

甘肃阳山金矿区安昌河—观音坝断裂带显微构造特征及地质意义

代堰镔^{1,2} 朱玉娣² 王根厚² 张连昌¹ 陶 宏³ 刘 洋⁴ 吕亚博⁵

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 北京 100029; 2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450002; 4. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 5. 中国石油长庆油田分公司第三采气厂, 内蒙古 鄂尔多斯 017300)

摘要:甘肃阳山金矿是我国最大的金矿床, 位于西秦岭造山带的陕甘川“金三角”地区。金矿成矿时代为早侏罗世, 与燕山期斜长花岗斑岩有密切的成因联系。基于野外地质调查, 本文对安昌河—观音坝断裂带构造岩进行了细致的显微构造研究, 以期通过微观构造特征认识宏观断裂构造的活动规律。镜下观察表明断裂带内兼具大量的脆性与塑性显微变形, 主要发育左行剪切, 暗示该断裂为左行切—脆性剪切带。断裂带内构造岩经历了高绿片岩相、低绿片岩相及低于绿片岩相的变质—变形过程, 且断裂带内至少存在过三到四期构造变形, 为断裂带曾发育“多期构造变形”提供依据。显微构造应力分析及岩层产状等密度图显示区域主压应力方向为 NNW—NNE, 是对印支期以来多期主应力方位的综合反映。据亚颗粒法及动态重结晶法计算的成矿前古应力差值为 128.6~95.8 MPa, 成矿期古应力差值为 74.9~69.3 MPa, 成矿后古应力差值为 65.8 MPa。综合分析认为中—晚三叠世以来安昌河—观音坝断裂带变质相相变为高绿片岩相→低绿片岩相→低于绿片岩相, 变形序列为韧性→切—脆性→脆性, 区域主应力大小发生了大→小的转变, 主应力方位经历了 SN 向挤压→NE 向挤压→NW 及 SN 向挤压的转换。安昌河—观音坝断裂带构造演化特征反映其经历了从深部到浅部逐渐抬升的过程。

关键词:脆性及韧性显微构造; 左行剪切; 变形温压条件; 古应力差值; 安昌河—观音坝断裂带; 阳山金矿

中图分类号: P542+.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)03-0729-11

甘肃阳山金矿是近年来新发现的超大型微细浸染型金矿床, 目前探明的黄金储量已超过 308 t^[1-2], 被认为是亚洲最大的类卡林型金矿, 已然成为众多地质学家研究的热点。以往的研究工作主要围绕矿床地质特征、矿床成因和控矿因素等方面展开, 且取得了丰硕的成果^[1-11]。前人的工作在矿床成因、主要控矿因素等方面存在较大分歧^[2], 但几乎无一例外地承认了安昌河—观音坝断裂带对金矿床有控矿作用^[2,3,7,8,9,12,13]。本文即以安昌河—观音坝断裂带内构造岩为主要研究对象, 报道了有关显微构造研究工作。结合前人研究成果, 以期对安昌河—观音坝断裂带构造演化特征作出更加全面的认识。此前的研究多

以地球化学方法为手段, 而在该区进行微观尺度的系统研究, 尚属首次。

1 成矿地质背景

阳山金矿地处中朝板块、扬子板块与松潘—甘孜褶皱带的结合部位(图 1-a), 即勉略构造混杂带北缘^[14], 是西秦岭地区卡林型—类卡林型金矿省的代表性矿床^[15]。

矿区出露的地层主要有: 中元古界碧口群碳酸盐岩、硅质岩、千枚岩、板岩及绿片岩等; 泥盆系砂岩、板岩、千枚岩、灰岩、含铁石英岩等; 二叠系灰岩、白云岩、砂岩、板岩等。此外, 还出露少量三叠系和侏

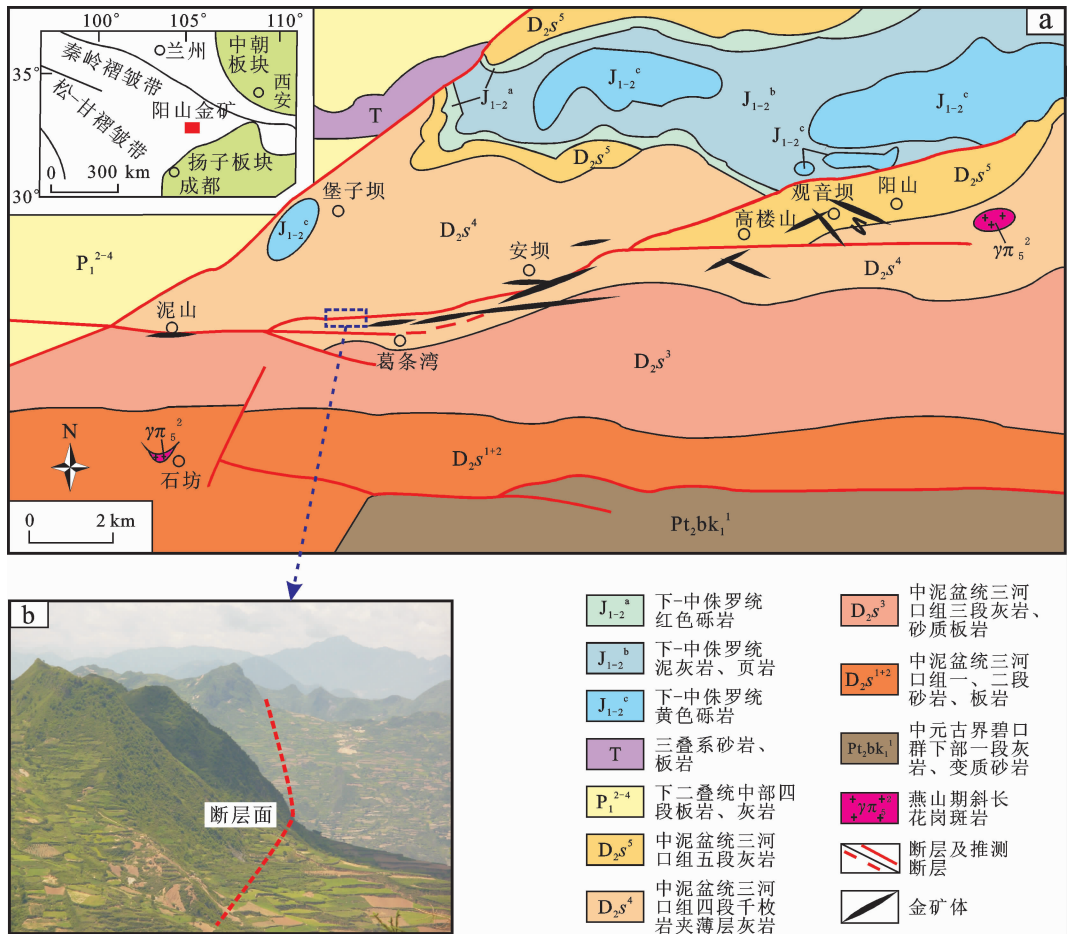


图1 阳山金矿地质图(a)(改自齐金忠等^[4])及安昌河—观音坝断裂带断层三角面(b)(摄于葛条湾,镜头方向 80°)
Fig.1 Geological map of the Yangshan gold deposit (a)(after Qi Jinzhong et al. ^[4]); triangular facet of the Anchanghe-Guanyinba fault zone (b) (shot at Getiaowan, with the shooting direction being 80°)

罗系碎屑岩^[3](图1-a)。泥盆系三河口组为主要的容矿围岩,由中细粒石英砂岩、炭质泥板岩、泥灰岩以及微晶灰岩、含炭硅质岩等组成;矿区的含矿地层由三河口组第三、四岩性段的炭质泥板岩-泥灰岩-薄层灰岩-粉砂泥板岩-硅质岩的薄互层组成^[12]。

矿区仅出露少量小岩株和岩脉,沿构造破碎带近东西向产出,岩性包括中细粒斜长花岗斑岩、细粒黑云二长花岗斑岩、花岗细晶岩以及霏细斑岩等。其中,燕山期斜长花岗斑岩脉出露最为广泛,金矿体一般产于千枚岩与斜长花岗斑岩脉内外接触带附近^[4]。矿区斜长花岗斑岩及石英-黄铁矿脉的碳氧同位素测定结果显示,斜长花岗斑岩脉 $\delta^{13}C_{全岩}$ 为 -9.14‰ $\sim -9.09\text{‰}$ 、 $\delta^{18}O_{全岩}$ 为 -9.77‰ $\sim -9.75\text{‰}$,与石英-黄铁矿脉 $\delta^{13}C_{全岩}$ -8.36‰ 、 $\delta^{13}O_{全岩}$ -13.54‰ $\sim -9.06\text{‰}$ 具有很好的一致性^[4,5]。矿石黄铁矿硫同位素测定结果

显示, $\delta^{34}S$ 值为 -2.2‰ $\sim -0.7\text{‰}$,平均 -1.6‰ ,接近于岩浆硫,而与泥盆系地层中沉积成因黄铁矿 $\delta^{34}S$ 值 10.9‰ 相差甚远^[6]。碳、氧、硫同位素示踪表明阳山金矿区成矿作用与岩浆活动之间存在密切的成因联系。矿区斜长花岗斑岩脉 K-Ar 年龄测试结果为 $209\sim 171\text{ Ma}$ ^[4,5],矿带内不同区段出露的中酸性岩脉锆石 SHRIMP U-Pb 年龄主要集中于 $220\sim 185\text{ Ma}$ ^[11],说明矿区中酸性岩脉主要侵位于晚三叠世—早侏罗世。矿区含金石英脉 $^{40}\text{Ar}-^{39}\text{Ar}$ 年龄为 195 Ma ^[4,5],含矿蚀变花岗斑岩中独居石电子探针 U-Th-Pb 年龄为 $(190\pm 3)\text{ Ma}$ ^[17],表明金矿化作用发生于早侏罗世,与斜长花岗斑岩脉的成岩时代一致。

2 矿体及控矿断裂地质特征

阳山金矿带西起泥山,东至张家山,全长近 30

km,宽 0.5~3 km,主要包括阳山、高楼山、安坝、葛条湾 4 个矿段(图 1-a)。矿脉在平面上为舒缓波状,剖面上为脉状,总体走向 NEE,倾向南,倾角 45~70°。矿脉长 2 100~3 500 m,平均厚度为 3.69~6.57 m,向深部矿脉品位下降、厚度变薄,由西向东矿化逐渐增强^[18]。

控制阳山金矿产出的区域地质构造为文县弧形构造,它由一系列近 EW 向断裂及褶皱构成。其中,安昌河—观音坝断裂为含矿构造,由一系列次级断裂及强变形带构成^[9]。该断裂为金矿床的控矿断裂,西起安昌河,东至观音坝附近,全长 30 km,宽数十米至数千千米,呈近东西向展布(图 1-b),总体为北倾,均产于中泥盆统千枚岩、灰岩、石英岩及砂岩中^[8,19]。主断面沿千枚岩与灰岩界面展布,断层与地层产状基本一致,为顺层断裂。断裂带西段走向为 95~115°,南倾为主,倾角较缓为 40~50°;断裂带中部走向近南北向,但延长较短,断层陡倾,南北向挤压作用在中部形成张性断裂;断裂带东段走向为 75°左右,北倾为主,倾角较陡为 50~60°。安昌河—观音坝断裂带沿东西走向上的变化形成“麻花式”构造,是区域南北向不对称挤压应力及其派生的 NEE、NWW 向剪应力作用造成的,矿体就位于断裂带扭转的交汇部位^[2]。

3 安昌河—观音坝断裂带显微构造形态学特征

不同显微构造有不同的成因机制:如果岩石能干性较强且变形产生于表浅构造层次,发育脆性显微变形;如果岩石能干性较弱且变形产生于较深构造层次,发育韧性显微变形^[20-22]。本次工作主要在安坝、高楼山、观音坝、阳山几个地区的断裂带内采集构造岩并磨制薄片。镜下观察可见丰富多彩的显微构造现象,将其分为脆性和塑性 2 类显微构造。

3.1 脆性显微构造

压碎结构:断层两盘相互挤压、研磨的结果,是碎裂岩特有结构。在 D5224-R1 号薄片(灰岩)中可观察到,方解石颗粒破碎成棱角状,其边缘呈锯齿状,粒度 0.015~0.10 mm,不具备定向构造,碎屑间的空隙为原岩研磨而成的细粒物质所充填(图 2-a)。方解石颗粒发育膨凸动态重结晶新晶及 e 双晶,后者反映了脆性变形之前的塑性变形^[23-25]。

显微张裂隙:裂隙多呈不规则状、平行状或共轭状,宽约 0.015 mm(图 2-b),单条裂隙延伸不远,且

常被后期方解石脉充填(图 2-n,p)。断裂带内岩石多发育此种张裂隙,反映后期表浅构造层次的脆性变形。

3.2 塑性显微构造

波状消光:镜下观察薄片 D8025-R1(变质石英砂岩),可见消光影呈不典型扇状、条状连续地扫过石英颗粒,其消光界面不明显(图 2-c)。波状消光现象是塑性变形的重要标志^[26,27],反映断裂带内岩石经历过较强的变形作用。

核幔构造:在正交偏光镜下,薄片 D8025-R1(变质石英砂岩)中的变形石英残斑(核)具波状消光,粒度约 0.8 mm×1.6 mm,其周围环绕细小的膨凸动态重结晶新颗粒(幔),粒度约为 0.02 mm(图 2-c)。

动态重结晶新颗粒:薄片 D8026-R1(糜棱岩化细砂岩)中发育石英亚颗粒旋转动态重结晶新颗粒,其大小和形状相似,粒度为 0.10~0.25 mm,呈压扁、拉长状,具强定向性,颗粒边界呈锯齿状或不规则港湾状,波状消光不发育(图 2-d)。薄片 D8005-R1(粉砂质千糜岩)中可见大量石英膨凸动态重结晶新晶,新晶或分布于残斑边部,或沿残斑内裂隙发育,其粒度为 0.01~0.04 mm,不显示定向性(图 2-e)。

机械双晶:应力作用使晶体内部分晶格沿一定面网方向发生均匀滑移所形成,一般都呈聚片双晶,在方解石和白云石中最为常见。薄片 D9006(灰岩)中可见发育良好的机械双晶,其双晶纹宽窄、密集程度不同(图 2-r),反映不同构造期次的应变强度不一致。

眼球状构造:薄片 D4274-R1(蚀变细粒斜长花岗斑岩)中斜长石残斑粒度约 0.12 mm×0.40 mm,具拖长的尾部,其边部发生膨凸动态重结晶作用,为“σ”型眼球状构造(图 2-f)。

书斜构造:相邻同种矿物沿解理或裂隙的滑动形成,以斜长石最为常见。薄片 D8022(千糜岩)中可见由一组斜长石构成的书斜构造,斜长石粒度约 0.05 mm×0.10 mm,发育绢云母化(图 2-g)。

矿物拉伸线理:薄片 D9001-R2(千糜岩)中石英在应力作用下被压扁、拉长,呈一定方向展布,显示增强的线理特征(图 2-h)。

带状构造:薄片 D8006-R1(石英岩)、D8006(变质石英砂岩)中变形石英呈条带状分布,图 2-i 为石英单晶丝带,粒度约 0.20 mm×1.00 mm;图 2-j 中条带由石英集合体组成,单颗粒石英粒度为 0.02~0.15 mm。

显微分层现象:岩石变形过程中先形成基质,将

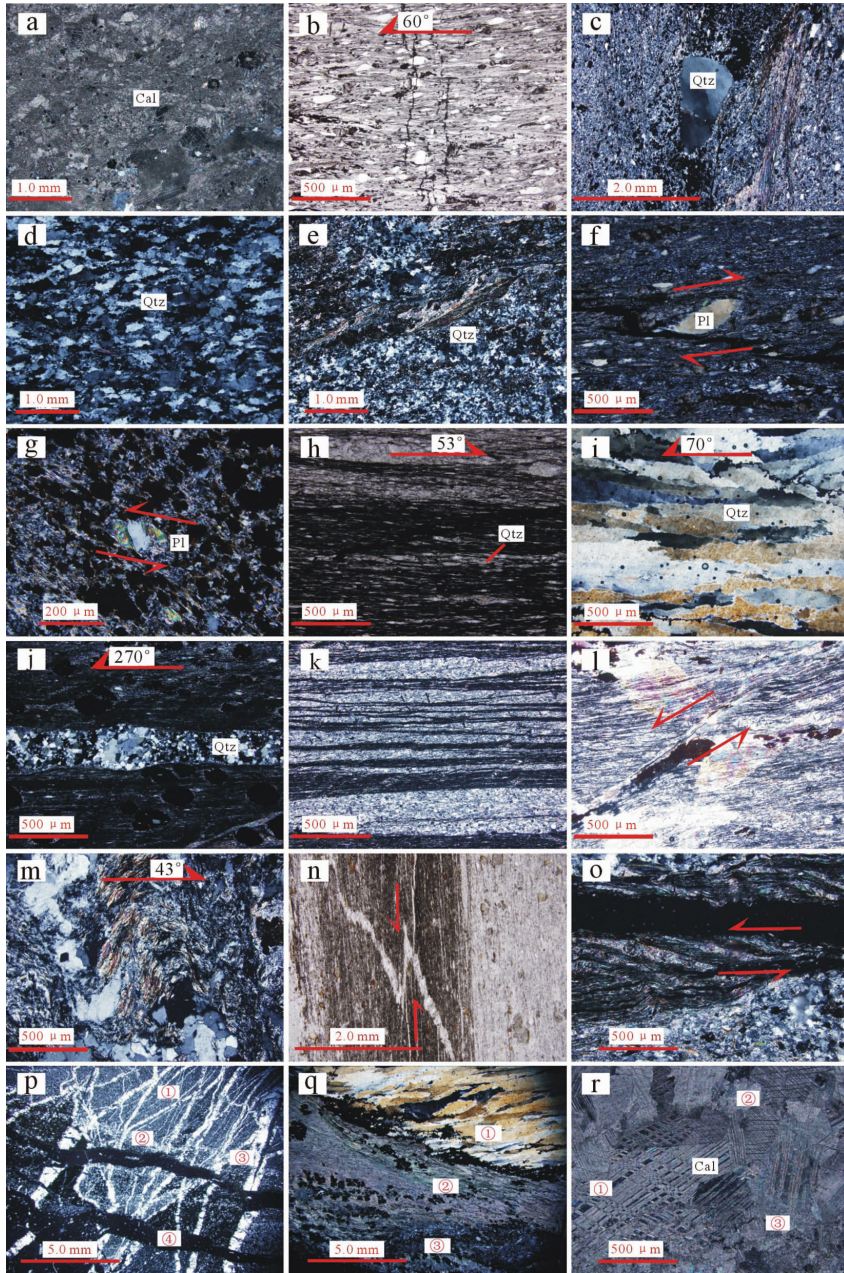


图2 安昌河—观音坝断裂带构造岩显微构造特征

a—灰岩具压碎结构,方解石(Cal)碎屑发育膨凸动态重结晶新晶及e双晶;b—雁列状显微张裂隙;c—石英(Qtz)的核幔构造,变形石英残斑(核)具波状消光,周围环绕细小的膨凸动态重结晶新颗粒(幔);d—石英亚颗粒旋转动态重结晶新晶具强定向性,波状消光不发育;e—石英膨凸动态重结晶新晶发育于残斑边部及残斑内裂隙,不显示定向性;f—斜长石(Pl)“σ”型眼球状构造,边部发育膨凸动态重结晶新颗粒,显示右行剪切;g—斜长石书斜构造,发育绢云母化,显示左行剪切;h—石英拉伸线理;i—石英单晶丝带;j—石英多晶条带;k—显微分层现象;l—显微塑性断裂;m—显微褶皱;n—方解石脉体的交切关系显示左行剪切;o—矿物集合体的塑性流变特征显示左行剪切;p—多组方解石脉体的穿插错断;q—不同变形期次的变形叠加;r—三组方解石机械双晶

Fig.2 Microstructural characteristics of tectonites in the Anchanghe-Guanyinba fault zone

a-Limestone with crush texture, and calcite having bulging dynamic recrystallization and e-twins; b-En echelon tensional microcrack; c-Core-mantle structure of quartz, and deformed quartz porphyroblast (core) with undulatory extinction surrounded by fine-grained bulging dynamic recrystallization grains (mantle); d-Quartz subgrains of twirling dynamic recrystallization intensely oriented, with no undulatory extinction; e- Quartz grains of bulging dynamic recrystallization developed at the edge of porphyroblasts and in the fracture of porphyroblasts, without being oriented; f- “σ” type ocellar structure of plagioclase showing dextral shear, whose edge develops new grains of bulging dynamic recrystallization; g- Domino structure of plagioclase showing sericitization and sinistral shear; h-Stretching lineation of quartz; i-Single crystal ribband of quartz; j-Polycrystal ribband of quartz; k-Micro-layering; l-Micro-ductile fracture; m-Micro-fold; n-Cutting relationship of calcite veins showing sinistral shear; o-Rheologic characteristics of mineral aggregation showing sinistral shear; p-Cutting relationship of multiunit calcite veins; q-Multistage deformed superposition; r. Three groups of calcite e-twins

刚性矿物包裹其中;随着变形的持续,基质富集构成条带,刚性矿物也趋向于排列成层,以利于进一步变形。薄片 D8010-R2(砂质板岩)中可见不同矿物发生分离,显示成层性及定向性(图 2-k)。

显微塑性断层:薄片 D8001(千糜岩)中可见显微塑性断层,其两侧矿物具定向性,并显示塑性流变特征(图 2-l),反映断层形成于较深构造层次,温度压力较高。

显微褶皱:薄片 D1041(绢云母千枚岩)中可观察到显微褶皱,褶皱波长约 1 mm,由石英、长石、绢云母等矿物集合体组成(图 2-m),反映应力作用下矿物在微观尺度的受力变形。

4 运动学分析

综合分析各种显微构造能准确判断剪切运动指向,其准则是利用简单剪切变形中形成的显微构造的对称性与应变对称性之间的关系^[28]。野外工作中采集定向标本,将其磨制薄片并恢复到野外实际产状,再依据上述原则进行显微构造运动学分析。

脉体错断:构造裂隙被后期物质充填形成脉体,根据脉体错断交切关系可对剪切方向进行判定。断裂带构造岩(如碎裂岩、糜棱岩化细砂岩)中发育大量脉体交切现象,均显示为左行剪切(图 2-n)。

眼球状构造:镜下观察可见薄片 D4274-R1(蚀变细粒斜长花岗斑岩)中发育“ σ ”型不对称眼球状构造,其拖尾的旋转方向应与剪切指向一致^[26, 27],据此判定为右行剪切(图 2-f)。

书斜构造:薄片 D8022(千糜岩)中发育书斜构造,其错列阶梯面下降方向与总体剪切指向相反,显示为左行剪切(图 2-g)。

显微塑性断层:薄片 D8001(千糜岩)中显微断裂两侧矿物拉伸方向有一定错位,显示为左行剪切(图 2-l)。

流变特征:薄片 D9001(绢云母千枚岩)中矿物集合体在韧性剪切作用下显示流变特征,形成“多米诺骨牌式”的变形显微构造,判定为左行剪切(图 2-o)。

运动学分析表明,阳山金矿区安昌河—观音坝断裂带剪切方向以左行剪切为主。

5 变形温压条件及变形期次

5.1 变形温压条件

在不同构造层次或不同变形温压条件下,矿物

发育不一致的显微变形特征^[29, 30]。阳山金矿区安昌河—观音坝断裂带构造岩中发育多种显微构造,主要为上地壳低温变形及中地壳中高温变形的产物,前者包括石英的波状消光(图 2-c)、膨凸动态重结晶新颗粒(图 2-c、2-e)、单晶丝带(图 2-i)以及长石的书斜构造(图 2-g);后者包括石英的亚颗粒旋转动态重结晶新颗粒(图 2-d)、多晶条带(图 2-j)以及长石的眼球状构造(图 2-f)、膨凸动态重结晶新颗粒(图 2-f)。上述两组显微构造表明断裂带内构造岩经历了高绿片岩相与低绿片岩相的变质-变形过程^[28, 29-31]。在断裂发育后期形成了大量的脆性显微构造(图 2-a、2-b),反映为地壳表层低于绿片岩相变质-变形的产物^[28]。此外,方解石在 250 °C 左右的低级变质作用条件下即可发生膨凸动态重结晶作用^[30](图 2-a),暗示方解石膨凸动态重结晶新晶发育于地壳表浅层次。

5.2 变形期次

利用构造岩的显微特征能有效识别构造变形的叠加关系及演化特征^[32]。本次工作选取变形较复杂的构造岩,切制薄片并进行详细观察,以期能较全面地认识断裂带所经历的构造变形期次。

脉体穿插错断:薄片 D8008-R1(砂质板岩)中发育大量方解石脉体,根据脉体的交切关系及宽窄变化,判定至少发生过 4 期构造变形(图 2-p)。

变形叠加:薄片 D4014-R1(绢云母千枚岩)中发育多期构造变形,后期变形叠加于早期变形之上或者截切早期变形,据此判定至少存在过 3 期构造变形(图 2-q)。薄片 D9006(灰岩)具压碎结构且方解石碎屑发育 e 双晶(图 2-a),反映脆性变形之前曾发育塑性变形;此种现象在安昌河—观音坝断裂带构造岩中较为常见,表明后期脆性变形对早期塑性变形具有叠加改造作用。

机械双晶:薄片 D9005(灰岩)中可见几组发育良好的方解石机械双晶,其双晶纹数量、宽度不同,判定至少发育过 3 期构造变形(图 2-r)。

6 应力分析

6.1 区域主应力方向

将定向薄片恢复至野外产状,镜下分析多种变形显微构造推导主应力方向。

显微张裂隙:薄片 D4274-R1(蚀变细粒斜长花岗斑岩)中显微张裂隙呈 330° 向近似雁列状展布

(图 2-b),主压应力方向应与雁列展布方向一致^[20,21],推导主压应力方向为 330°。

矿物拉伸线理:薄片 D9001-R2(千糜岩)中矿物拉伸线理方向为 53°(图 2-h),主压应力方向应与拉伸线理方向垂直^[21],推导主压应力方向为 323°。

带状构造:薄片 D8006-R1(石英岩)、D8006(变质石英砂岩)中石英条带延伸方向分别为 70°、270°(图 2-i,j),主压应力方向应与带状构造延伸方向垂直^[27],推导主压应力方向为 340°、0°。

显微褶皱:对显微褶皱进行受力分析时,可以采用类似宏观褶皱的分析方法^[20,33]。薄片 D1041(绢云母千枚岩)水平方向为 43°(图 2-m),显微褶皱轴面与铅垂线之间大致有 30°的偏离,轴面方向约为 103°,推导主压应力方向为 13°。

综上分析,显微构造所反映的区域主压应力方向为 323°~13°,为 NNW-NNE。

6.2 岩层产状等密度图

本次工作对安昌河—观音坝断裂带内 228 组岩层产状进行了测定与统计,作等密度图以获得岩层优势产状。根据岩层优势产状,可以对区域主应力方向进行推导。如图 3 所示,研究区岩层优势倾向为 NNE 向,表明主构造期区域主应力方向为 NNE 向。

6.3 古应力差值

运用亚颗粒法、动态重结晶法可以对古应力差值进行有效估测^[34,35]。近年来,国内外学者采用该方法计算古应力差值的实例比比皆是^[36-40]。石英亚颗粒大小与差应力之间的函数关系为: $\sigma_1 - \sigma_3 = 18000/D$,D 为石英亚颗粒大小(单位 μm)^[34,35]。动态重结晶颗粒大小与差应力大小之间的关系式为: $\sigma_1 - \sigma_3 = AD - 0.68$,A 为常数(石英 A 值为 6.1;长石 A 值为 7.8;方解石 A 值为 7.5),D 为动态重结晶颗粒大小(单位 mm)^[34,35]。

本次工作选取断裂带内具有代表性的构造岩薄片,统计当中矿物亚颗粒及动态重结晶新颗粒粒径,求其平均值用以计算古应力差值。测量及计算结果见表 1,据石英亚颗粒法计算的古应力差值为 128.6 MPa,据动态重结晶法计算长石、石英、方解石的古应力差值分别为 95.8 MPa、74.9~69.3 MPa、65.8 MPa。

7 讨论:显微构造的地质意义

前人认为阳山金矿区安昌河—观音坝断裂带是一条韧—脆性剪切带^[1,2,9,12,13],并且韧—脆性剪切带控制了矿体的定位与富集^[2,9,13]。对于“韧—脆性剪切带”的变形特征及运动学性质,前人的工作却鲜有提及。镜下观察表明,断裂带内构造岩兼具大量的脆性及韧性显微构造,暗示断裂带内曾发育脆性及韧性两类构造变形。运动学分析显示,断裂剪切方向以左行剪切为主,与前人研究结果一致^[41,42]。本文的研究工作首次为“左行韧—脆性剪切带”的定位提供了确切的显微构造证据。

安昌河—观音坝断裂带位于中朝板块、扬子板块与松潘—甘孜褶皱带的结合部位(图 1-a)。此前的构造研究工作表明,印支期扬子板块向南秦岭俯冲碰撞,产生的 SN 向挤压应力形成了文县弧形构造^[4];晚三叠世西秦岭地区受 SN 向挤压构造体制作用,燕山期受西太平洋构造域派生出的 NW 向水平挤压作用,喜山期受来自印度板块相对欧亚板块向北挤压而产生的 SN 向顺扭力偶作用^[43];对阳山金矿区成矿前节理及矿化裂隙产状的统计结果显示,区域主应力在晚三叠世为 SN 向挤压,早侏罗世转变为 NE 向挤压^[7]。综合上述前人研究工作认为:从晚三叠世→早侏罗世→早侏罗世之后,断裂带区域主应力方位经历了 SN 向挤压→NE 向挤压→NW 及 SN 向挤压的转换。本文显微构造分析及岩层产状等密

表 1 据不同古应力计计算的古应力差值

Table 1 Differential stress calculated by different paleopiezometers

样号	岩性	矿物	照片	统计个数/个	平均粒径/mm	计算方法	古应力差值/MPa
D8026-R1	糜棱岩化细砂岩	石英	图 2-d	30	0.14	亚颗粒法	128.6
D4274-R1	细粒斜长花岗斑岩	长石	图 2-f	15	0.025	动态 重结 晶法	95.8
D8005-R1	粉砂质千糜岩	石英	图 2-e	50	0.025		74.9
D8025-R1	变质石英砂岩	石英	图 2-c	50	0.028		69.3
D5224-R1	灰岩	方解石	图 2-a	20	0.041		65.8

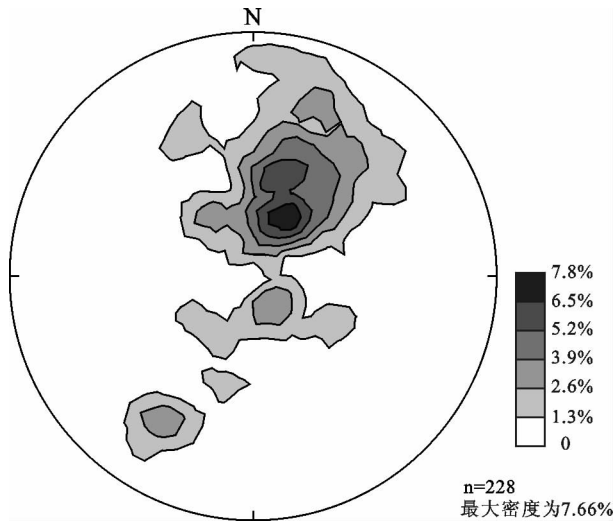


图 3 岩层产状等密度图

Fig.3 Isodensity diagram of stratigraphic attitudes

度图显示区域主应力方向为 NNW-NNE, 是对印支期以来多期主应力方位的综合反映。

对断裂带及其邻区的古应力研究表明, 甘肃地区燕山期差应力为 71.6 MPa^[44]; 西秦岭巴西金矿主成矿期古应力差值平均为 74.3 MPa^[43]; 利用石英位错密度法计算阳山金矿差应力为 85.3~142.5 MPa (平均 108.3 MPa), 该值明显偏大, 推测与成矿时构造活动强烈有关^[7]。本次工作采用亚颗粒法及动态重结晶法对矿物颗粒进行了古应力差值计算, 结合前述对断裂带变形温压条件的分析认为: 据石英亚颗粒法与长石动态重结晶法计算的古应力差值 128.6 MPa、95.8 MPa, 反映为中地壳层次构造变形的古应力差值; 据石英动态重结晶法计算的古应力差值 74.9 MPa、69.3 MPa, 反映为上地壳层次构造变形的古应力差值; 据方解石动态重结晶法计算的

古应力差值 65.8 MPa, 反映为地壳表层构造变形的古应力差值。

勉略缝合带早—中三叠世的俯冲—碰撞过程主要为韧性推覆构造变形, 其后的陆内变形约始于 225 Ma, 早期为强烈的左行韧性变形, 晚期为左行脆性变形^[41]。对阳山金矿带构造变形序列的研究显示, 矿区先后经历了中—晚三叠世韧性变形阶段、早侏罗世韧—脆性变形阶段及其后的脆性变形阶段^[1]。本文的显微构造研究表明, 安昌河—观音坝断裂带内构造岩经历了高绿片岩相、低绿片岩相及低于绿片岩相的变质—变形过程, 分别对应于中—晚三叠世韧性变形、早侏罗世韧—脆性变形及其后的脆性变形阶段。金矿化作用易发育于绿片岩相变质区^[45]、韧—脆性变形阶段^[46,47], 而阳山金矿赋矿围岩主要为三河口群千枚岩, 主成矿期处于早侏罗世韧—脆性变形阶段, 均有利于剪切带成矿流体中含金络合物的分解、沉淀及成矿^[2]。阳山金矿断裂带内地层经历了多期构造变形及叠加改造^[1,14,43], 具有韧—脆性递进变形序列的特征^[12]。显微构造观察表明, 断裂带内至少存在过三到四期构造变形, 为断裂带具“多期构造变形”特征提供了实在的依据。

前已述及, 阳山金矿成矿时代为 195 Ma, 表明成矿作用发生于早侏罗世^[43], 以此为界划分出成矿前、成矿期及成矿后 3 个构造期。综合上述分析结果, 厘定出安昌河—观音坝断裂带构造演化序列(表 2): 中—晚三叠世以来, 安昌河—观音坝断裂带变质相相变为高绿片岩相→低绿片岩相→低于绿片岩相, 变形序列为韧性→韧—脆性→脆性, 区域主应力大小发生了大→小的转变, 主应力方位经历了 SN 向挤压→NE 向挤压→NW 及 SN 向挤压的转换。安昌河—观音坝断裂带构造演化特征反映其经历了从

表 2 安昌河—观音坝断裂带构造演化特征

Table 2 Tectonic evolutionary characteristics of the Anchanghe-Guanyinba fault zone

构造期	时代	变质相	构造层次	变形特征	运动学性质	显微构造	主应力方向	主应力大小/MPa
成矿前	中-晚三叠世	高绿片岩相 (400~500°C)	中地壳	韧性	左行剪切	石英亚颗粒旋转动态重结晶、多晶石英条带; 长石眼球状构造、膨凸动态重结晶	SN 向挤压	128.6~95.8
成矿期	早侏罗世	低绿片岩相 (300~400°C)	上地壳	韧-脆性	左行剪切	石英波状消光、膨凸动态重结晶、单晶丝带; 长石书斜构造; 方解石机械双晶; 显微塑性断层	NE 向挤压	74.6~69.3
成矿后	早侏罗世以后	低于绿片岩相条件(<300°C)	地壳表层	脆性	左行剪切	压碎结构、显微张裂隙、方解石膨凸动态重结晶	NW 及 SN 向挤压	65.8

深部到浅部逐渐抬升的过程。

8 结 论

基于野外地质调查, 本文首次报道了对阳山金矿区安昌河—观音坝断裂带的显微构造研究工作, 结果表明:

1) 该断裂为一条左行韧—脆性剪切带, 断裂带内至少曾发育三到四期构造变形, 其中构造岩经历了高绿片岩相、低绿片岩相及低于绿片岩相的变质—变形过程。

2) 印支期以来区域主应力方位介于 NNW—NNE。

3) 古应力差值在成矿前为 128.6~95.8 MPa, 成矿期为 74.9~69.3 MPa, 成矿后为 65.8 MPa。

致谢: 野外工作得到武警黄金部队第十二支队的大力支持与协助, 在此表示衷心感谢!

参考文献(References):

- [1] 齐金忠, 杨贵才, 罗锡明. 甘肃阳山金矿带构造岩浆演化与金矿成矿[J]. 现代地质, 2006, 20(4):564-572.
Qi Jinzhong, Yang Guicai, Luo Ximing. Tectonic-magmatic evolution and gold mineralization in Yangshan gold belt, Gansu Province, China[J]. Geoscience, 2006, 20(4):564-572(in Chinese with English abstract).
- [2] 郭俊华, 毛世东, 陈衍景, 等. 甘肃文县阳山金矿田地质特征及控矿地质因素分析[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(2):243-252.
Guo Junhua, Mao Shidong, Chen Yanjing, et al. Geological features and ore-controlling factors of the Yangshan gold field in Wen County, Gansu Province[J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2009, 33(2):243-252(in Chinese with English abstract).
- [3] 齐金忠, 袁士松, 李莉. 甘肃省文县阳山金矿床地质地球化学研究[J]. 矿床地质, 2003, 22(1):24-31.
Qi Jinzhong, Yuan Shisong, Li Li. Geological and geochemical studies of Yangshan gold deposit, Gansu Province [J]. Mineral Deposits, 2003, 22(1):24-31(in Chinese with English abstract).
- [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与控矿因素分析[J]. 地质论评, 2003, 49(1):85-92.
Qi Jinzhong, Yuan Shisong, Li Li, 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(in Chinese with English abstract).
- [5] 齐金忠, 杨贵才, 李莉, 等. 甘肃省阳山金矿床稳定同位素地球化学和成矿年代学及矿床成因 [J]. 中国地质, 2006, 33(6):1345-1353.
Qi Jinzhong, Yang Guicai, Li Li, et al. Isotope geochemistry, chronology and genesis of the Yangshan gold deposit, Gansu [J]. Geology in China, 2006, 33(6):1345-1353(in Chinese with English abstract).
- [6] 齐金忠, 李莉, 杨贵才. 甘肃省阳山金矿床成因及成矿模式[J]. 矿床地质, 2008, 27(1):81-87.
Qi Jinzhong, Li Li, Yang Guicai. Genesis and metallogenic model of Yangshan gold deposit in Gansu Province [J]. Mineral Deposits, 2008, 27(1):81-87(in Chinese with English abstract).
- [7] 袁士松, 张继武, 齐金忠, 等. 甘肃阳山金矿构造控矿模式 [J]. 黄金地质, 2004, 10(4):23-27.
Yuan Shisong, Zhang Jiwu, Qi Jinzhong, et al. Structural-control model of the Yangshan gold deposit, Gansu[J]. Gold Geology, 2004, 10(4):23-27(in Chinese with English abstract).
- [8] 李志宏, 杨印, 彭省临, 等. 甘肃阳山超大型热液金矿床的成矿特征[J]. 大地构造与成矿学, 2007, 31(1):63-76.
Li Zhihong, Yang Yin, Peng Shenglin, et al. Metallogenic features of the Yangshan superlarge hydrothermal gold deposit in Gansu [J]. Geotectonica Et Metallogenia, 2007, 31(1):63-76(in Chinese with English abstract).
- [9] 李晶, 陈衍景, 李强之, 等. 甘肃阳山金矿流体包裹体地球化学和矿床成因类型[J]. 岩石学报, 2007, 23(9):2144-2154.
Li Jing, Chen Yanjing, Li Qiangzhi, et al. Fluid inclusion geochemistry and genetic type of the Yangshan gold deposit, Gansu, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(9):2144-2154(in Chinese with English abstract).
- [10] 张莉, 杨荣生, 毛世东, 等. 阳山金矿床锶铅同位素组成特征与成矿物质来源[J]. 岩石学报, 2009, 25(11):2811-2822.
Zhang Li, Yang Rongsheng, Mao Shidong, et al. Sr and Pb isotopic feature and ore-forming material source of the Yangshan gold deposit [J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(11):2811-2822(in Chinese with English abstract).
- [11] 雷时斌, 齐金忠, 朝银银. 甘肃阳山金矿带中酸性岩脉成岩年龄与成矿时代[J]. 矿床地质, 2010, 29(5):869-880.
Lei Shibin, Qi Jinzhong, Chao Yinyin. Zircon SHRIMP U-Pb ages of moderate-acid dykes and ore-forming epochs of Yangshan gold belt in Gansu Province [J]. Mineral Deposits, 2010, 29(5):869-880(in Chinese with English abstract).
- [12] 程斌, 张复新, 贺国芬. 甘肃文县地区阳山超大型微细浸染型金矿床的成因与类型[J]. 地质通报, 2006, 25(11):1354-1360.
Cheng Bin, Zhang Fuxin, He Guofen. Genesis and types of the Yangshan superlarge micro-disseminated gold deposit, Wenxian, Gansu, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11):1354-1360(in Chinese with English abstract).
- [13] 张复新, 侯俊富, 张存旺, 等. 甘肃阳山超大型卡林—类卡林型复合式金矿床特征[J]. 中国地质, 2007, 34(6):1062-1072.
Zhang Fuxin, Hou Junfu, Zhang Cunwang, et al. Characteristics of the superlarge Yangshan Carlin and Carlin-like compound type gold deposit in Gansu [J]. Geology in China, 2007, 34(6):1062-1072(in Chinese with English abstract).
- [14] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 2001.
Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling

- Orogenic Belt and Continental Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001(in Chinese).
- [15] 陈衍景, 张静, 张复新, 等. 西秦岭地区卡林—类卡林型金矿床及其成矿时间、构造背景和模式[J]. 地质论评, 2004, 50(2):134-152.
- Chen Yanjing, Zhang Jing, Zhang Fuxin, et al. Carlin and Carlin-like gold deposits in western Qinling mountains and their metallogenic time, tectonic setting and model [J]. Geological Review, 2004, 50(2):134-152(in Chinese with English abstract).
- [16] 罗锡明, 齐金忠, 袁世松, 等. 甘肃省阳山金矿床微量元素及稳定同位素地球化学研究[J]. 现代地质, 2004, 18(2): 203-209.
- Luo Ximing, Qi Jinzhong, Yuan Shisong et al. Geological and microelement geochemical study of Yangshan gold deposit, Gansu Province [J]. Geoscience, 2004, 18 (2):203-209 (in Chinese with English abstract).
- [17] 杨荣生, 陈衍景, 张复新, 等. 甘肃阳山金矿独居石 Th-U-Pb 化学年龄及其地质和成矿意义 [J]. 岩石学报, 2006, 22(10): 2603-2610.
- Yang Rongsheng, Chen Yanjing, Zhang Fuxin, et al. Chemical Th-U-Pb ages of monazite from the Yangshan gold deposit, Gansu Province and their geologic and metallogenic implications[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(10):2603-2610(in Chinese with English abstract).
- [18] 余金元, 李建忠, 李勇. 甘肃省文县阳山金矿床成因探讨 [J]. 四川地质学报, 2010, 30(2):170-173.
- Yu Jinyuan, Li Jianzhong, Li Yong. An approach to genesis of the Yangshan Au deposit in Gansu Province [J]. Acta Geologica Sichuan, 2010, 30(2):170-173(in Chinese with English abstract).
- [19] 李建忠, 刘洪波, 张亿其, 等. 甘肃省文县阳山金矿带控矿构造特征及找矿方向[J]. 四川地质学报, 2008, 28(1):13-17.
- Li Jianzhong, Liu Hongbo, Zhang Yiqi, et al. Ore-control structures and range of reconnaissance for the Yangshan Au ore zone, in Wenxian, Gansu[J]. Acta Geologica Sichuan, 2008, 28(1): 13-17(in Chinese with English abstract).
- [20] 许志琴. 地壳变形与显微构造[M]. 北京:地质出版社, 1984.
- Xu Zhiqin. Deformation and Microstructure of the Earth Crust [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1984(in Chinese).
- [21] 朱志澄. 构造地质学[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1999.
- Zhu Zhicheng. Structural Geology [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999(in Chinese).
- [22] 王好均. 显微构造及构造岩的研究与应用 [J]. 长春工程学院学报, 2002, 3(3):33-35.
- Wang Haojun. Research on microstructure and structural rock and its application [J]. Journal of Changchun Institute of Technology, 2002, 3(3):33-35(in Chinese with English abstract).
- [23] 刘强, 杨坤光, 张传林, 等. 西昆仑康西瓦断裂显微构造特征及其地质意义[J]. 矿物岩石, 2003, 23(3):26-30.
- Liu Qiang, Yang Kunguang, Zhang Chuanling, et al. The microstructure feature and its geological significance of Kangxiwa fracture zone, west Kunlun[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2003, 23(3):26-30(in Chinese with English abstract).
- [24] 付保国, 侯青亚. 岩石变形显微构造形成机制及常见的变形显微构造特征[J]. 甘肃冶金, 2003, 25(3):1-4.
- Fu Baoguo, Hou Qinya. Genesis and characteristics of microstructures[J]. Gansu Metallurgy, 2003, 25(3):1-4(in Chinese).
- [25] 刘耀辉, 梁金城, 陈懋宏, 等. 桂林—永福断裂北段断层岩显微构造研究[J]. 矿产与地质, 2006, 20(3):227-231.
- Liu Yaohui, Liang Jincheng, Chen Maohong, et al. Microstructure of fault rock at north part of Guilin—Yongfu fracture [J]. Mineral Resources and Geology, 2006, 20 (3): 227-231 (in Chinese with English abstract).
- [26] 刘瑞珣. 显微构造地质学[M]. 北京:北京大学出版社, 1988.
- Liu Ruixun. Microstructural Geology [M]. Beijing: Peking University Press, 1988(in Chinese).
- [27] 胡玲. 显微构造地质学概论[M]. 北京:地质出版社, 1998.
- Hu Ling. Introduction to Microstructural Geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998(in Chinese).
- [28] 胡玲, 刘俊来, 纪沫, 等. 变形显微构造识别手册[M]. 北京:地质出版社, 2009.
- Hu Ling, Liu Junlai, Ji Mo, et al. Deformation Microstructure Identification Manual [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009 (in Chinese).
- [29] Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics [M]. Berlin: Springer-verlag, 2005:56-57.
- [30] 纪沫, 胡玲, 刘俊来, 等. 主要造岩矿物动态重结晶作用及其变质条件[J]. 地学前缘, 2008, 15(3):226-233.
- Ji Mo, Hu Ling, Liu Junlai, et al. Dynamic recrystallization and metamorphic conditions of main rock-forming minerals [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (3):226-233 (in Chinese with English abstract).
- [31] 申亮, 刘俊来, 胡玲, 等. 辽东半岛大营子拆离断层系及其区域构造意义[J]. 中国科学(D 辑), 2011, 41(4):437-451.
- Shen Liang, Liu Junlai, Hu Ling, et al. The Dayingzi detachment fault system in Liaodong Peninsula and its regional tectonic significance[J]. Science in China (Series D), 2011, 41(4):437-451 (in Chinese).
- [32] 陈桂华, 温长顺, 胡玲, 等. 太行山北段中新生代断层岩的显微构造研究[J]. 地震地质, 2004, 26(1):102-110.
- Chen Guihua, Wen Changshun, Hu Ling, et al. Microstructural analysis of Meso-cenozoic tectonites in the northern segment of the Taihang mountains [J]. Seismology and Geology, 2004, 26(1): 102-110(in Chinese with English abstract).
- [33] 单文琅, 宋鸿林, 傅昭仁, 等. 构造变形分析的理论、方法和实践 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1991.
- Shan Wenlang, Song Honglin, Fu Zhaoren, et al. Principals, Methods and Practices of Structural Analysis [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1991(in Chinese).
- [34] Twiss R J. Theory and applications of a recrystallized grain size paleopiezometer[J]. Geophys., 1977, 115:227-244.
- [35] Twiss R J. Static theory of size variation with stress for subgrains

- and dynamically recrystallized grains [J]. U.S. Geo. Surv., 1980: 80-683.
- [36] Ross J V. Stress dependence of recrystallized grain and subgrain size in olirine[J]. Tectonophysics, 1980, 70(1/2):39-61.
- [37] Hacker Bradley R, Yin An, Christie John M, et al. Differential stress, strain rate, and temperatures of mylonitization in the Ruby Mountains, Nevada: Implications for the rate and duration of uplift[J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95:8569-8580.
- [38] Hacker Bradley R, Yin An, Christie John M, et al. Stress magnitude, strain rate, and rheology of extended middle continental crust inferred from quartz grain sizes in the Whipple Mountains, California[J]. Tectonics, 1992, 11(1):36-46.
- [39] 孟宪刚, 邵兆刚, 曲玮, 等. 辽西医巫闾山变质核杂岩拆离断裂带金矿成矿构造物理特征[J]. 地球学报, 2005, 26(4):343-348. Meng Xiangang, Shao Zhaogang, Qu Wei, et al. Tectonophysical characteristics of gold deposits in the detachment zone of the Yiwulushan Metamorphic Core Complex [J]. Acta Geoscientia Sinica, 2005, 26(4):343-348(in Chinese with English abstract).
- [40] 李加好, 宋传中, 任升莲, 等. 秦岭商丹构造带商南段岩石变形与变质条件探讨[J]. 地质论评, 2011, 57(5):641-649. Li Jiahao, Song Chuanzhong, Ren Shenglian, et al. Discussion on the deformation and metamorphic conditions of rocks on the Shangnan part of the Shangnan-Danfeng tectonic belt, Qinling orogen [J]. Geological Review, 2011, 57(5):641-649 (in Chinese with English abstract).
- [41] 陈虹, 胡健民, 武国利, 等. 西秦岭勉略带陆内构造变形研究[J]. 岩石学报, 2010, 26(4):1277-1288. Chen Hong, Hu Jianmin, Wu Guoli, et al. Study on the intracontinental deformation of the Mian-Lue suture belt, western Qinling [J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4):1277-1288 (in Chinese with English abstract).
- [42] 雷时斌. 甘肃阳山金矿带构造-岩浆成矿作用及勘查找矿方向 [D]. 中国地质大学(北京)博士学位论文, 2011. Lei Shibin. Tectonic and Magmatic Constraints on Mineralization and Gold Prospecting of Yangshan Gold Belt, Gansu Province[D]. Ph.D Thesis of China University of Geosciences (Beijing), 2011(in Chinese with English abstract).
- [43] 杜子图, 吴淦国. 西秦岭地区构造体系及金成矿构造动力学[M]. 北京:地质出版社, 1998. Du Zitu, Wu Ganguo. Study on Tectonic Systems and Gold Metallogenic Tectono-Dynamics in the Region of West Qinling [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [44] 万天丰. 中国大地构造学纲要[M]. 北京:地质出版社, 2004:344. Wan Tianfeng. Tectonics Outline of China[M]. Beijing:Geological Publishing House, 2004:344(in Chinese).
- [45] 刘国平, 艾永富. 含碳岩系与金矿床 [J]. 黄金地质, 1998, 4(2): 62-66. Liu Guoping, Ai Yongfu. Carbon bearing sedimentary formation and gold deposits[J]. Gold Geology, 1998, 4(2):62-66(in Chinese with English abstract).
- [46] 邱小平. 深部韧性剪切变形与金矿成矿作用[J]. 黄金地质, 1999, 5(3):6-12. Qiu Xiaoping. Deep ductile shear deformation and gold metallogenesis[J]. Gold Geology, 1999, 5(3): 6-12(in Chinese with English abstract).
- [47] 杨元根, 吴学益, 金志升, 等. 海南二甲金矿的动力变形成矿作用及构造地球化学模拟实验研究 [J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3):320-329. Yang Yuangen, Wu Xueyi, Jin Zhisheng, et al. Dynamic deformation related ore-forming process and tectono-geochemical simulating experiments of Erjia gold deposit, Hainan Province [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(3):320-329 (in Chinese with English abstract).

Microstructural characteristics of Anchanghe–Guanyinba fault zone in the Yangshan gold deposit of Gansu Province and their geological significance

DAI Yan-pei^{1,2}, ZHU Yu-di², WANG Gen-hou²,
ZHANG Lian-chang¹, TAO Hong³, LIU Yang⁴, LV Ya-bo⁵

(1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Geophysical Exploration Center of China Earthquake Administration, Zhengzhou 450002, Henan, China; 4. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 5. Third Gas Recovery Factory of Changqing Oilfield Branch, PetroChina, Ordos 017300, Inner Mongolia, China)

Abstract: The Yangshan gold deposit in Gansu Province, the largest gold deposit in China, lies in the Shaanxi–Gansu–Sichuan triangle area of the western Qinlin Orogen. The gold deposit was formed in the Lower Jurassic, closely related to the Yanshanian plagioclase granophyre. Based on the field work, the authors carried out systematic microstructural researches on tectonites of Anchanghe–Guanyinba fault zone, in the hope of reflecting the macroscopic structure by means of the microscopic structure. By observing the characteristics of the microscopic structure, the authors have found that brittle and ductile deformation is extensively developed in this area, and the shear orientation is mainly left–lateral, implying that the fault is a sinistral ductile–brittle shear zone. The deformation analysis shows that the metamorphic facies of this fault zone underwent the metamorphism–deformation of high greenschist facies, low greenschist facies and facies lower than the greenschist facies. The observation of the microscopic structure reveals that the structural deformation can be divided into 3 or 4 stages at least, thus providing evidence of multistage structural deformation in the fault zone. Stress analysis and isodensity diagram of stratigraphic attitudes indicate that the regional principal stress is in NNW–NNE direction in this area, synthetically reflecting the principal stress orientations since the Indo–Chinese epoch. Calculated by subgrain method and dynamic recrystallization method, the premineral differential stress was 128.6–95.8 MPa, the differential stress during the mineralization stage was 74.9–69.3 MPa, and the postmineral differential stress was 65.8 MPa. According to the research results, the authors hold that the transition of metamorphic facies in the fault zone was high greenschist facies→low greenschist facies→facies lower than greenschist facies from Middle–Late Triassic, whereas the deformation sequence being in order of ductile→ductile–brittle→brittle. The values of regional principal stress were changed from high to low and the regional principal stress orientation was SN compressional→NE compressional→NW and SN compressional. All these evolutionary characteristics imply that the fault zone was gradually uplifted from the depth to the shallow part.

Key words: brittle and ductile microstructure; sinistral shear; temperature and pressure conditions of deformation; differential stress; Anchanghe–Guanyinba fault zone; Yangshan gold deposit

About the first author: DAI Yan-pei, male, born in 1986, doctor candidate, mainly engages in the study of metallogeny and deformational structure; E-mail: diyep@foxmail.com.