

硫脲-硫氰酸钠浸出难处理金矿及浸出剂的稳定性

杨喜云, 刘政坤, 郭孔彬, 徐 徽, 石西昌

(中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘 要: 采用高温焙烧、硫脲-硫氰酸钠浸出难处理金矿中的金, 研究焙烧温度、硫氰酸钠浓度、硫脲(Tu)浓度、 Fe^{3+} 浓度、pH 值、浸出温度和时间对金浸出率的影响, 得到混合体系浸金的最优条件, 并研究浸出过程中硫氰酸钠和硫脲的稳定性。结果表明: 金的浸出率达到 93.1%, 超过相同条件下单一体系中的浸出率之和, 硫脲与硫氰酸钠摩尔比对金浸出率和金电极稳定电位影响较大; 硫氰酸钠使硫脲的稳定性降低, 而硫脲使硫氰酸钠的稳定性增强。

关键词: 难处理金矿; 硫脲; 硫氰酸钠; 浸出剂

中图分类号: TF80

文献标志码: A

Leaching of Au from refractory gold ore in thiourea-thiocyanate solutions and stability of lixiviants

YANG Xi-yun, LIU Zheng-kun, GUO Kong-bin, XU Hui, SHI Xi-chang

(School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Gold was extracted from refractory gold ore using a process of roasting followed by thiourea-thiocyanate leaching. The effects of roasting temperature, initial concentrations of thiocyanate, thiourea and ferric as well as pH value, leaching temperature and time on the leaching rate of gold were investigated. The results show that the gold leaching rate is 93.1% under the optimum conditions, and the leaching rate in mixed system is greater than the sum of leaching rate in solutions with each individual lixiviant. The mole ratio of thiourea to thiocyanate has significant influence on the leaching rate of gold and open potential. Thiocyanate accelerates the decomposition of thiourea whereas thiourea alleviates the decomposition of thiocyanate.

Key words: refractory gold ore; thiourea; thiocyanate; lixiviant

随着地表矿产资源的日渐耗尽和深部硫化矿床的不断开采, 易选冶金矿资源日益枯竭, 难处理金矿将成为今后黄金冶炼工业的主要来源^[1-2]。难处理金矿中金通常以极分散的形态嵌布在黄铁矿(FeS_2)和毒砂(FeAsS)的晶格中, 这两种硫化矿属于极难分解的顽固矿物, 即使进行超细磨也不能使金微粒完全暴露, 导致金难以与浸出剂接触。同时, 包裹金的硫化矿与浸出剂发生作用, 消耗大量的试剂, 影响金的浸出率。因此, 含砷硫难处理金矿在浸出之前需要进行预处理。预处理方法主要有焙烧氧化法、细菌氧化法和加压氧

化法, 其中焙烧氧化和细菌氧化法工业应用较广^[3-5]。

预处理后的提金技术主要包括氰化法和非氰化法两大类^[6-7]。氰化提金以其浸金率高、工艺简单、操作方便、成本低及技术成熟等优势一直作为主要的提金方法, 但存在剧毒、浸金速度慢等缺点。因此, 非氰、无毒、无污染提金技术开发及应用将成为以后科技攻关的重点。

目前, 对非氰化法浸金的研究主要集中在硫脲法^[8-9]、硫代硫酸盐法^[10-11]和硫氰酸盐^[12-16]等。这些方法浸金速度一般比氰化法快, 而且对环境的污染程

度远远小于氰化法的。但是, 硫脲法和硫代硫酸盐法存在药剂消耗量大、成本高、稳定性差等缺陷, 硫氰酸盐毒性小, 性质稳定, 但浸出速度慢, 因而限制了其在冶金工业中的推广应用。一些研究人员指出, 向硫氰酸盐体系中加入碘(或碘离子)^[17]、溴^[18]等组成的混合体系对硫氰酸盐浸金有非常明显的改善。最近, 本文作者^[19-21]以金电极为对象, 系统研究了硫脲-硫氰酸钠混合体系浸出金的工艺及相关机理。研究发现, 添加少量的硫脲于硫氰酸盐溶液中可以明显改善其浸出动力学, 硫脲与硫氰酸钠混合体系的浸出速度大于相同条件下单一体系浸出率之和, 硫脲与硫氰酸钠之间有一种协同作用。混合体系对难处理金矿的浸出效果如何, 还有待进一步研究。在此, 本文作者以难处理金矿为对象, 研究硫脲-硫氰酸钠混合体系浸出工艺, 并探讨浸出剂的稳定性, 为混合体系的工业应用奠定基础。

1 实验

1.1 原料

金矿为四川某企业提供的高品位金矿, 物相分析表明, 主要成分为石英(SiO₂)、黄铁矿(FeS₂)、砷黄铁矿(FeAsS)、白云石(CaMg(CO₃)₂)、菱铁矿(Fe(CO₃))、浅红银矿(Ag₃AsS₄)和 KAl₂Si₃AlO₁₀(OH)₂。主要化学元素的分析结果见表 1, 金矿含有较多的砷和硫, 属于典型的难处理金矿。

表 1 金矿的化学成分

Table 1 Composition of gold ore (mass fraction, %)						
Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Zn	Sb	Pb	Mg	Al
28	13.1	0.29	2.3	0.01	1.2	3.2
S	Fe	Ca	Cu	K	As	
13.9	16.3	3.3	0.05	1.5	2.3	

1) g/t。

1.2 实验过程

金矿的预处理。先经高温焙烧预处理, 采用管式炉焙烧, 控制焙烧温度 600~800 ℃, 焙烧后生成 SO₂ 以及 As₂O₃ 气体, 出气管末端浸泡在 NaOH 溶液中吸收 SO₂ 以及 As₂O₃。

金的浸出。取经过焙烧预处理的焙砂 20 g 倒入 500 mL 三口烧瓶内, 量取 200 mL Fe₂(SO₄)₃、硫脲(Tu)以及 NaSCN 组成的混合溶液, 然后将混合液倒入三口烧瓶与焙砂充分混合, 用稀 H₂SO₄ 调 pH 值, 恒温

搅拌浸出一定时间后, 过滤, 分析滤液金的浓度, 计算金的浸出率。

1.3 分析方法

Au 浓度采用 ICP-AES 即电感耦合等离子体原子发射光谱进行检测, 波长为 267.50 nm。

硫脲浓度的测定。以淀粉为指示剂, 采用碘酸钾溶液滴定至蓝色。

硫氰酸根浓度的测定。在酸性浸出溶液中加入过量的硝酸银, 生成硫氰酸银沉淀, 以硫酸铁铵为指示剂, 用硫氰酸钠标准溶液反滴定至呈浅棕红色, 根据硝酸银和硫氰酸钠的物质的量之差计算硫氰酸钠浓度。

1.4 开路电位的测试

采用 CHI660B 电化学工作站, 研究电极为从 Pine Instrument 公司购置的金电极, 参比电极为 232 型的饱和甘汞电极, 采用带有毛细管的盐桥消除不同溶液间的液体接界电势及降低溶液的欧姆电阻, 金电极用金相砂纸抛光, 蒸馏水冲洗、然后用滤纸擦干金电极表面的水, 防止在表面产生水膜, 影响反应进行与测定。

2 结果与讨论

2.1 金矿的浸出实验

2.1.1 焙烧温度对金浸出率的影响

控制焙烧时间 2 h, 焙砂浸出的工艺参数为 Tu 0.01 mol/L、NaSCN 浓度 0.05 mol/L、Fe³⁺ 0.01 mol/L、pH1.5、浸出温度 30 ℃、浸出时间为 80 min, 焙烧温度对金浸出率的实验结果如表 2 所列。

表 2 焙烧温度对金浸出率的影响

Table 2 Effect of roasting temperature on gold leaching rate	
Temperature/℃	Leaching rate/%
650	53.73
700	75.49
750	89.29
800	84.00
850	79.14
900	75.57

由表 2 可以看出, 随着焙烧温度的提高, 金浸出率增加。当焙烧温度升到 750 ℃时, 金矿的浸出率达到最高值 89.29%, 继续升高温度, 金矿的浸出率反而

降低,这可能是易熔共晶混合物的形成引起局部熔化所致,因此,物料结块,得到致密的烧渣,将金包裹,导致金的浸出效果下降。对 750 °C 焙烧的焙砂检测,焙砂产率为 85.5%,焙砂中 As 含量为 0.21%, S 含量为 0.17%,金的含量为 32.7 g/t,计算出 As 的脱除率为 92.2%,硫的脱除率为 99.0%,说明黄铁矿和砷黄铁矿已经全部氧化,金没有损失。因此,金矿最佳焙烧温度是 750 °C。

2.1.2 NaSCN 浓度对金浸出率的影响

在焙烧温度 750 °C、Tu 浓度 0.01 mol/L、Fe³⁺浓度 0.01 mol/L、pH 1.5、浸出温度 30 °C 以及浸出时间 80 min 的条件下,研究 NaSCN 浓度对金浸出率的影响,其结果如图 1 所示。

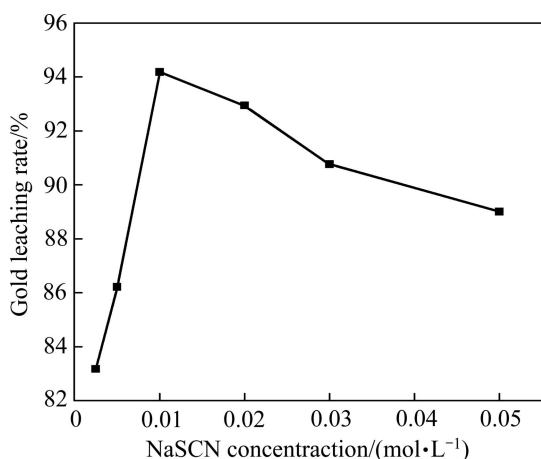


图 1 NaSCN 浓度对金浸出率的影响

Fig. 1 Effect of NaSCN concentration on gold leaching rate

由图 1 可以看出,当 NaSCN 浓度较低时,金的浸出率随着 NaSCN 浓度的增大而上升,当 NaSCN 浓度超过 0.01 mol/L 后,金的浸出率随着 NaSCN 浓度的增大而下降。产生这一现象可能有两方面的原因: 1) 硫氰酸钠浓度影响硫脲与硫氰酸钠之间的摩尔比,而此比率影响反应历程。YANG 等^[19-21]的研究表明,当硫脲/硫氰酸钠摩尔比为 1:1 至 1:4 时,以混合体系浸出的反应规律为主,反应按照式(1)进行,当硫脲/硫氰酸钠摩尔比大于 1:1 时,以硫脲浸出为主,反应按式(2)进行,当硫脲/硫氰酸钠摩尔比小于 1:5 时,以硫氰酸钠浸出为主,反应按式(3)进行,硫氰酸钠的反应动力学比硫脲慢,所以硫氰酸钠浓度达到一定值,浸出率下降。2) NaSCN 对硫脲的稳定性有影响,较高的硫氰酸钠浓度导致硫脲分解,降低硫脲的有效浓度,减慢金的浸出,在后续浸出剂的稳定性将再讨论。

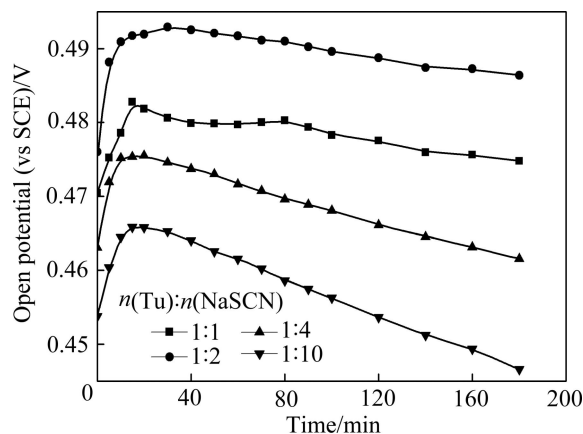
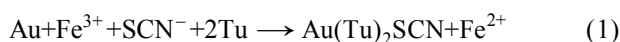
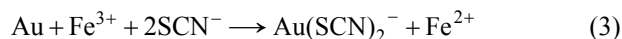
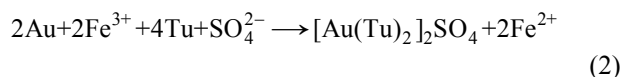


图 2 不同硫脲与硫氰酸钠摩尔比时金电极开路电位随时间的变化

Fig. 2 Changes of open potential of gold disk with time at different mole ratios of Tu to NaSCN



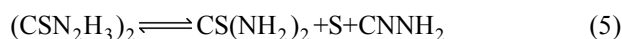
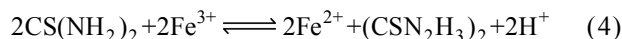
为了了解硫脲与硫氰酸钠摩尔比对反应历程的影响,以金电极为研究电极,甘汞为参比电极,固定 Tu 浓度为 0.005 mol/L, Fe³⁺浓度 0.055 mol/L、pH 1.5、温度 30 °C,改变硫氰酸钠浓度,使硫脲与硫氰酸钠摩尔比分别为 1:1、1:2、1:4、1:10,测试了金电极开路电位随时间的变化,其结果如图 2 所示。

从图 2 可以看出,随着硫脲与硫氰酸钠摩尔比由 1:1 减小到 1:10,开路电位先升后降,根据能斯特方程,按照式(1)或(3),开路电位应该降低,说明硫脲与硫氰酸钠摩尔比对反应历程有影响。

2.1.3 Tu 浓度对金浸出率的影响

在 NaSCN 浓度 0.01 mol/L、Fe³⁺浓度 0.01 mol/L、pH 1.5、浸出温度 30 °C、浸出时间 80 min、搅拌速度恒定的条件下, Tu 浓度对金浸出率的影响见图 3。

由图 3 可以看出, Tu 浓度对金的浸出率影响大,当 Tu 浓度低于 0.01 mol/L,随着 Tu 浓度的增加,金浸出率由 50%增加到 94%,当 Tu 浓度继续增加,浸出率稍有降低。这主要是由于在氧化剂 Fe³⁺作用下,酸性硫脲浸出金按照式(2)进行,同时,硫脲本身也会被 Fe³⁺氧化成二硫甲脒,二硫甲脒可进一步分解为硫脲、氨基氰和元素硫,反应分别如式(4)和(5)所示:



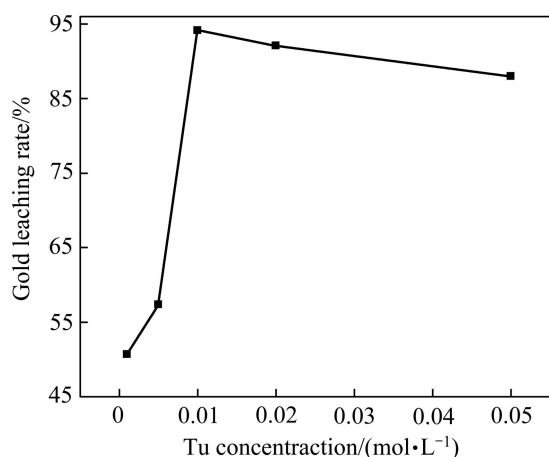


图3 Tu浓度对金浸出率的影响

Fig. 3 Effect of thiourea concentration on gold leaching rate

二硫甲脒分解产生的元素硫为高度分散(很细小)状,容易包裹在焙砂表面,使金表面钝化从而延缓或阻止金的浸出。

表3 单一体系和混合体系金的浸出率对比

Table 3 Comparison of gold leaching rate between single and mixed lixivants

Lixiviant	Leaching rate/%
Tu	78.3
NaSCN	13.8
Tu+NaSCN	94.18

为了对比混合体系和单一体系金的浸出率,在相同条件下测试了金的浸出率,结果如表3所列。由表3可以看出,混合体系中金浸出率大于单一体系中浸出率之和,说明混合体系确实存在一个相互协同作用。

2.1.4 Fe³⁺浓度对金浸出率的影响

在 pH 1.5、浸出温度 30 ℃、NaSCN 浓度 0.01 mol/L、Tu 浓度 0.01 mol/L、浸出时间 80 min、搅拌速度恒定的条件下,Fe³⁺浓度对金浸出率的影响见图4。

由图4可以看出,当Fe³⁺浓度为0.005 mol/L到0.01 mol/L时,金的浸出率随Fe³⁺浓度的增加明显增大,当Fe³⁺浓度大于0.01 mol/L,金的浸出率随Fe³⁺浓度增大而降低。Fe³⁺作为氧化剂使溶液的氧化电位维持在一定值,以保证金具有较高的浸出速率。同时,硫氰酸根与Fe³⁺形成一系列配合物,如Fe(NCS)₄⁻、Fe(NCS)₃、Fe(NCS)₂⁺、Fe(NCS)₂²⁺。当Fe³⁺浓度为0.005 mol/L,以阴离子配合物Fe(NCS)₄⁻为主,当Fe³⁺浓度为0.05 mol/L,阳离子配合物Fe(NCS)₂²⁺占优势^[13, 16],这些配合离子的氧化能力存在差异。对于单一硫脲体

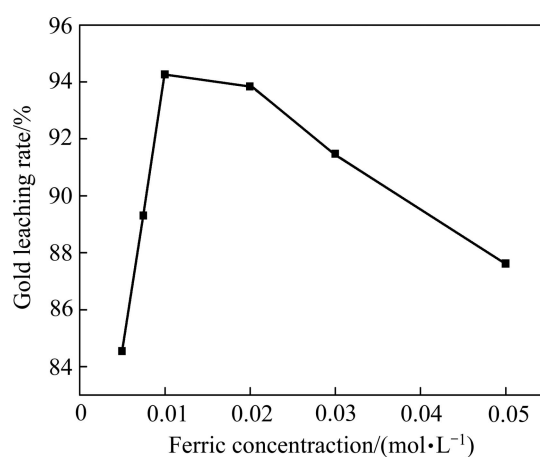
图4 Fe³⁺浓度对金浸出率的影响

Fig. 4 Effect of ferric concentration on gold leaching rate

系,LI等^[22]认为,当Fe³⁺浓度低于0.2 g/L时,金的浸出率随Fe³⁺浓度的增加而增大;当Fe³⁺浓度大于0.2 g/L时,金的溶解受表面反应控制,Fe³⁺浓度增加,金的溶解速度几乎不变。李玉文等^[23]研究认为,以硫脲为浸出剂,金浸出率随Fe³⁺浓度的增加先增大后减小,主要是因为Fe³⁺浓度增大,Au被氧化成Au⁺的程度增加,金的浸出率也就随Fe³⁺浓度的上升而增大,但当Fe³⁺浓度超过一定值后,促使Au氧化的同时也使硫脲氧化为硫和二硫甲脒,硫脲浓度降低,而且生成的元素硫对浸金有钝化作用,导致Au浸出率随之下降。在单一的硫氰酸钠体系,BARBOSA-FILHO等^[14-16]研究发现,Fe³⁺浓度对金浸出率的影响小,Fe³⁺浓度的增加可以加速SCN⁻氧化为(SCN)₂或(SCN)₃⁻,Fe²⁺累积使金的浸出速度逐渐变慢。混合体系受硫脲和硫氰酸钠的综合影响,所以,金的浸出率随Fe³⁺浓度先增大后降低。

2.1.5 pH值对金浸出率的影响

在NaSCN浓度0.01 mol/L、Tu浓度0.01 mol/L、Fe³⁺浓度0.01 mol/L、温度30 ℃、浸出时间80 min、搅拌速度恒定的条件下,考察了不同pH值下混合体系浸金效率,其结果如图5所示。

从图5可以看出,金的浸出率随pH值增加有一个先增后降的过程,当pH=1.5时,浸出率最高。对单一的硫脲浸金体系,pH值在1~2的范围内,金的浸出率随着pH值升高而增加^[22]。在单一的硫氰酸钠体系中,较低的pH值有利于硫氰酸根的稳定^[23]。对于混合体系先升后降的现象,可以解释为在较高pH值时,硫脲浸出金的速度加快,但Tu氧化成二硫甲脒(SCN₂H₃)₂的速度加快,硫氰酸根也更不稳定。所以,硫脲-铁(III)-硫氰酸钠混合体系浸取金时,浸出液的pH值为1.5较为合适。

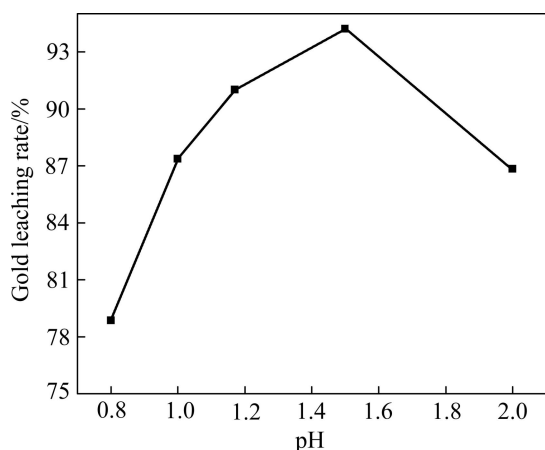


图5 pH值对金浸出率的影响

Fig. 5 Effect of pH value on gold leaching rate

2.1.6 温度对金矿浸出率的影响

在NaSCN浓度0.01 mol/L、Tu浓度0.01 mol/L、pH 1.5、浸出时间80 min、搅拌速度恒定的情况下，考察了温度对金浸出率的影响，结果见图6。

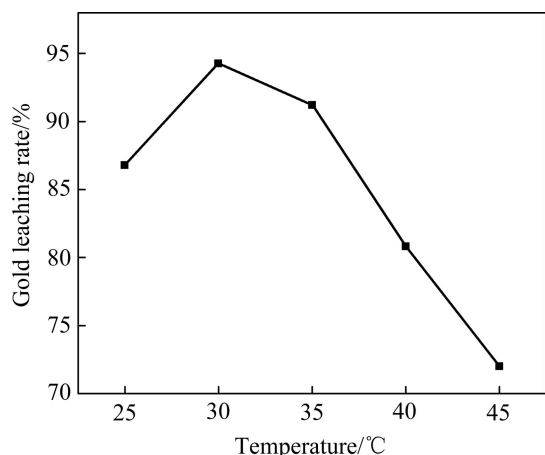


图6 温度对金浸出率的影响

Fig. 6 Effect of temperature on gold leaching rate

从图6可以看出，当温度低于30℃，Au的浸出率随温度升高而增加；当温度高于30℃时，Au的浸出率随温度升高而降低。这一现象与金电极的溶解有很大不同。无论在硫脲、硫氰酸钠还是混合体系中，金电极的浸出速度均随温度升高而增加，在单一的硫氰酸钠体系中，Au电极的溶解受化学步骤控制；在单一的硫脲或混合体系中，金电极的溶解受混合步骤控制^[19-22]。对于金矿的浸出，虽然黄铁矿和砷黄铁矿已经氧化，金已经暴露，但金仍然与石英、白云石、菱铁矿和 $KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$ 混合在一起，浸出液扩散到矿物中金表面的速度比金电极要缓慢，同时矿物中的

组份加速硫脲分解，这些因素使Au浸出率在温度高于30℃降低。

2.1.7 浸出时间对金矿浸出率的影响

在NaSCN浓度0.01 mol/L、Tu浓度0.01 mol/L、 Fe^{3+} 浓度0.01 mol/L、pH=1.5、浸出温度30℃、搅拌速度恒定的情况下，研究了浸出时间对金浸出率的影响，结果如图7所示。

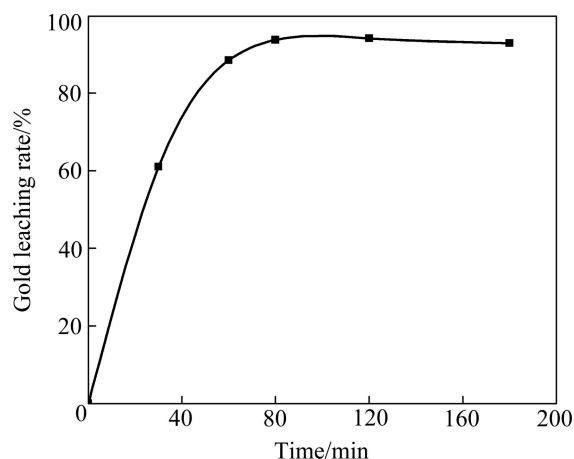


图7 时间对金浸出率的影响

Fig. 7 Effect of time on gold leaching rate

从图7可看出，随着时间的延长，金的浸出率增加明显，浸出时间达到80 min时，浸出率为93.8%，继续延长浸出时间，浸出率增加缓慢。

取经过750℃焙烧预处理的焙砂100 g倒入2500 mL三口烧瓶内，量取1000 mL浸出液，控制NaSCN浓度0.01 mol/L、Tu浓度0.01 mol/L、 Fe^{3+} 浓度0.01 mol/L、pH=1.5、浸出温度30℃、浸出时间80 min，过滤，洗涤，烘干，得到92.4 g渣，对该浸出渣进行化学分析，发现金含量为2.54 g/t，S含量为0.2%，As含量为0.23%，计算出金的浸出率为93.1%。S的含量比焙砂中的稍高，由于有少量硫脲发生分解析出硫，另外，焙砂中的氧化物与浸出液中的硫酸反应生成硫酸盐进入浸出渣中，导致硫含量稍有增加。

2.2 浸出剂的稳定性

在Tu浓度为0.01 mol/L、 Fe^{3+} 浓度0.01 mol/L、pH=1.5、浸出温度80℃、浸出时间80 min的条件下，考察了硫氰酸钠浓度对硫脲分解率的影响，结果见图8。硫脲和硫氰酸钠浓度随时间的变化如图9和10所示，为了对比，将相同浓度的硫脲单一体系中的分解率随时间的变化也列在图9中。

随着NaSCN浓度的增加，Tu的分解趋于严重，这表明在硫脲-硫氰酸钠混合体系中，NaSCN对Tu

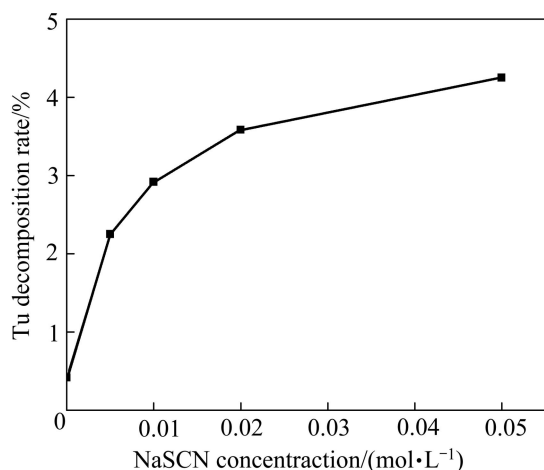


图8 NaSCN对硫脲稳定性的影响

Fig. 8 Effect of NaSCN concentration on thiourea stability

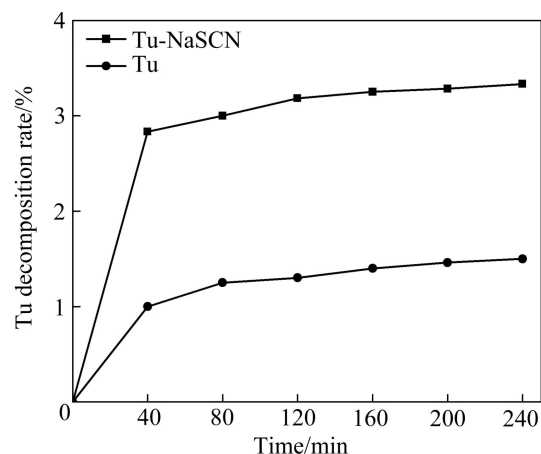


图9 硫脲分解率与时间的关系

Fig. 9 Relationship between thiourea decomposition rate and time

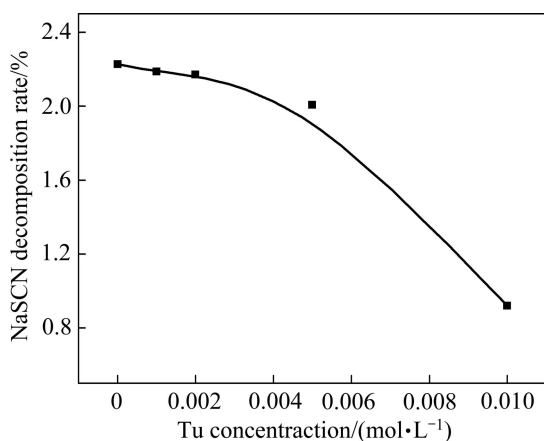


图10 硫脲浓度对硫氰酸钠分解率的影响

Fig. 10 Effect of thiourea concentration on thiocyanate stability

稳定性影响比较大,但是在整个范围,硫脲的分解率都较低,低于4.0%,并且硫脲的浓度低,分解量极少。图8表明,硫脲的分解主要发生在起初40 min内,后续分解率基本不变,单一硫脲体系与混合体系中,硫脲随时间变化的规律相同,由于硫氰酸钠的作用,混合体系硫脲分解的速度快一些。

由图10可知,随着Tu浓度增大,硫氰酸钠稳定性增强,当Tu浓度达到0.01 mol/L时,硫氰酸钠的分解率小于1.5%。硫脲减缓了硫氰酸钠的分解,而硫氰酸钠加速了硫脲的分解,说明硫脲与硫氰酸钠之间可能发生如下反应。



3 结论

1) 对含砷含硫的难处理金矿采用高温焙烧,然后用硫脲-硫氰酸钠浸出焙砂中的金,金的最佳浸出率达到93.1%。

2) 影响金浸出率的因素有焙烧温度、硫脲浓度、硫氰酸钠浓度、硫酸铁浓度、浸出时间和温度,其中焙烧温度和硫脲浓度对金浸出率的影响最大。

3) 开路电位测试表明,硫脲-硫氰酸钠的比率对反应的历程影响大。

4) 硫脲与硫氰酸钠混合体系浸出金的浸出率大于单一体系浸出率之和,硫脲与硫氰酸钠之间有一种协同作用。

5) 硫脲浓度增加,硫氰酸钠分解率降低,增强稳定性。硫氰酸钠浓度增大,硫脲的分解率增大,稳定性降低。

REFERENCES

- [1] 董博文, 李黎婷, 刘升明. 高硫高砷金精矿高压预氧化-氰化提金工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2011(6): 10-12.
DONG Bo-wen, LI Li-ting, LIU Sheng-ming. Research on the technology of high pressure preoxidation-cyanide leaching of gold for a high sulfur high arsenic gold concentrate[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2011(6): 10-12.
- [2] 金剑石, 张延安, 牟望重, 曾勇, 刘燕, 吕国志, 蒋孝丽. 难处理金矿浸出预处理过程的FeS₂-FeAsS-H₂O系电位-pH图[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(2): 120-124.
KIM Chang-sok, ZHANG Ting-an, MU Wang-zhong, ZENG Yong, LIU Yan, LÜ Guo-zhi, JIANG Xiao-di. E-pH diagram of FeS₂-FeAsS-H₂O system for leaching pretreatment of refractory

- gold ore[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2011, 10(2): 120–124.
- [3] 吴国元, 王友平, 陈景. 高砷金精矿氧化焙烧焙砂和真空蒸馏脱砷焙砂的硫脲浸出研究[J]. 黄金, 2004, 25(10): 34–36.
- WU Guo-yuan, WANG You-ping, CHEN Jing. Thiourea leach gold of bearing-high arsenic gold concentrates pretreated by vacuum evaporation and ordinary oxidation roasting[J]. Gold, 2004, 25(10): 34–36.
- [4] 殷书岩, 杨洪英. 难处理金矿加压氧化预处理技术及发展[J]. 黄金, 2008, 29(1): 56–59.
- YIN Shu-yan, YANG Hong-ying. Technology and progress in high pressure oxidation from refractory gold ores[J]. Gold, 2008, 29(1): 56–59.
- [5] 杨洪英, 杨立, 魏绪钧. 氧化亚铁硫杆菌(SH-T)氧化毒砂的机理[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(2): 323–327.
- YANG Hong-ying, YANG Li, WEI Xu-jun. Mechanism on biooxidation of arsenopyrite with *Thiobacillus ferrooxidans* strain SH-T[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11(2): 323–327.
- [6] 杨玮, 覃文庆, 刘瑞强, 任允超. 高砷难处理金精矿细菌氧化-氰化提金[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(5): 1151–1158.
- YANG Wei, QIN Wen-qing, LIU Rui-qiang, REN Yun-chao. Extraction of Au from high arsenic refractory gold concentrate by bacterial oxidation-cyanidation[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(5): 1151–1158.
- [7] 何桂春, 吴艺鹏, 冯金妮. 含金硫精矿焙烧除砷选铁-硫脲法提金试验研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(5): 62–66.
- HE Gui-chun, WU Yi-peng, HONG Jin-ni. Experimental study on gold extraction from gold-bearing pyrite concentrate by roasting for arsenic removal and thiourea leaching of gold[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(5): 62–66.
- [8] ZHANG H, RITCHIE I M, LA BROOY S R. Electrochemical oxidation of gold and thiourea in acidic thiourea solutions[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2001, 148: D146–153.
- [9] YANG X, MOATS M S, MILLER J D. The interaction of thiourea and formamidine disulfide in the dissolution of gold in sulfuric acid solutions[J]. Minerals Engineering, 2010, 23: 698–704.
- [10] BREUER P L, JEFFREY M I. An electrochemical study of gold leaching in thiosulfate solutions containing copper and ammonia[J]. Hydrometallurgy, 2002, 65: 145–157.
- [11] FENG D, VAN DEVENTER J S J. Thiosulphate leaching of gold in the presence of orthophosphate and polyphosphate[J]. Hydrometallurgy, 2011, 106: 38–45.
- [12] 宋岷蔚, 刘菁, 俞海平. 硫氰酸铵法提金工艺研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(2): 84–87.
- SONG Min-wei, LIU Jing, YU Hai-ping. Technical study on gold extraction by ammonium thiocyanate[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2013, 33(2): 84–87.
- [13] BROADHURST J L, DU PREEZ J G H. Thermodynamic study of the dissolution of gold in an acidic aqueous thiocyanate medium using iron (III) sulphate as an oxidant[J]. Hydrometallurgy, 1993, 32: 317–334.
- [14] BARBOSA-FILHO O, MONHEMIUS A J. Leaching of gold in thiocyanate solutions - part 1: chemistry and thermodynamics[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy, Section C: Mineral Processing and Extractive Metallurgy, 1994, 103: C105–110.
- [15] BARBOSA-FILHO O, MONHEMIUS A J. Leaching of gold in thiocyanate solutions-Part 2: Redox processes in iron(III)-thiocyanate solutions[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy C, 1994, 103: C111–117.
- [16] BARBOSA-FILHO O, MONHEMIUS A J. Leaching of gold in thiocyanate solutions-Part 3: Rates and mechanism of gold dissolution[J]. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy C, 1994, 103: C117–125.
- [17] BARBOSA-FILHO O, MONHEMIUS A J. Iodide-thiocyanate leaching system for gold[J]. Hydrometallurgy, 1994, 94: 425–440.
- [18] 王清江, 宗巍. 溴-硫氰酸盐体系浸取硫化矿中的金[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1996, 3: 72–73.
- WANG Qing-jiang, ZONG Wei. Leaching of gold from sulfide ore by the system of Bromine and thiocyanate[J]. Journal of East China Normal University: Natural Science, 1996, 3: 72–73.
- [19] YANG X, MOATS M S, MILLER J D. Gold dissolution in acidic thiourea and thiocyanate solutions[J]. Electrochimica Acta, 2010, 55: 3643–3649.
- [20] YANG X, MOATS M S, MILLER J D. Using electrochemical impedance spectroscopy to investigate gold dissolution in thiourea and thiocyanate acid solutions[J]. ECS Transaction, 2010, 28: 213–221.
- [21] YANG X, MOATS M S, MILLER J D, WANG X, SHI X, XU H. Thiourea-thiocyanate leaching system for gold[J]. Hydrometallurgy, 2011, 106: 58–63.
- [22] LI J, MILLER J D. Reaction kinetics of gold dissolution in acid thiourea solution using ferric sulfate as oxidant[J]. Hydrometallurgy, 2007, 89: 279–288.
- [23] 李玉文, 吴德东, 赵光楠. 浸出时间、 H_2SO_4 和 Fe^{3+} 浓度对硫脲浸金的影响[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(2): 49–52.
- LI Yu-wen, WU De-dong, ZHAO Guang-nan. The impact of leaching gold of thiourea about time, sulfuric acid and ferric concentration[J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(2): 49–52.

(编辑 龙怀中)