

## 硫氰酸盐浸金研究进展

吴浩, 黄万抚\*, 邱峰, 胡雪飞  
(江西理工大学 资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 硫氰酸盐是一种高效、稳定、环保的金矿物浸出剂。讨论了硫氰酸盐浸金机理, 从电化学角度阐述了浸出过程发生的反应与可行性, 总结了焙烧氧化、加压氧化、化学氧化等预处理方法对硫氰酸盐浸金工艺的影响, 归纳了浸出工艺参数浸出剂、氧化剂、pH、杂质离子、硫脲在浸金过程的作用, 概括了硫氰酸盐浸出贵液中回收金的方法。从应用、工艺、机理角度概述了硫氰酸盐浸金体系近年来的研究与发展, 并提出存在的问题与不足, 指出了硫氰酸盐浸金的研究方向。

**关键词:** 有色金属冶金; 无氰工艺; 浸金; 硫氰酸盐

**中图分类号:** TD953, TF831 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2016)03-0072-07

### Review of Gold Leaching by Thiocyanate

WU Hao, HUANG Wanfu\*, QIU Feng, HU Xuefei

(School of Resource and Environmental Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

**Abstract:** Thiocyanate leaching is a technology with efficient, stable and environmental friendly advantages. The working principles of thiocyanate leaching of gold were introduced, the reaction and feasibility of leaching process were expounded from the electrochemical point of view. The effects of pretreatment methods, such as roasting oxidation, pressure oxidation and chemical oxidation, were summarized. And also, the effects of leaching parameters, such as leaching agent, oxidant, pH, impurity ion and thiourea were summarized. And it was surveyed that the methods for recovering gold from leach liquor. In this paper, the research and development of leaching gold system was summarized in angles of application, technology and mechanism. The problems and deficiencies were put forward, and the research direction was pointed out.

**Key words:** nonferrous metallurgy; non-cyanide; gold leaching; thiocyanate

浸出是金的主要回收提取手段, 其中氰化法由于工艺成熟, 适应性广, 指标稳定, 操作简便, 浸出效率高, 经济效益好等优点, 是浸出提金的主要手段。然而, 氰化法易受杂质矿物影响, 浸出时间长。同时, 氰化法浸出剂的剧毒性, 给环境和工作人员带来了巨大的危害<sup>[1]</sup>。

随着环保要求越来越严格, 氰化法走到了淘汰的边缘, 迫切需要一种低毒、高效、经济的非氰浸金方法。硫脲和硫代硫酸盐<sup>[2]</sup>浸金环保无毒、选择性好、浸出速度快, 但浸出剂不稳定, 耗量大, 成

本高, 贵液中回收金工艺复杂等限制了其应用发展。卤化物法浸金, 速率快, 适应 pH 范围广, 但浸出液回收再生困难, 且生产过程中挥发有毒的卤素气体, 经济效益差等众多原因阻碍其替代氰化法。

硫氰酸盐中 SCN<sup>-</sup>离子与 Au(I)、Au(III)形成配合物的能力强<sup>[3]</sup>, 浸金率与氰化法接近。而且, 硫氰酸盐浸金选择性好、毒性小、性质稳定、浸出时间短、环境适应能力强。硫氰酸盐浸金近年来在国内外得到越来越多的重视, 是一种高效的环保浸金方法, 具有广阔的应用前景。

收稿日期: 2016-02-17

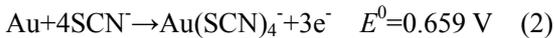
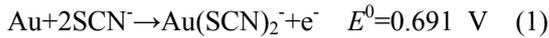
基金项目: 国家十二五科技支撑计划课题(复杂钨铜钼铋资源综合回收关键技术研究, 2012BAB10B03)。

第一作者: 吴浩, 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿物分选理论与工艺。E-mail: 342384870@qq.com

\*通讯作者: 黄万抚, 男, 教授, 研究方向: 液膜分离、矿物加工和废水处理技术。E-mail: sim2008@sina.com

### 1 硫氰酸盐浸金机理

硫氰酸盐浸出液由络合剂硫氰酸盐和氧化剂组成，根据浸出环境与矿物性质的不同，氧化剂常用  $Fe^{3+}$ 、 $MnO_2$ 、 $O_2$ 、 $H_2O_2$  等。当固体金浸入硫氰酸盐溶液中时，金粒发生电化学溶解，表面分为阳极区和阴极区，金粒在表面阳极区失去电子，与络合剂形成稳定的络合物浸出<sup>[4]</sup>。



而阴极氧化剂则得到电子，以  $Fe^{3+}$  为例，其反应为：



金粒表面形成了一个微电池<sup>[5]</sup>，阴阳极反应电位差越大，浸金反应的吉布斯自由能越小，浸出越容易。硫氰酸盐溶金过程如图 1 所示，当浸出反应开始后，固体金在氧化剂  $Fe^{3+}$  和  $SCN^-$  的共同作用下，表面发生阴极反应和阳极反应。单质金被  $Fe^{3+}$  氧化，与  $SCN^-$  结合成为络合离子  $Au(SCN)_2^-$  进入溶液， $Fe^{3+}$  则被还原<sup>[6]</sup>。浸金过程既是一个氧化过程，也是一个络合过程，伴随着电荷的转移扩散，固体金完成溶解浸出。

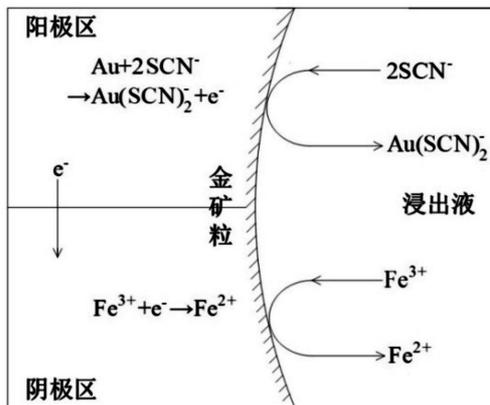
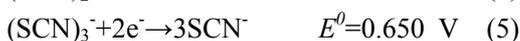
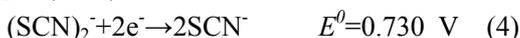


图 1 硫氰酸盐溶金示意图

Fig.1 Schematic diagram of the electrochemical process for the dissolution of gold in thiocyanate solutions

$SCN^-$  离子在水溶液中可以稳定存在，但是在某些氧化剂存在的情况下将会被氧化成亚稳态的中间体  $(SCN)_2^-$ ， $(SCN)_3^-$ 。



中间体不稳定，在水溶液中易水解，发生如下反应：



所以在具体浸出过程中，必须注意氧化剂的选择，硫氰酸盐的浓度，氧化剂用量相互之间的配合关系，减少硫氰酸盐被氧化水解，造成浸出剂的浪费与不必要损耗。 $Fe^{3+}$  是硫氰酸盐浸金体系中常用的氧化剂，因  $Fe^{3+}/Fe^{2+}$  标准电极电势为  $0.771 \text{ V}$ <sup>[7]</sup>，大于式(1)与(2)中金被氧化的电势，可以完成浸出。但同时大于式(4)与(5)中  $SCN^-$  被氧化的电势。 $Fe^{3+}$  浓度过高，发生如下反应，造成浸金成本的增加。 $SCN^- + 8Fe^{3+} + 7H_2O = SO_4^{2-} + CO_3^{2-} + NH_4^+ + 10H^+ + 8Fe^{2+}$

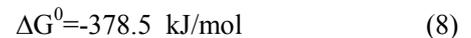


图 2 为  $25^\circ\text{C}$  下  $Au-SCN-H_2O$  系的  $E_h-pH$  图，其中硫氰酸盐的浓度分别  $0.5$ 、 $0.1$ 、 $0.005 \text{ mol/L}$ 。

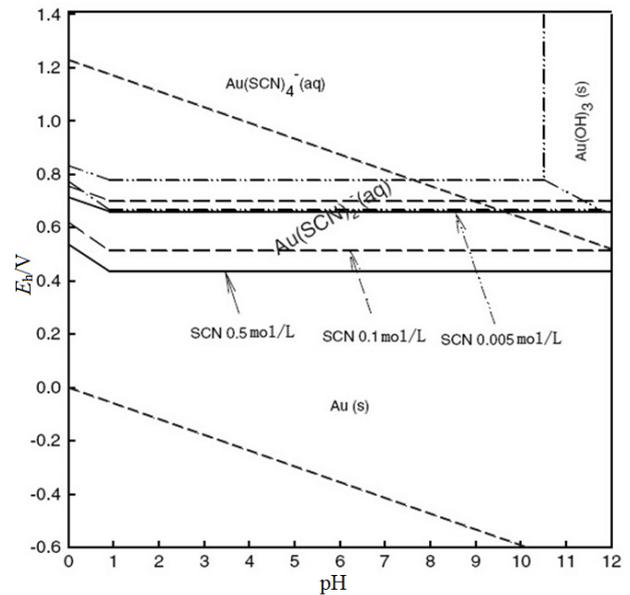


图 2  $Au-SCN-H_2O$  体系  $E_h-pH$  图

Fig.2  $E_h-pH$  diagrams for the  $Au-SCN-H_2O$  system

由图 2 可知， $Au(SCN)_2^-$  在  $pH=2$ ， $SCN^-$  浓度为  $0.5 \text{ mol/L}$  时具有最低氧化还原电势  $0.430 \text{ V}$ 。当  $SCN^-$  浓度为  $0.005 \text{ mol/L}$  时，氧化电势必须增加到  $0.670 \text{ V}$ ， $Au(SCN)_2^-$  才能稳定存在。所以， $Au(SCN)_2^-$  稳定存在电势与浸出剂浓度成反比， $SCN^-$  浓度越高，所需要的氧化电势越低。实际酸性条件下浸出时，浸出体系的电势应控制在  $0.6\sim 0.7 \text{ V}$  范围内<sup>[8]</sup>。过高会导致  $SCN^-$  分解，造成浸出剂的损耗。过低则会使得金矿物难以形成  $Au(SCN)_2^-$  进入溶液，浸出

效果差。碱性条件浸出时,常用氧气作为氧化剂,由图 2 可知,随着浸金溶液 pH 的增加,  $O_2/OH^-$  的电极电势越来越小,必须增加  $SCN^-$  浓度,才能保证金矿物被  $O_2$  氧化。所以,硫氰酸盐碱性浸出时,理论上浸出剂浓度较高。

## 2 硫氰酸盐浸金的影响因素

硫氰酸盐作为浸金剂在 20 世纪初便有报道,但一直未获得重视,直到近年来才作为高效无氰浸金剂得到深入研究。硫氰酸盐整个浸金体系好坏受到金矿的预处理手段、浸出工艺的选择、浸金贵液中回收金等影响。其中浸出工艺包含硫氰酸盐的浓度、氧化剂的选择与浓度、浸出温度与时间、pH 值、液固比等因素。

### 2.1 预处理方法

随着矿产资源的开发,易选矿石越来越少,难处理金矿的回收利用成为一个重点。难处理精矿由于金矿物与硫化矿物致密共生,被包裹无法解离或含有耗氧耗浸出剂的杂质矿物的存在,若直接进行浸出,难以得到理想的回收效果。硫氰酸盐浸金体系预处理方法与常规浸金工艺的预处理方法大致相同,主要为焙烧氧化、加压氧化、化学氧化等。

#### 2.1.1 焙烧氧化法

焙烧氧化法是通过焙烧使矿物中的包裹金的硫化矿物如黄铁矿、砷黄铁矿等氧化,破坏包裹金的矿物结构而使金暴露。陈建勋等<sup>[9]</sup>对含铜黄铁矿进行热重试验,在矿物质量变化的温度点进行矿物分析,证明焙烧温度在  $500^\circ\text{C}$  以后黄铁矿和砷黄铁矿开始氧化, $760^\circ\text{C}$  后会产生过焙烧现象,产生  $Fe_3O_4$  和  $CuFe_2O_4$  重新对金粒产生包裹,影响后续浸出。宋岷蔚等<sup>[10]</sup>将某硫化物包裹型金矿石精金砂在  $750^\circ\text{C}$  温度焙烧 2 h,再用硫氰酸铵浸出,浸金率达到 96.1%。

#### 2.1.2 加压氧化法

加压氧化是在高温高压下使金矿中硫和砷形成硫酸盐或砷酸盐,又分为酸性加压和碱性加压。作为近些年新发展起来的一种工艺,具有环保无烟气污染等优势。其中,由于酸性氧压 As 得不到有效回收、设备要求高等缺点,碱性加压预处理研究发展迅猛。在碱性加压氧化预处理的同时,可以将浸出剂同时加入高压釜内浸出,将预处理、浸出两个阶段合二为一,缩短浸出流程,降低成本,备受推崇。郭欢<sup>[11]</sup>对难处理复杂硫化金精矿进行加压氧化

预处理,在高压釜中碱用量为理论量的 0.8 倍,硫氰酸铵浸出剂浓度为  $2.0\text{ mol/L}$ ,温度为  $180^\circ\text{C}$ ,反应时间为 8 h,氧压为  $1.2\text{ MPa}$  的工艺条件,得到金的平均浸出率可以高达 95.29%。胡燕清<sup>[12]</sup>对比了硫氰酸盐在几种不同的碱性体系中的浸金效果,得出氨水+硫氰酸铵体系中金的浸出结果最好。氢氧化钠或者氢氧化钙碱性条件下浸出效果较差,甚至氢氧化钠条件下金不会被浸出来。

#### 2.1.3 化学氧化法

化学氧化法是在常压下加入氧化剂,使难处理金矿中砷和硫氧化而进行预处理,常用的氧化剂有过氧化物、氯气、高锰酸钾、硝酸等。沈智慧等<sup>[13]</sup>对贵州某微细浸染型金矿进行化学氧化预处理,加入 Q-1 和 Q-3 药剂在  $70^\circ\text{C}$  下搅拌 24 h 后再用  $0.4\text{ mol/L}$  的  $NH_4SCN$  浸出,结果表明经过化学预处理的金矿浸出率比直接浸出增加 36%,达到 86.16%。

## 2.2 浸出工艺参数

硫氰酸盐浸金过程属于液-固多相反应过程,近年来,国内外研究者从动力学和浸出工艺角度研究了各个因素对浸出效果和速率的影响。

### 2.2.1 硫氰酸盐浓度

随着硫氰酸盐浓度的增加,金的浸出率先增加后趋于平缓。这是由于  $SCN^-$  离子浓度增大,与  $Au(I)$  离子的络合作用增强。另一方面  $SCN^-$  可以溶解黄铁矿,与  $Fe^{3+}$  形成深红色配位离子  $Fe(SCN)_x^{3-x}$ ,这种溶解作用使金暴露,有利于金浸出率的提高。但王治科等人<sup>[14]</sup>采用硫氰酸盐-双氧水体系浸金研究发现,随着浸出剂硫氰酸盐浓度增大,浸金率先增加后减小,硫氰酸盐浓度过高会生成单质硫对金矿物重新包裹,造成浸金率下降。

### 2.2.2 氧化剂的选择与浓度

硫氰酸盐浸金体系常选用的氧化剂有  $O_2$ 、 $Fe^{3+}$ 、 $MnO_2$ 、 $H_2O_2$  等,其中酸性浸出时常用  $Fe^{3+}$ 、 $MnO_2$ 、 $H_2O_2$ ,碱性浸出中常用  $O_2$  作为氧化剂。表 1 为常见氧化剂的标准电极电势。

表 1 298 K 下部分氧化剂标准电极电势

Tab.1 The standard electrode potential of common oxidant at 298 K

氧化型/ 还原型	$Fe^{3+}/$ $Fe^{2+}$	$O_2/$ $H_2O$	$MnO_2/$ $Mn^{2+}$	$KMnO_4/$ $MnO_2$	$H_2O_2/$ $H_2O$
$E^0/V$	0.769	1.229	1.2293	1.7	1.763

由前文图 2 电化学分析可知,硫氰酸盐浸金体

系电势应控制在 0.6~0.7 V 范围内。 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  的电极电势为 0.769 V, 所以  $\text{Fe}^{3+}$  是一种较合适的氧化剂, 其他氧化剂  $\text{KMnO}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  氧化剂氧化能力更强, 但是会氧化消耗硫氰酸盐, 而氧由于在水中溶解度较小, 氧化能力有限。

随着氧化剂用量的增加, 硫氰酸盐浸金率先增加后减少。在一定限度内, 氧化剂的增加可以促进金的氧化, 提高浸金效果。超过一定范围, 便会氧化浸出剂, 影响浸出效果<sup>[15]</sup>。

### 2.2.3 溶液 pH 值

大量研究证明, 硫氰酸盐浸金最适宜的 pH 值范围为 1~3。酸性溶液中, 硫氰酸盐更稳定, 不易分解。同时高浓度  $\text{H}^+$ , 可以溶解焙烧渣中  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 获得游离的  $\text{Fe}^{3+}$  增强氧化效果, 造成隐质金粒暴露, 有利于浸金率提高。但酸性条件对设备的防腐要求高, 矿石中砷得不到回收。

碱性条件下浸出, 大部分砷和铁结合生成砷酸铁沉淀在溶液中, 降低了后续的废水处理难度。碱性条件下对设备要求低, 成本也较低, 但浸出效果不如酸浸。胡燕清等人<sup>[16]</sup>对比了焙烧后碱性和酸性浸出的差异, 发现酸性常压浸出效果要好于碱性常压浸出, 甚至碱性氧压浸出效果不如无氨水直接中性氧压浸金。

### 2.2.4 $\text{Cu}^{2+}$ 的影响

$\text{Cu}^{2+}$  对硫氰酸盐浸金体系的影响尚不明确, 没有得出一致的结论。胡燕清认为铜离子对硫氰酸盐氨性体系浸出金具有一定的催化作用, 因为  $\text{Cu}^{2+}$  具有微弱的氧化性。冀少华等<sup>[17]</sup>研究了预浸脱出  $\text{Cu}^{2+}$  和未脱出  $\text{Cu}^{2+}$  硫氰酸盐浸金的对比实验, 认为  $\text{Cu}^{2+}$  的存在对浸出效果影响不大。然而张潇尹<sup>[18]</sup>则认为过多的铜会与硫氰酸根 ( $\text{SCN}^-$ ) 生成络合物  $\text{Cu}(\text{SCN})_2$ , 并能进一步生成非常稳定的  $\text{Cu}_2(\text{SCN})_2$  沉淀, 反应如下:



### 2.2.5 硫脲的影响

向硫氰酸盐浸金体系中添加硫脲, 浸金效率较单一药剂明显提升。Yang 等<sup>[19]</sup>采用硫脲-硫氰酸钠浸出难处理金矿, 唐立靖等<sup>[20]</sup>采用硫脲-硫氰酸铵浸出微细浸染型金矿, 均证明硫脲和硫氰酸盐可以形成某种协同效应, 增加浸出率。

## 2.3 硫氰酸盐浸金液中回收金的方法

贵液中回收有价金属, 是整个浸金体系的最后一步, 也是决定浸出方法能否工业化的关键因素。

近年来, 基于其他浸金液回收金的手段, 从硫氰酸盐浸金液中回收金研究主要集中在活性炭吸附法、离子交换树脂吸附法、溶剂萃取法、置换沉淀法。

### 2.3.1 活性炭吸附法

活性炭可以直接从矿浆中有效回收金, 但对于硫氰酸盐浸金体系效果不佳, 研究较少。Gallagher P. Neil 等<sup>[21]</sup>认为硫氰酸金络合物通过化学吸附被活性炭吸附的, 解吸困难, 必须经过化学溶解。O. N. Kononova 等<sup>[22]</sup>模拟工业浸出液浓度条件, 在金浓度为 0.08~0.82 mol/L 下对比了 BAU、ABG、UC 和 LK-4 等 4 种吸附碳回收金效果的优劣, 结果证明 LK-4 是一种有效的吸附碳, 在 pH=2~6 范围内, 金的吸附回收率可达 90%。但解吸效果很差, 采用硫酸-硫脲混合解吸, 解吸率仅有 50%。添加乙醇强化解吸, 解吸率增加 15%~20%, 成本较高。Li 等<sup>[23]</sup>研究表明, 吸附碳回收金消耗较多的硫氰酸盐, 在实际生产中受到限制。

### 2.3.2 离子交换树脂吸附法

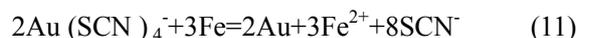
树脂法具有毒性低、易吸附和解吸、吸附容量高等优点, 发展迅速。采用离子交换树脂回收硫氰酸盐浸金液中金, 处于起步阶段, 研究不多。O. N. Kononova 等<sup>[24]</sup>使用了一种强碱大孔阴离子树脂 AV-17-10P, 在硫氰酸盐浸液中吸附性能好, 采用硫酸-硫脲解吸基本完全, 推荐在浸出中应用。

### 2.3.3 溶液萃取法

溶剂萃取法因其简单、灵活、选择性好, 当浸金溶液中金浓度比较高时, 常采用萃取法回收金。溶剂萃取法常用的萃取剂有苯、烷基亚膦酸酯、伯胺、仲胺、叔胺等。Li 等<sup>[25]</sup>对比了叔胺 Alamine 336、Alamine 308 和 Alamine 304-1 的回收效果, 结果显示 3 种萃取剂相差不大, 都具有良好的萃取效果。在正癸醇存在下, 采用 Alamine 336 以有机相/水相为 1/5 下萃取, 萃取率可达 100%。并且对比了氢氧化钠-硫氰酸铵、氨水、硫酸-硫脲在有机相/水相为 5/1 的反萃效果, 结果证明, 硫酸-硫脲的反萃效果最好, 反萃率为 92%。

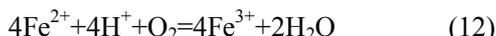
### 2.3.4 置换沉淀法

置换沉淀法是使用较活泼金属通过氧化还原反应, 将浸金液中金离子置换出来。工业应用时间最久, 常使用的置换金属有铁、铝、锌、铅等。在硫氰酸盐浸金体系中常用铁离子作为置换金属, 反应式如下:



铁离子不仅可以置换单质金, 也可以补充浸出

液中  $\text{Fe}^{2+}$ 。 $\text{Fe}^{2+}$  经过空气氧化后为  $\text{Fe}^{3+}$ ，做循环使用浸出液的氧化剂。



Li 等<sup>[23]</sup>对比了铁粉和锌粉从酸性硫氰酸盐浸金液中置换金的效果，实验证明，铁粉是一种高效率的置换金属，在 1 h 内便可得到 98% 的回收率。虽然热力学上锌粉比铁粉有利，但使用锌粉作为置换金属时，效果较差，金的回收率还不到 80%。

Wang 等人<sup>[26]</sup>从动力学角度研究了铁粉置换金反应，证明该反应为扩散控制，符合一级动力学，活化能为 9.3 kJ/mol。其中，pH、搅拌速度、初始金浓度、Fe/Au 质量比、溶解氧以及  $\text{Fe}^{3+}$  对反应有较大影响，而反应温度和硫氰酸盐浓度对反应影响微弱。

### 3 硫氰酸盐浸金研究现状

近些年，在硫氰酸盐浸金体系上取得了一系列的成果，国内外针对浸出机理，工艺优化开展了大量的研究。

应用发展上，硫氰酸盐浸金越来越得到重视，不仅应用在硫化矿浸金中，还作为浸出剂浸出电路板和冶炼废水污泥中的金银。如张潇尹等<sup>[27]</sup>在 pH=1~2 的废旧电路板粉末溶液中加入氧化剂二氧化锰，采用 0.4 mol/L 的硫氰酸铵做为浸出剂在 20℃ 下浸出 3 h，得到超过 96% 的高浸出率。梁昌金等使用 0.8 mol/L 的硫氰酸铵溶液，添加 30% 双氧水，对废旧线路板中金浸出 1 h，金浸出率可达 96%<sup>[28]</sup>。

浸出工艺上，目前研究集中在焙烧预处理-酸浸和氧压碱浸 2 个方面。焙烧预处理-酸浸是指硫化矿采用各种焙烧方法预处理后，加入氧化剂  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{MnO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}_2$  和浸出剂浸金。该方法应用早，较为成熟，浸出效果明显，但对设备防腐要求较高，焙烧消耗大量能源。氧压碱浸是近年来兴起的一种新工艺，在反应釜内以氧气为氧化剂，高压下加入氨水等调节溶液碱性进行浸出。将预处理、浸出 2 个阶段合二为一，缩短流程，降低成本。然而，带来了浸出效率较低，矿物氧化不充分，浸出剂高温下分解等一系列问题，有待研究改善。

浸出机理上，针对纯金矿物及其他硫化矿中金的酸浸和碱浸，国内外研究者从热力学、浸出动力学、电化学等方面进行了细致的研究。陈建勋等<sup>[6]</sup>采用旋转圆盘技术对  $\text{Fe}^{3+}$ -SCN<sup>-</sup> 酸浸体系中转速、时间、 $\text{Zn}^{2+}$  浓度、浸金剂浓度、温度等参数进行了研

究，证明浸金过程受化学反应控制，并得出动力学方程式，求出反应的活化能为 57.27 kJ/mol。王治科等人<sup>[7, 15]</sup>从热力学角度出发，研究了硫氰酸盐浸体系络合剂与氧化剂的关系，得出氧化剂选择的热力学凭据。冀少华<sup>[29]</sup>初步探讨了硫氰酸盐浸冶炼工业废渣中金的动力学，认为此浸出反应主要受矿物层扩散和化学反应共同控制。胡燕清等<sup>[30]</sup>研究了硫氰酸盐碱性浸金的热力学可能性，分析了金在硫氰酸铵+氨水浸出液中的溶解度。J. L. Broadhurst 等人<sup>[31]</sup>针对硫氰酸盐- $\text{Fe}^{3+}$  酸性浸出体系构建了浓度-pH 图，阐述了在不同 pH 下，不同浓度的  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、Au(I)、Au(III)、 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、SCN<sup>-</sup> 离子的配比关系，为最佳工艺参数的确定奠定了理论基础。O. Barbosa-Filho 等<sup>[32]</sup>研究了硫氰酸盐体系浸出金银的热化学，理论证明硫氰酸盐作为浸金剂的可能性。Li 等人<sup>[8, 23, 25]</sup>在前人研究的基础上，在热力学、浸出动力学、电化学方面总结研究了硫氰酸盐浸金机理，理论上分析了浸金过程中各工艺参数与浸出效果的关系，溶液中的杂质离子对浸出效果的影响。

### 4 硫氰酸盐浸金的未来发展

作为金银矿物高效浸出剂，硫氰酸盐具有其独有的优势：1) 硫氰酸盐毒性小，后续废水处理简单，且化学性质比同类无氰浸出剂硫代硫酸盐、硫脲稳定，不易分解。2) 硫氰酸盐作为浸出剂，浸出效果与氰化物相当，并且具有浸出速度快，浸出环境适应能力强，酸碱条件下均可进行浸出的优点。

然而，硫氰酸盐浸金依然存在一些问题，需要深入解决，从而使得硫氰酸盐广泛替代氰化物浸金，实现工业化生产：

1) 浸出贵液中回收金是整个浸金体系的重要一环，目前的研究多集中在浸出工艺，对回收手段研究不多，需要进一步加强。

2) 浸出剂循环利用可以有效降低生产成本，是实现硫氰酸盐浸金工业化的关键因素。很有必要探究浸金过程中硫氰酸盐的损耗量及副产物的生成，从而实现浸出剂的循环使用。

3) 目前已知硫脲可以强化硫氰酸盐浸金效果，但机理尚不明确，研究各种药剂与硫氰酸盐协同配合浸金的工艺与机理是未来研究方向之一。

4) 实验室浸出条件多包含焙烧、高酸或者高温高压，对设备要求严格，工业化生产成本较高，可行性较差。迫切需要改善浸出工艺，进行常温常

压中碱性低耗高效浸出。

5) 碱性条件下进行浸出是未来研究趋势, 近年来兴起的氧压碱浸具有很大的优势, 然而浸出效果不好, 浸出剂稳定性机理尚不清楚, 未来应该明确稳定性机理、继续完善该工艺。

6) 硫氰酸盐浸金体系理论研究不够全面、系统, 对于一些工艺因素的影响依旧存在争议, 例如铜锌离子对浸出效果的影响, 温度对浸出的影响看法不一。从热力学、动力学、电化学角度对硫氰酸盐浸金体系进行理论分析, 探讨各影响因素的配合关系、中间产物的形成、杂质离子的影响仍然很有意义。

### 参考文献:

- [1] MA C J, LI J Y, LIU R J. A review of thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold[J]. Applied mechanics & materials, 2015, 768(s113/114): 53-61.
- [2] 庞锡涛, 张淑媛. 硫氰酸盐法浸取金银的研究[J]. 黄金, 1992, 13(9): 33-37.  
PANG X T, ZHANG S Y. Study of leaching gold and silver by thiocyanate process[J]. Gold, 1992, 13(9): 33-37.
- [3] 陈耿涛. 硫氰酸铵溶液从硫化银锰精矿脱锰富银渣中氧压选择性提银[D]. 长沙: 中南大学, 2010.  
CHEN G T. Oxidative pressure selective leaching silver from silver-rich residue of the demanganized silver-manganese sulfide concentrate in ammonium thiocyanate solution[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [4] BROADHURST J L, PEREZ J G H D. A thermodynamic study of the dissolution of gold in an acidic aqueous thiocyanate medium using iron (III) sulphate as an oxidant[J]. Hydrometallurgy, 1993, 32(32): 317-344.
- [5] 刘秉涛, 庞锡涛. 硫氰酸盐法浸取金银的热力学分析[J]. 黄金, 1995, 16(3): 40-42.  
LIU B T, PANG X T. Thermodynamical analysis of gold (silver) leaching by thiocyanate[J]. Gold, 1995, 16(3): 40-42.
- [6] 陈建勋, 庞锡涛. Fe(III)-SCN-体系浸金的动力学理论研究[J]. 湿法冶金, 1997, 16(3): 16-21.  
CHEN J X, PANG X T. Study on kinetics of leaching gold in Fe(III)-SCN system[J]. Hydrometallurgy of China, 1997, 16(3): 16-21.
- [7] 王治科, 陈东辉, 陈亮. 硫氰酸盐浸金体系选择氧化剂的热力学判据[J]. 有色金属, 2006, 58(4): 26-28.  
WANG Z K, CHEN D H, CHEN L. Thermodynamic criterion for oxidant selection in thiocyanate gold leaching[J]. Nonferrous metals, 2006, 58(4): 26-28.
- [8] LI J, SAFARZADEH M S, MOATS M S, et al. Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part I: Chemical and thermodynamic considerations [J]. Hydrometallurgy, 2012(s113/114): 1-9.
- [9] 陈建勋, 庞锡涛. 硫氰酸盐法从含铜黄铁矿焙砂中浸金研究[J]. 黄金, 1997, 18(3): 33-38.  
CHEN J X, PANG X T. Study on leaching gold from the slag of Cu-bearing pyrite by thiocyanate[J]. Gold, 1997, 18(3): 33-38.
- [10] 宋岷蔚, 刘菁, 俞海平. 硫氰酸铵法提金工艺研究[J]. 矿冶工程, 2013, 33(2): 84-87.  
SONG M W, LIU J, YU H P. Technical study on gold extraction by ammonium thiocyanate[J]. Mining and metallurgical engineering, 2013, 33(2): 84-87.
- [11] 郭欢. 硫氰酸盐溶液从难处理复杂硫化金精矿中氧压浸金研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.  
GUO H. Oxidative pressure leaching of gold from refractory sulfide gold concentrate with thiocyanate solution[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [12] 胡燕清. 氨性硫氰酸铵从难处理硫化金矿氧压浸金研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
HU Y Q. Oxidative pressure leaching gold from refractory sulfide gold ores with ammoniacal ammonium thiocyanate solution[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [13] 沈智慧, 蔡仕琪, 张覃. 贵州某微细浸染型金矿硫氰酸盐浸出试验研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(3): 99-102.  
SHEN Z H, CAI S Q, ZHANG T. Experimental study on thiocyanate leaching of the micro-disseminated gold ore in Guizhou[J]. Mining and metallurgical engineering, 2015, 35(3): 99-102.
- [14] 王治科, 郭翔, 叶存玲. 硫氰酸盐-双氧水体系回收废电路板中的金[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2015(1): 57.  
WANG Z K, GUO X, YE C L. Gold recovery from waste printed circuit boards in thiocyanate-hydrogen peroxide systems[J]. Nonferrous metals: Extractive metallurgy, 2015(1): 57.
- [15] 王治科, 陈东辉, 陈亮. 基于热力学的浸金体系分析[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2006(3): 36.  
WANG Z K, CHEN D H, CHEN L. The analysis of gold leaching systems based on thermodynamics[J]. Nonferrous metals: Extractive metallurgy, 2006(3): 36.

- [16] 胡燕清, 杨声海, 陈永明. 某毒砂金矿硫氰酸盐氨性体系加压氧化提金探索试验[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2012(9): 34-37.  
HU Y Q, YANG S H, CHEN Y M. Exploration test on gold extraction from arsenopyrite gold concentrate with oxidation pressure leaching process in ammonium thiocyanate-ammonia system[J]. Nonferrous metals: Extractive metallurgy, 2012(9): 34-37.
- [17] 冀少华, 安莲英, 唐明林. 硫氰酸盐法从工业废渣中浸取金银的实验研究[J]. 矿产综合利用, 2009(1): 43-44.  
JI S H, AN L Y, TANG M L. Experimental research on leaching of gold and silver from industrial residues by thiocyanate process[J]. Multipurpose utilization of mineral resources, 2009(1): 43-44.
- [18] 张潇尹. 废印刷线路板硫氰酸盐法浸金[D]. 上海: 东华大学, 2008.  
ZHANG X Y. Gold leaching from waste printed circuit board by thiocyanate process[D]. Shanghai: Donghua University, 2008.
- [19] YANG X, SHI X, XU H, et al. Leaching of gold in acid thiourea-thiocyanate solutions using ferric sulfate as oxidant[C]. The Minerals, Metals and Materials Society. Supplemental proceedings materials processing & energy materials. Hoboken, New Jersey: John Wiley and Sons, Inc, 2011: 299-307.
- [20] 唐立靖, 唐云, 李娇娇, 等. 微细浸染型金矿硫脲-硫氰酸铵浸出研究[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(4):97-101.  
TAN L J, TAN Y, LI J J, et al. Leaching of Au from micro-disseminated gold ore in thiourea-thiocyanate solutions[J]. Gold science and technology, 2015, 23(4): 97-101.
- [21] NEIL P GALLAGHER, 聂国林. 活性炭对某些金(I)络合物的亲合力[J]. 湿法冶金, 1991, 10(4): 29-34.  
NEIL P GALLAGHER, NIE G L. The affinity of acticarbon for Au(I) complexes[J]. Hydrometallurgy of China, 1991, 10(4): 29-34.
- [22] KONONOVA O N, KHOLMOGOROV A G, DANILENKO N V, et al. Sorption of gold and silver on carbon adsorbents from thiocyanate solutions[J]. Carbon, 2005, 43(1): 17-22.
- [23] LI J, SAFARZADEH M S, MOATS M S, et al. Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part V: Process alternatives for solution concentration and purification[J]. Hydrometallurgy, 2012(s113/114): 31-38.
- [24] KONONOVA O N, KHOLMOGOROV A G, DANILENKO N V, et al. Recovery of silver from thiosulfate and thiocyanate leach solutions by adsorption on anion exchange resins and activated carbon[J]. Hydrometallurgy, 2007, 88(s1/4): 189-195.
- [25] LI J, SAFARZADEH M S, MOATS M S, et al. Thiocyanate hydrometallurgy for the recovery of gold. Part IV: Solvent extraction of gold with alamine 336[J]. Hydrometallurgy, 2012(s113/114): 25-30.
- [26] WANG Z, CHEN D, CHEN L. Gold cementation from thiocyanate solutions by iron powder[J]. Minerals engineering, 2007, 20(6): 581-590.
- [27] 张潇尹, 陈亮, 陈东辉. 硫氰酸盐法浸出废印刷线路板中的金[J]. 贵金属, 2008, 29(1): 11-14.  
ZHANG X Y, CHEN L, CHEN D H. Study of gold leaching from PCB by thiocyanate process[J]. Precious metals, 2008, 29(1): 11-14.
- [28] 梁昌金, 马传净. 中性环境中硫氰酸盐浸取废旧线路板中的金[J]. 贵金属, 2015, 36(4): 56-62.  
LIANG C J, MA C J. Gold leaching from waste circuit boards with thiocyanate in neutral environment[J]. Precious metals, 2015, 36(4): 56-62.
- [29] 冀少华. 冶炼工业废渣中金的非氰化浸出及过程动力学研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.  
JI S H. Studying on leaching gold with non-cyanide reagents and process kinetics from smelting industrial residue[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [30] 胡燕清, 杨声海, 陈永明. 某毒砂金矿硫氰酸盐氨性体系加压氧化提金探索试验[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2012(9): 34-37.  
HU Y Q, YANG S H, CHEN Y M. Exploration test on gold extraction from arsenopyrite gold concentrate with oxidation pressure leaching process in ammonium thiocyanate-ammonia system[J]. Nonferrous metals: Extractive metallurgy, 2012(9): 34-37.
- [31] BROADHURST J L, DU PREEZ J G H. A thermodynamic study of the dissolution of gold in the acidic aqueous thiocyanate medium using iron(III) sulphate as an oxidant [J]. Hydrometallurgy, 1993, 32(3): 317-344.
- [32] BARBOSA-FILHO O, MONHEMIUS A J. Leaching of gold in thiocyanate solutions. Part 1: Chemistry and thermodynamics[J]. Transaction of the institution of mining and metallurgy, 1994(103): C105-110.