捕收剂 CYHS-7 的制备及其对萤石的浮选性能①

刘宇轩[1]，缪亚兵[1]，王舰[2]，王祥[1]，陈文胜[2]，王怡圣[1]，王炼[1]
（1.长沙矿冶研究院有限责任公司，湖南 长沙 410012；2.湖南有色郴州氟化学有限公司，湖南 郴州 423037）

摘　要：为提升萤石矿浮选效率，合成了(E)-N-(2-羟乙基)十八碳-9-烯酰胺，并将其与油酸钠复配成新型捕收剂 CYHS-7。分别以 CYHS-7 和油酸钠为捕收剂，进行萤石浮选实验研究。结果表明，浮选适宜的 pH 值为 9，CYHS-7 和油酸钠闭路浮选的适宜用量分别为 175 和 350 g/t；在实验室规模的闭路浮选实验中，在 CYHS-7 用量仅为油酸钠用量一半的条件下，萤石回收率提高了 9.15 百分点。

关键词：浮选；捕收剂；(E)-N-(2-羟乙基)十八碳-9-烯酰胺；CYHS-7；油酸钠；萤石
中图分类号：TD923　　**文献标志码**：A　　doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2026.01.011
文章编号：0253-6099(2026)01-0069-04

Preparation of Collector of CYHS-7 and Its Flotation Performance for Fluorite

LIU Yuxuan[1], MIAO Yabing[1], WANG Jian[2], WANG Xiang[1], CHEN Wensheng[2], WANG Yisheng[1], WANG Lian[1]
(1.*Changsha Research Institute of Mining and Metallurgy Co., Ltd., Changsha* 410012, *Hunan*, *China*; 2.*Hunan Non-ferrous Chenzhou Fluorine Chemical Co., Ltd., Chenzhou* 423037, *Hunan*, *China*)

Abstract: To enhance flotation efficiency of fluorite ore, (E)-N-(2-hydroxyethyl) octadec-9-enamide was synthesized and then compounded with sodium oleate to prepare a novel collector CYHS-7. Then, an experiment on flotation of fluorite with CYHS-7 and sodium oleate as collectors was conducted, and the results demonstrate that an appropriate pH for flotation process is at 9, and the optimal dosages of CYHS-7 and sodium oleate in a closed-circuit test are 175 g/t and 350 g/t respectively. In a laboratory flotation test, the recovery of fluorite was increased by 9.15 percentage points with the dosage of CYHS-7 at half that of sodium oleate.

Key words: flotation; collector; (E)-N-(2-hydroxyethyl) octadec-9-enamide; CYHS-7; sodium oleate; fluorite

萤石(CaF_2)作为工业领域氟元素的主要来源，被列为全球 20 种重要非金属矿产资源之一，广泛应用于玻璃、陶瓷、水泥、化工及冶金等领域[1-2]。高纯度无色萤石可作光学材料，色泽艳丽的萤石兼具宝石价值与工艺雕刻原料功能。萤石常与石英、重晶石、方解石及高岭石等伴生，其与含钙脉石(尤其是方解石)表面特性相似导致分选困难，亟须开发特异性浮选药剂实现高效分离[3-8]。

工业上常以油酸钠(NaOl)作为萤石浮选的阴离子捕收剂[9-10]。但油酸钠选择性差、溶解度低且耐低温性弱，从含钙脉石中高效分离复杂连生萤石面临技术挑战。油酸酰胺是典型非离子表面活性剂，具有优异乳化性、分散性、抗离子干扰能力及协同效应[11-13]。本文成功合成(E)-N-(2-羟乙基)十八碳-9-烯酰胺(NOE)，并将其与 NaOl 按照质量比 3∶1复配成新型捕收剂 CYHS-7，在适宜的浮选条件下，系统研究 CYHS-7 和 NaOl 对萤石的浮选性能，证实 CYHS-7 对萤石具有卓越的捕收性能。

1　矿石性质与实验方法

1.1　矿石性质

实验用萤石矿石取自湖南省郴州市某钨钼铋多金属矿。该矿石由萤石、石榴石、辉石、角闪石、石英、长石、方解石、白云石、云母、磁铁矿等组成。矿石主要化学成分分析结果见表1。矿石中总 Ca 品位 23.68%，

表 1　矿石主要化学成分分析结果(质量分数)
Table 1　Chemical composition analysis of ore　%

CaF_2	Fe	SiO_2	Al_2O_3	Ca	MgO	S	F	C
18.70	10.62	31.38	1.74	23.68	1.12	0.04	5.27	0.50

① **收稿日期**：2025-08-30
基金项目：国家重点研发计划(2023YFE0199800)
作者简介：刘宇轩(1996—)，男，湖南长沙人，硕士，主要研究方向为选矿药剂合成与评价。E-mail：380715829@qq.com

钙主要以氟化钙、碳酸钙、硅酸钙等形式存在,其中CaF_2品位为18.70%。

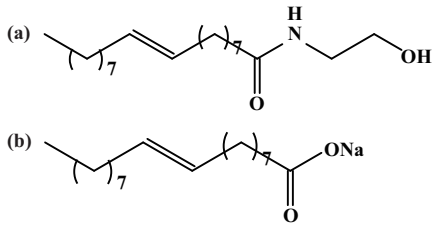
1.2 实验方法

1.2.1 NOE的合成

以油酸甲酯为原料,通过酯交换的方法合成酰胺基团,基于油酸酰胺分子结构,采用带有羟基的胺类引入羟基基团,制备兼具高溶解性、高选择性的油酸酰胺衍生物,成功合成(E)-N-(2-羟乙基)十八碳-9-烯酰胺(NOE)。合成中用到的原料均为分析纯试剂。

合成产品为白色粉末。采用配备5 mm $^{13}C/^{1}H$超低温探头的400 MHz布鲁克Avance III HD核磁共振仪和NICOLET iS50傅里叶变换红外光谱仪对合成产品进行表征,证实合成产品为(E)-N-(2-羟乙基)十八碳-9-烯酰胺(NOE)。

NOE和传统捕收剂油酸钠(NaOl)的化学结构如图1所示。



(a) NEO; (b) NaOl

图1 NOE和NaOl的化学结构

Fig. 1 Chemical structures of NOE and NaOl

1.2.2 浮选实验

使用XFD型单槽浮选机进行浮选实验。粗选在容积1 L的浮选槽中进行,精选在0.75 L和0.5 L的浮选槽中完成。浮选实验流程如图2所示。以NOE与NaOl按质量比3∶1复配成新型捕收剂CYHS-7,进行浮选实验,并与传统捕收剂NaOl的捕收性能进行对比。其他药剂包括抑制剂水玻璃、丙烯酸聚合物(PAA),pH值调整剂盐酸、氢氧化钠等,均为分析纯试剂。实验用水为自来水。浮选结束后,对精矿和尾矿分别进行过滤、烘干、称重、分析品位并计算回收率。

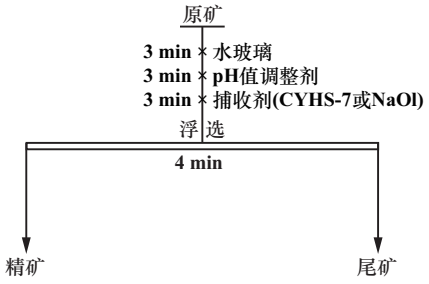


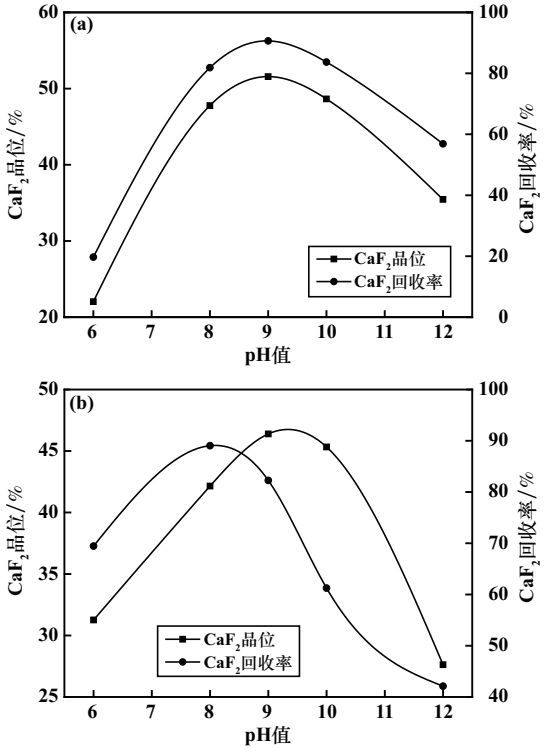
图2 浮选实验流程

Fig. 2 Flowchart of flotation test

2 实验结果与讨论

2.1 pH值实验

按照图2所示流程,只添加捕收剂,在CYHS-7用量150 g/t和NaOl用量300 g/t条件下,分别考察了pH值对萤石浮选指标的影响,结果见图3。以NaOl为捕收剂时,适宜的pH值为8~9;pH=9,NaOl用量300 g/t条件下,可获得CaF_2品位48.17%、回收率80.79%的萤石精矿。以CYHS-7为捕收剂时,适宜的pH值为8~10;pH=9,CYHS-7用量150 g/t条件下,可获得CaF_2品位51.58%、回收率90.63%的萤石精矿。以CYHS-7为捕收剂,获得的萤石精矿CaF_2品位和回收率都更高。pH=9条件下,新型捕收剂CYHS-7不仅对萤石具有良好的捕收效果,而且对脉石矿物具有显著的选择性抑制作用,其浮选效果优于NaOl。



(a) CYHS-7; (b) NaOl

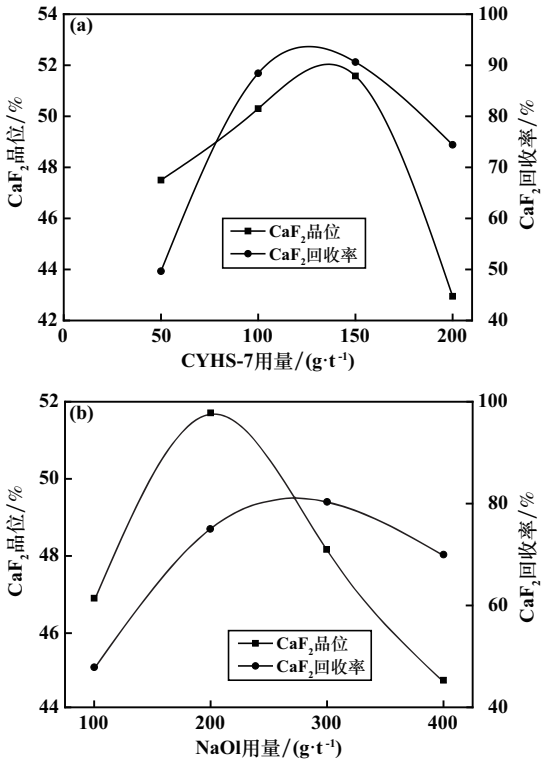
图3 pH值对萤石浮选指标的影响

Fig. 3 Effect of pH on flotation indicators of fluorite

2.2 捕收剂用量实验

pH=9时,考察了CYHS-7和NaOl用量对萤石浮选指标的影响,结果见图4。随着捕收剂用量增大,萤石精矿CaF_2品位及回收率均先增加后减少。CYHS-7用量150 g/t时,可获得CaF_2品位51.58%、回收率90.63%的萤石精矿;NaOl的适宜用量为300 g/t,此时可获得CaF_2品位48.17%、CaF_2回收率为80.79%的萤

石精矿。CYHS-7 用量仅为 NaOl 用量一半的情况下,CaF_2品位和回收率分别提升了 3.41 百分点和 9.84 百分点,证实 CYHS-7 对萤石的捕收性能优越。



(a) CYHS-7; (b) NaOl

图 4　捕收剂用量对萤石浮选指标的影响

Fig. 4　Effect of collector dosage on flotation of fluorite

2.3　闭路浮选实验

在条件实验基础上,进行了实验室规模的闭路浮选实验,闭路浮选实验流程见图5,实验结果见表 2。

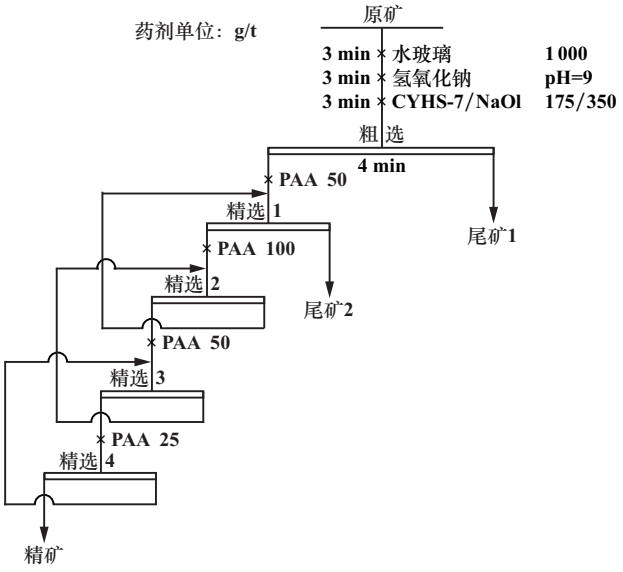


图 5　闭路浮选实验流程

Fig. 5　Flowchart for closed-circuit flotation test

表 2　闭路浮选实验结果

Table 2　Closed-circuit flotation test results

捕收剂种类	产品名称	产率/%	CaF_2品位/%	CaF_2回收率/%
CYHS-7	精矿	15.89	90.28	76.68
	尾矿 1	63.15	3.71	12.51
	尾矿 2	20.96	9.65	10.81
	原矿	100.00	18.71	100.00
NaOl	精矿	14.90	84.66	67.50
	尾矿 1	62.69	5.98	20.06
	尾矿 2	22.41	10.37	12.44
	原矿	100.00	18.69	100.00

pH=9,CYHS-7 用量175 g/t时可获得 CaF_2品位 90.28%、回收率 76.68%的萤石精矿;NaOl 用量350 g/t时可获得 CaF_2品位 84.66%、回收率 67.53%的萤石精矿。与传统捕收剂 NaOl 相比,CYHS-7 在用量仅为其一半的情况下,精矿 CaF_2品位与回收率分别提升 5.62 百分点和 9.15 百分点。可见 CYHS-7 是一种高效的萤石浮选捕收剂,它对脉石矿物具有优异的选择性抑制能力。相较于传统捕收剂 NaOl,CYHS-7 在萤石矿的泡沫浮选中表现出更卓越的捕收性能。

2.4　接触角测量实验

表 3 为捕收剂作用前后萤石接触角测量结果。数据表明:捕收剂浓度 2×10^{-4} mol/L 时,CYHS-7 作用后萤石接触角可达 95.4°,NaOl 作用后萤石接触角为 89.7°,表明 CYHS-7 在萤石表面具有强吸附能力,能大幅增强其疏水性,CYHS-7 作捕收剂可提升萤石浮选回收率。

表 3　捕收剂作用前后萤石接触角测量结果

Table 3　Contact angle of fluorite before and after reaction with collectors

捕收剂浓度/(10^{-5} mol·L^{-1})	接触角/(°)	
	CYHS-7	NaOl
0	77.8	77.8
1	88.8	80.4
5	90.4	83.4
10	91.9	84.3
20	95.4	89.7

3　结论

成功合成了(E)-N-(2-羟乙基)十八碳-9-烯酰胺(NOE),并将其与油酸钠按质量比 3∶1复配成新型捕收剂 CYHS-7 应用于实验室规模的萤石浮选,同时对比了 CYHS-7 与传统捕收剂油酸钠对萤石的浮选性能。闭路浮选实验结果表明,pH = 9 时,适宜的 CYHS-7 和 NaOl 用量分别为 175 g/t 和 350 g/t,获得的萤石精矿

CaF_2品位、回收率分别为90.28%、76.68%和84.66%、67.53%;CYHS-7在用量仅为NaOl用量一半的情况下,萤石CaF_2品位提高了5.62百分点,回收率提高了9.15百分点,展现出卓越的萤石捕收性能。

参考文献(References):

[1] 陈杰江,周仕娇,杨兵,等. 某稀土-萤石中矿中萤石的高效回收试验研究[J]. 非金属矿, 2025,48(1):38-42.
CHEN Jiejiang, ZHOU Shijiao, YANG Bing, et al. Experimental study on efficient recovery of fluorite from a rare earth-fluorite ore[J]. Non-Metallic Mines, 2025,48(1):38-42.

[2] 温润涛.江西某石英型萤石矿选矿试验研究[J]. 非金属矿, 2025,48(1):81-83.
WEN Runtao. Experimental study on mineral processing of a quartz type fluorite mine in Jiangxi Province[J]. Non-Metallic Mines, 2025, 48(1):81-83.

[3] 宋宪伟,梅光军,周杰强,等. 新型抑制剂对高钙萤石矿抑制机理及工艺研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):65-68.
SONG Xianwei, MEI Guangjun, ZHOU Jieqiang, et al. Depressing mechanism of new depressant SS-1 on high-calcium fluorite ore and corresponding floatation technology[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(5):65-68.

[4] 孔朝鹏,陈臣,孙伟. 河南某白钨矿伴生高钙萤石综合回收新工艺研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(6):42-46.
KONG Chaopeng, CHEN Chen, SUN Wei. New beneficiation process for comprehensive recovery of high-calcium fluorite ore associated with scheelite in Henan Province[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020,40(6):42-46.

[5] 肖文工,吴迪,王洪岭,等. 某白钨加温浮选尾矿回收萤石试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(1):80-83.
XIAO Wengong, WU Di, WANG Hongling, et al. Recovery of fluorite from tailings after hot flotation of scheelite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(1):80-83.

[6] 李维斯,严伟平,曾小波,等. 某萤石-方解石共生矿浮选实验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):68-71.
LI Weisi, YAN Weiping, ZENG Xiaobo, et al. Experimental study on flotation of fluorite-calcite symbiotic ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):68-71.

[7] 李育彪,杨旭. 萤石浮选药剂及浮选机理研究进展[J]. 金属矿山, 2022,51(10):122-129.
LI Yubiao, YANG Xu. Research progress on flotation reagents for fluorite and the flotation mechanism[J]. Metal Mine, 2022,51(10): 122-129.

[8] 黄颖兴,杨选江,杜金花,等. 某萤石矿工艺矿物学与选矿试验研究[J]. 矿业研究与开发, 2023,43(7):199-204.
HUANG Yingxing, YANG Xuanjiang, DU Jinhua, et al. Experimental study on process mineralogy and beneficiation of a fluorite ore[J]. Mining Research and Development, 2023,43(7):199-204.

[9] 刘春光,李宏静,王丽明,等. 包头某铁矿尾矿综合回收萤石试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(1):84-88.
LIU Chunguang, LI Hongjing, WANG Liming, et al. Experimental study on recovery of fluorite from tailings of Baotou iron mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(1):84-88.

[10] 赵旋,曾永杰,赵凯轩,等. 某高方解石含量萤石矿选矿试验研究[J]. 非金属矿, 2022,45(4):72-74.
ZHAO Xuan, ZENG Yongjie, ZHAO Kaixuan, et al. Experimental research on beneficiation of a high calcite content fluorite ore[J]. Non-Metallic Mines, 2022,45(4):72-74.

[11] 王龙,欧阳林莉,李杰,等. 低品位白钨矿与萤石矿选矿分离方法: CN117443587A[P]. 2024-01-26.
WANG Long, OUYANG Linli, LI Jie, et al. Mineral separation method for low-grade scheelite and fluorite ore: CN117443587A[P]. 2024-01-26.

[12] 冯青舒,陈文胜,王舰,等. 从湖南某钨多金属矿尾矿中回收伴生萤石试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(1):68-71.
FENG Qingshu, CHEN Wensheng, WANG Jian, et al. Recovering associated fluorite from tailings of tungsten-containing polymetallic ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022,42(1):68-71.

[13] 马志军,侯嘉屹,周南,等. 辽宁某萤石矿捕收剂效果对比试验[J]. 矿物学报, 2023,43(5):719-728.
MA Zhijun, HOU Jiayi, ZHOU Nan, et al. Comparative test of collector effects for processing fluorite ores in a fluorite mine in Liaoning Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2023,43(5):719-728.

引用本文:刘宇轩,缪亚兵,王舰,等. 捕收剂CYHS-7的制备及其对萤石的浮选性能[J]. 矿冶工程, 2026,46(1):69-72.
LIU Yuxuan, MIAO Yabing, WANG Jian, et al. Preparation of collector of CYHS-7 and its flotation performance for fluorite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2026,46(1):69-72.