

荆国强, 廉康, 胡菲菲, 等. 利用电子探针研究甘肃陇南赵家庄金矿载金矿物特征[J]. 岩矿测试, 2018, 37(5): 490 – 498.

JING Guo-qiang, LIAN Kang, HU Fei-fei, et al. Application of EPMA to Study the Characteristics of Gold-bearing Minerals in the Zhaojiazhuang Gold Deposit in Longnan, Gansu Province[J]. Rock and Mineral Analysis, 2018, 37(5): 490 – 498.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.201707170119】

利用电子探针研究甘肃陇南赵家庄金矿载金矿物特征

荆国强, 廉康, 胡菲菲, 李磊, 杜亚龙
(核工业二〇三研究所, 陕西 咸阳 712000)

摘要:应用偏光显微镜与电子探针相结合的手段是研究载金矿物的主要方法。本文采用镜下鉴定和电子探针分析技术,对赵家庄金矿中载金矿物含量、形态特征及其与其他矿物的空间关系开展研究,并对载金矿物进行定性和定量分析,探寻具有找矿意义的载金矿物和总结标志矿物特征。结果表明:研究区金矿石中主要载金矿物为黄铁矿,少量为黄铜矿、闪锌矿,这些载金矿物中 Au 含量依次为:细晶黄铁矿 > 粗晶黄铁矿 > 草莓状黄铁矿 > 黄铜矿。不同时期的黄铁矿(粗晶黄铁矿、细晶黄铁矿、草莓状黄铁矿)中 Au 的分布均匀,但存在差异性,主要表现为细晶黄铁矿和草莓状黄铁矿中的 Au 含量较高(平均含量 0.14% ~ 0.18%),这种现象表明此类矿物为构造热液期形成,金易富集。Au 以两种形式存在,一种是“可见金”包裹于脉石矿物中,或以裂隙金的形式嵌布在矿物晶隙及裂隙中;另一种是“不可见金”以纳米级颗粒金的形式存在于载金矿物中,也是 Au 的主要存在形式。本研究为后期矿床的成因、成矿过程和成矿机理研究提供了佐证,同时易于根据含金矿物的特征选择合适的选冶方法。

关键词: 电子探针; 金; 赋存状态; 载金矿物; 黄铁矿

- 要点:**
- (1) 选取赵家庄金矿石进行镜下鉴定和电子探针分析。
 - (2) 研究区主要载金矿物(黄铁矿和黄铜矿等)中的金含量有所不同,与载金矿物形成阶段有关。
 - (3) 载金矿物中细晶黄铁矿和草莓状黄铁矿的金含量较高,且金有两种存在形式。

中图分类号: P575.1; O614.123 **文献标识码:** A

以沉积岩为主要容矿岩石的卡林型金矿是目前世界上储量最大的金矿类型之一,其中的金以“不可见金”或颗粒极细状(纳米级)存在是该类型金矿最重要的特点之一。主要载金矿物有黄铁矿、毒砂和黏土矿物,尤以黄铁矿最为重要。氧化矿石中主要载金矿物是褐铁矿和黏土矿,自然金粒度很细,大多为次显微金^[1]。国内外对该类型金矿载金矿物开展了较系统的电子探针分析,结合 X 射线光电子能谱对黄铁矿和毒砂进行了表面元素的定性和定量分析,对探讨矿床的成矿条件、成矿过程及成矿机理具有重要的依据和信息^[2-4]。

甘肃省陇南赵家庄金矿是近年来在西秦岭南部

地区发现的此类型金矿之一,该地区卡林型金矿又有与国内外同类型矿床不同的特点,受构造破碎带控制。从已研究的资料来看,前人对该地区金的成矿模式与机理研究较多,积累了很多含矿层位、控矿构造、地球化学等成果,但是对含金矿物的组分和赋存状态研究较少,加之该地区的矿山开采较少,限制了矿石的综合开发利用。故本文应用偏光显微镜与电子探针相结合的手段,对该地区含金矿物的含量、矿物种类、赋存状态及其嵌布特征进行研究,并利用电子探针进行微粒金定性和定量测定,拟为研究矿床的成因、成矿过程和成矿机理提供依据,也为金矿床的选矿提供理论指导,具有重要的经济意义。

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2018-03-12; 接受日期: 2018-06-13
基金项目: 中国核工业地质局铀多金属矿普查项目(201564)
作者简介: 荆国强, 硕士, 工程师, 从事铀多金属勘查研究。E-mail: 276185772@qq.com。

1 地质背景

研究区地处西秦岭褶皱带南秦岭被动陆缘褶皱带南侧,位于扬子板块西北缘的次一级大地构造单元,夹持于文县—康县大断裂和枫相—铜钱区域韧性剪切带之间,碧口古陆西北缘大断裂通过本区,区域构造线呈 NEE 向展布^[2,5-6]。

研究区东西长 8 km,南北宽 7 km,面积约 55 km²,主要包括昌河坝、馍馍山及巩家山三个矿段。

地层主要为古生界中泥盆统三河口群,由老至新依次为桥头组(Dq)、屯寨组下、中、上段(Dt¹、Dt²、Dt³)和羊汤寨组下岩段(Dy¹),岩性为含碳微粒

灰岩、中厚层灰岩夹绢云石英千枚岩、含碳千枚岩及含铁石英岩、片理化不等粒斜长石英砂岩、中基性火山岩、含白云质灰岩、绢云石英灰质片岩等。矿化产于屯寨组,含矿岩性以片岩、千枚岩、板岩为主,个别为石英碳酸盐化韧性变形含碳白云母构造片岩。

区内断裂构造发育(图 1),总体构造形态表现为一北西倾斜的单斜构造,受韧性剪切带及 F5 断裂的影响,局部表现为背斜,按照走向大致可划分为近东西向和北东向两组,其中东西向 F5 断裂为主要的导矿断裂,其旁侧的次级断裂为主要的控矿断裂,如 F2、F6 及 F9 等。

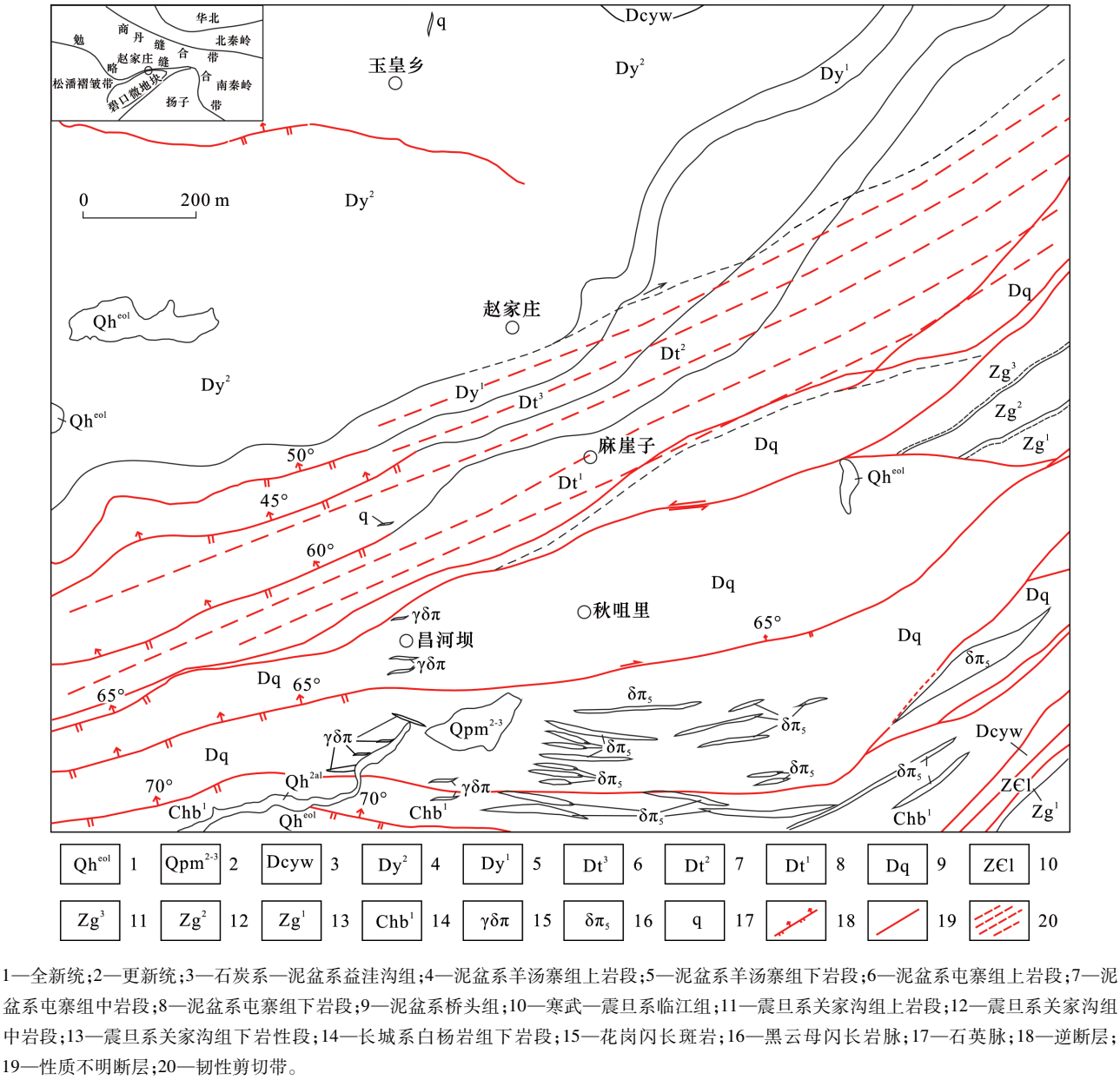


图 1 赵家庄金矿区域地质简图

Fig. 1 Regional geology sketch map of Zhaojiazhuang gold deposit

区域上岩浆活动强烈,研究区内主要以规模较小的岩脉产出,在巩家山、馍馍山及昌河坝矿段均发育有长 10 余米、宽 2 ~ 5 m 不等的花岗斑岩脉及闪长玢岩脉,且在部分见矿钻孔中发现了花岗斑岩,发育粗粒 - 细粒黄铁矿,部分钻孔花岗斑岩具有金异常,由此可见区内岩浆活动与金矿化关系密切。

围岩蚀变较发育,常见有黄铁矿化、硅化、碳酸盐化、赤铁矿化、褐铁矿化、高岭土化、绢云母化等,多沿断裂或构造裂隙面呈带状分布。其中,硅化、黄铁矿化、褐铁矿化、碳酸盐化与金矿化呈正相关;高岭土化、绢云母化与金矿化关系不明显。

研究区分别在昌河坝、馍馍山、巩家山三个地段圈定出金矿(化)体数十条,矿体一般长 68 ~ 85 m,厚度 1.03 ~ 7.51 m,金品位 3.04 ~ 8.04 g/t。矿体产状与地产产状一致,走向近东西向,矿体顶底板以结晶灰岩为主。

2 实验部分

2.1 样品的采集

电子探针分析技术是微束分析中的常规测试技术之一。电子探针因其分析区域小、绝对及相对灵敏度高、分析元素范围广等优点,为地质科学研究提

供了重要的研究手段,目前已经成为地学领域中矿物学、岩石学、矿床学及相关学科的重要研究工具^[7]。本次研究的样品均是采自赵家庄金矿的钻孔中矿石样品,电子探针和能谱分析样品均为含有黄铁矿的金矿石,样品的显微照片如图 2 所示。

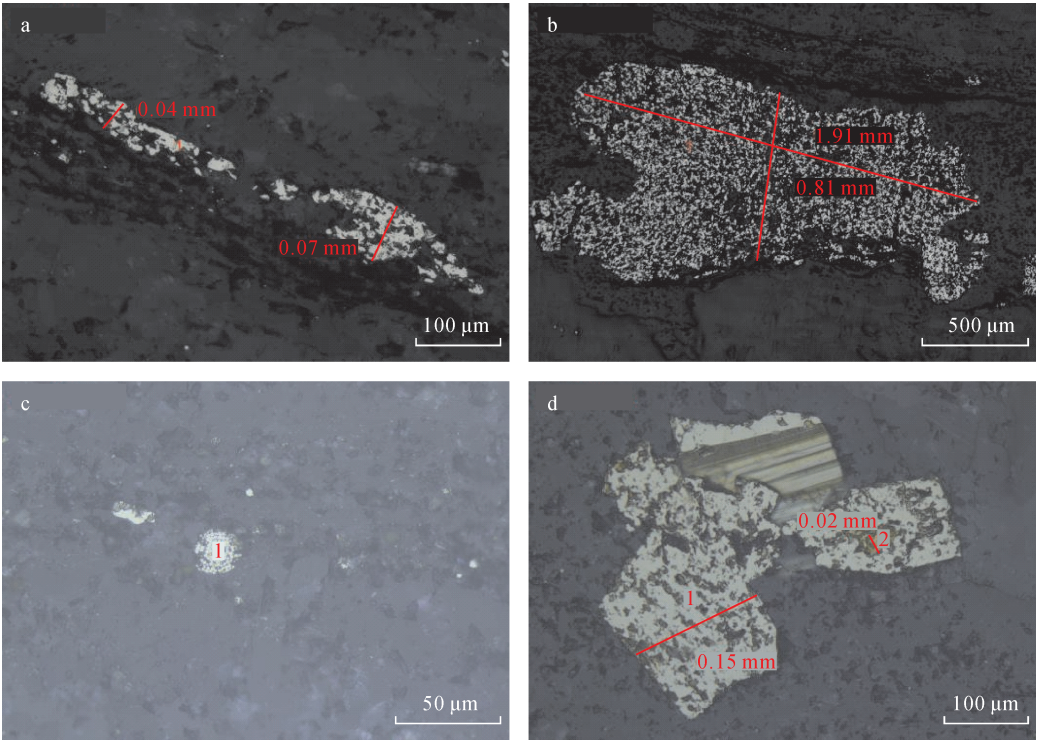
2.2 测量仪器与测量条件

本次研究共分析 166 点,黄铁矿的电子探针分析在长安大学电子探针实验室完成,仪器型号为 JXA - 8100 电子探针分析仪(日本电子公司),在几百到上千的放大倍数下重点寻找粒径小的金银矿物、硫化物矿物,同时对其成分进行测定,补缺显微镜的局限性,更准确地探讨其赋存状态。仪器分析条件为:加速电压 15 kV(硫化物);束流 1×10^{-8} A;束斑直径 5 μm ;检出角 40°;校正 ZAF;温度 25℃,湿度 55% ~ 60%。分析方法依据国家标准 GB/T 15617—2002《硅酸盐矿物的电子探针定量分析方法》和 GB/T 15246—2002《硫化物矿物的电子探针定量分析方法》。

3 结果与讨论

3.1 主要载金矿物及成分特征

通过大量岩石光薄片的镜下观察,初步判断金



a—平行构造片理排列的他形粒状黄铁矿;b—重结晶黄铁矿;c—一次生草莓状黄铁矿;d—重结晶的黄铁矿包裹的黄铜矿。

图2 矿石矿物特征

Fig. 2 Characteristics of ore minerals

银矿物的赋存状态,为下一步电子探针分析做准备。对样品进行显微镜下鉴定,根据矿物组成,矿石中金属矿物成分主要为黄铁矿、褐铁矿,少量黄铜矿及自然金,含量约 2%;非金属矿物主要有石英、方解石、白云母,少量碳质成分等,含量约 95%。

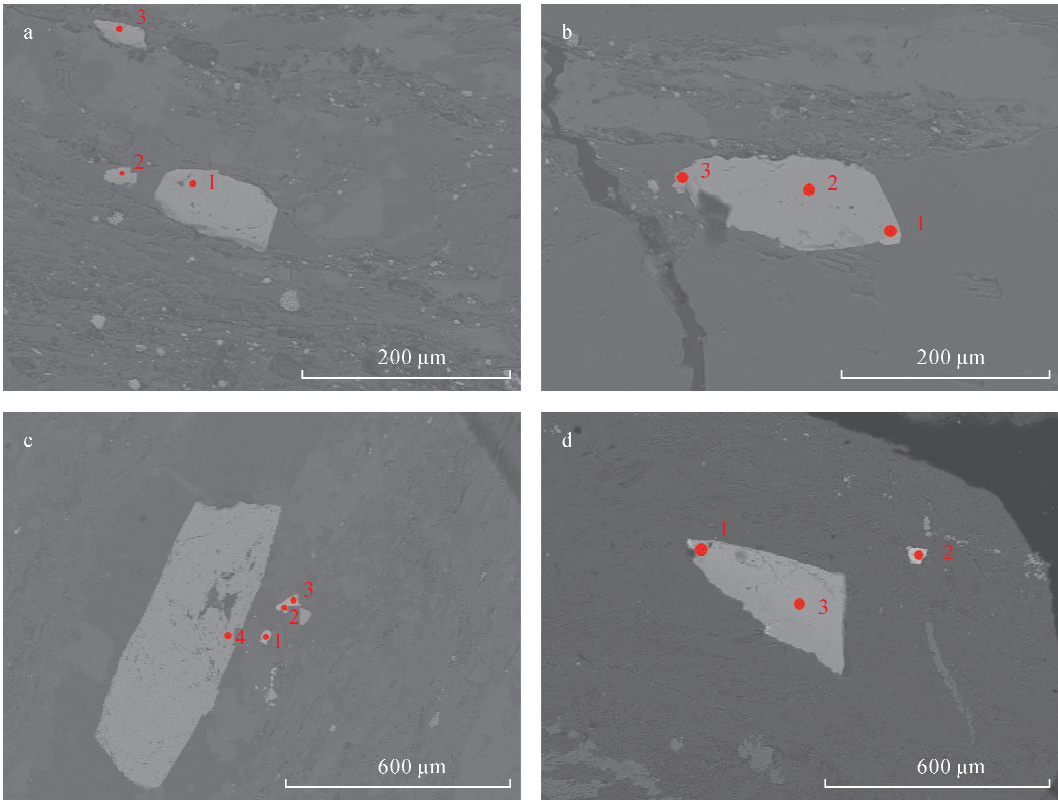
金属矿物中含金矿物主要为黄铁矿。黄铁矿具有三种成因:第一种为早期的破碎黄铁矿(图 2a),主要分布于变形带中,粒径小于 0.02 mm,大多数以碎粒结构为主,分布比较均匀;第二种为变形后重结晶的黄铁矿(图 2b),粒径 0.1~0.25 mm,全部呈重结晶结构,具有半自形特征,其中可见包裹的黄铜矿,粒径 0.02 mm;第三种为次生黄铁矿(图 2c),具有生物结构,以草莓状集合体为主,粒径小于 0.002 mm。其中第一种及第三种黄铁矿与成矿作用密切,是金矿物的主要载体。黄铜矿(图 2d)较少,主要被粗粒黄铁矿包裹,粒径 0.02 mm,他形粒状结构,包裹黄铁矿平行片理分布。

通过对赵家庄金矿载金矿物开展较为系统的显微照相和电子探针分析,矿石中金属矿物主要为黄铁矿、黄铜矿、毒砂,其次为闪锌矿、方铅矿,并见有少量银金矿。电子探针分析结果表明,赵家庄金矿

自然金主要呈“不可见”超显微包裹金形式存在,载金矿物主要为黄铁矿(图 3a),其次为黄铜矿(图 3b)、闪锌矿(图 3c)。自然金具有较高的成色,颜色为红黄色,包裹于脉石矿物中,粒径 0.005 mm;裂隙金显微微细粒嵌布在黄铁矿、黄铜矿、绢云母、石英晶隙及裂隙中,主要赋存于黄铁矿、黄铜矿中,少量赋存于绢云母等黏土矿物之中。

赵家庄金矿主要载金矿物黄铁矿和黄铜矿中 Au、Fe、S、Cu、As 等元素的电子探针波谱分析结果列于表 1,数据表明赵家庄金矿各类载金矿物中除了主含量元素外,还有一些微量元素。

黄铜矿中 Au 的含量为 0.11%,Pb 和 Ag 含量分别为 0.11%、0.02%;闪锌矿中 Au 平均含量为 0.20%,As 和 Pb 平均含量分别为 0.05%、0.10%;粗晶黄铁矿中 Au 平均含量为 0.15%,As、Pb、Zn、Ag、Cu 平均含量分别为 0.05%、0.26%、0.04%、0.04%、0.03%;细晶黄铁矿中 Au 平均含量为 0.18%,As、Pb、Zn、Ag、Cu 平均含量分别为 0.02%、0.18%、0.03%、0.02%、0.02%;草莓黄铁矿中 Au 平均含量为 0.14%,As、Pb、Zn、Ag、Cu 平均含量分别为 2.07%、0.20%、0.08%、0.02%、0.01%。



a—黄铁矿;b—黄铜矿;c—闪锌矿(2,3 探针点); d—毒砂(2 探针点)。

图 3 载金矿物特征

Fig. 3 Characteristics of gold-bearing minerals

载金矿物中存在金的富集点,如闪锌矿中 67-1b1-4 点 Au 含量为 0.26%;粗晶黄铁矿 67-1b2-6 点 Au 含量为 0.175%;细晶黄铁矿中 67-1b4-3、67-1b4-4 点 Au 含量为 0.23%;草莓状黄铁矿中 71-2b2-3 点 Au 含量为 0.19%。在 500 倍显微镜下,几乎未发现显微可见金,显示金矿中 Au 以机械混入的“不可见”显微-超显微包体金形式存在于载金矿物中^[8-12]。赵家庄金矿各主要载金矿物中 Au 含量依次为:闪锌矿>细晶黄铁矿>粗晶黄铁矿>草莓状黄铁矿>黄铜矿,但由于闪锌矿较少,电子探针点少,数据出现偶然较高的现象,不具有普遍性,总体金含量依次为:细晶黄铁矿>粗晶黄铁矿>草莓状黄铁矿>黄铜矿。

表 1 主要载金矿物元素含量分析结果
Table 1 Analytical results of elements in gold-bearing minerals

| 测试对象 | 点号 | 含量(%) | | | | | | | | 总计 |
|-----------------------|----------|-------|-------|-------|------|-------|------|-------|------|--------|
| | | As | S | Fe | Pb | Zn | Ag | Cu | Au | |
| 黄铜矿 | 67-1b3-3 | - | 25.44 | 9.98 | 0.11 | - | 0.02 | 62.65 | 0.11 | 98.31 |
| | 71-2b1-4 | - | 33.56 | 0.58 | 0.10 | 64.21 | - | - | 0.15 | 98.62 |
| 闪锌矿 | 67-1b1-4 | 0.05 | 33.03 | 3.23 | 0.09 | 61.75 | - | - | 0.26 | 98.42 |
| | 平均值 | 0.05 | 33.30 | 1.91 | 0.10 | 62.98 | - | - | 0.20 | 98.52 |
| 粗晶黄铁矿 (100~200 μm) | 67-1b2-5 | 0.03 | 49.45 | 44.31 | 0.63 | - | - | 0.04 | 0.13 | 94.59 |
| | 67-1b2-5 | 0.00 | 52.95 | 44.49 | 0.21 | 0.01 | - | 0.08 | 0.16 | 97.89 |
| | 67-1b2-5 | 0.01 | 51.91 | 45.68 | 0.24 | - | - | 0.00 | 0.10 | 97.94 |
| | 67-1b2-6 | 0.18 | 51.03 | 45.05 | 0.22 | 0.02 | 0.06 | 0.02 | 0.12 | 96.70 |
| | 67-1b2-6 | 0.13 | 51.11 | 43.48 | 0.30 | 0.01 | 0.09 | 0.04 | 0.23 | 95.39 |
| | 71-2b1-1 | 0.06 | 53.81 | 45.06 | 0.21 | - | - | - | 0.21 | 99.35 |
| | 71-2b1-3 | 0.04 | 55.27 | 45.15 | 0.17 | 0.07 | 0.00 | - | 0.18 | 100.87 |
| | 71-1b1-3 | - | 51.03 | 45.59 | 0.20 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.12 | 96.98 |
| | 71-1b1-4 | 0.02 | 50.96 | 45.49 | 0.28 | 0.04 | - | 0.00 | 0.13 | 96.92 |
| | 67-1b1-2 | 0.00 | 53.49 | 46.34 | 0.23 | 0.11 | - | 0.04 | 0.11 | 100.31 |
| | 67-1b1-3 | 0.01 | 53.34 | 45.81 | 0.18 | 0.04 | - | - | 0.14 | 99.52 |
| | 67-1b1-4 | - | 53.18 | 45.64 | 0.20 | - | - | - | 0.15 | 99.17 |
| | 平均值 | 0.05 | 52.29 | 45.17 | 0.26 | 0.04 | 0.04 | 0.03 | 0.15 | 97.97 |
| | 67-1b4-4 | - | 53.20 | 45.94 | 0.15 | 0.03 | - | - | 0.22 | 99.54 |
| 细晶黄铁矿 (20~50 μm) | 67-1b4-4 | - | 53.00 | 45.57 | 0.17 | - | 0.02 | 0.01 | 0.23 | 99.00 |
| | 67-1b4-3 | - | 53.31 | 45.49 | 0.24 | 0.03 | 0.03 | - | 0.23 | 99.33 |
| | 67-1b4-2 | - | 52.41 | 45.69 | 0.12 | 0.02 | - | - | 0.11 | 98.35 |
| | 67-1b4-1 | 0.02 | 53.31 | 45.93 | 0.19 | 0.07 | - | - | 0.14 | 99.67 |
| | 67-1b4-1 | 0.02 | 52.96 | 45.95 | 0.16 | - | 0.02 | 0.03 | 0.19 | 99.32 |
| | 67-1b4-1 | 0.01 | 53.12 | 45.71 | 0.14 | - | 0.01 | - | 0.12 | 99.11 |
| | 71-2b3-1 | 0.02 | 52.68 | 46.78 | 0.18 | 0.02 | - | 0.03 | 0.11 | 99.82 |
| | 71-2b3-3 | - | 51.31 | 46.02 | 0.24 | 0.04 | 0.01 | - | 0.21 | 97.84 |
| | 67-1b1-3 | - | 53.33 | 45.91 | 0.19 | - | 0.04 | - | 0.22 | 99.69 |
| | 平均值 | 0.02 | 52.86 | 45.90 | 0.18 | 0.03 | 0.02 | 0.02 | 0.18 | 99.17 |
| 草莓状黄铁矿 (15~30 μm) | 71-2b2-3 | 2.99 | 50.11 | 44.10 | 0.20 | - | 0.03 | 0.01 | 0.19 | 97.62 |
| | 71-2b2-4 | 1.10 | 49.86 | 45.85 | 0.21 | - | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 97.14 |
| | 71-2b2-4 | 2.12 | 50.91 | 45.40 | 0.12 | 0.04 | - | - | 0.14 | 98.73 |
| | 71-2b2-5 | 2.06 | 51.52 | 46.15 | 0.26 | 0.12 | 0.03 | - | 0.15 | 100.27 |
| | 平均值 | 2.07 | 50.60 | 45.38 | 0.20 | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 0.14 | 98.44 |

3.2 面扫描分析

根据各脉体及矿物之间的穿切关系,矿石标本、光薄片观察到的矿石组构、矿物组合及其特征,结合前人的数据,赵家庄金矿的成矿作用可分为沉积成岩期、热液期和表生氧化阶段^[3]。沉积成岩期主要以少量草莓状黄铁矿为主(图 2b),零星分布于含矿地层中;热液期黄铁矿大多数以细晶黄铁矿为主,少量为草莓状、粗晶黄铁矿,热液阶段的黄铁矿主要呈自形(图 4a)和半自形的晶型(图 4b),赋金黄铁矿又以细粒自形为主,莓球状、粗粒以及条带状次之。这些黄铁矿成因复杂,并且可能普遍受到热液蚀变作用影响,产于石英脉裂隙中;表生氧化期主要是沉积成岩期和热液阶段的黄铁矿在表生条件下发生氧

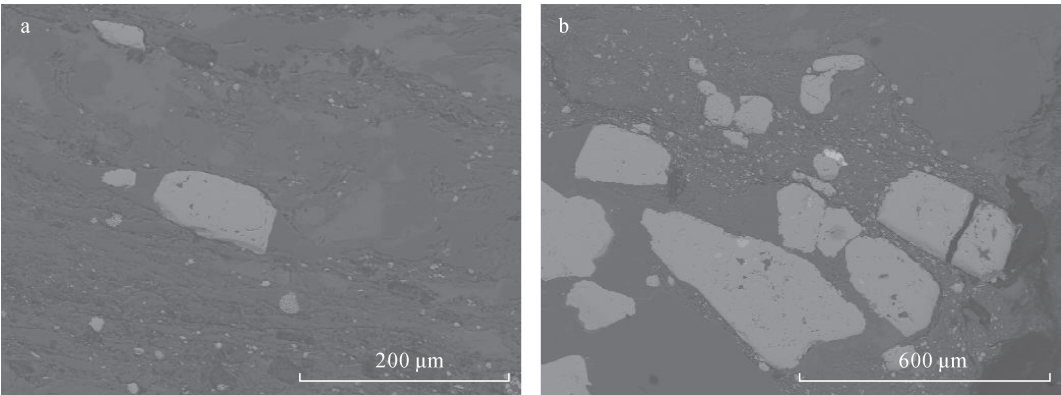


图 4 热液期呈自形(a)和半自形(b)黄铁矿
Fig. 4 Automorphic (a) and subhedral (b) crystal pyrites of hydrothermal stage

化,形成褐铁矿等,可产生金的次生富集^[3]。

本次研究主要对赵家庄金矿 12 件探针片中的粗晶黄铁矿 (100 ~ 200 μm)、细晶黄铁矿 (20 ~ 50 μm)、草莓状黄铁矿 (15 ~ 30 μm) 及黄铜矿等主要载金矿物进行了电子探针面扫描图像及元素定量分析。在黄铁矿和黄铜矿等载金矿物中,Fe、S、Cu 等主要组成元素较均匀地分布,清楚地显示了黄铁矿中主要组成元素 Fe、S 以及黄铜矿中 Fe、S、Cu 的分布状态。在粗晶黄铁矿、细晶黄铁矿以及黄铜矿中均可见到 Au 的分布,并且 Au 的含量比其周边非金属矿物要高出许多。但在这些金属硫化物的内部,Au 分布并不均匀^[3,13-15]。不同时期的黄铁矿(粗晶黄铁矿、细晶黄铁矿、草莓状黄铁矿)中 Au 的分布也不均匀,存在差异性,主要表现为在细晶黄铁矿和草莓状黄铁矿中的 Au 含量有增加趋势,这种现象说明此类黄铁矿为后期构造热液阶段形成,金含量更高^[4,16-17]。

3.3 金的存在形式

显微镜下和电子探针分析显示,研究区矿石中金的存在形式主要有两种:一种为“可见金”,另一种为“不可见金”^[6,18]。其中,可见金(一般扫描电镜下可见,粒度>0.001 mm)包裹于脉石矿物中,或者以裂隙金的形式嵌布在黄铁矿、黄铜矿、绢云母、石英晶隙及裂隙中,主要赋存于黄铁矿、黄铜矿中,少量赋存于绢云母等黏土矿物之中,颗粒粒径为 0.002 ~ 0.005 mm。

“不可见金”指的是在一般扫描电镜下不能检出的次显微金(<0.001 mm)^[18],国内外研究者对此开展了大量工作,大多数学者认为金主要以 Au⁺ 和 Au⁰ 的价态存在,少数学者认为金的价态是 Au³⁺

和 Au⁻。近年来许多光谱技术及高分辨率分析研究结果都表明,金在含砷黄铁矿中以两种形式存在: Au⁺ 和 Au⁰^[3,18-21],Reich(2005)将美国多个低温热液型和卡林型金矿黄铁矿分析数据投入 logAu - logAs 图中,总结出一条被称为“溶解度限度线”(C_{Au} = 0.02C_{As} + 4 × 10⁻⁵),并以此来判断含砷黄铁矿中金的存在形式^[18];溶解度线以上的含砷黄铁矿中的金为纳米级自然金(Au⁰),溶解度线以下的含砷黄铁矿中的金主要以固溶体(Au⁺)形式存在。如图 5 所示,研究区金矿含砷黄铁矿分析数据点全都位于溶解度线以上,表明含砷黄铁矿中的金主要以纳米级颗粒金形式存在。

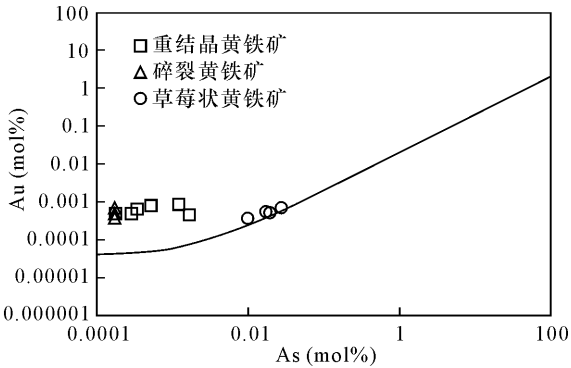


图 5 含砷黄铁矿金溶解度曲线
Fig. 5 Gold solubility curve of arsenic-bearing pyrite

综上,研究区金主要有两种存在形式:“可见金”包裹于脉石矿物中,或以裂隙金的形式嵌布在矿物晶隙及裂隙中;“不可见金”以纳米级颗粒金的形式存在于载金矿物中。

4 结论

通过电子探针面扫描图像及元素定量分析技术,对赵家庄金矿床主要载金矿物黄铁矿的元素含量、形态特征及矿物之间的空间分布关系进行研究,分析显示主要载金矿物为黄铁矿、黄铜矿、毒砂、闪锌矿等,主要载金矿物中 Au 含量依次为:细晶黄铁矿>粗晶黄铁矿>草莓状黄铁矿>黄铜矿。不同时期的黄铁矿(粗晶黄铁矿、细晶黄铁矿、草莓状黄铁矿)中 Au 的分布均匀,但也存在差异性,主要表现为在细晶黄铁矿和草莓状黄铁矿中 Au 的含量有增加趋势,这种现象表明此类黄铁矿的金含量更高,为后期构造热液阶段形成。金主要有两种存在形式,“可见金”包裹于脉石矿物中,或以裂隙金的形式嵌布在矿物晶隙及裂隙中;“不可见金”以纳米级颗粒金的形式存在于载金矿物中。

通过本次研究,为研究矿床成因、成矿过程及成矿机理提供了佐证,且该技术为一些微细矿物分布、组合规律及其与非矿石的关系研究提供了一套方法,同时对后期矿石的选冶提供了技术基础,易于根据含金矿物的特征选择合适的选冶方法。

5 参考文献

- [1] 喻光明,郭华.川陕甘地区卡林型金矿对比研究[J].地质学报,2010,30(2):163-169.
Yu G M, Guo H. Comparison of geological and geochemical features of Carlin-type audeposits in the Sichuan—Shannxi—Gansu border region [J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 30(2): 163-169.
- [2] 郭俊华,齐金忠,孙彬,等.甘肃阳山特大型金矿床地质特征及成因[J].黄金地质,2002,8(2):16-19.
Guo J H, Qi J Z, Sun B, et al. Geological features and origin of Yangshan supper large gold deposit, Gansu [J]. Gold Geology, 2002, 8(2): 16-19.
- [3] 毛世东,杨荣生,秦艳,等.甘肃阳山金矿田载金矿物特征及金赋存状态研究[J].岩石学报,2009,25(11):2776-2790.
Mao S D, Yang R S, Qin Y, et al. Characteristics of gold-bearing mineral and occurrence of gold in the Yangshan gold field, Gansu Province [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11): 2776-2790.
- [4] 齐金忠,袁士松,李莉,等.甘肃省文县阳山特大型金矿床地质特征及控矿因素分析[J].地质论评,2003,49(1):85-92.
Qi J Z, Yuan S S, Li L, et al. Geological features and ore-controlling factors of the Yangshan superlarge gold deposit, Gansu Province, China [J]. Geological Review,

2003, 49(1): 85-92.

- [5] 苏建平,张翔.甘肃金矿成矿规律和成矿区带的划分[J].黄金地质,2003,9(3):1-7.
Su J P, Zhang X. Metallogenic rules and division of metallogenetic districts (belts) of gold deposits in Gansu Province [J]. Gold Geology, 2003, 9(3): 1-7.
- [6] 李德忍.黄铁矿中金赋存状态的电子探针研究和超微粒金的发现[J].矿物学报,1992,12(3):284-288.
Li D R. Discovery of ultramicro-grained gold in special reference to electron microprobe studies of the existing forms of gold in pyrites [J]. Acta Mineralogica Sinica, 1992, 12(3): 284-288.
- [7] 廖立兵,王丽娟,尹京武,等.矿物材料现代测试技术[M].北京:化学工业出版社,2010.
Liao L B, Wang L J, Yin J W, et al. Modern Testing Technology of Mineral Materials [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [8] 张弘弢,苏文超,田建吉,等.贵州水银洞卡林型金矿床金的赋存状态初步研究[J].矿物学报,2008,28(1):17-23.
Zhang H T, Su W C, Tian J J, et al. The occurrence of gold at Shuiyindong Carlin-type gold deposit, Guizhou [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(1): 17-23.
- [9] 杨念,洪汉烈,张小文,等.海南乐东抱伦金矿金矿物的特征研究[J].矿物岩石,2009,29(2):31-37.
Yang N, Hong H L, Zhang X W, et al. Study on gold-bearing minerals in the Baolun gold deposit, Ledong, Hainan Province [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2009, 29(9): 31-37.
- [10] 李平,朱志新,陈川,等.索尔巴斯陶金矿地质特征及金赋存状态研究[J].新疆地质,2014,32(4):470-474.
Li P, Zhu Z X, Chen C, et al. Ore characteristics and occurrence of gold minerals in Suoerbasisitao gold deposit in Blikun, North Xinjing [J]. Xinjiang Geology, 2014, 32(4): 470-474.
- [11] 朱炳玉,刘家军,朱亿广,等.新疆伊宁金山金矿床金的赋存状态[J].地质通报,2010,29(7):1049-1055.
Zhu B Y, Liu J J, Zhu Y G, et al. Gold occurrence of the Jinshan gold deposit, Yining, Xinjiang, China [J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(7): 1049-1055.
- [12] 邵晓东.从陕、甘、川三省接壤地区砂金矿矿质来源看在该区寻找岩金矿的可能性[J].贵金属地质,2000,9(2):78-81.
Shao X D. Possibility of searching gold deposits in the junction area of Shannxi, Gansu and Sichuan provinces [J]. Journals of Precious Metallic Geology, 2000, 9(2): 78-81.

- [13] 郇伟静,袁万明,李娜. 川西甘孜—理塘金矿带形成条件的矿物电子探针与裂变径迹研究[J]. 现代地质, 2011, 25(2): 262–270.
- Huan W J, Yuan W M, Li N. Study on the mineral electron microprobe evidence of the formation conditions and fission track of gold deposits in Ganzi—Litang gold belt, Western Sichuan Province[J]. Geoscience, 2011, 25(2): 262–270.
- [14] 胡晓隆,杨礼敬,陈彦文,等. 甘肃省徽县头滩子金矿地质特征及远景预测[J]. 矿床地质, 2005, 24(4): 416–421.
- Hu X L, Yang L J, Chen Y W, et al. Geological characteristics and gold resource prognosis of Toutanzi gold ore district in Huixian County, Gansu Province [J]. Mineral Deposits, 2005, 24(4): 416–421.
- [15] 陆邦成,余金杰,陈春生,等. 江苏仑山金矿床金的赋存状态和富集机理研究[J]. 现代地质, 2016, 30(2): 317–327.
- Lu B C, Yu J J, Chen C S, et al. Research on occurrence and enrichment mechanism of gold in the Lunshan gold deposit, Jiangsu Province[J]. Geoscience, 2016, 30(2): 317–327.
- [16] 陈懋弘,毛景文,陈振宇,等. 滇黔桂“金三角”卡林型金矿含砷黄铁矿和毒砂的矿物学研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(5): 539–557.
- Chen M H, Mao J W, Chen Z Y, et al. Mineralogy of arsenian pyrites and arsenopyrites of Carlin-type gold deposits in Yunnan—Guizhou—Guangxi ‘golden triangle’ area, Southwestern China [J]. Mineral Deposits, 2009, 28(5): 539–557.
- [17] 刘云华,刘怀礼,高洪兴,等. 甘肃天水李子金矿床物质组分及金银赋存状态研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(5): 837–844.
- Liu Y H, Liu H L, Gao H X, et al. Material components and occurrence states of gold and silver in the Lizi gold deposit, Tianshui, Gansu Province [J]. Geology and Exploration, 2011, 47(5): 837–844.
- [18] 李增胜,朱笑青,卢焕章,等. 硫化物中“不可见金”的赋存状态研究进展[J]. 地质科技情报, 2013, 32(3): 81–85.
- Li Z S, Zhu X Q, Lu H Z, et al. Advances and current problems in the study of the occurrence of ‘invisible gold’ in sulfides[J]. Geological Science and Technology Information, 2013, 32(3): 81–85.
- [19] Reich M, Kesler S E, Utsunomiya S, et al. Solubility of gold in arsenian pyrite[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2005, 69(11): 2781–2796.
- [20] Cline J S. Timing of gold and arsenic sulfide mineral deposition at the Getchell Carlin-type gold deposit, North-Central Nevada[J]. Economic Geology, 2001, 96: 75–89.
- [21] 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: 1359–1366.

Application of EPMA to Study the Characteristics of Gold-bearing Minerals in the Zhaojiazhuang Gold Deposit in Longnan, Gansu Province

JING Guo-qiang, LIAN Kang, HU Fei-fei, LI Lei, DU Ya-long

(No. 203 Research Institute of Nuclear Industry, Xianyang 712000, China)

HIGHLIGHTS

- (1) Microscopic observation and EPMA analysis of selected gold-bearing minerals in the Zhaojiazhuang gold deposit.
- (2) The gold contents of main gold-bearing minerals (pyrite and chalcopyrite, etc) in the gold ore are different, which is related to the ore-forming stages of gold-bearing minerals.
- (3) Gold-bearing minerals fine-grained and strawberry-like pyrite have high gold content, and gold exists in two forms.

ABSTRACT

BACKGROUND: Microscopy and Electron Microprobe are the main methods for the study of gold-bearing minerals. Using these methods, the content and morphology of gold-bearing minerals and their spatial relationship with other minerals were studied in the Zhaojiazhuang gold deposit. The gold-bearing minerals were qualitatively and quantitatively analyzed.

OBJECTIVES: To summarize the gold-bearing minerals with the significance of prospecting and the features of indicator minerals.

METHODS: Microscopy and Electron Microprobe.

RESULTS: The main gold-bearing mineral is pyrite, then chalcopyrite and sphalerite. The contents of Au in the main gold-bearing minerals follow the sequence of fine-grained pyrite > coarse-grained pyrite > strawberry pyrite > chalcopyrite. The distribution of Au in different stages of pyrite (coarse pyrite, fine pyrite, strawberry pyrite) is uniform. Fine-grained and strawberry pyrite have higher gold content (average 0.14% – 0.18%), indicating that these types of pyrite formed by tectonic hydrothermal fluids where Au concentrates more easily. There are two occurrences of gold in the Zhaojiazhuang Au deposit. Visible gold is wrapped in gangue minerals, or embedded in mineral crystal gaps and cracks in the form of fissure gold. Invisible gold exists in the gold-bearing minerals in the form of nano-scale gold particles. Invisible gold is the main existence form of Au.

CONCLUSIONS: This study provides evidence for the study of the genesis, metallogenic process and mechanism of the same deposits and it is easy to select suitable methods for ore selection and smelting based on the characteristics of gold-bearing minerals.

KEY WORDS: Electron Microprobe; gold; occurrence state; gold-bearing minerals; pyrite