

## 基于工艺矿物学分析的含碲金矿石碱浸预处理效果研究

徐超, 蔡明明, 张文平, 高腾跃, 李光胜, 朱幸福

(山东黄金矿业科技有限公司选冶实验室分公司, 山东 烟台 261441)

**摘要:** 针对某矿山含碲金矿原矿和碱浸预处理后样品, 进行了工艺矿物学检测, 分别明确了样品中矿石的元素成分、矿物组成及矿物嵌布特征、目标元素赋存状态、目标矿物的粒度分布等情况。研究表明, 原矿中存在碲金矿, 在浸出过程中影响金的浸出率; 通过碱浸预处理工艺可将碲金矿氧化, 改善金的浸出效果; 原矿中细粒级矿物在碱浸过程中被氧化分解为微细粒矿物; 碱浸过程中黄铁矿和碲金矿被氧化释放了其中金矿物。说明碱浸对碲金矿预处理效果明显, 对含碲金矿石工艺流程的制定具有指导意义。

**关键词:** 工艺矿物学; 碲金矿; 嵌布关系; 连生

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2022.04.015

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2022) 04-0082-05

含碲金矿石是一种难处理类型矿石。金矿石中的碲主要以碲金矿 ( $\text{AuTe}_2$ )、碲金银矿 ( $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$ ) 和含金碲银矿 [ $(\text{AgAu})_2\text{Te}$ ] 的形式存在, 以碲金矿为主要组成。该类矿物与氰化物反应较慢, 加之被黄铁矿等硫化物包裹, 致使金、银的氰化浸出率较低<sup>[1-2]</sup>。B.B.罗杰希润夫很早提到含碲金矿石在浸出提金时需要较高的碱度才能进行<sup>[2]</sup>。金的碲化物在氰化物溶液中很难溶解, 在碱性条件下碲溶解生成  $\text{Na}_2\text{Te}$ , 继而生成亚碲酸盐<sup>[3]</sup>。

本文针对某矿山含碲金矿原矿和碱浸预处理后样品, 通过对该样品的工艺矿物学检测, 明确该样品中目标元素及矿物嵌布特征、目标元素赋存状态、目标矿物的粒度分布等情况, 确定其性质变化和碱浸效果<sup>[4-7]</sup>。

## 1 样品制备

样品经自然风干后缩分, 取代表性样品酒精浸泡后进行超声波分散; 后经环氧树脂固化, 速磨片抛光机粗磨、细磨、精磨和抛光, 多功能试样表面处理机处理, 制作成待检测光片。

检测分析用主要设备和功能为: TESCAN 扫描电镜获取矿物的背散射电子图像; X-射线能谱仪获取矿物的化学组成信息; BPMA 检测分析软件综合矿物的图像和化学成分信息结合矿物库中的数据, 统计样品中矿物的工艺矿物学参数。

## 2 原矿工艺矿物学分析

## 2.1 成分分析

原矿的多元素分析结果见表 1。

表 1 原矿的多元素分析结果/%

Table 1 Multi-element analysis results of raw ore

Au*	Cu	Pb	Zn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
15.36	<0.01	<0.01	<0.01	4.87	0.75	39.45	6.02	7.69	20.82	0.35

\*单位为: g/t。

收稿日期: 2021-01-20

基金项目: 矿冶过程自动控制技术国家重点实验室基金工艺矿物学数据分析及应用技术研究 (BGRIMM-KZSKL-2019-01)

作者简介: 徐超 (1984-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事选冶技术等方面的研究。

## 2.2 矿物组成

经电镜、能谱等分析，原矿中主要金矿物有自然金、碲金矿、银金矿、金银矿、自然银（含金）；另有少量黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿等金属矿物；脉石矿物主要由石英、绢云母、方解石、普通辉石、白云石、符山石、钙铁榴石、蒙脱石等矿物组成。

样品的矿物组成及相对含量见表2。

**表2 矿物组成及相对含量**  
Table 2 Mineral composition and relative content

金属矿物	含量/%	脉石矿物	含量/%
黄铁矿	1.19	石英	19.08
磁黄铁矿	0.26	普通辉石	23.75
磁铁矿	0.20	方解石	13.20
		绢云母	9.88
		白云石	19.19
		符山石	5.29
		钙铁榴石	4.16
		蒙脱石	1.74
其他	0.04	其他	2.02
		合计	100.00

## 2.3 金元素的分布

原矿中 Au 的分布见表3。

**表3 样品中 Au 的分布**  
Table 3 Distribution of Au in the sample

相别	自然金	碲金	银金	金银	自然	合计
	金中金	矿中金	矿中金	矿中金	银中金	
品位/(g·t <sup>-1</sup> )	3.94	4.68	2.84	3.80	0.10	15.36
分布/%	25.62	30.50	18.48	24.72	0.68	100.00

原矿中的金主要分布在自然金、碲金矿、银金矿和金银矿中，金的分布率分别为 25.62%、30.50%、18.48%、24.72%，另有少量分布于自然银中。

## 2.4 金矿物的粒度分析

表4是原矿中金矿物嵌布粒度分析。

原矿中的金矿物粒径较细，平均粒径为 12.64 μm，呈细粒-微细粒嵌布。

## 2.5 金的赋存状态

样品中金矿物的赋存状态分析结果见表5。

原矿中的金矿物主要以裸露金的形式存在，占比为 97.17%，其中连生金占 77.61%，单体金占 19.56%；以包裹形式存在的金矿物占 2.83%。

**表4 样品中金矿物粒度分析**  
Table 4 Particle size analysis table of gold minerals in samples

粒度/μm	含量/%	累积量/%
中粒-74+37	0	0
细粒-37+10	56.42	56.42
微细	-10+5	35.57
	-5	8.01
平均粒径 12.64		

**表5 样品中金矿物赋存状态分析结果**  
Table 5 Analysis results of the occurrence state of gold minerals in samples

赋存类别	裸露金				合计
	包裹金	单体	连生	晶间	
含量/%	2.83	19.56	77.61	0.00	100.00

## 2.6 金矿物的嵌布特征

自然金、碲金矿、银金矿、金银矿、自然银（含金）是样品中的主要金矿物。能谱分析表明，金矿物主要由 Au、Ag、Te 元素组成。金矿物平均粒径为 12.64 μm，较大颗粒粒径为 20.96 μm×12.80 μm。表6是原矿中金矿物连生程度统计。

**表6 样品中主要金矿物嵌布程度统计**  
Table 6 Statistics of the degree of intercalation of the main gold minerals in the samples

矿物	单体/%	共生体/%				合计/%
		黄铁矿	方解石	白云石	石英	
金矿物	19.56	6.35	29.15	27.83	17.11	100.00

金矿物主要以单体和与方解石、白云石、石英等脉石矿物连生的形式存在，以单体形式存在的金矿物，含量为 19.56%，与方解石连生的金矿物含量为 29.15%，与白云石连生的金矿物含量为 27.83%，与石英连生的金矿物含量为 17.11%，少量与黄铁矿连生，含量为 6.35%。

原矿中自然金与黄铁矿嵌布关系见图1。

原矿中碲金矿与白云石嵌布关系见图2。

原矿中碲金矿与石英嵌布关系见图3。

## 3 碱浸预处理后矿石工艺矿物学分析

### 3.1 碱浸预处理实验

为充分利用该类型难选灰岩，对该类矿石进行了碱浸预处理实验。主要实验设备包含实验用球磨机、激光粒度分析仪、碱浸用浸出搅拌机、

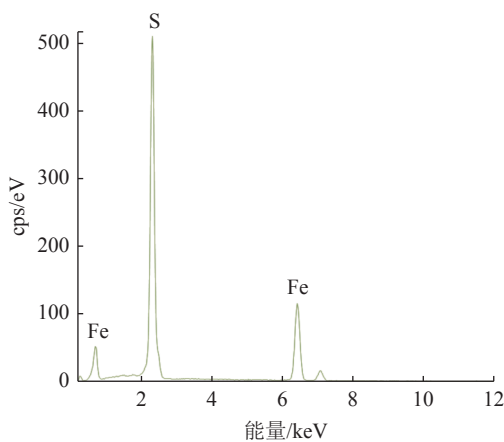
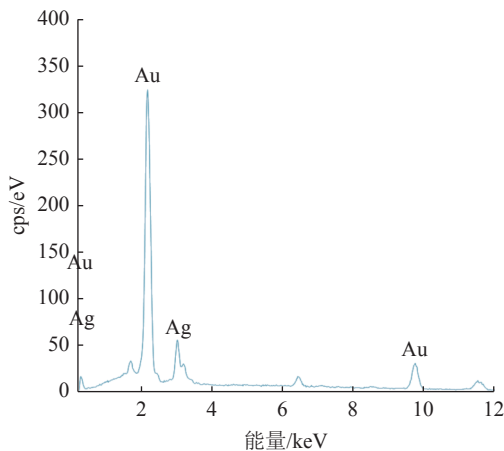
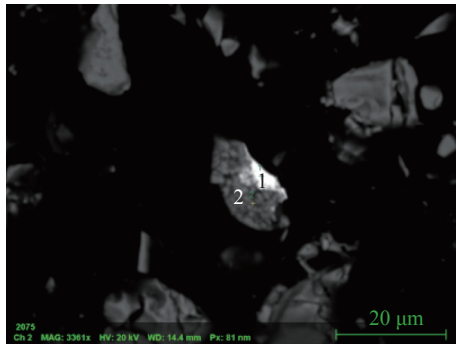


图 1 原矿中自然金与黄铁矿嵌布关系及能谱  
Fig.1 Intercalation relationship and energy spectrum of natural gold and pyrite in the ore

压滤机、滚瓶浸出实验机等。根据条件实验确定灰岩碱浸较优条件为，磨矿细度-0.037 mm 80%、液固比 2:1、通风量 0.025 m/h、矿浆初始 NaOH 含量 50 g/L、碱浸时间 24 h。

为确定碱浸作用的目的矿物及闭路循环中矿物组分的变化，取碱浸后的滤饼烘干后制样，做工艺矿物学分析。

### 3.2 成分分析

碱浸预处理后样品的多元素分析结果见表 7。

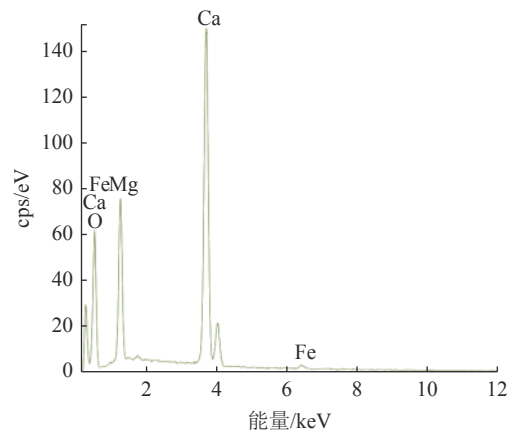
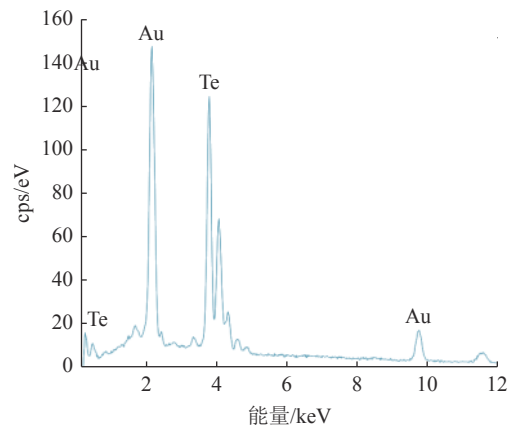
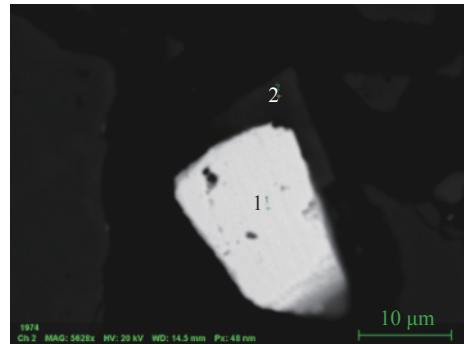


图 2 原矿中碲金矿与白云石嵌布关系及能谱  
Fig.2 Intercalation relationship and energy spectrum of tellurium gold ore and dolomite in the original ore

样品中金的含量为 15.76 g/t，与原矿分析结果基本一致。

### 3.3 矿物组成

经电镜、能谱等分析，碱浸 4-1#样品中主要金矿物有自然金、银金矿、金银矿；另有少量黄铁矿、磁铁矿等金属矿物；脉石矿物主要由石英、绢云母、方解石、灰硅钙石、白云石、符山石、香花石等矿物组成。

样品的矿物组成及相对含量见表 8。

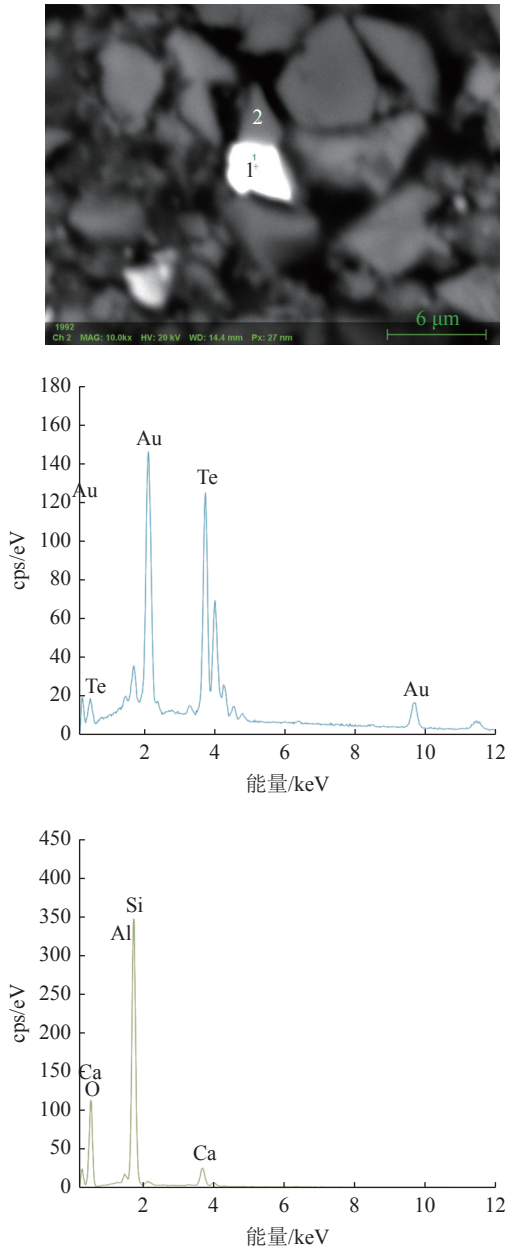


图3 原矿中碲金矿与石英连生关系及能谱  
Fig.3 Relationship between gold tellurium and quartz in the raw ore and the energy spectrum

表7 碱浸预处理后样品的多元素分析结果/%

Table 7 Multi-element analysis results of samples after alkaline leaching pretreatment

Au*	Cu	Pb	Zn	Fe	S	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O
15.75	<0.01	<0.01	<0.01	2.54	0.27	40.54	1.77	5.02	23.58	0.22

\*单位为g/t。

### 3.4 金元素的分布

碱浸预处理后样品中 Au 的分布结果见表9。

样品中的金主要分布在自然金和金银矿中，金的分布率分别为 67.69% 和 32.31%。

表8 矿物组成及相对含量

Table 8 Mineral composition and relative content

金属矿物	含量/%	脉石矿物	含量/%
黄铁矿	0.80	石英	28.10
磁铁矿	0.14	灰硅钙石	12.20
		方解石	19.17
		绢云母	3.30
		白云石	21.29
		符山石	2.94
		香花石	2.33
其他	0.07	其他	9.66
小计	1.01	小计	98.99
		合计	100.00

表9 样品中 Au 的分布结果

Table 9 Distribution results of Au in samples

分相	自然金中金	金银矿中金	合计
品位/(g·t <sup>-1</sup> )	10.66	5.09	15.75
分布率/%	67.69	32.31	100.00

通过比较发现，碱浸后自然金中金含量明显增加；在原矿中存在碲金矿，其金的分布率为 30.5%，碲金矿属于难溶解的含金矿物，影响金的浸出率。经碱浸预处理后，碲金矿被氧化释放了其中金矿物。

### 3.5 金矿物的粒度分析

表10 是碱浸预处理后样品中金矿物嵌布粒度分析。

表10 样品中金矿物粒度分析

Table 10 Particle size analysis of gold minerals in samples

粒级/μm	含量/%	累积量/%
中粒-74+37	0	0
细粒-37+10	36.51	36.51
微细 -10+5	52.93	89.44
-5	10.56	100.00
平均粒径		9.83

碱浸预处理后样品中的金矿物粒径较细，平均粒径为 9.83 μm，呈细粒-微细粒嵌布。

与原矿分析结果比较，经过碱浸后金矿物平均粒径有所下降，细粒级矿物含量下降，微细粒级矿物含量上升，说明部分细粒级在碱浸过程中被氧化分解为微细粒矿物。

### 3.6 金矿物的嵌布特征

金矿物主要以单体和与方解石、石英等脉石矿物连生的形式存在。金矿物平均粒径为 9.83 μm，

最大颗粒粒径为 15.96  $\mu\text{m}$ ×10.15  $\mu\text{m}$ 。碱浸预处理后样品中金矿物连生程度统计见表 11。

表 11 样品中主要金矿物嵌布程度统计  
Table 11 Statistics of the degree of intercalation of the main gold minerals in samples

矿物	单体/%	共生体/%				合计/%
		黄铁矿	方解石	白云石	石英	
金矿物	35.83	-	41.34	13.52	9.31	100.00

金矿物主要是以单体和与方解石、白云石、石英等脉石矿物连生的形式存在为主，以单体形式存在的金矿物，含量为 35.83%，与方解石连生的金矿物含量为 41.34%，与白云石连生的金矿物含量为 13.52%，与石英连生的金矿物含量为 9.31%。

与原矿分析结果比较，经过碱浸后以单体形式存在的金矿物含量明显增加，与黄铁矿连生金矿物比例减少，说明碱浸过程中黄铁矿和碲金矿被氧化释放了其中金矿物。

## 4 结 论

(1) 原矿中主要金矿物有自然金、碲金矿、银金矿、金银矿、自然银（含金）；另有少量黄铁矿、磁黄铁矿、磁铁矿等金属矿物；脉石矿物主要由石英、绢云母、方解石、普通辉石、白云石、符山石、钙铁榴石、蒙脱石等矿物组成。碱浸预处理后样品中主要金矿物有自然金、金银矿，未发现碲金矿；其他矿物组成与原矿相同。原矿中存在碲金矿，在浸出过程中影响金的浸出率，通过碱浸预处理工艺可将碲金矿氧化，改善金的浸出效果。

(2) 原矿中的金矿物平均粒径为 12.64  $\mu\text{m}$ ，碱浸预处理后样品中的金矿物平均粒径为 9.83  $\mu\text{m}$ ，均呈细粒-微细粒嵌布，细粒级被氧化分解为微细粒矿物，经过碱浸后金矿物平均粒径有所下降。

(3) 碱浸过程中黄铁矿和碲金矿被氧化释放了其中金矿物，导致碱浸后单体金矿物含量增加，与黄铁矿和脉石连生金矿物比例减少。

## 参考文献：

- [1] 杨玮, 王刚, 曹欢等. 从含碲金矿中综合回收金、银、碲的试验研究[J]. *矿冶工程*, 2019(4):39-42.
- [2] YANG W, WANG G, CAO H, et al. Experimental research on comprehensive recovery of gold, silver and tellurium from gold mines containing tellurium[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019(4):39-42.
- [3] 张兴仁. 选择性分步浸出法用于自然金和金银碲化物浸出金的评价[J]. *国外黄金参考*, 2001(9-10): 30-36.
- [4] ZHANG X R. Selective stepwise leaching method for the evaluation of natural gold and gold-silver telluride leaching gold[J]. *Foreign Gold Reference*, 2001(9-10): 30-36.
- [5] 许晓阳. 难处理金矿石加压氧化——氰化提金技术研究[J]. *黄金*, 2020(4):50-53.
- [6] XU X Y. Pressure oxidation of refractory gold ore—research on gold extraction technology by cyanide[J]. *Gold*, 2020(4):50-53.
- [7] 任华杰, 董兵. 金渠金矿氰化厂提高金洗涤率的实践[J]. *中国矿山工程*, 2009, 38(4):19-22.
- [8] REN H J, DONG B. Practice of improving the gold washing rate in the cyanide plant of Jinqiu Gold Mine[J]. *China Mining Engineering*, 2009, 38(4):19-22.
- [9] 梁晓, 胡瑞彪, 冯泽平. 广东某复杂难选难浸金矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):65-68.
- [10] LIANG X, HU R B, FENG Z P. Study on the process mineralogy of a complex refractory and refractory gold mine in Guangdong[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):65-68.
- [11] 邓元良, 明平田, 王广伟, 等. 某金精矿焙烧氧化-氰化尾矿工艺矿物学研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):121-125.
- [12] DENG Y L, MING P T, WANG G W, et al. Study on the process mineralogy of a gold concentrate roasting oxidation-cyanide tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):121-125.
- [13] 肖仪武, 方明山, 付强, 等. 工艺矿物学研究的新技术与新理念[J]. *矿产保护与利用*, 2020(4):121-125.
- [14] XIAO Y W, FANG M S, FU Q, et al. Study on the process mineralogy of a gold concentrate roasting oxidation-cyanide tailings[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):121-125.

(下转第 105 页)