿石化学成分分析结果/%

Table 1 Results of chemical composition analysis of ore

TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	Mn	CaO	MgO
23.52	12.66	51.71	6.80	0.30	1.32	0.072	2.91	2.21
K ₂ O	P	S	V	Cu	Pb	Zn	Ni	烧失
1.33	0.075	0.18	0.008	<0.05	<0.05	<0.05	<0.05	1.65

1.2 铁化学物相分析

矿石中铁的化学物相分析结果分别见表 2。

从表 2 可以看出, 矿石中的铁主要以磁性铁的形式存在, 占总铁的 85.60%, 磁铁矿是磁性铁的

主要代表矿物; 其次以赤铁矿、褐铁矿中的铁, 占总铁的 7.35%; 硅酸盐形式的铁占总铁的 6.33%; 只有微量的铁在硫化物矿物中, 占总铁的 0.72%。

收稿日期: 2020-08-22

基金项目: 工艺矿物学数据分析与应用技术研究, 矿冶过程自动控制技术国家(北京市)重点实验室开放基金(BGRIMM-KZSKL-2019-01)

作者简介: 蔡明明(1985-), 男, 工程师, 主要研究方向为复杂多金属矿分选及工艺矿物学检测分析等。

通信作者: 张文平(1985-), 男, 高级工程师, 研究方向为复杂多金属矿分选及工艺矿物学检测分析等。

表 2 矿石中铁的化学物相分析结果
Table 2 Results of chemical phase analysis of iron in ores

名称	磁性铁中Fe	赤褐铁矿中Fe	硅酸铁中Fe	硫化物中Fe	总铁
含量/%	20.15	1.73	1.49	0.17	23.54
占有率/%	85.60	7.35	6.33	0.72	100.00

1.3 矿物组成

通过显微镜下光片鉴定及扫描电镜检测综合分析, 结果表明, 矿石的主要金属矿物为磁铁矿, 亦见少量赤铁矿、黄铁矿, 可见微量的黄铜矿和闪锌矿; 脉石矿物主要有石英、长石(钾长石、钠长石、斜长石)、角闪石(阳起石、绿帘闪石等)、云母(黑云母、白云母等)、绿泥石、方解石、磷灰石等。矿石矿物相对含量见表 3。

表 3 矿石的矿物组成及相对含量
Table 3 Mineral composition and relative content of ores

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
磁铁矿	27.98	角闪石	11.04
赤、褐铁矿	2.47	云母	5.15
钛铁矿等	<0.4	绿泥石	3.53
黄铁矿、磁黄铁矿	0.3	方解石等	3.23
其他硫化物矿物	<0.2	磷灰石	0.21
石英	29.79	其他	余量
长石	15.61		

2 矿石中重要矿物的嵌布特征

2.1 磁铁矿

磁铁矿是矿石中的主要金属矿物, 矿物量为 27.98%, 主要化学组成为 Fe、O, 磁铁矿本身含杂质很少, 有部分含有一定数量的 Si、Al、Ti 等元素, 在个别磁铁矿中检测出了元素钒。磁铁矿平均含 Fe 72.09%、Al 0.15%、Si 0.06%、Ti 0.02、V 0.01%, 这些定量数据可作为生产铁精矿时铁品位的上限和含杂质元素的下限参考。

矿石中的磁铁矿多呈中-粗粒嵌布, 亦见呈不规则粒状和条状嵌布的磁铁矿; 矿石中粗粒磁铁矿遭受碎裂作用, 后期脉石沿裂隙充填形成磁铁矿的碎裂结构, 导致磁铁矿的边界复杂化, 同时生成一定数量的呈棱角状的磁铁矿碎屑, 这样的磁铁矿不易与脉石完全分离; 受构造破裂作用的影响和部分磁铁矿可能形成于成岩后的热液活动阶段, 所以存在一定数量的细粒磁铁矿, 这类磁铁矿在磨矿过程中不可能实现和脉石矿物的充分解离, 是生产铁精矿过程中要面对的主要困难之一。

将该矿石破碎至 0~2 mm 观察, 磁铁矿呈中-粗粒度嵌布, +0.074 mm 84.97%, -0.010 mm 0.04%, 这有利于通过磨矿使其与脉石矿物解离。磁铁矿主要粒度分布情况见表 4。磁铁矿主要嵌布特征见图 1。

2.2 赤铁矿、褐铁矿

矿石中含有少量的赤、褐铁矿, 矿物量为 2.47%, 其中主要是赤铁矿, 褐铁矿很少。赤铁矿化学组成相对简单, 除含 Fe、O 外, 一般不含其他杂质。

部分赤铁矿直接交代磁铁矿形成, 二者关系密切, 磨矿后与磁铁矿很难完全分离, 不能与磁铁矿完全分离的赤铁矿进入铁精矿中会降低精矿的铁品位。赤铁矿主要嵌布特征见图 2。

2.3 黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿

化学物相结果表明, 占总铁 0.72% 的铁在硫化物矿物中, 这部分铁主要是在黄铁矿中, 黄铜矿、闪锌矿的成分中也会含少量的铁, 由于它们的矿物量太小, 含铁量占总铁量也很小。黄铁矿主要嵌布特征见图 3。

表 4 磁铁矿粒度分布情况
Table 4 Particle size distribution of magnetite

粒级/ mm	+0.833	-0.833 +0.589	-0.589 +0.417	-0.417 +0.295	-0.295 +0.208	-0.208 +0.147	-0.147 +0.104	-0.104 +0.074	-0.074 +0.043	-0.043 +0.020	-0.020 +0.015	-0.015 +0.010	-0.010
含量/%	0.96	0.69	9.62	14.99	17.52	18.89	13.97	8.33	9.48	5.05	0.27	0.19	0.04
累积量/%	0.96	1.65	11.27	26.26	43.78	62.67	76.64	84.97	94.45	99.5	99.77	99.96	100.00

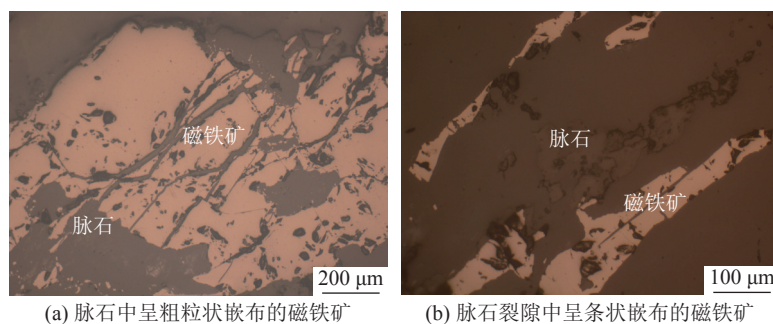


图 1 磁铁矿主要嵌布特征
Fig.1 Main distribution characteristics of magnetite

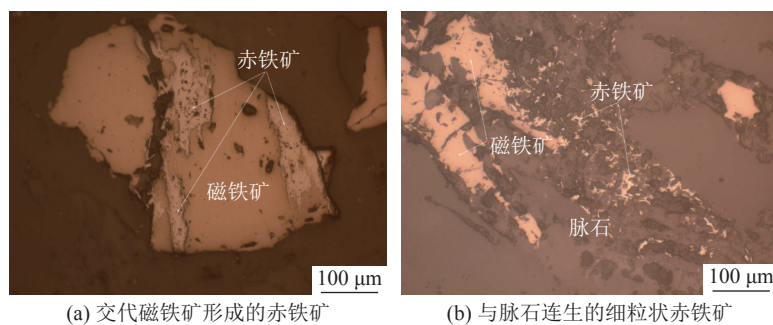


图 2 赤铁矿主要嵌布特征
Fig.2 Main distribution characteristics of hematite

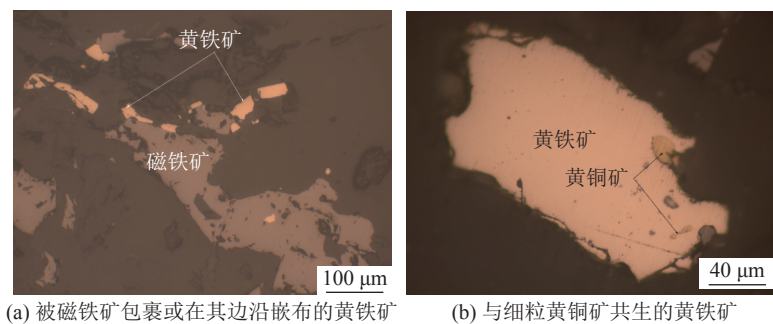


图 3 黄铁矿主要嵌布特征
Fig.3 Main distribution characteristics of pyrite

3 矿石中磁铁矿的解离度分析

为了使磁铁矿解离度的分析更有针对性，特开展了两段磨矿条件下的解离度分析研究。

一段磨矿研究是将矿石分别处理至不同磨矿细度，测定其中金属矿物的单体解离度，以为确定更加合理的一段磨矿条件提供参考依据。

一段磨矿不同磨矿细度下磁铁矿的解离度研究结果见表 5。

根据一段磨矿磁铁矿的单体解离度检测结果来看，当磨矿细度为-0.074 mm 67.4%时，磁铁矿的单体解离度为 92.39%，进一步提高磨矿细磨对磁铁矿的解离没有太大影响。

二段磨矿实验是在一段磨矿后磁选的粗精矿中完成，二段磨矿不同磨矿细度下磁铁矿的解离度分析结果见表 6。

表 5 一段磨矿不同磨矿细度磁铁矿解离度分析结果
Table 5 Analysis results of dissociation degree of magnetite with different grinding fineness in the first grinding stage

磨矿细度-0.074 mm /%	磁铁矿 /%		合计/%
	单体	与脉石连生	
19.3	72.98	27.02	100.00
42.3	84.16	15.84	100.00
56.9	85.12	14.88	100.00
67.4	92.39	7.61	100.00
83.3	92.52	7.48	100.00
91.7	92.56	7.44	100.00

表6 二段磨矿不同磨矿细度磁铁矿的解离度分析结果
Table 6 Analysis results of dissociation degree of magnetite with different grinding fineness in the second stage grinding

磨矿细度/%		磁铁矿/%		合计/%
		单体	连生体	
-0.074 mm	80	95.18	4.82	100.00
	90	96.49	3.51	100.00
	95	97.41	2.59	100.00
-0.044 mm	90	98.25	1.75	100.00
	95	98.82	1.18	100.00
-0.037 mm	95	99.12	0.88	100.00

从表6可以看出，当磨矿细度为-0.037 mm 95%时，磁铁矿的解离高达99.12%，此时连生体形式的磁铁矿的平均粒度约为0.003 mm，而与磁铁矿连生的脉石矿物的平均粒度约为0.008 mm，说明连生形式的磁铁矿粒度很细且以被脉石矿物包裹或连生的形式存在。

4 影响铁回收的矿物学因素分析

(1) 矿石中部分磁铁矿内部有细小的（一般在几百纳米）Al、Ti氧化物析出，细磨无法将Al、Ti氧化物与磁铁矿分离，它们会随磁铁矿进入精矿，降低精矿铁的品位，增加精矿的杂质含量。

(2) 矿石中磁铁矿属中-粗粒度嵌布，经磨矿后易与脉石矿物分离，有利于铁精矿的生产；解离度研究结果表明，无论在什么磨矿细度条件下，磁铁矿都有一定数量的连生脉石，这主要是由于矿石中总有一些呈微细嵌布的磁铁矿所决定的，细粒嵌布的磁铁矿有时也与粗粒磁铁矿经应力破裂造成的碎裂结构有关，该条件下粗粒磁铁矿形成许多棱角状碎片并为脉石充填，这不利于磁铁矿的磨矿解离。

(3) 矿石中有2.47%的赤铁矿、褐铁矿，主要是赤铁矿；部分赤铁矿以交代磁铁矿形式产于磁铁矿边缘，这部分赤铁矿很难与磁铁矿完全分离，在一定程度上影响了精矿铁的品位。

(4) 磁铁矿内部有细小的硅酸盐矿物包体，由于粒度细小，磨矿很难将其与磁铁矿完全分离，这些硅酸盐矿物进入铁精矿后会使精矿的杂质含量增加，进而影响铁精矿质量。

5 结 论

(1) 化学分析结果表明，该矿石中全铁含量为23.52%，是主要的可回收元素。

(2) 化学物相分析结果表明，矿石中的铁主要以磁性铁的形式存在，占总铁的85.60%，磁铁矿是磁性铁的主要代表矿物；其次以赤铁矿、褐铁矿中的铁，占总铁的7.35%；硅酸盐形式的铁占总铁的6.33%；只有微量的铁在硫化物矿物中，占总铁的0.72%。

(3) 矿石的主要金属矿物为磁铁矿，亦见少量赤铁矿、黄铁矿，可见微量的黄铜矿和闪锌矿；脉石矿物主要有石英、长石（钾长石、钠长石、斜长石）、角闪石（阳起石、绿钠闪石等）、云母（黑云母、白云母等）、绿泥石、方解石、磷灰石等。

(4) 通过两段磨矿条件下的磁铁矿解离度分析得出，粗粒磁铁矿有利于单体解离选别，但是部分硅酸盐、连生脉石、氧化铁等矿物呈致密侵染状嵌布于磁铁矿中，对精矿中铁的品位有一定影响。

参考文献：

- [1] 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.
- [2] 彭明生, 刘晓文, 刘羽. 工艺矿物学近十年的主要进展[J]. [矿物岩石地球化学通报](#), 2012, 31(3):210-217.
- [3] 薛忠言, 曾令熙, 刘应冬. 太和钒钛磁铁矿中硫化物的工艺矿物学研究[J]. [矿产综合利用](#), 2019(3):78-81.
- [4] 马驰, 于岸洲, 张颖新, 等. 国外某铁锰矿工艺矿物学研究[J]. [矿产综合利用](#), 2020(1):107-111.
- [5] 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.
- [6] PENG M S, LIU X W, LIU Y. Major advances in technological mineralogy in the past decade[J]. [Geochemistry Of Mineral Rocks](#), 2012, 31(3):210-217.
- [7] XUE Z Y, ZENG L X, LIU Y D. Process mineralogy of the sulfide in the Taihe vanadium titanomagnetite[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2019(3):78-81.
- [8] MA C, YU A Z, ZHANG Y X, et al. Study on process mineralogy of a foreign iron-manganese ore[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2020(1):107-111.

[5] 肖仪武, 方明山, 付强. 工艺矿物学研究的新技术与新理念[J]. [矿产保护与利用](#), 2018(3):49-54.

XIAO Y W, FANG M S, FU Q. New technology and new idea of technological mineralogy research[J]. [Protection and Utilization of Mineral Resources](#), 2018(3):49-54.

[6] 王玲, 赵战锋. 工艺矿物学在地质冶金学中的应用及问题[J]. [矿产综合利用](#), 2020(2):37-43.

WANG L, ZHAO Z F. Application and difficulties of process mineralogy in geometallurgy modeling[J]. [Multipurpose Utilization of Mineral Resources](#), 2020(2):37-43.

Study on Process Mineralogy of an Iron Ore in Inner Mongolia

Cai Mingming, Zhang Wenping, Yu Congquan, Li Guangsheng, Huang Fabo, Zhu Xingfu
(Metallurgical Laboratory Branch of Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Yantai, Shandong, China)

Abstract: In order to explore the technological mineralogical properties of an iron ore in Inner Mongolia, a more comprehensive technological mineral study was carried out on the ore. The results showed that the iron grade of the ore was 23.52%, and the iron in the ore mainly existed in the form of magnetic iron. 85.60% of the total iron, followed by iron in hematite and limonite, accounting for 7.35% of the total iron, iron in the form of silicate accounting for 6.33% of the total iron, only a trace amount of iron in sulfide minerals, it accounts for 0.72% of the total iron; the main metal mineral of the ore is magnetite, which contains a small amount of hematite and pyrite, and traces of chalcopyrite and sphalerite are visible. Gangue minerals mainly include quartz and feldspar (potassium Feldspar, albite, plagioclase), hornblende (actinolite, chlorite, etc.), mica (biotite, muscovite, etc.), chlorite, calcite, apatite, etc. The ore carries out systematic technological mineralogical research, which provides major basic data support for the comprehensive development and utilization of this type of resource.

Keywords: Process mineralogy; Iron ore; Chemical analysis; Mineral composition; dissemination feature; Particle size; Intergrowth

欢 迎 投 稿 欢 迎 订 阅