

非洲某含铌矿石工艺矿物学及浮选试验研究^①

刘超^{1,2,3}, 胡红喜^{1,2,3}, 张忠汉^{1,2,3}, 黄伟⁴, 杨记平^{1,2,3}, 陈志强^{1,2,3}

(1.广东省科学院资源利用与稀土开发研究所, 广东 广州 510651; 2.稀有金属分离与综合利用国家重点实验室, 广东 广州 510651; 3.广东省矿产资源开发与综合利用重点实验室, 广东 广州 510651; 4.盛和资源(连云港)新材料科技有限公司, 江苏 连云港 222042)

摘要: 对非洲东部某含铌矿石进行了工艺矿物学研究; 基于工艺矿物学, 将原矿磨细至-0.10 mm 粒级占 100%, 采用脱泥-除铁-浮选工艺对原矿进行预处理, 减少细泥、磁铁矿、锆石对铌矿物浮选指标的影响; 在弱酸性条件下, 以水玻璃+硫酸铝为组合抑制剂、硝酸铅为活化剂, 结合自制螯合类捕收剂 GYX₂ 进行铌浮选试验, 获得了铌精矿 Nb₂O₅ 品位 26.87%、作业回收率 88.31%、对原矿回收率 80.86% 的闭路试验指标, 实现了矿石中铌矿物的高效回收。

关键词: 铌矿; 烧绿石; 铌铁矿; 预处理; 浮选; 工艺矿物学; 脱泥

中图分类号: TD955

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.017

文章编号: 0253-6099(2025)04-0095-05

Process Mineralogy and Flotation Test of Niobium-Bearing Ore from Africa

LIU Chao^{1,2,3}, HU Hongxi^{1,2,3}, ZHANG Zhonghan^{1,2,3}, HUANG Wei⁴, YANG Jiping^{1,2,3}, CHEN Zhiqiang^{1,2,3}

(1. Institute of Resources Utilization and Rare Earth Development, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 2. State Key Laboratory of Rare Metals Separation and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resource and Comprehensive Utilization, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 4. Shenghe Resources (Lianyungang) New Materials Technology Co., Ltd., Lianyungang, 222042, Jiangsu, China)

Abstract: A process mineralogy study was conducted for a niobium-bearing ore in eastern Africa. Based on the study results, the raw ore was ground to -0.10 mm (100% passing size), and then pretreated with a process consisting of desliming, iron removal and zircon flotation for reducing the influence of slime, magnetite, and zircon on flotation performance. Under weakly acidic conditions, a closed-circuit niobium flotation test was carried out, with water glass and aluminum sulfate as a combined depressant, lead nitrate as an activator, and a self-developed chelating collector GYX₂, producing a niobium concentrate grading 26.87% Nb₂O₅ at 88.31% recovery, with a corresponding recovery of 80.86% from the raw ore. It is concluded that the niobium minerals in the ore can be effectively recovered.

Key words: niobium ore; pyrochlore; niobite; pretreatment; flotation; process mineralogy; desliming

铌是一种重要的战略稀有金属,具有熔点高、吸性好、超导性等特殊性能,在钢铁工业、航空航天等领域使用广泛,并在尖端电子领域具有广阔的应用前景^[1]。随着我国经济快速发展,人们对铌的需求量持续上升。

我国铌矿资源储量位居全球第二,其中 98% 的铌分布在内蒙古包头白云鄂博矿。我国铌矿资源品位低、嵌布粒度细、铌矿组成复杂,选别难度大,资源回收

率低^[2]。

含铌矿物种类较多,主要有铌铁矿、烧绿石、黑稀金矿、褐钇铌矿、易解石、钽铁矿等^[3]。近 90% 的铌矿床属于烧绿石^[4],主要分布于美洲地区^[5],浮选是回收烧绿石的主要方法。铌铁矿的选矿方法包括重选、浮选、磁选及其组方法。白云鄂博矿稀土土矿中主要铌矿物为铌铁矿、易解石、黄绿石等,回收铌铁矿较为典型的选矿工艺为“反浮选-浮铌-浮铁”和“反浮选-

① 收稿日期: 2025-02-18

基金项目: 广东省科学院专项资金项目(2022GDASZH-2022010104, 2023GDASZH-2023010104); 国家重点研发计划(2020YFC1908904)

作者简介: 刘超(1988—),男,江西抚州人,硕士,高级工程师,主要从事选矿及固废回收利用研究。E-mail: courage0128@163.com

通信作者: 胡红喜(1985—),男,河南周口人,硕士,高级工程师,主要从事选矿工艺研究。E-mail: hbxhere@163.com

浮铁-浮钨-磁选”^[6-7]。对于钨矿物种类较多的复杂钨矿[8],不能采用单一烧绿石或钨铁矿选矿方法有效回收钨资源^[9]。随着我国矿产资源“走出去”战略不断推进,开发利用国外复杂钨矿资源引起了研究者的重视。本文系统研究非洲东部某轻度风化的含钨矿物的工艺矿物学性质,并在此基础上开展钨矿浮选回收试验研究。

1 试验样品和试验方法

1.1 试验样品

试验矿样为来自非洲东部某矿区的转孔岩心样。从矿样中挑选具有代表性的矿石矿块制成光片,其余样品则进行破碎、混匀(堆锥3次)和筛分(筛孔尺寸2 mm),得到-2 mm 粒级矿样作为本次试验的样品。

样品化学多元素分析结果见表1,矿物组成见表2。由表1可知,原矿中Nb₂O₅品位0.34%、ZrO₂品位1.68%,主要有价金属为钨,是本次试验测试和回收的对象;钨达到了综合利用要求,本次试验暂不考虑钨的回收。由表2可知,原矿中含钨矿物种类较多,主要以烧绿石、钽铌烧绿石和钨铁矿形式存在,少量存在于易解石、钨铁金红石中,其他金属氧化物有硬锰矿、磁铁矿、褐铁矿;钨主要以钨石形式存在;脉石矿物主要为钠长石、钾长石、黑云母、高岭土,少量为磷灰石、白云母、石英等。

表1 样品化学多元素分析结果(质量分数)

Nb ₂ O ₅	Ta ₂ O ₅	ZrO ₂	CaO	CaF ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe	Mn	P ₂ O ₅
0.34	0.064	1.68	1.52	0.32	54.58	19.36	1.21	0.46	0.21

表2 矿物组成(质量分数)

烧绿石	钽铌烧绿石	钨铁矿	钨铁金红石	易解石	硬锰矿	钨石
0.27	0.13	0.11	0.02	0.02	0.72	2.32
石英	钠长石	钾长石	角闪石	霞石	白云母	黑云母
0.13	50.04	26.12	0.40	0.30	1.62	10.58
高岭土	磁铁矿	褐铁矿	磷灰石	独居石	其他	
3.57	0.88	0.96	0.54	0.11	1.16	

样品中烧绿石、钨铁矿和钨石的粒度分布如表3所示。由表3可见,样品中烧绿石、钨石、钨铁矿粒度分布范围为0~0.32 mm,钨石粒度略粗,-0.01 mm 难选微细粒级烧绿石和钨铁矿产率分别为12.58%和5.26%,表明部分烧绿石与钨铁矿嵌布粒度较细,增加了该钨矿物的回收难度。

表3 样品中烧绿石、钨铁矿和钨石的粒度分布

Table 3 Particle size distribution of pyrochlore, niobite and zircon in sample

粒级/mm	产率/%		
	烧绿石	钨石	钨铁矿
-0.32+0.16	12.72	18.20	14.69
-0.16+0.08	35.79	39.11	39.80
-0.08+0.04	18.12	7.91	21.66
-0.04+0.02	14.10	15.80	13.04
-0.02+0.01	6.69	10.33	5.55
-0.01	12.58	8.65	5.26

1.2 试验设备、药剂及方法

试验仪器和试验设备主要包括矿物自动定量分析仪(MLA系统)、FEI Quanta 650 扫描电子显微镜、Empyrean 锐影 X 射线荧光光谱仪、扫描电镜能谱仪(EDS)、Leica DMR XP 偏光显微镜、WFX-110B 原子吸收分光光度计、Leica M125 体视显微镜、水力旋流器、Φ240×90 锥形球磨机、ZCT 湿式筒式磁选机、XFD IV型单槽浮选机。

试验试剂包括硫酸、硫酸铝、硝酸铅(均为分析纯),模数2.5的水玻璃(工业纯),自制药剂GYX₁(主要成分为C₄₋₈的烷基羟胺)和GYX₂(主要成分为C₇₋₉的烷基羟胺)。

采用MLA系统定量测定样品的矿物组成。将捡取的代表性矿块样品制成光片后利用显微镜研究矿石结构、构造以及嵌布粒度、赋存状态等工艺矿物学特性。利用水力旋流器去除细泥,再通过湿式弱磁选机以及浮选机进行选矿试验,分别得到细泥尾矿、磁性产品和浮选产品。

2 试验结果与讨论

2.1 浮钨前预处理

工艺矿物学研究结果表明,矿石中可回收的主要矿物为烧绿石、钽铌烧绿石和钨铁矿;原矿含一定量风化石,细泥易干扰含钨矿物的浮选体系,同时会增加药剂消耗^[10-11]。此外,原矿中含有少量磁铁矿及部分可浮性较好的钨石,在烧绿石矿的浮选体系中易上浮,从而影响钨精矿品质。因此,在浮选钨之前,需对原矿进行预处理。将原矿磨细至-0.10 mm 粒级占100%,加水稀释矿浆后,利用水力旋流器进行脱泥,然后在磁场强度0.45 T条件下利用筒式磁选机脱除磁铁矿,最后在碱性体系下,以淀粉抑制含钨矿物,以油酸为捕收剂回收钨石。经过“脱泥-除铁-浮钨”工艺处理后,浮钨尾矿钨品位0.35%,钨回收率为91.56%,钨主要富集在浮选钨石后的尾矿中。将浮钨尾矿作为浮钨给矿进

行后续试验研究。

2.2 浮铌条件试验

2.2.1 捕收剂试验

烧绿石捕收剂以胺类、螯合剂为主^[12-14]。本矿石中铌矿物以烧绿石、铌铁矿为主,采用自制高效铌矿物螯合剂 GYX₁ 和 GYX₂ 为捕收剂,按照图 1 所示流程进行捕收剂用量试验,结果如图 2 所示。由图 2 可见,2 种捕收剂作用下,粗精矿铌品位接近,2 种捕收剂选择性相近,但 GYX₂ 捕收能力明显强于 GYX₁。随着 GYX₂ 用量增加,粗精矿铌品位下降,回收率上升,粗选 GYX₂ 用量大于 400 g/t 时,粗精矿铌品位大幅下降,

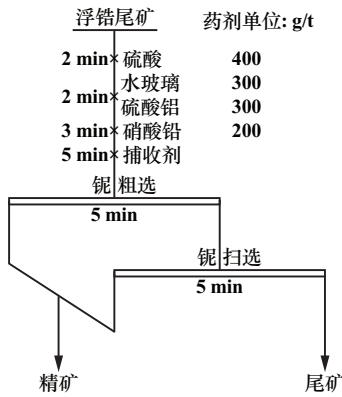
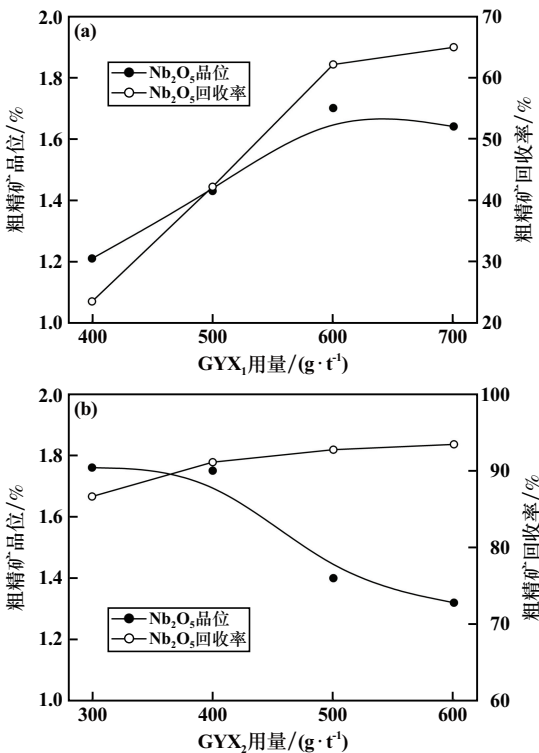


图 1 浮选试验流程

Fig.1 Flotation test flowchart



(a) GYX₁; (b) GYX₂

图 2 捕收剂用量试验结果

Fig.2 Collector dosage test results

回收率小幅上升。确定以 GYX₂ 为捕收剂,适宜的用量为 400 g/t。

2.2.2 活化剂试验

以硝酸铅为活化剂,在捕收剂 GYX₂ 用量 400 g/t 条件下,按照图 1 所示流程开展了活化剂用量试验,结果见图 3。由图 3 可知,随着活化剂硝酸铅用量增加,粗精矿铌品位先上升后下降,回收率先大幅上升后小幅上升,确定适宜的活化剂硝酸铅用量为 200 g/t。

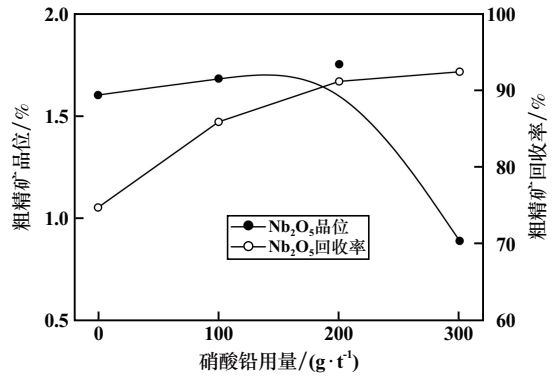


图 3 活化剂用量试验结果

Fig.3 Activator dosage test results

2.2.3 pH 值调整剂试验

烧绿石在酸性或弱酸性介质中表现出较好的可浮性。以硫酸为 pH 值调整剂,在捕收剂 GYX₂ 用量 400 g/t、活化剂硝酸铅用量 200 g/t 条件下,按照图 1 所示流程开展了 pH 值调整剂用量试验,结果如图 4 所示。由图 4 可见,随着 pH 值调整剂硫酸用量增加,粗精矿铌品位和回收率均呈现先上升后下降的趋势,硫酸用量 400 g/t 时,粗精矿铌品位高,铌回收率处于较高范围。适宜的粗选硫酸用量为 400 g/t。

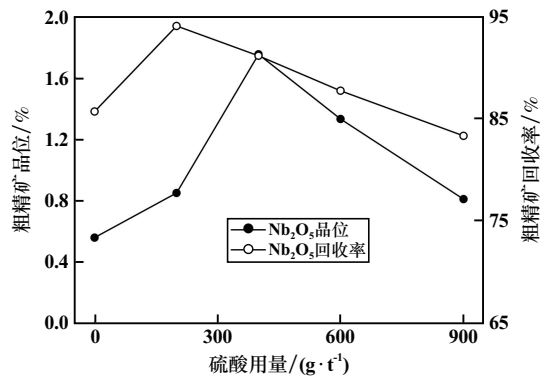


图 4 pH 值调整剂硫酸用量试验结果

Fig.4 Dosage test results of pH adjuster of H₂SO₄

2.2.4 抑制剂试验

水玻璃为硅酸盐脉石的常见抑制剂,对于矿物组成复杂的矿石,抑制剂组合使用往往能提高对脉石的

抑制效果。在捕收剂 GYX₂ 用量 400 g/t、活化剂硝酸铅用量 200 g/t、硫酸用量 400 g/t 条件下,按照图 1 所示流程,考察了水玻璃、水玻璃+硫酸铝(二者按质量比 1:1 混合均匀)对脉石矿物的抑制效果,结果如图 5 所示。由图 5 可见,相较于组合抑制剂,水玻璃对脉石矿物的选择性抑制效果较差,同时对含铌矿石表现出一定的抑制作用。随着组合抑制剂用量增加,粗精矿品位上升,铌回收率先上升后下降,当组合抑制剂用量大于 600 g/t 时,铌品位缓慢上升,回收率则大幅下降。确定以水玻璃+硫酸铝为脉石矿物的抑制剂,适宜用量为 600 g/t。

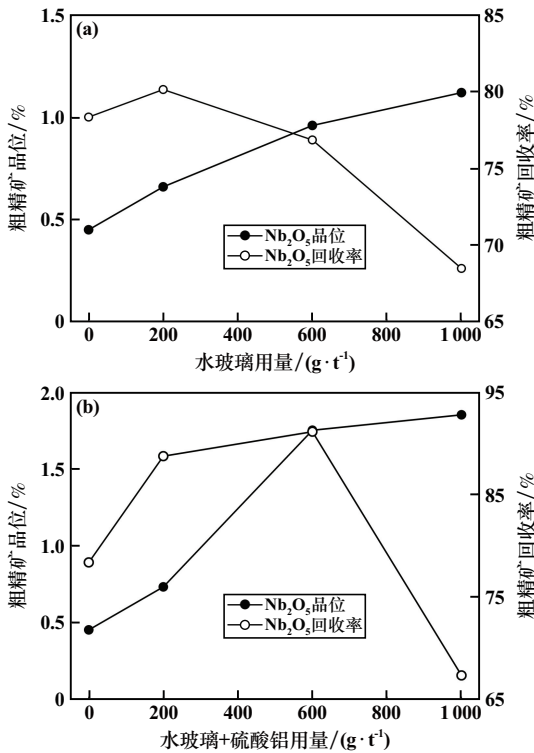


图 5 抑制剂对脉石矿物的抑制效果

Fig. 5 Effect of depressant on gangue minerals

2.3 浮铌闭路试验

在铌浮选条件试验基础上对浮铌尾矿进行了闭路试验,为获得高品位的铌精矿,闭路试验增加了一次精选作业,闭路试验结果见表 4,试验流程见图 6。

表 4 闭路试验结果

Table 4 Closed-circuit test results

产品名称	作业产率/%	Nb ₂ O ₅ 品位/%	Nb ₂ O ₅ 回收率/%	
			作业	对原矿
铌精矿	1.14	26.87	88.31	80.86
尾矿	98.86	0.041	11.69	10.70
浮铌尾矿	100.00	0.35	100.00	91.56

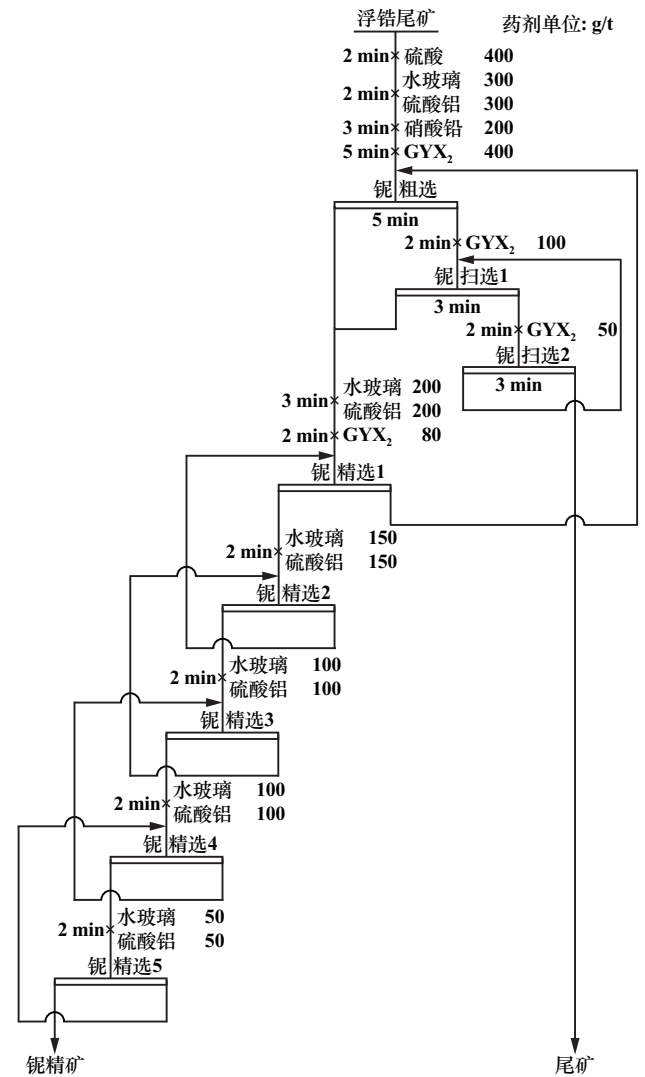


图 6 闭路试验流程

Fig. 6 Closed-circuit test flowchart

对 Nb₂O₅ 品位 0.35% 的浮铌尾矿进行浮选闭路试验,经一次粗选、二次扫选、五次精选,获得了 Nb₂O₅ 品位 26.87%、作业回收率 88.31%、对原矿回收率 80.86% 的铌精矿。该工艺较好地实现了矿石中铌矿物的回收。

3 结论

1) 矿石中主要有价金属为铌,含铌矿物种类较多,主要以烧绿石、钽铌烧绿石和铌铁矿形式存在,部分烧绿石与铌铁矿嵌布粒度较细。主要脉石矿物为钠长石、钾长石、黑云母、高岭土。

2) 原矿中的风化矿、磁铁矿、锆石矿石易干扰含铌矿物的浮选回收,因而在含铌矿石浮选前需进行脱泥、除铁、浮铌预处理,减少对后续含铌矿石浮选的干扰。

3) 对含 Nb₂O₅ 0.34% 的原矿,在磨细至 -0.10 mm 粒级占 100%,经“脱泥-除铁-浮铌”预处理,在弱酸性

条件下,以水玻璃+硫酸铝为组合抑制剂、硝酸铝为活化剂、 GYX_2 为捕收剂,闭路试验取得了 Nb_2O_5 品位26.87%、对原矿回收率80.86%的铌精矿,实现了矿石中铌矿物的高效回收。

参考文献(References):

- [1] GIBSON C E, KELEBEK S, AGHAMIRIAN M. Pyrochlore flotation from silicate gangue minerals; A mine adsorption mechanisms and the effect of modifying reagents[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 171:107100.
- [2] 张倩. 铌铁矿和石英浮选分离行为及机理研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2022.
ZHANG Qian. Research on flotation separation behavior and mechanism of niobite and quartz[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2022.
- [3] 梁冬云,李波. 稀有金属矿工艺矿物学[M]. 北京:冶金工业出版社, 2015.
LIANG Dongyun, LI Bo. Process mineralogy of rare metal ores[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [4] 尹兆波,高利坤,饶兵. 我国铌矿资源概况及选矿技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2024,44(1):115-125.
YIN Zhaobo, GAO Likun, RAO Bing. Overview of niobium resources and progress in mineral processing technology in China[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2024,44(1):115-125.
- [5] 艾永亮,范光. 世界主要烧绿石资源及选矿技术特点[J]. 中国矿业, 2015,24(4):130-133.
AI Yongliang, FAN Guang. Resources status and mineral processing of pyrochlore[J]. *China Mining Magazine*, 2015,24(4):130-133.
- [6] 罗晓锋,杨占峰,王振江,等. 白云鄂博东矿萤石型铌-稀土-铁矿石中铌的赋存状态及分布规律[J]. 矿物学报, 2022,42(5):659-668.
LUO Xiaofeng, YANG Zhanfeng, WANG Zhenjiang, et al. Occurrence state and distribution regularity of niobium in the fluorite-type Nb-REE-Fe ores of the East Mine in the Bayan Obo deposit[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2022,42(5):659-668.
- [7] 冉孟杰,任国兴,肖松文,等. 白云鄂博铌资源提取研究进展[J]. 稀有金属与硬质合金, 2022,50(5):12-18.
RAN Mengjie, REN Guoxing, XIAO Songwen, et al. Research progress on the extraction of niobium resources in Bayan Obo[J]. *Rare Metals and Cemented Carbides*, 2022,50(5):12-18.
- [8] 邱显扬,李美荣,梁冬云,等. 甘肃某复杂铌稀土矿石矿物学及选矿工艺特性研究[J]. 中国稀土学报, 2019,37(5):625-634.
QIU Xianyang, LI Meirong, LIANG Dongyun, et al. Mineralogical features and mineral processing characteristics of a complex niobium-rare earth ore from Gansu Province[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2019,37(5):625-634.
- [9] 黎洁,谢贤,吕晋芳,等. 铌矿资源概述及选矿技术研究进展[J]. 金属矿山, 2021(2):120-126.
LI Jie, XIE Xian, LYU Jinfang, et al. Overview of niobium resources and research progress in mineral processing technology[J]. *Metal Mine*, 2021(2):120-126.
- [10] 吴迪,孟庆波,高玉德,等. 某烧绿石尾矿选铌试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6):112-118.
WU Di, MENG Qingbo, GAO Yude, et al. Experimental study on niobium separation from pyrochlore tailings[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2021(6):112-118.
- [11] 王星. 新疆某锂钽铌铍多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(4):198-202.
WANG Xing. Beneficiation of lithium-tantalum-niobium-beryllium polymetallic ore from Xinjiang[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2024,44(4):198-202.
- [12] LIU M X, LI H, JIANG T, et al. Flotation of coarse and fine pyrochlore using octyl hydroxamic acid and sodium oleate[J]. *Minerals Engineering*, 2019,132:191-201.
- [13] 邹坚坚,胡真,王成行,等. 风化高泥铌多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):78-81.
ZOU Jianjian, HU Zhen, WANG Chenghang, et al. Beneficiation of weathered and high muddy niobium-containing polymetallic ore[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022,42(6):78-81.
- [14] 许海峰,周瑜林,卢翔,等. 铌矿浮选药剂研究进展[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):50-56.
XU Haifeng, ZHOU Yulin, LU Xiang, et al. Research progress of niobium ore flotation reagents[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2022,42(6):50-56.
- 引用本文:刘超,胡红喜,张忠汉,等. 非洲某含铌矿石工艺矿物学及浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):95-99.
LIU Chao, HU Hongxi, ZHANG Zhonghan, et al. Process mineralogy and flotation test of niobium-bearing ore from africa[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2025,45(4):95-99.