



第七章 地应力测量原理与技术

§ 7.1 岩体中的自重应力与构造应力

§ 7.2 地应力分布的基本规律

§ 7.3 地应力的直接测量法

§ 7.4 地应力的间接测量法



§ 7.1.0 基本概念

(1) 地应力：

英语名称： virgin stress of rock (rock mass)

initial stress of rock (rock mass)

指存在于地层中的未受工程扰动的天然应力。

也称原岩应力、初始应力。



§ 7.1.0 基本概念

(2) 原岩：

英文名称： virgin/initial rock

指未受采掘影响的天然岩体。

(3) 原岩应力场：

英文名称： virgin/initial stress field of rock

指原岩应力在岩体内的分布。



§ 7.1.0 基本概念

(4) 自重应力：

英文名称： gravity stress

指由于上覆岩层重力引起的应力。

也称岩重应力。

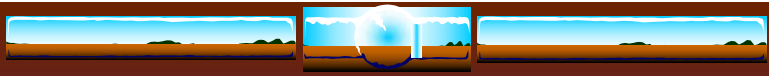


§ 7.1.0 基本概念

(5) 构造应力：

英文名称： tectonic stress

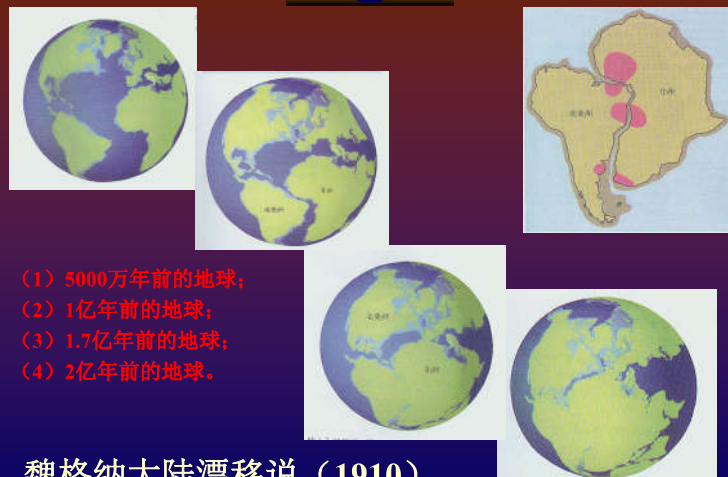
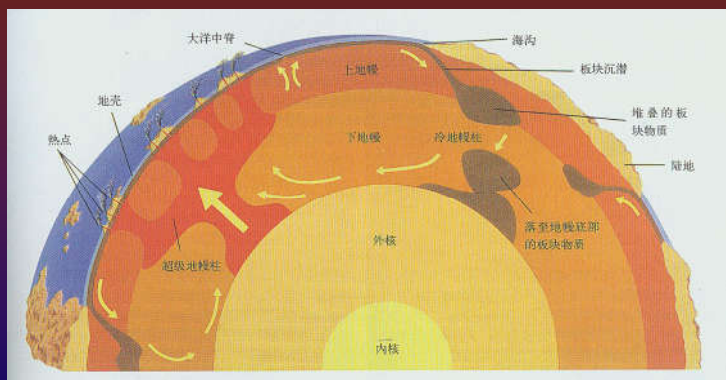
指由于地壳构造运动在岩体中形成的应力。



地应力形成主要与地球的各种动力运动有关，包括：板块边界受压、地幔热对流、地球内应力、地心引力、地球旋转、岩浆侵入、地壳非均匀扩容等。

温度不均匀、水压梯度、地表剥蚀或其它物理化学变化等也可引起相应的应力场。

构造应力和重力应力是地应力的主要组成部分。



魏格纳大陆漂移说 (1910)

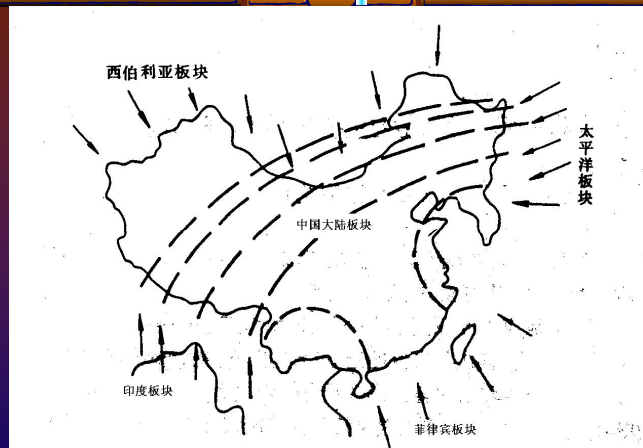


图 中国板块主应力迹线图

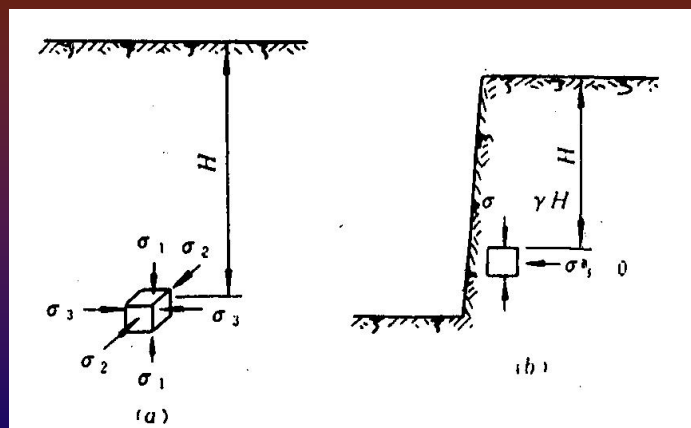


图7-1 岩块所在位置及其应力状态

§ 7.1.1 自重应力

(1) 垂直自重应力: $\sigma_1 = \gamma \cdot H$

(2) 水平自重应力:

金尼克假说:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = -\frac{\mu}{1-\mu} \gamma \cdot H$$

海姆假说 (静水应力状态假说):

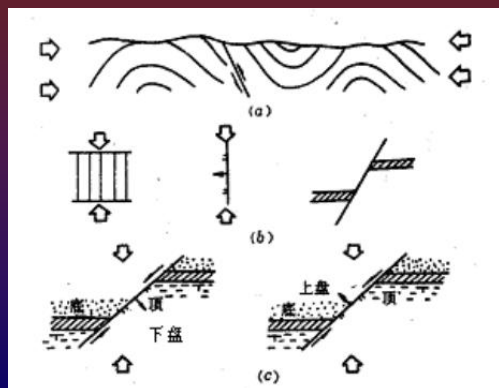
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \gamma \cdot H$$

§ 7.1.1 自重应力

自重应力的特点:

- (1) 普遍存在;
- (2) 与埋藏深度成正比关系;
- (3) 与上覆岩层容重成正比关系。

§ 7.1.2 构造应力



§ 7.1.2 构造应力

表 5-1 西南某水电站原岩应力实测结果

实测地点	垂直地应力 (MPa)	水平地应力 (MPa)	侧应力系数 λ
岩石试验洞	2.22	1.98	0.89
1号高压平洞	0.954	0.816	0.86
2号斜井	2.38	1.99	0.84
总岔管	7.92	8.87	1.12

§ 7.1.2 构造应力

构造应力的特点：

- (1) 以水平压应力为主；
- (2) 分布不均匀；
- (3) 具有明显方向性；
- (4) $\sigma_{Hmax} > \sigma_{Hmin} > \sigma_v$
- (5) 在坚硬岩层中出现较普遍。

§ 7.1.2 构造应力

构造应力的判别方法：

- (1) 静水应力场与非静水应力场判别：
- (2) 最大构造主应力作用方向的判别：

看巷道顶底、或不同方向巷道的破坏情况。

§ 7.2.1 地应力分布的基本规律

之一：地应力是一个具有相对稳定性的非稳定应力场，它是时间和空间的函数。

之二：垂直地应力基本等于上覆岩层的重量。

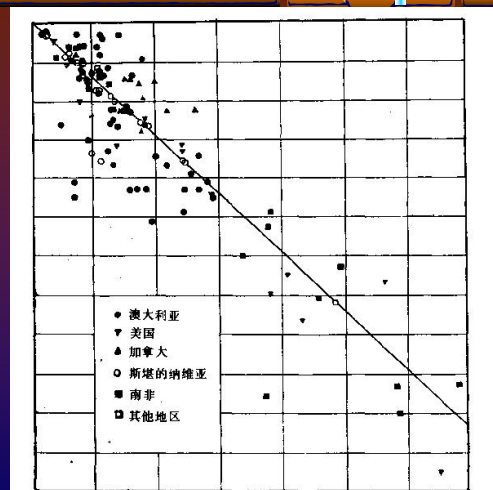


图7-3 世界各国垂直地应力变化规律
(E.Hoek, E.T.Brown)

中国: $\sigma_v / \gamma H = 0.8 \sim 1.2$ 占 5%,

$\sigma_v / \gamma H < 0.8$ 占 16%,

$\sigma_v / \gamma H > 1.2$ 占 79%.

在世界多数地区并不存在真正的垂直应力, 即没有一个主应力的方向完全与地表垂直。但在绝大多数测点都发现确有一个主应力接近于垂直方向, 其与垂直方向的偏差不大于 20° 。这一事实说明, 地应力的垂直分量主要受重力的控制, 但也受到其它因素的影响。

§ 7.2.1 地应力分布的基本规律

之三: 水平地应力普遍大于垂直地应力。

表 5-2 世界各国平均水平主应力、与垂直主应力的关系

国家名称	$\sigma_{k,av} / \sigma_v$			$\sigma_{k,max} / \sigma_v$
	<0.8	0.8—1.2	>1.2	
中国	32	40	28	2.09
澳大利亚	0	22	78	2.95
加拿大	0	0	100	2.56
美国	18	41	41	3.29
挪威	17	17	66	3.56
瑞典	0	0	100	4.99
南非	41	24	35	2.50
前苏联	51	29	20	4.30
其它地区	37.5	37.5	25	1.96

§ 7.2.1 地应力分布的基本规律

之四: 平均水平应力与垂直应力的比值随深度增加而减小, 但在不同地区, 变化的速度很不相同。

$$\frac{100}{H} + 0.3 \leq \frac{\sigma_{k,av}}{\sigma_v} \leq \frac{1500}{H} + 0.5$$

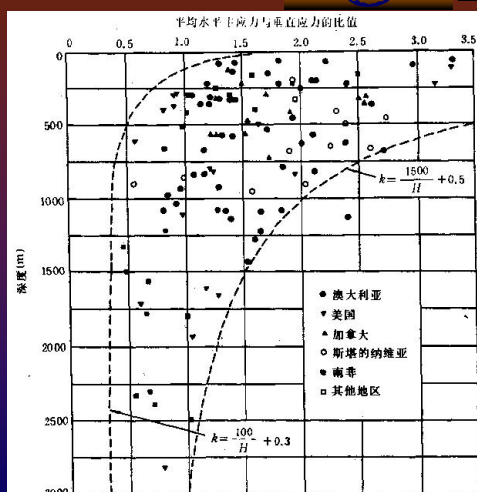


图7-4 世界各国平均水平主应力与垂直应力的比值随深度变化的规律图

§ 7.2.1 地应力分布的基本规律

之五: 最大水平主应力和最小水平主应力也随深度呈线性增长关系。

Stephansson方程:

最大水平主应力: $\sigma_{k,max} = 0.0444H + 6.7$

最小水平主应力: $\sigma_{k,min} = 0.0329H + 0.8$

§ 7.2.1 地应力分布的基本规律

之六：最大水平主应力和最小水平主应力之值一般相差较大，显示出很强的方向性。

表 5-3 世界部分地区两个水平主应力的比值表

实测地点	统计数目	$\sigma_{h, \min} / \sigma_{h, \max} (\%)$				合计
		1.0-0.75	0.75-0.50	0.50-0.25	0.25-0	
斯堪的纳维亚等地	51	14	67	13	6	100
北美	222	22	46	23	9	100
中国	25	12	56	24	8	100
中国华北地区	18	6	61	22	11	100

§ 7.2.1 地应力分布的基本规律

之七：地应力的上述分布规律还会受到地形、地表剥蚀、风化、岩体结构特征、岩体力学性质、温度、地下水等因素的影响，特别是地形和断层的扰动影响最大。

§ 7.2.2 高地应力区的若干特征

(1) 岩芯饼化与地应力差有关

饼状岩芯即钻探时取得的岩芯呈烧饼状，一片片地破坏。

(2) 地下峒室施工过程中出现岩爆、剥离

我国最大的煤与瓦斯突出：1975年发生在重庆天府三汇坝一矿，突出煤岩12780 t，瓦斯1400 万m³。

§ 7.2.2 高地应力区的若干特征

(3) 隧洞、巷道、钻孔的缩径现象

隧道、巷道、钻孔的缩径现象，即严重变形现象，是软岩流变或柔性剪切破坏的结果。

(4) 边坡上出现错动台阶

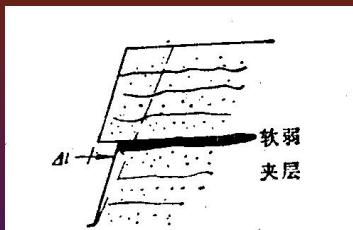
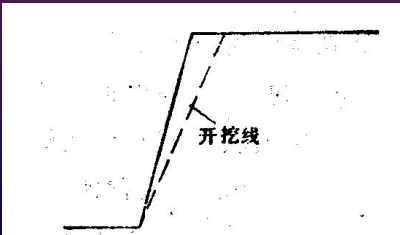


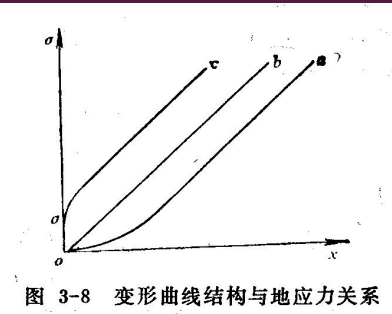
图7-5 基坑边坡回弹错动

图7-6 基坑回弹变形



§ 7.2.2 高地应力区的若干特征

(5) 原位变形曲线的变化



- a. 低地应力环境下，包有裂隙的岩块变形曲线；
- b. 低地应力条件下，完整岩块变形曲线；
- c. 高地应力条件下，岩石变形曲线。

图 3-8 变形曲线结构与地应力关系

§ 7.2.3 地应力测量的基本原则和方法

■ 基本原则：

- (1) 点测量原则；
- (2) 尽量少扰动原则；
- (3) 测点数量充足原则。

§ 7.2.3 地应力测量的基本原则和方法

■ 主要方法：

(1) 直接测量法：由仪器直接测量和记录各种应力量，如补偿应力、恢复应力、平衡应力，并由这些应力量 and 原岩应力的相互关系，通过计算获得原岩应力值。在计算过程中并不涉及不同物理量的相互换算，不需要知道岩石的物理力学性质和应力应变关系。

扁千斤顶法、水压致裂法、刚性包体应力计法和声发射法是实际测量中较为广泛应用的四种直接测量法。

§ 7.2.3 地应力测量的基本原则和方法

■ 主要方法：

(2) 间接测量法：是借助某些传感元件或某些媒介，测量和记录岩体中某些与应力有关的间接物理量的变化，如岩体中的变形或应变，岩体的密度、渗透性、吸水性、电磁、电阻、电容的变化，弹性波传播速度的变化等，然后由测得的间接物理量的变化，通过已知的公式计算出岩体中的应力值。

在间接测量法中，为了计算应力值，首先必须确定岩体的某些物理力学性质以及所测物理量和应力的相互关系等。

§ 7.2.3 地应力测量的基本原则和方法

■ 地应力测量技术发展概况

1932年，美国劳伦斯 (R. S. Lieurance) 在胡佛水坝下一个隧道中首次成功进行地应力的测量。

20世纪60年代中期出现三维地应力测量技术。代表成果：南非三轴孔壁应变计、澳大利亚三轴空心包体应变计、美国水压裂法。

目前地应力测量的最大深度已经超过5000m。

§ 7.2.3 地应力测量的基本原则和方法

■ 地应力测量技术发展概况

中国：1964年武汉岩土力学研究所在湖北大冶进行首次地应力测量；1966年在河北上尧县建立第一个地应力观测站；1980年在河北易县首次进行水压致裂应力测量。地应力测量最多的是地震、水利水电、采矿部门。

§ 7.3.1 扁千斤顶法

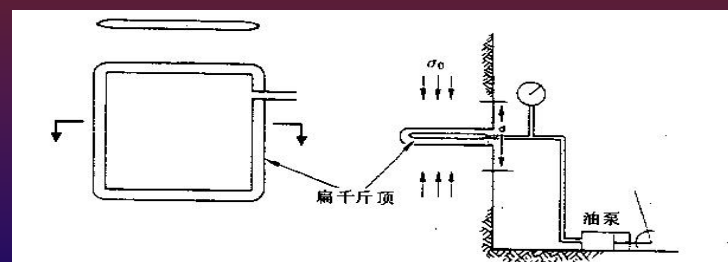


图7-9 扁千斤顶应力测量原理示意图

§ 7.3.1 扁千斤顶法

■ 测量步骤:

- 1、准备测面，安装二个测量柱，并用微米表测其距离；
- 2、开挖扁槽；
- 3、装扁千斤顶；
- 4、测平衡压力（补偿压力）。

§ 7.3.1 扁千斤顶法

■ 特点:

- (1) 一维测量方法；
- (2) 只能在井巷开挖表面进行，测量的非原岩应力场，而是受采动扰动的再生应力场（采动应力）；
- (3) 以完全线弹性理论为基础。

§ 7.3.2 刚性包体应力计法

理论分布表明，位于一个无限体中的刚性包体，当周围岩体中的应力发生变化时，在刚性包体中会产生一个均匀分布的应力场，该应力场的大小和岩体中的应力变化之间存在一定的比例关系。

$$\frac{\sigma'_x}{\sigma_x} = (1-\nu^2) \left[\frac{1}{1+\nu + \frac{E}{E'}(\nu'+1)(1-2\nu')} + \frac{2}{\frac{E}{E'}(\nu'+1) + (\nu+1)(3-4\nu)} \right]$$

§ 7.3.2 刚性包体应力计法

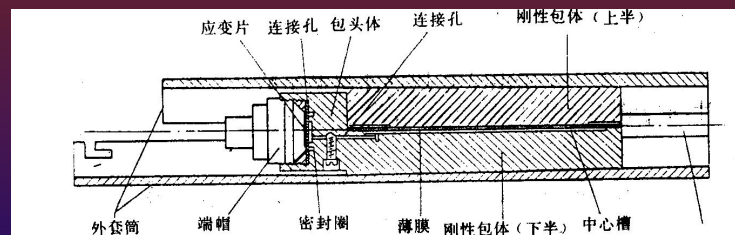


图7-10 梅应力计(A.N.May, 1958)

§ 7.3.2 刚性包体应力计法

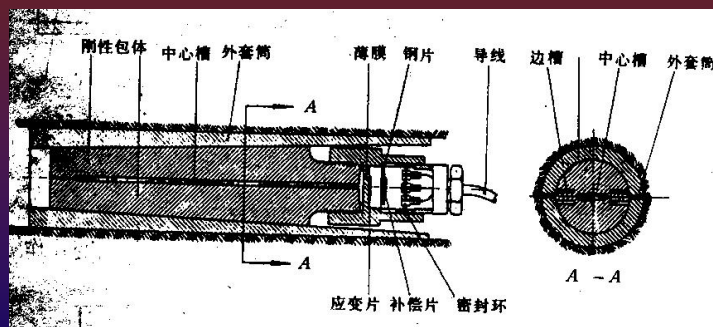


图 波茨应力计 (E.L.J.Potts, 1954)

§ 7.3.2 刚性包体应力计法

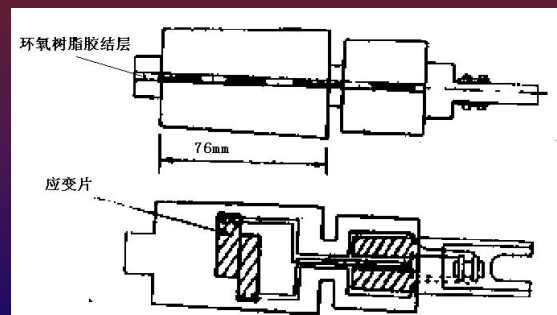


图 威尔逊电阻应变片式应力计 (A.H.Wilson, 1960)

§ 7.3.3 水压致裂法

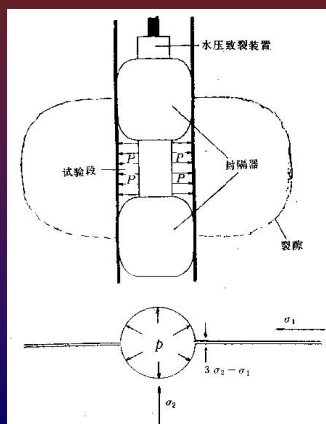


图7-11 水压致裂应力原理

§ 7.3.3 水压致裂法

1、测量原理：

非均匀分布应力场下圆孔周边应力分布：

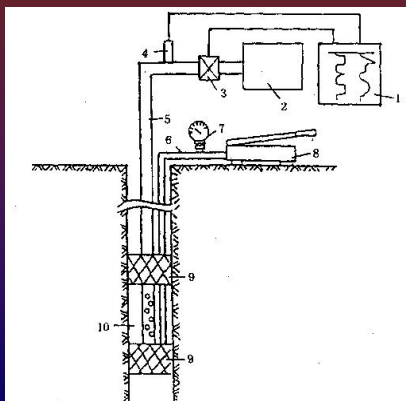
$$\sigma_{\theta} = \sigma_1 + \sigma_2 - 2(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta$$

$$\sigma_r = 0$$

§ 7.3.3 水压致裂法

图7-12 水压致裂应力测量系统示意图

1. 记录仪； 2. 高压泵；
3. 流量计； 4. 压力计；
7. 高压钢管； 6. 高压胶管；
7. 压力表； 8. 泵；
9. 封隔膜； 10. 压裂段



§ 7.3.3 水压致裂法

2、测量步骤：

- A 钻孔，封隔加压段；
- B 多循环注水测压；
- C 封隔器卸压，回撤仪器；
- D 测量压裂裂隙和天然裂隙位置、方向。

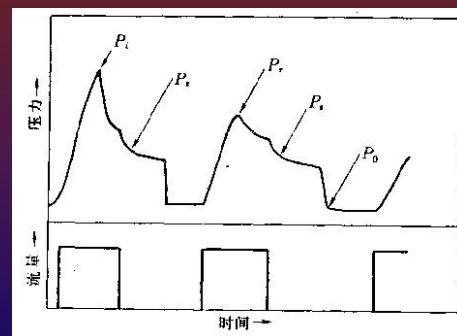


图7-13 水压致裂试验压力-时间、流量-时间曲线图

§ 7.3.3 水压致裂法

3、特点分析：

- (1) 是一种二维应力测量方法，只能测垂直于钻孔平面内的最大主应力和最小主应力的大小和方向；
- (2) 以岩石连续、均匀和各向同性假设为条件，适用于完整脆性岩石中；
- (3) 能够测量深部应力。

§ 7.3.4 声发射法

1、测量原理

材料在受到外载荷作用时，其内部贮存的应变能快速释放产生弹性波，发生声响，称为声发射。

多晶金属的应力从其历史最高水平释放后，再重新加载，当应力未达到先前最大应力值时、很少有声发射产生，而当应力达到和超过历史最高水平后，则大量产生声发射，这一现象叫做Kaiser效应。从很少产生声发射到大量产生声发射的转折点称为Kaiser点，该点对应的应力即为材料先前受到的最大应力。

§ 7.3.4 声发射法

实验证明，岩石也具有Kaiser效应。

所以Kaiser效应为测量岩石应力提供了一个途径，即如果从原岩中取回定向的岩石试件，通过对加工的不同方向的岩石试件进行加载声发射试验，测定凯泽点，即可找出每个试件以前所曾受到的最大应力，并进而求出取样点的原始(历史)三维应力状态。

§ 7.3.4 声发射法

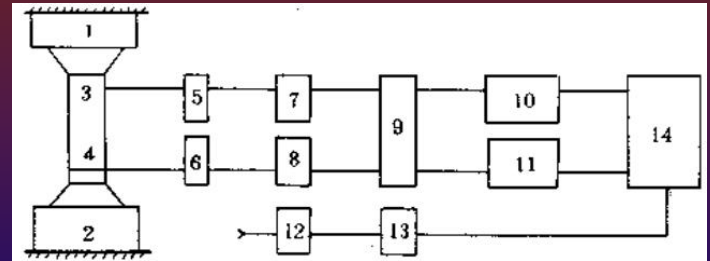


图7-14 声发射监测系统框图

1,2.上下压头；3,4.换能器A,B；5,6.前置放大器A,B；
7,8.输入鉴别单元A,B；9.定区检测单元；10,11.计数控制单元A,B；
12.压机油路压力传感器；13.压力电信号转换仪表；14.三笔函数记录仪

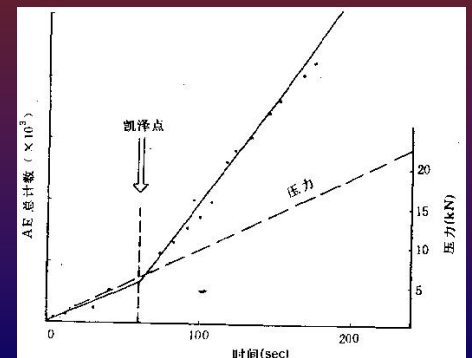
§ 7.3.4 声发射法

2、测量步骤：

- （1）试件准备：测三维应力状态，须沿6个方向制备试件，每个方向15~25块。
- （2）声发射测试：加载速率恒定。
- （3）计算地应力：

§ 7.3.4 声发射法

图7-15 应力-声发射事件试验曲线图



§ 7.3.4 声发射法

3、特点分析：

- （1）最大历史应力与地应力；
- （2）不能测定比较软弱疏松岩体中的应力。

§ 7.4.1 套孔应力解除法

套孔应力解除法是发展时间最长，技术上比较成熟的一种地应力测量方法。

在测定原岩应力(绝对应力)的适用性和可靠性方面，目前还没有哪种方法可以和应力解除法相比。

§ 7.4.1 套孔应力解除法

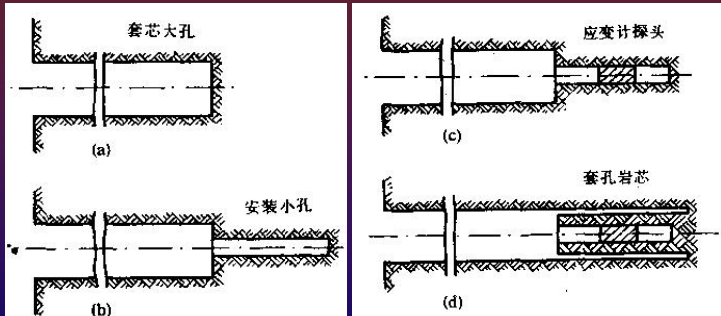


图7-16 应力解除法测量步骤示意图

§ 7.4.1 套孔应力解除法

E.R.Hoskings等人根据USBM孔径变形计使用10年积累的资料，得出结论：

USBM孔径变形计在良好岩石条件下，测量成功率80%以上；而在极为破碎的岩石条件下，成功率仅为5%。

USBM孔径变形计测量数量误差20~100%，方向误差10~25%。

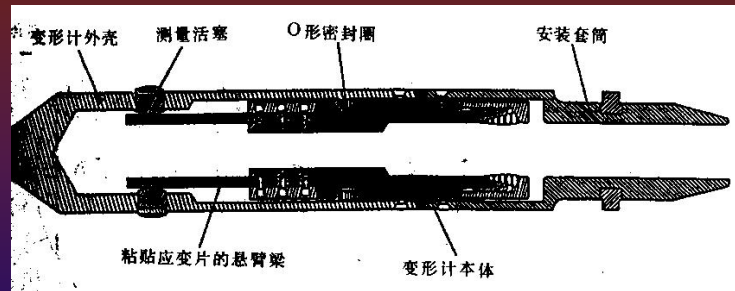


图 USBM孔径变形计

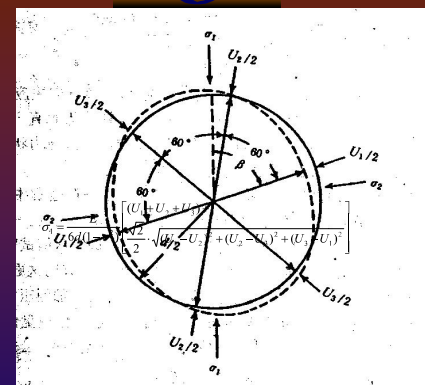


图 垂直钻孔轴线的平面孔内的孔径变形和应力状态示意图

$$\sigma_1 = \frac{E}{6d(1-\nu^2)} \left[\frac{(U_1 + U_2 + U_3) + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_3 - U_1)^2}}{2} \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{6d(1-\nu^2)} \cdot \left[\frac{(U_1 + U_2 + U_3) - \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (U_2 - U_3)^2 + (U_3 - U_1)^2}}{2} \right]$$

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \tan^{-1} \frac{\sqrt{3}(U_2 - U_3)}{2U_1 - U_2 - U_3}$$

$$E = \frac{4P_0 r R^2}{U(R^2 - r^2)}$$

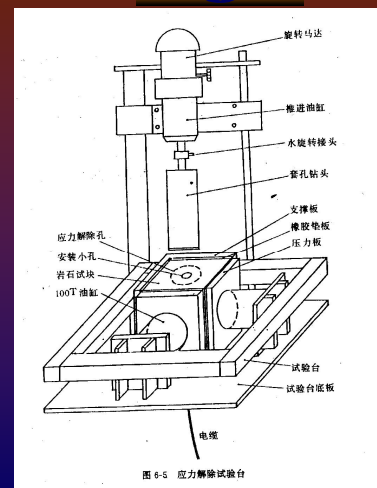


图 7-19 应力解除试验台

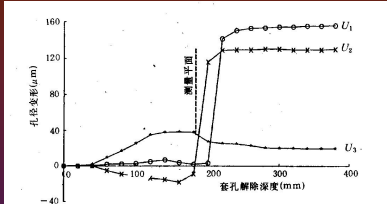


图 6-6 USBM 孔径变形计测煤试块应力解除曲线

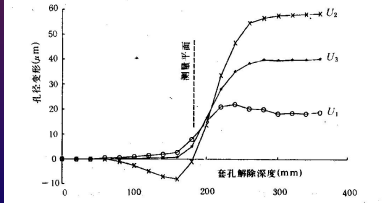


图 6-7 USBM 孔径变形计测砂岩试块应力解除曲线