

具有多种断层结构岩样的形变 和破裂特征的试验研究^{*}

胡毅力¹, 许 峻², 许昭永², 陈顺云², 张永安³, 张晓曼¹

(1. 云南大学 地球物理系, 昆明 650091; 2 云南省地震局, 昆明 650224

3. 昆明理工大学 激光研究所, 昆明 650041)

摘要: 在岩石板上切割出多条切缝并以石膏填充, 将其分为 3 个构造特征区: A 区 (断层交汇区)、B 区 (左行左列岩桥区)、C 区 (右行左列岩桥区)。采用双轴加压、定点应变、声发射信息系统和实时全息干涉计量方法 (激光) 进行观测研究。结果表明: 在岩样破坏孕育过程中, 各个特征区都出现了特大破裂。每个特大破裂发生前定点应变、激光干涉条纹图 (应变场) 和声发射信息都出现了特征变化。特大破裂的发生有先后, 其前兆特征的出现也有先后, 并且各区有各自的特点, 某些前兆还可能在各区之间交替出现。研究认为, 三个区的断层结构性质不同, 这就导致了不同的破裂顺序, 甚至产生不同的前兆现象。

关键词: 多个切缝岩样; 多种断层结构; 激光全息计量; 定点应变; 微破裂信息分析

中图分类号: P315.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-0666(2010)03-0320-09

0 引言

目前, 对地震机理的实验研究主要分为两类: 一类是摩擦实验, 另一类是破裂实验。介于二者之间的方法是在岩样上刻出一条裂缝进行破裂观测研究。关于试样上预刻单裂缝在不同受力时裂纹的形成、扩展的研究较多 (李世愚等, 1989; 赵豫生等, 1988; Huang et al 1990; 赵永红等, 1992, 1993; Nolen-hoeksema Gordon, 1987), 关于预刻双裂缝的相互作用对裂纹的形成、扩展的影响的研究也较多 (Kranz 1979; Wang et al 1987; 杜异军等, 1989; 张之立, 方兴, 1989; 张之立等, 1989), 但对预刻多裂缝 (3 条以上) 的研究甚少。地震的形成机制非常复杂, 它并不总在断层上发生, 也并不总在同一地点发生, 同一断层或块体交界处也可能发生多个大地震。这些地震在交界区域内何处形成、发生顺序怎样、前兆特征如何等问题目前研究不多。针对这些问题, 我们在实验中将岩样切割出 4 条裂缝, 以雁列式断层组成块体边界, 并制造 3 个性质不同的构造区, 进行初步研究。前人曾以焦散阴影光学

方法结合声发射定位对有机玻璃试样进行研究 (许昭永等, 2002; 陈顺云等, 2002; 胡毅力等, 2006)。杨润海等 (2006) 曾对拼合岩样作形变场研究。陈顺云等 (2003) 研究了多切缝岩石板试样破坏孕育过程中的声发射特征。本研究中, 我们依然用实时全息干涉计量技术、声发射及多点应变测量对岩石试样进行多种物理现象的观测研究。

1 试验方法

1.1 试样及加载

试样采用云南大理产 200 mm×200 mm×15 mm 粗粒花岗岩和大理岩石板 (各做了两个试件, 本文叙述花岗岩上的实验结果), 在其上用金刚砂锯片切割出雁列式断层组成的 V 形块体边界 (图 1a), 切缝以石膏填充。把样品分为 5 个构造特征区: A 区 (断层交汇区), B 区 (左行左列岩桥区), C 区 (右行左列岩桥区), D 区和 E 区在试样上方切缝端部处。在防震平台上架设双轴小型压机, 垂直向和水平侧向压力最大可达 3.0×10^5 N。在岩样上布设多个应变片和微破裂信息检波器

* 收稿日期: 2009-09-27.

基金项目: 云南省自然科学基金 (2007D0BM) 资助。

(图 1a)。加力方式：实验开始，在试样侧向和垂直向（X 和 Y 方向）同步加力，达一定程度后（ $\sigma_x=\sigma_y=5\text{ MPa}$ ）大致保持 σ_x 不变，分阶段增加 σ_y ，以便能够记录到破裂孕育过程中激光条纹图

像的变化，直到试样最后断裂。从一开始加力即同时开始应变和微破裂（声发射）记录，而从荷载超过 60%破裂应力的某一阶段开始（应变）图像激光摄影记录。

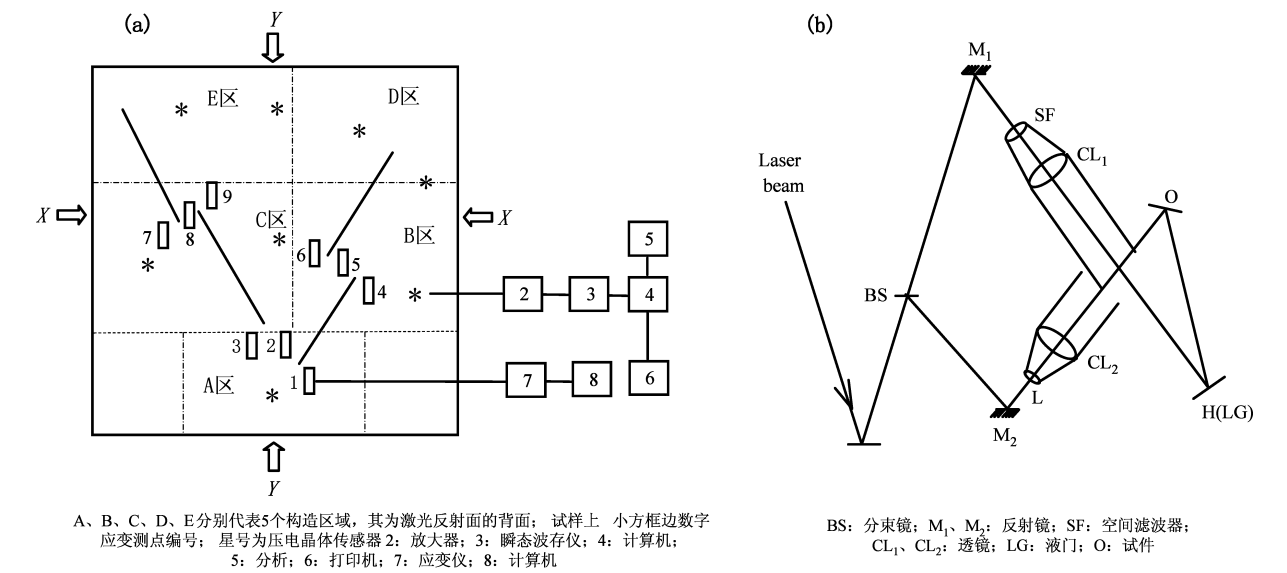


图 1 实验装置简图试样构造、加力方式及仪器布置
框图 (a) 和实时全息干涉计量摄像装置 (b)

Fig 1 Scheme of the experimental setup block diagram of the sample structure way of bading and apparatus arrangement (a) and set-up of photography by real-time holometry (b)

1.2 应力场检测实时全息干涉计量方法

实验采用的实时全息干涉摄影系统由带有液门的实时全息干涉系统、摄像机及具有连拍功能的数字照相机组成。光路布局为反射方式，如图 1b所示。此外，我们还采用了用物光再现的参考光和原参考光产生的干涉图纹进行检测的方法，改善了光场的质量，并可在液门后的位置进行记录（熊秉衡等，2002）。

1.3 破裂事件检测和应变测试

(1) 破裂事件检测

在岩石试样表面布设 8 个 PZT 压电晶体传感器（图 1a 中星号所示），用微破裂信息采集存储分析系统记录（许昭永等，2002）。

(2) 应变测试

在岩石试样表面布设 9 个应变测点（图 1a 中小方框及数字所示），用中国地震局地质研究所构造物理实验室研制的 LB-2 数字应变仪观测岩石破裂孕育过程中的应变变化。同时，在压机拉杆上布设应变点，以测定压力变化。LB-2 数字应变仪有 16 个通道，每道采样率为 1~1 000 Hz，可调，

每道（A/D 位数）16 Byte 与计算机相连，数据直接进入计算机。

2 分析方法

2.1 应力应变

试件受力后，光程要发生相应的变化：一是因试件厚度的微小变化；二是因试件折射率的微小变化。对于平面应力（ $\sigma_3=0$ ）， $\alpha(\sigma_3)$ 方向的应变

$$\epsilon_z = -(\nu/E)(\sigma_1 + \sigma_2).$$
 (1)

对于光学各向同性材料，物光和参考光之间的光程差为

$$\Delta S = d c (\sigma_1 + \sigma_2).$$
 (2)

前表面反射 $G = -\frac{\nu}{E}$ 透射 $G = A - (n-1)\frac{\nu}{E}$. (3)

在透射光场中，干涉条纹的亮纹条件为 $\Delta S = N\lambda$.

于是在 N级亮条纹处的 z方向应变为

$$\epsilon_z=N\lambda/[n-(AE/v)-1]d$$
 (4)

其中 d为试件厚度, A为绝对应力光学系数, v为泊松比, E为杨氏模量, n为折射率, $\sigma_i(i=1,2,3)$ 为主应力, C_r, C_t 分别为反射和透射系数; N为条纹序数, λ 为波长, $n-(AE/v)$ 可视为试件的有效折射率。于是, 由 (4) 式可定量计算 z方向试件的应变 ϵ_z 。通过 z方向应变与主应力之和的关系式 (1) 可以计算主应力之和的分布。

对于同样材料, 反射系数与透射系数二者之比

$$R=\frac{C_r}{C_t}=\frac{2}{n-1}$$
 (5)

对于有机玻璃, 取 $n=1.5$ 则 $R=4$

这表明对于同样材料的试样, 用透射式可以一次完成的观测研究过程, 用反射式则需几次才能完成。前文所述分阶段加压完成试验即因此不得已而为之。

2.2 微破裂定位

因试件为薄板, 微破裂定位采用平面定位, 采用与地震定位类似的方法 (许昭永等, 2002)。

2.3 声发射强度的 b值分析

利用尾波持续时间 (T) 估算声发射事件强度。即充分考虑背景噪音后取一合理值作为尾波截断时峰值 (本文取为 0.067 V, 满刻度为 1.0 V); 选加压过程中某一事件作为参考, 本文取第一个事件作为标准事件 (参考值), 计算出下式中的常数 a_1, a_2, a_3 值, 从而得到以此事件为标准事件的震级 (强度) 计算公式:

$$M=0.0234\lg T+0.0238\Delta-0.0002\Delta^2$$
 (6)

其中, Δ 为破裂点到接收点的距离, 单位为 mm; T为波列 (尾波) 持续时间, 单位为 s 每道记录的“震级”均以此式进行计算, 取平均值作为该事件“震级”即 AE强度 (王彬等, 1999)。

对于天然地震, 有著名的古登堡—里克特经验关系

$$\lg N=a-bM$$
 (7)

其中, M为震级, N为地震发生频度或累计频度, a, b为常数, b即为通常所说的 b值, Lockner和

Byerlee (1993) 的研究表明, 此关系对于声发射事件也同样适用。

3 大理花岗岩的实验结果

图 2a为加载过程示意图。从加载开始, 即开始记录声发射和几个测点的应变变化。在 31.7 MPa时保持压力稳定, 制作干板 (需 30 min 左右) 作第一次全息实时观测。压力再升高约 7 MPa时条纹全部消失, 再次保持压力稳定, 制作干板, 重新开始新一轮观测。在 45.0 MPa时最后一次制作干板, 做包括破坏在内的观测研究。试样的最终破坏应力为 47.5 MPa 在制作干板时, 应变和声发射继续处在连续采集记录状态。

前人对于在 60%破裂应力之前, 波速、形变、声发射等的特征变化的研究很多, 结果较明确, 同时由于反射式光测较为困难, 本文仅对较高应力后的变化特征加以研究。

3.1 全息图像及定点应变

图 2b为在第一次保压制作干板之前各测点应变随压力增加的变化过程。从图中可看出, 此时间段各点应变都随压力增加而增大, 只是变化的多少不同, 并无突跳、波动等特殊变化。图形上的抖动为手控加载不稳所致。对于声发射事件, 除试样边角较多外, 其余成“满天星”状零散分布 (图略)。

图 2c为在第一次保压制作干板之后, 应力从 32 MPa升高到 39 MPa时各测点的应变变化。从图中可看出, 此时间段有些点的应变随压力增加而增大很多, 其中一些点的应变甚至较剧烈, 出现突升或突降。经查看, 这些点分布在 A区。

图 3为第一次制作干板之后应力从约 32 MPa升高到 39 MPa的实时全息观测。从图中可看出, 随时间增加压力增大, 条纹越来越密。并且试样 A区出现异常: 图像由几部分特征条纹组成, 如我们先前所述的应变空区, 即高应变区包围着的相对低应变区, 其中, 靠近上边切缝 (断层) 端点处的条纹最密。在其背后的相应位置布设的应变测点也显示此时出现较大应变 (图 2c)。这一阶段的微破裂空间分布如图 6a所示, 本阶段微破裂多出现在 A区。

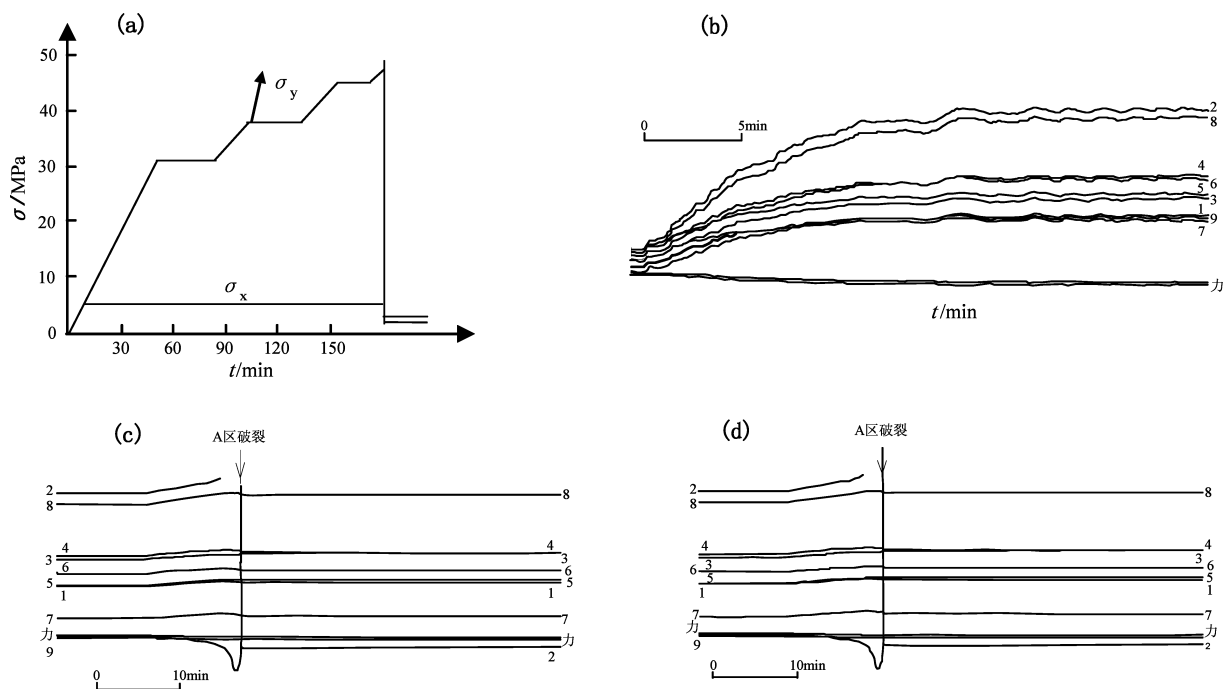


图 2 加力方式及各测点应变随压力增加的变化

(a) 加载过程示意图；(b) 第一次保压（32 MPa）制作干板之前各测点应变随压力增加的变化；
(c) 第一次保压制作干板之后（32 ~ 39 MPa）各测点应变随压力增加的变化；(d) 试样破坏前
（应力 45 MPa 之后）的应变变化（A 区：1、2、3 B 区：4、5、6 C 区：7、8、9）。

Fig 2 Loading pattern and the variation of strain at different measuring points with the increase of load
(a) Schematics of loading process (b) Variation of strain at different measuring points with the increase of load before the load was kept constant (stress is 31.7 MPa) while making holographic plate for the first time (c) Variation of strain at different measuring points with the increase of load (from 32 MPa to 39 MPa) after the load had been kept constant while making holographic plate for the first time (d) Strain variation on the sample before the failure of rock

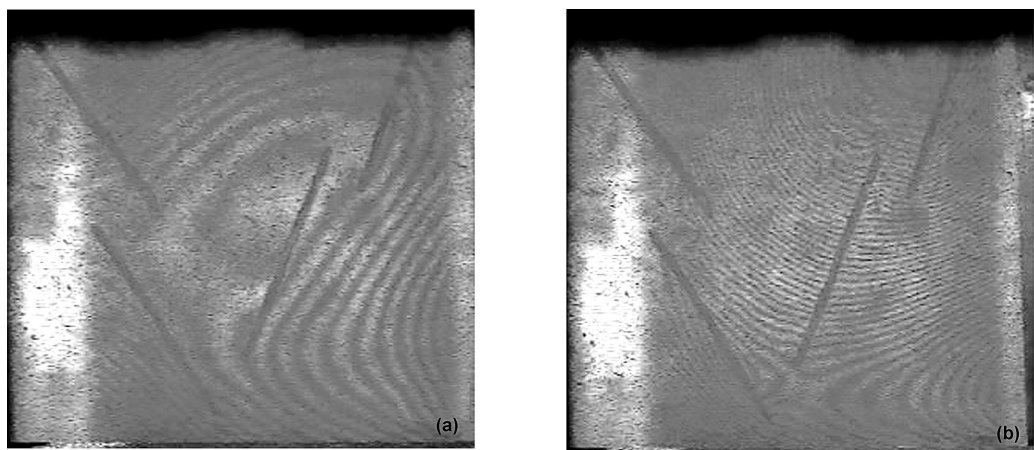


图 3 第一次保压制作干板之后（应力从 32 MPa 到 39 MPa）
实时全息观测（a）时间靠前；（b）时间靠后

Fig 3 The first round of real-time holographic observation after the load had been kept constant while making holographic plate for the first time—the stress is from 32 MPa to 39 MPa in which (a) is of an earlier and (b) is of a later time

图 4 为第二次保压制作干板之后（应力约从 39 MPa 到 45 MPa）的实时全息观测。从图中可看出，随时间增加压力增大，条纹越来越密，试样中部最密。同时，条纹形状出现畸变：先是 A 区从光滑连续型变成在切缝处转折，随后 B 区条纹由光滑变曲折，接着转向将两预制切缝端部横向相连（图 4d）。这一阶段的微破裂空间分布如图 6b 所示，本阶段微破裂从 A 区向 B 区迁移，并且多出现在 B 区。

在第三次保压制作干板（应力大于 45 MPa）

之后，随压力增加临近破坏，条纹变密速度更快（图 5a）：A 区条纹很快消失；B 区依然出现两预制切缝端部横向相连的条纹，并且条纹更密，奇变形状更清晰。随后 C 区也出现清晰的奇变（图 5b）：条纹在切缝处由连续逐渐错断。在破坏之前，条纹全部消失。A、B、C 三个区都未出现如图 5c 所示的宏观裂缝。这一阶段的微破裂空间分布如图 6c d e 所示，本阶段微破裂从 B 区向 C 区来回迁移，并且最终多出现在 C 区。试样的断裂情况如图 5c 所示。

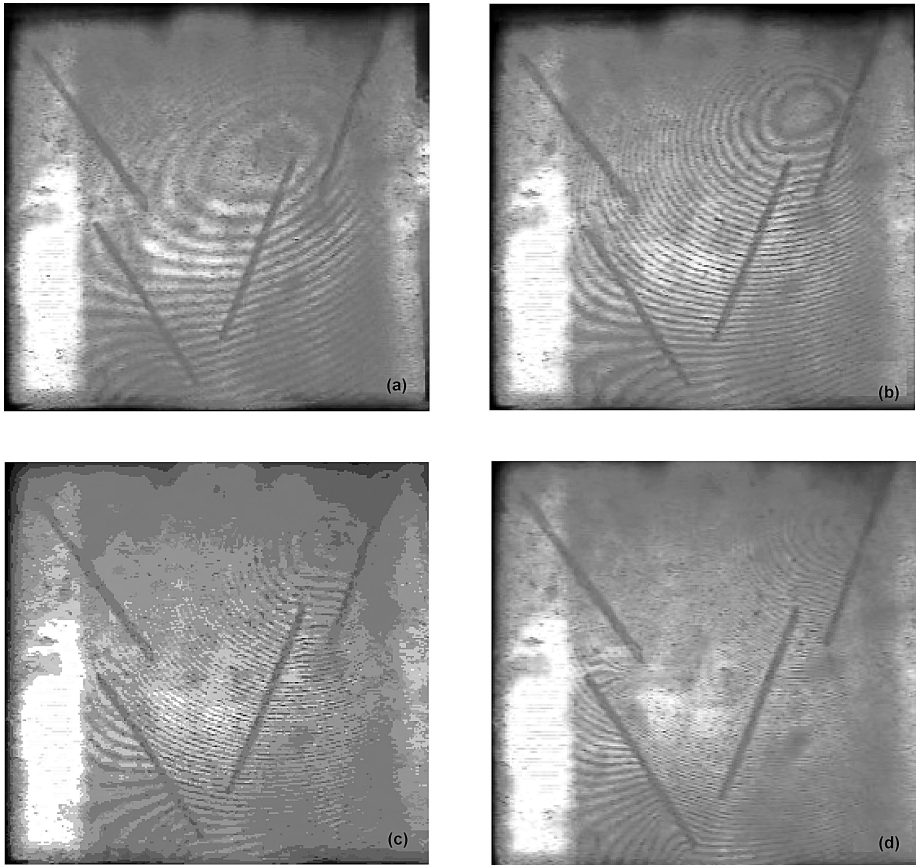


图 4 第二次保压制作干板之后的实时全息观测
(a) 时间靠前；(b) 时间居中；(c) 时间居中；(d) 时间靠后

Fig 4 The second round of real-time holographic observation after the bad had been kept constant while making holographic plate for the second time—the stress is from 39MPa to 45MPa in which (a) is of the earliest time (b) and (c) are in the intermediate while (d) is of the latest time

同时，A、B、C 区先后出现剧烈的应变变化（图 2d），临近破坏时大多数测点的应变都出现了显著的下降。并且 B 区比 C 区先出现大幅度突降。茂木清夫（1984）和许昭永等（1989）的结果是，

临近破坏时有的测点应变（突）升，有的（突）降，有的平缓，甚至有的反向突变。本实验结果之所以与前人的结果不同，是由于布点位置及观测方式不同。

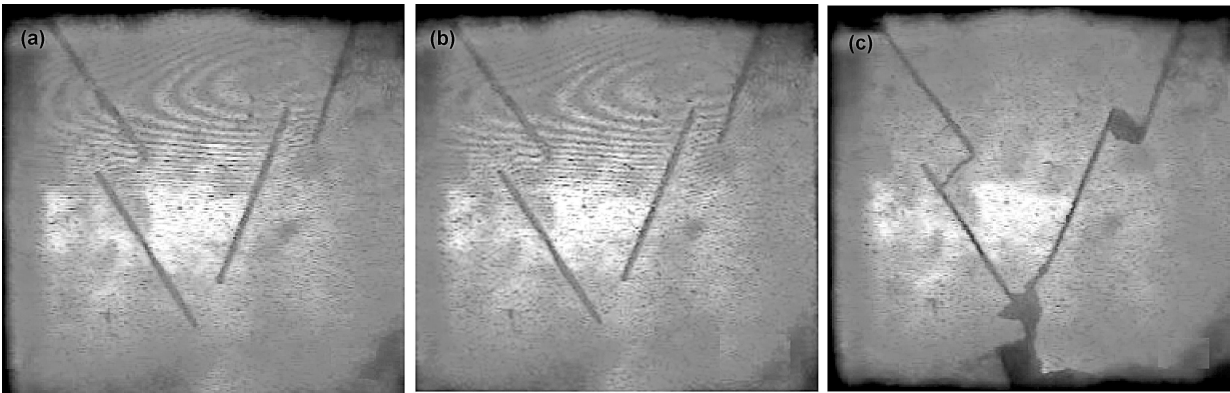


图 5 第三次保压制作干板之后（邻近主破裂前）的实时全息观测
(a) 时间靠前；(b) 居中；(c) 时间靠后

Fig. 5 The third round of real-time holographic observation after the load had been kept constant while making holographic plate for the third time—the stress is great than 45MPa just before the failure of rock in which (a) is of the earlier time (b) is of the later while (c) shows the position of macrocracks

3.2 微破裂的时间、空间分布

声发射事件定位结果如图 6 所示。对声发射事件按其序号进行分解，分别研究 AE 事件发生的时空特征。结果如下：

(1) 声发射有区域群发性，在一定时间段内，绝

大多数声发射总在某一特定位置发生。从图 6a~e 看出，声发射主要分为三个区域：A 区、B 区和 C 区。

(2) 声发射具有成群的迁移性，即在一个地方发生了一群之后再向其它地方迁移，在迁移初期，声发射在原发生地与迁移地两处交替发生。

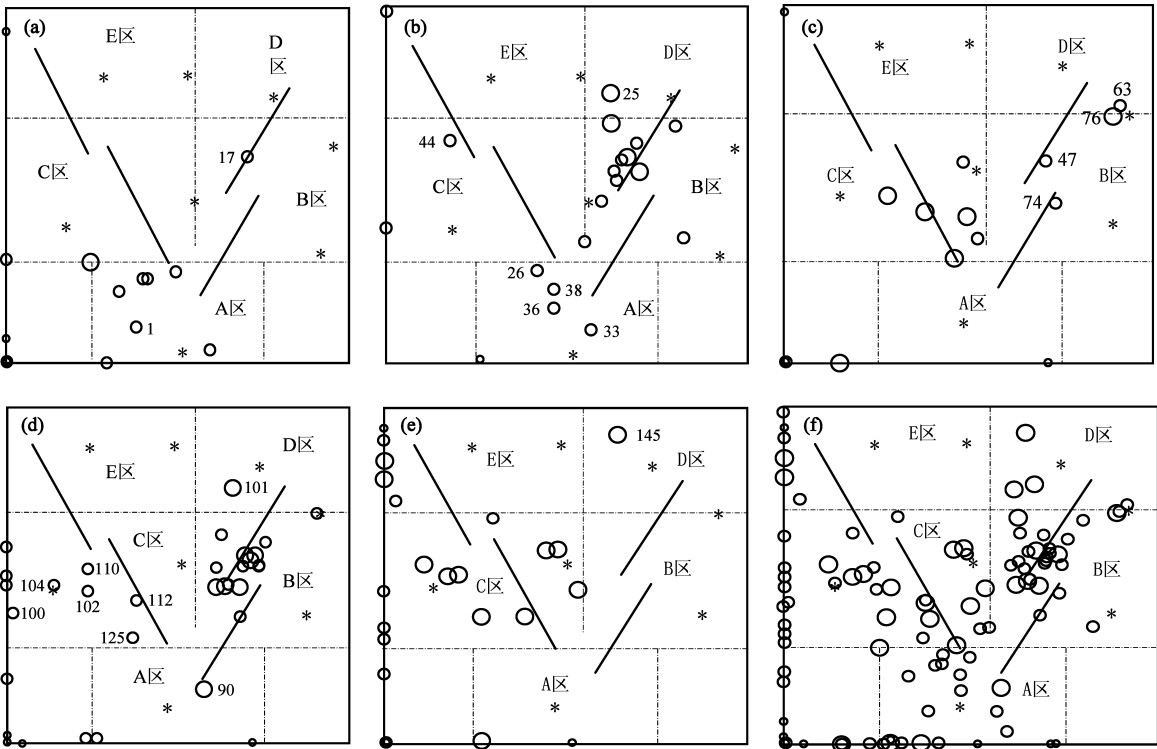


图 6 声发射事件定位结果图（圆圈表示 AE 事件，圈越大事件越大；星号表示 PZT 探头；圈边数字表示 AE 事件的序号）
(a)应力在 32 ~ 39 MPa 之间；(b)应力在 39 ~ 45 MPa 之间；(c)、(d)和 (e)应力均大于 45 MPa (f)应力从 32 MPa 到破裂

Fig. 6 Variation of microcracks (AE events) location with time (circle AE event the larger the circle the larger the event *: PZT transducer numeral by a circle represents the serial number of event occurrence)
(a) 32 MPa< stress< 39 MPa (b) 39 MPa< stress<45 MPa (c), (d), and (e) stress> 45 MPa (f) stress from 32 MPa to failure
© 1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 6a显示 AE 事件始发于 A 区,到了第 18 个事件以后,向 B 区迁移,此时 A 区 AE 事件尚未停止发生,还会零星地发生。从图 6b 中 A 区事件序号可以看出 A 区的事件已不是成群发生,主发射场已明显转移到 B 区,随后向 C 区迁移(图 6c),在 C 区发生了一系列事件以后回到 B 区(图 6d),主发射场仍明显地在 B 区。类似于 A 区与 B 区之间 AE 事件交替发生一样,此时在 B 区与 C 区之间 AE 事件也交替发生(图 6d),A 区从此时到最后都很少再有事件发生。到了加压后期,事件完全迁移至 C 区,A 区和 B 区这两个 AE 事件发生的主要场所则几乎再无事件发生。

(3) 相对较大的声发射事件,每个时期每个区域均有发生,但 C 区在最后时期相对集中(图 6e),并在 C 区即主大断裂区外围空,该处岩桥区断裂后试样崩溃。

3.3 声发射的 b 值变化

本实验岩样中含有多条宏观裂缝,含有多个不同断层结构的构造区。笔者在研究岩样整体 b 值

(图 7a)的同时,也根据不同的区域(图 7b c d)分析了相应的声发射 b 值。

Scholz (1968) 的研究结果表明,在主破裂(破坏)发生前,岩样 b 值下降。本实验仅重点比较在 60% 破裂应力后整个试样 b 值与单个区域 b 值的关系。图 7 展示了试件不同区域声发射频度与强度的关系。它清晰地显示出, A、B、C 单个区域的 b 值(图 7b c d)都比整个试样的 b 值(图 7a)偏低,其中 C 区更为明显(图 7d)。结合前面的微破裂定位及强度分析,可知主大断裂区发生最后崩溃前, b 值会有明显减小现象。

4 讨论与结论

4.1 敏感点(破裂易发点)与多点破裂

大地震虽然多数发生在块体边界上,但是在块体内部特别是邻近边界处也有发生,即使是发生在边界上也并不总在同一地点。本试验尽量简化但又尽可能设置一些可重复的复杂因素,使

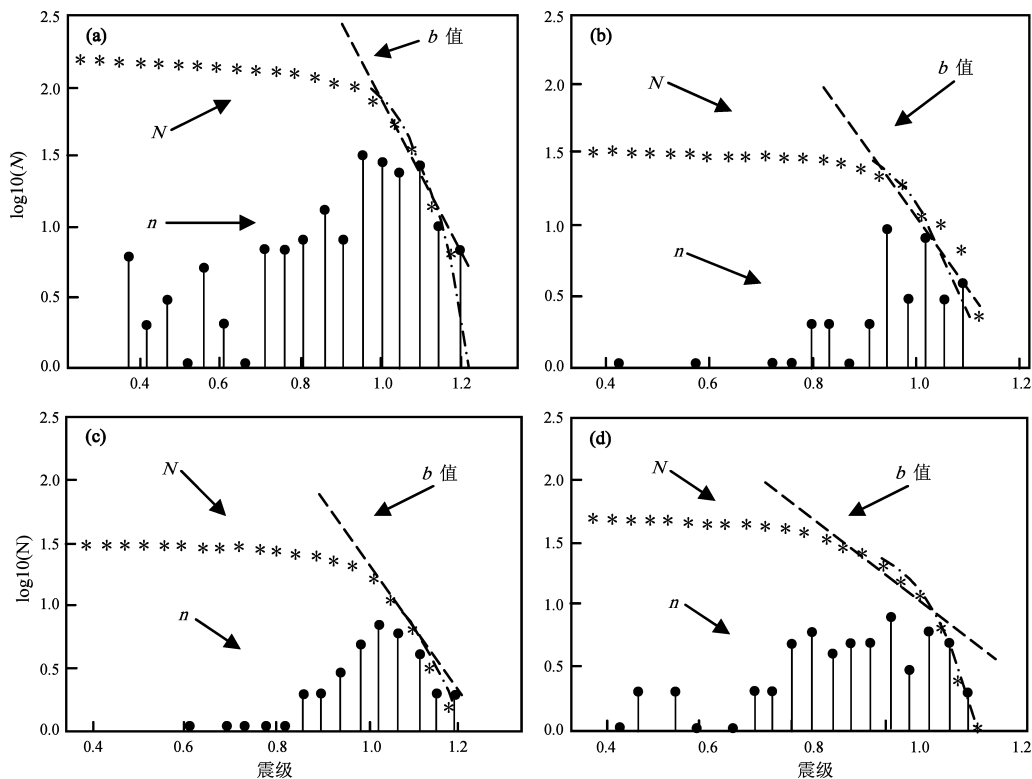


图 7 试件不同区域声发射频度与强度的关系 (n 频率; N 累积频率)
(a) 整个试样; (b) A 区; (c) B 区; (d) C 区

Fig 7 Relation between the AE frequency and AE intensity in different zones of the sample
(n frequency N accumulating frequency)

(a) The whole sample (b) Zone A of the sample (c) Zone B of the sample (d) Zone C of the sample

研究结果既有重复性又有代表性和一般性。如图 1a 所示, 试样上有 4 条切缝, 分 5 个区, 其中 D、E 区有压块边界效应暂不分析。A 区为两组雁行裂纹的交汇点, B 区为张性雁行裂纹相交点, C 区为压性雁行裂纹相交点, 三点为不同构造相交处, 为破裂事件发生的敏感区域。加压导致了不同块体之间发生轻微相对变形, 块体相交区域为受力集中区, 事件群正好发生于此。由于交汇点的不同性质, 导致了不同的破裂顺序和不同的前兆特征。从断裂力学的观点看, A 区处于两条裂纹端部受力扩展同向运动 (即加强) 区, B 区处于两条裂纹端部受力扩展相向运动区, C 区处于两条裂纹端部受力扩展相背运动区。在相同条件下, A 区先破裂, C 区最后破裂。由此可说明本实验的意义: 一是有多个破裂区, 二是多组破裂有一定的先后顺序; 三是在几个破裂区交替发生大破裂。这为野外地震研究提供了有效方法。当然, 这不是唯一方法, 如断层的间断胶结、愈合或分段转折也可造成多个破裂区。

块体的强度跟宏观裂纹之间的距离与位置以及裂纹数量都有着密切关系, 要解决此问题还有很多情况必需考虑, 需另作研究。

4.2 多个破裂区的前兆特征

预设多个破裂区的目的是研究多区内出现的前兆的异同及时间上的差异。本实验对形变 (包括定点应变和干涉图像)、微破裂 (包括空间时间分布, b 值) 等进行观测研究。从干涉图像上看, 3 个区都有条纹变密的过程, 但条纹形状及其演变却有很大差异: A 区有空区和转折, B 区转向, C 区略有错断。这标志着应力场及主应力方向都发生了变化。定点形变为一小范围的平均应变, 其突变一陡升或陡降标志此处出现大破裂, 此前的特征变化为此区的前兆。每个区都有大破裂发生, 此前也都有小破裂发生, 条件合适, 本区的 b 值也减小, 频谱特征也有变化。这就是说, 多区破裂, 每个区都有可观测到的前兆变化。

实验过程中, 往往此区发生大破裂时彼区也有反映, 如低频小破裂、形变特征变化等, 单从某一特定量很难判断哪区何时发生大破裂 (地震), 须综合分析比较才可得出结论。

4.3 干扰因素的排除

首先要排除一些不确定的或者是引起误会

必须考虑声发射产生的空间特征。不同区域, b 值不尽相同, 用所有事件去做统计并不一定能很好地说明问题, 特别是对多点破裂。而进一步把区域细分, 在小的区域里, 声发射事件会明显减少, 给统计的有效性带来考验。频度—能级关系会显示出“失真”现象。但累计频度则要好得多, 用累计频度—能级关系可得到更可靠的结果。另外, 由于弹性波的衰减, 观测系统的触发电平门槛在样品空间上并不均匀, 远离触发传感器的声发射信号必须达到较高的能级才能被记录到, 小事件必然丢失, 这必然导致声发射记录低能级段上的频度—能级关系不符合负相关模式。考虑到环境噪音和大事件限幅的情况, 整个实验过程中所用触发电平较高, 上述的频度—能级关系只会在较高能级时才表现出负相关性 (图 7)。

本文所采用的声发射定位, 并非实时速度, 这无疑给定位结果带来了误差。如前所述, 经过已知发射源和正演反复检验, 可以保证定位结果对于我们所做的研究来说是可靠的。

再者从观测上尽量减少干扰。压低干扰背景, 提高观测精度是常用的方法, 本文不再赘述。

综上所述, 我们采用具有多个不同性质的断层结构岩样, 模拟带有 V 型构造的块体活动特征, 研究岩样的多点大破裂, 发现其前兆特征是明显的, 复杂性也是突出的, 要取得更大进展, 尚需进一步研究。

参考文献:

- 陈顺云, 许昭永, 杨润海, 等. 2002. 含多组雁列构造试样的特征位移场与声发射的关系——应变空区的实验与理论探讨 [J]. 地震学报, 24(6): 627—637.
- 陈顺云, 许昭永, 杨润海, 等. 2003. 含 V 形构造花岗岩块体破坏过程中的声发射特征 [J]. 地震地质, 25(2): 317—326.
- 杜异军, 马瑾, 李建国. 1989. 雁列式裂纹的相互作用及其稳定性 [J]. 地球物理学报, 32(专辑 1): 218—231.
- 胡毅力, 文丽敏, 杨润海, 等. 2006. 孕震过程中几个典型形变场的实验研究 [J]. 地震研究, 29(2): 182—187.
- 李世愚, 尹祥础, 李红, 等. 1989. 闭合裂纹面相互作用过程中的多点破裂现象及其分析 [J]. 地球物理学报, 32(专辑 1): 174—182.
- 李世愚, 滕春凯, 卢振业, 等. 2000. 典型构造微破裂集结的实验研究 [J]. 地震学报, 22(3): 278—287.
- 茂木清夫. 1984. 地震预报的基础研究 [J]. 国家地震局科技监测司. 大陆地震活动和地震预报国际学术讨论会论文集. 北京: 地震出版社, 375—402.
- 王彬, 许昭永, 赵晋明, 等. 1999. 含固体试样破裂孕育过程中声发射的强度特征及其地震学意义, 地震地质, 21(4): 411—416.

- 王仁, 赵豫生, 陈颢, 等. 1986. 大理岩试件中裂缝的逆向共扼剪切破裂[J]. 地震学报, 8(2): 191—196.
- 熊秉衡, 王正荣, 吕晓旭, 等. 2002. 一种新型的实验地震学光学测量系统[J]. 中国激光, 29(4): 376—380.
- 许昭永, 舒燕华, 包一峰. 1989. 单轴压缩下填充物灌溉切口岩样的破裂特征/[C] 实验地球物理研究文集. 北京: 地震出版社, 269—274.
- 许昭永, 杨润海, 赵晋明, 等. 2002. Y形块体交界处多点大破裂的模拟实验研究[J]. 地球物理学报, 45(增刊): 214—224.
- 杨润海, 许昭永, 胡毅力, 等. 2006. 组合岩样破裂孕育过程中应变场的动态变化特征[J]. 地震研究, 29(4): 360—365.
- 张之立, 方兴. 1989. 含非均匀岩板中混合型裂纹扩展过程实验[J]. 地球物理学报, 32(专辑 1): 183—193.
- 张之立, 方兴, 阎红, 等. 1989. 拼接岩板受压混合型裂纹扩展过程位移和应变场的光测实验[J]. 地球物理学报, 32(专辑 1): 194—203.
- 赵永红, 黄杰藩, 王仁. 1993. 破裂带发展的扫描电镜实验研究及其对地震前兆的启示[J]. 地球物理学报, 36(4): 453—462.
- 赵豫生, 陈颢, 王仁. 1988. 岩石裂纹附近的变形局部化和破坏——激光全息干涉法的应用[J]. 地球物理学报, 31: 294—305.
- Horii H, Nemat-Nasser S. 1985. Compression-induced microcrack growth in brittle solids[J]. JGR, 90: 3105—3125.
- Huang JF, Chen G L, Zhao Y H, et al. 1990. An experimental study of the strain field development prior to failure of a marble plate under compression[J]. Tectonophysics, 175: 269—284.
- Kranz R L. 1979. Crack-crack and crack-pore interactions in stressed granite[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 16: 37—47.
- Lockner D, Byerlee J D. 1993. The role of acoustic emission in the study of rock fracture[J]. Int J Rock Mech Min Sci & Geomech Abstr, 30: 7883—899.
- Nolen-hoeksema R C, Gordon R B. 1987. Optical detection of crack patterns in the opening-mode fracture of marble[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 24: 135—144.
- Rudnicki J W, Kanamori H. 1981. Effects of fault interaction on moment stress drop and strain energy release[J]. JGR, 86: 1785—1793.
- Scholz C H. 1968. Frequency-magnitude relation of microfracturing in rock and its relation to earthquakes[J]. BSSA, 58: 399—415.
- Wang R, Zhao Y, Chen Y, et al. 1987. Experiment and finite element simulation of X-type shear fractures from a crack in marble[J]. Tectonophysics, 144: 141—150.

Experimental Study of the Characteristics of Deformation and Fracture of Rock Block with Various Structure of the Fault

HU Yi-li¹, XU Jun², XU Zhao-yong², CHEN Shun-yun²

ZHANG Yong-an³, ZHANG Xiao-man²

(1. Department of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming 650091, Yunnan, China)

(2. Earthquake Administration of Yunnan Province, Kunming 650224, Yunnan, China)

(3. Laser Institute, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650041, Yunnan, China)

Abstract

V-shaped block boundaries consisting of en echelon faults (slots or prefabricated cracks) were cut in a coarse-grained granite board. The slots were filled with gypsum. According to the structural characteristics, the board was divided into three zones: Zone A (where the faults converge), Zone B (where the faults form left-lateral and left-stepping rock bridges), and Zone C (where the faults form right-lateral and left-stepping rock bridges). An observational study was made by means of biaxial loading, fixed-point strain measurement, AE information system, and real-time holometry (laser). Results are as the following: All extra-fractures emerge in various structural zones during process of preparing failure of the sample. Before extra-fracturing, the variation characteristics such as the strains at measuring points increased with the increase of stress, message of AE events and fringes are observed by real-time holometry. Extra-fractures occurred in order, and the precursors of the extra-fractures emerged in order too. The three zones had their own characteristics with regard to the fracturing. Some precursors emerge alternately in various zones. When examined from the structural characteristics, it can be seen that the three zones are places where different structures meet and therefore are sensitive sections for events to occur. This has led to different orders of fracture or even resulted in different precursors.

Key words: prefabricated cracks; various structure of fault; laser holometry; rock block; strain; micro-crack analysis