

三轴压缩下软弱面对岩石破裂的影响

臧 绍 先

(北京大学 地球物理系)

摘 要

将岩石标本分为三组,分别锯至直径的 $\frac{1}{3}$ 、 $\frac{1}{2}$ 及完全切断。每组的切口与轴向上的交角分别取 20° , 30° , 40° 和 50° 。然后用环氧树脂将切断的标本粘合,将锯开的切口填充,形成人为软弱面。将上述标本及完整岩石标本分别在0.79千巴及3.03千巴的围压、 10^{-6} /秒的常应变率下进行实验,发现:

(1) 在部分切口的标本中,明显由两个紧接的主要破裂过程组成,第一个是软弱面的破裂,第二个是岩石标本中新破裂。

(2) 全切口标本中破裂面完全沿软弱面发展; $\frac{1}{3}$ 切口标本中,大多数破裂面沿软弱面发展,但在3.03千巴围压下,切口与轴向成 20° , 50° 角的标本中,主要破裂面取与软弱面共轭的方位; $\frac{1}{2}$ 切口标本中,破裂面较复杂,但都交汇在切口端点,且取向大都在软弱面共轭方位,但夹角较小。

(3) 切口对标本破裂强度有明显影响,切口越大,强度越低;切口的角度对全切口标本及 $\frac{1}{3}$ 切口标本的强度也有明显影响,在 30° 左右强度最小,而对 $\frac{1}{2}$ 切口标本的强度没有影响。

结合上述结果对地震断裂与软弱面的关系进行了讨论。

一、引 言

浅源地震与地壳中存在的断层等一类软弱面有着密切关系,这是地震学家普遍承认的,但地震破裂和这些已存在的软弱面是怎样的关系,却是需要认真研究的问题。地震工作者用地震断层面解来推断构造应力场的方向,有人也认为是一个需要进一步研究的问题^{[1][2]}。实验室内曾进行了大量的完整岩石的破裂实验^[3]及切断的岩石标本的摩擦实验^{[4][5]},对地震机制提出了可能的解释,本实验与上述两类实验不同,根据上面的问题,利用含有各种软弱面的岩石标本进行实验,研究各种软弱面对岩石破裂强度的影响及对破裂面形式和取向的影响。

二、实验设备及标本准备

实验是在英国伦敦大学大学学院的高压容器中进行的，围压是由气体介质（氩气）提供，轴向压力由电动螺旋千斤顶提供。围压由Harwood电阻测压计测量，差应力由Eliot测力计测量，应变测量结果以模拟方式记录在X—Y记录器上。

整个实验均是在室温下进行，应变率为 10^{-5} /秒。

实验所用的岩石是闪岩，为和该实验室通用标本形状一致，取长约3.0厘米，直径为1.0厘米的圆柱形，为避免各向异性的影响，所有标本是按同一方位，取自同一块岩石。

根据实验需要，岩石标本分三组进行加工。第一组按照与轴线成 20° 、 30° 、 40° 、 50° 角将标本锯断，然后用环氧树脂将锯开的两部分标本再重新粘合，下面称其为全切口标本；第二组是按照与上述相同的角度将标本锯到直径的三分之二处，清洗锯的表面后，用环氧树脂填充锯的缝隙，锯缝宽约0.8毫米，称其为 $\frac{2}{3}$ 切口标本；第三组是按照上述角度将标本锯到直径的三分之一，清洗表面后用环氧树脂填充，称其为 $\frac{1}{3}$ 切口标本。上述加工的目的是在完整岩石中造成人工的软弱面或软弱部分，研究这种软弱面对岩石破裂强度和破裂面的影响。待环氧树脂凝固后，将标本用薄铜套套住，并固定在压杆上，放于高压容器内试验。

三、实验结果及分析

将三组经过加工的岩石标本及没有切口的岩石标本分别在0.79千巴和3.03千巴（大约相当于地壳内深度在3公里到1公里的岩石静压力）的围压条件下，进行三轴实验，其实验结果可以归纳为以下三方面。

1. 切口对破裂过程的影响

图1上给出了完整岩石、全切口标本及部分切口标本的一些应力应变曲线。通过对所有

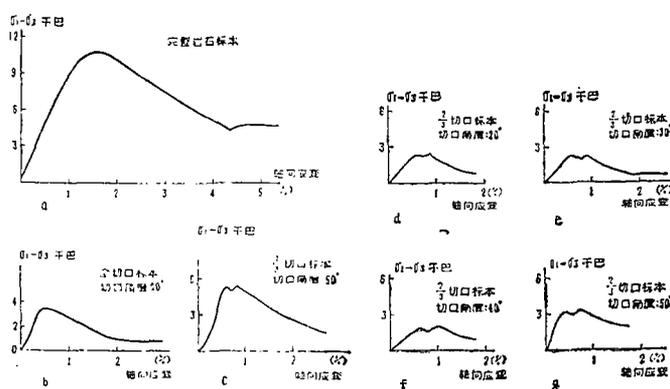


图1 3.03千巴围压下，完整岩石标本、全切口标本及部分切口标本的应力应变曲线

Fig. 1 The stress-strain curves for the intact rock samples, the completely cutting samples and the partly cutting samples under confining pressure of 3.03k bars.

应力应变曲线的分析，可以发现完整岩石标本及全切口岩石标本的应力应变曲线只有一个峰值。而绝大多数部分切口标本的应力应变曲线与前两者不同，均有两个极值，两个极值相差不大，而且相应于第一个极值后的应力降非常小，很快第二个极值就到达。所以完整岩石标本和全切口标本的结果和其他作者的结果一样，意味着是一个统一的剪切破裂过程，而部分切口标本似乎有两个主要的破裂过程。通过实验分析，部分切口标本应力应变曲线的第一个极值是与切口环氧树脂夹层与岩石之间粘结面的破裂有关，而第二个极值与岩石中新破裂的形成有关。

由应力应变曲线上可以看出，第一个破裂过程的应力降，与完整岩石标本相比是很小的，最大的约为几百巴，最小的在记录中观测不到，这可能是由于夹层周围的岩石没有破坏，限制了这部分破裂面上应力的进一步降低。

部分切口上两个极值在数值上相差不多，说明前后两个破裂在相近的差应力下产生的。把切口角度为 30° 的部分切口标本第一个极值和全切口标本的强度比较一下，可以发现随着切口深度的减小，使环氧树脂与岩石胶结部分破裂所需的差应力明显增大。这是因为部分切口标本中，环氧树脂夹层与岩石胶结面的破裂受到未切到的岩石的影响，这可能因为粘结部分的破裂要求有一定形变，未切断部分的岩石决定了形成相应应变所需的应力。当未切断的岩石部分的应变达到一定程度，胶结部分发生破裂，应力进一步集中到未切断的岩石部分，新的破裂面很快形成，两个极值所对应的应力差相差不多。

2. 切口角度和深度对标本破裂形态的影响

切口角度和深度影响破裂面的形态。

全切口标本全部沿锯断面破裂，其他部分完整无损。

$\frac{2}{3}$ 切口标本在0.79千巴围压下，破裂面沿锯切面继续发展，见图2 a-d。在切口角度为 40° 、 50° 的标本中，新破裂面（即超过锯断面的部分）与轴向夹角明显变小，在切口角

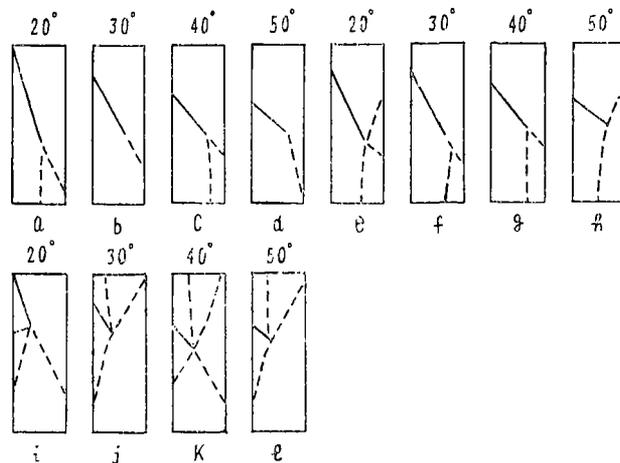


图2 切口角度和切口深度对破裂的影响

a-d为 $\frac{2}{3}$ 切口标本，围压为0.79千巴；e-h为 $\frac{2}{3}$ 切口标本，围压3.03千巴；i-l为 $\frac{1}{3}$ 切口标本，围压3.03千巴
实线为锯切口，虚线为新破裂面，切口角度示于图上。

Fig. 2 The effect of the cutting angle and the depth of cutting on the fracture.

度为 20° 、 40° 的标本中，除上述破裂面外，在切口端部还发展另一个近于轴向的破裂，见图2 a、c。在3.03千巴围压下，切口角度为 20° 、 30° 、 40° 的标本，破裂面沿切口面继续发展，同时也在切口端部有一个近于轴向的破裂面，而切口角度为 20° 、 50° 的标本，除原有切口破裂之外（ 50° 标本切口破裂而不继续发展），沿与切口近于共轭的面发展了另外一组贯通的剪切破裂，只是与轴向所成的角度要小于 30° ，见图2 e-h。（图2中a-d与e-h的不同是由于围压不同引起的。）

$\frac{1}{3}$ 切口标本不再有单一的剪切破裂面，破裂较为复杂，除环氧树脂夹层与岩石粘结面产生破裂外，尚其他的破裂面。这些破裂都通过切口的端点，其中一个贯穿标本成为主要破裂面，在图2 i-e上可以看到，除切口为 20° 的标本的主要破裂面是沿切口继续发展外，其他三种角度的标本的主要破裂面均与切口接近于共轭方位。

3. 切口角度和深度对岩石破裂强度的影响。

为了研究切口方位和深度对破裂强度的影响，将实验结果进行了归一化处理，即将各组切口标本的强度除以完整岩石标本的强度，称之为归一化强度。图3 a是围压为3.03千巴的结果，图3 b是围压为0.79千巴的结果，不同组的标本用不同的符号表示。由图3可以看出下列结果：

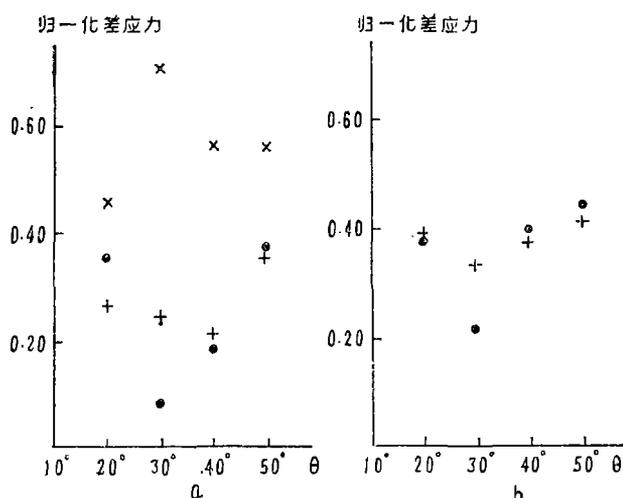


图3 切口角度和深度对破裂强度的影响

●代表全切口标本，+代表2/3切口标本，*代表1/3切口标本。a围压为3.03千巴，b围压为0.79千巴。

Fig. 3 The effect of the cutting angle and the depth of cutting on the strength of the samples.

全切口标本的破裂强度随切口角度变化非常明显，在 30° 左右达到最小值，归一化强度约为0.1—0.2左右，而在夹角为 20° 和 50° 时，强度变为0.3—0.4，接近增加一倍。如果就整组的平均强度来看，全切口标本是强度最低的一组。由上面对破裂面的分析可以看出，这是因为破裂完全是沿着软弱面进行的。

$\frac{2}{3}$ 切口标本的强度也受到切口角度的影响，在 30° — 40° 之间强度最低，而在 20° 至 50° 之间，破裂强度的变化范围比全切口标本小得多。平均强度约为完整岩石的 $\frac{1}{3}$ 左右。

对于 $\frac{1}{3}$ 切口标本，只作了围压为3.03千巴的一组，由图3 a可见，破裂强度与切口

角度没有什么明显的依赖关系，与上面两组标本完全不同，而且破裂强度比前面两组大大增加，近于 $\frac{2}{3}$ 切口标本的强度的两倍。

由上面结果可以清楚看出，切口深度对标本强度有着明显的影响，这主要是环氧树脂相当于软弱夹层，外加载荷主要由未切断的岩石部分来承担，所以就整个标本看来，切口越深，强度越低。

四、讨 论

本实验使用的粘结材料是环氧树脂，实验结果的具体数值会受到岩石及粘结材料性质的影响，但总的趋势却与材料关系不大。本节根据实验的结果对地震断裂进行几点定性的讨论。

1. 地壳中遍布一些断层和软弱面，有人认为在一定的应力作用下，这些断层重新活动是地震成因之一。全切口标本可以看成是原已存在而又重新胶结的断层模型，由实验结果来看，如果地壳中存在这种断层，当应力场达到一定程度，而且断层分布在一定角度之内，断裂将首先沿这些断层发生。这时断层面与最大主应力的夹角就不是地震断层面解给出的 45° ，而是决定于断层原有的方位。如果在各方位均有相同胶结强度的断层分布，这个角度应小于 45° ，具体数值决定于胶结材料的性质。

2. 地壳中常存在一些软弱面，它们没有贯穿地质块体，而中断于地质块体的某一部分。这些软弱面的端点常被认为是易于发生地震的地区，部分切口标本一定程度上代表了部分地质块体中存在着软弱面的模型。由实验可以看出软弱面的存在降低了地质块体的强度，容易引起破裂，而降低的程度决定于软弱面在地质块体中贯穿的程度，而新的破裂一般均开始于软弱面的端点，但新破裂面的取向，却取决于软弱面的取向及贯穿程度。从实验结果看，新破裂面与最大主应力的夹角明显小于 45° 。

3. 如果地震是由于应力在软弱面端点集中而发生，则由实验结果看，在软弱面上可能出现应力降很小的前震或者无震蠕动。

Murrell 博士对本实验工作曾提出有益的建议并进行了有益的讨论，特此感谢。

(本文1984年8月10日收到)

参 考 文 献

- [1] Mckenzie, D.P., The relation between the fault plane solutions for earthquakes and the directions of the principal stresses, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 59, 1969.
- [2] 臧绍先, 地震断裂和应力场, 地震地质, Vol. 3, № 3, 1981.
- [3] Edmond, D. and S.A.F. Murrell, Experimental observations on rock fracture at pressure up to 7 kbars and the implications for earthquake faulting, Tectonophysics, Vol. 16, 1973.
- [4] Byelee, J.D., and F. Brace, Stick slip, stable sliding and earthquakes -- effect of rock type, pressure, strain rate and stiffness, J. Geophys. Res., Vol. 73, 1968.
- [5] Scholz, C.H., Detailed studies of frictional sliding of Granite and implications for the earthquake mechanism, J. Geophys. Res., Vol. 77, 1972.

THE EFFECT OF A PLANE OF WEAKNESS ON ROCK FRACTURE UNDER TRIAXIAL COMPRESSION

Zang Shaoxian

(*Department of Geophysics, Beijing University, China*)

Abstract

For studying the relation between earthquake faulting and a pre-existing plane of weakness, the amphibolite samples were given special treatment. In the first group, the rock samples were sawed into two with the angles of 20°, 30°, 40°, 50°, between sawing plane and axial direction of the sample and then the two parts of the sample were adhered to each other with the epoxy resin. In the second and the third groups, the rock samples were sawed into two thirds and one third of the diameter of the samples respectively with the sample angles mentioned above, then were filled with the epoxy resin. The epoxy resin filled in the samples formed an artificial plane of weakness. The samples described above and the intact rock samples were tested under the confining pressures of 0.79k bars and 3.03k bars with constant strain rate of 10^{-5} per second. It was found:

1. The process of fracture in the partly cutting samples consists of two major subfractures which followed one another closely. The first one is the fracture of the plane of weakness, the second one is a new fracture in rock,

2. The fracture in the samples which were cut through is along the plane of weakness completely. The fracture in most of the samples which were cut into two thirds of its diameter developed along the plane of weakness but the fracture in the samples with cutting angles of 20° and 50° under confining pressure of 3.03k bars is in the conjugate direction of the plane of weakness. All of the fractures in the samples which were cut into one third of its diameter pass through the end of cutting and most of them are in the conjugate direction of the plane of weakness, but the included angle, smaller.

3. The plane of weakness had obvious effect on the strength of the samples. The deeper the cutting, the lower the strength. The cutting angle also influences the strength of the samples which were sawed into two or into two thirds of its diameter, but there is no effect of the cutting angle on the strength of samples which were sawed into one third of its diameter.

By means of the results from the experiment, the relation was discussed between the earthquake faulting and the plane of weakness.