

# 鲜水河断裂带古构造残余应力随 深度分布及带中残余能量\*

安 欧 高国宝

(国家地震局地壳应力研究所)

## 摘 要

本文介绍了测量岩体中三维区域残余应力和嵌镶残余应力及其弹性应变能密度的方法,并给出了鲜水河断裂带上的5个大口径深钻孔岩芯的具体测量结果,分析了鲜水河断裂带古构造残余应力及残余应变能密度沿深度的分布规律。结果表明,残余应力及残余弹性应变能密度均随深度的增加而增大。本文还估算了该断裂带岩体中储存的残余弹性应变能的量级。

**关键词:**残余应力;鲜水河断裂带;残余能量

世界上不少国家都在地表浅层,以岩体各向同性弹性理论为基础,用多种方法进行了岩体水平二维区域残余应力测量<sup>[1]-[10]</sup>。作者认为,除了研究古构造残余应力场及其应变能密度场的水平分布规律外,还需要研究其随深度的变化规律。由于古构造残余应力场是微观残留自平衡应力系统,只要岩石结构不变,其便在岩体中被长期保留<sup>[11]</sup>。因此,可通过测量钻孔岩芯中的两种残余应力及其应变能密度随深度的分布来完成。

作者在鲜水河断裂带上选择测区,进行了三维区域残余应力场应变能密度场水平分布的测量。在此基础上,又根据岩体正交异性弹性理论,用X射线衍射法,在该测区选取了5个大口径深钻孔的岩芯,在不同深度取样,测量了三维区域残余应力和嵌镶残余应力,计算了两种残余弹性应变能密度,分析了它们随深度的分布规律,并估算了该断裂带岩体中现今所储存的古构造残余弹性应变能量。本文介绍了主要研究结果。

## 二、测量原理和方法

从岩芯中部沿水平方向切出直径为5厘米的圆板形测样,其圆形表面为主平面(1, 2)。于是,测样表层的法向区域残余应力 $\sigma_3$ 便被释放掉,由于测量表面的尺寸远大于测样侧面法向释放深度,因此,区域残余主应力 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 在测量表面中部仍然保留<sup>[11]</sup>,因而在此表面法向方向上由于去掉岩芯上半部而发生的弹性应变 $e_3$ 只是由于 $\sigma_1$ 和 $\sigma_2$ 作用所引起的法向泊松效应。于是,测量 $e_3$ 和与法向成 $30^\circ$ 角并在测量表面的投影沿反时针方向依次相间 $60^\circ$ 的三个方向的正应变 $e_{a30^\circ}$ 、 $e_{b30^\circ}$ 和 $e_{c30^\circ}$ ,令这三个投影方向上的正应变为 $e_a$ 、 $e_b$ 和 $e_c$ ,则可得出平行测量表面的区域残余主应变 $e_1$ 、 $e_2$ 及 $e_a$ 与主轴1的交角 $\alpha$ 的表示式<sup>[12]</sup>。

再将岩芯被切去的上半部铅直切开,沿切面切取铅直测样。测量此测样表面的法向正

应变  $e_3'$  及在过此法向的铅直面上与此法向成  $30^\circ$  角方向的正应变  $e_{a30'}$ , 其在铅直测量表面上投影方向的正应变为  $e_3'$ 。因  $e_3'$  在铅直方向, 而过测点的三维应变状态的铅直区域残余主应变为  $e_3$ , 故由应变几何关系可得其用  $e_{a30'}$  和  $e_3'$  的表示式<sup>[12]</sup>。

在正交异性岩体中, 由于水平测样表面法向的区域残余主应力  $\sigma_3 = 0$ , 选测其中结构呈高级轴对称的矿物中的对称轴沿主轴 3 方向分布的晶粒, 则此测样中的弹性模量  $E_1 = E_2 = E$ , 泊松比  $\nu_{12} = \nu_{21} = \nu$ ,  $\nu_{13} = \nu_{23} = \nu$ 。于是, 将  $e_1$  和  $e_2$  的表示式代入水平测样平面应力状态的物性方程组, 可得  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$ <sup>[12]</sup>。

令铅直测样表面上的主轴为  $1'$  和  $2'$ , 表面法向的主轴为  $3'$ , 并使  $1'$  与 1 重合,  $2'$  与 3 重合。测量对称轴分布在主轴  $3'$  方向的晶粒, 于是得到其表面方向的  $E' = E$ ,  $\nu' = \nu$ 。因  $e_3'$  在铅直方向, 则  $\alpha' = 90^\circ$ , 于是  $e_3' = e_2' = e_3$ ,  $\sigma_2' = \sigma_3$ ,  $\sigma_1' = \sigma_1$ 。因之, 将  $\sigma_1$  和  $e_3$  代入铅直测样的物性方程组, 可得  $\sigma_3$  的表示式<sup>[12]</sup>。

由  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 、 $e_1$ 、 $e_2$ 、和  $e_3$ , 可算得测点岩体中区域残余弹性应变能密度  $\epsilon$ 。

设测点嵌镶残余应变的平均值为  $e_s$ , 则嵌镶残余应力

$$\sigma_s = Ee_s \quad (1)$$

嵌镶残余弹性应变能密度

$$\epsilon_s = \frac{1}{2} Ee_s^2 \quad (2)$$

上述各方程中的应变都是弹性应变, 而且是绝对值。因之, 必须测得岩体中的绝对残余弹性应变, 才能满足这些方程组的要求。本文用 X 射线衍射技术, 以经高温退火后矿物应变为零的状态作起算点。测量矿物晶面系法向的弹性形变。将 X 射线直接射入岩样中进行原态测量, 无须预加或恢复载荷, 也不需其他传感器。

测量仪器为用于晶体结构分析的 X 射线衍射测角仪。用波长为  $\lambda$  的单色射线束, 以掠射角  $\theta$  入射到所选测矿物的晶面系上, 便可在与晶面系法线对称的方向接收到反射线。由布拉格方程可得此晶面系的晶面间距  $d$ 。由于所选测晶面系的  $d$  一定, 故选定波长  $\lambda$  后, 掠射角  $\theta$  也一定。因而, 只有在此方位才能测到反射线, 于是从测角仪得到  $\theta$  值。由  $\theta$  可算得  $d$ 。以选测矿物的晶面系中经高温退火后无残余应变的晶面间距  $d_0$  或其相应的掠射角  $\theta_0$  作为起始状态, 求绝对残余应变, 由各方位的绝对残余应变求相应的残余应力。

测量中所用的  $\lambda$ 、 $n$  不变, 测样中选测矿物晶粒的  $d$  相对其  $d_0$  的变化量在  $10^{-4}$  纳米以下, 故将布拉格方程微分, 得晶面系法向正应变  $e$ 。设水平测样表面法向的晶面间距为  $d_{90'}$ , 相应的掠射角  $\theta_{90'}$ ; 设与表面法线成  $30^\circ$  角并在测量表面上的投影呈反时针排列、依次相间  $60^\circ$  的三个方向的晶面间距为  $d_{a30'}$ 、 $d_{b30'}$  和  $d_{c30'}$ , 相应的掠射角为  $\theta_{a30'}$ 、 $\theta_{b30'}$  和  $\theta_{c30'}$ 。设在同一测点铅直测样表面法向晶面间距为  $d_{90'}$  和在铅直面上与法线成  $30^\circ$  角的方向的晶面间距为  $d_{a30'}$ , 相应的掠射角为  $\theta_{90'}$  和  $\theta_{a30'}$ 。将它们各自代入  $e$  的表示式, 得到晶面系法线在各相应方向的正应变的表示式, 再将它们代入  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  和  $\alpha$  的表示式, 得到

$$e_1 = \text{ctg } \theta_0 \left[ -\frac{4}{3} (\theta_{a30'} + \theta_{b30'} + \theta_{c30'}) + 3\theta_{90'} + \theta_0 + \frac{4\sqrt{2}}{3} \cdot \sqrt{(\theta_{a30'} - \theta_{b30'})^2 + (\theta_{b30'} - \theta_{c30'})^2 + (\theta_{c30'} - \theta_{a30'})^2} \right];$$

$$\begin{aligned}
 e_2 &= ctg \theta_0 \left[ -\frac{4}{3}(\theta_{a30^\circ} + \theta_{b30^\circ} + \theta_{c30^\circ}) + 3\theta_{90^\circ} + \theta_0 - \frac{4\sqrt{2}}{3} \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot \sqrt{(\theta_{a30^\circ} - \theta_{b30^\circ})^2 + (\theta_{b30^\circ} - \theta_{c30^\circ})^2 + (\theta_{c30^\circ} - \theta_{a30^\circ})^2} \right] \\
 e_3 &= ctg \theta_0 (3\theta_{90^\circ}^* - 4\theta_{a30^\circ}^* + \theta_0) \quad ; \\
 \sigma_1 &= \frac{Ectg \theta_0}{1+\nu} \left[ \frac{4}{3}(\theta_{a30^\circ} + \theta_{b30^\circ} + \theta_{c30^\circ} - 3\theta_0) + \frac{1-3\nu}{\nu}(\theta_{90^\circ} - \theta_0) + \frac{4\sqrt{2}}{3} \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot \sqrt{(\theta_{a30^\circ} - \theta_{b30^\circ})^2 + (\theta_{b30^\circ} - \theta_{c30^\circ})^2 + (\theta_{c30^\circ} - \theta_{a30^\circ})^2} \right] \quad ; \\
 \sigma_2 &= \frac{Ectg \theta_0}{1+\nu} \left[ \frac{4}{3}(\theta_{a30^\circ} + \theta_{b30^\circ} + \theta_{c30^\circ} - 3\theta_0) + \frac{1-3\nu}{\nu}(\theta_{90^\circ} - \theta_0) - \frac{4\sqrt{2}}{3} \cdot \right. \\
 &\quad \left. \cdot \sqrt{(\theta_{a30^\circ} - \theta_{b30^\circ})^2 + (\theta_{b30^\circ} - \theta_{c30^\circ})^2 + (\theta_{c30^\circ} - \theta_{a30^\circ})^2} \right] \quad ; \\
 \sigma_3 &= Ectg \theta_0 \left\{ 3\theta_{90^\circ}^* - 4\theta_{a30^\circ}^* + \theta_0 + \frac{\nu}{1+\nu} \left[ \frac{4}{3}(\theta_{a30^\circ} + \theta_{b30^\circ} + \theta_{c30^\circ} - 3\theta_0) + \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. + \frac{1-3\nu}{\nu}(\theta_{90^\circ} - \theta_0) + \frac{4\sqrt{2}}{3} \sqrt{(\theta_{a30^\circ} - \theta_{b30^\circ})^2 + (\theta_{b30^\circ} - \theta_{c30^\circ})^2 + (\theta_{c30^\circ} - \theta_{a30^\circ})^2} \right] \right\} \quad ; \\
 \alpha &= \frac{1}{2} arctg \frac{\sqrt{3}(\theta_{b30^\circ} - \theta_{c30^\circ})}{2\theta_{a30^\circ} - \theta_{b30^\circ} - \theta_{c30^\circ}} \quad .
 \end{aligned}$$

用测角仪测得  $\theta_{90^\circ}$ 、 $\theta_{a30^\circ}$ 、 $\theta_{b30^\circ}$ 、 $\theta_{c30^\circ}$ 、 $\theta_{90^\circ}^*$ 、 $\theta_{a30^\circ}^*$  和  $\theta_0$ ，将其数值代入上述方程组，算得  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 、 $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$  和  $\alpha$ ，并可再由它们计算  $\varepsilon$ 。

设所选测晶面系的衍射线强度曲线峰值之半处所对应的掠射角范围为  $\Delta\theta'$ ，同一晶面系经高温退火后无嵌镶残余应力的衍射线强度曲线峰值之半处所对应的掠射角范围为  $\Delta\theta$ ，则  $\Delta\theta = \Delta\theta' - \Delta\theta_0$ 。用  $\Delta\theta$  替换  $e$  表示式中的  $(\theta - \theta_0)$ ，则(1)、(2)式变为

$$\begin{aligned}
 \sigma_s &= -E(\Delta\theta' - \Delta\theta_0)ctg \theta_0; \\
 \sigma_s &= \frac{1}{2}E(\Delta\theta' - \Delta\theta_0)^2ctg^2 \theta_0.
 \end{aligned}$$

### 三、测量设计和结果

在鲜水河断裂带测区内，有关单位已打了几百个钻孔。为减除或减小钻孔效应对岩芯中残余应力测量的影响，从这些钻孔中选取了5个108—130毫米的大口径深钻孔岩芯，沿深度相间100米设一个测点，在各深度处采样。从各测点所采取岩芯的中间部分切取水平和铅直测样。

由于岩样中石英或方解石的含量较高，故选测了这两种矿物晶体中垂直其对称轴的晶面间距较大的(001)晶面系。选用  $CrK\alpha$  系射线，其  $\lambda = 0.229092$  纳米。

各方向掠射角及石英和方解石的弹性参量用日本的 GAB-A 型晶体结构分析 X 射线衍射测角仪测得。计算所用的石英或方解石的弹性参量，用自制的加载装置在此 X 射线衍射测角仪上测得。

所测5个钻孔的位置及编号示于图1中。从各钻孔测得的三维区域残余应力和嵌镶

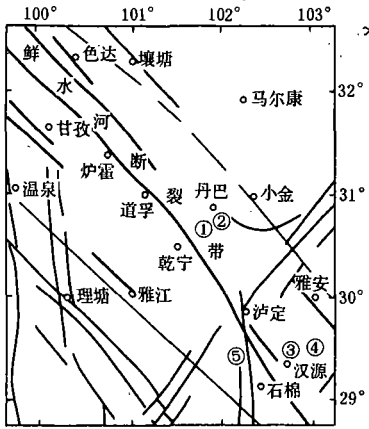


图1 测区内残余应力测量钻孔的位置和编号

Fig. 1 Locations and numbers of boreholes to be used to measuring residual stresses in the measuring region

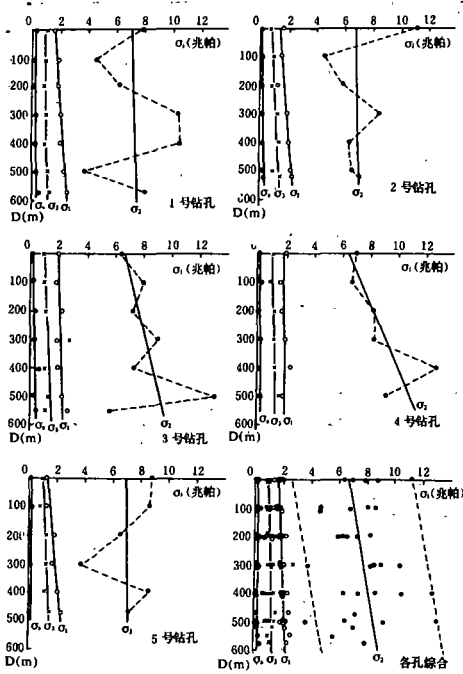


图2 测区内各测孔的三维区域残余主应力和嵌镶残余应力随深度分布

Fig. 2 The measuring results of three dimensional areal-residual stresses and mosaic-residual stresses distributing with depth in each measuring borehole in the measuring region

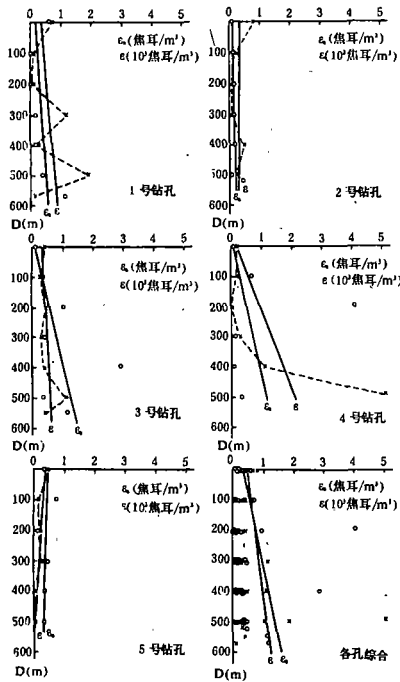


图3 测区内各测孔的区域和嵌镶残余弹性应变能密度随深度分布

Fig. 3 The measuring results of areal-residual and mosaic-residual elastic strain energy densities distributing with depth in each measuring borehole in the measuring region

残余应力随深度的分布图2。三维区域残余应力都是压性的，水平最大区域残余主压应力达13.0兆帕，最小残余主压应力达2.6兆帕，铅直区域残余主压应力达2.8兆帕，嵌镶残余应力最高为0.7兆帕。各测点主应力值的关系为 $\sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_1 > \alpha$ 。

各测孔的区域和嵌镶残余弹性应变能密度随深度的分布见图3。区域残余弹性应变能密度最高达 $5.3 \times 10^3$ 焦耳/米<sup>3</sup>，嵌镶残余弹性应变能密度最高达4.1焦耳/米<sup>3</sup>，前者比后者大三个数量级。

#### 四、残余应力及其应变能密度随深度的分布规律

图2表明，三维区域残余主压应力和嵌镶残余应力随深度总的变化趋势大体一致，都是随深度增加而增大。 $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$ 和 $\alpha$ 随深度的变化较稳定，由于各深度地层弹性模量不同和构造的影响 $\sigma_2$ 随深度变

化的宽散度较大。各深度处残余应力  $\sigma_i$  随深度的分布规律可表示为

$$\sigma_i = \sigma_{i0} + a_i D, \quad i = 1, 2, 3, s.$$

其中  $\sigma_{i0}$  为测孔内该项应力在地表的回归值, 单位是兆帕;  $D$  为深度, 单位是米;  $a_i$  是应力随深度的变化梯度, 单位是兆帕/米。各个测孔参数及残余应力参数见表 1。从此表可知, 各测孔  $\sigma_1$  的梯度  $a_1$  的变化范围为  $(0.42-2.17) \times 10^{-3}$  兆帕/米, 平均值为  $1.17 \times 10^{-3}$  兆帕/米;  $\sigma_2$  的梯度  $a_2$  的变化范围为  $(0.50-9.50) \times 10^{-3}$  兆帕/米, 平均值为  $3.83 \times 10^{-3}$  兆帕/米;  $\sigma_3$  的梯度  $a_3$  的变化范围为  $(0.67-1.67) \times 10^{-3}$  兆帕/米, 平均值为  $0.67 \times 10^{-3}$  兆帕/米;  $\sigma_s$  的梯度  $a_s$  的变化范围为  $(0.00-0.67) \times 10^{-3}$  兆帕/米, 平均值为  $0.17 \times 10^{-3}$  兆帕/米。各孔平均残余应力变化梯度的关系是  $a_2 > a_1 > a_3 > a_s$ 。

表 1 各测孔残余应力参量

测孔号	孔径 〔毫米〕	孔深 〔米〕	$\sigma_{10}$ 〔兆帕〕	$\sigma_{20}$ 〔兆帕〕	$\sigma_{30}$ 〔兆帕〕	$\sigma_{s0}$ 〔兆帕〕	$a_1$ 〔 $10^{-3}$ 兆帕/米〕	$a_2$ 〔 $10^{-3}$ 兆帕/米〕	$a_3$ 〔 $10^{-3}$ 兆帕/米〕	$a_s$ 〔 $10^{-3}$ 兆帕/米〕
1	120	571	1.6	7.1	0.9	0.2	1.50	0.67	0.67	0.17
2	108	525	1.4	6.8	0.8	0.5	1.42	0.67	1.67	0.42
3	120	580	2.0	6.6	1.0	0.2	0.42	5.17	1.33	0.67
4	130	508	1.8	6.4	1.0	0.2	0.50	9.50	1.25	0.42
5	130	501	1.3	6.8	1.0	0.3	2.17	0.50	1.17	0.00
综合			1.7	6.6	0.9	0.2	1.17	3.83	0.67	0.17

由图 3 可见, 区域和嵌镶残余弹性应变能密度随深度的变化, 除 5 号孔微有减小外, 其它都是上升。各孔的  $\epsilon$  和  $\epsilon_s$  随深度的分布规律可表示为

$$\epsilon = \epsilon_0 + bD;$$

$$\epsilon_s = \epsilon_{s0} + cD.$$

其中  $\epsilon_0$  和  $\epsilon_{s0}$  是各孔区域和嵌镶残余弹性应变能密度在地表的回归值, 单位是焦耳/米<sup>3</sup>。  $b$  和  $c$  是区域和嵌镶残余弹性应变能密度随深度的变化梯度, 单位是焦耳/米<sup>4</sup>。  $D$  是深度, 单位是米。各孔的有关参量示于表 2 中。各测孔  $\epsilon$  的梯度  $b$  的变化范围为  $-0.67-3.92$  焦耳/米<sup>4</sup>; 平均值为  $1.25$  焦耳/米<sup>4</sup>;  $\epsilon_s$  的梯度  $c$  的变化范围为  $(-0.08-2.50) \times 10^{-3}$  焦耳/米<sup>4</sup>, 平均为  $2.33 \times 10^{-3}$  焦耳/米<sup>4</sup>。  $b$  和  $c$  差三个数量级。

表 2 各测孔残余弹性应变能密度参量

测孔号	孔径 〔毫米〕	孔深 〔米〕	$\epsilon_0$ 〔焦耳/米 <sup>3</sup> 〕	$\epsilon_{s0}$ 〔焦耳/米 <sup>3</sup> 〕	$b$ 〔焦耳/米 <sup>4</sup> 〕	$c$ 〔焦耳/米 <sup>4</sup> 〕
1	120	571	350	0.15	1.00	0.00083
2	108	525	400	0.15	0.00	0.00025
3	120	580	350	0.10	0.50	0.00250
4	130	508	250	0.10	3.92	0.00217
5	130	501	400	0.45	-0.67	-0.00008
综合			500	0.30	1.25	0.00233

## 五、断裂带岩体中储存的残余弹性应变能量

鲜水河断裂带东段倾向南西, 倾角为  $60^\circ-75^\circ$ , 中西段倾向北东, 倾角为  $60^\circ-85^\circ$ 。该断裂带内大地震震源深 10-25 公里。因之, 为研究带内岩体中储存的残余弹性应变能量,

将岩体深度及沿断裂带两侧的宽度均取40公里。图4、图5给出了鲜水河断裂带两侧残余弹性应变能密度的水平分布。

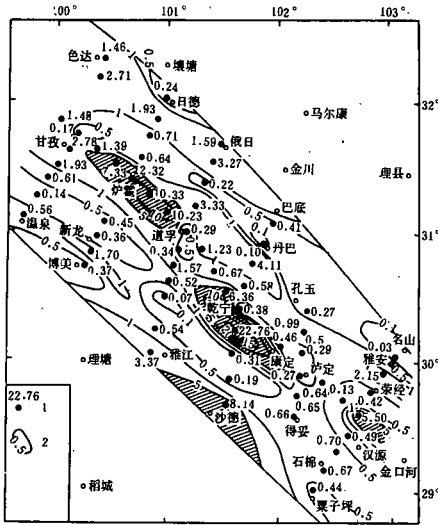


图4 鲜水河断裂带测区区域残余弹性应变能密度等值线  
 1. 测点和区域残余弹性应变能密度值 (单位:  $10^3$  焦耳/米<sup>3</sup>)  
 2. 区域残余弹性应变能密度等值线

Fig. 4 Horizontal isogram of areal-residual elastic strain energy density in the measuring region of Xianshuihe fault zone

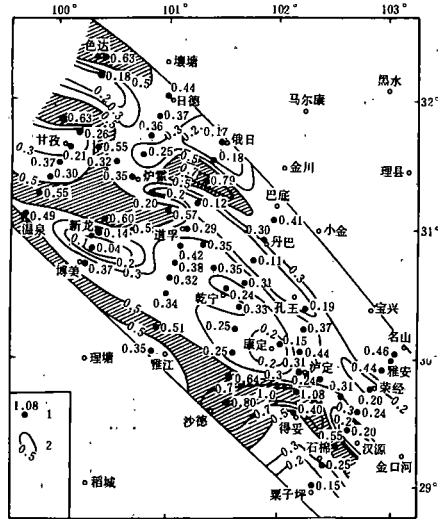


图5 鲜水河断裂带测区嵌镶残余弹性应变能密度等值线  
 1. 测点和嵌镶残余弹性应变能密度值 (单位: 焦耳/米<sup>3</sup>)  
 2. 嵌镶残余弹性应变能密度等值线

Fig. 5 Horizontal isogram of mosaic-residual elastic strain energy density in the measuring region of Xianshuihe fault zone

根据测区地表区域残余弹性应变能密度的水平分布(图4),可沿断裂带将其划分为5个区段。根据各孔平均区域残余弹性应变能密度随深度分布梯度  $1.25$  焦耳/米<sup>4</sup>,算得的各区段块体所储存的区域残余弹性应变能量及整个断裂带岩体中储存的区域残余弹性应变能量见表3。

表3 鲜水河断裂带各区段块体储存的区域残余弹性应变能量

划分区段	区段块体体积 (公里 <sup>3</sup> )	地表平均区域残余应变能密度 (焦耳/米 <sup>3</sup> )	块体所含区域残余应变能量 ( $10^{19}$ 焦耳)	全断裂带所含区域残余应变能量 ( $10^{20}$ 焦耳)
甘孜—炉霍	144000	1400	3.80	2.39
炉霍—道孚	160000	9000	5.44	
道孚—乾宁	144000	1500	3.82	
乾宁—泸定	192000	10000	6.72	
泸定—汉源	160000	800	4.13	

由测区地表嵌镶残余弹性应变能密度的水平分布(图5),可沿断裂带划分为3个区段。由各孔平均嵌镶残余弹性应变能密度随深度的分布梯度  $2.33 \times 10^{-3}$  焦耳/米<sup>4</sup>,算得的各区段块体和沿整个断裂带岩体中储存的嵌镶残余弹性应变能量见表4。

表 4 鲜水河断裂带各区段块体储存的嵌镶残余弹性应变能量

划分区段	区段块体体积 (公里 <sup>3</sup> )	地表平均嵌镶残余应变能密度 (焦耳/米 <sup>3</sup> )	块体所含嵌镶残余应变能量 (10 <sup>16</sup> 焦耳)	全断裂带所含嵌镶残余应变能量 (10 <sup>16</sup> 焦耳)
甘孜—道孚	304000	0.40	1.43	3.76
道孚—乾宁	144000	0.35	0.68	
乾宁—泸定	192000	0.25	0.90	
泸定—汉源	160000	0.30	0.75	

从表 3 和表 4 的计算结果可知, 鲜水河断裂岩体中现今所储存的区域残余弹性应变能相当于 3794 个 8 级地震的能量, 所储存的嵌镶残余弹性应变能相当于 19 个 7 级地震的能量。

四川省地质矿产局及其所属 207 地质队和 402 地质队、水利电力部成都勘测设计院及其所属第二地质勘探队、四川省自然资源研究所、地矿部西南石油地质局、四川省石油管理局、四川省煤炭工业管理局、四川省黄金工业管理局、四川省冶金工业厅和四川省轻工业厅, 对本项研究提供了钻孔资料或采取岩芯, 并给予了大力支持和诚恳的关注, 在此一并致谢。

(本文 1992 年 10 月 13 日收到)

### 参考文献

- [1] 安欧, X 射线地应力测量原理和方法, 地震研究, Vol. 2, No. 3, 1979.
- [2] 安欧, 迁西地区构造体系的 X 射线鉴定, 地质科学, No. 1, 1982.
- [3] Friedman, M., Residual elastic strain in rock, Tectonophy., Vol. 15, 297—330, 1972.
- [4] 星野一男、安田俊一、小出仁, 关东中部地方に於ける残留应力の定例, 地震月刊, No. 1, 1978.
- [5] Jaeger, C., In situ residual stresses in rock masses, Rockmech., Eng., Cambridge Univ., Ch. 5, 1972.
- [6] Oberti, G., Residual stress measurement in rock masses, Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rockmech., 2, 31—34, 1966.
- [7] Swolfs, H. S., et al., Field measurements of residual strain in granitic rock mass, Advances in Rock Mechanics, Proc. 3rd Cong. ISRM II, 563—568, 1974.
- [8] Holzhausen, G. R., The concept of residual stress in rock, Tectonophysics, Vol. 58, No. 3—4, 1979.
- [9] Bock H., Experimental determination of the residual stress field in a basaltic column, 4th International Congress on Rock Mechanics, No. 1, 45—49, 1979.
- [10] Engelder, T. and Geiser, P., Residual stress in the Tully Jimestone Appalachian Plateau, Journal of Geophysical Research, Vol. 89, No. B11, 9365—9370, 1984.
- [11] 安欧、高国宝、李占元, 古构造残余应力场 X 射线测量, 华北地震科学, Vol. 9, No. 3, 1991.
- [12] 安欧, 构造应力场, pp. 348—354 地震出版社, 1992.

(下转 87)

- (4) 王泽皋等, 由显著地震动态图象寻找华北强震活动场所, 华北地震科学, Vol. 3, No. 2, 1985.  
 (5) 王泽皋, 华北强震活动空间的动态韵律(线理部分), 西北地震学报, Vol. 9, No. 2, 1981.

**A FAR-RANGING REMOTE PHENOMENON OF  
LARGE EARTHQUAKES IN CHINA MAINLAND  
AND ITS ADJACENT AREAS**

Wang Zegao, Sun Peiqing, Gao Jingchun

(*Seismological Bureau of Hebei Province, Shijiazhuang China*)

**Abstract**

In this paper, a far-ranging remote phenomenon of large earthquake activity ( $M_s \geq 7.0$ ) has been discussed by seismicity time characteristics in China Mainland and its adjacent areas. Six zones have been divided with remote phenomenon. On the basis of giving remote phenomena in the paper, the active situation of large earthquakes will be roughly estimated in research areas, and a useful reference for mid-range prediction of large earthquakes in one or two years in the future is got.

**Key Words:** Mainland of China; Plate Movement; Seismicity; Remote Zone

(上接 69 页)

**DISTRIBUTION OF PALEOTECTONIC RESIDUAL STRESSES WITH  
DEPTH IN XIANSUIHE FAULT ZONE AND RESIDUAL ENERGY IN THIS ZONE**

An Ou, Gao Guobao

(*Institute of Earth Crust Dynamics, SSB, Beijing, China*)

**Abstract**

This paper introduced the measurements for three dimensional regional residual stresses, mosaic-residual stresses and their elastic strain energy densities distributing with depth in rock masses in measuring region of Xianshuihe fault zone, analyzed their plumb distributive regular pattern with depth, and computed the residual elastic strain energy stored in rock mass of this fault zone. In the measurement, based on orthotropic elastic theory of rock mass, the X-ray diffraction method is used, and the core specimens of 5 heavy caliber-boreholes are selected.

**Key Words:** Areal Residual Stress; Xianshuihe Fault Zone; Residual Energy in Fault Zone