

岩石蠕变过程中声发射活动的实验研究

吕培苓 吴开统 焦远碧

(中国北京 100036 国家地震局分析预报中心)

李纪汉 刘晓红

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘 要

在常温下、单轴加压下对两种岩石完整样品进行蠕变破坏过程中声发射活动实验。根据实验获得的数据讨论了蠕变三个阶段中声发射活动特征。在瞬态蠕变阶段,随着加载,声发射活动逐渐增强;在稳态蠕变阶段,在较低的声发射活动背景上,可能出现较强的信号,声发射幅值-频度关系的 m 值可能稳定于某一低值,也可能下降;进入加速蠕变阶段,声发射活动水平增强, m 值下降加快,也可能表现为明显回升后再下降,并与岩石样品的性质有关。

将蠕变破坏三个阶段中声发射活动与地震孕育过程中某些地震活动图象变化(如 b 值、前震活动)进行了联系,提出地壳岩石蠕变破坏机制形成前震—主震—(余震)型地震序列类型的可能性。

关键词 岩石蠕变实验;声发射; b 值;地震序列

一、前 言

岩石受力变形时,在岩体内原先存在或新产生的裂缝周围形成应力集中。这些局部应力集中区不均匀发展,并发生突然的破裂,从而向四周辐射弹性波,这就是岩石的声发射现象。六十年代初,茂木清夫进行岩石脆性破坏实验^[1],研究介质性质对声发射序列和 m 值的影响,指出随样品的不均匀程度产生三种不同类型的声发射序列,并认为 m 值由样品的不均匀程度决定。以后肖尔茨进行了实验,表明岩石样品声发射 m 值由样品所处的应力状态决定的观点^[2]。

七十年代以来,国内外学者在进行脆性破坏实验基础上开展了岩石样品摩擦滑动和蠕变破坏的实验研究,其中,值得一提的是茂木为了证实自己的观点进行岩石样品蠕变破坏实验^[3],表明声发射 m 值在加速蠕变阶段下降,重申 m 值与岩石介质不均匀程度有关。

但是真正完成了瞬态蠕变、稳态蠕变和加速蠕变三个阶段的声发射实验的是日本学者平田隆幸^[4],他的实验表明,在稳态阶段,声发射水平低, m 值大致不变,进入蠕变第三阶段后 m 值下降。

进行岩石蠕变实验有助于研究地震发生的物理过程。近年来的野外观测表明,天然地震的形成并不都是在岩石受到一定的应力后随即破坏而发生的,有不少地震是在由于

蠕变作用发生延迟破坏情况下发生的。和脆性破坏实验一样，我们首先进行单轴加压蠕变实验，研究岩石从受力、保持一定的应力水平、直至破坏过程中出现的某些信息，这对解释地震成因，实现地震预报将是一项有益的研究。

进行蠕变实验的困难之处在于，施加在样品上的蠕变应力和达到破坏的时间之间的关系难以确定。实验中选用济南辉长岩和房山大理岩两种样品，使用 200t 压机在常温下进行蠕变实验。

本文给出了实验获得的两种岩石的干、湿样品在蠕变三个阶段中的声发射率和 m 值的数据，并根据实验结果对地震孕育过程中某些地震活动图象，以及地震序列类型进行了一些讨论。

二、岩石样品蠕变破坏实验

实验使用 200-C-1 型压力试验机、AE-5000 声发射记录仪、FX-212 位移传感器，实

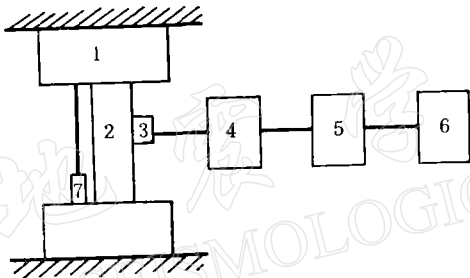


图 1 蠕变实验装置

1. 200-C-1 型单轴压力试验机。由人工控制给样品加载，误差 $\pm 0.5t$ ； 2. 岩石样品。两种样品均加工成高 110mm、直径 50mm 的圆柱体，两端面的不平行度小于 0.02mm； 3. 声发射探头。中心频率为 375kHz，仪器的阈值为 0.1V； 4. 前置放大器。声发射探头接收到的讯号经前置放大器放大后输入声发射主机，放大器增益为 80dB； 5. AET-5000 声发射仪主机； 6. AET-5000 声发射记录仪屏幕和照相设备； 7. FX-212 位移传感器

表 1 实验内容

实验序号	样品及其编号	蠕变应力 (MPa)	稳态蠕变阶段持续时间	样品破坏方式
1	干大理岩样品 MNO2	133	2 ^h 50 ^m	自然破坏
2	含水大理岩样品 MNO3	122	1 ^h 40 ^m	自然破坏
3	干辉长岩样品 GNO6	204	33 ^m	自然破坏
4	干辉长岩样品 GNO1	204	>5 ^h	共加载两次，使样品破坏。 第一次载荷 229MPa， 第二次载荷 245MPa
5	干辉长岩样品 GNO8	219	>5 ^h	共加载六次，使样品破坏。 载荷分别为 224, 229, 235, 240, 245, 250MPa
6	含水辉长岩样品 GNO9	204	21 ^m	自然破坏

验装置如图 1。实验内容和步骤见表 1。

对表 1 需进行两点说明：

- 1. 蠕变应力取作岩石强度的 90% 左右是据以往的经验得到。每一次实验开始是对样品加载,至蠕变应力后保持这一应力状态。实验 1,2,3 和 6 获得了蠕变三个阶段声发射序列和幅值-频度关系;
- 2. 含水样品经过室内浸泡三天后使用,实验过程中,为避免水份蒸发,用塑料薄膜将样品包裹。

三、实验结果

1. 岩石蠕变过程中声发射活动特征

实验 1 中我们看到,随着加载,声发射开始出现并逐渐增多.进入稳态蠕变阶段,声发射率明显下降。表 2 给出进入稳态阶段一小时后的声发射活动,声发射率最低为 4 次/分左右。

表 2 干大理岩样品稳态蠕变阶段声发射事件数 N (次)和声发射率 n (次/分)

顺序号*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
N	57	52	45	29	41	41	25	30	60	52	63	~83	~83	~80	
n	8.5	7.8	6.7	4.3	6.1	6.1	3.7	4.5	9.0	7.8	9.4	~13	~12	~12	显著增强

* 每一个顺序号表示一个时间过程,即 6 分 40 秒。所以 N 表示 6 分 40 秒内声发射次数。顺序号 1 从进入蠕变第二阶段一小时后开始计

从表 2 可见,声发射活动增强是在稳态蠕变进行 2 小时后开始(即顺序号 9),声发射

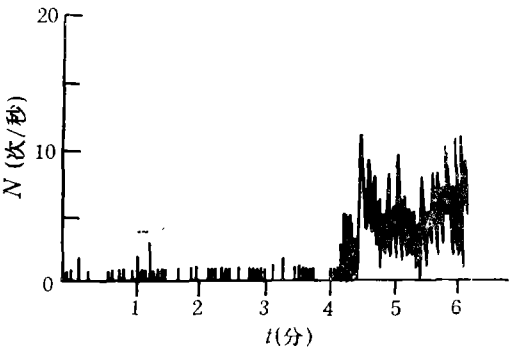


图 2 干大理岩样品 (MNO₂) 蠕变时声发射率的增强变化

率 10 次/分左右,信号振幅增大。破坏前半小时,出现一个显著增强的声发射序列(如图 2)。稍待平静后,声发射活动再度加强,声发射率每分钟上百次,持续十几分钟后样品自然破坏。

含水大理岩样品 (MNO 3) 蠕变过程中声发射水平更低,在稳态蠕变阶段几乎停止声发射,直到这一阶段后期才有所增强,如表 3 和图 3 所示,并显示两个增强的声发射序列。

图 4 表示辉长岩样品蠕变破坏过程中声发射率的变化。和以往实验一样,

辉长岩声发射水平比较高。从图 4a 中可看到有两次较大起伏:一次出现在破坏前 12 分钟;另一次在破坏前 5 分钟出现,随后样品破坏。图 4b 表示含水辉长岩样品破坏前声发射率至少有四次较大的起伏变化。

实验 4 和实验 5 的蠕变时间相对较长,在稳态蠕变阶段,AE 率增强变化出现次数也增多。实验 5 中可见有 3 次明显增强,表明干辉长岩样品破坏前的复杂过程。

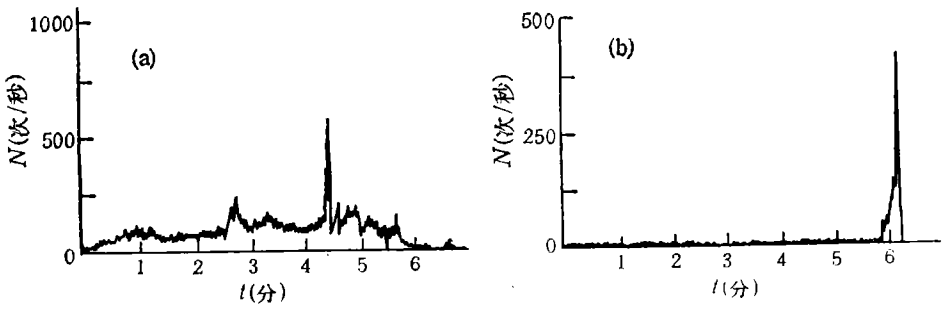


图 3 大理岩样品破坏前声发射活动随时间的变化
(a) 干样品 MNO₂; (b) 含水样品 MNO₃

表 3 含水大理岩样品稳态阶段声发射事件数 N (次)和声发射率 n 次/分

顺序号*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
N	31	9	5	11	9	4	15	7	9	9	15	
n	4.6	1.3	0.8	1.6	1.3	0.6	2.2	1	1.3	1.3	2.2	显著增强

* 意义同表 2

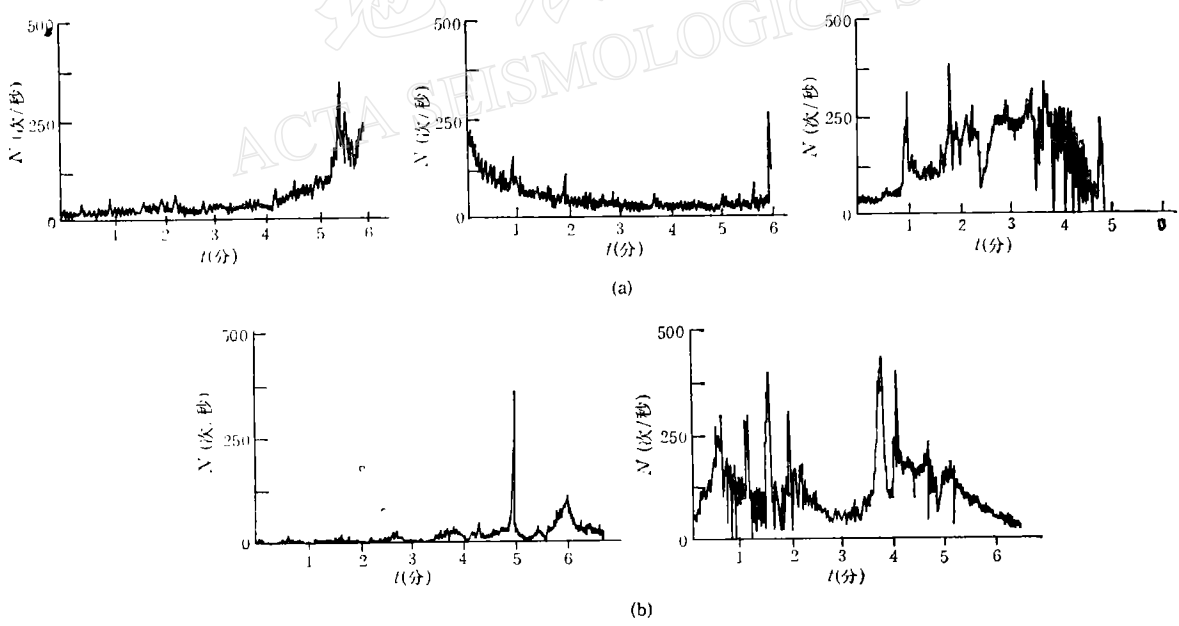


图 4 辉长岩样品破坏前声发射活动随时间的变化
(a) 干样品 GNO₆; (b) 含水样品 GNO₉

2. 岩石样品蠕变破坏过程中声发射幅值-频度关系(m 值)

声发射幅值-频度关系常用石本已四雄和饭田汲事(1939)^[9]公式中的 m 值表示,即

$$n(A)dA = kA^{-m}dA$$

式中, $n(A)$ 为地震发生的次数, A 为最大振幅。

图 5 表示大理岩样品蠕变时声发射 m 值的变化。在图 5a 中, 当进入稳态蠕变阶段后, m 由很高值(4.41)迅速降低, 到这一阶段后期 m 下降到最低值(1.24), 然后显示有起伏回升形态。但样品破坏前, m 仍处于很低值。图 5b 是含水样品在稳态蠕变阶段前期, m 由很高值(5.19)下降, 到后期下降到低值(1.98)。不同的是临近破坏前 m 值明显回升, 但破坏时 m 最低。含水大理岩样品破坏前 m 值显著回升, 表现了含水样品的破坏过程可能更复杂。

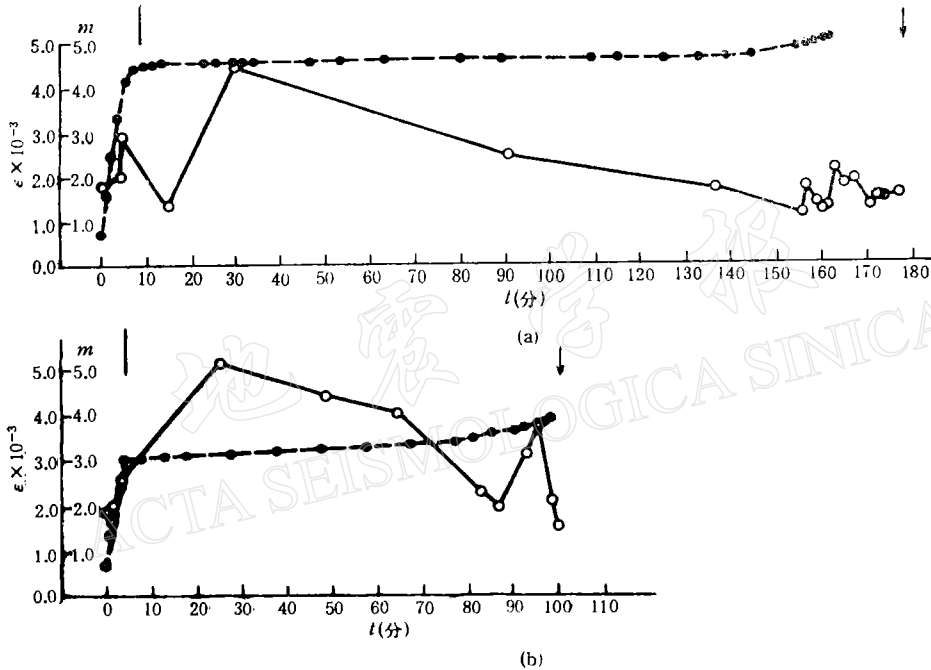


图 5 大理岩样品声发射 m 值(用“○”表示)和应变-时间曲线(用“●”表示),

图中箭头表示破坏时间, 短线表示蠕变阶段分界线

(a) 干样品; (b) 含水样品

大理岩样品实验表明, 于稳态蠕变阶段, m 值为下降形态。而辉长岩样品在稳态阶段, m 值表现为稳定在一个低值上或有起伏的缓慢变化(图 6)。图 6 中还看到, 辉长岩样品临近破坏时, m 值可能加速下降(图 6a); 可能变化不大(图 6b), 这和大理岩样品临近破坏时 m 值恢复-下降-破坏过程有所不同。

辉长岩样品在很短的蠕变过程(图 6)和较长时间蠕变(图 7)中于稳态蠕变阶段, m 均表现稳定或有小的起伏, 但后者在样品临近破坏前 m 值变化不大, 与含水辉长岩样品相似。

上述实验结果表明, 不同岩石或同种岩石的干湿样品蠕变破坏过程中声发射活动和 m 值的变化不尽相同。平田隆幸只用了一种岩石, 他得到在稳态蠕变阶段声发射水平一致, m 值大致不变。进入加速蠕变阶段, m 值下降与我们辉长岩样品实验颇接近, 与大理岩样品则有不同。我们的实验还表明, 样品含水后破坏更为复杂。

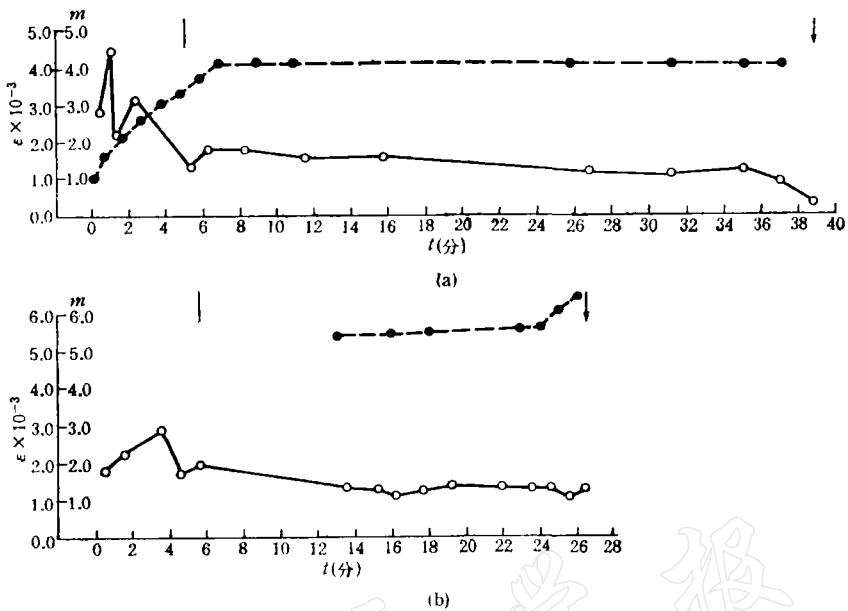


图 6 辉长岩样品声发射 m 值(用“○”表示)和应变-时间曲线(用“●”表示),
图中箭头短线同图 5
(a) 干样品; (b) 含水样品

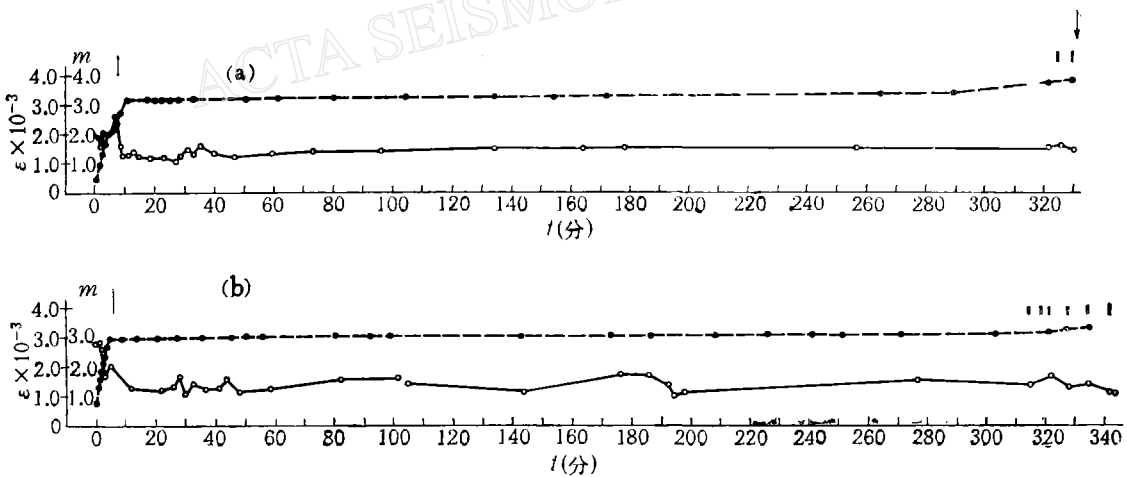


图 7 辉长岩样品声发射 m 值(用“○”表示)和应变-时间曲线(用“●”表示),
图中箭头、短线同图 5, 双线表示加载
(a) 干样品 GNO1; (b) 干样品 GNO8

四、讨 论

1. b 值 据浅田敏给出的关系式 $b = m - 1^{[6]}$, 我们对实验 1—6 的结果进行讨论。在实验 1—6 中, 除开始对样品加载外, 应力状态始终不变, b 值却有几种形态: 稳定

缓慢起伏变化和下降形态,临破坏时 b 值下降加快,或明显回升后再下降,这些与应力状态不完全相关。茂木早期实验认为, b 值与岩石样品不均匀程度有关。根据本实验结果, b 值的多种形态与岩石样品某些性质(岩石的材料常数、组成岩石的矿物的晶体结构等)有关。

在研究材料的流变性质时,经常用到蠕变柔度 $J(t)$ 的概念^[7]。令 $\sigma = \sigma_0 H(t)$, 其中 $H(t)$ 为海维赛德 (Heaviside) 函数(单位阶跃函数)表示某种材料受到应力 $\sigma = \sigma_0 H(t)$ 的作用,应变 ε 将随时间变化。根据应力应变关系得到: $\varepsilon(t) = \sigma_0 J(t)$ 。所以 $J(t)$ 表示在单位应力 $\sigma(t) = 1 \times H(t)$ 作用下应变随时间的变化规律,即表征当应力不变时岩石的蠕变特征。

一般假设岩石介质模型为标准线性固体。根据标准线性固体的本构方程

$$\sigma + P_1 \dot{\sigma} = q_0 \varepsilon + q_1 \dot{\varepsilon}$$

经拉普拉斯变换后

$$J(t) = \frac{1}{q_0} + \left(\frac{P_1}{q_1} - \frac{1}{q_0} \right) e^{-\frac{q_0}{q_1} t} \quad (t > 0)$$

即

$$J(t) = \frac{1}{q_0} \left[1 - \left(1 - \frac{P_1 q_0}{q_1} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right] \quad (t > 0)$$

式中, $\tau = q_1/q_0$, P_1, q_0, q_1 表示材料常数。

实验 3, 4, 5, 6 表明, 同类岩石样品在很短的蠕变过程和较长的过程(超过 5 小时)中 m 值形态相似, 说明材料常数对 m 值的影响更重要。另外, 辉长岩蠕变实验比大理岩蠕变实验难度大, 表明大理岩流变性能强。两种样品在 m 值形态上的差别可能与组成这两种岩石的矿物的晶体结构不同有关。本文不再加以讨论。

2. 关于地震序列类型 迄今为止, 我们已获得了几种主要岩石样品脆性破坏、蠕变破坏和摩擦滑动实验中声发射特征。但无论哪一种实验条件下, 我们都习惯于把样品大破坏认作主震, 大破坏前的破裂为前震, 其后为余震。但余震情况从目前的实验中难以得到。

基于这一认识, 岩石蠕变破坏可能较容易形成前-主-(余)型序列。在稳态阶段, 应力基本不变, 应变(轴向应变)一直在进行, 如图 5, 6, 7 中虚线表示的变形-时间曲线所示。在我们进行的另一些蠕变实验中, 还观测到声发射增多时位移也在加速。由于应变加速使样品发生局部破坏形成前震活动。局部破坏后, 应变有所恢复。

地震序列类型除与岩石介质不均匀性有关外, 还与应力水平有关。文献[8]指出, 具有前震、主震和余震的序列, 通常发生在中等预应力和破裂强度存在的情况下。显然, 蠕变应力不是使岩石样品破坏的最高应力, 样品破坏包括时间因素的作用, 并使应力不变时应变始终进行。这和加载实验中不断对样品加载最后达到岩石破裂强度的最高应力是不一样的。

由蠕变破坏形成前一主-(余)型序列, 其前震活动大体分为两类: 一类出现于蠕变第三阶段。特征是声发射信号多, 强度不等但逐步升级, 如 1975 年海城地震, 大震前三天震中区小震活动突然增加, 逐步升级直到主震发生; 另一类出现于蠕变第二阶段, 特别是这一阶段后期。特征是声发射信号不多, 但信号强, 如 1976 年唐山地震, 震前震中区没有小

震,但大震前几年有中强地震活动,如1970年丰南地震,1974年滦县震群。第一类一般叫直接前震,第二类称之为间接前震。

在应力状况不变时形成前震活动还与震源区介质不均匀程度有关。在稳态蠕变阶段,声发射有时突然增加,反映样品局部破坏。介质愈不均匀,局部破坏愈易发生。

五、结 论

本实验基本上完成了辉长岩和大理岩两种完整样品蠕变三个阶段的实验过程。根据实验获得的数据,讨论了蠕变三个阶段中声发射特征,并将这些特征与地震孕育过程中某些地震活动图象进行了联系,得到以下三点认识:

1. 考虑岩石蠕变破坏机制。在地震孕育过程中, b 值可以出现多种形态:在稳态阶段, b 值稳定于某一低值或下降。后期或进入加速蠕变阶段, b 值下降加快,或有明显恢复后下降,破裂前 b 值处于低值。这些形态可能作为地震发生的中短期前兆信息。

2. 考虑岩石蠕变破坏机制。在地震孕育过程中,可能出现两类前震活动。一种类型出现于稳态阶段后期,这类前震次数不多,但信号强;另一类在加速蠕变阶段出现,前震多且强度不等。

3. 岩石蠕变破坏有可能作为前-主-(余)型地震序列的一种成因,但并不是所有这类序列均由蠕变破坏产生。

本项工作曾得到耿乃光副研究员的多方指导,笔者向他深表谢意。作者感谢郝晋升、方亚如和蔡戴恩同志在实验过程中给予的大力协助。

本文系地震科学联合基金会资助项目。

参 考 文 献

- [1] Mogi, K., 1962. Study of elastic shocks caused by the fracture of heterogenous materials and its relations to earthquake phenomena. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **40**, 125—173.
- [2] Scholz, C. H., 1968. The frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, **58**, 399—415.
- [3] 茂木清夫, 1981. 地震——その本性をさぐる, 東京大学出版会, 東京.
- [4] 平田隆幸、柳谷俊、寺田孚, 1985. 大島花崗岩におけるクリープ時のAE発生時系列につて. *地震*, **38**, 159—172.
- [5] 石本巳四雄、飯田汲事, 1939. 微動計による地震観測(1). *地震研究所彙報*, **17**, 443—478.
- [6] 浅田敏、铃木次郎、友田好文, 1950. 地震の頻度とエネルギーについて. *地震*, **2**, 3.
- [7] 尹祥础, 1985. 固体力学, 地震出版社, 北京.
- [8] 陈运泰、L. Knopoff, 1988. 地震序列的模拟, 陈祥熊译. *世界地震译丛*, **1**: 9—19.

THE EXPERIMENTAL STUDY OF ACOUSTIC EMISSION DURING CREEP OF ROCKS

LÜ PEILING, WU KAITONG AND JIAO YUANBI

(Center for Analysis and Prediction, State Seismological Bureau, Beijing 100036, China)

LI JIHAN AND LIU XIAOHONG

(Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, Beijing 100081, China)

Abstract

Under normal temperature, uniaxial compression, creep experiments with whole samples of Gabbro and Marble rocks are made. According to the data obtained by tests, AE activities during three stage of creeping process are discussed. At the stage of instantaneous creep, AE events increase slowly with loading for samples; at the steady creeping stage, large AE signals appear probably on a lower background of AE action; the m -value which describes the relationship between AE amplitude and frequency remains stable and at a low value or decreases. At the accelerated creeping stage, AE activities increase and the m -value decreases quickly or decreases again after recovery. These experimental results are related to the quality of rock samples.

The AE activities during the three stages of creeping and fracture process are compared with the seismic patterns (for example b -value, foreshocks) during the seismogeny of a strong earthquake. Finally, it is pointed out that possibly the mechanism of creep fracture of crustal rocks forms the foreshock-mainshock-aftershock earthquake sequence.