

白云鄂博云母型铁矿石中铁、稀土的赋存状态研究

王维维^{1,2}, 李二斗^{1,2}, 侯少春^{1,2}, 郭春雷^{1,2}

1. 包头稀土研究院, 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 内蒙古 包头 014030;
2. 稀土冶金及功能材料国家工程研究中心, 内蒙古 包头 014030

中图分类号: TD91; TD955 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)05-0044-05
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.07.009

摘要 白云鄂博云母型铁矿石中 TFe 品位为 17.48%, 稀土 REO 品位为 2.46%。矿石中矿物组成复杂, 含铁矿物主要是磁铁矿和赤铁矿, 含有少量钕铁矿、黄铁矿等, 稀土矿物以氟碳铈矿和独居石为主。矿石构造主要由黑云母定向排列而成的片状构造、斑杂状构造及浸染状构造; 矿物主要为自形-半自形粒状结构、他形粒状结构、尖角状结构、交代残余结构、细脉状结构。磁铁矿多呈半自形至他形粒状变晶结构形式出现, 部分呈角砾状集合体与云母共生; 赤铁矿多呈半自形和他型粒状结构, 也有部分赤铁矿呈微细粒粒状嵌布在脉石矿物中; 氟碳铈矿和独居石呈粒状, 与周边其它矿物紧密共生、镶嵌关系复杂。磁铁矿和赤铁矿的嵌布粒度不均, 氟碳铈矿和独居石的嵌布粒度较细, 部分细粒铁矿石和稀土矿物嵌布在脉石矿物中, 部分铁矿石中也含有细粒稀土矿物。磨矿细度 -0.074 mm 占 90% 下磁铁矿、赤铁矿、氟碳铈矿和独居石的单体解离度仅为 51.54%、58.36%、52.27% 和 63.64%。因此, 强化矿石细磨和微细粒高效分选是解决精矿品位和回收率低的有效途径。

关键词 白云鄂博矿; 云母型; 铁; 稀土; 赋存状态

白云鄂博矿床是世界上著名的超大型 Fe-Nb-REE 矿床, 矿产资源储量大、种类多, 含铁和稀土的矿石有五种类型, 已查明铁矿石储量 14.68 亿 t, 稀土矿储量 1.80 亿 t^[1]。按照包钢“以铁为主, 综合利用”的指导方针, 采用“弱磁—强磁—浮选”工艺流程从五种混合型矿石中综合回收铁和稀土, 不仅铁、稀土精矿的品位和回收率较低, 且精矿中的有害元素 S、P 含量高, 从而增加了冶炼过程中添加剂的消耗量, 产生大量的放射性废渣, 严重污染环境^[2-5]。随着不断的开采, 高品位铁矿石日趋枯竭, 致使整体入选品位下降^[6]; 同时由于白云鄂博矿“多、贫、细、杂”的特征, 致使在现有工艺条件下生产铁精矿的品位和回收率下降, 造成资源浪费^[7-8]。因此, 包钢提出了“精准采矿, 分类选矿”的方针以提高铁、稀土的品位和回收率, 而查清矿石中铁、稀土的赋存状态是开发工艺流程和提高资源利用率的前提。

目前对白云鄂博矿工艺矿物学研究成果较为丰

富, 但都以白云鄂博早期铁矿石、选铁尾矿和尾矿库为主。且随着不断的开采, 矿石性质已发生变化, 需重新对目前开采的矿石分类进行系统的工艺矿物学研究^[9-11]。本文采用化学分析、物相分析、扫描电镜、MLA 矿物自动分析系统等手段对云母型铁矿石中铁、稀土的赋存状态进行了详细研究, 为该类型矿石中铁、稀土的合理利用提供理论指导。

1 矿石物质成分

1.1 矿石化学多元素分析

矿石多元素分析结果见表 1。表 1 结果表明, 矿石中铁的含量为 17.48%, 稀土氧化物 REO 含量较低, 为 2.46%, 是主要的有价元素; Nb₂O₅ 含量为 0.54%, Sc₂O₃ 含量为 0.014%, 可考虑综合回收; 主要的脉石元素为 SiO₂、CaO、MgO 等。

收稿日期: 2020-05-06

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2020MS05001); 内蒙古自然基金重大专项(2019ZD11)

作者简介: 王维维, 男, 硕士, 工程师, 主要从资源综合利用研究工作。

通信作者: 李二斗, 工程师, 致力于稀土资源综合利用研究, E-mail: viviw91@163.com。

表 1 矿石多元素分析结果 /%

Table 1 Multi-element analysis results of the ore

成分	TFe	REO	Nb ₂ O ₅	F	Na ₂ O	K ₂ O	MgO
含量	17.48	2.46	0.54	4.81	1.32	3.04	5.12
成分	CaO	BaO	SiO ₂	ThO ₂	Sc ₂ O ₃	P	S
含量	8.96	2.39	28.62	0.04	0.01	0.46	1.44

1.2 矿石矿物组成

采用 MLA 工艺矿物学自动分析系统对矿石主要矿物组成及相对含量进行分析,结果见表 2。矿石中矿物组成复杂,含铁矿物有磁铁矿(9.18%)、赤铁矿(11.04%)、钕铁矿(1.31%)、黄铁矿(1.19%)、菱铁矿(0.68%)、磁黄铁矿(0.45%)等;稀土矿物以氟碳铈矿和独居石为主,分别为 1.40%、0.62%,其中还包含黄河矿(0.02%)、褐帘石(0.83%)等;主要的脉石矿物为云母(43.03%)、长石(10.12%)、绿泥石(8.19%)、辉石(3.25%)、重晶石(3.91%)和闪石(1.28%)等。

表 2 矿石的主要矿物组成及相对含量 /%

Table 2 Mineral composition and the relative content of the ore

名称	磁黄铁矿	赤铁矿	磁铁矿	黄铁矿	菱铁矿
含量	0.45	11.04	9.18	1.19	0.68
名称	氟碳铈矿	萤石	钕铁矿	独居石	绿泥石
含量	1.40	4.55	1.31	0.62	8.19
名称	重晶石	辉石	云母	长石	闪石
含量	3.91	3.25	43.03	10.12	1.28
名称	褐帘石	磷灰石	黄河矿	方解石	白云石
含量	0.83	0.86	0.02	0.64	0.56

1.3 铁化学物相分析

铁的化学物相分析结果见表 3。由表 3 可以看出,磁铁矿中铁占 41.08%、赤铁矿中铁占 44.43%,是主要回收对象;其次为硅酸铁中铁,分布率为 8.31%;硫化铁主要存在于黄铁矿和磁黄铁矿中,占 4.27%,选矿中需考虑硫化铁中硫影响。

表 3 原矿铁化学物相分析结果 /%

Table 3 Iron phase analysis results of raw ore

铁物相	含量	分布率
磁铁矿中铁	7.12	41.08
赤铁矿中铁	7.70	44.43
菱铁矿中铁	0.33	1.91
硫化铁中铁	0.74	4.27
硅酸铁中铁	1.44	8.31
合计	17.33	100.00

1.4 稀土元素赋存状态

对该类矿石中各个矿物中的稀土分布进行了测定,分析结果见表 4。从表 4 可以看出,稀土元素在氟碳铈矿和氟碳钙铈矿中的分布率为 47.43%,在独居石中的分布率为 43.60%;此外,在磁铁矿和赤铁矿中的分布率为 5.26%,这部分稀土元素在铁矿物选别时容易富集在铁精矿中;脉石矿物中的稀土元素含量较低。

表 4 稀土在矿物中的分布 /%

Table 4 Distribution of rare earths in minerals

矿物种类	w(REO)	分布率
铁矿物	磁铁矿/假象磁铁矿	1.10
	赤铁矿/假象赤铁矿	0.99
	黄铁矿	0.11
钕矿物	钕铁矿	1.35
	稀土矿物	氟碳铈矿/氟碳钙铈矿
其他矿物	独居石	75.76
	萤石	0.42
	云母	40.01
	磷灰石	3.19
	石英/长石	2.36
	钠辉石	0.25
	钠闪石	0.05
	重晶石	0.35
	绿泥石	0.28
	白云石/方解石	0.09
总和		100.00

2 矿物嵌布特征

2.1 铁矿物

磁铁矿是白云鄂博云母型铁矿石中最主要的铁矿物之一,含量约为 10.00%,磁铁矿根据其结晶粒度的大小分为细粒和粗粒两种形态。粗粒磁铁矿多呈半自形至他形粒状变晶结构形式出现,常包裹其它矿物,在云母型矿石中,磁铁矿同时与云母、石英、萤石等共生,

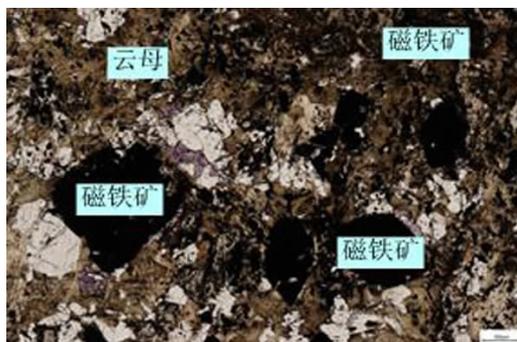


图 1 磁铁矿以半自形至他形粒状,部分呈稠密浸染状
Fig. 1 The magnetite which is semi-automorphic to its granular shape, some are densely disseminated

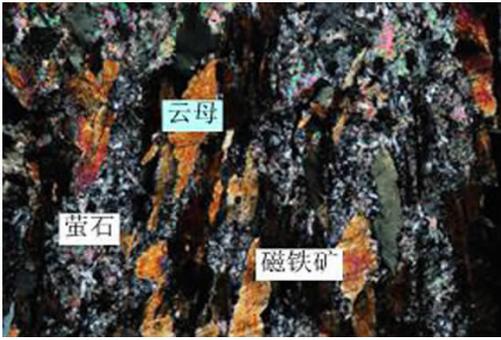


图2 磁铁矿以条带状嵌布在云母和萤石裂隙
Fig. 2 The magnetite which is disseminated in the fissures of mica and fluorite in stripes

细粒磁铁矿呈角砾状集合体与云母共生, 单体解离难度较大(图1); 部分磁铁矿以条带状嵌布在云母和萤石裂隙中(图2)。

赤铁矿磁性较弱, 在云母型铁矿石中分布较多, 含量约为11.00%, 应综合回收。多呈半自形和他型粒状结构, 也有部分赤铁矿呈微细粒状嵌布在脉石矿物中(图3)。

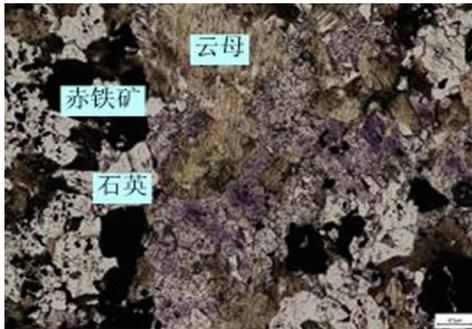


图3 赤铁矿以他型、微细粒嵌布
Fig. 3 The hematite which is disseminated with other types and fine particles

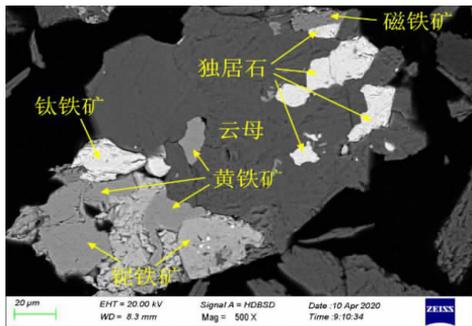


图4 独居石以微细粒嵌布在云母中
Fig. 4 The monazite which is disseminated in the mica with fine particles

黄铁矿含量约为1.00%, 以他形粒状结构出现, 黄铁矿被云母包裹或充填于钽铁矿裂隙中(图4)。钽

铁矿是铁、钽和锰的氧化物, 主要以他型变晶结构与云母或黄铁矿连生, 内部常见有微粒云母或稀土矿物包体(图4、图5)。白云鄂博钽资源丰富, 但与铁矿紧密共生, 品位较低, 提取难度大。

2.2 稀土矿物

云母型铁矿石中稀土含量相对较低, 主要是氟碳铈矿和独居石矿物。氟碳铈矿为铈氟碳酸盐矿物, 颜色通常为黄色或浅绿色, 在云母型铁矿石中主要的嵌布特征为: 氟碳铈矿与赤铁矿、黄铁矿连生, 氟碳铈矿镶嵌在云母边缘或充填于云母和磁铁矿的裂隙中(图6), 氟碳铈矿呈条带状包裹于钽铁矿中(图5)。

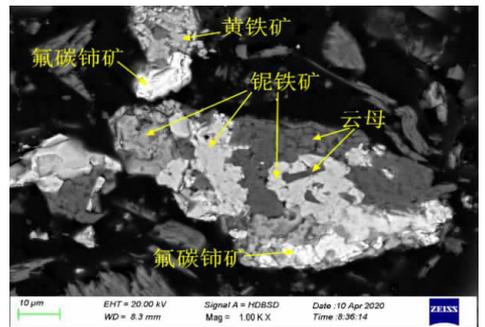


图5 钽铁矿与氟碳铈矿、云母共生
Fig. 5 The intergrowth of niobite, bastnaesite and mica

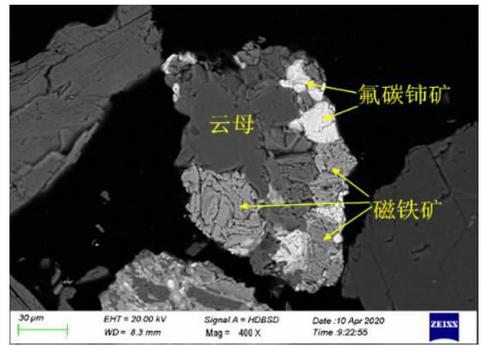


图6 氟碳铈矿与磁铁矿、云母连生
Fig. 6 The intergrowth of bastnaesite, magnetite and mica

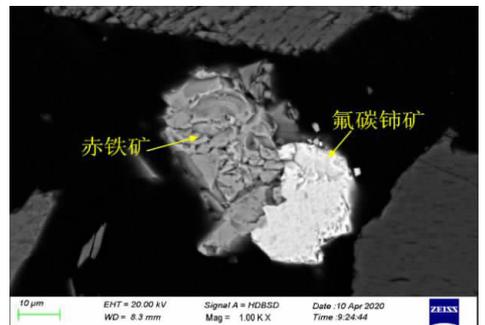


图7 氟碳铈矿与赤铁矿共生
Fig. 7 The intergrowth of bastnaesite and hematite

独居石是白云鄂博最常见的稀土矿物之一,但在云母型铁矿物中含量不足 1.00%,属磷酸稀土;独居石大多以自形或半自形粒状结构存在,矿物颗粒形态规则、大小不均;独居石与磁铁矿关系密切,以细小粒状充填于磁铁矿和云母的裂隙或被云母包裹(图 4),大颗粒独居石与磁铁矿连生并夹杂闪石(图 8)。

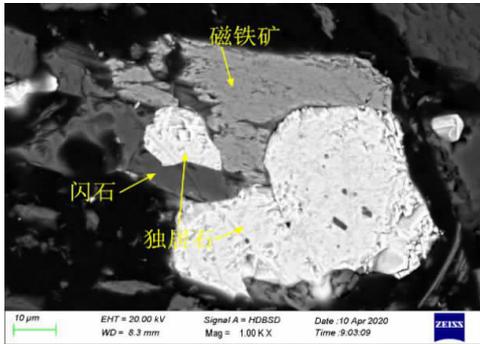


图 8 磁铁矿与独居石连生
Fig. 8 The intergrowth of magnetite and monazite

2.3 脉石矿物

主要的脉石矿物为云母,属于铝硅酸盐矿物,白云鄂博主要的造岩矿物之一,最常见的有黑云母,主要由黑云母定向排列而成的片状结构(图 3)、斑杂状构造及浸染状构造(图 1),与铁和稀土矿物共生关系密切。

3 主要矿物嵌布粒度及解离特征

3.1 主要矿物嵌布粒度

对矿石中主要矿物粒度组成进行测定,统计结果见表 5。表 5 表明,磁铁矿和赤铁矿的粒度分布不均,在 +0.074 mm 粒级分布率分别为 35.00% 和 40.22%,

表 5 主要矿物的粒度分布 /%

Table 5 Particle size distribution of major minerals

粒度(mm)	磁铁矿		赤铁矿		氟碳铈矿		独居石	
	个别	累计	个别	累计	个别	累计	个别	累计
+0.20	11.26	100.00	14.06	100.00				
0.10~0.20	8.51	88.74	11.67	85.94				
0.074~0.10	15.23	80.23	14.49	74.27				
0.043~0.074	17.74	65.00	19.47	59.78	14.46	100.00	3.19	100.00
0.02~0.043	12.87	47.26	16.38	40.31	29.67	85.54	25.89	96.78
0.01~0.02	26.31	34.39	18.54	23.93	29.52	55.87	42.42	70.89
-0.01	8.08	8.08	5.39	5.39	26.35	26.35	28.47	28.47

4 结论

(1) 白云鄂博云母型铁矿物中 TFe 品位为

在 -0.01 mm 粒级中的分布率为 8.08% 和 5.39%,这部分微细粒级的铁矿物主要嵌布在脉石矿物中难以回收;氟碳铈矿和独居石嵌布粒度较细,在 -0.043 mm 粒级分布率分别为 85.54% 和 96.78%。

3.2 主要矿物解离特征

对 -0.074 mm 占 90% 磨矿细度(现有工艺条件下)磁铁矿、赤铁矿、氟碳铈矿和独居石的单体解离度进行测定,结果见表 6。从表 6 可以看出,磁铁矿和赤铁矿的单体解离度为 51.54% 和 58.36%,与硅酸盐矿物的连生体分别为 39.27% 和 34.96%;氟碳铈矿和独居石的解离度也仅为 52.27% 和 63.64%,与铁矿物的连生体分别为 7.38% 和 4.02%。

根据以上矿石主要矿物嵌布粒度和赋存关系可知,部分细粒铁矿物和稀土矿物嵌布在脉石矿物中,部分铁矿物中也含有细粒稀土矿物,因此在现有磨矿细度下铁矿物和稀土矿物的单体解离度低,导致部分与铁矿物连生的脉石和稀土矿物进入铁精矿,不仅影响了铁精矿的品位,也造成稀土矿物的损失,从而降低了稀土的回收率。因此,强化细磨和微细粒高效分选是解决现有问题的关键。

表 6 主要矿物的单体解离度 /%

Table 6 Monomer dissociation degree of major minerals

样品名称	单体解离度	连生特征				
		与铁矿物连生	与碳酸盐矿物连生	与硅酸盐矿物连生	与稀土矿物连生	与其它矿物连生
磁铁矿	51.54	-	1.70	39.27	2.16	5.33
赤铁矿	58.36	-	0.47	34.96	1.03	5.18
氟碳铈矿	52.27	7.38	0.21	31.14	-	9.00
独居石	63.64	4.02	0.79	28.43	-	3.30

17.48%,稀土 REO 品位为 2.46%。矿石中矿物组成复杂,含铁矿物主要是磁铁矿和赤铁矿,含有少量钕铁矿、黄铁矿等,稀土矿物以氟碳铈矿和独居石为主。主

要的脉石矿物为云母、长石等。

(2) 磁铁矿和赤铁矿多呈半自形至他形粒状变晶结构形式出现, 粒度分布不均; 氟碳铈矿和独居石呈粒状, 嵌布粒度较细, 与周边其它矿物镶嵌关系复杂。铁主要赋存在磁铁矿和赤铁矿中, 分布率为 85.51%; 稀土元素主要赋存在氟碳铈矿/氟碳钙铈矿和独居石中, 分布率为 91.03%。

(3) 磨矿细度 -0.074 mm 占 90% 下磁铁矿、赤铁矿、氟碳铈矿和独居石的单体解离度仅为 51.54%、58.36%、52.27% 和 63.64%。因此, 强化矿石细磨和微细粒高效分选是解决精矿品位和回收率低的有效途径。

参考文献:

- [1] 林东鲁, 李春龙, 邹虎林. 白云鄂博特殊矿采选冶工艺攻关与技术进步[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 103-106.
- [2] 余永富, 陈泉源. 白云鄂博中贫氧化矿弱磁-强磁-浮选联合流程综合回收稀土研究[J]. 矿冶工程, 1992, 12(1): 58-61.

- [3] 李俐. 白云鄂博铁矿矿产资源的现状及其开发利用前景[J]. 包钢科技, 2003, 29(2): 1-4.
- [4] 马鹏起, 高永生, 徐自来. 包头白云鄂博资源的综合利用与环境保护[J]. 决策咨询通讯, 2009(2): 88-91.
- [5] 池汝安, 王淀佐. 稀土选矿与提取技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1996: 316.
- [6] 柳建勇, 陈林, 马文亮. 浅谈白云鄂博铁矿石入选品位降低的可行性[J]. 中国矿业, 2010(19): 367-369.
- [7] 樊丽琴, 贾艳. 提高白云鄂博氧化铁矿精矿品位的试验研究[J]. 金属矿山, 2010(11): 71-74.
- [8] 康德伟, 李解, 李保卫. 白云鄂博磁选铁精矿提铁降氟试验[J]. 金属矿山, 2017(9): 78-81.
- [9] 陈杏婕, 倪文, 范敦城. 白云鄂博铁矿石工艺矿物学研究[J]. 金属矿山, 2015(5): 109-113.
- [10] 黄小宾, 杨占峰, 王振江. 白云鄂博深部稀土尾矿的工艺矿物学[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(4): 6-8.
- [11] 付强, 金建文, 李磊. 白云鄂博尾矿库中铁的赋存状态研究[J]. 矿冶, 2017, 26(3): 94-98.

Research on Occurrence State of Iron and Rare Earth in Mica Type Iron Ore in

WANG Weiwei^{1,2}, LI Erdou^{1,2}, HOU Shaochun^{1,2}, GUO Chunlei^{1,2}

1. Baotou Research Institute of Rare Earths, State Key Laboratory of Bayan Obo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou 014030, China;

2. National Engineering Research Centre of Rare Earth Metallurgy and Functional Materials Co., Ltd, Baotou 014030, China

Abstract: The grade of TFe and REO in Bayan Obo mica type iron ore is 17.48% and 2.46%, respectively. The mineral composition of the ore is complex. The iron minerals are mainly magnetite and hematite, with a small amount of niobium, pyrite, etc. The rare-earth minerals are mainly bastnaesite and monazite. The ore structure is mainly composed of schistose structure, patchy structure and disseminated structure formed by directional arrangement of biotite. The minerals are mainly automorphic and semi automorphic granular structure, allomorphic granular structure, angular structure, metasomatic residual structure and veinlet structure. The magnetite is mostly in the form of semi automorphic to allomorphic granular crystalloblastic structure, some of which are in the form of breccia aggregate and mica. The hematite is mostly in the form of half automorphic and other granular structure, and some of hematite is embedded in gangue minerals in the form of fine grains. The bastnaesite and monazite are granular, which are closely associated with other surrounding minerals and have complex inlaying relationship. The distribution granularity of magnetite and hematite is uneven. The distribution granularity of bastnaesite and monazite is finer. Some fine-grained iron ores and rare-earth minerals are embedded in gangue minerals. Some iron ores also contain fine-grained rare-earth minerals. When the grinding fineness of -0.074 mm accounts for 90%, the monomer dissociation of magnetite, hematite, bastnaesite and monazite is only 51.54%, 58.36%, 52.27% and 63.64%, respectively. Therefore, it is an effective way to solve the problem of low concentrate grade and recovery rate by strengthening fine grinding and high efficiency separation of fine particles.

Key words: Bayan Obo; mica type; iron; rare earth; occurrence state

引用格式: 王维维, 李二斗, 侯少春, 郭春雷. 白云鄂博云母型铁矿石中铁、稀土的赋存状态研究[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 44-48.

Wang WW, Li ED, Hou SC, and Guo CL. Research on occurrence state of iron and rare earth in mica type iron ore in Bayan Obo[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(5): 44-48.