

尼日尔某氧化铜矿工艺矿物学及回收工艺

黄典强^{1,2,3}, 崔毅琦^{1,2,3}, 肖有明^{1,3}, 王靖^{1,2,3}, 张洋^{1,2,3}, 童雄^{1,2,3}

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 昆明理工大学省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093; 3. 昆明理工大学金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心, 云南 昆明 650093)

摘要: 以尼日尔某氧化铜矿为研究对象, 通过化学分析、X 射线衍射分析及光学显微镜分析对原矿进行了详细的工艺矿物学研究。结果表明, 原矿含铜 6.04%, 其中游离氧化铜、结合氧化铜分别为 65.07%、31.95%, 是高结合率氧化铜矿。矿石中金属矿物以孔雀石、蓝铜矿, 硅孔雀石、辉铜矿、黄铁矿、褐铁矿为主, 脉石矿物包括钾长石、斜长石、石英、黑云母等, 矿物成分较为复杂。原矿中的铜大部分以孔雀石和蓝铜矿的形式存在, 主要嵌布在石英、长石等脉石中。论文采用“浮选-浸出”选冶联合工艺路线, 经浮选后获得铜品位 28.23%、回收率为 56.18% 的铜精矿, 其尾矿直接用稀硫酸浸出, 浸出率为 91.15%, 铜的综合回收率达到 96.25%, 获得了较好的回收效果。

关键词: 尼日尔; 氧化铜矿; 工艺矿物学; 选冶联合

doi:10.12476/kczhly.202210110643

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 03-0142-07

引用格式: 黄典强, 崔毅琦, 肖有明, 等. 尼日尔某氧化铜矿工艺矿物学及回收工艺[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(3): 142-148.

HUANG Dianqiang, CUI Yiqi, XIAO Youming, et al. Process mineralogy and recovery process of a copper oxide mine in Niger[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(3): 142-148.

随着铜金属资源的开发, 高品位且易于选别的硫化铜矿资源日益减少。复杂难选别的氧化铜矿和混合铜矿成为铜资源开发的重要方向之一^[1-3]。在全球铜矿资源中, 氧化铜矿占基础铜资源的 10% 以上, 且比例在逐年增长^[4]。

氧化铜矿常用的浮选方法分为直接浮选法和硫化浮选法^[4]。直接浮选法回收氧化铜矿, 其尾矿中的铜流失较多; 硫化浮选法, 可以较好地回收这部分铜^[5]。硫化浮选法是将氧化铜矿预先进行硫化处理, 使亲水性较强的氧化铜矿表面吸附 S^{2-} 或 HS^- , 形成硫化薄膜从而增强其疏水性, 再加入捕收剂进行浮选^[6-8]。硫化浮选中常用的硫化剂有硫化钠、硫化氢钠和硫化钙等, 其中硫化钠应用最为广泛。浮选过程中, 硫化钠用量需严格控制,

用量太少硫化效果较差, 过量则会抑制氧化铜矿^[7-9]。王传龙^[10]在对混合型铜矿浮选时, 采用优先浮选硫化铜-硫化浮选氧化铜的工艺, 可以分别获得铜品位为 22.72%, 回收率为 64.12% 的硫化铜精矿和铜品位为 25.15%, 回收率为 20.22% 的氧化铜精矿。潘自维^[11]按照 1:3:2 比例将氧化铜捕收剂 HCC、异戊基钠黄药和异戊基钾黄药配制组合捕收剂, 通过协同作用提高铜品位, 在磨矿细度 -0.074 mm 88.50%、pH=10 的条件下通过“两粗三扫三精”浮选工艺, 获得了精矿铜品位 17.90%、铜回收率 75.27% 的浮选指标。吕超^[12]对西藏某高结合率氧化铜矿采用选冶联合工艺, 通过“一粗一扫两精”的闭路浮选实验, 得到铜品位为 29.56%, 回收率为 30.76% 的铜精矿, 浮选尾矿进

收稿日期: 2022-10-11

基金项目: 云南省重大科技项目 (202202AG050010)

作者简介: 黄典强 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事资源综合利用研究。

通信作者: 崔毅琦 (1980-), 女, 博士, 教授, 主要从事稀贵金属选冶与资源综合利用研究。

行酸浸处理，浸出率达 82.26%。

工艺矿物学能够揭示矿石中矿物间相互关系的内在规律，定量分析各元素在矿石中的赋存状态以及矿物之间的嵌布关系等^[13]。通过预先考查难处理矿石的性质，可为后续处理工艺提供更准确的信息，从而提高选矿效率。

尼日尔某铜矿属于高氧化率、高结合率氧化铜矿，通过对该矿进行工艺矿物学研究，查明该氧化铜矿的矿石结构、元素赋存状态、矿物组成以及矿物嵌布特征等，并在此基础上探索合理的选别工艺，为该矿的开发提供理论和实践指导。

1 矿样与实验方法

1.1 矿样

实验矿样来自尼日尔某氧化铜矿，通过实地多点取样，用颚式破碎机和辊破碎机对原矿进

行处理，得到粒径-2 mm 的矿粒，混合均匀作为后续实验样品。

1.2 实验方法

取 500 g 磨细至-0.074 mm 粒级的原矿样，用 Rigaku 的 d/Max2200 型 X 射线衍射分析仪对矿样进行 XRD 测试，取-2 mm 原矿以及块状矿石进行显微镜镜下观察，取 100 g 磨细至-0.045 mm 粒级矿样用于铜物相分析。

2 矿样化学元素和组成分析

2.1 矿样化学元素分析

对原矿进行化学多元素分析，结果见表 1，铜物相分析见表 2。由表 1、2 可知，该矿石中铜含量较高结合氧化铜占总含量的 31.95%，原生硫化铜含量仅为 0.02%，占总铜的 0.33%，次生硫化铜占比为 2.65%，该矿石属于高氧化率、高结合率的氧化铜矿。

表 1 氧化铜多元素 X 射线荧光分析/%

Table 1 Multi-element X-ray fluorescence analysis of copper oxide

O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti
33.73	1.92	0.96	6.42	24.31	0.03	0.28	2.93	2.32	0.02
Mn	Fe	Cu	Zn	As	Rb	Sr	Ba	Pb	
0.04	4.64	7.29	0.17	0.02	0.02	0.01	0.03	0.08	

表 2 铜物相分析结果

Table 2 Copper phase analysis results

名称	游离氧化铜	结合氧化铜	次生硫化铜	原生硫化铜	总铜
含量/%	3.93	1.93	0.16	0.02	6.04
占有率/%	65.07	31.95	2.65	0.33	100.00

2.2 矿物组成分析

对矿样进行 XRD 分析，结果见图 1。由图 1 可知，矿石中的主要金属矿石为孔雀石或蓝铜

矿、硅孔雀石等，主要的脉石矿物为钾长石、斜长石、石英等。

使用显微镜对矿石进行矿物颗粒的镜下观察，以确定其矿物的组成。部分矿物组成成分与含量见表 3。由表 3 可知，该矿由数十种矿物组成，其中有孔雀石、蓝铜矿、辉铜矿、黄铁矿、褐铁矿、硅孔雀石等金属矿物。脉石矿物以石英、斜长石、钾长石、黑云母为主。

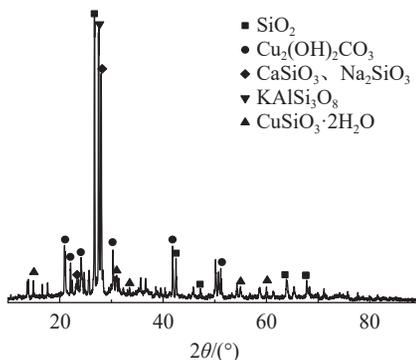


图 1 矿石的 XRD 分析结果

Fig.1 XRD analysis results of the ore

表 3 矿石中主要矿物组成及相对含量

Table 3 Composition and relative content of main minerals in ores

矿物	含量/%	矿物	含量/%
天青石	9.4	花岗岩碎屑	2.7
孔雀石	3.1	碳酸盐岩碎屑	3.4
褐铁矿	10.0	透闪石	3.4
斜长石	19.3	石英碎屑	0.7
钾长石	16.3	黑云母	1.8
石英	8.2	其他	21.6
		合计	100.0

3 主要矿物的嵌布特征

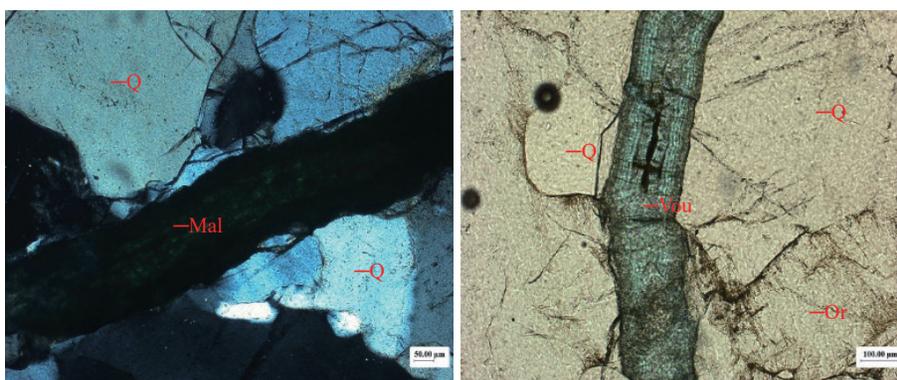
3.1 孔雀石

块状矿物在显微镜下呈现灰色，微带淡绿色，中等硬度，反射率低，非均质性，内部呈现反射的翠绿色，具有隐晶质细小纤维状集合体（见图 2（a）），但含量少；颗粒状矿物在显微镜下显示灰色微带绿色，中等硬度，反射率低，显均质性，呈胶体隐晶质，单体解离差，解离度大约在 20%，其余主要为褐铁矿、蓝铜矿（见

图 2（c）（d））与脉石矿物（见图 2（a））构成连生体，嵌布粒度在 0.02~0.20 mm，含量 0.3% 左右。

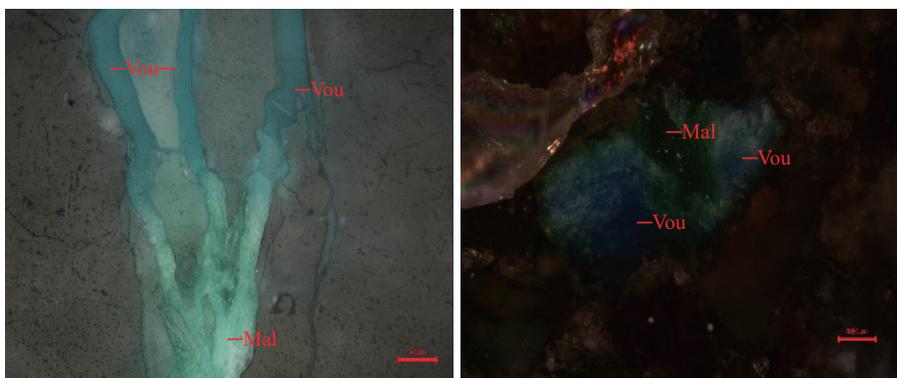
3.2 蓝铜矿

块状矿石在显微镜下呈现灰色微带淡蓝色，中等硬度，反射率低，非均质性，内部表现为反射性，且呈深蓝色，蓝铜矿具有隐晶质纤维状集合体（见图 2（b）），含量少；颗粒状矿物在显微镜下呈现灰色微带蓝色，中等硬度，反射率低，显均质性，胶体隐晶质，单体解离差，解离



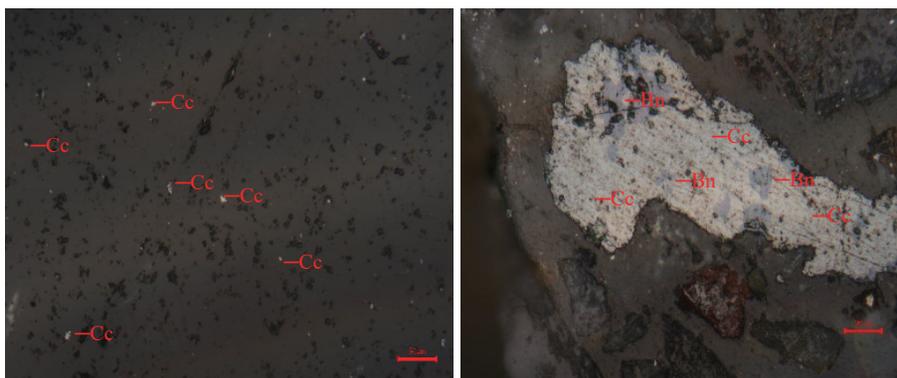
(a) 孔雀石 (Mal) 呈条脉状穿切花岗岩 (Q 石英、Or 长石)

(b) 蓝铜矿 (Vou) 呈条脉状穿切花岗岩 (Q 石英、Or 长石)



(c) 孔雀石 (Mal)、蓝铜矿 (Vou) 呈现细脉状嵌布

(d) 孔雀石 (Mal) 与蓝铜矿 (Vou) 连生体



(e) 辉铜矿 (Cc) 呈现星点状分布

(f) 辉铜矿 (Cc)、斑铜矿 (Bn) 连生体

图 2 铜矿呈现的嵌布特征

Fig.2 Inlaid features of copper deposits

度为20%左右，其余80%主要与褐铁矿、孔雀石（见图2（c）（d））、脉石矿物（见图2（b））构成连生体，嵌布粒度0.02~0.20 mm，含量0.5%左右。

3.3 辉铜矿

辉铜矿含量较少，呈现星点状分布（见图2（e）），与黄铁矿、斑铜矿（见图2（f））、脉石矿物构成连生体，嵌布粒度在0.05~

0.20 mm，其含量占比约在0.1%。

3.4 硅孔雀石

硅孔雀石呈现灰色微带蓝绿色，呈中等硬度，反射率低，在10%左右，显均质性，呈现胶体状集合（见图3（a）（b）），隐晶质。单体解离度差，解离度不足20%，主要与辉铜矿（见图3（a））、蓝铜矿、孔雀石、脉石矿物等构成连生体，嵌布粒度在0.02~0.2 mm，含量占比约

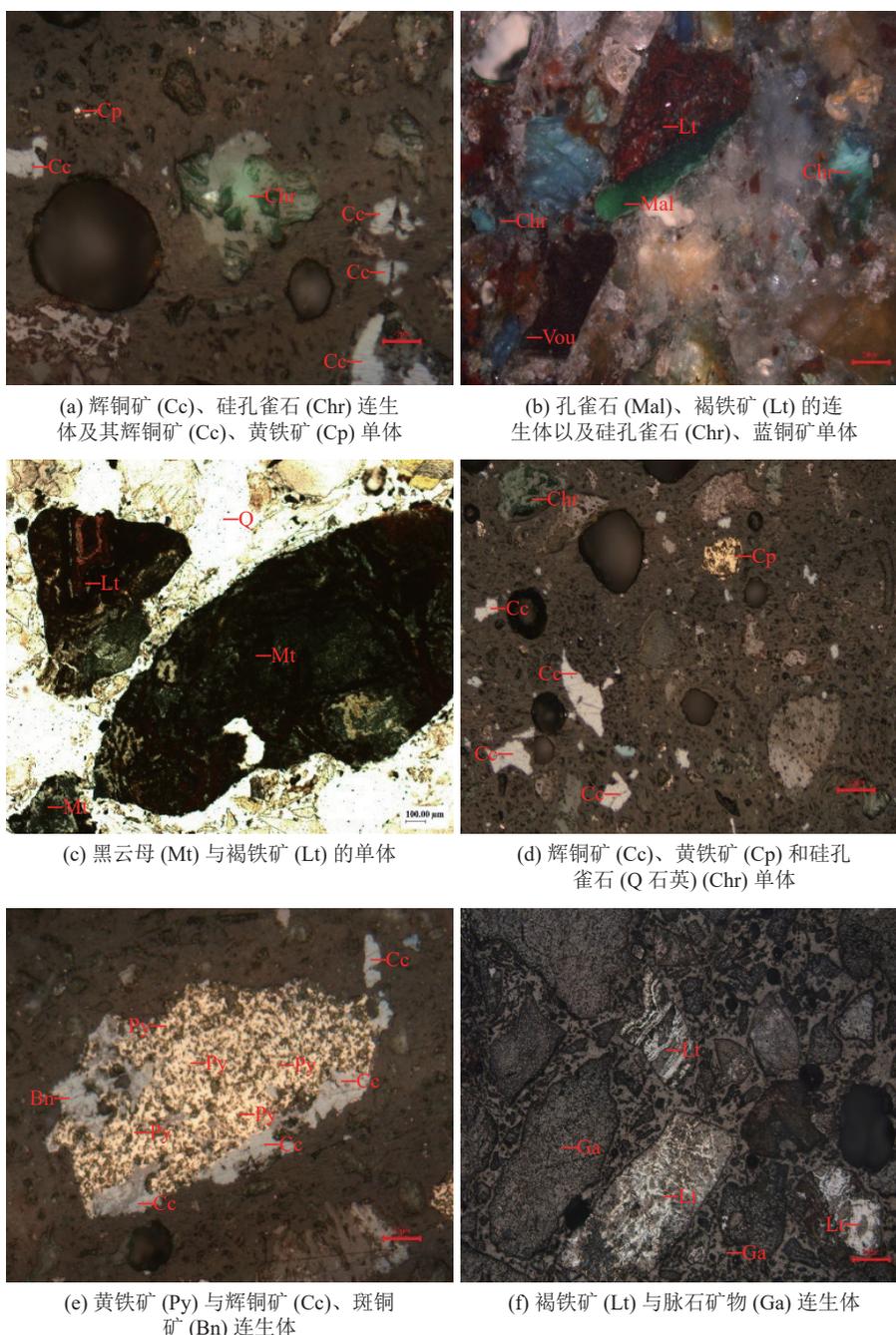


图3 氧化铜矿与其他矿物的嵌布关系

Fig.3 Inlaid relationship between copper oxide ores and other minerals

为 0.4%。

3.5 其他金属矿物

该氧化铜矿还包含了褐铁矿、黄铁矿、斑铜矿、黄铜矿等金属矿物，褐铁矿、斑铜矿单体解离度较差分别为 30%、20%，褐铁矿其余 70% 分别与其他金属矿物（见 图 3（b））、脉石矿物（见 图 3（c）（f））构成连生质体。斑铜矿（见 图 2（f））主要与辉铜矿构成连生质体，两者的嵌布粒度分别在 0.10~1.5、0.01~0.1 mm，含量均小于 5%；黄铁矿解离度大致在 40%，单体解离度较差，主要与褐铁矿、辉铜矿（见 图 3（e））和脉石矿物等构成连生体，其嵌布粒度在 0.05~0.20 mm，含量小于 0.5%；黄铜矿只有在解离度到 95% 时可见，少部分与脉石矿物（见 图 3（d））构成连生体，嵌布粒度在 0.01~0.08 mm，含量小于 0.5%。

4 氧化铜浮选与浸出实验

根据工艺矿物学研究，该矿属于高氧化率、高结合率的氧化铜矿，游离氧化铜占 65.07%，结合氧化铜占 31.95%，主要为孔雀石、蓝铜矿及硅孔雀石。直接浮选难以获得理想的结果，因此采用“硫化浮选-硫酸浸出”工艺，优先浮选硫化铜和游离氧化铜，浮选尾矿采用浸出法回收，具体流程见 图 4。

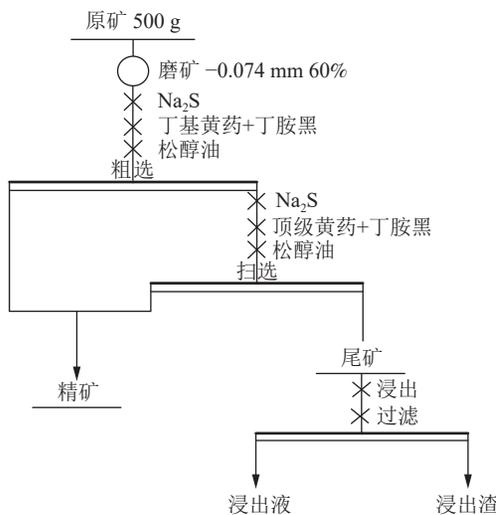


图 4 高结合率氧化铜矿回收工艺流程

Fig.4 Process flow chart of recovery of high binding rate copper oxide ore

4.1 氧化铜矿硫化浮选

称取 500 g 矿石样，磨矿细度为 -0.074 mm

60%，在活化剂硫化钠 2 000 g/t、捕收剂丁基黄药和丁铵黑药分别为 50 g/t 和 100 g/t、起泡剂松醇油 40 g/t 条件下进行粗选；硫化钠 1 000 g/t、丁基黄药和丁铵黑药分别为 25 g/t 和 50 g/t、松醇油 40 g/t 条件下进行扫选，实验结果见 表 4。经过“一粗一扫”的硫化浮选，可获得铜品位 28.23%，回收率为 56.18% 的铜精矿，尾矿中剩余的铜矿物采用浸出法回收。

表 4 硫化浮选实验结果

Table 4 Results of the sulfide flotation test

产物	质量/g	产率/%	Cu品位/%	Cu回收率/%
精矿	62.04	12.41	28.23	56.18
尾矿	437.94	87.59	3.12	43.82
总计	599.98	100.00	6.24	100.00

4.2 浮选尾矿浸出

浮选尾矿采用硫酸浸出，实验分别考查固液比、硫酸浓度和浸出时间对铜浸出率的影响，实验结果见 图 5~7。

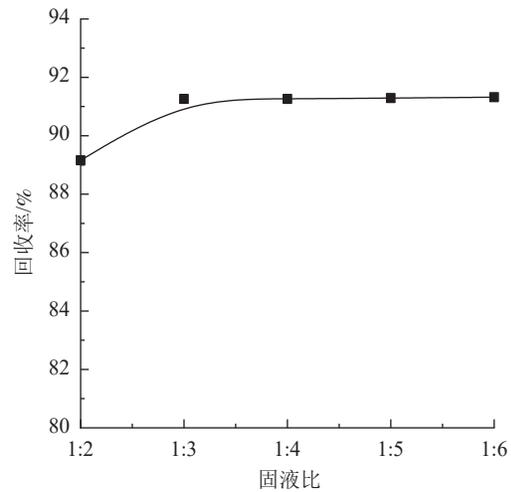


图 5 固液比对铜浸出的影响

Fig.5 Effect of solid-liquid ratio on copper leaching

通常情况下，降低矿浆的浓度有利于物质的扩散，可在一定程度上提高浸出率。由 图 5 可知，固液比对于浮选尾矿的浸出影响不大，固液比由 1:2 变化至 1:3 时，铜的浸出率仅提高了 2 个百分点，进一步降低矿浆浓度，铜的浸出率基本不变。因此，固液比为 1:3 时即可满足浮选尾矿的浸出需要。

由 图 6 可知，随着酸浓度从 1% 增加到 4%，铜的浸出率由 31.70% 提高到 91.15%，酸浓度增加

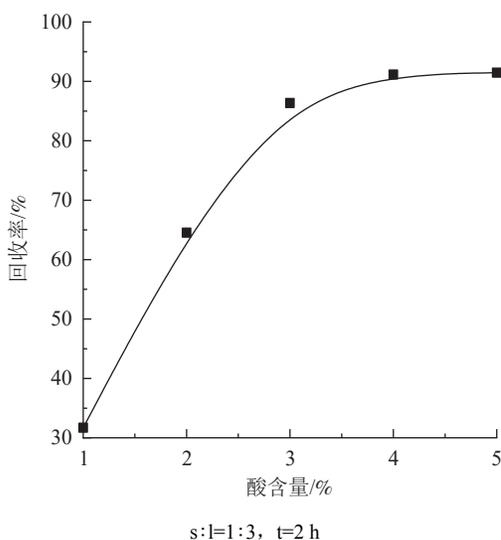


图6 酸用量对铜浸出的影响
Fig.6 Effect of acid dosage on copper leaching

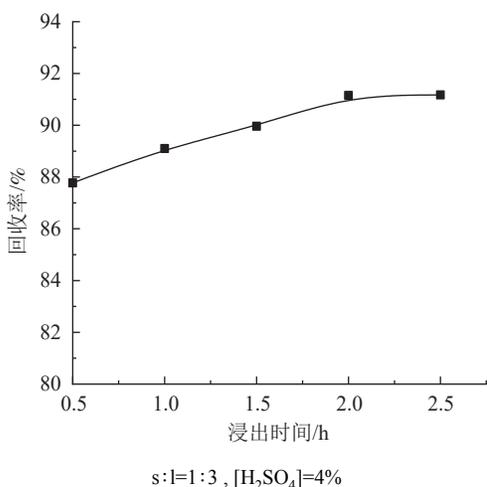


图7 浸出时间对铜矿浸出的影响
Fig.7 Effect of leaching time on copper ore leaching

到5%时铜的浸出率没有显著变化。可见，硫酸浓度过低，浸出率低，反应速率慢，硫酸浓度过高则会大大增加生产成本，酸浓度为4%是比较合适的。

由图7可知，在浸出时间0.5 h到2.0 h间铜浸出不断提高，浸出时间为2.0 h，铜浸出达到91.5%，继续延长时间浸出率基本保持不变，因此2.0 h为较佳浸出时间。浮选尾矿的较佳浸出工艺参数为：固液比1:3、硫酸用量浓度4%和浸出时间2.0 h。此条件下，浮选尾矿铜浸出率91.5%，铜的总回收率为96.25%。

5 结论

(1) 该铜矿铜含量为6.04%，主要以氧化铜为主，其分布率达到97.02%，其中游离氧化铜占

65.07%，结合氧化铜占31.95%，硫化铜矿仅占2.98%，该矿属于高氧化率、高结合率的氧化铜矿。

(2) 矿石中主要含有蓝铜矿、孔雀石、硅孔雀石、斑铜矿、辉铜矿、黄铁矿、褐铁矿等金属矿物，脉石矿物以石英、斜长石、钾长石、黑云母为主，该矿石矿物成分复杂，且共生关系密切。

(3) 在工艺矿物学研究的基础上，采用硫化浮选法回收氧化铜矿，经“一粗一扫”流程获得铜品位28.23%，回收率为56.18%的铜精矿。

(4) 浮选尾矿直接浸出，选用4%的稀硫酸作为浸出剂，固液比为1:3，浸出2.0 h，铜的浸出率为91.5%。

(5) 对于本高氧化率、高结合率氧化铜矿，采用硫化浮选—硫酸浸出的选冶联合工艺，获得了良好的回收效果，铜的总回收率达到96.25%，为这类铜矿的高效回收提供参考。

参考文献：

- [1] 羊建波, 柳群义, 陈其慎, 等. 未来10年中国矿山铜供应能力分析[J]. *中国矿业*, 2014, 23(10):1-4.
YANG J B, LIU Q Y, CHEN Q S, et al. Analysis of mine copper supply capacity in China in the next 10 years[J]. *China Mining Industry*, 2014, 23(10):1-4.
- [2] 王德英, 杨社平, 孙广周, 等. 云南某高碳氧化铜矿浮选实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(6):144-148.
WANG D Y, YANG S P, SUN G Z, et al. Flotation test for high carbon copper oxide ore of Yunnan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(6):144-148.
- [3] 李向益, 王世涛, 曾茂青, 等. 云南某高碳酸盐型含银氧化铜矿中铜银同步浮选实验[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):105-110.
LI X Y, WANG S T, ZENG M Q, et al. Experimental research on synchronous flotation of copper and silver in a silver-bearing copper oxide ore with high carbonate gangue from Yunnan[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):105-110.
- [4] 彭宇, 肖发新, 孙树臣, 等. 高碱性脉石低品位氧化铜矿提铜研究进展[J]. *有色金属科学与工程*, 2020, 11(5):69-74.
PENG Y, XIAO F X, SUN S C, et al. Research progress of copper extraction from low-grade oxidized copper ore with high alkaline gangue[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2020, 11(5):69-74.
- [5] 胡俊. 刚果(金)某氧化铜矿石浮选实验研究[J]. *黄金*, 2021, 42(1):71-74.
HU J. Experimental study on flotation of a copper oxide ore from Congo (DRC)[J]. *Gold*, 2021, 42(1):71-74.
- [6] 文书明. 孔雀石表面黄药吸附层稳定性实验研究[J]. 中

国矿业, 2001(4):60-62+76.

WEN S M. Experimental study on stability of xanthate adsorption layer on malachite surface[J]. *China Mining Industry*, 2001(4):60-62+76.

[7] 印万忠, 吴凯. 难选氧化铜矿选冶技术现状与展望[J]. *有色金属工程*, 2013, 3(6):66-70.

YIN W Z, WU K. Current status and prospect of refractory copper oxide smelting technology[J]. *Nonferrous Metal Engineering*, 2013, 3(6):66-70.

[8] 王万平. 氧化铜银矿中铜的高效利用及共生银的强化回收研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.

WANG W P. Study on high efficiency utilization of copper and enhanced recovery of co-occurring silver in copper oxide silver ore [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.

[9] 王美丽, 丰奇成, 王涵. 氧化铜矿选冶研究现状及展望[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):103-109.

WANG M L, FENG Q C, WANG H. Current research situation and prospect in beneficiation-metallurgy of copper oxide ores[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):103-109.

[10] 王传龙, 于传兵, 康金星, 等. 某氧硫混合型铜矿浮选工

艺研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021(3):93-98+103.

WANG C L, YU C B, KANG J X, et al. Study on flotation process of a mixed oxy-sulfur copper mine[J]. *Nonferrous Metals (Beneficiation Section)*, 2021(3):93-98+103.

[11] 潘自维, 路良山, 张立征, 等. 新疆难处理铜矿浮选实验研究与应用[J]. *矿产综合利用*, 2019(3):31-35.

PAN Z W, LU L S, ZHANG L Z, et al. Experimental research and application of flotation of refractory copper ore in Xinjiang[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(3):31-35.

[12] 吕超, 李尔东, 乔元栋, 等. 西藏某高结合率氧化铜矿选冶联合回收实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(5):177-181.

LYU C, LI E D, QIAO Y D, et al. Experimental study on the combined recovery of copper oxide with high binding rate in Xizang[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(5):177-181.

[13] 张宏伟, 李忠仙, 先凤学, 等. 云南腾冲铜铁矿工艺矿物学研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021(3):8-14.

ZHANG H W, LI Z X, XIAN F X, et al. Study on process mineralogy of Tengchong copper and iron ore in Yunnan Province[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Part)*, 2021(3):8-14.

Process Mineralogy and Recovery Process of a Copper Oxide Mine in Niger

HUANG Dianqiang^{1,2,3}, CUI Yiqi^{1,2,3}, XIAO Youming^{1,3}, WANG Jing^{1,2,3},
ZHANG Yang^{1,2,3}, TONG Xiong^{1,2,3}

(1.School of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2.Provincial and Ministry Jointly Build the State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 3.National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Mine Tailings Resources Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China)

Abstract: Taking a copper oxide ore from Niger as a research object, a detailed process mineralogical study on the raw ore was carried out by chemical analysis, X-ray diffraction analysis and optical microscope analysis. The results show that the original ore contains 6.04% copper, 65.07% of which is free copper oxide and 31.95% is bound copper oxide, respectively, which is a high binding rate copper oxide ore. The metallic minerals in the ore are mainly malachite, blue copper ore, silica malachite, pyroxene, pyrite and limonite, and the vein minerals include potassium feldspar, plagioclase, quartz and black mica, which is a complex mineral composition. Most of the copper in the original ore exists in the form of blue copper ore and malachite, and is mainly embedded in quartz, feldspar and other veinlets. The combined flotation-leaching process was proposed in the paper. After flotation, a copper concentrate with a copper grade of 28.23% and a recovery of 56.18% was obtained, and the tailings were directly leached with dilute sulfuric acid, with a leaching rate of 91.15% and a comprehensive recovery of 96.25% copper.

Keywords: Niger; copper oxide ore; process mineralogy; combined metallurgical processing