

## 含锑金矿回收方法研究现状

杨子轩, 谢 贤, 童 雄, 孟 奇, 侯 凯, 吕昊子

(省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室,

昆明理工大学国土资源工程学院, 云南省金属矿尾矿资源二次利用工程研究中心, 云南 昆明 650093)

**摘要:**本文简要介绍了我国含锑金矿分布与资源特点, 针对其回收存在难点与问题, 评述了我国含锑金矿几种主要回收方法, 包括浮选法、焙烧法、生物法、化学碱浸法、强化浸出法等, 指出了各回收方法优缺点及适用范围, 并提出了今后研究重点在于强化浸出及联合应用方面。

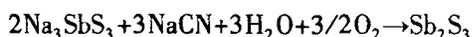
**关键词:**含锑金矿; 焙烧; 化学碱浸; 生物氧化; 强化浸出

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2015.03.005

中图分类号:TD952 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2015)03-0020-04

### 1 概述

含锑金矿是我国黄金资源的重要组成部分, 主要分布于我国的湖南、江西、甘肃、青海等地区<sup>[1]</sup>。锑多形成于酸性岩浆岩的高、中、低温热液矿床, 常与砷、硫等元素伴生, 因而, 含锑金矿显著特点为金呈微细粒包裹或浸染于辉锑矿、毒砂、黄铁矿等硫化物中, 这就导致常规磨矿方式难实现金的有效暴露。此外, 氰化浸金过程中辉锑矿会发生耗氰耗氧反应:



而且 NaCNS 等产物极易二次覆盖在已暴露的金矿物表面, 阻碍金与  $\text{O}_2$ 、 $\text{CN}^-$  接触, 导致金浸出指标变差<sup>[2]</sup>。因此, 如何消除这些不利因素的影响成为含锑金矿高效回收的关键。

### 2 含锑金矿回收方法

由于含锑金矿中金的微细粒嵌布及辉锑矿耗氰耗氧的原因, 常规直接氰化浸出指标均不高, 因而, 常采用浮选、预处理、化浸出等方式进行回收。

#### 2.1 浮选法

浮选法多用于处理锑矿物不是金的载体矿物类型的矿石, 其实质是锑矿物与硫、砷等载金矿物的浮

选分离。浮选法可分为混合浮选再分离和优先浮选两种, 混合浮选工艺流程相对简单, 但已上浮的硫、砷等载金矿物很难被抑制, 会导致部分硫、砷等矿物混入锑精矿中, 影响锑精矿质量, 同时也造成金损失在锑精矿中。周洪源等进行了某含锑金矿浮选试验, 原矿含金 4.8 g/t, 锑 0.51%, 金在辉锑矿中分布率很小仅为 0.15%, 毒砂中分布率为 80.06%, 采用锑金混浮再分离工艺分别回收锑和金, 锑金分离环节为了获得合格锑精矿, 同时减少锑精矿中金的夹带, 砷、锑分离过程中添加 KM8 作为抑砷试剂, KM8 属强氧化性有机小分子, 可选择性作用于毒砂表面, 使其氧化成氢氧化铁亲水膜而受到抑制, 当 KM8 用量为 600 g/t 时, 锑精矿品位为 52.10%, 回收率 82.33%, 金品位 5.4 g/t, 金回收率 0.89%<sup>[3]</sup>。

优先浮选原则上可分为优先浮砷硫等载金矿物与优先浮锑两种工艺, 但由于优先浮砷硫工艺中会有部分可浮性较好的锑矿物共同上浮, 导致锑在金精矿中损失较大, 同时下一步浮锑时又需加入大量酸以降低 pH 值, 使成本加大, 对环境也不友好。因而, 优先选锑流程较为常见, 其关键为锑矿物的高效捕收与砷硫等载金矿物的有效抑制。周菁等对某锑金矿进行浮选试验, 原矿金品位 2.90 g/t, 锑 0.70%, 砷 0.69%, 金在毒砂、黄铁矿、辉锑矿中分布率分别为 45.02%、27.35%、5.14%, 采用优先浮锑抑金工艺, 捕收剂 ZJ 80 g/t, 锑精矿中锑品位为

收稿日期:2014-12-09

作者简介:杨子轩(1991-),男,硕士研究生,主要研究稀有贵金属的提取。

50.89%,相应比丁铵黑药或乙基黄药分别高出了3.54%、5.23%。同时对比石灰+亚硫酸钠、乙酸钠、充气搅拌三种抑砷方式,其中充气搅拌获得锑精矿中砷含量0.37%,比另外两种抑砷方式分别低了0.52%、0.15%<sup>[4]</sup>。徐彪对某高砷锑金矿石进行浮选试验,原矿含金0.58 g/t、锑2.10%、砷1.12%,金多为不可见金形式赋存于硫化矿中,采用优先浮锑、尾矿再选金工艺,浮锑环节比较Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>、KMnO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>+KMnO<sub>4</sub>、Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>+木质素磺酸钠四种抑砷药剂,其中KMnO<sub>4</sub>效果最好,当其用量为1 000 g/t时,锑精矿中砷含量为0.48%,明显低于其他三者<sup>[5]</sup>。

孙晓华对优先浮锑尾矿中的金进行浮选试验,原矿含金2.63 g/t、砷1.14%,金多以包裹形式存在于毒砂、黄铁矿中,采用充气搅拌方式抑砷浮锑,尾矿不抑砷浮金获得精矿中金品位52.02%,砷品位达16.85%;对比充气搅拌氧化、石灰+硫酸铵、石灰+腐殖酸钠、石灰+亚硫酸钠四种抑砷方式,石灰2 000 g/t+硫酸铵500 g/t可使得金精矿中砷含量降至7.85%,效果明显优于其他三者,但同时金品位也降至30 g/t<sup>[6]</sup>。

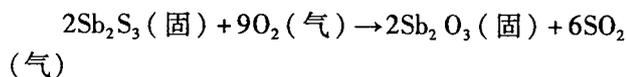
## 2.2 预处理

当原矿中锑品位较低,没有回收利用价值或金赋存于锑矿物中时,采用浮选的方法难以消除锑的影响,为改善含锑金矿氰化浸出环境,可在浸出前利用物理或化学手段进行预处理,以实现金的高效浸出,预处理方法包括焙烧、生物氧化、化学碱浸等。

### 2.2.1 焙烧法

焙烧法是氧化预处理含锑金矿的常用方法,通过焙烧改变矿石物理结构,产出疏松多孔的焙砂,同时在氧化性高温气氛中使辉锑矿变成含锑氧化物,从而消除包裹及辉锑矿的不利影响。

辉锑矿在焙烧过程中主要反应如下:



金世斌等进行Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对焙砂氰化浸出指标影响试验,原矿经焙烧温度540℃,氧化焙烧40 min,焙砂含金3.89 g/t、锑0.01%,直接氰化浸出,NaCN用量2 kg/t,金浸出率为76.09%;氰化浸出前添加Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>3 kg/t,其他条件不变,金浸出率为75.80%。可见Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>对氰化浸出几乎不造成影响<sup>[7]</sup>。然而,Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>会在较高温度下发生熔化生成细小熔化物,附着于载金硫化物焙砂颗粒表面,堵塞经过焙烧作用

新形成的良性微孔,同时还可对微细的裸露金颗粒形成致密覆盖或包裹,这都将严重阻碍浸出剂与金的接触,影响氰化浸金的指标。含锑金矿焙烧主要是如何防止辉锑矿过烧引起的二次包裹是关键,其影响因素主要有两点:焙烧温度、焙烧时间。袁朝新等进行某含锑金精矿焙烧试验,金精矿含金41 g/t、锑2.10%,焙烧温度650℃时,焙烧时间1 h,金浸出率达89.30%,温度再升高或时间延长,浸出率均会大幅度降低,其原因就在于温度过高或时间过长均会引起过烧造成金的二次包裹<sup>[8]</sup>。

含锑金矿焙烧法浸出率较高、工艺成熟,但其共伴生的砷、硫等矿物会产生环境污染问题。朱昌洛在某高砷高锑金精矿焙烧过程中用石灰固硫固砷,金精矿含金43.2 g/t、锑5.14%、砷5.66%,焙烧温度650℃,焙烧时间2 h,氰化浸出率达86.3%,其中,硫固定率91.6%、砷固定率98.6%<sup>[9]</sup>。随焙烧温度升高和焙烧时间延长,砷固定率不受影响,而部分硫酸盐会发生分解,造成硫固定率略有下降。

### 2.2.2 微生物氧化法

微生物氧化法多用于处理含毒砂、黄铁矿等硫化物类型锑金矿,并以选择性好、条件温和、可持续利用等优势逐渐得到关注。其氧化机理是通过浸矿微生物直接作用或间接作用破坏砷等载金硫化物的晶体结构,使其氧化分解成SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HAsO<sub>2</sub>等物质,被包裹的金得到暴露而易于浸出,这其中包含有化学过程、物理过程、微生物生长代谢过程等,体系较为复杂,关键是构建适合微生物生长的环境,主要包括pH值、温度、培养液浓度等因素。邓琼等进行某含锑砷金精矿微生物氧化试验,原矿含金44.2 g/t、锑36.81%、砷10.37%,金在毒砂、辉锑矿中分布率分别为67.50%、18.45%,选择嗜酸性氧化亚铁硫杆菌在9 K培养基上进行氧化试验,初始pH值为1.8~2.0,矿浆浓度1%~2%、矿石粒度为-0.074 mm 100%、温度30℃、搅拌转速为140 r/min,最终砷的脱出率为67.50%,后续氰化浸出率为76.55%,比原矿直接氰化浸出提高63.45%<sup>[10]</sup>。但锑脱出率仅为2%,该菌种几乎没有氧化辉锑矿。

王金祥进行了小曲碌沟含锑金矿微生物预氧化试验,原矿含金3.61 g/t、砷1.0%、锑5.0%,金主要以微粒包裹于毒砂、黄铁矿中,选择T1103菌,pH值为1.6~1.8,预氧化54 d,NaCN用量0.524 kg/t,金浸出率为92.15%,比原矿直接氰化浸出提高37.75%<sup>[11]</sup>。同时测定预氧化过程中砷含量变化,

砷氧化率的变化率呈现先升高后降低的趋势,最终砷氧化率为 35.26%。微生物氧化法不足在于氧化时间过长,生产周期长,同时关于微生物对辉锑矿的氧化行为仍有待于进一步的试验研究。

### 2.2.3 化学碱浸法

化学碱浸法多用于处理辉锑矿为主要载金矿物的金锑矿,该方法利用锑矿物能很好溶于碱或硫化钠的特性,通过水洗将  $\text{Na}_3\text{SbS}_3$  等产物提前脱除,避免后续氰化浸出时耗氰耗氧反应的发生,同时极大削弱  $\text{NaCNS}$  等产物的二次覆盖。孙建伟等采用化学碱浸预处理某锑金矿,原矿含金 2.32 g/t、锑 0.41%,辉锑矿为主要载金矿物,碱浸  $\text{NaOH}$  质量浓度为 3%,时间 6 h,水洗后氰化浸出率为 85.67%,虽然较焙烧与预处理低了 1.23%,但具有无污染、成本低廉、工艺简单的优势<sup>[12]</sup>。

巫汉泉对西北某含锑低品位金矿进行碱浸预处理试验,原矿金品位 2.02 g/t,锑 0.48%,采用碱性  $\text{Na}_2\text{S}$  预浸除锑,由于  $\text{Na}_2\text{S}$  易发生氧化分解,其产物亚硫酸钠和硫代硫酸钠会降低辉锑矿在  $\text{Na}_2\text{S}$  溶液中的溶解,导致锑脱除率下降,为此,添加 20 g/L  $\text{NaOH}$  作  $\text{Na}_2\text{S}$  氧化分解反应抑制剂, $\text{Na}_2\text{S}$  用量 30 g/L,预浸时间 30 min,锑脱除率达 88.65%,后续氰化金浸出率为 72.61%,相比直接氰化浸出提高了 37.47%<sup>[13]</sup>。

### 2.3 强化浸出法

强化浸出法是用于含锑金矿氰化浸出阶段,一方面通过添加  $\text{Pb}(\text{Ac})_2$ 、 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  等助浸剂抑制氰化浸出体系中辉锑矿耗氰耗氧反应的发生,避免其反应产物对金颗粒造成二次覆盖;另一方面通过添加高锰酸钾等氧化剂加速辉锑矿氧化,使其生成锑酸盐,破坏金的外围包裹层,同时提高金氰化浸出反应活性,加快浸出速度。江国红等进行了某含锑金矿强化浸出试验,原矿含金 6.79 g/t、锑 0.43%,金在辉锑矿、黄铁矿、毒砂中总分布率为 85.46%,混合氧化剂为 0.3 kg/t 双氧水+0.15 kg/t 高锰酸钾,混合助浸剂  $\text{Pb}(\text{Ac})_2$ +A 用量 1.1 kg/t,其中 A 是由高效活性生物酶、非离子表面活性剂、阴离子表面活性剂复配而成,具有活化及亲和金的作用,可加快金的氰化溶解浸出速度, $\text{NaCN}$  用量 0.8 kg/t,浸出时间 24 h,金浸出率达 91.17%,相比直接浸出高出 69.83%<sup>[14]</sup>。

熊玉宝等对某含锑金精矿进行强化浸出试验,原矿含金 51.3 g/t、锑 1.22%、砷 5.98%,辉锑矿、

毒砂为载金矿物,活化剂 AA 用量 5 kg/t, $\text{NaCN}$  用量 1 kg/t,浸出时间 12 h,金浸出率达 92.86%,比焙烧-氰化浸出高了 6.19%,浸出时间也缩短了 8~10 h,AA 属多官能团高分子有机物,可以抑制  $\text{NaCNS}$  等产物薄膜的生成,利于金的浸出<sup>[15]</sup>。

## 3 结 论

含锑金矿难回收一方面是锑矿物对金的包裹,另一方面是辉锑矿在浸出中耗氰耗氧,对于不同的矿石性质可选用不同的方法回收。

(1)浮选法适用于处理锑矿物不是金的载体矿物类型的矿石,可避免复杂预处理环节,同时还能获得副产品锑精矿,成本相对较低,但操作难度大,金的回收指标稍差,保证锑精矿浮选指标同时最大程度减少金的夹带是浮选法的关键。

(2)焙烧法是有有效的预处理方式,其最大优点为简单、高效、可靠,但环境污染大、能耗电耗大;生物氧化法适用于处理含毒砂、黄铁矿等硫化物类型锑金矿,绿色无污染、条件温和、选择性较好,但工艺流程长,氧化周期过长,同时微生物对辉锑矿氧化行为有待于进一步研究;化学碱浸法多用于处理辉锑矿为主要载金矿物的金锑矿,其反应快,周期短,污染少,成本较低,但应用范围局限性较大。

(3)强化浸出法主要用于含锑金矿氰化浸出阶段,无需对原矿进行预处理,同时可以加快浸出速率、提升浸出效率,但不适用于脉石包裹严重的锑金矿。

## 参考文献:

- [1]周丽,文书明,李华伟. 难浸金矿预处理技术及其应用[J]. 国外金属矿选矿,2004,41(3):11-15.
- [2]姜涛,吴振祥. 从难浸金矿石中回收金的理论与实践. 国外金属矿选矿,1989,8(8):36-43.
- [3]周洪源,黄云平,赵祖乔,等. 某卡林型金矿锑金分离试验研究[J]. 矿冶工程,2007,2(4):40-43.
- [4]周菁,李西山. 难选金锑矿选矿工艺研究[J]. 金属矿山,2010,8(8):452-454.
- [5]徐彪,王鹏程,谢建宏. 西藏某含高砷锑金矿石浮选回收锑金试验研究[J]. 黄金,2011,4(4):39-41.
- [6]孙晓华,吴天娇,王勇海,等. 青海某难选金锑矿石综合回收选矿试验研究[J]. 矿产综合利用,2011(5):19-23.
- [7]金世斌,马金瑞,邢志军,等. 锑对难处理金矿石(金精矿)焙烧-氰化浸金的影响[J]. 黄金,2009,2(2):33-37.
- [8]袁朝新,王云. 含砷、锑、碳难处理金精矿焙烧氰化提金工艺研究[J]. 有色金属、冶炼部分,2003,3(6):32-34.

- [9]朱昌洛,史光大,余平.高锑高砷复杂金精矿固硫固砷焙烧预处理初探[J].矿产综合利用,2001(2):45-47.
- [10]邓琼,李寿,白云汉,等.含砷锑金精矿的生物预氧化-氰化浸金研究[J].矿冶工程,2011,5(10):84-87.
- [11]王金祥.小曲碌沟金矿矿石微生物预氧化试验研究[J].黄金,2001,12(12):32-34.
- [12]孙建伟,杨磊.难浸金矿石的化学氧化预处理工艺试验研究[J].新疆有色金属,2009,(Z1):132-134.
- [13]巫汉泉,张金矿.含砷锑低品位难浸金矿石氰化浸出工艺试验研究[J].黄金,2005,3(3):32-34.
- [14]江国红,张艳敏.从含砷锑难处理金矿石中浸出金的试验研究[J].湿法冶金,2011,1(3):30-32.
- [15]熊玉宝,王婷,陶林冲,等.某含砷锑碳金精矿氰化试验研究[J].黄金,2007,6(6):39-41.

## Research Status of Methods of Recovery of the Gold Ore Containing Antimony

Yang Zixuan, Xie Xian, Tong Xiong, Meng Qi, Hou Kai, Lv Haozi

(State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Clean Utilization, Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Yunnan Province Engineering Research Center for Reutilization of Metal Tailings Resources, Kunming Yunnan, China)

**Abstract:** The distribution and characteristics of the gold ore containing antimony was briefly introduced in this paper. Several main recovery methods were reviewed to solve the problems of the gold containing antimony, including flotation process, roasting method, biological method, chemical alkali leaching method, strengthening leaching method. The advantage and disadvantage were also pointed out. The key of strengthening pretreatment and united application was put forward in the future research.

**Keywords:** The gold containing antimony; Roasting; Chemical alkali leaching; Biological oxidation; Strengthening leaching

(上接 10 页)

## The Development of Flotation for Serpentine Type Nickel Sulfide Ore

Feng Bo, Wang Huihui, Luo Xianping

(Jiangxi University of Science and Technology, Jiangxi Province Key Laboratory of Mining Engineering, Ganzhou, Jiangxi, China)

**Abstract:** The nickel sulphide ores that containing serpentine gangue are the major source of nickel resources in china. Serpentine is soft and easy to slime. In the weak alkaline pH range where nickel sulfide ore flotation commonly used, serpentine surface is positively charged and sulfide mineral surface is negatively charged. Strong electrostatic attraction exists between the two minerals, which result in heterogeneous agglomeration. Heterogeneous agglomeration leads to the formation of serpentine slime coating on the sulfide mineral surfaces and to depresses the flotation of sulfide minerals. Desorption of slime from sulfide mineral surface is the key to improve the ore recovery. Methods that desorption the slime include chemical desorption method and physical desorption method. Chemical desorption method use sodium phosphate, sodium carbonate, carboxymethyl cellulose, water glass to change serpentine surface electricity, so the interactions between the serpentine and sulfide minerals change from attracting to rejection, so as to eliminate the depression effect of serpentine on sulfide minerals. Physical desorption method is use fluid force field and ultrasonic field to desorption slime and eliminate the depression effect of serpentine on sulfide minerals. According to the nickel sulphide ore characteristics and the related theoretical research, the method of acid flotation, desliming flotation were developed and achieved good separation effect.

**Keywords:** Serpentine; Nickel ore; Slime coating; Flotation