

三峡船闸花岗岩亚临界裂纹扩展试验研究*

肖洪天 杨若琼 周维垣

(清华大学水电系 北京 100084)

摘要 采用双扭试件和自行研制的加载装置,对三峡船闸花岗岩进行了亚临界裂纹扩展试验研究。采用 UCAM-5B 自动巡回监测仪量测加载过程中试件的位移和应变。根据试验结果,得到了花岗岩亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子之间的关系和花岗岩的断裂韧度。由于试验方案设计合理,试验结果可靠。

关键词 花岗岩,亚临界裂纹扩展,断裂韧度

分类号 TU453

1 引言

三峡永久船闸高边坡中的裂隙对岩体的力学性质有显著的影响,岩体开挖后,边坡岩体卸荷,引起岩体中裂隙的扩展、连接,形成卸荷破坏带。由于开挖卸荷和环境的影响,裂隙扩展的时间效应不能忽视。为此,研究了花岗岩亚临界裂纹扩展,确定了断裂力学参数。

本文首先介绍了用双扭试件测定亚临界裂纹扩展速度、应力强度因子、断裂韧度的基本原理,给出了试验所采用的试件尺寸、加载及量测系统;根据试验结果,分析得到了三峡永久船闸花岗岩断裂参数;最后,讨论了裂纹亚临界裂纹扩展的机制。

2 双扭试件测试的基本原理

双扭试件首先被 Williams^[1]采用,如图 1 所示。双扭试件可以作为两个弹性扭转杆,每一杆截面为矩形。对于小变形 y ,当扭转杆的宽度远大于试件的厚度时,扭转应变由下式给出:

$$\frac{y}{w_m} = \frac{6Ta}{wt^3G} \quad (1)$$

式中: T 为扭矩 $Pw_m/2$, P 为作用于扭杆上的荷载, G 为岩石的剪切模量, a 为裂纹的长度, t 为试件的厚度, $w/2$ 为扭杆的宽度, w_m 为扭臂的长度。

式(1)可以重新写为

$$\frac{y}{P} = \frac{3w_m^2 a}{wt^3 G} C \quad (2)$$

式中: C 为双扭试件的弹性柔度。

裂纹扩展的应变能释放率 g 与试件的柔度 C 有以下关系式:

$$g = \frac{P^2}{2} \left(\frac{dC}{dA} \right) = \frac{P^2}{2t_n} \left(\frac{dC}{da} \right) \quad (3)$$

式中: A 为裂纹的面积, t_n 为裂纹所在面试件的厚度。对于双扭试件,应变能释放率可以通过在式(2)中 C 对 a 求导,并将结果代入式(3)中得到,于是

$$g = \frac{3P^2 w_m^2}{2wt^3 t_n G} \quad (4)$$

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 E 与 G 之间的关系,得到应力强度因子关系式:

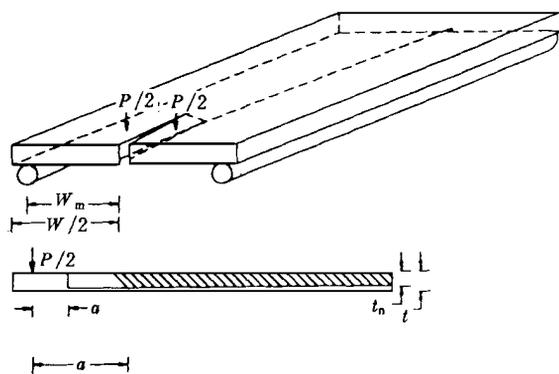


图 1 双扭试件

Fig. 1 Double torsion specimen

1997年12月5日收到初稿,1998年5月18日收到修改稿。

* 国家自然科学基金和三峡开发总公司资助项目(59493600-3)。

作者 肖洪天 简介:男,34岁,1998年于清华大学水电系水工结构工程专业获博士学位,现任副教授,主要从事岩土工程方面的科研与教学工作。

$$K_I = Pw_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wt^3 t_n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

从式(5)中可以看出, 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是很有价值的。

试验表明, 柔度变化率可以通过在给定荷载下位移变化率或在给定位移下荷载的变化率得到。在恒定位移条件下, 对式(2)求导, 得到

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_y = - \frac{wt^3 Ey}{6w_m^2 P^2 (1+\nu)} \left(\frac{dP}{dt} \right)_y \quad (6)$$

式(6)表明, 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。另外, 裂纹扩展速度可由柔度公式得到。

试验表明, 双扭试件的柔度 C 可表示为

$$C = Ba + D \quad (7)$$

式中: B 和 D 为试验参数。

在常位移条件下, 对式(7)就时间求导并利用式(2), 得到亚临界裂纹扩展速度为

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_y = - \frac{Ba + D}{BP} \left(\frac{dP}{dt} \right)_y \quad (8)$$

在恒位移条件下, 式(8)可进一步写为

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_y = - \frac{P_i a_i}{P^2} (a_i + D/B) \left(\frac{dP}{dt} \right)_y \quad (9)$$

式中: P_i 和 a_i 为荷载和裂纹的初值。对于岩石类材料, $D/B \ll a_i$ 。于是

$$\left(\frac{da}{dt} \right)_y = - \frac{P_i a_i}{P^2} \left(\frac{dP}{dt} \right)_y \quad (10)$$

如果裂纹长度初值已知, 亚临界裂纹扩展速度可由式(6)或式(10)计算得到。裂纹应力强度因子和断裂韧度可由式(5)求得。由此, 可以通过试验建立亚临界裂纹扩展速度和应力强度因子之间的关系。

3 试件尺寸和试验装置

3.1 试件尺寸

从三峡永久船闸工地取回的花岗岩岩芯, 经切割、磨平, 加工成双扭试件。试件共 6 块。No. 1, 2, 3, 4, 5 试件的几何尺寸为 90 mm × 70 mm × 6 mm; No. 6 试件的几何尺寸为 90 mm × 70 mm × 5 mm。在试件长度方向中央一侧, 加工一长 15 mm 的割缝, 并沿割缝方向加工一深 1 mm 的导向槽, 使裂纹沿试件的中央扩展。

在试件无导向槽的一面, 粘贴箔式电阻应变片。应变片分 3 组: 一组沿割缝方向, 另两组在第一组的两侧, 成对称分布。

3.2 试验装置

研制的加载测试系统见图 2。通过旋转锥形加载头, 使其与试件上部的荷载转换器接触, 荷载转换器将锥形加载头传递来的荷载转换为两个作用于试件上的集中力。锥形加载头与上部垂直杆丝扣连接, 便于荷载松弛时对位移控制。

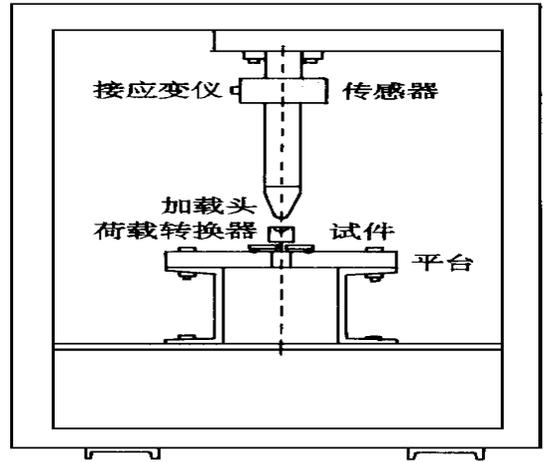


图 2 加载装置

Fig. 2 Loading device

在加载杆的顶部安装 BLR-1 型拉压力传感器, 并与静态电阻应变仪相连, 测量作用在试件上的荷载。采用 DT-100 型位移计, 试件的位移和电阻应变片的应变用 UCAM-5B 自动巡回监测仪量测。

4 试验结果分析

试验在室内进行。No. 2, 3, 5, 6 等 4 个试件试验成功, 裂纹沿导向槽扩展, 最后迅速加载至破坏。No. 1, 4 试件由于加载及原岩中存在微裂隙等原因, 试验过程中出现未沿割缝的破坏, 试验失败。

4.1 荷载及位移分析

加载初期, No. 2 试件平均每分钟加载 5.02 N; No. 3, 5, 6 试件平均每分钟加载 10 N 左右。此阶段加载时间 t_i , 最终位移和荷载分别为 u_i 和 P_i 。荷载松弛阶段, 维持常位移 u_i , 至试件上荷载不再有明显的变化, 松弛时间为 $t_f - t_i$, 荷载稳定值为 P_f 。最终的破坏荷载为 P_c 。No. 3 试件的荷载及变形曲线分别见图 3 和图 4。上述参数见表 1。

4.2 应变分析

No. 3 试件上的应变如图 5 所示。不同时间段对应的应变见表 2。 ϵ_i 为初期加载终点应变值, ϵ_f 为荷载松弛阶段后期应变值。

试件的应变随时间的变化曲线类似于荷载的变化曲线。距割缝近的应变片上的应变该特性尤为明显, 而距割缝较远的应变片上的应变变化不明显。一般情况下, 同一组应变片, 距割缝越远, 应变越

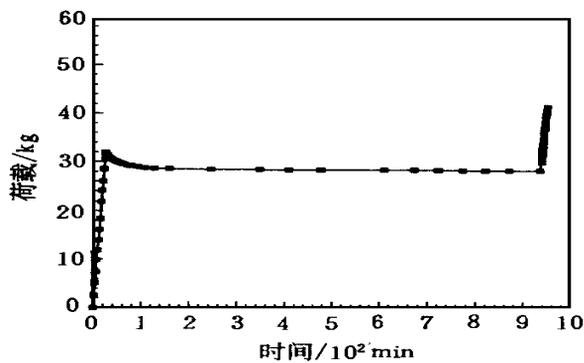


图 3 No.3 试件荷载曲线

Fig. 3 Loading curve of No. 3 specimen

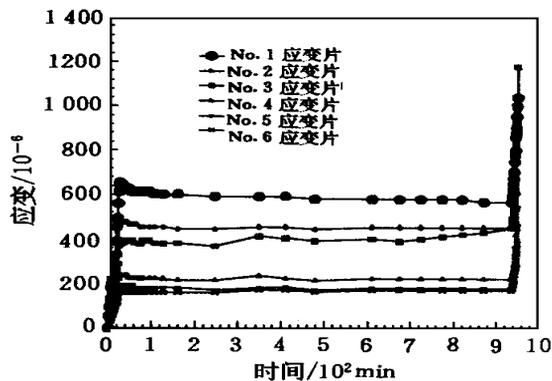


图 5 No.3 试件应变曲线

Fig. 5 Strain curve of No. 3 specimen

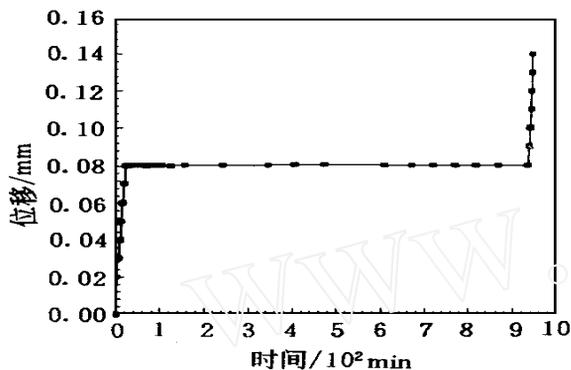


图 4 No.3 试件位移曲线

Fig. 4 Displacement curve of No. 3 specimen

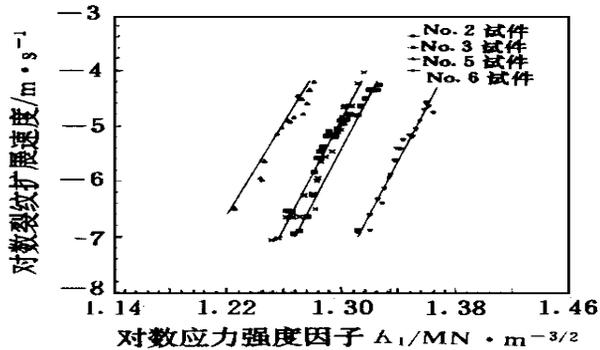


图 6 裂纹扩展速度与应力强度因子

Fig. 6 Crack velocity and stress intensity factor

表 1 试件上的荷载及位移试验成果

Table 1 Data of load and displacement

试件	t_i /min	u_i /mm	P_i /N	加载速度 /N·min ⁻¹	t_f /min	P_f /N	P_c /N
No.2	63	0.080 37	316.7	5.02	658	289.1	390.5
No.3	27	0.080 38	318.1	11.78	936	282.9	414.3
No.5	26	0.120 09	286.2	11.01	684	255.7	376.7
No.6	28	0.140 09	258.2	9.22	717	234.3	278.6

表 2 不同试件, No.1 应变片的应变值

Table 2 Strain of No.1 strain gauge of different specimen

试件	t_i /min	i /10 ⁻⁶	t_f /min	f /10 ⁻⁶	c /10 ⁻⁶
No.2	63	870.20	658	798.27	1 137.77
No.3	27	655.50	936	571.33	1 045.27
No.6	28	1 000.14	717	947.22	1 168.08

小, 但 No. 6 试件上的 No. 8 应变片的应变远大于 No. 7 应变片的应变, 这可能与应变片所在位置处的岩石微观结构有关。

4.3 亚临界裂纹扩展速度

利用式(10)求亚临界裂纹扩展速度时, 需要计算荷载松弛率, 此值可在荷载变化曲线上回归得到。四个试件的裂纹扩展速度 v 与应力强度因子 K_I 之间的关系如图 6 所示。在 log-log 直角坐标系中, v 和 K_I 呈线性关系。 v 和 K_I 之间的关系可用

$$v = A K_I^n \quad (11)$$

表示。对图 6 中的试验结果线性回归, 得到四个试件的 A 和 n , 见表 3。

表 3 亚临界裂纹扩展参数和断裂韧度

Table 3 Parameters of subcritical growth and fracture toughness

试件	A	n	断裂韧度 /MN·M ^{-3/2}
No.2	6.431 ×10 ⁻⁵⁸	49.40	2.609 1
No.3	1.718 ×10 ⁻⁵⁷	41.25	2.768 1
No.5	1.727 ×10 ⁻⁵⁵	41.00	2.516 9
No.6	5.887 ×10 ⁻⁵⁵	47.79	2.732 9
均值	4.36 ×10 ⁻⁵⁶	44.79	2.642 5 ±0.125 6

4.4 断裂韧度

在试验最后阶段, 快速加载, 试件破坏。测得试件的破坏荷载 P_c 。利用式(5)可求得花岗岩的断裂韧度 K_{Ic} , 如表 3 所示。三峡永久船闸花岗岩断裂韧度为 2.642 5 ±0.125 6 MN/M^{3/2}。

5 讨论

影响岩石亚临界裂纹扩展速度的因素很多, 从

以往的文献中发现有：应力强度因子、环境介质的活性、温度、应力、岩石微结构等。而岩石的断裂韧性也与诸多因素有关。以下结合试验结果进行讨论。

(1) 文[2]在真空中无任何介质状态下，研究了玻璃的亚临界裂纹扩展问题。试验结果表明，在此环境下，存在亚临界裂纹扩展。许多理论解释了这一现象，认为裂纹的扩展受控于裂纹尖端的原子结构；并认为，处于原子包围之中的裂纹，存在亚临界裂纹扩展的应力强度因子阈值，低于该值时，裂纹不再扩展。这种基于原子结构的亚临界裂纹扩展理论，考虑了材料内部的结构，可研究裂纹流变扩展的机制。对岩石不依赖介质的裂纹流变扩展机制了解甚少。

(2) 与环境有关的亚临界裂纹扩展机制包括：应力腐蚀、分解等。应力腐蚀是指裂纹尖端应变带在环境介质(如水、空气)作用下的弱化，加速了裂纹的扩展。此次室内试验环境与三峡坝区的环境差别在于三峡坝区岩石受水的影响比较大。文[3]试验结果表明，浸在水中的 Westerly 花岗岩亚临界裂纹扩展要比在空气中快， n 基本不变， A 增加了 100 倍。(3) 描述亚临界裂纹的主要参数为断裂韧度和亚临界裂纹扩展阈值 K_0 ， K_0 很难通过试验测得。Atkinson^[3] 指出，花岗岩亚临界裂纹扩展速度达到 10^{-12} m/s 时，仍没有发现 K_0 。 K_0 与扩展机制中起主导作用的因素有关。文[3]采用描述应力腐蚀的裂纹扩展方程，计算了 K_0 。石英岩在常温下 K_0 为 $0.2 \sim 0.39$ MN/M^{3/2}。

(4) 影响岩石断裂韧性 K_{Ic} 的因素很多，如岩石的各向异性、水、围压等。一般认为，花岗岩是各向同性的，如文[4]在三个垂直方向上测得的断裂韧性值仅相差 4%。水存在时，测得的断裂韧性低于空气

中测得的结果，如砂岩低 33%，灰岩低 34%。也有人认为水对渗透性低的岩石如花岗岩的断裂韧性没有什么影响。通常，岩石的断裂韧性随围压的增加而增大，如砂岩在无围压状态下 K_{Ic} 为 1.43 MN/M^{3/2}，而围压为 10 MPa 时， K_{Ic} 为 3.0 MN/M^{3/2}。此次，三峡永久船闸花岗岩的断裂韧性 K_{Ic} 的测试结果为 2.6425 ± 0.1256 MN/M^{3/2}，由于岩石试件经历了亚临界裂纹扩展，测试结果可靠。

6 结 论

采用双扭试件观测到亚临界裂纹扩展 $v-K_I$ 曲线，并确定了岩石的断裂韧性。试验结果表明，本研究课题的试验方案切实可行，试验中采用 UCAM-5B 自动巡回监测仪，量测精度高。加载系统采用旋转带有丝扣的加载头的方式，位移控制操作方便。本试验研究为岩石断裂测试手段和亚临界裂纹扩展研究进行了有益的探索。所测得的数据可用于三峡工程永久船闸高边坡稳定分析。

致谢 参加此项研究的还有沈大利、邹淑仪、兰金美等，特此一并致谢。

参 考 文 献

- Williams D P, Evans A G. A simple method for studying slow crack growth. *Journal of Testing and Evaluation*, 1973, 1(2): 264~270
- Wiederhorn S M, Johnson H. Fracture of glass in vacuum. *Journal of the American Ceramic Society*, 1974, 57(8): 35~42
- Atkinson B K. Subcritical crack growth in geological materials. *Journal of geophysical research*, 1984, 89(B6): 4077~4114
- 于晓中主编. 岩石和混凝土断裂力学. 长沙: 中南工业大学出版社, 1991

TESTING STUDY OF SUBCRITICAL CRACK GROWTH OF GRANITE AT THE THREE GORGES SHIPLOCK

Xiao Hongtian Yang Ruoqiong Zhou Weiyan
(Tsinghua University, Beijing 100084 China)

Abstract Subcritical crack growth of granite at the Three Gorges shiplock is studied by an experiment method. Double torsion specimens are applied to study subcritical crack growth. Loading apparatus is studied and made. UCAM-5B is used to measure displacement and strain under loading. Based on testing results, the relationship between velocity of granite subcritical crack growth and stress intensity factor, and the fracture toughness are obtained respectively. Due to the rationality of the experiment method, the results are reliable.

Key words granite, subcritical crack growth, fracture toughness