文章编号:0258-7106(2012)02-0195-12

小秦岭东桐峪金矿床的流体包裹体研究

吴晓贵¹ 徐九华^{1**} 魏 浩¹ 林龙华¹ 张国瑞¹ 惠德锋² 董华芳²

(1北京科技大学资源工程系,北京 100083;2潼关中金黄金矿业有限责任公司,陕西 潼关 714300)

摘要 东桐峪金矿床位于小秦岭金矿田的中西部,其含金石英脉受韧性剪切构造带的控制。该矿床的构造-成矿过程可划分为4个阶段:II黄铁矿-乳白色石英脉阶段;III灰白色石英-黄铁矿阶段;III石英-多金属硫化物阶段; IV石英-碳酸盐阶段。相对于小秦岭地区的其他金矿床,东桐峪金矿床的流体包裹体研究资料相对缺乏。文章表明, 该矿床内的流体包裹体类型主要为 CO_2 -H₂O包裹体和水溶液包裹体,见少量纯液相 CO_2 包裹体。显微测温表明,I 阶段的构造-成矿流体以中温、富 CO_2 等挥发分为特征,包裹体均一温度为 $221 \sim 392^{\circ}$ 、盐度 $u(NaCl_{eq})为5.5\% \sim$ 7.9% 密度为 $0.84 \sim 0.93$ g/cm³;II阶段和III阶段以 CO_2 -H₂O±CH₄流体为主,包裹体均一温度为 $205 \sim 350^{\circ}$ (II 阶段)和 $224 \sim 271^{\circ}$ (III阶段)盐度 $u(NaCl_{eq})$ 集中于 $5.1\% \sim 7.1\%$ 密度为 $0.83 \sim 0.96$ g/cm³;IV阶段的流体演化 为中-低温、低盐度的盐水溶液体系,包裹体均一温度为 $175 \sim 185^{\circ}$ 。文章对该矿床各成矿阶段的压力进行了估算, I、II、III阶段的流体最小捕获压力分别为 $123 \sim 160$ MPa、160 ~ 170 MPa、170 MPa 左右。

关键词 地球化学 流体包裹体 构造-成矿阶段 捕获压力 冻桐峪金矿 中图分类号:P618.51 文献标志码 A

A study of fluid inclusions of Dongtongyu gold deposit in Xiaoqinling area

WU XiaoGui¹, XU JiuHua¹, WEI Hao¹, LIN LongHua¹, ZHANG GuoRui¹, HUI DeFeng² and DONG HuaFang²

(1 Department of Resource Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;
 2 Tongguan Zhongjin Gold Co. Ltd., Tongguan 714300, Shaanxi, China)

Abstract

The Dongtongyu gold deposit is located in the middle-west part of the Xiaoqinling gold orefield. Gold-bearing quartz veins are controlled by the ductile shear zone. According to the vein types and their crosscutting relationships, mineralization of the Dongtongyu gold deposit can be divided into four stages: I pyrite-white quartz vein stage; II gray quartz-pyrite stage; III quartz-polymetallic sulfides stage; IV quartz-carbonate stage. The main types of fluid inclusions in vein quartz are CO_2 -H₂O fluid inclusions and aqueous fluid inclusions, with small amounts of pure CO₂ fluid inclusions. The fluid inclusions of stage I are characterized by mesothermal CO₂-rich fluids, with homogenization temperatures of fluid inclusions being $221 \sim 392^{\circ}$ C, salinities w (NaCl_{eq}) $5.5\% \sim$ 7.9%, and densities $0.84 \sim 0.93$ g/cm³. The fluid inclusions at stage II and stage III are characterized by CO₂-H₂O ± CH₄ fluids, with homogenization temperatures being $205 \sim 350^{\circ}$ C (stage II) and $224 \sim 271^{\circ}$ C (stage III), salinities w(NaCl_{eq}) $5.1\% \sim 7.1\%$, and densities $0.83 \sim 0.96$ g/cm³. The fluids at the quartz-pyrite-carbonate stage are epithermal-mesothermal low salinity aqueous solutions, with homogenization temperatures being $175 \sim$

^{*} 本文得到全国危机矿山接替资源找矿专项典型矿床及成矿规律总结研究项目(20109903)和国家自然科学基金项目(40972066)资助

第一作者简介 吴晓贵,男,1985年生,硕士研究生,矿产普查与勘探专业。Email:wuxiaogui2008@yahoo.cn

^{**} 通讯作者 徐九华,男,1951年生,教授,博士生导师,矿床学专业。Email:jiuhuaxu@ces.ustb.edu.cn 收稿日期 2011-09-15 改回日期 2012-01-08。许德焕编辑。

185°C. In this paper, the minimum trapping pressure of fluid inclusions are estimated to be $123 \sim 160$ MPa, 160 ~ 170 MPa and 170 MPa for stage I, II and III. The main gold mineralization was related to the post-orogenic extension environment, with the evolution characteristics corresponding to the evolution of shear zones.

Key words: geochemistry, fluid inclusions, structure-mineralizing stages, trapping pressures, Dongtongyu gold deposit

东桐峪金矿位于小秦岭金矿田西部陕西省潼关 县境内,是该矿田内主要的大型金矿之一。小秦岭 金矿田的成矿作用和流体包裹体研究已积累了大量 文献(范宏瑞等 2000 2003;陈衍景等,1992;徐九华 等,1990;1993;Jiang et al.,1999;Xu et al.,1998;祁 进平等,2002),这些文献较详细地记录了流体包裹 体的类型、均一温度、盐度、密度和成矿压力等多种 物理化学参数,主要针对文峪、东闯、杨砦峪等位于 河南省境内的大型金矿床。而对于东桐峪金矿床, 流体研究的资料相对较少,未见有针对该金矿床的 系统的流体包裹体研究成果。另外,随着矿山开采 的进行,深部地质情况不断被揭示,因此,有必要对 东桐峪金矿床,特别是其深部样品,进行细致的石英 脉世代和流体包裹体岩相学的研究。这对正确认识 其构造-成矿流体演化和成矿作用具有重要意义。

1 地质概况

小秦岭金矿田位于豫陕边界的东秦岭北缘地 区,华北克拉通的南缘,东起河南省灵宝,西至陕西 省华县,东西长逾140 km,南北宽70 km。该矿田 南、北以小河断裂和太要断裂为界,构成轴向为EW 向的狭长地带。该矿田内的地层为太古界太华群深 变质岩系。岩浆岩以燕山期花岗岩最为发育,自西 向东有华山、文峪和娘娘山等岩体(胡受奚等,1988; 陈衍景等,1992)。小河断裂南侧主要以蓟县系高山 河组石英岩和第四系沉积物为主。轴向为近EW 向 的复式褶皱以及区域性断裂组成了该矿田的构造格 架(图1)。

东桐峪金矿床是小秦岭金矿田内的大型金矿之 一。矿区内的地层主要是太华群的大月坪组、板石 山组、洞沟组和三关庙组(黎世美等,1996),其岩性 主要为片麻岩类、斜长角闪岩类、石英岩类及前两类 岩石经混合岩化而形成的混合岩类。近 EW 向的大 月坪-金罗斑复背斜控制了矿区内主要含金构造带 的分布,次级断裂、背斜的隆起或倾伏端控制着石英 脉密集区及其展布(图2)。近 EW 向的脆-韧性剪切断裂带是主要的控矿构造,其次为 NNE 向张断裂。

该矿区内断裂构造发育,受后期热液的充填和 交代形成了含金石英脉。矿区内已发现 α (Au)大于 1.0×10^{-6} 的矿脉近 40 条,其中绝大多数呈 EW 向 和 NE 向,主矿脉为 q8、q12,其走向长度大于 1 km。 q8 矿脉的走向为 60~90°,倾向 SW,长度为4 430 m (在该矿区内长1 900 m) q12 矿脉的走向为 50°,倾 向 SE,长度为1 546 m。q8 与 q12 矿脉在该矿区中 部呈"X"相交。矿脉由石英脉和糜棱岩组成。石英 脉在构造带内断续分布,长 7~280 m,厚 0.05~3.0 m。在含矿构造带内,金矿体沿走向和倾向具有膨 胀、收缩、尖灭、再现以及矿化中心近等间距分布的 特点。q8 脉矿体还具有明显侧伏规律。

图岩蚀变主要为硅化、绢云母化和黄铁矿化,其次为绿泥石化、碳酸盐化等。硅化、黄铁矿化与金矿化关系最为密切,其蚀变分带特征与文峪-东闯金矿(徐九华等,1990)相似。

矿石的主要金属矿物为黄铁矿、方铅矿、黄铜 矿、自然金、银金矿,次为闪锌矿、磁铁矿、磁黄铁矿、 辉铜矿、斑铜矿、白钨矿、黑钨矿等;非金属矿物主要 为石英,次为绿泥石、黑云母、绢云母、碳酸盐类矿物 等。金主要呈包含金、裂隙金及晶隙金赋存于黄铁 矿、石英、铁白云石及其他硫化物中(王亨治,1987; 范宏瑞等,2003)。

2 构造-成矿阶段

根据野外地质特征、穿插关系,结合手标本和显 微镜下研究,可将东桐峪金矿床的构造-成矿过程划 分为4个阶段。

Ⅰ 黄铁矿-乳白色石英阶段 早期韧性剪切作 用使含矿断裂带的主断裂呈波状起伏,并出现近等 间距的局部引张空间,形成了乳白色石英脉主体 (QI)图3A),含少量浸染状黄铁矿(PyI),而在挤 压强烈的地段则形成了糜棱岩等构造岩,被后期形



图 1 小秦岭地区区域地质及金矿床分布略图(据王亨治,1987资料改绘)

1—第四系;2—古近系;3—蓟县系高山河组石英岩;4—太华群桃峪组黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩;5—太华群秦仓口组黑云斜长片麻岩;6—太华群三关庙组黑云斜长片麻岩夹斜长角闪岩;7—太华群洞沟组黑云角闪变粒岩;8—太华群板石山组黑云变粒岩;9—太华群大月坪组斜长角闪岩;10—白垩纪黑云母花岗岩;11—晚元古代中粒二长花岗岩;12—中元古代片麻状花岗岩;13—花岗伟晶岩;14—断裂:F1—太要断裂,F2—小河断裂;15—金矿床:T—东桐峪金矿,W—文峪金矿,D—东闯金矿,J—金硐岔金矿,Y—杨砦峪金矿Fig. 1 Sketch geological map of Xiaoqinling area showing distribution of gold deposits (modified after Wang,1987)
1—Quaternary;2—Eocene;3—Quartzite of Gaoshanhe Formation, Jixian System;4—Biotite plagiogneiss with plagioclase amphibolite of Taoyu Formation, Archean Taihua Group;5—Biotite plagiogneiss of Qincangkou Formation, Archean Taihua Group;6—Biotite plagiogneiss with plagioclase amphibolite of Sanguanmiao Formation, Archean Taihua Group;9—Plagioclase amphibolite of Dayueping Formation, Archean Taihua Group;10—Cretaceous biotite granite;11—Late Proterozoic medium-grained monzogranite;12—Middle-Proterozoic gneissic granite; 13—Granite-pegmatite;14—Fault:F1—Taiyao fault,F2—Xiaohe fault;15—Gold deposit:T—Dongtongyu gold deposit,W—Wenyu gold

deposit , D—Dongchuang gold deposit , J—Jindongcha gold deposit , Y—Yangzhaiyu gold deposit



图 2 东桐峪金矿区地质简图(据潼关中金黄金矿业有限责任公司-东桐峪金矿区 1:10 000 地形地质图改绘) 1—第四系;2—太华群三关庙组黑云斜长角闪片麻岩;3—太华群洞沟组角闪黑云斜长片麻岩;4—太华群板石山组石英岩; 5—太华群大月坪组混合岩;6—含金石英脉及其编号

Fig. 2 Geological sketch map of the Dongtongyu gold ore district

(modified after 1:10 000 geological map by Dongtongyu Gold Orefield, Tongguan China Gold Mining Co., Ltd.) 1—Quaternary 2—Biotite plagioclase hornblende gneiss of Sanguanmiao Formation, Archean Taihua Group; 3—Hornblende biotite plagiogneiss of Donggou Formation, Archean Taihua Group; 4—Quartzite of Banshishan Formation, Archean Taihua Group; 5—Migmatite of Dayueping Formation, Archean Taihua Group; 6—Gold-bearing quartz veins and its serial number



图 3 东桐峪金矿含金石英脉特征

 Λ. 含金石荚脉,Ⅲ阶段黄铜矿(Cp)胶结早期白色石荚脉(QI),东桐峪 q531 脉,1300 m 东沿; B. Ⅲ阶段黄铜矿细脉(Cp)及Ⅲ阶段黄铁矿脉
 (PyⅡ)沿|阶段石荚脉(QI)底板充填,东桐峪 q8501 脉,600 m 中段; C. Ⅲ阶段方铅矿(Gn)网脉-细脉沿|阶段石荚(QI)充填,并见围岩 角砾,东桐峪 q8501 脉,600 m 中段; D. Ⅲ阶段闪锌矿(Sp)网脉-细脉沿|阶段石荚(QI)充填,东桐峪 q8501 脉,600 m 中段

Fig. 3 Characteristic of gold-bearing quartz veins in the Dongtongyu gold deposit

A. Gold-bearing quartz veins, stage III chalcopyrite(Cp) cementing white quartz vein (QI) of early stage, q531 vein in Dongtongyu, at 1 300 m level; B. Stage III chalcopyrite (Cp) stringer and stage II pyrite (PyII) stockwork filling the lower part of stage | quartz vein (QI), q8501 vein in Dongtongyu, at 600 m level; C. Stage III galena (Gn) stockwork-stringer filling stage | quartz vein (QI), wall-rock breccias observed, q8501 vein in Dongtongyu, at 600 m level; D. Stage III sphalerite (Sp) stockwork-stringer filling stage | quartz vein (QI), q8501 vein in Dongtongyu, at 600 m level;

成的黄铜矿(Cp)等充填胶结。该阶段,在围岩中产 生了强烈的绢英岩化和较弱的金矿化。

Ⅱ 灰白色石英-黄铁矿阶段 该阶段, 韧性变形 向脆性转化, 早阶段形成的乳白色石英脉产生微裂 隙, 伴随有较强烈的黄铁矿化、硅化和金矿化。该阶 段主要形成粗-细粒黄铁矿脉(PyⅡ), 充填在 I 阶段 石英的裂隙中, 或直接充填在围岩裂隙中, 与 Ⅱ 阶段 黄铁矿伴生的有少量灰白色石英(QⅡ), PyⅡ 在石 英脉中呈细脉状(图 3B), 有时见石英脉内 PyⅡ 穿入 围岩中。此阶段含金较富, 为金的主要矿化阶段之 一。

Ⅲ石英-多金属硫化物阶段 此阶段是韧脆性

变形的中-晚期,QI中脆性裂隙更为发育。微裂隙 内产出较多的细脉状-网脉状黄铜矿、方铅矿等硫化 物(图 3C),有时见闪锌矿(图 3D)。Ⅱ阶段的 PyⅡ 由于构造应力的持续作用也受到形变而碎裂,团块 状的 PyⅡ因其脆性较大,比QI及与其共生的 Py I 更易碎裂,因此,更多地被后期形成的矿物(黄铜矿、 闪锌矿、磁黄铁矿、方铅矿)充填胶结。在该阶段晚 期,亦生成透明度较好的石英(QⅢ),有时在晶洞中 出现。Ⅲ阶段的含金性仅次于Ⅱ阶段。

Ⅳ 石英-碳酸盐阶段 该阶段主要形成细粒石 英和方解石,呈细脉状穿插早期矿物,是剪切作用晚 期的产物,也是该区成矿晚期的产物。该阶段基本 不含矿。

3 流体包裹体研究

3.1 包裹体岩相学

本次工作主要对东桐峪矿床 V531、q8、q12 号脉 各成矿阶段石英中的流体包裹体进行了研究,镜下 观察包裹体片 50 余片,选取了 18 片有代表性的样 品做了显微测温实验,选取了 6 件合适的样品进行 了激光拉曼探针分析。

根据常温下包裹体的相态和成分,可将本次研 究的流体包裹体分为以下几种类型。

(1) CO_2 -H₂O 包裹体 该类包裹体是东桐峪矿 床石英脉中最主要的类型,在室温下表现为两相或 三相($L_{H_2O} + L_{CO_2} \pm V_{CO_2}$),呈椭圆形或各种不规则形 态,大小一般集中于 4~15 μ m, CO₂ 相气相分数变化 极大,从 20%到 90%均有,其中,有些 CO₂ 气相分数 较高的包裹体在片子中已破裂,还有很多在显微测 温过程中爆裂。

(2)纯 L_{CO2}包裹体 此类包裹体颜色较深,为纯液相 CO2 包裹体,一般为椭圆形,大小一般集中于4~ 10 µm 较少产出,主要在[[、]]阶段的石英中出现。

(3)水溶液包裹体 此类包裹体在室温下表现 为两相(L_{H₂O}±V_{H₂O}),气相分数一般小于 5%,呈不 规则状、扁平状,多小于 7 μm,主要集中在 IV 阶段的 石英中。

不同成矿阶段的包裹体的特征有一定的差别, 具体表现为:

(1) I 阶段石英中的包裹体数量多,个体较大, 分布较均匀,以 CO₂-H₂O包裹体为主(图 4a)。可见 CO₂-H₂O包裹体与水溶液包裹体共存于同一视域, 并且,气液包裹体的气相分数变化大(图 4b),这可能 是由于成矿流体进入断裂扩容部位后发生不混溶, 捕获了 CO₂ 比例不同的流体造成的(卢焕章等, 2004)。高温高压下,CO₂-H₂O-NaCl体系为均匀的 流体相,成矿流体进入断裂扩容部位后,压力降低, 体积增大,造成富 CO₂ 的气相与富水的液相分离,它 们可能同时被捕获,这就形成了气相分数相差十分 悬殊的包裹体的共存。此外,该阶段常见包裹体的 后生变化(图 4c),一些原生的富 CO₂包裹体已经被 破坏(图 4d)表明在 I 阶段石英(主体石英脉)形成 之后又经历了构造抬升作用,造成包裹体的内、外压

差太大而发生自爆。

(2) Ⅱ阶段石英中常见 CO₂-H₂O 包裹体,亦可 见少量纯 L_{CO2}包裹体。CO₂-H₂O 包裹体的 CO₂ 相 占整个包裹体的比例多大于 50%。

(3)Ⅲ阶段石英中也以 CO₂-H₂O 包裹体为主, 偶见纯 L_{CO₂}包裹体。CO₂-H₂O 包裹体的 CO₂ 相比 例也较大,也可大于 50%。此外,在该阶段中,与金 属硫化物相邻的石英边部被净化,如被黄铜矿包围 的石英内,包裹体的分布变得不均匀,个体大的包裹 体零散分布,个体小的包裹体成群集中分布(图4e)。

(4) Ⅷ阶段石英中以水溶液包裹体(图 4f)为 主 ,包裹体一般较小 ,小于 3 μm ,零散分布。

3.2 显微测温研究

流体包裹体的显微测温在北京科技大学资源系 实验室完成。测试仪器为 Linkam THMS 600 型冷 热台,其工作温度范围为 – 196~600℃。均一温度 测试精度为 ± 1 ℃ CO_2 部分均一及笼形物熔化温度 测试精度为 ± 0.1 ℃; CO_2 三相点的测试精度为 ± 1 ℃。

Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ成矿阶段内最主要的流体包裹体类型 是原生 CO₂-H₂O 流体包裹体。在升温过程中,该类 包裹体大多数在完全均一前就发生破裂,尤其是体 积较大且 CO₂ 相气相分数大于 30% 的包裹体。获 得了部分完全均一温度数据,这些包裹体最后都均 一到 H₂O 相。

Ⅰ阶段石英内 CO₂-H₂O 包裹体的均一温度变 化较大 ,为 221~392℃ ,集中于 230~330℃ ,但同一 样品内不同包裹体的均一温度变化不大。这可能是 流体发生了不混溶 ,导致被捕获的包裹体的 L_{CO.}/ L_{H.O}比值差别较大。 [] 阶段包裹体均一温度的变化 也很大,为205~350℃,集中于230~290℃。Ⅲ阶 段的包裹体在均一前大部分都已经爆裂,仅测得 TY052 号样品的 3 个有效均一温度 224℃、230℃、 271℃ 较Ⅱ阶段的略低。Ⅳ阶段的包裹体比较小, 本次研究选取了 TY036B 号样品中的 2 个原生包裹 体,其均一温度为175℃和185℃,明显低于前3个 阶段(表1),代表了矿液活动的尾声。包裹体均一温 度的数据统计结果见图 5。 [阶段石英内 CO₂-H₂O 包裹体中 CO₂相的固相融化温度为 - 82.1 ~ -57.3℃ CO₂相部分均一到液相的温度为 8.2~ 31.7℃; II 阶段石英内 CO₂-H₂O 包裹体中 CO₂ 相的 初融温度为-60.3~-56.7℃,CO2相部分均一到



图 4 东桐峪金矿各种构造石英脉中流体包裹体特征

a. I阶段富 CO₂相原生规则状包裹体,TY002 号样品;b. 气相分数相差较大的包裹体共存于一个视域,TY010 号样品;c. QI石英中富 CO₂ 三相原生包裹体,其形态在后期发生了变化,TY010 号样品;d. QI 变形石英中破坏的和残留的原生 L_{CO2}-L_{H2O}包裹体,次生的 L_{CO2}-L_{H2O}包裹体,TY005 号样品;e. 被黄铜矿包围的 II、III阶段石英边缘近黄铜矿处,包裹体被净化,TY028 号样品;f. QIV石英中的水溶液包 裹体,TY036B 号样品

Fig. 4 Characteristics of fluid inclusions in various quartz veins from the Dongtongyu gold deposit a. Primary regular CO₂-rich inclusions at stage I , sample TY002 ; b. Inclusions with remarkable difference of gas/liquid ratios coexistent in a vision , sample TY010 ; c. Primary CO₂-rich three-phase inclusion in QI quartz , sample TY010 ; d. Damaged and residual primary $L_{CO_2}-L_{H_2O}$ inclusions and secondary $L_{CO_2}-L_{H_2O}$ inclusions in variant QI quartz , sample TY005 ; e. Quartz of stage [[$\$ []] surrounded by chalcopyrite , inclusions being purified , sample TY028 ; f. Aqueous inclusions in QI quartz , sample TY036B

液相的温度为 $1.1 \sim 28.5$ [°] ; III 阶段石英内 CO₂-H₂O 包裹体中 CO₂ 相的初融温度为 $-60 \sim -58.5$ [°] , CO₂ 相部分均一到液相的温度为 $7.1 \sim 24.1$ [°] 。据 此计算出 I、II、III 阶段内包裹体中 CH₄ 的摩尔分数 (x_{CH_4})分别为 $0.04 \sim 0.11$ 、 $0.05 \sim 0.07$ 和 $0.04 \sim$ 0.06 (Thiery et al. ,1994)。由于包裹体中含 CH₄ 较 少 因此,在计算包裹体的流体密度时可予以忽略。

3.3 流体盐度和密度

根据 Collins(1979)的 CO2 笼形物熔化温度与盐

度关系表求得了富 CO₂ 包裹体的盐度。根据刘斌等 (1999)以及 Shepherd 等(1985)的 CO₂ 包裹体均一 温度与 CO₂ 相密度关系图求出了流体密度。

I 阶段包裹体笼形物的熔化温度为 0.8 ~7.8℃,主要集中于 5.7 ~ 7.1℃;计算得到该阶段包 裹体的盐度 u(NaCl_{eq})为 4.3% ~ 14.6%,主要集中 于 5.5% ~ 7.9%,属于低盐度流体;流体密度为 0.84 ~ 0.93 g/cm³。

Ⅲ阶段流体包裹体笼形物的熔化温度为2.4~

					表 1	东桐峪金矿流体包裹	長体显微测温结果				
			Tabl	le 1]	Thermometi	ric result of fluid inclusi	ion in the Dongton	zyu gold deposit			
样品号	采样位置	样品特征	阶段	类型	$\pm \Lambda/\mu m$	$t_{\rm m}({ m CO}_2)/{ m C}$	$t_{c}(\mathrm{CO}_{2}\!\cdot\!\mathrm{H}_{2}\mathrm{O})/\mathrm{^{*}C}$	$t_{\rm h}({ m CO}_2)/{ m °C}$	$t_{ m h}/{}^{\circ}{ m C}$	$w(\mathrm{NaCl}_{\mathrm{eq}})/\%$	$\rho/(g/cm^3)$
TY002	1300 m	QII 穿插 Q	14	́Ч~к	6.8~15 9.3	-59~-57.3(8)	5.8~7.6(3)	17.5~25.9(13)		4.6~7.7 (3)	
TY005	1300 m	含Cp的Ql	=	3 1	7.27 S	$-60.3 \sim -58.6(12)$	2.4~5.3(4)	23.2~28.5(8)	$205 \sim 268(4)$ 184.5(1)	8.5~12.7(4)	$0.83 \sim 0.91$
TY008	1300 m	QI	_	1	5~16	$-60.4 \sim -58.8(11)$	0.8(1)	$15.3 \sim 31(10)$	362(1)	14.6(1)	
TY010	1300 m	QII穿插 Q	—	3 1	$8 \sim 57$ $9 \sim 16$	-61.1 - 57.6(10)	4.1 - 6.5(6)	$27.9 \sim 31.6(10)$	276(1) 115~305(3)	$6.5 \sim 10.3(6)$	0.87
TY012	1016 m	Q丨中有晶簇状 Q II	—	1 3	4.5~15 7.8	$-82.1 \sim -57, 5(11)$	4.3~6.4(2)	11.3~30.6(12)	$260 \sim 310(4)$ 205(1)	$6.7 \sim 10.0(2)$	0.87
TY015	$1016 \mathrm{~m}$	含 Py 的 Q I	-	1	$6 \sim 15$	$-75.9 \sim -57.5(10)$	5.7(1)	25.4~30.6(8)	$219 \sim 360(6)$	7.9(1)	$0.84 {\sim} 0.93$
TY017A	550 m	含少量 Py 的 Q	—	3 1	$7.8 \sim 16$ $7.8 \sim 14$	$-59.2 \sim -59.3(3)$		8.9~27(9)	210 - 340(4) 210 - 250(2)		0.91
TY020	550 m	Q 被含 Cp 的 QIII穿插	—	1 3	$13{\sim}24$ 19.78	$-60.5 \sim -58.8(8)$	- AC	$10 \sim 24.8(7)$	202(1) 190(1)		
TY022	550 m	方解石产于 Q1中	.—	1	12 - 29	$-63.6 \sim -57.9(9)$	6.7~7.8(2)	18.2~26.9(10)	250~271(2)	4.3~6.2(2)	0.87
TY028	550 m	含Qp的QIII穿插QI	-	-	7~15	$-58.8 \sim -58.7(6)$		22, 8~23, 5(4)	250(1)		

第31卷 第2期

201

						矿	Æ	末	地		质						
Jont. Table 1	$\rho/(g/cm^3)$			0.92							0.92		0.96	0.92 - 0.96		本,类型2为纯	
U	$w(NaCl_{eq})/\%$										6.5~7.4(2)		4.3~7.9(13)	5.3~11.0(13)		为 CO2-H2O 包裹(
	$t_{\rm h}/C$	238.2~363.4(8)	$122 \sim 131(4)$	221~336(6)	175.2~185(2)	232~397.2(8)	$142 \! \sim \! 189(7)$	300~350(2)		$202 \sim 281.3(3)$	237~321(3)	237(1)	230~263(5)	224~271(3)		[英。包裹体类型1	
	$t_{\rm h}({\rm CO}_2)/{\rm C}$	8.9~9.5(4)		27.4 - 29(5)				1.1 - 10.5(7)	8.2 - 27(10)		$21.5 \sim 31.7(10)$		13.2 - 23.2(13)	7.1 - 24.1(15)	8.8~13.9(3)	i荚,QШ为Ⅲ阶段石	
	$t_c(\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O})/\text{C}$									C	6~6.5(2)		5.7~7.8(13)	3.7~7.2(13)	0)	₹石英,QⅡ为Ⅱ阶段石	
	$t_{\rm m}({ m CO}_2)/{ m C}$	$-57.9 \sim -57.6(4)$		$-58.2 \sim -57.8(3)$			EN C	$-60 \sim -57.7(12)$	- 59.3~ - 59.2(7)		- 59.5~ - 59.4(3)		$-58.9 \sim -56.7(10)$	$-60 \sim -58.5(15)$		为方铅矿,Q丨为丨阶段	
	大小/µm	2.6~7	2.6~6	6~7	$4\!\sim\!10$	$4 \sim 8.3$	3.2~7.2	$4 \sim 7$	$3.2 \sim 9.2$	$4 \sim 6.3$	$4 \sim 9.3$	4.1	5.2 - 12	$4 \sim 15$	3~7	为黄铜矿, Gn	
~	类型	5	e	I	Э	1	З	1	1	Э	1	ю	1	Г	2	ĵ ^r .Cp	
1	阶段	-		-	N	-	_	Π	-	-	-	_	Π	Ξ	∃	为黄铁	
	样品特征	早期乳白色石英脉		報曲望慶寺方法母	吃灼候段鱼生犬鼻	日田의 八名 万姓母	于拗乱口巴石关郧	烟灰色透镜状 QII	鱼 白在 万井時	11 L L L X W	医医	M MM LA	烟灰色 QⅡ	EC ない シック		验测定包裹体的数目: Py K溶液包裹体。	
	采样位置	910 m		010	111 016	010	m 016	$910 \mathrm{~m}$	010		042	040 m	640 m	000	U10 III 000	内的数字为实体,类型3为力	
	各門封	TY032		TYDORD		A FOOTT	V/COT T	TY038	TV020	CCUL L	21022	C401 1	TY048	02021	7001 1	注: 括号	in the

续表 1





Fig. 5 Histograms of homogenization temperature for fluid inclusions in I and II stage quartz vein from the Dongtongyu gold deposit

7.8℃,主要集中于 6.8~7.2℃;计算出此阶段的盐 度 u(NaCl_{eq})为 4.3%~12.7%,主要集中于 5.3% ~5.9%,流体密度为 0.83~0.96 g/cm³。

Ⅲ阶段所测得的有效数据比较少,流体包裹体 笼形物的熔化温度为 3.7~7.2℃,主要集中于 6.2 ~6.9℃;计算出该阶段的盐度 w(NaCleq)为 5.3% ~11.0%,主要集中于 5.1%~7.1%;流体密度为 0.92~0.96 g/cm³。

根据流体包裹体均一温度与盐度相关关系图 (图 6A)可知,包裹体均一温度与盐度呈明显的负相 关关系,同时,水溶液包裹体和富 CO₂包裹体共生的 事实,都说明该流体在被捕获时已发生了明显的相 分离作用,其结果是,挥发性组分分离逸出,残液的 浓度和盐度增大,富挥发性组分被捕获而形成了富 气相包裹体。

包裹体中 CO₂ 部分的密度是依据 Shepherd 等 (1985)的 CO₂ 包裹体均一温度与 CO₂ 相密度关系 图解计算出的 ,因 CO₂ 包裹体部分均一为液相 ,故求 密度时采用临界点上部的液相密度曲线。计算结果 表明 , I 阶段 CO₂ 的密度分布范围较大 ,为 0.47 ~ 0.89 g/cm³ ,主要集中于 0.65 ~ 0.73 g/cm³ ,Ⅲ 阶段 CO₂ 的密度主要集中于 0.71 ~ 0.83 g/cm³ ,Ⅲ 阶段 CO₂ 的密度为 0.83 ~ 0.89 g/cm³ 。 3 个阶段 CO₂ 的 密度逐渐升高(图 6B)。



图 6 东桐峪金矿流体包裹体均一温度与盐度相关关系图(A)及 CO₂ 密度直方图(B)

Fig. 6 Correlation between homogenization temperature and salinity (A) and histogram of ρ_{CO} (B) of fluid inclusions in the Dongtongyu gold deposit

3.4 激光拉曼探针测试

为定性了解 CO₂ 及其他挥发分的特点,在北京 大学地球与空间科学学院地质教学实验中心进行了 激光拉曼探针分析。测试仪器为英国 Renishaw 公 司生产的 RM-1000 型拉曼光谱仪;测试条件为 514 nm Ar⁺激光器,计数时间 10 s,分辨率 $1 \sim 2$ cm⁻¹, 激光束斑 $1 \sim 2$ μ m。

6 件代表性样品主要包括 [、]]、 [] 阶段的 CO₂-H₂O 包裹体 测试结果如图 7 所示。

I 阶段样品(TY002、TY008、TY010、TY028)中 的 CO₂-H₂O 包裹体的 CO₂ 相主要是 CO₂(图 7A、 C),同时含有 CH₄(图 7A),与测得的 CO₂ 相的初熔 温度相符(Van den Kerkhof et al. 2001)。

Ⅱ阶段样品(TY005)中 CO₂-H₂O 包裹体(气相 分数极大,仅见包裹体边缘有水膜)的 CO₂ 相也含有 一定量的 CH₄(图 7B)。

对Ⅲ阶段样品(TY052),选取了黄铜矿旁边的

 CO_2 -H₂O 包裹体 ,测得其气相中有丰富的 CH₄ ,同时 还见微弱的 H₂O 峰 ,液相中也含有一定量得 CO₂(图 7D)。

激光拉曼测试结果表明,东桐峪矿区 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ 阶段石英脉中的 CO₂-H₂O 包裹体均含有比较丰富 的 CH₄。

4 讨 论

4.1 成矿压力及深度

根据上述测温及盐度计算结果,可采用 CO₂ 摩尔分数法计算出包裹体最小捕获压力。首先,根据 CO₂-H₂O 包裹体的 CO₂ 相部分均一温度和包裹体 完全均一温度,结合 Diamond 2001)的 CO₂-H₂O 体 系的 V-X 相图,计算出 CO₂ 的摩尔分数,然后,利用 Takenouchi 等(1964)的 *p*-X 相图计算出包裹体最小 捕获压力值。



图 7 东桐峪金矿流体包裹体拉曼测试谱图

A. 1阶段 CO₂-H₂O 包裹体 ,TY002 号样品 ; B. Ⅱ阶段 CO₂-H₂O 包裹体 ,TY005 号样品 ; C. Ⅰ阶段 CO₂-H₂O 包裹体 ,TY010 号样品 ; D. Ⅲ阶段 CO₂-H₂O 包裹体 ,TY052 号样品

Fig. 7 Laser Raman analysis of fluid inclusions in the Dongtongyu gold deposit

A. CO2-H2O fluid inclusions of I stage , sample TY002 ; B. CO2-H2O fluid inclusions of II stage , sample TY005 ;

C. CO2-H2O fluid inclusions of I stage , sample TY010 ; D. CO2-H2O fluid inclusions of III stage , sample TY052

0	n	5
4	υ	J

表 2 东桐峪金矿流体包裹体最小捕获压力计算

Table 2 Minimum trapping pressure of fluid inclusions in the Dongtongyu gold deposit

廿모모	成矿胶码	坛宣	胺早	$t \in \operatorname{CO}_2 \cdot \operatorname{H}_2\operatorname{O}_2$			re (NaCl _{eq})	p/1	MPa
作中写	7X1V 191752	你同	脉写	/℃	$t_{\rm Ik}$ CO ₂ J C	$t_{\rm h}$	/%	CO ₂ 摩尔分数法	Schwartz 相图法
TY017A	Ι	550 m	q14	6.6	27	240	6.37	109	140
TY022	Ι	550 m	q14	6.7	20	250	6.20	140	160
TY028	Ι	550 m	q 8	7.8	23.4	250	4.26	135	145
TY036B	Ι	910 m	q 8	—	28.5	285	—	92	123
TY048	П	640 m	q640	7.6	17.1	263	4.62	140	170
				6.9	15.2	242	5.86	135	160
TY052	Ш	600 m	q8501	6.4	18.2	271	6.71	118	170

计算结果(表 2)表明,东桐峪金矿 q14 脉 550 m 标高样品内 I 阶段流体的最小捕获压力为 109~140 MPa q8 脉 550 m 标高样品内 I 阶段流体的最小捕 获压力为 135 MPa 左右 q8 脉 910 m 标高样品内 I 阶段流体的最小捕获压力为 92 MPa 左右 ;q640 脉 640 m 标高样品内 II 阶段流体的最小捕获压力为 135~140 MPa ;q8501 脉 600 m 标高样品内 II 阶段 流体的最小捕获压力为 118 MPa 左右。

此外 利用 Schwartz (1989)提供的 ra(NaCleg)为 6%的 CO₂-H₂O-NaCl 包裹体的 x_{CO_3} 、 v_{CO_3} 、 ρ 和 t_h 关 系图,以及该类包裹体的 x_{CO_x} 、 v_{CO_y} 和p关系图,笔 者选取 u(NaClea)为 6% 左右的包裹体来计算包裹 体的最小捕获压力,计算所得之 ∐ 阶段~ Ⅲ 阶段流 体最小捕获压力都比据 CO, 摩尔分数法计算的压力 高(n×10)MPa(表2),东桐峪 q14 脉 550 m 标高样 品内 I 阶段流体的最小捕获压力为 $140 \sim 160$ MPa, q8 脉 550 m 标高样品内 [阶段流体的最小捕获压力 为 145 MPa 左右 q8 脉 910 m 标高样品内 I 阶段流 体的最小捕获压力为 123 MPa 左右 ;q640 脉 640 m 标高样品内 Ⅲ阶段流体的最小捕获压力为 160~170 MPa ;q8501 脉 600 m 标高样品内Ⅲ阶段流体的最小 捕获压力为 170 MPa 左右(表 2)。由于成矿流体的 u(NaCleg)为6%左右,因此,采用Schwarta(1989)的 相图计算出的结果比较接近真实值。

由于东桐峪金矿是韧性剪切带构造控矿,且采 样点石英脉的倾角较缓,都小于45°,因此,采用静岩 压力来估算成矿的深度(Roedder et al.,1980)。根 据 Schwart (1989)的相图计算出的包裹体最小捕获 压力,东桐峪金矿床的最小成矿深度为4.6~6.3 km,与李绍儒等(1997)计算出的小秦岭东闯金矿的 成矿深度(4.8~6.1 km)相近,属中浅成矿床。

4.2 流体演化

东桐峪金矿含金脉石英中记录了多期流体的成

矿作用,早期的热液活动以形成乳白色石英大脉为 特征。初始成矿流体属 H_2O-CO_2 -NaCl 体系,流体最 低捕获温度为 221 ~ 392℃,密度为 0.84 ~ 0.93 g/cm³,是一种低盐度〔w(NaCl_{eq})为 5.5% ~ 7.9% \富 CO₂ 的流体,同时含有 CH₄ 等挥发分。 这种流体在早期韧性剪切-硅化阶段被 [阶段石英 所捕获。

_在Ⅱ、Ⅲ成矿阶段 ,早期的乳白色脉石英受到剪 切变形 富含 CO2 的流体沿构造薄弱带(石英脉壁附 近)迁移、交代,热液中硅质和黄铁矿等沉淀形成了 条带状和块状石英-黄铁矿脉体 ;随后的热液活动再 次叠加在乳白色石英脉之上,形成了网脉和细脉状 石英-多金属硫化物。剪切带内早期形成的石英脉 (QⅠ)产生裂隙,被烟灰色(QⅡ)或灰白色石英 (QⅢ)和硫化物填充。在这些石英中捕获了一些原 生 CO₂-H₂O 包裹体。其中,Ⅲ 阶段流体最低捕获温 度为 205~350℃, ra(NaCleg)为 5.3%~5.9%, 密度 为 0.83~0.96 g/cm³;Ⅲ 阶段流体最低捕获温度为 224~271℃,w(NaCleg)为5.1%~7.1%,密度为 0.92~0.96 g/cm3。由于强烈的剪切变形,早期石 英颗粒(Q1) 被变形成透镜状、眼球状。 一些原生包 裹体受到破坏 同时 形成了一些沿裂隙分布的次生 包裹体。 随着温度和压力的降低 ,富 CO, 的均质流 体进入到 CO2 与 H2O 的不混溶区 流体发生了广泛 而强烈的不混溶,分离成低密度的富 CO₂ 流体和高 密度的富 H₂O 流体,这两种流体以不同比例被捕获 而形成了混合型流体包裹体组合。

在Ⅳ成矿阶段,即碰撞作用的末期,主要表现为 石英的脆性变形,由于剪切构造带的抬升,流体最低 捕获温度降低(175.2~185℃),CO₂ 含量下降;另 外,由于碳酸盐的大量沉淀,也使此阶段 CO₂ 含量较 少,因此,水溶液包裹体在该阶段较为常见。

5 结 论

(1)东桐峪金矿床的构造-成矿过程可分为4个 阶段:黄铁矿-乳白色石英阶段(I);灰白色石英-黄 铁矿阶段(I);石英-多金属硫化物阶段(II);石英-碳酸盐阶段(IV)。I阶段发育丰富的CO₂-H₂O包 裹体,还有较少的 L_{CO_2} 包裹体;II、III阶段也发育 $CO₂-H₂O包裹体和<math>L_{CO_2}$ 包裹体;IV阶段以盐水包裹 体为主,CO₂含量较少。

(2)东桐峪金矿床内 CO₂-H₂O 包裹体的均一温 度主要集中于 205~392℃。从成矿早期的 I 阶段到 中-晚期的 II、III 阶段,包裹体的均一温度逐渐降低, ∞(NaCl_{eq})变化范围主要为 5%~8%,其中,I 阶段 流体的盐度最高,而主要成矿阶段流体的盐度则低 于 I 阶段。

(3)通过 Schwartz 相图法,计算得到东桐峪金 矿床流体的最小捕获压力,主要集中于 123~170 MPa 采用静岩压力估算的最小成矿深度为 4.6~ 6.3 km。

志 谢 野外工作得到东桐峪金矿地质技术人员的支持,还得到了中国地质大学(北京)涨德会教授、余心起教授的指教,以及中国地质大学(武汉)谭俊博士的帮助,在此一并志谢。

参考文献/References

- 陈衍景,富士谷.1992.豫西金矿成矿规律[M].北京:地震出版社. 234页.
- 范宏瑞,谢奕汉,赵 瑞,王英兰、2000.小秦岭含金石英脉复式成因的流体包裹体证据J]科学通报,45(5)537-542.
- 范宏瑞,谢奕汉,濯明国,金成伟.2003.豫陕小秦岭脉状金矿床三期 流体运移成矿作用[J].岩石学报,19(2):260-266.
- 胡受奚 林潜龙.1988. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿[M]南 京 南京大学出版社.558页.
- 李绍儒 /李强之 /李文良. 1997. 小秦岭东闯铅、金矿床流体包裹体地 球化学特征 J]. 黄金地质 X(4) 21-28.
- 黎世美 ,瞿伦全 ,苏振邦 ,黄建军 ,王小生 ,岳铮生. 1996. 小秦岭金矿

地质和成矿预测[M].北京 地质出版社.250页.

- 刘 斌 沈 昆.1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京:地质出版社. 294 页.
- 卢焕章 范宏瑞,倪 培,欧光习,沈 昆,张文淮.2004.流体包裹体 [M].北京,科学出版社.487页.
- 王亨治.1987.小秦岭金矿田地质特征及矿床成因[J].矿床地质,6 (1)57-67.
- 徐九华,倪 文,赵彦生.1990.豫西小秦岭东闯金矿床围岩蚀变研究 [J].地质找矿论丛, *5*(1):18-32.
- 徐九华,何知礼,申世亮,杨振林,杜加锋.1993.小秦岭文峪-东闯金矿 床稳定同位素地球化学及矿液矿质来源[J].地质找矿论丛,8 (2)87-100.
- Collins P L F. 1979. Gas hydrates in CO₂-bearing fluid inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity[J]. Econ. Geol. ,74: 1435-1444.
- Diamond L W. 2001. Review of the systematics of CO₂-H₂O fluid inclusions J]. Lithos 55:69-99.
- Jiang N Xu J H and Song M X. 1999. Fluid inclusion characteristics of mesothermal gold deposits in the Xiaoqinling district , Shaanxi and Henan provinces ,People 's Republic of China[J]. Mineralium Deposita 34 :150-162.
- Roedder E and Bodnar R J. 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies [J]. Ann. Rev. Earth Plannet Sci. , 8 :263-301.
- Schwartz M O. 1989. Determining phase volumes of mixed CO₂-H₂O inclusion using microthermometric measurements J J. Mineralium Deposita 24 '43-47.
- Shepherd T J ,Rankin A H and Alderton D H M. 1985. A practial guide to fluid inclusion studies J] Blackie Chapman & Hall. 239p.
- Takenouchi S and Kennedy G C. 1964. The binary system H₂O-CO₂ at high temperatures and pressures J J. Am. J. Sci. , 262 :1055-1074.
- Thiery R ,Vidal J and Dubessy J. 1994. Phase equilibria modeling applied to fluid inclusions : Liquid-vapour equilibria and calculation of the molar CO₂-CH₄-N₂ system [J]. Geochim. Cosmochim. Acta ,58 :1073-1082.
- Van den Kerkhof A M and Thiery R. 2001. Carbonic inclusions[J]. Lithos 55 49-68.
- Xu J H Xie Y L Jiang N and Bie F L. 1998. Mineralogical ,fluid inclusion ,and stable isotope study of Wenyu-Dongchuang gold deposits in the Xiaoqinling Mt. Area ,west Henan ,China[J]. Explor. Minning Geol. ,7(4) 321-332.