

岩石在不同围压、温度、应变速率 下的力学效应

中国科学院力学研究所 杜金声

近年来, 研究工作者越来越重视岩石在静态和动态条件下基本力学性质的研究。其主要原因是, 人们已经认识到与岩石有关的许多实际工程力学问题的解决, 都有赖于弄清岩石的破坏机理、破坏准则、模型以及本构关系的建立。而研究这样一些岩石的力学性状, 又必须研究岩石在各种围压、温度、应变速率等条件(即各种应力场与温度场)下的力学效应。

本文综合评述在这一领域中, 国外研究者的一些主要研究结果。

一、围压对岩石力学性状的影响

1. 围压对强度的影响

围压对岩石强度的影响是早就为人们所知的。大量的试验已经充分表明, 岩石的破坏强度随围压增加而增加。

研究指出, 应变率的变化(由静态的 10^{-4} /秒到动态的 10^3 /秒), 并不改变强度随围压增加而增加的性质^{[1][2]}。即不管加载速率如何, 只要是在一给定的应变率情况下, 围压愈高, 破坏强度便愈高(图1)。

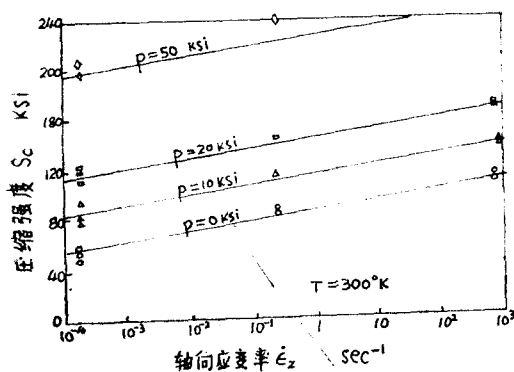


图1. 不同围压时压缩强度与应变率关系(玄武岩)

Lindholm^[2]对玄武岩做的试验结果给出, 在常温时的破坏应力随围压(0—7千巴)增大而增加, 且成线性关系。Brace^[3]对花岗岩在应变率 $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ /秒时得到的结果也证明, $\sigma_1 = f\sigma_3$, 近于线性关系。

Hobbs^[4]对四种煤层岩(薄片状Ormonde沉积岩; Bilshorpe城泥岩, Hucknall页岩; Bilshorpe泥页), 在静力三轴试验中对破裂岩样和完整岩样做了一系列各种不同围压的三轴试验, 并将试验结果用最小二乘法整理得到如下方程, 以描述强度与围压的关系。

$$\sigma_1 = B\sigma_3^b + \sigma_3$$

σ_1 ——破坏应力或屈服应力

破坏应力——试样在发生破坏以前所受的最大应力或破裂试样沿破坏面发生移动以前所受的最大应力;

屈服应力——比例极限应力;

σ_3 ——围压

B、b——常数

不同围压下各种岩石可由试验求得B、b值。Hobbs根据他的试验资料列出了若干B、b值的表格。遗憾的是, 他试验中的最大围压仅为138巴。因此, 在高围压下岩石的强度性质是否遵循这一规律, 尚属疑问。

Sangha & Dhir^[5]根据他对Laurencekirk砂岩所得的试验结果, 并应用Griffith理论, 采用内摩擦系数 μ , 建立了常温时在 σ_3 (围压)下强度 σ_1 和无侧限强度 σ_c 之间的关系, 其表达式为

$$\sigma_1 = \sigma_3 \frac{\mu + \sqrt{1 + \mu^2}}{-\mu + \sqrt{1 + \mu^2}} + \sigma_c$$

他们总结了许多人的工作, 得到一系列各种岩石在 σ_3/σ_c 下 μ 值的范围, 再加以推导, 得到下述计算公

式:

$$\sigma_1 = \sigma_c \left[1 + 3.20 \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^{0.70} \right]$$

Sangha & Dhir 试验中的围压范围仍不高, 最大围压为1380巴。

图2为Hoggar 花岗岩在 $\sigma_3 = 22$ 千巴, Westeryly 花岗岩在 $\sigma_3 = 20$ 千巴时的主应力差与 σ_3 的关系图^[6]。

可以看出, $\sigma_1 - \sigma_3$ 随 σ_3 增加的情况在低压时较近似线性增长, 但高压时增长的速度比低压时大大下降。Climax Stock 花岗岩在围压10千巴以下时, 主应力差随围压几乎完全是线性增长。

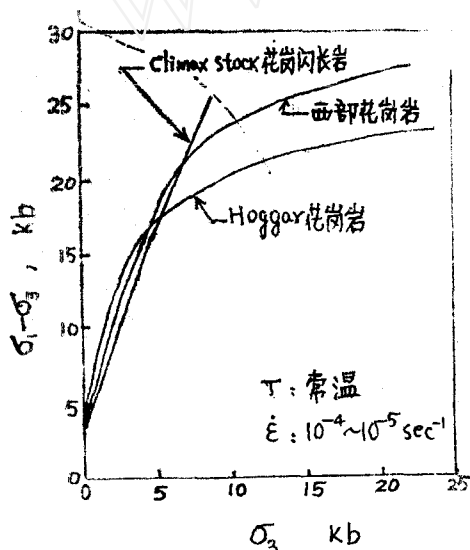


图2. 围压与强度关系图

因此, 似乎可以认为, 当常温时岩石在围压千巴量级以下时, 强度与围压基本上为线性关系, 但更高的围压, 强度随围压增长而增长的速度则愈来愈降低。

当高温时, 强度与围压的关系却有不同的变化。Heard^[7]研究了在 Solenhofen 石灰岩中的这种变化(图3)。由图中可看出, 岩石随围压的增长和温度的增高, 逐渐由原来强度随围压增高而增高的性质, 转变为强度随围压增高而减小的特性。这种性质, Griggs等早在1951年的时候就在Yale 大理石中发现了。但是其机理至今仍不清楚。

2. 围压对岩石应力—应变曲线的影响

岩样轴向加载时, 有围压或无围压, 围压的大小均对其应力—应变曲线有显著的影响。

通常, 在无围压($\sigma_3 = 0$)的单向加载情形中, 岩石的应力—应变曲线基本上是线性的^[2, 5, 8]。即或温度有各种变化, 在破坏前偏离线弹性的变形也是很小的(图4)。这是一种典型的脆性破坏方式。而在有围压时, 则随着围压增长其总变形量增大, 增大的程度依岩石的种类而异。此时岩石逐渐表现出塑性(韧性)。也就是, 随围压增长, 岩石的破坏强度和韧性都提高了(图5)。

在动加载情况下, 围压对 $\sigma - \epsilon$ (应力—应变)关系的影响也是显然的。Brown^[9]等人对 Nugget 砂岩在动加载($\dot{\epsilon} = 0.5 \times 10^3$ /秒)得到的 $\sigma - \epsilon$ 曲线表明, 随围压的增长, 岩石的纵向应变(ϵ_1)和横向应变(ϵ_3)均增加(图6)。

围压的大小会使某些岩石由脆性转变为韧性。最明显的是Solenhofen石灰岩, 许多人研究了这种岩

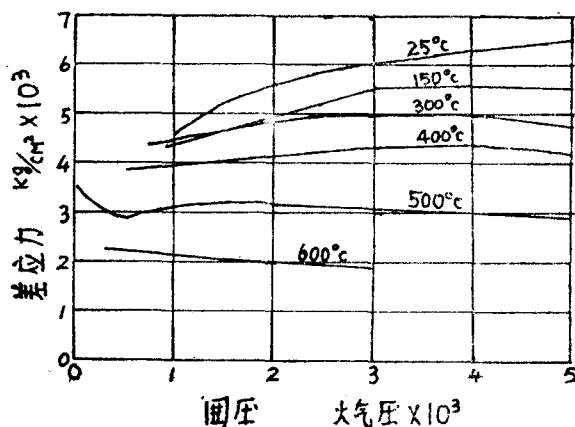


图3. 高温时强度随围压的变化

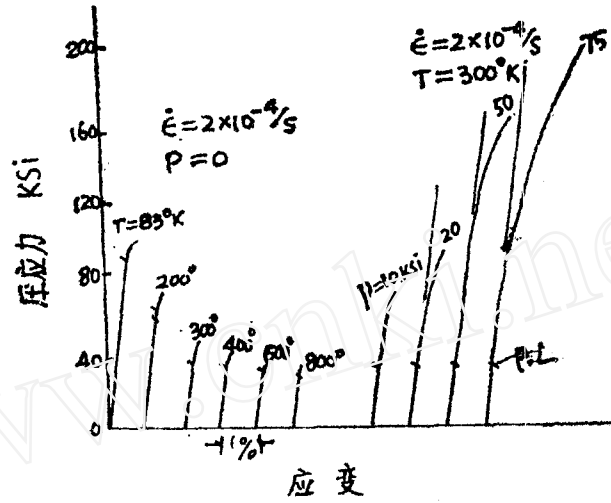


图4. 玄武岩典型应力-应变曲线

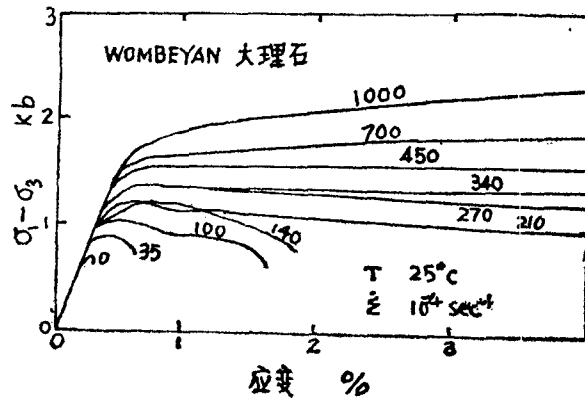


图5. 围压对应力-应变曲线的影响

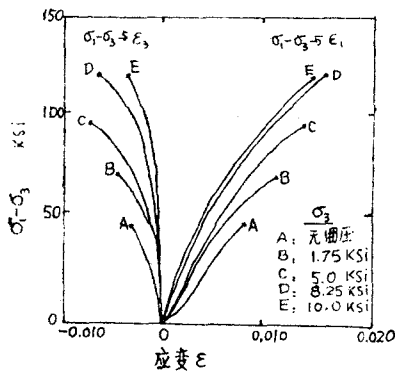


图6. 不同围压下动加载应力-应变曲线 (Nugget砂石)

石, 都证明这种岩石在某一围压下其性质要发生明显的改变(由脆性过渡到韧性)。譬如, Logan & Handin^[10]进行了在围压3000巴 室温、 $\dot{\epsilon} = 10^{-2}$ /秒至10/秒下的许多试验, 发现这种石灰岩大约在1.5千巴围压和 $\dot{\epsilon} = 10$ /秒时, 岩性发生由脆性向韧性的转化。

Heard给出, 当 $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ /秒时, 在围压1千巴时就变为韧性了。

3. 围压对杨氏模量的影响

Lindholm 对坚硬的高强度玄武岩的试验结果(图4)表明, 比例极限并不随围压而变化(斜率亦基本相同)。因此, 围压的大小对杨氏模量没有影响。

Hobbs^[4]对四种煤层岩的试验结果给出,破裂试件的杨氏模量随围压减速率增加,但整体(未破裂)试件,在围压很小时(69巴以下)也存在同样现象,而较大围压(69巴以上)时,模量随围压增大的现象基本没有了。

Logan & Handin^[10]的研究表明,西部花岗岩的弹性模量随围压增加而增加,这种效应在围压3000巴时终止了。

可以分析许多研究者这方面的结果,似乎存在着这样一种情况。即对于破裂岩石或有丰富裂隙的岩石以及孔隙率高的岩石,杨氏模量一般表现为随围压增加而增加,其增加的速率各有不同。然而对于致密的完整的脆性岩石来说,一般围压大小对其杨氏模量无重要影响。对有某种程度裂隙的岩石,在某一尚不能使裂隙完全闭合的压力作用下,杨氏模量表现为随围压增加而增加,但达到某一足以使裂隙完全闭合的压力时,此时杨氏模量随围压的变化便告终止。

二、温度对岩石性质的影响

许多研究者对各种岩石在高温、低温(最高温度达1400°K,最低温度为80°K)时做过不少试验研究工作,结果一致认为,温度对岩石的强度和韧性有重要的影响。总的趋势是,应变率、围压不变时,在高温时随着温度的上升强度愈来愈减小,韧性却有增加,在低温时随着温度的下降强度愈来愈增加,而韧性却减小。但是,岩石在高温温度场情况下,应变率对岩石强度影响的灵敏性却比常温温度场情况下大为显著。也就是说,岩石在高温时与常温时相比,在应变率增加同样量级时,虽然岩石的强度值低了,但强度增加的比值,高温时却比常温时要高许多。如大理石在围压5千巴,常温的情况下比在围压5千巴,500℃情况下的强度要高许多,但应变率同样增加10³量级时,高温时大理石强度增加的比值,却比常温时增加的比值要高许多(常温为5%,高温为42%)。又如石英在900℃,围压8千巴时,ε同样增加10³量级时其强度增加的比值为250%(图9)。

岩石存在着一个熔点温度,在这个温度时,使岩石破坏的应力为零或被接近于零。如玄武岩的熔点温度近似1400°K。当温度T=0°K时,还存在着一个使岩石破坏的最大应力。这个强度值σ(0)不是由试验得来的,一般由低温试验外推(图7)。通常认为,在0°K时曲线汇集于一个共同点。这种情况,可能像Kumar^[11]建议的裂纹成核和扩展的热效应机理,即在0°K时,热的变化不再对其过程和最大应力有所帮助,也不再应变率的灵敏性。但也有人

不同意将绝对零度时的曲线交于一个共同点,认为应是曲线的自然延伸。持这种看法的人认为,裂纹成核和扩展只是比较弱的与热效应有关,或者说不完全取决于热。这种情况,就可能像Scholz建议的,是一种应力腐蚀或静疲劳的反应速度的模型,即取决于时间和作用的应力,而只是较弱的与温度有关。

温度对岩石应力—应变曲线的影响也是明显的, Heard^[12]的试验指出,在同样围压为5千巴、25℃时的σ—ε曲线,比400℃、500℃时的σ—ε曲线有较弱的应变硬化现象出现。而且,应变率愈低,温度愈高应变硬化愈小甚至没有。

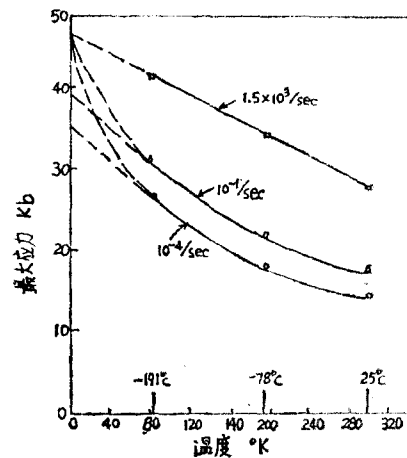


图7. 应力—温度曲线

三、应变率对岩石性质的影响

1. 应变率对岩石强度的影响

应变率对岩石强度性质的影响,许多人做过各种各样的研究工作,其中包括低应变速率的所谓静力试验($\dot{\epsilon} = 10^{-2}$ /秒以下)、中等应变速率的所谓准动态试验($\dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 10^2$ /秒)和高应变速率的所谓动态试验($\dot{\epsilon} = 10^3$ /秒以上)。目前,最高应变率试验是由冲击试验得到的(如轻气炮等),在岩石中已做到应变率为10⁷/秒,最低应变率试验是用常规静力试验机(如三轴仪),在岩石中已做到10⁻⁸/秒。

研究表明,应变率增高,岩石的破坏强度随之增高。

Nugget 砂岩在单轴(无围压)压缩时,岩石在高、中、低三种应变率情况下的强度如图8所示,其结果正好在一条直线上。当应变率增加一个量级时,

强度的增长率为2.5%。这一破坏应力增加的比值与其他研究者如Brace^[3]，对石灰岩的研究结果是基本一致的。

Brace和Junes^[3]汇集了许多研究者在各种应变率时的结果(图9)。总起来说，应变率增加 10^3 时，对硅酸盐类岩石的强度增加10%，Solenhofen 石灰岩的强度增加18%，总的平均增加量约为 $15 \pm 5\%$ 。然而Heard和Corter^[13]的结果却与此不同，他们在方解石，大理石中，当 $\dot{\epsilon}$ 增加 10^3 时，得到的强度

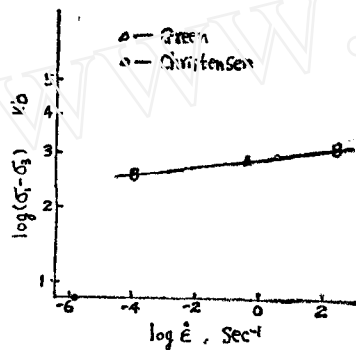


图8: 强度与应变率的关系

增加5%，碳酸盐和硅酸盐类岩石当温度由 500°C 至 300°C 时，破坏强度增加40—250%。

Christensen^[11]对Nugget砂岩在各种围压下所做的试验表明，高应变率的强度比低应变率的强度(即动态与静态)为高，在 $\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} \times 10^3$ /秒时的强度比 $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ /秒时的强度要高15—20%。

Kumer^[15]得到当应力率增加时，玄武岩及花岗岩压缩强度的增加值。当应力率由 2×10^9 磅/平方英寸·秒增加至 3×10^{10} 磅/平方英寸·秒时，玄武岩的强度增长2.15倍，花岗岩的强度增长2.4倍。

Logan & Handin^[10]对花岗岩所做 $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \sim 1$ /秒的试验结果给出，当 $\dot{\epsilon}$ 增大100倍时，强度增大20%。

为什么应变率增加而岩石的破坏应力增加呢？

通常认为，金属中应变率对流动应力和破坏应力的影响，是由金属的位错运动引起的。应变率的影响被认为是由于具有热效应的位错运动。即应变率的变化与热的变化对金属位错运动的机理是一致的。

Kumar根据Schardin在非晶玻璃中破坏应力与裂纹速度关系的研究，提出了一个模型，用以解释岩石等脆性材料破坏强度随应变率增加而增加的机理。按照Schardin的研究，发现在初始阶段裂纹扩展速

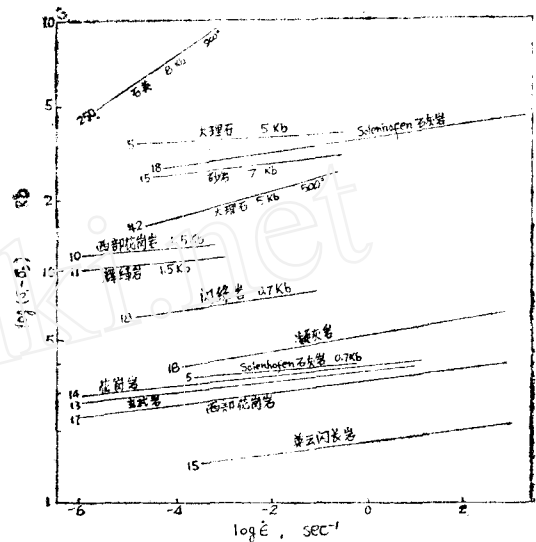


图9: 应变率与强度关系图
(直线左端的数字,表示 $\dot{\epsilon}$ 增加 10^3 时强度增加的百分比)

度是应力的函数。只是在某一时间间隔之后，裂纹扩展速度达到最大值时才与应力无关。因此，他把非金属材料的破坏应力看成是，把大量的裂纹核扩展并连通的应力。而且应变率是破坏应力的函数。Kumar由此假定，破坏应力之应变率的灵敏性，决定于应力的微裂纹扩展速度和微裂纹的数目：

$$\dot{\epsilon} = K \cdot N(\sigma) \cdot C \cdot V_c(\sigma)$$

其中 K——裂纹方向的常数

N——裂纹的数目

C——裂纹平均长度

V_c ——裂纹传播速度

N和 V_c 是应力的函数。应变率的增加可以引起微裂纹数目的增加或传播速度的增加，而这二者的增加，势必都需要更高的应力。这样就解释了由于应变率的增加而破坏应力增加的原因。

另外，许多人的研究(如Green & Perkins, 1969, Kumer, 1968; Perkins等, 1970)发现，岩石强度与应变率的关系在 10^3 /秒时有一个“飞跃”的变化。在 $\dot{\epsilon} = 10^3$ /秒以前，破坏应力随应变率的增长甚缓，到达此应变后， σ_1 随 $\dot{\epsilon}$ 的增长突然变得非常急剧。

有意思的是这种性质并不随温度改变而改变。Perkins等^[14]研究了英云闪长岩(tonalite)在常温和低温时应力与应变率的关系(图10)。由图中可看出，各种温度时均在 $\dot{\epsilon} = 10^3$ /秒处产生突变，即这时应变率有尖锐的灵敏性。

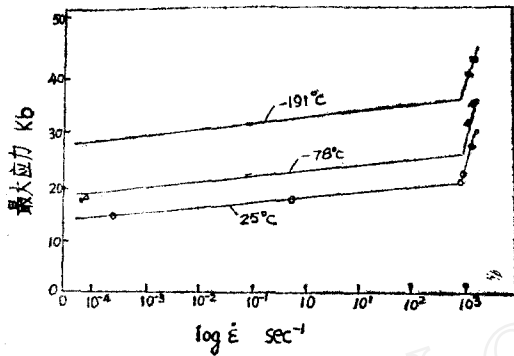


图10. 不同温度时应变率与最大应力关系图

一种可能的解释是, 岩石这种材料在应变率达到 10^8 /秒时, 在如此瞬间的快速加载情况下, 惯性力效应更加显著, 其裂纹成核和扩展来不及反映, 于是其强度值产生一个“飞跃”。

应变率的变化, 不仅对岩石的强度有重要影响, 同时对岩石的韧性亦有重要影响。通常, 应变率减小, 岩石的破坏强度降低, 而韧性却增加, 反之, 若应变率增加, 岩石的破坏强度增高, 而韧性却降低。图11为Euraka石英岩在围压 $\sigma_3 = 5$ 千巴, 温度 $T = 500^\circ\text{C}$ 时不同应变率的应力—应变曲线 [16]。可以看出, 当应变率变化时, 强度和韧性的变化情况。

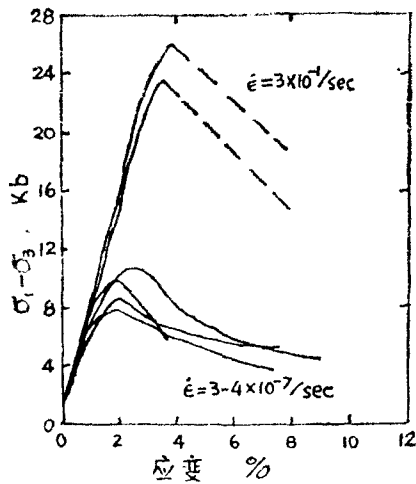


图11: 应变率变化时的 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon$ 曲线

2. 应变率对应力—应变关系的影响

岩石加载时应变率(动加载与静加载)对应力—应变曲线的影响, 许多人进行过研究。动态与静态应

力—应变曲线的比较, 一般可分为三类, 即动—静曲线基本一致, 不一致和低应力时一致高应力时不一致。

对于致密而强度高的完整岩石, 动态与静态的应力—应变曲线有可能基本一致。这主要是岩石中基本矿物的原子本身所固有的弹性行为所反映。在有的研究者的观察中, 给出加载率或应变率对弹性模量没有影响, 也证明了这种一致性。

对于孔隙率较高和易碎的岩石, 或者说存在有碎裂(Cataclasis)破坏机制的岩石(碎裂包括微细颗粒的破裂、颗粒的转动与滑动), 它很可能从一开始就产生永久变形, 而且有应变率的灵敏性。这种岩石的动—静应力—应变曲线常常是完全不一致的。动态曲线的陡度比静态曲线越来越高, 这主要是由于岩石在高应变率时的劲度(Stiffness)提高了。

对于具有普通孔隙率的岩石, 往往是低应力时动—静的应力—应变曲线基本接近(应变率效应不明显), 而在高应力时应变率的效应便愈加显著。这种情况的解释, 为前二类情况的结合。

3. 应变率与弹性模量的关系

应变率与弹性模量的关系, 有不同的结果。但多数研究者的结果认为, 随应变率的增高弹性模量提高了。

譬如, Fridman, Perkins & Green [15] 的研究表明, 西部花岗岩和Solenhofen石灰岩的弹性模量随应变率增加而增加。Green & Perkins, 1969; Perkins等, 1970; Logan & Handin [10] 的试验也证实, 花岗岩、凝灰岩和英云闪长岩在一个大气压时表明, 应变率对弹性模量有显著的影响, 模量随应变率增加。King [16] 对Boise砂岩在有围压下的动态和静态试验表明, 在围压由0—600磅/平方英寸时动态(高应变率)的杨氏模量比静态(低应变率)的杨氏模量都要高, 且随围压增高而增高。但动态杨氏模量与静态杨氏模量之比($E_{动}/E_{静}$)则随围压的增高而渐渐减小, 这种情况是由于岩石中存在的各向不规则的裂隙, 随围压的增加而使其逐渐闭合而引起。

Brace & Jones [8] 在花岗岩和石灰岩中的试验看到, 弹性模量与应变率无关(冲击与静力加载曲线在弹性阶段是一致的)。

弹性模量是否随应变率增高与岩石的种类(孔隙率、粒径、矿物成分等)和裂隙情况有关系。因为裂纹的摩擦滑动、生长与扩展, 均与应变率有关, 而裂纹的存在与弹性模量又是直接有关的。

4. 应变率对岩石剪胀性的影响

当岩石中应力超过破坏应力的一半或 $\frac{1}{3}$ 至 $\frac{1}{4}$ 时, 岩石的容积或体积要出现增加的现象, 这种效应, 称之为剪胀性。通常认为, 剪胀性是微裂隙的产生和颗粒间的滑移相连的。

Christensen^[11]对Nugget砂岩静态 ($\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ /秒)和动态 ($\dot{\epsilon} = 10^3$ /秒), 有围压与无围压条件下所得到的剪胀曲线说明, 当 $\dot{\epsilon}$ 由 10^{-4} /秒变到 10^3 /秒时, 对剪胀现象无重大影响, 即动、静剪胀曲线在定性方面是基本一致的。这一结果说明, 就剪胀性而言, 加载速率(或应变率)对微结构机理无重要影响。并由此推测, 在较高加载率时, 可能对剪胀性有所抑制。不过, 因为没有试验资料, 尚不能证实这一点。

Perkins等^[14]对英云闪长岩所做的结果给出, 当单向压缩试验时, 剪胀现象是在最大应力达到50%以前就开始了, 而不管其应变率如何。

四、考虑应变率、温度、围压对岩石性状的综合影响

岩石中考虑应变率、温度、围压进行综合分析的工作尚不多。特别是在有高应变率(动态)条件下的研究工作进行得更少。其主要原因是实验技术上的困难。但是, 若要彻底解决岩石的本构关系、破坏准则和模型等关键问题, 必须进行动、静加载条件下有围压、温度的一系列综合试验研究工作, 以弄清内在的各种变化规律。

岩石在围压、温度、应变率的共同作用下, 其力学性状随各参量的变化而有不同。Heard^[71]研究了在这种共同作用下岩石的性质, 认为根据岩石破坏前的永久变形量和 σ - $\dot{\epsilon}$ 曲线的形状, 可以将岩石性质分为脆性, 过渡和韧性三种。图12根据Solenhofen石灰岩在不同围压、温度、应变率下的试验结果对岩石脆性, 韧性范围的描述。可以看出, 能够任意调整这些参数, 而使岩石的脆性破坏达到增强或抑制。

Serdengecti和Boozer^[18]在1961年发表的文章中, 报导了砂岩、石灰岩和辉长岩在温度为150℃、围压1.4千巴、 $\dot{\epsilon} = 10^{-5}$ /秒至1/秒条件下所做的试验研究工作。他证明了应变率与温度的等效性(即应变率的增加与温度的降低对强度的影响是等同的)。他采用了Zener-Holoman参数与此建立了关系,

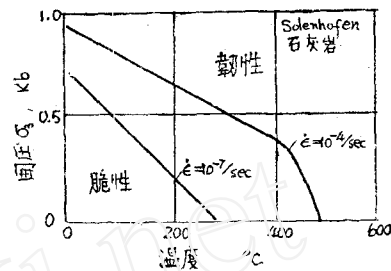


图12. 以 σ_3 , T , $\dot{\epsilon}$ 为函数的岩石的脆性~韧性转化图

其参数的形式为

$$Z = \dot{\epsilon} \exp\left(\frac{U}{RT}\right)$$

其中 U —激活能
 R —气体常数
 T —温度(°K)

1963年, Heard^[111]研究了应变率从 3×10^{-8} /秒到 4×10^{-1} /秒, $\sigma_3 = 5$ 千巴, $T = 500^\circ\text{C}$ 时 Yule 大理石的应变率、强度、温度间的关系。他发现, 在 25°C (常温)时强度随应变率的减小而略有减小, 但 500°C 时, 从最快(4×10^{-1} /秒)到最慢(3×10^{-8} /秒)的试验, 在应变变化10%时, 应力减小80%。Heard的资料, 提出了一个Eyring方程的经验修正公式:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \left\{ \exp\left(-\frac{U}{kT}\right) \right\} \text{Sinh}\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)$$

其中 $\dot{\epsilon}_0$, σ_0 —常数(具有应变率和应力的量纲)

k —波耳兹曼常数

$\dot{\epsilon}$ 、 U 、 T 、 σ —与前同

根据他对大理石的试验, 取得各种试验曲线, 从而得到式中的参数值为

$$\dot{\epsilon}_0 = 1.6 \times 10^7 / \text{秒}$$

$$U = 56,000 \text{ 卡/克分子}$$

$$\sigma_0 = 0.145 \text{ 千磅/平方英寸}$$

1968年, Kumer^[110]研究了花岗岩和玄武岩的应力率和温度的综合效应。 $T = 77^\circ\text{K} - 300^\circ\text{K}$, $\dot{\sigma} = 2 \times 10^{10} / \text{秒} \sim 3 \times 10^{10} / \text{秒}$ 。研究结果表明, 增加应力率的强度效应是与降低温度产生的效应等同的。因此认为, 岩石的破坏机理是有热激活(thermally activation)效应的。热效应机理可以用金属中所用的Arrhenius方程来描述:

$$\dot{\epsilon} = f \exp - \left(\frac{U}{kT} \right), U \equiv U(\sigma, \epsilon, T)$$

其中 f —— 频率因子

其余同前

根据试验资料和图形, 算得 当 $\sigma = 50$ 千磅/平方英寸时, $U_{\text{玄武岩}} = 450$ 卡/克分子, $U_{\text{花岗岩}} = 340$ 卡/克分子。

1972年, Lindholm研究了Dresser 玄武岩在围压 (0—7千巴), 温度 (80—800°K), 应变率 (10^{-4} — 10^4 /秒) 条件下的综合效应。由试验得到一个经验公式, 以描述温度、应变率与破坏应力的关系, 其式为

$$\sigma_f = \sigma(0) - \beta T \log \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0}$$

其中 σ_f —— 破坏应力

$\sigma(0)$ 、 β 、 ϵ_0 —— 常数

其余与前同

1974年, Lindholm^[2]进一步对 Dresser 玄武岩在 $T = 80^\circ - 1400^\circ K$, $\sigma^3 = 0 - 7000$ 巴, $\dot{\epsilon} = 10^{-4}$ 秒 $^{-1}$ — 10^8 秒 $^{-1}$ 情况下做了研究。再次表明岩石的破坏强度与温度和应变率有重要的关系。认为岩石的破坏是由热激活过程 (thermal activation process) 所支配。他导得了温度、应变率与应力之间的关系式, 并由此进一步推导了三向应力状态下的岩石破坏准则。他根据 Arrhenius 速率方程并考虑温度和应变率的综合影响推导出来的。

Arrhenius 的速率方程为

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0 \exp - \left(\frac{U(\sigma)}{RT} \right) \dots \dots \dots (1)$$

其中 $U(\sigma)$ —— 激活能, 是有效应力的函数

$\dot{\epsilon}_0$ —— 具有应变率量纲的常数 (表示极限应变率, 与温度无关)

ϵ_0 、 R 、 T —— 同前

从试验资料得出, σ 与 $U(\sigma)$ 的关系是线性的, 且有:

$$U(\sigma) \approx U_0 - v (\sigma - \sigma_0) \dots \dots \dots (2)$$

其中 U_0 —— 过程的总激活能

v —— 具有容积量纲的系数, 常称激活容积

σ —— 施加的应力

σ_0 —— 常数

$(\sigma - \sigma_0)$ —— 有效应力

将 (2) 代入 (1), 整理后得:

$$\sigma = \frac{U_0}{v} + \sigma_0 - \frac{RT}{v} \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\epsilon_0} \dots \dots \dots (3)$$

上式中, 当 $T = 0$ 或 $\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_0$ 时, $\frac{U_0}{v} + \sigma_0$ 是极限应力。

由上式可看出, 破坏应力随温度直线减小, 随应变率的对数直线增加。这样, 就建立了温度、应变率和应力之间的关系。

五、结 论

由上所述, 可以看出, 岩石的力学效应随围压、温度、应变率的改变而有不同的变化。

1. 常温时, 围压愈大, 岩石的静强度和动强度都增高。但在高温时, 逐渐随围压的增长岩石的强度却有所降低。围压愈大, 岩石就会由脆性逐渐转变为塑性 (韧性或延性)。围压对杨氏模量的影响则随岩石的裂隙和孔隙率而异, 对于有丰富裂隙或高孔隙率的岩石, 杨氏模量一般表现为随围压增加而增加, 但当施加的围压足以使裂隙完全闭合时, 这种现象即为终止, 对于致密的完整的脆性岩石, 通常围压对杨氏模量无重要影响。

2. 应变率一定, 高温时, 随着温度的增高, 岩石的强度愈来愈降低, 在低温时, 随着温度的下降, 岩石强度愈来愈增加。在常温时岩石为脆性, 而在高温时可能变为塑性甚至流动, 在低温时应变硬化现象愈加明显。

3. 应变率增高, 岩石的破坏强度增高, 韧性降低。在 $\dot{\epsilon} = 10^8$ 秒 $^{-1}$ 时, 其强度与应变率的关系有一个“飞跃”的变化。在此之前, 破坏应力随应变率的增长甚缓, 到达此应变率后, 破坏应力随应变率的变化突然增长异常急剧。这主要是由于岩石这种材料在这个应变率时的惯性力变得显著了。

应变率对岩石应力—应变曲线的影响, 随岩石种类而异。基本上可分为动—静曲线基本一致、不一致和低应力时一致高应力时不一致三种。

弹性模量通常随应变率增高而增高。

应变率的改变 (由 10^{-4} 秒 $^{-1}$ — 10^8 秒 $^{-1}$) 对岩石的剪胀现象无重大影响。由此可以推测, 在更高加载率时, 可能对剪胀性有所抑制。

4. 应变率的增高与温度的降低对岩石的力学效应已经证明是等同的。因此, 可以借鉴金属中熟知的 Eyring 方程或 Arrhenius 的速率方程并结合岩石的实际试验数据给以某些修正, 来描述应力、温度、应

变率之间的关系。

5. 岩石在不同围压、温度、应变率下的力学效应的研究, 虽进行了不少研究工作, 但仍很不够。欲要建立岩石的本构关系, 弄清破坏机理和建立正确的模型, 还必须深入细致地从理论上、实验上做更多的工作。特别是要开展在高应变率, 高围压、高(低)温综合效应下的试验研究工作。

参 考 文 献

- [1] Christensen, R. J., Swanson, S. R., Brown, S. W., *Exper. Mech.*, 12, 11 (1972), 508—513.
- [2] Lindholm, U. S., Yeakley, L. M., Vagy, A., *Int. J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 11, 5 (1974), 181—191.
- [3] Brace, W. F., Jones, A. H., *J. Geophysical Research*, 70, 20, (1971) 4913—4921.
- [4] Hobbs, D. W., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7, 2 (1970) 125—148.
- [5] Sangha, C. M. & Dhir, R. K., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 12, 9 (1975) 277—282.
- [6] Schock, R. N., Abey, A. E., Heard, H. C., Louis, H., UCRL—51296 (1972).
- [7] Heard, H. C., «Rock Deformation», Edited by Griggs & Handin, *Geol. Soc. Amer.*, Memoir 79 (1960), 193—226.
- [8] Lindholm, U. S., AD 736645 (1972).
- [9] Brown, W. S., Swanson, S. R., Wawersik, W. R., AD 734029 (1971).
- [10] Logan, J. M., Handin, J., *Dynamic Rock Mechanics Twelfth Symposium on Rock Mechanics (1970)*, 167—194.
- [11] Kumar, A., *Geophysics*, 33, 3 (1968), 505—513.
- [12] Heard, H. C., *J. of Geology*, 71, 2 (1963), 162—195.
- [13] Heard, H. C. & Carter, N. L., *Amer. J. Sci.*, 266 (January 1968), 1—42.
- [14] Perkins, R. D., Green, S. J., Fridman, M., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7 (1970), 507—535.
- [15] Fridman, M., Perkins, R. D., Green, S. J., *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 7, 3 (1970), 297—306.
- [16] King, M. S., *Rock Mechanics—Theory and Practice*, Edited by W. H. Somerton (1970), 329—352.
- [17] Heard, H. C., *Failure and Breakage of Rock*, 8th Symp. on Rock Mechanics (1966), 82—93.
- [18] Serdengecti, S. & Boozer G. D., *Fourth Symposium on Rock Mechanics (1961)*, 83.