



石硫合剂对金精矿浸出特性的影响

赵留成, 孙春宝, 李绍英, 龚道振

(北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

摘 要: 采用石硫合剂法对金精矿进行浸出, 考察硫黄、水与石灰质量比和合成时间对硫的转化率、母液 pH 值及金浸出效果的影响, 通过 XRD 分析了渣的主要成分, 揭示硫的转化途径。结果表明: 在硫黄、石灰和 H₂O 质量比为 2:1:(50~75) 和时间为 45 min 的条件下, 可得到硫转化率为 97.57%, pH 值为 10.5 的石硫合剂; 石硫合剂稀释浓度为 15% 时, 金的浸出率达到 73.42%; 硫黄与石灰的质量比是影响硫转化率和 pH 值的主要因素, 随质量比的增加, 硫的转化率和 pH 值逐步降低; 水与石灰的质量比和合成时间对 pH 值影响较大, 而对硫的转化率几乎没有影响; 硫在石硫合剂合成过程中主要进入溶液, 只有少量的硫以单质的形式残留在合成渣中, 渣中残留的硫随硫黄与石灰质量比的增加而增多。

关键词: 石硫合剂; 浸出特性; 金精矿; 非氰浸金; 转化率

中图分类号: TF803.21

文献标志码: A

Effects of lime sulphur synthetic solution on leaching characteristic of gold concentrates

ZHAO Liu-cheng, SUN Chun-bao, LI Shao-ying, GONG Dao-zhen

(Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines,

Ministry of Education, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Lime sulphur synthetic solution (LSSS) method was applied in gold concentrates leaching. The effect of mass ratio of sulphur, lime and water and synthetic time on sulfur conversion rate and pH value in synthetic process and gold leaching rate were investigated. X-ray diffraction was used to detect the main component of the residue aiming to uncover the transformation way of sulphur in LSSS synthetic process. The results show that the lime sulphur synthetic solution with sulfur conversion rate of 97.57% and pH of 10.5 is obtained when the synthesis conditions for mass ratio of sulphur, lime and water of 2:1:(50–75) and the time of 45 min. When the dilute concentration is 15%, the gold leaching rate reaches 73.42%. The mass ratio of sulfur to lime is the main reason affecting the sulfur conversion and pH value of mother solution. Both of sulfur conversion rate and pH value of mother solution show a declining tendency with the increase of the mass ratio of sulfur to lime. The mass ratio of water to lime and synthetic time has great effects on the pH value of mother solution, and has no effect on sulfur conversion rate. After LSSS preparation, sulfur mainly transfers into solution, a small amount of sulfur exists in the form of elemental sulfur in the residue, and the amount of this elemental sulfur increases with increasing the mass ratio of sulfur to lime.

Key words: lime sulphur synthetic solution; leaching characteristics; gold concentrates; cyanide-free leaching of gold; conversion rate

氰化法是目前应用最广泛的浸金方法, 随着易处理金矿石资源的日益减少, 难处理金矿的比例随之增加, 氰化法对难处理金矿的浸出效果不佳, 药剂用量

大, 而且氰化物有剧毒, 严重危害人身安全和污染环境。因此, 非氰提金方法越来越受到重视。近年来, 国内外着重研究的非氰浸金方法有硫脲法^[1-2]、硫代硫

酸盐法^[3]、多硫化物法、碘化法^[4-5]和石硫合剂法等。

石硫合剂是利用石灰和硫黄合成的一种非氰浸金试剂,有效浸金成分是多硫化钙(CaS_x)和硫代硫酸钙(CaS₂O₃),浸金过程是多硫化物浸金和硫代硫酸盐浸金两者的联合作用,属于复杂的多硫化物与硫代硫酸盐的混合浸金体系^[6-9]。石硫合剂法浸金具有选择性强、受杂质金属元素影响小、浸出时间短(约为氰化法的 1/4 左右)、浸出速度快和浸出率高等特点,而且无毒,对生态环境和人类无负面影响,被认为是一种很有应用前景的非氰浸金工艺^[10-11]。

目前,很多学者对石硫合剂浸出工艺进行了大量的研究工作。杨丙雨等^[7]采用石硫合剂法对含砷氧化金矿(Au 3.08 g/t、As 1.5%)、多金属硫化矿(Au 59.99 g/t、Cu 3.9%、Pb 11%、S 32.03%)、含砷金精矿(Au 54 g/t、As 3.5%)和含砷金矿(Au 7.1 g/t、As 0.51%)等进行系统浸金试验研究,金的浸出率均达到 90%以上,认为石硫合剂法对高硫、高砷、高铅等难处理金矿具有良好的浸出性能。陈江安等^[12]对某金矿用石硫合剂常温下浸出 3 h,金的浸出率达到 94%以上。陈怡等^[13]对某碳质金精矿进行焙烧预处理后采用石硫合剂法浸出,金浸出率可达 96%。李晶莹等^[14]采用石硫合剂法浸取废弃线路板中的金,金的浸出率达到 85%以上。刘有才等^[15]在浸出过程中添加氧化剂 H₂O₂ 提高金的浸出率。本文作者^[16]也考察了 SO₃²⁻、NH₃·H₂O 和 Cu²⁺ 浓度对石硫合剂浸出高硫金精矿的影响,金浸出率达到 88%左右。

对于金精矿的石硫合剂浸出工艺和浸出影响因素等方面已经做了大量的工作,但是很少涉及石硫合剂试剂本身对金浸出特性的影响。石硫合剂是一种合成试剂,不同的合成配方和合成时间都将会直接影响物料的转化率、试剂中主要成分的含量和金的浸出性能。因此,本文作者研究了不同合成条件下石硫合剂对金浸出特性的影响及合成过程中硫转化率和母液 pH 值的变化规律,分析渣中的主要组成成分,阐明硫在石硫合剂合成过程中的转化途径,为金精矿的石硫合剂法非氰浸出提供技术基础。

1 实验

1.1 实验原料

试验所用试样为福建双旗山金矿的浮选金精矿,其化学多元素分析结果见表 1。图 1 所示为该试样的 X 射线衍射分析结果,试样中金属矿物主要为黄铁矿,脉石矿物主要为石英。原矿岩矿鉴定结果表明金主要

以自然金形式存在,由于分析样中含金较少,所以在 X 射线衍射分析结果中没有出现。

所用试剂石灰和硫黄均为分析纯,水为本地自来水。

表 1 化学多元素分析结果

Table 1 Analysis results of chemical multi-element (mass fraction, %)

Au ¹⁾	Ag ¹⁾	Fe	S	Cu	SiO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃
70.03	102.7	19.65	16.92	0.24	35.51	4.59	4.12	12.71

1) g/t.

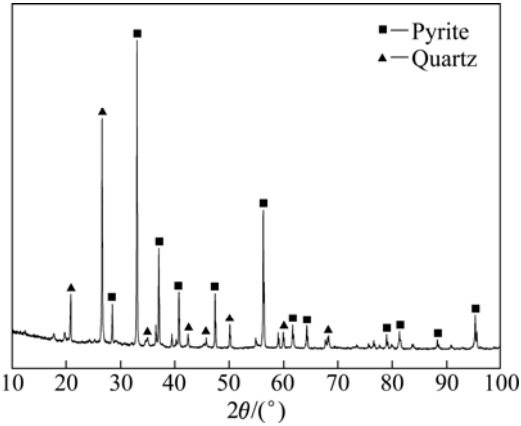


图 1 金精矿的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of gold concentrates

1.2 试验方法

石硫合剂的合成方法:按不同的硫黄与石灰质量比(文中无特殊说明,均为质量比),先称取一定量的石灰,加少量水消解,然后按比例补充足量的水,加热至沸腾后添加硫黄,再加热至沸腾并保持一定时间,合成期间经常搅拌物料。合成结束后,经冷却、过滤、洗涤,所得滤液即为石硫合剂母液,滤渣自然晾干。文中称石硫合剂合成过程中产生的渣为合成渣,对其进行称量、检测硫含量,计算硫的转化率。

硫的转化率计算公式:

$$\alpha = \frac{m - m_1 w}{m} \times 100\%$$
 (1)

式中:α 为硫的转化率,%;m 为添加硫黄的质量,g;m₁ 为合成渣的质量,g;w 为合成渣中硫的含量,%。

硫的化验方法:采用燃烧-中和法测定渣中的硫含量。试样在 1250~1300 °C 空气硫中燃烧,硫化物及硫酸盐中的硫转变为二氧化硫后,用过氧化氢溶液吸收并氧化生成硫酸,以甲基红-次甲基蓝混合溶液作指示剂,采用氢氧化钠标准液滴定。

合成渣的 XRD 分析：合成渣经混匀、制样，进行 X 射线衍射分析，研究渣的主要组成成分。X 射线衍射分析在北京科技大学材料分析测试中心的日本理学 Rigaku-RA 高功率旋转阳极 X 射线衍射仪(12 kW)上完成，辐射源为 Cu K α ($\lambda=0.15418$ nm)，步宽为 0.02°，扫描范围 10°~100°，扫描速度 5 (°)/min，电压 40 kV，电流 150 mA，常温下进行。

浸出试验方法：试样按 67% 的磨矿浓度，采用 XMQ 240×90 球磨机磨矿至粒径 <38 μ m 的物料含量为 90%，经过滤、烘干、混匀、缩分，每份试样 50 g 以备后续试验使用。将不同条件下合成的石硫合剂母液稀释至一定浓度，按一定的液固比与 50 g 试样一同放入 500 mL 的烧杯中，用磁力搅拌器 SZCL-4 进行搅拌浸出。浸出完成后，经过滤、洗涤、烘干、混匀、制样，化验浸渣中的金品位，计算金的浸出率。

金的浸出率计算公式为

$$\eta = \frac{m\alpha - m_1\gamma}{m\alpha} \times 100\% \quad (2)$$

式中： η 为金的浸出率，%； m 为金精矿的质量，g； m_1 为浸渣的质量，g； α 为金精矿中金品位，g/t； γ 为浸渣中金品位，g/t。

浸出试验条件：试样细度 <38 μ m 的含量为 90%，浸出温度 50 °C，液固比 6:1，浸出时间 5 h，搅拌速度 450 r/min，CuSO $_4$ 浓度 0.06 mol/L，NH $_3$ ·H $_2$ O 浓度 0.8 mol/L，Na $_2$ SO $_3$ 浓度 0.08 mol/L，Na $_2$ CO $_3$ 浓度 0.1 mol/L。

2 结果与讨论

2.1 硫黄与石灰质量比对石硫合剂合成和浸出效果的影响

为了考察硫黄与石灰质量比对石硫合剂合成效果的影响，以硫黄、石灰和水的质量比为 $x:1:50$ 合成石硫合剂， x 分别为 1.5、1.75、2.0、2.25、2.5、2.75、3.0，石硫合剂母液 300 mL，合成时间 60 min，试验结果如图 2 所示。

由图 2 可知，硫黄与石灰质量比对硫转化率和母液 pH 值影响较大。当硫黄与石灰质量比为 1.5:1 时，渣中不含硫，硫完全转化进入溶液，但母液 pH 值为 11.5，可能是石灰过量，与硫充分反应后大量剩余造成的。硫黄与石灰质量比从 1.5:1 增加到 3:1，合成中硫的转化率逐渐降低，从 100% 降至 70.81%，而母液中 pH 值的降幅较大，由 11.5 降至 10.3，其曲线迅速下降后逐渐趋于平缓。因此，合成较高硫转化率和适

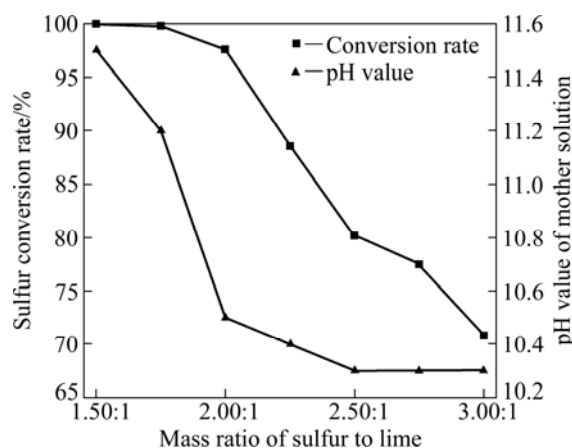


图 2 硫黄与石灰质量比对硫转化率和 pH 值的影响

Fig. 2 Effect of mass ratio of sulfur to lime on sulfur conversion rate and pH

当母液 pH 值的石硫合剂，硫黄与石灰质量比是关键因素。

选取硫黄与石灰质量比为 1.5:1、2.0:1、2.5:1 和 3.0:1 的石硫合剂母液，将其稀释为不同的浓度进行浸出试验，试验结果如图 3 所示。

由图 3 可知，不同硫黄与石灰质量比的石硫合剂，都能取得较高的金浸出率，且金的浸出率受其稀释浓度影响明显。当硫黄与石灰质量比为 1.5:1 时，在 15%~25% 的浓度范围内，金能被稳定的浸出，但浸出率较低，只有 60% 左右，可能是因为在在此配比条件下硫虽然完全反应进入溶液，但是试剂中有效浸出成分含量较低，而且母液 pH 值较高，即使稀释后浸出溶液 pH 值依然较高，影响金的溶解；当硫黄与石灰质量比为 (2~3):1 时，金的浸出率随试剂稀释浓度的增大

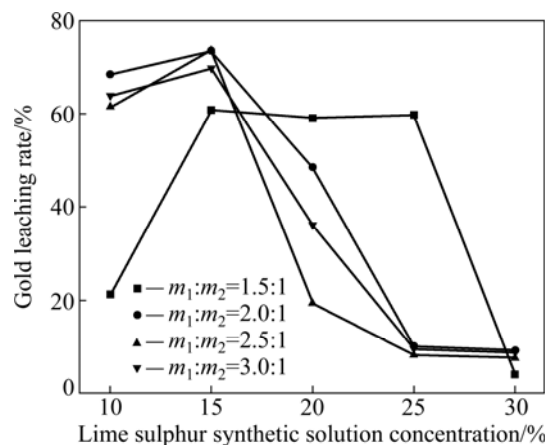


图 3 不同硫黄与石灰质量比对金浸出率的影响

Fig. 3 Effect of mass ratio of sulfur to lime on gold leaching rate (m_1 : mass of sulphur; m_2 : mass of lime)

呈先增加后降低的趋势, 试剂浓度由 10% 增加至 15% 时, 金浸出率则从 60% 提高至 73% 左右; 再增大试剂浓度, 金的浸出率下降迅速, 当试剂浓度大于 25% 时, 金几乎不被浸出。

综上所述, 硫黄与石灰质量比对硫转化率和母液 pH 值影响较大, 金的浸出率受石硫合剂稀释浓度影响明显。因此, 选择硫黄与石灰质量比为 2:1, 试剂浓度为 15% 的石硫合剂浸出较为合适, 此条件下硫的转化率为 97.57%, 母液 pH 值为 10.5, 金的浸出率为 73.42%。

2.2 水与石灰质量比对石硫合剂合成和浸出效果的影响

为了考察水与石灰质量比对石硫合剂合成效果的影响, 以硫黄、石灰和水的质量比为 2.5:1: x 合成石硫合剂, 分别取 x 为 12.5、25、50、75、100, 石灰 6 g, 合成时间 60 min, 试验结果如图 4 所示。由图 4 可以看出, 水与石灰质量比对硫的转化率影响不明显, 硫的转化率基本保持在 80% 左右; 当水与石灰质量比从 12.5:1 增加至 100:1 时, 母液 pH 值逐渐减小, 由 11.2 降至 9.7。

不同水与石灰质量比的石硫合剂浸出试验结果如图 5 所示, 试剂稀释浓度为 15%, 其他条件如浸出试验条件所述。由图 5 可知, 金的浸出率随水与石灰质量比的增加先增大后降低。当水与石灰质量比增至 75:1 时, 金的浸出率达到最大值 77.96%, 再增大水与石灰质量比, 金浸出率反而呈下降趋势。可能的原因是由于水与石灰质量比对硫转化率影响很小, 而仅对母液 pH 值影响较大, 水与石灰质量比过大或过小都会直接影响母液 pH 值, 从而造成浸出过程中 pH 值的

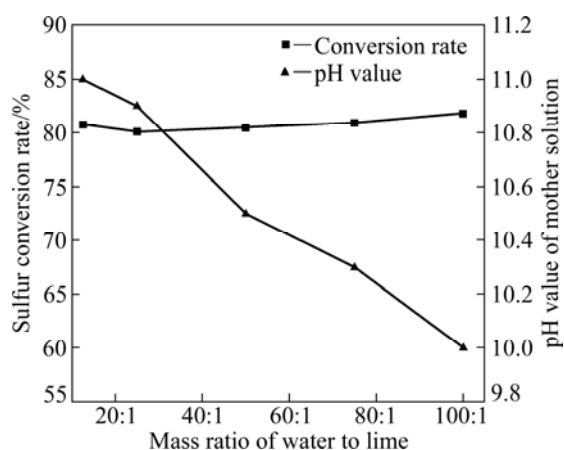


图 4 水与石灰质量比对硫转化率和母液 pH 值的影响

Fig. 4 Effect of mass ratio of water to lime on sulfur conversion rate and pH value of mother solution

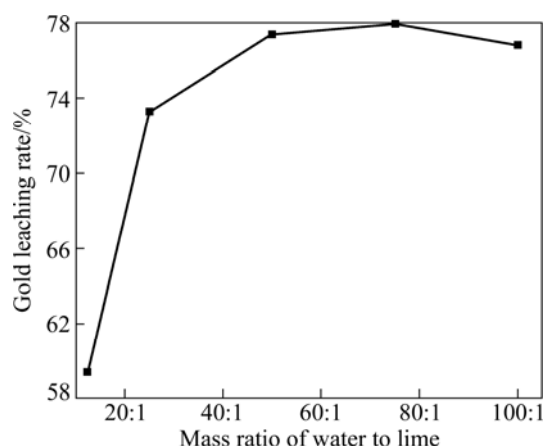


图 5 水与石灰质量比对金浸出率的影响

Fig. 5 Effect of mass ratio of water to lime on gold leaching rate

变化, 影响金的浸出。因此, 水和石灰比值为(50~75):1 较为合适。

2.3 合成时间对石硫合剂合成和浸出效果的影响

为了考察合成时间对石硫合剂合成效果的影响, 分别取合成时间为 15、30、45、60 和 75 min, 其他合成条件为硫黄、石灰和水的质量比为 1:2.5:50, 石灰 6 g, 试验结果如图 6 所示。由图 6 可知, 随合成时间的延长, 硫转化率逐渐提高, 但增幅较小, 母液 pH 值则逐渐减小。当合成时间由 15 min 增至 45 min 时, 硫转化率只提高了 1.32%, 达到了 81.7%, 母液 pH 值由 11.3 降至 10.5。可见, 合成时间低于 30 min 时, 合成反应还没有进行完全, 硫的转化率略低, 母液 pH 值较高。

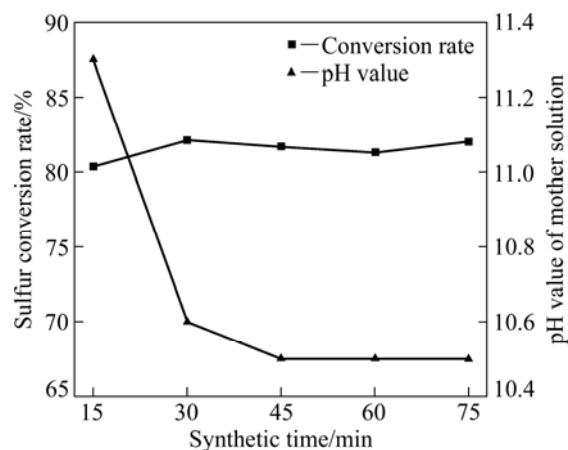


图 6 合成时间对硫转化率和母液 pH 值的影响

Fig. 6 Effect of synthetic time on sulfur conversion rate and pH value of mother solution

图7所示为不同合成时间的石硫合剂浸出试验结果,试剂稀释浓度为15%,其他条件如浸出试验条件所述。由图7可知,金的浸出率随合成时间的延长先升高后降低,合成时间由15 min延长至45 min,金浸出率从70.36%提高到81.10%,之后再延长合成时间,金浸出率却逐渐下降,75 min时,金浸出率降至77.06%。合成时间低于45 min时,石硫合剂合成还没有完成,主要浸出成分含量较低,且母液的pH值较高,致使金浸出率较低;随合成时间的延长,试剂中的主要成分多硫化钙和硫代硫酸钙氧化加剧(如式(3)~(6)),增加了浸出试剂的耗量,降低了金的浸出率^[17]。因此,合成时间为45 min为宜。

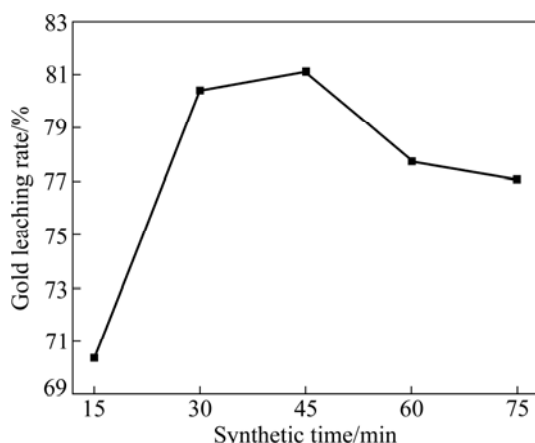
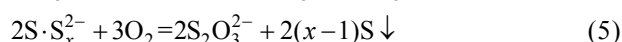
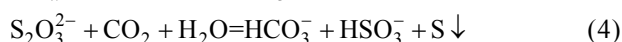
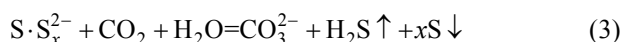


图7 合成时间对金浸出率的影响

Fig. 7 Effect of synthetic time on gold leaching rate

2.4 合成渣的成分分析

党晓娥^[18]认为,采用石灰和硫黄合成石硫合剂,渣中的主要成分为单质硫、 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CaSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$,合成过程中硫离子被氧化为 SO_4^{2-} , SO_4^{2-} 与 Ca^{2+} 离子结合生成 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CaSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 。为了探明硫在石硫合剂合成过程中的转化途径和渣中硫的存在形式,采用XRD对合成渣进行物相分析,结果如图8所示,石硫合剂合成条件为硫黄、石灰和水的质量比2:1:50,石灰6 g,合成时间为45 min。

从图8可以看出,合成渣的主要成分为S和 CaCO_3 ,还有少量的 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 。由此可见,石硫合剂合成过程中硫大部分转化为石硫合剂组分进入溶液,少量的硫依然以单质的形式存在于合成渣中,渣中残留的硫随硫黄与石灰质量比的增加而增多。由于

石硫合剂合成用水为自来水,水中含一定量的 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ,另外,分析纯 CaO 中也含有少量的 Mg^{2+} ,因而溶液中含有大量的 Ca^{2+} 和少量的 Mg^{2+} 。这些离子在沸腾状态下易与空气中的 CO_2 反应生成 CaCO_3 和 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$,可能的反应式如下:

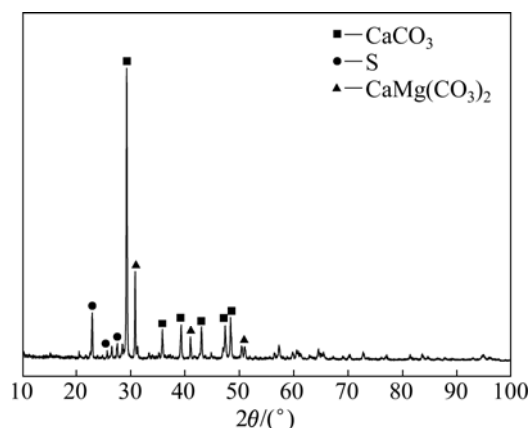
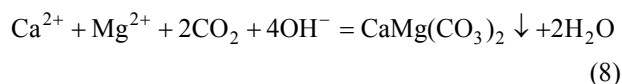
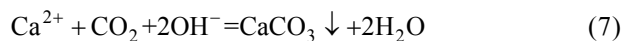
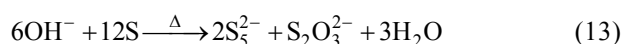
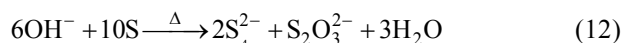
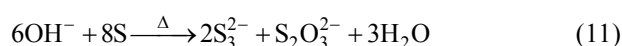
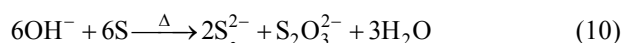
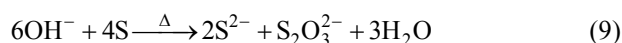


图8 石硫合剂合成渣的XRD谱

Fig. 8 XRD patterns of residue of lime sulphur synthetic solution

3 合成理论分析

不同比例的石灰和硫黄在溶液中反应,生成不同的多硫化物和硫代硫酸盐,发生的反应方程式^[17]如下:



反应式(9)~式(13)中有关离子和分子的标准摩尔生成自由能见表2。

反应式(9)的 $\Delta G^\ominus$ 计算为

表2 离子和分子的标准摩尔生成自由能^[17,19]

Table 2 $\Delta_f G_m^\ominus$ of ions and molecules^[17, 19] (kJ/mol)

S	S^{2-}	S_2^{2-}	S_3^{2-}	S_4^{2-}	S_5^{2-}	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	OH^-	H_2O
0	85.8	79.5	73.7	69.1	62.3	-522.5	-157.24	-237.13

$$\begin{aligned}\Delta G^{\ominus} &= 2\Delta G_{\text{m}}^{\ominus}(\text{S}^{2-}) + \Delta G_{\text{m}}^{\ominus}(\text{S}_2\text{O}_3^{2-}) + \\ &3\Delta G_{\text{m}}^{\ominus}(\text{H}_2\text{O}) - 6\Delta G_{\text{m}}^{\ominus}(\text{OH}^-) - 4\Delta G_{\text{m}}^{\ominus}(\text{S}) = \\ &2 \times 85.8 + (-522.5) + 3 \times (-237.13) - \\ &6 \times (-157.24) - 4 \times 0 = -118.85 \text{ kJ/mol}\end{aligned}\quad (14)$$

反应式(10)~式(13)的反应自由能 $\Delta G^{\ominus}$ 依次为 -131.45、-143.05、-152.25、-165.85 kJ/mol。根据热力学计算 $\Delta G^{\ominus}$ 可知,上述反应式都能自发进行。由于石硫合剂的主要成分为多硫化钙(CaS_4 和 CaS_5)和硫代硫酸钙(CaS_2O_3)^[7],可见反应以式(12)和(13)为主,因此,适宜的合成配比为即硫黄与石灰质量比为 (1.9~2.3):1。上述石硫合剂合成试验中的硫黄与石灰质量比为 2:1 与理论配比相一致。

4 结论

1) 硫黄与石灰的质量比是影响硫转化率和 pH 值的主要因素,随质量比的增加,硫转化率和 pH 值逐步降低;水与石灰的质量比和合成时间对 pH 值影响较大,而对硫的转化率几乎没有影响。石硫合剂适宜的合成条件为硫黄、石灰和水的质量比为 2:1:(50~75),合成时间 45 min,在此条件下硫的转化率为 97.57%,母液 pH 值为 10.5。

2) 石硫合剂的浓度对金浸出率有明显的影响,在稀释浓度为 15%时,金的浸出率达到 73.42%。

3) 硫在石硫合剂合成过程中大部分转化为石硫合剂组分进入溶液,少量的硫以单质的形式残留在合成渣中,渣中残留的硫随硫黄与石灰质量比的增加而增多。

REFERENCES

- [1] ZHANG Jian-tao, SHEN Shao-bo, CHENG Yao, LAN Hai-feng, HU Xing, WANG Fu-ming. Dual lixiviant leaching process for extraction and recovery of gold from ores at room temperature[J]. Hydrometallurgy, 2014, 144/145: 114-123.
- [2] YANG Xi-yun, MICHAEL S M, JAN D M, WANG Xu-ming, SHI Xi-chang, XU Hui. Thiourea-thiocyanate leaching system for gold[J]. Hydrometallurgy, 2011, 106(1/2): 58-63.
- [3] HA Vinh Hung, LEE Jae-chun, JEONG Jin-ki, HAI Huynh Trung, Jha Manis K. Thiosulfate leaching of gold from waste mobile phones[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 178(1/3): 1115-1119.
- [4] 李绍英,王海霞,袁喜振,赵留成,孙春宝.金精矿碘化浸出过程动力学[J].中国有色金属学报,2014,24(3):814-819.
- LI Shao-ying, WANG Hai-xia, YUAN Xi-zhen, ZHAO Liu-cheng, SUN Chun-bao. Leaching dynamics of gold concentrates by iodine-iodide solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(3): 814-819.
- [5] 李绍英,王海霞,孙春宝,赵留成,阎志强.碘化物对金精矿碘化浸出过程的影响[J].中国有色金属学报,2013,23(5):1434-1439.
- LI Shao-ying, WANG Hai-xia, SUN Chun-bao, ZHAO Liu-cheng, YAN Zhi-qiang. Effects of different iodide on gold concentrates leaching process in iodine-iodide solution[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(5): 1434-1439.
- [6] 钟俊.非氰浸金技术的研究及应用现状[J].黄金科学技术,2011,19(6):57-61.
- ZHONG Jun. Research and application status of non-cyanide gold leaching technology[J]. Gold Science and Technology, 2011, 19(6): 57-61.
- [7] 杨丙雨,兰新哲,张箭,韩爱玉.石硫合剂的提金原理及应用[J].贵金属,1997,18(2):58-61.
- YANG Bing-yu, LAN Xin-zhe, ZHANG Jian, HAN Ai-yu. Lime sulphur synthetic solution(LSSS)-A new nontoxic reagent for extraction of gold[J]. Precious Metals, 1997, 18(2): 58-61.
- [8] CHANDRA I, JEFFREY M I. An electrochemical study of the effect of additives and electrolyte on the dissolution of gold in thiosulfate solutions[J]. Hydrometallurgy, 2004, 73(3/4): 305-312.
- [9] AYLMOORE M G, MUIR D M, STAUNTON W P. Effect of minerals on the stability of gold in copper ammoniacal thiosulfate solutions-The role of copper, silver and polythionates[J]. Hydrometallurgy, 2014, 143: 12-22.
- [10] 傅平丰,孙春宝,康金星,龚道振.石硫合剂法浸金的原理、稳定性及应用研究进展[J].贵金属,2012,33(2):67-70.
- FU Ping-feng, SUN Chun-bao, KANG Jin-xing, GONG Dao-zhen. Progress of gold extraction mechanism, stability of extraction reagents and its application of lime sulphur synthetic solution(LSSS) method[J]. Precious Metals, 2012, 33(2): 67-70.
- [11] 陈江安,周源.石硫合剂浸金体系的探讨[J].现代矿业,2009(1):41-42,52.
- CHEN Jiang-an, ZHOU Yuan. Discussion on gold leaching system by LSSS[J]. Modern Mining, 2009(1): 41-42, 52.
- [12] 陈江安,周源.石硫合剂(LSSS)浸金的研究[J].南方冶金学院学报,2005,26(3):74-77,82.
- CHEN Jiang-an, ZHOU Yuan. The study of leaching gold concentrate by lime sulphur synthetic solution(LSSS) method[J]. Journal of Southern Institute of Metallurgy, 2005, 26(3): 74-77, 82.
- [13] 陈怡,宋永辉.某碳质金精矿石硫合剂法浸出试验研究[J].黄金,2012,33(3):43-46.
- CHEN Yi, SONG Yong-hui. Study on leaching gold from carbonaceous gold ores by lime sulphur synthetic solution[J]. Gold, 2012, 33(3): 43-46.

- [14] 李晶莹, 黄璐. 石硫合剂法浸取废弃线路板中的金的试验研究[J]. 黄金, 2009, 30(10): 48-51.
LI Jing-ying, HUANG Lu. Experimental research on leaching gold from waste printed circuit board by LSSS method[J]. Gold, 2009, 30(10): 48-51.
- [15] 刘有才, 朱忠泗, 符剑刚, 李丽峰, 林清泉, 李志辉. 某金矿石的石硫加碱催化剂法浸金研究[J]. 稀有金属, 2013, 37(1): 123-129.
LIU You-cai, ZHU Zhong-si, FU Jiang-gang, LI Li-feng, LIN Qing-quan, LI Zhi-hui. Leaching gold ores by lime sulphur synthetic solution with alkali-catalyzed process[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2013, 37(1): 123-129.
- [16] 赵留成, 孙春宝, 李绍英, 龚道振, 康金星. SO_3^{2-} 、 $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$ 、 Cu^{2+} 对高硫金精矿石硫合剂浸出的影响[J]. 黄金, 2013, 34(10): 63-67.
ZHAO Liu-cheng, SUN Chun-bao, LI Shao-ying, GONG Dao-zhen, KANG Jin-xing. Effects of SO_3^{2-} , $\text{NH}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$, Cu^{2+} on high-sulfur gold concentrate leaching using lime sulfur synthetic solution(LSSS)[J]. Gold, 2013, 34(10): 63-67.
- [17] 周源, 余新阳. 金银选矿与提取技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011: 123.
ZHOU Yuan, YU Xin-yang. Gold and silver ore dressing and gold technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2011: 123.
- [18] 党晓娥. LSSS、ML 制备及溶金体系的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2001: 22.
DANG Xiao-e. Study of the synthetic of LSSS and ML and the gold leaching system[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2001: 22.
- [19] 傅献彩, 沈文霞, 姚天扬. 物料化学[M]. 5 版. 北京: 高等教育出版社, 2005: 496.
FU Xian-cai, SHEN Wen-xia, YAO Tian-yang. Physical Chemistry[M]. 5nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2005: 496.

(编辑 李艳红)