

用双扭方法研究岩石的断裂韧性

韩德华 姚孝新 陈 颢

(国家地震局地球物理研究所)

摘 要

本实验用双扭技术测量了济南辉长岩的断裂韧性。在“干”、“湿”及垂直向位移恒定的条件下,用双扭松弛方法测定裂纹的扩展速度 V ,得到了与 Atkinson^[1] 类似的结果。

济南辉长岩的断裂韧性为: $K_{IC} = 2.81 \pm 0.03 \text{ MNm}^{-\frac{3}{2}}$ 。

本文提出了 Spetzler^[2] 和 Atkinson 关于在“湿”条件下亚临界裂纹扩展机制的不同看法。

由声发射的实验结果看出,声发射率与应力强度因子的关系呈现了与 K_I-V 曲线类似的趋势。

一、引 言

近年来,线弹性断裂力学广泛地用于研究金属、合金、玻璃、聚合物和陶瓷等材料的断裂机制。使用断裂力学的概念和方法为研究岩石断裂的性质提供了一条新的途径。在断裂力学的实验中研究的是单一裂纹扩展的规律,这就把完整岩石的多元问题转化为一元问题,显然大大简化了问题的复杂性,而且为均匀控制实验条件提供了很大方便。因此断裂力学的实验结果意义比较明确。然后人们^[3,4,5,6] 又进一步由完整岩石存在的天然裂隙的平均尺寸出发,利用断裂力学的实验结果,提出一些理论模式,试图估价完整岩石的破裂性质,进而讨论地下岩石的断裂规律及地震活动的孕育过程,显然这是很有意义的工作。

用断裂力学的概念和方法研究岩石断裂的性质受到普遍的重视,近几年发展很快。在 1977 年美国岩石力学论文集中涉及到岩石断裂力学方面的文章就达到 13 篇^[7],目前,这个问题已成为各实验室和有关专家关注的课题。

断裂力学中的重要参数是应力强度因子,它反映了弹性固体中,裂纹顶端破裂作用的强度。I 型破裂——即张开型破裂在脆性固体的破裂扩展中是极其普遍,非常重要的。 K_I 可以表示为:

$$K_I = Y \sigma_A a^{\frac{1}{2}}$$

其中 σ_A 是垂直于裂纹的张应力。 a 为裂纹长度的一半,简称为裂纹长度。 Y 为几何参数,它与裂纹的形态、裂纹体的构造,及加载方式有关。

当裂纹尖端的 K_I 值增大时,破裂扩展速度不断增加,这种破裂是以稳定的方式发展的,称为亚临界破裂扩展,或称为慢破裂。当 K_I 值增大到某一临界值时,裂纹的扩展失

稳。即外界不在提供使裂纹扩展的能量,裂纹也会自动高速扩展,直至整个物体完全张裂。这个临界值 K_{IC} ,即为材料的断裂韧性,它反映了材料抗断裂的本领,对描述脆性材料的断裂性质,是最重要的常数^[8]。

断裂韧性 K_{IC} 可用各种方法定义,但是最精密的方法是规定相应的破裂速度,一般定义 V_{IC} 在 0.1—1 米/秒之间^[9]。

为研究材料的断裂机制,在断裂力学中发展了很多技术方法,如三点弯曲,单边刃口拉伸,双悬臂梁,双扭等方法。以前曾有人用这些方法测定岩石的断裂韧性^[10-14],然而这些工作都存在一些问题,Peng 和 Johnson^[10] 及 Clifton^[11] 所用的方法涉及到狭窄的锯口的扩展,而不是自然裂纹的扩展,因此,所测的 K_{IC} 有很大的不确定性^[15,16]。Schmidt 等人^[12-14] 用三点弯曲和单边刃口拉伸法测 K_{IC} ,这时必须测量相应的裂纹长度,然而对于不透明的岩石来说测定裂纹长度是很困难的,而且 Schmidt 和 Haddle^[14] 使用的方法还需要广泛的样品准备,相对说来,双扭技术 (Double Torsion Technique 简称为 DT 技术)有其独特的优点,避免了上述困难。

DT 技术是由 Outwater^[17] 在 1966 年提出的,在 1972 年由 Evans^[18] 及 Williams 和 Evans^[19] 进一步发展了。DT 技术首先用于研究玻璃陶瓷等材料的断裂性质,Atkinson 在 1979 年用 DT 技术测量了 Tennessee 砂岩和 Carrara 大理岩的断裂韧性 K_{IC} ^[20] 探讨了黑辉长岩亚临界破裂扩展中声发射的规律^[2]。Swanson^[2] (1980) Winter^[21] (1979) 做过类似的工作。不过,总的说来,用断裂力学研究岩石的断裂性质还仅仅是开始。

本实验是用 DT 技术测量济南辉长岩的断裂韧性,用松弛方法研究亚临界破裂扩展的规律,了解水对岩石的应力腐蚀作用对破裂扩展的影响,研究在亚临界破裂扩展时声发射的规律。

二、DT 技术的实验原理

双扭样品的加载方式和结构如图 1 所示,DT 样品是长为 L ,宽为 W ,厚为 d 的薄板。要求样品宽度远大于厚度。在板的一面沿 L 方向的对称线开沟,样品在沟部的厚度记为 d_n 。加载时在样品一端施加一对扭矩,力臂记为 W_m ,裂纹沿板的对称线在沟内向前扩展。加载时,样品的另一端悬空。

当扭转很小,且假定梁的剪应变和未破裂部分的弯曲可以忽略时(实验证明对一般脆性材料是可以忽略的),则认为样品的柔度变化仅仅是由裂纹扩展引起的。据此,引入断裂力学的概念,得到 DT 样品应力强度因子 K_I 的解析式:

$$K_I = PW_m [1/W \cdot d^3 \cdot d_n \cdot (1 - \nu) \cdot \epsilon]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

其中 P 为压头(加载头)的压力, ν 为材料的泊松比, ϵ 为厚度因子。(1) 式表明:当 P 不变时, K_I 只与样品的几何形状及材料的弹性性质有关。即

$$K_I = AP \quad (2)$$

A 为常数。因此,对 DT 样品来说,应力强度因子 K_I 与裂纹长度 a 是无关的,仅由压力 P 决定。

理论和实验证明,DT 样品的柔度 λ 与裂纹长度 a 在一定条件下成线性关系^[18]:

$$\lambda = y/P = Ba + \lambda_0 \quad (3)$$

其中 B 与 λ_0 是与样品几何及材料相关的常数, y 为压头位移, 是以压头开始对样品加载时的位置为起点的. 由(3)式可知, 当 P 为常数时, 压头速率与破裂速度 V 成正比, 在测量 K_{IC} 时, 我们控制压头移动速率为 2 厘米/分时, 样品破裂扩展速度达到 0.4 米/秒, 即达临界失稳速度 V_{IC} . 这时

$$K_{IC} = P_{IC} W_m [1/W \cdot d^3 \cdot d_n (1 - \nu) \cdot \varepsilon]^{1/2} \quad (4)$$

其中 P_{IC} 为临界失稳破裂压力. 我们根据上式测量 K_{IC} .

利用 DT 技术测量 $K-V$ 曲线有常载荷方法、常位移松弛法和常位移率法. 其中松弛方法是由 Evans^[18,19] 首先提出的. 由(3)式出发, Evans 得出: 当压头位移 y 不变, 且 $\lambda_0/B \ll a_i$ 时, 破裂扩展速度为:

$$V = -\varphi \frac{P_{i,f} a_{i,f}}{P^2} \left(\frac{dP}{dt} \right)_y \quad (5)$$

其中下标 i, f 分别表示松弛的初态和末态. φ 为几何因子, 它是由破裂的形状决定的. 只要测量了压力, 压力梯度 $\left(\frac{dP}{dt} \right)_y$ 及初态或者末态的压力和裂纹长度, 就可由(5)式计算破裂速度, 由(1)式计算 K_I 值, 这样即可确定 K_I-V 关系.

三、实验设备及方法

(一) 设备 一台自制小压机、测力计, 灵敏度 22.0 克/每微应变. 传感器输出接 Y8DB-5 动态应变仪, 由 X-Y 函数记录仪显示. 断裂韧测量中用 SC-16 型紫外线示波器记录显示. 声发射测量中, 使用 S3207 单声道声发射综合参数测试仪.

(二) 方法 样品为济南辉长岩, 其矿物成份见参考文献 [22]. 矿物颗粒平均尺寸 0.58mm. 岩石样品的厚度取颗粒平均尺寸的五倍^[20]. 样品宽厚比对 K_{IC} 测量结果有很大影响^[23], 实验中, 当 $W/d < 12$ 时, 所得 K_{IC} 值一般偏高, 且与 W/d 的值近似成反比, 当 $W/d \geq 12$ 时, 可认为 K_{IC} 与样品尺寸无关^[24]. 本实验取宽厚比为 15:1. 实验样品具体尺寸如下:

测量 K_{IC} 的样品 $d = 3\text{mm}$, $W = 45\text{mm}$, $L = 70\text{mm}$, $d_n = 2\text{mm}$.

做松弛实验样品: $d = 3\text{mm}$, $W = 45\text{mm}$, $L = 130\text{mm}$, $d_n = 2\text{mm}$. 上下表面的平行误差小于 0.05mm.

对样品几何还有一个重要问题要说明, 为了避免裂纹漂移开样品的对称线, 一般沿对称线开沟. 样品开沟宽为 2mm, 深 1mm.

预制裂纹: DT 样品预制天然裂纹, Atkinson^[20] 利用慢加载, 压头速率为 $5 \times 10^{-3} \text{mm/s}$, 压至发生破裂后, 迅速卸载.

加载方式: 图 1(c) 所示, 采用钢珠加载, 钢珠直径为 3—4mm, 这样可得点加载系统. 为便于操作, 在样品上部采用钢珠加载, 当样品开裂时, 加载点仍为两点. 所以整个系统仍为四点加载系统. 在加载过程中, 加载点的位置稍有变化, 扭矩力臂减小, 但这种减小是可以忽略的^[24].

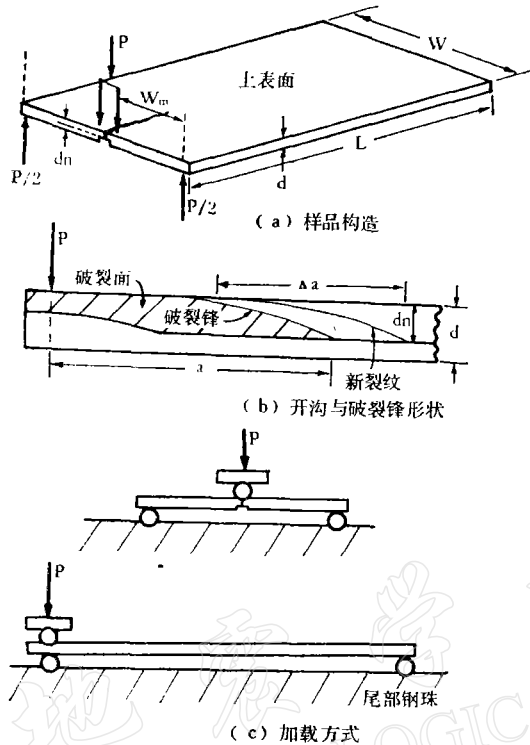


图 1

消除背景松弛：做松弛实验时，加载装置与压机的松弛性质必然会使所测松弛率偏大，这种附加的松弛叫做背景松弛。在实验前应尽量减小背景松弛。我们使用的方法是，首先对没有松弛性质的完整的模型样品，加载到预期加载水平的两倍^[25]，然后固定压头，这时产生的松弛即为背景松弛。不断地重复加载——松弛过程变得越来越小，直至在正常加载水平上基本上消除背景松弛才能开始实验。

临界破裂扩展实验：在测 K_{IC} — V 曲线时，需要严格控制室温、湿度。实验室环境应该安静，空气扰动不大，这样才能使整个装置，特别是传感器工作稳定。松弛实验一般控制在 15—20 分钟内，在这段时间内基本保证上述条件是稳定的。在松弛实验中要计算破裂速度，必须要确定松弛末态的裂纹长度（初态的裂纹长度较难确定），一般采用染色法。

四、实验结果

(一) K_{IC} 测量结果

济南辉长岩断裂韧性的测量值为：

$$K_{IC} = 2.81 \pm 0.03 \text{ MNm}^{-\frac{3}{2}}$$

十块样品的详细数据参见表 1。

测量 K_{IC} 时，由测量环节所带的误差，主要来自 d 和 d_n 的测量。由于样品加工水平

有限,样品厚度 d 与 d_n 的偏差可达 0.5 毫米,由于 $K_{Ic} \sim \frac{1}{d^2}$

$$\therefore \frac{\text{测量值}}{\text{真值}} = \frac{(d \pm |\Delta d|)^2}{d^2} = 1 \pm 2 \left| \frac{\Delta d}{d} \right| + \left(\frac{\Delta d}{d} \right)^2$$
$$\therefore \text{相对误差} \approx 2 \frac{|\Delta d|}{d} = 2 \times \frac{0.05}{3} = 3.3\%$$

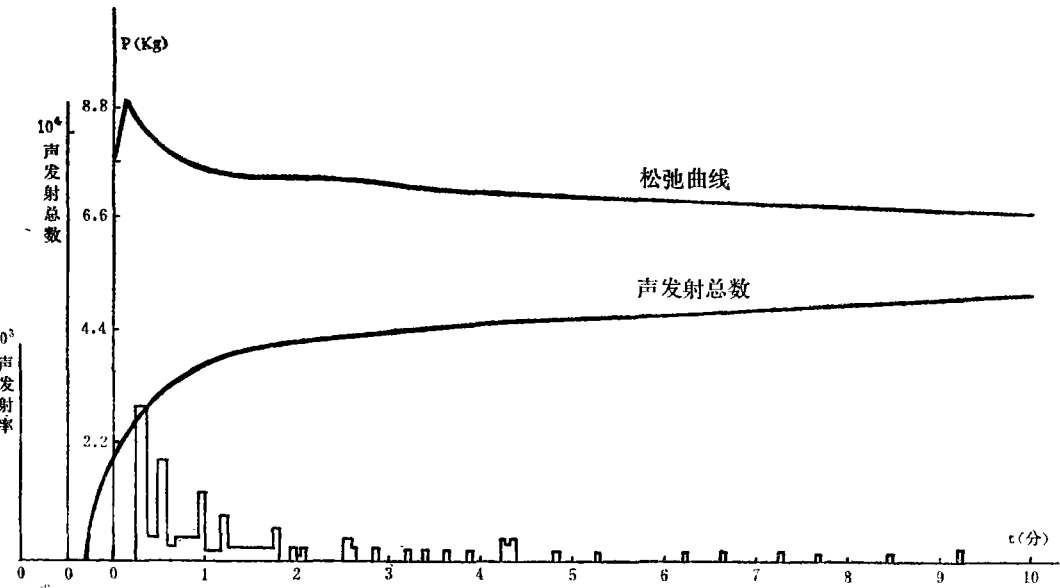
表 1

样品编号	P (公斤力)	W (厘米)	d (毫米)	d_n (毫米)	$K_{Ic} MNm^{-3/2}$
1	10.833	4.53	2.88	2.16	2.87
2	10.747	4.42	3.00	1.96	2.85
3	10.362	4.42	2.87	2.00	2.91
4	12.845	4.55	3.18	2.25	2.87
5	10.582	4.56	2.93	2.08	2.78
6	10.413	4.63	2.88	2.08	2.79
7	10.340	4.63	2.95	2.00	2.72
8	10.588	4.45	2.94	2.97	2.88
9	10.872	4.49	2.74	1.92	2.70
10	9.185	4.42	2.80	2.00	2.68

(二) “ K_I-V ” 曲线的测量结果

我们在“干”、“湿”两种条件下测量了济南辉长岩的“ K_I-V ”曲线,所谓“湿”条件是指样品浸在蒸馏水中进行实验。在进行实验时空气温度为 $30^{\circ} \pm 2^{\circ}C$,空气的相对湿度达 70—80%。压力测量灵敏度为 44 克/毫米,走纸速度为 1mm/秒,所测破裂速度范围为 10^{-7} — 10^{-4} 米/秒。

在“干”、“湿”条件下典型的松弛曲线如图 2 所示,在“干”、“湿”条件下破裂扩展速度



2 图

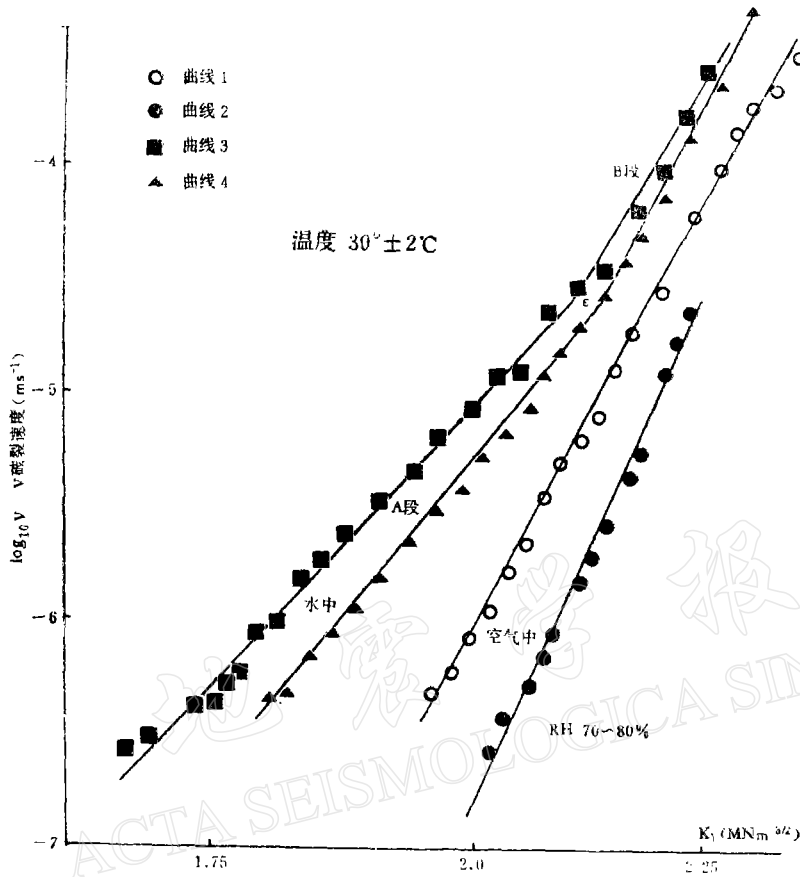


图 3

V 与应力强度因子 K_I 的函数关系如图 3 所示。曲线和数据来自四次松弛实验。结果如下:

1. 在干条件下, 每次松弛所得 $\log_{10} K_I - \log_{10} V$ 曲线呈很好的线性。曲线 1 的方程为:

$$\log_{10} V = -16.99 \pm 36.51 \times \log_{10} K_I \quad (r = 0.998)$$

$$V = 10^{-16.99} \times K_I^{36.51} \quad n_d = 36.51$$

曲线 2 的方程为

$$\log V = -20.13 + 44.30 \times \log_{10} K_I \quad r = 0.996$$

$$V = 10^{-20.13} \times K_I^{44.30} \quad n_d = 44.30$$

2. 在湿条件下的 $\log_{10} K_I - \log_{10} V$ 曲线形态有变化, 曲线 3 可以分为两段, 每一段均有较好的线性。A 段的曲线方程为(由后 18 个数据确定):

$$\log_{10} V = -11.42 + 21.21 \times \log_{10} K_I \quad (r = 0.996)$$

$$V = 10^{-11.42} \times K_I^{21.21} \quad n_{WA} = 21.21$$

B 段的曲线方程为(由前 6 点数据确定):

$$\log_{10} V = -16.04 + 35.50 \log_{10} K_I \quad (r = 0.996)$$

$$V = 10^{-16.04} \times K_I^{35.5} \quad n_{WB} = 35.50$$

曲线 4 也可分为两段. A 段的曲线方程为(由后 15 点确定):

$$\log_{10} V = -12.41 + 23.65 \log_{10} K_I \quad (r = 0.998)$$

$$V = 10^{-12.41} \times K_I^{23.65} \quad n_{WA} = 23.65$$

B 段的曲线方程为(由前 7 点确定):

$$\log_{10} V = -17.41 + 38.86 \log_{10} K_I \quad (r = 0.996)$$

$$V = 10^{-17.41} \times K_I^{38.86} \quad n_{WB} = 38.86$$

曲线 3、4 是同一块样品相继两次松弛的结果. 根据实验结果可得下述结论: 当破裂速度在 10^{-7} — 10^{-4} 米/秒范围内时:

(1) 济南辉长岩的 K_I — V 曲线在对数平面内呈较好的线性, 可以认为它的亚临界破裂扩展遵从指数规律.

$$V = DK_I^n$$

(2) 在水中 $\log K_I$ — $\log V$ 曲线可以看做两段大致分界点在 $2-4 \times 10^{-5}$ 米/秒, 其中 A 段曲线的 n_{WA} 小于 B 段曲线的 n_{WB} .

(3) 对比在“干”、“湿”两种条件下的曲线, 可以看出, 在同样应力强度因子的作用下, 在水中样品的破裂速度比在潮湿空气中样品的破裂速度大. 而且随着破裂速度下降, 这种差别越来越大. 由趋势看, 在“干”条件下的破裂扩展在较高的应力强度因子水平上即可被阻止.

(4) 由实验结果看, 在同样的条件下, 每次松弛呈现了类似的规律, 但不同的松弛过程, D 与 n 值均有离散. 曲线 3、4 是同一样品中相继两次实验结果. 它表明, 即使在极为类似的条件下, $\log K_I$ — $\log V$ 曲线仍有差别, A 与 n 都有些变化.

实验结果比较离散是由于松弛实验活动空间尺寸较小造成的. 每次松弛裂纹扩展只有几毫米. 除下表面附近, 破裂锋其它地方的扩展小于 1 毫米(参见图 1). 所涉及的微结构数量较少. 所测速度范围达到 4 个量级, 即 10^{-7} — 10^{-4} 米/秒, 这就使每次松弛所受微结构的影响有很大的随机性, 所以 K_I — V 曲线较离散.

(三) 声发射的实验结果

在松弛实验中, 对济南辉长岩亚临界破裂扩展的声发射现象做了初步测试, 由前面分析可知, 这种结果只具有说明趋势的意义. 测试仪器的放大倍数为 92 分贝.

结果 1 “干”破裂时声发射率(次/秒)与应力强度因子关系如图 4 所示, 其相应的 K_I — V 曲线即为图 3 中的曲线 2. 曲线可以回归对数平面的直线, 斜率 $n_{da} = 50.14$ ($r = 0.976$).

结果 2 “湿破裂”时声发射率(次/秒)与应力强度因子关系如图 4 所示, 其相当的 K_I — V 曲线即为图 3 中的曲线. 曲线可以分为两段, 前 16 点为 A 段, $n_{WAa} = 19.47$ ($r = 0.974$). 后 5 点为 B 段, $n_{WBa} = 42.56$ ($r = 0.991$).

结果 3 在干、湿条件下破裂速度与声发射率的关系曲线如图 5 所示. 声发射率与应力强度因子在对数平面内呈现一定的线性关系, 在有水作用下, 曲线可以分为两段, 看来声发射率和 K_I 值的关系与 K_I — V 曲线有相似的形态. 声发射率的探测可以说明亚临界破裂扩展的状况. 由声发射率的记录曲线看声发射现象是在平静背景上的孤立现象, 这似乎最能说明微结构与客观裂纹相互作用的不均匀.

声发射率(次/秒)

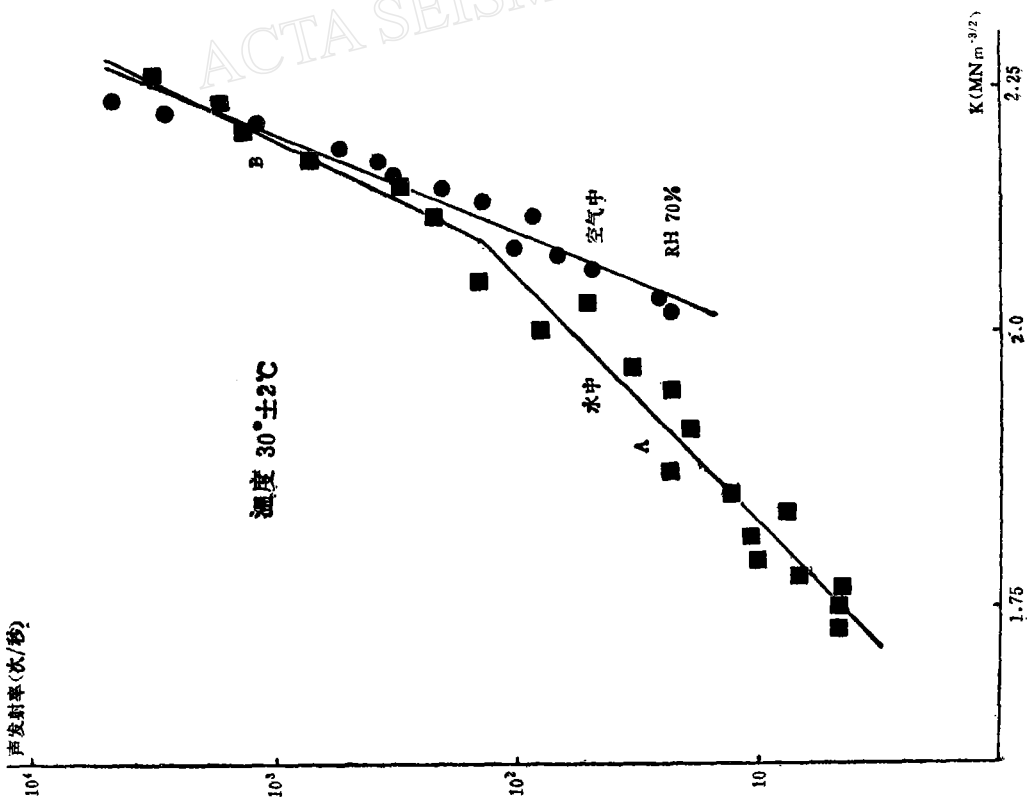


图 4

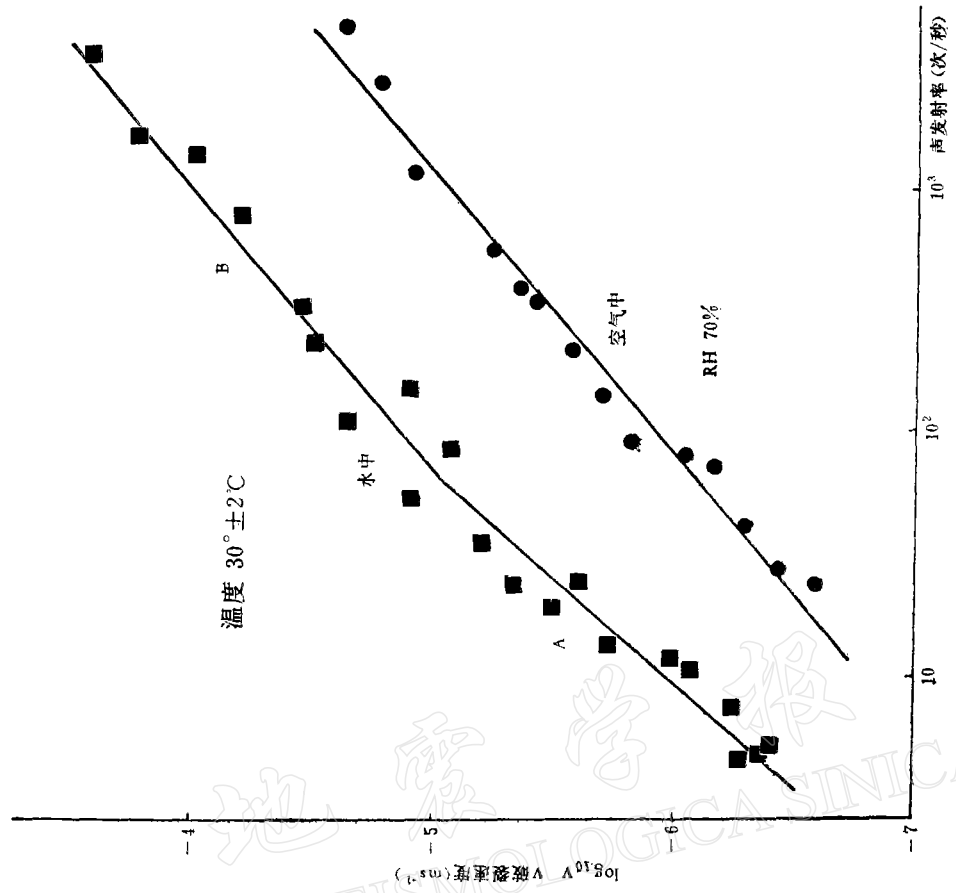


图 5

五、结 论

(一) 济南辉长岩的断裂韧性为 $K_{IC} = 2.81 \pm 0.03 MNm^{-\frac{3}{2}}$ 。

(二) 济南辉长岩的亚临界破裂扩展的 $\log_{10}K_I - \log_{10}V$ 曲线在破裂速度为 $10^{-7} - 10^{-4}$ (米/秒)范围内基本呈线性。

在有水条件下, $\log_{10}K_I - \log_{10}V$ 曲线可分为两段, 两段曲线交界处曲线较离散。水的应力腐蚀作用使有水条件下的破裂速度大于同一应力强度因子下的干破裂速度。在“干”、“湿”条件下各 n 值测量值如下:

	n_d	n_{WA}	n_{WB}	n_{da}	n_{WAa}	n_{WBa}
曲线一	36.51					
曲线二	44.30			50.14		
曲线三		21.21	35.50		19.47	42.56
曲线四		23.65	38.86			

(三) 济南辉长岩, 在亚临界破裂扩展时的声发射率与应力强度因子的关系在对数平面上与 $\log_{10}K_I - \log_{10}V$ 曲线有类似的形态。

(四) 由于岩石微结构对客观破裂的影响, 使实验结果依赖于实验活动空间尺寸, 并具有不同的意义。为评价实验活动空间尺寸的影响, 提出相对于岩石, 存在着由微结构尺寸决定的“微观”尺度和“宏观”尺度, 指出只有当实验活动空间的尺寸大于“宏观”尺度时, 实验结果对微结构的作用才具统计意义, 才是可靠的。从而表明, 根据微结构的尺寸确定客观尺度, 对指导和评价岩石力学实验是非常有意义的。

根据上述分析我们认为, 用 DT 方法测量 K_{IC} 的结果, 具有统计意义, 能够反映岩石抵抗断裂的本领。用松弛方法测量 $K_I - V$ 曲线的结果对于岩石具有定性的意义, 但在定量方面只有趋势的意义, 这是由于松弛实验的空间尺寸, 接近于“微观”尺度造成的。似乎用常载荷法, 可靠性较好。

DT 方法有很多优点, 实验方法简单, 对设备要求不高, 易于样品制备。特别是测量岩石的断裂韧性重复性较好。因此, 对需要及时了解各种岩石断裂韧性的工业部门, 采用 DT 技术测量可能是最迅速最有效的方法。

参 考 文 献

[1] H. Spetzler, A. model for time-dependent rock failure, 1981 (讲演稿)。

[2] B. K. Atkinson and R. D. Rawlings, Acoustic emission on during Subcritical tensile cracking of gabbro and granite, Abstract AGU meeting, May 1979, Washington, EOS, 60, 740, 1979.

[3] P. L. Swanson, Stress corrosion cracking in Westerly granite: An examination by the double torsion technique MSC thesis, U. Colorado 142, 1980.

[4] H. Spetzler, C. Sondergeld. and C. Getling, The influence of Stran rate and moisture content on rock failure, Proc XVIIth Assembly IUGG Canberra, Australia, 1979.

[5] H. Mizutani, H. Spetzler, I. Geffing, R. Marfin, J. III and N. Soga, Proc 8th lunar, Sci. Conf, 1235—1248, 1977.

[6] N. Soga. H. Spetzler and H. Mizutani, Proc 10th Lunar, Sci. Conf., 2165—2173, 1979.

- [7] R. A. Schmidt and J. T. Lutz, ASTM. STP. 678, 167, 1979.
- [8] F. F. Lange, In fracture mechanics of ceramics 1, 3—15. Edited by R. C. Braet. D. P. H. Hasselman and F. F. Lange, 1974.
- [9] B. J. S. Willkins and L. A. Simpson, Journal of the American Ceramics Society. 57, 11, 505, 1974.
- [10] S. Peng and A. M. Johnson, Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chalmersford granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech Abstra*, 9, 37—86, 1974.
- [11] R. J. Clifton, E. R. Simons, A. H. Jones and S. J. Green. *Expl Mech*, 16, 233—238, 1976.
- [12] R. A. Schmidt, Fracture-toughness testing of limestone. *Expl. Mech.*, 16, 161—167, 1976.
- [13] J. P. Henry and J. Paquet, Mecanique de la rupture de roches calcaïques, *Bull. Soc. geol. Fr*, 18, 1573—1582, 1976.
- [14] R. A. Schmidt and C. W. Haddle, *Int. J. Rock Mech Min. Sci. & Geomech Abstr.* 14, 289—293, 1977.
- [15] R. F. Pafsh, In Fracture Mechanics of Ceramics, Edited by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman and F. F. Lange, 2, 555—565, Plenum Press-New York, 1974.
- [16] L. A. Simpson. In fracture mechanics of ceramics. Edited by R. C. Bradt, D. P. H. Hasselman and F. F. Lange, 2, 567—577, 1976.
- [17] J. O. Outwater and D. J. Gery, On the fracture energy of glass. NRL Interim Contract Report, Contract NONR 3219 (01) (X). A. D. 640848. University of Vermont-Burlington vt Aug 1966.
- [18] D. P. Williams and A. G. Evans. *Journal of Testing and Evaluation*, 1 4, 264—270, 1973.
- [19] A. G. Evans, *Journal of Material Science*, 7, 10, 1137—1146, 1972.
- [20] B. K. Atkinson, *Int. J. Rock, Mech. Min. Sci & Geomech Abstr*, 16, 49—53, 1979
- [21] R. B. Winter, Bestimmung der Bruchzähigkeit und Spezifischen Oberflächenenergie von Gabbro in Dreipunkt-Biegeversuch Diplomarbeit Ruhr-Universität Bochum, 1979
- [22] 陈颙、姚孝新、耿乃光, 中国科学, 11, 1093—1100, 1979.
- [23] E. R. Jr. Fuller, ASTM STP, 678, 3—18, 1979.
- [24] F. P. Champomier ASTM. STP, 678, 60—72, 1979.
- [25] B. J. Pletka, E. R. Fuller. Jr. B. G. Koepke, ASTM. STP 678, 19—37, 1979.

DETERMINATION OF FRACTURE TOUGHNESS OF GABBRO BY DOUBLE TORSIONAL METHOD

HAN DEHUA YAO XIAOXIN CHEN YONG

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau)

Abstract

The stress intensity of Jinan gabbro was measured by using the double torsional method. The crack velocities V were also observed from the load relaxation at constant crosshead displacement under dry and wet conditions. The results obtained are similar to that of Atkinson's.

The fracture toughness of gabbro was found to be $2.81 \pm 0.03 \text{ MNm}^{-\frac{1}{2}}$.

A view different from that of Spetzler and Atkinson on the mechanism of the subcritical crack growth under wet condition has been proposed.

The relation between acoustic emission rate and the stress intensity is nearly the same as those of V vs K_I from results of acoustic emission experiment.