

玲珑金矿田花岗岩中韧性剪切带与成矿的关系

王吉瑶 余和勇

(冶金工业部天津地质研究院)

内容提要: 玲珑燕山期交代型花岗岩,是在构造活动的驱使下,由共存重熔岩浆交代胶东群变质岩生成的壳源花岗岩,成岩作用是在可塑性准固体状态下进行的。伴随底辟侵位广泛形成韧性剪切带,发育有各种塑变、应变结构和糜棱岩化。随着岩体温度和可塑度的降低,相继发生脆性断裂,往往叠加在韧性剪切带之上。这种构造叠加部位为矿液造成良好的通道和富集部位。

主题词: 花岗岩中韧性剪切带特征 演化阶段和对成矿的控制 玲珑金矿田

玲珑金矿田位于山东省胶东地区北部,包括108、欧家乔、玲珑——大开头、九曲、东风、双顶和破头青等矿床。1985年以来我们对金矿成矿规律和找矿方向进行了系统研究,确认玲珑花岗岩中有韧性剪切带的存在,并与金矿成矿有关,本文仅就韧性剪切带的特征和与成矿的关系进行一些讨论。

一、矿田地质简述

矿田内出露的岩石主要是玲珑花岗岩和部分郭家岭花岗岩以及少量胶东群变质岩系。玲珑花岗岩体南起平度,北至龙口市大陈家,呈NNE向延展,面积约2600km²,侵入在胶东群和粉子山群变质岩系中,研究确认它是一个底辟侵位的壳源交代型钙碱性花岗岩。玲珑金矿就赋存在玲珑花岗岩体的北东端。该段岩体由东向西可划分四个岩相带:片麻状黑云钾长花岗岩带、片麻变斑状黑云钾长花岗岩带、含石榴石黑云钾长花岗岩带和片麻状黑云钾长花岗岩带。成岩时代是燕山期中侏罗世(164.2Ma)。花岗岩中片麻状构造和似文象状构造(由火焰状流变石英集晶组成)、交代溶蚀、动力应变、再(和重)结晶结构普遍发育。含有大量胶东群斜长角闪岩、黑云斜长片麻岩、黑云母变粒岩、浅粒岩和片岩等交代残留体,有的残留体全被取代而呈阴影状,大小不一,一般从数厘米到数十米。

断裂构造发育,按展布方向分三组:①NEE-NE向断裂,突出特点是脆性断裂叠加在韧性剪切带之上,是区内主要控矿和赋矿构造。②NNE向断裂。③NW向断裂。后二者均属脆性断裂,一般无矿或切割金矿体。

区内共发现矿化构造蚀变带和石英脉数以百计。矿体主要产在花岗岩体内的脆性断裂与韧性剪切带叠加处,尤其在断裂由陡变缓部位、构造透镜体发育部位、断裂交汇部位和分枝复合部位。矿体呈透镜状和脉状,沿矿体走向和倾向呈舒缓波状起伏、膨缩和分枝复合现象普遍。单矿体长度40—350m,厚度1—10m,延深40—700m或至千余米。金矿石有三种类型:

绢英岩细脉浸染型含金黄铁矿矿石、钾化花岗岩细脉浸染型含金黄铁矿矿石和石英脉型含金硫化物矿石。围岩蚀变以绢云母化为主,其次有钾化、绢英岩化、硅化,少量碳酸盐化和绿泥石化。原生金属矿物以黄铁矿为主,其次有黄铜矿、闪锌矿、方铅矿和磁黄铁矿,少量磁铁矿、赤铁矿、穆磁铁矿、辉钼矿、毒砂、辉铋矿、黝铜矿和白铁矿,金的独立矿物以银金矿为主,其次有自然金。

矿床原生水平分带,以破头青断裂带为动-热中心依次向外分为三个带:①绢英岩和钾化花岗岩细脉浸染状金-黄铁矿带,含Au较低。②石英脉型金-黄铁矿带,混杂一部分绢英岩细脉浸染型金-黄铁矿矿石,黄铜矿相对增多,含金品位增高。③石英脉型金-多金属硫化物带,铅锌硫化物明显增多,含Au较高。由东向西各带之间除矿石类型,矿石构造和品位有规律的变化外,还表现在赋矿深度由深变浅,蚀变强度、成矿温度、金的成色和 $\delta^{34}\text{S}$ 逐渐降低,而石英脉的数量和宽度、铅锌硫化物和 $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐增高等规律性变化。

矿床垂直分带,自上而下分三个带:①氧化淋失带,主要组成矿物有针铁矿、纤铁矿、钠铁矾和软锰矿等,金发生明显氧化淋失而贫化,淋失率达89%左右。②半氧化-次生富集带,除有部分次生氧化物(针铁矿、纤铁矿)和残余硫化物(黄铁矿、黄铜矿等)外,还有次生的斑铜矿、铜蓝、蓝辉铜矿和自然金等的出现,金发生明显的次生富集提高金的品位,富集率达48%左右。③原生硫化物带,金矿物与多金属硫化物紧密共生。

二、矿田构造格局

I. 区域构造背景:玲珑金矿田位于华北板块胶东地体内,在前寒武纪结晶基底的东西向褶皱和断裂构造基础上,在早中侏罗世的强烈断裂活动驱使下,胶东群变质岩系深部层位被再次构造变动和重熔交代改造,重熔-交代花岗岩系列沿NE向断裂侵入,并在岩体内部和边部形成一系列NE-NNE向左行韧性剪切带,诸如三山岛、焦家、招平剪切构造带等。燕山期花岗岩和韧性剪切构造带的形成为该区金矿的生成创造了良好的地质前提。玲珑金矿恰位于招平剪切-破裂构造带的北东端。

II. 玲珑金矿田构造

玲珑矿田断裂构造有两个系列,即破头青NE-NNE断裂系列和玲珑NNE断裂系列,两大断裂系列叠加形成网格状构造格局(图1)。

(1)破头青断裂系列,形成较早,该系列在平面上构成向南东突出的弧形断裂群,其中以破头青断裂为主干,北西侧形成一系列斜列的次级断裂。该断裂系列的特点:a)早期韧性剪切作用强烈,普遍发育塑性变形和糜棱岩,在此基础上又广泛叠加有晚期脆性断裂、磨砾化、角砾化和碎裂化等。b)大部分受到NNE向断裂的切割或改造。c)是金矿的主要控矿和容矿构造。

破头青主干断裂是招平断裂的北延部分,走向NE,倾向SE-SSE,其北西侧的次级断裂倾向变化较大,近破头青主干断裂者倾向SE,由此向外的倾向逐渐陡立直至反倾(倾向NW-NNW),恰成入字形构造(图2)。该断裂系列形成的初期韧性剪切作用强烈,形成规模巨大的韧性剪切带,相继发生脆性断裂叠加其上,明显的扩容作用促使矿液的流动和聚集。

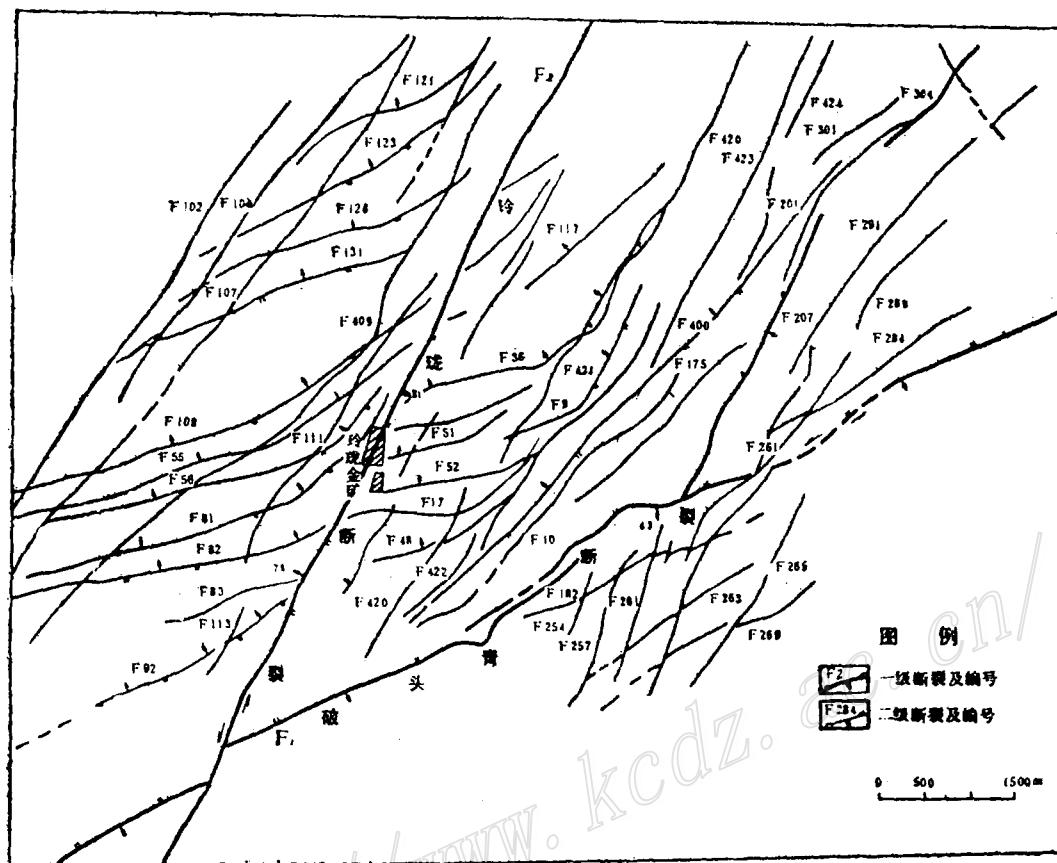


图 1 山东玲珑金矿田断裂构造纲要图

Fig. 1. Fault structural sketch of the Linglong gold orefield in Shandong.

Explanation: Upper-Grade I fault and its serial number; Lower-Grade II fault and its serial number.

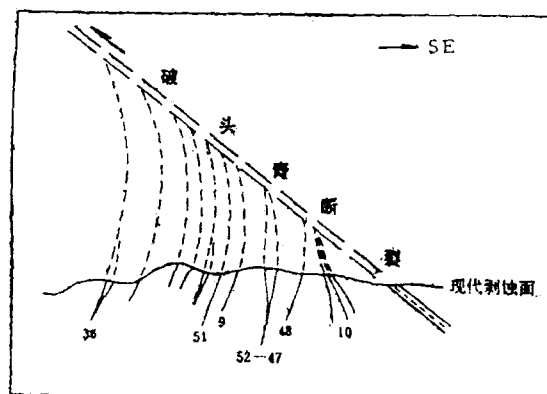


图 2 破头青断裂构造体系组成的“入”字型构造形态示意图 (以东山为例)

Fig. 2. "λ" shaped structural pattern formed by the Potouqing fault structural system (exemplified by Dongshan).

(2) 玲珑断裂系列, 大体上呈NNE向展布, 生成较晚, 直到第三纪仍有活动, 切割改造NE-NEE断裂系列和金矿脉。未见有韧性剪切迹象, 为左行压扭性的脆性断裂。在潘家集可见玲珑断裂切割破头青断裂, 左行平移断距400m左右。被切割的断裂经常发生拖曳和追踪现象, 从图1可见玲珑断裂两侧被切割的NEE断裂产生一系列左行牵引的弧形弯曲。

三、韧性剪切带的特征和演化

I. 破头青韧性剪切带的基本特征^[1]

(1) 韧性剪切带发生在玲珑岩体和郭家岭岩体内, 韧性剪切带宽约300—500m, 但实际影响范围还要大些。剪切带内花岗岩强烈糜棱化, 诸如初糜岩、眼球糜棱岩、碎斑糜棱岩、糜棱岩和超糜岩, 矿物晶屑发生明显塑性变形、压熔、重结晶和塑变流化, 相对刚性矿物有时形成透镜体和旋转碎斑, 定向排列成条纹状和片理化(照片1), 局部形成糜棱片岩, 再褶皱现象十分普遍。在剪切带中间部位糜棱岩化最强, 向两侧逐渐减弱, 一直过渡到正常花岗岩。

(2) 塑变流广泛发育, 尤其在剪切带中间部位, 主要由绢英糜棱岩-超糜岩组成, 有时包含旋转眼球体和扁豆体, 沿着塑变流方向拉长, 形成波浪状和卷曲状塑变流动纹理。糜棱面理(Sm)与剪切面理(Sc)之间夹角(θ)一般为 $40^\circ-0^\circ$, 随着剪切作用的增强 θ 值逐渐减小, 直到Sm平行于Sc, 即 $\theta=0^\circ$ 。

(3) 褶皱和挠曲普遍可见, 一般发育在塑变流两侧, 尽管褶皱的曲率较大, 但脊顶仍然是圆滑平整的, 没有任何张裂隙的出现, 这显然是塑性变形的特有产物。

(4) 旋转眼球体、透镜体和压力影, 相对刚性的斜长石和部分粗粒石英受力发生旋转和拉长, 沿着垂直应力的方向定向分布, 在眼球体或透镜体两端由易于流变的绢云母集中成尾状压力影。

(5) 火焰状流变石英集晶, 细小石英呈锯齿状相互嵌接, 沿着岩石裂隙流动和填充, 具有明显的波状异常消光, 形似火焰故此命名(照片2), 有时沿岩石平行裂隙填充成断续的条纹, 酷似文象状花岗结构。火焰状流变石英集晶主要发育在韧性剪切带内, 但在受到韧性剪切作用影响范围内的花岗岩中也广有所见, 只不过相对减少而已。这种石英集晶显然与韧性剪切压熔和分凝重结晶有关, 换言之, 只有在韧性剪切过程中, 承受热力和应力的双重作用下发生改造、迁移和重结晶, 才能形成此种特有的产状和异常消光的石英集合体。

(6) 扭折结构, 韧性剪切过程中, 长石和黑云母等晶体在塑变临界范围内时, 其双晶纹和解理纹发生明显的揉皱和弯曲, 当超临界时, 已经弯曲的晶体由于丧失内结力而被折断。

(7) 亚颗粒化, 在较大的石英颗粒轮廓中, 形成近于等粒状多边形亚颗粒, 有时进一步再结晶发生明显愈合使亚颗粒边界消失, 但可以借助不同消光位加以鉴别。多数亚颗粒是由于攀移作用形成的均匀状分布, 只有少数是位错滑移所成的不均匀状亚颗粒化。

(8) 异常消光^[2], 石英异常消光极为普遍, 不仅原始造岩石英, 即使同构造新生石英也不例外, 这些石英晶体受力时, 内部发生轴滑移、面滑移或者二者的结合, 反映在光性上

产生各种异常消光, 诸如波状消光、带状消光、放射状消光和不规则状消光。此外, 微斜长石、斜长石和黑云母等中也可见到波状消光和不规则状异常消光。

(9) 毕姆 (Bähm) 纹, 在石英晶体中常见, 由于石英受力晶体内部滑移, 暗色矿物微粒和气液包体沿脆弱带集中成条纹, 这些条纹一般是平直的, 但界线比较模糊, 偶尔也有弯曲的。在少数情况下尚可见到吕德线, 尤其在较大颗粒的石英中比较明显, 一些细微包体沿着共轭扭裂纹集中成“x”状条纹。

(10) 重结晶及次生长大现象普遍发育, 尤其在糜棱岩中更为明显, 表现形式多种多样, 但总的趋势是初期主要为粒化, 进一步重结晶或再结晶发生愈合, 并定向化。长石和石英还经常产生净化边和次生长大边, 并保持同消光位。被拉长的石英核幔结构也时有所见, 并有局部集中现象。

(11) 在韧性剪切带两侧花岗岩中含钛黑云母受应力作用, 普遍析出针状、放射状和菊花状金红石。

II. 断裂构造演化阶段, 可以明显的划分二个连续的构造演化阶段, 确定阶段的依据是:

(1) 同一构造破碎带中有不同成因类型构造岩的混杂, 包括塑变构造岩和脆变构造岩两大类, 所见构造岩类型列于表 1。

表 1 构造岩类型^[3]

Table 1. Types of tectonite

类型	岩石名称	分 布 及 特 征
塑变构造岩	眼球糜棱岩	较少, 剪切带内, 含拉长旋转眼球体、透镜体
	核幔糜棱岩	较少, 剪切带内, 含核幔结构石英集合体, 轻度拉长
	碎斑糜棱岩	较多, 剪切带内和两侧, 含塑变碎斑约 5—45%
	初糜岩	较多, 剪切带内及两侧, 定向性差, 粒度 2—0.5mm
	糜棱岩	广泛, 剪切带内等, 定向性明显, 粒度 0.5—0.02mm
	超糜岩	较少, 剪切带中部, 明显定向, 粒度 < 0.02mm
脆变构造岩	糜棱片岩	很少, 剪切最强部位, 片理化, 粒度 < 0.5mm
	碎裂状岩	广泛, 破碎带远外侧围岩中, 破而未移, 有匠对性
	碎裂岩	广泛, 破碎带内及两侧, 碎而移动, 匠对性差
	磨砾-角砾岩	广泛, 破碎带内, 二者相互混杂, 但不均匀
	碎斑岩	广泛, 破碎带内, 棱角完整, 未见重结晶
	碎粒岩	较少, 破碎带内, 多为晶屑, 未见重结晶
	碎粉片岩	很少, 在主结构面附近, 明显片理化

在韧性剪切-断裂破碎带内比较完整的构造岩分布剖面, 由内向外对称分布: ①超糜岩-糜棱岩-核幔糜棱岩-碎粒岩-碎斑岩组合, ②初糜岩-碎斑糜棱岩-角砾岩-磨砾岩-碎裂岩组合, ③初糜岩化-碎裂状花岗岩, ④正常花岗岩。由于两个阶段构造活动部位的不均匀性, 故构造岩剖面在多数情况下是不完整的, 既有缺失又有重复。塑变构造岩明显被脆变构造岩破坏和改造, 也就是说后者是在前者的基础上进一步发展而成。

(2) 塑变流或韧性剪切带上叠加脆性断裂和x形裂隙, 完整的演化过程是: a) 韧性剪切初期, 糜棱面理 (Sm) 与剪切面理 (Sc) 夹角 θ 在 30—40° 左右; b) 韧性剪切末期, 逐渐达

到 $S_m \parallel S_c$; c) 脆性断裂和x形裂隙叠加在韧性剪切带上(图3), 在脆性裂隙中经常生成脉状或网状含金硫化物矿石或含金石英脉。

(3) 舒缓波状主结构面广泛发育, 沿着主结构面的走向或倾向均可见到舒缓波状起伏,

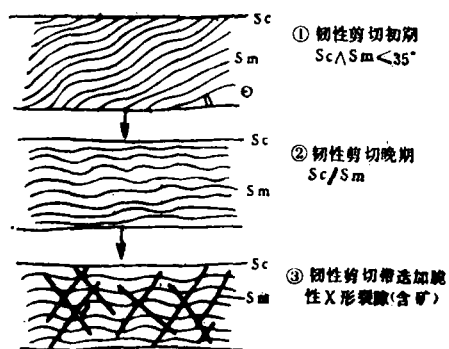


图3 韧性剪切到脆性断裂演化阶段示意图
Fig. 3. Evolution stages from ductile shearing to brittle fracturing.

1-Initial stage of ductile shearing; 2-Late stage of ductile shearing; 3 Brittle X-shaped fissures superimposed on ductile shear zone.

受它控制的金矿脉也随之发生变化, 例如10、108、305号矿脉的波状起伏极为明显。

(图4)。这种舒缓波状的形成是先褶皱后劈相互叠加的结果, 即首先发生塑变褶曲, 随后沿着褶曲的脆弱面发生脆性劈开而成。结构面上的擦痕极为发育, 多呈近于水平的和微倾斜的, 倾斜角均小于 10° 。在错移过程中结构面两侧若呈凹凹相对则形成构造透镜体, 在其中形成的矿体也随之富集膨大; 若呈凸凸相对, 则中间的空间缩小, 即两盘相抵, 矿体也随之变薄或尖灭。由这种构造所控制的矿体在产状上有如下特点: a) 沿走向或倾向上的产状经常变化不一, 时而向南时而朝北; b) 串珠状的透镜状矿体时现时灭。这二

点规律在探矿中正确运用是非常重要的, 否则会导致漏矿的。

(4) 褶劈构造, 先期塑性褶曲和揉皱被一组平行的脆性变形的劈理切割成一系列的斜列体, 这是塑性与脆性两种变形叠加的产物。

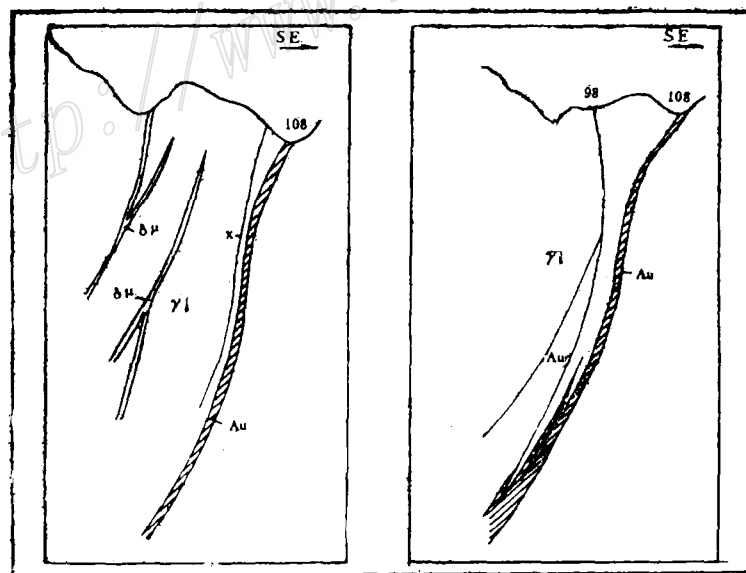


图4 玲珑金矿108脉沿倾向显示舒缓波状特点
左图为547剖面, 右图为554剖面(据山东地质八队)

Fig. 4. Smooth and gentle wavelike features displayed by No. 108 vein along the dip in the Linglong gold deposit (left-No. 547 section; right-No. 554 section).

一般来说,韧性剪切与脆性断裂之间的关系有两种情况,一种是过渡关系^[1],即在深部较高温下形成韧性剪切带,在浅部较低温条件下逐渐过渡为脆性断裂。另一种是叠加关系,即在深部发生韧性剪切,而后上升到浅部,再次发生脆性断裂叠加在韧性剪切带上。经研究确认玲珑矿田是属于后一种情况,即两个阶段叠加而成,而且两个阶段几乎是连续发生的。第一阶段韧性剪切阶段是发生在深部,岩石在可塑状态下,受力形成规模很大的压扭性韧性剪切带,其范围远超出有脆性变形带的范围,虽有明显的塑性变形和相对位移,但无明显的错裂面。韧性剪切阶段早期主要形成碎斑糜棱岩和初糜岩,剪切面理(Sc)与糜棱面理(Sm)的夹角 θ 在 30° — 40° 左右,晚期以糜棱岩和超糜岩为主,Sc面与Sm面近于平行。第二阶段是脆性断裂阶段,在浅部条件下,温度和岩石可塑性大大降低,受力产生脆性变形,脆性断裂往往叠加在韧性剪切带上。塑变构造岩被强烈改造而形成脆变构造岩,同时发生明显的扩容作用,导致含矿溶液的广泛运移,沿着构造裂隙填充富集成矿。这两个阶段几乎连续发生是由于花岗岩体所处的深度、温度、压力等物理条件的变化制约着构造变形的变化,即在同一应力场作用下,随着岩体的底辟侵位和可塑度的降低由韧性变形向脆性变形阶段演化。

四、韧性剪切带形成的地质条件和机理

I. 该区前寒武纪古老基底是在近南北向应力场的作用下,主要形成东西向的褶皱和断裂以及区域变质。中生代以来,在NW-SE应力场的作用下,一则产生NE-NNE向断裂系列,二则使古老的東西向基底断裂也有一定程度的复活。这一强烈构造活动导致地壳局部重熔和对基底岩系的交代改造,生成壳源重熔型-交代型花岗岩系列。

II. 韧性剪切带形成在玲珑花岗岩体内,因此弄清花岗岩的成岩方式和物理状态变化对韧性剪切带的发生和发展的研究是十分重要的。为了说明这一问题,首先列举如下事实:

(1) 玲珑岩体总体走向NNE,受中生代NE-NNE向断裂控制。

(2) 玲珑岩体与胶东群之间有二种接触关系,一种是断裂接触,相互破碎混杂,断裂以压扭性为主,并有韧性变形和脆性变形的叠加。另一种是侵入接触,发育在岩体局部重熔明显处。此外呈岩枝状穿插围岩现象屡见不鲜。在大磨曲家见到岩体外接触带形成宽约10m的接触矽卡岩带。玲珑岩体与郭家店、滦家河花岗岩体之间呈渐变过渡关系,前者是交代型的,后者是重熔岩浆型的,它们又是共存的,充分体现了它们之间直接成因联系。

(3) 在岩体周围沿接触带形成宽约10—150m的长英质伟晶化带,有些前人资料将其作为花岗岩与胶东群的渐变过渡带,经研究证实这是玲珑花岗岩成岩后期的气成阶段产物,这种伟晶化除集中发育在接触带以外,在岩体内部和围岩裂隙中也有所见。

(4) 近接触带的围岩除强烈破碎以外,尚有明显的位移和上隆,显然与岩体侵位有关。

(5) 玲珑花岗岩的硫、铅、氧、碳稳定同位素,稀土元素、宇宙尘、矿物演化、岩石化学、微量元素和围岩残留体等(另文专述)与胶东群变质岩之间存在一系列继承和演变关系。

(6) 花岗岩中片麻理发育, 岩体中部片麻理主要呈 NE-NNE 向展布, 与岩体走向近似, 在岩体边上的片麻理与接触带基本吻合, 当属同构造挤压所成。

(7) 岩体中普遍发育有褶皱、揉皱、应力矿物、应变结构、重结晶、变斑晶及交代包含结构。

综合以上, 可以作出如下推断:

i) 玲珑花岗岩起源于胶东变群质岩, 即壳源型花岗岩。

ii) 在共存重熔岩浆 (如郭家店和滦家河花岗岩重熔岩浆) 的作用下, 以交代方式生成玲珑交代型花岗岩, 该岩体在成岩过程中除局部有重熔外, 主体是处于高可塑性的准固态下进行的。在成岩之后相继发生气成作用形成长英质伟晶化。

iii) 构造活动驱使花岗岩的生成, 成岩作用始终处于构造活动之中。岩体发生过底辟侵位, 因为, 一方面岩体受热膨胀, 自身产生上浮力, 另一方面受构造挤压, 导致花岗岩体上侵。正是在这个阶段和这种成岩状态才为韧性剪切带的形成创造了极为有利的地质条件, 并且能将变形痕迹保留下来。

Ⅲ. 韧性剪切带形成在岩体底辟侵位和成岩后期的塑性变形阶段, 而玲珑花岗岩的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 快中子活化 K-Ar 定年技术测定年龄为 $164.2 \pm 0.69\text{Ma}$ (据胡世令), K-Ar 等时年龄 164Ma (12 个样品), K-Ar 表面年龄多在 $115-153.4\text{Ma}$ 之间, 由此推断韧性剪切作用是发生在燕山中期以后。

韧性剪切带的形成需要一个特定的地质环境, 即较深部位和较高温度、压力条件。Sibson 指出^{[5][6]}: 地壳中脆性与塑性断裂形成的分界深度为 15km 。鉴于该区断裂活动强烈, 产生大量的摩擦热和重熔岩浆, 并同时交代改造古老结晶基底。在矿物变化上, 如石英粒化、晶体滑移、重结晶和同构造重熔迁移, 长石和黑云母的重结晶和扭折, 黑云母广泛析出针状、放射状、菊花状金红石以及其它应力塑变结构的发育, 推测该区韧性剪切作用发生的深度至少在 10km 以下, 胶东群的总厚度为 17.48km , 因此, 成岩作用和韧性剪切作用的部位大约在胶东群的中下部。根据广泛的绢英岩化、长英质矿物的分解和石英包体的测温结果, 推测韧性剪切期的温度大体在 $350-500^\circ\text{C}$ 左右。又据 17 块薄片的显微镜测量, 糜棱岩动态重结晶平均粒度 $d=0.24\text{mm}$, 按 M. S. Weathers^[7] (1979) 公式计算古应力为:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = AD^c = 3.8 \times 0.24^{-0.71} = 10.5 \text{ (kb)}$$

破头青断裂带在大磨曲家一段, 韧性剪切作用比较发育, 没有明显的脆性断裂叠加, 基本上可以反映韧性剪切带的原始状态, 宽度 95m , 剪切带两侧与围岩之间没有明显的错裂面, 呈渐变关系, 在出露较好部位, 选择近于垂直剪切带的剖面, 分段对应变椭圆体中的压扁面 (xy) 与剪切面间的夹角 θ 以及所代表的宽度 dx 进行实测, 并分别计算剪切应变值 γ , 结果列于表 2。

依据 J. G. Ramsay, 简单剪切应变韧性断层带的研究方法^[8], 应用公式计算相对位移 s 如下:

$$s = \sum_0^x \gamma dx = \sum_0^x \frac{2}{\tan 2\theta} dx = 248.1 \text{ (m)}$$

即该断层上盘向 NE, 下盘向 SW 相对平移约 248.1m 。由表 2 中可见, 接近剪切带中部剪切应变值 γ 最大, 压扁面 (片理面) 与剪切面渐趋平行, 是韧性变形最强, 超糜岩、重结晶和

表2 大磨曲家韧性剪切带 θ 角统计(从NW至SE)Table 2. Statistical data on θ angles of ductile shear zones at Damoqujia (from NW to SE)

θ	39	40	35	33	30	29	9	21	37	24	39	41	40
dx	4	12	5	4	6	7	15	8	4	2	5	17	6
γ	0.43	0.35	0.73	0.89	1.16	1.25	6.16	2.22	0.57	1.80	0.43	0.28	0.35

压熔作用最明显的部位,向两侧逐渐减弱。

五、韧性剪切带与成矿关系

韧性剪切带对成矿的重要意义,已经引起地质工作者的注意,但就目前而言,花岗岩体中韧性剪切作用的研究颇感不足。一般情况下,韧性剪切带的规模和延深都很大,构造活动复杂,使成矿物质发生改造、迁移和富集,尤其沿韧性剪切带常常发生脆性断裂的叠加和强烈的构造扩容作用,为含矿热液循环和停聚创造了有利的构造空间。破头青断裂是一个脆性断裂与韧性剪切叠加的复杂构造带,纵贯全区,严格控制了玲珑金矿田的成矿作用,以此断裂为中心,依次向外形成原生成矿的分带现象,矿石产状随着构造破碎强度和构造形态的不同而变化,在韧性剪切作用强而脆性变形弱的部位形成细脉浸染型贫矿石,在羽状和X状脆性裂隙叠加处形成网状矿石,在舒缓波状断裂面转弯处和断续的构造透镜体发育处形成串珠状富矿透镜体,在空间较大的次级叠加脆性断裂中形成脉状矿体等。在韧性剪切与脆性断裂叠加的主干断裂中成矿深度最大,从目前探矿资料得知,占孔深达千馀米,矿体仍未终止,继续向下延深,由此可见,该区过往的勘探地段探矿深度是远远不够的,再进一步探边摸底扩大储量是十分必要的,一则向深部摸清矿体底界,二则沿断裂带向两端追索,尤其对矿田南部覆盖区的找矿工作,扩大新的成矿远景地段,探明成矿边界。在找矿勘探中,有两个成矿规律值得注意:第一,在成矿深度上,从构造形态、成矿分带、矿石组构、硫同位素、金成色及气液包体测温资料等规律性变化(另外详述)可知,以主干断裂(破头青断裂)中成矿深度最大,旁侧次级断裂成矿深度依次变浅,因此,深部找矿的重点部位是主干断裂本身及其附近,推测在-600m以深仍有较大的潜在储量。第二,由于脆性断裂与韧性剪切的叠加,容易形成舒缓波状断裂面和串珠状构造透镜体,相应的形成一系列断续的透镜状金矿体,因此,每探明一个浅部透镜状矿体之后,不应就此而止,尚应继续向深部追索可能有另一个透镜状矿体的存在,有时两个相邻透镜体的产状往往相反,故在布置占探工程时应特别谨慎以免漏矿。

破头青断裂向南延至平度,统称招平断裂,除控制玲珑金矿外,向南西又连续探明夏甸和大尹格庄金矿,充分说明这个韧性-脆性叠加断裂带对成矿是十分有利的,概括起来有三个有利条件:①在断裂带附近广泛分布胶东群变质岩系,含金较高,一般2—323ppb,平均22.11ppb,是区内的重要矿源层,具有明显的区域性成矿控制作用。②强烈的构造活动导致重熔岩浆型-底辟交代型花岗岩系列的形成,在这种动-热作用下,源岩中成矿物质广泛活化和迁移。③广泛而长期的韧性剪切和脆性断裂活动,强烈的构造扩容作用,为矿液的迁移

和聚集创造良好的条件,韧性剪切与脆性断裂叠加部位是成矿最有利部位,也是重点找矿部位,而在单一的韧性剪切或单一脆性断裂中一般是贫矿或无矿,这是该区一个重要成矿规律,对找矿有指示性意义。招平断裂是一个重要的成矿远景带,有很好的找矿前景。类似的韧性剪切-脆性断裂叠加带还广泛见于玲珑岩体的其它部位,诸如新城-焦家和三山岛断裂带,分别形成新城、焦家和三山岛,苍土金矿等。

在韧性剪切带和其影响范围内,岩石发生强烈的蚀变,改造了岩石组构和矿物成分,在新的物化条件下,形成新的组合和新的化学平衡。最主要的蚀变是绢云母化,其次是绢英岩化和硅化,主要蚀变岩的化学成分和计算结果列于表3。从表中可见,花岗岩经过强烈破碎和绢云母化作用可以带出大量Si、Ca、Na、K,这一计算结果与显微镜下观察到的矿物转

表3 蚀变岩化学分析和加入带出计算结果

Table 3. Chemical analyses of altered rocks and calculations for adding or removal of components

岩石 氧化物	玲珑花岗岩	绢云岩		绢英岩	
	6个样平均(%)	13个样平均(%)	加入(+),带出(-)	7个样平均(%)	加入(+),带出(-)
SiO ₂	73.34	52.10	-28.90	76.05	+3.90
TiO ₂	0.14	0.14	0.00	0.15	0.00
Al ₂ O ₃	14.19	7.10	-50.20	12.47	-12.20
Fe ₂ O ₃	0.77	27.69	+3370.00	2.70	+240.00
FeO	1.74	1.23	-29.20	0.91	-45.80
MnO	0.05	2.24	+3100.00	0.09	0.00
MgO	0.26	1.00	+300.00	0.46	+83.00
CaO	1.74	1.03	-41.90	0.53	-71.00
Na ₂ O	4.08	0.18	-95.50	0.39	-89.40
K ₂ O	4.19	2.39	-42.20	4.17	0.00
H ₂ O*	0.41	4.48	+1082.60	1.98	+859.40

玲珑花岗岩化学式: $\text{Si}_{320}\text{Ti}_{12}\text{Al}_{1674}\text{Fe}^{3+}_{60}\text{Fe}^{2+}_{111}\text{Mn}_{16}\text{Mg}_{26}\text{Ca}_{152}\text{Na}_{176}\text{K}_{270}\text{H}_{1132}\text{O}_{18228}$

绢云岩化学式: $\text{Si}_{622}\text{Ti}_{12}\text{Al}_{834}\text{Fe}^{3+}_{2302}\text{Fe}^{2+}_{102}\text{Mn}_{102}\text{Mg}_{102}\text{Ca}_{108}\text{Na}_{18}\text{K}_{156}\text{H}_{1032}\text{O}_{18696}$

绢英岩化学式: $\text{Si}_{7602}\text{Ti}_{12}\text{Al}_{1176}\text{Fe}^{3+}_{203}\text{Fe}^{2+}_{78}\text{Mn}_{16}\text{Mg}_{26}\text{Ca}_{31}\text{Na}_{42}\text{K}_{270}\text{H}_{11320}\text{O}_{18759}$

化完全一致,诸如更长石($\text{Ab}_{76.8}\text{An}_{19.5}\text{Or}_{3.7}$)转化成绢云母($\text{K}_2\text{Al}_4[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$)时,大约析出Si 8%、Ca 28%、Na 6.2%;微斜长石($\text{K}, \text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$)变成绢云母时大约析出Si 9%、K 4.1%。这些被带出的元素对金矿的成矿作用颇有裨益,尤其K、Na转入含矿溶液中,一则增加矿液的碱度和提高金属元素的溶解度,二则直接加入组成金的络合物,将金等运载到适宜部位富集成矿。 SiO_2 伴同金发生一定距离的迁移,在适宜的构造裂隙中形成含金石英脉。钙形成方解石网脉,有时含有明金。

花岗岩中的金,除了可能有自然金存在以外,主要含在辉石、角闪石、黑云母和某些长石中,当这些矿物被改造或分解时,金被析出并转移到溶液中。根据化学分析,胶东群变质岩平均含Au 22.11ppb,玲珑花岗岩含Au 4.5ppb,而绢云岩含Au一般小于2ppb。上述三种岩石的物质来源是有联系的,即变质岩改造成交代花岗岩,交代花岗岩经蚀变转变成绢云岩,但是金的含量却明显不同,这显然与岩石被改造程度有关,即岩石改造程度愈强金析出的愈多。

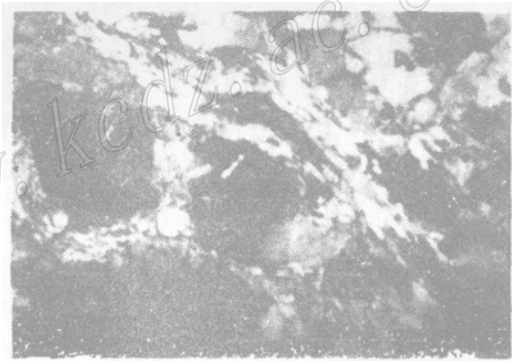
前已述及韧性剪切作用在交代花岗岩成岩后期或者在底辟侵位的过程中就已开始,在交代花岗岩成岩过程中,源岩中的辉石和角闪石被黑云母取代,部分黑云母被白云母取代,斜长石被钾长石交代,相继发生韧性剪切作用,进一步使黑云母、斜长石和钾长石改造成绢云母,在这些载金矿物的改造过程中将金解离出来,并转移到溶液中,在适宜的构造空间中富集成矿。

结 语

中生代强烈的构造活动驱动玲珑花岗岩的形成和底辟侵位。一则由于玲珑花岗岩的特殊成岩方式——在可塑性的准固体状态下遭受共存重熔岩浆(如郭家店、漆家河花岗岩浆)的强烈作用,以交代方式生成的交代型花岗岩。二则整个成岩过程处于构造活动之中。在这二种条件的结合下,岩体内广泛形成韧性剪切带亦属必然,随岩体底辟侵位,温度和可塑度的降低,在同一应力场下,相继发生脆性断裂的叠加。在动热作用下岩石发生强烈变形和蚀变改造,从源岩被活化的成矿物质转移到热液中,伴随构造扩容作用发生迁移并富集成矿。事实证明,韧性剪切带与脆性断裂的叠加是成矿的最有利的部位,而且这种构造在玲珑岩体中分布相当广泛,因此,玲珑岩体内的韧性剪切带有着广阔的成矿前景和找矿潜力。



照片1 眼球糜棱岩,重结晶定向分布,眼球体由石英组成 正交偏光 $\times 65$



照片2 火焰状流变石英集晶,压熔流动状波状消光,沿隙填充 正交偏光 $\times 54$

参 考 文 献

- 〔1〕 许志琴 1986 韧性剪切带的基本特征及研究方法 《板块构造基本问题》 地震出版社
- 〔2〕 刘燕君 1985 断裂构造岩中矿物的显微应力结构 《构造地质论丛》 (5) 第143页
- 〔3〕 孙岩等 1985 断裂构造岩带的划分 科学出版社
- 〔4〕 肖庆辉 1982 韧性断层的特征及断层应变和位移的测定方法 《构造地质论丛》 (2) 第131—144页
- 〔5〕 袁奎荣 1985 花岗岩体中断裂构造的初步研究 《构造地质论丛》 (5) 第86—96页
- 〔6〕 Sibson, R. H., 1977, Fault rocks and fault mechanisms. J. Geol. Soc. London, Vol. 133, pp. 191-213.
- 〔7〕 Weathers, M. S. et al., 1979, Differential stress determined from deformation-induced microstructures of the Moine Thrust J. Geophys. Res., Vol. 84, p. 7495.
- 〔8〕 Ramsay, J. G. and Graham, R. H., 1970, Strain variation in shear belt., Can. J. Earth. Sci., No. 3, p. 286

THE RELATION OF DUCTILE SHEAR ZONES TO MINERALIZATION IN THE LINGLONG GOLD OREFIELD

Wang Jijun and Yu Heyong

(Tianjin Academy of Geology, Ministry of Metallurgical Industry, Tianjin)

Abstract

The Linglong Yanshanian metasomatic type granite is a crust-source granite formed by metasomatism of metamorphic rocks of Jiaodong Group under the driving force of structural activity and the action of coexistent remelted granite magma, and the Linglong gold deposit occurs at the northeastern end of this rock body. Faults are quite developed in the rock body; the NEE-NE trending fault system, which experienced strong ductile shearing at the early stage and brittle fracturing at the late stage, is the major ore-controlling and ore-hosting structure; the NNE- and NW-trending faults, belonging to brittle faults, were formed comparatively late and frequently destroyed orebodies. The evolution of faults is obviously characterized by stages. When the rock body underwent diapiric emplacement, the granite was in a plastic quasisolid state and formed a series of ductile shear zones as a result of compression, thus developing extensively plastic deformation flow, folds, crenulation, kinks, subgrains, pressure solution, flame-like rheological quartz aggregate crystals, recrystallization, abnormal extinction and mylonitization. With the falling of temperature and plasticity of the rock body, brittle faults occurred in succession under the same stress field, and were frequently superposed on the ductile shear zones. Under the strong dynamothermal action, metallogenic substances of the source rock were activated and transferred. Ductile-brittle fractural shattered zones obviously control the formation and spatial distribution of gold deposits; the superposition localities of the ductile shear and the brittle fault seem especially favorable for ore formation, and are thus important criteria and the best positions for ore prospecting.