

综合评述

# 氧化铅矿浮选研究现状\*

王涵<sup>1,2</sup>, 文书明<sup>1,2</sup>, 李尧<sup>1,2</sup>, 韩广<sup>1,2</sup>

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093)

**摘要:** 铅是矿业开发产业链中不可或缺的重要金属, 在国民经济建设中地位日趋重要。随着铅资源不断消耗, 氧化铅的高效利用成为补充铅矿资源的重要途径。评述了国内外氧化铅矿浮选研究现状, 重点介绍了氧化铅矿浮选药剂制度以及工艺流程的进展情况, 并对氧化铅矿的浮选工艺进行展望, 以期在生产实践和理论研究提供参考。

**关键词:** 氧化铅矿; 浮选; 研究现状

中图分类号: TD952.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2018)01-0133-07

DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2018.01.024

## The Current Research in the Flotation of Lead Oxide Minerals

WANG Han<sup>1,2</sup>, WEN Shuming<sup>1,2</sup>, LI Yao<sup>1,2</sup>, HAN Guang<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Lead, which is an indispensable and important metal in the development of mining industry chain, has become increasingly important status in the national economic construction. As the lead resource consumption continually, lead sulfide resources cannot meet the demand of national economy. The efficient use of lead oxide minerals becomes an important way for supplement lead mineral resources. This paper briefly introduces the current research in the flotation of lead oxide mineral at home and abroad, which mainly includes reagent system and technological flowsheet of flotation, and makes the relevant technical prospects for technological flowsheet of flotation, so as to provide reference for practice and theory.

**Key words:** lead oxide minerals; flotation; the current research

## 引言

铅广泛应用于电气、机械、化工、冶金、医药、军工等领域<sup>[1]</sup>。我国铅资源储量丰富, 总储量约为642.5万t, 占世界总储量的15.19%, 仅次于澳大利

亚, 位居世界第二位, 主要分布在云南、广东、内蒙古、江西、湖南、四川等省份。自然界中, 铅资源与其他金属共生或伴生形成多金属矿石, 主要以硫化铅和氧化铅的形式存在。常见的具有工业开采价值的硫化铅矿物为方铅矿, 氧化铅矿物主要为白铅矿和

\* 收稿日期: 2017-11-27

基金项目: 昆明理工大学分析测试基金(2017M20162101095)

作者简介: 王涵(1994-)男, 满族, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 研究方向为浮选工艺及理论。

铅矿<sup>[2]</sup>。长期以来,硫化铅和氧化铅矿物是提取铅的天然原料,其中硫化矿物方铅矿是铅资源的主要原料<sup>[3]</sup>。然而,随着铅消费的日益增长,硫化铅资源渐渐不能满足日益增长的铅需求,因此,为了满足国民经济对铅金属的需求,以及缓解对进口铅矿石的依赖,对氧化铅矿的有效利用与富集就变得十分必要<sup>[4]</sup>。

在西藏和云南等地,部分氧化铅矿石中,目的矿物结构和构造复杂、矿物组分繁多、嵌布粒度不等、嵌布关系复杂,目的矿物性脆易磨、泥化现象严重;该类矿石中还含有大量的可溶性盐<sup>[6]</sup>。研究表明,与硫化铅矿物相比,氧化铅矿物具有更高的溶解度和表面亲水性<sup>[5]</sup>,其处理方法更为复杂。目前选矿厂在实际生产上,主要以浮选法为主,其他方法为辅,对氧化铅矿物进行富集<sup>[7]</sup>。因此,本文围绕氧化铅矿的浮选药剂以及浮选工艺展开综述。

## 1 氧化铅浮选药剂研究

### 1.1 捕收剂

根据矿石浮选过程中是否需要预先硫化处理,氧化铅矿物浮选法又可分为直接浮选法和硫化浮选法<sup>[8]</sup>。直接浮选法是氧化矿物在不经预先硫化处理的条件下,直接采用捕收剂对其浮选回收的方法,由于浮选成本较高,效果比硫化浮选法差,故主要应用于对氧化铅矿的机理研究中<sup>[9]</sup>。

硫化浮选法是目前处理氧化铅矿物最常用也是最经济的一种工艺方法<sup>[10]</sup>,它是通过使用硫化剂对氧化铅矿物表面进行硫化预处理,使其表面生成硫化铅薄膜,然后采用捕收剂捕收<sup>[11]</sup>。所采用的捕收剂主要包括常规捕收剂和新型捕收剂<sup>[12]</sup>。

#### 1.1.1 捕收剂机理

浮选氧化铅矿常用的捕收剂有丁基黄药、黑药、油酸、胺类等,这类捕收剂与矿物的作用机理主要是药剂在矿浆溶液中解离后以离子的形式吸附在矿物表面,使矿物颗粒疏水上浮。

近年来,国内外专家学者探索直接浮选和硫化浮选时氧化矿物的可浮性研究。

鉴于氧化铅矿物自身的溶解特性和表面亲水性<sup>[15]</sup>,Marabini等<sup>[16]</sup>根据矿物粒度与溶液中黄原酸铅沉淀粒度的差异,采用红外光谱对白铅矿与黄原酸盐的作用产物进行分析;结果表明,尽管黄原酸盐

与白铅矿反应能够生成疏水性黄原酸铅产物,但是这些物质不能稳定地吸附在矿物表面,会从矿物表面完全脱落;文中还指出,溶液中存在的黄原酸铅沉淀不能使白铅矿疏水上浮,故白铅矿的直接浮选效果很差。

沈同喜<sup>[13]</sup>直接采用乙基黄药和丁基黄药为捕收剂,在无硫化剂存在的情况下研究了白铅矿的浮选行为。研究表明:即使使用大量捕收剂,氧化铅浮选的回收率也较低,添加硫化钠进行活化则浮选效果较佳,但是要注意其用量,过量硫离子则会导致白铅矿的回收率降低。

因此,采用常规捕收剂对氧化铅矿物进行直接浮选不能获得理想的浮选指标。而硫化后采用常规捕收剂效果较好。

#### 1.1.2 新型捕收剂

新型捕收剂主要为螯合捕收剂以及复合类型捕收剂,其特点是选择性高、针对性强。多用于对氧化铅矿机理探索研究,部分用于现场。

螯合捕收剂是一种能够用直接浮选法有效地回收氧化铅矿物的浮选药剂,它与矿物的作用机理在于通过其特定的官能团选择性地与矿物表面上的金属离子形成一个或者多个环状的稳定的金属螯合物,使得矿物表面疏水,从而与其他矿物或者脉石矿物实现分离。

文献报道<sup>[18]</sup>,8-羟基喹啉是最早被提出浮选白铅矿的螯合捕收剂,该药剂能与白铅矿表面的铅离子形成稳定的螯合物,而不与石英发生作用。Marabini等<sup>[19]</sup>使用巯基苯并噻唑浮选白铅矿,研究表明:该螯合剂不仅包含能够与矿物表面铅离子进行螯合作用的官能团,而且还含有疏水性的烃链,故巯基苯并噻唑具有很强的选择性和疏水性,能够实现白铅矿与脉石矿物的有效分离。朱建光等<sup>[20]</sup>采用铜铁灵为捕收剂对硫酸铅单矿物以及硫酸铅、方解石和石英混合矿进行浮选试验,研究结果显示,铜铁灵能够选择性地捕收硫酸铅,而对方解石和石英没有捕收效果;同时,他们还通过电位测定和红外光谱技术解释了铜铁灵浮选硫酸铅的作用机理。赵景云等<sup>[21-22]</sup>分别使用水杨羟肟酸和BHA作为捕收剂,以硫酸铅为研究对象,探讨了这两种药剂的捕收性能。研究结果表明:水杨羟肟酸和BHA对硫酸铅都具有很强的捕收作用;电位和红外光谱测定结果显示,这两种药剂与硫酸铅的作用机理在于药剂通

过化学吸附的形式吸附在矿物表面后,与矿物表面的铅离子生成稳定的螯合物,从而使硫酸铅疏水上浮。谭欣等<sup>[23-24]</sup>采用北京矿冶研究总院自主研发的螯合型捕收剂 CF 对含钙、镁、铁、硅等的氧化铅矿物进行试验研究,研究表明,CF 是白铅矿的有效捕收剂,对方解石、白云石、石英和褐铁矿具有很好的选择性;而且该捕收剂能够在自然 pH 条件下将白铅矿与脉石矿物分离,并改善了矿浆泡沫的稳定性。朱永楷等<sup>[25-26]</sup>合成了新型螯合捕收剂  $\alpha$ -(3-苯基硫脲基)烷基膦酸二苯酯,此药剂能够选择性浮选白铅矿;红外光谱和 XPS 测试结果显示,该药剂与白铅矿的作用机理是药剂中的 O 和 N 原子与矿物表面上的铅离子共轭成环而在矿物表面生成五角形环状螯合物,从而提高白铅矿上浮率。

其他类型捕收剂大都为复合药剂,针对性较强。刘开宇等<sup>[27]</sup>研究复合捕收剂 CSFA 对锌氧化矿物(水锌矿)的捕收性能。CSFA 复合捕收剂是一种含有 -OH、-COOH 和 =N 的复合捕收剂,在氧化锌矿物表面发生了很强的化学吸附。经试验发现,CSFA 对氧化锌矿物具有良好的捕收效果,而且 CSFA 与丁黄药联合使用对氧化锌矿浮选具有更强的捕收作用。叶建军等<sup>[28]</sup>在对贵州某地氧化锌矿进行浮选时,由于其原矿泥化十分严重,单独使用丁基黄药或胺类捕收剂 GA-1 没有捕收效果,而单独使用脂肪酸类捕收剂 FA-1 在碱性条件下才具有捕收效果。采用 FA-1 和 GA-1 混合组合捕收剂进行浮选,当原矿锌品位为 8.9% 时,仅通过一次粗选可以获得精矿锌品位 22.59%、锌作业回收率 74.03% 的良好指标。张祥峰<sup>[29]</sup>等研究发现,采用 DDA(十二烷胺)和 KAX(戊基钾黄药)的摩尔比为 1:3 的混合捕收剂时,与传统黄药-胺法相比捕收效果更好,药剂用量小。对其机理研究发现,DDA 和 KAX 混合后,由于各自所带的阳、阴离子电性中和,降低了药剂分子之间的静电斥力,从而使混合捕收剂的临界胶束浓度值降低,在矿物表面吸附时形成半胶束吸附的浓度值降低,更易于形成半胶束吸附,从而增强对矿物的捕收性能。

综上所述,新型捕收剂的特点是稳定性好、选择性高。但其缺点也很明显,由于其作用效果取决于其电子结构和空间构型,所以应用范围较窄,只能与特定的矿物进行作用,且成本较为昂贵,现场稳定性较差。

## 1.2 调整剂

氧化铅矿物的浮选常常通过添加硫化剂来改善矿物表面性质使其浮选回收。常用的硫化剂主要包括硫化钠、硫氢化钠、多硫化钠等,在浮选生产中主要采用硫化钠作为氧化铅矿物的硫化剂。此外,还有一些其他类型的硫化剂<sup>[30]</sup>。

早在 1990 年人们就对硫化机理进行了研究,A. M. Marabini<sup>[31]</sup>等用红外光谱及 X 射线光电子能谱对硫化剂和捕收剂与白铅矿的作用关系进行研究。结果表明:在浮选过程中,白铅矿表面存在碳酸盐、羟基-碳酸盐、氢氧化物和物理吸附的 H<sub>2</sub>O 基,经过硫化钠硫化后,其表面形成 PbS,从而使物理吸附水量大大减少,对于白铅矿而言,有一个最佳的硫化浓度,超过或低于这一浓度,硫化效果都会减弱。

朱国庆<sup>[32]</sup>等对吐鲁番某难选氧化铅矿进行浮选时,对新型氧化矿硫化剂 ss-01 与硫化钠进行对比。对比表明:不再磨粗选情况下,使用硫化剂 ss-01 比使用硫化钠时精矿铅的品位提高 1%;在再磨条件下,精矿铅品位提高 2%,铅回收率提高 3%;闭路试验取得了良好的工艺指标。

毛益林<sup>[33]</sup>等对某铅锌矿进行混合浮选,试验发现,由于其原矿嵌布粒度微细、氧化率高,使用常规单一硫化剂硫化效果较差,故采用混合硫化剂,即 NH<sub>4</sub>Cl 与 EMS-3 配合,以增强其硫化效果。试验结果表明:不加硫化剂 EMS-3 时,氧化铅粗精矿质量较差,使用混合硫化剂时比使用单一硫化剂时精矿铅品位提高 2%,同时回收了其他金属,达到了资源综合回收的目的。

氧化铅矿石中脉石多为碳酸盐矿物、方解石等,这种类型的脉石矿物常用的抑制剂有水玻璃等。随着矿石物质组成复杂化,脉石矿物种类也逐渐增多,用传统的抑制剂抑制其脉石矿物比较困难,因此针对某些难分离氧化铅矿物,使用新型组合抑制剂能有效分离氧化铅与脉石矿物。

资料表明<sup>[34]</sup>,使用 BD<sub>1</sub> 与六偏磷酸钠作为混合抑制剂浮选氧化铅矿,可使其浮选效率大大提高。而对含铁的氧化铅矿石,采用 D<sub>2</sub> 抑制剂可以有效的抑制褐铁矿泥,从而分离氧化铅与褐铁矿,大大提高浮选效率。肖云<sup>[35]</sup>在厂坝铅锌矿药剂制度研究中,添加水玻璃和 MP 抑制剂,可以将精矿中的二氧化硅含量控制到 4% 以下。杨俊龙等<sup>[36]</sup>对一种复杂

的铅、锌多金属矿石进行研究,原有抑制剂不能使铅锌分离,采用  $\text{ZnSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_3 + \text{Na}_2\text{S}$  组合抑制剂,可有效分离铅锌,取得了良好的选矿指标。

另外在氧化铅矿的浮选过程中,其他药剂:起泡剂、抑制剂、絮凝剂等,常见如水玻璃、柴油和六偏磷酸钠等,不但能有效抑制脉石矿物,还可以增加浮选精矿质量,改善浮选指标<sup>[37]</sup>。

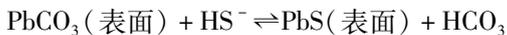
## 2 氧化铅矿处理工艺

在实际生产过程中大多数选厂采用硫化浮选法对氧化铅矿进行选别,影响选矿指标的主要因素为硫化条件,因此在浮选实践中主要是对硫化条件进行优化。

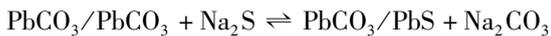
### 2.1 硫化机理

氧化铅矿物是一种较易溶解的矿物,因此,大量的铅离子从矿物晶格中释放到矿浆溶液中,会造成矿物表面不稳定。氧化铅矿物的另一个特点就是其表面极性较强,将其加入矿浆中,矿物表面易形成较厚的定向密集排列的水化膜,难以捕收<sup>[38]</sup>。

硫化钠与氧化铅矿物相互作用时的主要反应物为  $\text{HS}^-$ ,即矿浆溶液中的  $\text{HS}^-$  吸附在矿物表面后,与矿物表面的铅原子发生离子交换反应而生成疏水性硫化铅产物,从而对氧化铅矿物的浮选产生活化作用。故白铅矿表面硫化反应可表示为:



尽管很多人对各类硫化剂进行了大量的研究,由于硫化钠价格低廉<sup>[39]</sup>,仅硫化钠是有色金属氧化矿浮选实践中最常用的一种硫化剂。根据白铅矿和硫化钠会发生离子交换反应,白铅矿表面发生的硫化反应如下:



梁冬云等<sup>[40]</sup>采用红外光谱、俄歇电子能谱、X射线光电子能谱、X射线衍射等现代表面测试技术检测了白铅矿经硫化剂作用后的表面硫化产物;检测显示,硫化后的白铅矿解离面同时存在  $\text{PbS}$ 、 $\text{PbSO}_4$  和碱式碳酸盐,这些产物除了以化学吸附的方式作用外,还可通过溶液中的  $\text{S}^{2-}$  离子与矿物表面的  $\text{CO}_3^{2-}$  离子发生交换反应而进入矿物晶格中,从而在白铅矿表面形成以  $\text{PbS}$  为主要成分的结晶膜。

此外,陈经华等<sup>[41]</sup>也借助 XPS、XRD、SEM 等测

试手段研究了硫化处理后的白铅矿表面形态。结果表明:适量硫化钠处理后的矿物表面存在  $\text{PbS}$  薄膜,该物质能够有效地活化白铅矿,使其在乙基黄药浮选体系中的可浮性得到提高,这主要是由于生成的  $\text{PbS}$  薄膜令白铅矿表面的离子键成分降低,而共价键成分增加。

综上所述,氧化铅矿物的硫化过程成为浮选这类矿物的关键,而且硫化铅矿物的浮选无论在浮选工艺还是理论研究,均已较为成熟<sup>[42]</sup>。

### 2.2 硫化条件的影响

在氧化铅矿物的硫化浮选过程中,矿浆 pH 值、硫化剂的用量、硫化时间、搅拌条件、加药方式等条件也会对矿物的硫化结果产生显著的影响。

氧化铅矿物的硫化作用与矿浆 pH 值紧密相关。Feng Q C 等<sup>[43]</sup>在白铅矿机理研究中发现,首先,矿浆 pH 值对矿物硫化的影响是通过影响氧化铅矿物表面的溶解特性来实现的。矿浆 pH 值对白铅矿表面的溶解是至关重要的,即当矿浆溶液中存在大量的铅离子时,势必会消耗硫化剂,从而对白铅矿的硫化造成一定的影响。其次,由于硫化钠是强碱弱酸盐,在矿浆溶液中会完全电离生成  $\text{S}^{2-}$ ,而  $\text{S}^{2-}$  在水中会水解生成  $\text{HS}^-$  和  $\text{H}_2\text{S}$ ,因此,硫化钠在矿浆溶液中存在水解平衡状态;Sun W 等<sup>[44]</sup>对其 pH 作用进行研究,研究结果表明,当矿浆 pH < 7.0 时, $\text{H}_2\text{S}$  为硫化钠的优势组分;在 pH 为 7.0 ~ 13.9 时, $\text{HS}^-$  成为硫化钠的优势组分;当 pH > 13.9 时, $\text{S}^{2-}$  变为硫化钠的优势组分。故矿浆 pH 值对氧化矿硫化的另一种影响形式是通过影响硫化剂的存在状态来实现的。Gao Z Y<sup>[45]</sup>认为在氧化铅矿物的浮选实践中,矿物硫化后适宜捕收剂吸附的有效 pH 范围为 8 ~ 10,因此,矿浆 pH 值还对硫化的氧化铅矿物的稳定性以及其与捕收剂的相互作用有一定的影响。而且,在这样的 pH 范围内也有利于羧甲基纤维素、水玻璃、六偏磷酸盐等抑制剂对矿石中易浮硅酸盐脉石矿物的抑制作用。综上所述,控制矿浆 pH 为 9.0 左右,对氧化铅矿石进行水热硫化—浮选试验,有利于最终获得较好的分选指标。

硫化剂用量是影响氧化铅矿物硫化浮选的一个重要因素,只有当硫化剂用量合适时,氧化矿物才能获得理想的浮选效果,硫化剂用量不足或者过量对后续的浮选都是不利的<sup>[46]</sup>。硫化剂用量不足时,一

方面矿浆中的铅离子会将其消耗;另一方面,氧化铅矿物表面所生成的硫化铅含量较低,不能将氧化铅矿物表面完全覆盖,造成矿物表面已生成的硫化铅成分脱落。然而,硫化剂过量时,矿浆中残余的硫化剂亦会对后续的浮选产生影响:(1)硫化剂是一种强还原性物质,溶液中存在过量的硫离子会导致矿物/溶液界面的电位降低,致使矿物表面不能形成疏水性的黄原酸铅;(2)当矿浆中同时存在硫离子和黄原酸根时,这两种成分会在矿物表面发生竞争吸附,而硫化铅较黄原酸铅更容易形成;(3)矿物表面已生成的黄原酸铅也会被矿浆中残余的硫组分置换,这是由于硫化铅较黄原酸铅更难溶;(4)矿浆中的硫离子亦会吸附在硫化的氧化铅矿物表面,使得矿物表面带负电,这对于阴离子捕收剂的静电吸附是不利的。因此,氧化铅硫化时,必须严格控制硫化剂的用量。Fuerstenau M C<sup>[47]</sup>为了有效控制矿浆中硫化剂浓度,利用硫离子选择性电极以及硫化控制系统来实现对其实时监控,即通过调节硫化矿浆电位来达到控制矿浆溶液中硫离子浓度,从而使得氧化铅矿物表面能够得到理想的硫化效果,该技术在一些国外选矿厂中已有应用。

故对于不同类型的氧化铅矿石的硫化浮选工艺,所使用的硫化剂用量是有差异的,这取决于矿石性质,如矿石中目的矿物的含量、矿物组成、脉石矿物的类型、矿泥的含量、可溶性盐的种类及含量等。

硫化的实质在于将氧化矿物的表面转化为类似于硫化矿物的表面,而此过程的完成需要一定的时间。硫化时间不足,矿物表面形成的硫化铅组分的含量不足,而且其强度也较差,容易从矿物表面脱落,从而影响后续捕收剂的吸附,进而影响浮选指标;由于硫化钠属于强还原剂,故其在矿浆中容易被氧化而失效,所以矿物的硫化时间也不宜过长<sup>[48]</sup>。有文献指出<sup>[18]</sup>, $\text{Na}_2\text{S}$ 与白铅矿作用30 min时的硫化效果较佳,而 $\text{Na}_2\text{S}$ 与铅矾要达到较好的硫化效果,则需要更长的作用时间。魏宗武等<sup>[49]</sup>在研究白铅矿的硫化浮选过程中指出,硫化时间低于5 min,白铅矿浮选效果较差;当白铅矿的硫化时间为5 min时,其浮选效果达到最好;继续延长硫化时间,铅的回收率呈下降趋势。以上研究结果均表明,硫化过程中合理地控制硫化时间对氧化铅矿物的硫化浮选是至关重要的。

## 2.3 氧化铅矿浮选工艺

对现场原有的工艺流程和药剂制度等条件进行改造,是目前提高现场浮选效率的有效方法。

通过改进药剂制度可以提高浮选工艺指标, Fa等<sup>[50]</sup>对含泥氧化铅矿石的性质分析后,采用脱泥—硫化浮选工艺回收矿石中的氧化铅矿物,并重点考察了硫化钠用量在500~1 250 g/t范围内对浮选指标的影响。试验结果表明:硫化钠用量由500 g/t增加到750 g/t,铅精矿品位和回收率都显著地增加;当硫化钠用量增加至1 000 g/t,铅精矿品位达到最高,而铅回收率开始降低;继续增加硫化钠用量后,铅精矿品位和回收率均明显降低。经过改进药剂制度,使其得到合格的工艺指标。张祥峰等<sup>[51]</sup>对西藏某难选氧化铅矿进行浮选试验,采用了先选硫化矿再选氧化矿的工艺流程,选用丁铵黑药浮选方铅矿,其自主研发的OBF捕收剂浮选白铅矿,水玻璃抑制硅酸盐脉石矿物,取得了较好的精矿指标。陈旭波等<sup>[52]</sup>对某含泥量较大的氧化铅矿进行试验研究,原矿含泥量25.13%,且回收难度较大。经过试验探索,选用捕收能力较强的戊基黄药与丁铵黑药为组合药剂,水玻璃为分散剂,硫化钠为硫化剂,硫酸铵为活化剂,获得了铅品位60.93%、回收率73.48%的铅精矿。

改进浮选工艺流程也可以提高浮选效率,对汉源某难选氧化铅锌矿原矿性质<sup>[53]</sup>进行分析,最终提出如下原则流程:铜锌混合浮选—浮方铅矿—浮硫—强化浮选白铅矿,为实际生产做出了指导。叶雪均<sup>[54]</sup>对一贫铅富锌矿石中的难选氧化铅矿石采用了一次粗选、二次扫选、三次精选的不脱泥硫化浮选流程,最终获得了品质较好的铅精矿,其中使用硫化钠为硫化剂,自主研发的y-2组合药剂为抑制剂,丁基黑药为捕收剂。且该流程选锌作业也不脱泥,因此结构简单,流程环节少,便于生产。

## 3 研究展望

硫化浮选法仍是富集氧化铅矿的主要手段,随着日趋严格的环保政策及计算化学在矿物加工领域的快速发展,强化硫化过程将是降低氧化铅矿石浮选过程中药剂用量的重要方法,同时可结合量子化学计算来探索硫化组分与矿物表面的相互作用,从而实现靶向调控。另外,新型、高效、清洁的浮选药

剂研发也能够为氧化铅矿石的浮选生产提供技术突破。

### 参考文献:

- [1] Nwoye C. I. Model for predicting the initial solution pH at pre - assumed final pH and concentration of dissolved lead during leaching of galena in butanoic acid solution [J]. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2010( 5): 176 - 189.
- [2] Mikhlin Y, Kuklinskiy A, Mikhlina E, et al. Electrochemical behaviour of galena (PbS) in aqueous nitric acid and perchloric acid solutions [J]. *Journal of Applied Electrochemistry*, 2004, 34(1):37 - 46.
- [3] Feng QC, Wen SM, Wang YJ, et al. Investigation of leaching kinetics of cerussite in sodium hydroxide solutions [J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 2015, 51(2):491 - 500.
- [4] 刘凤霞,陈建华,魏宗武. 氧化铅矿浮选研究进展[J]. *矿产保护与利用*,2008(1):48 - 55.
- [5] 李勇. 低品位氧化铅锌矿硫化—浮选工艺及理论研究 [D]. 昆明:昆明理工大学,2009,1 - 24.
- [6] 杨磊,刘飞燕,陈晓青,等. 某氧化铅锌矿石工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*,2009(6):28 - 30.
- [7] 王福良,孙传尧. 利用分子力学分析黄药捕收剂浮选未活化白铅矿的浮选行为[J]. *国外金属矿选矿*,2008,44(6):25 - 27.
- [8] Antao S M, Hassan I. The orthorhombic structure of  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{SrCO}_3$ ,  $\text{PbCO}_3$  and  $\text{BaCO}_3$ : linear structural trends [J]. *The Canadian Mineralogist*, 2009, 47(5):1245 - 1255.
- [9] Vidal I, Navas A S. Evidence of a long C - C attractive interaction in cerussite mineral: QTAIM and ELF analyses [J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2014, 20(9):1 - 7.
- [10] Li CX, Wei C, Deng ZG, et al. Hydrothermal sulfidation and flotation of oxidized zinc - lead ore [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B - Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2014, 45(3):833 - 838.
- [11] Taheri B, Abdollahy M, Tonkaboni SZS, et al. Dual effects of sodium sulfide on the flotation behavior of chalcopyrite: I. effect of pulp potential [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2014, 21(5):415 - 422.
- [12] 高起鹏,宿静,秦贵杰. 氧化铜矿硫化浮选几个问题 [J]. *有色矿冶*,2003,19(2):22 - 24.
- [13] 沈同喜. 氧化铅矿硫化浮选强化技术研究 [D]. 赣州:江西理工大学,2013:15 - 16.
- [14] 刘凤霞. 氧化铅浮选黄药分子结构与性能研究 [D]. 南宁:广西大学,2007:30 - 41.
- [15] 方启学. 西部氧化铅锌资源提取基本思路探讨 [J]. *矿冶*,2002(11):75 - 78.
- [16] Marabini A, Cozza C. A new technique for determining mineral - reagent chemical interaction products by transmission IR spectroscopy: cerussite - xanthatesystem [J]. *Colloids and Surfaces*, 1988, 33:35 - 41.
- [17] Popov S R, Vucinic D R. Kinetics of ethylxanthate adsorption on cerussite in alkaline media in presence or absence of dissolved lead ions [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1994, 41(1 - 2):115 - 128.
- [18] 石道明,杨敖. 氧化铅锌矿的浮选 [M]. 昆明:云南科技出版社,1996.
- [19] Marabini A M, Barbaro M, Passariello B. Flotation of cerussite with a synthetic chelating collector [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1989, 25(1 - 2):29 - 40.
- [20] 朱建光,赵景云. 铜铁灵浮选硫酸铅和菱锌矿研究 [J]. *中南矿冶学院学报*,1991,22(5):522 - 528.
- [21] 赵景云,朱建光. 水杨羟肟酸浮选菱锌矿和硫酸铅试验 [J]. *有色金属*,1991,43(4):27 - 32.
- [22] 赵景云,朱建光. BHA 浮选硫酸铅试验 [J]. *有色金属(选矿部分)*,1992(1):26 - 29.
- [23] 谭欣,李长根. 以 CF 为捕收剂氧化铅锌矿浮选新方法 [J]. *有色金属*,2002,54(4):86 - 94.
- [24] 谭欣,李长根. 螯合捕收剂 CF 对氧化铅锌矿捕收性能初探 [J]. *有色金属(选矿部分)*,2002(4):31 - 36.
- [25] 朱永楷,孙传尧,吴卫国. 一种新型捕收剂对白铅矿和方解石与石英的捕收性能 [J]. *有色金属*,2006,58(3):77 - 80.
- [26] 朱永楷,孙传尧,吴卫国. 含(硫)脲基膦酸酯对白铅矿、方解石和石英的捕收性能 [J]. *金属矿山*,2006,366(12):22 - 25.
- [27] 刘开宇,张平民,唐有根. CSFA 对锌氧化矿物的捕收性能及其机理研究 [J]. *矿冶*,2001,10(1):31 - 35.
- [28] 叶军建,张覃,姜毛,等. 组合捕收剂浮选氧化锌矿试验研究 [J]. *有色金属(选矿部分)*,2014(6):46 - 50.
- [29] 张祥峰,孙伟. 阴阳离子混合捕收剂对异极矿的浮选作用及机理 [J]. *中国有色金属学报*,2014(2):499 - 505.
- [30] Zhou R, Chander S. Kinetics of sulfidization of malachite in hydrosulfide and tetrasulfidesolutions [J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1993, 37:257 - 272.
- [31] A. M. Marabini, 罗树庭,周玲美. 氧化铅锌矿石的浮选 [J]. *国外金属矿选矿*,1990(7):1 - 12.
- [32] 朱国庆,郭顺磊,常慕远. 某难选氧化铅锌矿选矿试验

- 研究[J]. 矿冶工程, 2014, 34(s1): 163 - 165.
- [33] 毛益林, 陈晓青, 杨进忠, 等. 某复杂难选氧化铅锌矿选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2011(1): 6 - 10.
- [34] 张心平. 氧化铅锌矿石浮选新药剂的应用研究[J]. 矿冶, 1996(3): 40 - 45.
- [35] 肖云. 厂坝铅锌矿浮选新药剂制度研究[J]. 金属矿山, 2009(4): 43 - 45.
- [36] 杨俊龙, 刘全军, 邓荣东, 等. 缅甸某复杂铅锌多金属矿的浮选试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2012(2): 39 - 43.
- [37] Marabini A M, Cirlachi M, Plescia P, et al. Chelating reagents for flotation[J]. Minerals Engineering, 2007, 20(10): 1014 - 1025.
- [38] 郭才虞. 硫化钠在浮选中的作用机理[J]. 云南冶金, 1981(3): 20 - 26.
- [39] Li C X, Wei C, Deng Z G, et al. Hydrothermal sulfidation and flotation of oxidized zinc - lead ore[J]. Metallurgical and Materials Transactions B - Process Metallurgy and Materials Processing Science, 2014, 45(3): 833 - 838.
- [40] 梁冬云, 张志雄, 许志华. 白铅矿、菱锌矿晶体化学性质与硫化行为[J]. 广东有色金属学报, 1992, 2(2): 83 - 88.
- [41] 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.
- [42] Morris G D M, Cilliers J J. Behaviour of a galena particle in a thin film, revisiting dippenaar [J]. International Journal of Mineral Processing, 2014, 131: 1 - 6.
- [43] Feng QC, Wen SM, Cao QB, et al. Theoretical calculation of dissolution equilibrium for cerussite in pulp solution[J]. Advanced Materials Research, 2014, 881 - 883: 1679 - 1682.
- [44] Sun W, Su J F, Zhang G, et al. Separation of sulfide lead - zinc - silver ore under low alkalinity condition[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(8): 2307 - 2315.
- [45] Gao Z Y, Bai D, Sun W, et al. Selective flotation of scheelite from calcite and fluorite using a collector mixture [J]. Minerals Engineering, 2015, 72: 23 - 26.
- [46] 白旭, 文书明, 刘建, 等. 缅甸高品位白铅矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2015(5): 58 - 61.
- [47] Fuerstenau MC, Olivias SA, Herrera - Urbina R, et al. The surface characteristics and flotation behavior of anglesite and cerussite[J]. International Journal of Mineral Processing, 1987, 20(1 - 2): 73 - 85.
- [48] 胡为柏. 浮选[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990.
- [49] 魏宗武, 陈晔. 黄药体系中白铅矿的浮选行为研究[J]. 江西有色金属, 2008, 22(1): 19 - 21.
- [50] Fa KQ, Miller JD, Jiang T, et al. 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.
- [51] 张祥峰, 孙伟, 刘润清, 等. 西藏某难选氧化铅矿浮选试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(5): 35 - 38.
- [52] 陈旭波, 刘水红, 曾克文. 某含泥难选氧化铅矿选矿试验研究[J]. 中国矿业, 2016, 25(s1): 438 - 443.
- [53] 惠博, 徐莺, 赵开乐, 等. 汉源某氧化铅锌矿难选原因分析及流程推荐[J]. 矿产综合利用, 2016(3): 76 - 79.
- [54] 叶雪均. 难选氧化铅锌矿石选矿试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2001(2): 1 - 5.

**引用格式:**王涵, 文书明, 李尧, 等. 氧化铅矿浮选研究现状[J]. 矿产保护与利用, 2018(1): 133 - 139.

WANG Han, WEN Shuming, LI Yao, et al. The current research in the flotation of lead oxide minerals[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018(1): 133 - 139.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E - mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)