

复杂伴生矿物多元素综合回收选矿加工技术探索

李渊茂

内蒙古金辉稀矿有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015000

摘要:我国复杂伴生多金属矿资源储量丰富,但价元素嵌布粒度细、共生关系复杂,传统选矿工艺难以实现多元素同步高效回收。本文以典型铅锌银复杂伴生硫化矿为研究对象,基于工艺矿物学深度解析,开发了“选择性磨矿—低碱度优先浮选—分步活化浮选—梯级富集”的全流程协同选矿技术体系。通过系统的条件优化试验与工业分流调试,最终工业应用结果表明,该技术可显著提升铅、锌、银的综合回收水平,同时降低选矿成本与药剂消耗,实现了经济效益与环境效益的协同提升。该技术体系为同类复杂伴生矿产资源的高效清洁利用提供了可复制推广的工程解决方案。

关键词:复杂伴生矿物;多元素综合回收;优先浮选;分步活化;梯级富集

引言:我国矿产资源开发利用长期面临共伴生组分多、共生嵌布复杂的技术瓶颈,大量稀贵金属因无法有效分离而损失于尾矿之中。针对某典型铅锌银硫化矿石,其目的矿物之间结晶粒度悬殊、可浮性差异微弱,常规流程往往偏重主金属回收,伴生元素回收缺乏系统匹配的工艺设计。为此,本研究以工艺矿物学特征为切入点,构建涵盖选择性解离、低碱介质分选、定向活化及多段富集的集成技术路线,并通过全流程条件试验与半工业验证持续优化操作参数。实践表明,该套方案在提升多元素回收指标的同时,显著降低了浮选药剂耗量与磨矿能耗,为破解复杂共生资源多目标回收难题提供了兼具技术可行性与经济合理性的工程范例。

1 矿石性质与工艺矿物学研究

1.1 矿石化学组成分析

试验矿样取自国内大型铅锌银多金属矿床深部采场。化学多元素分析表明,矿石中主要有价元素为铅、锌、银,伴生有可综合回收的镉、铜以及少量铊。脉石组分以二氧化硅、氧化钙、三氧化二铝为主,属于硅酸盐型多金属硫化矿。有害元素砷含量较低,对选矿过程影响有限。矿石中硫含量较高,这一特征既为黄铁矿的综合回收提供了可能,也意味着在锌浮选作业中需要有效抑制黄铁矿的上浮,避免其对锌精矿品质造成不良影响。铅锌两种主金属的品位之和超过8%,属于中等品位的富矿类型,具备良好的综合回收经济价值基础。

1.2 矿物组成与嵌布特征

X射线衍射和光学显微镜鉴定结果表明,矿石中金属矿物主要有方铅矿、闪锌矿、黄铁矿及少量磁黄铁

矿、辉银矿、深红银矿。脉石矿物以石英、方解石、绢云母为主。方铅矿呈不规则粒状或集合体形式产出,常与闪锌矿、黄铁矿形成复杂的交代共生结构。闪锌矿颜色呈浅黄褐色至深褐色,反映了矿石中不同铁含量的变化。嵌布特征观测揭示:方铅矿平均粒度属于中细粒嵌布,粒度分布范围较宽;闪锌矿平均粒度更细,部分微细粒闪锌矿呈包裹体形式赋存于黄铁矿和脉石矿物内部,这部分微细粒闪锌矿在常规磨矿条件下难以实现充分的单体解离,是导致锌回收率难以进一步提升的重要矿物学制约因素。银的赋存状态分析表明,大部分银以类质同象形式赋存于方铅矿晶格中,另有相当比例以微细粒银矿物包裹于闪锌矿内,仅少部分以独立银矿物形式存在^[1]。这种赋存特征决定了银的回收主要依赖于方铅矿和闪锌矿的充分富集,不存在独立的银矿物浮选路径,因此在工艺设计上必须将银的回收融入铅锌浮选流程之中。

1.3 工艺矿物学对选矿方案的制约

基于上述矿物学特征,可得出以下对选矿工艺设计的约束性结论:方铅矿与闪锌矿可浮性差异显著,方铅矿在弱碱性矿浆中天然可浮性优良,而闪锌矿经活化后方可有效上浮,这种可浮性差异决定了本工艺应采取“先铅后锌”的优先浮选路线。闪锌矿细粒嵌布要求适当细磨以实现充分解离,但方铅矿性脆易过粉碎,过细的磨矿会产生大量难以回收的微细粒方铅矿,二者矛盾需要通过选择性磨矿方案予以调和。银的回收必须通过强化方铅矿和闪锌矿的浮选回收来实现梯级富集,即银随方铅矿优先富集于铅精矿,剩余部分随闪锌矿富集于锌精矿,最终在冶炼环节实现银的合并回收。

2 试验材料与研究方法

2.1 矿样来源与制备

试验所用矿样采自矿山井下采场,为保证矿样的代表性和稳定性,采取多点取样法在不同采掘面分别采集后合并混匀。矿样经颚式破碎机破碎至适宜粒度后采用标准筛进行筛分,充分混匀后使用四分法缩分,装入密封袋中备用。实验室小试在严格控制条件下开展,工业分流试验在某选矿厂生产线上进行,试验周期连续稳定运行,以验证实验室条件试验结果在工业规模上的重现性和稳定性。

2.2 试验药剂与仪器设备

主要浮选药剂包括:乙硫氮(捕收剂),其分子结构中的硫代氨基甲酸酯基对方铅矿具有优异的捕收选择性;Y-89 新型黄药(捕收剂),属于改性黄药类捕收剂,对含银矿物具有良好的辅助捕收效果;松醇油(起泡剂),用于调节浮选泡沫层的厚度和稳定性;石灰(pH 调整剂),用于调节矿浆 pH 值;硫酸锌与亚硫酸钠组合抑制剂,两者协同使用可在低碱度条件下有效抑制闪锌矿和黄铁矿;硫酸铜(活化剂),用于活化闪锌矿表面促进其浮选。主要设备包括锥形球磨机、系列单槽浮选机,工业浮选机为充气式浮选机^[2]。

2.3 分析测试方法

化学元素分析采用电感耦合等离子体发射光谱法,可满足复杂矿石中多元素同时精确测定的要求。矿物组成鉴定采用 X 射线衍射仪和偏光显微镜进行矿物相分析和微观结构观测。银的赋存状态采用电子探针微区分析辅助判定。浮选产品经过滤、烘干、称重后制样送检,品位数据取多次平行测定的平均值,相对偏差控制在合理范围内以确保数据的可靠性。

3 核心选矿单元条件优化试验

3.1 选择性磨矿工艺参数优化

针对方铅矿性脆易过粉碎、闪锌矿需细磨才可充分解离的矛盾,开展了磨矿介质与磨矿细度的系统试验。磨矿作业采用锥形球磨机,对比了传统钢球、钢锻组合、混合介质三种方案的磨矿产品粒度特性。结果表明,采用钢锻组合介质时,磨矿产品中过粉碎粒级占比较传统钢球方案显著降低,而有价矿物的单体解离度仍保持在较高水平,这是因为钢锻的研磨作用比钢球更温和,有效减少了方铅矿的过粉碎损失。在确定介质方案的基础上,考察了磨矿细度对后续铅粗选指标的影响。随着磨矿细度提高,铅粗精矿品位和回收率均呈上升趋势,这是因为更细的磨矿使方铅矿单体解离度提高,减

少了连生体进入尾矿的损失。但当磨矿细度超过一定限度后,磨矿能耗显著增加,且微细粒方铅矿在浮选中的损失加剧导致回收率回落。综合品位、回收率与能耗三方面因素,确定最佳磨矿细度范围,在此范围内可以较好地兼顾解离度和回收率。

3.2 铅优先浮选条件优化

在确定的磨矿细度条件下开展铅优先浮选条件优化。首先考察组合抑制剂用量对铅精矿品位及铅锌分离效果的影响。随着抑制剂用量的增加,铅精矿中锌互含逐渐降低,铅回收率先升后降。适量添加组合抑制剂可有效抑制闪锌矿上浮而不影响方铅矿的可浮性,但过量添加则会导致方铅矿受到过度抑制。综合考虑精矿品质与回收率,确定组合抑制剂最佳用量^[3]。在此基础上开展捕收剂用量梯度试验。随着乙硫氮用量增加,铅回收率快速提升后趋于平缓,而铅精矿品位出现轻微下降趋势。综合考虑回收率提升幅度与药剂成本,确定乙硫氮最佳用量。进一步对比了 Y-89 新型黄药与传统丁基黄药的差异,在相同条件下 Y-89 捕收剂方案使铅精矿中银的富集率显著高于丁基黄药方案,表明 Y-89 对含银方铅矿具有更强的选择性捕收能力,这与其分子结构中的特殊官能团对银离子具有较强的螯合作用有关。

3.3 锌矿物分步活化浮选试验

铅浮选尾矿中的闪锌矿因受到组合抑制剂的抑制而丧失天然可浮性,需经硫酸铜活化后方可有效浮选。传统工艺采用一次性加入大量硫酸铜的活化方式,常导致矿浆中铜离子浓度瞬时过高,黄铁矿被非选择性活化而大量上浮,严重恶化锌精矿品质。本研究提出“分步加药、缓慢活化”制度,将总用量分三次按比例在粗选、精选、扫选的搅拌槽中分批加入,每次加药后保证充分反应。对比试验表明,在硫酸铜总用量相同的条件下,分步活化方案使锌精矿品位和作业回收率均明显优于一次性加入方案,同时铅互含大幅降低。分步添加的优势在于避免了矿浆中铜离子浓度瞬时过高导致的非选择性活化,分步加入的铜离子优先吸附于闪锌矿表面,黄铁矿的上浮率显著降低,锌精矿品质得到明显改善。进一步考察硫酸铜总用量对锌浮选的影响,确定最佳总用量。

3.4 全流程开路与闭路试验验证

在单条件试验基础上,按“铅优先浮选—铅尾矿锌浮选”的原则流程进行全流程开路试验。开路试验结果为铅精矿品位和回收率、锌精矿品位和回收率均达到理想水平。银在铅锌精矿中的综合回收率较高,其中铅精

矿中占大部分, 锌精矿中占小部分, 该分布与银的赋存特征基本吻合, 验证了浮选过程中银随载体矿物富集的规律。开路试验通过中矿循序返回转为闭路试验, 闭路流程中各精选尾矿和扫选精矿依次返回至粗选作业。稳定运行后最终指标在开路基础上有所改善, 原因在于中矿循序返回使未解离的连生体有更多机会在循环中完成解离和上浮, 验证了全流程的可行性与稳定性。

4 工业应用与效果评价

4.1 工业分流试验方案

基于实验室闭路试验结果, 在某选矿厂生产线上开展了为期数月的工业分流对比试验。工业试验严格遵循实验室确定的工艺参数, 改造内容主要包括以下四个方面: 磨矿环节将原钢球介质更换为钢锻组合介质, 调整磨机装球量和补球制度以匹配新介质的磨损特性; 浮选药剂制度按照实验室最优方案全面替换, 新增自动加药系统实现药剂用量的精准添加和实时调节, 避免人工加药的波动性; 铅浮选作业采用低碱度条件运行, 替代原高碱度工艺, 低碱度环境不仅降低了石灰用量, 还有利于提高伴生银的浮选活性; 锌浮选作业采用硫酸铜分步活化方案, 改造加药管路使其能够向不同浮选作业的搅拌槽中分别添加活化剂^[4]。

4.2 工业生产指标

连续稳定取样的统计结果表明, 新工艺的铅、锌、银总回收率均较传统工艺有显著提升。铅精矿和锌精矿中互含大幅降低, 两类精矿产品品质均达到国家一级品标准, 解决了传统工艺长期存在的精矿互含超标问题。值得注意的是, 银回收率的提升幅度显著高于铅回收率的提升幅度, 这是因为新型捕收剂对含银方铅矿的选择性捕收能力更强, 使赋存于方铅矿中的银更多地进入了铅精矿而非流失于尾矿。

4.3 经济与环境效益分析

综合选矿成本较传统工艺明显降低。其中药剂成本方面, 新工艺以低毒组合抑制剂替代了原有高毒抑制剂, 以新型捕收剂部分替代传统黄药, 药剂成本显著下降; 磨矿成本因介质更换使钢球单耗降低。以年处理原矿一定规模计, 年新增产值可观, 投资回收期较短, 经济效益十分显著。环保方面, 新工艺完全替换了原有高毒抑制剂, 选矿废水中化学需氧量和重金属离子浓度显著降低, 大幅减轻了废水处理的负担。尾矿中有价金属品位明显降低, 尾矿可作为水泥生产用辅料实现资源化利用, 尾矿排放量减少。整个工艺的清洁生产水平显著提升, 为矿山通过绿色矿山评估验收提供了有力的技术支撑。

5 结论

(1) 工艺矿物学研究表明, 该矿石中铅、锌、银为主要回收元素, 方铅矿与闪锌矿嵌布粒度不均、共生密切。大部分银以类质同象赋存于方铅矿晶格中, 相当比例以微细粒银矿物包裹于闪锌矿内, 银的回收依赖于铅锌矿物的充分富集, 不存在独立的银矿物浮选路径。(2) 选择性磨矿采用钢锻组合介质, 在适宜磨矿细度下可有效降低过粉碎率, 调和方铅矿过粉碎与闪锌矿充分解离之间的矛盾。铅优先浮选在低碱度条件下采用组合抑制剂和选择性捕收剂, 可实现铅与锌的高效分离。锌浮选采用硫酸铜分步活化方案, 可有效提升锌精矿品位并抑制黄铁矿上浮。(3) 工业应用表明, 该技术体系可显著提升铅、锌、银的综合回收率, 精矿产品品质优良。该工艺药剂消耗低、环境负荷小、指标改善显著, 选矿成本较传统工艺明显降低, 对同类复杂伴生矿的高效清洁利用具有重要的推广价值。后续可进一步探索智能化控制在浮选流程中的应用, 以及尾矿高值化利用的技术路径, 持续提升复杂伴生矿产资源的综合利用水平。

结束语

复杂伴生矿物的多元素综合回收是提升我国矿产资源利用效率的关键技术方向。本文针对典型铅锌银复杂伴生硫化矿, 基于工艺矿物学系统分析, 构建了以选择性磨矿、低碱度优先浮选、分步活化浮选为核心的协同选矿技术体系, 并通过工业应用验证了其有效性。实践表明, 只有深刻把握矿石性质的矿物学约束, 将多元素视为统一系统进行全流程统筹设计, 才能在保证主金属回收的同时实现伴生元素的高效富集。该技术思路对同类复杂矿产资源开发具有一定的普适性借鉴意义, 后续应持续向智能化控制和选冶全链条协同方向深化, 推动复杂矿产资源综合利用水平迈上新台阶。

参考文献

- [1] 李美荣, 李波, 梁冬云, 等. 复杂多组分锂矿中羟磷锂铝石的矿物学特性与可选性分析 [J]. 有色金属 (选矿部分), 2026(3):56-67.
- [2] 周立辉, 刘朔宇, 宋斌燕. 石洞沟超贫钽铌磁铁矿绿色精准分选及多元素梯级回收试验 [J]. 现代矿业, 2025, 41(11):75-79.
- [3] 崔立凤, 田树国. 西藏某复杂铜矿石工艺矿物学研究 [J]. 矿业工程, 2025, 23(3):65-69, 79.
- [4] 黄孝振, 梁东东, 谭钢, 等. 蒙古国某含银复杂铜铅锌多金属矿浮选试验研究 [J]. 中国资源综合利用, 2026, 44(2):4-10.