穆利亚希高结合率氧化铜矿柱浸试验研究①

刘亚平[1]，黄志豪[2]，王洪江[2]，张润芳[2]，白龙剑[2]，盛泽辰[2]
（1.中色卢安夏铜业有限公司，赞比亚 卢安夏 999134；2.北京科技大学 土木与资源工程学院，北京 100083）

摘 要：针对赞比亚穆利亚希湿法厂高结合率氧化铜矿开展了柱浸试验研究，探究柱浸-1 mm 粉矿比例、熟化酸耗、滴淋酸耗对铜浸出率的影响。结果表明，影响铜浸出率的因素主次顺序为：粉矿比例>滴淋酸耗>熟化酸耗，铜浸出的适宜条件为：粉矿比例 53%、滴淋酸耗 20 kg/t、熟化酸耗 10 kg/t，该条件下 Cu 浸出率可达 72.86%，比现场生产提高了 2.56 百分点。浸出渣物相和形貌分析结果表明，滴淋柱浸主要浸出自由氧化铜中的铜，渣中主要残余铜矿物为结合氧化铜和硫化铜，且柱浸过程易生成硫酸钙沉淀并覆盖在矿物表面，影响铜浸出率。

关键词：湿法炼铜；氧化铜矿；柱浸；堆浸；硫酸熟化；滴淋浸出
中图分类号：TF811　　**文献标志码**：A　　doi：10.3969/j.issn.0253-6099.2025.06.027
文章编号：0253-6099(2025)06-0151-06

Experimental Study on Column Leaching of High Binding-Rate Copper Oxide Ore in Muliashi

LIU Yaping[1], HUANG Zhihao[2], WANG Hongjiang[2], ZHANG Runfang[2], BAI Longjian[2], SHENG Zechen[2]
(1.*CNMC Luanshya Copper Mines PLC*, *Luanshya* 999134, *Zambia*; 2.*School of Civil and Resource Engineering*, *University of Science and Technology Beijing*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Column leaching experiments were carried out for the high binding-rate copper oxide ore from Mulashi hydrometallurgical plant in Zambia to investigate the effects of proportion of powdered ore (-1 mm), acid consumption for curing and consumption of dripped acid on copper leaching rate. The results show that those factors, such as proportion of powder ore, acid consumption for curing and consumption of dripped acid are in descending order of influence on copper leaching rate. Under the following conditions, including powdered ore accounting for 53%, dripped acid consumption of 20 kg/t and acid consumption of 10 kg/t for curing, the copper leaching rate can reach 72.86%, up by 2.56 percentage points compared to on-site production. Phase and morphology analysis of leaching residue shows that Cu in free copper oxide is mainly leached out by column leaching with dripped acid, while the copper minerals left in residue are bound to copper oxide and copper sulfide. Besides, $CaSO_4$ precipitate is prone to be formed to cover mineral surface during column leaching, thus affecting the copper leaching rate.

Key words: hydrometallurgical copper extraction; copper oxide ore; column leaching; heap leaching; sulfuric acid curing; leaching with dripped acid

铜矿资源广泛分布在世界各个国家和地区，其中智利和美国的铜矿资源储量分别占世界铜矿资源储量的 24.6%和 13.8%[1]。我国铜矿资源具有贫矿多、富矿少、难选冶矿多等特点，而且近年来，随着铜矿资源的开发利用，高品位、易选铜矿越来越少[2-3]。因此，加大铜矿资源的选别技术研究，尤其是开展复杂难处理氧化铜矿的开发利用研究迫在眉睫。

中色赞比亚穆利亚希湿法炼铜项目于 2012 年 4 月建成投产，设计年处理矿石量 450 万 t，年产阴极铜 4.0 万 t。该地铜矿主要以氧化物形式存在，通常与褐铁矿、黑云母等矿物结合，属难处理矿石。堆浸和搅拌浸出是处理氧化铜矿经济高效的浸出工艺，在实际生产中应用较为普遍；也可以将两种湿法冶金处理工艺相结合对原矿进行处理，硬岩矿破碎到一定块度进

① **收稿日期**：2025-06-30
作者简介：刘亚平(1966—)，男，河南镇平人，硕士，高级工程师，主要从事选矿及湿法工艺管理和技术研究工作。E-mail：2129892395@qq.com
通信作者：王洪江(1967—)，男，河南三门峡人，教授，博士研究生导师，主要从事充填采矿技术研究。E-mail：wanghj1988@126.com

行堆浸,软岩矿通过破碎、磨矿后进行搅拌浸出。对于自由氧化率较低的矿石,浓酸预处理技术[4-5]逐渐得到人们的关注。在筑堆之前向矿石中拌入浓硫酸,使矿样充分湿润但不被浸出液浸泡,形成气液固三相共存的稳定体系,提高金属的浸出速率和浸出率。

穆利亚希矿石的特殊性质决定了不能采用常规流程,搅拌浸出必须加温,堆浸必须熟化[6]。常温情况下搅拌浸出铜浸出率仅 40%,堆浸铜浸出率约 70%。由于赞比亚地区能源电力紧张、用电成本高,通过扩大堆浸规模、缩小搅拌浸出规模,可以增加产量、节约成本、提高质量和效率[7]。此外,在现场堆浸过程中,矿石块度选择也具有挑战性:小块度矿石在室内试验中表现出浸出速率高和浸出率高,但现场浸出时因渗透性能不佳导致浸出失败;大块度矿石虽具有良好的渗透性,却不利于浸出率的提升[8]。

堆浸工艺以其成本低、管理简单、环境友好等优势[9],受到了广大研究者的关注,并在国内外诸多矿山得到广泛应用。但堆浸工艺也存在矿堆渗透性差、浸出周期长、环境对浸出影响大等问题。柱浸试验能很好地模拟现场堆浸工艺,优化试验参数,为堆浸生产技术筑牢技术支撑[10]。本文通过室内柱浸试验,重点考察了粉矿比例、熟化酸耗及滴淋酸耗对铜浸出的影响,为优化现场工艺、提高铜浸出率提供指导。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料

1.1.1 矿石性质

试验所用原料为赞比亚穆利亚希某露天坑具有代表性的氧化铜矿石,其中 Heapleaching 矿样(简称 H 矿)为硬岩矿筛上物,用于堆浸工艺;B14 矿样(简称 B 矿)为硬岩矿筛下物,用于搅拌浸出。矿样中主要有价金属元素为 Cu,其中含有高含量(质量分数)的氧化铜和结合铜,同时还含有多种耗酸杂质如 CaO、MgO、Al_2O_3。原矿化学多元素分析结果见表 1,铜物相分析结果见表 2。

表 1 原矿化学多元素分析结果(质量分数)

Table 1 Multi-elemental analysis of raw ore %

矿石名称	Cu	Fe	P	Mn	Ti	K_2O	Na_2O	CaO
H 矿	1.60	6.04	0.047	0.36	0.38	7.01	0.13	0.57
B 矿	1.67	6.32	0.038	0.42	0.29	4.38	0.058	0.25
矿石名称	MgO	Al_2O_3	SiO_2	Ni	Zn	S	Co	
H 矿	6.04	14.20	58.96	0.004 4	0.004 2	0.38	0.049	
B 矿	7.62	11.40	61.73	0.005	0.005 8	0.026	0.049	

表 2 原矿铜物相分析结果

Table 2 Analysis of copper phase in raw ore

铜物相	H 矿		B 矿	
	含量/%	分布率/%	含量/%	分布率/%
自由氧化铜	1.000	63.90	0.650	39.20
结合氧化铜	0.330	21.10	0.980	59.10
次生硫化铜	0.055	3.50	0.015	0.90
原生硫化铜	0.180	11.50	0.013	0.80
总铜	1.565	100.00	1.658	100.00

1.1.2 原矿筛析

采用大于 2.5 mm 和小于 2.5 mm 的两套新标准石子筛对原矿进行筛分分析,结果如图 1 所示。其中 H 矿-1 mm 粒级占比 41.0%,矿样粒径分布范围大,平均粒径 1.42 mm,粗颗粒较多;B 矿-1 mm 粒级占比 76.5%,平均粒径 0.232 mm,矿样粒度偏细。

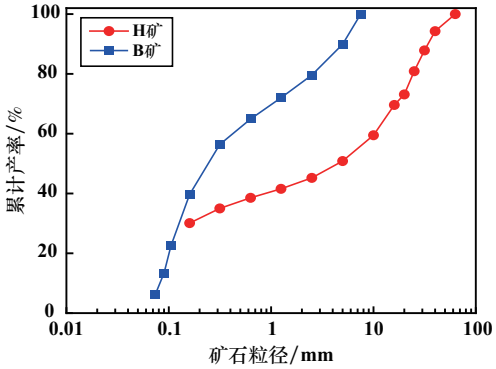


图 1 H 矿和 B 矿筛分分析结果

Fig. 1 Sieving analysis of H ore and B ore

1.2 试验装置及仪器

研制了 5 套相同的柱浸试验装置,均为有机玻璃材质,内径 0.15 m,高 1.0 m。柱浸试验装置从上往下依次为上位箱、带螺旋阀门的进液管、浸柱(底部带有多孔板)、带螺旋阀门的出液管。浸出时各部件串联连接,浸出液收集在可移动的下位箱中。柱浸试验装置见图 2。

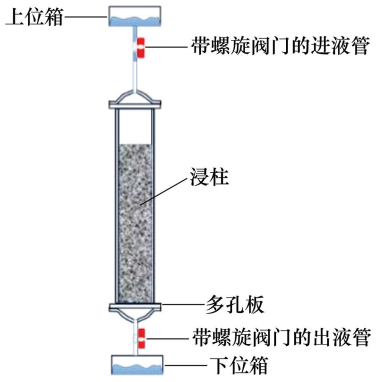


图 2 柱浸试验装置

Fig. 2 Column leaching test device

主要试验仪器包括 iCAP 7400 型电感耦合等离子原子发射光谱仪、pHS-3E 型实验室 pH 计、ACS 型工业计数秤、混料机等。

1.3　试验方法

采用三因素五水平均匀设计法进行试验方案设计。根据穆利亚希湿法厂生产数据统计,H 矿产量占 64.7%,B 矿产量占 35.3%。两种原矿按照现场生产比例混匀,得到露天坑硬岩矿破碎后的矿样粒级组成,其中-1 mm粒级占 53%。

参照现场生产情况,将-1 mm粒级粉矿占比在 41%~53%区间设置 5 个水平;熟化酸耗在 6~10 kg/t 区间设置 5 个水平;滴淋酸耗在 12~20 kg/t 区间设置 5 个水平。

按照试验方案,参照现场原矿生产比例分别配矿 19.54 kg,然后进行聚团、拌酸熟化、滴淋浸出。

1) 聚团。称取混匀的矿样放入混料机,并加入合适的黏结剂进行造粒成团。其中黏结剂应具有以下特点:① 矿石成球后具有足够的湿强度;② 不在粒团表面形成致密覆盖层;③ 不与本次溶浸剂硫酸及矿石中物质反应而影响柱浸;④ 价格低廉,易获取,易添加。根据前期的探索,采用清水作黏结剂并多次均匀喷洒进行聚团。

2) 拌酸熟化。聚团完成后,按设计的熟化酸耗量取硫酸,用玻璃管少量多次加入物料中,搅拌均匀后将物料装入自制柱浸装置,密封静置熟化 30 d。

3) 滴淋浸出。熟化完成后,进入滴淋浸出阶段。连接滴淋装置,在浸出柱底部事先垫上一层耐酸滤布并装上一层 2~3 cm 玻璃珠,以防局部粉矿量过大造成积液。在柱体顶部也进行相似操作,使酸液能尽量均匀地流到柱体各部位,提高浸出率。浸出剂为稀硫酸,通过进液管阀门控制滴淋强度。设置滴淋强度为 7.5 L/(m^2 · h),每天滴淋一次,滴淋周期为 90 d。

4) 化验分析。当浸出液中 Cu 质量浓度小于 3 g/L 且硫酸不足时,补加浓硫酸以控制 pH 值在 1.5 左右,并补充 20 g/L 稀硫酸保证每日喷淋酸量体积不变;反之,则将浸出液收集,并重新配制稀硫酸,重复上述步骤。每天试验结束后,取部分浸出液试样送 ICP 分析,计算每日铜浸出率。

试验中,熟化阶段使用的试剂主要为质量分数 98%的浓硫酸,其密度为 1.84 g/cm^3;浸出阶段使用质量浓度 20 g/L 的稀硫酸进行滴淋。柱浸试验参数如表 3 所示。

表 3　柱浸试验参数

Table 3　Column leaching test parameters

试验编号	粉矿比例/%	熟化酸耗/(kg · t^{-1})	滴淋酸耗/(kg · t^{-1})
1	41	7	18
2	44	9	16
3	47	6	14
4	50	8	12
5	53	10	20

2　试验结果及讨论

2.1　各影响因素对铜浸出效果分析

5 组柱浸试验结果见图 3。该图显示了 5 组均匀试验条件下柱浸过程中 Cu 浸出率随时间的变化规律。由于均匀试验设计中 3 个因素(粉矿比例、熟化酸耗、滴淋酸耗)在每一试验组合中均同时变化,动力学曲线的形状受多个因素共同影响,无法通过曲线趋势直观判断某一单独因素的主导效应。其中 5 号柱浸出 90 d 的浸出率最高,达到了 72.86%,且柱浸初期的浸出率高于其他 4 组。这是由于 5 号柱粉矿比例、熟化酸耗及滴淋酸耗均高于其他 4 组。柱浸初期铜浸出率较低,这是由于初期酸液主要与铜矿物表面的碱性矿物(Al_2O_3、CaO、MgO)等反应,与铜矿物直接接触反应的酸液较少。柱浸中期,随着酸液不断加入,矿石颗粒表面碱性矿物减少,大量酸液与裸露的铜矿物反应,且在此期间,铁、锰离子进入浸出体系,催化促进了矿石中部分结合氧化铜和次生硫化铜反应,铜浸出速率及浸出率随之增加。柱浸后期,随着反应的进行,自由氧化铜基本反应完全,剩余结合氧化铜与原生硫化铜反应难度较大,反应速率开始下降,铜浸出率也趋于稳定。

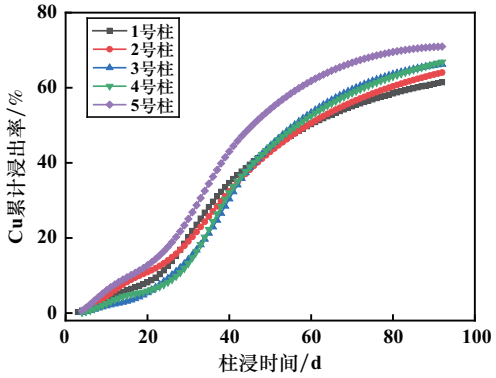


图 3　柱浸试验结果

Fig. 3　Column leaching test results

为定量分析粉矿比例、熟化酸耗、滴淋酸耗三因素对浸出终点效果的影响,选取浸出 90 d 时的终了浸出

率 Y_{90}作为响应值,利用多元线性回归方法建立因素效应模型。需要特别指出的是,该回归方程仅用于分析终点浸出率与各因素之间的统计关系,而不用于描述图3所示的浸出动力学过程。回归方程式为:

$$Y_{90} = 31.750\,3 + 0.646\,4X_1 + 0.065\,7X_2 + 0.246\,6X_3 \quad (1)$$

式中:Y_{90}为浸出90 d的终了浸出率,%;X_1为粉矿比例,%;X_2为熟化酸耗,kg/t;X_3为滴淋酸耗,kg/t。

浸出率拟合值及拟合误差如表4所示。

表4 浸出率拟合值及拟合误差

Table 4 Fitted value and fit error of leaching rate

样本	实测值/%	拟合值/%	误差/%
1	63.920 0	64.373 9	−0.710
2	66.250 0	65.796 1	0.685
3	67.350 0	66.894 7	0.676
4	67.870 0	68.326 8	−0.673
5	72.860 0	72.858 6	0.001

计算可得,所得方程相关系数 $R^2 = 0.990\,5$,总体显著性检验值 $F = 17.040\,4$,Durbin-Watson统计量 $d = 2.253\,6$,为正态分布。由表4可知,所有样本的拟合误差均在1%以下,可见此回归方程能很好地拟合铜浸出率与粉矿比例、熟化酸耗、滴淋酸耗之间的关系,具有较高的可靠度。

由式(1)可知,铜浸出率与粉矿比例 X_1 成正相关。这主要是因为矿石粒度越细,铜矿物单体解离度和暴露程度越大,浸出液与目标矿物接触的可能性越大,浸出反应越充分。

铜浸出率与熟化酸耗 X_2成正相关。一方面,浓硫酸通过破坏铜矿石表面包裹的黑云母结构使大量氧化铜矿物裸露出来,酸液可以与含铜矿物直接接触,从而大幅提高铜浸出率。另一方面,由于浓硫酸是一种强氧化剂,特别是在较高的温度条件下,其氧化能力特别显著。体系电位提高,硫化铜等难浸出矿物被氧化,有利于铜的浸出。此外,在熟化过程中,浓硫酸与湿矿样剧烈反应,使得整个体系温度升高,其吉布斯自由能变始终为负,有利于反应正向进行,促进铜的浸出。

铜浸出率与滴淋酸耗 X_3成正相关。分析其原因,可能是增加硫酸用量可以使反应体系维持较低的pH值、抑制沉淀的生成。此外也保证有足够的酸与氧化铜矿物反应,进而促进铜的浸出。

变量 X_1检验值 $t_1 = 5.470\,7$,变量 X_2检验值 $t_2 = 0.160\,6$,变量 X_3检验值 $t_3 = 1.776\,0$,$t_1 > t_3 > t_2$。这表明在试验因素水平内对铜浸出率的贡献程度从大到小为:粉矿比例>滴淋酸耗>熟化酸耗。

回归分析结果表明,粉矿比例53%、滴淋酸耗20 kg/t、熟化酸耗10 kg/t时,Cu浸出率可达72.86%,比现场生产提高了2.56百分点。

2.2 浸出渣成分分析

2.2.1 浸出渣化学成分分析

滴淋浸出90 d后,采集浸出渣进行化学成分分析,并与原矿化学成分进行对比,结果如表5所示。由表5可知,滴淋结束后,5组浸柱的浸出渣中Cu质量分数比浸出前降低了约1百分点,平均浸出率达到了67.62%;碱性脉石矿物 CaO、K_2O、MgO、Al_2O_3等也具有较高的浸出率。此外,Mn浸出率达到35.62%,Fe浸出率为4.32%,SiO_2基本不被浸出。

2.2.2 浸出渣铜物相分析

原矿与浸出渣铜物相分析结果见表6。滴淋结束后,5组浸柱的浸出渣中自由氧化铜平均浸出率高达90.26%,结合氧化铜平均浸出率为44.64%,原生硫化铜、次生硫化铜平均浸出率较低,说明柱浸过程主要是浸出自由氧化铜中的铜。

表5 原矿与浸出渣化学多元素分析结果

Table 5 Multi-elemental analysis results of raw ore and leaching residue

元素	原矿中元素含量(质量分数)/%					浸出渣中元素含量(质量分数)/%					平均浸出率/%
	1号柱	2号柱	3号柱	4号柱	5号柱	1号柱	2号柱	3号柱	4号柱	5号柱	
Mn	0.360	0.366	0.372	0.377	0.383	0.180	0.200	0.260	0.280	0.280	35.62
CaO	0.569	0.538	0.507	0.476	0.445	0.550	0.316	0.383	0.366	0.290	25.40
Cu	1.598	1.605	1.613	1.620	1.627	0.577	0.542	0.527	0.521	0.442	67.62
Fe	6.036	6.063	6.090	6.118	6.145	5.970	5.980	6.042	5.048	6.091	4.32
MgO	6.040	6.193	6.346	6.499	6.653	5.813	5.882	5.641	5.875	5.057	10.70
K_2O	7.009	6.754	6.501	6.247	5.993	5.951	5.959	5.491	5.472	5.173	13.70
Al_2O_3	14.200	13.930	13.660	13.390	13.120	13.424	13.187	12.514	12.533	12.276	6.40
SiO_2	58.960	59.230	59.500	59.770	60.030	58.370	58.840	59.200	59.470	59.950	0.56

表 6　原矿与浸出渣铜物相分析结果

Table 6　Analysis results of copper phase in raw ore and leaching residue

相别	物料种类	含量(质量分数)/%					分布率/%					平均浸出率/%
		1 号柱	2 号柱	3 号柱	4 号柱	5 号柱	1 号柱	2 号柱	3 号柱	4 号柱	5 号柱	
自由氧化铜	原矿	0.996	0.963	0.930	0.897	0.864	63.8	61.3	58.8	56.3	54.0	90.26
	浸出渣	0.150	0.110	0.100	0.053	0.048	26.0	20.6	18.5	9.8	11.0	
结合氧化铜	原矿	0.329	0.392	0.456	0.519	0.582	21.1	25.0	28.8	32.6	36.3	44.64
	浸出渣	0.200	0.220	0.260	0.320	0.240	34.7	41.2	48.1	59.2	54.9	
原生硫化铜	原矿	0.181	0.165	0.149	0.132	0.116	11.6	10.5	9.4	83.0	7.2	3.51
	浸出渣	0.179	0.158	0.139	0.127	0.114	31.0	29.6	26.0	23.5	26.1	
次生硫化铜	原矿	0.055	0.051	0.047	0.043	0.040	3.5	3.2	2.9	27.0	2.5	10.89
	浸出渣	0.047	0.046	0.042	0.040	0.035	8.2	8.7	7.8	7.4	8.0	

2.2.3　浸出渣形貌分析

采用 XRD 与 SEM-EDS 对 5 号柱原矿及浸出渣进行表征,图 4 为浸出前后 XRD 图谱,图 5 为原矿及浸出渣表面形貌,图 6 为 5 号柱浸出渣 EDS 微区分析结果。

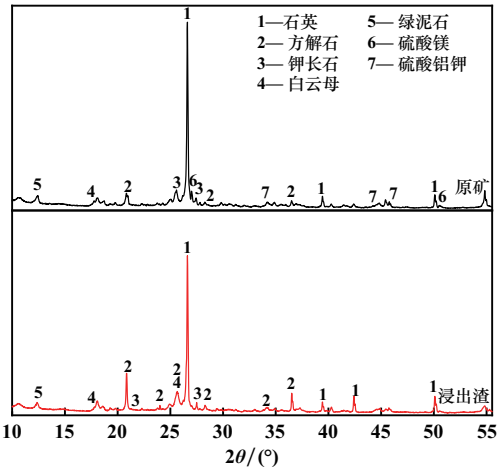
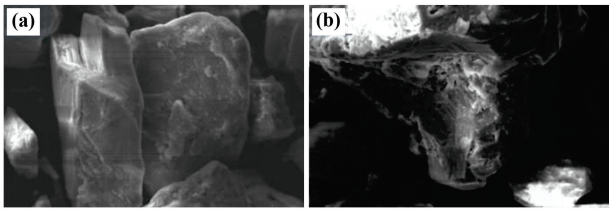


图 4　5 号柱原矿和浸出渣 XRD 图谱

Fig. 4　XRD patterns of raw ore and leaching residue in Column 5



(a) 原矿; (b) 浸出渣

图 5　原矿及浸出渣表面形貌

Fig. 5　Surface morphology of raw ore and leaching residue

由图 5 可知,原矿表面结构致密,晶体形状规则,晶体与晶体之间连续性好;浸出渣由于受到硫酸腐蚀,表面结构疏松,颗粒表面矿物及脉石等物质溶解,使得次生孔裂隙明显。

由图 6 可知,谱图 5 微区的主要元素组成为 O、Si、Al,对应矿物为 SiO_2,Si 元素所在区域在矿石表面呈现凸起,这是由于 Si 元素主要以 SiO_2形式存在于矿物中,且在滴淋过程中不易被浸出。谱图 6 微区的主要元素组成为 O、S、Ca、Al,随着氧化铜矿柱浸反应的进行,其矿样表面有致密性的柱状覆盖物,将浸出渣进行水洗,易溶解的硫酸盐溶解在水中,浸出后,矿体表面仍有白色结晶物附着。结合浸出渣的 XRD 和 EDS 分析结果,推断矿样表面的覆盖物为硫酸钙[10],此覆盖物影响铜的浸出进程。

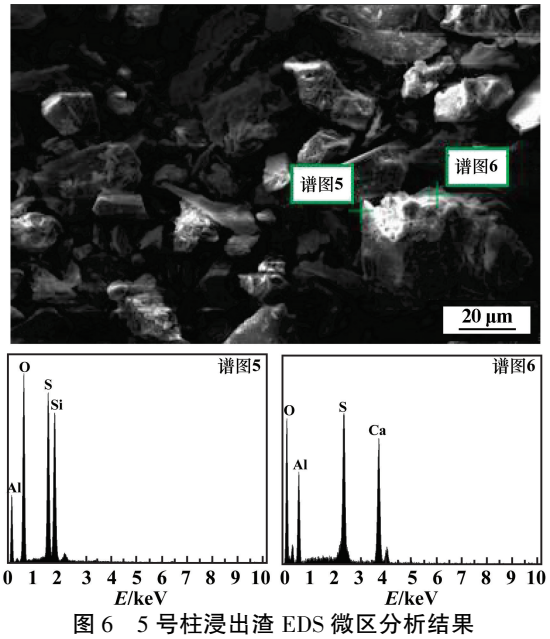


图 6　5 号柱浸出渣 EDS 微区分析结果

Fig. 6　EDS patterns of leaching residue in Column 5

3　结论

1) 利用 DPS 软件,回归分析得到 Cu 浸出率与各影响因素之间的数学方程表达式,得出各因素对 Cu 浸出率贡献程度从大到小为:粉矿比例>滴淋酸耗>熟化酸耗。

2) 均匀设计试验方案得到的适宜试验条件为:粉矿比例 53%、滴淋酸耗 20 kg/t、熟化酸耗 10 kg/t,该条

件下 Cu 浸出率可达 72.86%,Cu 浸出率比现场生产提高了 2.56 百分点。

3) 由柱浸浸出渣成分分析可知,滴淋柱浸过程中,主要浸出自由氧化铜中的铜,渣中主要残余铜矿物为结合氧化铜和硫化铜,且柱浸过程易生成硫酸钙沉淀并覆盖在矿物表面,影响浸出反应的顺利进行。

参考文献(References):

[1] 杨卉芃,王威,柳林,等. 全球铜矿开发利用技术发展趋势[J]. 矿产保护与利用, 2021,41(5):134-139.
YANG Huipeng, WANG Wei, LIU Lin, et al. Development trend of global copper mine exploitation and utilization technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(5):134-139.

[2] 张磊,蒋开喜,谢锋,等. 氧化铜精矿熔炼过程中铜、钴、铁的还原行为[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2024,45(3):337-345.
ZHANG Lei, JIANG Kaixi, XIE Feng, et al. Reduction behaviors of copper, cobalt and iron in smelting of copper oxide concentrate[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2024,45(3):337-345.

[3] 魏宗武,杨谦,黄涛,等. 某低品位难选铜铅锌硫化矿浮选分离试验研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):58-61.
WEI Zongwu, YANG Qian, HUANG Tao, et al. Flotation of low-grade refractory copper-lead-zinc sulfide ore for mineral separation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):58-61.

[4] 徐晓衣,俞献林,杨招君,等. 新疆某低品位难选氧化铜矿选矿试验研究[J]. 矿冶工程, 2019,39(6):39-42.
XU Xiaoyi, YU Xianlin, YANG Zhaojun, et al. Beneficiation of refractory low-grade copper oxide ore in Xinjiang[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2019,39(6):39-42.

[5] 蔡俊,高峰,颜文斌,等. 浓硫酸熟化浸出提取湘西石煤中的钒[J]. 稀有金属与硬质合金, 2023,51(4):24-27.
CAI Jun, GAO Feng, YAN Wenbin, et al. Extraction of vanadium from stone coal in Xiangxi by concentrated sulfuric acid curing leaching[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2023,51(4):24-27.

[6] 刘亚平,杨增军,龙生发,等. 赞比亚穆里亚希湿法厂工艺创新生产实践[J]. 中国金属通报, 2016(12):54-57.
LIU Yaping, YANG Zengjun, LONG Shengfa, et al. Production practice of technology innovation in Zambia Muliashi leach plant[J]. China Metal Bulletin, 2016(12):54-57.

[7] 甘国贤,马保中,张文娟,等. 低品位铜镍钴氧化矿堆浸扩大试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(12):1-8.
GAN Guoxian, MA Baozhong, ZHANG Wenjuan, et al. Expansion test on heap leaching of low-grade copper-nickel-cobalt oxide ores[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(12):1-8.

[8] 艾纯明,孙萍萍,王贻明,等. 表面活性剂在溶浸采矿中的研究与应用现状[J]. 金属矿山, 2019(5):9-13.
AI Chunming, SUN Pingping, WANG Yiming, et al. Research and application status on the surfactants in solution mining[J]. Metal Mine, 2019(5):9-13.

[9] 李相良,薛济来,秦树辰,等. 低品位氧化铜钴矿堆浸试验研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(5):105-108.
LI Xiangliang, XUE Jilai, QIN Shuchen, et al. Heap leaching of low-grade copper-cobalt oxide ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(5):105-108.

[10] 代宗,方建军,张琳,等. 基于 RSM 的难处理氧化铜矿酸浸试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2018,37(8):2378-2384.
DAI Zong, FANG Jianjun, ZHANG Lin, et al. Experimental study on acid leaching of a copper oxide based on RSM model[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018,37(8):2378-2384.

引用本文:刘亚平,黄志豪,王洪江,等. 穆利亚希高结合率氧化铜矿柱浸试验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(6):151-156.
LIU Yaping, HUANG Zhihao, WANG Hongjiang, et al. Experimental study on column leaching of high binding-rate copper oxide ore in Muliashi[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(6):151-156.

关于检测学术不端的公告

为弘扬良好学术风气,保护知识产权,防止抄袭、伪造、篡改、不当署名、一稿多投、一个学术成果多篇发表等学术不端行为,本刊与中国学术期刊(光盘版)电子杂志社合作,由中国学术期刊(光盘版)电子杂志社学术不端文献检测中心对本刊网络版刊登的文章进行系统检测,并按照“《中国学术期刊网络出版总库》删除学术不端文献暂行办法”,对出现以上学术不端行为的文章作出严肃处理。

特此公告!

矿冶工程杂志编辑部

2025 年 12 月