地 质 学 报
1987 年　ACTA GEOLOGICA SINICA　第 2 期

构造变形与热液成矿

王 子 潮　　　王 亚 南
（国家地震局地质研究所，北京）　（长春地质学院）

本文以沂南金厂金铜矿田为例，提出本区热液成矿物质的迁移、聚集主要受成矿期构造形变的控制。成矿元素富集于构造变形强烈的部位，并且在变形构造的不同部位存在有不同类型的矿体。另外通过室内岩石力学实验，测取岩石的力学参数，进行应力场的反演，并以渗流力学理论来模拟矿液运移势的分布，从而定量的评价构造的控矿性。

山东省沂南金厂金铜矿田，自 50 年代开采以来，地质、冶金部门曾进行了大量的普查勘探工作，并从岩石学和地球化学角度提出了本区成矿规律和成矿模式。

笔者通过系统地调查本区矿田成矿与构造变形的关系后，指出热液成矿主要受成矿期构造形变的控制；成矿物质的迁移、聚集也与构造变形密切相关。因此，笔者从成矿期构造形变的角度，通过综合分析化探数据，提出本区热液成矿的模式。

一、成矿期构造形变特征

（一）区域地质背景

金厂矿田位于中国东部燕山晚期多金属成矿带鲁西热液型多金属矿化区，往东距沂沭断裂带约 7km（图 1）。矿田由冶官墓、马旺、村里、小河口和后金墩等矿床组成。其中冶官墓矿床是主要开采矿床。 矿田内出露地层是寒武纪-奥陶纪浅海相碎屑岩和碳酸盐岩，矿化层位多为砂岩、泥页岩和灰岩互层。矿田内燕山晚期的岩浆活动剧烈，按其侵入顺序为辉长岩（121.5 Ma）、花岗闪长岩（116.4 Ma）、花岗斑岩（105.4 Ma）和细晶岩等[1)]。其中花岗斑岩的含矿性最好，是矿田内成矿母岩。

据详细的构造填图，发现本区矿田内构造为东西向、北西向和北北东向。其中东西向、北西向构造，通常为成矿前的构造，但在成矿期则又重新活动。而北北东向构造一般为成矿期构造。

（二）成矿期构造的形变特征

本区具有两种构造形迹：①原有的东西向和北西向构造带，其中包括 NE 80—85° 的张性、压扭性断裂和 NW 325° 的压性至扭性断裂，这两组断裂，在成矿期应力场作用

1）上述 K-Ar 法同位素年龄据吉林冶金勘探公司。

本文 1985 年 3 月收到，1986 年 5 月改回，王毅编辑。

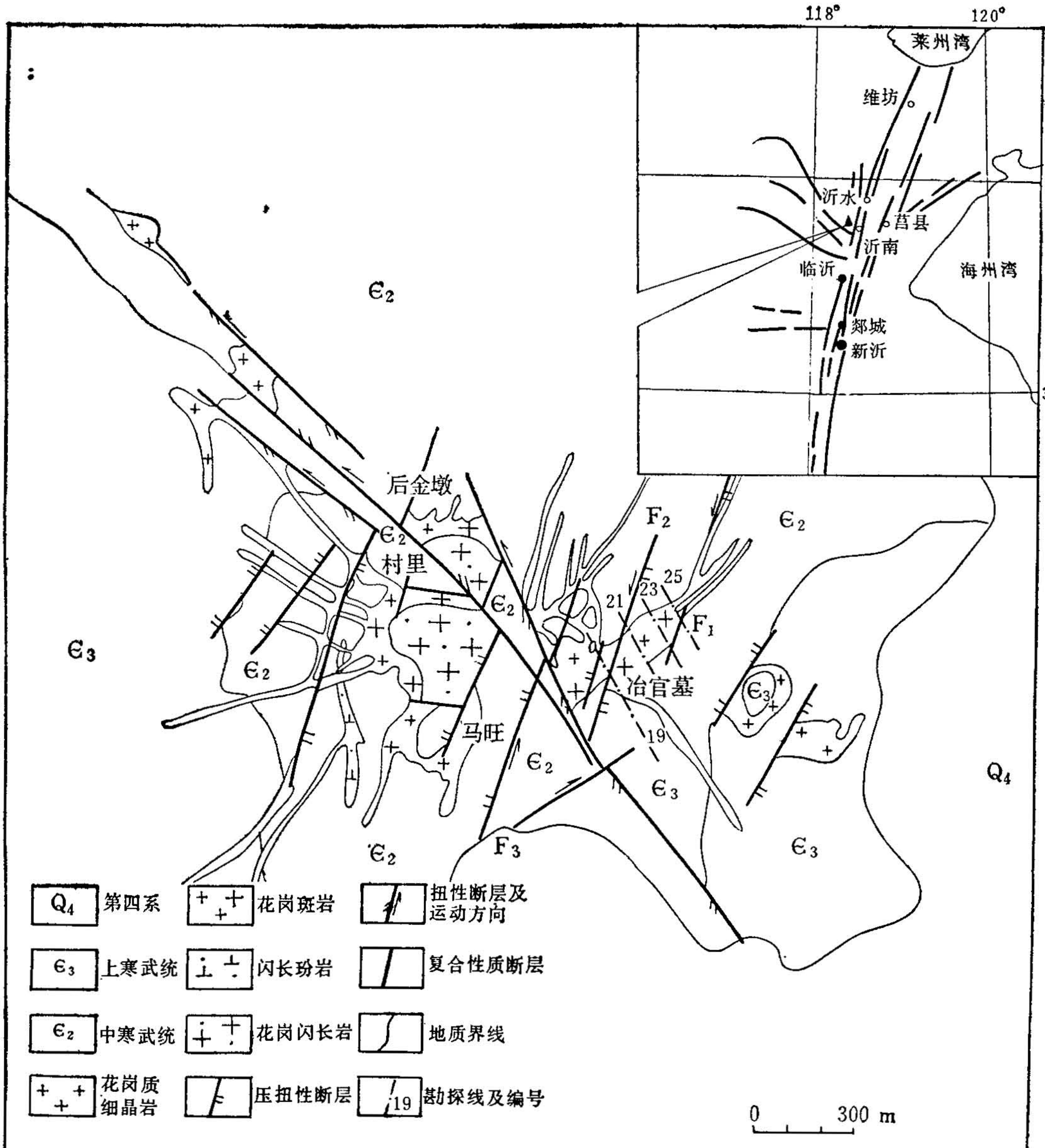


图 1　金厂矿田地质简图(据山东省地质八队修编)

Fig. 1　Geological sketch of the Jingchang ore deposit

下，其断裂复合部位发生再活动。由于它们经受多次的动力作用，构造变形强烈，力学性质复杂，多属容矿构造。②成矿期新生的构造，包括有北北东向 (20°) 金厂短轴背斜及其派生的破裂系统(图 2)和北北东向压性断裂 F_1、F_2 和 F_3，还有 NW 340° 走向的扭张性断层和 NE 70° 方向的扭压性断层，它们一般多属控矿构造。

1. 同成矿期北北东向构造的活动性和变形特征： 该组构造在成矿期活动十分强烈，先后经历褶皱和断裂变形，构成了本区矿液运移的主要通道。

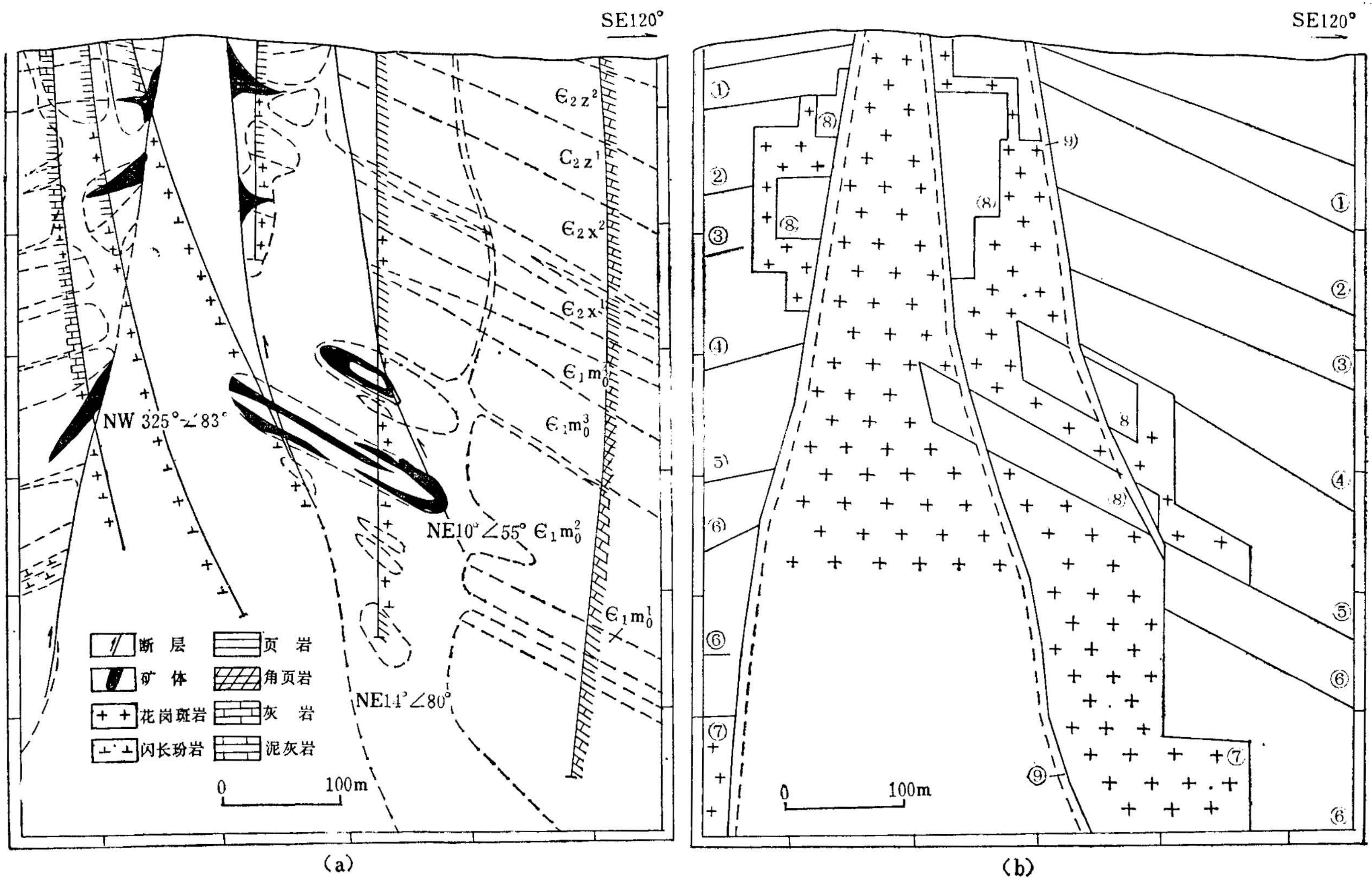


图2 金厂矿田冶官墓矿床21勘探线地质剖面和力学模型

Fig. 2 Geological section and mechanical model along the prospecting line No. 21 in the yieguanmo depsit of the Jinchang field.

(a)——构造剖面地质图，成矿母岩侵位于背斜构造的核部；(b)——根据（a）图编制的力学模型；其中数字编号相当于(a)图中的地层

（勘探线剖面系引用山东省冶金四队资料）

在早期褶皱变形阶段：一般形成北北东向高角度逆断层，由于断层产状受岩石力学性质控制，在剖面上呈阶梯状。在页岩、泥页岩和部分矽卡岩带中，断层产状平缓，一般表现为挤压揉皱带、密集微裂隙带。断层构造岩多为碎裂岩、透镜体化碎斑岩和眼球状碎斑糜棱岩。在这类岩石中的逆断层，其走向上的结构和构造多变，其横向上的裂隙度和渗透性也不均一。在灰岩、花岗岩等脆性岩石中，表现出破裂变形为主，断层产状一般变陡，其走向上及横向上的裂隙度和渗透性较均匀。

在晚期的断裂变形阶段：一般断裂剪切活动加强，使各种力学性质不同的断裂彼此贯通，断层岩石的渗透性和裂隙度趋于均一化，从而为矿液的运移提供了传输网络。

对矿田内不同类型的岩石所做的强度测试和压汞实验，证明了岩石变形特征对岩石的渗透性有一定的影响(见表 1)

表 1　部分构造单元中岩石物理常数

Table 1　The physical parameters of rocks in some structure units

实验参数 / 主要岩性	抗压强度 Co(kg/cm²)	弹性模量 E(10⁵kg/cm²)	泊松比 μ	孔隙度 n	备注
灰岩	520.0	4.81	0.259	8.13	
大理岩	511.0	3.30	0.12	7.2	
花岗斑岩	908.0	6.3	0.40	2.2	
矽卡岩	205.8	1.44	0.28	13.87	
碎裂岩	397.5	2.34	0.48	15.5	节理化带
碎裂岩	305.4	1.96	0.42	36.5	透镜体-碎斑岩
碎裂岩				13.8	片理化带

2. 同成矿期构造的成矿现象和矿化特征

(a) 成矿母岩在时空分布上主要受同成矿期构造的控制。含矿岩浆在岩石变形、岩层破碎、物化环境相对开放的条件下发生被动侵位，侵入到断裂的交叉部位，形成中心岩株、岩枝和不同方向的脉岩群，并在岩浆侵位过程中改变自身的组分，分离出富含矿质的流体相[1]。

(b) 矿田先后经历了矽卡岩—磁铁矿化、绿泥石—金铜矿化和碳酸盐—铜(金)矿化等三个阶段。磁铁矿化受北北东向的褶皱-压性断层控制，成矿环境相对封闭，形成磁铁矿、赤铁矿和铁尖晶石等高温氧化物组合，呈细脉侵染状产出(图 3)。

(c) 对冶官墓矿床矿体金的品位所做的趋势分析表明，趋势绝对高值区基本上沿北北东向断裂分布 (图 3-A)，相对高值区在空间上与断层破碎带、岩浆侵入接触带和各种软弱夹层带相吻合。

(d) 容矿构造的几何形态和岩体变形结构决定了矿体的形态，前者提供赋矿空间，后者决定成矿方式和矿体边界。已经查明的矿体有四种类型：简单接触带矿体、侵入接触断层带矿体、层状矿体和构造俘虏体型矿体，它们分别产于简单侵入接触带、侵入接触断层带等相应的构造带中，充分显示了构造的控矿性。

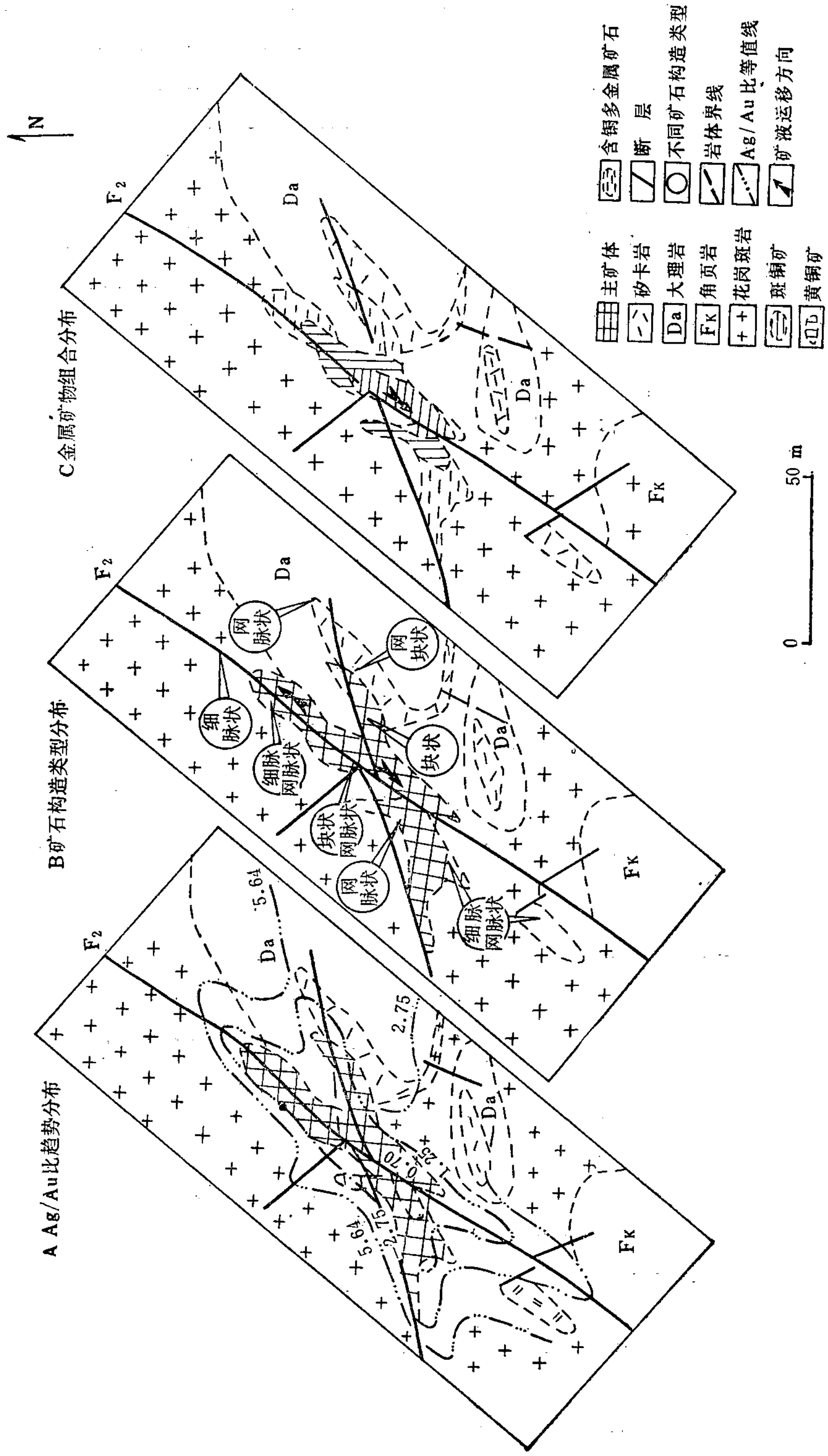


图3 冶官墓矿床105米中段 F_2 断层矿化特征简图

Fig. 3 Mincaralization features along the F_2 fault of the Yieguanmo deposit the 105m level

二、成矿期构造控矿规律及构造减压成矿1)

1. 成矿期构造控矿规律

金厂矿田矿化富集程度取决于成矿期构造的运矿和容矿的能力，实际上是取决于构造变形的性质和应力状态。所以成矿规律反映了构造变形规律。

根据矿田矿化特征和构造变形特征分析，可以看到：(a) 三个矿化阶段的矿体类型与成矿元素的富集取决于构造变形的强度和类型。例如，磁铁矿化富集于褶皱变形阶段，主要成矿构造是层间滑动带，各种类型侵入接触构造带和断裂构造所围绕的含矿的俘虏体。矿液沿上述裂隙构造顺层运移，形成品位较稳定的层状矿体，这类矿化富集多分布于矿床的较深部位。而金铜矿化易富集于剪切断裂活动阶段，聚矿部位多半位于变形强烈的断层滑动破碎带中。矿液沿贯通性剪切断层运移，而形成板状、楔状和透镜状矿体，这类矿化多分布于矿床的浅部。(b) 不同的变形阶段和不同的构造类型，其矿液的运移和聚集方式也是不同的。含矿热液沿断层运移的过程中，由于组分浓度差和构造应力引起的压力差之故，使含矿热液以扩散交代、渗透交代和充填作用等三种方式成矿。通过对矿石结构、构造的观察表明，矿液在断裂层通道闭合段，成矿方式以扩散交代为主；在断层贯通段，以渗透交代为主；在断层中部完全贯通地段，其成矿方式则以渗透交代完全转变为以充填方式为主[2]。矿石的结构和构造取决于构造的变形特征，在强烈的挤压揉皱带中，由于矿液穿插交代碎裂岩后而形成斑杂状、网脉状矿石。在脆性剪切破碎带中，矿化呈平行脉状、细脉状；在局部拉伸断层区，矿石呈小脉和大脉状 (图 3-B)。(C) 成矿元

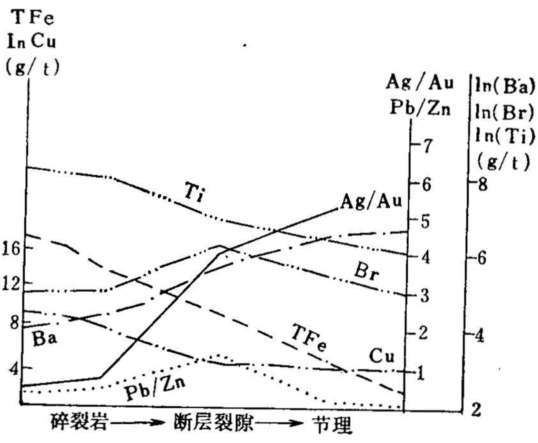


图 4　冶官墓矿床 105 米中段 F_2 断层中成矿元素和造岩元素分配特征

Fig. 4　Distribution of ore-forming and rock-forming elements along faul· 2in the 105m level of the Yieguanmo deposit

(系沿 F_2 断层走向取样分析结果；纵坐标是成矿元素含量、横坐标是沿断层走向的构造变形特征)

1) 在成矿期构造应力场作用下，在应力的集中部位，引起岩石断裂，当断裂进一步扩展，贯通时，便原来岩石聚集能量释放，形成圈闭性的应力低值区，这种构造变形作用称为构造减压作用。

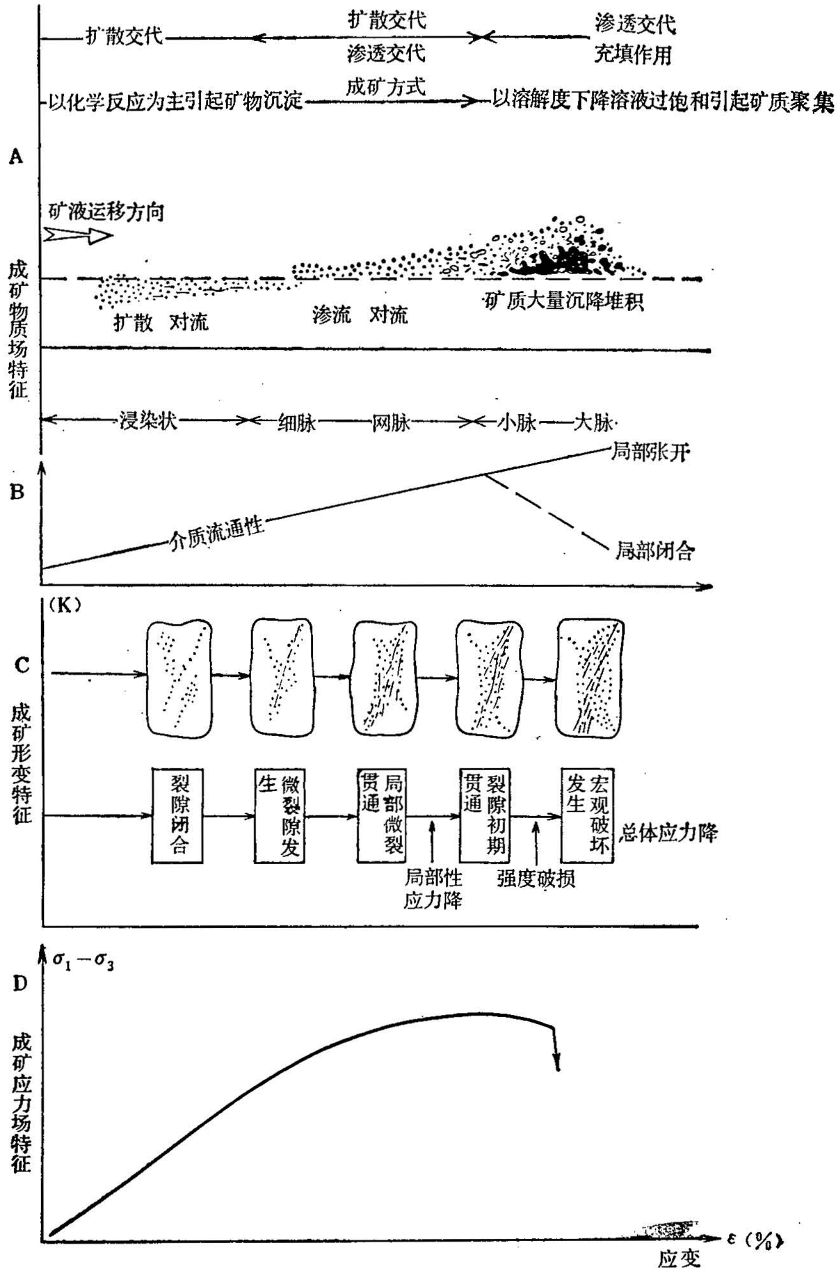


图 5 构造减压成矿机制

Fig. 5 Sketch Showing the ore-forming mechanism due to structure stress-releasing during the deformation

A,B——变形过程中构造减压引起的成矿方式和矿化特征的变化；C——成矿形变场演化特征，基本表现为主干断层的贯通过程；D——成矿应力场演化特征

（注意 ABCD 所示的各过程垂向上时间的对应关系）

素 Cu、Au、Fe 的迁移能力取决于构造变形强度。如冶官墓矿床 F_2 断层，在走向上岩石变形为节理化带一密集裂隙带时，一般富集碱金属元素和轻金属元素，当断层岩石进一

步变形为碎裂岩带时，则富集亲铜至亲铁元素。在这类变形序列中，其指向元素 Ag/Cu 比值降低，Pb/Zn 比值升高(图 4)。

2. 构造减压成矿及矿液聚集的力学条件

在部分成矿地段，岩石在变形过程中，不断地积累和释放能量，从而产生构造应力差，驱动矿液由压力高部位向压力低部位运移。而在构造应力降最大的部位，矿液大量的聚集。

A. 构造减压成矿机制

构造减压作用促使构造变形的有利于成矿的地段，在成矿初期的高应力区向成矿期低应力区发展（图 5)，引起压力空间开放，使其成矿，这期间热液温度和内压力骤降，热液的挥发性组分和运移过程中丢失和金属溶解度逐渐减小，这期间的成矿方式由扩散交代—渗透交代等—充填作用；矿石的结构、构造由侵染状—细脉状—小脉状—大脉状；矿质由扩散对流堆积到大量堆积(图 5)。

B. 根据应力条件和相应的变形方式，可确定出四种类型的构造减压带。

(1) 断层滑动构造减压带：断层贯通，岩石内聚力损失而错动，变形能转化的介质动能由断层错动来释放，构造减压表现为沿断层带最大错动部位的应力降。

(2) 蚀变带构造减压带：矿液交代围岩引起岩石组构变化导致强度下降，形成局部应力低值区，是一种间接的构造减压带。

(3) 软弱层构造减压带：软硬岩层在变形强度上有差异，软岩层易形成应力低值区，而硬岩层则相反，这样在软岩层中易形成构造减压带。

(4) 断层碎裂岩构造减压带：断层在围限压力下错动极小，变形能的积累引起岩石碎裂，碎裂岩石因失去整体性强度下降而减压。

以上四种类型减压带，为矿液运移、聚集提供了空间和动力源。

三、构造减压成矿机制的数学物理模拟

构造减压成矿机制是从构造变形角度来探讨热液成矿的条件。下面将利用数学物理方法模拟成矿期矿田的应力场、形变场和矿液运移势场(图 6)之间的内在联系，就可能定量分析矿质运移、聚集的条件和规律。

1. 对成矿期应力场中构造减压特征的模拟。

矿液运移的动力源主要来自同成矿期构造应力场，决定矿液运移的主要因素是构造变形过程中的减压作用。

将金厂矿田金铜矿化阶段的成矿构造抽象为断层滑动模型、软弱夹层模型、交切断层模型和地质的实际模型（图 2-b)，分别用有限元法和光测弹性力学方法进行应力场的模拟。其结果发现，介质在变形过程中，发生应力积累和释放，这时介质由应力高值区向低值区转化。例如，断层发生滑动变形时，其局部引张部位常常由高应力向低应力转化。软弱层和破碎带等低强度的介质，易形成封闭性的低应力、低能量区。入字型断层在变形过

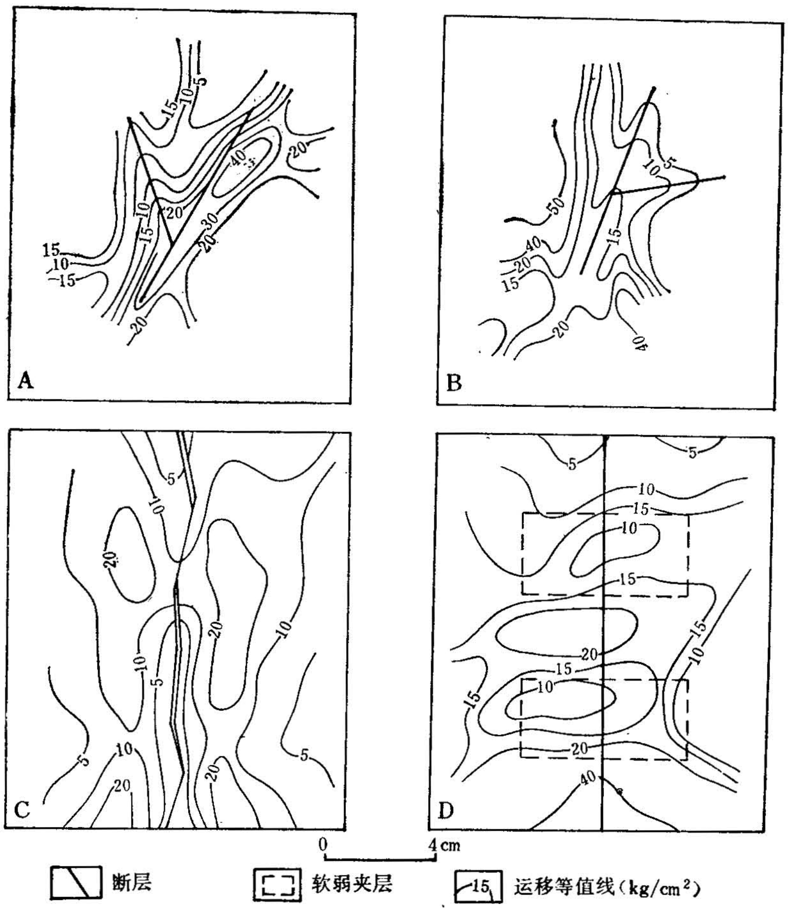


图 6 成矿构造组合的矿液运移势分布

Fig. 6 Distribution of hydrothemal migration potential in ore-forming structures

A——NNE-NW 交切断层贯通中运移势分布； B——NNE-NEE 交切断层贯通中运移势分布；
C——断层滑动变形中运移势分布； D——断层穿切软弱夹层时的运移势分布

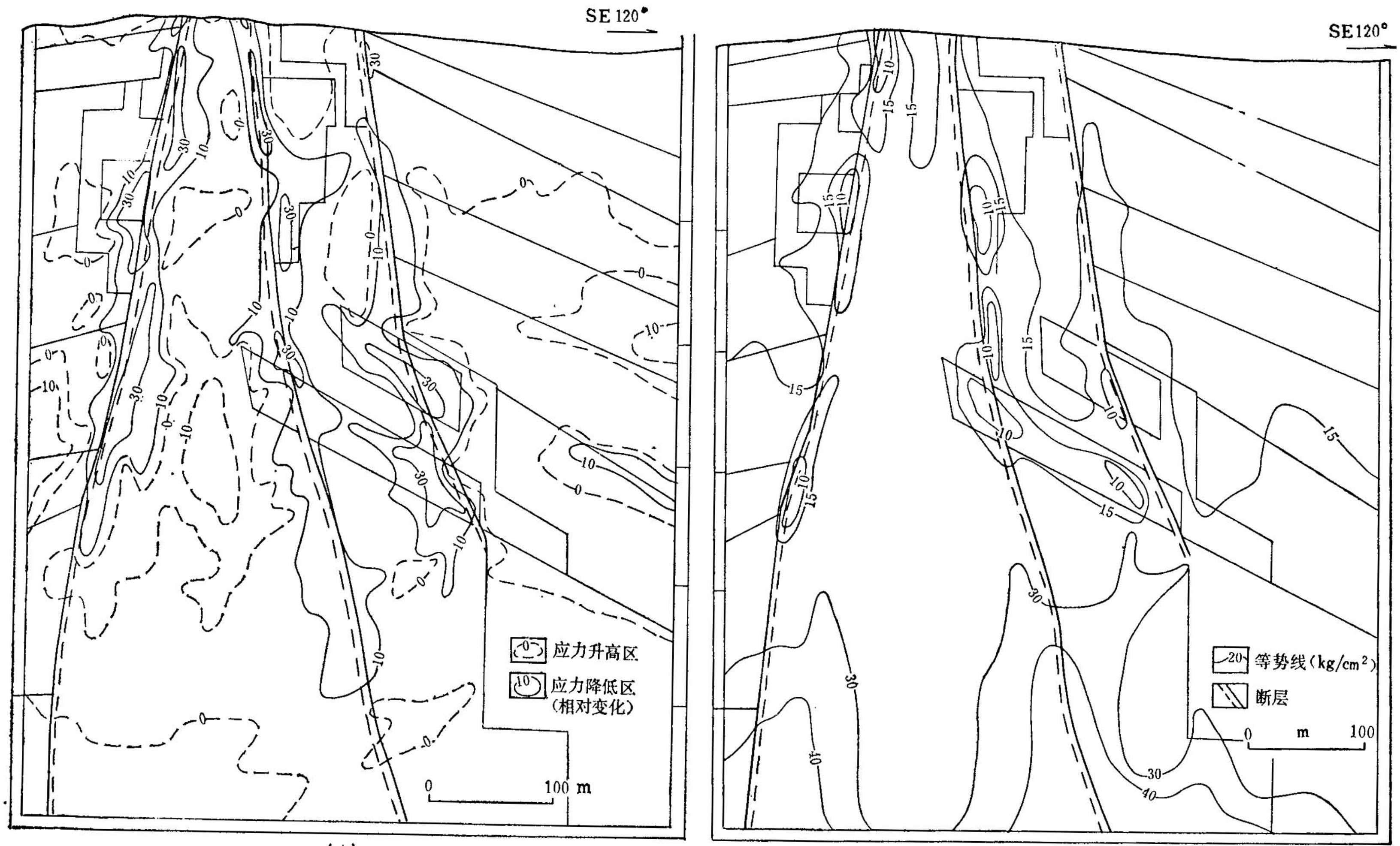
程中，分支断层与主干断层发生交切贯通，在其交叉部位产生应力低值区。

利用应力场有限单元法模拟冶官墓 21 线地质剖面的应力场，发现剖面上的软弱层单元、断层单元和其它变形体单元，它们的应力和能量均有所降低（图 7-A），在剖面上其它单元的应力场特征基本不变。

2. 矿液运移势的数学模拟

(a) 矿液运移势方程：矿液进入成矿域，在相对高压，中低温环境中沿运矿断层带及其影响区运移，构造应力为主要驱动力。由碎裂介质渗流理论[3]，从有限域矿质守恒定律出发，可推出简化的矿液运移势解析方程：

$$\mathrm{div}(k\,\mathrm{grad}\,H) = a\frac{\partial}{\partial t}(H) \tag{1}$$



(A) (B)

图 7　冶官墓21线剖面形变场中应力与矿液运移势分布

Fig. 7　Distribution of stresses and migration potential of hydrothermal fluids in the deformation field along exploralory profile 21 of the yieguanmo deposit

A——采用断层应力释放法计算的形变场变形前后平均应力分布；　B——矿液运移势分布

K——介质流通性；a——介质压缩系数；式中 k 值主要是岩石变形强度的函数，H和a则与应力场特征相关，即式(2)的物理意义是描述成矿形变场、应力场和矿液运移势之间的关系。

(b) 断层介质流通性（K）：将介质允许矿液运移的能力定义为介质流通性，其数值与岩石变形方式和强度有关。准静态应力场中，它是岩石裂隙度的函数，经验的表达式为[4]

$$k_0 = nb^2/12 \qquad n = (x,\ y) \qquad b = b(x,\ y) \tag{2}$$

n——岩石裂隙度；b——裂隙宽度；动态应力场中，k 值由下列实验方程式给出：

$$k = k_0\,[\mathrm{aexp}\,(\sigma - \sigma_0)] \tag{3}$$

实际计算矿液运移势时，k 值依据计算单元作离散化，k_0 由野外样品测试给出。

(c) 成矿域边界条件：A. 斑恩的压汞实验证明[4]，注汞于裂隙性岩石相对于孔隙性岩石所需压力要低的多，即矿液更易沿裂隙性岩石运移。因此，模拟的成矿域边界可分为二类：

孔隙性介质边界：其边界条件恒满足

$$-k/u \cdot \frac{\partial P}{\partial i} = v_i = 0 \quad i = x,\ y \tag{4}$$

裂隙性介质边界：该类边界有持续的矿液流动，边界条件可写为

$$V_i = -k/u \cdot \frac{\partial P}{\partial i} = 常数 \quad i = x,\ y \tag{5}$$

u——矿液粘度；P——矿液内压力；V——矿液流速；

(d) 矿液运移势的计算结果：将计算的各类成矿构造细分为有限单元，各自物理参数和应力量级由前述方法经模拟实验测定并代入式 (2)，并分别利用有限差分法迭代求解，则可给出它类成矿构造中矿液运移势的分布。

断层滑动型构造矿液运移势的分布：矿液运移势平行断层形成线性梯度带（图 6-C)。圈闭的局部低势区分布于断层滑动变形产生的引张区。野外见聚集的矿体多为尖灭再现的透镜状。

软弱层型构造矿液运移势分布：矿液沿穿切软弱层的断层运移，易在软弱层中形成圈闭性运移势低值区，并滞流聚集成矿。野外见形成的矿体多为层状、似层状(图 6-D)。

交切断层型构造矿液运移势的分布：断层交切贯通中，矿液以侧流、对流方式沿主干断层向分支断层运移，运移势沿分支断层递减，易于在断层交切部位或分支断层有限延伸域形成圈闭性运移势低值区。野外见相应部位的矿体多为柱状、囊状和不规则状。

冶官墓 21 线剖面矿液运移势的分布：该剖面是实际的地质模型。其底边断层单元满足裂隙性边界条件，其它边界单元属孔隙性边界。由矿物学方法测得矿液初始运移势为 50kg/cm²，经求解得出矿液运移势的趋势分布为下高上低，其最大梯度方向平行于断层单元，圈闭性的势低值区沿运矿断层呈串珠状分布于部分断层单元、断层旁侧的软弱层单元和构造俘虏体单元(图 7-B)。最大应力降部位与矿体空间位置基本吻合。

据运移势梯度变化表明，矿田中隐状矿体应位于岩体与断层间的侵入接触断层带中或其附近，而岩体本身和远离岩体的地层，其成矿性较差。

构造减压成矿机制模拟结果说明，成矿初期（褶皱阶段），矿液聚集域变形较微弱，属应力高值区。在成矿的中晚期(断裂变形阶段)，矿液聚集域变形强，岩石破碎，矿液运移域基本贯通，此时的矿液聚集域变为应力低值区，成矿条件最好。

通过以上金厂矿田构造成矿实例研究表明，成矿构造的形变场和地球化学场是密切相关的，而构造形变场对成矿元素运移、聚集的控制，是起决定性的作用。

本课题的研究，得到长春地质学院王林祥、赵寅震和沂南金矿的郑子恒、祁化钧等同志的指导与帮助，在此一并致谢。

参　考　文　献

[1] Шехтман, П. А., Королев, В. А., Никифоров, Федорчук, Н. А., Шихин, Ю. С., 1979, Детальные структурно-прогнозные карты гидротермальных месторождений. Москва недра

[2] Harbaugh, J. W., 1981, Computer Simulation in Geology, New York Wiley-Interscience Company.

[3] Bear, J., 1972, Dynamics of fluid in porous Media. New York, American. Elsevier.

[4] БАН, А. Максимов, В. А., 1962, Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости гостоптехиздат.

STRUCTURAL DEFORMATION AND HYDROTHERMAL MINERALIZATION

Wang Zichao

(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing)

Wang Yianan

(Changchun College of Geology, Changchun, Jilin)

Abstract

Taking the Jingchang gold-copper deposit of Yinan county, Shandong, for example, the authors propose that the migration and concentration of ore-forming substances in the hydrothermal solutions might be mainly controlled by structural deformation taking place during the stage of mineralization. Ore-forming elements are concentrated in the places with strong structural deformation, and there occur different types of ore body in different places of the deformational structures. Besides, the structural control of the ore deposition has been evaluated quantitatively through experimental studies on the mechanics of the rocks, measurements of mechanical parameters of the rocks, inversion of the stress field concerned and simulation of the distribution of the migration potential of ore-forming solutions by use of the theory of infiltration mechanics.