

[文章编号] 1004- 0609(2002)01- 0171- 07

钛渣中钙钛矿的浮选分离及其机理^①

马俊伟¹, 隋智通², 陈炳辰³, 聂永丰¹

(1. 清华大学 环境科学与工程系, 北京 100084; 2. 东北大学 材料与冶金学院, 沈阳 110006;

3. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110006)

[摘要] 研究了捕收剂油酸、羟肟酸、十二烷基双甲基膦酸, 抑制剂氟硅酸钠、水玻璃对改性渣中钙钛矿浮选的影响。通过浮选溶液化学计算、矿物动电电位、红外光谱等研究, 探讨了羟肟酸在钙钛矿表面的作用和水玻璃抑制钛辉石的作用机理。结果表明: 以羟肟酸为捕收剂, 水玻璃为抑制剂可实现钙钛矿与钛辉石等的浮选分离。钙钛矿和钛辉石晶体表面的 Ca、Ti 质点密度不同, 所处的位置及活性不同, 造成二者浮游性有一定的差异; 钙钛矿在整个研究范围内 ζ 电位始终为负值, 但在阴离子捕收剂 C₅₋₉羟肟酸中可浮性良好, 表明 C₅₋₉羟肟酸在钙钛矿表面发生了化学吸附。红外光谱研究证实, C₅₋₉羟肟酸的 C—N, N—O 官能团与钙钛矿表面的钛质点发生了化学键合。

[关键词] 钙钛矿; 羟肟酸; 水玻璃; 动电电位; 浮选溶液化学

[中图分类号] TD 923; X 757

[文献标识码] A

攀枝花钒钛磁铁矿中钛约占全国钛资源贮量的 95%^[1]。经选矿分离后约有 53% 的钛进入铁精矿, 经高炉冶炼后, 几乎全部进入渣相, 形成含 TiO₂25% 的高炉渣。这种炉渣用来生产矿渣水泥, 其 TiO₂ 含量过高; 用来冶炼钛铁合金或生产钛白等的原料, 其 TiO₂ 含量过低。由于一直没有找到切实可行的综合利用方法, 因而造成炉渣大量堆积, 至今已累积达 5 000 万 t, 并仍以每年 300 万 t 的速度增加, 既污染环境, 又浪费钛资源。炉渣里的 TiO₂ 弥散于多种物相中, 且晶粒细小, 采用传统的选矿方法很难将 TiO₂ 分离出来。因此通过对熔渣进行选择性析出技术处理, 人为地控制其凝固过程, 促进钙钛矿相选择性析出并长大^[1], 进而采用选矿方法将其分离出来, 以期达到资源回收和环境保护的双重目的。

文献[2]曾报道了科拉半岛天然钙钛矿的浮选分离, 但对人造矿渣中钙钛矿选别分离, 还未见报道。本文作者曾对含钛高炉渣经选择性析出处理后的改性渣的工艺矿物学特性和重选分离进行了详细研究^[3], 在此基础上, 本文作者对改性渣中钙钛矿的浮选分离进行了研究, 通过对钙钛矿和钛辉石的晶体化学特征分析、浮选溶液化学计算、动电电位测定、药剂作用前后矿物表面红外光谱研究等, 探

讨了羟肟酸在钙钛矿表面的作用机理和水玻璃对钛辉石的抑制作用机理。

1 实验

试样原料为攀钢高炉渣, 渣中主要含钛物相为钙钛矿、攀钛透辉石、富钛透辉石和尖晶石, TiO₂ 弥散于各矿物相中, 即使含钛量最多的钙钛矿相中 TiO₂ 含量也只占渣中总 TiO₂ 量的 50%, 而且钙钛矿晶粒细小, 只有几到十几微米, 无法将其提取出来, 高炉原渣显微结构示于图 1(a)。将原渣破碎成粉末, 调整渣的组成, 在钼丝炉中熔化并保温一段时间, 然后以一定速度降温, 优化热处理条件, 使 TiO₂ 富集在钙钛矿相中并使钙钛矿相选择性析出并长大, 得到改性渣。改性渣中 80% 的 TiO₂ 富集在钙钛矿中, 钙钛矿晶粒平均达 80 μ m 左右, 晶体形貌由原来弥散的星点状、云雾状变为柱状、块状, 为选别分离创造了条件, 改性渣显微结构如图 1(b) 所示。

改性渣经破碎, 在瓷球磨中磨细, 而后分级, 38~ 100 μ m 粒级的物料经实验室小型摇床反复提纯, 得到钙钛矿纯矿物和钛辉石纯矿物, 用蒸馏水洗涤数次, 室温晾干, 作为纯矿物浮选用样。化学

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(59574021)

[收稿日期] 2001- 04- 02; [修订日期] 2001- 07- 07

[作者简介] 马俊伟(1971-), 女, 博士。

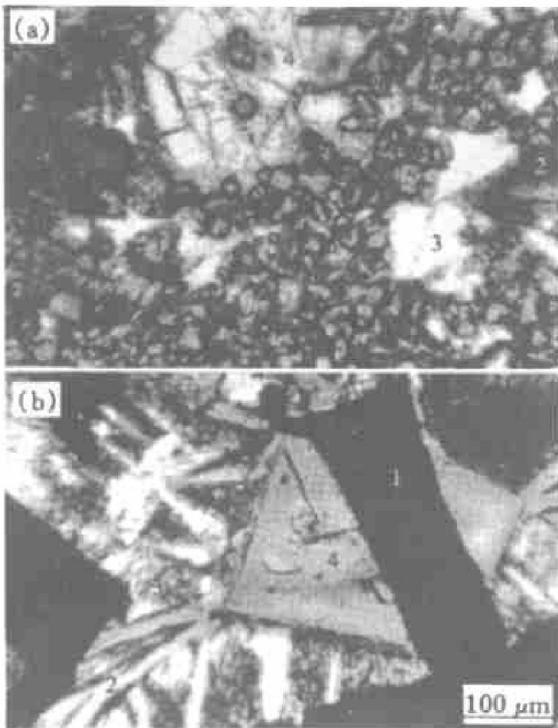


图1 渣样的显微结构

Fig. 1 Microstructures of as-received slag (a) and treated slag (b)

1—Perovskite; 2—Ti-rich diopside;
3—Titanaugite; 4—Spinel

分析和显微镜下鉴定表明,二者均符合纯矿物条件。经瓷球磨磨细并分级后得到的38~100 μm 粒级物料,不经提纯处理的部分作为实际改性渣浮选用样,其TiO₂含量为22.4%。

所用浮选药剂:抑制剂氟硅酸钠和硅酸钠为分析纯;捕收剂油酸钠为化学纯,羟肟酸为工业纯;调整剂硫酸和氢氧化钠为分析纯。

纯矿物试验采用XFG-76型挂槽浮选机,每次试验用样2g;未提纯的改性渣分选采用XFG-80型浮选机,每次试验用样30g。试验用水全部为一次蒸馏水。用pHS-25型酸度计测定介质pH值,用740FT-IR傅里叶红外光谱仪进行能谱测试,用DM-1型摄像监测显微电泳仪测定动电电位(ζ电位)。

2 浮选试验

2.1 纯矿物浮选试验

2.1.1 油酸钠用量和矿浆pH值对矿物可浮性的影响

介质pH值及油酸钠用量对钙钛矿和钛辉石浮选的影响分别如图2和图3所示。图2表明,油酸

钠在中、碱性条件下,对钙钛矿捕收作用最强,浮游率接近95%,而在此pH范围,油酸钠对钛辉石也有较强的捕收作用,浮游率接近80%。由图3可见,在最佳pH条件下,钙钛矿回收率随着油酸钠用量增加而增大。由图2和图3可见,油酸钠在pH值6.5~9.5范围内对钙钛矿捕收效果较好,在pH值7.5~8.2左右,对钛辉石捕收效果也很好。由此可见,油酸钠捕收能力强而选择性不好;此外,该药剂使用时需保持一定的矿浆温度。

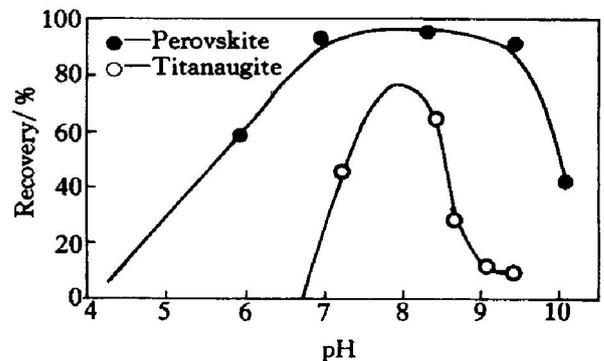


图2 固定油酸钠用量(150 mg/L)时pH值对钙钛矿和钛辉石浮选的影响

Fig. 2 Effect of pH value on floatation with 150 mg/L sodium oleate

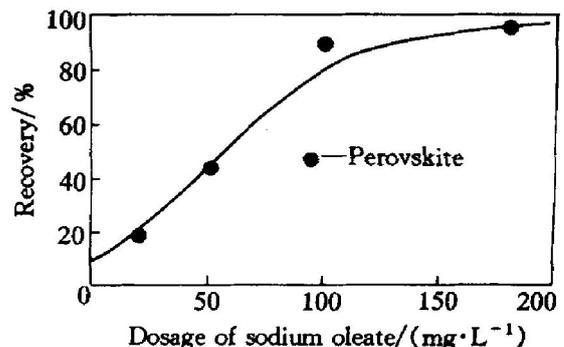


图3 油酸钠用量对钙钛矿浮选的影响

Fig. 3 Effect of dosage of sodium oleate (pH = 7.5)

2.1.2 羟肟酸用量和矿浆pH值对矿物可浮性的影响

图4和图5所示分别为介质pH值和C₅₋₉羟肟酸用量对钙钛矿和钛辉石浮选的影响。图4表明,钙钛矿和钛辉石的浮选最佳pH值均为6.0。由图5可见,二者的浮游率都随着羟肟酸用量增加而增大。前者在羟肟酸用量20 mg/L时,浮游率可达到91.24%,此时钛辉石的浮游率仅为42.5%。此后随着用量增大,浮游率增加缓慢。

由图4和5可见,在pH 6.0时,以羟肟酸为捕收剂,钙钛矿可浮性较好,同时钛辉石也可浮。如果添加合适的调整剂,可能实现二者的分离。

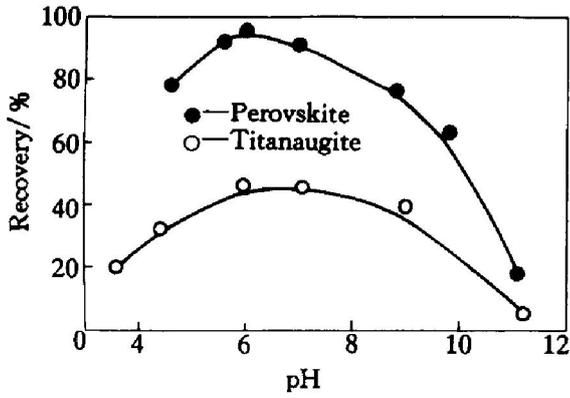


图 4 固定羟肟酸用量(30 mg/L)时 pH 值对矿物浮选的影响

Fig. 4 Effects of pH value on floatation with 30 mg/L of hydroxamate

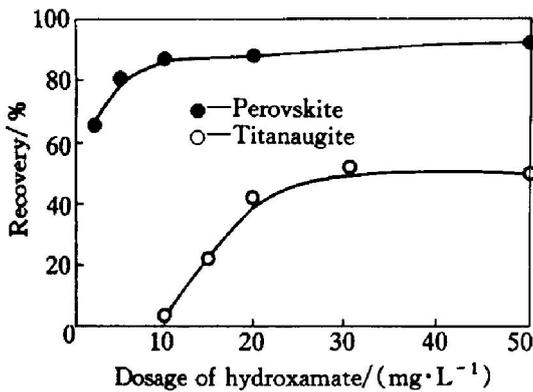


图 5 羟肟酸用量与可浮性的关系

Fig. 5 Effects of dosage of hydroxamate (pH= 6)

2. 1. 3 十二烷胺双甲基膦酸对矿物浮选的影响

图 6 和 7 所示分别为 pH 值和十二烷胺双甲基膦酸对钙钛矿和钛辉石浮选的影响。由图 6 可见, 二者都在 pH 值为 6 左右浮游性最好, 在酸性范围内可浮性差异较大, pH 值为 7 以后可浮性迅速下降, 且浮游性十分相近。图 7 表明, 在最佳 pH 值条件下, 十二烷胺双甲基膦酸用量为 20mg/L 时, 钙钛矿的回收率可达到 98%, 而此时钛辉石回收率只有 18.24%。由此可见, 用十二烷胺双甲基膦酸为捕收剂, 可以实现钙钛矿和钛辉石的分离。

由于羟肟酸是大量生产的工业产品, 而十二烷胺双甲基膦酸目前只是实验室合成产品, 考虑到经济效益以及大量应用的可行性, 对实际改性渣分选时应采用 C₅₋₉羟肟酸作捕收剂。因此这里仅探讨和研究 C₅₋₉羟肟酸作捕收剂的分选效果及作用机理。

2. 1. 4 抑制剂对矿物可浮性的影响

图 8 所示为以羟肟酸为捕收剂时, Na₂SiF₆ 用量对钙钛矿和钛辉石浮选的影响。由该图可见: Na₂SiF₆ 强烈抑制钛辉石, 同时对钙钛矿也有一定

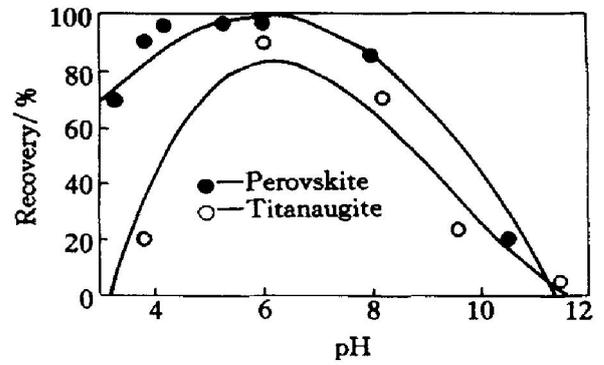


图 6 固定十二烷胺双甲基膦酸用量(30 mg/L)时 pH 值对矿物浮选的影响

Fig. 6 Effects of pH value on floatation with 30 mg/L of dodecyl amidomethyl phosphonic acid

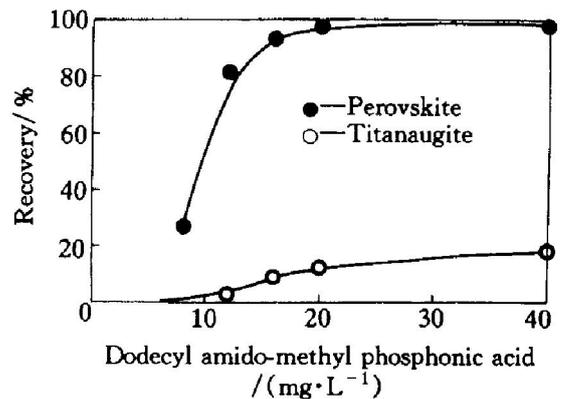


图 7 十二烷胺双甲基膦酸用量与可浮性的关系

Fig. 7 Effects of dosage of dodecyl amidomethyl phosphonic acid (pH= 6)

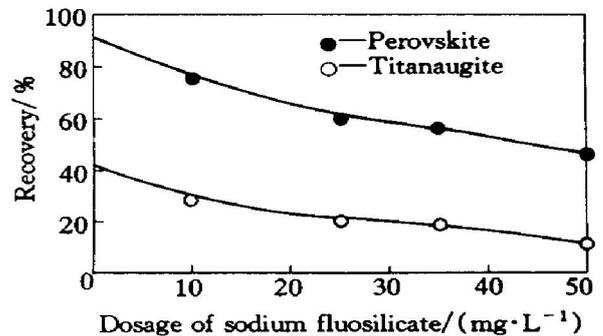


图 8 氟硅酸钠用量对矿物可浮性的影响

Fig. 8 Effects of dosage of sodium fluosilicate on mineral floatability

的抑制作用; 当 Na₂SiF₆ 用量 25 mg/L 时, 钙钛矿上浮率为 75.75%, 钛辉石为 15.72%。图 9 所示为水玻璃用量对钙钛矿和钛辉石浮选的影响。可见水玻璃与 Na₂SiF₆ 有相同的作用规律, 当水玻璃用量为 60 mg/L 时, 钙钛矿上浮率为 75.74%, 钛辉石为 22.82%; 故 Na₂SiF₆ 和水玻璃都可作为钛辉石的选择性抑制剂。

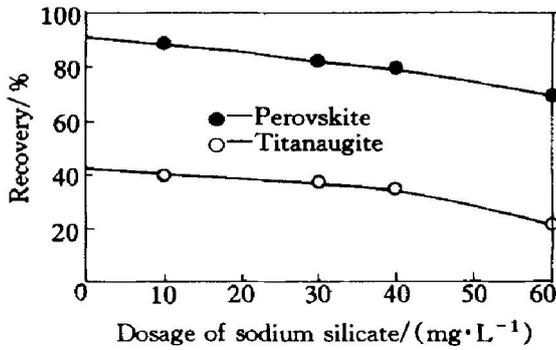


图9 水玻璃用量对矿物可浮性的影响

Fig. 9 Effect of dosage of sodium silicate on mineral floatability

2.1.5 浮选时间对矿物可浮性的影响

浮选时间是采用分批刮泡方法测定的，试验表明：C₅₋₉羟肟酸与钙钛矿作用速度快，加药调和后充气搅拌1 min即开始起泡，5 min可达浮选终点，浮选时间以4~5 min效果较好。羟肟酸与钛辉石作用速度慢，加药调和后充气搅拌3 min才起泡，10 min才浮选至终点。加入抑制剂后，钙钛矿和钛辉石的浮选速度都明显减慢，不过仍是钙钛矿浮选速度较快，而且随着浮选时间推移，对钛辉石抑制作用减弱，浮游率增加。再次表明水玻璃明显抑制钛辉石上浮，同时对钙钛矿也有轻微的抑制作用。

2.2 人工混合矿浮选

纯矿物试验结果表明：在弱酸性条件下，用C₅₋₉羟肟酸为捕收剂、水玻璃为抑制剂，可实现钙钛矿与钛辉石的分离。为此参照单矿物试验所确定的条件，钙钛矿和钛辉石各取1g，进行人工混合矿浮选分离，结果如表1所示。表1结果表明，以C₅₋₉羟肟酸为捕收剂，水玻璃为抑制剂，在弱酸性条件下，可获得含TiO₂38.94%，回收率为62.90%的钛精矿和含TiO₂13.80%的尾渣。人工混合矿分离效果与单矿物试验结论一致。

表1 人工混合矿浮选结果

Table 1 Flotation result of artificial mixture

Product	Yield/ %	TiO ₂ grade/ %	Recover/ %
Concentrate	37.53	38.94	62.90
Tailing	62.47	13.80	37.10
Feed	100.00	23.74	100.00

2.3 改性渣浮选试验

在纯矿物试验基础上，对改性渣进行条件试验，确定最佳药剂制度及工艺条件，而后对改性渣

进行了开路流程试验，试验流程及药剂条件如图10所示，试验结果见表2。试验结果表明：从含TiO₂22.40%的原矿，在弱酸性介质中，采用C₅₋₉为捕收剂，水玻璃为抑制剂，经一次粗选、一次扫选，三次精选的开路试验，可获得品位38.93%的精矿，尾矿品位可降至9.96%。

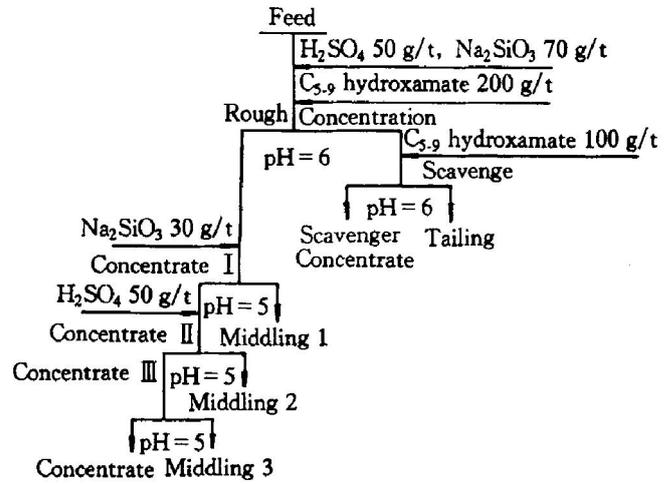


图10 开路试验工艺流程

Fig. 10 Technological flow sheet of open circuit

表2 开路试验结果

Table 2 Result of open circuit

Product	Yield/ %	TiO ₂ grade/ %	Recover/ %
Concentrate	17.13	38.93	29.29
Middling 1	33.25	20.16	29.47
Middling 2	13.43	27.71	16.35
Middling 3	6.47	25.27	7.19
Scavenger	12.98	18.16	10.37
Tailing	16.74	9.96	7.33
Total	100.0	22.75	100.0

3 分析与讨论

3.1 矿物晶体化学特征与可浮性的关系

钙钛矿晶体是理想的立方晶格，Ca²⁺离子位于立方体的顶点，Ti⁴⁺离子位于立方体的中心位置；O²⁻离子则构成面心立方体排列^[4]。钙钛矿具有平行{100}中等解理，质点分布密度为：Ti⁴⁺ 2.45个/nm²，Ca²⁺ 2.45个/nm²。

攀钛透辉石和富钛透辉石均为透辉石的类质同象固溶体，其中含有大量的Al³⁺，Ti⁴⁺类质同象质点。它们的晶体结构都与透辉石相近，都属单斜辉石。为简便起见，将其统称为钛辉石，前文中也是将二者统一作为钛辉石考虑的。

钛辉石为单链结构的硅酸盐矿物，它是由[SiO₄]四面体共两个角顶构成的直线单SiO₃联接

而成的, 其晶体结构中, $[\text{Si}_2\text{O}_6]$ 连结成无限延伸的二元单链, 链与链之间通过活性氧与阳离子相连接。钛辉石解理平行于链延伸方向的 $\{210\}$ 和 $\{110\}$, 两组完全解理^[5]。在解理面上, 根据类质同象取代量的不同, 计算得 $\{110\}$ 面上质点密度为: Al^{3+} 1.65 个/ nm^2 , Ti^{4+} 0.62 个/ nm^2 , Mg^{2+} 0.85 个/ nm^2 , Ca^{2+} 1.47 个/ nm^2 , Si^{4+} 2.94 个/ nm^2 ; 故钛辉石解理面上主要活性质点为 Ca^{2+} , Mg^{2+} , Si^{4+} , Al^{3+} , 而 Ti^{4+} 含量相对较小。

由矿物表面的质点组成看, 钙钛矿和钛辉石均含有 Ca 质点, 同时, 由于类质同象的存在, 钛辉石表面也具有 Ti 质点, 这将使它们的浮游性有一定的相似性; 但由于它们的晶体表面 Ca 和 Ti 质点密度不同, Ca 和 Ti 质点所处的位置及活性不同, 因此其可浮性存在一定差异。钛辉石表面具有钙钛矿表面所没有的 Mg, Al 质点和 SiO_3^{2-} , 且 Si-O 键极性较强, 可以采用对这些质点具有选择性抑制作用的抑制剂, 使钛辉石表面活性质点密度降低, 增大与钙钛矿的浮游性差距。

3.2 矿物表面电性与可浮性的关系

纯水中钙钛矿和钛辉石的 ζ 电位的测定结果如图 11 所示。图中曲线 2 所示为钛辉石的 ζ -pH 曲线, 其特点是随着 pH 值的下降, 矿物的动电电位的负值逐渐减小, 经过等电点, 最终由负值变为正值, 其 PZC 为 2.4 左右; 曲线 1 为钙钛矿的 ζ -pH 曲线, 其特点是随着 pH 值减小, 钙钛矿动电电位绝对值逐渐减少, 但在整个测量的范围内钙钛矿动电电位不变号, 始终为负值。这是由于在钙钛矿中, Ca^{2+} 和 TiO^{2-} 水化能及氧键的解离能相差不大^[6], 因此 Ca^{2+} 和 Ti^{4+} 都从矿物表面部分溶解, 使矿物表面带负电。钙钛矿表面 ζ 电位为负值, 且随 pH 增大, ζ 电位单调减小, 这一方面是由于钛

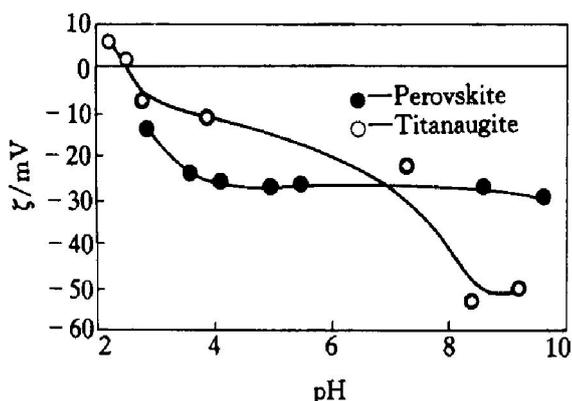


图 11 纯水中矿物的 ζ -pH 关系

Fig. 11 ζ -pH curves of mineral in pure water

铁矿表面两性的 Ti 的羟基络合物离解生成 TiO_3^{2-} , 另一方面是由于 OH^- 的吸附。

在整个试验范围内, 钙钛矿的 ζ 电位为负值, 而它在阴离子捕收剂 C_{5-9} 羟肟酸的作用下, 浮游性很好; 由图 12 可以看出, 与钙钛矿在水中的 ζ 电位相比, 在 C_{5-9} 羟肟酸溶液中, 钙钛矿的 ζ 电位向负值方向移动, 且随着羟肟酸用量增加, ζ 电位单调减小; 由此可以推断, 钙钛矿表面吸附了带负电荷的捕收剂离子, C_{5-9} 羟肟酸根离子不是靠静电引力在钙钛矿表面上吸附, 而是进入钙钛矿双电层的紧密层, 发生了化学吸附。

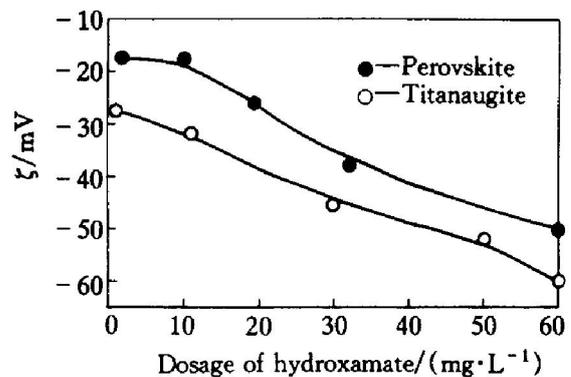


图 12 羟肟酸对矿物 ζ 电位的影响

Fig. 12 Influences of hydroxamate on ζ potential of mineral surface

3.3 溶液化学计算

由溶液化学理论可知^[7], 钙钛矿颗粒表面的 Ca 和 Ti 质点在水溶液中发生溶解和水化反应, 生成各种羟基络合物。根据羟基络合物的稳定性常数和溶液平衡关系, 绘制出钙钛矿溶解组分的溶解度对数图(LSD)示于图 13。由该图可见, 在 pH 值为 4~6 范围内, Ti^{4+} 主要以 $\text{Ti}(\text{OH})_3^+$ 及 $\text{Ti}(\text{OH})_2^{2+}$ 的形式存在。而 C_{5-9} 羟肟酸为阴离子捕收剂, 故在 pH 值为 4~6 范围内, 其活性基团很易与带正电的 $\text{Ti}(\text{OH})_3^+$ 和 $\text{Ti}(\text{OH})_2^{2+}$ 结合。可以认为 C_{5-9} 羟肟酸与钙钛矿表面的作用方式为: 矿物表面 Ti^{4+} 首先水解成 $\text{Ti}(\text{OH})_3^+$ 及 $\text{Ti}(\text{OH})_2^{2+}$, 然后羟肟酸再与之作用, 生成羟肟酸钛表面螯合物。文献[8]认为, 矿物表面阳离子与 C_{5-9} 羟肟酸形成 O, N 四元环。

文献表明^[9], 羟肟酸与碱土金属 Ca^{2+} , Mg^{2+} 形成的络合物稳定性较差, 而与 Ti^{4+} , Cu^{2+} , Fe^{3+} 和 Al^{3+} 等高价金属离子形成的络合物稳定性较强。钙钛矿表面主要为 Ti^{4+} 和 Ca^{2+} , 而钛辉石表面主要为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} , 只有少量类质同象取代的 Ti^{4+} , 因此 C_{5-9} 羟肟酸对钙钛矿具有选择性捕收作用。

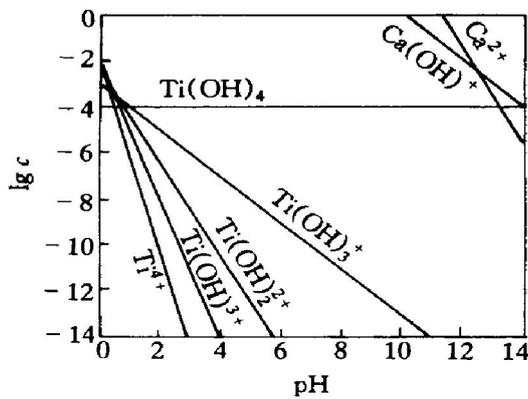


图 13 钙钛矿的 LSD

Fig. 13 LSD of perovskite

3.4 红外光谱分析

采用红外光谱测试羟肟酸与钙钛矿表面的作用,如图 14 所示,其中曲线 1 为 C₅₋₉羟肟酸的红外光谱,2 900, 2 850 cm⁻¹分别为 CH₃ 和 CH₂ 的反对称、对称的伸展振动吸收峰;1 460 cm⁻¹为 CH₂ 的剪式振动和 CH₃ 反对称变形振动,1 630 cm⁻¹为 OH 面外弯曲振动,3 450~ 3 030 cm⁻¹为 N—OH 上 OH 的伸缩振动,1 695~ 1 895 cm⁻¹之间为 C—N 和 C—O 的振动吸收,1 055~ 870 cm⁻¹为 N—O 伸缩振动吸收^[10]。曲线 2 为钙钛矿的红外光谱。曲线 3 为钙钛矿与 C₅₋₉羟肟酸作用的红外光谱,可以看出,作用后的谱图上不仅出现了 CH₂, CH₃ 的振动峰,而且在 1 598 cm⁻¹, 1 259 cm⁻¹和 925 cm⁻¹处明显出现吸收,显然这是羟肟酸与钙钛矿表面作用后, C—N, N—O 官能团与钙钛矿表面的金属质点发生了键合,是 C₅₋₉羟肟酸在钙钛矿表面发生化学吸附的有力证明。

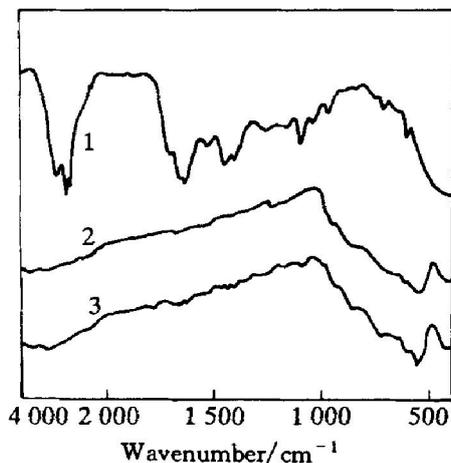


图 14 红外光谱

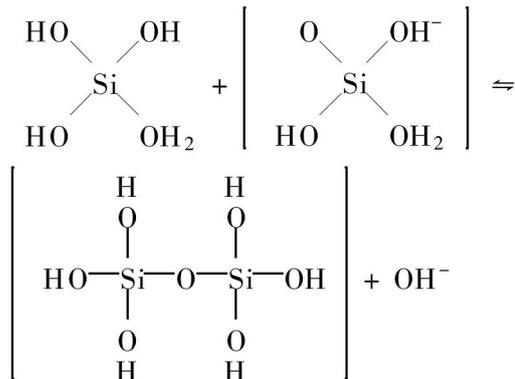
Fig. 14 Infrared spectrum

1—Hydroxamate; 2—Perovskite;

3—After adsorbing hydroxamate

3.5 水玻璃抑制钛辉石的作用机理分析

水玻璃与酸反应第一步的产物是 H₄SiO₄^[11],而且易发生聚合。在碱性或弱酸性溶液中,硅酸的聚合主要是通过硅酸分子和硅酸负离子之间的氧联反应实现:



聚硅酸通式可表示为 H_{2n+2}Si_nO_{3n+1} 或 xSiO₂·yH₂O, 所成溶胶带负电。

因此水玻璃对矿物的抑制作用主要是:在弱酸性条件或碱性条件下,通过氧联反应聚合而成的、带负电荷的胶态硅酸以及 SiO(OH)₃ 在矿物表面吸附后,使矿物强烈亲水,其吸附强度与抑制作用强度密切相关。使用抑制剂后钙钛矿和钛辉石浮选速度都变慢就是很好的说明。

钙钛矿受到轻微抑制,钛辉石受到强烈抑制,是由于胶态硅酸和 SiO(OH)₃ 离子与硅酸盐矿物具有相同的酸根,比较容易吸附在这些矿物表面,且吸附比较牢固,由于它们的吸附,阻止了捕收剂羟肟酸与钛辉石表面金属离子的键合。所以水玻璃是硅酸盐矿物的良好抑制剂。

4 结论

1) C₅₋₉羟肟酸是钙钛矿的良好捕收剂,水玻璃是钛辉石的有效抑制剂,而对钙钛矿只有轻微的抑制作用。在 pH= 4~ 6 条件下,以 C₅₋₉羟肟酸为捕收剂,水玻璃为抑制剂,可实现改性渣中钙钛矿与钛辉石等其它矿物的浮选分离。

2) 从含 TiO₂ 22.40% 的原矿,在弱酸性介质中,采用 C₅₋₉为捕收剂,水玻璃为抑制剂,经一次粗选、一次扫选,三次精选的开路试验,可获得品位 38.93% 的精矿,尾矿品位可降至 9.96%。

3) 采用将渣改性的方法来富集炉渣中微细粒钙钛矿,再用选矿方法回收,为其它类型炉渣中贵金属的回收提供了一条新思路。

[REFERENCES]

[1] SUI Zh-tong, ZHANG Pe-xin, Yamauchi C. Precipitar

- tion selectivity of boron compound from slags [J]. *Acta Mater*, 1999, 47(4): 1337–1344.
- [2] Naifonov T B, Klyuchnikova A M, Efremov V P, et al. Direct flotation of perovskite with IM-50 collector under pilot-plant conditions [J]. *Obogashch Rud*, (in Russian), 1976(5): 10–73.
- [3] MA Jur-wei, SUI Zhi-tong, CHEN Bing-chen. Separating titania from treated slag by gravity separation or flotation [J]. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10(4): .
- [4] 何铸文. 矿物晶体化学 [M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1982.
HE Zhur-wen. *Mineral Crystal Chemistry* [M]. University of Science and Technology of China Press, 1982.
- [5] 潘兆橧. 结晶学与矿物学 [M]. 北京: 地质出版社, 1994. 148.
PAN Zhaō-lu. *Crystallography and Mineralogy* [M]. Beijing: Geological Press, 1994. 148.
- [6] LU Shou-ci. Mechanism of pH value on the flotation of titanium mineral [J]. *Acta Metalurgical Sinica*, 1961(2): 27–32.
- [7] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学 [M]. 长沙: 湖南科技出版社, 1988.
WANG Dian-zuo, HU Yue-hua. *Flotation Solution Chemistry* [M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1988.
- [8] 刘邦锐. 螯合浮选剂 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
LIU Bang-ru. *Chelating Flotation Reagent* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982.
- [9] 高颖剑, 林江顺. C₅₋₉羟肟酸浮选赤铁矿 [J]. *有色金属(季刊)*, 1999(3).
GAO Ying-jian, LIN Jiang-shun. Study on flotation of hematite with C₅₋₉ hydroxamate [J]. *Nonferrous Metal*, 1999(3).
- [10] 彭文世. 矿物红外光谱图集 [M]. 北京: 科学出版社, 1982. 108.
PENG Wen-shi. *Mineral Infra-Red Spectroscopy* [M]. Beijing: Science Press, 1982. 108.
- [11] 爱格列斯著 A M. 浮选调整剂 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
Agris A M. *Flotation Regulator* [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1982.

Flotation behavior and mechanism on perovskite in Ti-bearing blast furnace slag

MA Jur-wei¹, SUI Zhi-tong², CHEN Bing-chen³, NIE Yong-feng¹

(1. Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110006, China;

3. School of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110006, China)

[Abstract] The effects of sodium oleate, hydroxamate, dodecyl amidomethyl phosphonic acid, sodium fluosilicate, and sodium silicate on the flotation of perovskite in treated slag have been studied, and the experiments show that perovskite can be effectively separated from rich-titanium diopside, titanite, and spinel in weak acid pulp, with hydroxamate as collector, sodium silicate as depressant, and sulphuric acid as regulator. The chemical mechanism of flotation reagent on the mineral surface has been tested by the chemical solution calculation, zeta potential and infrared spectrum. There are three major findings: 1) the distributing density of Ca and Ti particles on the crystal surface, the location and activation are different, which makes the floatability different between perovskite and titanite; 2) zeta potential of perovskite remains negative during the whole process and its value decreases with the dosage of hydroxamate increasing, which indicates that hydroxamate is chemically adsorbed on surface of perovskite; 3) the result is also supported by the infrared spectrum study that chemical bounding has happened between C—N, N—O functional group of hydroxamate and titanium particles of perovskite.

[Key words] perovskite; flotation; hydroxamate; sodium silicate; zeta potential; solution chemistry