



水岩作用下岩体裂纹亚临界扩展

曹 平, 陈绍名

(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, 利用 Inston1342 型电液伺服材料试验机, 采用常位移松弛法分别进行自然状态以及饱水状态下岩块的亚临界裂纹扩展实验, 获得了两种环境下岩石裂纹扩展速率 v 与应力强度因子 K_I 的关系及亚临界裂纹扩展参数, 研究水对岩石亚临界裂纹扩展规律的影响, 并对两种环境下亚临界裂纹扩展参数进行了对比分析。结果表明: 两种环境下岩石的 $\lg K_I - \lg v$ 有较好的线性规律, 岩石的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; 在双对数坐标空间中, 含饱和水试件的 $\lg K_I - \lg v$ 曲线位于空气中试件 $\lg K_I - \lg v$ 曲线的左上角, 含饱和水试件的曲线斜率较空气中试件的减小, 而截距增加。在同一应力强度因子水平上, 含饱和水试件的裂纹扩展速度大, 表明水加速了岩体亚临界裂纹扩展。该实验结果可为水化学作用下复杂岩体的稳定性分析提供可靠依据。

关键词: 双扭试件; 常位移松弛法; 水化学作用; 亚临界裂纹扩展; 应力强度因子

中图分类号: TU45

文献标志码: A

Subcritical growth of rock crack under water-rock interaction

CAO Ping, CHEN Shao-ming

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

Abstract: Subcritical crack growth is one of the main causes of time-dependent behavior in rock mass engineering. By using Instron 1342 type electro hydraulic servo test machine and adopting the double-torsion load-relaxation method at constant displacement, two groups of specimens, one immersed in groundwater and the other in air, were tested to study the relationship between the crack growth rate v and fracture toughness K_I , and the parameters of subcritical crack growth in the two different environments were gotten. The influence of water on the subcritical crack growth mechanism was analyzed, and comparisons of the parameters of the growth of subcritical crack were made for the two different environments above-mentioned. The results show that the parameters of $\lg K_I - \lg v$ are in accord with linear rules, the relationship between subcritical crack growth velocity v and stress intensity factor K_I agrees power function. In the double logarithmic coordinates space, the $\lg K_I - \lg v$ curves of those specimens in saturated water locate at the left coner above those of the specimens in air with smaller slope but larger intercept. In addition, the subcritical crack growth velocity of saturated water specimen is higher at the same stress intensity factor, which indicates that water speeds up the subcritical crack growth. Those results can provide reliable references to study the complicated rock mass stability under the effects of water.

Keyword: double torsion specimen; constant displacement load relaxation method; chemical water-rock interaction; subcritical crack growth; stress intensity factor

岩体被广泛应用于地下结构工程中, 这些工程都必须考虑其长期的稳定性, 各种与岩体有关的工程实

例表明: 岩体的变形与破坏机制与岩体中裂纹的萌生、扩展和贯通过程密切相关, 根据断裂力学原理, 当裂

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51174228, 51274249)

收稿日期: 2014-03-12; 修订日期: 2015-01-19

通信作者: 曹 平, 教授, 博士; 电话: 13973128263; E-mail: pcao_csu@sina.com

纹尖端应力强度因子达到材料的断裂韧性(K_{IC})时, 裂纹就会以接近声速扩展。但是, 在裂纹尖端的应力强度因子(K_I)未达到断裂韧性(K_{IC})即裂纹开始快速扩展前, 有一个称为亚临界裂纹扩展的裂纹稳定扩展过程^[1], 因此, 提出了应力腐蚀概念: 构件在拉应力和腐蚀介质的联合作用下会产生裂纹, 且裂纹会不断扩展, 最后导致断裂破坏, 这种过程称为应力腐蚀。在此过程中, 裂纹的扩展速度随 K_I 的增大而增大。岩石内裂纹的快速扩展进而发生断裂, 通常是在亚临界裂纹扩展到一定程度后发生的^[2-3], 亚临界裂纹扩展是岩石中最主要的与时间相关的行为, 亚临界裂纹扩展参数对分析岩体的长期稳定性是非常重要的^[4-5]。同时由于岩体是颗粒或晶体相互胶结或粘结在一起的聚集体, 岩石的力学特性随着不同环境的影响而变化, 其中水(如地下水、雨水等)的存在是影响其工程稳定性的一个最主要因素, 它将改变岩石的物理状态和微观结构, 使其力学特性发生变化, 岩石力学工作者对水作用下岩石强度和裂纹扩展做了大量研究^[6-7], 结果表明: 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^[6-7]。水岩反应的力学效应方面的研究越来越被重视, 且多集中在水对岩石的强度及弹性模量的作用等方面的研究, 而对水岩作用下岩石亚临界裂纹扩展规律和断裂特性的实验研究还鲜见报道^[8-9]。

双扭试验最先用于研究玻璃、陶瓷和钢材的断裂特性, 并取得了许多研究成果^[10-11], 1977年, HENRY等^[12]将双扭试验应用于岩石材料, 研究其断裂韧性及亚临界裂纹扩展规律, 双扭试验由于其同时具有直观、适应性强、加载方式简便、试件形状简单而无需柔度标定等诸多优点, 已成为研究亚临界裂纹扩展有效而理想的方法^[13]。因此, 本文作者采用双扭测试法, 研究地下水作用下岩石的亚临界裂纹扩展速度和断裂韧性, 并对实验结果进行分析, 探讨水对岩石亚临界裂纹扩展规律的影响, 为复杂矿岩的稳定性分析提供了可靠的实验依据。

1 岩石亚临界裂纹扩展机制

当裂纹由成核、生长和亚临界扩展发展到了临界长度, 裂纹尖端区域的应力强度因子 K_I 也随着裂纹的扩展而增长到 K_{IC} 。此时, 裂纹的扩展从稳态转入动态, 随即出现快速断裂, 即裂纹尖端屈服区附近的应力足以撕开原子间结合键, 使原子间结合键的逐步破

坏, 从而导致沿着原子面发生解理。而断裂通常是在亚临界裂纹扩展到一定程度后发生, 岩石裂纹亚临界扩展的影响因素取决于岩石裂纹扩展的机制。通常应力强度因子、裂纹尖端位移模式、温度、压力、环境介质的活性、环境介质中固体的可溶性、岩石微结构等是岩石裂纹亚临界扩展的主要影响因素。

图1所示为典型的岩石裂纹亚临界扩展速度(v)与裂纹尖端应力强度因子(K_I)的关系。

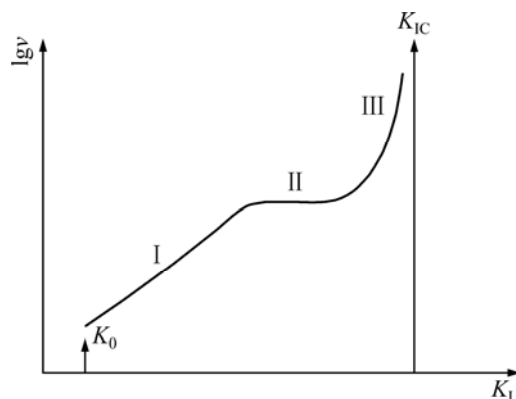


图1 典型亚临界扩展速度与应力强度因子关系

Fig. 1 Relationship between typical subcritical propagation velocity and stress intensity factor

典型亚临界裂纹扩展一般存在3个阶段。在第一阶段(I)内, 当刚超过 K_0 后, 裂纹经过一段孕育期突然加速扩展, 裂纹的扩展主要由应力腐蚀速度决定。当进入扩展的第二阶段(II)后, 裂纹扩展处于稳定状态, 其扩展速率不随应力强度因子 K_I 的提高而增加, 此时裂纹的扩展主要由环境中活性物质向裂纹尖端扩散的速度决定。当裂纹由成核、生长和亚临界扩展发展到临界长度后, 裂纹尖端区域的应力强度因子 K_I 也随着裂纹的扩展而增高到 K_{IC} , 此时, 裂纹的扩展从稳态阶段进入动态阶段(第三阶段)。在第三阶段(III)内, 裂纹尖端屈服区附近的应力足以撕开原子间结合键, 使原子间结合键逐渐破坏, 从而导致沿着原子面发生解理, 随时可能出现断裂。裂纹的扩展受热激活焓的影响, 而受环境介质的影响并不明显。岩石裂纹亚临界扩展的影响因素取决于岩石裂纹扩展机制, 通常岩石显微结构、裂纹尖端位移模式、温度、压力、环境介质活性与可溶性等是岩石裂纹临界扩展的主要影响因素。

在建立岩石类材料裂纹亚临界扩展速度关系时, 通常考虑裂纹扩展速度与裂纹尖端的应力强度因子之间的关系。部分研究者对玻璃和陶瓷中应力腐蚀亚临界裂纹扩展的机理提出过一些理论, 在本研究中, 主

要采用与岩石材料的亚临界裂纹扩展规律最为吻合的 Charles 理论^[14], Charles 理论认为应力腐蚀是由于拉应力使原子之间的距离增大, 从而使碱离子易于扩散而引起的。在裂纹尖端, 由于应力集中, 拉应力很大, 碱离子的扩散就更为严重。因此, 推导出最通用的描述 K_I-v 关系的方程, 即 Charles 方程:

$$v=v_0\exp[-H/(RT)]K_I^n \quad (1)$$

式中: v 为裂纹扩展速度; H 为活化焓(热函); R 为摩尔气体常数; T 为绝对温度; v_0 和 n 为常数。式(1)被广泛用于岩石和矿物中裂纹扩展研究。当温度 T 恒定时, 可将式(1)表示为 K_I-v 空间的幂函数及 $\lg K_I-\lg v$ 空间的线性函数分别如式(2)和(3)所示:

$$v = AK_I^n \quad (2)$$

$$\lg v = a_1 + b_1 \lg K_I \quad (3)$$

式中: A 、 a_1 、 b_1 均为常数。

2 双扭试验的基本原理

双扭方法是测试亚临界裂纹扩展速度的一种直接方法, 它能够直观地监测裂纹的扩展过程, 适用性广, 加载方式简便, 是研究亚临界裂纹扩展的有效手段。图2所示为双扭试件的示意图。

试件为一矩形薄板, 在板的下表面沿长度方向的对称线开一中槽, 以使裂纹沿中槽扩展。双扭试件可以看作由两个弹性扭转杆组成, 对于小变形 y , 当扭转杆的宽度远大于试件的厚度时, 扭转应变 θ 如式(4)所示^[15]:

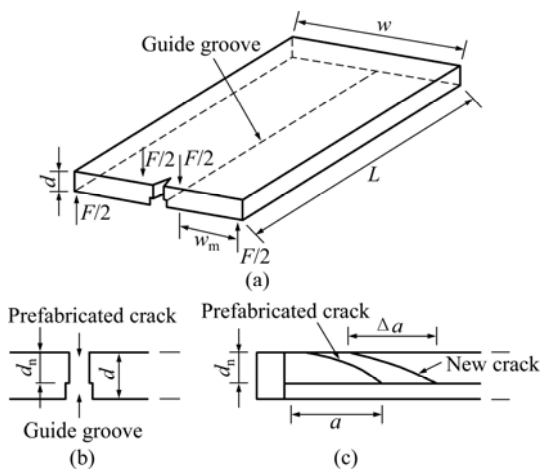


图2 双扭试件示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of DT specimen: (a) Specimen shape; (b) Horizontal cross-section; (c) Longitudinal cross-section

$$\theta = \frac{y}{w_m} = \frac{6Ta}{wd^3E} \quad (4)$$

式中: y 为加载点的位移; w_m 为扭臂的长度; T 为扭矩, $T=Fw_m/2$; F 为作用于扭杆上的荷载; E 为岩石的剪切模量; a 为裂纹的长度; d 为试件的厚度; $w/2$ 为扭杆的宽度。

结合式(4)进行整理后有

$$C = \frac{y}{F} = \frac{3w_m^2a}{wd^3E} \quad (5)$$

式中: C 为试件的柔度。

裂纹扩展的应变能释放率 G 与试件的柔度 C 的关系式^[16-17]如式(6)所示:

$$G = \frac{F^2}{2} \left(\frac{dC}{dA} \right) = \frac{F^2}{2d_n} \left(\frac{dC}{da} \right) \quad (6)$$

式中: A 为裂纹的面积; d_n 为裂纹面上试件的厚度。

将式(5)对 a 求导, 并将结果代入式(3)中得到:

$$G = \frac{3F^2w_m^2}{2wd^3d_nE} \quad (7)$$

根据应力强度因子 K_I 与应变能释放率 G 之间的关系以及泊松比 μ 与岩石的剪切模量 E_2 之间的关系, 可推导出应力强度因子关系式^[18]如式(8)所示:

$$K_I = (EG)^{1/2} \quad (8)$$

由于 $G = \frac{E}{2(1+\nu)}$, 则有应力强度因子关系式如式

(9)所示:

$$K_I = Fw_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3d_n} \right]^{1/2} \quad (9)$$

由式(9)可知, 应力强度因子与荷载、试件尺寸和泊松比等因素有关, 不依赖裂纹的长度。

当荷载 F 达到临界值 F_C 时, 裂纹快速扩展, 此时, K_I 也达到临界值, 即为断裂韧度 K_{IC} 如式(10)所示:

$$K_{IC} = F_C w_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3d_n} \right]^{1/2} \quad (10)$$

从式(10)可以看出, 应力强度因子与荷载、试件尺寸和泊松比等因素有关, 不依赖裂纹的长度, 这一特点对于亚临界裂纹扩展研究很有价值。

当荷载 F 达到临界值 F_C 时, 裂纹快速扩展, 此时, K_I 也达到裂纹扩展临界的断裂韧度值 K_{IC} , 则由式(10)有

$$K_{IC} = F_C w_m \sqrt{\frac{3(1+\mu)}{wd^3d_n}} \quad (11)$$

令

$$B = \frac{3w_m^2}{wd^3E_2} = \frac{6w_m^2(1+\mu)}{wd^3E} \quad (12)$$

则式(10)可转换为

$$y = FBa \quad (13)$$

将式(13)对时间 t 求导有

$$\frac{dy}{dt} = Ba \frac{dF}{dt} + BF \frac{da}{dt} \quad (14)$$

对于常位移松弛法, 有 $\frac{dy}{dt} = 0$, 故式(14)可转变为:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{a}{F} \frac{dF}{dt} \quad (15)$$

联立式(9)、(10)和(12)得

$$v = \frac{da}{dt} = -\frac{wd^3Ey}{6w_m^2F^2(1+\nu)} \frac{dF}{dt} \quad (16)$$

式(16)表明: 在给定位移状态下, 如果试件尺寸和位移已知, 亚临界裂纹扩展速度与此荷载作用下的荷载松弛率有关。由此, 可以通过试验建立亚临界裂纹扩展速度 v 和应力强度因子 K_I 之间的关系。MCKINNEY 在实验的基础上, 提出了应力强度因子的宽厚比修正公式如式(17)所示:

$$K_I = Fw_m \sqrt{\frac{3(1+\mu)}{wd^3d_n\xi}} \quad (17)$$

式中: ξ 为宽厚比修正系数, 且 $\xi = 1 - \frac{5d}{4w}$ 。

从式(17)可以看出, 当宽厚比 $w/d > 13$ 时, K_I 值相对误差在 5% 以内。因此, 一般试件的宽厚比控制在 15:1~12:1 之间。

对试验数据进行处理时, 选取若干数量的时间点和相应的荷载值与位移值, 再将试样基本参数一起代入式(16)和(17), 即可求得亚临界裂纹扩展速度和裂纹扩展时的应力强度因子。

3 实验

用岩石切割机将岩石锯成薄片, 再在金刚砂磨石机上磨光, 试件尺寸为 $140 \text{ mm} \times 55 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$, 沿中央轴线用金刚石锯片锯制一条通槽, 槽宽 1 mm , 槽深约为 $d/3$ 。试样一端沿中央轴线开一个长 10 mm , 宽 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。试件的宽厚比在 15:1~12:1 之间, 加工时试样上下表面平整, 不平行度误差在 0.025 mm 以内。为了研究金川矿区地下水对岩石力学性质的影响, 对金川地下水进行了采集并应用于试验中。将试件分成两组, 一组放置于自然状态下, 另一组则浸泡于取自金川的地下水溶液($\text{pH}=7.1$)中, 试件浸泡时间为 7 d , 试验温度为室温, 整个浸泡过程中温差不大。

试验在 Instron1342 型电液伺服材料试验机上进行, 其压力传感器的最大载荷为 250 kN , 具有模拟控制和计算机控制两种控制方式, 试验机除了静态加载外, 还能完成正弦波、三角波和方波等幅信号和随机信号的低周疲劳加载, 进行各种常规力学性能和断裂参数的测试。

表 1 试样力学参数

Table 1 Mechanical parameters of specimens

Environmental condition	Specimen quantity	Compressive strength/MPa	Elastic modulus/GPa	Poisson's ratio
In air	3	104.50	36.88	0.24
In water	3	99.69	16.08	0.24

图 3 所示为试验装置的示意图。图 3(a)中底板用于放置试件, 其尺寸为 $290 \text{ mm} \times 94 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$, 经过高精度的加工制成, 其上开有半球形空洞和半圆柱形空槽以搁置 $d5 \text{ mm}$ 的钢球(见图 3(b)), 试件由 4 粒钢珠支承, 前端两粒承受压机的压力, 尾部两粒只起支承试件和后半部分质量的作用。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素, $d5 \text{ mm}$ 的两粒钢珠是用黄油嵌入到压头上的两个半球形空洞

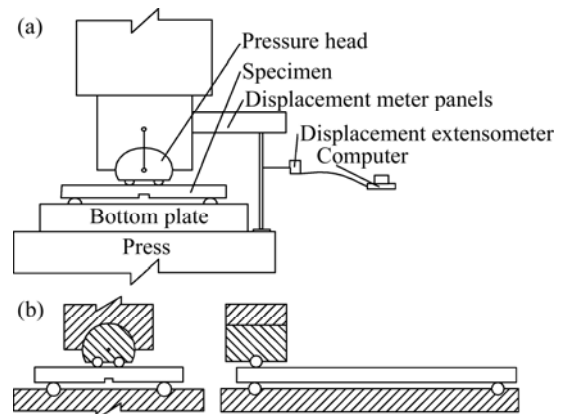


图 3 试验装置和加载方式示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of testing equipment (a) and loading method (b)

中, 为保证两钢珠与试样均匀接触, 压头上设置了一个可以灵活转动的圆弧面, 圆弧面用黄油润滑。试验采用 Instron 轴向位移引伸计感应位移量, 其量程为 $\pm 2\text{ mm}$ 。位移、力和时间由计算机自动采集记录。图 4 所示为加载与数据采集系统。



图 4 加载与数据采集系统

Fig. 4 Photo of loading and data acquisition system

4 结果与分析

4.1 试件常位移松弛载荷-时间曲线

通过常位移松弛试验, 得到了自然状态下以及饱水状态下的各试件位移和载荷实测值, 通过常位移松弛试验, 得到了各试件位移和载荷实测值(见图 5)。

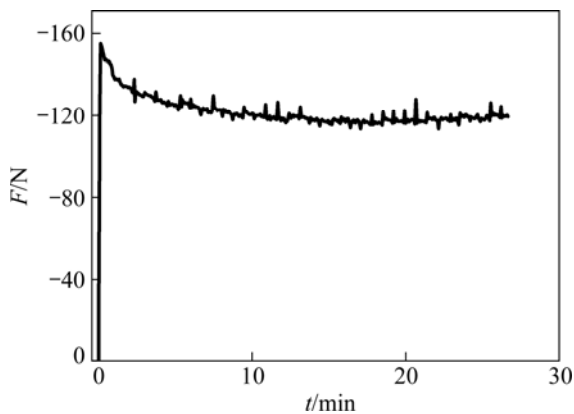


图 5 典型常位移松弛载荷-时间曲线

Fig. 5 Unload-time curve of typical sample

在此恒定位移条件下所加载荷随时间逐步减小, 但由于各岩样矿物组分及力学性质的不同, 松弛过程中各种岩样的平均载荷范围和载荷下降幅度也不一样, 同时利用饱水状态下的岩石试件进行松弛试验, 所施加的最大载荷较空气环境中试件所施加的载荷要小一些, 但是其荷载下降量较空气中的大, 这表明水

的存在不仅破坏了裂纹尖端的粒间连接, 而且破坏了晶粒本身, 使得承载力降低, 加速了亚临界裂纹扩展。

4.2 K_I-v 曲线

目前, 完整的 K_I-v 曲线只是在玻璃、陶瓷及金属材料中探测到, 对岩石材料, 以往的研究者没有探测到完整的 K_I-v 曲线。但是, 在应力强度因子及亚临界裂纹扩展速度较高的第三阶段, 随着应力强度因子进一步增加, 当应力强度因子满足条件 $K_I > K_{IC}$ 时, 岩石内裂纹会发生快速扩展, 从而使结构发生突变破坏。因此, 得到该阶段岩石的 K_I-v 曲线尤为重要。

根据双扭试验测得的数据, 利用公式(16)和(17)得到岩石在空气中以及饱水下的亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子的关系。图 6 所示为各试件的 $\lg K_I-lg v$ 曲线。由图 6 可见, 每次松弛所测得的 $\lg K_I-lg v$ 都有很好的线性关系, 这与 Charles 理论相符, 但是对于同种岩石, 离散性较大, 主要是由于岩石本身的矿物成分、颗粒大小、力学性质的不均匀性所致。从图 6 中还可以看出, 经地下水浸泡过的试件的 $\lg K_I-lg v$ 回归曲线, 其斜率明显小于空气中岩样的 $\lg K_I-lg v$ 回归曲线的, 表现在常位移松弛试验中的载荷-时间曲线中, 为载荷下降量的增加。其次, 饱水试件的 $\lg K_I-lg v$ 回归曲线偏于坐标轴左方, 位于空气中测试试件的左上角。与空气中试件的曲线相比, 饱水试件的曲线斜率减小, 而截距增加, 在同一应力水平上, 裂纹扩展速度加大, 表明水能加速亚临界裂纹扩展。

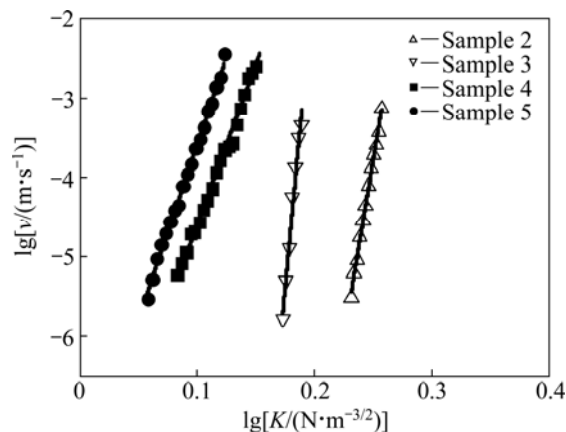


图 6 各试件的 $\lg K_I-lg v$ 曲线

Fig. 6 $\lg K_I-lg v$ curve of different samples

对图 6 的数据进行回归, 得到

$$\lg v = a + b \lg K_I \tag{18}$$

表 2 所列为回归曲线方程中的参数 a 和 b 的值及相关系数。

表2 参数的回归分析结果

Table 2 Regression analyses results of parameters

Sample No.	Environmental condition	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
2	In air	-16.5216	60.2636	0.9024
3	In air	-18.1616	60.1332	0.9381
Average	In air	-17.3416	60.1984	0.92025
4	In water	-6.8865	20.0006	0.8913
5	In water	-7.4225	23.7139	0.8347
Average	In water	-7.1545	21.85725	0.8630

由图6和表2可见,对每次松弛所得的同一组数据,按Charles方程回归的相关系数平均值都在0.80以上,由表3知相关性程度均为高度相关,说明此种理论能很好地解释试验结果。

表3 相关系数与相关性程度关系的回归分析结果

Table 3 Regression analyses results of relationship between correlation coefficient and correlation degree

Correlation coefficient	Correlation degree	Correlation coefficient	Correlation degree
$0 \leq R \leq 0.3$	Minimal correlation	$0.3 \leq R < 0.5$	Low correlation
$0.5 \leq R < 0.8$	Significant correlation	$0.8 \leq R < 1.0$	High correlation

采用Charles理论,对亚临界裂纹扩展应力强度因子 K_I 与扩展速率 v 间的关系进行分析时,利用式(2)得到岩样在空气中及饱水状态下的 A 和 n 如表4所列,其中 $n=b$, A 为常数。同时,表4所列为各试件在不同环境条件下的亚临界裂纹扩展参数及平均值,从表4中可以看出,在空气中和饱水中测试得到两个参数都发生了很大的变化。

表4 岩块在不同环境下亚临界裂纹扩展参数

Table 4 Parameters of subcritical crack growth under different environmental conditions

Sample No.	Environmental condition	<i>A</i>	<i>n</i>
2	In air	3.0088×10^{-17}	60.2636
3	In air	6.8928×10^{-19}	60.1332
Average	In air	1.5389×10^{-17}	60.1984
4	In water	1.2987×10^{-7}	20.0006
5	In water	3.7801×10^{-8}	23.7139
Average	In water	8.3834×10^{-8}	21.85725

4.3 水对岩石断裂韧度的影响分析

根据各岩石断裂韧度 K_{IC} 的载荷-时间曲线,将其破坏时的最大载荷 F_C 代入式(11)即可得到断裂韧度 K_{IC} ,如表5所列。从表5可以看出,水对岩石断裂韧度的影响较大。岩石在空气中的断裂韧度均大于其饱水状态的断裂韧度。

表5 亚临界裂纹扩展参数

Table 5 Parameters of subcritical crack growth

Sample No.	Environmental condition	Fracture peak/MN	Fracture toughness/(MN·m ^{-3/2})
2	In air	302.8613	2.0820
3	In air	303.4765	2.0933
Average	In air	303.1689	2.0877
4	In water	253.7674	1.9496
5	In water	277.1378	1.9301
Average	In water	265.4526	1.9398

5 结论

1) 采用双扭测试法研究水作用下岩石亚临界裂纹扩展规律。根据实验结果,得到了水岩作用下岩块的亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子之间的关系。

2) 对比自然状态下常位移松弛实验中的载荷-时间曲线,水作用后测得的载荷下降量均大于自然状态中的载荷下降量。表现为 $\lg K_I - \lg v$ 曲线明显偏向于坐标轴,其斜率小于自然状态下所得到的 $\lg K_I - \lg v$ 曲线的斜率,但是截距有所增大。对应于同一应力强度因子水平,水作用下的岩石亚临界裂纹扩展速度要快。

3) 相对于自然状态,水岩作用后的亚临界裂纹扩展参数 A 和 n 都发生了较大的变化。同时,水的存在使得岩石的断裂韧度明显降低, K_{IC} 下降了7.08%。该试验结果可为预测金川矿区软弱复杂矿岩的稳定性分析提供可靠依据。

REFERENCES

- [1] LEI X, KUSUNOSE K, RAO M, NISHIZAWA O, SATOH T. Quasi-static fault growth and cracking in homogeneous brittle rock under triaxial compression using acoustic emission monitoring[J]. J Geophys Res, 2000, 105(B3): 6127-6139.
- [2] SCHULTZ R A. Growth of geologic fractures into larger strain populations: Review of nomenclature, subcritical crack growth

- and some implications for rock engineering[J]. *Int J Rock Mech Min Sci*, 2000, 37(2): 403-411.
- [3] PU Cheng-zhi, CAO Ping. Failure characteristics and its influencing factors of rock-like material with multi-fissures under uniaxial compression[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(1): 185-191.
- [4] 肖洪天, 杨若琼, 周维垣. 三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 1999, 18(4): 477-450.
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): 477-450.
- [5] CAO Ping, LI Jiang-teng, YUAN Hai-ping. Testing study of subcritical crack growth rate and fracture toughness in different rocks[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2006, 16(3): 709-713.
- [6] CAO Ping, WAN Lin-hui, WANG Yi-xian. Viscoelasto plastic properties of deep hard rocks under water environment[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: 2711-2718.
- [7] 刘涛影, 曹平, 范祥. 高渗压条件下隧洞围岩的劈裂破坏特性研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2012, 43(6): 2281-2287.
LIU Tao-ying, CAO Ping, FAN Xiang. Splitting failure properties of fractured rock in high water pressure[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2012, 43(6): 2281-2287.
- [8] 汤连生, 王思敬. 岩石水化学损伤的机理及量化方法探讨[J]. *岩石力学与工程学报*, 2002, 21(3): 314-319.
TANG Lian-sheng, WANG Si-jing. Analysis on mechanism and quantitative methods of chemical damage in water-rock interaction[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2002, 21(3): 314-319.
- [9] 黎立云, 刘大安, 史孝群. 多裂纹类岩体的双压实验与正交各向异性本构关系[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(1): 165-171.
LI Li-yun, LIU Da-an, SHI Xiao-qun. Biaxial compression experiments and orthotropic constitutive relationship for regular cracks in replicated rock mass[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2002, 12(1): 165-171.
- [10] 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.
- [11] SAADAOUIA M, REYNAUDA FANTOZZIA G, PERONNET F, CASPAR J P. Slow crack growth study of plaster using the double torsion method[J]. *Ceramics International*, 2000, 26(4): 435-439.
- [12] HENRY J, PAQUET J, TANCRET J E. Experimental study of crack propagation in calcite rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1977, 14(2): 85-91.
- [13] 曹平, 杨慧, 江学良. 水岩作用下岩石亚临界裂纹的扩展规律[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2010, 4(12): 649-654.
CAO Ping, YANG Hui, JIANG Xue Liang. Subcritical crack growth of rock during water-rock interaction[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2010, 4(12): 649-654.
- [14] LAJTAI E Z, BIELUS L P. Stress corrosion cracking of Laodun Bonnet granite in tension and compression[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1986, 19(1): 71-87.
- [15] 孙训方. *材料力学*[M]. 北京: 人民教育出版社, 1979.
SUN Xun-fang. *Materials mechanics*[M]. Beijing: People's Education Press, 1979.
- [16] CICCOTTI M. A realistic finite-element model for the double torsion loading configuration[J]. *Am Ceram Soc*, 2000, 83(11): 2737-2744.
- [17] 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.
YU Xiao-zhong. *Fracture mechanics of rock and concrete*[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991.
- [18] CHEVALIER J, OLAGNON C, FANTOZZIA G, CALES B. Subcritical crack growth and thresholds in a 3Y-TZP ceramic under static and cyclic loading conditions[J]. *Ceramics International*, 1997, 23(3): 263-266.

(编辑 王超)