

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

辽宁高家堡子银矿床流体包裹体研究

代军治^{1,2)}, 王可勇²⁾, 毛景文¹⁾, 杨言辰²⁾

1) 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京, 100037; 2) 吉林大学地球科学学院, 长春, 130061

内容提要: 高家堡子银矿床经历了沉积—变质期和热液叠加期。包裹体岩相学研究表明, 沉积—变质期不发育可供研究的流体包裹体, 热液叠加期发育大量原生流体包裹体, 其中石英—黄铁矿阶段主要发育 I 型气液两相、II 型含 CO₂ 三相、III 型单 CO₂ 及 IV 型单液相包裹体, 包裹体均一温度为 136~359℃, 盐度为 3.1%~15.9% NaCl_{eq}, 成矿流体属 NaCl-H₂O-CO₂ 体系; 独立银阶段主要发育 I 型气液两相和 IV 型单液相包裹体, 包裹体均一温度、盐度分别为 114~190℃, 2.0%~5.5% NaCl_{eq}, 属低温、低盐度 NaCl-H₂O 流体体系。通过与矿区新岭岩体中流体对比研究发现, 两者存在一定的相似性, 表明成矿阶段流体主要来自岩浆热液, 在成矿过程中, 成矿流体经历了早期阶段不混溶作用到晚期阶段地下水的混合过程。流体的不混溶作用到混合过程对银的沉淀成矿产生了重要影响。

关键词: 高家堡子银矿床; 流体包裹体; 成矿流体; 流体不混溶作用

辽宁青城子地区是中国东部重要的铅—锌、金、银多金属矿集区之一, 在约 20 km² 范围内, 分布有大型 Pb、Zn 矿床 12 个, 大型金、银矿床各 1 处, 中、小型金矿床多处。高家堡子银矿床是 20 世纪 90 年代在青城子铅—锌矿田外围发现的大型银矿床(图 1), 目前, 已探明银储量 3199t, 平均品位 312.43×10⁻⁶。由于其发现较晚, 总体研究程度较低, 对矿床成因亦存在多种认识, 如韧性剪切—喷流沉积—岩浆热液叠加复合型矿床(姜瑛等, 1998); 浅成低温热液渗滤型银矿床(王文清等, 2000); 浊积岩型矿床(陈江, 2000)及岩浆热液成矿(魏民, 2001)等。本文从成矿流体研究入手, 通过对流体包裹体进行显微测温、包裹体成分分析, 系统研究成矿流体的性质、演化, 进而探讨了成矿流体来源及成矿机制。

1 成矿地质背景

高家堡子银矿床地处华北地台辽东裂谷轴部凹陷带, 该带是在太古宙基底上古元古代期间地壳拉张裂解—快速沉降—回返挤压收缩形成的陆间裂谷, 区内主要岩石建造为辽河群一套绿片岩相与角闪岩相的变质岩系。原岩恢复表明下部为偏碱性火山岩建造, 中部碳酸盐岩建造, 上部粘土岩—陆源碎屑岩建造(陈荣度, 1984; 张秋生, 1988)。

矿区出露地层为辽河群盖县组云母片岩和其下的大石桥组三段四层和三段五层大理岩, 其中三段

四层可分为三个岩性层, 下部为浅粒岩, 中部为白云石大理岩, 上部为石榴子石黑云母片岩。岩层厚 10~20 m。三段五层主要为白云石大理岩夹方柱石大理岩, 层厚 30~100 m。古—中元古代和中生代矿区内岩浆活动比较强烈, 主要有大顶子富 Na 质黑云母斜长花岗岩, 新岭、双顶沟似斑状黑云母花岗岩。大顶子、双顶沟、新岭岩体(株)侵位时代分别为 1740~1621 Ma、230.7±5 Ma、217.6~226.7 Ma (K-Ar 法, 芮宗瑶等, 1994)。目前在新岭岩体的外接触带发现银、金矿化点多处, 表明新岭岩体与区内矿化作用具有密切的关系。新岭岩体出露于矿区北西侧, 面积约 4 km², 岩体与地层接触关系明显。岩石呈灰白和浅粉色, 具似斑状和斑状结构, 块状构造, 斑晶主要为正长石, 基质为微斜长石和正长石, 多呈他形粒状。

2 矿床地质

矿区内目前已查明银矿体 4 条, 主要赋存于辽河群大石桥组三段四层、三段五层及其与盖县组接触部位的层间破碎带中, 矿体形态为似层状、透镜状或扁豆状。矿体延长 100~600 m, 延深 80~400 m, 厚 0.51~11.63 m, 其总体走向 70°~80°, 倾向北西, 倾角 20°~30°。银矿石最高品位可达 8.70‰, 平均品位 312.43×10⁻⁶, 伴生 Pb 的含量为 1.14%, Zn 含量为 2.33%。矿化类型主要有含银硅化石英脉型

注: 本文为吉林大学科研启动基金和国家重点基础发展规划项目(编号 G1999043216)的成果。

收稿日期: 2006-01-22; 改回日期: 2006-03-25; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 代军治, 男, 1978 年生。在读博士研究生, 主要从事矿床学研究。Email: daijunzhi@sohu.com。

和含银碎裂大理岩型。矿床的形成经历了区域沉积—变质(变形)和热液叠加改造两大成矿期:① 沉积—变质期由于受到后期热液的强烈改造,矿石组构在矿区保留较少,仅见少量的层纹状、条带状矿石(厚 0.2~0.7 cm),不连续残留于晚期石英脉中。代表矿物为莓球状黄铁矿、镶边状(环带状)黄铁矿、板柱状毒砂。② 热液叠加期为主要成矿期。发育较多石英—黄铁矿大脉,形成了大量晶洞、晶簇构造。该期成矿作用可进一步分为石英—黄铁矿阶段和独立银阶段。前者形成的代表矿物为黄铁矿(图 2-a)、毒砂、闪锌矿、方铅矿;后者则大量沉淀出自然银、深红银矿、辉银矿(图 2-b)等。与银矿化有关的围岩蚀变主要为硅化,少量碳酸盐化,其中硅化与银矿化关系密切。

3 流体包裹体特征

用于流体包裹体研究的样品主要采自大石桥组三段四层、三段五层及其与盖县组接触部位的井下

巷道中。由于受到后期热液的强烈改造,沉积—变质期矿石在矿区保留较少,其内流体包裹体少且小,本次未对其作详细研究。本文的主要研究对象是与银矿化关系密切的石英—黄铁矿阶段和独立银阶段的含银硅化石英脉型矿石。室内将这些样品磨制成厚 0.25~0.3 mm 的双面抛光包裹体片,进行流体包裹体岩相学、均一—冷冻法测温研究及成分分析。研究工作在吉林大学地球科学学院地质流体实验室完成。包裹体测温用仪器为 Linkam THMS600 型冷热台,测试前用人造纯 H_2O 及 25% H_2O-CO_2 包裹体(国际标样)进行了系统校正,低温部分误差 0.1℃,高温部分(>100℃)误差为±2℃;包裹体成分分析采用 Renishaw System-1000 型激光拉曼光谱仪,514 nm Ar^+ 离子激光器,扫描范围 4500~850 cm^{-1} ,狭缝宽度 20 μm ,分辨率 1~2 cm^{-1} 。

包裹体岩相学研究表明,高家堡子银矿床与银矿化伴生的热液脉石英中发育较丰富的原生流体包裹体。依其室温下的相态特征,这些原生流体包裹体

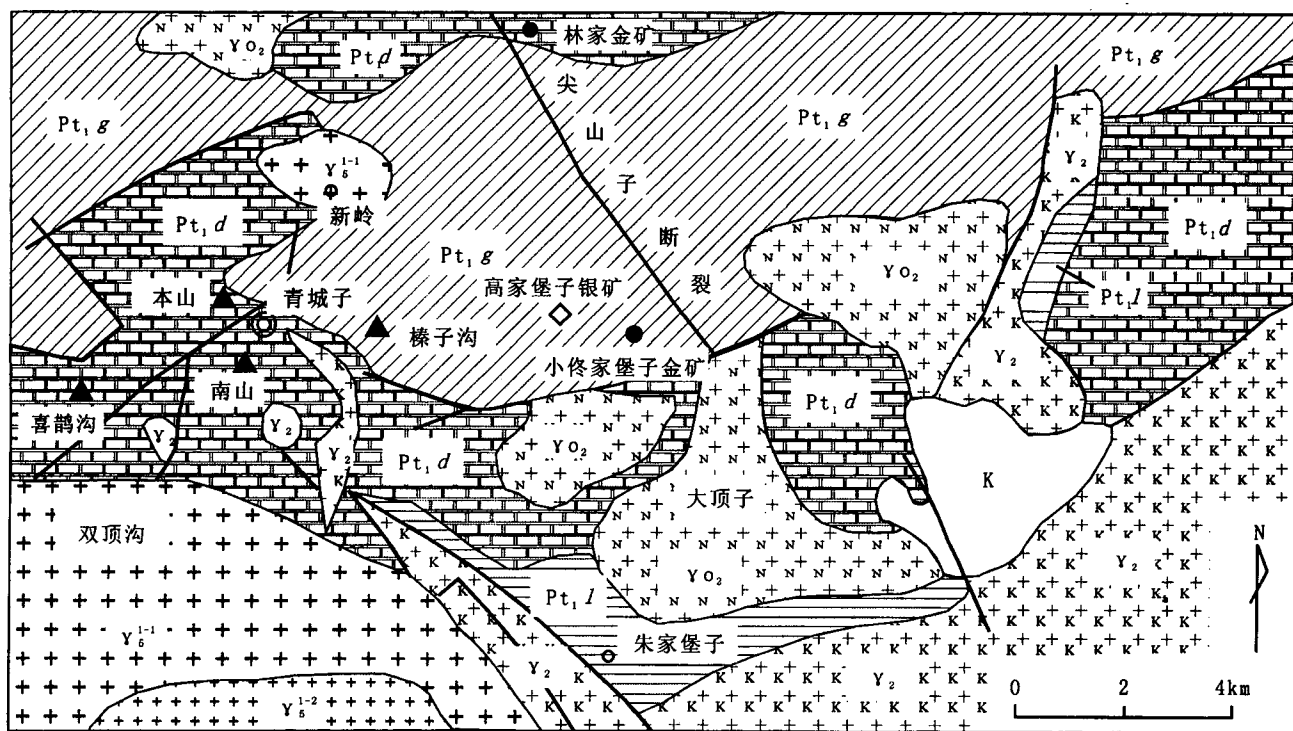


图 1 青城子矿田地质简图(据薛春纪等,2003 修改)

Fig. 1 Geological map of the Qingchengzi orefield (Modified from Xue Chunji et al., 2003)

K 白垩纪火山岩; Pt_1 古元古代辽河群; Pt_{1g} 盖县组云母片岩; Pt_{1d} 大石桥组大理岩; Pt_{1l} 浪子山组变粒岩; Y_3^{1-2} 印支期第二次侵入花岗岩; Y_3^{1-1} 印支期第一次侵入花岗岩; Y_{02} 中元古代钠质花岗岩; Y_2 古元古代钾质花岗岩; ▲—铅锌矿床; ◇—银矿床; ●—金矿床

K—Cretaceous volcanic rock; Pt_1 —Paleoproterozoic Liaohé Group; Pt_{1g} —mica schist of Gaixian Formation; Pt_{1d} —marble of Dashiqiao Formation; Pt_{1l} —granulite of Langzishan Formation; Y_3^{1-2} —the Second stage Indosinian granite; Y_3^{1-1} —the First stage Indosinian granite; Y_{02} —Mesoproterozoic sodium granite; Y_2 —Paleoproterozoic potassic granite; ▲—lead-zinc deposit; ◇—silver deposit; ●—gold deposit

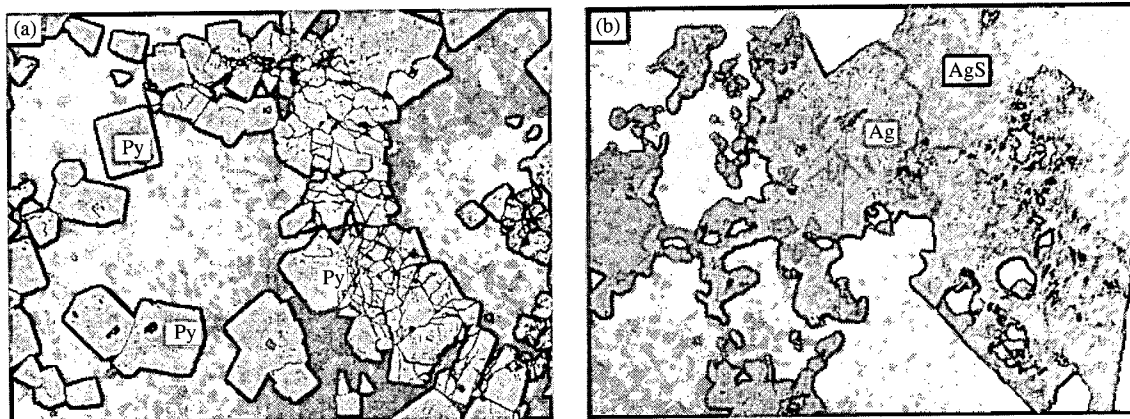


图 2 热液叠加期不同阶段矿石组构

Fig. 2 Photographs of different stages of hydrothermal alteration phase

(a)—脉状构造(黄铁矿呈细脉状分布于石英脉中); (b)—交代结构(辉银矿交代自然银); Py—黄铁矿; Ag—自然银; AgS—辉银矿
(a)—Veinlet structure (Pyrite as veinlets in quartz veins); (b)—metasomatic texture
(argentite replacing natural silver); Py—pyrite; Ag—natural silver; AgS—argentite

主要为气液两相(I)、含 CO_2 三相(II)及单 CO_2 (III)包裹体,少量的单液相(IV)包裹体。石英—黄铁矿阶段以上各类型包裹体都发育,独立银阶段仅发育气液两相和单液相包裹体,偶见含 CO_2 三相包裹体和单 CO_2 包裹体,现分述如下:

3.1 石英—黄铁矿阶段流体包裹体

I 型包裹体:室温下由水溶液相及气相构成,气相体积一般 5%~20%,多数在 10%左右,偶见富气相包裹体,气相体积为 80%。该类型包裹体大小一般为 4~20 μm ,多数在 6~12 μm 之间,个别可达 30 μm ,常见形态为次圆形、负晶形、长条形、椭圆形

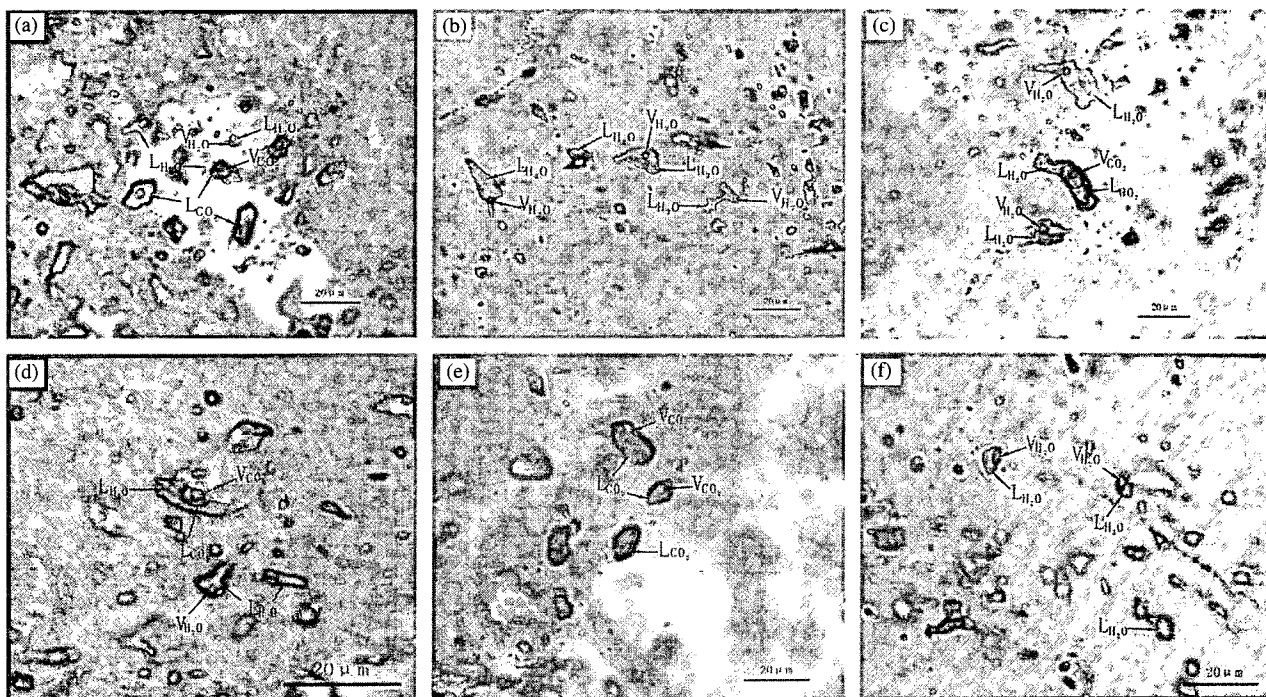


图 3 高家堡子银矿床流体包裹体显微照片

Fig. 3 Micrographs of fluid inclusions in Gaojiapuzi silver deposit

及不规则状(图 3-b、c)。本类包裹体占包裹体总数的 60% 左右。

Ⅱ 型包裹体: 室温下由液态 CO_2 (L_{CO_2})、气态 CO_2 (V_{CO_2})、水溶液三相或 L_{CO_2} 与水溶液两相组成。 L_{CO_2} 相与水溶液两相包裹体常在温度降至 10°C 左右出现气态 CO_2 而变成三相包裹体。按 CO_2 相所占体积百分比大小, 该类包裹体可进一步划分为 **Ⅱ a 富 CO_2 包裹体** ($\text{L}_{\text{CO}_2} > 50\%$, 图 3-c) 及 **Ⅱ b 含 CO_2 富水溶液包裹体** ($\text{L}_{\text{CO}_2} < 50\%$, 图 3-d) 两种类型。在所观察样品中, **Ⅱ a 型包裹体** L_{CO_2} 相体积百分比为 $50\% \sim 85\%$, 其中 V_{CO_2} 占 CO_2 相体积百分比的 $20\% \sim 30\%$, 该类包裹体大小一般为 $6 \sim 25 \mu\text{m}$, 形态为椭圆形、三角形; **Ⅱ b 型包裹体** 大小一般为 $8 \sim 20 \mu\text{m}$, L_{CO_2} 相体积百分比为 $20\% \sim 25\%$, V_{CO_2} 占 CO_2 相体积百分比的 $20\% \sim 35\%$, 个别可达 $75\% \sim 80\%$; 该类包裹体形态多为椭圆形、菱形、不规则四边形。该类包裹体占包裹体总数的 15% 左右。

Ⅲ 型包裹体: 室温下呈 CO_2 气液两相或纯 CO_2 液相, 该类包裹体以富液相 CO_2 为主, 少量富 CO_2 气相, 富液相 CO_2 包裹体气相 CO_2 所占比例一般为 $10\% \sim 40\%$, 富 CO_2 气相包裹体气液比一般在 $50\% \sim 60\%$ 。该类包裹体大小一般在 $10 \sim 15 \mu\text{m}$, 其形态为椭圆形、负晶形、不规则四边形等(图 3-a、d、e), 该类包裹体约占包裹体总数的 15%。

Ⅳ 型包裹体: 室温下由单一液相构成, 发育较少, 大小一般为 $2 \sim 6 \mu\text{m}$, 少数 $8 \sim 15 \mu\text{m}$, 形态多为长条形、不规则状。

上述四种类型包裹体中, **I**、**Ⅱ**、**Ⅲ** 型常密集成群发育, 在同一石英颗粒中亦常见共生现象(图 3-a), 显示它们近似于同时捕获的特征。

3.2 独立银阶段流体包裹体

I 型包裹体: 室温下由液相及气泡两相构成, 气液比变化不大, 一般为 $5\% \sim 10\%$ 。该类包裹体大小 $5 \sim 18 \mu\text{m}$ 不等, 少量达 $40 \mu\text{m}$, 形态以椭圆形、长条形及不规则四边形为主(图 3-f), 占该阶段包裹体数量的 80% 左右。

Ⅳ 型包裹体: 室温下由单一液相构成, 大小一般 $3 \sim 8 \mu\text{m}$ 或更小, 形态以负晶形、长条形、次圆形及不规则状为主。

4 流体包裹体显微测温

4.1 石英—黄铁矿阶段流体包裹体测温特征

气液两相包裹体: 冷冻—升温过程中观测到少

量包裹体初熔现象, 初熔温度值为 $-22.6 \sim -27.2^\circ\text{C}$, 低于纯 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 溶液标准低共熔温度值 -20.8°C , 反映在热液中除 Na^+ 外, 还存在一定量的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等多种阳离子成分(Shepherd et al., 1985; 张文淮等, 1993)。包裹体冰溶化温度为 $-2.0 \sim -12.0^\circ\text{C}$, 相应流体盐度为 $3.9\% \sim 15.9\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$, 多数盐度值集中于 $9.5\% \sim 12.5\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$ (图 4-b)。包裹体最终均一至液态方式为主, 均一化温度变化范围为 $136.8 \sim 358.5^\circ\text{C}$, 温度峰值为 $220 \sim 260^\circ\text{C}$ (图 4-a)。依据盐水溶液包裹体温度—密度、温度—压力关系方程(刘斌等, 1999), 估算热液密度为 $0.77 \sim 1.01 \text{ g/cm}^3$, 平均密度 0.93 g/cm^3 。

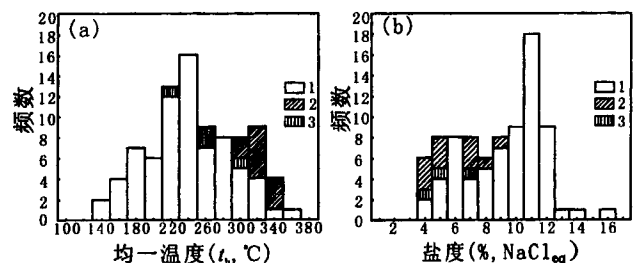


图 4 石英—黄铁矿阶段流体包裹体均一温度(a)及盐度直方图(b)

Fig. 4 The histograms of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions of quartz-pyrite stage

1—**I** 型包裹体; 2—**Ⅱ a** 型包裹体; 3—**Ⅱ b** 型包裹体

1—**I**-type fluid inclusion; 2—**Ⅱ a**-type fluid inclusion;

3—**Ⅱ b**-type fluid inclusion

含 CO_2 三相包裹体, 冷冻—升温过程中, **Ⅱ** 型包裹体 CO_2 相全部熔化温度为 $-57.3 \sim -59.2^\circ\text{C}$, 低于 CO_2 标样标准值 -56.6°C , 反映了其内少量 CH_4 等成分存在(张文淮等, 1993; 刘斌等, 1999; Shepherd et al., 1985)。升温过程中, 该类包裹体中普遍见到了 CO_2 笼形物存在, CO_2 笼形物消失温度为 $5.3 \sim 8.4^\circ\text{C}$, 依据相应公式(Roedder, 1984; 刘斌、沈昆等, 1999)求得其盐度值为 $3.1\% \sim 8.6\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$, 峰值 $5.0\% \sim 7.5\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$ (图 4-b); CO_2 相部分均一至液相方式为主, 少数临界均一, 均一温度为 $25.3 \sim 29.4^\circ\text{C}$; 多数包裹体通过 H_2O 溶解于 CO_2 相而均一成蒸气相, 少数则通过 CO_2 溶解于 H_2O 相而均一成液体状态, 其均一化温度变化范围为 $210 \sim 340^\circ\text{C}$, 温度峰值在 $300 \sim 340^\circ\text{C}$ (图 4-a)。其中 **Ⅱ a** 型包裹体完全均一温度多数集中于 $298 \sim 340^\circ\text{C}$ 之间, 而 **Ⅱ b** 型包裹体则主要集中于 $210 \sim 260^\circ\text{C}$ 之间;

依据 CO_2 的均一方式是均一到液相还是均一到气相,选择不同的 CO_2 体系热力学方程或者相图(刘斌,沈昆等,1999),估算Ⅱ型包裹体 CO_2 相密度为 $0.57 \sim 0.69 \text{ g/cm}^3$; H_2O 溶液相密度为 $1.02 \sim 1.06 \text{ g/cm}^3$ 。依据刘斌 1999 年热力学公式计算得 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{NaCl}$ 体系中各组分含量, $n(\text{CO}_2)$ 为 $7\% \sim 60\%$; $n(\text{H}_2\text{O})$ 为 $40\% \sim 91\%$; $n(\text{NaCl})$ 为 $0.4\% \sim 1.5\%$ 。

单 CO_2 包裹体:冷冻—加热过程中,Ⅲ型包裹体 CO_2 固体全部熔化温度与Ⅱ型相似,为 $-56.9 \sim -59.3^\circ\text{C}$,低于纯 CO_2 标样熔化温度值 -56.6°C ,反应了 CO_2 相内 CH_4 等成分的存在; CO_2 气相大部分以均一到液相 CO_2 方式为主,个别气相 CO_2 含量较高者显示临界均一; CO_2 相部分均一温度变化范围为 $25.1 \sim 28.8^\circ\text{C}$;室温下呈单相存在的 CO_2 包体,其部分均一温度多低于 23.5°C 。依据 CO_2 的均一方式及温度估算 CO_2 包裹体密度为 $0.63 \sim 0.73 \text{ g/cm}^3$ 。

4.2 独立银阶段流体包裹体测温特征

独立银成矿阶段流体包裹体类型以气液两相为主,冷冻—均一过程中亦观测到少量包裹体初熔现象,初熔温度值为 $-22.3 \sim -25.2^\circ\text{C}$,低于纯 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 溶液标准低共熔温度值 -20.8°C ,亦反映热液中存在 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等多种阳离子成分(Shepherd et al., 1985; 张文淮等, 1993)。包裹体冰溶化温度为 $-0.9 \sim -7.6^\circ\text{C}$,平均 -3.0°C ,相应流体盐度为 $1.0\% \sim 5.6\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$,盐度峰值 $2.0\% \sim 5.5\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$ (图 5-b)。包裹体以均一至液相为主,均一化温度变化范围为 $114 \sim 190^\circ\text{C}$,温度峰值为 $130 \sim 170^\circ\text{C}$ (图 5-a)。依据盐水溶液包裹体温度—密度、温度—压力关系方程(刘斌等, 1999),估算热液密度为 $0.9 \sim 1.01 \text{ g/cm}^3$,平均 0.95 g/cm^3 。

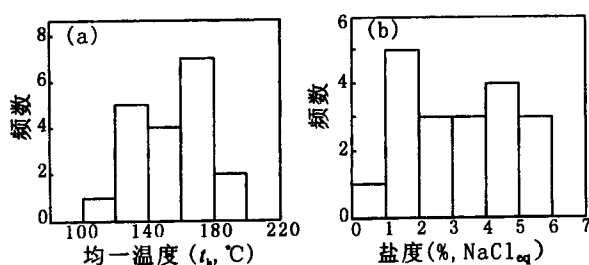


图 5 独立银阶段气液两相均一温度(a)及盐度直方图(b)

Fig. 5 The histograms of homogenization temperature and salinity of fluid inclusions of nature silver stage

5 流体包裹体成分分析

选择石英—黄铁矿阶段和独立银阶段矿石石英中的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ型包裹体开展了单个包裹体成分激光拉曼光谱研究。结果(图 6)表明,不同成矿阶段的流体成分有一定差异,具体表现为:

石英—黄铁矿阶段:Ⅰ型包裹体成分以 H_2O 为主,少量 CO_2 成分(图 6-a);Ⅱ型和Ⅲ型包裹体成分基本上以 CO_2 为主,个别包裹体 H_2O 含量较高,此外还含有少量的 CH_4 、 H_2S 等成分(图 6-b、c)。显然,石英—黄铁矿阶段成矿流体总体属 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 体系。

独立银阶段:流体包裹体成分则是以 H_2O 为主(图 6-d),其他成分含量甚微。这种流体成分上表现出与石英—黄铁矿阶段流体明显不同,总体属 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 体系流体。

6 讨论

6.1 成矿流体性质

高家堡子矿床成矿流体以气液两相、含 CO_2 三相、单 CO_2 相包裹体为主,因此石英—黄铁矿成阶段流体包裹体反映了主成矿阶段流体的基本特征。由于该阶段石英中同时存在Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ及Ⅳ型原生流体包裹体,且成群共生产出于同一石英颗粒中的特点,表明其捕获时成矿流体处于一种不均匀状态(Shepherd et al., 1985; 张文淮等, 1993)。产生这种现象的原因可能有两种:① $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 与 CO_2 两种不同流体的混合作用;② 原来均匀 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体发生不混溶。对于前者,由 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 及 CO_2 两种不同性质流体混合而形成各类包裹体,其盐度值应存在较大范围的波动现象,同时,由不均匀捕获而形成的含 CO_2 量不同的包裹体,其 CO_2 成分应相对稳定,这与本区包裹体实际特点不符。前已述及,黄铁矿矿石中Ⅰ、Ⅱ型包裹体盐度相对稳定,前者为 $3.9\% \sim 15.9\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$,峰值 $9.5\% \sim 12.5\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$;后者为 $3.1\% \sim 8.6\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$,峰值 $5.0\% \sim 7.5\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$,两类包裹体盐度连续略有差别,造成这种现象的原因,正是由于不混溶作用而从原来均一的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体中分离出富 CO_2 流体,使气液两相盐度略有增高;单个包裹体成分分析结果显示,Ⅱ、Ⅲ型包裹体其微量成分含量一般均略高于Ⅰ型包裹体。这一规律明显符合流体不混溶作用特征,因为原始均匀的 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体因所处温、压条件变化而发生相分离作用,形成富 $\text{NaCl}-\text{H}_2\text{O}$ 溶液

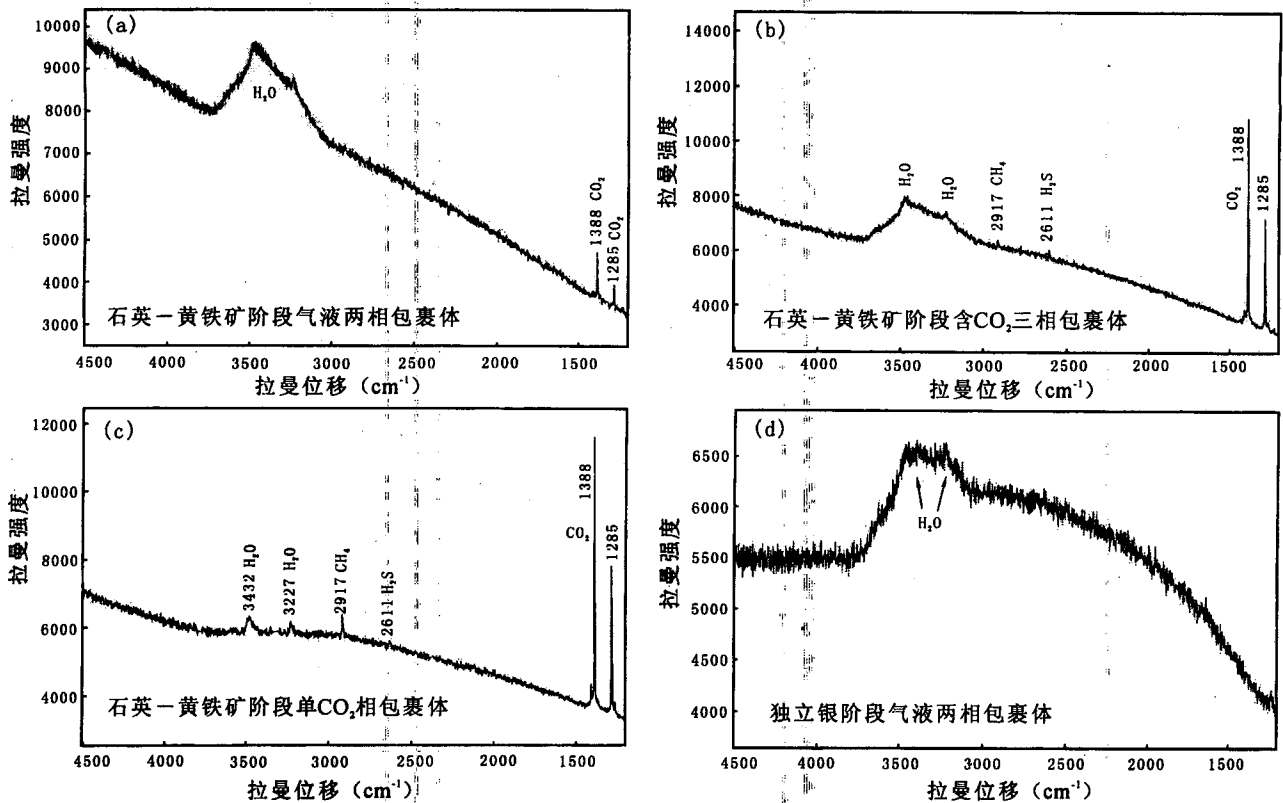


图 6 高家堡子银矿床流体包裹体拉曼光谱分析

Fig. 6 Raman spectra of fluid inclusions from the Gaojiapuzi silver deposit

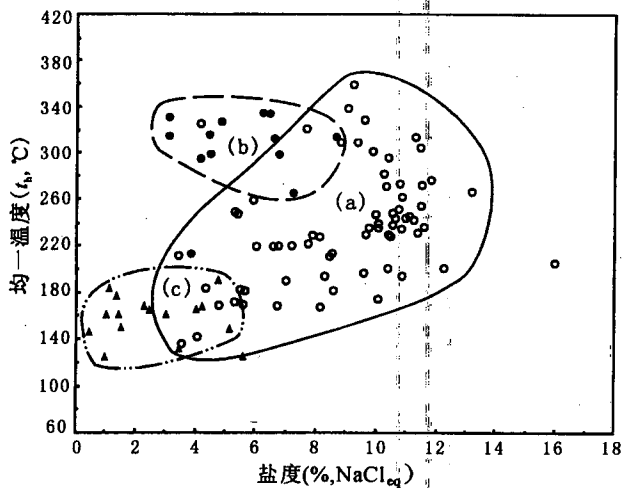


图 7 流体包裹体均一温度对盐度图解

Fig. 7 Diagram showing homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions

(a)—石英黄铁矿阶段 I 型包裹体; (b)—石英黄铁矿阶段 II 型富 CO₂ 包裹体; (c)—独立银阶段 I 型包裹体
 (a)—I-type fluid inclusions of quartz-pyrite stage; (b)—II-type CO₂-rich fluid inclusions of quartz-pyrite stage; (c)—I-type fluid inclusions of independent silver stage

流体及富 CO₂ 流体, CH₄、H₂S、H₂、CO 等气体倾向于在 CO₂ 相中富集(张文淮等, 1993)。由包裹体均一温度、盐度关系图(图 7)可以看出, 气液两相流体盐度随着温度的升高而增大(或随着温度的降低而减小), 温度和盐度呈现正相关性, 这代表成矿作用过程中流体演化的一般规律(李荫清, 1995)。而含 CO₂ 三相富 L_{CO2} 流体盐度则表现出随温度的升高而降低, 这正符合了原始均一的 NaCl-H₂O-CO₂ 流体由于不混溶作用而分离出纯 CO₂ 相和气液两相流体, 导致气液两相流体盐度升高和富 L_{CO2} 流体盐度降低。此外, 在 NaCl-H₂O-CO₂ 体系 $t_h-n(\text{CO}_2)$ 相图中(图 8), 所有含 CO₂ 包裹体 $t_h-n(\text{CO}_2)$ 数据点分布于 6% NaCl_{eq} 盐度, 0.1 GPa 压力下 NaCl-H₂O-CO₂ 流体两相不混溶区内, 表明包裹体捕获于不混溶 NaCl-H₂O-CO₂ 热液体系。反映本区成矿过程中成矿流体确实发生了不混溶即相分离作用。

独立银阶段发生于成矿作用晚期, 其流体性质总体代表了银矿床晚期成矿流体的特征。该类石英中以气液两相包裹体为主, 气相所占体积百分数 5%~10%, 比较均匀, 盐度集中于 2.0%~5.5%

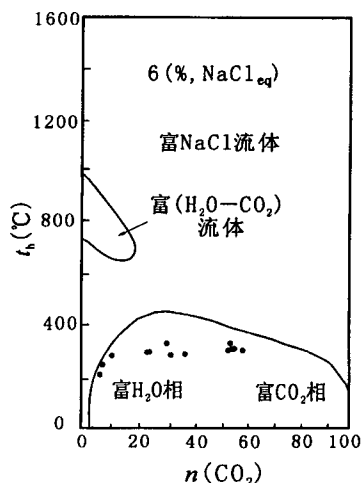
图 8 含 CO_2 三相包裹体 $t_h-n(\text{CO}_2)$ 相图

Fig. 8 The $t_h-n(\text{CO}_2)$ phase diagram of carbon dioxide-bearing three-phase fluid inclusions

NaCl_{eq} 。升温过程中流体包裹体均一到液相,包裹体均一温度为 $110\sim 190^\circ\text{C}$,主要集中于 $130\sim 170^\circ\text{C}$,这一温度基本反映了该矿床银晚期富集成矿温度。流体成分以 H_2O 和 CO_2 为主,代表一种较均匀的低温、低盐度的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系流体特点。

6.2 流体捕获的温压条件

在流体不混溶过程中捕获的流体包裹体,其捕获端元组分的流体包裹体均一温度相近且基本代表了成矿作用的温度(张文淮等,1993;刘斌等,1999)。本区石英—黄铁矿阶段 I 型及 II a 型包裹体为捕获于富 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 流体相及富 CO_2 相流体两种端元流体的代表,故其均一温度可反映高家堡子银矿成矿时的温度值。从本区两类包裹体测温结果来看, I 型气液两相包裹体均一温度基本略低于 II a 型富 CO_2 包裹体均一温度,这种现象在加拿大 Sigma、Star Lake 等同类金矿中也普遍存在,Robert 等(1987)、Tbrahim 等(1991)都认为,这种现象是由于压力波动导致连续多次不混溶作用的结果。在这种情况下 I 型包裹体均一温度较其被捕获时的温度值低。故在 II a 及 I 型包裹体中, II a 型包裹体均一温度值较可靠的反映了成矿温度值,在高家堡子, II a 型包裹体均一温度峰值为 $298\sim 340^\circ\text{C}$,表明高家堡子银矿床的成矿作用高峰温度为 $298\sim 340^\circ\text{C}$ 。

捕获压力采用等容线相交法进行了估算。高家堡子不混溶流体中水端元组分的密度为 $0.77\sim 0.97\text{g/cm}^3$,平均 0.92g/cm^3 ; CO_2 端元组分的密度为 $0.63\sim 0.73\text{g/cm}^3$,平均 0.68g/cm^3 。利用等容线

相交法求得成矿流体捕获压力值为 $82.0\sim 142.0\text{MPa}$,平均压力为 112.0MPa (图 9),依相关公式(Shepherd et al, 1985)估算,其相应成矿深度为 $3.09\sim 5.36\text{km}$ 。

由于在本区独立银阶段矿石中经常可以看到大量的晶洞、晶簇构造,代表一种开放体系环境,其成矿流体压力介于静水与静岩压力之间,接近静水压力,其捕获压力及成矿深度的计算依据邵洁莲(1988)提出的经验公式,求得成矿压力为 $8.83\sim 15.57\text{MPa}$,平均为 11.18MPa ;相应成矿深度为 $0.89\sim 1.57\text{km}$ 。

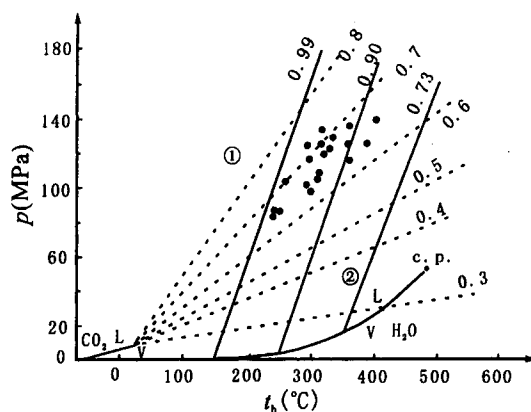


图 9 流体包裹体压力估算图解
(底图据 Roedder 等,1980)

Fig. 9 The pressure estimation diagram of fluid inclusions(after Roedder et al., 1980)

①— CO_2 等容线; ②— H_2O 溶液等容线
①—isochores of CO_2 ; ②—isochores of H_2O

6.3 成矿流体来源

笔者等对比分析了矿区新岭岩体流体包裹体资料^①(表 1),可以发现,新岭岩体中流体以气液两相、含 CO_2 三相、单 CO_2 包裹体和含子矿物三相为主。I 型包裹体均一温度 $139\sim 371^\circ\text{C}$,盐度 $8.2\%\sim 13.2\%\text{NaCl}_{\text{eq}}$,密度 $0.75\sim 1.03\text{g/cm}^3$; II 型包裹体均一温度 $254\sim 390^\circ\text{C}$; V 型包裹体均一温度 $184\sim 303^\circ\text{C}$,盐度 $31.1\%\sim 38.4\%\text{NaCl}_{\text{eq}}$,各类包裹体常共存于同一石英颗粒中,流体成分以 H_2O 、 CO_2 为主,少量 CH_4 、 H_2S 、 N_2 ,成矿流体总体属 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 型体系。前述表明,高家堡子银矿床主成矿阶段流体为不混溶 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系,其流体性质与印支期新岭岩体中流体具有相似性,表明高家堡子银矿床主成矿阶段流体主要来自印支期岩浆热液。此外,薛春纪、陈毓川等(2003)联合采用 Rb-Sr 和 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$

Ar 法对高家堡子银矿床测得了一组十分集中的印支中期成矿年龄。银矿石中石英流体包裹体的 Rb—Sr 等时线年龄为 234 ± 14 Ma; $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法测得网脉状含银石英坪年龄 $t_p = 238.80 \pm 0.60$ Ma, 等时线年龄 $t_i = 240.35 \pm 0.88$ Ma。显然, 上述年龄与区内印支期的构造—岩浆事件时代相对应, 亦说明成矿流体主要来自岩浆热液。

氢氧同位素分析(姜瑛等, 1998)表明, 成矿作用晚阶段流体 $\delta\text{D} = -51.0\text{‰} \sim -70.6\text{‰}$, 与岩浆水 δD 同位素值接近; $\delta^{18}\text{O} = -8.63\text{‰} \sim -7.74\text{‰}$, 靠近大气降水线, 这可能是受到岩浆期后热液或地温梯度与大气降水的影响。这与独立银阶段成矿流体性质相似。该阶段包裹体无论在均一温度、盐度, 还是成分上都表现出不同于石英—黄铁矿阶段流体包裹体, 属低温、低盐度的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系流体, 这种低温、低盐度的流体造成了成矿流体晚期阶段的混合现象(图 7), 表明成矿作用晚期有大气降水的混入。

6.4 成矿元素的沉淀机制

大量的研究表明, 流体的不混溶作用对金属元素的沉淀析出具有重要的制约作用, 是金属的重要富集机理之一(张德会, 1997)。由原来均匀的一种流体变为两种或两种以上不均匀流体, 从而破坏了原有的平衡状态, 导致某些有用组分沉淀成矿(张文淮等, 1996)。如 Alaska 某含金石英脉金的沉淀可能是伴随 $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-H}_2\text{O}$ 流体的不混溶引起 pH 值变化而触发的(Read, 1986); Ibrahim (1999) 对荷兰 Masumbiri 和 Sierra Leone 矿床含金石英脉的流体包裹体研究表明, 金的沉淀与均一 $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ 母流体的不混溶作用有关; 毛景文等(2001)对河北东坪碲化物金矿床流体包裹体研究指出, 由于成矿系统温

度下降, 致使 CO_2 和 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 相分离, 引起碲化物和自然金等矿物沉淀和聚集成矿。

高家堡子银矿床成矿流体主要来自印支期岩浆热液。富含 $\text{H}_2\text{O-CO}_2$ 等挥发性成分的深部含矿流体在上升至大石桥组、盖县组地层的层间破碎带过程中, 由于体系温度、压力降低, 原来均一的 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 体系发生不混溶作用, 引起 CO_2 与 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 相分离, 形成了低—中等盐度的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 溶液和纯 CO_2 流体。正是由于流体的不混溶作用, 引起了成矿溶液 pH、Eh、 f_{O_2} 、 f_{S_2} 等条件显著变化, 导致大量硫化物和银硫盐等有用组分相继沉淀成矿。含矿热液同时溶解矿区碳酸盐岩地层, 形成了大量的晶洞构造。随着成矿作用进行到晚期独立银阶段, 低温、低盐度的大气降水沿着层间破碎带混入, 使含矿热液系统的状态再次发生改变, 破坏溶液的化学平衡(张德会, 1997; 王可勇等, 2000), 银矿物进一步富集成矿, 在晶洞晶簇构造发育部位形成了自然银、辉银矿、深红银矿等含银矿物。

7 结论

(1) 对高家堡子银矿床流体包裹体研究表明, 早期沉积—变质期流体包裹体不发育。流体包裹体主要发育于热液叠加期, 主要有气液两相、含 CO_2 三相、单 CO_2 及单液相四种类型。其中石英—黄铁矿阶段以上各类包裹体都发育, 而独立银阶段只发育气液两相和单液相包裹体。

(2) 主成矿阶段即石英—黄铁矿阶段, 流体成分以 H_2O 和 CO_2 为主, 同时含有微量的 CH_4 、 H_2S 等, 成矿流体属 $\text{NaCl-H}_2\text{O-CO}_2$ 不混溶体系, 包裹体均一温度 $136 \sim 359$ °C, 盐度 $3.1\% \sim 12.5\%$ NaCl_{eq} , 气液两相密度 $0.77 \sim 1.01$ g/cm^3 , 纯 CO_2 相流体密

表 1 高家堡子银矿床及岩体成矿流体主要参数表

Table 1 Main parameters of ore-forming fluids in silver deposit of Gaojiapuzi and granite rock

矿床/岩体	成矿期次	包裹体类型	测试个数	均一温度 (°C)	盐度(%, NaCl_{eq})	流体密度 (g/cm^3)	捕获压力 (MPa)	成矿深度(km)
高家堡子	石英—黄铁矿阶段	I、II、III、IV	126	136~359(I) 210~340(II)	3.9~15.9(I) 3.1~8.6(II)	0.77~1.01 ($\rho_{\text{H}_2\text{O}}$) 0.63~0.73 (ρ_{CO_2})	82.0~142.0	3.09~5.36
	独立银阶段	I、IV	20	114~190(I)	2.0~5.5(I)	0.90~1.01	8.83~15.57	0.89~1.57
新岭岩体	印支期	I、II、III、IV、V	107	139~371(I) 254~390(II) 184~303(V)	8.2~13.2(I) 31.1~38.4(V)	0.75~1.03(I)	/	/

注: I—气液两相包裹体; II—含 CO_2 三相包裹体; III—单 CO_2 包裹体; IV—单液相包裹体; V—含子矿物三相包裹体。

度为 $0.63 \sim 0.73 \text{ g/cm}^3$, 成矿压力为 $82.0 \sim 142.0 \text{ MPa}$, 成矿深度 $3.09 \sim 5.36 \text{ km}$; 晚期独立银阶段, 流体成分主要是 H_2O , 成矿流体属 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系, 包裹体均一温度 $110 \sim 190^\circ\text{C}$, 盐度为 $2.0\% \sim 5.5\% \text{ NaCl}_{\text{eq}}$, 密度 $0.9 \sim 1.01 \text{ g/cm}^3$, 流体捕获压力 $8.83 \sim 15.57 \text{ MPa}$, 成矿深度为 $0.89 \sim 1.57 \text{ km}$ 。

(3) 与银矿化伴生的热液脉石英中流体包裹体在类型、均一温度、盐度条件、性质及成分上与印支期新岭岩体的流体具有一定的相似性, 表明高家堡子银矿床成矿流体主要来自岩浆热液而非区域变质热液。流体包裹体研究及前人氢氧同位素资料表明, 成矿作用晚期有地下水参与成矿作用。

(4) 流体包裹体研究表明, 高家堡子银矿床在形成过程中, 石英—黄铁矿阶段的不混溶体作用和独立银阶段的低温、低盐度流体的混合作用, 对银的沉淀、富集产生了重要影响。

致谢: 野外工作中得到了中国地质调查局李基宏处长, 沈阳地质矿产研究所马德有所长、邴志波副所长, 辽宁有色金属勘查局 103 队野外作业组金海宽高工、郑吉凯工程师、刘福星工程师等有关同志的大力帮助; 论文撰写期间得到赵财胜博士后, 叶会寿博士的热情指教; 徐文艺副研究员对初稿进行了审阅, 并提出了诸多宝贵意见, 在此一并表示谢意。

注 释

- ① 代军治. 2005. 辽宁青城子地区金银矿床成流体特征及其成因探讨[硕士论文]. 长春: 吉林大学, 68~72.

参 考 文 献

- 陈荣度. 1984. 一个元古代裂谷盆地——辽东裂谷. 辽宁地质, (2): 125~133.
- 姜瑛, 刘先利. 1998. 青城子矿田高家堡子大型金银多金属矿床成因机制. 辽宁地质, (3): 205~213.
- 陈江. 2000. 辽宁青城子矿田浊积岩型金银多金属矿床. 辽宁地质, 17(4): 241~245.
- 李荫清, 陈殿芬. 1995. 吉林小西南岔金铜矿床流体包裹体及成矿作用研究. 矿床地质, 14(2): 151~172.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学基础. 北京: 地质出版社. 1~290.
- 芮宗瑶, 施林道, 方如恒. 1994. 华北陆块北缘及邻区有色金属矿床地质. 北京: 地质出版社. 66~67.
- 毛景文, 李荫清. 2001. 河北省东坪砷化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系. 矿床地质, 20(1): 23~36.
- 邵洁莲. 1988. 金矿找矿矿物学. 武汉: 中国地质大学出版社, 7~45.
- 王可勇, 姚书振, 张均, 吕新彪. 2000. 川西北马脑壳金矿床流体包裹体研究与热液成矿机理探讨. 岩石学报, 16(4): 564~568.
- 王文清, 曲亚军. 2000. 辽东古元古宙金矿地质特征及成矿模式. 辽宁地质, 17(3): 161~172.
- 魏民. 2001. 青城子矿田金、银矿床基本特征及成因探讨. 辽吉地区地质与成矿研讨会论文集, 137~145.
- 薛春纪, 陈毓川, 路远发, 李华芹. 2003. 辽东青城子矿集区金、银成矿时代及地质意义. 矿床地质, 22(2): 177~184.
- 张德会. 1997. 流体的沸腾和混合在热液成矿中的意义. 地球科学进展, 12(6): 546~562.
- 张德会. 1997. 关于成矿流体地球化学研究的几个问题. 地质地球化学, (3): 49~57.
- 张秋生. 1988. 辽东半岛早期地壳与矿床. 北京: 地质出版社, 1~574.
- 张文淮, 张志坚, 伍刚. 1996. 成矿流体及成矿机制. 地学前缘, 3(3~4): 245~252.
- 张文淮, 陈紫英. 1993. 流体包裹体地质学. 武汉: 中国地质大学出版社. 1~246.
- Ibrahim J Barrie and Jacques L R Touret. 1999. Fluid inclusion studies of gold-bearing quartz veins from the Yirisen deposit, Sula Mountains greenstone belt, Masumbiri, Sierra Leone. Ore Geology Reviews, 14: 203~225.
- Read J J, Meinert L D. 1986. Gold-bearing quartz vein mineralization at the Big Harrah Mine, Seward Peninsula, Alaska. Economy Geology, 81: 1760~1774.
- Robert F, Kelly W C. 1987. Ore-forming fluid in Archean gold-bearing quartz vein at the Sigma mine, Abitibi greenstone belt, Quebec, Canada. Economy Geology, 82: 1464~1482.
- Roedder E and Bodnar R J. 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies. Ann. Rev. Earth Planet Science, 8: 263~301.
- Roedder E. 1984. Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, Mineralogical Society of America, 12: 1~644.
- Shepherd T J, RaKin Arl and Alderton D H M. 1985. A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies. Blackie & Son Limited, 1~154.
- Tbrahim M S, Kyser T K. 1991. Fluid inclusion and isotope systematics of the high-T Proterozoic Star Lake Lode gold deposit, Northern Saskatchewan, Canada. Economic Geology, 86: 1468~1490.

Fluid Inclusions in the Gaojiapuzi Silver Deposit, Liaoning Province

DAI Junzhi^{1,2)}, WANG Keyong²⁾, MAO Jingwen¹⁾, YANG Yanchen²⁾

1) *Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

2) *College of Earth Science, Jilin University, Changchun, Jilin, 130061*

Abstract

The Gaojiapuzi silver deposit underwent earlier sedimentation—metamorphism phase and later hydrothermal alternation phase. Detailed microthermometric studies and Laser Raman Spectroscopic analysis of fluid inclusions indicate that there are lots of primary fluid inclusions developed in the hydrothermal alternation phase, whereas hardly any in the sedimentation—metamorphism phase. There are four types of primary fluid inclusions in the quartz—pyrite stage: I, two-phase aqueous, II, three-phase carbon dioxide-bearing, III, aqueous-phase carbon dioxide and IV, liquid only. The ore-forming fluids are of NaCl—H₂O—CO₂ immiscible hydrothermal system. Microthermometric studies indicate that the temperature, salinities and pressure vary from 136 to 359°C, 3.1% to 12.5% NaCl_{eq}, 82.0 to 142.0 MPa, respectively. The fluid inclusions in quartz from independent silver stage are mainly of types I and IV, with lower homogenization temperature (110 to 190°C), lower salinities (2.0% to 5.5% NaCl_{eq}) and lower pressure (8.83 to 15.57 MPa). The ore-forming fluids belong to the NaCl—H₂O fluid system. Comparing with the fluid inclusions of Xinlin pluton nearby, it can be concluded that the ore-forming fluids in the main stage derived from magma. In the ore-forming process, the ore-forming fluids underwent immiscible process to miscible process that brought positive influence on the concentration and precipitation of silver.

Key words: Gaojiapuzi silver deposit; fluid inclusion; ore-forming fluid; fluid immiscibility