# 低温萤石捕收剂CK-1的研发在承德某萤石矿的应用*

肖舜元[1],祁忠旭[1],高志勇[2],徐世红[2]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要**:为解决承德某萤石选矿厂冬季生产采用油酸做捕收剂时,因油酸水溶性和分散性差等因素造成的捕收能力不足、耐低温性能差,需加温矿浆至20 ℃以上,导致生产成本及能耗较高的问题,通过使用高低不同碘值油酸磺化后复配—皂化—乳化等方式,研发了一种新型低温萤石捕收剂CK-1。应用捕收剂CK-1后,夏季常温生产条件下,较原有生产指标,萤石精矿的回收率提升了0.77个百分点,在冬季矿浆温度为12 ℃的情况下,获得了与原夏季矿浆温度为25 ℃、使用现场油酸作捕收剂的条件下相近的选矿指标,但降低了吨矿加温成本11.03元,实现了该选厂的冬季不加温浮选,经济效益显著。在我国北方地区每年冬季萤石选矿的加温费用达到数千万元,因此CK-1在我国北方地区具有良好的推广应用价值。

**关键词**:萤石;捕收剂;低温浮选;选矿指标;生产成本

**中图分类号**:TD923$^{+}$.13;TD97 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)09-0268-07

**Application of Low-Temperature Fluorite Collector CK-1 in a Fluorite Mine in Chengde**

*XIAO Shunyuan*[1], *QI Zhongxu*[1], *GAO Zhiyong*[2], *XU Shihong*[2]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China)

**Abstract**: When oleic acid is used as collector in winter production of a fluorite concentrator in Chengde, due to poor water solubility and dispersion of oleic acid, the collection capacity is insufficient and the low-temperature resistance is poor. It is necessary to heat the slurry to more than 20 ℃, resulting in high production cost and energy consumption. In order to solve these problems, a new type of low-temperature fluorite collector CK-1 was developed using oleic acid with different iodine values to sulfonate and compound-saponification-emulsification. After the application of collector CK-1, the recovery rate of fluorite concentrate increases by 0.77 percentage points compared with the original production index under the condition of normal temperature production in summer. In the case of slurry temperature of 12 ℃ in winter, the beneficiation index is similar to that of the original condition with slurry temperature of 25 ℃ in summer and oleic acid as collector, but the heating cost per ton of ore is reduced by 11.03 yuan, and the flotation without heating in winter is realized, and the economic benefit is remarkable. In the northern region of China, the annual heating cost of fluorite beneficiation in winter reaches tens of millions of yuan, so CK-1 has good application value in the northern region of China.

**Key words**: Fluorite, Collector, Low-temperature flotation, Beneficiation index, Production cost

## 0 引言

萤石是生产氟化物的主要原料,而氟被广泛应用于冶金、化工、建材、新能源、新材料、国防、航天航空等领域。我国是世界上萤石资源较为丰富的国家之一,但资源禀赋较差、中高品位资源逐渐被利用殆尽,低品位矿也在加速消耗,单一萤石迅速枯竭,开采伴生萤石矿越来越重要。而此类萤石矿的品位普遍偏低,原矿中萤石品位一般仅在18%~35%,因而萤石开采的难度正逐步加大[1-5]。当下氟化工的下游锂电池行业对六氟磷酸锂的需求正盛,而萤石几乎可以视作是氟化工中氟元素的唯

* **收稿日期**:2024-09-06
**作者简介**:肖舜元(1993—),男,湖南郴州人,工程师,主要从事选矿工艺与选矿药剂研发工作。E-mail:xsykobe@qq.com

一来源,因此对现有萤石矿的高效回收利用显得十分重要[6-11]。

长久以来,萤石的浮选过程大多以油酸为捕收剂,以纯碱为调整剂,以水玻璃为抑制剂,该浮选工艺在常温(25 ℃左右)条件下进行时,油酸的捕收性能可以满足浮选要求。但当环境温度低于 20 ℃时,以油酸为捕收剂就出现较大的问题,例如存在因水溶性和分散性差等因素造成的捕收能力不足、药剂消耗量大、耐低温性能差和起泡性弱等缺点,尤其是在北方地区的冬季,温度较低,经磨矿后用于浮选的矿浆温度普遍低于 12 ℃,只有将浮选矿浆加热到 20 ℃左右,才会使浮选效果有所改观。然而加温作业必将消耗大量的能源,使浮选成本大幅提升,因此开发高效的低温萤石捕收剂十分重要。目前国内针对低温萤石捕收剂的理论研究已取得较大进展。呼振峰等[12]采用 BK421 萤石捕收剂,在矿浆平均温度为 11 ℃的条件下,获得了 $CaF_2$ 品位为 97.26%、回收率为 82.53%的萤石精矿。尚保忠等[13]采用 HY-F 萤石捕收剂,在 5 ℃的低温矿浆环境下,获得了 $CaF_2$ 品位为 98.41%、回收率为 87.87%的萤石精矿。陈浩等[14]采用耐低温性好的石油磺酸钠捕收剂(PSK-13),在矿浆温度为 5 ℃的条件下,获得了 $CaF_2$ 品位为 98.57%、回收率为 75.02%的 FC-98 级萤石精矿。上述的低温萤石捕收剂主要是针对脂肪酸进行改性,引入羧基、酯基、羟基等多种官能团,提高脂肪酸的增溶性和弥散性,避免了药剂的聚集凝结。

实际生产过程中,低温萤石捕收剂仍有较多的不足。普通皂化脂肪酸虽然溶解性及分散性相对较好,但存在泡沫过于丰富且稳定性较差的问题,在精选段容易跑槽,造成资源的浪费,最直观的表现就是造成回收率下降;以脂肪醇聚氧乙烯醚羧酸钠、十六烷基磺酸钠和脂肪酸甲酯磺酸钠混合而成的复配捕收剂,其应用的浮选效果较好,但药剂价格极为昂贵,实际应用价值较低。因此有必要研发既能在低温条件下拥有强捕收能力和选择性,又能保证较高的萤石回收率,且原料成本低廉的高效低温萤石捕收剂。

## 1 矿石性质

矿石的荧光光谱半定量分析、化学多元素分析结果分别见表 1、表 2。

**表 1 矿石的荧光光谱分析结果**

**Table 1 Analysis results of fluorescence spectrum of ore** %

| $SiO_2$ | CaO | F | MgO | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 63.28 | 17.59 | 15.26 | 0.53 | 0.79 | 1.17 |
| BaO | $SO_3$ | $K_2O$ | $Na_2O$ | MnO | $P_2O_5$ |
| 0.26 | 0.27 | 0.13 | 0.09 | 0.12 | 0.01 |

**表 2 矿石的矿物含量分析结果**

**Table 2 Analysis results of mineral content of ore** %

| 萤石 | 方解石 | 石英 | 黄铁矿 | 辉石闪石 |
|---|---|---|---|---|
| 21.67 | 3.94 | 67.56 | 0.04 | 1.26 |
| 长石 | 云母 | 褐铁矿 | 绿泥石 | 其他 |
| 1.54 | 1.89 | 0.54 | 0.21 | 1.35 |

由表 1、表 2 可知,该矿石中可回收的矿物为萤石,$CaF_2$ 品位为 21.67%;矿石中主要脉石矿物为石英、方解石,含量分别为 67.56%和 3.94%。该矿石属于石英型萤石矿,方解石含量较低。

## 2 小型试验研究

### 2.1 捕收剂 CK-1 的研发思路

(1) 将高碘值的油酸与低碘值的油酸联合使用,充分利用不同种类油酸与萤石表面吸附位点的差异,提高萤石表面的油酸吸附量,以此提升捕收剂对萤石矿物的选择性,增强捕收效果。

(2) 不同碘值油酸混合物的临界胶团浓度值比混合前各单一组分的临界胶团浓度值普遍低两个数量级,而临界胶团浓度值越低,也越有利于捕收剂产生大小和稳定性适中的气泡,从而有利于浮选过程的顺利进行。

(3) 将所使用的高/低碘值的一类油酸先经磺化处理,再与未经磺化处理的另一类碘值的油酸充分混合,使捕收剂内引入了适量的强极性基团磺酸基,进一步增强药剂与萤石表面的吸附作用力,在进一步提升捕收剂表面活性的同时,又能在萤石颗粒表面形成良好的疏水性薄膜,提高矿物的可浮性,使捕收效果进一步增强。再将活化后的油酸及其衍生物的混合产物与碱溶液进行皂化反应,使油脂充分水解成对应的碱金属盐,再加入少量表面活性剂进行乳化,从而大幅提升捕收剂在低温条件下的水溶性和分散性,进而增强捕收剂在 10~20 ℃的低温条

件下的捕收能力,减少捕收剂的用量。

所用油酸主要为植物油酸、动物油酸,磺化处理所用试剂为浓硫酸、氯磺酸、亚硫酸盐等,表面活性剂主要为十二烷基磺酸盐,乳化剂为聚乙二醇月桂酸酯。上述原材料来源广泛,成本低廉,且性质稳定,具有明显的产业化优势。

## 2.2 捕收剂用量试验

在磨矿细度为-0.074 mm 占比 63%,碳酸钠用量为 500 g/t 的条件下,进行萤石粗选的捕收剂 CK-1 用量试验,试验流程见图 1,试验结果见图 2。

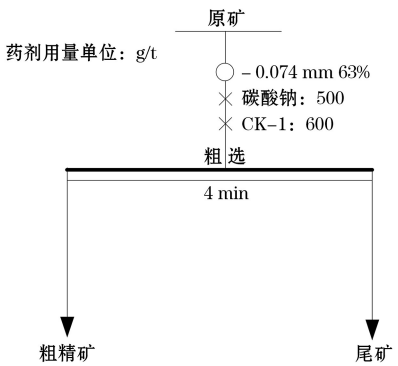



图 1 粗选条件试验流程

Fig.1 Process of rough selection condition test

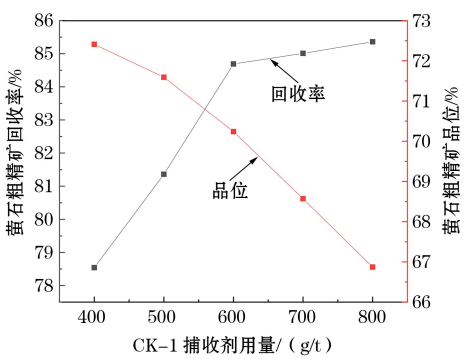



图 2 捕收剂 CK-1 用量试验结果

Fig.2 Test results of collector CK-1 dosage

由图 2 可知,CK-1 用量达到 600 g/t 后,萤石粗精矿回收率增幅较缓,$CaF_2$ 品位下降趋势较为显著。因此选定 CK-1 用量为 600 g/t,此时萤石粗精矿 $CaF_2$ 品位为 70.24%,回收率为 84.69%。

## 2.3 矿浆温度试验

在不同矿浆温度下,采用选厂现场油酸和 CK-1 进行试验,固定磨矿细度为-0.074 mm 占比 63%,碳酸钠用量为 500 g/t,试验流程见图 1,试验结果见图 3。经测量,在冬季最低气温时,该选厂的矿浆温度为 12 ℃,因此试验中设定最低矿浆温度为 12 ℃。

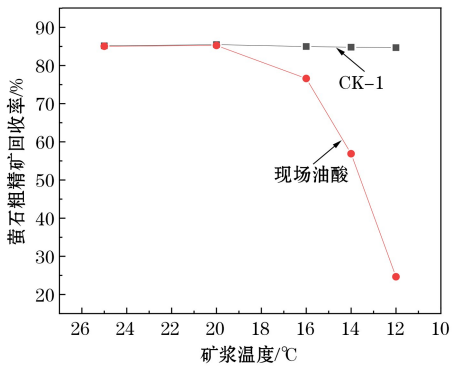



图 3 不同矿浆温度下的试验结果

Fig.3 Test results at different slurry temperatures

由图 3 可知,在矿浆温度低于 20 ℃后,使用现场油酸进行粗选时,萤石回收率大幅降低,在矿浆温度为 12 ℃时,粗选作业泡沫层稀薄,带矿量少,萤石粗精矿回收率仅为 24.65%。在使用 CK-1 进行粗选时,随着矿浆温度的降低,萤石粗精矿回收率较为稳定,矿浆温度为 12 ℃时,萤石粗精矿回收率为 84.68%。

## 2.4 不同温度下捕收剂对矿物表面电性的影响

表面电性对矿物的可浮性有着直接的影响。在萤石浮选过程中,通过添加捕收剂,可使萤石矿物表面带负电,从而使矿物表面疏水性增强,可浮性增大。

在不同矿浆温度下,分别进行了 CK-1 与现场油酸对萤石表面电性的影响试验,选定 pH 为 8,捕收剂 CK-1 和油酸的用量均为 4 mg/L。试验结果如图 4 所示。

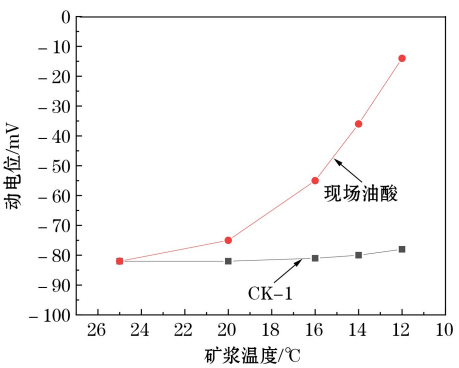



图 4 不同温度下矿浆表面电性试验结果

Fig.4 Test results of surface potential of ore slurry at different temperatures

由图 4 可知，使用现场油酸作捕收剂时，随着矿浆温度的降低，萤石表面的动电位呈上升趋势。这表明随着矿浆温度的降低，油酸改变萤石表面电性的作用减弱，萤石疏水性减弱。使用 CK-1 作捕收剂时，随着矿浆温度的降低，萤石矿物表面的动电位未见显著变化，基本趋于稳定。这表明随着矿浆温度的降低，CK-1 与萤石的作用效果未见减弱，展现出良好的低温稳定性。

## 2.5　碳酸钠用量试验

碳酸钠是萤石选矿的重要调整剂。在用 CK-1 作捕收剂的情况下，碳酸钠用量对选矿指标的影响的试验流程如图 1 所示，试验结果如图 5 所示。

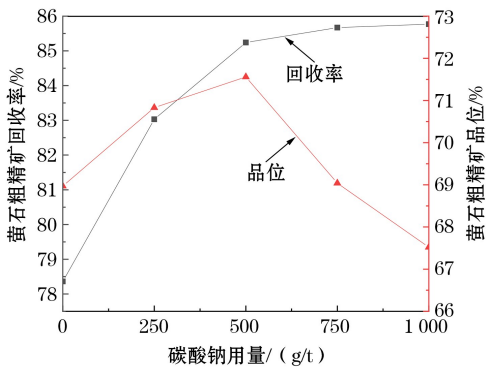



**图 5　碳酸钠用量试验结果**

**Fig.5　Test results of sodium carbonate dosage**

由图 5 可知，随着碳酸钠用量的增加，萤石粗精矿的 $CaF_2$ 品位呈先升高后再降低的趋势，萤石回收率呈先升高后稳定的趋势。当碳酸钠用量为 500 g/t 时，可获得较优选矿指标，此时萤石粗精矿的 $CaF_2$ 品位为 71.56%，回收率为 85.24%。

## 2.6　精选酸化水玻璃用量试验

选用酸化水玻璃作为精选阶段的脉石抑制剂。通过试验考察了精选阶段酸化水玻璃用量对选矿指标的影响，同时验证 CK-1 的耐酸性。试验中固定磨矿细度为－0.074 mm 占比 63%，粗选碳酸钠用量为 500 g/t，粗选 CK-1 用量为 600 g/t。试验流程见图 6，试验结果见图 7。

由图 7 可知，随着精选阶段酸化水玻璃总用量的增加，萤石精矿的品位逐渐提高，而回收率呈下降趋势。当酸化水玻璃总用量达到 1 500 g/t 后，精矿品位趋于稳定，因此选定精选酸化水玻璃总用量为 1 500 g/t，此时开路试验中萤石精矿的 $CaF_2$ 品位为 97.34%，回收率为 67.04%。同时试验结果表明，在精选阶段的酸性矿浆环境中，CK-1 不易掉槽，具有良好的耐酸性能。

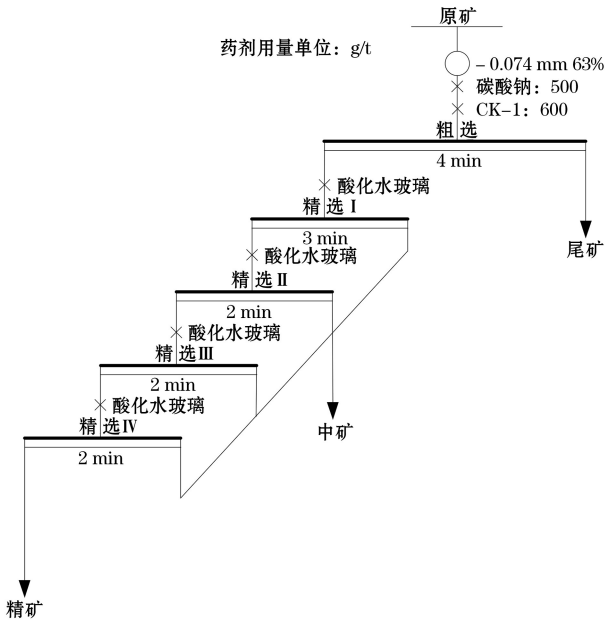



**图 6　精选酸化水玻璃用量试验流程**

**Fig.6　Test process for selected acidified water glass dosage**

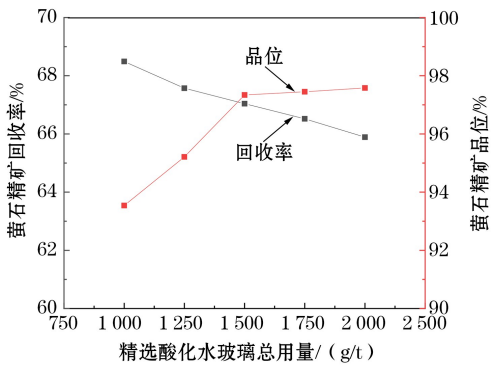



**图 7　精选酸化水玻璃用量试验结果**

**Fig.7　Test results of selected acidified water glass dosage**

## 2.7　闭路试验

在条件试验的基础上，进行了全流程闭路试验。在矿浆温度分别为 25 ℃和 12 ℃的条件下，采用 CK-1 进行了试验。在常温（25 ℃）条件下，采用现场油酸进行了对比试验。试验流程见图 8，对比试验结果见表 3。

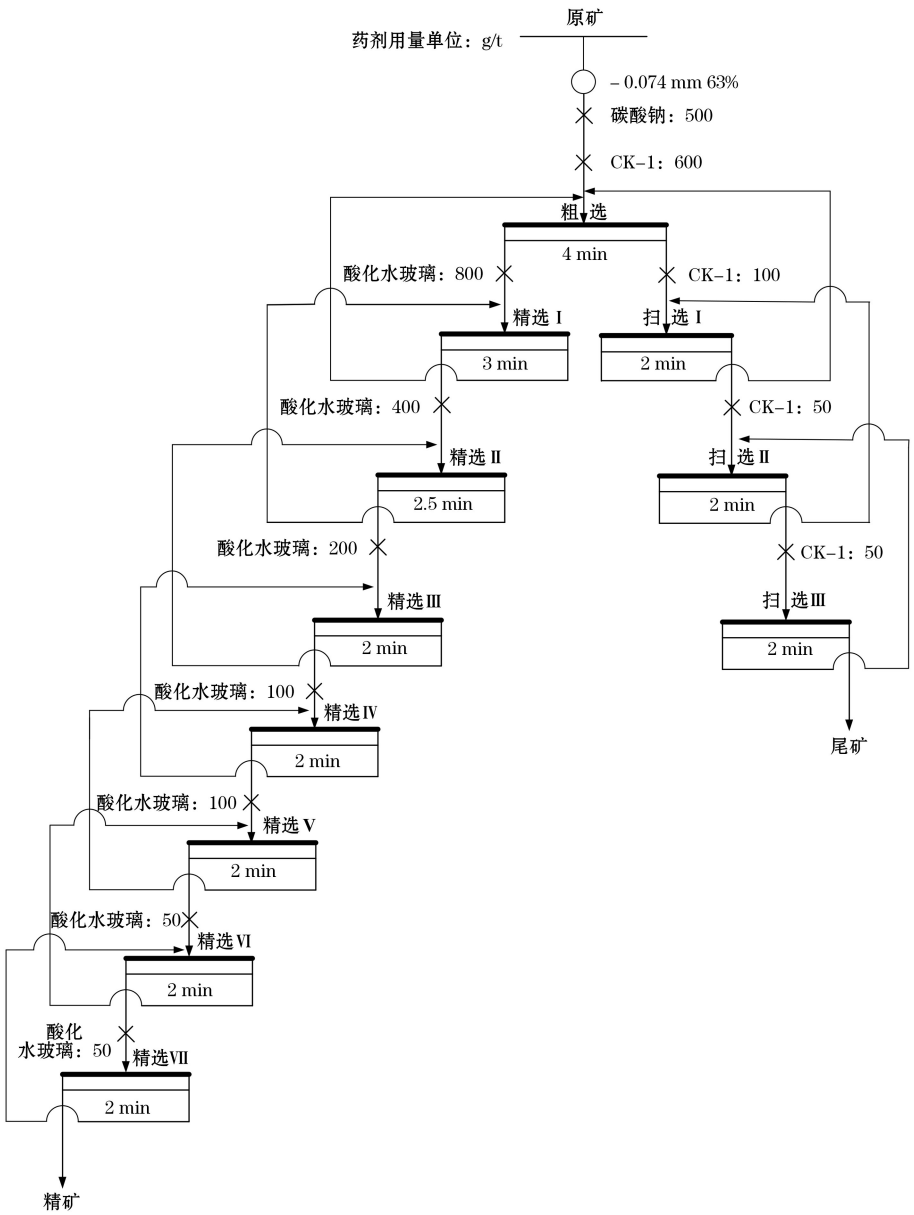



**图 8 闭路试验流程**

**Fig.8 Flow of closed circuit test**

**表 3 闭路试验结果对比**

**Table 3 Comparison of closed circuit test results**

| 捕收剂 | 矿浆温度/℃ | 产品 | 产率/% | $CaF_2$ 品位/% | $CaF_2$ 回收率/% |
|---|---|---|---|---|---|
| CK-1 | 25 | 萤石精矿 | 18.68 | 97.56 | 84.12 |
| | | 尾矿 | 81.32 | 4.23 | 15.88 |
| | | 原矿 | 100.00 | 21.66 | 100.00 |
| 现场油酸 | 25 | 萤石精矿 | 18.96 | 97.24 | 83.55 |
| | | 尾矿 | 81.04 | 4.48 | 16.45 |
| | | 原矿 | 100.00 | 22.07 | 100.00 |
| CK-1 | 12 | 萤石精矿 | 19.04 | 97.58 | 83.85 |
| | | 尾矿 | 80.96 | 4.42 | 16.15 |
| | | 原矿 | 100.00 | 22.16 | 100.00 |

由表 3 可知，采用 CK-1 作为萤石捕收剂时，在矿浆温度为 25 ℃的条件下，闭路试验可获得 $CaF_2$ 品位为 97.56%、回收率为 84.12%的萤石精矿；在矿浆温度为 12 ℃的条件下，闭路试验可获得 $CaF_2$ 品位为 97.58%、回收率为 83.85%的萤石精矿，实现了低温矿浆条件下的有效回收，且精矿 $CaF_2$ 品位和回收率均高于矿浆温度为 25 ℃的情况下使用现场油酸作捕收剂的选矿指标。

## 3 工业应用

在闭路试验取得良好选矿指标的情况下，于夏

季开展了工业应用。在工业试验初始,因药剂配制方式、药剂添加量、药剂使用方式未达到要求,加之现场工人对新药剂泡沫现象不熟悉,使得选矿指标存在一定的波动。经过几天调试后,工艺参数逐步达到要求,最终取得了较为理想的工艺指标。CK-1 应用前后的选矿指标对比见表 4。

**表 4 捕收剂 CK-1 应用前后的选矿指标对比**

**Table 4 Comparison of mineral processing indexes before and after the application of collector CK-1**

| 捕收剂 | 产品 | $CaF_2$ 品位/% | $CaF_2$ 回收率/% |
|---|---|---|---|
| CK-1 | 萤石精矿 | 97.68 | 85.03 |
| | 尾矿 | 4.23 | 14.97 |
| | 原矿 | 22.68 | 100.00 |
| 现场油酸 | 萤石精矿 | 97.52 | 84.26 |
| | 尾矿 | 4.48 | 15.74 |
| | 原矿 | 22.85 | 100.00 |

采用 CK-1 替换现场油酸后,经过一个月的工业试验,获得了 $CaF_2$ 品位为 97.68%、回收率为 85.03% 的萤石精矿,较原有生产指标,萤石精矿回收率提升了 0.77 个百分点。

在夏季常温生产中验证了捕收剂 CK-1 的实际使用效果后,在冬季生产中应用 CK-1,并停用加温设备,CK-1 冬季生产(矿浆温度 12 ℃)的平均指标见表 5。在冬季生产中,因停止使用加热措施,每处理 1 t 原矿可节省加温费用 11.03 元。

**表 5 应用捕收剂 CK-1 后的冬季选矿生产指标**

**Table 5 Production indexes of mineral processing in winter after using collector CK-1**

| 产品 | $CaF_2$ 品位/% | $CaF_2$ 回收率/% |
|---|---|---|
| 萤石精矿 | 97.26 | 84.33 |
| 尾矿 | 4.39 | 15.67 |
| 原矿 | 22.54 | 100.00 |

应用低温萤石捕收剂 CK-1 后,冬季不加温生产时获得了 $CaF_2$ 品位为 97.26%、回收率为84.33% 的萤石精矿,实现了该选厂冬季不加温浮选,而生产指标与使用现场油酸的夏季浮选指标相近,节约加温费用,经济效益显著。我国北方地区(如河北、内蒙古、新疆、青海等地)萤石储量超过 2 500 万 t,冬季均采用矿浆加温浮选,每年加温费用数千万元,因此,CK-1 在北方地区具有较大的推广应用前景。

## 4 结论

(1) 使用高低不同碘值油酸磺化后复配—皂化—乳化等方式,研发了 CK-1 低温萤石捕收剂。该捕收剂具有良好的耐低温性能,选择性好,捕收能力强,且所用原料来源广泛,成本低廉,性质稳定,无毒害,具有明显的产业化优势。

(2) 采用 CK-1 作为萤石捕收剂进行了闭路试验。在矿浆温度为 25 ℃的条件下,闭路试验获得了 $CaF_2$ 品位为 97.56%、回收率为 84.12% 的萤石精矿。在矿浆温度为 12 ℃的条件下,闭路试验获得了 $CaF_2$ 品位为 97.58%、回收率为 83.85% 的萤石精矿,实现了低温矿浆条件下的萤石有效回收,且试验指标均高于矿浆温度为 25 ℃情况下使用现场油酸的选矿指标。

(3) 冬季不加温生产获得了 $CaF_2$ 品位为 97.26%、回收率为 84.33% 的萤石精矿,与使用现场油酸作捕收剂时的夏季生产选矿指标相近,每处理 1 t 原矿可节约加温费用 11.03 元。研发的捕收剂 CK-1 在我国北方地区具有较大的推广应用前景。

**参考文献(References):**


[1] 湛景震,高志勇,范才兵,等.我国萤石资源利用现状和战略规划分析[J].矿业研究与开发,2024,44(5):251-259.
ZHAN Jingzhen, GAO Zhiyong, FAN Caibing, et al. Utilization status and strategic planning of fluorite resources in China[J]Mining Research and Development,2024,44(5):251-259.

[2] 李育彪,杨旭.我国萤石资源及选矿技术进展[J].矿产保护与利用,2022,42(2):49-58.
LI Yubiao, YANG Xu. Overview of fluorite resources and processing technology in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2022,42(2):49-58.

[3] 刘秋颖.中国萤石资源供需形势分析及对策建议[J].矿产勘查,2023,14(10):1798-1804.
LIU Qiuying. Analysis of supply-demand situation of fluorite resources in China and suggestions[J]. Mineral Exploration,2023,14(10):1798-1804.

[4] 许海,刘海涛,贾元琴,等.关于中国萤石矿产业发展的思考[J].四川有色金属,2021(3):2-5+51.
XU Hai, LIU Haitao, JIA Yuanqin, et al. Reflection on the development of fluorite industry in China [J]. Sichuan Nonferrous Metals,2021(3):2-5+51.

[5] 王茂原,熊文良,张丽军,等.稀土尾矿中伴生萤石资源综合利用现状[J].稀土,2022,43(3):23-33.
WANG Maoyuan, XIONG Wenliang, ZHANG Lijun, et al. Comprehensive utilization status of associated fluorite resources in rare earth tailing[J]. Chinese Rare Earths,2022,43(3):23-33.

[6] 张丹仙,亢建华,黄红军,等.萤石资源开发利用现状与战略意义[J].过程工程学报,2023,23(1):1-14.
ZHANG Danxian, KANG Jianhua, HUANG Hongjun, et al. Exploitation and utilization of fluorite and its strategic significance [J]. The Chinese Journal of Process Engineering,2023,23(1):1-14.

[7] 李翠芬,孙景敏,李荣改,等.河南某萤石矿选矿工艺流程试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(12):36-40.
LI Cuifen, SUN Jingmin, LI Ronggai, et al. Experimental study on beneficiation process of a fluorite ore in Henan[J]. Mining Research and Development,2022,42(12):36-40.

[8] 吴迪,王洪岭,孟庆波,等.内蒙古某多金属矿尾矿回收萤石实验研究[J].矿产综合利用,2022(6):155-158+166.
WU Di, WANG Hongling, MENG Qingbo, et al. Experimental research on recovery of fluorite from a polymetallic mine tailing in Inner Mongolia [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(6): 155-158+166.

[9] 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.

[10] 李凤久,孔亚然,贾清梅.某萤石矿选矿实验研究[J].矿产综合利用,2023(2):81-86.
LI Fengjiu, KONG Yaran, JIA Qingmei. Experimental study on beneficiation of a fluorite ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2023(2):81-86.

[11] 韩远燕.重庆某方解石型低品位萤石矿选矿技术研究[J].矿业研究与开发,2020,40(8):116-119.
HAN Yuanyan. Study on beneficiation technology of low-grade calcite-type fluorite in Chongqing[J]. Mining Research and Development,2020,40(8):116-119.

[12] 呼振峰,阳光,罗科华,等.低温捕收剂 BK421 浮选内蒙古某萤石矿应用研究[J].有色金属(选矿部分),2022(3):144-149.
HU Zhenfeng, YANG Guang, LUO Kehua, et al. Application of low temperature collector BK421 in flotation of fluorite ore from Inner Mongolia[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section),2022(3):144-149.

[13] 尚保忠,陈秋平,黄业豪,等.新型耐低温捕收剂 HY-F 在某萤石矿中的应用研究[J].非金属矿,2024,47(4):74-77.
SHANG Baozhong, CHEN Qiuping, HUANG Yehao, et al. Application study of new low temperature resistant collector HY-F in a fluorite mine[J]. Non-Metallic Mines, 2024,47(4):74-77.

[14] 陈浩,任子杰,高惠民,等.石油磺酸钠低温浮选石英型萤石的试验研究[J].矿产保护与利用,2020,40(3):135-139.
CHEN Hao, REN Zijie, GAO Huimin, et al. Experimental study on low-temperature flotation of quartz-type fluorite with petroleum sodium sulfonate [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,2020,40(3):135-139.