

# 影响断层带再活动的一些 因素的实验研究

马 瑾 张渤涛 袁淑荣 许秀琴

王宝生 刘天昌 吴秀泉

(国家地震局地质研究所)

## 摘 要

很多地震发生在活动断层上。但断层带是否活动并不是一成不变的。目前,在没有大量实测资料的情况下,我们往往还要推断哪些断层是易于活动的。实验与计算结果表明,影响断层再活动的因素为力的方向、力的大小,断层带厚度,断层带物质的力学性质等。这些结果将有助于我们推测活断层。

## 一、前 言

在漫长的地质历史中地壳上形成很多不同方向的深大断裂。在某一地质时期,一些断层相对活动并影响了其两盘的地层、沉积岩相、构造变形、地貌、岩浆及地震活动。当时相对平静的另一些断层到了另一个地质时期却相对活跃起来。各条断层活动与否并不是一成不变的。研究影响断层再活动的因素,不仅有很大的实际意义而且对分析地质历史上应力场的演化规律也会有一定的参考价值。

本文考虑到,不仅区域应力场的方向、大小会影响断层的再活动,而且断层本身的力学性质、厚度也会影响断层的再活动。故就以上几方面进行了一些计算与实验,探讨在哪些条件下断层易于活动。为进行地震、工程等研究分析活断层时参考。

## 二、反映断层带再活动水平的力学参数的选择

由于自然界中哪些断层带活动、沿什么方向错动并不是固定不变的,这首先是因为区域应力场并不是固定的,区域应力场的方向、大小是变化的,因此,活动断层及其错动方向也随着变化。其次,断层带本身的性质也是各不相同的。断层带中往往充填了断层碎屑物(如断层角砾、断层泥等)以及热液矿脉。断层带要开始活动就意味着夹在断层带内的软弱夹层发生变形与破裂错动。因此,断层带本身的结构特性、内部充填物的性质、厚度等也影响了

断层是否易于错动以及它的活动性质。为了便于分析对比，我们试图选取一个统一的力学参数来衡量断层错动的难易程度，并通过它来研究影响断层带再活动的因素。我们把在某一方向力作用下，断层带抵抗剪切错动的能力称之为断层带的峰值强度。当作用在标本上的差应力大于断层带的峰值强度G时，断层发生失稳破裂。我们根据实验时的应力应变曲线(图 1)求出断层带的峰值强度G，并通过不同条件下断层峰值强度的大小来探讨断层再活动的难易程度。

### 三、计算结果

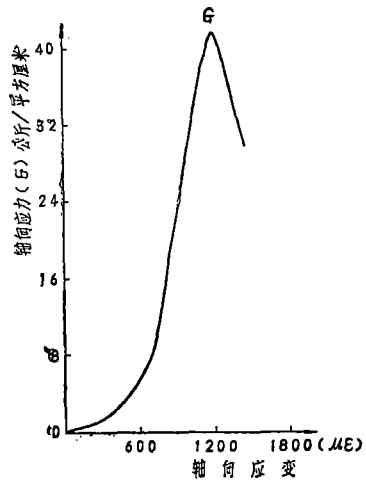


图 1 单轴压缩下松香石蜡标本的应力应变曲线 (G 点表示峰值强度)

在进行各种条件下峰值强度的测定以前，我们首先用有限单元法分析一下几种因素对断层带应力的影响，因为应力影响了该断层是否易于破裂。我们设计了一个含有一条裂缝的弹性园模型。令平行断层方向为X轴，垂直断层方向为Y轴，设沿断层一盘的中心点在平行断层方向位移为零，同一盘在垂直断层方向的边缘点上平行与垂直断层方向位移均为零，模型上施加均匀应力。

首先取围岩的力学参数相当于15公里处花岗岩的性质(弹性模量 $E = 800000$ 公斤/平方厘米，泊松比 $\nu = 0.23$ )，断层带的性质则取 $E = 400000$ 公斤/平方厘米， $\nu = 0.3$ ，断层带的厚度H为常数(2毫米)。最大压应力取5000公斤/平方厘米，最小压应力取3000公斤/平方厘米，取 $\theta$ 为最大主压应力与断层带走向的夹角。改变加力方向看断层带上应力的变化。由图 2 (一)可见随着 $\theta$ 的增加，断层带内平均应力 $\sigma_m$ ( $\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$ )增大，但最大剪应力 $\tau_{max}$ 也增加。在 $\theta \leq 45^\circ$ 时，断层带内 $\tau_{max}$ 的增加快于 $\sigma_m$ 的增加，增加了沿断层带剪切破裂的可能性。其中 $30^\circ < \theta < 45^\circ$ 时， $\tau_{max}$ 与 $\sigma_m$ 保持的差值最大，是最易破裂的角度。当 $45^\circ < \theta < 60^\circ$ 时， $\tau_{max}$ 继续增加，但 $\sigma_m$ 的增加快于 $\tau_{max}$ 的增加，从而减小了剪切破裂的可能性。但当 $\theta > 60^\circ$ 后， $\tau_{max}$ 相对减小， $\sigma_m$ 仍在增加，破裂的可能性更小。

其次，在上述基本条件下，令 $\theta(60^\circ)$ 、H(2毫米)不变，同时令断层带的弹性模量也保持常数(分别为围岩弹性模量的1/2, 1/4, 1/8, 1/10及1/20)，分别求出当最大压应力固定为5000公斤/平方厘米，改变最小压应力(因此改变了差应力)时，断层带上的应力情况。由图 2 (二)可见，相同物性下，由于差应力增大，最大剪应力一般均增大，而平均应力均减小。所以差应力愈大愈易破裂。其中弹性模量比大者[图 2 (二) 5]最大剪应力变化陡，平均应力变化也陡，说明差应力的变化对弹性模量大的断层带的影响更大些。

与上述条件相同，由图 2 (三)可见，在同样的差应力下断层带内外弹性模量比增大，最大剪应力下降，平均应力增大，减小了破裂的可能性。其中差应力小时应力变化较陡，破裂的可能性更小了。图 2 (三) 5 显示 $\theta = 30^\circ$ 时比 $\theta = 60^\circ$ [图 2 (三) 1]变化陡些。说明材料性质对这种夹角的断层影响大些。

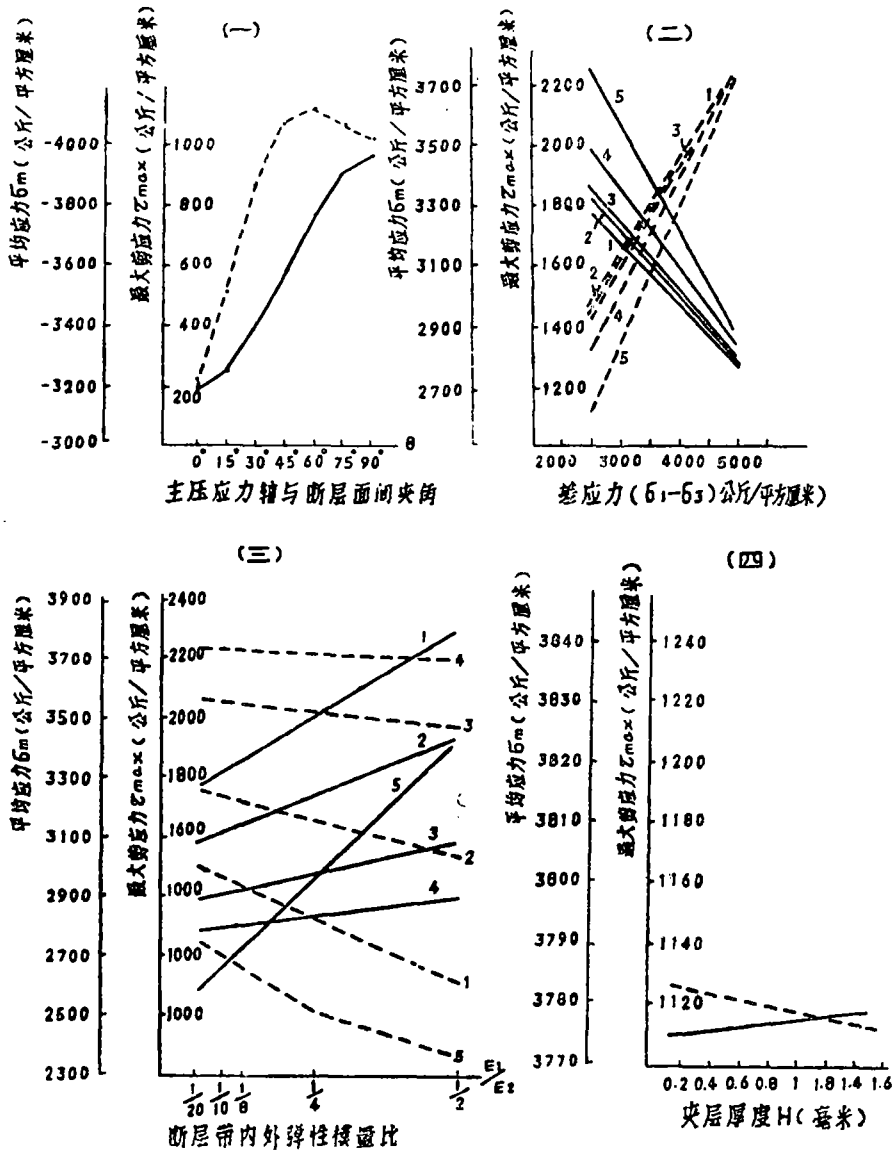


图2 不同条件下断层带内最大剪应力(虚线)与平均应力(实线)

(一) 最大剪应力与平均应力随 $\theta$ 的变化。

(二) 最大剪应力与平均应力随差应力的变化。断层带内外弹性模量比: (1)  $\frac{1}{20}$ , (2)  $\frac{1}{10}$ , (3)  $\frac{1}{8}$ , (4)  $\frac{1}{4}$ , (5)  $\frac{1}{2}$ 。

(三) 最大剪应力与平均应力随断层带内外弹性模量比的变化。差应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ): (1) 2000公斤/平方厘米; (2) 3000公斤/平方厘米; (3) 4000公斤/平方厘米; (4) 4500公斤/平方厘米。(5)  $\theta = 30^\circ$  差应力为2000公斤/平方厘米时的变化。

(四) 最大剪应力和平均应力随断层带夹层厚度的变化。

第三, 在其它条件不变,  $\theta$ 保持 $60^\circ$ , 差应力保持为2000公斤/平方厘米, 断层带弹性模量保持为400000公斤/平方厘米下, 求断层带厚度分别为1毫米、2毫米、10毫米、15毫米

时，最大剪应力和平均应力的变化〔图2(四)〕。由图2(四)可见，应力随厚度变化很小。可以看出随着断层带厚度的增大，最大剪应力略有下降，平均应力略有上升（这里比例尺增大10倍）。

由计算结果看来，上述因素对断层带应力影响程度的大小依次为力的方向、力的大小、断层带弹性模量和断层带的厚度。

#### 四、实验方法和标本

计算结果反映了上述因素对断层带应力的影响，需通过实验进一步测定各种条件下的峰值强度，实际观测错动之难易。

实验是通过对标本进行单轴压缩而进行的。信号主要通过位移传感计和压力传感器经动态电阻应变仪放大并由X—Y函数记录仪记录，并绘出标本在单轴压缩下的轴向应力—应变曲线。

实验所采用的标本有两类。一种是白色大理岩标本 $5 \times 5 \times 12.5$ 厘米，分别按与压力轴呈 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $75^\circ$ 的交角作成切口，里面充填以断层物质。这些断层物质为含水量不同的石膏、松香—石腊及软泥等。为了对比，我们还采用了松香—石腊混合物熔化浇铸成的长方柱标本，断层物质为白腊。

#### 五、主压应力轴与断层面的交角 $\theta$ 对G的影响

首先研究了断层面与最大主压应力轴间的交角 $\theta$ 对峰值强度G的影响。我们采用的标本为含石膏夹层的大理岩标本。我们把断层厚度H保持常数（2毫米）， $\theta$ 分别为 $15^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $60^\circ$ 和 $75^\circ$ 等不同的角度来重复实验。由每块标本测得的应力应变曲线中选取峰值强度G，然后以G为纵坐标，以 $\theta$ 为横坐标作出峰值强度G随 $\theta$ 变化的函数曲线，以说明 $\theta$ 对G的影响，如图3所示。

实验结果表明，三批实验数据不完全相同（这可能是因为每批标本所含石膏夹层的干燥度不完全相同），但其曲线的变化趋势是一致的。即在夹层厚度不变的情况下，峰值强度G的大小随着断层面与主压应力方向间的夹角 $\theta$ 的变大而增加。有意思的是，曲线的斜率以 $\theta = 45^\circ$ 为界，有一个截然不同的变化。在 $\theta < 45^\circ$ 时峰值强度G随着 $\theta$ 变化不大。而在 $\theta > 45^\circ$ 以后，G随着 $\theta$ 角而急剧增加。在 $\theta < 45^\circ$ 前， $\theta$ 增加一度，峰值强度只提高0.05—0.5公斤/平方厘米，但在 $\theta > 45^\circ$ 以后 $\theta$ 增加一度，峰值强度则要提高5—15公斤/平方厘米，增加了1—2个数量级。

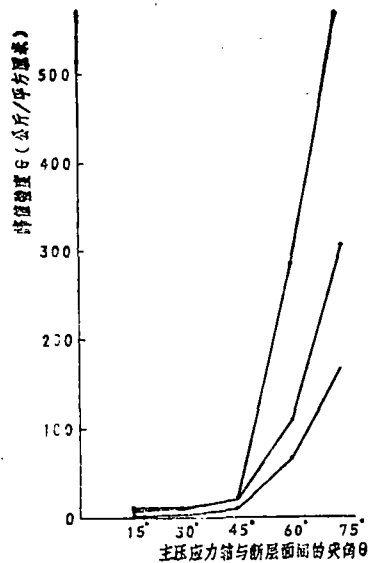


图3 含石膏夹层（H = 2毫米）的大理岩标本的G与 $\theta$ 的关系曲线

含白腊夹层的松香—石腊标本的实验结果也可以看出G随 $\theta$ 的增加而增加的变化情况与含石膏夹层的大理岩标本的情况类似。不过，由于浇铸软弱夹层时温度有差异，夹层厚度做的不准确或者做成软弱夹层有时带弯曲等造成了一系列误差，但总的趋势和变化规律还是一致的。图4表示了松香——石腊标本的峰值强度G随 $\theta$ 的变化。

### 六、断层泥厚度H对峰值强度G的影响

断层泥厚度也影响断层带再活动的难易<sup>[1,2]</sup>。在 $\theta$ 角度保持不变( $60^\circ$ )的情况下，我们研究了不同夹层厚度H对G的影响。我们以G为纵坐标，以夹层厚度H为横坐标作G—H关系曲线(图5)。曲线表明，G的数值随着H的增加而减小，但曲线的变化是非线性的，近似以指数形式变化。从整体来看，曲线以H=8毫米为界，在该点以前G下降的快，变化率大；但当厚度达到某一极限值时，G趋近于一个常数，厚度再增大对G的影响也就不大了，甚至有所上升。有的作者也得到过类似的结果<sup>[8]</sup>。这是由于在这两种情况下错动机制不同而造成的。实验中我们观察到当夹层很薄时，断层的剪切错

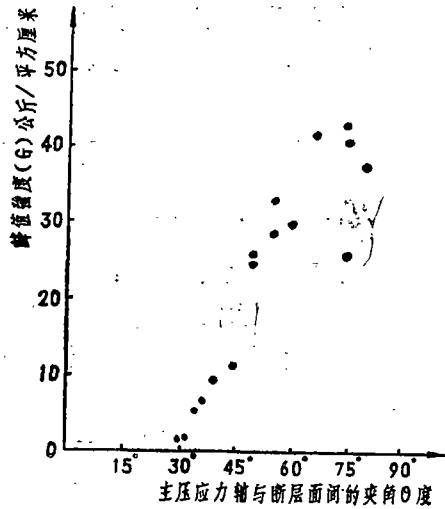


图4 含白腊夹层的松香——石腊标本的峰值强度G与 $\theta$ 的关系图

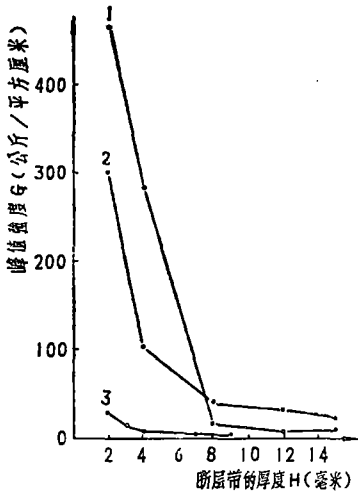


图5 在 $\theta = 60^\circ$ 时含石膏夹层的大理岩标本(1)、(2)和夹层为白腊的松香—石腊标本(3)的峰值强度G与夹层厚度H的关系曲线

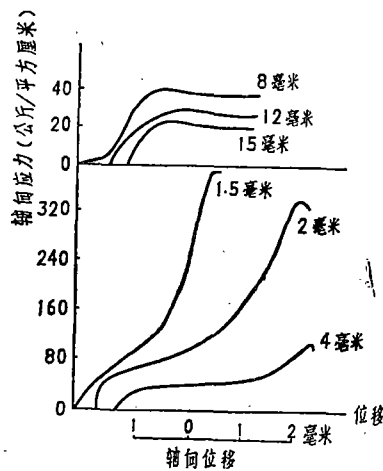


图6 大理岩标本在含不同厚度石膏夹层时应力应变曲线的变化

动主要发生在断层面和软弱夹层的接触面上；而当夹层变厚到一定程度时，断层的错动主要发生在软弱夹层内部。前者取决于面之间的摩擦阻力，后者则取决对软弱夹层内的抗剪强度。同样，两种错动机制下的应力——应变曲线也是不同的（图 6）。

由实验可见，断层厚度对峰值强度的影响并不亚于力的方向的影响，这似乎与计算结果矛盾，但实际上在厚度达到一定值（ $H = 8$  毫米）后，实验结果与计算结果是一致的。但在厚度较小时，沿断层的破裂机制是摩擦滑动，而这点在计算中没有考虑。这时，峰值强度随夹层厚度迅速下降是由于软弱夹层的润滑作用迅速降低了由摩擦面粗糙造成的摩擦阻力。

含白腊夹层的松香——石腊标本夹层厚度所引起的变化也有同样的趋势〔图 5（3）〕。

### 七、断层内外物质强度比对峰值强度G的影响

为了探讨断层物质强弱对断层活动所起的作用，我们又进行了含不同强度的断层物质的大理岩标本的实验，用于研究夹层充填物与围岩强度比（ $P_1/P_2$ ）对G的影响。实验中保持H为常数（2 毫米）。图 7（1）表示了当围岩为大理岩时，软弱夹层为松香——石腊时G随 $\theta$ 的变化。图 7（2）表示当围岩为大理岩、软弱夹层为石膏时的变化情况。由于松香——石腊的强度为50公斤/平方厘米，而石膏的强度为30公斤/平方厘米，所以可以看到在不同角度下后者的G值低于前者。同样，我们改变石膏夹层中水的含量（表 1），水的含量越少石膏强度越大。由此得到相同的夹角（ $\theta = 60^\circ$ ）情况下G随夹层强度的变化（图 8）。

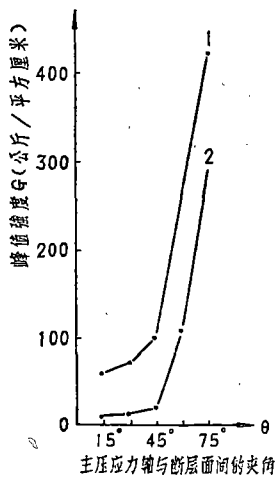


图 7 软弱夹层强度

不同时峰值强度  
G随 $\theta$ 的变化

- (1) 含松香——石腊夹层的大理岩  
 $P_1/P_2 = 0.04$
- (2) 含石膏夹层的大理岩  $P_1/P_2 = 0.02$

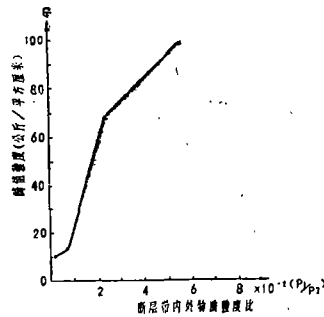


图 8 峰值强度与断层带内外强度比（ $P_1/P_2$ ）的关系曲线

表 1

水与石膏含量之比	抗压强度公斤/平方厘米	弹性模量（E）公斤/平方厘米
0.6 : 1	71.44	$8 \times 10^4$
0.8 : 1	29.60	$8 \times 10^4$
1.2 : 1	9.52	$1 \times 10^4$
1.4 : 1	2.84	$0.5 \times 10^4$

此外，还有不少因素影响峰值强度，如断层面的平直程度、断层岩脉融蚀围岩的程度、断层带内部结构、断层带的摩擦系数等也都很重要。

## 八、结 论

断层峰值强度的大小是衡量断层再活动的难易程度的一个标准,而影响峰值强度大小的因素主要来自两个方面。

第一方面,应力场的方向、大小对断层带是否再活动起了重要的作用。在 $\theta \leq 45^\circ$ 时断层很易错动,角度变化对峰值强度影响不大,所以破裂时 $\theta$ 角不一定为 $45^\circ$ ,但在 $\theta = 60^\circ$ 时要引起断层再活动的应力比 $\theta \leq 45^\circ$ 时几乎大1—2个数量级。说明在这种角度下产生再活动是很难的,只有在一定的条件下才可能发生。 $\theta > 75^\circ$ 时,要产生错动就更难了。此外力的大小同样影响很大。

第二方面,断层本身的因素也很重要。由计算与实验结果对照看来,在断层带厚度不大时厚度变化对G值影响很大,在断层面很不平整时,影响峰值强度的厚度变化范围更大。但当断层带厚度足够大时,断层带厚度的作用就不大了。但断层带材料性质变化1—2个数量级对G影响较小。

前一个因素说明了同一方向自然界中往往存在一系列的平行断层系(由于 $\theta$ 角相同),后一个因素说明同一方向的断层在活动性方面还有差异(由于断层带本身的性质不同),这两个因素互相作用,共同决定了断层带是否活动,从而使活动断层的分布复杂化了。前一因素研究较多,看来尚须对断层各方面的性质及断层带之间的相互影响加强研究。

(本文1980年8月10日收到)

## 参 考 文 献

- [1] Summer, R. Byerlee, J., A note on the effect of fault gouge composition on the stability of frictional sliding, *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci.* Vol.14, No.2, 1975.
- [2] Byerlee, J., Friction of rocks, *Pageoph.* Vol.116, NoS.4/5, 1978.
- [3] 郭志, 起伏结构面内软弱夹层厚度的力学效应, 全国第一届工程地质会议论文, 1979.

### EXPERIMENTAL RESEARCH ON SOME FACTORS AFFECTING THE REACTIVATION OF FAULTS

Ma Jin, Zhang Bo -tao, Yuan Shu-rong, Xu Xiu-qin  
Wang Bao-sheng, Liu Tian-chang, Wu Xiu-quan

(Institute of Geology, National Bureau of Seismology)

#### Abstract

A number of earthquakes are associated with active faults. In the absence of measuring data, we intend to deduce which faults are apt to be active. Based on the experimental and measured results, it is shown that direction and magnitude of external stress field as well as thickness and strength of faults are main factors which have affected the reactivation of faults.