

## 采用硫化砷渣制备三氧化二砷工艺

郑雅杰, 刘万宇, 白 猛, 张传福

(中南大学 冶金科学与工程学院, 湖南 长沙, 410083)

**摘 要:** 硫化砷渣经氢氧化钠溶液浸出、空气氧化脱硫和  $\text{SO}_2$  还原制备得到  $\text{As}_2\text{O}_3$ 。研究表明: 当  $\text{NaOH}$  与  $\text{As}_2\text{S}_3$  物质的量比为 7.2:1, 固体质量与液体体积之比为 1:6, 反应温度为  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , 反应时间为 2 h, 转速为 300 r/min 时, 用氢氧化钠溶液浸取硫化砷渣, 其砷的浸取率达到 95.90%; 过滤后在碱浸液中通空气脱除碱浸液中  $\text{Na}_3\text{AsS}_3$  中的硫; 当反应时间为 10 h, 反应温度为  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , 空气流量为 120 L/h, 对苯二酚和高锰酸钾质量浓度分别为 1.5 g/L 和 0.5 g/L, 木质素磺酸钠质量浓度为 0.13 g/L 时, 脱硫率可达到 96.00%; 当 pH 值为 0, 反应时间为 1 h, 反应温度为  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , 砷质量浓度为 60.00 g/L 时通入  $\text{SO}_2$  还原溶液中  $\text{AsO}_4^{3-}$ , 产物中  $\text{As}_2\text{O}_3$  含量和砷回收率分别达到 92.14% 和 95.21%; 稀硫酸洗涤后,  $\text{As}_2\text{O}_3$  纯度达 95.14%。

**关键词:** 硫化砷渣; 碱浸; 氧化; 还原; 三氧化二砷

中图分类号: TF09

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)06-1157-07

## Preparation of arsenic trioxide from arsenic sulfide slag

ZHENG Ya-jie, LIU Wan-yu, BAI Meng, ZHANG Chuan-fu

(School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Arsenic trioxide was prepared by leaching arsenic sulfide slag in  $\text{NaOH}$  solution, oxidating with air and reducing with sulfur dioxide. The results show that arsenic sulfide slag is leached by sodium hydroxide solution and the leaching rate of arsenic is 95.90% when the molar ratio of  $\text{NaOH}/\text{As}_2\text{S}_3$  is 7.2:1, the ratio of mass of solid to volume of liquid is 1:6, reaction temperature is  $90\text{ }^\circ\text{C}$ , reaction time is 2 h, and agitation speed is 300 r/min. After filtration, the sulphur of  $\text{Na}_3\text{AsS}_3$  is removed by blowing air into the alkali leaching solution. The removal rate of sulphur is 96.00%, when reaction time is 10 h, reaction temperature is  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , ventilation flux is 120 L/h, hydroquinone is 1.5 g/L, potassium permanganate is 0.5 g/L and lignin is 0.13 g/L. When pH value is 0, reaction time is 1 h, reaction temperature is  $30\text{ }^\circ\text{C}$ , the concentration of As is 60 g/L, arsenic trioxide content of the product and recycling rate of As are 92.14% and 95.21%, respectively, after  $\text{AsO}_4^{3-}$  in the solution is reduced by  $\text{SO}_2$ . After washing in dilute sulphuric acid, the purity of  $\text{As}_2\text{O}_3$  is 95.14%.

**Key words:** arsenic sulfide slag; alkali leaching; oxidation; reduction; arsenic trioxide

$\text{As}_2\text{O}_3$  是一种剧毒物质, 0.1 g 可致人死亡, 人长期接触还可致癌<sup>[1]</sup>。 $\text{As}_2\text{O}_3$  可用作玻璃工业的澄清脱色剂<sup>[2]</sup>, 生产高纯砷, 在医药、制革、印染等行业中也得到一定应用<sup>[3-4]</sup>。三氧化二砷的制备方法有火法和湿

法。火法包括焙烧法、熔炼法和蒸馏法<sup>[5-6]</sup>, 对操作人员健康危害大, 能耗高, 现已基本被淘汰。湿法主要有硫酸铜置换法、加压氧化还原法<sup>[7]</sup>和硫酸铁法<sup>[8-9]</sup>, 硫酸铜置换法的铜粉消耗量大, 加压氧化还原法对设

收稿日期: 2008-01-10; 修回日期: 2008-03-17

基金项目: 广东省创新基金资助项目(200501045)

通信作者: 郑雅杰(1959-), 男, 湖南常德人, 教授, 从事湿法冶金、水污染控制、资源综合利用; 电话: 0731-8836285; E-mail: zzyyjj01@yahoo.com.cn

备要求较高,硫酸铁法工艺复杂。碱浸液氧化还原法是碱性浸出硫化砷渣,使铜、铋与砷分离,铜和铋得到富集,在碱性浸出液中通空气得到单质硫,再通  $\text{SO}_2$  还原得到三氧化二砷。该方法生产安全、工艺简单、无污染,能耗较低。本文作者研究氢氧化钠溶液浸出硫化砷渣、空气氧化脱硫和  $\text{SO}_2$  还原工艺制备  $\text{As}_2\text{O}_3$ 。

## 1 实验

### 1.1 实验步骤

实验取某铜冶炼厂硫化钠沉淀含砷废水得到的硫化砷渣,其成分如表 1 所示。

表 1 硫化砷渣化学成分

| As    | Cu    | Bi   | S     | Pb   | Zn   | Ni   | Fe   |
|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|
| 18.17 | 10.90 | 1.85 | 19.25 | 0.22 | 0.21 | 0.06 | 0.32 |

使用氢氧化钠溶液浸取硫化砷渣,经过过滤、洗涤得到碱浸渣和碱浸液。在碱浸液中通入空气氧化脱硫后过滤,在滤液中通入  $\text{SO}_2$  气体还原,经加热蒸发、浓缩至还原液中砷为  $60 \text{ g/L}$  后过滤、洗涤、烘干得到三氧化二砷粉末。其工艺流程如图 1 所示。

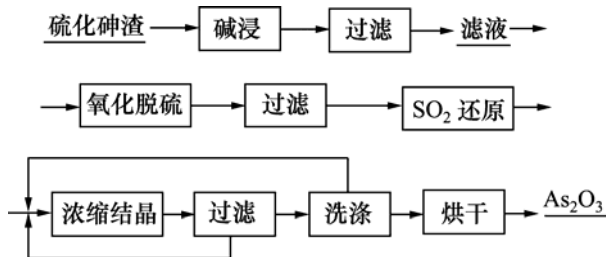


图 1 硫化砷渣制备三氧化二砷的工艺流程

Fig.1 Process flow of preparation of arsenic trioxide from arsenic sulfide slag

### 1.2 分析与检测

实验采用溴酸钾滴定法<sup>[10]</sup>测定溶液中砷和固体产物中的砷含量。

根据化学反应物质的量关系,按如下公式计算脱硫率( $\alpha$ ):

$$\alpha = \frac{2n_2 - n_1}{n_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $n_1$  为碱浸液中总砷物质的量, mol;  $n_2$  为在氧化

脱硫碱溶液中加入浓硫酸过滤去除  $\text{As}_2\text{S}_3$  后,溶液中总砷物质的量, mol;  $n_1 - n_2$  为未氧化脱硫的  $\text{Na}_3\text{AsS}_3$  的物质的量。

## 2 结果与讨论

### 2.1 硫化砷渣的碱性浸取

实验取  $1\,000 \text{ g}$  硫化砷渣,采用氢氧化钠溶液浸取。当  $\text{NaOH}$  与  $\text{As}_2\text{S}_3$  物质的量比为  $7.2:1$ , 固体质量与液体体积比为  $1:6$ , 反应温度为  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , 反应时间为  $2 \text{ h}$ , 转速为  $300 \text{ r/min}$  时, 砷浸出率为  $95.90\%$ 。浸取所得碱浸渣和碱浸液成分如表 2 和表 3 所示, 其中, 碱浸液 pH 值为  $7.8$ 。

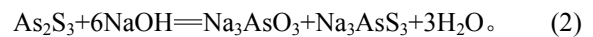
表 2 碱浸渣化学成分

| As    | Cu    | Bi    | S     | Pb   | Zn   | Na   | Fe   |
|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|
| 2.616 | 50.00 | 10.63 | 24.42 | 0.61 | 0.64 | 0.95 | 1.22 |

表 3 硫化砷渣的碱浸液主要元素含量

| As    | Cu    | S     |
|-------|-------|-------|
| 20.25 | 0.012 | 10.59 |

由表 2 可知, 硫化砷渣经过碱性浸取,  $\text{Cu}$  和  $\text{Bi}$  等与  $\text{As}$  得到有效分离。 $\text{Cu}$  和  $\text{Bi}$  等得到有效回收。由表 3 可知,  $\text{As}$  在碱浸液中质量浓度达到  $20 \text{ g/L}$ , 可提取回收砷。硫化砷渣在  $\text{NaOH}$  溶液中发生如下反应:



而硫化砷渣中  $\text{CuS}$ 、 $\text{Bi}_2\text{S}_3$  不与  $\text{NaOH}$  反应。因此,  $\text{Cu}$ 、 $\text{Bi}$  得到分离和富集。

### 2.2 碱浸液氧化脱硫

#### 2.2.1 反应时间对脱硫率的影响

向  $400 \text{ mL}$  碱浸液中以  $80 \text{ L/h}$  的流量通空气, 当对苯二酚质量浓度为  $1.5 \text{ g/L}$ , 反应温度为  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  时, 反应时间对脱硫率的影响如图 2 所示。

由图 2 可知, 脱硫率随氧化时间增加而增加,  $10 \text{ h}$  时达到  $84.09\%$ ; 随着氧化时间继续增加, 脱硫率变化不大。在碱浸液中通入空气, 发生如下反应<sup>[11]</sup>:

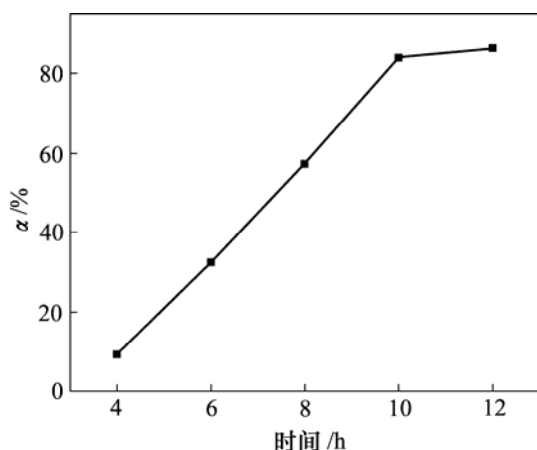
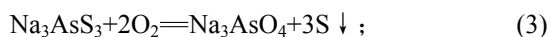


图2 反应时间对脱硫率的影响

Fig.2 Influence of reaction time on removing rate of sulphur



反应(3)为气液反应, 30 °C时氧气在溶液中的溶解度仅为水中空气溶解度的33.60%<sup>[12]</sup>, 扩散速率小<sup>[13]</sup>, 氧化速率慢。10 h后, 溶液中生成的硫易结成膜, 阻碍氧化, 因此, 反应时间对脱硫率影响不大。

### 2.2.2 反应温度对脱硫率的影响

当空气流量为 80 L/h, 对苯二酚质量浓度为 1.5 g/L, 反应时间 10 h 时, 反应温度对脱硫率的影响如图 3 所示。

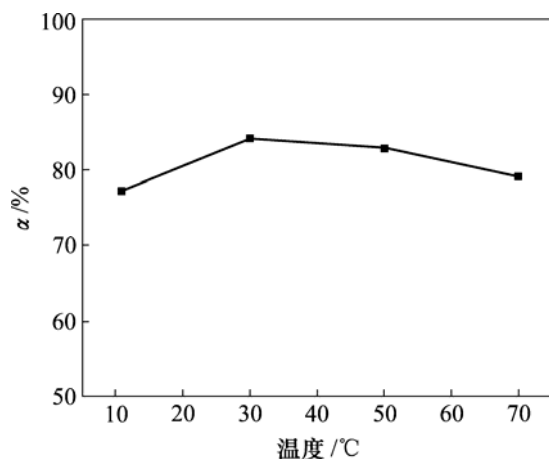
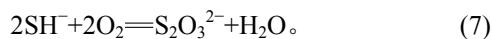
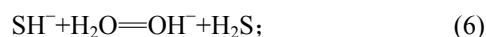


图3 反应温度对脱硫率的影响

Fig.3 Influence of reaction temperature on removing rate of sulphur

由图 3 可知, 脱硫率随反应温度的升高先增加后降低。30 °C时最大, 为 84.09%。因此, 氧化脱硫的适宜温度为 30 °C。当反应温度高于 50 °C时, 脱硫率

降低, 这是因为反应温度升高时, 发生下列副反应<sup>[14]</sup>:



### 2.2.3 空气流量对脱硫率的影响

当对苯二酚质量浓度为 1.5 g/L, 反应时间 10 h, 反应温度为 30 °C时, 空气流量对脱硫率的影响如图 4 所示。

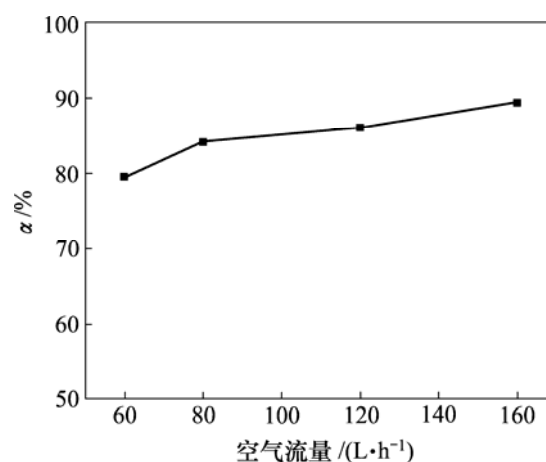


图4 空气流量对脱硫率的影响

Fig.4 Influence of air flux on removing rate of sulphur

由图 4 可知, 脱硫率随空气流量的增大而增加, 当空气流量为 160 L/h 时, 脱硫率达 89.33%, 但增幅不明显。因此, 空气流量为 120 L/h 比较合适, 其脱硫率为 85.96%。

### 2.2.4 对苯二酚用量对脱硫率的影响

当空气流量为 120 L/h, 反应时间 10 h, 反应温度为 30 °C时, 对苯二酚用量对脱硫率的影响如图 5 所示。

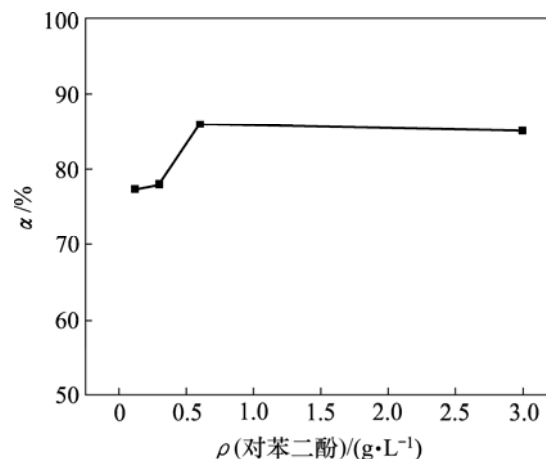


图5 对苯二酚用量对脱硫率的影响

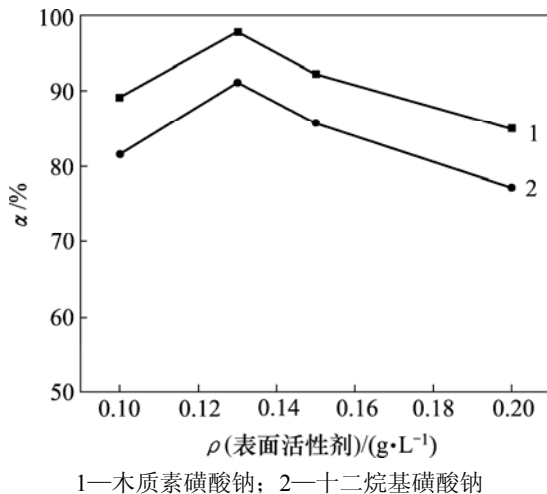
Fig.5 Influence of hydroquinone on removing rate of sulphur

由图 5 可知, 脱硫率随对苯二酚质量浓度的增加而增加, 对苯二酚质量浓度达 1.5 g/L 时, 继续添加对苯二酚, 脱硫率几乎不变。对苯二酚的载氧作用与质量浓度有一定关系<sup>[15]</sup>, 使用量较少时, 载氧作用明显; 过量的对苯二酚在一定条件下被空气氧化为醌, 产生少量双氧水<sup>[14]</sup>, 可将少量  $S^{2-}$  氧化为  $SO_4^{2-}$ , 降低脱硫率。

为进一步提高脱硫率, 使用 1.5 g/L 对苯二酚和 0.5 g/L 高锰酸钾的混合催化剂<sup>[15]</sup>, 脱硫率增加明显, 可达 95%, 高锰酸钾起到一定的氧化作用。

### 2.2.5 表面活性剂实验

当空气流量为 120 L/h, 反应时间 10 h, 反应温度为 30 °C, 对苯二酚质量浓度为 1.5 g/L, 高锰酸钾用量为 0.5 g/L 时, 表面活性剂对脱硫率的影响如图 6 所示。



1—木质素磺酸钠; 2—十二烷基磺酸钠

图 6 不同表面活性剂及浓度对脱硫率的影响

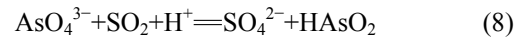
Fig.6 Influence of surfactants and their concentration on removing rate of sulphur

由图 6 可知, 表面活性剂浓度增加, 脱硫率先增后减, 0.13 g/L 时, 脱硫率最大, 十二烷基磺酸钠为 91.07%, 木质素磺酸钠为 97.67%, 木质素磺酸钠的亲硫效果更好。表面活性剂亲油基会富集硫, 破坏硫膜, 增加与氧的接触, 提高脱硫率。当表面活性剂过量时, 在溶液中聚团<sup>[13, 16-18]</sup>, 降低反应速率。

上述实验表明, 碱浸液氧化脱硫的适宜条件是反应时间为 10 h, 反应温度为 30 °C, 空气流量为 120 L/h, 催化剂为 1.5 g/L 的对苯二酚和 0.5 g/L 的高锰酸钾, 表面活性剂木质素磺酸钠为 0.13 g/L。

### 2.3 脱硫后溶液还原

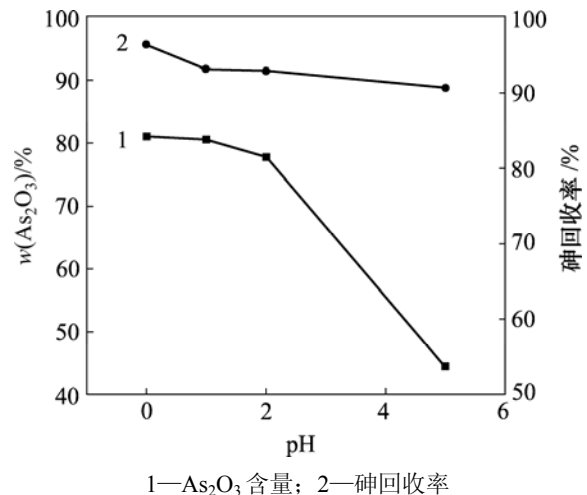
在脱硫后溶液中通入  $SO_2$ , 主要反应为:



$HAsO_2$  溶解度较小, 易脱水析出  $As_2O_3$ 。

#### 2.3.1 pH 值对产物中 $As_2O_3$ 含量和砷回收率的影响

在 200 mL 脱硫后溶液中通入  $SO_2$ , 当反应时间为 40 min, 反应温度为 30 °C, 反应溶液中砷浓度为 20.25 g/L 时, pH 值对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响如图 7 所示。



1— $As_2O_3$  含量; 2—砷回收率

图 7 pH 值对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响

Fig.7 Influence of pH on  $As_2O_3$  content of product and recycling rate of As

由图 7 可知, 产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率随着 pH 值升高而降低。pH 值为 0 时产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率最大, 分别为 81.02% 和 96.35%。 $HAsO_2$  的溶解度随 pH 值的减小而减小<sup>[19-20]</sup>, pH 值降低有利于产生的  $HAsO_2$  析出。因此, pH 值越低, 产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率越高。

#### 2.3.2 反应时间对产物中 $As_2O_3$ 含量和砷回收率的影响

当 pH 值为 0, 反应温度为 30 °C, 反应物砷质量浓度为 20.25 g/L 时, 反应时间对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响如图 8 所示。

由图 8 可知, 随着反应时间的延长, 产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率先增加后减少。当反应时间为 1 h 时, 产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率达到最大, 分别为 89.67% 和 96.62%。溶液中随着反应时间的延长, 杂质析出越多, 导致产物中  $As_2O_3$  含量降低, 砷回收率下降。

#### 2.3.3 反应温度对产物中 $As_2O_3$ 含量和砷回收率的影响

当 pH 值为 0, 反应时间为 1 h, 砷质量浓度为 20.25

g/L 时, 反应温度对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响如图 9 所示。

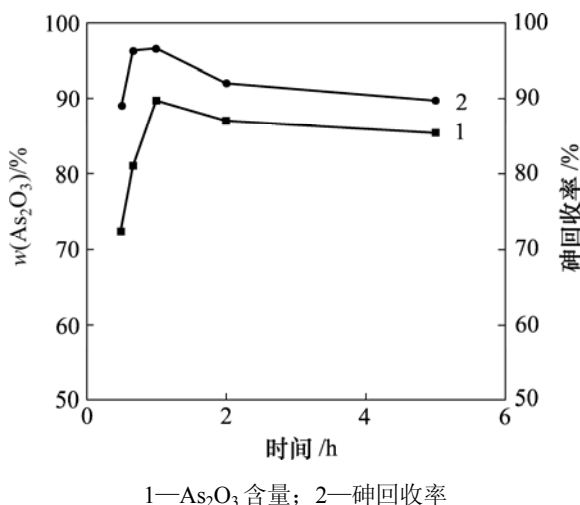


图 8 反应时间对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响

Fig.8 Influence of reaction time on  $As_2O_3$  content of product and recycling rate of As

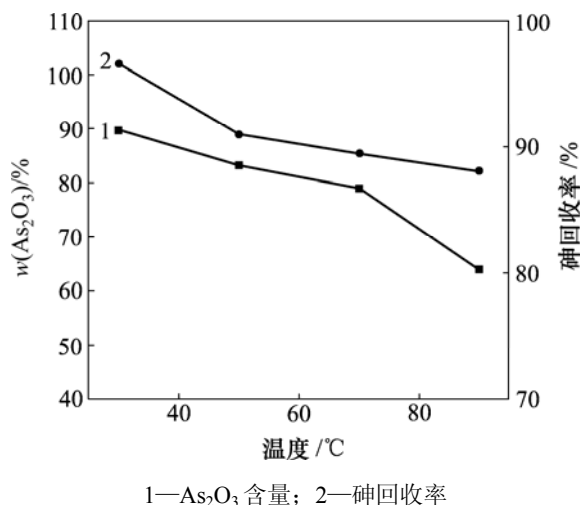


图 9 反应温度对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响

Fig.9 Influence of reaction temperature on  $As_2O_3$  content of product and recycling rate of As

由图 9 可知, 30 °C 时产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率最高, 分别为 89.67% 和 96.62%。随着反应温度的升高, 产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率逐渐降低。反应 (8) 是放热反应<sup>[21]</sup>, 反应温度的升高不利于反应产物的生成。

### 2.3.4 砷浓度对产物中 $As_2O_3$ 含量和砷回收率的影响

当 pH 值为 0, 反应时间为 1 h, 反应温度为 30 °C 时, 砷浓度对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响如图 10 所示。

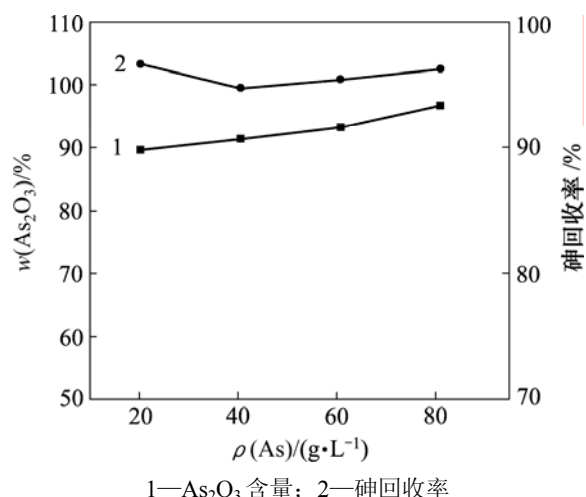


图 10 砷浓度对产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率的影响

Fig.10 Influence of As concentration on  $As_2O_3$  content of product and recycling rate of As

由图 10 可知, 随着反应物砷浓度的增加, 产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率都逐渐升高, 当砷质量浓度为 81.00 g/L 时, 产物中  $As_2O_3$  含量和砷回收率较高, 分别为 96.64% 和 96.24%, 此时, 蒸发的能耗较高。HAsO<sub>2</sub> 溶解度低<sup>[22]</sup>; 当砷质量浓度为 60.00 g/L 时, 还原过程中会自动析出白色沉淀, 纯度较高, 能耗较低。

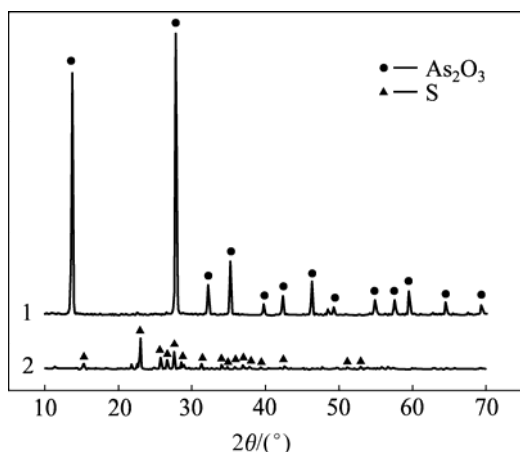
综上所述, 氧化后液通 SO<sub>2</sub> 还原的适当条件是 pH 值为 0, 反应时间为 1 h, 反应温度为 30 °C, 砷质量浓度为 60.00 g/L。

根据上述氧化脱硫以及还原的适宜条件进行放大实验。实验取碱浸液 1 L 进行氧化脱硫, 再经浓缩、还原、过滤、洗涤、烘干制备得 27.42 g  $As_2O_3$ 。氧化脱硫得到的硫磺和还原产物三氧化二砷成分如表 4 所示, 其 X 射线衍射实验结果如图 11 所示。

由图 11 可知, 氧化脱硫产物为单质硫, 还原产物为  $As_2O_3$ 。根据表 4 可知, 产物中  $As_2O_3$  含量为

表 4 硫磺和三氧化二砷成分

| Table 4 Components of sulphur and arsenic trioxide w/% |           |       |       |      |
|--|-----------|-------|-------|------|
| 产物   | $As_2O_3$ | S     | O     | Na   |
| 硫磺   | 5.85      | 78.01 | 11.58 | 0.83 |
| 三氧化二砷  | 92.14     | 14.51 | —     | 4.89 |
| 产物   | Mn        | Fe    | K     | Si   |
| 硫磺   | 4.56      | 0.08  | 0.03  | 0.08 |
| 三氧化二砷  | —         | 0.03  | 0.01  | 0.41 |



1—还原产物; 2—氧化产物

图 11 氧化产物和还原产物的 X 射线衍射图

Fig.11 XRD patterns of oxidized product and reduced product

92.14%，砷回收率为 95.21%。经稀硫酸洗涤后， $\text{As}_2\text{O}_3$  纯度达 95.14%。

### 3 结 论

a. 在 NaOH 与  $\text{As}_2\text{S}_3$  物质的量比为 7.2:1，固体质量与液体体积之比为 1:6，反应温度为 90 °C，反应时间为 2 h，转速为 300 r/min 的条件下，氢氧化钠溶液浸取硫化砷渣，砷浸取率达到 95.90%，碱浸渣中 Cu 和 Bi 的质量分数分别为 50.00%和 10.63%。

b. 在反应时间为 10 h，反应温度为 30 °C，空气流量为 120 L/h，对苯二酚和高锰酸钾浓度分别为 1.5 g/L 和 0.5 g/L，木质素磺酸钠质量浓度为 0.13 g/L 的条件下，脱硫率可达到 96.00%。

c. 在 pH 值为 0，反应时间为 1 h，反应温度为 30 °C，溶液中砷浓度为 60 g/L 的适宜条件下，氧化后液通  $\text{SO}_2$ ，还原产物经稀硫酸洗涤，其中  $\text{As}_2\text{O}_3$  含量和砷回收率分别可达 95.14%和 95.21%。

d. X 射线衍射证实氧化脱硫产物为硫磺， $\text{SO}_2$  还原产物为  $\text{As}_2\text{O}_3$ 。

#### 参考文献:

[1] Monhemius A J, Swash P M. Removing and stabilizing arsenic from copper refining circuits by hydrothermal processing[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, 51(9): 30–33.  
[2] 刘小波, 章 礼, 杨名江. 含砷烟尘做玻璃澄清剂的研究[J].

环境科学研究, 1995, 8(3): 46–47.

LIU Xiao-bo, ZHANG Li, YANG Ming-jiang. Use of arsenic smoke as the fining agent of glass[J]. Research of Environmental Sciences, 1995, 8(3): 46–47.

[3] 廖祥文. 含砷工业废水处理技术现状及展望[J]. 矿产综合利用, 2006, 8(4): 27–30.

LIAO Xiang-wen. Present situation and prospects of technology for treating As-containing industrial wastewater[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2006, 8(4): 27–30.

[4] 杨天足, 刘伟锋, 赖琼林, 等. 空气氧化法生产焦锑酸钠的氧化后液中砷和锑的脱除[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(4): 576–581.

YANG Tian-zu, LIU Wei-feng, LAI Qiong-lin, et al. Removal of arsenic and antimony from oxidated solution of sodium thioantimonite production by air oxidation[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(4): 576–581.

[5] 吴俊升, 陆跃华, 周杨霖, 等. 高砷铅阳极泥水蒸焙烧脱砷实验研究[J]. 贵金属, 2003, 24(4): 26–31.

WU Jun-sheng, LU Yue-hua, ZHOU Yang-ji, et al. Experimental study on arsenic removal from arsenic-rich lead anode slime by volatilization roasting in steam condition[J]. Precious Metals, 2003, 24(4): 26–31.

[6] 仇勇海, 卢炳强, 陈白珍, 等. 无污染砷碱渣处理技术工业试验[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(2): 234–237.

QIU Yong-hai, LU Bing-qiang, CHEN Bai-zhen, et al. Commercial scale test of anti-pollution control technique for slag of arsenic and soda[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(2): 234–237.

[7] Fernandez M A, Segarra M, Espiell F. Selective leaching of arsenic and antimony contained in the anode slimes from copper refining[J]. Hydrometallurgy, 1996, 41(2/3): 255–267.

[8] 覃用宁, 黎光旺, 何 辉. 含砷烟尘湿法提取白砷新工艺[J]. 有色冶炼, 2003, 32(3): 37–40.

QIN Yong-ning, LI Guang-wang, HE Hui. New wet process for extracting white arsenic from arsenic-bearing flue dust[J]. Non-ferrous Smelting, 2003, 32(3): 37–40.

[9] 董四禄. 湿法处理硫化砷渣研究[J]. 硫酸工业, 1994(5): 3–8.

DONG Si-lu. Research on treatment of arsenic sulphide cinder by a wet process[J]. Sulphuric Acid Industry, 1994(5): 3–8.

[10] 王维利, 车广华, 张英杰, 等. 氧化还原滴定法测定污染水中砷和锑[J]. 中国卫生检验杂志, 2001, 11(5): 580.

WANG Wei-li, CHE Guang-hua, ZHANG Ying-jie, et al. Determination of arsenic and antimony in the polluted water by oxidation-reduction titration[J]. Chinese Journal of Health Laboratory Technology, 2001, 11(5): 580.

[11] 金哲男, 蒋开喜, 魏绪钧, 等. 高温  $\text{As-S-H}_2\text{O}$  系电位-pH 图[J]. 矿冶, 1999, 12, 8(4): 45–50.

- JIN Zhe-nan, JIANG Kai-xi, WEI Xu-jun, et al. Potential-pH diagrams of As-S-H<sub>2</sub>O system at high temperature[J]. *Mining & Metallurgy*, 1999, 12, 8(4): 45-50.
- [12] 顾庆超, 楼书聪, 戴庆平, 等. 化学用表[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1979.
- GU Qing-chao, LOU Shu-cong, DAI Qing-ping, et al. *Chemical manual*[M]. Jiangsu: Jiangsu Science Technology Press, 1979.
- [13] 郭瑾龙, 程文, 周孝德, 等. 小气泡扩散曝气氧传质速率研究[J]. *西安理工大学学报*, 1999, 15(4): 86-90.
- GUO Jin-long, CHENG Wen, ZHOU Xiao-de, et al. Research on the oxygen transfer rate of fine bubble diffused aeration in clean water[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 1999, 15(4): 86-90.
- [14] 寇建军, 朱昌洛. 硫化砷矿合理利用的湿法氧化新工艺[J]. *矿产综合利用*, 2001, 6(3): 26-29.
- KOU Jian-jun, ZHU Chang-luo. A new technology of aqueous oxidation for rational utilization of arsenic sulfide ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2001, 6(3): 26-29.
- [15] 施南庚, 贺小华. 几种工艺体系中离心传质机的传质性能[J]. *南京化工大学学报*, 1999, 21(1): 39-43.
- SHI Nan-geng, HE Xiao-hua. Mass transfer property of centrifugal mass transfer machine in some processes[J]. *Journal of Nanjing University of Chemical Technology*, 1999, 21(1): 39-43.
- [16] 毕宝宽. 湿式氧化法脱硫过程副反应及腐蚀问题[J]. *小氮肥*, 2006(11): 19-21.
- BI Bao-kuan. The side reactions and corroding problem in the process of sulphur removing by hydro-oxidation[J]. *Small Nitrogenous Fertilizer Plant*, 2006(11): 19-21.
- [17] 孙天友, 王吉坤, 杨大锦, 等. 硫化锌精矿加压氧化酸浸动力学研究[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2006(2): 21-23.
- SUN Tian-you, WANG Ji-kun, YANG Da-jin, et al. Study on oxidative leaching kinetics of sphalerite in acid solution under pressure[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2006(2): 21-23.
- [18] 赵国玺, 朱步瑶. 表面活性剂作用原理[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2003.
- ZHAO Bao-xi, ZHU Bu-yao. *Function principle of surfactant*[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2003.
- [19] Rusen M J. *Surfactants and interfacial phenomena*[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1989.
- [20] Chukhlantsev V G. Solubility products of arsenates[J]. *Journal of Inorganic Chemistry (USSR)*, 1956(1): 1975-1982.
- [21] 孙世连, 赵文, 金思毅. 可逆放热反应过程流程结构的确定[J]. *化学工程*, 2006, 34(1): 24-27.
- SUN Shi-lian, ZHAO Wen, JIN Si-yi. Optimal design of reactor networks in reversible exothermic reaction system[J]. *Chemical Engineering*, 2006, 34(1): 24-27.
- [22] 刘昌勇. 贵溪冶炼厂亚砷酸生产工艺[J]. *有色冶炼*, 1982(2): 8-10.
- LIU Chang-yong. Arsenous acid production in Guixi smelter[J]. *Non-Ferrous Smelting*, 1982(2): 8-10.