

中国 地壳应力状态

曾秋生 编著



地震出版社

3
52

中国地壳应力状态

曾秋生 编著

地震出版社

1990

内 容 提 要

本书汇集了反映中国地壳应力状态的一系列新资料，并以原地应力测量结果为基础，综合研究了本世纪以来中国地壳应力状态的基本特征。书中还对地壳应力活动分区与地质构造的关系进行了讨论，认为中国地壳应力活动及其分区与地球自转速度的变更有密切联系。

本书可供从事构造地质、地震地质、工程地质和矿山地质等工作的科技人员以及有关大专院校师生参考。

中国地壳应力状态

曾秋生 编著

责任编辑：朱向军

责任校对：王花芝

*

地质出版社 出版

北京民族学院南路9号

北京朝阳展望印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 7.25 印张 182 千字

1990年9月第一版 1990年9月第一次印刷

印数 0001—2100

ISBN 7-5028-0371-8/P·240

(761)定价：4.00 元

前 言

研究地壳应力活动特征和分布规律, 有助于了解现代地壳构造活动的机制。近 20 多年来, 随着原地应力测量技术的蓬勃发展, 地壳应力状态的研究, 无论是在构造地质学、地震预报和地球动力学等科学的研究中, 还是在矿山开采、地下工程和能源开发的生产实践中, 均得到了广泛的应用, 并日益受到国内外地质界和工程界的重视。

目前已有 20 多个国家的许多学者开展了地壳应力状态的研究工作。1958 年, 瑞典的哈斯特首先在斯堪的那维亚地区取得了地壳浅部应力状态的第一批资料, 得到了地下介质处于压力状态、应力值随深度呈线性增加和水平应力值明显大于垂直应力值的结果。莫斯科自然探索者协会地球物理小组、全苏矿山地质力学与矿山测量科学研究所和全苏地质研究所倡导出版的《地壳应力状态》论文集, 汇总了矿山巷道应力直接测量的成果, 格佐夫斯基还编制了中亚地区地壳现代构造应力图和全苏境内地壳最大剪应力绝对值上限分区示意图。美国的海姆森和佐巴克等人, 对美国大陆的地壳应力状态进行了系统而深入的研究, 并编制了美国大陆最大水平主应力方向分布图、最小水平主应力方向分布图和地壳应力分区图。澳大利亚的沃罗特尼斯基等根据矿山隧道应力测量和地震观测资料, 研究了澳大利亚地壳上部的应力状态, 编制了澳大利亚地壳上部的现今应力分布图。日本的田中丰等人根据原地应力测量、水平形变测量和地震观测资料, 研究了日本群岛的地壳应力状态, 编制了日本列岛的最大水平主应力方向分布图。

我国的地壳应力状态研究, 特别是原地应力测量工作, 是在李四光教授的倡导下于 60 年代初期发展起来的, 目前已在地震、地质、冶金、煤炭、石油和水电等部门得到了广泛的应用。例如: 金川矿区的三维应力测量, 为该矿地下巷道的合理设计及施工提供了重要的科学依据; 二滩电站坝区的应力测量, 对于该坝区内一系列重大岩体工程稳定性问题的处理和电站枢纽布局方案的选择, 都有重要的应用价值。

为了适应我国经济建设的发展和科学研究的需要, 作者在参与编制《中国岩石圈动力学图集》中的“中国地壳应力状态图”的基础上, 进一步系统地汇集了中国本世纪以来的原地应力测量、震源机制解、地应变测量、地震形变带和断层微量位移测量五个方面的最新资料和综合研究的最新成果, 编著了本书。

全书共分为七章。第一章绪论, 主要叙述研究地壳应力状态的意义、现状以及研究的方法和内容。第二、三章详细分析中国各区和全国地壳应力状态的基本特征。第四、五章着重阐明中国地壳应力活动分区与地质构造的关系, 以及地壳应力状态的研究在实际中的应用。第六章介绍有关地壳应力状态的实验研究, 以及理论计算结果与实测资料的对应性。第七章讨论中国地壳应力活动的力源问题。

本书丰富的实际资料, 对于岩石圈动力学、地震预报、矿产预测、能源开发和工程建设等方面的研究, 都有一定的参考价值。但由于地壳应力状态的研究进展很快, 且作者水平有

限，书中错漏之处恳求广大读者批评指正。

本书在编写过程中得到了丁国瑜、陈庆宜先生的热情鼓励和指导，陈先生还亲自审阅并修改了全稿。卞兆银、业成之和王宝杰等参加了部分资料的收集、整理和计算方面的工作。在此一并表示衷心感谢。

第一章 绪 论

第一节 研究地壳应力状态的意义和现状

一、研究地壳应力状态的目的和意义

地壳应力状态是岩石圈动力学最重要的研究内容之一。研究地壳应力特征及分布规律,不仅有助于了解现代地壳构造活动的机制和构造运动的发展史,而且对于地震预报、矿产预测、能源开发和大型工程建设都有重要意义。

国际地质科学联合会和国际大地测量地球物理联合会,将地壳应力状态研究列为 80 年代国际固体地球科学研究规划的重要内容,并指出“应力场的研究对了解构造活动过程有明显的重要性。查明应力的方向和量级,对于理解地质构造的所有问题都是必要的,包括应力场的起源以及观察到的各种变形(褶皱、断裂)与应变速率的关系。定量估算作为板块运动驱动力的各种机制,也需要知道全球和区域应力分布的详细资料”。

裴伟更加明确地指出了地壳应力状态研究的重要性。他说,对全苏矿山地质力学与矿山测量科学研究所、哈斯特及其他人用各种不同的解除法测定的那些成果加以综合,就足以对地壳中的全球应力场和区域应力场做出结论,并抛弃了某些大地构造假说,如地球扩张说等(裴伟, 1978)。

李四光教授认为,地震是地应力在组成地壳的岩层中逐渐加强,以致在比较脆弱的处所超过了岩石的弹性强度,产生突然破裂而引起的震动,地震过程是一个力学过程。因此,地震活动必然与地壳应力状态有密切关系,测定地应力的分布与变化,是解决地震预报的关键所在(李四光, 1973)。现有资料和工作结果表明,无论是中国还是全球范围的大地震,大都发生在水平或近于水平应力活动占优势的构造活动区内,而水平应力与垂直应力相当或垂直应力大于水平应力的地区,则很少有强震活动。

各类构造体系,都是在地壳运动过程中不同阶段形成的,一定方式的构造运动所产生的构造形迹,是地应力按一定条件在岩层中作用的反映。若干不同性质构造带在一定地区中的排列和组合,往往呈现某种规律,它反映了该区应力场作用的特点。因此,从这些构造现象就可以追索力的作用方式,而从力的作用方式又可以追索地壳运动的方式。再根据各类构造体系的发育时期及其联合、复合关系,进而分析地质构造发生发展的全过程,就可追索地壳构造运动的演化历史。

在进行大型工程建设前,为了保证工程的安全和资金的合理使用,先要进行选址可行性研究或区域稳定性评价。地壳应力状态的研究,正是开展此项工作不可缺少的重要内容。现有工作结果证明,地壳上层范围里(深达 600—900 米)岩石应力状态有两种类型:一种类型相当于大地静力场,它具有各向同性的流体压力的特征,即 $\sigma_x = \sigma_y = \gamma_H$ 。具有这种应力状态地区的构造活动性往往是不明显或很微弱的;另一种是相当于大地动力场,其特征是水平

的压应力值非常高,并具有十分明显的各向异性,其水平应力往往比大地静压力 γ_H 大50— 100×10^5 帕(甚至超过 500×10^5 帕),而且与现代构造活动有关。由此,根据地壳应力状态的不同类型,不仅可以确定活动区和稳定区,而且还能在构造活动区内寻找出相对比较安全的地带,合理选定工程建筑的场址。

工程场地选定之后,还必须结合当地的地质构造、地形地貌、水文地质和工程地质等具体条件,对场地的稳定性作进一步的研究,而不同的应力状态,将决定着场区断裂的活动方式,以及水库大坝、矿山巷道和场地边坡的稳定程度。例如,在垂直应力占优势的地区,就容易促使正断层活动和边坡向下滑移;在水平挤压力占主导的情况下,就需要考虑主压力方向与断层走向或边坡延伸方向的关系。这是因为二者夹角越小,断层和边坡越容易产生滑移;反之夹角越大,则越有利于增强场地地基的稳定性。可见,研究地壳应力状态,对于正确评定工程场地地基的稳定性也是很重要的。

大量事实表明,岩体应力状态与冲击地压和巷道壁的岩崩、岩爆等问题密切相关。我国科技工作者在矿山工程内进行的原地应力测量和综合研究结果证实:将巷道轴线和采场轴线分别选择在接近最大主应力和靠拢最大剪应力方向上,就能减少巷道的变形破坏,有利于采场的安全与稳定。因此,根据工程所处的不同构造部位和工程地质条件,结合地壳应力作用的特征,合理确定断面的几何形态和跨度,对于保证巷道的相对稳定和生产的安全都有重要意义。此外,巷道的支护方式、采场的布局和回采顺序的合理选定,也都与地壳应力状态有密切关系。

二、地壳应力状态的研究现状

随着科学技术的发展和生产建设的实际需要,地壳应力状态的研究已被越来越多的科学工作者所关注。自50年代初以来,全球范围内已在原地应力测量、地壳形变测量和震源机制解等方面获得大量资料,为研究地壳应力状态打下了良好的基础。目前,中国、美国、苏联、瑞典、日本和澳大利亚的不少学者,都不同程度地对相应地区的应力状态进行了较系统的研究,并取得了有意义的成果。

我国的原地应力测量和地壳应力状态的研究,始于本世纪60年代中期。1965年中国地质科学院地质力学研究所和中国科学院岩土力学研究所为解决水电工程和矿山建设的有关问题,分别在广东新丰江水库区和湖北大冶矿区首次进行了原地应力测量工作。1966年邢台地震后,地质力学研究所和地震地质大队在邢台震区及北京周围先后进行了多处地应力绝对值的实地测量。70年代以来,地震、水电、冶金、地质和石油等部门的一些单位,在我国各地区广泛开展了原地应力测量,取得了150多个测点的实际数据,为研究我国的地壳应力状态提供了丰富的基础资料。

随着地学界和工程界对地壳应力状态的研究在地震预报和各类工程建设中的重要作用的认识的提高,我国科技界,尤其是地震部门的许多科学工作者越来越重视这方面的研究工作,并逐步应用原地应力测量、震源机制解、地壳形变测量和地震断层等资料,对某些地区乃至全国范围的地壳应力状态进行了较系统的研究,取得了一批有理论意义和实用价值的研究成果。如李方全等人从不同角度对整个中国以至邻近地区的地壳应力状态作过比较系统的研究,提出:①我国现今地壳应力状态的区域特征是:华北地区大致以太行山为界,以东的主压应力方向为近东西向,以西为南北向;华南地区以北西向为主;西北地区则是近北北

东向；西南地区不同地块的主压应力方向不一样。主应力值东部比西部偏小。② 地壳应力状态随深度而变化，多数地区水平应力大于垂直应力，但不同构造单元有所不同。水平应力与垂直应力之比值在深 100 米以上较分散，100 米以下趋于线性关系。根据我国现有资料，水平主应力的方向随深度变化不大。③ 地壳应力状态与断层活动方式有密切关系， $\sigma_{Hmax} > \sigma_v > \sigma_{Hmin}$ 时，断层表现为走滑型活动； $\sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin} > \sigma_v$ 时，断层活动以逆冲型为其特征。④ 大震后震中区的应力值低于周围地区，其最大主应力方向与区域主应力方向也有所偏离，经过一段时间后又大体恢复一致。

国际上对地壳应力状态较早进行系统研究的是哈斯特，他于本世纪 50 年代初就在瑞典、挪威、芬兰，以及北起斯匹次卑尔根、南至赞比亚的广大地区，进行了岩石的绝对应力测量和综合研究。到 1969 年为止，在 2 万次左右的测量记录中，全都表现为地壳的水平压缩应力其大小要比同水平面上由覆盖层重量所产生的应力大几倍。此外，他还进一步确定了靠挪威海岸南半部大陆地块的大西洋洋底、芬兰北部、冰岛东海岸及其南部和葡萄牙等地的最大水平压力的方向(哈斯特，1972)。

在苏联，也有很多学者从事地壳应力场的研究。他们通过对 50 年代末以来在煤田、矿山和水电工程区取得的原地应力测量结果的分析，认为：地壳上部的应力状态取决于地壳中的重力场(又称大地静力场)和地质构造应力场(又称大地动力场)。格佐夫斯基在系统研究地壳构造应力场的基础上，利用地质构造、震源机制解和矿山应力测量的资料编制了苏联境内的现代地壳应力图，并以相应的水平剪应力值把苏联境内划分为四种类型的应力区。

美国学者对地壳应力状态也进行过比较系统而深入的研究。自 60 年代初以来，先后在许多地区进行了 100 多个测点的原地应力测量，初步提供了一幅美国大陆主应力方向的图象，并认为，美国大陆的水平主应力方向似乎与古构造线没有明显的关系，但却反映了活断层作用的机制。海姆森和布朗等人还比较系统地研究了水平应力与垂直应力随深度的变化。1980 年，佐巴克等人根据应力测量、震源机制解和地质观察结果，编制了美国境内的水平主应力方向图和美国大陆的地壳应力分区图。

在日本，田中丰和市川政治等人也曾利用原地应力测量、震源机制解和水平形变测量等资料，对日本岛弧地区的地壳应力状态进行了比较系统的研究(田中丰等，1980)，其结果表明，日本列岛地壳应力的主压应力方向是北西—近东西向的，压应力的平均方向与水平面形成的角度很小。实际资料还表明，该区从地表到 1500 米深处的水平应力随深度有明显的变化趋势。大约在 500 米以上的测点，平均水平应力大于垂直应力，且随深度增加而增大；而在 500 米以下的测点，平均水平应力小于垂直应力。

在澳大利亚，一些学者根据 65 个岩石应力测量的结果和近期 5 次地震的震源机制解，研究了澳洲大陆地壳上部的应力状态，并编制了澳大利亚地壳上部的现今应力分布图。他们的结论是：澳大利亚地壳基本处于水平挤压状态，在大多数情况下，平均水平应力比垂直应力大；水平应力随深度增加而增大，其变化速率与垂直应力的变化速率大致相同；在澳洲大陆的东部和西部，主应力方向接近于东西向，而在阿德莱到辛普森沙漠的中部地区，则以南北向应力作用占主导(沃罗特尼斯基等，1982)。

由于地壳应力状态的研究在地学各个领域中的理论探讨和实践方面的重要性，使得这一研究工作在短时间内取得很大的进展。可以预见：随着科学技术的进步和生产建设的需要，地壳应力状态的研究将会得到更广泛的应用和更迅速的发展。

第二节 地壳应力状态的研究内容和方法

一、地壳应力状态的研究内容

研究地壳应力状态,是从解决人们生产活动中的实际问题开始的。因而生产建设的需要,也就决定着所要研究的内容。目前,这项研究工作所涉及的范围大致可以概括为以下几个方面:

(1) 研究地壳应力活动方式。根据原地应力测量获得的水平应力值、垂直应力值和剪应力值的大小及其相互之间的关系,确定相应地区岩石应力是处于大地静态场状态还是处于大地动态场状态。

(2) 研究地壳应力活动强度。大量实际工作结果证明,在一个地壳应力活动处于大地动态场状态的地区,地震活动水平随应力活动强度的增减而变化,应力活动强度越大,地震活动水平就越高,工程场地的稳定性也就越差。因此,研究地壳应力活动强度,并进行分区,对于地震危险性分析和大型工程的选址,都十分重要。

(3) 研究地壳应力的主压应力方向。确定应力集中部位,判断地震危险点,评价工程场地活动断层的活动方式和边坡的稳定性,以及大型水电工程与矿山设计中最佳巷道轴向的选择、合理确定巷道断面的几何形态等,都与地壳应力活动的主压应力方向有密切关系。

(4) 研究地壳应力活动的时空变化特征。在漫长的地史发展过程中,地壳应力活动的时、空变化非常明显,构造运动的阶段性、同期的和不同期的构造运动强烈影响区在空间分布上的差异,都是地壳应力活动时空变化的具体表现。对于判断相应地区地震活动趋势,确定较强地震活动区域,都是必不可少的。

(5) 研究地壳应力活动随深度的变化。地壳应力值的大小和水平主应力的方向随深度的变化,也是大型水电工程、矿山开采和油田开发设计,以及地震科学研究应该着重考虑和研究的问题。

(6) 研究地壳深部应力和浅层应力的关系。深部构造和浅层构造的关系,是地学研究工作十分关注的问题。研究地壳深部应力和浅层应力的关系,对于阐明现代地壳构造活动的机制以及地震预报、矿产预测、能源开发和大型工程场址的选定,都有重要意义。

(7) 研究地壳应力活动的分区性。现有资料表明,现今地壳应力活动,无论是在主压应力方向和活动程度上,还是在活动方式上,都有明显的分区性。这一研究,对于工程建设的选址和场地稳定性评价、地震活动趋势和活动水平的估计、强震活动区域及危险地点的判定,都是十分重要的。

二、地壳应力状态的研究方法

随着地壳应力状态研究工作的迅速发展,用于研究地壳应力状态的方法也逐渐增多,目前较常用的方法有原地应力测量、震源机制解、地壳形变测量和地震形变带分析等。

1. 原地应力测量

早在本世纪30—40年代,鉴于工程的需要,曾用应力恢复法在坑道壁上测量过应力。到50年代,逐步研制出了钻孔应力测量仪器,采用了应力解除法。60—70年代以来,原地应力测量获得了很大的发展,用于应力解除的方法也不断更新。近些年来,随着石油工业的发展,又出现了一种新的深部应力测量方法——水压致裂法。此外,还有波速测定法、X射线

测定法、声发射测定法、热力法、重力法和井下电视法等多种地应力测量方法。下面仅就目前最常用的应力解除法和水压致裂法作一些介绍。

(1) 应力解除法——套芯法原地应力测量。这是目前应用最广泛的地应力测量方法。具体作法是：在需要测量岩石应力的点上，钻一个直径大约为 36 毫米的小孔，把测量元件（应力计）放入孔中适当的位置，同时给元件施加一定的预应力，并记录下仪器的读数。然后再钻一个与小孔同轴的大孔，称为释放槽（图 1.1）。释放槽开完后，岩石就脱离了周围应力场的作用，于是岩芯发生弹性恢复。随着测量元件上的负荷发生变化，仪器的读数也跟着变化。应力释放槽开出前后仪器的读数差值即为“记录应力值”。在测量过程中，只要在钻孔的三个不同直径方向上（通常为互成 60° 或 45° ）放置三个元件，就可以得到三个读数，然后再根据这三个读数，计算出该测点的平面主应力的方向和大小（苏恺之，1985）。

为了得到更加可靠的测量结果，一般可在一个测点上进行多次测量并进行统计分析，以便得到更加接近于该点的真实应力值。大量实验研究和野外实测证实，该方法的测量值误差一般不超过 10%，方向误差约为 $\pm 5^\circ$ （李方全等，1982）。

如果在三个互相正交的钻孔中或者在交角小于 90° 的两个钻孔中进行六次以上的测量，就可以计算出三维应力状态。在一点上进行多次这种测量，用最小二乘方法处理，也可以获得可靠的三维应力资料。

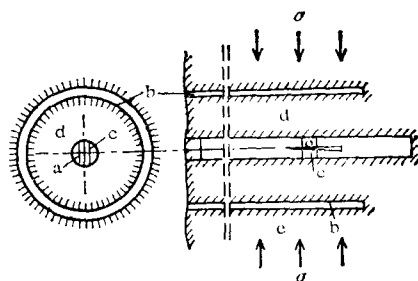


图 1.1 应力解除示意图

a. 测量孔；b. 应力解除槽；c. 测量元件；d. 被解除应力的岩芯；e. 受应力作用的围岩

(2) 水压致裂法。1947 年，为了从旧油井中二次采油，有人提出了水压致裂方法。60 年代，这一方法已被应用于地应力绝对值测量，并在理论研究和室内试验方面有了很大进展。70 年代以来，包括我国在内的许多国家广泛开展了水压致裂测量工作，获得了大量资料，并显示了这种测量方法的优越性。

水压致裂法的工作程序如图 1.2 所示，即选择有代表性的基岩裸露的井孔段，用可膨胀的橡胶封隔器将某一孔段封闭，由地表泵入压裂液加压，并逐渐升高压力，直至钻孔围岩破裂，造成液压突然降低。随后，再继续加大泵量，使破裂进一步扩展。根据所记录到的液压-时间关系曲线（图 1.3）及岩石的有关参数，即可求出主应力值（苏恺之，1985）。在该观测方法中，主应力的方位是利用印痕封隔器测量出的破裂方位而定出的。

水压致裂法能直接测量较深处的绝对应力状态，无需了解和测定岩石的弹性模量，甚至连岩石的抗张强度 σ_T 也可以用水压曲线的分析求出。最小主应力值 σ_{Hmin} 完全与岩石力学参量无关。与应力解除方法相比，其测量应力的空间范围较大，受局部因素的影响较小，且不需要套芯工序，可直接利用石油钻井及其它工程的勘探孔进行压裂。但本方法在理论及技术上还不够完善，测量结果的精度也还不够高， σ_{Hmax} 值的误差估计为 25% 左右， σ_{Hmin} 的误差约在 10% 以内。还有，水力压裂车等野外试验装备较笨重，观测成本也很高。

2. 震源机制解

地震发生时，震源运动过程的一个重要结果是辐射地震波。地震波传递着震源信息，通过它可以直接了解震源处的运动特征，进而分析地壳应力状态。地震纵波（P 波）到达接收

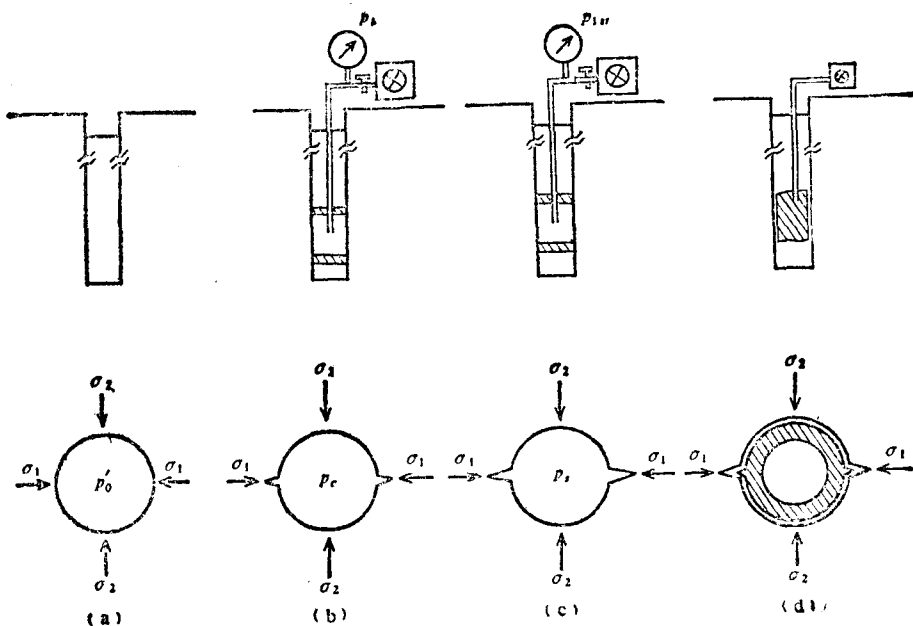


图 1.2 水压致裂法工作程序 (示意)

(a) 钻井; (b) 压裂, 液压 P_L ; (c) 瞬时封井压力 P_L''' ; (d) 测量裂隙方位

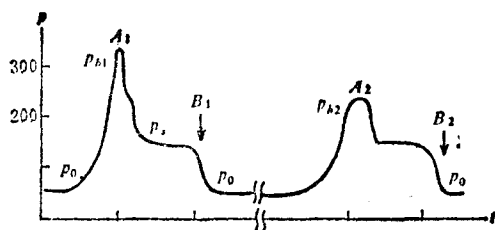


图 1.3 水压致裂中的水压记录曲线 (示意)

A_1 第一次破裂, P_{h1} 为第一次破坏压力; B_1 第一次开启液泵阀门, P_0 为孔隙压力; A_2 第二次破裂, P_{h2} 为第二次破坏压力; B_2 第二次开启液泵阀门

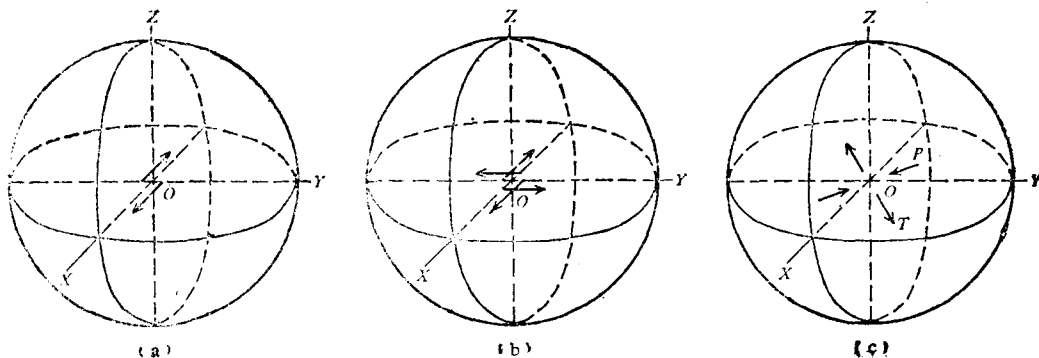


图 1.4 震源运动模式

(a) 单力偶源; (b) 双力偶源; (c) 主应力方向

器的第一个振幅方向（即称初动方向），在地面分布上呈现一种特殊的图象，这种图象反映了震源的运动过程，它与断裂的产状及力的作用方式有直接关系。震源运动过程可以用一个模式来表示。最简单的为单力偶模式，如图 1.4(a) 所示。它在 XOY 面内模拟沿 X 轴有大小相等方向相反的一对力作用的震源运动， XOZ 面则相当于断层面。据理论计算，在 XOZ 面和 YOZ 面相互正交所划分的四个象限区内，属于力的正方向的两个区域，辐射初始振动为压缩（+号）的纵波。属于力的反方向的两个区域，辐射初始振幅为膨胀（-号）的纵波。它们与地面相交，在地面上形成两条相交的节线，将纵波初动符号分布分割成正负相间的四块地区。这样，当地震时，在地面观测站垂直向地震仪上就能接受到一个与压缩纵波相应的向上的运动（+号），或者一个与膨胀纵波相应的向下的运动（-号）。

能够解释 P 波初动符号分布的还有一种双力偶模式，如图 1.4(b) 所示。它在 XOY 面内模拟沿 X 轴和 Y 轴同时有大小相等方向相反的两对力作用，而且完全等效于图 1.4(c) 中的主压力 P 和主张力 T 。根据地震横波和面波波动图象观测分析，多数地震与双力偶源比较符合。

根据上述原理，当求取震源运动参数时，首先在乌尔福网上找到每个观测台站的位置，并标出各自的初动符号，再划两条大圆弧，将它们分隔为正负相间的四个区域。这两条大圆弧就是 P 波的两条节线（图 1.5）。由此我们便可以求出震源运动的所有参数（表 1.1）。按照这个方法求解的精度可分为 A、B、C、D 四类。资料比较丰富、象限分布比较好、节线可变动范围小的为 A 类；节线可变动范围不大、资料不够丰富、或资料虽然丰富但节线可变

表 1.1 震 源 运 动 参 数

参 数 名 称	走 向	倾 向	倾 角	仰 角
节 面 A	$\widehat{NA}$	$\widehat{NY'}$	$Y_A A''$	$X'X_A$ $Y'Y_B$ $N'N$ $P'P$ $T'T$
节 面 B	$\widehat{NB}$	$\widehat{NX'}$	$X_B B''$	
X_A 轴	$\widehat{NX'}$			
Y_B 轴	$\widehat{NY'}$			
N 轴	$\widehat{NN'}$			
P 轴	$\widehat{NP'}$			
T 轴	$\widehat{NT'}$			

动范围稍大一些、且存在不符合点的定为 B 类；节线可变动范围较大、资料不够丰富或略有混乱、但节线位置基本可靠的为 C 类；初动资料很少，虽能划出两条节线，但可靠性差，仅供参考的为 D 类。

3. 地应变测量

测量地表各点位置的变化，是描述和研究地壳运动及地壳应力状态的重要途径之一。当一点在空间运动时，它的位移有三个分量：一个是垂直于水平面的，反映的是地表本身的升降，通常用水准测量来求得；另两个分量是水平面上的，通常用三角测量和三边测量等方法求得。根据水平面上的变形可设法推算出水平应力的方向和大小。应该说明的是：水平形变测量是将地壳中的应变积累过程近似地作为一个平面问题来考虑的，并假定地壳介质是各向同性和均匀连续的，然后用应变摩尔圆图解水平形变参数。

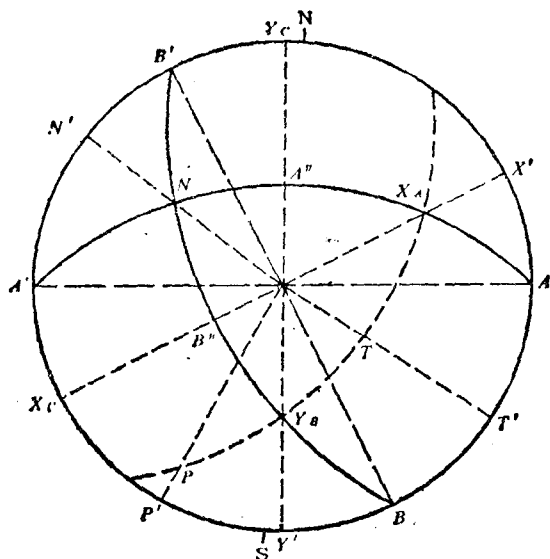


图 1.5 图解震源运动参数示意

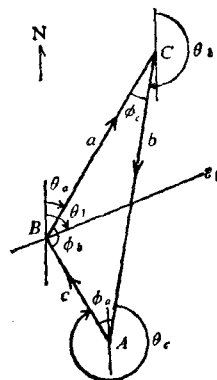


图 1.6 三边测量图形

弹性力学理论表明：平面上一点附近地区的变形程度可以由沿 X 方向和 Y 方向的线应变 ϵ_x 、 ϵ_y 和 X 、 Y 方向之间的剪应变 γ_{xy} 这三个量代表。也就是说，一点相对于任意邻点间的距离和方向的变化，均可通过以上三个量计算出来。

我们在整理计算测距网资料时，只要计算出三个方向的线应变，就可以求出主应变和主方向。在三边测量中，如果测得三边 a 、 b 、 c 的方位角分别为 θ_a 、 θ_b 、 θ_c (图 1.6)，设最大拉应变 ϵ_1 的方位角为 θ_1 ，则 a 、 b 、 c 三边与 ϵ_1 方向的夹角分别为 $\theta_1 - \theta_a$ 、 $\theta_1 - \theta_b$ 、 $\theta_1 - \theta_c$ 。设测得沿这三边的线应变为 ϵ_a 、 ϵ_b 、 ϵ_c ，代入线应变计算公式得：

$$\epsilon_\phi = \epsilon_1 \cos^2 \phi + \epsilon_2 \sin^2 \phi = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2\phi$$

$$\epsilon_a = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2(\theta_1 - \theta_a)$$

$$\epsilon_b = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2(\theta_1 - \theta_b)$$

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{2} + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{2} \cos 2(\theta_1 - \theta_c)$$

联立这三个方程式，就可以解出 ϵ_1 、 ϵ_2 和 θ_1 ，即主应变和主方向。当三角形诸边的方向是任意时，解这组联立方程式比较麻烦，可以用应变摩尔圆图解法求出。

用三边测量结果求主应变和主方向作图法的具体步骤是：

- (1) 任意作一横线，选好表示线应变的尺度；
- (2) 在 ϵ_a 、 ϵ_b 、 ϵ_c 处画三条垂直线 I、II、III；
- (3) 在中间那条线 II (在这个例题中是 ϵ_c) 上任意取一点 P ，按基线 a 与 b 的夹角 (30°) 作斜线与 I (ϵ_b) 相交于 Q ，按基线 c 与 b 的夹角 (61.5°) 作一斜线与 III (ϵ_a) 相交于 R ；
- (4) 经过 P 、 Q 、 R 三点作一个圆，其圆心就是 PR 和 PQ 的垂直平分线的交点 M (图 1.7)；

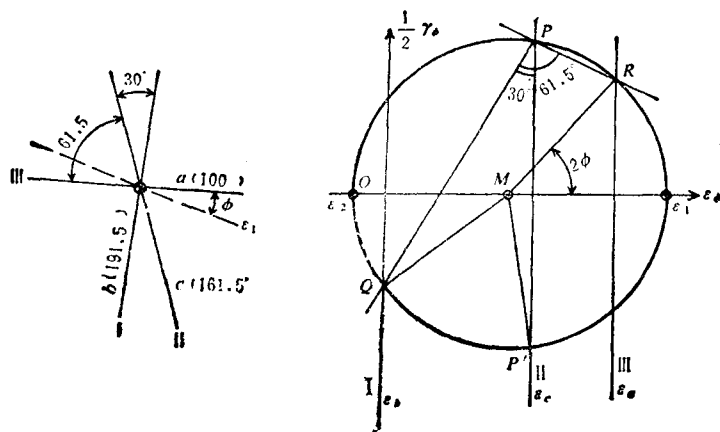


图 1.7 应变摩尔圆图解主应变和主方向

(5) 过 M 点作一水平线，就是 ϵ_x 轴线，圆与 ϵ_x 的两个交点就是 ϵ_1 和 ϵ_2 ；

(6) 从圆上量 ϵ_1 点与 R 点的圆心角 2ϕ ，它的一半就是 ϵ_1 方向与基线 a 方向的夹角。

我们在求测距网中每个小三角形的水平形变参数时，就是按上述步骤图解出来的，所求出的数字代表这个三角形区域内的应变，可把它画在三角形的重心点上。

整个测距网的水平形变参数是用玫瑰花图法解得的。具体作法是：把全网（锁）所有小三角形的最大压应变轴按其方位以 20° 为一组（如 $0^\circ-19^\circ$ ， $20^\circ-39^\circ$ ，……），然后找出具有明显优势的（即包含最大压应变轴最多的）一组，取这组的平均最大主应变变量代表全网的最大主应变变量，其最大压应变轴的平均方位代表全网的最大主压应变轴方位。我们选择几个地区的相同的基础资料，将测距网作为一个整体，上计算机进行水平形变参数的统一计算，经检验，证明其结果非常接近，精度是可信的。

4. 断层微量位移测量

由于地壳结构系由不均匀弹性介质组成，其运动所产生的水平分量比垂直分量普遍大得多（李四光，1973）。在水平应力的作用下，地壳变形存在连续和不连续两种根本不同的形式。在连续变形条件下，则以应变的形式显示出来；而在不连续的情况下，其变形则以不连续面上的蠕动或相对位错的形式显示出来，这种断层的蠕动或相对位错是受与断层成一定夹角的应力作用而产生的。目前高精度基线和水准测量得到的位移矢量，其主要成分是反映断层的蠕动或相对位错的运动轨迹，在一定的岩石力学条件下，便可推断出断裂的受力方向（业成之，1986）。

据黄忠贤等人的二维模型实验结果可知：构造应力的主压应力方向要比震源释放的主应力方向更偏近断层一些。当断层的粘滑运动沿着原有断层面发生时，主应力方向与断层面的夹角应当在几度到不大于 60° 的范围内（黄忠贤，1980）。对刻有断层的粘土模型进行从 0° 到 90° 方向的加压实验，结果表明：在不同角度的压力作用下，断裂具有不同的位移方式（图 1.8，表 1.2）。

此实验假设条件虽然较为简单，但对断裂两旁的质点在受力后所产生的不同位移方向仍

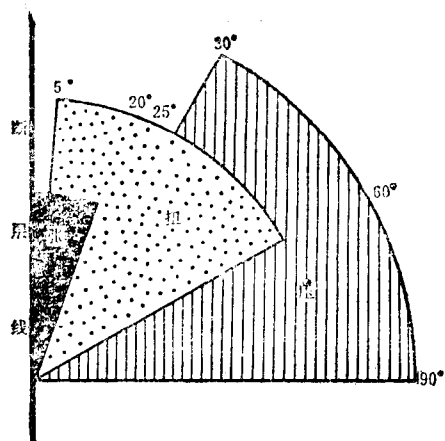


图 1.8 受不同方向压力作用的断层活动方式

表 1.2 受不同方向加压实验断层位移方式

压力轴与断层夹角	断层位移方式
$0^{\circ}-20^{\circ}$	以张为主
$30^{\circ}-60^{\circ}$	兼有扭压
$>60^{\circ}$	以压为主
$20^{\circ}-25^{\circ}$	扭动量最大

可得出定性的认识，概括为以下两种情况：

(1) 当压应力轴与断层夹角大于 25° 时，断层两盘质点作指向断层面方向移动，且质点移动方向与压力轴向大体一致。

(2) 当压力轴与断层夹角在 $0^{\circ}-25^{\circ}$ 之间，断层两盘质点作背离断层面方向移动。其中，当夹角接近 0° 时，质点移动方向与断层近于垂直；当夹角接近 25° 时，质点移动方向与断层几乎平行。

根据上述结果，可以从断层相对总体位移矢量，推断挤压作用力的方向。当总体位移矢量趋向断层面时，则推测挤压作用力方向基本与位移方向一致（图 1.9 a）。当总体位移矢量背离断层面时，推测挤压作用力方向与断层面成 $0^{\circ}-20^{\circ}$ 夹角（图 1.9 b）；当质点背离

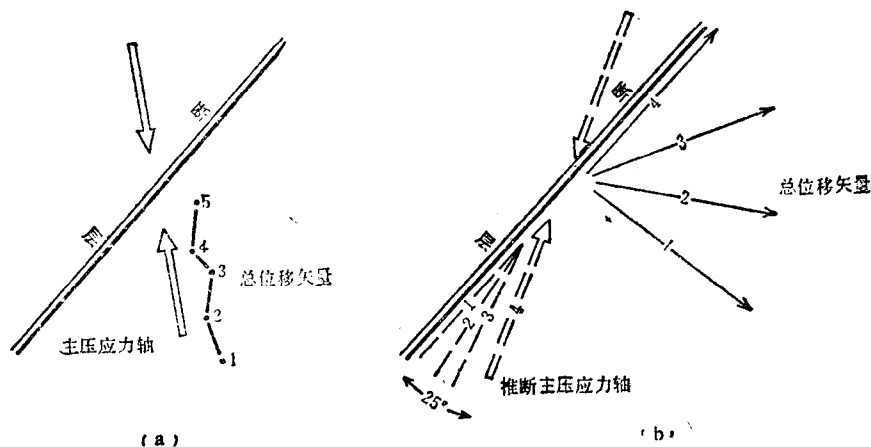


图 1.9 不同位移方向所判定的挤压作用力方向

(a) 总体位移矢量趋向断层面；(b) 总体位移矢量背离断层面

断层的移动方向与断层成 90° 角时，压力方向与断层平行 (0°)；当质点位移方向与断层面平行时，压力方向与断层面夹角为 $20^{\circ}-25^{\circ}$ 。

跨断层测量位移矢量的计算，依目前资料有两种情况：

(1) 跨断层三边测量：确定不跨断层的一边为固定边 s ，二端点 A 、 B 为参考点（图 1.10），根据 a 、 b 二边长度的变化，计算断层另一盘点位 P 的相对位移量（坐标增量）。

$$dx_p = \frac{aq}{hs} da + \frac{br}{hs} db$$

$$dy_p = \frac{a}{s} da + \frac{b}{s} db$$

式中 da 、 db 分别为二期 a 、 b 各自的差值。

(2) 跨断层二边测量（垂直及斜交于断层面基线各一条）：以垂直于断层的基线长度的变化及断层的水平扭动量为直角坐标，确定二盘相对位移矢量。

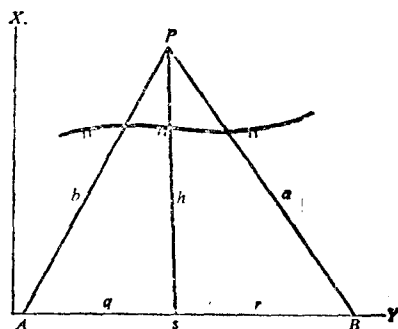


图 1.10 跨断层三边测量

5. 地震形变带分析法

通过对地震过程中产生的地表形变现象的展布特点、力学性质和组合形式的分析，推断地震发生时的力学特征和发动地震的构造应力场状况，可为研究现今地壳应力状态提供重要资料。由于地震过程出现的地表破坏现象往往是构造的和非构造的混杂在一起，在研究处理各类资料时，应特别注意发震构造的直接和间接的破坏形迹，尽量消除地震影响场的构造牵动现象。此外，分析破坏形迹的力学特征时，还应注意形迹的成生序次。

分析过程主要是依据弹性破坏理论，用地质力学方法进行的。基本程序是：在查明地裂缝为主的构造形迹的展布及其特征的同时，着重研究各种构造形迹或结构要素的力学性质，并确切辨别构造形迹的序次，再按照序次查明同一断裂面力学性质可能转变的过程，最后根据它们的组合形式，用应变椭球原理进行归纳解析，从而确定地震过程的主压应力方向（李四光，1972）。

运用应变椭球解析构造现象并推断主压应力方向时，其精度有时很差，这与宏观破坏现象的发育程度有密切关系。如若各类力学性质的形变现象发育齐全、抑或虽然发育不很齐全但能较确切反映作用力方向的结构面表现得很充分，那么，推断出来的主压应力方向的精度就高，反之，其误差就大。

根据上述这些方法所取得的资料就可进行地壳应力状态的研究。从使用资料角度考虑，在目前国内外许多学者中，其研究方法可以概括为应用单项资料的、几项资料并用的和以某项资料为主辅以其它资料进行研究的三种情况。在以往的研究中，哈斯特是应用单项资料进行研究的典型代表。他应用岩体中直接测量的应力资料，研究了芬兰-斯堪的那维亚以及北起斯匹次卑尔根，南至赞比亚的广大地区的地壳应力状态。日本学者在研究中是几项资料并用的，他们系统地整理了原地应力测量、地壳形变测量和震源机制解资料，综合研究了日本岛弧地区的地壳应力状态。澳大利亚学者对澳洲大陆地壳上部应力状态的研究，也类似此种情形。本书的研究方法，更具有系统性和综合性。

从当前现状看来，在研究地壳应力状态工作中，比较多的学者采用的是以某项资料为主并结合其它资料的方法进行的，但其侧重点和结合的程度差别很大。例如：佐巴克等人主要是应用原地应力测量资料，结合震源机制和地质观察结果，编制了美国境内的地壳应力图；

格佐夫斯基编绘的全苏现代地壳应力图，重点是根据地质资料，辅以震源机制解和矿山应力测量结果；邓起东和李坪等人在研究中国构造应力场时，也是侧重地质分析并结合震源机制和地震断层资料进行的。此外，如黄培华等人，应用卫星重力资料探讨深部地壳应力场，也取得了一定的进展。

到目前为止，凡是研究地壳应力状态随深度变化的学者都有一个共同点，就是他们所使用的都是原地应力测量结果。尽管在研究方法上至今仍存在上述三种情况，但应用多项资料进行综合研究，则是未来发展的主要趋势。