

doi: 10. 20239/j. issn. 1671-9492. 2025. 01. 008

# 细粒铁尾矿中低品位硫磷资源综合回收试验研究

李建娟<sup>1,2</sup>, 谢海云<sup>1,2,3</sup>, 陈海君<sup>1</sup>, 郭图悦<sup>1</sup>, 冯梦菲<sup>1</sup>, 刘殿文<sup>1,2,3</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093;

2. 西南联合研究生院, 昆明 650092;

3. 云南省战略金属矿产资源绿色分离与富集重点实验室, 昆明 650093)

**摘要:** 河北邯郸某细粒铁尾矿中含有低品位硫铁矿和磷灰石等有用矿物, 具有较高的回收价值。针对含S 1.12%, 含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2.20%的铁尾矿, 在尾矿工艺矿物学研究的基础上, 采用硫磷顺序优先浮选工艺, 考察矿浆pH值、抑制剂、捕收剂种类及用量对铁尾矿中硫、磷浮选回收的影响。试验结果表明, 硫浮选最佳条件为pH=6~7、H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>用量600 g/t、捕收剂丁基黄药和乙基黄药用量各50 g/t, 磷浮选最佳条件为pH=10、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>用量800 g/t、抑制剂水玻璃用量为200 g/t、捕收剂油酸钠用量为750 g/t。经过一粗一扫三精的浮选闭路试验流程, 可以获得S品位41.28%、回收率为88.83%的硫精矿和P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>品位31.11%、回收率78.62%的磷精矿, 实现了该铁尾矿中低品位硫磷矿物的有效分离和高效回收。研究结果为类似细粒铁尾矿中低品位硫、磷资源的综合回收提供了一定借鉴和技术支撑。

**关键词:** 细粒铁尾矿; 黄铁矿; 磷灰石; 硫磷综合利用

中图分类号: TD923; TD97

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2025)01-0075-06

## Experimental Study on Comprehensive Recovery of Low-grade Sulphur and Phosphorus Resources from Fine Iron Tailings

LI Jianjuan<sup>1,2</sup>, XIE Haiyun<sup>1,2,3</sup>, CHEN Haijun<sup>1</sup>, GUO Tuyue<sup>1</sup>, FENG Mengfei<sup>1</sup>, LIU Dianwen<sup>1,2,3</sup>

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology,

Kunming 650093, China;

2. Southwest United Graduate School, Kunming 650092, China;

3. Yunnan Provincial Key Laboratory of Green Separation and Enrichment of Strategic Metal Mineral Resources, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Fine-grained iron ore tailings in Handan, Hebei province contained valuable minerals such as low-grade pyrite and apatite, which had high recovery value. Based on the process mineralogy study of iron tailings containing S 1.12% and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 2.20%, the sequential preferential flotation process of sulfur and phosphorus was adopted to investigate the effects of pH value of pulp, types and dosage of inhibitors and collectors on the flotation recovery of sulfur and phosphorus from iron tailings. The results showed that the optimum conditions for sulfur flotation are as follows: pH=6~7, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> dosage of 600 g/t, collector butyl xanthate and ethyl xanthate dosage of 50 g/t, the optimum conditions for phosphorus flotation are as follows: pH=10, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> dosage of 800 g/t, inhibitor sodium silicate dosage of 200 g/t and collector sodium oleate dosage 750 g/t. A sulfur concentrate with S grade of 41.28% and recovery of 88.83% and a phosphorus concentrate with P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> grade of 31.11% and recovery of 78.62% were obtained by the locked-cycle flotation process of one roughing, one scavenging and three cleanings, which realized the effective separation and efficient recovery of low-grade sulfur and phosphorus minerals in the iron tailings. The research results provided a reference and technical support for the comprehensive recovery of low-grade sulfur and phosphorus

收稿日期: 2024-07-15

基金项目: 云南省重大科技专项项目(202202AG050015); 国家自然科学基金资助项目(52064027)

作者简介: 李建娟(2000—), 女, 甘肃兰州人, 硕士研究生, 主要从事矿物加工工程方面的研究工作。

通信作者: 谢海云(1973—), 女, 甘肃天水人, 博士, 教授, 主要从事矿物加工和湿法冶金的研究工作。

resources in similar fine-grained iron tailings.

**Key words:** fine iron tailings; pyrite; apatite; comprehensive utilization of sulfur and phosphorus

随着矿产资源的不断消耗,尾矿资源的再选和回收已成为矿产行业关注的热点和重点。铁尾矿是铁矿石选出有用组分后剩余的固体废弃物<sup>[1-3]</sup>,其产出量较大,我国每生产1 t精矿即排放2.5~3 t的尾矿<sup>[4]</sup>。铁尾矿中仍然含有多种有价矿物,有较高的回收利用价值<sup>[5-8]</sup>。我国河北邯郸地区有大量铁尾矿,其中含有低品位的硫和磷,分别以黄铁矿和磷灰石的形式存在,有较高的回收价值。目前,上述地区的选厂仅针对铁尾矿中的磷灰石进行了浮选回收,但由于黄铁矿有良好的可浮性,直接浮选磷灰石时部分黄铁矿会与磷灰石一起上浮,导致磷灰石中杂质硫和铁的含量高,造成磷灰石品质下降,销售时扣款严重,极大地影响选厂效益。

本研究以河北邯郸某细粒铁尾矿为研究对象,针对其中的低品位硫磷资源,采用先硫后磷的顺序优先浮选工艺,对尾矿中的有价矿物黄铁矿和磷灰石进行了综合回收<sup>[9-12]</sup>。研究工作对细粒铁尾矿中硫磷资源

的综合利用<sup>[13-14]</sup>具有一定的指导意义。

## 1 试验材料与研究方法

### 1.1 试验矿样

试验所用铁尾矿矿样来自河北邯郸,细粒尾矿中-0.074 mm(-200目)占80%。矿样经室温晾干后进行充分混匀,缩分后分别取出分析样和试验样。对铁尾矿进行了主要化学成分分析和矿物定量分析,重点分析了其中的硫磷含量和矿物组成。分析结果分别见表1、2。

由表1可知,铁尾矿中有价组分为 $P_2O_5$ 、S、Fe,其品位分别为2.20%、1.12%、5.91%,脉石矿物主要是石英、碳酸钙、硅酸盐等。由表2可知,矿样中硫主要以黄铁矿( $FeS_2$ )的形式存在,磷则以磷灰石( $Ca_5(PO_4)_3(OH,F)$ )的形式存在,含量分别为2.10%和5.18%。此外,矿样中石英、白云母、方解石、绿泥石、透辉石及透闪石回收价值较低,可作为脉石矿物处理。

表1 铁尾矿主要化学成分分析结果

Table 1 Results of main chemical composition analysis of the iron tailings

/%

组分	$P_2O_5$	S	Fe	Cu	K	$Al_2O_3$	MgO	CaO	$SiO_2$	Ag <sup>1)</sup>	Au <sup>1)</sup>
含量	2.20	1.12	5.91	0.025	0.12	2.12	2.91	4.12	30.50	1.00	0.05

注:1)单位为g/t。

表2 铁尾矿的矿物定量分析结果

Table 2 Results of mineral quantitative analysis of the iron tailings

/%

矿物名称	磷灰石	方解石	绿泥石	黄铁矿	透辉石
分子式	$Ca_5(PO_4)_3(OH,F)$	$CaCO_3$	$(Mg,Al)_6(Si,Al)_4O_{10}(OH)_8$	$FeS_2$	$CaMgSi_2O_6$
含量	5.18	9.61	5.23	2.10	1.82
矿物名称	白云母	石英	透闪石	其他	合计
分子式	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	$SiO_2$	$NaCa_2(Fe,Mg)_4Al(Si_6Al_2)O_{22}(OH)_2$	—	—
含量	4.52	59.22	9.04	3.28	100.0

### 1.2 试验设备与药剂

试验设备主要有XMQ $\Phi$ 240 $\times$ 80型破碎机、XFD1.5/0.75 L型单槽浮选机、DL-5C型真空过滤机、标准套筛、pH计。

选矿试验中所用的药剂主要有硫酸( $H_2SO_4$ )、碳酸钠( $Na_2CO_3$ )、水玻璃( $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ )、丁基黄药( $C_4H_9CSSNa$ )、乙基黄药( $C_2H_5CSSNa$ )、水玻璃( $Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$ )、氧化石蜡皂( $RCO_2Na$ )和油酸钠( $C_{18}H_{33}NaO_2$ )。

### 1.3 试验方法

对试验用铁尾矿样进行镜下观察和分析,其中的

硫铁矿、磷灰石与脉石颗粒单体解离程度较好,若对尾矿进一步磨矿不仅会增加成本,过磨导致矿浆泥化,增加浮选药剂消耗,降低浮选效率,影响浮选效果,因此,本研究采用铁尾矿直接浮选回收硫和磷。由于黄铁矿通常具有良好的浮选活性,而磷灰石的浮选活性相对较低,先选硫可以减少硫对后续磷浮选过程的影响,因此确定采用硫磷依次优先浮选的工艺流程。

## 2 选矿试验及结果讨论

### 2.1 硫浮选条件试验

硫浮选条件试验采用一粗一扫流程进行,主要考

察矿浆pH值、捕收剂种类及用量对硫浮选指标的影响,试验流程见图1。

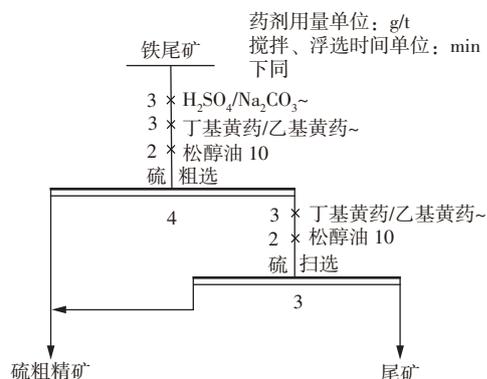


图1 硫浮选条件试验流程

Fig. 1 Flowsheet of sulfur flotation condition tests

### 2.1.1 矿浆pH值对硫浮选指标的影响

矿浆的pH值对黄铁矿的浮选有显著影响。因此,首先开展了矿浆pH值对硫浮选指标的影响试验,使用 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 和 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 作为pH值调整剂,捕收剂采用丁基黄药和乙基黄药组合,用量各50 g/t,起泡剂为松醇油,用量为10 g/t。试验结果见图2。

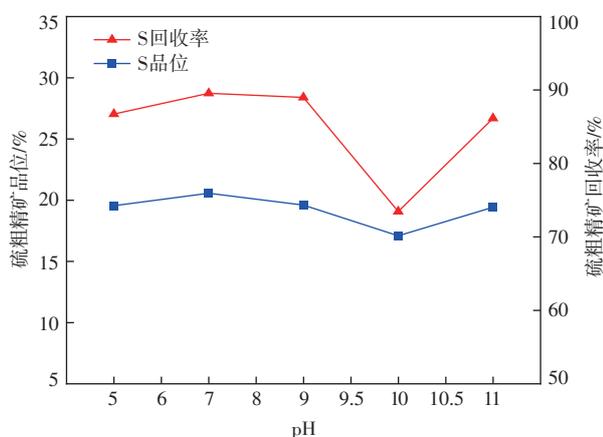


图2 选硫pH条件试验结果

Fig. 2 Results of pH condition tests for sulfur

由图2可知,在酸性环境下,随着pH值升高,硫粗精矿S回收率逐渐上升,当 $\text{pH}=6\sim 7$ 时,硫粗精矿浮选指标最佳,S品位达到20.56%,S回收率达到了89.56%。而在碱性环境中,硫粗精矿S回收率随pH值升高呈下降趋势,当 $\text{pH}=10$ 时,硫粗精矿S品位下降至17.09%,S回收率下降至73.45%,但随着pH升高至11,硫粗精矿的指标迅速上升,S品位达到了19.42%,S回收率达到了86.15%。由图2可知,在 $\text{pH}=7\sim 9$ 的中性~弱碱性条件下硫粗精矿的指标与 $\text{pH}=6\sim 7$ 时的基本相当,而且更有利于后续选磷。因此,后续选磷试验在 $\text{pH}=7\sim 9$ 的条件下进行。

### 2.1.2 捕收剂种类对硫浮选指标的影响

在硫化矿浮选中,黄药是最重要、也是应用最广泛的捕收剂。分别以丁基黄药、乙基黄药和丁基黄药+乙基黄药(1:1)作为硫浮选捕收剂进行对比试验,固定用量为100 g/t。其他药剂条件为: $\text{H}_2\text{SO}_4$ 作为pH调整剂,用量为600 g/t,松醇油作为起泡剂,用量为10 g/t。试验结果见图3。

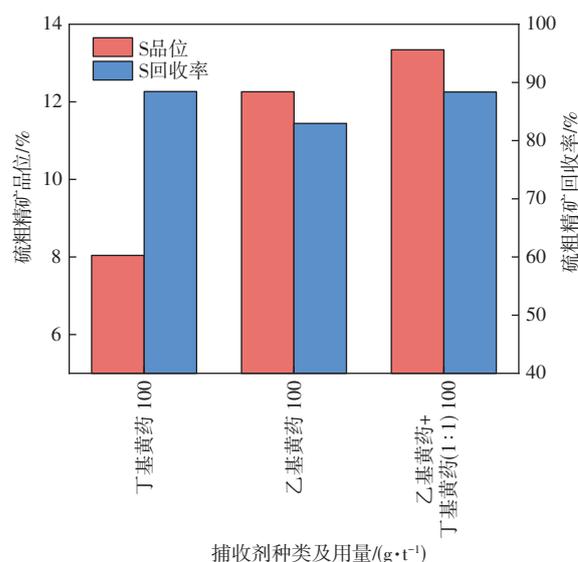


图3 选硫捕收剂种类试验结果

Fig. 3 Results of sulfur collector type tests

由图3可知,丁基黄药与乙基黄药1:1混合后对于硫的浮选效果强于单一黄药,以组合黄药作为捕收剂,可以得到S回收率为88.36%的硫粗精矿,且硫粗精矿中S品位达到了13.34%。因此,选择丁基黄药与乙基黄药1:1的组合作为选硫捕收剂。

### 2.1.3 组合捕收剂用量对硫浮选指标的影响

黄药是常见的硫化矿捕收剂,其用量对于硫化矿的浮选有着较大影响,因此在30%的矿浆浓度条件下开展了组合捕收剂用量试验,试验结果见图4。

由图4可知,硫粗精矿S回收率随黄药用量的增加而提高,当丁基黄药+乙基黄药各添加50 g/t时,硫粗精矿浮选指标最好,硫粗精矿S品位达到13.34%,S回收率达到88.97%。当黄药组合捕收剂用量继续增加时,硫粗精矿S品位逐渐下降,而S回收率增幅很小。综合考虑,组合捕收剂丁基黄药+乙基黄药的合适用量为两者各50 g/t。

## 2.2 磷浮选条件试验

在优化硫浮选条件的基础上,对选硫后铁尾矿进行了磷浮选条件试验,包括矿浆pH值、水玻璃用量、捕收剂种类及用量等。磷浮选条件试验采用一粗一扫流程进行,试验流程见图5。

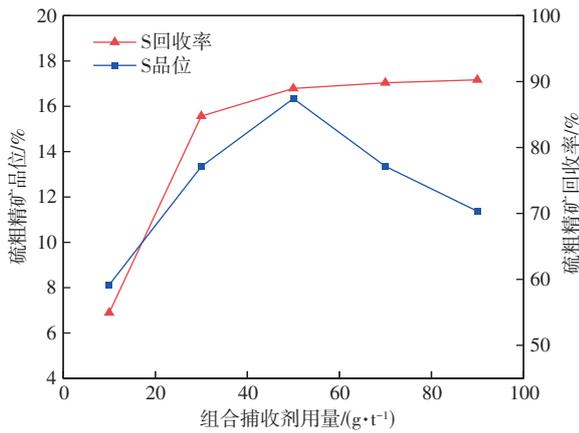


图4 选硫捕收剂用量试验结果

Fig. 4 Results of sulfur collector dosage tests

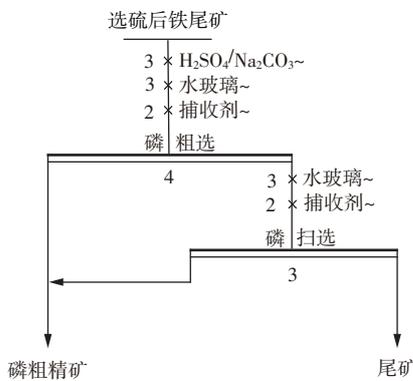


图5 磷浮选条件试验流程

Fig. 5 Flowsheet of phosphorus flotation condition tests

2.2.1 矿浆pH值对磷浮选指标的影响

以500 g/t水玻璃作为抑制剂、400 g/t油酸钠作为捕收剂、硫酸或碳酸钠作为矿浆pH调整剂,考察了矿浆pH值对磷浮选指标的影响,试验结果见图6。

由图6可知,磷粗精矿中P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>品位随矿浆pH值

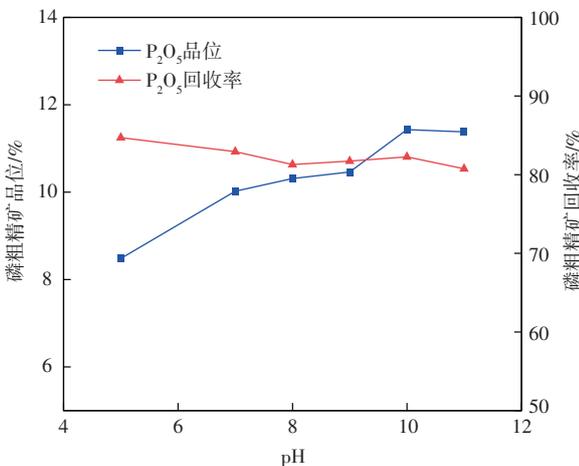


图6 选磷pH条件试验结果

Fig. 6 Results of pH condition tests for phosphorus

的增加逐渐增加,当pH=10时最佳,此时,磷粗精矿P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>品位为11.43%、回收率达到82.26%。综合考虑,后续磷浮选矿浆pH值确定为10,此时Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>用量为800 g/t。

2.2.2 抑制剂用量对磷浮选指标的影响

水玻璃是常见的脉石类矿物的抑制剂,对磷灰石也有一定的抑制作用<sup>[15]</sup>,水玻璃在水溶液中解离成SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和Na<sup>+</sup>,SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>会在磷灰石及脉石矿物表面吸附,形成一层硅酸盐薄膜,从而改变磷灰石及脉石矿物表面的电化学性质,抑制其与捕收剂的作用;此外SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>可与磷灰石中的金属离子(如Ca<sup>2+</sup>)形成稳定的络合物,降低表面活性,从而抑制磷灰石的浮选;水玻璃还能起到分散剂的作用,使矿浆中的脉石矿物颗粒分散开来,防止颗粒聚集,提高选择性浮选的效果。在矿浆浓度30%、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>用量为800 g/t、油酸钠用量为400 g/t的条件下考察了水玻璃用量对磷浮选指标的影响,试验结果见图7。

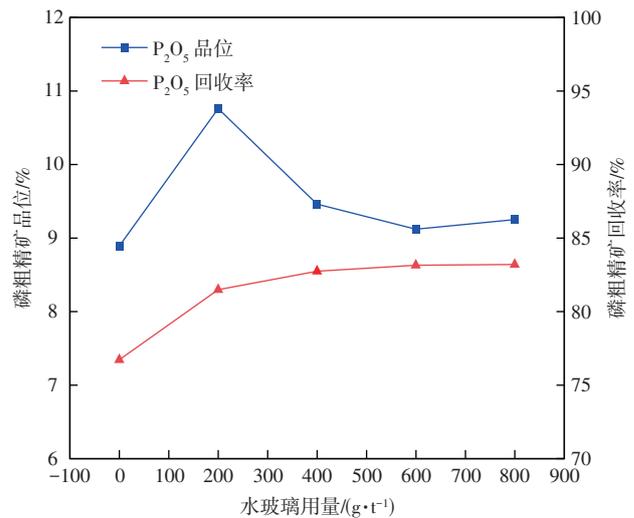


图7 选磷抑制剂用量试验结果

Fig. 7 Results of phosphate inhibitor dosage tests

由图7可知,当水玻璃用量为200 g/t时,磷粗精矿中P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>品位达到最大值10.76%,此时P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>回收率为81.49%。因此,后续试验确定水玻璃用量为200 g/t。

2.2.3 捕收剂种类对磷浮选指标的影响

分别以油酸钠、氧化石蜡皂和MOH作为磷浮选捕收剂进行对比试验,捕收剂用量为500 g/t,Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>作为pH调整剂,用量为800 g/t,水玻璃用量200 g/t,松醇油作为起泡剂,用量为10 g/t。捕收剂种类试验结果见表3。

由表3可知,采用油酸钠作为捕收剂进行浮选,所

表3 选磷捕收剂种类试验结果

Table 3 Results of phosphorus collector type tests

collector type tests		/%		
捕收剂种类	产品名称	产率	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 品位	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 回收率
油酸钠	磷粗精矿	34.55	9.28	80.55
	选磷尾矿	65.45	1.18	19.45
	原矿	100.0	3.98	100.0
氧化石蜡皂	磷粗精矿	34.78	8.37	75.02
	选磷尾矿	65.22	1.49	24.98
	原矿	100.0	3.88	100.0
MOH	磷粗精矿	33.76	9.21	79.73
	选磷尾矿	66.24	1.31	22.32
	原矿	100.0	3.90	100.0

得磷粗精矿 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位和回收率指标相较其他捕收剂更好，磷粗精矿产率为 34.55%，P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位为 9.28%、回收率为 80.55%。因此，后续试验选用油酸钠作为选磷捕收剂。

2.2.4 捕收剂用量对磷浮选指标的影响

与氧化石蜡皂和 MOH 相比，油酸钠对磷灰石具有良好的捕收效果，油酸钠<sup>[16]</sup>在水溶液中电离产生的 C<sub>17</sub>H<sub>33</sub>COO<sup>-</sup>能与磷灰石表面 Ca<sup>2+</sup> 反应，形成稳定的油酸钙络合物，进一步增强磷灰石表面疏水性，实现浮选；C<sub>17</sub>H<sub>33</sub>COO<sup>-</sup>也可通过静电作用吸附在磷灰石表面，从而增强其疏水性。通过这些反应，油酸钠成功地使磷灰石表面形成疏水性薄膜，从而实现有效的捕收，并且油酸钠本身还具有较好的起泡性。油酸钠用量对磷灰石浮选效果的影响试验结果如图 8 所示。

由图 8 可知，随油酸钠用量增加，磷粗精矿中 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位和回收率逐渐提高，当油酸钠用量为 750 g/t 时，磷粗精矿 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 品位上升至 11.01%、回收率达到 81.43%。当油酸钠用量继续增加，磷粗精矿 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 回收率及品位呈下降趋势，因此油酸钠用量以 750 g/t 为宜。

2.3 闭路试验

在条件试验基础上设计了铁尾矿硫磷顺序优先浮选闭路试验，试验流程见图 9，试验结果见表 4。由表 4 可知，采用如图 9 所示的工艺流程和药剂制度处理该铁尾矿，闭路试验可获得 S 品位为 41.28%、回

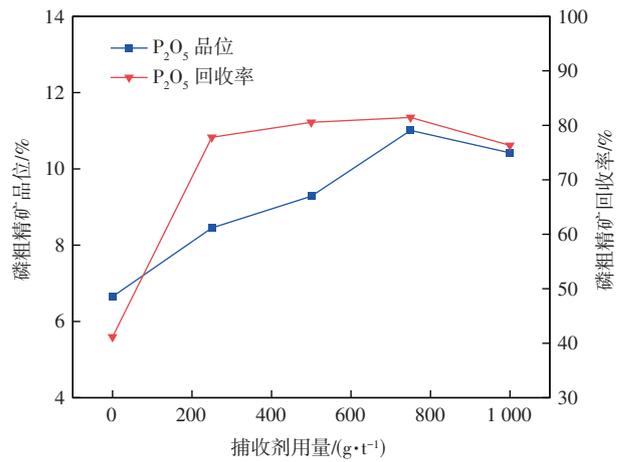


图 8 选磷捕收剂用量试验结果

Fig. 8 Results of phosphorus collector dosage tests

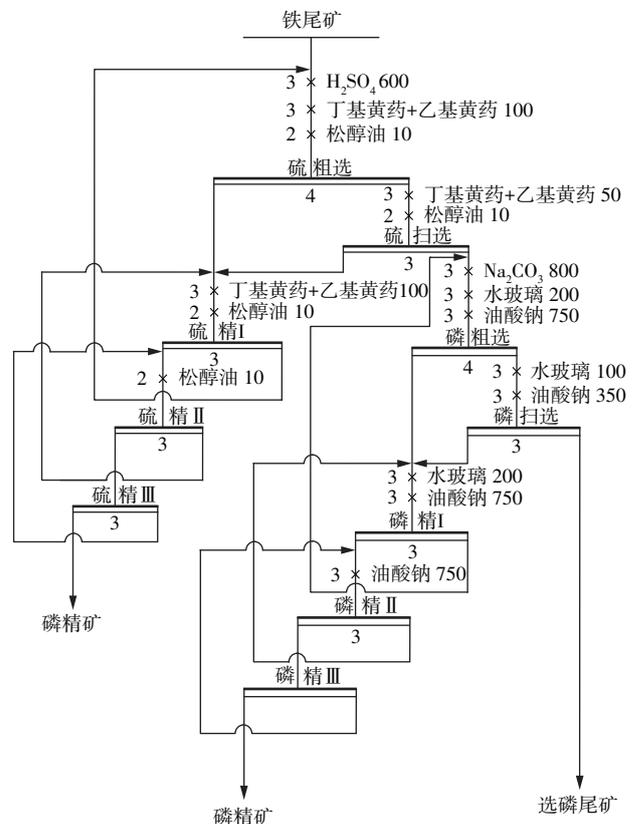


图 9 铁尾矿浮选闭路试验流程

Fig. 9 Flowsheet of the locked-cycle flotation tests on the iron tailings

表 4 铁尾矿浮选闭路试验结果

Table 4 Results of the locked-cycle flotation tests on the iron tailings

产品名称	产率	品位		回收率	
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	S
硫精矿	2.41	0.59	41.28	0.65	88.83
磷精矿	5.56	31.11	0.13	78.62	0.65
选磷后尾矿	92.03	0.50	0.13	20.73	10.52
铁尾矿	100.0	2.20	1.12	100.0	100.0

收率为88.83%的硫精矿和 $P_2O_5$ 品位为31.11%、回收率为78.62%的磷精矿。

### 3 结论

1) 某细粒铁尾矿(-0.074 mm占80%)中S和 $P_2O_5$ 含量分别为1.12%和2.20%,S主要以黄铁矿(2.10%)形式存在, $P_2O_5$ 主要以磷灰石(5.18%)形式存在,脉石组分有石英、碳酸钙、硅酸盐等,其中硫、磷具有综合回收价值。

2) 根据原矿性质,采用硫磷依次优先浮选流程进行选别。通过优化条件试验,最终确定硫浮选最佳条件为 $H_2SO_4$  600 g/t、pH=6~7,组合捕收剂丁基黄药和乙基黄药用量各50 g/t;磷最佳条件为 $Na_2CO_3$ 用量800 g/t、pH=10、抑制剂水玻璃用量200 g/t、捕收剂油酸钠用量750 g/t。

3) 在优化条件试验基础上,分别采用一粗一扫三精、中矿顺序返回的工艺流程顺序优先浮选回收硫磷,闭路试验最终获得S品位为41.28%、回收率为88.83%的硫精矿和 $P_2O_5$ 品位为31.11%、回收率为78.62%的磷精矿,实现了该低品位铁尾矿中硫磷的高效回收利用。

#### 参考文献

- [1] JIANG W, JIANG Y S, LI P Y, et al. Reuse of phosphogypsum and phosphorus ore flotation tailings as adsorbent: the adsorption performance and mechanism of phosphate[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 2023, 178: 111313. DOI: 10.1016/j.jpics.2023.111313.
- [2] 张晋霞,李新邈,牛福生,等. 铁尾矿超细粉体的制备及磨矿动力学试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(5): 73-80.
- ZHANG Jinxia, LI Xinmiao, NIU Fusheng, et al. Study on preparation and grinding kinetics of ultrafine iron tailings[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2023(5): 73-80.
- [3] LI Z Y, WANG J, SHE Z X, et al. Tailings particle size effects on pollution and ecological remediation: a case study of an iron tailings reservoir[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 476: 135024. DOI: 10.1016/J.JHAZMAT.2024.135024.
- [4] 张振国,王月,陈军典,等. 铁尾矿资源化利用现状与发展策略[J]. 科技导报, 2024, 42(2): 90-103.
- ZHANG Zhenguo, WANG Yue, CHEN Jundian, et al. Current situation and countermeasures of iron tailings resource utilization[J]. Science and Technology Review, 2024, 42(2): 90-103.
- [5] LIU S, ZHANG W D, REN Q L, et al. Innovating an amphoteric collector derived from dodecylamine molecular structure: facilitating the selective flotation separation of apatite from quartz and dolomite[J]. Minerals Engineering, 2024, 215: 108819. DOI: 10.1016/J.MINENG.2024.108819.
- [6] 卯松,章铁斌,张覃. 阴离子对磷灰石和白云石表面性质影响的第一性原理研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(5): 32-38.
- MAO Song, ZHANG Tiebin, ZHANG Qin. First-principles study on the effect of anions on the surface properties of apatite and dolomite[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2022(5): 32-38.
- [7] 汪明星,廖传华,曾祥荣,等. 铁尾矿中重金属去除技术研究进展[J]. 矿冶, 2024, 33(1): 86-95.
- WANG Mingxing, LIAO Chuanhua, ZENG Xiangrong, et al. Research progress of heavy metal removal technology in iron tailings[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(1): 86-95.
- [8] YU F, CHEN X, FANG Y, et al. Study on the basic properties of iron tailings powder-desulfurization ash mine filling cementitious material[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2024, 31(1): 436-445.
- [9] 何根幸,郝顺利,王静. 铜陵某铁尾矿中磷的选矿回收试验[J]. 金属矿山, 2013, 42(3): 155-157.
- HE Genxing, HAO Shunli, WANG Jing. Beneficiation tests on phosphorus recovery from tailings of a Tongling iron mine[J]. Metal Mine, 2013, 42(3): 155-157.
- [10] 刘安荣,聂登攀,张覃,等. 贵州某磷尾矿再选试验研究[J]. 金属矿山, 2012, 41(2): 157-158.
- LIU Anrong, NIE Dengpan, ZHANG Qin, et al. Reconcentration study on the tailings of phosphorite in Guizhou[J]. Metal Mine, 2012, 41(2): 157-158.
- [11] 刘兴华,李淑菲,袁致涛,等. 朝阳新华钼矿铁精矿脱硫试验研究[J]. 有色矿冶, 2011, 27(4): 23-26.
- LIU Xinhua, LI Shufei, YUAN Zhitao, et al. Flotation desulfurization of iron concentrate in Chaoyang Xinhua molybdenum mine[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2011, 27(4): 23-26.
- [12] 李俊旺,郭汝民. 河北某铁尾矿选磷试验[J]. 金属矿山, 2013, 42(11): 161-163.
- LI Junwang, GUO Rumin. Beneficiation of phosphorus ore from an iron tailing in Hebei[J]. Metal Mine, 2013, 42(11): 161-163.
- [13] 郭永杰,李江丽,李海兵,等. 磷尾矿工艺矿物学特征与资源化利用可行性分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(7):

COLSURFA. 2023. 132404.

[14] 翁存建, 马鹏飞, 王鹏程, 等. 我国铜硫矿选矿技术研究进展[J]. 有色金属科学与工程, 2014, 5(5): 117-122.  
WENG Cunjian, MA Pengfei, WANG Pengcheng, et al. Research progress of beneficiation technology for China's copper sulfide[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2014, 5(5): 117-122.

[15] 柏少军, 丁湛, 毕云霄, 等. 铜硫浮选分离药剂研究现状与展望[J]. 化工矿物与加工, 2021, 50(12): 1-6, 16.  
BAI Shaojun, DING Zhan, BI Yunxiao, et al. Research status and prospect of flotation reagents for Cu-S separation[J]. Chemical Minerals and Processing, 2021, 50(12): 1-6, 16.

[16] ZOU S, WANG S, MA X, et al. Underlying synergistic collection mechanism of an emerging mixed reagent scheme in chalcopyrite flotation[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 364: 119948. DOI:10.1016/j.molliq.2022.119948.

[17] 晋怀霞, 张淑霞, 沈玉泉. 被井下充填体污染金矿石的活化浮选试验[J]. 金属矿山, 2008, 37(4): 50-52, 63.  
JIN Huaixia, ZHANG Shuxia, SHEN Yuquan. Test on flotation activation of gold ore polluted by underground filler[J]. Metal Mine, 2008, 37(4): 50-52, 63.

[18] 王竹生, 于兴勇, 陈仰胜, 等. 石灰在黄铁矿浮选中的作用[J]. 化工地质, 1981(1): 9-31.  
WANG Zhusheng, YU Xingyong, CHEN Yangsheng, et al. The role of lime in pyrite flotation [J]. Chemical Geology, 1981(1): 9-31.

[19] 蒋文瑞, 涂志红, 周姝, 等. 黄铁矿表面氧化机理及动力学影响因素研究进展[J]. 金属矿山, 2021, 50(3): 88-102.  
JIANG Wenrui, TU Zhihong, ZHOU Shu, et al. A brief overview on the mechanism and kinetic influencing factors of the pyrite surface oxidation[J]. Metal Mine, 2021, 50(3): 88-102.

[20] ZHAN C, CHEN J, LI Y, et al. DFT study of interactions between calcium hydroxyl ions and pyrite, marcasite, pyrrhotite surfaces[J]. Applied Surface Science, 2015, 355: 577-581.

(本文编辑 刘水红)

(上接第 80 页)

30-37.  
GUO Yongjie, LI Jiangli, LI Haibing, et al. Process mineralogy of phosphorus tailings and feasibility analysis of resource utilization[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2024(7): 30-37.

[14] 荣一阳, 叶国华, 亢选雄, 等. 北方某铁尾矿浮磷试验研究[J]. 钢铁钒钛, 2023, 44(5): 111-115.  
RONG Yiyang, YE Guohua, KANG Xuanxiong, et al. Experimental study on phosphorus flotation of an iron tailings in northern China[J]. Iron Steel Vanadium Titanium, 2023, 44(5): 111-115.

[15] ZHANG W D, WANG Z J, TIAN H D, et al. Experimental evidence supporting distinct adsorption configurations of N, N-bis(2-hydroxy-3-chloropropyl) dodecylamine and dodecylamine on apatite surfaces: quartz crystal microbalance and atomic force microscopy studies[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 51: 104681. DOI: 10.1016/J.SURFIN.2024.104681.

[16] FILIPPOVA V I, FILIPPOV O L, LAFHAJ Z, et al. Effect of calcium minerals reactivity on fatty acids adsorption and flotation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2018, 545: 157-166.

(本文编辑 刘水红)