

氧化铜矿硫化浮选及浸出联合选矿工艺研究

王 勇

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 氧化铜矿因矿物组成复杂、赋存状态多样,传统单一选矿工艺难以实现高效回收。本文针对氧化铜矿中易浮矿物与难处理矿物共存的特性,开展硫化浮选与浸出联合工艺研究。通过分析矿物的矿物学特性与工艺难点,优化硫化浮选药剂制度与浸出强化技术,构建分段协同的联合工艺流程。该工艺实现了易浮矿物的优先浮选回收与难处理矿物的深度浸出提取,提高了铜的综合回收率,为复杂氧化铜矿资源的高效利用提供了技术支持。

关键词: 氧化铜矿; 硫化浮选; 浸出工艺; 联合选矿; 工艺优化

引言: 氧化铜矿作为重要的铜资源,其选矿工艺对铜资源的有效利用意义重大。然而,氧化铜矿矿物组成复杂,存在硅孔雀石等难处理矿物,且常伴生多种脉石,导致单一选矿工艺效果不佳。硫化浮选和浸出工艺在处理氧化铜矿时各有优劣,单独使用难以实现资源高效利用。因此,开展氧化铜矿硫化浮选及浸出联合选矿工艺研究,对提高铜回收率、降低生产成本具有迫切的现实需求。

1 氧化铜矿的矿物学特性、原矿性质及选矿难点

1.1 矿物组成与分类

氧化铜矿中,孔雀石以其独特的翠绿色和丝绢光泽成为常见且易于识别的矿物类型,其晶体结构中铜离子与碳酸根离子紧密结合,形成稳定的层状结构。蓝铜矿则呈现鲜艳的蓝色,晶体结构与孔雀石相似,但铜离子配位环境略有差异,导致其表面化学性质有所不同。硅孔雀石作为氧化铜矿中的难处理矿物,其晶体结构中硅氧四面体与铜离子相互交织,形成复杂的网络结构,表面羟基化程度较高,化学反应活性相对较低^[1]。赤铜矿则以红色或暗红色为特征,晶体结构中铜离子以氧化态存在,表面性质较为活泼。这些氧化铜矿物的晶体结构

差异直接影响了浮选药剂在其表面的吸附行为,进而决定了浮选效果。此外,氧化铜矿中常伴生有硅酸盐脉石,如石英和黏土矿物,以及碳酸盐脉石,如方解石和白云石,还有铁矿物等。这些脉石矿物在选矿过程中会干扰目标矿物的分选,降低精矿品位。

1.2 选矿技术难点

硫化浮选在处理氧化铜矿时面临选择性限制。硅孔雀石等难浮矿物硫化效率低下,硫化膜稳定性差,难以形成有效的疏水层,导致浮选回收率低。浸出工艺处理氧化铜矿时,碳酸盐脉石会大量消耗浸出剂,显著增加生产成本。矿泥化现象在氧化铜矿选矿中尤为突出,微细粒矿物易吸附药剂,形成泥罩现象,降低分选效率。此外,结合铜的回收难题一直困扰着选矿工作者,机械分散或化学吸附在脉石矿物表面的铜难以通过单一选矿工艺有效回收,导致资源浪费。

1.3 原矿性质详细分析

1.3.1 矿石的化学性质及物质组成

为了全面了解原矿中的主要元素及其含量,从而明确该矿石的主要有价回收金属元素,对该矿石进行了化学多元素分析,分析结果如表1所示。

表1

元素名称	Cu	Pb	Zn	Ag*	Au*	C	S
含量, %	1.05	0.028	0.006	5.80	0.068	0.787	3.30
元素名称	MgO	CaO	Fe	As	SiO ₂	Al ₂ O ₃	/
含量, %	2.40	3.91	3.87	0.0381	43.59	6.01	/

从表1可以看出,该氧化铜矿石中铜是主要的有价回收金属元素,同时还含有一定量的贵金属银和金。此外,矿石中还含有一定比例的脉石成分,如SiO₂、Al₂O₃、MgO、CaO等,这些脉石成分的存在会对选矿过程产生干扰,影响精矿品位。

1.3.2 原矿中的铜物相分析

对原矿进行铜物相分析,有助于深入了解铜在矿石中的赋存状态,为制定针对性的选矿工艺提供依据。原矿中铜的物相分析结果如表2所示。

表2

相别	硫酸铜相铜量	自由氧化铜	结合氧化铜	次生硫化物铜	原生硫化物铜	合计	全铜
百分含量	< 0.001	0.12	0.020	0.44	0.38	0.96	0.98
占有率	< 0.10	12.5	2.08	45.83	39.58	100.00	/

由表2可知，原矿中铜主要以次生硫化物铜和原生硫化物铜的形式存在，二者占有率分别达到45.83%和39.58%，是铜的主要赋存形式。自由氧化铜和结合氧化铜的含量相对较少，硫酸铜相铜量几乎可以忽略不计。这种铜的物相分布特点，决定了在选矿过程中需要综合考虑不同物相铜的性质，采用合适的工艺来提高铜的回收率。

1.3.3 原矿粒度筛析

原矿的粒度分布对选矿指标有着重要影响，不同粒级的矿物在选矿过程中的行为存在差异。为考察金属在各个粒级的金属产率与金属占有率，在-0.074mm占70%的磨矿细度下进行原矿粒度分析，试验结果如表3所示。

表3

筛孔尺寸 (mm)	产率, %	Cu品位, %	Cu金属量占有率, %
+0.074	30.88	0.65	18.33
-0.074+0.045	25.47	0.85	19.77
-0.045+0.038	5.22	1.13	5.39
-0.038	38.44	1.61	56.51
合计	100.00	1.09	100.00

从表3可以看出，原矿中-0.038mm粒级的产率最高，达到38.44%，且该粒级的Cu品位也相对较高，为1.61%，其Cu金属量占有率更是高达56.51%，说明铜矿物在该粒级中较为富集。而+0.074mm粒级的产率为30.88%，Cu品位最低，仅为0.65%，Cu金属量占有率为18.33%。这种粒度分布特点提示我们在选矿过程中，需要重点关注微细粒级矿物的回收，采取有效的措施提高微细粒级铜矿物的分选效果。

2 硫化浮选工艺原理与优化策略

2.1 硫化浮选机理

在硫化浮选过程中，硫化钠进入矿浆后迅速解离，释放出HS⁻离子。这些离子与氧化铜矿物表面发生化学反应，生成一层致密的硫化铜薄膜。这层薄膜的存在显著改变了矿物表面的物理化学性质，使其具备疏水性，从而能够附着在气泡上实现浮选。硫化膜的稳定性受多种因素影响，其中pH值是关键因素之一^[2]。在适宜的pH范围内，硫化膜能够保持较好的厚度与附着力，确保浮选效果。此外，硫化剂的用量及添加方式也对硫化膜的形成至关重要。过量或不足的硫化剂用量，以及不合理的添加方式，

都可能导致硫化膜质量下降，影响浮选回收率。捕收剂在硫化浮选中的作用机制同样不容忽视。黄药类捕收剂，如丁基黄药，通过硫原子与硫化铜表面的铜离子紧密结合，形成一层稳定的疏水层，使矿物更容易被气泡捕获。

2.2 工艺优化方向

针对传统硫化剂存在的局限性，研究人员开始探索新型硫化剂的应用。硫氢化钠、微胶囊化硫化剂等新型硫化剂的出现，为硫化浮选工艺的优化提供了新的可能。分步添加硫化剂技术能够有效避免一次性过量添加导致的HS⁻离子抑制浮选的问题。在捕收剂方面，黄药与脂肪酸的复配体系展现出良好的协同作用，能够显著提升孔雀石等易浮矿物的回收率。螯合型捕收剂，如羟肟酸，则针对难浮矿物展现出优异的选择性捕收能力。此外，抑制剂与分散剂的开发也是工艺优化的重要方向。硅酸盐抑制剂，如水玻璃、六偏磷酸钠，能够有效抑制脉石矿物的浮选，提高精矿品位。矿泥分散技术则通过机械脱泥或化学分散的方式，减少矿泥对浮选过程的干扰，提升分选效率。

3 浸出工艺原理与强化技术

3.1 浸出方法分类与适用性

浸出工艺根据矿石性质及处理需求可分为多种类型。堆浸工艺投资成本低、操作简便，广泛用于低品位且渗透性良好的氧化矿处理。此类矿石破碎后直接堆置于浸出垫上，喷淋浸出剂实现铜溶解回收，整个过程无需复杂设备支撑，对场地条件的适配性较强，适合大规模低价值矿石的资源化利用。搅拌浸出工艺针对高品位或复杂难处理矿石设计，通过机械搅拌强化矿浆流动，使矿物与浸出剂充分接触，提升反应速率。该工艺对矿石粒度要求高，需预先细磨，磨矿环节的精细化程度直接影响后续浸出效率，能有效处理那些常规方法难以分解的复杂矿种。细菌浸出技术作为绿色冶金代表，利用嗜酸氧化亚铁硫杆菌等微生物代谢作用，将铜矿物氧化分解为可溶性铜离子。此类微生物在酸性环境中适应性强，能耐受高浓度重金属离子，降低传统工艺能耗与试剂消耗，同时减少有害气体与废渣排放，契合现代冶金工业的绿色发展趋势。

3.2 浸出剂选择与成本控制

浸出剂的选择对浸出工艺成本和效果至关重要。常

见浸出剂有硫酸、盐酸等无机酸,可提供酸性环境,促进铜矿物溶解,此外部分有机浸出剂因选择性强的特点,在特定矿物分离提取中也得到逐步应用。但不同矿石对浸出剂适应性不同。对于含大量碳酸盐脉石的氧化铜矿,用硫酸作浸出剂时,碳酸盐脉石会与硫酸反应,消耗大量硫酸,增加成本,还会生成大量硫酸盐沉淀,覆盖在矿物表面阻碍浸出反应持续进行。选浸出剂要综合考虑矿石成分、浸出效率及成本等因素。除优化浸出剂种类,还可调整其浓度控制成本。在一定范围,适当提高浓度可提高浸出速率,但过高不仅增加成本,还可能腐蚀设备,甚至破坏矿物晶体结构导致目标元素难以有效溶出。需通过实验确定最佳浓度,平衡成本与效果,同时结合浸出温度、矿浆浓度等参数进行协同调控,实现工艺效益最大化。

3.3 浸出过程强化策略

化学强化方面,添加氧化剂可突破难溶矿物溶解瓶颈。 Fe^{3+} 与 MnO_2 等氧化剂能破坏硅孔雀石等矿物晶体结构,促进铜离子释放。针对酸耗过高问题,可采用预处理技术脱除碳酸盐脉石,如方解石与白云石,其在酸性环境中会大量消耗浸出剂。通过浮选或磁选预先分离脉石,可降低后续浸出酸耗。物理强化手段中,水热硫化浸出法调控温度与压力参数,在高温高压下加速硫化反应,提升难处理矿物浸出效率。超声波与磁场辅助技术通过空化效应与磁致振动,破坏矿物表面钝化层,增强浸出剂渗透能力^[3]。生物强化领域,定向选育耐酸、耐重金属高效菌株,可缩短浸出周期并提高铜回收率。添加特定营养剂维持菌群活性,构建优势菌群群落,能进一步提升生物浸出系统稳定性与处理效率。

4 硫化浮选与浸出联合工艺设计

4.1 联合工艺流程架构

联合工艺通过分段处理实现资源高效利用。硫化浮选段聚焦回收易浮氧化铜与硫化铜矿物。孔雀石等矿物表面性质活泼,在适宜药剂下可快速形成疏水层,通过浮选高效分离。硫化铜矿物天然疏水,浮选中可浮性好。浸出段负责回收浮选尾矿中难处理矿物,针对硅孔雀石等难浮矿物及结合铜,采用酸性浸出实现铜深度溶解。工艺衔接需解决两个关键问题。浮选尾矿预处理通过脱泥减少微细粒矿物对浸出的干扰,同时调pH至酸性,为浸出创造条件。浸出液循环利用系统采用萃取-电积技术,通过有机溶剂选择性萃取铜离子,再经电积得高纯度阴极铜。该技术实现铜高效回收,降低废水排放,符合清

洁生产要求。

4.2 工艺设备选型与匹配

在硫化浮选与浸出联合工艺中,设备选型与匹配对工艺稳定运行和高效处理至关重要。硫化浮选阶段,浮选机选择要考虑矿石性质、处理量及浮选药剂特性等因素。氧化铜矿物组成复杂,浮选难度大,需选充气和搅拌性能好的浮选机,保证矿物与药剂充分接触,提高回收率。浸出阶段,搅拌浸出槽是关键设备,其设计要考虑矿浆流动性、浸出剂分散效果及反应时间等因素。合理搅拌速度和方式能促进矿物与浸出剂混合,提高浸出效率。此外,浸出加热、过滤设备等也要合理选型,确保工艺流程顺畅。

4.3 工艺参数协同优化

硫化浮选与浸出对pH条件要求差异显著。硫化浮选需在弱碱性环境(pH9-11)进行,确保硫化膜稳定形成;浸出依赖强酸性条件(pH1.5-2.5)促进矿物溶解。工艺设计需通过流程分段与pH梯度控制,实现两种环境平稳过渡。例如,在浮选尾矿输送管道设pH调节装置,逐步降低矿浆pH,避免矿物表面性质改变。药剂制度衔接上,浮选尾矿中残留黄药类捕收剂可能抑制浸出,添加氧化剂或调整浸出剂组成可消除影响。能量与资源综合利用方面,浮选精矿脱水热能可通过热交换装置回收,用于浸出矿浆预热;浸出废热可通过余热回收系统转化,形成完整能量循环体系。

结束语

硫化浮选与浸出联合选矿工艺针对氧化铜矿特性,充分发挥两种工艺优势。通过合理设计流程架构、精准选型匹配设备、协同优化工艺参数,有效解决了单一工艺的局限。该工艺提高了铜回收率,降低生产成本,减少资源浪费,实现氧化铜矿资源高效利用。在氧化铜矿选矿领域具有显著应用价值,为类似矿石选矿提供有益借鉴,推动行业技术进步。

参考文献

- [1]路晓龙,李天恩.组合药剂硫化—浮选某含银氧化铜矿石的试验研究[J].矿产保护与利用,2023,43(2):35-39.
- [2]王黎明,吴华.西藏某氧化铜铅锌矿混合浮选工艺[J].矿产综合利用,2024,45(3):193-199.
- [3]付强,王立刚.某高氧化率铜矿综合回收硫化铜选矿工艺技术研究[J].铜业工程,2022(4):33-36.