

# 山东招掖地区金矿控矿应力场初探

谢 义 行

(山东省地质学校)

## 一、前 言

山东省招(远)掖(县)地区金矿驰名中外,近二十余年来,开展了大规模地质工作,取得大量地质成果。对岩浆作用、成矿作用、构造变动等地质规律的认识不断深入,就断裂构造控矿的研究也有许多成果。至于控制这些断裂构造的应力作用与应力场问题,在进行“构造体系”的研究中,也曾有所涉及,只是限于当时的工作程度,应力场的分析多是定性的,且以二维的平面应力场为主。

近年来,国内外对构造应力场问题的研究逐步深入,出现许多新的理论和方法。一般认为应力分析应在三维空间进行,决定应力场特征的主应力轴并不完全是水平或直立的,实际状况要复杂得多。国内地质学界曾经流行主应力方向是水平或近于水平,并可用平面应力场来代替三维空间应力分析的说法,显然以现代地应力的表现来代替经过漫长地质历史发展过程中复杂的地应力状态,特别对于局部构造的应力分析,则更是不可靠的。诚然古构造应力场并不象现代构造应力场那样,可以用仪器来测定,比较可靠的是利用“变形化石”“变形鲕粒”等来推算其变形方向与变形量。在没有上述条件的地区,退而次之,则只有利用地质构造本身及其空间组合特点来推测当时的应力场了。这实质上是构造地质领域的“将今论古”的方法。而利用共轭断裂系统的两组节理或断层在极射赤平投影图上求三个主应力轴方位并判断各共轭断裂的性质与位移方向,则是常用的方法之一。进而在资料统计的基础上,还可以分析应力场的演化。

招掖地区区域地质概况(图1),许多文章已作过介绍,本文不再赘述。对于本区控矿构造作用的认识,尽管尚未一致,但本文所涉及的下列几点,大体是没有分歧的。

1. 本区金矿产于中生代构造岩浆带中,区域主要控矿的黄掖断裂带与招平断裂带沿玲珑岩体( $r^1_0$ )长轴两侧遥遥相对,走向近似而倾向相反,呈剖面上的共轭关系;

2. 玲珑岩体( $r^1_0$ )和郭家岭岩体( $r^2_0$ )与金矿成矿作用密切相关,而岩体的展布与控矿断裂有方位上的联系;

3. 储矿构造往往是次级断裂(黄掖、招平带内或带的下盘),它们成群出现,按规模大小划分的级别层次清楚,各级断裂都有固定的方位;

4. 成矿作用是多期脉动的,控矿与储矿断裂也是如此;

5. 矿后构造有继承性和新生性。

总之,招掖金矿区,有如此完美的断裂构造图象,又有比较充分的断裂分期分级资料,本文即在此基础上,以极射赤平投影为手段,探求共轭断裂系统所显示的控矿应力场。吴氏

网的使用按一般习惯采用下半球投影，计算按常规作法。为了便于讨论，各产状参数均采用正式地质报告及公开发表的文献的数据，其中部分经统计处理，多数为经验筛选所得。

## 二、初始期控矿应力场分析

### (一) 黄掖断裂与招平断裂的共轭关系反映了初始期控矿应力场

招掖地区金矿床与矿点星罗棋布，但总体均在玲珑岩体的展布范围之内，玲珑花岗岩

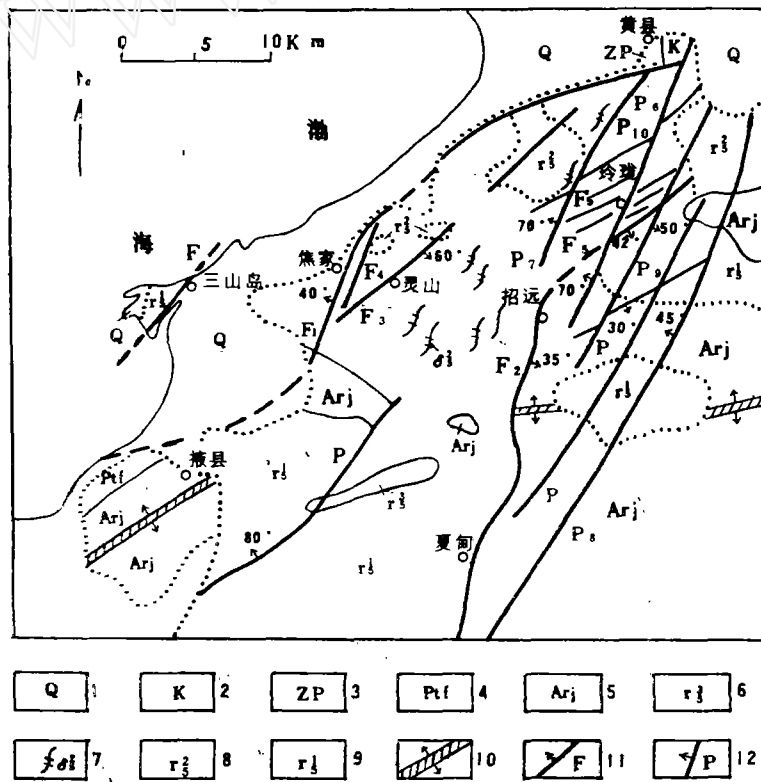


图 1 山东招掖地区区域地质构造略图

- |                |                |             |
|----------------|----------------|-------------|
| 1、第四系          | 2、白垩系          | 3、上元古界蓬莱群   |
| 4、下元古界粉子山群     | 5、太古界胶东群       | 6、燕山晚期花岗闪长岩 |
| 7、燕山早期闪长岩、闪长玢岩 | 8、燕山早期郭家岭石英二长岩 | 9、印支晚期玲珑花岗岩 |
| 10、栖霞复背斜轴      | 11、控矿断裂        | 12、矿后断裂     |

$F_1$  黄掖断裂带     $F_2$  招平断裂带     $F_3$  北灵断裂     $F_4$  望儿山断裂  
 $F_5$  玲珑金矿田控矿断裂群     $P_6$  玲珑断裂     $P_7$  黄猫顶断裂     $P_8$  凤仪店断裂  
 $P_9$  陡道于家断裂     $P_{10}$  猫头沟断裂 (只对文中涉及的断裂编号)

( $r^1_s$ )及随后侵入于玲珑花岗岩体中的上庄—郭家岭石英二长岩( $r^2_s$ )和更晚的一些脉岩( $\delta^2_s$ )属同一构造—岩浆—成矿旋回,分别属于本区成矿作用初始期、成矿期、成矿期后的岩浆活动。在形成玲珑岩体的花岗岩化过程中,导致胶东群基底“矿源层”中金组分的初步迁移富集,揭开金矿成矿作用的序幕。

玲珑花岗岩体主体部分呈NNE向长条状延伸,两侧沿与胶东群(A群)接触带边缘发育的黄掖、招平断裂带,属本区的I级构造,长达上百公里,而且形成时代早。野外资料可以推定,两条主干断裂带,初始阶段是雁行状或断续发育的若干小断裂构成,但是总体展布和产状是经过多次迭加活动继承而保留至今的格局。因此用黄掖断裂带与招平断裂带在剖面上的共轭关系,来推导本区的初始期控矿应力场。

### (二) 初始期控矿应力场的推导

黄掖断裂中段平均走向 $30^\circ$ , NW倾, 倾角 $29^\circ-43^\circ$ , 一般 $30^\circ/NW40^\circ$ 。招平断裂平均走向 $15^\circ$ , SE倾, 倾角 $31^\circ-45^\circ$ , 一般 $15^\circ/SE35^\circ$ 。以一般产状数据在吴氏网上用赤平投影方法计算结果如下(图2):

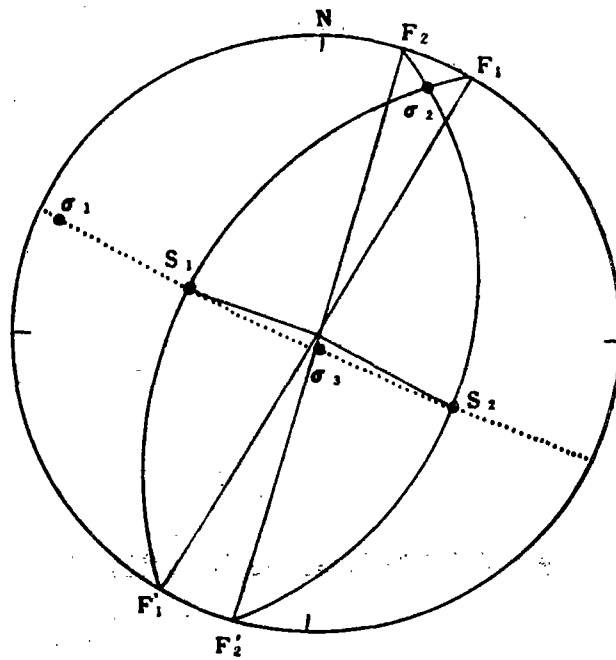


图2 初始期应力场解析图

$F_1F_1'$ 黄掖断裂     $F_2F_2'$ 招平断裂     $\sigma_1$ 最大主应力轴     $\sigma_2$ 中间主应力轴  
 $\sigma_3$ 最小主应力轴     $S_1$   $F_1$ 滑动方向     $S_2$   $F_2$ 滑动方向     $S_1F_1'$   $S_1$ 在 $F_1$ 上的侧伏  
 $S_2F_2'$   $S_2$ 在 $F_2$ 上的侧伏     $S_1\sigma_1S_2$ 共轭角     $S_1\sigma_1S_2\sigma_1$ 剪裂角

由上图推导可以得出:

1. 本区控矿初始期应力场: 最大主应力轴 $\sigma_1$ ,  $293^\circ \angle 3^\circ$ ; 中间主应力轴 $\sigma_2$ ,  $23^\circ \angle 6^\circ$ ;

最小主应力轴 $\sigma_3$ ； $180^\circ \angle 86^\circ$ 。

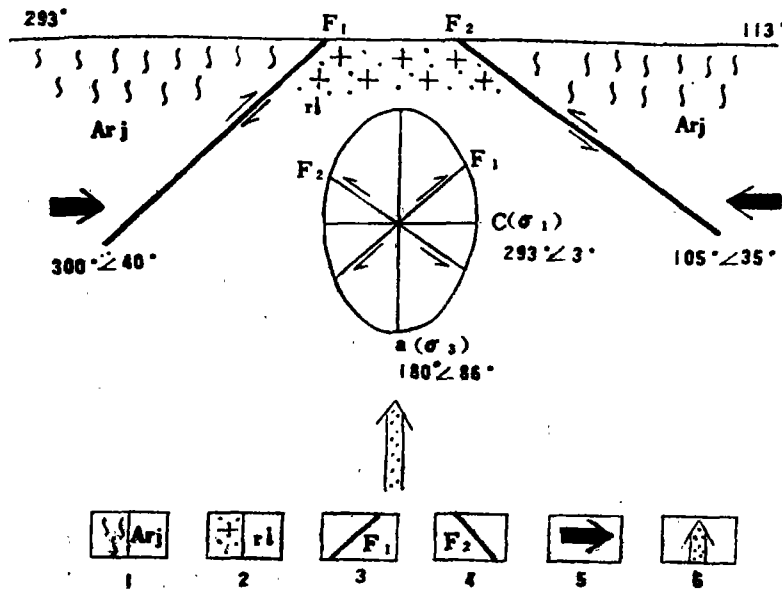
2.  $\sigma_1$ 在断裂投影弧的凸侧，故 $F_1$ 、 $F_2$ 均为逆断层。 $\sigma_1$ 所在盘总是向着 $\sigma_2$ 所在方向滑动，故 $F_1$ 为右行平移、 $F_2$ 为左行平移。所以黄掖断裂为右行平移逆断层、招平断裂为左行平移逆断层。 $S_1$ 、 $S_2$ 代表 $F_1$ 、 $F_2$ 的滑动方向，即 $F_1$ 、 $F_2$ 的上盘沿 $S_1$ 、 $S_2$ 向赤平圆心方向滑动，下盘相反。因此， $F_1$ 上盘向 $108^\circ$ 方向斜冲，下盘向 $288^\circ$ 方向斜落； $F_2$ 上盘向 $297^\circ$ 方向斜冲，下盘向 $117^\circ$ 方向斜落。

3.  $S_1$ 在 $F_1$ 上的侧伏为 $\angle 82^\circ \text{SW}$ ， $S_2$ 在 $F_2$ 上的侧伏为 $\angle 80^\circ \text{SW}$ ，故两断裂均以倾向滑动为主，平移量很小。

4.  $S_1$ 与 $S_2$ 的锐夹角为共轭角，此例为 $74^\circ$ 。 $S_1$ 、 $S_2$ 与 $\sigma_1$ 的夹角为剪裂角（1/2共轭角），此例为 $37^\circ$ 。

**（三）主应变面与次应变面**

最大主应力轴 $\sigma_1$ 与最小主应力轴 $\sigma_3$ 构成主应变面。招掖地区控矿初始期的主应变面显然是在剖面上，其模式为图3所示。



**图3 初始期应力场主应变面应力应变模式图**

- 1. 胶东群
- 2. 玲珑花岗岩
- 3. 初始期的黄掖断裂
- 4. 初始期的招平断裂
- 5. 挤压方向
- 6. 岩浆上升总体方向

我们在用变形椭圆代替变形椭球进行应变分析时，通常以含 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 的主应变椭圆来代替应变椭球， $\sigma_2$ 即b轴一般作为不变轴来看待。但实际上b轴不变的可能性是很小的，特别在挤压应力作用下，往往b轴也有一定的伸长，因此由 $\sigma_1$ 与 $\sigma_2$ 构成的面也是一个变形面，但属次应变面。例如本例，岩浆上升过程中，在平面上的长轴方向也有一定的流动，因此构成了平面上的次应变面。

值得注意的是，平面次应变面中，也会派生一对次级共轭剪裂面，其剪裂角应该与主应变应力场相同。因为据哈特曼（L. Hartmann 1896）定律：“脆性物质中，剪切面以相交的锐角被最大应力轴所等分，而其钝角的等分线则代表最小应力轴。剪切面夹角的大小，常常随物质的种类而不同，与应力的强度无关”。显然次应变面与主应变面相比，只是应力强度减小，而岩石的力学性质与所处的变形阶段均未改变，所以其剪裂角应该基本不变。

由此，我们可以得出平面次应变面的应力状况是： $\sigma_1$ 仍为 $293^\circ$ ，为C轴； $\sigma_2$ 为 $23^\circ$ ，由b轴转化为 $a'$ 轴，剪裂角仍为 $37^\circ$ ，则应该生成 $76^\circ$ 与 $320^\circ$ 走向的两组剪切破裂面，前者右行，后者左行。（图5）一般岩石力学理论认为，这两组剪切破裂面不会很发育，多以节理、裂隙出现，只有当次应变面转化为主应变面时，才可能逐步发展为较大的断裂。在这种意义上说，通常把处于次应变阶段的这对剪切破裂面称为“势断层”。

据资料统计，玲珑花岗岩中广泛发育的原生节理与充填的早期无矿白色石英脉、伟晶岩脉通常有两组，即NEE组（ $70^\circ\sim 80^\circ$ ）与NW组（ $320^\circ\sim 330^\circ$ ）就是这两组次应变剪切破裂面的显示。而本区若干 $70^\circ\sim 80^\circ$ 走向的次级控矿断裂就是沿势断层进一步发育的结果。如玲珑矿田的控矿断裂群（图1， $F_5$ ）。

#### （四）岩蓬地带张裂阶段应力场的转化

岩蓬地带系指侵入体同围岩相接触的地带，大体相当于侵入接触带的内带或岩体边缘相带。许多文献已经指出这一地带的重要成矿意义，并特别指出其“岩凸”的部位矿床特别集中。招掖地区焦家式金矿的分布也有这个特点。当玲珑期（ $r_1^1$ ）岩浆活动尚未完全结束时，岩蓬地带已经冷凝收缩，显然，对于岩体边部来说，应力场也发生了相应的转化，即最大的伸长方向（ $\sigma_3$ ）变为最大的收缩方向（ $\sigma_1$ ，即C'轴），最大的挤压方向变为最小的收缩方向，即相对伸长方向（ $\sigma_3$ ，即a'轴），也就是说 $\sigma_1$ 与 $\sigma_3$ 的位置发生了对换（图5）。

此时本区的主应变面显然仍在剖面上，由于岩体收缩，在岩蓬地带处于张力的环境，早期黄掖断裂、招平断裂由逆断层转化为正断层的性质，在其影响范围内，形成一些倾角较陡的势断层。

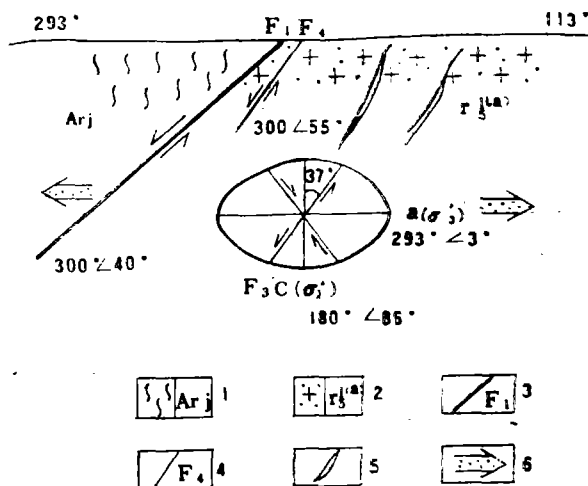


图4 岩蓬地带张裂阶段主应变面应力应变模式图

- 1, 胶东群 2, 玲珑花岗岩边缘相
- 3, 黄掖断裂 4, 望儿山断裂
- 5, 早期蚀变带 6, 拉张方向

由图 4 说明黄掖断裂下盘岩蓬地带张裂阶段的应力应变状态及势断层的方位，（如仍用 37° 剪裂角计算，则势断层倾角为 53° 左右，它们与主断裂走向平行，倾向上有小夹角，倾角陡于主断裂），推论焦家金矿带的望儿山断裂（30°/NW50°—55°）则开始形成于这个阶段。

平面上的次应变面也发生了类似的变化，即原来的  $\sigma_1$ （113°）转化为  $a'''$  轴， $\sigma_2$ （23°）转化为  $C'''$  轴，则应当形成 60° 与 346° 的两组势断裂（图 5）。60° 左右走向的这组势断裂，在以后的成矿期得到发展，由剪性转化为张剪性，形成了北岭断裂成矿带、草沟头断裂成矿带及玲珑矿田的部分控矿断裂带。而 346° 左右的一组，由于旋转变形的结果，向挤压面转化，因而多不发育，在玲珑矿田中常见的 NW 向挤压劈理带就是它的显示，并为少量矿前脉岩（煌斑岩、闪长玢岩）充填。

总之，本区的控矿初期应力场可以由黄掖断裂与招平断裂的共轭关系来推导。初期应力场经历了生成与张裂两个阶段，各阶段又存有主应变与次应变两个相关的应变面，控制了多组断裂与势断裂的发育方位，其中部分在成矿期各局部应力场中发展为主要的储矿构造。而在初期则在岩浆热液作用下，产生普遍的绢英岩化及少量的早期黄铁矿化，金矿有益组分得到初步的富集，但未形成有工业意义的矿体。

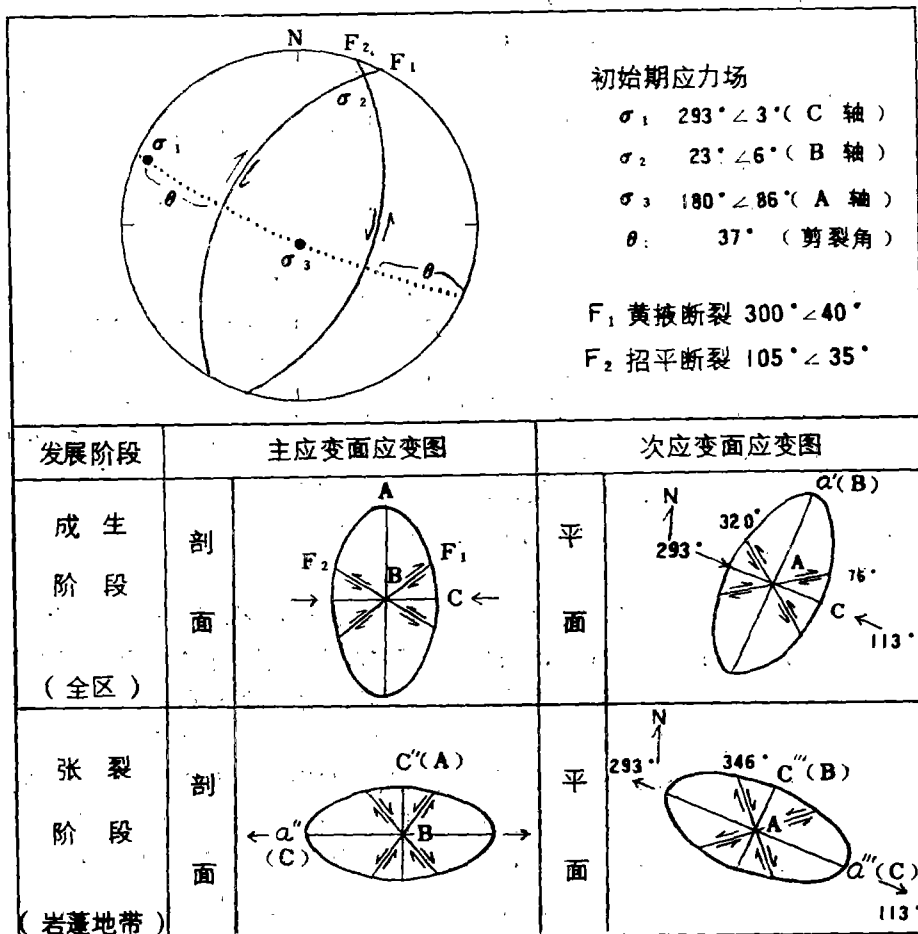


图 5 初期应力场及应变图

### 三、成矿期应力场分析

招掖地区的金矿在成因上主要与郭家岭石英二长岩( $r^2$ )的侵入活动有关。据统计该侵入岩的金含量较背景值高60倍。本区许多金矿床,几乎都与这期岩浆活动密切相关。本区金矿床多分布在 $r^2$ 侵入体顶部和内外接触带附近,成矿作用主要发生在岩体形成后和派生中基性岩脉( $\delta^2$ )发育之前的阶段。该岩体在本区多呈一系列岩株出露,总体呈EW向,与栖霞复背斜轴向一致,显然受胶东群基底构造方位的影响。岩体为正岩浆系列,在其上隆活动作用影响下,各小岩体周围原有的断裂得到进一步的发展,成为储矿的有利场所。因此,伴随 $r^2$ 岩浆活动的一系列构造变动,是本区成矿期构造。

#### (一)成矿期应力场的一般特点

1.成矿期应力场继承初始期应力场,各主要控矿断裂的总体展布方位,均可追溯到初始期应力场所控制的各组断裂或势断裂;

2.成矿期应力场也有新生性, $r^2$ 各岩体的侵入活动,必然影响本区各矿田、成矿带的局部应力场。在早期断裂的端部、侧翼等应力集中部位,断裂进一步发展,主断裂带内的节理裂隙和旁侧的羽状裂隙,均是主要的储矿构造;

3.由于早期断裂的影响,玲珑花岗岩体已被初步分割,各部位在成矿期的应力场受不同的边界条件制约,表现各不相同,已由一个统一的初始应力场分解为若干局部应力场,故此应力场的状况更为复杂,必须分别对待。

现试以本区矿床最集中的焦家成矿带及玲珑金矿田为例,分别探求其成矿期应力场。

#### (二)焦家成矿带成矿期应力场

本文所指焦家成矿带包括黄掖断裂带中段焦家断裂带的焦家、新城、河东等大型金矿床及下盘北灵断裂带的北截、灵山等中型金矿床和其间的望儿山、洼孙家等矿床(图11)。

郭家岭石英二长岩( $r^2$ )在本成矿带称为上庄岩体,已有资料证明为成矿母岩。本成矿带的成矿活动受焦家断裂、北灵断裂的继承性活动所制约,矿体赋存于早期形成的构造蚀变带内,呈细脉、网脉状产出;或赋存于断裂带旁侧羽状分支裂隙中,以石英脉型产出。

我们由焦家断裂与北灵断裂的共轭关系探求本成矿带成矿期的总应力场:

由图6得知,本成矿带的总体应力状态是 $\sigma_1: 360^\circ \angle 74^\circ$ ,  $\sigma_2: 224^\circ \angle 12^\circ$ ,  $\sigma_3: 132^\circ \angle 10^\circ$ 。

$S_1$ 代表 $F_1$ (焦家断裂)的滑移方向,倾伏: $324^\circ \angle 37^\circ$ ,侧伏: $\angle 70^\circ \text{NE}$ 。 $S_3$ 代表 $F_3$ (北灵断裂)的滑移方向,倾伏: $114^\circ \angle 56^\circ$ ,侧伏: $\angle 76^\circ \text{NE}$ 。共轭角 $80^\circ$ ,剪裂角 $40^\circ$ 。

$F_1$ 属右行平移正断层, $F_3$ 属左行平移正断层,均以垂向滑动上盘下落为主,水平滑移量较小。

现在的问题是,这个应力场的推导是否为野外地质事实所支持,本成矿带成矿期的地质构造演化是否确实是在这个应力场的制约之下进行的,下面就结合野外地质实例来加以讨论。

1.作为成矿母岩的上庄岩体共结斑晶暗色矿物呈定向排列,流面产状 $310^\circ/\text{SW}20^\circ$ (图

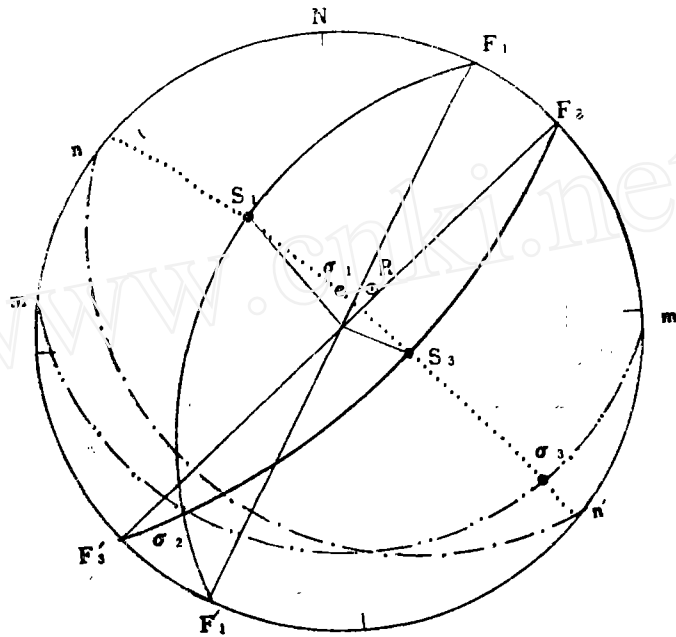


图6 焦家成矿带成矿期应力场解析图

$F_1F_1'$ 焦家断裂 ( $300^\circ/40^\circ$ )  $F_2F_2'$ 北灵断裂 ( $140^\circ/60^\circ$ )

$mm'$ 理论流面  $nn'$ 实测流面  $R$   $nn'$ 的法线点

6  $nn'$ 所示)。而从赤平投影图上分析,垂直 $\sigma_1$ 由 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 构成的大圆弧代表的构造面,承受最大的压应力,是理论上的流面(图6  $mm'$ 所示,理论值为 $274^\circ/SW15^\circ$ )。从图6可以直接看出 $mm'$ 与 $nn'$ 两面十分相近,如作 $nn'$ 的法线点 $R$ ,则与 $mm'$ 的法线点 $\sigma_1$ 的空间夹角 $<10^\circ$ 。考虑到岩体内部各部分的物质构成不均一及尚未查清的岩体深部变化,这理论与实测产状值是一致的。因此,可以认为,上述推导的应力场与上庄岩体侵入活动的应力状态是一致的。

2.成矿期构造活动直接控制了矿体的形态。如焦家矿床构造蚀变带与矿体平面上呈现右行平移的应力控制特征(图7),剖面上矿体多赋存在倾角变陡处,显示正断层滑动控矿特点(图8),这与多数擦痕(成矿后)显示的左行逆断层滑动特征不同。总之,从蚀变带与矿体形态来看,焦家断裂成矿期应属右行平移正断层,这与推导的 $F_1$ 断层的滑移是一致的。

3.在焦家成矿带内,由于各矿床所处的边界条件不同,各矿床的局部应力场也不一致。据地质报告资料,各矿床的容矿节理裂隙一般有两组,密度均在3—5条/米,延伸数米,充填金—硫化物—石英,呈细脉浸染状(图9)。

据共轭节理数据,分别求出各矿床成矿期各局部应力场主应力轴方位,其中灵山为石英脉型金矿,用主脉、支脉的共轭控矿断裂产状数据(图10)。

据图10,上庄岩体流面产状用全成矿带的应力轴方位代表,依此编出主应力轴轨迹(图11)。

由主应力轴轨迹图可以看出,焦家、北灵断裂之间成矿期的应力状态,尽管各个局部有

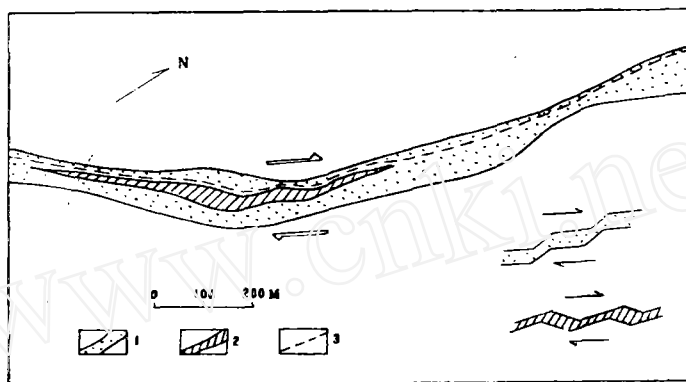


图7 焦家金矿床蚀变带与矿体形态平面图

1, 构造蚀变带 2, 矿体 3, 主裂面(成矿后)

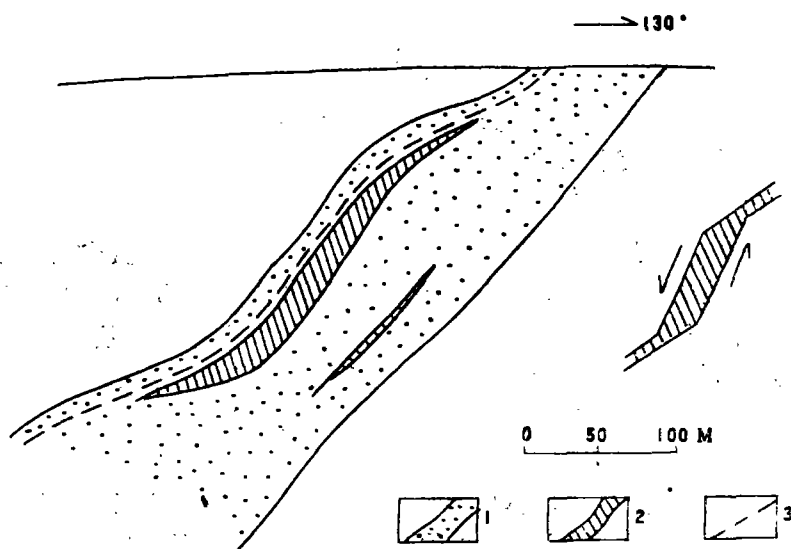


图8 焦家金矿床蚀变带与矿体形态剖面图

1, 构造蚀变带 2, 矿体 3, 主裂面(成矿后)

所差异,但是属于连续统一的应力场。其主压应力以NNE—SSW为主,局部转为NE—SW或SN向。主张应力以NW—SE为主,局部转为EW向。推测外力来源主要是上庄岩体的侵入活动造成本地带的隆起状态,形成以水平拉伸为主的应力,同时还受到初始期已经形成的断裂继承性活动的影响。从应力场波及范围来考察,焦家断裂形成早,在成矿期已经存在明显的破裂分割面,该应力场北西界严格局限于焦家断裂下盘。(野外资料认为:从蚀变矿化作用来说,由于焦家断裂的糜棱岩带对主要成矿阶段起阻隔圈闭作用,热液很少透过主裂面上盘,矿体均赋存于下盘离主裂面不远处)。而北灵断裂是次级构造,形成较晚,是由初始

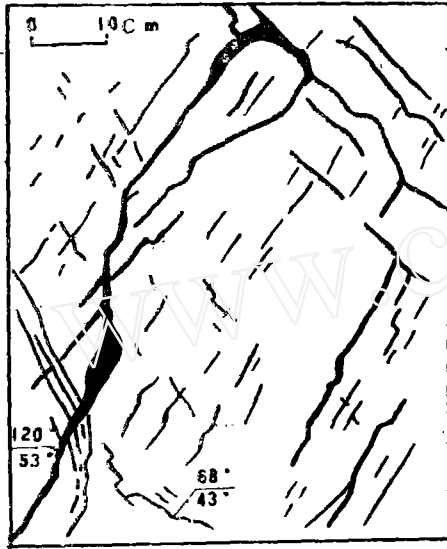


图9 金—硫化物—石英细脉沿共轭节理充填  
(焦家矿床穿脉坑道壁局部素描)

期应力场中“势断层”逐步发育起来的。可以设想，它对应力场与成矿作用的南东界，不能起严格的限制作用，北灵断裂以南仍然有若干较小的矿体存在。

### (三) 玲珑金矿田成矿期应力场

玲珑金矿田在招掖金矿成矿区东北部，矿田东南以破头青断裂( $F_2$ )为界，一般认为它是招平断裂带的北东延续地段，宽百米，为矿田 I 级构造。矿田中发育十余条控矿断裂( $F_3$ )，长千米至数千米，宽 2~10 米，为 II 级构造。侧羽分支断裂十分发育，达上百条，为 III 级、IV 级构造。控矿断裂系统规律明显(图 12)。矿体赋存于控矿断裂及分支断裂中，特别是断裂分支、复合、弯曲部位。除破头青断裂带内为细脉浸染蚀变岩型(焦家式)金矿，其余均为石英脉型金矿。

破头青断裂平均走向 $60^\circ$ 、倾向 SE、倾角 $42^\circ$ 。控矿断裂一般走向 $75^\circ$ 、倾向 NW、倾角自北向南逐步变陡，一般 $65^\circ$ 。这组控矿断裂群在方位上沿袭初始期应力场中的势断层(图 5)。据破头青断裂( $F_2$ )与控矿断裂群( $F_3$ )的共轭关系，推导玲珑矿田成矿期总应力场。

由图 13 得知，矿田成矿期的总体应力状态是 $\sigma_1: 194^\circ \angle 75^\circ$ ， $\sigma_2: 71^\circ \angle 9^\circ$ ， $\sigma_3: 338^\circ \angle 12^\circ$ 。滑移方向 $S_2$  倾伏 $157^\circ \angle 41^\circ$ ，侧伏 $\angle 76^\circ \text{SW}$ ； $S_3$  倾伏 $322^\circ \angle 64^\circ$ ，侧伏 $\angle 80^\circ \text{SW}$ 。共轭角 $74^\circ$ ，剪裂角 $37^\circ$ 。

$F_2$  属右行平移正断层， $F_3$  属左行平移正断层。以下仍结合野外地质实例加以讨论。

1. 矿田中控矿断裂( $F_3$ )的羽状分支十分发育，主要分支断裂(III 级构造)在走向上大体与控矿断裂平行或呈小的交角，而在剖面上呈共轭关系(图 14)。这些普遍存在的局部构造反映了成矿期总应力场主应变面的应力应变状况。图 14 中由局部应力场制约的支脉与冈长岩反映的断裂共轭关系，说明了尽管总体与各个局部应力场是逐级控制的，但在成矿期内各个阶段，总应力场始终起着总体控制作用。

另外一组分支断裂(III—IV 级构造)呈 NE $30^\circ \sim 40^\circ$  走向，倾向 SE 或 NW，倾角 $40^\circ \sim$

矿床	共轭容矿节理产状	图 解	主应力轴方
1 焦家	① 20° / SE 45° ② 335° / NW 65°		$\sigma_1: 170^\circ \angle 8^\circ$ $\sigma_2: 75^\circ \angle 40^\circ$ $\sigma_3: 268^\circ \angle 49^\circ$
2 新城	① 20° / NW 65° ② 75° / NW 68°		$\sigma_1: 46^\circ \angle 4^\circ$ $\sigma_2: 308^\circ \angle 64^\circ$ $\sigma_3: 138^\circ \angle 26^\circ$
3 洼孙家	① 42° / SE 70° ② 15° / SE 55°		$\sigma_1: 194^\circ \angle 30^\circ$ $\sigma_2: 66^\circ \angle 48^\circ$ $\sigma_3: 301^\circ \angle 27^\circ$
4 望儿山	① 20° / NW 50° ② 330° / SW 60°		$\sigma_1: 183^\circ \angle 12^\circ$ $\sigma_2: 285^\circ \angle 50^\circ$ $\sigma_3: 84^\circ \angle 38^\circ$
5 灵山	主脉 50° / SE 60° 支脉 35° / SE 51°		$\sigma_1: 204^\circ \angle 24^\circ$ $\sigma_2: 80^\circ \angle 40^\circ$ $\sigma_3: 309^\circ \angle 30^\circ$

图10 焦家成矿带成矿期各矿床局部应力场主应力轴图表

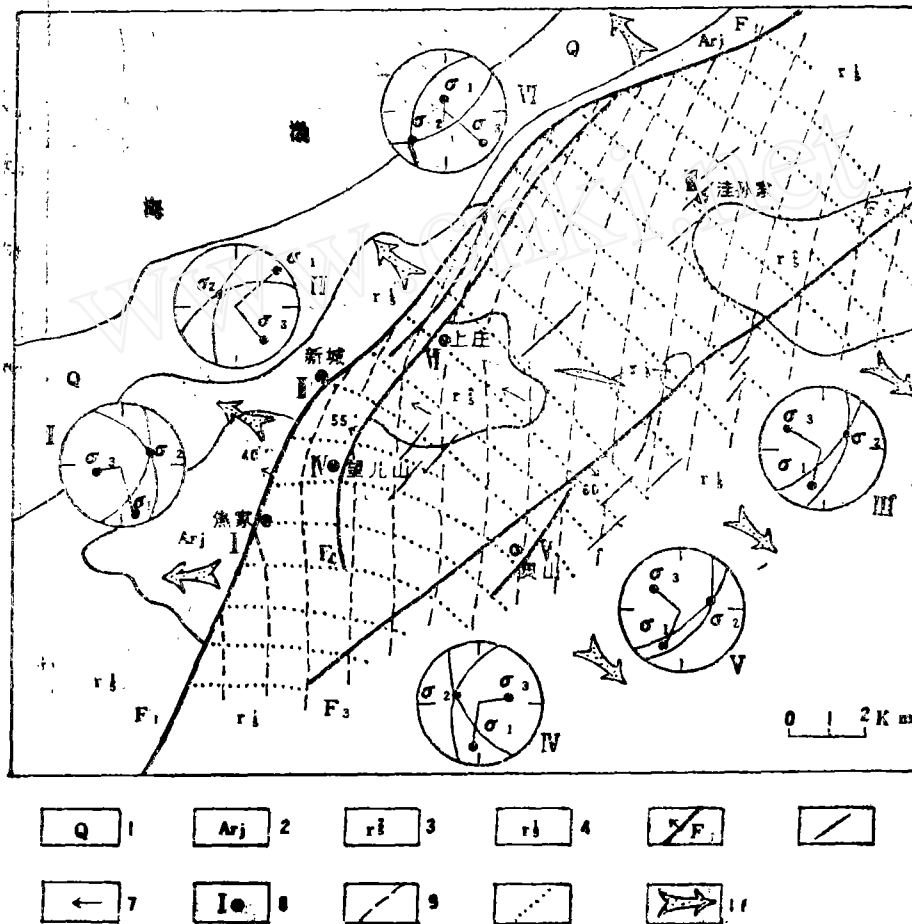


图11 焦家成矿带成矿期主应力轴轨迹图

- 1、第四系 2、胶东群 3、郭家岭石英二长岩 4、玲珑花岗岩  
 5、断裂带及编号 (F<sub>1</sub>: 焦家断裂 F<sub>2</sub>: 北灵断裂 F<sub>3</sub>: 望儿山断裂)  
 6、矿脉 7、流线 8、矿床及编号 9、最大主应力轴 ( $\sigma_1$ ) 迹线  
 10、最小主应力轴 ( $\sigma_3$ ) 迹线 11、拉伸方向

80°它们与控矿断裂的关系多数反映了控矿断裂为右行平移的特征，估计形成最初的微断裂阶段相当于控矿断裂的挤压生成阶段。（该阶段矿田总应力场表现为图13中 $\sigma_1$ 与 $\sigma_3$ 位置互换，因此当时F<sub>3</sub>为右行平移逆断层）。而在张裂阶段得到充分的发展，在方位上则与次应变面（平面）上的一组势断层一致（图12P<sub>1</sub>所示）。矿田内各控矿断裂的NE尾端常常由NE向转为NE~NNE向，也明显地迁就了这组势断层的方位。当然，这些Ⅲ级Ⅳ级构造在各自的影响范围内形成各自的局部应力场，由于边界条件的不同，其状况是复杂的，矿体形态也是多样的。但就总体而言，可以认为断裂构造的逐级控制关系与所推导的矿田成矿期应力场是一致的。

2. 控矿断裂 (F<sub>3</sub>) 中的单个矿体及组合形态，均反映控矿断裂当时的左行平移正断层性

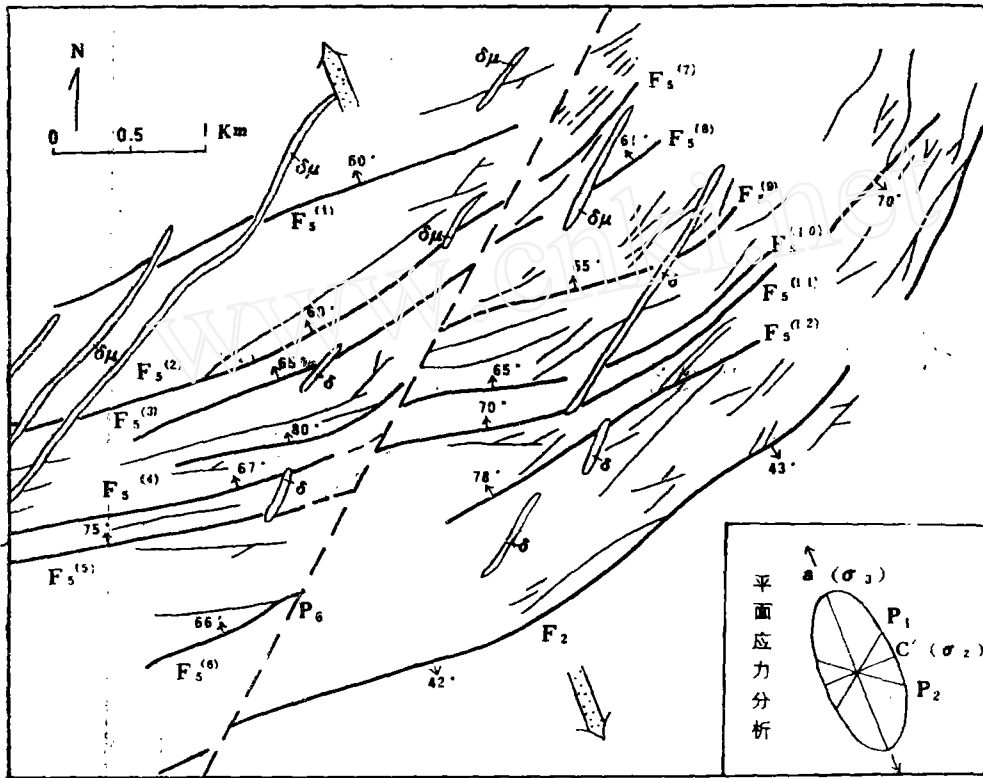


图12 玲珑金矿田地质构造图  
1、闪长玢岩 2、闪长岩 3、玲珑花岗岩 4、控矿断裂  
5、分支控矿断裂 6、矿后断裂 平面总体应力方向

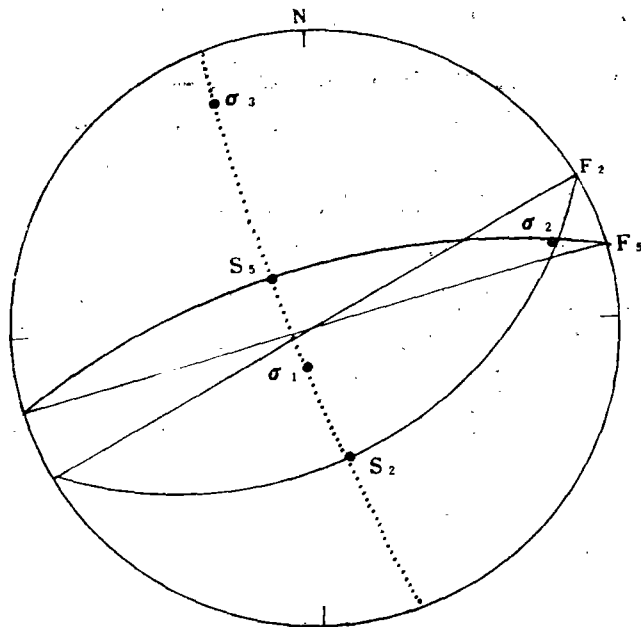


图13 玲珑金矿田成矿期应力场解析图

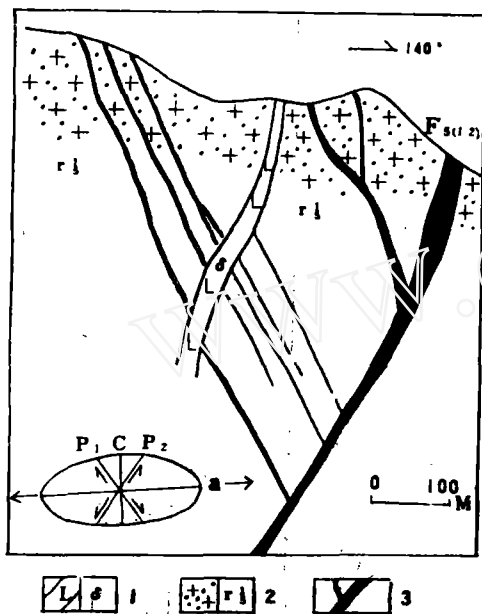


图14 玲珑金矿田主矿脉与分支矿脉的剖面共轭形态

1、闪长岩 2、玲珑花岗岩 3、矿脉

这种大致垂直于主脉的拉张状态与所推导的成矿期总应力场的应力状态是一致的。至于破头青断裂( $F_2$ )，在地质图上，显示了矿体受右行平移控断裂的制约。

3. 玲珑金矿田成矿期的主应变面显然在剖面上，主压应力来自垂直方向，因此深部必定有成矿期挤压应力的来源。七十年代，招掖地区的金矿地质学者认识到上庄岩体( $r^2$ )为焦家金矿的成矿母岩，在玲珑矿田引起相应的注意，但没有结果。近年来，矿山深部坑道已经多处见花岗闪长岩、石英二长岩等 $r^2$ 岩体。正是 $r^2$ 的岩浆活动对本区已经冷凝成岩的玲珑花岗岩块体起顶托作用，使玲珑矿田成矿期总体处于NNW—SSE的 近于水平的拉张状态。追溯初始期本矿田就处于玲珑花岗岩的岩蓬地带，形成了一系列断裂与势断层，当成矿期张应力强烈作用之时，这些断裂普遍启开、发展、贯通并充填了矿体，其模式为图16所示。

与焦家成矿带成矿期应力场相应的特点是：破头青断裂形成较早，在成矿期已经存有明显的破裂分割面，因此形成矿田严格的南东界。而控矿断裂群是在成矿期逐渐发展的，不能起严格的限制作用，矿田控矿断裂群以北，尚有零星矿体出现。

#### 四、成矿期后应力场的简要讨论

招掖金矿成矿区内，最发育的构造当推成矿后构造。一方面黄掖、招平两条主干断裂带及其他较大的控矿断裂在成矿后均有继承性活动，普遍发育断层泥(厚三米至十几厘米，未受热变质但有时含矿，最高可接近边界品位)，大量的成矿后擦痕，都是明显的标志。另一

质。图15A图中三个矿体均产于产状较陡处，明显受正断层滑动制约，而在平面上矿体则赋存于断裂两壁作左行平移而形成的虚脱部位。A图三个矿体呈首尾紧密相连的雁行状与B图所示主脉矿体雁行状组合形态，均显示了控矿断裂平面上的左行平移滑动。图15中C图与D图分别反映了成矿期平面和剖面上的拉张效应。一般认为，当受到张应力时，在一定小区间内，裂隙张开的程度是相同的。当主脉体出现分支时，厚度就变薄，但在平行于张力的各个小剖面上，各脉体厚度之和基本相等。D图还显示了脉体沿一对共轭节理充填，当总体正断层滑动时，上盘下落，产生了局部的剪切应力，导致了共轭剪节理的旋转变形。其中产状较陡的一组( $P_1$ )向张性面转化，节理启开易于充填脉体，而产状较缓的一组( $P_2$ )向挤压面转化，节理面应为闭合状态，但由于总体处于较强的拉张状态，致使断裂的全部(包括闭合部位)均受到拉张并充填成矿。这种

大致垂直于主脉的拉张状态与所推导的成矿期总应力场的应力状态是一致的。至于破头青断裂( $F_2$ )，在地质图上，显示了矿体受右行平移控断裂的制约。

玲珑金矿田成矿期的主应变面显然在剖面上，主压应力来自垂直方向，因此深部必定有成矿期挤压应力的来源。七十年代，招掖地区的金矿地质学者认识到上庄岩体( $r^2$ )为焦家金矿的成矿母岩，在玲珑矿田引起相应的注意，但没有结果。近年来，矿山深部坑道已经多处见花岗闪长岩、石英二长岩等 $r^2$ 岩体。正是 $r^2$ 的岩浆活动对本区已经冷凝成岩的玲珑花岗岩块体起顶托作用，使玲珑矿田成矿期总体处于NNW—SSE的 近于水平的拉张状态。追溯初始期本矿田就处于玲珑花岗岩的岩蓬地带，形成了一系列断裂与势断层，当成矿期张应力强烈作用之时，这些断裂普遍启开、发展、贯通并充填了矿体，其模式为图16所示。

与焦家成矿带成矿期应力场相应的特点是：破头青断裂形成较早，在成矿期已经存有明显的破裂分割面，因此形成矿田严格的南东界。而控矿断裂群是在成矿期逐渐发展的，不能起严格的限制作用，矿田控矿断裂群以北，尚有零星矿体出现。

#### 四、成矿期后应力场的简要讨论

招掖金矿成矿区内，最发育的构造当推成矿后构造。一方面黄掖、招平两条主干断裂带及其他较大的控矿断裂在成矿后均有继承性活动，普遍发育断层泥(厚三米至十几厘米，未受热变质但有时含矿，最高可接近边界品位)，大量的成矿后擦痕，都是明显的标志。另一

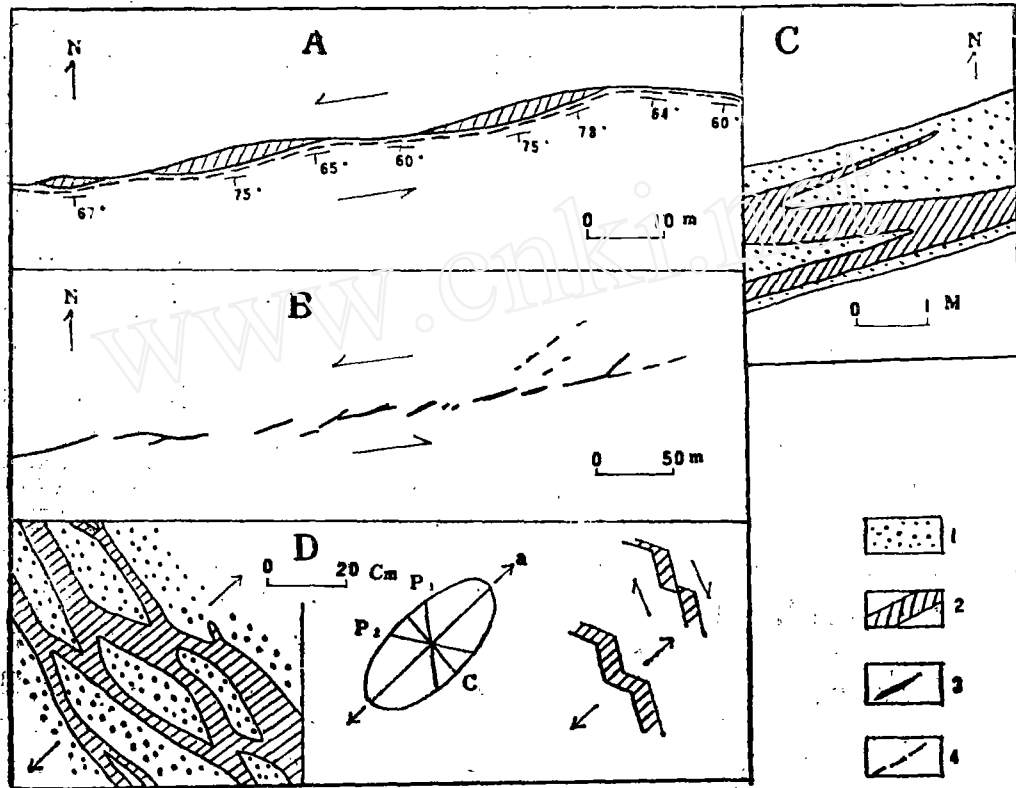


图15 玲珑金矿田沿脉坑道中的矿体形态

A支脉中的单矿体形态〔坑道中断地质图〕 B主脉矿体雁行状组合形态〔坑道中断图缩编〕  
C矿体分支形态〔沿脉坑道顶板素描〕 D矿体分支复合形态及应力应变分析〔穿脉坑道壁局部素描〕 1、黄铁绢英岩化蚀变岩 2、3、金—硫化物—石英脉矿体 4、主裂面(矿后)

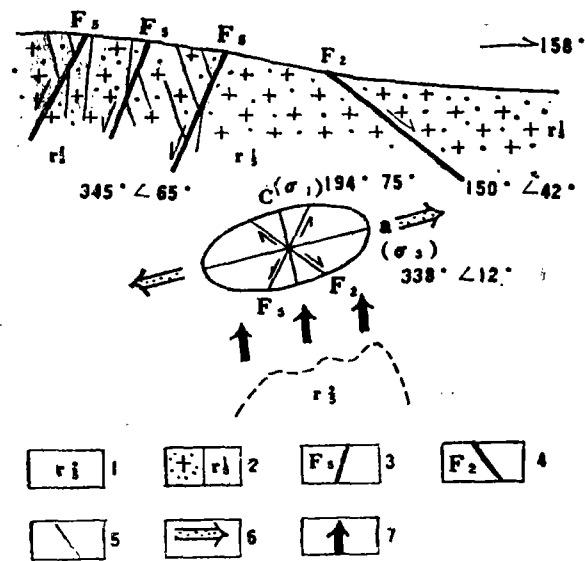


图16 玲珑金矿田成矿期主应变面应力应变模式图

- 1、郭家岭花岗闪长岩、石英二长岩
- 2、玲珑花岗岩
- 3、矿田控矿断裂群
- 4、破头青断裂带
- 5、分支断裂
- 6、总体拉张方向
- 7、挤压应力方向

方面，新生构造也很发育，主要有①NNE向（ $25^\circ$ 左右）的断裂群（成矿区东部及外侧特别发育）；②NEE向（ $60^\circ$ 左右）的断裂；③NNE向的闪长玢岩脉（ $\delta^2$ ）的充填；④规模较小的NW向断裂。但遗憾的是，在众多的成矿后构造中，我们尚不能以充分的依据筛选出其中的成矿期后构造，即在成矿热液活动结束后一段时间内，成矿作用所属的构造岩浆旋回的尾声阶段的构造。相当部分的成矿后构造可能属于另一构造旋回的产物。问题的复杂性还在于，成矿期后由于初始期与成矿期断裂的发展，本区已被许多断裂分割成各个小的“断块”，其各自的应力场特征显然是很不同的。但尽管如此，从总体来看，玲珑岩体中部以闪长玢岩脉群（ $\delta^2$ ）的充填为特征，而玲珑岩体边部及其外侧则以NNE及NEE两组斜冲逆断层的发育为特征（图1）。我们依此分别推导本区中部与边部成矿期后应力场。

（一）本区成矿期后的闪长玢岩（少量闪长岩）的脉岩活动十分广泛，一般认为属燕山早期的最后阶段，集中分布在黄猫顶断裂（图1， $P_7$ ）与北灵断裂（ $F_3$ ）之间，大体相当于玲珑岩体的内部相与过渡相，特别在本区中部约5公里宽的范围内更为密集。脉岩长4~8公里，宽10~50米，走向NNE $20^\circ\sim 45^\circ$ ，或沿NNE与NE向曲折追踪，倾角近于直立。其应力状态推导如下（图17）：

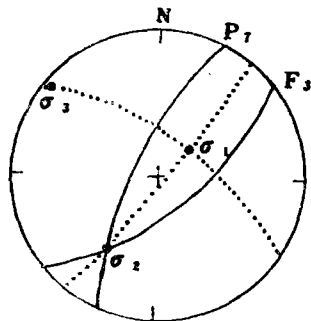


图17 招掖成矿区中部成矿期后应力场解析图

$F_3$  北灵断裂（ $140^\circ \angle 60^\circ$ ）

$P_7$  黄猫顶断裂（ $295^\circ \angle 70^\circ$ ）

$\sigma_1$ :  $50^\circ \angle 64^\circ$

$\sigma_2$ :  $215^\circ \angle 25^\circ$

$\sigma_3$ :  $307^\circ \angle 6^\circ$

垂直于 $\sigma_3$ ，包含 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 的大弧为理论张裂面，理论值 $36^\circ/SE84^\circ$ ，显然与脉岩群的实际产状是一致的。

（二）玲珑岩体边部，如玲珑矿田及外侧十几公里范围内，发育两组逆冲断层。第一组如玲珑断裂（ $P_6$ ）、黄猫顶断裂（ $P_7$ ）、凤仪店断裂（ $P_8$ ）等，长30—100公里以上，走向NNE，倾向NWW、少量SEE，倾角 $45^\circ\sim 80^\circ$ （图1）。这组断裂经过长时间多次活动直至现代。估计成矿期后为其初始形成阶段。另一组如玲珑矿田北侧的胡家埠断裂（图1未画）、猫头沟断裂（ $P_{10}$ ）、陡道于家断裂（ $P_9$ ）等，规模较小，长十余公里，走向NEE $60^\circ$ ，倾向SSE或NWW，倾角较缓。我们以凤仪店断裂（ $P_8: 25^\circ/NW \angle 45^\circ$ ）与陡道于家断裂（ $P_9: 60^\circ/SE \angle 30^\circ$ ）的共轭关系来推导成矿期后玲珑矿田及外侧的应力场（图18）。

此时 $P_6$ 为左行平移逆断层、 $P_9$ 为右行平移逆断层。

（三）比较图17与图18，可看出其各主应力轴方位有某种内在的联系。 $\sigma_2$ 基本不变， $\sigma_1$ 与 $\sigma_3$ 大体对换位置。这种应力状态可以设想为已经充分冷凝的玲珑花岗岩作为整体上拱的块体，在侧向挤压力作用下，其边部与块体弯曲的顶部应力作用正好相反，其间在玲珑矿田

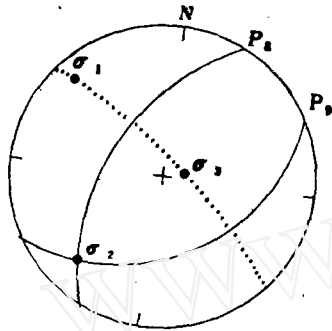


图18 玲珑矿田及外侧成矿期后应力场解析图

$\sigma_1: 316^\circ \angle 9^\circ$   
 $\sigma_2: 218^\circ \angle 13^\circ$   
 $\sigma_3: 83^\circ \angle 73^\circ$

与焦家成矿带内侧，大体为过渡地带，总体应力为NW—SE向的挤压。其模式为图19:

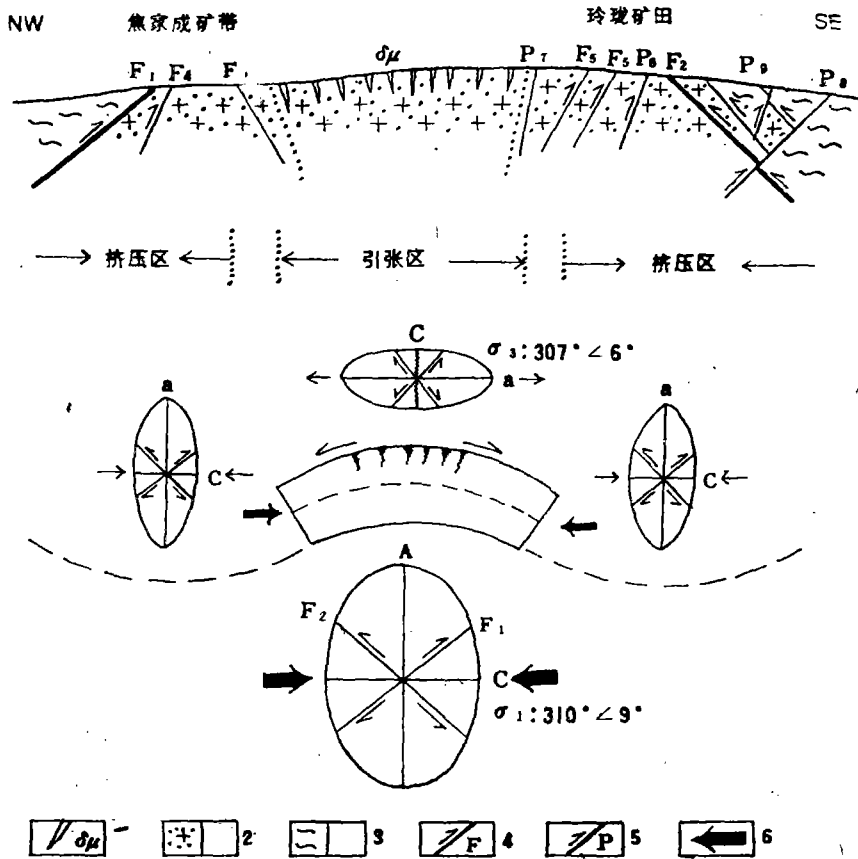


图19 招掖成矿区成矿期后主应变面应力应变模式图

1、闪长玢岩 2、玲珑花岗岩 3、胶东群 4、控矿断裂  
 5、矿后断裂 6、总应力方向  $F_1-F_5$   $P_1-P_3$  断裂名称同图1

### 五、几个相关问题的简要讨论

综上所述，招掖金矿成矿区成矿活动属印支晚期—燕山早期构造岩浆旋回，其应力场经

历初始期、成矿期、成矿期后的复杂演化。总体是初始期为NW—SE向近于水平的挤压；成矿期焦家成矿带为NW—SE向近于水平的拉张，玲珑矿田为NNW—SSE向近于水平的拉张；成矿期后为NW—SE向近于水平的挤压。初始期本区为统一的初始应力场，成矿期与成矿期后则分解为各个局部应力场，呈现了复杂多样的应力状态。

控矿应力场的探讨必须在地质构造、成矿作用、岩浆作用的基础上进行研究，必然会关连到断裂构造性质与演化，成矿作用阶段与脉动性，岩浆成矿专属性等问题。限于篇幅，以下仅对若干相关问题作初步讨论。

### （一）应力场的演化与成矿脉动性

控矿断裂与成矿的关系从成因上分为两个阶段，即挤压生成阶段与张裂充填阶段。前者应力状态以水平挤压为主，往往形成一些逆断层。后者则水平方向为拉张所代替，多为正断层，成为成矿的有利阶段。

对于一个构造岩浆旋回来说，自始至终应力强度不是恒等的，而往往经历最强—减弱—增强的演化。初期的强应力往往是区域挤压力的作用，导致一个构造岩浆旋回的序幕，而一系列岩石的破裂、弯曲与蠕变变形的增加，致使应力逐渐消耗，挤压力松弛，则整体呈现张裂为主的特征，然后再积累应力或新的区域挤压力的迭加，导致新的旋回。因此初始应力场往往控制了某成矿区的构造总体格局。

必须注意的是，这种挤压生成—张裂充填作用不是一次完成的。岩浆活动有若干幕，而构造断裂的生成也是多期迭加。张裂阶段充填的物质，往往也随岩浆的分异演化有很大的差异。对成矿有意义的，只是其中的一次或少数几次而已。而只有追寻到这种成矿期的应力场，才对指导矿产的普查与勘探有较大的价值，因为它直接制约矿床构造规律。

在成矿期内，应力场的演化又分为几个小的阶段，它们同样经历了生成挤压与松弛张裂的反复过程，如招掖地区金矿，就分为四~五个阶段，其矿石矿物组合有所区别，这就是通常所指的热液矿床脉动性。当然，这时的应力强度比初始阶段大大减弱，处于成矿区总应力场的张裂充填阶段。但在各个局部，则有应力相对增强—减弱的多次作用，正是这一定方向的多次应力，产生含矿裂隙组合。含矿裂隙实际上是在矿液沉淀前夕才产生或沿旧裂面启开的。对于矿液沉淀有直接意义的是成矿前夕的变形，而不是更早的变形。这时各个小的局部应力场就制约了矿体的形态、厚度与品位。

### （二）主应力轴的旋转变位

在本文探讨初始期、成矿期、成矿期后应力场的演化时，我们发现主压应力轴（ $\sigma_1$ ）经常在三度空间作有规律的变位。不论级别如何，只要是同一应力场，在挤压生成阶段与张裂充填阶段，主压应力轴（ $\sigma_1$ ）与主张应力轴（ $\sigma_3$ ）位置互换，即 $\sigma_1$ 轴、 $\sigma_3$ 轴绕 $\sigma_2$ 轴旋转 $90^\circ$ 。有趣的是，在依次控制的不同级别，不同期的应力场中，各个主压应力轴（ $\sigma_1$ ）也经常作近 $90^\circ$ 的旋转，只不过不是围绕 $\sigma_2$ 轴， $\sigma_1$ 与 $\sigma_3$ 位置不是互换，而是在三度空间作有规律的旋转（图20）。

这个事实与国内外许多资料一致。苏联学者在研究毒砂矿床并类比全苏金、多金属、稀有金属矿床之后，得出结论：“成矿后挤压阶段与相应的成矿前阶段比较，变形图相差 $90^\circ$ ”。曾庆丰在研究赣南钨矿之后，指出：“多次成生阶段的压应力方向经常变换方位，

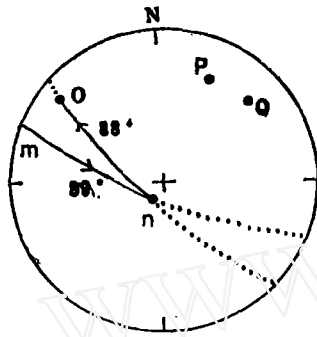


图20 玲珑金矿田各期主压应力轴旋转变位图

- m: 初始期 $\sigma_1$  293°∠3°  
 n: 成矿期 $\sigma_1$  194°∠75°  
 O: 成矿期后 $\sigma_1$  310°∠9°  
 P: m→n的旋转轴 24°∠16°  
 Q: n→O的旋转轴 42°∠14°

约在90°左右，强度由强而弱”。如果这种规律能得到理论或模拟实验的证明，那末我们今后在纷乱繁杂的断裂图案中，就可能依据其各个局部应力场主压应力轴 $\sigma_1$ 是否旋转90°，来筛选出属于同一构造岩浆成矿旋回的断裂系统。进一步可能成为解决一定区域内断裂分期的一种新的途径。

### (三) 剪裂角问题

本文在推导主应力轴时，共轭断裂投影弧的交点为 $\sigma_2$ ，在共轭断裂的空间二面角中，以锐角为共轭角，以含 $S_1$ 、 $S_2$ 圆弧的锐夹角的中点来求 $\sigma_1$ ，以钝角中点来求 $\sigma_3$ 。这种 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 的确定方法是有争议的。这牵涉到长期争论的剪裂角是否必定小于45°或也可大于45°的问题。本文采用了剪裂角小于45°，也是多数地质学者采用的观点。有趣的是，剪裂角的推导结果，存在某种规律。本区初始期剪裂角37°（图2），成矿期焦家成矿带剪裂角40°（图6），玲珑矿田剪裂角37°（图13），成矿期后中部剪裂角28°（图17），边部与外侧剪裂角36°（图18）。也就是说，招掖成矿区各期应力场自始至终剪裂角值均在37°左右，共轭角值均在74°左右（这个数值与国外学者用岩组法研究石英颗粒中最发育的两组微裂隙的统计值共轭角74°正好相同）。这种多期应力场剪裂角值的一致性，其机理与意义尚待进一步探讨。

### (四) 断裂滑移方向问题

控矿断裂有继承性与新生性。新生的断裂依据其控制生成的应力场决定其方位，既有总体规律，又有各自局部应力场的差异。继承性的断裂，往往表现为方位的继承，断裂力学性质（张性、剪性）与滑移方向（正断层式滑动与逆断层式滑动；左行平移滑动与右行平移滑动），则可以相反的。同一断裂在生成挤压阶段与张裂充填阶段，主应力轴位置互换，断裂的滑移方向必然变化，而且经常是反向的。而同一断裂在不同期的应力场中，随着主应力轴的旋转变位，也可能出现滑移方向的改变。

我们野外常用羽状分支与主断裂的锐角关系来确定断裂滑移方向，一般是可行的，但从时间上来说，往往只是代表了初始形成阶段的状况，很难依此分清断裂往复活动时的滑移；从空间上来说，如果只用平面或剖面的锐角关系，则不够可靠，有时面上的锐角其空间二面角却是钝角。野外还常用擦痕、阶步来确定断裂滑移方向，但擦痕往往多组，最易于保留的只是最后一次滑动的痕迹。迄今为止，我们很难从露头上鉴别出初始期、成矿期的擦痕。

正是这种复杂情况，因此多数学者在研究区域应力场时，都用分期的共轭节理为基础。

本文试以一定规模的共轭断裂为基础，尽管考虑了各个条件，但毕竟只是一种尝试，所采用的方法是否得当，尚待指正。

本文应用的地质基础资料主要是山东省地矿局第六地质队的地质报告及专题成果，成文之前承蒙该队李士先工程师提供近年来的新资料并讨论了若干基本观点。成文之后，又承蒙山东省地矿局刘振主任工程师、杨宜水工程师、山东地矿局地科所郭振一工程师审阅指正，在此表示谢意。

### 参 考 文 献

- 〔1〕陈国达，1978，成矿构造研究法。地质出版社。
- 〔2〕J·C·耶格 N·G·W·库克（中国科学院工程力学研究所译），1978，岩石力学基础。地质出版社。
- 〔3〕何绍勋，1979，构造地质学中的赤平极射投影。地质出版社。
- 〔4〕E·W·斯宾塞（朱志澄等译），1981，地球构造导论。地质出版社。
- 〔5〕李士先 刘连生，1981，山东胶西北S型构造及其对金矿的控制作用。地质力学文集（五），地质出版社。
- 〔6〕曾庆丰，1978，成矿裂隙的成生和充填及其脉动性。地质科学，第2期。
- 〔7〕Г·М·维罗夫良斯基，1965，某些热液矿床矿田构造的形成规律。地质译丛，总第36期。
- 〔8〕万天丰，1984，关于共轭断裂剪切角的讨论。地质论评，第30卷第2期。

STRESS FIELD OF CONTROLLING GOLD MINERALIZATION IN  
ZHAOYUAN-YEXIAN AREA IN SHANDONG PROVINCE

Xie Yixing

(The Shandong Geological College)

Abstract

Zhaoyuan and Yexian Counties in Shandong Province are the important gold production districts in China. Structures of controlling the gold mineralization are mainly faults. Based on the study of structures in the field the paper deals with the stress field stereographic projection and conjugate fracture deduction of the principal axis of stresses, the states of the stress fields before during and after the gold mineralization are deduced; the trajectory maps of principal stresses and some model patterns of stress and strain are given in the paper.

Some examples are given to illustrate the controls of the stress fields in different periods on the faults and gold mineralization. Finally some problems concerned are briefly discussed in the paper.