

镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离中有机抑制剂的机理研究进展

孔令宇¹, 吕晋芳^{1,2}, 魏民¹, 郑永兴²

1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;
2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD923⁺.14; TD954 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)02-0033-09
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.02.004

摘要 蛇纹石是一种富含镁的硅酸盐矿物,常与镍黄铁矿共生。在镍黄铁矿浮选过程中,蛇纹石的上浮会造成镍精矿中镁含量超标,从而影响镍黄铁矿的冶炼。介绍了蛇纹石的晶体结构和表面性质,剖析了蛇纹石难以抑制的原因,阐明了常用有机抑制剂羧甲基纤维素、淀粉类、壳聚糖、瓜尔胶及组合药剂对蛇纹石的抑制机理。

关键词 镍黄铁矿;蛇纹石;浮选分离;有机抑制剂;抑制机理

镍是我国重要的战略性有色金属,在航天工业、国防工业、合金材料等领域都有广泛的应用^[1]。我国镍矿可开采储量为399.64万t,分布于11个省(区),其中甘肃省的可开采储量高达263.62万t,占全国的65%。甘肃的金川镍矿是国内规模最大的镍生产基地,其主要利用镍黄铁矿生产镍。由于蛇纹石等含镁硅酸盐充填于镍黄铁矿晶体裂隙中,导致蛇纹石难以受抑制进入精矿中,使得精矿中镁含量较高^[2]。精矿中镁含量超标,因镁熔点高需升高温度将其去除,无形之中增加了冶炼成本,同时降低了冶炼回收率以及对冶炼设备造成损坏^[3]。由此可见,降低镍精矿中镁的含量,对于提升精矿品质和降低生产成本具有十分重要的意义,因此在镍黄铁矿浮选中对蛇纹石的抑制一直是金川镍矿亟需解决的问题。

目前,众多学者在酸浸降镁、电化学调控和浮选药剂等方面研究出多种降镁方法及措施,但都有一定的局限性。酸浸法降镁酸耗大、对设备腐蚀严重,实际应用困难;电化学调控存在设备配置复杂和难以工业化应用的缺点。浮选降镁工艺流程短、生产成本低、降镁效果佳,所以在实际生产中得到广泛的应用。目前,降镁药剂可分为有机抑制剂和无机抑制剂两大类。常见的无机抑制剂包括水玻璃和六偏磷酸钠,但其抑制效

果不理想,选择性差;有机抑制剂主要包括羧甲基纤维素、淀粉类、壳聚糖、瓜尔胶等。由于有机抑制剂具有成本低廉、易降解、来源广、对环境友好等优点,而且可通过药剂合成或改性提高其选择性^[4]。通过总结有机抑制剂在镍黄铁矿浮选过程中对蛇纹石的抑制机理,对研发新型高效有机抑制剂具有指导和借鉴作用,实现蛇纹石和镍黄铁矿的高效分离具有重要的实际意义。

1 蛇纹石晶体结构及表面性质

蛇纹石 $[\text{Mg}_6\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8]$ 是辉石和橄榄石在热液变质过程中的典型蚀变产物^[5],富含镁,镁含量一般为43.6%。由于蛇纹石具有特殊的晶体结构和表面性质,可通过机械夹带^[6]、杂合聚集(黏液涂层)^[7]和“异相凝聚”作用^[8]等方式进入镍精矿,造成镍精矿中镁含量超标。

1.1 蛇纹石晶体结构

蛇纹石的晶体结构如图1所示,其属于TO型的层状晶体结构硅酸盐矿物,由硅氧四面体(T层)与氢氧镁石八面体(O层)组成结构单元层,在单元层结构中,原子间以共价键结合,层间以氢键连接^[9]。多个四面

收稿日期:2022-03-02

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52074139);云南省基础研究专项(202001AU070028);云南省基础研究计划项目昆明理工大学“双一流”创建联合专项(202101BE070001-036_202202AG050010)

作者简介:孔令宇(1996-),男,云南昆明人,硕士研究生,研究方向为浮选理论与工艺;E-mail:2625798482@qq.com。

通信作者:吕晋芳(1985-),女,山西太原人,博士,硕士生导师,研究方向为资源与环境;E-mail:jflv2017@126.com。

体连接成网状且朝向一致,四面体角顶的氧可取代八面体中含有的羟基,两者大小尺寸不一致,故单元层可卷曲成管状^[10]。由于单元层间氢键作用力小,蛇纹石主要沿层间解离,使得蛇纹石易于泥化。蛇纹石泥化后,粒度小、黏性强,易吸附于其他矿物表面,使得其他矿物的表面性质发生改变,同时降低矿粒与气泡的附着概率,影响矿物的浮选分离^[11-12]。

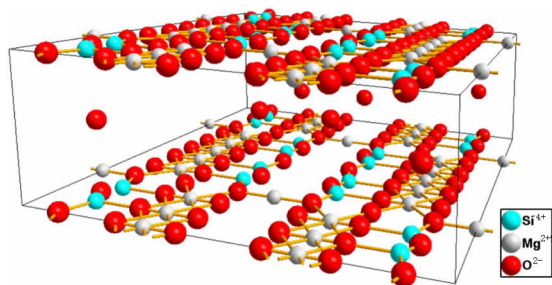


图1 蛇纹石晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of serpentine

1.2 蛇纹石表面性质

蛇纹石是特殊的层状晶体结构硅酸盐矿物,层与层之间以氢键连接,氢键作用力小、易断裂,故蛇纹石解离时主要沿层间断裂。蛇纹石解离之后表面暴露出大量的羟基、硅离子、镁离子、氧离子和氢氧根离子,其中羟基、氧离子和氢氧根离子易与水分子形成氢键,故天然可浮性差^[13]。此外,由于羟基能与水形成氢键则在水中优先溶出,以及较多的镁离子留在蛇纹石表面,使得蛇纹石表面荷正电^[14]。解离后的蛇纹石,大量的氢键残存在基面上,端面则有羟基存在,较高的表面电荷和残存的表面氢键赋予其极好的吸附阴离子(团)及有机物性能^[9]。在 $\text{pH} = 10.1$ 时,镍黄铁矿表面荷负电荷,蛇纹石与镍黄铁矿因表面电荷不同,产生静电引力,形成“异相凝聚”现象,阻碍镍黄铁矿与捕收剂的吸附和向气泡黏附,从而对镍黄铁矿浮选产生影响^[15]。

2 蛇纹石进入镍精矿的原因

对蛇纹石进入镍精矿的原因进行分析,从而“对症下药”,可有效地降低镍精矿中的镁含量。目前,对于蛇纹石进入精矿的原因主要归咎于四方面:(1)泥化后罩盖镍黄铁矿表面以机械夹带的方式进入精矿中;(2)被金属离子活化后吸附在精矿表面进入精矿;(3)具有一定的天然可浮性一同被浮起进入精矿;(4)蛇纹石与镍黄铁矿以连生体方式进入精矿中。

2.1 泥化罩盖镍黄铁矿表面

蛇纹石是层状硅酸盐矿物,碎磨时易从层间解离,加之硬度较小,使之易于泥化。泥化后的蛇纹石因表

面电性不同,与镍黄铁矿产生“异相凝聚”作用,所以蛇纹石泥化后吸附于镍黄铁矿表面进入精矿中。此外,蛇纹石松散易碎,在破碎磨矿过程之中会产生大量的次生矿泥,而矿泥间“自凝聚”的现象使矿浆黏度增加,导致蛇纹石矿泥包裹在镍黄铁矿颗粒表面,形成“黏液涂层”,并黏附在气泡表面,夹杂于泡沫之中,进入镍精矿^[16-18]。

2.2 金属离子活化作用

Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 等金属离子对蛇纹石会产生活化作用,活化后的蛇纹石能够被黄药捕收进入精矿中^[19]。其活化作用主要体现在两个方面:(1)在偏中性和弱碱性条件下, Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 的氢氧化物增大蛇纹石表面电位,且随离子浓度的增大,Zeta 电位也随之增大,但加入黄药后,黄药与 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 的氢氧化物发生反应,蛇纹石表面电位降低,使得蛇纹石被活化,而在酸性条件下,没有活化作用;(2)部分金属离子会覆盖于蛇纹石表面,加入黄药捕收剂后,与之反应生成相应的黄原酸盐,使蛇纹石的浮选活性得到提高,活化了蛇纹石^[20]。

2.3 天然可浮性

蛇纹石因其特殊的晶体结构和表面性质,具有一定的天然可浮性,浮选时会因捕收剂的选择性差,随镍黄铁矿一起被捕收。试验证明,在 $\text{pH} = 7$ 时,只添加起泡剂蛇纹石的回收率达到 18%^[18]。此外,蛇纹石层间价键较弱,当矿物表面的化学键弱化时,不易与极性很强的水分子结合^[21],且其断裂面含有的大量 $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$ 、 $\text{O}-\text{Si}-\text{O}$ 等化学键活性强,但碱性条件下极性会减弱,疏水性增强,使矿物颗粒不易被水润湿,从而蛇纹石具有一定的天然可浮性^[22],在药剂的作用下会随镍黄铁矿浮起进入精矿。

2.4 单体解离困难

在金川镍矿中镍黄铁矿是主要的含镍矿物,由于地质条件的差异,导致原生矿物与次生矿物蚀变共存,使得矿石成分复杂、嵌布粒度较细^[23]。金川镍矿受地质条件的影响,导致镍黄铁矿的嵌布粒度较细,在 $0.02 \sim 0.417 \text{ mm}$ 的范围内;此外镍黄铁矿与黄铁矿等矿物形成共生集合体以海绵状充填于蛇纹石晶粒间隙,部分镍黄铁矿则以浸染状嵌布于蛇纹石之中^[2]。这就造成蛇纹石与镍黄铁矿难以单体解离,最终两者连生体共存,一同进入精矿中。

3 有机抑制剂对蛇纹石的抑制机理

有机抑制剂是抑制剂的重要类型,也是近年来研究的重点,其凭借种类多、选择性好、对环境友好等优点在硫化矿浮选中得到广泛应用^[24]。在镍黄铁矿浮选中,羧甲基纤维素、淀粉类、壳聚糖、瓜尔胶等常用于

对蛇纹石的抑制,也有将有机抑制剂与无机药剂组合使用的组合药剂,以增强对蛇纹石的抑制效果。

3.1 羧甲基纤维素

羧甲基纤维素(CMC)是由纤维素羧基化得到的一种多糖,其结构如图2所示。从图2可看出,羧甲基纤维素的每个葡萄糖结构单元都含有三个-OH,羟基上的氢原子与羧基能发生取代反应,氢原子被取代的数目则定义为取代度(DS);聚合度(DP)表示羧甲基纤维素中结构单元的数量,即 n 值^[25]。CMC含有大量的-COOH和-OH,-COOH在水中可水解成 COO^- ,CMC的表面电性发生变化并且能与一些金属离子发生化学反应,抑制脉石矿物;-OH是一种极性基团,能与水分子发生氢键作用,改变矿物的表面亲水性,使矿物得到抑制、分散和絮凝。在镍黄铁矿浮选中,CMC对蛇纹石的抑制机理研究也主要围绕这两个基团展开。

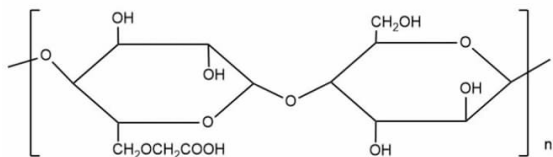


图2 羧甲基纤维素的结构

Fig. 2 Structure of carboxymethyl cellulose

羧甲基纤维素通过氢键作用吸附于蛇纹石表面,从而引入亲水基团,使蛇纹石受抑制。李治华^[12]认为,羧甲基纤维素含有-OH和-COOH两大官能团,其中-COOH水解产生的 COO^- 使CMC表面带负电,在弱碱性条件下,羧甲基纤维素与蛇纹石因表面电性不同发生静电吸附,从而蛇纹石表面会吸附上一层羧甲基纤维素。羧甲基纤维素包裹于蛇纹石表面,包裹在外层的羧甲基纤维素含有的-OH又与水形成氢键作用,在氢键的作用下羧甲基纤维素外层又形成一层

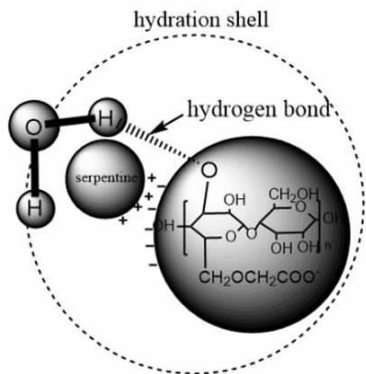


图3 CMC氢键作用机理

Fig. 3 Mechanism of CMC hydrogen bonding

薄薄的水化膜,从而形成了一个中心为蛇纹石、中间为羧甲基纤维素、外层为水化膜的包裹体,使得蛇纹石的表面亲水性得到增强,抑制了蛇纹石,抑制剂机理如图3所示。邱显扬^[26]结合实际认为,在镍黄铁矿浮选体系中使用六偏磷酸钠或水玻璃药剂,这些药剂解离产生的磷酸阴离子、胶态硅胶、 HSiO_3^- 和 SiO_3^{2-} 等离子,使得弱碱性(pH为10)条件下蛇纹石与羧甲基纤维素不发生静电吸附,羧甲基纤维素通过化学吸附和氢键作用抑制蛇纹石。

CMC与蛇纹石因表面电性的差异产生“异相凝聚”,改变蛇纹石表面电位,也是抑制蛇纹石的重要机理之一。王德燕等^[17]试验发现,蛇纹石表面荷正电,CMC中含有的-COOH水解后能产生 COO^- 阴离子, COO^- 阴离子使得CMC表面荷负电,两者因电性相反产生静电吸附,蛇纹石的表面电位由正变负,因此与荷负电的镍黄铁矿产生静电斥力,减少了蛇纹石矿泥黏附硫化镍矿表面,有益于镍黄铁矿的浮选,抑制机理如图4所示。冯博等人^[27]通过分析红外光谱发现,蛇纹石与CMC作用后,蛇纹石的吸收峰发生了变化,分别在 Mg-O-H 处和 Mg-O 处发生位移变化,从而推测CMC与蛇纹石不仅产生静电吸引作用,还产生了化学吸附,这是由于CMC中羧基与蛇纹石表面暴露出的镁离子发生了反应。

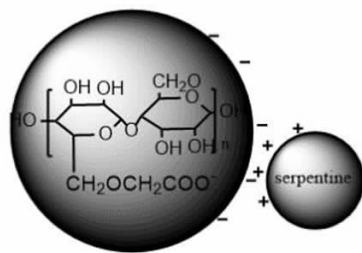


图4 CMC静电作用机理

Fig. 4 Mechanism of CMC electrostatic

在镍黄铁矿浮选中CMC对蛇纹石的影响是多方面的,除抑制作用外,还具有分散、絮凝作用,分散和絮凝能够减少蛇纹石矿泥对镍黄铁矿浮选的影响^[28]。M. C. Pietrobon等^[29]通过试验发现,CMC是大分子的阴离子聚合物,含有大量的羟基和羧基官能团,这些基团使得CMC可通过氢键与蛇纹石矿物形成稳定黏附,降低它的 ζ 电位,从而使蛇纹石从镍黄铁矿中分离出来。此外,CMC可以起到空间位阻剂的作用,阻止蛇纹石颗粒间的范德华力,减少了颗粒间的凝聚,增加了蛇纹石矿泥的分散性,改善泡沫排水性能,相应降低蛇纹石的回收率^[30]。CMC不仅能对蛇纹石矿泥产生分散作用,也具有絮凝作用。冯博等人^[26]通过试验发现,羧甲基纤维素对蛇纹石具有絮凝作用,CMC通过静电吸附和蛇纹石表面的镁质点发生化学反应产生絮

凝作用,微细粒蛇纹石聚集在一起增大了表观粒度,减少了泡沫夹带现象。不同的温度条件下,由于 CMC 在水中的状态不同,导致在矿物表面有不同的吸附行为,在 25 °C 条件下,CMC 通过氢键作用溶解于水中,但在矿物表面吸附量较低;当温度升至 65 °C 时,溶液中会析出部分 CMC,析出的 CMC 在蛇纹石表面沉积,导致吸附量增加,增强了 CMC 对蛇纹石的絮凝作用^[31]。

羧甲基纤维素是一种纤维素醚类聚合物,随聚合度的不同其含有的羟基和羧基数量也不同,对于镍黄铁矿浮选中蛇纹石的抑制、分散和凝聚作用,主要得益于 -OH 和 -COOH 两大官能团,其抑制机理目前认为也主要是氢键作用、静电吸附和化学反应^[32-36]。

3.2 淀粉类

淀粉是自然界中最丰富的物质之一,大量储存于各种植物根茎和果实中,其结构如图 5 所示。淀粉分直链淀粉和支链淀粉,其中支链淀粉占 75% ~ 80%,随支链数量的增加,淀粉中羟基数量随之增加,羟基可与水分子形成氢键,有利于增加淀粉的溶解度^[37]。此外,通过氢键作用淀粉能吸附于矿粒表面,使矿粒表面的亲水性发生改变,从而使矿粒受到抑制或絮凝^[38]。人们根据对浮选药剂的需求,对天然淀粉进行切断、重排、氧化以及引入化学基团,从而得到性质不同的改性淀粉^[39]。目前,淀粉类抑制剂已广泛用于硫化矿浮选和抑制含镁硅酸盐矿物^[40]。

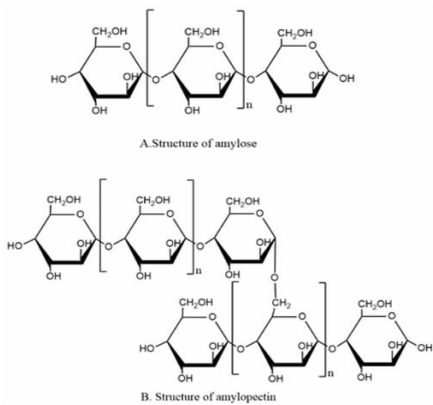


图 5 淀粉的结构

Fig. 5 Structure of starch

阴离子淀粉是在天然淀粉基础上经过酯化、醚化等化学反应引入羧基、磺酸等基团制得的淀粉衍生物,与天然淀粉相比,阴离子淀粉具有较好的可溶性、对蛇纹石的抑制效果更佳^[41-42]。ZD-1 型阴离子淀粉,具有淀粉的通性,对蛇纹石的抑制机理与 CMC 相似^[43]。ZD-1 阴离子淀粉中含有羧基,羧基水解后产生的 -COO⁻ 离子使其表面荷负电,从而通过静电作用吸附蛇纹石表面,改变蛇纹石 ζ 电位,使其受到抑制,作用机理如图 6 所示^[44-45]。

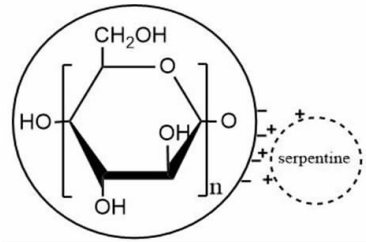


图 6 淀粉静电作用机理

Fig. 6 Electrostatic mechanism of starch

利用原淀粉上的羟基与有机酸或无机酸进行酯化反应,会生成一类新的淀粉——酯化淀粉。酯化淀粉由于在反应时会比原淀粉多引入一些阴离子官能团,从而使其亲水性提高^[46]。酯化淀粉与蛇纹石作用后,酯化淀粉含有的 -OH 以氢键作用的方式吸附在蛇纹石的表面,增强蛇纹石的亲水性,使蛇纹石得到抑制^[47-48],其作用机理如图 7 所示。淀粉枝接聚合物在酸性的条件下,酸性越强,其与蛇纹石表面作用更强,这是由于淀粉枝接聚合物里面含有羟基和羰基,发生了酸碱中和反应。矿浆 pH = 8 时,淀粉枝接聚合物通过氢键作用吸附于蛇纹石表面,使蛇纹石表面荷负电,镍黄铁矿与蛇纹石矿物颗粒之间作用力由静电引力变为静电斥力,从而抑制了蛇纹石^[49]。

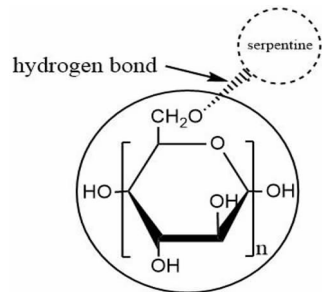


图 7 淀粉氢键作用机理

Fig. 7 Mechanism of starch hydrogen bonding

淀粉类抑制剂是高分子聚合物,其所带官能团可根据矿物表面性质引入,使其具有一定的选择性,从而可以通过物理吸附、络合作用和键合作用^[42,50-51]等对脉石和矿物有抑制作用,这也是淀粉类抑制剂能广泛应用于浮选中的重要原因。

3.3 壳聚糖类

壳聚糖是由甲壳素脱去乙酰胺而形成的有机高分子化合物,是自然界中唯一的天然碱性多糖,其具有优良的生物相容性和金属螯合性,在医药、食品、纺织、化妆品工业、废水处理等领域广泛应用^[52-53],结构如图 8。壳聚糖类有机物在浮选领域也有应用,根据浮选药剂对官能团的需要,在原壳聚糖的基础上进行改性,从而使其拥有羧基官能团,加强了其对蛇纹石的抑制效果。

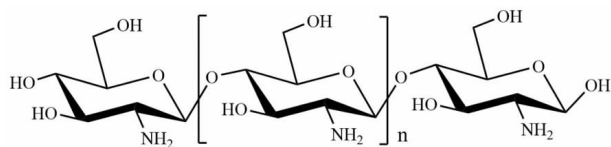


图 8 壳聚糖的结构

Fig. 8 Structure of chitosan

壳聚糖对蛇纹石的作用与其溶解性质和官能团有关,其对蛇纹石的抑制主要有两方面:酸性条件下的分散作用和弱碱性条件下的凝聚作用。酸性条件下,在矿浆中加入壳聚糖,溶于水中的壳聚糖通过羟基与蛇纹石形成氢键,使壳聚糖吸附于蛇纹石表面,分散了蛇纹石矿泥;而随 pH 值慢慢升高至 9 时,由于溶解度变小,导致部分壳聚糖从溶液中析出,而析出的壳聚糖在蛇纹石表面发生沉积,使得蛇纹石矿泥凝聚成团,从而产生较强的絮凝作用^[54-55],作用机理如图 9 所示。

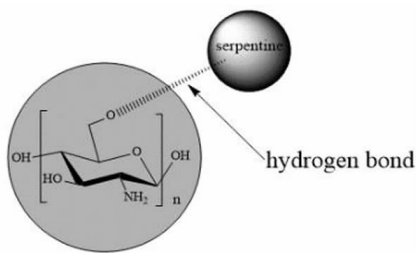


图 9 壳聚糖氢键作用机理

Fig. 9 Hydrogen bonding mechanism of chitosan

羧化壳聚糖是由壳聚糖改性而来,通过 $-\text{CH}_3\text{COOH}$ 官能团取代原有的 $-\text{NH}_2$ 官能团,使其与 CMC 一样含有 $-\text{COOH}$ 。在镍黄铁矿浮选中,在弱碱性条件下镍黄铁矿与蛇纹石表面电性相反,两者产生静电吸附;而加入羧化壳聚糖,其含有的乙酰胺基和羧基官能团与蛇纹石表面暴露出的镁离子发生络合,使蛇纹石表面电位由正变负,蛇纹石与镍黄铁矿产生较强的静电斥力,减少了二者的异相凝聚^[56-58],作用机理如图 10 所示。

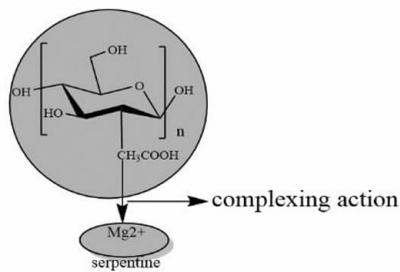


图 10 壳聚糖络合作用机理

Fig. 10 Mechanism of chitosan complexation

壳聚糖类多糖常作为絮凝剂、分散剂用于浮选领域以及对选矿废水的处理,这是与其所含官能团和溶

解性质分不开的,在碱性条件下可产生凝胶,且随 pH 值的变化凝胶能消失也可重现。在镍黄铁矿浮选中,其通过氢键作用和络合作用对蛇纹石主要起絮凝、分散作用。

3.4 瓜尔胶

瓜尔胶,又称古尔胶,是一种以半乳糖甘露聚糖为基本结构单元的多糖,其结构如图 11 所示。瓜尔胶的结构单元半乳糖甘露聚糖中含有大量的羟基,在这些羟基中有一些顺位羟基,这些羟基可彼此加固,有益于氢键的形成。瓜尔胶具有天然亲水性,在浮选中可用于对蛇纹石、滑石等硅酸盐脉石的抑制^[59-60]。瓜尔胶作为抑制剂抑制蛇纹石,通过红外光谱分析发现:蛇纹石在和瓜尔胶反应后,除了蛇纹石的吸收峰外, N - H 吸收峰和 O - H 吸收峰也出现了位移变化,从而推测蛇纹石与瓜尔胶之间发生了化学吸附^[61]。

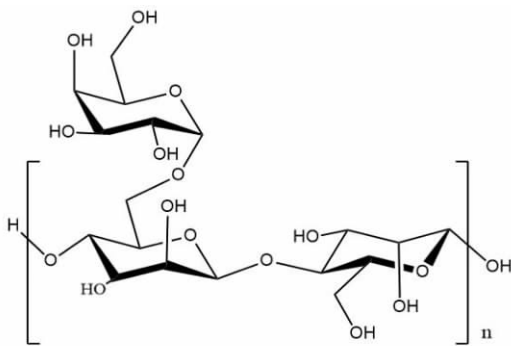


图 11 瓜尔胶的结构

Fig. 11 Structure of guar gum

3.5 组合药剂

矿浆中的 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 对蛇纹石的活化是造成其进入精矿中的重要原因之一,对此采用络合剂 + 抑制剂的组合药剂,既可消除离子的活化作用,又能抑制蛇纹石。络合剂中含有大量的羧基和羟基等官能团,这些官能团与铜、镍等金属阳离子发生络合形成络合物,去除吸附于蛇纹石表面的活化离子,减少对捕收剂浮选活性的影响;在镍黄铁矿表面生成的氧化薄膜,络合剂能够将其溶解,使得镍黄铁矿浮选活性得到改善。同时抑制剂和分散剂通过物理吸附、化学吸附和化学反应等作用,使蛇纹石的表面电位发生改变,亲水性增强,有效抑制蛇纹石^[62-63]。张亚辉等^[64]认为,柠檬酸、EDTA 和草酸等可作为金属离子的络合剂,能够有效地去除吸附于蛇纹石、绿泥石等含镁硅酸盐矿物表面的 Cu^{2+} 和 Ni^{2+} ,减少金属离子对蛇纹石的活化作用,配合抑制剂或分散剂一起使用能够显著降低镍精矿中的 MgO 含量。张亚辉等^[65]基于柠檬酸 + 六偏磷酸钠组合药剂对金川镍矿进行浮选降镁试验,最终镍精矿

中镁含量由 7.67% 降至 6.33%。李玄武等^[66]以柠檬酸为络合剂配合改性淀粉进行试验,将镍的回收率从 81.89% 提高至 85.30%,而镁含量由 6.76% 降至 6.18%。黄俊玮等^[67]在 EDTA 二钠 + 六偏磷酸钠 + JC 的药剂体系下,对铜镍混合精矿进行降镁提质试验,试验结果与现场流程工艺相比,镍的回收率提高了 0.35 百分点,精矿中的镁含量下降了 0.59 百分点。

EP 组合药剂是在已知结构的化合物基础上进行复配组合形成的新药剂,其对蛇纹石的抑制作用依赖于含有的官能团能与蛇纹石产生静电吸附和络合作用。EP 中含有羧基和羟基,羧基水解产生 $-COO^-$,进而通过静电吸附于蛇纹石表面,使蛇纹石的表面电位发生改变;蛇纹石解离后表面会暴露出许多金属离子,EP 组合药剂能与金属离子产生络合反应,生成稳定、可溶的产物,有效抑制蛇纹石^[68]。

FY 组合药剂是一种由无机分散剂与有机抑制剂按配比混合而成的新型抑制剂,其对蛇纹石的抑制作用主要有以下两方面:一是分散了蛇纹石的矿泥,减少泥化罩盖现象;二是能够吸附于蛇纹石矿泥表面来增强其表面的亲水性,提高对蛇纹石的抑制效果。试验证明以 FY 组合药剂作为抑制剂,最终精矿中镁含量降低了 6.03 百分点^[69]。

3.6 其他药剂

国外学者发现,通过对苔藓(地衣)的水溶液进行加热可提取得到苔聚糖和异苔聚糖,经试验证明该类物质对蛇纹石有非常好的抑制效果,可以替代淀粉和 CMC^[70];彼得罗维奇发现含有一个胺基和 3~7 个羟基的多羟基胺对蛇纹石也有抑制作用,它能与蛇纹石反应生成亲水性化合物,使其受到抑制^[71-72]。

4 结语

蛇纹石因其特殊的晶体结构及表面性质,在镍黄铁矿浮选中因泥化罩盖吸附、受金属离子活化作用、天然可浮性以及难解离原因进入镍精矿,导致精矿中镁含量超标,给后续的冶炼带来影响。有机抑制剂对镍黄铁矿和蛇纹石浮选分离的影响及抑制,其主要源于所含有的羟基、羧基等官能团,这些官能团能与蛇纹石表面以氢键作用、物理吸附和化学吸附等方式结合,使蛇纹石受到抑制、分散和絮凝。近年来,也有学者研究新型的组合药剂,在对蛇纹石的抑制方面,取得了良好的效果。未来应加强对有机抑制剂对蛇纹石抑制机理研究,探索更多的抑制途径,从而针对性地开发选择性高、效果好的新药剂,与此同时不断改进现有药剂,使其性能更优。

参考文献:

[1] 杨志强,王永前,高谦,等. 中国镍资源开发现状与可持续发展策略及其关键技术[J]. 矿产保护与利用,2016(2):58-69.

- YANG Z Q, WANG Y Q, GAO Q, et al. Development status, sustainable development strategies and key technologies of nickel resources in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2016 (2): 58-69.
- [2] 李艳峰,费涌初. 金川二矿区富矿石选矿的工艺矿物学研究[J]. 矿冶,2006(3):98-101.
LI Y F, FEI Y C. Study on process mineralogy of beneficiation of rich ore in Jinchuan No. 2 Mining Area [J]. Mining and Metallurgy, 2006 (3): 98-101.
- [3] 王景旭,李长贵,耿隽菁,等. 降低镍精矿中氧化镁含量的研究与应用[J]. 有色矿山,2001(5):28-30+43.
WANG J X, LI C G, GENG J H, et al. Research and application of reducing magnesium oxide content in Nickel concentrate [J]. Non-ferrous Mine, 2001(5): 28-30+43.
- [4] 彭建城,熊道陵,马智敏,等. 有机抑制剂在浮选中抑制黄铁矿的研究进展[J]. 有色金属科学与工程,2012,3(2):61-65.
PENG J C, XIONG D L, MA Z M, et al. Research progress of organic inhibitors for pyrite inhibition in Flotation [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2012, 3(2): 61-65.
- [5] KIRJAVAINEN V, HEISKANEN K. Some factors that affect beneficiation of sulphide nickel-copper ores [J]. Minerals Engineering, 2007, 20 (7): 629-633.
- [6] KIRJAVAINEN, V. M., Review and analysis of factors controlling the mechanical flotation of gangue minerals [J]. International Journal of Mineral Processing, 1996, 46(1): 21-34.
- [7] EDWARDS, C. R., W. B. KIPKIE, AND G. E. AGAR. The effect of slime coatings of the serpentine minerals, chrysotile and lizardite, on pentlandite flotation [J]. International Journal of Mineral Processing, 1980, 7(1): 33-42.
- [8] FENG B, LU Y, LUO X. The effect of quartz on the flotation of pyrite depressed by serpentine [J]. Integrative Medicine Research, 2015, 4(1): 8-13.
- [9] 李治杭,韩跃新,李艳军,等. 蛇纹石表面特性研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2018,39(3):404-408.
LI Z H, HAN Y X, LI Y J, et al. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(3): 404-408.
- [10] 李学军,王丽娟,鲁安怀,等. 天然蛇纹石活性机理初探[C]//岩石矿物学杂志第二届全国环境矿物学学术研讨会论文集. 编辑部. 北京:2004:67-71.
LI X J, WANG L J, LU A H, et al. Preliminary study on active mechanism of natural serpentine [C]// Proceedings of the 2nd National Symposium on Environmental Mineralogy. Editorial Department of Journal of Rock Mineralogy, 2004: 67-71.
- [11] 唐敏,张文彬. 微细粒铜镍硫化矿浮选的电化学调控 [J]. 有色矿冶,2003(5):12-14+50.
TANG M, ZHANG W B. Electrochemical control of flotation of fine Cu-Ni sulfide ore [J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 2003(5): 12-14+50.
- [12] 李治华. 含镁脉石矿物对镍黄铁矿浮选的影响 [J]. 中南矿冶学院学报,1993(1):36-44.
LI Z H. Influence of mg-bearing gangue minerals on the flotation of pyrite [J]. Journal of Central South Institute of Mining and Metallurgy, 1993(1): 36-44.
- [13] 黄晓毅,罗小新,张兴旺. 两种层状镁硅酸盐矿物的晶体结构与可浮性研究 [J]. 重型机械,2010(S2):105-108.
HUANG X Y, LUO X X, ZHANG X W. Study on crystal structure and floatability of two layered magnesium silicate minerals [J]. Heavy Machinery, 2010(S2): 105-108.

- [14] FENG B, LU Y, FENG Q, et al. Mechanisms of surface charge development of serpentine mineral [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4): 1123 - 1128.
- [15] 郭昌槐, 胡熙庚. 蛇纹石矿泥对金川含镍磁黄铁矿浮选特性的影响 [J]. 矿冶工程, 1984(2): 28 - 32 + 75.
GUO C H, HU X G. Effect of serpentine slime on flotation characteristics of Jinchuan Nickel - bearing pyrrhotite [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 1984(2): 28 - 32 + 75.
- [16] LIU, C., et al., Effects of lizardite on pentlandite flotation at different pH: Implications for the role of particle - particle interaction [J]. Minerals Engineering, 2019, 132: 8 - 13.
- [17] 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(4): 15 - 17.
WANG D Y, GE B L. Research on the behavior of serpentine gangue minerals in flotation of Cu - Ni sulfide ore [J]. Non - ferrous Mining and Metallurgy, 2003(4): 15 - 17.
- [18] 唐敏, 张文彬. 低品位铜镍硫化矿浮选中蛇纹石的行为研究 [J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2001(3): 74 - 77.
TANG M, ZHANG W B. Study on the behavior of serpentine in the flotation of low - grade Cu - Ni sulfide ore [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2001(3): 74 - 77.
- [19] 艾光华, 蔡鑫, 毕康颖, 等. 金属离子对矿物浮选行为影响的研究进展 [J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(6): 70 - 74.
AI G H, CAI X, BI K Y, et al. Research progress of effect of metal ions on flotation behavior of mineral [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(6): 70 - 74.
- [20] 曹钊, 张亚辉, 孙传尧, 等. 铜镍硫化矿浮选中 Cu(II) 和 Ni(II) 离子对蛇纹石的活化机理 [J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(2): 506 - 510.
CAO Z, ZHANG Y H, SUN C Y, et al. Mechanism of activation of serpentine by Cu(II) and Ni(II) ions in flotation of Cu - Ni sulfide ore [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(2): 506 - 510.
- [21] 王虹, 邓海波. 蛇纹石对硫化铜镍矿浮选过程影响及其分离研究进展 [J]. 有色矿冶, 2008(4): 19 - 23 + 27.
WANG H, DENG H B. Research progress on the effect of serpentine on the flotation process and separation of copper - nickel sulfide ore [J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 2008(4): 19 - 23 + 27.
- [22] MELLINI M. The crystal structure of lizardite 1t: hydrogen bonds and polytypism [J]. Geoscienceworld, 1982, 67(5): 587 - 598.
- [23] 王虹. 含镍硅酸盐矿物在硫化铜镍矿浮选分离体系中的行为机理研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
WANG H. Study on the behavior mechanism of magnesium - bearing silicate minerals in the flotation separation system of copper - nickel sulfide ore [D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [24] 翁存建, 马鹏飞, 王鹏程, 等. 我国铜镍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 C J, MA P F, WANG P C, et al. Nonferrous metals science and engineering, 2014, 5(5): 117 - 122.
- [25] 李党国. 羧甲基纤维素钠的性质及其在造纸工业中的应用 [J]. 黑龙江造纸, 2008(3): 50 - 52.
LI D G. Properties of sodium carboxymethyl cellulose and its application in papermaking industry [J]. Heilongjiang Paper Making, 2008(3): 50 - 52.
- [26] 邱显扬, 俞继华, 戴子林. 镍黄铁矿浮选中抑制剂的作用 [J]. 广东有色金属学报, 1999(2): 86 - 89.
QIU X Y, YU J H, DAI Z L. Effect of inhibitors on the flotation of pyrrhotite [J]. Guangdong Journal of Nonferrous Metals, 1999(2): 86 - 89.
- [27] 冯博, 朱贤文, 彭金秀. 羧甲基纤维素对微细粒蛇纹石的絮凝及抑制作用 [J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(5): 1367 - 1371.
FENG B, ZHU X W, PENG J X. Flocculation and inhibition of fine serpentine by carboxymethyl cellulose [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(5): 1367 - 1371.
- [28] SHAIKH SM, NASSER MS, HUSSEIN I, et al. Influence of polyelectrolytes and other polymer complexes on the flocculation and rheological behaviors of clay minerals: a comprehensive review [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 187: 137 - 161.
- [29] PIETROBON, M. C. et al., Recovery mechanisms for pentlandite and MgO - bearing gangue minerals in nickel ores from Western Australia [J]. Minerals Engineering, 1997, 10(8): 775 - 786.
- [30] CAO J, TIAN X, LUO Y, et al. The effect of graphene oxide on the slime coatings of serpentine in the flotation of pentlandite [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 522: 621 - 627.
- [31] 汪惠惠, 彭金秀, 朱贤文, 等. 甲基纤维素对微细粒蛇纹石的絮凝作用及机理 [J]. 非金属矿, 2016, 39(5): 1 - 3.
WANG H H, PENG J X, ZHU X W, et al. Flocculation of ultrafine serpentine by methyl cellulose and its mechanism [J]. Nonmetallic Ores, 2016, 39(5): 1 - 3.
- [32] 来庆腾, 廖寅飞, 赵一帆, 等. 铜镍硫化矿浮选精矿降镁研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2017(5): 7 - 12.
LAI Q T, LIAO Y F, ZHAO Y F, et al. Research progress on magnesium reduction of copper and nickel sulfide ore flotation concentrate [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(5): 7 - 12.
- [33] 谢海云, 柳彦昊, 田小松, 等. 高镁锌矿选矿降镁提质研究 [J]. 有色金属工程, 2021, 11(2): 79 - 85.
XIE H Y, LIU Y H, TIAN X S, et al. Study on magnesium reduction and quality improvement of high magnesium zinc ore [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2021, 11(2): 79 - 85.
- [34] SHAIKH SM, NASSER MS, HUSSEIN I, et al. Influence of polyelectrolytes and other polymer complexes on the flocculation and rheological behaviors of clay minerals: a comprehensive review [J]. Separation and Purification Technology, 2017, 187: 137 - 161.
- [35] BULATOVIC, S. M. Use of organic polymers in the flotation of poly-metallic ores: a review [J]. Minerals Engineering, 1999, 12(4): 341 - 354.
- [36] 冯其明, 龙涛, 卢毅屏, 等. 聚合物对微细粒蛇纹石的絮凝作用及机理 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(9): 2531 - 2536.
FENG Q M, LONG T, LU Y P, et al. Flocculation and mechanism of polymer on fine serpentine [J]. Journal of central south university (science and technology), 2011, 42(9): 2531 - 2536.
- [37] SHRIMALI K, MILLER JD. Polysaccharide depressants for the reverse flotation of iron ore [J]. 2015, 69(1): 83 - 95.
- [38] 戴思行, 王欠欠, 刘诚, 等. 淀粉类调整剂在矿物浮选中的应用和作用机理研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2021(4): 73 - 79.
DAI S X, WANG Q Q, LIU C, et al. Research progress on application and action mechanism of starch regulator in mineral flotation [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021(4): 73 - 79.
- [39] 汪桂杰. 几种改性淀粉对赤铁矿的抑制机理及其应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
WANG G J. Study on the inhibition mechanism and application of several modified starches on hematite [D]. Changsha: Central South University, 2013.
- [40] 魏民, 吕晋芳, 郑永兴, 等. 淀粉对硫化矿物和脉石矿物的选择性抑制作用及机理研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2): 58 - 64.

- WEI M, LV J F, ZHENG Y X, et al. Selective Inhibition of sulfide minerals and gangue minerals by starch and its mechanism [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2021, 41(2): 58–64.
- [41] 邓艳, 柳春, 罗想平, 等. 阴离子淀粉研究进展[J]. *大众科技*, 2015, 17(6): 48–51.
- DENG Y, LIU C, LUO X P, et al. Research progress of anionic starch [J]. *Popular Science and Technology*, 2015, 17(6): 48–51.
- [42] FLETCHER, B, CHIMONYO W, PENG Y J. A comparison of native starch, oxidized starch and CMC as copper-activated pyrite depressants[J]. *Minerals Engineering*, 2020(156): 106532.
- [43] 顾幅华, 朴正杰, 邹毅仁, 等. 阴离子淀粉对铝硅酸盐矿物浮选的影响及机理研究[J]. *矿冶工程*, 2010, 30(2): 28–30+34.
- GU G H, PIAO Z J, ZOU Y R, et al. Effect of anionic starch on aluminum silicate flotation and its mechanism [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2010, 30(2): 28–30+34.
- [44] 刘安. 胶磷矿浮选中改性淀粉抑制机理研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- LIU A. Study on the inhibition mechanism of modified starch in collophanite flotation [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2012.
- [45] 熊文良, 潘志兵, 田喜林. 改性淀粉在硫化镍矿浮选中的应用[J]. *矿产综合利用*, 2008(3): 13–15.
- XIONG W L, PAN Z B, TIAN X L. Application of modified starch in flotation of nickel sulfide ore [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2008(3): 13–15.
- [46] 包浩. 两种酯化变性大米淀粉的制备及其结构与性质的研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2015.
- BAO H. Preparation structure and properties of two esterified modified rice starches [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2015.
- [47] LIN, L. et al. Experimental research on anionic reverse flotation of hematite with a flotation column[J]. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2009, 1(1): 791–798.
- [48] 翁存建. 铜镍硫化矿物与多元镁硅酸盐浮选分离行为研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- WENG C J. Study on flotation separation behavior of copper-nickel sulfide minerals from multiple magnesium silicate [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2016.
- [49] 曹建, 程少逸, 胡秀琴, 等. 淀粉接枝聚合物在镍黄铁矿浮选中对蛇纹石的抑制[C]//第八届全国选矿专业学术年会暨矿产资源绿色高效开发利用高峰论坛论文集. 2016: 161–163.
- CAO J, CHENG S Y, HU X Q, et al. Inhibition of serpentine by starch grafted polymer in the flotation of pyrite [C] // Proceedings of the 8th National Mineral Processing Professional Academic Annual Conference and The Summit Forum of Green and Efficient Development and Utilization of Mineral Resources. 2016: 161–163.
- [50] CAO J, LUO Y, XU G, et al. Utilization of starch graft copolymers as selective depressants for lizardite in the flotation of pentlandite[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 337: 58–64.
- [51] LIU Q, ZHANG Y, LASKOWSKI J S. The adsorption of polysaccharides onto mineral surfaces: an acid/base interaction[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, 60(3): 229–245.
- [52] LIU C, FENG Q M, SHI Q, et al. Utilization of N-carboxymethyl chitosan as a selective depressant for talc in flotation of chalcopyrite[J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2019, 55(1): 108–115.
- [53] XIANG Y, LIU Q, WANG K. N-carboxymethyl chitosan in differential flotation of galena and chalcopyrite [C]//2014–Sustainable Industrial Processing Summit. 2014(2): 331–332.
- [54] FENG B, PENG J, ZHU X, et al. The settling behavior of quartz using chitosan as flocculant [J]. *Integrative Medicine Research*, 2017, 6(1): 71–76.
- [55] 冯博, 彭金秀, 朱贤文, 等. 壳聚糖对微细粒蛇纹石的分散-絮凝作用[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(11): 3617–3621+3627.
- FENG B, PENG J X, ZHU X W, et al. Dispersion and flocculation of serpentine by chitosan [J]. *Chinese Journal of Ceramics*, 2016, 35(11): 3617–3621+3627.
- [56] 王洪岭. 羧化壳聚糖对镍黄铁矿/蛇纹石浮选体系的作用机理[J]. *矿产保护与利用*, 2018(3): 112–116.
- WANG H L. Mechanism of carboxylated chitosan on pyrite/serpentine flotation system [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2018(3): 112–116.
- [57] 丁德润. N-羧甲基壳聚糖对 Ca^{2+} , Fe^{2+} 的络合(吸附)及光谱分析[J]. *上海工程技术大学学报*, 2004(4): 298–301.
- DING D R. Complexation (adsorption) and spectral analysis of Ca^{2+} , Fe^{2+} by N-carboxymethyl chitosan [J]. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2004(4): 298–301.
- [58] ZHANG C, LIU C, FENG Q, et al. Utilization of N-carboxymethyl chitosan as selective depressants for serpentine on the flotation of pyrite [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, 163: 45–47.
- [59] M·J·皮尔斯, 李长根, 杨歧云. 化学药剂在矿物加工中的应用概况[J]. *国外金属选矿*, 2005(5): 5–11.
- M. J. PIERCE, LI C G, YANG Q Y. Application of chemical agents in mineral processing [J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2005(5): 5–11.
- [60] J. S. LASKOWSKI, LIU Q, C. T. O'CONNOR. Current understanding of the mechanism of polysaccharide adsorption at the mineral/aqueous solution interface [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2007, 84(1–4): 59–68.
- [61] 张亚辉, 孟凡东, 孙传尧. 铜镍硫化矿中 MgO 脉石矿物抑制工艺研究[J]. *矿冶*, 2012, 21(2): 1–5.
- ZHANG Y H, MENG F D, SUN C Y. Study on MgO gangue mineral inhibition in Cu-Ni sulfide ore [J]. *Mining and Metallurgy*, 2012, 21(2): 1–5.
- [62] 贾俊俊. 组合调整剂和起泡剂对硫化铜镍矿精矿降镁的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- JIA J J. Study on magnesium reduction of copper-nickel sulfide ore concentrate by combined regulator and foaming agent [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [63] CAO Z. Activation mechanism of serpentine by Cu(II) and Ni(II) ions in copper-nickel sulfide ore flotation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(2): 506–510.
- [64] 张亚辉, 孟凡东, 孙传尧. 铜镍硫化矿浮选过程中 MgO 脉石矿物的抑制途径探析[J]. *矿冶*, 2012, 21(2): 1–5.
- ZHANG Y H, MENG F D, SUN C Y. Study on the inhibition pathway of MgO gangue minerals in the flotation process of Cu-Ni sulfide ore [J]. *Mining and Metallurgy*, 2012, 21(2): 1–5.
- [65] 张亚辉, 熊学广, 张家, 等. 用柠檬酸和六偏磷酸钠降低金川铜镍精矿镁含量[J]. *金属矿山*, 2013(5): 67–70+74.
- ZHANG Y H, XIONG X G, ZHANG J, et al. Application of citric acid and sodium hexametaphosphate to reduce the magnesium content of Jinchuan Cu-Ni concentrate [J]. *Metal Mine*, 2013(5): 67–70+74.
- [66] 李玄武, 张亚辉, 雷治武, 等. 基于柠檬酸-改性淀粉的金川铜镍精矿降镁提质[J]. *金属矿山*, 2015(7): 64–68.
- LI X W, ZHANG Y H, LEI Z W, et al. Magnesium reduction and quality improvement of Jinchuan copper-nickel concentrate based on citric acid-modified starch [J]. *Metal Mine*, 2015(7): 64–68.
- [67] 黄俊玮, 张亚辉, 张成强, 等. 络合剂-抑制剂联合抑镁浮铜镍试验

- [J]. 金属矿山, 2014(7): 79-83.
- HUANG J W, ZHANG Y H, ZHANG C Q, et al. Experimental study on inhibition of copper and nickel flotation with complexation agent and inhibitor [J]. *Metal Mine*, 2014(7): 79-83.
- [68] 张国范, 卢毅屏, 冯其明. 抑制剂 EP 降低镍精矿中氧化镁含量研究 [J]. *矿产保护与利用*, 1999(3): 30-33.
- ZHANG G F, LU Y P, FENG Q M. Study on the reduction of magnesium oxide content in nickel concentrate by EP inhibitor [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 1999(3): 30-33.
- [69] 陈文亮, 方夕辉, 张帅, 等. 某低品位难选铜镍硫化矿高效降镁与铜镍分离 [J]. *有色金属工程*, 2014, 4(6): 48-52.
- CHEN W L, FANG X H, ZHANG S, et al. High efficiency magnesium reduction and Cu-Ni separation of a low-grade refractory Cu-Ni sulfide ore [J]. *Non-ferrous Metals Engineering*, 2014, 4(6): 48-52.
- [70] LIU C, AI G, SONG S. The effect of amino trimethylene phosphonic acid on the flotation separation of pentlandite from lizardite [J]. *Powder Technology*, 2018, 336: 527-532.
- [71] 王伟东, 刘金华, 胡熙庚. 硫化镍矿石浮选工艺和药剂 [J]. *矿产保护与利用*, 1989(4): 40-43.
- WANG W D, LIU J H, HU X G. Flotation process and reagent of nickel sulfide ore [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 1989(4): 40-43.
- [72] 旃习涵. 国外蛇纹石抑制剂的研究 [J]. *国外金属矿选矿*, 1984(7): 28-33.
- ZHAN X H. Study on inhibitor of serpentine from abroad [J]. *Metallic Ore Dressing abroad*, 1984(7): 28-33.

Research Progress of Mechanism on Organic Depressants for the Flotation Separation of Pentlandite and Serpentine

KONG Lingyu¹, LYN Jinfang^{1,2}, WEI Min¹, ZHENG Yongxing²

1. Kunming University of Science and Technology, Land Resources Engineering, Kunming 650093, Yunnan, China;
2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, Yunnan, China

Abstract: Serpentine is a silicate mineral that contains large amounts of magnesium, and it often coexists with pentlandite. During the flotation process of pentlandite, the floating serpentine will cause the magnesium content in nickel concentrate to exceed the standard, leading to pentlandite smelting difficulty. In the paper, the crystal structure and surface property of serpentine were introduced, and the reason that serpentine was difficult to be depressed in the flotation was analyzed. In addition, the depressing mechanism of common organic reagents, such as carboxymethyl fiber, starch, chitosan, guar gum, and combination reagents of serpentine were summarized.

Keywords: pentlandite; serpentine; flotation separation; organic depressant; depressing mechanism

引用格式: 孔令宇, 吕晋芳, 魏民, 郑永兴. 镍黄铁矿与蛇纹石浮选分离中有机抑制剂的机理研究进展 [J]. *矿产保护与利用*, 2022, 42(2): 33-41.

KONG Lingyu, LYN Jinfang, WEI Min, ZHENG Yongxing. Research progress of mechanism on organic depressants for the flotation separation of pentlandite and serpentine [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2022, 42(2): 33-41.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn