中图分类号: TD982

# 含硫砷金矿一段焙烧脱除硫和砷的热力学研究

张 雁,李 骞<sup>\*</sup>,杨永斌,徐 斌,姜 涛,李鸿炜,刘晓亮 (中南大学 资源加工与生物工程学院,长沙 410083)

摘 要:采用热力学软件 FactSage7.0 研究了某含硫砷金矿焙烧的热力学行为,探索一段焙烧脱除 硫和砷的可行性。模拟结果表明,在较窄的氧含量范围内,可在较宽温度范围内实现硫、砷的一段 焙烧脱除;氧含量过高时,改变焙烧温度不能实现硫和砷的同时脱除;通过添加适量的碳、或通入 一氧化碳,可还原硫酸盐和砷酸盐,提高硫和砷的一段焙烧脱除率。 关键词:有色金属冶金;含硫砷金矿;一段焙烧;硫、砷的脱除;热力学

# Thermodynamic Analysis for Removing Sulfur and Arsenic from a Gold Ore by One-stage Oxidative Roasting

文章编号: 1004-0676(2017)02-0052-06

文献标识码: A

ZHANG Yan, LI Qian<sup>\*</sup>, YANG Yongbin, XU Bin, JIANG Tao, LI Hongwei, LIU Xiaoliang (School of Minerals Processing & Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** The thermodynamic behavior of roasting a sulfur and arsenic-bearing gold ore was simulated by the thermodynamic software FactSage7.0, and the feasibility of removing sulfur and arsenic via one-stage oxidative roasting was explored. The simulation results demonstrate that under an appropriate content of oxygen the simultaneous removal of sulfur and arsenic can be achieved effectively at a relatively wide range of roasting temperature. However, when excessive oxygen is present, it is thermodynamically impossible to eliminate both elements simultaneously and effectively only by adjusting the roasting temperature. Adding carbon or injecting carbon monoxide during roasting will facilitate the removal of sulfur and arsenic, because they will reduce sulfates and arsenates.

**Key words:** nonferrous metallurgy; sulfur and arsenic-bearing gold ore; one-stage oxidative roasting; removal of sulfur and arsenic; thermodynamics

随着金矿资源的日益开发,金的提取已逐步由 易处理矿石转向难处理矿石。含硫砷金矿属于典型 的难浸金矿,而当其中含有碳时,金的浸出更为困 难,主要原因是毒砂、黄铁矿等硫化物对金形成了 包裹,阻碍了金与浸出剂的直接接触,导致金的浸 出率较低,故必须进行预处理以改善浸出效果<sup>[1-4]</sup>。 相比加压氧化法、化学氧化法以及生物氧化法<sup>[5-8]</sup>, 焙烧氧化法<sup>[9-10]</sup>作为传统工艺因其工艺成熟、操作 简单、技术可靠、适应性强等优势,仍然是该类矿 石预处理工艺中最具吸引力的方法。

已有研究表明,砷、硫的脱除气氛不同。一般 在较低温度(300~500℃)、中性气氛下砷的脱除效果 较好。当氧气浓度较高时,三氧化二砷会被氧化成 五氧化二砷,且该物质不挥发易残留在焙砂中,氰 化时部分砷溶解进入溶液中,五价砷的化合物易在 金的表面形成薄膜,从而影响金的浸出。而硫的脱 除一般在较高温度(650℃左右)和强氧化气氛下进 行。因此,对含硫砷金矿,常采用两段氧化焙烧预

收稿日期: 2016-08-30

基金项目:国家自然科学基金(No.51574284)、国家青年自然科学基金(No.51504293)、云南省校科技合作项目(No.2013IB020)。

第一作者:张 雁,女,博士,研究方向:黄金的提取与冶炼。E-mail: zhangyancsu@126.com

<sup>\*</sup>通讯作者: 李 骞, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 贵金属冶金及矿产资源综合利用。E-mail: csuliqian@126.com

处理:第 I 段脱砷使砷以 As<sub>4</sub>O<sub>6</sub> 形式释放,第 II 段 脱硫,使硫以 SO<sub>2</sub> 气体形式释放。这样形成的焙砂 是疏松多孔的铁氧化物颗粒,有利于金与氰化物接 触,提高金的浸出率。但两段焙烧预处理工艺温度 很难控制、易产生过焙烧造成二次包裹,且时间长 (一般为 2~3 h)、能耗大、效率低、成本高<sup>[11-14]</sup>。

张淑会等<sup>[15]</sup>使用 HSC Chemistry 5.0 热力学分 析软件研究表明当 CO 含量较高时, O2 及 CO2 能削 弱体系的强还原性气氛,促进脱砷;当 CO 含量较 低时, O<sub>2</sub>的存在不利于脱砷; 不论在何种气氛中, 提高温度均有利于脱砷。Chakraborti 等<sup>[16]</sup>在 525℃ 下研究了不同 CO<sub>2</sub>/CO 的脱砷,结果表明在纯 CO 气氛下的脱砷率远远大于 CO-CO, 混合气氛, 并且 随着 CO<sub>2</sub>比例的增加, 脱砷率下降; 若以固体 C 为 还原剂, 脱砷率随着配 C 量的增加先上升后下降。 这是因为在过强的还原性气氛条件下, 部分砷能以 单质形式存在,高温下 As 与 Fe 形成固态 FeAs 而 降低脱砷率。杨大锦等[17]对某高砷红土矿焙烧过程 中添加焦粉及在 CO 气氛下焙烧的试验表明, 随着 焦粉添加量的增加或 CO 浓度的提高, 脱砷率均呈 现为先增大后减小的趋势,在焦粉配入量为2%~3% 或 p<sub>CO</sub>=(5~10)×10<sup>3</sup> Pa 时,砷的脱除率大于 98%。由 此可见, C及CO均利于砷的脱除。

鉴于两段焙烧存在的不足,是否可通过调节焙烧过程中的温度和气氛来实现含硫砷金矿中硫和砷的一段焙烧脱除,是一个值得研究的方向。上述脱砷研究提供了一些借鉴,然而,有关一段焙烧脱除含硫砷金矿中硫和砷的研究较少,并且有关 C 和 CO 对硫砷脱除行为影响的研究也不全面。因此,本文采用热力学计算软件 FactSage7.0 中的 Equilib 模块对云南某难处理金精矿一段焙烧硫、砷的脱除行为进行了热力学模拟研究。

## 1 模拟条件

### 1.1 模拟计算原理

含硫砷金矿中硫砷分别主要以黄铁矿和砷黄铁 矿形式存在。黄铁矿和砷黄铁矿氧化焙烧过程中所 发生的反应比较复杂,且欲使硫砷均以气体形式脱 除所需的氧浓度和焙烧温度差异较大,因此工业常 采用两段焙烧处理含砷金矿。两段焙烧存在较多不 足,本文采用热力学计算软件 FactSage7.0 中的 Equilib 模块对一段焙烧脱除硫和砷的可行性进行 了模拟计算。 FactSage 是一种化学热力学计算系统,其应用 范围包括材料科学、火法冶金、湿法冶金、电冶金、 腐蚀、玻璃工业、燃烧、陶瓷、地质等。本文所用 的 Equilib 模块是 FactSage 的 Gibbs 自由能的部分。 其依据 ChemApp 法则<sup>[18]</sup>,使用 Gibbs 自由能最小 原则计算在一定条件下(温度,压强或给定元素或者 化合物含量)反应达到化学平衡时各物相的含量。

本文中的模拟计算是在一个大气压下,含砷金 矿含量一定的条件下,改变体系的氧含量(绝对含氧 量,即假设通入的氧气与黄铁矿和砷黄铁矿完全反 应)或焙烧温度,从而得出氧含量及焙烧温度对硫砷 脱除率及焙烧后焙砂中主要物相平衡含量的影响。 此外,还研究了 C 和 CO 含量对含硫砷金矿焙烧硫 砷脱除行为的影响。

本文中假设金精矿含量为 10 kg。氧含量指焙烧 10 kg 金精矿体系所需的理论氧含量,单位为 mol/10 kg 金精矿,正文中氧含量单位均简称为 mol。同理, C 和 CO 含量即为焙烧 10 kg 金精矿体系所需的理 论 C 或 CO 含量,正文中同样简称为 mol。

## 1.2 物料

本文中进行热力学计算的试验样品为我国云南 某浮选金精矿,其化学成分如表1所示。

#### 表1 金精矿主要化学成分

| Tab.1 Main components of the gold concentrate |          |         |       |                  | /%        |
|---|----------|---------|-------|------------------|-----------|
| Component                                     | Au/(g/t) | $SiO_2$ | CaO   | MgO              | $Al_2O_3$ |
| ω/%   | 18.05    | 27.68   | 4.26  | 2.00             | 6.19      |
| Component                                     | As       | Fe      | S     | K <sub>2</sub> O |           |
| $\omega$ /%                                   | 1.62     | 19.6    | 20.76 | 2.10             | _         |

由表1可知,该金精矿中金含量为18.05 g/t。 其中硫和砷含量分别为20.76%和1.62%。并且该金 精矿中硫和砷分别主要以黄铁矿和砷黄铁矿的形式 存在。根据软件初始条件的设定要求,当金精矿质 量为10 kg时,折算出其中黄铁矿(FeS<sub>2</sub>)含量为30.66 mol、砷黄铁矿(FeAsS)含量为1.49 mol,此条件作 为模拟计算的初始条件。

# 2 计算结果与讨论

## 2.1 氧含量对硫和砷脱除行为的影响

900 K 下, 模拟计算了氧含量对 30.66 mol FeS<sub>2</sub>+1.49 mol FeAsS 体系焙烧硫砷脱除率的影响, 结果如图 1 所示。



Fig.1 Effect of oxygen contents on behavior of removing arsenic and sulfur from the gold concentrate at 900 K

由图 1(a)可知, 硫和砷的脱除与氧含量的相关 性可分为 3 个阶段: 1) 较低氧含量下, 硫就开始脱 除, 并随着氧含量的增加, 脱硫率不断增加。2) 脱 砷率在氧含量超过 80 mol 时, 才开始显著增加; 脱 硫率和脱砷率在氧含量为 86~88 mol 时同时达到最 大值 100%。3) 继续增加氧含量, 脱硫率和脱砷率 均快速降低。因此, 从热力学分析, 当氧浓度适宜 时, 含硫砷金矿可以通过一段焙烧实现硫砷的同时 脱除。结合图 1(a)的分段, 可将图 1(b)分以下 3 个 部分进行分析:

1) 氧含量低于 80 mol。随着氧浓度的增加,黄 铁矿的氧化程度不断增加,首先较低氧浓度下主要 以磁黄铁矿(Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>和 FeS)形式存在,然后随着氧含 量的增加开始生成 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>。砷黄铁矿则只能生成 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>液相,这是由于黄铁矿氧化生成 Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>、FeS 和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的反应比砷黄铁矿氧化为 As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>的反应更 易发生。因此在氧含量不足时黄铁矿会优先氧化, 同时脱除部分硫;而砷黄铁矿仅能生成 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>,导 致砷无法以气体形式脱除。可见,该氧含量下,黄 铁矿和砷黄铁矿均不能得到充分的氧化。

2) 氧含量为80~88 mol。当氧含量为80 mol 时, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 含量达到最大值,此时砷黄铁矿开始氧化生 成 As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>。随着氧含量的增加,As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>和 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>含量 逐渐降低,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>开始生成并且含量不断增加。在 氧浓度为86 mol 时,砷黄铁矿完全氧化生成As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>, 此时脱砷和脱硫率均达到最大值。

3) 氧含量高于 88 mol。当氧含量稍大于 88 mol 时, FeAsO<sub>4</sub>就可大量生成,此后继续增加氧含量会 陆续的生成 FeSO<sub>4</sub>和 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>,这是因为高氧含量 下 FeAsO<sub>4</sub>比 FeSO<sub>4</sub>和 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>更容易生成。可见, 氧含量过高,将生成砷酸盐和硫酸盐导致脱砷和脱 硫率的降低。

综上所述,低氧含量下 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>不易进一步氧化, 而高氧含量下 FeAsO<sub>4</sub> 又极易生成,从而导致适宜 脱砷的氧含量范围较窄。若能控制氧含量在 86~88 mol 范围内,仍可实现硫砷的一步脱除。

#### 2.2 焙烧温度对硫和砷脱除行为的影响

为了揭示焙烧温度对金精矿硫砷脱除的影响, 分别模拟了氧含量为 88 mol (适宜氧含量)和 100 mol (过氧含量)时,焙烧温度对 30.66 mol FeS<sub>2</sub>+1.49 mol FeAsS 体系硫砷脱除率和固体产物含量变化的 影响。

2.2.1 最佳氧含量下焙烧温度的影响

氧含量为 88 mol 时, 硫砷脱除率和固体产物含 量随温度的变化如图 2 所示。

由图 2(a)可知,669 K 时脱硫率开始增加,并 在684 K 时达到最大值; 而脱砷率在678 K 时开始 增加,在735 K 时达到最大值。因此,在氧含量为 88 mol 时,焙烧温度仅需高于735 K 便可实现硫砷 的一步脱除。

由图 2(b)可知, 焙烧温度低于 669 K 时, FeS<sub>2</sub> 氧化生成 FeSO<sub>4</sub> 的反应更易发生,但由于氧含量的 限制,导致仍有部分未氧化的 FeS<sub>2</sub>存在,因此脱硫 率较低。当温度升至 669 K 时, FeS<sub>2</sub>更易氧化生成 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,从而使得硫以 SO<sub>2</sub>形式释放,导致脱硫率的 增加,并在 684 K 时达到最大值。焙烧温度低于 678 K 时,FeAsS 仅能氧化生成 As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>,这是由于 FeS<sub>2</sub> 氧化生成 FeSO<sub>4</sub>需要消耗大量的氧气,因此 FeAsS 氧化氧气不足。但随着温度的增加,由于 FeS<sub>2</sub>更易 氧化生成 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,该反应耗氧较少,使得 FeAsS 能



(a). 硫砷脱除率(Removal rate of sulfur and arsenic); (b). 焙砂矿物组成(Mineral constituent of calcine)

图 2 焙烧温度对金精矿焙烧硫砷脱除行为的影响(适氧, 88 mol O<sub>2</sub>)

Fig.2 Effect of roasting temperatures on behavior of removing arsenic and sulfur from the gold concentrate (suitable O<sub>2</sub> of 88 mol)

够开始氧化生成 As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>,虽然此后会生成少量的 Fe<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>,但在温度高于 735 K 时砷最终均以 As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>气体形式释放。

因此,最佳氧含量(88 mol)下,硫砷脱除所需的

适宜温度范围较宽(>735 K)。

2.2.2 过氧含量下焙烧温度的影响

氧含量为100 mol 时,硫砷脱除率和固体产物 含量随温度的变化如图3所示。



(a). 硫砷脱除率(Removal rate of sulfur and arsenic); (b). 焙砂矿物组成(Mineral constituent of calcine)

图 3 焙烧温度对金精矿硫砷脱除行为的影响(过氧, 100 mol O<sub>2</sub>)

Fig.3 Effect of roasting temperatures on behavior of removing arsenic and sulfur from the gold concentrate (excess O2 of 100 mol)

由图 3(a)可知,在焙烧温度低于 910 K时,脱 硫率仅有 40%左右;当温度超过 910 K时脱硫率才 开始显著增加,并在将近 1000 K时达到最大值。而 在焙烧温度低于 777 K时,脱砷率为 100%;当温 度超过 777 K时,脱砷率显著降低为 0%。因此, 过氧含量(100 mol)下,即使通过改变温度也无法实 现硫砷的一步脱除。

由图 3(b)可知,温度低于 910 K 时,FeS<sub>2</sub> 氧化 主要生成 FeSO<sub>4</sub>和 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>;并且此时氧气含量仍 有剩余,因此 FeAsS 可以氧化生成 As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>,使得脱 砷率较大;但是当温度超过 777 K时,由于体系中 氧含量过剩导致 FeAsS 在高温下更易氧化生成 FeAsO<sub>4</sub>,使得脱砷率降低至 0%。当温度超过 910 K 时,FeS<sub>2</sub>氧化生成 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的反应开始发生;Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>的含量在 910 K 时突然增加,但之后随着温度的增 加,含量逐渐降低,因此脱硫率不断增加。

## **2.3** C和CO含量对硫和砷脱除行为的影响 过氧含量(100 mol)下,无法实现硫、砷的一段

焙烧脱除,而已有研究<sup>[14-16]</sup>表明 C 和 CO 均对脱砷 有利,因此模拟了 900 K、过氧含量下(100 mol),

CO及C含量对硫砷脱除行为的影响,结果如图4、5所示。



(a). 硫砷脱除率(Removal rate of sulfur and arsenic); (b). 焙砂矿物组成(Mineral constituent of calcine)



Fig.4 Effect of CO contents on behavior of removing arsenic and sulfur from the gold concentrate (100 mol O<sub>2</sub>, 900 K)





(a). 硫砷脱除率(Removal rate of sulfur and arsenic); (b). 焙砂矿物组成
 (Mineral constituent of calcine); (c). CO<sub>2</sub> 含量(CO<sub>2</sub> content)

## 图 5 碳含量对金精矿硫砷脱除行为 的影响(100 mol O<sub>2</sub>, 900 K)



由图 4(a)和 5(a)可知,添加少量的 C(12~14 mol) 或 CO(24~29 mol),均可使硫砷的脱除率显著增加, 并且可实现过氧含量下硫、砷的一段焙烧脱除。由 图 4(b)和 5(b)可知,随着 C 和 CO 含量的增加, 焙 砂中 FeSO<sub>4</sub>和 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>逐渐降低,然后 FeAsO<sub>4</sub>和 Fe<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 也逐渐减少,当焙砂中含量仅为 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>时,硫砷脱除率达到最大。这是由于焙烧 过程中通入 CO 时,会发生以下反应:

$$FeSO_4 + 1/2CO(g) = 1/2Fe_2O_3 + 1/2CO_2(g) + SO_2(g)$$
 (1)

 $Fe_2(SO_4)_3 + 3CO(g) = Fe_2O_3 + 3CO_2(g) + 3SO_2(g)$  (2)

 $FeAsO_4+CO(g)=1/4As_4O_6(g)+1/2Fe_2O_3+CO_2(g) \quad (3)$  $Fe_3(AsO_4)_2+1/2CO(g)=$ 

1/4As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>(g)+3/2Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+1/2CO<sub>2</sub>(g) (4) CO 可有效还原过氧焙烧下产生的硫酸盐和砷酸盐,从而显著提高硫、砷的脱除率。而由图 5(c) 可知,添加 C 焙烧过程中,单质碳几乎全氧化为 CO<sub>2</sub>,CO 极其微量,因此 C 对硫、砷脱除的影响 并不是由于其燃烧产生的 CO 的还原作用造成的, 而是 C 对硫酸盐和砷酸盐的直接还原及 C 燃烧消耗 部分氧气造成的,相关反应如下:

 $FeSO_4 + 1/4C = 1/2Fe_2O_3 + 1/4CO_2(g) + SO_2(g)$  (5)

 $FeSO_4 + 3/2C = Fe_2O_3 + 3/2CO_2(g) + 3SO_2(g)$  (6)

FeAsO<sub>4</sub>+1/2C=1/4As<sub>4</sub>O<sub>6</sub>(g)+1/2Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+1/2CO<sub>2</sub>(g) (7) Fe<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>+1/4C=

 $Fe_3(ASO_4)_2 + 1/4C -$ 

 $1/2As_4O_6(g) + 3/2Fe_2O_3 + 1/4CO_2(g)$  (8)

因此,过氧含量下,添加少量的 C 或 CO,均 可显著提高硫、砷的脱除率,从而实现硫、砷一段 焙烧脱除。

### 3 结论

采用计算软件对一段焙烧脱除某金精矿中的硫 和砷的热力学行为进行了模拟,结果表明:

1) 在一个狭窄的氧含量范围(86~88 mol/10 kg 金精矿)内,硫、砷可在较大温度范围内(>735 K)一 步脱除。氧含量过高时,即使通过调整焙烧温度, 也不能实现硫和砷的一步脱除。

2) 氧含量过高时,添加适量碳(12~14 mol/10 kg 金精矿)或一氧化碳 (24~29 mol/10 kg 金精矿),可还原过氧焙烧下产生的硫酸盐和砷酸盐,提高硫、砷的脱除率,可实现过氧含量下硫、砷的一段焙烧 脱除。

上述模拟条件可行性有待进一步的实验验证。

### 参考文献:

 KYLE J H, BREUER P L, BUNNEY K G, et al. Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing. Part I: Mineralogy, aqueous chemistry and toxicity[J]. Hydrometallurgy, 2011, 107(3/4): 91-100.

- [2] KYLE J H, BREUER P L, BUNNEY K G, et al. Review of trace toxic elements (Pb, Cd, Hg, As, Sb, Bi, Se, Te) and their deportment in gold processing. Part II: Deportment in gold ore processing by cyanidation[J]. Hydrometallurgy, 2012(111/112): 10-21.
- [3] TAN H, FENG D, VAN DEVENTER J S J, et al. Effect of contaminant carbonaceous matter on the sorption of gold by pyrite[J]. International journal of mineral processing, 2005, 77(3): 123-138.
- [4] 唐道文,高鹏,陈亮,等. 焙烧预处理过程中硫的转化 对浸金的影响[J]. 贵金属, 2016, 37(4): 63-65.
   TANG D W, GAO P, CHEN L, et al. The influence of desulfurization on gold leaching in the process of roasting pretreatment[J]. Precious metals, 2016, 37(4): 63-65.
- [5] BROOY S R L, LINGE H G, WALKER G Review of gold extraction from ores[J]. Minerals engineering, 1994, 7(10): 1213-1241.
- [6] FRASER K S, WALTON R H, WELLS J A. Processing of refractory gold ores[J]. Minerals engineering, 1991, 4(7/11): 1029-1041.
- [7] KOMNITSAS C, POOLEY F D. Mineralogical characteristics and treatment of refractory gold ores[J]. Minerals engineering, 1989, 2(4): 449-457.
- [8] 殷书岩,杨洪英. 难处理金矿加压氧化预处理技术及 发展[J]. 贵金属, 2008, 29(1): 56-59.
  YIN S Y, YANG H Y. Technology and progress in high pressure oxidation for refractory gold ores [J]. Precious metals, 2008, 29(1): 56-59.
- [9] DE MICHELIS I, OLIVIERI A, UBALDINI S, et al. Roasting and chlorine leaching of gold-bearing refractory concentrate: experimental and process analysis[J]. International journal of mining science and technology, 2013, 23(5): 709-715.
- [10] THOMAS K G, COLE A P. Roasting developmentsespecially oxygenated roasting[J]. Developments in mineral processing, 2005, 15: 403-432.
- [11] 吴海国. 含砷锑硫碳金精矿提金工艺研究[J]. 湖南有 色金属, 2003(3): 13-15.
  WU H G. Study on gold leaching from arsenic sulfur stibium carbon gold concentrate[J]. Hunan nonferrous metals, 2003(3): 13-15.