

# 湖南某细粒难选萤石矿选矿试验研究<sup>①</sup>

陈湘根<sup>1,2</sup>, 刘欣<sup>2,3</sup>

(1.郑州大学, 河南 郑州 450001; 2.中原能矿投资开发有限公司, 河南 郑州 450000; 3.河南投资集团有限公司, 河南 郑州 450003)

**摘要:** 为合理开发利用湖南某细粒难选萤石矿, 采用粗磨-预选回收-粗精矿再磨再选的选矿流程, 以 CYP-01 为捕收剂、碳酸钠为调整剂、水玻璃为抑制剂, 并在精选段使用分段抑制的方式, 在粗磨细度-0.045 mm 粒级占 50%、再磨细度-0.045 mm 粒级占 85% 条件下, 经一次粗选、八次精选, 获得了 CaF<sub>2</sub> 品位 93.04%、回收率 64.24% 的化工级萤石产品, 实现了该细粒难选萤石矿的高效回收利用。

**关键词:** 萤石; 浮选; 磨矿; 捕收剂; 抑制剂

中图分类号: TD97

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2025.04.018

文章编号: 0253-6099(2025)04-0100-05

## Experimental Study on Beneficiation of Fine-Grained Refractory Fluorite Ore in Hunan

CHEN Xianggen<sup>1,2</sup>, LIU Xin<sup>2,3</sup>

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China; 2. Zhongyuan Energy Mining Investment and Development Co., Ltd., Zhengzhou 450000, Henan, China; 3. Henan Investment Group, Zhengzhou 450003, Henan, China)

**Abstract:** A beneficiation test was performed with a kind of fine-grained refractory fluorite ore in Hunan Province for rational development and utilization. In the test, a process consisting of coarse grinding, pre-concentration, regrinding and re-concentration of rough concentrate was adopted, with CYP-01 as a collector, sodium carbonate as a modifier, and water glass as a depressant. Depression in steps was performed in the cleaning stage. With the coarse grinding fineness of -0.045 mm 50%, regrinding fineness of -0.045 mm 85%, a kind of chemical-grade fluorite product with CaF<sub>2</sub> grade of 93.04% was obtained at 64.24% recovery after one stage of roughing and eight stages of cleaning. It is shown that such kind of fine-grained refractory fluorite ore can be effectively recovered and utilized.

**Key words:** fluorite; flotation; grinding; collector; depressant

萤石是我国的战略性非金属矿产资源, 广泛应用于冶金、陶瓷、医药、造纸、化学、光学等领域, 是氟化工重要的工业原料<sup>[1-4]</sup>。我国是萤石生产和消费大国, 产量与消费量均居全球首位。近年来, 新能源领域对氟化工产品的需求日益旺盛, 萤石资源消费量呈现逐年上升的态势。尽管我国萤石资源储量丰富, 但贫矿多、组成复杂、难选别、利用率低, 未来将面临萤石资源依赖进口、供需矛盾突出等问题, 严重威胁我国新兴技术领域的发展甚至是国家战略安全<sup>[5-8]</sup>。针对我国复杂难选萤石资源的开发利用技术研究具有重要意义。

本文对湖南某细粒难选萤石矿进行了选矿试验研究, 采用高效捕收剂并配合精选段分步抑制的方式, 获

得合格的化工级萤石产品, 实现该萤石矿的高效回收利用。

## 1 矿石性质及试验方法

### 1.1 矿石性质

试验矿样为湖南某萤石矿。矿样化学多元素分析结果见表 1, 矿物组成见表 2。样品中 CaF<sub>2</sub> 品位为 40.43%, SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量分别为 19.86% 和 14.53%。萤石是选矿富集回收的主要目的矿物, 其矿物含量为 40.4%, 脉石矿物以绢云母为主, 此外含少量方解石、石英/长石、赤褐铁矿等, 属云母型萤石矿石。结合 MLA 矿物分析系统和显微镜镜下观察发现, 萤石主要为自

① 收稿日期: 2025-02-16

作者简介: 陈湘根(1983—), 男, 湖南浏阳人, 高级工程师, 主要从事矿山开采、矿物加工及冶金等方面的研究。E-mail: 151424430@qq.com

形、半自形等轴粒状或不规则粒状,少部分为不规则团块状或细脉状,主要与绢云母或方解石等紧密交生,嵌布关系极为复杂,晶粒或集合体内部常包裹有微细粒的绢云母、方解石等杂质矿物。

表1 矿样化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of ore sample %

| CaF <sub>2</sub> | Fe               | Cu               | Pb                             | Zn   | Rb   | Sn   | Sr                |
|------------------|------------------|------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|
| 40.43            | 3.45             | 0.028            | 0.23                           | 0.28 | 0.15 | 0.03 | 0.046             |
| W                | SiO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO  | MgO  | MnO  | Na <sub>2</sub> O |
| 0.043            | 19.86            | 0.10             | 14.53                          | 3.21 | 1.68 | 1.06 | 1.64              |
| K <sub>2</sub> O | As               | S                | P                              | C    | 烧失   |      |                   |
| 3.44             | 0.019            | 0.77             | 0.026                          | 0.73 | 7.25 |      |                   |

表2 矿物组成(质量分数)

Table 2 Mineral composition %

| 萤石   | 绢云母  | 赤褐铁矿 | 方解石 | 硬石膏 | 石英/长石    |
|------|------|------|-----|-----|----------|
| 40.4 | 42.0 | 4.2  | 3.7 | 2.8 | 2.1      |
| 黄铁矿  | 锰铅矿  | 高岭石  | 闪锌矿 | 方铅矿 | 黄铜矿 其他   |
| 1.2  | 1.0  | 0.8  | 0.4 | 0.3 | <0.1 1.0 |

1.2 试验方法

结合矿石性质研究结果,萤石是选矿富集回收的主要目的矿物,考虑到矿石中萤石的不均匀嵌布特征以及与脉石矿物复杂的嵌布关系,采用“粗磨-预选回收-粗精矿再磨再选”的流程对该萤石进行富集回收。

1.3 试剂及仪器设备

试验试剂包括碳酸钠(分析纯)、水玻璃(工业品)、CYP-01(工业品,由长沙矿冶研究院有限责任公司提供)、硫酸铝(分析纯)、氯化铁(分析纯)、盐酸(分析纯)、硫酸(分析纯)等。

仪器设备包括 XMQ-Φ240 \* 90 锥形球磨机, XFD 型(1 L、0.75 L、0.5 L)单槽浮选机, DL-5C 型盘式真空过滤机,分析天平,电热鼓风干燥箱等。

2 结果与讨论

2.1 粗选条件试验

2.1.1 粗磨磨矿细度试验

解离度是影响浮选指标的重要因素之一,磨矿是实现矿物单体解离的有效手段<sup>[9]</sup>。按照图1所示流程,在调整剂碳酸钠用量 1 000 g/t、抑制剂水玻璃用量 1 800 g/t、捕收剂 CYP-01 用量 500 g/t 条件下,进行了粗磨磨矿细度试验,结果见图2。从图2可知,随着粗磨磨矿细度增加,浮选粗精矿品位逐渐下降,而回收率

逐渐提高。适宜的粗磨磨矿细度为-0.045 mm 粒级占 50%,该条件下可获得 CaF<sub>2</sub> 品位 52.35%、回收率 97.12% 的粗精矿。

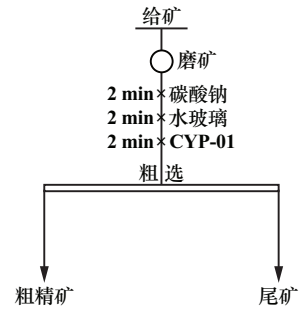


图1 粗选试验流程

Fig.1 Roughing test flowchart

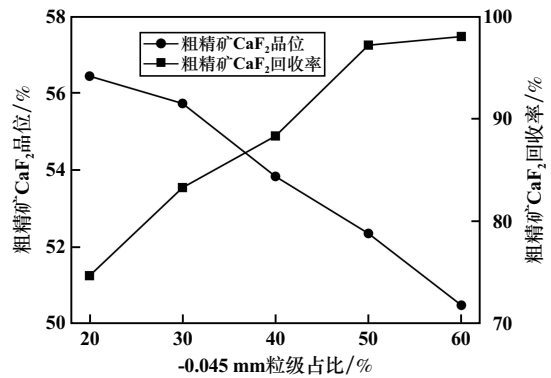


图2 粗磨磨矿细度试验结果

Fig.2 Coarse grinding fineness test results

2.1.2 粗选碳酸钠用量试验

粗磨磨矿细度-0.045 mm 粒级占 50%,其他条件不变,进行了粗选碳酸钠用量试验,结果见图3。从图3可知,增加碳酸钠用量可提升萤石回收率,但粗精矿品位下降。碳酸钠用量超过 1 000 g/t 后,继续增加碳酸钠用量,粗精矿回收率提升幅度较小且品位明显下降。从药剂消耗和选别指标等多方面考虑,粗选碳酸钠用量以 1 000 g/t 为宜。

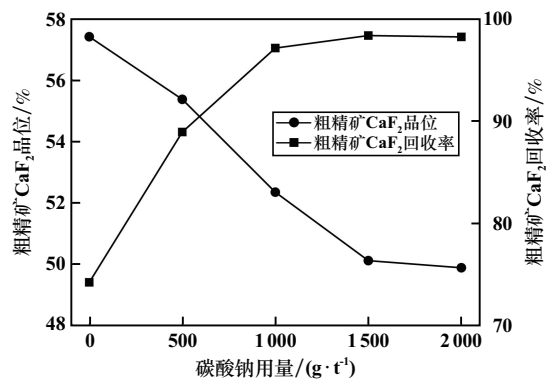


图3 粗选碳酸钠用量试验结果

Fig.3 Test results of sodium carbonate dosage in roughing

### 2.1.3 粗选水玻璃用量试验

碳酸钠用量 1 000 g/t,其他条件不变,进行了粗选水玻璃用量试验,结果见图 4。从图 4 可知,随着水玻璃用量增加,粗精矿品位逐渐增大、回收率逐渐减小。适宜的粗选水玻璃用量为 3 600 g/t。

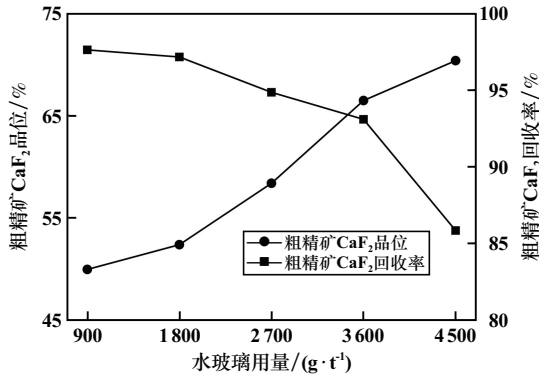


图 4 粗选水玻璃用量试验结果

Fig. 4 Test results of water glass dosage in roughing

### 2.1.4 粗选 CYP-01 用量试验

水玻璃用量 3 600 g/t,其他条件不变,进行了粗选捕收剂 CYP-01 用量试验,结果见图 5。从图 5 可知,增加捕收剂 CYP-01 用量有利于提升粗选回收率,但粗精矿品位逐渐减小。综合考虑,粗选 CYP-01 用量 500 g/t 为宜。

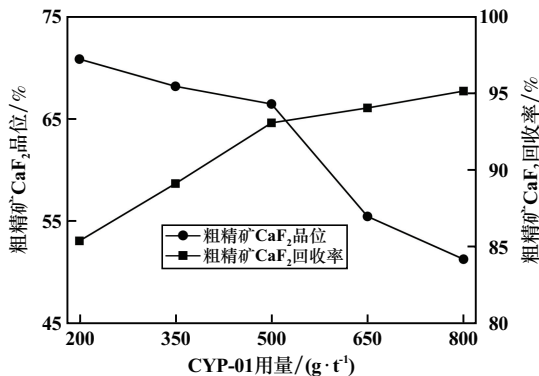


图 5 粗选 CYP-01 用量试验结果

Fig. 5 Test results of CYP-01 dosage in roughing

## 2.2 精选条件试验

在粗磨磨矿细度-0.045 mm 粒级占 50%、碳酸钠用量 1 000 g/t、水玻璃用量 3 600 g/t、CYP-01 用量 500 g/t 条件下进行粗选,获得了产率 57.06%、品位 66.43%、回收率 93.06%的粗精矿。

### 2.2.1 再磨细度试验

为进一步提高萤石单体解离度,对粗精矿进行了再磨再选试验,试验流程见图 6。

在碳酸钠用量 200 g/t、水玻璃用量 500 g/t、CYP-01

用量 100 g/t 条件下,按照图 6 所示流程进行了再磨细度试验,结果见图 7。从图 7 可知,随着再磨细度增加,精矿品位增加而精矿回收率逐渐降低。适宜的再磨细度为-0.045 mm 粒级占 85%时,此时可获得 CaF<sub>2</sub> 品位 77.76%、回收率 80.83%的精矿。

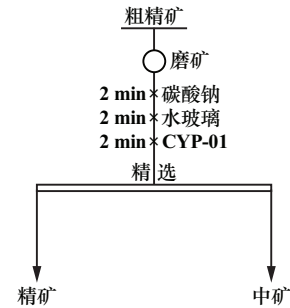


图 6 粗精矿再磨再选试验流程

Fig. 6 Flowchart of re-grinding and re-concentration for roughing concentrate

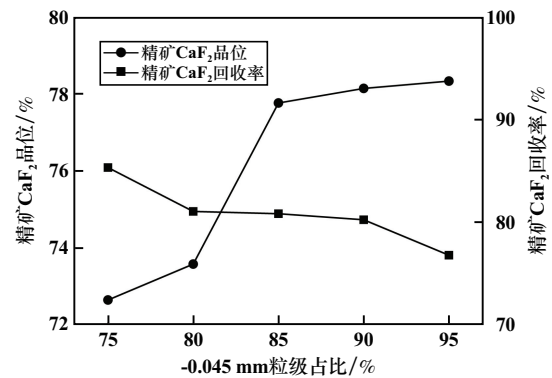


图 7 再磨细度试验结果

Fig. 7 Re-grinding fineness test results

### 2.2.2 精选碳酸钠用量试验

再磨细度-0.045 mm 粒级占 85%,其他条件不变,进行了精选碳酸钠用量试验,结果见图 8。随着碳酸钠用量增加,精矿回收率逐渐增大,精矿品位逐渐减小。综合比较,精选碳酸钠用量 200 g/t 为宜。

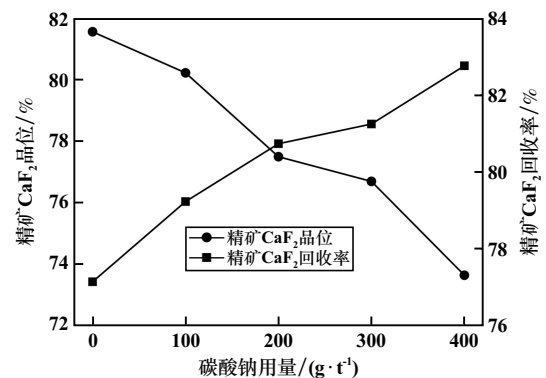


图 8 精选碳酸钠用量试验结果

Fig. 8 Test results of sodium carbonate dosage in cleaning

2.2.3 精选水玻璃用量试验

碳酸钠用量 200 g/t,其他条件不变,进行了精选水玻璃用量试验,结果见图 9。随着水玻璃用量增大,精矿回收率逐渐减小,精矿品位逐渐增大。适宜的精选水玻璃用量为 500 g/t。

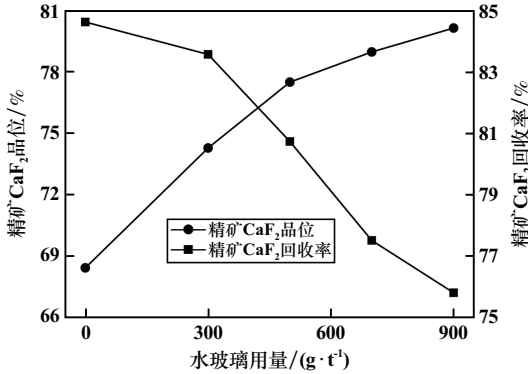


图 9 精选水玻璃用量试验结果

Fig.9 Test results of water glass dosage in cleaning

2.2.4 精选 CYP-01 用量试验

水玻璃用量 500 g/t,其他条件不变,进行了精选捕收剂 CYP-01 用量试验,结果见图 10。增加精选 CYP-01 用量有利于提高精矿回收率,但精矿品位逐渐减小。综合考虑,精选 CYP-01 用量 100 g/t 为宜。

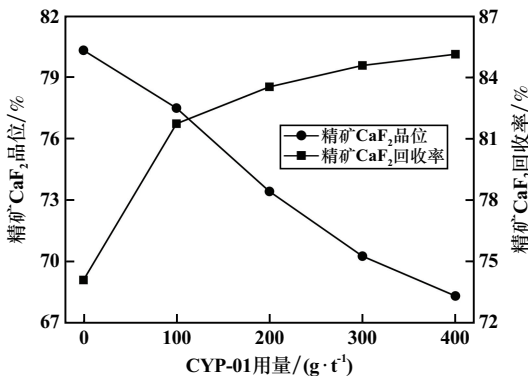


图 10 精选 CYP-01 用量试验结果

Fig.10 Test results of CYP-01 dosage in cleaning

2.2.5 精选方解石抑制剂种类试验

该萤石矿中含有石英、方解石、钙铁硅酸盐等多种脉石矿物,石英、硅酸盐等矿物在碱性环境下能被有效抑制,而方解石在弱酸性环境下能被抑制,因此对脉石矿物采用分段抑制的方式,在精选 4~8 采用盐酸逐步调整矿浆 pH 值由碱性至弱酸性,从而强化对方解石的抑制。

选择合适的抑钙抑制剂是提高萤石精矿品位的关键,水玻璃是常用的方解石抑制剂,对水玻璃进行改性有助于增强其抑制能力和选择性<sup>[10-11]</sup>。以硫酸、硫酸铝和氯化铁分别与水玻璃按质量比 1:3 混合配制成酸

化水玻璃及盐化改性水玻璃,在盐酸用量 500 g/t、抑制剂用量 200 g/t 条件下进行了方解石抑制剂种类对比试验,结果见表 3。结果表明,对水玻璃进行改性有助于提高其抑制能力,以酸化水玻璃为抑制剂时,精矿品位高,回收率比铝盐和铁盐改性水玻璃为抑制剂获得的精矿高。在精选 4~8 段采用酸化水玻璃为抑制剂,通过分段抑制的方式,可有效提高精矿品位。

表 3 方解石抑制剂种类对比试验结果

Table 3 Test results of calcite depressant type

| 抑制剂种类   | 精矿产率/% | 精矿 CaF <sub>2</sub> 品位/% | 精矿回收率/% |
|---------|--------|--------------------------|---------|
| 水玻璃     | 25.21  | 87.57                    | 54.48   |
| 酸化水玻璃   | 23.14  | 93.47                    | 53.63   |
| 铝盐改性水玻璃 | 15.58  | 91.97                    | 35.36   |
| 铁盐改性水玻璃 | 20.64  | 90.44                    | 46.06   |

2.3 闭路试验

在条件试验和开路试验基础上进行了闭路试验,试验流程见 11,结果见表 4。采用粗磨-预选回收-粗精

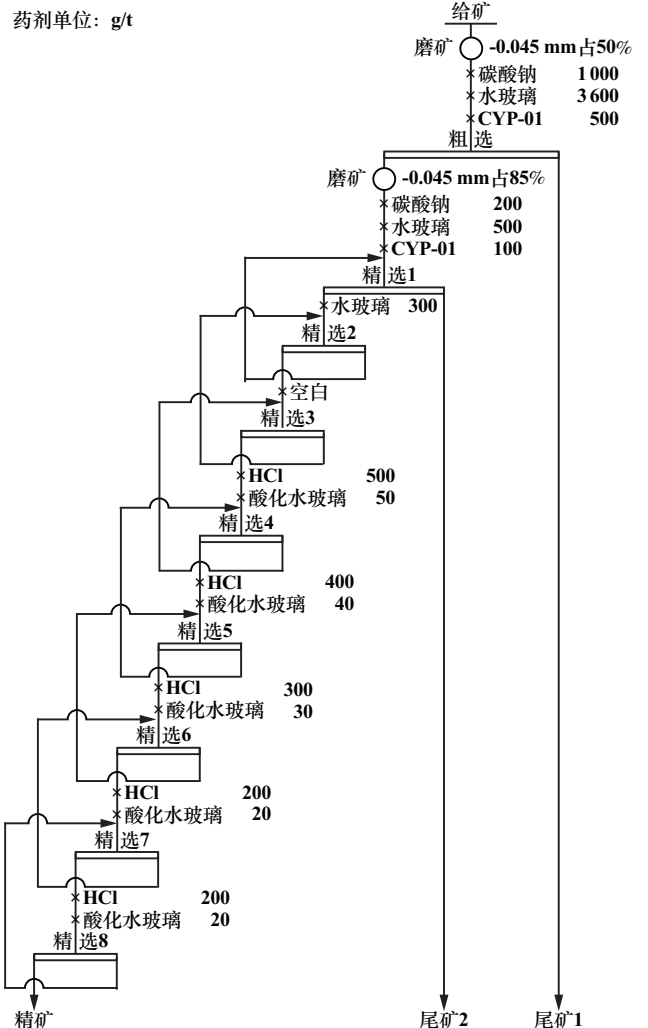


图 11 闭路试验流程

Fig.11 Closed-circuit test flowchart

矿再磨再选的闭路试验流程,在粗磨细度-0.045 mm 粒级占 50%、再磨细度-0.045 mm 粒级占 85%条件下,经一次粗选、八次精选,可获得产率 27.86%、CaF<sub>2</sub> 品位 93.04%、回收率 64.24%的化工级萤石精矿。

表 4 闭路试验结果

Table 4 Closed-circuit test results

| 产品名称 | 产率/%   | CaF <sub>2</sub> 品位/% | CaF <sub>2</sub> 回收率/% |
|------|--------|-----------------------|------------------------|
| 精矿   | 27.86  | 93.04                 | 64.24                  |
| 尾矿 1 | 34.62  | 6.35                  | 5.45                   |
| 尾矿 2 | 37.52  | 32.59                 | 30.31                  |
| 给矿   | 100.00 | 40.35                 | 100.00                 |

### 3 结论

1) 湖南某萤石矿矿物组成复杂,脉石矿物以绢云母、方解石、石英等为主,萤石具有不均匀中细粒嵌布的特点,且形态不规则,粒度较细,与脉石矿物嵌布关系复杂,特别是大部分晶粒内部包裹有微细粒的杂质矿物,属细粒难选萤石矿。

2) 采用粗磨-预选回收-粗精矿再磨再选的试验流程,在粗磨磨矿细度-0.045 mm 粒级占 50%、再磨细度-0.045 mm 粒级占 85%条件下,经一次粗选、八次精选,获得了 CaF<sub>2</sub> 品位 93.04%、回收率 64.24%的化工级萤石产品,实现了该难选萤石资源的高效回收利用。

#### 参考文献(References):

- [1] 黄丽娟,温建,岳丽琴,等. 福建某萤石矿选矿试验研究[J]. 福建冶金, 2024,53(2):11-14.  
HUANG Lijuan, WEN Jian, YUE Liqin, et al. Beneficiation experimental study of a fluorite mine in Fujian[J]. Fujian Metallurgy, 2024,53(2):11-14.
- [2] 冯青舒,缪亚兵,陈文胜,等. 某冶金级萤石精矿提质降杂试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):73-76.  
FENG Qingshu, MIAO Yabing, CHEN Wensheng, et al. Experimental study on improving quality and reducing impurities of metallurgical grade fluorite concentrate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):73-76.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 荆正强,胡瑞彪,张建刚,等. 新疆某难选碳酸盐型萤石矿选矿试验[J]. 现代矿业, 2024,40(5):128-132.  
JING Zhengqiang, HU Ruibiao, ZHANG Jiangan, et al. Beneficiation test of a refractory carbonate fluorite ore in Xinjiang[J]. Modern Mining, 2024,40(5):128-132.
- [6] 刘兴华. 从低品位萤石重晶石共生矿中优先浮选萤石试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(6):54-57.  
LIU Xinghua. Preferential flotation of fluorite from low-grade associated ore of fluorite and barite[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(6):54-57.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 熊浩,刘建,秦晓艳,等. 改性水玻璃抑制剂研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2023,43(5):138-145.  
XIONG Hao, LIU Jian, QIN Xiaoyan, et al. Review on modified water glass inhibitors[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023,43(5):138-145.
- [11] 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.

引用本文:陈湘根,刘欣. 湖南某细粒难选萤石矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(4):100-104.

CHEN Xianggen, LIU Xin. Experimental study on beneficiation of fine-grained refractory fluorite ore in Hunan [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(4):100-104.