

# 贺兰山 NNE 向反“S”型构造的弹性力学探讨

李 天 斌

(宁夏地质矿产勘察院)

**摘 要** 贺兰山 NNE 向反“S”型构造由一系列褶皱、断裂组成,相互平行,略显斜列。构造形迹多表现为压扭性,且以压性为主,兼有反扭。对其构造特征、力学成因和成生发展史,前人仅有定性描述。本文从弹性力学角度半定量-定量来求解该问题,并给出一个数学力学模型,较圆满地解释了贺兰山 NNE 向反“S”型构造的力学成因。

**关键词** 贺兰山 NNE 向构造 反 S 型构造

## 0 引 言

贺兰山所处大地构造位置独特,不少地质学家和地学工作者对其构造特征作过论证。黄汲清(1965)等认为贺兰山、六盘山地区地层沉积厚度大,断裂、褶皱较剧烈,与长期表现稳定的鄂尔多斯拗陷区的发展截然不同,故称鄂尔多斯西缘褶皱带。张文佑(1959)从断块的观点出发,称贺兰山为贺兰台向斜,认为它在古生代时期是一个长期的拗陷带;而张伯声(1975)的地壳波浪状镶嵌构造观点认为贺兰构造带属环太平洋构造带的一部分,系由一级套一级的大小小斜阶断块组成,形成不同等级的波状构造地貌。按陈国达的地洼说,贺兰山属华夏期(中生代)南北地洼区贺兰地洼系。李四光(1950-1954)认为贺兰山属祁吕贺山字型构造的脊柱部分。70年代宁夏地质局在贺兰山区开展了 1:20 万石嘴山市幅、阿拉善左旗幅、巴伦别立幅、银川市幅等区调工作,对其地质构造进行了全面系统的调查研究,查明整个贺兰山区主要由一系列 NNE 向的褶皱、断裂组成,构造形迹多表现为压扭性(反扭),略具斜列,据此将其归属新华夏系,并提出构成祁吕贺山字型构造的贺兰脊柱何在?

80年代中期到 90年代,宁夏地矿局、西安地质学院在贺兰山开展了 1:5 万区调工作,取得许多重要进展,进一步查明了贺兰山的构造形迹和构造格架,重塑其地质发展史。

以上是迄今为止,人们从不同的角度或用不同的理论方法对贺兰山区构造特征研究的概述,虽然也给出了一些定性的解释,但都没有从半定量-定量的角度来解释贺兰山区 NNE 向构造的力学成因及成生发展史。本文力图从弹性力学的角度来探讨此问题。

## 1 区域地质概况

贺兰山 NNE 向构造带沿贺兰山山体展布,总体走向  $30^{\circ}$ ,呈南小北大的楔形体(图 1)。它

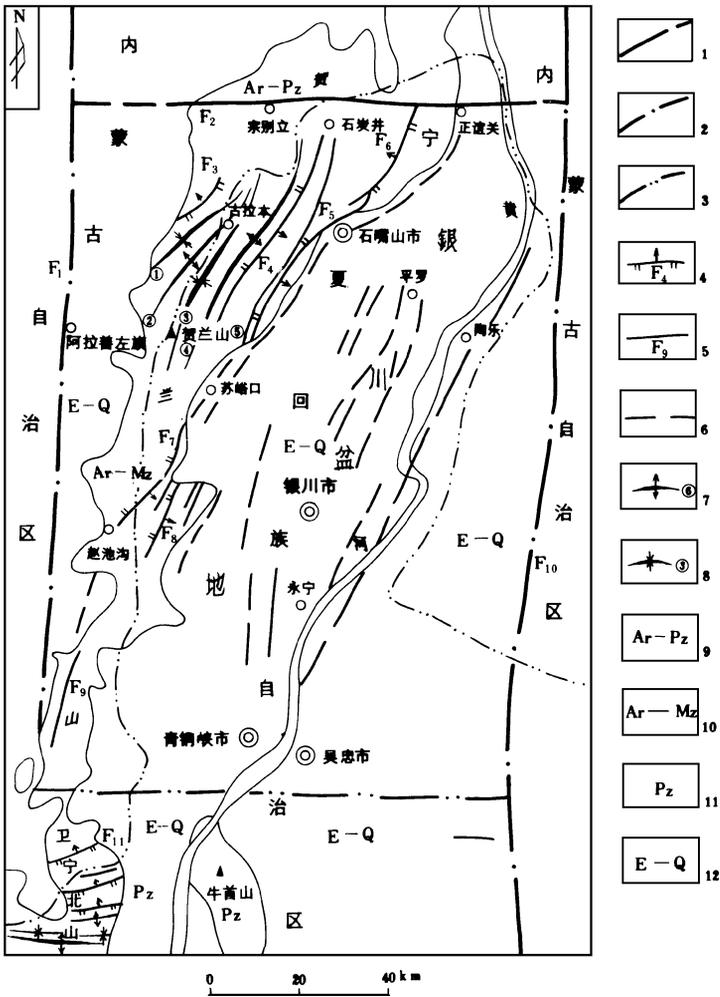


图 1 贺兰山 NNE向构造及邻区构造展布纲要图

Fig. 1 Structural outline map of Helanshan NNE trending reversed "S" structural belt

1. 大断裂及编号; 2. 隐伏深大断裂及编号; 3. 推测隐伏断裂; 4. 逆断层及编号; 5. 性质不明断层及编号; 6. 新生代断裂; 7. 背斜及编号; 8. 向斜及编号; 9. 太古界—古生界; 10. 太古界—中生界; 11. 古生界; 12. 第三系—第四系

影响了太古代、元古代以来至白垩纪的所有地层,主要形成于燕山期。第三纪—第四纪仍有活动,具多期性且构造活动强烈,形变大,形迹复杂。以苏峪口为界,可分为北段断褶带和南段断裂带。北段的构造形迹主要为二叠系、三叠系及侏罗系组成的 NE—NNE向褶皱,由北西向南东有北寺—红石崖向斜①、大岭—庙前梁子沟背斜②、白芨芨沟—汝箕沟—响水沟向斜③、苏峪口—神水庙背斜④、黄草滩倒转复式向斜⑤。褶皱一般宽约 5km,长可达 35—50km;褶皱轴两端大都有向南、向北偏转之势,在平面上呈舒缓波状的反“S”型展布。由西向东,褶皱逐渐紧闭,两翼地层由开阔平缓渐转陡立,甚至倒转,与褶皱相伴随发育两条相互平行的逆冲断裂,兰圈—老树湾断裂 (F<sub>5</sub>)及南沟—汝箕沟断裂 (F<sub>4</sub>),走向 35°—50°,呈反“S”型延伸约 40km,断面

倾向 SE, 倾角  $50^{\circ}-80^{\circ}$ ; 断层在平、剖面上都表现为舒缓波状, 挤压强烈, 切割了太古界贺兰山群至三叠系白茆茆沟群的所有地层, 并显示反扭特征, 但扭距不大。贺兰山南段由一系列走向  $25^{\circ}-35^{\circ}$  的冲断裂 ( $F_7-F_9$ ) 组成。断裂相互平行, 大多倾向 SE, 倾角  $65^{\circ}-85^{\circ}$ , 挤压破碎带发育, 兼有反扭特征。

需要指出的是, 贺兰山东邻的银川盆地, 在燕山期同为贺兰山 NNE 向褶断构造带<sup>[1,2]</sup>, 喜马拉雅期始成为断陷盆地, 出露地表的新生代断裂亦受基底 NNE 向断裂影响, 构成现今构造变形图像。

综上, 贺兰山 NNE 向构造带单个构造形迹呈反“S”型展布, 组合形态略呈多字型, 平行斜列但重叠大, 虽有反扭特征显示, 但较大的水平扭动未见。显然造成这种构造变形图像不可能由 SN 向的纯剪切力偶作用形成, 也不可能单独由 NW-SE 向的挤压力形成。因此, 它的成生必须具备特殊的边界条件及受力条件, 即特定的构造应力场。

## 2 受力边界条件

从大区域看, 可将所讨论的地块近似地看作为一个矩形块体 ABCD (图 2), 燕山运动时期遭受 EW 向的挤压力及 SN 向力偶的作用, 形成了现今贺兰山 NNE 向构造带。

### 2.1 东部受力边界条件

银川盆地东部存在一条纵贯宁夏南北的深大断裂: 桌子山东麓—平凉东隐伏深大断裂  $F_{10}$ 。它是鄂尔多斯西缘拗陷与鄂尔多斯台拗的分界线<sup>[1]</sup>。据物探资料, 它为区域磁场明显的分区界线和重力密集梯度带, 已切断陕甘宁盆地的太古界基底。断裂西侧为上古生界陆梁, 且一直处于上升状态; 东侧为下降区, 尤以中生代最为明显。该断裂成生时期较早, 总体呈 SN 向, 构成所讨论地块的东部边界, 相当于图 2 中的 CD 边。由于燕山期太平洋板块向北部亚洲大陆俯冲, 其作用力传递到研究区时, 桌子山东麓—平凉东隐伏深大断裂作为构造边界, 产生一个由东向西的推挤作用力  $P_2$  及一个向北的剪切力  $Q_2$ ; 因亚洲

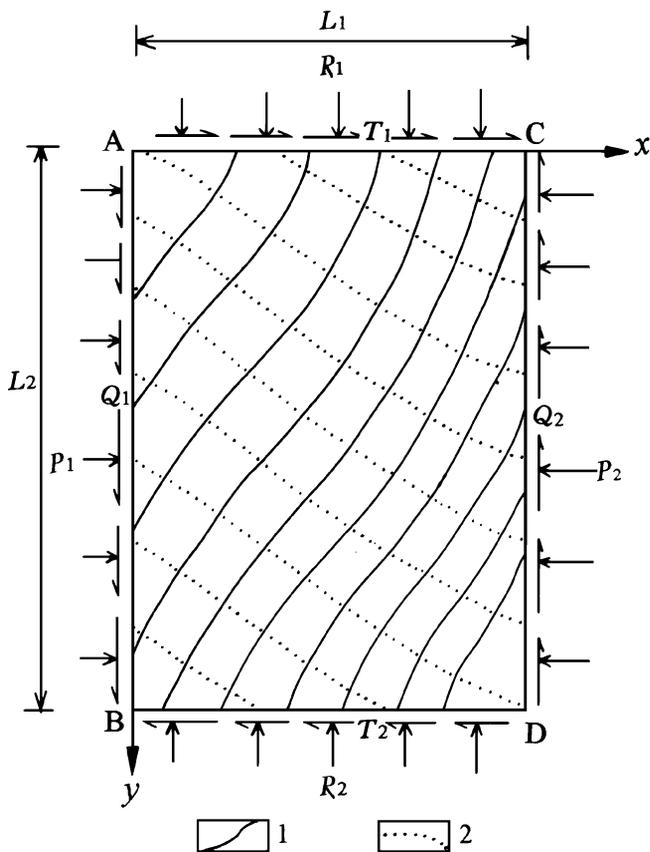


图 2 贺兰山 NNE 向构造受力边界条件及主应力轨迹线图

Fig. 2 Forces applying on the boundaries and trajectory of the principal stress

1. 最大主应力轨迹线; 2. 最小主应力轨迹线

大陆由北向南不断推移,故可设北部剪切力大于南部,并作线性分布,  $Q_2 = Q - K_2 y$  ( $Q$ 为某一常数,  $K_2$ 为相关系数),建立图 2所示的直角坐标系,则受力边界条件为:  $T=0^\circ, x=L_1, F_x = -P_2, F_y = -Q_2 = -Q + K_2 y$

## 2.2 西部受力边界条件

贺兰山西缘阿拉善左旗存在一隐伏深大断裂:巴音浩特隐伏断裂  $F_1$  它是阿拉善地块与鄂尔多斯西缘拗陷的分界线,控制了这个地区自寒武纪以来的沉积建造和海陆分异<sup>①</sup>。该断裂呈 SN 向,南延经马夫峡子东,中宁西<sup>②</sup>,断距达 1000m,构成所讨论地块的西部边界,相当于图 2中的 AB 边。作用于此边界上的力有 EW 向的挤压力  $P_1$  以阻挡整个块体向西位移,由于来自东边的力是主导力,  $P_1 < P_2$ ; 同时还有南北向的剪切力  $Q_1$  与东部  $Q_2$  构成一对力偶,故  $Q_1 = Q' - K_1 y$  ( $Q'$ 为常数,  $K_1$ 为相关系数)。由上述,西部受力边界条件为:  $T=180^\circ, x=0, F_x = P_1, F_y = Q_1 = Q' - K_1 y$

## 2.3 北部受力边界条件

贺兰山 NNE 向构造的北部边界为宗别立—正谊关 EW 向大断裂  $F_2$  它切割了太古界贺兰山群至古生界地层,控制和影响了南、北两侧的地层和构造格局。该断裂成生早(加里东期或更早)且有多期活动,燕山期顺扭特征明显。由于它的阻挡作用,前述东、西两侧边界的作用力就不能使所讨论的地块向北移动,因此它给地块一个 SN 向的约束反力  $R_1$ ; 另外,为了使地块不发生整体转动,在北部边界 AC 及南部边界 BD 必须存在一对反力偶矩来抵抗由于东部边界 CD 及西部边界 AB 一对力偶矩 ( $Q_1, Q_2$ ) 的作用,因此, AC 边沿  $x$  轴方向还存在剪切约束反力  $T_1$ 。综上, AC 边的受力边界条件为:  $T=270^\circ, y=0, F_x = T_1, F_y = R_1$

## 2.4 南部受力边界条件

贺兰山南部卫宁北山一带早期形成(最早可追溯到寒武纪)的卫宁区域 EW 向构造带,由一系列褶皱及冲断裂 ( $F_3$  等) 组成,断裂多具顺扭特征<sup>[2]</sup>。该带过黄河向东被贺兰褶皱所挡,至陕北盆地,该构造形迹虽被掩盖,但仍在相当的纬度上出现一个引人注目的狭长分水岭,显示该带的存在<sup>[3]</sup>。该带为本文研究区的南界,沿此边界产生一个向北的约束反力  $R_2$  和抵抗地块整体转动而产生的 EW 向剪切约束反力(顺扭)  $T_2$ 。故 BD 边的受力边界条件为:  $T=90^\circ, y=L_2, F_x = -T_2, F_y = -R_2$

# 3 弹性力学解

为了求得满足以上地块各边界受力条件的应力解,首先应拟定一个应力函数<sup>[4]</sup>:

$$h = ax^2 + by^2 + cxy + dxy^2 \quad (1)$$

$a, b, c, d$  为待定系数。显然  $h$  满足双调和方程:

$$\left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] \left[ \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right] h = \left[ \frac{\partial^4}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4}{\partial y^4} \right] h = 0$$

则

$$\epsilon_x = \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 2b + 2dx \quad (2)$$

① 宁夏地质局研究队(地质力学编图组),宁夏 1:500000 构造体系图说明书,1980

② 中国科学院遥感应用所,宁夏大坝、分守岭电厂邻近区断裂构造及活动迹象分析图,1982

$$\epsilon_y = \frac{\partial h}{\partial x^2} = 2a \quad (3)$$

$$f_{xy} = -\frac{\partial h}{\partial x \partial y} - Xy - Yx = -c - 2dy - Xy - Yx \quad (4)$$

式中,  $X$ 、 $Y$ 是地块的体力。为方便计,令体力  $X=0$ 、 $Y=0$ (从后面的分析结果将看出  $X$ 、 $Y$ 都不等于零时,其结论也不会发生实质性的变化,只是数值大小略有变动), (4)式可简化为:

$$f_{xy} = -c - 2dy \quad (5)$$

AB边界受力条件有:

$$\begin{cases} \epsilon_x \cos 180^\circ + f_{xy} \sin 180^\circ = F_x = P_1 \\ f_{xy} \cos 180^\circ + \epsilon_y \sin 180^\circ = F_y = Q_1 = Q' - K_1 y \end{cases}$$

将 (2) (3) (5)式代入上两式整理得:

$$b = -\frac{P_1}{2}, c = Q', d = -\frac{K_1}{2}$$

CD边界受力条件有:

$$\begin{cases} \epsilon_x \cos 0^\circ + f_{xy} \sin 0^\circ = F_x = -P_2 \\ f_{xy} \cos 0^\circ + \epsilon_y \sin 0^\circ = F_y = -Q_2 = -Q + K_2 y \end{cases}$$

整理得:

$$d = -\frac{P_2 - P_1}{2L_1}, c = Q = Q', K_2 = K_1 = \frac{P_2 - P_1}{L_1}$$

AC边界受力条件有:

$$\begin{cases} \epsilon_x \cos 270^\circ + f_{xy} \sin 270^\circ = F_x = T_1 \\ f_{xy} \cos 270^\circ + \epsilon_y \sin 270^\circ = F_y = R_1 \end{cases}$$

整理得:

$$T_1 = c = Q, a = -\frac{1}{2}R_1$$

BD边界受力条件有:

$$\begin{cases} \epsilon_x \cos 90^\circ + f_{xy} \sin 90^\circ = F_x = -T_2 \\ f_{xy} \cos 90^\circ + \epsilon_y \sin 90^\circ = F_y = -R_2 \end{cases}$$

整理得:

$$T_2 = c + 2dL_2 = Q - \frac{L_2}{L_1}(P_2 - P_1), R_2 = -2a = R_1$$

最后将  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 代入 (1) (2) (3) (5)各式求得应力函数和应力解分别为:

$$h = -\frac{1}{2}R_1 x^2 - \frac{1}{2}P_1 y^2 + Qxy - \frac{P_2 - P_1}{2L_1}xy$$

$$\epsilon_x = -P_1 - \frac{P_2 - P_1}{L_1}x \quad (6)$$

$$\epsilon_y = -R_1 \quad (7)$$

$$f_{xy} = -Q + \frac{P_2 - P_1}{L_1}y \quad (8)$$

将 (6) (7) (8)式代回上述各受力边界条件检验,各边界条件都能满足,故 (6) (7) (8)式就是贺兰山 NNE向构造带问题的应力解。

由此得主应力为:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{-P_1 - \frac{P_2 - P_1}{L_1}x - R_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{-P_1 - \frac{P_2 - P_1}{L_1}x + R_1}{2}\right)^2 + \left(-Q + \frac{P_2 - P_1}{L_1}y\right)^2} \quad (9)$$

主方向为

$$\theta = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} = \frac{1}{2} \arctg \frac{-2Q + 2\frac{P_2 - P_1}{L_1}y}{-P_1 - \frac{P_2 - P_1}{L_1}x + R_1} \quad (10)$$

由(10)式,  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $Q$ 、 $R_1$ 取相应数字,就可求出各点的主方向,由此可作出主应力轨迹图(图2)。

图2中实线是最大主应力轨迹,虚线代表最小主应力(最大压应力)方向。如果出现压性结构面,则其走向应与最大压应力方向垂直,也即与最大主应力轨迹线一致。从该图形可看出,实线的展布与贺兰山NNE向构造的形象基本一致。分析一下这个图形及(9)、(10)两式,可以得到如下几点认识:

(1)  $x$ 、 $y$ 越小(西北角), $\theta$ 就越大,最大主应力轨迹线就越偏离南北向(靠近东西);随着 $x$ 或 $y$ 的不断增加, $\theta$ 逐渐减小,最大主应力轨迹线向南、北偏转。这说明越往地块的西北,压性或压扭性构造线就越偏离SN向,如小松山、古拉本南一带的NE向断裂和褶皱;越往东南,压性或压扭性构造线越接近SN向,如苏峪口一带。

(2)由(10)式,挤压力与剪切力的变化将影响主方向 $\theta$ 的变化,即挤压力越大,剪切力越小, $\theta$ 就变小,最大主应力轨迹线更偏向南北;反之 $\theta$ 就变大,最大主应力轨迹线就偏离南北。用此模型可较好地解释贺兰山NNE向反“S”型构造。燕山运动初期,地块东、西边界受剪切力较强,相对来说,挤压力较弱, $\theta$ 就较大,故形成的压扭性构造线偏离SN而呈NE向;但由于本地块所处的特殊位置及地球物理特性的变化,该地块受力不可能长期以剪切力为主,代之而起的是挤压力为主,剪切力占次要地位(据国际地球动力学计划研究资料<sup>[5]</sup>,晚近时期东亚太平洋地区完全受近EW向的挤压作用),因此 $\theta$ 变小,主应力轨迹线更靠近SN方向,而此方向正是压性构造发育的方向,故这时的压性构造线在原来NE向构造线的基础上向两端拓展时,方向更接近NNE-SN向,总体形态构成反“S”型构造。这与实际情况极其相似,说明贺兰山NNE向反“S”型构造不是一蹴而就的,而是在一期构造运动中多次逐步发展起来的。

(3)该模型显示NNE向构造斜列不明显,且大的反扭错动不易见,仅于反“S”型构造的中段反扭较明显,往南、北两端多以压性为主,压扭性次之。这些恰与贺兰山NNE向构造的实际情况相同。

(4)由应力解(6)式可知,东部边界的挤压应力最大,向西渐小,西部边界为最小。表现在图2中最大主应力轨迹线由西向东逐渐变密。这就是前述贺兰山NNE向构造尤其是褶皱构造有由西向东逐渐加强之势的原因。另外由(7)、(8)两式可得出南、北边界不仅有SN向的挤压应力,而且还存在一对顺扭力偶矩,且北部剪应力 $\tau_{xy}$ 数值大于南边界 $\tau_{xy}$ 值,进一步佐证了宗别立—正谊关断裂及卫宁区域EW向构造具顺扭特征,且前者顺扭特征更明显。

由应力解(6)、(7)、(8)式还可求出应变及位移函数(涉及到解偏微分方程,具体推导较繁,

此处仅列结果)

应变函数为

$$\begin{aligned} X_x &= \frac{1}{E}(\epsilon_x - \nu \epsilon_y) = -\frac{1}{E} \left[ P_1 - \nu R_1 + \frac{P_2 - P_1}{L_1} x \right] \\ X_y &= \frac{1}{E}(\epsilon_y - \nu \epsilon_x) = -\frac{1}{E} \left[ R_1 - \nu P_1 - \nu \frac{P_2 - P_1}{L_1} x \right] \\ V_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \epsilon_{xy} = \frac{2(1+\nu)}{E} \left[ -Q + \frac{P_2 - P_1}{L_1} y \right] \end{aligned}$$

又由  $X_x = \frac{\partial U}{\partial x}$ ,  $X_y = \frac{\partial V}{\partial y}$ ,  $V_{xy} = \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial y}$  (设在原点处位移  $U|_{x=y=0} = 0$ ,  $V|_{x=y=0} = 0$ ,  $\frac{\partial V}{\partial x}|_{x=y=0} = 0$ )

求得位移函数为:

$$\begin{cases} U = -\frac{1}{E} \left[ P_1 x - \nu R_1 x + \frac{P_2 - P_1}{2L_1} x^2 \right] - \frac{2(1+\nu)}{E} Q y + \frac{2+\nu}{E} \cdot \frac{P_2 - P_1}{2L_1} y^2 \\ V = -\frac{1}{E} \left[ R_1 - \nu P_1 - \nu \frac{P_2 - P_1}{L_1} x \right] y \end{cases}$$

上面各式中  $E$   $\nu$  分别代表杨氏模量和泊松比。

在上述应变及位移函数中,由于所讨论的地块是受 EW 向的挤压力,因而应把 SN 向的约束反力  $R_1$  视为较小,所以  $P_1 - \nu R_1$  ( $\nu$  在一般岩石中小于 0.5) 应为正数。这样由西向东沿  $x$  轴方向的应变  $X_x$  和位移  $U$  都随  $x$  的增加而增大(方向相反、压缩),这就是贺兰山 NNE 向褶皱由西向东逐渐紧密甚至倒转的原因。

上面给出了贺兰山 NNE 向构造数学力学模型,比较圆满地解释了贺兰山 NNE 向构造的力学成因问题。推而广之,它也适用于中国东部整个新华夏系 NNE 向构造,特别是反“S”型构造的成因机制解。只要将南、北边界换成巨型纬向构造带;东、西边界变为经向构造带即可,有兴趣的同志可作进一步研究。

上述分析表明,解任何一个弹性力学问题,各应力分量所要满足的基本方程是一样的,解的差别都是由边界条件和受力情况不同而引起。因此,在处理一个具体问题时,首先要把边界条件和受力情况分析清楚,选定坐标系,列出受力边界条件,拟定一个满足双调和方程的应力函数,最后求出满足受力边界条件的应力解。显然,用这种应力函数法求解一般地质构造问题是比较复杂的,因而近年来运用计算机来求解弹性力学问题的有限单元法得以广泛应用,取得了极大进展,但该方法前期准备工作亦相当繁琐。两种方法各有利弊,应视具体情况而定。

## 参 考 文 献

- 1 霍福臣等,宁夏地质概论 北京:科学出版社,1989
- 2 宁夏区域地质调查队, J- 48- X X II 中卫幅区域地质调查报告. 1976
- 3 邓乃恭,中国几个重要半隐伏构造带. 国际交流地质学术论文集(1)(构造地质,地质力学)北京:地质出版社,1979
- 4 王仁等,固体力学基础. 北京:地质出版社,1979
- 5 彭一民,对新华夏系及其应力场的讨论. 地质论评,1982,28(4)

# ELASTIC MECHANICS APPROACH OF HELANSHAN NNE TRENDING REVERSED S-SHAPED STRUCTURE

Li Tianbin

*(Prospecting institute of Geology and Mineral Resources of Ningxia, Yinchuan)*

**Abstract** The reversed “S”-shaped structure consists of series of NNE-trending folds and faults, which are mutually parallel and en echelon arranged. The component structures are mostly expressed as compress-shear elements, with sinistral motion predominated. They were only qualitatively described previously. This article, however, gives a mathematical-mechanical model for its formation.

**Key words** Helanshan NNE trending structure, reversed s-shaped structure

## 作 者 简 介

李天斌,男,1962年生.现为宁夏地质矿产勘察院总工程师.高级工程师,1982年毕业于成都地质学院找矿系地质力学专业.主要从事区域地质矿产调查及地层构造等基础地质研究.通讯地址:银川市胜利南街187号宁夏地质矿产勘察院.邮政编码:750004