

## 六偏磷酸钠在硫化铜镍矿浮选中的分散机理

龙 涛, 冯其明, 卢毅屏

(中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

**摘 要:** 通过浮选实验、沉降实验、Zeta 电位测试、红外光谱测试和显微镜下观测考察六偏磷酸钠在硫化铜镍矿浮选中的作用, 研究六偏磷酸钠的分散作用机理。人工混合矿实验结果表明: 镍黄铁矿易与蛇纹石发生异相凝聚, 降低镍黄铁矿的浮选回收率; 六偏磷酸钠能提高人工混合矿的分散性, 实现镍黄铁矿与蛇纹石的浮选分离。硫化铜镍矿实际矿石浮选结果表明: 六偏磷酸钠能较好地分散矿浆, 当原矿镍品位为 0.33% 时, 通过两次粗选就能得到合格的镍精矿产品, 镍总回收率为 80.27%。作用机理研究表明: 六偏磷酸钠通过化学吸附以及溶出蛇纹石表面的镁离子两种方式调整蛇纹石的表面电性, 进而分散镍黄铁矿与蛇纹石。

**关键词:** 六偏磷酸钠; 硫化铜镍矿; 蛇纹石; 分散; 浮选

中图分类号: TD923

文献标志码: A

## Dispersive mechanism of sodium hexametaphosphate on flotation of copper-nickel sulphide

LONG Tao, FENG Qi-ming, LU Yi-ping

(School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Through flotation tests, sedimentation experiments, zeta potential measurements, infrared spectroscopic analysis and observation under microscope, the effect of sodium hexametaphosphate (SHMP) on the flotation of copper-nickel sulphide was investigated, and the dispersive mechanism of sodium hexametaphosphate was studied. The results of tests on artificial mixed mineral show that the hetero-coagulation between pentlandite and serpentine decreases the flotation recovery of pentlandite, the sodium hexametaphosphate can fulfil the flotation separation of pentlandite and serpentine by promoting the dispersion of artificial mixed mineral. The flotation results of copper-nickel sulphide ores indicate that sodium hexametaphosphate can disperse pulp effectively. The qualified nickel concentrate products can be obtained by two roughing with total nickel recovery of 80.27%. The mechanisms demonstrate that the sodium hexametaphosphate adjusts the surface potential of serpentine through chemical adsorption and dissolving magnesium ions from serpentine surface, and then disperses pentlandite and serpentine.

**Key words:** sodium hexametaphosphate; copper-nickel sulphide; serpentine; dispersion; flotation

目前, 镍冶金工业的原料主要来自硫化铜镍矿石<sup>[1-2]</sup>, 对这类矿石一般采用浮选方法进行选矿富集, 而矿石中蛇纹石等含镁硅酸盐脉石矿物对浮选有很大的负面影响<sup>[3-4]</sup>。蛇纹石的硬度较低, 在解离过程中易泥化罩盖在有用硫化矿物表面<sup>[5-6]</sup>, 进而降低铜镍等有

价金属的浮选回收率; 蛇纹石还易随浮选泡沫进入铜镍精矿<sup>[7]</sup>, 增加精矿中 MgO 含量, 不利于后续冶炼工艺。因此, 研究浮选药剂对蛇纹石等含镁脉石的浮选抑制, 减少其对硫化铜镍矿浮选的不利影响, 对合理利用铜镍资源具有重要的意义。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2007CB613602)

收稿日期: 2011-04-14; 修订日期: 2011-07-28

通信作者: 冯其明, 教授, 博士; 电话: 0731-88836817; E-mail: qmfeng@126.com

六偏磷酸钠是常见的浮选调整剂,广泛应用于金属硫化矿的浮选<sup>[8-9]</sup>。六偏磷酸钠是一种高相对分子质量的聚合物( $\text{NaPO}_3$ )<sub>n</sub>,其平均相对分子质量为12 000~18 000,链中的 $\text{PO}_3$ 单元可达200个<sup>[10]</sup>。六偏磷酸钠对 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{Fe}^{2+}$ 等金属离子具有较强的络合作用,可将金属离子转化为可溶性的稳定络合物<sup>[11]</sup>。六偏磷酸钠常用于硫化铜镍矿的浮选,作为蛇纹石等脉石矿物的分散剂与抑制剂。夏启斌等<sup>[12]</sup>认为六偏磷酸钠能吸附在蛇纹石表面,提高颗粒间静电排斥作用能和位阻排斥作用能,从而分散蛇纹石。王德燕和戈保梁<sup>[13]</sup>认为六偏磷酸钠能提高蛇纹石表面的亲水性,从而使蛇纹石得到抑制。

已有文献报道大多针对六偏磷酸钠在浮选中的应用,而对于六偏磷酸钠在硫化铜镍矿中作用机理的认识不够深入。事实上,六偏磷酸钠作为聚合磷酸盐的代表,能够通过选择性地作用于矿物表面<sup>[14]</sup>,使目的矿物与脉石矿物有效分散,进而实现矿石中各类矿物的浮选分离。本文作者通过人工混合矿浮选实验、实际矿石浮选实验、沉降实验、Zeta电位测试、红外光谱测试和显微镜下观测,考察六偏磷酸钠在硫化铜镍矿浮选中的作用,研究其分散作用机理,进而指导实际矿石的浮选,为进一步研究硫化铜镍矿的浮选提供理论与技术参考。

## 1 实验

### 1.1 矿物样品与试剂

人工混合矿实验所用蛇纹石样品取自江苏东海,镍黄铁矿样品取自甘肃金川。蛇纹石块矿经破碎手选后用瓷球磨、搅拌磨磨细,得到蛇纹石单矿物样品;金川特富矿经破碎手选后用瓷球磨磨细,经磁选后筛分得到镍黄铁矿单矿物样品。两种单矿物样品经X射线衍射分析和化学分析,其纯度均达90%以上。表1所列两种单矿物样品的粒度组成。

表1 样品的粒度

Table 1 Sizes of samples

| Sample      | $d_{10}/\mu\text{m}$ | $d_{50}/\mu\text{m}$ | $d_{90}/\mu\text{m}$ |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Serpentine  | 1.65                 | 3.94                 | 13.62                |
| Pentlandite | 6.83                 | 43.27                | 121.36               |

人工混合矿实验所用盐酸、氢氧化钠、六偏磷酸钠(SHMP)为分析纯试剂,戊基黄原酸钾(PAX)和甲基

异丁基甲醇(MIBC)为化学纯试剂,实验用水为蒸馏水。

实际矿石浮选实验所用硫化铜镍矿取自新疆哈密,实验所用药剂碳酸钠、六偏磷酸钠、丁基黄药(BX)、羧甲基纤维素(CMC)和乙硫氨酸(Z-200)均为工业品,实验用水为生产用水。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 浮选实验

人工混合矿浮选实验采用40 mL XFG型挂槽式浮选机。每次实验称取人工混合矿样品2 g(人工混合矿按照实验条件以一定比例配成,总质量为2 g),置于浮选槽内,加入一定浓度浮选药剂并搅拌5 min,经精密pH计测定pH值后,浮选刮泡5 min,浮选过程采取手工刮泡。将所得的泡沫产品与槽内产品烘干、称取质量后,计算产率,浮选产品经化学分析后计算镍黄铁矿的浮选回收率。

硫化铜镍矿实际矿石浮选采用3 L XFD型单槽式浮选机。每次实验称取1 kg实际矿石进行浮选,所得的精矿、中矿和尾矿产品经烘干、称取质量后,计算产率,同时送化学分析并计算铜镍的回收率。

#### 1.2.2 沉降实验

采用浊度来表征人工混合矿的分散状态。称取混合矿1 g,加入一定浓度六偏磷酸钠溶液并搅拌5 min,再放入100 mL沉降筒沉降3 min,抽取上层悬浊液20 mL,放入试样瓶中,采用WGZ-3(3A)型散射光浊度仪测量浊度。浊度较大时,表示沉降体系上层悬浊液中矿物颗粒数量较多,矿浆处于分散状态;反之,当浊度较小时,代表上层悬浊液中矿物颗粒数量较少,矿浆处于聚集状态。

采用沉降速率来表征实际矿石矿浆的分散性。按照浮选实验的药剂条件处理矿石,将得到的矿浆倒入沉降筒中,总沉降高度为250 mm,记录不同时间的沉降高度,得到沉降时间与沉降高度的关系,拟合出矿浆的沉降速率。沉降速率越小,表示矿浆的分散性越好;反之,沉降速率越大,表示矿浆的分散性越差。

#### 1.2.3 Zeta电位测试

采用Coulter Delsa440sx Zeta电位分析仪进行Zeta电位测试。将单矿物样品细磨至粒径小于2  $\mu\text{m}$ 后,用高精度天平称取30 mg样品,放入烧杯中并加入50 mL水,添加相关浮选药剂并搅拌5 min,然后放入样品池中进行Zeta电位测定,每个实验条件测量3次后取平均值。实验所用电解质为1 mmol/L的 $\text{KNO}_3$ 溶液。

### 1.2.4 红外光谱测试

称取细磨至粒径小于  $2\ \mu\text{m}$  的蛇纹石单矿物样品 2 g, 加入一定浓度的六偏磷酸钠溶液, 充分搅拌后, 静置一段时间, 待矿物完全沉降后, 用吸管吸出上层清液, 然后用蒸馏水充分洗涤矿物, 固液分离后自然晾干, 采用 Nicolet FTIR-740 型傅立叶变换红外光谱仪进行红外光谱检测。

### 1.2.5 显微镜下观测实验

称取 2 g 人工混合矿样品, 加入一定浓度的六偏磷酸钠溶液并搅拌 5 min, 在搅拌状态下用针管移取少量矿浆滴在载玻片上, 将载玻片置于 Olympus CX31 型透射光显微镜下观察矿物的分散状态, 并通过与显微镜相联的摄像头获取观测到的电子图像。

### 1.2.6 蛇纹石表面 $\text{Mg}^{2+}$ 溶出量测定

称取 1 g 蛇纹石单矿物样品, 按照实验条件加入一定浓度的六偏磷酸钠溶液, 搅拌 10 min 后离心出上清液。将上清液进行化学分析, 得到溶液中的  $\text{Mg}^{2+}$  浓度, 并计算蛇纹石表面  $\text{Mg}^{2+}$  的溶出量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 六偏磷酸钠在镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离中的分散作用

本文作者采用人工混合矿悬浊液的浊度来表征镍黄铁矿与蛇纹石的分散状态, 浊度越大, 说明分散性越好, 反之, 则分散性越差。图 1 所示为六偏磷酸钠对人工混合矿浊度的影响。比较图 1 中曲线 b 与 c 可知, 人工混合矿的浊度比蛇纹石单矿物的浊度小, 镍黄铁矿与蛇纹石发生异相凝聚, 尤其在碱性条件下异

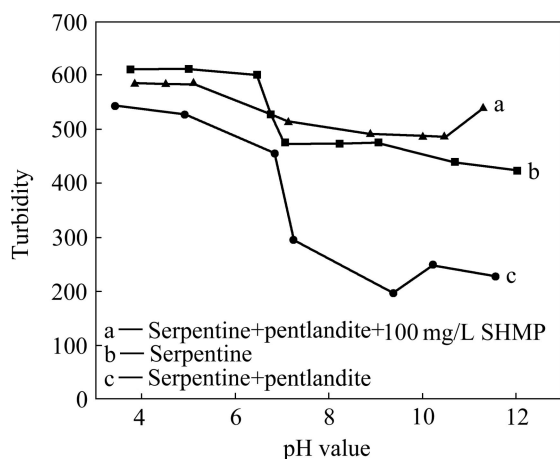


图 1 六偏磷酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石分散性的影响

Fig. 1 Effect of SHMP on dispersion of pentlandite and serpentine

相凝聚更显著。硫化铜镍矿的浮选一般在弱碱性 pH 条件下进行, 此时蛇纹石易与硫化矿发生异相凝聚, 进而影响铜镍的浮选回收。由图 1(a)与(c)可知, 加入 100 mg/L 六偏磷酸钠后, 人工混合矿浊度显著升高, 分散性变好。

为了更直观地反映六偏磷酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石的分散效果, 对人工混合矿矿浆进行显微镜下观测实验。图 2 所示为 pH=9 时人工混合矿矿浆的显微照片。黑色大颗粒为镍黄铁矿, 浅色小颗粒为蛇纹石。由图 2 可知, 不添加六偏磷酸钠时, 蛇纹石颗粒聚集在一起, 并与镍黄铁矿发生异相凝聚; 添加六偏磷酸钠后, 蛇纹石颗粒分散开来, 颗粒间异相凝聚得到改善, 矿浆的分散性变好。

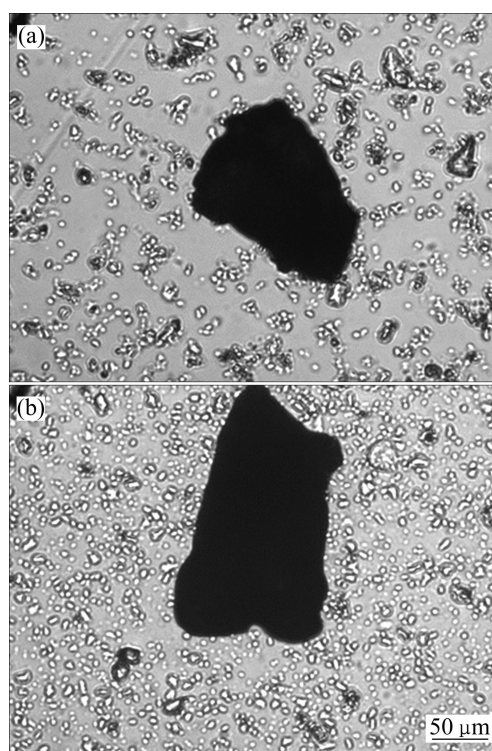


图 2 pH=9 时六偏磷酸钠作用前后人工混合矿矿浆的显微照片

Fig. 2 Microphotographs of pentlandite and serpentine in aqueous solution in absence and presence of SHMP at pH=9: (a) Without reagent; (b)  $\rho(\text{SHMP})=100\ \text{mg/L}$

图 3 所示为六偏磷酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石人工混合矿浮选的影响, 选择戊基钾黄药(PAX)作为镍黄铁矿的捕收剂, MIBC 为起泡剂。由图 3 可知, pH 值为 9 时镍黄铁矿单矿物的可浮性很好, 浮选回收率可达到 90%以上; 随着混合矿中蛇纹石比例的升高, 镍黄铁矿的浮选回收率迅速下降; 加入六偏磷酸钠后, 随着混合矿中蛇纹石比例的升高, 镍黄铁矿的浮选回

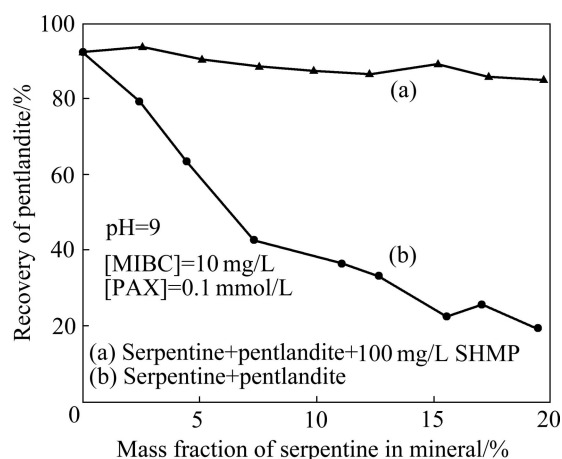


图3 六偏磷酸钠对人工混合矿浮选的影响

Fig. 3 Effect of SHMP on flotation of artificial mixed minerals

收率变化不大, 均能较好地浮选回收。结合前文的沉降实验可知, 镍黄铁矿与蛇纹石易发生异相凝聚, 蛇纹石的存在显著降低了镍黄铁矿的浮选回收率; 六偏磷酸钠能提高混合矿的分散性, 改善蛇纹石对镍黄铁矿的浮选。

## 2.2 低品位硫化铜镍矿实际矿石浮选

为考察六偏磷酸钠对实际矿石浮选的作用, 进行了新疆哈密低品位硫化铜镍矿的浮选实验。图4所示为实际矿石浮选实验流程图。采用棒磨将原矿磨至粒度 $<74\ \mu\text{m}$ 为70%(质量分数), 进行两次粗选和三次扫选, 得到高品位镍精矿1和低品位镍精矿2。浮选实验结果如表2所列。由实验结果可知, 添加六偏磷酸钠后, 总精矿的镍回收率从73.84%提高到80.27%, 铜回收率从76.03%提高到80.70%。而且铜镍矿的浮

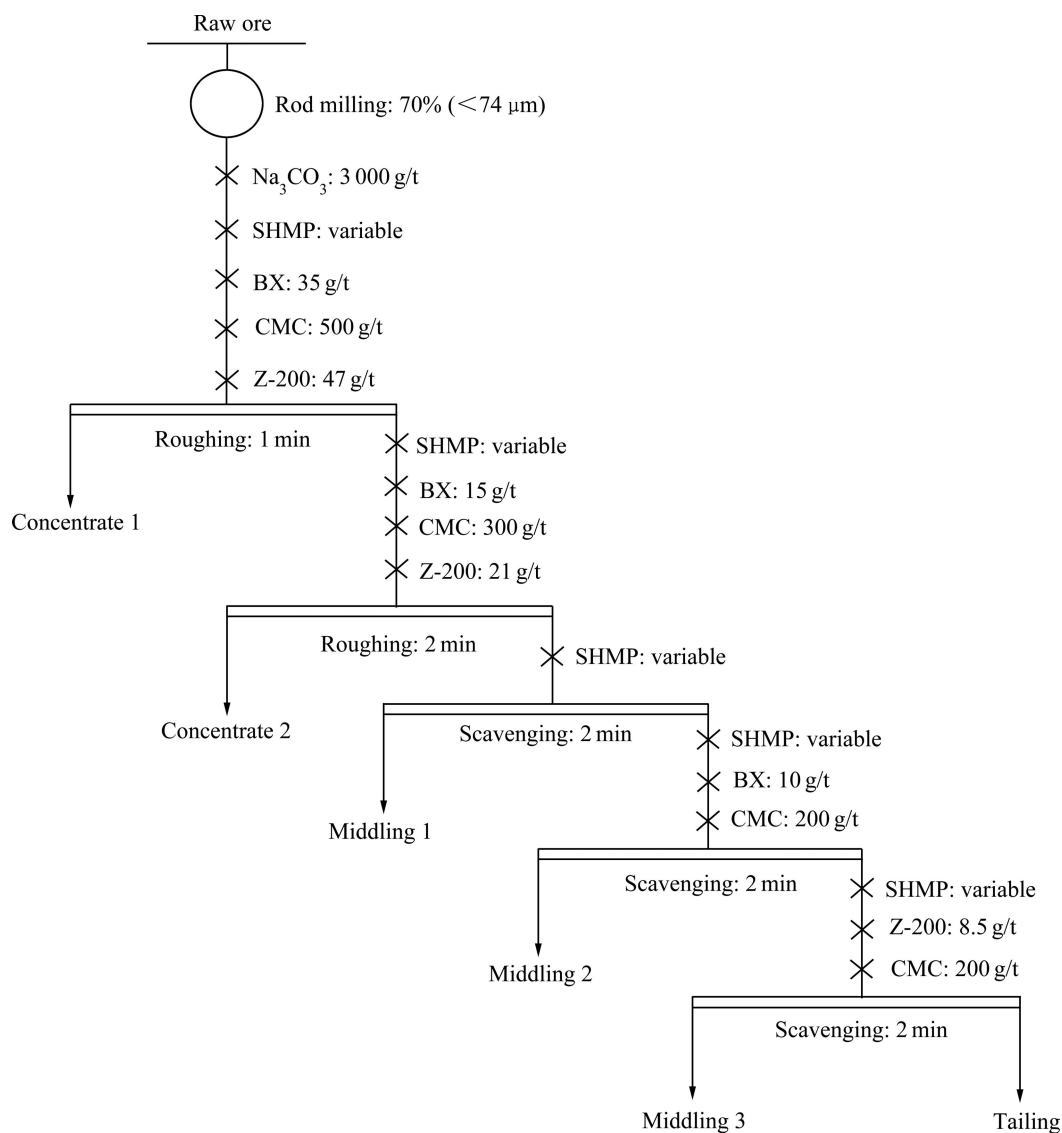


图4 哈密低品位硫化铜镍矿浮选实验流程图

Fig. 4 Flotation flow sheet for Kami low grade copper-nickel sulphide ore

表 2 哈密低品位硫化铜镍矿浮选实验结果

Table 2 Flotation results of Kami low grade copper-nickel sulphide

| Number | Dosage of SHMP/(g·t <sup>-1</sup> ) | Product       | Yield/% | Grade/% |       | Recovery rate/% |        |
|--------|-------------------------------------|---------------|---------|---------|-------|-----------------|--------|
|        |                                     |               |         | Ni      | Cu    | Ni              | Cu     |
| 1      | 0                                   | Concentrate 1 | 4.86    | 3.141   | 0.910 | 46.54           | 36.25  |
|        | 0                                   | Concentrate 2 | 6.48    | 1.382   | 0.749 | 27.30           | 39.78  |
|        |                                     | Summation     | 11.34   |         |       | 73.84           | 76.03  |
|        | 0                                   | Middling 1    | 3.56    | 0.563   | 0.206 | 6.11            | 6.01   |
|        | 0                                   | Middling 2    | 3.23    | 0.370   | 0.138 | 3.64            | 3.65   |
|        | 0                                   | Middling 3    | 2.39    | 0.270   | 0.112 | 1.97            | 2.19   |
|        |                                     | Tailing       | 79.48   | 0.059   | 0.018 | 14.44           | 12.11  |
|        |                                     | Total         | 100.00  | 0.328   | 0.122 | 100.00          | 100.00 |
| 2      | 500                                 | Concentrate 1 | 3.19    | 6.430   | 2.843 | 62.92           | 68.19  |
|        | 150                                 | Concentrate 2 | 4.57    | 1.238   | 0.364 | 17.35           | 12.51  |
|        |                                     | Summation     | 7.76    |         |       | 80.27           | 80.70  |
|        | 100                                 | Middling 1    | 3.13    | 0.496   | 0.138 | 4.76            | 3.25   |
|        | 100                                 | Middling 2    | 2.05    | 0.336   | 0.112 | 2.11            | 1.73   |
|        | 100                                 | Middling 3    | 1.95    | 0.239   | 0.086 | 1.43            | 1.26   |
|        |                                     | Tailing       | 85.11   | 0.044   | 0.021 | 11.42           | 13.07  |
|        |                                     | Total         | 100.00  | 0.326   | 0.133 | 100.00          | 100.00 |

选速率得到较大提高, 第一次粗选精矿镍回收率从 46.54% 提高到 62.92%, 铜回收率从 36.25% 提高到 68.19%。还可以看出, 铜镍金属选矿富集比增加了, 高品位精矿镍品位从 3.141% 提高到 6.430%, 铜品位从 0.910% 提高到 2.843%; 尾矿镍品位也显著下降, 从 0.059% 下降到 0.044%, 尾矿镍分布率由 14.44% 下降到 11.42%。

图 5 所示为六偏磷酸钠对哈密硫化铜镍矿石的分散作用, 采用沉降速率表征矿浆的分散性。由图 5 可以看出, 加入六偏磷酸钠后, 矿浆的沉降速率降低。对曲线进行拟合后可知, 沉降速率从 6.67 mm/min 降低到 4.44 mm/min, 矿浆的分散性变好。说明六偏磷酸钠能较好地分散矿浆, 实现哈密低品位硫化铜镍矿的有效浮选分离。

2.3 六偏磷酸钠对蛇纹石的分散作用机理

蛇纹石属于 TO 型层状镁硅酸盐矿物, 晶体结构由镁氧八面体和硅氧四面体组成。蛇纹石解离时, 镁氧八面体层破裂<sup>[15]</sup>, 外羟基断裂进入水溶液中, 表面暴露出大量的 Mg—O 键, 表现出较强的正电性。图 6 所示为六偏磷酸钠对蛇纹石与镍黄铁矿 Zeta 电位的影响。由图 6 可知, 蛇纹石的等电点 pH 为 10, 在

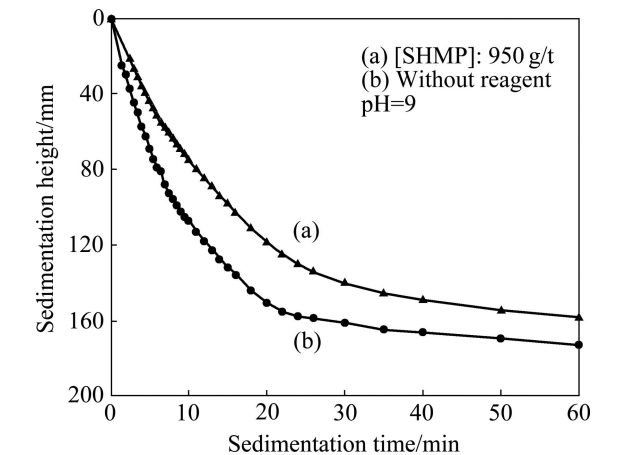


图 5 六偏磷酸钠对哈密低品位硫化铜镍矿的分散作用  
Fig. 5 Effect of SHMP on dispersion of Kami low grade copper-nickel sulphide

pH<10 的范围内, 表面带正电荷; 而镍黄铁矿在 pH 值为 2~12 的范围内, 均荷负电; 在硫化铜镍矿浮选的弱碱性矿浆中, 蛇纹石易与镍黄铁矿发生异相凝聚, 影响镍黄铁矿的浮选。加入六偏磷酸钠后, 镍黄铁矿的 Zeta 电位变化不明显, 而蛇纹石的 Zeta 电位变负, 蛇纹石表面荷上较强的负电。此时镍黄铁矿与蛇纹石均荷负电, 根据 DLVO 理论, 镍黄铁矿与蛇纹石颗粒

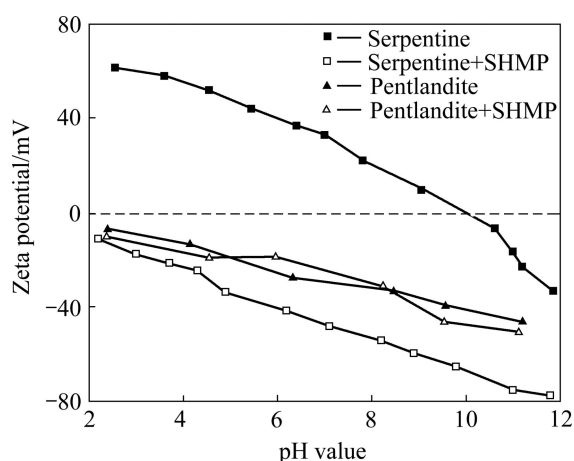


图6 六偏磷酸钠对镍黄铁矿和蛇纹石 Zeta 电位的影响

Fig. 6 Effect of SHMP on Zeta-potential of pentlandite and serpentine

间作用力表现为相互排斥,两种矿物能较好地分散。

图7所示为六偏磷酸钠与蛇纹石作用前后的红外光谱。在蛇纹石的红外光谱中,3 686.3  $\text{cm}^{-1}$ 和612.9  $\text{cm}^{-1}$ 处分别对应Mg—OH的伸缩和弯曲振动峰,984.6  $\text{cm}^{-1}$ 为蛇纹石的Si—O伸缩振动特征峰,580  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰为Mg—O外弯曲振动,443.6  $\text{cm}^{-1}$ 处特征峰为Mg—OH剪切振动<sup>[16]</sup>。与六偏磷酸钠作用后,蛇纹石的Mg—O外弯曲振动峰偏移至566.2  $\text{cm}^{-1}$ ,Mg—OH剪切振动峰偏移至462.7  $\text{cm}^{-1}$ ,说明六偏磷酸钠与蛇纹石表面的镁发生了化学反应并吸附在蛇纹石表面。

六偏磷酸钠不仅通过自身吸附降低蛇纹石表面电位,同时还能溶解出蛇纹石表面的 $\text{Mg}^{2+}$ ,进一步降低

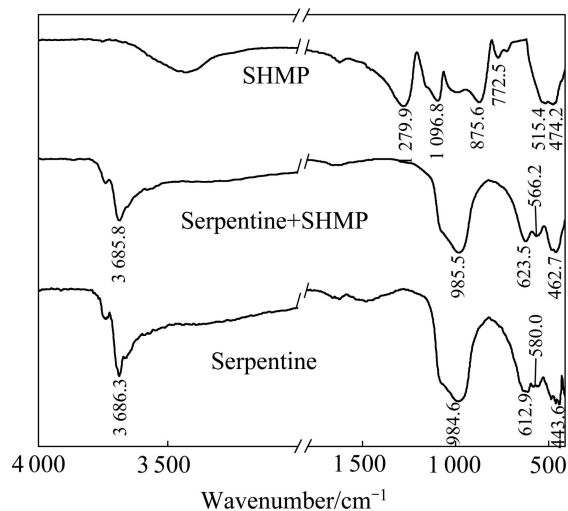


图7 六偏磷酸钠与蛇纹石作用前后的红外光谱

Fig. 7 Infrared spectra of serpentine in absence and presence of SHMP

其表面电位。在蛇纹石的双电层结构中, $\text{Mg}^{2+}$ 和 $\text{H}^+$ 共同构成定位离子<sup>[14]</sup>,其中 $\text{H}^+$ 离子浓度受pH控制,在特定的pH条件下, $\text{Mg}^{2+}$ 是主要的调控因素。 $\text{Mg}^{2+}$ 的溶出能降低蛇纹石双电层中定位离子的正电荷密度,降低其Zeta电位。图8所示为六偏磷酸钠对蛇纹石表面镁溶出的影响。由图8可知,六偏磷酸钠能溶解蛇纹石表面的 $\text{Mg}^{2+}$ ,随着六偏磷酸钠浓度的增加, $\text{Mg}^{2+}$ 溶出量逐渐升高。六偏磷酸钠还能和溶液中的 $\text{Mg}^{2+}$ 生成可溶性的络合物<sup>[17]</sup>,防止溶出的 $\text{Mg}^{2+}$ 重新进入蛇纹石的双电层。

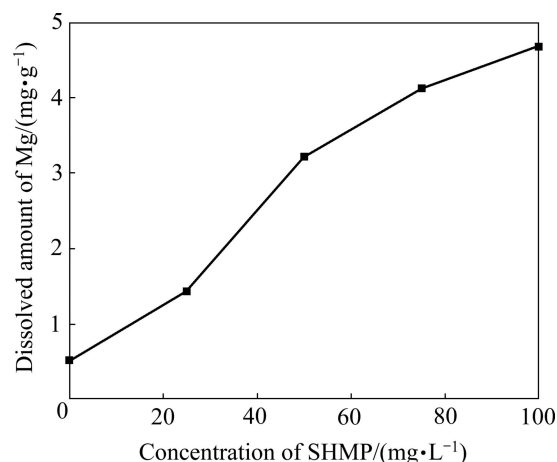


图8 六偏磷酸钠对蛇纹石表面镁溶出的影响

Fig. 8 Effect of SMHP on dissolution of Mg on surface of serpentine

### 3 结论

1) 硫化铜镍矿浮选体系中,蛇纹石脉石易与镍黄铁矿发生异相凝聚,影响镍黄铁矿的浮选;六偏磷酸钠能分散镍黄铁矿与蛇纹石,消除蛇纹石对镍黄铁矿浮选的影响。

2) 在哈密低品位硫化铜镍矿实际矿石的浮选中,六偏磷酸钠能很好地分散矿浆,提高矿石的浮选速率、铜镍品位和回收率。对镍品位0.33%的原矿,经过两次粗选,就能得到镍品位6.430%、镍回收率62.92%的高品位粗精矿和镍品位1.238%、镍回收率17.35%的低品位粗精矿,两精矿产品的总回收率达到80.27%。

3) 六偏磷酸钠通过调控蛇纹石的Zeta电位来分散镍黄铁矿与蛇纹石。六偏磷酸钠对蛇纹石的电性调控包括两个方面:通过在蛇纹石表面发生化学吸附降低其Zeta电位;溶出蛇纹石表面的 $\text{Mg}^{2+}$ ,进而降低

蛇纹石的 Zeta 电位。

## REFERENCES

- [1] 胡显智, 张文彬. 金川镍铜矿精矿降镁研究与实践进展[J]. 矿产保护与利用, 2003(1): 34-37.  
HU Xian-zhi, ZHANG Wen-bin. Research progresses on removal of MgO from the flotation concentrate of Jinchuan copper-nickel sulfide[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2003(1): 34-37.
- [2] HUANG Kun, LI Qi-wei, CHEN Jing. Recovery of copper, nickel and cobalt from acidic pressure leaching solutions of low-grade sulfide flotation concentrates[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(7): 722-728.
- [3] 唐敏, 张文彬. 在微细粒铜镍硫化矿浮选中蛇纹石类脉石矿物浮选行为研究[J]. 中国矿业, 2008, 17(2): 47-58.  
TANG Min, ZHANG Wen-bin. A study on floatability of serpentine in ultra-fine copper-nickel sulfide[J]. China Mining Magazine, 2008, 17(2): 47-58.
- [4] KIRJAVAINEN V, HEISKANEN K. Some factors that affect beneficiation of sulphide nickel-copper ores[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(7): 629-633.
- [5] BREMMELL K E, FORNASIERO D, RALSTON J. Pentlandite-lizardite interactions and implications for their separation by flotation[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2005, 252(2/3): 207-212.
- [6] PENG Y, SEAMAN D. The flotation of slime-fine fractions of Mt. Keith pentlandite ore in de-ionised and saline water[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(5): 479-481.
- [7] 卢毅屏, 龙涛, 冯其明, 欧乐明, 张国范. 微细粒蛇纹石的可浮性及其机理[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1493-1497.  
LU Yi-ping, LONG Tao, FENG Qi-ming, OU Le-ming, ZHANG Guo-fan. Flotation and its mechanism of fine serpentine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1493-1497.
- [8] SILVESTRE M O, PEREIRA C A, GALERY R, PERES A E C. Dispersion effect on a lead-zinc sulphide ore flotation[J]. Minerals Engineering, 2009, 22(9/10): 752-758.
- [9] JORJANI E, BARKHORDARI H R, TAYEBI KHORAMI M, FAZELI A. Effects of aluminosilicate minerals on copper-molybdenum flotation from Sarcheshmeh porphyry ores[J]. Minerals Engineering, 2011, 24(8): 754-759.
- [10] RASHCHI F, FINCH J A. Polyphosphates: A review their chemistry and application with particular reference to mineral processing[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(10/11): 1019-1035.
- [11] 徐刚. 最新磷化工工艺技术手册[M]. 北京: 中国知识出版社, 2005: 255-259.  
XU Gang. New handbook of phosphorus chemical process technology[M]. Beijing: China Knowledge Press, 2005: 255-259.
- [12] 夏启斌, 李忠, 邱显扬, 戴子林. 六偏磷酸钠对蛇纹石的分散机理研究[J]. 矿冶工程, 2002, 22(2): 51-54.  
XIA Qi-bin, LI Zhong, QIU Xian-yang, DAI Zi-lin. Investigation of action mechanism between sodium hexametaphosphate and serpentine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(2): 51-54.
- [13] 王德燕, 戈保梁. 硫化铜镍矿浮选中蛇纹石脉石矿物的行为研究[J]. 有色矿冶, 2003, 19(4): 15-17.  
WANG De-yan, GE Bao-liang. A study on behavior of serpentine in processing of copper-nickel sulphide[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy, 2003, 19(4): 15-17.
- [14] LU Yi-ping, ZHANG Ming-qiang, FENG Qi-ming, LONG Tao, OU Le-ming, ZHANG Guo-fan. Effect of sodium hexametaphosphate on separation of serpentine from pyrite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 208-213.
- [15] 孙传尧, 印万忠. 硅酸盐矿物浮选原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 75-81.  
SUN Chuan-Yao, YIN Wan-zhong. Flotation mechanism of silicate mineral[M]. Beijing: Science Press, 2001: 75-81.
- [16] 冯其明, 杨艳霞, 刘琨, 肖愉, 张国范. 采用纤蛇纹石制备纳米纤维状多孔氧化硅[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(6): 1088-1093.  
FENG Qi-ming, YANG Yan-xia, LIU Kun, XIAO Yu, ZHANG Guo-fan. Preparation of porous silica with nanofibrous morphology from chrysotile[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2007, 38(6): 1088-1093.
- [17] 兰文艺, 邵刚. 实用环境工程手册—水处理材料与药剂[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 381-386.  
LAN Wen-yi, SHAO Gang. Practical handbook of environmental engineering — Water treatment materials and reagents[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002: 381-386.

(编辑 李艳红)