

第一章 岩石的力学性质

岩石和岩体的力学性质，是矿山岩体力学的大体问题。岩石的力学性质主要指：在各类载荷作用下，它们的变形特征，出现塑性流动和发生破坏的条件。表征岩石力学性质的参数如下：

变形参数：岩石的变形模量，弹性模量，切变模量，泊松比和流变性等。

强度特性参数：岩石抗拉，抗弯，抗剪，抗压等各类强度极限。

第一节、岩石的成份及结构与其力学性质的关系

岩石是多种矿物颗粒的集合体。岩石一般有下列十余中主要矿物组成，即长石(正长石、斜长石)、石英、云母(黑云母、白云母)、角闪石、辉石、橄榄石、方解石、白云石、高岭土、赤铁矿等。它们在矿石中的含量按岩石成因此异。

岩层按成因分类为：

岩浆岩 — 系由岩浆在地壳内不同深度冷凝而成；

沉积岩 — 是由已有岩体经风化、崩溃、搬运、再胶结或化学作用而形成；

变质岩 — 则由已有岩石在高温高压条件下通过改变而形成的。

大体概念

(1)、**岩石的结构**：岩石的矿物颗粒的大小、形状、表面特征、颗粒彼此关系、胶结类型等特征。

(2)、**岩石的构造**：岩石的组成部份在定向的排列情形。如层面、断层（几何特征）。

晶体结构是岩浆岩和变质岩的最大特征，也是很多沉积岩的特征。

(3)、**矿物的晶体**：组成矿物的各类化学元素的原子（离子）在空间必然规律排列，使其具有规则的几何形状的固体称为**晶体**。

(4)、**矿物的晶体的结构类型**：等粒结构，不等粒结构，斑状结构。

图 1-1 是典型晶体结构类型

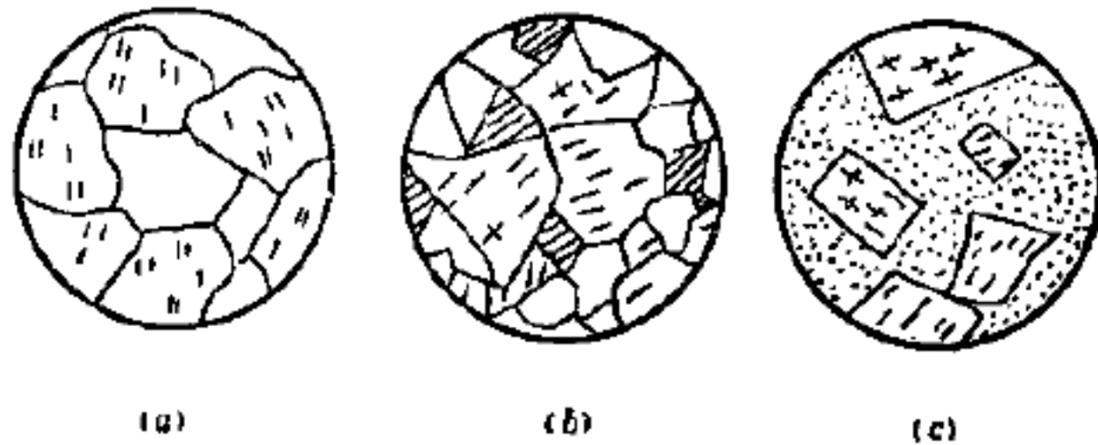


图 1-1 晶体结构类型
(a) 等粒结构；(b) 不等粒结构；(c) 斑状结构

岩浆岩和变质岩的晶体结构与岩石力学性质的关系：晶粒细小，等粒状，岩石强度大。颗粒大的斑状结构晶体内部或晶粒间含有缺点，岩石强度低。

沉积岩的结构与力学性质的关系

沉积岩中的岩石碎屑之间由胶结物将连结在一路。其力学性质取决于胶结物和胶结类型。

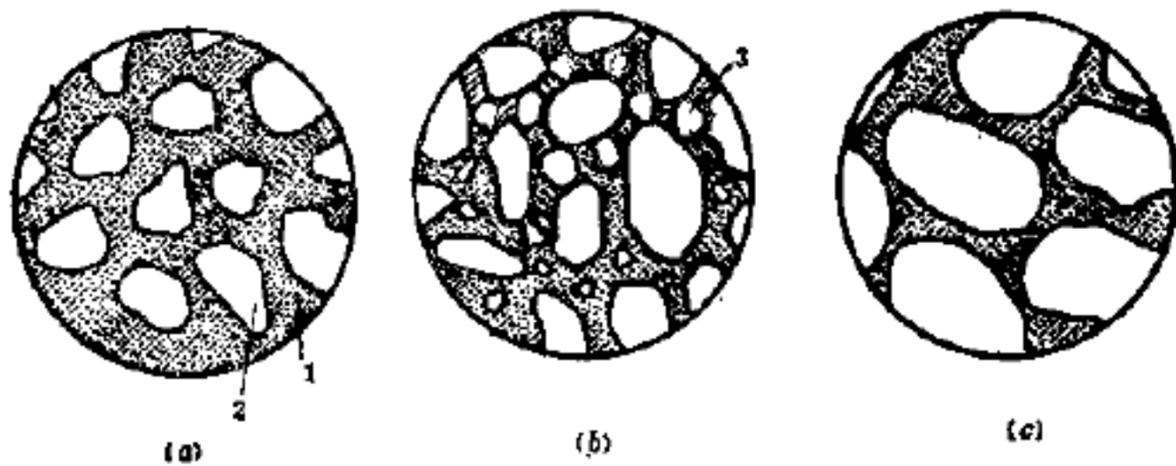


图 1-2 胶结类型
(a) 基质胶结；(b) 接触胶结；(c) 孔隙胶结
1—胶结物质；2—颗粒；3—未被充填的孔隙

基质胶结：岩石碎屑被胶结物包围，强度取决于胶结物。

接触胶结：仅颗粒接触处有胶结物，胶结不牢，强度低，透水性强。

孔隙胶结：胶结物完全成部份地充填与颗粒孔隙之间。胶结牢固，所以岩石强度和透水性主要由胶结物性质及充填程度肯定。

胶层物分类：硅质和铁质强度高，钙质次之，泥质最低。

沉积强度主要取决于胶结物性质及充填程度。

除组成岩石的矿物颗粒大小，结合方式对其力学性质有影响外，矿物的排列方式（构造）及沉积顺序亦表现出影响。如云母片岩、片麻岩、页岩等，则表现出力学性质的各向异性。

第二节 影响岩石力学性质的物理特性

一、容重和比重

一、容重

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

式中 γ —容重； W —岩石试件重量； V —岩石试件体积

岩石容重与岩性和成因有关。从岩石力学的角度，岩石的容重和比重影响到岩石的自重应力场和惯性质量

岩石容重的测试方式。

二、比重

岩石比重是扣除孔隙的岩石干重和其实体积之比，再与 4℃ 水的容重之比。

$$\Delta R = \frac{W_d}{V\gamma_w}$$

式中 ΔR —岩石比重； W_d —岩石试件在烘箱中烘至 105℃ 维持恒温、恒重时，岩石固体重量； V —扣除孔隙的岩石试件固体部份的体积； γ_w —4℃ 时水的容重。

二、岩石的孔隙度

岩石的孔隙度是岩石试件中孔隙体积与包括孔隙的岩石体积之比，直接测量孔隙体积是困难的，一般通过测量岩石重量，再通过一些换算公式测量岩石的孔隙

$$n = \frac{W_s - W_d}{\rho_L V} \times 100\%$$

式中 W_s —为水饱和的岩石试件重量(如某种岩石与水有化学反映时，应改用与岩石无化学反映的液体)； W_d —干燥岩石试件的重量； V —岩石试件体积； ρ_L —液体的密度。

几种岩石的容重、比重、孔隙度见下表

岩石名称	容重 (g/cm ³)	比重	孔隙度 n (%)
花岗岩	2.6~2.7	2.5~2.84	0.5~1.5
粗玄岩	3.0~3.05		0.1~0.5
流纹岩	2.4~2.6		4.0~6.0
安山岩	2.2~2.3	2.4~2.8	10.0~15.0
辉长岩	3.0~3.1	2.7~3.2	0.1~0.2
玄武岩	2.8~2.9	2.6~3.3	0.1~1.0
砂岩	2.0~2.6	2.6~2.75	5.0~25.0
页岩	2.0~2.4	2.57~2.77	10.0~30.0
石灰岩	2.2~2.6	2.48~2.85	5.0~20.0
片麻岩	2.9~3.0	2.63~3.07	0.5~1.5
大理岩	2.6~2.7	2.6~2.8	0.5~2.0
石英岩	2.65	2.63~2.84	0.1~0.5
板岩	2.6~2.7	2.68~2.76	0.1~0.5

三、岩石的水理性质

实践表明，水能瞬时地或逐渐地改变岩石的力学性质和性态。

岩石在水溶液作用下所表现出的力学的、物理的、化学的性质称为岩石的水理性质。

(1)、岩石的渗透性

水通过岩石流动的难易程度，在一维条件下，有

$$v = -K \frac{dp}{dx}$$

式中 v — 渗流速度，也称比流量； p — 孔隙水压力； K — 渗透系数。

岩石的渗透性通常利用渗透系数 K 衡量， K 越大，渗透性越好。

(2)、软化性

岩石被水湿润后，强度降低，柔度增加(弹性模量降低)的特性。

(3)、溶蚀性

由于水的化学作用，岩石中的某些成份被水流带走的现象。溶蚀造成岩石致密程度降低，孔隙度增大，渗透性改善，强度降低。

(4)、膨胀性

岩石受水浸湿后，体积膨胀的现象。岩石膨胀造成强度降低、柔度增加并致使应力的不均匀。

表 1-2 几种岩石渗透系数表

岩石名称	孔隙情况	渗透系数
		K (cm/s)
花岗岩	致密。微裂隙 含微裂隙 微裂隙及一些粗裂隙	$1.1 \times 10^{-12} \sim 9.5 \times 10^{-11}$ $(1.1 \sim 2.5) \times 10^{-11}$ $2.8 \times 10^{-9} \sim 7 \times 10^{-8}$
辉绿岩	致密	$< 10^{-12}$
流纹岩	致密	$< 10^{-13}$
玄武岩	致密	$< 10^{-13}$
安山玢岩	微裂隙	8×10^{-11}
砂岩	较致密	$10^{-11} \sim 2.5 \times 10^{-14}$
砂岩	孔隙较发育	5.5×10^{-8}
石灰岩	致密 微裂隙、孔隙 裂隙、孔隙较发育	$3 \times 10^{-12} \sim 6 \times 10^{-10}$ $2 \times 10^{-9} \sim 3 \times 10^{-8}$ $8 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-4}$
页岩	微裂隙发育	$2 \times 10^{-10} \sim 8 \times 10^{-9}$
片岩	微裂隙发育	$10^{-9} \sim 5 \times 10^{-8}$
片麻岩	致密 微裂隙 微裂隙发育	$< 10^{-12}$ $9 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-7}$ $2 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-3}$
石英岩	微裂隙	$(1.2 \sim 1.8) \times 10^{-11}$

表 1-3 某些岩石在水作用下强度变化

岩石名称	抗压强度 (MPa)		折减系数
	干燥	浸水	
花岗岩	40~220	25~205	0.03~0.25
闪长岩	97.7~232	68.8~159.7	0.24~0.40
辉长岩	116.1~272.5	58~245.8	0.10~0.56
玄武岩	102.7~290.6	102~192.4	0.08~0.29
石灰岩	13.4~250.8	7.8~189.2	0.06~0.42
砂岩	17.5~250.8	5.7~245.5	0.03~0.56
粘土岩	20.7~59	2.4~31.8	0.13~0.92
页岩	57~136	13.7~75.1	0.45~0.76
板岩	128~198.6	72~149.6	0.18~0.48
千枚岩	30.1~49.4	28.1~33.3	0.04~0.31
片岩	59.6~218.9	29.5~171.4	0.20~0.51
石英岩	145.1~200	50~171.4	0.04~0.20

第三节 岩石的变形特征

岩石在载荷作用下第一发生的现象是变形。岩石的变形性对采矿工程和岩石工程有重要影响。岩石的单向、二向、三向变形特征不同，但研究最充分的是岩石的单向变形，岩石的变形(用应变表示)与载荷(用应力表示)有关，但有时还与时刻有关。当岩石的变形不仅取决于应力还取决于时刻时，需要考虑岩石的流变特性。**脆性、塑性、坚硬等说法是通常常用来描述岩石变形性能(有时也包括强度)的直观说法，形象但不十分严格。**

脆性材料 — 破坏具有突变性的材料。

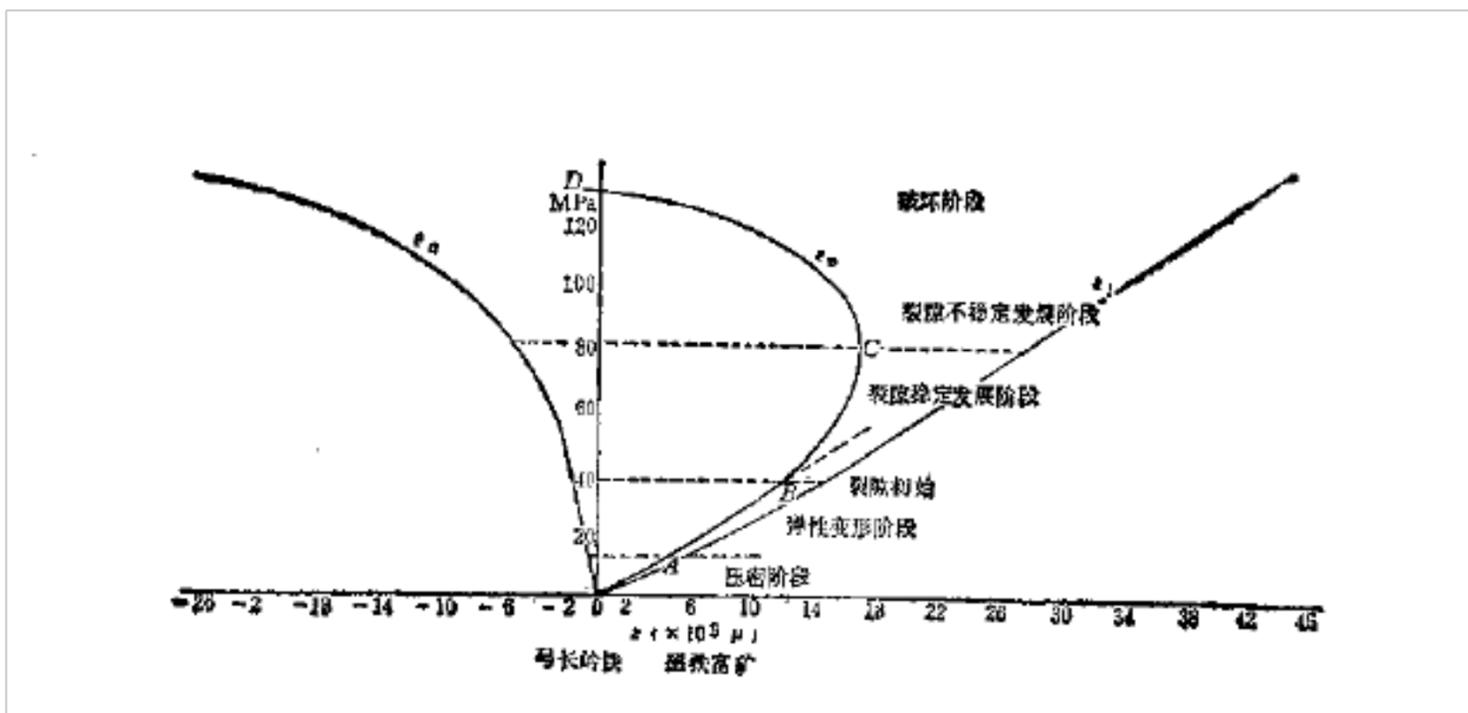
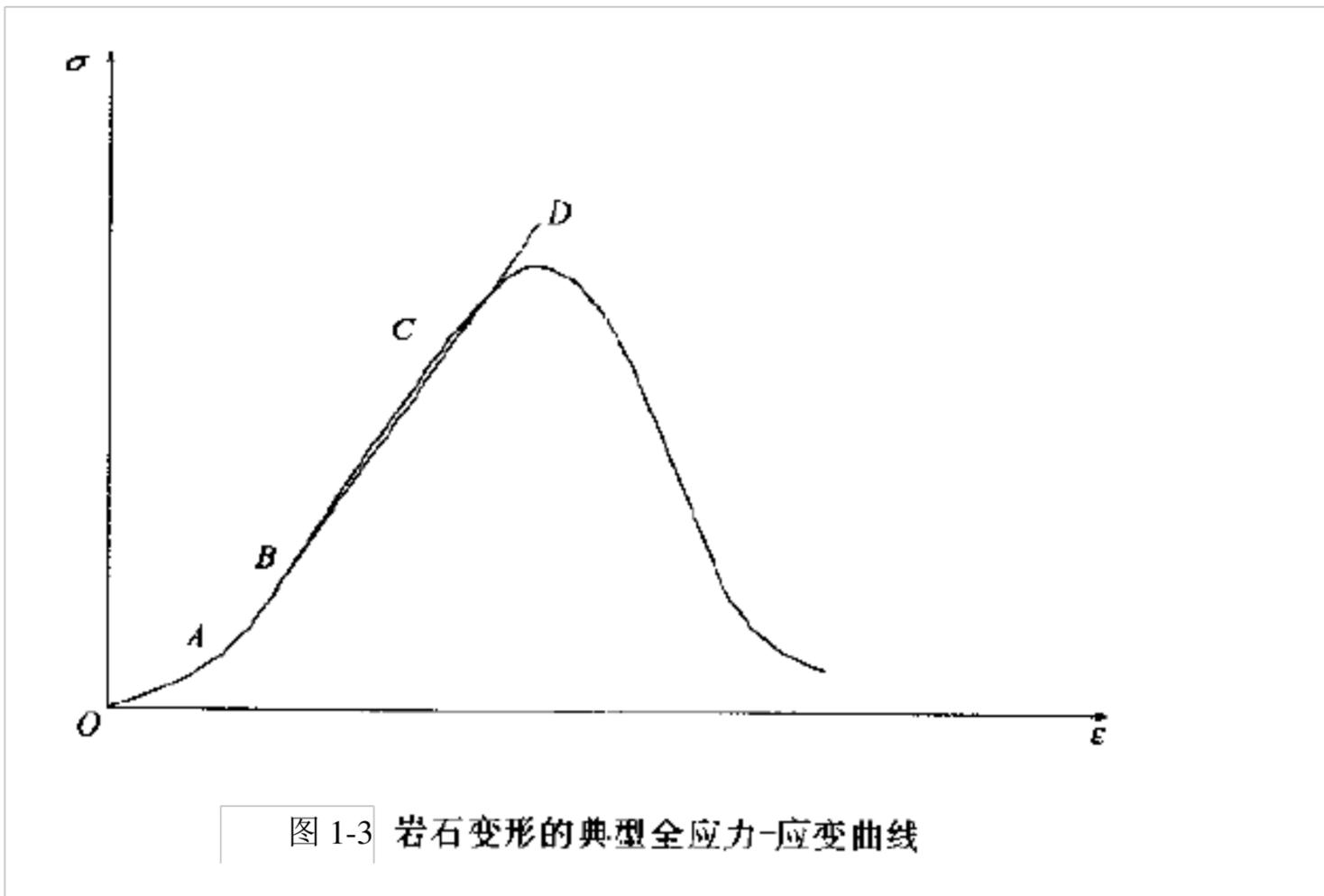
延性材料 — 破坏比较平缓的材料。

脆性 — 破坏前永久变形的大小，可用脆性度气字（库克）。

延性 — 塑性，永久变形。

一、岩石在单向受压状态下的变形

下面图是单向受压情形下岩石的应力应变应变的全进程曲线。图 1-3 是全图，图 1-4 是屈服以前的局部放大图。



从图中能够看出在单向受载下岩石的变形可划分为四个阶段：

一、微裂隙压密段（ $O-A$ 段），岩石内部原有裂隙的闭合超过新产生的裂隙，曲线上凹；
二、弹性变形阶段（ $A-B$ 段），岩石内部原有裂隙的压密与新产生的裂隙大致相等，岩石被继续紧缩，应力应变曲线的斜率不变，应力应变关系呈现为线性；

3、岩石整体上进入裂隙进展和扩展的阶段（ $B-C$ ）段，在该阶段岩石中新产生的裂隙超过了被压密的裂纹，曲线向下凹，开始进入塑性阶段，并发生体积膨胀。同时有声发射加重的现象；

4、裂隙加速产生并非稳固扩展，直至岩石试件完全丧失承载能力（ $C-D$ ）段。破坏过程。在那个阶段随着应变的增加，岩石强度减小，岩石的这种特性称为岩石的应变弱化，应变弱化岩石区别于金属的显著的力学性质之一

对于均匀各向同性介质，按线弹塑性理论，在弹性阶段的体积变形为

$$\varepsilon_v = \varepsilon_z - 2\varepsilon_x$$

依照那个关系能够描述岩石单向压应力与体积变形的关系。一般以为，当体积变形偏离弹性紧缩并增大，就以为产生了压应力作用下的体积膨胀，压应力下的体积膨胀是岩石区别于金属的另一显著的力学性质。

压应力作用岩石的应力应变全进程曲线反映了岩石在压应力作用下其内部裂隙的进展进程、渐近破坏，应变弱化的是岩石区别于金属的最主要的力学特性。

二、实验机特性与岩石的应力—应变全进程曲线

第一介绍刚度的概念。设物体所受的载荷为 Q ，在 Q 的作用下，总的变形为 U ，若是物体是弹性的，则 Q 与 U 之间的关系为

$$Q=KU \quad (1-1)$$

式中 K 就是该物体的刚度。从上式能够看出，**刚度 K 是物体产生单位位移(整体变形)所需要的力(载荷)**。这里弹性表现为 K 是与 U 无关的是一个常数。对于弹性介质，应力应变的线性关系等价于载荷 Q 和位移(整体变形)的线性关系。这是因为，若是 A 是弹性试件的面积，

L 是试件的长度， Q 是试件所受的载荷， ΔL 是试件在载荷 Q 的作用下的总变形，则 $\frac{Q}{A} = \sigma$

是试件应力， $\frac{\Delta L}{L} = \varepsilon$ 是试件应变，弹性变形要求

$$\sigma = E\varepsilon \Rightarrow \frac{Q}{A} = E \frac{\Delta L}{L} \quad (1-2)$$

从上式可得出

$$Q = \frac{EA}{L} \Delta L \Rightarrow Q = K \Delta L \quad K = \frac{EA}{L} \quad (1-3)$$

由于 E 是常数，因此 K 也是常数，因此线弹性的应力应变关系致使线性的载荷位移关系，但必需指出的是，**刚度包括了几何因素，因此不是材料内秉的力学性质，而是一种结构特性。**

岩石实验机在其工作范围内整体的力学特性是弹性的，不然实验机不能正常工作。如此实验机和岩石组成的力学系统能够简化成下图的力学模型，若 P 是实验机所受力， Q 是

岩石试样所受的力，由于实验机与试样组成了串联系统，因此在平衡状态下

$$P=R \quad (1-4)$$

由于实验机在弹性范围内工作，因此

$$P = K_M U_M \quad K_M = \text{const} \quad (1-5)$$

式中 U_m —实验机的变形， K_m —实验机的刚度。 U_R —岩石的变形， K_m —实验机的刚度

从图 1—3 能够看到，岩样的应力应变关系是非线性的，岩石的刚度 K_R 是变形 U_R 的函数，因此

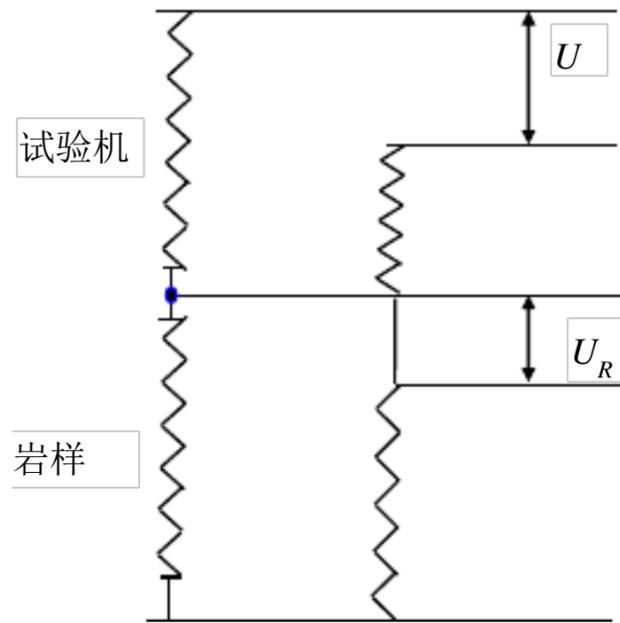


图 1—5 试验机—岩样系统的力学模型

$$Q = K_R(U_R) U_R \quad (1-6)$$

式中 U_R —岩石的变形。若系统的总位移是 U 。在岩样破坏前的加载进程中，外部对系统的功为

$$W = \frac{1}{2} P U \quad (1-7)$$

贮存在实验机中的弹性变形能为

$$W_M = \frac{1}{2} P U_M = \frac{1}{2} K_M U_M^2 = \frac{1}{2} \frac{P^2}{K_M} \quad (1-8)$$

贮存在岩样中的变形能和由于岩样内裂隙生成、扩展所消耗的功之和为

$$W_R = \int_0^{U_R} U_R dU_R = \int_0^{U_R} K_R(U_R) U_R dU_R \quad (1-9)$$

上式能够写为

$$W_R = \overline{K_R} \int_0^{U_R} U_R dU_R = \frac{1}{2} \overline{K_R} U_R^2 = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{\overline{K_R}} \quad (1-10)$$

式中 $\overline{K_R}$ 是岩样从变形为零到变形为 U_R 进程中的平均刚度。上式的正确性可由定积分的

第一中值定理取得(见有关数学分析的教程)。

由于 $P=R$ ，若是实验机的刚度 K_M 小于岩样的平均刚度，即 $K_M < \overline{K_R}$ ，从(1-8)式和(1-10)式可知，在加载进程中贮存在实验机中的弹性能 W_M 大于 W_R ，即 $W_M > W_R$ 。现在，岩样一旦发生破坏，则贮存在实验机中的弹性能突然释放，对岩样产生冲击作用，破坏以突变的形式发生，实验终止，无法取得岩样的全程曲线。

当岩样进入过峰值强度后的变形区，使岩样继续紧缩所需要的载荷减小，系统受力 $P=Q$ 减小，若是现在 $K_M < |K_R|$ ，则从图 1-7 可见，即便外界不对系统做功，岩样的变形也可继续发生。从图 1-7 还可见到，岩样从 U_{RC} 变到 U_{RP} 进程中，载荷降低了 ΔQ ，这引发实验机变形恢复，并释放能量。从图 1-7 能够看出，若 $K_M < K_R$ ，则载荷减少 $\Delta P = \Delta Q$ 进程中，实验机释放的能量超过了使岩样继续变形 $\Delta U = U_{RP} - U_{RC}$ 所需要的能量。实验机施加于岩样的实际载荷 P_{CP} 也大于现在岩石的强度 U_{RP} ，即 $P_{CP} > Q_{RP}$ 。

在这种情形下，一旦岩样的变形进入了过峰值强度后的 U_{RP} 时，贮存在实验机中弹性变形能突然释放，对岩样产生冲击作用，致使岩石的突然破坏。无法取得岩样的应力应变全过程曲线。

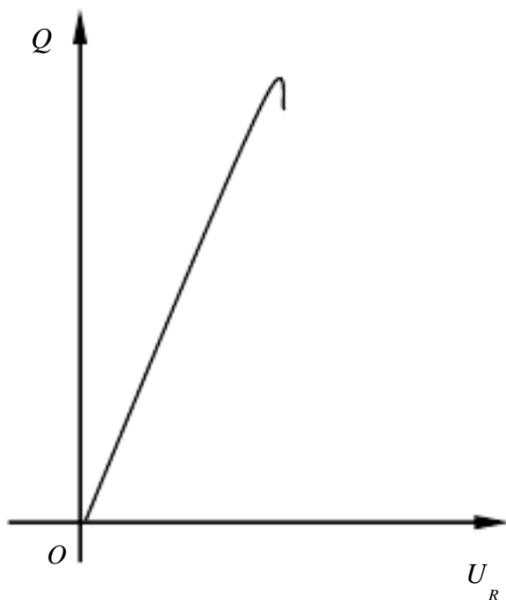


图 1—6 普通柔性试验机上岩样的突然破坏

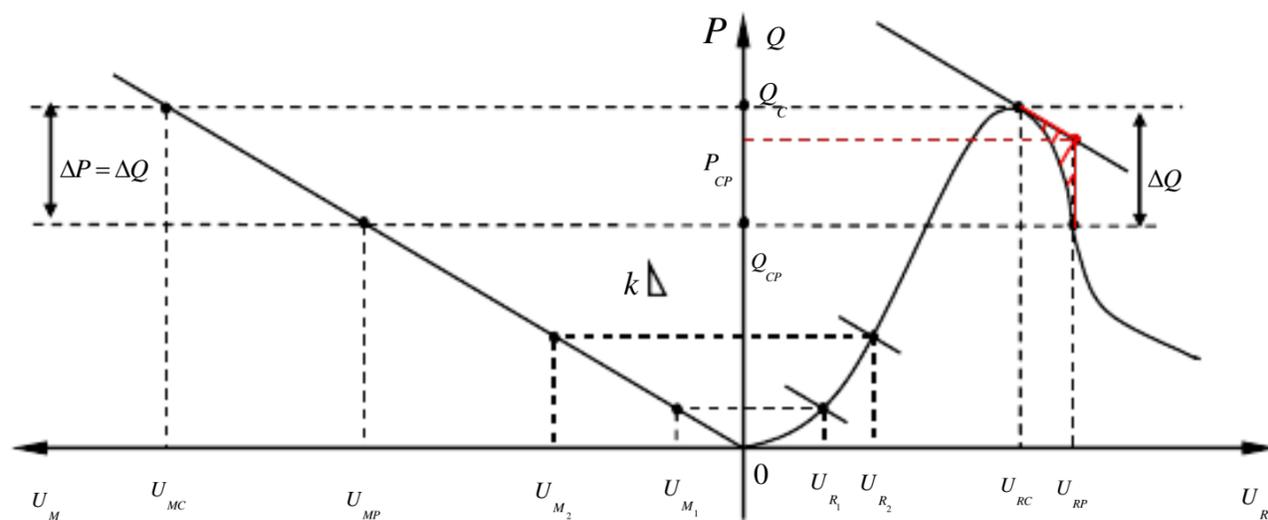
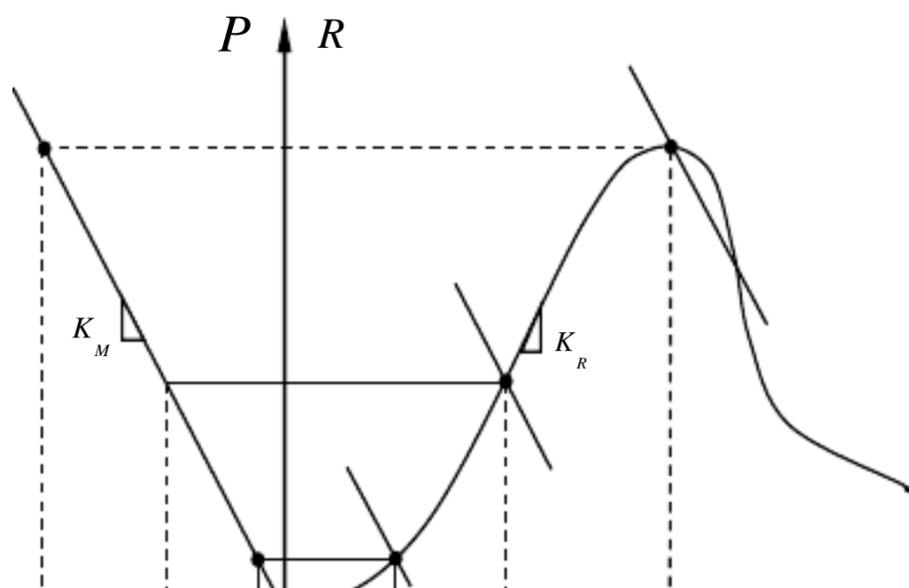


图 1—6 试验机与岩样的相互作用

反之，若是实验机的刚度 K_M 更大，当岩样进入过峰值强度后的变形区，岩样继续变形， $\Delta U = U_{RP} - U_{RC}$ 的进程中，实验机释放的弹性能小于岩样继续紧缩的变形能。实验机的载荷 P_{CP} 也小于岩样的载荷 Q_{CP} ，因此，必需外界继续对实验系统做功，岩样才能继续紧缩(见图 1-8)。KM 专门大的实验机叫刚性实验机。



最先的岩石应力应变全进程曲线是在刚性实验机上取得的,此刻有了更先进的伺服实验性能使实验机施于岩石的载荷与岩样强度的衰减同步降低。

三、岩石应力应变曲线的类型

类型 I: 线性应力—应变关系。坚硬岩石, 细粒岩浆岩、细粒变质岩、玄武岩、石英岩、辉绿岩、白云岩和坚硬石灰岩, 脆性破坏。

类型 II: 弹塑性。开始弹性, 以后塑性。代表性岩为石灰岩、粉砂岩、凝灰岩。

类型 III: 塑弹性开始上凹, 后转为直线。破坏以前没有明显屈服。具有这种塑弹性变形特征的是岩石中有孔隙和细裂隙的坚硬岩石, 如砂岩、花岗岩、某些辉绿岩等。

类型 IV: 塑性—弹性(细 S 型)。线性段斜率较大。这种变形的岩石有坚硬致密的变质岩, 如大理岩、片麻岩。

类型 V: 亦为细 S 型, 但线性段斜率较小。如在垂直片理方向受压的片岩, 有很高的紧缩性和专门大的塑性变形。

类型 VI: 岩盐及其他蒸发岩的变形特征曲线。开始是很短的直线, 随后出现不断增大的非弹性变形和持续蠕变。

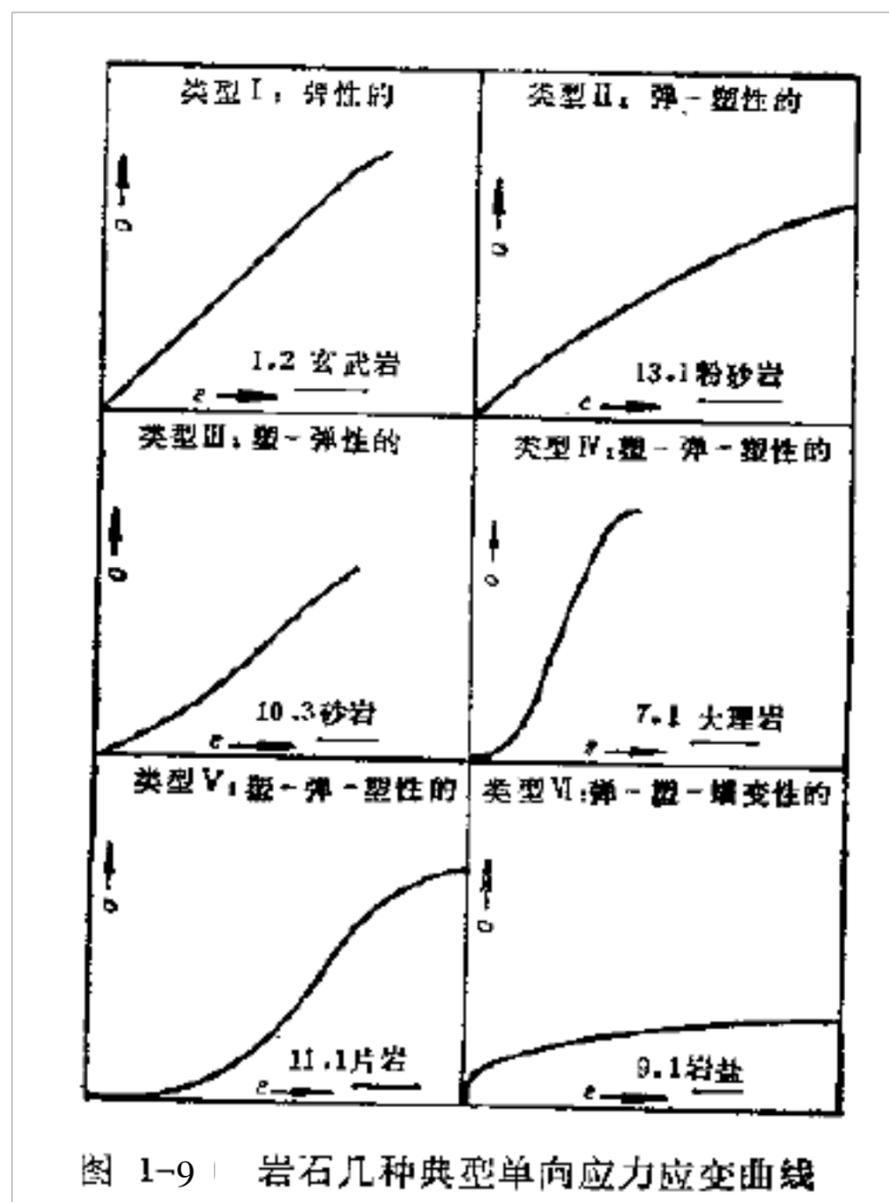


图 1-9 岩石几种典型单向应力应变曲线

三轴实验下的应力—应变曲线（围压的影响）

一、围压对围岩的影响因围岩不同而异，硬岩受围压影响小，较软的砂岩受围岩影响大。
 二、围压加大时破坏时的峰值载荷增大(强度增加)，塑性变形增大。
 这些从下图能够看出。

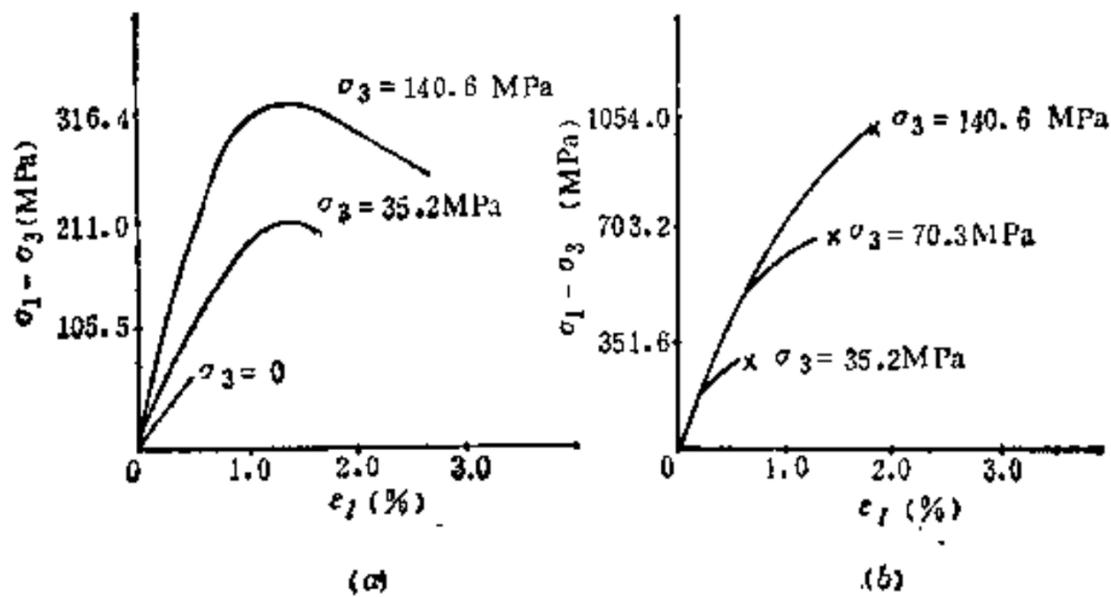


图 1-10 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 ϵ_1 关系图
 (a) 倍利亚砂岩; (b) 辉长岩

加载

随着加载速度增加，曲线斜率增大，即变形模量增大。

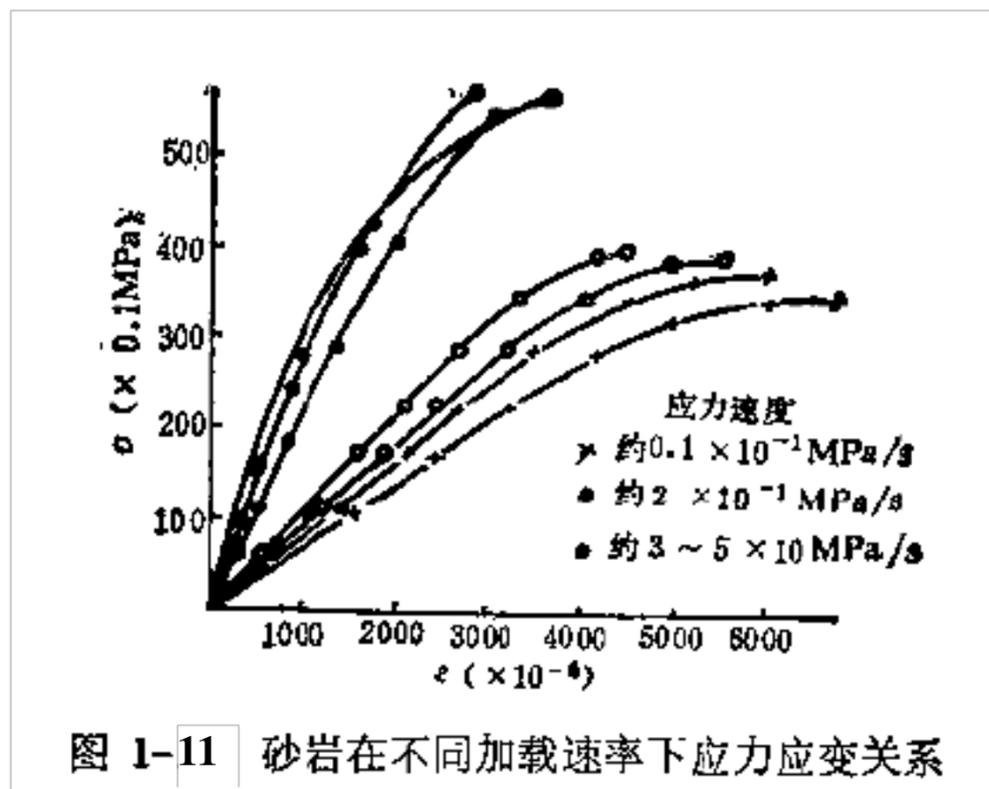


图 1-11 砂岩在不同加载速率下应力应变关系

四、变形指标及其测定

反映岩石变形特性的指标有弹性模量(变形模量)和泊松比(侧向变形系数)。

弹性模量 E (变形模量)的概念为 $E = \sigma / \epsilon$ ，由于单向受压情形下岩石的应力应变关系是非线性的，因此变形模量不是常数，常常利用的变形模量有以下几种

一、初始模量，用应力应变曲线坐标原点的切线斜率表示，即

$$E_i = d\sigma / d\epsilon$$

二、割线模量，由应力应变曲线的起始点与曲线上另一点作割线，割线的斜率就是割线模量，一般选强度为 50% 的应力点 σ_{50}

$$E_s = \frac{\sigma_{50}}{\varepsilon_{50}}$$

3、切线模量，用应力应变曲线直线段的斜率表示

$$E_t = \frac{\sigma_{t1} - \sigma_{t2}}{\varepsilon_{t1} - \varepsilon_{t2}}$$

随岩性不同，这三种模量能够相差专门大。一般有 $E_t > E_s > E_i$ ，有时能够用 E/E_t 反映岩石孔隙发育的程度。在工程应用上应用哪一种模量到目前尚未统一的规定。

4、泊松比 μ ，单向载荷作用下，横向变形与纵向变形之比

$$\mu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z}$$

式中 ε_z 为平行加载方向的纵向应变， ε_x 为垂直于加载方向的横向应变。

第四节 岩石的流变性

岩石的流变是其本构方程（应力应变关系）随时刻而转变的性质。更准确地说是岩石的应力率与应变率之间的物理关系。最多见的岩石流变是在外力不变的情形下岩石的变形随时刻流逝而增加，即蠕变。岩石的蠕变不必然要在外载荷专门大时才发生，也不必然要在高温下才发生。即便在常温条件下，虽然作用在岩石上的载荷很小，只要它的作用时间相当长。也会发生永久变形。在地壳中所看到的各类地质构造形迹，和在第四纪冰川沉积物中常常可看到各类弯曲砾石。这些现象就是岩石流变性的反映。

大体概念：

流变—介质应力或应变之间的物理关系与时刻而相关的性质，或说是岩石的应力率与应变率之间的物理关系。

蠕变—外力不变时，变形随时刻的进展的现象。

松弛—变形不变时，介质应力随时刻而降低的现象。

岩石流变的实例，沉积岩的弯曲，第四纪冰川沉积物中的各类弯曲砾石。

研究岩石流变性质的方式：一、经验定律；二、模型理论；3、积分理论。本章只介绍经验定律和模型理论。

一、研究岩石蠕变的经验定律

岩石蠕变的典型形式，

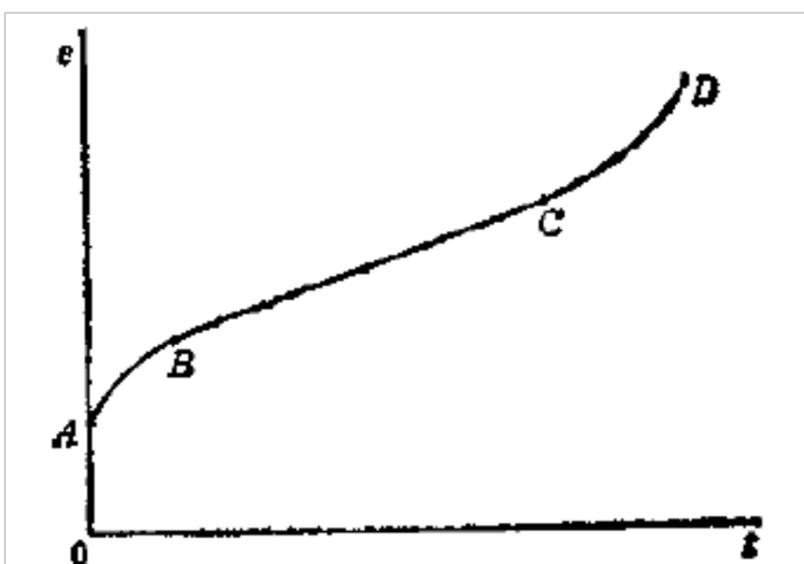


图 1-12 岩石的典型蠕变曲线

图 1—12 所示的蠕变应变可表示为

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(t) + vt + \varepsilon_3(t)$$

OA 段—**瞬时弹性**，变形以接近声速的速度完成。

AB 段—蠕变第一阶段，蠕变速度下降，也叫**瞬时蠕变**。

BC 段—蠕变第二阶段，**等速蠕变**，亦称**稳固蠕变**。

CD 段—蠕变第三阶段，加速蠕变，蠕变破坏阶段。

对于 $\varepsilon_1(t)$ ，有以下几种常常利用的经验蠕变定律

$$\varepsilon_1(t) = At^n \quad 0 < n < 1$$

其中最常常利用的是幂定律

$$\varepsilon_1(t) = At^{1/3} \quad (\text{Andrade, 1910, 194})$$

和对数定律

$$\varepsilon_1(t) = A \ln t$$

可是这三个经验定律都没有严格地符合瞬态蠕变的概念，表此刻

(1)、随着时刻增加变形不断增加，而不是趋于一个常数；

(2)、 $t \rightarrow 0$ 时蠕变速度 $\dot{\varepsilon}_1(t)$ 趋于无穷大。

为避免这些缺点，又有

$$\varepsilon_1(t) = A \ln(1 + \alpha t) \quad (\text{Lomnitz, 1956, 1957})$$

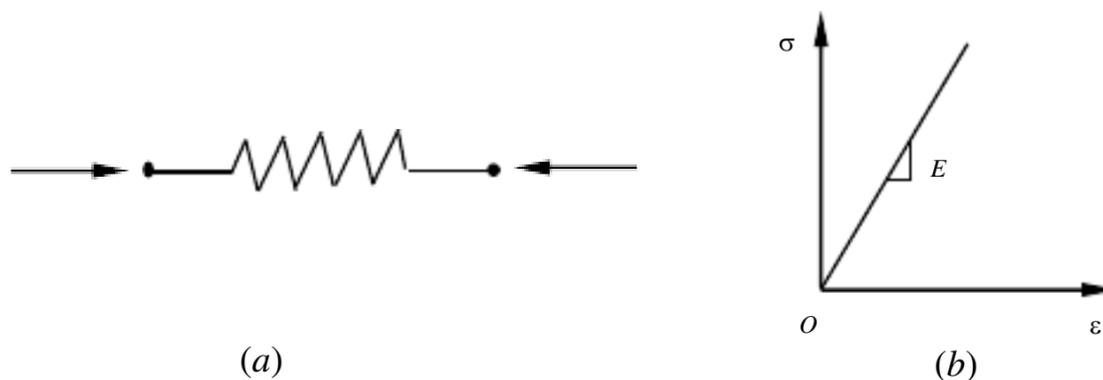
经验定律的中 V 和 A 取决于实验条件。

二、研究岩石流变的模型理论

其主要的思想是利用具有简单力学性质的元件的组合，反映岩石的更为复杂的流变特性。

常常利用的元件有三种：(1)、弹性元件；(2)、粘性元件；(3)、摩擦片。弹性元件反映弹性变形，粘性元件反映岩石的粘性，摩擦件反映岩石的塑性。

(1)、弹性元件



1-13 弹性元件的模型简图与应力应变关系

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-11)$$

从上图能够看出弹性元件的力学特点为：应力仅仅依赖于应变，与时刻无关。在力的作用下，弹性变形瞬时完成，以后只要受力不变，变形就恒定。简而言之，**弹性元件有受力瞬时变形，应变恒定的特点**。

(2)、粘性元件

图 1-14 是粘性元件的模型简图与应力应变关系。从图中能够看出粘性元件的力学特点

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/976140200242010110>