

山西某蚀变斑岩型金矿工艺矿物学研究

赵汝全^{1,2,3}, 魏转花^{1,2,3}, 梁治安^{1,2,3}, 黄裕卿^{1,2,3}

¹紫金矿业集团股份有限公司, 福建 龙岩

²低品位难处理黄金资源综合利用国家重点实验室, 福建 龙岩

³厦门紫金矿冶技术有限公司, 福建 厦门

收稿日期: 2021年9月16日; 录用日期: 2021年10月20日; 发布日期: 2021年10月27日

摘要

山西某蚀变斑岩型金矿石中可回收的主要有价元素是金, 品位为1.1 g/t, 主要金属矿物有黄铁矿, 少量褐铁矿、闪锌矿及微量方铅矿、黄铜矿、黝铜矿等。脉石矿物主要是石英, 其次为长石、云母, 矿石中矿物组成较复杂, 但除金银以外其他元素均不具有回收价值。矿石中的金矿物主要为含银自然金和银金矿, 分别占70%、30%, -75 μm占65%条件下矿石中的金主要以裸露金的形式存在, 分布率为86.61%。矿石中金矿物的载体矿物主要是黄铁矿, 嵌于黄铁矿粒间、裂隙或包裹于黄铁矿中的金矿物占30%左右, 大部分金矿物与长石、石英、菱锰矿等脉石矿物紧密嵌生。金矿物嵌布粒度极细是影响选别指标的重要因素。

关键词

工艺矿物学, 蚀变斑岩型金矿, 嵌布特征, 赋存状态, MLA, 微细粒

Study on Process Mineralogy of an Altered-Porphyry Gold Deposit in Shanxi Province

Ruquan Zhao^{1,2,3}, Zhuanhua Wei^{1,2,3}, Zhian Liang^{1,2,3}, Yuqing Huang^{1,2,3}

¹Zijin Mining Group Co., Ltd., Longyan Fujian

²State Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Low-Grade Refractory Gold Ores, Longyan Fujian

³Xiamen Zijin Mining and Technology Co., Ltd., Xiamen Fujian

Received: Sep. 16th, 2021; accepted: Oct. 20th, 2021; published: Oct. 27th, 2021

Abstract

The gold ore from Shanxi belongs to altered porphyrytype, in which the main valuable recovery element is gold (Au 1.1 g/t), and the main metal minerals are pyrite, a small amount of limonite,

文章引用: 赵汝全, 魏转花, 梁治安, 黄裕卿. 山西某蚀变斑岩型金矿工艺矿物学研究[J]. 矿山工程, 2021, 9(4): 352-361. DOI: 10.12677/me.2021.94051

sphalerite, traceofgalena, chalcopyrite, tetrahedrite, etc. The gangue mineral is mainly quartz, followed by feldspar and mica. So the mineral composition of the ore is complex and the other elements except gold and silver have no recovery value. The gold minerals in the ore are mainly silver-containing natural gold and silver gold ore, accounting for 70% and 30% respectively. The gold in the ore at $-75\ \mu\text{m}$ accounted for 65%, mainly in the form of bare gold, with a distribution rate of 86.61%. The carrier mineral of the gold mineral in the ore is mainly pyrite. The gold mineral embedded in the pyrite particles, cracks or wrapped in pyrite accounts for about 30%. Most of the gold minerals are closely embedded with the gangue minerals, such as feldspar, quartz, rhodochrosite, etc. The fine grain size of gold mineral inlays is an important factor affecting the selection index.

Keywords

Process Mineralogy, Altered-Porphyry Gold Deposit, Embedded Characteristics, Occurrence State, MLA, Fine Particles

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着黄金资源的大规模开发利用, 易选易处理金矿越来越少[1] [2] [3], 且新探明矿体多为嵌布粒度细、品位低的难处理金矿, 这给黄金资源综合开发利用带来了巨大的挑战[4]-[9]。斑岩型金矿是重要的金矿类型之一, 目前对其认识还远不如其他类型金矿[10] [11] [12] [13] [14]。近年, 山西某矿企在矿区河湾斑岩体深部探矿过程中发现了大规模的蚀变斑岩型金矿体[15]。为了更好地开发利用蚀变斑岩型金矿, 开展了一系列工艺矿物学和选矿试验研究。

矿石的工艺矿物学性质决定了矿石选冶工艺的制定[16] [17] [18] [19] [20]。通过工艺矿物学检测分析, 深入了解矿石特性, 查明影响选冶指标的矿物学因素, 可为选冶指标的优化提供技术支持。本文研究了山西某蚀变斑岩型金矿的工艺矿物学性质, 分析影响选矿指标的因素, 为后续选矿工艺流程的制定与选择提供了充分的理论依据。这些研究对蚀变斑岩型金矿的开发利用具有重要意义。

2. 矿石的化学组成

对山西某蚀变斑岩型金矿进行 X 荧光光谱半定量分析, 结果如表 1 所示。矿石化学成分定量分析结果如表 2 所示。结合 X 荧光光谱半定量分析与化学定量分析发现, 矿石中非造岩元素以铁、硫、砷为主, 其次有少量的铜、铅、锌等, 并伴生有金、银。矿石中除金、银, 其他有价元素的含量均较低, 综合利用的价值不大。矿石中砷含量较高, 会影响金精矿质量。原矿含金 1.10 g/t、含银 6.37 g/t, 主要造岩组分为 SiO_2 , 含量高达 80.80%, 其次为 Al_2O_3 、 K_2O 。

Table 1. Semi-quantitative analysis results of ore X fluorescence spectroscopy/%

表 1. 矿石 X 荧光光谱半定量分析结果/%

元素	含量	元素	含量	元素	含量	元素	含量
O	50.02	S	0.41	Fe	0.47	Rb	0.01
Na	0.04	K	3.42	Ni	0.003	Sr	0.01

Continued

Mg	0.76	Ca	0.56	Cu	0.008	Zr	0.02
Al	8.23	Ti	0.34	Zn	0.054	Ba	0.11
Si	29.58	Cr	0.01	Ga	0.002	Pb	0.01
P	0.04	Mn	0.11	As	0.44	-	-

Table 2. Analysis results of main chemical components of ore/%

表 2. 矿石主要化学成分分析结果/%

组分	Au*	Ag*	Fe	S	Al ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂	As
含量	1.10	6.37	1.03	0.72	7.17	0.18	0.89	0.09	4.87	80.80	<0.02

注: *单位为 g/t。

3. 矿石的矿物组成

采用 MLA (矿物参数自动分析系统)分析,并结合偏光显微镜、扫描电镜观测结果及化学多元素分析结果,得出矿石的矿物组成及各矿物的相对含量,结果如表 3 所示。

Table 3. The main mineral composition of the ore/%

表 3. 矿石主要的矿物成分/%

金属矿物	含量	非金属矿物	含量
含银自然金	微量	正长石	24.08
银金矿	微量	钠长石	0.05
碲银矿	微量	斜长石	0.01
辉碲铋矿	微量	钙长石	0.02
黄铁矿	1.19	白(绢)云母	6.45
闪锌矿	0.10	黑云母	0.47
黄铜矿	0.02	方解石	0.67
方铅矿	0.01	白云石	0.03
赤、褐铁矿	0.35	石英	65.31
钛铁矿	0.07	高岭石	0.09
磁铁矿	0.06	硅灰石	0.37
铁菱锰矿	0.58	绿泥石	0.07
小计	2.38	小计	97.62

通过偏光显微镜镜下鉴定和扫描电镜分析研究发现,该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。矿石中的金矿物主要是含银自然金,其次为银金矿。金属矿物主要是黄铁矿,少量褐铁矿、闪锌矿及微量黄铜矿、黝铜矿、方铅矿、碲银矿、辉碲铋矿、磁黄铁矿、铜蓝、白铅矿、针硫铋铅矿等。脉石矿物主要是石英,其次为长石、白(绢)云母,少量方解石、铁菱锰矿、黑云母、硅灰石,微量高岭石、绿泥石、独居石、磷灰石、锆石等。

4. 矿石的矿物特征

4.1. 金矿物种类及相对含量

山西某蚀变斑岩型金矿中金矿物主要是含银自然金(约占总金矿物的 70%左右),其次为银金矿(约占

总金矿物的 30%左右)。含银自然金化学成分较稳定, 平均含金 86.58%, 银金矿平均含金 74%。金矿物相对质量分数见表 4。因含银自然金的含金量较高, 且相对质量分数多, 故含银自然金的回收率将直接影响金的回收指标。

Table 4. The statistical results of the relative mass fraction of gold minerals/%

表 4. 金矿物的相对质量分数统计结果/%

金矿物名称	相对质量分数	金含量	银含量	合计	金分布率	银分布率
含银自然金	70.00	86.58	13.42	100.00	73.19	54.64
银金矿	30.00	74.00	26.00	100.00	26.81	45.36
合计	100.00	-	-	-	100.00	100.00

4.2. 金矿物嵌布特征

矿石中的金矿物主要是含银自然金, 其次为银金矿。自然金的产出形式主要有两种: 一是呈圆粒状、不规则粒状分布于长石、铁菱锰矿、石英等脉石矿物中(如图 1~3 所示), 主要以粒间金、包裹金的形式存在, 多数金粒分布较集中, 几粒至几十粒的成群出现。以此形式产出的自然金以微粒金为主, 粒度在 $10\ \mu\text{m}$ 以下, 还有部分金粒小于 $1\ \mu\text{m}$; 二是呈粒状包裹于黄铁矿中或呈不规则状分布于黄铁矿粒间(如图 4 所示), 以此形式产出的自然金以细粒金为主, 粒度范围主要在 $8\sim 40\ \mu\text{m}$ 之间。据粗略统计, 上述两种产出形式的金矿物含量比大概为 70:30。偶见自然金与闪锌矿、辉碲铋矿接触嵌生。



Figure 1. Natural gold (Gl) is distributed in gangue minerals in granular form (Reflection picture of optical microscope)

图 1. 自然金(Gl)呈粒状分布于脉石矿物中(光学显微镜反光图片)

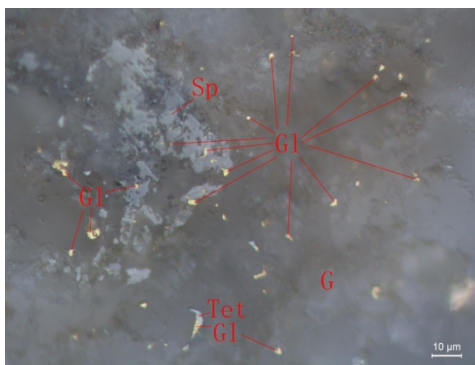


Figure 2. Natural gold (Gl) is concentrated in gangue minerals (G) in fine particles, partly closely embedded with sphalerite (Sp) and bismuth tellurite (Tet)

图 2. 自然金(Gl)呈微细粒集中的分布于脉石矿物(G)中, 部分与闪锌矿(Sp)、辉碲铋矿(Tet)紧密嵌生

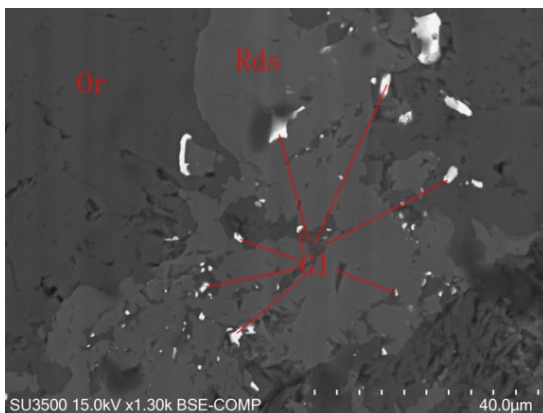


Figure 3. Natural gold (Gl) is fine-grained, short-veined and concentrated in gangue minerals composed of orthoclase (Or) and ferromanganese (Rds) (Scanning Electron Microscope Backscattered Picture)

图 3. 自然金(Gl)呈细粒状、短脉状集中分布于由正长石(Or)、铁菱锰矿(Rds)组成的脉石矿物中(扫描电镜背散射图片)

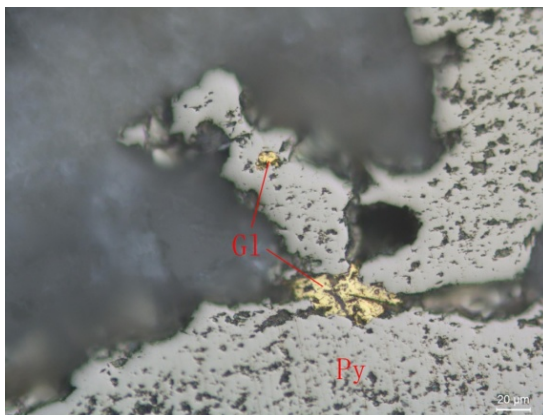


Figure 4. Natural gold (Gl) is wrapped in pyrite (Py) and its grains in granular and short-vein form

图 4. 自然金(Gl)呈粒状、短脉状包裹于黄铁矿(Py)中及其粒间

银金矿的产出形式主要是呈粒状、不规则状分布于石英、长石、云母等脉石矿物中(如图 5、图 6 所示), 嵌布粒度细小, 多数在 10 µm 以下, 少数粒度在 10~20 µm。金的载体矿物主要是长石、铁菱锰矿、石英等脉石矿物, 其次是黄铁矿。



Figure 5. The silver-gold deposits (Elc) are distributed in the gangue minerals (G) in the shape of short veins and granules

图 5. 银金矿(Elc)呈短脉状、粒状分布于脉石矿物(G)中

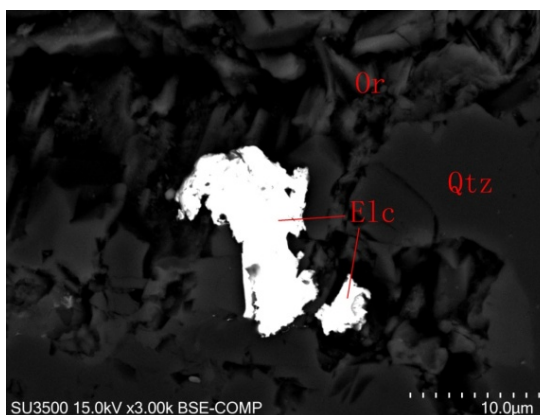


Figure 6. Silver-gold ore (Elc) is distributed in irregular granular shape in a gangue base composed of quartz (Qtz) and orthoclase (Or)

图 6. 银金矿(Elc)呈不规则粒状分布于由石英(Qtz)、正长石(Or)组成的脉石基底中

4.3. 金的化学物相分析

在 $-75\ \mu\text{m}$ 占65%的磨矿产品中金的物相分析结果见表5,从表5中数据分析可知,矿石中的金主要以单体金、连体金(即解离或者暴露的自然金)的形式存在,与镜下观测结果相符,分布率为86.61%;少量以晶格金或极微细的包裹金等次显微金赋存于硫化物、氧化物及硅酸盐中,分布率分别为3.94%、2.36%、7.09%。

Table 5. Chemical phase analysis results of gold in ore (%)

表 5. 矿石中金的化学物相分析结果(%)

金相	单体金、连体金	硫化物中金	氧化物中金	硅酸盐中金	总金
含量(g/t)	1.1	0.05	0.03	0.09	1.27
分布率	86.61	3.94	2.36	7.09	100

4.4. 金矿物的粒度特征

根据在显微镜和扫描电镜下对自然金、银金矿的观察测量,对镜下发现的415颗金矿物进行了粒度统计,统计结果见表6。

Table 6. Particle size distribution of gold minerals in ore

表 6. 矿石中金矿物粒度分布

粒度区间(μm)	颗粒数	频率%	线长合计(μm)	粒度分布率%	累计分布%
+37	1	0.24	41	6.44	6.44
-37+26	3	0.72	93	14.6	21.04
-26+19	2	0.48	44	6.91	27.95
-19+10	3	0.72	42	6.59	34.54
-10+5	19	4.58	146	22.92	57.46
-5+2	22	5.30	71	11.15	68.61
-2+1	68	16.39	102	16.01	84.62
-1	297	71.57	98	15.38	100
合计	415	100.00	637	100	-

由表 6 的统计结果可以看出, 矿石中发现的金矿物粒度多数小于 10 μm 。金矿物嵌布粒度较细, 主要粒度范围在 1~10 μm 及 26~37 μm 区间, 在 10 μm 以下的金矿物的分布率高达 65.46%, 其中在 5 μm 以下者为 42.54%, 小于 1 μm 的金矿物就占总量的 15.38% 左右。

4.5. 其他矿物的嵌布特征

1) 银矿物: 矿石中的银主要赋存于银金矿及含银自然金中, 独立银矿物可见有碲银矿, 化学式为 Ag_2Te , Ag 62.84%, Te 37.16%。偶见碲银矿呈不规则状与黄铁矿接触嵌生分布于脉石矿物中(如图 7 所示)。

2) 黄铁矿: 黄铁矿是矿石中主要的金属矿物, 也是金矿物的主要载体之一。黄铁矿主要呈他形粒状、自形-半自形晶粒状分布于脉石矿物中(如图 8 所示), 部分边缘、裂隙被网脉状的褐铁矿交代(如图 9 所示), 也见少量黄铁矿与闪锌矿、方铅矿等接触嵌生(如图 10 所示)。偶见黄铁矿中包裹粒状的自然金颗粒。

3) 闪锌矿、方铅矿、黄铜矿: 矿石中闪锌矿、方铅矿、黄铜矿的含量较低。闪锌矿主要呈不规则状分布于脉石矿物中(如图 11 所示), 部分内部包裹乳浊状的自然金颗粒。少量闪锌矿与黄铁矿等交代嵌生。方铅矿主要呈他形粒状分布于黄铁矿边缘或呈细粒状包裹于黄铁矿中。黄铜矿主要呈不规则粒状分布于脉石矿物中或与黝铜矿、黄铁矿、闪锌矿等接触嵌生(如图 12 所示)。

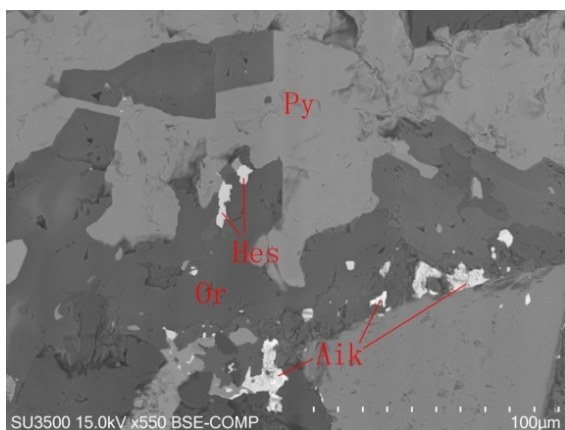


Figure 7. Silver tellurite (Hes) is in granular and irregular shape and is embedded in orthoclase (Or) in contact with pyrite (Py)
图 7. 碲银矿(Hes)呈粒状、不规则状与黄铁矿(Py)接触嵌生分布于正长石(Or)中, Aik-针硫铋铅矿

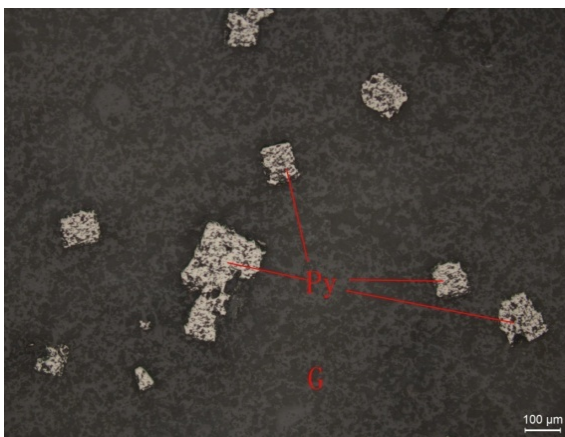


Figure 8. Pyrite (Py) is distributed in euhedral-semi-automorphic grains in gangue minerals (G)
图 8. 黄铁矿(Py)呈自形-半自形晶粒状分布于脉石矿物(G)中

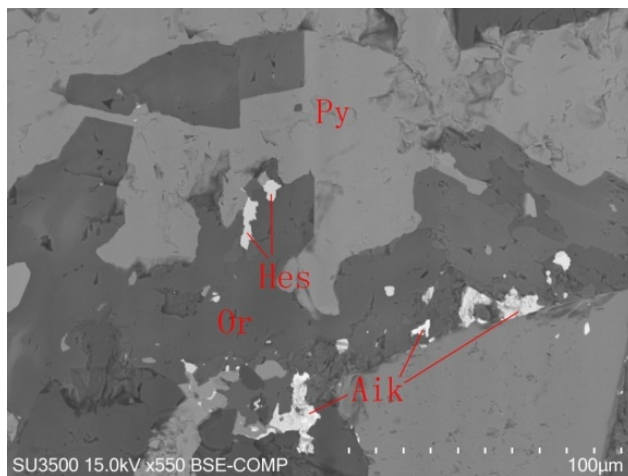


Figure 9. Pyrite (Py) is replaced by a network of limonite (Lim)
图 9. 黄铁矿(Py)被网脉状的褐铁矿(Lim)交代

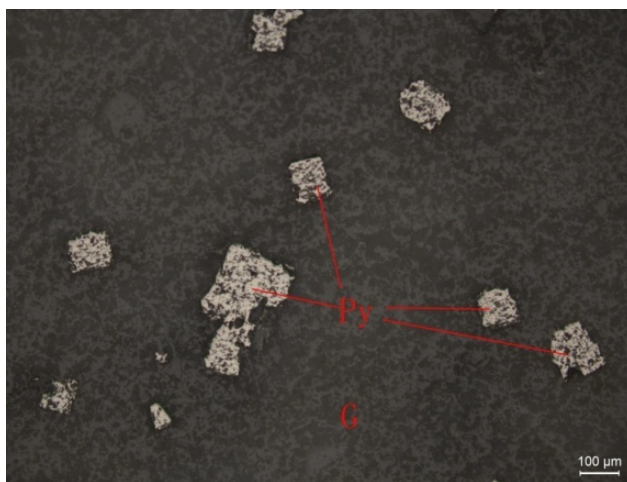


Figure 10. Pyrite (Py) and Sphalerite (Sp) contact embedded growth
图 10. 黄铁矿(Py)与闪锌矿(Sp)接触嵌生

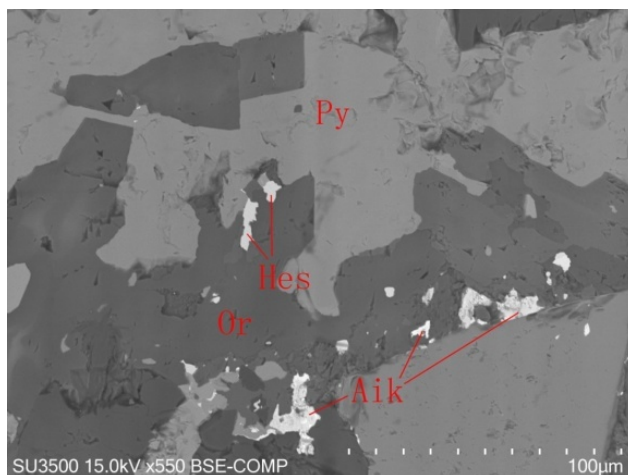


Figure 11. Sphalerite (Sp) is irregularly distributed in gangue minerals (G)
图 11. 闪锌矿(Sp)呈不规则状分布于脉石矿物(G)中

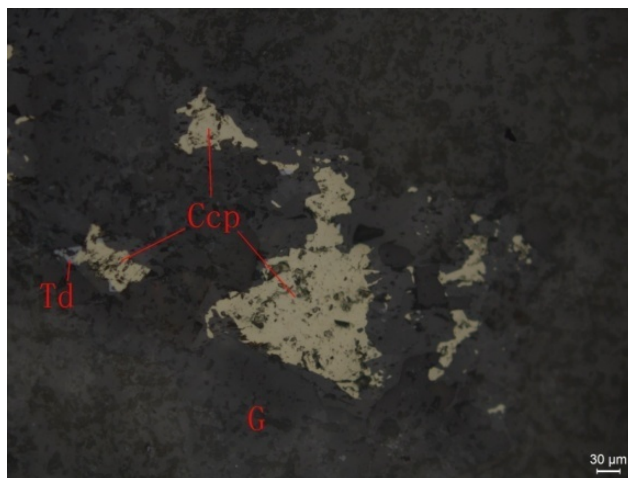


Figure 12. Chalcopyrite (Ccp) is irregularly distributed in gangue minerals (G), and part of it is closely embedded with tetrahedrite

图 12. 黄铜矿(Ccp)呈不规则粒状分布于脉石矿物(G)中, 部分与黝铜矿紧密嵌生

4) 脉石矿物: 矿石中的脉石矿物主要是石英, 其次为长石、白(绢)云母、铁菱锰矿等。石英是矿石中含量最高的脉石矿物, 主要呈他形粒状集合体, 与长石、云母等嵌生。铁菱锰矿主要呈不规则状集合体与长石、石英等紧密嵌生。

5. 结论

1) 山西某蚀变斑岩型金矿石中可供选矿回收的主要有价元素是金, 品位为 1.1 g/t; 主要的化学组分是 SiO_2 , 其次为 Al_2O_3 、 K_2O 等。矿石中的金矿物主要是含银自然金, 其次为银金矿。金属矿物主要是黄铁矿, 少量褐铁矿、闪锌矿及微量方铅矿、黄铜矿、黝铜矿等。脉石矿物主要是石英, 其次为长石、白(绢)云母, 少量铁菱锰矿、方解石等。在磨矿产品 $-75\ \mu\text{m}$ 占 65%的条件下, 矿石中的金主要以单体金、连体金(即解离或暴露的自然金)的形式存在, 分布率为 86.61%; 少量金以晶格金或极微细的包裹金等次显微微粒金赋存于硫化物、氧化物及硅酸盐中, 分布率分别为 3.94%、2.36%、7.09%。

2) 影响选矿指标的矿物学因素主要有: ① 矿石中金矿物嵌布粒度较细, 金矿物的嵌布粒度主要在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$, 部分粒径在 $26\sim 37\ \mu\text{m}$ 之间, 有 40%左右的金粒的嵌布粒度小于 $5\ \mu\text{m}$, 其中 $1\ \mu\text{m}$ 以下者就占 15%左右, 粒度极其细小。② 矿石中金矿物的载体矿物主要是黄铁矿和石英、长石、菱锰矿等脉石矿物。其中, 嵌于黄铁矿粒间、裂隙或包裹于黄铁矿中的金矿物占 30%左右, 大部分金矿物是与长石、石英、菱锰矿等脉石矿物紧密嵌生的。需要将矿石破碎到较细, 将上述脉石矿物中的金解离或暴露出来, 才可将其与黄铁矿一起浮选回收。

参考文献

- [1] 王越, 王婧, 李潇雨, 等. 青海某金矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2018(6): 81-84.
- [2] 苏妤芸. 甘肃李坝金矿中金的工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2018(5): 114-117.
- [3] 宋学文, 朱加乾, 罗增鑫, 等. 某氰渣工艺矿物学及金浮选工艺研究[J]. 黄金科学技术, 2018, 26(1): 89-97.
- [4] 明平田, 陈自强, 任琪, 等. 青海某难选半氧化金矿选矿试验研究[J]. 黄金科学技术, 2016, 24(4): 107-111.
- [5] 陈京玉, 康维刚, 于建华, 等. 老挝某金矿工艺矿物学特性与其全泥氰化提金工艺相关性分析[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(4): 1-3.
- [6] 张吉明, 孙宇辉, 杨习威. 研究某微细粒复杂难选金矿浮选新技术的应用实践[J]. 世界有色金属, 2018(19):

52-53.

- [7] 郭艳华, 杨俊龙. 甘肃某碳酸盐型难选金矿提高生产指标试验研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2018(6): 40-45+61.
- [8] 崔立凤, 田树国, 何美丽. 贵州水银洞含炭细粒浸染型难选冶金矿石选矿试验研究[J]. 矿产综合利用, 2018(4): 1-4.
- [9] 孟庆秋. 试论金矿各类分选的处理方法[J]. 世界有色金属, 2017(2): 84-85.
- [10] 段留安, 杨晓勇, 汪方跃. 长江中下游成矿带抛刀岭大型斑岩型金矿特征及找矿前景[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(1): 161-170.
- [11] 施文艺, 孙晓华. 青海某石英斑岩型金矿石的工艺矿物学研究[J]. 青海大学学报(自然科学版), 2011, 29(2): 45-48.
- [12] 张辉煌, 刘连登, 任云生, 等. 安徽抛刀岭浅成斑岩型金矿的论证[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 771-774.
- [13] 李颖, 兰翔, 刘连登. 斑岩型金矿分类探讨[J]. 地质与勘探, 1999(6): 20-23.
- [14] 侯辉, 马海杰, 汪立今, 等. 新疆加曼特金矿与斑岩型金矿的对比研究[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2015, 32(1): 17-20.
- [15] 张立中. 山西省繁峙义兴寨金矿新发现蚀变斑岩型金矿体的地质地球化学特征与成矿时代[J]. 华南地质与矿产, 2018, 34(2): 134-141.
- [16] 张莉莉, 梁冬云, 李波, 等. 新疆某金矿工艺矿物学研究[J]. 材料研究与应用, 2017, 11(3): 197-201.
- [17] 董再蒸, 高鹏, 张淑敏, 等. 甘肃早子沟金矿石工艺矿物学研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 711-715.
- [18] Guo, X.Y., Xin, Y.T., Wang, H., *et al.* (2017) Mineralogical Characterization and Pretreatment for Antimony Extraction by Ozone of Antimony-Bearing Refractory Gold Concentrates. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 27, 1888-1895. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(17\)60213-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(17)60213-9)
- [19] 武俊杰, 孙阳, 李青翠, 等. 新疆托里金矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2015(6): 1-4.
- [20] 陈道前, 傅开彬, 董发勤, 等. 四川里伍铜矿多金属低品位尾矿工艺矿物学研究[J]. 黄金科学技术, 2015, 23(6): 70-74.