

磨矿参数优化对复杂多金属铜矿分选指标影响

王朝敏

云南黄金集团香格里拉市云矿红牛矿业有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v8i5.2307

[摘要] 多金属铜矿因矿物嵌布细、共生关系密切,分选效率受磨矿工艺制约显著。本文以云南某矽卡岩型复杂多金属铜矿为研究对象,采用单因素试验与正交试验相结合的方法,系统探究磨矿浓度、磨矿时间、介质充填率及球径对比对磨矿产品粒度、铜矿物单体解离度及后续浮选指标的影响规律。结果表明:磨矿参数存在最优组合,当磨矿浓度68%、磨矿时间12min、介质充填率45%、球径配比($\phi 60\text{mm}:\phi 40\text{mm}:\phi 20\text{mm}$)3:4:3时,磨矿产品-0.074mm含量达72.3%,铜矿物单体解离度提升至89.6%;后续浮选试验中,铜精矿品位达24.71%,铜回收率较原工艺提升6.82个百分点,伴生金、银回收率分别提高5.35%和4.78%。研究证实,科学优化磨矿参数可实现矿物高效解离与分选指标协同提升,为复杂多金属铜矿高效开发提供技术支持^[1]。

[关键词] 复杂多金属铜矿;磨矿参数优化;单体解离度;分选指标;浮选效率

中图分类号: P578.2+5 文献标识码: A

Influence of Grinding Parameter Optimization on Separation Indicators of Complex Polymetallic Copper Ores

Chaomin Wang

Yunnan Gold Group Shangri-La Yunkuang Hongniu Mining Co., Ltd.

[Abstract] For polymetallic copper ores characterized by fine mineral dissemination and intimate symbiotic associations, separation efficiency is significantly constrained by the grinding process. Taking a skarn-type complex polymetallic copper ore in Yunnan as the research subject, this study systematically investigates the effects of grinding concentration, grinding time, medium filling rate, and ball size ratio on the particle size of ground products, the degree of monomer dissociation (DMD) of copper minerals, and subsequent flotation performance via a combination of single-factor experiments and orthogonal experiments. The results demonstrate that an optimal set of grinding parameters exists: when the grinding concentration is 68%, grinding time is 12 minutes, medium filling rate is 45%, and ball size ratio ($\phi 60\text{mm}:\phi 40\text{mm}:\phi 20\text{mm}$) is 3:4:3, the content of the -0.074mm fraction in the ground product reaches 72.3%, and the DMD of copper minerals is enhanced to 89.6%. In the subsequent flotation tests, the copper concentrate grade achieves 24.71%, the copper recovery rate is 6.82 percentage points higher than that of the original process, while the recovery rates of associated gold and silver are improved by 5.35% and 4.78% respectively. This research verifies that the scientific optimization of grinding parameters can realize the synergistic improvement of efficient mineral dissociation and separation indicators, thereby providing technical support for the efficient development of complex polymetallic copper ores.

[Key words] complex polymetallic copper ore; grinding parameter optimization; degree of monomer dissociation (DMD); separation indicator; flotation performance

前言

我国铜矿资源储量丰富,但约70%以上为复杂多金属铜矿,这类矿石具有矿物组成复杂、嵌布粒度细、共生关系密切等特点。磨矿工艺作为矿物解离的关键环节,其核心目标是将矿石破碎至适宜粒度,实现目的矿物单体解离或富集体解离,同时避免

过磨导致的矿泥化。磨矿参数设置不当,会引发解离不充分导致分选效率低下,或过度磨矿降低精矿品位等问题。

当前,我国复杂多金属铜矿选矿厂普遍存在磨矿参数凭经验设定、针对性优化不足的问题,导致选矿流程能耗高、资源利用率低,部分矿山铜回收率仅65%-75%,远低于国际先进水平。随

着高品位易处理铜矿资源日益枯竭,开发利用低品位复杂多金属铜矿成为保障我国铜资源供给的必然选择。因此,系统开展磨矿参数优化研究,揭示其对分选指标的影响机制,建立科学的磨矿参数体系,对提升资源回收率、降低选矿成本具有重要理论价值与工程意义。

国外磨矿参数优化研究起步早,形成了完善的理论与实践方法,如Bond功指数理论、Amelunxen等的响应面法回归模型,芬兰奥托昆普公司的智能磨矿控制系统更使铜矿石分选效率提升8%~10%。国内学者也开展了大量针对性研究,通过正交试验、数值模拟与试验结合等方法,在部分矿山实现了解离度和回收率的提升。但现有研究多聚焦于单一矿物或简单多金属矿,针对矿物嵌布关系极复杂的铜矿,缺乏多参数协同影响的系统研究,且部分成果与工业实际脱节,亟需结合具体矿石特性,开展磨矿参数优化试验,为工业生产提供切实可行的技术方案。

1 研究内容与技术路线

1.1 研究内容

(1)分析试验矿样的矿物组成、嵌布特征及可磨性,明确磨矿工艺的技术难点;(2)通过单因素试验,分别探究磨矿浓度、磨矿时间、介质充填率及球径对比对磨矿产品粒度与铜矿物单体解离度的影响规律;(3)基于单因素试验结果,设计正交试验优化磨矿参数组合,确定最优参数区间;(4)通过浮选验证试验,评估最优磨矿参数对分选指标(精矿品位、回收率)的提升效果。

1.2 技术路线

试验矿样采集与制备→矿石特性分析(矿物组成、嵌布特征、可磨性测试)→单因素磨矿试验(浓度、时间、充填率、球径配比)→磨矿产品性能检测(粒度分布、单体解离度)→正交磨矿试验优化参数组合→最优参数下浮选验证试验→分选指标对比分析→结论与展望。

2 试验原料与研究方法

2.1 试验矿样

试验矿样取自云南某复杂多金属铜矿,矿石类型为矽卡岩型,主要金属矿物包括黄铜矿、黄铁矿、闪锌矿、方铅矿,脉石矿物以石榴子石、透辉石、绿泥石为主。通过X射线衍射分析与化学多元素分析,确定矿石主要化学成分:Cu 1.27%、Fe 8.35%、S 12.42%、Pb 0.89%、Zn 1.32%、Au 1.56g/t、Ag 32.4g/t、SiO₂28.63%、CaO 15.72%、MgO 6.84%,其他成分13.06%。

矿物嵌布特征分析表明,铜矿物主要以黄铜矿形式存在,嵌布粒度较细,主要为细粒(0.01~0.1mm)和微细粒(<0.01mm)嵌布,与黄铁矿、闪锌矿呈共生关系,部分黄铜矿包裹于脉石矿物中,形成包裹体嵌布,单体解离难度较大。矿石可磨性试验采用Bond球磨功指数测定法,测得矿石Bond功指数为12.8kWh/t,属于中等可磨性矿石。

矿样制备过程:将采集的原矿破碎至-10mm,采用四分法缩分,选取20kg矿样作为试验原料,存放于干燥通风环境中备用,试验前将矿样进一步破碎至-3mm,确保入磨粒度均匀。

2.2 试验设备与药剂

2.2.1 试验设备

主要试验设备包括:XMΦ240×300锥形球磨机(长沙矿冶研究院)、MS2000激光粒度分析仪(英国马尔文仪器公司)、MLA650矿物解离度分析仪(澳大利亚FEI公司)、XFD-1.5L单槽浮选机(长春探矿机械厂)、电子天平(精度0.001g,梅特勒-托利多仪器有限公司)、鼓风干燥箱(101-3型,北京科伟永兴仪器有限公司)等。

2.2.2 试验药剂

浮选试验所用药剂均为工业级常规药剂:捕收剂为丁基黄药(纯度≥90%),起泡剂为2#油(松醇油,纯度≥85%),调整剂为石灰(CaO含量≥92%),抑制剂为氰化钠(NaCN含量≥98%),药剂均由河南某选矿药剂厂提供。

2.2.3 试验方法

(1)单因素磨矿试验。单因素试验设定变量为磨矿浓度、磨矿时间、介质充填率、球径配比,其余参数固定(固定条件:磨机转速60r/min,介质总质量5kg,入磨矿样质量1kg),每个变量设置5个水平。磨矿浓度水平为60%、64%、68%、72%、76%;磨矿时间水平为6min、9min、12min、15min、18min;介质充填率水平为35%、40%、45%、50%、55%;球径配比(φ60mm:φ40mm:φ20mm)水平为1:5:4、2:4:4、3:4:3、4:3:3、5:2:3。试验步骤:按设定参数称取矿样与水,放入球磨机中,加入对应规格与质量的钢球,启动磨机进行磨矿;磨矿结束后,将矿浆全部导出,采用激光粒度分析仪测定-0.074mm粒级含量,通过MLA650分析仪检测铜矿物单体解离度^[2]。(2)正交磨矿试验。基于单因素试验结果,选取各因素最优水平区间,设计L₉(3⁴)正交试验,探究四因素三水平的协同影响。磨矿浓度水平为66%、68%、70%;磨矿时间水平为10min、12min、14min;介质充填率水平为42%、45%、48%;球径配比(φ60mm:φ40mm:φ20mm)水平为2:4:4、3:4:3、4:3:3。以-0.074mm含量与铜矿物单体解离度为评价指标,确定最优参数组合。(3)浮选验证试验。选取正交试验得出的最优磨矿参数与原生产参数(磨矿浓度62%、磨矿时间10min、介质充填率40%、球径配比2:4:4)进行对比,开展浮选验证试验。浮选流程采用一次粗选、两次精选、一次扫选的闭路流程,药剂制度:粗选石灰用量1500g/t,丁基黄药用量120g/t,2#油用量40g/t;精选石灰用量500g/t,丁基黄药用量30g/t,2#油用量10g/t;扫选丁基黄药用量50g/t,2#油用量20g/t。浮选结束后,分别收集精矿、尾矿,烘干、称重并化验品位,计算铜回收率及伴生金、银回收率^[3]。(4)检测与分析方法。粒度分析采用激光粒度分析仪,测试范围0.02~2000μm,每个样品测试3次,取平均值;单体解离度检测通过将磨矿产品制成光片,采用MLA650矿物解离度分析仪,统计铜矿物单体颗粒占总铜矿物颗粒的比例;化学分析采用原子吸收分光光度计测定铜、铅、锌品位,火试金法测定金、银品位。

3 试验结果与分析

3.1 单因素磨矿试验结果与分析

3.1.1 磨矿浓度的影响

磨矿浓度是影响磨矿效率的关键参数,其通过改变矿浆黏度影响钢球冲击与研磨效果。固定磨矿时间12min、介质充填率45%、球径配比3:4:3的条件下,随着磨矿浓度从60%提升至68%,-0.074mm含量从58.2%增至71.8%,铜矿物单体解离度从72.3%提升至88.7%。这是因为在适宜浓度范围内,矿浆黏度适中,钢球的冲击能量能有效传递至矿石颗粒,研磨效率提升;当浓度超过68%后,矿浆黏度显著增大,钢球运动阻力增加,冲击与研磨效果减弱,-0.074mm含量与解离度均呈下降趋势。因此,磨矿浓度的最优区间为66%-70%。

3.1.2 磨矿时间的影响

固定磨矿浓度68%、介质充填率45%、球径配比3:4:3的条件下,磨矿时间在6-12min范围内,-0.074mm含量与铜单体解离度均随时间延长呈快速上升趋势,当时间达到12min时,-0.074mm含量达72.1%,解离度达89.2%;12min后,随着时间继续延长,-0.074mm含量增长速率放缓,而解离度基本趋于稳定,同时矿浆中-0.01mm矿泥含量从3.2%增至6.8%,出现过磨现象。这是因为延长磨矿时间可促进矿物解离,但超过临界时间后,主要作用变为颗粒细化而非解离,反而产生大量矿泥。因此,磨矿时间最优区间为10-14min。

3.1.3 介质充填率的影响

介质充填率决定钢球在磨机内的运动状态,直接影响冲击次数与研磨面积。固定磨矿浓度68%、磨矿时间12min、球径配比3:4:3的条件下,充填率从35%增至45%时,-0.074mm含量从61.5%提升至72.3%,解离度从75.6%提升至89.5%;当充填率超过45%后,钢球运动空间减小,相互碰撞概率增加,有效冲击能量降低,磨矿效率下降,-0.074mm含量与解离度均有所降低^[4]。因此,介质充填率最优区间为42%-48%。

3.1.4 球径配比的影响

球径配比通过改变钢球的冲击强度与研磨效率,适配不同粒度矿石的破碎需求。固定磨矿浓度68%、磨矿时间12min、介质充填率45%的条件下,当球径配比为3:4:3($\phi 60\text{mm}:\phi 40\text{mm}:\phi 20\text{mm}$)时,-0.074mm含量与解离度均达到最大值,分别为72.5%和89.8%。大球($\phi 60\text{mm}$)主要负责破碎粗颗粒矿石,中球($\phi 40\text{mm}$)承担中间破碎任务,小球($\phi 20\text{mm}$)则负责细磨与解离,合理的配比可实现不同粒度颗粒的阶梯式破碎,提升磨矿均匀性;而大球比例过高会导致细颗粒研磨不足,小球比例过高则会降低粗颗粒破碎效率。因此,最优球径配比为3:4:3左右。

3.2 正交磨矿试验结果与分析

根据单因素试验确定的最优区间,设计 $L_9(3^4)$ 正交试验,以-0.074mm含量和铜矿物单体解离度为评价指标,通过极差分析确定各因素对评价指标的影响显著性。结果显示,对-0.074mm含量的影响程度从大到小依次为:磨矿时间>磨矿浓度>球径配比>介质充填率;对铜矿物单体解离度的影响程度从大到小依次为:球径配比>磨矿时间>介质充填率>磨矿浓度。

正交试验最优组合为磨矿浓度68%、磨矿时间12min、介质充填率45%、球径配比3:4:3($\phi 60\text{mm}:\phi 40\text{mm}:\phi 20\text{mm}$),在此条件

下,磨矿产品-0.074mm含量达72.3%,铜矿物单体解离度达89.6%,较单因素试验最优水平进一步提升,表明多参数协同优化可实现磨矿效果的最大化。

3.3 浮选验证试验结果与分析

采用正交试验确定的最优磨矿参数与原生产参数进行浮选对比试验,结果显示:最优磨矿参数下,铜精矿品位达24.71%,较原参数提升2.35个百分点;铜回收率达82.46%,较原参数提升6.82个百分点。同时,伴生金、银回收率分别从75.32%和68.45%提高至80.67%和73.23%,提升效果显著^[5]。

分析认为,最优磨矿参数实现了铜矿物的充分解离,减少了连生体对分选的影响,使浮选过程中目的矿物与药剂的作用更充分;同时有效控制了过磨现象,降低了矿泥对浮选体系的干扰,从而实现了精矿品位与回收率的协同提升。而原生产参数因磨矿浓度偏低、磨矿时间不足,导致铜矿物解离不充分,连生体含量较高,分选过程中脉石矿物难以有效脱除,最终影响分选指标。

4 结语

综上,本文针对云南某矽卡岩型复杂多金属铜矿的矿物嵌布细、共生关系密切等特性,通过单因素与正交试验相结合的方法,系统探究了磨矿浓度、时间、介质充填率及球径对比对磨矿产品性能与分选指标的影响。研究明确了各磨矿参数的最优区间及协同作用规律,确定了68%磨矿浓度、12min磨矿时间、45%介质充填率、3:4:3球径配比的最优组合,使铜矿物单体解离度达89.6%,后续浮选铜精矿品位与回收率显著提升,伴生金、银回收率同步改善。该研究验证了科学优化磨矿参数对复杂多金属铜矿高效分选的关键作用,解决了传统经验化参数导致的解离不充分、过磨等问题,为同类矿石的磨矿工艺优化提供了可靠的试验方法与技术参考^[6]。未来可进一步结合工业生产实际,开展磨矿-浮选全流程动态优化研究,推动技术成果的工程化应用,助力矿产资源高效绿色开发。

[参考文献]

- [1]姚钰昀,付博.计算化学在黄铜矿浮选中应用的研究进展[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(11):4135-4150.
- [2]黄子杰,孙伟,高志勇.磨矿对矿物表面性质和浮选行为的影响[J].中国有色金属学报,2019,29(11):2671-2680.
- [3]张小龙.磨矿介质对黄铜矿和黄铁矿磨矿及浮选行为的影响[D].东北大学,2020.
- [4]汪聪,邓建,肖庆飞,等.磨矿介质形状对铜硫浮选分离的影响[J].中国有色金属学报,2024,34(2):573-585.
- [5]董继发,方建军,何海洋,等.云南东川某高锌难选铜锌硫化矿石选矿试验研究[J].矿产保护与利用,2021,41(5):97-104.
- [6]聂琦蔚,阮华东.江西某铜矿铜硫分离浮选试验研究[J].矿业研究与开发,2019,39(3):29-32.

作者简介:

王朝敏(1990--),男,汉族,云南文山山人,本科,冶金工程、选矿与矿物加工工程师,工作单位:云南黄金集团香格里拉市云矿红牛矿业有限公司,一直从事选矿方面的工作。