

633-2铀矿床断裂与成矿的探讨

蒋荣辉 谭亚辉

(核工业第六研究所)

内容提要: 本文论述了633-2铀矿床断裂与成矿之间的规律性。它立足于地质构造动力学说和多阶段叠加成矿的观点,应用莫尔力学强度理论和有限单元法、赤平极射投影、数理统计的分析方法,不仅对成矿构造应力场和叠加断裂作用进行了理论分析,还对不同成矿阶段叠加矿化强度进行了数值计算。研究表明,633-2铀矿床断裂与成矿之间在空间上有明显的关系。

关键词: 矿床构造 叠加断裂 叠加成矿

一、矿床地质概况

633-2铀矿床位于某花岗岩体东北边缘的内接触带,北东与北东东向断裂斜接的锐角楔形岩块中(图1)。

F₂断裂是矿床主要的成矿断裂,位于矿床的东南部:产状为N70°E,倾向SE,∠60°。据

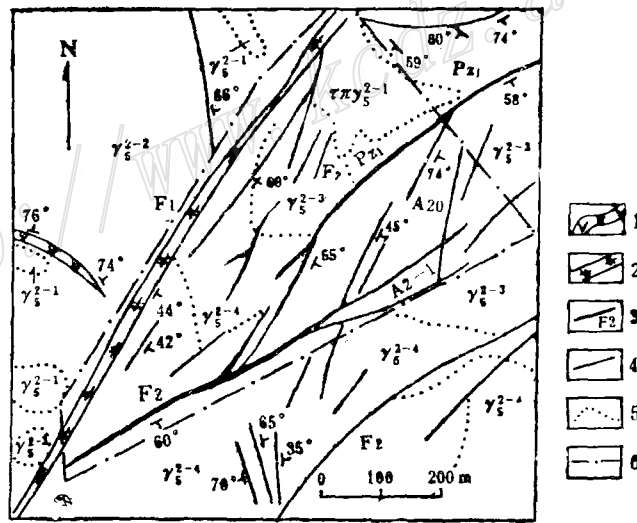


图1 633-2铀矿床地质构造略图
(据矿山)

ϵ —寒武系浅变质岩; $\tau\pi\gamma_5^{2-1}$ —英安斑岩; γ_5^{2-4} —细粒白云母花岗岩; γ_5^{2-3} —中-细粒二云母花岗岩; γ_5^{2-2} —细粒黑云母花岗岩; γ_5^{2-1} —中粒黑云母花岗岩; 1—煌斑岩; 2—石英断裂带; 3—硅化断裂带及编号; 4—裂隙; 5—地质界线; 6—矿床范围

Fig.1. Schematic geologic-structural map of the 633-2 uranium deposit.

ϵ —Cambrian epimetamorphic rock; $\tau\pi\gamma_5^{2-1}$ —Dacite porphyry; γ_5^{2-4} —Fine-grained muscovite granite; γ_5^{2-3} —Medium-fine grained binary granite; γ_5^{2-2} —Fine-grained biotite granite; γ_5^{2-1} —Medium-grained biotite granite; 1—Lamprophyre; 2—Quartz fault zone; 3—Silicified fault zone and its serial numbers; 4—Fissure; 5—Geological boundary; 6—Boundary of ore deposit.

现场观察, 断裂外部形态、产状的变化, 旁侧次级裂隙产出和相互切割的组合关系以及断裂内部结构成分和构造岩特征等, 确定该断裂在成矿期发生了三次叠加变动, 是矿床叠加断裂的典型代表, 形成复杂的硅化断裂带。

矿床和矿体的形成与分布严格受断裂和裂隙构造控制, 工业矿体主要赋存在北东向张剪性硅化断裂带中, 多呈脉状、透镜状。矿化主要与硅化、赤铁矿化关系密切, 不同成矿阶段的矿化叠加形成厚大富矿体。根据热液产物互相切割的关系和矿物生成顺序及其变化, 确定矿床热液活动有五次, 其中成矿期有3个阶段: 红色微晶石英-赤铁矿-沥青铀矿阶段; 紫黑色玉髓、萤石-赤铁矿-黄铁矿-沥青铀矿阶段; 浅色玉髓含铀矿化阶段。

二、叠加断裂变动分析

1. 为了确定支配成矿构造活动的应力场——成矿构造应力场, 笔者运用有限单元法进行矿区构造应力场的数学模拟。据现场断裂构造研究资料和数学模型的要求确定模型。根据模型内各类岩石力学性质的差异, 以区别各类岩性为原则, 划分三角形单元。在模型边界各受力点上均匀地施加 295° — 115° 方向的挤压力, 并将它分解为 x 和 y 方向的力。编制有限单元弹性平面问题增量法源程序, 在计算机上算出各单元节点上的位移, 再由节点上的位移, 近似地算出各单元的应变及其相应的应力。将各单元的主应力方向连接起来, 得到的主应力轨迹线反映的是燕山晚期新华夏系应力分布状况, 最大主应力(σ_1)轴方向为北西西 290° 左右, 最小主应力(σ_3)轴方向为北东 20° 左右。由此确定了矿区成矿构造应力场属新华夏系, 在该应力场作用下形成的 F_2 断裂为矿床主导成矿断裂。

2. 确定成矿期应力场(应力方向)的变化。在新华夏系构造应力场的统一作用下, 矿区局部边界条件发生改变, 从而派生出局部应力场并发生相应的断裂变动。笔者运用赤平极射投影图解法^[1], 求得三维应力轴的方位和倾斜度(图2), 以了解成矿期应力场的变化。

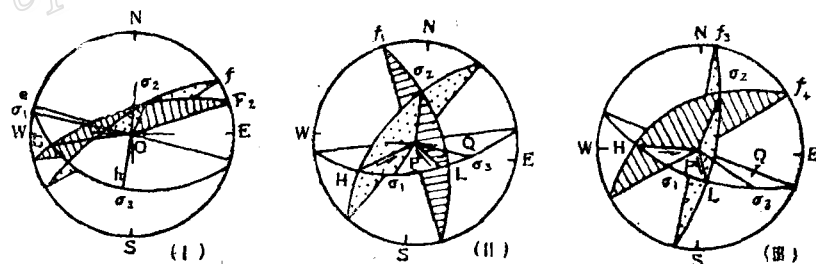


图2 断层应力状态图(下半球投影)

I: F_2 —NE 70° , 倾向SE, $\angle 65^{\circ}$; f —NE 55° , 倾向SE, $\angle 70^{\circ}$; II: f_1 —NW 340° , 倾向SW, $\angle 65^{\circ}$; f_2 —NE 40° , 倾向SE, $\angle 60^{\circ}$; 剪切角 $\phi = 40^{\circ}$; III: f_3 —NE 10° , 倾向NW, $\angle 70^{\circ}$; f_4 —NE 60° , 倾向SE, $\angle 60^{\circ}$, 剪切角 $\phi = 35^{\circ}$

Fig. 2. Stress state of faults (projection of lower hemisphere).

I: F_2 —NE 70° , dipping SE, $\angle 65^{\circ}$; f —NE 55° , dipping SE, $\angle 70^{\circ}$; II: f_1 —NW 340° , dipping SW, $\angle 65^{\circ}$; f_2 —NE 40° , dipping SE, $\angle 60^{\circ}$; shear angle $\phi = 40^{\circ}$; III: f_3 —NE 10° , dipping NW, $\angle 70^{\circ}$; f_4 —NE 60° , dipping SE, $\angle 60^{\circ}$, shear angle $\phi = 35^{\circ}$.

根据 F_2 断裂产状和它的分支剪压性裂隙产状,求得断层应力状态,如图2-I。

又据 F_2 断层上下盘含矿共轭剪裂隙产状统计测量,利用它们之间的相互特征和互错关系,在野外分期配套并初步确定主应力轴(σ_1 和 σ_3)的方位,然后用赤平极射投影图解法^[1]求得断层应力状态如图2-II、III。

根据上述求得的主应力轴产状(图2),把成矿期局部应力场划分为三次:第1次,主应力轴方向 σ_1 为 $288^\circ-108^\circ$, $\angle 2^\circ$; σ_2 为 $18^\circ-198^\circ$, $\angle 58^\circ$; σ_3 为 $15^\circ-195^\circ$, $\angle 32^\circ$ 。第2次,主应力轴方向 σ_1 为 $12^\circ-192^\circ$, $\angle 46^\circ$; σ_2 为 $7^\circ-187^\circ$, $\angle 44^\circ$; σ_3 为 $97^\circ-277^\circ$, $\angle 4^\circ$ 。第3次,主应力轴方向 σ_1 为 $36^\circ-216^\circ$, $\angle 48^\circ$; σ_2 为 $29^\circ-209^\circ$, $\angle 41^\circ$; σ_3 为 $123^\circ-303^\circ$, $\angle 4^\circ$ 。由此可以看出,成矿期局部3次应力场,它们是在不同应力状态下产生的,而且其方向是变化的。第1次应力场基本上是继承区域新华夏系应力场方位;其后,应力场方位发生了按顺时针方向旋转的规律性变化。

3. 探讨成矿断裂在不同局部应力场作用下,发生叠加变动的类型与性质。李兴唐指出^[3]:在讨论叠加断裂的力学原理时,仍然可以将莫尔-库仑理论作为基础。叠加断裂产生的重要条件之一,就是决定于断裂走向与最大主应力轴(σ_1)之间的夹角(α)的关系。当 $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ (α_1 和 α_2 称为临界剪切角)时,产生剪切叠加断裂;当 $\alpha = 0^\circ$ 时,产生张性叠加断裂。按照这种原理和方法,对矿床成矿断裂产生叠加变动的类型与性质进行分析。

据统计,区内原生花岗岩平均剪切角为 $\alpha = 18^\circ$ 。由 $\alpha = 45^\circ - \varphi/2$,求得原岩内摩擦角 $\varphi_0 = 54^\circ$ 。再由 $\text{tg}\varphi = 1/2\text{tg}\varphi_0$,求得构造岩内摩擦角 $\varphi = 34^\circ 31'$ 。

岩石力学试验表明,区内花岗岩抗剪强度为12MPa。按照经验公式(Jacgct, 1959、1971) $S = 1/3s_0$,求得构造岩的抗剪强度为4MPa。

据 F_2 断裂现时的产状和它的次级裂隙产状,求得其各晚期断裂走向方位与 σ_1 轴之间的夹角 α_r' (图3)。

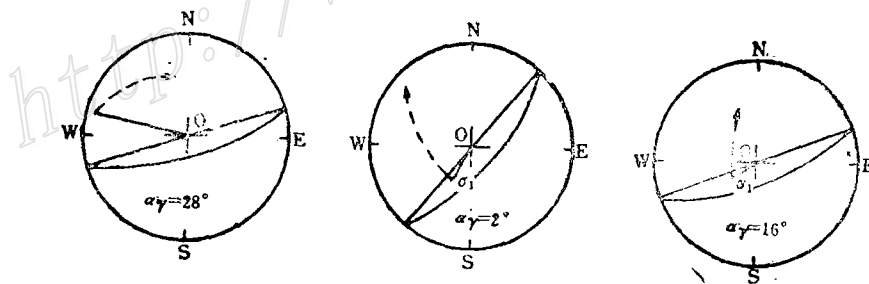


图3 求 α_r' 赤平投影图解(下半球投影)

Fig.3. Stereographic projection for evaluating α_r' , (projection of lower hemisphere).

我们利用莫尔圆图解法求得临界剪切角为 $4.5^\circ < \alpha < 51^\circ$ 。由不同岩石的最优剪切角表(李兴唐, 1981)^[3]查得岩石的内摩擦角 $\varphi = 54^\circ$,岩体最容易产生叠加断裂的最优剪切角为 $\alpha_r = 20^\circ$ 。

对比 α_r 与 α_r' 可知, 1、2局部应力场的 α_r' 与 α_r 相近。它表明这种位置的叠加断裂作用最强,剪切变形和位移量最大。按照李兴唐指出的叠加类型与 α 的关系(张性断裂区, $\alpha = 0$ 。

—10°；剪性断裂区， $\alpha=10^\circ-70^\circ$ ；压性断裂区， $\alpha=70^\circ-90^\circ$) 判别， F_2 断裂在成矿期的1、2次应力场作用下，产生了明显的剪切叠加变动，形成了剪性叠加断裂。

F_2 断裂在局部应力场作用下重新活动，当其走向与最大主应力轴(σ_1)平行时，即 $\alpha=0^\circ$ 时，断裂面产状改变部位平行剪应力 τ (左旋)起主导作用。它可以分解为两个分力：一为张应力分量 T ，一为剪应力分量 τ' (图4-b)

由公式：

$$\text{垂直正应力 } \sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\alpha$$

$$\text{剪应力 } \tau = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\alpha$$

求得 $\tau'=0$ ， $T=\sigma_3$ 。在应力状态莫尔圆上，Q点就垂直落在 σ_3 点上(图4-c)。也就是说，

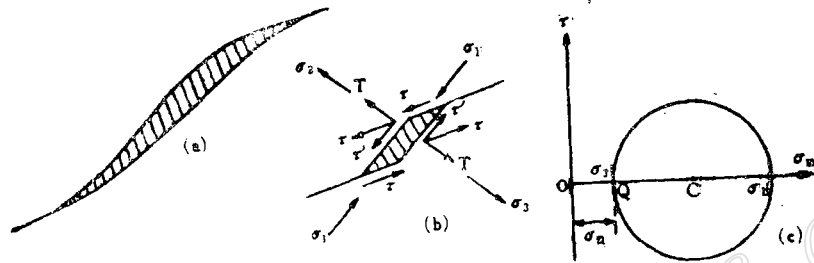


图4 张性断裂成因分析图

(a)—断裂带；(b)—应力分析；(c)—二维应力状态莫尔圆

Fig. 4. Genetic analysis of the tension fault.

(a)—Fault zone; (b)—Stress analysis; (c)—Mohr circle of two-dimensional stress state.

这种产状的断裂仅受张应力作用，最小主应力值大于构造岩拉张强度。据图3得知，在第二次局部应力场作用下， $\alpha'_r=2^\circ$ ，接近于 0° 。按照李兴唐指出的叠加断裂类型与 α 的关系(见前)判别， F_2 断裂产生了张性叠加变动，形成了张性叠加断裂。

三、叠加成矿作用分析

在成矿的全过程中，伴随断裂的叠加变动形成了多阶段叠加矿化；不同阶段热液产物不尽相同，矿化强度也不一样。为了探讨叠加成矿的矿化强度^①与成矿阶段之间的关系，我们从研究矿石铀品位统计分布特征入手，计算成矿过程中各阶段的矿化强度的相对大小。

矿石铀品位是表示给定点上的多阶段叠加成矿作用程度的相对大小，它是空间分布位置的实函数。我们选择了四个矿体的四个采场639个样品，分别将品位数据($\times 100$)换算成对数值，进行统计计算并作品位密度分布曲线，呈现了三峰正态不对称多重总体分布特征。采用峰度、偏度法检验，结果表明：铀品位对数值分布曲线服从对数正态分布律。这种品位多峰型多重总体分布反映出矿化是多次地质构造、地球化学作用叠加的结果，是多次成矿作用叠

① 刘石年，1985年，多阶段成矿作用中的矿化强度，是指每一阶段的矿化在整个成矿过程中相对作用的大小

加的结果。

多峰型多重总体是由单个成分总体组成的，可以应用概率论的原理把它们逐个分解出来并求出其参数值。我们选用加拿大A·J·辛克莱提出的概率图解法^[2]和我国关大杰拟定的剩余频数计算法^①试作分解并比较，后者通过精确的计算，出现了三个成分总体，与成矿三阶

表1 剩余频数计算表

Table 1. Calculating table for residual frequency

| | | logσ | 0.1693 | 0.3495 | 0.5297 | 0.7099 | 0.8091 | 1.0703 | 1.2505 | 1.4307 | 1.6109 | 1.9711 | 1.9713 | 总计 |
|--------|--------------------------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|
| 原始数据统计 | 多重总体 F | <i>f_i</i> | 3 | 5 | 8 | 16 | 13 | 10 | 11 | 7 | 4 | 2 | 1 | 80 |
| | | Σ <i>f_i</i> | 3 | 8 | 16 | 32 | 45 | 55 | 66 | 73 | 77 | 79 | 80 | |
| | | Σ <i>f_i</i> (%) | 4 | 10 | 20 | 40 | | | | | | | | |
| 第一成分总体 | A | Σ <i>f_i</i> (A)(%) | 5 | 16 | 32 | 62 | 82 | 94 | 98.7 | 99.8 | 99.98 | | | |
| | | <i>T_i</i> (A) | | | | | 20 | 12 | 4.7 | 1.1 | 0.18 | | | |
| | | <i>f_i</i> (A) | 3 | 5 | 8 | 16 | 10 | 6 | 2 | 1 | | | | 51 |
| 一次剩余 | 多重总体 F' | <i>f_i'</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 4 | 9 | 6 | 4 | 2 | 1 | |
| | | Σ <i>f_i'</i> | | | | | 3 | 7 | 16 | 22 | 26 | 28 | | |
| | | Σ <i>f_i'</i> (%) | | | | | 11 | 25 | 57 | | | | | |
| 第二成分总体 | B | Σ <i>f_i</i> (B)(%) | | | | | 12 | 28 | 64 | 87 | 97 | 99.6 | 99.97 | |
| | | <i>T_i</i> (B) | | | | | | | | 23 | 10 | 2.65 | 0.32 | |
| | | <i>f_i</i> (B) | | | | | 3 | 4 | 9 | 6 | 3 | | | 25 |
| 二次剩余 | 多重总体 F'' | <i>f_i''</i> | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | |
| | | Σ <i>f_i''</i> | | | | | | | | | 1 | 3 | 4 | |
| | | Σ <i>f_i''</i> (%) | | | | | | | | | 25 | 75 | | |
| 第三成分总体 | C | Σ <i>f_i</i> (C)(%) | | | | | | | | | 25 | 75 | 97.5 | |
| | | <i>T_i</i> (C) | | | | | | | | | | | 22.5 | |
| | | <i>f_i</i> (C) | | | | | | | | | 1 | 2 | 1 | 4 |
| 总 剩 余 | Σ Δ <i>f_i</i> | | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | |

段相一致。因而本文采用关氏法分解多重总体(表1),并在正态概率纸上作多重总体累积频数曲线图(图5)和多重总体分解图(图6)。多重总体F分解出三个成分总体A、B、C,其参数均值(\bar{X}):A为0.6413,B为1.1784,C为1.701(均值估计,以图6中对应于纵座标累计百分位数50的横座标上读出)。均方差(σ):A为±0.2318,B为±0.2728左右,C为±0.1352。均方差分别从图6中对应于纵座标累计百分位数16和84的横座标上读出,以其差值二等分

① 关大杰,1978,分解多重总体的剩余频数法及其初步效果,地质科技,第3期

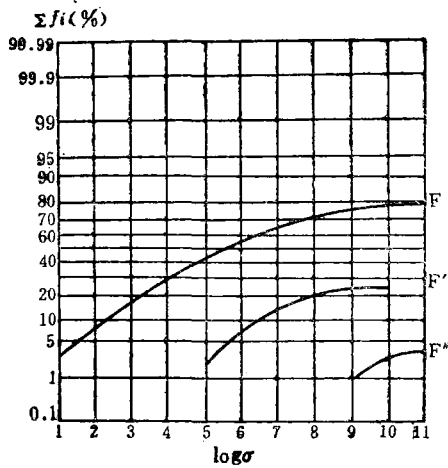


图 5 多重总体累积频数曲线

Fig. 5. Accumulative frequency curves of multiple population.

(图中 $\log \sigma$: 1—0.1693; 2—0.3495; 3—0.5297; 4—0.7099; 5—0.8091; 6—1.0703; 7—1.2505; 8—1.4307; 9—1.6109; 10—1.7911; 11—1.9713)

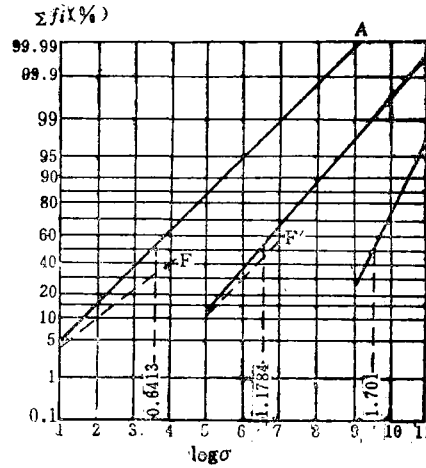


图 6 多重总体分解图

Fig. 6. Decomposition of multiple population.

来估计, 如 $\sigma_A = (0.8131 - 0.3495) \div 2 = 0.2318$ 。比例 (P): A 为 64%, B 为 31%, C 为 5% (比例由公式计算, 如 $P_A = f_{i(A,B)} / f_{i(B)} = 51/81 \doteq 0.64 \doteq 64\%$)

将上述分解所得各成分总体的有关参数代入多阶段叠加成矿中矿化强度的计算公式^[7]:

$$K_i = P_i \cdot \bar{X}_i / \sum_{i=1}^n P_i \cdot \bar{X}_i$$

其中: K_i 为第 i 阶段的矿化强度; P_i 为第 i 阶段的矿化所占比例; \bar{X}_i 为第 i 阶段的铀品位均值本矿床 $i=1, 2, 3$, 即 A、B、C 三成分总体代表的三个成矿阶段。求得本矿床叠加 1、2、3 成矿阶段的矿化强度分别为 0.48、0.42、0.1。

综上所述, 可认为 A、B、C 三成分总体分别与铀成矿一、二、三阶段相对应。其矿化发育程度随阶段演化而变弱, 而铀的平均品位逐渐增高。从矿化强度来看, 尽管第二阶段矿化比例不及第一阶段的一半, 但矿化强度却与之接近; 第三阶段矿化强度最低, 为成矿的尾声。

四、断裂变动与铀成矿的关系

据前所述, 在成矿过程中, 断裂与成矿经历了多阶段长期发展的过程, 它既有连续性; 又有阶段性; 既有自身的特点, 又互有关联和影响, 综合归纳于表 2。由表可以看出:

1. 断裂变动期次与成矿作用阶段及其产物的形成, 具有内在的对应关系。随着断裂变动期次的演化, 形成相应的构造产物和热液产物; 断裂变动期次与成矿作用阶段之间形成统一的内在机理。如本矿床 F_2 断裂在成矿期间, 受不同构造应力作用, 明显地发生了三次叠加

表2 断裂变动与成矿作用关系表

Table 2. Relations between faulting and mineralization

| 断裂变动 | | | | | 成矿作用 | | | |
|------|--------------|------------------|-------------------|-------------|------|---------|------|-----------------------------|
| 变动期次 | 力学性质 | 主应力方向 σ_1 | 变形强度 ^① | 构造产物 | 成矿阶段 | 矿化比例(%) | 矿化强度 | 热液产物 |
| 成矿前期 | 剪切 | 290°—110° | | 糜棱岩、角砾岩(磨圆) | | | | 粗—细晶石英、绢云母、硅化岩 |
| 成矿期 | I 剪为主兼压 | 282°∠5° | 次强 | 同上、片理化 | 一 | 64 | 0.48 | 沥青铀矿、红色微晶石英、绢云母、赤铁矿、主要铀成矿阶段 |
| | II 张为主兼剪 | 214°∠54° | 强 | 角砾岩 | 二 | 31 | 0.42 | 沥青铀矿、黑色微晶石英、黑紫色萤石、黄铁矿、铀富矿阶段 |
| | III 剪为主兼压 | 235°∠55° | 弱 | 糜棱岩、片理化 | 三 | 5 | 0.1 | 沥青铀矿、浅色玉髓状石英 铀成矿尾声 |
| 成矿后期 | 拉张 | NEE-SWW | | 张性充填脉晶洞 | | | | 白色疏松石英、方解石 |

①据剪裂角大小相似于压应力大小而确定的相对变形强度

断裂作用和叠加成矿作用，并产生了相应的构造产物和热液产物。

2. 矿化富集与断裂变动的性质和类型有关，其矿化强度与断裂变形强度是一致的。在成矿期间，断裂发生的第II次变动，受水平拉张作用而张开，变形强度局部增大，矿液温度和内压力骤然下降，铀元素聚集形成矿体；同时，也使断裂拐弯处（走向方位角变小的地段）发生张性改造，矿液充填并加厚形成富矿体。所以，第二成矿阶段矿化所占比例虽不及第一成矿阶段的一半，但矿化强度却与之接近。而断裂发生的第I次变动，受剪切作用为主，变形强度相对弱些，规模也小些，尽管矿化所占的比例大，但矿化强度相对低些。

3. 矿体的空间展布取决于断裂变动时的构造应力场。在成矿过程中，成矿构造应力场派生出三次局部应力场，其中控制矿床和矿体产出的主要是1、2次应力场。在它们的作用下，使矿前期形成的断裂重新活动，两大断裂构成的楔形岩块部位应变能量增加两倍以上（据全息光弹模拟实验测知），引起岩石破碎并发生位移张开，造成有利于成矿的空间；同时，部位机械能转化为热能，产生动力热变质作用和定向压力引起的动力分解作用，破坏了热动力学平衡状态，使得含铀溶液在断裂破碎带及其附近高渗透性的构造岩石中发生分解，从中析出铀沉淀成矿。因此，两大断裂构成的楔形岩块控制了矿床的空间产出部位。工业矿体的展布主要方向总是与成矿期北东-南西向压应力轴方向一致，赋存在叠加改造的张性断裂中。

五、结 论

综上所述，可以得出如下结论：

1. 在成矿过程中，断裂变动与成矿作用的多阶段发展过程表明了应力场-断裂-成矿相对应的变化规律。即成矿构造应力场派生出三次局部应力场，导致成矿断裂发生了三次叠加

变动,并随之发生了三阶段成矿叠加现象。由此认为:叠加成矿阶段性研究,是判断矿区局部应力场发生期次变化的重要依据;叠加断裂多次性的研究,是划分矿化阶段重要依据之一;叠加断裂作用强弱的研究,是判断叠加成矿作用相对大小的依据。

2. 叠加断裂的发展演化,控制了铀矿床形成的时间;各不同矿化阶段当时构造应力场控制着矿床(矿体)的空间展布。由此认为:断裂与成矿关系的探讨,是用来研究矿床成因和它的空间展布规律的重要方法与手段。

3. 研究断裂与成矿的关系,有助于掌握各次形成的叠加断裂空间展布规律及其成生关系,阐明控矿作用和指示富矿体的赋存部位,对探矿工作有实际意义。

参 考 文 献

- 〔1〕 何绍勋 1979 《构造地质学中的赤平极射投影》 地质出版社
- 〔2〕 A.J.辛克莱(赵鹏大等译) 1981 《概率图在矿床勘探中的应用》 地质出版社
- 〔3〕 李兴唐 1981 叠加断裂形成机制及其与构造应力场演变关系 地质科学 第3期
- 〔4〕 汤经武 1985 关于叠加断裂的构造解释 成都地质学院学报 第2期

A TENTATIVE DISCUSSION ON THE RELATIONSHIP OF FAULTING TO MINERALIZATION IN THE 633-2 URANIUM DEPOSIT

Jiang Ronghui and Tan Yahui

(No. 6 Research Institute of Nuclear Industry, Hengyang, Hunan)

Abstract

This paper deals with the relation of faulting to mineralization in the 633-2 uranium deposit. Based on dynamic theory of geologic structure and viewpoint of polystage superimposed mineralization, the authors, using Mohr's theory of mechanical strength, finite element method, stereographic projection and mathematical statistics, not only made an theoretical analysis of ore-forming tectonic stress field and superimposed faulting, but performed numerical calculation for superimposed mineralization intensity of different ore-forming stages as well. The results obtained show that obvious spatial and temporal relationship between faulting and mineralization does exist in the 633-2 uranium deposit. In the ore-forming process, the previously-formed faults produced three times of superimposed faulting, accompanied by three times of superimposed mineralization; mineralization intensity depended largely on the properties and types of superimposed faults, and spatial distribution of orebodies was decided by tectonic stress field at the ore-forming stage and characteristics of ore-bearing faults.