

矿物浮选过程中的交互影响*

印万忠¹, 唐远¹, 姚金¹, 罗溪梅², 王纪镇³

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 3. 西安科技大学 化学与化工学院, 陕西 西安 710054)

摘要:复杂矿石体系中矿物间难以分离的主要原因是有用矿物的嵌布粒度太细,有用矿物与脉石矿物的共生关系复杂,要实现矿物之间的单体解离,首先必须对矿石进行细磨,从而造成矿石泥化现象以及矿物之间的相互罩盖,进而对矿物的可浮性产生交互影响,导致矿物分离困难。矿物浮选的交互影响是指复杂矿石浮选体系中两种以上矿物间相互吸附、表面转化等对浮选分离产生的影响。因此,要实现复杂矿石体系中有用矿物的选择性分离,首先必须摸清不同复杂矿石体系中矿物之间的交互影响规律,进而找到利用或消除矿物间交互影响的方法,最终达到提高分离选择性的目的。系统阐述了近年来在复杂铁矿石、菱镁矿矿石和钨矿石体系中不同矿物间的浮选交互影响规律的研究成果,以及浮选过程中不同类型复杂矿石中各矿物交互影响的晶体化学和表面物理化学机制,并提出了削弱或促进矿物之间交互影响和适于不同类型复杂矿石浮选分离的方法,建立了复杂铁矿石、菱镁矿矿石和白钨矿矿石中矿物浮选交互影响的理论体系。

关键词:浮选;铁矿石;菱镁矿矿石;白钨矿矿石;交互影响

中图分类号:TD91 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0076(2018)03-0055-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.03.010

Interactive Effects in Mineral Flotation Process

YIN Wanzhong^{1*}, TANG Yuan¹, YAO Jin¹, LUO Ximei², WANG Jizhen³

(1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: The main reason for the difficulty to separate different minerals in complex ore system is that the dissemination size of useful mineral is too small, and the intergrowth relationship between useful minerals and gangue minerals is too complex, so ore must first be finely ground to realize dissociation between the minerals, which, however, results in mutual covering between minerals and sliming phenomenon of ores, and then the interactive effects of mineral flotation happen and lead to the mineral separation being very difficult. The interactive effects of mineral flotation mean the influence of the adsorption and surface conversion of more than two minerals on flotation separation in the complex ore flotation system. In order to achieve selective separation of useful minerals in complex minerals system, the interaction laws between minerals must first be found out, and then the methods must be sought to eliminate the interactive effects among minerals; and ultimately to improve the separation selectivity of minerals. Recent research achievements about flotation interactive effect law of complex iron ore, magnesite ore and tungsten ore system were described. The crystals

* 收稿日期:2018-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51374079)

作者简介:印万忠(1970-),男,浙江临安人,教授,博士生导师,主要研究复杂难选矿的高效分离理论与技术。

chemistry and surface physical and chemical mechanism of flotation interactive effect of various minerals in different types of complex ores were revealed. Methods of weakening or promoting the interactive effect among minerals were put forward. Then a theoretical system of flotation interactive effects for complex iron ore, magnesite ore and scheelite ore were established.

Key words: flotation; iron ore; magnesite ore; scheelite ore; interactive effect

引言

复杂矿石选别难度大的原因之一是矿物间存在交互式影响,导致分选差异性减小,使矿物难以分离。当矿物嵌布粒度较小时,交互式影响更为突出。矿物浮选过程中的交互影响是指复杂矿石浮选体系中各种矿物间相互吸附、活化、抑制等对浮选分离产生的影响^[1]。矿物间产生交互影响的原因主要是由于有用矿物嵌布粒度太细,且与脉石矿物共生关系复杂,要实现矿物间的单体解离,首先必须对矿石进行细磨,而造成了泥化严重及矿物间的罩盖,进而对矿物的可浮性产生交互影响,导致有用矿物虽已达到单体解离,但矿物的分离还是极为困难的现象。

通常情况下,矿物间的这些交互影响主要有以下几种形式^[2,3]:(1)细粒目的矿物黏附于粗粒脉石矿物上;(2)细粒目的矿物黏附于粗粒目的矿物上(即载体浮选);(3)细粒脉石矿物黏附于粗粒目的矿物;(4)细粒脉石矿物和细粒目的矿物相互吸附聚集;(5)物理化学性质相近的目的矿物或脉石,交互影响而使产品互含;(6)矿物表面不饱和断裂键的重组以及离子的溶解,例如硫化铜矿物溶解的 Cu^{2+} 对闪锌矿和方铅矿的活化作用。

针对矿物间的交互影响现象,国内外研究学者也做了大量研究工作。邱冠周等^[4]用+10 μm 的不同粒级黑钨矿对-5 μm 粒级的黑钨矿进行载体浮选,回收率从原来的40.50%上升到70.38%。Fuerstenau^[5]采用十二烷基硫酸钠对细粒赤铁矿絮凝浮选的研究指出,剪切絮凝作用可以提高-10 μm 赤铁矿颗粒的浮选速率。张国范和王毓华等^[6,7]在铝土矿脱硅工艺中,采用碳酸钠和六偏磷酸钠强化矿浆分散,减轻了矿泥团聚和罩盖对浮选过程的影响,获得了良好的分选指标。另外,东北大学还针对东鞍山含碳酸盐铁矿石,开发了分步浮选工艺^[8]用以消除菱铁矿对浮选的不利影响。分散浮选和分步浮选是削弱细颗粒矿物与粗颗粒矿物或细颗粒矿物与细颗粒矿物间交互作用的有效方法。综上可知,矿石中的矿物组分越繁杂,在浮选过程中的交互影响也越复杂。有些矿物间的交互影响过程对浮选目的

矿物是有利的,需要对该过程进行强化;有些交互影响过程对浮选目的矿物是不利的,需要对该过程进行削弱甚至消除^[2,9]。

本文系统总结了笔者近年来对复杂铁矿石、菱镁矿矿石和白钨矿矿石浮选体系中不同矿物间的交互影响的研究成果,包括不同矿石浮选中所涉及的交互影响规律、交互影响产生的机制及削弱或促进交互影响的方法,为建立矿物浮选交互影响理论体系,实现矿物间交互影响的合理利用和精细化浮选分离作铺垫。

1 铁矿石浮选中的交互影响

我国铁矿石中铁矿物和脉石矿物种类繁多,目前具有工业利用价值的铁矿物包括磁铁矿、赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿等,脉石矿物主要有石英、方解石、白云石等^[10]。这些矿物在分选过程中经常相互影响,导致矿物间的分离困难。作者以不同粒级赤铁矿、菱铁矿、磁铁矿、褐铁矿、白云石和石英为研究对象,系统考察了在铁矿石浮选中的交互影响,并对其规律进行了总结^[11,12]。下面以菱铁矿对赤铁矿浮选的影响为例进行介绍。

1.1 交互影响规律

作者研究了在油酸钠和十二胺浮选体系(油酸钠160 mg/L, CaO 60 mg/L, 淀粉5 mg/L; 十二胺100 mg/L, 淀粉15 mg/L)中菱铁矿单矿物对赤铁矿和石英混合矿(质量比4:5)浮选的影响,结果如图1所示。

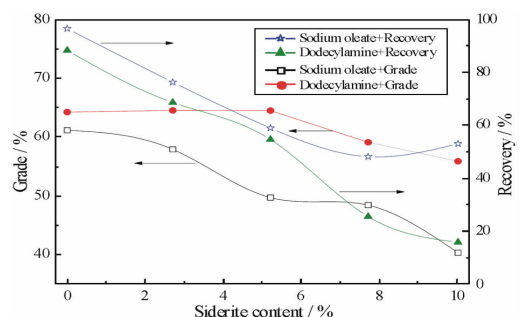


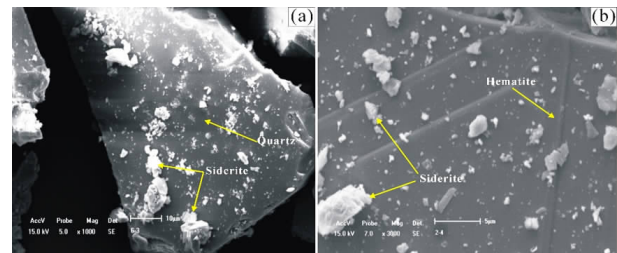
图1 菱铁矿对赤铁矿可浮性的影响

Fig. 1 Effects of siderite on the floatability of hematite

由图1可知,无论是在油酸钠阴离子反浮选体系中还是在十二胺阳离子反浮选体系中,菱铁矿的存在均会对赤铁矿的浮选产生较大的影响,且随着菱铁矿的比例增大,精矿铁品位和回收率均迅速下降,即菱铁矿的加入会恶化赤铁矿的浮选。

1.2 交互影响产生机理

通过对混合矿浮选后的精矿和尾矿产品的扫描电子显微镜(SEM)和EDS能谱检测,发现细粒菱铁矿在石英和赤铁矿表面发生了无选择性罩盖现象(分别见图2(a)和(b)所示),使得赤铁矿和石英呈现出部分菱铁矿的性质,即赤铁矿与石英表面特性趋同,导致赤铁矿和石英的浮游性趋于一致。由于菱铁矿属中等可浮性矿物,其在油酸钠或十二胺浮选体系中均不易上浮也不易被抑制,因此影响了赤铁矿和石英的有效分离。



(a) 在石英表面; (b) 在赤铁矿表面

图2 细粒菱铁矿在矿物表面的吸附罩盖 SEM 图

Fig. 2 SEM images of the adsorption and cover of fine siderite on mineral surface

1.3 交互影响的消除方法

作者针对东鞍山含碳酸盐铁矿石的浮选,提出了分步浮选和分散浮选技术,很好地解决了其典型的铁矿物间交互影响严重的问题。

(1)分步浮选 该技术是利用不同矿物在不同介质条件下可浮性的差异,先在中性条件下将易发生罩盖的细粒菱铁矿和绿泥石等含泥硅酸铁矿物第一步提前分离,减少对后续分选的影响;然后第二步在强碱性条件采用常规反浮选技术分选赤铁矿,原则工艺流程如图3所示。研究表明^[2],采用分步浮选工艺可削弱菱铁矿对赤铁矿浮选的不利影响,利于提高精矿品位和回收率。

(2)分散浮选 该技术则主要指通过加入分散剂来分散矿物颗粒,防止矿物颗粒团聚和矿物间的交互式影响,最终达到提高浮选指标的目的。笔者针对上述东鞍山烧结厂分步浮选过程中产生的含菱铁矿中矿在分散剂水玻璃作用前后进行了 SEM 对

比研究,结果见图4。

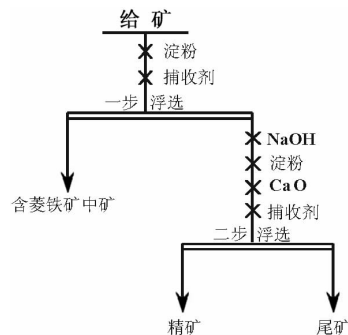
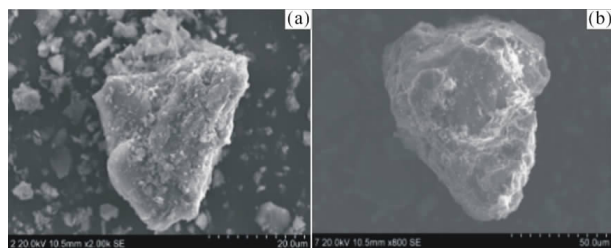


图3 铁矿石分步浮选原则工艺流程图

Fig. 3 Step flotation flowchart of iron ore



(a) 作用前; (b) 作用后

图4 水玻璃作用前后含菱铁矿中矿 SEM 图

Fig. 4 SEM images of siderite containing middling before or after interacting with sodium silicate

由图4可知,添加模数为2.4的水玻璃作分散剂前,悬浮液中有明显的微细颗粒相互聚团和罩盖等现象,在添加水玻璃后,随着浮选机的搅拌,粗颗粒表面黏附的微细颗粒及微细粒聚团被打散脱离粗颗粒,均匀分布于悬浮液中的微细粒聚团也随着药剂作用而分散。

综上所述,通过分步和分散浮选技术,可有效削弱甚至消除赤铁矿浮选过程中菱铁矿对浮选的影响,恢复粗粒目的铁矿物的本来性质,减少微细粒部分因夹杂而进入尾矿的概率,达到提高铁矿石分选指标的目的。

2 菱镁矿矿石浮选中的交互影响

随着菱镁矿资源的不断开发,菱镁矿提纯工作也越来越受到重视。菱镁矿的杂质矿物主要是白云石和滑石,其次是透闪石、方解石、蛇纹石和石英等^[13,14]。在菱镁矿浮选过程中,有效降低钙和硅等含量是提高菱镁矿品质的关键^[15,16]。作者以油酸钠为捕收剂,六偏磷酸钠(SHMP)作抑制剂,系统考察了白云石、滑石和石英等脉石矿物对菱镁矿可浮

性的影响并深入探讨了影响机理^[17,18]。在此,笔者主要针对白云石和石英对菱镁矿浮选的影响进行总结。

2.1 交互影响规律

考察了白云石和石英单矿物对菱镁矿浮选的影响,分别进行了白云石和石英不同添加比例的混合矿浮选试验,试验结果如图 5 所示。

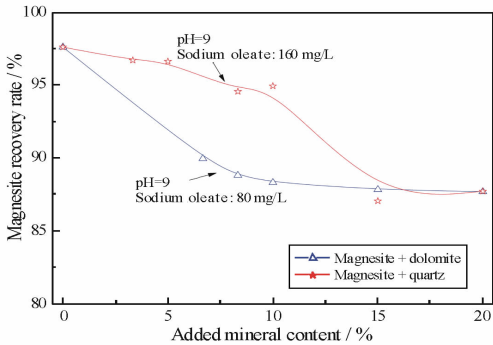


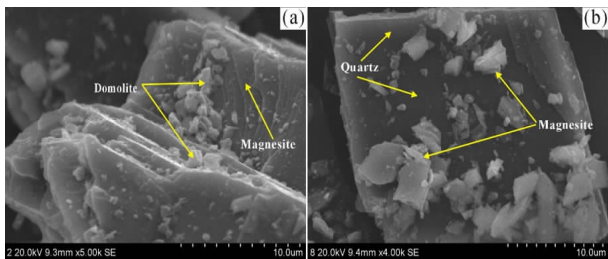
图 5 白云石和石英对菱镁矿可浮性的影响

Fig. 5 Effects of dolomite and quartz on the floatability of magnesite

由图 5 可知,随着白云石和石英比例的增加,菱镁矿浮选回收率均逐渐降低。当白云石含量超过 8% 时,会使菱镁矿回收率下降到 90% 以下,但随着白云石含量的继续增加,菱镁矿回收率变化不大。当石英含量超过 13% 以后,会使菱镁矿的回收率降到 90% 以下,之后随着石英含量的升高,菱镁矿的回收率变化也不大。菱镁矿、白云石和石英这三种矿物间会产生交互影响,白云石和石英会降低菱镁矿浮选回收率,产生不利影响。

2.2 交互影响产生机理

当添加白云石和石英质量比为 20% 时,菱镁矿回收率均减少到 90% 以下,此时对浮选尾矿产品进行 SEM 分析,结果如图 6 所示。



(a) 菱镁矿与白云石; (b) 菱镁矿与石英

图 6 菱镁矿与白云石或石英混合矿浮选尾矿 SEM 图

Fig. 6 SEM images of flotation tailings of mixed minerals

由图 6 可知,细粒白云石易罩盖在菱镁矿表面上,细粒菱镁矿易罩盖在石英表面,同时由粒级试验结果可知,细粒白云石可浮性较差,粗粒石英几乎不上浮,导致菱镁矿随白云石和石英进入尾矿,使菱镁矿浮选回收率降低。另一方面^[19],白云石在水中易溶解,溶解的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 会与脂肪酸类捕收剂生成难溶性沉淀,消耗脂肪酸类捕收剂的用量,也会降低菱镁矿的浮选回收率。

2.3 交互影响的消除方法

SHMP 与 Ca^{2+} 结合的产物溶解度小于与 Mg^{2+} 结合产物的溶解度,因此对白云石的抑制效果优于菱镁矿,可以作为菱镁矿浮选脱钙的抑制剂,同时六偏磷酸钠具有分散效果。作者发现,在添加 SHMP 为调整剂时,白云石对菱镁矿浮选的抑制作用减弱,多个粒级菱镁矿回收率由不添加 SHMP 时的下降变为上升, $-0.067 + 0.045$ mm 粒级白云石使 $-0.1 + 0.067$ mm 粒级菱镁矿回收率上升最大^[20]。进一步研究表明,SHMP 作为分散剂一定程度上能够削弱白云石吸附罩盖的影响,降低伴生矿物对菱镁矿浮选的不利影响,有利于实际矿石分选。

3 白钨矿矿石浮选的交互影响

我国白钨矿矿石储量大,但绝大部分品位低、组成复杂,且嵌布粒度较细,属难选矿种^[21]。白钨矿与方解石和萤石可浮性相近,对方解石、萤石有强烈抑制作用但对白钨矿几乎无抑制作用的药剂往往仍不能有效分离这三种矿物,造成该现象的主要原因是含钙脉石与白钨矿之间存在相互干扰^[22]。目前对于这三种矿物浮选分离的研究一般都是围绕着新浮选药剂,关于含钙脉石对白钨矿浮选的影响机制及调控的研究相对较少。因此,作者从矿物间交互影响的角度,针对含钙伴生矿物及其对白钨矿浮选的影响规律及机理进行了研究。

3.1 交互影响规律

分别以油酸钠和十二胺为捕收剂时方解石对白钨矿浮选的影响如图 7 所示。

图 7 显示,油酸钠为捕收剂时,在 $pH = 8.5 \sim 12.0$ 范围内方解石对白钨矿有强烈的抑制作用;十二胺为捕收剂时, $pH > 10$ 后方解石对白钨矿有强烈的抑制作用。前期研究还发现,油酸钠为捕收剂时碳酸根离子对白钨矿有活化作用而钙离子对白钨矿

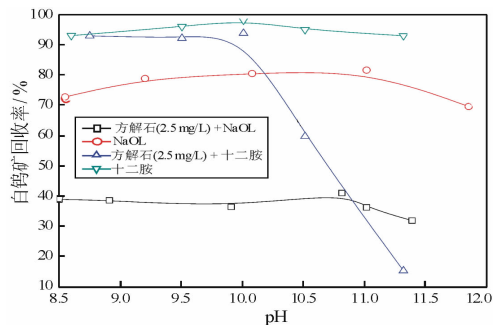


图7 方解石对白钨矿浮选的影响

Fig. 7 Effects of calcite on the flotation of scheelite

有明显的抑制作用;以十二胺为捕收剂时,碳酸钠对白钨矿有明显的抑制作用,而钙离子的影响不明显。

3.2 交互影响产生机理

油酸钠用量对白钨矿浮选回收率的影响如图8所示。

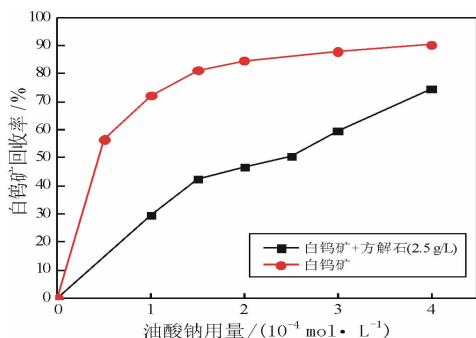


图8 油酸钠用量对白钨矿以及方解石 + 白钨矿混合矿中白钨矿回收率影响 (pH = 11.0)

Fig. 8 Effects of sodium oleate concentration on the scheelite recovery in presence or absence of calcite

当方解石不存在时,白钨矿回收率随油酸钠用量增加而迅速增加,当油酸钠用量达到 2×10^{-4} mol/L 后白钨矿的回收率基本达到最高值。方解石存在时,随着油酸钠用量增加白钨矿回收率也逐渐增加,此时方解石对白钨矿回收率的影响也随着油酸钠用量增加而减弱,由此可见,方解石主要是通过消耗油酸钠而降低白钨矿回收率的。

方解石对白钨矿影响主要通过以下几种方式^[23]:方解石颗粒在白钨矿表面罩盖、方解石晶格离子与白钨矿表面发生置换反应(矿物表面转化)、方解石颗粒分散于矿浆中消耗捕收剂或改变气泡性质、方解石晶格离子溶解于矿浆中增加离子浓度。研究表明,少量方解石对白钨矿有抑制作用,随着方解石含量增多,白钨矿回收率明显增加。前两种作

用方式都很难解释少量方解石明显降低了白钨矿回收率的原因,并且与矿物表面转化机理相反(矿物表面转化是由于碳酸根离子置换了钨酸根,而作者发现碳酸根对白钨矿有一定的活化作用),方解石颗粒消耗捕收剂机理难以解释随着方解石含量增多白钨矿回收率明显增加,只有方解石溶解离子消耗捕收剂才可说明少量方解石对白钨矿有明显抑制作用。当方解石超过一定含量后,随着方解石含量增加白钨矿回收率增加可能与矿物罩盖或气泡性质改变有关。

3.3 交互影响的消除方法

以羧甲基纤维素钠(CMC)为调整剂时,碳酸钠对白钨矿浮选的影响如图9所示。

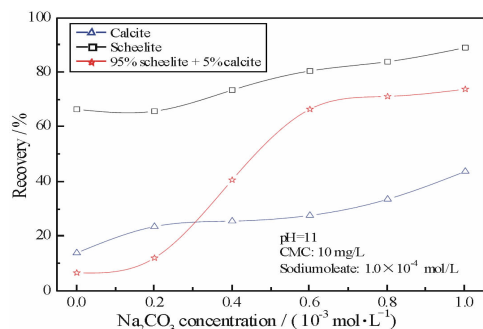


图9 碳酸钠对 CMC 抑制效果的影响

Fig. 9 Effects of Na₂CO₃ on the depressant effect of CMC

由图9可知,CMC存在时白钨矿和方解石的回收率随碳酸钠用量的增加都有缓慢增加,但两者回收率仍有明显的差异。无碳酸钠时,CMC在方解石溶解出的钙离子的作用下对白钨矿有强烈的抑制作用;随着碳酸钠浓度增加,方解石对白钨矿的影响逐渐减弱,说明碳酸钠消除了方解石溶解出的钙离子对CMC选择性的影响。因此,CMC为调整剂时,碳酸钠既可消除方解石对白钨矿的影响,又对两种矿物回收率的影响不明显,但碳酸钠用量过多会降低CMC对方解石的抑制作用,即碳酸钠有最佳用量,调节pH值时应组合使用氢氧化钠和碳酸钠,并且碳酸钠的用量应严格控制。

4 结论与展望

(1)分步和分散浮选技术,可以有效削弱赤铁矿浮选过程中菱铁矿的影响,减小微细粒部分因夹杂而进入尾矿的概率,提高铁矿石分选指标。

(2) 细粒白云石易罩盖在菱镁矿表面, 而细粒菱镁矿易罩盖在石英表面, 影响菱镁矿的浮选。同时, 白云石溶解的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 也会消耗脂肪酸类捕收剂。研究表明, 利用六偏磷酸钠作为分散剂可削弱吸附罩盖的影响, 有利于矿物间的分离。

(3) 矿物可浮性相近、矿物的相互干扰是白钨矿与含钙脉石矿物难以分离的主因。油酸钠为捕收剂时, 方解石及其溶解的钙离子可降低白钨矿的回收率和抑制剂的选择性, 碳酸钠可明显抑制方解石的溶解和降低溶液中钙离子的浓度, 因而可降低这些不利影响, 强化白钨矿与含钙脉石矿物的分离。

参考文献:

- [1] 印万忠, 罗溪梅, 姚金, 等. 浮选体系中矿物交互影响的研究现状[C]//中国采选技术十年回顾与展望. 北京: 冶金工业出版社, 2012.
- [2] 印万忠, 马英强, 王乃玲, 等. 基于矿物浮选交互式影响的铁矿石分散浮选技术研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2013(s1): 146-150.
- [3] 张明, 刘明宝, 印万忠, 等. 东鞍山含碳酸盐难选铁矿石分步浮选工艺研究[J]. 金属矿山, 2007, 37(9): 62-64.
- [4] 邱冠周, 胡为柏, 金华爱. 微细粒黑钨矿的载体浮选[J]. 中南大学学报(自然科学版), 1982(3): 28-35.
- [5] Fuerstenau D W, 李晓沙. 用剪切絮凝和载体浮选法提高细粒赤铁矿浮选回收率[J]. 国外金属矿选矿, 1993(3): 1-6.
- [6] 张国范, 卢毅屏, 欧乐明, 等. 捕收剂 RL 在铝土矿浮选中的应用[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 712-715.
- [7] 王毓华, 陈兴华, 胡业民, 等. 磷酸盐对细粒铝硅酸盐矿物分散行为的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(2): 238-244.
- [8] 印万忠, 马英强, 刘明宝, 等. 东鞍山高碳酸铁矿石磁选精矿分步浮选工业试验[J]. 金属矿山, 2011, 40(8): 64-67.
- [9] 卢寿慈. 界面分选原理及应用[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- [10] 袁致涛, 高太, 印万忠, 等. 我国难选铁矿石资源利用的现状与发展方向[J]. 金属矿山, 2007(1): 1-6.
- [11] 罗溪梅, 印万忠, 姚金, 等. 分散剂对鞍山某磁选铁精矿反浮选的影响[J]. 金属矿山, 2012, 41(5): 63-66.
- [12] Luo X M, Yin W Z, Wang Y F, et al. Effect and mechanism of siderite on reverse anionic flotation of quartz from

hematite[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(1): 52-58.

- [13] 王兆敏. 中国菱镁矿现状与发展趋势[C]//2006 中国非金属矿工业大会暨全国非金属矿加工应用技术交流会. 上海: 中国非金属矿工业编辑部, 2006: 6-8.
- [14] Kvarla J, Kmet S. Non-equilibrium electrokinetic properties of magnesite and dolomite determined by the laser-doppler electrophoretic light scattering (ELS) technique. a solids concentration effect[J]. Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects, 1996, 111(1-2): 153-157.
- [15] Anastassakis G N. A study on the separation of magnesite fines by magnetic carrier methods[J]. Colloids & Surfaces A: Physicochemical & Engineering Aspects, 1999, 149(1-3): 585-593.
- [16] Botero A E C, Torem M L, Mesquita L M S D. Surface chemistry fundamentals of biosorption of rhodococcus opacus and its effect in calcite and magnesite flotation[J]. Minerals Engineering, 2008, 21(1): 83-92.
- [17] 李东, 印万忠, 姚金, 等. 菱铁矿和白云石对石英浮选的影响[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 557-561.
- [18] Yao J, Yin W Z, Hou Y. Effects of solution chemistry on the flotation of magnesite, dolomite and quartz with sodium oleate as a collector using SEM analysis[J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2013, 17(7): 44-49.
- [19] Yin W Z, Yao J. Influences of interactive effects in the flotation of magnesite with sodium oleate as collector based on solution chemistry[J]. Research Journal of Chemistry and Environment, 2013, 17(9): 76-81.
- [20] 姚金. 含镁矿物浮选体系中矿物的交互影响研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [21] Gao Z Y, Sun W, Hu Y H, et al. Surface energies and appearances of commonly exposed surfaces of scheelite crystal[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 2147-2152.
- [22] Yin W Z, Wang J Z. Effects of particle size and particle interactions on scheelite flotation[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(11): 3682-3687.
- [23] 王纪镇. 复杂难处理白钨矿浮选分离的强化及其机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.

引用格式: 印万忠, 唐远, 姚金, 等. 矿物浮选过程中的交互影响[J]. 矿产保护与利用, 2018(3): 55-60.

YIN Wanzhong, TANG Yuan, YAO Jin, et al. Interactive effects in mineral flotation process[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(3): 55-60.