

混合型稀土精矿工艺矿物学及气氛焙烧-稀硫酸浸出分离稀土矿物研究^①

王亮^{1,2,3}, 辛文彬^{1,2,3}, 李文博⁴, 邓永春^{1,2,3}, 张小龙⁴, 姜银举^{1,2,3}, 李健飞^{1,2,3}

(1.内蒙古科技大学 稀土产业学院(稀土工程技术学院), 内蒙古 包头 014010; 2.轻稀土资源绿色提取与高效利用教育部重点实验室(内蒙古科技大学), 内蒙古 包头 014010; 3.轻稀土清洁提取与应用内蒙古自治区工程研究中心, 内蒙古 包头 014010; 4.东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 在工艺矿物学研究基础上,针对某混合型稀土精矿提出了气氛焙烧-稀硫酸浸出的分离工艺。结果表明:混合型稀土精矿 REO 品位 48.23%,主要矿相结构由氟碳铈矿、独居石、磷灰石、萤石构成,稀土元素主要赋存于氟碳铈矿与独居石中;混合型稀土精矿在空气/氩气气氛下焙烧,独居石、磷灰石和萤石物相均未发生明显变化,物相转变的差异性主要由氟碳铈矿的反应造成。空气/氩气气氛下焙烧过程为 $CeFCO_3 \rightarrow Ce_7O_{12} \rightarrow Ce_{11}O_{20} \rightarrow CeO_2$, 氩气下氟碳铈矿转变过程为 $CeFCO_3 \rightarrow Ce_7O_{12}$ 、 $Th_{0.5}Ce_{0.5}O_{1.84} \rightarrow CeOF$ 。稀土精矿经 500 °C 空气气氛焙烧后稀硫酸浸出, F-REO、P-REO 浸出率分别为 86.67%、1.70%, 700 °C 氩气气氛焙烧后对应的 F-REO、P-REO 浸出率分别为 75.97%、13.33%, 2 种浸出渣中 F-REO、P-REO 含量(质量分数)分别为 6.92%、26.02% 和 11.86%、21.81%, 浸出渣均以独居石物相为主,通过气氛焙烧-稀硫酸浸出工艺达到了有效分离氟碳铈矿与独居石的目的。

关键词: 稀土; 氟碳铈矿; 独居石; 混合型稀土精矿; 工艺矿物学; 气氛焙烧; 矿相转变; 硫酸浸出

中图分类号: TF111

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.02.020

文章编号: 0253-6099(2025)02-0113-05

Process Mineralogy Study and Separation Process of Atmosphere Roasting and Dilute Sulfuric Acid Leaching for Mixed Rare Earth Concentrate

WANG Liang^{1,2,3}, XIN Wenbin^{1,2,3}, LI Wenbo⁴, DENG Yongchun^{1,2,3}, ZHANG Xiaolong⁴,
JIANG Yinju^{1,2,3}, LI Jianfei^{1,2,3}

(1. School of Rare Earth Industry (School of Rare Earth Engineering), Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 2. Key Laboratory of Green Extraction and Efficient Utilization of Light Rare Earth Resources of Ministry of Education, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 3. Inner Mongolia Engineering Research Center for Clean Extraction of Light Rare Earth and Application, Baotou 014010, Inner Mongolia, China; 4. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: Based on process mineralogy study, a processing technique consisting of atmosphere roasting and leaching with dilute sulfuric acid was proposed to separate a kind of mixed rare earth concentrate containing 48.23% REO. It is found that the phase composition of such concentrate is mainly composed of bastnaesite, monazite, apatite and fluorite, with rare earth elements primarily existing in bastnaesite and monazite. Under air/argon atmosphere roasting, phases of monazite, apatite and fluorite can remain stable, and phase transition is mainly attributed to bastnaesite reaction. In an air atmosphere, bastnaesite is transitioned in the following steps, $CeFCO_3 \rightarrow Ce_7O_{12} \rightarrow Ce_{11}O_{20} \rightarrow CeO_2$, while its transition steps in an argon atmosphere include $CeFCO_3 \rightarrow Ce_7O_{12}$, $Th_{0.5}Ce_{0.5}O_{1.84} \rightarrow CeOF$. After roasting in an air atmosphere at 500 °C followed by leaching with dilute sulfuric acid, the leaching rates of F-REO and P-REO can reach 86.67% and 1.70%, respectively, while the process of roasting at 700 °C in an argon atmosphere can lead to the leaching rates of

① 收稿日期: 2024-10-10

基金项目: 国家重点研发计划青年科学家项目(2022YFC2905800); 一流学科科研专项项目(YLXKZX-NKD-002/008); 内蒙古自治区自然科学基金(2022QN05017)

作者简介: 王亮(1998—),男,内蒙古呼和浩特人,硕士,主要研究方向为稀土冶金理论与工艺。E-mail: 15561033900@163.com

通信作者: 邓永春(1982—),男,山西宁武人,博士,副教授,主要研究方向为稀土冶金理论与工艺。E-mail: yongchundeng1211@126.com

F-REO and P-REO at 75.97% and 13.33% respectively. And the leaching residues obtained from above-mentioned two different processes have F-REO and P-REO contents of 6.92%, 26.02% and 11.86%, 21.81% respectively, all dominated by monazite. It is concluded that this processing technique of atmosphere roasting followed by dilute sulfuric acid leaching can effectively achieve separation between bastnaesite and monazite.

Key words: rare earth; bastnaesite; monazite; mixed rare earth concentrate; process mineralogy; atmosphere roasting; phase transition; sulfuric acid leaching

我国大力发展稀土资源综合利用等相关技术,针对独特的稀土资源特点,开发系列世界领先的稀土提纯技术和分离技术。稀土已广泛应用于冶金、石油、纺织、农业等各行业^[1-2]。稀土矿的类型主要有单一氟碳铈矿、独居石型和混合型稀土矿,以及离子吸附型稀土矿和磷钇稀土矿^[3]。其中经传统选矿分离后的混合型稀土精矿以共生的氟碳铈矿和独居石为主,稀土品位40%~65%^[4-5]。

目前国内混合稀土精矿分离提取稀土的主流工艺为浓硫酸焙烧法,但由于前端未分离氟碳铈矿与独居石,存在硫酸消耗量大、含氟含硫气体同时排出等诸多问题。目前主要在选矿端采用磁选、浮选和重选的联合工艺分离氟碳铈矿与独居石,但由于混合稀土精矿中的杂质矿物种类多,且萤石、磷灰石、方解石和重晶石等矿物的可浮性与稀土矿类似,钠辉石、钠闪石和赤铁矿的磁性与稀土矿类似,并且各类矿物嵌布情况复杂,存在包裹连生的嵌布情况,大多数氟碳铈矿与独居石被其他矿物包裹,直接通过选矿分离矿物的难度极大,导致工艺指标不理想、有价矿物回收利用率低^[6-7]、生产流程长、生产成本低^[8-10]。

本文对某混合型稀土精矿的工艺矿物学特性进行详细研究,明确混合稀土精矿中主要的矿物类型、稀土元素赋存状态、嵌布特征及各类矿物之间伴生关系等,并对空气/氩气2种气氛下混合型稀土精矿焙烧产物物相组成以及硫酸浸出液和浸出渣进行研究,为实现氟碳铈矿和独居石的有效分离提供一种湿法工艺思路。

1 实验原料与实验方法

1.1 实验原料

实验原料为某公司提供的混合型稀土精矿,经筛分除杂、混合均匀后置于烘干箱中90℃干燥4h,之后密封备用。实验用浓硫酸为市售分析纯试剂。

混合型稀土精矿化学成分分析结果如表1所示。混合稀土精矿中总稀土(TREO)含量(质量分数,下同)为48.23%,其中可溶于酸稀土(F-REO)含量为31.94%,不可溶于酸稀土(P-REO)含量为16.29%,需要排除的杂质成分CaO、F、P、Fe和SiO₂含量均较高。

表1 混合型稀土精矿化学成分分析结果(质量分数)

mixed rare earth concentrate									%
F-REO	P-REO	F	P	CaO	TFe	ThO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	
31.94	16.29	7.11	4.98	11.56	4.10	0.18	2.38	0.29	

表2为混合型稀土精矿矿物组成及含量。由表2可以看出,混合型稀土精矿中矿物种类较为复杂,主要稀土富集矿物为氟碳铈矿、独居石、氟碳钙铈矿等,其中氟碳铈矿与独居石的质量比约为3:2。硅铈铈矿、褐帘石中也含有少量稀土元素。脉石矿物主要为磷灰石、萤石、黄铁矿、白云石、磁/赤铁矿,次为方解石、辉石、黄河矿、重晶石等。

表2 混合型稀土精矿矿物组成及含量(质量分数)

氟碳铈矿	独居石	氟碳钙铈矿	磷灰石	萤石	黄铁矿	白云石	磁/赤铁矿
35.41	23.55	5.59	11.19	6.14	4.63	2.35	1.63
方解石	辉石	黄河矿	重晶石	闪石	硅铈铈矿	褐帘石	其他
1.36	1.06	1.02	1.01	0.95	0.07	0.06	3.98

氟碳铈矿与独居石的单体解离度及连生度如表3所示。结果表明,在混合型稀土精矿中,氟碳铈矿单体解离度为87.50%,主要与磷灰石、萤石和铁矿物连生,其次与碳酸盐矿物和硅酸盐矿物连生;独居石单体解离度为87.77%,主要与磷灰石、铁矿物和萤石连生,与萤石的连生程度明显低于氟碳铈矿,其次与碳酸盐矿物和硅酸盐矿物连生。

表3 氟碳铈矿与独居石的单体解离度及连生度

Table 3 Mineral liberation degree and locking degree of bastnaesite and monazite

矿物种类	单体解离度/%	连生度/%						
		萤石	碳酸盐矿物	硅酸盐矿物	铁矿物	磷灰石	重晶石	其他矿物
氟碳铈矿	87.50	2.50	1.17	0.83	1.92	3.33	0.33	2.42
独居石	87.77	1.98	1.03	1.03	2.07	3.01	0.26	2.84

扫描电镜背散射分析结果表明,氟碳铈矿是混合

型稀土精矿中稀土含量最高的稀土矿物,其中包含 Ce、La、Nd、Pr 等稀土元素。氟碳铈矿单体颗粒度较大且呈不规则的块状和条状,部分呈浸染状沿裂缝填充于磷灰石中、呈散心状或细粒状填充于萤石中;部分氟碳铈矿紧密嵌布在磁铁矿边缘,少量以粒状镶嵌在磁铁矿内部。与氟碳铈矿成分极为接近的氟碳钙铈矿,常常以粒状被其包裹,也常被磁铁矿、钠闪石等包裹其中。独居石中主要包含 Ce、La、Nd、Pr 等稀土元素。独居石颗粒相对氟碳铈矿更细且呈不规则状,多数独居石嵌布在萤石和石英矿边缘,少量呈颗粒状被萤石包裹;部分独居石与氟碳铈矿和氟碳钙铈矿构成连生体矿物,少量以粒状嵌布在钛铁矿中。被其他矿包裹起来的氟碳铈矿与独居石粒度均低于 75 μm,导致常规的物理分离工艺难以实现两者的有效分离。

1.2 实验方法

根据混合型稀土精矿工艺矿物学特点,本文提出“气氛焙烧-稀硫酸浸出”的火法-湿法联合分离工艺。空气/氩气氛焙烧后,混合型稀土精矿中主要物相氟碳铈矿发生矿相转变,利用转变后其化学浸出性的差异实现氟碳铈矿与独居石的分离,分离后氟碳铈矿中的稀土元素进入溶液,随后可以进入萃取分离工艺,而浸出渣物相以独居石为主,后续可采用浓硫酸焙烧法分离提取稀土元素。气氛焙烧-稀硫酸浸出工艺流程如图 1 所示。

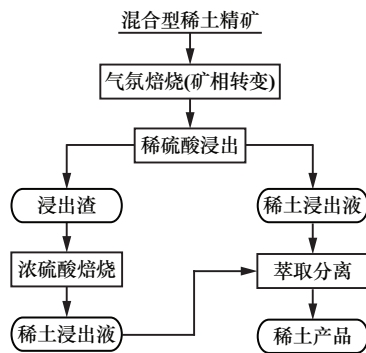


图 1 气氛焙烧-稀硫酸浸出工艺流程

Fig.1 Flowchart of atmosphere roasting and dilute sulphuric acid leaching

1.2.1 气氛焙烧实验

气氛焙烧实验在空气和氩气 2 种气氛下进行,具体实验过程如下:将烘干后的混合型稀土精矿置于管式气氛炉中,升温速率 10 °C/min,焙烧时间 60 min,焙烧温度分别为 500、700 和 900 °C,焙烧完成后,样品随炉冷却至室温,期间持续通入相应气体。

1.2.2 稀硫酸浸出实验

取 10 g 经气氛焙烧 60 min 的混合型稀土精矿,加

入 2.8 mol/L 稀硫酸溶液 80 mL,充分混合,于水浴锅中恒温搅拌浸出 60 min,浸出结束后,过滤、定容,测定浸出液中稀土含量。所得浸出渣于烘箱中 90 °C 下烘干 12 h,记录干重,并测定渣中稀土含量及物相组成。

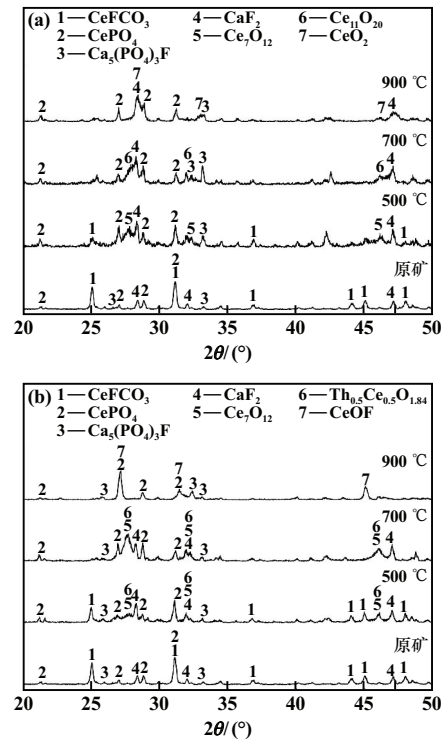
1.2.3 分析表征方法

采用电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)分析稀土矿物多元素化学成分及稀土元素配分;利用 X 射线衍射仪(XRD)分析混合型稀土精矿的矿物物相种类;采用 Sigma-500 型场发射扫描电子显微镜及 AMICS 自动矿物分析系统分析矿物种类及含量;通过 Axio Scope A1 Pol 偏反光显微镜分析矿物解离及连生情况;采用傅里叶红外光谱(FT-IR)分析焙烧产物基团的变化情况。

2 气氛焙烧-稀硫酸浸出实验研究

2.1 气氛焙烧实验

空气和氩气 2 种气氛下的焙烧产物 XRD 图谱见图 2。



(a) 空气气氛; (b) 氩气气氛

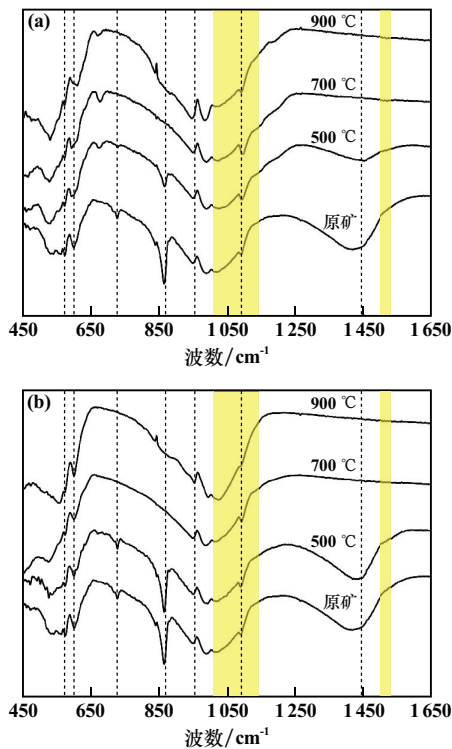
图 2 稀土精矿焙烧产物 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of calcined products of rare earth concentrate

无论空气气氛还是氩气气氛,不同焙烧温度下独居石、磷灰石和萤石物相均未发生明显变化,其物相分别呈现 CePO₄、Ca₅(PO₄)₃、CaF₂ 的结构类型;2 种气氛下焙烧过程物相转变均体现为氟碳铈矿发生不同转变,

其中空气气氛下混合稀土精矿升温至 500、700、900 °C 时, 氟碳铈矿物相转变过程为 $\text{CeFCO}_3 \rightarrow \text{Ce}_7\text{O}_{12} \rightarrow \text{Ce}_{11}\text{O}_{20} \rightarrow \text{CeO}_2$, 空气气氛下升高焙烧温度会使 CeFCO_3 中的 Ce 向高价形态转变, 原精矿中的 Ce^{3+} 在 500、700 °C 时分别转变为同时含有 Ce^{3+} 、 Ce^{4+} 的 Ce_7O_{12} 、 $\text{Ce}_{11}\text{O}_{20}$ 物相, 900 °C 时转变为以 Ce^{4+} 为主的 CeO_2 物相; 氩气气氛下混合稀土精矿升温至 500、700、900 °C 时, 氟碳铈矿物相转变过程为 $\text{CeFCO}_3 \rightarrow \text{Ce}_7\text{O}_{12}$ 、 $\text{Th}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}\text{O}_{1.84} \rightarrow \text{CeOF}$, 氩气气氛下, 升高焙烧温度同样会使 Ce 向高价形态转变, 原精矿中的 Ce^{3+} 在 500、700 °C 时转变为同时含有 Ce^{3+} 、 Ce^{4+} 的 Ce_7O_{12} 、 $\text{Th}_{0.5}\text{Ce}_{0.5}\text{O}_{1.84}$ 物相, 900 °C 时转变为以 Ce^{3+} 为主的 CeOF 物相, 说明空气焙烧时 CeFCO_3 中 Ce 的氧化程度高于氩气焙烧时。

图 3 为不同气氛和温度下焙烧产物 FT-IR 图谱。可以看出, 混合型稀土精矿 FT-IR 图谱中有明显的 CO_3^{2-} 红外吸收峰, 波数 1 416、867、727 cm^{-1} 以及波数段 953~1 093 cm^{-1} 和 572~600 cm^{-1} 处为 PO_4^{3-} 红外吸收峰区域, 说明混合型稀土精矿原矿主要由碳酸盐矿物与磷酸盐矿物组成。经过 2 种气氛焙烧后, 700、900 °C 产物中 CO_3^{2-} 吸收峰均消失, 而 PO_4^{3-} 吸收峰依旧存在, 说明在 2 种气氛条件下, 主要发生碳酸盐矿物的分解反应且反应较为彻底, 结合图 2 结果, 氟碳铈矿在 2 种气氛



(a) 空气气氛; (b) 氩气气氛

图 3 稀土精矿焙烧产物 FT-IR 图谱

Fig. 3 FT-IR spectra of calcined products of rare earth concentrate

下焙烧后物相消失, 亦能说明焙烧过程的物相转变是由氟碳铈矿的反应所致。

2.2 稀硫酸浸出实验

稀硫酸浸出结果如表 4 所示, 浸出渣稀土元素含量及浸出率如表 5 所示, 部分浸出渣 XRD 图谱如图 4 所示。结果表明: 未焙烧的混合型稀土精矿直接稀硫酸浸出的总稀土浸出率仅 4.81%; 空气气氛下 500 °C 焙烧后稀硫酸浸出, F-REO 浸出率为 86.67%, P-REO 浸出率仅 1.70%, 总稀土浸出率为 57.97%, 浸出液中总稀土元素质量浓度为 15.04 g/L, 浸出渣中 F-REO 和 P-REO 含量(质量分数)分别为 6.92% 和 26.02%; 氩气气氛下 700 °C 焙烧后稀硫酸浸出, F-REO 浸出率为 75.97%, P-REO 浸出率为 13.33%, 总稀土浸出率为 54.81%, 浸出液中总稀土质量浓度为 14.76 g/L, 浸出渣中 F-REO 和 P-REO 含量(质量分数)分别为 11.86% 和 21.81%。

表 4 稀硫酸浸出结果

Table 4 Results of dilute sulfuric acid leaching

焙烧条件	焙烧料中稀土 质量分数/%	浸出液中稀土 质量浓度/(g·L ⁻¹)	总稀土 浸出率/%
未焙烧	48.23	1.16	4.81
空气, 500 °C	51.89	15.04	57.97
空气, 700 °C	53.20	10.45	39.29
空气, 900 °C	53.23	11.89	41.66
氩气, 500 °C	48.69	5.28	21.67
氩气, 700 °C	53.86	14.76	54.81
氩气, 900 °C	54.93	4.54	16.53

表 5 浸出渣稀土元素含量及浸出率

Table 5 Content of F-REO and P-REO in leaching residue and their leaching rates

焙烧条件	含量(质量分数)/%		浸出率/%	
	F-REO	P-REO	F-REO	P-REO
空气, 500 °C	6.92	26.02	86.67	1.70
氩气, 700 °C	11.86	21.81	75.97	13.33

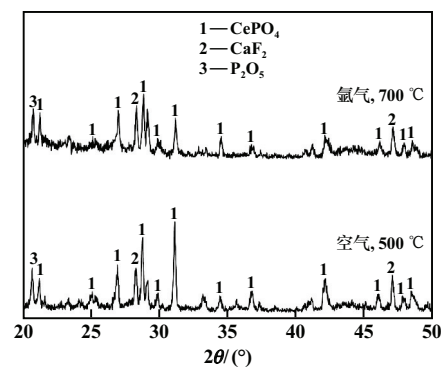


图 4 部分浸出渣 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of some part of leaching residue

结合图2~3可知:空气焙烧过程中,CeFCO₃基本转变为Ce₇O₁₂物相时,浸出液中稀土元素含量较高,物相转变为Ce₁₁O₂₀和CeO₂时,浸出液中稀土元素含量较低;氩气焙烧过程中,CeFCO₃完全转变为Ce₇O₁₂物相时,浸出液稀土含量较高,500℃焙烧料稀土浸出率低可能是CeFCO₃未完全转变所致,物相转变为CeOF时,稀硫酸难以浸出稀土元素。由此可以得出,氟碳铈矿转变为Ce₇O₁₂物相时其中的稀土元素更容易被稀硫酸溶液浸出。结合图4,2种工艺处理后的浸出渣中稀土物相均以CePO₄为主,未发现其他稀土物相的特征峰,说明2种焙烧条件下混合稀土精矿中绝大多数氟碳铈矿经气氛焙烧-稀硫酸浸出后,其中的稀土元素进入浸出液,浸出渣以独居石物相结构为主,通过气氛焙烧-稀硫酸浸出方法有效实现了两者的分离。

3 结论

基于氟碳铈矿与独居石的矿物特征,提出空气/氩气焙烧-稀硫酸浸出工艺处理混合型稀土精矿,得出以下结论。

1) 混合型稀土精矿TREO品位48.23%,其中F-REO品位31.94%、P-REO品位16.29%。混合型稀土精矿中氟碳铈矿和独居石矿物含量(质量分数)分别为35.41%和23.55%,脉石矿物主要为磷灰石、萤石、黄铁矿、白云石、磁/赤铁矿。氟碳铈矿与独居石粒度较细且与其他矿物嵌布特征较为复杂,存在包裹连生的嵌布情况。

2) 空气和氩气2种气氛下焙烧,独居石、磷灰石和萤石物相均未发生明显变化,焙烧过程中物相转变均体现为氟碳铈矿发生不同转变,其中空气气氛下氟碳铈矿物相转变过程为CeFCO₃→Ce₇O₁₂→Ce₁₁O₂₀→CeO₂,氩气气氛下氟碳铈矿物相转变过程为CeFCO₃→Ce₇O₁₂、Th_{0.5}Ce_{0.5}O_{1.84}→CeOF。

3) 混合型稀土精矿经500℃空气气氛焙烧后稀硫酸浸出,F-REO、P-REO浸出率分别为86.67%、1.70%,经700℃氩气气氛焙烧后稀硫酸浸出,F-REO、P-REO浸出率分别为75.97%、13.33%,2种浸出渣中F-REO、P-REO含量(质量分数)分别为6.92%、26.02%和11.86%、21.81%,2种浸出渣均以独居石物相为主,通过气氛焙烧-稀硫酸浸出达到了有效分离氟碳铈矿与独居石的目的。

参考文献(References):

- [1] 左更. 我国稀土行业现状分析与建议[J]. 冶金经济与管理, 2023(6): 4-8.
ZUO Geng. The analysis and relative suggestions on China rare earth

- industry[J]. China Metal Bulletin, 2023(6):4-8.
[2] 黄小卫,张永奇,李红卫. 我国稀土资源的开发利用现状与发展趋势[J]. 中国科学基金, 2011,25(3):134-137.
HUANG Xiaowei, ZHANG Yongqi, LI Hongwei. Development trend and research progress of rare earth extraction in China[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2011,25(3):134-137.
[3] ZHAO Y Y, XU S, MENG D L, et al. Effect of phase transition during roasting of Mountain Pass rare earth concentrate on leaching efficiency of rare earths [J]. Journal of Rare Earths, 2024,42(2):409-414.
[4] 王维维,李二斗,王其伟,等. 白云鄂博微细粒稀土矿工艺矿物学及浮选实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(5):81-85.
WANG Weiwei, LI Erdou, WANG Qiwei, et al. Study on process mineralogy and flotation test of the Bayan Obo fine-grained rare earth ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):81-85.
[5] 李娜,秦玉芳,王其伟. 低钙高品位稀土精矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(6):43-46.
LI Na, QIN Yufang, WANG Qiwei. Flotation of high-grade rare earth concentrate with low calcium content [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2021,41(6):43-46.
[6] 吴玮,韩建民,方以坤. 稀土产业现状分析与策略研究[J]. 粉末冶金工业, 2023,33(6):133-139.
WU Wei, HAN Jianmin, FANG Yikun. Current situation analysis and development strategy of rare earth industry[J]. Powder Metallurgy Industry, 2023,33(6):133-139.
[7] 时晗,何晓娟,胡真,等. 我国稀土矿选矿近十年研究现状及发展前景[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(4):18-25.
SHI Han, HE Xiaojuan, HU Zhen, et al. Research status and development prospect of rare earth ore dressing in China in recent ten years[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(4):18-25.
[8] 马升峰,许延辉,徐惠,等. 稀土矿物的固相分解研究进展[J]. 稀土, 2023,44(4):15-28.
MA Shengfeng, XU Yanhui, XU Hui, et al. Progress in solid phase decomposition of rare earth minerals[J]. Chinese Rare Earths, 2023,44(4):15-28.
[9] 李凯,田杰,李梅,等. 混合稀土精矿还原焙烧磁选工艺研究[J]. 稀有金属与硬质合金, 2020,48(3):5-10.
LI Kai, TIAN Jie, LI Mei, et al. Study on reduction roast and magnetic separation process of mixed rare earth concentrate[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2020,48(3):5-10.
[10] 兰茜,高金涛,郭占成. 白云鄂博稀土共生矿超重力梯级分离稀土元素的工艺研究[J]. 过程工程学报, 2022,22(10):1429-1437.
LAN Xi, GAO Jintao, GUO Zhancheng. Study on technology of super gravity step separation of rare earth elements in Bayan Obo rare earth ore[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022,22(10):1429-1437.

引用本文:王亮,辛文彬,李文博,等. 混合型稀土精矿工艺矿物学及气氛焙烧-稀硫酸浸出分离稀土矿物研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(2): 113-117.

WANG Liang, XIN Wenbin, LI Wenbo, et al. Process mineralogy study and separation process of atmosphere roasting and dilute sulfuric acid leaching for mixed rare earth concentrate [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(2):113-117.