

红泉铀矿床 含矿热液运移的数学模拟研究

张 诚

金景福

(地矿部西安地矿所)

(成都地质学院)

内容提要: 红泉铀矿床系吕梁期岩浆气成热液成矿作用和海西期含矿热液成矿作用复合叠加形成的矿床。本文运用有限单元法数学模拟海西期含矿热液运移方向和铀沉淀部位。结果表明,海西期含矿热液从伟晶状白岗岩汲取铀,在构造应力作用下,从高应力区向低应力区运移,并在断裂发育的低应力区富集成矿。

关键词: 铀矿床 有限单元法 数学模拟 构造应力场 热液运移

一、矿床地质概况

红泉铀矿床是我国近年来发现的一种新型铀矿床。该矿床位于华北地台西部边缘,阿拉善台隆南缘北西向龙首山拱断带的西段。矿体产于侵位于下元古界龙首山群的伟晶状白岗岩体中(图1)。

龙首山群为一套中级变质的长英质岩-碳酸盐岩建造。在矿床南面出露有中、上元古界,北面还有以角度不整合覆于龙首山群之上的下石炭统。

矿区出露的岩浆岩有:吕梁期的石英闪长岩与斜长花岗岩、伟晶状白岗岩,加里东期的中粒花岗岩,海西期的正长岩,以及各时代的脉岩。伟晶状白岗岩是该矿床的含矿主岩,它总体上呈岩枝状侵位于龙首山群之中。岩体中常见有变质岩捕虏体。

矿区内近东西向的压扭性断裂十分发育,主要分布于矿床北部伟晶状白岗岩内外,往往沿岩体与变质岩接触面延展,在伟晶状白岗岩出露区基本上形成一个破碎带。此外,还有北西向、北东向的压扭性断裂,它们错断了近东西向断裂。

矿体呈透镜状、似脉状产出,受构造控制明显。工业矿体多分布于伟晶状白岗岩与变质片岩的接触带附近(图2)。铀矿化可划分为两个成矿期:第一成矿期为吕梁期白岗质岩浆分异晚期产生的含矿气成热液成矿期(同位素年龄为1767 Ma左右^①)。该期为主成矿期,矿物组合为晶质铀矿、黄铁矿、辉钼矿和黑云母等。黑云母中铀含量较高^②。据戎嘉树等人的资料(1983),第二成矿期为海西期的含矿地下水热液成矿期(同位素年龄为300 Ma左右)。矿物组合为沥青铀矿、再生铀黑、黄铁矿、赤铁矿和方铅矿等。围岩有赤铁矿化。该期铀矿化叠加于第一期铀矿体之上,使矿体变富。

① 戎嘉树等1983年资料

② 王木清1982年资料

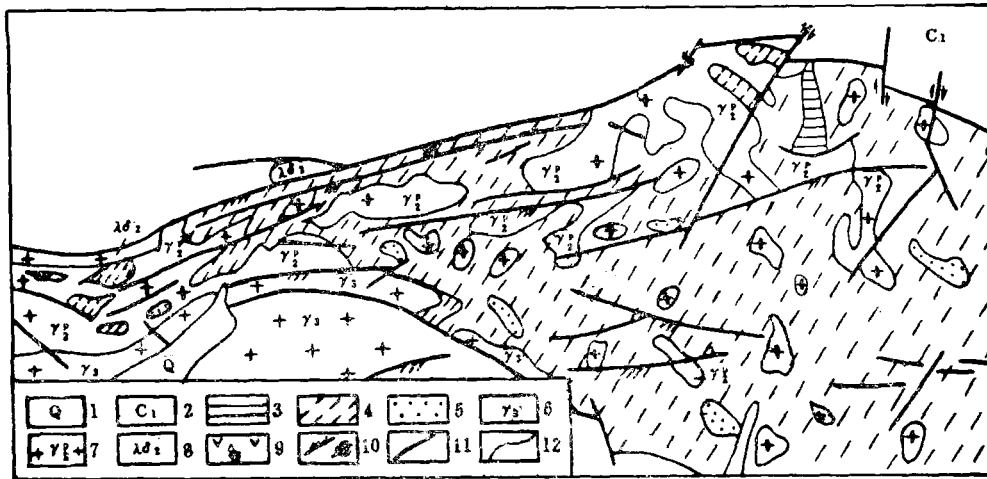


图 1 红泉铀矿床地质示意图

(据西北地勘局212队)

1—第四系；2—下石炭统；3—龙首山群大理岩；4—龙首山群变质片岩；5—龙首山群块状石英岩；6—中粒花岗岩；7—伟晶状白岗岩；8—斜长花岗岩与石英闪长岩；9—煌斑岩；10—压扭性和扭性断层；11—断层；12—地质界线

Fig.1. Schematic geological map of the Hongquan uranium ore deposit.

1—Quaternary; 2—Lower Carboniferous; 3—Marble of Longshoushan Group (pt); 4—Metamorphic schist of Longshoushan Group; 5—Massive quartzite of Longshoushan Group; 6—Medium-grained granite; 7—Pegmatitic alaskite; 8—Plagioclase granite and quartz diorite; 9—Lamprophyre; 10—Compresso-shear and shear faults; 11—Fault; 12—Geological boundary.

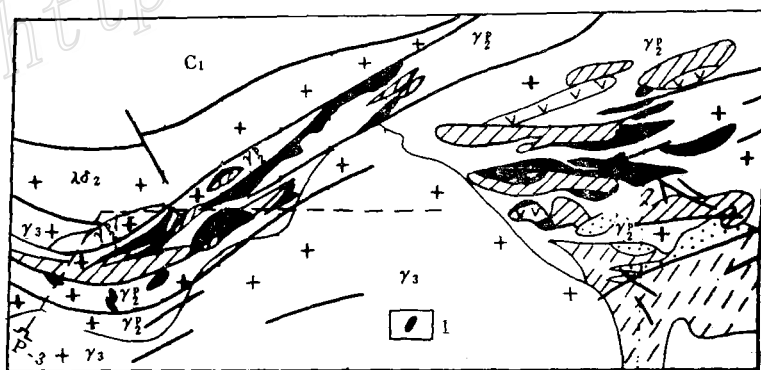


图 2 2287 m标高地质示意图

(据西北地勘局212队)

1—铀矿体；P-3—坑道；其它同图1

Fig.2. Sketch geological diagram at 2287m elevation.
1—Uranium orebody; P-3—Gallery; Other symbols as for Fig.1.

二、含铀热液中铀的来源

研究表明,形成第二期铀矿化的地下水热液中的铀主要来自伟晶状白岗岩体,其依据是:

1. 伟晶状白岗岩的铀含量较高(表1),且铀主要以晶质铀矿形式存在(戎嘉树等,1983),易于活化转移。

表1 各类岩石铀含量(ppm)

Table 1. Uranium contents of various rocks
(in ppm)

编号	岩性	U	Th	Th/U
K-39	伟晶状白岗岩	19.6	8	0.4
Z-19	中粒花岗岩	7.2	6	0.8
K-32	斜长黑云片岩	13.1	20	1.5
D-24	钾长黑云片岩	6.9	8	1.2
D-6	石英岩	2.0	3	1.5

(由成都地质学院核原料与核工程应用系采用分光光度计分析)

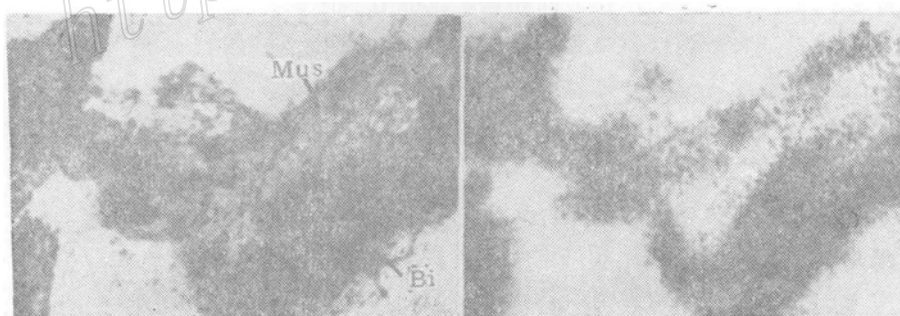
表2 不同深度伟晶状白岗岩的铀含量

Table 2. Uranium contents of pegmatitic alaskite at different depths

编号	采样深度(m)	铀含量(ppm)
D-16	地表	5.26
K-10	100	26.1
Z-15	265	43.4

(由成都地质学院核原料与核工程应用系用分光光度计分析)

2. 如上所述,第一成矿期形成的黑云母铀含量较高,且普遍有绿泥石化、白云母化现象。在蚀变交代过程中,铀可从黑云母中活化转移出来。笔者通过诱发裂变径迹法研究了白云母化过程中黑云母中铀的活化转移现象(样品的热中子照射由核工业部九院二所完成,照射的积分中子通量为 1.57×10^{16} n/cm²,照射时间为174.8小时。照射后的样品经30天冷却后取下探测器,用6.25N的NaOH溶液在55℃温度下恒温蚀刻60分钟)。诱发裂变径迹表明,在黑云母的白云母化部分,裂变径迹明显减少(照片1),白云母化对黑云母中的铀起到了一种“净化”作用。此部分铀则可被热液萃取。



照片1

黑云母(Bi)白云母(Mus)化(左)后,其中的径迹明显减少(右) (-) × 80

3. 伟晶状白岗岩的地表部分与地下部分,无论在颜色上还是铀含量上都有明显的差别。地表附近的伟晶状白岗岩颜色较浅,裂隙发育,铀含量低(表2),说明地表附近岩体中部分铀已被活化迁出。

综上所述,地下水在下降过程中由于地温梯度的影响而加热,并从伟晶状白岗岩中萃取

轴，形成含矿热液，为第二期矿化创造了有利条件。

三、含矿热液运移的数学模拟

1. 基本原理

含矿热液的运移明显地受构造控制。构造运动对成矿主要有两种作用：一是引起岩石变形，形成断裂，为含矿热液提供运移通道和停积空间，即构造的空间控矿作用；二是构造应力产生流体内压力差，驱动流体从高压区向低压部位运移，即构造的动力控矿作用。W. S. Fyfe (1978) 的试验表明^[1]，多孔介质应力与孔隙流体内压力的关系式为：

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= s_1 - p \\ \sigma_3 &= s_3 - p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

或

$$\left. \begin{aligned} \sigma_n &= \frac{1}{2} [(s_1 - p) + (s_3 - p)] \\ &\quad - \frac{1}{2} [(s_1 - p) - (s_3 - p)] \cos 2\theta \\ \tau &= \frac{1}{2} [(s_1 - p) - (s_3 - p)] \sin 2\theta \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

式中， σ_1, σ_3 为介质应力， s_1, s_3 为外力， p 为流体内压力。

对同一种材料来说，体积可压缩率相同，多孔介质的孔隙流体内压力为：

$$p = c\sigma \dots\dots\dots (3)$$

式中 c 为压缩常数， σ 为有效应力。

由(3)式可知，流体内压力与应力成正比，即应力越大，流体内压力就越大；反之，应力越小，流体内压亦越小。这样流体可以在构造应力作用下从高内压区向低内压区运移，亦即从高应力区向低应力区运移。由此可见，根据主应力场的分布模式，则可确定流体的运移方向和停积部位。正是根据这一基本原理，笔者采用了有限单元法求出矿区范围内的构造应力场，以此来确定含矿热液的运移方向和轴矿化的有利部位。

有限单元法就是将一连续体分割成数目有限的小块体（称为有限单元或单元），根据相似原理和一定的力学计算模型，计算出各个单元的应力状态，通过对各个单元应力状态的研究来探讨连续体的应力场分布模式。这是研究构造活动和含矿热液运移的有效途径和手段。

2. 建立计算模型

运用有限单元法研究构造应力场，首先要建立计算模型，也就是要确定外力方向、边界条件等，这要根据矿床地质特征和构造活动特点加以确定。

红泉矿床，断裂构造十分发育，其中近东西向断裂最发育，断裂性质为压扭性，矿体主要受该组断裂的控制。此外，还有北东向、北西向断裂，它们切割近东西向断裂和矿体，属于晚期构造活动的产物。因此，在建立计算模型时不考虑北东向和北西向断裂，在计算模型中，选取矿区空间范围作为计算对象。

在模拟过程中，将整个模型作为理想的弹塑性平面应变问题处理，并且只考虑该“板块”受水平方向构造应力的作用。断裂带作为理想弹塑性体的层状材料，其余部分看作各向同性的纯弹性体^[2]。

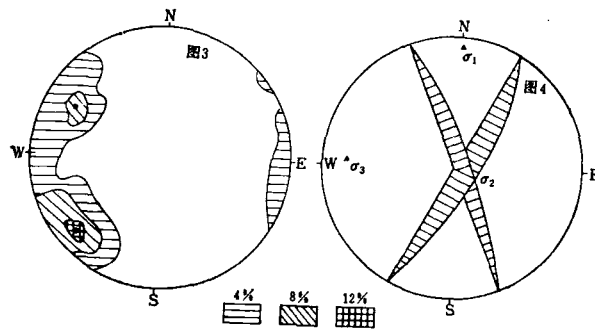


图3 含矿裂隙极点等密度图

Fig.3. Pole contour diagram of ore-bearing fissures (left).

图4 主应力轴方位图

Fig.4. Preferred orientation diagram of principal axis of stress(right).

表3 岩石力学参数

Table 3. Rock mechanical parameters

材 料	弹性模量 (kg/cm ²)	泊 松 比	摩 擦 系 数
断 层	14 × 10 ⁴	0.35	0.85
碳酸盐岩	61.8 × 10 ⁴	0.23	0
变质片岩	43.1 × 10 ⁴	0.27	0
中粒花岗岩	78 × 10 ⁴	0.22	0
伟晶状白岗岩	81 × 10 ⁴	0.225	0

根据该矿床内12号矿体含矿裂隙的产状统计, 作出裂隙极点等密度图(图3)。从图3可知, 两个含矿裂隙极点极密处的产状分别为 $299^\circ \angle 68^\circ$ 和 $227^\circ \angle 76^\circ$, 它们代表了两组X共轭剪裂隙的产状。根据此产状, 运用吴氏网作图原理, 可以求出各应力轴的方向(图4)。共轭剪裂隙夹角的锐角等分线方向代表了最大主压力 σ_1 的方向。从图4可看出, σ_1 的方向为南北向, 且 σ_1 轴的倾角很小, 近于水平。因此, 在计算模型中施加南北向的水平外力。

由于讨论含矿热液的运移只是考虑应力的相对大小, 因此外力的大小是任取的, 这毫不影响应力场的分布模式。在计算中, 所加外力为100kg。计算中所用的岩石力

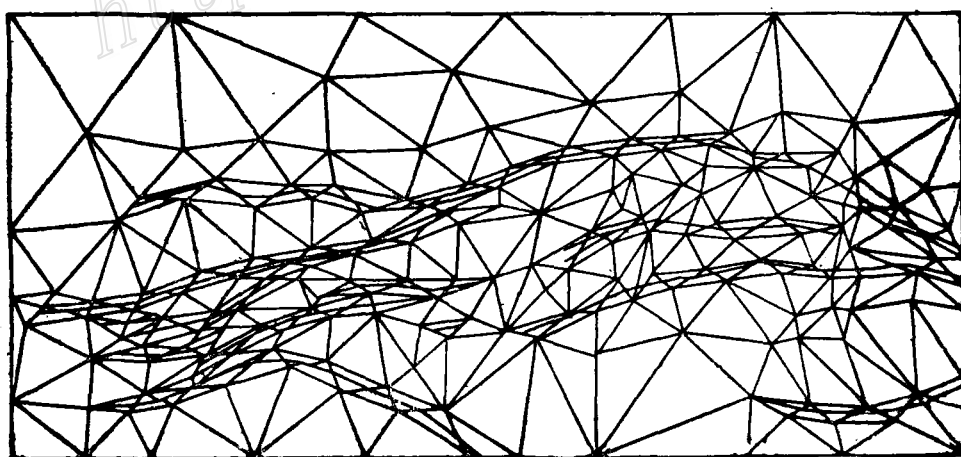


图5 构造-有限单元网络图

Fig.5. Network chart of structure-finite element

学参数见表3^[3]。

根据矿床内断裂构造分布特点，作出构造-有限单元网络图（图5）。

3. 计算结果

根据计算模型计算出图5中各个有限单元的应力状态。计算工作是在成都地质学院电算站6912-5机上进行的。应力的单位为 kg/cm^2 。依据各有限单元的最大主压应力值，可绘制出最大主压应力等值线图（图6）。

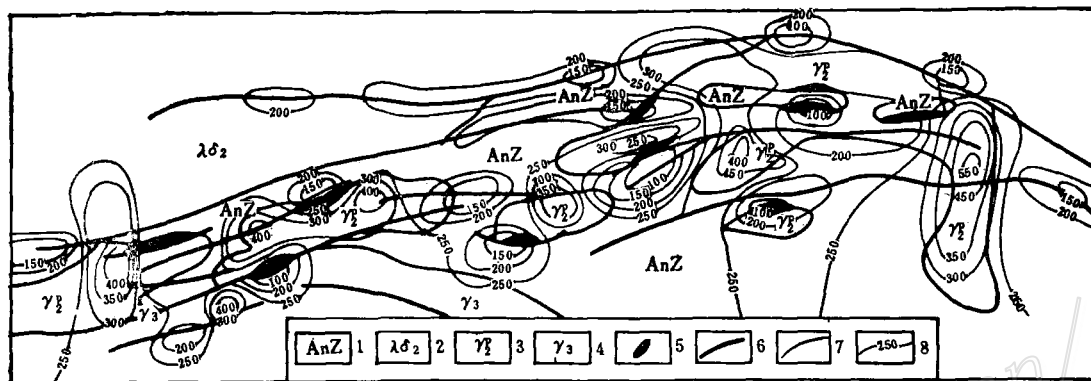


图6 最大主应力等值线示意图

1—7同图1和图2；8—最大主应力等值线（单位为 kg/cm^2 ）

Fig.6. Contour diagram of maximum principal stress.

1—7 as for Fig. 1 and Fig. 2; 8—Contour lines of maximum principal stress.

四、讨论

根据图6显示的高应力区和低应力区的分布特点，可以推测含矿热液运移的方向和铀矿化的有利部位。

1. 高应力区主要位于伟晶状白岗岩分布区，岩体与变质片岩接触部位往往为低压应力区。热液可从伟晶状白岗岩体中汲取铀，并向岩体与变质片岩接触部位运移。

2. 沿断裂构造分布的应力场并非等值，伟晶状白岗岩体的断裂部分往往具有较高的应力值，岩体与变质片岩接触带附近的断裂部分则有较低的应力值。这说明断裂构造是含矿热液由高应力区向低应力区运移的有利通道。

3. 矿体多赋存于高应力区包围的低应力地段。这表明断裂构造发育部位，特别是伟晶状白岗岩体与变质片岩接触部位，是含矿热液停滞、矿质沉淀的场所，这与地质情况相吻合。

综上所述，地下水热液从伟晶状白岗岩体中萃取铀，形成含矿热液，在构造应力作用下，由高应力区向低应力区运移，在伟晶状白岗岩与变质片岩接触部位富集成矿。因此，伟晶状白岗岩与变质片岩接触带附近是有利的找矿地段。

参 考 文 献

- [1] 周济元等 1983 浙江建德铜矿矿床特征及矿液运移机理的研究 成都地质学院学报 第4期
- [2] 国家地震局地震研究所 1984 中国诱发地震 地质出版社

[3] G·哥德赫 1983 有限元法在岩土力学中的应用 中国铁道出版社

A MATHEMATIC SIMULATION STUDY ON THE MOVEMENT OF ORE-BEARING HYDROTHERMAL FLUIDS IN THE HONGQUAN URANIUM ORE DEPOSIT

Zhang Cheng

(Xian Institute of Geology and Mineral Resources, Xian, Shaanxi)

Jin Jingfu

(Chengdu College of Geology, Chengdu, Sichuan)

Abstract

The metallization of Hercynian groundwater ore-bearing hydrothermal fluids played an important role in the further concentration of orebodies in the Hongquan uranium ore deposit. The investigation into the migration direction of Hercynian ore-bearing hydrothermal fluids and the favorable positions for uranium metallization is therefore of great significance in search for rich orebodies.

Studies show that the groundwater was heated during its ascent as a result of the effect of geothermal gradient and extracted uranium from the giant alaskite, forming ore-bearing hydrothermal fluids. From the relationship between internal pressure (p) of fluids in porous media and stress of the media (σ), i. e., $p=c\sigma$, it is known that the movement of ore-bearing fluids are controlled by structural stress. The finite element method is hence adopted to determine the distribution pattern of structural stress field and, on such a basis, to investigate the migration direction of the ore-bearing hydrothermal fluids and the favorable positions for uranium precipitation.

The azimuths of various stress axes (Fig. 4) are obtained from the polar equidensity diagram (Fig. 3). It is seen that the maximum principal stress is in approximately horizontal SN direction in this area. The contour map of maximum principal stress (Fig. 6) calculated from network diagram of structure-finite elements (Fig. 5) shows that the ore-bearing hydrothermal fluids moved from high stress area to low stress area under the action of structural stress, and were concentrated to form ore deposits in contact zones between giant alaskite and metamorphic schist which were geologically and physico-chemically favorable for ore deposition. It is therefore concluded that these contact zones are promising places for ore-prospecting.