

## 黄铁矿低温浮选试验及机理分析\*

刘向<sup>1,2,3</sup>, 李祚毕<sup>1,2,3</sup>, 李展<sup>1,2,3</sup>, 王应东<sup>1,2,3</sup>, 邓政斌<sup>1,2,3,4\*</sup>, 谢贤<sup>4</sup>

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 贵州 贵阳 550025; 3. 非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025; 4. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

**摘要:**我国高寒地区硫化矿资源丰富, 由于冬季和夏季矿浆温差大, 技术经济指标出现明显的季节性波动, 甚至导致冬季停产。基于此, 论文以黄铁矿为研究对象, 通过单矿物浮选试验研究不同低温条件(0~23℃)下黄铁矿的浮选行为, 并检测了 Zeta 电位、黄药的吸附量及溶液的表面张力。结果表明: 黄铁矿回收率随着捕收剂和起泡剂用量的增加而增大; 同等药剂用量下, 随着温度的降低, 黄铁矿回收率大幅下降; 同步添加捕收剂和起泡剂, 可以显著提升黄铁矿回收率; 在强酸性条件下, 黄铁矿可浮性最好, 温度影响较小, 随着 pH 值增大, 黄铁矿回收率下降, 低温具有明显的协同抑制作用; 温度降低, 黄铁矿的 Zeta 电位增大, 零电点向右偏移; 丁黄药在黄铁矿表面的吸附量下降, 溶液的表面张力增大, 不利于黄铁矿浮选。提高矿浆溶液酸度, 或者增加捕收剂和起泡剂用量可有效改善温度对浮选的影响。

**关键词:**黄铁矿; 浮选; 低温; 动电位; 表面张力; 吸附量

**中图分类号:**TD971<sup>+</sup>.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2019)04-0115-06

**DOI:**10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.048

### Study and Mechanism Analysis on the Flotation of Pyrite in Low Temperature

LIU Xiang<sup>1,2,3</sup>, LI Zuobi<sup>1,2,3</sup>, LI Zhan<sup>1,2,3</sup>, WANG Yingdong<sup>1,2,3</sup>, DENG Zhengbin<sup>1,2,3,4\*</sup>, XIE Xian<sup>4</sup>

(1. Mining College, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guiyang 550025, China; 3. Guizhou Key Lab of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resource, Guiyang 550025, China; 4. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Sulfide ore resources are abundant in alpine regions of China. Due to the large different temperature of pulp between winter and summer, the technical and economic indicators show obvious seasonal fluctuations, and even lead to serious shutdown in winter. Based on it, the pyrite is selected as the research object. The flotation behavior of pyrite at different temperatures was studied by single mineral flotation tests, and Zeta potential and surface tension of solution were detected in this paper. The results indicate that the recovery of pyrite increases with the increases of collector and frother. At the same dosage of agentia, the recovery decreases with the decrease of temperature. Simultaneous addition of collector and frother can significantly improve the recovery of pyrite.

\* 收稿日期: 2019-04-02

**基金项目:**省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室开放课题基金(CNMRCUKF1703); 贵州大学博士基金(201652); 贵州大学大学生“SRT计划”项目(贵大SRT字(2016)139号)

**作者简介:**刘向(1995-), 男, 贵州毕节人, 本科生, 主要研究方向为矿产综合利用。

**通信作者:**邓政斌(1986-), 男, 贵州清镇人, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为浮选理论与矿产综合利用。

Pyrite has the best floatability under strong acidic conditions, with little influence of temperature. The flotation recovery decreases with the increase of pH value and low temperature has obvious synergistic inhibitory effect of flotation recovery. The Zeta potential of pyrite increases and the zero electric point shifts to the right with the decrease of temperature, while the adsorption of butyl xanthate on the surface of pyrite decreased, and the surface tension of the solution increased. All of which are not conducive to the flotation of pyrite. The effect of temperature on flotation can be effectively improved by increasing the acidity of pulp solution, or by increasing the addition of collector and frother.

**Key words:** pyrite; flotation; low temperature; Zeta potential; surface tension; adsorption capacity

## 引言

黄铁矿是地壳中分布最广的一种硫化矿物,它的主要成分是二硫化亚铁( $\text{FeS}_2$ ),常呈立方体、五角十二面体等晶形或块状集合体。纯黄铁矿中含有46.67%的铁和53.33%的硫,因此在工业上黄铁矿又称之为硫铁矿<sup>[1]</sup>。对“硫”而言,它是在工业化学生产过程中所需的一种重要原料物质,同时也是一种最基本的化工原料,主要被应用于制造硫酸和硫磺<sup>[2]</sup>。硫的总消耗量的85%以上是供化学工业作为制硫酸的原料,少部分用以制硫磺及其他化合物<sup>[3]</sup>。

黄铁矿常与黄铜矿、铅锌矿、煤等共伴生,是铜、铅、锌精矿中主要杂质矿物<sup>[4]</sup>。其冶炼过程中硫转化为二氧化硫,大部分硫形成硫化氢和硫醇、硫醚等气态有机硫化物。产生酸雨,污染环境,破坏生态平衡<sup>[5]</sup>。随着我国对环保越来越重视,对精矿质量的要求越来越严。因此,需要对矿物中的黄铁矿进行脱除,用的方法是浮选法<sup>[6]</sup>。目前,研究者主要关注浮选新药剂<sup>[7,8]</sup>、粒度<sup>[9]</sup>、晶体结构<sup>[10-12]</sup>、水化层<sup>[13]</sup>、金属离子<sup>[14]</sup>、颗粒间的交互作用<sup>[15]</sup>等对黄铁矿浮选的影响及作用机理,忽视了矿浆温度对浮选的影响。国内外研究中,温度对浮选的影响主要集中在氧化矿的浮选中,如温度影响硫化反应、脂肪酸类捕收剂的溶解,而对硫化矿的浮选影响很少报道。在实际生产中,部分硫化矿选厂在冬季和夏季矿浆温度差别大,技术经济指标出现明显的季节性波动,药剂用量变化幅度较大,更为严重的甚至导致停产,如高寒地区西藏和云南地区很多硫化矿选厂冬季由于温度较低导致停产,造成了巨大的经济损失。由此可见矿浆温度的影响不可忽视,必须着重考虑。目前最常用的解决方式就是加温浮选,矿浆需加温

到一定温度,否则浮选效果很差。但选矿厂矿浆量很大,如果单纯为了调整温度,而将大量矿浆加温,成本较高。因此,研究矿物的低温浮选,找出其低温难浮本质的原因,对于高硫矿物低温高效浮选提质意义重大。

## 1 试验

### 1.1 材料

试验所使用的黄铁矿取自彝良驰宏矿业公司高品位原矿,通过人工筛选、手工破碎、研磨、干筛后得到 $-0.15+0.075\text{ mm}$ 的纯矿物,其化学元素分析见表1,纯矿物中Fe、S的含量分别为46.41%、53.24%,其他元素含量较少。其XRD元素分析见图1,从图中可以看出,杂质峰较少,结合元素分析可以确定黄铁矿的纯度在95.00%以上。试验使用的丁黄药产自株洲浮选药剂有限公司,起泡剂2#油、pH值调整剂盐酸和氢氧化钠均产自天津第三化学试剂厂,试验所用的水为去离子水。

表1 黄铁矿纯矿物化学多元素分析结果  
Table 1 Chemical composition analysis of pyrite

| 元素   | Fe    | S     | Zn    | Pb   | $\text{SiO}_2$ | 其他    |
|------|-------|-------|-------|------|----------------|-------|
| 含量/% | 46.41 | 53.24 | 0.042 | 0.01 | 0.17           | 0.128 |

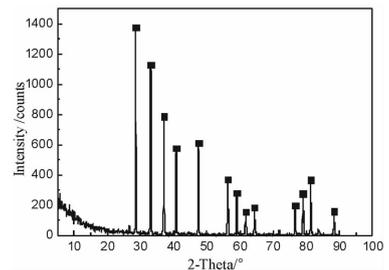


图1 黄铁矿的XRD分析结果

Fig. 1 X-ray diffraction patterns of pyrite

## 1.2 浮选试验

单矿物浮选试验所用浮选机为 40 mL 的 XFG-II 挂槽型浮选机, 主轴搅拌转速固定为 1 950 r/min。每次试验采用 2.0 g 的黄铁矿, 先用超声波清洗 5 min, 然后用 40 mL 去离子水冲入到浮选槽中, 并采用 NaOH 和 HCl 调节矿浆 pH 值, 按要求添加指定药剂并调浆, 其中调浆时间均为 3 min, 浮选时间为 5 min, 浮选结束后将泡沫产品和槽内产品分别过滤、烘干、称重并计算回收率, 其计算公式如下所示<sup>[16]</sup>: 回收率 = 上浮产品质量 / (上浮产品质量 + 未上浮产品质量) × 100%。

## 1.3 Zeta 电位测试

Zeta 电位测试在 beckman coulter 公司生产的 A53878 宽动态电位仪上进行。试验时先取 1.0 g 粒度为 -0.013 mm 的细粒纯矿物, 采用超声波清洗多次。然后将细粒矿物加入到烧杯中, 加入去离子水沉降较粗颗粒后再虹吸至容量瓶中, 如此反复定容成 1 000 mL 备用。每次试验抽取 10 mL 溶液, 调浆至指定条件并采用注射器将含有细粒矿物的上层悬浮液注入到电泳槽中进行 Zeta 电位测试, 每次试验重复 5 次, 取 5 次试验的平均值为该条件下的 Zeta 电位数据。

## 1.4 吸附量检测

丁黄药的吸附量测定使用上海凌光技术有限公司的 7595 型紫外可见分光光度计, 最佳波长  $\lambda$  设置为 290 nm。先制定浓度标准曲线, 每次称取 1 g 矿样, 经超声波清洗、调浆、加药后, 使用离心机固液分离 10 min 后, 取上部清澈溶液测定其吸光度, 重复测量三次, 然后取平均值, 再根据浓度标准曲线计算残余药剂浓度。矿物表面丁黄药吸附量为反应前丁黄药的量减去澄清液中丁黄药的量<sup>[17]</sup>。

## 1.5 表面张力检测

表面张力使用型号为 JK99D 的全自动张力仪测定, 采用白金板法, 铂金片宽度为 24 mm, 触发张力值为 5 mN/m。先将它挂在扭力秤上, 然后转动扭力丝, 使铂金片缓慢上升离开溶液, 再操作控制器将白金板逐渐浸入液体, 当白金板浸入到被测液体后, 白金板周围就会受到液体表面张力的作用, 将白金板尽量地往下拉, 当液体表面张力和重力与所受的浮力达到均衡时, 白金板就会停止向液体内部浸

入, 此时仪器的平衡感应器就会测量浸入深度, 并将它转化为液体的表面张力值。每次试验重复三次, 取三次的平均值作为该条件下的表面张力。

## 2 结果与讨论

### 2.1 捕收剂用量对黄铁矿低温浮选的影响

捕收剂主要作用是增强矿物表面的疏水性。矿浆温度是影响捕收剂作用的重要因素, 通常捕收剂如脂肪酸类捕收剂在低温条件下由于溶解度降低、活性变差, 导致捕收能力及选择性变差, 进而影响到浮选技术指标<sup>[18-20]</sup>。试验在中性条件下, 单一添加捕收剂丁黄药, 在不同温度条件下探讨其用量对黄铁矿回收率的影响。

由图 2 可以看出: 不同温度条件下黄铁矿的回收率规律一致, 回收率随着捕收剂用量的增加而增大, 到一定值时, 回收率趋于平缓; 在相同捕收剂的用量时, 黄铁矿的回收率与温度成正比, 温度越低, 回收率越低, 反之增高; 不同温度条件下, 最佳捕收剂用量不同, 室温 (23 °C), 捕收剂用量 10 mg/L 即可达到最佳回收率, 15 °C 时则需要 20 mg/L, 0 °C 时, 捕收剂最佳用量高达 40 mg/L; 最佳捕收剂用量下的不同温度条件下的最大回收率不同, 室温 (23 °C) 条件下, 最大回收率可达 90% 以上, 随着温度的降低, 最大回收率降低, 0 °C 时, 最大回收率最低, 仅为 69% 左右。

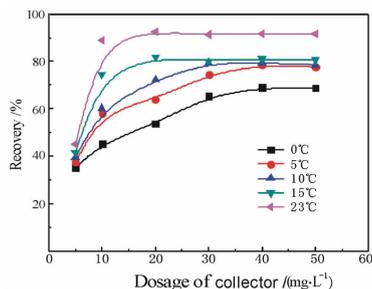


图2 捕收剂用量对黄铁矿回收率影响  
Fig. 2 Effect of different dosage of collector on pyrite floatation recovery

### 2.2 起泡剂用量对黄铁矿低温浮选的影响

温度的变化显著影响起泡剂在固液界面的定向吸附和排列、气液界面的表面张力、泡沫的分散度及稳定性等, 进而对浮选产生重要影响<sup>[21]</sup>。试验在丁黄药用量为 10 mg/L, 以 2#油为起泡剂, 研究起泡剂用量对黄铁矿回收率的影响。

由图 3 可以看出:不同温度条件下黄铁矿的回收率规律一致,回收率随着起泡剂用量的增加而增大,到一定值时,回收率趋于平缓;起泡剂用量增加能增加气泡数量,气泡变得稳定,使表面有一定疏水程度的硫化矿与气泡碰撞和黏附的概率增加,进而回收率增大;在相同起泡剂的用量时,黄铁矿的回收率与温度成正比,温度越低,回收率越低,反之增高;不同温度条件下,最佳起泡剂用量不同,室温 23 ℃,起泡剂用量 5 mg/L 即可达到最佳回收率,0 ℃ 时则需要 10 mg/L;温度的变化显著影响气泡的性质,温度低时,气体扩散导致泡沫衰退;温度高时,泡沫由顶端开始破灭。同时,温度升高,液膜表面黏度降低,排液速度加快,泡沫稳定性下降,进而导致回收率降低<sup>[22]</sup>。

最佳起泡剂用量下的不同温度条件下的最大回收率不同,室温(23 ℃)条件下,最大回收率可达 95% 以上,随着温度的降低,最大回收率降低,0 ℃ 时,最大回收率最低,为 89% 左右。

与单纯的添加捕收剂相比,同时添加起泡剂,黄铁矿的最大上浮显著提升,表明起泡剂与捕收剂有较强的交互作用,可以明显改善浮选环境,从而提高回收率。

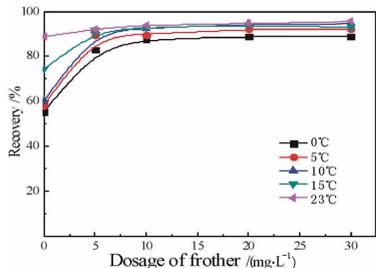


图 3 起泡剂用量对黄铁矿回收率影响  
Fig. 3 Effect of different dosage of frother on pyrite floatation recovery

### 2.3 pH 值对黄铁矿低温浮选的影响

在浮选行为过程中,pH 值是影响矿物表面的电性、亲水性及药剂效能的重要影响因素之一。试验在丁黄药用量为 10 mg/L,2#油用量为 10 mg/L 时,采用 NaOH 和 HCl 调节 pH 值,研究 pH 值对黄铁矿浮选的影响。

由图 4 可以看出:酸性条件下,在较高温度(15 ℃、23 ℃)时,黄铁矿的回收率先增加后降低,在 pH 值 3~6 之间,黄铁矿可很好浮选,其中 pH = 4 左右回收率达到最大值,高达 95% 以上,与 G·布

鲁特<sup>[23]</sup>等的研究结果相一致;随着温度的降低(0 ℃、5 ℃、10 ℃),在整个 pH 值范围内,黄铁矿的回收率呈下降趋势,在 pH = 2 的强酸性条件下回收率最高(93% 左右),主要是由于在酸性条件下,黄铁矿表面会形成疏水聚硫化物使其可浮性得到提高。碱性条件下,黄铁矿的回收率均呈下降趋势,在 pH = 12 时几乎不上浮;在碱性条件下,矿物表面会形成氢氧化合物、亚硫酸盐或硫酸盐等化合物,阻碍矿物与药剂作用,降低可浮性;相同的 pH 值条件下,黄铁矿的回收率随温度降低呈下降的趋势,说明低温和 pH 值对黄铁矿的浮选有协调抑制作用。23 ℃ 时,黄铁矿回收率最高,0 ℃ 时,回收率最低。

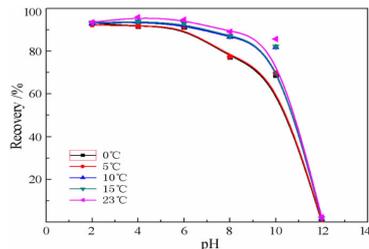


图 4 pH 值对黄铁矿回收率的影响  
Fig. 4 Floatation recovery at different pH

### 2.4 低温对黄铁矿表面 Zeta 电位的影响

Zeta 电位是指带电的胶粒与介质作相对运动时滑移面与介质之间的电势差。根据 pH 值对 Zeta 电位的影响结果,可以确定水悬浮液中的离子与矿物表面相互作用机理。温度对黄铁矿表面 Zeta 电位的影响如图 5 所示。

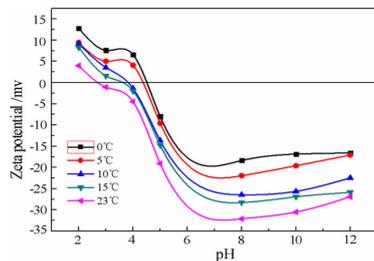


图 5 不同温度与 pH 条件下的 Zeta 电位值  
Fig. 5 Zeta potential at different temperature and pH

由图 5 可知:在酸性条件下,黄铁矿的 Zeta 电位为正值,更有利于阴离子捕收剂黄药的吸附;而在碱性条件下,Zeta 电位均为负值,不利于黄药的吸附;随着温度的变化,黄铁矿的零电点发生了偏移;温度降低,使得水的黏度增加,导电性降低和结构的有序性发生改变,矿浆中的氢离子与矿物表面硫原

子作用变弱<sup>[13]</sup>,黄铁矿表面的负电性增强,因此,零电点向右移动;相同的 pH 值条件下,温度降低,Zeta 电位升高;0 ℃时,Zeta 电位最高,23 ℃时,Zeta 电位最低;随着温度的升高,Zeta 电位负值增大。这是因为带电粒子随温度升高运动速度加快,而 Zeta 电位与粒子运动速度的快慢有关系,因此就表现为随着温度的升高,Zeta 电位的绝对值增大<sup>[24]</sup>。

## 2.5 低温对黄铁矿表面丁黄药吸附量的影响

在浮选行为过程中,捕收剂的吸附量直接影响矿物表面的疏水性差异,是黄铁矿浮选的重要影响因素之一。试验在丁黄药用量为 10 mg/L、pH = 7 的条件下,研究不同作用时间低温对黄铁矿表面丁黄药吸附量的影响。

由图 6 可以看出:丁黄药的吸附量随着作用时间的延长而增大,并且随着作用时间的延长丁黄药的吸附量到达一定值后增加变缓,说明时间越长越有利于黄药的吸附,作用时间过长,矿浆溶液中黄药浓度的逐渐降低以及矿物表面的活性点减少降低黄药的吸附效率;同一时间,温度降低,黄药的吸附量降低,说明低温不利于黄药的吸附,与浮选试验结果一致。

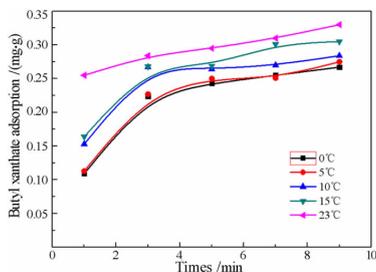


图 6 不同温度条件下的丁黄药在黄铁矿表面的吸附量

Fig. 6 Effect of times on butyl xanthate adsorption on sphalerite surface at different temperature

## 2.6 低温对矿浆溶液表面张力的影响

表面张力是增加单位面积所消耗的功。在实际情况下,表面张力随温度的升高而降低,其原理是温度升高时物质膨胀,分子间距离增大,故而吸引力减弱,表面张力降低。图 7 为低温条件下,无添加药剂,pH 值对纯矿物表面张力的影响。

由图 7 可以看出:从整体来看,随着 pH 值的增加,由于 H<sup>+</sup> 和 OH<sup>-</sup> 添加,氢键作用使得水分子间的吸引力增强,因此,溶液的表面张力先降再增;矿物

表面张力与 pH 值的变化有关,表面张力在强酸或者强碱下都比较大;因此,黄铁矿不易在强酸和强碱条件下浮选,测试结果与浮选试验结果相一致;相同 pH 值条件,温度越低溶液的表面张力越大,越不利于矿物浮选,这也是黄铁矿低温条件回收率较低的原因之一。

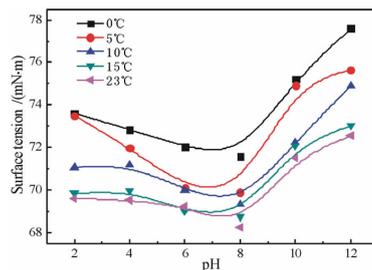


图 7 不同温度与 pH 值条件下的表面张力  
Fig. 7 Surface tension at different temperature and pH

## 3 结论

(1)降低温度使黄铁矿表面的动电位发生改变,并降低了表面黄药的吸附量,同时增大了溶液的表面张力,不利于黄铁矿低温浮选。

(2)增加捕收剂、起泡剂的药剂用量或在强酸性条件下浮选,可以显著提高低温条件下黄铁矿的回收率;而在碱性条件下,降低温度对黄铁矿浮选有明显的协同抑制作用。

(3)低温浮选不仅需要关注矿物表面的润湿性变化,还需要关注矿浆体系参数的变化;建议选择耐低温、捕收能力较强的捕收剂、增加搅拌强度或延长药剂作用时间等,强化药剂于矿物表面的作用;同时挑选耐低温的调整剂,控制矿浆的参数如 pH 值、表面张力等,优化浮选环境。

## 参考文献:

- [1] Prince K C, Matteucci M, Kuepper K, et al. Core - level spectroscopic study of FeO and FeS<sub>2</sub>[J]. Phys. Rev. B, 2005, 71 (8): 5102 - 5103.
- [2] 袁启奇. 我国硫铁矿市场分析[J]. 工程设计与研究, 2013 (1): 38 - 40.
- [3] 黄巧琼. 浅谈黄铁矿浮选现状研究[J]. 化学工程与装备, 2013(1): 151 - 152.
- [4] 刘磊,王双玉,孙晓华,等. 青海某铁铜矿铜、硫综合回收试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2017(6): 52 - 56.
- [5] 赵璐,葛英勇,余俊,等. 内蒙古某磁选铁精矿浮选脱硫试验研究[J]. 矿冶工程, 2018, 38(2): 58 - 60.
- [6] 李辉跃. 广东某铜硫矿铜硫综合回收选矿流程试验研究[J]. 矿冶工程, 2017, 37(6): 66 - 70.
- [7] 吴金鑫. 新型 HP - 1 黄药在硫浮选中的试验研究[J]. 世界

有色金属,2018(9):73-74.

[8] 彭建城,熊道陵,马智敏,等. 有机抑制剂在浮选中抑制黄铁矿的研究进展[J]. 有色金属科学与工程,2012,3(2):61-65.

[9] 薛季玮,姚金,唐远等. 粒度对蓝辉铜矿与黄铁矿浮选分离特性的影响[J]. 金属矿山,2018(8):73-78.

[10] 陈建华. 浮选捕收剂的结构及其作用机理研究[J]. 矿产保护与利用,2017(4):98-106.

[11] 曹育洵,刘文礼,郗朋等. 煤系黄铁矿表面碳原子掺杂浓度对其疏水性影响的量子化学研究[J]. 矿业科学学报,2018,3(2):186-193.

[12] 王瑜,刘建,罗德强,等. 巯基乙酸和巯基乙醇对黄铁矿抑制作用的 DFT 计算[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2018,43(2):39-44.

[13] 陈建华,朱阳戈. 硫化矿物表面水化层结构及其对药剂作用的影响[J]. 矿产保护与利用,2018(3):1-8.

[14] 张德文. 金属离子对铜蓝和黄铁矿浮选行为的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2018(3):92-96.

[15] 于跃先. 煤泥浮选颗粒间相互作用及对浮选影响研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018.

[16] 杨波. 闪锌矿与黄铁矿的交互作用及其对锌硫浮选分离的影响机理[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.

[17] 邓政斌. 载铜、载锆及普通闪锌矿表面的浮选药剂吸附特性与机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.

[18] 徐飞飞,黄建芬,黄国贤. 萤石矿低温浮选高效捕收剂的研究与选矿应用[J]. 世界有色金属,2017(18):261-263.

[19] 任阳光,熊堃. 孔雀石表面丁基黄药吸附和解吸特性研究[J]. 金属矿山,2014(12):112-115.

[20] 徐龙华,田佳,巫侯琴,等. 组合捕收剂在矿物表面的协同效应及其浮选应用综述[J]. 矿产保护与利用,2017(2):107-112.

[21] 谷艳玲. 硫化矿浮选起泡剂性能与作用研究[D]. 长沙:中南大学,2013.

[22] 刘德生,陈小榆. 温度对泡沫稳定性的影响研究[J]. 中国海洋平台,2006(4):19-22.

[23] G·布鲁特,白秀梅,肖力子. 双黄药在黄铁矿浮选中的作用:可溶性、吸附研究、Eh 和 FTIR 测定[J]. 国外金属选矿,2002(12):17-21,43.

[24] 孙振艳. 三元复合驱采出水混凝过程中 Zeta 电位研究[J]. 技术与市场,2016,23(5):93-94,96.

**引用格式:**刘向,李祚毕,李展,等. 黄铁矿低温浮选试验及机理分析[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):115-120.  
 LIU Xiang, LI Zuobi, LI Zhan, et al. Study and mechanism analysis on the flotation of pyrite in low temperature[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):115-120.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)

(上接第 103 页)

[39] Larachi F., Gravel J. P., Grandjean B. P. A., et al. Role of steam, hydrogen and pretreatment in chrysotile gas-solid carbonation: opportunities for precombustion CO<sub>2</sub> capture[J]. International journal of greenhouse gas control, 2012, 6: 69-76.

[40] He R, Jiang W, Jin B, et al. Serpentine light porous granules used for e. g. preparing soilless culture medium, contain serpentine, high viscosity attapulgite clay, foaming agent, expanded perlite and vermiculite, ferrous sulfate and water; 106116502-A[P]. 2016.

[41] Blonska E; Januszek K, Malek S; et al. Effects of serpentinite fertilizer on the chemical properties and enzyme activity of young spruce soils [J]. International agrophysics, 2016, 30: 401-414.

[42] 莫覃盛. 蛇纹石的综合开发利用[J]. 才智,2009,(16):269.

[43] 刘开琪. 我国耐火材料的现状与发展趋势[J]. 新材料产业, 2010(9):43-47.

[44] 朱继存. 蛇纹石的物质成分特征和利用[J]. 石材,2000(12):33-35.

[45] 石能学,李旭俊,段永莉. 云南新平药用蛇纹石矿物学及医疗机理分析[J]. 云南地质,2011,30(1):89-91.

[46] 杨博,张振忠,赵芳霞. 蛇纹石综合利用现状及发展趋势[J]. 材料导报,2010,24(S1):381-384.

**引用格式:**彭祥玉,刘文刚,王本英,等. 蛇纹石综合利用现状与展望[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):99-103,120.  
 PENG Xiangyu, LIU Wengang, WANG Benying, et al. Current situation and prospect of comprehensive utilization of serpentine[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):99-103,120.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)