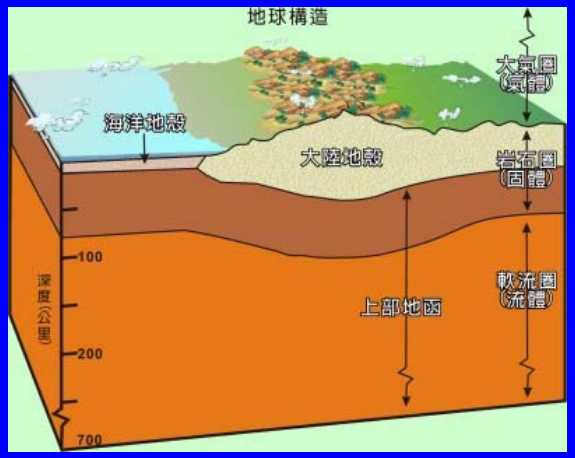
第一章 钻井的工程地质条件

Chapter 1 Engineering geology of drilling

第一节 地下压力特性

第二节 岩石的工程力学性质



第一节　地下压力特性

Section 1 Formation pressure characteristics

一、地下各种压力的概念

二、地层压力评价方法

三、地层破裂压力及评价方法

在工程力学中，规定拉应力为正，压应力为负。在谈到压力时，规定压应力为正，拉应力为负。

一、地下各种压力的概念

（一）静液压力（hydrostatic pressure）

1. 静液压力

$$p_h = \rho g h_l \qquad (1\text{-}1)$$

式中：p_h —— 静液压力，Pa;

ρ —— 液体密度，淡水：1000kg/m³；盐水：1050kg/m³;

g —— 重力加速度，m/s²

h_l —— 液柱的垂直高度，m。

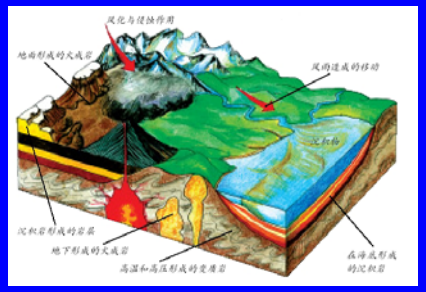
2. 静液压力梯度

$$G_h = \rho g \qquad (1\text{-}2)$$

式中：G_h——静液压力梯度 ，Pa/m;

淡水：0.00981MPa/m；盐水：0.0105MPa/m。

（二）上覆岩层压力（Overburden pressure）



1. 上覆岩层压力

$$P_o = \frac{\text{基岩重力} + \text{流体重力}}{\text{面积}}$$

$$P_o = Dg\,[(1-\phi)\rho_{ma} + \phi\rho] \qquad (1\text{-}3)$$

$$p_o = \sum \rho_{oi} g \Delta D_i \qquad (1\text{-}4)$$

$$p_o = \int_0^D \rho_o(D) g \, dD$$

D 为深度；ϕ 为孔隙度；ρ_{ma} 为岩石骨架的密度；ρ 为孔隙内流体的密度；ρ_o 为混合体的密度；i 为段序；P_o 为上覆岩层压力。

如基东高尚堡构造:

$$\rho_o(D) = 2000\, e^{0.575\times10^{-4} D}$$

2. 上覆岩层压力梯度

$$G_o = p_o / D$$

注意:

（1）上覆岩层压力梯度随深度增加而增大。

（2）沉积岩的平均密度大约为2300kg/m³，平均上覆岩层压力梯度一般为0.0227兆帕/米。

（3）在石油钻井中，以钻台作为上覆岩层压力的计算基准面。

（三）地层压力（formation pressure）

地层孔隙内的流体所具有的压力，亦称为地层孔隙压力，p_p。

正常地层压力——$p_p=p_h$

异常地层压力——$p_p>p_h$，异常高压

$p_p<p_h$，异常低压

地层压力的当量（钻井液）密度：

当某深度处的地层压力与钻井液的静液柱压力相等时的钻井液密度。

$$p_p = \rho_p g D \qquad (1\text{-}5)$$

ρ_p ——地层压力当量（钻井液）密度。

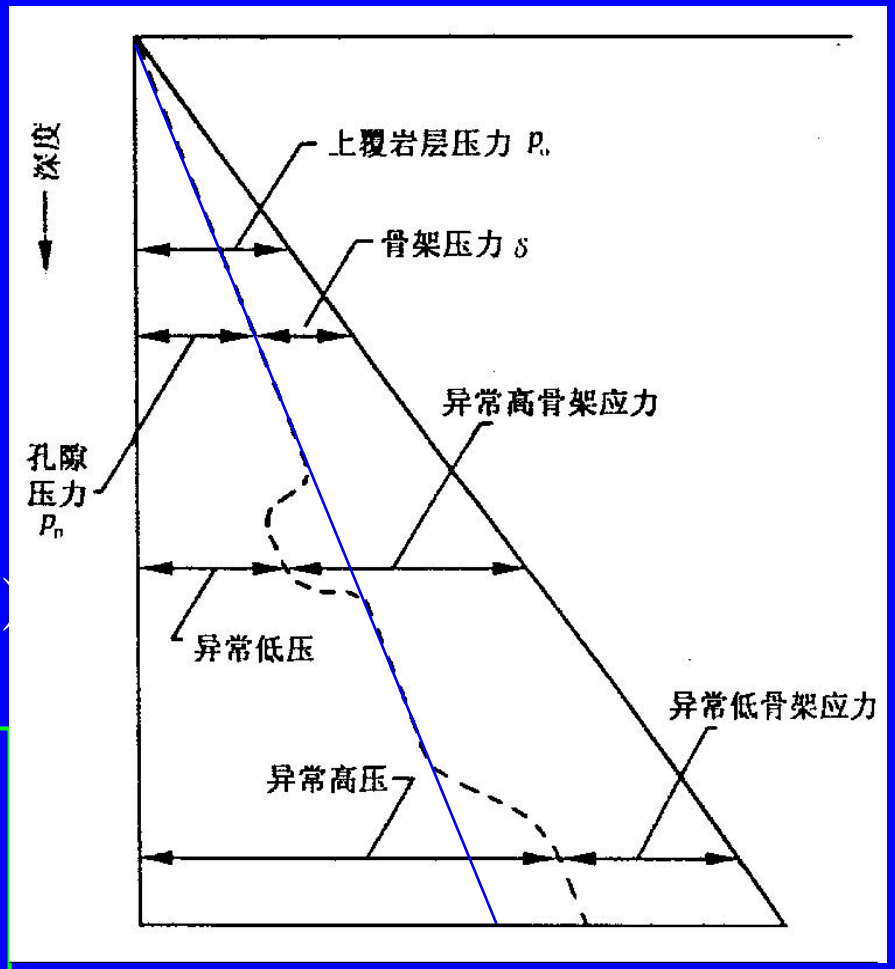
（四）基岩应力（matrix stress）

由岩石骨架（相互接触的岩石颗粒）支撑的那部分上覆岩层压力，又称为有效上覆岩层压力或有效垂直地应力。记为 σ_1

地下各种压力的关系：

$$p_o = \sigma_1 + p_p \quad \text{(书中)}$$

$$p_o = \sigma_1(1-\phi) + \phi p_p \quad \text{(实际)} \qquad (1-5)$$



当 p_o 一定时，σ_1 减小，p_p 增大；$\sigma_1 \to 0$，$p_p \to p_o$；所以，地层的孔隙压力增大，基岩应力必然减小。

注意：（1-5）与书中的不同！

（五）异常地层压力的成因

异常低压和异常高压统称为异常压力（abnormal pressure）。

1. 异常低压（abnormal low pressure）

压力梯度小于9.81kPa／m（即正常地层压力梯度）为异常低压。

产生异常低压的原因:

（1） 生产多年而又没有压力补充的枯竭油气层。

（2） 地下水位很低。

2. 异常高压（abnormal high pressure）

压力梯度大于10.5千帕／米的是异常高压。

（1）形成异常高压的地质条件

① 地层具有保存流体的孔隙;

② 地层周围存在不渗透围栅，构成圈闭;

③ 具有一定的埋藏深度，形成足够大的上覆岩层压力。

（2）异常高压的成因

★ 地层沉积中的欠压实作用

在地层沉积过程中，随着沉积物的不断增加，上覆岩层压力逐渐增大。当地层是可渗透的，流体可以自由流通，则随着上覆岩层压力的增大，地层被正常压实，地层孔隙减小，孔隙中多余流体被排出，便建立了正常的静液压力环境，此时地层压力即为静液压力。这种正常沉积压实的地层，随着埋藏深度的增加，孔隙度减小，密度增大，基岩应力增大。如果是“封闭”的地质环境，即地层周围存在不渗透围栅，则随着上覆岩层压力的增大，地层孔隙内流体的排出受到限制，必然承受部分上覆岩层重力。结果是地层流体压力升高，地层得不到正常压实，孔隙度相对增大，岩石密度相对减小，基岩应力相对降低。这种作用称为欠压实作用。

★ 其它原因：

① 地质构造作用：地层上升；巨大地应力的挤压

② 水热增压作用：温度升高，流体体积膨胀

③ 渗透作用：水由盐浓度低的一侧通过泥岩半透膜向高侧渗透。

（3）异常高压的大小

异常高压一般不会超过上覆岩层压力。但也有超过上覆岩层压力的特高压地层（水平地应力的杰作），由覆盖在高压层以上岩层的内力（结构强度）帮助上覆岩层压力来平衡地层流体的巨大向上作用力。

二、地层压力评价方法

◆ 预测方法

（1）地震法（钻前）

（2）测井资料法——声波时差法（钻后）

◆ 监测方法（随钻）

（1）dc指数法

（2）页岩密度法

（3）标准化钻速法

◆ 基本原理

高压地层欠压实，孔隙度比正常压实时大，密度比正常压实时小。

（一）声波时差法

1. 声波时差

声波（纵波）在单位距离地层内的传播时间称为声波时差。

$$\Delta t = \sqrt{\frac{\rho(1+\mu)}{3E(1-\mu)}} \qquad (1\text{-}6)$$

式中：Δt——声波时差；

ρ——岩层密度，　$\rho = f(\phi)$；

E——岩石的弹性模量；

μ——岩石的泊松比。

对于一定的岩性（泥页岩），　$\Delta t \approx f(\phi)$。

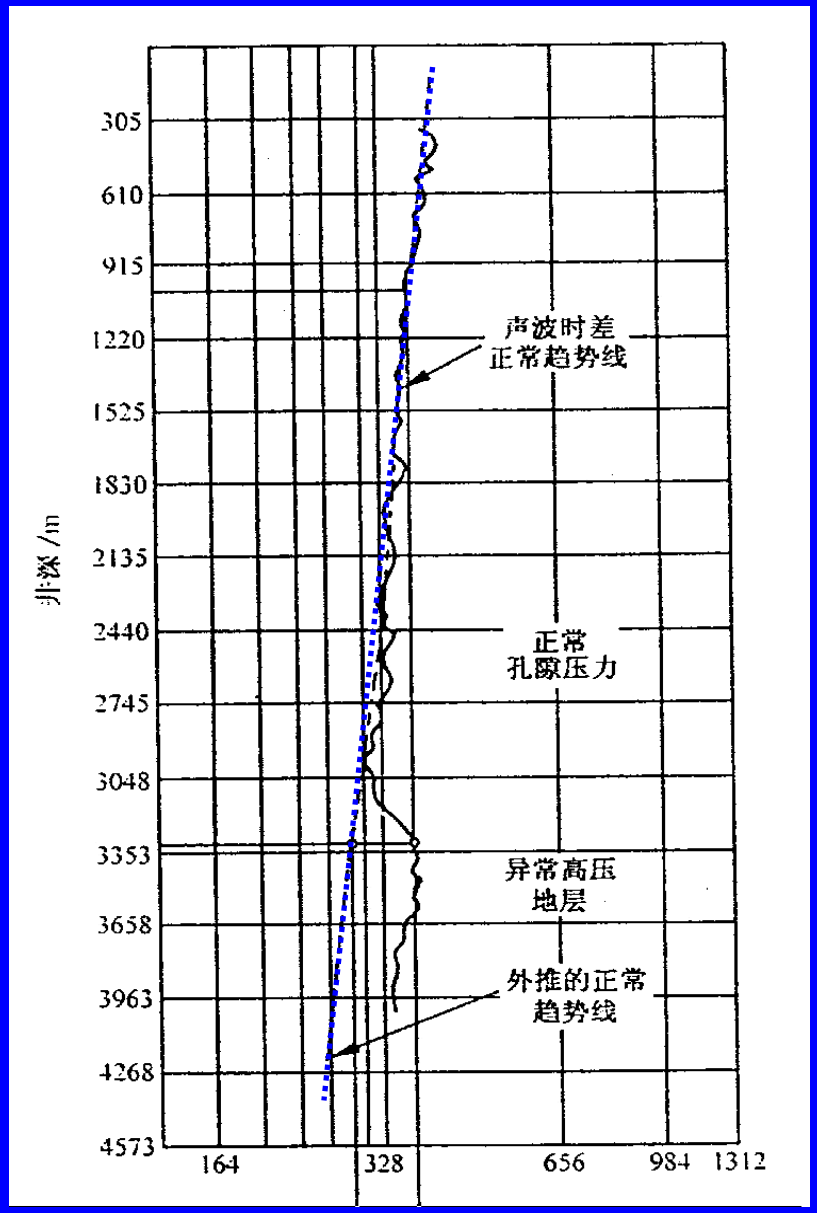
2. 基本原理

在正常压力层段，随着地层埋藏深度的增加，岩石孔隙度减小，密度增大，声波速度逐渐增大，声波时差逐渐减小。在半对数坐标中，声波时差随井深呈直线变化关系，称之为正常趋势线。

$$\Delta t = ae^{-cD} \qquad (1\text{-}10)$$

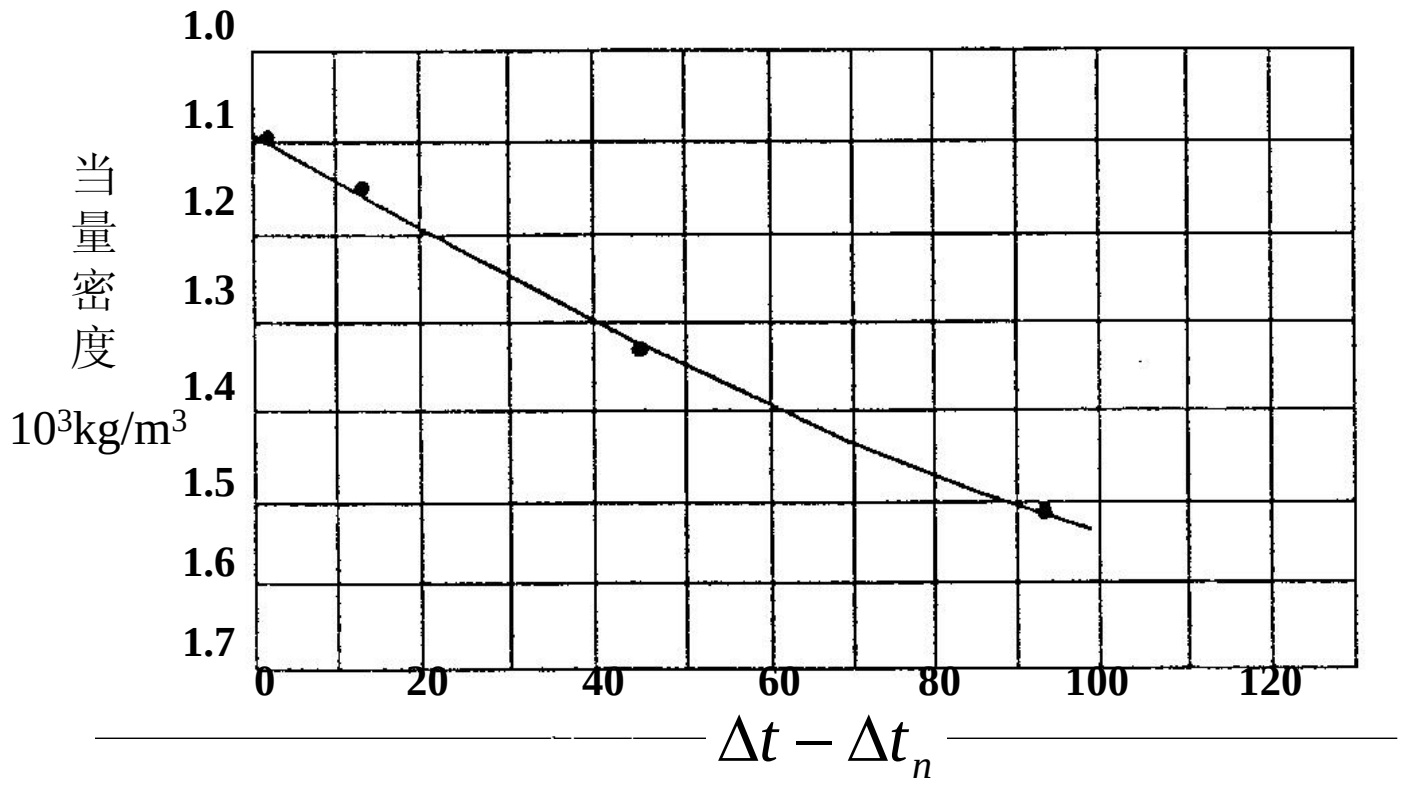
其中，a和c为系数。

进入异常高压地层时，由于岩层欠压实，孔隙度相对增大，声波速度相对减小，声波时差相对增大，则必然偏离正常压力趋势线。据此可预测异常高压，并可根据偏离程度的大小定量计算地层压力。



3. 地层压力的计算

常用方法：经验图版法、当量深度法



4. 地层压力预测步骤

（1）收集声波时差测井资料，读取泥页岩点的声波时差数据;

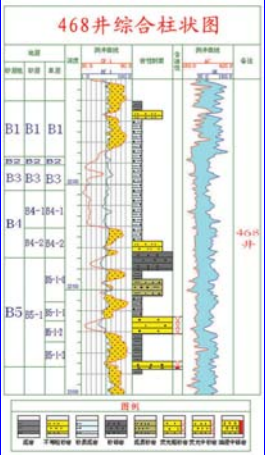
（2）绘制散点图，引出正常压力趋势线：$\Delta t = a e^{-cD}$

（3）读出异常高压层段的实际Δt和该深度D所对应的正常趋势线上的声波时差Δt_n，计算$\Delta t - \Delta t_n$;

（4）从经验图版上读出$\Delta t - \Delta t_n$所对应的当量密度ρ_p;

（5）计算地层压力:

$$p_p = \rho_p g D \qquad (1\text{-}12)$$



（二）d_c指数法

思路：在正常地层压力条件下，若岩性和钻井条件不变，机械钻速随井深增加而减小。钻遇异常高压层，由于地层欠压实，机械钻速增大。据此可评价地层压力。

1. dc指数的概念

宾汉钻速模型（Bingham, 1964）：$V_{pc} = Kn^e (\frac{W}{d_b})^d$ （1-13）

V_{pc}为钻速；n为转速；W为钻压；d_b为钻头直径；K, e, d为系数。

（1）d指数（泥页岩层）

$$d = \frac{\lg(V_{pc} / Kn^e)}{\lg(W / d_b)} \quad (1\text{-}15)$$

（此页为书上内容，但有问题）

常规处理：令K=1，e=1,(没有道理)，得

$$d=\frac{\lg(V_{\mathrm{pc}}/n)}{\lg(W/d_{\mathrm{b}})}$$

在正常地层压力条件下，若岩性和钻井条件不变，机械钻速随井深增加而减小，则d指数随井深增加而增大。钻遇异常高压层，由于地层欠压实，机械钻速增大，d指数则相对减小。据此可评价地层压力。

（2）dc指数——修正的d指数

Rehm & Meclendon(1971)研究了钻井液密度变化的影响（钻井液密度增大将导致机械钻速降低，d指数增大），提出了修正的d指数，称为dc指数。

$$d_{\mathrm{c}}=d\frac{\rho_{\mathrm{n}}}{\rho_{\mathrm{d}}} \qquad \textbf{(1-17)}$$

（**d**指数法有问题）

(三)标准化钻速法

标准化钻速法于1967年由维德(Vidrine)和贝尼特(Benit)提出，1980年由普伦蒂斯(Prentice)和伍兹(Woods)进一步完善，并用于现场。它是利用钻速方程把影响钻速的诸因素修正成标准值，唯一将压差(当量循环密度与地层压力之差)孤立出来。当井内的当量循环密度为一常数时，标准化钻速值的变化，可以直接反映出所钻地层孔隙压力的变化。

据有关资料介绍，该方法能监测到地层压力很小的变化，但因其分析计算较繁琐，从而限制了它的广泛应用。

(四)其它方法

地层压力还可利用页岩密度法、岩屑情况变化分析、化石资料、钻井液返出温度及钻井液中天然气、氯化物含量变化等预测。

三、地层破裂压力及评价方法

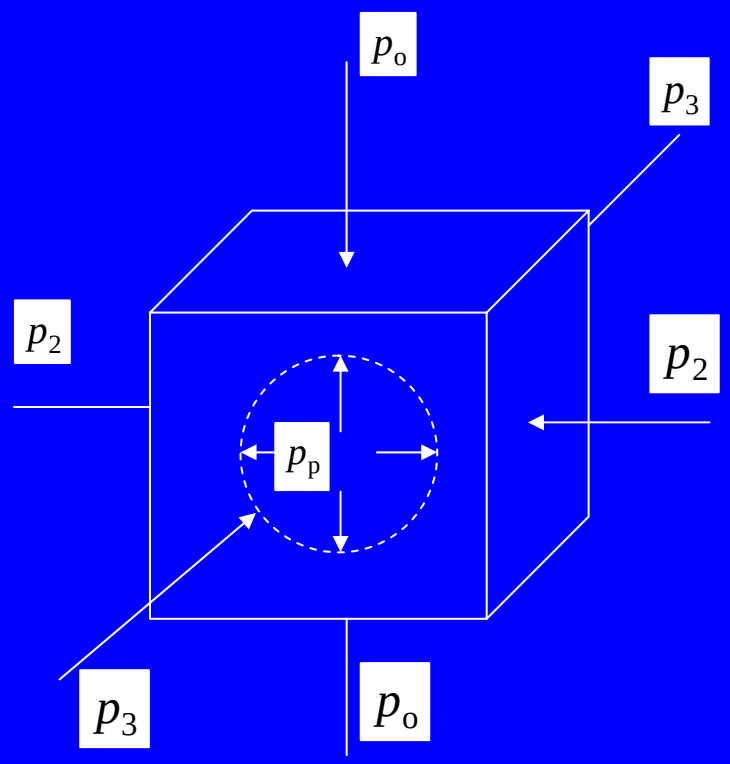
(注意本条与教材中的公式不同)

（一）地下岩石的应力状态——地应力

岩石在地下受到 压力的作用。根据弹性力学，一定存在一个空间直角坐标系，使得该点的应力在三个坐标轴的方向上，只存在拉压应力，而没有剪切应力。这时候，作用在三个方向上的拉或压应力，称为主应力，三个方向称为主方向。

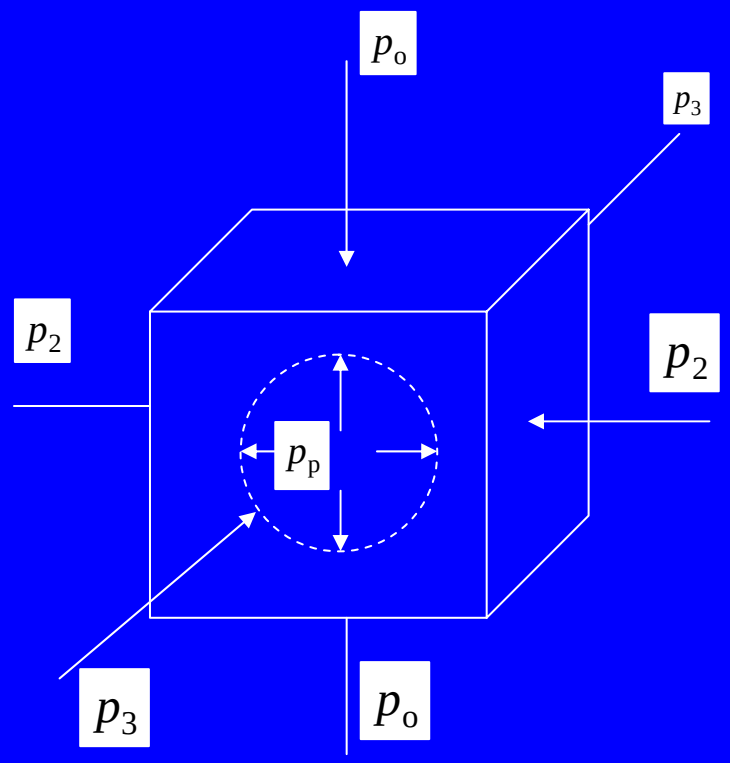
岩石在地下的一个主应力方向大致是铅垂线，不同的地点可能有些偏斜，但一般不大；另两个主应力方向是与铅垂线垂直，而它们又互相垂直的两个方向。

在地下，存在着两种主应力，一是岩石骨架压应力，二是液体压应力。它们共同承担着外部载荷，形成总压应力。



假设岩石的上覆岩层压力为 p_o，水平方向的两个总压力为 p_2，p_3；孔隙内的液体压力为 p_p；三个方向对应的岩石骨架应力为 $\sigma_1,\sigma_2,\sigma_3$。则有：

$$p_o = (1-\phi)\sigma_1 + \phi p_p$$
$$p_2 = (1-\phi)\sigma_2 + \phi p_p$$
$$p_3 = (1-\phi)\sigma_3 + \phi p_p$$



因为我们的目的是研究岩石的应力和破坏，并且只有岩石的变形服从虎克定律，为此，需要把基岩的三个应力计算出来：

$$\sigma_1 = \frac{p_o - \phi p_p}{(1-\phi)}$$
$$\sigma_2 = \frac{p_2 - \phi p_p}{(1-\phi)}$$
$$\sigma_3 = \frac{p_3 - \phi p_p}{(1-\phi)}$$

如果假设岩石具有一定的蠕变性，则有：

$$p_o = p_2 = p_3$$
$$\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$$

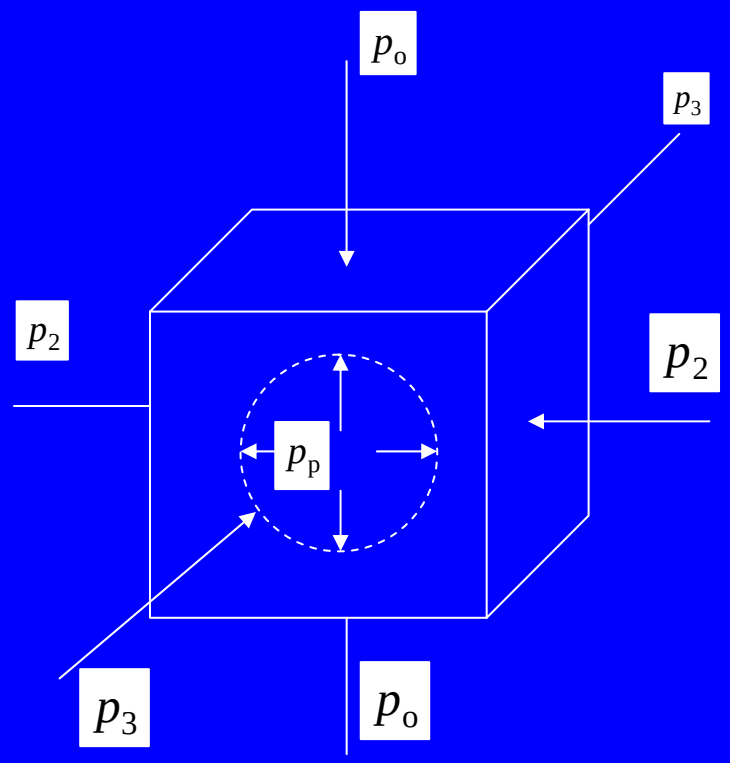
如果假设岩石是完全弹性体，从地面乡下压的过程中，水平截面不变，则有：

$$\sigma_2 = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_1$$
$$\sigma_3 = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma_1$$

如果同时考虑岩石的弹性、地壳的构造运动和缓慢的流变性，则有：

$$\sigma_2 = (\frac{\mu}{1-\mu} + \alpha)\sigma_1$$
$$\sigma_3 = (\frac{\mu}{1-\mu} + \beta)\sigma_1$$

μ为泊松比，α、β为系数。



教材中

- 有效垂直地应力（基岩应力）

$$\sigma_1 = p_o - p_p$$

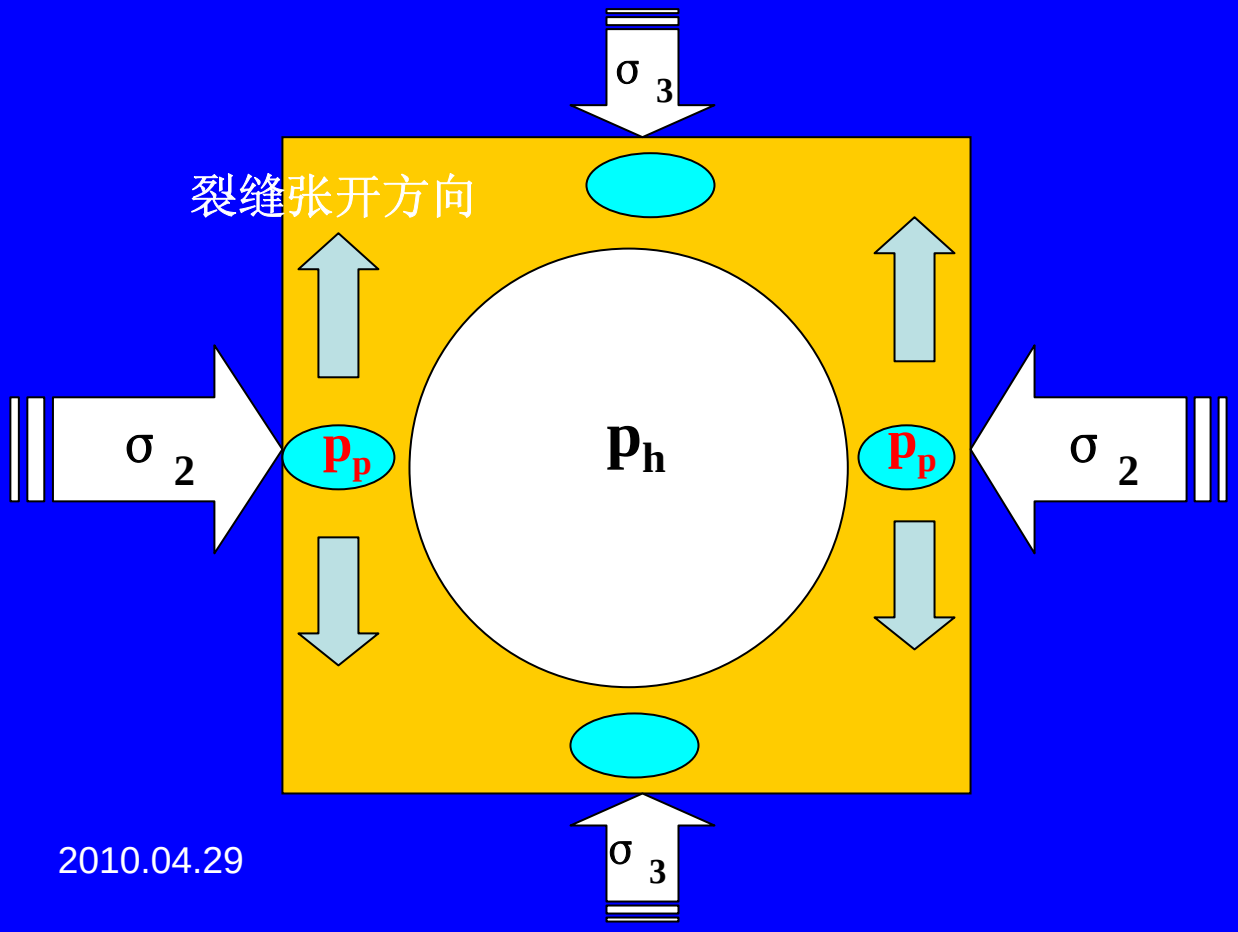
- 有效水平地应力

$$\begin{cases} \sigma_2 = (\dfrac{\mu}{1-\mu} + \alpha)(\sigma_1 - p_p) \\ \sigma_3 = (\dfrac{\mu}{1-\mu} + \beta)(\sigma_1 - p_p) \end{cases}$$

欠妥

（二）地层破裂压力（Fracture Pressure）

使某深度处地层破裂时的井内液体压力称为该地层的破裂压力，用 P_f 表示。它取决于井眼周围岩石的应力状态和岩石强度。



地层开裂条件:

$$\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$$

$$p_f > (1-\phi)\sigma_3 + \phi p_p$$

P_f为井筒内液体压力。

（三）预测方法

1. Hubbert & Willis（1957）

认为：① 三维不均匀应力状态，$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$，

且 $\sigma_3 = (1/3 \sim 1/2)\,\sigma_1$

② 井内液压力必须克服地层孔隙压力和最小有效水平地应力时地层才能破裂。

$$p_f = p_p + (1/3 \sim 1/2)(p_o - p_p) \qquad \text{（1-21）}$$

2. Mathews & Kelly(1967)

认为：① 水平均匀地应力状态，$\sigma_3 = \sigma_2 = K_i(D)\,\sigma_1$

② 井内液柱压力必须克服地层孔隙压力和最小有效水平地应力时地层才能破裂。

$$p_f = p_p + K_i(p_o - p_p) \qquad \text{（1-23）}$$

3. Eaton(1969)

认为：① 水平均匀地应力状态，$\sigma_3 = \sigma_2 = \frac{\mu}{1-\mu}\sigma$ **(1-24)**

② 井内液压必须克服地层孔隙压力和最小有效水平地应力时地层才能破裂。

$$p_f = p_p + \frac{\mu}{1-\mu}(p_o - p_p) \qquad (1\text{-}25)$$

4. 黄荣樽（1985）

认为：① 井壁岩石处于三维不均匀应力状态，$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$；

② 水平地应力由上覆岩层压力和构造力 两部分产生;

③ 当井内液压力超过地层孔隙压力、最小水平地应力和岩石 的抗拉强度，地层开裂。

$$p_f = p_p + \left(\frac{2\mu}{1-\mu} + K_{ss}\right)(p_o - p_p) + S_t \qquad (1\text{-}26)$$

式中：K_{SS} 由现场压裂实验数据求得；S_t 岩心抗拉试验求得。

讨论：

根据理论推导

$$\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$$

$$p_f = (1-\phi)\sigma_3 + \phi p_p$$

$$= (\frac{\mu}{1-\mu} + \beta)(p_o - \phi p_p) + \phi p_p$$

前面介绍的四种方法，虽然在推导基岩应力方面存在问题，但具有的统一格式

$$p_f = a_1 p_p + a_2 p_o + a_3 S_t$$

通过适当选取修正系数 a_1, a_2, a_3 ，可以在工程上使用。

（四）现场液压试验实测法

地层破裂压力

$$p_{\mathrm{f}} = \rho_{\mathrm{d}} g D + p_{\mathrm{L}}$$

其中，ρ_{d}为钻井液密度，D 为井垂深，p_{L}为井口最高压力 。

地层破裂的钻井液密度

$$\rho_{\mathrm{f}} = \rho_{\mathrm{d}} + \frac{p_{\mathrm{L}}}{gD} \qquad (1\text{-}27)$$

第二节 岩石的工程力学特性
Section 2 Mechanical properties of rocks

一、岩石的类型及结构特点

二、岩石的力学性质

三、影响岩石力学性质的因素

四、岩石的可钻性与研磨性

一、岩石的类型及特点

（一）岩石的组成

岩石　是矿物颗粒的集合体，颗粒之间或者靠直接接触面上的作用力联结，或者由外来的胶结物胶结。大多数岩石由两种以上的矿物成分组成。

矿物　是具有固定的化学成分和确定的物理性质的天然无机化合物。除了硫、碳的矿物及少数金属外，绝大多数矿物是由两种以上元素组成的化合物。

主要造岩矿物

硅酸盐类：正、斜长石、石英、黑/白云母、辉石、角闪石、橄榄石

碳酸盐类：石灰石、白云石

硫酸盐类：石膏，硬石膏

氧 化 物：赤铁矿

粘 土 类：高岭土、蒙脱土、伊利石

其　　它：岩盐

天下奇石
www.tianxia70.com

观 赏 石
WWW.ZGGSSW.COM

（二）岩石的类型

1. 火成岩（岩浆岩）

由岩浆（硅酸盐）溶体冷凝而成。

如花岗岩、玄武岩、 橄榄岩、安山岩等。

2. 变质岩

火成岩和沉积岩等由于高温高压作用或外来物质的加入，改变了原来的成分、结构，变成新的岩石。

如花岗岩→片麻岩，石灰岩 →大理岩，石英砂岩→石英岩等。

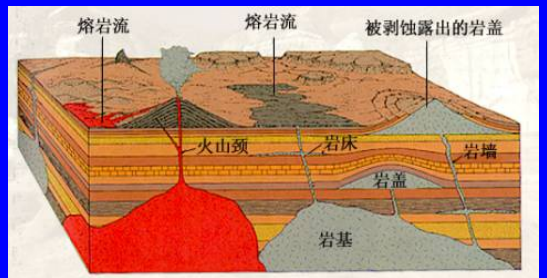
3. 沉积岩

母岩风化后的产物经过搬运、沉积和成岩作用而形成的岩石。

如泥岩、砂岩、石灰岩、白云岩、石膏、岩盐 。

在地壳中，火成岩占95%，沉积岩约5%，变质岩很少。

在地表中，沉积岩占75%，火成岩和变质岩占25%。



（1）沉积岩类型

①碎屑岩

母岩风化后的碎屑物质经机械沉积作用后形成的岩石。

碎屑颗粒(岩石、矿物碎屑)+胶结物(泥质、铁质、钙质、硅质)。

砾　岩：颗粒大于1mm。主要是火成岩、变质岩碎屑，碎屑间由胶结物充填。

巨砾：＞1m；中砾：10-100mm；粗砾：100-1000mm；细砾：1-10mm

砂　岩：颗粒0.1-1mm。石英、长石、辉石、角闪石、云母等矿物颗粒+胶结物。

粗砂：0.5-1mm；中砂：0.25-0.5mm；细砂：0.1-0.25mm

粉砂岩：介于砂岩和泥岩之间的一类岩石，颗粒尺寸0.1-0.01mm。

泥　岩：颗粒小于0.01mm。主要成分为粘土矿物，并含有部分碎屑物质。

②化学沉积岩

母岩风化后的溶解物质经化学沉积作用后形成晶质岩石。

碳酸盐岩-石灰岩，主要成分为石灰石（$CaCO_3$）

白云岩，主要成分为白云石（$MgCa(CO_3)_2$）

硫酸盐岩-石膏（$CaSO_4$）

岩　　盐-食盐（NaCl）

在沉积岩中：泥岩—60%，砂岩—30%，碳酸盐岩居第三位。

（三） 沉积岩的特点

1. 没有确定的化学组成和物理性质。

2. 非均质性。即岩石不同部分可能具有不同物理力学性质。

3. 倾斜的层状结构（地层倾角、层理、页理）是沉积岩的主要构造特征。

4. 微裂隙发育的多孔介质（孔隙度）。

5. 各向异性，即岩石的某一性质随方向不同而不同。

二、岩石的力学性质

岩石受力后表现出来的变形特性和强度特性。

弹性——岩石在外力作用下产生变形，外力撤除后变形随之消失，恢复到原来的形状和体积的性质称为弹性。相应的变形称为弹性变形。

塑性——岩石在外力作用下产生变形，外力撤除后变形不能完全恢复的性质。相应的残余变形称为塑性变形。

脆性——岩石在外力作用下变形量很小（小于3%）时就发生破坏的性质。相应的破坏称为脆性破坏。

强度——岩石在外力作用下发生破坏时的最大应力。

抗拉强度—岩石单纯受拉伸应力作用时的强度。
抗压强度—岩石单纯受压缩应力作用时的强度。
抗剪强度—岩石单纯受剪切应力作用时的强度。
抗弯强度—岩石单纯受弯曲应力作用时的强度。

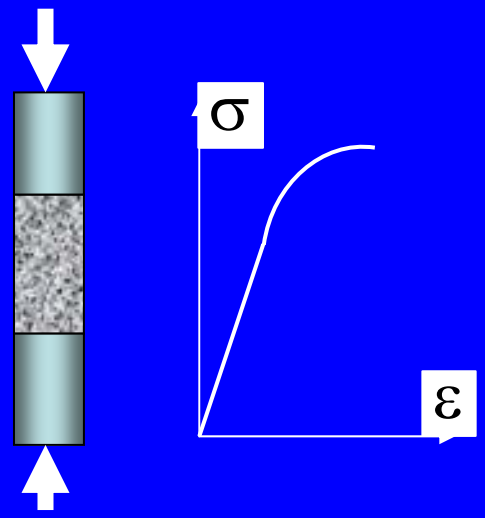
（一）岩石的弹性

衡量岩石弹性性质的参数：弹性模量E与泊松比μ。

1. 弹性模量

纵向弹性模量（杨氏模量）*E*:

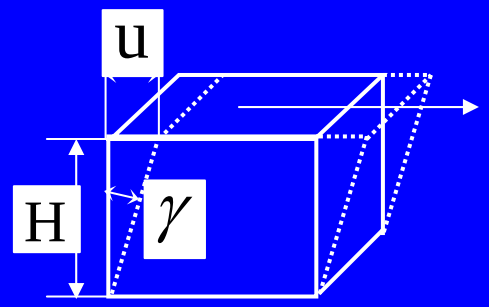
$$\sigma = E\varepsilon \qquad (1\text{-}28)$$



剪切弹性模量*G*:

$$\frac{u}{H} \approx \gamma$$

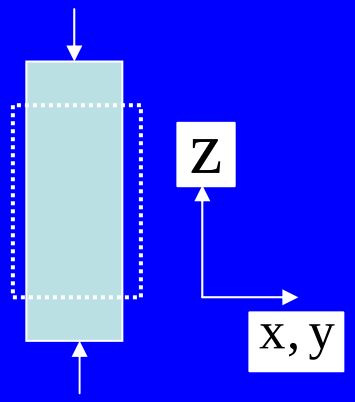
$$\tau = G\gamma \qquad (1\text{-}31)$$



其中，σ为压应力，ε为压应变，τ为剪应力， γ为剪应变。

2. 泊松比

$$\left.\begin{aligned}\mu_x &= -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}\\ \mu_y &= -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}\end{aligned}\right\} \qquad (1\text{-}29)$$



3. 三个弹性参数的关系

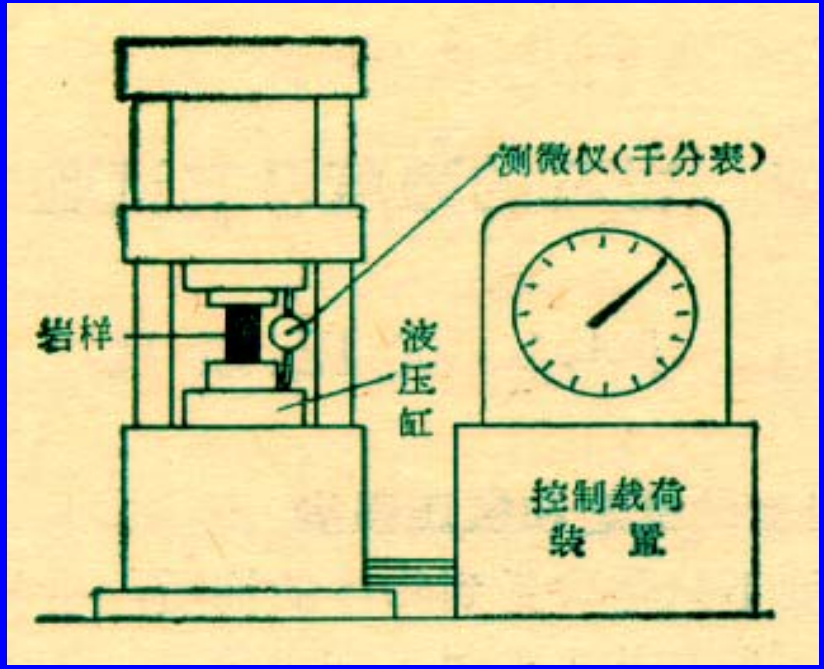
$$G = \frac{E}{2(1+\mu)} \qquad (1\text{-}32)$$

（二）岩石的强度

1. 单向应力条件下岩石的强度

（1）单轴抗压强度

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$



单轴压缩试验

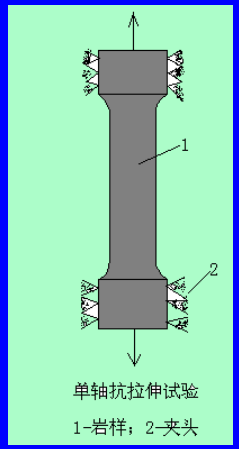
其中，P 为破坏时的压力，A 为试件截面积，σ_c为抗压强度。

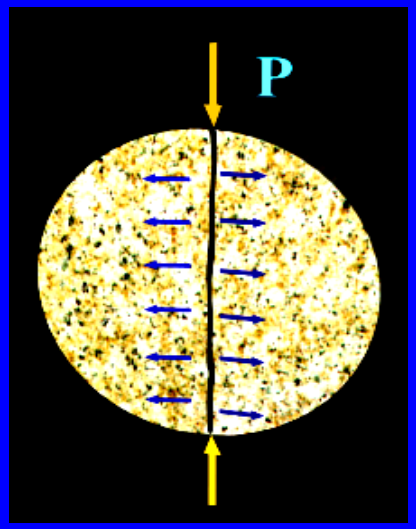
（2）抗拉强度

从道理上来讲，岩石的抗拉强度可以用工程力学的拉伸试验来确定。由于岩石的脆性，夹持成了问题，所以改由间接的、压缩的劈裂法做。

$$\sigma_t = -\frac{p}{\pi r_0 t}$$

其中，P 为破坏时的压力，r_0为试件半径，t为试件厚度，σ_t为抗拉强度。



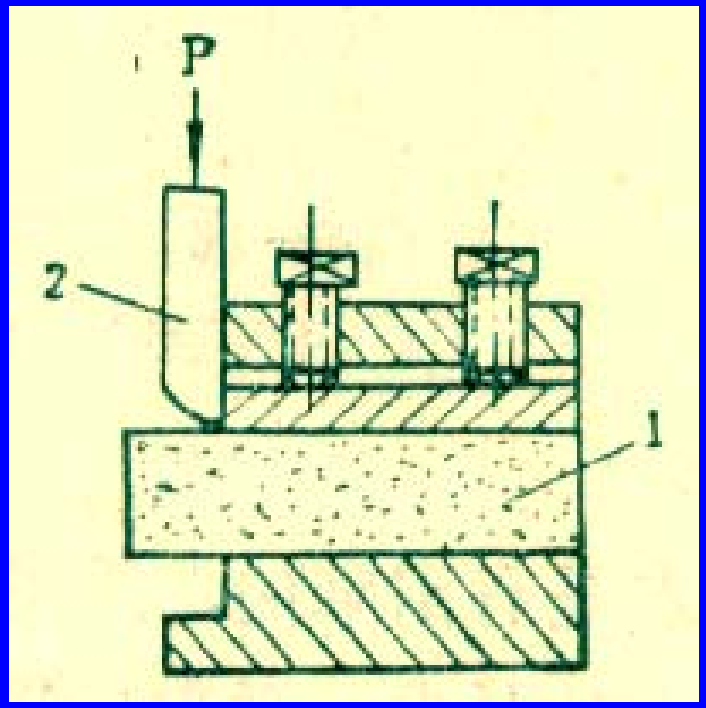


巴西劈裂试验

$$r_0 \geq 2.7\text{cm}, \quad t = r_0$$

（3）抗剪强度

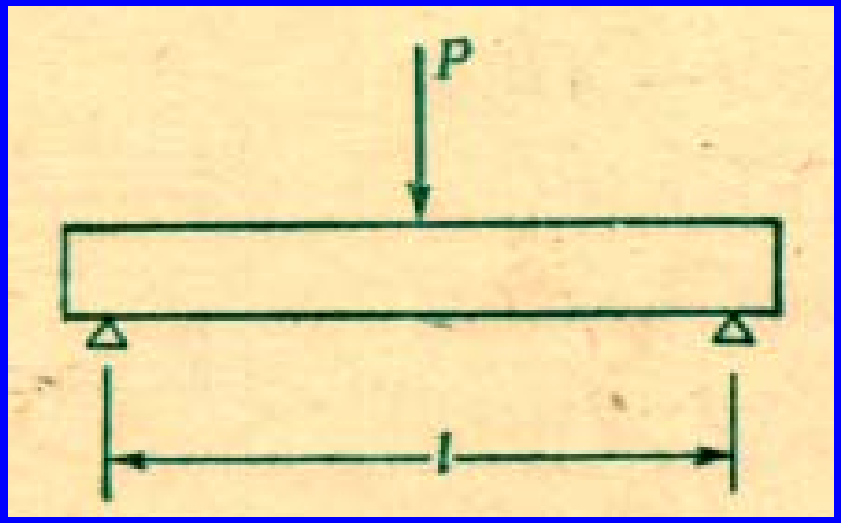
$$\tau_s = \frac{P}{A}$$



其中，P 为破坏时的压(剪)力，A 为试件截面积，τ_s为抗剪强度。

（4）抗弯强度

$$\sigma_b = \frac{3Pl}{2bh^2}$$



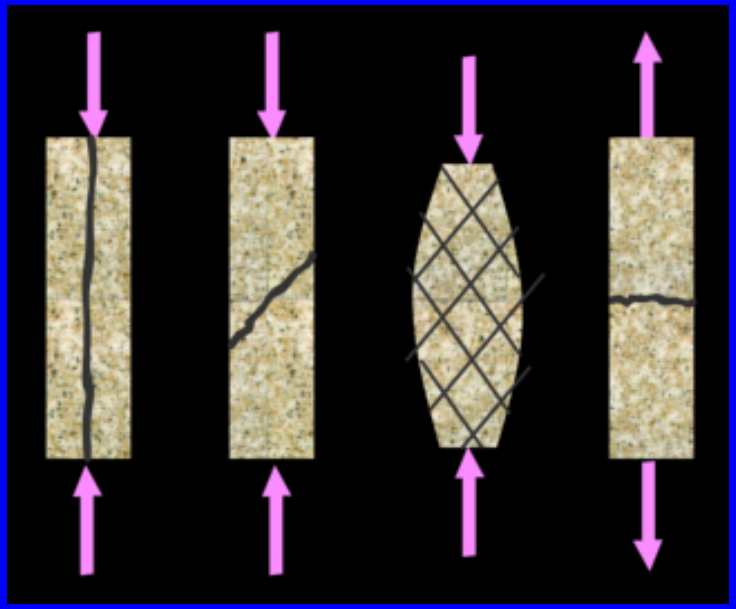
其中，*P* 为破坏时的压力，*l*为试件的长度，*h*为试件的高度，*b*为试件厚度，σ_b为抗弯强度。

对于金属材料，抗拉=抗弯=抗压=2 × 抗剪；而对于岩石则不同。

★ 抗拉 < 抗弯 < 抗剪 < 抗压

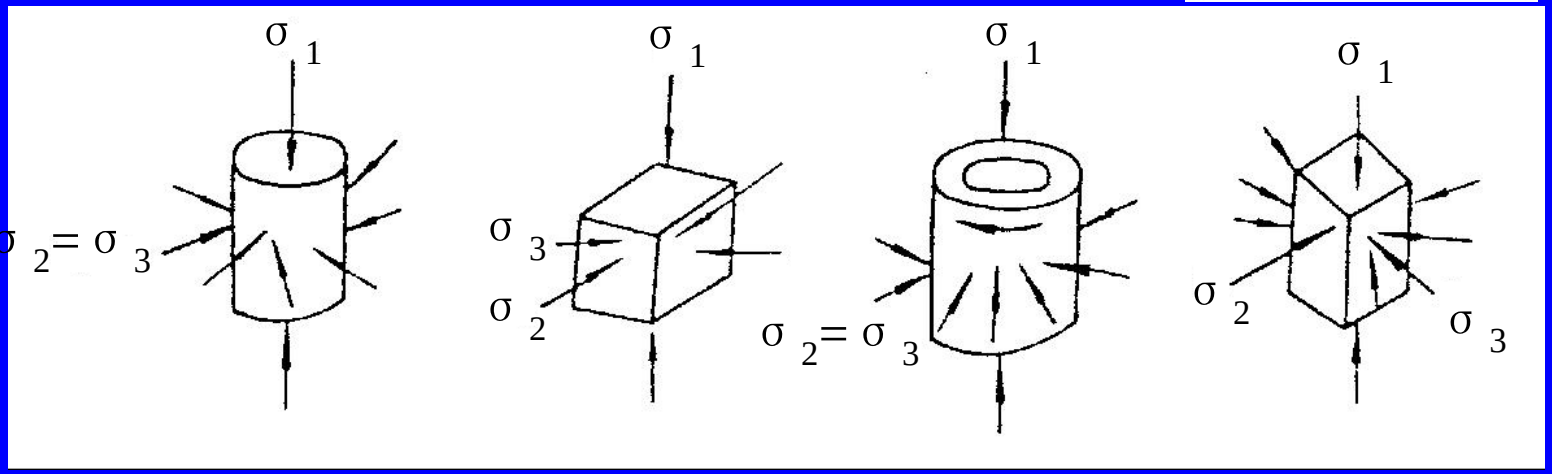
$$\sigma_t \approx \frac{1}{10}\sigma_c \qquad \tau_s \approx \frac{1}{3}\sigma_c$$

★ 不管在哪种应力状态下，岩石的破坏都是因为其内部的拉应力超过岩石的抗拉强度而引起的拉伸破坏，或者是剪应力超过其抗剪强度而引起的剪切破坏。



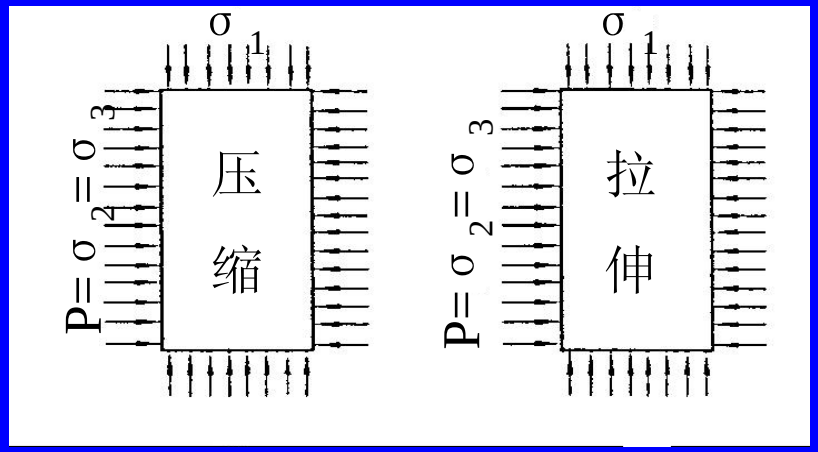
2. 复杂应力条件下岩石的强度

（1）三轴岩石试验

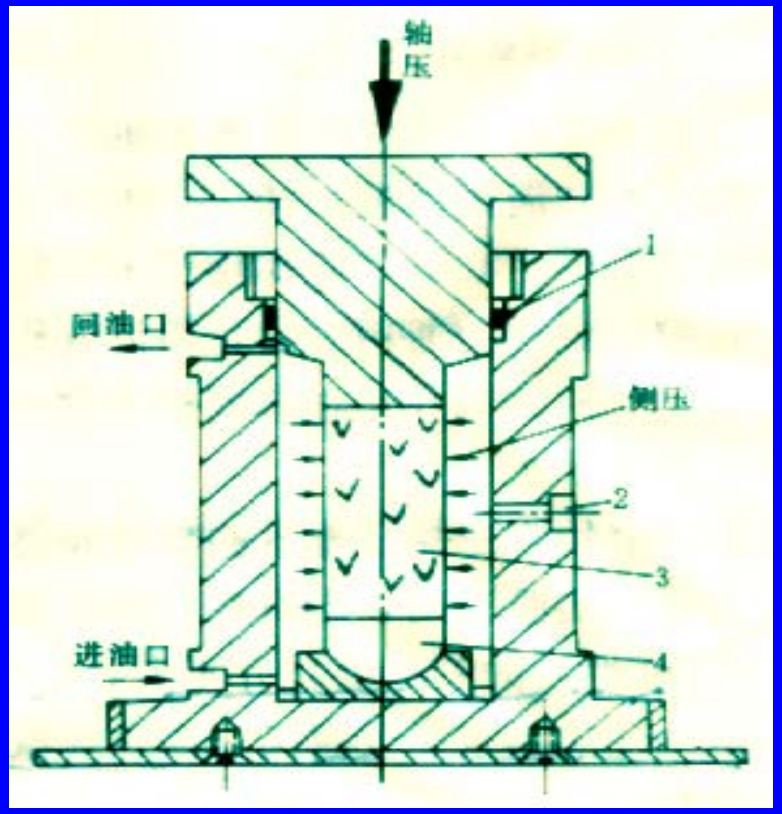


常规三轴试验	真三轴试验	液压作用下压、扭试验	液压作用下两柱塞压缩试验
$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$	$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$		

常规三轴试验:

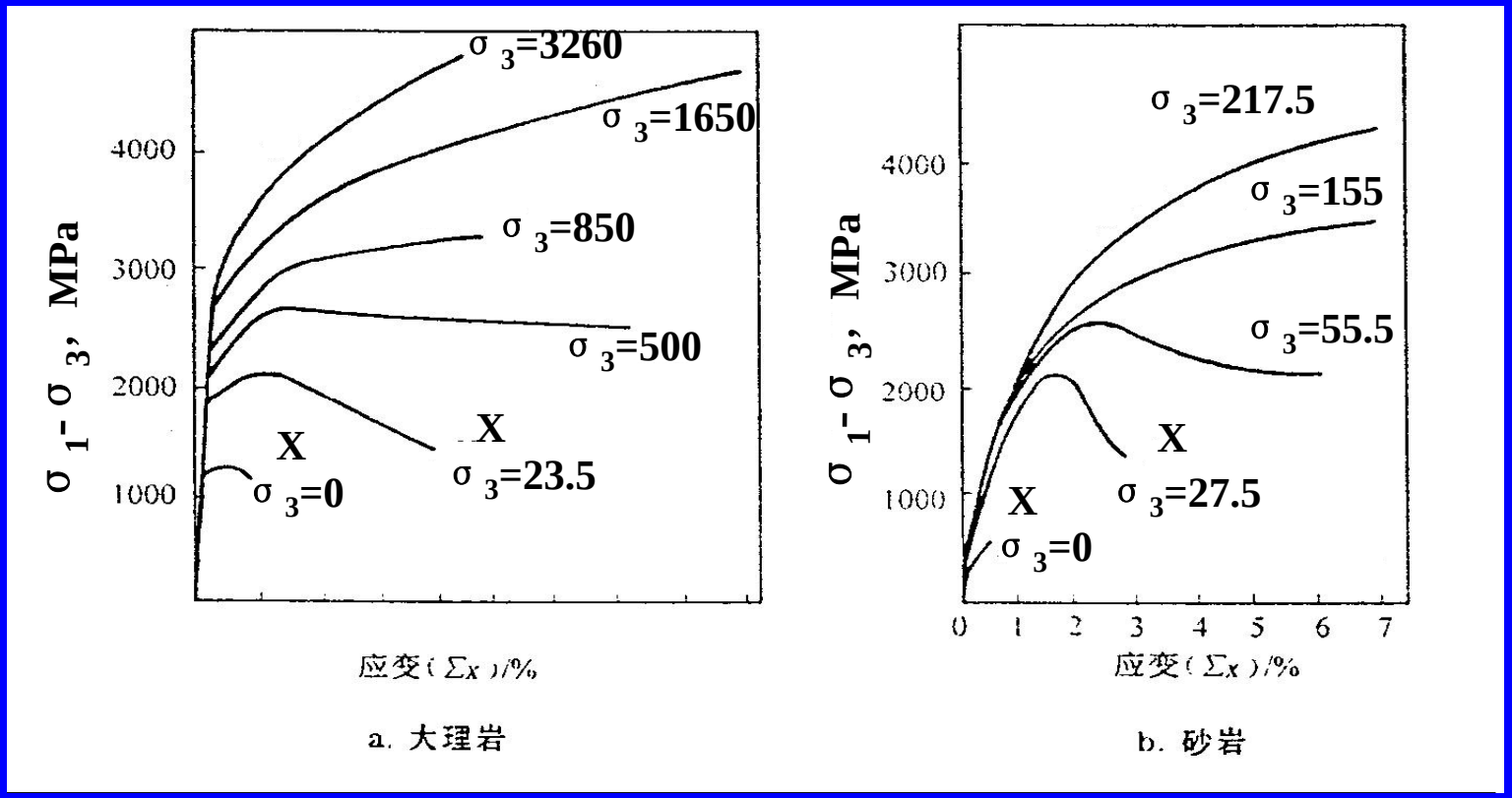


$\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$　　$\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$

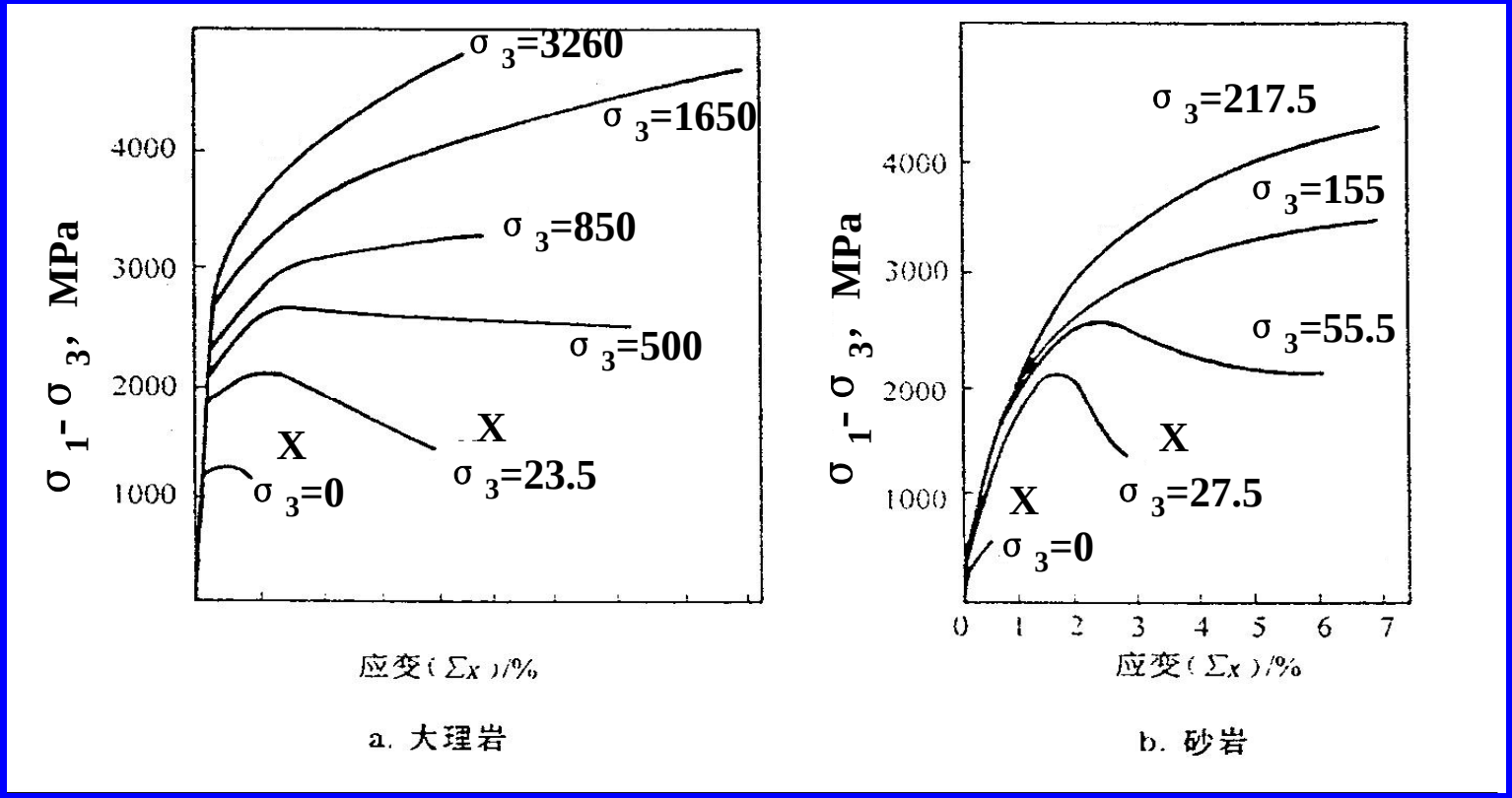


三轴试验的应力应变曲线：

岩石强度随围压增大而增大



（三）岩石的脆/塑性



◆ 在单轴应力条件下，大多数岩石表现为脆性性质。

◆ 在三轴应力条件下，随着围压的增大，岩石由脆性向塑性转化。围压越大，岩石的塑性越大。岩石由脆性转化为塑性时的围压称为临界压力。

（四）岩石的硬度和塑性系数

1. 概念

硬度——岩石抵抗其它物体表面压入或侵入的能力。

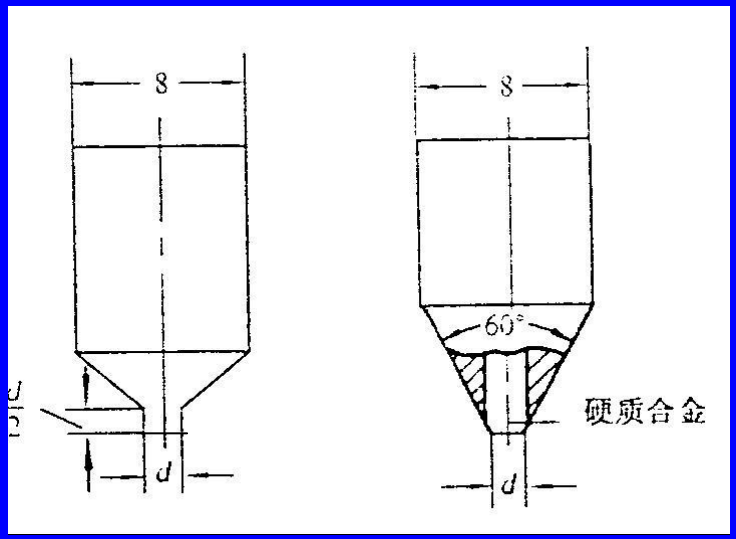
前苏联史立涅尔提出压入硬度（史氏硬度）表征岩石的抗压入性能。

硬度与抗压强度区别:

硬度是岩石表面的局部抵抗另一物体压入或侵入破碎时的能力，抗压强度则是岩石整体抗压碎能力。

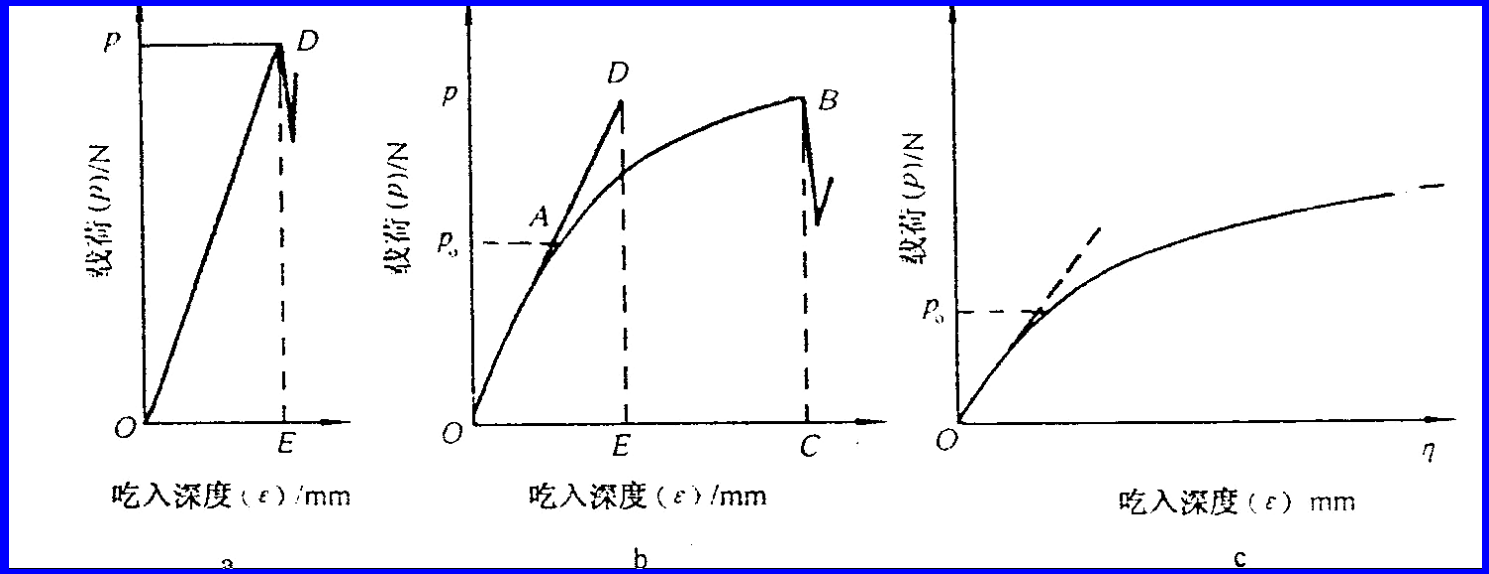
塑性系数——表征岩石塑性和脆性大小的参数。定义为岩石破碎前耗费的总功A_F与岩石破碎前弹性变形功A_E的比值。

2. 硬度试验



岩石硬度试验装置

3. 岩石硬度和塑性系数的计算



脆性和塑脆性岩石：

$$P_y = \frac{P}{S} \qquad (1\text{-}34)$$

塑性岩石：

$$P_y = \frac{P_0}{S} \qquad (1\text{-}35)$$

塑性系数K_p：

$$K_p = \frac{\text{岩石破碎前耗费的总功 } A_F}{\text{岩石破碎前弹性变形功 } A_E} = \frac{OABC\text{面积}}{ODE\text{面积}} \qquad (1\text{-}33)$$

三、影响岩石力学性质的因素

（一） 岩石结构的影响

1. 致密沉积岩的硬度与其造岩矿物的硬度有直接关系。一般地讲，主要造岩矿物成分的硬度越高，岩石越硬，越难破碎。

如: 玄武岩（斜长石、辉石，6） ＞白云岩（白云石，4）＞石灰岩（石灰石，3）。

2. 砂岩和粉砂岩类碎屑岩的硬度主要取决于矿物成分和胶结物结构。矿物成分相同时，硅质胶结碎屑岩硬度最高，钙质次之，铁质再次之，泥质最低。泥质胶结大约比灰质胶结的同类岩石的硬度小三倍。

3. 泥质—碳酸盐质岩石（泥岩、灰质泥岩、泥质灰岩、灰岩），随着碳酸岩含量的增加，硬度急剧增大。这是因为随着岩石含碳酸岩质的增加，质点间结晶联结作用增强的缘故。

4. 同种岩石孔隙度增大，密度降低，强度降低。因此，岩石的强度一般随埋藏深度的增加而增大。

（二）井底各种压力的影响

1. 一般地讲，随着上覆岩层压力的增大，岩石强度增大，塑性也增大。

2. 井内液柱压力与孔隙压力之差越大，岩石强度越大，塑性越大。

（三）液体介质的影响

液体，特别是加入表面活性剂的水，侵入孔隙时，吸附在固体表面使固体表能降低，同时还产生楔裂作用和减小固体变形时的内摩擦，结果导致强度降低。这种现象称为列宾捷尔效应。

岩石强度（硬度）减低剂如下:

电解质类：烧碱（NaOH）、石灰（$Ca(OH)_2$）、氯化铝（$AlCl_3$）和氯化钠（NaCl）、碳酸钠（Na_2CO_3）、水玻璃（Na_2SiO_4）

有机化合物：皂类及一些合成润湿剂。

（四）载荷性质的影响

1. 抗压＞ 抗剪＞ 抗弯＞ 抗拉。

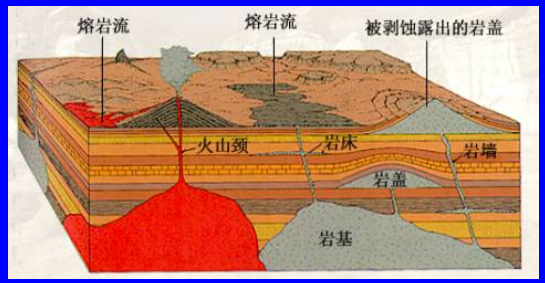
2. 岩石对动载的抗力要比静载大得多。随着冲击速度增大，硬度增大，塑性系数减小。但在冲击速度小于10米/秒时，岩石硬度和塑性系数变化不大，接近于静载时的数值。

在10000米深度范围内:

强度：岩盐＜泥页岩＜石灰岩＜石膏＜白云岩

砂岩强度取决于胶结物及胶结程度。

塑性：岩盐＞石灰岩＞泥页岩＞石膏＞白云岩＞石英岩



四、岩石的可钻性与研磨性

（一）岩石的可钻性（Rock Drillability）

1. 概念

岩石可钻性可理解为岩石破碎的难易性，它反映了是岩石抵抗钻头钻进的能力。

2. 评价方法—微钻法

试验装置：华石III型岩石可钻性测定仪

微型钻头：直径31.75mm（1-1/4in）

试验条件：钻压889.7N（200磅）、转速55r/min

可钻性指标：

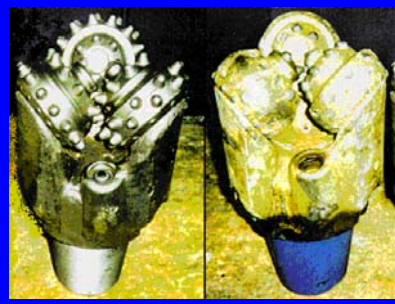
（1）钻时：钻进2.4mm孔深所需要的时间t_d（秒）

（2）级值：$K_d=Log_2 t_d$

3. 油矿地层可钻性分级

级别	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	Ⅵ	Ⅶ	Ⅷ	Ⅸ	Ⅹ
t_d（秒）	<4	4~<8	8~<16	16~<32	32~<64	64~<128	128~<256	256~<512	512~<1024	≥1024
K_d	<2	2 ~<3	3 ~<4	4 ~<5	5 ~<6	6 ~<7	7 ~<8	8 ~<9	9 ~<10	≥10
分类	极软			软	中软	中	中硬	硬		极硬

（二）岩石的研磨性（ Rock Abrasiveness）



岩石磨损钻头切削刃材料的能力称为岩石的研磨性。

至今尚没有统一的测定岩石研磨性的方法和分级标准。

泥岩、盐岩、石膏等为研磨性最小的岩石;

石灰岩和白云岩等碳酸盐类为低研磨性岩石;

砂岩、粉砂岩类岩石研磨性较高；粒度越大，研磨性越高；胶结强度增大，研磨性降低；石英含量越高，研磨性越高。