

# 黄金冶金

赵捷 编  
乔繁盛

## 内 容 简 介

《黄金冶金》一书乃是1987年加拿大采矿冶金学会召开的黄金冶金学国际会议的译文集，书中收集论文46篇，共分五部分：炭浆法提金工艺、工厂实践、金的工艺矿物学、难处理金矿石、提金工艺新进展。本书内容丰富，展示了当今国际提金工艺中的最新研究成果，为我国黄金科研与生产提供了颇有价值的资料。本书可供从事贵金属、稀有金属、稀土、有色金属的湿法冶金、化学化工、水处理和环境工程等科研、设计、生产人员以及大专院校有关专业师生阅读。

## 黄 金 冶 金

赵捷 乔繁盛 编

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京通县印刷厂排版印刷

\* \* \*

开本787×1092 1/16·印张 33.5·字数 850千字

1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 1—3500

ISBN7-5022-0167-X

TF·4 定价：8.00元

## 编 者 的 话

1987年8月23—26日，在加拿大曼尼托巴省温尼伯市由加拿大采矿冶金学会召开了第26届冶金学家年会——黄金冶金学国际会议。来自世界许多国家和地区的近百名学者以及我国有关专家出席了这次会议。金的提取冶金是这届年会的主题。在正式学术交流会前，举办了为期两天的炭浆法提金技术讲座，特约北美和南非一些著名的金冶金专家讲课。

在8月23—26日的学术交流会上，各国金冶金专家们宣读了30余篇学术论文；介绍了现有金冶金工厂的生产实践、科研工作以及新技术(硫脲浸出、离子交换、溶剂萃取等)的进展情况；重点研讨了某些难处理金矿石的预处理方法。

这届黄金冶金学国际会议展示了当今国际金提取工艺中的最新研究成果，对我国黄金科研与生产战线的广大读者颇有参考价值。为了贯彻国务院1987年全国黄金工作会议精神，动员各方面力量，调动一切积极因素，群策群力，把我国黄金生产提高到一个新水平，为实现黄金在“七·五”翻番做出贡献；为了向全国广大黄金工作者及时提供最新科技信息，中国核工业总公司北京第五研究所《湿法冶金》编辑部组织专业技术人员精选翻译会议论文46篇，编辑出版《黄金冶金》一书以飨读者。

《黄金冶金》一书按内容分为五个部分：(1)炭浆法提金工艺；(2)工厂实践；(3)金的工艺矿物学；(4)难处理金矿石；(5)提金工艺新进展。该书有插图339张(内含照片8张)、表格199个，并在书后附录有英汉对照专业词汇。《黄金冶金》一书内容丰富，可供从事贵金属、稀有金属、稀土、有色金属的湿法冶金、化学化工、水处理和环境工程等科研、设计、生产人员以及大专院校有关专业师生阅读。

囿于水平，加之时间仓促，书中欠妥和错误之处在所难免，望广大读者批评指正。

在本书排印过程中，得到北京通县印刷厂的大力支持和协助，谨致谢意。

1988年5月14日

## 本书译校编辑人员

### 译 校 (以姓氏笔划为序)

丁力南	王瑞德	向 华	向寨路	伍三民
关自斌	乔繁盛	李 斌	肖成珍	杨淳庆
汪焰台	陈豫德	张立诚	张宝亮	张淑兰
张登福	郑官庆	范家骏	金绮珍	赵 捷
胡长柏	祝振鑫	聂国林	夏德长	黄伦光
黄宗良	黄宝茅	黄昌海	葛道才	蒋铮民
蔡 存	谭佩珺	鞠永善		

总审校 聂国林 范家骏 赵 捷

编 辑 赵 捷 乔繁盛

# 目 录

编者的话

## 第一部分：炭浆法提金工艺

金的溶解	T. Foster (3)
活性炭吸附金的理论基础	C. A. Fleming (40)
活性炭吸附金——极限容量和杂质离子对吸附速率的影响	W. R. Boehme等 (64)
用去离子水从活性炭上解吸金	R. J. Davidson等 (73)
从活性炭上加压解吸金	J. R. Ross等 (82)
用碱性醇溶液从活性炭上解吸金	H. J. Heinen等 (88)
从活性炭上淋洗金和银	George H. Hope (95)
以水作洗脱剂从活性炭上洗脱金的深入研究	R. J. Davidson等 (106)
从活性炭上洗脱金的动力学	M. D. Adams等 (116)
Micron炭解吸法述评	Micron 冶金研究实验室 (125)
从活性炭上洗脱金的Zadra法的评述——Zadra洗脱系统的设计和	P. R. Bailey (128)
操作	
从活性炭上解吸金的三种方法——Zadra法、AARL法和有机溶剂法的比较	M. Ruane (149)
炭浆法所用活性炭的最佳性质	D. McArthur等 (161)
活性炭吸附金的操作等温线	J. A. King (170)
金工业中粒状活性炭的处理	E. F. Legros等 (183)

## 第二部分：工厂实践

Detour湖矿山金的回收	D. Rollwagen等 (197)
硫脲浸出金的中间工厂连续试验	Rein Raudsepp等 (209)
磨矿回路中作为分级机的带式筛	J. A. Tumilty等 (216)
闭矿法在处理贵金属矿石中的实际应用	Rory L. Tibbals (222)
西非Poura金矿选冶厂	G. Queadraogo等 (229)
Golden Sunlight——一个新的金采选厂	T. J. Smolik等 (242)
Echo海湾矿物公司Lupin金厂利用还原能力作为回路化学监测手段	J. Fulcher等 (249)
1987年坎贝尔红湖厂的现代化改建工作	Scott Roberts等 (257)
Bateman-AARL系统与其它解吸系统的比较	Mark Suddaby (266)
研制提金流程所需要考虑的环境问题	R. W. Lawrence等 (273)
金加工厂的物料平衡	D. Cimon等 (281)
金矿石的取样和分析	A. J. Reed等 (291)
金和银矿石的取样和样品制备	G. Zárate (304)

### 第三部分：金的工艺矿物学

- 炭浆法提金原料及其准备的述评..... K. G. Thomas (319)
- Kidd Creek厂从矿石到阳极泥的银和金工艺矿物学..... J. D. Scott (335)
- 矿石地质特性对Jerritt Canyon厂工艺流程的影响..... D. Birak等 (342)
- 魁北克奇布加莫地区各种金-铜矿石的矿物学和冶金学特性省..... A. R. Laplante (346)
- 新矿床流程研究中矿石矿物的鉴别浸出..... J. A. Tumilty等 (356)
- 矿物学对McLaughlin金矿和Homestake地区其它金矿冶金工艺  
研究的影响..... R. S. Kunter等 (363)

### 第四部分：难处理金矿石

- 难处理硫化矿石中不可见金的直接测定..... S. L. Chryssoulis等 (369)
- 难处理金原料的湿法加压氧化..... D. Robert Weir等 (376)
- 难处理金矿的氧化——连续试验的模拟..... A. S. Hayden等 (390)
- 用活性炭从硫脲浸出液中回收金..... C. A. Fleming (396)
- Nitrox过程的各种方案..... K. J. Fair等 (407)

### 第五部分：提金工艺新进展

- 高效的金矿氰化新技术..... C. E. Elmore等 (419)
- 炭浆法回收金过程的动力学模拟..... C. Carrier等 (426)
- 难处理金精矿的微波辐射预处理..... K. E. Haque (438)
- 难处理金矿的酸法加压氧化..... G. P. Demopoulos等 (448)
- 从硫脲溶液中回收金的各种可用技术的研究..... G. Deschênes等 (461)
- 用离子交换法从氰化物溶液中回收金和银..... P. A. Riveros等 (476)
- 黄金冶金的新进展..... David Muir (487)
- 附录：英汉对照词汇..... (502)

## 第一部分

# 炭浆法提金工艺





# 金的溶解

T. Foster

## 引言

几乎没有任何现代的采金企业正在开采高品位金矿。原矿品位低于10克金/吨矿石是常见的，而且某些尾矿再处理作业所处理的品位在1克金/吨以下。即使金的价格高达450美元/盎司，上述情况也意味着必须尽可能回收近100%的金。较大的颗粒状金，可以用而且现在往往仍在用机械方法回收。但是，较小的金颗粒常常分散在整块矿石中，因而只能用化学方法才能满意地回收。

最常用的浸出剂——氰化物大约是100年前应用于采矿工业的，所以，各种氰化物浸出技术都是些非常成熟的技术。因此，当找到一新矿时，必须要做的事情就是做几次简单的浸出试验，看看是否可得到良好的金回收率。然而，如果金回收率很差，那么，这种浸出剂对金几乎是无能为力的，其原因则是多种多样的。这意味着，如果不首先检查一下金在矿石中的赋存形式，做进一步的浸出试验是不适宜的。

## 金的矿物学

在这里我只能粗略地介绍一下这方面的内容，因为在前面一个讲座中已对其作了比较全面的讨论。然而，矿石的矿物学在解决矿物加工问题方面的作用是有限的，因而其重要性不能强调得太过份。金最常见的赋存形式是自然金，它可以单独存在，也可以以银金合金形式与银共存。然而，由于金的浓度很低，故其浸出行为往往为其基岩矿物所掩盖。

矿石的矿物学试验可以表明：

(1) 金是否以不与其它矿物伴生的游离晶粒形式存在。如果是，则只要磨得更细一些就可以提高浸出的回收率。

(2) 存在什么其它矿物。某些矿物(诸如鸡冠石和辉锑矿以及各种炭质矿物等)可能不直接与金伴生，但可以严重影响浸出的化学过程和行为。

(3) 金是否以银金合金形式存在。如果是，有多少银与其伴生。由于银能产生锈膜，因此，银含量高的银金合金会使金的提取率变得很差。

(4) 金是否被闭锁在矿物中，以及此类闭锁的方式。例如，金是否被闭锁在某一矿物的裂隙中，或在某一矿物的晶粒之间，从而确定是否可用进一步磨碎法把金解离。该闭锁矿物本身有可能为另一种矿物所闭锁。

一旦了解了难浸复杂矿石的矿物学特性，人们就可以判断是否可以最终用浸出法成功地回收金，而且，如果是这样，则还可以进一步确定是否需要采取下述手段：

(1) 磨得更细些；

(2) 调整浸出条件——加入氧化剂，改变浸出条件以避免干扰粒种溶解下来，等等；

(3) 使用另一些浸出剂；

(4) 进行浮选以得到比原矿较适合于浸出的精矿或尾矿；

(5) 化学处理，诸如焙烧，加压氧化，或细菌分解等，使金易于与浸出剂作用，或使干扰粒种钝化。

人们认识到，矿物学并不是一种万能的技术。然而，如果用简单的浸出试验确实不能浸出金，那么，不首先对它进行矿物学鉴定而去做进一步的试验就是无意义的——我确信，“大海捞针”这一谚语中的“针”就是用金制成的！一个有经验的矿物学家进行较少量的工作就可以使矿物加工实验室节省大量的时间和人力！

## 氰化物

有人提出，早在200多年前就有人知道金可溶解于氰化钾水溶液中。远在1846年，Elsner就确定了这样一个重要的事实，即为了使金与氰化物成功地进行反应，必须有大气中的氧存在。Mc Arthur和Forrest兄弟在实践中运用了上述知识，他们于1887年获得了一项专利——用氰化物从矿石中提取金的方法。真是无巧不成书，这正值Witwatersrand大型金矿开采达到高潮之时。这些相当单纯的、易加工的矿石是非常适合于氰化浸出的，而且其工艺过程也易于为人们所采用，因而，直到现在它仍然是从该矿床矿石中回收金的主要技术。采用氰化法的普遍程度可以用下列数字来说明：1889年全世界所使用的氰化物不到50吨，而现在一年中仅用于浸出金的氰化物就达75000多吨！

表1 (Attia et al., 1985) 表明采用氰化法回收金的广泛程度。

表1 金矿石的类型和常规处理方法

矿石类型	处理方法
自然金	粗粒金:重选; 细粒金:氰化
与硫化铁伴生的金	浮选黄铁矿, 吹气熔融, 煨烧, 氰化
与砷和(或)锑矿物伴生的金	浮选, 焙烧, 洗涤, 氰化
碲化金	浮选, 焙烧或化学氧化, 而后再氰化
与铜伴生的金	熔融并电解沉积铜, 金留在阳极泥中
与铅和锌伴生的金	浮选, 金留在炉渣中或电解纯化锌的残渣中, 对浮选渣进行某种氰化
炭质矿石	氧化, 浮选, 先表面处理后再氰化
河水或海水中可溶金	离子交换树脂法
红土矿金	焙烧, 化学氧化, 氰化物浸出
有机或生物(植物和动物)金	各种化学方法

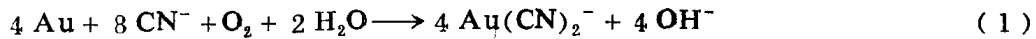
## 氰化物溶解金的机理

因为金是一种贵金属，所以，正确地说，几乎没有什么溶剂能溶解金。那些可使金转入溶液中的体系通常均含有一种氧化剂和一种能与金形成热力学上有利的络合物的试剂。在氰化物的情况下，此氧化剂就是氧，而氰根当然是络合剂了，它们与金生成氰亚金酸根离子  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ ，一种Au(I)的络合物。通过研究氰亚金酸根的氧化势，并把它与其它金离子和络离子的氧化势进行比较，人们就可以知道该络离子的生成是比较容易的 (Attia et al., 1985)；

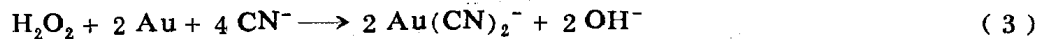
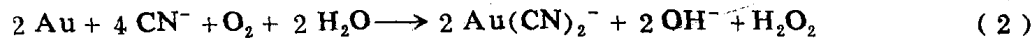
表2 金的各种溶解反应的标准氧化势

产 物	标准氧化势, 伏
Au <sup>-</sup>	-1.71
Au <sup>3+</sup>	-1.49
Au(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.61
AuCl <sub>4</sub> <sup>-</sup>	-1.002
Au(S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) <sub>n</sub> <sup>-</sup>	-0.153
Au(SCN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	-0.662
Au(CS(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> <sup>+</sup>	-0.38

氰根-金溶解反应往往写成被称之为Elsner反应式的如下形式:



事实上, 上述反应式可能是真实反应机理的一种过于简化的形式。早已有人提出 (Bodlander, 1886), 该反应是通过以下两个截然不同的步骤进行的:



Bodlander通过探测到溶液中有过氧化氢存在来支持他的假设。后来, 有些研究人员测定了氰亚金酸根络离子的生成自由能 (Barsky et al., 1934); 利用这一数据, 他们计算了这些反应中自由能的变化, 而且能证明, 所有这三个反应在热力学上都是可行的。其他一些研究人员 (Kameda, 1949; Lund, 1951) 证明了在用氰化物溶解金和银期间有过氧化氢存在。

对于将过氧化氢加入氰化物溶液中去所产生的效应的研究 (Kameda, 1949) 表明, 在 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的浓度低于 0.01 摩尔/升时, 加入过氧化氢可使金的溶解速率增加, 但是, 当再提高过氧化氢的加入速率时, 金的溶解速率降低了, 或者溶解甚至停止了。后来的工作 (Day, 1967) 得到了类似的结果, 同时也证明该效应取决于氰根浓度。

另一些研究结果相互矛盾。Kudryk 和 Kellogg (1954) 不能探测到与金接触的氰化物溶液中有过氧化氢存在, 而 Deitz 和 Halpern (1953) 报告说, 加入少量 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对金的溶解速率无任何影响。此外, 反应式 (3) 表明, 金将在有双氧水存在而不存在氧的条件下溶解。对这一假设所做的试验 (Boonstra, 1943) 证明, 金在这种条件下的溶解速率比之在有氧存在的氰化物中要慢得多。

过氧化氢在金的氰化过程中的作用依然是一个谜 (Paul, 1984)。现有的认识是: 大部分金是通过反应式 (2) 的反应溶解的, 而少部分金是按照反应式 (3) 所示的那个慢得多的反应溶解的 (Habashi, 1967; Finkelstein, 1972; Clem, 1982; Staker et al., 1984; Wors-tell, 1987)。假如情况果真是这样, 则必须指出, 其总反应乃是反应式 (2) 和 (3) 的和, 事实上, 它就是反应式 (1)。

实际上, 现代的认识比这还要更深入些, 因为人们认为, 上面所述的纯化学反应是不准确的, 就金的溶解而言, 据说其反应在本质上乃是电化学反应。这一观点首先由 Boonstra (1943) 提出; 他通过提出以下反应机理来解释他测量金-氰化物体系电流密度-电势所得到的结果:





如果这是一个电化学反应,那么,我们要讨论的就是一个简单的腐蚀电池的生成反应:金在阳极溶解,而这一过程中释放出来的电子则移向阴极;氧则在阴极还原为氢氧根离子。这将是一种纯表面现象,其速率由氧和氰根离子穿过金属表面界面层的扩散速率所控制。氰根浓度超过一定数值后,氧的扩散速率就是控制因素,反之亦然。一些研究人员已经研究了这些可能性,他们利用了金板的溶解速率测量和电势测量这两种数据(在一种情况下是金球),而且已经证明,这些条件是满足的(Thompson, 1947; Kudryk et al., 1954; Cathro et al., 1961)。

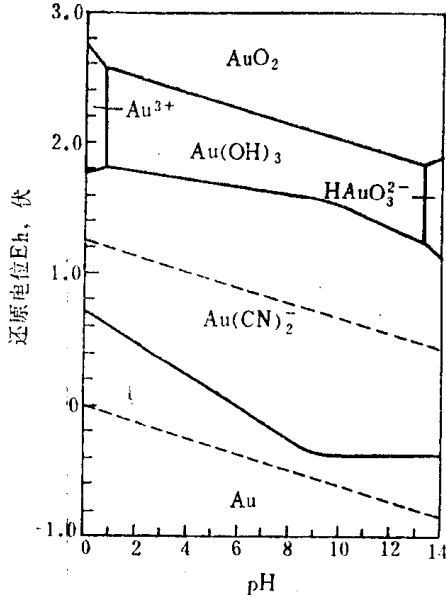


图 1

此外,因为这一过程必然是一个非均相反应,金属的溶解速率应该直接正比于颗粒的表面积。这一点对于金(Kameda, 1949)和银(Lund, 1951)都是正确的。已有人对所有这些工作做了全面的述评(Habashi, 1967)。

已有人借助电势-pH图根据较深的理论对这一概念进行了讨论(Finkelstein, 1972)。图 1 示出简化的电势-pH图(Jha et al., 1984)。

该图表明,金的溶解线总是位于氢线之上(即  $E_h$  总是必然高于  $\text{H}_2\text{O}$  还原为  $\text{H}_2$  所相应的电势)。此外,氧线(即  $\text{H}_2\text{O}$  氧化成  $\text{O}_2$  时的  $E_h$ )总是在金的溶解线之上,这清楚地说明,可以用空气来氧化金。最后,由于  $\text{HCN}$  是一种弱酸,氰根的浓度随 pH 的提高而增加,其结果是体系的还原电势较低,这有利于金的浸出。当  $\text{pH} > 9$  时,几乎所有的氰根都以离子形态存在,而且金的还原电势对 pH 是不灵敏的。

简言之,现代的观点(Osseo-Assare et al., 1984)是:金被氰化物所溶解是一个电化学过程,其中包括金在阳极溶解为氰亚金酸根络离子(反应式(9)),以及与此同时氧与水在阴极反应(反应式(10))。过氧化氢的生成可能是后一反应的一个中间步骤。从图 2 上可以看到一种能明确说明有过氧化氢生成的图示方式(Habashi, 1966)。

阳极反应:



阴极反应:



事实上,金的阳极溶解可能比反应式(9)所显示的更为复杂。对这一反应的电化学研究(Kirk et al., 1978, 1979)曾证明,反应式(9)确实描述了总反应,但有人(Eisenmann, 1978; Kirk et al., 1978)已进一步证明,该过程实际上分三步进行:



在这三步中,据认为,(9a)和(9b)是动力学控制步骤,而(9c)则是扩散控制步骤。取决于体系的总电势,决定速率的步骤不是(9b)就是(9c), (9c)在较正的阳极区(-0.39到+0.64伏)占优势,而(9b)则在中间电势区(-0.26到+0.39伏)占优势。

### 氰化物溶解金的动力学

正如前节所讨论的,已有许多研究人员研究了纯金在氰化物溶液中的溶解速率。他们的研究结果一般总落在  $2-4 \times 10^{-9}$  摩尔/厘米<sup>2</sup>/秒 的范围内。由此数据出发,已有人(Kameda, 1949)计算过,一个直径为75微米的圆形金颗粒要经过40小时才能完全溶解。当然,较小的圆金粒可在比这短得多的时间内溶解。

实际上,今天所处理的许多金都是分散得很细的,而且,在任何情况下,75微米那么大的金颗粒很可能在氰化之前,早已用机械方法(诸如溜槽淘洗或跳汰选等)回收了。然而,甚至很细的颗粒也不会很快溶解。它们通常总是不规则的,而不是圆形的,它们不可能用碾磨法来完全解离,以致只有一小部分表面实际上可以受到氰根的作用。因为最大的回收率通常总是采金厂操作人员所关心的主要问题,而不是金的实际溶解速率,因此,浸出时间有变得相当长的倾向,从几个小时到48小时之多都有。

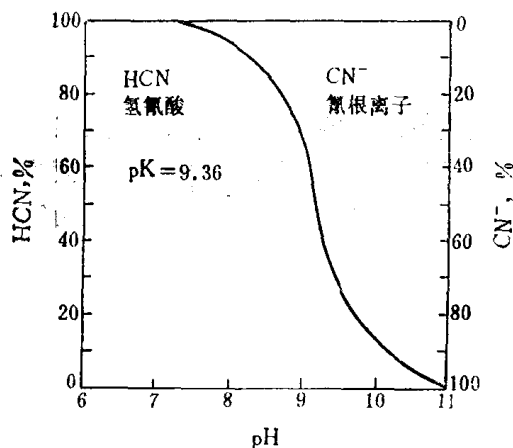


图3

对于这一反应,其pH=9.36。因此,当pH=9.36时,该溶液就含有等摩尔数量的氰根离子和氢氰酸分子。因为大部分浸出溶液都通入空气,所以在pH<10的碱性条件下浸出时,HCN的损失可能相当大;而且,又因为在pH很高条件下浸出时金的溶解速率要下降,所以,大部分操作都是在pH=10~12的条件下进行的。适合于某一特定矿石的最佳pH值将取决于矿石的矿物学特性,而且在某些情况下可能会在pH=10以下,正如我们在后面将会看到的那样。

如所预料,反应速率也依赖于温度。这里有几种竞争效应。因为当温度升高时,氧的溶解度降低了,以致反应速率在85℃左右达到一最大值,如图4所示(Julian and Smart, 1921)。

在评述对纯金-氰化物体系所做的工作时, Habashi(1967)得出了如下结论:

- (1) 当溶液中氧浓度高时,金的溶解速率随氰根浓度的增加而增大;
- (2) 当溶液中氰根浓度高时,反应速率随氧浓度的增加而增大;

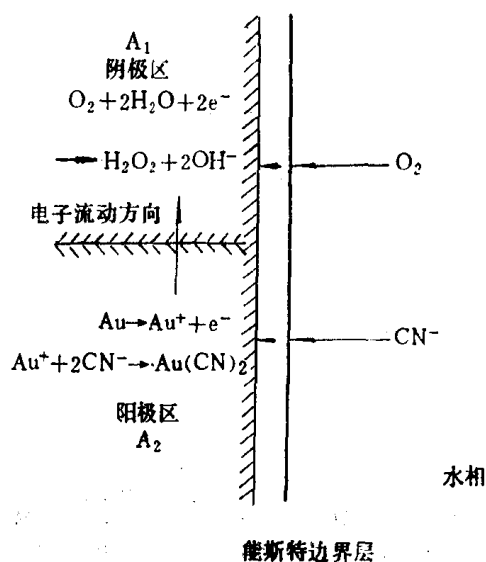


图2

水相

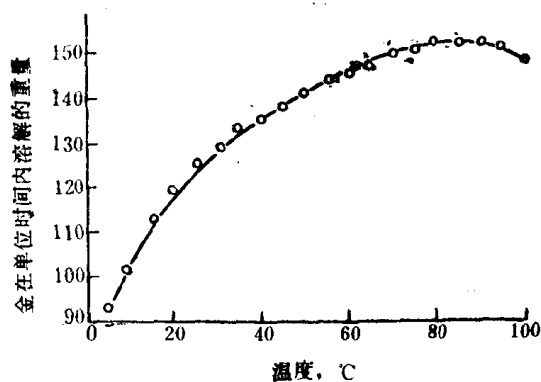


图 4

(3) 金的溶解速率取决于金在溶液中暴露的总面积;

(4) 金的溶解速率随搅拌速度的增加而增大;

(5) 反应速率随温度的提高而增大的幅度较小, 因而反应的活化能较低(2—5千卡/摩尔, 与扩散控制一致)。

然后, 在假定反应式(2)真实地描述了所发生的反应之后, Habashi利用Fick定律推导出方程式(12), 把氰根与氧的浓度之比与它们的扩散性质联系起来。Kudryk和Kellogg(1954)

进行了类似的工作, 但是, 他们根据的是反应式(1), 在该反应式中过氧化氢被还原为氢氧根, 因此, 他们提出了一个稍微不同的比值, 正如方程式(13)所示:

$$\frac{(\text{CN}^-)}{(\text{O}_2)} = 4 \frac{(D)_{\text{O}_2}}{(D)_{\text{CN}^-}} \quad (12)$$

$$\frac{(\text{CN}^-)}{(\text{O}_2)} = 8 \frac{(D)_{\text{O}_2}}{(D)_{\text{CN}^-}} \quad (13)$$

其中,  $(\text{CN}^-)$ ——氰根浓度;

$(\text{O}_2)$ ——氧浓度;

$(D)_{\text{CN}^-}$ ——氰根的扩散系数;

$(D)_{\text{O}_2}$ ——氧的扩散系数。

根据已发表的一些结果, Habashi取氧对氰根的扩散系数之比的平均值为1.5。假定这一数值是正确的, 并假定大部分浸出液在常温和常压下为空气所饱和, 这相应于氧的浓度为8毫克/升, 然后再根据方程式(12)和(13), 我们可以计算出金的最大溶解速率所需要的氰根浓度:

$$8 \text{ 毫克/升 } \text{O}_2 = 0.25 \times 10^{-3} \text{ 摩尔/升}$$

根据方程式(12), 对于金的最大溶解速率为:

$$\begin{aligned} (\text{CN}^-) &= 0.25 \times 10^{-2} \times 6 \times 26 \\ &= 0.04 \text{ 克/升} \end{aligned}$$

根据方程式(13), 对于金的最大溶解速率为:

$$(\text{CN}^-) = 0.25 \times 10^{-3} \times 8 \times 26 = 0.08 \text{ 克/升}$$

事实上, 虽然这些数值是根据只含纯金的体系推导出来的, 但这些数字与实际所用的值差异不大。浸出金矿石所用的典型氰根浓度是0.1—1.0克/升 NaCN, 或大约为0.05—0.5克/升  $\text{CN}^-$ 。此浓度水平足以使金完全溶解; 提高氰根的浓度无益于提高金的回收率, 而往往造成氰根的消耗较高, 这是由于氧化、挥发, 或者更通常地, 是由于受到矿石中消氰物破坏的结果。对最后一个原因我们将在下节中讨论。

### 氰化浸出中的干扰

目前所加工处理的大部分金矿石只含有几克/吨的金, 即其中的金仅仅是ppm量级的。换

句话说，与所存在的其它金属矿物相比，金是矿石中非常次要的组分。因此，不应当感到奇怪：其它矿物会对氰化浸出产生干扰。而且，事实上也确实如此。此种干扰可分为以下两大类：

(1) 活性矿物——包括那些会释放出离子，能显著影响体系溶液化学的矿物。这些矿物通常会影晌金的浸出反应速率和氰根的消耗量，但往往对金的回收率几乎无影响。

(2) 难浸矿物——这些是主要限制金的回收率的矿物，它们或者把很细的浸染状金闭锁起来，或者吸附已溶解的金。

### 活性矿物

许多金属可以在溶液中生成稳定的氰合络离子，正如表 3 所示(Hilton et al., 1986)：

表 3 金属氰合络离子的生成常数

金属离子	络离子	总生成常数, $\log\beta$
Ag <sup>+</sup>	Ag(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	21.1
Au <sup>+</sup>	Au(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup>	38.3
Cu <sup>+</sup>	Cu(CN) <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	30.3
Cd <sup>2+</sup>	Cd(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	18.9
Hg <sup>2+</sup>	Hg(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	41.5
Ni <sup>2+</sup>	Ni(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	31.3
Zn <sup>2+</sup>	Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	16.7
Co <sup>3+</sup>	Co(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>	64.0
Cr <sup>3+</sup>	Cr(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>	—
Fe <sup>2+</sup>	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup>	35.4
Fe <sup>3+</sup>	Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>	43.6
Mn <sup>3+</sup>	Mn(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup>	9.7

在这些金属中，作为矿物存在于贵金属矿石中最常见的有锌、汞、铜和铁。它们对氰化浸出的影响分述如下。

**锌** 大部分锌矿物在氰化物溶液中都有中等的溶解度(Hedley and Tabachnik, 1968)。然而，锌络离子的生成似乎并不妨碍金的溶解。事实上，与金的络离子相比，锌的络离子乃是一个较弱的络离子，而且，实际上可能是与金缔合的，因此，起着金的溶剂的作用(Hedley and Tabachnik, 1968)。然而，如果锌过量存在的话，则会干扰金的浸出，因为它会使溶液中游离氰根浓度给出虚假的高值。这是由于通常用来测定游离氰根的分析方法是用硝酸银溶液进行滴定，其结果是与锌的氰合络离子缔合。

锌的存在也使氰根的消耗量增加(氰根的消耗量通常是用加入到浸出体系中的总氰根与浸出结束时剩余下来的游离氰根之差来计算的)。实际上，矿石中锌的这些影响是不大重要的，首先是由于锌矿物只有中等的溶解度，其次是由于它们往往为溶液中的其它金属，特别是铜的效应所掩盖。

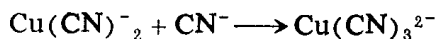
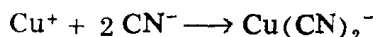
**汞** 含汞的金矿石并不常见，而且，与锌矿物类似，它们在氰化物溶液中也只有中等的溶解度(10—30%)。汞会增加氰根的消耗量，虽然实际上很少达到任何显著的程度。汞在溶液中的存在确实会引起一个重要的实际问题，即它会与金一起通过炭吸附-解吸过程。通常必须在熔炼阶段通过蒸馏除去汞，而且往往没有什么经济效益，而汞蒸汽则可能会严重影响电积、蒸馏和炭再活化工序操作人员的健康。

最近研究出了一种方法可除去以氰合络离子形式溶解在浸出液中的汞(Staker et al.,

1984), 即把硫化钠或硫化钙加入浸出液中沉淀出不溶的硫化汞。虽然曾对内华达州产的金矿石进行了一些试验,但看来该法似乎还没有在工业上采用。在内华达州的Pinson采矿公司曾对一条采金生产线进行了试验(Bolland, 1985),但其结果很明显只是取得了部分成功,因为沉淀下来的汞会随着时间的推移而重新溶解。

与此完全相反,据报道,津巴布韦的Rencop矿把200克/吨的氯化汞加入到浸出液中,以使金的回收率最佳;目前尚不清楚这一步骤的机理(Randol International, 1985)。

铜 许多氧化铜和硫化铜矿物都能很好地溶解于氰化物溶液中(Hedley and Tabachnik, 1968);在最常见的铜矿物中,只有黄铜矿在这些体系中才具有有限的溶解度。铜能生成某些氰合络离子(Stamboliadis et al., 1976; Shantz et al., 1978, 1976; Hedley et al., 1945):



现在人们公认,三氰合粒种是占优势的,四氰合粒种只有在铜浓度高、且氰根与铜之比高的溶液中才能以显著的浓度存在(Shantz et al., 1978; Osseo-Asare et al., 1984)。然而,虽然这些络离子中的氰根已不能用来溶解金,但是,据报道,当用标准的硝酸银滴定法分析浸出液时,这些氰根中的大部分却可看作是游离氰根。这意味着,表观上含有足够数量游离氰根的溶液,事实上有可能不完全溶解金。已有人对此作了阐明(Hedley and Tabachnik, 1968):当CN与Cu的摩尔比在3:1左右时,金的溶解速率急剧增高;当该摩尔比为4:1时,溶解速率达到最大值。这一点可从Goldfields采矿和开发公司绘制的曲线图(图5)中得到清楚的说明(Randol International, 1982)。

铜也会引起其它问题,因为它能与金一起通过整个工艺系统,从而使多尔金锭的成色降低。它也将使氰根的耗量增加,如图6所示(Stamboliadis et al., 1976)。

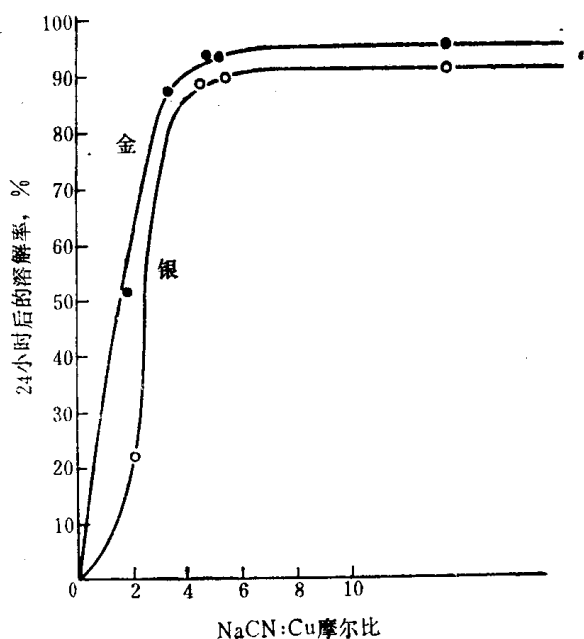


图5

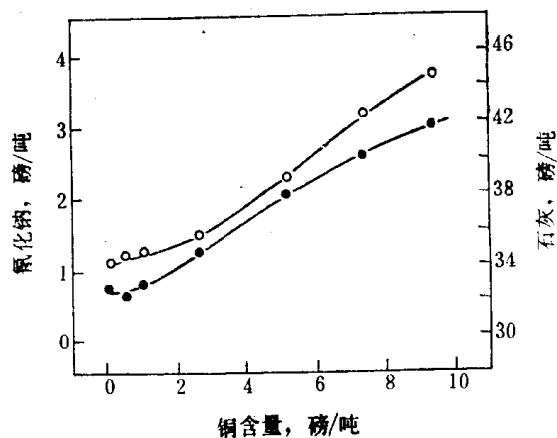


图6



虽然人们已认识到，铜在氰化物浸出液中的溶解速率会因铜矿物的性质及其在某一特定矿石中的赋存状态而异，通常认为，一种含0.3%以上铜的矿石最好把它作为含金的铜矿石来处理(Stewart, 1984)。这样，铜可经浮选入精矿，而中和以后的浮选尾矿可通过氰化回收金。例如，Equity银矿业公司对其主矿脉的矿石所采取的加工步骤就是这样，其矿石约含0.38%的铜(Marchant, 1986)。

**铁** 虽然许多金矿石是与铁矿物伴生的，而且铁-氰根络离子是很稳定的，但是，就氰根消耗量和金的回收率来说，二价铁与三价铁的氰化物的生成几乎不是一个问题。但如果它们被排入尾矿池中，则铁的氰化物或许会受到人们的关注。因为，这些络合物本身虽是低毒性的，但它们会慢慢为紫外光所分解而释放出游离氰根。

有时金可能被铁的氧化物所覆盖，必须用酸预洗法把此覆盖层除去(Addison, 1980; Randol International, 1982)。但此覆盖层往往在磨矿时或浸出时由于搅拌的磨擦作用而清除掉。

黄铁矿对金的氰化浸出几乎没有什么妨碍(Stewart, 1984; Addison, 1980; Hedley and Tabachnik, 1968)。然而，金有时是很细的，而且广泛地散布在整个黄铁矿的基体中，因此，其中的金不会通过细磨而经济地得到解离。对此类矿石的处理将在下一节难浸矿石中讨论。

白铁矿，以及更值得注意的磁黄铁矿，常常易与氰化物溶液发生反应。然而，这种反应所溶解的铁量比硫化物矿物中硫的反应所溶解的铁量少得多，后者由于转变成硫氰酸根而引起氰根大量消耗(Hedley and Tabachnik, 1968)。对于磁黄铁矿含量高的矿石，最广泛采用的方法是在碱性条件下预通空气，使亚铁离子和可溶性硫化物氧化(Stewart, 1984; Addison, 1980)。将硝酸铅加入浸出液中，往往对此类矿石有一定效果。这一点将在硫化物一节中进一步讨论。

工业生产的例子有：内华达州的Battle Mountain金矿(McQuiston and Shoemaker, 1981; Argall, 1986)和Echo Bay金矿(Randol International, 1985)，它们均使用碱性条件下的预通空气法，并往浸出液中加入硝酸铅。Echo Bay矿的矿石除含磁黄铁矿外，还含砷黄铁矿和黄铁矿。

最后，昆士兰的Mount Morgan矿已报道说，它们已成功地处理了含硫化铁的矿石。采用的方法是在氰化浸出之前用微型旋流器除去一小部分富铁的矿泥(Randol International, 1985)。

**砷和锑** 砷黄铁矿与其铁对应物相似，实际上不干扰金的氰化浸出(Hedley and Tabachnik, 1968)。然而，许多含砷黄铁矿的矿石是难浸的，由于金是以很细的颗粒形式散布在该矿物中的，且不能用机械方法解离。Equity银矿业公司已废弃的南部尾矿便是这类矿石的典型例子。对于该矿石，尚未研究出一种经济地回收金的满意流程(Marchant, 1986; Sorensen, 1984)。

其它硫化物矿物，诸如二硫化二砷，三硫化二砷和辉锑矿对氰化浸出有显著干扰(Finkelstein, 1972; Nagy et al., 1966; Hedley and Tabachnik, 1968; Jha et al., 1984)。其主要问题是：这些矿物的存在使金的溶解速率降低，且使金的总回收率也降低，正如图7-10所示(Hedley and Tabachnik, 1968)。

该工作实际上是对一人工配制的金矿石作出的。这种人工配制矿石的制备方法如下：把负载金的炭与玻璃砂混合，然后把炭烧掉(Hedley and Tabachnik, 1968)。这几幅图清楚地