



矿浆难免离子对铅锌硫化矿分离的影响研究进展

徐宏祥^{1,2}, 庞增瑞², 黎全¹, 胡明振¹, 邓久帅², 张茜²

(1. 广西华锡集团股份有限公司博士后科研工作站, 铟锡资源高效利用国家工程实验室, 广西 柳州 545200; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 这是一篇矿物加工工程领域的论文。矿浆溶液中普遍存在一些难免离子, 并且其中存在的难免离子对铅锌硫化矿的浮选分离有着重要影响。矿浆中难免离子主要来源于选厂用水、矿物自身溶解、活化剂或者抑制剂解离以及流体包裹体释放引入的原生离子和磨矿过程中引入的次生离子。本文对矿浆中引入的原生离子以及磨矿体系引入的次生难免离子对铅锌硫化矿浮选分离的影响进行了总结分析发现, 不论是原生离子还是次生离子对铅锌硫化矿浮选行为的影响均较为明显, 较多的学者针对这种现象进行了大量的研究。通过药剂调控以及改变磨矿环境等方法已经取得了较大的突破, 为后续研究者提供了重要的研究思路。本文的关注点是前人的研究成果与现场工艺紧密结合, 在不影响工业经济情况下如何从源头消除难免离子, 如何从现场工艺中降低难免离子对浮选指标的影响仍是未来研究的重要方向。

关键词: 矿物加工工程; 矿浆难免离子; 铅锌硫化矿; 浮选分离; 磨矿体系

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.01.015

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)01-0128-07

引用格式: 徐宏祥, 庞增瑞, 黎全, 等. 矿浆难免离子对铅锌硫化矿分离的影响研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(1): 128-134.

XU Hongxiang, PANG Zengrui, LI Quan, et al. Research progress on the effect of inevitable ions in slurry on the separation of lead-zinc sulfide ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(1): 128-134.

锌金属矿物是重要的矿产资源, 目前在我国有色金属行业中, 它具有重要的主导作用。我国的铅锌矿资源种类复杂, 伴生的矿物质较多, 具有较高的综合利用价值。在铅锌矿床中, 锌基铅锌矿床多于铅基铅锌矿床, 单铅矿床很少, 总体反应出贫矿多, 富矿少的特征^[1]。在选矿研究领域中, 硫化矿石通常经过湿磨—浮选两种工艺以便于实现有用矿物的富集^[2]。硫化矿浮选矿浆中可能存在一些矿物自身溶解、流体包裹体释放以及选厂用水引入的原生离子或者湿式磨矿过程导致矿物单体解离以及介质损耗引入的次生离子。笔者对华锡集团车河选矿厂的回水进行了一系列离子的

检测, 并与当地自来水中的离子含量对比, 结果发现浮选用回水中的 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Mg^{2+} 、 Cu^{2+} 、 SO_4^{2-} 等离子含量相对较高。这些难免离子中部分金属阳离子可能与捕收剂发生作用导致捕收剂用量增加; 可能对矿物产生抑制等作用, 增大硫化矿浮选分离难度。选厂回水逐次累积的原生离子以及磨矿介质损耗引入的次生离子导致矿浆中的难免离子含量发生改变从而影响硫化矿的浮选行为。因此, 探究难免离子对铅锌硫化矿浮选产生的影响具有重要意义。本文从难免离子的来源开始切入, 从原生离子以及次生离子的角度介绍了其对铅锌硫化矿浮选分离的影响, 最后针对此类

收稿日期: 2021-05-08; 修回日期: 2021-06-29

基金项目: 中国博士后科学基金资助 (NO. 2020M673551XB)

作者简介: 徐宏祥 (1986-), 男, 博士, 主要从事微细粒矿物分选方面的研究。

通信作者: 庞增瑞 (1996-), 男, 硕士, 主要从事微细粒矿物分选方面的研究。

影响进行了如何调控的总结。

1 矿浆中难免离子来源及其对浮选行为的影响

1.1 矿浆中难免离子的来源

在矿物浮选工艺过程中，矿浆溶液中总是存在一些难免离子，诸如 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 等，这些金属离子的产生及其原因主要包括：抑制剂或活化剂的解离、研磨介质的损耗、矿物的溶解^[3-4] 或循环用水的积累以及流体包裹体释放的离子。其中铅锌硫化矿常用的活化剂和抑制剂分别为硫酸铜水溶液和石灰，溶解可能会给矿浆引入 Cu^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} ；研磨介质损耗可能引入 Fe^{3+} ；铅锌矿物的溶解可能引入 Pb^{2+} 、 Zn^{2+} ；循环用水累积引入 K^+ 、 Mg^{2+} ；流体包裹体释放可能引入 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等离子。

Xian Y 等^[5] 通过研究发现，矿浆中难免离子不仅可以通过常规途径引入，而且流体包裹体也是难免离子的主要来源之一。黄铁矿流体包裹体是水溶液中 Cu^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cl^- 和 SO_4^{2-} 的主要来源，这些离子很有可能导致黄铁矿在浮选过程中被无意活化。

Deng J 等^[6-8] 通过研究分析发现，在黄铜矿中存在大量的流体包裹体，流体包裹体也会释放出大量 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 阳离子以及 Cl^- 、 SO_4^{2-} 等阴离子。由此可以看出， Cu^{2+} 除了循环用水、矿物溶解和研磨介质引入之外，矿物的流体包裹体是 Cu^{2+} 新的以及重要的来源，并且也是导致硫化矿浮选分离困难新的影响因素。矿浆中难免离子的来源较为广泛且不可避免，因此难免离子的存在必然对浮选行为产生一定的影响。

1.2 矿浆中难免离子对铅锌硫化矿浮选行为的影响

难免离子的出现通常会对浮选过程中的矿物产生一些重要影响，比如消耗捕收剂，抑制或者活化矿物。

魏明安等^[9] 通过分析去离子水浸泡矿石后矿浆中的难免离子组成，研究矿浆中发生变化较大的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Al^{3+} 等离子对黄铜矿和方铅矿浮选的影响。发现这些金属离子在用乙基硫胺酯做捕收剂的体系中对黄铜矿的浮选基本没有影响，而对方铅矿浮选的影响分成3类：（I）起活化作用的 Cu^+ ；（II）起抑制作用的 Al^{3+} 、 Fe^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Cu^{2+} ；（III）基本不起作用的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 。

刘爽等^[10] 以会泽铅锌矿方铅矿、闪锌矿和黄铁矿为研究对象，研究了高浓度无机离子对矿物可浮性的影响。实验结果表明当加入的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 达到特定浓度后，对三种矿物的可浮性将会有不同程度的影响。

祁忠旭^[11] 对某铅锌选矿废水进行分析得知，该选厂废水具有金属离子的种类多、固体悬浮物的含量高、pH 值高的特点。通过考查 pH 值以及各种离子含量对硫化铅矿可浮性的影响，发现由于在铅锌矿浮选工艺中使用大量石灰做抑制剂导致 Ca^{2+} 含量较高， Ca^{2+} 的存在影响了捕收剂在矿物表面的吸附，从而导致硫化铅矿物可浮性下降。

Guo B 等^[12] 研究发现， Cu^{2+} 在黄铁矿表面的吸附改变了黄铁矿的表面性质，从而改变了它的浮选分离难度。含铜 (I) 的物种被结合到黄铁矿中，在更高的氧化电位下由氰化铜溶液形成硫化铜类硫化物，而在更高的还原电位下沉积在黄铁矿上的铜含量显著提高，严重影响硫化矿的浮选分离。

Ikumapayi 等^[13] 通过 Zeta 电位、漫反射红外光谱和方铅矿纯矿物的 XPS 测量，研究了循环工艺用水中存在的 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} 对方铅矿浮选的影响。研究表明， Ca^{2+} 的存在导致黄药在方铅矿上的吸附量减少。由于 Ca^{2+} 可能与碳酸盐表面形成可溶性复合物，从而对方铅矿的浮选产生不利影响。

Özlem 等^[14] 研究了溶解离子对某铜锌复杂硫化矿浮选性能的影响，浮选实验结果表明，溶解的金属离子和硫化物离子（主要以 SO_4^{2-} 和 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的形式）的积累改变了硫化矿物的泡沫稳定性和表面化学性质。溶解的金属离子如 Cu^{2+} 和 Pb^{2+} 的存在也提高了闪锌矿的浮选速率和回收率。

Huang P 等^[15] 研究壳聚糖作为一种选择性抑制剂在闪锌矿-方铅矿浮选应用中发现，在方铅矿和闪锌矿混合矿物的浮选中，壳聚糖的添加导致两种矿物都被严重抑制。这是由于 Pb^{2+} 污染闪锌矿表面造成的， Pb^{2+} 可能来自氧化方铅矿在弱酸性悬浮液中的溶解。

Zhang Q 等^[16] 研究金属离子对闪锌矿浮选行为的影响时发现， Fe^{3+} 、 Ca^{2+} 和 Cu^{2+} 对闪锌矿的浮选起活化作用，当闪锌矿和其他矿物伴生时，这三种金属离子会优先吸附在闪锌矿表面，使得闪锌矿抑制效果降低，造成矿物浮选分离困难。

通过上述研究发现，在硫化铅锌矿浮选过程中，难免离子主要通过改变捕收剂在矿物表面的吸附量、改变矿物表面的 Zeta 电位以及改变矿

浆溶液的 pH 值使得部分难免离子以沉淀物的形式附着在矿物表面从而改变矿物的可浮性。

2 磨矿体系对硫化铅锌矿浮选行为的影响

磨矿工艺是硫化矿浮选体系中一种复杂的物理、化学及物理化学工艺过程，它对于硫化矿物的表面形态及其性质，矿浆的化学性质以及浮选行为都具有重要影响^[17]。磨矿体系产生的次生离子导致浮选矿浆中的难免离子含量发生改变，这些难免离子的引入使铅锌硫化矿的浮选行为受到影响。在磨矿体系中，磨矿介质以及磨矿环境对铅锌硫化矿的浮选行为影响较大，笔者对此进行详细描述。

2.1 磨矿介质对铅锌硫化矿浮选行为的影响

在铅锌硫化矿磨矿工艺流程中，选厂大多采用铁或者钢研磨介质对矿物进行研磨。研磨介质的损耗向矿浆中引入一些难免离子，从而影响硫化矿的选择性分离。

何发钰^[18-19]研究表明，陶瓷研磨介质与铁研磨介质相比，前者更利于硫化矿物的浮选。由于铁研磨介质氧化生成 FeOOH，FeOOH 罩盖在闪锌矿表面对 Cu²⁺、Pb²⁺的活化作用起到了“屏蔽效应”，并且这些产物会导致方铅矿表面亲水性增强，从而影响方铅矿的浮选分离效率。

Wei Y 等^[20]研究了不同的研磨介质在硫化铅锌矿浮选时的作用。研究结果表明，在使用陶瓷介质进行研磨时，铅锌矿的回收率最高，其原因主要是陶瓷介质的研磨能够为铅锌矿提供氧化的环境，氧化环境对 Cu²⁺活化闪锌矿是有益的；而在使用铁性介质时，铅锌矿的回收效果较低，这是因为铁介质提供的是还原环境，可防止 Cu²⁺活化闪锌矿。可以看出，选择合适的研磨介质对贵金属回收有重要影响。

Bruckard 等^[21]综合评述了研磨和研磨介质（通常是铁基的）对硫化矿浮选性能的影响，发现硫化矿和钢介质之间的电偶作用会影响矿浆电位、溶解氧水平或氢氧化铁的形成程度，这通常对矿物浮选不利。使用更惰性的铬合金球可以限制矿浆中氢氧化物的形成，从而改善浮选性能。

胡岳华等^[22]研究了磨矿介质类型、机械力的大小对矿物电极电位和表面反应电流的影响，发现方铅矿的浮选行为与矿物表面电极电位有着密切的联系，在适当的电位范围内，矿物会表现出很好的可浮性，超出这个范围可浮性下降。

通过上述研究发现，磨矿介质的选择对铅锌

矿硫化浮选分离影响较大，不同的磨矿介质对矿浆的性质影响不同。较多学者针对磨矿介质展开研究发现，陶瓷介质比铁介质的使用效果好很多，但是考虑到现场工业条件，如何降低铁研磨介质对矿物浮选行为的影响就显得较为重要。

2.2 磨矿环境对铅锌硫化矿浮选行为的影响

魏以和等^[23]研究发现，在低碳钢研磨介质下，低碳钢介质因具有较强的还原性环境以及自身腐蚀产生的氧化铁类物质对矿物表面覆盖，进而影响了方铅矿的可浮性；而在陶瓷介质下，由于陶瓷介质产生一定的氧化性环境，使得方铅矿具有良好的可浮性。因此为保证方铅矿具有良好的可浮性，磨矿时采用陶瓷介质更佳。

覃文庆等^[24]研究发现，当使用铁基研磨球介质时，由于 Fe³⁺在铁介质表面上的作用，在研磨液中存在还原性气氛，这有利于方铅矿和闪锌矿的浮选。在存在捕收剂的情况下，铁基研磨球介质与硫化物矿物之间会发生电化反应，这不利于在方铅矿表面形成捕收剂的疏水产物，影响硫化物矿物的选择性浮选分离。

Deng R 等^[25]通过在磨机中添加抑制剂来改变研磨环境，在实验中发现，磨矿环境对复杂铅锌矿的浮选分离有显著影响。结果分析表明，磨矿环境对铅的回收影响不大，但对锌的回收有显著影响，在该磨矿环境下有利于降低铅精矿中锌的含量。

聂梦宇等^[26]通过研究闪锌矿在不同磨矿体系下的可浮性差异实验中发现，在相同药剂条件下，相比钢球介质湿磨环境，以陶瓷介质湿磨后闪锌矿可浮性较高。在钢球介质湿磨体系中，由于钢球介质的磨损引入大量的 Fe³⁺，且随着磨矿时间的延长，Fe³⁺与矿浆中 OH⁻结合生成金属氧化物覆盖在矿物表面，导致矿浆中金属离子含量不断下降。

通过上述研究发现，磨矿环境的改变主要是因为磨矿介质的不同而引起，不同的磨矿介质会给矿浆带来不同的氧化还原环境，从而对硫化矿的浮选行为产生影响。针对上述影响可以采取在磨矿过程添加药剂的方式以改变磨矿环境，降低难免离子带来的不利影响。

3 难免离子对铅锌硫化矿分离影响的调控

铅和锌具有相同的成矿原因和相似的电子层结构，铅、锌矿床在很大程度上具有相同的亲水性和疏水性，并且铅锌矿床中的一些铅和锌之间

具有紧密的共生关系，很难完全解离，这使得铅和锌的分离变得困难^[27]。此外，矿物的结构和晶格缺陷、矿浆中难免离子的作用以及机械性活化等这些因素都是导致铅锌分离困难的重要原因^[28]。

在进行复杂铅锌多金属硫化矿浮选工艺设计过程中，大多数企业都会选择采用“抑锌硫、浮铅”的浮选工艺设计原则。因此，选取合适的铅锌抑制剂在铅锌硫化矿浮选分离中具有重要的应用意义。抑制剂的主要作用机理为：在矿物表面迅速形成一层亲水性薄膜、溶解矿物表面的活化膜以及消除其他活化离子^[29]。闪锌矿最常用的抑制剂为抑制效果较佳的氰化物，但是由于氰化物自身的危害性，研制新型无氰抑制剂已经成为现阶段的研究热点。

3.1 药剂制度对铅锌硫化矿分离的调控

冯忠伟^[30]研究云南某铅锌矿中的高硫铅锌矿石发现，由于硫酸锌、硫酸亚铁等可溶性盐类含量高，使得浮选矿浆中存在大量的 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 等金属离子。为减少可溶性盐对铅锌浮选的影响，采用无碱工艺浮选铅锌矿物，选铅时以硫酸锌和亚硫酸钠作闪锌矿抑制剂，获得较好的浮选指标。

张心平^[31]使用了新型捕收剂 PN 和相应的抑制剂 BDI 进行浮选实验。以 BDI 和硫酸锌为组合抑制剂，对硫化铅矿物进行抑制，浮选效率得到了明显的改善。说明新型抑制剂的应用得到了较好的浮选指标，可逐步将新型抑制剂应用在工业中。

T·N·赫麦雷娃等^[32]采用分批浮选实验和表面分析方法研究了亚硫酸氢钠对被铜活化的闪锌矿的可浮性影响。实验结果证实，亚硫酸氢钠不仅会与闪锌矿表面反应，而且还会与吸附状态的黄药反应。

Xie X 等^[33]对内蒙古某复杂铅锌矿进行了研究，通过捕收剂的组合成功地将铅矿物与锌矿物分离。新试剂 X-43 作为锌活化剂在铁闪锌矿浮选中显示出优势，采用该工艺生产出的铅、锌矿物回收率较高。

Chen 等^[34]研究了 10 种有机抑制剂对铁闪锌矿和黄铁矿的抑制性能。结果表明，分子中只有单个羟基 (-OH)、羧基 (-COOH) 或者氨基 (-NH₂) 的有机化合物对铁闪锌矿和脆硫锑铅矿的抑制无效。这些官能团的组合仍然不能增强有机抑制剂的抑制能力。但是含有还原性官能团的巯基乙酸对铁闪锌矿和黄铁矿有很好的抑制作用。

Silvestre 等^[35]研究了矿浆中颗粒的分散度对铅锌浮选的影响发现，在铅浮选中使用分散剂并没有提高整体的回收率，该类方法尽管提高了铅

的回收率，但分散剂的存在显著增加了铅精矿中锌的损失，与在自然酸碱度和用石灰调节的酸碱度情况下获得的结果相比，碳酸钠的分散度低，不影响铅的浮选结果。分散剂 3223 和聚丙烯酸钠在锌浮选中特别有效，两种试剂均显著提高了锌的回收率，且不影响精矿质量。

通过上述研究发现，较多学者对铅锌硫化矿浮选调控进行了研究，发现不同的药剂制度对矿浆中存在的难免离子作用不同。筛选效果较佳的无机抑制剂组合、有机抑制剂以及新型无氰抑制剂对铅锌硫化矿浮选分离具有重要意义，众多学者研发的新型无氰抑制剂在未来势必会代替氰化物成为常见的抑制剂。

3.2 浮选工艺对铅锌硫化矿分离的调控

冯其明等^[36]针对经铜离子活化后含有大量捕收剂和起泡剂的某铅锌硫混合硫化矿精矿，采用部分混合浮选工艺。在活性炭脱药、硫化钠和硫酸锌联合抑锌的药剂制度下，获得了较好的浮选指标。

王云等^[37]对某地含银铜铅锌多金属硫化矿进行研究，由于该地区硫化矿易浮且难以分离，并且矿石嵌布粒度不均匀，因此采用优先浮选工艺且利用硫化钠消除次生 Cu^{2+} 的影响。

郑伦等^[38]在进行凡口铅锌矿选择性浮选实验时发现温度是影响硫酸铜活化闪锌矿的重要因素，提高温度有利于增加铜离子在闪锌矿表面的吸附量，提高闪锌矿的活性，但是矿浆温度低于 25 °C 时，即使消耗大量活化剂也难以取得满意的指标。由此可见，矿浆温度也会对浮选指标产生一定的影响。

Grano 等^[39]研究了在研磨介质和研磨过程中吹扫气体对复杂铜铅锌硫化矿浮选行为的影响。结果显示，高铬介质提高了黄铜矿的浮选速度和回收率。而使用高铬介质的同时用氮气吹扫，可以提高黄铜矿的回收率，同时也避免了闪锌矿的活化。

Liang Y 等^[40]采用了一种新的混合浮选工艺，通过新旧混合浮选工艺的对比结果表明，新混合浮选工艺的铅回收率比传统工艺高出 10 个百分点。与传统工艺相比，新工艺可以回收部分氧化铅矿物，提高了铅的回收率，与此同时对锌的浮选指标没有负面影响。从浮选指标、药剂用量和生产成本等几个方面来看，新的整体浮选工艺均优于传统工艺。

通过上述研究发现，难免离子的存在对铅锌硫化矿的浮选指标会产生不利影响，一些学者采

用不同的浮选工艺对浮选进行调控,通过改变浮选工艺以及矿浆环境对矿物浮选分离进行改善,发现调控后获得的浮选指标较佳,这些方法为后续研究者提供了重要的思路。

4 结论及展望

目前,众多研究人员针对矿浆中矿物溶解、药剂解离、流体包裹体释放以及研磨过程引入的难免离子对铅锌硫化矿浮选的影响做了大量的研究。但仍未对有难免离子存在的浮选工艺进行系统的研究,如何调控现场的药剂制度以及减弱难免离子带来的不利影响是现阶段急需解决的重大问题。矿浆中难免离子对铅锌硫化矿的影响主要体现在:

(1) 矿浆中由于矿物自身溶解、流体包裹体释放以及选厂回水中引入的难免离子属于原生离子范畴,在不同 pH 值条件下,这些离子以沉淀物或者络合物的形式吸附在矿物表面,不仅会消耗捕收剂而且还能对矿物起到活化作用,严重影响抑制剂对矿物的抑制作用。

(2) 磨矿体系中引入难免离子属于次生离子的范畴,在不同磨矿介质、环境下对铅锌硫化矿浮选产生较大的影响。虽然陶瓷介质是较好的磨矿介质,但是选厂普遍采用铁介质,消除磨矿介质对硫化铅锌矿的浮选分离的影响对现场浮选工艺具有重大意义。

(3) 如何从源头消除或者减弱矿浆中原生离子的引入仍是未来研究的重要课题。采用添加药剂或者改变浮选工艺的方法对矿浆中的难免离子进行调控是现阶段普遍采用的方法,但仍未真正消除或者减弱难免离子对铅锌硫化矿产生的不利影响。未来的研究应着重于如何解决工业中难免离子的存在带来的一系列不利影响。

参考文献:

- [1] 张长青,芮宗瑶,陈毓川,等.中国铅锌矿资源潜力和主要战略接续区[J].*中国地质*,2013,40(1):248-272.
ZHANG C Q, RUI Z Y, CHEN Y C, et al. The main successive strategic bases of resources for Pb-Zn deposits in China[J]. *Geology of China*, 2013, 40(1):248-272.
- [2] 程倩,王明,万宏民,等.某低品位铅锌矿选矿工艺研究[J].*矿产综合利用*,2021(1):65-71.
CHENG Q, WANG M, WAN H M, et al. Study on mineral processing technology for a low-grade lead-zinc ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(1):65-71.
- [3] 温凯,陈建华.某含银复杂铜铅锌多金属硫化矿浮选试验[J].*矿产综合利用*,2019(6):28-32.

- WEN K, CHEN J H. Experimental study on flotation of copper, lead and zinc polymetallic sulfide ore containing silver[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):28-32.
- [4] 廖诗进,何玉良,岳国利,等.某铅锌矿综合回收工艺技术[J].*矿产综合利用*,2021(3):9-16.
LIAO S J, HE Y L, YUE G L, et al. Comprehensive recovery technology of a lead-zinc ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(3):9-16.
- [5] Xian Yongjun, Wen Shuming, Liu Jian, et al. Discovery of a new source of unavoidable ions in pyrite aqueous solutions[J]. *Mining, metallurgy & exploration*, 2013, 30(2): 117-121.
- [6] Deng Jiushuai, Wen Shuming, Xian Yongjun, et al. New discovery of unavoidable ions source in chalcopyrite flotation pulp: Fluid inclusions[J]. *Minerals Engineering*, 2013, 42.
- [7] Deng Jiu-shuai, Mao Ying-bo, Wen Shu-ming, et al. New influence factor inducing difficulty in selective flotation separation of Cu-Zn mixed sulfide minerals[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2015, 22(2):111-115.
- [8] 邓久帅.黄铜矿流体包裹体组分释放及其与弛豫表面的相互作用[D].昆明:昆明理工大学,2013.
DENG J S. Component release of chalcopyrite fluid inclusions and their interaction with relaxation surfaces[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [9] 魏明安,孙传尧.矿浆中的难免离子对黄铜矿和方铅矿浮选的影响[J].*有色金属*,2008(2):92-95.
WEI M A, SUN C Y. Influence of metal cations in pulp to chalcopyrite and galena floatability[J]. *Non-ferrous metals*, 2008(2):92-95.
- [10] 刘爽,孙春宝,陈秀枝.钙、镁、硫酸根离子对会泽铅锌矿硫化矿浮游性的影响[J].*有色金属(选矿部分)*,2007(2):26-28.
LIU S, SUN C B, CHEN X Z. Effect of Ca^{2+} , Mg^{2+} and SO_4^{2-} on floatability of sulfide mineral of huize leza-zinc ore[J]. *Non-Ferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2007(2):26-28.
- [11] 祁忠旭.铅锌选矿废水对硫化铅浮选的影响研究[J].*矿业研究与开发*,2021,41(1):146-149.
QI Z X. Study on the influence of lead-zinc mineral processing wastewater on lead sulfide flotation[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(1):146-149.
- [12] Guo Bao, Peng Yongjun. The interaction between copper species and pyrite surfaces in copper cyanide solutions[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, 158:85-92.
- [13] Ikumapayi Fatai, Makitalo Maria, Johansson Bjorn, et al. Recycling of process water in sulphide flotation: Effect of calcium and sulphate ions on flotation of galena[J]. *Minerals Engineering*, 2012, 39.
- [14] Bıçak Özlem, Ekmekçi Zafir, Can Metin, et al. The effect of water chemistry on froth stability and surface chemistry of the flotation of a Cu-Zn sulfide ore[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2012, 102-103:32-37.

- [15] Huang Peng, Cao Mingli, Liu Qi. Selective depression of sphalerite by chitosan in differential Pb-Zn flotation[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2013, 122.
- [16] Zhang Q, Xu Z, Bozkurt V, et al. Pyrite flotation in the presence of metal ions and sphalerite[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 1997, 52(2).
- [17] 何发钰, 孙传尧, 宋磊. 磨矿环境对方铅矿和闪锌矿矿浆化学性质的影响[J]. *金属矿山*, 2006(8):30-33.
HE F Y, SUN C Y, SONG L. Study on effect of grinding environment on pulp chemistry of galena and sphalerite[J]. *Metal Mine*, 2006(8):30-33.
- [18] 何发钰, 孙传尧, 宋磊. 磨矿环境对硫化矿物浮选的影响[J]. *中国工程科学*, 2006(8):92-102.
HE F Y, SUN C Y, SONG L. Influence of grinding environment on flotation of sulfide minerals[J]. *Chinese Engineering Science*, 2006(8):92-102.
- [19] 何发钰, 孙传尧, 宋磊. 磨矿介质对方铅矿表面性质和浮选行为的影响[J]. *有色金属*, 2006(3):81-84.
HE F Y, SUN C Y, SONG L. Effects of grinding media on surface properties and flotation behaviour of galena[J]. *Non-ferrous metals*, 2006(3):81-84.
- [20] Wei Y. , Sandenbergh R. F. Effects of grinding environment on the flotation of Rosh Pinah complex Pb/Zn ore[J]. *Minerals Engineering*, 2006, 20(3).
- [21] Bruckard W. J. , Sparrow G J, Woodcock J T. A review of the effects of the grinding environment on the flotation of copper sulphides[J]. *International Journal of Mineral Processing*, 2011, 100(1-2): 1-13.
- [22] 胡岳华, 孙伟, 覃文庆. 方铅矿浮选的机械电化学行为[J]. *中国有色金属学报*, 2002(5):1060-1064.
HU Y H, SUN W, QIN W Q. Mechanics-electrochemistry action in PbS flotation[J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002(5):1060-1064.
- [23] 魏以和, 周高云, 罗廉明. 捕收剂与磨矿环境对铅锌矿浮选的影响[J]. *金属矿山*, 2007(6):34-38.
WEI Y H, ZHOU G Y, LUO L M. Effect of collector and grinding environment on flotation of lead-zinc ore[J]. *Metal Mine*, 2007(6):34-38.
- [24] 覃文庆, 邱冠周, 徐竞, 等. 磨矿过程硫化矿物表面电化学性质及其对浮选的影响[J]. *矿产综合利用*, 1999(3):7-11.
QIN W Q, QIU G Z, XU J, et al. Surface electrochemical properties of sulfide minerals during grinding process and its influence on flotation[J]. *Comprehensive utilization of minerals*, 1999(3):7-11.
- [25] Deng Rong Dong, Liu Quan Jun, Hu Ting, et al. Influence of the addition of depressants during grinding on lead-zinc separation[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 1915.
- [26] 聂梦宇, 韩跃新, 李艳军. 磨矿介质对闪锌矿浮选行为的影响研究[J]. *金属矿山*, 2019(2):163-167.
NIE M Y, HAN Y X, LI Y J. Effects of grinding media on the flotation behaviors of sphalerite[J]. *Metal Mine*, 2019(2):163-167.
- [27] Xie Xian, Hou Kai, Tong Xiong, et al. Experimental research on lead-zinc separation of refractory lead-zinc ore[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 2986.
- [28] 李佳磊, 宋凯伟, 刘殿文, 等. 闪锌矿浮选的活化与去活化研究进展[J]. *过程工程学报*, 2018, 18(1):11-19.
LI J L, SONG K W, LIU D W, et al. Research progress on activation and deactivation of sphalerite flotation[J]. *Chinese Journal of Process Engineering*, 2018, 18(1):11-19.
- [29] 王伊杰, 文书明, 刘建, 等. 铅锌分离中锌矿物的抑制剂和活化剂及作用机理[J]. *矿冶*, 2012, 21(4): 21-25.
WANG Y J , WEN S M, LIU J, et al. Introduction of zinc depressants & activators and their function mechanism in lead-zinc separation [J]. *Mining and Metallurgy*, 2012, 21(4): 21-25.
- [30] 冯忠伟. 富含可溶性盐高硫铅锌矿无碱浮选工艺研究[J]. *金属矿山*, 2009(8):45-48.
FENG Z W. Research on alkali-free flotation process of soluble salt-rich high sulfur lead-zinc ores[J]. *Metal Mine*, 2009(8):45-48.
- [31] 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.
ZHANG X P. Study on the application of new reagents for flotation of lead-zinc oxide ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 1996(3):40-45.
- [32] T·N·赫麦雷娃, 李长根, 崔洪山. 在被铜活化的闪锌矿黄药诱导浮选中亚硫酸氢钠的抑制作用机理[J]. *国外金属矿选矿*, 2007(1):29-36.
T·N·HERMEREVA, LI C G, CUI H S. Inhibition mechanism of sodium bisulfite in flotation induced by copper-activated sphalerite xanthate[J]. *Foreign metal ore beneficiation*, 2007(1):29-36.
- [33] Xie Xian, Hou Kai, Tong Xiong, et al. Experimental research on lead-zinc separation of refractory lead-zinc ore[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 886:55-58.
- [34] CHEN Jian-hua, LI Yu-qiong, LONG Qiu-rong. Molecular structures and activity of organic depressants for marmatite, jamesonite and pyrite flotation[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(10):1993-1999.
- [35] Silvestre M O, Pereira C A, Galery R, et al. Dispersion effect on a lead-zinc sulphide ore flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22(9-10):752-758.
- [36] 冯其明, 周荣. 经铜离子活化后的某铅锌硫混合精矿中闪锌矿的浮选分离研究[J]. *矿冶工程*, 2011, 31(5):32-34.
FENG Q M, ZHOU R. Flotation separation of sphalerite from pb-zn-s bulk concentrate activated by cupric sulfate[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2011, 31(5):32-34.
- [37] 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.
WANG Y, ZHANG L J. Experimental study on mineral processing of complex multi-metals cu-pb-zn sulphide ore[J]. *Non-Ferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2007(6):1-6.
- [38] 郑伦, 张笃, 刘运财. 凡口矿高碱介质中闪锌矿浮选特性研究[J]. *矿冶工程*, 2005(3):37-40.

ZHENG L. ZHANG D, LIU Y C. The study on flotation properties of sphalerite in high alkalinity medium in fankou lead-zinc mine[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2005(3):37-40.

[39] Grano Stephen, Huang Guozhi. Improving the flotation behavior of a sulfide ore by controlling electrochemical

interactions during grinding[J]. ECS Transactions, 2006, 2(3):9-20.

[40] Liang Yi Qiang, Zhang Xu Dong, Zhang Han Ping, et al. Using a new bulk flotation process to enhance the recovery of mineral beneficiation in a lead-zinc sulfide-oxide mixed ore[J]. Advanced Materials Research, 2013, 634-638:3545-3550.

Research Progress on the Effect of Inevitable Ions in Slurry on the Separation of Lead-Zinc Sulfide Ore

XU Hongxiang^{1,2}, PANG Zengrui², LI Quan¹, HU Mingzhen¹, DENG Jiushuai², ZHANG Qian²
(1.Postdoctoral Research Station, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Indium and Tin Resources, Guangxi Huatin Group Co., Ltd., Liuzhou 545200, Guangxi, China; 2.School of Chemistry and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral processing engineering. Some unavoidable ions commonly present in the slurry solution have an important influence on the flotation separation of lead-zinc sulfide ore. The unavoidable ions in the slurry mainly come from the water used in the processing plant, the dissolution of minerals, the dissociation of activators or depressants, and the primary ions introduced by the release of fluid inclusions and the secondary ions introduced during the grinding process. This article summarizes and analyzes the effects on the flotation separation of lead-zinc sulfide ore which is caused by the primary ions introduced in the slurry and the secondary inevitable ions introduced in the grinding system. It is found that both primary ions and secondary ions have obvious effects on the flotation behavior of lead-zinc sulfide ore. And many scholars have done a lot of research on this phenomenon. In this paper, a great breakthrough has been made through the adjustment and control of reagents and changes in the grinding environment. At the same time, this article provides important research ideas for follow-up researchers. The focus of this article is how to integrate the previous research results with the field process significantly, how to eliminate inevitable ions from the source without affecting the industrial economy, The important direction of future research is still how to reduce the influence of inevitable ions on the flotation index from the field process.

Keywords: Mineral processing engineering; Inevitable ions in pulp; Lead-zinc sulfide ore; Flotation separation; Grinding system

(上接第 108 页)

methods. The rocks are characterized by high alkali (average $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ content of 6.26%), potassium ($\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}=1.03$), low TiO_2 (average 0.50%) and quasi-aluminous (aluminum saturation index $A/\text{CNK}=0.933\sim 1.033$, average 0.991) high potassium-calcium-alkaline rock system. Rare earth elements show negative anomalies at Eu, which is the Eu-deficient type, and Ce has weak negative anomalies; trace elements show enrichment of large ion-parental elements Rb, Th, Nd, La and K; high field strength elements Nb, Ba, U, Ta, Ce, Sm and Ti are deficient; reflecting the mixed crust-mantle type of magma origin and the presence of subduction oceanic crustal melting. The zircon LA-ICP-MS U-Pb isotopic age is (345.3 ± 1.8) Ma, and its formation age is Early Carboniferous. The analysis of the regional geological data suggests that this magmatic event is a product of the formation of the northern part of the eastern Gondwana continent after the breakup of the Rodinia supercontinent. The project points go to I-type granite, the discriminant diagrams indicate it's formed from continental island arc, going through time before plate collision to co-collisional orogenic movement, which indicates a long period time of magmatic evolution; the rock geochemical characteristics show the environment of magmatic evolution changed from the start of island arc(primary island arc)-development(early stage island arc)-maturement(full-grown island arc).

Keywords: Earth sciences; LA-ICPMS U-Pb dating; Zircon trace elements; Jiacha; Early Carboniferous; Granitic amphibolite