

高品位稀土精矿中稀土、铁、磷、钙元素赋存状态研究

李娜, 秦玉芳, 金海龙, 王其伟

(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)

摘要: 白云鄂博混合稀土精矿稀土品位 65.86%, 杂质元素 P_2O_5 、CaO、TFe 含量分别为 11.26%、3.89%、1.34%。实验采用化学分析、AMICS (自动矿物分析系统)、SEM 及 EDS 等分析手段, 研究混合稀土精矿中的稀土及杂质元素赋存状态。研究表明: 稀土主要以独立矿物形式存在于氟碳铈矿、独居石、氟碳钙铈矿和黄河矿, 铁主要存在于磁/赤铁矿和黄铁矿中, 磷主要赋存于独居石和磷灰石中, 钙主要赋存于萤石、磷灰石、白云石和方解石中, 为进一步分选氟碳铈矿和独居石精矿, 及降低稀土精矿中杂质元素含量提供矿物学依据。

关键词: 稀土精矿; 稀土; 铁; 磷; 钙; 赋存状态

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.06.033

中图分类号: TD955 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 06-0193-08

稀土元素 (REEs) 是重要的战略资源, 世界稀土资源储量估算有 1.2 亿 t^[1-2]。我国稀土资源较为丰富, 根据美国地质调查局资料显示, 截至 2019 年已探明的稀土资源储量 4400 万 t, 约占全世界稀土储量的 36.67%, 占比世界第一^[3-4]。内蒙古白云鄂博矿是世界著名的超大型铁-稀土-铌矿床, 采用“弱磁-强磁-浮选”工艺生产 REO 50% 品级的混合型稀土精矿, 其中主要的稀土矿物为氟碳酸盐矿物和独居石。随着我国稀土行业的快速发展及环境问题的日益严峻, 浮选高品位稀土精矿, 降低精矿中的杂质含量, 进行高品位混合型稀土精矿的氟碳酸盐和独居石精矿分选 (以下简称氟碳铈矿和独居石分选), 可简化稀土冶炼工艺流程, 从源头上降低稀土冶炼工艺污染物产生, 具有重要的现实意义和经济价值^[5-7]。研究分析认为^[8-9] 混合稀土精矿的给矿品位是影响氟碳铈矿和独居石分离的首要因素, 近年科研院所在稀土精矿提质降杂方面做了大量的研究工作, 获得了 REO 65% 以上的高品位混合稀土精矿。文献^[10]研究了包头稀土精矿中稀土矿物的嵌布特征及杂

质元素的赋存状态, 本文以 REO 65% 稀土精矿为研究对象, 开展了稀土精矿中的稀土及杂质元素的赋存状态研究, 为选矿工艺最大限度降低稀土精矿中铁、磷、钙等杂质元素, 进行氟碳铈矿和独居石分选提供必要依据。

1 实验

1.1 实验方法

本实验样品为白云鄂博混合稀土精矿再分选除杂的高品位混合稀土精矿, 将样品混匀、缩分, 对缩分样品进行化学元素分析、采用 AMICS (自动矿物分析系统)、SEM 及 EDS 等分析手段, 研究白云鄂博高品位混合稀土精矿的稀土及杂质元素钙、磷、铁的赋存状态。

1.2 样品分析

1.2.1 精矿多元素分析

采用化学分析、X 射线荧光、ICP-MS 等分析手段, 进行稀土精矿的多元素分析、稀土配分及稀土物相检测, 结果见表 1~3。

收稿日期: 2021-07-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1909103); 内蒙古自治区科技创新引导项目 (KCBJ2018077), 内蒙古自治区自然科学基金重大项目 (2019ZD11)

作者简介: 李娜 (1982-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向为矿产资源综合利用。

表 1 试样主要化学成分分析结果/%
Table 1 Analysis results of main chemical components of the sample

Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	BaO	SiO ₂	ThO ₂	Al ₂ O ₃
0.059	<0.010	0.12	3.89	1.04	0.34	0.24	0.42
REO	Nb ₂ O ₅	F	P ₂ O ₅	S	TFe	Sc ₂ O ₃	C
65.86	0.055	5.20	11.26	0.28	1.34	<0.0010	2.96

表 2 试样稀土配分分析结果/%
Table 2 Rare earth distribution analysis results of the sample

La ₂ O ₃	CeO ₂	Pr ₆ O ₁₁	Nd ₂ O ₃	Sm ₂ O ₃	Eu ₂ O ₃	Gd ₂ O ₃	Tb ₄ O ₇
27.59	50.92	4.81	14.71	1.06	0.20	0.36	<0.10
Tb ₄ O ₇	Dy ₂ O ₃	Ho ₂ O ₃	Er ₂ O ₃	Tm ₂ O ₃	Yb ₂ O ₃	Lu ₂ O ₃	Y ₂ O ₃
<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	<0.10	0.23

表 3 试样稀土、钙的化学物相分析
Table 3 Rare earth and calcium phase analysis of the sample

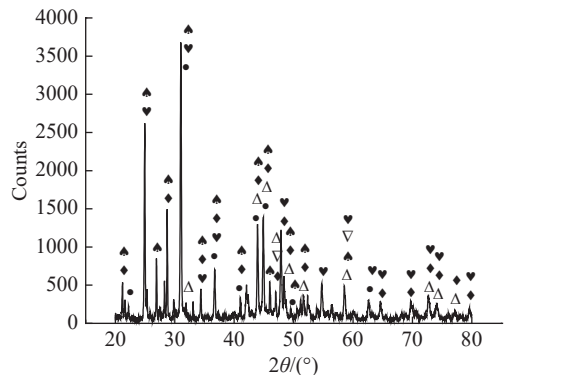
名称	REO	REO-F	REO-P	CaO	氟化钙中的CaO	磷酸钙中的CaO	碳酸钙中的CaO	硅酸钙中的CaO	硫酸钙中的CaO
含量/%	65.86	39.68	26.18	4.03	2.24	1.30	0.05	0.39	0.05
分布率/%	100.00	60.25	39.75	100.00	55.58	32.26	1.24	9.68	1.24

从表中数据可知，稀土精矿的主要组成元素有 REO、P₂O₅、F、C、Fe，其含量合计 90.02%，杂质元素 P₂O₅、CaO、TFe 含量分别由 REO 50% 品级稀土精矿中的 13.12%、11.44%、3.00% 降低至 11.26%、3.89%、1.34%。La₂O₃、CeO₂、Pr₆O₁₁、Nd₂O₃ 配分合计 98.03%，属于轻稀土矿，稀土元素以氟碳酸盐和磷酸盐两种形式存在，其比例约为 6:4。由钙化学物相分析可知，氟化钙中的 CaO 和磷酸钙中的 CaO 分别为 2.24%、1.30%，两者分布率合计为 87.84%，因此精矿中 CaO 绝大部分分布在萤石和磷灰石矿物中，分散在硅酸盐矿物、白云石、方解石等其他矿物中的 CaO 合计为 12.16%。

1.2.2 精矿矿物组成

采用 XRD、SEM、EDS 及 AMICS 进行样品矿物鉴定及矿物组成分析，其主要矿物定量和 X 射线衍射结果见图 1、表 4，试样能谱分析见图 2。从 XRD 分析结果可以看出，精矿中主要的矿物主要有氟碳铈矿、独居石、黄河矿，萤石、磷灰石，主要矿物的定量结果表明，主要的稀土矿物有氟碳铈矿、独居石、氟碳钙铈矿、黄河矿，矿物含量合计 92.31%；其他稀土矿物包括易解石、褐钇铈矿、褐帘石、黄绿石含量为 0.13%；脉石矿物主要包括磷灰石、萤石、磁/赤铁矿、黄铁矿、

白云石和方解石等，含量合计为 7.56%。



△ 磷灰石 Ca_{5.061}(P_{2.87}O_{11.46})F_{0.89} ▼ 氟碳铈矿 CeFCO₃ ▽ 萤石 CaF₂
◆ 独居石 (Ce,La,Nd)PO₄ ● 独居石 CePO₄ • 黄河矿 BaCe(CO₃)₂F

图 1 试样 XRD 分析

Fig.1 XRD analysis of the sample

1.2.3 精矿稀土矿物粒度分析

精矿中稀土矿物嵌布粒度见表 5。矿物粒度较为微细，氟碳铈矿、独居石、氟碳钙铈矿、黄河矿嵌布粒度主要分布在 -38 μm，负累计分布率为 96.50%、96.99%、95.22%、98.05%，以上四种稀土矿物的 P80 分别为 23.54 μm，22.19 μm、18.29 μm、20.93 μm，-10 μm 的微细颗粒（难选粒子）分别占比 21.17%、23.56%、47.05%、31.24%，稀土矿物的嵌布粒度细小，进一步分选氟碳铈矿和独居石精矿的难度较大。

表4 试样矿物组成/%
Table 4 Mineral composition of the sample

氟碳铈矿	独居石	氟碳钙铈矿	黄河矿	褐帘石	褐钇铈矿	易解石	铈铁金红石	铈铁矿
52.00	36.29	2.01	2.01	0.02	0.02	0.01	0.05	0.02
黄绿石	磷灰石	萤石	白云石	方解石	磁/赤铁矿	黄铁矿	菱铁矿	钛铁矿
0.01	2.02	1.87	0.45	0.15	1.11	0.44	0.02	0.04
钡铁钛石	菱锰矿	方铅矿	石英	闪石	辉石	云母	重晶石	其他
0.01	0.03	0.04	0.08	0.04	0.10	0.01	0.30	0.85

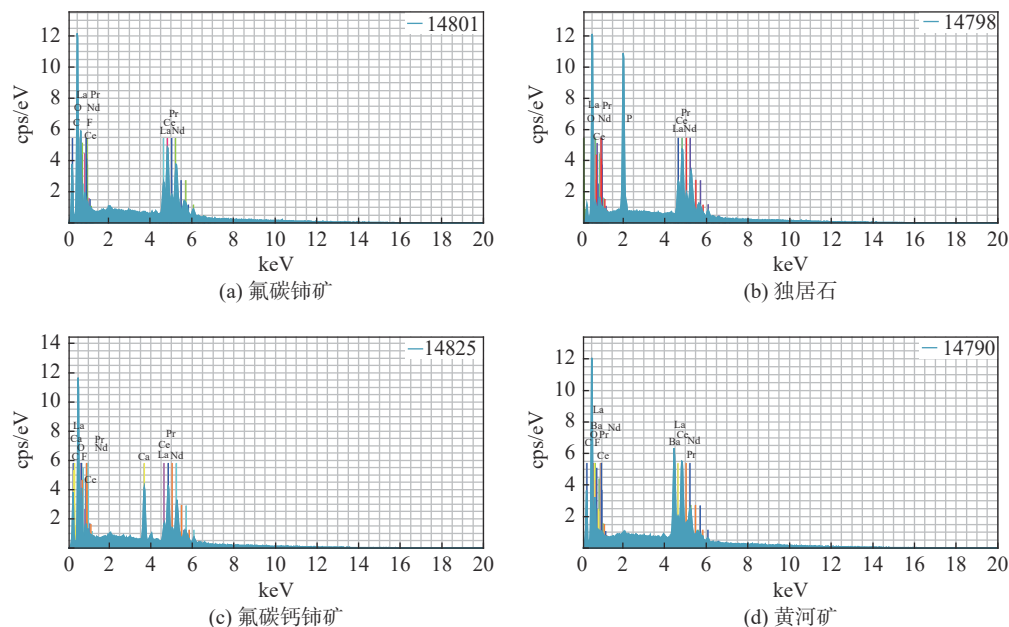


图2 试样能谱分析

Fig.2 Energy spectrum analysis diagram of sample

表5 试样稀土矿物嵌布粒度/%
Table 5 Particle size distribution of rare earth mineral of the sample

粒径/ μm	氟碳铈矿		独居石		氟碳钙铈矿		黄河矿	
	分布率/%	累计分布率/%	分布率/%	累计分布率/%	分布率/%	累计分布率/%	分布率/%	累计分布率/%
+74	0.04	100.00	0.02	100.00	0.00	100.00	0.00	100.00
-74+53	1.28	99.96	0.97	99.98	3.56	100.00	0.72	100.00
-53+38	2.18	98.68	2.02	99.01	1.22	96.44	1.23	99.28
-38+30	11.61	96.50	10.15	96.99	4.14	95.22	8.11	98.05
-30+20	22.62	84.88	18.87	86.84	12.11	91.08	18.24	89.94
-20+10	41.10	62.27	44.41	67.97	31.92	78.97	40.47	71.71
-10	21.17	21.17	23.56	23.56	47.05	47.05	31.24	31.24

2 稀土、铁、磷、钙的元素赋存状态研究

2.1 矿物解离度分析

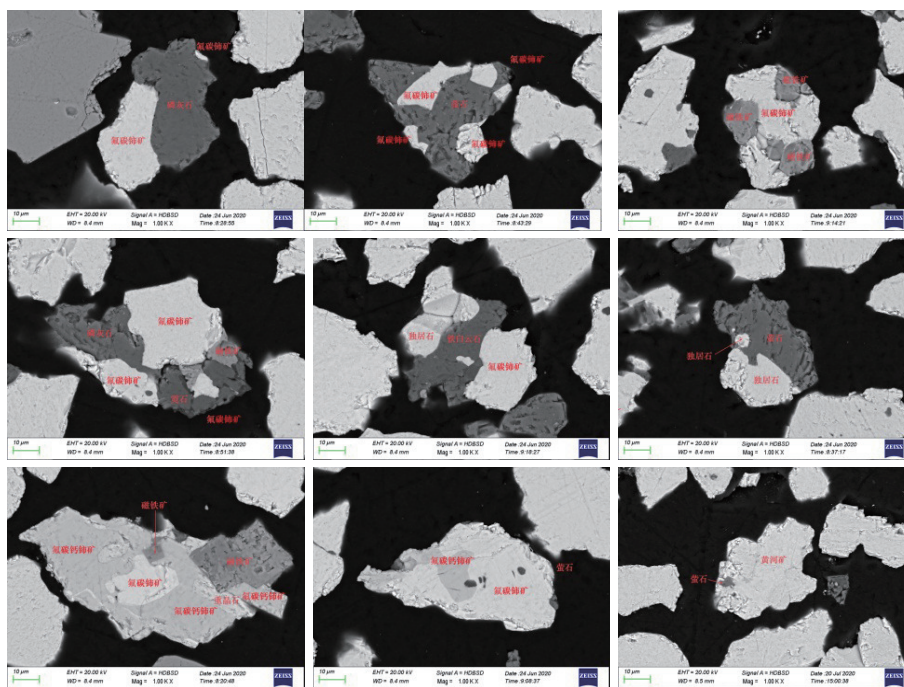
为了探讨稀土矿物与磁/赤铁矿、萤石、磷灰石等主要脉石矿物进一步分选提纯，及氟碳酸盐矿物与独居石分离的可能性，对精矿中的氟碳铈矿、独居石、磁/赤铁矿、萤石、磷灰石进行了单体解离度及其结合情况分析，结果见表6。

从表6中可以看出，稀土矿物多以单体形

式存在，单体产出的氟碳铈矿和独居石分布率分别达到92.11%、88.01%，与磷灰石、萤石和铁矿物连生较多，占比合计分别为4.83%、6.44%。稀土精矿中磁铁矿/赤铁矿、黄铁矿、萤石、磷灰石的单体解离度为53.77%、84.99%、39.68%、54.98%，与稀土矿物的连生度分别达到39.59%、12.69%、53.94%、40.66%，由此可见稀土矿物与磁铁矿/赤铁矿、黄铁矿、萤石、磷灰石嵌布关系密切。

表 6 稀土矿物、磁铁矿/赤铁矿、萤石、磷灰石单体解离度分析
Table 6 Dissociation degree analysis of rare earth minerals, magnetite, hematite, fluorite and apatite

矿物名称	单体	与磷灰石连生	与萤石连生	与铁矿物连生	连生度/% 与碳酸盐矿物连生	与硅酸盐矿物连生	与其他矿物连生	
氟碳铈矿	92.11	1.74	1.70	1.39	0.53	0.21	2.32	
独居石	88.01	2.18	2.41	1.85	0.82	0.32	4.50	
矿物名称	单体	与稀土矿物连生	与碳酸盐矿物连生	与硅酸盐矿物连生	连生度/% 与萤石连生	与磷灰石连生	与其他矿物连生	
磁铁矿/ 赤铁矿	53.77	39.59	0.35	0.15	1.59	1.47	3.08	
矿物名称	单体	与稀土矿物连生	与碳酸盐矿物连生	与硅酸盐矿物连生	连生度/% 与萤石连生	与磷灰石连生	与磁/赤铁矿连生	与其他矿物连生
黄铁矿	84.99	12.69	0.12	0.07	0.37	0.13	0.51	1.12
矿物名称	单体	与稀土矿物连生	与碳酸盐矿物连生	与硅酸盐矿物连生	连生度/% 与铁矿物连生	与磷灰石连生	与其他矿物连生	
萤石	39.68	53.94	0.59	0.15	1.10	0.87	3.68	
矿物名称	单体	与稀土矿物连生	与碳酸盐矿物连生	与硅酸盐矿物连生	连生度/% 与萤石连生	与铁矿物连生	与其他矿物连生	
磷灰石	54.98	40.66	0.31	0.15	0.82	0.96	2.13	



(1) 氟碳铈矿与磷灰石毗邻连生 (2) 氟碳铈矿成群分布在萤石矿物中 (3) 氟碳铈矿与磁铁矿连生 (4) 氟碳铈矿与磷灰石、萤石、磁铁矿复杂连生 (5) 独居石与氟碳铈矿、铁白云石复杂连生 (6) 独居石与萤石毗邻连生，且以细小包裹体形式分布在萤石矿物 (7) 氟碳铈矿与重晶石、磁铁矿、氟碳铈矿连生 (8) 氟碳铈矿与氟碳铈矿壳层连生，且萤石呈包裹体分布在氟碳铈矿中 (9) 萤石包裹于黄铁矿中

图 3 稀土精矿中稀土矿物的连生特征

Fig.3 Characteristics of rare earth minerals association in rare earth concentrate

2.2 稀土矿物与铁矿物、萤石、磷灰石的连生关系

稀土矿物中氟碳铈矿和独居石多呈柱粒状或它形粒状，少量呈不规则状，与萤石、磷灰石连

生关系最为密切，其次是磁铁矿、白云石、萤石、闪石，少量与石英、重晶石等连生。氟碳铈矿多与氟碳铈矿伴生，与萤石、磁铁矿等连生，黄铁矿多以单体形式存在，少量与萤石、磷

灰石等连生。

2.3 混合稀土精矿中稀土及主要杂质元素赋存状态

根据样品矿物组成及稀土、铁、磷、钙矿物的相对含量和品位，对稀土精矿中的稀土、铁、磷、钙进行元素平衡计算，结果见表7。

2.3.1 精矿中稀土的赋存状态

稀土精矿中稀土的分布见表8，稀土元素绝大部分以独立矿物形式存在，分配在稀土矿物中的稀土占99.92%，其中氟碳酸盐矿物（包括氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、黄河矿）占61.64%，独居石占

38.28%，仅有0.08%的稀土以类质同象或细小包裹体分散在萤石、赤铁矿、磷灰石中。

2.3.2 精矿中铁元素的赋存状态

精矿中铁元素的分布见表9。主要存在于赤铁矿和黄铁矿中，分别占总铁量的59.14%、17.13%，铁呈类质同象和细小包裹体分散于氟碳铈矿、独居石、白云石、方解石等矿物中的分布率为23.73%。精矿中铁矿物的单体解离度偏低，约为53.77%，采用选矿方法降低铁含量，必然损失稀土回收率。

表7 稀土、钙、磷、铁元素平衡计算结果
Table 7 Results of rare earth, calcium, phosphorus and iron balance calculation

矿物名称	矿物含量/%	REO		P ₂ O ₅		TFe		CaO	
		品位/%	分布率/%	品位/%	分布率/%	品位/%	分布率/%	品位/%	分布率/%
氟碳铈矿	52.00	74.26	58.61	0.45	2.09	0.24	9.50	1.41	19.33
氟碳钙铈矿	2.01	62.07	1.89	-	-	0.54	0.83	10.25	5.43
黄河矿	2.01	37.33	1.14	0.51	0.09	0.06	0.09	0.51	0.27
独居石	36.29	69.51	38.28	27.67	90.46	0.27	7.46	0.57	5.45
萤石	1.87	0.69	0.02	0.06	0.01	0.56	0.80	71.54	35.26
赤铁矿	1.11	0.11	0.00	0.10	0.01	70.00	59.14	0.21	0.06
磷灰石	2.02	1.94	0.06	40.35	7.34	-	0.00	51.31	27.32
白云石方解石	0.60	-	-	-	-	4.96	2.27	43.20	6.83
辉石	0.10	-	-	-	-	22.98	1.75	1.43	0.04
黄铁矿	0.44	-	-	-	-	51.14	17.13	-	-
菱铁矿	0.02	-	-	-	-	39.63	0.60	1.58	0.01
其他	1.53	-	-	-	-	0.37	0.43	0.01	0.00
合计	100.00		100.00		100.00		100.00		100.00
金属总量/%		65.89		11.10		1.31		3.79	
化学分析结果/%		65.86		11.26		1.34		3.89	
平衡系数/%		100.05		98.59		98.04		97.53	

表8 精矿中稀土的分布
Table 8 Distribution of rare earth in concentrate

名称	氟碳铈矿	氟碳钙铈矿	黄河矿	独居石	萤石	赤铁矿	磷灰石	合计
金属量/%	38.6125	1.2476	0.7503	25.2252	0.0129	0.0012	0.0392	65.8916
分布率/%	58.61	1.89	1.14	38.28	0.02	0.00	0.06	100.00

表9 精矿中铁的分布
Table 9 Distribution of iron in concentrate

名称	赤铁矿	黄铁矿	氟碳铈矿	独居石	白云石方解石	钠辉石	氟碳钙铈矿	萤石	菱铁矿	铈铁金红石	铈铁矿	黄河矿	方铅矿	合计
含量/%	0.7770	0.2250	0.1248	0.0980	0.0298	0.0230	0.0109	0.0105	0.0079	0.0033	0.0023	0.0012	0.0001	1.31
分布率/%	59.14	17.13	9.50	7.46	2.26	1.75	0.83	0.80	0.60	0.25	0.18	0.09	0.01	100.00

2.3.3 精矿中磷的赋存状态

稀土精矿中磷的分布见表10，存在形式：

(1) 磷的独立矿物：样品中磷酸盐矿物主要有独居石、磷灰石两种，两者分布率约占97.80%；

(2) 以细小包裹体和分散状态赋存于氟碳铈矿、黄河矿、萤石、赤铁矿中，分布率占2.20%。

2.3.4 精矿中钙的赋存状态

稀土精矿中钙的分布见表11，大部分形成有

表10 精矿中磷的分布
Table 10 Distribution of phosphorus in concentrate

名称	独居石	磷灰石	氟碳铈矿	黄河矿	萤石	赤铁矿	合计
金属量/%	10.0414	0.8151	0.2319	0.0103	0.0011	0.0011	11.1009
分布率/%	90.46	7.34	2.09	0.09	0.01	0.01	100.00

萤石和磷灰石，两者 CaO 含量约占 62.58%，白云石、方解石中的 CaO 含量约占 6.83%，以细小包裹体和分散状态赋存于氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、独居石的 CaO 含量约占 30.21%，分散在其他矿物中的 CaO 含量仅占 0.38%。

由表 11 可知，若降低稀土精矿中的 CaO 含

量，主要降低稀土精矿中的萤石和磷灰石矿物含量。根据 SEM 检测结果萤石和磷灰石的单体解离度相对较低，约为 39.68%、54.98%，因此通过选矿方法降钙难度较大。此外部分萤石、磷灰石矿物以细小包裹体形式存在于氟碳铈矿、氟碳钙铈矿中，无法采用物理选矿方法去除。

表 11 精矿中钙的分布

Table 11 Distribution of calcium in concentrate

名称	萤石	磷灰石	氟碳铈矿	白云石方解石	氟碳钙铈矿	独居石	黄河矿	赤铁矿	钠辉石	菱铁矿	合计
金属量/%	1.3378	1.0365	0.7332	0.2592	0.2060	0.2069	0.0103	0.0023	0.0014	0.0003	3.7940
分布率/%	35.26	27.32	19.33	6.83	5.43	5.45	0.27	0.06	0.04	0.01	100.00

混合稀土精矿的氟碳铈矿和独居石矿物分选实验一般采用浮选工艺，选择邻苯二甲酸为捕收剂，明矾为抑制剂，通过调整工艺参数增大氟碳铈矿与独居石矿物的可浮性差异，使两者实现浮选分离。由表 12 可知，氟碳铈矿、氟碳钙铈矿和黄河矿为氟碳酸盐矿物，预计氟碳酸盐精矿的最

高品位和理论回收率 (REO) 分别为 72.50%、61.64%，杂质元素 TFe、P₂O₅、CaO 理论含量分别为 0.24%、0.43%、1.69%；独居石精矿的最高品位和理论回收率 (REO) 分别为 69.51%、38.28%，杂质元素 TFe、P₂O₅、CaO 理论含量分别为 0.27%、27.67%、0.57%。

表 12 氟碳铈矿与独居石分选的元素平衡计算

Table 12 Calculation of element balance in separation of bastnaesite and monazite

矿物名称	矿物含量	REO		TFe		P ₂ O ₅		CaO	
		含量%	分布率%	含量%	分布率%	含量%	分布率%	含量%	分布率%
氟碳铈矿	52.00	74.26	58.60	0.24	9.50	0.45	2.09	1.41	19.33
氟碳钙铈矿	2.01	62.07	1.89	0.54	0.83	-	-	10.25	5.43
黄河矿	2.01	37.33	1.14	0.06	0.09	0.51	0.09	0.51	0.27
氟碳酸盐	56.02	72.50	61.64	0.24	10.42	0.43	2.18	1.69	25.03
独居石	36.29	69.51	38.28	0.27	7.46	27.67	90.46	0.57	5.45

2.4 元素相关性分析

为了研究稀土精矿中稀土品位与杂质元素含量之间的伴生关系 (图 3)，对 REO 与 TFe、P₂O₅、CaO 数据进行了相关性分析，分析结果显示稀土精矿中稀土与杂质元素 TFe、P₂O₅、CaO 之间有明显的负相关性，即随着稀土含量的增加杂质元素含量呈下降趋势。从矿物中的稀土品位与杂质元素含量关系图 (图 4) 中可以看出，萤石的稀土品位与 TFe 含量为正相关，而氟碳铈矿、独居石、氟碳钙铈矿、黄河矿和赤铁矿中的稀土品位与 TFe 含量呈负相关性；独居石、萤石、赤铁矿的稀土品位与 P₂O₅ 含量为正相关，而氟碳铈矿、黄河矿、磷灰石中稀土品位与 P₂O₅ 含量呈负相关性；赤铁矿、氟碳钙铈矿的稀土品位与 CaO 含量为正相关、而氟碳铈矿、独居石、黄河矿、萤石、磷灰石中稀土品位与 CaO 含量呈负相关性。

3 结 论

(1) 混合稀土精矿中 REO 及杂质元素 TFe、

P₂O₅、CaO 含量分别为 65.86%、1.34%、11.26%、3.89%。稀土元素主要以独立矿物形式存在于氟碳铈矿、独居石以及少量的氟碳钙铈矿和黄河矿，其分布率为 99.92%；铁元素分布较为广泛，主要以矿物形式存在于磁/赤铁矿和黄铁矿中，其分布率为 76.27%，其余部分以类质同象和细小包裹体分散于氟碳铈矿、独居石、白云石、方解石等矿物中；磷主要以独立矿物形式赋存于独居石和磷灰石中，两者分布率约占 97.80%；钙的主要矿物为萤石、磷灰石、白云石和方解石，其分布率为 69.41%，其余部分以细小包裹体和分散状态赋存于氟碳铈矿、氟碳钙铈矿、独居石等矿物中。

(2) 在混合稀土精矿中杂质元素多以矿物形式存在，但是精矿中脉石矿物含量低，矿物粒度细，大部分与稀土矿物形成连生体，稀土精矿中铁矿物、萤石、磷灰石的单体解离度仅为 53.77%、39.68%、54.98%，通过选矿方法降低杂质元素的含量，会降低稀土的回收率。

(3) 混合稀土精矿中氟碳铈矿与独居石的单

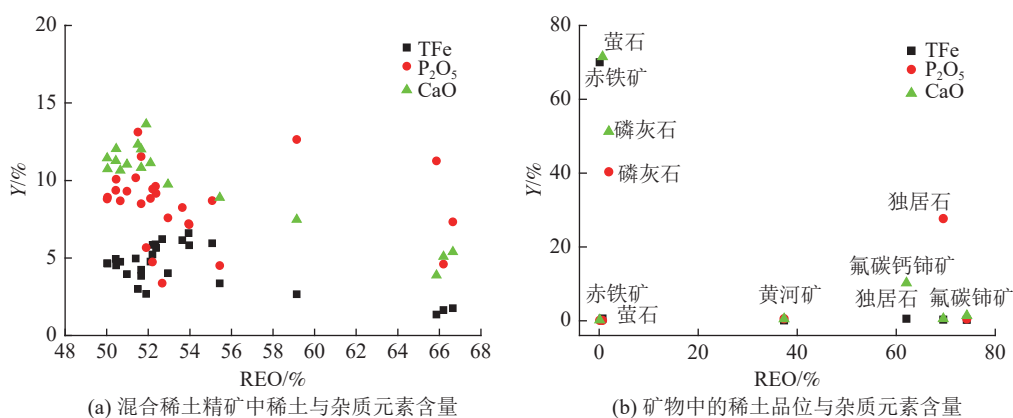


图4 稀土品位与杂质元素含量关系
Fig.4 Relationship between rare earth grade and impurity element content

体解离度分别为 92.11%、88.01%，一般采用浮选工艺进行氟碳铈矿与独居石分选，氟碳酸盐精矿的理论品位和回收率（REO）分别为 72.50%、61.64%，独居石精矿的理论品位和回收率（REO）分别为 69.51%、38.28%。

参考文献：

[1] Tian L, Chang H Q, Tang P, et al. Rare earth elements occurrence and economical recovery strategy from shale gas wastewater in the Sichuan Basin, China[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(32):11914-11920.

[2] 张博, 宁阳坤, 曹飞, 等. 世界稀土资源现状[J]. *矿产综合利用*, 2018(4):7-12.

ZHANG B, NING Y K, CAO F, et al. Current situation of worldwide rare earth resources[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(4):7-12.

[3] Chen W X, Zhou F, Wang H Q, et al. The occurrence states of rare earth elements bearing phosphorite ores and rare earth enrichment through the selective reverse flotation[J]. 2019, 9(11): 698-707.

[4] 王建英, 文登学, 贾艳. 白云鄂博稀选尾矿中铈的回收试验[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):121-126.

WANG J Y, WEN D X, JIA Y. Experiment on recovery of niobium in the tailings of Bayan Obo[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):121-126.

[5] Li J F, Li M, Zhang D L, et al. Clean production technology of Baiyun Obo rare earth concentrate decomposed by $Al(OH)_3$ -

NaOH[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020:382.

[6] 金海龙, 李娜, 魏威, 等. 白云鄂博混合原矿中有害元素的赋存状态研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(6):201-205.

JIN H L, LI N, WEI W, et al. Study on the occurrence state of harmful elements in the Bayan Obo mixed raw ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(6):201-205.

[7] 洪秋阳, 梁冬云, 李波, 等. 某复杂铈稀土矿石工艺矿物性质及可选性分析[J]. *矿产综合利用*, 2021(1):171-178.

HONG Q Y, LIANG D Y, LI B, et al. Process mineralogy characteristics of a complex niobium-rare earth ore and implications for mineral processing[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):171-178.

[8] 宋常青. 氟碳铈矿与独居石矿浮选分离的研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 1993(4):5-8.

SONG C Q. Study on flotation separation of bastnaesite and monazite[J]. *Nonferrous metals (mineral processing)*, 1993 (4):5-8.

[9] 朱智慧. 氟碳铈矿与独居石浮选分离及机理研究 [D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2019.

ZHU Z H. Study on flotation separation and mechanism of bastnaesite and monazite [D]. Baotou: Inner Mongolia University of science and technology, 2019.

[10] 朱智慧, 杨占峰, 王其伟, 等. 白云鄂博稀土精矿工艺矿物学研究[J]. *有色金属 (选矿部分)*, 2019(6):1-4+22.

ZHU Z H, YANG Z F, WANG Q W, et al. Study on technological mineralogy of rare earth concentrate in Bayan Obo[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2019(6):1-4+22.

Occurrence of Rare Earth, Iron, Phosphorus and Calcium in High Grade Rare Earth Concentrate

Li Na, Qin Yufang, Jin Hailong, Wang Qiwei

(State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Research and Comprehensive Utilization, Baotou

Research Institute of Rare Earths, Baotou, Inner Mongolia, China)

Abstract: Rare earth grade of Bayan Obo mixed rare earth concentrate is 65.86%, and the contents of P_2O_5 , CaO and TFe are 11.26%, 3.89% and 1.34%, respectively. Chemical analysis, automatic mineral analysis system, SEM and EDS were used to study the occurrence of rare earth and impurity elements in mixed rare earth concentrate. The results show that rare earth mainly exists in bastnaesite, monazite, parisite and huanghoite in the form of independent minerals, iron mainly exists in magnetite hematite and pyrite, phosphorus mainly exists in monazite and apatite, calcium mainly exists in fluorite, apatite, dolomite and calcite, which can provides mineralogical basis for further separation of bastnaesite and monazite concentrate and reduction of impurity elements in rare earth concentrate.

Keywords: Rare earth concentrate; Rare earth; Iron; Phosphorus; Calcium; Occurrence state

(上接第 192 页)

参考文献:

- [1] 孙晶, 冯博. 新疆某铜镍矿石工艺矿物学研究[J]. *现代矿业*, 2019, 35(4):105-108.
SUN J, FENG B. Research on process mineralogy of a copper-nickel ore in Xinjiang[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(4):105-108.
- [2] 杨磊, 许阳芳, 吴伟. 新疆铜镍选矿分离工艺技术的研究与进展[J]. *新疆有色金属*, 2019(2):69-75.
YANG L, XU Y F, WU W. Research and progress of Xinjiang copper-nickel beneficiation and separation technology[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2019(2):69-75.
- [3] 瞿思思, 曹佳宏, 钟彪, 等. 哈密某铜镍矿石的选矿工艺矿物学研究[J]. *矿冶工程*, 2015, 35(4):51-58.
QU S S, CAO J H, ZHONG B, et al. Mineralogy research on the beneficiation process of a copper-nickel ore in Hami[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2015, 35(4):51-58.
- [4] 罗立群, 李金良, 曹佳宏. 哈密铜镍矿工艺矿物学特性与影响选矿的因素[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(7):1846-1854.
LUO L Q, LI J L, CAO J H. The technological mineralogical characteristics of Hami copper-nickel mine and the factors affecting ore dressing[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(7):1846-1854.
- [5] 谈伟军, 冯泽平. 青海某铜镍多金属硫化矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2015(2):56-59.
TAN W J, FENG Z P. Process mineralogy of a copper-nickel polymetallic sulfide ore in Qinghai[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2015(2):56-59.
- [6] 刘长征, 杨启安, 吴树宽, 等. 青海夏日哈木铜镍矿石工艺矿物学研究[J]. *中国矿业*, 2016, 25(2):136-141.
LIU C Z, YANG Q A, WU S K, et al. Research on process mineralogy of Xiahamu copper-nickel ore in Qinghai[J]. *China Mining*, 2016, 25(2):136-141.
- [7] 马英强, 盛秋月, 唐浪峰, 等. 赞比亚某含铜镍矿石工艺矿物学研究[J]. *金属矿山*, 2018, 506(8):104-107.
MA Y Q, SHENG Q Y, TANG L F, et al. Study on process mineralogy of a copper-nickel ore in Zambia[J]. *Metal Mine*, 2018, 506(8):104-107.

Study on Process Mineralogy of a Copper-Nickel Polymetallic Sulfide Ore

Tan Weijun¹, Feng Zeping²

(1. Qinghai Yellow River Mining Co., Ltd., Golmud, Qinghai, China; 2. Power China Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, China)

Abstract: In this study, the process mineralogy of a copper-nickel polymetallic sulfide ore was studied. Results show that the main useful minerals in the ore are nickel-pyrite and chalcopyrite. The main metal sulfides are pyrrhotite and a small amount of pyrite. The gangue minerals are mainly magnesium silicate minerals such as serpentine, olivine and actinolite. The ore has a high comprehensive recycling value. It is recommended to carry out research on the occurrence state of platinum, palladium, gold and silver and the corresponding beneficiation process to maximize the recovery of precious metal minerals in the ore.

Keywords: Copper-nickel polymetallic sulfide ore; Process mineralogy; Serpentine