

## 超声波协同高分子絮凝强化镜铁矿尾矿磁选回收研究

程义桓<sup>1</sup>, 杨磊<sup>2</sup>, 王立韬<sup>2</sup>, 王登魁<sup>2</sup>, 王永刚<sup>2</sup>, 熊宸武<sup>1</sup>, 孙均熠<sup>1</sup>, 周文波<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学 资源与环境工程学院,湖北 武汉 430081; 2. 甘肃酒钢集团,甘肃 嘉峪关 735100)

**摘要:**为提升镜铁矿尾矿中铁矿物的回收效率,本研究提出超声波预处理协同高分子絮凝—磁选新工艺。探讨了超声波分散处理时间及聚丙烯酰胺(PAM)、预糊化马铃薯淀粉(PPS)、预糊化木薯淀粉(PCS)三种高分子絮凝剂用量对镜铁矿尾矿分选指标的影响。结合金相显微镜观测与红外光谱(FTIR)分析,揭示了药剂—矿物界面作用的机理。结果表明:三种絮凝剂均能有效提高镜铁矿尾矿中铁矿物的回收,其中PPS效果最好。在最佳试验条件下(超声波分散处理30 s、PPS用量为10 g/t、矿浆pH=10.0、磁场强度为0.5 T),可获得铁品位为42.53%、回收率为63.10%的磁选精矿,与常规高梯度磁选工艺相比,铁回收率提高10.66个百分点。机理研究表明:PPS和PCS主要是通过羟基和羧基官能团与镜铁矿表面发生化学吸附,形成稳定络合物;而PAM与镜铁矿之间主要是通过酰胺基与Fe<sup>3+</sup>的化学配位以及物理架桥作用,其对微细粒铁矿物的选择性低于淀粉类絮凝剂。

**关键词:**微细粒镜铁矿; 超声波分散; 选择性絮凝; 高梯度强磁选; FTIR

中图分类号: TD92; TD951

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)05-0085-09

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.05.082

## Research on ultrasonic synergistic polymer flocculation to enhance magnetic separation and recovery of mirrorite tailings

CHENG Yihuan<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>, WANG Litao<sup>2</sup>, WANG Dengkui<sup>2</sup>, WANG Yonggang<sup>2</sup>,

XIONG Chenwu<sup>1</sup>, SUN Junyi<sup>1</sup>, ZHOU Wenbo<sup>1</sup>

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. Gansu Jiugang Group, Jiayuguan 735100, Gansu, China)

**Abstract:** In order to improve the recovery efficiency of iron minerals in specularite tailings, a new process of ultrasonic pretreatment combined with polymer flocculation and magnetic separation is proposed. The effects of ultrasonic dispersion treatment time and the dosage of polyacrylamide (PAM), pregelatinized potato starch (PPS) and pregelatinized cassava starch (PCS) on the sorting index of specularite tailings are discussed. Combined with metallographic microscopy observation and infrared spectroscopy (FTIR) analysis, the mechanism of the agent-mineral interface is revealed. The results show that all three flocculants could effectively improve the recovery of specularite tailings, and PPS has the best effect. Under the best test conditions (ultrasonic dispersion treatment for 30 s, PPS dosage of 10 g/t, slurry pH = 10.0, magnetic field strength of 0.5 T), magnetic separation concentrate with iron grade of 42.53% and recovery rate of 63.10% can be obtained, and the iron recovery rate is increased by 10.66% compared with the conventional high-gradient magnetic separation process. Mechanistic studies show that PPS and PCS are mainly chemisorbed with the surface of pyroxene through hydroxyl and carboxyl functional groups to form stable complexes. However, the selectivity between PAM and eperolite is mainly through the chemical coordination and physical crosslinking between amide groups and Fe<sup>3+</sup>, and

收稿日期: 2025-04-14; 修回日期: 2025-05-06

基金项目: 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室基金资助项目(2018QN19)。

作者简介: 程义桓(1999—),男,硕士研究生,从事微细粒矿物分选方面的研究。

通信作者: 周文波(1973—),男,副教授,从事微细粒矿物分选方面的研究。

its selectivity for fine-grained iron minerals is lower than that of starch flocculants.

**Key words:** fine-grained specularite; ultrasonic dispersion; selective flocculation; high gradient strong magnetic separation; FTIR

近年来,随着优质铁矿资源的日益枯竭,低品位微细粒铁矿物的高效分选已成为选矿领域的重要课题。镜铁矿作为重要的铁矿物资源,其微细粒级因质量轻、比表面积大、比磁化系数小等特点,在常规分选过程中易发生非选择性团聚、矿泥罩盖及机械夹杂等问题,造成精矿铁品位与回收率的“双低”困境<sup>[1-3]</sup>。在磁选过程中,颗粒所受的磁力主要受颗粒粒度和磁场强度的影响;随磁场强度和粒度的减小,作用在磁性颗粒和非磁性颗粒上的磁力急剧减小,使得微细粒铁矿物的磁选效率低下<sup>[4]</sup>。因此,可以通过提高磁场强度或增大颗粒粒度来提高微细粒铁矿物的回收率。但是对于一些粒度极细的矿物,即使提高磁场强度,其磁力仍然可能不足以克服颗粒间的范德华力和水动力等阻力,导致分选效果不佳。

高分子絮凝分选技术为微细粒矿物富集提供了新思路,其分子链可通过特定官能团与矿物表面发生选择性吸附,可实现目标颗粒的定向团聚,增大颗粒表观尺寸,从而提高其在分选过程中的捕获效率<sup>[5-7]</sup>。李文博等<sup>[8]</sup>通过在聚丙烯酰胺分子链上引入活性基团制备了一种新型改性聚丙烯酰胺-HPM,实验结果表明 HPM 对赤铁矿具有选择性絮凝团聚作用,且在赤铁矿表面存在静电吸附和氢键吸附,而在石英表面不发生吸附作用。程绍凯等<sup>[9]</sup>以东鞍山烧结厂弱磁尾矿为研究对象,以交联玉米淀粉为絮凝剂,通过桥联团聚-强磁选工艺,获得了铁品位为 46.70%,铁回收率为 72.66%的铁精矿,与直接强磁选相比,铁回收率升高了 7.59 个百分点。苏兴国等<sup>[10]</sup>研究了玉米淀粉、改性聚丙烯酰胺以及改性木薯淀粉三种不同絮凝剂对东鞍山微细粒铁矿絮凝-磁选指标的影响,发现与其他两种药剂相比,改性木薯淀粉具有更好的选择性絮凝效果,与常规磁选工艺相比,磁选精矿铁回收率提高了 3.67 个百分点。以上研究结果表明,加入高分子絮凝剂可以有效提高微细粒铁矿物的分选效率和回收率,然而不同类型的高分子絮凝剂因其分子结构、官能团种类

及电荷性质等差异,对微细粒矿物表现出不同的絮凝效果。因此,絮凝剂的选择及其与矿物颗粒间作用机理的研究成为关键。

本文以镜铁矿尾矿为研究对象,结合超声波分散与絮凝-强磁选技术,探究了超声波分散处理时间及聚丙烯酰胺(PAM)、预糊化马铃薯淀粉(PPS)、预糊化木薯淀粉(PCS)用量对镜铁矿尾矿分选指标的影响。通过金相显微镜观察镜铁矿与药剂作用前后的形貌差异,并通过红外光谱检测分析矿物表面官能团变化,系统揭示了不同絮凝剂与镜铁矿和石英之间的作用机理。

## 1 试样性质和研究方法

### 1.1 试样性质

#### 1.1.1 试样化学成分

研究所用试样取自酒钢镜铁矿强磁选尾矿,为经过水力旋流器分级处理后的溢流产品。试样主要化学成分如表 1 所示。

表 1 试样主要化学成分(质量分数)

TFe	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	MgO
2.95	0.80	1.03	0.78	0.07
CaO	MnO	K <sub>2</sub> O	S	P
27.82	31.49	6.18	4.48	3.87

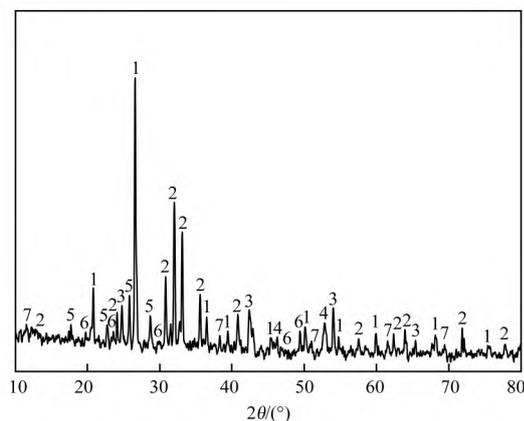
由表 1 可知,试样中  $w(\text{TFe})$  为 27.82%,脉石成分较为复杂,其中  $w(\text{SiO}_2)$  最高,为 31.49%。此外,试验所用的镜铁矿和石英纯矿物来自于安徽某地,其中镜铁矿纯矿物的  $w(\text{TFe})$  为 67.55%,石英纯矿物的  $w(\text{SiO}_2)$  为 98.75%。

#### 1.1.2 试样矿物组成

为进一步了解试样的矿物组成,分别对试样进行了 X 射线衍射分析以及铁物相分析,分析结果分别见图 1 与表 2。

通过图 1 可以看出,试样中的主要铁矿物为镜铁矿、褐铁矿以及菱铁矿,脉石矿物以石英为主,并含云母、重晶石及方解石等。结合表 2 的数据可以发现,试样中的铁元素主要富集于镜铁

矿中, 分布率为 64.42%; 褐铁矿和菱铁矿次之, 分布率分别为 19.66% 和 13.23%; 少量铁分布于磁赤铁矿、黄铁矿以及黄铜矿中。



1—石英; 2—镜铁矿; 3—褐铁矿; 4—菱铁矿;  
5—云母; 6—重晶石; 7—方解石。

图 1 试样 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of the sample

### 1.1.3 试样主要矿物嵌布特征

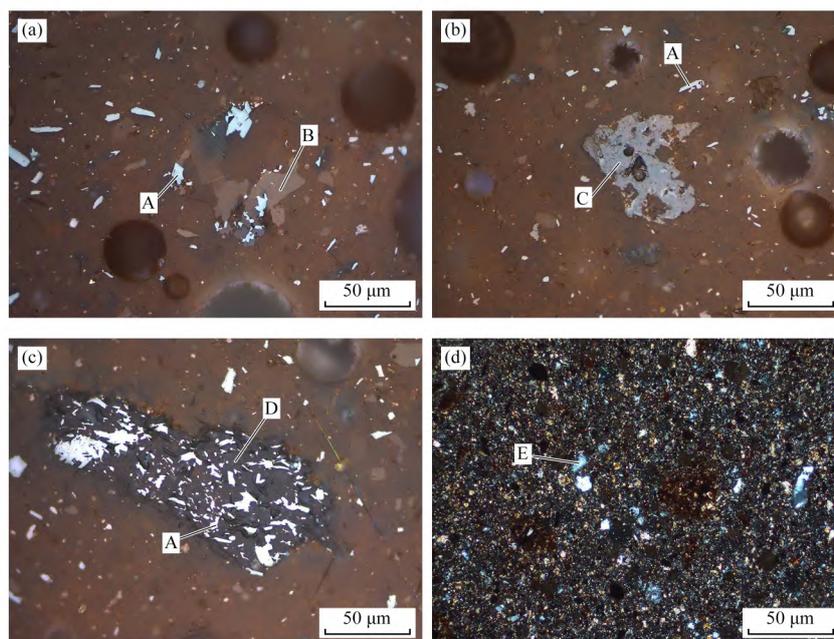
为了解镜铁矿中各矿物嵌布关系以及连生情况, 采用偏反光显微镜对该试样进行观察, 结果如图 2 所示。

表 2 试样铁物相分析结果(质量分数)

Table 2 Results of iron phase analysis of the sample %

铁物相	铁品位	金属分布率
镜铁矿	17.92	64.42
褐铁矿	5.47	19.66
菱铁矿	3.68	13.23
磁赤铁矿	0.31	1.11
黄铁矿	0.25	0.90
黄铜矿	0.19	0.68
总计	27.82	100.00

由图 2 可知, 试样中镜铁矿的粒度相对较细, 其形态多呈自形—半自形板状或细粒状, 大多呈单晶粒零散分布。此外, 镜铁矿与菱铁矿之间存在交生现象 [图 2(a)], 镜铁矿也常见浸染状分布在脉石矿物之中 [图 2(c)], 或者被褐铁矿包裹及交代 [图 2(b)]。褐铁矿呈微细粒集合体团粒状, 其结构较为独特, 可具有胶状、土状、多孔状等多种特征, 颜色多为深灰或褐灰色, 分布较为零散, 可包裹交代镜铁矿和黄铁矿, 或与脉石矿物一同分布。菱铁矿的形态则表现为半自形或不规则细粒集合体状, 颜色为深灰色, 并且表现出显



(a) 镜铁矿分布于菱铁矿晶粒间; (b) 褐铁矿团粒结构; (c) 镜铁矿浸染分布于脉石矿物中; (d) 脉石矿物  
A—镜铁矿; B—菱铁矿; C—褐铁矿; D—方解石; E—石英。

图 2 试样主要矿物嵌布特征

Fig. 2 Main mineral distribution characteristics of the sample

著的非均质性,呈褐红色,少量单晶粒,常与脉石矿物共生,或者与镜铁矿呈连晶分布。石英通常以他形粒状或集合体形式存在[图 2(d)],分布较为广泛,部分与铁矿物或其它脉石矿物共生。

#### 1.1.4 试样的粒度分布

为考察试样的粒度特性,采用湿法筛析对试样中矿物颗粒的粒度组成进行分析,结果如表 3 所示。

表 3 试样粒度筛分分析结果

Table 3 Results of particle size analysis of the sample

项目	>45 mm	(38,45] mm	(15,38] mm	[0,15] mm
占比(质量分数)/%	2.35	3.32	5.83	88.50
铁品位/%	8.88	7.96	5.92	27.01
金属分布率/%	0.75	0.95	1.24	97.06

由表 3 可知,试样中粒度在 [0,15] mm 范围内的颗粒占比高达 88.50%,且铁矿物在细粒级范围内具有较高的富集程度,其中 [0,15] mm 粒级中铁的分布率达到了 97.06%。

#### 1.1.5 高分子絮凝剂溶液的制备

本试验中所用的聚丙烯酰胺(1 000 万分子量)与选矿现场使用一致。预糊化淀粉溶液制备方法:按照质量比为 5:1(0.1 g:0.02 g)的比例称取预糊化淀粉和 NaOH 置于烧杯中,加入 100 mL 去离子水,在 90 °C、200 r/min 的条件下恒温水浴 30 min,直至溶液呈澄清透明状,即得到浓度为 0.1% 的预糊化淀粉溶液。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 絮凝—强磁选试验

研究采用超声波清洗器对矿浆进行分散处理,矿浆浓度为 33%;使用悬臂式电动搅拌器对矿浆进行搅拌,滴加 NaOH 调整矿浆 pH 值为 10.0;随后,向矿浆中加入高分子絮凝剂,调节搅拌器转速为 300 r/min,匀速搅拌 3 min。完成絮凝处理后,将周期式脉冲高梯度磁选机的冲次调节至 170 次/min、排水量为 50 mL/s、磁选背景场强为 0.5 T,以稳定缓慢的流速将矿浆送入磁选机中进行分选作业。絮凝—强磁选试验流程如图 3 所示。

#### 1.2.2 镜铁矿尾矿絮凝前后的微观形貌观察

为探究镜铁矿尾矿及石英纯矿物絮凝前后微

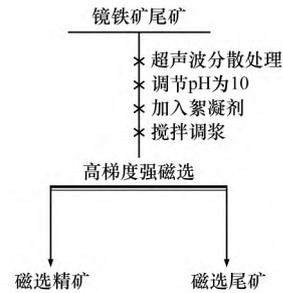


图 3 絮凝—强磁选试验流程

Fig. 3 Flow chart of flocculation-high intensity magnetic separation test

观形貌的变化,试验首先采用塑胶滴管分别取少量未经絮凝处理的原始矿浆和经过絮凝处理后的矿浆,滴在干净的载玻片上,使其均匀分布;再将载玻片置于 40 °C 干燥箱烘干;最后使用金相显微镜配备的图像采集系统,对镜铁矿颗粒与药剂作用前后的形貌进行观察与对比分析。

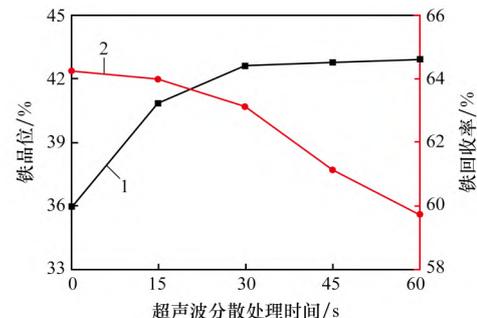
#### 1.2.3 红外光谱分析

将制备好的 <5 μm 的镜铁矿和石英纯矿物置于烧杯中,加入适量去离子水配制成均匀的水悬浮液,调节溶液 pH 值为 10.0,加入药剂后搅拌 3 min,放置沉淀。沉淀完全后,通过真空抽滤进行固液分离,并用相同 pH 值的蒸馏水洗涤矿物两次,将固体置于 40 °C 真空干燥箱中烘干。最后采用傅里叶红外光谱仪测量样品的红外光谱。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 超声波分散处理时间的影响

试验以 PPS 为絮凝剂,在用量为 10 g/t 的条件下,探讨了超声波分散处理时间对镜铁矿尾矿分选指标的影响,结果如图 4 所示。



1—精矿铁品位; 2—铁回收率。

图 4 超声波分散处理时间对镜铁矿尾矿分选指标的影响

Fig. 4 Effect of ultrasonic dispersion treatment time on separation indices of specularite tailings

由图4可知,精矿铁品位随超声波处理时间增加呈上升趋势。当处理时间达60 s时,铁品位由35.88%提升至42.92%,较未处理样品提高7.04个百分点。这主要归因于超声波的机械振动和空化效应,其能够有效剥离矿物表面杂质并促进颗粒分散,提高絮凝剂选择性吸附效率。精矿铁回收率随处理时间增加呈现持续下降,综合考虑精矿品位和回收率,在后续试验中选择超声波处理时间为30 s。

## 2.2 絮凝剂种类及用量的影响

试验采用PAM、PPS、PCS三种絮凝剂,絮凝剂不同用量对精矿铁品位与铁回收率的影响如图5所示。

由图5(a)可知,当PAM用量为15 g/t时,铁回收率达到最大值,此时铁回收率为65.85%,与不添加絮凝剂时相比,铁回收率提高13.41个百分点,但此时精矿铁品位骤降至37.12%。当PAM用量继续增加时,铁回收率呈下降趋势,同时精矿铁品位进一步降低。这一现象说明,PAM对于尾矿中铁矿物的选择性较低,高用量时可能会让絮团中夹带更多脉石矿物,进而影响精矿铁品位。综合精矿铁品位和铁回收率考虑,PAM的最佳用量为10 g/t,此时精矿铁品位为39.05%,铁回收率为63.72%。

由图5(b)和图5(c)可知,PPS和PCS在提高尾矿中铁矿物的回收率方面都表现出了良好的效果。综合精矿的铁品位和铁回收率考虑,二者的最佳用量均为10 g/t,此时,精矿铁品位分别为42.53%和41.65%,铁回收率分别为63.10%和

61.75%。对比显示,PPS在提高精矿铁品位和铁回收率方面略优于PCS。

本研究中,磁选精矿铁品位不高的原因主要与精矿中菱铁矿、褐铁矿以及连生体的存在有关。取最优条件下的磁选精矿进行焙烧试验(焙烧温度为950 ℃,焙烧时间为1 h),经焙烧处理后,精矿的铁品位可提升至51.54%。

## 2.3 高分子絮凝剂作用下的矿物微观形貌分析

采用金相显微镜对超声波分散处理30 s的镜铁矿尾矿与石英纯矿物及二者分别与药剂作用后的微观形貌进行观察,具体结果如图6所示。

对比图6(a)和图6(b)可以发现,超声波分散处理能使矿浆内的颗粒达到高度分散且均匀分布的状态。从图6(c)~(e)可以观察到,与添加PCS和PPC后相比,镜铁矿尾矿与PAM作用后,形成的絮团表观尺寸更大。这是由于PAM具有较高的电荷密度和分子量,其高分子链能够有效地吸附在镜铁矿颗粒表面,并通过架桥作用将多个颗粒连接在一起,形成较大的絮团。但与此同时,絮团内会夹杂较多的脉石矿物,这一现象也很好解释了为何在相同用量下,加入PAM获得的磁选精矿回收率高而铁品位相对较低。添加PPS所形成的絮团尺寸相对于PCS更大一些,说明PPS的絮凝效果要优于PCS,这与之前絮凝-强磁选试验的结果一致。石英与PAM、PPS和PCS作用后的微观形貌如图6(g)、图6(h)以及图6(i)所示,与图6(f)对比可见,石英颗粒仍保持分散状态,未形成絮团。

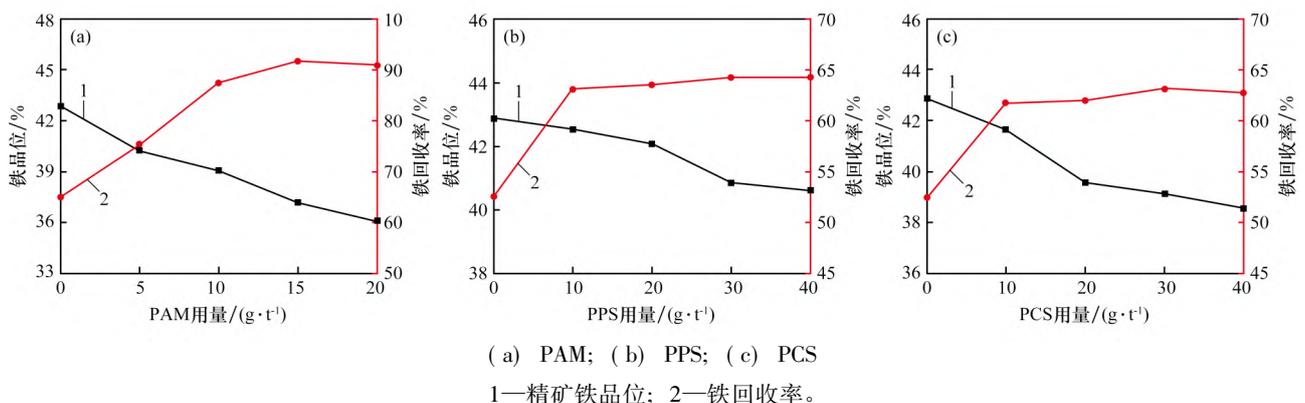
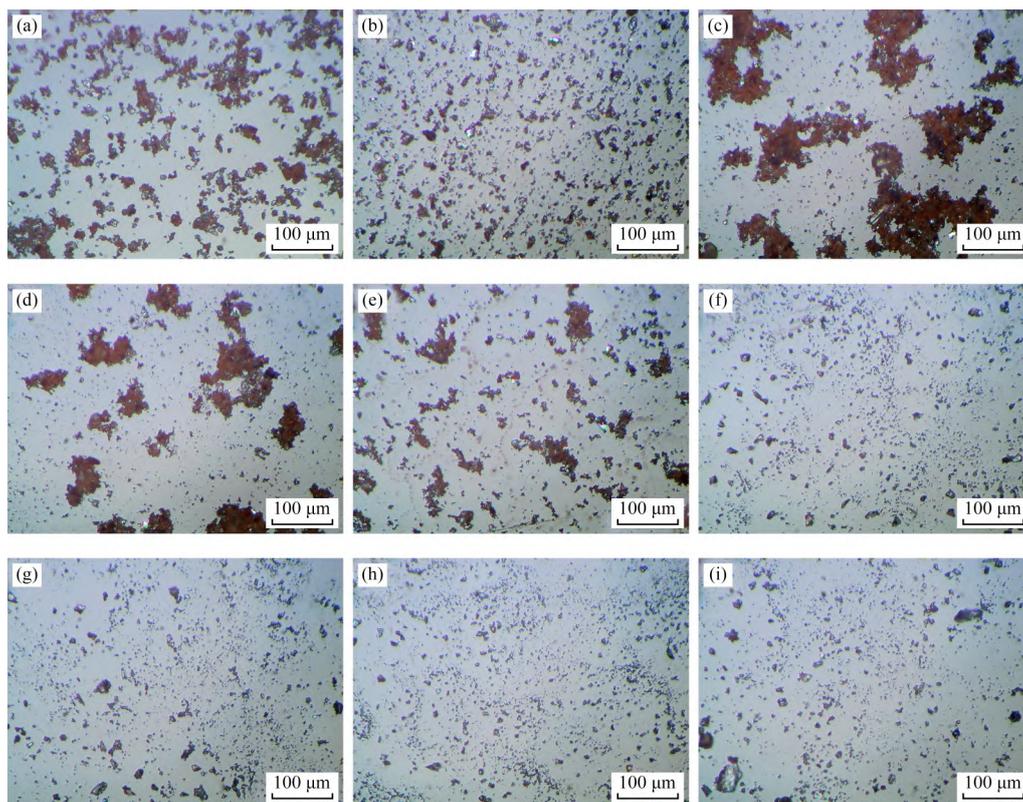


图5 絮凝剂用量对镜铁矿尾矿分选指标的影响

Fig. 5 Effect of flocculant dosage on separation indices of specularite tailings



(a) 镜铁矿尾矿(未处理); (b) 镜铁矿尾矿(分散 30 s 后); (c) 与 PAM 作用后的镜铁矿尾矿;  
(d) 与 PPS 作用后的镜铁矿尾矿; (e) 与 PCS 作用后的镜铁矿尾矿; (f) 石英(未处理);  
(g) 与 PAM 作用后的石英; (h) 与 PPS 作用后的石英; (i) 与 PCS 作用后的石英。

图 6 药剂与镜铁矿尾矿及石英作用后微观形貌变化

Fig. 6 Microscopic morphology changes after the interaction of reagents with specularite tailings and quartz

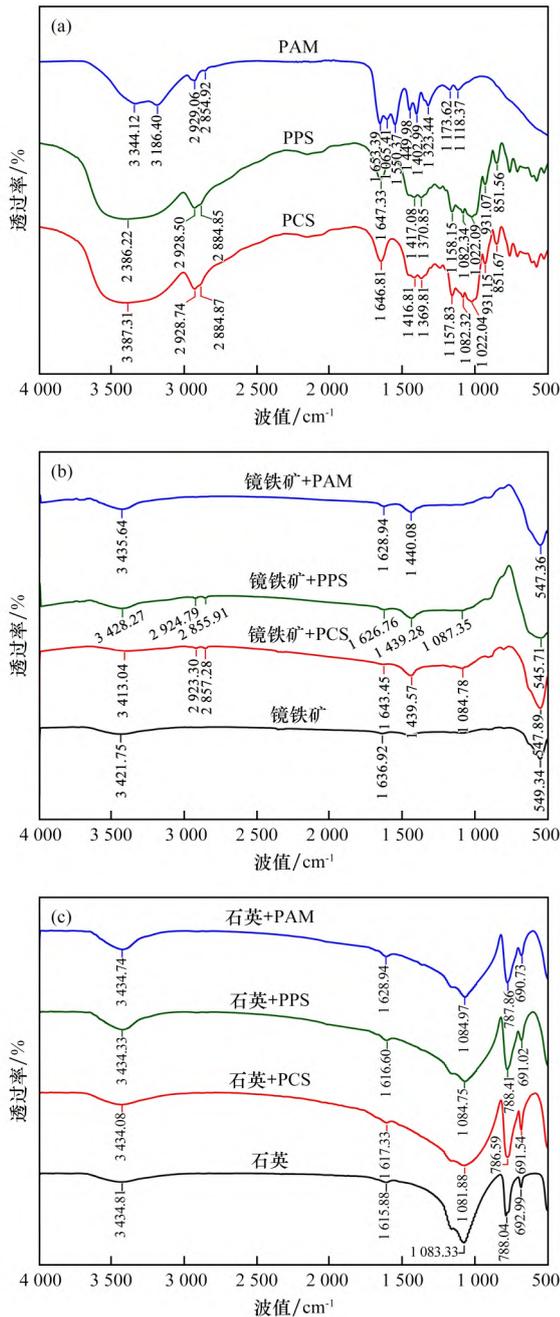
#### 2.4 红外光谱分析

为探究药剂与微细粒镜铁矿之间相互作用的机理, 试验对添加药剂及未添加药剂的镜铁矿和石英纯矿物进行了红外光谱分析, 相关结果如图 7 所示。

由图 7(a) 可知: ① 在 PPS 和 PCS 光谱图中, 位于  $3\ 386.22\ \text{cm}^{-1}$  和  $3\ 387.31\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰归属于羟基( $-\text{OH}$ ) 的伸缩振动。 $2\ 928.50\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 928.74\ \text{cm}^{-1}$  处与  $2\ 884.85\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 884.87\ \text{cm}^{-1}$  处分别对应  $\text{C}-\text{H}$  的反对称和对称伸缩振动<sup>[11]</sup>。 $1\ 647.33\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 646.81\ \text{cm}^{-1}$  为  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动。 $1\ 416\sim 1\ 370\ \text{cm}^{-1}$  区间的吸收峰分别为  $-\text{CH}_2$  和  $-\text{CH}$  弯曲振动。 $1\ 158.15\ \text{cm}^{-1}$  和  $1\ 157.83\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  键的伸缩振动吸收峰。 $931\ \text{cm}^{-1}\sim 852\ \text{cm}^{-1}$  区间的峰归因于  $\alpha-1,4$  糖苷键( $\text{C}-\text{O}-\text{C}$ ) 的振动及  $\text{C}-\text{C}$  骨架振动<sup>[12]</sup>。② 在 PAM 光谱图中, 在  $3\ 344.12\ \text{cm}^{-1}$  和  $3\ 186.40\ \text{cm}^{-1}$  处分别为酰胺基

团( $-\text{CONH}_2$ ) 中  $\text{N}-\text{H}$  的反对称和对称伸缩振动峰。 $2\ 929.06\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 854.92\ \text{cm}^{-1}$  分别对应亚甲基的反对称和对称伸缩振动<sup>[13]</sup>。 $1\ 653.39\ \text{cm}^{-1}$  处强峰源于酰胺 I 带  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动。 $1\ 449.98\ \text{cm}^{-1}$  处与  $-\text{CH}_2-$  基团的弯曲振动相关。

由图 7(b) 可知: ① 镜铁矿纯矿物光谱图中, 在  $3\ 421.75\ \text{cm}^{-1}$  处观察到宽弱的吸收峰, 归属镜铁矿表面羟基或吸附水的  $\text{O}-\text{H}$  伸缩振动。 $1\ 636.92\ \text{cm}^{-1}$  处为吸附水的弯曲振动。 $549.34\ \text{cm}^{-1}$  处的峰是  $\text{Fe}-\text{O}$  键的伸缩振动吸收峰<sup>[14]</sup>。② 镜铁矿与 PAM 作用后, 在  $2\ 927.79\ \text{cm}^{-1}$  和  $2\ 858.90\ \text{cm}^{-1}$  处出现  $-\text{CH}_2-$  伸缩振动峰<sup>[15]</sup>, 表明 PAM 分子链中的疏水基团通过范德华力吸附于镜铁矿表面, 形成物理吸附层。 $1\ 627.95\ \text{cm}^{-1}$  处的峰形变宽, 表明酰胺基的  $\text{C}-\text{O}$  与镜铁矿表面  $\text{Fe}^{3+}$  发生配位作用。镜铁矿的  $\text{Fe}-\text{O}$  的特征峰由  $549.34\ \text{cm}^{-1}$  移至  $547.36\ \text{cm}^{-1}$ , 这可能是由



(a) 药剂; (b) 镜铁矿 + 药剂; (c) 石英 + 药剂

图7 药剂与镜铁矿及石英纯矿物作用前后的红外光谱分析  
Fig. 7 Infrared spectra of specularite and quartz before and after adding different flocculants

于PAM吸附在镜铁矿表面,削弱了Fe—O键的振动<sup>[8]</sup>。此外,在3435.64 cm<sup>-1</sup>处—OH的伸缩振动峰明显增强,说明PAM中的N—H与镜铁矿表面的羟基形成了氢键或配位键。③镜铁矿分别与PCS和PPS作用后,在3413.04 cm<sup>-1</sup>和3428.27 cm<sup>-1</sup>处观察到—OH的伸缩振动峰增强,

表明PCS和PPS中的一OH与Fe形成氢键<sup>[16]</sup>,且PPS与镜铁矿表面的相互作用更强。2855~2925 cm<sup>-1</sup>范围内出现了两个微弱的新峰,对应于C—H的反对称和对称伸缩振动<sup>[17]</sup>。1628.21 cm<sup>-1</sup>和1626.76 cm<sup>-1</sup>处峰的位移证实了羧基与镜铁矿表面的Fe<sup>3+</sup>发生化学吸附<sup>[18]</sup>。547.89 cm<sup>-1</sup>和545.71 cm<sup>-1</sup>处为镜铁矿的特征峰。

由图7(c)可知:在石英的光谱图中,3434.81 cm<sup>-1</sup>处为吸附水的一OH反对称伸缩振动峰。1615.88 cm<sup>-1</sup>处为—OH弯曲振动峰。1083.33 cm<sup>-1</sup>处为Si—O—Si的反对称伸缩振动峰。788.04 cm<sup>-1</sup>和692.99 cm<sup>-1</sup>处为Si—O—Si对称伸缩振动峰<sup>[19]</sup>。加入PAM后,—OH的弯曲振动峰由1615.88 cm<sup>-1</sup>移至1628.94 cm<sup>-1</sup>处,说明PAM与石英之间可能发生了氢键吸附;而加入PPS和PCS后,石英的红外光谱图谱未出现新的吸收峰,且整体谱图未发生显著变化,这说明PPS和PCS对石英表面均无显著吸附作用。

### 3 结论

(1) 该镜铁矿尾矿全铁品位为27.82%,铁矿物主要以镜铁矿(64.42%)为主,其次为褐铁矿(19.66%)和菱铁矿(13.23%),并含少量磁赤铁矿、黄铁矿及黄铜矿。铁矿物在细粒级中富集程度较高,<15 μm粒级中铁的分布率高达97.06%,其脉石矿物主要为石英。

(2) 超声波分散处理30 s后的镜铁矿尾矿絮凝—强磁选效果最佳。在最佳用量下,添加高分子絮凝剂可使镜铁矿尾矿的磁选回收率提高9.31~11.28个百分点。其中,PPS的效果最优,铁回收率较不加药剂时相比可提高10.66个百分点,而铁精矿品位仅下降了0.34个百分点。

(3) PAM可使镜铁矿形成大尺寸、高孔隙率的松散絮团,增加脉石夹带;PPS和PCS使其形成尺寸适中、低孔隙率的致密絮团,减少脉石夹带。

(4) PPS、PCS与镜铁矿表面通过羟基和羧基发生氢键及化学吸附,且不与石英发生吸附。其中,PPS与镜铁矿作用更强;PAM通过物理架桥与弱配位作用团聚镜铁矿,与石英间存在弱氢键作用。

## 参考文献:

- [1] 郑海雷,高起方,龚明辉,等. 某尾矿强磁选预富集产品的工艺矿物学研究及可选性分析[J]. 金属矿山, 2024(10): 92-99.  
ZHENG Hailei, GAO Qifang, GONG Minghui, et al. Mineralogy study and washability analysis of tailings high intensity magnetic separation pre-enrichment products [J]. Metal Mine, 2024(10): 92-99.
- [2] 杨光,周立波,李文博,等. 东鞍山铁矿强化细粒铁矿物回收新技术研究[J]. 金属矿山, 2021(7): 102-109.  
YANG Guang, ZHOU Libo, LI Wenbo, et al. Research on new technology of enhanced separation recovery of fine-grained iron minerals in donganshan iron mine [J]. Metal Mine, 2021(7): 102-109.
- [3] 袁晨光,黄自力,刘楚玉,等. 酒钢镜铁矿尾矿中铁矿物再回收试验研究[J]. 烧结球团, 2023, 48(1): 98-105.  
YUAN Chenguang, HUANG Zili, LIU Chuyu, et al. Experimental research on recovery of iron minerals from specularite tailings in JISCO [J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(1): 98-105.
- [4] ZHENG X Y, CHENG W W, CHENG J R, et al. Enhancing the separation of refractory weakly magnetic minerals with magnetic fluid in high gradient magnetic separation: Conversion of competing capture to mechanical entrainment [J]. Separation and Purification Technology, 2024, 335: 126273.
- [5] 郭图悦,谢海云,晋艳玲,等. 微细粒矿物选择性絮凝理论与技术进展[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(3): 27-37.  
GUO Tuyue, XIE Haiyun, JIN Yanling, et al. Advances in theory and technology of selective flocculation of fine-grained minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(3): 27-37.
- [6] 吴宇,张英,李小康,等. 微细粒矿物絮凝浮选研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2024, 44(3): 16-26.  
WU Yu, ZHANG Ying, LI Xiaokang, et al. Advancements in studying the flocculation flotation of fine minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2024, 44(3): 16-26.
- [7] 牛福生,张晓亮,张晋霞,等. 淀粉对赤铁矿的絮凝特性及作用机理研究[J]. 矿冶工程, 2016, 36(6): 30-34.  
NIU Fusheng, ZHANG Xiaoliang, ZHANG Jinxia, et al. Influence of starch on flocculation characteristics and mechanism of hematite [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2016, 36(6): 30-34.
- [8] 李文博,周立波,韩跃新,等. 改性聚丙烯酰胺对赤铁矿强磁选的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40(7): 1002-1008.  
LI Wenbo, ZHOU Libo, HAN Yuexin, et al. Effect of modified polyacrylamide on high intensity magnetic separation of hematite [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2019, 40(7): 1002-1008.
- [9] 程绍凯,李文博,周立波,等. 东鞍山弱磁性铁矿桥联团聚—强磁选技术研究[J]. 金属矿山, 2021(4): 90-95.  
CHENG Shaokai, LI Wenbo, ZHOU Libo, et al. Study on the technology of bridging flocculation followed by high-intensity magnetic separation for dong'anshan low intensity magnetic iron ore [J]. Metal Mine, 2021(4): 90-95.
- [10] 苏兴国,周立波,李文博,等. 东鞍山微细粒铁矿选择性絮凝—强磁选技术研究[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2): 129-136.  
SU Xingguo, ZHOU Libo, LI Wenbo, et al. Study on selective flocculation-high gradient high intensity magnetic separation technology in donganshan iron ore [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41(2): 129-136.
- [11] RAMMAK T, BOONSUK P, KAEWTATIP K. Mechanical and barrier properties of starch blend films enhanced with Kaolin for application in food packaging [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 192: 1013-1020.
- [12] LEWANDOWICZ G, ŚSORAL-SMIETANA M. Starch modification by iterated syneresis [J]. Carbohydrate Polymers, 2004, 56(4): 403-413.
- [13] 陈和生,邵景昌. 聚丙烯酰胺的红外光谱分析[J]. 分析仪器, 2011(3): 50-54.  
CHEN Hesheng, SHAO Jingchang. Analysis of polyacrylamide by infrared spectroscopy [J]. Analytical Instrumentation, 2011(3): 50-54.
- [14] LI W B, CHENG S K, ZHOU L B, et al. Enhanced iron recovery from magnetic separation of ultrafine specularite

- through polymer-bridging flocculation: A study of flocculation performance and mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2023, 308: 122882.
- [15] HAN W J, ZHU Y M, LIU J, et al. A novel depressant HPAM of the hematite in reverse cationic flotation of iron ore [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 641: 128547.
- [16] 张爽, 李文博, 程绍凯, 等. 淀粉及其改性产品对东鞍山细粒赤铁矿聚团磁选的影响 [J]. 金属矿山, 2024 (3): 83 - 88.  
ZHANG Shuang, LI Wenbo, CHENG Shaokai, et al. Effect of starch and its modified products on agglomeration and magnetic separation of fine-grained hematite in Donganshan [J]. Metal Mine, 2024 (3): 83 - 88.
- [17] LI W B, ZHOU L B, HAN Y X, et al. Effect of carboxymethyl starch on fine-grained hematite recovery by high-intensity magnetic separation: Experimental investigation and theoretical analysis [J]. Powder Technology, 2019, 343: 270 - 278.
- [18] ZHOU L B, HAN Y X, LI W B, et al. Study on polymer-bridging flocculation performance of ultrafine specular hematite ore and its high gradient magnetic separation behavior: Description of floc microstructure and flocculation mechanism [J]. Separation and Purification Technology, 2021, 276: 119304.
- [19] CHENG K, WU X Q, TANG H H, et al. The flotation of fine hematite by selective flocculation using sodium polyacrylate [J]. Minerals Engineering, 2022, 176: 107273.
- 
- (上接第 67 页)
- LI Yang, LI Boquan, ZHANG Xiliang, et al. Mathematical modeling and numerical simulation of pellet drying process [J]. Sintering and Pelletizing, 2018, 43(4): 33 - 39.
- [4] 王琳. 链算机中氧化球团温度场有限元分析研究 [J]. 矿业工程, 2015, 13(1): 52 - 55.  
WANG Lin. Finite element analysis of temperature field of oxidized pellets in travelling grate [J]. Mining Engineering, 2015, 13(1): 52 - 55.
- [5] 冯军胜. 烧结矿余热回收竖罐内气固传热过程及其应用研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2017.  
FENG Junsheng. Gas solid heat transfer process and application research in vertical tank for sinter waste heat recovery [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [6] 孙红星, 刘东昆, 高宝威, 等. 关于链算机焙烧温度场优化控制仿真研究 [J]. 计算机仿真, 2016, 33(9): 350 - 353.  
SUN Hongxing, LIU Dongkun, GAO Baowei, et al. Simulation of optimal control of chain grate's temperature field [J]. Computer Simulation, 2016, 33(9): 350 - 353.
- [7] 储太山. 基于过程模拟和多目标评价的氧化球团链算机优化计算 [J]. 烧结球团, 2015, 40(4): 24 - 27.  
CHU Taishan. Optimized computation of oxidized pellet traveling grate based on a combination of process simulation and multi-criterion evaluation [J]. Sintering and Pelletizing, 2015, 40(4): 24 - 27.
- [8] 王祎, 范晓慧, 陈许玲. 铁氧化球团链算机漏风状态的软测量模型 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(3): 671 - 676.  
WANG Yi, FAN Xiaohui, CHEN Xuling. Soft sensing model of air leak status in grate during iron ore oxide pellet production [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(3): 671 - 676.