

⑰
101-106

岩石三点弯曲圆梁断裂韧度 K_{IC} 的测试研究

AN INVESTIGATION FOR TESTING ROCK FRACTURE TOUGHNESS WITH THREE-POINT BEND ROUND BARS

王启智
Wang Qizhi

鲜学福
Xian Xuefu

(重庆大学资源及环境工程系)

TU454

摘要 用两种三点弯曲圆梁(分别具有人字形切槽和直切槽)测定了一种重庆灰岩的断裂韧度 K_{IC} 。测试结果表明:前者比后者在防止过载,避免裂纹扩展偏斜,考虑非线性修正等方面有若干优点,但测试值的尺寸效应尚有待解决。

关键词 岩石断裂韧度;三点弯曲圆梁;人字形切槽;直切槽;裂纹稳定扩展;尺寸效应
中国图书资料分类法分类号 TG115.57

测试

ABSTRACT Chevron-notched and straight-through-notched three-point bend round bars are used to test fracture toughness K_{IC} of a Chongqing limestone. The results show that the former specimen has some advantages over the latter in the aspects of preventing overload, avoiding deviation of crack growth from notch plane and considering nonlinear correction in calculation, etc. However, the size effects of test values are to be solved.

KEY WORDS rock fracture toughness; three-point bend round bar; chevron notch; straight-through notch; stable crack growth; size effects

0 前 言

研究岩石的切削,水压致裂和爆破断裂等都需要了解岩石断裂韧度。近年来,对地热能源和其它能源(油和气)的需求越来越大,在这些能源开发项目中,经常采用水压致裂和现场爆破技术,因而关于岩石断裂韧度的评价愈加显得重要。

具有人字形切槽的断裂试样现在已被广泛用于测试金属和非金属的断裂韧度,但是文献检索表明,大多数的研究集中在短棒试样上^[1],关于人字形切槽三点弯曲圆梁(以下简称为CB)的研究却比较少^[2]。本文是作者测试一种重庆灰岩的断裂韧度的经验总结,采用了具有不同直径和初始裂纹长度的CB试样以便研究尺寸效应。

同时还采用了直切槽的三点弯曲圆梁(以下简称为SB),以便对两种弯曲圆梁试样加以

比较。

1 试样的制备和测试

试样取自重庆附近南桐矿区的灰岩岩芯, CB 试样如图1所示, 试样的构形基本上与国际岩石力学学会 (ISRM) 规定的一样^[3], 只是无量纲初始裂纹长度 $\alpha_0 (= a_0/D)$ 有变化。试样的人字形切槽是用厚1.2mm 直径120mm 的金刚石圆片砂轮在万能铣床上加工的, 加工精度得到保证, 人字形切槽由两次铣削成形, 被准确地控制在一个平面内。然后再用单面刀片手工刻画人字形切槽的根部使其尖锐, 据估计, 这种刀片技术可以使切槽尖端半径小于0.01mm。试样的直径有56mm 和72mm 两种。无量纲初始裂纹长度 α_0 分别是0.15, 0.2, 0.3 (ISRM 规定 $\alpha_0 = 0.15$)。一共测试了16个 CB 试样。

SB 试样的切槽横截面如图2所示, 它的跨度和试验装置与图1相同, 试样的制备也采用上述方法。

材料试验机是 MTS810型, 它的伺服液压载荷框架由4根立柱构成, 其刚度是1100kN / mm。作者在进行过一番调查和比较后选定这一刚度高的试验机, 其目的是为了在测试时减少载荷框架变形所贮存的能量, 这些能量作用在试样上对裂纹的稳定扩展有不利的影响, 在测试岩石的断裂韧度, 特别是试样处于弯曲加载时, 试验机的刚度必须加以考虑。用 MTS 型夹式引伸计测量裂纹张开位移 (CMOD), 此引伸计的灵敏度要高, 因为岩石在测试时的变形量小, 另外, 试验机的位移控制变量就是 CMOD, CMOD 速率为0.01mm / min。采用 CMOD 控制的好处是它只与试样的变形有关, 从而排除了试验机以及加载滚子和试样接触部位变形的影响, 如果采用施力点位移 (LPD) 控制, 这些影响就难以排除。注意到岩石断裂韧度与应变率关系不大^[4], 因而选用了比较低的 CMOD 速率, 其目的是为了防止过载和有助于裂纹的稳定扩展。

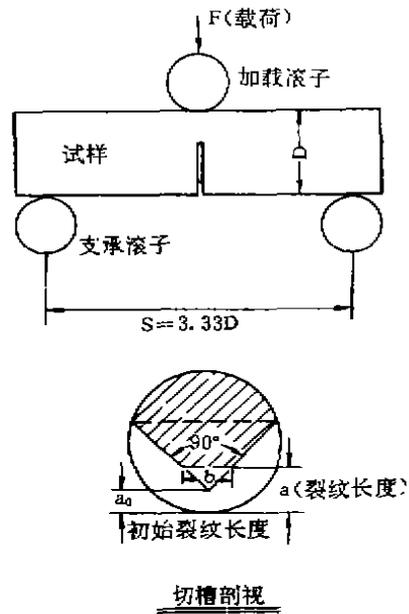


图 1 CB 试样及其加载方式

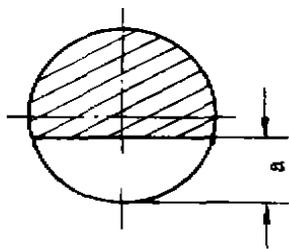


图 2 SB 试样的切槽横截面

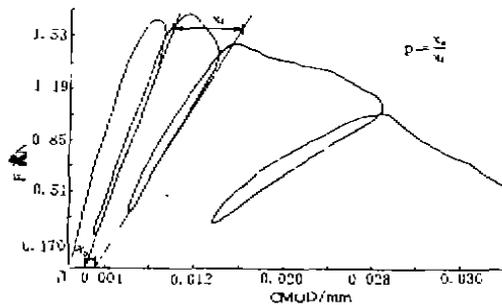


图 3 CB 试样的载荷—裂纹张开位移 (CMOD) 曲线

在测试 CB 试样时要进行几次卸载—加载的循环, 最大载荷应位于某两次循环之间, 如

图3所示,由此可以得到一个非线性的修正因子 p 用于断裂韧度的计算^[3]。对 SB 试样则难以进行这种循环,这是由于后者的稳定性比前者差所致^[3]。

2 计算和讨论

用下面的式子计算 CB 试样的断裂韧度 K_{Ic} ,下标 CB 代表所用的试样,上标 p 代表非线性修正

$$K_{CB} = A_{min} \cdot \frac{F_{max}}{D^{1.5}} \quad (1)$$

$$K_{CB}^p = K_{CB} \cdot \sqrt{\frac{1+p}{1-p}} \quad (2)$$

其中, F_{max} 是最大载荷, D 是直径, p 是非线性修正因子, A_{min} 是最小无量纲应力强度因子,并由文献[3]给出如下

$$A_{min} = (1.835 + 7.15\alpha_0 + 9.85\alpha_0^2) \cdot \frac{S}{D} \quad (3)$$

其中, S 和 D 的定义均见图1。

用下式定义试样的非线性行为的程度 p

$$p = \frac{x_a}{x_r} \quad (4)$$

其中, x_a 和 x_r 由图3决定^[3]。

值得指出的是,在许多文献中 p 因子是由载荷-LPD 曲线决定的,本文改用 CMOD 来代替 LPD 的理由已在上文给出。岩石在断裂时,裂尖前端有一个由微裂纹组成的断裂过程区,界面之间有桥联,从而造成了岩石变形的非线性行为,在这方面考虑 p 因子的(2)式比不考虑的(1)式要更合理。CB 试样的测试结果列在表1。

表1 用 CB 试样测试的一种重庆灰岩的断裂韧度

D (mm)	α_0	p	K_{CB} (MPa·m ^{1/2})	K_{CB}^p (MPa·m ^{1/2})
56	0.15	0.14	1.15	1.33
56	0.20	0.16	1.21	1.42
56	0.30	0.20	1.33	1.61
56	0.20	...	2.02*	(过载,未得到 p)
72	0.15	0.18	1.28	1.54
72	0.20	0.20	1.38	1.69
72	0.30	0.25	1.45	1.87

注:除*以外,给出的是至少两次测试的平均值。

SB 试样测试的断裂韧度值计算利用文献[6]给出的应力强度因子表达式如下

$$K_{Ic} = \frac{F}{D^{1.5}} \cdot \frac{S}{D} \cdot \frac{\alpha^{0.5}}{(1-\alpha)^2} \cdot (3.75 - 11.98\alpha + 24.40\alpha^2 - 25.69\alpha^3 + 10.02\alpha^4) \quad (5)$$

其中, $S/D = 3.33$, $\alpha = a/D$, F 是载荷并采用最大载荷 F_{max} 。测试结果列在表2。

表 2 用 SB 试样测试的一种重庆灰岩的断裂韧度

D (mm)	σ	K_{IS} (MPa \cdot m $^{1/2}$)
56	0.288	1.42
72	0.255	1.60
56	0.253 (裂纹扩展偏斜)*	1.08

*注:裂纹扩展偏离切槽平面约20°.

有关测试情况的讨论:

1) 过载

因为试样能承受的最大载荷不大(仅几个 kN),所以初始载荷的冲击便足以将试样摧毁。特别是在 CMOD 控制下,必须是在载荷已加上并有了 CMOD 变化后控制才会起作用,因此,初始载荷的施加必须小心。另外,切槽根部由刀片加工的裂纹也要足够尖锐才行,否则容易引起过载。

试样是否过载,从记录的载荷—施力点位移(LPD)曲线可以看出。图4表明 SB 试样自动地发生一种“回跳失稳”(snap-back instability)现象^[7],其特征是过了最大载荷后,虽然 CMOD 值仍在不断增加(因为试验机处 CMOD 控制下),LPD 值却反而减小,呈现一种反弹。此时,除了外载荷提供的能量供裂纹扩展外,还有一部份由试样本身释放出来,这说明已有过载发生。CB 试样发生这种回跳失稳的情况比 SB 试样少得多,其典型的记录曲线表明裂纹的扩展是稳定的(见图5),卸载—加载循环线在图中略去未画。由此可知,在其它条件完全相同的情况下,试样的构形对裂纹扩展稳定性的影响是大的,裂纹扩展越不稳定就越容易过载。将上述的 MTS 试验机刚度等条件代入作者对 SB 试样稳定性的理论分析结果(文献[5]的图2)可以看出 SB 试样的稳定扩展条件要求 $\sigma > 0.3$,本文的 SB 试样均不满足这一条件,因而失稳是难免的。CB 试样的稳定性(尤其在裂纹扩展的初期阶段)要比 SB 试样好得多。对于 CB 试样,文献[8]给出这种试样的稳定性分析的数值结果。材料试验机的柔度,试样的几何构形,以及加载方式都对 CB 试样裂纹的稳定扩展有重要的影响。现被测重庆灰岩的弹性模量是 $E = 104 \text{ kN/mm}^2$, MTS 试验机的刚度是 1100 kN/mm , 定义试验机的无量纲柔度 $C_m = ECD$, 可以分别对 $D = 56 \text{ mm}$ 和 76 mm 的试样算出 C_m 值分别是 5.3 和 6.8, 再利用文献[8]之图6可知此时 $C_m \rightarrow 0$, 故对 $\sigma_0 = 0.15$ 的 CB 试样可以实现裂纹的稳定扩展。分析表明, σ_0 越大, 试样越稳定, 故对 $\sigma_0 = 0.20, 0.30$ 的试样, 其裂纹的稳定扩展在理论上得到保证。当然, 其它偶然因素, 如人字形切槽的根部不够尖锐, 材料的非均质性 etc 也可能破坏这种稳定性(见表1第4栏)。

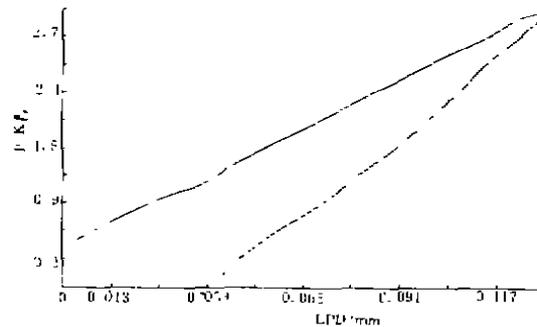


图 4 SB 试样的载荷—施力点位移(LPD)曲线显示的回跳失稳

SB 试样还有一个不利因素就是裂纹扩展方向容易偏离切槽平面,这一般都会使测试值偏低,从而抵消了过载的一些影响,但过载和偏斜都不能真实地反映材料的断裂韧度,因此都是不可取的。CB 试样的人字形切槽对裂纹扩展方向有一定的约束作用,发生裂纹扩展偏斜的可能性也小些。

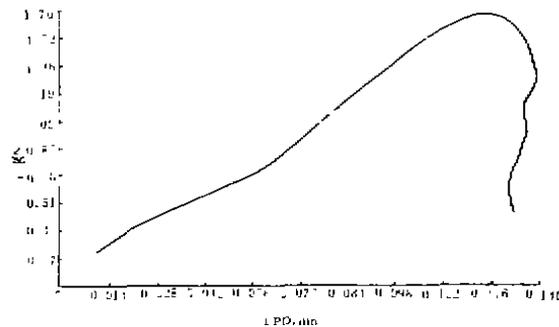


图5 CB 试样的载荷—施力点位移(LPD)曲线显示的裂纹稳定扩展

2) 卸载—加载循环

CB 试样可以进行这种循环(见图3),并由此得到一个非线性修正因子 p (见式(2)、(4))。SB 试样的稳定性比 CB 试样差得多,故不可能进行这种循环。

3) 尺寸效应

对 CB 试样研究了尺寸效应,即试样直径 D 和初始裂纹长度 a_0 对断裂韧度值的影响。从表1可以看出,随着 D 和 a_0 的增加, K_{Ic} 值也增加。在考虑了 p 因子修正后,这种增加的趋势对 K_{Ic} 值仍然存在。对这种现象的一种解释是被测试的灰岩有一种上升的断裂阻力曲线,即裂纹扩展量 Δa 越大,断裂阻力值 K_R 也越大,当 D 或 a_0 (但 $a_0 \leq 0.4$) 增大时,对应测试时的裂纹临界扩展 Δa_c 也增大,从而使测得的 K_{Ic} 值上升,尺寸效应是断裂韧度测试应该尽量减少的,这方面还有待进一步的工作。

3 结 论

为了可靠并有效地测试脆性岩石的断裂韧度,试样裂纹在测试中的稳定扩展是重要的,但又是容易实现的,对于弯曲加载这方面的困难更大。试样的构形(CB 试样的 a_0 、 D 和 θ , SB 试样的 α ,以及跨径比 S/D),加载方式(载荷控制或位移控制,后者又分 LPD 控制和 CMOD 控制),以及试验机刚度都对裂纹稳定扩展有影响。本文的测试经验表明,选用 CB 试样比 SB 试样好得多,采用以 CMOD 为参数的位移控制(0.01mm/min)以及刚度高的电液伺服材料试验机(刚度为1100kN/mm)是成功的。在 CMOD 控制下,如果载荷—LPD 曲线出现一种回跳失稳现象,则可判定试样已有过载。CB 试样出现这种情况的可能性比 SB 试样小,前者出现裂纹扩展偏斜的程度也较小。

但是 CB 试样的测试结果随着试样直径 D 和初始裂纹长度 a_0 的增加而增加,有尺寸效应。这与被测试的灰岩具有上升的阻力曲线有关,如果被测试材料具有平坦的阻力曲线,则尺寸效应不会出现。

参 考 文 献

- 1 Underwood J H et al. (Eds). Chevron-Notched Specimens; Testing and Stress Analysis, ASTM STP 855, Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 1984
- 2 Chuider Hsiao et al. Fracture Toughness Testing of Rock Cores. In: Proceeding of 28th U. S. Symptom on Rock Mechanics, 1987, 141~148
- 3 Ouchterlony F (co-ordinator). Suggested Method for Determining the Fracture Toughness of Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. 1988, 25(2): 71~96
- 4 Haberfield C M et al. Determination of the Fracture Toughness of a Saturated Soft Rock, Canadian Geotechnical Journal, 1990, 27(3): 276~284
- 5 王启智等, 三点弯曲圆梁断裂试样的稳定性因子, 重庆大学学报, 1992, 19(2): 13~18, also published in International Journal of Fracture, 1991, 50(4): R61~R67
- 6 Underwood J H et al. Wide Range Stress-intensity-factor Expression for an Edge-cracked Round Bar Bend Specimen, Experimental Mechanics, 1989, 29(6): 166~168
- 7 Bocca P. Evaluation of the Released Energy During Catastrophic Failure, Experimental Techniques, 1989, 13(5): 25~28
- 8 王启智等, 二种岩石断裂韧度试样测试的稳定性分析, 实验力学, 1991, 6(3): 264~271