

焙砂超浸强化硫脲浸金研究

杜浩杰^{1,2}, 张磊^{1,2*}, 郭学益^{1,2}, 田庆华^{1,2}, 袁水平³, 王亲猛^{1,2}

(1. 中南大学冶金与环境学院; 2. 中国有色金属工业协会中国清洁冶金工程研究中心; 3. 福州大学紫金地质与矿业学院)

摘要:以焙砂为原料,首先经过酸洗预处理去除砷等有害元素,并减少杂质含量,降低硫脲消耗,考察硫酸质量浓度对砷、铁、铜、锌浸出率的影响,并对酸洗后的矿相转化行为进行了分析;同时,开展超浸与常规酸性硫脲体系浸金效果的对比研究。结果表明:酸洗预处理可有效去除有害元素砷,最优条件下,砷、铁、铜、锌浸出率分别为96.3%、0.5%、22.7%、7.6%;超浸可降低颗粒粒径,强化反应动力,实现包裹金的深度解离,有效提高金浸出率。常规酸性硫脲体系金浸出率仅为54.6%,采用超浸工艺反应10 min,金浸出率达到84.6%,可实现金的高效浸出。

关键词:焙砂;金;硫脲;酸洗预处理;超浸

中图分类号:TF831

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2024)04-0025-07

doi:10.11792/hj20240407

引言

黄金是一种稀缺的贵金属,具有强耐腐蚀性和可加工性,广泛用于流通货币、贵重饰品、航空、医疗等高新产业^[1-2]。随着易处理金矿的消耗,难处理金矿逐渐成为主要金矿资源。在全球已探明的金矿资源中,约30%的金矿为难处理金矿^[3]。难处理金矿中部分金被毒砂、硫化矿物等包裹^[4],需经过预处理打开这些矿物对金的包裹才能实现金的高效浸出。预处理方法有焙烧法、加压氧化法和细菌氧化法等^[5-7]。其中,焙烧法是常用的预处理方法,其原理是在氧化气氛下使硫化矿物包裹物分解,促使金暴露,从而有利于湿法浸金过程。

湿法浸金方法主要包括氰化法、卤素法、硫脲法、硫代硫酸盐法等。其中,氰化法是湿法回收金的主流工艺^[8]。张福元等^[9]采用高酸催化氧化—氰化浸出工艺从氰渣中高效回收金、银。但是,该工艺周期长,氰化物毒性大,操作环境恶劣,环境污染严重。卤素法主要包括溴化法、氯化法和碘化法,该工艺具有浸出速率快、环境友好等优点^[10-11]。李桂春等^[12]采用次氯酸钠—碘化物体系浸金,金浸出率可达85%以上,但药剂消耗量大,成本较高,难以实现工业化应用。硫代硫酸盐试剂无毒、价格便宜,潘志刚等^[13]采用铜氨硫代硫酸盐提取金,在严格控制反应温度和pH条件下,金浸出率为75.1%,但该工艺需加热,且适宜温度区间较窄,不易控制,难以实现

工业化。

硫脲法是通过控制氧化气氛与金发生络合作用^[14-15],实现金高效浸出的方法,该工艺浸出速率快且无毒,具有应用前景^[16]。碱性硫脲法具有对设备要求低且伴生矿物不易被浸出等优势^[17]。但是,碱性条件下硫脲易分解为硫化物和氨基氰等有毒物质^[18],严重制约其实际应用。酸性硫脲法具有低毒、浸金速率快、条件温和、环保等优点,是目前研究热点。廖阳平等^[19]开展某硫铁矿烧渣硫脲搅拌浸金研究,虽然金浸出率较高,但硫脲消耗量大。段毅^[20]开展自然氧化金矿硫脲浸金工艺优化,发现经过焙烧后的难处理金矿外层仍有大量包裹物。酸性硫脲体系难以实现金的有效浸出,常规预处理手段(如磁场、超声波强化等)能耗高,难以大规模生产,亟须开发一种新的强化浸出技术^[21-22]。

针对酸性硫脲体系浸金存在的难题^[23],本文提出酸洗预处理与超浸协同强化酸性硫脲体系浸金,首先通过酸洗预处理去除砷、铜等杂质,实现砷脱除的同时减少铜等杂质对硫脲的消耗;采用硫脲和硫酸铁为浸金剂,进行超浸与常规酸性硫脲体系浸金效果的对比研究,实现金的深度提取。后续可采用铁粉还原回收滤液中金,通过磁选工序回收浸出渣中 Fe_3O_4 。本文创新性地提出酸洗预处理与超浸协同强化焙砂中金深度浸出的方法,为焙砂中金的高效清洁回收提供理论和技术支撑。

收稿日期:2023-12-03;修回日期:2024-01-05

基金项目:博士后创新人才支持计划(BX20230438);湖南省环保厅环境保护科研课题(HBKYXM-2023022)

作者简介:杜浩杰(1996—),男,博士研究生,研究方向为有色金属资源循环;E-mail:dhj_csu@163.com

*通信作者:张磊(1991—),男,博士,研究方向为非氰提金及含砷固废无害化处理;E-mail:zhang_lei@csu.edu.cn

1 原料及方法

1.1 原料分析

本试验以湖南某黄金冶炼公司高砷高硫难处理金矿在弱氧化气氛中高温焙烧产生的焙砂为原料。焙砂化学成分分析结果见表1,不同矿物的SEM图像和EDS光谱见图1。

由表1可知:焙砂中主要包含铁、砷、铝、锌、铅等

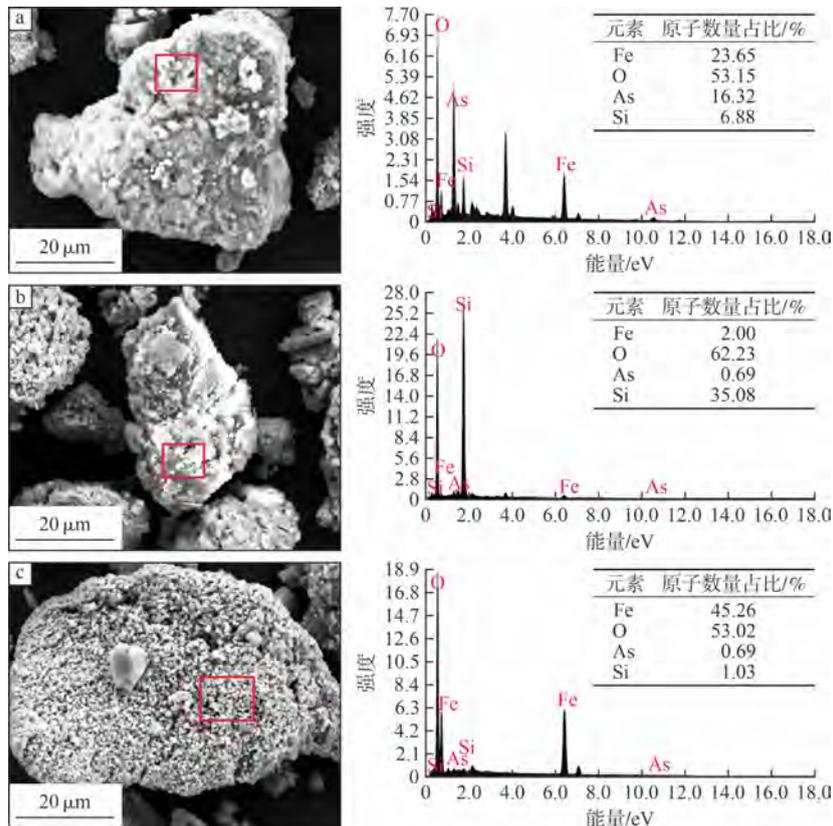


图1 不同矿物的SEM图像和EDS光谱

Fig. 1 SEM images and EDS spectrums of the different minerals

由图1可知:高砷高硫难处理金矿在弱氧化气氛焙烧预处理过程中易形成 Fe_3O_4 和具有挥发性的 As_2O_3 。结合图1-a中EDS光谱结果推测,铁氧化物表面白色附着物主要为 As_2O_3 , As_2O_3 在酸性体系下易生成亚砷酸。图1-b主要物相为二氧化硅,表面较为致密。图1-c主要物相为 Fe_3O_4 ,表面密集多孔。焙砂中铁氧化物和二氧化硅均会对金形成包裹,尤其以铁氧化物最为严重。通过酸洗预处理可将表面部分铁氧化物和 As_2O_3 溶解,将更多的金暴露出来,再通过超浸降低颗粒粒径,使得金进一步暴露,强化金的浸出过程。

1.2 浸出原理

酸洗预处理主要通过加入硫酸,将焙砂中包裹在金外层的金属氧化物溶解,以铁、砷为例,化学反应式为:

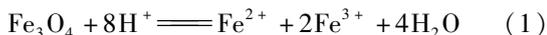


表1 焙砂化学成分分析结果

Table 1 Analysis results of the chemical composition of roasting sand

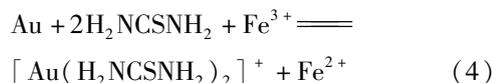
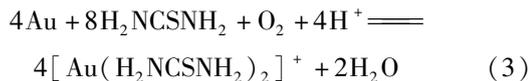
成分	Au ¹⁾	Fe	As	Pb	Zn	Cu	S	Al	Mn	SiO ₂
w/%	33.66	47.89	2.82	0.97	1.73	0.13	0.49	2.41	0.64	19.85

注:1) $w(\text{Au})/(\text{g} \cdot \text{t}^{-1})$ 。

元素,其中,铁质量分数为47.89%,砷质量分数为2.82%,金品位为33.66 g/t。



酸性硫脲体系浸金过程主要指硫脲和 Fe^{3+} 在酸性(pH=1.0~2.0)体系下与金形成络合物,化学反应式为:



1.3 试验方法

酸洗预处理:单次取200 g焙砂放入1 000 mL烧杯中,加入600 mL纯水,开启搅拌器,控制转速为420 r/min,硫酸初始质量浓度分别为20 g/L、25 g/L、30 g/L、40 g/L、50 g/L,测量不同时间点溶液中铁、铜、砷和锌质量浓度及溶液电位和pH。待酸洗预处理结束后,过滤洗涤,酸洗液进行脱砷处理,酸渣可用

于浸金工序。

常规酸性硫脲体系浸金:单次取 200 g 酸渣放入 1 000 mL 烧杯中,加入 600 mL 纯水,开启搅拌器,控制转速为 400 r/min,通入空气,调节 pH 值为 1.3,加入适量硫酸铁和硫脲,测量不同时间点溶液中金品位。

超浸酸性硫脲体系浸金:单次取 200 g 酸渣放入 1 000 mL 烧杯中,加入 600 mL 纯水,调节 pH 值为 1.3,加入适量硫酸铁和硫脲,待混合均匀后,转移至超浸装置中,通入空气,调节装置至适宜频率和出料速度,测量不同时间点溶液中金品位。

1.4 分析手段

样品中金用火试金法进行定量分析,砷、铁、铜、锌用电感耦合等离子体发射光谱仪进行定量分析。用扫描电子显微镜(JSM-6360LV,20 kV)分析了样品的微观形貌。用 X 射线衍射仪(日本 TTRAX-3 型,测试电压 50 kV,测试电流 300 mA,扫描条件 $10^\circ/\text{min}$)分析了样品的物相组成。金浸出率按式(5)计算:

$$\eta = \left(1 - \frac{mw}{m_0w_0} \right) \times 100 \% \quad (5)$$

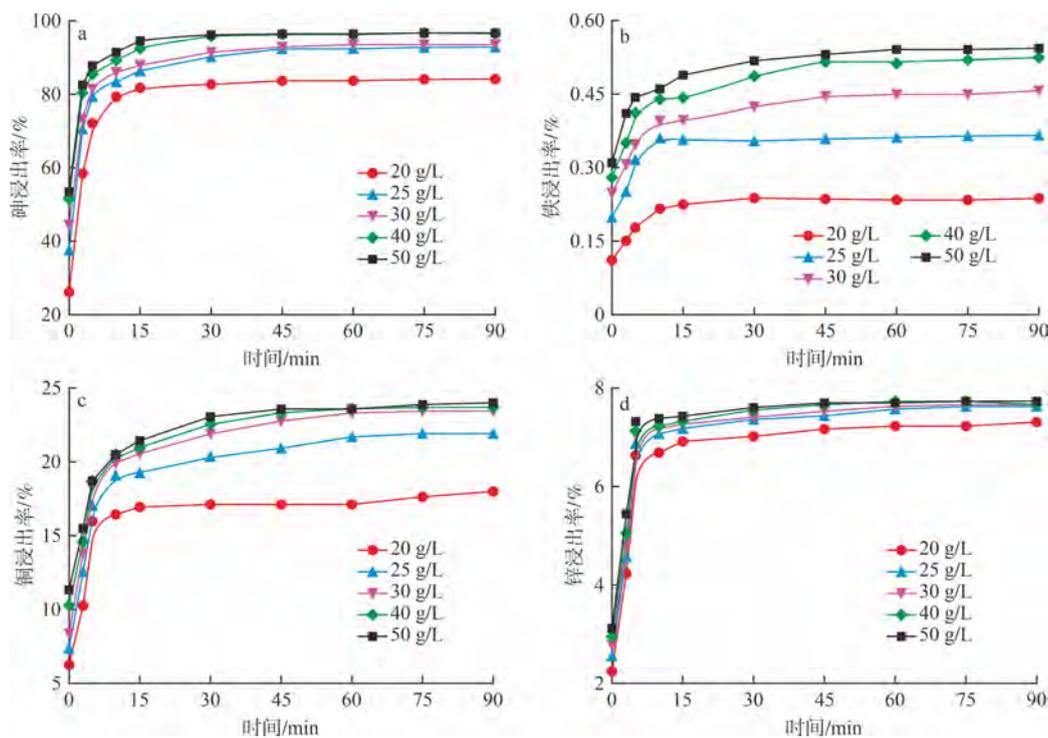


图2 硫酸质量浓度对砷(a)、铁(b)、铜(c)、锌(d)浸出率的影响

Fig. 2 Effect of sulfuric acid mass concentration on the leaching rate of arsenic (a), iron (b), copper (c), and zinc (d)

由图2可知:硫酸质量浓度升高可以加快砷、铁、铜、锌的浸出速率,提高浸出率。硫酸质量浓度提高至 40 g/L,反应时间为 30 min 时,砷、铁、铜、锌浸出率分别为 96.3 %、0.5 %、22.7 %、7.6 %。继续增加硫酸质量浓度和反应时间,浸出率基本不再升高。

2.1.2 硫酸质量浓度对溶液 pH、电位影响

在上述条件下,考察硫酸质量浓度对溶液 pH 和

式中: η 为浸出率(%); m 为浸渣质量(g); w 为浸渣金品位(g/t); m_0 为样品质量(g); w_0 为样品金品位(g/t)。

2 结果与讨论

通过酸洗预处理与超浸协同强化酸性硫脲体系浸金并进行机理研究,考察了酸洗预处理过程硫酸质量浓度对焙砂中砷、铁、铜、锌等杂质浸出效果的影响,并对矿相转化行为进行了分析。开展了超浸与常规酸性硫脲体系浸金效果的对比研究,分别考察了常规酸性硫脲体系浸金过程中铁离子质量浓度、硫脲质量浓度对金浸出率的影响,超浸酸性硫脲体系浸金过程设备频率和硫脲质量浓度对金浸出率的影响。

2.1 酸洗预处理及其机理分析

2.1.1 硫酸质量浓度对杂质浸出率影响

酸洗预处理可以脱除有害元素砷,同步去除铜、锌等杂质,提高硫脲的选择浸出性,强化金的浸出效果。初始条件:反应温度 40°C 、液固比 3 mL/g、搅拌速度 420 r/min。考察硫酸质量浓度对砷、铁、铜、锌浸出率的影响,结果见图 2。

电位的影响,结果见图 3。由图 3 可知:随着硫酸质量浓度升高,溶液 pH 降低,电位升高。随着酸洗预处理反应时间的增加,溶液 pH 升高,电位降低,表明氢离子质量浓度降低,验证酸洗预处理过程硫酸与金属氧化物发生化学反应。

2.1.3 焙砂和酸渣的 XRD 谱图、实物图片分析

对焙砂和酸渣进行 XRD 及扫描电子显微镜下检

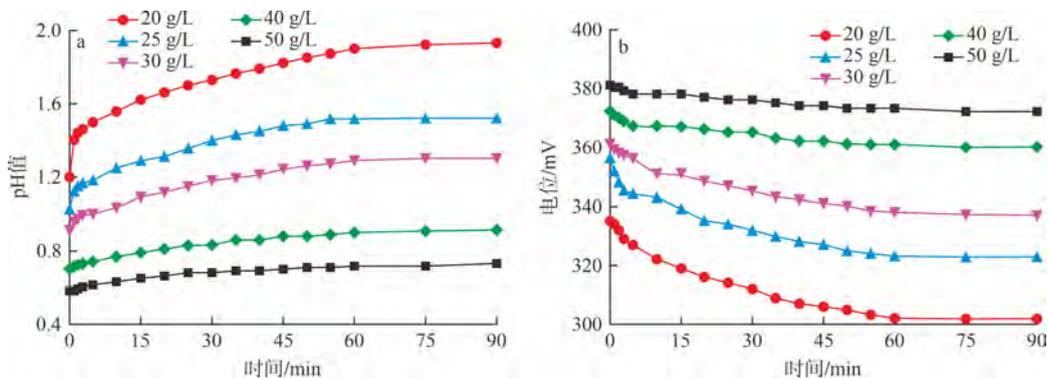


图3 硫酸质量浓度对溶液 pH(a) 和电位(b) 的影响

Fig. 3 Effect of sulfuric acid mass concentration on solution pH (a) and potential (b)

测,试验结果见图4。

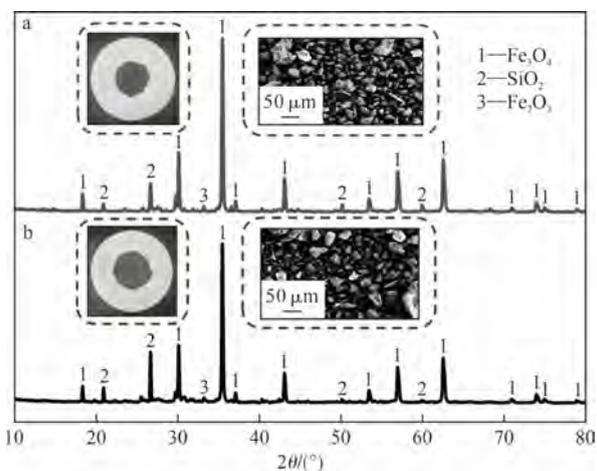
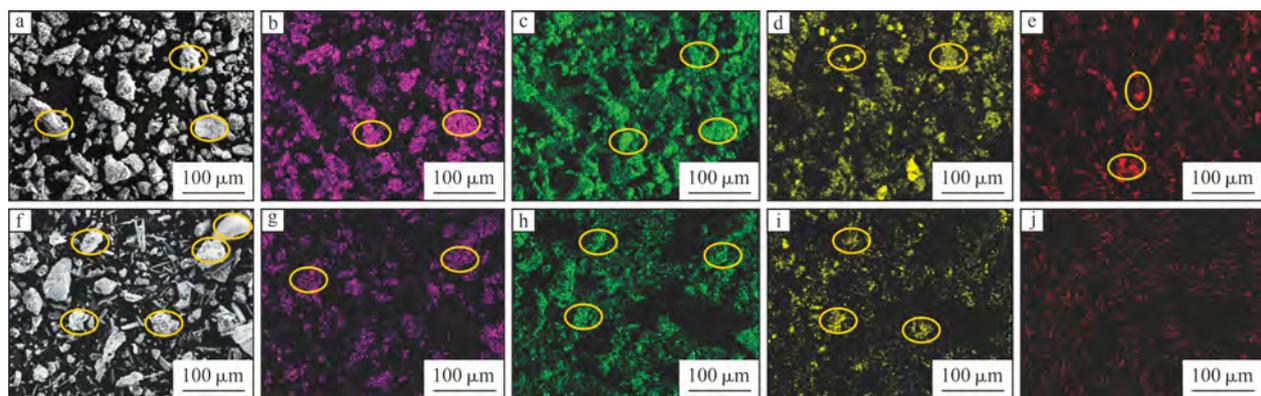


图4 焙砂(a)和酸渣(b)的XRD谱图、实物图片

Fig. 4 XRD patterns, physical pictures

of the roasting sand (a) and acid residue (b)



a~e—焙砂 f~j—酸渣

图5 焙砂和酸渣的SEM图像

Fig. 5 SEM images of the roasting sand and acid residue

2.2 常规酸性硫脲体系浸金过程研究

2.2.1 铁离子质量浓度

硫酸铁的加入可以提高硫脲浸金效率。初始条件:反应温度 40 ℃、液固比 3 mL/g、硫脲质量浓度 1.0 g/L、搅拌速度 400 r/min、pH 值 1.3。通入空气条件下,考察铁离子质量浓度对金浸出率的影响,结

果见图4可知:对比焙砂和酸渣实物图片,酸渣颜色较焙砂深,可能是由焙砂中部分浅色氧化物溶解引起;对比焙砂和酸渣 XRD 图谱可知,焙砂经酸洗后物相变化较小,主要物相仍为 Fe₃O₄、SiO₂ 和 Fe₂O₃, 铁氧化物和二氧化硅在酸洗预处理过程中较为稳定。

2.1.4 焙砂和酸渣 SEM 图像分析

对焙砂和酸渣进行 SEM 图像分析,试验结果见图5。

由图5可知:焙砂经酸洗后表面形貌变化较小,矿样中颗粒状物质多为铁氧化物和二氧化硅,存在少量铁氧化物和硅氧化物叠加情况,如图中黄色圆圈区域所示;对比图5-a~e和图5-f~j 砷面扫图像可知,焙砂经酸洗预处理后砷含量大幅降低,酸渣中几乎不存在砷高度聚集现象,酸洗预处理可实现绝大多数砷的高效脱除。

果见图6。

由图6可知:适当加入铁离子可有效提高金浸出率和浸出速率。当铁离子质量浓度为 1.5 g/L 时,金浸出率可达 46.2%。继续提高铁离子质量浓度至 2.5 g/L 时,金浸出率反而下降,铁离子过多会加速硫脲分解。

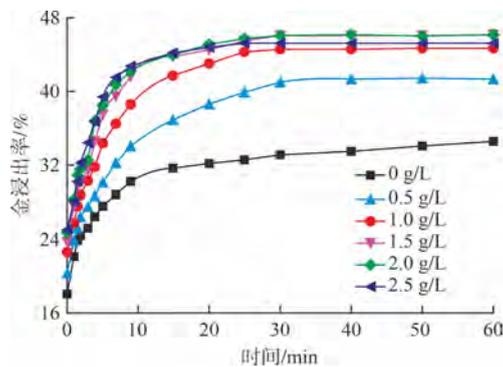


图6 铁离子质量浓度对金浸出率的影响

Fig. 6 Effect of Fe^{3+} mass concentration on gold leaching rate

2.2.2 硫脲质量浓度

初始条件:反应温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液固比 3 mL/g 、铁离子质量浓度 1.5 g/L 、搅拌速度 400 r/min 、pH 值 1.3 。通入空气条件下,考察硫脲质量浓度对金浸出率的影响,结果见图 7。

由图 7 可知:适当增加硫脲质量浓度可有效提高金浸出率和浸出速率,当硫脲质量浓度为 1.5 g/L ,

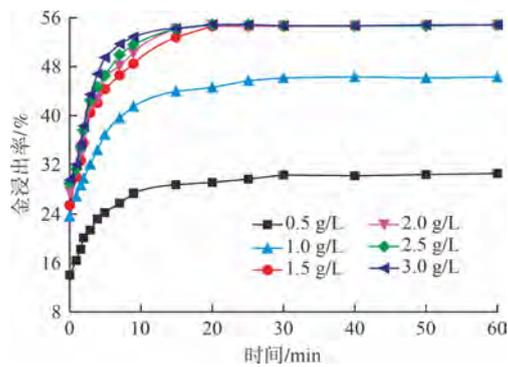


图7 硫脲质量浓度对金浸出率的影响

Fig. 7 Effect of thiourea mass concentration on gold leaching rate

反应时间 20 min 时,金浸出率可达 54.4% 。当硫脲质量浓度高于 1.5 g/L 时,金浸出率变化较小,考虑生产成本等因素,选取硫脲质量浓度为 1.5 g/L 。

2.2.3 金嵌布状态

常规酸性硫脲体系下浸出渣中金嵌布状态及含量分析结果见表 2。

表 2 常规酸性硫脲体系浸出渣中金嵌布状态及含量

Table 2 Dissemination status and gold content of leaching residue in conventional acidic thiourea system

嵌布状态	裸露金	硫化矿物包裹金	铁氧化物包裹金	硅酸盐包裹金	合计
金品位/ $(\text{g}\cdot\text{t}^{-1})$	0.64	2.86	12.35	0.47	16.32

由表 2 可知:常规酸性硫脲体系下浸出渣中金品位较高,为 16.32 g/t 。其中,硫化矿物包裹金、铁氧化物包裹金及硅酸盐包裹金中金品位分别为 2.86 g/t 、 12.35 g/t 、 0.47 g/t ,表明常规酸性硫脲体系不能充分浸出金。可以通过超浸工序降低颗粒粒径,破坏金外层的包裹物,提高金浸出率。

2.3 超浸酸性硫脲体系浸金过程研究

2.3.1 超浸频率

初始条件:反应温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液固比 3 mL/g 、铁离子质量浓度 1.5 g/L 、硫脲质量浓度 2.0 g/L 、pH 值 1.3 。通入空气条件下,考察超浸频率对金浸出率的影响,结果见图 8。

由图 8 可知:适当升高超浸频率可提高超浸设备内部转盘转速,短时间内降低物料颗粒粒径,不仅可高效打开金的包裹,还可以强化固液表面动力学反应,有效提高金浸出率。当超浸频率为 45 Hz ,反应 10 min 时,金浸出率可达 84.2% 。继续提高超浸频率至 55 Hz ,金浸出率变化较小。考虑能耗问题,选取超浸频率 45 Hz 为最佳条件。

2.3.2 硫脲质量浓度

初始条件:反应温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液固比 3 mL/g 、铁离子质量浓度 1.5 g/L 、超浸频率 45 Hz 、pH 值 1.3 。通

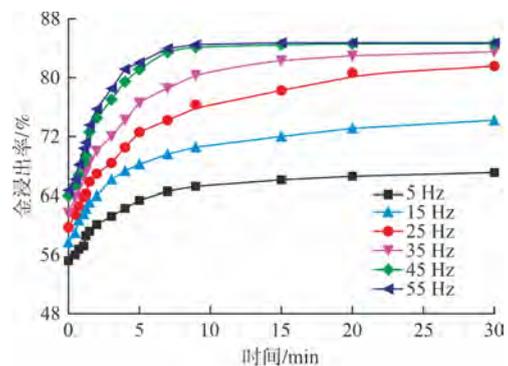


图8 超浸频率对金浸出率的影响

Fig. 8 Effect of super leaching frequency on gold leaching rate

入空气条件下,考察硫脲质量浓度对金浸出率的影响,结果见图 9。

由图 9 可知:升高硫脲质量浓度可有效提高金浸出率和浸出速率。当硫脲质量浓度为 1.0 g/L ,反应时间 10 min 时,金浸出率可达 84.6% 。继续提高硫脲质量浓度,金浸出率变化较小。考虑硫脲消耗成本,选取硫脲质量浓度为 1.0 g/L 为最佳条件。

2.3.3 金嵌布状态

对超浸酸性硫脲体系下浸出渣中金嵌布状态及含量进行分析,结果见表 3。

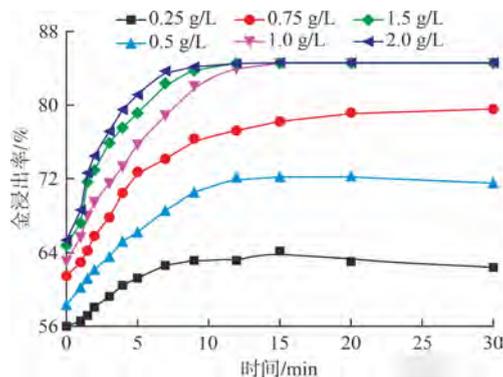


图9 硫脲质量浓度对金浸出率的影响

Fig.9 Effect of thiourea mass concentration on gold leaching rate

表3 超浸酸性硫脲体系浸出渣中金嵌布状态及含量

Table 3 Dissemination status and gold content of leaching residue in super leaching acidic thiourea system

嵌布状态	裸露金	硫化矿物包裹金	铁氧化物包裹金	硅酸盐包裹金	合计
金品位/($g \cdot t^{-1}$)	0.16	1.41	4.72	0.24	6.53

择性和浸出速率。酸洗预处理最优条件:反应温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液固比 3 mL/g 、搅拌速度 420 r/min 、反应时间 30 min 、硫酸质量浓度 40 g/L 。在此优化条件下,砷、铁、铜、锌浸出率分别为 96.3% 、 0.5% 、 22.7% 、 7.6% 。

2) 常规酸性硫脲体系浸金效率低。最优条件:反应温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液固比 3 mL/g 、铁离子质量浓度 1.5 g/L 、硫脲质量浓度 1.5 g/L 、pH值 1.3 。通入空气条件下,金浸出率仅 54.4% 。

3) 超浸可实现酸渣中金的深度回收。最优条件:反应温度 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、液固比 3 mL/g 、硫脲质量浓度 1.0 g/L 、超浸频率 45 Hz 、pH值 1.3 、反应时间 10 min 。在此优化条件下,金浸出率可达 84.6% 。

[参考文献]

[1] 王燕东. 2009—2019年我国金矿资源勘查形势分析与对策[J]. 中国矿业, 2020, 29(11): 7-13.

[2] 张福良, 方一平, 李晓宇, 等. 新时期我国黄金资源战略价值浅析[J]. 中国矿业, 2016, 25(增刊1): 1-4, 12.

[3] 孙留根, 袁朝新, 王云, 等. 难处理金矿提金的现状及发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(4): 38-43.

[4] ECHEVERRY-VARGAS L, ROJAS-REYES N R, ESTUPIÑÁN E. Characterization of copper smelter slag and recovery of residual metals from these residues[J]. Revista Facultad de Ingeniería, 2017, 26(44): 61-71.

[5] 张磊, 郭学益, 田庆华, 等. 难处理金矿预处理方法研究进展及工业应用[J]. 黄金, 2021, 42(6): 60-68.

[6] ZHANG L, GUO X Y, TIAN Q H, et al. Extraction of gold from typical Carlin gold concentrate by pressure oxidation pretreatment-Sodium jarosite decomposition and polysulfide leaching[J]. Hydrometallurgy, 2022, 208: 1-13.

[7] LORENZO T J, IGLESIAS G N, MAZUELOS A, et al. An alternative approach to recover lead, silver and gold from black gossan (polymetal-

lic ore). Study of biological oxidation and lead recovery stages[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 207: 510-521.

[8] 刘志楼, 杨天足. 难处理金矿的处理现状[J]. 贵金属, 2014, 35(1): 79-83, 89.

[9] 张福元, 张玉华, 姐小凤. 从氰渣中浸取金、银试验研究[J]. 黄金, 2007, 28(9): 37-39.

[10] 张兴仁. 无氰提金新工艺及其发展前景[J]. 矿产综合利用, 1992, 13(6): 30-37.

[11] 袁喜振, 李绍英, 孙春宝, 等. 浮选金精矿和难浸含铜金矿的碘化浸金[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(12): 3 123-3 128.

[12] 李桂春, 吕进云. 次氯酸钠-碘化物浸金的实验研究[J]. 矿冶工程, 2010, 30(1): 44-46.

[13] 潘志刚, 谢锋, 郑钟伟, 等. 某高砷金精矿预处理后焙砂硫代硫酸盐浸出研究[J]. 黄金, 2023, 44(1): 49-52.

[14] 郭学益, 张磊, 田庆华, 等. 添加剂作用下铁粉协同还原酸性硫脲浸液中金的研究[J]. 黄金, 2020, 41(9): 81-85.

[15] ORGUL S, ATALAY U. Reaction chemistry of gold leaching in thiourea solution for a Turkish gold ore[J]. Hydrometallurgy, 2002, 67: 71-77.

[16] 李骞, 沈煌, 张雁, 等. 硫脲浸金研究进展[J]. 黄金, 2018, 39(1): 66-69.

[17] 严永谋, 孟奇, 崔毅琦, 等. 硫脲浸金技术研究现状[J]. 黄金, 2014, 35(2): 50-53.

[18] WEI W D, YUAN C L, RYOICHI I, et al. Gold leaching in an alkaline Thiourea Solution[J]. Journal of The Electrochemical Society, 1999, 146(2): 559-563.

[19] 廖阳平, 刘有才, 朱忠泗. 某硫铁矿烧渣的硫脲法浸金研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(6): 178-181.

[20] 段毅. 硫脲法浸金的工艺优化试验[J]. 云南冶金, 2020, 49(3): 64-67.

[21] 邱廷省, 罗仙平, 付丽珠. 磁场强化硫脲浸金试验研究[J]. 黄金, 1999, 20(9): 32-34.

[22] 许世伟, 王建英, 郑升, 等. 用硫脲从低品位尾矿中提取金的试验研究[J]. 湿法冶金, 2013, 32(2): 79-81.

3 结论

1) 酸洗预处理过程实现有害元素砷脱除, 同步将包裹在金外层的部分杂质去除, 提高硫脲浸金的选

[23] 郭学益,张磊,田庆华,等. 氧压渣非氰体系浸金及其机理[J].

中国有色金属学报,2020,30(5):1 131-1 141.

Research on enhanced thiourea leaching of gold from roasting sand by super leaching

Du Haojie^{1,2}, Zhang Lei^{1,2}, Guo Xueyi^{1,2}, Tian Qinghua^{1,2}, Zhong Shuiping³, Wang Qinqing^{1,2}

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University;

2. Cleaner Metallurgical Engineering Research Center, China Nonferrous Metals Industry Association;

3. Zijin School of Geology and Mining, Fuzhou University)

Abstract: Using roasting sand as raw material, the acid washing pretreatment process was first carried out to achieve the removal of arsenic, while removing other impurities and reducing the consumption of thiourea. The effect of sulfuric acid concentration on the leaching rate of arsenic, iron, copper and zinc was investigated, and the acid washing ore phase behavior was analyzed; at the same time, a comparative study was conducted on the leaching of gold using super leaching and conventional acid thiourea systems. The results show that acid washing pretreatment can effectively remove harmful element arsenic. Under optimal conditions, the leaching efficiency of arsenic, iron, copper and zinc are 96.3%, 0.5%, 22.7% and 7.6%, respectively; super leaching can reduce particle size, enhance reaction kinetics, achieve deep dissociation of encapsulated gold, and effectively improve the leaching efficiency of gold. The leaching efficiency of gold in the conventional acidic thiourea system is only 54.6%, and the leaching efficiency of gold after 10 min of reaction using the super leaching process reaches 84.6%, which can achieve efficient gold leaching.

Keywords: roasting sand; gold; thiourea; acid washing pretreatment; super leaching

(上接第 20 页)

[参考文献]

- [1] 张钦礼,王新民. 金属矿床地下开采技术[M]. 长沙:中南大学出版社,2016.
- [2] 张伯贤,张宝,孙民航,等. 浅孔留矿诱导落矿采矿法在四儿沟门金矿的应用研究[J]. 采矿技术,2019,7(4):3-4.
- [3] 王青,任凤玉. 采矿学[M]. 北京:冶金工业出版社,2020.

- [4] 解世俊,周德元,宋晓天,等. 采矿手册[M]. 北京:冶金工业出版社,2008.
- [5] 周君才. 难采矿体新型采矿法[M]. 北京:冶金工业出版社,1998.
- [6] 张世雄. 固体矿物资源开发工程[M]. 武汉:武汉理工大学出版社,2008.

Application of short-hole induced caving sublevel open stope mining method in a gold mine

Shi Chuanlong

(Shandong Gold Group Co., Ltd.)

Abstract: In response to problems such as the development of rock joints and fractures in a gold mine, poor stability of the ore body, difficulties in preliminary mining and support, and poor safety in recovery, experimental research on the short-hole induced caving sublevel open stope mining method was carried out in localized fractured areas of the ore body. The method utilizes the mechanical properties of the rock itself and the caving stress field controlled by artificial engineering to cave crushed ores. The study provides a detailed introduction to the structural parameters of the stope, the layout of mining and cutting engineering, undercutting, and ore caving processes. Field applications have shown that with the implementation of this method, the production capacity of the stope reaches 127 t/d, the mining loss rate is 9.2%, and the ore dilution rate is 14.6%, achieving good results. It has reference value for the safe and efficient recovery of similar ore bodies.

Keywords: development of rock joints and fractures; fractured ore body; short-hole induced caving; sublevel; open stope mining method