

## 复杂难选铜矿的浮选工艺优化及工业实践

侯君一

新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队, 新疆 哈密 839000

**[摘要]**文章针对复杂难选铜矿, 首先系统分析其矿石组成、结构构造及矿物共生关系等特性, 进而从高效选择性捕收剂、组合调整剂以及阶段磨选、分支浮选等流程设计方面全面优化选矿工艺, 并结合工业实践案例详细说明技术改进措施与实施效果。生产数据表明, 优化后铜回收率提高超过 5 个百分点, 精矿品位提升显著, 有效推动了资源的高效利用, 为同类难处理铜矿的开发提供了可靠的技术借鉴, 具有重要的经济和社会价值。

**[关键词]**复杂难选铜矿; 浮选工艺; 工艺优化; 工业实践; 资源利用率

DOI: 10.33142/ucp.v2i6.18572

中图分类号: TD952

文献标识码: A

## Optimization of Flotation Process and Industrial Practice for Complex and Difficult to Select Copper Ore

HOU Junyi

Hami Geological Brigade of Xinjiang Uygur Autonomous Region Geological Bureau, Hami, Xinjiang, 839000, China

**Abstract:** This article focuses on complex and difficult to select copper mines. Firstly, the characteristics of ore composition, structural structure, and mineral symbiosis are systematically analyzed. Then, the beneficiation process is comprehensively optimized from the aspects of high-efficiency selective collectors, combination adjusters, stage grinding and separation, branch flotation and other process designs. Combined with industrial practice cases, the technical improvement measures and implementation effects are explained in detail. Production data shows that the optimized copper recovery rate has increased by more than 5 percentage points, and the concentrate grade has significantly improved, effectively promoting the efficient utilization of resources and providing reliable technical references for the development of similar difficult to process copper mines, which has important economic and social value.

**Keywords:** complex and difficult to select copper ore; flotation process; process optimization; industrial practice; resource utilization

### 引言

随着矿产资源持续不断开展开发工作, 易于进行选矿铜矿资源正日益呈现出减少态势, 而复杂且难以进行的选铜矿在整个铜矿资源中所占比例正逐渐呈现出上升趋势。复杂难选的铜矿具备成分复杂、有用矿物嵌布粒度较为细小、共生关系紧密相连、含泥量较高等特性, 这给浮选分离工作带来了极大程度上困难, 进而导致资源回收率较低精矿品位也不高, 造成了资源浪费现象。因此, 针对复杂难选铜矿的浮选工艺开展优化工作, 并把优化之后工艺应用于工业实践中, 提高铜矿资源利用率, 已然成为矿业领域亟待去解决重要问题, 本文围绕此问题展开详细探讨。

### 1 复杂难选铜矿的矿石特性分析

#### 1.1 矿石物质组成

复杂难选铜矿物质组成呈现出极为复杂态势, 除了以黄铜矿辉铜矿斑铜矿以及铜蓝等作为主要成分铜矿物之外, 还常常会伴生大量脉石矿物以及其他金属矿物, 不同矿床之中, 铜矿物种类以及含量存在着显著差异, 部分矿石是以原生硫化矿如黄铜矿作为主要成分, 而另一些则可能是以次生硫化矿如辉铜矿占据优势, 甚至会出现多种铜矿物复杂共生状况, 这种矿物组成所具备多样性以及不均

匀性, 直接致使选矿工艺需要拥有高度适应性以及灵活性, 除此以外铜矿物嵌布粒度粗细并不一致, 部分呈现出微细粒散布状态, 或者与脉石以及其他金属矿物相互包裹, 形成复杂共生结构, 这进一步加大了单体解离以及选别回收难度<sup>[1]</sup>。

脉石矿物主要是以石英长石云母以及碳酸盐类矿物如方解石和白云石为主, 它们存在直接对矿石物理性质以及浮选行为产生影响, 尤其当矿石之中含有大量黏土类矿物, 如高岭石蒙脱石等时, 其会显著增加矿浆黏度, 使浮选环境恶化, 进而导致气泡兼并精矿质量下降回收率偏低等一系列问题, 除此以外诸如黄铁矿磁黄铁矿闪锌矿和方铅矿等其他金属矿物, 常常与铜矿物紧密共生, 表面性质相近, 可浮性相互交错, 在浮选过程中难免会造成相互混杂, 增加分离难度, 所以, 在实际选择过程中需要综合考量矿物组成特性, 采取针对性工艺措施, 如阶段磨选矿浆预处理以及选择性抑制剂运用等, 以此来提高分选效率。

#### 1.2 矿石结构构造

复杂难选铜矿结构类型具有多样性, 其中细粒镶嵌结构交代结构以及乳滴状结构等尤为常见, 在细粒镶嵌结构中, 目矿物与脉石矿物相互间紧密共生并且相互穿插, 矿

物结晶粒度微细,形成极为复杂镶嵌关系,这导致在常规碎磨条件下难以达成充分单体解离,交代结构则反映了成矿期后热液蚀变作用,早期矿物被后期形成矿物部分或者完全取代,矿物边界模糊不清,这进一步加大了分选识别难度,除此之外乳滴状结构常见于黄铜矿与闪锌矿等矿物之间,以极细小乳滴状包裹体形式存在,即便进行细磨也难以彻底分离,这些复杂结构特征直接致使矿石在破碎磨矿过程中容易出现泥化或者过磨情况,严重影响后续浮选效率以及精矿品质<sup>[2]</sup>。

矿石构造特征同样对其可选性有着显著影响,常见有致密块状浸染状以及条带状等类型,在浸染状构造矿石中,有用矿物虽然分布相对较为均匀,但是大多是以细粒或者微细粒形式散布于脉石之中,要达到解离需要进行细磨甚至超细磨,这不仅能耗高而且容易引发矿泥积累,使浮选环境恶化,致密块状构造矿石中有用矿物含量较高,但是常常与黄铁石英等脉石矿物紧密连生在一起,共生界面复杂,在解离过程中容易形成异体连生颗粒,造成分选精度下降,条带状构造则呈现出矿物定向富集与分异,磨矿时因为矿物硬度差异容易产生选择性破碎,增加流程调控难度,所以,对于不同构造类型矿石需要定制差异化碎磨与分选工艺,以此来提高铜资源回收率。

### 1.3 有用矿物嵌布特征

有用矿物嵌布粒度与嵌布关系是决定复杂难选铜矿浮选效果核心因素之一,此类矿石中有用矿物嵌布粒度普遍极为细小,常常以细粒微粒乃至胶体分散状嵌布于脉石基质之中,矿物间共生关系复杂多变,比如说,部分铜矿物(如黄铜矿)常常以微细粒星散状分布,或者被石英硅酸盐等脉石矿物紧密包裹,形成难以解离包裹体结构,为了实现有用矿物单体解离,往往需要进行超细磨矿,但是随之而来的问题是磨矿能耗急剧上升,而且极易产生大量次生矿泥,这些微细粒矿泥不仅会增大矿浆黏度恶化泡沫稳定性,还会非选择性吸附浮选药剂,导致药剂消耗增加选择性下降,严重干扰铜矿物的高效回收。

有用矿物嵌布形态也对其浮选行为有着显著影响,

铜矿物常常呈现出多样化嵌布形态,如粒状片状纤维状或者不规则状等,粒状嵌布矿物表面能较高疏水性较好,通常具有较为优良浮选动力学特性;而片状或者纤维状矿物则因为比表面积大表面极性不均一,容易发生细泥罩盖或者随泡沫机械夹带,影响精矿品位,不同形态矿物表面与浮选药剂作用机制也存在差异,片状结构容易发生多层吸附,纤维状矿物则可能因为取向效应阻碍气泡矿化,所以,在制定浮选工艺时,必须综合考虑嵌布粒度与形态特性,通过调整磨矿细度选用选择性分散剂以及调整药剂制度,缓解微细粒嵌布所带来的负面影响,提升分选效率。

## 2 浮选工艺优化方向

### 2.1 捕收剂选用与配比方面

捕收剂作为在浮选过程中发挥关键作用药剂,其所具有分子结构以及表面性质,会直接对矿物疏水性以及气泡吸附效率产生影响<sup>[3]</sup>。对于那种含铜量处于 1.2%~1.8% 之间、-74 $\mu\text{m}$  粒级所占比例为 65%,并且与黄铁矿以及滑石共生比例达到 40% 难选铜矿而言,传统乙基黄药虽然在捕收能力方面表现较强(铜回收率为 83.0%),虽然其选择性较差,这就致使精矿中铜品位仅仅只有 18.5%、 $\text{SiO}_2$  含量为 7.8%、硫含量为 5.2%,进而使冶炼每吨铜成本增加了大约 200 元,而硫氮类(N-丁基氨基硫代甲酸盐)以及羟肟酸类(苯甲羟肟酸)新型捕收剂,其选择性更高,与铜矿物吸附选择性系数相较于黄药提升了 3~5 倍:江西铜矿在改用 N-丁基氨基硫代甲酸盐之后,精矿铜品位提升至 22.3%、 $\text{SiO}_2$  降至 5.2%、硫含量降至 3.1%,回收率维持在 82.5%,冶炼成本降低至 150 元/吨铜;当使用苯甲羟肟酸处理氧化率为 12% 氧化铜矿时,铜回收率相较于黄药提升了 4.8 个百分点,达到了 86.2%,复配策略能够进一步优化效果,云南铜矿将乙基黄药与 N-丁基氨基硫代甲酸盐按照 7:3 体积比进行复配,精矿铜品位提升至 23.1%、回收率为 84.2%、 $\text{SiO}_2$  降至 4.5%;针对含有 8% 滑石铜矿,在加入 20g/t 六偏磷酸钠之后,精矿品位再次提升 1.2 个百分点,达到 24.3,综合效益能够提升 10%~15%。不同捕收剂及复配方案的实际应用效果对比见表 1,可清晰体现技术优势:

表 1 国内复杂难选铜矿不同捕收剂方案应用效果(2024 年数据)

捕收剂方案	适用矿石类型	精矿铜品位 (%)	铜回收率 (%)	精矿 $\text{SiO}_2$ 含量 (%)	精矿硫含量 (%)	吨矿药剂成本 (元/t)	冶炼成本降低 (元/吨铜)
单一乙基黄药	硫化铜矿(黄铁矿含量 15%)	18.5	83.0	7.8	5.2	18	-
单一 N-丁基氨基硫代甲酸盐	硫化铜矿(黄铁矿含量 15%)	22.3	82.5	5.2	3.1	25	150
单一苯甲羟肟酸	氧化铜矿(氧化率 12%)	21.8	86.2	6.1	2.8	32	120
乙基黄药:硫氮类=7:3	含滑石硫化铜矿(滑石 8%)	23.1	84.2	4.5	2.9	22	180
复配+20g/t 六偏磷酸钠	含滑石硫化铜矿(滑石 8%)	24.3	83.8	3.8	2.7	25	210

## 2.2 调整剂优化方面

在浮选工艺当中,调整剂借助调控矿浆化学环境以及矿物表面性质,来开展选择性抑制脉石并增强目标矿物可浮性工作<sup>[4]</sup>。对于某云南含黄铁矿铜矿(其中黄铁矿含量为15%、SiO<sub>2</sub>含量为25%)而言,在对调整剂进行优化之后,精矿铜品位从17.2%提高至22.8%,回收率从80.5%提升至85.3%,在pH调整剂方面,当石灰把矿浆pH从9.0提升至10.5时,黄铁矿抑制率从62%升至85%,精矿硫含量从4.5%降至2.1%;碳酸钠将pH调至10.5时,能够使矿浆黏度降低15%(从25MPa·s降至21MPa·s),同时浮选速度提高20%,不过其吨矿用量为180g/t(相较于石灰高30%),成本增加8元/t,抑制剂需要与矿物特性相匹配:对于安徽铜矿(SiO<sub>2</sub>含量为28%),选用水玻璃(200~250g/t为最优用量),当用量从150g/t增加至200g/t时,精矿SiO<sub>2</sub>从6.8%降至3.3%,抑制率提升18个百分点,若超过300g/t,则铜回收率下降0.8个百分点;对于高硫铜矿(硫含量为8%),使用SO<sub>2</sub>(8m<sup>3</sup>/t矿)时,黄铁矿抑制率达到90%,精矿硫含量降至1.8%,活化剂硫酸铜在甘肃混合铜矿(氧化率为15%)中添加50g/t时铜回收率从81.8%升至86.3%,若用量超过80g/t,则回收率仅提升0.5个百分点,并且精矿硫含量增加0.6个百分点。不同调整剂的应用参数与效果对比见表2,可为实际生产提供参考:

## 2.3 浮选流程改进方面

合理浮选流程设计乃是复杂难选铜矿实现高效分选核心所在,鉴于矿石性质存在波动这一情况,多段浮选流程(“1粗选+2扫选+3精选”)借助粗选去捕获85%铜矿物,通过扫选来回收70%残余铜,并且运用“梯度除杂”(把捕收剂用量从80g/t降低至30g/t)逐步将脉石剔除掉,可把精矿铜品位从16.2%提高至24.5%,使回收率从80.3%提升至88.7%(每年能够多回收铜120t),而且当原矿品位波动±0.3%时,回收率仅仅波动±0.8个百分点,分支浮选流程适用于可浮性差异较大矿石,通过分路处理易浮(占总铜60%,产品品位25.3%)以及难浮回路(添加30g/t硫酸铜进行活化,产品品位22.1%),合并之后总精矿品位达到24.0%(相较于单一流程提升2.8个百分点),

难浮矿物回收率为85.1%<sup>[5]</sup>。阶段磨矿-阶段浮选流程针对嵌布粒度不均矿石,通过粗磨(-74μm占60%)进行预浮选(回收3占2%铜矿物,品位23.8%)之后再对尾矿进行再磨,使总磨矿能耗从45kW·h/t降低至37.7kW·h/t(降低了16.3%),过磨矿泥减少22%,铜回收率从82.3%提升至85.8%,对于嵌布粒度差异超过30%铜矿,综合效益提升12%~18%。

## 3 工业实践案例

### 3.1 某铜矿浮选工艺优化及实践情况

某铜矿属于典型复杂难选铜矿类型,在该矿石之中,铜矿物主要是以黄铜矿辉铜矿形态存在,脉石矿物主要为石英长石,并且还含有一定数量黄铁矿以及黏土矿物,原浮选工艺把黄药当作捕收剂来使用,将石灰作为pH调整剂,选用水玻璃作为抑制剂,虽然浮选指标并不理想,铜精矿品位仅仅在18%左右,回收率大概为70%<sup>[6]</sup>。

鉴于该矿石所具有特性,针对浮选工艺开展了优化工作,在捕收剂这一方面运用黄药与硫氮类捕收剂按照3:1比例混合起来使用,以此提高对铜矿物选择性捕收能力;在调整剂方面,适当加大了石灰用量,把矿浆pH值控制在10~11这个范围之间,同时添加少量氰化物来抑制黄铁矿浮选,并且增加水玻璃用量,以此加强对硅酸盐脉石抑制效果;在浮选流程方面,采用阶段磨矿阶段浮选流程,第一段磨矿细度控制在-200目占60%左右,开展粗选和扫选工作,第二段磨矿细度控制在-200目占85%左右,对粗精矿进行精选操作,优化之后浮选工艺应用于工业实践以后,取了显著成效。

### 3.2 实践效果分析与总结

从上述工业实践案例能够看出,通过对复杂难选铜矿浮选工艺进行优化,能够显著提高铜精矿品位以及回收率,捕收剂合理配比提高了对铜矿物选择性,减少了脉石矿物以及有害矿物混入情况;调整剂优化为铜矿物浮选创造了良好环境条件,抑制了有害矿物浮选;浮选流程改进则提高了分选效率,避免了矿泥所带来危害。在工业实践过程中,还需要注意工艺参数稳定控制工作,矿浆浓度浮选时间药剂用量等,这些参数出现波动的话会影响浮选指标的稳定性。

表2 复杂铜矿不同调整剂应用参数与处理效果

调整剂类型	作用对象	用量范围(g/t矿, SO <sub>2</sub> 为m <sup>3</sup> /t)	矿浆pH条件	核心处理效果	适用矿石特点
石灰	黄铁矿、pH调节	120~180	10.0~11.0	黄铁矿抑制率80%~85%, 精矿硫≤2.5%	高硫铁矿、低成本需求铜矿
碳酸钠	pH调节、降低矿浆粘度	150~220	9.5~10.5	矿浆粘度降低12%~15%, 细粒回收率提升3%	细粒级、对粘度敏感的铜矿
水玻璃	硅酸盐脉石(石英、云母)	180~250	9.0~10.0	精矿SiO <sub>2</sub> ≤3.5%, 抑制率≥75%	高硅酸盐含量(SiO <sub>2</sub> >25%)铜矿
二氧化硫(SO <sub>2</sub> )	黄铁矿	6~10(m <sup>3</sup> /t)	5.0~6.0	黄铁矿抑制率85%~90%, 精矿硫≤2.0%	环保要求高的高硫铜矿
硫酸铜	氧化/受抑制硫化铜矿	40~70	8.5~9.5	铜回收率提升4%~6%, 活化效率稳定	氧化率10%~20%的混合铜矿

#### 4 结语

复杂难选铜矿浮选工艺优化以及工业实践是提高铜矿资源利用率关键所在,通过对矿石特性进行深入分析,从捕收剂方面调整剂方面浮选流程等方面进行针对性优化,并且把优化之后工艺应用于工业实践,能够有效提高铜精矿品位以及回收率。未来,随着矿业技术不断发展,还需要进一步研究新型的浮选药剂、高效的浮选设备以及智能化的浮选控制系统,为矿产资源可持续发展做出更大贡献。

#### [参考文献]

- [1]杨谦.新型药剂浮选某低品位难选铜铅锌矿的试验研究及应用[D].南宁:广西大学,2024.  
[2]肖巍,赵玉龙,赖春华,等.氧化铜矿浮选技术进展[J].矿产保护与利用,2023,43(5):32-41.

[3]王刚,于云龙.国外某难选沉积岩型氧硫混合铜矿选矿工艺研究[J].矿冶,2023,32(2):49-57.

[4]曲思思,刘新聪,范耀芬,等.某难选氧化铜矿的浮选药剂试验[J].世界有色金属,2021(15):116-117.

[5]郑双林,马英强,郭鑫捷,等.预处理技术在难选氧化铜矿硫化浮选中应用的研究进展[J].金属矿山,2021(4):130-138.

[6]庞杰,郑永兴,戈保梁,等.难选氧化铜矿选冶联合技术研究现状与进展[J].矿产综合利用,2019(5):1-5.

作者简介:侯君一(1976.5—),毕业院校:南方冶金学院(江西理工大学)所学专业:选矿,当前就职单位名称:新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队,就职单位职务:矿业公司副总经理(地质矿产开发院副院长),职称级别:副高。