doi: 10.20239/j.issn.1671-9492.2026.08.024

新型复合捕收剂强化浮选回收白云鄂博低品位伴生铌矿及机理研究

曹 钊[1,2,3],汪 录[1,2],吴 旭[1,2],加晨琳[1,2],衷小斌[1,2],
魏祥展[1,2],李慧敏[1,2],王介良[1,2],李 震[1,2]
(1. 内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古自治区矿业工程重点实验室,内蒙古 包头 014010;
3. 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)

摘 要: 为提高白云鄂博铌资源的高效捕收利用效率,针对铌矿物嵌布粒度细、矿物共生关系复杂及浮选回收效率低的难题,使用苯甲羟肟酸(BHA)和水杨羟肟酸(SHA)组成复合捕收剂,开展实际矿浮选试验,结合AMICS、X射线光电子能谱(XPS)等测试方法,研究了复合捕收剂对铌铁矿、易解石、铌铁金红石及烧绿石浮选行为的影响及协同作用机制。结果表明,采用六偏磷酸钠作为抑制剂、BHA/SHA复合捕收剂作为捕收剂,在BHA∶SHA质量比为10∶1、捕收剂用量为4 kg/t的条件下,铌浮选指标最佳。与单独使用BHA相比,复合捕收剂获得Nb_2O_5品位5.19%、回收率52.47%的铌精矿,其中铌回收率提高21.55个百分点。XPS分析结果表明,复合捕收剂作用后四种含铌矿物表面N 1s信号均明显增强,其中烧绿石、铌铁金红石、易解石及铌铁矿表面N 1s含量均高于单一捕收剂体系,说明BHA与SHA在矿物表面发生了明显的协同吸附作用,形成了更加稳定、致密的有机吸附层,有效改善了矿物表面疏水性,提高了矿物与气泡的黏附能力,从而强化了细粒级含铌矿物的浮选回收。

关键词: 白云鄂博;伴生铌矿;复合捕收剂;羟肟酸;协同吸附
中图分类号: TD952;TD923 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9492(2026)08-0276-12

Study on Enhanced Flotation Recovery of Low-grade Associated Niobium Ore from Bayan Obo Using Novel Composite Collector and Its Mechanism

Cao Zhao[1,2,3], Wang Lu[1,2], Wu Xu[1,2], Jia Chenlin[1,2], Zhong Xiaobin[1,2],
Wei Xiangzhan[1,2], Li Huimin[1,2], Wang Jieliang[1,2], Li Zhen[1,2]
(1. School of Mining and Coal, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;
2. Key Laboratory of Mining Engineering of Inner Mongolia Autonomous Region, Baotou 014010, Inner Mongolia, China;
3. Key Laboratory of Green Extraction & Efficient Utilization of Light Rare-Earth Resources, Ministry of Education, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

Abstract: To improve the efficient recovery and utilization of niobium resources from the Bayan Obo deposit, a composite collector consisting of benzohydroxamic acid (BHA) and salicylhydroxamic acid (SHA) was developed to overcome the challenges associated with fine-grained dissemination, complex mineral intergrowth, and low flotation recovery of niobium-bearing minerals. Flotation experiments were conducted using a practical ore sample, and the flotation performance and synergistic adsorption mechanism of the composite collector on aeschynite,

收稿日期: 2026-07-03
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52574318, 52264033);国家重点研发计划项目(2022YFC2905302, 2021YFC2901000);内蒙古科技大学科炬计划项目(KJJH2023928);内蒙古自治区一流学科项目(YLXKZX-NKD-016, YLXKZX-NKD-004);内蒙古自治区杰青项目(2024JQ02);内蒙古自治区自然科学基金项目(2024QN05044, 2024QN05021, 2024QN05057);内蒙古自治区高校基本科研业务费(0406082414)
作者简介: 曹 钊(1985—),男,湖北随州人,博士,教授,主要从事战略性有色金属矿产绿色高效分选研究。
通信作者: 吴 旭(1989—),男,河北保定人,博士,讲师,主要从事战略性矿产资源高效回收利用研究。

niobium-bearing rutile, pyrochlore, and columbite were investigated using automated mineralogy analysis (AMICS) and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results demonstrated that the optimal flotation performance of niobium was achieved using sodium hexametaphosphate as the depressant and the BHA/SHA composite collector as the collector, with a BHA/SHA mass ratio of 10∶1 and a collector dosage of 4 kg/t. Compared with the single BHA collector system, the composite collector produced a niobium concentrate with a Nb_2O_5 grade of 5.19% and a recovery of 52.47%, resulting in an improvement of 21.55 percentage points in Nb recovery. XPS results revealed that the N 1s peak intensities on the surfaces of the four niobium-bearing minerals were significantly enhanced after treatment with the composite collector. The surface N 1s atomic concentrations of pyrochlore, niobium-bearing rutile, aeschynite, and columbite were higher than those obtained with the single collector system, indicating that BHA and SHA exhibited strong synergistic adsorption on mineral surfaces. This synergistic interaction promoted the formation of a more stable and compact organic adsorption layer, effectively improving mineral surface hydrophobicity and enhancing mineral-bubble adhesion, thereby facilitating the flotation recovery of fine-grained niobium-bearing minerals.

Key words: Bayan Obo; associated niobium ore; composite collector; hydroxamic acid; synergistic adsorption

0　引言

铌作为关键的战略性金属，在航空航天、电子信息、高端制造等领域具有不可替代的应用价值[1-5]。白云鄂博矿床是世界级稀土-铌-铁多金属共伴生矿床，蕴藏着丰富的铌资源，高效回收白云鄂博共伴生铌资源，对于保障国家战略性关键金属的供给安全具有重要的现实意义。白云鄂博含铌矿物种类繁多，主要包括易解石、铌铁金红石、烧绿石和铌铁矿等，其嵌布粒度细、与萤石、赤铁矿、白云石等脉石矿物连生关系复杂，导致铌矿物解离困难、可浮性差，严重制约了伴生铌资源的综合回收。铌矿物嵌布粒度微细，大部分含铌矿物分布在－38 μm，含铌矿平均品位0.13%，且大部分分布在0.1%以下[6-8]，细粒级铌矿物的高效回收仍是制约该资源开发利用的瓶颈。

浮选仍是回收细粒级含铌矿物最有效的方法之一，而捕收剂性能是影响浮选分离效果的关键因素[9-14]。近年来，羟肟酸类捕收剂因具有较强的Nb^{5+}、Ce^{3+}等金属离子螯合配位能力，被广泛应用于烧绿石、铌铁矿及其他氧化矿物浮选[15-17]，其中，苯甲羟肟酸(BHA)具有较好的捕收能力和选择性，是目前应用最广泛的含铌矿物捕收剂之一，但对复杂伴生矿体系中细粒级矿物的捕收能力有限。水杨羟肟酸(SHA)具有较强的络合能力，可改善矿物表面吸附行为，但单独使用时捕收能力仍难以满足复杂矿石浮选要求。在羟肟酸药剂体系下，六偏磷酸钠作为白云鄂博矿选铌抑制剂具有良好的应用效果[17]。此外，油酸类、脂肪酸类及其他羟肟酸类捕收剂[18-23]虽在含铌矿物浮选中取得了一定研究进展，但普遍存在选择性不足、药剂用量大及对不同含铌矿物适应性较差等问题。因此，开发高效、选择性好的新型捕收剂体系仍是提高白云鄂博伴生铌资源浮选回收率的重要途径。

近年来，复合药剂可通过不同组分之间的协同作用改善矿物表面性质，在复杂氧化矿浮选中取得了较好的应用效果。然而，针对白云鄂博低品位伴生铌矿的复合捕收剂研究仍相对较少，尤其是针对易解石、铌铁金红石、烧绿石及铌铁矿等不同含铌矿物的表面吸附行为及协同作用机制尚缺乏系统研究。

基于此，本文以白云鄂博低品位伴生铌矿为研究对象，采用苯甲羟肟酸(BHA)和水杨羟肟酸(SHA)组成复合捕收剂强化细粒级铌矿物浮选回收，开展实际矿浮选试验，并结合AMICS自动矿物分析、X射线光电子能谱(XPS)等测试方法，系统研究复合捕收剂对不同含铌矿物(铌铁矿、易解石、铌铁金红石、烧绿石)的捕收行为及表面吸附特征，阐明BHA/SHA复合捕收剂强化细粒级含铌矿物浮选的协同吸附机制，为白云鄂博伴生铌资源高效开发利用及新型复合捕收剂设计提供理论依据。

1　试验原料与方法

1.1　试验矿样

试验矿样取自白云鄂博铌多金属矿区，矿石中含铌矿物的嵌布特征及粒度分布情况见图1。由图1可知，含铌矿物与脉石矿物连生严重，且粒度较细，大部分含铌矿物分布在38 μm以下。试样元素及矿物组成情况如表1～3所示，Nb_2O_5品位仅为0.30%，主

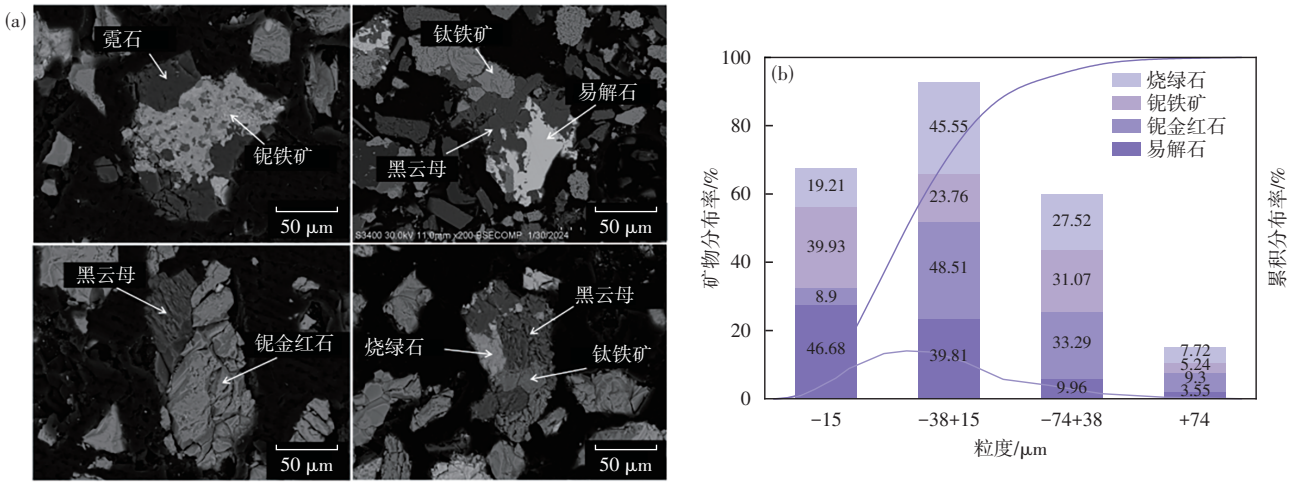


图1 试样中铌矿物嵌布特征(a)及不同粒度中含铌矿物分布(b)

Fig. 1 Dissemination characteristics (a) of niobium minerals and distribution of niobium-bearing minerals in different particle sizes (b) in the ore sample

表1 试样化学多元素分析结果

Table 1 Results of multi-element analysis of the ore sample /%

组分	TFe	mFe	REO	SiO_2	P_2O_5	S	F	K_2O
含量	23.29	0.11	1.98	32.45	0.39	0.49	0.030	2.71
组分	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	BaO	MnO	Nb_2O_5	其他
含量	10.28	4.31	2.13	0.83	0.71	1.21	0.30	18.78

表2 试样矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content of the ore sample /%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
磁/赤铁矿	37.61	石英	6.69
黑云母	2.80	萤石	2.72
方解石	1.42	钛铁矿	0.96
黄铁矿	0.53	易解石	0.41
黑云母	0.24	铌铁矿	0.13
霓石	28.55	白云石	5.62
重晶石	2.73	钠镁闪石	2.44
氟碳铈矿	1.25	独居石	0.93
磷灰石	0.47	铌铁金红石	0.28
烧绿石	0.18	其他矿物	4.04

表3 试样中铌元素分布

Table 3 Distribution of niobium in the ore sample /%

矿物名称	烧绿石	铌铁矿	铌铁金红石	易解石	其他
铌分布率	35.89	27.28	21.21	13.34	2.28

要含铌矿物为易解石、铌铁金红石、烧绿石及铌铁矿，矿物含量分别为0.41%、0.28%、0.18%和0.13%。铌元素主要赋存于烧绿石中，分布率为35.89%；其次为铌铁矿、铌铁金红石与易解石，铌元素分布率分别为27.28%、21.21%、13.34%，四类含铌矿物的铌总分布率达到97.72%，是本次浮选回收的主要目标矿物。

1.2 试验药剂

铌浮选捕收剂：BHA(苯甲羟肟酸)、SHA(水杨羟肟酸)，铌浮选抑制剂：SHMP(六偏磷酸钠)、CMC、水玻璃、氟硅酸铵，起泡剂：松醇油。BHA与SHA药剂结构见图2。

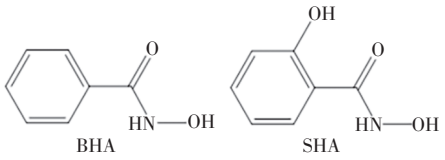


图2 BHA和SHA的分子结构

Fig. 2 Molecular structures of BHA and SHA

1.3 试验方法

1.3.1 浮选试验

采用CFDⅣ型0.25～0.5 L单槽浮选机进行开路及闭路浮选试验，固定矿浆温度50 ℃、矿浆pH值为7、矿浆质量浓度50%。针对实际矿样，采用一段开路浮选工艺，系统考察抑制剂用量、单一捕收剂用量及复配捕收剂配比对铌矿物浮选效果的影响。在开路试验基础上，进一步开展单一捕收剂与复合捕收剂体系下“一粗一精、一粗二精”闭路浮选试验。浮选结束后，对所得精矿、尾矿产品依次进行过滤、干燥、称重与化学分析，并对不同药剂制度下的浮选精矿进行工艺矿物学对比分析。

1.3.2 XPS测试

采用Thermo Scientific K-Alpha型X射线光电子

能谱仪(XPS)表征药剂作用前后矿物表面的元素组成与化学赋存状态。测试以单色Al Kα X射线($h\nu$=1486.6 eV)为激发光源，工作功率150 W，体系真空度优于1.0×10^{-7} Pa。全谱扫描区间0～1 350 eV，通能100 eV；高分辨谱通能30 eV，步长0.1 eV。以C 1s(284.80 eV)作为结合能校准基准，采用Avantage软件完成分峰拟合与数据解析。

1.3.3　AMICS矿物分析测试

采用配备Oxford X-Max80能谱仪的FEI MLA 650F场发射扫描电子显微镜，联合AMICS(Advanced Mineral Identification and Characterization System)自动矿物分析系统，测试矿样矿物组成、嵌布特征及各矿物含量。测试采用背散射电子(BSE)成像模式，加速电压20 kV，束流约10 nA，工作距离10 mm，像素分辨率5 μm。依靠EDS能谱与矿物数据库自动匹配识别矿物，同时辅以人工校核提升识别准确度。

1.3.4　X射线衍射测试

采用Rigaku SmartLab型X射线衍射仪分析样品物相组成。测试光源为Cu Kα辐射(λ=0.15406 nm)，工作电压40 kV，工作电流40 mA。扫描范围10°～80°(2θ)，扫描步长0.02°，扫描速率5°/min^{-1}。借助MDI Jade软件开展物相检索，结合ICDD PDF数据库完成物相匹配与鉴定。

2　试验结果及讨论

2.1　不同抑制剂种类及用量试验

固定捕收剂BHA用量4 kg/t，分别选取六偏磷酸钠(SHMP)、CMC进行抑制剂对比试验，试验流程见图3，试验结果见图4。由图4可知，SHMP与CMC的选择性抑制效果优于氟硅酸铵；采用六偏磷酸钠作为抑制剂时浮选效果最优，可获得Nb_2O_5品位1.31%、回收率38.21%的铌精矿。

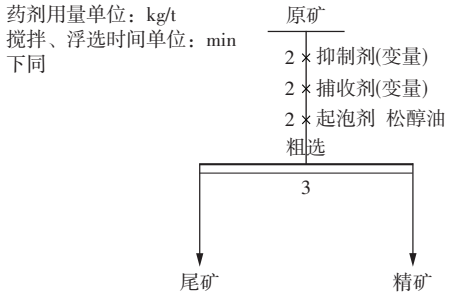


图3　铌浮选粗选试验流程

Fig. 3　Flowsheet of niobium flotation roughing tests

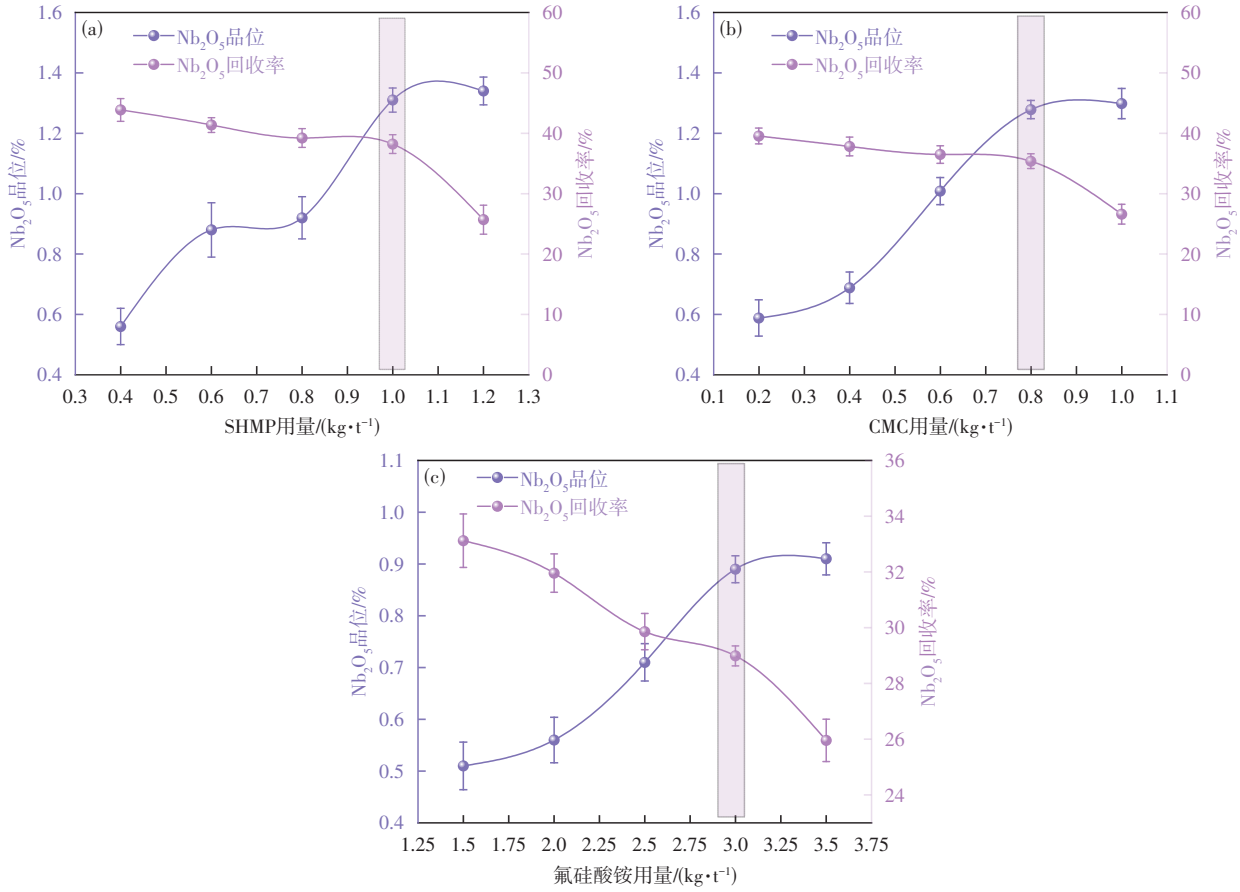


图4　不同抑制剂用量对铌浮选指标的影响

Fig. 4　Effects of depressant dosage on niobium flotation performance

2.2 复合捕收剂配比试验

为确定BHA与SHA最佳质量配比，在矿浆pH=7、矿浆质量浓度50%、抑制剂SHMP用量1 kg/t的条件下，研究不同复合捕收剂质量占比对铌浮选回收效果的影响，试验流程同图3，捕收剂BHA用量对铌浮选效果的影响见图5(a)。由图5(a)可知，当BHA用量为4 g/t时浮选指标最优，铌精矿Nb_2O_5品位为1.31%、回收率为38.21%。固定BHA用量为4 kg/t，进一步考察复合捕收剂中SHA的占比对铌浮选效果的影响，试验结果见图5(b)。由图5(b)可知，当BHA∶SHA质量比=10∶1时，复合捕收剂浮选性能最优，可获得Nb_2O_5品位1.399%、作业回收率为72.51%的铌精矿，相较于单一捕收剂BHA体系，铌精矿Nb_2O_5回收率提升34.31个百分点，显著强化了含铌矿物的回收效果。

2.3 铌浮选闭路试验及产品分析

铌正浮选闭路试验流程见图6，试验结果见表4。由表4可知，采用单一捕收剂BHA，经一粗一精作业分选，可获得作业产率1.86%、Nb_2O_5品位5.07%、作业回收率31.21%的铌精矿；采用BHA/SHA复合捕收剂，经一粗二精作业分选，可获得作业产率3.03%、Nb_2O_5品位5.19%、作业回收率52.47%的铌精矿。与单独使用捕收剂BHA相比，在铌精矿Nb_2O_5品位维持5%以上的前提下，采用复合捕收剂铌精矿Nb_2O_5回收率提升21.55个百分点，效果显著。

对单一捕收剂BHA和复合捕收剂BHA/SHA浮选获得的铌精矿进行矿物组成分析，分析结果见表5。由表5可知，复合捕收剂BHA/SHA对易解石、铌铁金红石、烧绿石、铌铁矿四类含铌矿物具备更强的同步富集能力。

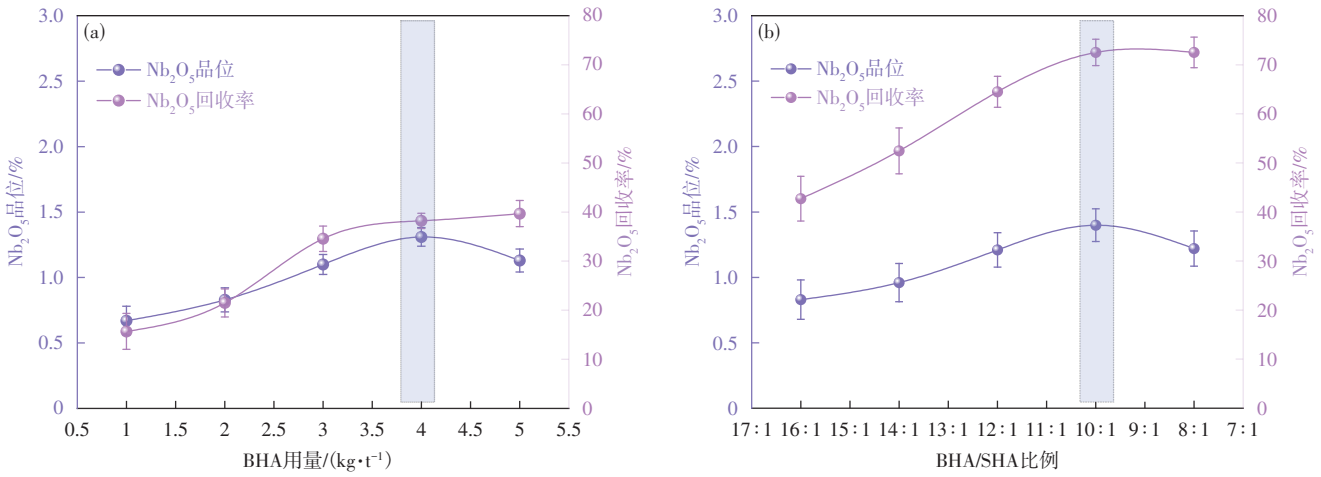


图5 不同捕收剂用量对铌浮选指标的影响

Fig. 5 Effects of different collector dosage on niobium flotation performance

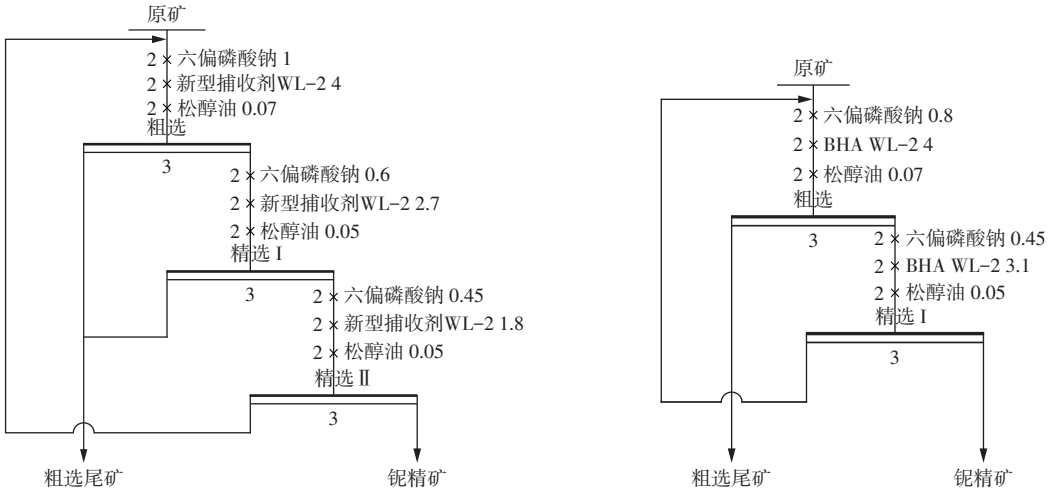


图6 铌浮选闭路试验流程

Fig. 6 Flowsheets of the locked-cycle tests of niobium flotation

表 4　铌浮选闭路试验结果

Table 4　Results of the locked-cycle tests of niobium flotation　/%

捕收剂种类	产品名称	产率	Nb_2O_5品位	回收率
BHA	精矿	1.91	5.01	31.9
	尾矿	98.09	0.208	68.1
	原矿	100.0	0.30	100.0
BHA/SHA	精矿	3.15	5.09	53.45
	尾矿	98.95	0.144	46.55
	原矿	100.0	0.30	100.0

表 5　铌精矿产品矿物组成

Table 5　Mineral composition of the niobium concentrate　/%

矿物组成	原矿	铌精矿产品（捕收剂为BHA）	铌精矿产品（捕收剂为BHA/SHA）
易解石	0.41	9.63	9.85
铌铁金红石	0.28	3.15	4.61
烧绿石	0.18	1.02	1.81
铌铁矿	0.13	0.76	1.59

对四种含铌矿物进行粒度统计分析，分析结果见表6，复合捕收剂浮选获得铌精矿中，易解石、烧绿石、铌铁金红石、铌铁矿颗粒整体粒度偏细；含铌矿物连生体的P_{50}值分别为39.94、29.39、24.94、14.96 μm。说明复合捕收剂对细粒级铌矿物捕收能力更强，能够有效提升白云鄂博矿含铌矿物的综合回收效率。

2.4　BHA/SHA 复合捕收剂强化捕收的机理研究

为了探明BHA/SHA复合捕收剂在四种含铌矿物表面的吸附行为与界面作用机制，结合XPS全谱与N 1s高分辨谱系统分析药剂在矿物表面覆盖程度、电子结构变化与协同吸附特征，揭示复合捕收剂对易解石、铌铁金红石、烧绿石、铌铁矿的捕收作用机理。

2.4.1　铌铁矿与BHA、SHA作用的XPS分析

与BHA、SHA作用前后铌铁矿XPS全谱与N 1s高分辨谱见图7，矿物表面原子浓度数据见表7。由图7可知，与BHA、SHA作用后，XPS全谱反映矿物表面

表 6　含铌矿物粒度分布

Table 6　Particle size distribution of niobium-bearing minerals　/μm

矿物名称	铌精矿产品(捕收剂为BHA)			铌精矿产品(捕收剂为WL-2)		
	P_{80}	P_{50}	P_{20}	P_{80}	P_{50}	P_{20}
铌铁矿	51.74	34.34	20.64	42.31	25.54	14.96
铌铁金红石	45.04	27.43	16.07	40.88	24.94	14.22
烧绿石	58.40	39.38	22.85	44.78	29.39	16.19
易解石	71.05	51.03	32.58	56.96	39.94	25.14

*注：P值代表在一定粒径(单位：μm)以下的某矿物的质量分数。

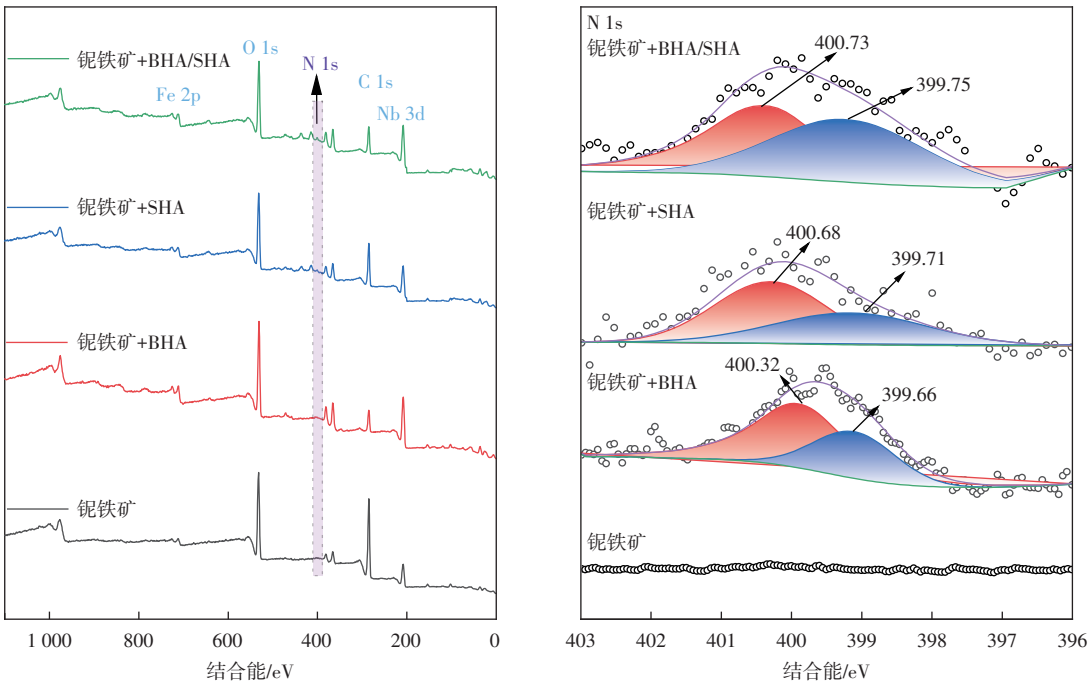


图 7　与 BHA、SHA 作用后铌铁矿的 XPS 光谱和 N 1s 高分辨率 XPS 光谱

Fig. 7　Survey XPS spectra and high-resolution N 1s XPS spectra of columbite after treatment with BHA and SHA

表 7 与 BHA、SHA 作用前后铌铁矿矿物表面的原子浓度

Table 7 Surface atomic concentrations of columbite before and after interaction with BHA and SHA /%

样品	Nb 3d	C 1s	O 1s	N 1s	Fe 2p
铌铁矿	8.24	38.88	48.64	0	4.24
铌铁矿+BHA	8.48	39.41	47.08	1.99	3.04
铌铁矿+SHA	7.56	38.18	50.38	1.58	2.30
铌铁矿+BHA/SHA	7.12	40.12	47.46	3.20	2.10

元素组成发生明显变化。试验原矿样品Nb 3d、Fe 2p信号稳定，与BHA单独作用后，矿样表面谱图出现N 1s特征峰，说明含氮捕收剂分子成功吸附于矿物表面。

在单一BHA体系中，N 1s高分辨谱在399.66、400.32 eV出现明显特征峰，对应胺类或羟肟酸类配位结构中的N—C、N—O化学环境，说明BHA在铌铁矿表面以化学吸附为主，同时伴随一定程度的物理吸附。在BHA与SHA复配体系中，N 1s特征峰偏移至399.71、400.68 eV，峰强度显著提升，表面N原子占比由SHA单独作用时的1.58%升高至3.20%。结果表明，SHA的引入并未抑制BHA的吸附，反而通过分子间协同作用增强了药剂在矿物表面的富集程度。根据结合能变化(最高0.41 eV)，推断矿物表面电子密度发生改变，进一步促进配位吸附与静电作用共同发生。

表面原子浓度结果显示，复配体系中Nb 3d相对含量略有降低，N 1s含量明显上升，说明有机药剂覆盖率提高，矿物表面被有机膜部分包覆，两种药剂产生协同作用增加吸附效果，吸附形式为物理吸附与化学吸附共存。

2.4.2 烧绿石与BHA、SHA作用的XPS分析

与BHA、SHA作用前后烧绿石XPS全谱和相对原子含量见图8，矿物表面原子浓度数据见表8。结果表明，烧绿石在药剂作用前后表现出明显的表面元素重构特征，与单一BHA、SHA体系相比，复配体系下N 1s含量提升至5.87%，说明复配药剂在该矿物表面的吸附能力更强。

XPS结果表明，复合捕收剂对烧绿石表面化学组成影响显著。经BHA/SHA共同作用后，矿物表面O 1s由50.40%降低至47.38%，Nb 3d由4.37%降至2.93%，而C 1s则显著上升至42.73%，N 1s提升至5.14%。该变化说明有机捕收剂在矿物表面发生了明显覆盖与取代作用。更为关键的是，单一SHA体系中N 1s仅0.66%，复合体系N 1s提高至5.87%，

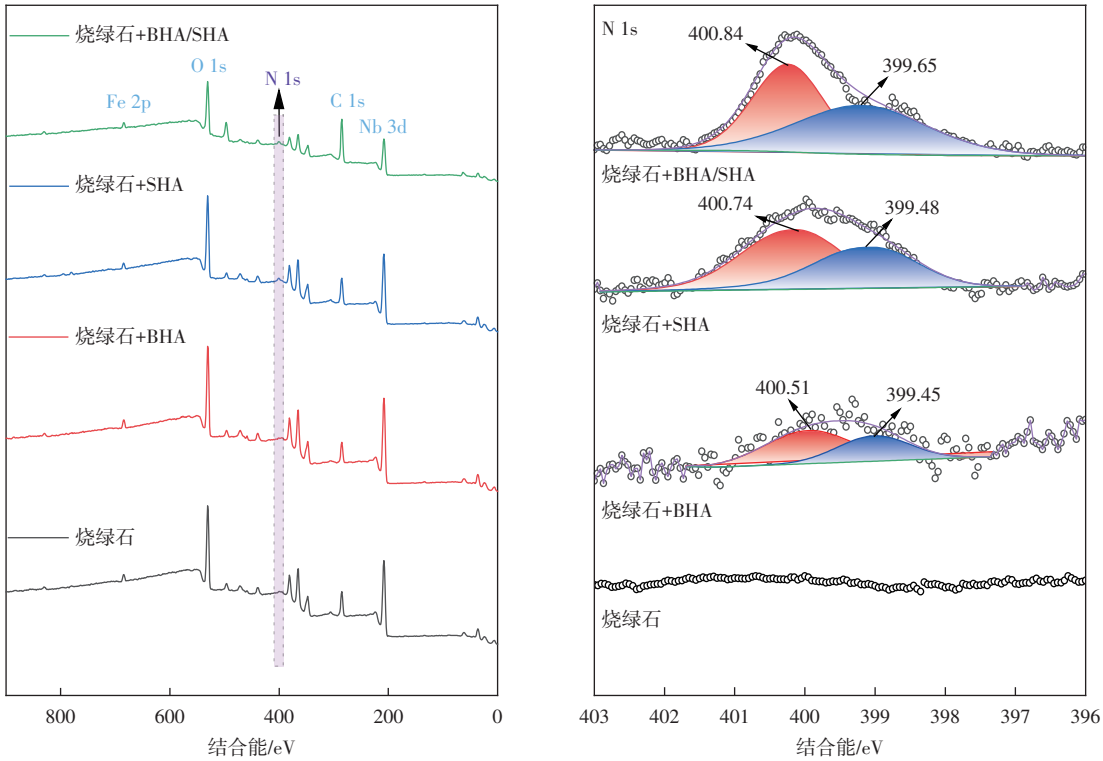


图8 与BHA、SHA作用后烧绿石的XPS光谱和N 1s高分辨率XPS光谱

Fig. 8 Survey XPS spectra and high-resolution N 1s XPS spectra of pyrochlore after treatment with BHA and SHA

表 8　与 BHA、SHA 作用前后烧绿石矿物表面的原子浓度

Table 8　Surface atomic concentrations of pyrochlore before and after interaction with BHA and SHA /%

样品	Nb 3d	C 1s	O 1s	N 1s	F 1s
烧绿石	4.70	41.77	49.78	0	3.75
烧绿石＋BHA	4.37	40.88	50.40	0.66	3.69
烧绿石＋SHA	2.93	42.73	47.38	5.14	1.82
烧绿石＋BHA/SHA	0.44	42.09	50.74	5.87	0.86

说明 BHA/SHA 协同作用增强了对矿物表面的吸附能力。

2.4.3　铌铁金红石与 BHA、SHA 作用的 XPS 分析

与 BHA、SHA 作用前后铌铁金红石 XPS 全谱和相对原子含量见图 9，矿物表面原子浓度数据见表 9。结果表明，经 BHA/SHA 复合捕收剂作用后，铌铁金红石矿物表面元素组成发生明显变化，其中 N 1s 显著提升至 5.49%，N 1s 高分辨谱显示，复合捕收剂处理后 N 信号明显增强，但特征结合能无明显偏移，说明 N 元素主要以物理吸附形式存在，未改变矿物表面化学环境，这表明 BHA、SHA 在铌铁金红石表面依靠表面络合、物理吸附发挥作用，同时存在氢键与静电相互作用。相较于单一 BHA 药剂体系，复合体系中 N 1s 含量由 4.86% 提升至 5.49%，两种捕收剂存在明显的协同增强效应，BHA/SHA 复合捕收剂对铌铁金红石浮选回收具有显著促进作用。

2.4.4　易解石与 BHA、SHA 作用的 XPS 分析

与 BHA、SHA 作用前后易解石的 XPS 全谱和相对原子含量见图 10，矿物表面原子浓度数据见表 10。XPS 结果显示，复合捕收剂可与易解石发生强烈界面作用。BHA/SHA 共同作用后，易解石表面 Nb 3d 相对含量由 6.58% 下降至 3.02%，说明矿物表面活性位点被捕收剂覆盖，N 1s 高分辨谱结果表明，复合捕收剂作用后 N 信号提升至 4.52%，明显高于单一 BHA(2.98%) 与 SHA(2.65%) 体系，两种捕收剂存在明显协同效应。结合元素变化规律可知，BHA 与 SHA 在易解石表面的作用是通过矿物界面重构实现协同吸附，在矿物表面形成稳定有机吸附层。

为揭示 BHA 及 BHA/SHA 复合体系在不同含铌矿物表面的吸附特征，测定了矿物表面 N 1s 的含量

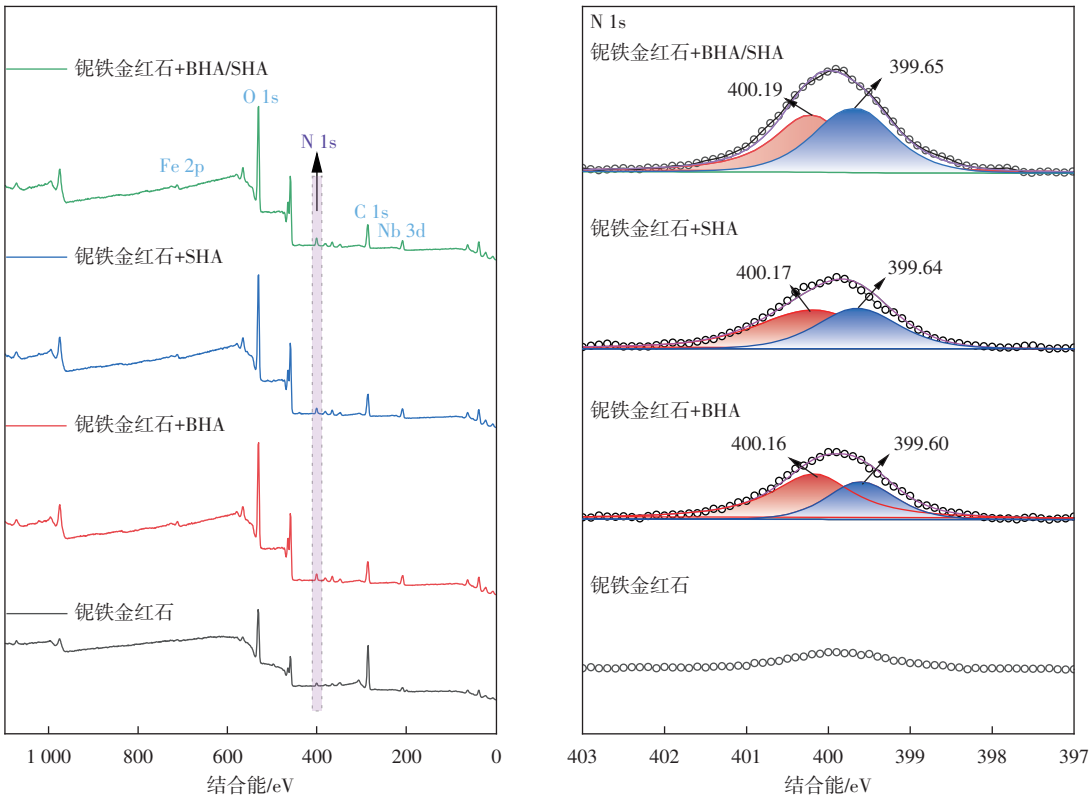


图 9　与 BHA、SHA 作用后铌铁金红石的 XPS 光谱和 N 1s 高分辨率 XPS 光谱

Fig. 9　Survey XPS spectra and high-resolution N 1s XPS spectra of ilmenorutile after treatment with BHA and SHA

表 9 与 BHA 和 SHA 作用前后铌铁金红石矿物表面的原子浓度

Table 9 Surface atomic concentrations of ilmenorutile before and after interaction with BHA and SHA /%

样品	Nb 3d	C 1s	O 1s	N 1s	Fe 2p	Ti 2p
铌铁金红石	1.18	30.23	49.41	0.00	1.15	15.1
铌铁金红石+BHA	1.38	29.39	48.19	4.86	1.63	14.55
铌铁金红石+SHA	1.31	28.61	49.25	3.98	1.33	15.52
铌铁金红石+BHA/SHA	1.23	28.52	48.83	5.49	1.43	14.50

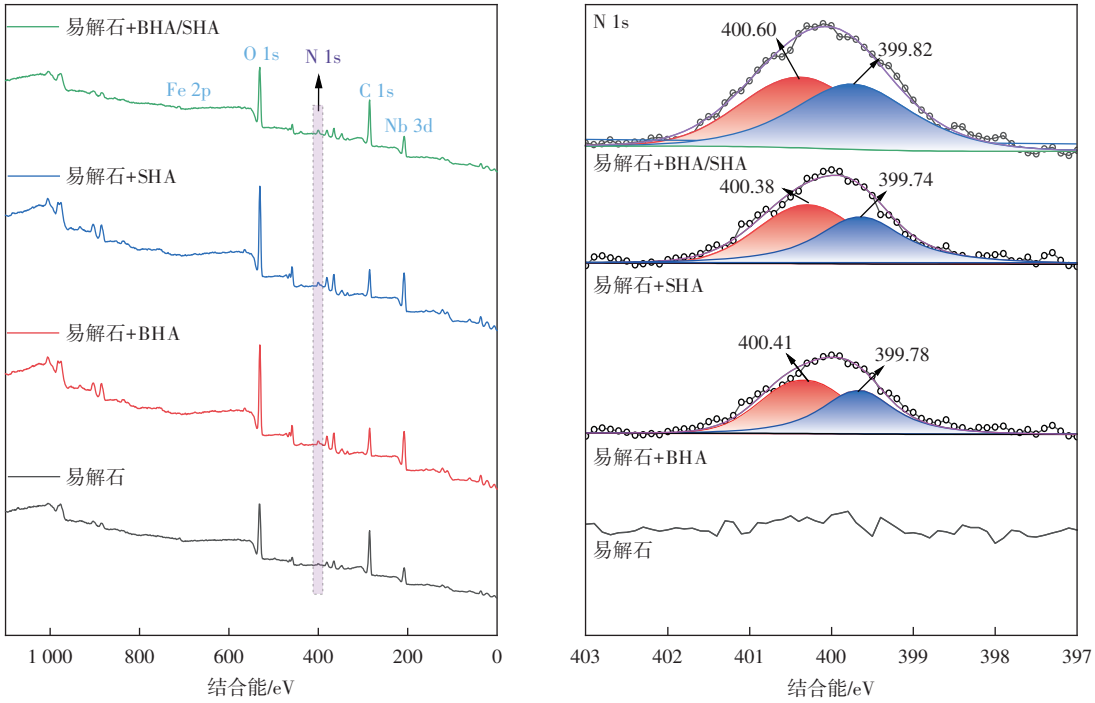


图 10 与 BHA、SHA 作用后易解石的 XPS 光谱和 N 1s 高分辨率 XPS 光谱

Fig. 10 Survey XPS spectra and high-resolution N 1s XPS spectra of aeschynite after treatment with BHA and SHA

表 10 与 BHA 和 SHA 作用前后易解石矿物表面的原子浓度

Table 10 Surface atomic concentrations of aeschynite before and after interaction with BHA and SHA /%

样品	Nb 3d	C 1s	O 1s	N 1s	Ce	Ti 2p
易解石	6.58	39.96	47.09	0.00	1.45	4.92
易解石+BHA	4.32	38.88	48.92	2.98	1.34	3.56
易解石+SHA	5.92	38.95	46.79	2.65	1.37	4.32
易解石+BHA/SHA	3.02	39.80	50.31	4.52	0.60	1.75

变化，结果见图 11。由图 11 可知，BHA 单独作用时，不同含铌矿物表现出一定的吸附差异，其中铌铁金红石表面的 N 1s 含量最高，达到 4.86%，其次为易解石(2.98%)、铌铁矿(1.99%)和烧绿石(0.66%)，表明 BHA 分子对烧绿石和铌铁矿的吸附能力相对较弱，难以满足复杂含铌矿中多类型矿物的有效捕收需求。

与 BHA 单一体系相比，BHA/SHA 复合捕收剂作用后，四种含铌矿物表面的 N 1s 含量均明显提高，易解石、铌铁金红石、烧绿石和铌铁矿表面 N 1s 含量分别达到 4.52%、5.49%、5.87%和 3.20%。其中，烧绿石和铌铁矿表面 N 含量提升最为显著，分别提高 5.21%和 1.21%；易解石和铌铁金红石表面也分别提高 1.54%和 0.63%。四种含铌矿物表面的 N 1s 含量顺序为：烧绿石＞铌铁金红石＞易解石＞铌铁矿。结果表明，BHA/SHA 复合体系能够有效增强捕收剂分子在不同含铌矿物表面的吸附程度，显著提升 BHA 对含铌矿物表面的作用能力，体现出明显的协同吸附效应。

结合实际矿石浮选结果分析，白云鄂博含铌矿具有铌矿物含量低、嵌布粒度细及共生关系复杂等特

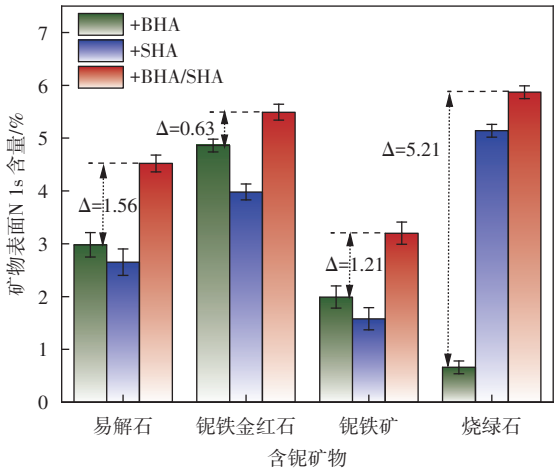


图11　不同含铌矿物经BHA、SHA及BHA/SHA作用后表面N 1s含量变化

Fig. 11　Changes in surface N 1s content of different niobium-bearing minerals after adsorption of BHA, SHA and BHA/SHA

点，单一BHA难以实现多类型含铌矿物的高效回收。BHA/SHA复合捕收剂通过增强药剂分子在易解石、铌铁金红石、烧绿石及铌铁矿表面的吸附，促进细粒含铌矿物浮选回收，与实际浮选中BHA/SHA复合捕收剂提高铌回收率的结果相一致，进一步验证了复合捕收剂协同吸附强化含铌矿物浮选的作用机制。

3　结论

1) AMICS自动矿物分析结果表明，白云鄂博试验矿样中主要含铌矿物为易解石、铌铁金红石、烧绿石、铌铁矿，矿物含量分别为0.41%、0.28%、0.18%、0.13%。含铌矿物与脉石矿物共生关系复杂、连生普遍，整体嵌布粒度微细，大量矿物分布于－38 μm粒级，给矿物解离与浮选回收带来较大难度。

2) 浮选条件试验结果表明，六偏磷酸钠可有效抑制脉石矿物，改善含铌矿物与脉石的浮选分离效果。当BHA与SHA质量配比10∶1、复合捕收剂用量为4 kg/t时，铌粗选指标最佳。闭路试验证实，相较于单一BHA捕收剂体系，在铌精矿Nb_2O_5品位保持5%以上的条件下，复合捕收剂将铌精矿Nb_2O_5回收率提升21.55个百分点，强化了对细粒级含铌矿物的捕收能力，提高了不同含铌矿物的同步富集效率。

3) XPS光谱分析表明，BHA/SHA复合捕收剂在铌铁矿、烧绿石、铌铁金红石、易解石表面均表现协同吸附特征，复合药剂作用后，四类矿物表面N 1s信号均明显增强，复合捕收剂在四种含铌矿物表面N 1s含量为：烧绿石(5.87%)＞铌铁金红石(5.49%)＞易解石(4.52%)＞铌铁矿(3.2%)。BHA与SHA依靠物理吸附与化学吸附协同作用，强化了对细粒级含铌矿物的浮选回收，研究成果可为白云鄂博低品位伴生铌资源的高效开发利用提供理论支撑。

参考文献

[1] Ren Yisu, Yang Xiaoyong, Yang Xueming, et al. Mineralogical study on the distribution regularity of niobium in various types of ores in the giant Bayan Obo Fe-REE-Nb deposit[J]. Ore Geology Reviews, 2023, 161: 105602. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2023.105602.

[2] Li Hongtao, Yang Kuifeng, Gao Yupu, et al. Age and origin of the H9 member from the Bayan Obo Group: implications for the genesis of the giant Bayan Obo Fe-Nb-REE deposit, China[J]. Ore Geology Reviews, 2022, 146: 104927. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2022.104927.

[3] Yu Yan, Li Yang, Liu Yu, et al. Three-stage niobium mineralization at Bayan Obo, China[J]. National Science Review, 2024, 11(4): nwae063. DOI: 10.1093/nsr/nwae063.

[4] Liu Shang, Ding Lin, Fan Hongrui, et al. Hydrothermal genesis of Nb mineralization in the giant Bayan Obo REE-Nb-Fe deposit(China): implicated by petrography and geochemistry of Nb-bearing minerals[J]. Precambrian Research, 2020, 348: 105864. DOI: 10.1016/j.precamres.2020.105864.

[5] 曹钊，卢文达，王介良，等. 铌矿选矿技术研究现状及展望[J]. 金属矿山，2024，53(12)：1-9.
Cao Zhao, Lu Wenda, Wang Jieliang, et al. Research status and prospect of niobium ore beneficiation technology[J]. Metal Mine, 2024, 53(12): 1-9.

[6] 侯晓志，杨占峰，王振江，等. 白云鄂博铌精矿矿物组成特征及铌的分布规律研究[J]. 有色金属(选矿部分)，2018(2)：4-7，11.
Hou Xiaozhi, Yang Zhanfeng, Wang Zhenjiang, et al. Study on minerals composition characteristics of niobium concentrate and distribution of niobium in Bayan Obo[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2018(2): 4-7, 11.

[7] 赵琳，匡敬忠，陈芳芳，等. 白云鄂博铌资源选矿技术研究进展[J]. 有色金属(选矿部分)，2025(12)：1-9.
Zhao Lin, Kuang Jingzhong, Chen Fangfang, et al. Research progress on the beneficiation technology of niobium resources from Bayan Obo[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(12): 1-9.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 叶志平, 孙兴来, 李英霞. 强磁尾矿综合回收稀土、铌选矿工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分), 1996(6): 1-4.
Ye Zhiping, Sun Xinglai, Li Yingxia. Study on mineral processing technology of comprehensive recovery of rare earth and niobium from high-intensity magnetic tailings[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 1996(6): 1-4.

[11] 王建英, 文登学, 贾艳. 白云鄂博稀选尾矿中铌的回收试验[J]. 矿产综合利用, 2019, 40(3): 121-126.
Wang Jianying, Wen Dengxue, Jia Yan. Experiment on recovery of niobium in the tailings of Baiyun ebo[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019, 40(3): 121-126.

[12] 陈宏超, 刘文丽, 曾永杰, 等. 白云鄂博主、东矿铌矿选别工艺工业应用实践[J]. 包钢科技, 2025, 51(3): 20-25.
Chen Hongchao, Liu Wenli, Zeng Yongjie, et al. Industrial application practices on beneficiation technology of niobium ore in main and east mines of Bayan Obo[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2025, 51(3): 20-25.

[13] 张立繁, 韩海生, 孙伟, 等. 含铌矿物选矿技术研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2026, 57(2): 475-487.
Zhang Lifan, Han Haisheng, Sun Wei, et al. Research progress on beneficiation of niobium-bearing minerals[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2026, 57(2): 475-487.

[14] 刘文丽, 杜文秀, 陈宏超, 等. 白云鄂博矿稀土浮选尾矿回收铌试验[J]. 现代矿业, 2023, 39(1): 148-151, 155.
Liu Wenli, Du Wenxiu, Chen Hongchao, et al. Recovery of niobium from rare earth flotation tailings of Bayan Obo Mine[J]. Modern Mining, 2023, 39(1): 148-151, 155.

[15] 胡轶文, 汪录, 王介良, 等. 羧甲基纤维素对铌铁矿和铁白云石浮选行为的影响及作用机理[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(11): 109-119.
Hu Yiwen, Wang Lu, Wang Jieliang, et al. Influences and mechanisms of carboxymethyl cellulose on the flotation behavior of columbite and ankerite[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(11): 109-119.

[16] 刘龙, 汤家焰, 王介良, 等. 白云鄂博块状型含铌矿铌的回收试验[J]. 有色金属(选矿部分), 2025(8): 48-56.
Liu Long, Tang Jiayan, Wang Jieliang, et al. Recovery test of niobium in the massive-type niobium-bearing ore from Bayan Obo[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2025(8): 48-56.

[17] 贺宇龙, 赵增武, 贾艳, 等. 复合捕收剂浮选回收白云鄂博某尾矿中的铌及其机理分析[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(5): 40-46.
He Yulong, Zhao Zengwu, Jia Yan, et al. Recovery of niobium from a tailings of the Bayan Obo Mine by flotation with a composite collector and its mechanism[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(5): 40-46.

[18] 李侠, 张倩, 陈世岭, 等. EDTA在铌铁矿和石英浮选分离中的选择性抑制作用机理[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(1): 37-43.
Li Xia, Zhang Qian, Chen Shiling, et al. Mechanism of inhibitor EDTA in flotation separation of niobite and quartz[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(1): 37-43.

[19] 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, 127.
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, 127.

[20] 徐伟, 张敏, 于宏东, 等. 1-羟基辛叉-1, 1-双膦酸捕收剂对白云鄂博铌矿中铌铁金红石的浮选机理研究[J]. 过程工程学报, 2024, 24(12): 1442-1452.
Xu Wei, Zhang Min, Yu Hongdong, et al. The mechanism study on flotation of ilmenorutile based on Bayan Obo niobium-bearing minerals with 1-hydroxyoctane-1, 1-bisphosphonic acid as collector[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2024, 24(12): 1442-1452.

[21] 周瑜林, 赵兴琦, 陈雯. 白云鄂博易解石型铌矿的浮选分离试验及工艺优化[J]. 有色金属(选矿部分), 2026(5): 64-70.
Zhou Yulin, Zhao Xingqi, Chen Wen. Flotation separation test and process optimization of aeschynite-type niobium ore from Bayan Obo[J]. Nonferrous

Metals (Mineral Processing Section), 2026(5): 64-70.

[22] 李健，朱丹，林璠，等. 湖北某铌钽矿磁精产品浮选条件试验[J]. 现代矿业，2021，37(6)：150-152.
Li Jian, Zhu Dan, Lin Fan, et al. Study on flotation condition test of magnetic concentrate of niobium-tantalum ore in Hubei Province[J]. Modern Mining, 2021, 37(6): 150-152.

[23] Yu Li, Xu Xinyang, Yuan Zhitao, et al. Effect of lead ions on the selective flotation of ilmenite against titanaugite using octyl hydroxamic acid as collector[J]. Applied Surface Science, 2022, 603: 154458. DOI: 10.1016/j. apsusc. 2022. 154458.

（本文编辑 刘水红）

【缅怀寄语】

提笔之际，导师孙传尧院士的音容笑貌犹在眼前，谆谆教诲犹在耳畔，悲痛与思念难以言表。

先生是我国矿物加工领域的领军人物，一生扎根矿冶事业。他常说，中国矿物加工的目标，不是世界一流，而是世界第一。他开创性地提出“基因选矿”“和谐选矿”“智能选矿”和“绿色选矿”等学术观点，首创的“柿竹园法”，成功破解了钨钼铋复杂多金属矿及铅锌、铜镍等选矿领域的诸多关键技术难题，极大提升了我国矿产资源开发利用的技术水平，在选矿工艺与工程化、矿物浮选晶体化学、选矿过程智能优化控制等多个领域取得丰硕成果。

作为导师，先生德高望重、甘为人梯、关爱学生，培养造就了一大批行业翘楚和科技领军人才。回想读博期间，生活上遇到的每一件难事，导师无不关心备至，每次都是亲自过问帮忙解决，学业上每一次关键节点，导师总是亲自悉心指导，开题报告、中期报告、毕业论文和每一篇小论文导师总是在百忙之中抽出时间逐字逐句修改。毕业工作之后，导师对我的科研和教学工作仍然非常关心，每次交流都悉心帮忙指导工作遇到的各种问题，叮嘱我要把专业科研、人才培养和行政工作统筹兼顾好，结合他的亲身经历和经验对我进行讲解指导。作为他的学生，我有幸亲承謦欬，受益终身。

斯人已逝，风范长存。先生虽已远去，但他的精神如种子般在我们心中生根发芽。作为学生，唯有秉承先生的治学精神与科学品格，在自己的学术道路上砥砺前行，方不负先生多年的栽培与期望。

——曹　钊