

低品位铌矿石超常富集选矿试验研究^①

周瑜林

(长沙矿冶研究院有限责任公司, 湖南长沙 410012)

摘要:对白云鄂博西矿区某低品位铌矿石进行了超常富集选矿试验研究,采用磁选-重选抛尾预富集,获得 Nb₂O₅ 品位 2.61% 的铌粗精矿;铌粗精矿经浮选去除硫化矿后,采用捕收剂 CYN-7 和抑制剂 CYD-2 浮选回收铌矿物,达到铌矿物与脉石矿物的高效分离。结果表明,在给矿 Nb₂O₅ 品位 0.06%、磨矿细度-0.074 mm 粒级占 85% 条件下,采用磁选-重选抛尾、反浮选脱硫、一粗三精正浮选选铌流程,最终可获得 Nb₂O₅ 品位 22.37%、Nb₂O₅ 回收率 33.64% 的铌精矿。

关键词:白云鄂博铌矿; 铌铁矿; 超常富集; 浮选; 铌; 捕收剂; 抑制剂

中图分类号: TD955

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.011

文章编号: 0253-6099(2025)04-0063-05

Beneficiation Experiment of Low Grade Niobium Ore for Super Enrichment

ZHOU Yulin

(Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co. Ltd., Changsha 410012, Hunan, China)

Abstract: A beneficiation experiment for super enrichment was carried out with the low-grade niobium ore from western zone of Bayan Obo mine. In the experiment, a process of magnetic separation followed by gravity concentration for tailings discarding was firstly adopted for pre-concentration, and the obtained rougher concentrate grading 2.61% Nb₂O₅ was subjected to a reverse flotation for desulfuration, followed by a direct flotation with CYN-7 as a collector and CYD-2 as a depressant for recovering Nb minerals, resulting in efficient separation between Nb and other gangue minerals. It is found that the raw ore grading 0.06% Nb₂O₅, with a grinding fineness of -0.074 mm 85% is treated by magnetic separation and gravity concentration for tailings discarding, followed by a reverse flotation for desulfuration, and a direct flotation consisting of one stage of roughing and three stage of cleaning. As a result, a Nb concentrate grading 22.37% Nb₂O₅ at 33.64% recovery can be finally obtained.

Key words: Bayan Obo niobium ore; niobite; super enrichment; flotation; niobium; collector; depressant

铌具有熔点高、抗腐蚀性能强、低温下超导性能好等特点,广泛应用于高强度钢筋材料、高温合金材料、超导材料等,是现代工业和尖端技术中不可缺少的重要关键金属。美国地质调查局资料显示,1994—2022年世界铌产品总量总体保持增长趋势^[1]。全球铌资源分布相对集中,巴西和加拿大的铌资源占世界铌资源总量的90%以上,也是世界主要铌生产国,2022年巴西铌产量占全球铌产量的91%(71 000 t),加拿大铌产量占8%^[2]。

目前,全球主要经济体的铌供应都高度依赖进口,

欧盟^[3]、美国^[4]和中国^[5]都将铌列为重点保障的关键原材料、关键矿产。我国铌资源储量较为丰富,储量(以 Nb₂O₅ 计)达到了 927 万 t^[6],其中白云鄂博 Fe-REE-Nb 矿床是我国最大的铌储量基地,铌储量(以 Nb₂O₅ 计)达到了 660 万 t,约占全国铌储量的 71%,但因铌品位低、铌矿物与其他矿物之间共生关系复杂,未能开发利用形成实际生产能力^[7]。

推动白云鄂博铌矿资源的有效开发和利用,对解决我国铌资源开发“卡脖子”问题具有重要而深远的意义。本文对白云鄂博西矿区某低品位铌矿资源进行

① 收稿日期: 2025-02-16

基金项目: 国家自然科学基金(92062223); 国家重点研发计划(2020YFC1909103)

作者简介: 周瑜林(1983—),女,湖南岳阳人,博士,高级工程师,主要研究方向为铁及铁基共生矿产资源开发利用。E-mail: 1258989413@qq.com

铌选矿研究,取得了突破性进展,试验指标先进。

1 矿石性质

试验所用矿样来自白云鄂博西矿区低品位铌矿,其化学多元素、矿物组成和铌矿物含量及 Nb 元素分布分析结果分别见表 1~3。由表 1~2 可知,该矿中 Nb_2O_5 品位仅 0.06%,长石、云母、绿泥石、辉石-闪石、石英等硅酸盐类脉石矿物含量达到 55.05%,白云石、方解石等碳酸盐类脉石矿物含量 34.38%,其次还有多种铁矿物和稀土矿物等,矿物组成十分复杂。由表 3 可知,该矿的铌元素主要分布于铌铁矿中,其次在易解石中,再次在烧绿石中,铌在三者中总分布率为 98.04%。

表 1 试样化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis results of sample %

Nb_2O_5	REO	Fe	CaF ₂	Sc ₂ O ₅ ¹⁾	TiO ₂	SiO ₂
0.06	0.71	8.09	1.44	35.4	0.23	31.88
Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	BaO	SrO	Na ₂ O
8.1	12.29	9.36	0.66	0.63	0.27	2.61
K ₂ O	P	S	C	F	烧失	
3.91	0.38	0.96	3.78	1.24	12.79	

1) 单位为 g/t。

表 2 试样矿物组成(质量分数)

Table 2 Mineral composition of sample %

铌矿物	独居石	氟碳铈矿类	褐帘石	磁铁矿	赤褐铁矿	菱铁矿
0.10	0.28	0.24	0.80	1.36	0.86	0.76
萤石	黄铁矿	方解石	白云石	长石	云母	绿泥石
1.29	1.91	9.26	25.12	21.05	26.75	3.14
辉石-闪石	磷灰石	石英	重晶石	硅灰石	钛铁矿	其他
3.00	1.73	1.11	0.18	0.38	0.13	0.55

表 3 试样中铌矿物含量及 Nb 元素分布

Table 3 Contents of niobium minerals and distribution of

Nb element in sample

矿物名称	矿物含量(质量分数)/%	Nb 分布率/%
铌铁矿	0.068 9	87.80
易解石	0.010 3	7.03
烧绿石	0.026 0	3.21
(含铌)金红石	0.018 2	0.68
包头矿	0.001 2	0.23
其他	0.002 4	1.05
合计	0.103 6	100.00

2 试验原则流程及试验药剂

试验矿样中脉石矿物种类多、含量大,主要包含硅

酸盐矿物长石、云母、绿泥石、辉石-闪石以及碳酸盐矿物白云石、方解石等,高效预选脱除硅酸盐、碳酸盐脉石对提高铌矿分选效率具有重要作用。磁选是白云鄂博铌矿预选去除脉石较为常用且有效的方法^[8],试验矿样中主要铌矿物为弱磁性铌铁矿,采用强磁选可实现大量非磁性脉石矿物如长石、方解石、白云石等矿物的预抛尾;云母、绿泥石、辉石-闪石及白云石等具有一定弱磁性,易与铌铁矿一起进入强磁选精矿,但这些矿物密度相对较小,重选法是去除这部分脉石较好的方法;弱磁性黄铁矿密度较大,难以通过磁选-重选预选分离,可采用硫化矿浮选法有效去除黄铁矿。羟肟酸类捕收剂是铌矿物浮选的良好捕收剂^[9],在白云鄂博铌矿浮选研究中常表现出较好的选择性,可显著提高铌矿正浮选分选效率。综合考虑,确定低品位复杂铌矿选矿原则流程为:磁选-重选抛尾、反浮选脱硫、正浮选选铌。试验原则流程如图 1 所示。

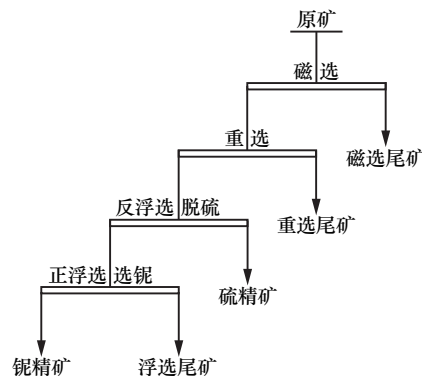


图 1 试验原则流程

Fig. 1 Principle flowchart in test

试验所用抑制剂包括市购的工业品氟硅酸氨、腐殖酸钠、草酸以及自主研发的抑制剂 CYD-2,捕收剂包括市购的 LN-2(N-十二烷基-N,N-二甲基磷酸)、辛硫基羟肟酸以及自主研发的 CYT-38A(C₅₋₉烷基羟肟酸)和 CYN-7(C₆₋₁₂烷基羟肟酸)。

3 试验结果与讨论

3.1 预选试验

试验矿样中含有少量磁铁矿,对弱磁选去除磁铁矿后的弱磁选尾矿再进行强磁选,可提高强磁选效率。在弱磁选磁场强度 0.15 T、强磁选粗选磁场强度 1.5 T 条件下,考察了磨矿细度对磁选效果的影响,结果如图 2 所示。由图 2 可知,磨矿细度-0.074 mm 粒级占 65.0%~96.0% 条件下,随着磨矿细度增加,强磁选精矿 Nb_2O_5 品位从 0.23% 提高到 0.33%;但随着磨矿细度增加,强磁选精矿 Nb_2O_5 回收率先升后降,其主要

原因是过磨产生大量极微细粒铌铁矿,难以使用磁选捕获回收,铌矿物损失较大。磨矿细度-0.074 mm 粒级占 86.80%条件下,经弱磁选-强磁选,可获得 Nb₂O₅ 品位 0.30%、回收率 78.59%的强磁选精矿。

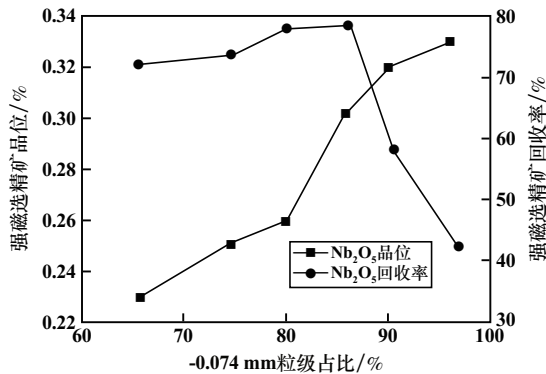


图2 磨矿细度对磁选效果的影响

Fig.2 Effect of grinding fineness on magnetic separation

采用 MLA 对强磁选精矿进行矿物组成及含量分析,结果见表 4。结果表明,强磁选精矿中主要脉石矿物为白云石和云母,其次为绿泥石、辉石-闪石、方解石,这些矿物密度均小于铌铁矿、易解石、烧绿石等铌矿物,可采用重选去除这些脉石矿物。

表 4 强磁选精矿矿物组成(质量分数)

Table 4 Mineral composition of HIMS concentrate %

铌矿物	稀土矿物	方解石	绿泥石	菱铁矿	辉石-闪石	云母	长石
0.69	1.88	2.94	6.44	5.63	4.80	25.64	1.16
白云石	磁/赤铁矿	磷灰石	钛铁矿	赤褐铁矿(磁)	黄铁矿	萤石	其他
38.71	2.15	0.35	2.13	0.86	6.17	0.47	0.39

采用摇床重选法,对强磁选精矿进行分选,效果显著,可得到 Nb₂O₅ 品位 2.61%的铌粗精矿,重选尾矿 Nb₂O₅ 品位为 0.095%。

采用 MLA 对重选精矿进行矿物组成及含量分析,结果见表 5。由表 5 可知,重选精矿中铌矿物含量达到 3.29%,主要脉石矿物为辉石-闪石、云母,其次为白云石-方解石,尤为显著的是,重选精矿中(磁)黄铁矿含量较高,达到了 21.77%,需要进行浮选去除。

表 5 重选精矿矿物组成(质量分数)

Table 5 Mineral composition of gravity-separation concentrate %

铌矿物	稀土矿物	萤石	辉石-闪石	石英	菱铁矿(磁)	黄铁矿
3.29	7.89	0.05	21.37	0.31	6.90	21.77
磷灰石	磁/赤铁矿	长石	白云石-方解石	云母	钛铁矿	其他
1.11	0.18	0.37	16.05	16.08	3.30	3.12

经过调整硫化矿浮选药剂种类及用量,最终在丁基黄药 200 g/t、Z-200 用量 50 g/t 条件下进行硫化矿浮选,可获得 Nb₂O₅ 品位 3.24%、作业回收率 95.80%的铌精矿,同时可产出 S 品位 45.23%、Nb₂O₅ 品位 0.28%的硫精矿。重选精矿反浮选脱硫试验结果见表 6。

表 6 重选精矿反浮选脱硫试验结果

Table 6 Desulfurization of gravity-separation concentrate by reverse flotation

产品名称	作业产率/%	品位/%		作业回收率/%	
		Nb ₂ O ₅	S	Nb ₂ O ₅	S
硫精矿	22.83	0.28	45.23	4.20	97.98
浮硫尾矿	77.17	3.24	0.28	95.80	2.02
给矿(重选精矿)	100.00	2.61	10.54	100.00	100.00

3.2 铌矿浮选试验

白云鄂博低品位铌矿石磁选-重选预选以及浮选脱硫后进入铌矿浮选,铌矿浮选给矿中主要脉石为硅酸盐和碳酸盐矿物,其次还有少量稀土矿和钛铁矿,为实现铌矿物的高效分选,进行了铌矿捕收剂和抑制剂种类和用量以及流程结构试验。

3.2.1 铌浮选捕收剂种类和用量试验

Araxa 矿、Ctaloa 矿以及 Niobec 矿等铌矿山的浮选实践中均采用胺类捕收剂^[10],但据文献报道^[11],胺类捕收剂对烧绿石、铌铁矿等铌矿物与石英、钾长石、霓石-辉石、黑云母等硅酸盐矿物的浮选分离效果不理想。羟肟酸类、膦酸类和肼酸类捕收剂对铌有较强的选择性作用,在铌矿物与硅酸盐矿物浮选分离中表现优良,且相对膦酸类和肼酸类捕收剂,羟肟酸类捕收剂具有显著的环境友好性^[12]。本研究选用羟肟酸类药剂作为铌矿浮选捕收剂。

抑制剂氟硅酸氨用量 1 500 g/t、捕收剂用量 500 g/t,采用一次粗选的浮选流程,进行了捕收剂 LN-2、辛硫基羟肟酸、CYT-38A、CYN-7 的铌浮选对比试验,捕收剂种类对铌浮选效果的影响见图 3。结果表明,CYT-38A 一次粗选铌精矿 Nb₂O₅ 品位超过了 7.00%,但铌回收率相对较低;辛硫基羟肟酸、CYN-7 对铌的浮选回收率高,均达到 90%以上,但 CYN-7 相对辛硫基羟肟酸浮选铌精矿品位更高。确定以 CYN-7 为捕收剂进行铌矿浮选。

相同条件下,进行了捕收剂 CYN-7 用量试验,结果见图 4。由图 4 可以看出,随着 CYN-7 用量增加,铌浮选粗精矿 Nb₂O₅ 作业回收率显著增加,但 CYN-7 用量超过 500 g/t 后,再增加 CYN-7 用量,Nb₂O₅ 作业回收率变化较小,且铌精矿 Nb₂O₅ 品位显著下降。适宜

的 CYN-7 用量为 500 g/t, 此时浮选精矿 Nb_2O_5 品位达到 6.00%, Nb_2O_5 作业回收率为 92.37%。

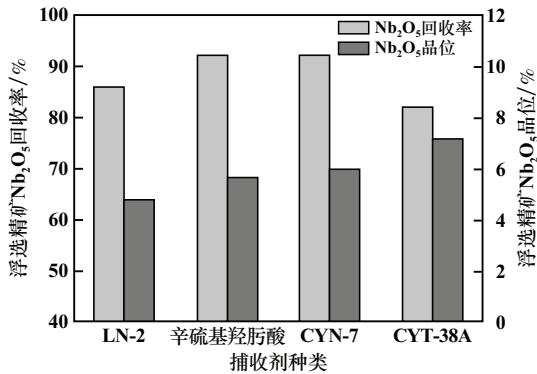


图3 铌浮选捕收剂种类对铌浮选效果的影响

Fig.3 Effect of collector types on niobium flotation

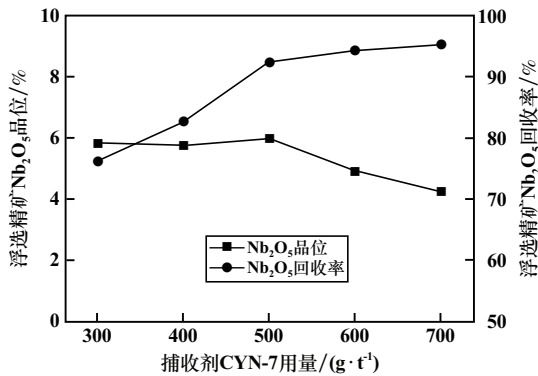


图4 铌浮选捕收剂 CYN-7 用量试验结果

Fig.4 Test results of CYN-7 dosage for niobium flotation

3.2.2 铌浮选抑制剂种类和用量试验

铌浮选给矿中含有辉石-闪石、云母、白云石、方解石、磷灰石等多种不同性质脉石矿物,为实现多种脉石的抑制,抑制剂种类的选择尤为重要。捕收剂 CYN-7 用量 500 g/t, 抑制剂用量 1 500 g/t, 对比了氟硅酸铵、腐殖酸钠、草酸和 CYD-2 等多种抑制剂对铌浮选效果的影响, 结果见图 5。从图 5 可以看出, 腐殖酸钠在铌矿物浮选过程中具有较强的抑制作用, 但选择性较差; 氟硅酸铵、草酸和 CYD-2 在铌矿物浮选中均具有较好的选择性抑制作用, 其中 CYD-2 选择性抑制效果更好。选择 CYD-2 作为本次铌浮选的脉石抑制剂。

相同条件下, 进行了抑制剂 CYD-2 用量试验, 结果见图 6。由图 6 可以看出: 随着 CYD-2 用量增加, 铌浮选粗精矿回收率逐渐降低, Nb_2O_5 品位显著增加; CYD-2 用量超过 2 500 g/t 后, 再增加 CYD-2 用量, 浮选铌粗精矿 Nb_2O_5 品位和回收率均降低。适宜的抑制剂 CYD-2 用量为 2 500 g/t, 此时浮选精矿 Nb_2O_5 品位达到 13.30%, Nb_2O_5 作业回收率为 85.98%。

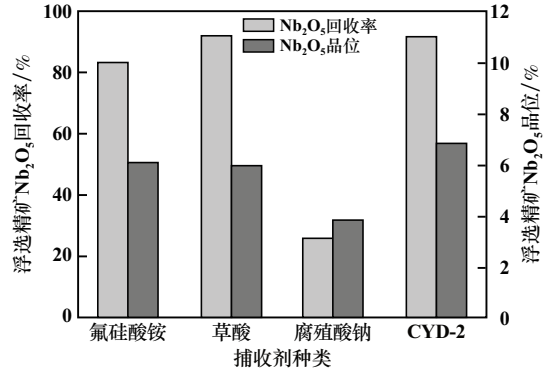


图5 铌浮选抑制剂种类对铌浮选效果的影响

Fig.5 Effect of inhibitors types on niobium flotation

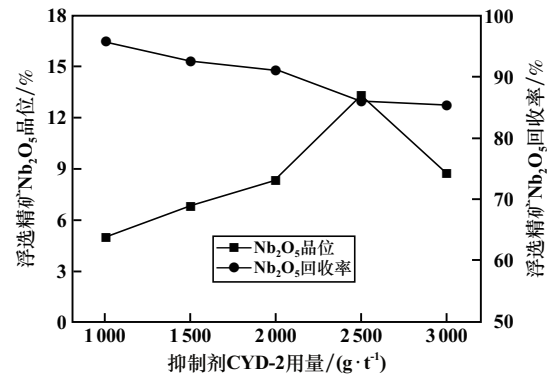


图6 铌浮选抑制剂 CYD-2 用量试验结果

Fig.6 Test results of CYD-2 dosage for niobium flotation

3.3 闭路试验

在条件试验基础上, 进行了预选-铌浮选闭路流程试验, 结果见表 7, 试验流程见图 7。试验工艺条件为: 磨矿细度 -0.074 mm 粒级占 85%, 弱磁选磁场强度 0.15 T, 强磁选磁场强度 1.5 T; 硫化矿浮选粗选丁基黄药用量 150 g/t、Z-200 用量 50 g/t, 硫化矿浮选精选丁基黄药用量 100 g/t、Z-200 用量 50 g/t; 铌浮选粗选 CYN-7 用量 500 g/t、CYD-2 用量 2 500 g/t, 铌精选 1、精选 2、精选 3、精选 4 CYD-2 用量分别为 500、300、200、100 g/t。闭路试验可以获得 Nb_2O_5 品位 22.37%、回收率 33.64% 的铌精矿。

表7 闭路试验结果

Table 7 Closed-circuit test results

产品名称	产率/%	Nb_2O_5 品位/%	Nb_2O_5 回收率/%
铌精矿	0.096	22.370	33.64
浮选尾矿	3.426	0.289	15.51
硫精矿	0.271	0.530	2.25
重选中矿	3.803	0.320	19.07
重选尾矿	8.694	0.035	4.77
强磁选尾矿	82.610	0.017	22.00
弱磁选精矿	1.100	0.160	2.76
合计	100.000	0.064	100.00

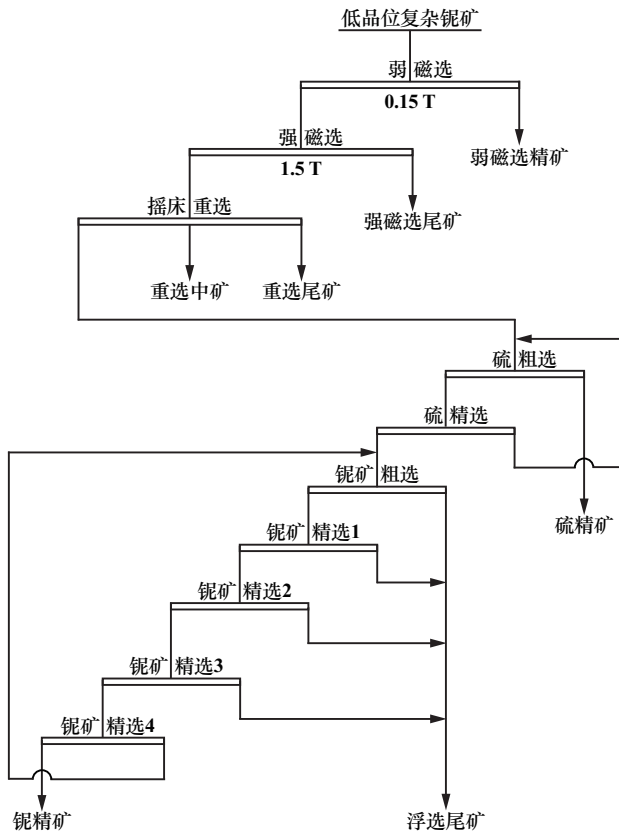


图 7 闭路试验流程

Fig. 7 Closed-circuit test flowchart

4 结论

1) 白云鄂博西矿区白云岩型铌矿石 Nb_2O_5 品位 0.06%, 铌主要以铌铁矿形式存在, 铌矿物嵌布粒度细, 与其伴生矿物共生紧密。

2) 采用磁选-重选可预先抛除产率超过 90% 的尾矿; 磁选-重选抛尾、反浮选脱硫、正浮选选铌闭路试验可获得 Nb_2O_5 品位 22.37%、回收率 33.64% 的铌精矿。

参考文献 (References):

[1] 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.

[2] 邓攀, 陈玉明, 叶锦华, 等. 全球铌钽资源分布概况及产业发展形势分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(4): 63-68.
DENG Pan, CHEN Yuming, YE Jinhua, et al. Study on the resource distribution and industry development of global niobium and tantalum[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(4): 63-68.

[3] Study on the review of the list of critical raw materials executive summary[R]. European Commission, 2017. <http://ec.europa.eu/docsroom/>

documents/25421.

[4] Final list of critical minerals 2018[R]. U.S. Department of the Interior, 2018. <https://www.federalregister.gov/documents/2018/05/18/2018-10667/final-list-of-critical-minerals-2018>.

[5] 王安建, 王高尚. 全球矿产资源形式报告(2021)[R]. 北京: 中国地质调查局/中国地质科学院全球矿产资源战略研究中心, 2021.
WANG Anjian, WANG Gaoshang. Report on the global mineral resources situation (2021)[R]. Beijing: China Geological Survey/Global Mineral Resources Strategy Research Center, Chinese Academy of Geological, 2021.

[6] 王汝成, 车旭东, 郭斌, 等. 中国铌钽铅资源[J]. 科学通报, 2020, 65(33): 3763-3777.
WANG Rucheng, CHE Xudong, WU Bin, et al. Critical mineral resources of Nb, Ta, Zr, and Hf in China[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(33): 3763-3777.

[7] 王维维, 杨占峰, 候少春, 等. 白云鄂博铌资源特征及开发利用新进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 49-53.
WANG Weiwei, YANG Zhanfeng, HOU Shaochun, et al. Characteristics of Bayan Obo niobium resources and new progress in its development and utilization[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(5): 49-53.

[8] 陈宏超, 刘文丽, 曾永杰, 等. 白云鄂博矿选别工艺研究发展及应用现状[J]. 包钢科技, 2025, 51(1): 13-19.
CHEN Hongchao, LIU Wenli, ZENG Yongjie, et al. Development and application status of beneficiation technology study of baiyuneboite[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2025, 51(1): 13-19.

[9] 毕冉, 李侠, 张倩. OHA 及 OHA 与亚油酸钠复配对铌铁矿浮选的影响试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2021(6): 107-111.
BI Ran, LI Xia, ZHANG Qian. Effect of OHA and OHA combined with sodium linoleate on niobite flotation[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2021(6): 107-111.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 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.

引用本文: 周瑜林. 低品位铌矿石超常富集选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2025, 45(4): 63-67.
ZHOU Yulin. Beneficiation experiment of low grade niobium ore for super enrichment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025, 45(4): 63-67.