第 9 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

药剂制度优化对铜铅锌硫金银伴生矿浮选回收率的提升研究

陈忠　郑宇光
鹤庆北衙矿业有限公司
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2499

[摘　要] 本文依托矿山现场生产实际,采用“铜铅混合浮选—锌硫混合浮选—铜铅精准分离—锌硫精准分离”的两段混浮、分步分选工艺路线,聚焦各浮选作业药剂体系调整。通过逐段调试捕收剂、抑制剂、活化剂的选型、单耗用量及配伍比例,改良矿浆浮选环境。矿石中伴生金、银主要依托铜矿物实现定向富集,最终留存于铜精矿产品中,提升二者综合回收率。
[关键词] 铜铅锌硫伴生矿；药剂优化；混合浮选
中图分类号：R94　文献标识码：A

Study on Improving Flotation Recovery of Copper–Lead–Zinc–Sulfur Ore Associated with Gold and Silver by Reagent System Optimization

Zhong Chen　Yuguang Zheng
Heqing Beiya Mining Co., Ltd.

[Abstract] Based on actual mining site operations, this study employs a two-stage mixed flotation and sequential separation process – comprising "copper–lead mixed flotation – zinc–sulfur mixed flotation – precise copper–lead separation –precise zinc–sulfur separation"–with a focus on optimizing the chemical reagent systems used in each flotation stage. By progressively optimizing the selection, dosage, and compatibility ratios of collectors, inhibitors, and activators at each stage, the flotation conditions of the ore slurry are improved. The associated gold and silver in the ore are primarily subjected to targeted enrichment through copper minerals, with the resulting metals ultimately retained in the copper concentrate, thereby increasing the overall recovery rate of both metals.
[Key words] copper-lead-zinc-sulfur associated ore; reagent optimization; bulk flotation

引言

铜铅锌硫复合型多金属伴生矿是国内有色金属选矿行业重点开发利用的矿产资源,此类矿石普遍伴生金、银贵金属,具备极高利用价值。通过针对性优化各作业药剂组合方案与工艺参数,削弱多金属矿物间的浮选干扰作用,强化金银贵金属随铜矿物定向富集效果,提升铜、铅、锌、硫主金属及伴生金银的回收率。

1 矿石性质与生产现状

1.1矿石物化性质

本次试验矿样取自国内某有色金属矿山铜铅锌硫金银伴生矿,矿石中主要有价矿物包含黄铜矿、方铅矿、闪锌矿、黄铁矿,伴生贵金属以自然金、角银矿为主,脉石矿物主要为石英、长石、方解石,杂质组分简单。经工艺矿物学系统检测,该原矿铜品位0.68%、铅品位1.42%、锌品位2.35%、硫品位8.62%,含金0.21g/t、含银12.56g/t[1]。矿物嵌布观测结果显示,黄铜矿与方铅矿紧密共生、嵌布均匀,可浮性高度重合；闪锌矿与黄铁矿多呈相互包裹状态,细粒级占比偏高；金银贵金属大多赋存于黄铜矿晶格内部及矿物裂隙中,仅有少量附着于方铅矿表面,几乎不富集在锌、硫精矿内。

1.2原生产工艺及存在问题

一是铜铅浮选作业所用抑制剂选择性较差,对闪锌矿、黄铁矿的抑制效果不彻底；二是锌硫浮选阶段活化剂选型单一、用量匹配不合理,出现闪锌矿活化不充分、黄铁矿过度活化的问题,增加后续锌硫分离难度；三是各浮选作业仅采用单一捕收剂,针对性不足,无法捕捉微细粒金银矿物,贵金属流失量大；四是药剂配比与混浮－分选工艺适配度低,各作业浮选选择性、矿物富集效率失衡,整体生产指标波动较大。

2 试验工艺流程与技术路线

2.1核心工艺流程

原矿经过磨矿分级处理后,进入铜铅混合粗选作业,经两次精选得到高品位铜铅混合精矿；铜铅混浮尾矿送入锌硫混合浮选工序,通过粗选+两次精选获得锌硫混合精矿；分别对

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

铜铅、锌硫混合精矿开展脱药预处理,再进行分步分选,最终得到铜精矿、铅精矿、锌精矿、硫精矿四种合格产品,伴生金银全部富集于铜精矿中,实现多元素协同回收。

2.2技术路线

首先完成原矿取样与工艺矿物学检测,摸清矿石特性与原有工艺短板;其次梳理原有药剂体系的适配缺陷,针对性制定分段优化方案；随后分别开展铜铅混浮、锌硫混浮、铜铅分离、锌硫分离的药剂单因素梯度试验,确定最优药剂选型、用量及配比；完成小试参数优化后,导入生产线开展工业调试,逐步稳定生产参数;最后统计长期生产数据,对比分析药剂优化前后的回收率、精矿品位指标变化,形成适配现场优化方案[2]。

2.3浮选工艺流程

原矿→磨矿处理(磨矿细度-0.074mm占比85%)→分级机筛分→铜铅混浮粗选(投加复合捕收剂、复合抑制剂、起泡剂)→两次铜铅混浮精选→铜铅混合精矿(待分选)；铜铅混浮尾矿→锌硫混浮粗选(投加活化剂、捕收剂、pH调整剂)→两次锌硫混浮精选→锌硫混合精矿(待分选)；铜铅混合精矿→活性炭脱药预处理→铜铅分离粗选+精选→铜精矿、铅精矿；锌硫混合精矿→酸调脱药预处理→锌硫分离粗选+精选→锌精矿、硫精矿。

3 浮选药剂制度优化试验

3.1铜铅混合浮选药剂优化

本次优化采用复合捕收剂搭配选择性复合抑制剂的全新药剂体系,适配现场浮选工况。捕收剂优化方面,采用丁基黄药与乙硫氮复配模式,经过多组现场梯度试验验证,确定粗选最优药剂单耗为丁基黄药45g/t、乙硫氮25g/t,相较于原有单一药剂制度,铜铅粗选矿物富集率提升3%以上,微细粒金银上浮率提升效果尤为显著；抑制剂改用硫酸锌+亚硫酸钠复合抑制剂组合,试验确定最优用量为硫酸锌180g/t、亚硫酸钠120g/t；起泡剂统一选用2#油,固定单耗30g/t,可稳定矿浆泡沫形态;矿浆pH值优化将铜铅混浮阶段矿浆pH稳定控制在9.0~9.5的弱碱性区间,充分发挥复合抑制剂的选择性抑制效果,为金银贵金属定向富集创造稳定的矿浆环境。

3.2锌硫混合浮选药剂优化

锌硫混合浮选主要处理铜铅混浮后的尾矿,核心任务是充分回收尾矿中残留的闪锌矿、黄铁矿,最大限度挖掘尾矿残余资源价值。本次活化剂选用硫酸铜作为专属活化剂,替代原有混杂活化体系,可精准激活闪锌矿表面活性位点,同时对黄铁矿的活化作用温和,从源头降低后续锌硫分离难度。捕收剂选用适配细粒级锌硫矿物的戊基黄药,单耗控制为50g/t；投加适量石灰调节矿浆环境,抑制脉石杂质上浮,石灰单耗800g/t。作业过程中将矿浆pH稳定控制在10.0~10.5。优化后,锌硫混浮作业的尾矿金属流失率降低,锌硫矿物综合富集率提升5%以上,尾矿资源利用率提高。

3.3铜铅分离药剂优化

预处理阶段投加60g/t活性炭,对铜铅混合精矿进行脱药处理,彻底清除矿物表面残留的混浮药剂,消除药剂残留带来的浮选干扰,从根本上提升分选精准度。分离作业摒弃传统剧毒氰化钠抑制剂,选用绿色高效的EF1301作为方铅矿专属抑制剂,药剂选择性极强,可精准抑制方铅矿上浮,同时完整保留黄铜矿浮选活性,最优单耗为100g/t[3]；捕收剂选用Z-200选择性捕收剂,仅对铜矿物产生捕收作用,单耗35g/t,实现铜矿物优先高效上浮、铅矿物稳定抑制。

3.4锌硫分离药剂优化

首先采用硫酸对锌硫混合精矿进行预处理,硫酸单耗120g/t,用于中和矿浆内残留的碱性药剂,彻底解除闪锌矿的过度抑制状态,恢复其浮选活性。分选作业以石灰作为黄铁矿专属抑制剂,将用量精准控制在1200g/t,既能稳定抑制黄铁矿上浮,又可避免影响闪锌矿浮选;补加30g/t硫酸铜对残余未活化闪锌矿进行二次活化,搭配25g/t丁基黄药捕收锌矿物。全程将矿浆pH稳定在11.0左右,保障锌矿物高效上浮、硫矿物充分抑制。

4 工业应用与生产效果分析

4.1主金属精矿回收指标对比

药剂制度优化前后四类主金属精矿的品位、回收率数据对比清晰。优化后,铜精矿品位由18.26%提升至20.12%,浮选回收率从82.35%提升至86.61%,累计提升4.26%；铅精矿品位由61.35%提升至63.88%,回收率由81.62%提升至85.47%,提升3.85%；锌精矿品位由45.62%提升至48.95%,回收率由78.26%提升至83.38%,提升5.12%；硫精矿品位由42.18%提升至45.36%,回收率由75.33%提升至80.01%,提升4.68%。

从数据变化规律可以看出,优化后的复合药剂体系与两段混浮、分步分离工艺高度适配,各作业药剂针对性、选择性大幅提升,彻底解决了多金属矿物相互干扰、分选不彻底、精矿互含率高的现场难题,提升各类精矿产品品级的同时,减少了主金属尾矿流失。其中锌回收率提升幅度最为明显,核心原因是本次优化解决了原有工艺闪锌矿活化不足、过度抑制的痛点[4]。

4.2金银贵金属回收指标对比

优化后,矿石中的金、银全部稳定富集于铜精矿中,不再分散留存于尾矿及其他精矿产品内。现场生产数据统计显示,优化后铜精矿金品位由6.85g/t提升至7.92g/t,金回收率由76.28%提升至82.59%,提升6.31%；银品位由1025.36g/t提升至1186.25g/t,银回收率由74.15%提升至79.94%,提升5.79%。

表1　药剂制度优化前后金银回收指标对比

项目	铜精矿金品位/(g·t⁻¹)	铜精矿银品位/(g·t⁻¹)	金总回收率/%	银总回收率/%	金银主要赋存位置	金银损失主要去向
优化前	6.85	1025.36	76.28	74.15	铜精矿为主,少量进入铅精矿、尾矿	微细粒金银随尾矿流失,部分解离金银混入铅精矿
优化后	7.92	1186.25	82.59	79.94	几乎全部富集于铜精矿	仅极少量微细颗粒进入尾矿,铅精矿金银占比显著下降
变化差值	1.07	160.89	6.31	5.79	—	尾矿贵金属损失占比下降7.12%

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

相较于铜、铅、锌、硫主金属，金银回收率提升幅度更大。优化后的复配捕收剂可高效捕捉微细粒金银矿物，稳定分段浮选体系避免了金银矿物在分选过程中脱落、流失，盘活了伴生贵金属资源。

4.3生产稳定性与经济性分析

整套优化工艺投入工业应用以来，生产线运行状态平稳，未出现泡沫紊乱、跑槽、精矿品位大幅波动、药剂积底等异常工况，药剂适配性与工艺稳定性良好。药剂成本方面，虽然新增部分复合药剂、调整药剂配比，但通过精准管控各作业药剂单耗、杜绝过量投加、减少药剂无效损耗，每吨原矿的综合药剂成本仅增加0.82元。相较于有价金属与贵金属回收增量带来的经济收益，药剂增量成本极低，投入产出效益十分可观。

5 结论

针对该矿山铜铅锌硫金银伴生矿矿物嵌布复杂、多矿物可浮性相近、分选难度大、贵金属易分散流失的生产特点，采用“铜铅混合浮选—锌硫混合浮选—铜铅分离—锌硫分离”的两段混浮、分步分选工艺，搭配精细化分段药剂优化体系，可实现四类主金属精矿与金银贵金属的协同高效回收，工艺适配现场工况、生产稳定性强。各作业药剂优化方案针对性极强，实操效果突出，彻底解决了多金属矿物分选混杂的现场痛点。

[参考文献]

[1]郑海雷,高起方,叶小璐,等.某低品位金银铜铅锌铁多金属硫化矿工艺矿物学研究及综合回收工艺验证[J].矿业研究与开发,2026,46(3):255-264.

[2]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.

[3]张军庆,吴斌杰,柏杨,等.新型二硫代磷酸盐在铜铅锌多金属硫化矿中的应用研究[J].有色金属(选矿部分),2025,(1):131-138.

[4]郑思勇,安昌,戚华强,等.某铜锌硫多金属硫化矿高效分离浮选试验研究[J].中国矿业,2023,32(3):118-124.

作者简介：

陈忠(1990--),男,汉族,云南保山人,本科,选矿工程师(中级),研究专业方向：矿物加工工程(浮选：铜铅锌硫浮选工艺)。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.