

缅甸某金矿浸出试验及机理分析

杨婉婷^{1,2}, 蓝卓越^{1,2,3*}, 杨迪^{1,2}, 李云川^{1,2}, 李雄^{1,2}, 李行^{1,2}, 杜云翔^{1,2}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 省部共建复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室, 云南 昆明 650093;
3. 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, 云南 昆明 650093)

摘要: 缅甸某金矿含金品位为 3.29 g/t, 金主要以独立矿物的形式赋存于银金矿中, 少数以类质同象或超显微包裹的形式赋存于黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿中, 脉石矿物主要有钾长石、石英、白云母、绿泥石、黄铁矿等。该矿石中的铜、铅、锌等有色金属元素以及砷等有害元素含量低且无综合回收价值, 但由于金的嵌布粒度粗细不均且存在包裹金的现象, 原矿直接浸出或粗磨浸出效果不佳。在工艺矿物学研究的基础上, 本文考查了磨矿细度、浸金剂种类、浸金剂绿金用量、助浸剂、固液比、浸出 pH 值、浸出时间等对金浸出的影响, 结果表明, 通过细磨和添加助浸剂强化浸出可以提高金的浸出率。在磨矿细度-0.074 mm 91.13%, 浸出 pH 值 12, 绿金用量 2000 g/t, 搅拌转速 400 r/min, 浸出时间 12 h 的试验条件下, 金的浸出率为 87.93%; 添加助浸剂硝酸铅预处理 2 h, 同样浸出条件下金的浸出率可提高至 90.03%, 硝酸铅的助浸作用主要表现为微电池效应、化学沉淀和钝化膜溶解等。

关键词: 金矿; 工艺矿物学; 浸金剂; 浸出; 助浸剂

中图分类号: TD953 **文献标志码:** A

第一作者: 杨婉婷, 女, 2000 年生, 硕士研究生, 研究方向为矿产资源综合利用、浮选理论与工艺。E-mail: 1573542398@qq.com。

The leaching test of ore from a gold mine in Myanmar and its mechanism analysis

YANG Wanting^{1,2}, LAN Zhuoyue^{1,2,3*}, YANG Di^{1,2}, LI Yunchuan^{1,2}, LI Xiong^{1,2}, LI Hang^{1,2}, DU Yunxiang^{1,2}

(1. College of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan, 650093, China;
2. State Key Laboratory of Clean Utilization of Complex Nonferrous Metal Resources, Kunming Yunnan 650093, China; 3. National and Local Joint Engineering Research Center for Green Comprehensive Utilization of Metal Mine Tailings Resources, Kunming Yunnan, 650093, China)

Abstract: The gold ore from a gold mine in Myanmar has a gold grade of 3.29 g/t. Its gold mainly occurred in the form of independent mineral of argyrite. A small amount of gold occurred in forms of isomorphism or ultra-microscopic inclusion in pyrite, galena, sphalerite, and chalcopyrite. Gangue minerals mainly include K-feldspar, quartz, muscovite, chlorite, etc. The contents of non-ferrous metal elements such as copper, lead, zinc, and harmful elements such as arsenic in the ore are low with no comprehensive recovery value. However, due to the uneven distribution of gold particle sizes and the problem of gold inclusion, the original ore's direct leaching of raw ore or the leaching of rough grinded ore are not effective. Based on the process mineralogy research, this paper investigated effects of the grinding fineness, type of gold leaching agent, amount of green gold leaching agent, leaching aid, solid-liquid ratio, pH value of leaching solution, and leaching time on the gold leaching from the ore. The results show that the leaching rate of gold from the ore can be improved by strengthening the leaching effectiveness through the fine grinding of ore and the addition of leaching aid. Under the experimental condition including the ore grinding fineness of -0.074 mm at 91.13%, pH value of 12 for the leaching

solution, green gold dosage of 2000 g/t, stirring speed of 400r/min, and leaching time of 12 hours, the leaching rate of gold from ore is 87.93%. When the grinded ore had been pre-treated by adding lead nitrate as the leaching aid for 2 hours and then was leached under the same previous experimental condition, the leaching rate of gold from ore is increased to 90.03%. The leaching effect of lead nitrate is mainly manifested in the micro cell effect, chemical precipitation and passivation film dissolution.

Keywords: gold mines; process mineralogy; leaching agent; leaching; leaching aids

黄金作为一种战略金属, 不仅拥有金融、货币和商品的属性, 还广泛应用于仪器仪表制造、电子工业、医疗、化工设备、通信、航天等各个行业^[1], 在全球经济发展中具有重要的地位, 因此金矿资源也被视为一种战略矿产资源。全球金矿资源分布广泛, 遍布六大洲, 但其分布不均匀, 相对集中于澳大利亚、俄罗斯和南非等几个资源大国^[2]。根据美国地质调查局统计数据, 截至2022年, 全球黄金资源储量约5.3万t, 其中已探明黄金储量为3.3万t, 资源量(包括探明和推断)约为12万t。目前, 主要的黄金储量集中在澳大利亚, 占全球储量的17.82%^[3]。近年来, 南亚的缅甸、老挝等国家也相继发现并开发了一些金矿, 引起了行业的关注。

黄金的选冶工艺因矿石类型而有所不同, 包括重选、浮选和氰化浸出等方法^[4], 其中, 氰化浸出工艺是最常用的提金方法, 占全球提金工艺的一半以上^[5]。氰化浸出具有工艺简单、回收率高等优点, 但也存在一些缺陷, 比如剧毒性^[6], 对环境有较大的危害^[7], 并且对含砷、含硫、含铜和含碳等难处理金矿的直接浸出效果不理想^[8]。目前环保浸金剂已实现商业化应用, 常见报道的有金蝉^[8,9]、圣的^[10]、绿金^[11]、喜金^[12]等。绿金环保浸金剂的实验室试验和工业应用效果与氰化钠相当, 其浸出工艺与全泥氰化浸金工艺相似, 在碱性条件下同样能够快速、高效地浸金, 并且具有低毒环保等优点。在浸出过程中, 有时需要添加助浸剂以进一步提高金的浸出率, 助浸剂可分为氧化物、氨盐、重金属盐以及有机型助浸剂^[13]。

本论文以缅甸某金矿作为研究对象, 在工艺矿物学研究的基础上查明矿石性质以及金的赋存状态, 制订了细磨强化浸出技术路线, 以环保药剂“绿金”为浸金剂, 考察了磨矿细度、浸出剂种类、绿金用量、固液比、浸出pH值、浸出时间以及助浸剂对金矿浸出效果的影响, 旨在提高金的浸出率。

1 矿石性质

1.1 矿石化学性质

金矿石取自缅甸某地区, 采用X-射线荧光光谱分析和化学多元素分析法, 对矿石化学成分及含量进行检测, 结果分别见表1、2所示。

由表1可知矿石中主要元素为Si、Al、Fe、K、S、Ca, 由表2可知矿石含Au 3.29 g/t, Ag 9.3 g/t, 其他组分含量较高的有SiO₂ 58.18%、Al₂O₃ 14.58%、Fe 6.33%、K₂O 7.31%、S 3.77%。从

表1 矿石X-射线荧光光谱分析结果(%)

Table 1. Results of X-ray fluorescence spectroscopy of the ore (%)

Si	Al	Fe	K	S	Ca	Mg
19	6	4	4	1	1	0.8
Mn	Na	Ti	Cu	P	Pb	Zn
0.2	0.07	0.2	0.07	0.04	0.2	0.2
Zr	Sr	Rb	Ba	Ce	Cr	Hg
0.008	0.008	0.02	0.2	0.08	0.004	0.004

化学多元素分析结果可知, 该矿石除金以外其他共伴生组分没有太多的回收价值, 且其中铜、砷、硫等有害元素含量较低, 对浸金过程有利。脉石矿物主要有钾长石、石英、白云母、绿泥石、黄铁矿等。

表2 矿石化学多元素分析结果 (%)
Table 2. Results of multi-element analysis of the ore (%)

Au*	Ag*	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe	K ₂ O
3.29	9.3	58.18	14.58	6.33	7.31
S	Cu	Zn	Pb	Ti	Mn
3.77	0.11	0.24	0.35	0.51	0.2
CaO	MgO	Na ₂ O	Ba	As	C
1.82	1.36	0.18	0.21	<0.1	0.73

备注: 表中标注“*”的元素含量单位为g/t。

1.2 金矿的嵌布特征

对矿石块状样品磨制光片、薄片, 在镜下观察主要目的矿物的嵌布特征, 并结合MLA分析, 对该样品中主要目的矿物和其他主要矿物的嵌布特征进行分析。

该矿石的主要构造为块状构造, 主要结构为蚀变斑状结构, 金属矿物的主要结构为自形-半自形粒状结构。矿石中的金主要以银金矿形式存在, 经X-射线能谱分析, 银金矿含Au 75.56%、Ag 23.44%、Fe 1.10%。矿石中银金矿总体粒度较粗, 因其硬度较低且具延展性, 多呈它形粒状或不规则状, 常随其他矿物的颗粒边缘或孔隙分布。银金矿的嵌布特征如图1所示。

由图1可知其矿石中银金矿的嵌布特征主要有: 1) 部分银金矿单独解离, 呈它形粒状, 星点状分布于矿石中; 2) 部分银金矿与黄铁矿、黄铜矿、方铅矿、闪锌矿等硫化物连生, 少数包裹黄铜矿等硫化物或被硫化物包裹; 3) 部分银金矿与绿泥石、白云母、钾长石、石英等脉石矿物连生。银金矿粒度多在0.005~0.2 mm之间。从嵌布特征可知, 矿石中的银金矿呈不规则分布, 有的嵌布较细且连生紧密, 在浸出前需要通过细磨保证银金矿的单体解离。单独解离的银金矿在浸金过程中可以直接与浸金剂接触反应溶解至浸出液中, 而与黄铜矿、黄铁矿等硫化矿物连生的银金矿在浸出过程中由于硫化铜容易溶解在含氰化物的溶液中, 会在金的表面形成一层钝化的硫化铜薄膜阻碍金的浸出, 且黄铁矿的存在也会增加浸金剂的消耗, 故在浸出过程中需考虑使用助浸剂来减少硫化矿物的干扰, 从而促进金的浸出。

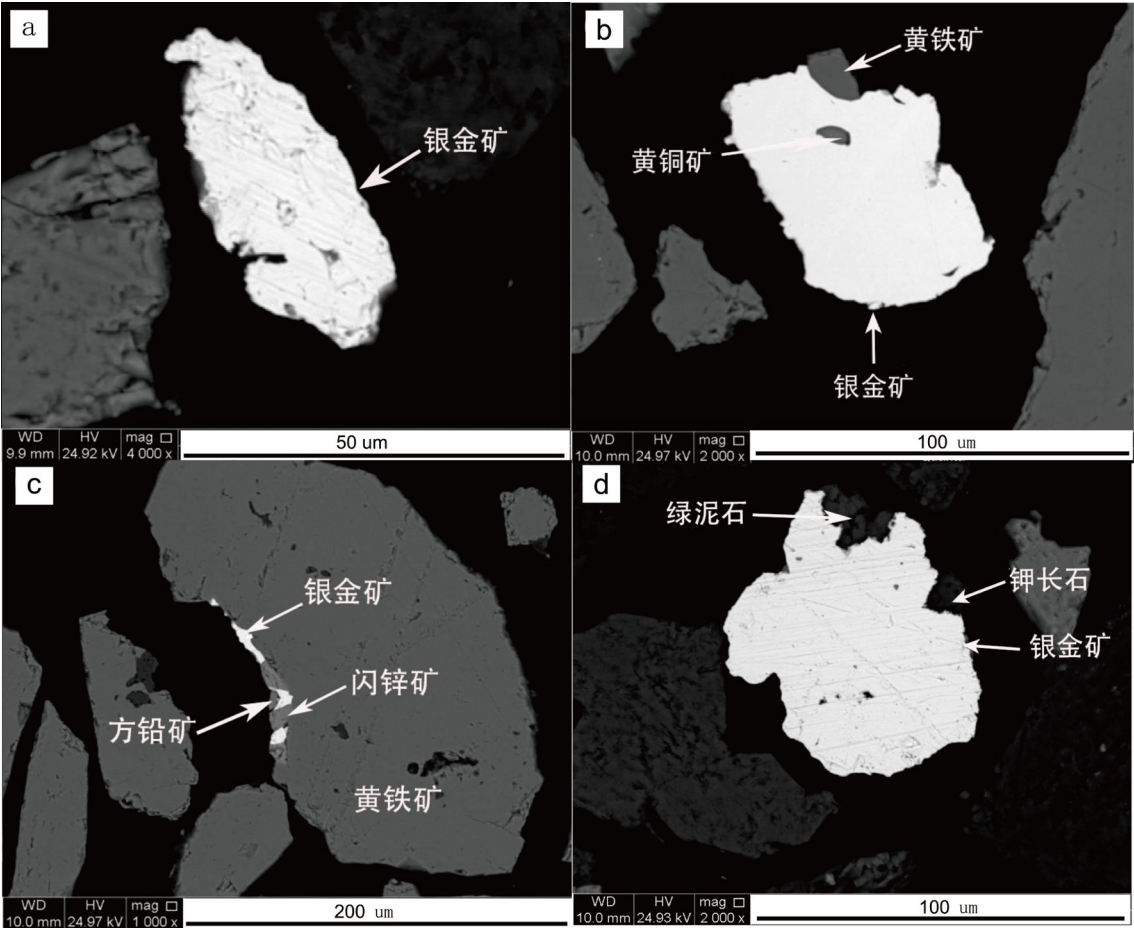
1.3 目的元素赋存状态

矿石中的金多数以银金矿存在, 占金分配率的99.54%, 少数以类质同象或超显微包裹的形式赋存于黄铁矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿中(占金分配率的0.40%、0.02%、0.02%、0.02%), 其他少量。金在各主要含金矿物中的分配率计算如表3所示。

2 原材料与研究方法

2.1 试验药剂

本实验采用的试验药剂为分析纯, 主要包括pH调整剂石灰(CaO)、硫酸(H₂SO₄); 本次浸出试验主要采用环保浸金剂产品绿金, 并与硫代硫酸钠(Na₂S₂O₃)、硫脲(CH₄N₂S)、溴化钠(NaBr)、氰化钠(NaCN)等其他浸出剂进行对比; 助浸剂高锰酸钾(KMnO₄)、铁氰化钾



a. 银金矿单独解离, 呈它形粒状; b. 银金矿与黄铁矿连生、包裹黄铜矿; c. 银金矿与黄铁矿、闪锌矿、方铅矿连生; d. 部分银金矿与绿泥石等脉石矿物连生。

图1 银金矿的嵌布特征

Fig. 1. Distribution characteristics of argyrite

表 3 金在各主要含金矿物中的分配率

Table 3. Prtitioning rates of gold in main gold-bearing minerals

矿物	矿物含量/%	矿物中金的含量/(g/t)	矿物中金的分配量/(g/t)	金在各主要含金矿物中的分配率/%
银金矿*	4.06*	75.56*	3.170	99.54
黄铁矿	6.73	0.16	0.011	0.40
方铅矿	0.40	0.16	0.001	0.02
闪锌矿	0.36	0.16	0.001	0.02
黄铜矿	0.32	0.16	0.001	0.02
其他	88.66	/	/	/
合计	100.00	/	2.681	100.00

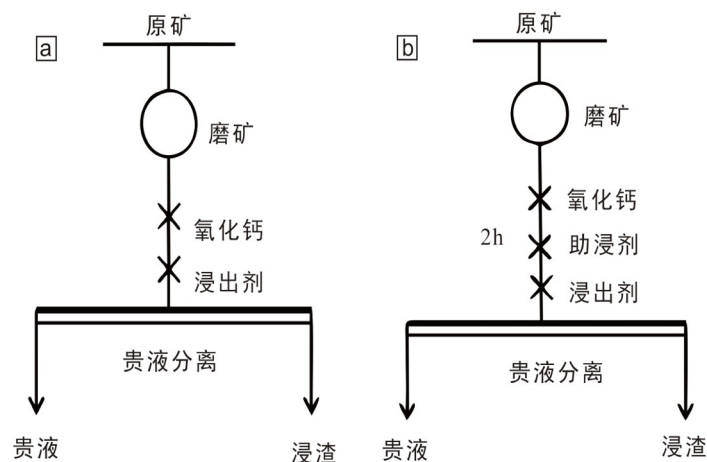
备注: 表中标注“*”的银金矿的矿物含量单位为g/t, 矿物中金的含量单位为%。

(Fe(SCN)₃), 氯化氢胺 (NH₄Cl), 硝酸铅 (Pb(NO₃)₂) 以及柠檬酸三钠 (C₆H₅Na₃O₇)。

2.2 研究方法

采用单因素实验法对该矿石进行浸金试验, 主要考察磨矿细度、石灰用量、绿金环保浸金剂用

量、浸出时间、助浸剂及用量等条件对金浸出率的影响。浸出固体浓度为20%，采用石灰调节pH，助浸剂预处理时间为2 h，加入绿金环保浸金剂，在常温下搅拌浸出一定时间，对浸出渣进行过滤、洗涤、烘干，分析浸渣金品位，计算浸出率，具体浸出试验流程见图2。



a. 浸出试验流程; b. 助浸剂浸出试验流程。

图2 浸出试验流程

Fig. 2. The leaching test process

3 结果与讨论

3.1 搅拌浸出试验

3.1.1 磨矿细度对金矿浸出的影响

试验流程如图2a所示，以磨矿细度为变量，固液比1:5，石灰用量为3000 g/t，pH值为13，绿金用量为1500 g/t，浸出时间为24 h，搅拌转速400 r/min，在室温下进行搅拌浸出试验，浸出结果如图3a所示。

由图3a可知，随着-0.074 mm粒级含量的增大，金的浸出率逐渐增加，说明磨矿细度对金的浸出影响较大。随着细度的增加，金颗粒的单体解离度增加，浸出率显著提高。当-0.074 mm粒级含量达到91.13%时，金的浸出率达到较高水平，为72.52%。

3.1.2 浸出剂种类对金矿浸出的影响

在磨矿细度为-0.074 mm 91.13%，固液比1:5，石灰用量3000 g/t，pH值为13，浸出时间24 h，搅拌转速400 r/min的室温条件下进行浸出试验，考察浸出剂种类对金浸出的影响，试验结果见图3b所示。

由图3b可知，溴化法、硫代硫酸盐法和硫脲法对金的浸出效果不佳，而使用环保浸金剂绿金时金的浸出率达到77.83%，与氰化法相当，故本次试验采用环保浸金剂绿金。

3.1.3 绿金用量对金矿浸出的影响

在磨矿细度为-0.074 mm 91.13%，固液比1:5，石灰用量3000 g/t，pH值为13，浸出时间24 h，搅拌转速400 r/min的室温条件下进行浸出试验，考察绿金用量对金浸出的影响，试验结果见图3c所示。

由图3c可知，随着绿金用量的增加，金浸出率总体呈增加之势，在绿金用量为2000 g/t时，金的浸出率达到75.96%，故绿金用量取2000 g/t。

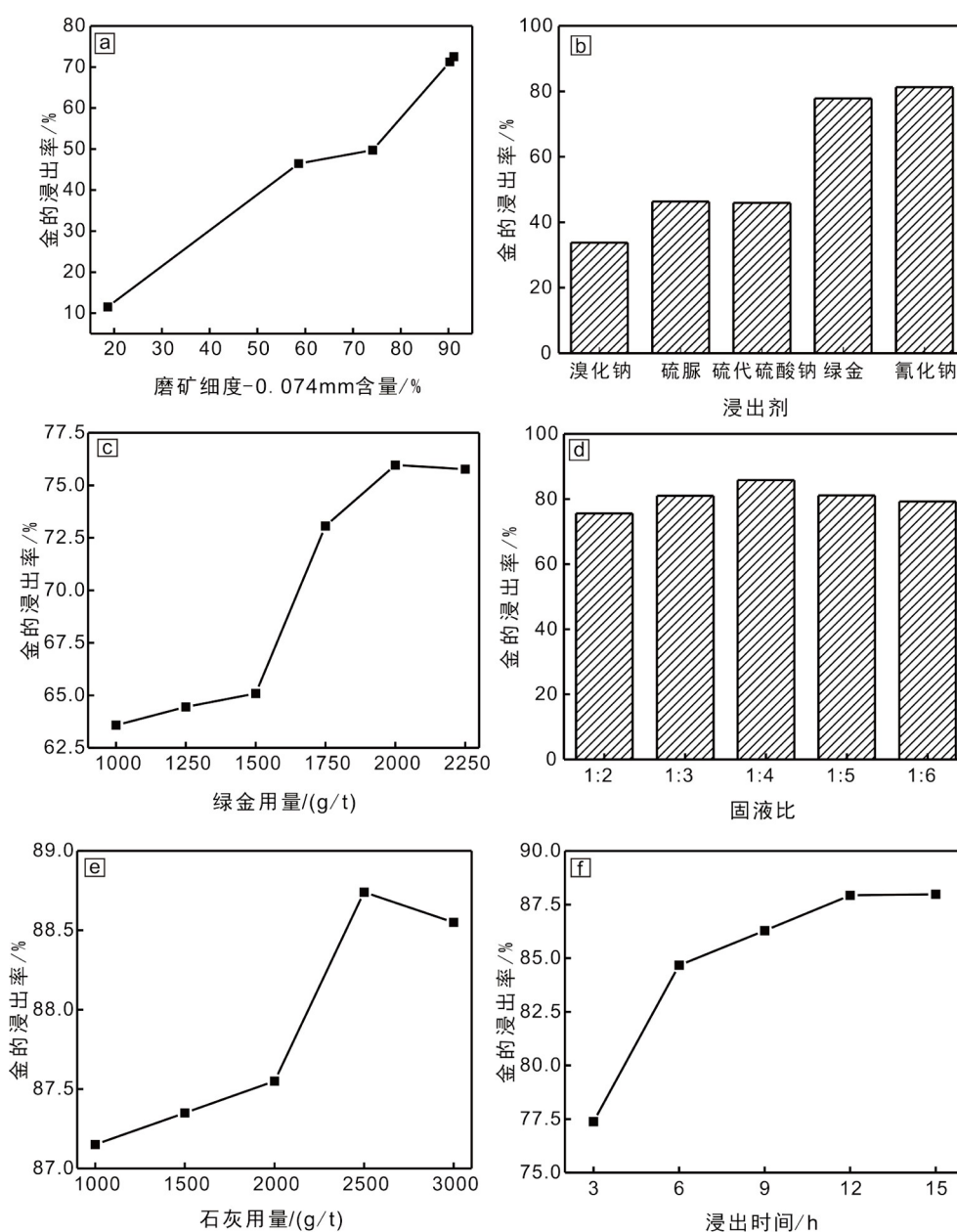
3.1.4 固液比对金矿浸出的影响

在磨矿细度为 -0.074 mm 占91.13%、石灰用量 3000 g/t ，pH值为13，绿金用量 2000 g/t ，浸出时间为 24 h ，搅拌转速 400 r/min 的条件下，考察固液比对浸出的影响，结果如图3d所示。

由图3d结果可以看出，在固液比为1:4时金浸出率最高，达到85.78%，说明保持一定的矿浆流变性以及一定的浸出剂浓度是提高金浸出率的前提，故固液比选用1:4。

3.1.5 石灰用量对金矿浸出的影响

溶液的pH值是影响金浸出的一个重要条件，试验中所用的浸金剂绿金中含有硫代硫酸盐、聚合氰胺钠和三聚氰酸钠， $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 在酸性溶液中可以被氧化，而在碱性条件下可稳定存在并与金生成稳



a. 磨矿细度对金浸出率的影响; b. 浸出剂对金浸出率的影响; c. 绿金用量对金浸出率的影响; d. 固液比对金浸出率的影响; e. 石灰用量对金浸出率的影响; f. 浸出时间对金浸出率的影响。

图3 搅拌浸出试验结果

Fig. 3. Results of the leaching test with stirring

定的络合离子, 而聚合氰胺钠和三聚氰酸钠在碱性条件下分别分解释放 $\text{N}(\text{CN})_2$ 和 OCN^- , 该离子在有氧条件下能溶解金生成络合离子, 故绿金需在碱性条件下使用。试验采用石灰作为pH调整剂, 在磨矿细度为 -0.074 mm 91.13%, 固液比1:4, 绿金用量为2000 g/t, 浸出时间为24 h, 搅拌转速400 r/min, 考察石灰用量对浸出的影响, 结果如图3e所示。

当石灰用量分别为1000、1500、2000、2500、3000 g/t时, 对应的pH值分别为9.5、10、10.5、12、13。由图3e试验结果可以看出, 在石灰用量为2500 g/t时, 此时pH值为12, 金的浸出率最高, 达到88.74%, 故石灰用量选用2500 g/t。

3.1.6 浸出时间对金矿浸出的影响

金的浸出率会随着浸出时间的增长而有所提高, 在磨矿细度为 -0.074 mm 91.13%, 固液比1:4, 石灰用量2500 g/t, pH值为12, 绿金用量2000 g/t, 搅拌转速400 r/min的条件下, 考察浸出时间对金浸出的影响, 结果如图3f所示。

从图3f试验结果可以看出, 浸出12 h后, 金的浸出率可达到87.93%, 随着浸出时间进一步延长, 金浸出率增加不明显, 故综合考虑金的浸出时间为12 h。

3.2 助浸剂对金矿浸出的影响

3.2.1 助浸剂种类对金矿浸出影响

浸金中助浸剂的种类主要有氧化物、氨盐、重金属盐和有机物等, 本次试验主要考察高锰酸钾(KMnO_4)、铁氰化钾($\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$)、氯化氢铵(NH_4Cl)、柠檬酸三钠($\text{C}_6\text{H}_5\text{Na}_3\text{O}_7$)以及硝酸铅($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)对金浸出的影响。

在磨矿细度 -0.074 mm 占91.13%, 固液比1:4, 石灰用量2500 g/t, pH值为12, 助浸剂作用时间2 h, 绿金用量2000 g/t, 浸出时间12 h, 搅拌转速400 r/min的条件下, 对比各类助浸剂的助浸效果, 浸出试验流程如图2b所示, 结果如图4所示。

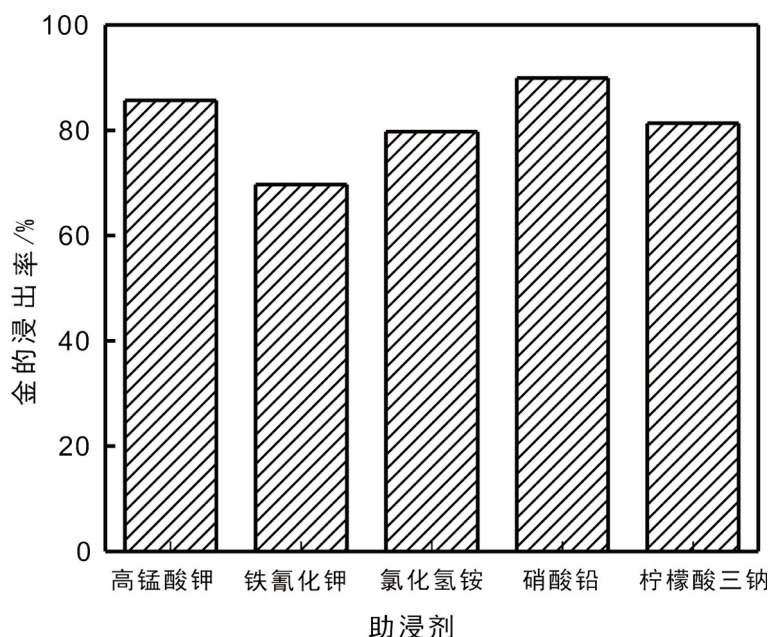


图4 助浸剂种类对金浸出率的影响

Fig. 4. Effect of the leaching aid type on the leaching rate of gold from ore

从图4结果可以看出, 氧化型助浸剂中, 用强氧化剂高锰酸钾和温和氧化剂铁氰化钾作助浸剂时, 金的浸出率分别为85.69%、69.71%, 助浸效果不佳; 使用氨类助浸剂氯化氢胺和有机型助浸剂时, 金的浸出率分别为79.74%、81.35%, 助浸效果同样不佳; 而重金属助浸剂硝酸铅的助浸效果较好, 金的浸出率可达89.96%。

3.2.2 硝酸铅用量对金矿浸出的影响

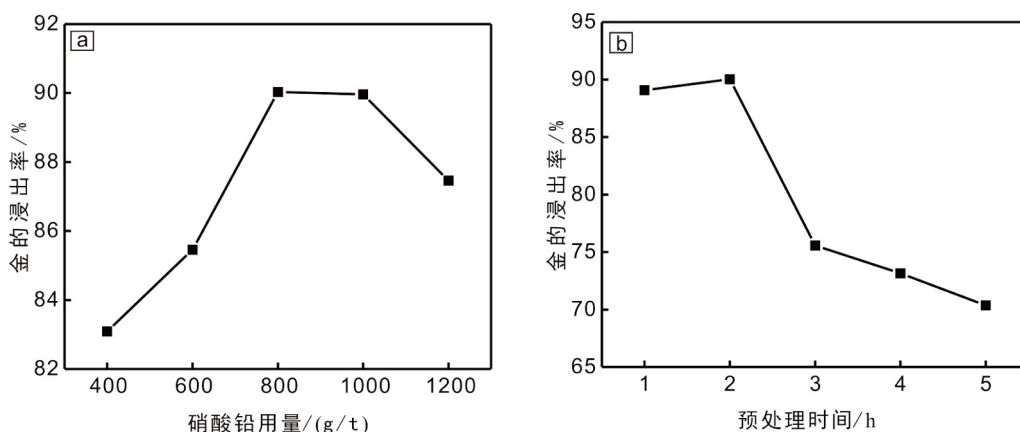
在磨矿细度-0.074 mm占91.13%, 固液比1:4, 石灰用量2500 g/t, pH值为12, 助浸剂作用时间2 h, 绿金用量2000 g/t, 浸出时间12 h, 搅拌转速400 r/min的条件下, 考察硝酸铅用量对金浸出的影响, 结果如图5a所示。

由图5a可知, 随着硝酸铅用量的增加, 金的浸出率也逐渐增加, 当硝酸铅用量为800 g/t时, 浸出率达到90.03%, 此后随硝酸铅用量增加金的浸出率反而降低, 故合适的硝酸铅用量为800 g/t。

3.2.3 预处理时间对金矿浸出的影响

在磨矿细度-0.074 mm占91.13%, 固液比1:4, 石灰用量2500 g/t, pH值为12, 硝酸铅800 g/t, 绿金用量2000 g/t, 浸出时间12 h, 搅拌转速400 r/min的条件, 考察助浸剂预处理时间对金浸出的影响, 结果如图5b所示。

由图5b结果可知, 硝酸铅的预处理时间为2 h时, 金的浸出率达到90.03%, 而当预处理时间继续延长, 金的浸出率反而降低, 故合适的预处理时间为2 h。



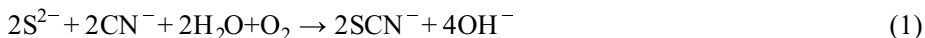
a. 硝酸铅用量对金浸出率的影响图; b. 硝酸铅预处理时间对金浸出率的影响。

图5 硝酸铅用量及预处理时间对金浸出率的影响

Fig. 5. The influence of the lead nitrate dosage and pretreatment time on the leaching rate of gold from ore

3.3 金矿浸出的作用机理分析

众所周知, 硫化矿物可以通过形成表面产物或保护涂层使金表面失活^[14], 阻碍金的浸出, 硫化矿物在浸出液中溶解产生的 S^{2-} 不仅能够牢固的吸附在金的表面, 且在含氰的浸出环境中可形成硫氰酸盐(反应(1)), 而硫氰酸盐的生成会增加绿金的消耗量。本次实验的金矿中含有黄铁矿, 黄铜矿等硫化矿, 对金的溶解具有负面影响。

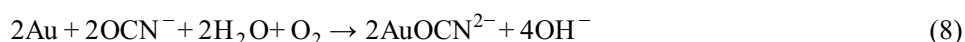
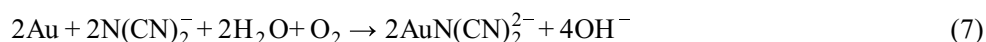
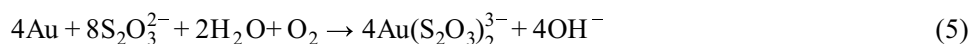


在浸金过程中加入石灰为金的浸出提供碱性环境, 还可以与 S^{2-} 形成硫化钙沉淀(反应(2))减少溶液中 S^{2-} 含量。且在氧化浸出过程中由于黄铁矿暴露于水和氧气中可反应生成硫酸^[15](反应(3)), 加入石灰可中和反应产生的酸(反应(4))保持溶液的pH值稳定。

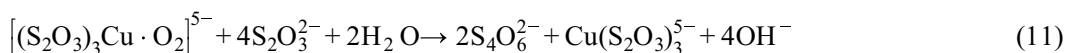
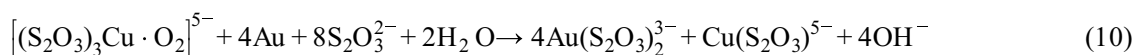
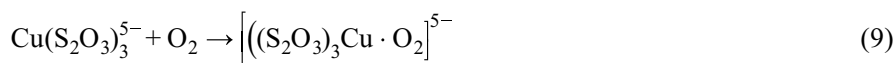


绿金是一种商用的绿色浸金剂, 是铁氰化物、尿素、硫代硫酸盐和碱类等多种组分化合而成的混合物, 以复合盐的方式来浸出金, 具有选择性好, 浸出率高, 污染低等优点, 且浸出效果与传统氰化钠相当, 在商业应用中受到越来越多的青睐。

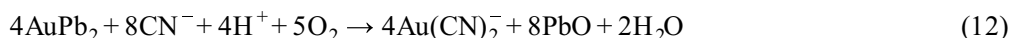
绿金含有硫代硫酸盐、聚合氰胺钠和三聚氰酸钠, 在碱性条件下, 硫代硫酸盐浸金反应如(5)所示, 聚合氰胺钠分解释放 $\text{N}(\text{CN})_2$, 浸金反应如(6、7)所示, 三聚氰酸钠转化为三聚氰酸-钠盐并产生 OCN^- 离子与金生成络合物(反应(8))。



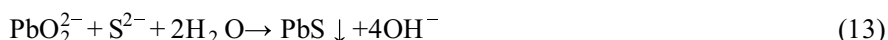
浸出过程中金矿中含有的铜极易溶解在含氰溶液中, 此时绿金中含有的硫代硫酸盐可与 Cu^{2+} 形成络合离子 $[(\text{S}_2\text{O}_3)_3\text{Cu} \cdot \text{O}_2]^{5-}$ 促进金的溶解, 其反应如(9-11)所示^[16]。



关于铅离子对金浸出过程的影响, 已有多种说法。一种是微电池作用(反应(12)), 铅盐在金表面形成微型原电池促进金的溶解^[17], 还有一种是化学反应作用, 铅盐可去除矿浆中妨碍浸出的杂质, 从而提高金的浸出和减少浸金剂的消耗量。

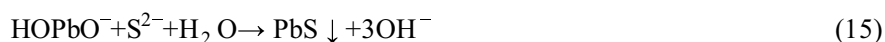


在浸出过程中加入适量铅盐, 其中的铅离子在碱性溶液中可以生成亚铅酸盐离子 PbO_2^{2-} , 亚铅酸盐离子 PbO_2^{2-} 与 S^{2-} 反应形成硫化铅沉淀(反应(13)), 减少溶液中 S^{2-} 对金浸出的影响从而提高金的浸出率^[18]。



且在浸出液中加入的硝酸铅会在黄铁矿表面形成 $\text{Pb}(\text{OH})_2$ 抑制层, 降低硫氰酸盐的生成, 从而减缓黄铁矿与绿金的反应^[19]。

在浸出液中铜会在金的表面形成钝化的硫化铜薄膜, 阻碍金与绿金的反应, 而在铅离子存在的情况下铅离子可将硫化物离子迅速反应并从溶液中以硫化铅的形式从溶液中分离出来(反应(14-16)), 而铜离子在铅离子的促使下形成氢氧化铜, 从而降低了硫化铜在金表面形成非活性膜的概率^[20]。



由图5a结果可以看出, 随着硝酸铅用量的增加, 金的浸出率也逐渐增加, 而当硝酸铅的用量继续增加时金的浸出率反而逐渐降低, 这是因为铅离子过量时, 绿金中含有硫代硫酸盐将与铅离子结合从而增加绿金的消耗量, 使浸出率不升反降, 其反应如反应(17-18)所示。



4 结论

1) 工艺矿物学研究表明, 缅甸某金矿石的主要构造为块状构造, 主要结构为蚀变斑状结构, 金属矿物的主要结构为自形-半自形粒状结构; 矿石中的金主要以银金矿形式存在, 含Au 3.23 g/t, Ag 9.3 g/t, 其中的铜、铅、锌等有色金属元素以及砷等有害元素含量低且无综合回收价值, 对浸出过程有利, 脉石矿物主要有钾长石、石英、白云母、绿泥石、黄铁矿等。从金的赋存状态和嵌布特征看, 矿石中的银金矿呈不规则分布, 有的嵌布较细且连生紧密或呈包裹状, 在浸出前需要通过细磨保证银金矿的单体解离。

2) 绿金是一种商用的绿色浸金剂, 是铁氰化物、尿素、硫代硫酸盐和碱类等多种组分化合而成的混合物, 适合于该金矿石的浸出, 效果与传统氰化浸出剂相当。在磨矿细度为-0.74 mm 91.13%, 石灰用量为2500 g/t, pH值为12, 绿金用量为2000 g/t, 搅拌转速为400 r/min, 浸出时间为12 h的试验条件下, 金的浸出率可达87.93%; 添加800 g/t硝酸铅作为助浸剂, 预处理时间为2 h, 在同样的浸出条件下可将金的浸出率提高到90.03%。

3) 助浸机理分析表明, 硝酸铅的助浸作用主要表现为微电池效应、化学沉淀和钝化膜溶解等, 适量的硝酸铅可以在一定程度上提高金的浸出率, 但硝酸铅过量时反而造成浸出剂的消耗, 降低金的浸出率。

参考文献:

- [1] 谢为, 郑明贵. 世界黄金价格影响因素模型研究[J]. 有色金属科学与工程, 2012, 3(3): 90-94.
- [2] 任忠富. 黄金资源国内外供需形势分析及合理开发利用建议[J]. 黄金, 2009, 30(12): 1-4.
- [3] 邢丽霞. 国土资源部中国地质调查局. 中国地质调查百项成果[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [4] 孙留根, 袁朝新, 王云等. 难处理金矿提金的现状及发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(4): 38-43.
- [5] 李骞, 董斯宇, 许瑞, 等. 金矿提金技术及其研究进展[J]. 黄金, 2020, 41(9): 86-101.
- [6] Rice N C, Rauscher N A, Wilkins W L, et al. Behavioural and physiological assessments of dimethyl trisulfide treatment for acute oral sodium cyanide poisoning[J]. Basic & Clinical Pharmacology & Toxicology, 2019, 125(3): 289-303.
- [7] Anderson C G. Alkaline sulfide gold leaching kinetics[J]. Minerals Engineering, 2016, 92: 248-256.
- [8] 廖璐, 李红立, 任大鹏. 无氰工艺回收利用黄金尾矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(2): 109-111.
- [9] 李得立, 曾小波, 魏友华, 等. 矿山企业矿产资源开发利用水平评价方法: 以湖南省金矿矿山为例[J]. 矿产综合利用, 2019(5): 22-27.
- [10] 吕超飞, 贾佳林, 张新岗, 等. 环保型浸金试剂Sandioss在陕西某金精矿中的应用研究[J]. 矿冶工程, 2015, 35(1): 92-96.
- [11] 熊召华, 浦江东, 胡海平. 某难处理金矿石绿色高效联合提金工艺试验研究[J]. 黄金, 2018, 39(1): 58-61+65.
- [12] 柳耀鹏, 卢亮, 张宝. 低毒环保浸出提金技术研究与应用[J]. 采矿技术, 2018, 18(2): 46-48+73.
- [13] 刘洋, 胡显智, 魏志聪. 助浸剂在氰化提金中的研究进展[J]. 矿冶, 2011, 20(2): 57-62.
- [14] 吴卫国. 大冶铁矿硫精矿提金试验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2003.
- [15] Dold B. Evolution of acid mine drainage formation in sulphidic mine tailings[J]. Minerals, 2014, 4(3): 621-641.
- [16] Zhang S, Nicol M J. An electrochemical study of the dissolution of gold in thiosulfate solutions Part I: Alkaline solutions[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2003, 33(9): 767-775.
- [17] 刘涛, 吴卫国, 张一敏, 等. 低品位含金硫精矿氰化提金的试验研究[J]. 矿冶工程, 2004(3): 32-34.
- [18] 金世斌, 邵志国, 毋鹏先. 铅盐在氰化浸金中的作用及其应用条件[J]. 黄金, 2002, 23(2): 34-40.
- [19] Ahtiainen R, Liipo J, Lundström M. Simultaneous sulfide oxidation and gold dissolution by cyanide-free leaching from refractory and double refractory gold concentrates[J]. Minerals Engineering, 2021, 170: 107042.
- [20] Soltani F, Marzban M, Darabi H, et al. Effect of Oxidative Pretreatment and Lead Nitrate Addition on the Cyanidation of Refractory Gold Ore. JOM, 72(2): 774-781.