

甘肃早子沟金矿石工艺矿物学研究

董再蒸^{1,2}, 高鹏^{1,3}, 张淑敏¹, 韩跃新¹

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 东北大学 新材料技术研究院, 辽宁 沈阳 110819;
3. 山东招金集团有限公司, 山东 招远 265400)

摘 要: 甘肃早子沟金矿为典型卡林型金矿,该矿含金4.09 g/t,锑0.46%,砷0.39%,主要金属矿物有黄铁矿、毒砂、辉锑矿和褐铁矿,非金属矿物主要有石英、碳酸盐矿物和绢云母,矿石中矿物组成较复杂,但是除金及辉锑矿以外其他元素均无回收价值.矿石中的金矿物主要为自然金,相对质量分数为99.12%,除分布在脉石中的金,辉锑矿是金的重要载体.自然金粒度不均匀,经统计的颗粒全部小于0.075 mm,未发现粗粒金.工艺矿物学研究表明,该矿石难于选冶的主要原因为易泥化矿物、包裹金及含砷锑等耗氰矿物较多.

关 键 词: 早子沟金矿石;卡林型金矿;工艺矿物学;赋存状态;嵌布特性

中图分类号: TD 912 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)05-0711-05

Process Mineralogy of Gold Ore in Zaozigou Gold Mine, Gansu Province

DONG Zai-zheng^{1,2}, GAO Peng^{1,3}, ZHANG Shu-min¹, HAN Yue-xin¹

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Institute of Advanced Material Technology, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 3. Shandong Zhaojin Group Co., Ltd., Zhaoyuan 265400, China. Corresponding author: DONG Zai-zheng, E-mail: dongzz@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The samples collected from Zaozigou gold mine in Gansu Province can be considered as typical Carlin-type gold deposits. The Au, Sb, and As contents of the ore are 4.09 g/t, 0.46% and 0.39%, respectively. It was found that the main metallic minerals in the gold ore are pyrite, arsenopyrite, stibnite and limonite. The primary gangue minerals are quartz, carbonate minerals and sericite. Mineral composition of the ore is complex, however, gold and antimony are the only useful minerals. The gold minerals in the ore are mainly native gold with the relative content of 99.12%. In addition to gold distributed in the gangue minerals, stibnite is an important carrier of gold. Particle size of native gold is tiny less than 0.075 mm and nonuniform. According to the process mineralogy research, the main reasons for the refractory of the ore are the easily argillaceous minerals, inclusion gold and containing huge amounts of minerals consuming cyanide such as arsenic antimony matter.

Key words: Zaozigou gold ores; Carlin-type gold ores; process mineralogy; occurrence state; dissemination characteristics

随着金矿资源的大量开发利用,易选易处理金矿越来越少,而嵌布粒度细、品位低的难选金矿则日益增多,给黄金资源的开发利用带来巨大挑战^[1-3].卡林型(或称微粒浸染型)金矿是一种典型的难处理金矿^[4],在中国,“滇黔桂金三角”、“川

陕甘金三角”、滇西南上芒岗等地分布有储量巨大的卡林型金矿^[5-6].截止目前,全国已探明的卡林型金矿累计储量已超过1 000 t,位居世界第二位.

本文研究矿石取自甘肃早子沟金矿,早子沟金矿位于甘肃省甘南藏族自治州合作市境内,为

招金矿业股份有限公司、甘肃省地矿局第三勘查院和合作市政府共同拥有. 至 2013 年早子沟金矿累计探明金资源量 142 t. 2014 年在矿区东北向矿带 2 600 m 标高以下进行深部金矿勘查, 深部探明金资源量逾 30 t. 早子沟金矿矿床成因类型为岩浆期后中 - 低温热液(交代)构造蚀变岩型金矿床, 成矿作用方式主要为低温热液含金热液充填交代(包括渗滤交代)成矿, 具有多期成矿的特点. 矿化蚀变形成的主要金属矿物黄铁矿、毒砂、辉锑矿以粗细不等的粒状嵌布在脉石矿物中, 且无定向排列, 形成浸染状构造, 矿石中部分褐铁矿以脉状穿插矿石的裂隙中, 形成脉状构造. 非金属矿物主要有石英、碳酸盐矿物、绢云母等. 早子沟金矿的容矿岩石、围岩蚀变、金的赋存状态等特征与美国内华达地区的卡林型金矿相似, 因此可以认为早子沟金矿为典型的卡林型金矿^[7].

金矿石的工艺矿物学是金矿石选冶工艺制定的决定性因素^[8]. 本文研究了早子沟金矿石的工艺矿物学性质, 分析了影响氰化提金的因素, 为流

程选择提供理论依据. 这些研究对我国此类难处理金矿的开发和应用具有重要的意义.

本文原矿的化学多元素分析结果是样品经适当地预处理后, 由原子吸收分光光度计, ICP 原子发射光谱仪, 红外定硫定碳仪, X 射线荧光光谱仪测量而得. 矿物赋存信息是在破碎前的样品中选取块样, 磨制光片进行鉴定而得. 在光学显微镜下根据矿物的形貌和反光特性识别矿物种别, 使用线段统计法并结合矿物密度和化学分析结果等信息, 得出矿物成分的质量分数和颗粒形态、嵌存状态的统计结果, 鉴别的光片数和矿物颗粒的数量越多, 准确度越高. 取细磨后矿物置于导电胶上并喷碳处理, 用扫描电子显微镜观察表面形貌, 运用 SEM - EDX 系统对样品进行形貌、定性分析, 考察物相之间的嵌布关系.

1 化学成分分析

原矿的多元素化学分析结果见表 1.

表 1 矿石样品主要化学成分(质量分数)														%
Table 1 Chemical composition of ore samples(mass fraction)														
Au *	Ag *	Cu	Pb	Zn	Fe	C	S	Sb	As	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂
4. 09	1. 1	0. 005	0. 004	0. 014	3. 30	2. 07	0. 85	0. 46	0. 39	56. 11	14. 33	5. 51	2. 83	0. 55

* 单位 g/t.

由表 1 可以看出矿石中非脉石矿物元素以铁、碳、硫、砷、锑为主, 其次有少量的铜、铅、锌等, 并伴生有金、银. 矿石中除了金、锑, 其他有价元素的含量均较低, 综合利用的价值不大. 砷的含量较高, 会影响金的选别指标.

2 矿物成分

通过对矿石的矿物组成及含量统计发现, 矿石具有矿物组成复杂, 矿物种类多, 金属矿物含量低, 非金属矿物含量高的特点. 其中硫、铁、砷、锑、

铜、铅、锌等均以独立矿物存在. 硫的独立矿物主要为黄铁矿, 另有微量白铁矿和磁黄铁矿; 砷的独立矿物为毒砂; 锑的独立矿物为辉锑矿; 铁的独立矿物主要为褐铁矿, 另有微量磁铁矿; 铜的矿物较多, 有黄铜矿、铜蓝和辉铜矿等, 合计质量分数为 0. 02%; 锌和铅的独立矿物为闪锌矿、方铅矿, 含量很低; 金矿物主要为自然金和银金矿, 为该矿的回收矿物. 非金属矿物主要有石英、碳酸盐矿物和绢云母, 其次有白云母、长石、黑云母、高岭石和磷灰石等, 具体成分见表 2.

表 2 矿石主要的矿物成分(质量分数)				%
Table 2 Main minerals of ore samples(mass fraction)				
金属矿物	质量分数	非金属矿物	质量分数	
黄铁矿	0. 95	石英	32. 97	
毒砂	0. 84	碳酸盐矿物	29. 09	
辉锑矿	0. 64	绢云母	19. 39	
褐铁矿	0. 55	白云母	5. 15	
黄铜矿、辉铜矿、铜蓝	0. 02	长石	4. 55	
闪锌矿	0. 02	黑云母	2. 91	
方铅矿	0. 01	高岭石	1. 94	
辉钼矿	0. 01	磷灰石	0. 96	
小计	3. 04	小计	96. 96	

3 金矿物特征

3.1 金矿物的种类及相对含量

矿石中金矿物主要为自然金,相对质量分数为 99.12%,另有少量的银金矿,相对质量分数仅占 0.88%。金矿物相对质量分数见表 3。因自然金的含金量高,且相对质量分数多,故自然金回收率的高低直接影响金的回收指标。

表 3 金矿物的相对质量分数统计结果		
Table 3 Relative content of gold minerals %		
金矿物名称	相对质量分数	
自然金	99.12	
银金矿	0.88	
合计	100.00	

3.2 金矿物的产出特征

1) 自然金. 通过对原矿石光片、团矿和精矿

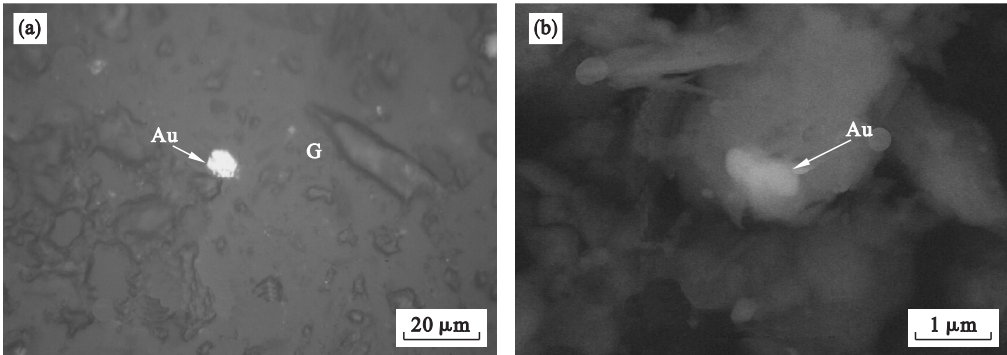


图 1 矿石的光学照片
Fig. 1 Optical images of the ore
(a)—自然金(Au)嵌布在脉石(G)中;(b)—扫描电镜下精矿中次显微粒的自然金(Au)。

2) 银金矿. 银金矿在矿石中的相对质量分数很少,粒度十分细小,所见银金矿均属微粒级的,粒度均小于 0.005 mm,以不规则短脉状嵌布在脉石中,嵌布特征与自然金相似,银金矿与矿石中的其他金属矿物的嵌布关系不密切。

3.3 金矿物的形态

金矿物的形态划分主要依据金矿物颗粒的延率(长/宽),分为粒状、麦粒状、叶片状和针线状 4 种,经统计发现矿石中自然金主要以麦粒状产出、粒状次之,叶片状和针线状的金矿物较少,见表 4。

表 4 金矿物颗粒形态统计结果				
Table 4 Particle morphology of gold minerals %				
金银矿物形态	粒状	麦粒状	叶片状	针线状
延率	1~1.5	1.5~3	3~5	>5
分布率	22.60	52.90	12.89	11.61

粉团矿的镜下观察发现,矿石中的自然金在矿石中分布较分散,粒度十分不均匀,主要以麦粒状、浑圆粒状、长条状、枝状和不规则状产出,多呈单独颗粒嵌布在脉石中(图 1a),少量自然金与闪锌矿边缘接触共生嵌布在脉石中,另一部分自然金包裹在辉锑矿中,或嵌布在辉锑矿的边部,未发现自然金与黄铁矿、毒砂等矿物有直接的嵌布关系。在精矿中,大部分自然金以单体存在,少部分自然金与辉锑矿结合或被辉锑矿包裹形成连生体(图 2),另有个别自然金包裹在脉石矿物中形成连生体。自然金的粒度较细小,发现最大粒度的自然金属中粒金,粒度为 0.043 mm,呈粒状、麦粒状分散嵌布在脉石中,最小粒度自然金不到 1 μm,属次显微金,细粒和微粒自然金的颗粒数量较多,粒度小于 0.01 mm,主要呈细粒状、麦粒状、叶片状和不规则状(图 1b),未发现有粗粒金存在。

3.4 金矿物的嵌存状态

矿石中金矿物的嵌存状态对其解离和回收有重要影响,对金矿物的嵌存状态统计结果见表 5。

表 5 金矿物嵌存状态统计结果	
Table 5 Occurrence status of gold minerals %	
嵌布类型	分布率
分布在脉石中	88.75
包裹在辉锑矿中	8.21
与闪锌矿共生,分布在脉石中	3.04
合计	100.00

从表 5 中可以看出,大部分金矿物分布在脉石中,少部分金矿物包裹在辉锑矿中或嵌布在辉锑矿的边缘,还有少量金矿物与闪锌矿有共生关系。

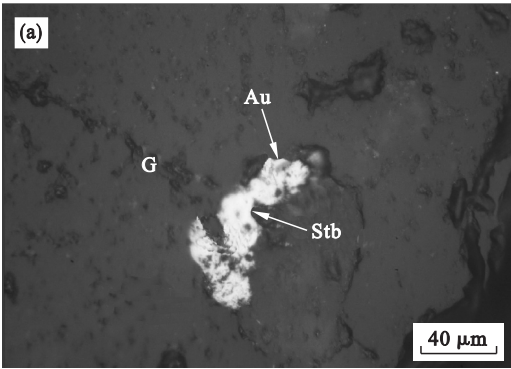
3.5 金矿物的嵌布粒度

通过对金矿物的嵌布粒度统计,其结果详见

表 6.

表 6 金矿物嵌布粒度统计结果						
Table 6 Dissemination size of gold minerals						
粒级	中粒	细粒	微粒		次显微	合计
μm	75 ~ 37	37 ~ 10	10 ~ 5	5 ~ 1	< 1	
质量分数	73. 78	5. 48	13. 96	7. 74	0. 03	100. 00
%						

由表 6 可见,矿石中可以观察到的金矿物的嵌布粒度以中粒嵌布为主,质量分数为 73. 78%,其次为微粒级和细粒级,质量分数分别为 21. 70% 和 5. 48%,次显微粒质量分数很低,仅占 0. 03%. 对浮选精矿进行扫描电镜分析时发现了粒径 1 μm 左右的金颗粒,做面扫描时也发现了



极细小的晶格金分布于铝、硅、硫等元素的分布区域中,但这些金暂无法做出精确统计,表 6 统计结果仅说明光学显微镜下已统计到的各粒级自然金在原矿中的占比.

4 主要矿物的产出特征

4. 1 辉锑矿

辉锑矿以他形粒状产出,在矿石中较集中产出,粒度不均匀,以粗粒嵌布为主,多嵌布在脉石中,有的充填在黄铁矿的粒间和裂隙中,并对黄铁矿有交代熔蚀作用. 如图 2 所示,辉锑矿中有自然金包裹体,为金的重要载体.

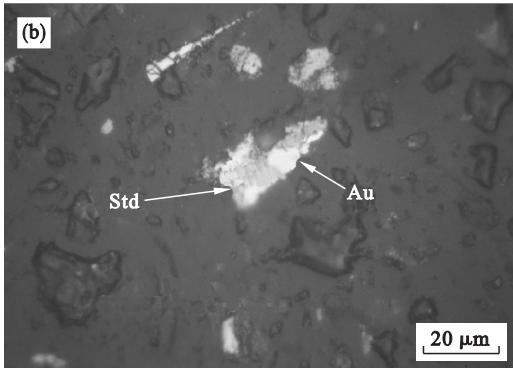


图 2 自然金 (Au) 嵌布辉锑矿 (Stb) 和脉石矿物 (G) 粒间
Fig. 2 Intergrowth relationship between gold and stibnite
(a)—辉锑矿; (b)—脉石矿.

4. 2 黄铁矿

矿石中的黄铁矿为硫的独立矿物,多以他形粒状产出,少量自形、半自形粒状产出,分散分布在矿石中,局部分布较稠密,呈集合体产出. 黄铁矿以中细粒嵌布为主,粗细较均匀. 受地质作用的影响,黄铁矿的边缘、裂隙和内部被浸蚀风化,形成破碎状、岛屿状和不规则状,孔洞和裂隙充分发育,孔隙中被土状的脉石矿物充填,部分黄铁矿被褐铁矿沿其裂隙进行交代. 有的黄铁矿颗粒被矛状的毒砂穿插,在黄铁矿的粒间和裂隙中常见有辉锑矿充填胶结,并被辉锑矿、闪锌矿等交代熔蚀,在黄铁矿粒间还见有细粒的磁铁矿嵌布其中. 在矿石的局部黄铁矿有白铁矿化现象,白铁矿与黄铁矿一般呈连晶关系.

4. 3 毒砂

毒砂为矿石中的砷矿物,多以自形、半自形菱柱状、粒状、矛状、长条状和细长的柱状浸染分布在脉石中,与黄铁矿伴生,粒度十分细小均匀,一般在矿石中大致呈条带状较集中分布,部分中粒毒砂零星嵌布在脉石中. 毒砂与矿石中其他金属

矿物嵌布关系不密切,仅有少量毒砂穿插黄铁矿颗粒.

5 影响提金工艺的因素

- 1) 矿石中非金属矿物种类较多,主要为石英、碳酸盐矿物、绢云母、白云母、黑云母、长石等. 矿石中的绢云母和白云母属易泥化矿物,含量很高,不利于金的浮选.
- 2) 尽管矿石中金主要以自然金的形式产出,但它基本上均以细小颗粒包裹于硫化物和脉石中,即使把矿石磨到极细小也不能将金颗粒充分暴露出来^[9-10]. 在氰化浸出时,氰化溶液很难直接与金矿物接触发生反应,从而影响金的浸出效果.
- 3) 矿石中存在较多对氰化过程有显著干扰的矿物种类,除辉锑矿、黄铁矿和毒砂外,以绢云母为代表的黏土矿物和方解石、白云石等碳酸盐类矿物的含量亦相当高,它们都是消耗氰化物的矿物,这也是矿石中金难以浸出的主要原因之一.

6 结 论

1) 该矿石的元素以铁、碳、硫、砷、锑为主,其次有少量的铜、铅、锌等,并有伴生金. 矿石中金属矿物的矿物组成较复杂,矿物种类较多,主要金属矿物有黄铁矿、毒砂、辉锑矿和褐铁矿,其余的金属矿物如铜矿物、闪锌矿、方铅矿等含量较少. 除金、锑以外,其他元素均无回收价值.

2) 矿石中的金矿物主要为自然金,相对质量分数为 99. 12% ,另含少量的银金矿. 占 91. 79% 的自然金直接分布在脉石中,其中 3. 04% 的自然金与闪锌矿共生,有 8. 21% 的自然金包裹在辉锑矿中,辉锑矿的粒度较粗大,这部分自然金易随辉锑矿一起回收. 自然金粒度不均匀,经统计的颗粒全部小于 0. 075 mm,未发现粗粒金,其中 21. 73% 的自然金属微粒以下粒级,这部分自然金大部分分布在脉石中,由于粒度细小,很难从脉石中解离出来,将影响金的回收率.

3) 矿石的矿物组成和金矿物的嵌布特征等因素导致浮选、氰化等常规提金手段难以得到良好的分选指标,应采用合适的预氧化、超细磨矿、电脉冲等预处理手段,有针对性的去除硫化物、脉石包裹等不利影响,提高分选指标,使我国储量巨大的难选冶卡林型金矿获得高效利用.

参考文献：

[1] Haque K E. Gold leaching from refractory ores-literature survey[J]. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*,1987,2(3) :235 – 253.

[2] 李俊萌. 难处理金矿石预处理方法研究现状及其发展趋势[J]. *稀有金属*,2003,27(4) :479 – 481,490.

(Li Jun-meng. Current situations of refractory gold ore ’ s

pretreatment method research and its tendency[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*,2003,27(4) :479 – 481,490.)

[3] 崔毅琦,陈海亮,董鹏罗,等. 卡林型金矿预处理技术研究现状[J]. *黄金*,2014,35(10) :61 – 63.

(Cui Yi-qi, Chen Hai-liang, Dong Peng-luo, et al. Research on the status of pretreatment techniques for Carlin-type gold deposits[J]. *Gold*,2014,35(10) :61 – 63.)

[4] Simon G, Kesler S E, Chryssoulis S L. Geochemistry and textures of gold-bearing arsenian pyrite, Twin Creeks, Nevada; implications for deposition of gold in Carlin-type deposits[J]. *Economic Geology*,1999,94(3) :405 – 421.

[5] Mao J W, Qiu Y M, Goldfarb R J, et al. Geology, distribution, and classification of gold deposits in the western Qinling belt, central China[J]. *Mineralium Deposita*,2002,37(3/4) :352 – 377.

[6] 周余国,刘继顺,欧阳玉飞,等. 卡林型金矿的再定义[J]. *黄金*,2008,29(11) :7 – 11.

(Zhou Yu-guo, Liu Ji-shun, Ouyang Yu-fei, et al. Redefinition of Carlin-type gold deposit[J]. *Gold*,2008,29(11) :7 – 11.)

[7] 刘春先,李亮,隋吉祥. 甘肃早子沟金矿的矿化特征及矿床成因[J]. *地质科技情报*,2011,30(6) :66 – 73.

(Liu Chun-xian, Li Liang, Sui Ji-xiang. Mineralization characteristics and ore genesis of the Zaozigou gold deposit, Gansu Province[J]. *Geological Science and Technology Information*,2011,30(6) :66 – 73.)

[8] Zhou J Y, Cabri L J. Gold process mineralogy: objectives, techniques, and applications[J]. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*,2004,56(7) :49 – 52.

[9] Palenik C S, Utsunomiya S, Reich M, et al. “ Invisible ” gold revealed: direct imaging of gold nanoparticles in a Carlin-type deposit[J]. *American Mineralogist*,2004,89(10) :1359 – 1366.

[10] 余建文,高鹏,韩跃新,等. 难浸金矿预处理方法的新进展[J]. *矿冶*,2013,22(2) :59 – 62.

(Yu Jian-wen, Gao Peng, Han Yue-xin, et al. New advances of refractory gold ore pretreatment method[J]. *Mining and Metallurgy*,2013,22(2) :59 – 62.)



(上接第 710 页)

[6] Singer D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1990, 34 (22) : 145 – 155.

[7] Guimarões A C F, Ebecken N F F. Fuzzy FAT: a fuzzy fault tree system for uncertainty analysis[J]. *Annals of Nuclear Energy*,1999,26:523 – 532.

[8] Suresh P V, Babar A K, Venkat R V. Uncertainty in fault tree analysis: a fuzzy approach[J]. *Fuzzy Sets and Systems*,1996,83(2) :135 – 141.

[9] Kumar M, Yadav S P. The weakest t-norm based intuitionistic fuzzy fault-tree analysis to evaluate system reliability[J]. *ISA Transactions*,2012,51:531 – 538.

[10] Mentes A, Helvacioğlu I H. An application of fuzzy fault tree

analysis for spread mooring systems[J]. *Ocean Engineering*, 2011,38:285 – 294.

[11] Li Y F, Huang H Z, Zhu S P, et al. An application of fuzzy tree analysis to uncontained events of an aero-engine rotor[J]. *International Journal of Turbo and Jet-Engines*,2012,29(4) :309 – 315.

[12] 成大先. 机械设计手册:第 3 卷[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

(Cheng Da-xian. Mechanical design handbook; 3rd Volume[M]. Beijing: Chemical Industry Press,2008.)

[13] 饶振纲. 行星传动机构设计[M]. 北京:国防工业出版社,1994:462 – 465.

(Rao Zhen-gang. Design of planetary transmission mechanism[M]. Beijing: National Defense Industry Press,1994:462 – 465.)