

岩石破碎新技术

刘少勤 秦书玉

阜新矿业学院情报室

一九八四年六月

目 录

绪 言

第一章 岩石及其力学性质

§ 1. 岩石物理力学性质	4
§ 2. 岩石的变形性质	13
§ 3. 岩石状态特性	16
§ 4. 岩石破碎的强度理论	24
§ 5. 岩石的破碎功和比功	26

第二章 电物理破碎岩石

§ 1. 高能激光切割岩石	30
§ 2. 等离子炬破碎岩石	45
§ 3. 电子束松破碎岩石	49
§ 4. 电磁波破碎岩石	50

第三章 热——水力破碎岩石

§ 1. 热——水力射流破碎岩石	59
§ 2. 高压水射流破碎岩石	65
§ 3. 热感生应力破碎岩石	84

第四章 弹丸破碎岩石

§ 1. 高速射弹冲击破碎岩石	105
§ 2. 弹丸穿透岩石	111

参考文献:

前 言

人类对能源资源的需求日益增加，能源问题在世界范围内尖锐起来。为解决能源和矿物原料短缺，高速发展地下工程，必须改变现有的岩石破碎技术，加速掘进速度。其根本问题就是能源升级。为此，作者在这里介绍了十几种高能破岩新技术，供教学科研人员和工程技术人员参考。

这本资料是该院科研处刘绍勛和秦龙丑两同志经过近几年搜集的大量国内外资料编写而成。由于作者水平有限，错误在所难免，请读者提出宝贵意见。

目 录

绪 言

第一章 岩石及其力学性质

§ 1. 岩石物理力学性质	4
§ 2. 岩石的变形性质	13
§ 3. 岩石状态特性	16
§ 4. 岩石破碎的强度理论	24
§ 5. 岩石的破碎功和比功	26

第二章 电物理破碎岩石

§ 1. 高能激光切割岩石	30
§ 2. 等离子炬破碎岩石	45
§ 3. 电子束松破碎岩石	49
§ 4. 电磁波破碎岩石	50

第三章 热——水力破碎岩石

§ 1. 热——水力射流破碎岩石	59
§ 2. 高压水射流破碎岩石	65
§ 3. 热感生应力破碎岩石	84

第四章 弹丸破碎岩石

§ 1. 高速射弹冲击破碎岩石	105
§ 2. 弹丸穿透岩石	111

参考文献:

绪 言

岩石破碎，这一最基本的作业过程，有着悠久的历史。在生产实践中破碎岩石的方法得到了不断的改进和发展，但是，做为一种基础学科，系统地研究岩石破碎机理，揭示岩石破碎的实质，破碎的能耗和破碎效果间的联系，用以指导和寻求有效的破岩方法，是最近三、四十年来发展起来的。然而，由于岩石本身的复杂性，如岩石的各向异性，结构特征等等，破碎载荷和作用条件的特殊性以及各种因素和影响，使得岩石破碎的研究在理论上还不是很完善的。特别是目前还不能从理论上定量化地解决岩石破碎的实际问题。在解决岩石破碎的一些实际问题时，如破碎载荷的大小，破碎的能耗，破碎的范围和效果，合理的工艺参数等，还须借助于实验数据，经验的或半理论性的途径。

破碎岩石的方法主要有打眼放炮，机械切割，水力喷射，火焰喷射等等。这些方法可归纳为机械破岩、炸药破岩和电物理破岩三种方式。

机械破岩是利用机械和工具对岩石施加破碎载荷，如冲击式凿岩，旋转式铰眼，刀具的切割、挤压等。

炸药破岩是利用炸药爆炸所产生的炸胀能来破碎岩石。

电物理破岩是借助热能在岩石中形成热应力造成岩石破碎。这种破岩只属于物理性的变化而没有化学的变化。例如，火焰喷射，高频电电磁波，电子束等。

从上述破岩方式来看，破碎岩石的外载都是动载。这些载荷在短暂的时间内有很大的变化。因此，研究岩石破碎的机理必须与外载的特性相联系，考虑岩石的动载性能，揭示在不同外载条件下岩石的破碎过程，确立外载与破碎之间的关系，从而确定合理的破岩工艺参数，改进和寻求新的破岩方法。

这里就不同破碎岩石方法的基本原理及其相关问题做扼要的论述。

第一章 岩石及其力学性质

§1 岩石物理力学性质

岩石是由多种矿物组成的不均匀的固体，从其微观组成的结构来看有和许多固体相同之处。由于组成岩石的不同矿物成分和不同的结构与构造，造成岩石在物理力学性质上有很大差别。然而仅就岩石破碎的问题，从宏观方面来考察岩石的基本性质，即将岩石作为均匀的连续体，就可以满足目前技术理论的要求了。但是在深入探讨岩石破碎机理或拟定新的破碎方法时，必须从微观方面进行研究，此时岩石的解理，裂隙都是不可忽略的。

一、岩石的强度与硬度

在讨论岩石强度概念时，一般是指抵抗外载破碎的能力。它是与外载的特性和受载状态相联系的。影响岩石强度的因素基本是两个方面，一方是自然因素如岩石的矿物成分、结构和构造，另一方是技术因素。从理论上讲，如果材料中不存在任何缺陷时，即完全结构的矿物晶格的断裂强度可达 $0.1 \sim 0.15E$ ，即理论强度。然而，岩石的实际强度一般小于 $1 \times 10^2 \sim 1 \times 10^3$ 。如岩石的理论断裂强度为 200 kg/cm^2 ，而实际强度仅为 0.5 kg/cm^2 。石英的理论强度为 1000 kg/cm^2 ，而实际强度为 11.6 kg/cm^2 。所以如此，是因为岩石本身赋存许多天然的缺陷，如裂隙等。

岩石的实际强度或称工程强度又分为试件强度和岩体强度两种。试件强度只能反映岩石内微型裂纹，不能反映较粗型裂纹和较大裂缝等缺陷对强度的影响。岩体强度则与试件强度有很大差别，外破破岩时一般破碎范围较大，如果直接引用试件强度将会产生较大的误差。

岩石的强度取决于矿物成分，颗粒大小及胶结物质等因素。石英在造岩矿物中具有最高的强度。岩石中胶结物所占比例愈大，则碎屑本身强度对岩石强度的影响愈小。组成岩石的矿物颗粒尺寸影响着岩石强度。对某些粘土质岩试验表明，其强度与颗粒直径成反比。在机械破岩中岩石的矿物成分和颗粒大小影响着破岩效果和刀具的磨损。

从统计数据表明，在一定范围内试件抗压强度与纵弹性模量 E 之间存在有相关关系，如图 1-1。

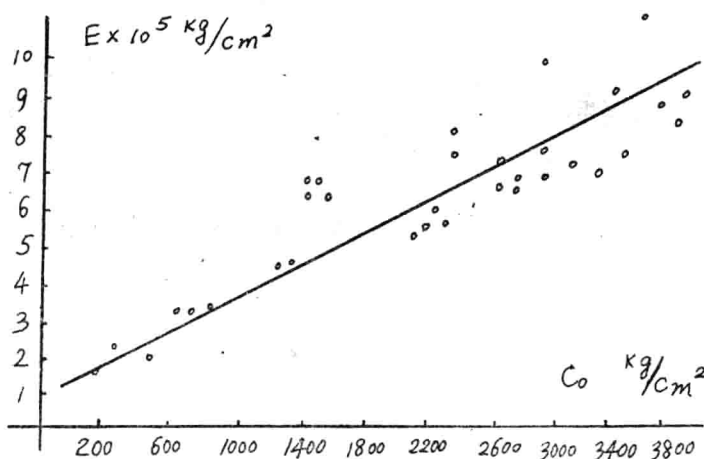


图 1—1

可用下列近似经验公式来表示：

$$C_0 = 4.2 \times 10^{-4} E - 4.45 \quad (1-1)$$

因细长杆件的纵波传播速度 C_p 等于

$$C_p = \sqrt{E/\rho} \quad (1-2)$$

式中： E ——介质纵弹性模量；

ρ ——介质密度。

所以，当知道岩石容重和试件中纵波波速可按式(1-1)求出弹性模量 E 后就能估算出岩石的强度。

岩体的抗压强度 C'_0 可按下式计算：

$$C'_0 = \left(\frac{C'_p}{C_p} \right)^2 \times C_0 \quad (1-3)$$

式中： C'_p ——岩体中纵波速度。

岩石的密度或容重越大，纵弹性模量越大，因而能使岩石具有较高的强度(公式1-1)。对大多数岩石来说，容重 γ 和纵弹性模量之间存在着下

岩石破碎新技术

列鋼相乘關係。

$$E = (7.28 - 13.05) \times 10^5 \quad (1-4)$$

岩石空隙率增大，相当于密度减少，从而使岩石强度降低。空隙内一般含有不同程度的水分，含量愈大岩石的强度就愈低。如表 1—2 所示，砂岩、泥灰岩和泥岩含湿率对抗压强度和抗剪强度的影响。

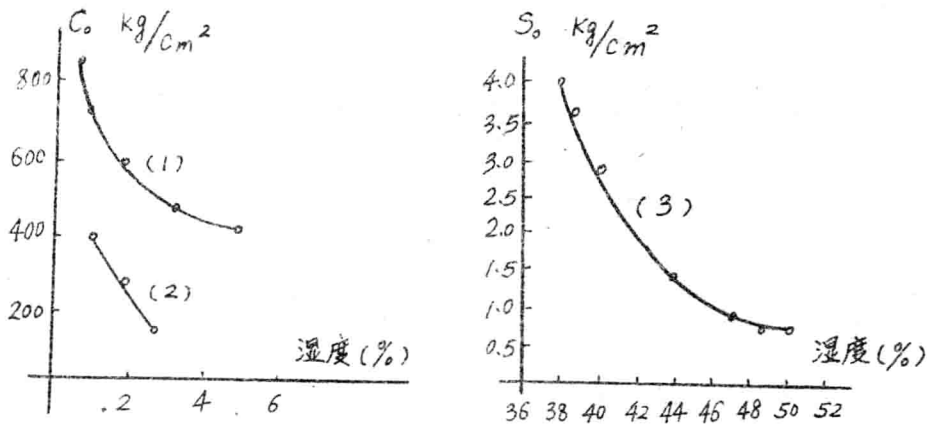


图 1—2

岩石的强度性质与载荷的形式相联系，一般讲岩石的抗压强度大于抗剪强度大于抗拉强度，即 $C_0 > S_0 > T_0$ 。几种岩石的强度性质列于表 1—1。

从表中可知，岩石的抗剪强度为抗压强度的 12%~59%，而抗拉强度仅为抗压强度的 2~10%。

从岩石破碎的实质来看，不论施加载荷如何，或不现在岩石中产生应力的形式如何，岩石发生破碎的最终原因是由于拉应力产生拉伸作用或是剪应力产生剪切作用以克服分子间的内聚力而造成。所以，研究岩石的抗剪强度和抗拉强度对岩石破碎讲具有重要的实际意义。

岩石的硬度，到目前为止还没有一个完整的确切的概念和定义。一般在使用上认为，岩石的硬度是抵抗另一物体侵入的抗力，其单位为 kg/cm^2 ，即岩石的局部抗压入强度。

表 1—1

岩石名称	密度 kg/m ³	岩石强度				
		抗压 C ₀	抗压 T ₀	抗压 S ₀	T ₀ /C ₀	S ₀ /C ₀
蛇纹岩	2430	230	23.0	135	0.100	0.587
石灰岩	2670	995	23.0	294	0.023	0.295
石灰岩	2690	997	50.0	350	0.050	0.351
辉绿岩	2640	1300	40.0	160	0.031	0.123
粘土页岩	2650	1300	45.5	330	0.035	0.254
变质凝灰岩	2530	1340	41.0	335	0.031	0.250
水成片麻岩	2640	1390	62.0	420	0.044	0.301
内长玢岩	2750	1600	73.2	370	0.046	0.231
安山岩	2700	1950	89.0	375	0.046	0.192
砂岩	2630	2150	72.0	395	0.033	0.184
角岩	2590	2370	48.0	375	0.020	0.158
片麻状片岩	2930	2390	8300	350	0.035	0.146

测量岩石的硬度有不同方法。按上述概念，必须算出载荷大小和接触石的面积。并定出硬度的标准。硬度的标准应当是压入情况下的弹性极限。对弹脆性体讲，达到弹性极限时，就开始发生脆性硬碎，对弹塑性体讲，达到弹性极限时，将开始塑性流变。

赫芝利用球体压入脆性体时的抗压入强度表示绝对硬度。其硬度标准是裂缝形成时，球体和被测物接触面中心的最大压力，表示为：

$$P_0 = \frac{3}{2\pi} \times \frac{P}{a^2}$$

式中：P —— 形成裂缝时的总压力；

a —— 形成裂缝时压力圈半径。

史涅龙尔推出了利用圆柱形或圆锥形平顶压头压入岩石以测定岩石硬

度测试法。压头的顶面积为 $1-2\text{ mm}^2$ 。硬度的标准是取如下的方法：对于脆性岩石，取压头下岩石完全破碎瞬间所施加的压力。对于塑性岩石是取与屈服极限相当的压力。为此，要做应力应变曲线来确定。

史氏按上述测硬度的方法将岩石分为三种类型：弹脆性，塑脆性和不发生脆性破坏的塑性岩石。

从以上可知，岩石的硬度在实际上是与岩石的单向抗压强度相联系的。利用机械破碎岩石时，岩石的硬度将影响着破碎的效果和工具的磨损。

影响岩石硬度的因素和影响岩石强度的因素相似。矿物中石英的含量、胶结物的性质、结晶水、孔隙水以及结构上的缺陷都直接影响着岩石硬度的测定值。

二、岩石的弹性和塑性

在各种变形情况下，除了各方向受很大压缩的情况外，所有主要造岩矿物和岩石都是弹脆性体，因此岩石和矿物没有任何残余应变，当达到弹性极限时就要开始破碎。

对于岩石讲，由于组成岩石的矿物具有不同的弹性模数，因而岩石的变形不遵守虎克定律，应力应变呈指数关系，

$$\epsilon = \sigma_m / E$$

岩石的弹性模数受两方面因素的影响。一种是外界技术因素，如岩石对动载所表现的弹性模数为 E_d ，对反复加载所表现的弹性模数为 E_N ，对单次加载所表现的弹性模数为 E 时，它们之间表现为：

$$E_d > E_N > E$$

这说明在动载作用岩石的破碎具有更多的脆性性质，在反复加载的破碎条件下岩石也具有比缓慢加载更大的脆性性质。影响岩石弹性模数的另一因素是岩石的自然条件。造岩矿物的弹性模数直接影响着岩石的弹性模数。在其它条件相同时，岩石的颗粒小，则有较大的弹性模数，如粗砂岩的

$E = 2.77 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ ，细砂岩的 $E = 3.00 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 。岩石的孔隙性也

影响着弹性模数，Б. П. БЕЛИКОВ观察了石英岩，大理岩、石灰岩、白

去岩石得出了下列论断。

- 1、在岩石中如果均匀地分布着空隙则弹性模量随着空隙率的增大而降低；
- 2、如果岩石具有相同的孔隙度，虽组成的矿物成分不同，但所具有的弹性模量几乎相同；
- 3、压缩时岩石的变形主要是由于岩石内部充满着孔隙和空洞给予变形发展的空间条件。

对于某些岩石讲层节理，湿度等也影响着弹性模量。例如增大粘土质岩石的湿度由 3% 至 14%。则其 E 值从 7.3×10^3 降至 3.2×10^3 ，如湿度再增至 25% 时， E 值则降至 $0.3 \times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ 。

在一般应力条件下，造岩矿物和岩石都是典型的脆性体，但是，在高压情况下，某些矿物就会产生相当大的塑性应变。岩石的这种塑性应变主要取决于晶粒间的滑移，岩石的塑性是由晶粒大小和形状，晶粒间相互作用力的性质，胶结物的组成所影响。

从岩石破碎的角度来看，塑性岩石的破碎将消耗较大的破碎功。

三、岩石的磨蚀性

利用工具对岩石进行破碎时，将对工具产生磨损的反映是岩石的磨蚀性。

磨蚀性的大小主要取决于岩石的硬度和造岩矿物的硬度，同时也取决于岩石的结构。石英的硬度比长石大得多，因而长石砂岩对工具的磨损仅为石英质砂岩上磨损的 $1/20$ 。另外，含铁的石英岩要比石英质砂岩的硬度大得多，但是，前者对工具的磨损要比后者小得多，这是由于岩石结构上的某些特征所引起的。在石英质岩石中石英颗粒本身的硬度比颗粒间连接的硬度要大，随颗粒的加大，磨蚀性亦加大。工具在破碎时所接触的表面是粗糙的，加大了岩石对工具的磨损。

岩石的磨蚀性是以工具的磨损为标志，除了岩石或矿物的硬度，结构的因素外，还决定于工具对岩石磨损功。

工具破碎岩石时，由于与岩石的粗糙面相接触，所以实际接触面积要比“视接触面”为小，对每个岩石颗粒上的作用力就相当大。根据库兹涅左夫的实验证明，脆性固体在拖动时，其磨损与摩擦力成正比。

岩石破碎新技术

当进行破碎时，加在岩石上的力应等于或大于岩石的硬度，此时，

$$F = MPf$$

式中： P ——为岩石硬度 kg/cm^2 ；
 f ——为接触角；
 M ——为动摩擦系数。

因而所做摩擦功为 $A = MPf \cdot S$ (S 为拖动距离)。

从上可知，动摩擦系数对工具的磨损影响很大。动摩擦系数受如下因素所影响： a 、工具与岩石接触面上的正压力； b 、工具破岩速度； c 、摩擦面之间的介质； d 、湿度等。根据一些实验资料，在正压力没达到岩石硬度之前， M 是 P 的增函数，即 $M = f(P)$ ，当正压力超过岩石硬度之后， M 保持常数。 M 值还决定于工具与岩石的相对运动速度 V_R ，即 $M = f(V_R)$ 。随 V_R 的增大 M 值增大，但有其极限值。摩擦物之间的介质及湿润条件亦影响着 M 值，干燥的表面比有水润湿的 M 值大，水润湿的岩石要比泥浆润湿的 M 值大。

上述的一些对工具磨损的影响属于技术方面的因素，它对破碎岩石的效果和工具的磨损有着重要影响。因此在实际工作中，如冲击，滚压，切削等机械破岩中要正确地选择工作制度，才能获得良好的破岩效果。

四、岩石的坚固性

人们在采矿实践中，采用各种不同方法破碎岩石，以及为了维护岩层的稳定和防止岩石的破碎运用了不同的手段和方法，从中认识到有的岩石容易破碎，有的岩石难以破碎，从而提炼出一个岩石坚固性的概念。岩石的坚固性反映了破碎岩石和防止岩石破碎的难易程度。在用各种方法破碎岩石的实践中，又认识了岩石坚固性在各个方面的表现，如凿岩的难易程度，爆破的难易程度等。这些与生产工艺相联系的坚固性的表现，又可以分为岩石的可钻性，岩石的可炸性等。所以岩石坚固性是一个综合性的概念，它反映了凿岩的难易程度，爆破的难易程度，维护的难易程度等各方面的表现。

苏联的普罗托吉雅可诺夫最早提出了岩石坚固性的概念。他指出：“岩石的坚固性和其它材料一样，是一种抵抗外力的性能”。“一般而言，

平常所指的坚固性一词，意味着多种的，按实质说是一个综合性的概念”。它反映了各种作业下破碎岩石和防止岩石破碎的难易程度。这样，坚固性所具有的概念和在建筑力学中关于抗拉、抗压、抗剪等概念在内容上有着根本的差别。

普氏认为岩石的坚固性在岩石的表现趋于一致，指出：“假如一种岩石在某一方石，如凿岩，和另一种岩石的坚固性的比值是 $f_1 : f_2$ ，那么在其它方石，如炸破、射定等，坚固性也有相同的比值”。“一种岩石当凿岩时比另一种坚固若干倍，那么它在炸破、射眼、支护的情况下也将坚固同样的倍数，岩石在所有这些方石都是有同一个比例系数”。普氏将岩石坚固性用一个无因次的系数表示，通常称为普氏系数，并认为“坚固性系数就是岩石间相对坚固性在数量上的表现，它的最重要性质在于不问是何种外力，和它是如何引起的，而给予岩石相互之间做比较的可能性，甚至用来做计算，它的准确程度也未必比一般建筑上的计算求得差一些”。

为了确定岩石坚固性系数，他采用多种方法的平均值，诸如抗压强度极限值，抗剪强度极限值以及各种采掘工艺中所耗功的系数，凿岩速度，炸药消耗量等。

继普氏之后，许多学者对岩石的坚固性进行了研究并有着不同的观点和结论。

如何确定岩石的坚固性？也有着多种说法。如抗压强度、侵入硬度、捣碎法等。

用岩石的抗压强度做岩石坚固性指标。应当明确，在表征坚固性时，是把抗压强度作为岩石坚固性的一个相对指标，它不同于一般抗压强度做为材料性质的力学常数的概念。

我们常用的普氏系数，是把抗压强度与岩石坚固性系数联系起来，如通常统计的是 $f = R/100$ 。但是这个关系也是几经变动的。1972年巴隆认为用下式计算可以得到最好的结果。

$$f = \frac{R + 105}{600} + \sqrt{\frac{R + 105}{120}}$$

式中 R 是规整试块的抗压强度， σ' 是不规则岩块的抗裂强度。

$\sigma' = P \left(\frac{\gamma}{\rho} \right)^{0.67}$ 。P为断裂载荷， γ 是岩石密度， ρ 是岩块重量。所以

上述坚固性系数值实际上是岩石抗压强度和断裂强度的平均值，由于岩石的各种破碎都包含了抗压和抗裂两个方面，所以巴氏认为它是综合反应了岩石坚固性。

岩石的坚固性系数用岩石抗压强度来表示岩石在各种受力破坏时的强度，这只是具有统计规律。实际上岩石在各种受力情况下的强度是不一样的。影响岩石强度的因素很多，往往可钻性和可炸性不一致，而且同种岩石，由于裂隙性，含水量等等不同，同一种指标的差别也很大。

1978年国际岩石力学协会委员会推荐用C-2型肖氏硬度计和L型施密特锤作为测定岩石硬度的标准方法，并以此做为岩石坚固性指标。这两种方法都是利用回弹的原理来测定岩石的硬度。压汞肖氏硬度计常用来测定金属的硬度，后者常用于测定混凝土强度的。

从上述硬度指标的实质来看，它只反映了岩石的弹性，而不是反映破碎的难易。要表示岩石的坚固性，抗钻性或抗炸性还需建立钻眼速度，破碎比功等相关关系。

在牙轮钻进时，美国常用侵入硬度作为岩石坚固性指标。R. I. Morris用半径为 $\frac{1}{8}$ 吋顶端曲率的硬质合金齿状压头，以跃进后的侵入深度和载荷之比作为坚固性指标。再利用此指标和实际牙轮钻的穿孔速度作对比，得到以下估算牙轮穿孔速度的经验公式：

$$C = 56N \left(\frac{h}{p} \right) \left(\frac{F}{N} \right)$$

式中：C——穿孔速度 呎/小时；
 $\frac{h}{p}$ ——侵入深度和载荷之比 吋/磅。
 F——牙轮钻轴向推力 磅；
 N——所有牙轮的总齿数；
 N——牙轮钻主轴每分钟转数。

美国 Dresser 公司采用上式来估算牙轮钻的穿孔速度，据说和实际偏差小于 25%，一般在 10% 左右。

在破碎岩石时，所施外载与破碎程度和岩石坚固性之间有一定规律性。一般讲，在一定的能量作用下，岩石破碎的愈剧烈，其坚固性则越小，反之则大。

测定岩石的坚固性可用捣碎法或砸碎法。捣碎法比较方便简单，它的指标和凿岩，炸破之类的冲击破碎岩石的方法相协调。砸碎法指标和冲击式凿岩速度之间有较好的相关性，与炸破时产生单位新表面面积所耗炸药之间亦有较好的相关性。

岩石的坚固性是一个反映岩石破碎难易或稳定性的一个综合性概念。普氏岩石坚固性係数是反映坚固性的一个指标，具有简明，抽象和概括的特色，它从总体上体现了岩石坚固性的程度。但是它仅仅只描绘了整个破碎岩石问题的轮廓，并未阐明每一类别破碎岩石方法的规律，因而不能用它来改进某一具体的破碎岩石方法及应选择的机具，尚不能做精确的对比。当深入到某一类别的破碎岩石方法时，在确定岩石坚固性时就将具体方法与坚固性的表现相联接。如苏氏的抗挠性和抗炸性。但是应当看到，生产所采用的方法及机只是经常发展、改革和变化着的。所以，应当把每一类别的破碎岩石方法，如凿岩，炸破，切割等的各自破碎本质抽象出来，并依此来拟定测定的方法，揭示破碎过程的实质去测定岩石的坚固性。

§2. 岩石的变形性质

从反映岩石变形特点的应力应变图中可以了解岩石在力学方面的许多特点。根据岩石的变形特点，把岩石分为弹脆性体和弹塑性体。

弹脆性体在破碎前的变形过程中不产生有明显的塑性变形，卸载后变形消失。弹脆性岩石可有两种不同的模型，如图1-3所示。若应力应变关系为直线符合虎克定律的为线性弹性体，应力应变关系为曲线不符合虎克定律的为非线性弹性体。如果加载和卸载遵循同一曲线不产生滞后现象的称为理想弹性体，加载时贮存的能量，卸载时全部释放，不产生有能量的逸散，反之，加载和卸载不遵循同一曲线，即产生有滞后现象的弹性体，加载时贮存的能量卸载时不能立即全部释放，就会造成能量的逸散。炸药炸破时放出的能量靠在岩石中产生的应力波进行传递，而能量逸散是应力波传递过程中衰减的一个重要因素。

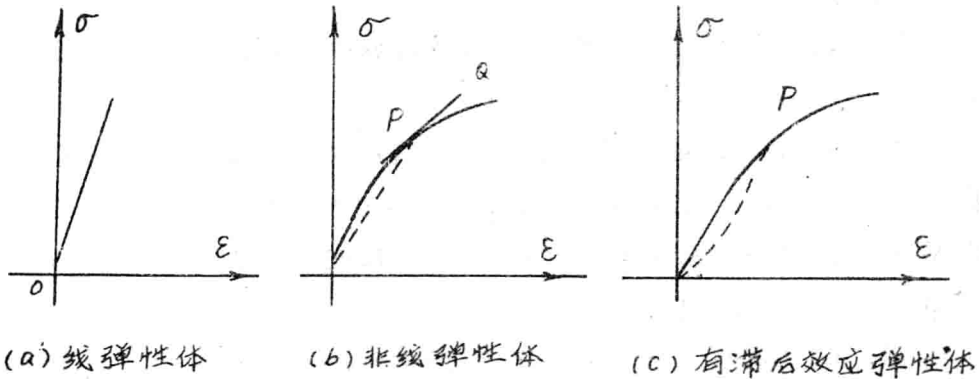


图 1-3

弹塑性体岩石的模型如图 1-4 所示。弹塑性岩石受载超过弹性极限

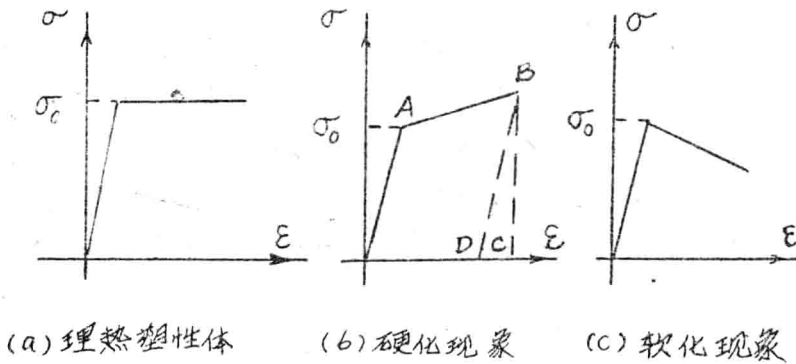


图 1-4

后产生塑性变形，卸载时保留塑性变形。如果载荷超过弹性极限后产生蠕变现象，即应力保持不变时变形继续不断增大，这样的物体称为理想塑性体。一般情况下弹塑性体受载超过弹性极限后，都产生着硬化和软化现象。所谓硬化现象即超过弹性极限后，应力继续随应变的增加而增大，反之，应力随应变加大而减小的现象称软化现象，在这种情况下，有一部分弹性变形转化为塑性变形，即产生松弛现象。

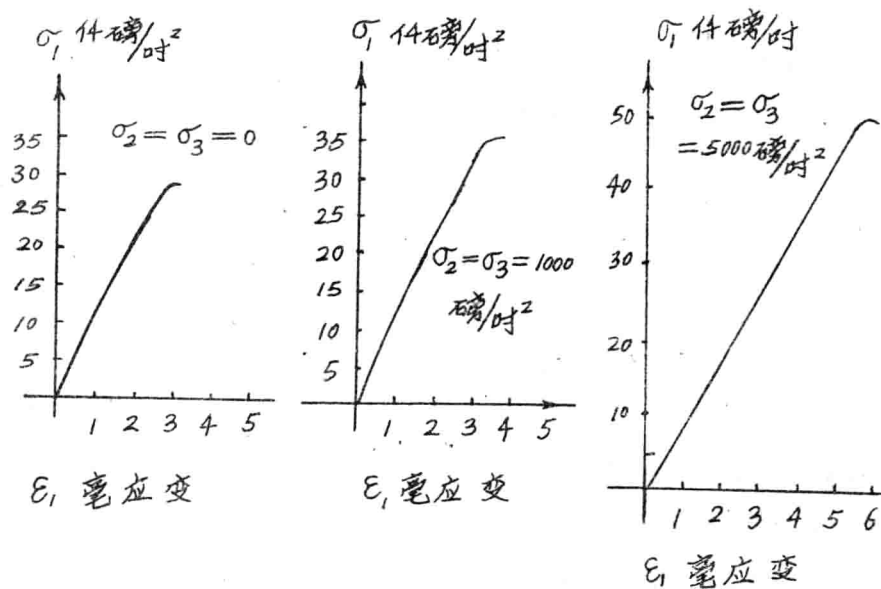
利用塑性系数可以相对地评价岩石的塑性和脆性。所谓塑性系数，即是岩石破坏时的总变形能与其中弹性变形能的比值如图 1-4 b 所示。

$$\text{塑性系数 } K = \frac{\text{面积 } OABC}{\text{面积 } BCD}$$

理想的脆性体岩石的塑性系数 $K=1$ ，塑性增加则塑性系数相应增大。在强度相等条件下，塑性增加破碎岩石所需的比能耗（破碎单位岩石体积所需的能量消耗）也相应增大。无论是用炸药破碎或机械破碎，塑性系数大的岩石所需的能量亦大。所以说，影响破碎效果的不但是岩石的硬度和强度，而且还取决于塑性。炸药炸裂时产生的应力波在弹塑性岩石中传播时，因产生塑性变形，能量耗损大，所以应力波要比在弹脆性岩石中传播时衰减得快。

前节已提到，岩石的变形性质不仅取决于岩石本身的成分、组成、结构和构造，而且还与岩石的温度、应力状态、加载或变形速度等因素有关。

大多数岩石在单轴应力状态下表现为脆性，而且应力应变曲线近于直线。在三轴 ($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 应力状态下，对大多数火成岩和变质岩来说，也同单轴应力状态相类似，但它们的屈服极限，塑性应变及岩石强度将随侧限压力的增加而增大。如各 1-5 为 Ramd 石英石在不同侧限压力条件下的应力应变图。但是对于另外一些岩石，尤其是碳酸盐类岩石和大多数



各 1-5