

难处理含金硫精矿的焙烧氧化-硫代硫酸盐浸出

李 峰^{1,2}, 丁德馨^{1,2}, 胡 南¹, 彭志成^{1,2}, 陈 伟^{1,2}

(1. 南华大学 铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 衡阳 421001;

2. 南华大学 核资源工程学院, 衡阳 421001)

摘 要: 为了提高难处理含金硫精矿中金的浸出率, 采用同步热分析仪研究在马弗炉中焙烧氧化难处理含金硫精矿的最佳条件, 通过优化实验确定硫代硫酸盐浸出的最佳工艺参数。结果表明: 在马弗炉中焙烧氧化难处理含金硫精矿最佳条件为在 700 °C 温度下焙烧 2 h, 难处理含金硫精矿硫的去除率可达 94.7%。焙烧后, 金的浸出率大幅度提高。使用组成为 0.03 mol/L CuSO₄、1.0 mol/L NH₃·H₂O、0.3 mol/L Na₂S₂O₃、0.1 mol/L (NH₄)₂SO₄ 和 0.3 mol/L Na₂SO₃ 的硫代硫酸盐溶液作为浸出剂, 最佳浸出工艺参数如下: 浸出时间 18 h、液固比 2:1、振荡速度 250 r/min、浸出温度 50 °C。在此浸出工艺参数下, 金浸出率达 71.2%。

关键词: 难处理含金硫精矿; 金; 硫代硫酸盐; 浸出; 焙烧; 氧化

中图分类号: TF803.21

文献标志码: A

Roasting oxidation-thiosulfate leaching of gold from refractory gold-bearing sulfur concentrates

LI Feng^{1,2}, DING De-xin^{1,2}, HU Nan¹, PENG Zhi-cheng^{1,2}, CHEN Wei^{1,2}

(1. Key Discipline Laboratory for National Defence for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, University of South China, Hengyang 421001, China;

2. School of Nuclear Resource Engineering, University of South China, Hengyang 421001, China)

Abstract: In order to increase the leaching rate of gold from refractory gold-bearing sulfur concentrates the synchronous thermal analyzer was adopted to study the best condition of roasting and oxidizing refractory gold-bearing sulfur concentrates in the muffle, and the optimum technological parameters of thiosulfate leaching were ascertained through optimal experiment. The results show that the best conditions of roasting and oxidizing refractory gold-bearing sulfur concentrates are as follows: roasting in the muffle at 700 °C for 2 h with 94.7% removal rate of sulfur. After the roasting and oxidizing, the gold leaching rate increases substantially. The leaching rate of gold reaches 71.2% at the optimal leaching technological parameters of the leaching time 18 h, ratio of liquid to solid 2:1, oscillating speed 250 r/min, leaching temperature 50 °C when leaching lixiviation is composed of 0.03 mol/L CuSO₄, 1.0 mol/L NH₃·H₂O, 0.3 mol/L Na₂S₂O₃, 0.1 mol/L (NH₄)₂SO₄ and 0.3 mol/L Na₂SO₃.

Key words: refractory gold-bearing sulfur concentrates; gold; thiosulfate; leaching; roasting; oxidation

金作为重要的国际储备资产, 同时也是特殊的战略资源, 具有极优的稳定性与良好的导电性和导热性, 在工业和现代高新技术产业中得到了广泛应用^[1-4]。我国金矿资源丰富, 但在已探明的金矿资源中, 近 1/4

的属于难浸金矿。随着易浸金矿的日益减少, 人们越来越关注难浸金矿的研究^[5-8]。难浸金矿中金的浸出率低是因其被其他成分包裹, 使其不能与浸出剂接触反应。为了提高金的浸出率, 需对矿石进行预处理, 使

基金项目: 湖南省自然科学基金省市联合基金资助项目(12JJ8008)

收稿日期: 2013-06-24; 修订日期: 2013-11-03

通信作者: 丁德馨, 教授, 博士; 电话: 0734-8282534; E-mail: dingdxzzz@163.com

包裹金充分暴露。目前,国内外预处理难浸金矿石的主要方法是氧化焙烧法、加压氧化法、细菌氧化法与化学氧化法^[9-11]。

氰化法是最常用的浸金方法,但因氰化物本身有剧毒,浸出后的排放物也会造成污染,许多国家和地区已禁止氰化物浸金,同时氰化浸出复杂含金矿石的效果也不理想^[7]。阳建国等^[12]用焙烧-氰化工艺浸出某低品位含金硫精矿,焙砂金的浸出率为76.25%,虽然浸出率较高,但环境污染问题仍阻碍其发展。王勇^[13]用2 mol/L的NaOH预浸氧化焙烧后的含金硫精矿,有效去除了矿石中不利于浸出的杂质,使金的浸出率从直接氰化浸出的57.68%提高到76.64%,但预浸工作的投资成本高,不利于实际应用。所以,寻找更环保和抗干扰能力更强的浸出剂来取代氰化物是该领域研究的重点。硫代硫酸盐法浸金是一种无毒且更合适浸出复杂含金矿石的浸金方法^[14-17]。硫代硫酸盐在溶液中能与金生成稳定的络合物,且与氰化法相比,硫代硫酸盐浸金更加经济和环保,在难处理金矿石浸出中对金的浸出选择性更强^[18-19]。

本文作者以湖南某难处理含金硫精矿(含砷)为研究对象,对其进行焙烧氧化预处理和硫代硫酸盐溶液浸出。采用扫描电镜和能谱仪等检测手段对焙烧产物进行分析,为焙烧氧化预处理难浸含金硫精矿及硫代硫酸盐浸金工业化提供理论依据。

1 实验

1.1 矿样

实验矿样取自湖南某矿的难处理含金硫精矿,其粒径分布为粒径小于0.074 mm的占70%,其主要化学成分如表1所列,XRD谱如图1所示。

由表1可知,原矿金品位为6.7 g/t,并含有大量硫和铁,存在少量砷,其含量分别为43.08%、40.16%和1.02%。由图1可知,原矿中金属矿物主要为黄铁矿(FeS₂),其他矿物的衍射强度(如砷黄铁矿等)很弱,

表1 含金硫精矿的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition in gold-bearing sulfur concentrates (mass fraction, %)

Au ¹⁾	Ag ¹⁾	S	Fe	As	Cu
6.7	41.82	43.08	40.16	1.02	0.043
Zn	Pb	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
0.71	0.24	7.77	2.93	0.198	1.25

1) g/t.

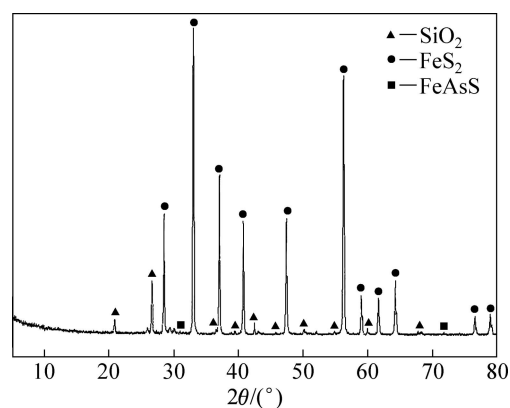


图1 含金硫精矿的XRD谱

Fig. 1 XRD pattern of gold-bearing sulfur concentrates

相对应的含量低。脉石矿物主要为石英。此类矿石中的金易包裹于黄铁矿和砷黄铁矿中,为难处理含金硫精矿^[8]。

1.2 实验步骤及工艺流程

采用锥堆四分法将原矿混合均匀并缩分,作为实验所用矿样。

1.2.1 氧化焙烧实验

取31 mg矿样置于同步热分析仪中,条件如下:起始温度30 °C,终点温度1600 °C,升温速率10 °C/min,空气气氛,空气流量20 L/min。经过分析得出焙烧氧化的最佳温度。

将马弗炉的焙烧温度设定为最佳焙烧温度,然后将5个分别盛有10 g矿样的石英舟置于马弗炉中,每隔0.5 h取出一个,待其冷却,计算焙烧后矿石中硫元素含量,与原矿中硫元素含量相比较,得出硫的去除率。焙烧过程中产生的尾气,用质量分数为40%的NaOH溶液吸收。

1.2.2 硫代硫酸盐浸出实验

取一定量的焙烧后的矿样加入硫代硫酸盐溶液中,将盛放矿样和硫代硫酸盐溶液的锥形瓶用橡皮塞塞紧后固定于恒温高速振荡器,振荡一定时间后过滤、干燥,测量滤渣中金品位。采用单一变量法,确定硫去除率、浸出时间、液固比、恒温高速振荡器振荡速度和浸出温度等最佳工艺参数。

1.2.3 工艺流程

硫代硫酸盐溶液浸出难处理含金硫精矿的工艺流程如图2所示。

1.3 分析方法

用王水将干燥后的滤渣溶解,采用泡塑吸附法吸

附溶解后的金; 用原子吸收分光光度计测量溶液中金含量^[20]; 用扫面电镜和能谱仪分析焙烧前后矿样表面形态的变化及矿样中主要元素的变化。

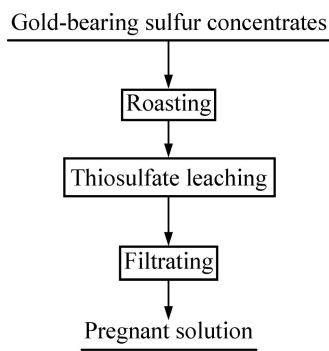


图 2 硫代硫酸盐溶液浸出难处理含金硫精矿工艺流程

Fig. 2 Flow sheet for thiosulfate leaching of gold from refractory gold-bearing sulfur concentrates

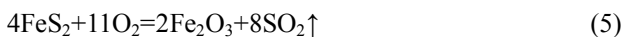
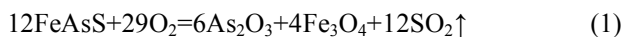
2 结果与讨论

2.1 难处理含金硫精矿的焙烧氧化预处理

因金亲硫, 硫精矿中的伴生金常被金属硫化物包裹。氧化焙烧是破坏硫化物包裹最常用的方法^[21]。

2.1.1 焙烧温度对质量损失率的影响

矿样差热分析(TGA)结果如图 3 所示。由图 3 可知, 当温度升高到 400 °C 时, 样品的质量开始变化, 砷黄铁矿开始发生氧化反应, 生成挥发性很强的 As₂O₃, As 转化为气相, 达到脱砷的效果, 如式(1)所示。同时, 黄铁矿发生热解离, 生成硫和磁黄铁矿, 如式(2)所示, 此时, 对应 TGA 曲线斜率开始急剧增大; 随着温度的升高(500 °C), 在有足够氧气的条件下, 黄铁矿与其热解离生成的磁黄铁矿氧化, 如式(3)~(5)所示; 当温度继续升高到 650~750 °C 时, 氧化生成的氧化铁与硫化铁发生化学反应, 如式(6)和(7)所示; 温度高于 650 °C 后, 由于黄铁矿和砷黄铁矿的不断氧化, 其含量也随之降低, 因此反应速率开始降低^[22]。由于温度越高, 能耗就越高, 且金在过高温下会少量挥发, 又因温度超过 700 °C 后, 质量损失曲线斜率趋于零, 故选取 700 °C 作为本研究的焙烧温度。



2.1.2 焙烧时间对矿石中硫去除率的影响

将盛放矿粉的石英舟置于 700 °C 的马弗炉中焙烧, 焙烧时间对矿石中硫去除率的影响如图 4 所示。由图 4 可知, 随着焙烧温度的升高, 硫化物和砷化物不断氧化, 硫去除率不断增加, 当焙烧时间达到 2 h 时, 硫去除率为 94.7%, 继续延长焙烧时间, 硫去除率基本不再变化。因此, 焙烧的最佳时间为 2 h。

2.2 难处理含金硫精矿焙烧氧化后的硫代硫酸盐浸出

实验所用硫代硫酸盐浸出剂含 0.3 mol/L Na₂S₂O₃、0.03 mol/L CuSO₄、1.0 mol/L NH₃·H₂O、0.1 mol/L (NH₄)₂SO₄、0.3 mol/L Na₂SO₃^[23]。

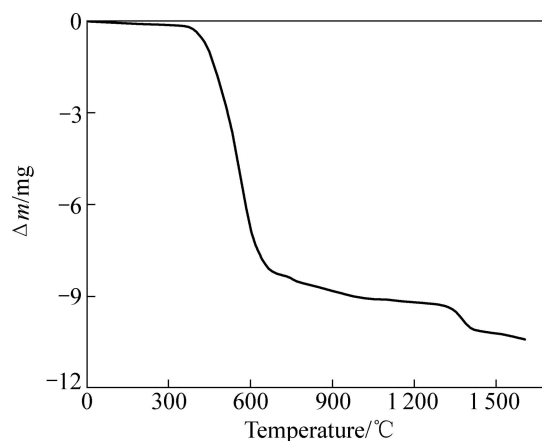
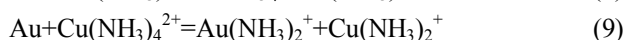
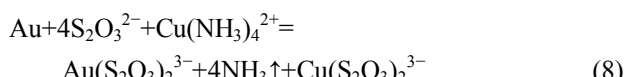


图 3 矿样的 TGA 曲线

Fig. 3 TGA curve of ore sample

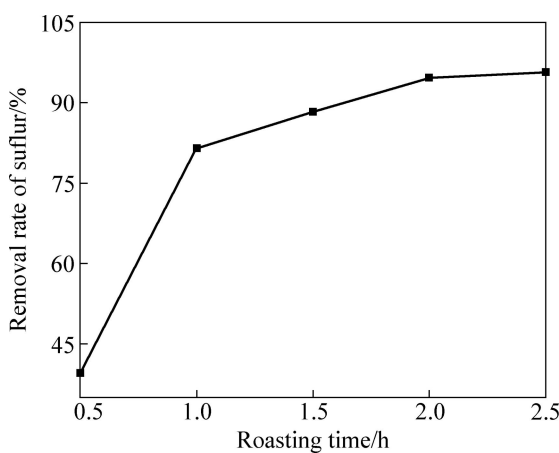
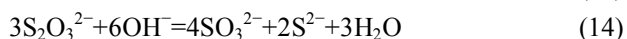
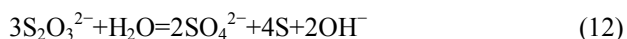
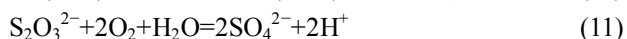
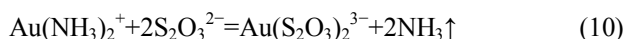


图 4 焙烧时间对硫去除率的影响

Fig. 4 Effect of roasting time on removal rate of sulfur



溶液中发生的主要反应如式(8)所示;其中 NH_3 与 Cu^{2+} 形成的 $\text{Cu}(\text{NH}_3)_4^{2+}$ 在反应过程中起氧化剂的作用,如式(9)所示;氨的存在能阻止 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 分解产生的硫在金表面产生钝化现象,并且铵根与金形成的二胺络合物能与硫代硫酸根离子反应,转化为更加稳定的 $\text{Au}(\text{S}_2\text{O}_3)_2^{3-}$,如式(10)所示;溶液中硫酸铵既可抑制 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 的氧化,如式(11)所示,又可防止 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 水解和沉淀物 S 和 CuS 的生成,如式(12)和(13)所示;亚硫酸钠作为稳定剂,可阻碍 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 在碱性环境下的分解^[5, 24-26],如式(14)所示。

2.2.1 矿石中硫去除率对金浸出率的影响

取原矿与焙烧得到不同硫去除率的矿粉各 10 g,加入浸出剂,将恒温振荡器的浸出参数设定如下:温度 50 °C、液固比 3:1、振荡速度 250 r/min、浸出时间 18 h。矿石中硫去除率对金浸出率的影响如图 5 所示。

由图 5 可知,焙烧后金浸出率明显高于原矿直接浸出的浸出率。且随着硫去除率的增加,金浸出率也增大。未经焙烧的硫代硫酸盐溶液浸出,金的浸出率仅为 10.1%。当硫去除率达到 94.7%时,金浸出率为 66.9%,远高于原矿的金浸出率,这是因为随着硫去除率的增大,矿石中包裹金的硫化矿氧化更充分,金暴露得更多。张顺应^[27]用限氧焙烧脱砷-沸腾焙烧脱砷-氧化法提取含砷金硫精矿中的金,第一步在 700 °C 中限氧焙烧 30 min,第二步在 800 °C 以上温度焙烧,硫去除率为 93%,最后金氰化浸出率为 70%。而在本研究中采取一段焙烧,工艺流程更加简单,能耗更

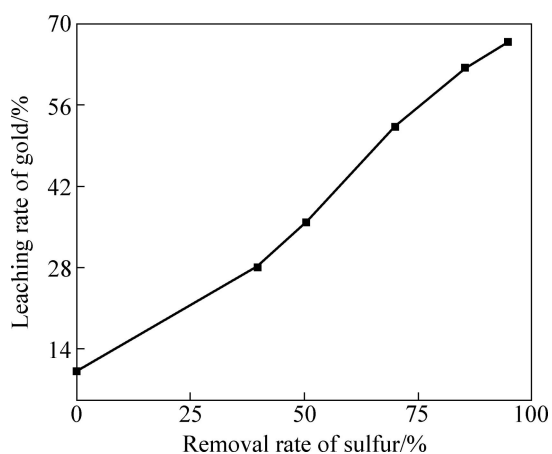


图 5 硫去除率对金浸出率的影响

Fig. 5 Effect of removal rate of sulfur on leaching rate of gold

低,且浸出剂更加安全环保。

2.2.2 焙烧前后矿石的 SEM 像以及能谱扫描元素分析

图 6 所示为原矿与焙烧后矿样的 SEM 像。由图 6(a)可见,原矿颗粒表面平滑,棱角分明,结构致密,大部分呈块状。由图 6(b)可见,焙烧后的矿样由于包裹金的硫化物和砷化物的氧化分解,使原本致密的矿石颗粒表面结构变得疏松多孔,比表面积也随之增大,使浸出剂更容易与金接触反应,进而浸出率有较大幅度的提高。表 2 所列为焙烧前后矿样能谱扫描元素分析结果。由表 2 可知,焙烧前矿样含有大量的硫元素以及少量砷元素,焙烧后砷元素几乎不存在,硫元素

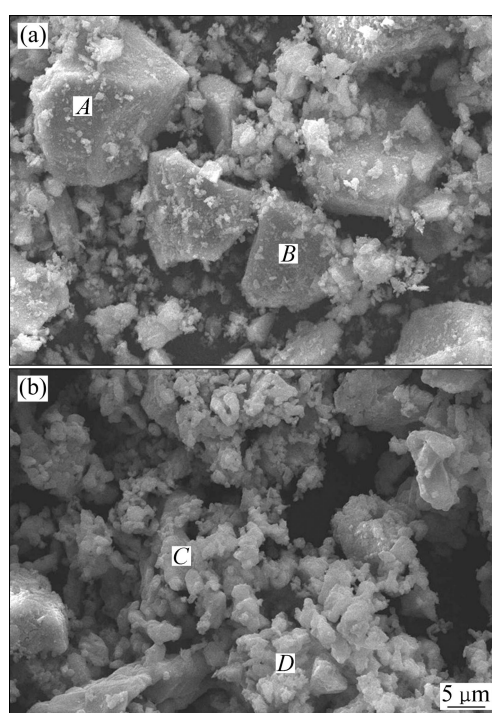


图 6 原矿与焙烧后矿石的 SEM 像

Fig. 6 SEM images of raw ore (a) and roasted ore (b)

表 2 图 6(a)中 A、B 点和图 6(b)中 C、D 点的 EDS 能谱分析结果

Table 2 EDS analysis results of points A and B in Fig. 6(a) and points C and D in Fig. 6(b)

Element	Mass fraction/%			
	Point A	Point B	Point C	Point D
O	1.71	1.35	1.63	1.30
As	1.84	1.64	—	—
Si	5.56	1.59	6.43	5.65
S	41.2	41.3	1.97	1.75
Ca	2.21	1.27	2.41	2.21
Fe	47.48	52.85	87.56	89.09

的去除率达到 95.68%。由此可见,在 700 °C 下焙烧 2 h,能达到很好的除硫除砷效果。

2.2.3 浸出时间对金浸出率的影响

取预处理后的矿粉 10 g,在浸出温度为 50 °C、液固比为 3:1、振荡速度为 250 r/min 时浸出时间对金浸出率的影响如图 7 所示。

由图 7 可知,随着浸出时间的延长,金浸出率提高,当浸出时间由 4 h 延长到 18 h,金浸出率从 53.4% 增加到 66.9%;进一步延长浸出时间,金浸出率不再增加。又由于浸出时间增加,能耗增大,因此,最佳浸出时间应为 18 h。与常规的氧化浸出相比^[12-13],本实验中采用的方法浸出时间更少。

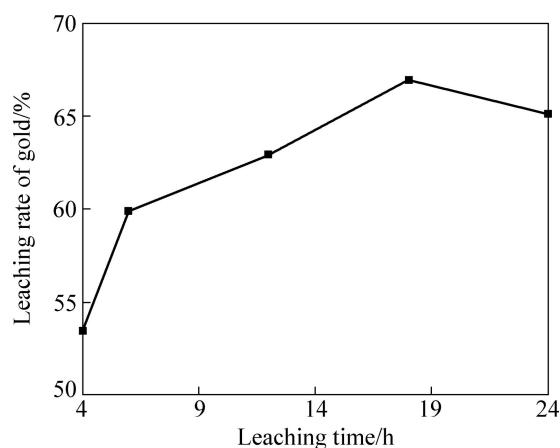


图 7 浸出时间对金浸出率的影响

Fig. 7 Effect of leaching time on leaching rate of gold

2.2.4 液固比对金浸出率的影响

液固比对金浸出率的影响直接关系到浸出剂的用量。当其他条件不变、浸出时间为 18 h 时,液固比对金浸出率的影响如图 8 所示。由图 8 可知:随着液固比的增大,金浸出率先增大后减小。增大液固比,反应物与浸出剂接触的概率增加,从而使金浸出率增大。当液固比为 2:1 时,金浸出率最大,达到 69.1%。继续增大液固比时,金浸出率反而下降,因此,最佳液固比为 2:1。彭会清等^[28]选用硫代硫酸盐浸出金含量为 0.76 g/t 的硫化矿,浸出剂成分为 75 g/L Na₂S₂O₃、50 g/L (NH₄)₂SO₄、5 g/L CuSO₄、pH=9.0(氨水调节),金浸出率可达 90%。但比较单位质量金所消耗的试剂,本次研究用量明显更少。

2.2.5 振荡速度对金浸出率的影响

当其他条件不变、液固比为 2:1 时,振荡器的振荡速度对金浸出率的影响如图 9 所示。由图 9 可知:随着振荡速度增大,金浸出率有较大幅度的增加,当振荡速度为 250 r/min 时,浸出率达到最大值 70.0%。

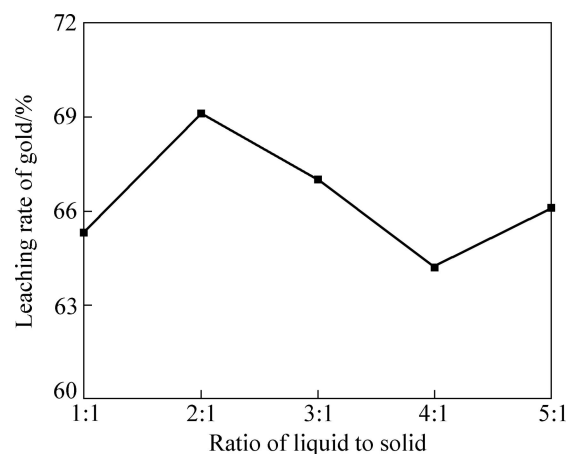


图 8 液固比对金浸出率的影响

Fig. 8 Effect of ratio of liquid to solid on leaching rate of gold

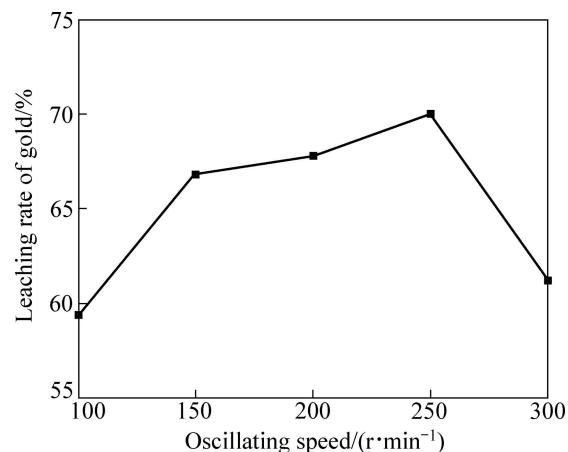


图 9 振荡速度对金浸出率的影响

Fig. 9 Effect of oscillating speed on leaching rate of gold

振荡速度增大,矿粉与浸出剂的混合更加均匀,矿粉表面的扩散层厚度减小,金浸出率增大。随着振荡速度增大,扩散层趋于一个稳定值,金浸出率也趋于稳定。但当振荡速度达到 300 r/min 时,金浸出率反而减小,这是因为振荡速度太快,一方面会加快溶液中 S₂O₃²⁻ 的氧化,另一方面会造成矿粉和浸出剂形成整体转动或附壁旋转,致使矿粉表面接触不到新的浸出剂,阻碍硫代硫酸盐与金的反应,从而导致金浸出率下降。故选用最佳振荡速度为 250 r/min。白成庆^[23]的研究表明,最佳振荡速度为 300 r/min,因其所用矿粉粒径为 0.074 mm 以下的含量为 85%。与本研究相比,矿样粒径更小,为使矿样混合均匀,所需振荡速度更大。

2.2.6 浸出温度对金浸出率的影响

当其他条件不变、振荡速度为 250 r/min,浸出温

度对金浸出率的影响如图 10 所示。由图 10 可知：随着浸出温度升高，金浸出率提高；当浸出温度为 50 ℃ 时，金浸出率达到 71.2%。适当温度升高能促进分子间的作用，加快化学反应速率。但是，温度过高会使硫代硫酸钠和亚硫酸钠分解，生成沉淀，从而降低金浸出率^[5]。因此，选择最佳浸出温度为 50 ℃。AYLMORE 等^[5]研究表明，硫代硫酸盐浸出含金硫化矿，在 55 ℃ 条件下的浸出率为 70%。相比较而言，本次研究能耗明显降低。

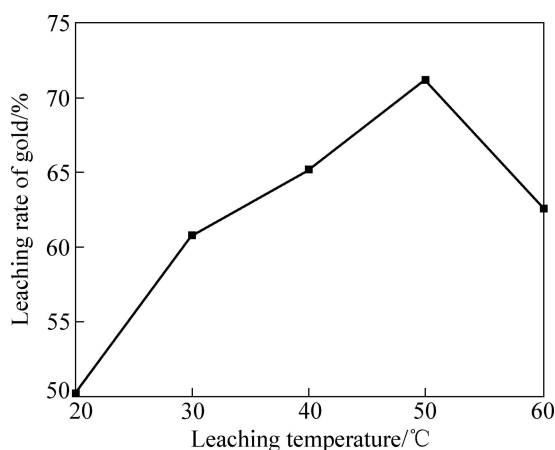


图 10 浸出温度对金浸出率的影响

Fig. 10 Effect of leaching temperature on leaching rate of gold

3 结论

1) 本研究中所用难处理含金硫精矿的化学成分极为复杂，其中铁、硫和砷的含量(质量分数)分别为 40.16%、43.08%和 1.02%，金的品位为 6.7 g/t。

2) 通过差热分析及马弗炉焙烧实验，确定难处理含金硫精矿的焙烧氧化条件如下：700 ℃ 下焙烧 2 h。在此条件下硫去除率达到 94.7%。

3) 采用硫代硫酸盐浸出时，金的浸出率随硫去除率的增大而增大，随浸出时间的延长而增大，随振荡速度、液固比和温度的增大先增大后减小。金的最佳浸出条件如下：浸出时间 18 h、液固比 2:1、振荡速度 250 r/min、浸出温度 50 ℃。在此条件下，金浸出率达到 71.2%。

REFERENCES

[1] 王银宏. 中国金矿资源现状与思考[J]. 国土与自然资源研究, 2003(2): 75-76.

WANG Yin-hong. Status and consideration of gold mineral resources in China[J]. Territory & Natural Resources Study, 2003(2): 75-76.

[2] 韦永福, 孙培基. 我国金矿地质现状区域成矿及找矿[J]. 地质与资源, 2012, 21(1): 98-104.

WEI Yong-fu, SUN Pei-ji. Geological situation, regional metallogeny and prospecting direction of gold deposits of China[J]. Geology and Resources, 2012, 21(1): 98-104.

[3] 邱廷省, 熊淑华, 夏青. 含砷难处理金矿的磁场强化氧化浸出试验研究[J]. 金属矿山, 2004(12): 32-34.

QIU Ting-sheng, XIONG Shu-hua, XIA Qing. Study on treating arsenic-bearing refractory gold ore by magnetic field-intensified cyanidation leaching[J]. Metal Mine, 2004(12): 32-34.

[4] 孙兆学. 中国金矿资源现状及可持续发展对策[J]. 黄金, 2009, 30(1): 12-13.

SUN Zhao-xue. Status of gold mineral resources and its sustainable development strategies in China[J]. Gold, 2009, 30(1): 12-13.

[5] AYLMORE M G, MUIR D M. Thiosulfate leaching of gold—A review[J]. Minerals Engineering, 2001, 14(2): 135-174.

[6] 杨玮, 覃文庆, 刘瑞强, 任允超. 高砷难处理金精矿细菌氧化-氰化浸出[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] GROSSE A C, DICINOSKI G W, SHAW M J, HADDAD P R. Leaching and recovery of gold using ammoniacal thiosulfate leach liquors—A review[J]. Hydrometallurgy, 2003, 69: 1-21.

[8] LI Qing-cui, LI Deng-xin, QIAN Fang-jun. Pre-oxidation of high-sulfur and high-arsenic refractory gold concentrate by ozone and ferric ions in acidic media[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97: 61-66.

[9] 黄怀国, 张卿, 林鸿汉. 难选冶金矿提取工艺工业应用现状[J]. 黄金科学技术, 2013, 21(1): 71-77.

HUANG Huai-guo, ZHANG Qing, LIN Hong-han. Research and application status of extraction technology for the refractory gold ore[J]. Gold Science and Technology, 2013, 21(1): 71-77.

[10] FENG D, DEVENTER J S J V. Oxidative pre-treatment in thiosulphate leaching of sulphide gold ores[J]. International Journal of Mineral Processing, 2010, 94: 28-34.

[11] 崔日成, 杨洪英, 富瑶, 陈森, 张硕. 不同含砷类型金矿的细菌氧化-氰化浸出[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 694-699.

CUI Ri-cheng, YANG Hong-ying, FU Yao, CHEN Sen, ZHANG Shuo. Biooxidation-cyanidation leaching of gold concentrates with different arsenic types[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 694-699.

[12] 阳建国, 曹亮. 低品位含金硫精矿综合回收金选冶试验[J].

- 现代矿业, 2013(6): 79-81.
- WANG Jian-guo, CAO Liang. Beneficiation-metallurgy test for comprehensive recovering gold from low-grade gold-bearing sulfur concentrates[J]. *Modern Mining*, 2013(6): 79-81.
- [13] 王勇. 含金砷硫精矿回收金的工艺研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012: 41-47.
- WANG Yong. Process study on recovery gold from sulfur concentrate containing gold and arsenic[D]. Changsha: Central South University, 2012: 41-47.
- [14] HASHEMZADEHFINI M, FICERIOVÁ J, ABKHOSHK E, SHAHRAKI B K. Effect of mechanical activation on thiosulfate leaching of gold from complex sulfide concentrate[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: 2744-2751.
- [15] HA V H, LEE J C, JEONG J, HAI H T, JHA M K. Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 178: 1115-1119.
- [16] JEFFREY M I, WATLING K, HOPE G A, WOODS R. Identification of surface species that inhibit and passivate thiosulfate leaching of gold[J]. *Minerals Engineering*, 2008, 21: 443-452.
- [17] MOLLEMAN E, DREISINGER D. The treatment of copper-gold ores by ammonium thiosulfate leaching[J]. *Hydrometallurgy*, 2002, 66: 1-21.
- [18] 赖才书, 胡显智, 字富庭. 硫代硫酸盐浸金溶液中金的回收研究现状及发展趋势[J]. *矿冶*, 2011, 20(2): 40-43.
- LAI Cai-shu, HU Xian-zhi, ZI Fu-ting. Research status and development trends of thiosulfate leaching solution of gold recovery[J]. *Mining and Metallurgy*, 2011, 20(2): 40-43.
- [19] 钟蓓, 杨明香. 泡塑吸附原子吸收法测金探讨[J]. *贵州地质*, 2007, 24(3): 244-246.
- ZHONG Pei, YANG Ming-xiang. Discussion on flame AAS determination of gold after absorption by foam[J]. *Guizhou Geology*, 2007, 24(3): 244-246.
- [20] 刘汉钊. 国内外难处理金矿焙烧氧化现状和前景[J]. *国外金属矿选矿*, 2005(7): 5-10.
- LIU Han-zhao. Present situation and prospects of refractory gold ore roasting oxidation at home and abroad[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2005(7): 5-10.
- [21] 夏青, 邱廷省. 提高硫化物包裹型难处理金矿石金浸出率的试验研究[J]. *黄金*, 2008, 29(5): 36-38.
- XIA Qing, QIU Ting-sheng. Experimental research on how to enhance the leaching rate of gold in sulfide-inclusion type refractory gold ore[J]. *Gold*, 2008, 29(5): 36-38.
- [22] 郑海雷. 高砷含金硫精矿资源高效利用试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2010: 13-14.
- ZHENG Hai-lei. Experimental study on efficient utilization of resources of gold-bearing pyrite with high arsenic[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010: 13-14.
- [23] 白成庆. 硫代硫酸盐溶金机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008: 36-48.
- BAI Cheng-qing. Mechanism study on gold leaching by thiosulfate[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2010: 36-48.
- [24] 黄万抚, 王淀佐, 胡永平. 硫代硫酸盐浸金理论与实践[J]. *黄金*, 1998, 19(9): 34-36.
- HUANG Wan-fu, WANG Dian-zuo, HU Yong-ping. Theory and practice of leaching gold by thiosulfate[J]. *Gold*, 1998, 19(9): 34-36.
- [25] FENG D, DEVENTER J S J V. Ammoniacal thiosulphate leaching of gold in the presence of pyrite[J]. *Hydrometallurgy*, 2006, 82: 126-132.
- [26] 段玲玲, 胡显智. 硫代硫酸盐浸金研究进展[J]. *湿法冶金*, 2007, 26(2): 62-66.
- DUAN Ling-ling, HU Xian-zhi. Research progress on leaching of gold using thiosulfate[J]. *Hydrometallurgy of China*, 2007, 26(2): 62-66.
- [27] 张顺应. 康家湾含砷金硫精矿提金工艺的研究进展与评述[J]. *湖南有色金属*, 2003, 19(1): 14-16.
- ZHANG Shun-ying. Improvement of extracting gold in containing arsenic and gold concentrate of Kanjiawan[J]. *Hunan Nonferrous Metals*, 2003, 19(1): 14-16.
- [28] 彭会清, 胡明振. 含金硫化矿硫代硫酸盐浸金试验研究[J]. *现代矿业*, 2009(2): 67-70.
- PENG Hui-qing, HU Ming-zhen. Experimental study of gold-bearing sulfide ore by thiosulfate leaching gold process[J]. *Modern Mining*, 2009(2): 67-70.

(编辑 陈卫萍)