



## 岩石室内的水压致裂研究

颜玉定

(广东省地质局 广州)

### 提 要

本文根据石英粉砂岩、层凝灰岩、页岩三类岩石共 97 个试件的室内三轴水压致裂实验的研究,得到以下几点认识:(1)在水压致裂的全过程中,岩石的变形以环向为主,主破裂前  $\sigma-\epsilon$  呈线性关系;致裂瞬间  $\epsilon$  突然增大,  $\sigma-\epsilon$  呈非线性,但岩石材料仍可视作弹性。(2)致裂时的应变速率随围压的增大而线性下降。(3)水压致裂法与劈裂法所得的岩石抗拉强度基本一致,前者略高。(4)低围压条件下试件致裂时的孔压差(孔压减围压)随围压的升高而升高,当围压超过某一值后,它却随围压的升高而降低。(5)岩石水压致裂所需的环向正应力(拉应力)随围压的升高而降低。(6)水压致裂的 AE 率图象与常规三轴的截然不同,前者反映张性破裂机制,后者反映剪性或压剪性破裂机制。(7)AE 率图反映出水压致裂是沿一个或有限的几个面而发生,而常规实验的破裂往往在全体积内发生。(8)水压致裂主要为张性破裂,许多张性总破裂由多次破裂组成,张破裂为环向正应力所致,由内孔壁沿径向扩展至外壁。

### 一、前 言

随着地下能源的不断开发,地下工程的蓬勃兴起,用于测量地壳岩体的应力状态、研究破裂机制的水压致裂法,受到地学和岩石力学工作者的重视,水压致裂法的一些新技术、新方法已经和正在被应用于实际。

用我们自己研制的 HF-1 型岩石水压致裂三轴仪<sup>[1]</sup>,对广西龙滩水库坝址附近的石英粉砂岩、层凝灰岩、页岩三类岩石试件进行室内水压致裂实验,求取它们在不同围压下的致裂强度、变形、声发射及破裂特征,并对岩石水压致裂的机制进行了初步的探讨。

## 二、试件

1. 岩性: 分三类, (1) 长石石英粉砂岩 (以下简称砂岩); (2) 层凝灰岩 (简称凝灰岩); (3) 页岩、砂页岩 (简称页岩), 表1\*为有关物理参数。

2. 试件几何尺寸、状态及数量: 制成外直径5cm, 内孔径0.8cm, 高10cm的厚壁圆筒状, 表面光滑, 两端面不平整度小于0.05mm, 试件分风干、饱水两种状态, 其数量和饱水时间列于表2。

表1 物理参数

Tab.1 Physical parameters

项目	岩性		
	长石石英粉砂岩	层凝灰岩	页岩砂页岩
容重 (g/cm <sup>3</sup> )	2.71	2.72	2.73
比重 (g/cm <sup>3</sup> )	2.73	2.73	2.75
总孔隙率 %	0.73	0.37	0.75

表2 试件分配

Tab.2 Distribution of samples

试件	状态	风干		饱水	
		数量 (个)	饱水时间 (天)	数量 (个)	饱水时间 (天)
砂岩		13	17	110—115	
凝灰岩		10	17	115—122	
页岩		19	21	115—122	

## 三、实验原理与方法

### 1. 原理

处于地下的岩体总要受围岩的侧压作用, 此即围压, 同时还承受上覆岩层和地面建筑物 (如水库大坝、库水等) 的重力作用, 此力相当于实验时的轴压, 当岩体内存在断裂或其它破碎结构面时, 这些弱面将成为水的通道, 在某些特定条件下 (如人工注水) 会形成高压水而使岩体致裂, 此现象类似实验室孔内注水致裂, 因三轴水压致裂仪可同时施加轴压、围压和孔压, 且三种加压系统又是独立的, 因而可用来模拟野外岩体的水压致裂。

设试件为弹性体, 其受力状态如图1所示, 为防止围压与孔压相通, 实验时先加一固定轴压  $P_z$ ,  $P_z$  限制了试件的轴向变形, 使圆筒各横截面处于平面应变状态, 按厚壁圆筒的拉梅 (Lame) 公式<sup>[2]</sup>, 并使压应力为正, 拉应力为负, 则

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{(p_2 - p_1)r_1^2 r_2^2}{r^2(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{r_2^2 p_2 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_2^2} \\ \sigma_t &= -\frac{(p_2 - p_1)r_1^2 r_2^2}{r^2(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{r_2^2 p_2 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_2^2} \\ \sigma_z &= \frac{p_z}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{2\mu(r_2^2 p_2 - r_1^2 p_1)}{r_1^2 - r_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

\* 广东省地震局水库室, 广西龙滩水库岩样软化与室内水压致裂试验报告, 1986。

式中  $\sigma_r$ 、 $\sigma_t$ 、 $\sigma_z$  分别为径向、环向和轴向正应力,  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r$  分别为试件外、内半径和厚壁内任意点半径,  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_z$  分别为围压、孔压和轴压,  $\mu$  为泊松比。

当  $p_1=0$ , 即无围压时, 由 (1) 式得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{r_2^2 p_2}{r_1^2 - r_2^2} \left( \frac{r_1^2}{r^2} - 1 \right) \\ \sigma_t &= -\frac{r_2^2 p_2}{r_1^2 - r_2^2} \left( \frac{r_1^2}{r^2} + 1 \right) \\ \sigma_z &= \frac{p_z}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{2\mu r_2^2 p_2}{r_1^2 - r_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

由 (2) 式知, 当  $p_2$  较大时, 内孔壁径向受到很大的压应力 ( $\sigma_r = p_2$ ), 环向受到更大的拉应力

$\sigma_t = -\left( \frac{1+r_2^2/r_1^2}{1-r_2^2/r_1^2} p_2 \right)$ , 最大拉应力和最大剪应力

$\tau_{max} = \frac{p_2}{1-r_2^2/r_1^2}$  都在内壁, 所以了解孔壁的应力状态极为

重要。在试件内孔壁, 即  $r=r_2$  时, 由 (1) 式得,

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= p_2 \\ \sigma_t &= \frac{2r_1^2 p_1 - (r_1^2 + r_2^2) p_2}{r_1^2 - r_2^2} \\ \sigma_z &= \frac{p_z}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{2\mu(r_2^2 p_2 - r_1^2 p_1)}{r_1^2 - r_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

通常, 应变片总是贴在试件的外表面, 要求外表面的  $\sigma-\epsilon$  关系, 需知其应力状态。在试件外壁, 即  $r=r_1$  时, 由 (1) 式得

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= p_1 \\ \sigma_t &= \frac{(r_1 + r_2) p_1 - 2r_2 p_2}{r_1^2 - r_2^2} \\ \sigma_z &= \frac{p_z}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{2\mu(r_1^2 p_2 - r_1^2 p_1)}{r_1^2 - r_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

## 2. 方法

图 2 为 HF-1 型岩石水压致裂三轴仪的压力室结构示意图, 图 3 是实验原理图<sup>[3]</sup>, 轴压由压机施加; 围压由电动油泵施加; 孔压由手摇泵施加。试件外表面贴纵横两个方向的应变片 (各 2 片), 测量轴、环向应变; 压力室外表面装有声发射 (AE) 探头, 测量试件的 AE 率和事件总数。轴压、围压、孔压通过 ZQ-Y<sub>1</sub>/600 型压力传感器与应变片的应变同时输入 Y6D-ZG 型电阻-电感应变仪的各个通道, 由应变仪将各讯号放大, 再输入 X-Y 函数记录仪, AE 讯号经声发射仪也输入 X-Y 仪, 就这样自动、连续地记录下各物理量。

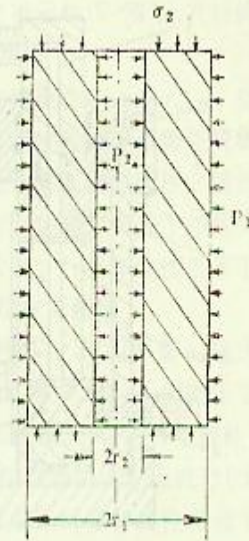
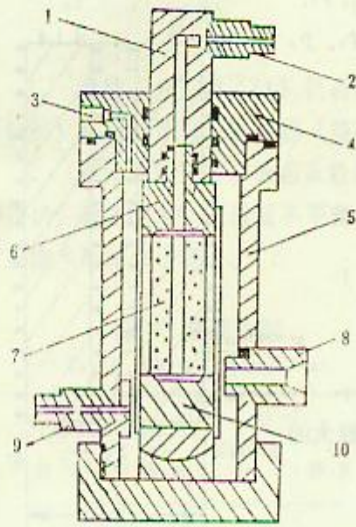


图 1 试件受力状态  
Fig. 1 Force-bearing status of sample



1. 三轴室 (triaxial cell)
2. 传感器 (transducer)
3. 手摇油泵 (hand pump)
4. 试件 (sample)
5. 动态应变仪 (dynamic strain indicator)
6. X-Y 函数仪 (X-Y plotter)
7. 压力表 (pressure gage)
8. AE 探头 (AE probe)
9. AE 仪 (AE indicator)
10. 传感器 (transducer)
11. 应变片 (strain gauge)
12. 电动油泵 (electric pump)

图2 水压三轴压力室结构示意图  
Fig.2 Structural sketch showing a triaxial hydraulic pressure chamber

1. 传力柱 (pressure pillar)
2. 孔压进口 (pore pressure inlet)
3. 排气孔 (exhaust hole)
4. 筒盖 (tube lid)
5. 筒体 (tube body)
6. 上压头 (upper pressure head)
7. 试件 (sample)
8. 电测引线口 (wire hole)
9. 围压进口 (confining pressure inlet)
10. 下压头 (lower pressure head)

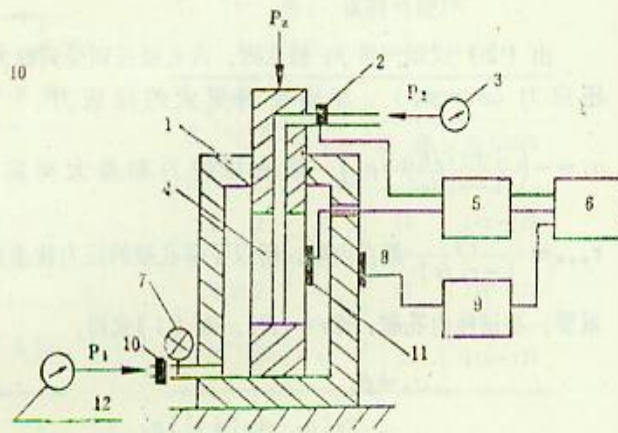


图3 水压三轴实验原理图  
Fig.3 Diagram of experimental principles in triaxial hydraulic pressure fracture

实验的加载途径是：先加轴压  $P_x$ （一般加2—4吨），压紧试件，防止围压和孔压由端部连通；然后加围压，本实验的围压一般分0、5、10、15、20 MPa 五级；最后加孔压至试件破裂。

## 四、结果与分析

为叙述和资料整理的方便，将砂岩、凝灰岩、页岩试件分别用字符 I、II、III 表示，如 I<sub>12</sub>—砂岩第12号试件；II<sub>10</sub>—凝灰岩第10号试件；III<sub>1</sub>—页岩第1号试件。

### 1. 水压致裂实验过程中试件的变形特征

变形特征由贴在试件外表面的应变片应变值反映出来，由 X-Y 函数仪记录的应力、应变和时间曲线，可对试件外表面在轴、围、孔压各荷载段的轴向应力-应变 ( $\sigma_x - \epsilon_1$ ) 和环向  $\sigma_r - \epsilon_3$  关系作出分析。以下对有、无围压两种应力状态时的  $\sigma_x - \epsilon_1$ 、 $\sigma_r - \epsilon_3$  分别进行阐述。尽管本实验大部分试件都有良好的  $\sigma$ 、 $\epsilon$ 、 $t$ （时间）曲线记录，但因篇幅所限，无法全数罗列，本文仅取少量以代表，其它图件亦照此取舍。

(1) 有围压 ( $P_1 \neq 0$ ) 时试件外表面的  $\sigma - \epsilon$  关系如图 4 (II<sub>31</sub>,  $P_1 = 15 \text{ MPa}$ ) 所示，

图中 $\sigma_2-e_1$ 曲线用虚线表示,  $\sigma_1-e_3$ 用实线表示, 曲线中的黑圆点表示轴压-围压-孔压的荷载转换点。

(a)  $\sigma_2-e_1$ 曲线: 反映出轴压由0增至27MPa时,  $e_1$ 随之从0增至135 $\mu\epsilon$ ,  $\sigma_2, e_1$ 呈线性关系; 稳定轴压, 施加围压至15MPa, 此时 $\sigma_2$ 降至24MPa, 因试件处于平面应变状态, 故 $e_1$ 仍保持135 $\mu\epsilon$ , 该段 $\sigma_2-e_1$ 曲线为一平行 $\sigma$ 轴的线段; 稳定围压施加孔压, 随着孔压的增加,  $\sigma_2$ 缓慢上升,  $e_1$ 开头仍然不变, 当试件临近破裂时, 出现“膨胀”效应, 即两端部仍被约束而中部已向外鼓出, 此时试件已非平面应变状态,  $e_1$ 呈非线性迅速下降, 破裂瞬间,  $e_1$ 转为拉应变,  $\sigma_2-e_1$ 曲线几乎垂直 $\sigma$ 坐标轴, 拉应变剧增。

(b)  $\sigma_1-e_3$ 曲线: 随着轴压的增大,  $\sigma_1$ 缓慢下降(拉应力增大), 环向应变 $e_3$ 随之线性下降(拉应变增大), 轴压至预定值时,  $\sigma_1=-5.7$ MPa,  $e_3=-36\mu\epsilon$ ; 加围压至15MPa, 由(4)式得 $\sigma_1=15.8$ MPa(压应力),  $e_3=36\mu\epsilon$ (压应变),  $\sigma_1-e_3$ 呈线性; 施加孔压,  $\sigma_1$ 随之下降, 由(4)式计算可知: 外壁的 $\sigma_1$ 至试件破裂前仍为压应力(本实验全部有围压试件的结果都如此),  $e_3$ 开头线性下降, 至“膨胀”时呈非线性迅速下降, 破裂瞬间,  $e_3$ 转为拉应变并急剧下降(拉应变剧增)。

(2) 无围压( $P_1=0$ )时试件外表面的 $\sigma-e$ 关系如图5(III<sub>1</sub>试件)所示, 图中 $\sigma-e$ 曲线的表示法与图4相同, 对比图4中的相应曲线, 图5中的 $\sigma_2-e_1$ 曲线除缺少围压段外, 轴压和孔压两段的变化与图4完全一致, 而 $\sigma_1-e_3$ 曲线的孔压段却与图4中不同,  $P_1=0$ , 外壁的 $\sigma_1 < 0$ , 都是拉应力,  $e_3$ 全是拉应变, 当然, 致裂瞬间的特点是一样的。

(3) 致裂瞬间试件外壁的应变速率与围压的关系

设 $\eta$ 为试件某一应变分量的应变速率(简称应变率),  $\eta$ 定义为

$$\eta = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta e}{\Delta t} = \frac{de}{dt} \quad (5)$$

式中 $\Delta e$ 、 $\Delta t$ 分别为应变增量和时间增量。

由(5)式可知,  $\eta$ 取决于 $\Delta e$ 和 $\Delta t$ , 在材料的弹性范畴内 $\Delta e$ 正比于加荷速率, 且受

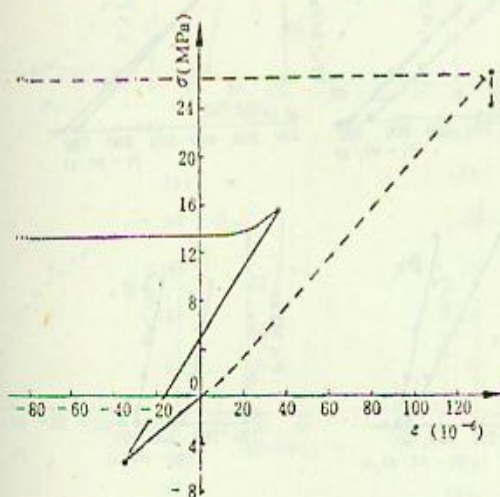


图4 水压致裂的 $\epsilon-\sigma$ 图 ( $P_1 \neq 0$ )

Fig. 4 An  $\epsilon-\sigma$  pattern in hydraulic pressure fracture when  $P_1 \neq 0$

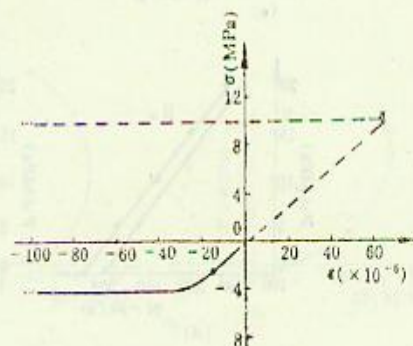


图5 水压致裂实验的 $\epsilon-\sigma$ 图 ( $P_1 = 0$ )

Fig. 5  $\epsilon-\sigma$  pattern at  $P_1 = 0$

其控制。本实验孔压的加荷速率是人为的，所以  $\sigma$ - $\epsilon$  曲线各线性段内的  $\eta$  也属人为。然而，当试件临近破裂和破裂瞬间， $\sigma$ - $\epsilon$  曲线表现为非线性， $\Delta\epsilon$  与加荷率已无多大关系，远非人为所能控制，此时的  $\eta$  应完全或主要是表现了岩石固有的一种力学性质。不同围压下，本实验三类岩石试件水压致裂瞬间，外壁的环向和轴向平均应变率列于表3。表中 I、II、III 的脚标 D、W 分别表示风干和饱水状态，图6为致裂瞬时应变率与围压的关系图。

表3 致裂瞬时应变率

Tab.3 Instantaneous rate of strain ( $\eta$ ) at fracture

$P_1$ (MPa)	应变方向		试件 I D		I W		II D		II W		III D		III W	
			$\epsilon_1$	$\epsilon_3$	$\epsilon_1$	$\epsilon_3$	$\epsilon_1$	$\epsilon_3$	$\epsilon_1$	$\epsilon_3$	$\epsilon_1$	$\epsilon_3$	$\epsilon_1$	$\epsilon_3$
	$\eta(\mu\epsilon/s)$													
0	-601	-692	-703	-660	-705	-743	-514	-557	-378	-404	-244	-368		
5.0	-513	-585	-608	-534	-601	-624	-424	-480	-328	-378	-236	-346		
10.0	-417	-456	-482	-411	-491	-491	-346	-381	-261	-357	-214	-328		
15.0	-315	-346	-358	-281	-362	-385	-264	-306	-214	-314	-183	-303		
20.0	-	-	-	-	-263	-234	-182	-218	-156	-310	-	-		

从表3、图6中可知：(1)试件致裂时的瞬时应变，无论环向、轴向，还是风干、饱水，全是拉应变，且 $\eta < 0$ 。(2)致裂瞬间的应变率随围压的增大而线性下降，由图6得 $\eta$ 与 $P_1$ 的关系：

$$\eta = kP_1 - b \tag{6}$$

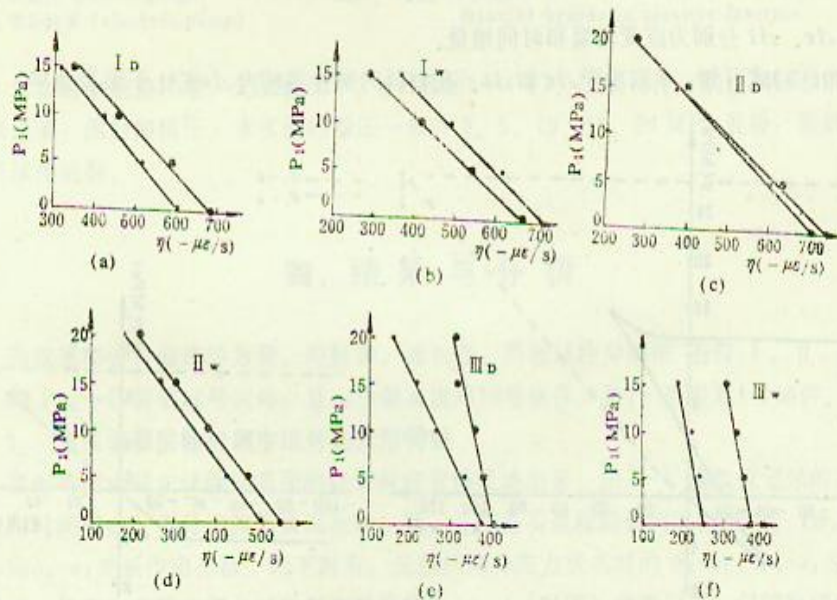


图6 水压致裂应变率与围压关系图 ·轴向 $\eta$  ○环向 $\eta$

Fig.6 Correlation chart showing hydraulic fracture rate of strain against confining pressure

式中  $k$  是与材料性质有关的系数,  $b$  为无围压条件下的致裂瞬时应变率, (3) 通常在同级围压中  $\eta$  的绝对值总是风干大于饱水, 环向大于径向, 但也有例外, 如  $I_w$  的轴向  $\eta$  就比  $I_D$  的大。

## 2. 试件水压致裂的强度特征

表 4 是用劈裂法和水压致裂法得到的三类岩石的风干和饱水的抗拉强度, 两种方法的结果较接近, 后者略高些, 可能是受厚壁圆筒这种特殊试件形状的影响, 饱水抗拉强

表 4 抗拉强度

Tab. 4 Tensile strength

抗拉 强度(Mpa)	岩性		砂岩		凝灰岩		页岩	
			风干	饱水	风干	饱水	风干	饱水
	实验方法							
劈裂法	22	18	21	21	4	3		
水压致裂法	27	26	22	21	7	3		

度比风干的低, 显示了软化特性。

为研究水压致裂强度与围压的关系, 作孔压差-围压( $\Delta P-P_1$ ) 曲线和致裂强度-围压( $\sigma_1-P_1$ ) 曲线(图7), 孔压差  $\Delta P$  定义为  $\Delta P = P_2 - P_1$  (7)

(1)  $\Delta P-P_1$  关系 图 7 中实线为  $\Delta P-P_1$  曲线, 可见在  $P_1$  较低时,  $\Delta P$  随  $P_1$  的增加而增加, 当  $P_1$  达某一稍高值后,  $\Delta P$  反随  $P_1$  的增加而减小, 此变化趋势除图 7(a) 外, 图 7(b)-(f) 中都十分明显, 似乎存在一“转折点”围压, 而图 7(a) 中的曲线没有

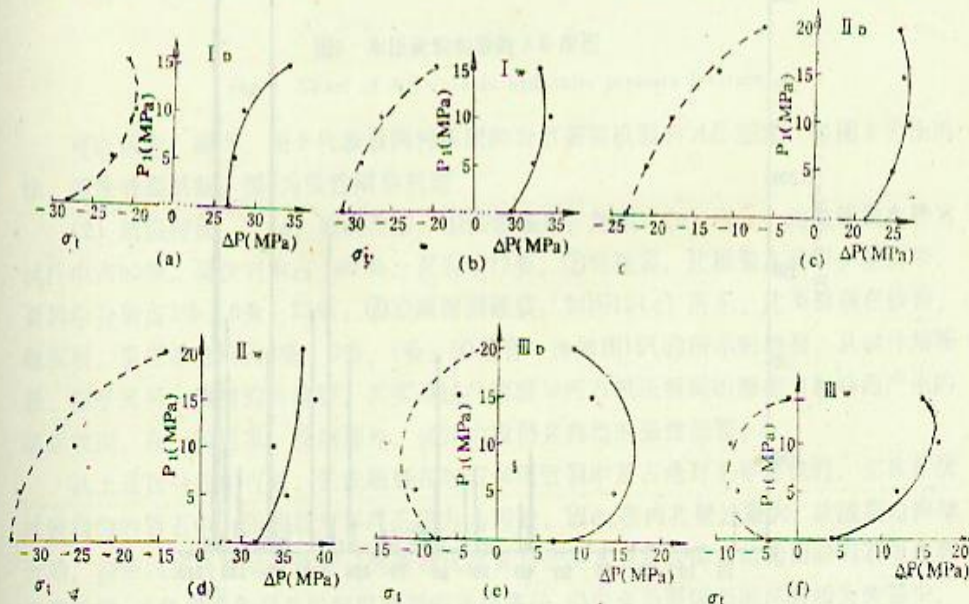


图 7 孔压差、致裂环向正应力与围压关系图

Fig. 7 Correlation chart showing pore pressure difference and fracture annular positive strain against confining pressure

出现此现象可解释为  $P_1$  尚未达到此点。

(2)  $\sigma_1-P_1$ 关系 这里的  $\sigma_1$  系指水压致裂时试件内壁的环向正应力,即抗拉强度。图7中虚线为  $\sigma_1-P_1$  曲线,可见一般情况下,抗拉强度随  $P_1$  的增加而逐渐变小,此现象在  $P_1$  较高时更明显,说明围压越大所需致裂应力越小,若此现象普遍存在,则意味着孔隙水压力在深部亦可诱发水库地震。

由于此次实验的围压低(最高仅20 MPa),试件种类少(三种),尚难断定上述现象的普遍性,有待进一步作高围压、多岩性的实验以证实。再者,若该现象确具普遍性,则  $\Delta P$ 、 $\sigma_1$  随着  $P_1$  的不断增大最终必趋于某一稳定值(或范围),不可能无休止地小(指绝对值)下去。

### 3. 岩石水压致裂的声发射与破裂特征

(1) 声发射(AE) 岩石常规三轴(或单轴)实验过程的声发射特点是人们比较熟悉的,在轴压和围压都还比较低时,声发射便会出现,随着轴压的增大,AE 则将接踵而至,当破裂发生前后,其数量更大,图8(II<sub>as</sub>,围压20MPa)为凝灰岩常规三轴实验的AE率图。

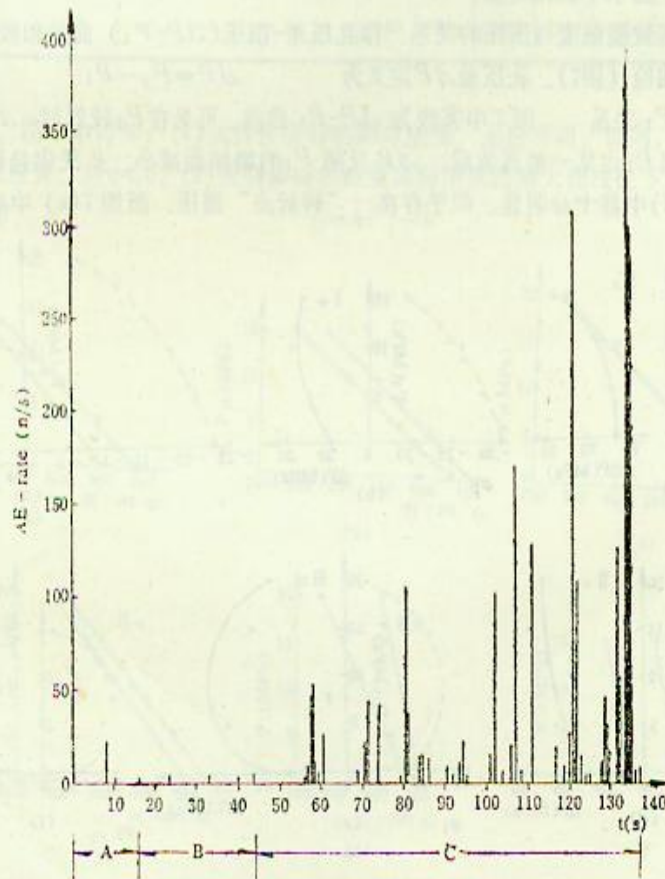


图8 常规三轴实验的AE率图

Fig.8 Chart of AE-rate in conventional triaxial experiment



然而, 岩石水压致裂实验的声发射特点却别具一格, 与常规的差别甚大, 图9(Ⅲ<sub>27</sub>,  $P_1 = 15 \text{ MPa}$ ) 为水压致裂实验全过程的  $AE$  率图, 具有下述特点:

(a) 在加轴压和围压段, 即图8、9中的  $A$ 、 $B$  段, 常规和致裂实验的加载情况相同,  $AE$  率的特点也一样——零星出现, 反映试件发生微破裂; (b) 图8的  $C$  段是轴压段, 图9  $C$  段是孔压段, 由于两者加载方式不同,  $C$  段的  $AE$  的情形也大不相同, 图8反映出随轴压的增大, 试件内微破裂越来越多, 数不胜数, 而图9仅在总破裂时出现2个较大的破裂, 及在此之前仅出现2个小破裂。

常规实验的试件内主要出现压剪性或剪切破裂, 破裂分布在试件的整个体积内, 所以在  $AE$  图中出现众多的  $AE$  事件, 然而, 水压致裂实验的试件内却主要出现张性破裂或少量张性为主略带剪性的破裂, 此类破裂仅分布在一个或几个沿径向且平行于轴向的面内, 破裂次数极其有限, 所以  $AE$  也很少。

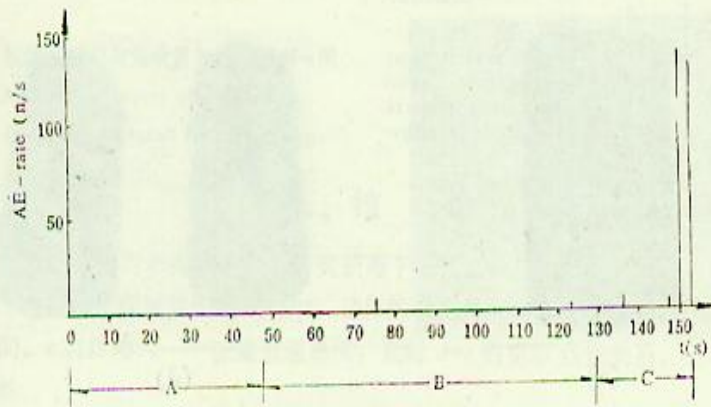


图9 水压致裂实验的  $AE$  率图

Fig.9 Chart of AE-rate in hydraulic pressure fracture

可以认为: 图8、图9代表着两种不同的岩石破裂机制的  $AE$  图象, 即图8为压剪性、剪性破裂机制; 图9为张性破裂机制。

(2) 破裂特征 (a) 破裂类型: ①张性破裂: 如图10(a)所示, 此类破裂在砂岩试件中占90%, 凝灰岩中占100%, 页岩中73%; ②剪破裂: 此破裂在砂岩、凝灰岩、页岩中分别占3%、0%、23%; ③沿原弱面破裂: 如图10(c)所示, 此类破裂在砂岩、凝灰岩、页岩中分别占3%、0%、5%; ④另有一种如图10(d)所示的破裂, 从试件端部看, 似乎属另一类型的剪破裂, 其实是试件端面与压力机压板间的摩擦力影响而产生的端部效应, 是一种假象, 除端部外, 试件中段仍是典型的张性破裂。

从上述百分比中可见, 张性破裂在岩石水压致裂中是占绝对主导地位的, 尤其在质地较均匀的岩石中, 张破裂为环向正应力  $\sigma_r$  所致, 因  $\sigma_r$  在内孔壁处最大, 故破裂由内壁开始, 沿径向扩展至试件外壁, 剪破裂仅在页岩之类本身富含薄弱结构面的岩石中占有少量比例, 虽然这些弱面是引起剪破裂的先决条件, 但完全沿原弱面破坏的却为数甚少, 因为  $\sigma_r$  总是强烈地牵制着它, 使裂面偏离原弱面而呈张剪性。

(3) 张性破裂的多次性 岩石水压致裂时, 张性破裂并非总是一次完成, 多数试件都是经过多次破裂, 表5列出了本实验属张性破裂的试件的总破裂次数, 总破裂经2

次以上完成的占53%，最多的竟达7次。

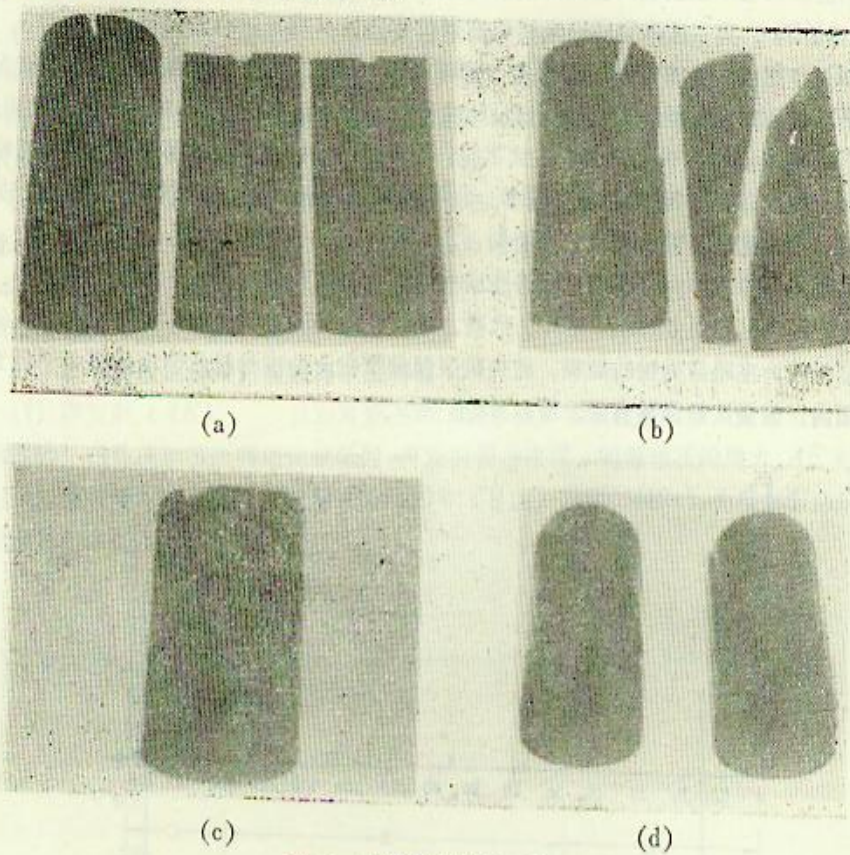


图10 水压致裂试件的破裂状态图

Fig.10 Status of samples in hydraulic pressure fracture

表5 张性总破裂次数

Tab.5 Frequency of busbar tensile fractures

岩石名称	张破裂试件 总数(个)	张性破裂次数(次)							破裂比例(%)	
		1	2	3	4	5	6	7	一次	多次
砂岩	27	14	5	2	—	3	2	1	52	48
凝灰岩	27	14	12	3	1	—	—	—	41	59
页岩	29	14	9	5	1	—	—	—	48	52
累计	83	39	26	10	2	3	2	1	47	53

图11为 $\epsilon_1$ 、 $AE-t$ 曲线。图11(a)(Ⅲ<sub>22</sub>,  $P_1=5\text{MPa}$ )、图11(b)(Ⅱ<sub>20</sub>,  $P_1=0$ )、图11(c)(Ⅰ<sub>13</sub>,  $P_1=10\text{MPa}$ )分别代表1、2、5次完成总破裂的 $\epsilon_1$ 和 $AE$ 对照图。图中可见,应变释放次数和 $AE$ 突发次数都与完成总破裂的破裂次数相对应。

图12(Ⅲ<sub>13</sub>,  $P_1=0$ )是一幅试件受张应力 $\sigma_1$ 作用而破坏,但破裂面却受原薄弱结构面影响的典型图象,它的总破裂分5次完成,(b)图为其环向应变曲线,

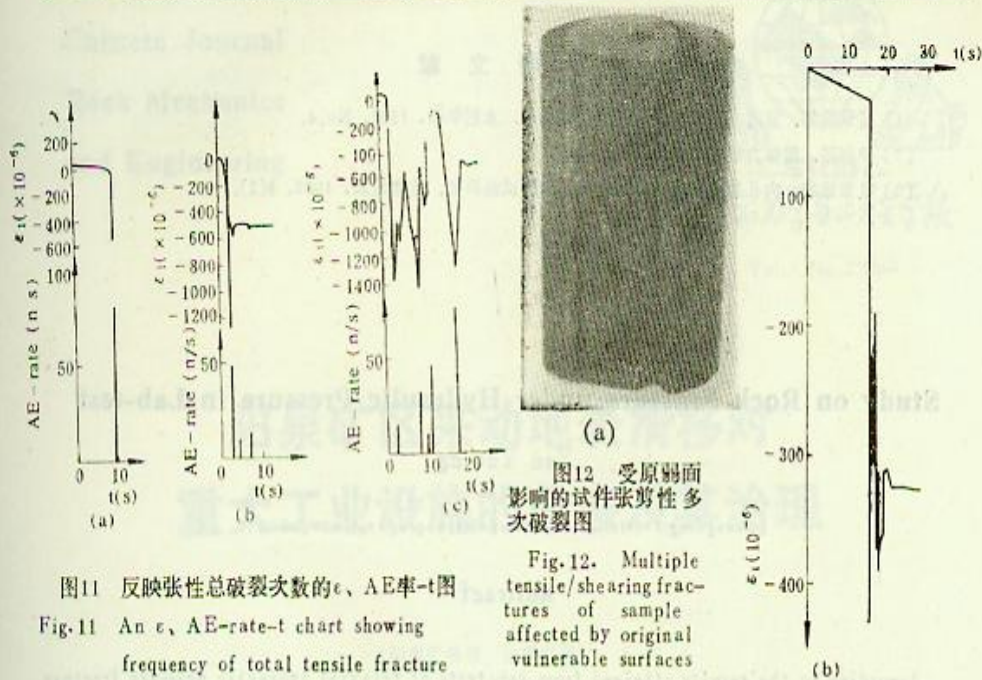


图11 反映张性总破裂次数的 $\dot{\epsilon}$ 、AE率-t图  
Fig. 11 An  $\dot{\epsilon}$ , AE-rate-t chart showing frequency of total tensile fracture

图12 受原弱面影响的试件张剪性多次破裂图

Fig. 12. Multiple tensile/shearing fractures of sample affected by original vulnerable surfaces

## 五、结 论

本次岩石室内的水压致裂实验研究获得下述几点认识:

1. 在岩石水压致裂的全过程中, 试件的变形以环向为主, 致裂前  $\sigma$ - $\epsilon$  呈线性关系, 致裂瞬间,  $\epsilon$  突然增大——能量迅速释放, 此时  $\sigma$ - $\epsilon$  则呈非线性关系, 但岩石材料仍可视作弹性。
2. 致裂瞬间试件外壁的应变速率  $\dot{\eta}$  随围压的增大呈线性降低, 一般情况下, 同围压的  $\dot{\eta}$  总是环向大于轴向、风干状态大于饱水状态。
3. 水压致裂法与劈裂法所得的抗拉强度基本一致, 前者略高, 说明水压致裂法是求取岩石抗拉强度的一种可行的方法。
4. 试件致裂的孔压差随围压的升高而增大, 当围压超过某一值后, 它却随围压的升高而降低。
5. 岩石水压致裂由环向正应力  $\sigma_r$  引起, 试件内孔壁致裂时的  $\sigma_r$  即为抗拉强度, 抗拉强度随围压的增大而降低。
6. 岩石水压致裂的 AE 率图象与常规三轴的截然不同, 前者反映张性破裂机制, 后者反映压剪性或剪性破裂机制。
7. 岩石水压致裂一般是张性破裂, 破裂由内孔壁开始沿径向扩展至外壁, 张破裂往往在一个或有限的几个面内发生。
8. 多数张性总破裂是由多次破裂组成的。

本文实验试件虽较多, 也进行了许多测试项目, 获得了比较丰富的资料, 认识到岩石在水压致裂和有围压作用下的破裂机制, 但因仪器设备所限, 而且整个实验是在低围压条件下完成的, 显然, 这些现象和认识存在一定的局限性, 有待进一步深化。

参加本实验工作的还有李健康、廖远群、石勇等同志, 笔者在此深致谢意。

## 参 考 文 献

- (1) 吴景浓等. 室内水压致裂法的初步实验研究. 水利学报, 1982, No.4.  
(2) 尹祥础. 固体力学. 地震出版社, 1985.  
(3) 吴景浓等. 内孔加压三轴条件下岩石的破裂试验研究. 地震地质, 1985, 8(2).

## Study on Rock Fracture under Hydraulic Pressure in Lab-test

Yan Yuding

*(Guangdong Provincial Bureau of Seismography, Guangzhou)*

## Abstract

According to the results attained from lab-tests of triaxial hydraulic pressure fracture upon 97 samples of quartz sandstone, layer tuff and shale, the paper brings to you the following conclusions; (1) In the whole process of hydraulic pressure fracture, annular fracture covers the majority of rocks deformation. The  $\sigma-\varepsilon$  shows linear correlation before the primary fracture. Then the  $\varepsilon$  increases suddenly and instantly with fracture and the  $\sigma-\varepsilon$  shows nonlinear correlation, but still the rock can be thought as elastic material; (2) During the fracture, the rate of strain decreases with the increase of confining pressure; (3) The both tensile strengthes of the rock under hydraulic pressure and wall pressure are essentially identical, with the former being relatively higher; (4) Under low confining pressure the pore pressure difference (pore pressure deducts confining pressure) of the sample rises with the rising of confining pressure during fracture, but it decreases with the increase of the confining pressure once the confining pressure exceeds a certain value; (5) The annular positive strain which causes the hydraulic pressure fracture of rock reduces with the increase of confining pressure; (6) The AE-rate pattern of hydraulic pressure fracture is absolutely different from that of conventional tri-axial fracture; the former reflects a mechanism of tensile fracture and the latter reflects a mechanism of shearing or pressurized shearing fracture; (7) It was shown by the AE-rate pattern that hydraulic pressure fracture of the samples happens along with one or several limited surfaces, against the fracture occurred in the whole volume during traditional experiments; (8) A hydraulic pressure fracture is principally a tensile fracture, and the busbar fracture of numerous tensile fractures comes from multiple fractures.