

围压条件下岩石的抗拉强度¹⁾

颜玉定 廖远群 吴景浓 石 勇

(广东省地震局)

摘要 用水压致裂法对7种岩石的厚壁圆筒试件进行不同围压下的抗拉强度实验,并从试件致裂瞬间的内壁环向应力 σ_t 、环向应变 ϵ_t 等五种参数随围压变化的角度,对围压条件下岩石的抗拉强度进行研究。结果表明,若用 σ_t 表示岩石的应力抗拉强度,则 σ_t 随围压的增加而减少,并由低围压时的拉应力逐渐过渡为高围压时的压应力。高围压时,虽然试件已处于三向受压状态,但其破裂仍表现为典型的张性破裂。从另一意义上讲,处于高围压环境中的岩石,其内部不可能存在拉应力,拉应力只在低围压状态中存在。若岩石的应变抗拉强度由 ϵ_t 表示,即使岩石三向受压,张性破裂的 ϵ_t 始终是拉应变。岩石的抗拉强度由应变率表征似乎更合理。 σ_t 先随围压的增大而增大,当围压超过某一特征值后, σ_t 反随围压的增大而有所减少。

将上述结果应用于岩体(或地震)破裂,可以证明,当岩体内存在 $\sigma_3 < \mu(\sigma_1 + \sigma_2)$ 的应力状态时,即使三向受压,岩体照样会出现张性破裂。由此认为,地震的破裂也存在着张性破裂的可能。

关键词 抗拉强度 围压 水压致裂法

一、前言

岩石的抗拉强度是岩石力学中的一个重要指标,因其值远低于抗压强度,故在较小的力的作用下,岩石便被拉伸破坏。因此,它在地下工程、水工、建筑、采矿及地震研究中都有着重要意义。

迄今,岩石的抗拉强度研究主要仍局限于单轴试验,常用的如劈裂法、弯曲试验、直接拉伸和不规则试件的点荷载试验等。然而,对有围压条件下岩石的抗拉强度的研究,无论理论或实验都较少涉及。本文作者利用厚壁圆筒试件的水压致裂方法,在以前实验的基础上⁽¹⁾,再增加四种岩石(共7种)进行实验,并采用多种分析方法,刻意对岩石抗拉强度随围压的变化进行探讨。

二、实验原理与方法

图1为岩石厚壁圆筒试件水压致裂实验的装置示意图。轴向压力 P_2 由试验机施加,围压 P_1 和内孔压 P_3 由两台手摇泵分别施加。加载顺序为:① P_2 ,其值略大于将要施加的 P_1 。加 P_3 的目的主要是压紧试件两端面,防止 P_1 、 P_2 在试件未致裂前相通;② P_1 ;③ P_2 、 P_1 、 P_3 ;

1) 地震学联合基金会资助的课题

各通过一压力传感器与贴在试件外壁的纵、环向两对应变片的应变 ϵ 同时输入动态应变仪,各讯号经应变仪放大再输入X-Y函数记录仪, P_1 、 P_2 和 c 便被自动、连续地记录下来。

试件的受力状态如图2(a)所示,图2(b)为单元体的应力状态。图2中 r_1 、 r_2 分别为试件外、内半径, σ_r 、 σ_t 、 σ_z 分别为径向、环向和轴向正应力。

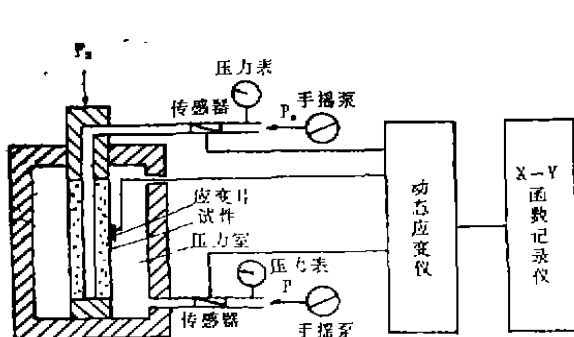


图1 实验装置示意图
Fig.1 Sketch showing the test system

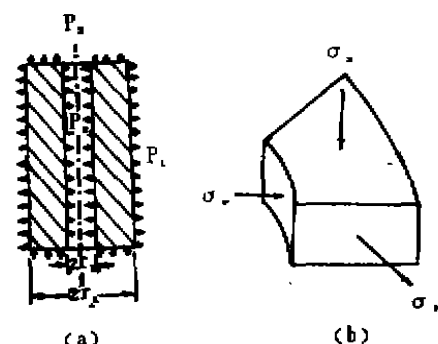


图2 试件受力状态、
Fig.2 Force-bearing status

根据厚壁圆筒的拉梅 (Lame) 公式^[2], 并规定压应力为正, 拉应力为负, 则:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{(P_2 - P_1)r_1^2 r_2^2}{r^2(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{r_2^2 p_2 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_2^2} \\ \sigma_t &= -\frac{(P_2 - P_1)r_1^2 r_2^2}{r^2(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{r_2^2 p_2 - r_1^2 p_1}{r_1^2 - r_2^2} \\ \sigma_z &= \frac{P_z}{\pi(r_1^2 - r_2^2)} - \frac{2\mu(r_2^2 p_2 - r_1^2 p_1)}{r_1^2 - r_2^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中 r 为圆筒厚壁内任意点半径, μ 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($\sigma_t = -\frac{1 + r_2^2/r_1^2}{1 - r_2^2/r_1^2} \cdot p_2$)。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。因 $|\sigma_t| > |\tau_{\max}|$, 且岩石的抗拉强度小于抗剪强度, 所以致裂主要由 σ_t 引起并始于内壁, 文献[1]等资料都证明, 即使在有围压的条件下亦如此。致裂时内壁的 σ_t 即为岩石的抗拉强度。

在内壁, 即 $r=r_2$ 时, 由(1)式得:

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

三、试 件

用7种岩石, 分别为石龙红砂岩(以下简称红砂岩)、新丰江花岗岩(简称花岗岩)¹⁾、云浮大理岩(简称大理岩)、黄杨山辉长岩(简称辉长岩)、龙滩长石石英粉砂岩(简称粉砂岩)²⁾、龙滩层凝灰岩(简称凝灰岩)²⁾和龙滩页岩砂页岩(简称页岩)²⁾。除大理岩和页岩内部存在大量纹流面, 微裂面和其它一系列原生薄弱结构面外, 其余五种岩石的宏观结构都比较均匀。表1为各种岩石的一些物理、力学参数。(试件制成外径50mm、内径10mm、

表1 试件所用岩石的物理、力学参数

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of the rocks

项目 数量	比重 (g/cm ³)	容重 (g/cm ³)	孔隙度 (%)	单轴抗压强度(MPa)		弹性模量($\times 10^4$ MPa)		泊松比	
				风干	饱水	静态	动态	静态	动态
红砂岩	2.70	2.43	7.65	45.0	32.7	1.4	2.6	0.20	0.18
花岗岩	2.70	2.64	1.22	191.0	141.8	5.9	6.4	0.23	0.25
大理岩	2.74	2.70	0.78	151.5	113.6	7.5	7.8	0.28	0.26
辉长岩	2.96	2.88	1.28	203.7	128.9	7.1	9.0	0.32	0.26
粉砂岩	2.73	2.71	0.73	214.8	160.4	7.1	8.2	0.26	0.23
凝灰岩	2.73	2.72	0.37	181.7	136.7	8.2	8.2	0.21	0.24
页岩	2.75	2.73	0.75	118.0	74.2	8.0	8.6	0.24	0.26

高100mm的厚壁圆筒状, 表面光滑, 两端面不平整度小于0.05mm, 共160个试样。)

四、抗 拉 强 度

1. 单轴抗拉强度

表2为7种岩石用劈裂法和水压致裂法所得的单轴抗拉强度。表2中的数据表明, 无论是风干还是饱水, 水压致裂法的结果总比劈裂法的大。据文献(3)的分析, 此现象可能由于厚壁圆筒试件沿壁厚方向的应力分布不均匀, 存在一应力梯度的缘故。表2中反映出各种岩石的风干强度大于饱水强度, 说明水对岩石的软化现象在抗拉强度中也存在。大理岩的结果

1) 本文花岗岩的部分资料取自: 广东省地震局水库室岩石力学组实验资料, 1983。

2) 本文粉砂岩、凝灰岩、页岩的部分资料取自: 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。

表2 单轴抗拉强度
Tab.2 Anti-pulling strength of single-axis

抗拉强度 (MPa)	岩性	红砂岩		花岗岩		大理石				辉长岩		粉砂岩		凝灰岩		页岩	
		状态		状态		应力方向		应力方向									
		风	饱	风	饱	垂直纹理	平行纹理	垂直纹理	平行纹理	风	饱	风	饱	风	饱	风	饱
实验方法		干	水	干	水	风	饱	风	饱	干	水	干	水	干	水	干	水
劈裂法		2.4	1.5	8.6	7.3	5.1	4.9	7.9	6.6	11.5	8.0	22.0	18.0	21.0	21.0	4.0	3.0
水压致裂法		5.8	4.2	10.2	9.5	/	/	8.1	6.1	23.9	23.1	27.0	26.0	22.0	21.0	7.0	3.0

中，拉应力方向与试件纹流面垂直的强度比与之平行的低，说明结构不均匀的岩石，其抗拉强度是各向异性的。

2. 不同围压条件下岩石的抗拉强度

下文将由致裂孔压差 Δp ($\Delta p = p_2 - p_1$)、围压与致裂孔压比 $\frac{p_1}{p_2}$ 、 σ_1 、致裂时内壁

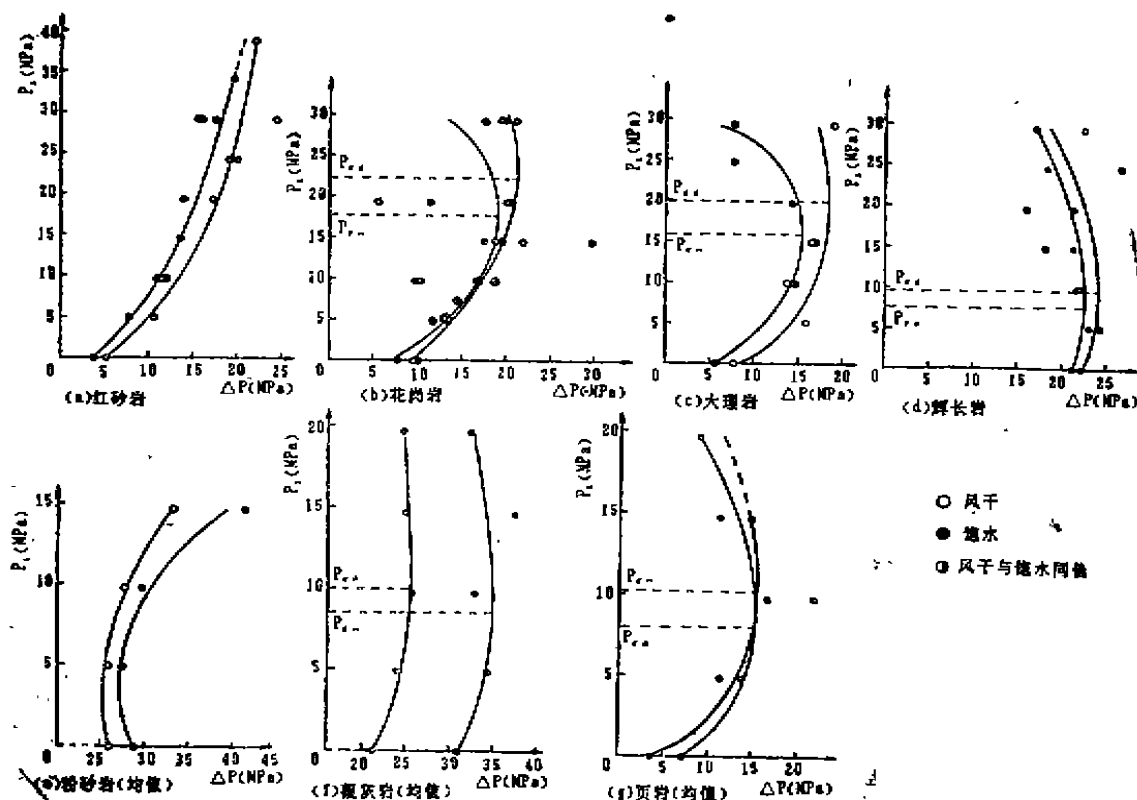


图3 致裂孔压差与围压关系图

Fig.3 Correlation between differential fracture pore pressure and confining pressure

的环向应变 ϵ_t 和致裂因子 F ($F = \frac{p_1}{p_2} - \frac{r_1^2 + r_2^2}{2 r^2}$) 5种参数随围压的变化特点加以讨论。

(1) 致裂孔压差 Δp 与 p_1 的关系

图3 (a) — (g) 分别为上述7种岩石的 Δp 与 p_1 的关系图。除 (a)、(e) 两图外, 其它5组曲线均表现出以下特征: 在低围压条件下, Δp 随 p_1 的增大而增大。当 p_1 大于某一特征值 p_i (图中 p_{iD} 、 p_{iw} 分别表示风干和饱水的 p_i , 下同) 后, Δp 不再随 p_1 的增大而增大, 仅随 p_1 的增大而变小。不同岩石, p_i 值也不同。

同类岩石风干状态的 Δp 一般比同围压饱水状态的大, p_i 亦如此。(a)、(e) 两图的反常现象可解释为 p_1 尚小于 p_i 。

(2) 围压与致裂孔压的比值 $\frac{p_1}{p_2}$

$\frac{p_1}{p_2}$ 的值越大 (越接近于1), 意味着致裂孔压 p_2 越与围压 p_1 相近 (p_2 总大于 p_1), 在相同的围压下致裂所需的 p_2 值越小, 岩石越容易致裂, 反之, 致裂所需的 p_2 值愈高, 岩石相对难致裂。

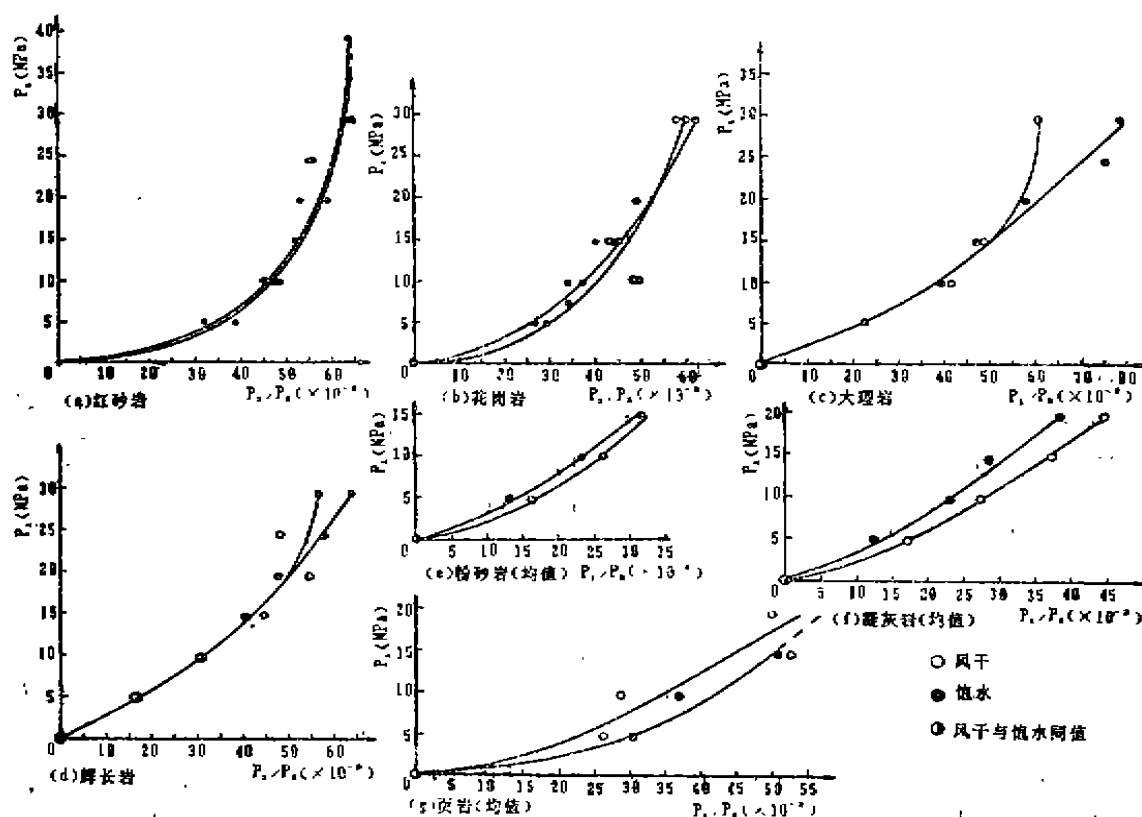


图4 P_1/P_2 与围压关系图

Fig.4 Correlation between P_1/P_2 and confining pressure

图4 (a) — (g) 为各类岩石的 $\frac{P_1}{P_2}$ 随 P_1 的变化图。图中可见, 随着 P_1 的增大, $\frac{P_1}{P_2}$ 也随

之变大。说明围压越大, P_2 越接近 P_1 , 即二者差值减小, 此结果与第 (1) 点是一致的。

(3) 抗拉强度 σ_t

厚壁圆筒致裂时的环向正应力 σ_t 定义为抗拉强度。图 5 (a) — (g) 为 7 种岩石的 σ_t 与 P_1 的关系图。

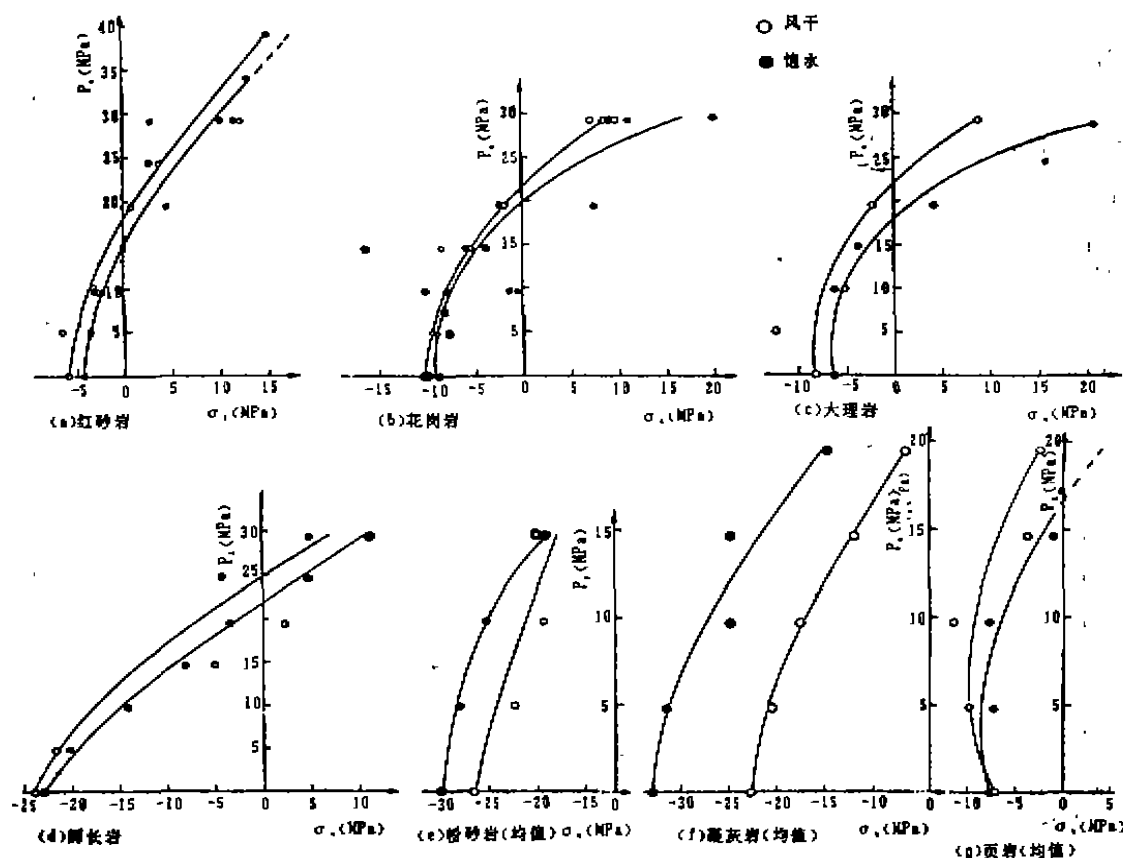


图 5 抗拉强度 σ_t 与围压关系图

Fig.5 Correlation between tension resistant strength σ_t and confining pressure

图中可见, σ_t 随 P_1 的增大而增大 (拉应力减小), 并逐渐由拉应力过渡为压应力。当 σ_t 为压应力时, 试件处于三向受压状态 (因 σ_r , σ_z 始终是压应力), 但试件仍呈张性破裂。实验证明, 不管处于何种围压下, 试件的水压致裂几乎全是沿径向, 平行轴向的典型张性破裂, 裂面与 σ_t 方向垂直, 如图 6 所示。值得指出, 尽管不少试件存在原生薄弱面, 但只有极少数胶结状况极差的, 实验中沿原弱面破坏, 绝大多数试件的破裂仍与无弱面一样。

(4) 致裂因子 F

由 (3) 式中 $\sigma_t = \frac{2r_1^2 P_1 - (r_1^2 + r_2^2) P_2}{r_1^2 - r_2^2}$ 可导出,

$$\frac{r_1^2 - r_2^2}{2r_1^2} \cdot \frac{\sigma_t}{P_2} = \frac{P_1}{P_2} - \frac{r_1^2 + r_2^2}{2r_1^2} \quad (4)$$

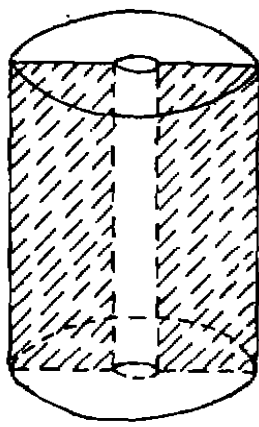


图6 试件破裂特征
Fig.6 Fracton characteristics of the specimen

$$\text{设 } F = \frac{r_1^2 - r_2^2}{2 r_1^2} \cdot \frac{\sigma_1}{P_2} \quad (5)$$

$$\text{或 } F = \frac{P_1}{P_2} - \frac{r_1^2 + r_2^2}{2 r_1^2} \quad (6)$$

并称F为致裂因子(无量纲)。

式(5)中,因 $r_1 > r_2$, $P_2 > 0$, 所以 $\frac{r_1^2 - r_2^2}{2 r_1^2 P_2} > 0$, 可知F与 σ_1 同号。二者的关系为: ① $F = 0$, $\sigma_1 = 0$; ② $F < 0$, $\sigma_1 < 0$, 此时 σ_1 为拉应力, F的绝对值越大, 拉应力也越大; ③ $F > 0$, $\sigma_1 > 0$, 此时 σ_1 为压应力, F越大, 压应力越大。

当 r_1 、 r_2 为定值时, $\frac{r_1^2 + r_2^2}{2 r_1^2}$ 是一个小于1大于0的常数, 设此常数为 β , 则(6)式变为

$$F = \frac{P_1}{P_2} - \beta \quad (7)$$

F仅为 $\frac{P_1}{P_2}$ 的函数, 二者的关系为: ① $F = 0$, $\frac{P_1}{P_2} = \beta$; ② $F < 0$, $\frac{P_1}{P_2} < \beta$, 说明 P_2 较大, ΔP 也大; ④ $F > 0$, $\frac{P_1}{P_2} > \beta$, 表明 P_2 与 P_1 值较相近, ΔP 较小。

当 $P_1 = 0$, 由(6)式可得 $F = -\frac{r_1^2 + r_2^2}{2 r_1^2}$, F仅与试件的内、外径有关, 与 P_2 无关。因 $F < 0$, 从上述的分析可知无围压时的 σ_1 一定是拉应力。

当 $r_1 \gg r_2$ 时, $\frac{r_1^2 - r_2^2}{2 r_1^2} = \frac{r_1 + r_2^2}{2 r_1^2} = \frac{1}{2}$, (5)、(6)两式分别变为

$$F = \frac{\sigma_1}{2 P_2} \quad (8)$$

$$F = \frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{2} \quad (9)$$

$$(4) \text{式变为: } \sigma_1 = 2 P_1 - P_2 \quad (10)$$

显然, 此结果可用于野外岩体中的钻孔或孔隙水压致裂。

致裂因子F既可反映 σ_1 的性质和大小, 又可反映 $\frac{P_1}{P_2}$ 或 ΔP 的大小, 可作为岩石致裂强度的一种表征量。

图7(a)-(g)为各种岩石试件的F与 P_1 的关系图。图中可见, 随着 P_1 的增大, F随之增大, 并由负值逐渐转变为正值。F与 P_1 呈非线性关系, P_1 较小时, $\frac{dF}{dP_1}$ 较大, P_1 越大变化率 $\frac{dF}{dP_1}$ 越小。上已述及, F的变化实质上反映了 σ_1 和 $\frac{P_1}{P_2}$ 的变化, 图7中各曲线的变化趋

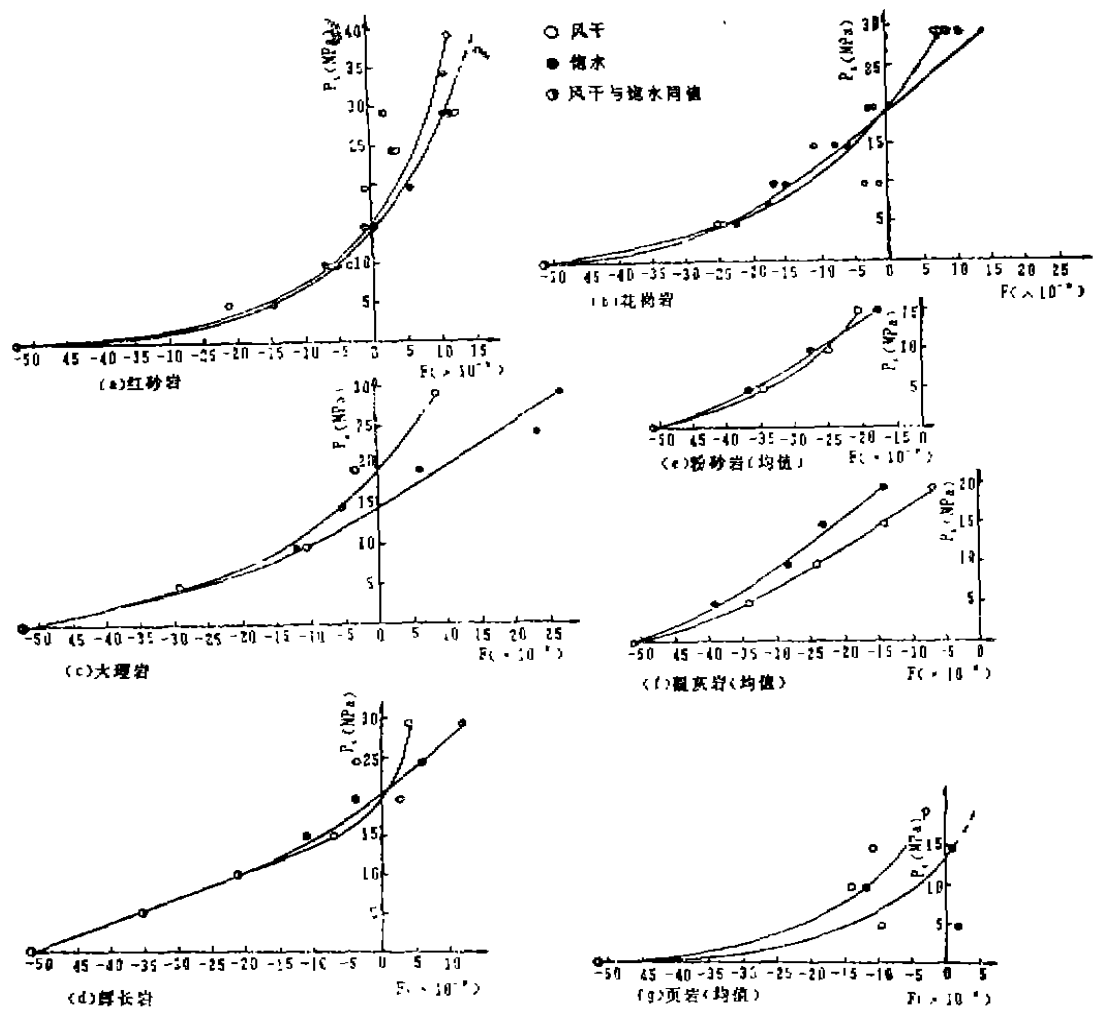


图 7 致裂因子 F 与围压关系图

Fig.7 Correlation between fracture factor F and confining pressure

势与图 4、图 5 是一致的。

(5) 致裂瞬间的内壁环向应变化 ϵ_t 。

由于技术上的原因，未能直接测量试件内孔壁上的应变，仅在外壁贴上应变片进行测量。因此，内壁上缺实测资料，只能由理论计算补充。

设 ϵ_t 、 ϵ_r 分别为内壁的环向和径向应变，并规定压应变为正，拉应变为负，按弹性理论

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_t &= -\frac{1}{E} [\sigma_t - \mu (\sigma_r + \sigma_z)] \\ \epsilon_r &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \mu (\sigma_t + \sigma_z)] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中 E 为弹性模量。

计算结果，试件致裂时的 ϵ_t 全是拉应变， ϵ_r 全是压应变。因张性破裂主要与 ϵ_t 有关，表 3 中仅列出了各试件在不同围压下致时的内壁环向应变 ϵ_t ，还作出 ϵ_t 与 P_1 的关系图（图 8 (a)）

表3 试件内壁的理论变值

Tab. 3 Theoretic strain on the inner wall

岩性	试件号	P_1 (MPa)	ε_t ($\times 10^{-6}$)	岩性	试件号	P_1 (MPa)	ε_t ($\times 10^{-6}$)	岩性	试件号	P_1 (MPa)	ε_t ($\times 10^{-6}$)	岩性	试件号	P_1 (MPa)	ε_t ($\times 10^{-6}$)
红砂岩 (风干)	40	0	-827	花岗岩	66	34.3	-312	花岗岩	6	14.7	-334	花岗岩	41	14.7	-288
	47	4.9	-829		1	0	-256		10	14.7	-291		38	19.6	-222
	41	9.8	-620		4	0	-279		9	19.6	-314		40	24.5	-413
	67	9.8	-523		10	4.9	-280		12	29.4	-160		39	29.4	-309
	43	19.6	-756		12	4.9	-284		13	24.9	-32		43	0	-469
	45	24.5	-726	花岗岩	3	9.8	-153	花岗岩	36	0	-176	花岗岩	49	4.9	-462
	42	29.4	-219		15	9.8	-168		38	4.9	-326		44	9.8	-385
	48	29.4	-1016		11	14.7	-358		37	9.8	-194		48	14.7	-348
	44	39.2	-390		13	14.7	-295		40	19.6	-258		45	19.6	-328
	56	0	-497		8	19.8	-306		39	29.4	-184		47	24.5	-242
红砂岩 (饱水)	62	4.9	-576	花岗岩	7	29.4	-227	花岗岩	41	0	-143	花岗岩	46	29.4	-196
	57	9.8	-592		9	29.4	-211		42	9.8	-213			0	-594
	63	9.8	-665		14	29.4	-196		45	14.7	-225			4.9	-550
	46	14.7	-643		1	0	-258		43	19.6	-148			9.8	-521
	61	14.7	-624		11	0	-217		47	24.5	-4			14.7	-601
	58	19.6	-450	花岗岩	3	4.9	-272	花岗岩	46	29.4	-20	花岗岩		0	-481
	60	24.5	-818		2	7.4	-301		36	0	-484			4.9	-487
	59	29.4	-281		4	9.8	-321		42	4.9	-487			9.8	-507
	65	29.4	-389		5	9.8	-365		37	9.8	-386			14.7	-463

—(g))。图8中可见, ϵ_t 随 P_1 的变化曲线, 形态上与图3的 $\Delta P-P_1$ 曲线类似, 亦存在一个特征值 P_2 , 当 $P_1 < P_2$ 时, 随 P_1 的增加, ϵ_t 变小(拉应变增大); 当 $P_1 > P_2$ 时, P_1 增大, ϵ_t 增大(拉应变减小)。实际上在致裂瞬间, 内壁的开裂部位处于非弹性状态, 拉应变的实际值远大于表3中的理论值。从各试件外壁上实测的环向应变值来看, 致裂时的实测值是理论计算值的2—16倍。外壁尚且如此, 内壁的实际应变值应更大。

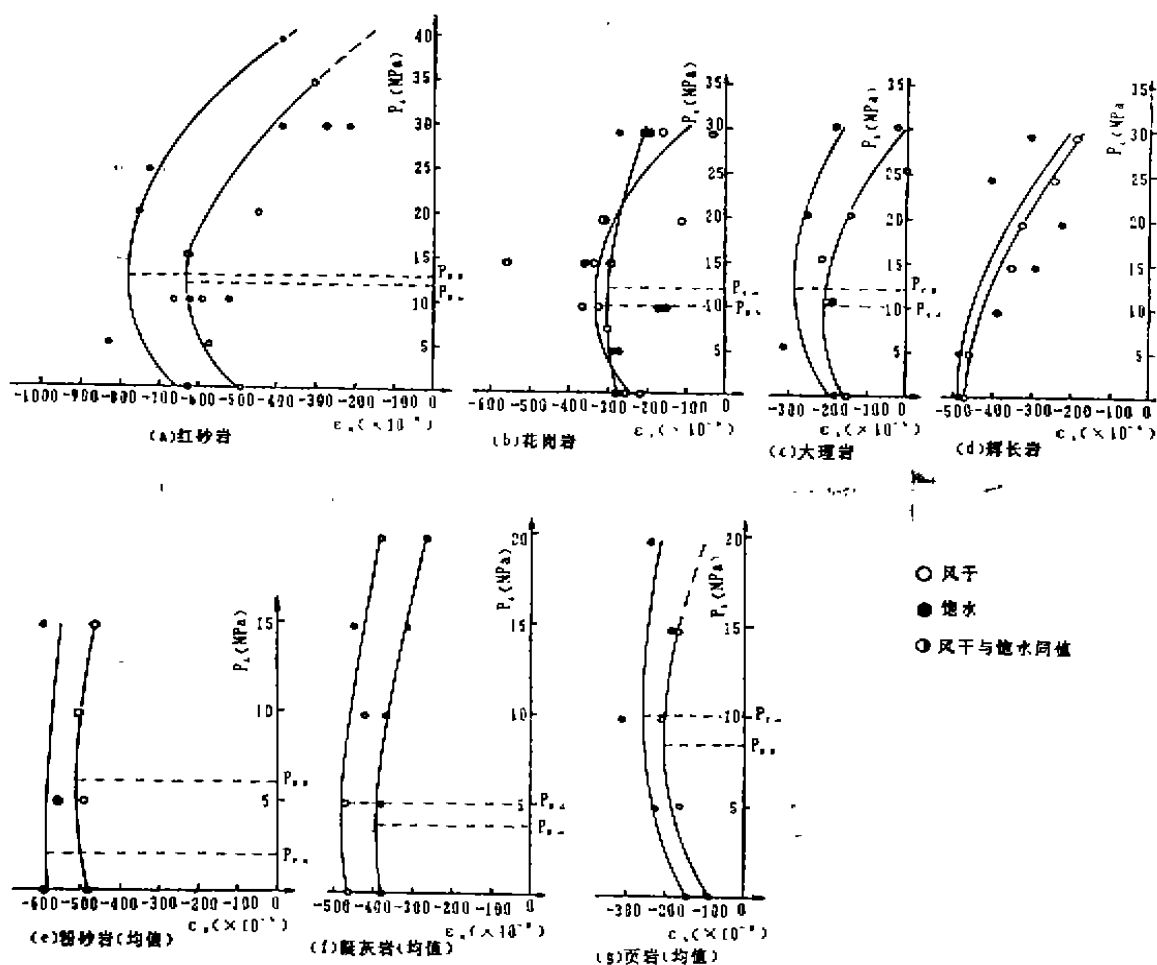


图8 环向应变 ϵ_t 与围压关系图
Fig.8 Correlation between circular strain ϵ_t and confining pressure

五、结语及讨论

(1) 致裂孔压差 ΔP 在低围压时随围压 P_1 的增大而增大, 当 P_1 大于特征值 P_2 后, ΔP 反随 P_1 的增大而减小。 $\frac{P_1}{P_2}$ 随 P_1 的增大而增大。 ΔP 和 $\frac{P_1}{P_2}$ 随 P_1 的变化特点都说明, 围压越大, 致裂岩石所需的孔压与围压越接近。

(2) 随着围压的逐渐增大, 岩石的抗拉强度逐渐减小并由拉应力过渡为压应力, 且压应力随围压的增大而增大。试件的应力状态也由轴向、径向受压、环向受拉而变为三向受压, 但试件始终为张性破裂。

从另一种意义上讲, 处于高围压环境中的岩石, 其内部不可能存在拉应力, 但可存在拉应变, 拉应力只在低围压状态中存在。

(3) 致裂因子 F 可综合反映出 σ_1 、 $\frac{P_1}{P_2}$ 和 ΔP 等参数随围压的变化特点, 不失作为岩石水压致裂的一种表征量。

(4) 在水压致裂中, 即使岩石处于高围压环境中的三向受压状态, 但与最小主应力 σ_3 相对应的最小主应变 ϵ_3 始终是拉应变, 岩石的破裂也始终是典型的张性破裂。看来, 岩石的张性破裂实质上受拉应变控制, 岩石的抗拉强度由最小主应变来表征似乎更为合理。

(5) 岩石试件水压致裂的破裂面是典型的张性破裂面, 它沿径向并与轴向平行。

(6) 岩石饱水后被软化的性质, 在抗拉强度中同样存在。

如上所述, 即使在高围压环境中, 岩石处于三向受压状态, 但只要最小主应变是拉应变, 岩石仍可呈张性破裂。处于地壳较深处的岩体, 一般均为三向受压, 可否出现上述应变现象而导致岩体张性破裂?

设岩体为弹性体, 按广义虎克定理

$$\epsilon_3 = \frac{1}{E} [\sigma_3 - \mu (\sigma_1 + \sigma_2)] \quad (12)$$

式中 σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为最大、中间和最小主应力, ϵ_3 为最小主应变。由 (12) 式可知, 当 $\sigma_3 < \mu (\sigma_1 + \sigma_2)$ 时, ϵ_3 即为拉应变 (σ_1 、 σ_2 、 σ_3 均为压应力时), 若岩体发生破裂, 破裂将是面垂直于 σ_3 方向的张性破裂。假定泊松比 $\mu = 0.25$, 只需 $\sigma_3 < \frac{1}{4} (\sigma_1 + \sigma_2)$, ϵ_3 就是拉应变。这种应力状态在岩体中是可能存在的, 岩体一旦破裂引起地震, 震源破裂面将为张性破裂面。

如岩体的裂隙内存有高压水, 孔隙水压的作用相当于本实验的内孔压作用, 它将使原已处于三向受压状态的岩体的径向压应力增大, 环向压应力减小, 有可能使岩体的应力状态变为 $\sigma_3 < \mu (\sigma_1 + \sigma_2)$ 而导致张性破裂, 诱发出地震, 如平库诱发地震。

参加本实验的还有李健康高级工程师, 笔者特此致谢。

参 考 文 献

- (1) 颜玉庭, 岩石室的水压致裂研究, 岩石力学与工程学报, 1988, 7, (2)
- (2) 尹祥础, 固体力学, 地震出版社, 1985。
- (3) J. C. 耶格, N. G. W. 库尼, 岩石力学基础, 中国科学工程力学研究所译, 科学出版社, 1981。

TENSION RESISTENT STRENGTH OF ROCK UNDER CONFINING PRESSURE

Yan Yuding, Liao Yuanqun, Wu Jingnong and Shi Yong

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

[Abstract] Tension resistant strength of rock under confining pressure is examined by experiments of applying hydraulic fracturing method with different confining pressure upon thick-walled cylindrical specimens of seven kinds of rock and by adopting the rules of five parameters like inner wall circular stress σ_t and circular strain ϵ_t at the fracture instant of specimen along with the variation of confining pressure. The result shows that when σ_t indicates the tension resistant strength of the rock, the tension resistant strength of rock decreases with the increase of confining pressure, and that the tension strain at low confining pressure gradually transits to the pressure strain at high confining pressure. At high confining pressure, it shows typical tensile fracture, even the specimen suffers from three-directional pressure. From another point of view, tension strain could not exist in the rock under high confining pressure, it could only exist under low confining pressure. And when ϵ_t indicates the tension resistant strength of the rock, the ϵ_t of tensile fracture is always the tension strain, even if the rock sits are in three-directional pressure. It seems rationally to express the tension resistant strength of rock by the strain. At first the ϵ_t increases with the increase of confining pressure, then it decreases after the confining pressure reaches to a certain specific value.

Applying the above results upon rock fracture or earthquake, it can be proven that once an $\sigma_3 < \mu(\sigma_1 + \sigma_2)$ stress exists in the rock, tensile fracture will appear in the rock even it suffers from three-directional pressure. Thus it can be seen that tensile fracture may occur at a seismic focus.

[Key words] Tension resistant strength, Confining pressure, Hydraulic fracturing