

构造应力 与井巷工程稳定性

煤炭工业出版社

构造应力 与井巷工程稳定性

〔苏〕И. А. 多尔恰尼诺夫 等著

赵惇义 译

煤炭工业出版社

内 容 提 要

在本书中,作者根据大地构造的资料和井下对一系列应力的实测,叙述关于地球表面应力状态的最新观点,介绍量测岩体应力,以及检查巷道围岩应力-应变的各种方法;根据岩体构造应力作用的实测资料,描述了单一巷道和采空区周围应力分布的特殊规律,详细探讨影响巷道稳定性的主要矿山地质因素及施工工艺因素,总结了维护巷道工程的基本原则、井巷支护和各参数的计算方法,提出构造应力作用下的开采方法和改善开采方法的途径。

本书可供从事矿山地压与支护研究、设计和生产的科技工作者学习参考。

责任编辑:鲍 仪

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

КОЛЬСКИЙ ФИЛИАЛ ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ
ТЕКТОНИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЗЕМНОЙ КОРЕ

И УСТОЙЧИВОСТЬ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

«НАУКА» ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

ЛЕНИНГРАД 1978

*

构造应力与井巷工程稳定性

赵 惇 义 译

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/8}$ 印张 $7^{3/8}$

字数 191千字 数1—3,690

1984年8月第1版 1984年8月第1次印刷

书号15035·2639 定价1.25元



译者的话

随着采矿技术的进步，开采水平越来越向着地层的深处发展，特别是开发较早的抚顺、开滦、鸡西、萍乡、长广等矿区，这种情况更明显。但也有些新矿井，一开始井筒就较深，如平顶山八矿，长广的六矿、七矿，兖州的南屯矿等。在这些深井中处理支护问题时，在不同程度上都遇到了新的问题——较大的侧压力。冶金系统也有类似的问题。不少专家已不止一次提出要求注意这个问题。现场的生产技术管理人员对此更为关切，要求从事研究地压与支护的工作者提出一些解决的办法。

过去，在矿井的设计计算中，对于重力引起的地压问题考虑较多，这也是很自然的。因为，一般来说，开采是从地层浅部向深部发展，而在浅部，引起矿山压力的主要原因是重力。但随着开采深度的增大，或者向更复杂的地区开采，构造应力对支护的影响就逐渐增加，甚至可以说，到一定程度后，构造应力引起的矿山压力是主要的地压形式。相比之下，重力引起的地压倒可以忽略不计了。这样，问题也更显得复杂。南非维特伐吉尔斯朗特矿的问题就属于这一性质。

目前，在解决矿山支护的稳定性时，也有提到构造应力的文章，但为数不多，而且只是零星地提到几个侧面。所以说当前的情况是生产中已提出了问题，等待去解决，但在煤炭系统，这项工作刚刚起步。

И. А. 多尔恰尼诺夫等编著的《构造应力与井巷工程稳定性》一书提出的问题及搜集的资料，对解决深井的支护很有实用价值。当然，书中提到的某些支护形式的使用范围，对我们不一定完全适用。各地有各地的情况，我国也有自己的丰富经验。因而在决定具体的支护形式时，决不可生搬硬套，还要根据具体的情况分析、解决。

本书对从事矿山地压与支护研究、设计和生产的人员都有参考价值。对矿建和采矿专业的师生，特别是矿建专业的师生更有用处。

对译文中不妥之处请读者批评指正。

序 言●

矿山岩体力学最重要的任务，第一，是在采矿区、地下工程和水工建筑区确定岩体的实际应力状态；第二，是在评价井巷工程的稳定性和地下建筑的构件时计算岩体应力。最近二、三十年的试验研究完全证实，在一定的矿山地质条件下，岩体的应力状态首先决定于地壳内的构造应力，同时也解释了自然应力场沿走向在不同深度的不均性和多变性。在大规模的深采和地下建筑中，为了在矿山工程设计和施工中不出现大问题，必须考虑岩体的实际应力状态，所以在大型矿山及地下工程中，在勘探、建设和生产阶段要求完成一系列相应的试验工作，以便确定自然应力场的各个参数值。

并不是所有的岩体中都会出现构造应力，所以在工程的设计阶段，有必要事先衡量一下出现的可能性和规模的大小。本著作就是讲述在具体的矿山地质条件下，出现构造应力的可能性；在岩体中确定自然应力场的试验方法；检查巷道围岩应力——应变状态的方法；在构造应力作用下分析井巷工程的稳定性，以及在这种条件下矿山工程的施工方法。

书中汇集了作者十五年来在国内金属矿山中，关于构造应力的试验及理论研究的成果。首先是库尔斯克半岛各金属矿的研究成果，在这个半岛上作者完成了试验工作及国外一些工作的主要内容。研究工作不仅探索到科研和实践的方向，同时得出在相应矿山中合理地构筑矿山工程的具体意见。在构造应力很大的条件下，进行矿山工程的一系列原则具有共性，所以，在具有构造应力的岩体中构筑工程时，考虑这些因素是有益的。

在Г.А.马尔柯夫的诺模图〔1〕中，非常完整地阐明在西平的最大磷灰石矿施工时，研究及计算构造应力的独一无二之经验，

① 译时有删节——译者。

这使作者省略了很多例题计算，同时给出了必要的引证。

书中的序言，§ 1.2~1.4，§ 3.2由И.А. 多尔恰尼诺夫编写；§ 1.1, 1.5, 2.2, 2.5, 3.1, 4.5, 6.3由Г.А. 马尔柯夫编写；§ 2.4, 3.8由В. И. 依万诺夫编写；§ 3.3, 3.7, 5.5, 6.8由А. А. 可兹列夫编写；§ 2.1, 2.3由И. А. 多尔恰尼诺夫和В. И. 依万诺夫合著；§ 3.9由И. А. 多尔恰尼诺夫和А. А. 可兹列夫合著；§ 1.6, 6.10由А. А. 可兹列夫和Г.А. 马尔柯夫合著；§ 6.1由В. И. 依万诺夫和А. А. 可兹列夫合著；其余各节由作者在一起合写，编写§ 3.1时，参加工作的还有Э. В. 卡史巴里扬。

开发地下矿藏时，为了消除构造应力造成的有害影响，构造应力分布的规律已被采用。关于维护井巷工程的主要措施得到了磷灰石生产联合企业的总工程师В. В. 戈辛和其它有关人员的赞许，并应用于其矿山。

目 录

第一章 地壳表面的应力状态	1
§ 1.1 关于地壳构造的新概念	1
§ 1.2 地壳运动	3
§ 1.3 地壳内的应力场	4
§ 1.4 重力场作用	5
§ 1.5 构造应力作用	8
§ 1.6 巷道稳定性的评价标准	9
参考文献	14
第二章 岩体中确定应力的方法	17
§ 2.1 确定应力的经典方法	17
§ 2.2 根据地震学及构造物理数据作应力判断	24
§ 2.3 肉眼判断岩体应力	29
§ 2.4 用仪表确定应力	32
§ 2.5 确定岩体全应力的综合方法	42
参考文献	46
第三章 围岩应力——应变状态的检查	51
§ 3.1 围岩在构造应力作用下的变形特性	51
§ 3.2 检查岩体状态方法的分类	57
§ 3.3 裂缝的光学观察法	61
§ 3.4 流量量测法	66
§ 3.5 超声波量测法	74
§ 3.6 放射量测法	80
§ 3.7 应变锚杆量测法	84
§ 3.8 光弹量测法	90
§ 3.9 围岩破坏区各参数确定方法的比较	92
参考文献	96
第四章 用试验确定岩体的应力状态（以西平矿区为例）	101
§ 4.1 矿区的工程地质及地质构造特性	101

§ 4.2	西平矿区总应力场 (根据金属矿测得的资料)	109
§ 4.3	单巷周围的应力分布	113
§ 4.4	采区内巷道围岩的应力状态	120
§ 4.5	预测岩体应力状态的变化	125
	参考文献	127
第五章	构造应力作用下的巷道稳定性	128
§ 5.1	构造应力作用下巷道的破坏特性及稳定条件	128
§ 5.2	构造应力场内单一巷道围岩应力的分布规律	138
§ 5.3	采区影响范围内的构造应力分布规律及巷道稳定性	146
§ 5.4	静压和动压 (工艺作用) 共同作用下的巷道稳定性	160
§ 5.5	金属砂浆锚杆对巷道变形和松动范围的影响	171
	参考文献	176
第六章	在构造应力作用下的岩体中施工	177
§ 6.1	构造应力作用下巷道的维护方法	177
§ 6.2	矿区开采次序的基本要求	178
§ 6.3	合理的巷道方向	185
§ 6.4	巷道断面形状的选择	188
§ 6.5	准备巷道的相互位置和掘进次序	196
§ 6.6	采动影响区内准备巷道的合理布置	199
§ 6.7	挑选合理的支护类型	206
§ 6.8	确定锚杆支护的参数	208
§ 6.9	具有构造应力时改善分层强制崩落法的途径	214
§ 6.10	构造应力和巷道围岩状态的正常检查	222
	参考文献	226

第一章 地壳表面的应力状态

§ 1.1 关于地壳构造的新概念

近十年内矿山工程涉及之岩体是本书所要研究的对象。矿山工程所达到的最大深度为3000~3500米（印度和南非的金矿），大部分矿山工程只达到1000~1500米。石油井和生产天然气的钻孔深度达7000米，研究地质构造和地质勘探的钻孔达9900米深，计划钻进深度要到15000米。上述深度对于地球半径来说是一个非常渺小的数字，只是它的0.1~0.2%。地球硬壳（地壳）的平均厚度为30公里，因此可以说，研究矿山工程和钻孔稳定性时直接感兴趣的是地壳表层的应力状态，但是，包括地表在内的整个地壳之应力状态与地球之深部结构及发展有密切关系〔2、3〕。

根据地壳物理深探所获得的资料，地球从纵剖面来看是一个环带构造，这个环带反映了地球物质的带状分布和密度。地球分地壳，上地幔和下地幔，外地核和内地核（图1.1）。大陆的地壳厚度为20~70公里。在海洋，其厚度要小一些，约5~15公里。组成地壳的岩体密度为2.7~3.0克/厘米³，径向弹性波速度约6~7.4公里/秒。上地幔和地壳的分界线称“摩赫面”，也称地震界面。地震界面的弹性波速度跳跃式地增长，其值大于8公里/秒。这与上地幔的物质密度（3.3~3.7克/厘米³）的增大有关。

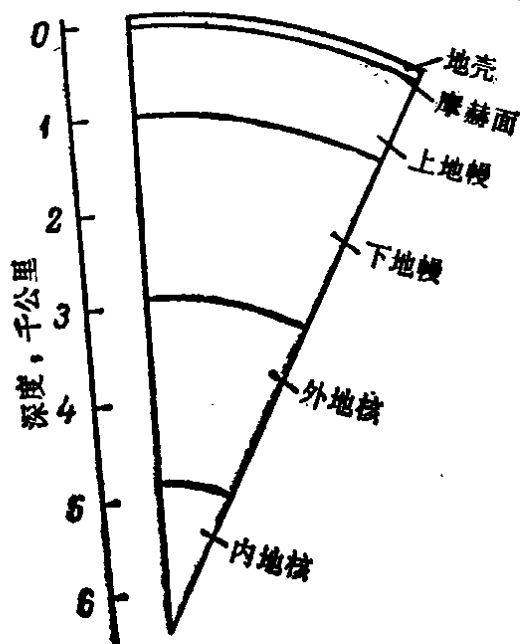


图 1.1 地球构造图

地球物理勘查的结果使得有可能在上地幔分出层次。岩流圈，它居于陆地下100至250公里之间，其粘度为 10^{20} 泊，比上地幔的混合层低2~3级〔4〕。由于岩流圈的粘度低、塑性大，结果起了这样的作用，似乎它上部的上地幔地层和地壳按阿基米德原理浮在它上面，因此产生地壳均衡学说——相对平衡：不管地表的地形如何变化，在岩流圈（约100公里深）上的地壳压力处处相等。

地壳与上地幔组成构造圈——在地球中出现构造运动的区域。地壳本身为非均质体，按照地震的特征它可分三层，沉积岩层，花岗岩层和玄武岩层。上面一层为沉积岩层，可能有10~15公里厚（个别地方达25公里），它的弹性波速为2.0~5.0公里/秒。再往下为花岗岩层，最大厚度达30~40公里，它的弹性波速为5.5~6.0公里/秒。花岗岩层的下面为玄武岩层，其厚度约15~30公里，弹性波的速度是6.5~7.4公里/秒。在它们的某两层间，能改变速度的地震界面称孔拉特面。

地壳和岩流圈以上的地幔合在一起称岩石圈。

与纵剖面条带一样，在岩石圈内还存在着横向条带。横向条带的形成始于45~50亿年前，在形成地壳的同时就开始了。岩石圈内分各种级别的构造——深部构造和浅部构造：星型（行星）构造，区域性构造，块状构造和条状构造。深部构造的第一级为地壳的陆地和海洋区，构造的第二级为活动的地槽带和相对稳定的地台和地盾。这两级构造的规模一般以千公里计，与它们相交的断层之级别更低，属于区域性的第三级和第四级。岩石圈分为行星地块，地板块，棱镜体和地楔。

深大断裂为地壳的早期构造。

不超出地壳的地裂和行星地块被分割成地段称更低级的断裂。地壳构造组成不同级别的褶皱，其规模可达几十公里，有时可达几百公里。在地块和地段中可以发展成展开的和闭锁的褶皱及波状弯曲。

可见地壳具有条块——波状结构。

§ 1.2 地 壳 运 动

上一节已经指出了岩流圈在地壳构造运动中的特殊作用。岩流圈是地壳表面岩体运动的衰减区，但又是地壳运动的发生器，因为它制造岩浆，岩浆的升降将引起地壳板块的移动。

地壳的构造运动受地球深部和宇宙因素的影响，其中有行星的和宇宙——行星的因素。如地壳和上地幔的热、密度、机械性能和物质的不均匀性，地球运动的不等速，以及区域的位置〔5〕。近几年，人们的研究证明了地壳上没有一个质点不在运动，不论是在从前的地质年代里或是现在都是如此。何况在现代的构造地质动力学中，把地壳视为地球的“沸腾层”〔6〕，那就更不用多说了。

深大断裂和地壳断层是天然的接合处，在地球的整个地质史中，沿着它们在进行着构造运动。研究人员分析了两对相交的深大断裂系统：正交断裂系统和斜交断裂系统。前者为经纬方向相交，后者为北西——南东和北东——南西方向相交。查明这些系统的方向与切向作用力有关，这一切向作用力在漫长的地质年代里取决于地球的运动。

根据构造运动的特点可以划分为下列类型：

- a) 脉冲式或震动式运动；
- б) 隆起和下沉；
- в) 波状和块状运动；
- г) 褶皱状和条块状运动。

构造的总运动组成多级的频谱。在一个地壳的较大的部分的隆起里也可以找到小的局部的下沉（按速度为第二级），以及从次序来说更为复杂的第三级的运动，等等。第一级构造运动的周期为2亿年，第二级构造运动的周期为3~4千万年，第三级为1~1.5千万年。最小的震动期为上百年和上千年〔7〕。

引起构造运动的原因是力，B. B. 别洛窝萨夫称这个力为构造力。应当指出，上下构造运动与地壳均衡学说论是相矛盾

的。当构造力的作用停止时，可以发现地壳在重力作用下趋向均压平衡〔7〕。

现在的和出现在五千到一万年间的地壳构造运动称近期运动。分缓慢（不停的）的和与地震有关的快速（跳跃式）运动两种。在地槽带，地壳近期构造运动的速度要比板块带高出一级。根据仪器测示，上下运动的速率可达每年10厘米，水平方向的运动可达一年几厘米，也可以超过上下运动的速率〔8〕。必须强调的是，运动本身，不论其范围和时间都非常复杂，隆起的过程中可能周期性地出现下沉。但这种变化的发生都需经过很长的年代，而且后期运动的特点和速率往往承嗣前期的特点，因此，可以将现今的构造运动看成继续的不变的规律。

§ 1.3 地壳内的应力场

在我们的研究中，最感兴趣的是整个地壳和它的表面部分，也具有现实意义，因为它内部布置着矿山工程，而且受到各种力场的作用。也就是说它处在应力状态中。地壳主要受两个相互独立的力场作用：按牛顿万有引力规律的重力场作用和构造力场的作用。构造力场的作用，使得地壳的运动速度和变形速度在空间内部不均等。也就是说存在构造运动的阶梯。

此外，在地壳的不同地区还可能受到局部的区域性的力场作用。如地下承压水的作用，热流不均引起的附加应力作用，等等。在地震区以及进行爆破作业，也会使静应力场内出现短暂的（脉冲式的）动应力场，它们在一系列情况下，可以对井巷工程的稳定性产生严重的影响。

万有引力的表现形式为重力加速度 g ，从严格的物理含义而论 g 是两个参数的函数，这两个参数是指至地球中心的距离 $R_{c.m}$ 和岩体的密度 ρ 。由于在地壳不同厚度的各点， g 值的变化是如此的微小，所以在解决岩体力学问题时可以将它看成常数

$$g = \text{const} = 980 \text{ 厘米/秒}^2 \approx 1000 \text{ 厘米/秒}^2$$

重力产生引力场的垂直分力 σ_{vH} ，其值为计算点上部岩体容

重 γ 和深度 H 的乘积,

$$\sigma_{\gamma H} = \gamma H \quad (1.1)$$

容重本身又是岩体密度 ρ 和重力加速度 g 的函数:

$$\gamma = \rho g \quad (1.2)$$

引力场水平分力 $\sigma_{\gamma H_1}$ 和 $\sigma_{\gamma H_2}$ 的分析见后。

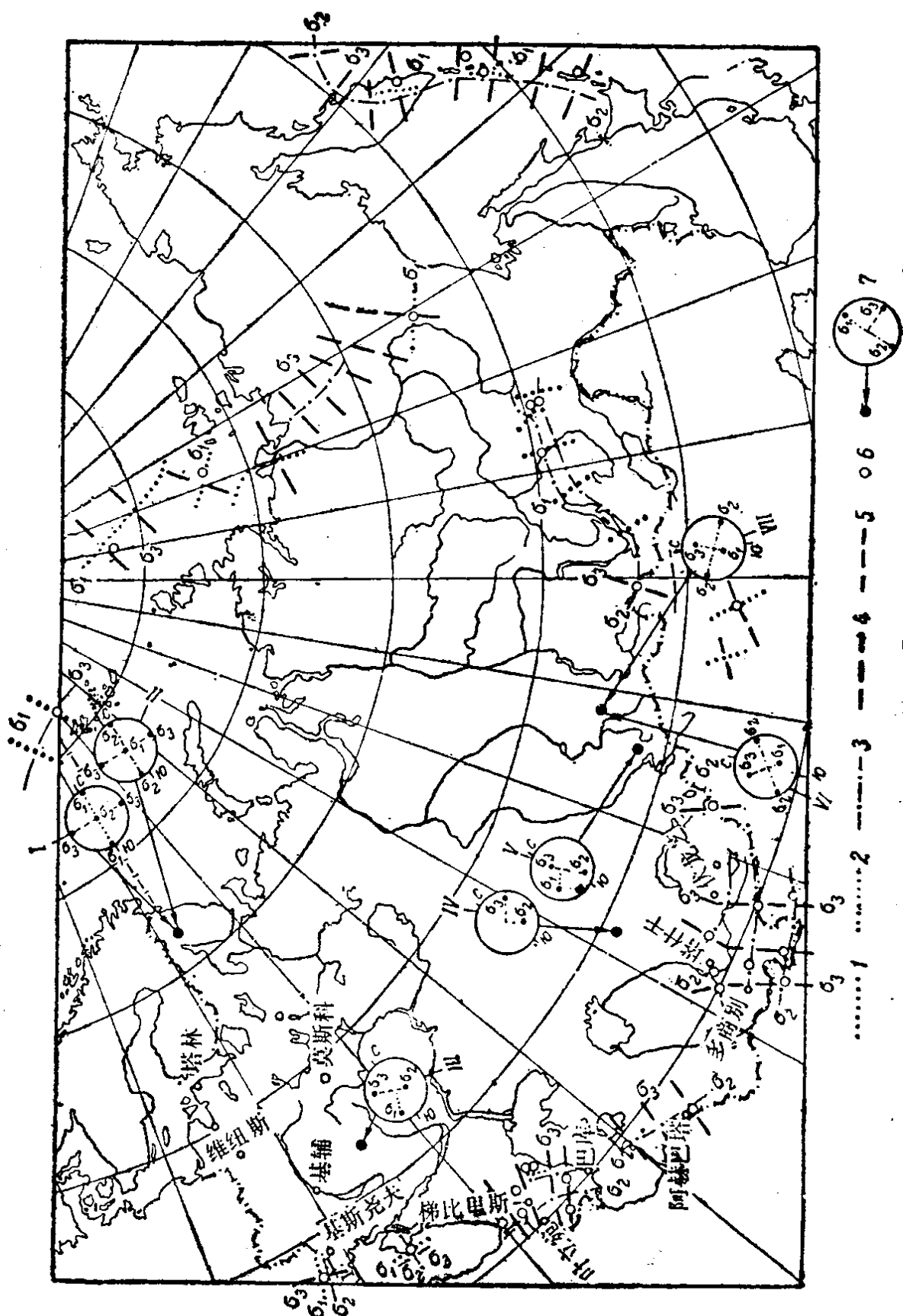
上面已经指出, 构造运动的速度和地壳的变形速度在空间内是不均匀的, 因而构造应力场要比重力应力场复杂得多。一般讲, 构造应力的方向为水平方向或近似水平, 在地震学和大地构造学中, 它的值根据最大切向应力而定〔3〕。

根据矿山工程中无数直接量测的资料 (图1.2), 可以肯定地壳表面构造应力场的存在〔9〕。这个观点还可以从岩爆的资料中得到证实。在深度不大 (100~200米) 的巷道中岩体具有高强度 (达1500~2000公斤/厘米²)〔10, 11〕。但是, 根据它的条件, 若只有重力场作用, 就是把应力集中因素都计算在内, 在巷道围岩内的最大应力也要低于岩体强度, 不可能破坏岩体, 可是却发生了岩爆。

在地球的不同部位、在晶基岩层、在褶皱内, 用众所周知的卸载法, 脉冲地震法, 以及其它方法进行量测时, 几乎在所有的地方都留下了存在水平构造应力的记录〔12〕。在几千公里深的沉积岩内, 同样发现构造应力作用的痕迹, 在石油和天然气贮藏区发现非常大的反常的地层压力。这些异常大的压力可以高出重力好多倍, 这就是一个见证。在深度超过4.5公里的石油矿区和天然气矿区, 构造应力几乎处处都有, 它将地壳的活动区——阿尔卑斯大向斜和板块的构造活动区域——移向石油天然气产地的中心〔13〕。

§ 1.4 重力场作用

如式 (1.1) 所示, 重力场组成垂直分力。A. И. 奇尼克求得了各向同性的弹性体内水平分力的通用公式〔14〕。他想像地从岩体内截取出一个单元体——六面体, 其各面置于水平或垂直的



位置，这个单元体平衡的条件是上下两个面都受到重力 $P = \sigma_3 = \gamma H$ 的挤压。在这种情况下，侧压力，或叫水平压力，可用下式表示

$$\sigma_1 = \sigma_2 = \frac{\nu}{1-\nu} \gamma H = \xi \gamma H \quad (1.3)$$

式中 ν ——单元体的侧向变形系数（泊松系数）。

侧压系数 $\xi = \frac{\nu}{1-\nu}$ （式1.3）告诉我们，当岩体横断面不可能变形时，正压力的那一部分变成了与正压力垂直的横断面上之应力。

对岩石来说 ν 值介于 0.08 至 0.5 之间，则对相应的侧压系数 ξ 将是 0.1 至 1。当 ν 的最大值为 0.5 时， ξ 等于 1。从式(1.1)和(1.3)得知，岩体中重力的静水力学平衡条件是 $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ，它与十九世纪末期著名的 A. 葛姆假说相一致。因此，A. H 奇尼克表达的重力场中之静水应力状态是岩体应力状态的特殊情况。

应当强调，重力场中的侧压力值 σ_1 和 σ_2 取决于被研究的 i 层的侧压系数 ξ_i ，而与其顶板和底板的侧压系数 ξ_{i-1} ， ξ_{i+1} 无关。所以当岩体由不同质的各种岩层所组成、它们的系数 ν 和 ξ 又完全各异时，垂直应力（重力） σ_3 将不变地随深度而增加。但当岩层从一层转向另一层时将随着 ν 值的大小之变更，而有局部的变化。

但是应力场中的重力并不永远绝对垂直，因为地形并不平整，所以水平方向的质量也不一样，而且水平方向的岩体密度也多种多样，这就使得应力 σ_3 偏离了垂直线。一般来讲，最大不超过 $10^\circ \sim 15^\circ$ [15]。

图 1.2 地壳中的主应力方向

1~5—根据地震资料得出的球面主应力轨迹投影（1— σ_1 数学最大值，它们与构造区的走向相交；2— σ_1 ，数学最大值，它们与构造区的走向不相交；3— σ_2 ，数学平均值；4— σ_3 ，数学最低值，它们与构造区走向不相交；5— σ_3 ，数学最低值，它们与构造区走向不相交）；6—某些地震的震源；7—苏联矿山测得的主应力方向 [9]。I—拉斯丰恰尔金属矿，西平斯克块体；II—基洛夫金属矿，西平斯克块体；III—哥勃金金属矿；IV—捷兹卡兹干，煤矿 31—32；V—佐良诺夫金属矿；VI—搭舒塔郭金属矿，矿山晓里亚

§ 1.5 构造应力作用

在晶基岩体和褶皱层中, 直接测到的强构造应力可以与出现切向压力相联系, 也可以和地壳的隆起相关联〔3〕。上面已经指出, 与测得的结果一样, 构造应力可以近似地看作水平应力。构造应力的方向受地壳构造结构方向的影响。在很多情况下, 构造应力要比重力值大1~1.5倍〔12〕。

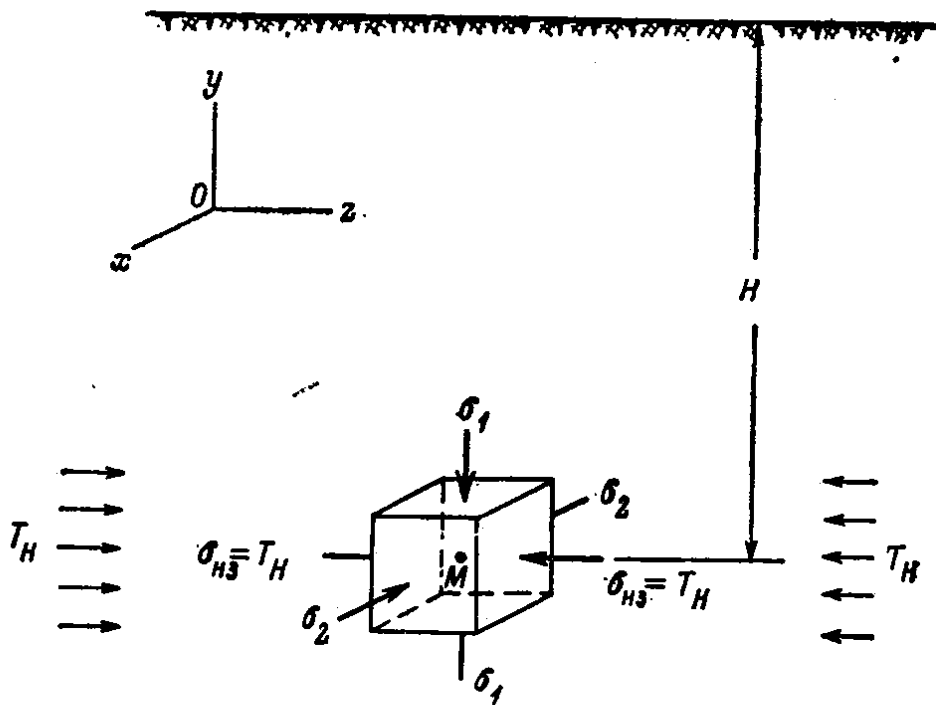


图 1.3 水平构造应力计算图

与重力场相比, 构造应力场很不稳定, 它的参数在空间和时间上可以有很大的差异, 就是主应力的方向和其绝对值也变化不定。随着深度的增大, 构造应力的变化也不一致, 有时变大, 有时变小〔1〕。构造应力垂直方向的变化可用纵向应力梯度 ∇_{σ_z} (公斤/厘米²/米) 来表示。在山区, 开采工作所达到的深度内, 梯度 ∇_{σ_z} 的数值之大小与地形有关。能够用来计算梯度 ∇_{σ_z} 的实验应力数据之相应深度为1500~2000米。这种数据还不丰富, 不可能用来预测更大深度的 ∇_{σ_z} 之变化。

根据 A. H. 奇尼克所作的重力场之分布分析, 我们来研究一下构造应力在弹性均质体 (图1.3) 中的分布。