

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2021.02.011

含镁脉石矿物的选矿降镁研究现状及进展

柳彦昊 谢海云 晋艳玲 张培 冯艳虎

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 昆明 650093)

摘要: 蛇纹石、绿泥石和滑石等含镁硅酸盐矿物常与有价金属矿物共生, 在浮选分离过程中这类脉石矿物难以被抑制, 造成精矿镁含量超标而对冶炼产生极大影响, 因此如何实现高效选矿降镁是业界亟待解决的难题。首先从选矿降镁工艺开发和浮选降镁抑制剂作用机理两方面总结了降镁的研究现状, 归纳了常见含镁硅酸盐脉石矿物蛇纹石、绿泥石和滑石的结构及其表面特征, 进一步从不同角度分析了含镁脉石难分离和难抑制的原因, 对选矿降镁技术的发展趋势作了展望, 以为选矿降镁提供一定的参考和借鉴。

关键词: 含镁硅酸盐; 降镁; 选矿工艺; 选矿药剂

中图分类号: TD923 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-7854(2021)02-0070-09

Research status and development of magnesium reduction by mineral processing of magnesium-containing gangue

LIU Yan-hao XIE Hai-yun JIN Yan-ling ZHANG Pei FENG Yan-hu

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: Magnesium-bearing silicate minerals such as serpentine, chlorite and talc often coexist with valuable metal minerals, which are difficult to be suppressed in the process of flotation separation, resulting in excessive magnesium content in the concentrate, which has a badly impact on smelting. Therefore, it is urgent issue that how to achieve efficient beneficiation and magnesium reduction for the industry. The research development of magnesium reduction was summarized through investment of process and inhabiting mechanism of depressant of magnesium reduction, and the structure and surface characteristics of serpentine, chlorite and talc were concluded respectively in this paper, which demonstrates the reasons that magnesium-bearing gangues are difficult to separate and inhabit from various aspects further more. At the same time, the development trend of magnesium reduction technology by mineral processing is prospected to provide some reference for other similar mine.

Key words: magnesium containing silicate; magnesium reduction; mineral processing technology; beneficiation reagent

在地壳中硅酸盐类矿物约占地壳矿物总量的92%, 与有价矿物共生的硅酸盐类矿物常被当为脉石矿物。蛇纹石、绿泥石和滑石是常见的含镁硅酸

盐脉石矿物, 这类矿物因其自身具有的独特组分、层状结构和表面性质^[1], 在选矿过程中难以被抑制和分离, 往往进入浮选精矿而造成镁含量超标。浮选精矿采用火法冶炼时, 对其中的杂质镁的含量有较严格的要求, 即入炉精矿中氧化镁含量小于5.0%, 甚至更低, 若精矿中夹杂大量含镁硅酸盐, 因为其多属于高熔点矿物, 增加了火法冶炼的能耗, 炉渣黏度过大易粘结在炉壁腐蚀冶炼炉

收稿日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51764024)

第一作者: 柳彦昊, 硕士研究生, 研究方向为矿物加工。

E-mail: 735411787@qq.com

通信作者: 谢海云, 博士, 副教授; E-mail: xie-haiyun@163.com

体^[2]。此外，浮选精矿采用湿法冶炼时，以硫酸浸出锌精矿为例，锌精矿中的含镁硅酸盐不仅造成硫酸耗量的增加，且溶解在酸液中的 Mg^{2+} 不断累积，导致 $MgSO_4$ 以晶体形态析出堵塞滤布等一系列危害^[3]，因此降镁问题始终是选矿的技术目标和难题。

鉴于此，本文针对蛇纹石、绿泥石和滑石三种常见的含镁硅酸盐矿物，根据广泛查阅国内外相关选矿降镁的文献，从选矿的工艺和药剂两方面对降镁的研究现状进行分析总结，并在归纳这类脉石矿物晶体结构和表面特征的基础上，从不同角度分析其难抑制和难分离的原因，旨在为降镁理论和技术的开发提供参考。

1 选矿降镁工艺研究现状

1.1 磨矿阶段降镁

1.1.1 阶段磨矿阶段选别

由于蛇纹石、滑石等脉石矿物与有用矿物包裹共生且嵌布粒度不均匀，脉石矿物常常与有价矿物存在海绵状、浸染状等共存的结构体系，磨矿细度过粗无法达到单体完全解离，磨矿细度过细导致含镁脉石矿物泥化包裹于有价金属颗粒上，恶化浮选环境，因此磨矿阶段细度过粗或过细均不利于浮选抑制含镁脉石矿物。阶段磨矿阶段选别不仅可以改善浮选初期的分选效率，还可以降低含镁脉石矿物泥化对浮选带来的不利影响，有利于提高最终精矿的品位和回收率，并降低其氧化镁含量。但采用阶段磨矿一定程度上会使精矿粒度变细，不利于后续脱水处理，额外增加磨机能耗，增大选矿厂基建支出。

1.1.2 采用新型磨矿介质

矿物的粒度组成和单体解离度是磨矿效果的直接体现。影响磨矿效果的主要因素包括磨矿介质的尺寸大小、粒度组成状态及磨矿介质对矿粒的施力方式。为了提高有用矿物的单体解离度，避免脉石矿物泥化，优化浮选矿物的粒度组成，肖庆飞等^[4]研究了不同新型磨矿介质对浮选的影响，显著降低了精矿中氧化镁含量，取得了良好选矿指标。表明新型磨矿介质的应用可以一定程度上优化磨矿浮选工艺，对精矿降镁具有一定的指导作用。但新型磨矿介质在实际生产中的应用研究还处于实验室试验阶段，不具备大规模更新选厂磨矿设备的条件。

1.2 浮选阶段降镁

1.2.1 强机械作用脱泥降镁

利用高强度的机械搅拌和超声处理等物理方法，可以增加矿泥的动能，使粗矿粒表面罩盖的矿泥脱附，增加了捕收剂与目标矿物作用的机会，从而达到降镁效果。冯博等^[5]将浮选机转速从 1 950 r/min，提升至 2 800 r/min，对矿浆预先搅拌 20 min，精矿中金属回收率从 81% 提升至 88% 而氧化镁含量降低的良好指标。马桂起等^[6]采用 CFD 模拟搅拌槽中矿浆的受力方式，结果表明采用上杆直桨和下杆斜桨的桨型，可以优化矿浆的轴向速度和搅拌槽内流体的剪切力，提高了浮选效果。

1.2.2 酸法浮选

溶液 pH 值是影响浮选的一个重要因素。酸性介质不仅可以清洗有用矿物表面的矿泥，还可以溶解有用矿物因氧化作用在表面形成的羟化膜或氧化膜，形成硫化层活化有用矿物，恢复其原有浮选活性^[7]。酸性介质对蛇纹石、滑石等含镁硅酸盐脉石矿物具有腐蚀性，破坏其表面结构，降低脉石矿物可浮性，还能使细粒脉石形成絮团，减弱细粒脉石罩盖的影响。我国金川公司曾经做过酸法浮选工业试验，取得了精矿中有价金属的回收率较高，而氧化镁含量较低的良好指标^[8]，但酸法浮选不仅易引起设备腐蚀及环境污染，还会导致有价金属溶解于酸溶液中造成金属量的损失。因此，尽管酸法浮选具有较多的优点，仍未在实际生产中广泛应用。

1.2.3 闪速分选

闪速浮选是一种快速富集矿石中粗粒级有用矿物的浮选技术。对磨矿后的矿浆进行分级，沉砂直接进入浮选机，优先浮选出矿浆中嵌布粒度较粗、可浮性较好的金属矿物，实现早收多收，尾矿产品返回球磨再磨。其优点是一方面可防止脉石矿物泥化对浮选产生的不利影响，改善精矿质量，降低精矿水份，另一方面可降低磨机负荷，提高磨机工作效率。和常规流程相比减少了进入浮选的矿量，节省基建投资^[9]。但闪速分选只能取得能收早收的效果，并不能从根本上改善精矿夹杂含镁脉石矿物的情况。

2 浮选降镁药剂研究现状

选矿工艺降镁在生产实践中的应用较为广泛，合理的选矿工艺可有效的降低药剂用量，节省选矿厂开支。但随着矿石的性质变化，选择改变选矿工

艺的方式将面临改造基础设施和选矿流程,二次投资较高的问题,而通过调整选矿降镁药剂的方式可在不改动选矿流程的基础上达到降镁效果。目前降镁药剂主要以调整剂为主,调整剂对进入精矿的含镁脉石矿物具有抑制作用。降镁抑制剂与矿物的作用机理主要是在矿物表面形成亲水覆盖膜或亲水胶粒,使矿物表面亲水或者削弱对捕收剂的吸附活性,或者是溶去矿物表面易于捕收剂作用的活性质点或活化膜,避免矿浆中活化离子对含镁脉石矿物的影响。含镁脉石矿物抑制剂可分为有机和无机两类。有机类抑制剂包括羧甲基纤维素(CMC)、糊精、草酸和淀粉等,无机类抑制剂包括水玻璃、六偏磷酸钠和氟硅酸钠等。

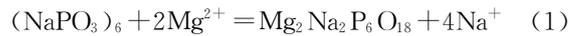
2.1 甲基纤维素(CMC)

CMC是带负电荷的纤维素醚类阴离子聚合物,带有大量—OH和—COOH作侧链。—OH可与含镁脉石矿物表面的氢键缔合形成一层水化膜,增强其表面的亲水性。在水中—COOH解离为—COO⁻而带负电,蛇纹石解离后表面存在大量的Mg²⁺,因为电性异相相吸的作用,CMC可吸附于蛇纹石表面使其表面电位降低。同时,CMC还可以絮凝磨矿泥化产生的含镁脉石矿物,降低细粒含镁脉石矿物在有用矿物表面的罩盖,从而消除对浮选的影响^[10]。冯其明等^[11]对CMC在细粒蛇纹石表面的吸附机理进行分析,研究表明CMC在蛇纹石表面的吸附以物理作用为主。MCFADZEAN等^[12]认为高分子量(600 000~700 000 g/mol)的CMC比低分子量(40 000~70 000 g/mol)的更具有选择性抑制脉石的作用。MACCARINI等^[13]研究表明CMC具有空间位阻小,静电阻力小等特点,在滑石表面以单层吸附的方式存在,增加滑石的负电性,对泥化后的滑石具有絮凝作用,使矿浆趋于稳定。PAN等^[14]研究表明CMC以物理吸附于滑石表面,溶液中金属阳离子可起桥联作用,疏水相互作用为主要作用力。PUGH^[15]研究表明CMC通过氢键缔合的作用形成碳氢环状结构而吸附于滑石表面。

2.2 六偏磷酸钠

六偏磷酸钠为分子量12 000~18 000的无机聚合物,因其能吸附于脉石矿物表面抑制其上浮,在浮选中常作为抑制剂。六偏磷酸钠可以促进含镁脉石矿物表面的镁迁移到液相,并显著提高矿物表面负电位;另外,其能与蛇纹石等含镁脉石矿物表面

的金属离子和水化金属阳离子发生络合作用,生成稳定的亲水络合物,使脉石矿物表面电位降低从而将抑制,反应如式1、2所示。



冯其明等^[16]研究表明六偏磷酸钠能与蛇纹石表面发生化学吸附,或与蛇纹石表面镁离子形成络合物而溶解,两种方式均能降低蛇纹石表面Zeta电位,抑制蛇纹石上浮。李治杭等^[17]研究表明,高分子的六偏磷酸钠主要通过和蛇纹石表面Mg²⁺作用吸附于蛇纹石表面且吸附量较小,但增加蛇纹石表面电位的绝对值,降低了蛇纹石的静电引力,减弱了蛇纹石对硫化矿的吸附作用。

2.3 水玻璃

水玻璃(R₂O·nSiO₂)为水溶性硅酸盐,为弱酸强碱盐,水解后溶液呈碱性,其水解方程式如式3所示,水玻璃的水解产物能通过吸附作用使含镁脉石矿物表面亲水而受到抑制,其抑制能力比六偏磷酸钠及CMC稍弱。



贾俊俊^[18]认为亲水胶粒的活性高,在蛇纹石等含镁脉石表面更容易吸附,使其亲水而受到抑制,并且水玻璃在酸化后会产生更多的亲水胶粒。张明强^[19]研究表明水玻璃水解产物多硅酸盐可以改变蛇纹石表面的动电位,使之形成高负电位。阻止脉石矿泥由于电性作用而罩盖有用矿物表面,起分散矿泥并改善浮选的作用。

2.4 组合抑制剂

在实际浮选中,矿物之间还存在着交互作用,情况复杂,导致浮选结果受多种因素的影响。目前单一抑制剂很难有效地在保证浮选取得良好的结果。有效的组合调整剂可以产生协同效应,增强药剂效果。陈文亮等^[20]分别考察CMC与六偏磷酸钠组合、六偏磷酸钠与瓜尔胶组合、CMC与氟硅酸钠组合等组合抑制剂对浮选精矿降镁的影响,精矿含氧化镁从10.64%降至4.61%,取得了较好的降镁效果。熊学广^[21]将柠檬酸-六偏磷酸钠组合使用,对金川二矿矿样进行了浮选闭路试验,精矿品位和回收率上升的同时精矿中氧化镁含量降为6.33%。黄俊玮^[22]将EDTA二钠和六偏磷酸钠组合使用,取得了精矿中有用矿物品位和回收率增加

而氧化镁含量降低的良好指标。

3 主要含镁脉石矿物的晶体特征与难抑制的原因分析

3.1 主要含镁脉石矿物的晶体结构及表面特征

含镁硅酸盐矿物的晶体结构较为复杂。在选矿过程中，常见的含镁硅酸盐脉石矿物主要有蛇纹石、绿泥石和滑石。在这类含镁硅酸盐晶体中，阳离子占据在阴离子堆积的空隙中，构成了硅酸盐晶体的基本结构单位即硅氧四面体(SiO_4)，每一个硅氧四面体与相邻的其他硅氧四面体连接，在晶体空间形成了层状结构，如图 1 所示。每个只有一个氧的电价未饱和，通过 Mg^{2+} 或者 $(\text{OH})^-$ 将层与层之

间连接^[23]。晶体结构中原子之间主要以共价键的形式链接，层间主要以氢键相连，不存在结构电荷。蛇纹石、绿泥石和滑石的结构特征和表面特性见表 1。

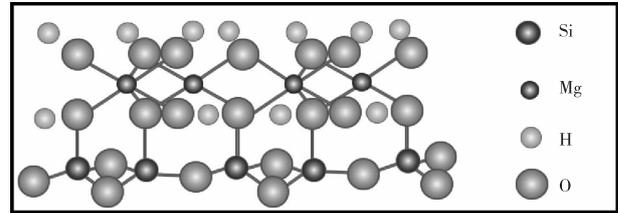


图 1 含镁硅酸盐矿物晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of magnesium bearing silicate minerals

表 1 常见含镁硅酸盐脉石矿物结构特征和表面特性

Table 1 Structural and surface characteristics of common magnesium bearing silicate gangues

常见含镁脉石矿物	蛇纹石	绿泥石	滑石
化学通式	$\text{A}_6[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$ (A 为 Mg^{2+} , Fe^{2+} 、 Ni^{2+})	$\text{Y}_3[\text{Z}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_2 \cdot \text{Y}_3(\text{OH})_6$ (Y 为 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+})	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{12}$
结构特征	硬度 2.5~4，晶体为 1:1 型(TO 型)层状结构，层间主要以范德华力相连，不存在结构电荷。	硬度 2~3，晶体为 2:1 型(TOT-O 型)层状结构，层间作用力主要为分子键力，层间的极性较弱，解离呈现非极性而疏水。	硬度 1~1.5，晶体为 2:1 型(TOT 型)层状结构，层间作用力为范德华力，层间解离极完全。有 2 个性质不同的面，基面疏水性较好，端面疏水性略差。
表面特性	表面接触角约 35° ，等电点为 7.5~12 ^[24] 。	表面接触角约 50° ，等电点为 4~4.5 ^[25] 。	表面接触角约 68° ，等电点为 2~3 ^[24] 。

分析图 1 和表 1 可见，蛇纹石、绿泥石和滑石具有独特的层状结构和表面特征，易导致层与层之间的氢键率先断裂而解离，造成含镁硅酸盐矿物易泥化的典型特性。泥化后的含镁硅酸盐矿物不仅对磨矿和筛分流程造成不利影响，还在有用矿物表面形成矿泥覆盖，减弱了捕收剂在有用矿物表面的吸附作用，对矿物的浮选分离均会造成一定的影响。

3.2 选矿过程中含镁脉石矿物难抑制和分离的主要原因

在分析主要含镁脉石矿物蛇纹石、绿泥石和滑石晶体结构及表面性质的基础上，进一步分析在选矿过程中这类含镁矿物难以被抑制或被分离的原因，将其总结为以下三种。

1) 含镁硅酸盐矿物自身特性导致上浮

蛇纹石自身可浮性差，但据研究显示，在蛇纹石的生成过程中，内部会包裹蚀变作用形成的极细粒磁铁矿而带有弱磁性，在浮选中金属矿物

会因磁性吸附一部分蛇纹石上浮^[26]。在碱性矿浆中，含镁脉石矿物表面呈现负电性，会吸收矿浆中的金属阳离子形成络合物，进一步与捕收剂结合而上浮^[27]。蛇纹石、绿泥石和滑石与有价金属矿物之间存在不同的等电点，在一定的 pH 范围内两者电性互异从而相互吸附进入精矿。除此以外，矿浆中绿泥石、滑石等具有一定天然可浮性，也会进入浮选精矿。对此可以通过改变含镁脉石矿物表面特性，避免与有用矿物的吸附作用，选择适宜的起泡剂改变浮选泡沫特性来改善浮选效果。

2) 层状结构引起的过磨泥化罩盖和机械夹杂

由于蛇纹石等含镁脉石矿物为大多为层状硅酸盐矿物，层与层之间为氢键链接，键能相对较弱。在矿物碎磨的过程中，若磨矿不完全，有用矿物与含镁脉石矿物未达到完全解离，在浮选过程中，有用矿物被捕收，部分脉石矿物以连生体的方式进入精矿；若过磨，则含镁脉石矿物层间

的分子键率先断裂,使得脉石矿物过粉碎,附着在泡沫上或有用矿物夹带等机械夹杂方式进入精矿^[28]。这种情况可以通过优化磨矿条件控制有用矿物单体解离度以减少矿泥的产生,改变浮选设备的参数从而改变搅拌分散作用或在浮选中添加絮凝剂改善浮选效果。

3) 金属阳离子异相吸附对浮选过程的影响

含镁脉石矿物晶体因金属阳离子的浸染、交代作用,在其表面会有捕收剂的作用活性点,另外碎磨过程中在矿物断裂面上存在大量的镁氧等不饱和键,因此在含镁脉石矿物表面具有很高的化学活性能^[29],会使含镁脉石矿物具有天然可浮性。pH 值在 9~12 时,含镁脉石矿物解离的 Mg^{2+} 在硫化矿表面形成一层羟化镁膜,阻碍硫化矿吸附捕收剂上浮^[30]。对于这种情况可以采用合适的络合剂消除脉石矿物表面的金属阳离子的影响,从而降低其对捕收剂的浮选活性;采用合适的调整剂来抑制脉石矿物,防止脉石矿物因异相吸附进入精矿。

4 结论与展望

选矿降镁是矿物加工领域亟待解决的问题之一。通过广大科研人员和相关矿业领域从业者的不懈努力,针对降镁问题有了不同的突破思路,降镁工艺和药剂也有了新的发展,但仍然有许多问题需要解决,选矿降镁的研究和工作方向主要有以下三方面:

1) 强化工艺矿物学研究。对矿石中 useful 组分及含镁脉石矿物进行详细的工艺矿物学分析,查清含镁脉石矿物进入精矿的途径,是降镁研究的本质所在。

2) 降镁新工艺的开发。酸法浮选、阶段磨矿阶段选别、强化搅拌、闪速分选、采用新型磨矿介质等方法在一定程度上能达到降镁的效果,但这类工艺的实际应用范围存在局限性。因此,根据不同矿石的降镁要求,需进一步开发适宜且高效的选矿降镁工艺。

3) 新药剂的开发及应用。羧甲基纤维素(CMC)、六偏磷酸钠、水玻璃对含镁脉石矿物有一定的抑制作用,但这类抑制剂往往难以达到精矿高效降镁和选矿综合指标具佳的效果。因此,进一步开发新的含镁脉石矿物选择性浮选抑制剂,对现

有药剂进行改性优化,或采用新的组合抑制剂等,有望解决浮选精矿降镁的难题。

参考文献

- [1] 谢宝华. 含镁硅酸盐矿物间相互作用及其对硫化矿浮选的影响研究[D]. 长沙:中南大学, 2014.
XIE B H. Study on the interaction between magnesium bearing silicate minerals and its influence on sulfide ore flotation [D]. Changsha: Central South University. 2014.
- [2] 李景峰. 高氧化镁物料加入对某冶炼厂生产系统的影响[J]. 有色冶金设计与研究, 2014(5): 41-42.
LI J F. Influence of high MgO addition on production system of a smelter [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2014(5): 41-42.
- [3] 高建雄, 李林波, 方钊, 等. 湿法炼锌过程钙镁结晶机理研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(7): 1-4.
GAO J X, LI L B, FANG Z, et al. Study on calcium magnesium crystallization mechanism in zinc hydrometallurgy [J]. Nonferrous Metals (Extrative Metallurgy), 2015(7): 1-4.
- [4] 肖庆飞, 李博, 康怀斌, 等. 改善磨矿效果提高镍精矿指标的研究[J]. 稀有金属, 2016, 40(2): 160-166.
XIAO Q F, LI B, KANG H B, et al. Study on improving grinding effect and improving nickel concentrate index [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2016, 40(2): 160-166.
- [5] 冯博, 冯其明, 卢毅屏. 强搅拌调浆在金川硫化铜镍矿浮选中的作用机制研究[J]. 稀有金属, 2014, 38(5): 861-867.
FENG B, FENG Q M, LU Y P. Study on mechanism of strong stirring slurry mixing in flotation of Jinchuan copper nickel sulfide ore [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2014, 38(5): 861-867.
- [6] 马桂起, 卢毅屏, 冯其明, 等. 搅拌调浆对硫化铜镍矿物浮选的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017(10): 2559-2564.
MA G Q, LU Y P, FENG Q M, et al. Effect of stirring slurry mixing on flotation of copper nickel sulfide minerals [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017(10): 2559-2564.
- [7] 黄欢, 张国范, 刘德志, 等. 硫化镍精矿-软锰矿在酸性条件下的协同浸出[J]. 有色金属工程, 2019,

- 9(6): 55-60.
- HUANG H, ZHANG G F, LIU D Z, et al. Synergistic leaching of nickel sulfide concentrate pyrolusite under acidic conditions [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2019, 9(6): 55-60.
- [8] 朱烁. 磁罩盖法分选金川低品位镍精矿的技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- ZHU S. Technical research on separation of Jinchuan low grade nickel concentrate by magnetic cover method[D]. Shenyang: Northeast University, 2014.
- [9] 赵泓铭, 戴惠新. 闪速浮选技术及其应用[J]. *矿产综合利用*, 2016(6): 17-20.
- ZHAO H M, DAI H X. Flash flotation technology and its application [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(6): 17-20.
- [10] SHAIKH S M R, NASSER M S, 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.
- [11] 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.
- [12] MCFADZEAN B, DICKS P, GROENMEYER G, et al. The effect of molecular weight on the adsorption and efficacy of polysaccharide depressants[J]. *Minerals Engineering*, 2011, 24(5): 463-469.
- [13] MACCARINI M, ATREI A, INNOCENTI C, et al. Interactions at the CMC/magnetite interface: Implications for the stability of aqueous dispersions and the magnetic properties of magnetite nanoparticles [J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2014, 462: 107-114.
- [14] PAN G, SHI Q, ZHANG G, et al. Selective depression of talc in chalcopyrite flotation by xanthan gum; Flotation response and adsorption mechanism[J]. *Colloids and Surfaces: A Physicochemical and Engineering Aspects*, 2020, 600: 124902.
- [15] PUGH R J. Macromolecular organic depressants in sulphide flotation — A review, 2. Theoretical analysis of the forces involved in the depressant action[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1989, 25(1-2): 131-146.
- [16] 冯其明, 龙涛, 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.
- FENG Q M, LONG T, LU Y P. Dispersion mechanism of sodium hexametaphosphate in copper nickel sulfide ore flotation[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2012, 22(6): 1763-1769.
- [17] 李治杭, 韩跃新, 李艳军, 等. 六偏磷酸钠对蛇纹石作用机理分析[J]. *矿产综合利用*, 2016(4): 52-55.
- LI Z H, HAN Y X, LI Y J, et al. Mechanism analysis of sodium hexametaphosphate on serpentine[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2016(4): 52-55.
- [18] 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 concentrate by combined regulator and foaming agent [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.
- [19] 张明强. 蛇纹石与黄铁矿异相分散的调控机理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- ZHNAG M Q. Study on regulation mechanism of heterogeneous dispersion of serpentine and pyrite[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [20] 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, ZHNAG S, et al. Efficient magnesium reduction and copper nickel separation of a low-grade refractory copper nickel sulfide ore [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2014, 4(6): 48-52.
- [21] 熊学广. 利用络合剂—抑制剂组合降低金川镍矿精矿中氧化镁含量研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- XIONG X G. Study on reducing MgO content in Jinchuan nickel ore concentrate by using complexing agent inhibitor combination [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2013.
- [22] 黄俊玮. 铜镍硫化矿浮选中含镁脉石矿物的抑制剂研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- HUANG J W. Study on inhibitors for flotation of

- magnesium bearing gangue minerals from copper nickel sulfide ore[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2014.
- [23] 方帅, 徐龙华, 巫侯琴, 等. 层状硅酸盐矿物晶体各向异性及其与浮选关系研究进展[J]. 现代矿业, 2018(5): 46-53.
- FANG S, XU L H, WU H Q, et al. Crystal anisotropy of layered silicate minerals and its relationship with flotation [J]. Modern Mining, 2018(5): 46-53.
- [24] LIU D, ZHANG G, HUANG G, et al. The flotation separation of pyrite from serpentine using lemon yellow as selective depressant[J/OL]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 581: 123823[2019-11-20]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.123823>.
- [25] 陈武. 中国西北地区几种尘类矿物与微生物界膜电性特征研究[D]. 四川绵阳: 西南科技大学, 2014.
- CHEN Wu. Electrical characteristics of several dust minerals and microbial interface membranes in Northwest China [D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2014.
- [26] 袁致涛, 卢冀伟, 刘炯天, 等. 镍黄铁矿表面磁性增强及其与蛇纹石的磁选分离[J]. 中国有色金属学报(英文版), 2017, 27(1): 204-210.
- YUAN Z T, LU J W, LIU J T, et al. Enhancement of pentlandite surface magnetism and implications for its separation from serpentine via magnetic separation [J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017, 27(1): 204-210.
- [27] KIRJAVAINEN V, HEISKANEN K. Some factors that affect beneficiation of sulphide nickel-copper ores[J]. Minerals Engineering, 2007, 20 (7): 629-633.
- [28] 罗立群, 魏金明, 王召. 硫化铜镍矿分选难点与工艺技术进步[J]. 中国矿业, 2017, 26(005): 102-106.
- LUO L Q, WEI J M, WANG Z. Separation difficulties and technological progress of copper nickel sulfide ore [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(5): 102-106.
- [29] WEN S, LIU J, DENG J S. Fluid inclusion effect in flotation of sulfide minerals [M]. ELSEVIER, 2019: 179-230.
- [30] 康金星, 王亚运, 王鑫, 等. 镁离子对低品位硫化镍矿氧化浸出电化学行为的影响[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(1): 27-35.
- KANG J X, WANG Y Y, WANG X, et al. Effect of magnesium ion on Electrochemical Behavior of oxidation leaching of low-grade nickel sulfide ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(1): 27-35.