

岩石蠕变断裂特性的试验研究¹⁾

陈有亮

(上海大学土木工程系, 上海 200072)

摘要 以一类红砂岩为例对蠕变条件下岩石裂纹的起裂和扩展的机理、准则进行了试验研究和理论分析. 试验结果表明, 岩石裂纹常常在初始应力强度因子 K_I 小于断裂韧度 K_{IC} 的情况下, 经过一段时间的持续蠕变变形产生裂纹起裂和扩展. 当然, 初始应力强度因子 K_I 小于断裂韧度 K_{IC} 是有限度的, K_I 不得小于另一固定值 K_{IC2} , K_{IC2} 表征了岩石在蠕变条件下抵抗裂纹起裂和扩展的能力, 而且其值小于 K_{IC} , 可称之为蠕变断裂韧度. 在岩石工程的设计和计算中, K_{IC2} 是一个重要参数.

关键词 岩石, 蠕变, 断裂, 机理, 三点弯曲, 试验研究

引 言

蠕变特性是岩石的一个重要特征. 已有的研究结果表明, 在许多岩石中都发现了蠕变特征的存在, 如岩盐、砂岩甚至一些坚硬岩石, 这些结果在南非金矿、虎门大桥项目等诸多工程的现场试验中都得到了验证^[1,2]. 本文中蠕变被定义为恒定荷载作用下岩石的持续变形, 并用于分析含裂纹岩石试块的演化规律. 而岩石断裂往往又是岩石破坏的原因和结果.

在一些岩石工程中, 我们发现, 起初一些岩石裂纹并不扩展, 但经过一段时间的持续蠕变荷载作用之后, 岩石裂纹会起裂和扩展, 但至今还没有发现有关岩石蠕变裂纹起裂和扩展准则的研究成果, 本文将研究这个问题.

本文试验采用的是三点弯曲试验方法. 试样取自四川峨嵋地区. 采用大小约为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 250\text{ mm}$ 的长方体试块, 试块分别由以下三种材料加工而成.

- (1) 接近均质、各向同性的细粒灰砂岩;
- (2) 接近均质、各向同性的细粒红砂岩;
- (3) 含层理面的细粒红砂岩.

相应地, 试验采用的试块可分为四类:

- (1) A 类试件 —— 由均质、各向同性的细粒灰砂岩加工制作;
- (2) B 类试件 —— 由均质、各向同性的细粒红砂岩加工制作;

(3) C 类试件 —— 由含层理面的细粒红砂岩加工制作, 且预制裂纹垂直于层理面方向;

(4) D 类试件 —— 由含层理面的细粒红砂岩加工制作, 且预制裂纹平行于层理面方向.

在岩石断裂力学试验中, 颗粒大小是一个很关键的因素, 因为它不仅影响断裂过程区的大小, 而且影响断裂参数 (如断裂韧性、断裂能等) 的大小, 因此不能被忽略. 已有研究成果表明, 为了得到准确合理的 K_{IC} 值, 岩石试块的尺寸至少应该不小于粒径的 20~40 倍. 由于此次试验所采用的试块是由粒径约为 $1/16 \sim 1/8\text{ mm}$ 的细粒砂岩加工制做的, 因此, 试块尺寸满足要求.

在研究金属材料蠕变裂纹扩展特性时, 根据裂纹扩展过程中蠕变变形在整个变形中所占的比例, 可将材料分为蠕变脆性或蠕变延性. 此处所采用的岩石材料为蠕变脆性材料.

为了探寻岩石的蠕变裂纹起裂和扩展规律, 本文用三点弯曲试验方法对细粒砂岩的蠕变断裂特性进行了试验研究. 为了避免伺服试验机由于漂移现象而产生巨大误差, 本文设计加工了专用的三点弯曲刚性试验架. 在试验过程中, 位移由千分表量测, 荷载由砝码重量和事先标定的结果确定. 试验结果表明, 岩石裂纹在 $K_I < K_{IC}$ 的情况下也可以产生裂纹扩展. 当然, 裂纹扩展必须满足一定的前提条件, 即 $K_I \geq K_{IC2}$. K_{IC2} 表征蠕变条件下岩石材料抵抗裂纹起裂和扩展的能力, 此处将其命名为蠕变断裂韧度.

2002-03-06 收到第一稿, 2003-04-07 收到修改稿.

1) 国家自然科学基金资助项目 (59809005) 和上海市自然科学基金资助项目 (02ZF14036).

1 室内试验

本次试验是在同济大学材料力学实验室的高频疲劳伺服试验机和自行设计加工的三点弯曲刚性试验架上进行的。预制裂纹可分为两部分：宽裂纹和

窄裂纹。宽裂纹由锯条或锯片加工，窄裂纹由金刚石锯片加工，窄裂纹宽度约为 0.2~0.3 mm。试验包括两部分内容：常规断裂试验和蠕变断裂试验。由于篇幅关系，此处只介绍蠕变断裂试验。试块的数量分布请参看表 1。

表 1 三点弯曲试验中所采用的各类岩石试块的数量分布

Table 1 The quantity of various rock samples used in three point bending test

	A Speciment	B Speciment	C Speciment	D Speciment
conventional fracture test	2	0	3	3
fracture test under creep condition	0	32	10	10

表中采用的 K_{IC} 的计算公式为

$$K_{IC} = f(a/W)P_{max} \cdot S/(BW^{3/2}) \quad (1)$$

其中

$$f(a/W) = 2.9(a/W^{1/2}) - 4.6(a/W^{3/2}) + 21.8(a/W^{5/2}) - 37.6(a/W^{7/2}) + 38.7(a/W^{9/2}) \quad (2)$$

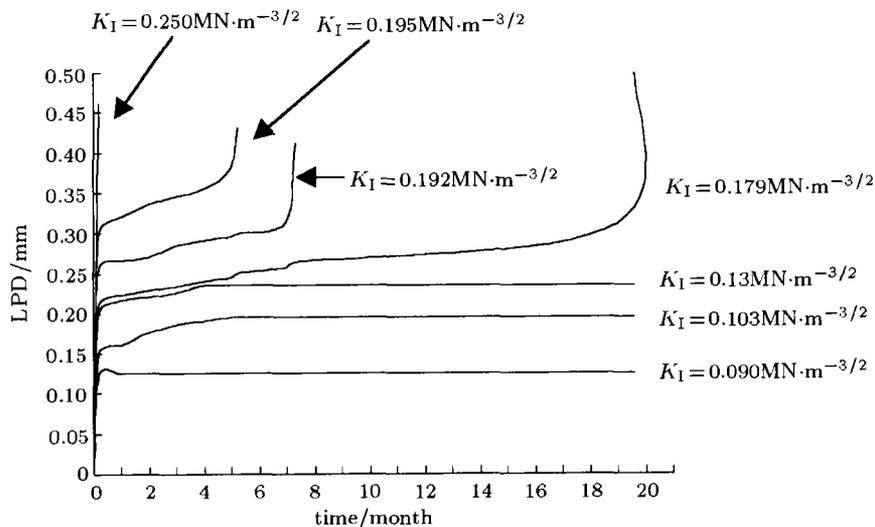
K_{IC} 表示断裂韧性； W, B 分别表示试块高度和厚度； a 表示裂纹长度； P_{max} 表示最大荷载； S 表示支座间的跨距。

1.1 试验装置和试块制作

蠕变断裂试验是在自行设计加工的三点弯曲刚性试验架上进行的。试块主要是含层理和不含层理的细粒红砂岩 (B, C, D 三类试块)。蠕变断裂试验中恒定荷载的作用时间分别为几小时到几个月甚至超过一年不等。

1.2 试验结果

试验得到了 B, C, D 三类试块在不同应力强度因子水平下的荷载点挠度随时间变化的曲线，其中的一些代表性曲线如图 1 所示，图 1 中 LPD 代表荷载点位移。

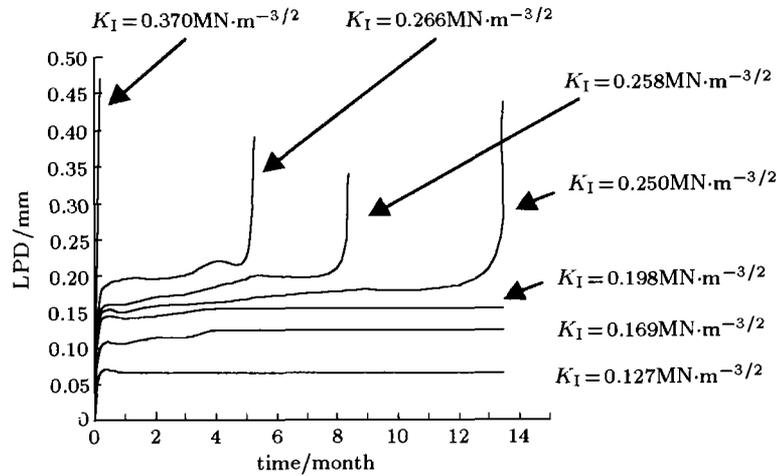


(a) B 类试块的时间 - 荷载点位移曲线

(a) LPD versus time curves for specimen B

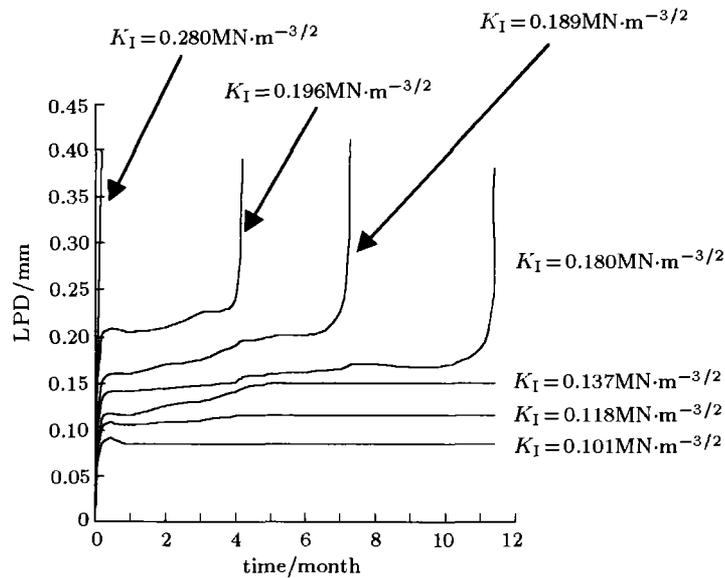
图 1 三点弯曲蠕变断裂试验所得到的三种岩石试块的荷载点位移随时间变化曲线，LPD = 荷载点位移

Fig.1 The LPD-time curves of three kinds of rock specimens under three point bending test



(b) C类试块的时间-荷载点位移曲线

(b) LPD versus time curves for specimen C



(c) D类试块的时间-荷载点位移曲线

(c) LPD versus time curves for specimen D

图1 三点弯曲蠕变断裂试验所得到的三种岩石试块的荷载点位移随时间变化曲线, LPD = 荷载点位移(续)

Fig.1 The LPD-time curves of three kinds of rock specimens under three point bending test (continued)

由图 1(a) 可以看出:

(1) 当 $K_I = 0.090 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 时, B 类试块无明显流变变形;

(2) 当 $K_I = 0.103 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 或 $K_I = 0.130 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 时, B 类试块有蠕变变形发生, 但经过一段时间荷载作用之后, 蠕变变形停止发展;

(3) 当 $K_I = 0.179 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 或 $K_I = 0.192 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 或 $K_I = 0.195 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 时, B 类试块有明显蠕变变形发生, 而且蠕变变形将一直发展下去,

直至蠕变断裂;

(4) 当 $K_I = 0.250 \text{ MN}\cdot\text{m}^{-3/2}$ 时, 试块迅速断裂.

从图 1(b) 和图 1(c) 也可发现, C, D 两类试块也有类似性质.

1.3 试验结论

试验得到了 B, C, D 三类试块在不同应力强度因子水平下的荷载点挠度随时间变化的曲线, 通过整理试验结果, 可以得到如下结论:

所研究的岩石存在三个特征值, 分别记为 K_{IC1} , K_{IC2} 和 K_{IC3} , 它们满足如下条件:

(1) 当 $K_I < K_{IC1}$ 时, 细粒红砂岩材料无明显流变变形特征;

(2) 当 $K_{IC1} \leq K_I < K_{IC2}$ 时, 细粒红砂岩材料有蠕变变形特征, 但经过一段时间荷载作用之后, 蠕变变形停止发展;

(3) 当 $K_{IC2} \leq K_I < K_{IC3}$ 时, 细粒红砂岩材料有明显蠕变变形特征, 而且蠕变变形将一直发展下去, 直至蠕变断裂;

(4) 当 $K_I \geq K_{IC3}$ 时, 细粒红砂岩材料迅速断裂。

对于 B, C, D 三类试块, 得到的特征值如表 2 所示。

表 2 四川峨边地区细粒红砂岩裂纹蠕变起裂与扩展的特征值

Table 2 The characteristic values of crack initiation and propagation for red fine-grained sandstone from Emei under creep conditions

Type of specimen	$K_{IC1}(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	$K_{IC2}(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$	$K_{IC3}(\text{MN}\cdot\text{m}^{-3/2})$
specimen B	0.103	0.179	0.250
specimen C	0.169	0.250	0.370
specimen D	0.118	0.180	0.280

从表 2 可以看出, 平行于层理面的裂纹比垂直于层理面的裂纹容易产生蠕变裂纹扩展; 由于红砂岩材料有明显的流变特性, 因此, 红砂岩在 $K_I < K_{IC}$ 的情况下会产生蠕变裂纹的起裂和扩展 (当然, K_I 必须大于 K_{IC2}), K_{IC2} 是一个非常重要的参数。

为方便起见, 我们称 K_{IC2} 为蠕变断裂韧度。

2 结 论

本文对三点弯曲条件下细粒砂岩的断裂和蠕变断裂特性进行了室内试验研究, 通过这些研究可以得到如下结论:

(1) 蠕变断裂韧度 K_{IC2} 是一个非常重要的参数, 在一些岩石工程中, 由于蠕变变形所引起的微结构效应, 使得岩石有时在 $K_{IC2} < K_I < K_{IC}$ 的条件下也会产生蠕变破坏;

(2) 岩石流变断裂还有许多值得进一步研究的课题, 例如 II 型和 III 型蠕变断裂问题的研究以及它们的混合问题的研究, 动态荷载作用下岩石断裂问题的研究, 人工开挖引起的卸荷断裂问题等, 这

都是需要进一步研究的很有意义的课题。

参 考 文 献

- 1 Malan DF. Time-dependent behaviour of deep level tabular excavations in hard rock, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1999, 32(2): 123~155
- 2 Silberschmidt VG, Silberschmidt VV. Analysis of cracking in rock salt. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2000, 33(1): 53~70
- 3 周维垣. 高等岩石力学. 北京: 水利电力出版社, 1990. 362~403 (Zhou Weiyuan. Advanced Rock Mechanics. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1990. 362~403(in Chinese))
- 4 郑少河, 朱维申. 裂隙岩体渗流损伤耦合模型的理论分析. 武汉: 岩石力学与工程学报, 2001, 20(2): 156~159 (Zheng Shaohu, Zhu Weishen. The coupling seepage-damage model of jointed rock mass. Wuhan: *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2001, 20(2): 156~159 (in Chinese))
- 5 袁龙蔚. 流变学. 北京: 科学出版社, 1984 (Yuan Longwei. Rheology. Beijing: Science Press, 1984(in Chinese))
- 6 谢和平. 岩石、混凝土损伤力学. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1990 (Xie Heping. Damage Mechanics of Rock and Concrete. Xuzhou: Press of Chinese University of Mining Science and Technology, 1990(in Chinese))

THE EXPERIMENTAL STUDY ON CREEP FRACTURE OF ROCK¹⁾

Chen Youliang

(Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract The mechanism and criterion of crack initiation and propagation of rocks were investigated by many researchers. And the creep behaviour of rocks was also theoretically and experimentally studied by some scientists and engineers. The characteristics of crack initiation and propagation of rocks under creep condition, however, are very important for rock engineering and still not paid enough attention by researchers. In this paper, the criterion and mechanism of crack initiation and propagation under creep condition were investigated using specimens collected from sandstone rock formations outcropping in Emei Mountain, the Sichuan Province of China. Cuboid specimens under three point bending were used in this investigation. All specimens were classified into four sorts and used for Mode-I fracture or creep fracture tests. The experimental result shows that due to creep deformation, rock crack will inevitably initiate and propagate under a load of K_I , which is less than fracture toughness K_{IC} but not less than a constant (marked as K_{IC2}). K_{IC2} indicates the ability of rock to resist crack initiation and propagation under creep conditions and is less than fracture toughness K_{IC} , it is defined as creep fracture toughness in this paper. K_{IC2} should be considered as an important parameter on design and computation of rock engineering.

Key words rock, creep, fracture, mechanism, three point bending, experimental study

Received 6 March 2002, revised 7 April 2003.

1) The project supported by the National Natural Science Foundation of China (59809005) and the Natural Science Foundation of Shanghai (02ZF14036).