德兴金山金矿田不同尺度构造特征及其 与成矿作用的关系

李晓峰1),王春增2),易先奎3),冯佐海4),王义天1)

1) 中国地质科学院矿产资源研究所,北京,100037;

2)美国缅因州大学,普雷斯克艾尔, ME 04769;3)江西有色地质矿产勘查开发院, 南昌,330001;4)桂林工学院, 广西桂林, 541004

内容提要:德兴市金山金矿田是与赣东北深大断裂带内次一级剪切带有关的中温热液矿床。其矿石类型主要 由与断裂充填有关的小尺度石英脉组成,这些石英脉主要呈纹层状。不同尺度的构造研究表明,金山金矿是同构造 的产物,递进变形作用与成矿作用密切相关,在成矿过程中,普遍发育压溶作用,导致早期的石英颗粒发生溶解以及 形成黄铁矿压力影。金山金矿蚀变硫化物以黄铁矿为主,说明成矿流体中硫主要以 H₂S 和 HS⁻形式存在。断层阀 机制引起压力波动,进而导致成矿流体的相分离和水一岩反应,是金山金矿的主要成矿机制。

关键词:不同尺度构造;递进变形作用;成矿作用;金山金矿;江西

金山金矿田位于扬子板块与华南褶皱系之间的 江南造山带,赣东北深大断裂带的次级剪切带中,是 一个与韧一脆性剪切带有关的超大型金矿床(韦星 林,1995a, b),主要由金山、花桥、八十源等矿床组 成(以下简称金山金矿)。金山金矿的采矿历史最早 可追溯到北宋年间。上世纪80年代,江西省有色地 质勘查四队在调查老窟过程中发现了超糜棱岩型金 矿体,其金的品位为1×10⁻⁶~18×10⁻⁶。在随后 的10余年间,在金山及其外围陆续发现了花桥、朱 林和八十源等矿床。90年代,江西地质矿产局赣东 北地质大队又在金山矿床西侧发现了蛤蟆石、董家 和奈坑等石英大脉型金矿床。到目前为止,该地区 已探明金的储量达200多吨。

目前有关金山金矿的成因有两种认识:① 岩浆 热液成因(黄宏立和杨文思,1990);② 变质热液成 因(韦星林,1995a,b,1996;万昌林,1997;王可勇 等,1999;Li et al.,2003)。一些学者在强调变质热 液的同时,也认为大气降水参与了成矿作用(季峻峰 等,1994a,1994b)。虽然金山金矿的研究资料比较 丰富,对矿床成因的研究取得了一些认识,但是对于 矿床形成过程中不同尺度变形构造对成矿作用的制 约研究则相对较少。正如 Guilbert 与 Park (1968) 所说:在矿床勘查过程中,详细的构造研究是至关重 要的;它可以使我们得到其它方法无法得到的有价 值的找矿信息。本文在前人研究成果的基础上,结 合大量的野外宏观构造与室内显微构造的观察与研 究,总结和分析了不同尺度构造对金矿的控制作用, 提出了金山金矿的成矿作用与递进变形作用密切相 关,初步建立了金山金矿矿床成因模型。

1 区域地质

金山金矿所在的赣东北地区位于江南造山带 (又称江南古陆)东段,北面是扬子板块,南面是华南 褶皱系,东面则是同属江南造山带的江(山)绍(兴) 地区。由于我国东部几个主要构造区如秦岭一大别 造山带、扬子板块、江南造山带和华南褶皱系都在皖 赣浙地区呈明显的变窄收敛并相互接界,因此,该地 区一直以来是地质研究的一个热点。尽管如此,其 大地构造属性及其演化还处于争论之中(华仁民等, 2000)。

德兴地区出露地层有中元古界双桥山群、新元 古界登山群、南华系志堂组、下寒武统荷塘组、下侏 罗统林山组和鹅湖岭组,以及白垩系石溪组(图1)。 其中,中元古界双桥山群出露面积广泛,约占全区面

注:本文为国家自然科学基金青年基金项目(编号 40403006)和留学人员短期回国讲学专项(40610404013)的成果。

收稿日期:2007-03-16;改回日期:2007-08-13;责任编辑:章雨旭。

作者简介:李晓峰, 男,1971年生。博士。主要从事矿床地质和地球化学的科研工作。通讯地址:100037,北京市百万庄大街 26号。 Email: x-f-li@hotmail.com。



K₁s-白垩系石溪组;J₁e-下侏罗统鹅湖岭组;J₁l-下侏罗统林山组; $\in_1 h$ -寒武系荷塘组;Nh₁z-南华系志堂组; Pt₃d-新元古界登山群;Pt₂sh²-中元古界双桥山上亚群;Pt₂sh¹-中元古界双桥山下亚群; γ_5^2 -中一晚侏罗世花岗岩; $\gamma\delta\pi_5^2$ -中侏罗世花岗闪长岩; $\xi\mu_5^2$ -早侏罗世英安斑岩; $\lambda\pi_5^2$ -早侏罗世石英斑岩; $\upsilon\delta_3$ -古元古代辉石闪长岩; β_2 -新元古代变细碧角斑岩; Σ_2 -新元古代超镁铁质岩;m φ_2 -新元古代变余角闪辉石岩

K₁s—Cretaceous Shixi Group; J₁e—Lower Jurassic Ehuling Group; J₁l—Lower Jurassic Linshan Group; $\in_1 h$ —Cambrian Hetang Group; Nh₁z—Nanhuan System Zhitang Group; Pt₃d—Neoproterozoic Dengshan Group; Pt₂sh²—Mesoproterozoic Upper Shuangqiaoshan Sub-Group; Pt₂sh¹—Mesoproterozoic Lower Shuangqiaoshan Sub-Group; γ_5^2 —Middle—Late Jurassic granite; $\gamma \delta \pi_5^2$ —Middle Jurassic granodiorite; $\xi \mu_5^2$ —Early Jurassic dacite porphyry; $\lambda \pi_5^2$ —Early Jurassic quartz porphyry; $\upsilon \delta_3$ —Paleoproterozoic pyroxenite diorite; β_2 —Neoproterozoic metaspilite keratophyre; Σ_2 —Neoproterozoic ultramafic rock; $m\varphi_2$ —Neoproterozoic blast amphibolite pyroxenite

积的 70%。双桥山群由一套浅变质的火山碎屑沉 积岩夹变质火山熔岩组成,分为属于不同成因类型、 产于不同大地构造环境的上、下亚群。其中,双桥山 下亚群以深海相泥砂质及火山碎屑复理石建造为 主,属于稳定的大陆边缘沉积岩系(1515 Ma)(刘英 俊等,1989,1993);而上亚群则为一强烈活动的板块 边缘沉积岩系(1371 Ma)(江西地质矿产局,1984), 以灰绿色变质火山浊积岩与火山熔岩为特征。新元 古界登山群为近海湖盆陆相火山一碎屑岩建造。南 华系志堂组主要为近海湖盆碎屑岩建造。下寒武统 荷塘组为碳酸盐岩建造。下侏罗统林山组为河漫滩 相一湖泊沼泽相碎屑岩建造,而鹅湖岭组为陆相火 山岩建造,其底部为千枚质砾岩,中部为流纹质集块 角砾岩和角闪流纹熔岩,上部为英安质集块岩和英 安质熔岩。白垩系石溪组主要为陆相红色碎屑建造 (江西银山铜铅锌金银矿床编写组,1996)。

赣东北深大断裂带、乐安江深大断裂带以及泗 洲庙复式向斜三者构成本区基本构造格架(图1)。 在赣东北深大断裂和乐安江断裂之间发育着次一级 的 NNE 向的八十源一铜厂韧性剪切带和江光一富 家坞韧性剪切带。而金山剪切带主要由几组近于平 行的近 EW 向韧一脆性剪切带组成,夹持于八十 源一铜厂韧一脆性剪切带和江光一富家坞韧一脆性 剪切带之间。崔学军(1998)把赣东北地区的构造归 结为"网结状"韧性变形阵列构造。

区域岩浆活动频繁,主要有新元古代早期的海 相安山质火山碎屑岩和基性火山熔岩。早侏罗世陆 相潜火山岩石英斑岩、英安斑岩(183 Ma,Li et al., 2007)和中侏罗世花岗闪长岩(171 Ma,王强等, 2004);以及中一晚侏罗世黑云母花岗岩和花岗闪长 岩等(江西银山铜铅锌金银矿床编写组,1996)。

2 矿床地质

金山金矿田(图1)位于赣东北深大断裂带次一 级的金山韧一脆性性剪切带中。它主要由数条近于 平行的韧一脆性性剪切带组成,分别控制着金山、花 桥和八十源等金矿的产出。矿田赋矿地层为中元古 界双桥山群下亚群浅变质岩系。

矿田内宏观变形构造以推覆型剪切带的多层叠 置为特征。剪切带规模大小悬殊,宽度由 0.1m 到 650m 不等,呈带状、扁豆状尖灭再现,倾向变化于 北西向、北向、北东向之间,倾角为 5°~35°,呈舒缓 波状起伏,沿倾向呈舒缓台阶状延深,与矿田边缘区 域性北东向走滑型剪切带低角度渐变交接(韦星林, 1995a, b)。

矿体严格受剪切带控制,金矿体赋存于剪切带 应变中心部位的石英一黄铁矿一铁白云石化带一金 矿化带中。赋矿剪切带可出现多应变矿化中心,而 每一条矿化中心往往有多条矿体叠置产出。矿体形 态以似层状为主,板柱状、透镜状次之,产状与主剪 切面(平行 C 面理)平行。一般厚度为 1.2~6.0 m, 平均 3.5 m 左右,最大可达 16.28 m。矿石品位变 化比较大,一般为 6×10⁻⁶ 左右,单样最高品位达 1687×10⁻⁶。

金山金矿田具有变形一蚀变一矿化作用一体化 的特征。围岩蚀变主要有硅化、钠长石化、黄铁矿 化、绢云母化、绿泥石化和碳酸盐化。其中,硅化和 黄铁矿化与金矿化的关系密切。根据岩石的变形变 质作用、矿物的共生组合关系,围岩蚀变由内向外可 以分为三个带,①石英一钠长石一铁白云石一黄铁 矿带,该蚀变组合产于应变最强烈的主剪切面附近。 垂向厚度从数米到数十米不等,一般不超过 50m。 特征矿物是钠长石和铁白云石。该蚀变带金矿化较 强。② 石英—绢云母—铁白云石化带。此蚀变组 合产于石英—钠长石—铁白云石—黄铁矿带的两 侧,垂向厚度近百米。特征矿物是绢云母和铁白云 石。③ 绿泥石—方解石—绢云母化带。该组合产 于变形带的最外带,范围广,但不超出剪切带的范 围。特征矿物是绿泥石和方解石。

矿石类型有星散浸染状蚀变岩型(硅化、黄铁矿 化、铁白云石化)和含金石英脉型两大类。矿石矿物 组合简单,主要有黄铁矿,其次是磁铁矿、赤铁矿、毒 砂、闪锌矿、黄铜矿和方铅矿等;脉石矿物主要有石 英,其次为绢云母、钠长石、铁白云石和绿泥石等。 黄铁矿是最主要的金属矿物和载金矿物,含量 1.17%~1.28%。自然金是唯一的金矿物和有用组 份,成色高(953.6~969.4),以细粒单体金(占 85.1%~91.21%)为主。金主要以不规则状、它形 粒状、脉状、片状成群嵌布于黄铜矿及石英的粒间和 显微裂隙中。黄铜矿、方铅矿、黝铜矿等富金硫化物 的出现是明金(图版 [-1)和高品位金的宏观指示标 志。在显微镜下可以观察到金或呈细脉状或不规则 叶片状穿插于黄铁矿裂隙中,或在黄铁矿边缘出现。 有时在黄铁矿附近的石英颗粒中也会有自然金颗粒 出现(图版 [-2, [-3, [-4)。

- 3 含金石英脉的分类及其与不同尺度 变形构造的关系
- 3.1 含金石英脉的分类及其与中小尺度 变形构造的关系

与剪切带有关的中温热液金矿(250~450℃)矿 床(Cox, 1991; Robert, 1994; McCuaig and Kerrich, 1998)是较为普遍的一种受构造控制的矿 床类型。它是世界上金的主要来源(Groves et al., 1989; Kerrich and Cassidy, 1994)。这种类型金矿 主要赋存于断层、剪切带或者与之有关的破裂系统 中或其周围,最大位移量不超过100m(Cox,1999)。 对该类矿床的成脉系统进行合理的分类,对于鉴定 脉体的类型、构造指示意义以及对构造的解析都具 有重要的意义。脉体的内部结构、构造可以反映赋 存构造的性质(如剪切或者破裂和伸展)及其形成机 制。已有的分类系统主要根据赋存构造的性质 (Cox, 1991)、或者脉体内部结构构造 (Vearncombe,1993)来划分的。本文在对前人分类 (Cox, 1991; Mapani and Wilson, 1994; Robert et al., 1995; Robert and Poulsen, 2001; Kreuzer,

2006)研究的基础上,根据赋存构造、几何形态、内部 构造样式和野外产状,以及不同脉体之间的相互关 系,把金山金矿与剪切带有关的成脉系统划分为3 种类型:(1)与断裂充填有关的脉体(fault-filling veins)(图版 [-5, [-6);(2)伸展脉体(extensional and oblique-extensional veins)(图版 [-7);(3)网脉 状脉体(vein stockworks)。与断裂充填有关的脉体 (fault-fill veins)是指充填于断层、微断层或者裂隙 中以及位于剪切带中间部位的石英脉,与赋存构造 的面理基本一致或者小角度相交。这种类型的脉体 由纹层状(laminated)石英脉、擦痕面(slickenside) 和擦痕线(slickenline)以及片理化的围岩(图版 I-8,图版Ⅱ-1)组成。纹层状的石英脉通常表现为拉 伸的透镜体,而透镜体本身往往也是矿体(图版]-5, [-6)。伸展脉(extensional veins)主要以面状产 于剪切带外部的低应变的岩石中,并且主要是在强 干层中,通常呈雁行型排列。其主要特点是往往以 大角度与叶理或者面理相交(图版 I-7); 而网状脉 (vein stockworks)主要有两组或者两组以上的相互 交切的脉体组成。

擦痕线(slickenline)和擦痕组构(slickenfiber) (图版Ⅱ-1)是与断层充填有关的脉状矿床中两种重 要的构造型式,它们主要发育于断层或剪切滑移面 上盘或者下盘的接触带以及脉体的内部构造面中。 擦痕组构是矿脉生长过程中由于晶体沿滑移矢量方 向结晶生长而成,因此记录了成矿作用过程中断层/ 剪切滑移的矢量方向;而滑移线代表了断层/剪切滑 动作用过程中的机械方向。滑移线主要形成于脉体 形成之后,它记录了后成矿作用的事件。然而,许多 中温脉状矿床中含矿石英脉表现为典型的带状构 造,说明与断层充填有关的这种脉体是在一次较长 地质事件中多次滑动和流体作用的结果(Robert and Poulsen, 2001)。不过,一个断层面上的多组方 向滑移线通常代表了脉体形成之后的多次断层活 动。在韧性和半脆性环境中,矿物的拉伸线理总是 与滑移矢量一致。为此, Nelson(2006)提出了在钻 探过程中可以利用滑移线和滑移组构来进行与剪切 带有关的矿床勘查工作。

金山金矿(包括金山、花桥以及八十源等矿床) 含金石英脉均以第一类型,即断裂充填有关的脉体 为主。含金石英脉主要表现为细小的石英脉和粗大 的石英脉以及厚度介于两者之间的石英脉组成,类 似于 Robert and Poulsen (2001)提出的纹层状断裂 充填的石英脉(Laminated fault-fill veins)、席状石 英脉(sheeted veinlets)和单脉(isolated veinlets) 等,其区别在于石英脉体与围岩所占相对比例的多 少。在纹层状的石英脉中,单个的石英条带或者纹 层主要由片理化的围岩碎片分离开来(图版 I-5, I-6,I-8;图版 II-2)。在片理化的围岩中,往往大 量发育沿片理充填的热液蚀变矿物黄铁矿(图版 II-1,II-3)。这些片理面往往也是滑移面,沿滑移面也 同样发育大量的热液矿物(如绿泥石、绢云母和黄铁 矿等)以及金的沉淀(图版 I-2, I-3;图版 II-1,图 版 II-2)。有时这些纹层状的石英脉发生破裂,形成 断层角砾或者碎裂岩,这些角砾往往发生一定角度 旋转(图版 II-3)。而胶结物往往也是热液蚀变的产 物,如绿泥石、绢云母和黄铁矿(图版 II-4)。

需要指出的是,在金山金矿化带中,含矿石英脉 普遍表现为强烈的剪切透镜体化,表明在含矿石英 脉的形成过程中或形成之后仍然存在强烈的韧性剪 切变形作用,是金山含矿韧性剪切带递进剪切作用 的宏观表现。

3.2 微观尺度构造与成矿作用的关系

3.2.1 韧性剪切带内岩石与矿石的递进变形特征

在对德兴地区与剪切带有关的金矿野外观察和 宏观构造研究的基础上,对其显微构造研究同样发现,金山金矿的成矿作用与剪切带的递进变形作用 密切相关,其主要特点有:

(1)金山金矿赋存的金山剪切带是在中一低绿 片岩相变质作用条件下形成的。剪切带内变形变质 作用的产物"糜棱岩"的原岩实际上是一种细粒的石 英绢云母片岩或绢云母石英片岩,其片理主要表现 为新生矿物绢云母的定向排列,绢云母的定向排列 可形成典型的交织结构(图版Ⅱ-5)。石英碎屑普遍 动态重结晶化、亚颗粒化。动态重结晶形成的亚颗 粒(和新颗粒)可形成石英条带。变形越强,石英的 动态重结晶程度越强,颗粒越细,片理化越强。除少 部分长石碎屑发生双晶弯曲外,大部分长石碎屑则 普遍未受变形变质作用影响。

(2)剪切变形过程中普遍发生强烈的剪切压溶 作用(pressure solution)。显微镜下可普遍观测到 石英碎屑的压溶(图版Ⅱ-5,Ⅱ-6)。压溶现象的普 遍存在解释了为什么会在韧性剪切带内普遍发育石 英分异脉,就是说分异石英脉的物质来源于溶解掉 的石英。同时,压溶作用的普遍存在也证实剪切带 是在中一低绿片岩相变质条件、在浅地壳环境下形 成的。

(3) 含金石英脉是同构造的,是与剪切带的递

进变形作用紧密相关的。在流体的作用下,由于流 体的软化作用,可以使岩石在相对较低的温度下发 生塑性变形作用。① 野外与显微镜下均发现含金 石英脉是在剪切带停止剪切变形之前形成的,至少 是同构造的。含金石英脉或平行于片理、或普遍表 现为拉长透镜体化(布丁化)。拉长透镜体化表明递 进变形作用的存在。② 由于含金石英脉是同构造 的,因此,含金石英脉也受到不同程度的剪切变形, 如上述的透镜体化(布丁化)。在微观尺度具体表现 为石英脉内石英的塑性变形。采自阳山矿床井下的 高品位含金石英大脉中发育显微尺度剪切带,剪切 带内表现为粗颗粒石英的强烈动态重结晶与亚颗粒 化,亚颗粒石英条带化。微剪切带外的粗颗粒石英 也大多形态不规则或边界呈锯齿状,晶内塑性变形 强烈,如普遍发育的变形纹、不规则消光等现象(图 版Ⅱ-6,Ⅱ-7)。这些现象充分表明韧一脆性剪切变 形作用在含金石英大脉形成后仍在进行。因而含金 石英脉的形成与演化与剪切带的递进变形紧密相 关。

(3)黄铁矿压力影普遍发育(图版Ⅱ-8;图版Ⅲ-1,Ⅲ-2)。在金山金矿中,黄铁矿主要呈浸染状发 育于石英脉中或者呈脉状分布于纹层石英脉中或者 糜棱岩片理中。黄铁矿的压力影矿物以石英为主, 偶尔也可见绢云母。压力影矿物石英主要表现为呈 纤维状,平行于片理;而绢云母常因递进剪切变形可 形成"书斜构造"(图版Ⅱ-8)。个别黄铁矿颗粒因递 进剪切变形而碎裂化。

(4)碳酸盐化普遍发育,主要表现为脉状蚀变和面状蚀变(图版Ⅲ-3,Ⅲ-4)。其中形成稍早的方解石脉被稍后的递进变形作用叠加,表现为剪切移动和揉皱化。而面状蚀变主要发育于张性区域,表现为与黄铁矿化、绢云母化、绿泥石化一起发育。可以看到绿泥石往往围绕方解石颗粒周围发育。局部地段可以看到成矿期后(或变形期后)的方解石脉,它们往往切穿片理,或切穿(含矿)石英脉,是成矿期后(或变形期后)的产物,与矿化作用无关。

3.2.2 显微构造与变形条件

金山金矿田赋存于近东西向的韧性剪切带中。 赋矿岩石普遍发育韧性剪切作用。矿石主要由不同 尺度的纹层状石英脉组成。这些脉体内部构造表 明,它们是经过多阶段破裂—愈合事件形成的。剪 切带内岩石在成矿作用过程中普遍发育剪切压溶作 用和压力影构造以及发育于石英脉中的显微剪切带 是递进变形作用的结果。 在流体的作用下,矿物的变形机制和变形行为 变得复杂。但通过对矿物的变形机制和变形行为的 研究,可以帮助我们了解矿物的变形历史及其变形 条件。在低级变质作用过程中(300℃以下),石英 主要表现为脆性破裂、压溶作用和物质的迁移,典型 的显微构造特征是石英颗粒的破裂、波状消光以及 压溶作用的发生和物质的再沉淀;在中级变质作用 (300~400℃)过程中,主要表现为位错滑移和位错 蠕变,典型的结构特征表现为扫帚状消光和变形纹 的发育;在中一高级变质作用(400~700℃)条件下, 位错蠕变是石英的主要变形机制,其主要表现为相 对较少的拉长的石英颗粒和大量的因动态重结晶或 静态重结晶而形成的极小石英颗粒与石英亚颗粒的 组构特点(Passchier and Trouw, 2000)。

在低级变质条件(300℃以下)下,长石则主要表 现为脆性变形,其变形行为主要有颗粒尺度的微断 层以及弯曲的双晶。在中级变形(300~400℃)条件 下,长石表现为颗粒内部的破裂、锥状变形双晶、弯 曲的双晶、波状消光和变形条带和膝折带。云母类 矿物发生韧性变形的最低温度为 250℃。相对来 说,白云母具有较好的弹塑性能,在糜棱岩中因剪切 滑动可形成"云母鱼"。

方解石变形双晶随着变形温度的不同而表现为 不同的几何形态,因此可以作为变形温度的压力计 (Blenkinsop,2000; Passchier and Trouw, 2000)。 平直、狭窄的双晶(小于 5mm 宽)(Type 1)的形成 温度小于 200℃;较宽的双晶(大于 5mm)(Type 2) 的形成温度可达 300 ℃(150~300 ℃)(Evans and Dunne, 1991; Ferrill, 1991);如果变形温度超过 200 ℃,则形成相互交织的或者弯曲的双晶。双晶 的弯曲是沿 r 面和 f 面滑移的结果(Burkhand, 1993)。如果温度超过 250 ℃,则由于颗粒边界的滑 移 作 用 形 成 锯 齿 状 的 双 晶 (Vernon, 1981; Burkhand, 1993)。

在金山金矿含矿韧性剪切带中可普遍观察到石 英颗粒的波状消光、亚颗粒、变形条带以及棋盘格子 变形条带(图版Ⅲ-5,Ⅲ-6),以及长石的弯曲双晶 (图版Ⅲ-7)、相互交织和弯曲的方解石双晶(图版 Ⅲ-8)。因此,根据金山金矿不同矿物的变形行为以 及流体包裹体的测温数据(张文淮和谭铁龙,1998), 可以推断金山金矿石英脉的变形温度为 300~350 ℃,相应地,其成矿作用的温度也应该在 300~350 ℃。

4 矿床成因模型和成矿过程——讨论

金山金矿赋存于中元古界双桥山群浅变质岩系 中,这套岩系属于岛弧环境的变质火山一沉积岩序 列。矿体主要呈不连续或者石香肠状分布,与围岩 的叶理相协调,主要以石英一黄铁矿脉和围岩的弱 黄铁矿化为特征。石英一黄铁矿脉主要呈纹层状以 及不同尺度的构造表明,金山金矿发育不均匀的 韧一脆性变形作用,其成矿作用是同构造的,成矿作 用与递进变形作用密切相关。围岩中沿叶理面的张 裂作用在成矿作用过程中起到了重要的角色。根据 金山金矿的矿物组合、成矿作用与变形作用的关系 以及流体包裹体特征和前人发表的稳定同位素数据 (张文淮和谭铁龙,1998;曾键年等,2001,2002;华仁 民等,2002),本文初步建立金山金矿矿床成因模型。

矿床中小尺度的构造(矿床尺度及手标本尺 度)、显微构造特征以及矿物学和流体包裹体的数 据,说明矿脉侵位于韧一脆性环境。已有的流体包 裹体研究(张文淮和潭铁龙,1998)表明,金山金矿与 成矿作用有关的流体为 CO₂一H₂O 流体,这种流体 包裹体具有不同的气液比。在均一化过程中,有的 流体包裹体均一于气相、有的均一于液相,并且均一 温度相同,说明成矿作用过程中发生了流体的不混 溶作用(张文淮和谭铁龙,1998)。含矿石英脉呈纹 层状也是成矿作用过程中,压力发生波动的有力证 据,而且其内部结构表明,成矿作用过程中发生了多 次的破裂一愈合地震泵事件。上述事实说明了金山 金矿的成矿作用过程中存在流体不混溶现象和压力 的波动。

在许多与剪切带有关的矿床成矿过程中,压力 的波动是普遍存在的现象。在剪切带热液成矿系统 中,流体的压力是通常从静岩压力到静水压力变化 的,并且常常是超过静岩压力的(Sibson, 1987)。 另一方面,在滑移系统中,最小主应力 σ₃ 方向是近 于水平的,由此产生近于直立方向上的破裂构造,从 而造成流体压力的下降,这有利于流体从深部迁移 到有利的成矿位置。

金山金矿硫化物围绕含金石英脉富集的现象说 明成矿流体与围岩是不平衡的,成矿流体很可能来 自深部较深层次韧性剪切环境的变质流体(张文淮 和谭铁龙,1998;曾键年等,2001,2002;华仁民等, 2002)。从构造、矿物学、以及流体的角度来看,断层 阀模型(Sibson, 1980,1986,1987,1988; Cox et al., 1995,1999; Robert et al., 1995)是金山金矿 最有可能的成矿模型。因而,深部来源的变质流体 通过赣东北深大断裂(它代表了区域上近于直立的 走滑断层系统)上升到较浅部的地震带(脆一韧性环 境)。在超静岩压力条件下,在断层滑动之前,也就 是在岩石愈合期间,岩石主要表现为塑性变形和压 溶作用。由于水一岩反应,引起围岩蚀变,造成金的 沉淀。在断层滑动的瞬间,即破裂的过程中,岩石主 要表现为破裂脆性变形和流体渠化作用。在这个时 期,由于水压致裂作用,产生一系列破裂构造,流体 压力远远大于静水压力,导致流体流入这些破裂构 造。由压力降低而造成成矿流体相的分离,导致金 从成矿流体中沉淀出来,形成与断裂充填有关的含 金石英脉。在破裂一愈合过程中,金的不同沉淀机 制可能是主要产生不同类型金矿石以及金的品位高 低的原因。虽然,在断层的演化过程中,这种方式是 单一的还是循环的还是个未知的问题,但是,从石英 脉的纹层构造、金与黄铁矿的关系(图版 [-1~4)、 以及黄铁矿的压力影和石英的韧性变形,说明金和 硫化物是在构造一流体的演化过程中沉淀的,而不 是晚期叠加的产物。

矿体中金与硫化物共生沉淀,说明 H₂S 和 HS⁻是成矿流体中的主要组分。流体包裹体的成 分、均一温度以及热动力学参数的变化和较低的贱 金属含量等数据表明金山金矿金主要以还原硫络合 物的形式迁移,在这种条件下,Au(HS)²⁻是最有可 能的迁移形式。由于压力降低而导致成矿流体发生 相的分离以及由于水一岩反应等引起的物理化学变 化,是导致这种络合物分解以及金沉淀的主要机制 之一。由于流体的不混溶作用导致 CO₂ 从流体中 分离开来,致使溶液中的 pH 值上升,碳酸根离子活 动加强,沉淀出碳酸盐矿物(例如铁白云石和方解 石)。 $CO_2 - H_2O$ 流体的相分离可能是形成石英脉 中自然金沉淀的主要原因;而成矿流体与围岩中的 铁镁硅酸盐矿物的水/岩反应导致的成矿流体脱硫 化作用可能是形成黄铁矿一金矿物组合的主要机 制。

在变质地体中,成矿作用的时间对于划分矿床 类型和成因模式都是十分重要的。但是,目前对金 山金矿成矿时代的研究也是众说纷纭,如伍勤生[●] 根据伊利石的 Rb-Sr 年龄认为成矿时代为燕山期; 张金春[●]根据全岩和绢云母的 Rb-Sr 认为成矿时代 为晋宁期,后又受到燕山期岩浆作用的叠加改造;韦 星林(1996)根据矿石中黄铁矿的 Pb 同位素模式年 龄和糜棱岩全岩 Rb-Sr 年龄认为成矿时代属于晋宁 期;王秀璋等(1999)测得成矿流体包裹体 Rb-Sr 等 时线年龄为加里东期;但是由于金的矿化与剪切带 密切相关,流体的渠化作用有可能造成 Rb-Sr 同位 素体系的不平衡,从而影响准确的定年。同时全岩 Rb-Sr 同位素体系的封闭温度在 500℃左右,而绢云 母的 Rb-Sr 同位素体系的封闭温度在 200~500℃ 之间(Chesley, 1999),而金山金矿的成矿温度在 300~350℃之间,故已有的利用 Rb-Sr 同位素定年 结果不能完全代表成矿作用的时间。不同尺度的构 造特征表明,其成矿作用是同构造的,在此基础上, 李晓峰最近测得纹层状石英脉中滑动面上热液蚀变 绢云母 Ar-Ar 年龄变化在 560~660Ma 之间(绢云 母 Ar-Ar 同位素体系封闭温度在 300~350℃之间, 能够代表成矿作用的时间)(未发表资料),基本上代 表了成矿作用的年龄,同时也排除了燕山期的岩浆 叠加作用的可能。因此,本文认为,金山金矿是同构 造的,其成矿作用与递进变形作用密切相关,其成矿 模型类似于 Sibson 的断层阀模式(Sibson, 1980, 1986,1987,1988)。

5 结论

(1)金山金矿的矿石主要由与断裂充填有关的 石英脉组成,这些石英脉主要呈纹层状。

(2)不同尺度的构造表明,金山金矿是同构造的,发育于脆一韧性的环境,其变形温度在 300~ 350℃之间。在成矿作用过程中,普遍发育压溶作用 和塑性变形作用,成矿作用与递进变形作用密切相关。

(3)金山金矿是多次愈合一张裂地震泵事件的 产物。其成矿模型类似于 Sibson 的断层阀模式。

致谢:在野外工作期间,得到了江西有色地质勘 查局韦星林副局长和金山金矿张开平副矿长的大力 支持,以及金山金矿地质测量科地质同行的热情帮 助,在此深表谢意。

注释 / Notes

- 江西省有色地质勘查四队. 1996. 江西省德兴市新营一花桥金矿 概查地质报告, 24~28.
- 伍勤生. 1989. 金山金矿床年龄测定及矿床成因探讨. 见:第四 届全国同位素会议论文集, 37.
- 张金春.1994.江西金山韧性剪切带型金矿成矿地球化学研究.
 [硕士学位论文].南京:南京大学,1~78.

参考文献 / References

崔学军. 1998. 赣东北地区"网结状"韧性变形带阵列构造的特征及 其构造意义浅析. 江西地质, 12(3): 213~217.

- 华仁民,李晓峰,陆建军,陈陪荣,邱德同,王果. 2000. 德兴大型铜 金矿集区的构造环境与成矿流体研究. 地球科学进展,15(4): 525~533.
- 华仁民,李晓峰,张开平,邱德同,杨凤根. 2002. 江西金山金矿成矿 过程流体作用地球化学. 南京大学学报(自然科学),38(3): 408~417.
- 黄宏立,杨文思. 1990. 赣东北金山金矿的地质特征及矿床成因. 地 质找矿论丛,5(2):29~39.
- 季峻峰,刘英俊,孙承辕,邱德同. 1994a. 江西金山剪切带型金矿床 两类矿石的地球化学特征——兼论两阶段成矿机制. 地球化 学,(3):226~232.
- 季峻峰,孙承辕,郑晴. 1994b. 江西金山剪切带型金矿床中含金石 英脉的成矿特征. 地质论评,40(4):361~367.
- 江西省地质矿产局. 1984. 江西省区域地质志. 北京:地质出版社,1 ~921.
- 江西银山铜铅锌金银矿床编写组.1996.江西银山铜铅锌金银矿 床.北京:地质出版社,1~380.
- 刘英俊,沙鹏,朱凯军.1989. 江西德兴地区中元古界双桥山群含金 建造的地球化学研究.桂林冶金地质学院学报,(2),115~ 126.
- 刘英俊,孙承辕,马东升. 1993. 江南金矿及其成矿地球化学背景. 南京:南京大学出版社,61~84.
- 万昌林. 1997. 试论金山金矿成矿特征与成矿控制. 江西地质,9:1 ~6.
- 王可勇,梁敏鎏,卢作祥. 1999. 江西金山金矿矿床地质特征及矿床 成因探讨. 地质与勘探,35(2):17~20.
- 王强,赵振华,简平,许继峰,包志伟,马金龙. 2004. 德兴花岗闪长 斑岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学和 Nd-Sr 同位素地球化学. 岩 石学报,20(2):315~324.
- 王秀璋,梁华英,单强,程景平,夏萍. 1999. 金山金矿成矿年龄测定 及华南加里东成金期的讨论. 地质论评, 45(1):19~25.
- 韦星林. 1995a. 金山金矿田地质特征及成矿地质作用. 矿产与地质,9(6):471~480.
- 韦星林. 1995b. 金山金矿田发现过程及其找矿前景. 有色金属矿产 与勘查,4(5):283~288.
- 韦星林. 1996. 江西金山韧性剪切带型金矿地质特征. 江西地质,10 (1):52~64.
- 曾键年,范永香,马宪.2001.江西金山金矿床成矿流体地球化学. 黄金地质,7(1):26~32.
- 曾键年,范永香,林卫兵. 2002. 江西金山金矿床成矿物质来源的 铅和硫同位素示踪.现代地质,16(2):170~176.
- 张文淮,谭铁龙. 1998. 江西省金山金矿有机流体与金矿的关系. 矿 床地质,17(1):15~23.
- Blenkinsop T. 2000. Deformation microstructures and mechanisms in minerals and rocks. Kluwer Academic Publishers, 1~150.
- Burkhard M. 1993. Calcite twins, their geometry, appearance and significance as stress-strain markers and indicators of tectonic regime: a review. Journal of Structure Geology, 15: 351~368.
- Chesley J. 1999. Integrative geochronology of ore deposits: new insight into the duration and timing of hydrothermal circulation. Reviews in Economic Geology, 12:115~141.
- Cox S F. 1991. Geometry and internal structures of mesothermal vein systems: implications for hydrodynamics and ore genesis during deformation. In: Hronsky J M A. ed. Structural Geology in Mining and Exploration: Perth, University of Western Australia, University Extension, Publication, 25:47~ 53.
- Cox S F. 1995. Faulting processes at high fluid pressures: an

example of fault-valve behavior from the Wattle Gully Fault, Victoria, Australia. Journal of Geophysical Research, 100:841 ${\sim}859.$

- Cox S F. 1999. Deformation controls on the dynamics of fluid flow in mesothermal gold systems: In: McCaffrey, K J W, Lonergan L and Wilkinson J J. eds. Fractures, Fluid Flow and Mineralization. Geological Society, London, Special Publications, 155:123~140.
- Evans M A, Dunne W M. 1991. Strain factorization and partitioning in the North Mountain thrust sheet, central Appalachians, USA. Journal of Structure Geology, 54:29~39.
- Ferrill D A. 1991. Calcite twin widths and intensities as metamorphic indicators in natural low-temperature deformation of limestone. Journal of Structure Geology, 13: 667~676.
- Groves D I, Barley M E, Ho S E. 1989. Nature, genesis and tectonic setting of mesothermal gold mineralization in the Yilgarn block, Western Australia. In: Keays R, Ramsay R W H and Groves D I. eds. The Geology of Gold Deposits: The Perspective in 1988. Economic Geology Monograph, 6:71~85.
- Guilbert J M and Park C F Jr. 1986. The Geology of Ore Deposits. New York: Freeman,1~985.
- Kerrich R and Cassidy K F. 1994. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation — Archean to present: A review. Ore Geology Reviews,9:63~310.
- Kreuzer O P. 2006. Textures, paragenesis and wall-rock alteration of lode-gold deposits in the Charters Tower district, north Queensland: implications for the conditions of ore formation. Mineralium Deposita,40:639~663.
- Li Xiaofeng, Hua Renmin, Mao Jingwen, Ji Junfeng. 2003. A study of illite Kübler Indexes and chlorite crystallinities with respect to shear deformation and alteration, Jinshan gold deposit, East China. Resource Geology, 53(4):283~292.
- Li Xiaofeng, Watanabe Y, Mao Jingwen, Liu Shengxiang, Yi Xiankui. 2007. Sensitive High-resolution iron microprobe U-Pb zircon and ⁴⁰ Ar-³⁹ Ar muscovite ages of the Yinshan deposit in the northeast Jiangxi Province, south China. Resource Geology, 57(3), 325~337.
- Mapani B S E, Wilson C J L. 1994. Structure evolution and gold mineralization in the Scotchmans fault zone Magdala Gold Mine, Stawell, Western Victoria, Australia. Economic Geology, 89: 566~583.
- McCuaig T C, Kerrich R. 1998. P—T—t—deformation—fluid characteristics of lode gold deposits: evidence from alteration systematics. Ore Geology Reviews,2:381~453.
- Nelson E P. 2006. Drill-hole design for dilational ore shoot targets in fault-fill veins. Economic Geology, 101: 1079~1085.
- Passchier C W, Trouw R A. 2000. Microtectonic. Springer, $1 \sim 289.$
- Robert F. 1994. Vein fields in gold district: the example of Val d' Or, southeastern Abitibi subprovince, Quebec. in: Current Research 1994-C. Ottawa, Ont.: Geological Survey of Canada, 295~302.
- Robert F, Boullier A M, Firdaous K. 1995. Gold—quartz veins in metamorphic terranes and their bearing on the role of fluids in faulting. Journal of Geophysical Research,100 (7):61~12879.
- Robert F and Poulsen K H. 2001. Vein formation and deformation in greenstone gold deposits. Society of Economic Geologists

Review, 14:111~155.

- Sibson R H. 1980. Transient discontinuities in ductile shear zones. Journal of Structure Geology, 2:165~171.
- Sibson R H. 1986. Earthquakes and rock deformation in crustal fault zones. Annual Reviews of Earth and Planetary Science,4: 149~175.
- Sibson R H. 1987. Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems. Geology, 15:701~704.
- Sibson R H, Robert F and Poulsen K H. 1988. High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling, and mesothermal gold—quartz deposit. Geology,16:553~555.
- Vearncombe J R. 1993. Quartz vein morphology and implications for formation depth and classification of Archean gold-vein deposits. Ore Geology Reviews, 8:407~424.
- Vernon R H. 1981. Optical microstructure of partly recrystallized calcite in some naturally deformed marbles. Tectonophysics, 78:601~612.

图版说明 / Explanation of Photos

Ι

图版I / Plate

- 1. 含金石英脉中的明金。
- 2. 围绕黄铁矿颗粒边缘生长的金和独立的金颗粒。
- 3. 金沿黄铁矿的裂隙生长。
- 4. 金与黄铁矿的同沉淀。
- 5,6. 纹层状的含金石英脉。
- 7. 呈雁列状排列的伸展脉。
- 8. 纹层状石英脉的内部结构。
- 1. Visible gold grains in gold-bearing veins.
- 2. Gold attached to pyrite crystal surface and isolated gold grains.
- 3. Gold occurs along the fractures in pyrite.
- 4. Gold precipitated simultaneously with pyrite.
- 5, 6. Laminated fault-fill vein and strongly foliated slivers of wall rock, individual quartz vein is separated by discrete slip surface, line with fine-grained chlorite.
- 7. En echelon extensional veins.
- 8. Internal structures of laminated veins.

图版Ⅱ / PlateⅡ

- 1. 滑移面和滑移线及滑移面上热液矿物的生长组构。
- 2. 发育于纹层石英脉和围岩残片之间的热液黄铁矿。
- 3. 角砾状含金石英脉。
- 4. 沿围岩片理发育的黄铁矿脉。
- 5. 围岩绢云母石英片岩中石英的压溶作用。
- 6. 横切片理的石英细脉在递进变形过程中遭受塑性剪切变形,而且 动态重结晶的石英颗粒与亚颗粒的形态组构平行于主片理。说 明此种石英脉形成于递进塑性剪切变形过程中,它的存在是在剪 切变形/变质过程中有流体存在的证据。
- 7. 含金石英大脉中的微剪切带。
- 黄铁矿的压力影,压力影由绢云母组成,这些绢云母形成书斜构 造,说明是递进变形作用的结果。
- Stepped chlorite and ankerite along slip surface within a fault-fill vein, clearly indicating that mineral precipitation accompanied slip along the vein.
- 2. Pyrite occurs between the veins and foliated slivers of wall rocks.
- 3. Fault breccia of laminated fault-fill vein. the breccia consists of

angular clasts of altered wall rocks coating with hydrothermal minerals.

- 4. Pyrite veins in strongly foliated wall rocks.
- 5. Pressure solution in mylonitic sericite-quartz schist.
- 6. Quartz vein transecting schistosity was deformed during progressive deformation. Quartz and quartz subgrains produced by dynamic recrystallization are parallel to the main schistosity. Both observations suggest fluid production and precipitation during deformation and metamorphism process.
- A micro-shear zone transects through an auriferous quartz vein. The sample was collected from a meter-thick ore body.
- Pyrite pressure shadow of sericite that was deformed and imbricated, indicating a progressive deformation.

图版Ⅲ / PlateⅢ

1,2. 黄铁矿的压力影,压力影由纤维状石英组成。

- 3. 稍早形成的方解石脉在递进变形过程中被剪切错断。
- 4. 含金石英脉中发育的稍后期的面状碳酸盐化蚀变。
- 5. 棋盘格子状石英亚颗粒,沿亚颗粒边缘发育动态重结晶。
- 6. 石英亚颗粒,以及由这些亚颗粒组成的变形条带。
- 7. 弯曲的长石双晶。
- 8. 交织状和弯曲的方解石双晶。
- 1, 2. Pyrite pressure shadow of fibrous quartz.
- 3. Pre-mineralization calcite vein was sheared during progressive deformation.
- 4. Post-mineralization carbonation in gold-bearing quartz vein.
- Crossboard pattern of quartz subgrains and dynamic recrystallisation.
- 6. Quartz subgrains and subgrain ribbons.
- 7. Feldspar kinking bands.
- 8. Anastomosing and and benting calcite twins.

Deformation Structures at Various Scales and Their Roles during Gold Mineralization at Jinshan Gold Deposit, Jiangxi Province

LI Xiaofeng¹¹, WANG Chunzeng²¹, YI Xiankui³¹, FENG Zuohai⁴¹, WANG Yitian¹¹

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

2) University of Maine at Presque Isle, Presque Isle, ME, 04769, USA;

3) Jiangxi Institute of Geological Prospecting and Mineral Resource for Nonferrous Metals, Nanchang, 330001, China;
 4) Guilin Institute of Technology, Guilin, Guangxi, 541004, China

Abstract

The Jinshan gold deposit, the largest gold deposit south of Yangtze River of China, with a reserve of 200 tones, is hosted by the Jinshan ductile shear zone. The shear zone is associated with a magnificent supracrustal Proterozoic mélange—suture zone, i. e. the Northeastern Jiangxi Deep Fault Zone. The shear zone is hosted within a Mesoproterozoic (1300 ~ 1500 Ma) meta-pyroclastic—turbidite sequence. The mineralized fault-filled quartz veins that are elongated and boudinaged along with mylonitic foliations serve as main ore bodies. Deformation structures observed in the ductile shear zone and the sheared auriferous quartz veins at various scales indicate a syn-deformational mineralization associated with a progressive deformation. The segregation character of the quartz veins is consistent with pervasive and significant pressure solution observed in the shear zone, suggesting an in-situ source of ore fluids. Gold precipitated in response to fluids phase separation and fluid—rock interaction caused by pressure fluctuating as a result of periodic fault-valve activities. It is concluded that the Jinshan deposit is syn-tectonic, the gold mineralization is closely with progressive deformation.

key words: various scales structures; progressive deformation; gold mineralization; Jinshan deposit; Jiangxi