

# 铜铅硫化矿物浮选分离中铅抑制剂的研究进展

白睿, 魏志聪, 彭蓉, 王衡嵩

昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093

中图分类号: TD923+.14; TD952.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)02-0074-06  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.07.003

**摘要** 硫化铜铅矿物的浮选分离问题是矿物加工工程领域的热点和难点, 文章针对浮选抑制剂的研究进展, 从无机抑制剂、有机抑制剂、组合抑制剂和新型抑制剂四个方面, 对硫化铜铅矿物浮选分离中铅抑制剂的研究成果进行了概述。分析指出, 利用浮选药剂分子设计理论开发出新型铅抑制剂, 使用组合抑制剂是未来硫化铜铅矿物浮选分离的重点研究方向。

**关键词** 铜铅分离; 黄铜矿; 方铅矿; 铅抑制剂; 浮选

## 引言

难选的复杂铜铅硫化矿石是我国铜和铅金属资源的重要来源, 而硫化铜和硫化铅矿物在自然界中主要以黄铜矿和方铅矿的形式存在。方铅矿(PbS)是分布最广的铅矿物, 是一种灰色的硫化铅矿物, 常呈立方体形状, 聚积在一起形成粒状或块状; 方铅矿中常常含有银, 因此也被用来作为提炼银的重要资源之一。而黄铜矿(CuFeS<sub>2</sub>)是一种铜铁硫化物矿物, 常含微量的金和银等, 属正方晶系, 晶体相对少见, 为四面体状; 多呈不规则粒状及致密块状集合体, 也有肾状和葡萄状集合体, 其矿物表面氧化速率缓慢。方铅矿和黄铜矿常常致密共生, 且两种矿物的天然可浮性较好。

复杂硫化铜铅矿物在浮选分离时存在分离难度大、分离不彻底和互含严重等问题, 其原因有: (1) 矿石结构复杂、矿物间多以微细粒状致密嵌布和呈包裹状态; (2) 铜铅矿物具有极为相近的自诱导和捕收诱导浮选特性; (3) 矿浆中部分溶解的铜离子对铅矿物的活化作用等<sup>[1]</sup>。

由于黄铜矿的可浮性略优于方铅矿, 目前难选的复杂硫化铜铅矿物浮选分离, 主要采用抑铅浮铜的方法, 因此方铅矿抑制剂的选择和开发显得十分重要。本文主要对方铅矿的无机抑制剂、有机抑制剂、组合抑

制剂和新型抑制剂的研究进展进行综述, 并指出高效环保的方铅矿新型抑制剂和组合抑制剂是未来研究硫化铜铅矿物浮选分离的重点研究方向。

## 1 无机抑制剂及其抑制机理

硫化铜铅矿物浮选分离中, 方铅矿的无机抑制剂主要有重铬酸盐、亚硫酸盐、水玻璃和焦磷酸钠等。

重铬酸盐作为方铅矿有效的抑制剂, 被广泛应用于铜铅矿物浮选分离中, 具有效果好、用量少、对硫化铜矿物的浮选影响小等优点。使用重铬酸盐抑制铅矿物时, 需要控制矿浆搅拌时间, 这是因为长时间搅拌会破坏硫化铜矿物晶格, 从而影响其可浮性。最佳搅拌时间应控制在方铅矿表面充分氧化, 而硫化铜矿物表面刚开始氧化, 一般控制在0.5~1 h<sup>[2]</sup>。在弱碱性矿浆中, 重铬酸盐能转化为铬酸盐, 然后与方铅矿表面发生化学吸附, 生成一层具有亲水性的铬酸铅薄膜, 改变了矿物表面性质从而使得方铅矿被抑制<sup>[3]</sup>。闫德利<sup>[4]</sup>在安徽某铜铅矿石浮选分离试验中, 使用重铬酸钾作为铅抑制剂, 控制搅拌时间45 min, 在最终闭路试验中获得的铜精矿中铜品位15.34%、铅品位5.94%、铜回收率44.49%, 使得铜铅矿物得到了有效分离。

亚硫酸盐具有较强的适用性, 矿浆中难免离子对其影响较小, 可与其它药剂组合使用应用于复杂铜铅

收稿日期: 2021-02-10

作者简介: 白睿(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 浮选理论与工艺。

通信作者: 魏志聪(1981-), 男, 讲师, 主要研究方向: 浮选理论与工艺以及资源综合利用, E-mail: 13577100486@126.com。

锌多金属硫化矿浮选中,是一种良好的方铅矿抑制剂<sup>[5]</sup>。王聘仪<sup>[6]</sup>试验结果表明,亚硫酸盐可以分解吸附在方铅矿表面上的黄药,使方铅矿在矿浆中的可浮性降低,但对硫化铜矿物表面吸附的黄药没有影响,硫化铜表面与黄药生成的黄原酸盐仍然可以稳定存在,因此导致两种矿物的可浮性存在明显差异,从而有效实现铜铅分离。亚硫酸盐可以有效实现铜铅浮选分离的另一个原因,是可以在硫化铅矿物表面生成亲水性的亚硫酸铅,使其表面亲水难浮,但对铜矿物有活化作用,从而产生可浮性差异实现铜铅分离。Grano SR 等<sup>[7]</sup>利用 XPS 研究了亚硫酸盐对方铅矿浮选的影响,证明了亚硫酸盐与方铅矿发生反应,表面生成了亲水的亚硫酸铅沉淀,从而起到亚硫酸盐对方铅矿的抑制作用。

水玻璃在铜铅浮选分离中经常与其它药剂组合抑制方铅矿,从而实现硫化铜矿物与硫化铅矿物的有效分离。Ye Zhang 等<sup>[8]</sup>通过浮选和电化学方法研究了水玻璃为抑制剂时,对方铅矿浮选行为的影响,结果表明水玻璃能有效附着在方铅矿表面上,同时在矿物表面生成亲水物质正硅酸铅,从而使方铅矿的浮选受到抑制。

焦磷酸钠在柠檬酸钠存在的前提下,对  $Pb^{2+}$  具有较强的络合作用,可与方铅矿表面上的金属离子反应生成金属盐,同时在矿物表面生成一层亲水膜,影响矿物可浮性,因此能作为方铅矿的抑制剂<sup>[9]</sup>。Wenqing Q 等<sup>[10]</sup>用焦磷酸钠在酸性条件下浮选分离方铅矿和黄铜矿,在焦磷酸钠体系下,用红外光谱和吸附量测试方法研究其作用机理。小型浮选试验表明,在酸性条件下,焦磷酸钠几乎完全抑制了方铅矿的浮选;红外光谱表明,焦磷酸钠的抑制作用主要是因为其在方铅矿表面发生了化学吸附,生成的络合物覆盖在方铅矿表面上,但对黄铜矿没有明显的影响;吸附量测定试验表明,焦磷酸钠体系下,捕收剂在方铅矿表面的吸附受到了阻碍,使方铅矿表面上捕收剂的吸附量小于黄铜矿上的吸附量,因此焦磷酸钠在铜铅浮选分离中,对方铅矿具有良好的抑制效果。

在无机抑制剂中,重铬酸盐、亚硫酸盐、水玻璃和焦磷酸钠四种抑制剂主要是通过对方铅矿表面生成亲水性络合物或者是降低方铅矿表面捕收剂吸附量来实现对方铅矿的抑制作用,它们在铜铅浮选分离中对黄铜矿的抑制效果不明显。同时,四种药剂的适用性强,抑制效果好,但重铬酸盐对矿浆搅拌时间有严格要求,而且重铬酸盐毒性大,因此在浮选中严格限制使用。焦磷酸钠需在酸性条件下与柠檬酸钠配合使用。

## 2 有机抑制剂及其抑制机理

有机抑制剂具有分选效果好、选择性良好和对环

境友好等优点,常用的方铅矿有机抑制剂有糊精、CMC、腐殖酸钠、鞣酸、海藻酸钠、铬铁木质素和 O, O - 二(2,3 二羟基丙基)二硫代磷酸盐等。

糊精是一种多糖类有机高分子化合物,在硫化铜铅矿石浮选分离中应用较为广泛。Qin W 等<sup>[11]</sup>试验发现,糊精和可溶性淀粉都能对方铅矿产生抑制作用。红外光谱试验表明,糊精分子中的羟基在方铅矿表面发生化学反应,生成亲水的羟基铅;吸附量测试表明,在有糊精存在的浮选体系中,捕收剂(O-异戊基-N-乙基硫代氨基甲酸酯)在黄铜矿表面的吸附量高于方铅矿,产生了吸附量差异,从而有效降低方铅矿可浮性。Jan Drzymala 等<sup>[12]</sup>在高温条件下焙烧土豆淀粉制得糊精,以此作为方铅矿抑制剂。在黄药为捕收剂的情况下,对波兰某铜选厂生产的混合铜铅精矿进行铜铅浮选分离,结果表明,当矿浆 pH 8.0 ~ 8.2 时,糊精对方铅矿产生了抑制作用,从而实现铜铅矿物的高效分离。

CMC(羧甲基纤维素)是一种常用的方铅矿高分子有机抑制剂,对方铅矿的抑制作用主要与其分子结构中的羟基和羧基有关。孟青书等<sup>[13]</sup>研究发现,在碱性条件下,方铅矿表面的铅以  $PbOH^+$  形式与 CMC 中的一  $COO^-$  发生静电作用,而其表面的另一部分铅则以  $H_2PbO_2^-$  形式与 CMC 中的  $OH^-$  发生氢键作用,从而使 CMC 选择性地吸附于方铅矿表面,使其亲水难浮。另外,矿物表面吸附的部分 CMC 结构中的羟基与水分子作用,在矿物表面形成一层水化膜,改变了方铅矿表面性质,使得方铅矿抑制。迟晓鹏等<sup>[14]</sup>在湖南郴州某铜矿的研究中,采用 CMC 为主、硫酸铝为辅的组合抑制剂作为铅抑制剂。在试验中先添加硫酸铝再添加 CMC,两种药剂间产生了正协同效应,经过一次粗选就得到了铜品位 22.49%、铜回收率 77.29%、铅回收率仅为 4.96% 的铜精矿,以及铅品位 41.38%、铅回收率 95.04% 的铅精矿,取得了良好的分选指标。

腐殖酸钠是一种结构中含有羧基和甲氧基等众多亲水性基团的有机高分子聚合物,具有络合和离子交换等性质,同时还具备改变矿物表面亲疏水性的能力。腐殖酸钠对方铅矿的抑制主要是通过吸附作用与矿物表面发生离子络合,形成亲水性包裹层而对矿物产生抑制。Rui - zeng LIU 等<sup>[15]</sup>在腐殖酸钠抑制方铅矿的浮选性能研究中,对其进行吸附量和 FTIR 测试发现,腐殖酸钠在新鲜的方铅矿表面上吸附能力差,但当方铅矿表面氧化生成  $PbSO_4$  后,该抑制剂能与矿物表面发生反应,以化学吸附的方式吸附于方铅矿表面上,从而对方铅矿的浮选产生抑制。王道委等<sup>[16]</sup>针对湖南某铜铅混合精矿中铜含量和铅含量分别为 10.57% 和 27.62% 的铜铅混合精矿难分离的情况,以腐殖酸钠作

抑制剂,硫酸调节矿浆酸碱度至 pH 5.5 左右,粗选抑制剂用量 800 g/t,抑制剂与矿物作用时间 20 min,可有效实现铜铅矿物的浮选分离,试验最终获得了铜品位 20.60%、铅品位 8.46% 和铜回收率 89.63% 的铜精矿和铅品位 47.27%、铜品位 2.03% 和铅回收率 91.54% 的铅精矿。

鞣酸又称单宁酸,分子中含有四个极性酚羟基,其多酚羟基的结构使其具有与多种金属离子发生络合和静电作用的能力<sup>[16]</sup>。邱仙辉等<sup>[17]</sup>在小型浮选试验中,研究了鞣酸对黄铜矿和方铅矿浮选行为的影响,并通过吸附量和 FTIR 测试对其抑制机理进行了研究。结果表明,鞣酸对方铅矿具有强烈的抑制能力,而对黄铜矿的抑制能力较小;吸附量测试表明,鞣酸在方铅矿和黄铜矿表面上的吸附量差异较大,因此鞣酸对两种矿物抑制能力明显不同。红外光谱分析结果表明,鞣酸对方铅矿的抑制作用主要是通过结构中的酚羟基与方铅矿表面发生了化学吸附作用,改变了矿物表面性质,从而使方铅矿亲水难浮。在青海某铜矿的浮选试验中,使用鞣酸抑铅浮铜,最终从含铜 2.03%、铅 59.00% 的铜铅混合精矿中,得到铜品位 23.77%、铅品位 8.28%、铜回收率为 55.86% 的铜精矿。

海藻酸钠(NaAl)是从海藻中提取出的一种天然多糖,富含羟基和羧基,对许多金属离子具有较高的化学活性。Chen 等<sup>[18]</sup>以二丁基二硫代磷酸铵(ADD)为捕收剂,通过 Zeta 电位、FTIR 光谱和 XPS 光谱分析研究了海藻酸钠对黄铜矿和方铅矿浮选性能的影响。试验表明,海藻酸钠可以选择性地吸附在方铅矿表面上,并有效地阻碍捕收剂在方铅矿表面的吸附,方铅矿表面的  $Pb^{2+}$  与海藻酸钠中的官能团之间发生吸附,吸附过程中的选择性可能来源于金属离子的存在或金属羟基在矿物表面的再附着,特别是海藻酸钠既不能吸附在黄铜矿表面,也不会阻碍捕收剂在黄铜矿表面上的吸附,对黄铜矿可浮性的影响不大。该抑制剂在铜铅多金属硫化矿浮选中具有作为一种有效、无毒的抑制剂的潜力。

酪铁木质素(FCLS)是钻井生产中使用的—种降黏剂,由亚硫酸纸浆废液、硫酸亚铁和红矾在 80 °C 下反应得到。近年来有研究发现,FCLS 可作为铜铅矿石浮选分离中的铅矿物抑制剂,并取得了良好的试验指标。刘润清等<sup>[19]</sup>使用 FCLS 作为铜铅浮选分离试验中的铅抑制剂,FCLS 对黄铜矿的抑制能力微弱,但在使用 NaOH 为调整剂,将矿浆调节至强碱性时,方铅矿被 FCLS 强烈抑制。红外光谱分析发现,FCLS 在黄铜矿表面上的吸附量较小,但在方铅矿表面上吸附量大,并与捕收剂发生竞争吸附。XPS 分析结果进一步证实,FCLS 的吸附对矿物表面特性有很大的影响,FCLS 的

吸附促进了方铅矿的表面氧化,但阻止了黄铜矿的表面氧化,因此对方铅矿产生了抑制作用<sup>[20]</sup>。

O,O-二(2,3-二羟基丙基)二硫代磷酸盐(DHDTP)是一种小分子有机物,在浮选中能有效抑制方铅矿。Piao ZJ 等<sup>[21]</sup>通过 Zeta 电位和吸附量测试,研究了 DHDTP 对方铅矿产生抑制作用的原因:Zeta 电位测定表明,DHDTP 的加入明显增加了矿物的负电位,表明 DHDTP 和方铅矿可能存在氢键和化学吸附作用;另外,在较大的 pH 范围内,DHDTP 在黄铜矿和方铅矿上吸附量有很大差异,且药剂在方铅矿上的吸附量随着浓度的增加而上升,进一步证明 DHDTP 在方铅矿表面发生了化学吸附,对方铅矿产生了抑制作用。

在铜铅浮选分离过程中,有机抑制剂主要是通过其分子结构中存在的亲水基团羟基和羧基与方铅矿表面金属离子发生络合反应,使得矿物表面亲水性增强,从而达到对方铅矿抑制的效果。有机抑制剂的抑制效果普遍优于无机抑制剂,且其对环境友好,试验过程中药剂用量较小。但其药剂成本要高于无机抑制剂,且适用性相对较弱。

### 3 组合抑制剂及其抑制机理

研究发现,单一的方铅矿抑制剂很难满足生产要求,存在抑制效果不佳和药剂用量大等缺点,而将多种抑制剂组合使用可以有效地解决上述问题,因此越来越多的研究朝着组合抑制剂的方向发展。组合抑制剂主要通过发挥组分药剂各自的特性和抑制效果,在矿物抑制上产生了协同效应,但各个组分药剂对矿物的抑制机理并没有发生变化。在生产实践中利用组合抑制剂进行铜铅分离得到了广泛应用。

李江涛等<sup>[22]</sup>在探索云南某低品位铜铅锌矿铜铅分离试验时,进行了重铬酸钾、重铬酸钾+水玻璃、重铬酸钾+羧甲基纤维素和重铬酸钾+亚硫酸钠组合抑制剂对方铅矿抑制效果的探索试验,试验采用一次粗选两次扫选三次精选的浮选工艺,发现使用重铬酸钾+亚硫酸钠为铅抑制剂时,得到了铜品位 24.99%、含铅 5.48% 的铜精矿和铅品位 34.34%、含铜 6.56% 的铅精矿,获得了铜铅浮选分离的理想指标。

毛富邦等<sup>[23]</sup>在内蒙古某铅锌矿石铜铅分离试验研究中,分别使用了磷酸钠+CMC、CMC+亚硫酸钠+水玻璃和硫酸+硫酸亚铁+亚硫酸钠多种抑制剂进行试验。试验结果表明,使用 CMC+亚硫酸钠+水玻璃组合抑制对铅的抑制效果较好,在闭路试验中得到的铜品位 24.59%、铜回收率 90.71% 的铜精矿和铅品位 46.37%、铅回收率 98.80% 的铅精矿产品。

李明贵等<sup>[24]</sup>在云南哀牢山脉南段金子河地区的含金多金属硫化矿的研究中,通过大量铜铅分离试验

发现,采用腐殖酸钠 + 羧甲基纤维素 + 亚硫酸钠组合抑制剂来抑铅浮铜,最终获得了铜品位 26.22%、铜回收率 88.01% 的铜精矿和铅品位 75.12%、铅回收率 88.28% 的铅精矿,达到了与重铬酸盐法近似的抑制效果。

余力等<sup>[25]</sup>在临沧某铜铅锌多金属硫化矿混合浮选得到的铜铅混合精矿分离选矿试验研究中,探索了亚硫酸 + 硫化钠 + 淀粉组合抑制剂对铅的抑制作用,并对三种药剂组合方式和用量进行了试验。经过大量配比试验确定了该组合抑制剂的最佳配比是  $m(\text{亚硫酸}) : m(\text{硫化钠}) : m(\text{淀粉}) = 1 : 2 : 1.5$ ,此时对铅的抑制效果最好。试验采用一次粗选两次扫选三次精选的闭路流程得到铜品位 20.94%、铅品位 1.91%、铜回收率 79.09% 的铜精矿和铅品位 48.68%、铜品位 3.29%、铅回收率 97.73% 的铅精矿,最终达到了理想的分选指标。

#### 4 新型抑制剂及其抑制机理

近年来,国内外学者在新型抑制剂的研发方面取得了新的进展,以下对 PMA - PDTC、LY、PD - 1、PAM - ATU、BK556 和 LD - 1 六种方铅矿新型抑制剂。

Xingrong Zhang 等<sup>[26]</sup>根据密度泛函理论(DFT)的计算结果,设计合成了一种新型高分子抑制剂聚马来酰胺 - 二硫代氨基甲酸丙酯(PMA - PDTC)。在 pH 8.5 的条件下,以 PMA - PDTC 为抑制剂,以 O - 异丙基 - N - 乙基硫代氨基甲酸酯(IPETC)为捕收剂,对铜铅矿物进行浮选分离。试验最终可以获得含铅 12.12%、铜品位 28.89% 的铜精矿和铅品位 80.65%、含铜 1.49% 的铅精矿。试验结果表明,PMA - PDTC 是一种分离方铅矿和黄铜矿的有效抑制剂,对方铅矿有强烈的抑制作用和良好的选择性。

梁溢强等<sup>[27]</sup>发现了一种容易降解的无机氧化剂 LY,单矿物浮选试验发现,该氧化剂与硫代硫酸钠组合使用能有效抑制方铅矿;人工混合矿浮选分离试验发现,在该抑制剂的作用下得到的分离指标较好,铜和铅的分离趋势明显。在云南某实际铜铅混合精矿浮选分离试验中,利用该抑制剂取得的铜精矿中铜含量为 29.06%、铜回收率 73.16%,铅精矿含铅 70.43%、铅回收率 77.42%,试验证明了该新型抑制剂可以替代重铬酸钾用于铜铅浮选分离。

钱志博等<sup>[28]</sup>在聚丙烯酰胺易于改性的基础上,通过在其分子结构上嫁接多个亲固基研制出 PD - 1,并研究了其对铜铅矿物浮选行为的影响。在单矿物和人工混合矿浮选试验中发现,在 PD - 1 用量较小的条件下就能实现对方铅矿的强烈抑制,从而实现铜铅矿物的有效分离,且该药剂对方铅矿抑制效果要比传统的

糊精和硫酸亚铁强。另外,PD - 1 能够在方铅矿表面选择性吸附,利用结构中的酰胺基改变方铅矿表面性质,增强矿物表面亲水性,从而使方铅矿得到抑制。PD - 2 也是一种有效的新型方铅矿抑制剂,Zeta 电位和红外光谱分析发现,PD - 2 以化学吸附的方式选择性吸附于方铅矿表面上,在黄铜矿表面吸附性较差;而且 PD - 2 分子中的酰胺基具有亲水性,能使方铅矿抑制,因此能达到抑铅浮铜目的<sup>[29]</sup>。

Zhang XR 等<sup>[30]</sup>采用溶剂法合成了高分子聚合物聚丙烯酰胺 - 烯丙基硫脲(PAM - ATU)。小型浮选试验证明,PAM - ATU 是一种较好的方铅矿抑制剂。红外光谱结果表明,经 PAM - ATU 作用后,方铅矿表面发生了药剂吸附,对方铅矿产生了抑制;Zeta 电位和 XPS 结果表明,PMA - ATU 在方铅矿表面的吸附性能比在黄铜矿表面的更强,且 PAM - ATU 可以阻止 IPETC 捕收剂吸附于方铅矿表面上。

北京矿冶研究总院自制的特效抑制剂 BK556,其主要为大分子改性纤维素。胡志凯等<sup>[31]</sup>在对西藏某铜铅锌多金属矿研究中,用 BK556 作为铜铅混合精矿中铜铅分离的铅抑制剂,在闭路试验中获得了铜品位 26.40%、铜回收率 83.75% 的铜精矿和铅品位 65.42%、铅回收率 89.50% 的铅精矿,该药剂可代替传统的重铬酸钾作为一种绿色和高效的抑制剂,避免了对高原脆弱生态环境造成污染。

胡波等<sup>[31]</sup>在处理某复杂铜铅硫化矿时使用了一种新型抑制剂 LD - 1。LD - 1 是一种高效低毒含多糖类有机物的组合抑制剂,研究发现,其对铅矿物的抑制性能可与传统的重铬酸钾相媲美。LD - 1 组分中的多糖类有机物结构中含有大量的羟基(-OH)和羧基(-COOH),其中 -COOH 基团可以选择性吸附在方铅矿的表面上;-OH 则与矿浆中的水分子作用,在矿物表面形成一层水膜,降低矿物表面的疏水性,从而使方铅矿受到抑制。同时 LD - 1 中的无机组分,在水中可以与矿浆中溶解的难免离子或矿物表面上的金属离子发生配位-络合,产生吸附作用,并形成亲水膜,从而阻碍捕收剂在方铅矿表面上的吸附,实现铜铅分离。

#### 5 结论

硫化铜铅矿物浮选分离主要使用的方铅矿无机抑制剂有重铬酸盐、亚硫酸盐、水玻璃和焦磷酸钠等。硫化铜铅矿物浮选分离使用的方铅矿有机抑制剂种类较多,有糊精、羧甲基纤维素、腐殖酸钠、鞣酸、FCLS、焦磷酸钠、DHDP、海藻酸钠等。有机抑制剂在生产中常与一些无机抑制剂组合使用,充分发挥各自的特点和优点,取得了良好的指标,是目前生产与研究的主要方向。

硫化铜铅矿物浮选分离的研究经过几十年的发展,取得了不少成果,并在应用中取得了不错的效果。进一步完善抑制剂及其抑制机理的研究,在浮选药剂分子结构设计理论的基础上,对药剂分子进行嫁接;利用药剂之间的正协同作用,研制组合抑制剂;开发新型、环保、高效的抑制剂应是未来研究硫化铜铅矿物浮选分离的重点方向。

### 参考文献:

- [1] BOLIN NJ, LASKOWSKI JS. Polysaccharides in flotation of sulphides. part II. copper/lead separation with dextrin and sodium hydroxide[J]. 1991, 33(1-4): 235-241.
- [2] 朱玉霜,朱建光. 浮选药剂的化学原理[M]. 长沙:中南工业大学出版社,1987.
- [3] 王卫初. 利用组合抑制剂进行铜铅分离的试验研究[J]. 有色矿山, 1999(2):3-5.
- [4] 闫德利. 安徽某矿山铜铅分离选矿试验[J]. 现代矿业,2019,35(5): 186-190.
- [5] 陈海亮,崔毅琦,童雄. 硫化铜铅矿物浮选分离的研究现状及进展[J]. 矿冶,2016,25(1):13-16.
- [6] 王聘仪. 亚硫酸及其盐在浮选过程中作用机理的探讨[J]. 湖南化工,1981(2):55-57.
- [7] GRANO SR, PRESTIDGE CA, RALSTON J. Sulphite modification of galena surfaces and its effect on flotation and xanthate adsorption[J]. International Journal of Mineral Processing, 1997, 52(1): 1-29.
- [8] ZHANG Y, LIU RQ, SUN W, et al. Electrochemical mechanism and flotation of chalcopyrite and galena in the presence of sodium silicate and sodium sulfite[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(4): 1091-1101.
- [9] 李健民,宋凯伟,章晓林,等. 组合抑制剂柠檬酸钠和焦磷酸钠在某铅锌矿分离浮选中的作用[J]. 过程工程学报,2017,17(3):500-505.
- [10] QIN WQ, WEI Q JIAO F, et al. Effect of sodium pyrophosphate on the flotation separation of chalcopyrite from galena[J]. 矿业科学技术(英文版), 2012, 22(3):345-349.
- [11] QIN WQ, WEI Q JIAO F, et al. Utilization of polysaccharides as depressants for the flotation separation of copper/lead concentrate[J]. Int J Min Sci Technol, 2013, 23(2): 191-198.
- [12] JAN DRZYMALA, JANUSZ KAPUSNIAK, PIOTR TOMASIK. Removal of lead minerals from copper industrial flotation concentrates by xanthate flotation in the presence of dextrin[J]. International Journal of Mineral Processing, 2003, 70(1): 147-155.
- [13] 孟书青,黄炎珠,何志权. CMC在浮选分离铅锌矿中的作用[J]. 中南矿冶学院学报,1981(4):49-55.
- [14] 迟晓鹏,王纪镇,邓海波,等. 铜铅分离新型铅抑制剂研究[J]. 金属矿山,2013(11):56-59.
- [15] LIU RZ, QIN WQ, JIAO F, et al. Flotation separation of chalcopyrite from galena by sodium humate and ammonium persulfate[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(1): 265-271.
- [16] 王道委,焦芬,覃文庆,等. 湖南某铜铅混合精矿铜铅分离试验研究[J]. 矿冶工程,2018,38(1):46-49.
- [17] 邱仙辉,孙传尧,邱廷省. 鞣酸对方铅矿及黄铁矿的抑制作用[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(1):124-128.
- [18] 邱仙辉,于洋,张春菊. 有机抑制剂鞣酸对黄铜矿和方铅矿浮选的影响[J]. 有色金属工程,2016,6(6):62-66.
- [19] CHEN W, CHEN T, BU XZ, et al. The selective flotation of chalcopyrite against galena using alginate as a depressant[J]. Minerals Engineering, 2019, 141: 105848.
- [20] 刘润清,孙伟,胡岳华. 铜铅分离有机抑制剂 FCLS 的研究[J]. 矿冶工程,2009,29(3):29-32.
- [21] YU JS, LIU RQ, WANG L, et al. Selective depression mechanism of ferric chromium lignin sulfonate for chalcopyrite - galena flotation separation[J]. International Journal of Minerals Metallurgy and Materials, 2018, 25(5): 489-497.
- [22] PIAO ZJ, WEI DZ, LIU ZL. Effects of small molecule organic depressants on the flotation behavior of chalcopyrite and galena[J]. Dongb Daxue Xuebao/Journal of Northeastern University, 2013, 34(6): 884-888.
- [23] 李江涛,库建刚,黄加能. 亚硫酸钠在铜铅分离浮选中的应用[J]. 中国矿业,2007(10):74-76.
- [24] 毛富邦,郭超华,陶恒畅. 内蒙古某铅锌矿石铜铅分离试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2018(5):36-42.
- [25] 李明贵,何石,代生权. 某含金多金属硫化矿铜铅无氰无铬浮选分离试验研究[J]. 世界有色金属,2017(21):64,66.
- [26] 余力,刘全军,袁华玮,等. 铜铅混合精矿浮选分离工艺研究[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2017,42(1):26-33,52.
- [27] ZHANG XR, QIAN ZB, ZHENG GB, et al. The design of a macromolecular depressant for galena based on dft studies and its application[J]. Minerals Engineering, 2017, 112: 50-56.
- [28] 梁溢强,刘攻华,简胜,等. 云南某铜铅矿分离试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2013(1):20-22,34.
- [29] 钱志博,吴卫国,张行荣,等. 新型环保有机铅抑制剂在硫化铜铅分离中的应用[J]. 有色金属(选矿部分),2018(5):105-110.
- [30] 钱志博,吴卫国,张行荣. 新型铅抑制剂在铜铅分离中的抑制作用及机理研究[J]. 有色金属(选矿部分),2018(1):100-105.
- [31] ZHANG XR, ZHU YG, ZHENG GB, et al. An investigation into the selective separation and adsorption mechanism of a macromolecular depressant in the galena - chalcopyrite system[J]. Minerals Engineering, 2019, 134: 291-299.
- [32] 胡志凯,于洋,陈经华. 西藏某铜铅锌多金属矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程,2016,36(6):46-48,56.
- [33] 胡波,陈代雄,李茂林,等. 高硫复杂铜铅多金属矿高效分离浮选新工艺研究[J]. 有色金属(选矿部分),2013(S1):70-73.

# Research Status and Progress of Flotation Separation of Copper – lead Sulfide Minerals

BAI Rui, WEI Zhicong, PENG Rong, WANG Hengsong

*Kunming University of Science and Technology, Land Resources Engineering, Kunming 650093, Yunnan, China*

**Abstract:** The flotation separation of copper – lead sulfide minerals is a hot and difficult point in the field of mineral processing engineering. The article focuses on the research progress of flotation inhibitors, from the four aspects of inorganic inhibitors, organic inhibitors, combined inhibitors and new inhibitors. The research results of lead inhibitors for flotation separation of copper – lead minerals are summarized. The analysis pointed out that the use of the molecular design theory of flotation reagents to develop a new type of lead inhibitor, and the use of combined inhibitors is the key research direction for the flotation separation of copper – lead sulfide minerals in the future.

**Key words:** copper – lead separation; chalcopyrite; galena; lead inhibitor; flotation

**引用格式:**白睿,魏志聪,彭蓉,王衡嵩. 铜铅硫化矿物浮选分离中铅抑制剂的研究进展[J]. 矿产保护与利用,2021,41(2):74-79.

Bai R, Wei ZC, Peng R, and Wang HS. Research status and progress of flotation separation of copper – lead sulfide minerals[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(2): 74 – 79.

投稿网址:<http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E – mail:kcbh@chinajournal.net.cn