

影响非洲某金矿选冶回收的矿物学因素

李磊^{1,2}, 彭俊³, 肖仪武¹, 田明君¹, 王辉¹

- (1. 矿冶科技集团有限公司, 矿物加工科学与技术国家重点实验室, 北京 102628;
2. 成都理工大学地球科学学院, 四川 成都 610059; 3. 河南省地质矿产勘查开发局第二地质矿产调查院, 河南 郑州 450001)

摘要: 这是一篇工艺矿物学领域的论文。本文以非洲某金矿为研究对象, 使用光学显微镜与矿物自动分析仪 (AMICS、MLA) 等手段, 对该矿进行了系统的工艺矿物学研究。研究查明金矿物为自然金, 成色较高 (900±); 以粒间金和裂隙金形式存在的金矿物占 62.77%, 有 37.23% 的自然金以包裹金的形式存在; 自然金总体较细, 10 μm 27.54%; 自然金多分布在非金属矿物中, 与硫化物的关系不密切, 仅有 32.15% 的自然金与硫化物相关。针对这些特点, 该矿不利于通过全硫化物浮选的方式进行金的回收, 适宜采用细磨后直接搅拌浸出的方式来回收金。

关键词: 自然金; 分布特征; 工艺矿物学; 选冶工艺

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.06.031

中图分类号: TD91 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 06-0202-05

黄金作为一种特殊的金属, 用途广泛, 还是一种货币商品, 具有重要的战略作用, 黄金资源的开发和利用对我国具有重要的意义。自从中国提出“一带一路”的倡议以来, 得到了很多国家的响应和支持, 为我国矿业企业走出去提供了契机^[1]。非洲矿产资源丰富, 总体开发利用程度低, 前景巨大^[2], 很多非洲与中国的联系也越来越密切, 是我国重要的投资目的地。同时, 考虑到政治、经济、文化、政策以及资源禀赋性等方面的差异, 非洲对我国积极“走出去”的矿业企业充满了机遇和挑战^[3-4]。

本文研究的金矿是我国矿业公司在非洲自主投资勘探的矿山, 属于典型的条带状含铁建造 (BIF) 型金矿, 矿山周边该类型矿床 (点) 多。合理高效开发该矿床不仅能快速收回投资、降低风险, 也能为企业在周边矿山的投资决策提供依据。针对金矿而言, 矿石性质以及金矿物的分布特征是选冶工艺流程选择和设计的基础, 对后期采矿规划、选厂生产效益具有决定性作用^[5-8]。为了查清影响选冶工艺的矿物学因素, 本文对该矿床进行了系统的工艺矿物学研究, 研究成果为选

冶工艺的选择提供了依据, 也能为企业对该地区同类型金矿的投资决策提供参考。

1 样品及分析方法手段

1.1 实验样品

本次研究的样品为岩心样, 从选矿试验大样中挑选选取。样品中主要组分的含量分别为: Au 3.63 g/t; Ag 2.58 g/t; Cu 0.011%; Pb 0.007%; Zn 0.035%; S 0.92%; As 0.19%; C_总 1.72%; TFe 22.2%; MFe 14.24%。Au 是最主要的有价元素。

1.2 研究方法手段

通过光学显微镜以及 AMICS、MLA 等手段对矿石的物质组成、金矿物种类进行了系统的分析。在矿物组成分析的基础上, 利用化学分析定量法对矿物相对含量进行的计算。

偏光显微镜 (Axio Scope A1), 配备有高分辨率扫描电子显微镜 (EVO) 及现代快速高分辨率能谱仪 (Bruker) 的矿物自动分析仪 (AMICS), 工作电压为 20 kV, 工作电流为 2 nA, FEI Quanta 600 扫描电镜以及 EDAX Genesis 7000 能谱仪。

收稿日期: 2021-04-19

作者简介: 李磊 (1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向工艺矿物学。

2 结果与讨论

2.1 主要矿物组成

矿石中金矿物组成简单，绝大部分为自然金，偶见银金矿。自然金的X射线能谱分析结果见表1，根据分析结果可知，自然金的成色较高（900±），部分自然金中含有少量的铁。其他金属矿物主要为磁铁矿，其次为黄铁矿、菱铁矿、磁黄铁矿、毒砂等；非金属矿物主要为石英，其次为绿泥石、黑云母、方解石、直闪石、钠长石、白云母等。矿石的矿物组成及相对含量见表2。

表1 自然金的X射线能谱分析结果

Table 1 Result of X-ray energy spectrum analysis of gold

序号	Au/%	Ag/%	Fe/%
1	90.37	7.16	2.48
2	91.68	8.32	0.00
3	90.95	8.44	0.61
4	89.94	7.42	2.64
5	90.43	8.35	1.21
6	89.14	7.67	3.19
7	88.36	11.64	0.00
8	88.03	11.97	0.00
9	92.45	7.55	0.00
10	87.53	11.91	0.56
11	92.51	7.49	0.00
12	85.77	11.15	3.08
13	87.52	11.76	0.72
14	90.44	9.56	0.00
15	91.43	8.57	0.00
16	91.85	6.24	1.91
17	93.89	6.11	0.00
18	92.59	5.97	1.44

表2 矿石的矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content in the sample

矿物名称	含量/%	矿物名称	含量/%
黄铁矿	2.66	黑云母	6.06
磁黄铁矿	0.54	方解石	5.91
毒砂	0.41	直闪石	4.25
磁铁矿	19.27	钠长石	2.29
菱铁矿	0.96	白云母	1.77
石英	43.08	其他	0.91
绿泥石	11.89	合计	100.00

样品中磁铁矿的含量占19.27%，绿泥石、黑云母、方解石等易泥化的矿物的含量相对较高。

2.2 自然金的分布特征

本次研究共计找到400余颗自然金。按照自然金在矿石中分布特征的差异可以分为包裹、粒间、裂隙三类（图1、2），在此基础上对自然金的分布特征统计，见表3。结果显示，该矿石中自

然金以粒间金为主，占52.72%；其次为包裹金，占37.23%；另有部分以裂隙金的形式存在，占10.05%。

自然金与脉石的关系最为密切，其中以不同脉石矿物粒间、脉石包裹、脉石裂隙形式分布的自然金占52.81%，分布在脉石与其他金属矿物（磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿等）粒间的自然金占22.38%。与硫化物相关的自然金占32.15%，且主要与黄铁矿相关。

对矿石中自然金的嵌布粒度进行了统计（图3），自然金主要分布在-50 μm，其中，5~10 μm和-5 μm的自然金含量相对较多，分别占19.03%、8.51%。由于矿石中包裹金的含量较高，占37.23%，其粒度分布对磨矿工艺及选冶工艺的制定具有重要意义（图3），5~10 μm和-5 μm粒级的包裹金分别占有所有金矿物的5.51%、5.01%，这部分自然金在磨矿过程中不易裸露出来，易于造成金的损失。

2.3 重要矿物的嵌布特征

磁铁矿 是含量最多的金属矿物，多呈不规则粒状、浸染状结构、脉状结构及交代残余结构的形式嵌布。多呈细粒不规则的磁铁矿呈稠密浸染状分布在脉石矿物中（图4），部分磁铁矿与磁黄铁矿、黄铁矿的共生关系紧密，在磨矿过程中与脉石单体解离的难度大。

黄铁矿 常见黄铁矿呈不规则粒状嵌布在脉石矿物中，在磁铁矿的裂隙及边缘常见黄铁矿分布，部分黄铁矿交代磁铁矿呈交代残余结构（图4）。

毒砂 具有局部富集的特点，主要呈自形-半自形粒状分布（图4），嵌布粒度相对较粗，集中分布在0.02~0.2 mm之间。

2.4 磁铁矿、硫化物粒度分布及解离特征

磁铁矿、硫化物集合体的粒度分布见表4。磁铁矿粒度细，-0.02 mm粒级中的含量较高，占30.46%，这部分磁铁矿在磨矿的过程中不易与其他矿物单体解离。硫化物集合体在+0.074 mm 51.41%，-0.02 mm 17.61%，在一段磨矿过程中，也难以取得较好的解离效果。

由于样品中磁铁矿和硫化物集合体的嵌布粒度细，对-0.074 mm 90%样品中的磁铁矿和硫化物集合体进行了解离度测定。结果显示，磁铁矿和硫化物集合体的单体解离度分别为39.07%、60.04%，单体解离程度较差，连生体部分都主要为与脉石连生，分别占58.24%、36.67%。

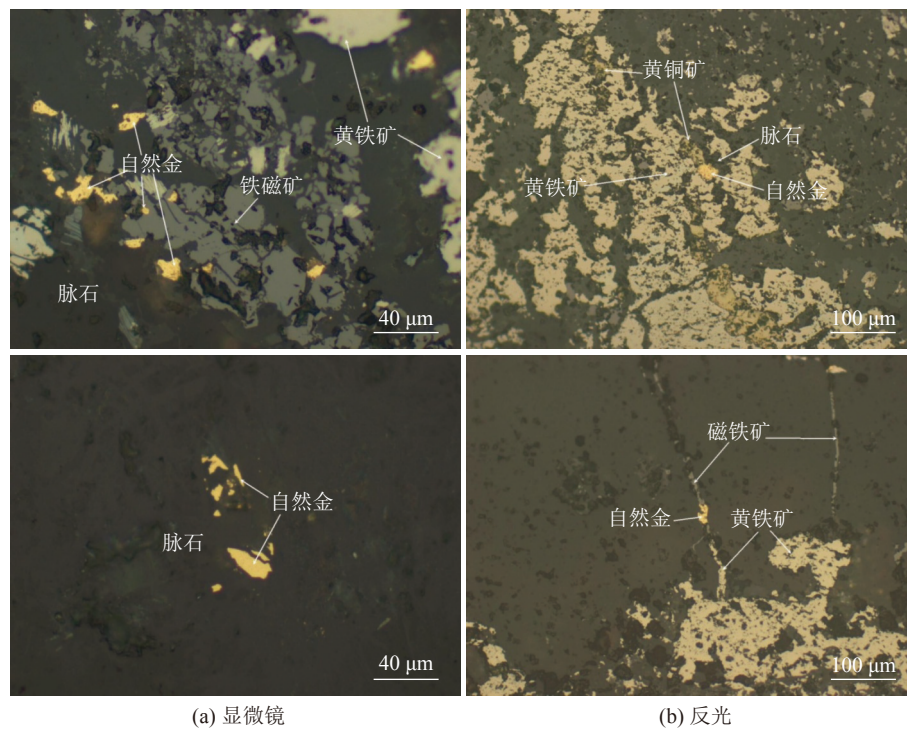


图 1 自然金在矿石中的分布特征
Fig.1 Distribution characteristic of gold

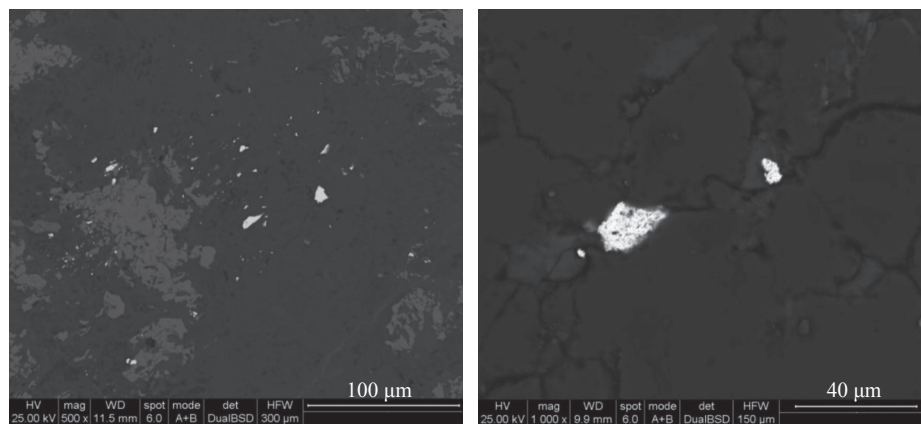


图 2 自然金以包裹和裂隙的形式分布
Fig.2 Gold occurring as inclusions and along fractures

表 3 自然金在矿石中的分布特征 Table 3 Distribution characteristic of gold			
分布特征	相关矿物	分布率/%	合计/%
粒间金	脉石	13.64	52.72
	黄铁矿与磁铁矿	13.23	
	磁铁矿与脉石	10.01	
	黄铁矿与脉石	8.61	
	毒砂与磁铁矿	3.47	
	磁黄铁矿与脉石	3.76	
包裹金	脉石	29.95	37.23
	磁铁矿	4.20	
	黄铁矿	2.75	
	毒砂	0.33	
裂隙金	脉石	9.22	10.05
	磁铁矿	0.83	

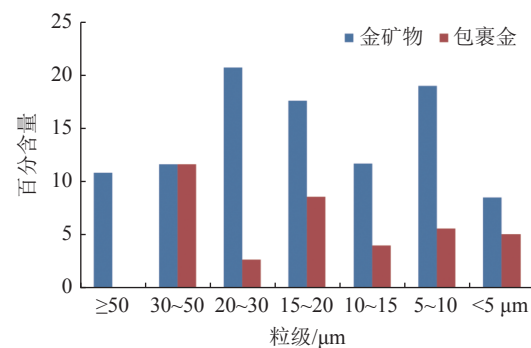


图 3 金矿物和包裹金部分的粒度分布
Fig.3 Particle size distribution histogram of gold minerals and wrapped gold

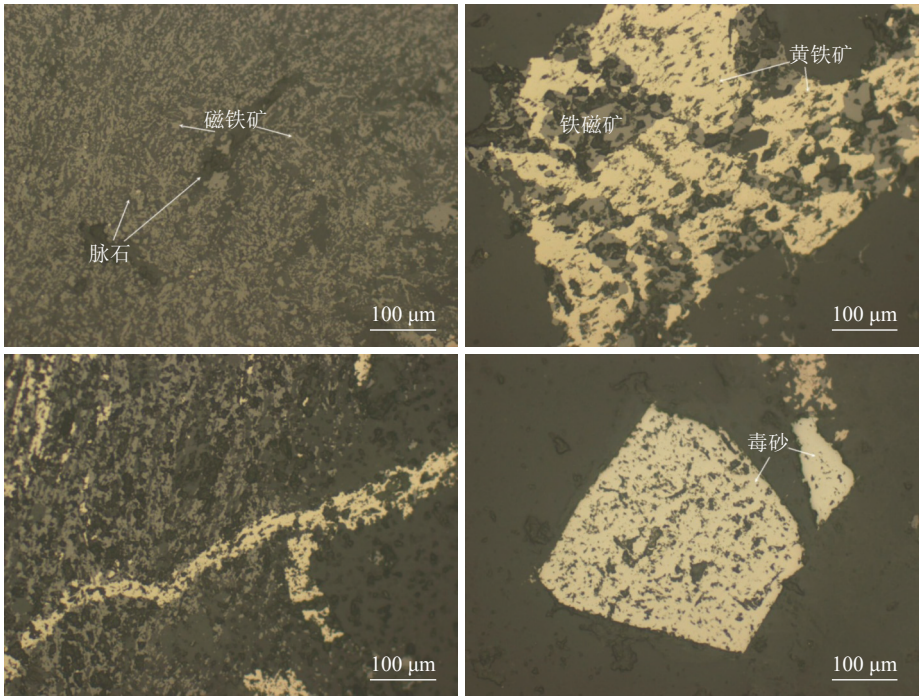


图4 磁铁矿、黄铁矿的嵌布特征
Fig.4 Embedded characteristics of magnetite and pyrite

表4 磁铁矿、硫化物集合体的粒度分布特征				
Table 4 Size distribution of magnetite, sulfide aggregate				
粒级/mm	磁铁矿 ⁺ /%		硫化物集合体/%	
	含量	累计	含量	累计
-1.651+1.168			1.10	1.10
-1.168+0.833			5.52	6.63
-0.833+0.589	3.61	3.61	0.78	7.41
-0.589+0.417	2.56	6.17	3.89	11.30
-0.417+0.295	5.43	11.60	6.68	17.98
-0.295+0.208	6.39	17.99	5.27	23.25
-0.208+0.147	7.04	25.03	9.41	32.66
-0.147+0.104	7.27	32.30	9.42	42.08
-0.104+0.074	7.06	39.35	9.33	51.41
-0.074+0.043	13.08	52.44	14.98	66.39
-0.043+0.020	17.10	69.54	16.00	82.39
-0.020+0.015	8.34	77.88	5.81	88.20
-0.015+0.010	7.74	85.62	5.85	94.06
-0.010	14.38	100.00	5.94	100.00

2.5 金的化学物相分析

采用浸出的方式回收金是当前金矿的选冶常用的一种方法。该方法是通过磨矿、氧化预处理等方式使矿石中的金矿物颗粒裸露出来，能够与溶金剂接触。浸出的结果（化学物相中裸露金部分）对矿石的质量评价和生产工艺流程都具有重要的意义。

本文使用碘浸法对细度为-0.074 mm 100% 的样品开展了金的化学物相分析，结果见表5。根据分析结果可知，在该磨矿细度下，裸露金占 93.09%。

表5 金的化学物相分析结果				
Table 5 Results of chemical phase analysis of gold				
名称	裸露金	硫化物包裹	其他矿物包裹	合计
含量/(g/t)	3.37	0.03	0.22	3.62
分布率/%	93.09	0.83	6.08	100.00

3 影响金回收的因素分析

（1）金以自然金的形式存在，粒度普遍较细，集中分布在-50 μm，其中 5~10 μm 和-5 μm 的部分分别占 19.03%、8.51%，不宜直接采用重选的方法进行回收。

（2）自然金与非金属矿物的关系最为密切，52.81% 的自然金分布在非金属矿物的粒间、裂隙及被包裹；分布在非金属矿物与金属矿物（磁铁矿、黄铁矿、磁黄铁矿等）粒间的自然金占 22.38%，不利于直接采用全硫化物浮选的方式来回收金。

（3）磁铁矿含量相对较高，但与自然金的关系不紧密，且磁铁矿粒度细，部分与硫化物共生紧密，磁铁矿综合回收难度大。

（4）包裹金含量高，占 37.23%，尤其是-10 μm 10.52%，这部分自然金在磨矿过程中单体解离或裸露难度大，易造成损失。

（5）硫化物的嵌布粒度细，-0.074 mm 90% 的磨矿细度时，硫化物集合体的解离度在 60.04% 左右，解离效果差，若要取得较好的解离效果，

需要进一步细磨。

4 结 论

(1) 金以细粒自然金的形式存在, 仅有 32.15% 的自然金与硫化物相关, 且硫化物嵌布粒度细。因此, 该矿石不利于直接采用全硫化物浮选的方式来回收金。若采用浮选的方式来回收, 需要在细磨的条件下, 强化对单体及裸露的金矿物、硫化物的回收, 来提高金的回收效果。

(2) 自然金以粒间金为主。包裹金的含量虽然相对较高, 但是大部分在 10 μm 以上, 通过适当的细磨, 可以提升自然金的解离及裸露情况。因此, 该矿石适宜在合理的磨矿细度下采用直接搅拌浸出的方式来回收金。部分细粒包裹的自然金会损失到尾矿中。

参考文献:

- [1] 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研究——以湖南省金矿矿山为例[J]. 矿产综合利用, 2019(5):22-27.
- LI D L, ZENG X B, WEI Y H, et al. Research on evaluation method of mineral exploration level for mine enterprise-taking Hunan province gold mine enterprise as an example[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(5):22-27.
- [2] 江思宏, 张莉莉, 刘翼飞, 等. 非洲大陆金矿分布特征与勘查建议[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(4):465-478.
- JIANG S H, ZHANG L L, LIU Y F, et al. Distribution characteristics of gold deposits in Africa and exploration suggestions[J]. Gold Science and Technology, 2020, 28(4):465-478.

- [3] 张伟波, 黄霞, 陈秀法, 等. 我国矿产资源勘查开发“走出去”形势分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(12):1-6.
- ZHANG W B, HUANG X, CHEN X F, et al. Analysis on the situation of China's mineral exploration and exploitation "going global" [J]. China Mining Magazine, 2019, 28(12):1-6.
- [4] 汤文豪, 陈丽萍, 吴初国, 等. 中国矿业对外直接投资趋势及机遇分析[J]. 中国矿业, 2019, 28(7):19-25.
- TANG W H, CHEN L P, WU C G, et al. Analysis on the trend and future opportunities of China's outward foreign direct investment in mining industry[J]. China Mining Magazine, 2019, 28(7):19-25.
- [5] 王枫, 姜章平, 卢晶, 等. 安徽南陵姚家岭锌金多金属矿床金矿物特征研究[J]. 矿产综合利用, 2019(3):93-97.
- WANG F, JIANG Z P, LU J, et al. Disseminated characteristics of gold minerals Zn-Au polymetallic deposit in Yaojialing, Nanling County, Anhui Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(3):93-97.
- [6] 李林积, 王丹, 邱鹏玉. 西秦岭格尔托金矿金的赋存状态及可选性试验研究[J]. 矿产综合利用, 2019(4):83-86.
- LI L J, WANG D, QIU P Y. Experimental study on occurrence and optionality of gold in Gelto gold deposit, western Qinling[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(4):83-86.
- [7] 周利华, 陈晓芳, 苏妤芸. 山西某斑岩型金矿工艺矿物学特性[J]. 矿产综合利用, 2020(3):143-147.
- ZHOU L H, CHEN X F, SU S Y. Technological and mineralogical characteristics of a porphyry gold deposit in Shanxi province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(3):143-147.
- [8] 刘坤, 王婷霞, 李健民, 等. 天水某金矿工艺矿物学及选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2020(5):101-104.
- LIU K, WANG T X, LI J M, et al. Process mineralogy and mineral processing of a gold mine in Tianshui[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2020(5):101-104.

Mineralogical Factors Affecting Beneficiation-Metallurgy of a Gold Deposit in Africa

Li Lei^{1,2}, Peng Jun³, Xiao Yiwu¹, Tian Mingjun¹, Wang Hui¹

(1.BGRIM Technology Group, State Key Laboratory of Mineral Processing Science and Technology, Beijing, China; 2.School of Earth Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, China; 3.The Second Geological and Mineral Survey Institute of Henan Geological and Mineral Exploration and Development Bureau, Zhengzhou, Henan, China)

Abstract: This is an essay in the field of process mineralogy. Systematic process mineralogy has been done in this study, focusing on a gold deposit in Africa, using automatic mineral analysis system (i.e. AMICS, MLA) combined with optical microscopy. This study finds that gold minerals are mainly native gold, with high fineness of around 900. Intergranular and fracture gold totally occupy 62.77% of gold, and 37.23% of gold appears as inclusions in gangue minerals. The particle size of native gold is fine, with 27.54% portion under 10 μm . Nonmetallic minerals are main gold-hosting minerals, while sulfides are less related to gold, only 32.15%. Taking these features into consideration, flotation of whole sulfides is not suitable for gold recovery in this deposit, while stirring leaching after fine grinding will quite fit.

Keywords: Native gold; Embedded characteristics; Process mineralogy; Beneficiation and metallurgical technology