

文章编号: 1674-9669(2012)06-0039-05

# 硫化钠在浮选中的应用技术现状

邱廷省, 丁声强, 张宝红, 严思明

(江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 硫化钠是一种重要的浮选调整剂, 在浮选中具有广泛的应用. 在处理有色金属硫化矿时, 硫化钠可作为抑制剂、脱药剂、活化剂; 在处理有色金属氧化矿时, 硫化钠则是重要的硫化剂. 在浮选溶液电化学中, 硫化钠既可以调节矿浆 pH, 也可以调节矿浆电位  $Eh$ . 本文将硫化钠在实际中的应用与其基本性质相结合, 论述硫化钠在浮选中的不同作用及机理, 指出控制硫化钠的用量和作用时间是合理使用硫化钠的关键.

**关键词:** 硫化钠; 抑制剂; 活化剂; 硫诱导浮选

**中图分类号:** TD923; TF803.2      **文献标志码:** A

## Application situation of sodium sulfide in the flotation

QIU Ting-sheng, DING Sheng-qiang, ZHANG Bao-hong, YAN Si-ming

(School of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** Sodium sulfide is an important regulator with a wide range of application in the flotation. It can act as depressant, reagent removal agent and activator in processing non-ferrous metal sulfide, while as important vulcanizing agent in non-ferrous metal oxide ores. In the electrochemistry of flotation solution, it can adjust the pH and  $Eh$  of slurry. By combining practical application with basic properties of sodium sulfide, this paper discusses its different functions and mechanisms in flotation, and points out that the key to its reasonable use is to control its dosage and action period.

**Key words:** sodium sulfide; depressant; activator; sulfur induced flotation

## 0 引言

硫化钠( $\text{Na}_2\text{S} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ )是一种重要的化工产品, 在浮选中有着广泛的应用, 既可作为有色金属硫化矿的抑制剂、混合精矿脱药剂、硫诱导浮选剂、矿浆 pH 调整剂, 也可作为有色金属氧化矿的硫化剂. 由于硫化钠在浮选中的多重作用, 使得硫化钠

在实际生产中不好控制: 硫化钠用量不足, 起不到预想的作用, 用量过多, 又会起反作用. 多年来, 许多选矿工作者对硫化钠在浮选中的应用进行了研究、总结, 取得了很大的成绩, 使硫化钠在实际生产中得到广泛的应用. 本文根据硫化钠在实际生产中的应用, 结合其基本性质, 探讨硫化钠在浮选中的不同作用及机理, 旨在通过理论来更好地指导实际生产, 使硫化钠得到更合理的利用.

收稿日期: 2012-09-02

作者简介: 邱廷省(1962-), 男, 教授, 主要从事有色金属矿物分离技术研究, E-mail: qiutingsheng@163.com.

## 1 硫化钠作为抑制剂应用技术现状

在处理有色金属硫化矿时,硫化钠常作为抑制剂在浮选中被广泛使用.凡能够破坏或削弱矿物对捕收剂的吸附,增加矿物表面亲水性的药剂称之为抑制剂<sup>[1]</sup>.可以通过以下几种方式使矿物达到抑制:从溶液中消除活化离子、消除矿物表面的活化薄膜、在矿物表面形成亲水的薄膜等.

### 1.1 从溶液中消除活化离子

在处理有色金属硫化矿时,矿浆中的离子如 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 等离子会对其他矿物如闪锌矿、黄铁矿产生活化<sup>[2-5]</sup>,使闪锌矿、黄铁矿的可浮性变好,抑制剂对它们的抑制效果变弱,矿物分离变得困难.所以在矿物分离前,要消除这种活化离子的影响.

高起鹏<sup>[6]</sup>对西藏玉龙某难选铜矿石进行浮选研究时发现,在铜-硫分离时,硫上浮量较大,铜精矿中铜品位只有8.26%.经试验研究发现, $\text{Cu}^{2+}$ 的存在较大程度地影响了铜矿物的回收率和品位.试验在铜粗选时加入200 g/t的硫化钠,使其在溶液中电离的 $\text{S}^{2-}$ 与 $\text{Cu}^{2+}$ 形成难溶的硫化铜沉淀,消除 $\text{Cu}^{2+}$ 的不利影响,取得了铜品位21.89%的较好指标.

陈家栋等<sup>[7]</sup>针对矿石富含铜、铅离子的特点,采用硫化钠首先沉淀矿浆中的 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 等离子,使闪锌矿不致于预先活化而浮起.硫化钠的使用不仅简化了药剂制度,而且获得了较满意的技术指标.

王云等<sup>[8]</sup>针对某地含银铜铅锌多金属硫化矿易浮难分、嵌布粒度极不均匀的特点,通过添加硫化钠来消除次生铜离子的影响,试验结果表明,添加少量硫化钠对铜影响较小,对铅锌具有较强的抑制效果;硫化钠用量一定要严格控制在200 g/t以内,否则将严重影响铜精矿回收率.

硫化钠属强电解质,在水中电离式为<sup>[9]</sup>:



电离出的 $\text{S}^{2-}$ 能与许多金属离子,如 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ 、 $\text{Zn}^{2+}$ 、 $\text{Co}^{2+}$ 、 $\text{Ni}^{2+}$ 等反应生成难溶硫化物沉淀,举例如下:



孙伟等<sup>[10]</sup>在铜铅混合浮选中对硫化钠沉淀试验.试验结果表明,硫化钠可以沉淀矿浆溶液中大量的 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Pb}^{2+}$ ,较大程度地降低了矿浆溶液

中这两种离子的浓度,消除了对闪锌矿的活化作用,起到抑制闪锌矿的作用.

### 1.2 在矿物表面形成亲水薄膜

在处理铜铅矿石时,因铅矿物可浮性极好难以被抑制,优先浮选多采用“先铅后铜”的流程结构,此法最大的缺点是铜矿物被硫化钠或其他抑制剂抑制后,难以活化,这对回收铜极为不利,“铜铅混合浮选”可避免浮选过程中的“重压重拉”,较多采用<sup>[11-13]</sup>.当硫化钠用量大时,可以抑制绝大多数的硫化矿,抑制的递减顺序大致为:方铅矿、闪锌矿、黄铜矿、斑铜矿、铜蓝、黄铁矿、辉铜矿.由于辉铜矿的天然可浮性很好,所以硫化钠不能抑制它,利用这一点,硫化钠常用作铜、铅分离浮选中的抑铜药剂.俞娟等<sup>[14]</sup>在处理铜铅混合精矿时,用硫化钠作为铜矿物抑制剂,取得了较好的分离效果.

因为一般铜铅混合精矿中铜品位较高,且硫化钠容易在浮选过程中氧化失效,所以硫化钠的用量一般很大.降低其用量或寻找新型药剂取代硫化钠在大多数铜铅矿山生产中是一个意义重大的研究方向.谷志君等<sup>[15]</sup>对某大型铜铅矿的铜铅混合精矿进行铜铅分离试验研究,试验结果表明,硫化钠加氧化的方法能有效地抑制铜矿物.

硫化钠在矿浆中对矿物的抑制往往带有时间性,故很少采用单一的硫化钠作为抑制剂使用.胡著生<sup>[16]</sup>为了增强铜矿物的可浮性,加大铜铅矿物的可浮性差异,选择了多种对铜矿物有活化作用,同时对铅锌等矿物有一定抑制作用的药剂,调整剂对比试验结果表明,以硫化钠+焦亚硫酸钠的效果较为理想.

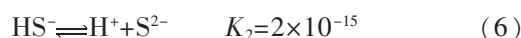
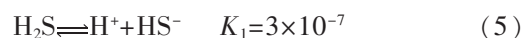
袁明华等<sup>[17]</sup>对某复杂铜锌硫化矿采用优先浮选流程,通过抑制剂对比试验,确定了硫化钠+硫酸锌+亚硫酸钠联合使用,对该矿石中的闪锌矿和黄铁矿抑制效果较好.

张锦林等<sup>[18]</sup>在分析小铁山多金属硫化矿选矿生产工艺时,指出亚硫酸+硫化钠是小铁山多金属矿铜与铅锌分离最成熟、最有效的方法.

硫化钠易发生水解反应使水溶液呈强碱性,反应式为:



$\text{H}_2\text{S}$ 属二元弱酸,其分步电离如下:



硫化钠水溶液中各组分的分布与pH有关<sup>[19]</sup>,pH值在1~7范围内是 $\text{H}_2\text{S}$ 占优势,pH值在7~13.7范围内是 $\text{HS}^-$ 占优势.当硫化钠的用量一定时,pH

值越高,溶液中硫离子浓度越大,反之,随着 pH 值的逐渐降低,溶液中的硫氢根离子浓度逐渐增大。 $\text{Na}_2\text{S}$  溶液组分的  $\Phi$ -pH 图见图 1。

由式(4)、式(5)、式(6)可知,硫化钠水溶液

中含有  $\text{HS}^-$ 、 $\text{S}^{2-}$ 、 $\text{Na}^+$ 、 $\text{OH}^-$  等离子,而  $\text{HS}^-$  离子和  $\text{S}^{2-}$  离子对重金属矿物表面具有比巯基捕收剂更强的亲和力,会优先吸附在矿物表面,形成亲水性薄膜,使得矿物表面丧失与捕收剂接触而被抑制。

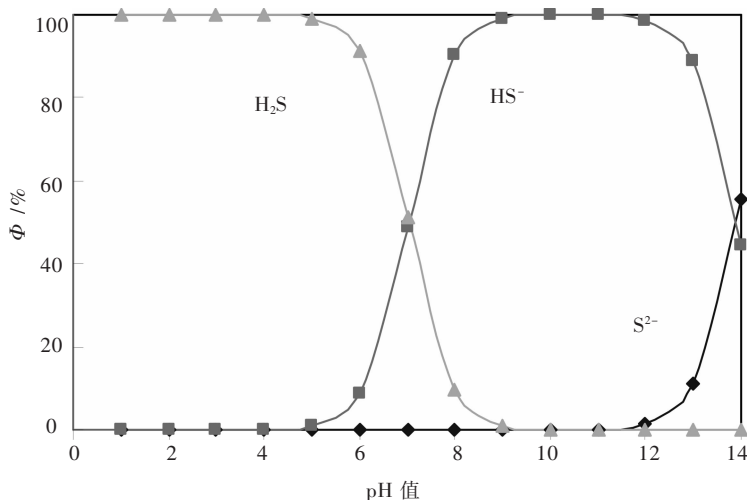


图 1  $\text{Na}_2\text{S}$  溶液组分的  $\Phi$ -pH 图

## 2 硫化钠作为脱药剂应用技术现状

浮选中常用的脱药方法主要有 3 种<sup>[20]</sup>。机械脱药法:包括多次精选、再磨、浓缩、擦洗、过滤及洗涤等方案;解吸法:硫化钠解吸脱药、活性炭吸附脱药;加温及焙烧法:通蒸汽加热或焙烧,以破坏矿物表面的捕收剂膜,然后再加水稀释进行分离。

脱药是混合精矿浮选分离的首要因素。陈建华等<sup>[21]</sup>在脱药后再磨和再磨后脱药的方案选择上,根据理论上脱药后再磨能产生更多的新鲜表面,利于下一步浮选分离和探索性试验的综合分析后,选择脱药后再磨浮选分离的方案。

鑫河选矿厂堆存铅锌中矿剩余药剂多,污染、泥化严重,并有部分铅锌矿物氧化,属极难处理铅锌矿石。万宏民<sup>[22]</sup>采用硫化钠脱药-预处理-浮选工艺流程处理该中矿,铅锌分离效果好,为二次矿产资源的再利用找到了一条新路子。

袁明华等<sup>[23]</sup>对某含铜 8.22%、铅 28.87%、锌 11.36% 的混合精矿开展铜铅分离试验,通过试验研究,最终采用硫化钠脱药,成功实现了铜铅的有效分离,硫化钠用量达 9 000 g/t。

硫化钠脱药机理是<sup>[24]</sup>硫化钠溶液中  $\text{HS}^-$  离子和  $\text{S}^{2-}$  离子对硫化矿物有很强的亲合力,它们可以在矿物表面发生强烈吸附,当这些离子的浓度达到一定值时,便可将矿物表面已吸附的捕收剂离子解吸下来,从而达到脱药的目的。硫化钠容易在

浮选过程中氧化失效,单独使用硫化钠作为脱药剂时,硫化钠的用量较大,可以配合其他的脱药方法来减少硫化钠的用量。由于活性炭可以吸附被硫化钠从矿物表面排挤下来的捕收剂和脱药时加入的残留硫化钠,硫化钠+活性炭组合脱药采用较多。

## 3 硫化钠作为活化剂应用技术现状

硫化钠不仅可以作为抑制剂,也作为活化剂在浮选中广泛使用。孟宪瑜<sup>[25]</sup>分别研究了硫酸铜、硫化钠、硝酸铵、草酸、硫酸铵对富含磁黄铁矿的磁铁矿矿石的活化作用,并对不同的组合用药及药剂用量作了对比。试验结果表明, $\text{Cu}^{2+}$  可替代磁黄铁矿表面晶格的  $\text{Fe}^{2+}$ ,使得表面可浮性变好,反应式为:



硫化钠与吸附在磁黄铁矿表面的  $\text{Cu}^{2+}$  生成  $\text{CuS}$ ,提高了磁黄铁矿可浮性,强化了磁黄铁矿的浮选。以硫酸铜+硫化钠为磁黄铁矿的活化剂,取得较好的效果。

有色金属氧化矿不能被黄药捕收,但如果用黄药浮选前先加入硫化钠与有色金属氧化矿作用,则可以在矿物的表面产生一层硫化矿的薄膜,黄药就可以对其捕收了。硫化钠的这种作用称为硫化作用<sup>[26]</sup>。

I. N. Babich 等<sup>[27]</sup>研究了矿浆碱度对某沉积岩铜矿浮选的影响,发现硫化铜最佳矿浆碱度是  $\text{pH} =$

9, 氧化铜最佳矿浆碱度是  $\text{pH}=10$ . 在氧化矿浮选回路中, 将硫化钠添加到第二个搅拌桶, 使  $\text{pH}$  值从 8 提高到 10, 使得铜总回收率从 84.2 % 提高到 89.0 %.

FA Keqing 等<sup>[28]</sup>利用一个新的工艺流程来回收某氧化铅锌矿中的有价矿物. 新的工艺流程包括: 硫化矿浮选、脱泥和氧化矿疏水浮选. 通过对药剂制度研究发现, 硫化钠的用量、温度和捕收剂种类是主要的影响参数. 对于白铅矿的浮选, 当硫化钠用量在一合适值时, 回收率达到最大值; 对于菱锌矿的浮选, 硫化钠的所需用量比白铅矿高.

F. Rashchi 等<sup>[29]</sup>从某锌浸渣中回收铅(以硫酸铅为主), 试验对比了戊基黄原酸钾、黑药、硫化钠的浓度和  $\text{pH}$  值对铅浮选的影响, 结果显示硫化钠浓度对铅回收率的影响显著.

陈经华等<sup>[30]</sup>采用 XPS、XRD 和 SEM 测试技术测定了白铅矿在硫化钠处理后的表面状态. 测试结果表明, 加入适量的硫化钠后, 白铅矿表面生成了 PbS 薄膜. 其硫化反应为:



硫化钠对氧化矿的硫化机理<sup>[31]</sup>主要是硫化钠在溶液中解离出来的  $\text{S}^{2-}$  离子与氧化物表面晶格离子发生置换反应, 使矿物表面从氧化物转变为易与黄药类捕收剂作用的硫化物, 从而提高了矿物可浮性. 硫化钠是氧化矿的有效活化剂, 其用量的多少与矿物的氧化程度有关. 硫化钠用量过少, 不足以使矿物得到充分硫化. 但当矿浆中有过量的  $\text{HS}^-$  时, 不仅对硫化矿起抑制作用, 而且对被硫化过的氧化矿也起抑制作用. 因此硫化钠用量有

一个适当的范围<sup>[32]</sup>, 当需要较高的硫化钠用量时, 可用硫氢化钠代替或部分代替硫化钠. 为避免硫化钠氧化失效, 工艺中常将硫化钠分批添加.

#### 4 硫化钠在浮选电化学中的应用技术现状

近年来, 随着硫化矿浮选电化学的深入研究和进展, 硫化钠在浮选中的地位越来越重要. 矿浆  $\text{pH}$ 、矿浆电位  $Eh$ 、捕收剂浓度  $c$  是控制浮选电化学的 3 个因素<sup>[33]</sup>. 硫化钠即可调节矿浆  $\text{pH}$ , 也可调节矿浆电位  $Eh$ .

按照硫化矿诱导浮选理论<sup>[34]</sup>, 硫化矿可分为天然可浮性与诱导可浮性; 诱导可浮性根据疏水性机理不同, 又可分为: 捕收剂诱导可浮性、自诱导可浮性和硫诱导可浮性. 硫诱导可浮性是指硫化矿在有硫化钠存在的液相中显示的无捕收剂可浮性.

硫诱导浮选理论认为, 中性硫是硫化矿硫诱导浮选的疏水体<sup>[35]</sup>. 中性硫来自两个方面<sup>[36]</sup>, 一是  $\text{HS}^-$  离子在矿物表面的氧化; 二是矿物表面自身的氧化. 对于黄铁矿和毒砂, 硫诱导可浮性好, 而黄铜矿和方铅矿的硫诱导可浮性差<sup>[37]</sup>. 利用硫诱导可浮性差异, 则可在一定浓度下抑制黄铜矿、方铅矿和闪锌矿的无捕收剂浮选, 实现硫的优先浮选.

覃文庆等<sup>[38]</sup>对湖北某硫化铜矿采用硫诱导浮选和常规捕收剂浮选相结合的微量捕收剂浮选新工艺综合回收 Cu、Au, 取得了较好的指标. 试验指标和现场原生产指标见表 1.

A.E.C. Peres 等<sup>[39]</sup>研究了矿浆电位对某硫化铜矿浮选中的影响, 发现矿物表面氧化后使得铜

表 1 试验指标和现场原生产指标

试验类型	原矿品位 /%		精矿品位 /%		回收率 /%	
	Cu	Au*	Cu	Au*	Cu	Au
微捕闭路流程工艺试验	1.31	1.25	22.97	18.5	91.24	95.41
现场原生产流程	1.23	1.32	23.75	4.84	90.17	17.1

注: “\*”表示 Au 的单位为 g/t.

浮选变得困难并增加了药剂的消耗, 通过在浮选前对矿浆进行硫化和使用氮气代替空气浮选是可行的. 用硫化钠将矿浆电位保持在 0~100 mV 范围内, 可以在最低捕收剂和起泡剂用量下获得较高铜回收率. 同时, 用氮气浮选, 可以减少用硫化钠来保持矿浆电位在适宜范围内的用量.

祁忠旭等<sup>[40]</sup>通过硫化钠调控电位, 在可实现

方铅矿无捕收剂诱导的基础上补加丁黄药, 更巩固了方铅矿的浮选, 与现场工艺对比, 获得铅精矿含铅 55.07 %、铅回收率 95.75 % 的良好选矿指标.

王云楚等<sup>[41]</sup>通过硫诱导浮选黄铁矿, 其结果与用丁黄药浮选黄铁矿相当, 说明添加合适的硫化钠用量(16.67~100 mg/L), 在一定的矿浆电位条件下, 黄铁矿具有良好的可浮性.

## 5 结 论

硫化钠是一种重要的浮选调整剂,在浮选中具有广泛的应用.在处理有色金属硫化矿时,硫化钠可以通过调节矿浆 pH 和矿浆电位  $Eh$  来实现矿物的无捕收剂浮选;硫化钠用量大些时,可以消除矿浆中的活化离子、抑制硫化矿;作为混合精矿的脱药剂和氧化矿的硫化剂时,硫化钠的用量较大.在使用硫化钠时,硫化钠用量不足,不能达到预想的效果;用量过多,又会起反作用,控制硫化钠的用量和作用时间是合理使用硫化钠的关键.在实际生产中,应根据硫化钠在浮选中不同的作用,结合硫化钠作用机理,通过自动化设备控制硫化钠的用量和作用时间,使硫化钠的作用最大化.

### 参考文献:

- [1] 胡为柏. 浮选[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [2] Dávila Pulido G I, Uribe Salas A. Estudio de los mecanismos de activación de la esfalerita con Cu (II) y Pb (II)[J]. Revista de Metalurgia, 2011, 47(4): 329-340.
- [3] 于雪, 马广清. 矽卡岩型复杂铜锌硫化矿分离的浮选研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2003, (6): 10-13.
- [4] Chandra A P, Gerson A R. Review of the fundamental studies of the copper activation mechanisms for selective floatation of the sulfide mineral sphalerite and pyrite[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 145(1/2): 97-110.
- [5] F 拉齐什. 闪锌矿的活化剂表面 Pb 离子浓度[J]. 国外金属矿选矿, 2003, (6): 31-35.
- [6] 高起鹏. 西藏玉龙某难选铜矿石选矿试验研究[J]. 铜业工程, 2005, (1): 25-27.
- [7] 陈家栋, 邓敬石. 富含铜、铅离子铅锌矿浮选研究[J]. 云南冶金, 2001, 30(4): 8-11.
- [8] 王云, 张丽军. 复杂铜铅锌多金属硫化矿选矿试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2007, (6): 1-6.
- [9] 胡熙庚, 黄和慰, 毛钜凡, 等. 浮选理论与工艺[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991.
- [10] 孙伟, 张刚, 董艳红, 等. 硫化钠在铜铅混合浮选中的应用及其作用机理研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2011, (2): 52-56.
- [11] 龙秋容. 某低品位铜钼硫化矿浮选试验研究[J]. 湖南有色金属, 2011, 27(3): 7-10.
- [12] 程建农. 浅析德兴铜矿铜钼分选工艺改进[J]. 铜业工程, 2008, (3): 20-23.
- [13] 雷贵春. 某铜钼矿铜钼分离工艺试验研究[J]. 中国钼业, 2004, 28(5): 18-21.
- [14] 俞娟, 杨洪英, 周长志, 等. 某难选铜钼混合矿分离浮选试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2008, (6): 6-9.
- [15] 谷志君, 苏凯, 郝福来. 铜、钼浮选分离探索试验研究[J]. 黄金, 2003, 30(10): 42-45.
- [16] 胡著生. 七宝山铅锌矿铜铅浮选新工艺研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2001, (2): 6-10.
- [17] 袁明华, 普仓凤. 多金属复杂铜矿铜锌硫分离浮选试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2008, (1): 1-3.
- [18] 张锦林, 李朝晖, 王德海. 难选铜铅锌多金属硫化矿选矿工艺的探讨[J]. 中国有色冶金, 2004, 33(4): 68-71.
- [19] 王淀佐, 胡岳华. 浮选溶液化学[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1988.
- [20] 艾光华, 朱易春, 魏宗武. 组合抑制剂在铜铅分离浮选中的试验研究[J]. 中国矿山工程, 2005, 34(5): 11-12, 16.
- [21] 陈建华, 李宁钧, 曾冬丽. 铜锌混合精矿浮选分离试验研究[J]. 中国矿业, 2011, 20(11): 78-82.
- [22] 万宏民. 硫化钠在铅锌中矿分选中的应用[J]. 矿产保护与利用, 2000, (2): 42-45.
- [23] 袁明华, 赵继春. 铜铅混合精矿铜铅浮选分离试验研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2008, (5): 5-7.
- [24] 张宝元. 铜钼矿石的浮选及铜钼分离工艺[J]. 化工技术与开发, 2010, 39(5): 36-38, 48.
- [25] 孟宪瑜. 磁铁矿与磁黄铁矿的浮选分离的试验研究[J]. 有色矿冶, 2011, 27(5): 16-17.
- [26] 谢广元. 选矿学[M]. 北京: 中国矿业大学出版社, 2002.
- [27] Babich I N, Adamov E V, Panin V V. Effect of alkalinity of a pulp on selective flotation of sulfide and oxide copper minerals from the Udokan deposition ore[J]. Russian Journal of Non-Ferrous Metals, 2007, 48: 252-255.
- [28] FA Ke-qing, Jan D Miller, JIANG Tao. Sulphidization flotation for recovery of lead and zinc from oxide-sulfide ores[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2005, 15(5): 1138-1144.
- [29] Rashchi F, Dashti A, Arabpour-Yazdi M. Anglesite flotation: A study for lead recovery from zinc leach residue[J]. Minerals Engineering, 2005, 18(2): 205-212.
- [30] 陈经华, 孙传尧. 白铅矿浮选体系中硫化钠作用机理研究[J]. 国外金属矿选矿, 2006, 43(2): 19-20.
- [31] 任金菊, 吴天骄, 王勇海, 等. 提高某地金矿石浮选回收率试验研究[C]//中国有色金属学会第七届学术年会论文集, 北京: 冶金工业出版社, 2008: 194-196.
- [32] 邵致远, 周明华, 喻勇, 等. 提高铜绿山低品位氧化铜矿回收率的途径[C]//第九届中国选矿大会论文集, 马鞍山: 现代矿业杂志社, 2009: 165-167.
- [33] 冯其明, 陈蓁. 硫化矿浮选电化学[M]. 长沙: 中国工业大学出版社, 1992.
- [34] 覃文庆. 硫化矿物颗粒的电化学行为与电位调控浮选技术[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1997.
- [35] 陈蓁, 冯其明, 李世锟. 方铅矿表面上元素硫的作用与行为[J]. 有色金属, 1987, 39(2): 41-46.
- [36] 田学达, 李隆峰. 硫化钠在硫化矿浮选分离中的作用[J]. 湖南有色金属, 1995, 11(1): 29-31.
- [37] 黄开国. 巧用硫化钠浮选硫化矿[J]. 国外金属矿选矿, 2007, 44(2): 29-30.
- [38] 覃文庆, 邱冠周, 李柏淡, 等. 某硫化铜矿浮选新工艺的研究[J]. 矿产综合利用, 1995, (4): 1-3.
- [39] Peres A E C, Goncalves K L C, Andrade V L L. Effect of pulp potential on the flotation of a sulfide copper ore[J]. Minerals and Metallurgical Processing, 2005, 22(3): 168-172.
- [40] 祁忠旭, 陈代雄, 杨建文, 等. 宝山铅锌矿抑制剂作用研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2011, (5): 58-61.
- [41] 王云楚, 王淀佐, 李柏淡. 黄铁矿硫诱导浮选行为的研究[J]. 金属矿山, 1991, (9): 55-58.