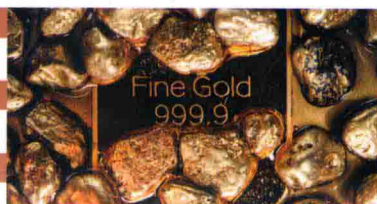


崔毅琦 © 著

非氰提取金银技术



Au-Ag



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

非氰提取金银技术

崔毅琦 著

北京
冶金工业出版社

2010—

内 容 提 要

本书分上下两篇共 14 章, 上篇, 非氰浸出技术, 包括氰化提金技术、硫脲提金技术、卤素及其化合物提金技术、氨性硫代硫酸盐提金技术; 下篇, 无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银矿, 包括从硫化银矿中提取银的研究现状、无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银的热力学、纯硫化银的溶解和贵液的回收工艺、无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银的动力学、硫代硫酸盐溶液的电化学行为、无氨硫代硫酸盐浸出硫化银的反应机理和硫化银矿浸出实践。

本书适合于从事矿物加工、湿法冶金、金银提取等领域的工程技术人员使用, 也可供相关科研人员和大专院校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

非氰提取金银技术/崔毅琦著. —北京: 冶金工业出版社, 2019. 4

ISBN 978-7-5024-8088-2

I. ①非… II. ①崔… III. ①金—提取冶金 ②银—提取冶金 IV. ①TF830.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 077365 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 郑小利 版式设计 禹蕊

责任校对 郑娟 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-8088-2

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷
2019 年 4 月第 1 版, 2019 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 11 印张; 215 千字; 164 页

55.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题, 本社营销中心负责退换)

前 言

氰化法因工艺简单、稳定性好、贵液回收容易等优点，自发明以来一直在世界黄金工业中占主导地位。但是，氰化物为剧毒化合物，对环境并不友好，2016年8月1日更新的《国家危险废物名录》将氰化浸金尾渣定为“危险废物”，需要经过严苛的处理才能排放。另外，氰化法浸出含有铜、砷、碳、锑的金矿难以获得理想效果。随着人们对环保的日益重视和易处理矿石的日益减少，开发高效、绿色的非氰浸出剂已成为金银提取领域的研究热点。

目前，研究较多的非氰浸出剂有硫脲、卤化物、石硫合剂和硫代硫酸盐等。这些试剂浸出速率快、毒性低，但也存在一些问题，例如硫脲的稳定性不高、氯化物选择性较差、碘化物价格昂贵等，并且，对于从以上浸出贵液中回收金银的研究极少，工业实施缺乏相应的理论依据。硫代硫酸盐是最有可能取代氰化物的提金试剂，氨性硫代硫酸盐溶液相对低毒，对环境的影响较小；其次，硫代硫酸盐提金基本不受含铜、有机碳和硫化矿物的影响，对于难处理矿石仍可获得较满意的回收率。当然，氨性硫代硫酸盐法也有不足之处，溶液体系复杂、试剂消耗量大、贵液中金属难以回收，这些都制约了该方法的工业化应用。

针对氨性硫代硫酸盐法存在的问题，本书介绍了一种无氨硫代硫酸盐浸出硫化银矿的新方法，该方法不使用氨以及任何形式的铵盐，避免了由氨或铵盐所带来的不利影响，具有低消耗、高效率、环境友好、易于回收等特点。通过热力学计算、浸出工艺研究，结合电化学、溶液化学、动力学研究及SEM和XPS等测试手段分析了无氨硫代硫酸盐法提取硫化银矿的反应机理。

热力学研究表明,在硫代硫酸盐溶液中,铜(I)离子和银(I)离子可与硫代硫酸根形成稳定的络离子存在于水溶液中,硫代硫酸铜络离子与 Ag_2S 的反应在热力学上是可行的。

硫化银浸出研究表明,在一定的工艺条件下,硫化银的溶解率可达96.50%,硫代硫酸根浓度、铜离子与硫代硫酸根离子的比例、 Ag_2S 粒度、搅拌速度、反应温度及反应时间都会在一定程度上影响硫化银的溶解率。锌粉可有效置换贵液中的银,置换率达99.31%,银的总回收率为95.83%。

动力学研究和分析测试表明, Ag_2S 在无氨硫代硫酸盐体系中的溶解分为两个阶段:第一阶段,铜离子部分取代硫化银中的银,此过程受化学反应和溶液扩散混合控制;第二阶段,铜离子取代剩余的银离子,此过程受内扩散控制。

无氨硫代硫酸盐溶液浸出硫化银浮选银精矿的实践也表明,该浸出体系能有效浸出浮选精矿中的银,选择合适的工艺参数银的浸出率均可达90%以上,而Pb、Zn、Fe、Sb等矿物不溶解于浸出溶液。相较于氰化法,无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银矿具有无毒环保、回收率高、选择性好等优点,药剂消耗量较高的问题可通过改进工艺流程的方法解决。

本书分上下两篇共14章:上篇非氰浸出技术,包括氰化提金技术、硫脲提金技术、卤素及其化合物提金技术、石硫合剂提金技术和硫代硫酸盐法提金的研究现状;下篇无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银矿,包括从硫化银矿中提取银的研究现状、无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银的热力学研究、硫化银的溶解和贵液的回收工艺研究、无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银的动力学研究、硫代硫酸盐溶液的电化学行为研究、无氨硫代硫酸盐浸出硫化银的反应机理研究和硫化银矿浸出实践。

本书内容所涉及的研究得到了复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室、金属矿尾矿资源绿色综合利用国家地方联合工程研究中心的支持和国家自然科学基金项目(51664028、51104077)的资助。本

书的编写得到了昆明理工大学童雄教授、董鹏副教授的指导和帮助，同时，昆明理工大学吕晋芳、孟奇、何建、贺俊傲、蔡鑫等人在这书编写过程中协助查阅文献资料等，在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中不当之处，敬请读者批评指正。

作 者

2018年12月于昆明

目 录

❖ 上篇 非氰浸出技术 ❖

1 氰化提金技术	1
1.1 氰化法的发展历史	1
1.2 氰化物的性质	1
1.3 氰化废水、废渣对环境的污染	2
1.3.1 氰化废水	2
1.3.2 氰化废渣	3
1.4 氰化法的局限性	3
1.4.1 含铜金矿	4
1.4.2 含铁金矿	5
1.4.3 金银碲合物	6
1.4.4 碳质金矿	7
1.4.5 含砷、锑金矿	8
1.5 本章小结	9
2 硫脲提金技术	10
2.1 酸性硫脲浸金	10
2.1.1 酸性硫脲氧化剂	10
2.1.2 酸性硫脲稳定性	11
2.1.3 酸性硫脲浸出前的预处理	11
2.1.4 酸性硫脲的强化浸出	12
2.1.5 酸性浸金液中金的回收	13
2.2 碱性硫脲浸出	14
2.2.1 碱性硫脲稳定性	15
2.2.2 碱性硫脲氧化剂	15
2.3 本章小结	16

3 卤素及其化合物提金技术	17
3.1 氯化法	17
3.1.1 氯化浸金的热力学基础	17
3.1.2 氯化浸金法的实例	18
3.2 溴化法	19
3.2.1 溴化浸金的热力学基础	19
3.2.2 溴化浸金的实例	19
3.3 碘化法	20
3.3.1 碘化浸金的热力学基础	20
3.3.2 碘化浸金的实例	21
3.4 本章小结	22
4 石硫合剂提金技术	23
4.1 石硫合剂的浸金原理	23
4.2 浸出体系中 S_x^{2-} 和 $S_2O_3^{2-}$ 的降解反应	23
4.3 石硫合剂的配制	24
4.3.1 原料	24
4.3.2 配制方法	24
4.3.3 配制石硫合剂的注意事项	25
4.4 石硫合剂浸出实例	26
4.5 改性石硫合剂	26
4.6 本章小结	27
5 硫代硫酸盐法提金技术	28
5.1 硫代硫酸盐的化学性质	28
5.2 硫代硫酸盐浸出法发展史	29
5.3 常压下氨性硫代硫酸盐浸出金的热力学原理	29
5.4 硫代硫酸盐浸出金的化学原理	30
5.5 硫代硫酸盐浸出体系中的其他化学反应	31
5.5.1 硫代硫酸盐的化学反应	31
5.5.2 铜/铜氨络合离子的化学反应	32
5.5.3 氨/胺的化学反应	33
5.6 硫代硫酸盐的消耗及解决措施	35
5.6.1 影响硫代硫酸盐消耗的主要因素	36

5.6.2 降低硫代硫酸盐消耗的途径	37
5.7 从硫代硫酸盐浸出液中回收金银	42
5.7.1 置换法	43
5.7.2 电沉积法	44
5.7.3 溶剂萃取	44
5.7.4 活性炭吸附	45
5.7.5 树脂吸附	46
5.8 本章小结	47

❀ 下篇 无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银矿 ❀

6 从硫化银矿中提取银的研究现状	49
6.1 国内外银矿资源及其特点	49
6.2 银矿物原料特点	51
6.3 从硫化银矿中提取银的研究现状	51
6.3.1 氰化法浸出硫化银矿存在的问题	51
6.3.2 硫化银矿其他浸出方法	53
6.3.3 氨性硫代硫酸盐法浸出银	59
6.3.4 酸性硫代硫酸盐体系中硫化银的浸出	61
6.4 无氨硫代硫酸盐浸出硫化银矿新工艺的提出	62
6.5 本章小结	62
7 无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银的热力学	63
7.1 硫化银在硫代硫酸盐体系中的化学反应	63
7.1.1 热力学计算方法	63
7.1.2 Ag_2S 在 $\text{Cu-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 体系中可能发生的化学反应	64
7.2 Eh-pH 图	64
7.2.1 Eh-pH 图的理论计算	64
7.2.2 $\text{Ag}_2\text{S-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 体系的 Eh-pH 图	68
7.2.3 $\text{Cu-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 体系的 Eh-pH 图	71
7.3 本章小结	74
8 纯硫化银的溶解和贵液的回收工艺	75
8.1 原料、装置和方法	75

8.1.1	浸出原料	75
8.1.2	反应装置	75
8.1.3	浸出方法	76
8.2	结果与讨论	76
8.2.1	硫酸铜与硫代硫酸盐比例对溶解率的影响	76
8.2.2	硫酸铜与硫代硫酸盐浓度对溶解率的影响	77
8.2.3	气氛对溶解率的影响	78
8.2.4	搅拌速度对溶解率的影响	80
8.2.5	pH 值对溶解率的影响	81
8.2.6	氨对溶解率的影响	83
8.2.7	粒度对溶解率的影响	84
8.2.8	温度对溶解率的影响	85
8.2.9	时间对溶解率的影响	86
8.2.10	工艺条件的优化	87
8.3	贵液中银的回收	87
8.3.1	锌粉用量对置换率的影响	88
8.3.2	时间对置换率的影响	88
8.4	本章小结	88
9	无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银的动力学	90
9.1	动力学理论模型	90
9.1.1	反应速率模型	90
9.1.2	活化能的计算	92
9.2	原料、装置和方法	93
9.3	结果与讨论	94
9.3.1	粒度对反应速率的影响	94
9.3.2	温度对反应速率的影响	95
9.3.3	反应动力学模型的选择	96
9.4	本章小结	99
10	硫代硫酸盐溶液的电化学行为	100
10.1	实验装置和方法	100
10.1.1	电化学测试系统	100
10.1.2	电化学研究方法	101
10.2	电化学理论基础	101

10.2.1	双电层结构	101
10.2.2	双电层对电极反应的影响	101
10.3	结果与讨论	102
10.3.1	硫代硫酸盐溶液的循环伏安曲线	102
10.3.2	pH 值对硫代硫酸盐溶液循环伏安曲线的影响	104
10.3.3	铜(II)离子对硫代硫酸盐溶液循环伏安曲线的影响	104
10.3.4	铜(II)离子浓度对硫代硫酸盐溶液循环伏安曲线的影响	106
10.3.5	pH 值对含铜硫代硫酸盐溶液循环伏安曲线的影响	106
10.3.6	空气对含铜硫代硫酸盐溶液循环伏安曲线的影响	107
10.4	本章小结	108
11	无氨硫代硫酸盐浸出硫化银的反应机理	109
11.1	溶液化学	109
11.1.1	$\text{Ag-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 体系溶液化学	109
11.1.2	$\text{Cu-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 体系溶液化学	111
11.2	反应物及产物的化学特征	112
11.2.1	反应物化学组成和结构特征	112
11.2.2	反应中间产物化学组成和结构特征	113
11.2.3	反应最终产物化学组成和结构特征	115
11.3	反应机理	116
11.4	Ag_2S 与 Ag 在硫代硫酸盐溶液中反应的区别	117
11.4.1	单质 Ag 在 $\text{Cu-NH}_3\text{-S}_2\text{O}_3^{2-}$ 体系中的反应	117
11.4.2	Ag_2S 在 $\text{Cu-S}_2\text{O}_3^{2-}\text{-H}_2\text{O}$ 体系中的反应	119
11.5	本章小结	119
12	墨西哥某硫化银矿浸出实践	121
12.1	原料性质	121
12.1.1	化学分析	121
12.1.2	矿物学分析	121
12.1.3	矿石粒度分析	123
12.2	浸出装置及方法	123
12.3	矿样 1 的结果与讨论	123
12.3.1	药剂比例及浓度对银浸出率的影响	123
12.3.2	温度对银浸出率的影响	125
12.3.3	矿浆浓度对银浸出率的影响	129

12.3.4	粒度和时间对银浸出率的影响	129
12.3.5	反应条件的优化	130
12.3.6	其他金属矿物的浸出	130
12.4	反应产物特征分析	131
12.5	本章小结	133
13	云南某硫化银浮选精矿浸出实践	134
13.1	原料性质	134
13.1.1	化学分析	134
13.1.2	矿物学分析	134
13.1.3	矿石粒度分析	135
13.2	研究方法	137
13.2.1	氰化浸出	137
13.2.2	硫代硫酸盐浸出	137
13.3	浸出结果与讨论	138
13.3.1	氰化法浸出结果	138
13.3.2	硫代硫酸盐浸出结果	138
13.3.3	硫代硫酸盐浓度对银浸出率的影响	138
13.3.4	液固比对银浸出率的影响	139
13.3.5	浸出时间对银浸出率的影响	140
13.3.6	浸出温度对银浸出率的影响	140
13.4	多段浸出	141
13.4.1	多段浸出工艺流程	141
13.4.2	多段浸出扩大研究	142
13.5	三段逆流浸出	142
13.6	本章小结	144
14	无氨硫代硫酸盐法浸出硫化银矿总结	145
	附录	148
	参考文献	153

非氰浸出技术

1 氰化提金技术

1.1 氰化法的发展历史

氰化法是以碱金属氰化物的水溶液做溶剂，浸出矿石中的贵金属，然后将贵金属从溶液中提取出来的方法。早在 1783 年，瑞典的席莱就发现金可溶于氰化物溶液，但是，氰化法提取贵金属应用于工业生产是在 1887~1888 年间由麦克阿瑟与福雷斯特兄弟获得专利后开始推广的。氰化法于 1889 年首先在新西兰克朗矿进行生产试验，此后该工艺迅速扩展，1891 年应用于墨西哥、美国的一些矿山。南非德兰矿金品位低，以细粒嵌布于硬岩中，难以回收。氰化法应用于该矿后，金的回收率从原来的 70% 提高到 95%，挽救了日益下滑的企业。在 20 世纪 60 年代之前，氰化浸出法在工业上都采用槽浸，直到 1971 年，世界上第一家工业规模的金堆浸场在美国内华达州投产，氰化堆浸法开始用于处理低品位矿石。

氰化法发展至今，已提出很多从溶液中回收贵金属的技术。最初，从氰化矿浆中回收金的流程是：先进行矿浆洗涤，然后进行贵液的澄清、除气，接着用锌粉置换法从澄清的贵液中沉淀金，此方法一直沿用至今。20 世纪 60 年代以来发展起来的炭浆法（CIP）和炭浸法（CIL），通过向矿浆中加入活性炭吸附金氰络离子。随着对离子交换剂应用的研究，人们开始采用离子交换树脂（树脂矿浆法 RIP 和 RIL）从氰化液或氰化矿浆中吸附金。利用溶剂萃取从氰化液中提金在近些年也取得了一定的研究进展，异戊醇、烷氧基磷酸酯可分别从酸性和碱性溶液中萃取金，实现金与砷、铁等杂质的分离^[1]。

1.2 氰化物的性质

氰化物是指带有氰基（CN）的化合物，其中的碳原子和氮原子通过叁键相

连接，这一叁键给予氰基以相当高的稳定性，使之在通常的化学反应中都以一个整体存在。氰化物根据分子结构可以分为两类：一类为无机氰，如氢氰酸、氰化钠、氰化钾等；另一类为有机氰或腈，如丙烯腈、乙腈等。在黄金企业中广泛应用的主要是无机氰化物，如氰化钠和氰化钾，在浸出过程中常加入大量 CaO 作为保护碱，防止氰化物水解为氢氰酸气体挥发出来，所以在黄金生产中会产生大量的高浓度含氰废水、废渣。氰化物具有毒性，对环境很不友好，因此，人们对氰化物污染问题非常重视。

氰化物进入水体会给水生物带来严重破坏，其毒性与水的 pH 值、溶解氧及其他金属离子的存在情况有关。一般情况下，当水中氰化物产生的氰离子 (CN^-) 浓度达到 0.01mg/L 时，就能使浮游生物和甲壳类生物死亡；对于鱼类， CN^- 致死量为 0.04~0.1mg/L。即使是铁氰酸盐和亚铁氰酸盐等低毒性氰化物复盐大量排入水中后，经过阳光照射和其他条件的配合也会分解释放出相当数量的游离氰根，导致水生物中毒死亡。此外，含氰废水还会造成农业减产、牲畜死亡等。对人类来说，氰化物能经口、呼吸道或皮肤进入人体，致死量仅为 0.15~0.2g 左右^[2]。氰化物一旦进入胃内，在胃酸的作用下，会立即水解为氢氰酸进入血液，细胞色素氧化酶中的 Fe^{3+} 与血液中的氰根结合，生成氰化高铁细胞色素氧化酶，使 Fe^{3+} 丧失传递氧的能力，造成呼吸链中断，细胞窒息死亡。

1.3 氰化废水、废渣对环境的污染

氰化物对环境的污染主要指含氰废水外排所造成的河流（地面水）、饮用水（地下水）、土壤的污染。含氰废渣在碱性条件下一般不会对大气环境造成损害，但是随着时间的推移，含氰废渣中的氰化物会渗入土壤和地下水中，最终造成土壤、植被、地下水甚至周边河流的污染^[3]。

1.3.1 氰化废水

氰化提金过程中会产生大量含氰废水，如氰化贫液、洗矿废水、尾矿浆等。根据矿石组成和生产工艺条件，氰化提金废水中主要化学成分为： CN^- ， SCN^- ， $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ ， $\text{Ag}(\text{CN})_2^-$ ， $\text{Cu}(\text{CN})_4^{2-}$ ， $\text{Fe}(\text{CN})_4^{2-}$ ， $\text{Ni}(\text{CN})_4^{2-}$ ， $\text{Zn}(\text{CN})_4^{2-}$ 等，其中的氰含量远远超过国家允许的 0.5mg/L 排放标准。含氰废水存贮不当会造成废水渗漏，污染周围地下水，给人畜带来严重危害；如果未经处理直接排放，将严重地污染水资源。有些小矿山和个体淘金者将氰化废水直接排入江河湖海中，对水生生态系统中的浮游动物群、底栖生物群、鱼群，以及下游的居民造成极为严重的后果。

从上海、石家庄、山东等地调查发现，不同的农作物对氰化物的耐受程度不同，实践表明，用含 80mg/L 氰化物的污水灌溉农田，对农作物生长影响不大，

但其果实是否含有氰化物、地下水是否受到污染、污染程度如何,都有待进一步研究。目前,国内外黄金科研工作者在不断研究氰化废水的净化技术,在发展经济的同时,也保护地球生态环境。

1.3.2 氰化废渣

2006年经青海省环保部门检测,氰化提金废渣中氰化物平均含量(以CN⁻计)高达18mg/L,超出国家工业废渣排放标准(氰化物含量5mg/L)3倍以上,氰的污染情况远远超过环境的自净化能力,成为周边环境安全的重大隐患,给周边人群身体健康和动植物生长带来危害。

2016年8月1日,新《国家危险废物名录》将采用氰化物进行黄金选矿过程中产生的氰化尾渣定为“危险废物”。2018年1月1日起施行的《中华人民共和国环境保护税法》规定,对危险废物征收1000元/吨的环境保护税。黄金行业生产工艺不同于其他行业的最大特征是尾渣产率接近100%。我国黄金行业每年氰化尾渣产生量约1亿吨。若按1000元/吨的标准对其征收环境保护税,黄金行业每年需缴纳1000亿元的税款。目前,我国金矿平均品位为2~3g/t,黄金行业所获取利润总额远不足以缴纳环保税。

在技术上,氰化尾渣脱氰处理方法包括臭氧氧化法、因科法、固液分离洗涤法、自然降解法、高温水解法等,传统的臭氧氧化法、二氧化硫-空气法等化学方法处理氰化尾渣时,不同程度地存在工艺流程复杂、投资及运行成本高、人工操作要求苛刻、氰化物脱除不彻底等难题。辽宁新都黄金有限责任公司采用“氰化尾矿WAST非均相治理技术”,利用含有高浓度二氧化硫的冶炼烟气对氰化尾矿进行无害化处理,使尾渣达到一般工业固体废物要求,可直接外售,创造效益的同时也为企业解决了库容问题,实现了尾气达标排放。山东黄金精炼厂采用洗涤压滤法,通过0.7倍水在线洗涤过滤,滤饼含水率11%,清洗后的尾渣中总氰含量从2371mg/L降低到2.32mg/L,直接达到一般固废排放标准,洗涤脱氰率达99.5%。

当前一些发达国家黄金企业利用无害化处理技术,已经实现了氰化尾渣井下充填,如澳大利亚的顶峰金矿、卡若纳·贝勒金矿等。以顶峰金矿为例,含氰尾矿充填砂浆含氰浓度在低于50mg/L的情况下,可以进行井下采空区充填作业,其渗出液经矿井涌水稀释后能够达到澳大利亚环保标准。

1.4 氰化法的局限性

一百多年来,氰化法因工艺简单、稳定性好的优点在世界黄金工业中一直占主导地位,但是,氰化法处理含铜、铁、砷、锑及碳的金矿石却难以获得理想的浸出效果。

1.4.1 含铜金矿

含铜金矿是常见的难处理金矿石之一，在普通氰化条件下，金属铜和次生硫化铜矿、氧化铜矿（如蓝铜矿、赤铜矿、辉铜矿、孔雀石）都能够完全且迅速地溶解于氰化溶液中，严重干扰金的浸出和回收过程^[4]。

含铜矿物对氰化浸金的影响主要体现在以下三个方面：

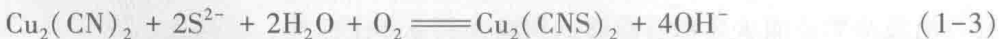
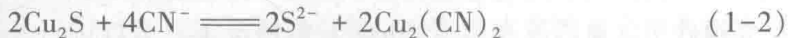
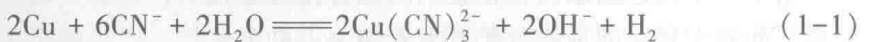
第一，含铜矿物的氧化溶解会消耗大量的游离氰根离子和溶解氧，而这也是氰化浸金的关键因素，浸出液中游离氰根和溶解氧浓度的降低会导致金的溶解速率降低，增加氰化提金的成本。表 1-1 列出了常见铜矿物在氰化液中的溶解率。

表 1-1 一些铜矿物在氰化液中的溶解率

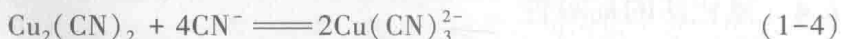
矿物名称	组 分	溶解率/%	
		23℃	45℃
黄铜矿	CuFeS ₂	5.6	8.2
硅孔雀石	CuSiO ₃	11.8	15.7
黝铜矿	4Cu ₂ S · SbS ₃	21.9	43.7
硫砷铜矿	3CuS · As ₂ S ₅	65.8	75.1
斑铜矿	FeS · 2Cu ₂ S · CuS	70.0	100.0
赤铜矿	Cu ₂ O	85.5	100.0
金属铜	Cu	90.0	100.0
辉铜矿	Cu ₂ S	90.2	100.0
孔雀石	CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	90.2	100.0
蓝铜矿	2CuCO ₃ · Cu(OH) ₂	94.5	100.0

注：将各种铜矿分别磨碎至-0.15mm（100目），与-0.15mm的石英砂配置成含铜0.2%的试样，于0.1%NaCN液中浸出24h，固体物料质量占比9%。

单质铜和辉铜矿能快速溶于氰化物溶液：

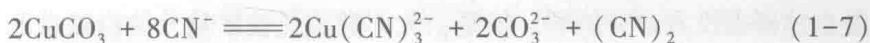


生成的氰化铜和硫氰化铜进一步溶于氰化物溶液中：



氢氧化铜和碳酸铜与过量氰化物的反应为：

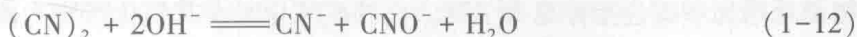




孔雀石与氰化物的反应为:



碱性环境中在氰根络合作用下,孔雀石可自发溶解,且增大氰根浓度更易形成高配位数铜氰络合物。反应副产物 $(\text{CN})_2$ 会分解为 CN^- 和 CNO^- ,同时 CN^- 自身在氧气的作用下也会发生氧化反应:



第二,当浸出液中游离氰根浓度降低,溶解的铜氰络离子会在金粒表面离解形成 CuCN 钝化膜:

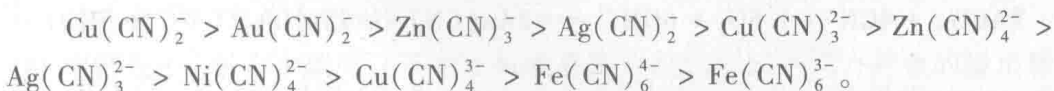


CuCN 沉淀覆盖在金粒表面,阻碍了金的进一步溶解甚至使溶解过程停止。放射性同位素研究已经证明了在含铜的氰化物溶液中金粒表面确实存在铜,并且随着铜浓度的增加,钝化膜密度增大,金的溶解速度相应降低。

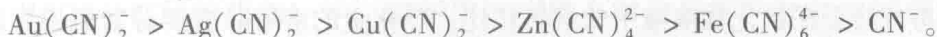
第三,溶液中的铜氰络合离子会影响溶液中金的回收。

铜氰络离子对锌粉置换金会产生一定影响,当铜络离子浓度达 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ mol/L时就能显著降低金的回收,而且置换产物中含有大量的铜,不利于后续处理。

强碱性和弱碱性离子交换树脂对氰化液中各种离子亲和力的顺序为:



胺类萃取剂是萃取金的重要溶剂,当用叔胺三烷基胺从氰化浸出液中萃取时,各类氰化物离子的萃取顺序为:



虽然,铜氰络离子和金、银的氰化络离子在活性炭上吸附能力的相对大小还不十分明确,但已知铜氰络离子的吸附能力随氰配位数的增加而减小:

$\text{Cu}(\text{CN})_2^- > \text{Cu}(\text{CN})_3^{2-} > \text{Cu}(\text{CN})_4^{3-}$,这至少表明铜氰络离子也能在活性炭上吸附,从而影响金氰络离子的吸附。

1.4.2 含铁金矿

金矿石中的含铁矿物可分为氧化铁矿物和硫化铁矿物两大类,其中,氧化铁矿物(如赤铁矿、磁铁矿、针铁矿、菱铁矿等)一般不与氰化物作用,对氰化