高砷低品位金矿的提金实验研究①

朱 军,王 毅,祁 栋,刘漫博,刘苏宁
(西安建筑科技大学,陕西 西安 710055)

摘 要:研究了高砷低品位金矿采用焙烧预处理进行氰化提金的工艺。以 $CaCO_3$ 作为焙烧固定剂,$Pb(NO_3)_2$ 作为助浸剂,最佳实验条件为:磨矿粒度为 -0.074 mm 粒级占90%,焙烧时间4 h,$CaCO_3$ 用量为矿量的2%,焙烧温度650 ℃;助浸剂 $Pb(NO_3)_2$ 用量200 g/t,预处理4 h,NaCN 用量1.2 kg/t,浸出时间22 h,浸出温度20 ℃,pH=11,液固比2.5,搅拌速度900 r/min,此条件下金的浸出率达到80.67%。

关键词:氰化提金;低品位金矿;焙烧固定剂;助浸剂;浸出率
中图分类号:TF111 **文献标识码**:A **文章编号**:0253-6099(2011)03-0081-04

Study on Gold Extraction from a Low-grade High-arsenic-containing Gold Ore

ZHU Jun, WANG Yi, QI Dong, LIU Man-bo, LIU Su-ning
(*Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an* 710055, *Shannxi, China*)

Abstract: The process for gold recovery with Cyanide from a low-grade high-arsenic-containing gold deposit by roasting pretreatment was studied. It is concluded that choosing $CaCO_3$ as a fixing agent for roasting, $Pb(NO_3)_2$ as leaching agent, the gold leaching rate can be 80.67% under the following optimum conditions: with 90% particles of -0.074 mm grinding size, being roasted at a temperature of 650 ℃ for 4 hrs with dosage of $CaCO_3$ 2% of the ore feed and 1.2 kg/t of leaching agent $Pb(NO_3)_2$, pretreated for 4 h with 1.2 kg/t of NaCN, leaching at a temperature of 20 ℃ for 22 h from a solution with pH=11, liquid-solid ratio of 2.5 at a mixing speed of 900 r/min.

Key words: gold recovery with cyanide; low-grade gold ore; fixing agent for roasting; leaching agent; leaching rate

为了提高浸出率,大部分金矿的预处理方法均为氧化焙烧。焙烧可以使硫化物分解、砷和锑均以氧化态挥发、含碳物质失去活性、显微细粒状的金得到富集,但是直接焙烧时,会生成 As_2O_3 和 SO_2 污染环境[1-2]。固硫固砷焙烧工艺是在焙烧过程中分别加入 CaO、$CaCO_3$、Na_2CO_3 或 NaOH 等固定剂,这些固定剂与硫、砷生成相应的硫酸盐和砷酸盐,而不放出有毒气体,同时也可使被包裹的金充分暴露,以提高浸出率[3-5]。本实验研究在焙烧过程中加入 $CaCO_3$ 作为固定剂,焙砂氰化浸出前首先进行预处理,最终固砷率大于95%,金浸出率达到80%以上。

1 矿石性质

实验所用金矿取自我国青海某地。该金矿金品位为2.38 g/t,砷含量是0.87%,且该矿石中约40%的金都是脉石包裹金,用常规氰化法浸出时,金浸出率仅为6.72%(氰化条件为 NaCN 用量1.5 kg/t,浸出时间24 h),所以该矿石属于难浸金矿。原矿多元素分析和物相分析结果分别见表1和表2。

表1 原矿多元素分析结果(质量分数)/%

Au[1)]	Ag[1)]	Cu	Pb	Zn	S	P	K_2O
2.38	2.0	0.09	0.061	0.030	1.24	0.28	3.16
As	Sb	Mo	Co	TC	TFe	Mn	Na_2O
0.87	0.21	0.0008	0.001	1.52	3.40	0.086	0.54
Ni	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	TiO_2	V_2O_5	LOI
0.002	55.57	13.7	6.02	1.37	0.36	1.024	6.27

1) 单位为 g/t。

表2 原矿金物相分析结果

金物相	含量/(g·t^{-1})	分布率/%
裸露及半裸露金	0.36	14.29
硫化物中金	1.00	39.68
赤褐铁矿中金	0.16	6.35
碳酸盐中金	0.18	7.14
硅酸盐中金	0.82	32.54
合计	2.52	100.00

① **收稿日期**:2010-11-08
作者简介:朱 军(1963-),男,山东莱阳人,博士,副教授,主要研究方向为有色金属冶金。

2 实验方法

用棒磨机将该金矿磨至 -0.074 mm 粒级占90%，每次实验取 100 g 磨细的矿石加入固定剂焙烧后，助浸剂预处理焙砂，最后搅拌氰化浸出。实验中选用的固定剂是 $CaCO_3$，助浸剂是 $Pb(NO_3)_2$，氰化剂为 NaCN。

3 实验结果与分析

3.1 焙烧过程影响固砷率和浸出率的因素

3.1.1 固定剂用量 固定焙烧温度 650 ℃，焙烧时间 4 h，磨矿粒度为 -0.074 mm 粒级占 90%，焙砂浸出时间 24 h，浸出温度 20 ℃，NaCN 用量 1.2 kg/t，pH = 11，液固比 2.5，搅拌速度 900 r/min，就固定剂用量进行单因素实验。固定剂用量对固砷率和浸出率的影响见图 1 和图 2。由图 1 可知，随着 $CaCO_3$ 用量增加，固砷率随之提高。加入 3% $CaCO_3$ 焙烧时，固砷率最高，达 97.70%。由图 2 可知，在焙烧过程中加入固定剂后浸出率有所下降，这是因为金矿中大部分的 As 和 S 不挥发，氰化浸出时生成的 $CaSO_4$ 和 $Ca_3(AsO_4)_2$ 会在金的表面形成一层薄膜，在一定程度上阻碍浸出反应。当 $CaCO_3$ 用量为矿量的 2% 时，固砷率和浸出率都较高。故本实验选取固定剂 $CaCO_3$ 用量为 2% 较为合适。

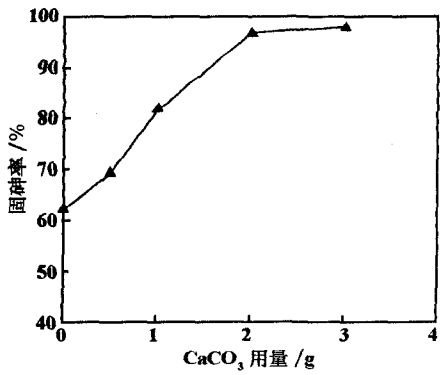

图 1 固定剂用量对固砷率的影响

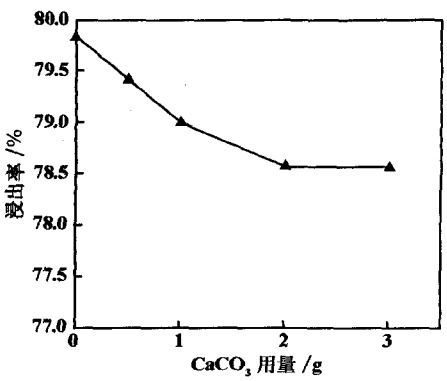

图 2 固定剂用量对浸出率的影响

3.1.2 焙烧时间 固定焙烧温度 650 ℃，固定剂 $CaCO_3$ 用量 2%，磨矿粒度为 -0.074 mm 粒级占 90%，焙砂浸出时间 24 h，浸出温度 20 ℃，NaCN 用量 1.2 kg/t，pH = 11，液固比 2.5，搅拌速度 900 r/min，焙烧时间对固砷率和浸出率的影响见图 3 和图 4。从图 3 和图 4 可以看出，随着焙烧时间的延长，金的浸出率逐渐提高，这是因为焙烧时间越长，被硫和砷包裹的金表面露出越多，因而浸出率提高。当焙烧时间超过 3 h 后，时间对固砷率的影响不再明显，当焙烧时间为 5 h 时，固砷率最高，但是浸出率会降低。故本实验选取最佳焙烧时间为 4 h，此时的固砷率可以达到 96.55%。

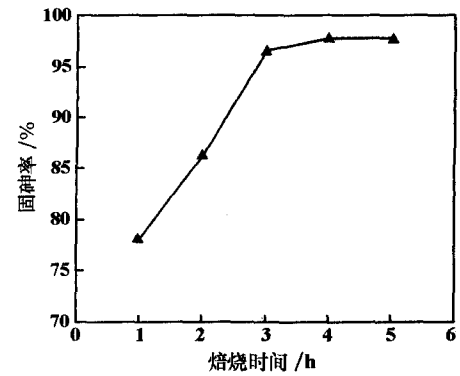

图 3 焙烧时间对固砷率的影响

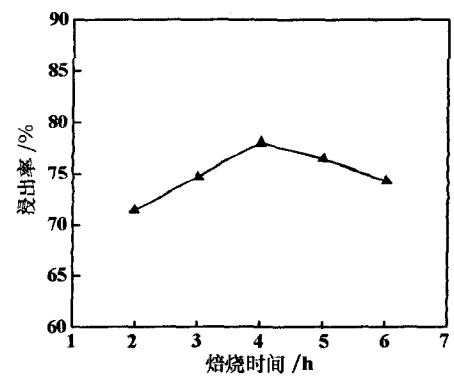

图 4 焙烧时间对浸出率的影响

3.1.3 焙烧温度 固定焙烧时间 4 h，固定剂 $CaCO_3$ 用量 2%，磨矿粒度为 -0.074 mm 粒级占 90%，焙砂浸出时间 24 h，浸出温度 20 ℃，NaCN 用量 1.2 kg/t，pH = 11，液固比 2.5，搅拌速度 900 r/min，焙烧温度对固砷率和浸出率的影响见图 5 和图 6。从图 5 和图 6 可以看出，随着焙烧温度升高，固砷率逐渐提高，当温度达到 600 ℃时，固砷率趋于稳定。当焙烧温度超过 650 ℃时，浸出率有所下降，此时部分矿石有可能发生熔结，熔融后的金属对金进行二次包裹，对浸出不利。故本实验选取最佳焙烧温度为 650 ℃，此时固砷率可以达到 95% 以上。

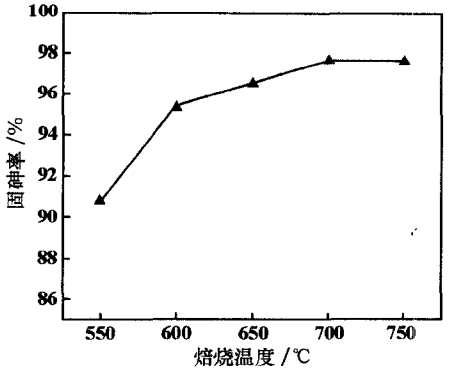

图5　焙烧温度对固砷率的影响

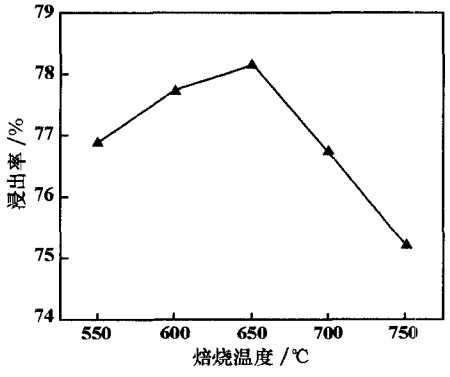

图6　焙烧温度对浸出率的影响

3.1.4　*磨矿粒度*　固定焙烧温度650 ℃，焙烧时间4 h，固定剂 $CaCO_3$ 用量2%，焙砂浸出时间24 h，浸出温度20 ℃，NaCN用量1.2 kg/t，pH=11，液固比2.5，搅拌速度900 r/min，磨矿粒度对浸出率的影响见图7。从图7可以看出，金浸出率随着物料粒级变细逐渐提高，这是由于经过磨矿，金粒一般都可以得到单体分离或从伴生矿物的表面上暴露出来，磨矿粒度越细、金粒的暴露越完全，更易浸出。当磨矿粒度为 -0.074 mm 粒级占90%以上时，浸出率提高不明显，并综合考虑经济性等因素，本实验选取磨矿粒度为 -0.074 mm 粒级占90%较为合适。

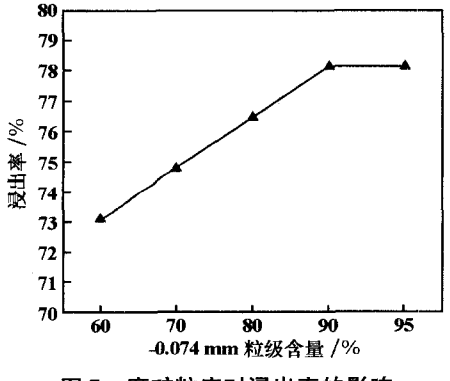

图7　磨矿粒度对浸出率的影响

3.1.5　焙烧最优条件　通过上述实验，得到最佳焙烧条件为：焙烧温度650 ℃，焙烧时间4 h，固定剂 $CaCO_3$ 用量2%，磨矿粒度为 -0.074 mm 粒级占90%以上。

3.2　氰化过程中影响浸出率的因素

3.2.1　*助浸剂用量*　以最佳焙烧条件下得到的焙砂作为实验原料，固定焙砂经 $Pb(NO_3)_2$ 预处理2 h，氰化浸出时间24 h，浸出温度20 ℃，NaCN用量1.2 kg/t，pH=11，液固比2.5，搅拌速度900 r/min，助浸剂用量对浸出率的影响见图8。从图8可以看出，在加入硝酸铅预处理一段时间后，再进行氰化浸金，金浸出率随着 $Pb(NO_3)_2$ 用量的增加而提高，这是因为铅盐的加入，矿浆中的干扰离子减少，金氰配合物生成的机会增多，金浸出率提高。直到加入的硝酸铅用量大于200 g/t后，浸出率不发生明显变化。故本实验选取助浸剂 $Pb(NO_3)_2$ 用量为200 g/t。

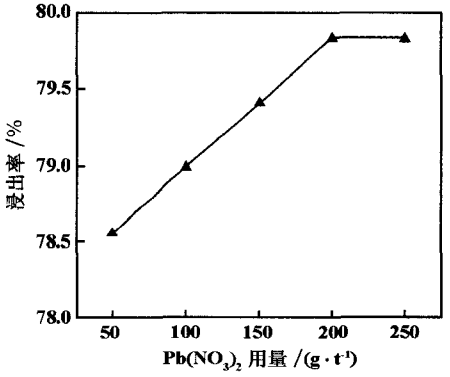

图8　助浸剂用量对浸出率的影响

3.2.2　预处理时间　固定焙烧条件和其它浸出条件同前，预处理时间对浸出率的影响见图9。从图9可以看出，反应初期金的浸出率随着 $Pb(NO_3)_2$ 预处理时间的增加而提高，因为当矿浆中加入 $Pb(NO_3)_2$ 后，有以下几种作用：作为氧化剂溶解金；Pb^{2+} 与硫化物发生放热反应使矿浆的温度提高，加速金的溶解；消除不利于浸金的有害物质的影响，并使部分被硫化物包裹的金暴露出来。要完成以上的反应，需要一定的反应时间，$Pb(NO_3)_2$ 在溶液中的这些反应达到平衡状态，金

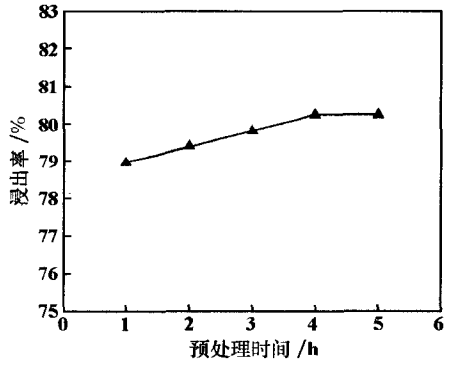

图9　助浸剂预处理时间对浸出率的影响

的浸出率不再发生明显变化，可达到80.25%。故本实验选取预处理时间为4 h。

3.2.3 浸出剂用量 固定焙烧条件和其它浸出条件同前，NaCN用量对浸出率的影响见图10。从图10可以看出，当NaCN用量增加时，金浸出率也随之增加。研究表明，当氰化物浓度较低时，金的溶解速度只取决于氰化物溶液的浓度；当氰化物浓度较高时，溶液中氧的浓度是决定性条件，由动力学研究表明，当氰化速度达到最大值时，反应体系中游离的CN^-浓度和游离氧浓度的最佳比值为6[6]。同时，在一般情况下，氧在氰化溶液中的溶解度为7.5～8.0 mL/L，因此氰化物浓度增加到某一极限时，其与氧浓度的比例被破坏，此时加大氰化物用量对浸出率没有影响，从实验中可以发现，当NaCN用量为1.2 kg/t后，金的浸出率不再发生变化。故本实验选取NaCN用量为1.2 kg/t。

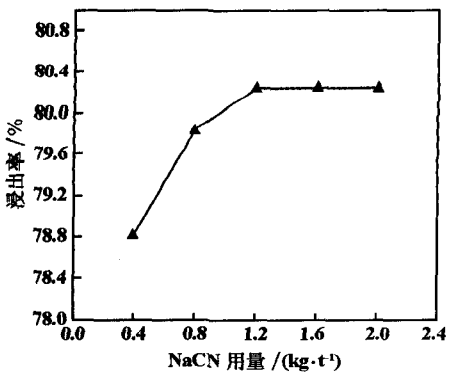

图10 NaCN用量对金浸出率的影响

3.2.4 浸出时间 固定焙烧条件和其它浸出条件同前，浸出时间对浸出率的影响见图11。从图11可以看出，当浸出时间小于22 h时，金浸出率随着浸出时间的增加而增加；当浸出时间大于22 h后，浸出率不发生明显变化。故本实验选取最佳浸出时间为22 h，此时金的浸出率为80.25%。

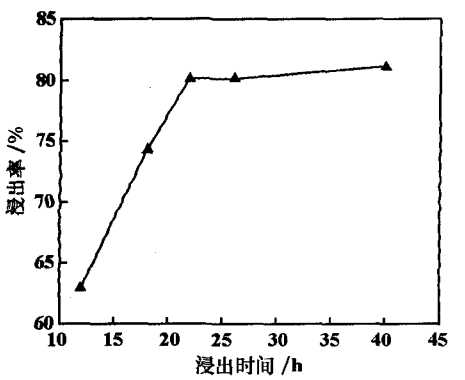

图11 NaCN浸出时间对金浸出率的影响

3.2.5 液固比 固定焙烧条件和其它浸出条件同前，液固比对浸出率的影响见图12。从图12可以看出，随着液固比的增加，搅拌越来越充分，越有利于溶液中CN^-和O_2向金粒表面扩散，金的浸出率增加，当液固比为2.5时，浸出率可以达到最大值。故本实验选取最佳液固比为2.5。

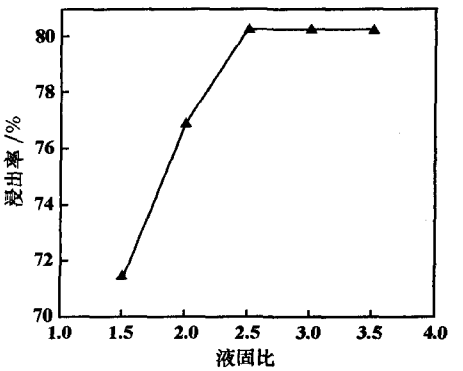

图12 液固比对金浸出率的影响

3.2.6 搅拌速度 固定焙烧条件和其它浸出条件同前，搅拌速度对浸出率的影响见图13。动力学研究表明，氰化浸出过程属于扩散控制，因此，加快搅拌速度，也就是加快了CN^-和O_2向金粒表面的扩散，在一定程度上可以增加溶解度[7]。从图13可以看出，当搅拌速度为900 r/min时，Au的浸出率较高，当转速提高到1 100 r/min时，浸出率没有增加，说明O_2在溶液中已经达到了溶解平衡。故本实验选取搅拌速度为900 r/min。

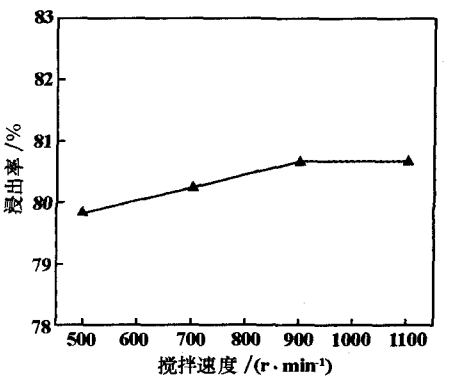

图13 搅拌速度对浸出率的影响

3.3 综合试验

该高砷低品位金矿的提金最佳工艺条件为：焙烧温度650 ℃，焙烧时间4 h，焙烧固定剂$CaCO_3$用量为矿量的2%，磨矿粒度－0.074 mm粒级占90%，助浸剂$Pb(NO_3)_2$用量200 g/t，预处理4 h，NaCN用量1.2 kg/t，浸出时间22 h，浸出温度20 ℃，pH＝11，液固比2.5，搅拌速度900 r/min，此条件下金的浸出率达到80.67%。

（下转第88页）

究了冷固球团-还原挥发-电炉熔分新工艺处理含铅锌铁锰矿。回转窑还原挥发后的金属化球团中铅、锌含量较低,不会影响电炉炉衬寿命和操作,回收铅、锌的同时省去了铁锰粉矿进电炉前需造块的工序。试验得到如下结果:

1)在原料粒度106 μm,焦粉加入量20%,粘结剂用量2.5%,水分加入量12%的条件下造球,生球粒径为Φ8~12 mm,生球落下强度达到20次/0.5m,生球在200 ℃下干燥60 min后,干球落下强度达到12次/0.5 m,干球抗压强度达到15 kg/个。

2)在电炉中考察还原条件铅、锌挥发的影响,当温度为1 150 ℃,还原剂焦粉用量为20%,还原时间为60 min时,铅挥发率达到97.81%,锌挥发率达到95.98%。在回转窑实验中,原料粒度300 μm,加23%的焦粉,粘结剂用量2%,水分12%,200 ℃下干燥固结60 min,得粒径为Φ8~12 mm的球团,在窑温为1 100 ℃,停留时间控制在60~90 min条件下,铅挥发率达到85.07%,锌挥发率达到71.38%。

3)电炉熔分条件为温度1 390 ℃,焦粉加入量20%,硅石用量2.5%,熔分时间90 min,得到生铁和锰渣,铁的品位达到95.72%,收率98.38%。锰的品位31.53%,收率95.66%。

4)本工艺成功地解决了含铅、锌的铁锰多金属矿综合利用技术难题,通过还原挥发和电炉熔分二步实现了铁、锰、铅、锌4种元素的有效回收利用。

参考文献:

[1] 封志敏,宁顺明,余宗华. 磁化还原焙烧工艺处理贫锰铁矿的研究[J]. 矿冶工程,2009,29(3):65-68.

[2] 张小云,田学达,刘树根,等. 铁锰多金属矿综合利用新工艺[J]. 中国有色金属学报,2005,15(4):650-654.

[3] 张汉泉,余永富,陆小苏,等. 软锰矿悬浮还原焙烧试验研究[J]. 矿冶工程,2010,30(4):40-43.

[4] 康兴东,刘建朋,夏春才,等. 金属化球团技术现状[J]. 金属矿山,2009(10):12-15.

[5] 陈爱良,赵中伟,贾希俊,等. 氧化锌矿综合利用现状与展望[J]. 矿冶工程,2008,28(6):62-66.

[6] 李永刚,俞小花,杨大锦. 炉渣中铅锌还原挥发的研究[J]. 材料研究与应用,2008,2(1):63-66.

[7] 熊利芝,陈启元,尹周澜,等. 真空碳热还原处理低品位氧化铅锌矿热力学分析及实验研究[J]. 矿冶工程,2009,29(4):64-66.

(上接第84页)

4 结 论

1)固砷焙烧-氰化浸出工艺适用于高砷低品位金矿,在提高金浸出率的同时,可以加入一定的固定剂将90%以上的砷固定于焙砂中,大大降低气体污染,对此类金矿资源的开发利用具有非常重要的意义。

2)该高砷低品位金矿的提金最佳工艺条件为:焙烧温度650 ℃,焙烧时间4 h,焙烧固定剂$CaCO_3$用量为矿量的2%,磨矿粒度-0.074 mm粒级占90%,助浸剂$Pb(NO_3)_2$用量200 g/t,预处理4 h,NaCN用量1.2 kg/t,浸出时间22 h,浸出温度20 ℃,pH=11,液固比2.5,搅拌速度900 r/min,此条件下金的浸出率达到80.67%。

参考文献:

[1] 刘 涛,吴卫国,张一敏,等. 低品位含金硫精矿氰化提金的试验研究[J]. 矿冶工程,2004,24(3):32-34.

[2] 张 敏. 金精矿固砷固硫焙烧提金工艺设计[J]. 矿冶工程,2002,22(4):58-60.

[3] 张秀华. 难选冶金矿石预处理工艺现状[J]. 湿法冶金,1998(3):13-18.

[4] 伍赠玲. 高砷微细浸染型难处理金矿细菌预氧化-氰化提金试验研究[J]. 矿冶工程,2010,30(1):54-56.

[5] 郭凯琴,李登新,马承愚,等. 过氧化氢氧化预处理高硫高砷难选金精矿的试验研究[J]. 矿冶工程,2008,28(6):37-40.

[6] 陈 聪,姚 香. 难处理金矿石预处理方法简述[J]. 黄金科学技术,2004,12(4):27-30.

[7] 郑存江. 含砷难浸金矿的研究及应用[J]. 陕西地质,2003,21(1):88-97.