甘肃阳山金矿带构造变形特征研究

王　梁[1,2]，王根厚[1]，贾丽琼[1]，雷时斌[2]，李文良[2]，陶　宏[1]

（1. 中国地质大学（北京）地球科学与资源学院；2. 中国人民武装警察部队黄金地质研究所）

摘要：阳山金矿带内构造变形复杂强烈，对构造变形特征的系统研究表明：阳山金矿带内发育有 A 型线理、石香肠、旋转碎斑等构造，这些构造大部分都表现出由北向南的韧－脆性剪切特征；对褶皱轴面产状的统计表明其主应力方向为近南北向；利用石英颗粒动态重结晶法得到古应力值为 45.55 MPa。结合蠕变方程得到变形平均应变速率为 $3.6\times10^{-10}s^{-1}$；根据矿物显微变形特征认为变形形成温度为 280～400 ℃，应发生于地壳深度不超过 12 km 的范围内；依据斜长花岗斑岩形成时间及地层变形特征，认为剪切变形形成于晚三叠世—早白垩世；结合阳山金矿成矿特点，认为该剪切对本区金的活化、迁移富集以及最终金矿体的最终定位，有着极其重要的控制作用。

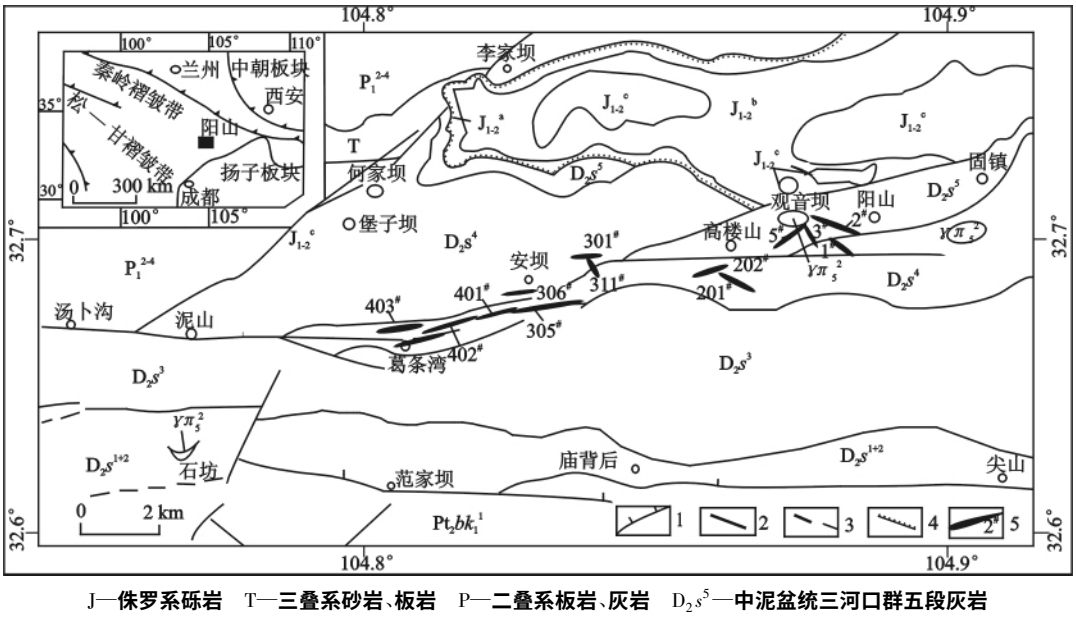
关键词：构造变形特征；韧－脆性剪切变形；控矿作用；阳山金矿带

中图分类号：P 54　P 618.51　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001－1277（2012）02－0007－08

阳山金矿带位于川陕甘交界的金三角地区。1997 年中国人民武装警察部队黄金十二支队在进行水系沉积物测量时发现了阳山金矿床。经过 10 余年的勘查工作，目前，该矿床控制的金资源量已达到 328 t，为一超大型金矿床。对于该矿床前人已进行过有关矿床地质、地球化学、成矿年代学和矿床成因等多方面的研究[1－5]，但是，对于金矿带构造变形特征的研究却较为薄弱。本文在宏观构造研究的基础上，又首次在该矿区进行了显微构造研究，通过宏观与微观构造相结合的方式，对该区域的构造变形特征、变形环境以及构造变形与金矿化的关系等方面进行了分析，希望可以抛砖引玉，能够引起更多学者对该区域构造研究的重视，对该区域地质找矿工作有所帮助。

1　地质概况

在大地构造位置上，阳山金矿床处于华北板块以南、扬子板块以北、松潘甘孜褶皱带以东的三角区内，是三大构造域（华北—扬子—松潘）会聚转化部位，属于西秦岭南亚带，为西秦岭构造带的组成部分[3]（见图 1）。



J—侏罗系砾岩　T—三叠系砂岩、板岩　P—二叠系板岩、灰岩　D_2s^5—中泥盆统三河口群五段灰岩　D_2s^4—中泥盆统三河口群四段千枚岩夹薄层灰岩　D_2s^3—中泥盆统三河口群三段灰岩、砂质千枚岩　D_2s^{1+2}—中泥盆统三河口群一、二段砂岩、板岩　Pt_2bk_1—中元古界碧口群灰岩、变质砂岩　$\gamma\pi_5^2$—斜长花岗斑岩　1—俯冲带　2—断层　3—推测断层　4—不整合界线　5—矿体

图 1　阳山金矿带地质图[3]

收稿日期：2011－10－23

基金项目：武警黄金指挥部专项基金项目（HJ09－03）

作者简介：王　梁（1987—），男，陕西西安人，助理工程师，硕士研究生，主要从事矿床学研究工作；河北省廊坊市丰盛路 159 号，中国人民武装警察部队黄金地质研究所，065000

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

出露地层主要有中元古界碧口群的碳酸盐岩、硅质岩、千枚岩、板岩、超基性—基性岩及绿片岩等; 泥盆系千枚岩、灰岩、板岩、石英砂岩、含碳硅质岩等; 石炭系灰岩、白云岩、白云质灰岩、泥灰岩、石英砂岩及板岩等; 二叠系灰岩、白云岩、砂质板岩等; 三叠系砂岩、砂质板岩夹少量灰岩。侏罗系及白垩系砾岩等。其中,泥盆系三河口组为阳山金矿床的主要容矿围岩。

控制本区的主要构造为文县弧形构造,由一系列近东西向的断裂组成,包括松柏—黎坪断裂、安昌河—观音坝断裂、马家磨—魏家坝断裂、白马—临江断裂。其中,安昌河—观音坝断裂带为矿带的主控断裂,该断裂呈 NEE 走向,总体向北倾,由一系列平行韧-脆性断层组构成,断层与地层产状近于一致或低角度交角。

区内沿构造破碎带出露一些浅成花岗岩类的小型岩株和岩脉,尤以斜长花岗斑岩在矿区出露最为广泛且与矿床形成有密切的关系。斑晶主要为他形粒状—半自形板状斜长石,粒度一般为 0.5 ~ 2 mm,占 30 % 左右,其中斜长石局部绢云母化较强; 基质主要由微、细粒斜长石、石英、黑云母构成,大小 0.1 ~ 0.3 mm,相对含量在 60 % 左右。

2 金矿带构造变形特征

2.1 变形岩石的岩相学特征

中泥盆统三河口组第三和第四岩性段是主要的含矿岩层,也是金矿带构造变形的主体,岩性主要以粉砂质千枚岩为主,其次为中薄层灰岩、变质石英砂岩等。

粉砂质千枚岩呈灰色—黄绿色,变余粉砂结构,千枚状构造,主要由粉砂、绢云母、绿泥石组成。镜下鉴定表明,粉砂主要为石英和少量长石,其中石英颗粒内部带状或波状消光发育,有的被定向拉长成为带状。绢云母及绿泥石,呈鳞片状,呈线状或断线状分布,形成细而薄的连续微片理。野外观察表明,除了在断层破碎带附近以脆性变形为主外,其他情况下,千枚岩大多发生强烈的韧性变形,主要表现为岩层内各种强烈的褶皱构造变形。

灰岩为泥粉晶—中细晶结构,块状构造,主要成分为方解石、陆源碎屑和生物碎屑等。其中方解石晶粒粒度变化较大,从泥晶到中细晶都存在,在较大的晶粒上可见明显机械双晶。陆源碎屑成分以岩屑为主,含少量长石、石英。生物碎屑含量较少,主要为海百合及双壳类残骸等。在许多薄片中观察到微细的不规则裂隙,部分薄片可观察到多条裂隙交叉构成网状,这些裂隙后期多为硅质及碳酸盐充填。宏观上,这些灰岩多表现出韧-脆性变形的特征,发育褶皱、断层、节理等构造。其中,张节理后期多为方解石脉所充填,而脉的穿插关系复杂,表明区内经过多次构造事件。值得一提的是,部分灰岩在压扭应力作用下发生糜棱岩化形成了糜棱岩化灰岩,主要沿断裂带附近断续出现,厚度不大。其相对于普通灰岩,更多地表现出塑性变形的特点,发育有较多的方解石机械双晶,可以观察到许多双晶都发生了弯曲、压扁、拉长现象。

变质石英砂岩为变余粉砂质微细粒结构,块状构造,由陆源砂-粉砂级碎屑及少量填隙物组成。其中,陆源砂-粉砂级碎屑主要由石英、长石构成。在变形较轻微的岩石中,石英晶粒内多见波状消光。而在部分变形较为严重的岩石中,石英多被剪切拉长而成为似矩形条带状,具明显的定向性。填隙物主要由黏土质杂基及硅质胶结物构成,其中黏土质已变为微鳞片状绿泥石和绢云母,很多硅质已重结晶为石英矿物颗粒的自生加大边。岩石内还多发育一些网状裂隙,由方解石、铁质、硅质填充裂隙。

2.2 宏观构造变形特征

甘肃阳山金矿带经历了多期复杂的构造运动,岩石变形相当强烈,形成了形态多样的构造变形现象,但根据这些小构造的形态特征及野外产出的空间特征,分析认为宏观构造特征主要表现为自北而南的韧-脆性剪切,其主要构造表现形式如下:

1) A 型线理。在阳山金矿带内,线理构造并不是特别发育,常见的一般为 B 型线理(皱纹线理和交面线理) 。但在局部地区,亦可见少量 A 型线理,主要为拉伸线理,表现为先期的岩石碎屑、矿物颗粒等在变形作用过程中发生剪切旋转拉长定向而平行排列。董瀚等[7]统计出,区内矿物拉伸线理的优选产状为 350°∠(55° ~ 60°) 。

2) 节理。区内主要岩石类型中都不同程度地发育剪节理和张节理。剪节理常常表现为典型的共轭 X 型节理。张节理后期往往被碳酸盐或硅质所充填而形成方解石脉和石英脉。部分地区可见具有指示意义的雁列式石英或方解石脉。在灰岩中发育的一组雁列脉(见图 2-a) ,充填物为方解石。根据雁列脉的排列方式,可以判断出其为右行剪切变形的产物。结合其产出的空间方位,可以反映出由北向南的逆冲韧性剪切。

3) 石香肠构造。石香肠构造主要物质成分是石英脉。由于石英脉遭受较强烈的剪切-压缩作用,大部分形成不规则状剪切的揉皱型石香肠构造。灰岩中所发育的一个由石英脉经剪切作用后所形成的石香肠构造(见图 2-b) 。灰岩在韧性剪切变形过程

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

中，将其中的石英脉剪切拉长，使其发生细颈化，状如莲藕，部分甚至被拉断分离，两端有明显的膨大现象。根据此石香肠经韧性剪切作用后所表现出的形态特点，可以判断其为右行剪切所致，根据野外产出的空间特征，可以反映出由北向南的剪切变形。

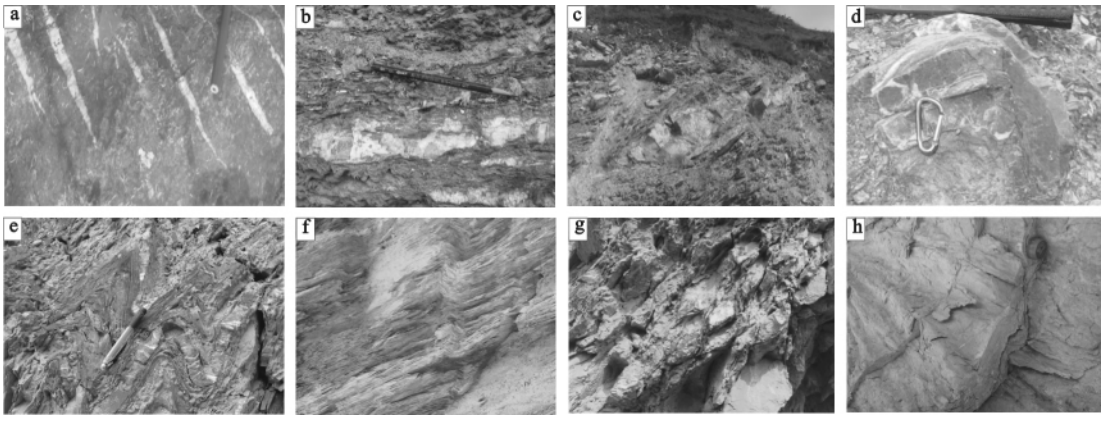


图 2　阳山金矿带宏观构造变形照片

4) 构造透镜体。区内砂质千枚岩中广泛发育有石英砂岩构造透镜体，这些构造透镜体规模不等，长径一般为数十厘米至数米，常常成组、成带或叠置产出，具有尖灭再现的特点。砂质千枚岩中花岗斑岩透镜体(见图 2－c)，显示剪切方向应为右行剪切，结合野外产出的空间特征，也可以反映出其为由北向南的剪切。

5) 小型褶皱。金矿带内小褶皱非常发育，其褶皱幅度一般在数厘米至数米之间。小褶皱形态类型复杂多样，根据这些小褶皱转折端的形态可分为圆弧褶皱、尖棱褶皱和膝褶三大类。其中，能干性较强的岩层(如灰岩、变质石英砂岩)形成转折端圆滑的等厚褶皱，发育正扇形不连续间隔劈理；能干性较弱的岩层(如千枚岩、石英脉)形成尖棱－顶厚褶皱，部分发育反扇形连续劈理。

圆弧褶皱主要在灰岩和变质石英砂岩中发育。变质石英砂岩中所发育的圆弧褶皱(见图 2－d)，其转折端呈宽缓的马蹄形，枢纽为近东西向，轴面稍向北倾。

尖棱褶皱主要发育在粉砂质千枚岩和部分中薄层灰岩中。千枚岩中所发育的复合型褶皱(见图 2－e)，其由两个次级尖棱褶皱所组成，翼部平直，厚度变化不大，基本上保持在 2 cm，翼尖角在 50°左右，整体呈“Z”字型，指示右行剪切，结合野外产出的空间特征，也可以反映出由北向南的剪切。

阳山金矿带内，在变形强烈地段的千枚岩等能干性较弱的岩层中，常成群出现膝折。产于砂质千枚岩中的膝折(见图 2－f)，其膝折角为 80°左右，显示出较强的韧性变形特征，指示右行剪切，结合野外产出的空间特征，也可以反映出由北向南的剪切。

6) 旋转碎斑。旋转碎斑较为发育，在露头尺度和显微域内均可见到。图 2－g 为发育于砂质千枚岩中的石英脉经韧性剪切所形成的旋转碎斑，根据其形态特征可以指示右行剪切，结合其野外产出的空间特征，可以反映出其为由北向南的韧性剪切。

7) 窗棂构造。马杏垣将窗棂构造分为褶曲式，劈理式，石香肠式 3 种类型[8]。区内所见到的窗棂构造主要为褶曲式。发育在千枚岩所夹薄层灰岩中的一系列近于平卧的小型褶曲(见图 2－h)，这些小褶曲的转折脊都呈半圆柱面，侧面看形似若干根圆木棒，可以看做是一种较小的窗棂构造。野外测量表明，这些小的窗棂柱直径大概为组成该构造的薄灰岩厚度的三分之一，即为 2～4 cm，出露柱长大约 1.5 m 左右，整体延伸方向约为 165°，略向北倾，结合其野外产出的空间特征，大致也可以反映出其为由北向南的剪切作用所致。

2.3　显微构造变形特征

在构造应力作用下，岩石不但会表现出各种宏观构造变形，微观上其结构构造和组成矿物也会表现出十分丰富多彩的变形现象。通过对阳山金矿带内所采岩石样品薄片的镜下观察和分析发现，金矿带内显微构造十分发育且非常典型，各种韧脆显微特征基本都能观察到。

1) 显微破裂。显微破裂具体分为剪破裂、张破裂 2 种基本类型，以及张剪性破裂和压剪性破裂 2 种复合类型。在区内部分石英颗粒内部张、剪两种破裂均有不同程度的发育，其中张破裂的破裂面粗糙不平，多呈不规则状和锯齿状延伸(见图 3－a)，而剪破裂的破裂面一般较为较平直，方位稳定，延伸性好，并且常成对出现，呈交叉共轭组合(见图 3－b)。

2) 碎裂结构。由于构造应力的持续作用致使显微破裂程度进一步加剧，完全切割破坏了矿物的原始

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

形态，使其机械破碎，演化为碎裂结构（见图3－c）。另外，在区内一些碎裂的方解石晶体之中可见发育有弯曲的机械双晶，这反映了在脆性变形之前曾发生过塑性变形。

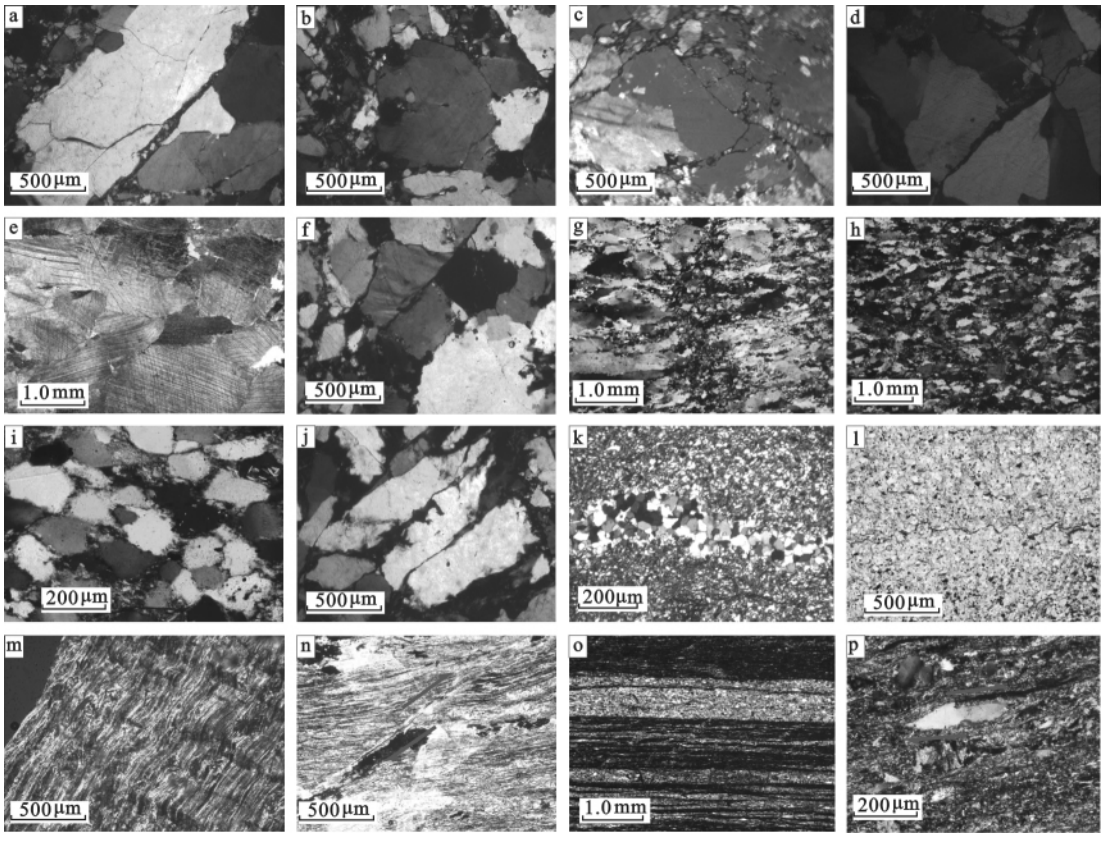


图3 阳山金矿带显微构造变形照片

3）变形纹。在正交偏光镜下可以观察到石英晶粒中发育明显的变形纹，它表现为类似聚片双晶一样相间消光的线纹，线纹厚度多2μm左右，大多数较为平直，少数呈轻微的弧线形，但并不切穿晶粒（见图3－d）。

4）机械双晶。阳山金矿带内大多数方解石由于发生双晶滑移形成了大量机械双晶，多表现为边界平直的双晶纹密集排列且贯穿整个晶粒，并可见一些机械双晶发生了变形弯曲（见图3－e）。机械双晶是塑性变形的标志，区内方解石发育大量机械双晶的事实说明了该区构造变形曾经一段时期以韧性变形为主导。

5）波状消光。这种现象是由于初期应变增量过程中所产生了自由位错或位错的密度致使矿物晶格内各个消光影之间的光性方位存在轻微的偏差所引起的光学现象[9]，是晶体塑性变形的重要标志。阳山矿区经历过强烈的变形变质作用，石英颗粒波状消光现象十分发育（见图3－f）。

6）消光带。研究区部分石英晶粒由于构造作用影响，在形态有所变化的同时其光学特征也发生了变化，在偏光镜下表现有带状消光的现象（见图3－g），纵向上不同的消光区呈拉长状，而在横向上它们的过渡是突变的，并没有像波状消光那样不同消光区之间的变化是连续的。

7）动态重结晶。在塑性变形条件下，石英及方解石晶粒会通过动态重结晶的方式来改变其大小与形状的方式以消除晶粒内应力而达到相对的稳定平衡状态。重结晶后晶粒的粒度较之前会明显变小，形态方面也会有一定程度的压扁或拉长而呈现出他形的特点，不同晶粒间表现出锯齿状或港湾状的边界。尽管动态重结晶现象在阳山矿带内石英和方解石颗粒中均可以观察到，但尤以石英颗粒较为普遍，易于识别（见图3－h）。

8）静态重结晶。上述的部分石英晶粒在动态重结晶变形中止后，弹性应变能已经消失，但因为形态极不规则，表面积较大，具有较高的表面能，为了降低自身表面能达到稳定状态，便会改变动态重结晶所形成的晶粒形态，发生静态重结晶，使弯曲的边界发生改变向“三连点”转化。石英动态重结晶颗粒边界已开始从不规则或长柱状向“三边平衡结构”转变（见图3－i）。静态重结晶现象的出现反映变形层次较深，此种显微构造现象在研究区内不甚发育，表明研

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

究区变形层次为中—浅层次，静态恢复作用不是很强烈。

9) 条带石英。阳山金矿带内，既广泛发育单个拉长的石英，也存在多晶粒组成的条带。拉长的单晶石英条带(见图 3 - j)，其整体性未遭到破坏，颗粒边界平直，形态为矩形或近似矩形，长宽比较大。由众多石英动态重结晶颗粒排列而成的石英条带(见图 3 - k)，单个晶粒呈不规则状长圆形且长轴有一定的定向。

10) 压溶缝合线。在挤压变形过程中，岩石中某一段物质逐渐被压溶而消失，两侧物质便挤进这个被压溶的地段。由于两侧压溶速度不完全一样，则两侧岩石拼在一起的位置不会严格处在一条线上，溶解快的一边成了谷，溶解慢的一边成了峰[10]，这样就形成了呈不规则锯齿状的压溶缝合线。灰岩中所发育的压溶缝合线见图 3 - l。

11) 断裂和褶曲构造：岩石在强应力作用下，不仅会在宏观尺度上形成褶皱和断裂，而且在微观尺度上，构成岩石的一些矿物也会发生一定程度的变形，形成相应的显微褶曲和断裂构造(见图 3 - m、图3 - n)。其中的显微断裂切割早期韧性变形矿物也说明了区域构造变形早期为韧性后期转为脆性，另外根据断裂形态特征可辨别其为右形剪切所致，把薄片恢复到野外产出的原始状态，其运动方向为右行剪切，结合定向标本的产状判断，大体与前面所观察到宏观指向构造判断的剪切方向基本一致，即由北向南的剪切。

12) 显微分层。在相同应力作用下，绝对熔融温度高的矿物表现为刚性，而绝对熔融温度低的矿物则表现为塑性，故在变形过程中绝对熔融温度低的矿物首先形成基质将刚性矿物包裹而呈现出分层现象[11]。相对较大粒径的石英和极细的绢云母、绿泥石等矿物相间分布所形成的显微分层现象见图3 - o。

13) 旋转碎斑。根据拖尾的几何形态可分“δ”型和“σ”型两种，其中“σ”型碎斑能够较好地指示剪切方向。图 3 - p 为阳山金矿带内岩石中石英作为刚性体系所构成的“σ”型碎斑，绿泥石绢云母等则表现为塑性变形构成基质，刚性的石英碎斑发育楔形结晶尾，根据碎斑系的拖尾的尖端延伸方向判断其为右行剪切变形。结合定向标本的产状判断，其微观与宏观构造的剪切方向大体保持一致，反映由南向北的剪切。

按照阳山金矿带内发育的各种显微构造的变形程度和变形机制，可将这些显微构造划分为低级、中级、中—高级三大类(见表 1)。金矿带同时发育有大量的塑性显与脆性显微构造特征，变形机制以的粒内滑动为主，这都反映出研究区内应主要发生韧 - 脆性变形，属于中—浅构造层次，而且一些韧性变形后期又发生了脆性形变，说明了剪切变形早期以韧性为主后期向脆性转变的韧脆性过渡特征。显微构造所反映的剪切，将其恢复到野外的原始产出状态，与宏观指向构造判断的剪切方向基本一致，即由北向南的运动，从而更加证明了阳山金矿带内主体的构造变形特征为自北而南的韧 - 脆性剪切。

表 1　阳山金矿带内显微构造分类

显微构造类别	显微构造现象	构造变形机制	应变强度	构造层次
低级构造变形	显微破裂，碎裂结构	粒间滑动	低	浅层
中级构造变形	机械双晶、变形纹、波状消光、带状构造显微断裂	粒内滑动	中	浅—中层
中—高级构造变形	动态重结晶、静态重结晶、压溶缝合线、褶曲构造、显微分层、旋转碎斑	粒内滑动、位错	中—高	中层

3.1　主应力方位

根据在阳山金矿带内系统测量的 54 组小褶皱轴面产状，做出优势倾向图(见图 4)，从图 4 中可以看出轴面总体表现为北倾，表明存在近南北向的挤压应力场，显示该地区主应力方向为近南北向。而正是在这种近南北向的挤压应力作用下，才形成了区域内由北向南的韧 - 脆性剪切变形。

3.2 古构造应力大小估算

矿物变形实验业已证明，差异应力与重结晶颗粒大小的指数成反比，具体表达式[11]为：

$$\sigma_1 - \sigma_3 = AD^{-m} \quad (1)$$

式中：σ_1 为最大主应力(MPa)；σ_3 为最小主应力(MPa)；D 为重结晶颗粒的直径(mm)；A、m 均为常数，其具体值采用 Twiss[11] 的参数 $A = 6.1$，$m = 0.68$。

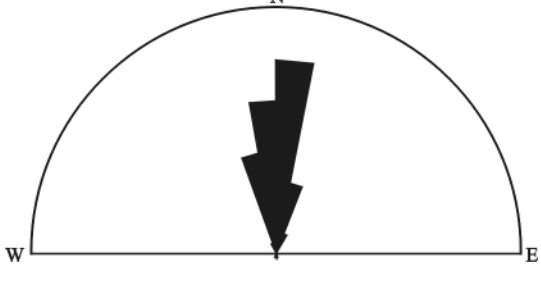


图 4　褶皱轴面优势倾向

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

本次根据变形岩石的镜下特征，选择较动态重结晶较为发育的石英晶粒来进行古应力值的计算。首先，在显微镜下对适合于统计的石英动态重结晶颗粒采集显微照片；接着，利用 AutoCad 软件，对整个视域内适合统计的石英动态重结晶晶粒用直线段进行直径标定；最后，通过对比照片比例尺，测出直线段实际长度，即可换算出动态重结晶晶粒的直径。采用最小二乘法（见图 5，其中直线为使用 Matlab 软件根据最小二乘法线性回归结果）对所测量的石英动态重结晶颗粒粒径数据做进一步分析处理，得出晶粒直径 D = 0.052 mm，使用公式（1）计算出古应力值为 45.55 MPa。

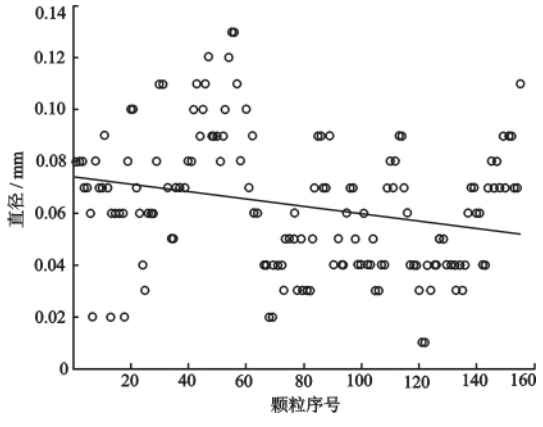


图 5　阳山金矿带内动态重结晶颗粒粒径及线性回归处理（直线代表 Matlab 最小二乘法线性拟合）

3.3　应变速率的估算

岩石流变实验表明，应变速率是岩石所受应力及其作用方式的函数，其大小受应力、温度及岩石蠕变激活能大小的控制。在岩石稳态流变时，应变速率与构造应力和温度等因素的关系式[12]可以表述为：

$$\varepsilon = A \cdot \sigma^n \cdot \exp(-Q/RT) \qquad (2)$$

式中：ε 为应变速率（s^{-1}）；A 为材料放热常数（$MPa \cdot s^{-1}$）；Q 为蠕变激活能（$J \cdot mol^{-1}$）；R 为理想气体常数（$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$）；$T$ 为变形时的绝对温度（K）；σ 为古应力值（MPa）；n 为应力指数。

各参数根据研究的产物不同采用不同的数值，采用 Parrish[13] 的参数 $A = 7 \times 10^5$ MPa · s^{-1}，$n = 2.6$，$Q = 2.3 \times 10^5$ J · mol^{-1}，$R = 8.314$ J · mol^{-1} · K^{-1}，变形温度为 280 ~ 400 ℃（温度具体估算过程见下文），本次计算取平均值 340 ℃，即 T = 613.15 K，结合上文所得古构造应力的大小，应变速率计算结果为 3.6×10^{-10} s^{-1}。

3.4　变形温度分析

石英和方解石是阳山金矿带内常见的变形矿物，而这两种矿物的显微构造变形特征与变形时的温度之间具有一定的对应关系：石英的塑性变形出现在 280 ~ 300 ℃，首先表现为 SR 型动态重结晶，大于 400 ℃时开始出现 GBM 型重结晶，从而呈现 GBM 与 SR 型动态重结晶石英共存的现象[14]；在低于 400 ℃时，方解石机械双晶较薄，其边界鲜明且贯穿整个晶粒；在较高温度下，特别是在 700 ~ 800 ℃时，只有很少厚的且具有不规则边界的双晶纹；在 800 ℃时，即使最有利定向的晶体也从未发生过完全双晶化[15]。

镜下观察发现，阳山金矿带内石英的动态重结晶类型基本上均为 SR 型；而方解石机械双晶较薄，边界明显，基本上贯穿了整个晶粒。对照这两种矿物变形特征与温度的关系，分析变形温度应为 280 ~ 400 ℃。按照古地温梯度为 33 ℃/km，地表平均温度为 20 ℃计算[16]，阳山地区主要岩石发生变形时的深度应该不超过 12 km。

3.5　变形时代及形成机制

张复新等[3]研究指出区内斜长花岗斑岩是与沉积围岩的韧性剪切同步的同构造岩浆活动产物。齐金忠等[4]测定阳山金矿带内斜长花岗斑岩脉 K - Ar 年龄为 171 ~ 209 Ma。因此，阳山金矿带的韧 - 脆性剪切变形的形成时代应该不会早于晚三叠世。区内泥盆系地层上覆的下白垩统砾岩等的构造变形以宽缓褶皱为特征，与泥盆系地层中由北向南的剪切变形特征明显不同，故可推断韧 - 脆性剪切变形的形成不会晚于早白垩世。结合秦岭地区在晚三叠世到早白垩世之间，构造应力场以南北向挤压体制为特征以及本区韧 - 脆性剪切变形的南北向挤压机制，大致可以确定该剪切变形形成于晚三叠世—早白垩世。

阳山金矿带内韧性剪切变形是西秦岭地区构造演化的结果，只有将该区纳入到变形所发生的晚三叠世—早白垩世时整个秦岭地区的大地构造演化史中，才能真正了解阳山金矿带内韧 - 脆性剪切变形的形成过程。中—晚三叠世，随着扬子板块沿勉略带向南秦岭板块之下的俯冲和勉略洋盆闭合，南秦岭海水由东向西退出成陆，西秦岭进入陆内造山演化阶段[17]，板块撞碰产生的强大挤压力，致使岩层在中深层次下发生韧性剪切变形而弯曲变形进而发展形成顺层掩卧褶皱及紧闭同斜褶皱。在三叠纪—侏罗纪，由于持续的板块碰撞作用，在南北向挤压应力作用下，岩层之间的褶皱变形最终达到极限，沿层面产生巨大逆冲推覆，并将局部较深层的韧性剪变形带推覆到地壳浅部，形成了剪切指向总体显示为自北向南的韧 - 脆性剪切变形，而成因上来说应当是属于逆冲式剪切变形。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4　构造变形与成矿的关系

阳山金矿带内所表现出的逆冲式韧－脆性剪切变形与金矿床具有密切的时间和空间上的联系。时间上，逆冲剪切变形的形成与成矿作用是近乎同时发生的。齐金忠等人[4]研究确认了阳山矿带内的金矿床主要形成于侏罗纪早期，并在白垩纪早期以及第三纪发生了一定程度的岩浆叠加成矿作用。而前面部分已经大致确定韧－脆性剪切变形形成的时代在晚三叠世之后早白垩世之前，这表明剪切变形的形成时代与成矿时代基本一致，并且贯穿于早期矿床的形成过程中。空间上，剪切变形的产物为矿脉的主要产出部位。逆冲式剪切变形形成了包括安昌河—观音坝断裂在内的一系列北倾的韧－脆性断裂，而安昌河—观音坝断裂正是阳山金矿带内主要的控矿构造，矿脉就主要产于该断裂带内。

构造变形与金矿床之间这种密切的时空联系正是两者之间成因联系的具体体现，分析认为，剪切变形在金矿形成过程中主要发挥着以下 2 个方面的重要作用:

1) 早期对金活化富集起到了重要的促进作用。在泥盆纪，由于受古特提斯洋扩张作用的影响，处于扬子大陆边缘的该区发生伸展拉张作用形成裂陷盆地，并沉积了一套巨厚的 Au、Ag、Pb、Zn、A s、Sb、Hg 等元素含量较高的碳、硅、泥质地层[5]，为阳山金矿床的形成奠定了充足的物质基础。晚三叠世以后在南北向挤压应力作用下所形成的早期剪切变形使这套含矿岩系强烈变形，在逆冲式剪切变形及其所引起的变质作用的影响下，地层中的含水矿物释放出了大量的 H_2O 及 CO_2，形成了以 H_2O 为主要成分的低盐度的变质流体，这些流体同时萃取了泥盆纪沉积形成的地层中的成矿物质，形成最为原始的成矿热液。另外，又由于岩浆活动的影响，在原始成矿热液的基础上又叠加入了岩浆热液，形成了更具潜力的成矿热液。

2) 后期的剪切变形为金的沉淀提供了最佳场所与环境，决定了金矿体的规模和矿床就位机制。剪切变形形成了一系列的总体北倾的韧－脆性断裂(如安昌河—观音坝断裂) ，成矿热液进入这些断裂带中会与已萃取地层中成矿物质的大气降水进行混合，，另一方面，在断裂带内，由于 T、p、Eh、pH、fo_2 等物理化学条件的变化，成矿流体发生卸载，Au 产生沉淀聚集，形成了阳山超大型金矿床。

5　结　论

1) 甘肃阳山金矿带发育大量的宏观和显微构造现象，表现出韧－脆性变形的特点。多数宏观和微观上具有指示意义的剪切构造，都能表现出由北向南剪切的特征。因此可以确定阳山金矿带内虽然经历了多期复杂的变形，但是，主体构造变形特征表现为自北而南的韧－脆性剪切。

2) 通过褶皱轴面产状的统计表明其主应力方向为近南北向。在显微镜下，根据石英动态重结晶粒径大小与应力差值的关系估算剪切变形的古差应力差值，运用最小二乘法直线拟合处理测量得到的粒径数据，计算出古应力差值为 45. 55 MPa。结合蠕变方程，其所对应的变形速率为 $3.6\times10^{-10}s^{-1}$。

3) 根据变形矿物在显微镜下的变形特征及矿物组合，初步认为阳山金矿带内的由北向南的剪切变形形成温度为 280 ~ 400 ℃，且应发生于地壳深度不超过 12 km。

4) 通过对比不同地层的构造变形特征，结合前人所做的测年工作，推断韧－脆性剪切变形形成于晚三叠世—早白垩世，并联系区域大地构造运动，认为剪切变形是三叠纪末—侏罗纪末，是由于持续的板块碰撞作用，在南北向挤压应力作用下产生的巨大的逆冲推覆的产物，属于逆冲式剪切变形。

5) 阳山金矿带内韧－脆性剪切变形同成矿之间存在密切的时间和空间上的联系。其与成矿的关系可概括为先期对金的活化富集的重要促进作用，以及后期所形成的一系列韧－脆性断裂为金的沉淀提供了最佳场所与物化环境，决定了金矿体的规模和矿床就位机制。

参 考 文 献

[1] 齐金忠，袁士松，李莉，等. 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)：24－29.

[2] 程斌，张复新，贺国芬. 甘肃文县地区阳山超大微细浸染型金矿床的成因与类型[J]. 地质通报，2006，25(11)：1 354－1 360.

[3] 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)：1 062－1 070.

[4] 齐金忠，李莉，袁士松，等. 甘肃省阳山金矿床石英脉中锆石 SHRMP U－Pb 年代学研究[J]. 矿床地质，2005，24(2)：141－148.

[5] 雷时斌，齐金忠. 甘肃阳山金矿带地球动力学体制与多因耦合成矿作用[J]. 地质与勘探，2007，43(2)：33－38.

[6] 张国伟，程顺有，郭安林，等. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识——兼论中国大陆主体的拼合[J]. 地质通报，2004，23(9－10)：846－853.

[7] 董瀚，张海峰. 甘肃省堡子坝幅 1∶5 万地质图说明书[M]. 兰州：甘肃地质出版社，1999.

[8] 马杏垣. 解析构造学[M]. 北京：地质出版社，2004：44－45.

[9] 胡玲. 显微构造地质学概论[M]. 北京：地质出版社，1998：50－70.

[10] 刘瑞珣. 显微构造地质学[M]. 北京：北京大学出版社，1988：76－89.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[11] Twiss R J. Theory and applicability of the recrystallized grain size geopiezometer [J]. Geophys Res Lett,1977(5):227 - 244.
[12] Weertman J. Dislocation climb theory of steady state creep [J]. Amer Soc Metals Trans,1980(61):681 - 694.
[13] Parrish D K and Ross J V. Experimental deformation of anhydrite and early strain history of saltdomes [J]. Amer Geophys Union Trans, 1976,57: 332.
[14] 朱光,徐佑德,刘国生,等. 郯庐断裂带中—南段走滑构造特征与变形规律 [J]. 地球科学,2006,41(2):226 - 241.
[15] 何永年,林传勇,史兰斌. 构造岩石学基础 [M]. 北京:地质出版社,1988:15 - 24.
[16] 钟建华. 一条特殊的超浅成脆 - 韧性剪切带:湘西白沙镇含油瘤状灰岩带 [J]. 岩石学报,1997,13(4):515 - 527.
[17] 刘家军,郑明华,刘建明,等. 西秦岭大地构造演化与金成矿带的分布 [J]. 大地构造与成矿学, 1997, 21(4):307 - 314.

Study on the characteristics of structural deformation in Yangshan gold deposit belt, Gansu province

Wang Liang[1,2], Wang Genhou[1], Jia Liqiong[1], Lei Shibin[2], Li Wenliang[2], Tao Hong[1]
(1. *School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing)*;
2. *Gold Geology Institute of CAPF*)

Abstract: Structural deformation in Yangshan gold deposit belt is very strong and complicated. This paper has studied the structural deformation characteristics of the deposit belt in detail. The main conclusions are listed as follows: there are some important structures, such as A-type lineation, boudinages, rotated porphyroclast, which indicate the ductile-brittle shear characteristics from N to S; the axial planes of folds show that the orientation of principal stress is near NS. By the measurement of the dynamically recrystallized quartz grain, the paleo-stress is calculated as 45.55 MPa. In terms of the creep equation, the average strain velocity is obtained as $3.6 \times 10^{-10} s^{-1}$. According to the features of the deformed minerals, it is determined that the ductile-brittle shear formed at the temperature from 280 ℃ to 400 ℃ and its depth of formation was no more than 12 km beneath the ground. According to the formation time of plagiogranite porphyry and deformation characteristics of strata, the ductile-brittle shear formed between the Upper Triassic and the Lower Cretaceous. Based on the ore forming features of Yangshan gold deposit, it is believed that the shear is significant for the gold element activation, enrichment and final orientation.

Keywords: structural deformation characteristic; ductile-brittle shear deformation; ore-controlling function; Yangshan gold deposit belt

(编辑:宿晓静)

2011 年全国黄金产量突破 360 t 连续 5 年世界第一

据中国黄金协会最新统计数据显示,2011 年中国黄金产量达到 360.957 t,比上年增加 20.081 t,增幅 5.89 %,再创历史新高,连续 5 年居世界第一。黄金产量排名前 5 位的省份依次为山东、河南、江西、福建、内蒙古,产量占全国总产量的 59.90 %。

近年来,随着金融风暴和债务危机的愈演愈烈,使黄金作为重要规避风险资产的价值再次被世人认可。世界各国都开始重新审视黄金作用。人们对黄金非货币化进行反思,而产生了对黄金永恒价值的再认识,官方和民间对持有实物黄金的兴趣持续增强,在国际金融体系和货币体系改革中加入黄金因素的呼声日渐高涨。黄金作为对抗风险、维护安全的全球重要战略资产的特殊地位不断凸显。在此背景下,中国黄金生产、加工、消费持续增长,黄金投资空前活跃。在世界黄金版图上,中国已经从追随者成长为领军者,已进入创新驱动、转型发展的重要战略机遇期。中国黄金生产能力的提高,增强国家对抗金融风险的能力,对维护国家经济安全、金融安全具有重要意义。

2011 年,中国黄金行业继续深入学习贯彻科学发展观,推进产业结构调整,坚持科技创新和技术进步,在资源勘查和资源整合等多方面都呈现出良好的运行态势和发展前景。一批大型黄金企业在地质勘探、资源整

(下转第 19 页)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net