DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42778

钨酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离的影响及作用机理

王志坚，卢冀伟，袁致涛，黄 晨

(东北大学 资源与土木工程学院，沈阳 110819)

摘 要：针对浮选时镍黄铁矿和蛇纹石易产生异质凝聚而造成其浮选分离难的问题，研究发现添加钨酸钠可实现镍黄铁矿和蛇纹石的有效分离。通过纯矿物浮选试验、浊度试验、Zeta电位测试、浮选溶液化学及X射线光电子能谱(XPS)分析，研究了钨酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离的影响及作用机理。结果表明：加入钨酸钠后，镍黄铁矿与蛇纹石单矿物的浮游差由69.02%升高至81.28%，人工混合矿中镍黄铁矿回收率升高至83.56%，表明添加钨酸钠可促进镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离；钨酸钠的加入使蛇纹石和镍黄铁矿的浊度值升高，表明二者之间的分散作用增强。钨酸钠在溶液中主要以WO_4^{2-}形式存在，可吸附在镍黄铁矿和蛇纹石表面，使二者表面均荷强负电，增强了二者之间的静电斥力，从而减弱二者的异质凝聚。WO_4^{2-}在镍黄铁矿表面发生化学吸附，且其吸附强度强于蛇纹石表面的吸附强度。

关键词：蛇纹石；镍黄铁矿；异质凝聚；钨酸钠；浮选

文章编号：1004-0609(2022)-11-3470-09 **中图分类号**：TD923 **文献标志码**：A

引文格式：王志坚, 卢冀伟, 袁致涛, 等. 钨酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离的影响及作用机理[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(11): 3470−3478. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42778

WANG Zhi-jian, LU Ji-wei, YUAN Zhi-tao, et al. Role and mechanism of sodium tungstate in flotation separation of pentlandite and serpentine[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(11): 3470−3478. DOI: 10.11817/j.ysxb.1004.0609.2021-42778

金属镍质地坚硬，有较好的延展性和抗腐蚀性，主要应用于钢铁、镍基合金、电镀及电池等领域[1−2]。全球镍产量中有超过三分之二的镍产量来自硫化铜镍矿，我国镍资源构成又以硫化铜镍矿为主，约占86%，其中主要镍矿物为镍黄铁矿[3]。蛇纹石是硫化铜镍矿中常见的脉石矿物[4]，天然可浮性差，但磨矿过程中易泥化[5]，且浮选过程中与镍黄铁矿表面荷相反电荷，可与镍黄铁矿产生异质凝聚，这样一方面会恶化镍黄铁矿的浮选，另一方面也会随镍黄铁矿进入泡沫产品，使精矿中氧化镁含量过高，不利于后续冶炼工艺[6−10]。因此，研究镍黄铁矿与蛇纹石的高效浮选分离，是目前研究的重点和难点。

常见的用于硫化铜镍矿浮选的调整剂有六偏磷酸钠、羧甲基纤维素、水玻璃类等[11−14]，在溶液中会生成亲水性配合物，可吸附在蛇纹石表面调整其表面电位从而达到分散抑制的效果。但随着入浮原矿品位越来越低，现有药剂制度选别效果也逐渐变差。PENG等[15−16]和JELDRES等[17]研究发现盐水浮选体系可显著改善镍黄铁矿的浮选效果；刘诚等[18]

基金项目：国家自然科学基金资助项目(51704057)

收稿日期：2021-12-13；**修订日期**：2022-03-08

通信作者：卢冀伟，副教授，博士；电话：024-83687694；E-mail：lujiwei20041202@163.com

袁致涛，教授，博士；电话：024-83673956；E-mail：yuanzhitao@mail.neu.edu.cn

研究发现无机盐氯化钠所营造的盐水环境可通过压缩双电层来改变表面电荷，从而削弱镍黄铁矿与蛇纹石之间的异质凝聚；加入的无机盐还可能与矿物表面发生作用，改变矿物表面性质。因此，研究无机盐对镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离的作用具有重要意义。

钨酸盐作为一种低毒性，无污染，对环境、人体无害的无机盐，在海水用于循环冷却水过程中得到了广泛的应用[19]，钨酸钠可以与Fe等金属离子发生化学作用，不仅可以改变金属的活化极化作用，而且还可以有效抑制金属的点腐蚀[20−21]；也可用于合成复合材料 MgH_2-Fe_2O_3/Na_2WO_4，改善 MgH_2 的储氢性能[22]，但对钨酸钠在矿物浮选领域的应用还缺乏研究。本文作者在研究无机调整剂对镍黄铁矿与蛇纹石之间异质凝聚调控的过程中发现，钨酸钠对蛇纹石和镍黄铁矿的浮选有较好的作用效果，因此，通过纯矿物浮选试验、浊度试验、Zeta电位检测分析、浮选溶液化学分析和XPS检测分析，研究了钨酸钠在镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离中的作用机理，为进一步研究钨酸钠应用于硫化铜镍矿浮选提供理论与技术参考。

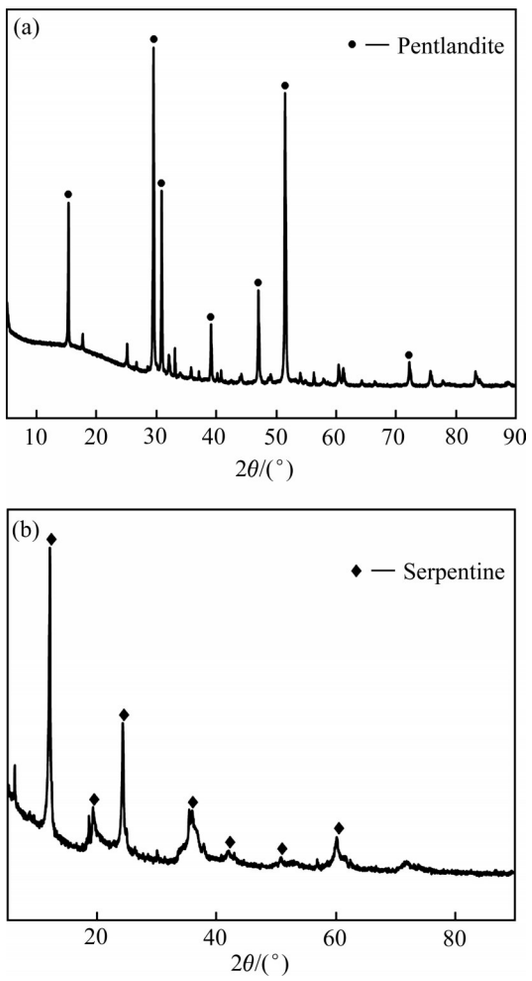

图1　镍黄铁矿和蛇纹石的XRD谱

Fig. 1　XRD patterns of pentlandite(a) and serpentine(b)

1　实验

1.1　矿物样品与试剂

镍黄铁矿取自金川，经人工破碎至−10 mm，手选出脉石矿物。矿样经小型颚式破碎机和盘式破碎机破碎至−2 mm，后进入球磨机磨至−0.15 mm，通过摇床、弱磁分选，最终得到含镍29.80%(质量分数)的镍黄铁矿，用行星球磨机磨至−74 μm占75%(质量分数)，真空密封保存。蛇纹石取自江苏东海，经过颚式破碎机和盘式破碎机破碎到−0.5 mm，后用陶瓷球磨机闭路磨矿至−20 μm，烘干后得到含MgO含量为39.67%(质量分数)的蛇纹石。图1所示为镍黄铁矿和蛇纹石的XRD谱，可见矿样满足试验要求。

试验用盐酸、氢氧化钠、钨酸钠均为分析纯，2#油、丁基黄药(BX)为工业纯，试验用水为去离子水。

1.2　纯矿物浮选试验

单矿物浮选试验采用XFG型挂槽式浮选机。由于镍黄铁矿极易氧化，故每次试验前将2 g镍黄铁矿超声5 min去除表面氧化膜，静置10 min后倒掉上清液并冲入浮选槽内，起泡剂2#油用量为20 mg/L，药剂与去离子水总体积约为40 mL，转速为1602 r/min。按照药剂添加顺序加药，每种药剂作用3 min，手工刮泡3 min，将所得的泡沫产品和槽内产品分别收集，过滤、烘干、称量质量后，计算所得产率即为回收率。

人工混合矿浮选试验采用XFG型挂槽式浮选机，取镍黄铁矿与蛇纹石各1 g混合均匀，组成人工混合矿，浮选调浆流程与单矿物浮选试验一致，浮选结束后分别收集精、尾矿烘干后称量质量，并化验品位，最终计算得到回收率。

1.3 浊度试验

使用HI88713 ISO型浊度仪测量浊度。将0.1 g蛇纹石与0.1 g镍黄铁矿置于250 mL烧杯中，加入90 mL水及钨酸钠并以1000 r/min转速搅拌3 min后，倒入100 mL沉降量筒中定容，上下颠倒摇晃5次后静置3 min，取上层清液12 mL放入试样瓶中进行浊度测试，同一条件下测量3次后取平均值。

1.4 Zeta电位检测分析

采用美国Brookhaven公司ZetaPALS/90 plus型Zeta电位分析仪进行Zeta电位测试。称取30 mg粒度为−10 μm的镍黄铁矿或蛇纹石矿样，镍黄铁矿处理方法同浮选试验，蛇纹石无需处理。将样品置于100 mL烧杯中，添加去离子水与药剂共40 mL，调节pH后搅拌3 min，取上层清液进行Zeta电位测试，同一条件下测量3次后取平均值。

1.5 XPS检测分析

采用ESCALAB 250 Xi XPS(Thermo Fisher)型光谱分析仪进行XPS检测。试验样品为纯矿物浮选用样，将矿样与一定量去离子水放入浮选槽，调节pH稳定后搅拌3 min，再加入一定量钨酸钠搅拌3 min，用去离子水洗涤3次，过滤后，置于50 ℃真空烘箱中干燥。制得样品后送样检测。

2 结果与讨论

2.1 浮选试验

2.1.1 钨酸钠对镍黄铁矿和蛇纹石单矿物浮选的影响

研究不同pH对镍黄铁矿和蛇纹石浮选回收率的影响，试验结果如图2所示。由图2可知，在试验探究的pH范围内，镍黄铁矿回收率随pH升高略有下降，pH=9时，镍黄铁矿回收率为80.94%，此时蛇纹石回收率为11.92%；蛇纹石在pH=11.32时回收率降低至6.17%，此时镍黄铁矿回收率降低至76.08%。

图3所示为丁基黄药用量对镍黄铁矿和蛇纹石单矿物浮选的影响。由图3可知，丁基黄药对镍黄铁矿有良好的捕收效果而对蛇纹石几乎无捕收能力。随丁基黄药用量增加，镍黄铁矿回收率逐渐升高，在用量为15 mg/L时，镍黄铁矿回收率达80.94%，此时蛇纹石回收率为11.92%，二者浮游差为69.02%；之后，继续增加捕收剂用量，镍黄铁矿和蛇纹石的回收率均变化不大。

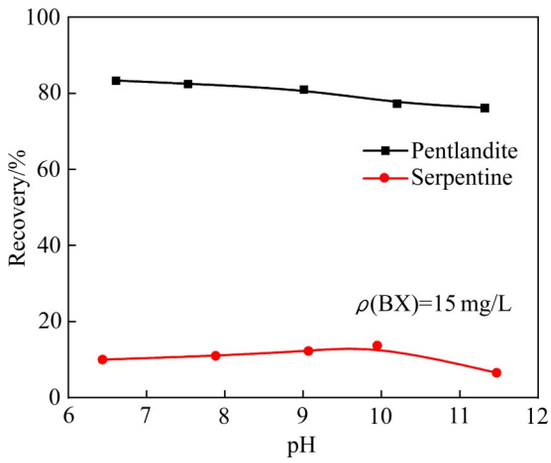

图2 pH对镍黄铁矿、蛇纹石浮选的影响

Fig. 2 Effect of pH on flotation of pentlandite and serpentine

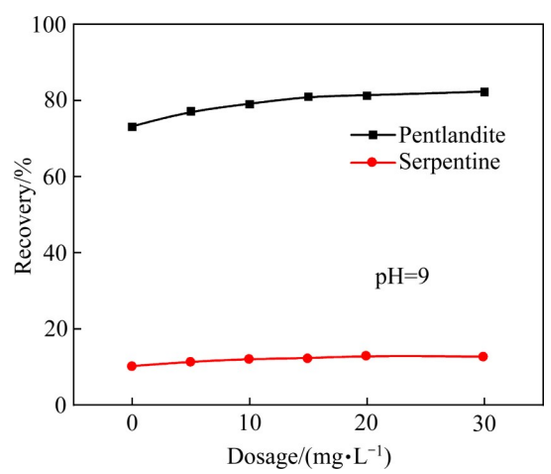

图3 丁基黄药用量对镍黄铁矿、蛇纹石单矿物浮选的影响

Fig. 3 Effect of BX dosage on flotation of pentlandite and serpentine

图4所示为钨酸钠用量对镍黄铁矿和蛇纹石单矿物浮选的影响。由图4可知，加入钨酸钠后，镍黄铁矿回收率升高，在用量为1.47×10^3 mg/L时达到89.55%，之后随用量增加回收率变化不大；蛇纹石回收率随钨酸钠用量增加而降低，在用量为1.47×10^3mg/L时回收率为8.27%，此时二者浮游差

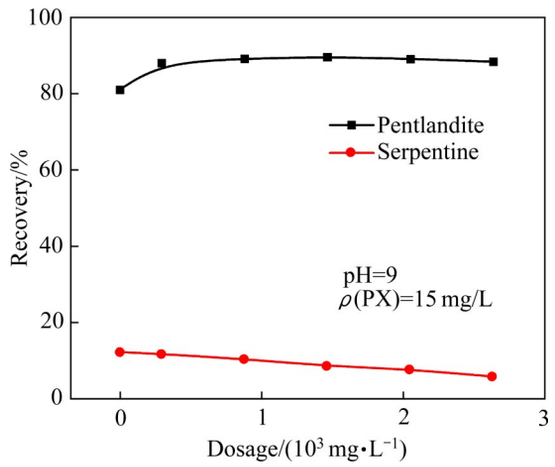

图4　钨酸钠用量对镍黄铁矿、蛇纹石单矿物浮选的影响

Fig. 4　Effect of Na_2WO_4 dosage on flotation of pentlandite and serpentine

由69.02%升高至81.28%。

以上单矿物浮选试验结果表明，镍黄铁矿和蛇纹石在丁基黄药为捕收剂的浮选体系下可浮性差异较大，钨酸钠的加入可进一步扩大二者的浮游差，从而更有效地促进镍黄铁矿与蛇纹石的浮选分离。

2.1.2　钨酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石人工混合矿浮选的影响

基于单矿物浮选试验结果，进一步研究钨酸钠对人工混合矿浮选的影响。图5所示为钨酸钠用量对镍黄铁矿与蛇纹石人工混合矿浮选的影响。由图5可知，在未添加钨酸钠时，混合矿浮选精矿中镍黄铁矿回收率不到10%，MgO含量为26.05%(质量分数)；加入钨酸钠后可显著提高镍黄铁矿回收率，

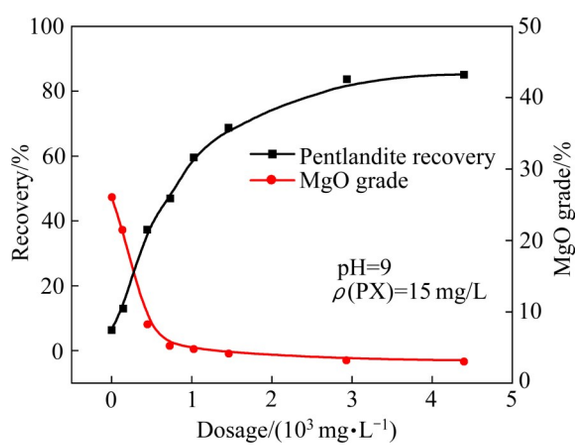

图5　钨酸钠用量对人工混合矿浮选的影响

Fig. 5　Effect of Na_2WO_4 dosage on flotation of artificial mixed ore

随钨酸钠用量增加，镍黄铁矿回收率逐渐升高，在钨酸钠用量为1.47×10^3 mg/L时，镍黄铁矿回收率为68.76%，此时精矿中MgO含量降低至4.12%(质量分数)，钨酸钠用量升高至2.93×10^3 mg/L时镍黄铁矿回收率可达83.56%，说明钨酸钠可有效促进镍黄铁矿与蛇纹石的浮选分离。

2.2　浊度试验

蛇纹石与镍黄铁矿因表面电性相反而产生的异质凝聚是影响镍黄铁矿浮选的一个重要因素，矿浆的浊度值可反映矿物颗粒间的分散聚集状态[10]，因此进行浊度试验以探究钨酸钠对二者异质凝聚的影响。本文作者采用人工混合矿矿浆浊度值表征镍黄铁矿与蛇纹石的异质凝聚，浊度值越高，矿浆分散性越强，两种矿物之间异质凝聚越弱，反之则异质凝聚越强。

由图6可知，与蛇纹石单矿物的浊度相比，加入镍黄铁矿会使矿浆体系浊度值降低，说明二者之间产生了异质凝聚；加入钨酸钠后混合矿浊度值升高，镍黄铁矿与蛇纹石之间异质凝聚减弱。结合人工混合矿浮选试验结果，钨酸钠可通过削弱镍黄铁矿与蛇纹石之间的异质凝聚来促进二者的浮选分离。

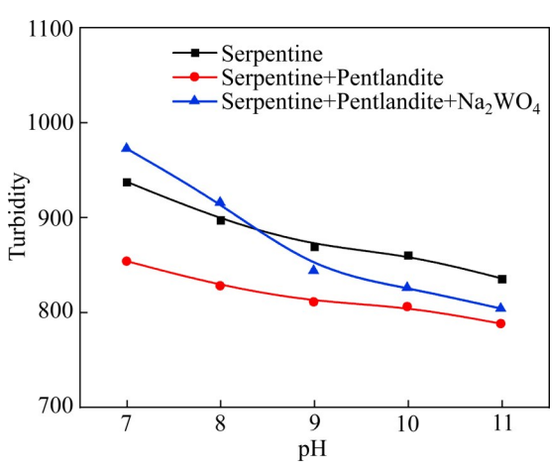

图6　钨酸钠对镍黄铁矿与蛇纹石浊度的影响

Fig. 6　Effect of Na_2WO_4 on turbidity of pentlandite and serpentine

2.3　Zeta电位检测分析

为探究钨酸钠削弱镍黄铁矿与蛇纹石异质凝聚的作用机理，进行Zeta电位检测。钨酸钠添加前后

蛇纹石、镍黄铁矿表面Zeta电位值如图7所示。在所测pH范围内，镍黄铁矿表面均荷负电而蛇纹石表面荷正电，二者在矿浆中因静电作用易产生异质凝聚，更为细小的蛇纹石会黏附在镍黄铁矿表面从而恶化镍黄铁矿的浮选。加入钨酸钠后，蛇纹石表面电位由正变负，随pH升高，表面电位绝对值变小，即矿物表面所荷电荷降低；加入钨酸钠后镍黄铁矿表面电位降低，但随pH升高电位绝对值逐渐减小，在pH等于11.45时，表面电位绝对值较未添加钨酸钠时减小。以上结果说明钨酸钠在两种矿物表面产生吸附作用，使二者表面均荷负电，因此减弱二者在矿浆中因表面电性相反而产生的异质凝聚，从而促进镍黄铁矿与蛇纹石的浮选分离，与浮选试验结果相符合。

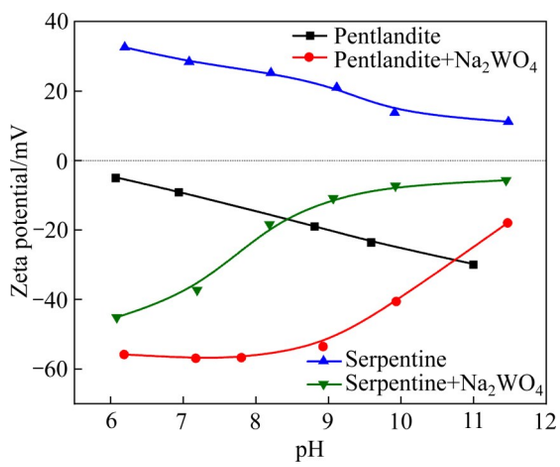

图7 钨酸钠对镍黄铁矿和蛇纹石表面电位的影响

Fig. 7 Effect of Na_2WO_4 on Zeta potential values of pentlandite and serpentine

综合浮选试验、浊度试验和Zeta电位检测可得出，镍黄铁矿和蛇纹石主要由于表面电性相反而产生异质凝聚，影响镍黄铁矿的浮选。钨酸钠的吸附可改变二者表面荷电情况，使两种矿物表面均荷强负电，减弱镍黄铁矿与蛇纹石之间的异质凝聚，优化镍黄铁矿的浮选环境。

2.4 浮选溶液化学分析

钨酸钠在溶液中先发生水解反应，然后解离，存在以下平衡：

$$Na_2WO_4+2H_2O \rightleftharpoons H_2WO_4+2NaOH \quad (1)$$

$$WO_4^{2-}+H^+ \rightleftharpoons HWO_4^-$$

$$K_1^H=\frac{[HWO_4^-]}{[H^+][WO_4^{2-}]}=10^{3.5}=\beta_1^H \quad (2)$$

$$HWO_4^-+H^+ \rightleftharpoons H_2WO_4$$

$$K_2^H=\frac{[H_2WO_4]}{[H^+]^2[HWO_4^-]}=10^{4.7} \quad (3)$$

$$\beta_2^H=\frac{[H_2WO_4]}{[H^+]^2[WO_4^{2-}]}=K_1^H\cdot K_2^H=10^{8.2} \quad (4)$$

式中：K_1^H、K_2^H称为逐级加质子常数；β_1^H、β_2^H称为累计加质子常数。同时定义[A]、[A]′分别为溶液中游离物质A的浓度和所有含A物质的浓度之和，那么：

$$[WO_4^{2-}]'=[WO_4^{2-}]+[HWO_4^-]+[H_2WO_4] \quad (5)$$

$$\phi_{[WO_4^{2-}]}=\frac{[WO_4^{2-}]}{[WO_4^{2-}]'}=\frac{1}{1+K_1^H[H^+]+\beta_2^H[H^+]^2}=1$$

$$\frac{1}{1+10^{3.5}[H^+]+10^{8.2}[H^+]^2} \quad (6)$$

$$\phi_{[HWO_4^-]}=\frac{[HWO_4^-]}{[WO_4^{2-}]'}=\beta_1^H\phi_{[WO_4^{2-}]}[H^+]=$$

$$10^{3.5}\phi_{[WO_4^{2-}]}[H^+] \quad (7)$$

$$\phi_{[H_2WO_4]}=\frac{[H_2WO_4]}{[WO_4^{2-}]'}=\beta_2^H\phi_{[WO_4^{2-}]}[H^+]^2=$$

$$10^{8.2}\phi_{[WO_4^{2-}]}[H^+]^2 \quad (8)$$

结合上式，计算得出钨酸钠溶液的组分分布与pH的关系曲线，如图8所示。由图8可知，随着溶液pH变化，钨酸钠在溶液中的不同组分H_2WO_4、HWO_4^-、WO_4^{2-}的含量也随之变化。在pH小于2时，溶液中主要组分为H_2WO_4；pH为2~6时，HWO_4^-、

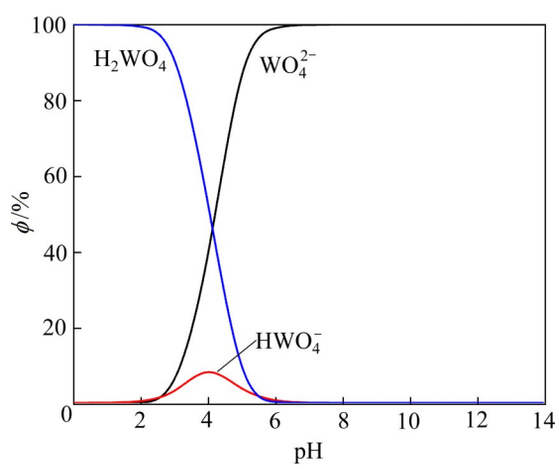

图8 钨酸根的组分−pH图

Fig. 8 Relationship between mass fraction of WO_4^{2-} solution and pH

WO_4^{2-} 出现，H_2WO_4 随 pH 升高含量逐渐降低而 WO_4^{2-} 含量逐渐升高；pH 大于 6 以后溶液中主要组分为 WO_4^{2-}，结合 Zeta 电位检测结果，说明吸附在矿物表面使电位降低的组分主要是 WO_4^{2-}。

2.5　XPS 检测分析

XPS 检测分析可用来研究矿物表面的元素组成和化学特性[23]。为进一步探究钨酸钠对镍黄铁矿和蛇纹石的吸附作用机理，进行 XPS 检测分析。镍黄铁矿和蛇纹石经钨酸钠处理前后的 XPS 全谱图如图 9 所示，表面原子相对含量如表 1 所示。由表 1 可知，经钨酸钠作用后镍黄铁矿表面 W 元素相对含量为 1.8%，蛇纹石表面 W 元素相对含量为 0.17%；由全谱图可知，两种矿物与钨酸钠作用后均出现 W 4f 的特征峰，说明钨酸钠在两种矿物表面均产生吸附作用。进一步对 W 元素窄扫描图谱进行分析，从图 10 中可看出，镍黄铁矿表面 W 4f 的峰强度远强于蛇纹石表面 W 4f 的峰强度，与全谱图及表面原素相对原子含量测定结果一致，说明钨酸钠在镍黄铁矿和蛇纹石表面均发生吸附作用，且与镍黄铁矿作用更强烈。

为了探究钨酸钠对镍黄铁矿的作用机理，对镍黄铁矿表面 Fe 元素进行窄区扫描分析。由图 11 可知镍黄铁矿的 Fe 2p 窄区扫描图在结合能 713.02 eV、710.89 eV 处出现了特征峰，与钨酸钠作用后 Fe 2p 在结合能 713.02 eV 处的特征峰偏移至 713.31 eV，偏移量为 0.29 eV(大于 0.2 eV)，说明钨酸钠在镍黄铁矿表面发生了化学吸附。结合文献[19, 24]，

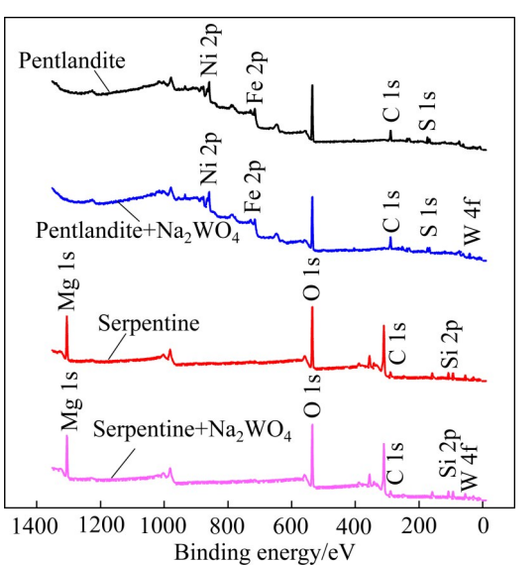

图 9　钨酸钠作用前后镍黄铁矿和蛇纹石表面全谱扫描谱图

Fig. 9　Scanning spectrogram of pentlandite and serpentine before and after Na_2WO_4 treatment

表 1　钨酸钠处理前后镍黄铁矿和蛇纹石表面 W 元素的结合能和相对含量

Table 1　Binding energy and atomic concentration of W element on pentlandite and serpentine surfaces before and after Na_2WO_4 treatment

Mineral surface	x(W)/%	Binding energy/eV
Pentlandite	–	–
Pentlandite+Na_2WO_4	1.80	35.41
Serpentine	–	–
Serpentine+Na_2WO_4	0.17	35.39

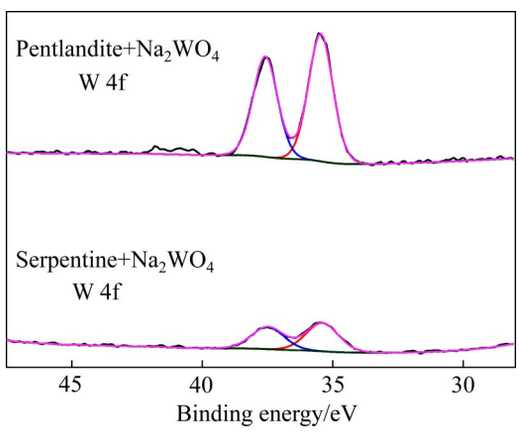

图 10　钨酸钠作用后镍黄铁矿和蛇纹石表面 W 元素的窄区扫描图谱

Fig. 10　Resolved narrow scan W 4f spectra of pentlandite and serpentine surfaces after Na_2WO_4 treatment

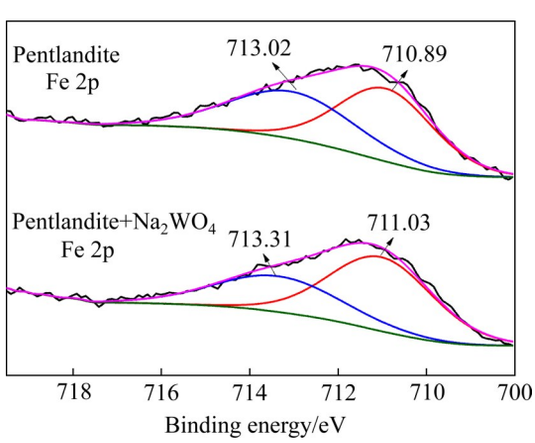

图 11　钨酸钠作用后镍黄铁矿表面 Fe 元素窄区扫描图谱

Fig. 11　Resolved narrow scan Fe 2p spectra of pentlandite surfaces before and after Na_2WO_4 treatment

钨酸钠可能与Fe^{3+}作用生成$Fe_2(WO_4)_3$，也可能生成了钨的杂多酸。

3 结论

1) 丁基黄药为捕收剂体系下镍黄铁矿与蛇纹石可浮性差异明显，加入钨酸钠可进一步增大二者的浮游差，有利于镍黄铁矿与蛇纹石的浮选分离。人工混合矿浮选试验说明钨酸钠可有效促进镍黄铁矿与蛇纹石的浮选分离，提高镍黄铁矿回收率且降低精矿中MgO含量。

2) 浊度试验说明钨酸钠可使混合矿浊度值升高，增强矿浆分散性，削弱了镍黄铁矿与蛇纹石之间的异质凝聚；浮选溶液化学分析和Zeta电位检测结果显示pH=9时钨酸钠在溶液中主要以WO_4^{2-}的形式存在，可吸附在镍黄铁矿和蛇纹石表面，使二者均荷负电，由静电吸引力转变为静电斥力，从而削弱二者因电荷相反而产生的异质凝聚，促进二者的浮选分离。

3) XPS检测分析结果显示钨酸钠在镍黄铁矿和蛇纹石表面均有吸附，在镍黄铁矿表面发生了化学吸附，且吸附作用更强。

REFERENCES

[1] LIN Z. Evaluation and Countermeasures on sustainable development of nickel resources in China[J]. IOP conference series. Earth and Environmental Science, 2017, 81(1): 12113.

[2] 魏 国. 我国镍产业发展现状及市场分析[J]. 中国有色金属, 2020(14): 44−45.
WEI Guo. Current situation and market analysis of Nickel industry in China[J]. China Nonferrous Metals, 2020(14): 44−45.

[3] 刘贵清, 张邦胜, 张 帆, 等. 中国镍矿资源与市场分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(7): 102−105.
LIU Gui-qing, ZHANG Bang-sheng, ZHANG Fan, et al. China's nickel ore resources and market analysis[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(7): 102−105.

[4] LU J, SUN M, YUAN Z, et al. Innovative insight for sodium hexametaphosphate interaction with serpentine[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 560: 35−41.

[5] 冯 博, 卢毅屏, 翁存建. 碳酸根对蛇纹石/黄铁矿浮选体系的分散作用机理[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(4): 1085−1091.
FENG Bo, LU Yi-ping, WENG Cun-jian. Dispersion mechanism of carbonate on flotation system of serpentine and pyrite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(4): 1085−1091.

[6] CHEN Y, ZHANG G, SHI Q, et al. Utilization of trisodium phosphate to eliminate the adverse effect of Mg^{2+} on the flotation of pyrite[J]. Minerals Engineering, 2020, 150: 106281.

[7] 何 浩, 邵延海, 吴海祥, 等. 我国硫化铜镍矿浮选工艺及药剂研究现状[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(2): 100−104.
HE Hao, SHAO Yan-hai, WU Hai-xiang, et al. Research status on flotation process and reagent for copper-nickel sulfid ore[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(2): 100−104.

[8] TANG X, CHEN Y. Using oxalic acid to eliminate the slime coatings of serpentine in pyrite flotation[J]. Minerals Engineering, 2020, 149: 106228.

[9] YUAN Z, LU J, LIU J, et al. Enhancement of pentlandite surface magnetism and implications for its separation from serpentine via magnetic separation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(1): 204−210.

[10] 胡 聪, 陈 伟, 许鹏云. 酸性体系中蛇纹石矿泥的抑制及其对硫化铜镍矿浮选的影响[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(1): 211−221.
HU Cong, CHEN Wei, XU Peng-yun. Inhibition of serpentine slime in acidic system and its effect on flotation of Cu-Ni sulfide ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(1): 211−221.

[11] 冯 博, 郭宇涛, 王 涛, 等. 黄原胶在黄铜矿和闪锌矿浮选分离中的作用及机理[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(5): 1202−1208.
FENG Bo, GUO Yu-tao, WANG Tao, et al. Role and mechanism of xanthan gum in flotation separation of chalcopyrite and sphalerite[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(5): 1202−1208.

[12] 龙 涛, 冯其明, 卢毅屏. 六偏磷酸钠在硫化铜镍矿浮选中的分散机理[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1763−1769.
LONG Tao, FENG Qi-ming, LU Yi-Ping. Dispersive mechanism of sodium hexametaphosphate on flotation of copper-nickel sulphide[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1763−1769.

[13] WELLHAM E J, ELBER L, YAN D S. The role of carboxy methyl cellulose in the flotation of a nickel sulphide transition ore[J]. Minerals Engineering, 1992, 5(3): 381−395.

[14] LU J, YUAN Z, GUO X, et al. Magnetic separation of pentlandite from serpentine by selective magnetic coating[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials, 2019, 26(1): 1−10.

[15] 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.

[16] PENG Y, BRADSHAW D. Mechanisms for the improved flotation of ultrafine pentlandite and its separation from lizardite in saline water[J]. Minerals Engineering, 2012, 36/37/38: 284−290.

[17] JELDRES R I, ARANCIBIA-BRAVO M P, REYES A, et al. The impact of seawater with calcium and magnesium removal for the flotation of copper-molybdenum sulphide ores[J]. Minerals Engineering, 2017, 109: 10−13.

[18] 刘 诚, 冯其明, 石 晴, 等. 氯化钠在蛇纹石/黄铁矿浮选体系中的分散机理[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(8): 1715−1719.
LIU Cheng, FENG Qi-ming, SHI Qing, et al. Dispersion mechanism on flotation system of serpentine and pyrite in presence of sodium chloride[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(8): 1715-1719.

[19] 程 俊, 蔡晓霞. 海水缓蚀剂的研究进展[J]. 河北能源职业技术学院学报, 2018, 18(1): 64−66.
CHENG Jun, CAI Xiao-xia. Research progress of corrosion inhibitors in seawater[J]. Journal of Hebei College of Energy Technology, 2018, 18(1): 64−66.

[20] HU J, WANG T, WANG Z, et al. Corrosion protection of N80 steel in hydrochloric acid medium using mixed $C_{15}H_{15}NO$ and Na_2WO_4 inhibitors[J]. Coatings, 2018, 8(9): 315.

[21] 于静敏, 柳鑫华, 梁英华. 钨酸盐作海水缓蚀剂可行性讨论[J]. 表面技术, 2006(5): 60−64.
YU Jing-min, LIU Xin-hua, LIANG Ying-hua. Feasibility of tungstate as corrosion inhibitor in seawater[J]. Surface Technology, 2006(5): 60−64.

[22] WANG J, ZHANG W, LI B, et al. Effects of Fe modified Na_2WO_4 additive on the hydrogen storage properties of MgH_2[J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2019, 34(5): 1030−1036.

[23] YANG B, YIN W, ZHU Z, et al. Differential adsorption of hydrolytic polymaleic anhydride as an eco-friendly depressant for the selective flotation of apatite from dolomite[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 256: 117803.

[24] 吕桂双, 芮玉兰, 柳鑫华, 等. 钨酸盐做海水缓蚀剂可行性研究状况[J]. 清洗世界, 2006(7): 1−7.
LU Gui-shuang, RUI Yu-lan, LIU Xin-hua, et al. The present situation of research on tungstate of corrosion inhibitoron[J]. Cleaning World, 2006(7): 1−7.

Role and mechanism of sodium tungstate in flotation separation of pentlandite and serpentine

WANG Zhi-jian, LU Ji-wei, YUAN Zhi-tao, HUANG Chen

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China.)

Abstract: In view of the difficulty of separation between pentlandite and serpentine due to the formation of heterogeneous coagulation in flotation, it was founded that adding sodium tungstate can realize the effective separation of them. The effect of sodium tungstate on the separation of pentlandite and serpentine was studied by flotation test, turbidity test, zeta potential test, flotation solution chemistry and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS). The results show that, after adding sodium tungstate, the flotation difference between pentlandite and serpentine increases from 69.02% to 81.28%, and the recovery rate of pentlandite in the mixed ore increases to 83.56%, indicating that adding sodium tungstate can weaken the adhesion of serpentine to pentlandite. The addition of sodium tungstate increases the turbidity of serpentine and pentlandite, indicating that the dispersion of them is enhanced. Sodium tungstate mainly exists in the form of WO_4^{2-} in the solution and adsorbs on the surface of pentlandite and serpentine, so that both surfaces are strongly negatively charged, which increases the electrostatic repulsion between them and weakens their heterogeneous condensation. WO_4^{2-} is chemisorbed on the surface of pentlandite, and the adsorption strength is stronger than that of serpentine.

Key words: serpentine; pentlandite; heterogeneous condensation; sodium tungstate; flotation

---

Foundation item: Projects(51704057) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2021-12-13; **Accepted date:** 2022-03-08

Corresponding author: LU Ji-wei; Tel: +86-24-83687694; E-mail: lujiwei20041202@163.com

YUAN Zhi-tao; Tel: +86-24-83673956; E-mail: yuanzhitao@mail.neu.edu.cn

(编辑　何学锋)