

# 韧性剪切构造演化及其对金成矿的制约

——以青海野骆驼泉金矿为例\*

## Structural Evolution of Ductile Shear Belt and Its Constraints on Gold Mineralizations: Exemplified by Yeluotuoquan Gold Deposit, Qinghai Province

丰成友<sup>1</sup> 张德全<sup>1</sup> 余宏全<sup>1</sup> 李大新<sup>1</sup> 徐文艺<sup>1</sup> 苏亮红<sup>2</sup>

(1 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037; 2 青海省地质调查院, 青海 西宁 810000)

Feng Chengyou<sup>1</sup>, Zhang Dequan<sup>1</sup>, She Hongquan<sup>1</sup>, Li Daxin<sup>1</sup>, Xu Wenyi<sup>1</sup>, Su Lianghong<sup>2</sup>

(1 Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2 Geological Survey of Qinghai Province, Xining 810000, Qinghai, China)

**摘 要** 通过对青海野骆驼泉金矿含矿构造带、矿床地质和流体包裹体进行研究, 结果表明, 矿床明显受三级构造系统控制, 存在着三期构造 - 流体 - 矿化模式。早期的韧性剪切作用是晚加里东造山的深层次塑性流变产物, 赋存于碎斑石英中的高密度、中 - 低温含 CO<sub>2</sub> 流体作用导致金的初始富集; 主成矿期发生在脆 - 韧性剪切变形阶段, 产生大量含金构造透镜体, 为地壳较浅层次压扭性应力作用产物, 以富含成矿物质的富液相流体为主; 晚期发育的脆性裂隙为造山作用之后地壳浅层次及近地表条件下张扭性应力作用结果, 指示构造活动和矿化已接近尾声。

**关键词** 韧性剪切带 构造演化 流体 野骆驼泉金矿 青海

剪切带及其与金成矿的关系不仅为广大地质工作者所熟知, 而且随着对其研究的日益深入, 已取得丰硕成果。早在 1977 年和 1980 年, Sibson (1977) 和 Ramsay (1980) 分别发表了关于韧性剪切带的经典论著。几乎同时, Boyle 于 1979 年首次提出了韧性剪切带型金矿这一概念, 系指一种成矿机制和控矿因素都与韧性剪切带有关的金矿床类型。1990 年, Bonnemaison 等 (1990) 则提出含金剪切带三阶段矿化模式。之后, 有关韧性剪切带的理论探讨、实际应用和剪切带型金矿床的研究很快引起了国内外地质学家的极大关注, 一些学者还对韧性剪切带控矿机制及韧性剪切变形作用对成矿元素迁移、富集的制约关系进行了大量研究 (刘继顺, 1996; 陈柏林等, 1999)。

青海柴达木盆地北缘地区是中国中央造山带 - 秦祁昆褶皱系的一部分, 也是典型的复合造山带 (殷鸿福等, 1998)。近十几年来, 本区陆续发现了一些金矿床或矿点, 已有的研究表明, 它们皆与这里广为发育的韧性剪切带密切相关 (张德全等, 2001; 于凤池等, 1998; 崔艳合等, 2000; 丰成友等, 2002)。本文即以其中的野骆驼泉金矿床为例, 通过对区域构造与金矿床分布、含矿构造带及矿床特征研究, 来探讨韧性剪切变形过程及与金成矿的密切联系。

### 1 区域构造系统和金矿床空间分布

柴达木盆地北缘位于青藏高原北部, 由于多次造山活动, 这里明显形成了控制金矿床分布的三级构造

\* 本文得到国家地质大调查项目 (K1.1.3.1 和 200110000001) 资助

第一作者简介 丰成友, 男, 1972 年生, 博士, 助理研究员, 从事矿床地质和地球化学研究。

系统,它们分别是深断裂、大型剪切带、褶皱和断裂-裂隙系统。研究表明(张德全等,2001),区内所有金矿床均沿深断裂的近侧分布,如在柴北构造带北侧自西向东发现了野骆驼泉、千枚岭、红柳沟、青龙沟、滩间山和赛坝沟金矿等,它们均分布在柴北缘深断裂的南侧。大型剪切带是区域控矿构造或矿田构造,而直接控制矿床或矿体产出的则是大型剪切带内或旁侧与之相配套的褶皱和断裂-裂隙构造。在柴北缘地区,褶皱控矿的例子如滩间山和青龙沟金矿,野骆驼泉金矿则为与剪切带伴生的断裂-裂隙系统控矿的典型代表。该矿床具体构造位置处于柴北裂陷造山带的西端赛什腾山复向斜南翼柴北缘深断裂与阿尔金旁侧断裂的交汇部位,在其 SW 侧 2 km 处,一条长达 30 km 的 NW 向大型剪切带从中通过,倾向 NE,宽 200 ~ 1000 m,为柴北缘深断裂南侧的次级构造,而它北侧有 3 条呈左行斜列式展布的近 SN 向断裂带,它们的南部呈弧形交汇于该大型剪切带之上,为此 NW 向大型剪切带的次级构造,也是主要的控矿构造,野骆驼泉金矿即产于这 3 条断裂带的中间一条断裂带内。

## 2 含矿构造带特征与演化

矿区主要出露地层为上奥陶统滩间山群红旗沟组一套变质火山-沉积岩组合,自西向东可划分为 3 个岩性段,即黑色炭质千枚岩段、灰绿色绿泥绢云千枚岩段和灰黑色千枚岩夹变砂岩段,彼此之间为断层接触。其中在绿泥绢云千枚岩段,由  $F_4$ 、 $F_5$  所围限的破碎带蚀变岩在近 SN 方向上的展布,从而构成了矿区重要含矿构造带,其以具典型的深层次韧性变形及其后脆-韧性变形构造组合为特征。该构造带地表宏观特征十分明显,表现为一条状近 SN 向展布的褐黄色构造蚀变带,在矿区内长约 1050 m (全长 > 3 km),总体北宽南窄,宽约 50 ~ 200 m,厚度 250 ~ 640 m,倾向以 NE - NEE 为主,局部 W - SW,倾角  $45^\circ \sim 78^\circ$ ,沿层理有肉红色花岗岩脉、灰绿色闪长岩脉侵入。含金性、破碎蚀变程度以北段为最佳,中段次之,南段较差。带内面理构造发育,面理上具有明显的丝绢光泽,主要由绿泥石、黑云母、绢云母等片状矿物组成,具有很大的可剥性,野外用锤子敲击,较易沿面理剥离。因受强烈的韧-脆性构造演化作用,出现一些特征构造现象,如韧性变形、揉皱构造、S - C 组构、鞘褶皱、剪切透镜体、角砾状构造、脆性裂隙等。带内构造岩主要是糜棱岩系列岩石夹一定量弱蚀变的脉岩,金矿石本身就是以糜棱岩系列为主的蚀变构造岩。根据岩石结构构造和矿物成分的差异,构造岩类型可分为构造片岩、超糜棱岩、蚀变糜棱岩、千糜岩、构造角砾岩和弱应变蚀变闪长岩等。

综合对构造蚀变带的野外和室内研究,并结合区域成矿地质背景,可将野骆驼泉金矿与成矿有关的过程划分为 3 个主要构造演化阶段。

(1) 早期深层次韧性剪切变形阶段。形成区域上 NW 向的巨型韧性剪切带(最宽达 1 km 以上)及其北侧 3 条近 SN 向的次级构造带。由一套片理化岩石组成,包括千枚岩、片岩、微片岩以及糜棱岩、片理化砂岩、粉砂岩等。在 3 条近 SN 向的次级构造带中,由  $F_4$ 、 $F_5$  断裂控制的构造带受后期多次构造活动叠加成为重要含矿带。区内片理化岩石及糜棱面理产状与构造带相近似,走向近 SN,倾向以 NE ~ NEE 为主,局部 W - SW,倾角  $45^\circ \sim 78^\circ$ ,糜棱面理十分发育,具丝绢光泽且易剥。野外工作过程中发现绿泥绢云片岩中的揉皱构造、鞘褶皱、S - C 组构等反映韧性变形特征的组构,还发育大量显微组构包括显微鳞片变晶结构、长石等矿物的旋转碎斑、片状构造、定向构造、千糜状构造、雪球构造、边缘细粒化、扭折带等。该阶段为地壳深层次变形变质作用,经历过动力变质作用、固态流变作用、部分熔融作用等。

(2) 中期脆-韧性剪切变形阶段。该阶段出现大量构造透镜体,为地壳较浅层次压扭性应力作用产物,构成区内重要的控矿含矿构造,并对早期阶段发生构造叠加。受构造及热液蚀变作用形成构造角砾岩、碎裂岩、矿化蚀变糜棱岩等。构造透镜体的产状为  $120^\circ \sim 135^\circ$ 、 $45^\circ \sim 81^\circ$ ,部分  $275^\circ \sim 280^\circ$ 、 $46^\circ \sim 68^\circ$ ,走向上与早期韧性剪切形成的片理方向有一定交角。构造角砾岩角砾成分大部分是糜棱岩,反映具压扭性应力作用特征。某些构造透镜体本身就是矿体,空间上表现为尖灭侧现平行斜列式展布的一组矿脉,表明该构造阶段为主成矿阶段。

(3) 晚期脆性断裂发育阶段。形成于造山作用之后地壳浅层次及近地表条件下,受张扭性应力作用,

表现为裂开-愈合作用过程, 叠加于前两个变形阶段。野外可见细的硅化石英脉切穿整个岩石或不同角砾, 显微镜下观察发现沿裂隙充填有细的硅化石英脉、长英质脉、碳酸盐脉等, 有时彼此相互交切, 指示含金剪切带构造演化进入晚期阶段。

### 3 矿床地质特征

#### 3.1 矿体

野骆驼泉金矿床共圈定大小矿体 19 个, 这些矿体总体呈左行斜列式集中分布于由 F4、F5 断裂控制的近 SN 向长条状构造蚀变带中, 单个矿体呈长条状、透镜状, 走向与主断裂面之间的交角为  $5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ , 空间上表现为沿走向膨大缩小、尖灭再现、尖灭侧现、分枝复合等复杂变化形式。矿体总体倾向西, 倾角  $50^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 。一般单个矿体规模不大, 品位、厚度不稳定, 平均品位为  $7.23 \text{ g/t}$ , 且向下部有变贫的趋势。根据擦痕推断, 矿脉向深部有向南小角度侧伏斜列的可能, 矿体的这种空间排列样式是早期构造被中期压扭性应力改造的结果。

结合构造控制及矿体集中分布特征, 可概括为 4 个矿群: 矿群。集中分布于北蚀变带中段, 为本矿区两大主矿群之一, 规模较大, 由 4 个矿体组成, 单个矿体呈透镜状、长条状左行斜列式近 SN 向展布, 矿体尖灭再现、尖灭侧现特征显著, 长  $40 \sim 620 \text{ m}$ , 最宽达  $37.5 \text{ m}$ , 品位  $1.12 \sim 62.8 \text{ g/t}$ , 总体产状  $270^{\circ} 70^{\circ} \sim 80^{\circ}$ ; 矿群。分布于北蚀变带南段, 由 6 个矿体组成, 规模较小, 以长条状为主, 长  $40 \sim 200 \text{ m}$ , 宽  $1 \sim 3.0 \text{ m}$  不等, 品位  $1.02 \sim 12.7 \text{ g/t}$ , 总体产状  $90^{\circ} 60^{\circ} \sim 69^{\circ}$ ; 矿群。位于 矿群南, 由 2 个矿体组成, 被一平移断裂所隔开, 其规模、品位都最小, 矿体呈长条状, 长  $32.5 \text{ m}$ , 最宽约  $3 \text{ m}$ , 品位  $1.62 \sim 2.60 \text{ g/t}$ , 总体产状  $270^{\circ} 50^{\circ} \sim 70^{\circ}$ ; 矿群。位于构造带东侧的中、南段, 共有 7 个矿体, 赋存在 F5 断层的上、下盘及附近, 规模较大, 矿体呈长条状, 沿走向具膨大缩小、尖灭再现之特征, 由地表向下矿体的规模、品位均有变小的趋势, 长  $40 \sim 260 \text{ m}$ , 宽  $1 \sim 14.4 \text{ m}$ , 品位  $1.04 \sim 60.5 \text{ g/t}$ , 总体产状为  $270^{\circ} 74^{\circ}$ 。

#### 3.2 矿石

为典型的黄铁绢英岩化构造蚀变岩型金矿石。主要金属矿物包括黄铁矿、褐铁矿、磁铁矿, 非金属矿物包括石英、斜长石、绿泥石、黑云母、白云母、绢云母, 少量磷灰石、电气石、金红石等, 光片下观察, 未发现自然金。矿石具显微鳞片变晶结构、碎裂结构、糜棱结构、片状构造、千糜状构造、角砾状构造等。

#### 3.3 围岩蚀变

矿区围岩蚀变十分发育, 构成由 F4、F5 断裂控制的近 SN 向展布的褐黄色构造蚀变带, 主要蚀变类型包括硅化、绿泥石化、黄铁绢英岩化、碳酸盐化等, 由矿体中心向两侧蚀变强度依次减弱, 从早到晚分为不同蚀变期次, 即早期绿泥石化、中期黄铁绢英岩化和晚期碳酸盐化。

### 4 流体包裹体

流体包裹体研究结果表明, 不同构造演化阶段包裹体的主要类型及所测的均一温度、盐度值相差较大, 证实了为不同构造演化阶段的产物。代表早期韧性剪切的流体包裹体以含  $\text{CO}_2$  和富液相两种类型为主, 产于蚀变岩的碎斑石英中,  $t_h$  变化幅度不大 ( $178 \sim 326$ ), 但盐度高  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为  $9.2\% \sim 14.8\%$ ; 代表中期压扭性构造演化阶段的流体包裹体主要是富液相的, 其次是含  $\text{CO}_2$  的包裹体, 另有少量富气相的包裹体, 寄主于含金破碎带蚀变岩再次碎裂化的碎斑石英中,  $t_h$  变化于  $120 \sim 400$  之间, 低-中等盐度  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为  $2.2\% \sim 8.6\%$ , 为主成矿期流体; 代表晚期张扭性演化阶段的流体包裹体主要是富液相包裹体, 常见于晚期含金石英细脉或石英碎斑边部再生加大处, 温度范围宽 ( $100 \sim 380$ ) 盐度低  $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$  为  $0.1\% \sim 4.2\%$ 。另外, 由含  $\text{CO}_2$  包裹体构筑成的 3 条  $p-t$  演化曲线, 也明显反映出三期不同构造演化阶段的流体特征。

## 5 讨论与结论

已有的研究表明,野骆驼泉金矿是产于绿片岩相变质岩中、严格受三级构造系统控制的破碎带蚀变岩型金矿床。过去,人们习惯于将此类矿床称之为中温深成热液型(Mesothermal)金矿床,近年的研究结果显示,该类金矿床与造山过程紧密相关,它们的成矿深度也存在着很宽的变化范围,因而 Groves 等(1998)建议将之称为造山型金矿床。

如前所述,野骆驼泉矿区含矿构造带为紧邻柴北缘深断裂旁侧的次级构造系统,明显存在着三阶段构造-流体-矿化模式。其早期的韧性剪切作用是晚加里东造山的深层次塑性流变产物,陈文(1994)和崔军文等(1996)对矿区南侧柴北缘深断裂中的韧性剪切变形变质期形成的黑云母测得的 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为 400 Ma 和 454 Ma(私人交流)。尽管这 2 个年龄值并不十分一致,但其与柴北带的晚加里东造山(主造山期)活动的年龄数据非常一致。该矿床流体包裹体研究发现,寄主于该期石英碎斑中的流体是一套高密度的中—低温含 $\text{CO}_2$ 的流体,其最大捕获压力( $p_{\max}$ )为 $2.6 \times 10^8$  Pa,剪切摩擦生热引起的地热梯度为 $31^\circ/\text{km}$ 。100 多个在韧性剪切作用下形成的构造岩(构造片岩、千糜岩等)的 Au 含量统计表明,它们平均含 Au 在 $20 \times 10^{-9}$ (构造片岩)和 $90 \times 10^{-9}$ (千糜岩)之间,比区域绿片岩的 Au 背景值( $3 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-9}$ )提高了数倍至数十倍。因此,早期(晚加里东主造山期)深层次的构造流体作用导致矿床中金的初始富集。

寄主于压扭性构造期形成的构造透镜体中的石英内的流体包裹体捕获压力低 $400 \times 10^5 \sim 1200 \times 10^5$  Pa(相当于 1.3~4 km 深),显示这是一期活动在地壳较浅层次脆性构造变形带中的流体。该期流体具高热梯度(约 $100^\circ/\text{km}$ ),这种局部的高热流可能与印支期西赛什腾山花岗岩(Rb-Sr 等时年龄 222 Ma)侵位有关。我们测得黄铁绢英岩化蚀变糜棱岩型金矿石的绢云母 $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ 年龄为 246 Ma,对应于柴北带的后造山过程。统计表明,这一期构造蚀变岩的 Au 平均含量在 $1000 \times 10^{-9}$ 左右,是在前期(含 Au $20 \times 10^{-9} \sim 90 \times 10^{-9}$ )初始富集的基础上,流体再次聚集的一次主成矿期。受压扭性构造控制,这一期的含金流体可能主要沿强、弱应变带之间的过渡带聚集,从而导致金矿体在空间上呈左行斜列式脉群分布。

第三期构造(张扭性)流体只形成局部的含金石英细脉,叠加于早期矿化之上,形成局部的高品位矿石。这是一期受印支期花岗岩类岩浆侵入热扰动的、活动于地壳浅层次脆性变形带中的局部高热流体。灰白色石英细脉、长英质脉和碳酸盐脉沿裂隙充填交切,标志矿化已接近尾声。

## 参 考 文 献

- 陈柏林,董法先,李中坚. 1999. 韧性剪切带型金矿成矿模式. 地质论评, 45(2): 186~192.
- 崔艳合,张德全,李大新,等. 2000. 青海滩间山金矿床地质地球化学及成因机制. 矿床地质, 19(3): 211~221.
- 丰成友,张德全,李大新,等. 2002. 青海赛坝沟金矿地质特征及成矿时代. 矿床地质, 21(1): 45~52.
- 刘继顺. 1996. 韧性剪切带中金成矿研究的若干问题. 地质论评, 42(2): 123~128.
- 殷鸿福,张克信. 1998. 中央造山带的演化及其特征. 地球科学, 23(5): 437~442.
- 于凤池,马国良,魏刚锋,等. 1998. 青海滩间山金矿床地质特征和控矿因素分析. 矿床地质, 17(1): 47~56.
- 张德全,丰成友,李大新,等. 2001. 柴北缘—东昆仑地区的造山型金矿床. 矿床地质, 20(2): 137~146.
- 博伊尔 R W. 1979. 金的地球化学及金矿床. 马万均,王立文等译. 北京:地质出版社.
- Bonnemaïson M and Marcoux E. 1990. Auriferous mineralization in some shear zone: A three-stage model of metallogenesis. Mineralium Deposita, 25(2): 96~104.
- Ramsay J G. 1980. Shear zone geometry: A review. Struct. Geol., 2: 83~99.
- Sibson R H. 1977. Fault rocks and fault mechanism. Geol. Soc. London, 133: 191~213.