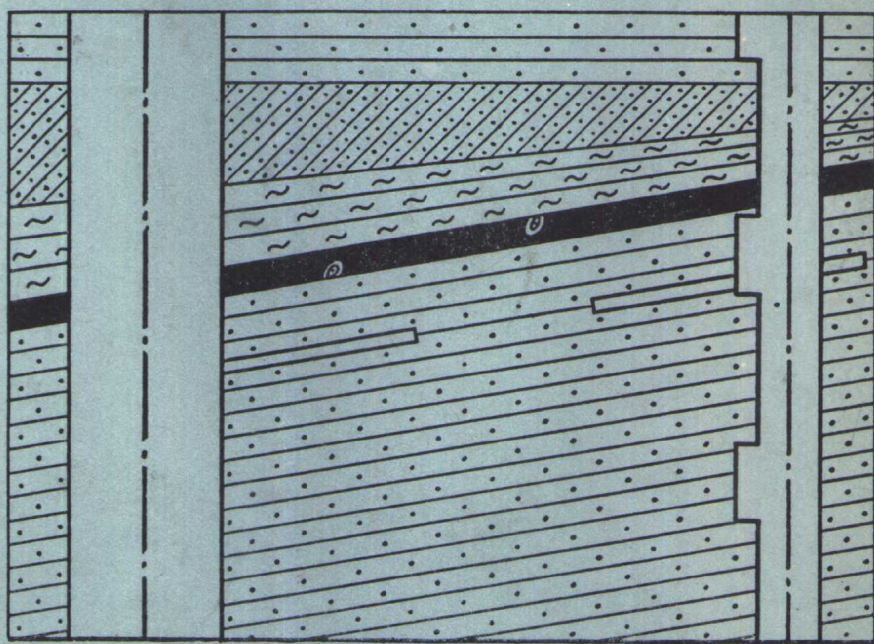


地壳应力状态

〔苏〕 A. B. 裴伟等著

国家地震局地震地质大队情报资料室译



地震出版社

41
5

地壳应力状态

〔苏〕 A. B. 裴伟等著

国家地震局地震地质

大队情报资料室译

地质出版社

1978

译 者 的 话

本文集总结了在苏联境内及国外的各种岩体中进行直接测量取得的资料。这些资料表明,在地下不很深处就发现了很大的水平挤压力,它是由于构造力的作用而产生的。所得出的结论对于预防矿井和隧道中的冲击地压及矿柱变形很重要,对于了解造山作用、褶皱作用和地震产生过程的机制也具有普遍意义。可供地球物理、地质、矿山工程设计与建筑工作者和采矿工程师参考。

本书包括十七篇译文,其中七篇由地质力学研究所丁元辰同志协助校对,在此表示感谢。

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
МОСКОВСКОЕ ОБЩЕСТВО ИСПЫТАТЕЛЕЙ ПРИРОДЫ

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ

(ПО ИЗМЕРЕНИЯМ В МАССИВАХ ГОРНЫХ ПОРОД)

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»

Москва 1973

地壳应力状态

〔苏〕 А. В. 裴伟等著

国家地震局地震地质

大队情报资料室译

*

地震出版社出版

北京三里河路54号

北京印刷二厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 $6\frac{3}{4}$ 印张 180千字

1978年8月第一版 1978年8月第一次印刷

统一书号: 13180·42 定价: 0.60元

目 录

研究地壳应力的新途径.....	A.B. 裴伟 (1)
由矿井和矿山中实测的应力估计地壳应力状态的 可能性.....	Г. Т. 涅斯捷连科等 (5)
根据直接测量的资料研究地壳中的构造应力.....	П. Н. 克鲁泡特金 (10)
根据矿山巷道测量和构造物理分析的资料看地壳 的应力状态.....	М. В. 格佐夫斯基等 (17)
根据希宾地块的测量资料研究构造应力场.....	И. А. 杜尔恰宁诺夫等 (27)
基洛夫(克里沃罗格) 矿山花岗岩体的应力状态.....	П. А. 鲍格丹诺夫等 (32)
米尔加立姆赛矿区(南哈萨克斯坦) 石灰岩原状 岩体的应力测量.....	Р. К. 特维尔多夫斯基等 (34)
杰兹卡兹甘矿床背斜构造应力场的试验资料.....	Ю. И. 恰勃达罗娃等 (38)
戈尔诺绍里亚构造因素与现代应力场的关系.....	А. Т. 沙曼斯卡娅等 (42)
乌拉尔矿区岩石的应力状态.....	Н. П. 弗洛赫等 (48)
维索科戈尔和科奇卡尔矿床岩体应力的试验研究.....	В. В. 贾科夫斯基等 (59)
里沃夫-沃伦和顿巴斯煤田岩体应力的研究成果.....	П. Я. 加卢什科等 (66)
库兹巴斯煤田应力状态试验研究成果.....	М. В. 库尔列尼亚 (71)
河谷两侧裂隙岩体中自然应力的分布规律.....	В. М. 库捷波夫 (76)
原状岩体的应力状态在空间和时间上的变化.....	С. А. 巴杜金等 (84)
斯堪的纳维亚、西欧、冰岛、非洲、北美岩石应 力状态的测量结果.....	П. Н. 克鲁泡特金 (90)
从地下坑道天然应力测量分析中得出的几点结论.....	Н. К. 布林 (98)

研究地壳应力的新途径

A.B. 裴 伟

由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(ВНИМИ)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。在这些测量中考虑到地下巷道附近的应力集中:测量通常在距巷道足够远(5—20米)的钻孔底端进行^[10, 6]。上述成果在一些情况下只能看成是近似的成果或提供定性的评述(例如,乌拉尔某些矿山中的许多测量成果,参见H.П.弗洛赫等人的文章),在另一些情况下则可看作是原状岩体中应力的相当精确的定量特征。在Г.Т.涅斯捷连科等人的文章中,叙述了用以获取这些特征的各种应力解除的方法。

从文集材料中得出,在进行试验的地壳上层范围里(即深达600—900米)岩体应力状态有两种类型。一种类型相当于应力大地静力场,如П.Я.加卢什科等人的文章中所指出的那样;另一种情况相当于大地动力场,在这里除了重力场即上覆岩层的重量外,应力还由其它构造的或综合的因素(如新构造运动)所造成。

在大地静力场的情况下,应力常常相当准确地符合A.H.金尼克公式。这些公式首先是由瑞士构造学家A.海穆^[9]论证的。在距地表深H的原状岩体中,垂向压应力在这种情况下等于上覆岩体重量所造成的压力: $\sigma_z \approx \gamma H$,式中 γ ——这些岩体的容重。水平向的压应力 $\sigma_x = \sigma_y \approx \lambda \gamma$,式中 $\lambda = \frac{\mu}{1-\mu}$ ——横压系数, μ ——泊松比,一般在0.3左右。在这种情况下 λ 值介于0.3和0.6之间^[5]。 σ_x 、 σ_y 值的局部偏离可能与各种岩石的力学性质的不均匀及断裂上应力集中等有关,但这些局部误差不应当很大,不可能超过计算值的50%。

里沃夫-沃伦煤田的沉积岩层(深330—530米),库兹巴斯的含煤地层(深80—200米)和乌拉尔的维索科戈尔铁矿(深262—380米)和科奇卡尔金矿(深110—710米)中所完成的测量成果大致符合应力大地静力场的那些条件。

然而,必须指出,这些矿床上的水平应力比按A.H.金尼克公式计算的要大40—50倍。又如库兹巴斯煤田,在所有情况下水平应力也都比计算的大20%—100%(见74页图3)。在一些情况下这可能表明存在着由构造力作用而引起的应力。在另一种情况下则可能是在相当长的时期内应力松弛的结果。当由上复地层重量引起的应力,在某个深度发生比较彻底的松弛时,应力大地静力场具有各向同性的流体压力(大地静压力)的特征,即 $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \gamma H$ 。

应力大地动力场的特征是水平的(有时还有垂直的),压应力值非常高。常常还观测到这些应力值有很大的各向异性,即沿不同的水平方向压应力值有很大的差别。水平主应力,即水平面截取应力椭球体所得的应力椭圆的轴,通常用符号 σ_x 和 σ_y 来表示。

水平应力常比大地静压力 γH 大50—200公斤/厘米²(甚至可大出500公斤/厘米²),而且与近代构造有关。在И.А.杜尔恰宁诺夫等人的文章(科拉半岛希宾地块);Ю.И.恰勃达

罗娃等人的文章（杰兹卡兹甘）；沙曼斯卡娅等人的文章（阿拉套的延长部分——戈尔诺绍里亚的捷米尔套和塔斯塔戈尔矿床）；H.П.弗洛赫等人的文章（乌拉尔金属矿）；П.Я.加卢什科等人的文章（顿巴斯不同地区的矿井——测量深度从540到915米）和B.M.库捷波夫（在叶尼塞河萨彦-舒森水电站和纳伦河托克托古尔水电站建设区的测量），以及M.B.格佐夫斯基等人的“根据矿山巷道测量和构造物理分析的资料看地壳的应力状态”和П.Н.克鲁泡特金等人的概述性文章中都援引了大地动力场的例子。在上述的第一篇文章中除了已提到的资料外，还援引了卡集卡耶夫在库尔斯克磁异常上（深度250米）测得的资料。这些资料表明，近水平向的压应力比大地静压力 γH 大110公斤/厘米²。

在A.T.沙曼斯卡娅的文章中，证实了首先由H.哈斯特在斯堪的纳维亚某些金属矿中大量测量的基础上所作出的结论：即大地动力场特有的构造应力随深度的增长呈线性规律^[11、2]。

这个规律性在П.Н.克鲁泡特金的几篇文章里是用世界各地的资料来说明的。它使人想到在更深的地方应力的大地动力场应充溢于整个地壳之中。在最表层的地层中，如果它们是由塑性较大和含孔隙水的沉积岩所组成的（例如，在本文集中提到的里沃夫-沃伦和库兹巴斯的煤层里），或者它们含有易破坏，易变形的夹层岩脉，或者它们的裂隙十分发育，那么原先有的构造应力将被解除或者构造应力根本就不会产生。在这些情况下，应力场将具有大地静力状态的典型特点。在这些地层中应力差不多完全由上覆岩体的地形特征和岩石密度（容重）相应的重力场所决定。

已发表的成果表明，应力大地动力场在不深的地方已分布得很普遍了。显然，在深度大于200米的坚硬岩石中开凿或修建各种设施时，在确定构筑物强度标准的规范里必须考虑到上述情况。

然而，本文集不仅对从事工程地质、矿业的专业人员、水利工程、铁道（隧道）及其他地下构筑物的设计与施工人员有意义，对广大的地质、地球物理人员也同样是有意义的。

问题在于构造学——这门关于地壳褶皱和断裂，关于山脉、裂谷和大洋盆地形成的科学，虽然是地质学和地球物理学的最重要的组成部分之一，但对它所研究的变形、断裂及位移产生的机制至今还没有一个明确的概念。对地震学来说也是一样，因为地震的绝大部分正是那些构造应力的释放。构造作用的机制之所以不清楚，正是由于我们不知道地壳中应力的总的状况如何，缺乏关于这些应力的数值和方向的充分的资料，通常我们能够加以研究的仅仅是地壳中长期作用的应力的最终累计结果。它们刻印于褶皱和大陆漂移等等现象之中。

同时，我们并不知道，譬如说，像地幔对流说所假设的那样，在同一地质时期里，地壳中是否在一些地区存在着广阔的张力场，而同时在另一些地区又存在着广阔的压力场；或像大地构造脉动说的作者所设想的那样，整个地球在不同的时期时而被挤压所笼罩，时而被扩张所笼罩（B.伯契尔，M.A.乌索夫和B.A.奥勃鲁契夫等）。

同样还要注意到，在当代著名的地球物理学者和地质学者中，我们既可以遇见著名的收缩说（即地球在整个发展期间其半径一直缩短）的拥护者（Г.德热弗里斯，M.毕令斯，Л.柯伯尔），又可以遇见受到海洋学家所特别赞赏的地球扩张理论的信徒（B.希津，Л.埃季耶德，C.克里）。

在分析地震波特性的基础上，对地壳和上地幔震源应力状态的研究表明，总的说来是以挤压为主，但这种研究同样不能提供有关应力场的正确概念。问题在于任何地震震动时仅仅

只能记录引起震动的应力的一部分^[1、3]。而地震之后，在震源处还保留了多少应力却仍然不得而知。由于这一情况根据震波特征算出的应力椭球就成了某种虚构的几何结构，它相当于地震前后的主应力在数值和方向上的差值。

对于引起地震，导致地球表层缓慢上升和下降以及形成褶皱的那些现今应力分布图象的可靠资料，能够获得它的唯一途径，就是在巷道中直接测定坚硬岩石的应力状态。

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的特征做出初步的结论，并抛弃了某些大地构造假说，如地球扩张说等。

许多资料似乎能证实哈斯特的意见，即现在存在着与地球半径缩短有关的全球应力场^[8]。然而，在接受这种观点的同时，首先不能把地球收缩的概念扩展到地球发展的整个漫长时期中。从造山与褶皱时期（即所谓的造山“期”，整个第四纪都属这种造山“期”）与延续较长的稳定时期的更迭来看，以及从地面上垂直运动的正负交替的特点或者地球自转速度现代变化的正负变换特点（表现在地球半径的变异）来看，还不如认为我们行星的挤压与扩张期是相互交替的。

M.B.格佐夫斯基等正确地指出，均一的全球场的概念是经受不住批评的。如果存在与地球现代挤压有关的全球场，这个场应该是不均一的，其特点是水平压应力各向很不均匀，这种各向异性在现代造山作用活动带和最新褶皱带表现得大为显著。无论是地质观察，还是地震测量都表明垂直年青褶皱山脉走向的压力比沿其走向的要大得多。

不仅如此，在像红海地堑和贝加尔湖这样的地段，测量与地震都表明地壳受到拉伸。可能这与塑性的、灼热的或熔化的地幔物质，在同是那一个全球挤压作用下，从很深处沿着穿过地堑轴部的断裂被压到地表上来有关（“岩浆楔”机制）。但这也同样可以解释为全球应力场随时间很易变化，并且经受着持续时间不等的反正变化的缘故。

岩体应力状态的研究与冲击地压和巷道壁的岩崩、岩爆等问题密切相关。因此，矿山工作安全的要求迫使人们必须深入研究地壳中存在的应力。这个问题在杜尔恰宁诺夫和巴杜金等人的文章中都涉及到了。

在最后一篇文章里正确地指出：有矿山震动危险的煤矿（开采深度大于250米）的分布与它们所处的苏联各地区现代构造活动性的大小之间存在相关性。这篇文章的作者按格佐夫斯基的观点，通过作用于地壳中的最大剪应力值来表明活动性的大小。剪应力值大的那些地区，矿床中矿山震动发生较为频繁，发生的深度较浅。

同时，对于这个相关关系还必须指出一些批评意见。这些作者把上述的相关关系视之为矿山震动频率，地震数和太阳活动性之间的相关性（见87页图2）。虽然从比较基泽洛夫、舒罗布和苏恰宁煤矿的矿山震动数的资料发现曲线相似（从1950到1954年次数增长，1954—1955年达到极大值，1957—1958年为极小值，1962—1964年为极大值）。但是，在其它煤矿和全球的资料中，对这些趋势能得到多大程度的证实，还是不清楚的。显然，采煤工作面愈宽，记录到的矿山震动数应当愈多。另一方面，正像作者自己指出的那样，随着采用越来越多的预防矿山震动的技术措施，矿山震动数减少很快。水文地质情况和许多其它因素也都有很大的影响。因此，该文中的原始统计资料不能认为是充分可靠的。

如果说要寻求地壳应力状态的变化与宇宙和全球性作用的关系，那么首先应当将矿山震动数的统计资料与地球自转速度的变化相对比。这些变化可能反映地球尺寸的变异*。

可以期望,本文集的发表将奠定岩石应力状态测量资料系统总结的基础,这些资料可能会有助于说明地壳构造应力场的特性。在利用苏联和国外各种矿山技术勘察中所取得的这些资料的同时,在一些能解决大地构造和地震学理论问题的地方,例如,在帕米尔金属矿中或谢万湖地区正在修造的水利枢纽的隧洞中,组织专门测量的必要性也已经成熟了。

正象本文集内容所表明的那样,在这个领域内,与建筑、矿山和其它技术工程实践有关的研究工作,可以成功地与解决地质学和地球物理学重大课题的任务结合起来。

参 考 文 献

- [1] Балакина Л. М., Введенская А. В., Мишарина Л. А., Широкова Е. И. 1967. Напряженное состояние в очагах землетрясений и поле упругих напряжений Земли. - Изв. АН СССР, Физика Земли, № 6.
- [2] Булин Н. К. 1971. Современное поле напряжений в верхних горизонтах земной коры. - Геотектоника, № 3.
- [3] Введенская А. В. 1969. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М., "Наука".
- [4] Гравитация и относительность. Под ред. Х. Цзю, В. Гоффмана. 1965. Перев. с англ. М., "Мир".
- [5] Динник А. Н., Моргаевский А. Б., Савин Г. Н. 1938. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок. - Труды совещ. по управлению горным давлением. М.-Л., Изд-во АН СССР.
- [6] Кораблев А. А. 1969. Современные методы и приборы для изучения напряженного состояния массива горных пород. М., "Наука".
- [7] Кропоткин П. Н. 1970. Возможная роль космических факторов в геотектонике. - Геотектоника, № 2.
- [8] Кропоткин П. Н. 1971. Напряженное состояние земной коры по измерениям в горных выработках и геофизическим данным. - Сб. "Проблемы теоретической и региональной тектоники". М., "Наука".
- [9] Прочухан Д. П. 1966. Остаточные напряжения в скальных массивах и возникающие при их разгрузке деформации. - Тезисы докл. к III регион. совещ. по инженерн. геол., октябрь 1966 г. Изд. Ленингр. горного ин-та.
- [10] Слободов М. А. 1960. Руководство по применению метода разгрузки для определения напряженного состояния в глубине горных массивов. Л., Изд. ВНИМИ.
- [11] Хаст Н., Нильсон Т., 1967. Измерения напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин. - Сб. "Проблемы инженерной геологии", вып. 4. М., "Мир".

* 如果对于可能发生的固体地球与大气层之间的动量交换效应予以忽略,那么,地球自转角速度 ω 与其半径 R 之间有一个简单的关系 $\omega R^2 = \text{const}$,因为地球动量矩($I \approx 0.3MR^2$)和地球质量 M 是常数。曾发现 ω 的变化与地球上强震的密集相关。按季卡的说法,这表明地壳应力状态的变异。

由矿井和矿山中实测的应力估计 地壳应力状态的可能性

Г.Т. 涅斯捷连科等

开采各种矿产用的地下巷道，给地壳上部岩体应力的直接测量开辟了广阔的道路。

现在苏联和国外用解除法作了许多实地应力测量。这些测量主要是在巷道影响带中以及
在原状地块的较为有限的范围里进行的。本文集汇集了在巷道影响带外完成的测量成果，它
们代表岩体的应力状态。这些测量成果可用于解决一系列这样的实际问题：确定开采系统中
构件的合理参数，选择和计算巷道支架，以及阐明地壳构造应力场的基本规律性。

用解除法测量应力可按三种测量弹性形变的方式实现：

a) 钻取岩芯的钻孔底面法 (ВНИМИ 式解除法，图 1, a)；

б) 钻取岩芯的同轴钻孔直
径法 (哈斯特式解除法，图 1, б)；

в) 钻取岩芯的同轴钻孔壁
法 (李曼式解除法，图 1, в)。

如果用解除法测得的应力相
当于有效应力，那么基于地下巷
道的岩体中的应力测量，就可以
获得地壳应力状态的可靠资料。

因此，全苏矿山地质力学与
矿山测量科学研究所对解除法中
的三种具体方式 (ВНИМИ 式，
哈斯特式和李曼式) 的评价及实
现这些方式的具体手段和技术装
备的改善进行了一系列的研究。

正象大家知道的一样，应用
解除法确定岩体应力归结为测量
岩体 (岩芯) 从作用应力下释放

时的弹性形变和随后按弹性理论公式进行岩体的应力计算。因此在分析解除法的现有方式
时，应着重评价从测量应变转换到应力的方法。转换方式决定于所使用的解除法的方式。

应用 ВНИМИ 式解除法时，在钻孔底上测量解除应变，并且考虑到应力集中系数^[15]，
采用平面应力状态的弹性公式，将之换算为作用于岩体中的应力。分析瓦西列夫等人<sup>[2、3、
4、5、6、12、18、14]</sup>及国外李曼等人^[20、22、23、24]对这个问题的研究，分析 ВНИМИ 所使
用旋光材料做的三维模型的实验^[11]和由泊松比 $\mu = 0.36$ 、弹性模量 $E = 3.3 \times 10^4$ 公斤/厘米²
^[10、7]的有机玻璃做成的三维应变模型的实验，均表明对于具有上述应力集中系数的平面应

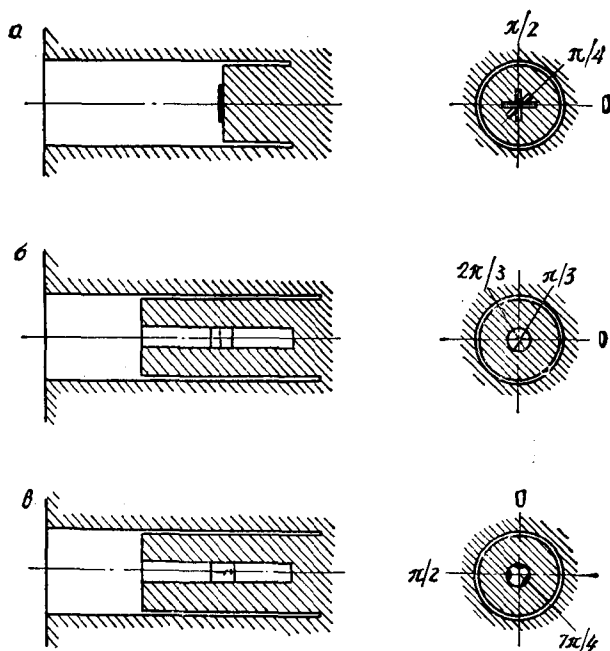


图 1 解除法的三种方式

力状态, 利用已知公式并不是在一切情况下都合理的。问题在于孔底的应力状态与被钻孔的那个岩体的应力状态的类型及岩石的 μ 值有关。因此, 作者用岩石 ($\mu=0.16-0.30$ 和 $E=3.3 \times 10^4-9.2 \times 10^6$ 公斤/厘米²) 做的三维模型上以及钢和硬铝做的三维模型上作了补充研究, 而钢和硬铝的模型可以在很大的范围内研究上述因素的影响。

首先要确定, 测量钻孔的钻进方向应该与主应力之一的方向一致。因为, 若是钻孔的钻进方向与主应力方向有一个角度, 那么孔底产生的应变场相对孔底中心就不对称, 在这种情况下从应变换算为应力实际上是不可能的。如果钻孔钻进的方向与主应力方向一致, 那么在

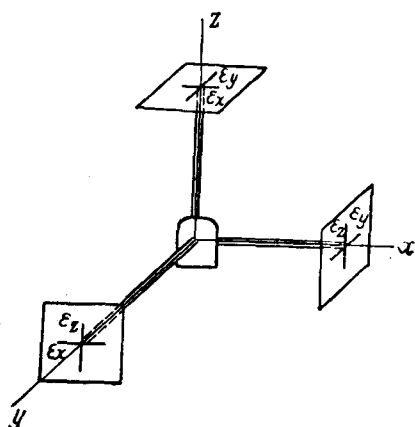


图2 测量钻孔的取向

这种情况下钻孔底上的应变呈对称分布, 而对称分布不仅决定于作用于孔底平面上的应力, 而且决定于沿孔轴作用的应力。此时由作用于孔底平面上的应力产生应变, 而这些应变对平孔底来说其集中系数为 $K_1=1.4$, 对于复杂形状的孔底 $K_1=1.55$ 。这些系数与 E 和 μ 无关。由顺钻孔轴作用的应力在钻孔底面上产生的应变集中系数, 对于平面孔底来说为 $K_2=1.15$, 而对复杂形状的孔底为 $K_2=0.95$ 。

为此, 岩体中的应力同解除时孔底上测得的应变间的关系可以用下列关系式表达:

1) 如果钻孔轴与主应力 σ_x 方向重合 (图

2)

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{K_1}{E} (\sigma_x - \mu\sigma_y) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_z, \\ \varepsilon_y &= \frac{K_1}{E} (\sigma_y - \mu\sigma_x) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_z,\end{aligned}\quad (1)$$

2) 如果钻孔轴与主应力 σ_y 方向重合

$$\begin{aligned}\varepsilon_y &= \frac{K_1}{E} (\sigma_y - \mu\sigma_x) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_z, \\ \varepsilon_x &= \frac{K_1}{E} (\sigma_x - \mu\sigma_y) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_z,\end{aligned}\quad (2)$$

3) 如果钻孔轴与主应力 σ_z 方向重合

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{K_1}{E} (\sigma_z - \mu\sigma_x) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_y, \\ \varepsilon_x &= \frac{K_1}{E} (\sigma_x - \mu\sigma_z) - \frac{K_2}{E} \mu\sigma_y.\end{aligned}\quad (3)$$

从 (1) — (3) 关系式得知, 为了求得主应力 σ_x , σ_y , σ_z 必须在互相垂直的方向上钻两个钻孔并确定出主应变 ε_x , ε_y , ε_z 。

因此, 作者进行的研究表明, 如果已知主应力之一的方向, 就可采用 ВНИИ 式解除法测定原状地块的应力状态。第一个测量钻孔, 钻在根据应力解除所测应变结果而确定的主

应变的方向上,而且相应地确定出另外两个主应力的方向。第二个测量钻孔钻进方向是在根据第一个钻孔里测定的主应力之一的一个方向上(最好在最小主应力方向上)。根据两个钻孔中的测量确定出三个主应变($\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$)后,由公式组合(1)一(2), (2)一(3)或(1)一(3)求得主应力。

如果岩体为各向异性弹性体,那么采用公式(1)一(3)式时必须予以考虑。

为了确定主应力之一的方向推荐以下方法:

1) 对于那些从地质特征得知不可能有构造应力的地区可以先假设主应力之一是铅直的,那么在这个方向钻进第一个测量钻孔是合理的。根据第一个钻孔取得的测量成果来钻第二个钻孔,在第二个钻孔应变测量的基础上检查这个假设的合理性。如果假设被证明可行,那么就能够利用测得的主应变按上述公式换算为应力。

2) 对于那些可能有构造应力的地区,则根据矿井底板上各不同方向的巷道状态的直观考察,可以近似估计主应力方向。例如沙曼斯卡娅在1971年写的文章里^[19]所说的就是这种做法。也可以利用地球物理方法(如超声测井)定性估计主应力的方向^[17]。在一定条件下最大主应力方向能够根据钻进过程中圆片状岩芯分裂的标准来确定^[13]。

用哈斯特式解除法时,首先必须注意到哈斯特式解除法最初提出的方案是测量孔钻在主应力方向上。并且哈斯特提出,只有在 $\sigma_x = \sigma_y$ 时或者相差不大时才可以用 $\varepsilon_\theta = \frac{u}{r}$ 代替 $\varepsilon_\theta = \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{u}{r}$ 。在应用测得应力换算为岩体应力的公式校准时^[21],如果作用应力是顺钻孔轴,且作用于垂直钻孔轴面上的应力没有或者很小时才是正确的。否则必须考虑它们的影响。这个影响将改变所取得的 $\mu\sigma_z$ 值的结果,为此需要应变计作专门校准和钻补充测量钻孔,并且在很大程度上限定哈氏解除法只能应用在岩体应力状态复杂地段的有效区域。

李曼式解除法是哈斯特式解除法的进一步发展,区别在于它能在一个钻孔中确定主应力的所有分量及方向。这在很大程度上提高了方法的效率。但是此法与哈斯特解除法同样在技术上很难实现,特别是在有裂缝的坚硬岩体中更难办,因为实际上往往不可能钻出很长的没有破坏其完整性的岩芯。

分析李曼所使用的数学公式,在钻孔中央壁上测得的应变换算为作用于岩体上的主应力^[25],不难看出,在点 $\phi = 0, \phi = \frac{\pi}{2}, \phi = \frac{7\pi}{4}$ 上测定应变 ε_θ 和 $\varepsilon_{z'}$,对于确定分量 $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}, \sigma_{z'}, \tau_{x'y'}$ 来说是够了。然而对于确定作用于岩体上的主应力 σ_x, σ_y 和 σ_z 来说,还必须确定应力 $\tau_{x'z'}$ 和 $\tau_{y'z'}$ 才行,这就要求测量 $\gamma_{\theta z'}$ 。为了确定 $\gamma_{\theta z'}$,李曼提出关系式 $\gamma_{\theta z'} = \varepsilon_\theta + \varepsilon_{z'} - 2\varepsilon_{45^\circ}$,此式不考虑钻孔曲率,仅适合于平面。必须估计运用这个关系式所引入的误差。

作为李曼式解除法的方案之一,作者提出在三个互相垂直的测量钻孔中确定原状岩体的应力状态。在顺 z' 轴钻进的钻孔中确定 $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}, \sigma_{z'}$ 和 $\tau_{x'y'}$ 及顺 y' 和顺 x' 轴钻进的钻孔中确定应力 $\tau_{x'z'}$ 和 $\tau_{y'z'}$ 。由第II和第III钻孔确定的应力分量可作为检查。如果知道 $\sigma_{x'}, \sigma_{y'}, \sigma_{z'}, \tau_{x'y'}, \tau_{x'z'}$ 和 $\tau_{y'z'}$,则可确定主应力的分量值及代表主轴方向的余弦。

由解除法测得的应变计算为应力,数学运算非常繁重,作者设计了用电子计算机“Напри”的程序,利用它可大大缩短时间而又简化换算过程。往计算机中输入岩石弹性参数和应力解除所测得的应变,则得计算好的应力值及方向。

根据全苏矿山地质力学与测量科学研究所应用解除法的多年经验,此法用于实践可以探

讨和培植更臻完善和可靠的技术手段。

为测量孔底应变而把应变电阻贴在孔底时^[16],应使用能使应变电阻器严密防潮和防漏电的可取下小平板的那种应变计。为测量钻孔中部孔壁径向位移而应用哈斯特式解除法时制出了三分量应变计^[8]。根据李曼式解除法为测量钻孔中部孔壁的形变,专门研究制造了应变仪^[9]。它的作用原理是以借摩擦力传递为基础的。这个摩擦力是把应变电阻器压紧在所研究的面上的摩擦力。这就极大地加快和简化了应变测量的过程。

使用应变测量站 СБ-8 和带检流计 М195/1 的十道应变附加器 71Р01 作为读数装置。这两套装置可以在矿井条件下测量应变。应变测量站 СБ-8 适宜于工作在有瓦斯和灰尘的危险矿井,而带检流计 М195/1 的附加器 71Р01 则适用于没有瓦斯和灰尘危险的矿井。两套装置的灵敏度可以随测量的应变而改变。

因此,现在用矿井和矿山巷道测定地壳上部应力状态有了可靠的技术装备和加工整理方法。

参 考 文 献

- [1] Ахматов В. И., Малык А. Н., Иогансен Л. Б. 1970. Новая аппаратура для изучения проявлений горного давления. - Сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск, "Наука".
- [2] Васильев В. З. 1967. Напряжения в упругом изотропном полупространстве вблизи торца вертикальной цилиндрической выемки. - Прикладная механика, № 7.
- [3] Гришин А. С. 1966. Исследование распределения напряжений в призабойной зоне буровой скважины методом фогуупругости. - Сб. "Проблемы механики горных пород". Алма-Ата, "Наука".
- [4] Иванов В. И. 1968. Изучение концентрации напряжений на забое скважины методом моделирования. - Сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск, "Наука".
- [5] Лехницкий С. Г. 1935. О переходе от напряжений в прозрачной модели к напряжениям в действительной модели. - Сб. "Экспериментальные методы определения напряжений и деформаций в упругой и пластической зонах". М.-Л., ОНТИ.
- [6] Молодцова Л. С., Мельников Е. А. 1970. О переходе от напряжений на торце скважины к напряжениям в массиве горных пород. - физ.-техн. пробл. разраб. полезн. ископ., № 1.
- [7] Нестеренко Г. Т., Барковский В. М. 1969. Исследования концентрации деформаций и напряжений около скважины. - Технология добычи угля подземным способом. М., ЦНИЭИуголь, № 7.
- [8] Нестеренко Г. Т., Барковский В. М. 1970. Трехкомпонентный деформатор для исследования напряженного состояния массива горных пород методом разгрузки керн с центральной скважиной. - Сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск, "наука".
- [9] Нестеренко Г. Т., Барковский В. М. 1971. Деформометр для измерения деформаций стенок буровой скважины. - Сб. "Горные машины и автоматика". М., ЦНИЭИуголь, № 4.
- [10] Нестеренко Г. Т., Барковский В. М., Черников А. К. 1970. Исследование метода разгрузки для определения напряженного состояния массива горных пород. - Сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск, "Наука".
- [11] Нестеренко Г. Т., Иевлев Г. А., Барковский В. М. 1969. Распределение напряжений на торце скважины. - Сб. "Технология добычи угля подземным способом". М., ЦНИЭИуголь, № 7.
- [12] Нестеренко Г. Т., Твердовский Р. К., Артемов Р. П. 1966. Совершенствование метода разгрузки для определения напряжений в крепких трещиноватых породах. - Труды ВНИМИ, сб. 62. Л.
- [13] Нестеренко Г. Т., Шаманская А. Т., Егоров П. В. 1970. Приближенный метод оценки напряженного состояния горных пород. - Сб. "Измерение напряжений в массиве горных пород". Новосибирск,

“Наука”.

- [14] Руководство по измерению напряжений в массиве горных пород методом разгрузки. 1970. Апатиты. Изд. КФ АН СССР.
- [15] Слободов М. А. 1965. Руководство по применению метода разгрузки для определения напряженного состояния в глубине горных массивов на породах слабых и средней прочности. Л., Изд. ВНИМИ.
- [16] Твердовский Р. К. 1970. Тензометры для измерения напряжений методом разгрузки по способу ВНИМИ. – Сб. “Измерение напряжений в массиве горных пород”. Новосибирск, “Наука”.
- [17] Турчанинов И. А., Панин В. И. 1970. Результаты исследования геофизических методов изучения напряженного состояния в массиве горных пород. Новосибирск, “Наука”.
- [18] Фомин В. Л. 1961. О погрешности решения упругой задачи при замене одного коэффициента Пуассона другим. – Сб. “Исследования по упругости и пластичности”, вып. 1. Изд-во ЛГУ.
- [19] Шаманская А. Т. 1971. Исследование стреляния горных пород и разработка мер борьбы с ними на рудниках Горной Шории. Автореф. канд. дисс. Кемерово, ВНИМИ.
- [20] Bohnéchére F., Fairhurst C. 1968. Determination of the regional stress field from “Doorstopper” measurements. – J. S. Afric Inst. Mining and Metallurgy, 68, N 12.
- [21] Hast N. 1958. The measurement of rock pressure in mines. – Sver. geol. undersök., ser. C, Arsbok 52, N 3.
- [22] Heerden W. 1965 Contribution to discussion of a paper by E. R. Leeman, the measurement of stress in rock. – J. S. Afric. Inst. Mining and Metallurgy, 65.
- [23] Hoskins E. R. 1967. An investigation of strain rosette relief methods of measuring rock stress. – Internat. J. Rock Mech and Mining Sci., 4.
- [24] Leeman E. R. 1964. The measurement of stress in rock. – J. S. Afric. Inst Mining and Metallurgy, 65, 45–114, 254–284.
- [25] Leeman E. R. 1968. The determination of the complete state of stress in rock in a single borehole – laboratory and underground measurements. – Internat. J. Rock Mech. and Mining Sci., 5, N 1.

根据直接测量的资料研究地壳中的构造应力

П.Н.克鲁泡特金

由于进行隧道、矿井及其它地下巷道工程，在许多地区的坚硬岩体中，发现一种水平压应力，它比与岩石重量相对应的大地静压力（或水的静压力） P 高100—500公斤/厘米² ($P = \rho g H$, ρ ——密度, g ——重力加速度, H ——离地表的深度)。在高山麓旁和深切的河谷下水平应力 ($\sigma_h > P$) 有所增高。但是，这种水平应力远远小于上述那种水平压应力，例如，在谷坡高达600米的纳伦河峡谷下，水平应力超过大地静压力还不到30公斤/厘米²。

大大超过大地静压力的这种“剩余”水平应力，看来有着构造的起因，并且不仅与地壳相应地段新生代晚期的应变特点有关，而且与全球应力场有关，这种应力场，比方说，可能相应于现今地质时期地球半径总的缩短。我们没有理由认为这些应力是比新生代晚期更久远的地质时期保留下来的，因为固结了的地壳表层中，弹性应力松弛时间总计为20000年左右。这就相当于在300000年内——一个仅为最短最新的地质时期即第四纪的五分之一的时间内，应力自然减小到百万分之一。甚至假定松弛时间 $t = 100000$ 年，我们将发现，在第四纪时期内应力也应该降到百万分之一。

上述“剩余”水平应力已在瑞典南部、芬兰西部和美国的一些测量点上6—15米深处被观测到，在另外一些地区则要深得多，主要是在结晶岩基底和褶皱体系内（参看图1）。而在沉积盖层里（包括非洲地台南部古老沉积盖层中1900米的深处）和裂隙发育的块状岩石中几乎不存在这种“剩余”水平应力。用解除法测量时已发现这些剩余应力的最大深度计有880米（瑞典中部的斯帖尔堡）、915米（顿巴斯煤田）和1100米（勃朗峰下面的阿尔卑斯隧道）。两个相互垂直的水平方向上的主应力 $\sigma_x + \sigma_y$ 的和 ($\Sigma \sigma_h = \sigma_x + \sigma_y$) 分别为1020、1150和1220公斤/厘米² [32、8]。在希宾地块河谷水平以下600米或者说是该地块地面平均水准以下约800—1000米的深度上获得了近似的结果 ($\sigma_x + \sigma_y = 930$ 公斤/厘米²)；在所有这些测点上， $\Sigma \sigma_h$ 比静水压力的一倍还大500—600公斤/厘米²。

总起来说，根据现有资料得出一种印象，即从10—200米深度开始（而有些地方更深，大约是从2000米处开始）剩余应力充溢于整个所谓的“花岗岩”层，亦即地壳的褶皱和结晶基底之中，这种现象见之于各种不同地区，无论在古老的、构造活动性弱的前寒武纪地台内，还是在最新的褶皱区里，均是如此。在波罗的海地盾^[23]、北美地台的加拿大地盾、非洲地台上的利比里亚、赞比亚、埃及和挪威、斯匹次卑尔根、爱尔兰、萨彦岭以及西伯利亚的戈尔诺绍里亚下古生代（加里东）褶皱带内、乌拉尔^[21]、顿巴斯煤田、中哈萨克斯坦（科温拉德、杰兹卡兹甘）、阿巴拉契亚和美国东部其它地区、澳大利亚东南部和塔斯马尼亚岛^[34] 上古生代（海西）褶皱带内，都有这种剩余应力。

它们也出现在加拿大西部不列颠哥伦比亚、马来西亚、伊朗、葡萄牙、阿莱山脉、阿尔卑斯和加利福尼亚较年青的、中生代和新生代（阿尔卑斯）褶皱带中。北美地台沉积盖层深部（700米）的下古生代石灰岩中，测得水平应力 $\sigma_x + \sigma_y = 724$ 公斤/厘米²，比两倍大地静压

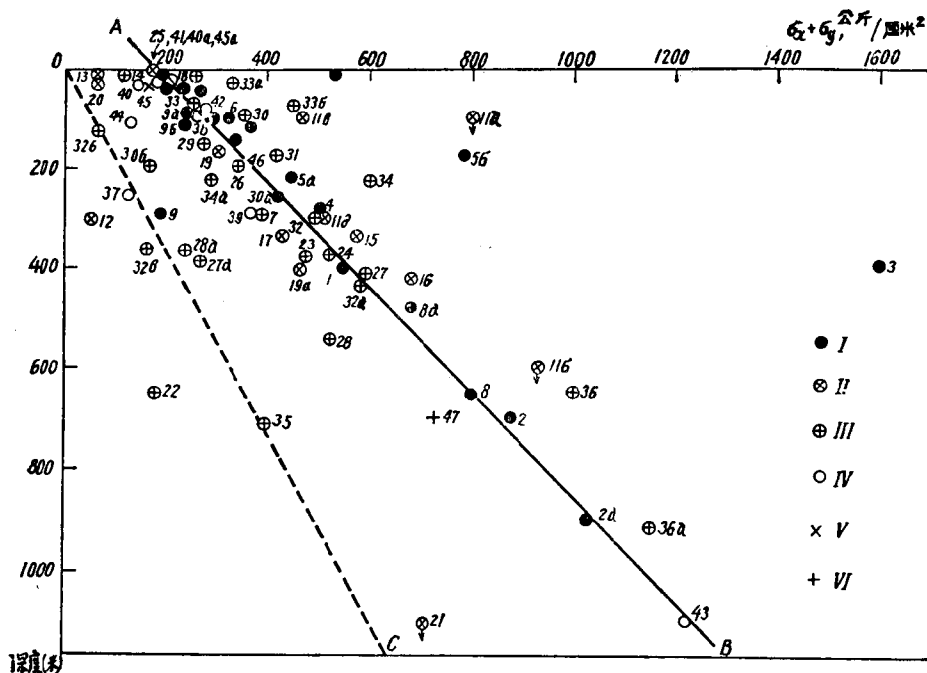


图1 结晶基底岩中和褶皱体系内应力值(公斤/厘米²)随深度(米)的变化,图中所示为两个相互垂直的水平主应力的和($\Sigma\sigma_h = \sigma_x + \sigma_y$)

AB——据哈斯特^[36]公式所得应力的变化;OC——两倍的静压力(大地静压力, $2P$)。I——波罗的海地盾, 1—10^[30, 31]; II——前寒武纪地台, 其中包括: 11a—11n——希宾地块, 科拉半岛^[22], 12——克里沃罗格^[20], 13—17——加拿大^[28, 27], 18——美国^[16], 19, 19a——赞比亚, 20——利比里亚^[31], 21——南非^[33]; III——古生代褶皱带, 其中包括加里东褶皱带: 22—23——挪威^[30], 24——斯匹次卑尔根^[31], 25——西伯利亚的萨彦岭^[14], 26——爱尔兰^[31], 27, 27a——戈尔诺绍里亚, 自库兹巴斯煤田以南^[10, 11, 42]; 海西褶皱带: 28, 28a——澳大利亚东南^[38], 29——塔斯马尼亚^[16], 30—32c——乌拉尔^[1, 26], 33—33b——阿巴拉契亚和美国其它一些东部地区^[40], 34——哈萨克斯坦、杰兹卡兹甘^[18, 25], 34a——哈萨克斯坦, 科温拉达^[9], 35—36a——顿巴斯煤田^[8]; IV——中生代和新近代褶皱地区, 其中包括中生代的褶皱带: 37——美国内华达^[37], 38——加拿大不列颠哥伦比亚^[31], 39——马来西亚, 阿尔卑斯褶皱带^[16]; 40——葡萄牙^[31], 40a——地点同上^[16], 41——伊朗^[16], 42——苏联阿莱山脉^[19], 43——阿尔卑斯, 44——加利福尼亚^[35]; V——冰岛火成岩中的测量, 45, 45a^[31]; VI——北美地台沉积盖层中的测量: 46——硬石膏矿井^[17], 47——古生代石英岩; 俄亥俄^[37]。

力还高 300 公斤/厘米²。

特别重要的事实是, 在通常被看成现代地壳张力起源带的大西洋中脊轴线带附近的冰岛, 哈斯特已于 4 至 50 米深的地方发现了压应力。在两个相互垂直的水平方向上, 其总和比大地静压力的两倍还大 26 至 197 公斤/厘米²。

看来, 在最精确的测量中可能误差不超过 5% (例如, 哈斯特的一些著作中, 其资料是根据每个测点的几百次局部测量并整理后得出的, 这些测量的总数达到几万次)。除了这些著作, 我们还使用了这样一些应力状态的测量结果, 其精度只有 10—30%。但总的说来, 现有的全球性资料中所具备的数据已足够应用于通过统计的方法作出初步的、最一般的结论。看来, 对说明地壳应力状态的真实值来说, 测量数值存在着误差, 这种误差值既可能偏高 (由于对坑道和断裂附近的应力集中估计不足), 也可能偏低 (与裂隙发育和风化的岩石中

应力的自然卸荷现象有关)。

如果认为两个方面的误差都带有偶然性,可以对现有的全球性数据按深度的间距进行统计整理。这样的整理可以显示出,应力或者是接近于静水压力(图1中的OC线),或者聚集于直线AB附近,该直线符合于哈斯特^[31]的公式:两个水平方向的应力和 $\Sigma\sigma_h = \sigma_x + \sigma_y = 180 + 0.98H$ 。根据所在三个相互垂直的钻孔中进行的测量,就可以为建立完整的应力椭球取得足够的数。现已看出,虽然椭球体的主轴通常是稍稍偏离垂线和水平面,但椭圆截面两个水平轴上应力的相互关系非常准确,尽管对于应力椭球体的总方向及其形状的概念是粗略的。

根据《构造物理学》杂志刊载的哈斯特的文章中列举的51个测点所示,水平压力的各向异性可用下列最大水平压应力 σ_x 和最小水平压应力 σ_y 的比值平均数来表示: 1) σ_y/σ_x 在

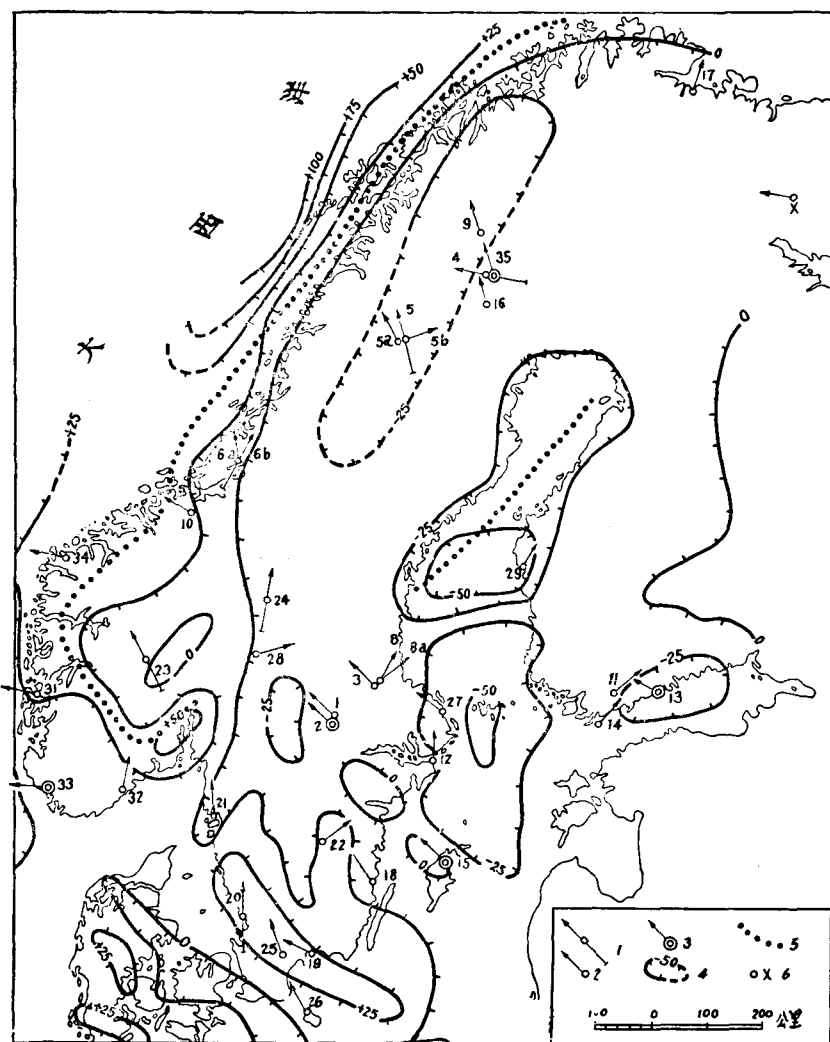


图2 斯堪的纳维亚和芬兰最大水平压应力 σ_x ^[32, 23] 的方向,重力异常等值线以及主要地震带

1—3—— σ_x 的方向[1-在这些测点中测量的水平压应力各向异性最大, σ_y/σ_x 从0.3 到0.52; 2- σ_y/σ_x 从0.53到0.75的点; 3-各向异性最小的点, σ_y/σ_x 从0.75 到1.0]; 4——异常等值线^[2]; 5——主要地震带; 6——希宾地块。在(4、5、6a, b、20、23、24、×)各点中观察到水平压应力的各向异性最大, 它们分布在为地壳的新构造所触及到的斯堪的纳维亚的北部、西部和南部。

14%的测点上为0.75至1.0; 2)在67%的测点上为0.5至0.75; 3)在13%的测点上为0.25至0.5; 4)在6%的测点上为0至0.25。

最后两组的特点是各向异性最大,而且主要是哈斯特在挪威以及瑞典的北部和西南部观察到的。这些地区最大压缩方向是北西向。同样的方向也出现在科拉半岛(见图2)。它垂直于形成挪威山脉的年青的新构造隆起带,并且垂直于斯堪的纳维亚的重力异常等值线的走向和主要地震带的走向。地球物理分析表明,此处由于北西向力的作用,地壳中的压力垂直于大西洋海岸。

测得的最大水平应力与山脉的方向和等压异常方向的相互垂直关系在葡萄牙、乌拉尔、阿莱山脉等地也观测得到。在乌拉尔,最大挤压方向是横跨山脉的,即纬向的。某些情况下的各向异性大到如此程度,以致在经向上挤压力不仅比静压力 P 小得多,而且有些地方甚至为张力所代替(捷格嘉尔和卡拉巴什矿山)^[1]。垂直于最大挤压的张力在阿莱山脉(在海达尔干纳)已被发现^[19]。

因而,在剩余水平压应力的方向和现今作用力方向的体系之间,可以看到一定的相应关系。这种体系则可在研究那些表现为造山作用的地壳表层的新生代褶皱和新构造挠曲(波状弯曲)的基础上,以及研究地震和重力异常的基础上勾划出来。

应注意的是,褶皱、震源的应力方向和大地测量(在日本和塔吉克斯坦)都表明,水平压力是垂直于年青山脉和太平洋边缘岛弧以及阿尔卑斯—喜马拉雅和天山—蒙古—鄂霍茨克活动带的。如果知道地壳均衡和等压面(在分析地震波速、岩石密度以及重力异常的基础上对海面以下40公里的平面上的静压力计算)受到破坏的话,深大断裂(逆掩断层,逆断层)倾斜地帯上的应力值可以根据力的平行四边形规则确定^[12]。等压面的破坏造成每平方厘米上1000—2000公斤的力;相应的压应力水平分量在深部巨大逆掩断层上达到1000—3000公斤/厘米²(图3)。

关系式 $\Sigma\sigma_h = f(H)$ 的线性特征允许向深部进行外推。考虑到这样一种情形,即最大塑性的地壳下层80—150公里深的软流圈中应力应该近似于静压力,那种外推就会得出一个结论,10—40公里深度上剩余应力达到最大。大概在这种场合 $[\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - P]$ 达到2000—3500公斤/厘米²。沿整个地球的这个面上,在地震的时候发生弹性变形的能量释放最大(全部地震波能量的70%以上)。绝大多数的地震是在挤压情况下发生的;震源中的位错乃是逆掩断层、逆断层、逆-平移断层^[3, 6]。

那样一种情形,即累计的水平压力 $\Sigma\sigma_h$ 对深度的关系在完全不同的构造区域——前寒武纪地台上,古生代的硬化带内,年青的阿尔卑斯褶皱地帯以及大洋中脊附近,有着同一性质,才有可能评论地壳中压应力场的存在。哈斯特关于现代地球半径缩短(或者说是在不久以前的地质时期曾发生过这种缩短)的推测值得注意。这被地球的自转速度和惯性力矩变化方面的天文学资料所证实。从分析现代的和古老的日月食中发现,在最近3000年里地球半径每年

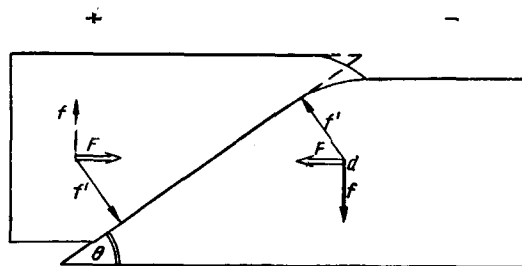


图3 水平压力 F 近似估计值的示意图,此力是明显的负(-)和正(+)地壳均衡异常作用下的移动地壳岩块的逆掩断层中下盘下沉和上盘抬升所必需的。假定在40—100公里深处(靠近补偿面)破坏地壳均衡的静压力差大致相当于力 f 的和,那么, $F = f \tan \theta$, θ ——断裂面倾斜角