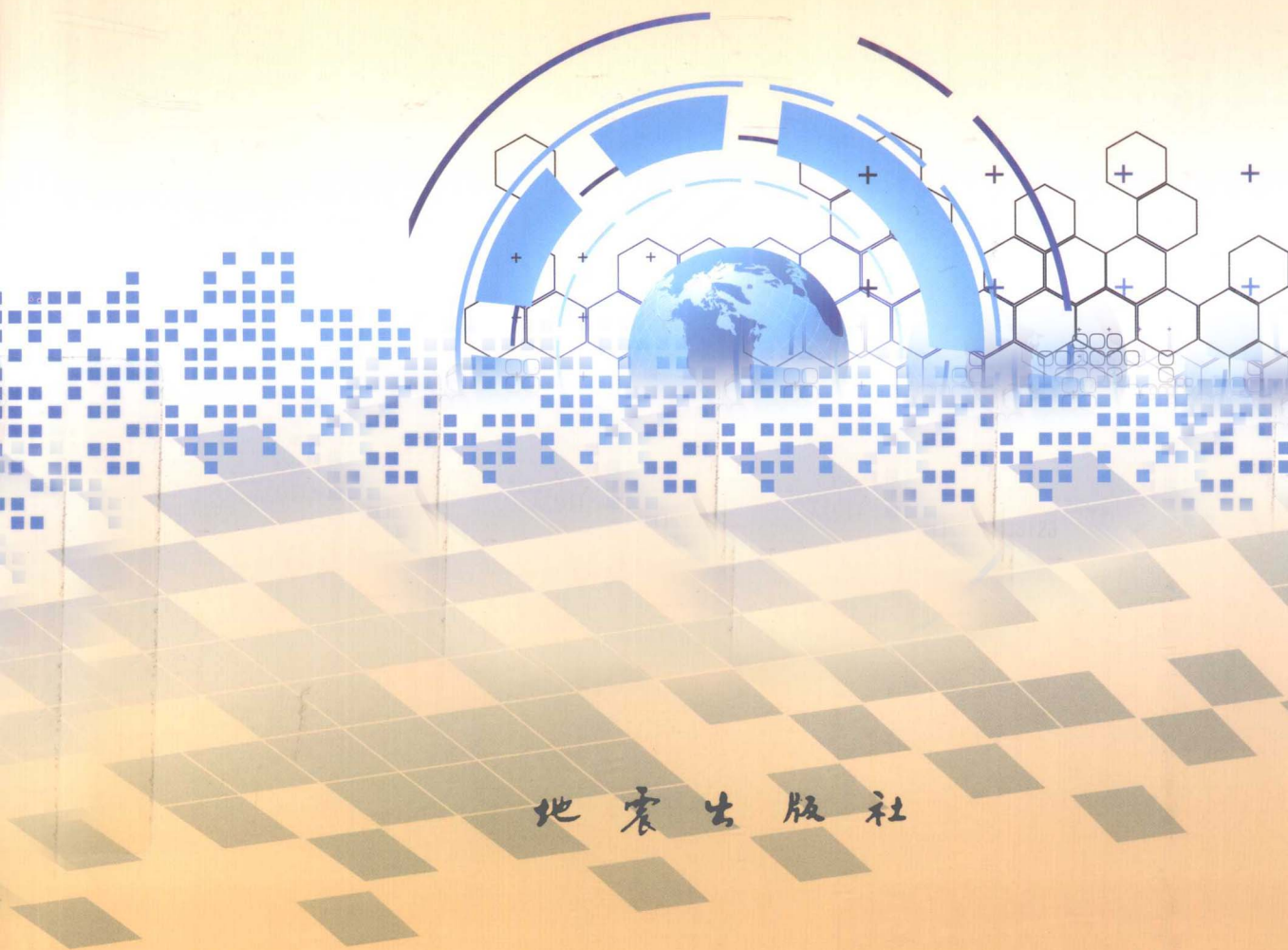


中国地震局老专家科学基金  
中国地震局地壳应力研究所基本科研业务费专项

资助出版

# 地壳残余应力场

安欧 著



地震出版社

# 地壳残余应力场

安 欧 著

地 震 出 版 社

**图书在版编目 (CIP) 数据**

地壳残余应力场/安欧著. —北京:地震出版社, 2011. 4

ISBN 978-7-5028-3852-2

I. ①地… II. 安… III. ①构造地应力-应力场 IV. ①P553

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 032863 号

**地震版 XM 2178**

**地壳残余应力场**

安欧 著

责任编辑: 江楚

责任校对: 庞亚萍

---

出版发行: **地震出版社**

北京民族学院南路9号

邮编: 100081

发行部: 68423031 68467993

传真: 88421706

门市部: 68467991

传真: 68467991

总编室: 68462709 68423029

传真: 68455221

专业部: 68467982

经销: 全国各地新华书店

印刷: 北京鑫丰华彩印有限公司

---

版(印)次: 2011年4月第一版 2011年4月第一次印刷

开本: 787×1092 1/16

字数: 186千字

印张: 7.25

书号: ISBN 978-7-5028-3852-2/P (4493)

定价: 25.00元

**版权所有 翻印必究**

(图书出现印装问题, 本社负责调换)

## 序

固体中的应力场，有现今成因造成的现今应力场和以前曾经存在过的应力场残留至今的残余应力场，它们共同叠加成固体中的现有应力场。

固体中残余应力的研究从 20 世纪初就开始了，随之金属材料的铸造、切削、锻造、焊接、冷加工和热处理产生的残余应力、预应力混凝土中的预应力残留量、玻璃和陶瓷材料生产过程中的残余应力检查等研究，便在工业生产中广为应用。70 年代后发展迅速，对冶金工程、材料工程和机械工程的发展以及解决固体理论强度比实际强度高三个数量级问题都有重要推动作用，了解到固体的破坏或断裂与残余应力有重要关系，明确了构件中的残余应力对使用有利者应给以保留或特意加强，对使用不利者应用退火、振动等方法给以消除或减弱到许用的安全值。

地壳岩体中的残余应力，从 20 世纪 50 年代起便开展了研究。它是地壳古应力场的残余场，与现今应力场一起叠加成地壳现代应力场。这个叠加场是现代地壳运动的动力。

作者 1957 年在迁西地区岩石中发现了地壳残余应力，提出了测量正交异性岩体三维残余应力的 X 射线法，测量了其大小和方向，1958 年公布了结果，1959 年发表了其形成机制，由于是岩体在进行长期塑性变形中形成的而称之为“蠕变应力”，并据之提出了地壳岩体构造变形是岩石在地质时期受当时构造应力和岩体中“蠕变应力”共同作用进行长期蠕变的结果。接着又去原地采样复测，增设了 11 条测线共 96 个测点，得到了迁西山字形构造的残余应力场，并将结果应用于结构面鉴定和构造体系研究。

1985~1994 年在中国西南部龙门山、安宁河、红河、鲜水河四个测区，平行和横跨断裂带布设了 26 条测线共 223 个测点、47 个钻孔深达 7000 余米，以岩体正交异性弹性理论为基础，用测量正交异性岩体三维残余应力的 X 射线法，选测了岩体中轴对称矿物石英、方解石六方晶系的 (001) 晶面系面间距，测得了四个测区残余应力三维主分量及其应变能密度的水平和铅直分布，并将结果应用于地震预测和岩体工程。同时又对我国油田钻井岩芯作了残余应力测量，结果用于油气开发。

世界上，中国、美国、日本、英国、葡萄牙和澳大利亚等许多国家，都已开展了岩体残余应力测量，参与研究的多是国际地学界的名家，实力很强。如，

雷拉特 (1962)、欧伯特 (1966)、汉丁 (1967)、福利得曼 (1967)、丁克霍斯 (1967)、霍斯金 (1970)、耶格 (1972)、思沃夫斯 (1974)、图里斯 (1977)、星野一男 (1978)、布克 (1979)、霍着森 (1979)、布恩 (1979)、恩哥德 (1984) 等。

苏联别辽耶夫院士、乌孟斯基院士，我国陈宗基院士，孙广忠教授，日本米谷茂教授都曾强调残余应力研究在固体力学、金属学、地震学、岩体力学中的重要意义和发展前途。诸家称此种应力为“残留应力”、“封闭应力”、“锁住应力”、“固结应力”、“自平衡应力”、“化石化应力”。

本书对地壳残余应力场的研究，在测量原理、观测技术、研究程度和成果应用上又向前迈出了一步，望能推动本领域的研究和应用活跃发展。

安 欧

2010年12月于北京

# 目 录

<b>第一章 地壳残余应力场概论</b> .....	(1)
第一节 岩体残余应力场力学性质 .....	(1)
一、固体内的应力系统 .....	(1)
二、残余应力自身性质 .....	(2)
第二节 岩体残余应力场分类 .....	(4)
一、固体物理分类 .....	(4)
二、分布范围分类 .....	(4)
三、工程应用分类 .....	(4)
第三节 岩体残余应力场产生机制 .....	(12)
第四节 地壳残余应力场物理特征 .....	(16)
第五节 地壳残余应力场释放途径 .....	(16)
一、加热退火 .....	(16)
二、发生破裂 .....	(17)
三、机械振动 .....	(18)
四、塑性变形 .....	(18)
<b>第二章 地壳残余应力场测量</b> .....	(19)
第一节 残余应力测量 .....	(19)
一、X 射线法特点 .....	(19)
二、测量原理 .....	(20)
三、测量技术 .....	(25)
四、测法要点 .....	(27)
第二节 原场时代测定 .....	(28)
<b>第三章 地壳残余应力场分布</b> .....	(29)
第一节 龙门山测区残余应力场分布规律 .....	(29)
一、水平分布规律 .....	(29)
二、铅直分布规律 .....	(33)
第二节 安宁河测区残余应力场分布规律 .....	(36)
一、水平分布规律 .....	(36)
二、铅直分布规律 .....	(36)
第三节 鲜水河测区残余应力场分布规律 .....	(39)
一、水平分布规律 .....	(39)
二、铅直分布规律 .....	(39)
第四节 红河测区残余应力场分布规律 .....	(46)

一、水平分布规律 .....	(46)
二、铅直分布规律 .....	(51)
第五节 迁西地区残余应力场分布规律 .....	(57)
<b>第四章 地壳残余应力场在地震力学中的应用 .....</b>	<b>(59)</b>
第一节 震源释放的能量 .....	(59)
第二节 控震和触发应力 .....	(61)
第三节 测区内发震机制 .....	(66)
第四节 中长期地震预测 .....	(68)
第五节 跟踪短期预测法 .....	(85)
<b>第五章 地壳残余应力场在岩体力学中的应用 .....</b>	<b>(91)</b>
第一节 对工程的准静态影响 .....	(91)
第二节 对工程的动态影响 .....	(93)
第三节 岩石综合抗断强度 .....	(95)
<b>第六章 地壳残余应力场在地质力学中的应用 .....</b>	<b>(106)</b>
第一节 结构面鉴定 .....	(106)
第二节 构造带鉴定 .....	(106)
第三节 构造体系鉴定 .....	(107)

# 第一章 地壳残余应力场概论

地壳应力，从形成时间上划分，有古应力、古应力残留至今的残余应力和现今应力。残余和现今应力同时存在，叠加成现代地壳应力场。但二者有不同的力学性质、产生机制、物理特征、分布形式和作用途径，因此需要分别测量和论述，而在应用中由于同时存在又要一起使用、发挥作用和作综合处理。

本章对地壳残余应力的力学性质、分类、产生机制、物理特征和释放途径，作一综合论述。

## 第一节 岩体残余应力场力学性质

地壳岩体中的古应力场残留下来的残余应力场和现今成因造成的现今应力场叠加成的现代地壳应力场，是现代地壳运动的成因，影响石油开采、地震活动、岩体工程、液气运移和人类社会活动。

为便于对地壳残余应力场作深入论述，本节先讨论其力学性质。

### 一、固体内的应力系统

固体内的应力，按性质可分两大系统。

#### 1. 开放应力系统

这是有边界载荷时固体内存在的应力系统，在边界处与边界载荷平衡。如地壳惯性应力、重力、热应力、岩石试件受载内部所生的应力。

#### 2. 孤立应力系统

这是无边界载荷时固体内存在的应力系统，在体内自行平衡，可分两类。

##### (1) 内生应力系统。

这是固体内部因素变化产生的应力系统。如玄武岩内的冷却应力、岩土体内的干缩应力、混凝土浇筑的预应力、变质岩的相变应力。

##### (2) 残留应力系统。

这是开放应力系统在体内残留下来的应力系统，又分如下两类。

##### ①宏观自平衡残余应力系统。

这是固体内各小区域之间以相反性质运动维持平衡的应力系统。如金属冷加工残余应力、金属铸件残余应力、陶瓷烧结残余应力。

##### ②微观自平衡残余应力系统。

这是固体内以弹性与塑性微观结构固结维持平衡的应力系统。如，冻结应力，是分子间冷却固结残留下来的应力系统。其形成是由于高分子材料升到一定温度时，其中软化温度较高的聚合分子结成布满材料的连续格架来维持弹性，而其间填充的软化温度低的分子已软化成为基质。加载冷却后，此软化相变硬，并对弹性相的弹性恢复给以阻抗和约束，而使其中的应力保留下来。即应力的这种宏观时空有序分布，是微观作用的结果。从其中平行主平面



切取的薄板表层中的法向应力，由于处在自由表面而向表面法向释放，但里边深处的不变，平行表面的应力在距周边侧面一定距离以里的也不变。故可在体内所需方位切取薄板，进行板面方向的平面残留应力测量。这种残留应力场，可保持冷却冻结时的原应力状态。如，三维光弹性冻结应力模型中的切片应力测量。

## 二、残余应力自身性质

从岩石测件中测到的古应力残余值，简称残余应力，它须满足如下的基本条件：是机械应力；是残留自平衡应力系统。

### 1. 从测件中测到的是机械应力的标志

(1) 用 X 射线法从残余应力岩石测件中测到的是矿物晶粒选测晶面系晶面间距的变化。矿物晶体不受力时，离子间距稳定，离子势能最低而平衡；离子间距缩短，势能上升，受斥力作用，相互推压；离子间距拉长，势能也上升，受引力作用，相互引拉，说明矿物晶面间距法向缩短时受有压力，法向拉长时受有张力。晶面间距的此种变化，反映了相互间弹性形变的压、张应力作用。这是机械应力的固体物理学标志。

(2) 残余应力岩石测件的切片在显微光弹仪上观察，在测量残余应力的矿物中有等倾线和等色线（图 1.1）。这是机械应力的光测弹性学标志。

(3) 垂直残余应力岩石测件的测量表面，都测到了其法向泊松效应。法向泊松应变

$$e'_3 = \frac{d_{90^\circ} - d_0}{d_0} = -(\theta_{90^\circ} - \theta_0) \tan \theta_0$$

式中， $d_{90^\circ}$ 、 $\theta_{90^\circ}$  分别是分布在测件表面法向的晶体间距和其晶面系所反射的 X 射线掠射角； $d_0$ 、 $\theta_0$  分别是测件高温退火后无残余应力时此晶面系的晶面间距和其所反射的 X 射线掠射角。由于测件表面已是自由表面，法向应力已释放，故此法向应变  $e'_3$  是表面方向应力作用引起的横向泊松应变。在残余应力测量中，就是用此结果来算得测件中平行表面方向的残余应力。这是机械应力的固体力学标志。



图 1.1 岩石薄片石英晶粒内放大 100 倍的宏观残余应力场 (a) 和晶粒边界放大 40 倍的微观残余应力场 (b) 的显微光弹性等色线照片

(4) 岩石测件能引起在其中衍射的 X 射线衍射线宽散, 使高  $\theta$  角  $K_{\alpha}$  双线相连而模糊不分。有残余应力的岩石测件中矿物晶粒晶面间距改变  $\delta d$ , 微分布拉格方程得

$$\delta\theta = -\frac{\delta d}{d}\tan\theta$$

则知, 相应的掠射角改变  $\delta\theta$ , 而且对一定的  $\delta d$ , 掠射角单向改变量  $\delta\theta$  随  $\theta$  增加而增大。由于衍射线发生双向角宽化  $2\delta\theta$ , 量取测件有残余应力和经退火后无残余应力时衍射线强度曲线半高双向角宽化范围  $\Delta\theta'$ 、 $\Delta\theta'_0$ , 用其差取代  $\delta\theta$ , 并把  $\delta d$  代之以  $\Delta d$ , 得残余应力引起的衍射线峰值半高双向角宽化度

$$B = \Delta\theta' - \Delta\theta'_0 = -\frac{\Delta d}{d}\tan\theta_0$$

而晶粒过细引起的衍射线角宽化度为

$$\beta = \frac{K\lambda}{D\cos\theta_0}$$

由于从测件中测到的衍射线宽化度与  $\tan\theta_0$  成正比, 与 X 射线波长  $\lambda$  无关, 故其成因是  $B$  而不是  $\beta$ , 与晶粒过细无关, 是受应力作用造成的。这是机械应力的 X 射线物理学标志。

(5) 测件中选测矿物的 X 射线劳埃相上有星芒辐射状衍射斑点, 退火后消失。这是机械应力的 X 射线晶体学标志。

## 2. 从测件中测到的是残留自平衡应力的标志

(1) 用 X 射线法测量岩石测件中的残余应力, 是把岩样从地壳采下来, 制成测件放在 X 射线测角仪上测量, 此时其边界已自由, 而无现今外力作用。故其中的应力场在体内自行平衡, 属残留自平衡应力系统。在同一测件中, 对不同矿物晶粒测得的残余应力是一致的, 这又从不同矿物晶粒间的应力平衡上, 说明了测件内的应力是自平衡应力系统。

(2) 岩石测件中的应力值, 多大于同一测点用钻孔法测得的现今应力值。可见测件中的应力不可能是现今应力的残余部分, 因为残留值不可能大于原值, 而只能是古构造应力的残留自平衡部分。中国西南部残余应力大于现今应力, 也说明其在中国西南部开始形成的晚第三纪地区的构造运动比现今强烈, 并且其残留至今的残余应力场仍然控制着现代大地震的分布; 而现今构造运动正处于舒缓时期, 且大部分是古构造运动的延续, 并有继承性, 当今时代甚或第四纪的地震活动水平比晚第三纪相对平静, 这是地质历史上大地震相对较少的时代。

(3) 所测得的宏观残余应力, 在地表均有铅直分量, 而现今应力在地表的铅直分量应近于零。这也说明, 测件中的应力场不可能是现今应力场的残余场, 而是古构造应力的残留自平衡部分。在上部岩体被剥蚀掉之后, 下部岩体残余应力的铅直分量便暴露于岩体表面或其浅层。

上述说明, 所测得的岩体残余应力, 属残留自平衡应力系统。这是它基本的力学性质, 其各种物理特征也是依此脉生的。

## 第二节 岩体残余应力场分类

### 一、固体物理分类

#### 1. 区域残余应力

在一定区域内均匀一致残留的, 为区域残余应力场。它的特点是使 X 射线通过岩石内矿物晶粒的衍射线的衍射角  $2\theta$  整个移动, 反映晶面间距沿法向的整个张、压性平移变形, 而使岩石发生宏观残余弹性形变, 是晶面受法向张、压力作用造成的。由于其在宏观的大范围内较均匀一致, 并有明确的方向, 故又称为宏观残余应力场。

#### 2. 嵌镶残余应力

在矿物晶粒内或晶粒之间及边界附近残留的, 为嵌镶残余应力场。其特点是使 X 射线通过岩石晶粒的衍射线强度曲线所占的角度范围向高角和低角方向变宽, 反映晶面上的原子或离子沿晶面法向离开晶面而发生阵点离散, 使晶粒发生了面散残余弹性形变, 是由于晶面扭曲和边界嵌镶作用所造成, 是整个晶粒受畸变应力作用的结果。

#### 3. 位错残余应力

在矿物晶粒内滑移面附近局部微观范围内残留的, 为位错残余应力场。其特点是使 X 射线通过岩石晶粒的衍射线强度降低, 反映晶粒内局部范围的原子或离子分布发生点阵畸变, 使晶粒内发生了位错残余弹性形变, 是由于晶面滑移过程中局部位错堆和局部孪生过程引起的局部应力集中所造成。

嵌镶残余应力场和位错残余应力场, 由于发生在晶粒中和其局部微小体积内, 故又统称之为微观残余应力场。

### 二、分布范围分类

岩体中残余应力, 在分布空间范围上也分三种, 它们与固体物理分类基本相应。

#### 1. 块体残余应力

此种残余应力分布在一定区域中, 与区域残余应力相当。

#### 2. 结构残余应力

此种残余应力分布在矿物晶粒边界附近, 与嵌镶残余应力相当。

#### 3. 晶内残余应力

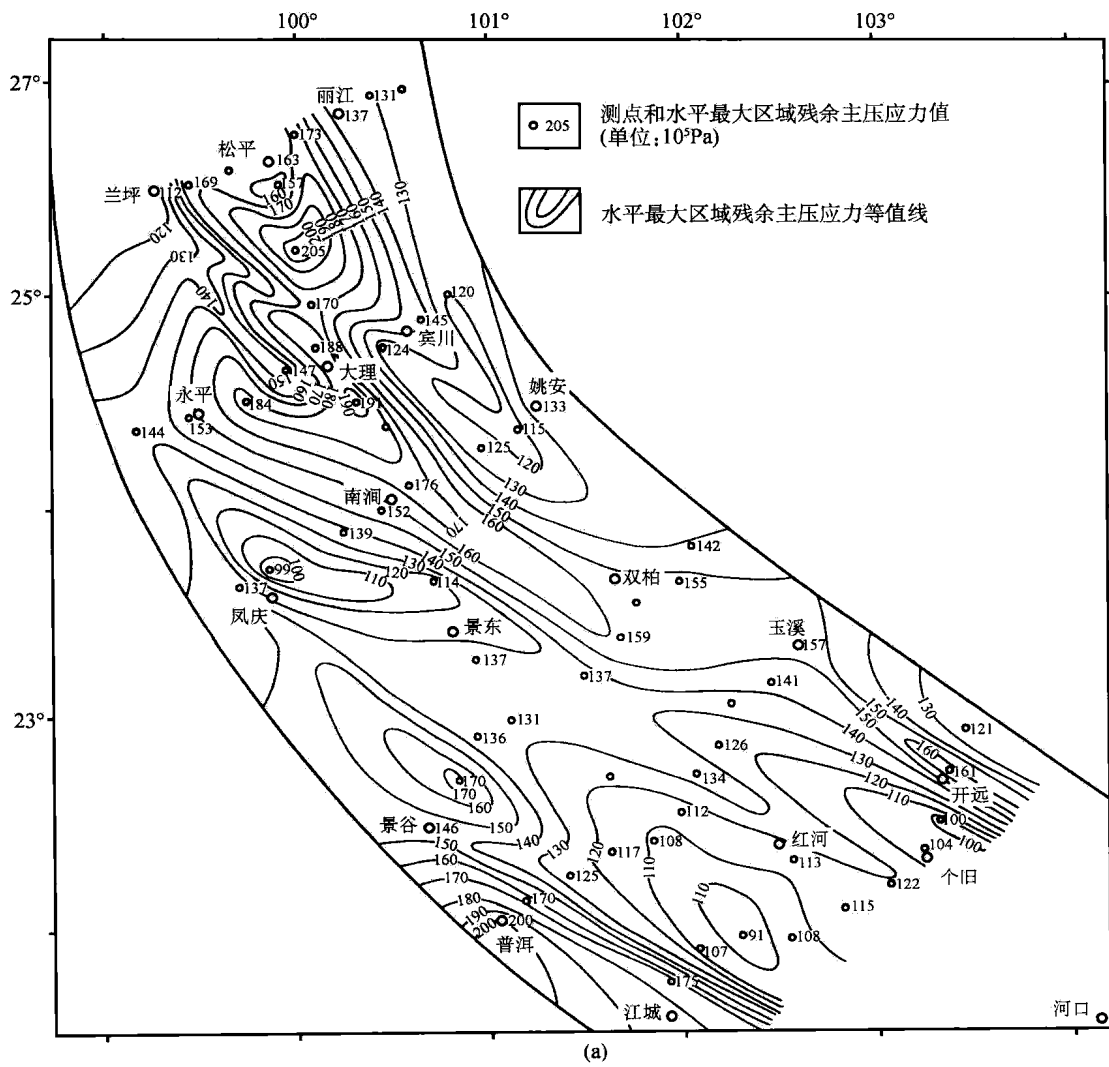
此种残余应力分布在矿物晶粒内, 与位错残余应力相当。

### 三、工程应用分类

实用中, 为方便起见, 常称宏观残余应力为第一种残余应力, 嵌镶残余应力为第二种残余应力, 位错残余应力为第三种残余应力。

岩体嵌镶残余应力约比宏观残余应力小 1~2 个数量级 (图 1.2~1.3), 嵌镶残余弹性应变能密度则比宏观的小 3~4 个数量级 (图 1.4~1.5)。位错残余应力及其荷载能量研究

得很少。因此，本书主要讨论宏观残余应力。



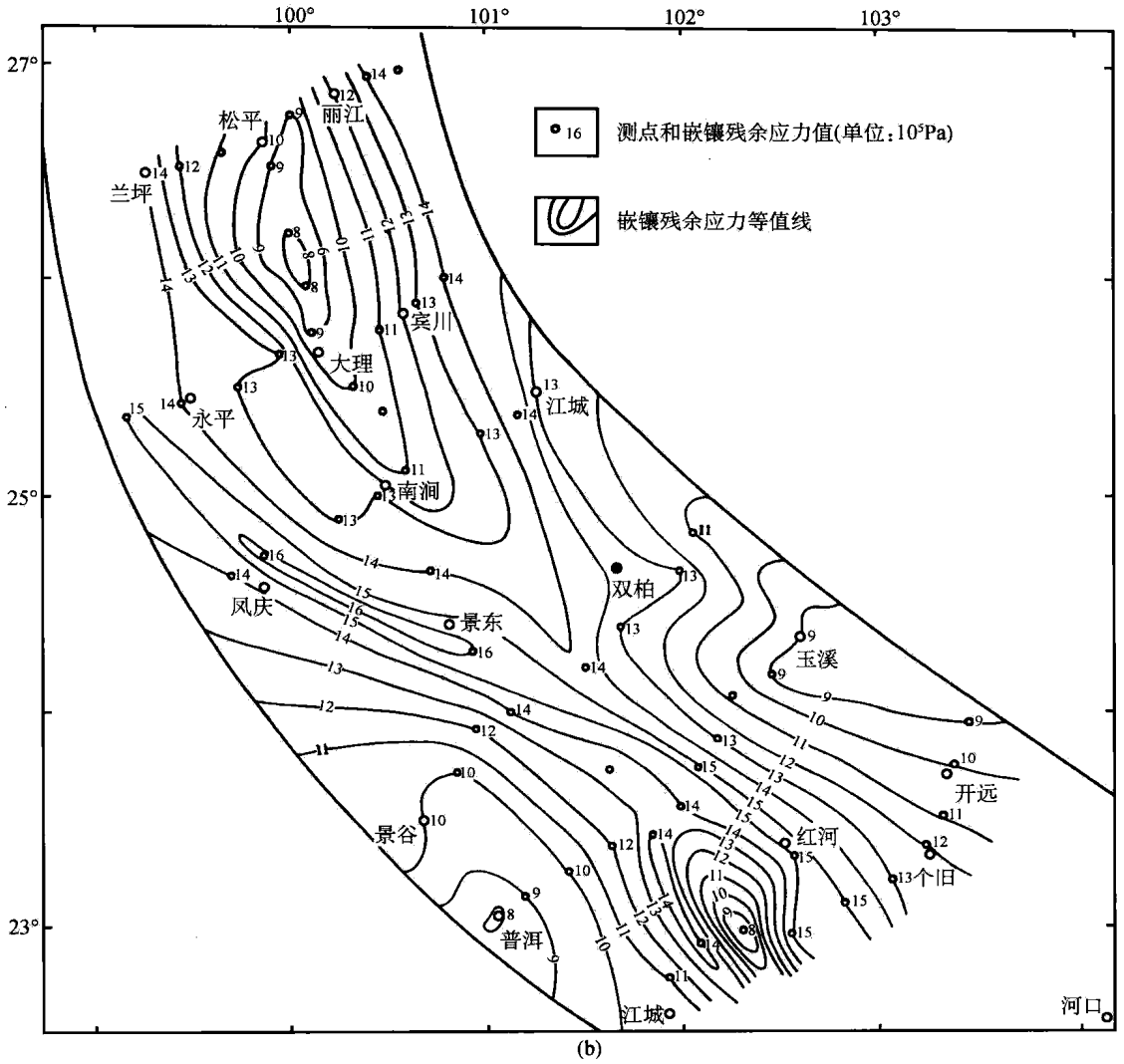
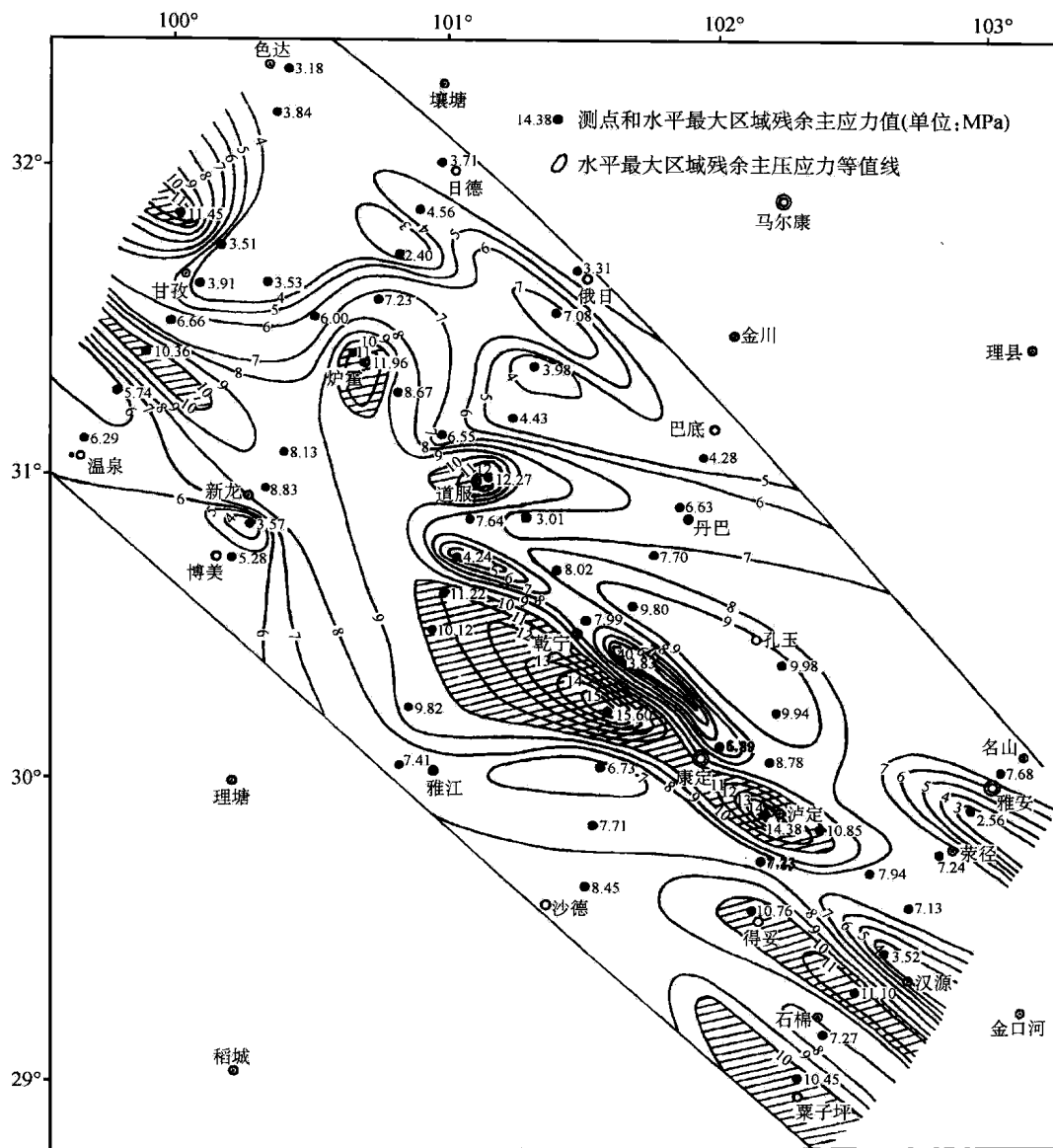
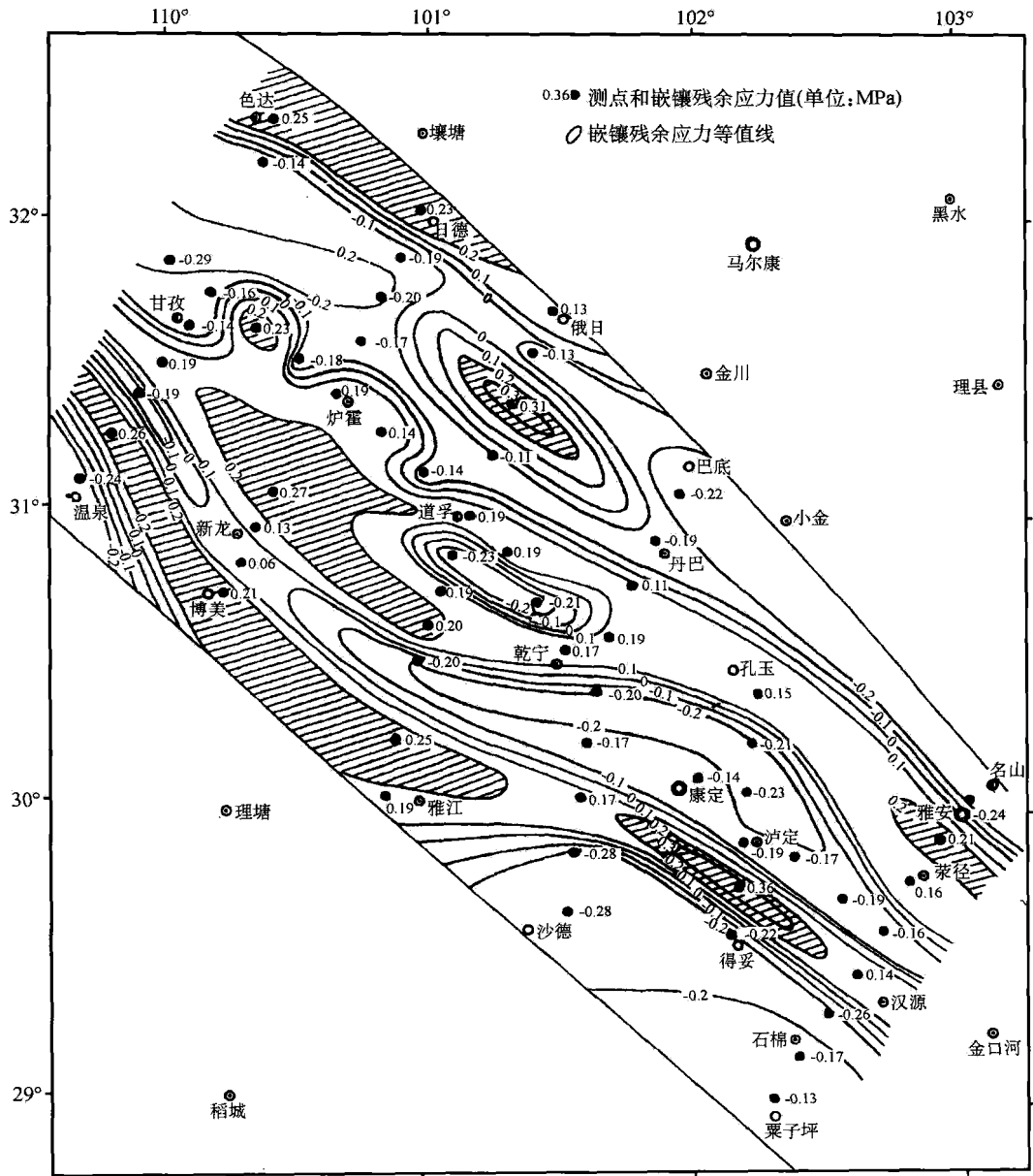


图 1.2 红河断裂带测区用 X 射线法测得的水平最大宏观残余主压应力 (a) 镶嵌残余应力 (b) 水平分布等值线图 (高国宝参加采样和测量)

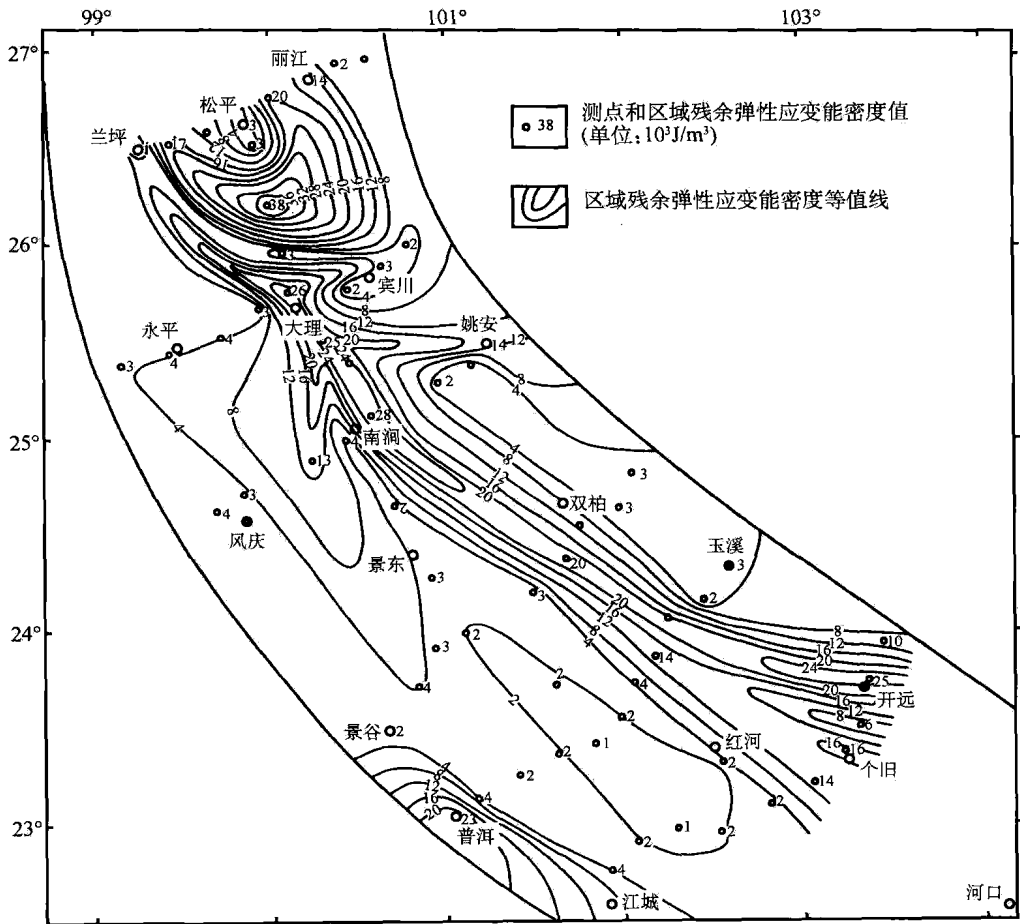


(a)



(b)

图 1.3 鲜水河断裂带测区用 X 射线法测得的水平最大宏观残余主压应力 (a) 嵌镶残余应力 (b) 水平分布等值线图 (高国宝参加采样和测量)



(a)



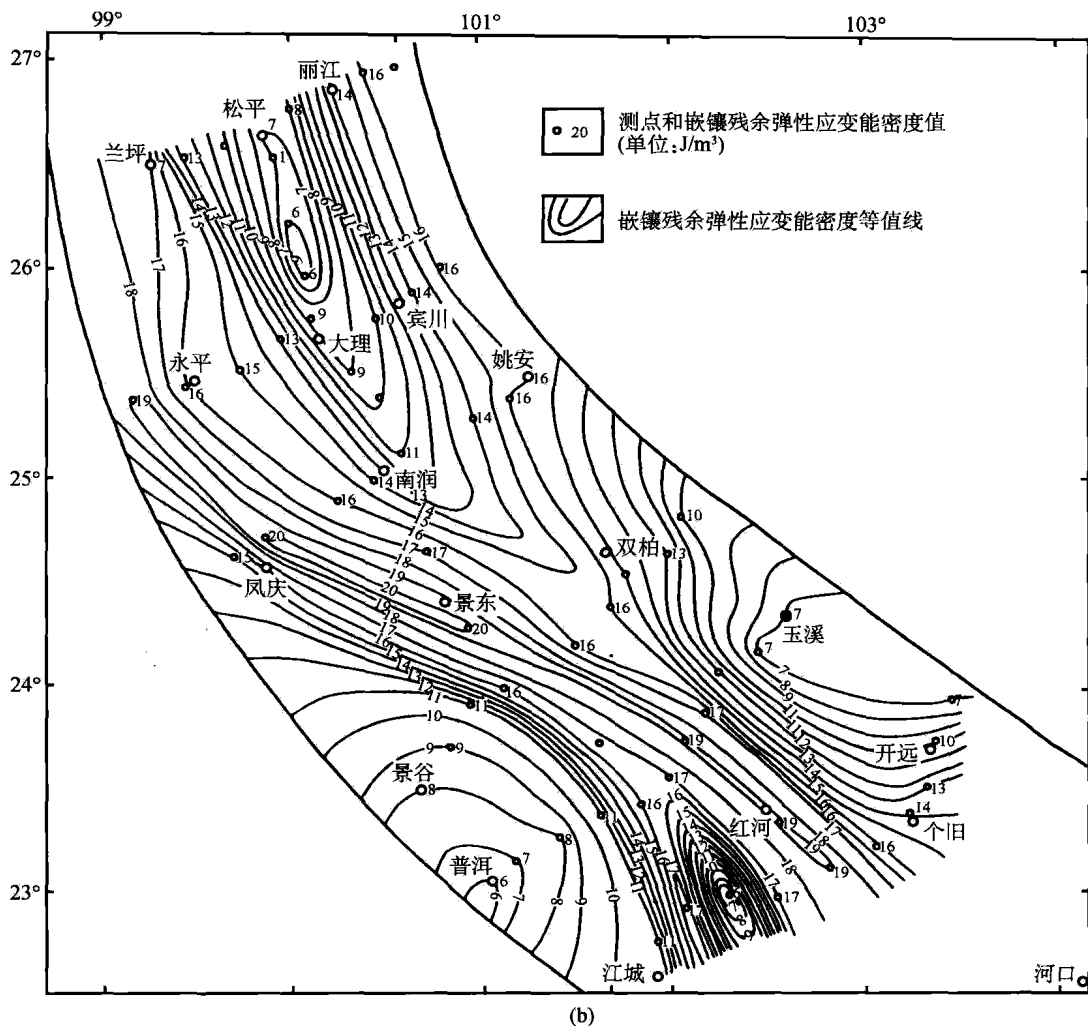


图 1.4 红河断裂带测区用 X 射线法测得的宏观残余弹性应变能密度 (a) 嵌镶残余弹性应变能密度 (b) 水平分布等值线图 (高国家参加采样和测量)