

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.10.004

硫化铜精矿氧压浸出工艺研究

全一喆^{1,2}, 刘自亮^{1,2}, 王恒辉^{1,2}, 孟凡成³

(1. 长沙有色冶金设计研究院有限公司, 长沙 410001;

2. 湖南省铅锌清洁冶炼工程技术研究中心, 长沙 410001;

3. 中国科学院过程工程研究所 湿法冶金清洁生产国家工程实验室, 北京 100190)

摘要:针对硫化铜精矿火法冶炼工艺副产硫酸,在硫酸滞销地区难以大规模应用的难题,研究了硫化铜精矿氧压浸出工艺。对某硫化铜精矿原料进行了成分、物相及有价元素赋存状态进行了分析,从理论上分析了硫化铜精矿氧压浸出的可行性,研究了一段氧压浸出、两段氧压浸出工艺的浸出效果。结果表明,采用两段逆流氧压浸出,一段控制温度 135~140 °C、总压 1.3~1.4 MPa、时间 2~2.5 h、分散剂加入量 4‰~5‰、沉矾剂加入量 2.5‰~3‰,二段控制温度 165~170 °C、总压 1.4~1.5 MPa、时间 2.5~3 h、分散剂加入量 6‰~7‰、沉矾剂加入量 3‰~3.5‰,铜浸出率为 90.49%~92.25%。一段浸出液含铜 90.78~92.34 g/L、铁 10.81~13.84 g/L、硫酸 28~30 g/L,可送后续除铁净化—电积生产电铜。

关键词:湿法炼铜;硫化铜精矿;氧压浸出

中图分类号:TF811

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)10-0030-08

Study on Oxygen Pressure Leaching Process of Copper Sulfide Concentrate

TONG Yizhe^{1,2}, LIU Ziliang^{1,2}, WANG Henghui^{1,2}, MENG Fancheng³

(1. CINF Engineering Corporation Limited, Changsha 410001, China;

2. Hunan Lead-Zinc Clean Smelting Engineering Technology Research Center, Changsha 410001, China;

3. National Engineering Laboratory of Cleaner Production Technology of Hydrometallurgy, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Address to the by-product sulfuric acid in the pyrometallurgical smelting process of copper sulfide concentrate is difficult to be applied on a large scale in the unsalable area of sulfuric acid, the oxygen pressure leaching process of copper sulfide concentrate was studied. The composition, phase and occurrence state of valuable elements of a copper sulfide concentrate raw material were analyzed. The feasibility of oxygen pressure leaching of copper sulfide concentrate was analyzed theoretically. The leaching effects of one-stage oxygen pressure leaching and two-stage oxygen pressure leaching process were studied. The results show that the copper leaching rate is 90.49%—92.25% by two-stage countercurrent oxygen pressure leaching. In the first stage, the temperature is 135—140 °C, the total pressure is 1.3—1.4 MPa, the time is 2—2.5 h, the amount of dispersant is 4‰—5‰, and the amount of precipitation agent is 2.5‰—3‰. In the second stage, the temperature is 165—170 °C, the total pressure is 1.4—1.5 MPa, the time is 2.5—3 h, the amount of dispersant is 6‰—7‰, and the amount of precipitation agent is 3‰—3.5‰. The leaching solution from the first stage contains copper 90.78—92.34 g/L, iron 10.81—13.84 g/L and H₂SO₄ 28—30 g/L, which can be sent to subsequent iron removal purification-electrowinning to produce electrocopper.

Key words: copper hydrometallurgy; copper sulfide concentrate; oxygen pressure leaching

收稿日期:2024-05-08

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFE0123100)

作者简介:全一喆(1980-),男,教授级高级工程师;通信作者:刘自亮(1991-),男,高级工程师

目前,硫化铜精矿基本是采用火法冶炼,首先将硫化铜精矿中铜冶炼成粗铜,然后将粗铜电解得到阴极铜,含硫烟气送制酸生产硫酸。而氧化铜矿以及低品位硫化铜矿则采用湿法冶金,即浸出一萃取—电积工艺生产电积铜,因原料含硫低不产出硫酸^[1-4]。在一些生产硫化铜精矿的地区,由于周边工业基础薄弱,硫酸无法运输、贮存及销售,也就无法实施火法冶炼硫化铜精矿的工艺方法^[5]。因此,研究类似硫化锌精矿氧压浸出生产硫磺的方法应用于硫化铜精矿的湿法冶金方法具有十分重要的现实意义^[6-7]。虽然硫化锌精矿氧压浸出工艺用于工业生产已有三十余年实践经验,但硫化铜精矿氧压浸出工艺还只是处于试验研究阶段,目前大多数研究工作内容及方法路线与工业化生产还有很大差距^[8-9]。硫化铜精矿氧压浸出工艺最大难点是铜浸出需要高温,温度升高,铜浸出率高,但随之进入浸出液中的铁及硫酸含量增加,后续工序采用中和剂如石灰石降酸除铁,将产出大量中和渣导致铜损失,由于浸出液中铁为 Fe^{3+} ,铁渣过滤性能也差^[10]。2007 年在美国 Arizona 建成一套 6.6 万 t/a 铜氧浸工厂,该厂采用一段高温高压氧浸工艺,产出的浸出液经脱硅后进行铜电积,产出的大部分电积液送往氧化铜矿堆浸降酸,堆浸液经萃取净化后返

回氧压浸出,即进入高压釜的混合电积液酸度低。因此,该厂完全是利用硫化铜精矿氧压浸出产出的多余硫酸用于氧化铜矿堆浸^[11]。

然而,在没有足够氧化铜矿来消耗多余硫酸的地区,在保证铜浸出率的同时,如何控制进入浸出液中的铁及硫酸含量以满足后续电积铜工序的工况要求也具有很大的难度^[12]。针对上述问题,本研究对某硫化铜精矿原料进行了成分、物相及有价元素赋存状态进行了分析,从理论上分析了硫化铜精矿氧压浸出的可行性,研究了一段氧压浸出、两段氧压浸出工艺的浸出效果。

1 铜精矿原料分析与方法

1.1 铜精矿化学成分分析

采用 XRF、ICP 分析铜精矿的化学成分,结果如表 1 所示。由表 1 可以看出,该铜精矿的铜、铁和硫质量分数 ICP 分析结果分别为 22.81%、27.22% 和 30.05%。

1.2 矿石中主要的矿物组成及相对含量

铜精矿的背散射电子像及 MLA 矿物彩图如图 1 所示。从图 1 可知,铜精矿中主要物相为黄铜矿、黄铁矿、石英等,MLA 分析得出的矿物组成及其质量分数见表 2。

表 1 铜精矿化学成分

Table 1 Chemical composition of copper concentrate

/%

测试方法	Cu	Fe	S	Si	Al	K	Ba	Mg	As	Ca	Pb	Ti
XRF	22.65	25.74	30.35	3.59	1.46	0.37	0.23	0.2	0.16	0.13	0.12	0.09
ICP	22.81	27.22	30.05	4.61	1.29	0.47	0.01	0.1	0.24	0.24	0.17	0.15

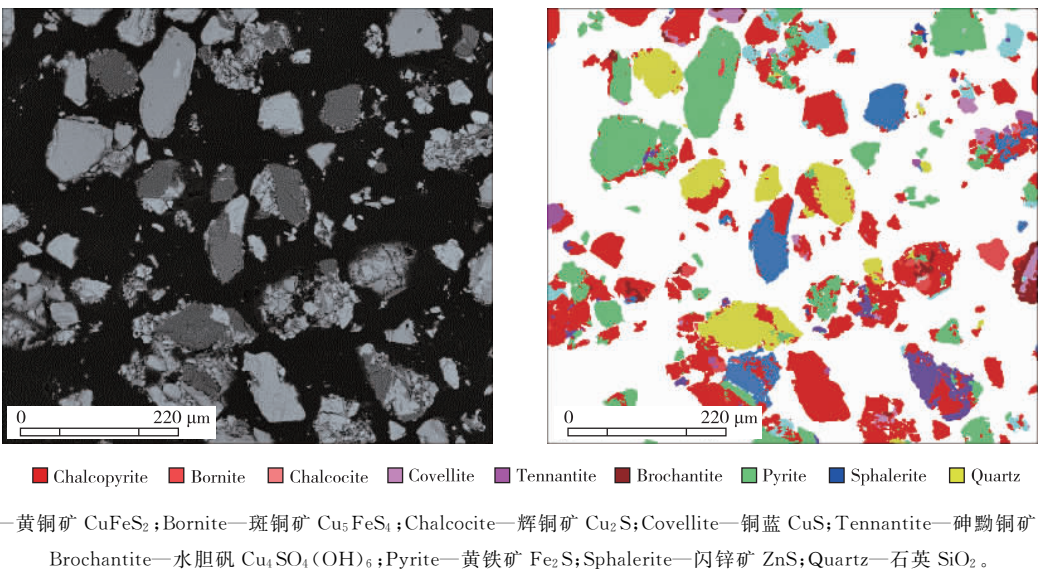


图 1 铜精矿粉背散射电子像和 MLA 矿物彩图

Fig. 1 Backscattered electron image of copper concentrate powder and MLA mineral color map

表 2 各矿物组成 MLA 分析结果
Table 2 MLA analysis results of each mineral composition /%

矿物	黄铜矿	斑铜矿	辉铜矿	铜蓝	黝铜矿	水胆矾	纤铁矾(含铜)	黄铁矿	闪锌矿
质量分数	51.15	2.52	0.00	3.15	0.65	0.93	0.32	24.48	1.04
矿物	石英	白云母-绢云母	黑云母	钠长石	钾长石	斜长石	砷铅铝矾	磷灰石	金红石
质量分数	7.10	4.38	0.05	2.69	0.40	0.02	0.02	0.10	0.21
矿物	菱铁矿	高岭石	绿泥石	褐铁矿	方解石	黝帘石	辉钼矿	方铅矿	铁透闪石
质量分数	0.18	0.05	0.27	0.06	0.00	0.01	0.06	0.03	0.01
矿物	桐石	水磷铝铅矿	磷镁石	钙绿松石	滑石	锆石	独居石	其他	合计
质量分数	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.06	100.0

由表 2 可知,整体而言,铜精矿的主要物相为黄铜矿(51.15%)、黄铁矿(24.48%)、石英(7.10%)、铜蓝(3.15%)、白云母-绢云母(4.38%)、钠长石(2.69%)、斑铜矿(2.52%)、闪锌矿(1.04%),上述物相总量占 96.51%。其它的物相都在 1%以下。

图 2 和图 3 分别为铜精矿的二次电子像和背散射射像,由图 2 可以看出,铜精矿矿物本体棱角分明,呈块状,表面相对致密。图 3 中可以明显看出铜精

矿由三种衬度颜色的矿物颗粒组成,为此 EDS 选取了 3 种衬度位置进行能谱打点分析,位置 1(灰色)中主要为 Fe、S 元素,比对 MLA 分析,不难得出为黄铁矿,其表面光洁、块砾状,棱角分明;位置 2 所在颗粒衬度颜色为浅灰色,EDS 分析表明颗粒由 Cu、Fe、S 组成,应为黄铜矿,其颗粒较之黄铁矿表面略微粗糙,颗粒尺寸略小;位置 3(黑色)颗粒,为 Si、O、Al 元素组成,应为硅铝酸盐的脉石。

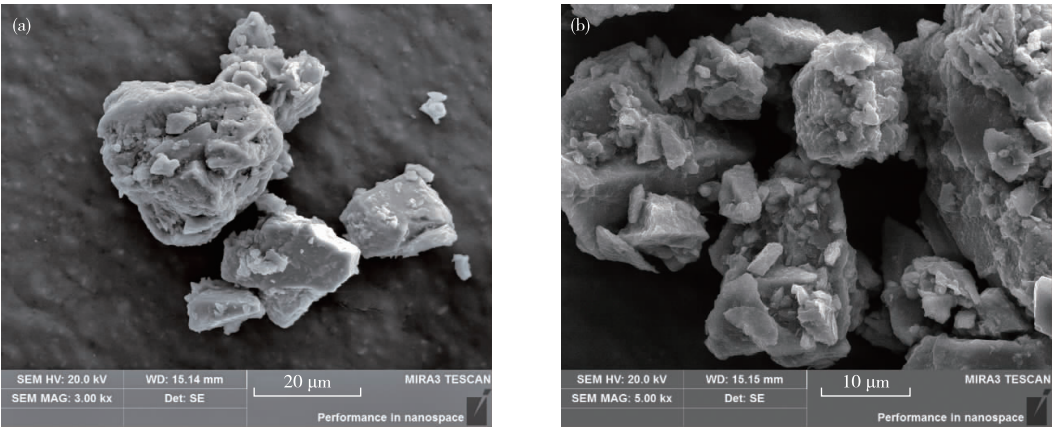


图 2 铜精矿 SEM 形貌
Fig. 2 SEM morphologies of copper concentrate

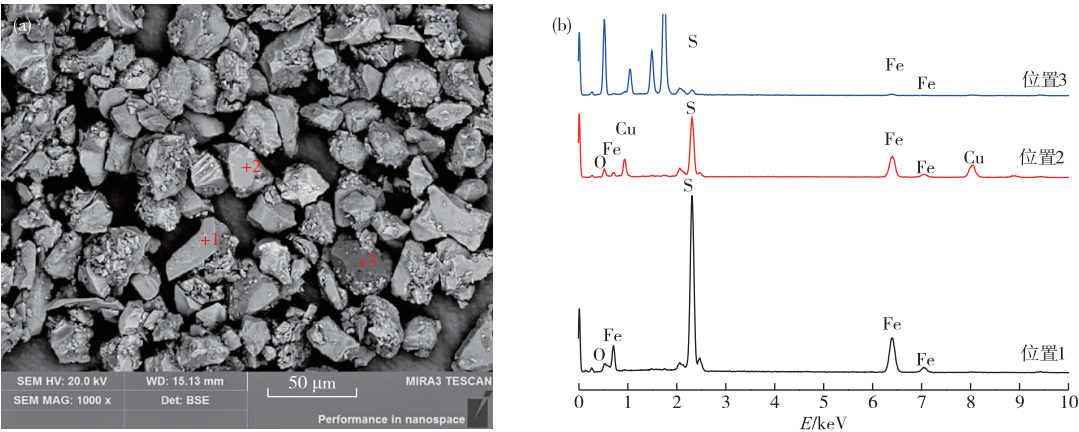


图 3 主要矿相 SEM-EDS 分析
Fig. 3 SEM-EDS analysis of main mineral phases

1.3 各元素的赋存状态

表 3 为 MLA 分析得出的硫化铜精矿中 Cu、Fe、S 元素在各矿物中的分布情况。

表 3 元素赋存状态 MLA 分析结果
Table 3 MLA analysis results of element occurrence state

矿物	Cu	Fe	S
黄铜矿	79.51	56.52	53.62
斑铜矿	7.16	1.02	1.93
辉铜矿	0.02	0.00	0.00
铜蓝	9.41	0.00	3.18
黝铜矿	1.37	0.03	0.57
水胆矾	2.34	0.00	0.20
纤铁矿(含铜)	0.18	0.31	0.12
黄铁矿	0.00	41.38	39.26
闪锌矿	0.00	0.00	1.03
黑云母	0.00	0.01	0.00
菱铁矿	0.00	0.30	0.00
绿泥石	0.00	0.31	0.00
褐铁矿	0.00	0.12	0.00
辉钼矿	0.00	0.00	0.07
方铅矿	0.00	0.00	0.01
合计	100.0	100.0	100.0

1)铜

矿石含 Cu 22.81%。矿石中 Cu 主要以独立矿物存在,包括黄铜矿(CuFeS₂)、铜蓝(CuS)、斑铜矿(Cu₅FeS₄)、水胆矾(Cu₄SO₄(OH)₆)、黝铜矿(Cu₁₂Sb₄S₁₃)等组成,其分布率分别为 79.51%、9.41%、7.16%、2.34%和 1.37%,黄铜矿占比极大。

2)铁

矿石含 Fe 27.22%。矿石中 Fe 主要以黄铜矿(CuFeS₂)、黄铁矿(FeS₂)、斑铜矿(Cu₅FeS₄)等组成,其分布率分别为 56.52%、41.38%和 1.02%。

3)硫

矿石含 S 30.05%。矿石中 S 主要以黄铜矿(CuFeS₂)、黄铁矿(FeS₂)、铜蓝(CuS)、斑铜矿(Cu₅FeS₄)和闪锌矿(ZnS)等组成,其分布率分别为 53.62%、39.26%、3.18%、1.93%和 1.03%。

2 试验原理与方法

2.1 硫化铜精矿加压浸出体系 E-pH 图计算

基于上述原料分析,原料中的铜 79.51%以 CuFeS₂ 的形式存在,同时黄铜矿与黄铁矿相互嵌布,若需将铜浸出进入溶液,则大部分铁也会随之浸出。因此,本节讨论了 Cu-Fe-S-H₂O 体系的 E-pH 图。由于 Cu-Fe-S-H₂O 体系的 E-pH 图过于复杂,且生成 Cu-Fe-S 复合物的情况相对简单,因此采用 FactSage 8.0 软件分别计算了 Cu-S-H₂O 体系和 Fe-S-H₂O 体系在 160 ℃(参考本研究实际浸出温度)时的 E-pH 图,分别如图 4 和图 5 所示。计算时物质的质量摩尔浓度为 1 mol/kg H₂O,S 的相对含量根据实际浸出体系选择,分别为 0.5<S/(Cu+S)<1 和 0.667<S/(Fe+S)<1。

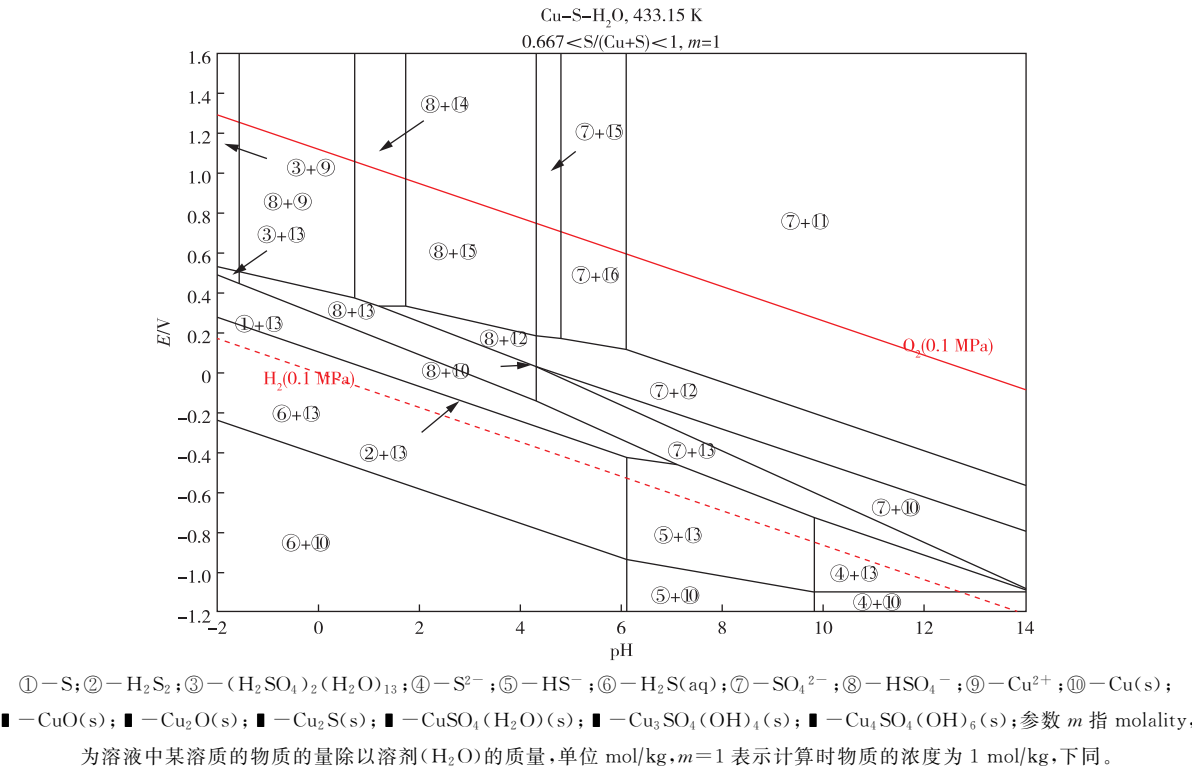
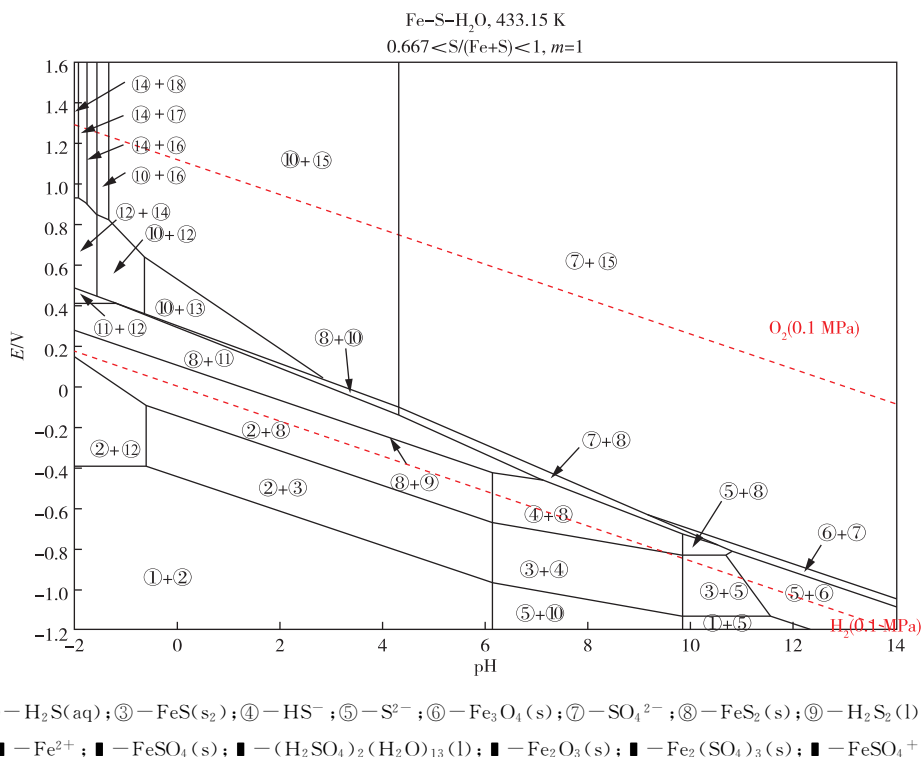
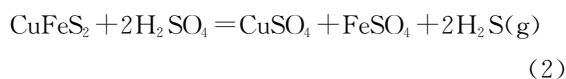
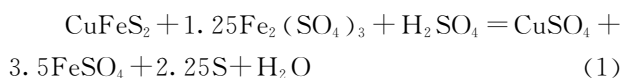


图 4 Cu-S-H₂O 体系的 E-pH 图
Fig. 4 E-pH diagram of Cu-S-H₂O system

图5 Fe-S-H₂O体系的E-pH图Fig. 5 E-pH diagram of Fe-S-H₂O system

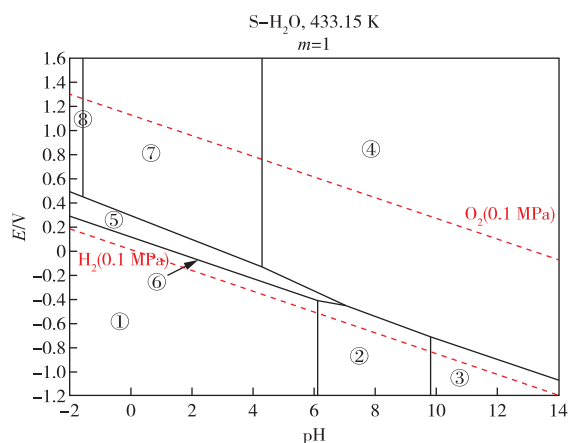
从图4和图5可以看出,主要的硫化物如黄铁矿和硫化铜类可以在pH为2至14范围内被氧气氧化为硫酸盐。铜和铁以可溶性的铜离子和铁离子在溶液中存在需要低pH。铜的溶解需要pH小于1.1且氧化还原电位高于0.4 V,但为了保持溶液中的铁离子并防止铁完全沉淀,需要更低pH(pH<0)。这是因为铁离子通过反应(1)和(2)可以实现黄铜矿间接浸出,即铁离子的氧化还原循环促进黄铜矿的分解。



从图4中还可以看出,铜离子与硫酸盐或硫酸氢盐离子共存,但不与元素硫共存。然而,当黄铜矿在中低温(<180℃)和中等氧化电位(<1 V)下酸浸时,试验发现元素硫也是主要的硫产物。这是因为E-pH图仅显示了平衡,并未提供有关反应动力学的信息。

为此,计算了S-H₂O体系的E-pH图用来辅助说明在浸出体系中硫与硫酸盐的形成条件,结果如图6所示。硫酸盐离子在很宽的pH范围内是稳定

的,但主要是在氧化性区域中。在酸性介质中,硫酸盐离子的稳定域邻近元素硫,这解释了为什么S⁰可在中低温下形成。但是单质硫存在的区域比较狭窄,所以如果工艺温度>150℃,元素硫变得不稳定,硫酸盐的形成比元素硫更有利。黄铜矿浸出时彻底氧化需要更高的温度和氧分压,并且消耗更多的能量。



①—H₂S(aq); ②—HS⁻; ③—S²⁻; ④—SO₄²⁻; ⑤—S(l);
⑥—H₂S₂(l); ⑦—HSO₄⁻; ⑧—(H₂SO₄)₂(H₂O)₁₃(l)。

图6 S-H₂O体系的E-pH图Fig. 6 E-pH diagram of S-H₂O system

2.2 试验方法

将细磨后的硫化铜精矿与硫酸溶液按比例混合,加入添加剂等搅拌均匀后,转入反应釜中,将反应釜密闭后,反应釜启动加热,大约 0.5 h 可达到指定温度,此时记为计时起点。此时的表压为反应体系内的水蒸气压力,将氧压表调到一定的数值以达到试验要求的氧气分压,并打开氧气阀向釜内连续通氧。反应中搅拌转速为 400~600 r/min。反应釜在指定温度保温一定时间后停止加热。卸下加热套,使用自来水冷却釜体,使温度降至 65 ℃左右时,打开泄压阀,排除釜内气体,随后打开反应釜,将物料趁热过滤。过滤后测量滤液的体积,以及滤饼的质量,取样,检测样品中 Cu、Fe、S/H₂SO₄ 的含量,据此计算 Cu、Fe、S 的浸出率。

2.3 试验试剂与设备

本试验使用的试剂主要有工业纯硫酸、硫酸铜、硫酸铁、木质素磺酸钙。主要设备有高压釜(CJK-2-12.5-TA2)、球磨机(10 L)、循环水式多用真空泵(SHB-3)、电热恒温鼓风干燥箱(DHG-9000)、电子天平(JA12002)。

3 试验结果与讨论

采用一段氧压浸出和两段氧压浸出对比研究了铜、铁的浸出率及浸出液的成分。

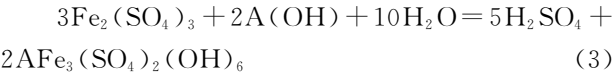
3.1 一段氧压浸出

取 200 g 硫化铜精矿,磨矿至 90%精矿粒度小于 15 μm,获得矿浆。将矿浆与浸出剂混合,添加适量分散剂,分别进行一段氧压浸出,试验条件及结果如表 4 所示。

表 4 一段氧压浸出参数及试验结果

Table 4 One-stage oxygen pressure leaching parameters and experimental results															
序号	浸出剂成分/(g·L ⁻¹)			每吨精矿	每吨精矿	反应时间/ h	试验条件		浸出液成分/(g·L ⁻¹)			渣成分/%		浸出率/%	
	酸	铜	总铁	分散剂用量/kg	沉矾剂用量/kg		温度/℃	总压/MPa	酸	铜	总铁	铜	铁	铜	铁
1	160	40	2	5.0	/	2	130	1.2	61	78.0	23.4	6.7	25.4	77.4	32.7
2	160	40	2	5.0	/	2	150	1.4	84	84.6	46.7	4.8	18.5	85.1	58.5
3	40	70	35	4.5	0	2	140	1.4	4.7	92.0	48.2	5.0	23.7	83.0	24.5
4	40	70	35	4.5	30	2	140	1.4	25.1	90.5	16.0	6.2	30.4	75.4	—28.5

从表 4 中第 1 组、第 2 组试验可知,一段氧压浸出的浸出液中酸、铁含量高,且温度越高,浸出液中酸、铁含量也越高,这是由于随着温度的升高,元素硫变得不稳定,硫酸盐的形成比元素硫更有利,导致浸出液的酸度高,进而抑制了铁的水解沉淀。由第 3 组、第 4 组试验可知,沉矾剂的添加,可有效降低浸出液中铁含量,甚至可将浸出剂中的部分铁离子转入渣相,如第 4 组试验的铁浸出率为-28.5%,主要是发生了如下反应。



3.2 两段氧压浸出

在铜电积过程中,电积废液的硫酸浓度约 160~180 g/L,若采用一段浸出,则终酸为 60~80 g/L,溶液含铁也高,对后续工序非常不利。为了在降低铁浸出率的同时,获得更高的铜浸出率,本研究采用两段逆流氧压浸出,将二段浸出液返回一段浸出,降低一段的始酸,从而降低一段的终酸及溶液含铁量。工艺参数根据前期的试验基础,第一段浸出采用了中温,便于降酸、除铁,而第二段浸出采用高温,以提高铜的浸出率。

取 200 g 硫化铜精矿,磨矿至 90%精矿粒度小于 15 μm,获得矿浆。将二段上清液、分散剂、沉矾剂与矿浆加入高压釜中,通入氧气,升温升压,进行一段氧压浸出,反应后获得一段上清液和一段底流。将产生的一段底流进行二段氧压浸出,加入废电积液、分散剂及沉矾剂,通入氧气,升温升压,进行二段氧压浸出,反应后产生二段浸出渣和二段浸出液。试验结果如表 5 所示。

从表 5 可知,经过两段浸出,一段浸出液中铁、酸浓度大幅降低,为后续中和、除铁工序减轻了压力。为了降低溶液的铁含量,本研究有意识地弱化了浸出条件,将铜浸出率控制在 90%~95%,二段浸出渣含铜 3%左右,需要进一步回收。

MLA 分析结果得出浸出渣的矿物组成及其含量见表 6。由表 6 可以看出,铜元素主要分布在黄铜矿、铜蓝、黝铜矿、水胆矾等矿物中,其分布率分别为 34.18%、38.84%、26.77%、0.20%,99.79%的铜以硫化物形式存在,可采用浮选工艺回收。本团队对含铜 1.87%的硫化铜氧压浸出渣浮选回收铜的闭路试验结果表明,采用丁基黄药进行快速浮选,可获得铜精矿品位 18.35%,回收率 87.83%,尾矿铜品位 0.25%^[13]。

表 5 两段氧压浸出参数及试验结果
Table 5 Two-stage oxygen pressure leaching parameters and experimental results

试验条件	试验 1	试验 2
分散剂加入量/%	4	5
沉矾剂加入量/%	2.5	3.0
浸出液固比	4 : 1	4 : 1
温度/℃	135	140
一段氧压浸出		
压力/MPa	1.3	1.4
反应时间/h	2.0	2.5
一段上清液含铜/(g · L ⁻¹)	90.78	92.34
一段上清液含 Fe/(g · L ⁻¹)	10.81	13.84
一段上清液含 H ₂ SO ₄ /(g · L ⁻¹)	28	30
二段氧压浸出		
分散剂加入量/%	6	7
沉矾剂加入量/%	3.0	3.5
浸出液固比	4 : 1	4 : 1
温度/℃	165	170
压力/MPa	1.4	1.5
反应时间/h	2.5	3.0
二段浸出渣含铜/%	3.1	2.6
二段浸出渣含铁/%	33.7	33.1
两段总渣率/%	70	68
浸出率		
两段铜浸出率/%	90.49	92.25
两段铁浸出率/%	13.34	17.31

表 6 二段浸出渣中主要元素的赋存状态
Table 6 Occurrence state of main elements in second stage leaching residue

矿物	Cu	Fe	S
黄铜矿	34.18	8.48	12.67
铜蓝	38.84	0.00	6.90
黝铜矿	26.77	0.90	5.90
水胆矾	0.20	0.00	0.01
黄铁矿	0.00	2.22	4.11
辉钼矿	0.00	0.00	0.64
铁矾	0.00	88.11	46.28
重晶石	0.00	0.00	0.02
褐铁矿	0.00	0.29	0.00
单质硫	0.00	0.00	23.46
合计	100.0	100.0	100.0

3.3 流程推荐

根据本文的研究结果,推荐采用如图 7 的流程处理硫化铜精矿。

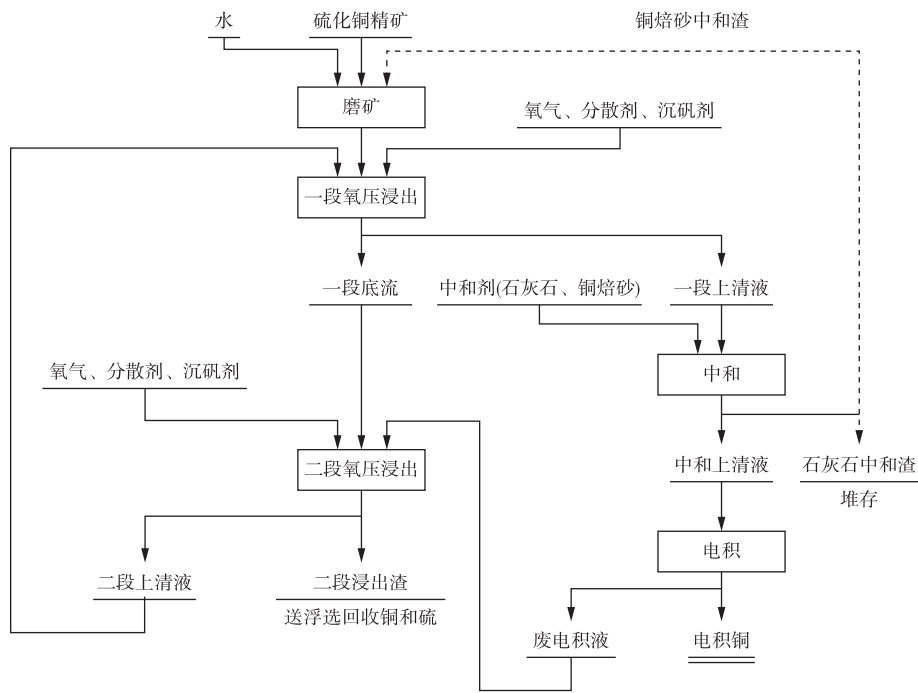


图 7 硫化铜精矿处理推荐流程

Fig. 7 Recommended process for copper sulfide concentrate treatment

4 结论

- 1)在硫化铜精矿氧压浸出的过程中加入沉矾剂,直接将铁以矾渣形式沉积在高压釜内,解决了铜氧压浸出上清液铁含量高的难题。
- 2)采用两段逆流氧压浸出,一段控制温度 135~140 ℃、总压 1.3~1.4 MPa、时间 2~2.5 h、分散剂加入量 4‰~5‰、沉矾剂加入量 2.5‰~3‰;一段

- 底流采用废电积液直接浸出,二段控制温度 165~170 ℃、总压 1.4~1.5 MPa、时间 2.5~3 h、分散剂加入量 6‰~7‰、沉矾剂加入量 3‰~3.5‰,两段铜总浸出率为 90.49%~92.25%,二段上清液经一段氧压浸出降酸后,产出的一段浸出液含铜 90.78~92.34 g/L、铁 10.81~13.84 g/L、硫酸 28~30 g/L,可送后续除铁净化—电积生产电铜。
- 3)两段逆流氧压浸出可提高铜的浸出率,两段

氧压浸出中铜的总浸出率可达90%以上,且一段上清液酸低、铁低,便于后续处理。对二段浸出渣中未被浸出的铜,可送浮选回收铜及硫。

参考文献

- [1] 朱文云,何宗庆,李奕龙,等.富氧侧吹熔炼—多枪顶吹吹炼炼铜工艺杂质元素行为[J].有色金属(冶炼部分),2023(3):25-34.
ZHU W Y, HE Z Q, LI Y L, et al. Behavior of impurity elements in copper smelting process of oxygen enrichment side blowing smelting-top-blowing with multiple gun [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2023(3):25-34.
- [2] 代宗.难处理氧化铜矿酸浸-萃取-电积工艺研究[D].昆明:昆明理工大学,2019.
DAI Z. Study on acid leaching-extraction-electrowinning process of refractory copper oxide ore[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [3] 谭春梅.美国内华达州巴特山附近铜浸出一溶剂萃取—电积工厂的发展挑战(一)[J].中国有色冶金, 2018,47(1):1-5.
TAN C M. Challenges with developing a copper L-SX-EW plant near Battle Mountain, Nevada, USA; Part I [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018,47(1):1-5.
- [4] 陈雄,李亚新,江源,等.刚果(金)某低品位氧化铜钴矿强化还原浸出试验研究[J].有色金属工程,2023,13(6):66-72.
CHEN X, LI Y X, JIANG Y, et al. Experimental study on enhanced reduction leaching of a low grade copper cobalt oxide from D. R, Congo[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023,13(6):66-72.
- [5] 刘自亮.硫化铜精矿氧压浸出回收电积铜的工艺研究[J].铜业工程,2021(6):38-41.
LIU Z L. Study on the process of recovering electrowinning copper from copper sulfide concentrate by oxygen pressure leaching[J]. Copper Engineering, 2021(6):38-41.
- [6] 徐克华,陈志彬,刘柳.提高硫化铜精矿氧压浸出过程中氧气利用率的策略分析[J].中国有色冶金,2021,50(3):28-33.
XU K H, CHEN Z B, LIU L. Technological research on improving the oxygen utilization ratio in the process of oxygen pressure leaching of copper sulfide concentrate[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2021, 50(3):28-33.
- [7] 王玉芳,蒋开喜,王海北,等.铜冶炼加压浸出研究进展[J].矿冶,2017,26(4):53-58.
WANG Y F, JIANG K X, WANG H B, et al. The research development of pressure leaching in copper extraction[J]. Mining and Metallurgy, 2017, 26(4):53-58.
- [8] 陈龙义.高海拔地区硫化锌精矿氧压浸出技术的创新研究与产业化应用[J].世界有色金属,2021(15):1-2.
CHEN L Y. Innovative research and industrial application of oxygen pressure leaching technology for zinc sulfide concentrate in high altitude area[J]. World Nonferrous Metals, 2021(15):1-2.
- [9] 王邕舟.硫化锌精矿氧压浸出工艺硫回收关键设备研究[J].湖南有色金属,2023,39(2):25-27.
WANG Y Z. Study on the sulfur recovery equipment for oxygen-pressure leaching of zinc sulfide concentrate[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2023,39(2):25-27.
- [10] 刘自亮.硫化铜精矿氧压浸出液除铁工艺研究[J].中国有色冶金,2020,49(2):29-32.
LIU Z L. Study on iron removal method for oxygen pressure leaching solution of copper sulfide concentrate[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020,49(2):29-32.
- [11] 全一喆,刘自亮,何醒民,等.硫化铜精矿加压酸浸工艺大规模工业应用的可行性分析[J].中国有色冶金,2018,47(4):23-25,43.
TONG Y Z, LIU Z L, HE X M, et al. Feasibility analysis of large scale industrial application of acid pressure leaching copper sulfide concentrate[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2018,47(4):23-25,43.
- [12] 全一喆,刘自亮,王恒辉,等.硫化铜精矿的氧压浸出方法和铜冶炼方法:PCT,WO 2020/062145 A1[P].2018-09-29.
TONG Y Z, LIU Z L, WANG H H, et al. Oxygen pressure leaching method for copper sulfide concentrate and copper smelting method: PCT, WO 2020/062145 A1[P]. 2018-09-29.
- [13] 罗虹霖,冯泽平.某硫化铜氧压浸出渣浮选试验研究[J].矿产综合利用,2020(5):125-129.
LUO H L, FENG Z P. Experimental study on oxygen leaching slag flotation of a copper sulfide[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(5):125-129.