

蛇纹石型硫化铜镍矿浮选研究进展

冯 博,汪惠惠,罗仙平

(江西理工大学 江西省矿业工程重点实验室,江西 赣州 341000)

摘要:含蛇纹石脉石的硫化铜镍矿是我国镍资源的主要来源。蛇纹石质软,易泥化,在硫化铜镍矿浮选常用的弱碱性 pH 区间,脉石矿物蛇纹石表面荷正电,而硫化矿物表面荷负电,二者之间存在较强的静电吸引作用,容易发生异相凝聚。异相凝聚导致蛇纹石矿泥罩盖在硫化矿物表面,抑制了硫化矿物的浮选。脱附硫化矿物表面罩盖的蛇纹石矿泥是提高该类型硫化铜镍矿回收率的关键。脱附罩盖矿泥的方法有化学脱附法和物理脱附法。化学脱附法是利用六偏磷酸钠、碳酸钠、羧甲基纤维素、水玻璃等化学药剂改变蛇纹石表面电性,使蛇纹石与硫化矿物之间的相互作用由吸引变为排斥,从而消除蛇纹石对硫化矿物的抑制作用。物理脱附法是利用流体力场和超声外场的作用脱附硫化矿物表面罩盖的蛇纹石矿泥,消除蛇纹石对硫化矿物的抑制作用。根据该类型硫化铜镍矿的矿石特点及相关理论研究开发的酸法浮选、脱泥浮选等浮选技术,取得了较好的选别效果。

关键词:蛇纹石;镍矿石;矿泥罩盖;浮选

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2015.03.002

中图分类号:TD952 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2015)03-0006-06

镍矿资源主要有硫化镍矿、氧化镍矿和海底结核三种。由于经济技术条件的限制,目前红土镍矿和海底结核尚不能大规模开发利用,硫化镍矿是当今利用的最主要镍矿资源类型。世界镍资源基础储量共 1.4 亿 t,其中硫化镍矿资源只占 30%,但是由于硫化镍矿资源品质好,工艺技术成熟,目前世界上 59% 的镍产量来源于硫化镍矿^[1-2],世界著名的硫化铜镍矿床,如中国的金川镍矿、俄罗斯的诺里尔斯克镍矿、加拿大的萨德贝里镍矿、澳大利亚的卡姆巴尔达镍矿,形成均与基性或超基性岩岩浆作用有关。与基性超基性岩有关的硫化铜镍矿石中的脉石矿物主要为橄榄石、蛇纹石、辉石、滑石、绿泥石等。由于蛇纹石硬度小,易泥化,对硫化镍矿物的浮选起负面影响。因此,蛇纹石与硫化镍矿物的有效分离是镍矿石浮选的关键。

1 蛇纹石对硫化矿物浮选的影响

蛇纹石是一种层状构造的含镁硅酸盐矿物,主要由橄榄石、辉石蚀变而成,其理论化学组成为:

$\text{MgO } 43.6\%, \text{SiO}_2 43.3\%, \text{H}_2\text{O } 13.1\%$ ^[4],有时发生 Fe 和 Ni 取代 Mg 而生成少量的 FeO 、 Fe_2O_3 、 NiO 等。蛇纹石最常见的颜色为绿色,深浅不等,也有呈白色、浅黄色、灰色、蓝绿色或褐黑色者。摩氏硬度为 2.5~4.0,相对密度为 2.2~3.6^[5]。

蛇纹石属于 1:1 型层状硅酸盐矿物,其结构单元层由硅氧四面体层与镁氧八面体层按 1:1 比例连接而成^[6-7]。硅氧四面体在结构单元层中相互连接形成网状结构层,层中所有的硅氧四面体朝向一方,与镁氧八面体层相连。在镁氧八面体层中,一个方向上每三个羟基中的两个被硅氧四面体角顶的氧代替,四面体中的 Si^{4+} 被四个 O^{2-} 围绕,而八面体中的 Mg^{2+} 被两个 O^{2-} 和四个 OH^- 离子围绕^[8-10]。蛇纹石晶体结构中八面体内部靠离子键连接,四面体内部靠共价键连接,四面体层与八面体层之间的连接也为离子键,但它比八面体层内的离子键要弱。与八面体中的阳离子 Mg 结合的键基本上是离子性的,键弱,而与四面体中的阳离子 Si 结合的键具有共价性,键强。蛇纹石的断裂面上存在不饱和 Si-O-

收稿日期:2014-10-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51404109);江西省科技厅自然科学基金(20142BAB216021);江西省教育厅基金项目(GJJ14425);江西理工大学博士基金项目(jxxjbs13020)

作者简介:冯博(1986-),男,副教授,博士,主要从事矿物加工理论与工艺等方面的研究。

Si、O-Si-O、含镁键等,使蛇纹石具有很高的化学活性^[11-12]。

当蛇纹石置于溶液中时,表面会发生不等量溶解,镁氧八面体层中的 OH^- 优先溶解,而 Mg^{2+} 留在蛇纹石表面,使其电点较高^[13]。在硫化铜镍矿浮选的常用 pH 值区间 ($\text{pH} \approx 9$),硫化矿物表面荷负电,而蛇纹石表面荷正电。蛇纹石通过静电吸引作用附着于硫化矿物表面形成矿泥覆盖层,阻碍了镍黄铁矿与气泡的接触,抑制了镍黄铁矿浮选^[14-16]。

2 蛇纹石从硫化矿物表面上的脱附

常用的从硫化矿物表面上脱附蛇纹石矿泥的方法有物理脱附法和化学脱附法。

2.1 蛇纹石矿泥物理脱附方法

为缩短浮选所需时间及降低浮选药剂消耗,浮选前通常需要在搅拌桶内对矿浆进行搅拌调浆。Bulatovic^[17] 将浮选前的强搅拌过程称之为高强度调浆,并研究了高强度调浆对细粒铜锌矿、铜镍矿和铜矿浮选的影响,发现高强度调浆能够显著提高矿物的浮选回收率和精矿品位。Engel 等^[18] 研究了高强度调浆对西澳大利亚硫化铜镍矿浮选的影响,发现高强度调浆显著调高了镍矿物的浮选回收率。调浆速度越快,调浆时间越长,硫化镍矿物浮选速率和回收率越高。Feng 等^[19] 研究发现高强度调浆能够提高金川硫化铜镍矿的选别指标。

对高强度调浆改善矿物浮选行为的机理的研究很多。Sun 等^[20] 认为在强搅拌条件下,疏水的微细颗粒发生碰撞,并形成疏水聚团,是高强度调浆提高微细粒闪锌矿浮选回收率的主要原因。Farrow 等^[21] 认为高强度调浆作用下细颗粒镍黄铁矿将形成镍黄铁矿聚团,容易上浮进入精矿。Chen^[22-23] 认为高强度调浆能够脱附镍黄铁矿表面的蛇纹石矿泥,调浆强度越强,调浆时间越长,脱附的矿泥数目越多。

将矿浆直接放入超声场中,控制超声频率和超声时间,可以使矿物颗粒充分分散^[24]。Aldrich^[25] 研究了超声波对硫化矿浮选的影响,发现超声波预处理能提高硫化矿物的疏水性和脉石矿物的亲水性,增加浮选过程的选择性。Mason 等^[26] 认为超声波分散矿物颗粒的作用机理包括两个方面:一方面是超声波在矿浆中以驻波的形式传播,使微细矿物颗粒受到周期性的拉伸和压缩作用;另一方面是超声波在矿浆中能够产生“空化”作用,从而使颗粒分

散。Feng 等^[27] 认为超声波通过三个方面的作用改善矿物的浮选效果:首先是通过超微束作用产生湍流使颗粒运动加剧;第二是空化作用;第三是气泡兼并产生超音速射流作用于粗颗粒矿物表面的微细颗粒,使其脱附。

2.2 蛇纹石矿物化学脱附方法

矿泥化学脱附方法是生产中广泛应用在矿浆中加入化学分散剂,使其与矿物颗粒表面作用,改变矿物颗粒的表面性质,实现颗粒的分散^[28]。化学脱附方法的作用机理主要有以下三种^[29]:

(1) 改变矿物颗粒的表面电性,增大颗粒间的静电排斥作用力;

(2) 大分子分散剂吸附在矿物颗粒表面,产生较强的位阻排斥作用力;

(3) 增强颗粒表面亲水性,提高颗粒间的水化排斥作用力。

常用的化学分散剂主要有碳酸钠、六偏磷酸钠、水玻璃和羧甲基纤维素^[30]。

碳酸钠是一种强碱弱酸盐,在水溶液中能够发生电离及水解反应,使溶液显碱性并具有一定的 pH 值缓冲能力^[31]。碳酸钠能够与矿浆中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子发生沉淀反应,起到软化水质的作用,在选矿领域作为 pH 值调整剂和分散剂得到广泛应用。冯博等^[32] 研究发现,碳酸盐水解生成的荷负电的 CO_3^{2-} 能够吸附在蛇纹石表面,改变蛇纹石表面电性,从而对蛇纹石与黄铁矿混合矿起到分散作用,减弱蛇纹石对黄铁矿的抑制作用。

六偏磷酸钠是一种分子量较大的链状磷酸盐,在浮选中广泛用作矿泥分散剂和抑制剂^[33-36]。六偏磷酸钠能与蛇纹石表面的镁离子发生络合反应,生成稳定的亲水络合物,从而抑制蛇纹石的上浮。吸附在蛇纹石矿泥表面的六偏磷酸钠还能改变蛇纹石表面电位,使蛇纹石表面电性由正变负,消除蛇纹石对镍黄铁矿的抑制作用^[37-38]。六偏磷酸钠还能溶解镍黄铁矿表面的羟化镁薄膜,提高镍黄铁矿的可浮性^[39]。张英等^[40] 研究了六偏磷酸钠在某硫化铜镍矿浮选中的作用,发现六偏磷酸钠能够显著提高选矿指标。

水玻璃是一种水溶性硅酸盐,由二氧化硅与碱金属氧化物按不同比例反应生成^[41]。水玻璃在水溶液中能够发生水解反应,使水溶液呈碱性,反应生成的 NaH_2SiO_4 ,容易聚合生成 $\text{Na}_2\text{H}_4\text{Si}_2\text{O}_7$,并进而形成聚合多硅酸盐^[42]。溶液中存在的各种硅酸

盐单体和聚合物能够与矿物作用,改变矿物表面性质,有效的分散和抑制脉石矿物^[43-44]。水玻璃吸附在蛇纹石表面,能阻止黄铁矿表面蛇纹石矿泥罩盖现象的发生,改善黄铁矿浮选^[45]。

羧甲基纤维素(CMC)是一种具有较长烃链和许多羟基、羧基基团的高分子聚合物,是常用的疏水脉石的抑制剂^[46],同时对脉石矿泥具有分散作用。李治华^[47]研究发现 CMC 能够降低镍黄铁矿表面蛇纹石矿泥覆盖层的密度。Pietrobon 等人^[48]认为 CMC 通过分子中的羟基和羧基与氧化镁矿物发生作用,消除了矿物颗粒间的相互吸引作用,消除了矿泥对硫化矿物浮选的影响。冯博^[49]等人研究发现羧甲基纤维素能够分散蛇纹石与黄铁矿混合矿,恢复被蛇纹石抑制的黄铁矿的可浮性。

3 蛇纹石型硫化铜镍矿浮选技术研究

酸法浮选工艺。研究发现^[51],酸性 pH 值条件下浮选时铜镍矿物的浮选回收率明显高于中性和碱性 pH 值条件^[50]。酸性 pH 值可以阻止镍黄铁矿等硫化矿物表面形成氧化膜,增加其可浮性;在酸性 pH 值条件下,硅酸盐脉石与硫化矿物表面电性相同,不会发生异相凝聚,减轻了脉石矿泥对有用矿物浮选的影响^[52]。虽然酸法浮选能够改善硫化铜镍矿的浮选指标,但矿浆中存在的碳酸盐及酸溶性硅酸盐能与酸反应,消耗大量酸,使选矿成本较高,如芬兰希土拉镍矿为将粗选矿浆 pH 值保持在 4 ~ 4.5,每吨原矿耗酸高达 33.2 kg^[53]。

脱泥-浮选工艺。硫化铜镍矿石中的硅酸盐脉石质软,易泥化。矿泥不仅消耗浮选药剂,干扰有用矿物浮选,还容易通过泡沫夹带进入精矿^[54]。因此,对于矿物组成简单的硫化铜镍矿石,采用脱泥浮选或者泥砂分别处理工艺,能够提高浮选回收率,降低浮选药剂用量^[55]。我国云南金平镍矿在浮选前使用 MIBC 作为起泡剂进行预先脱泥,避免了浮选过程中矿泥增大矿浆黏度,在粗粒硫化矿物表面形成矿泥罩盖等现象,提高了浮选指标^[56];我国甘肃金川镍矿在处理露天矿石时,将两段磨矿浮选后得到的尾矿进行脱泥浮选,可以得到镍品位 2.5%,回收率 3% 的精矿^[57]。脱泥过程中,部分有用矿物损失在矿泥中,会降低有用矿物回收率,同时脱泥工艺流程复杂、操作困难,资金和人员投入较多。因此,脱泥-浮选工艺适用于矿泥含量高,且矿泥对有用矿物浮选影响较大的矿石。

阶段磨矿阶段选别流程。硫化铜镍矿矿物嵌布类型多样,通常存在块状、海绵晶铁状和细粒浸染状等不同构造共存的现象,因此,利用矿石的这种特性采用阶段磨矿和阶段选别流程可以减少矿石的过粉碎^[58]。澳大利亚温达拉选厂采用了两段磨矿流程,提高了选矿指标。中南大学在进行金川二矿区富矿石浮选研究时,通过两磨两选、中矿粗精矿再磨的工艺流程取得了较好的选别指标^[59]。

闪速浮选工艺。闪速浮选是一种快速回收粗粒级有用矿物的浮选技术^[60]。在磨矿分级回路中处理磨机的返砂,优先浮选已经单体解离的粗颗粒金属矿物或含金属矿物较多的连生体,直接获得精矿产品,实现早收多收,闪速浮选尾矿则返回磨矿作业处理。闪速浮选能减少有用矿物在矿泥中的损失,降低循环负荷,提高磨机的处理能力^[61]。芬兰奥托昆普公司的瓦玛拉选矿厂,采用 SK-80 闪速浮选机处理球磨机水力旋流器的底流,与不用闪速浮选机相比,精矿镍品位提高 5.37%,氧化镁含量降低 4%, -0.074 mm 粒级含量比普通精矿低 38%。金川硫化铜镍矿选矿厂进行了闪速浮选工业试验,获得了较好的指标,与不用闪速浮选机相比,镍、铜回收率分别提高 1.32% 和 0.75%, -0.074 mm 粒级含量比普通精矿低 32%。

4 结 论

(1)在硫化铜镍矿浮选常用的弱碱性 pH 值区间,蛇纹石与硫化镍矿物表面电性相反,存在较强的静电吸引作用,容易发生异相凝聚。蛇纹石通过异相凝聚作用附着在硫化矿物表面,抑制了硫化矿物的浮选。

(2)六偏磷酸钠、羧甲基纤维素等药剂可以改变蛇纹石表面电性,消除蛇纹石对硫化镍矿物的抑制作用。流体外场和超声外场也可以脱附硫化矿物表面上罩盖的蛇纹石矿泥,提高被蛇纹石抑制的硫化矿物的浮选回收率。

(3)根据蛇纹石型硫化铜镍矿的矿石特点,可以采用酸法浮选、脱泥浮选等浮选技术,取得了较好选别指标。

参考文献:

- [1]何焕华,蔡乔方.中国镍钴冶金[M].北京:冶金工业出版社,2000.
- [2]Kuek PH. Nickel. U. S. Geological Survey[M]. Washington, 2009.

- [3] Weedon DS. The ultrabasic/basic igneous rocks of the Huntly region[J]. *Scottish Journal of Geology*, 1970, 6(2): 26-40.
- [4] Post JL, Borer L. High-resolution infrared spectra, physical properties, and micromorphology of serpentines[J]. *Applied Clay Science*, 2000, 16(1-2): 73-85.
- [5] Anbalagan D, Sakthimurugesan K, Balakrishnan M, Gunasekaran S. Structural analysis, optical absorption and EPR spectroscopic studies on chrysotile[J]. *Applied Clay Science*, 2008, 42(1-2): 175-179.
- [6] Auzende AL, Pellenq RJ M, Devouard B, Baronnet A, Grauby O. Atomistic calculations of structural and elastic properties of serpentine minerals; the case of lizardite[J]. *Physics and chemistry of minerals*, 2006, 33(4): 266-275.
- [7] Mookherjee M, Stixrude L. Structure and elasticity of serpentine at high-pressure[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279(1-2): 11-19.
- [8] Rucklidge JC, Zussman J. The crystal structure of the serpentine mineral, lizardite $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ [J]. *Acta Crystallographica*, 1965, 19(3): 381-389.
- [9] Krstanovi? I. Crystal structure of single-layer lizardite[J]. *Zeitschrift für Kristallographie*, 1968, 126(1-3): 163-169.
- [10] Zussman J. Investigation of the crystal structure of antigorite[J]. *American Mineralogist*, 1954, 30(227): 498-512.
- [11] Mellini M, Viti C. Crystal structure of lizardite-1 T from Elba, Italy[J]. *American Mineralogist*, 1994, 79(12): 1194-1198.
- [12] 李学军, 王丽娟, 鲁安怀, 等. 天然蛇纹石活性机理初探[J]. *岩石矿物学杂志*, 2003, 22(4): 386-390.
- [13] Bo Feng, Yiping Lu, Qiming Feng, et al. Mechanisms of surface charge development of serpentine mineral. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(4): 237-242.
- [14] 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, 4(2): 28-32.
- [15] 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, 24(1): 36-44.
- [16] Edwards CR, Kipkie WB, Agar GE. 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.
- [17] Bulatovic SM, Wyslouzil DM. Research and development in selective froth flotation of mineral fines from polymetallic refractory sulphide ores[C]. In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy, Proceedings of Second International Conference*. Beijing, 1992, 23-27.
- [18] Engel MD, Middlebrook PD, Jameson CJ. Advances in the study of high intensity conditioning as a means of improving mineral floatation performance[J]. *Minerals Engineering*, 1997, 10(1): 55-68.
- [19] Bo Feng, Yiping Lu, Qiming Feng, et al. The effect of conditioning methods and chain length of xanthate on the flotation of a nickel ore. *Minerals Engineering*, 2012, 39(12): 48-50.
- [20] Sun W, Xie Z J, Hu Y H, Deng M J, Yi L, He G. Effect of high intensity conditioning on aggregate size of fine sphalerite[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(2): 438-443.
- [21] Farrow JB, Jones WG, Klauber C, Vernon CF. Conditions affecting the flotation response of Mount Keith ore[C]. In: *Mineral Products Communication, MPC/C-049*, 1991.
- [22] Chen G, Grano S, Sobieraj S, Ralston J. The effect of high intensity conditioning on the flotation of a nickel ore, Part 1: Size by size analysis[J]. *Minerals Engineering*, 1999, 12(10): 1185-1200.
- [23] Chen G, Grano S, Sobieraj S, Ralston J. The effect of high intensity conditioning on the flotation of a nickel ore, Part 2: Mechanisms[J]. *Minerals Engineering*, 1999, 12(11): 1359-1373.
- [24] Thoma SG, Ciftcioglu M, Smith DM. Determination of agglomerate strength distributions; Part 1. Calibration via ultrasonic forces[J]. *Powder Technology*, 1991, 68(1): 53-61.
- [25] Aldrich C, Feng D. Effect of ultrasonic preconditioning of pulp on the flotation of sulphide ores[J]. *Minerals Engineering*, 1999, 12(6): 701-707.
- [26] Mason TJ, Lorimer JP. Sonochemistry: theory, applications and uses of ultrasound in chemistry[M]. New York: Chemistry John Wiley, 1988.
- [27] Feng D, Aldrich C. Effect of preconditioning on the flotation of coal[J]. *Chemical Engineering Communications*, 2005, 192(7): 972-983.
- [28] Lu S C, Song S X, Dai Z F. Dispersion of fine mineral particles in water[J]. *Advanced Powder Technology*, 1992, 3(2): 89-96.
- [29] 卢寿慈, 翁达. 界面分选原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [30] Pearse M J. An overview of the use of chemical reagents in mineral processing[J]. *Minerals Engineering*, 2005, 18(2): 139-149.
- [31] 王毓华, 陈兴华, 胡业民. 碳酸钠对细粒铝硅酸盐矿物分散行为的影响[J]. *中国矿业大学学报*, 2007, 36(3): 292-297.

- [32] Feng Bo, Luo Xianping. The solution chemistry of carbonate and implications for pyrite flotation, 53(11), pp 181-183, 2013.
- [33] Andreola F, Castellini E, Ferreirac J M F, Olheroc S, Romagnoli M. Effect of sodium hexametaphosphate and ageing on the rheological behaviour of kaolin dispersions[J]. Applied Clay Science, 2006, 31(1-2): 56-64.
- [34] Rashchi F, Finch JA. Polyphosphates: A review their chemistry and application with particular reference to mineral processing[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(10-11): 1019-1035.
- [35] Huynh L, Feiler A, Michelmor A, Ralston J, Jenkins P. Control of slime coatings by the use of anionic phosphates: A fundamental study[J]. Minerals Engineering, 2000, 13(10-11): 1059-1069.
- [36] Choi I K, Wen W W, Smith R W. The effect of a long chain phosphate on the adsorption of collectors on kaolinite[J]. Minerals Engineering, 1993, 6(11): 1191-1197.
- [37] Lu Y, Zhang M, Feng Q, Long T, Ou L, Zhang G. The effect of sodium hexametaphosphate on the separation of serpentine from pyrite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(1): 208-213.
- [38] Feng B, Lu Y, Feng Q, Zhang M, Gu Y. Talc-serpentine interactions and implications for talc depression[J]. Minerals Engineering, 2012, 32(5): 68-73.
- [39] 李治华, 胡熙庚. 金川二矿区镍黄铁矿浮选特性及作用机理研究[J]. 中南矿冶学院学报, 1989, 20(5): 488-496.
- [40] 张英, 王毓华, 汤玉和. 某低品位铜镍硫化矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2009, 29(3): 40-47.
- [41] Mishra SK. Electrokinetic properties and flotation behaviour of apatite and calcite in the presence of sodium oleate and sodium metasilicate[J]. International Journal of Mineral Processing, 1982, 9(1): 59-73.
- [42] McDonald WS, Cruickshank DWJ. A reinvestigation of the structure of sodium metasilicate, Na_2SiO_3 [J]. Acta Crystallographica, 1967, 22(1): 37-43.
- [43] Dho H, Iwasaki I. Role of sodium silicate in phosphate flotation [J]. Minerals & Metallurgical Processing, 1990, 7(4): 215-221.
- [44] Kirjavainen V, Heiskanen K. Some factors that affect beneficiation of sulphide nickel-copper ores[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(7): 629-633.
- [45] Feng B, Lu Y, Feng Q, Li H. The solution chemistry of sodium silicate and implications for pyrite flotation [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(37): 12089-12094.
- [46] Morris GE, Fornasiero D, Ralston J. Polymer depressants at the talc-water interface adsorption isotherm, microflotation and electrokinetic studies [J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 67(1-4): 211-227.
- [47] Wellham EJ, 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(3-5): 381-395.
- [48] Pietrobon MC, Grano SR, Sobieraj S, Ralston J. Recovery mechanisms for pentlandite and MgO-bearing gangue minerals in nickel ores from Western Australia [J]. Minerals Engineering, 1997, 10(8): 775-786.
- [49] 冯博, 冯其明, 卢毅屏. 羧甲基纤维素在蛇纹石/黄铁矿浮选体系中的分散机理[J]. 中南大学学报, 2013, 44(7): 1933-1939.
- [50] Heiskanen K, Kirjavainen V, Laapas H. Possibilities of collectorless flotation in the treatment of pentlandite ores [J]. International Journal of Mineral Processing, 2005, 33(1-4): 263-274.
- [51] Malysiak V, O'Connor C T, Ralston J, Gerson A R, Coetzera L P, Bradshaw D J. Pentlandite-feldspar interaction and its effect on separation by flotation [J]. International Journal of Mineral Processing, 2002, 66(1-4): 89-106.
- [52] Feng B, Feng Q, Lu Y. The effect of lizardite surface characteristics on pyrite flotation [J]. Applied Surface Science, 2012, 259(25): 153-158.
- [53] 刘春生. 芬兰硫化镍矿的浮选[J]. 国外金属矿选矿, 1973(8): 20-26.
- [54] Oats W J, Ozdemir O, Nguyen AV. Effect of mechanical and chemical clay removals by hydrocyclone and dispersants on coal flotation [J]. Minerals Engineering, 2010, 23(5): 413-419.
- [55] 卢毅屏, 龙涛, 冯其明. 微细粒蛇纹石的可浮性及其机理[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1493-1497.
- [56] 梁冬梅. 云南金平硫化铜镍矿石选矿试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2009.
- [57] 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.
- [58] Senior G D, Thomas SA. 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.
- [59] 唐敏, 张文彬. 流程结构的选择对微细粒铜镍硫化矿的浮选影响[J]. 矿冶, 2008, 17(3): 4-9.
- [60] Newcombe B, Bradshaw D, Wightman E. Flash flotation-and the plight of the coarse particle [J]. Minerals Engineering, 2012, 34(7): 1-10.
- [61] Harbort GJ, Jackson BR, Manlapig EV. Recent advances in jameson flotation cell technology [J]. Minerals Engineering, 1994, 7(2-3): 319-332.

(下转 23 页)

- [9]朱昌洛,史光大,余平.高锑高砷复杂金精矿固硫固砷焙烧预处理初探[J].矿产综合利用,2001(2):45-47.
- [10]邓琼,李寿,白云汉,等.含砷锑金精矿的生物预氧化-氰化浸金研究[J].矿冶工程,2011,5(10):84-87.
- [11]王金祥.小曲碌沟金矿矿石微生物预氧化试验研究[J].黄金,2001,12(12):32-34.
- [12]孙建伟,杨磊.难浸金矿石的化学氧化预处理工艺试验研究[J].新疆有色金属,2009,(Z1):132-134.
- [13]巫汉泉,张金矿.含砷锑碳低品位难浸金矿石氰化浸出工艺试验研究[J].黄金,2005,3(3):32-34.
- [14]江国红,张艳敏.从含砷锑难处理金矿石中浸出金的试验研究[J].湿法冶金,2011,1(3):30-32.
- [15]熊玉宝,王婷,陶林冲,等.某含砷锑碳金精矿氰化试验研究[J].黄金,2007,6(6):39-41.

Research Status of Methods of Recovery of the Gold Ore Containing Antimony

Yang Zixuan, Xie Xian, Tong Xiong, Meng Qi, Hou Kai, Lv Haozi

(State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization,
Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Yunnan Province Engineering Research Center for Reutilization of Metal Tailings Resources,
Kunming Yunnan, China)

Abstract: The distribution and characteristics of the gold ore containing antimony was briefly introduced in this paper. Several main recovery methods were reviewed to solve the problems of the gold containing antimony, including flotation process, roasting method, biological method, chemical alkali leaching method, strengthening leaching method. The advantage and disadvantage were also pointed out. The key of strengthening pretreatment and united application was put forward in the future research.

Keywords: The gold containing antimony; Roasting; Chemical alkali leaching; Biological oxidation; Strengthening leaching

(上接 10 页)

The Development of Flotation for Serpentine Type Nickel Sulfide Ore

Feng Bo, Wang Huihui, Luo Xianping

(Jiangxi University of Science and Technology, Jiangxi Province Key Laboratory of Mining Engineering,
Ganzhou, Jiangxi, China)

Abstract: The nickel sulphide ores that containing serpentine gangue are the major source of nickel resources in china. Serpentine is soft and easy to slime. In the weak alkaline pH range where nickel sulfide ore flotation commonly used, serpentine surface is positively charged and sulfide mineral surface is negatively charged. Strong electrostatic attraction exists between the two minerals. which result in heterogeneous agglomeration. Heterogeneous agglomeration leads to the formation of serpentine slime coating on the sulfide mineral surfaces and to depresses the flotation of sulfide minerals. Desorption of slime from sulfide mineral surface is the key to improve the ore recovery. Methods that desorption the slime include chemical desorption method and physical desorption method. Chemical desorption method use sodium phosphate, sodium carbonate, carboxymethyl cellulose, water glass to change serpentine surface electricity, so the interactions between the serpentine and sulfide minerals change from attracting to rejection, so as to eliminate the depression effect of serpentine on sulfide minerals. Physical desorption method is use fluid force field and ultrasonic field to desorption slime and eliminate the depression effect of serpentine on sulfide minerals. According to the nickel sulphide ore characteristics and the related theoretical research, the method of acid flotation, desliming flotation were developed and achieved good separation effect.

Keywords: Serpentine; Nickel ore; Slime coating; Flotation