

# 断层交汇区附近的变形特点 与声发射特点的实验研究\*

马 瑾 张渤涛 许秀琴 王宝生

(国家地震局地质研究所)

## 摘 要

把昌平花岗岩切割成 20 多种含两组断层交汇情况的模型。断层物质用 2 毫米厚的石膏模拟。模型受单轴应力的作用。

实验中得出四种破裂组合情况:

**1. 滑动破裂型** 发生在两组断层与主压应力轴  $\sigma_1$  的交角一组大于  $45^\circ$ , 一组小于  $45^\circ$  的情形下。其中, 当断层物质石膏湿度为 10—15% 时, 先在大角度面上产生剪切破裂, 后沿小角度面产生最终磨擦滑动。在应力位移曲线上表现为两次应力降。当断层物质石膏湿度小于 5% 时, 则只沿小角度面上产生磨擦滑动。应力位移曲线为单应力降。

**2. 压楔型** 发生在两组断层与  $\sigma_1$  夹角均大于  $45^\circ$  的情况下。其应力位移曲线为阶梯式上升型。断层位移方向反复。

**3. 张楔型** 发生在两组断层与  $\sigma_1$  夹角均不大于  $30^\circ$  时。应力位移曲线为单应力降。

**4. 双滑或双破型** 发生在两组断层与  $\sigma_1$  夹角均在  $30^\circ$  和  $45^\circ$  之间。应力位移曲线为连续的两次应力降。

根据应力位移曲线和应力声发射累积数曲线的相似性, 主破裂前的声发射累积数与主破裂时峰值应力的相似性以及断层组合与声发射组合的关系中, 看出声发射过程对构造条件是敏感的。

文中还对不同断层组合下可能出现的地震前兆进行了讨论。

## 一、引 言

影响区域地震活动性的因素很多。不少作者<sup>[1,2]</sup>考虑到应力和应力途径对地震活动性的影响。也有些作者分析了结构因素<sup>[3]</sup>, 讨论了它对地震活动性的影响<sup>[4]</sup>。我们曾从实验上得到当主压应力轴与断层夹角不同时, 地震序列特点不同<sup>[5]</sup>。由于中国不少大震前后存在两组不同方向的地震条带, 因此有些作者提出这些地震是发生在两组断层交汇区<sup>[6-8]</sup>。考虑到自然界断层中往往含有软弱夹层, 因此, 我们从实验角度研究了含两组软弱夹层模型的破裂过程、声发射、应力位移以及断层位移等特点, 进一步探讨断层组合对地震活动性的可能影响, 特别是前震的出现与断层组合的关系。

\* 1981 年 4 月 18 日收到初稿, 1982 年 4 月 7 日收到修改稿。

## 二、实验条件

设计了四组模型,每组模型有五种组合,它们都有一个共同的断层面。它们与主压应力轴的交角分别为  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $90^\circ$ 。每一个模型还有另一个断层面,它们与共同的断层面倾向相反,与主压应力轴的交角分别为  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  和  $75^\circ$ 。两组断层在模型中心交汇(图1),从而组成 20 种交汇情况不同的模型。为了补充说明一些问题,还制作了角度为  $30^\circ-35^\circ$ ,  $30^\circ-40^\circ$ ,  $45^\circ-45^\circ$  的模型。

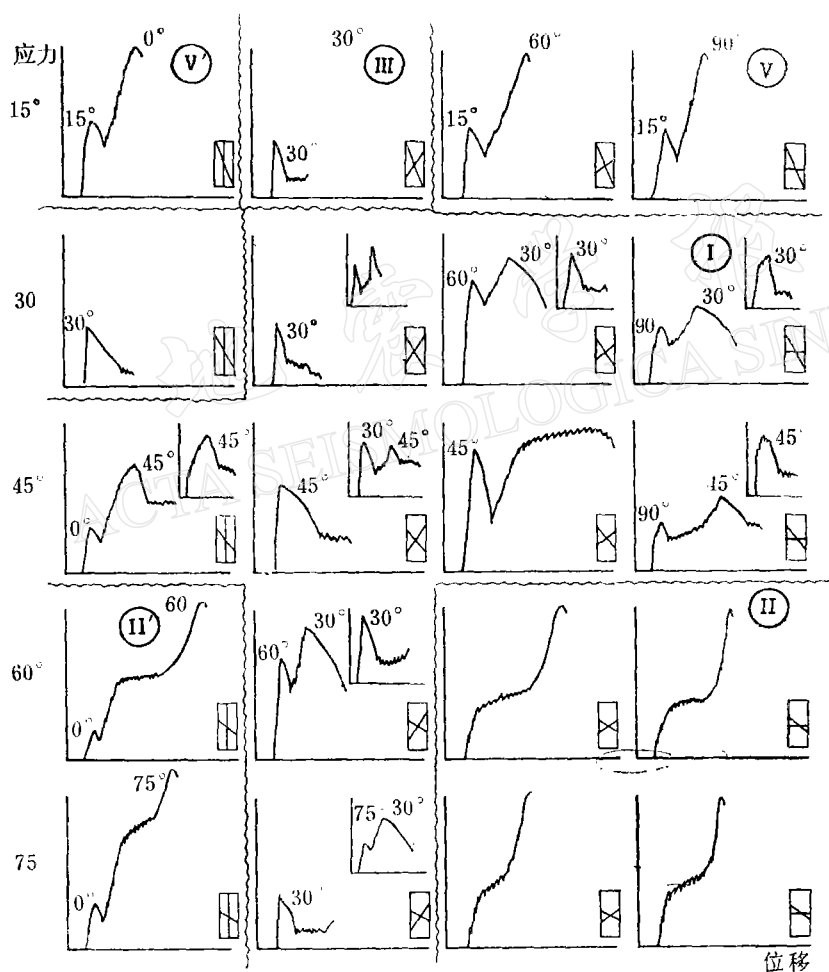


图1 含交叉断层模型应力位移曲线图

模型由昌平燕山晚期侵入的肉红色中粒花岗岩构成。据顾藏娟同志鉴定,花岗岩中正长石、微斜长石占 65%,石英占 30%,钠长石占 5%。长石中高等岭土化。把模型按上述方向切开后,再用石膏灌注成整体。石膏夹层厚 2 毫米。

实验设备与方法同文献 [5]。为了同步记录声发射的累积数与振幅大小随应力的变化,采用了 S3202 单通道声发射综合参数测试仪,接 X-Y 记录仪记录,同时设置断层位移

计于断层端部,以观测断层两侧的相对错动。

### 三、破裂特点

为了阐明模型的破裂特点,首先用有限单元法计算了其应力分布。计算条件与以往相同<sup>[9]</sup>。计算结果表明,断层带内应力分布是不均匀的,其中交汇区附近应力最复杂。对着最大主压应力方向的菱形交汇区尖角附近,最大剪应力最大。对着最小主应力方向断层与围岩交接的边缘,最大剪应力较高。与最小主应力相对的菱形交汇区尖角附近平均应力较小。从应力分布看,这些都是易于破裂的部位。

是否发生破裂由两方面因素决定。一方面是应力分布情况。模型中包括了两类物质:断层带物质和围岩物质。由于断层带物质强度远低于围岩强度,所以大部分情况下破裂发生在断层带内。个别情况下,破裂可延续到围岩中。有时破裂只沿一组发生,有时则沿两组发生。图 2 表示了两组断层错动时,破裂由交汇区向外发展以及由模型边缘向交汇区发展时的两种破裂型式。图中所表示的前三种型式,两断层带的破裂错动往往不同时发生,主破裂主要沿一个方向发生。第 4 种型式,两断层带物质的破裂近于同时发生,主破裂有时沿两个方向发展。

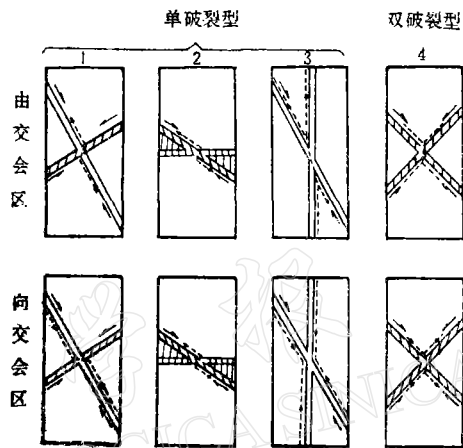


图 2 破裂型式示意图

两断层带物质破裂错动的先后次序,有如下几个特点:

1. 当模型中包含两组倾向相反的断层。一组与最大主应力轴的交角大于  $45^\circ$ ; 另一组与它的交角小于  $45^\circ$  时,破裂顺序可分两种情形: (1) 由于模拟断层带的湿度较大(在  $30^\circ\text{C}$  温度下烘一昼夜,湿度为 10—15%), 因而较为柔性时, 断层先沿大于  $45^\circ$  的断层面剪切压扁, 然后沿小于  $45^\circ$  的断层面发生最终错动(图 2(a)); (2) 由于模拟断层带的石膏湿度较小(在  $30^\circ\text{C}$  温度下烘三昼夜, 湿度小于 5%), 因而较脆时, 模型则只沿小于  $45^\circ$  的断层面上发生错动。以下简称为滑动破裂型。

2. 当模型中包含两组倾向相反的断层、两组断层与最大主应力轴的交角均大于  $45^\circ$  时, 沿两组断层均发生剪切压扁。由于两组断层带的压扁作用, 由这两组断层所夹的楔形区中的花岗岩也被挤破, 形成一对与最大主应力轴近于正交的楔形破裂区, 但没有明显的大破裂错动(图 2(b))。我们称之为压楔型。

3. 当模型中包含的两组断层与最大主应力轴的交角一组小于  $30^\circ$ , 一组为  $30^\circ$  时, 也出现一对楔形破坏区(图 2(c))。与上述楔形破坏区不同的是, 楔形破坏区长轴与最大主应力轴近于平行, 破坏往往首先由交汇区开始, 然后沿断层扩展; 除交汇区附近较破碎外, 整个楔形区, 并不强烈破碎; 强烈错动沿  $30^\circ$  断层面发生。我们称为张楔型。

4. 当模型中包含的两组断层与最大主应力轴的交角均在  $30^\circ-45^\circ$  之间时, 两组断层的破裂程度相近, 或同时破裂, 或略有先后(图 2—4)。我们称为双滑或双破型。

以上实验中实际存在两种变形机制。一种是断层带物质的剪切压扁机制, 一种是断层带物质与围岩介质间的磨擦滑动机制<sup>[5]</sup>。

## 四、应力位移曲线

为了观测模型总的变形情况和断层位移情况, 一方面观测了模型的应力应变曲线, 同时, 设置了断层位移计以观测跨断层的相对位移。

### 1. 应力位移曲线

由于模型中断层组合情况不同, 应力位移曲线的特点也不相同。按其类型, 我们把它们分为五类, 并按前述破裂类型的顺序加以描述。

1) 滑动破裂型的应力位移曲线较多表现为两次明显的应力降(图 1 中 I 类)。当断层物质较为柔性, 两组断层与主压应力轴交角又相差较大时, 第一次应力降较小, 声发射振幅也小, 由大角度断层剪切压扁造成。第二次应力降较大, 声发射振幅也大, 由小角度断层错动造成。当断层带物质较脆性时, 有时只有一次应力降, 由沿小角度断层的错动造成。

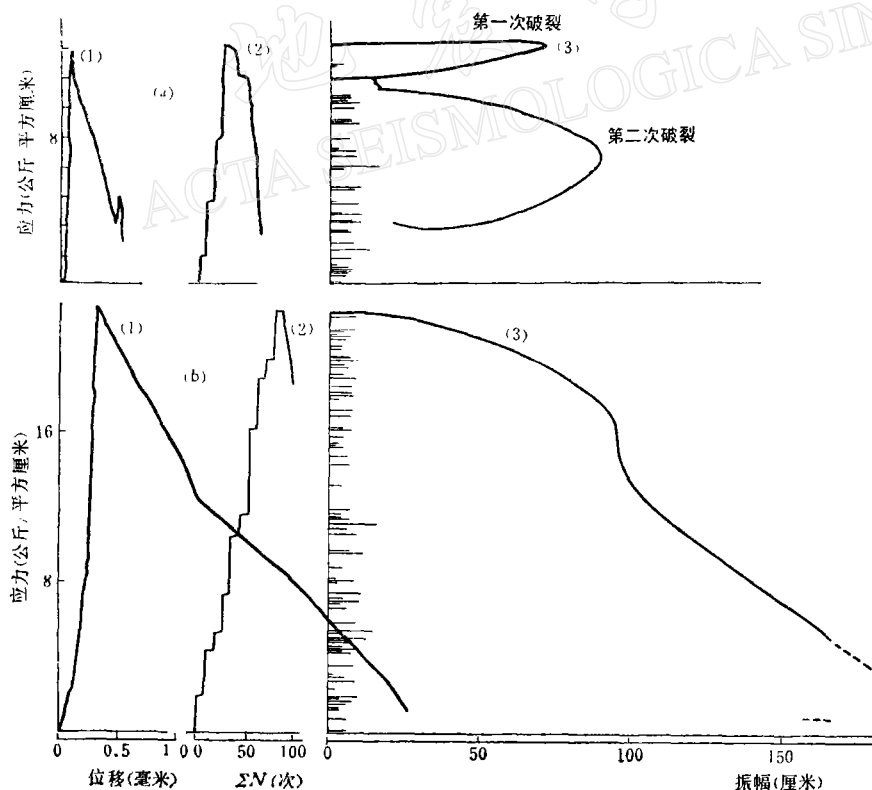


图 3 含  $40^\circ-45^\circ$  模型 (a) 及含  $30^\circ-35^\circ$  模型 (b) 的 (1) 应力—声发射累积数曲线 (2) 应力—位移曲线和 (3) 应力—声发射振幅曲线

成。但这时,沿  $30^\circ$ , 特别是沿  $45^\circ$  面错动前,曲线上出现较多的小应力降。

2) 压楔型(图 1 中 II 类)的应力位移曲线与  $60^\circ$ 、 $75^\circ$  的单断层时的曲线类似,表现为阶梯式上升型曲线。但在断层带厚度相同的条件下,这里出现了较多的小应力降。这种条件下要使模型完全破坏,需要大得多的应力。图 1 中 II' 类曲线总特点与此类似,暂归于此类。

3) 张楔型(图 1 中 III 类)的应力位移曲线大多表现为由于沿  $30^\circ$  面错动造成的单次应力降。这里大错动前较少出现小应力降。

4) 双滑或双破型的应力位移曲线表现为几乎连续的两次应力降(图 3)。我们称为第 IV 类曲线。有时也可形成相隔较远的两次应力降类似于图 1-I 类中  $30^\circ$ — $45^\circ$  右上角的情形。所以,第 IV 类是第 I 类中的一种特例。

5) 当模型中含有  $0^\circ$ — $15^\circ$  的情形时(图 I-V 类),模型除可沿  $15^\circ$  发生错动外,很难再发生什么破坏,所以曲线上在由  $15^\circ$  错动产生的应力降后,应力迅速上升。V' 类曲线与之类似。

## 2. 断层位移情况及相互关系

由于两组断层与主应力轴交角不同,所以断层位移情况也不同。

1) 从位移量上看,不同角度断层上位移量不同。沿小于  $45^\circ$  的断层面上错动量大,大于  $45^\circ$  断层面上错动量小。从图 4-1、4-2、4-3 均可以看到这一点。

2) 从位移特点看,不同角度断层上位移过程也不相同。小角度断层上位移方向是一贯的,而大角度断层面上,位移方向是反复的。在  $30^\circ$ — $60^\circ$  模型上(图 4-2)见到,沿  $60^\circ$  面位移方向是反复的,而沿  $30^\circ$  面,虽然位移速率可以不同,但位移方向却是一贯的。

3) 从断层位移所反映的时间先后次序看,情况也不完全相同。当应力位移曲线中包含两次应力降时,两组断层也可以先后活动,而未互相牵动。图 4-3 中沿  $60^\circ$  面发生剪切压扁时,沿  $30^\circ$  面上没有发生位移。而沿  $30^\circ$  面错动时,  $60^\circ$  面上也没有发生位移。  $30^\circ$ — $45^\circ$  模型中(图 4-4),先沿  $30^\circ$  面发生错动,  $45^\circ$  面并没有多少错动。后来  $45^\circ$  面错动时,  $30^\circ$  面上又没有多少错动。

当两组断层交角相似,或者角度虽然不相似但却互相牵动时,两断层位移量可以不

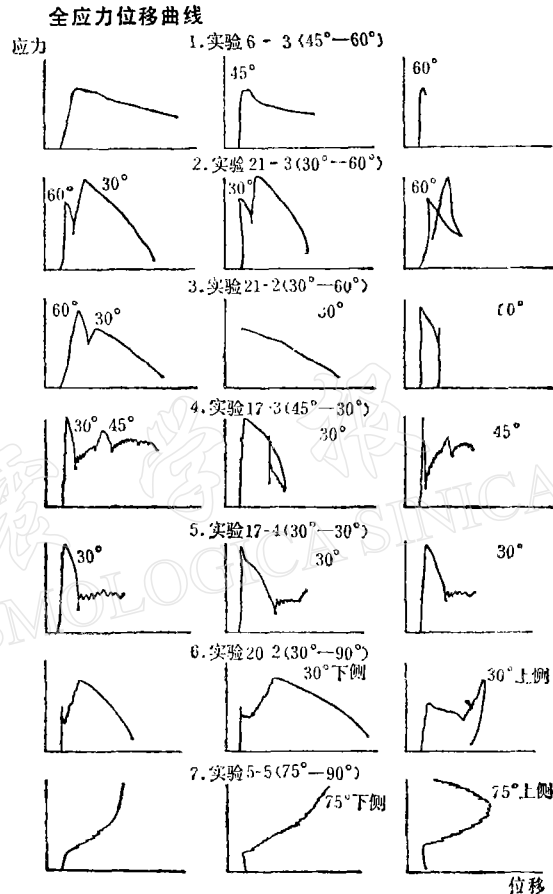


图 4 不同方向断层位移相互关系图  
(全应力位移曲线表示模型整体的垂直位移,右侧两曲线上用数字表示该角度断层两侧的相对位移曲线)

同,但却同时发生错动。图 4-2 如此,图 4-5 也可说明这一点。

4) 同一断层各段位移情况不同。如图 4-6 中,在  $30^\circ-90^\circ$  模型中,第一次应力降在断层上侧造成较大的位移,而在断层下侧位移很小。第二次应力降在断层下侧造成很大的位移,而在上侧不但位移很小,而且还是反向的。这个特点在第 II 类模型中表现得更突出。在  $75^\circ-90^\circ$  模型上(图 4-7)沿  $75^\circ$  面在交汇点上下两侧位移情况就不同。 $75^\circ$  面下侧断层位移向一个方向发展,而  $75^\circ$  面上侧断层先向一个方向,后又反向位移。

由以上事实可见,断层位移的观测进一步验证了我们对破裂发展顺序和过程的观测。

## 五、声发射特点

在实验过程中,我们观测了模型变形过程中声发射累积数( $\Sigma N$ )随应力的变化,也观测了声发射振幅大小随应力的变化。由实验结果可见:

### 1. 声发射与断层组合的关系

不同断层组合下,声发射的序列特征不同。如图 5(a) 表示  $0^\circ-30^\circ$  断层组合时的声发射序列。主破裂前声发射很少,或者没有。图 5(b) 表示  $30^\circ-60^\circ$  断层组合时的声发射序列,主破裂前声发射较多。第一次大震振幅较小,代表沿  $60^\circ$  面的剪切破裂。第二次大震振幅较大,代表沿  $30^\circ$  面的磨擦滑动。图 6 中横坐标表示模型中一组断层与主压应力轴的夹角,曲线上的数字表示所含另一组断层面与主压应力轴的夹角。纵坐标表示主破裂前声发射的总数。由图可见,  $30^\circ$  或  $45^\circ$  的断层与任何方向断层组合时声发射数均低,

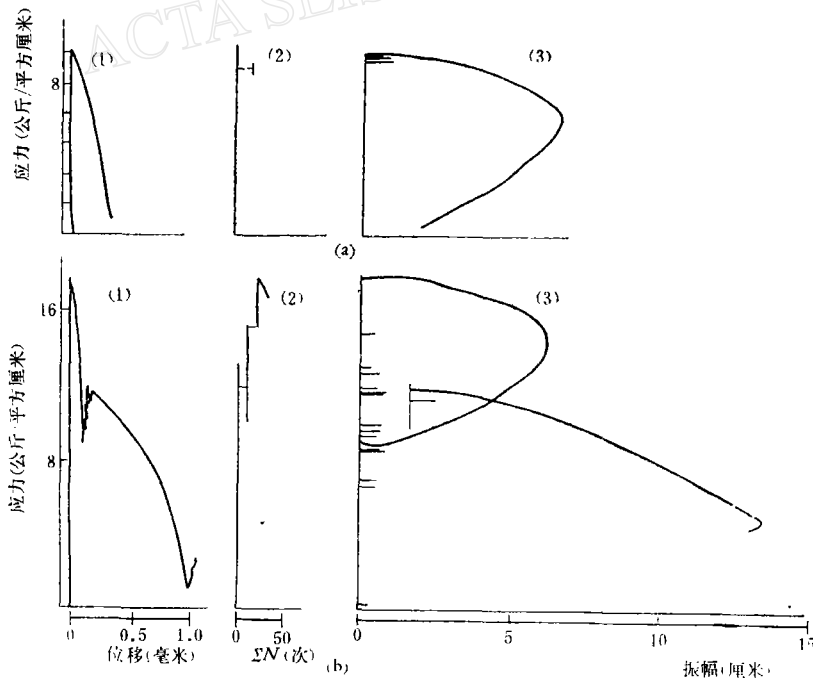


图 5 含  $0^\circ-30^\circ$  (a) 及  $30^\circ-60^\circ$  (b) 模型的 (1) 应力—位移曲线, (2) 应力—声发射累积数曲线, (3) 应力—声发射振幅曲线

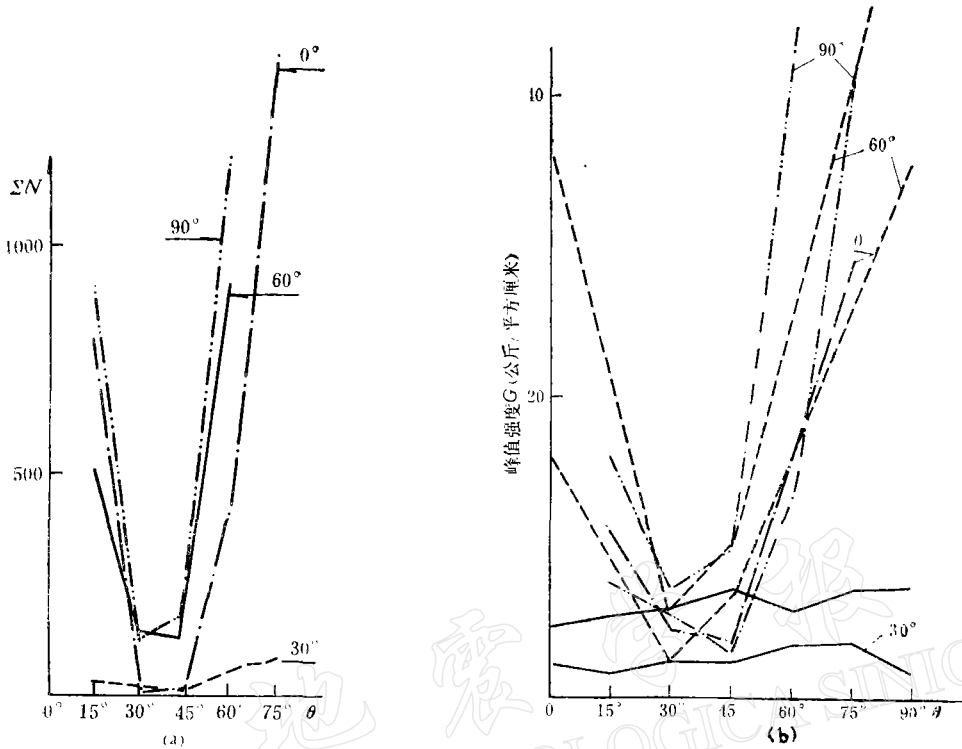


图 6 不同断层组合下主破裂前声发射总数  $\Sigma N$ (a) 及峰值强度  $G$ (b)  
(曲线上数字表示模型中一组断层面与  $\sigma_1$  的夹角；图上横坐标为另一组断层面与  $\sigma_1$  的夹角)

其中  $30^\circ$  或  $45^\circ$  的断层与另一组  $30^\circ$  或  $0^\circ$  断层组合时声发射最低,只有 10—30 次。  $30^\circ$  或  $45^\circ$  断层与其它方向组合时,声发射数一般均有所提高。与  $90^\circ$  或  $60^\circ$  断层组合时,声发射数提高较多,可达 100 多次。可见,是否发生前震,也有可能与断层组合有关。

2. 声发射与位移的关系

由图 7 可见应力—位移曲线 ( $\sigma-D$ ) 与应力—声发射累积数 ( $\sigma-\Sigma N$ ) 曲线的一致性。当应力位移曲线处于直线上升阶段,声发射数增加较慢,大破裂时,应力陡降,声发射数短期内增加,增量并不一定很大,重要的是大振幅的声发射与大应力降同时出现。当沿断层持续发生错动时 (位移迅速增加),声发射数增加也很快。说明了  $\sigma-D$  曲线与  $\sigma-\Sigma N$  曲线的一致性,充分反映了声发射数与位移量之间的关系,因此二者可以互相验证,相互推测。

3. 声发射与应力的关系

声发射情况与应力关系也很密切。

1) 图 6(b) 表示不同断层组合下模型峰值强度的情况<sup>[6]</sup>。图上横坐标表示模型中一组断层与主压应力轴的夹角。曲线上的角度表示另一组断层与主压应力轴的夹角。纵坐标表示模型发生最终破裂时峰值强度  $G$ 。图中用相同符号的两条线表示某断层组合条件下峰值应力的范围。对比图 6(a) 与图 6(b),可见二者十分相似。在一组断层为  $30^\circ$  或  $45^\circ$  时,最终破裂发生在较低的应力水平下,声发射数低。当断层为其它角度时,最终破裂发

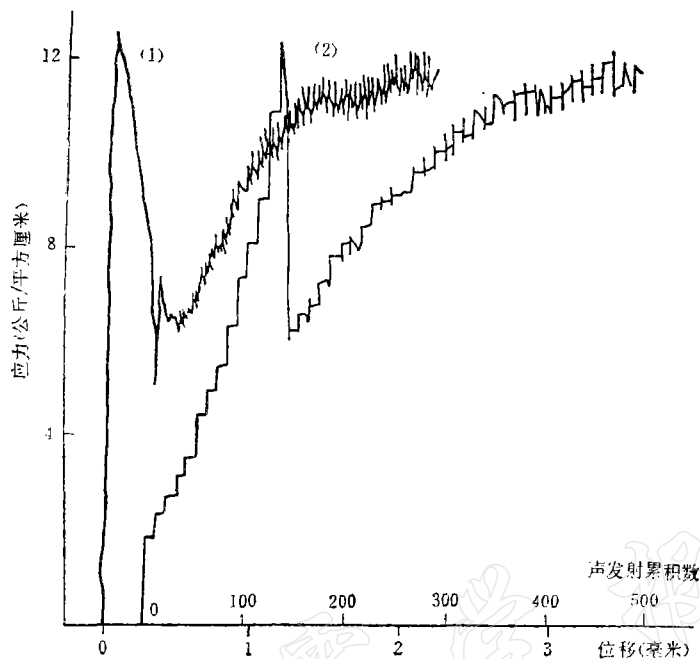


图7 含  $45^{\circ}$ — $60^{\circ}$  模型的 (1) 应力—位移曲线和 (2) 应力—声发射累积数曲线

生在较高的应力水平下,声发射数高。从这一个侧面反映了声发射与应力的关系。

2) 从声发射的振幅随应力的变化中,可以看到最大振幅的声发射发生在应力达到峰值时,或者达到峰值后略有下降时。这种破裂引起的声发射伴随了最大的应力降。

3) 大应力降时有大振幅的声发射,但大振幅的声发射并不总伴随大应力降。说明声发射振幅还与破裂类型有关。实验 35-6 ( $30^{\circ}$ — $45^{\circ}$ ) (图 8) 中,第一次声发射发生在峰值应力处,应力降很大(9 公斤/平方厘米),声发射振幅为 9.4 厘米,代表了沿  $45^{\circ}$  面的破裂。继续加载,  $\sigma$ — $D$  曲线上出现一系列的小应力降,在此过程中出现第二次振幅很大的声发射(振幅达 8 厘米)。对应的应力降微不足道。它所代表的是沿  $45^{\circ}$  面的一次错动。

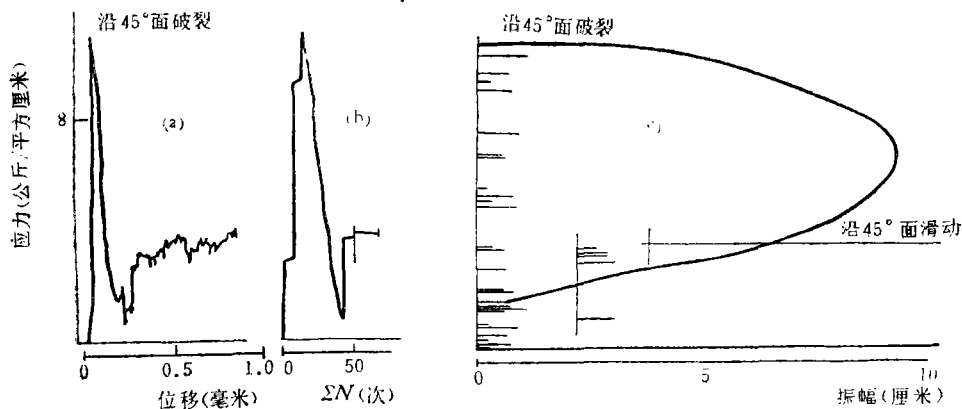


图8 含  $30^{\circ}$ — $45^{\circ}$  模型的 (1) 应力—位移曲线 (2) 应力—声发射累积数曲线和应力—声发射振幅曲线



此外一般沿  $30^{\circ}$  面破裂产生的应力降大,沿  $45^{\circ}$  面破裂产生的应力降小。种种迹象表明,声发射振幅与破裂时的错动量有关,而与应力降并无直接关系。

4) 当两组断层与主压应力交角相差不大时,有时见到双震。二次破裂发生在很短的时间间隔内。 $45^{\circ}$ — $45^{\circ}$  模型(图 3(a))中两组声发射相隔很近,一次刚恢复,又发生第二次。声发射振幅相当  $30^{\circ}$ — $35^{\circ}$  模型中(图 3(b))两次声发射相隔时间更近,第一次振动尚未恢复,又发生第二次。振幅相当。而在  $30^{\circ}$ — $45^{\circ}$  模型中(图 1),两组声发射相隔时间较长。说明相隔时间的长短可能与两组断层与主压应力轴交角的相近程度,以及它们本身抗剪强度的一致性程度有关。

六、 讨 论

以上我们论证了破裂顺序、破裂特点与断层组合关系密切,从而推想地震活动特性对区域构造也是很敏感的。因此,对地震进行构造分类是有益的<sup>[12]</sup>。我们把各类变形的特点归纳为表 1,以作为对地震进行构造分类的实验根据。我们从破裂特点、应力位移曲线、断层位移以及声发射四方面情况出发,把各种双断层交汇区的情况划分为四种组合型式: 1) 滑动破裂型; 2) 压楔型; 3) 张楔型; 4) 双滑(双破)型。破裂组合型式不同,地震活动特点、出现前兆的可能性不同,前兆特点也不相同。我们分析炉霍地震、通海地震与第 I 类较接近;唐山地震类似于 I、III 类混合型;龙陵地震、渤海地震、松潘地震更接近于第 IV 类。了解不同构造区断层活动情况及可能的地震活动特点,有助于合理的进行地震区划。针对这些活动特点,可以有意识地选择适当的地震监测手段和发震标志。

表 1 断层组合的破裂类型

破裂类型		断层 1 与最大主应力轴夹角	断层 2 与最大主应力轴夹角	有无大震	地震类型 声发射类型	狭义前震	广义前震 条带及活动时间	应力位移 曲线	断层位移
I	滑动破裂型	$30^{\circ}$ — $45^{\circ}$	$45^{\circ}$ — $60^{\circ}$	有	主震余震型	可能少	有可能,先后出现	双应力降(先后发生)或单应力降	两断层先后发生位移(或同时)大角度上有反复
		$30^{\circ}$ — $45^{\circ}$	$60^{\circ}$ — $90^{\circ}$	有	前主余型	可能性较大	可能性较大,先后出现	双应力降或单应力降	同上
II	压楔型	$60^{\circ}$ — $75^{\circ}$	$60^{\circ}$ — $90^{\circ}$	可能性不大	震群型	有但非前震	与主应力轴近正交的楔形	阶梯式上升型	断层位移方向反复
III	张楔型	$30^{\circ}$	$15^{\circ}$ — $30^{\circ}$	有	主震型	无	无	单应力降	单断层位移
IV	双双滑破型	$30^{\circ}$ — $45^{\circ}$	$30^{\circ}$ — $45^{\circ}$	有	双震型	可能性少	有可能,同时或略有先后	双应力降连续发生	断层位移同时或略有先后

此外,自然界有狭义前震的地震不多。由表 1 可见,现有一些地震有可能出现广义的前震条带。当地震活动由一组断层转向与之交汇的另一组断层时,一组断层上位移发生反向,而当另一组与之相交的断层也开始位移时,或者前兆活动区明显转移时,可能标志着大震的迫近。

1967 年炉霍 6.7 级地震前,区域内先出现近南北向的地震条带,主震沿北西向鲜水河断层发育。实验表明,与主应力轴交角大的断层先破裂,主破裂发生在交角较小的面上是可能的。产生这种现象的条件是什么?自然界出现这种现象又说明什么?

前述实验表明,实际存在两种变形机制:一种是断层带物质的剪切破裂机制;一种是断层带物质与围岩夹层间的磨擦滑动机制。这样也就存在两种破裂参数和准则<sup>[10,11]</sup>。

对完整材料的剪切破裂说

$$\tau = \tau_0 + n\sigma \quad (1)$$

其中,  $\tau_0$  是完整材料的内聚强度;  $n$  是完整材料的内磨擦系数,它是在一个虚构的剪切面上抵抗剪切的一种阻力;  $\tau$  是该虚构面上破裂时的剪应力;  $\sigma$  是其上的正应力。

对已有断层面的磨擦滑动说

$$\tau = \tau_s + \mu\sigma \quad (2)$$

其中,  $\tau_s$  是已有滑动面上的内聚阻力,它可能很小;  $\mu$  是已有断层面上磨擦阻抗系数或外磨擦系数。

四个系数  $\tau_0$ 、 $n$ 、 $\tau_s$  和  $\mu$  中,  $\tau_0$  是随已有的各向异性面与主应力轴相对关系而变化的量。  $n$  与  $\mu$  是两个不同的物理量。不同岩石在相同条件下  $\mu$  与  $n$  不同。有的岩石  $n$  大于  $\mu$ , 有的则相反。

韩丁<sup>[10]</sup>利用含一组切口 ( $\theta = 65^\circ$ ) 的标本研究标本变形方式是产生新的剪切破裂还是沿已有的切口滑动时,得到三种情况: 1) 不产生新破裂,而只是沿已有的断面滑动,但产生滑动的角度范围很大。如果我们把完整岩石相应参数取为  $\tau_0$  和  $n$ , 标本切口面上相应参数取  $\tau_s$  和  $\mu$ , 则  $\tau_0 + n\sigma > \tau_s + \mu\sigma$ ; 2) 在完整岩石中产生新破裂,不沿已有切口滑动,相当于  $\tau_0 + n\sigma < \tau_s + \mu\sigma$ ; 3) 既在完整岩石中产生新破裂,又沿已有切口产生滑动,相当于  $\tau_0 + n\sigma \sim \tau_s + \mu\sigma$ 。

在单断层模型实验中,在围压 500 巴下,含  $60^\circ$  切口的花岗岩模型沿已有切口滑动,不产生新破裂。含  $60^\circ$  切口的大理岩模型产生新破裂,而不沿已有弱面滑动,符合上述道理。

在双断层实验中,每个断层有一组参数,岩石本身还有一组参数。因此,可能出现的破裂组合方式很多。但在以下几个前提下,可能出现的情况被减为四种。这些前提是: 1) 围岩的强度比软弱夹层的强度大得多。如果产生破裂,则首先发生在软弱夹层内; 2) 两组断层中至少有一组易于滑动面 ( $30^\circ - 45^\circ$ ), 这样就避免出现第 II 种破裂,即围岩也破裂的情况; (3) 断层 I 与主压应力轴夹角比断层 II 大; (4) 两断层带的物质与夹层厚度相同。可能出现的四种情况是断层 I 破, 断层 II 滑动 ( $I_1$ ); 断层 II 滑动 ( $I_2$ ); 双滑或双破 (IV)。

出现第一种情况的条件:

$$\tau_{s1} + \mu_1\sigma_1 > \tau_{s2} + \mu_2\sigma_2 \quad (3)$$

如果

$$\tau_{01} + n_1\sigma_1 < \tau_{s2} + \mu_2\sigma_2 \quad (4)$$

由公式 (3), 所以

$$\tau_{01} + n_1\sigma_1 \ll \tau_{s1} + \mu_1\sigma_1 \quad (5)$$

则先沿断层 I 先产生剪切破裂, 然后转为磨擦滑动。然而由于公式 (3), 故转为沿断层 II 磨擦滑动。反之, 如

$$\tau_{01} + n_1\sigma_1 > \tau_{02} + \mu_2\sigma_2 \quad (6)$$

则只沿断层 II 磨擦滑动。在我们的实验中断层带物质较湿,  $n$  值较小时, 产生第一种情况。当断层带物质比较脆性,  $n$  值较大时, 产生第二种情况。

如果断层带物质很硬, 其极限情况是与围岩一致, 这时相当存在一个切口时的第一种情况。那么它会沿已有的断层 II 滑动。即相当第二种情况。

由此可见, 只有当两组断层与主压应力轴交角相差较大, 而且大角度断层物质较弱, 夹层的  $\tau_0 + n\sigma$  比小角度断层上的  $\tau_s + \mu\sigma$  还小时, 才能出现自然界中见到的沿一组断层先错动, 然后, 主破裂发生在另一个面上的情况。

由于实验条件限制, 我们仅能从破裂特点、断层位移特点等方面, 区别断层活动的先后, 还不能从声发射位置上进一步区别断层带的活动特点与顺序。我们猜想不同断层带会有其特有的震级及机制, 值得进一步探讨。

这是一组大大简化了的实验, 与真实情况相差还是很大的。仅供在分析断层尚能存在的深度、岩性范围内的变形时参考。不当之处, 敬希批评指正。

实验过程中曾得到刘天昌、王统濬、褚宝贵在测试方面以及邢全友同志在计算方面的帮助, 潘善德同志提出许多宝贵意见, 特此表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] C. H. Scholz, Experimental study of the fracturing process in brittle rocks, *J. G. R.*, **73**, 1447—1454, 1968.
- [2] 陈颙, 不同应力途径三轴压缩下岩石的声发射, *地震学报*, **3**, 1, 41—48, 1981.
- [3] H. H. Einstein, R. A. Nelson, R. W. Bruhn, R. C. Hirschfeld, Model Studies of Jointed-Rock Behavior from "Rock Mechanics Theory and Practice" ed. by Wiebur H. Somerton 1970.
- [4] K. Mogi, Study of elastic shocks caused by heterogeneous material and its relations to earthquake phenomena. *Bull. of Earthq. Res. Inst. Univ. of Tokyo*, **40**, part 1, 1962.
- [5] 马瑾等, 断层破裂过程与声发射特点的实验研究, *地震地质*, **3**, 1, 1981.
- [6] 张四昌, 大地震与共轭性构造活动, *地震地质*, **2**, 3, 1979.
- [7] 章光月等, 在地震孕育和发生过程中共轭断层活动的作用, *地震地质*, **2**, 1, 1980.
- [8] 四川省地震局, 1976 年松潘地震, 科学出版社, 1979.
- [9] 马瑾等, 影响断层带再活动的一些因素的实验研究, *西北地震学报*, **3**, 2, 1981.
- [10] J. Handin, On the Coulomb-Mohr failure criterion, *J. G. R.*, **74**, 22, 5343—5348, 1969.
- [11] F. A. Donath, Effects of cohesion and granularity. on deformational behavior of anisotropic rock, *Geol. Soc. of Amer. Mem.*, 135, 95—128, 1972.
- [12] 马宗晋等, 中国近年九次强震的构造分类, *西北地震学报*, **2**, 1, 1980.

## MODEL EXPERIMENTAL STUDY ON BEHAVIOR OF DEFORMATION AND ACOUSTIC EMISSION NEAR THE INTERSECTIONS OF FAULTS

MA JIN    ZHANG BOTAO    XU XIUQIN    WANG BAOSHENG

(*Institute of Geology, State Seismological Bureau*)

### Abstract

More than 20 kinds of models, each with two intersecting faults are made from the Changping granite. Gypsum used to simulate the fault material is of thickness 2 mm. The models are loaded under uniaxial stress.

Four types of fracture combinations are obtained during the experiments:

(1). Shearing and slipping In this case, the model contains two faults dipping in opposite directions, one at an angle of more than  $45^\circ$  to  $\sigma_1$  and the other at an angle less than  $45^\circ$  to  $\sigma_1$ . When gypsum in the fault zones has a moisture content of 10—15% the shearing fracture occurred along the fault starts at larger angles and then a terminal frictional slip along the fault at smaller angles, takes place. There are two stress drops on the stress-displacement curve. When the gypsum in fault zones has a moisture content of less than 5%, a frictional slip occurs only along the surface of the fault at small angles. There is one stress-drop on the stress-displacement curve.

(2). Wedge by compression This happens when the two sets of faults make angles larger than  $45^\circ$  with  $\sigma_1$ . Its stress-displacement curve rises in the form of steps. The direction of fault dislocation may vary repeatedly.

(3). Wedge by tension This happens when the sets of faults make angles less than  $30^\circ$  with  $\sigma_1$ . There is only one stress drop on the stress-displacement curve.

(4). Bi-shearing or Bi-slipping This happens when the two sets of faults make angles of  $30^\circ$  to  $45^\circ$  with  $\sigma_1$ . There appear two successive stress drops on the stress-displacement curve.

Based on the facts of similarity between the stress-displacement curve and the stress-accumulative number of acoustic emission curve and that between the accumulative acoustic emission number before the principal fracture and the peak stress value during it as well as the relation between acoustic emission and faults, it can be seen that the process of acoustic emission is sensitive to structural conditions.

Earthquake precursors possibly appear in the case of different combinations of faults have also been discussed in this paper.