

# 山东文登金矿成矿动力学研究\*

许顺山 杨 农 孙 青

(中国地质科学院地质力学研究所, 北京) (北京大学地质系, 北京)

**提 要:** 本文通过古应力估算、流体包体研究、应变测量以及矿化蚀变规律研究, 探讨了山东文登金矿的动力作用与金成矿的主要关系。认为构造动力作用是金成矿的主要原因, 韧性剪切作用向韧-脆性变形作用的过渡过程是金成矿的必要条件之一。

**主题词:** 韧性剪切 成矿作用 构造动力 文登金矿 山东

## 1 矿床地质

文登金矿位于胶东东部文登市西院下, 因而又名西院下金矿(图1)。大地构造位置属于华北地台边缘的中生代活化区, 北北东及近南北向的米山断裂带北段西盘, 处于昆嵛山复式花岗岩体(时间跨度为元古代至中生代)的东部边缘和燕山早期文登花岗岩西部边缘之间。两岩体主要展布方向为近南北向, 岩体边缘变形地质特征受断裂变形作用的影响, 表明米山断裂形成于两岩体侵入之后。该金矿成矿是以构造动力作用为主线, 具有构造-岩浆-地层三位一体的成矿特点。成矿期绢云母 K-Ar 年龄为  $(101.97 \pm 2.49) \times 10^6 \text{ a}^{[1]}$ 。

矿区内地层为荆山群斜长片麻岩, 黑云母变粒岩, 长石石英片岩。岩浆岩为片麻状二长花岗岩, 属于昆嵛山岩体北缘的岩枝部分。另有花岗斑岩脉发育, 走向 $40^\circ \sim 50^\circ$ , 倾

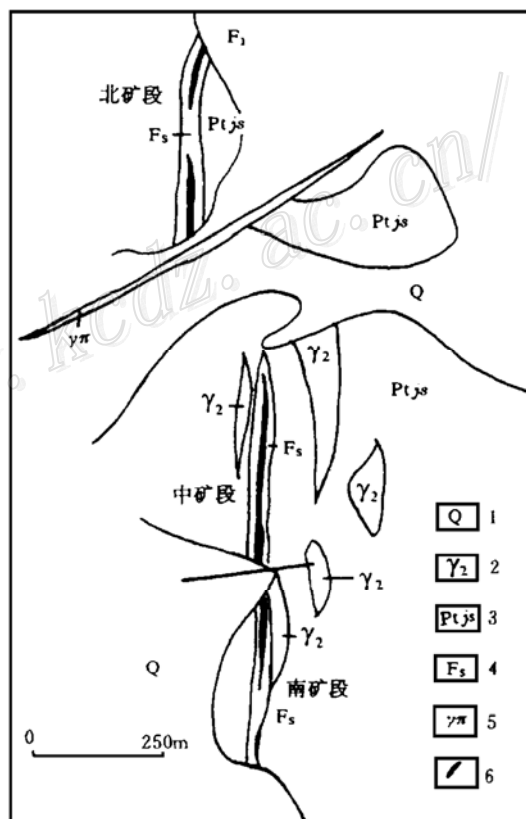


图1 文登金矿地质图

1—第四系; 2—元古代混合花岗岩; 3—元古代荆山群片麻岩;  
4—构造蚀变岩; 5—燕山晚期花岗斑岩; 6—金矿体  
Fig. 1. Geological map of the Wendeng gold deposit.  
1—Quaternary; 2—Proterozoic migmatitic granite; 3—Gneiss of Proterozoic Jinshan Group; 4—Altered tectonite; 5—Late Yanshanian granite porphyry; 6—Gold orebody.

\* 本文为国家黄金局“山东文登市金矿成矿规律及矿体定位预测研究”项目的部分成果(编号: 93-95-09)许顺山, 男, 1963年生, 在职博士生, 助研, 主要从事矿田构造、地质力学研究。邮政编码: 100081 1996-11-04收稿, 1997-03-05修改回

向南东,宽10~15 m,长度大于9 km。断裂主要为 NNE 向的西院下断裂,也是主要的控矿断裂。断裂倾向 $80^{\circ}\sim 100^{\circ}$ ,倾角 $40^{\circ}\sim 50^{\circ}$ ,长大于1 km,宽10~20 m。经历过多期活动:早期韧性阶段有韧性揉皱,糜棱岩化、片理化等现象;晚期以脆性为主,发育碎裂岩、角砾岩等构造岩,金矿体赋存于该断裂中。另一断裂为北东东向的 F2 断裂,是成矿后断裂,左型正断层切割矿体,断裂倾向北西,倾角 $70^{\circ}$ 左右。

矿体呈透镜状产出,以 F2 断裂和花岗斑岩脉为界,分为南矿段、中矿段和北矿段。矿石构造为:①细脉状和网脉构造;②浸染状构造;③条带状构造;④块状构造;⑤角砾状构造。矿石矿物主要为黄铁矿和镜铁矿,其次有方铅矿、闪锌矿、赤铁矿和黄铜矿。围岩蚀变有黄铁绢英岩化、硅化、钾长石化和镜铁矿化等。含金硅化岩是主要矿石类型。

## 2 动力作用与成矿关系

构造动力作用是物质结构调整及组分调整的主要原因。构造作用力的大小直接影响物质迁移的幅度。构造动力对成矿的影响主要表现在两方面:①构造变形直接引起岩石破碎→研磨→流动→重熔,从而岩石矿物结构发生变化或化学反应,使有用元素集中<sup>[2]</sup>;②,岩浆结晶或矿液沉淀过程中,受到应力梯度的制约,成矿过程从应力强区到弱区,金属元素依次为 Au→Cu、Mo→Pb、Zn<sup>[3]</sup>。

### 2.1 断裂剖面分带与金矿成矿关系

F<sub>1</sub>断裂经历过从韧性变形到韧脆性、脆性变形的过程,构造岩的叠加作用表现最为明显,往往在韧性变形的岩石或矿物中叠加有脆性裂隙。

断裂变形具有对称结构,中心韧性变形较强,发育有糜棱岩及片理化岩石,石英具波状消光、变形纹和变形带;向两侧渐变为碎裂岩和未变形岩石。蚀变、矿化同样具有分带性,如图2、图3所示。断裂中心部位蚀变类型以硅化、绢云母化为主,向两旁渐变为绢云母化和钾化。而 Au 等微量元素含量也是中心地带较高。

由此可知,应变强度决定了蚀变及金矿化作用的分带,也就是说,金矿化直接与应力作用有关。应力导致元素迁移及分带的原因是应力作用使岩石矿物不断破碎,造成总表面积增大,因而表面能就越大(总表面能=单位面积表面能×总表面积)。表面能的增加使得颗粒处于活动状态,能够促进化学反应和增加吸附作用,同时使粉末物质的重结晶和形成新矿物成为一种自发的趋势。由于变形中心变形强度大,岩石破碎越细,而活动性越强,活化组分带出越多。

### 2.2 应力、应变纵向及垂向变化与金矿化

由上述可知,应变在剖面上具有分带结构,且应变强度与金矿化为正相关。那么垂向和纵向上的变化规律怎样?通过古应力估算及应变测量来进行研究。

古应力值的估算采用位错密度法。位错密度与应力的定量关系最早是从金属研究中给出的,即  $\Delta\sigma = \alpha\mu b\rho^{0.5}$ ,其中  $\rho$  是位错密度, $\mu$  是剪切模量, $b$  为布格矢量,可由材料的晶体常数表中查出。本文采用 Weather et al (1979) 的经验公式  $\Delta\sigma = 66 \times 10^{-3} \times \rho^{0.5}$ ,其中  $\rho$  的单位为  $\text{cm}^{-2}$ ,差应力单位为 MPa。位错密度的统计方法是采用厚度-线条法(Smith-Guthman 方法)公式为:  $\rho = 2N/Lt$ <sup>[4]</sup>。

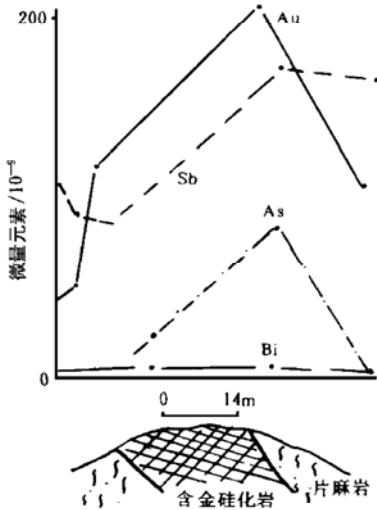


图 2 米山断裂南部3号地质地球化学剖面图

Fig. 2. No. 3 geological-geochemical section in southern Mishan fault.

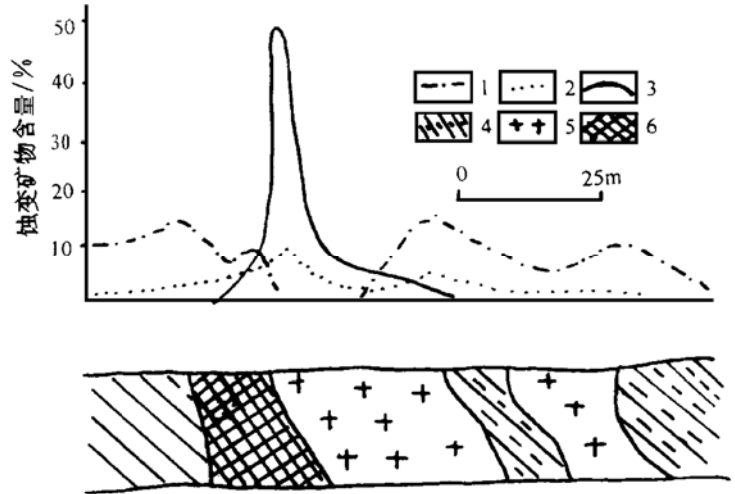


图3 40 m 中段9号穿脉蚀变分带图

1—钾长石;2—绢云母;3—石英;4—黑云二长片麻岩;5—黑云二长花岗岩;6—金矿体

Fig. 3. Alteration zoning along No. 9 ort at 40 m level.

1—K-feldspar; 2—Sericite; 3—Quartz; 4—Biotite monzogneiss; 5—Biotite adamellite; 6—Gold orebody.

计算结果表明,在文登金矿区应力大小是从地表(50 m)到Ⅲ中段(-40 m)依次增大,同一水平南部应力小于北部(表1)如在Ⅱ中段,靠近北部的样品Ⅱ<sub>20</sub>的差应力值为192.79 MPa,靠近南部的样品Ⅱ<sub>44</sub>、Ⅱ<sub>40</sub>的差应力分别为152.42 MPa和133.36 MPa。将此结果与图4进行比较,发现应力大小与金品位呈正相关关系,即差应力较大处的金品位较高。由此推论,北部成矿条件要比南部为好。

表 1 文登金矿古应力值和  $K_{ac}$  值结果

Table 1. Paleostress and  $K_{ac}$  value of the Wendeng deposit

样品号	S <sub>19-1</sub>	Ⅱ <sub>40</sub>	Ⅱ <sub>44</sub>	Ⅱ <sub>45</sub>	Ⅱ <sub>20</sub>	Ⅱ <sub>21</sub>	W <sub>3-21</sub>
位置	地表19线	Ⅱ中段南	Ⅱ中段南	Ⅱ中段南	Ⅱ中段北	Ⅱ中段北	Ⅲ中段
$\Delta\sigma$ /MPa	130.15	133.36	152.42		192.79		206.96
$K_{ac}$			1.78	2.16	2.17	1.85	

应变测量只在Ⅱ中段测量了4个样品,其中Ⅱ<sub>44</sub>、Ⅱ<sub>45</sub>是靠近南部的样品,它们的  $K_{ac}$  值分别为2.16和1.78,平均值是1.95,而靠近北矿段的两个样品Ⅱ<sub>20</sub>、Ⅱ<sub>21</sub>的  $K_{ac}$  值分别为2.17和1.85,平均值是2.01,表明北部变形比南部稍强。这个结论与古应力估算结果一致。

### 2.3 流体包裹体的研究

流体包裹体与构造应力的关系,很少为人们所注意。近10年来,我国包裹体工作者注意到了次生包裹体与构造微裂隙的关系,并指出次生包裹体是因变质作用往往伴随构造运动和岩石变形而产生(卢焕章,1990)<sup>[5]</sup>。

对文登金矿床中石英包裹体的研究表明，石英中存在两种类型的包裹体——原生包裹体和次生包裹体。次生包裹体往往沿两组共轭的微裂隙分布，单个包裹体呈与裂隙斜交的长轴状（图版1、2）。包裹体的发育程度与金矿化呈明显的正相关关系，反映了金矿化过程是物理化学条件发生相对突变的环境。

赖勇（1995）通过阴极发光研究发现成矿早期石英具有环带结构<sup>[1]</sup>，外环发育沸腾包裹体。均一至液相的包裹体较多。液相均一温度和气相均一温度为290~270℃。因而它反映了流体的一次沸腾事件。而早期石英中次生包裹体的均一温度为260℃左右，其温度与第二期石英的沸腾包裹体的温度一致，反映二次矿化事件在第一期石英中留下了痕迹。经过两次沸腾事件之后，流体压力从早期的300×10<sup>5</sup> Pa降为40×10<sup>5</sup> Pa，气液比从40%~70%降为5%，温度从375~420℃降为100~160℃。

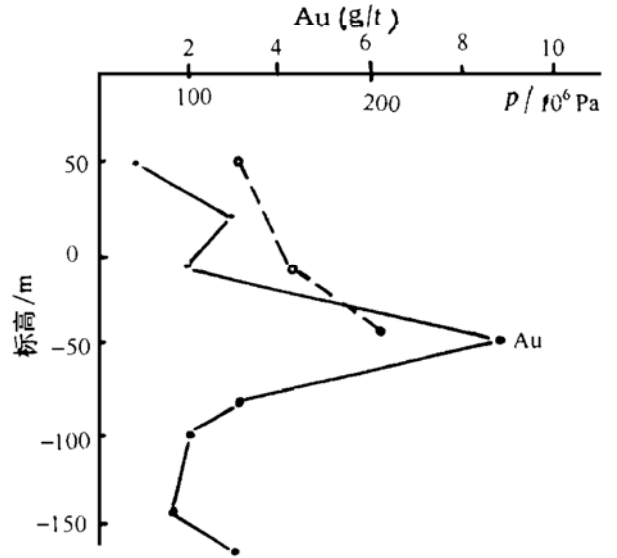
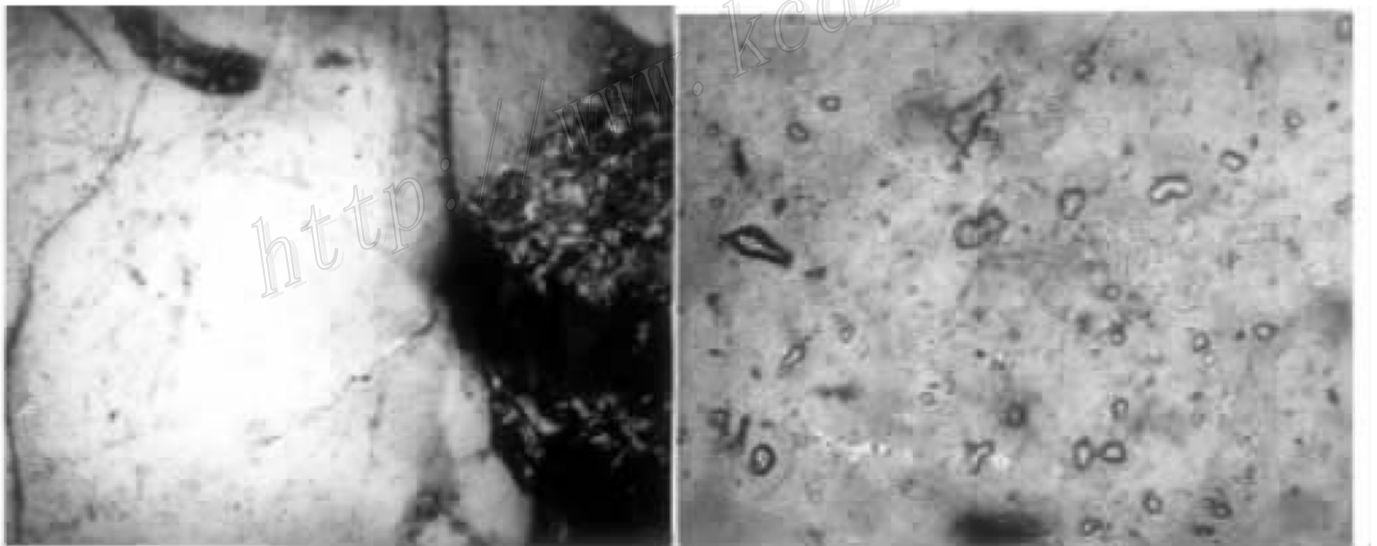


图4 古应力与金品位的垂向变化  
Fig. 4. Vertical variation of paleostress and gold grade.



照片1 W<sub>2-1</sub>石英中沿X型裂隙分布的次生包裹体，正交 ×2.5  
照片2 照片1中的局部放大，正交 ×40

以上事实说明，矿化作用与微裂隙的大量出现有关，显微裂隙的大量产生改变了含矿溶液与围岩的平衡关系，使原来的封闭体系向半开放、开放体系转变，骤然减压而导致流体沸腾，流体通过裂隙运移温度下降而引起有用元素沉淀。流体沸腾和减压过程中造成新的脆性裂隙产生，引起新的成矿作用。

#### 2.4 断裂空间结构与矿体赋存规律

断裂的三维形态是由应力状态控制的。文登金矿严格受断裂控制，因而断裂的产状变化直接影响金矿的赋存。

各中段倾角统计结果表明, I、II 中段倾角较大, III 中段(-40 m) 倾角较小, IV 中段又开始变大(图5), 反映了断裂形态的舒缓波状。矿体在产状变陡部位膨胀。同时经过观察发现断裂在走向上也呈舒缓波状。在走向上, 断裂走向偏东的部位往往是矿体尖灭的地段, 而偏北的区段是矿体的膨大部位。这一现象说明该断裂成矿时期是一左旋正断层。这种形态的变化, 控制了矿体的形态呈透镜体状产生, 对比图4可知, 在断裂产状变缓的地方, 金品位较高, 构造应力较大。然而文登金矿金品位与厚度的关系是负相关关系, 即在矿体较厚的位置品位较低, 在矿体尖灭变薄的位置品位反而变高。可见, 金的品位变化反映的是早期的韧性变形。晚期脆性活动不容易测得其构造应力值, 因而对于应力与成矿的关系难以确定。关于这方面的问题, 有待今后进一步研究。

## 2.5 应力演化与金矿形成过程

控矿断裂  $F_1$  经历了由早期的韧性变形至晚期的韧脆性变形, 最后为脆性变形。金的矿化作用是与这种过程同步进行的。金矿化位置受剪切带严格控制, 且遭受韧性剪切带活动的改造。

早期强烈的韧性剪切变形产生大量的热能, 可以达到使地壳岩石局部熔融, 乃至达到产生花岗岩熔浆的温度, 并导致大量的硅质析出形成石英脉。Helgeson (1980) 提出, 体系内温度每升高  $100^{\circ}\text{C}$  将会使金的溶解度增加两个数量级。由此可知, 韧性剪切对金的活化迁移有不可忽视的作用。而韧性变形向脆性变形的过渡是打破体系平衡造成含金流体沿脆性裂隙迁移、沉淀的必要环节。

动力变形作用与金矿的成矿过程: 最初变形使岩石破碎, 进一步形成一系列定向构造, 同时岩石中的含水矿物发生分解, 形成以水、二氧化碳为主的流体, 流体从岩石中提出金构成含金的变质流体, 此时体系为暂时的封闭循环体系, 原始的金开始富集。

构造层次的改变产生的脆性微裂隙使第一期含金石英脉沉淀, 随着裂隙的大量形成, 流体发生沸腾隐爆, 从封闭的体系变成开放的体系, 打破了原来的平衡状态, 加强了含金流体从矿源层迁出, 含金流体与围岩的反应及物理化学条件改变而引起主要成矿作用。在大量矿质沉淀封闭了连通的通道之后, 温度、压力又开始上升, 导致新的裂隙产生, 从而发生晚期成矿作用。

## 3 结 论

通过以上分析, 认为构造动力作用与金的成矿关系密切。

- (1) 金矿化富集与差应力、应变的大小呈正相关关系。
- (2) 强调了韧性剪切作用在成矿作用初始阶段的引发作用。
- (3) 阐明了韧性剪切向(韧)脆性过渡的成矿过程。

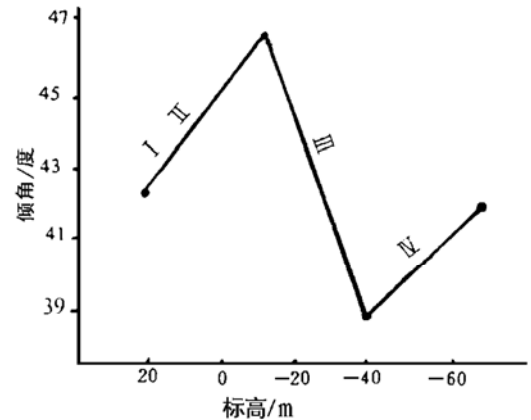


图5 倾角垂向变化曲线图

Fig. 5. Vertical variation of the dip angle.

(4) 指出了构造变形过程对物质结构及成分改变的直接影响。

### 参 考 文 献

- 1 赖勇. 山东文登金矿成矿条件及成矿过程——阴极发光技术在包裹体研究中的应用. 矿床地质, 1995, 14 (3): 281~288
- 2 杨开庆. 动力成岩成矿理论的研究内容与方向. 地质力学研究所所刊, 1986, (7): 1~4
- 3 肖庆辉等著. 当代地质科学前沿. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993, 107~109
- 4 万天丰. 古构造应力场. 北京: 地质出版社, 1988, 76~92
- 5 卢焕章. 包裹体地球化学. 北京: 地质出版社, 1990

## METALLOGENIC DYNAMIC STUDIES OF THE WENDENG GOLD DEPOSIT, SHANDONG PROVINCE

Xu Shunshan, Yang Nong

(*Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081*)

Shun Qing

(*Department of Geology, Peking University, Beijing 100871*)

**Key words:** ductile shearing, metallogenesis, structural driving force, Wendeng gold deposit, Shandong

### Abstract

Structural dynamic action is one of the main factors responsible for the adjustment of material structure and components. The intensity of structural activity directly affects the extent of material migration. The ore-forming process of the Wendeng gold deposit is related to the deformation and evolution of the NS-trending Mishan fault, which underwent multiperiod activities dominated by ductile deformation at early stage and brittle deformation at late stage. Such variation of deformation mechanism constituted indispensable prerequisite for the formation of the gold deposit. A comparative study of calculated paleostress and strain measurements with gold grade shows that paleostress and strain intensity are in direct correlation with gold grade. Gold grade is usually higher where deformation intensity is relatively high, suggesting the existence of close correlation between material migration and tectonic movement. Fluid inclusion studies indicate that the main ore-forming process occurred during the transition from the ductile deformation to the brittle deformation. Ductile deformation mainly gave birth to auriferous metamorphic fluids. At the late stage, large quantities of brittle fissures were formed, boiling and cryptoexplosion of fluids took place, and closed system turned into open system, which broke the original equilibrium and caused the migration of original auriferous metamorphic fluids and their eventual precipitation in favorable space. Spatial distribution of orebodies reveals the negative correlation between orebody thickness and gold grade, which reflects multiperiod activities of faults and multiple ore-forming processes.