Sep., 1991

# 古构造残余应力场X射线测量\*

## 安欧 高国宝 李占元

(国家地震局地壳应力研究所,北京)

#### 摘 要

以岩体正交各向异性弹性理论为基础,用X射线衍射法,沿红河断裂带布设7条测线, 沿迁西山字型构造带布设11条测线,完成了岩体中三维残余应力测量,绘出了宏观残余应 力场等值线及主应力线图、微观残余应力场等值线图,算出了岩体内两种残余弹性应变能 密度场,确定了其形成时期。

关键词 残余应力场 应变能密度场 三维 正交各向异性 X射线衍射法

## 一、序言

中国、美国、日本、英国、葡萄牙,都进行了 地 壳 岩体残余应力测量<sup>1-10</sup>。其 中,使用 x 射线衍射法的除作者外,还有福利得曼教授和星野一男教 授。本 文 在 岩 体 正交各向异性弹性理论的基础上,用 x 射线衍射法选测了岩体中力学性质成高级轴对称 的矿物,测量了其轴对称弹性模量和泊松比,进行了岩体三维残余应力测量,沿红河断 裂带布设7条测线,沿迁西山字型构造带布设11条测线,绘 出了宏观残余应力场等值线 及主应力线图、微观残余应力场等值线图,算出了岩体中宏观和微观残余弹性应变能密 度场,确定了此种场形成的时期。

古构造残余应力场,是古构造应力场残留至今的部分,影响现代构造运动,但又与 地块在受相邻地块作用的现代边界条件下所产生的现今构造应力场的物理机制不同。地 壳岩体的构造变形主要是蠕变,在整体进行此种塑性变形中,局部尚处于弹性阶段的体 积和晶粒,由于被塑性变形的围岩所包围,使其局部地被封闭住,又作用于围岩,而在 岩体中保留下来的应力场,为残余应力场。在一定区域内残留的为区域残余应力,它使 x射线经岩石内矿物晶体的衍射线掠射角θ整个移动,反映晶面沿法向的整个张、压性平 移变形,是晶面受法向张、压力作用造成的,由于其在大范围内较一致,又称宏观残余 应力,在晶粒内的微观范围中残留的为嵌镜残余应力,它使x射线经岩石内矿物晶体的 衍射线强度曲线所占的θ角范围向高角度或低角度方向变宽,反映晶面上的原子或离子 在晶面法向离开晶面平面或使晶面弯扭而呈不规则的晶格畸变,是晶粒中的孪生、位错

地震学联合科学基金资助的课题

堆和边界嵌镶作用引起的微观体积内的应力集中所造成,故又称微观残余应力〔<sup>1,2</sup>。 这两种残余应力具有如下特征:

1. 是岩体经漫长地质时期的缓慢构造运动形成的,受岩体中发生了强塑性变形的骨架所控制,只要岩石结构不变,便可在地质时期内长期保留,不因岩块失去现今的边界 载荷而消失<sup>1,2</sup>。福利得曼在美国怀俄明州响尾蛇山区和星野一男在日本关东地区测 得的都是白垩纪残留至今的残余应力场<sup>3,4</sup>。作者于1957年在中国迁西地区所测的6个 测点1965年重新采样用×射线衍射法复测得的残余应力大小和方向,均未变化<sup>1</sup>。可 见,在漫长的地壳构造运动中,此种应力虽然也会随岩体的蠕变而松驰,但其松驰速度 远比岩石短时间实验测得的现今应力松驰速度为小。这说明,地壳残余应力形成的机制 与现今短时加载产生的应力有所不同,因之星野一男又称之为"化石化应力"<sup>4</sup>。但 现今构造应力,在岩块边界载荷卸去后便消除。因而,将测量岩样从地壳采下后,由于 此时岩样有自由边界,其中便无现今构造应力作用,又由于岩样中温度和湿度分布基本 均匀,故其中也无热应力和湿应力作用,于是便可测量其中剩下的残余应力;

2.与岩体经长期构造变形形成的后生组构所反映的强塑性形变场一致,构造带中强 塑性变形的形式若不被后来的构造运动所改变,则其中残余应力场的分布形态也不 变<sup>2</sup>。对含砂灰岩边长20厘米正方形板面上的四个直角区的四次测量与将其切成直径3 厘米的园板后测得的残余应力大小和方向完全相同,而不受测样边界形状和尺寸大小的 影响。在6平方米的测量表面上测得的残余应力,仍近似均匀分布<sup>7</sup>。在相距100米范围 内的不同岩石中采样测量的结果相近,以致可在大小和方向上取平均值,而视为一个测 点<sup>[1,2,11]</sup>。测点间距,从迁西地区的500米、1公里、7公里、13公里到红河断裂带的 20—30公里,所测得的残余应力场无论在大小和方向上的分布形态,都与区内岩体构造 变形的分布形式一致<sup>2</sup>。这说明残余应力场之所以残留至今,是由于岩石中部分造岩 矿物进行了强塑性变形的结果。岩石中这种在长期构造运动中形成的强塑性变形部分, 在结构上构成了岩石的骨架以维持岩石的变形状态,其间尚处于弹性状态的矿物中的应 力又作用到这种塑性变形的骨架中来,于是使残余应力布满整个岩体,并在取消外力作 用时以平衡状态存在于岩体内,这个特点与三维光弹性实验材料中的冻结应力类似。正 因为如此,斯沃夫思称之为"自平衡应力系统"<sup>[7]</sup>,陈宗基称之为"封闭应力"<sup>[12]</sup>, 耶格称之为"锁住应力"<sup>[13]</sup>。

3.用显微光弹仪观测有等色线和等倾线,在岩块新断开或新切开表面上立即测到了 表面法向的弹性泊松效应,即断开或切开的相对二表面间相互作用的残余应力被释放, 由于变成了自由表面而使得岩石中平行表面方向的残余应力造成的表面法向的泊松效应 得以表现出来,而发生表面法向的弹性应变,也正因为这样才得以测量表面法向和几个 斜向弹性正应变,去求平行表面方向的残余应力。<sup>1,2,3,4</sup>在直径5厘米的片麻岩圆柱 体横切圆形表面上做此种测量后,在将此表面1厘米厚一层切去,而在新露出的圆形表 面上再测,如此反复四次所得的结果一样,这说明残余应力在新表面法向的释放深度, 对此种岩石小于1厘米。用竖直槽从地壳切取下一边长2.5米的石英闪绿岩立方岩块,上 表面的31个应变计反映此表面均匀变形,说明现今的应力作用被解除。再在其中竖直开 槽切成一系列小方柱块,也测得近新槽壁表面的法向残余应力立即完全释放,但其释放

3

量从各槽壁表面向内迅速减小,即岩块里边的由于岩石结构没被破坏而仍然保留着<sup>[7]</sup>。 因之,虽然其形成的物理机制与短时间实验所造成的开放应力系统不同,但在尺寸大于 各边缘释放深度的新表面上平行表面的和表层里边的,仍可借用研究现今应力的理论去 计算;

4.经高温退火后消除。含残余应力矿物的×射线衍射记录底片上有呈星芒 辐射状衍 射斑点,经高温退火后消失。含残余应力矿物的晶面间距随退火温度而变化,并趋向一 无残余应力的恒定值。红河断裂带的岩石中,石英六方晶系的(001)晶面系晶面间距 d(001)趋向的恒定值为0.6049500纳米,开始恒定的退火温度为475℃;方 解石六方晶系 的d(001)趋向的恒定值为1.6955660纳米.开始恒定的退火温度为400℃。



图1 红河断裂带石英和方解石的晶面间距d(0,1)随退火温度变化曲线。用500℃/时〕 的速度升温至各个退火温度后恒定5小时,再以250℃/时〕的速度退火至室温

5.与各现今地应力成份叠加在一起,构成地壳应力场。由于残余应力场与现今应力 场有不同的形成机制、空间分布和作用途径,须分别测量和研究。最新测量结果表明, 宏观残余应力大小多为测点或其附近用钻孔法测得地应力大小的0.5—5倍,大者十几倍 (表3)。

### 二、测量原理和方法

据宏观残余应力椭球的历史抽样测量结果知,其主轴与水平面和铅直线的交角最大的几度到十几度,极个别的达21°。故在大量测量中为简化测量手续,假定测点的残余应力主轴在水平和铅直方向。在采取点标上预采岩块的原方位后,沿节理切成的块体从地 壳采下来,再沿水平方向切开,则此切开表面为主平面(1,2)。由于上半部被去掉, 则其对下半部测样表面的垂直宏观残余应力σ3的作用便去除了,于是测样表面附近的 法向宏观残余应力便被释放掉,但测量表面方向的由于表面有足够大而仍然存在,因而 此表面法向的弹性应变e3只是由此面方向的宏观残余应力作用所引起的法向泊松效应。

чŤ

4

$$e_{1} = \frac{4}{3} \left( e_{a30} \circ + e_{b30} \circ + e_{c30} \circ \right) - 3_{3}^{\prime} + \frac{4\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left( e_{a30} \circ - e_{b30} \circ \right)^{2} + \left( e_{b30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} + \left( e_{c30} \circ - e_{a30} \circ \right)^{2} - e_{c30} \circ \right)^{2}} + \left( e_{c30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} + \left( e_{c30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} - e_{c30} \circ \right)^{2} - \frac{4\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left( e_{a30} \circ - e_{b30} \circ \right)^{2} + \left( e_{b30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} + \left( e_{c30} \circ - e_{a30} \circ \right)^{2} - e_{c30} \circ \right)^{2}} \alpha = -\frac{1}{2} - \arctan \left( \frac{\sqrt{3} \left( e_{b30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} + \left( e_{b30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} - e_{c30} \circ \right)^{2}}{2e_{a30} \circ - e_{b30} \circ - e_{c30} \circ }$$
(1)

应变,以伸为正,以缩为负,α角从主轴1到e。以逆时针方向为正。再将 岩样去 掉的上 半部过已测知的主轴1方向铅直切开,在一半的铅直表面上,同样测得铅直方向 的宏观 残余主应变es:将铅直测样测量表面的法向应变表示为e<sup>s</sup>,在过此法向的铅直面上与此 法线交成30°角方向的应变表示为e<sup>s</sup>,或so,其在铅直 测 样表面上投影方向的应变表示为 e<sup>s</sup>,由于其位在铅直方向而为测量地点三维应变状态的铅直宏观残余主应变es,故 由 应变几何公式得

$$e_3 = 4e_{a_{30}}^{"} - 3e_3^{"}$$
 (2)

公式(1)、(2)构成了表示测点三维宏观残余主应变大小及方向的方程组。

在各向异性岩体中测量三维宏观残余应力,须以正交各向异性弹性方程为基础。由 于水平测样测量表面上的宏观残余主应力 $\sigma_3 = 0$ ,故此测样中的宏观残余应力处于平面 应力状态。选测其中力学性质成高级轴对称的矿物,并测量此对称轴分布在主轴 3 方向 的晶粒,则平面正交各向异性弹性方程中的弹性模量 $E_1 = E_2 = E$ ,泊松比 $v_{12} = v_{21} =$ v, $v_{13} = v_{23} = v'$ 。于是,将(1)代入水平测样平面应力状态的应力与应变关系方程 组,得

$$\sigma_{1} = \frac{-E}{1+\nu} \left[ \frac{4}{3} \left( e_{a30} \circ + e_{b30} \circ + e_{c30} \circ \right) + \frac{1-3\nu'}{\nu'} e_{3}' - \frac{4\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left( e_{a30} \circ - e_{b30} \circ \right)^{2} + \left( e_{b30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} + \left( e_{c30} \circ - e_{a30} \circ \right)^{2}} \right]$$
  
$$\sigma_{2} = \frac{-E}{1+\nu} \left[ \frac{4}{3} \left( e_{a30} \circ + e_{b30} \circ + e_{c30} \circ \right) + \frac{1-3\nu'}{\nu'} e_{3}' \right]$$
(3)

$$+\frac{4\sqrt{2}}{3}\sqrt{(e_{*30}\circ-e_{b30}\circ)^{2}+(e_{b30}\circ-e_{c30}\circ)^{2}+(e_{*30}\circ-e_{*30}\circ)^{2}}\right]$$

**铅直测样测量**表面上的主轴为1<sup>"</sup>, 2<sup>"</sup>,表面法向的主轴为3<sup>"</sup>。 取1<sup>"</sup>与1 重 合,2<sup>"</sup>与3重 合,在其中选测与水平测样相同的矿物,并仍测量对称轴分布在主轴3<sup>"</sup>方向的晶粒,于 是其表面方向的E<sup>"</sup> = E,  $\nu$ " =  $\nu$ 。因e<sup>"</sup>在铅直方向,则a<sup>"</sup> = 90°,于是e<sup>"</sup><sub>a</sub> = e<sup>"</sup><sub>2</sub> = e<sub>3</sub>,  $\sigma$ <sup>"</sup><sub>2</sub> =  $\sigma_3$ ,  $\sigma$ <sup>"</sup><sub>1</sub> =  $\sigma_1$ 。因之,将(3)中第一式的 $\sigma_1$ 和(2)式中的e<sub>3</sub>代入铅直测样平面应力 状态的应力与应变关系方程组,得

$$\sigma_{3} = E \left( 4e_{a30}^{''} \circ -3e_{3}^{''} \right) - \frac{\nu E}{1+\nu} \left( \frac{4}{3} \left( e_{a30} \circ + e_{b30} \circ + e_{c30} \circ \right) + \frac{1-3\nu}{\nu'} e_{3}^{'} - \frac{4\sqrt{2}}{3} \sqrt{\left( e_{a30} \circ - e_{b30} \circ \right)^{2} + \left( e_{b30} \circ - e_{c30} \circ \right)^{2} + \left( e_{c30} \circ - e_{a30} \circ \right)^{2}} \right)$$

$$(4)$$

(3)、(4)便构成了表示测量地点三维宏观残余主应力大小的方程组。

一律取水平测样上的e。在南北方向,从e<sub>430</sub>°开始反时针方向依次相间60°测e<sub>630</sub>°, e<sub>430</sub>•及法向应变e<sub>3</sub>,在铅直测样上,测得e<sub>430</sub>。, $e_{3}^{'}$ ,用x射线法测得岩样 中 所 选 测 矿物的轴对称力学参量E, v, v',代入(1)、(2)、(3)、(4)式,算得 采样点 三维宏观残余主应力 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ 和主应变e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, e<sub>3</sub>的大小及主方向 $\alpha$ 。将其代入

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \left( \sigma_1 e_1 + \sigma_2 e_2 + \sigma_3 e_3 \right) \tag{5}$$

**算得测**点岩体中宏观残余弹性应变能密度ε。

$$\overline{\sigma}_s = \overline{Ee},$$
 (6)

采样点岩体中的微观残余弹性应变能密度

$$\overline{\varepsilon_s} = \frac{1}{2} \overline{E} \overline{e_s^2}$$
 (7)

上述弹性理论方程中的应变,都是弹性应变,而且是从零起算的绝对应变值。因 之,只能测量弹塑性地应变相对变化而区分不出其中弹性应变成份和其绝对值的技术在 此是不适用的,而必须选用测量岩体中绝对残余弹性应变的技术才能满足上述方程组的 要求。

### 三、x射线测量技术

用x射线法测量岩体中应力有如下特点: 1.只测岩体 中矿物晶粒的晶面间距。而晶 面间距的变化正是岩体晶粒弹性变形的机制,塑性变形的机制则是晶面滑移 和 晶 粒碎 裂,并不改变晶面间距,故此法只测晶粒的弹性形变,测不到塑性形变,于是影响岩体 塑性变形的时间效应,如蠕变、滞后、加力速率等,对测量均无影响,2.测得的弹性形 变是以所测矿物经高温退火后弹性形变为零的状态作起算点,故为绝对弹性形变,因之 可用弹性理论方程求得绝对应力值,3.由岩体矿物晶粒弹性形变计算应力用的是所选测 矿物晶体的弹性参量,比多晶体岩石的弹性参量稳定,不受多晶岩石结 构 和 孔隙的影 响,4.在测量表面原样测量而不须对之预加载荷或恢复载荷,避免了岩石重载时由于力 学参量不还原性所引起的测量状态与原岩状态力学参量不同对测量、结果的影响,5.x射 线直接射入测样中测量矿物晶体的晶面间距,而不需其它与测样表面接触的传感器,免 去了由于接触和传感器材料刚度对测量的影响,6.测量用的是晶体结构 分析x射线衍射 测角仪,迁西地区测量用的是西德西门兹Eg404/2e型,红 河 断 裂带测量用的是日本理 学电机株式会社出品的GAB—A型,测样可于小马达带动下在所选取平面内水平来回移 动或固定于所选取的角度,经过弯曲晶体单色器单色化的入射x射线成铅直薄 平面光束 在往返移动的测样表面上成铅直细线扫描而在测量圆上聚焦后进 入 计数管,heta角的测量 精度小于0.0001°,记录纸长与θ角的比例关系,对前种仪器最大为640毫米/度,对后种 仪器最大为80毫米/度,配有精度0.001毫米的比长仪供精确测量之用,所用x射线波长 精度为10-°纳米,测石英或方解石(001)晶面系的晶面间距,求得其法向 应 变的精度 为1×10<sup>-6</sup>或5×10<sup>-7</sup>。

岩石是由一种或多种矿物晶粒按各种取向构成的多晶体。将其测样放在x射线衍射 测角仪中心的测样架上,用波长入的单色x射线束以掠射角θ入射到测样中所选测 矿 物 的选测晶面系上,便可在对晶面系法线对称的方向接收到反射线。由布拉格方程知,此 晶面系的晶面间距d = n入/(2Sinθ),n为正整数,常数为1。从此式知,对选定的晶 面 系,由于d一定,故选用波长入的x射线后,则θ也一定,即只有在此方位才能 测 到 反 射 线,于是从测角仪得到θ。因之,由θ可求得所测矿物同一晶面系的法线与入射线和反射 线在同一平面上满足布拉格方程的某一定方位各晶粒此晶面系的d。每个被测晶粒 相当 于测样中一个小测点,将x射线束照射于直径5厘米的圆盘形测样表面,便测得测样表 层 一定深度无数被选测矿物晶粒被选测晶面系的d。因之,从测样中无数小测点上反 射 的 x射线强度的分布峰值所在的θ,是被照射岩面一定深度内无数小测点的d的平均值,它已 是在宏观范围内的分布值了。

由于二测样中的应变都是通过测量其中同种矿物同一晶面系的晶面间距而得,因而 都应使用此种矿物此晶面系经退火后无残余应变的晶面间距d。或其相应的掠射角θ。作起

1 N 1

使状态来求绝对应变,由各方位的绝对应变求相应的残余应力也都使用此矿物相同的弹 性参量。

因测量所用x射线波长及n值不变,而且有残余应力的测样中矿物晶粒的晶面间距d 相对于其d。的变化量在10<sup>-4</sup>纳米以下而属于微小形变,故将布拉格,程微分可得晶面系 法向应变对水平测样表面成倾角θ方向入射×射线,并在对测样表面法线成平面对称 的

$$e = \frac{d - d_0}{d_0} = -ctg\theta_0 (\theta - \theta_0)$$
(8)

方向接收反射线,则用此 $\theta$ 可由布拉格方程算得位于测样表面法向的晶面间距dg。。,将 此<sup>θ</sup>表示为<sup>θ</sup>。。。。仿此,可测得与测样表面法线成30°交角并在测量表面上的投影成反时 针依次相间 $60^{\circ}$ 的三个方向的晶面间距 $d_{a30^{\circ}}$ ,  $d_{b30^{\circ}}$ 、 $dc_{30^{\circ}}$ , 相应的 $\theta$ 表示为  $\theta_{a30^{\circ}}$ ,  $\theta_{b_{3,0}}$ ,  $\theta_{c_{3,0}}$ ,  $\theta_{c$  $0^{''}_{\alpha\alpha}$ ,  $\theta^{''}_{\alpha\alpha}$ , 于是将它们各自代入上式, 可得晶面系法线在各相应方向的无数 晶 粒 的平均应变 $e'_{a,s_0}$ ,  $e_{a,s_0}$ ,  $e_{a,s_0}$ ,  $e''_{a,s_0}$ ,  $e''_{a,s_0}$ 的相应表示式, 再将它们代入(1)、 (2)、(3)、(4),得  $e_1 = \operatorname{ctg}_{\theta_0} \left( -\frac{4}{3} \left( \theta_{a30} \circ + \theta_{b30} \circ + \theta_{c30} \circ \right) + 3\theta_{00} \circ + \theta_{0} \right)$  $+\frac{4\sqrt{2}}{3}\sqrt{\left(\theta_{a30}^{\circ}-\theta_{b30}^{\circ}\right)^{2}+\left(\theta_{b30}^{\circ}-\theta_{c30}^{\circ}\right)^{2}+\left(\theta_{c30}^{\circ}-\theta_{a30}^{\circ}\right)^{2}}\right]$  $e_{2} = c_{t}g\theta_{0} \left[ -\frac{4}{3} \left( \theta_{a30}^{\circ} + \theta_{b30}^{\circ} + \theta_{c30}^{\circ} \right) + 3\theta_{00}^{\circ} + \theta_{0} \right]$  $-\frac{4\sqrt{2}}{2}\sqrt{\left(\theta_{a30}^{\circ}-\theta_{b30}^{\circ}\right)^{2}+\left(\theta_{b30}^{\circ}-\theta_{c300}\right)^{2}+\left(\theta_{c30}^{\circ}-\theta_{a30}^{\circ}\right)^{2}}\right]$  $e_3 = c tg \theta_0 (3 \theta_{90}^{"} - 4 \theta_{9300}^{"} + \theta_0)$  $\sigma_{i} = \frac{\text{Ectg}\theta_{0}}{1+\gamma} \left( \frac{4}{3} \left( \theta_{a30}^{\circ} + \theta_{b30}^{\circ} + \theta_{c30}^{\circ} - 3\theta_{0} \right) + \frac{1-3\gamma'}{\gamma'} \left( \theta_{a0}^{\circ} - \theta_{0} \right) \right)$  $+\frac{4\sqrt{2}}{2}\sqrt{\left(\theta_{a30}^{\circ}-\theta_{b30}^{\circ}\right)^{2}+\left(\theta_{b30}^{\circ}-\theta_{c30}^{\circ}\right)^{2}+\left(\theta_{c30}^{\circ}-\theta_{a30}^{\circ}\right)^{2}}\right)$  $\sigma_{2} = \frac{\text{Ectg}\theta_{0}}{1+\gamma} \left( \frac{4}{3} \left( \theta_{a30}^{\circ} + \theta_{b30}^{\circ} + \theta_{c30}^{\circ} - 3\theta_{0} \right) + \frac{1-3\gamma'}{\gamma'} \left( \theta_{30}^{\circ} - \theta_{0} \right) \right)$  $-\frac{4\sqrt{2}}{2}\sqrt{\left(\theta_{\mathtt{a}30}^{\circ}-\theta_{\mathtt{b}30}^{\circ}\right)^{2}+\left(\theta_{\mathtt{b}30}^{\circ}-\theta_{\mathtt{c}30}^{\circ}\right)+\left(\theta_{\mathtt{c}30}^{\circ}-\theta_{\mathtt{a}30}^{\circ}\right)^{2}}\right]$  $\boldsymbol{D}_{3} = \operatorname{Ectg}\theta_{0} \left\{ 3\theta_{00}^{''} - 4\theta_{030}^{''} + \theta_{0} + \frac{v}{1+v} \left[ -\frac{4}{3} \left( \theta_{030}^{\circ} + \theta_{030}^{\circ} + \theta_{030}^{\circ} - 3\theta_{0} \right) \right] \right\}$ 

$$+\frac{1-3\gamma}{\nu'}(\theta_{e0}\circ-\theta_{0})$$

$$+\frac{4\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\theta_{a30}\circ-\theta_{b30}\circ)^{2}+(\theta_{b30}\circ-\theta_{e30}\circ)^{2}+(\theta_{e30}\circ-\theta_{a30}\circ)^{2}}]\}$$

$$\alpha = \frac{1}{2}\operatorname{arctg}\frac{\sqrt{3}(\theta_{b30}\circ-\theta_{e30}\circ)}{2\theta_{a30}\circ-\theta_{b30}\circ-\theta_{e30}\circ}$$

9 券

Ś

把用测角仪测得的 $\theta_{e_0}$ °,  $\theta_{*30}$ °,  $\theta_{*30}$ °,  $\theta_{*30}$ °,  $\theta_{*30}$ °,  $\theta''_{*0}$ °,  $\theta''_{*30}$ °,  $\theta_{0}$ 代入上方程组可 算得 $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ ,  $\sigma_1$ 、 $\sigma_2$ 、 $\sigma_3$ 、a, 并可用(5)式算得 $e_0$ 。

微观残余应力使测样中矿物晶面畸变所引起晶面间距的起伏 $\triangle d$ ,使相应的掠射角 出现宽散度 $\triangle \theta$ ,测量衍射线强度曲线峰值之半处所对应的角度范围 $\triangle \theta'$ ,并将其与同种晶面系经高温退火后无微观残余应力的衍射线强度曲线峰值之半处所对应的角度范围  $\triangle \theta_0^{\prime}$ 相减,得 $\triangle \theta = \triangle \theta' - \triangle \theta_0^{\prime}$ 。用 $\triangle \theta$ 替换(8)中的( $\theta - \theta_0$ ),得微观残余应变e.=

为

$$-(\Delta \theta' - \Delta \theta'_{0}) \operatorname{ctg} \theta_{0}, \ \mathbf{M}(6), \ (7) \operatorname{d} \mathbf{\mathfrak{E}}$$

$$\overline{\sigma}_{*} = - \operatorname{E}(\Delta \theta' - \Delta \theta'_{0}) \operatorname{ctg} \theta_{0}$$

$$\overline{\varepsilon}_{*} = \frac{1}{2} \operatorname{E}(\Delta \theta' - \Delta \theta'_{0})^{2} \operatorname{ctg}^{2} \theta_{0}$$

迁西地区的岩样采自石英岩、灰岩和片麻岩中,红河断裂带的岩样中石英或方解石 含量也较高(表1),故都选测了这两种矿物。为满足x射线对这两种矿物晶体衍射的 要求,选用了CrKα系射线,λ=0.229092纳米。石 英和方解石 晶 体都属六方晶系, 其力学性质对单位晶胞六方柱体的轴近似成轴对称各向异性,为提高应变计算精度选测 了其晶面间距较大的(001)晶面系(图2),其法线即力学性质对称轴,故由此晶面间 距的测量结果适于用前述公式计算残余应力。



表1

٠.

:

#### 红河断裂带岩样的x射线物相分析结果

测点标号	岩石名称		主要矿物成	份 [%]	
1	泥灰岩	方 <b>解</b> 石80	高岭石8	蒙脱石5	水云母 5
2	石英砂岩	石英>95			
3	长石石英砂岩	石英75	长石21	白云母2	
4	长石石英砂岩	石英75	长石16	白云母5	
5	硅质页岩	石英85	高龄石1°	蒙脱石5	绿泥石 2
6	泥质灰岩	方 <b>解</b> 石80	高岭石10	蒙脱石5	绿泥石 4
7	长石石英砂岩	石英80	长石15	云母3	水云母 3
8	长石石英砂岩	石英82	长石15	云母2	
9	断层角砾岩	方解石98			
10	灰岩	方解石>95			1
, 11	凝灰岩	长石60	普通辉石18	绿泥石15	磁铁矿 4
12	长石石英砂岩	石英90	长石7		
13	石英砂岩	石英93	- 长石4	云母3	
14	灰岩	方解石>95			
15	粗面岩	遗长石53	正长石30	角闪石6	石英4
16	灰岩	方 <b>解</b> 石98			
17	灰岩	方解>95			
18	长石石英砂岩	石英80	长石17	云母3	
19	硅质灰岩	方解石75	石英20		-
20	石英砂岩	石英90	长石8	云母2	
21	长石石英砂岩	石英82	长石15	云母2	
22	石英岩	石英>98	;		
23	长石石英砂岩	石英80	长石15	云母3	ĺ
24	玄武岩	斜长石57	石英15	普通辉石13	磁铁矿 9
25	灰岩	方解石>95			
26	石英砂岩	石英95	长石4		
27	长石石英砂岩	石英78	长石20	云母2	
28	长石石英砂岩	石英85	长石10	白云母3	
29	硅质灰岩	方解石70	石英25		
30	白云母片麻岩	长石6-)	石英25	白云母10	
31	黑云母花岗岩	正长石65	石英25	黑云母8	
32	灰岩	方 <b>解石</b> >90			
33	长石石英砂岩	石英75	长石20	白云母3	
34	灰岩	方解石97			
35	石英砂岩	石英85	长石8	长日云母4	
36	石英砂 <sup>岩</sup>	石英95			
37	石英砂 <sup>岩</sup>	石英>9)			
38	石英砂岩	石英>gn			
39	长石石英砂岩	石英82	长石15	白云母2	
40	石英砂岩	石英>95			
41	友岩	方解石>90	)		<b>,</b>

续表1
-----

测点标号	岩石名称	主要矿物成份[%]			· · · ·
42	长石石英砂岩	石 <b>英8</b> 0	长石16	白云母3	
43	石英砂岩	石英95	1	1	
44	长石石英砂岩	石英83	长石15	白云母2	
45	石英砂岩	石英92	长石4	白云母3	
46	长石石英砂岩	石英80	长石15	白云母3	
47	石英砂岩	石英〉95			
48	长石石英砂岩	石英85	长石10	白云毋4	
49	石英砂岩	石英92	长石5	白云母2	
50	黑云母花岗岩	正长石68	关英24	白云母6	
51	黑云母花岗岩	正长石65	石英26	黑云母6	
52	角砾岩	方解石>90	ļ		
53	灰岩	方解石〉⁰5			
54	灰岩	方解石>95		1	
55	灰岩	方 <b>解</b> 石 > 95	-		
56	灰岩	方解石〉95			
57	灰岩	方 <b>解</b> 石>95	1		
58	石英岩	石英石>95		1	
59	黑云母花岗岩	正长石65	石英25	黑云母7	
60	长石石英砂岩	石英82	长石14	黑云母3	
61	石英岩	石英〉95		1	
62	长石石英砂岩	石英78	长石15	自云母3	•
63	石英砂岩	石英88	长石8	白云母2	

用自行研制的加载装置,在x射线衍射测角仪上,测得了测样中石英和方解石的弹性参量(表2)

**表**2

用x射线测得的红河断裂带岩样中石英和方解石弹性参量

<b>矿物</b>	E×10 <sup>4</sup> 〔兆帕〕	٧	1	ν'	
石 英	6.15167	0.113	23	0.10950	
方解石	5.09611	0,280	80	0.29110	

#### 四、测量结果

红河断裂带各测点的宏观 残 余 应力多大于钻孔法地应力测值(表3),即使 取 钻 孔法地应力测量的最大综合误差为100%,其最大值上限也不过加大一倍,但仍有 半 数 的宏观残余应力值大于此上限值。因之,残余应力不可能是现今各地应力成份在从地壳 采下岩样中的残留值,因为残留部分不可能大于其原值。现今构造应力的铅直分量在近 地表近于零,而近地表的铅直残余主应力值很高(图5),也证明它不是现今构造应力的

9 卷

ý

医梨带史如路全位力与结子 法通缉地应力于 水形核束

测点	水平宏观残 〔兆	余	钻孔法测得水平地 值〔兆帕〕(据丁旭	应力的主应力 如和饶凯年等),	$\frac{\delta_1}{S_1}$	<u>62</u>
	бı	б2	s <sub>1</sub>	\$ 2		
下关	19.1	10.8	1.1	0.8 / /	17.00	13.50
弥渡	18.0	410.5	4.2	2,7	4.29	3.89
保山	14.4	7.4	4.0	1.5	3.60	4.93
建水	12.0	9.8	11.7	4.8	1.03	2.04
新平	15.0	9.0	10.4	4.8	1.44	1.88
景谷	14.6	10.5	12.1	8.3	1.21	1.27
墨江	11.3	8.5	12.1	7.1.	0.93	1.20

残余量。可见,残余应力是古构造应力的残留部分。

红河断裂带三维宏观残余宝应力都是压性的(图3、4、5),其中以铅直主压应力 为最大,最大值达20余兆帕,它们的分布是在测区的南涧以北的北西段中间高两侧低,



图3 红河断裂带水平最大宏观残余主压应力等值线分布图

南涧以南的南东段中间低两侧高,北西段应力值最高而南东段最低。水平宏观残余最大 主压应力线的分布方向约在NET5~30°(图6),红河断裂带的总体走向约为NW35°,因 之此场的作用是使断裂带右旋压扭性错动。红河断裂带形成较早,最近一场强烈运动在

12



图5 红河断裂带铅直宏观残余主压应力等值线分布图

ġ.





L





图 9 迁西山字型构造带中水平最大宏观残余主压应力等值线(A)及水平宏观残余主应力线(B)分布图

晚第三纪到更新世,余尾延至全新世,从北西向南东减弱,总趋势是右旋压扭性错动。可见,带内水平宏观残余反力场的最大主压应力分布方向,与断裂带最近一场强烈运动的方式是一致的,其最高最低值分布区,也与这场强烈运动的强弱分布地段一致, 宏观残余弹性应变能密度的分布(图7),沿红河断裂带较高,其中也是松平一南 涧 区 段最高,其次是开远和个旧地区,再次为普洱、姚安地区。



图10.山字型构造体系的连续酚醛塑料光塑性 漠影实验应力场: A一水平最大主压应力等值 线图 B-水平主应力线图

带内微观残余应力的大小不及宏观残余应 力的十分之一(图8),其弹性应变能密度则 比宏观残余弹性应变能密度小三个数量级以 上,分布与宏观残余应力及其应变能密度相 反,在南涧以北是中间小两侧大,在南涧以南 则是中间大两侧小。由于晶体孪生和晶格位错 等微观现象是岩石塑性变形的结果,因之这反 应岩石塑性变形的分布是沿断裂带活动强烈的 北西段中间弱两侧强,而南东段则相反。

迁西山字型构造带中宏观残余应力场的大 小和方向分布形态(图9),与用模拟实验求 得的山字型构造在断裂形成前的应力场的大小 和方向分布形态(图10)基本一致。证明这个 宏观残余应力场是山字型构造中断裂形成前的 构造应力场的残留场,在此山字型西翼中段两 条断裂附近按方格网状布点采了122块岩样,测 得二断裂两盘的微观残余应力等值线,于过断 裂处发生了顺时针水平错动。在东翼北段两条 断裂附近也做了同样测量,从106块岩样测得 的微观残余应力等值线,在过断裂处发生了反

时针水平错动。<sup>2</sup>,<sup>11</sup> 这首先鑑定了两翼四条断裂的客观存在,其次,证明两 翼二 断 裂发生了顺时针而东翼二断裂发生了反时针水平错动,第三,说明此残余应力场在断裂 形成以至发生水平错动之前已经存在了;最后,又证明它们是造成此山字型构造的应力 场的残留部分,迁西山字型构造体系完成在侏罗纪,因此这个残余应力场应是侏罗纪前 期构造应力的残余场。

(1290年3月15日收到初稿)

#### 参考文献

- (1) 安欧, x射线地应力测量原理和方法, 池曼研究, 2, 3, 1979.
- [2] 安欧,迁西池区构造体系的X射线滥定,池质科学,1,1932.
- [3] Friedman M., Residual elastic strain in rocks, Tectonophy, 15, 1972
- 〔4〕 星野一男,安田俊一,小出仁, 阙东中部地方记於计为残留応力切测定例,地质调查所,1978.
- (5) Jaeger C., In-situ residual stresses in rock masses, Rockmech, Eng., Cambridge Univ., Ch.5, 1373.
- [6] Oberti G., Residual stress measurement in rock masses, proc.lst.congr.Int.Soc. Rockmech., 2, 1983.
- [7] Swolfs H.S., et al, Field measurements of residual strain in granitic rock mass, Advances in Rock Mechanics, proc.3rd cong.ISRM I, 1974.
- [8] Holzhausen G.R. The concept of residual stress in rock, Tectonophysics, 58,

- [10] T.Engelder, P.Geiser, Residuac stress in the Tully Limestone Appalactian Plateau, Journal of Geophysical Research, 89, B11, 1984.
- 〔11〕 安欧,绝对弹性地形变的x射线测量与地震,西北地震学报, 6, 4, 1984。
- [12] 陈宗基和康文发,岩石的封闭应力,蠕变和扩容以及本构方程,第四届国际岩石力学会议论文选集, 冶金工业出版社,田良灿等译,1985。
- (11) J.C.Jaegre, N.G.W.Cook, Fundamentals of Rook Mechanics, London 1979.

## MEASUREMEAT OF PALEOTECTONIC RESIDUAL STRESS FIELD BY X-RAY DIFFRACTOMETRY

An Ou Gao Guo bao Li Zhanyuan

(Institute of Earth Crust Dynamics, State Seismological Bureau)

#### Abstract

This treatise has accomplicited residual stresses measurement of three dimensions in rock masses in Honghe fracture zone and Qianxi epsilon shaped structural system, has drawn isopleth and principal stress line m aps of macro—residual stresses as well as isopleth map of micro—residual stresses, has evaluated elastic strain energy density fields of aforesaid two kinds of residual stresses in rock masses in these regions and has de termined their formed periods. The measurement has been based on orthot ropic elastic theory of rock mass and used the x-ray diffraction method.

2