

# 愈合断层再破裂的实验研究

张 智 吴开统

(国家地震局分析预报中心)

耿乃光 李纪汉 刘晓红

(国家地震局地球物理研究所)

## 摘 要

将济南辉长岩岩柱沿不同角度锯开,再用环氧树脂粘接后加工成标准圆柱形样品以模拟愈合断层。将样品置放在单轴压机下加压,使愈合断层再破裂。实验表明:愈合断层再破裂的前兆变形、破裂前的声发射率变化规律和声发射b值变化规律在某些条件下类似于完整岩石的破裂,而在某些条件下又类似于既存断层的错动。断层面与主压应力的交角以及断层愈合程度是影响愈合断层再破裂的前兆特征的主要因素。本文还指出,在地震活动性的研究中,地震断层在一定程度上愈合后再发生破裂这一问题是不容忽视的重要问题。

## 引 言

了解和掌握地震的活动性是实现地震预报的重要基础。研究地震活动性不能停留在经验的和唯象的水平,而应探索它的机理。在这方面开展适当的模拟实验,能够给理论研究带来有益的启发。从地震的发生是地壳中岩石破裂所引起的观点出发,人们进行了岩石破裂实验〔1〕。另一种观点认为地震是由地壳中既存断层的错动引起的,据此,人们又开展了岩石的摩擦滑动实验研究〔2〕。然而,地壳中断层在地下高温高压的环境下,经过一定的时期,可能会在一定程度上愈合,愈合的断层在应力作用下发生再破裂,在这种情况下地震活动规律如何?它类似于完整岩石的破裂,还是类似于既存断层的错动?这个问题是断层带上地震活动性研究中的主要问题。我们在单轴压力条件下进行了一些实验,作为探索这一问题的开端。

## 一、实验方法

为了模拟愈合断层,我们用直径为50毫米的圆柱形济南辉长岩制作样品。将辉长岩岩柱沿与轴向成一定角度的方向锯开,用粘接剂粘接,然后加工端面,使样品长度为110毫米。端

面的不平行度小于0.02毫米。

为了选取较强的粘合剂，我们试用了水泥、水玻璃、氧化铜、914胶和环氧树脂等。首先用双剪实验测量了这些粘合剂粘合的辉长岩样品的抗剪强度，测量结果如表1所示。结果表明，环氧树脂的抗剪强度最大。因此使用环氧树脂作为粘合剂。实验中发现，环氧树脂完全固化需7天左右的时间。

表1 各种粘合剂的抗剪强度

| 粘 合 剂             | 水 泥  | 水 玻 璃 | 氧 化 铜 | 914胶 | 环 氧 树 脂 |
|-------------------|------|-------|-------|------|---------|
| 抗剪强度 $\tau$ (MPa) | 0.81 | 2.34  | 5.19  | 13.7 | 19.4    |

模拟断层面与圆柱轴向的角度为30°、40°、50°和60°，这些角度即实验时断层面与载荷力的交角。样品放在200吨单轴压机上加载，加载的应变率为 $10^{-5}$ 秒。实验中用SF—02A型声发射仪测量声发射率，测量误差为3%。用AET—5000声发射仪测量声发射频度的幅值分布，其误差为2%。用应变片式测力器测量轴向载荷，用差动变压器式位移计测量轴向位移，用应变片测量了样品上的轴向和横向应变值。力、位移和应变的测量误差均为1%。

## 二、主要结果及分析

不同角度的粘合样品再破裂后的破坏形态如图1所示。由图可见，断层面与主压应力成30°、40°、50°角的样品破坏时，沿愈合断层面裂开，断层面两边岩面上看不到宏观裂纹。断层面与主压应力成60°角的样品在破坏时，虽然也沿愈合断层面裂开，但临近破坏前断层两边岩石上已有宏观裂纹发育。

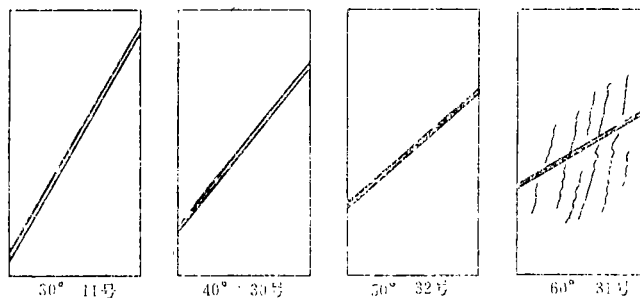


图1 不同角度的粘合样品再破裂后的破坏形态

Fig.1 The re-fracture state of the adhesive sample in various angles

图2和图3分别给出了不同角度的粘合样品实验过程中的应力 $\sigma$ —应变 $\epsilon$ 曲线和声发射率随时间的变化。为了便于比较，图中也给出了完整辉长岩样品的实验结果。我们还把不同角度粘合的样品和完整样品的破坏应力与最大轴向应变值列于表2。

由图2的应力—应变曲线可见，断层面与主应力的交角为30°、40°和50°的样品，其破坏前应变变化基本上保持在线弹性范围内，应力—应变曲线偏离直线很少。交角为60°的样品破坏前应力—应变曲线已明显偏离直线而向下弯曲，类似于完整岩石样品破坏前的应力—

应变曲线。这一现象与图1所示的交角为 $60^\circ$ 的样品破裂前断层两边岩石中的宏观裂纹的发育相一致。

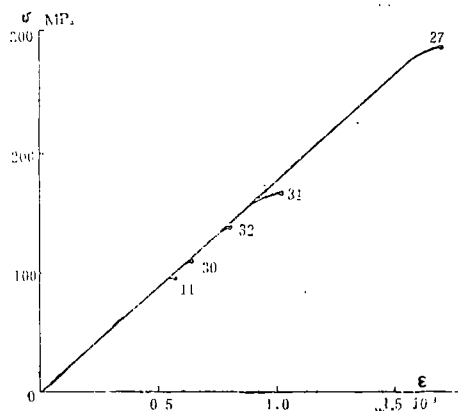


图2 不同角度的样品及完整样品破坏过程中的轴向应力 $\sigma$ 和轴向应变 $\epsilon$ 的关系曲线(图中标号代表岩样号)

Fig. 2 The relative curve between the axial stress( $\sigma$ ) and the axial strain( $\epsilon$ ) during the rupture of intact samples and the samples with different angles

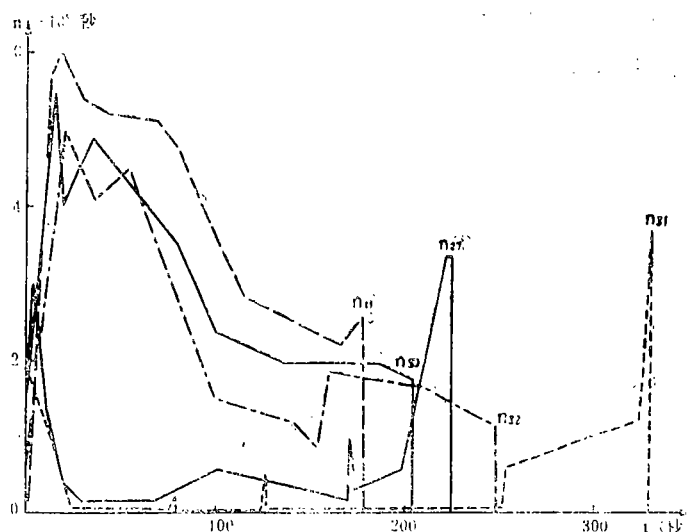


图3 不同角度的样品和完整岩样破坏过程中的声发射 $n$ 与时间 $t$ 的关系曲线(图中标号代表岩样号)

Fig. 3 Relative curve between ratio of acoustic emission( $n$ ) and time( $t$ ) during the fracture of intact samples and the samples with different on angles

表2 不同角度粘合样品及完整岩样的破坏应力与最大轴向应变值

| 岩 样 编 号                    | 11   | 30    | 32    | 31    | 27   |
|----------------------------|------|-------|-------|-------|------|
| 被切开的角度                     | 30°  | 40°   | 50°   | 60°   | 完整   |
| 破坏应力 (MPa)                 | 95.9 | 109.8 | 138.8 | 164.7 | 225  |
| 最大轴向应变 (10 <sup>-3</sup> ) | 0.57 | 0.61  | 0.79  | 1.03  | 1.69 |

表2的数据表明, 粘合断层样品的强度随断层面与主压应力的交角的增加而增加, 样品破坏前的最大应变值也随此交角的增加而逐渐增加。

图3给出了断层面与主压应力交角为30°、40°、50°和60°的样品及完整辉长岩样品破坏过程中声发射率 $n$ 随时间 $t$ 的变化。由图可见, 完整岩石样品(27号)在加压开始后, 声发射率较高, 随着应力的增加, 声发射率降低到很低的水平, 当岩石临近破裂时, 声发射率急剧增加, 随之岩样发生破坏。从图中可以看到, 具有60°切口的31号样品的声发射活动与完整岩石的声发射活动十分相似, 声发射也经历了增加—减小—平静—再增加的过程。而对于具有30°、40°和50°角切口的11号、30号和32号样品, 加压开始后, 声发射活动出现高峰。随着应力的增加, 声发射率慢慢下降, 不出现声发射平静阶段。临破裂前, 声发射率增加的前兆不明显(11号样品), 甚至观测不到(30号和32号样品)。这种现象类似于岩石摩擦实验中正应力较低情况下的声发射活动特征〔3〕。

在研究地震前微震活动规律方面,  $b$ 值是一个重要的特征量。为此, 我们测量了具有不同角度切口的样品破裂前声发射频度的幅值分布。图4给出了切角为30°(22号样品, 图4a)和50°(图4b, 32号样品)样品的声发射频度—幅值分布。纵座标 $N$ 为声发射次数,

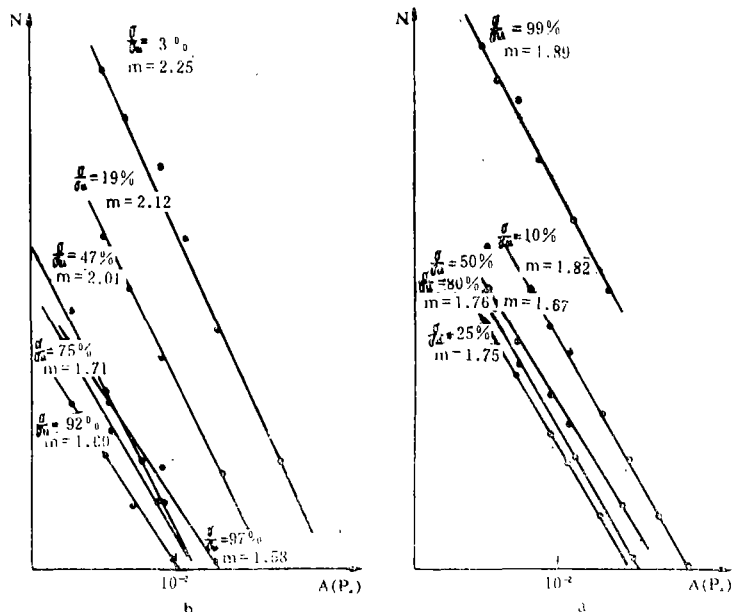


图4 样品破裂前声发射频度的幅值分布  
a. 22号样品      b. 32号样品

Fig. 4 The frequency distribution of acoustic emission with acoustic pressure amplitude of samples No. 22 (a) and No. 32 (b)

横坐标A为声压幅值。图中每条直线代表一定应力状态下, 应力变化5 MPa过程中声发射频度的幅值分布。这些直线的斜率就是石本—饭田公式中的 $m$ 值<sup>[4]</sup>。利用关系式 $b = m - 1$ , 很容易得到不同应力状态下的 $b$ 值<sup>[5]</sup>。

图5给出了上述两种岩样加载过程中 $b$ 值随应力状态的变化(曲线3和4)。为了便于比较, 同时给出了完整辉长岩加载过程中的声发射 $b$ 值变化(曲线1)和辉长岩摩擦实验中粘滑发生前声发射的 $b$ 值变化(曲线2)。由图可见, 完整辉长岩破裂前声发射 $b$ 值略有下降。而摩擦滑动的粘滑失稳前, 声发射 $b$ 值略有上升。有切口的粘合样品的实验表明,  $30^\circ$ 切口样品的声发射 $b$ 值的变化规律类似于岩石摩擦实验中声发射的 $b$ 值变化。 $50^\circ$ 切口的样品破裂前当应力水平在低于样品强度70%时, 其 $b$ 值的变化规律类似于岩石破裂时的 $b$ 值变化, 随后 $b$ 值的变化又类似于岩石摩擦情况下的 $b$ 值变化。

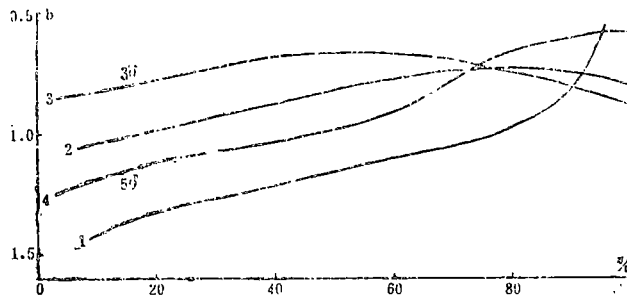


图5 岩样及辉长岩在摩擦实验中的声发射 $b$ 值随应力状态的变化

1. 完整辉长岩破裂 2. 辉长岩摩擦(正应力 $\sigma = 60\text{MPa}$ )  
3. 愈合断层样品再破裂(22号) 4. 愈合断层样品再破裂(32号)

Fig. 5 The changes of  $b$  value of acoustic emission in various stresses of sample No. 22 (curve 3), sample No. 32 (curve 4), intact sample (curve 1) and gabbro sample (curve 2)

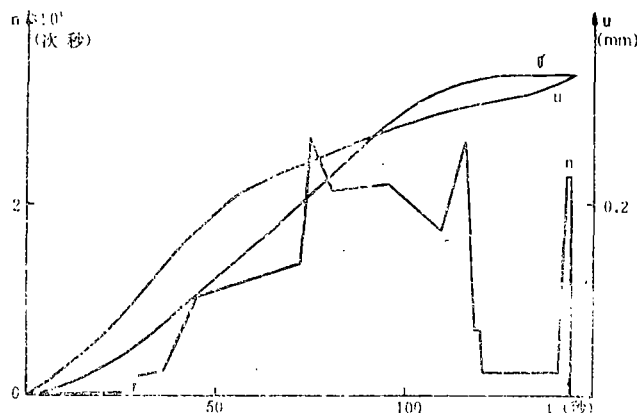


图6 16号岩样(粘接24小时后)的轴向应力 $\sigma$ 、整体位移 $u$ 及声发射率 $n$ 与时间 $t$ 的关系曲线

Fig. 6 Relative curve between axial stress ( $\sigma$ ), displacement ( $u$ ), and the ratio of acoustic emission ( $n$ ) of sample No. 16 with time ( $t$ ) (after healing for 24 hours)

图6是用粘接剂粘接24小时后,即粘接剂没有完全固化的样品的实验结果。样品的切口角度为 $30^{\circ}$ 。由图可见,加压经过一段时间后,声发射现象开始明显增加,随着应力的增加,声发射率也越来越大,而在临破坏之前,可以看到应力基本不随时间变化,而与此同时,声发射急剧下降,出现异常的声发射平静期。而随着蠕变现象的延续,在一定的时期后,岩石发生破坏,也即发生一次较大的地震。因而对于愈合年代不太长的愈合断层的再破坏,在蠕变现象之后或是在声发射的平静期后,将会发生一次较大的地震。

### 三、讨 论

上述实验表明,岩石中愈合断层再破裂前的微震活动和变形等前兆特征,在某些条件下类似于完整岩石的破裂前兆,而在另一些条件下类似于既存断层的摩擦滑动粘滑失稳的前兆。有些场合其微震活动特征先类似于完整岩石破裂,随后又转向类似于既存断层的摩擦。还有些场合其前兆性微震活动具有自己独特的特点。这些实验表明,在地震活动性的研究中,断层在一定程度上愈合后再发生破裂这一问题是不容忽视的。

本项研究主要探讨了断层面与主应力交角不同时的影响,发现由于交角不同,愈合断层破裂的前兆有很大的差别。我们还做了一些实验来探讨愈合强度不同时前兆性微震活动的影响,并证实了这种影响的存在。然而,由于济南辉长岩自身强度很高,我们尚未找到抗剪强度能与它相比甚至超过它的粘合剂,因此,本实验的样品都属于弱胶结样品,相当于愈合强度不高的断层。今后应对愈合强度更高的样品进行实验,并在实验中考虑更多的影响因素。

(本文1985年9月21日收到)

### 参 考 文 献

- [1] 茂木清夫, 岩石の破坏火山, 第2集, Vol. 7, 第2—3号, 89—101, 1962.
- [2] Brace, W. F., Byerlee, J. D., Stick-slip as a mechanism for earthquake, Science, Vol. 153, 990—992, 1966.
- [3] Scholz, C. H., Microfracturing and the inelastic deformation of rock in compression, J. Geophys. Res., Vol. 73, No. 4, 1417—1432, 1968.
- [4] 石本巳四雄, 饭田汲事, 微动计にする地震观测(1), 地震研究所报, Vol. 17, 443—478, 1939.
- [5] 浅田敏, 铃木次郎, 友田好文, 地震の頻とエネルギーについて地震, Vol. 2, No. 3, 11—15, 1950.

## AN EXPERIMENTAL STUDY OF REFRACTURE ON HEALED FAULT

Zhang Zhi    Wu Kaitong

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

Geng Naiguang    Li Jihan    Liu Xiaohong

(*Institute of Geophysics, State Seismological Bureau, China*)

### Abstract

In order to model healed fault, standard columnar sample is made from Jinan gabbro, which is sawed with various angles and cemented by epoxy resin. Under the uniaxial stress, healed fault is refractured. It is found that precursor deformation of healed fault, which is refractured, the regular change of acoustic ratio and the  $b$  value before rupture are similar to the complete sample in some conditions and to the stagger of original faults in sample in other conditions. The angle between fault plane and main stress as well as the degree of fault being healed, is the factor affecting the refracture of healed fault. It shows that the problem of healed faults is very important in study of seismic activity.