

河南嵩县下蒿坪金矿工艺矿物学研究

张辰子¹, 彭晶晶¹, 李昱瑾¹, 邵媛姣¹, 于保强²

(1. 河南省地质局 地质灾害防治中心, 河南 郑州 450000; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要: 通过化学分析、扫描电镜以及工艺矿物学自动定量分析系统(MLA)等测试方法对河南嵩县下蒿坪金矿进行了系统的工艺矿物学研究,包括原矿化学组成、矿物组成、金的赋存状态、主要载金矿物嵌布特征以及矿物解离特性等。结果表明,该金矿中主要可回收的有价金属为金,其品位为 3.75×10^{-6} 。该金矿的原矿矿物主要由石英、钾长石、钠长石、黄铁矿和铁白云石组成,此外还有少量的赤铁矿、萤石、白云石以及方解石。原矿中的金主要赋存在黄铁矿中,而黄铁矿大部分以细粒、微细粒形式嵌布在石英和长石颗粒中。原矿中自然金的含量非常少,多以单独的自然金颗粒形式存在。原矿磨至 $P_{80}=0.074$ mm (-0.074 mm 粒级含量占80%)时载金矿物黄铁矿、方铅矿、闪锌矿的单体解离度相对较高,有利于通过浮选回收。

关键词: 金矿; 工艺矿物学; 载金黄铁矿; 矿物解离度

中图分类号: P575; TD912; P618.51

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2023)03-0402-05

Study on process mineralogy of Xiahaoping gold mine in Song County, Henan Province

ZHANG Chen-zi¹, PENG Jing-jing¹, LI Yu-jin¹, TAI Yuan-jiao¹ and YU Bao-qiang²

(1. Geological Disaster Prevention Center of Henan Geological Bureau, Zhengzhou 450000, China; 2. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: The systematic process mineralogy study of Xiahaoping gold mine in Song County, Henan Province, was carried out by means of chemical analysis, scanning electron microscope and automatic quantitative analysis (MLA), including chemical composition of raw ore, mineral composition, occurrence state of gold, dissemination characteristics of main gold-bearing mineral, and mineral liberation characteristics. The results indicate that the main valuable metal in the mine is gold, with a grade of 3.75×10^{-6} . The gold deposit is mainly composed of quartz, K-feldspar, albite, pyrite and ankerite, and a small amount of hematite, fluorite, dolomite and calcite. The gold in the raw ore is mainly hosted in pyrite, and most of pyrite is embedded in quartz and feldspar particles in the form of fine and micro-fine particles. The content of natural gold in the raw ore is very low, and mostly exist in the form of individual natural gold particles. Gold-bearing mineral pyrite, galena and sphalerite have a relatively high liberation degree when the raw ore is ground to $P_{80}=0.074$ mm (-0.074 mm particle size content accounts for 80%), which is in favour of recovering by flotation.

Key words: gold mine; process mineralogy; gold-bearing pyrite; mineral liberation degree

Fund support: 2019 Science and Technology Innovation Project of Rock and Mineral Testing Center, Henan Province (Henan Testing [2019] No. 18-201904)

收稿日期: 2023-02-06; 接受日期: 2023-03-07; 编辑: 曲丽莉

基金项目: 河南省岩石矿物测试中心2019年度科技创新项目(豫地测试[2019]18号-201904)

作者简介: 张辰子(1988-), 女, 硕士, 主要从事贵金属矿及珠宝玉石检测分析, E-mail: 916195090@qq.com。

金矿是我国重要的战略性矿产资源,由于黄金特殊的物理化学性质而广泛应用于珠宝首饰、电子、航空航天和化学等领域,其中珠宝首饰消耗最多(张福良, 2016; 殷璐等, 2018; 刘海强, 2020)。随着国民经济的不断发展,我国对黄金资源的需求也将越来越大。我国金矿资源比较丰富,黄金储量和产量均位居世界前列(冯丹丹, 2019)。但我国金矿资源分布较为分散,大型金矿床较少,贫矿居多。随着易选金矿资源的不断消耗,复杂难选金矿将成为今后开发利用的主要资源(许文力, 2017; 张龙坤, 2017; 魏春霞, 2018; 王斌等, 2020; 倪曦等, 2021)。金矿的加工利用方法主要由其矿石性质决定,包括重选法、浮选法以及浸出法(代生权等, 2017; 马芳源等, 2017; 闫晓慧等, 2019; 惠士成等, 2020)。

河南嵩县下蒿坪金矿属于细粒及微细粒浸染型金矿,金的储量较大,但矿石性质复杂,较难回收(秦军强等, 2017; 方荣等, 2021)。为实现对该金矿的有效开发利用,文章通过化学分析、扫描电镜以及工艺矿物学自动定量分析系统(MLA)等测试方法对原矿进行了系统的工艺矿物学研究,包括原矿化学组成、矿物组成、金的赋存状态、主要载金矿物嵌布特征以及矿物解离特性等,以期为该矿选矿工艺的制定与优化提供参考。

1 实验材料与方法

实验矿样取自河南嵩县下蒿坪金矿岩芯,首先在实验室将矿样破碎筛分到-2 mm,然后进行混匀

再通过网格法取出代表性的矿样用于矿石性质研究。矿石化学元素组成以及金物相分析由河南省地质局地质灾害防治中心完成。矿石矿物组成以及矿物解离度采用中国科学院过程研究所工艺矿物学自动定量分析系统(MLA)进行分析。矿样中主要载金矿物嵌布特征采用德国卡尔蔡司高分辨场发射扫描电子显微镜(型号 MERLIN Compact)进行分析。

2 矿石化学元素组成

原矿化学多元素分析结果表明,该金矿主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 、 K_2O 、 SO_3 、 MgO 和 TiO_2 ,其含量分别为 64.12%、14.21%、7.65%、4.48%、3.86%、2.88%、1.36% 和 0.60%。原矿中有价金属元素 Pb (0.17%)、 Zn (0.10%)、 Mn (0.33%)、 Ga (0.01%) 的含量很低,不具有回收价值。原矿中 Au 的品位为 3.75×10^{-6} ,为主要可回收的金属元素。矿石中 SO_3 含量为 2.88%,推测矿样中含有一定量的硫化矿。矿石中主要成分 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较高,且含有一定量的 CaO 和 MgO ,认为矿石中主要脉石矿物为石英和铝硅酸盐类矿物。

3 矿石矿物组成

采用工艺矿物自动定量分析系统(MLA)对代表性的矿样进行分析,其中典型的原矿 MLA 扫描图片如图 1 所示。原矿矿物组成分析结果如表 1 所示,可以看出原矿中主要的载金硫化矿为黄铁矿,其含量为 6.57%。主要脉石矿物为石英、钾长石和钠长

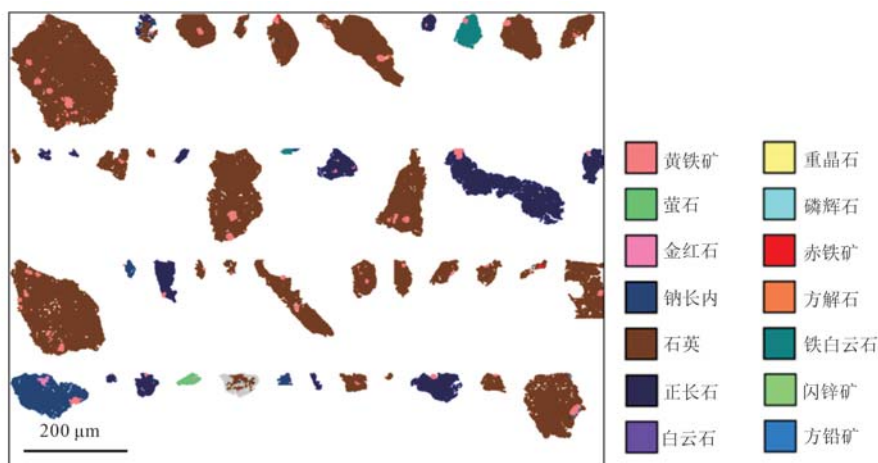


图 1 典型原矿 MLA 扫描图
Fig. 1 MLA figure of the typical raw ore

表1 原矿物组成分析结果 $w_B/\%$

Table 1 Mineral composition analysis result of the raw ore

矿物名称	含量	矿物名称	含量
石英	37.65	赤铁矿	4.32
钾长石	29.43	萤石	3.27
钠长石	7.74	白云石	2.93
黄铁矿	6.57	方解石	2.32
铁白云石	5.06	其他	0.71

石,其含量分别为37.65%、29.43%和7.74%,其他脉石矿物如铁白云石、赤铁矿、萤石、白云石以及方解石的含量较少。

4 金的赋存状态

为了确定原矿中金的赋存状态,对原矿中的金进行化学物相分析,结果如表2所示。原矿中的金以硫化矿包裹金为主,其中黄铁矿包裹金占76.78%,铅锌硫化矿包裹金占7.91%。原矿中自然金含量较少,占3.17%。硫化矿物与自然金属于易浮矿物,可通过浮选法进行回收。此外,原矿中碳酸盐包裹金、石英和硅酸盐包裹金以及赤铁矿包裹金的含量分别占3.43%、6.86%、1.85%,该部分金采用常规浮选较难回收。

表2 原矿金物相分析结果

Table 2 Gold phase analysis result of the raw ore

相别	金含量/ 10^{-6}	金分布率/%
自然金	0.12	3.17
黄铁矿包裹金	2.91	76.78
铅锌硫化矿包裹金	0.30	7.91
碳酸盐包裹金	0.13	3.43
石英和硅酸盐包裹金	0.26	6.86
赤铁矿包裹金	0.07	1.85
合计	3.79	100.00

5 主要载金矿物嵌布特征

5.1 黄铁矿

图2(a)为黄铁矿扫描电镜图。黄铁矿是原矿中最主要的载金硫化矿,粒度分布不均匀,粗颗粒在 $100\ \mu\text{m}$ 以上,但大部分以细粒($-20\ \mu\text{m}$)以及微细粒浸染形式存在,少量以粗粒集合体形式存在。黄铁矿通常以他形或不规则粒状结构嵌布在石英或长石颗粒中。

5.2 方铅矿

图2(b)为方铅矿扫描电镜图。原矿中方铅矿大多与黄铁矿连生,或以交代形式充填在黄铁矿裂隙或边缘处,也有单独的方铅矿粗颗粒存在,但相对较少。方铅矿主要以他形不规则粒状或条带状结构产出,其粒径主要介于 $20\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间。

5.3 闪锌矿

图2(c)为闪锌矿光学显微图。原矿中闪锌矿含量很少,粒度相对较粗。闪锌矿大多以他形不规则粒状形式嵌布在脉石矿物石英颗粒中,且与方铅矿密切共生,图中也可见方铅矿以交代形式充填在闪锌矿裂隙或边缘处。

5.4 自然金

图2(d)为自然金光学显微图。原矿中自然金的含量非常少,多以单独的自然金颗粒形式存在,其粒度通常较小,在 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 之间。原矿中自然金颗粒形状主要为不规则粒状或近似椭圆形。此外,也有少量金以极微细粒形式被包裹在脉石矿物中而很难被发现。

6 主要矿物解离度

采用MLA对原矿磨至 $P_{80}=0.074\ \text{mm}$ 的产品进行矿物解离度分析,结果见表3。磨矿产品中已经单体解离的黄铁矿占70.81%,解离度相对较高,而未解离的黄铁矿主要与石英、钾长石、钠长石以连生体或被包裹体的形式存在。方铅矿的单体解离度为71.18%,未解离部分主要与石英、钾长石、黄铁矿以连生体或被包裹体的形式存在。对于闪锌矿,其单体解离度为67.57%,未解离部分主要与石英、钾长石、铁白云石以连生体或被包裹体的形式存在,少量闪锌矿存在于黄铁矿中,这与原矿扫描电镜的观察结果一致。对于脉石矿物如石英、长石、白云石以及方解石等,其解离度相对较高。

7 结论

(1) 河南嵩县下嵩坪金矿中主要可回收的有价金属为金,其品位为 3.75×10^{-6} 。该金矿的原矿矿物主要由石英、钾长石、钠长石、黄铁矿和铁白云石组成,其含量分别为37.65%、29.43%、7.74%、6.57%和5.06%,此外还含有少量的赤铁矿、萤石、白云石以及方解石。

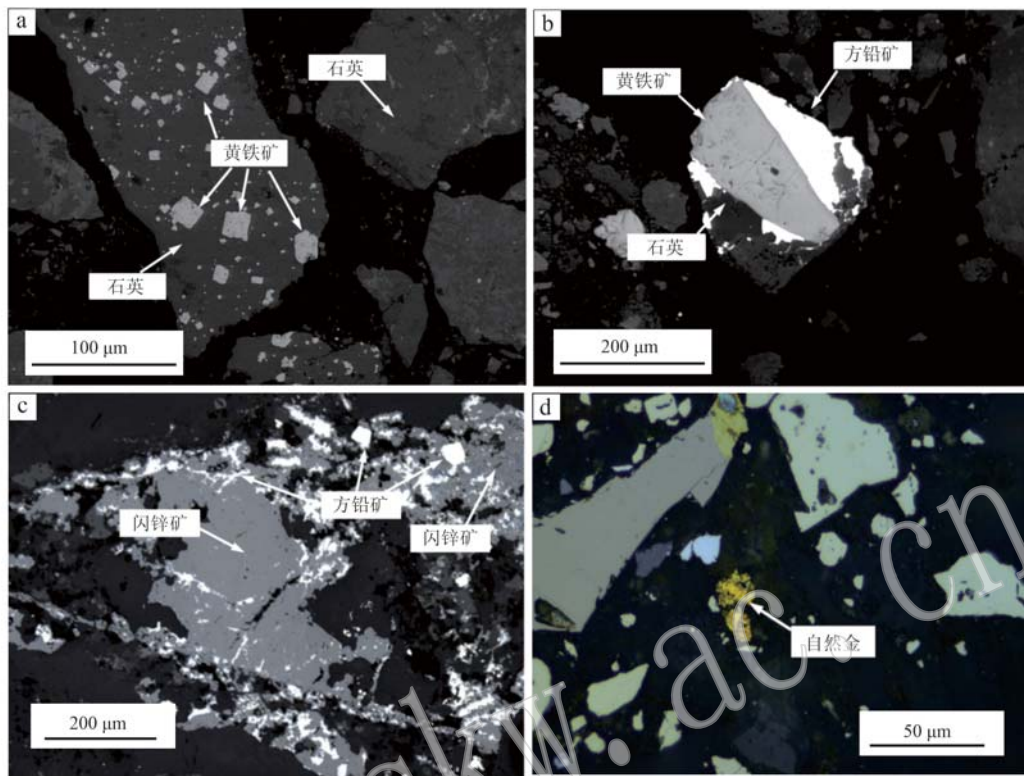


图 2 主要载金矿物扫描电镜或光学显微图

Fig. 2 SEM or Optical micrographs of gold-bearing minerals

a—黄铁矿 SEM 图；b—方铅矿 SEM 图；c—闪锌矿光学显微图；d—自然金光学显微图

a—SEM of pyrite; b—SEM of galena; c—optical micrograph of galena; d—optical micrograph of native gold

表 3 原矿 $P_{80}=0.074\text{ mm}$ 的磨矿产品矿物解离度分析结果

$w_B/\%$

Table 3 Mineral liberation degree analysis result of grinded product ($P_{80}=0.074\text{ mm}$)

解离度	黄铁矿	闪锌矿	方铅矿	萤石	赤铁矿	钠长石	方解石	钾长石	石英	铁白云石	白云石	其他	单体
黄铁矿	0.00	0.06	0.27	0.77	0.58	2.00	0.05	7.78	13.39	1.60	0.86	1.83	70.81
方铅矿	6.87	0.46	0.00	0.11	1.22	1.18	0.04	7.42	7.88	1.43	0.64	1.57	71.18
闪锌矿	1.63	0.00	0.51	0.00	0.61	2.68	0.00	8.61	8.51	4.46	0.07	5.35	67.57
石英	1.39	0.03	0.03	0.29	1.91	2.19	0.06	6.85	0.00	1.27	0.70	2.29	82.99
钾长石	1.04	0.04	0.04	0.70	2.78	2.48	0.00	0.00	8.77	0.35	0.19	2.02	81.59
钠长石	0.82	0.04	0.02	0.48	2.88	0.00	0.10	7.62	8.63	2.35	0.99	2.92	73.25
方解石	0.08	0.00	0.00	0.00	0.14	0.39	0.00	0.06	0.90	0.25	1.63	0.37	96.18
铁白云石	1.23	0.12	0.04	0.38	2.51	4.42	0.12	2.02	9.37	0.00	3.27	2.18	74.34
白云石	1.03	0.00	0.03	0.29	0.91	2.90	1.20	1.70	7.98	5.07	0.00	1.23	77.66
萤石	3.89	0.00	0.02	0.00	1.92	5.94	0.01	26.45	14.10	2.46	1.24	7.11	36.86
赤铁矿	0.54	0.02	0.04	0.35	0.00	6.57	0.08	19.45	17.08	3.04	0.71	2.88	49.24
其他	1.97	0.20	0.07	1.51	3.32	7.68	0.24	16.24	23.67	3.04	1.11	0.00	40.95

(2) 原矿中的金以硫化矿包裹金为主,其中黄铁矿包裹金占 76.78%,铅锌硫化矿包裹金占 7.91%,自然金含量较少,占 3.17%,此外还有少量金被石英、长石以及碳酸盐等脉石矿物包裹。

(3) 原矿中主要载金矿物黄铁矿大部分以细粒、微细粒形式嵌布在石英和长石颗粒中,方铅矿大

多与黄铁矿连生,或以交代形式充填在黄铁矿裂隙或边缘处,闪锌矿与方铅矿共生关系密切。原矿中自然金的含量非常少,多以单独的自然金颗粒形式存在。

(4) 原矿磨至 $P_{80}=0.074\text{ mm}$ 时载金矿物黄铁矿、方铅矿、闪锌矿的单体解离度分别为 70.81%、

71. 18%、67.57%，相对较高，有利于通过浮选回收。

References

- Dai Shengquan and Tan Baihua. 2017. Research on the separation technology of gold and sulfur arsenic flotation[J]. *World Nonferrous Metals*, (10): 39~40(in Chinese with English abstract).
- Fang Rong, Yang Sen, Ying Yage, *et al.* 2021. Geological characteristics and genesis of Xiahaoping gold deposit in Songxian County of West Henan[J]. *Mineral Resources and Geology*, 35(4): 635~640, 647 (in Chinese with English abstract).
- Feng Dandan. 2019. Analysis of supply and demand situation of gold resources in 2017[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 39(1): 150~154(in Chinese with English abstract).
- Hui Shicheng, Wang Zhongming and Li Congfei. 2020. Discussion on gold ore dressing technology and process method[J]. *World Nonferrous Metals*, (10): 37~38(in Chinese with English abstract).
- Liu Haiqiang. 2020. On the application of gold resources and prospecting technology in China[J]. *World Nonferrous Metals*, (4): 88, 90(in Chinese with English abstract).
- Ma Fangyuan, Dai Shujuan and Liu Shujie. 2017. Current research status of refractory gold ores in China[J]. *Gold*, 38(1): 64~67(in Chinese with English abstract).
- Ni Xi and Bai Hailing. 2021. Characteristics of gold resources and metallogenic regularity in China[J]. *World Nonferrous Metals*, (19): 60~61(in Chinese with English abstract).
- Qin Junqiang, Dong Wenchao, Nie Huaiyue, *et al.* 2017. Discussion on the geochemistry characteristics and genesis of Xiahaoping Gold Deposit in Song County, Henan Province[J]. *Gold Science and Technology*, 25(2): 23~31(in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Li Jingchao, Wang Chengxi, *et al.* 2020. An overview of characteristics and prospecting of gold ore deposits in China[J]. *Geological Journal of China Universities*, 26(2): 121~131(in Chinese with English abstract).
- Wei Chunxia. 2018. The analysis of Chinese gold mine resource present situation and prospects[J]. *China Metal Bulletin*, (1): 19~20(in Chinese with English abstract).
- Xu Wenli. 2017. Brief discussion on present situation of gold resources in China[J]. *World Nonferrous Metals*, (18): 134~135(in Chinese with English abstract).
- Yan Xiaohui, Li Guichun and Meng Qi. 2019. Research progress of gold extraction technology in gold deposits[J]. *Applied Chemical Industry*, 48(11): 2 719~2 723 (in Chinese with English abstract).
- Yin Lu, Jin Zhenan, Yang Hongying, *et al.* 2018. Present situation and forecast of gold resources utilization in China[J]. *Gold Science and Technology*, 26(1): 17~24(in Chinese with English abstract).
- Zhang Fuliang, Fang Yiping, Li Xiaoyu, *et al.* 2016. Analysis of the strategic value of gold resources in the new era in China[J]. *China Mining Magazine*, 25(z1): 1~4, 12(in Chinese with English abstract).
- Zhang Longkun. 2017. The gold mine resource prospects and analysis in our country[J]. *World Nonferrous Metals*, (20): 151~152(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 代生权, 谭白华. 2017. 金矿金硫砷浮选分离技术研究[J]. *世界有色金属*, (10): 39~40.
- 方荣, 杨森, 英亚歌, 等. 2021. 豫西嵩县下嵩坪金矿地质特征及矿床成因探讨[J]. *矿产与地质*, 35(4): 635~640, 647.
- 冯丹丹. 2019. 2017年度全球黄金资源供需形势分析[J]. *矿产保护与利用*, 39(1): 150~154.
- 惠士成, 王仲明, 李丛飞. 2020. 金矿选矿技术和工艺方法探讨[J]. *世界有色金属*, (10): 37~38.
- 刘海强. 2020. 浅谈我国黄金资源及找矿技术的运用[J]. *世界有色金属*, (4): 88, 90.
- 马芳源, 代淑娟, 刘淑杰. 2017. 中国难处理金矿石研究现状[J]. *黄金*, 38(1): 64~67.
- 倪曦, 白海铃. 2021. 中国金矿资源特征及成矿规律概要[J]. *世界有色金属*, (19): 60~61.
- 秦军强, 董文超, 聂怀跃, 等. 2017. 河南嵩县下嵩坪金矿地球化学特征及成因探讨[J]. *黄金科学技术*, 25(2): 23~31.
- 王斌, 李景朝, 王成锡, 等. 2020. 中国金矿资源特征及勘查方向概述[J]. *高校地质学报*, 26(2): 121~131.
- 魏春霞. 2018. 中国金矿资源的现状及前景分析[J]. *中国金属通报*, (1): 19~20.
- 许文力. 2017. 浅谈我国金矿资源现状[J]. *世界有色金属*, (18): 134~135.
- 闫晓慧, 李桂春, 孟齐. 2019. 金矿中提金技术的研究进展[J]. *应用化工*, 48(11): 2 719~2 723.
- 殷璐, 金哲男, 杨洪英, 等. 2018. 我国黄金资源综合利用现状与展望[J]. *黄金科学技术*, 26(1): 17~24.
- 张福良, 方一平, 李晓宇, 等. 2016. 新时期我国黄金资源战略价值浅析[J]. *中国矿业*, 25(z1): 1~4, 12.
- 张龙坤. 2017. 我国金矿资源前景与分析[J]. *世界有色金属*, (20): 151~152.