

铜镍硫化矿浮选精矿降镁研究进展

来庆腾¹, 廖寅飞², 赵一帆¹, 刘泽晨¹, 贺玉程¹, 廖炎望¹, 丁世豪¹

(1. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州, 221116;

2. 中国矿业大学 国家煤加工与国家煤加工与洁净化工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116)

摘要:我国铜镍矿石资源主要为富含 MgO 硅酸盐脉石矿物的低品位硫化矿。浮选是实现铜、镍金属富集的主要途径,然而浮选精矿普遍存在 MgO 含量过高的问题。闪速熔炼要求 MgO 含量必须低于 6.5%,精矿中高含量的 MgO 会导致冶炼炉温升高、炉渣粘度增大、炉子结瘤、渣相分离困难,导致回收率降低和冶炼成本增加。对此,国内外科研人员做了大量研究,但是普遍存在降低镁含量的同时铜镍损失率过大的问题,降低铜镍硫化矿精矿中镁含量一直是选矿的技术难题。本文就国内外铜镍硫化矿浮选精矿降镁研究进展进行了总结概述,分析了降镁机理并提出了发展趋势。

关键词:铜镍硫化矿;浮选;降镁;研究进展

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2017.05.002

中图分类号:TD923 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2017)05-0007-06

镍是一种银白色金属,由于具有良好的机械强度和延展性,难熔耐高温,并具有很高的化学稳定性,广泛用于飞机、雷达、导弹、坦克、舰艇、宇宙飞船、原子反应堆等各种军工制造业和民用机械制造业。世界镍矿资源主要分为硫化镍矿和氧化镍矿两类。全球超过 60% 的镍是从硫化镍矿中提取的^[1],我国以低品位硫化镍矿为主,镍黄铁矿和紫硫镍铁矿为主要含镍矿物。硫化铜镍矿床通常是基性和超基性岩经地质作用形成,其蚀变产物为 MgO 含量较高的滑石、绿泥石、透闪石^[2-3]、蛇纹石、黑云母等,有价矿物与脉石以块状构造和稀疏星点状构造为主,其次为脉状和斑点状构造与脉石矿物交错共存。铜镍硫化矿富集的主要方法是浮选,浮选精矿中 MgO 含量偏高,严重影响精矿质量及后续冶炼。众多学者对降低铜镍硫化矿浮选精矿的 MgO 含量做了大量工作,取得了丰硕的成果^[4-6]。本文从铜镍硫化矿物结构特性、矿物物理性质、化学性质等方面分析了浮选精矿中氧化镁含量高的原因,系统地总结了药剂降镁、电化学降镁、酸浸法降镁、物理降镁、工艺降镁等降镁方法,并提出了铜镍硫化矿浮选精矿降镁的发展趋势。

1 铜镍硫化矿物结构特性

1.1 单体解离困难

铜镍硫化矿物与含镁脉石矿物嵌布粒度微细、嵌布关系复杂,镍黄铁矿的嵌布粒度一般为 0.02 ~ 0.417 mm,磁黄铁矿的嵌布粒度一般为 0.02 ~ 0.589 mm^[5],需要细磨才能单体解离。例如,我国最大的硫化铜镍矿金川镍矿,磁黄铁矿、镍黄铁矿和黄铜矿多以集合体或单体形式嵌布于脉石中。镍黄铁矿作为主要含镍矿物,在金属硫化矿物方面,与磁黄铁矿、黄铜矿等关系密切,其共生的集合体以海绵晶铁状形式充填在脉石晶粒间隙中^[5];在含镍脉石方面,镍黄铁矿具有十分发育的八面体解理和裂隙,蛇纹石、白云石、滑石等含镁矿物交代充填到镍黄铁矿裂纹八面体解理中,呈网状穿插,镍黄铁矿八面体解理和裂隙中的 MgO 含量最高达 2.5%^[7-8],有的镍黄铁矿以细粒浸染状嵌布于脉石中,并与磁黄铁矿呈固溶体分离的片状、焰状和乳滴状结构^[5],这些结构特点决定了有用矿物与脉石矿物难于解离。但铜镍硫化矿物为离子键型的晶体矿物,属于脆性矿物,在细磨过程中容易过粉碎,粒度低于 10 μm 后有用矿物可浮性降低,而且容易产生大量

收稿日期:2017-01-23;改回日期:2017-02-24

作者简介:来庆腾(1993-),男,硕士研究生在读,研究方向为复杂难选矿物的分离。

矿泥。一方面,矿泥与有用矿物形成竞争吸附,减弱捕收剂与有用矿物的相互作用,降低回收率;另一方面,矿泥与捕收剂相互吸附或随有价矿物上浮,增加了精矿中 MgO 的含量。如果不充分解离,含镁脉石矿物常以连生体的形式进入精矿。

1.2 含 MgO 矿物易泥化,形成矿泥罩盖

硫化铜镍矿中脉石矿物在地质作用过程中发生蚀变,各种蚀变大大降低矿石的力学强度,金属硫化物的海绵晶铁状构造被挤拉成文象或条纹状构造,而脉石矿物蛇纹石、绿泥石、透闪石呈鳞片状、纤维状、泥状,性脆疏松的其结构特征使其更容易过粉碎及泥化。如,蚀变产生的滑石莫氏硬度仅 1.5,蛇纹石 $[\text{Mg}_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8]$ 是超基性岩经中低温交代作用或中低区域作用形成,其硬度 2~3.5,相对密度 2.5~2.62^[9]。

由前面分析可知,为实现单体解离,铜镍硫化矿需要进行细磨,加上脉石矿物硬度低、质脆的特点,泥化现象严重,易形成矿泥罩盖。细粒级的蛇纹石矿泥吸附在镍黄铁矿表面,发生了罩盖,影响镍黄铁矿与捕收剂的相互作用;一方面,使捕收剂吸附无法捕捉镍金属矿物,损失于尾矿中;另一方面,含镁蛇纹石随上浮的有用矿物进入精矿,使精矿中 MgO 含量增高。与此同时,泥化细泥容易发生氧化,氧化细泥在矿物颗粒表面上形成薄膜影响捕收剂的选择性吸附^[10],含 MgO 泥膜进入精矿,这也是精矿中 MgO 含量高的原因之一。另外,泥化后为了增加浮选颗粒直径,往往会添加絮凝剂,微细粒形成的絮团具有疏松、多孔的特性,含镁脉石矿泥容易进入其空隙,通过机械夹带入精矿^[11]。

1.3 矿物浮游特性

含 MgO 矿物具有良好的天然可浮性,以蛇纹石为例,自然 pH 值下,不加药时蛇纹石的上浮率为 18%,随 2 号油用量的增大蛇纹石上浮率逐渐升高^[11]。蛇纹石是 1:1 型三八面体层状硅酸盐,即硅氧四面体的六方网层与氢氧镁石的八面体层结合而成^[12],八面体与四面体之间靠离子键力相连接,键力较弱,破碎时沿该解理面断裂,表面化学键为分子链,矿物表面分子键或氢键较弱,不易与极性很强的水分子结合,从而使矿物颗粒不易被水润湿,使其有强疏水性^[9]。Mellini M^[13] 等研究发现蛇纹石的断裂面上存在不饱和的 Si-O-Si、O-Si-O 等含镁键,使蛇纹石具有很高的化学活性。硫化铜镍矿通常在弱碱性条件下分选,碱性条件下蛇纹石由于表面动

电位较低,极性减弱,疏水性增强,造成蛇纹石在碱性情况下可浮性较好,很容易进入铜镍混合精矿中,使得精矿中 MgO 含量升高^[14]。另外,滑石同样具有良好的天然疏水性。滑石由外层的硅氧四面体和内层的镁氧八面体组成“夹心结构”^[15]。其解离主要沿层间断裂,表面为残余的分子键,水化作用弱,天然疏水性好,疏水性表面占总表面的 75%^[16]。可浮性好的脉石矿物在浮选过程中既容易与镍矿形成对气泡的竞争附着而抑制镍矿浮选,又容易进入精矿,增加精矿中 MgO 含量。

1.4 矿物表面电性作用

静电吸附导致 MgO 随脉石进入精矿。蛇纹石作为主要含镁脉石矿物 PZC=9.6,镍黄铁矿的 PZC=3.9^[9]。硫化铜镍矿通常在弱碱性条件下分选,此时镍黄铁矿表面荷正电,蛇纹石表面荷负电,异性电荷相凝聚,蛇纹石吸附在镍黄铁矿表面进入精矿。蛇纹石与黄铜矿的表面电荷也为异性电荷,因静电吸附而难于分离。

1.5 难免金属离子活化作用

在铜镍硫化矿物的蚀变过程中,围岩也发生蚀变,并有大量的可溶性盐析出,溶于矿浆内,造成矿浆中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 等离子浓度过高,其中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 对石英及含镁硅酸盐脉石矿物有活化作用,使有用矿物与脉石矿物可分离性变差^[4]。矿浆中某些难免离子在矿物表面形成金属膜,阻止了捕收剂对矿物的捕收。镍黄铁矿的晶体结构决定其破碎后表面排布高度有序,金属离子暴露于矿物表面最外缘,形成了以金属离子为中心的羟基吸附。如,溶液中的 Mg^{2+} 在矿物表面形成金属晶体羟化膜,会导致镍黄铁矿回收率降低,难以与含镁脉石分离^[18]。

2 国内外降镁进展及降镁机理分析

2.1 药剂降镁

药剂降镁主要是指在浮选过程中添加含 MgO 脉石矿物的抑制剂。常用的抑制剂包括 EP、六偏磷酸钠、羧甲基纤维素、水玻璃、古尔胶、组合抑制剂 EDTA 二钠-六偏磷酸钠、JCD、混合调整剂 CA_2 与无机抑制剂 PN_3 及 CMC 联合、组合抑制剂 AB、苛性淀粉、酯化淀粉、组合抑制剂 FY 等。

张国范等^[19]采用 EP 作为抑制剂,在原矿 MgO 含量为 27.43% 的条件下,可将浮选精矿 MgO 含量降到 5.95%,他认为这主要是由于 EP 含有大量的-

OH 和 $-COOH$, 在水中 $-COOH$ 电离为 $-COO^-$ 带负电, 而吸附于蛇纹石的表面, 使动电位明显降低, 防止含镁脉石矿物因静电吸附进入精矿。另外, 有学者发现 EP 可以与蛇纹石发生络合反应, 抑制含镁蛇纹石上浮^[20]。

六偏磷酸钠对蛇纹石有分散作用, 添加六偏磷酸钠可以将蛇纹石的表面电位由正电改为负电, 使蛇纹石的表面荷电性质与镍黄铁矿的相同, 阻止了两者间的静电吸附, 降低含镁脉石进入浮选精矿。另外, 武汉大学分析化学^[19]中提出六偏磷酸钠作用机理是镍磁黄铁矿表面存在 $Fe(OH)^3$, $Ni(OH)^2$, 由此会产生 Fe^{3+} , Ni^{2+} 及羟基络合离子, 铁、镍离子的最外层 d 轨道上均未饱和, 可以容纳六偏磷酸钠基团中氧提供的孤对电子形成亲水络合物, 通过络合含镁脉石表面的金属阳离子及水合金属阳离子抑制脉石的上浮^[21]。

羧甲基纤维素(CMC)是指纤维素醚类, 通常是由天然纤维素与苛性碱及一氯醋酸反应后制得的一种阴离子型高分子化合物, 分子量 6400 (± 1000)。在 pH=9 时, 羧甲基纤维素能使滑石表面接触角从 70° 降到 50° 左右, 通过降低脉石的可浮性降低精矿中 MgO 含量^[15]。羧甲基纤维素主要通过两个极性较强的基团 $-OH$ 和 $-COOH$ 发挥作用, $-COO^-$ 可以吸附在荷正电的脉石表面, $-OH$ 与水以氢键键合, 调节矿物表面的电性, 避免蛇纹石与黄铜矿发生静电吸附, 使其分散, 减少因静电吸附带入浮选精矿的 MgO 含量。也有研究者提出羧甲基纤维素是通过增大颗粒表面水化膜的厚度及空间位阻作用实现颗粒的分散, 从而抑制含 MgO 脉石进入精矿。

水玻璃是一种水溶性硅酸盐, 在溶液中水解产生 NaH_2SiO_4 , 容易生成聚合多硅酸盐^[22], 该硅酸盐及聚合物与矿物相互作用, 通过改变矿物表面电性, 分散、抑制脉石矿物, 降低含镁脉石在精矿中的产率^[23]。

古尔胶^[24]是一种分枝多糖, 由半乳甘露聚糖构成基本结构单元, 分子中含有大量 $-OH$, 可通过在滑石等硅酸盐矿物表面吸附使其得到抑制, 从而降低 MgO 含量。

近年来, 国内外学者开发了一批抑制含 MgO 矿物的新型高效抑制剂。西北矿冶研究院研制了一种降镁新药剂 JCD^[25], 它是由 T-1140、29[#] 药剂和 0[#] 油混合而成, 它使得精矿中 MgO 含量从原矿的 24.56% 降至 6.15%; T-1140 由多硫化物的数种无

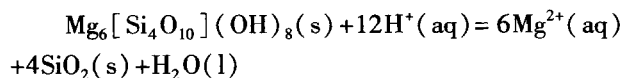
机盐组成, 按药剂的协同效应配制而成, 29[#] 药剂是一种低分子聚合物, 0[#] 油是一种中性油, JCD 药剂通过抑制蛇纹石等含镁脉石, 从而降低了精矿中 MgO 含量, 同时 JCD 对镍黄铁矿和磁黄铁矿还有一定的活化作用。组合抑制剂 EDTA 二钠-六偏磷酸钠, EDTA 能消除 $CuSO_4$ 对蛇纹石的活化作用, 解决因活化而造成的捕收剂黄药在蛇纹石表面的吸附。高玉德等^[7] 提出混合调整剂 CA_2 与无机抑制剂 PN_3 及 CMC 联合使用, CA_2 混合调整剂既活化了镍黄铁矿, 又对脉石矿物有絮凝作用, 可控制矿泥的影响, PN_3 与蛇纹石表面的金属离子发生络合反应, 改变了蛇纹石的表面电性, CMC 通过化学吸附及氢键作用吸附在蛇纹石表面而将其抑制, 把精矿中 MgO 含量降到 5.19%。王景旭等^[4] 提出组合抑制剂 AB, 该组合抑制剂对含镁硅酸盐矿物具有较好的选择性, 具有较强的键合能力, 分散效果好, 能与矿浆中金属离子发生螯合作用, 避免金属离子对含镁脉石的活化。熊文良等^[26] 在碱性条件下, 使用玉米淀粉与二硫化碳发生酯化反应而生成的苛性淀粉作为 MgO 脉石矿物的抑制剂, 将 MgO 的品位从原矿的 21.77% 降到精矿的 4.36%。此外, 中南大学研制了硫化铜镍矿降镁的组合抑制剂^[25], 中国地质科学院矿产综合利用研究所使用酯化淀粉实现了硫化铜镍矿中含镁矿物的抑制^[27]。陈文亮等^[27] 开发组合抑制剂 FY, 将无机分散剂与有机抑制剂按一定配比混合, 既产生分散硫化矿物表面蛇纹石矿泥的作用, 又能对蛇纹石类矿物产生吸附作用, 增加其表面亲水性。

药剂降镁在金川二矿区生产中取得明显效果, 保证回收率没有损失的情况下, 矿石中氧化镁含量由 27.61% 降到 5.95%, 解决了 1 号矿体矿石进行闪速熔炼时氧化镁含量偏高的问题^[25]。吉林镍业公司与东北大学合作的药剂降镁工业实验, 镁含量降至 6.45%, 同时镍品位提高三个百分点, 成功应用于工业生产^[4]。熊文良使用药剂 ZD-1 成功降低了复杂矿物中氧化镁含量高的问题, 解决了因静电吸附等造成的镁含量偏高的问题^[26]。药剂降镁在选矿生产中应用广泛, 作用效果明显, 但是部分药剂使用成本较高, 残余药剂对水环境有一定的污染, 需要进行废水处理。

2.2 酸浸法降镁

金川公司一选厂部分精矿镁含量特别高, 用物理方法无法降到合格范围, 通过酸浸把 MgO 含量从 11.44% 降至 2.64%, 解决了高镁在冶炼过程中造

成的问题。蛇纹石与酸反应方程式如下:



其 ΔG_T^0 远小于 0, K_T^0 达到 10^{59} 数量级, 反应进行很完全^[28]。另外, 微细粒中脉石比重较大, 酸浸处理使镁质硅酸盐溶解, 微细粒含量降低。酸浸处理后凝聚现象减弱, 矿物分散, 有利于浮选^[29]。

试验表明, 硫酸浓度 14.5%、浸出温度 75℃、浸出时间为 240 min、液固比 5:1、搅拌强度 300 r/min、磨矿细度 -0.037 mm 80%, 在低铜、镍损失的情况下, MgO 的脱除率可达到 83.27%^[30]。在酸性介质中, 次生硫化镍矿物-紫硫镍铁矿在氧化蚀变过程中形成的表面氢氧化铁薄膜可被溶去, 使紫硫镍铁矿得以活化。同时, 镍黄铁矿、含镍磁黄铁矿的矿物表面能被及时清洗, 防止其表面氧化, 进而提高其可浮性。生产实践中, 有时将酸浸工艺与酸法浮选相结合, 使矿物在酸性条件下完成分选过程, 充分发挥酸性介质对矿物表面的清洗, 活化作用。酸浸降镁主要应用于矿石品位较低, 脉石嵌布粒度极细, 或者矿石中的含镁脉石在酸性条件下极易分解的矿物。酸浸的优势是成本较低, 回收率高, 还可以综合回收矿物中的 Fe^{2+} , Mg^{2+} 等其他金属。金宝山铂钯矿^[29]在工业生产中利用硫酸法钛白生产中产生的废液作为酸浸溶液, 不仅解决了精矿含镁量高的难题, 还实现了废液的综合利用, 进一步降低了浸出成本。但是酸浸周期较长, 效率低, 污染环境, 而且由于硫化镍矿的自然 pH 值为碱性, 酸浸法的药剂消耗量较大, 生产成本低, 对设备腐蚀严重, 所以酸浸法不是最佳选择, 需要进一步改进^[31]。

2.3 电化学调控

硫化铜镍矿中主要含镁脉石是蛇纹石, 在水溶液中蛇纹石表面羟基优先溶解, Mg^{2+} 残留在蛇纹石表面使其荷正电。带正电的蛇纹石易与表面荷负电的镍黄铁矿等硫化矿物通过静电作用发生异相凝聚, 影响硫化铜镍矿的浮选。有学者通过降低蛇纹石表面的电性, 减弱甚至消除矿物颗粒间的异相凝聚, 从而实现降镁的目的。蛇纹石表面电性调控的关键在于调控蛇纹石表面双电层中定位离子的正电荷密度, 降低蛇纹石表面电位。链状聚合磷酸盐通过促进蛇纹石表面的镁迁移到液相, 与液相中的 Mg^{2+} 作用生成为稳定的可溶性络合物, 阻止 Mg^{2+} 向蛇纹石表面反吸附, 吸附在蛇纹石表面等途径调控蛇纹石表面电位^[26]。Fornasiero D^[32] 研究发现: 在

弱碱性条件下 $\text{Cu}(\text{II})$ 和 $\text{Ni}(\text{II})$ 以稳定的羟基络合物的形式, 通过静电吸附和沉淀的形式附着在含镁硅酸盐矿物表面, 从而促进黄药的吸附, 使含镁脉石与有价矿物同时上浮, 导致精矿中镁含量偏高。黄俊玮等^[24]通过实验证实, EDTA 和 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 可以络合稳定溶液中的 $\text{Cu}(\text{II})$ 和 $\text{Ni}(\text{II})$ 羟基化合物, 使其无法吸附到滑石、蛇纹石表面形成活化中心, 从而降低含镁脉石的上浮率。

电化学调控降镁对脉石与有用矿物电位差较大, 或者双电层中定位离子密度较高的矿物应用效果较好, 应用电化学调控的矿物常为导体或者半导体。通过调整矿浆电位, 使表面反应按照阳极氧化, 阴极还原定向进行, 对改善精矿质量具有明显作用。电化学调控使用药剂较少, 具有较大的发展前景。目前主要存在的问题是当矿浆中多种矿物的电位相近, 矿浆流体环境复杂时, 无法准确调整电位, 捕收剂容易发生阳极氧化而失效, 或者矿物在电极反应前已经于药剂发生了吸附作用, 应该强化电分选与化学分选的机理研究, 进一步拓展电化学选矿的应用范围。

2.4 工艺流程降镁

2.4.1 预先脱泥降镁

滑石、蛇纹石自然可浮性好, 在添加抑制剂的情况下, 仍然会有一定比例进入粗精矿, 造成中矿产率高, 药剂消耗量大。为了降低滑石和蛇纹石对选别过程的影响, 邢方丽等^[33]采用预先浮选滑石-铜镍混浮-混合精矿分离的流程, 在保证铜镍回收率和品位的情况下大幅度降低了精矿中镁的含量。云南金平镍矿采用 MIBC 作起泡剂进行预先脱泥, 避免了矿泥增大矿浆黏度及矿泥在粗粒硫化矿物表面罩盖等问题, 提高了浮选指标^[34]。

2.4.2 阶段磨矿浮选降镁

张远荫^[34]和曾新民^[35]提出在降低精矿中 MgO 含量方面, 阶段磨矿浮选流程比集中磨矿浮选流程的效果要好, 阶段磨矿浮选可以尽可能的早回收铜镍硫化矿物, 防止过磨引起的矿泥罩盖, 保证精矿回收率, 降低 MgO 含量。G. D. Senior 等^[36-37]采用预先浮选含镁矿物, 然后将物料分级分别处理, 分段抑制含镁矿物, 最后活化含镍矿物, 得到高品位镍精矿, 可除去 98% 的含镁矿物。

2.4.3 闪速浮选

闪速浮选即经过磨矿, 分级后对可浮性好的有用粗颗粒矿物提前回收, 金川公司在生产实践中取

得较好的效果,回收率明显提高,可以减少不必要的磨矿,降低能耗。另外,避免了部分有用矿石在磨矿过程中泥化,发生罩盖成为难分选矿物^[38]。

工艺降镁在生产实践中应用广泛,其作用效果是其它降镁方法无法弥补的,合理的工艺方法可以大大减少药剂用量,降低药剂成本,保护环境。当矿体性质发生变化时,工艺降镁是首先考虑的方法。但是,工艺降镁短期内花费较高,有时需要更换设备,改造基础设施。

2.5 物理方法降镁

Engel^[39]和 Bulatovic^[40]研究发现高强度调浆能提高铜、镍浮选的品位和回收率,一定时间限度内,浮选速度、回收率与调浆时间成正比。Sun 等^[41]试验表明在高能量叶轮的搅拌作用下,聚合物明显增大,但是当单纯输入能量时,聚合物不增大,所以他们认为在高强度调浆下回收率提高的主要原因是叶轮的搅拌作用使疏水微细粒碰撞几率增大,形成疏水絮团。低品位硫化铜镍矿中蛇纹石会在有用矿物表面形成矿泥罩盖,冯博等^[20]提出提高回收率降镁的关键是实现脱附,笔者认为高强度调浆之所以提高回收率可能与高强度调浆产生的强流场力有关,强流场力的作用下使有用矿物表面的矿泥发生了脱附。

石贵明等^[8]试验证明,精矿中 MgO 的混入很大程度上取决于入选物料的粒度组成,而药剂及流程的影响不如粒度组成影响大。他认为改善选别指标的重点是改善入选物料的粒度特性,减少粗粒及微细矿粒的含量,增加易选级别的金属含量。微细粒含镁脉石矿物因表面能大,粘附气泡进入精矿,所以尽量用棒磨机磨矿,调控磨矿介质配比,避免含镁脉石泥化。

3 降镁趋势及展望

综上所述,降低 MgO 含量对于降低能耗,避免漏炉,减少尾矿中铜、镍损失^[5],具有重要的意义。国内外学者从矿物嵌布关系、矿物浮游特性、物理性质、化学性质等方面深入分析了浮选精矿中 MgO 含量高的原因,并提出了药剂降镁、酸浸降镁、电化学降镁、工艺降镁、物理降镁等先进的降镁方法,但在高效降镁方法和降镁机理方面的研究仍比较欠缺。笔者认为化学法和物理法协同降镁、选冶联合流程降镁将是未来高效降镁方法的发展趋势,而从界面胶体化学、量子化学和流体力学层面强化降镁机理

的研究是将为高效降镁方法的开发提供有力的理论支持。

参考文献:

- [1] 宋谢炎,胡瑞忠,陈列锰. 铜、镍、铂族元素地球化学性质及其在幔源岩浆起源、演化和岩浆硫化物矿床研究中的意义[J]. 地学前缘,2009(4):287-305.
- [2] 刘湘南. GIS 空间分析原理与方法(21 世纪高等院校教材)[M]. 北京:科学出版社,2008.
- [3] 李徽文,刘明宝,印万忠. 金川镍矿二矿区富矿选矿降镁工艺技术研究现状及趋势[J]. 现代矿业,2012,28(3):10-12.
- [4] 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]. 中国矿山工程,2001,30(5):28-30.
- [5] 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,2006,515(3):98-101.
- [6] 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.
- [7] 高玉德,胡春晖,邓丽红. 降低金川镍精矿氧化镁含量的研究[J]. 材料研究与应用,2000,10(2):96-99.
- [8] 石贵明. 降低镍铜混合精矿氧化镁含量的新工艺研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2008.
- [9] 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,2008,24(4):19-23.
- [10] 高喜潮. 金川硫化铜镍矿床中镍黄铁矿的浮选[J]. 中国矿山工程,2015,44(6):12-16.
- [11] 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,2001,26(3):74-77.
- [12] Auzende A L, Pellenq J M, Devouard B, et al. Atomistic calculations of structural and elastic properties of serpentine minerals: the case of lizardite[J]. Physics & Chemistry of Minerals, 2006, 33(33):266-275.
- [13] Mellini M, Viti C. Crystal structure of lizardite-1T from Elba, Italy[J]. American Mineralogist, 1994, 79(11):1194-1198.
- [14] 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):28-31.
- [15] Jenkins P, Ralston J. The adsorption of a polysaccharide at the talc-aqueous solution interface[J]. Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects, 1998, 139(1):27-40.
- [16] 龙涛,冯其明,卢毅屏,等. 羧甲基纤维素对层状镁硅酸盐矿物浮选的抑制与分散作用[J]. 中国有色金属学报,2011,21(5):1145-1150.
- [17] 武汉大学. 分析化学[M]. 1984.
- [18] 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):28-31.

- [19] 郭昌槐, 邓竹声, 胡熙庚. 六偏磷酸钠对含镍磁黄铁矿浮选的影响[J]. 有色金属: 选矿部分, 1985(6): 17-21.
- [20] 冯博, 汪惠惠, 罗仙平. 蛇纹石型硫化铜镍矿浮选研究进展[J]. 矿产综合利用, 2015(3): 6-10.
- [21] 胡显智, 张文彬. 铜镍矿浮选精矿降镁研究与实践进展[J]. 有色矿冶, 2003, 19(1): 21-25.
- [22] Dho H, Iwasaki I. Role of sodium silicate in phosphate flotation. [J]. Minerals & Metallurgical Processing, 1990.
- [23] 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.
- [24] 牛生洋, 郝峰鸽. 羧甲基纤维素钠的应用进展[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(15): 3574-3575.
- [25] 张国范, 卢毅屏, 冯其明. 金川二矿区富矿石选矿新药剂应用研究[J]. 湖南有色金属, 2001, 17(5): 6-7.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 杨子轩, 谢贤, 韩彬, 等. 金川铜镍矿浮选中矿脱镁浸渣选矿试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(6): 1725-1732.
- [29] 胡显智. 高镁矿石酸浸降镁及浸出液综合利用研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2001.
- [30] 韩彬. 金川铜镍矿浮选中矿选择性脱镁及活化浮选试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
- [31] 北京矿业学院先矿教研组. 有用矿物的破碎、磨碎和筛分[M]. 北京: 中国工业出版社, 1963.
- [32] Fornasiero D, Ralston J. Cu(II) and Ni(II) activation in the flotation of quartz, lizardite and chlorite [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 76(1-2): 75-81.
- [33] 邢方丽, 肖宝清. 新疆某低品位铜镍矿选矿试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2010(1): 20-25.
- [34] 张远荫. 提高金川镍精矿质量的研究[J]. 中国矿山工程, 1988(12): 69.
- [35] 曾新民. 金川镍铜矿选矿降镁工艺研究与生产实践[J]. 有色金属: 选矿部分, 1996(1): 1-5.
- [36] Senior G D, Thomas S A. Development and implementation of a new flowsheet for the flotation of a low grade nickel ore [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 78(1): 49-61.
- [37] Senior G D. Flotation of sulphide minerals: US, US6945407 [P]. 2005
- [38] 欧晓玲. 金川二选厂降镁工艺的生产实践及研究[J]. 金川科技, 2002(1): 12-15.
- [39] Engel M D, Middlebrook P D, Jameson G J. Advances in the study of high intensity conditioning as a means of improving mineral flotation performance [J]. Minerals Engineering, 1997, 10(10): 55-68.
- [40] Bulatovic S, Jessup T M, Jackson J F, et al. Depressant for flotation separation of polymetallic sulphide ores: US, US5693692 [P]. 1997.
- [41] Sun W, Xie Z J, Yue-Hua H U, et al. Effect of high intensity conditioning on aggregate size of fine sphalerite [J]. 中国有色金属学报: 英文版, 2008, 18(2): 438-443.

Review of Reducing MgO in the Flotation Concentrate of Copper-nickel Sulfides

Lai Qingteng¹, Liao Yinfei², Zhao Yifan¹, Liu Zechen¹, He Yucheng¹, Liao Yanwang¹, Ding Shihao¹

(1. School of Chemical Engineering & Technology, CUMT, Xuzhou, Jiangsu, China;

2. National engineering research center of coal preparation and purification technology, CUMT, Xuzhou, Jiangsu, China)

Abstract: Nickel ore resources in China are mostly low-grade sulfide ores with high percentage of MgO-containing silicate gangue minerals. Flotation is the main way to concentrate copper and nickel metal. However, the percentage of MgO in flotation concentrates is generally high. Flash smelting requires MgO content must be less than 6.5%. High content MgO in concentrate may cause smelting furnace temperature rise, slag viscosity increase, furnace junction, difficulty in slag separation, which results in lower smelting recovery rate and higher smelting cost. In this regard, the domestic and foreign researchers have done extensive studies. But the problem that reducing MgO content leads to high loss rate of copper and nickel is widespread. Reducing MgO content in the concentrate of copper-nickel sulfides is a difficult problem in mineral processing. The research progresses on reducing MgO in the flotation concentrate of copper-nickel sulfides were summarized in this paper, and the reduction mechanism and development trend were also analyzed.

Keywords: Copper-nickel sulfides; Flotation; Reducing MgO; Research progress