

构造应力场控矿原理及控矿规律的实验研究^①

王成金 王义强

(长春地质学院)

摘 要 本文从成矿构造应力场入手,研究了成矿构造应力场控矿的应变能原理及矿液运移原理,认为主应力和($\sigma_1 + \sigma_2$)与主应力差($\sigma_1 - \sigma_2$)决定了应变能的大小和矿液运移势的高低,它们都体现了能量规律。在此基础上对矿床中经常出现的4种典型构造在不同边界条件下进行了全息光弹模拟实验,发现应变能的分布、成矿流体的运动和集中与构造应力场密切相关,应变能的高梯度区和成矿流体运移势的低值区是成矿的有利构造部位。文中还介绍了一些控矿实例。

关键词 成矿构造体系 成矿构造应力场 构造控矿规律 光弹实验

“构造应力场控矿”是地壳或岩石圈中存在的普遍规律。80年代以前,大多数学者主要研究的是“构造形迹控矿”,而“构造应力场控矿”的概念是80年代才提出的(杨开庆,1982;赵寅震,1982)。之后,此方面的研究在国内迅速发展,但主要有利的侧重于经验的总结,缺乏系统的实验研究。本文从成矿构造应力场控矿原理及实验研究入手,进行了有益的探索。

1 成矿构造应力场

内生金属矿产的分布是由构造应力场控制下的构造应力决定的。由于这个原因,必须在成矿前、成矿同时和成矿之后的各种不同的构造应力场中确定出成矿构造应力场。在成矿作用期间发生活动的构造应力场称为成矿构造应力场,而与成矿同时活动的构造体系称为成矿构造体系,在此基础上可进一步研究构造控矿规律,其主要内容是研究矿产形成、分布和富集的有利构造部位,找出矿产在时间和空间上受哪个特定构造体系的控制。在一个地区,控制某种矿床的地质构造是成矿构造应力场作用下发生活动的构造,包括新生的构造和被利用改造的先存构造,它们的确定对厘定成矿构造应力场至关重要。

^① 本文属国家计委专项资助的第三十届国际地质大会科研项目“地球自转变化与全球构造应力场演化”的一部分内容。

2 构造应力场控矿的基本原理

在构造应力场中成矿物质的分布遵守能量定律;能量定律中最重要的因素则是构造应力场中的应变能和矿液运移势。应变能的释放区与应变能的强烈积累区是密切相关的;能量集中区是个相对的概念,无论大小,其内均有局部破裂存在。这种包含许多局部破裂的应变能集中区应是成矿有利地区。宏观上的应变能集中区的圈定,在找矿中更具重要意义。这是我们用能量规律研究矿产形成和分布的理论基础。

2.1 构造应力场中的应变能

根据虎克定律,可导出平面应力场中应变能的基本关系式:

$$U = \frac{1+\mu}{12E} [(\sigma_1 + \sigma_2)^2 + 3(\sigma_1 - \sigma_2)^2] \quad (1)$$

式中: U 为应变能, μ 为泊松比, E 为弹性模量, σ_1 、 σ_2 分别为最大和最小主应力。

在全息光弹实验中可以很方便地获得主应力值,即

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{n_c f_c}{d_c} \quad \sigma_1 + \sigma_2 = \frac{n_p f_p}{d_p} \quad (2)$$

式中: f_p 、 f_c 及 d_p 、 d_c 分别为条纹值和模型厚度,是由实验测定的常数。 n_p 为模型中各点的等和条纹级数, n_c 为等差条纹级数。 n_p 、 n_c 对各不同点来说是变量。这样(1)式可变为:

$$U = \frac{1+\mu}{12E} \left[\left(\frac{n_p f_p}{d_p} \right)^2 + 3 \left(\frac{n_c f_c}{d_c} \right)^2 \right] \quad (3)$$

一般地讲,物体随变形增大应变能储存量随之增大;当变形到一定程度时,应变能储存值达到极限,岩石发生破裂,从而使应变能释放出来。这一过程称为应变能的积累和释放过程。此过程改变了含矿物质的状态,使含矿物质向破裂面内运移、聚积而形成矿脉。因此,应变能集中区是成矿的有利部位。

2.2 构造应力场中矿液运移原理

根据成矿流体运移势理论,成矿流体从高势区流向低势区;根据达西定律和某些实验结果,导出的矿液运移势的表达式为:

$$V_i = -\frac{ak_0}{\eta} [\exp(\sigma_1 - \sigma_2)] (\sigma_1 + \sigma_2) \quad (4)$$

式中: V_i 为各点的矿液流速, a 为介质的压缩系数, k_0 为介质流通系数的经验值, η 为矿液粘度,其他符号同(1)式。在光弹实验中,(4)式可变为:

$$V_i = -\frac{ak_0}{\eta} \left[\exp\left(\frac{n_c f_c}{d_c}\right) \right] \left(\frac{n_p f_p}{d_p}\right) \quad (5)$$

(4)式中 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 的正负分别代表扩张和收缩。收缩使压力增高,矿液向外流;扩张使压力降低,矿液向内流。因此位移势不仅控制了矿液的流速,而且还控制了矿液的流向。主应力和 $(\sigma_1 + \sigma_2)$ 与主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 决定了应变能的大小和矿液运移势的高低。

3 典型构造应力场应变能和矿液运移势的实验

为了进一步揭示成矿构造应力场中成矿物质的迁移和富集规律,本文应用4种典型构造,即雁行式构造、入字型构造、旋扭构造和交叉复合构造作实例,进行了构造应力场全息光

弹模拟实验,实验模型及加力方式如图 1 所示。在前 3 种模型边界上采用了 2 种加力方式,使其左侧为张扭性断裂构造,右侧为压扭性断裂构造;交叉复合断裂构造只采用了一种加力方式。

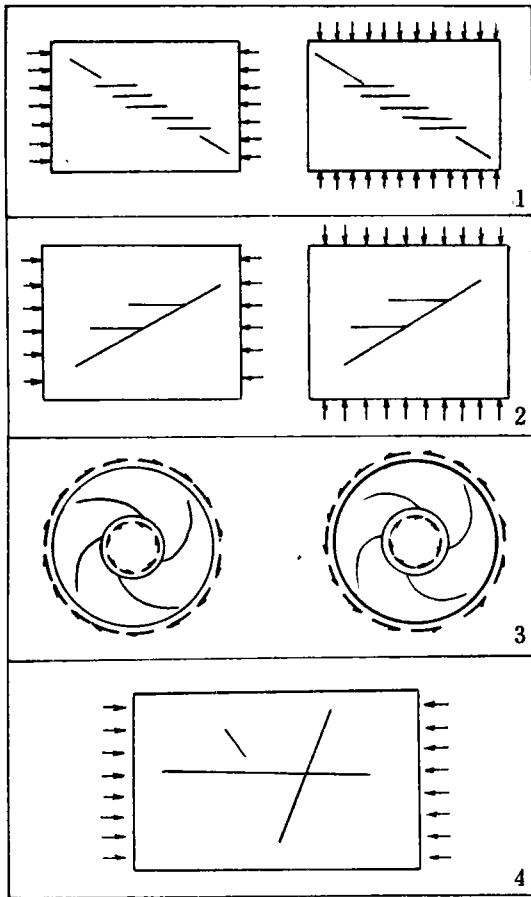


图 1 典型构造实验模型及加力方式
Fig. 1 Experimental models of typical tectonic types and their boundary forces

1. 雁行式构造; 2. 入字型构造; 3. 旋扭构造; 4. 交叉复合构造

大部分与各分支断裂吻合,呈孤立的透镜状,各分支断裂末端常有一小的扩张区(图 2-a)。压扭性雁行式构造的应变能较高值区呈长椭圆状,总体呈与断裂相反的斜列方式,而与断裂大角度相交;扩容区包含了除断裂端点以外的各分支断裂,在相邻两断裂之间的中心部位常有扩张区分布,而使大部分扩张区相连(图 2-b)。

2 入字型构造 张扭性和压扭性入字型构造的应变能分布大致相同。应变能高值区主要沿分支断裂分布,但前者较偏向于主干断裂与分支断裂所夹的锐角区,而后者较偏向于钝角区。张扭性入字型构造的矿液运移势负值区主要分布于主干断裂与分支断裂所夹的锐角区,

实验模型和加力方式是专门为实验设计的。实际上,无论是断裂还是褶皱,只要构造样式和力学性质与实验模型相同,就应该有共同的规律。

我们对模型进行光弹模拟实验,可以获得等差线和等和线,然后分别确定条纹级数。利用公式(3)和(5)即可求得模型中各点的应变能和运移势等值线。该实验求的是各点的相对值,各常数值提取公因式于括号外并令其等于 1。应变能为单位体积的应变能(J/m³),矿液运移势的单位为 m/s。

部分实验未给出运移势,只给出了扩容值($\Delta > 0$ 、 $\Delta = 0$ 、 $\Delta < 0$)3 种区域。这里

$$\Delta = \frac{1-2\nu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (6)$$

式中可以看出, Δ 的正负取决于主应力和($\sigma_1 + \sigma_2$)。矿液由 $\Delta < 0$ 区流向 $\Delta = 0$ 区再流向 $\Delta > 0$ 区;与此对应,矿液由 $V_i > 0$ 区流向 $V_i = 0$ 区再流向 $V_i < 0$ 区。由前述的理论可知, V_i 最低值区、 $\Delta < 0$ 区和高应变能分布区均是成矿的有利部位。现将实验结果分析如下:

1 雁行式构造 雁行式构造的应变能集中区包围了雁行式构造的各条断裂。张扭性雁行式构造的应变能较高值区主要沿各分支断裂中间部位分布,部分分布于断裂末端;矿液运移扩容区($\Delta > 0$)

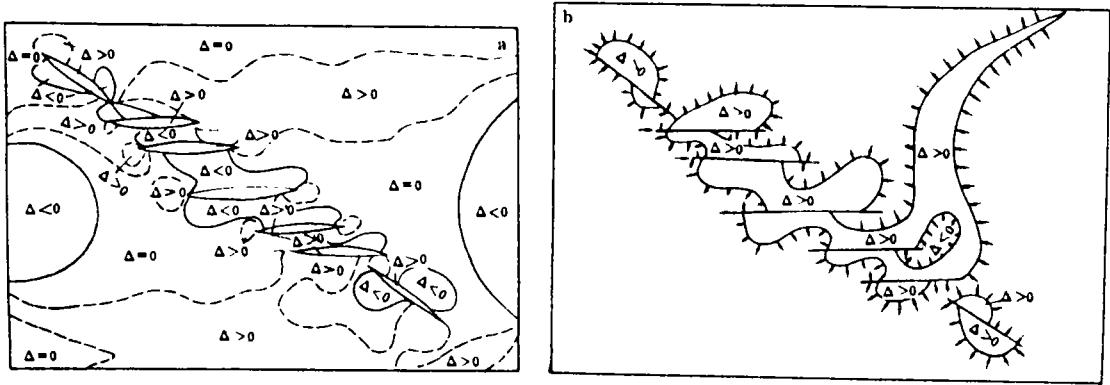


图 2 雁行式构造扩容值分布图($\Delta > 0$ 、 $\Delta = 0$ 、 $\Delta < 0$)

Fig. 2 Distribution plan of the dilatant values of echelon fracture

a. 张扭性; b. 压扭性

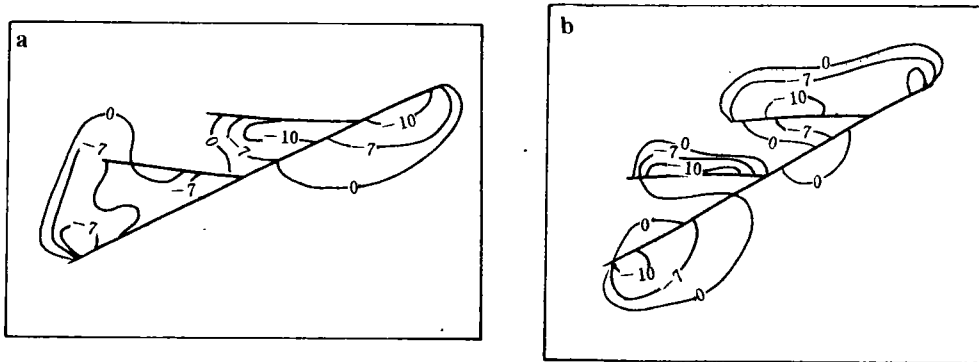


图 3 入字型构造应变能和运移势($\Delta > 0$)等值线图

Fig. 3 Contour of strain energy and migration potential of λ -type fracture

a. 张扭性; b. 压扭性

且最低值区靠近交叉点(图 3-a);而压扭性入字型构造的矿液运移势负值区则主要分布于钝角区,最低值区大约位于分支断裂中部(图 3-b),主干断裂端点的高应变能及运移势负值区为人为断裂端点,可不考虑。

3 旋扭构造 张扭性旋扭构造的扩容区($\Delta > 0$)主要分布于各弧形断裂内侧,断裂撒开端的扩容区较窄,向收敛端逐渐变宽,并于收敛端相互连结(图 4-a)。压扭性旋扭构造的扩容区($\Delta > 0$)分布于相邻断裂之间,且从一条断裂曲率较大的部位(或大致中间部位)沿半径方向向断裂内侧延伸到相邻断裂收敛端一侧的断裂端点区域,单个扩容区呈宽带状分布(图 4-b)。

4 交叉复合构造 应变能高值区主要分布于断裂交叉复合部位及交叉断裂末端(图 5-a)。

矿液运移势负值区与应变能分布较为吻合,但明显地集中于交叉断裂的复合部位(图 5-b)。

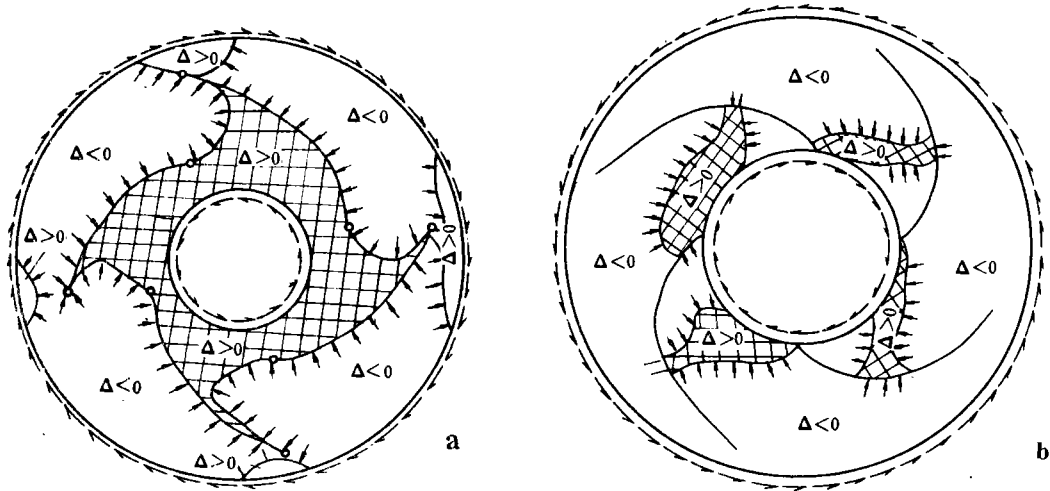


图 4 旋扭构造矿液运移方向和汇聚区图

Fig. 4 Direction of ore solution migration and concentration areas in vortex fractures

a. 张扭性; b. 压扭性

箭头为矿液流向; 网络线区为矿液流入的区域

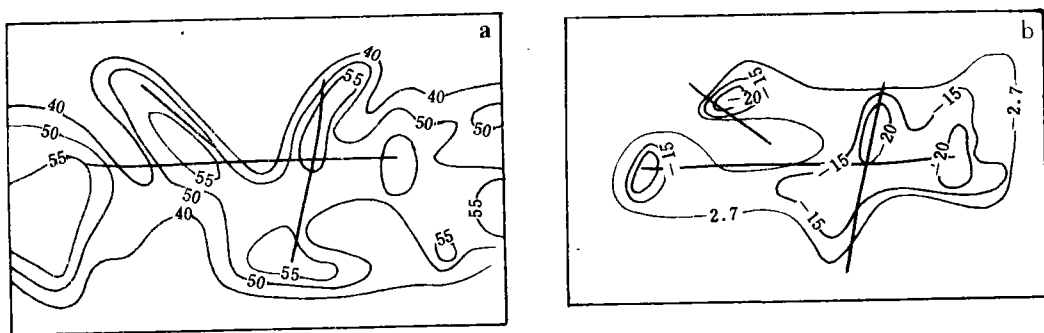


图 5 交叉复合构造的应变能(a)和运移势(b)等值线图

Fig. 5 Contour maps of strain energy (a) and migration potential (b) of intersection fractures

4 一些典型构造控矿实例

这里仅以广东曲江某铅锌矿和豫西某地多金属矿田为例,分别说明张扭性入字型构造和复合型构造的控矿规律。

广东曲江某铅锌矿是比较典型的张扭性入字型构造控矿实例(图 6)。图中两条主干断裂与分支断裂在剖面上呈入字型。矿体严格受入字型构造控制,均分布于分支断裂与主干断

裂所夹的锐角区,与实验得出的构造应力场控矿规律吻合。

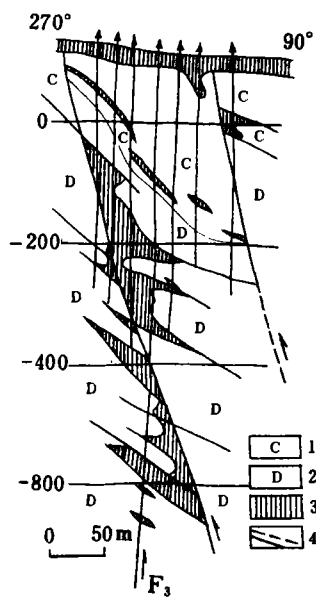


图6 广东曲江某铅锌矿 201 线剖面图
(据翟裕生,1984)

Fig. 6 Section of exploration line 201 of Pb,Zn ore-deposit in Qujiang,Guangdong Province (After Zhai Yusheng)

- 1. 石炭系;2. 泥盆系;3. 铅、锌矿体;4. 实测与推测断层

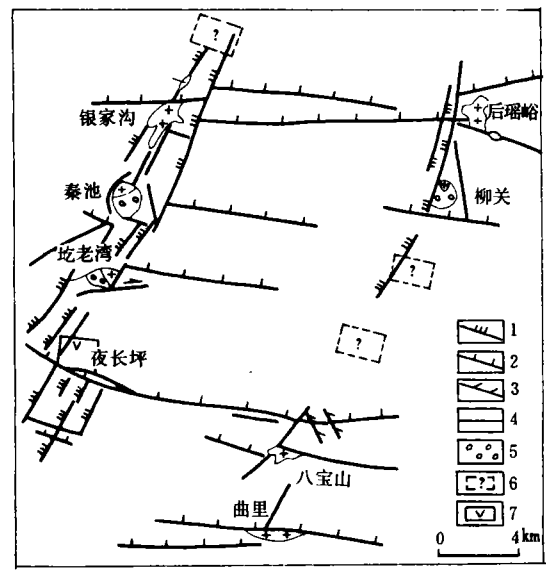


图7 豫西某地地质构造与成矿小岩体预测关系略图

Fig. 7 Skech map of geological tectonic and metallogenic prognosis in west Henan

- 1. 压扭性断层;2. 张性断层;3. 张扭性断层;4. 扭性断层;5. 火山角砾岩;6. 隐伏矿床预测区;7. 已验证的隐伏矿床预测区

豫西某地多金属矿田是比较典型的复合型构造控矿实例。图中有两条穿过东西向构造带的 NNE 向构造—岩浆岩成矿带。东带以八宝山铁铜矿田为代表;西带以银家沟黄铁矿、铅锌矿田为代表。矿床的形成无论在成因上或空间分布上,均认为与燕山期中酸性小岩体有关。EW 向构造带是早期先存的强大构造带,晚期 NNE 向新华夏系复合其上,使先存的 EW 向构造带受到强烈的改造。在二者复合部位张开的宽度较大,张开最大部位的连线沿 NNE 向构造带展布,并与两条 NNE 向构造—岩浆岩成矿带相吻合。这些张开最大的部位,也是小岩体侵入的部位。这些小岩体的长轴方向迁就东西带的方向,但各小岩体的连线则为新华夏系 NNE 向构造线方向。它们控制着与岩浆岩有关的多金属矿田的分布。

以上所讨论的实例与实验所得出的构造应力场控矿规律相吻合,从而证明了构造应力场控矿规律的普遍意义。构造应力场控矿原理及控矿规律的实验研究在我国已被广泛应用于区域矿产控矿规律的研究和预测中。例如大别山商城—罗山地区多金属矿床(赵寅震、王成金等,1986)、西秦岭南亚带碳硅泥岩型金矿(王义强、周裕文等,1991)等等,均取得了较好的经济效益和社会效益。

参 考 文 献

- 1 王成金、梁一鸿,全球构造应力场理论与应用。长春:长春出版社,1994,67—117。
- 2 杜方权、王伏泉、王开怡、吴玺虹,构造成矿与找矿。北京:地质出版社,1991,93—95。
- 3 赵寅震、王成金、梁一鸿,大别山北麓斑岩型矿床的构造控制和矿化富集规律的模拟实验。地质力学文集(6),北京:地质出版社,1986,77—87。

EXPERIMENTAL STUDY OF THE PRINAPLE AND REGA-LARITY GOVERNING TECTONIC STRESS CONTROL OF ORE DEPOSITS

Wang Chengjin Wand Yiqiang

(Changchun College of Geology)

Abstract In this peper, the authors discuss the ore-bound principle of strain energy and ore solution migration under a specific tectonic stress field that prevaiced during mineralization. It is thought that strain energy and migration potential are controlled by the sum and difference of the principal stresses($\sigma_1 + \sigma_2$), ($\sigma_1 - \sigma_2$). Photoelastic experiments of four typical structures under different boundary conditions indicate that the movement and concentration of ore-forming fluid is closely related to the tectonic stress field: the ore deposits are most likely to form where the strain energy gradient is steep or the fluid migration potential is low. Some examples of the typical structures are given.

Key words metallogenic tectonic system, metallogenic tectonic stress field, regularity of structural control of ore-deposits, photoelastic experiment

第一作者简介

王成金,男,57岁,教授,主要从事构造地质的教学与研究。通讯地址:长春地质学院。邮政编码:130061。