

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2737-06

水对岩石亚临界裂纹扩展及门槛值的影响研究

万琳辉, 曹平, 黄永恒, 汪亦显

(中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘要: 亚临界裂纹扩展是岩体工程时间相依性的主要原因之一。采用常位移松弛法, 对饱水和干燥两种状态下的大理岩、花岗岩双扭试件进行了亚临界裂纹扩展试验研究, 获得了两种岩石在两种状态下的亚临界裂纹扩展速率 V 与应力强度因子 K_I 的关系, 分析了两种岩石在两种状态下亚临界裂纹扩展的规律, 并确定了两种岩石在两种状态下的门槛值 (干燥状态): 大理岩 K_0 为 1.365, 花岗岩 K_0 为 2.305; (饱水状态): 大理岩 K_0 为 1.118, 花岗岩 K_0 为 1.490。研究表明, 两种岩石的 $\lg K_I$ 与 $\lg V$ 关系有较好的线性规律, 但由于岩石本身矿物成分等的不均匀性, 同种岩石的 $\lg K_I$ 与 $\lg V$ 关系离散性较大, 饱水状态下离散性更大; 水能加速岩石亚临界裂纹的扩展, 且对不同的岩石, 其影响程度也不一样; 水可以使岩石亚临界裂纹扩展的门槛值有较大幅度降低, 不同岩石其降低的程度也不一样。

关键词: 常位移松弛; 双扭试件; 亚临界裂纹扩展; 水影响; $\lg K_I$ 与 $\lg V$ 关系; 门槛值

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of subcritical crack growth of rocks and threshold values in different environments

WAN Lin-hui, CAO Ping, HUANG Yong-heng, WANG Yi-xian

(School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Subcritical crack growth is one of the main causes of time-dependent behavior in rocks. Applied the constant displacement relaxation method, subcritical crack growth in specimens made of marble and granite which were in dry and water-saturated environments was studied in double torsion test. The relations of the stress intensity factor K_I versus the subcritical crack growth velocity V were obtained under the two different environments. The behavior of subcritical crack growth was analyzed. The threshold values of subcritical crack growth in rocks were obtained under the two different environments — dry environment: marble $K_0=1.365$, granite $K_0=2.305$; water-saturated environment: marble $K_0=1.118$, granite $K_0=1.490$. The results showed: the relations between $\lg K_I$ and $\lg V$ accorded with linear rules; but it were discrete because of inhomogenous mineral composition, etc, it was more discrete under water-saturated environment; water can accelerate the subcritical crack growth; the effect degree was different in different rocks; the threshold values were reduced by water; the reduction was different in different rocks.

Key words: constant displacement relaxation; double torsion specimen; subcritical crack growth; effects of water; relations between $\lg K_I$ and $\lg V$; threshold values

1 引言

地下发电厂、地下仓库、采矿巷道等硐室绝大部分为岩体工程, 为保持这些工程正常进行, 岩体工程结构需要保持长期稳定, 因此, 研究岩石稳定的时间相依性是十分必要的^[1]。

根据断裂力学原理, 当应力强度因子达到材料的断裂韧度时裂纹便扩展。然而, 应力强度因子在达到断裂韧度之前, 裂纹有一个缓慢而稳定扩展的

过程, 这种现象就是亚临界裂纹扩展。亚临界裂纹扩展是岩石稳定的时间相依性的主要原因之一, 同时岩石是处于一定环境状态下复杂的地质材料, 地质环境中的活跃因素是地下水^[2], 地下水会对岩石亚临界裂纹扩展产生很大影响, 为此, 研究岩石亚临界裂纹扩展规律和水对其影响, 获得相应资料, 对岩石稳定的时间相依性研究具有重要的意义。

已有研究者在干燥状态下对岩石亚临界裂纹扩展进行了研究^[3-6], 得到了一些岩石亚临界裂纹扩

收稿日期: 2009-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50774093); 中南大学学位创新课题 (No. 2009bsxt061); 湖南省安监局资助项目 (2009)。

第一作者简介: 万琳辉, 男, 1977年生, 博士研究生, 主要从事岩-水、深部岩体工程稳定性研究方面的工作。E-mail: wlh9818@163.com

展的规律和参数,为相应岩体工程稳定的时间相依性研究提供了基本数据。水对岩石强度和裂纹扩展的影响,岩石力学工作者也开展了大量研究^[7-9],研究表明,水能够使岩石软化,强度降低;对岩体应力强度因子和裂纹扩展的方向具有很大影响;水还能加剧裂纹扩展,使裂纹由稳定扩展变为不稳定扩展。

本文选用了两种岩石,采用双扭试件和常位移松弛试验方法,研究两种岩石在干燥和饱水两种状态下的亚临界裂纹扩展规律及门槛值,分析得到了水作用下岩石亚临界扩展规律与门槛值,为地下水丰富的岩体工程结构进一步研究提供了基本数据。

2 试验原理与过程

本次岩石亚临界裂纹扩展速率与断裂韧度测定的试验方法是常位移松弛法,选用的岩石是变质花岗岩和含晶大理岩。

2.1 双扭试验原理

双扭试件如图 1 所示。试件为长 L 、宽 W 、厚 d 的薄板,要求试件宽度远大于厚度。板下表面沿 L 方向的对称线有中槽,以便裂纹沿中槽扩展,槽部厚度为 d_n 。采用 4 点加载方法,荷载为 $P/2$,相当于在试件一端施加一对 $\frac{P}{2}W_m$ (W_m 为力臂)的扭矩。

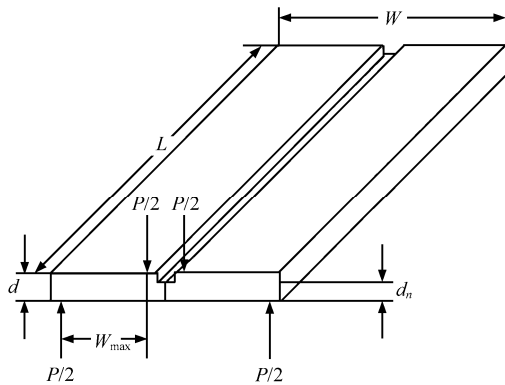


图 1 双扭试件示意图

Fig.1 Schematic illustration of double torsion specimen

可以认为双扭试件是由两块弹性扭转板组成,每块扭转板的尺寸为 $a \frac{W}{2} d$ (a 为裂纹长度),扭转力矩为 $\frac{P}{2}W_m$ 。当扭转板的挠曲很小,且板的宽度比厚度大得多时,扭转应变 θ 为

$$\theta = \frac{y}{W_m} = \frac{6Ta}{Wd^3G} \quad (1)$$

式中: T 为扭矩, $T = \frac{P}{2}W_m$; G 为试件材料的剪切模量; y 为加载点位移; d 为板的厚度。由此,可根据式 (2) 或式 (3) 作为常位移松弛时裂纹扩展速度计算的依据^[10-13]。

$$K_I = PW_m \left[\frac{3(1+\mu)}{Wd^3d_n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

或

$$V = -\frac{Wd^3Ey}{6P^2W_m^2(1+\mu)} \frac{dP}{dt} \quad (3)$$

式中: K_I 为裂纹尖端应力强度因子; μ 为试件材料的泊松比,其他参数同前。

从式 (2) 可以得到一个很重要的结论,即应力强度因子是施加荷载、试件尺寸和泊松比的函数,而与裂纹长度无关。这个结论对研究裂纹亚临界扩展是非常有价值的,且当荷载 P 达到最大值 $P_{\max}$ 时,即试件的破坏荷载,代入式 (2) 可得到试件的断裂韧度 K_{IC} 。

本次试验 K_I - V 关系数据处理采用式 (3)。

2.2 试件要求与制备

双扭试件要求^[13]: $W:d \geq 15:1$; 试件厚度与岩石颗粒尺寸之比应大于 $5:1$ 。上下表面平整,不平行误差在 0.025 mm 以内。沿中央轴线开一导向槽,槽宽约 1 mm ,深为 $d/3$ 。在试件一端沿中央轴线开一个长 1 cm ,宽约 1 mm 的切口。在加载过程中,裂纹从切口开始,并沿导向槽延伸。

按上述要求,用岩石切割机将岩石锯成薄板,再用金刚砂磨石机将岩石薄板磨光,中槽用金刚石锯片锯制。试件、试件尺寸及力学参数值见图 2 和表 1。

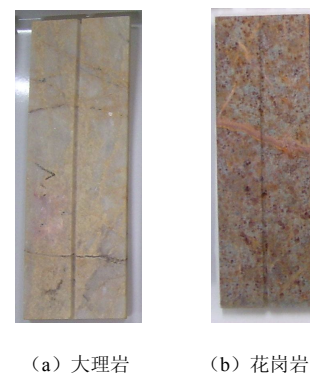


图 2 双扭试件

Fig.2 Picture of double torsion specimen

表1 试件尺寸及力学参数

Table 1 Sizes and mechanical parameters of specimens						
组号	岩性	试件数量 /个	试件尺寸 /mm	抗压强度 /MPa	弹性模量 /GPa	泊松比
1	花岗岩	9	180×60×5	101.8	32.7	0.26
2	大理岩	9	180×60×5	201.0	38.3	0.16

2.3 试验装置

试验在中南大学测试中心 INSTRON 1342 材料伺服机上进行, 试验装置和加载方式如图 3 所示。用 CBW 型高精度轴向位移引伸计测量位移, 其量程为 ± 27 mm。位移、力和时间同时采用计算机控制与采集系统自动记录。

底板用于放置试件, 其上开有半球形空间和半圆柱形空槽以搁置直径为 5 mm 的钢球, 试件由 4 粒钢珠支承, 前端 2 粒承受压机的压力, 尾部 2 粒只起支承试件和后半部分重力的作用。钢珠支承一方面可保证试件受力为点载荷, 另一方面可减小支承物与试件的摩擦。

压头也是直接与试件接触的元件, 将直径 4 mm 的 2 粒钢珠用黄油嵌入压头上的 2 个半球形空洞中。为保证钢珠与试件均匀接触, 压头上设置了一个可以灵活转动的黄油润滑圆弧面。

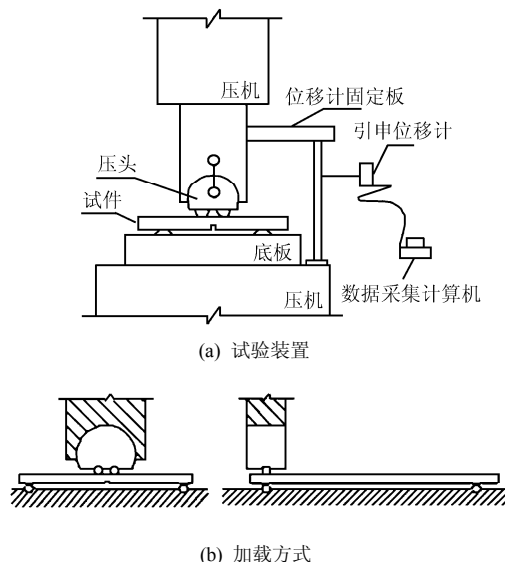


图3 试验装置和加载方式

Fig.3 Schematic illustration of the DT test apparatus and loading configuration of the DT test

2.4 试验方法

考虑各种因素后试验采用了以下方法:

①为了试验过程中使试件中裂纹顺利扩展, 试件需要预裂。具体预裂方法: 首先调节好底板、试件与压头的位置, 并将动态应变仪调平衡; 再以 0.05 mm/min 的恒定位移速率加载, 记录载荷随时

间变化的 $P-t$ 曲线; 当载荷基本不随时间上升时, 停止加载, 提起压头, 预裂完毕。图 4 为典型试件预裂时的 $P-t$ 曲线。

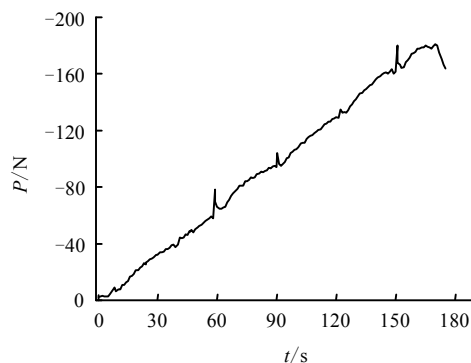


图4 典型试件预裂载荷-时间曲线

Fig.4 The load-time curve of typical specimen with crack

②为了便于考察水对岩石裂纹扩展的影响, 每个试件进行两次试验。首先进行不含水试验, 试验时不将试件压断, 然后取下试件放入纯净水 ($\text{pH}=6.5$) 中浸泡 72 h 后进行含水饱和状态下的第 2 次试验。

③试验采用位移松弛法。试验时, 首先以 5 mm/min 的位移速度快速加载, 当试件上的荷载达到试件预裂载荷峰值的约 95% 时, 停止加载, 固定荷载点位移, 进行试件荷载松弛试验, 记录试件的 $P-t$ 和 $y-t$ 曲线, 如图 5、6 所示。随着时间的延长, 载荷的松弛越来越小, 当试件上的荷载松弛趋于稳定时提起压头, 试验完毕。整个试验时间约为 15~40 min。

试验过程中, 由于原岩本身的裂隙缺陷及加载等原因, 大理岩和花岗岩各有一个试件试验失败。整个试验在室温环境下进行, 温度约为 20 °C。图 5、6 分别为典型试件的恒位移松弛试验 $P-t$ 实测曲线及 $y-t$ 实测曲线。

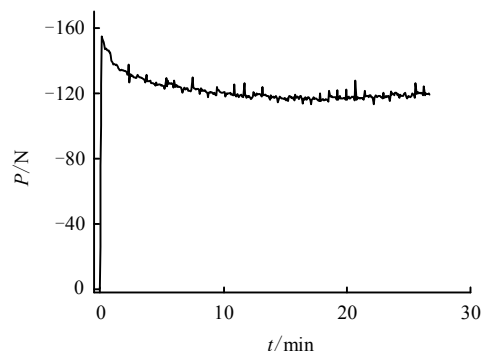


图5 典型试件恒位移松弛载荷-时间图

Fig.5 The load-time curve of typical specimen

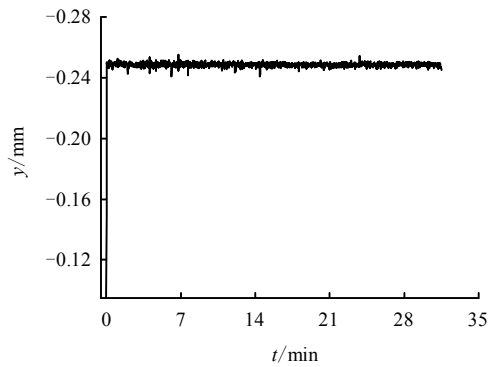


图6 典型试件位移-时间曲线

Fig.6 The displacement-time curve of typical specimen

3 试验结果及分析

3.1 K_I 与 V 关系和断裂韧度

将试验记录的数据代入式(2)和式(3),可得到各试件的裂纹扩展速度与裂纹尖端应力强度因子的关系。图7、8为大理岩和花岗岩双对数坐标系中 K_I - V 散点图,对图中的 K_I 、 V 数据进行了线性回归,得到方程:

$$\lg V = a + b \lg K_I \quad (4)$$

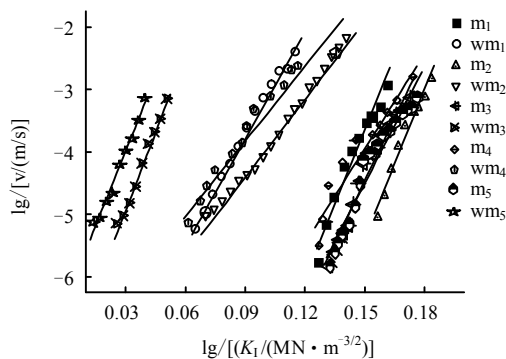
图7 大理岩试件 K_I - V 关系曲线

Fig.7 Curves for different marble specimens

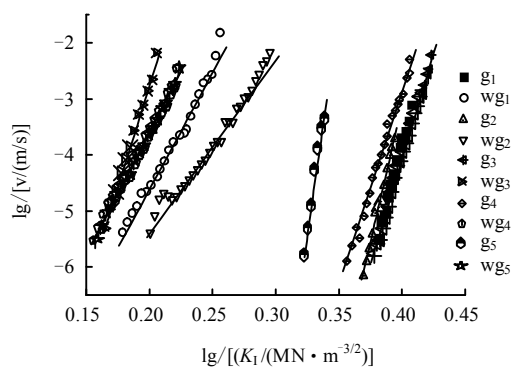
图8 花岗岩试件 K_I - V 关系曲线

Fig.8 Curves for different granite specimens

表2、3为试件试验结果的回归参数及相关系数。从表中可以看出,双对数坐标系中经线性回归的相关系数 R 均在0.962 14以上,说明 $\lg V$ 与 $\lg K_I$ 均呈很好的线性关系。根据Charles理论^[14-15], V 与 K_I 之间的幂函数关系为 $V = AK_I^n$,由此可得到亚临界裂纹的扩展参数,见表4。

表2 大理岩试验结果回归系数

Table 2 The regression coefficient of marble test result				
	试件	参数 a	参数 b	相关系数 R
大理岩 (干燥)	m ₁	-15.530	79.311	0.972 48
	m ₂	-17.291	79.413	0.981 85
	m ₃	-14.459	83.360	0.980 78
	m ₄	-11.514	50.445	0.962 14
	m ₅	-13.809	79.302	0.972 12
	均值	-14.520±1.91	74.367±12.06	0.973 87±0.007 2
大理岩 (饱水)	wm ₁	-8.936	57.121	0.996 72
	wm ₂	-8.161	41.648	0.996 75
	wm ₃	-7.446	66.689	0.994 66
	wm ₄	-7.435	40.032	0.979 06
	wm ₅	-6.367	62.059	0.992 35
	均值	-7.669±0.854	53.510±10.80	0.991 91±0.006 62

表3 花岗岩试验结果回归系数

Table 3 The regression coefficient of granite test result				
	试件	参数 a	参数 b	相关系数 R
花岗岩 (干燥)	g_1	-39.400	88.931	0.997 56
	g_2	-42.169	97.628	0.996 49
	g_3	-34.202	75.314	0.996 98
	g_4	-30.392	68.794	0.996 27
	g_5	-57.039	158.687	0.991 41
	均值	-40.640±9.157	97.871±32.040	0.995 74±0.002 22
花岗岩 (饱水)	wg_1	-12.962	41.706	0.992 97
	wg_2	-11.639	31.093	0.990 06
	wg_3	-17.320	72.740	0.997 33
	wg_4	-12.337	43.703	0.997 92
	wg_5	-12.370	43.845	0.998 06
	均值	-13.326±2.040	46.618±13.883	0.995 27±0.003 2

表4 亚临界裂纹扩展参数

Table 4 The parameters of subcritical crack growth					
试件		A (干燥)	n (干燥)	A (饱水)	n (饱水)
大理岩	m_1	2.95×10^{-16}	79.311	1.16×10^{-9}	57.121
	m_2	5.12×10^{-18}	79.412	6.91×10^{-9}	41.648
	m_3	3.48×10^{-15}	66.689	3.58×10^{-8}	83.360
	m_4	3.06×10^{-12}	50.445	3.67×10^{-8}	40.032
	m_5	1.55×10^{-14}	62.059	4.30×10^{-7}	79.302
	均值	6.17×10^{-13}	67.600	1.02×10^{-7}	60.292
花岗岩	g_1	3.99×10^{-40}	88.931	1.09×10^{-13}	41.706
	g_2	6.78×10^{-43}	97.628	2.29×10^{-12}	31.093
	g_3	6.28×10^{-35}	75.314	4.79×10^{-18}	72.740
	g_4	4.05×10^{-31}	68.794	4.61×10^{-13}	43.703
	g_5	9.15×10^{-58}	158.69	4.26×10^{-13}	43.845
	均值	8.11×10^{-32}	97.871	6.58×10^{-13}	46.618

根据断裂力学原理, 岩石裂纹尖端应力强度不断增大且达到岩石断裂韧度时, 会导致裂纹失稳扩展, 在岩体工程中表现为工程的破坏, 因此测得岩石断裂韧度, 对控制岩体工程破坏具有很大的实际意义, 可以通过双扭试验测定岩样的断裂韧度。根据式 (2), 当荷载 P 达到最大值 $P_{\max}$ 时, 即试件的破坏荷载时就可得到岩样的断裂韧度 K_{IC} 。表 5 为两种岩石的断裂韧度。

表 5 断裂韧度表 K_{IC}
Table 5 Fracture toughness K_{IC}

大理岩	断裂韧度 $K_{IC}/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2})$	花岗岩	断裂韧度 $K_{IC}/(\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2})$
m ₇	1.660	g ₇	2.620
m ₈	1.800	g ₈	2.530
m ₉	1.410	g ₉	2.560
均值	1.620±0.228	均值	2.570±0.0529

3.2 门槛值 K_0

通常在测试岩石裂纹亚临界扩展速率过程中, 随着裂纹的扩展, 裂纹尖端的应力强度因子减小, 裂纹的扩展速度降低; 当裂纹接近亚临界扩展的门槛值 K_0 时, 裂纹的扩展速度难以测到^[6]。目前门槛值 K_0 在玻璃、陶瓷及金属材料中的研究较多, 而在岩石材料中, 没有研究者测得 K_0 值。Williams^[10]、李江腾^[6]等对岩石裂纹亚临界扩展进行研究, 扩展速度达到 $10^{-6} \sim 10^{-12}$ m/s 时仍没有发现 K_0 值。本次试验中所测到裂纹扩展的速度 (包括空气和饱水两种状态) 为 5×10^{-7} m/s 量级, 从工程意义上来说, 可以认为此时的裂纹扩展已经停止, 因此本次试验将裂纹扩展达到最低速度时, 看作裂纹扩展的停滞速度。根据式 (3), 将裂纹扩展的最低速度对应的应力强度因子 K_I 作为裂纹扩展的门槛值 K_0 , 如表 6 所列。

表 6 裂纹扩展门槛值 K_0
Table 6 Threshold values K_0

Table 6 Threshold values K_0					
试件	K_0 (干燥) /($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$)	K_0/K_{IC}	K_0 (饱水) /($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$)	K_0/K_{IC}	
大理岩	m_1	1.341	0.826	1.163	0.717
	m_2	1.433	0.883	1.179	0.726
	m_3	1.354	0.834	1.061	0.654
	m_4	1.340	0.826	1.155	0.712
	m_5	1.358	0.837	1.031	0.635
	均值	1.365	0.841	1.118	0.689
花岗岩	g_1	2.410	0.964	1.513	0.589
	g_2	2.354	0.942	1.595	0.621
	g_3	2.106	0.842	1.440	0.560
	g_4	2.387	0.955	1.466	0.570
	g_5	2.270	0.908	1.436	0.559
	均值	2.305	0.922	1.490	0.580

3.3 分析讨论

从断裂力学中裂纹扩展的角度来考虑岩石强度的时间效应, 是岩石流变力学以外的另一种研究方法, 岩石的 K_I - V 关系与岩石的流变力学模型一样, 是反映岩石强度时间效应的一种力学特性。因此 K_I - V 关系和 K_{IC} 都是研究岩石强度时间效应的基础。本次试验所测的参数 (表 2~5) 可为岩石稳定的时间相依性进一步研究提供基本数据。

从图 7、8 以及表 2、3 中可以看出, 每次试验所测得的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 关系都呈线性, 但同种岩石的不同试件, 各次试验所测得的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 关系离散性较大, 尤其是各试件在饱水状态下测得的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 离散性更大。分析认为, 干燥状态时离散性大主要由岩石本身的矿物成分、颗粒大小、力学性质的不均匀性引起的。饱水状态时离散性更大, 除了岩石的颗粒大小、力学性质的不均匀性等因素外, 笔者认为, 岩石的矿物成分不均匀性是主导因素, 这是因为水对不同矿物成分的腐蚀程度不同, 故对其离散性影响更大。应该说, 岩石的不均匀性越大, 试验测得的结果离散性就越大, 为提高试验结果的可靠性, 应对同种岩石进行多次试验, 然后将多次试验结果的平均值作为岩石亚临界裂纹扩展的参数。

从图 7、8 以及表 2、3 中还可以看出, 两种岩石饱水状态的试件测得的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 回归直线斜率 b 比较小, 而截距 a 比较大, 也就是说在同一应力强度因子水平上饱水试件的亚临界裂纹扩展的速度更大, 这表明水能加速亚临界裂纹扩展。对于大理岩, 在饱水状态下的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 直线斜率是空气状态下的 0.72 倍; 花岗岩在饱水状态下 $\lg K_I$ - $\lg V$ 直线斜率是空气状态下的 0.48 倍, 可见对于不同的岩石, 水对亚临界裂纹扩展的影响是不同的。

水对岩石的断裂韧度也有影响, 水存在时测得的断裂韧度低于空气中测得的结果, 如砂岩低 33%~60%, 灰岩低 34%, 石英岩低 15%。但也有人认为水对渗透性低的岩石如花岗岩的断裂韧度没有什么影响^[13]。

从表 6 可以看出, 空气状态下本次试验的两种岩石的 K_0/K_{IC} 有所差异, K_0/K_{IC} 在 0.826~0.964 之间变化, 饱水状态时 K_0/K_{IC} 值明显减小, 对大理岩, K_0/K_{IC} 的均值为 0.69, 是空气状态下所测值的 81.9%; 花岗岩 K_0/K_{IC} 的均值为 0.58, 仅为空气状态下所测值的 62.9%, 这说明水可以使岩石亚临界裂纹扩展的门槛值有较大幅度降低, 不同的岩石其降低幅度也不一样。

4 结 论

(1) 多次试验研究^[1, 3-6, 11-13]表明, 在研究岩石亚临界裂纹扩展中双扭测试方法是一种简便、有效的试验方法。该方法直观, 适应性强, 加载方式简便, 试验形状简单而无需柔度标定, 也不需要测定裂纹长度。

(2) 采用常位移松弛法所测两种状态下大理岩和花岗岩的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 关系都呈线性 ($R > 0.962$), 即亚临界裂纹扩展速率与裂纹尖端应力强度因子服从幂函数关系, 这与 Charles 理论相符。

(3) 同种岩石的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 关系离散性较大, 饱水状态时离散性更大, 主要是由岩石本身的矿物成分、颗粒大小、力学性质的不均匀性引起的; 饱水状态时主导因素是岩石本身的矿物成分。

(4) 从工程应用的角度确定了大理岩和花岗岩亚临界裂纹扩展的门槛值 K_0 , 发现水能使岩石亚临界裂纹扩展的门槛值 K_0 有较大幅度的降低, 不同岩石其降低幅度也不同。本次测试中大理岩降低了约为 18.1%, 而花岗岩则降低了约 37.1%。为岩体工程破坏的时间效应研究提供了基本资料。

参 考 文 献

- [1] NARA Y, KANEKO K. Study of subcritical crack growth in andesite using the double torsion test[J]. **International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences**, 2005, 42: 521—530.
- [2] 汤连生, 张鹏程, 王思敬. 水-岩化学作用之岩石宏观力学效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(4): 526—531.
TANG Lian-sheng, ZHANG Peng-cheng, WANG Si-jing. Testing study on macroscopic mechanics effects of chemical action of water on rocks[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(4): 526—531.
- [3] 肖洪天, 杨若琼, 周维垣. 三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(4): 447—450.
XIAO Hong-tian, YANG Ruo-qiong, ZHOU Wei-yuan. Testing study of subcritical crack growth of granite at the three gorges shiplock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1999, 18(4): 447—450.
- [4] LEI X, KUSUNOSE K, RAO M V, et al. Quasistatic fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring[J]. **J. Geophys Res.**, 2000, 105(B3): 6127—6139.
- [5] 袁海平, 曹平, 周正义. 金川矿岩亚临界裂纹扩展试验研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, 37(2): 381—384.
YUAN Hai-ping, CAO Ping, ZHOU Zheng-yi. Testing study of subcritical crack growth of ore in Jinchuan mine[J]. **Journal of Central South University (Science and Technology)**, 2006, 37(2): 381—384.
- [6] 李江腾, 曹平, 袁海平. 岩石亚临界裂纹扩展试验及门槛值研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(3): 415—418.
LI Jiang-teng, CAO Ping, YUAN Hai-ping. Study on subcritical crack growth and thresholds of rocks[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(3): 415—418.
- [7] 赵延林, 曹平, 林杭, 等. 渗透压作用下压剪岩石裂纹流变断裂贯通机制及破坏准则探讨[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(4): 511—517.
ZHAO Yan-lin, CAO Ping, LIN Hang. Rheologic fracture mechanism and failure criterion of rock cracks under compressive-shear load with seepage pressure[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2008, 30(4): 511—517.
- [8] 汤连生, 张鹏, 程王洋. 水作用下岩体断裂强度探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(19): 3337—3341.
TANG Lian-sheng, ZHANG Peng, CHENG Wang-yang. On fracture strength of rocks with cracks under water action[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(19): 3337—3341.
- [9] 汤连生, 张鹏, 程王洋. 岩体复合型裂纹的扩展规律 II. 有水作用条件下[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(1): 90—94.
TANG Lian-sheng, ZHANG Peng-cheng, WANG Yang. Propagation of the complex cracks in rocks II. under water pressure and chemical damage[J]. **Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni**, 2003, 42(1): 90—94.
- [10] WILLIAMS D P, EVANS A G. A simple method for studying slow crack growth[J]. **Journal of Testing and Evaluation**, 1973, 1(4): 264—270.
- [11] CICCOTTI M. A realistic finite-element model for the double torsion loading configuration[J]. **Am Ceram Soc.**, 2000, 83 (11): 2737—2744.
- [12] 罗礼. 用双扭方法测试岩石的亚临界裂纹扩展速度和断裂韧度[硕士学位论文 D]. 长沙: 中南工业大学, 1988.
- [13] 于晓中. 岩石和混凝土断裂力学[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991: 463—468.
- [14] ATKINSON B K. Subcritical crack growth in geological materials[J]. **Journal of Geophysical Research**, 1984, 89(B6): 4077—4114.
- [15] LAJTAI E Z, BIELUS L P. Stress corrosion cracking of Laodu Bonnet granite in tension and compression[J]. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, 1986, 19(1): 71—87.