



用8000KN多功能三轴仪测量脆性 岩石的扩容、蠕变及松弛*

陈宗基、石泽全、于智海、伍向阳

(中国科学院地球物理研究所 北京 100083)

提 要

本文提出了系统研究岩石在脆性范围内的扩容、蠕变及松弛性状的初步报告。

文中全面地描述了新型的8000KN伺服控制的多功能三轴仪。在常应变率为 $5 \times 10^{-5}/\text{sec}$ ，对四组16个房山花岗岩和济南辉长岩试件进行了从100MPa到400MPa的各种围压和从25°到250°C的各种温度的试验。根据以前提出的蠕变扩容本构方程(陈、康, 1980, 1983)，介绍了一种确定扩容参数 n 、 D^* 和 C 的新方法。试验结果表明扩容随着温度的增加而增加，随着围压的增加而受到抑制。

为了进一步研究在线性和扩容阶段与时间有关的变形，进行了蠕变和松弛实验。在围压和温度分别为100和200MPa，7°C和200°C的条件下，采用梯级加载对房山花岗岩进行了二个蠕变试验。用这种方法还能从一个试件获得蠕变和扩容依赖于偏应力和时间的关系。最后，在围压分别为100MPa和200MPa，和温度分别为7°C和200°C的条件下，采用随时间变化的梯级应变，对花岗岩进行了二个松弛试验。从所得的应力—应变关系中确定出蠕变和松弛在扩容开始时的临界值 t^* 。文中还分析了与时间有关的扩容过程，并指出它与裂纹的增长、接合和产生，而导致的结构变化有关。

引 言

为了更好地了解象地壳构造、地震成因等地壳运动过程，需要深刻认识岩石在脆性范围内，各种不同应力和温度条件下的流变性状。本文对扩容现象将提出系统的研究。扩容是由于偏应力效应引起的体积增加，这是象火成岩，沉积岩以及砂、粘土、混凝

土、铸铁等粒状的和多晶体的材料的一种普遍性质,扩容现象最早是由Reynolds(1885)在湿砂中观测到的,之后,在土力学中也研究了扩容,但未曾得到应有的重视,在这种粒状的聚合物中,扩容通常是由于颗粒之间的相对运动而改变了颗粒的集聚而产生的,这种过程会伴随着大变形和强度的降低,因而不稳定,因此,土壤工程师们必须避免这些接近破坏阶段。

Bridgman (1949)通过对滑石、大理岩和辉绿岩的压缩试验,首先观测到在破裂之前非弹性的体积增加,在沉积岩和花岗岩(Handin等1963)中也观察到扩容,Matsushima (1960)证明了增加围压会降低扩容量,而弹性性状的范围则增加,Brace, Paulding和Scholz (1966)在高围压情况下,做了更系统的研究,阐明了在宏观破裂之前出现微观裂纹的过程。

以下的研究结果对我们的研究是重要的。

1. 人们已经广泛地接受,岩石受压缩时,在脆性范围的应力应变性状可分成四个阶段(例如Paterson 1978, John 1974)。

(1) 应力应变关系的上凹;它是由于存在的原生裂纹的闭合产生的,这个阶段,在高围压情况下,对坚硬的岩石是可以忽略的,例如我们的房山花岗岩和济南辉长岩试件。

(2) 近于完全的线弹性,没有时间效应。

(3) 伴随着微裂纹的稳态扩展的微破裂和扩容的发展。

(4) 导致产生宏观破裂的微裂纹的不稳定扩展,在第(4)阶段的这些发展主要因为材料是非均匀的,而且不再看作是连续体了,它被破坏成碎块,这些碎块的破裂和相对运动导致出现大的永久性应变(碎裂流动)。

上述结论都是根据在常应变率、室温条件下的试验获得的。

2. Matsushima (1960)在花岗岩的压缩蠕变试验中观察到扩容随时间而增加,他还发现:随着应力的增加,侧向蠕变速率比纵向蠕变的速率增加得快得多,他认为这是开裂的结果,Gramberg (1970)也曾发现了这种性质,Scholz (1968)从Westerly花岗岩的单轴蠕变试验得出:扩容可能是微裂纹随时间开裂的结果,Wu和Thomsen (1975)从Westerly花岗岩的单轴蠕变试验中发现:在开始阶段,体积应变是负的(压缩),但是经过一段时间之后又变为正的,类似的趋势也可以在脆性的Ophir页岩,当其围压为500Psi的三轴试验中观察到(Cogan 1976),Brace, Paulding和Scholz (1966)发现:减小加载或应变速率能够降低扩容开始时的临界应力 C' ,并且在一定的垂直应变下会得到较大的扩容,应力 C' 按照陈(1953),Geuze和陈(1953),陈、康(1980),陈(1988)以前的论文,称之为临界应力或屈服应力 f^* ,他们在粘土、黄土和岩石中也发现了这种应力。

3. 上述的所有试验都是在室温条件下进行的,人们通常研究温度作用是与脆性——延性的转变有关的,Tullis和Yund (1977)发现干的花岗岩在温度 500°C 、围压1500MPa状态下,表现出延性,Wong (1982)研究了Westerly花岗岩破坏和破坏后的性状,Hadley (1975)在一篇摘要中报导:对San Marcos辉长岩,当温度提高到 400°C ,扩容量增加,而临界应力 f^* 则突然降低,就我们所知,温度对扩容的影响还很少为人们所了解。

4. 现在人们已经普遍接受了扩容、声发射均与微破裂直接有关的观点，因此与时间有关的扩容是微裂纹随时间开裂的结果。在蠕变试验中也监测到了声发射 (Byerlee and Locker 1976, Lockner和Byerlee 1977)；他们发现蠕变的应变与能量的积聚之间有密切的关系，有趣的是在线性范围内也出现了声发射，这表明必然发生了应变能的突然释放，即在纯理论意义上，线性范围并不是弹性的，这一系列应变能的突然释放，也可以用不同的方法在与时间有关的变形中监测到，的确，在应力 $(\sigma_1 - \sigma_3) < f_3$ 的线性范围内的蠕变，在砂岩中也已量测到 (陈、康1980)，因此，我们将进行蠕变和松弛试验来研究在线性和非线性阶段的时间效应。

岩石扩容的现象潜在着很大的实际意义，人们被扩容对浅层地震的力学机制起着重要作用的假设所激励已经作了许多实验室研究 (Nur 1972, Scholz, Sykes and Aggarwal 1973)，实际上，海城地震之前的地壳隆起；唐山地震 (1976) 发生以前三年，在唐山外围半径100公里就有电阻率在逐渐减小和许多深井水位在逐渐下降等，这都是破坏之前与时间有关的扩容现象的明显证明 (陈、康1983)，然而扩容的时间效应至今还没有充分地研究。

这些基础的研究，对进一步理解岩石力学中的复杂问题也是很有帮助的，所以在隧洞洞室周围形成的裂纹松动区就是由于扩容引起的结果，它能导致隧洞的不稳定 (陈1987)，基于扩容直接与声发射有关的概念，作者 (1986) 曾利用本文的方程 (2)、(3)、(4)、(5) 和 (6) 对天生桥隧洞进行了数值反分析，试图求出声发射区，所得结果与现场实测基本一致。

因此，对岩石在脆性范围内的流变性质的基本试验和理论研究，尤其要注意在不同的应力和温度条件下扩容随时间的过程，不仅对我们研究地震成因、地壳动力学和演变是根本的，而且在岩石、煤炭和石油工程中也具有很广泛的应用价值。

为此目的，北京中国科学院地球物理所最近建成了一座为研究岩石在地壳条件下的高温高压实验室，已设计和制造了二种类型的仪器设备：

1. 围压可达1000MPa，温度可达 $T < 600^\circ\text{C}$ 的多功能三轴流变仪 (大体积实验)。
2. 围压可达100MPa， $T < 400^\circ\text{C}$ ，研究岩石力学的长期蠕变仪。

此外，为了研究地壳和上地幔条件下的岩石，已制造了一台围压可达3500MPa，温度 $T < 1500^\circ\text{C}$ 的修改Grigg的仪器，用于常应变率和松弛试验。

本文全面地介绍了第一台仪器，并报导了第一批在不同围压和温度下进行的常应变率、蠕变和松弛的试验结果，我们的目的是研究瞬时的应力应变性状，并特别注意随时间变形的扩容。

我们尤其打算研究以下内容：

1. 在线性范围内的粘弹性性状；Boltzmann迭加原理的有效性。
2. 扩容开始时的临界值 f^* 和破坏强度 σ_F 作为围压和温度的函数。
3. 扩容阶段的非线性性状和用一组现象方程对其描述，并确定其扩容状态参数 (扩容参数 n , D^* , C 将在后面确定)。
4. 破坏前在扩容状态下与时间有关的变形。

多功能三轴仪

此仪器大体上是由一个带有活塞 (B) 的圆柱形三轴室 (A) 组成, 通过硅油施加围压, 用一个8000KN的液压千斤顶 (C) 推动活塞 (图1)

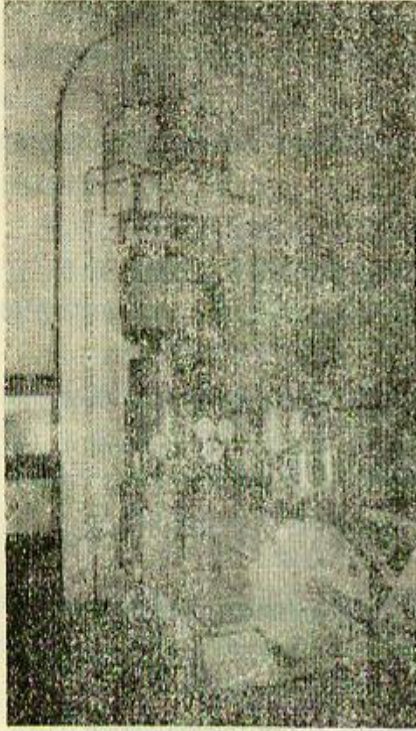


图1 多功能三轴仪

Fig.1 Multipurpose Triaxial Apparatus
(A)三轴室;(B)活塞;(C)8000KN伺服控制的
液压千斤顶;(D)伺服控制的压力增压器;
(E)载荷压力室;(F)线性传感器。
(A) cell;(B)piston;(C)8000 KN servo-
controlled hydraulic jack;(D) servo-
controlled Pressure intensifier;
(E) load-cell;(F) linear transducer.

部, 穿透颗粒状的裂纹 (Transgranular Cracks) 均贯穿各种矿物的颗粒。

试件在80~100°C烘箱中烘干8小时, 然后套上0.2mm厚的薄铜套, 为了使铜套紧贴试件, 将套好的试件施加 $\sigma_1 = \sigma_3 = 50\text{MPa}$ 的压力, 最后, 将试件放置在三轴室中的试验位置, 对高温试验则以4°C/min的速率加热, 当热电偶显示出所需的温度60分钟后, 开始试验。

步 骤

我们曾进行过以下三类试验:

1. 在常应变率 $5 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ 的试验;

借助于压力增压器 (D) 增大围压, 千斤顶和增压器都由伺服元件控制, 它们可以单独操作, 或者当同步地联接时主同操作, 利用载荷压力室 (E) 和线性传感器 (F) 测量垂直载荷和位移, (E) 和 (F) 也可为自动控制提供反馈信息, 仪器能够人工或自动操作, 压力增加器 (D) 的活塞与位移传感器连接在一起给伺服系统提供反馈信息, 各项规格列于表1。

压力室装有内热炉、内部测力计以及为测量试件的垂直和侧向变形的内部测量计。

岩料和试件制备

试验的岩石试件采用了房山花岗岩和济南辉长岩, 它们的矿物成份如下:

房山花岗岩: 石英20%; 长石65%; 角闪石15%; 白云母10%; 粒径0.2~1.3mm; 含水量0.2%。

济南辉长岩: 斜长石50%; 辉石40%; 橄榄石5%; 角闪石3%; 白云母2%; 粒径0.05~0.1mm; 含水量0.1%。

用光学显微镜观察花岗岩和辉长岩薄片表明: 裂纹是沿颗粒的边界或在颗粒的内

表 1. 多功能流变三轴仪技术指标
(大体积实验)

Tab 1. Technical data Multipurpose Rheological Triaxial Apparatus
(large volume experimentation)

项 目	技 术 指 标
最大载荷	8000 KN
最大围压	800MPa (长期) 1060MPa (短期)
最高温度	400°C (长期) 600°C (短期)
应 变 率	可以连续增加应变达到 $10^{-3} \sim 10^{-6} \text{sec}^{-1}$
活塞行程	20 mm
附 度	18600KN/mm
试件尺寸	直径40 mm 高度 80~100mm
压 力 室	内径 100mm 外径 590mm 高度 880mm
试 验 方 法	A. 常应变率 B. 蠕 变 C. 松 弛 D. 注意连续加载序列

2. 蠕变试验;

3. 松弛试验.

在常应变率 $5 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$ 的试验

这类的试验目的是要研究: (a)、温度 T 和围压 σ_3 对应力—应变特性的影响; (b)、由于空隙和裂纹的形成和开裂引起的附加的体积为正值的扩容起始值 f^* ; (c)、破坏应力 σ_F , 即在逐渐或突然应力下降使试件破坏之前, 应力差达到的最大值.

在我们首次试验中, 应变率只在 $5 \times 10^{-5} \text{sec}^{-1}$ 进行试验. Brace和Martin (1968)的试验表明: 在室温条件下, 应变率变化三个数量级, Westerly花岗岩的破裂强度大约变化10%. Wong (1982)得出结论: 在温度大约达到600°C时, Westerly花岗岩破坏应力的应变率敏感性不很明显地依赖于温度. 因此我们可以推测: 在应变率为 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 的范围内, 我们采用的花岗岩和辉长岩的断裂强度受应变率的影响很小.

实验结果

为了确定花岗岩和辉长岩的应力—应变关系，屈服值 f^* 和破坏强度依赖于围压 σ_3 和温度 T 的关系，我们进行了四组16个试件的试验：

花岗岩：

第 I 组：3 个试件； $\sigma_3=100\text{MPa}$ ； $T=25^\circ, 100^\circ, 200^\circ\text{C}$

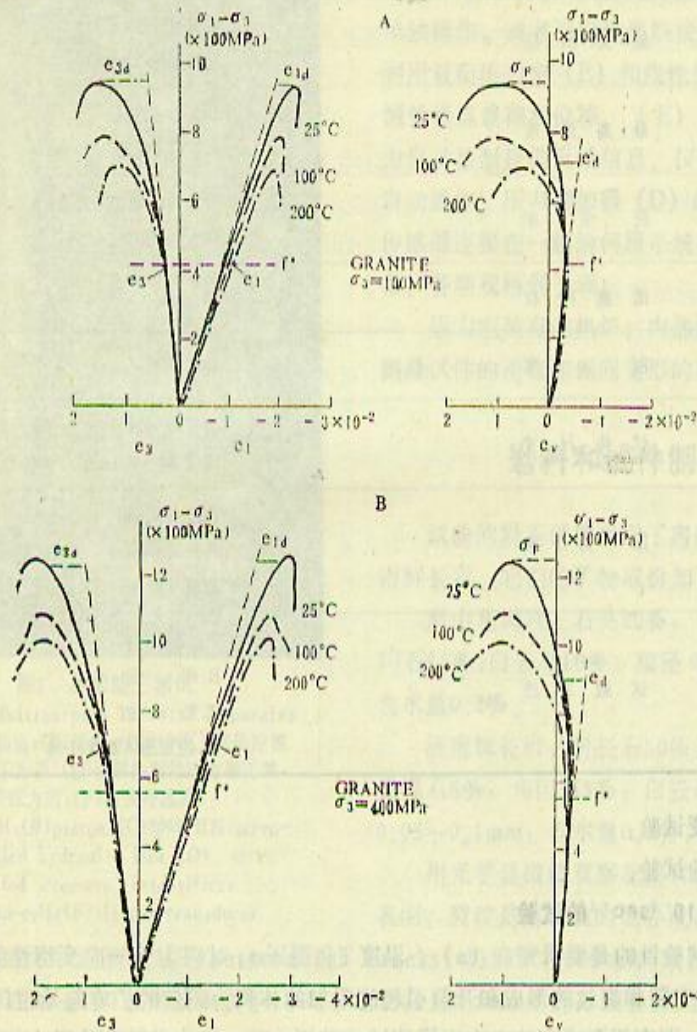


图2 房山花岗岩的应力应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationships for Fangshan granite

- (A) $\sigma_3=100\text{Mpa}$ 和 $T=25, 100,$ 和 200°C 的 $(\sigma_1-\sigma_3)/e_1, (\sigma_1-\sigma_3)/e_2$ 和 $(\sigma_1-\sigma_3)/e_v$ 曲线
- (B) $\sigma_3=300\text{Mpa}$ 和 $T=25, 100$ 和 200°C 与(A)类似的关系曲线。
- e_1 = 垂直应变, e_2 = 侧向应变, e_v = 体积应变, f^* = 在压缩时的扩容临界值 (图中仅标明在 25°C 时的值), σ_F = 断裂应力, e_d = 扩容体积应变。
- (A) $(\sigma_1-\sigma_3)/e_1, (\sigma_1-\sigma_3)/e_2$ and $(\sigma_1-\sigma_3)/e_v$ for $\sigma_3=100\text{Mpa}$ and $T=25, 100$ and 200°C .
- (B) Similar relationships for $\sigma_3=400\text{MPa}$ and $T=25, 100$ and 200°C . e_1 = vertical strain, e_2 = lateral strain, e_v = volumetric strain, f^* = threshold value of dilatancy in compression, only shown for the curves at 25°C , σ_F = fracture stress, e_d = dilatant volumetric strain.

第Ⅱ组: 3个试件: $\sigma_3=400\text{MPa}$; $T=25^\circ, 100^\circ, 200^\circ\text{C}$

辉长岩:

第Ⅲ组: 3个试件: $\sigma_3=100\text{MPa}$; $T=25^\circ, 100^\circ, 200^\circ\text{C}$

第Ⅳ组: 4个试件: $\sigma_3=400\text{MPa}$; $T=25^\circ, 100^\circ, 200^\circ, 250^\circ\text{C}$

此外, 在下列条件下还进行了三个辉长岩试件的试验;

$\sigma_3=300\text{MPa}$, $T=25^\circ\text{C}$; $\sigma_3=300\text{MPa}$, $T=100^\circ\text{C}$ 和 $\sigma_3=300\text{MPa}$, $T=200^\circ\text{C}$

图2A和B表示花岗岩在常围压为100MPa和400MPa的试验结果, 图3A和B表示辉长岩在

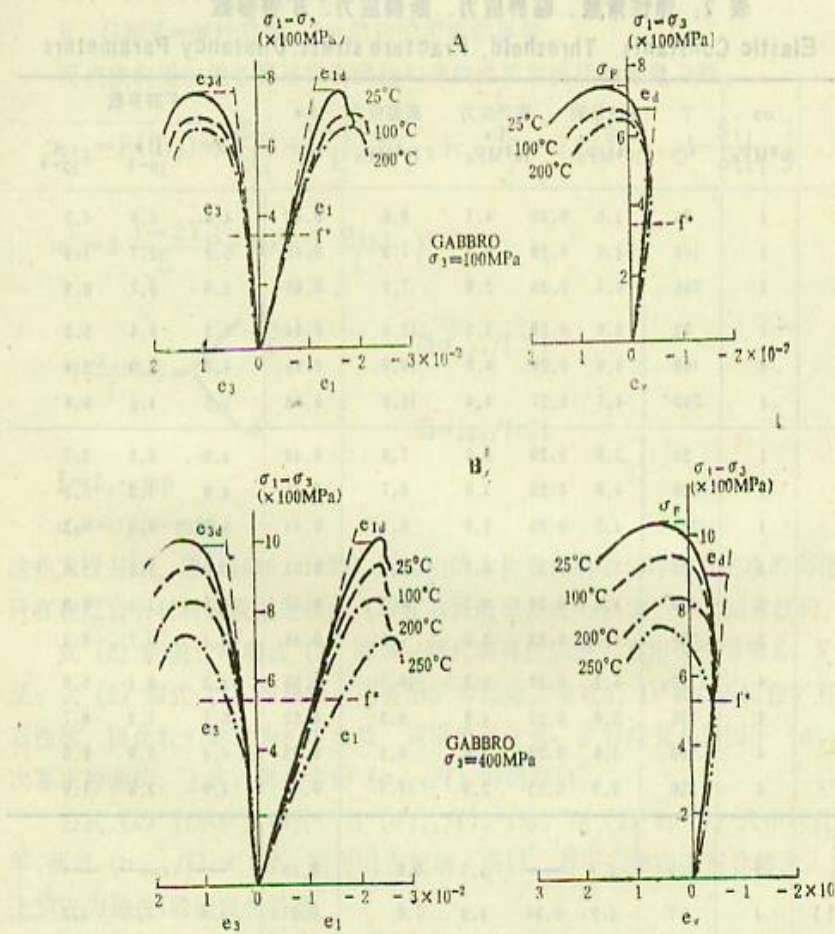


图3 济南辉长岩的应力应变关系

Fig.3 Stress-strain relationships for Jinan gabbro.

(A) $\sigma_3=100\text{MPa}$ 和 $T=25, 100$ 和 200°C

(B) $\sigma_3=400\text{MPa}$ 和 $T=25, 100, 200$ 和 250°C

(注): 图2和图3中, 侧向应变的扩容部分 e_{3d} 始终比垂直应变的扩容部分 e_{1d} 大, 而且随着 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 的增加也比较迅速地增加, 尤其是在高温的情况

(A) for $\sigma_3=100\text{ MPa}$ and $T=25, 100$ and 200°C

(B) for $\sigma_3=400\text{ MPa}$ $T=25, 100, 200$ and 250°C .

Note that the dilatant part of the lateral strain e_{3d} is always larger and increases much more rapidly with increase in $(\sigma_1-\sigma_3)$ than that of the vertical strain e_{1d} , especially for high temperatures in Fig.2 and Fig.3

围压分别为 $\sigma_3=100\text{MPa}$, 400MPa ; 温度分别为 $T=25^\circ$, 100° , 200° 和 250°C 的试验结果。

在所有的图中, 压缩应变为负, 而扩容为正值。体应变 e_v 开始是负值, 但当应力差 $(\sigma_1-\sigma_3)$ 超过 f^* 值之后, 它就下降, 最终变为正值。从这些曲线中可以看出, 应力差小于屈服值时有较好的线性, 于是就可以把 $(\sigma_1-\sigma_3)/e_v$ 曲线中非线性的开始确定为 f^* 值。图中只绘出了标有 σ_F 最大值的曲线的 f^* , 在各种围压下的 f^* 值, 弹性参数 E 和 ν 均列于表2。

表 2. 弹性常数、临界应力、断裂应力、扩容参数

Tab. 2 Elastic Constants, Threshold, Fracture stress, Dilatancy Parameters

岩石类型	σ_3 10 ² MPa	T °C	弹性常数		临界应力 f^* 10 ² MPa	断裂应力 σ_F 10 ² MPa	f^* σ_F	扩容参数		
			E 10 ⁴ MPa	ν				n	D [*] 10 ⁻⁵	C 10 ⁻⁵
花岗岩	1	25	4.5	0.30	4.1	9.6	0.43	4.8	6.8	5.2
	1	100	4.3	0.29	3.3	7.9	0.42	5.2	2.7	1.9
	1	200	4.1	0.28	2.9	7.2	0.40	5.9	0.7	0.5
	4	25	5.0	0.29	5.5	12.6	0.44	4.3	8.4	5.2
	4	100	4.9	0.28	4.9	10.9	0.45	4.8	3.9	2.4
	4	200	4.7	0.27	4.4	10.2	0.43	5.5	1.5	0.8
辉长岩	1	25	5.0	0.29	3.5	7.6	0.46	4.3	6.2	3.7
	1	100	4.8	0.26	3.0	6.7	0.45	4.9	1.3	0.5
	1	200	4.5	0.25	2.8	6.4	0.44	5.9	0.5	0.3
	3	25	5.1	0.25	4.7	9.3	0.51	6.0	2.3	1.6
	3	100	4.8	0.24	4.1	8.7	0.47	5.9	1.4	0.9
	3	200	4.6	0.23	3.6	7.5	0.48	6.4	0.7	0.4
	4	25	5.1	0.28	5.2	10.5	0.50	4.3	8.4	5.9
	4	100	5.0	0.25	4.8	9.3	0.52	5.1	1.3	0.7
	4	200	4.8	0.23	3.6	8.3	0.43	6.4	0.9	0.5
	4	250	3.9	0.22	2.9	7.3	0.40	4.0	2.4	1.0
花岗岩 (蠕变 I)	2	200	4.4	—	5.7	9.0	0.63	—	—	—
(蠕变 I I)	1	7	4.2	0.30	4.0	7.8	0.51	4.9	7.7	4.1
(松弛 I)	2	200	4.5	—	4.8	7.0	0.69	—	—	—
(松弛 I I)	1	7	4.3	0.30	4.2	8.8	0.48	4.4	6.3	1.2

注: 估算精度: $n \sim \pm 4\%$; $D^* \sim \pm 8\%$; $C \sim \pm 12\%$

本构方程

在叙述如何确定扩容参数方法以前, 首先我们介绍有关的本构方程。

全应变 $e_{1,0,t}$ 是弹性应变 e_e 和扩容应变 e_d 之和

$$e_{1,0,t} = e_e + e_d \quad (1)$$

引入下列符号:

σ_{ij} = 应力张量; s_{ij} = 偏应力张量;

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - p; \quad \sigma_{oct} = J^{1/2} = \left(\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}\right)^{1/2};$$

$$p = \frac{1}{3} (\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) = \text{静水应力};$$

e_{ij} = 偏应变张量; e_v = 体积应变

δ_{ij} = Kronecker delta;

E、G和V = 弹性常数; f = 剪切的扩容临界值。

现在我们提出能够描述岩石线性和非线性扩容性状的张量方程:

$$e_{ij} = F(S_{ij}) = \frac{S_{ij}}{2G} + \frac{1-2V}{E} P \delta_{ij} + \left\langle \frac{\sigma_{oct}}{f} \right\rangle^n \left[D^* \delta_{ij} + \frac{S_{ij}}{\sigma_{oct}} \right] \quad (2)$$

$$e_v = 3 \frac{1-2V}{E} P + 3D^* \left\langle \frac{\sigma_{oct}}{f} \right\rangle^n \quad (3)$$

$$\left\langle \frac{\sigma_{oct}}{f} \right\rangle = \begin{cases} \frac{\sigma_{oct}}{f} & \text{当 } \sigma_{oct}/f > 1 \\ 0 & \text{当 } \sigma_{oct}/f \leq 1 \end{cases} \quad (4)$$

$$f = f_0 - mp \quad (5)$$

$$\sigma_F = \sigma_{F0} - m'p \quad (6)$$

这些方程是陈、康 (1980, 1983) 所提出的本构方程略去与时间有关项的简化。此方程只有在把岩石材料看成是连续体 (即在达到断裂强度 σ_F 以前), 才是有效的。

式 (2) 的前二项和式 (3) 的第一项代表弹性应变, 它用弹性常数 E, V 和 G 来表征; 式 (2) 和式 (3) 的最后一项表示扩容部分, 参数 n, D^* 和 C 表征在扩容状态的岩石性状, 因此我们称之为扩容参数, 这里值得注意: 扩容应变是由因子 (σ_{oct}/f) 的 n 次幂来控制的, 上式, 都是考虑 (σ_{oct}/f) 的绝对值。

公式 (4) 表示扩容条件: 当 $(\sigma_{oct}/f) > 1$ 时, 在 (2) 和 (3) 式中的此项并不是零; 而当 $(\sigma_{oct}/f) < 1$ 时, 则可消去此项, 所以, 对于三维应力组合情况, 当八面体上剪应力超过 f 时就发生扩容。

在公式 (5) 中假设屈服值是随静水压力 P 呈线性增加, 这一强化效应可由参数 m 来表征, 因此, 扩容完全可以由增加 P 使 f 变得大到上面的比值 $(\sigma_{oct}/f) \leq 1$ 来抑制, 于是在 (2) 和 (3) 式中扩容项就可以消去, 公式 (6) 中断裂强度 σ_F 是假定随 P 呈线性增加, 这由参数 m' 表征。

注意, 参数 n, D^* , C, m 和 m' 都是无量纲。

为了从我们的三轴试验来确定扩容参数 n, D^* 和 C', 我们把上述的张量方程运用到轴对称的“三轴”条件, 即令 $\sigma_{11} = \sigma_1; \sigma_{22} = \sigma_2 = \sigma_{33} = \sigma_3$, 而且我们仅考虑应变 e_{11} , e_{33} 和 e_v 的扩容部分, 分别用 e_{1d} , e_{3d} 和 e_d 表示, 令 $e_{11} = e_{1d}; e_{33} = e_{3d}; e_v = e_d$, 得出下列方程:

$$e_{1d} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f^*} \right)^n \left(D^* - \frac{2}{\sqrt{3}} C \right) \quad (7)$$

$$e_{3d} = \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f^*} \right)^n \left(D^* + \frac{1}{\sqrt{3}} C \right) \quad (8)$$

$$e_d = 3D^* \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f^*} \right)^n \quad (9)$$

或者:

$$\log e_d = \log 3D^* + n \log \left(\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{f^*} \right) \quad (9a)$$

在这些方程中, 对于压缩的扩容临界值 (f^*) (本文中称为临界值 f^*) 和剪切的扩容临界值 f 的关系是

$$f^* = f \sqrt{3}$$

注意从 (7) 和 (8) 式中看到, 侧向扩容应变 e_{3d} 总是大于垂向扩容应变 e_{1d} , 我们从图2A和3A中可以看到, e_{3d} 曲线比 e_{1d} 曲线偏离线性要快得多, 现在从 (7)、(8) 和 (9) 三个方程能够确定出三个未知参数 n 、 D^* 和 C , 为此我们绘制了 $(\sigma_1 - \sigma_3) / f^*$ 对 e_d 的双对数曲线图, 图4举出了一些例子, 在研究的所有16种情况中, 都可发现具有较好的线性关系, 这些线的斜率代表了参数 n (9a), 再从 (9) 和 (8) 或 (7) 中就可以确定 D^* 和 C , 其结果列于表2.

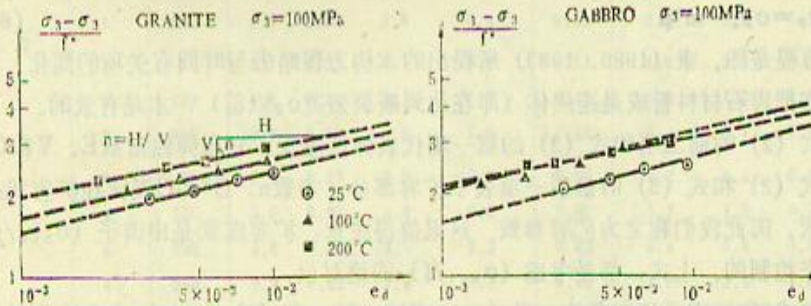


图4 $\log \langle (\sigma_1 - \sigma_3) / f^* \rangle$ 与 $\log e_d$ 的关系,

具有如 (9a) 式所描述的、较好的线性关系

Fig.4 Plots of $\log \langle (\sigma_1 - \sigma_3) / f^* \rangle$ against $\log e_d$ give satisfactorily straight lines as formulated in (9a)

图5 表示在恒温25°, 100°和200°C下, 破坏应力 σ_F 和临界应力 f^* 随着静水压力而增加, 这些线的斜率给出了 m 和 m' 值, f_0^* 和 σ_{F0} 都是如 (5) 和 (6) 式所述, f^* 和 σ_F 在 $p=0$ 时的初始值, 对辉长岩的结果列于下表:

T(°C)	$f_0^*(100\text{MPa})$	m	$\sigma_{F0}(100\text{MPa})$	m'
25	2.3	0.52	4.9	0.75
100	2.1	0.47	4.6	0.68
200	2.0	0.43	4.5	0.57

由此我们可以看到 f^* 、 f^* 、 σ_F 和 σ_F 都是随着温度增加而降低，图6表示花岗岩在常围压为400MPa和100MPa情况下， σ_F 和 f^* 随温度增加而降低。

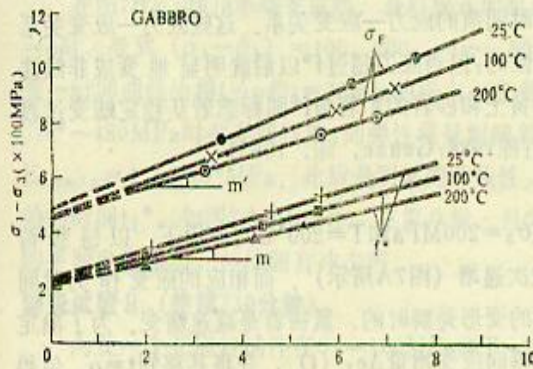


图5、辉长岩 σ_F 和 f^* 与静水压力 P 的关系，具有(5)和(6)式所描述的直线关系。

在 $P=600$ MPa下，温度由 $T=25^\circ\text{C}$ 上升到 200°C 会使辉长岩的 σ_F 和 f^* 下降大约20%。

Fig.5 Plots of σ_F and f^* against the hydrostatic pressure P give straight lines as formulated in (5) and (6); An increase of temperature from $T=25^\circ$ to $T=200^\circ\text{C}$ at $P\sim 600$ MPa gives a drop in σ_F and f^* of about 20% for gabbro.

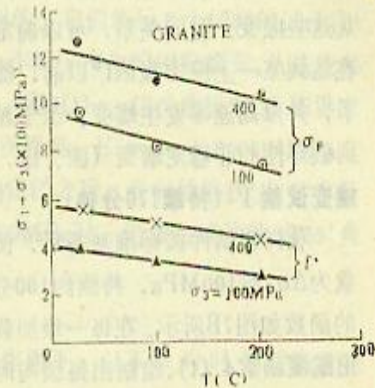


图6 房山花岗岩在 $\sigma_3=100$ MPa和400MPa; $T=25, 100, 200$ 条件下， σ_F 和 f^* 依赖于温度的关系。温度由 $T=25^\circ\text{C}$ 增加到 200°C 会使 σ_F 和 f^* 下降大约20~25%。

Fig.6 Dependence of σ_F and f^* on temperature for fangshan granite tested at $\sigma_3=100$ MPa and 400 MPa; $T=25, 100, 200^\circ\text{C}$. A temperature increase $T=25$ to 200°C gives a drop in σ_F and f^* of about 20-25%.

这16个试件的弹性参数 E 、 V ，临界值 f^* ，扩容参数 n 、 D^* 和 C ，断裂强度 σ_F 和比值 f^*/σ_F 都列于表2。此外，由蠕变和松弛试验的参数也列于此表。

与时间有关的变形

为了更细致地研究变形和扩容，就需要研究与时间有关的这些过程。在我们的分析中，不考虑由于静水应力 P 作用的体积变形的时间效应，因为它与应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 引起的蠕变效应相比，可以略去不计。

蠕变试验

Boltzmann 迭加原理指出：由应力增量 $\Delta\sigma^*$ 相联系的变形是载荷作用的 t 瞬时无关，即引起的变形 $e^*(t)$ 并不受平移时间轴的影响，而只取决于蠕变函数 $\psi(t)$ ，因此，在任意加载下的蠕变变形可以写成(例如，Locket 1972)：

$$e^*(t) = \sum_1^n \Delta e_n^*(t) = \int_0^t \psi(t-\theta) \frac{dF^*[\sigma^*(\theta)]}{d\theta} d\theta \quad (10)$$

式中 $F^*[\sigma^*]$ 是 σ^* 的一个非线性函数，并且当 $\sigma^* < f^*$ 时， $F^*(\sigma^*) \rightarrow \sigma^*$ 。

为了便于分析，可以但并非必需应用梯级输入，借以使每一级都有同样的强度和相等的时间间隔，这样就能很方便地求出应力—应变关系，和研究迭加原理的有效性(陈、康、1980)，并进一步地找到临界应力 f^* 。

运用这个理论,作用在 $t=\theta$ 瞬时的梯级载荷引起的 $\Delta^*e(t)$,可以移到 $t=0$ 时刻,按照这一方法就能求得在 $t=0$ 的各级载荷段 $\Delta\sigma^*$, $2\Delta\sigma^*\dots n\Delta\sigma^*$ 相应的变形,这一结果可以通过 n 个同样的试件在 $t=0$ 时,分别施加载荷 $\Delta\sigma^*$, $2\Delta\sigma^*$, $\dots n\Delta\sigma^*$ 试验而得到,从这些应变—时间关系,可以确定各个时间值的应力—应变关系,这些应力—应变关系在达到某一上应力极限 f^* 以前,都是线性的;但当应力超过 f^* 以后就明显地变成非线性了,并以高速率发生蠕变,至于粘土、黄土和砂岩的扩容值 f^* 则标志着从稳定蠕变过渡到破坏性的非稳定蠕变(陈、康,1980;陈1988;Geuze,陈,1953).

蠕变试验 I (持续770分钟)

花岗岩试件按标准制备后,使其在 $\sigma_3=200\text{MPa}$ 和 $T=200^\circ\text{C}$ 的作用下,以每级荷载为 $\Delta\sigma_1\approx 100\text{MPa}$,持续约100分钟依次递增(图7A所示),而相应的应变作为时间的函数如图7B所示,在每一级加载之后的变形是瞬时的,紧接着是减速蠕变,为了确定出蠕变函数 $\psi(t)$,绘制出每级与时间的垂向应变增量 $\Delta e_1(t)$,并将其移到 $t=0$,值得

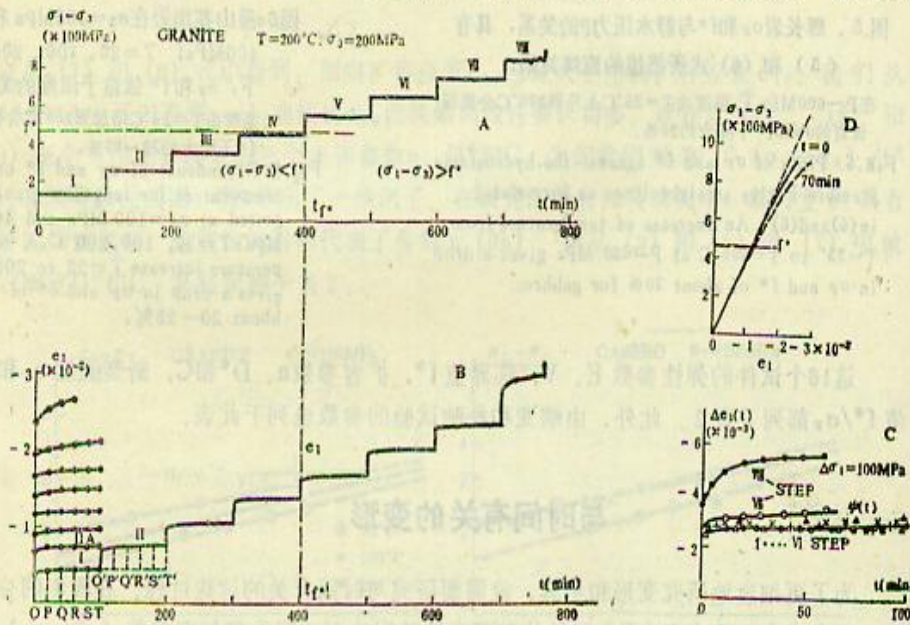


图7 蠕变试验 I: $\sigma_3=200\text{MPa}$, $T=200^\circ\text{C}$

Fig.7 Creep test I, $\sigma_3=200\text{MPa}$, $T=200^\circ\text{C}$.

(A) 梯级加载, 每级 $\Delta\sigma_1\approx 100\text{MPa}$

(B) 相应的应变 $e_1(t)$: 左边的8条曲线是根据迭加原理从 $e_1(t)$ 中绘制的, 曲线 IIA 是将 $O'P'Q'R'S'T'$ 各点的纵坐标迭加到相应的OPQRST各点的纵坐标上绘制的.

(C) 8级的增量应变—时间曲线, 前6级较一致, 可用蠕变函数 $\psi(t)$ 表示.

(D) $t=0$ 和 $t=70\text{min}$ 的应力—应变关系是由(B)左边的曲线构成的, $t>t_f^*=400$ 分钟时发生与时间有关的扩容.

(A) stepwise loading, every step $\Delta\sigma_1\approx 100\text{MPa}$.

(B) strain response $e_1(t)$: the 8 curves at left side have been constructed from $e_1(t)$ with the help of the superposition principle. Curve IIA has been constructed by superimposing the ordinates at $O'P'Q'R'S'T'$ to the corresponding ones at OpQRST.

(C) incremental strain time curves for the 8 steps, the curves in the first 6 steps coincide and are expressed by the creep function $\psi(t)$

(D) stress strain curves for $t=0$ and $t=70\text{min}$ constructed from the curve at the left side of (B). Time dependent dilatancy for $t>t_f^*=400$ minutes

注意的是前6级曲线非常一致。图7C给出了蠕变函数 $\psi(t)$ 。因此, 迭加原理 (10) 式在 $(\sigma_1 - \sigma_3) < 620\text{MPa}$ 应力范围内是正确的, 其应力差略超过了临界值 $f^* \sim 480\text{MPa}$ 。

在图7B左边的8条蠕变曲线, 是根据迭加原理绘制的, 它们表示8个同样的试件在 $t=0$ 时, 受到 $(\sigma_1 - \sigma_3) = 100, 200, \dots, 800\text{MPa}$ 作用下产生的相应蠕变。从这些应变—时间曲线绘得 $t=0$ 和 $t=70\text{min}$ 的应力—应变关系 (图7D)。这些曲线直至临界应力 $f^* \sim 480\text{MPa}$ 时都是线性的; 而弹性模量则随着时间而降低; $E_{t=0} = 4.2 \times 10^4\text{MPa}$, $E_{70\text{min}} = 4.1 \times 10^4\text{MPa}$ 。此后是明显的非线性。在确定 f^* 之后, 我们能够找出扩容开始的时间 t_r^* , 如图7A和B所示。在第八级, 当 $\sigma_p = 900\text{MPa}$ 时, 沿着与试件轴成 35° 角的平面发生断裂, 并伴有冲击声。

蠕变试验 II (持续330分钟)

为使一个花岗岩试件在 $\sigma_3 = 100\text{MPa}$ 和 $T = 7^\circ\text{C}$ 的作用下, 以不等的时间间隔承受梯级加载, 每级载荷为: 80、180、280、380、480、530、680、750、780MPa, 如图8A所示。为了求得完整的 $(\sigma - \epsilon - t)$ 曲线, 以便进一步研究与时间有关的扩容, 这就必须测量三个主应变, 即: 作为应力和时间函数的垂向应变 $e_1(t)$ 和侧向应变 $e_2(t) = e_3(t)$ 。温度由 200°C 降到 7°C , 我们就能研究温度效应。在测量出 $e_1(t)$ 和 $e_3(t)$ 后, 就有可能根据 $e_v(t) = e_1(t) + 2e_2(t)$ 的关系绘制出体积应变 $e_v(t)$ 。图8B表示测得的2条应变—时间曲线 $e_1(t)$ 和 $e_3(t)$ 。在绘制的体积应变 $e_v(t)$ 曲线上表

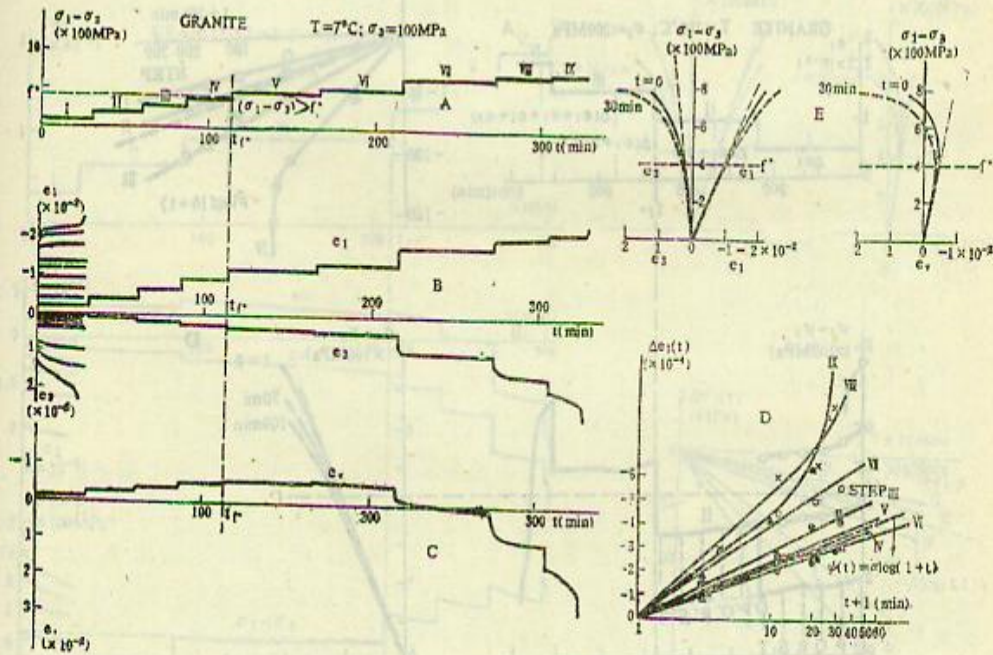


图8 蠕变试验 II: $\sigma_3 = 100\text{MPa}$, $T = 7^\circ\text{C}$

Fig. 8 Creep test II $\sigma_3 = 100\text{MPa}$, $T = 7^\circ\text{C}$.

(A) 梯级加载; (B) 观察到的 $e_1(t)$ (上部) 和 $e_3(t)$ (下部) 曲线; (C) $e_v(t)$ 随时间的变化曲线, 根据 $e_v(t) = e_1(t) + 2e_3(t)$ 绘得; 在 $t_r^* = 120\text{min}$ 时开始发生与时间有关的扩容; (D) 点绘 Δe_1 对 $\log(t+1)$ 的关系; (E) $t=0$ 和 $t=30\text{min}$ 时的应力—应变曲线。

(A) stepwise loading; (B) observed $e(t)$ (upper part) and $e_3(t)$ (lower part) curves; (C) variation of $e_v(t)$ with time is constructed from $e_v(t) = e_1(t) + 2e_3(t)$ time dependent dilatancy starts at $t_r^* = 120\text{min}$ (D) plot of Δe_1 against $\log(t+1)$; (E) stress-strain curves for $t=0$ and $t=30\text{min}$.

示了前三级压缩在增加, 然后保持近于常数, 最后出现显著时间效应的扩容, 假定扩容为正 (图8C)。

为了求得蠕变函数 $\psi(t)$, 我们绘制第 III 级到 IX 的垂向应变 $\Delta e_1(t)$ 对 $\text{Log}(1+t)$ 的关系, 并将其移至 $t=0$ (图8D)。在可确定的误差范围内, 第 III、IV、V、VI 级的曲线可用 $e_1(t) = \alpha \log(1+t)$ 近似地描述, 而第 VII 和 IX 级的应变则在最终破裂之前, 随着时间迅速地增加。

运用迭加原理, 绘制了在 $t=0$ 的变形时间曲线 $e_1(t)$ 和 $e_3(t)$, 如图 8B 左边所示, 根据这些曲线, 绘制了 $t=0$ 和 $t=30\text{min}$ 的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与 e_1 、 e_3 和 e_v 的应力应变关系, 如图 8E 所示, $t=0$ 和 $t=30\text{min}$ 时的弹性模量分别为 4.2 和 $4.1 \times 10^4 \text{MPa}$; $\nu=0.3$, $f^* \sim 400 \text{MPa}$; $\sigma_v \sim 780 \text{MPa}$; $n \sim 4.9$; $D \sim 7.7 \times 10^5$; $C \sim 4.1 \times 10^{-9}$ 。

松弛试验

就松弛而论, 迭加原理可用下列公式表示:

$$\sigma^*(t) = \sum_1^n \Delta \sigma_n^*(t) = \int_0^t R(t-\theta) \frac{df[e^*(\theta)]}{d\theta} d\theta \quad (11)$$

式中, $R(t)$ = 松弛函数, $f(e^*)$ 是 e^* 的非线性函数, 我们运用此原理绘制了应力—时间曲线在图 9B 和 10B 的左边和应力—应变关系在图 9D 和 10E 中。

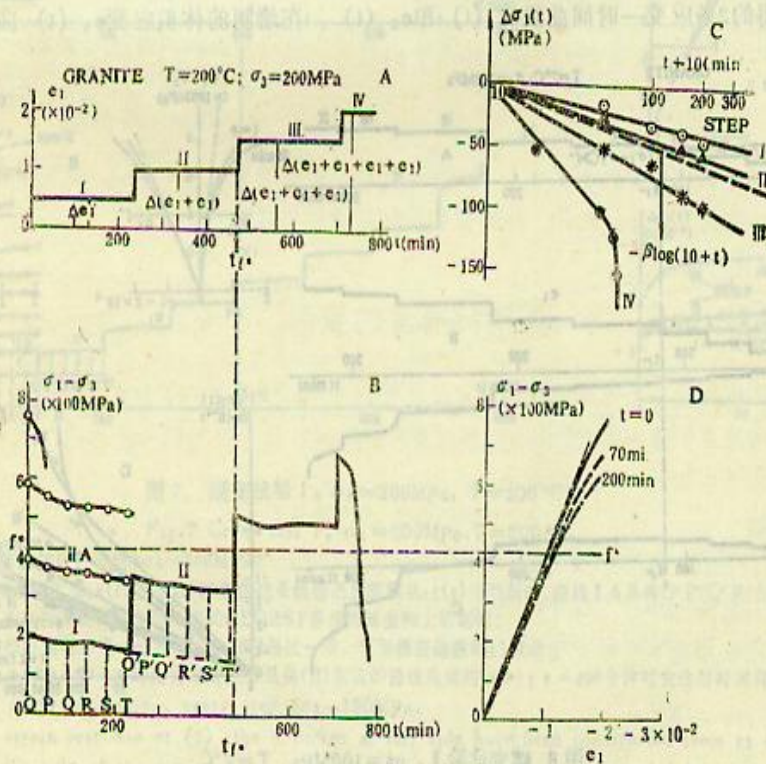


图 9 松弛试验 I; $\sigma_3=200\text{MPa}$; $T=200^\circ\text{C}$

Fig. 9 Relaxation test I; $\sigma_3=200\text{MPa}$; $T=200^\circ\text{C}$

(A) 级应变; $\Delta e_1 \sim 0.45 \times 10^{-2}$; (B) 相应的应力松弛曲线; 此图左边的曲线是根据公式(11)绘制的; (C) 每级加载的松弛曲线; (D) $t=0, 70$ 和 200min 的应力应变关系, 在 $t_f^* \sim 470\text{min}$ 时开始发生与时间有关的扩容。

(A) Stepwise straining; $\Delta e_1 \sim 0.45 \times 10^{-2}$; (B) stress relaxation response curves; the curves at left side of this figure have been constructed on the basis of formula(11); (C) Relaxation curves for the steploadings; (D) stress strain relationships for $t=0, 70$ and 200min . Time dependent dilatancy started at $t_f^* \sim 470\text{min}$.

松弛试验 I (持续780分钟)

花岗岩试件按标准制备后，在 $\sigma_3 = 200\text{MPa}$ 和 $T = 200^\circ\text{C}$ 下进行试验，逐级的应变为 $\Delta e_1 \sim 0.4 \times 10^{-2}$ ，如图9A所示，每级保持约240分钟，应力—时间的反应表明是随时间减速的松弛（图9B），从点绘 $\Delta \sigma_1(t)$ 对时间的关系可以找到松弛函数 $R(t)$ （图9C），函数 $R(t) = -B \log(1+t)$ 对前三级是适合的，这些曲线移到 $t=0$ 时的一致性较差，因为我们包括了第三级，而第三级相应的应力略超过了临界应力 f^* （图7B），第四级明显地表明了有在30分钟内有一个陡急下降的松弛，图9B左边的四条应力—时间曲线表示4个同样的试件如果在 $t=0$ 时，分别承受变形 e_1 为 0.45 、 0.90 、 1.3 和 1.8×10^{-2} 的应力松弛曲线，图9D是 $t=0, 70$ 和 200min 的应力—应变关系，弹性模量分别为 $4.3 \times 10^4 \text{MPa}$ 、 $4.1 \times 10^4 \text{MPa}$ 和 $4.0 \times 10^4 \text{MPa}$ ，临界值 $f^2 = 430\text{MPa}$ 和 $\sigma_r = 680\text{MPa}$ ，在第三级作用之后，在 t_r^* 时立刻发生扩容，断裂是沿着与垂直轴成 32° 角的陡平面发生的，并可听到微弱的破裂声。

松弛试验 II (持续300分钟)

为了研究完整的 $\sigma-e-t$ 关系和与时间有关的扩容，必须测量作为时间函数的应力松弛和测向变形 $e_2(t) = e_3(t)$ 。

图10A是花岗岩试件在 $\sigma_3 = 300\text{MPa}$ 和 $T = 7^\circ\text{C}$ 条件下，用不同时间间隔的阶梯应变

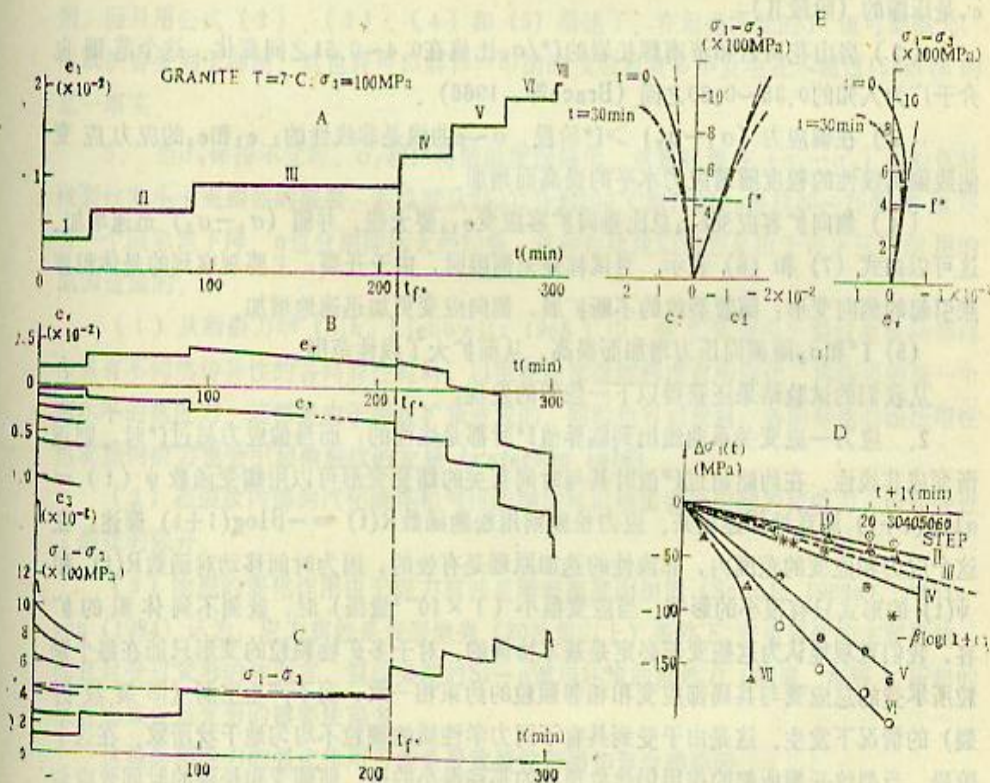


图10 松弛试验 II $\sigma_3 = 100\text{MPa}$; $T = 7^\circ\text{C}$

Fig. 10 Relaxation test II $\sigma_3 = 100\text{MPa}$; $T = 7^\circ\text{C}$.

(A) 每级应变 $\Delta e_1 \sim 0.3 \times 10^{-2}$; (B) 测量的 $e_2(t)$ 和由 $e_2(t) = e_1 + 2e_3(t)$ 求得的 $e_2(t)$; (C) 点绘 $\Delta \sigma_1(t)$ 对 $\log(1+t)$; (E) $t=0$ 和 $t=30\text{min}$ 的应力—应变关系。
 (A) stepwise straining $\Delta e_1 \sim 0.3 \times 10^{-2}$; (B) $e_2(t)$ has been measured; $e_2(t)$ constructed from $e_2(t) = e_1 + 2e_3(t)$; (C) time dependent dilatancy started at $t_r^* \sim 210$ minutes; (D) plot of $\Delta \sigma_1(t)$ against $\log(1+t)$; (E) stress strain relationships for $t=0$ and $t=30\text{min}$.

进行的试验;除最后一级 $\Delta e_1 = 0.15 \times 10^{-2}$ 外,其余每级均为 $\Delta e_1 \sim 0.3 \times 10^{-2}$.随时间变化的应力松弛如图10C示,测量的侧向应变 $e_2(t)$ 和求得的体积应变 $e_v(t)$ 的应变—时间曲线如图10B,可以看到体应变—时间曲线与蠕变时的(图9C)有类似的趋势,在头几级的松弛响应可用松弛函数 $R(t) = -\beta \log(1+t)$ 近似地描述,借助迭加原理,可绘制出 $(\sigma_1 - \sigma_3)/e_1$ 和 $(\sigma_1 - \sigma_3)/e_3$ 的应力应变曲线,从这两条曲线就可以绘制 $(\sigma_1 - \sigma_3)/e_v$ 曲线图.

$t=0$ 和 $t=30\text{min}$ 的弹性模量分别为 4.6×10^4 和 $4.4 \times 10^4 \text{MPa}$; $\nu=0.3$.这些曲线在 $f^*=420 \text{MPa}$ 之前是线性的,在 $\sigma_F=880 \text{MPa}$ 时,沿着与试件轴成 32° 角的平面发生断裂,并有可听到的微弱破裂声,扩容参数 $n \sim 4.4$; $D^* \sim 6.3 \times 10^{-5}$; $C \sim 1.2 \times 10^{-5}$.扩容是在施加第四级之后,在 t_r^* 开始发生的.

分析和结论

1. 我们在恒应变率 $5 \times 10^{-3} / \text{sec}$ 情况下得到的试验结果与以前的研究结果符合得较好.

(1) 在偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3) < f^*$ 阶段,应力应变曲线具有很好的线性,体积应变 e_v 是压缩的(阶段II).

(2) 房山花岗岩和济南辉长岩的 f^*/σ_F 比值在 $0.4 \sim 0.51$ 之间变化,这个范围也介于广为人知的 $0.35 \sim 0.60$ 之间(Brace等,1966).

(3) 在偏应力 $(\sigma_1 - \sigma_3) > f^*$ 阶段, $\sigma \sim e$ 曲线是非线性的; e_1 和 e_3 的应力应变曲线偏离线性的程度随着应力水平的提高而增加.

(4) 侧向扩容应变 e_{2d} 总比垂向扩容应变 e_{1d} 要大些,并随 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 迅速增加,这可以由式(7)和(8)表示,当试样是无侧限时,由于开裂,主要观察到的是体积膨胀引起的侧向变形;随着裂纹的不断扩展,侧向应变更加迅速地增加.

(5) f^* 和 σ_F 随侧向压力增加而提高,从而扩大了线性范围.

从我们的试验结果还获得以下一些新的发现:

2. 应力—应变关系曲线出到临界值 f^* 时都是线性的;而当偏应力超过 f^* 时,则逐渐变成非线性,在约略超过 f^* 值时其与时间有关的蠕变变形可以用蠕变函数 $\psi(t) = \alpha \log(1+t)$ 满意地描述出来,应力松弛则用松弛函数 $R(t) = -\beta \log(1+t)$ 描述,在这个应力和应变的范围内,非线性的迭加原理是有效的,因为时间移动对函数 $R(t)$ 和 $\psi(t)$ 的形式只有很小的影响,当应变很小(1×10^{-2} 量级)时,就侧不到体积的扩容,我们直观地认为这些变形必定是基本协调的,对于多矿物颗粒的变形只能在每个颗粒所承受的总应变与其局部应变和相邻颗粒的约束相一致,而不产生空洞(即裂纹开裂)的情况下发生,这是由于受到具有不同力学性质的颗粒不均匀地干扰所致,在这个阶段,当裂纹开裂所起的作用仍然象预期的那样很小的话,则蠕变和松弛的时间效应似乎可以认为,是由许多裂纹的壁面和易滑面所产生的与时间有关的滑动的结果,而这些容易滑动的面就象薄层断层泥那样.

3. 对于较大的变形上述情况就不能再维持了,其结果裂纹将会张开,更明显的时间效应可能是分布在空间的裂纹接连发生张开、蔓延和聚合,还有沿颗粒边界和易滑面

更剧烈的滑动，可能也会引起更显著的促进作用。

Tapponier和Brace (1976) 根据扫描电子显微镜观察，揭示了随着应力增加，首先发生变化的是：(1) 沿颗粒边界开裂增加；(2) 闭合裂纹又重新张开；(3) 新的分裂出现。这些效应在应力值 f^* 附近是很明显的。在稍微高一点的应力时，穿透颗粒的轴向裂纹开始扩散。Wong (1982) 观察到：有许许多多穿透颗粒的裂纹在与最大压缩方向交成低角度 ($<15^\circ$)。

在这些过程中，应力腐蚀可能是一种重要的触发因素。Zoback和Byerlee (1975) 已经发现：可渗透性的增加是由于曲折通道逐渐形成的结果。

用幂函数 $(\sigma_1 - \sigma_3) / f^*$ 来描述这个扩容阶段Ⅲ是相当满意的。花岗岩和辉长岩试件参数 n 的阶分别为4.3~5.9和4.3~6.4。而且 n 不受围压影响，但有随温度增加的趋势。参数 D^* 在 $10^{-4} \sim 10^{-4} \sim 10^{-8}$ 量级和参数 $C \sim 6 \times 10^3$ 。测定的精确度可按以下估计：

$$n \sim \pm 4\% ; D \sim \pm 8\% \text{ 和 } C \sim 12\%$$

我们还记得：当不考虑时间效应时， n 、 D^* 、 C 是与扩容有关的参数。

4. 显然要使围压增加就必然会增加裂纹面上的正压力，将使裂纹的开裂和滑动变得更加困难，因此需要更大的应力差才能产生扩容 (图5、表2)。这已经在前面看到，而且用公式 (2)、(3)、(4) 和 (5) 描述了。在地壳深处的 f^* 值可能很大，以致扩容受到了抑制。这也许可以解释：中国的浅层地震多半发生在不超过15km 深的这一事实。

5. 当 σ_3 保持不变时， σ_F 和 f^* 将随温度而降低。这意味着在 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 值较低时微裂纹发生了更剧烈的破裂。若温度从250°C升到200°C则 f^* 和 σ_F 将按20~25%的顺序有一个陡急地下降。 n 也分别降低大约20%。这种性状我们设想是由于以下三种作用的原因造成的。

(1) 从断裂力学 (Sih, Liebowitz 1968) 中，我们知道由于裂纹象缺陷那样和具有不同热传导性的各向异性材料，以至在局部温度梯度有所强化，其结果形成一个高水平的热应力。这都是由于裂纹扩张造成的。同时也可以预料：各向异性的线压缩性热膨胀内应力也会引起微裂纹的发展 (Paterson 1978)。

(2) 在裂纹内部的汽化液体和气压的增加可以增加裂纹尖端的拉应力，因而促进了裂纹的张开。

(3) 物理的弱化作用由于应力腐蚀是随着温度而加剧 (Scholz 1968a)。Atkinson (1984) 认为：应力腐蚀是浅层地壳 (20公里以上) 条件下，产生裂纹的主要机制。而且对受过变形的硅而言，裂纹尖端的Si-O键与环境的自然力 (如风、水等) 所起的反应比未受过变形的键要快得多。

这些局部应力的强化作用可能是导致裂纹传播和聚合的原因。

6. 当应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 超过 f^* ，将发生与时间有关的扩容。与此现象相关的有：非线性应力应变关系，垂向 $e_1(t)$ 、侧向 $e_3(t)$ 和体积应变 $e_v(t)$ 的强烈的时间效应。图7、8、9和10中所示的 t_r^* 是表示与时间有关的扩容的开始时间。这就可以提出：图8c和10B所示的随时间发生扩容体积应变的过程，可以解释1976年唐山大地震前

的某些前兆现象。在上述图中的 $e_v(t)$ 曲线,显示了其中有一段时间,尽管 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 是在增加,但其体积应变却基本保持不变(大约100分钟),因为开裂与能量释放有关,显然这里有一个不发生开裂的区间,即这个区间是“静止”的,而这样一个没有前震发生的静止期,我们在唐山地震(Chang 1978)之前也观察到了,经过这段时间以后,由于裂纹的张开和接合引起体积应变随时间的迅速增加,这种现象也在唐山地震发生前6年就已经观察到,其表现形式是在唐山周围半径100公里以内的许多深井的水位下降(王,1979),水位随时间下降的过程同我们测得的体积应变 $e_v(t)$ (图8c, 10B, 11)的时间效应很相象。

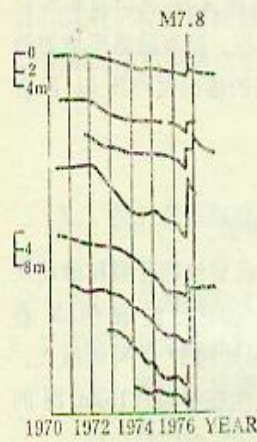


图11 唐山附近100公里
内,深井水位的下降
(王,1979)

Fig. 11 Lowering of water
level in wells 100km around
Tangshan(Wang 1979)

7. 现在我们对图2、3、7c、8D、9c和10D中的 $(\sigma-e-t)$ 关系曲线来作进一步分析,应变的瞬态部分与时间无关,已经在(2)式中提出: $e_{ij} = F(S_{ij})$;这也能变换一个形式写成: $S_{ij} = f(e_{ij}) = F^{-1}(e_{ij})$.在任意时刻的全应变 $e_{i,j,t}(t)$ 是瞬态部分 $e(0)$ 和与时间有关的部分 $e_c(t)$ 的总和:

$$e_{i,j,t}(t) = e(0) + e_c(t)$$

在持续时间很短的试验中,时间对 $(\sigma-e-t)$ 关系的影响可以忽略不计,由于排除了时间的影响,我们就有了一个共同和简单的基础去研究各种试验方法的影响,在这方面我们已经用不同的加载路径进行了试验,将 $t=0$ 时的各种情况下的实验结果绘制在同一轴上(图12):

(A) 常应变率 $\dot{e} = 5 \times 10^{-3} \text{秒}^{-1}$; (B) 蠕变试验 I, 200MPa, 200°C; (C) 蠕变试验 II, 100MPa, 7°C; (D) 松弛试验 I, 200MPa, 200°C; (E) 松弛试验 II, 100MPa, 7°C. 可以看到下列现象:

(1) 所有的曲线在线性范围都很好地相合,弹性模量的变化在 $4.2 \sim 4.6 \times 10^4$ MPa 范围内, (2) f^* 在 $4.0 \sim 4.8 \times 10^2$ MPa 范围内变化; (3) B和D在200°C时彼此之间相合得较好;对A、C和E曲线在 $T=7^\circ$ 和 $T=25^\circ\text{C}$ 时则有些分散,而且在扩容范围,这种曲线的分散性是随应力的增加而增加; (4) 温度升高是引起试件弱化的原因,象B和D与A、C和E的平均值相比较的那样。

这也许表明,在一定的误差范围内,这些曲线能够用 (S_{ij}, e_{ij}) 方程(2)来满意地描述,只要看一眼表2就知,三类试验的E、V、 f^* 、n和 D^* 值之间的一致性较好的,所以由于材料质量的变化,在一定的误差范围内, (σ, e, t) 关系并不受这三种试验方法的影响。

由于岩石的流变性质都很复杂,所以需要使应力或应变状态尽可能地保持简单,最简单的试验是在常载荷 $\sigma_0 H(t)$ 或常应变 $e_0 H(t)$ 的条件下的试验,其中 $H(t)$ 是 Heaviside 单位阶跃函数,这种方法能使我们直接研究蠕变和松弛效应,在各种应力或应变常值的情况下测量蠕变或松弛,就能以简单的方法获得不同时间的应力和应变关系,在应力的一定范围,迭加原理也许是有效的,于是就可以只用一个试件采取梯级加

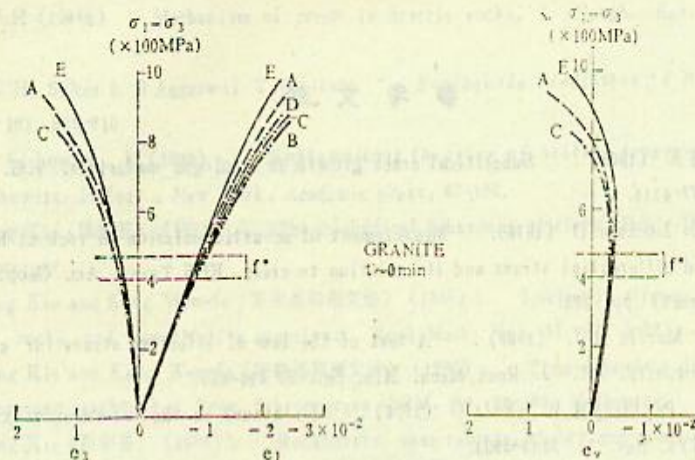


图12 t很小时的应力应变曲线

Fig. 12 Stress-strain curves for small values of t

- | | | | | | | | |
|----|--|------|--------|----|--------|-------|--------|
| A. | $\dot{e}_1 \sim 5 \times 10^{-6} \text{ Sec}^{-1}$ | 25°C | 100MPa | B. | 蠕变试验 I | 200°C | 200MPa |
| C. | 蠕变试验 II | 7°C | 100MPa | D. | 松弛试验 I | 200°C | 200MPa |
| E. | 松弛试验 II | 7°C | 100MPa | | | | |

B和D曲线较靠近, A、C和E的偏离可能由于花岗岩的质量变化所引起的

- | | | | | | | | |
|----|--|------|---------|----|--------------|-------|---------|
| A. | $\dot{e}_1 \sim 5 \times 10^{-6} \text{ sec}^{-1}$ | 25°C | 100MPa; | B. | Creep I | 200°C | 200MPa; |
| C. | Creep II | 7°C | 100MPa; | D. | Relaxation I | 200°C | 200MPa; |
| E. | Relaxation II | 7°C | 100MPa. | | | | |

Close correspondence for the curves B,D. The deviations in A,C and E may be due to the quality variations in granite.

截进行试验, 这样我们就能得到所有各级的蠕变函数 $\psi(t)$ 或松弛函数 $R(t)$, 这些都是非线性积分方程中, 与 σ 、 e 和 t 有关, 象 (10) 和 (11) 式中所表示的那样的核函数。

当我们采用常应变率 $\dot{e} = C^*$ 时, 问题就变得比较复杂了, 因为我们引进了一个以 $e = C^*t$ 形式的附加的复杂因素。为了研究与时间有关的 $(\sigma, e) C^*$ 关系, 必须在 n 个相同试件上进行 n 次试验, 才能得到一组 n 个 $(\sigma, e) C^*$ 关系。此外要从这组曲线中求出本构方程 $e_{ij} = F(S_{ij}, t)_{P,T}$ 或 $S_{ij} = F^{-1}(e_{ij}, t)_{P,T}$, 即使可能也是比较困难的。

这些常应变率 $\dot{e} = C^*$ 试验有一个好处, 就是它们对研究破坏后的性状很适合。

在接近破坏强度 σ_F 应力处, 与时间有关的扩容是非常复杂的, 至于迭加原理看来也不再适用了。在这方面还有待于进一步的研究, 因为, 在破坏前阶段与时间有关的扩容对地震预报和工程是非常重要的。

参 考 文 献

- Atkinson B K (1984). Subcritical crack growth in geologic materials. J.G.R. Vol.86, No. B6 pp. 4077-4114.
- Byerlee J D, Lockner D (1976). Measurement of acoustic emission in rock at high confining pressure and differential stress and its relation to creep. EOS Trans. Am. Geophys. Union 57, 1011 (abstract). pp. 122.
- Brace W F, Martin R J. (1968). A test of the law of effective stress for crystalline rocks of low porosity. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 5. 414-426.
- Brace W F, Paulding B W, Scholz C (1966). Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. J. Geophys. Res. 71 3939-3953.
- Bridgman P W (1949). Volume changes in the plastic stages of simple compression. J. Appl. Phys. 20, 1241-1251.
- Chang Chu-sheng (1978). Land deformation associated with the Tangshan M=7.8 earthquake. Int. Workshop on Monitoring crustal Dynamics in Earthquake Zones. Joint. Meet. Eur. Seismol. Comm. and Eur. Geophys. Soc., Strassbourg.
- Cogan J (1976). Triaxial creep tests of Opohonga limestone and Ophir shale. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 13. 1-10.
- Geuze E C W A, Tan Tjong kie (1953). The mechanical behaviour of clays. proc. 2nd. Cong. Rheology, Oxford. pp. 247.
- Gramberg J (1970). Klastische en Kataklastische Processen en hun betekenis voor de gesterente mechanica. Dr. thesis Tech. Un. Delft Drukkery J.H. pasmans, The Hague.
- Hadley K (1975). Dilatancy of rocks at elevated temperatures. EOS Trans Am. Geophys. Union 56 pp. 1060 (Abstract).
- Handin J, Hager R V, Friedman M, Feather J N (1963). Experimental deformation of sedimentary rocks under confining pressure; pore pressure effects. Bull. Am. Assoc. petrol. Geol. 47. 717-755.
- John. M. (1974) Zeitabhängigkeit der Bruchvorgänge von Gesteinen, proc. 3d Cong. ISRM Vol. 11 (A), 330-350.
- Locke FJ (1972). *Nonlinear Viscoelastic solids*. Chapt 9, AC. press, London, New York
- Lockner D, Byerlee J D (1977). *Acoustic emission and creep in work at high confining pressure and differential stress*. Bull. Seismol. Soc. Am. 67; 247-258
- Matsushima S (1960). On the flow and fracture of igneous rocks and the deformation and fracture of granite under high confining pressure. Disaster prevention Res. Inst., Kyoto Univ., Bull. No. 36; 20.
- Nur A (1972). Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of v_s/v_p travel time. Bull. Seismol. Soc. Am. 62. 1217-1222.
- Paterson M S (1978). *Experimental Rock Deformation-The Brittle Field*, Springer Verlag, New York.
- Reynolds O (1885). On the dilatancy of media composed of rigid particles in contact. Phil. Mag. 20, 469-481.
- Scholz C H (1968a). Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression. J. Geophys. Res. 73. 1417-1423.

- Scholz C H (1968b) Mechanism of creep in brittle rocks, J. Geoph. Res. 73, 3295-3301.
- Scholz C H, Sykes L R Aggarwal Y P (1973). *Earthquake Prediction, a Physical basis*. Science 181, 803-810.
- Sih G C Liebowitz, H (1968). *Mathematical theories of brittle fracture*, in: Fracture, Vol. II. Liebowitz, H (ed); New York; Academic press; 67-190.
- Tan Tjong Kie (陈宗基) (1953). The mechanical behaviour of clays. Publ. Delft Soil Mechanics Laboratory.
- Tan Tjong Kie and Kang Wen-fa (陈宗基和康文法) (1980). Locked in stresses, creep and dilatancy of rocks and constitutive equations. Rock Mech. Vol. 13, pp. 5-22.
- Tan Tjong Kie and Kang Wen-fa (陈宗基和康文法) (1983). Time-dependent dilatancy prior to rock failure and earthquakes. Proc. 5th congress ISRM, pp. 96-102, Melbourne.
- Tan Tjong Kie (陈宗基) (1986). Rockbursts, case records, theory and control. Proc. Int. Symp. on Engineering in Complex Rock Formation, 32-47, Beijing, China
- Tan Tjong Kie (陈宗基) (1987). The NATM studied from the view point of rheology and geodynamics. Proc. 6th Congr. ISRM. PP. 1265-1270, Montreal.
- Tan Tjong kie (陈宗基) (1988). The fundamental Properties of loess from North Western China. Eng. Geology (in Print).
- Tapponnier P, Brace W F (1976). Development of stress-induced microcracks in Westerly granite. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 13. 103-112.
- Tullis J and Yund R E (1977). Journ. Geoph. Res. 82 pp. 5705-5718.
- Wang Chen-ming et al. (1979). Characteristics of deep-well water level variation before and after Tangshan earthquake. Symp. Earthquake Prediction, UNESCO, Paris.
- Wong T F (1982). Effects of Temperature and Pressure on failure and Post-failure behavior of Westerly granite. Mechanics of Materials. 1, 3-17.
- Wong T F (1982). Micro Mechanics of Faulting in Westerley Granite. Int. J. Rock Mech. Min Sc. & Geo. Mech. 16 Str. Vol. 19, 49-64.
- Wu F T and Thomsen L (1975). Micro-fracturing and deformation of Westerley granite under creep condition. Int. J. Rock Mech. Min. Sc. Vol. 12 167-173.
- Zoback MD and Byerlee J D (1975). The effece of microcrack dilatancy on the Permeability of Westerley granite. J. Geophys. Res. 80 742-755.

金济山 译

周思益, 康文法 校

Dilatancy Creep and Relaxation of Brittle Rocks Measured with the 8000 KN Multipurpose Triaxial Apparatus

Tan Tjong Kie, Shi Zhe Ouan, Yu Zhi Hai, Wu Xiang Yang

(Institute of Geophysics, Academia Sinica, Beijing, China)

Abstract

A comprehensive description is given of the new 8000 KN servocontrolled multipurpose triaxial apparatus for the research of the dilatancy, creep and relaxational behaviour of rocks in the brittle stage. Eight series of tests at the constant strain rate of 5×10^{-5} /sec on samples of Fangshan granite and jinan gabbro have been performed for various confining pressures and temperatures; the dilatancy parameters have been determined on the basis of constitutive equations for creep dilatancy presented earlier (Tan, Kang 1983). The tests show an increase of dilatancy with the temperature and suppression of dilatancy with the confining pressure. A creep test on Fangshan granite has been carried out under a stepwise loading under 200 MPa confining pressure and a temperature of 200°C; in this manner the dependence of creep on deviatoric stress and time can be obtained very easily from one sample. At last a relaxation test under the same confining pressure and temperature has been performed under stepwise straining with the time. The yield values f^* for creep and relaxation have been determined from the stress-strain isochrones. An analysis of the time dependent processes of dilatancy is presented in connection with structural changes due to crack growth, coalescence and generation.