

岩石亚临界裂纹扩展试验及门槛值研究

李江腾, 曹平, 袁海平

(中南大学资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083)

摘要: 利用 Instron1342 型电液伺服材料试验机, 采用常位移松弛法对大理岩、花岗岩双扭试件进行了亚临界裂纹扩展试验研究, 获得了其裂纹扩展速率 V 与应力强度因子 K_I 的关系 (K_I - V 曲线) 及 I 型断裂韧度, 分析了不同岩石中裂纹亚临界扩展的规律, 确定了岩石亚临界裂纹扩展的停滞速度和门槛值 K_0 。研究表明: 采用常位移松弛法所测岩石的 $\lg K_I$ - $\lg V$ 关系都有很好的线性规律, 即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, 这与 Charles 理论相符。二种岩石的 K_0/K_{IC} 值的变化在 0.706~0.870 之间。所测数据为岩土工程稳定的时间相依性研究提供了基本数据。

关键词: 双扭试件; 常位移松弛法; 断裂韧度; 亚临界裂纹扩展; 停滞速度; 门槛值

中图分类号: O342.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)03-0415-04

作者简介: 李江腾(1964-), 女, 湖南人, 教授, 博士, 主要从事固体力学及岩土工程的研究与教学工作。

Study on subcritical crack growth and thresholds of rocks

LI Jiang-teng, CAO Ping, YUAN Hai-ping

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

Abstract: Subcritical crack growth of specimens made of marble and granite was studied in double torsion test using Instron1342 type electro hydraulic servo test machine. The relations of the stress intensity factor K_I versus the subcritical crack growth velocity V and the fracture toughness K_{IC} were obtained by the load relaxation method under constant displacement. The behavior of subcritical crack growth was analyzed. The threshold values of subcritical crack growth in rocks were obtained. It was shown that $\lg K_I$ - $\lg V$ relations of rocks measured by this method accorded with linear rules, i.e. the relations between subcritical crack growth velocity V and stress intensity factor K_I conformed to power law, which was in good agreement with the Charles theory. The range of K_0/K_{IC} for these two kinds of rocks was from 0.706 to 0.870. The test results would provide the basis for studying time-dependency of rock stability.

Key words: double-torsion specimens; constant displacement load relaxation method; fracture toughness; subcritical crack growth; Stasis velocity; threshold values

0 引言

随着岩土工程规模的不断扩大, 工程稳定的时间效应越来越受到重视。从现场各种工程的失稳实例分析和岩石室内试验表明: 岩石的破坏是岩体裂隙发育、扩展、联接引起的。近三十年来, 许多人采用断裂力学的方法从理论和试验方面研究了岩石的裂隙的扩展发育规律^[1-6]。研究表明: 处于一定环境介质中的含裂纹材料, 在拉应力和腐蚀介质的联合作用下, 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。在应力腐蚀过程中, 常用裂纹尖端的应力强度因子 K_I 作为控制裂纹扩展的参量, 相应的应力腐蚀下限为 K_0 , 断裂韧度为 K_{IC} 。当 $K_I > K_{IC}$ 时, 裂纹就会以接近声速的速度扩展; 当 $K_I < K_0$ 时, 裂纹不扩展; 而当 $K_0 < K_I < K_{IC}$ 时, 由于以下原因^[7]: ①在裂纹前端发生

微开裂和形成空隙等过程, 造成裂纹尖端应力的增强; ②与环境介质发生的反应, 造成键断裂应力的减少。裂纹仍会以一定的速度向前扩展, 且随着 K_I 的增大而增大, 但此时裂纹扩展速度以稳定的方式进行, 这种岩石裂纹稳定的、准静态扩展方式称之为应力腐蚀亚临界扩展。而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, 这便导致岩土工程失稳与岩石裂纹扩展的时间相关。所以研究岩石亚临界裂纹扩展规律和断裂特性, 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。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (50274074); 国家自然科学基金重点资助项目 (50490274); 中南大学博士生创新工程项目 (030608)
收稿日期: 2005-03-07

1 试验原理与试验过程

1.1 试验原理

双扭试件示意图如图 1 所示,试件为一矩形薄板,在板的下表面沿长度方向的对称线开有一条通槽,以使裂纹沿该槽扩展。

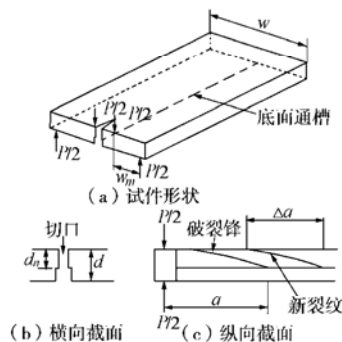


图 1 双扭试件示意图

Fig. 1 The schematic diagram of double torsion specimen

双扭试件可以看作由两个弹性扭转杆组成,对于小变形,且宽度远大于试件厚度的双扭试件,裂纹尖端的应力强度因子^[5, 8-13]为

$$K_I = Pw_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3d_n} \right]^{\frac{1}{2}}, \tag{1}$$

式中 P 为作用于扭杆上的荷载; w_m 为扭臂的长度; ν 为泊松比; d 为试件的厚度; d_n 为裂纹面上试件的厚度。

当荷载 P 达到临界值 P_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}

$$K_{IC} = P_c w_m \left[\frac{3(1+\nu)}{wd^3d_n} \right]^{\frac{1}{2}}. \tag{2}$$

在给定位移加载条件下,裂纹亚临界扩展的速度为^[5, 8-13]

$$V = - \frac{wd^3Ey}{6w_m^2P^2(1+\nu)} \frac{dP}{dt}, \tag{3}$$

式中 E 为弹性模量; y 为加载点沿加载方向的位移。

由式 (1) 及式 (3) 可以建立亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子之间的关系。

1.2 试样制备

用岩石切割机将岩石锯成薄片,再在金刚砂磨石机上磨光,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,加载过程中,裂纹从切口开始,并沿导向槽延伸。加工时试样上下表面平整,不平行度误差在 0.025 mm 以内^[13]。试件尺寸及力学参数值参见表 1。

1.3 测试方法

由于双扭方法在确定 K_I 及 V 时不需要知道裂纹

表 1 试样尺寸与力学参数

Table 1 Sizes and mechanical parameters of specimens

组号	岩石名称	试样块数	试样尺寸/mm	弹性模量/GPa	泊松比
1	大理岩	9	180×60×4	25.68	0.26
2	花岗岩	9	180×60×4	36.88	0.24

长度,因此避免了裂纹长度测量与跟踪等难题,加上预裂方式简单有效,测试过程较简便,该方法成为研究裂纹亚临界扩展的有效手段。试验在中南大学测试中心 Instron1342 型电液伺服材料试验机上进行,为获得合理的 K_{IC} 及 K_I-V 数据,需对试件以恒定位移速率进行预裂^[3, 8, 13],预裂速度为 0.05 mm/min。图 2 为典型试件预裂时的载荷-时间曲线。

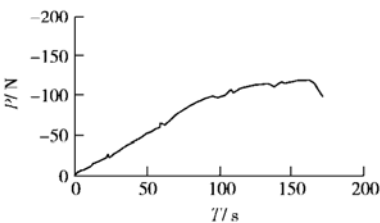


图 2 典型试件预裂载荷-时间曲线

Fig. 2 The load-time curve of typical specimen with crack

采用常位移松弛法对大理岩、花岗岩双扭试件进行亚临界裂纹扩展速度测试。试验时,首先以 5 mm/min 的位移速度快速对预裂过的试件加载,当试件上的荷载达到试件预裂载荷峰值的 95%时,控制试件上的位移,使其保持定值,并做试件荷载松弛试验,记录试件的荷载-时间曲线。随着时间的延长,荷载的松弛越来越小,当试件上的荷载松弛趋于稳定时,停止试验。1-4, 2-5 二个试件由于加载及原岩中存在微裂隙等原因,出现未沿割缝破坏,试验失败,其余试件试验成功。试验时采集了试件的载荷-时间数据、位移-时间数据,通过整理建立了岩石的裂纹亚临界扩展速度 V 与裂纹尖端的应力强度因子 K_I 的关系。图 3、图 4 分别为典型试件的恒位移松弛试验载荷-时间实测曲线及位移-时间实测曲线。

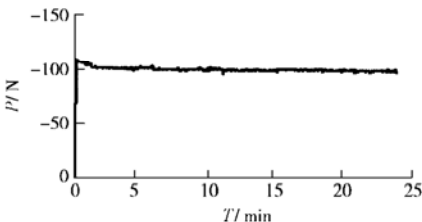


图 3 典型试件恒位移松弛载荷-时间图

Fig. 3 The load-time curve of typical specimen

在测试断裂韧度 K_{IC} 时,裂纹扩展过程中的最大载荷可用于计算断裂韧度 K_{IC} 。每组试样中有 3 个试件用于测试断裂韧度 K_{IC} 值,试验时,以 20 mm/min

的恒定位移速率对预裂过的试件加载^[3], 测得其破坏载荷 P_c , 利用式 (2) 可求得断裂韧度 K_{IC} 。图 5 为典型试件测试断裂韧度 K_{IC} 时所采集的载荷-时间曲线。

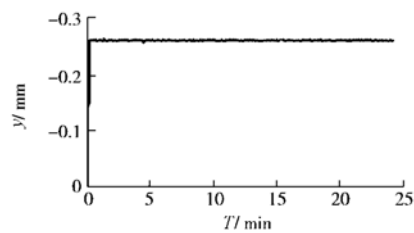


图 4 典型试件位移-时间曲线

Fig. 4 The displacement-time curve of typical specimen

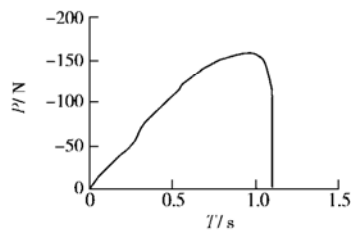


图 5 典型试件 K_{IC} 实测载荷-时间曲线

Fig. 5 The load-time curve of typical specimen in testing K_{IC}

2 试验结果与分析

2.1 K_I - V 关系与断裂韧度

根据试验测得的数据, 利用式 (1) 和式 (3), 可得到各试样的裂纹扩展速度与裂纹尖端应力强度因子的关系。图 6 给出了其双对数坐标系中 K_I - V 散点图, 对图中的 K_I - V 数据进行了线性回归, 得到以下方程:

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

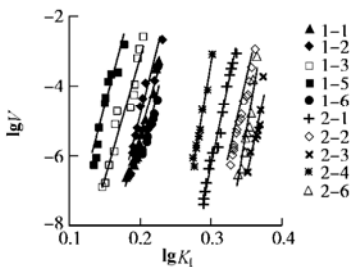


图 6 试件 K_I - V 关系曲线

Fig. 6 K_I - V curve for different specimens

表 2 为试件的回归参数及相关系数, 从表中可以看出: 在双对数坐标系中各试件 $\lg K_I$ 与 $\lg V$ 均呈很好的线性关系 ($R^2 \geq 0.8125$)。 V 和 K_I 之间的幂函数关系为

$$V = AK_I^n \quad (5)$$

表 3、表 4 给出了各试件的亚临界裂纹扩展参数及断裂韧度。而从断裂力学角度来研究岩石稳定的时间效应必须以岩石的断裂韧度 K_{IC} 和亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子的关系 K_I - V 为基础。因此, 这

些参数的获得为进一步研究岩土工程稳定的时间相异性研究提供基本资料。

表 2 亚临界裂纹扩展试验回归系数

Table 2 The regression coefficient of subcritical crack growth

试件编号	a	b	相关系数 R^2
1-1	-20.376	75.168	0.9547
1-2	-16.034	66.977	0.9014
1-3	-17.070	70.324	0.9188
1-5	-14.731	68.294	0.8258
1-6	-22.556	81.993	0.8125
均值	-18.153±2.888	72.551±6.247	0.883±0.050
2-1	-33.897	92.629	0.9837
2-2	-32.5728	81.845	0.9528
2-3	-41.731	100.18	0.8430
2-4	-34.447	102.44	0.8958
2-6	-40.968	102.62	0.8509
均值	-36.723±3.834	95.943±7.931	0.905±0.016

表 3 亚临界裂纹扩展参数

Table 3 The parameters of subcritical crack growth

试件编号	A	n
1-1	4.21×10^{-21}	75.168
1-2	9.25×10^{-17}	66.977
1-3	8.51×10^{-18}	70.324
1-5	1.86×10^{-15}	68.294
1-6	2.78×10^{-23}	81.993
均值	3.92×10^{-16}	75.551
2-1	1.27×10^{-34}	92.629
2-2	2.67×10^{-33}	81.845
2-3	1.86×10^{-42}	100.180
2-4	3.57×10^{-35}	102.440
2-6	1.08×10^{-41}	102.620
均值	5.67×10^{-34}	95.943

表 4 断裂韧度 K_{IC}

Table 4 Fracture toughness K_{IC}

试件编号	K_{IC} /($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$)	试件编号	K_{IC} /($\text{MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$)
1-7	1.847	2-7	2.718
1-8	1.798	2-8	2.255
1-9	1.882	2-9	2.614
均值	1.843	均值	2.529

2.2 门槛值的确定

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时, 裂纹的扩展速度难以测到^[5]。目前, 门槛值 K_0 的测定只是在玻璃、陶瓷及金属材料中, 对岩石材料, 以往的研究者没有探测到 K_0 值, Wilkins^[1]在进行花岗岩裂纹亚临界扩展研究时, 当扩展速度达到 10^{-12}m/s 时, 仍没有发现 K_0 值。本试验中所测到二种岩石各试件的最低裂纹扩展速度在 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ 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, 本文以一组岩石试验所测到的最低裂纹扩展速度作为该岩石的裂纹扩展停滞速度 (试验测得大理岩裂纹扩

展最小速度 $V_{10}=1.30 \times 10^{-7}$, 花岗岩裂纹扩展最小速度 $V_{20}=4.00 \times 10^{-8}$, 按式 (5) 计算其裂纹扩展相应的应力强度因子 K_I 作为裂纹扩展的门槛值 K_0 (见表 5)。

表 5 裂纹扩展门槛值 K_0 Table 5 Threshold values K_0

试件编号	$K_0/(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	K_0/K_{IC}
1-1	1.511	0.820
1-2	1.369	0.743
1-3	1.395	0.757
1-5	1.302	0.706
1-6	1.552	0.842
均值	1.435	0.778
2-1	1.932	0.764
2-2	2.030	0.802
2-3	2.201	0.870
2-4	1.836	0.726
2-6	2.123	0.839
均值	2.024	0.800

3 结 论

(1) 本文采用双扭试验对大理岩、花岗岩的亚临界裂纹扩展试验进行了研究, 在 Instron1342 型电液伺服材料试验机上对试样进行了亚临界裂纹扩展速度及断裂韧度的测试。根据试验结果, 得到了试件的亚临界裂纹扩展速度与应力强度因子之间的关系和断裂韧度, 推算了门槛值 K_0 , 并分析了其基本规律, 为岩土工程稳定的时间相依性研究提供了基本资料。

(2) 采用常位移松弛法所测岩石的 $\lg K_I - \lg V$ 关系都有很好的线性规律 ($R^2 \geq 0.8125$), 即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。这与 Charles 理论相符。

(3) 从工程应用的角度确定了岩石亚临界裂纹扩展的门槛值 K_0 。二种岩石各试件的 K_0/K_{IC} 值的变化在 0.706~0.870 之间。

(4) 由于岩石是处在一定环境状态下的地质材料, 因此岩石的裂纹亚临界扩展受环境的影响很大。如水、地应力对裂纹亚临界扩展有明显的影响, 若岩石处于地层深处, 温度对岩石的裂纹亚临界扩展不能忽视。这些因素的影响还有待于今后进一步研究。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] HENRY J P, PAQUET J, TANCRET J P. Experimental study of crack propagation in calcite rocks[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1977, **14**(1):85 - 91.
- [3] ATKINSON B K. Fracture toughness of Tennessee sandstone and Canam marble using the double torsion testing method[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1979, **16**(1):49 - 53.
- [4] SWANSON P L. Subcritical crack propagation in westerly granite: an investigation into the double torsion method[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 1981, **18**(2):445 - 449.
- [5] 肖洪天. 三峡船闸高边坡损伤流变研究及实测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, **18**(5):497 - 502. (XIAO Hong-tian. Rheologic damage study of three gorges shiplock highslope and analysis on in-situ measured deformation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, **18**(5):497 - 502.)
- [6] CICCOTTI M, NEGRI N, SASSI L, et al. Elastic and fracture parameters of Etna, Stromboli, and Vulcano lava rocks[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, **98**(1-4):209 - 217.
- [7] 张福初, 王西成, 陆 坚, 等译. 断裂力学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1981. (ZHANG Fu-chu, WANG Xi-cheng, LU Jian, et al. translators, Fracture mechanics [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1981.)
- [8] SAADAOUIA M, REYNAUDA P, FANTOZZIA G, et al. Slow crack growth study of plaster using the double torsion method[J]. Ceramics International, 2000, **26**(4):435 - 439.
- [9] CHEVALIER J, OLAGNON C, FANTOZZIA G, et al. Subcritical crack growth and thresholds in a 3Y-TZP ceramin under static and cyclic loading conditions[J]. Ceramics International, 1997, **23**(3) 263 - 266.
- [10] KRELLA Andreas, PIPPELB Eckhard, WOLTERSDORF Jorg, et al. Subcritical crack growth in Al₂O₃ with submicron grain size[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2003, **23**(1):81 - 89.
- [11] CICCOTTI M, GONZATO G, MULARGIA F. The double torsion loading configuration for fracture propagation: an improved methodology for the load-relaxation at constant displacement[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2000, **37**(7):1103 - 1113.
- [12] CICCOTTI M, NEGRI N, GONZATO G, et al. Practical application of an improved methodology for the double torsion load relaxation method[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, **38**(4):569 - 576.
- [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. (YU Xiao-zhong. Fracture mechanics of rock and concrete[M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1991.)