

微细浸染型金矿酸性热压氧化预处理动力学研究

冯吉福, 周卫宁*, 李尽善, 袁江涛, 罗 星, 马荣锴
(中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004)

摘要: 以氧气消耗速率表征氧化速率, 研究了微细浸染型硫化物金矿热压氧化预处理过程动力学的影响因素, 考察了矿浆 pH 值、温度、矿样粒度、氧分压、气液界面面积和矿浆浓度对氧化速率的影响, 以及氧化率和氧化速率的关系。结果表明, 矿浆 pH<2.5 时, 保持较高的氧化速率; 氧化速率随温度升高、氧分压增加和矿浆浓度降低而增大; 增加气液接触面积可提高氧化速率, 当矿浆浓度为 33%、氧分压 1.6 MPa, 在优化条件下, 气液接触比表面积达到 $25 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 40 min 可完成氧化预处理。

关键词: 冶金原料与预处理; 热压氧化; 硫化物金矿; 动力学

中图分类号: TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)03-0010-07

Study on the Kinetics of Pretreatment for Micro-disseminated Sulfide Gold Ores by Acidic Autoclave Oxidation

FENG Jifu, ZHOU Weining*, LI Jinshan, YUAN Jiangtao, LUO Xing, MA Rongkai
(China Nonferrous Metal Guilin Geology and Mining Co. Ltd., Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: The reaction of oxidation pretreatment was characterized by the oxygen consumption rate. The influencing factors on dynamics of autoclave oxidation pretreatment were studied in the micro-disseminated sulfide gold ore. The impacts on the oxidation rate by the initial pH of slurry, temperature, particle size, oxygen pressure, gas-liquid interfacial area, slurry concentration were investigated. The relationship between the degree and reaction rate of oxidation was also explored. The results showed that a high reaction rate of oxidation would be maintained when the pH of the slurry was less than 2.5. The oxidation would accelerate, as the temperature and oxygen pressure was increased while the slurry concentration was reduced. The reaction rate of oxidation could also be improved by rising gas-liquid interfacial area. The oxidation pretreatment could be finished in 40 min under the optimized conditions, when the slurry concentration was 33%, oxygen pressure was 1.6 MPa, gas-liquid interfacial area was $25 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Key words: metallurgical raw materials and pretreatment; autoclave; gold-bearing sulfide; kinetics

我国独立金矿中, 微细浸染型硫化物金矿是主要的难处理金矿资源, 约为 1500 t 金属, 占已探明金矿总储量的三分之一^[1]。微细浸染型金矿石既有难选的特性, 又具有难冶的特性, 目前此类微细粒浸染型硫化物金矿需进行预先处理^[2-14], 充分暴露

出包裹的金、消除“劫金”性物质活性, 预处理后再进行氰化浸出, 使金等有价值元素得到最大限度的回收。氧化预处理硫化金矿技术主要包括焙烧氧化法、生物氧化法、化学氧化法、热压氧化法等。其中热压氧化预处理是优点突出的预处理方法。

收稿日期: 2016-10-31

基金项目: 广西科技开发项目(桂科 AB16380023)。

第一作者: 冯吉福, 男, 教授级高工, 研究方向: 材料与冶金技术研发。E-mail: jeffrey773@163.com

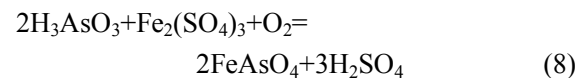
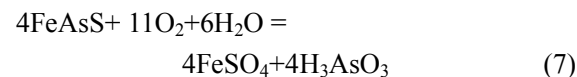
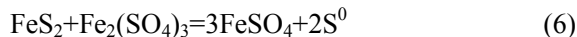
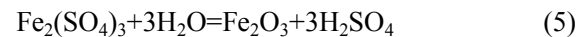
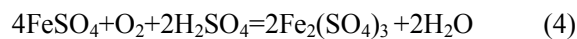
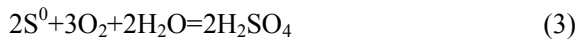
*通讯作者: 周卫宁, 男, 教授级高工, 研究方向: 资源综合利用。E-mail: 116i@163.com

国外热压氧化预处理技术于 1985 年开始在美国 Mclaughlin 金矿获得工业应用, 此后得到推广。工艺参数通常为^[14-15]: 温度 180~225℃、总压力 1.1~3.2 MPa、在反应釜停留时间 1~3 h、介质通常为酸性。国内热压氧化预处理有比较多的研究^[16-23], 也取得了一定的成果。在热压氧化工艺预处理硫化物金矿动力学方面, 研究了氧化温度、氧分压、物料粒度、处理时间、矿浆浓度等因素对硫化物的氧化率和金浸出率的影响, 金的回收率与矿石的氧化程度正相关的特点得到了公认。本文以氧气消耗速率表征氧化热预处理速率, 研究硫化物金矿的酸性热压氧化预处理的氧化速率, 为热压氧化预处理微细浸染型硫化物金矿提供新的途径和方法。

1 实验部分

1.1 实验原理

微细浸染型金矿载金矿物主要是黄铁矿, 需要将载金矿物氧化, 释放出被包裹的金, 使之能与浸金溶液接触, 从而有效的浸出。热压氧化预处理过程的主要化学反应有:



热压氧化预处理过程是包含一系列固、液、气的复杂反应, 大部分的反应在氧气参与下进行, 因此, 以氧气消耗速率可以表征氧化预处理过程的反应速率。

1.2 材料及仪器

1.2.1 矿样成分

微细浸染型硫化物金矿来自于贵州某金矿, 主要化学分析结果和矿物组份如表 1 和表 2 所示。金主要赋存于黄铁矿中, 黄铁矿粒度 D_{50} 为 30 μm (相当于-400 目)。

1.2.2 实验试剂

氢氧化钙, 分析纯, 西陇化工股份有限公司; 硫酸, 化学纯, 西陇化工股份有限公司; 氧气, 工业级, 桂林恒宇氧气站。

表 1 金矿多元素化学分析结果

| 元素 | Au/(g/t) | S | Fe | S | Al |
|----|----------|------|------|------|-------|
| 含量 | 3.16 | 27.0 | 7.15 | 6.32 | 6.31 |
| 元素 | C | Ca | As | Mg | Zn |
| 含量 | 1.44 | 1.43 | 0.25 | 0.10 | 0.015 |

表 2 金矿的主要矿物组成及含量

| 矿物 | 金银矿 | 石英 | 粘土矿物 | 黄铁矿 | 萤石 |
|----|------|-------|-------|-------|------|
| 含量 | 痕量 | 53.63 | 26.98 | 10.96 | 2.58 |
| 矿物 | 褐铁矿 | 磁铁矿 | 有机碳 | 毒砂 | 白云石 |
| 含量 | 2.15 | 1.13 | 1.45 | 0.54 | 0.51 |

1.2.3 仪器设备

反应釜, 威海行雨化工机械厂, 型号分别为 GSH-1L、GSH-5L; 精密电位/pH 计, 上海般特仪器有限公司, Bantee922 型; 分析天平, 上海天平仪器厂, FA2204 型; 全谱直读电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES), 美国安捷伦, ICP-OES 725 型。

自制氧气计量装置: 氧气瓶与缓冲瓶通过减压阀连接, 缓冲瓶与反应釜也用减压阀连接。根据缓冲容器的压力变化得出气体体积与压力关系, 经过校准后换算成标准立方米, 即通过缓冲瓶的压力降低数值得到消耗的氧气数量。

1.3 实验方法

实验用微细浸染硫化物金矿矿样为破碎到设定的粒度-200 目(100%过筛), 混匀, 制得矿样。每次实验用 200 g 矿样, 加入自来水, 形成矿浆, 用硫酸调节酸度。在设定条件下, 在 GSH-1L 反应釜中, 从反应釜上部通入氧气(完全氧化过程试验除外), 以保持不同的试验固液界面面积, 进行热压氧化预处理实验。

记录单位时间内氧气消耗量, 计算氧气消耗速率。由于反应过程会产生硫酸, 改变矿浆 pH, 因此, 采用测量时刻点后的 1.5 min 平均值作为氧气消耗速率(R_0)。试验均以测试时刻后的 1.5 min 平均值作为试验值。

气液界面面积对氧化速率影响实验根据需要在 2 种反应釜中进行, 用自制聚四氟乙烯浮子遮盖部分气液界面面积。

氧化全过程实验在 GSH-1L 反应釜中进行, 用气体吸收管从底部通入氧气。用化学物相法测出氧化渣的硫酸盐含量, ICP-AES 测总硫含量。计算氧

化率:

$$\text{氧化率} = \frac{\text{氧化渣总硫含量} - \text{氧化渣硫酸盐的硫含量}}{\text{原矿总硫含量} - \text{原矿硫酸盐的硫含量}} \quad (9)$$

2 结果与讨论

2.1 矿浆 pH 对氧化速率的影响

使用-200 目粒度的矿样, 固定矿浆浓度(质量分数, 下同)为 25%、氧分压 0.7 MPa、温度 230°C、搅拌转速为 800 r/min, 用硫酸调节不同的矿浆溶液 pH 值, 考察其对热压预处理氧化速率的影响, 结果如图 1 所示。

图 1 结果表明, 矿浆 pH 值对氧化速率(以氧气消耗速率 R_O 表征)影响非常大。矿浆溶液 pH=6, 氧化速率极低, 氧化预处理 7 h, 氧气消耗量低于 $0.1 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3$; pH=2.5 时, 氧气消耗速率已经达到 $0.1 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{min}$; pH 小于 2.5, 氧气消耗速率基本稳定在略高于 $0.1 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{min}$ 的水平。

根据文献[24], 在室温下, pH 为 1~4 时黄铁矿的氧化速率公式可表示为:

$$R(t) = -KC^{1/2}[H^+]^{1/2} \quad (10)$$

式中, K 为速率系数, $[H^+]$ 为氢离子浓度, C 为 t 时刻的三价铁浓度。

pH>3.5 时, 本实验结果反映的规律与式(10)相

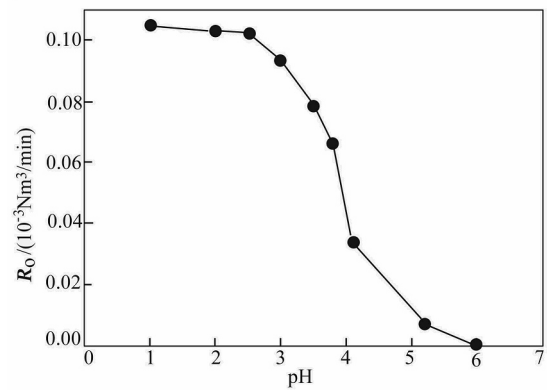


图 1 矿浆 pH 对氧化速率的影响

Fig.1 Effect of pH on the oxidation rate

符, 即氢离子浓度低, 反应速率较低, 反应速率与氢离子浓度关系符合指数规律; pH<2.5 时, 本实验结果与式(10)严重偏离。在高酸度的黄铁矿氧化研究中, 众多结果^[17, 25-26]都显示溶液酸度对黄铁矿的氧化速率几乎没有影响。pH<2.5 的强酸性条件下热压氧化预处理微细硫化物金矿的氧化速率较大。

2.2 温度对氧化速率的影响

使用-200 目粒度的矿样, 固定矿浆浓度为 25%、硫酸浓度 5 g/L、氧分压 0.7 MPa、搅拌转速为 800 r/min, 改变实验温度, 考察其对热压预处理氧化速率的影响, 结果如图 2 所示。

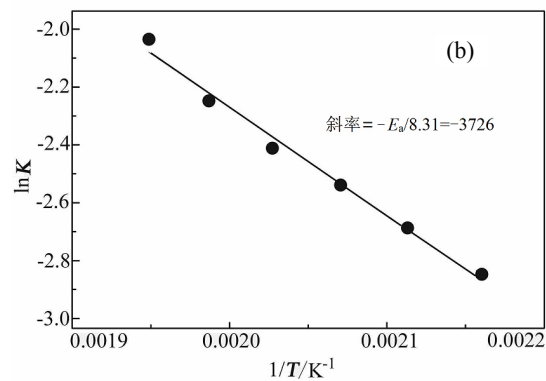
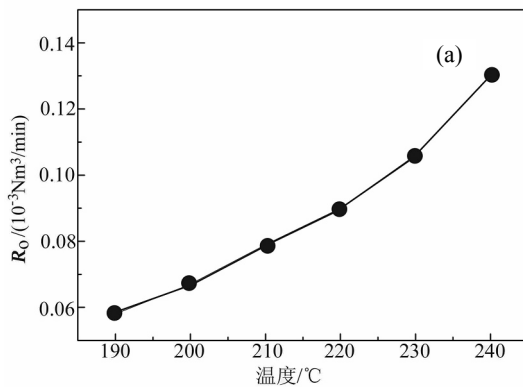


图 2 温度对氧化速率的影响(a)及拟合直线(b)

Fig.2 Effect of the temperature on the oxidation rate (a) and linear fitting (b)

一般情况下, 温度对反应速率常数的影响符合阿伦尼乌斯方程式:

$$K = A \cdot \exp(-E_a/RT) \quad (11)$$

式中, K 为反应速率常数, E_a 为反应活化能, T 为绝对温度, R 为气体常数。

由图 2(a)可见, 氧化速率随反应温度升高而增大, 反应速率常数与温度表现出很好的线性关系(如

图 2(b)所示)。拟合得到氧化反应表观活化能为 31 kJ/mol, 比文献[25]测出的(从矿石中分选出纯的黄铁矿 90°C 下酸性氧化预处理)活化能 37 kJ/mol 略低。表观活化能为 10~40 kJ/mol 的反应通常为扩散与表面化学反应混合控制。据此认为, 微细浸染型硫化物金矿的热压氧化预处理属于扩散与表面化学反应混合控制, 并非典型化学反应控制的氧化过程。

2.3 矿样粒度对氧化速率的影响

固定矿浆浓度为 25%、硫酸浓度 5 g/L、氧分压 0.7 MPa、温度 230℃、搅拌转速 800 r/min，使用粒度分别为-160、-200 和-325 目的矿石，考察矿样粒度对氧化速率的影响，结果如表 3 所列。表 3 结果显示，矿样粒度从-160 目到-325 目，氧化预处理的反应速率几乎不变。

表 3 矿样粒度对氧化速率的影响

Tab.3 Effect of the ore size on the oxidation rate

| 矿样粒度/目 | 160 | 200 | 325 |
|--|------|------|------|
| 氧气消耗速率/(10 ⁻³ Nm ³ /min) | 0.11 | 0.10 | 0.11 |

实验用矿样的载金黄铁矿粒度 D_{50} 为 30 μm ，矿样细度为-160 目，黄铁矿有可能被包裹；当矿样细度为-325 目时，黄铁矿大量离解。表 3 结果表明载金黄铁矿在没有完全裸露和完全裸露 2 种情况下，氧化反应速率变化不大。结合前述氧化反应的表观活化能数据认为，在本实验条件下，氧化预处理反应的控制步骤不是黄铁矿表面化学反应。

2.4 氧分压对氧化速率的影响

使用-200 目粒度的矿样，固定矿浆浓度为 25%、硫酸浓度 5 g/L、反应温度 230℃、搅拌转速 800 r/min，改变氧分压，考察其对热压预处理氧化速率的影响，结果如图 3 所示。

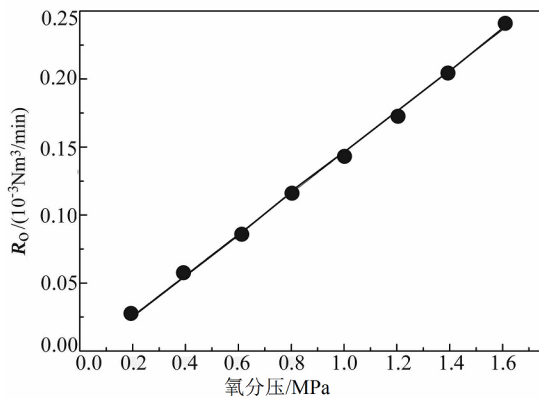


图 3 氧分压对氧化速率的影响

Fig.3 Effect of the oxygen partial pressure on the oxidation rate

图 3 的结果显示，氧分压与氧气消耗速率成正比。根据实验数据得到回归方程为：

$$R_O = 0.15p - 0.004 \quad (12)$$

式中， R_O 是氧气消耗速率(L/min)， p 是氧分压(MPa)。

通常情况下，压力釜总压由氧分压和水蒸汽压组成。蒸汽压随着反应温度升高而升高，因此，在反应釜压力不变的条件下，氧分压和反应温度相互

协调，可以达到最佳的氧化速率。根据式(11)和(12)，温度由 230℃降低到 195℃，总压强由 3.5 MPa 降低至 3.0 MPa，同时氧分压由 0.7 MPa 升高至 1.6 MPa 此时，氧化预处理反应速率增加 1.4 倍。

2.5 气液界面面积对氧化速率的影响

用自制聚四氟乙烯浮子遮挡部分气液界面，造成不同的气液界面面积进行加压预处理实验。气液界面面积为 63 和 38 cm^2 的实验在 GHS-1L 高压釜中进行；气液界面面积为 153 和 86 cm^2 的实验在 GHS-5L 高压釜中进行。使用-200 目粒度的矿样，矿浆浓度为 25%、调剂矿浆 pH=1.0、氧分压 0.8 MPa、反应温度 220℃、搅拌转速 800 r/min，考察气液界面面积对氧化速率影响，结果如图 4 所示。

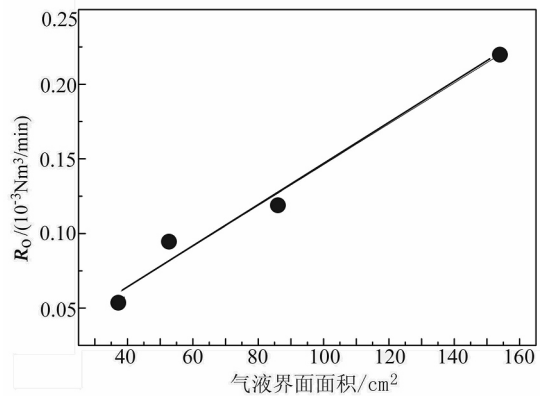


图 4 气液界面面积对氧化速率的影响

Fig.4 Effect of the gas-liquid interfacial area on oxidation rate

图 4 结果表明，氧化速率与气液界面面积(S , cm^2)成正比。根据实验数据得到线性方程：

$$R_O = 0.0015S \quad (13)$$

实际工作中，增加气液界面比较容易达到，所以，通过增加气液界面可以加快金矿的氧化预处理反应速度，缩短预处理时间。

气液之间的传质，阻力主要来自液体一侧，氧气的传质速率可表示为^[27]：

$$R_a = \alpha_l K_l (C^* - C^1) / (1 - \epsilon_g) \quad (14)$$

式(14)中， R_a 为氧气在液相的体积吸收速率， $\text{kmol}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$ ； C^* 为氧气在液相的饱和浓度， kmol/m^3 ； C^1 为氧气在液相的浓度， kmol/m^3 ； α_l 为气液接触比表面积， m^2/m^3 ； K_l 为气液传质系数， m/s ； ϵ_g 为液相气含率。根据文献[28]，氧分压增高，溶液中饱和氧溶解度增高，在实验范围内氧气饱和溶解度与氧分压近似线性，比较式(14)和式(12)，只有氧气在液相的浓度不随着压力变化，两式才相互吻合；另一方面 pH 小于 2.5 下，氧化速率稳定，此时 C^1

远小于 C^* ，才能符合这样的规律。因此认为，实验条件下氧气在液相的浓度近似为零，氧分压通过影响氧气在液相的饱和浓度而改变氧化速率。

2.6 矿浆浓度对氧化速率的影响

使用-200 目粒度的矿样，固定硫酸浓度 5 g/L、氧分压 0.7 MPa、反应温度 230℃、搅拌转速 800 r/min，改变矿浆浓度，考察其对氧化预处理的氧气消耗速率影响，结果如图 5 所示。

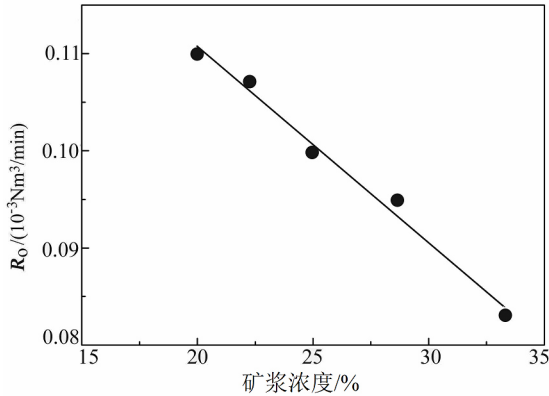


图 5 矿浆浓度对氧化速率的影响

Fig.5 Effect of the slurry concentration on oxidation rate

图 5 表明，矿浆浓度与氧气消耗速率呈线性负相关，根据实验数据得到方程：

$$R_O = 0.15 - 0.0021\omega \quad (15)$$

式中 ω 为矿浆浓度(质量分数)，%。氧气消耗速率与矿浆浓度乘积最大，则反应釜单位体积氧化能力最大，据式(15)，即 $0.15\omega - 0.0021\omega^2$ 取得最大值， $\omega = 0.15 / (0.0021 \times 2) = 35.7$ ，此时反应釜单位体积氧化效率最高。

纯氧气氛下水中饱和氧浓度为 1.28 mol/m^3 ^[29]。本实验中，氧分压 0.7 MPa，气液界面面积 63 cm^2 ，溶液体积为 0.7 L，溶液含气率为 0。据式(15)，矿浆浓度 0%，氧气消耗速率 $R_O = 0.15 \text{ Nm}^3/\text{s}$ 。依据热力学原理计算相关参数^[29]，利用亨利定律修正氧分压对氧气的饱和浓度的影响，反推得到氧气的传质速率 $K_1 = 3.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ ；同时利用克拉珀龙方程，依据文献[29]计算的氧气溶解热，修正温度对氧气饱和溶解度的影响，得出本实验温度下的饱和氧浓度，进而得到氧气的传质速度 $K_1 = 13 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。外推至无矿浆时，氧气在水中的传质速度($13 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)与文献[27]中纯水溶液中的数值($7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$)基本相符。另一方面，当矿浆浓度 71%时，据式(15)，氧气消耗速率 $R_O = 0$ ，此时矿浆已经成为不含自由流动溶液的矿石。基于上述分析认为，矿浆浓度对氧气消耗

速率的影响本质上是改变了有效气液界面面积。

2.7 金矿完全氧化过程的反应速率变化

矿浆完全氧化过程实验条件为：用-200 目粒度的矿样，矿浆浓度 33%，初始 pH=2.5，氧分压 1.6 MPa(反应釜总压 3 MPa)，反应温度 195℃，搅拌转速 800 r/min，实验中氧气经过气体吸收管从底部通入矿浆。实验中观察到，反应开始的 10 s 内，氧气消耗速率迅速升高，此后相当长时间内，氧化速率相对稳定。预处理过程氧气消耗速率和金矿的氧化率随预处理时间变化如图 6 所示。

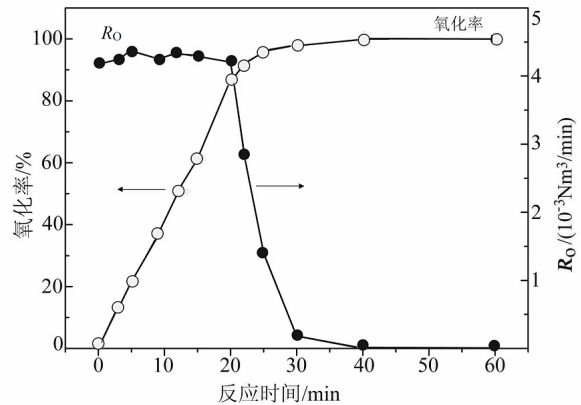


图 6 预处理过程的氧化速率和氧化率

Fig.6 The oxidation rate and degree of oxidation in the pretreatment process

由图 6 可见，氧气消耗速率在前 20 min 保持在较高的水平(约 $4.5 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{min}$)，20~40 min 期间氧气消耗速率快速降低，40 min 以后几乎没有氧气消耗。伴随氧气的消耗，矿石中硫的氧化率在前 20 min 迅速增加，20~40 min 阶段继续缓慢增加至基本氧化完全，40 min 可结束氧化预处理。

分析完全氧化反应过程，在氧化率达到 90%(20 min)前，溶液中氧气的溶解度远小于其饱和溶解度。此时氧化速率基本不变，氧化速率受气液界面的氧气传质速度控制。随着氧化率进一步提高，氧化速率迅速降低，反应速率可能受到黄铁矿表面化学反应控制。这一现象揭示了仍可以采取提高气液界面面积的方式增加氧化速率，缩短氧化预处理时间。

与此前的实验相比，完全氧化实验氧化温度由 230℃降低至 190℃，反应釜总压力由 3.5 MPa 降低 3 MPa，氧分压由 0.7 MPa 增加至 1.6 MPa，氧气进气方式为底部进气，增加了气液界面面积。图 6 显示的氧气消耗速率提高约 4 倍，根据式(12)和(13)计算，气液界面面积提高提高 2.8 倍，气液接触比表面积达到了 $25 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 。

3 结论

以贵州某微细浸染型硫化金矿为样本, 以氧气消耗速率表征氧化速率, 研究了矿浆 pH、反应温度、矿样粒度、氧分压、气液界面面积、矿浆浓度等因素对热压氧化预处理的影响。得到如下结论:

1) 实验结果表明, 在 $\text{pH}<2.5$ 的强酸性条件下, 矿浆酸度对黄铁矿的氧化速率几乎没有影响, 保持较高的氧化速率; 氧化速率随反应温度升高而增大; 矿样粒度对氧化速率影响不大; 氧分压与氧化速率成正比; 矿浆浓度与氧化速率呈线性负相关, 当矿浆浓度为 35.7% 时, 反应釜单位体积氧化效率最高。

2) 机理分析表明, 微细浸染型硫化物金矿的热压氧化预处理属于扩散与表面化学反应混合控制的氧化过程, 表观活化能为 31 kJ/mol; 氧化预处理反应的控制步骤不是黄铁矿表面化学反应。

3) 增加气液接触面积可提高氧化速率。通过调整矿浆浓度(33%), 增加氧分压(1.6 MPa), 采用合适的温度(195℃)和总压力(3.0 MPa), 采用底部进气方式, 气液接触比表面积达到 $25 \text{ m}^2/\text{m}^3$, 在初始 $\text{pH}=2.5$ 的条件下, 40 min 内可完成氧化预处理。

参考文献:

- [1] 席立永, 马金虎, 戴首平, 等. 我国黄金矿产资源与地质勘查形势的初步分析[J]. 西部探矿工程, 2011, 23(1): 129-131.
XI L Y, MA J H, DAI S P, et al. A preliminary analysis of gold mineral resources and the situation of geologic exploration in China[J]. West-China exploration engineering, 2011, 23(1): 129-131.
- [2] 陈桂霞. 我国黄金难选冶矿石预氧化技术研究现状及发展前景[J]. 新疆有色金属, 2008, 31(Z1): 96.
CHEN G X. Actuality research and development prospect of pre-oxidation treatment for the refractory gold ore of China[J]. Xinjiang nonferrous metals, 2008, 31(Z1): 96.
- [3] 时建辉, 鲁佳, 黄庆. 卡林型金矿研究的发展与现状[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2011, 31(11): 241.
SHI J H, LU J, HUANG Q. Development and current situation of research into Carlin-type gold deposits[J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2011, 31(11): 241.
- [4] 邓江, 鲁佳, 黄庆. 微细浸染型金矿国内外研究现状及进展[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2012, 32(1): 246.
DENG J, NU J, HUANG Q. Present situation and progress of the study on micro-fine disseminated gold in China and abroad[J]. China petroleum and chemical standard and quality, 2011, 32(1): 246.
- [5] 宋鑫. 中国难处理金矿资源及其开发利用技术[J]. 黄金, 2009, 30(7): 46-49.
SONG X. Refractory gold resources and relevant development and utilization technology in China[J]. Gold, 2009, 30(7): 46-49.
- [6] 印万忠, 洪正秀, 马英强, 等. 国内外含砷硫金矿预处理技术的研究进展[J]. 现代矿产, 2011(2): 1-8.
YIN W Z, HONG Z X, MA Y Q, et al. Research progress of pretreatment technology for As, S-bearing gold ore concentrate at home and abroad[J]. Morden mining, 2011(2): 1-8.
- [7] 刘俊壮, 黄万抚. 含高砷金矿浸金工艺研究现状[J]. 现代矿产, 2010(10): 26-29.
LIU J Z, HUANG W F. Progress of gold leaching process from the high arsenic gold ore[J]. Morden mining, 2010(10): 26-29.
- [8] 李大江, 王云, 袁朝新. 含砷难处理精金矿预氧化工艺对比试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(5): 40-42.
LI D J, WANG Y, YUAN C X. Comparative experiment of pre-oxidation processes on arsenic bearing refractory gold ore[J]. Nonferrous metals (Extraction metallurgy), 2012(5): 40-42.
- [9] 胡春融, 杨凤, 杨廻春. 黄金选冶技术现状及发展趋势[J]. 黄金, 2006, 27(7): 29-35.
HU C R, YANG F, YANG H C. Current status and developing tendency of gold extraction[J]. Gold, 2006, 27(7): 29-35.
- [10] 惠学德, 王海东, 梁泽来. 某难处理金矿石提金工艺试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(2): 22.
HUI X D, WANG H D, LANG Z L. Experimental study of gold extraction process for a refractory gold ore[J]. Nonferrous metals (Extraction metallurgy), 2011(2): 22.
- [11] 郑晔. 难处理金矿预处理技术及应用现状[J]. 黄金, 2009, 30(1): 36-41.
ZHENG Y. Pretreatment technique and its application of refractory gold ore[J]. Gold, 2009, 30(1): 36-41.
- [12] 刘汉钊. 国内外难处理金矿压力氧化现状和前景(第一部分)[J]. 国外金属矿选矿黄金, 2006(8): 4-9.
LIU H Z. Present situation and prospect of pressure oxidation for the refractory gold ore in China and abroad (Part I)[J]. Metallic ore dressing abroad, 2006(8): 4-9.

- [13] 刘汉钊. 国内外难处理金矿压力氧化现状和前景(第二部分)[J]. 国外金属矿选矿黄金, 2006(9): 4-8.
LIU H Z. Present situation and prospect of pressure oxidation for the refractory gold ore in China and abroad (Part II) [J]. *Metallic ore dressing abroad*, 2006(9): 4-8.
- [14] 谢营邦, 曾睿, 罗思强, 等. 低品位微细粒金矿浮选精矿的处理工艺研究[J]. 贵金属, 2015, 36(1): 25-28.
XIE Y B, ZENG R, LUO S Q, et al. Processing technology on low-grade microgranular gold mine and its flotation concentrate[J]. *Precious metals*, 2015, 36(1), 25-28.
- [15] MARSDEN J, HOUSE I. The chemistry of gold extraction[M]. Littleton, Colorado, USA: The Society for Mining Metallurgy and Exploration Inc. 2009: 163-171.
- [16] 张文波. 加压氧化浸出工艺的机理研究[J]. 黄金科学技术, 2011, 19(5): 40-43.
ZHANG W B. Research on the mechanism of pressure oxidation leaching process[J]. *Gold science and technology*, 2011, 19(5): 40-43.
- [17] 周衡, 具兹范, 秦晓鹏. 高压釜内闪速氧化提金工艺研究[J]. 黄金, 1995, 16(12): 35-37.
ZHOU H, JU C F, QIN X P. Study on gold extraction by way of flash cyanidation in autoclave[J]. *Gold*, 1995, 16(12): 35-37.
- [18] 段东平, 周蛾, 陈思明, 等. 高砷硫金精矿提金研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(1): 39-41.
DUAN D P, ZHOU E, CHEN S M, et al. Investigation on gold recovery from high arsenic sulfur bearing gold concentrate[J]. *Nonferrous metals (Extractive metallurgy)*, 2012(1): 39-41.
- [19] 李大江. 含砷金精矿的酸性热压氧化预处理试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(8): 28-31.
LI D J. Acidic pressure pre-oxidation of refractory gold ore containing arsenopyrite[J]. *Nonferrous metals (Extractive metallurgy)*, 2011(8): 28-31.
- [20] 周绍奎. 难处理金矿的碱法热压氧化预处理与设备[J]. 中国矿业, 2006, 15(8): 84-86.
ZHOU S L. Pressure leaching oxidation pretreatment and apparatus of refractory gold ores[J]. *China mining magazine*, 2006, 15(8): 84-86.
- [21] 黄怀国. 某难处理金精矿的酸性热压氧化预处理研究[J]. 黄金, 2007, 28(6): 35-38.
HUANG H G. A research on acid hot-pressure oxidation pretreatment of a certain refractory gold concentrate[J]. *Gold*, 2007, 28(6): 35-38.
- [22] 邹来昌, 罗吉束. 某卡林型金矿碱性热压氧化预处理试验研究[J]. 黄金科学技术, 2006, 14(1): 23-28.
ZOU L C, LUO J S. Study on the pretreatment of a kalin gold ores by alkaline hot-press oxidation[J]. *Gold science and technology*, 2006, 14(1): 23-28.
- [23] 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, 14(6): 10-12.
DONG B W, LI L T, LIU S M. Research on the technology of high pressure pre-oxidation-cyanide leaching of gold for a high sulfur high arsenic gold concentrate[J]. *Multipurpose utilization of mineral resources*, 2011, 14(6): 10-12.
- [24] HAAN S B D. A review of the rate of pyrite oxidation in aqueous systems at low temperature[J]. *Earth-science reviews*, 1991, 31(1):1-10.
- [25] 袁水平, 吴智, 黄中省, 等. 硫酸介质中载金黄铁矿的氧化动力学[J]. 稀有金属, 2013, 37(2): 295-301.
ZHONG S P, WU Z, HUANG Z S, et al. Oxidation Kinetics reaction of gold-bearing pyrite in sulphuric acid [J]. *Chinese journal of rare metals*, 2013, 37(2): 295-301.
- [26] ANTONIJEVIC M M, DIMITRIJEVIC M, JANKOVIC Z. Leaching of pyrite with hydrogen peroxide in sulphuric acid[J]. *Hydrometallurgy*, 1997, 46(1/2): 71.
- [27] 赵跃强, 吴争鸣, 刘纬炜, 等. 金矿氰化浸出过程氧气溶解行为研究[J]. 金属矿山, 2005(6): 18-20.
ZHAO Y Q, WU Z M, LIU W W, et al. Study on the behavior of oxygen dissolution in gold ore leaching by cyanidation method[J]. *Metal mine*, 2005(6): 18-20.
- [28] 高光华, 谭志强, 于养信, 等. 气体在电解质水溶液中高压溶解度的研究[J]. 高校化学工程学报, 1999, 13(4): 291-298.
GAO G H, TAN Z Q, YU Y X, et al. Study on gas solubilities in aqueous electrolyte solutions under high pressures[J]. *Journal of chemical engineering of Chinese universities*, 1999, 13(4): 291-298.
- [29] 姚凤仪, 郭德威, 桂明德. 无机化学丛书: 氧、硫、硒分族: 第 5 卷[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 22.
YAO F Y, GUO D W, GUI M D. *Inorganic chemistry series: oxygen, sulfur, selenium subgroup: Vol. 5*[M]. Beijing: Science Press, 2011: 22.