

介质在断层运动中的作用 及其地震地质意义

(参考材料之八)

各种因素对地震发生条件的交叉影响

马 瑾

(国家地震局地质研究所)

在地震发生条件的研究中,一些人对构造因素给予了较多的注意,一些人对物理环境则更重视,而地震发生处介质(如断层泥)的作用,例如断层带物质的矿物学和岩石学、断层带物质的结构和构造、断层带内孔隙水的多少及其化学成份以及断层泥在温度、压力、溶液化学影响下的作用等则研究较少。一般认为,作为一种软弱介质,断层泥的作用不过是使断层弱化,并使其滑动稳定化而已。用传统的因素分析法分析地震的发生条件时,往往得出围压增大会促进粘滑,温度增高会抑制粘滑,应变速率减慢会促进粘滑等结论。这里往往不涉及断层带的物质。下面我们拟讨论断层泥的成份,以及不同因素对它们的力学性状的交叉影响,从而剖析外因是如何通过介质这个内因条件来体现其作用的。

断层带的物质成份以及对力学性质起主导作用的成份

对断层带的物质成份没有全面调查,但有一些资料。如云南昇龙湖断层带物质中以伊利石为主^[1];二连附近断层物质以蒙脱石、绿泥石、伊利石以及方解石碎屑为主^[2]。沿圣安德列斯断层的干湖谷钻孔中,在600多米深处为蒙脱石、伊利石、绿泥石、高岭石以及石英、长石碎屑^[3-5]。另一些作者得出圣安德列斯断层中段是以粘土类断层泥为主^[6],而南段是以破碎的碎裂岩为主^[4],其成份包括石英、长石、云母和绿泥石等。在一些深大正裂带的超基性岩发育处,蛇纹石则是最常见的断层带物质^[7]。

一些作者研究了断层带物质的力学性质^[8-11]。其中以不同的物质作断层泥进行实验,得到如下结果:常温下断层带物质的强度、滑动特性以及由稳滑向粘滑的转换压力与其组成矿物的莫氏硬度有关。石英、长石、黄铁矿等矿物的莫氏硬度为6—7,转换压力在200 Mpa以上。白云石、方解石、硬石膏的莫氏硬度为3—5,转换压力在50—100 Mpa之间。岩盐、重晶石的莫氏硬度为2.5—3.5,转换压力很高,至少在200 Mpa以上。因此,在相同的压力条件下,由于物质不同,有的可表现为粘滑,有些则表现为稳滑。

断层泥往往是由不同的物质混杂组成。当它们是以均匀方式混合时,软矿物只要占10%,即可以影响滑动特性。用由石英和硬石膏组成的混合断层泥进行实验发现,单纯石英断层泥在100 Mpa下是稳滑,单纯硬石膏断层泥在100 Mpa下是粘滑。二者混合,在硬石膏含量占10%时开始出现粘滑。随着硬石膏含量增大,粘滑增强,粘滑时的应力增大。当不同介质的断层泥形成层状结构时,软介质的层起主导作用。由上述分析可见,断层泥中的软介质对断层力学性状可能有更大的作用。

围压对断层滑动性质的影响

图 1 表示了几种含不同断层泥的标本在不同围压下的变形曲线。实验是在常温 (20℃) 下进行的, 沿与轴向呈 30° 的方向将标本切成两块, 中间填充断层泥, 断层泥厚度为 0.064 厘米。标本和断层泥均为干燥的, 轴向压缩速率为 6×10^{-3} 毫米/秒, 这是几种断层泥实验中的共同条件。这些实验的不同点是所含断层泥成份不同。图 1(a) 中标本所含断层泥为花岗岩碎屑。由图可见, 随着围压增大, 整个标本强度增大, 并在 3.17 千巴围压下由稳滑变为粘滑。图 1(b) 是含蛇纹石碎屑标本的应变曲线。随着围压增大, 标本同样表现为强度增大, 在 3.12 千巴围压下由稳滑变为粘滑。在这里, 围压的作用是增加强度, 促进粘滑。其它材料的实验中(图 1(c)), 围压的作用没有显示趋势性的差别。断层泥物质的不同没有造成围压效应的本质区别, 不同的仅仅是从稳滑变为粘滑的转变压力随介质而变。

温度的作用

在围压为常数的情况下, 增加温度对不同介质的断层泥可造成不同的影响。图 2 是砂岩标本沿与轴向呈 35° 方向切开, 中间充填方解石粉的应力应变曲线。围压为 200MPa,

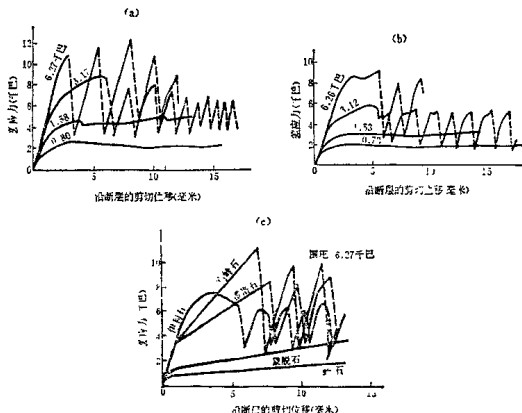


图 1 几种含不同断层泥的标本在不同围压下的应力应变曲线 (a) 花岗岩碎屑 (b) 蛇纹石碎屑 (c) 其它材料

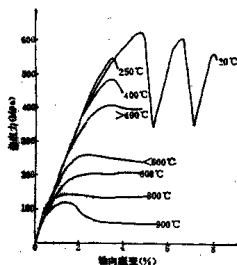


图2 含方解石页岩中的砂岩标本的应力应变曲线⁽¹⁾

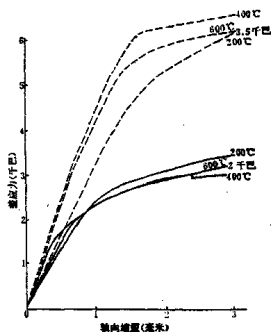


图3 含花岗岩碎屑页岩的标本在不同围压条件下的变形曲线⁽¹⁾

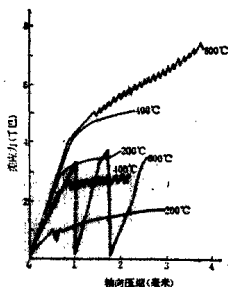


图4 含方解石页岩泥标本在不同围压条件下的变形曲线
(根据[1]改画)

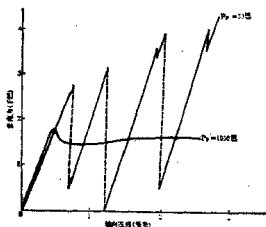


图5 在有效压力、温度、应变速率相同而孔隙压力不同的情况下,含方解石页岩泥标本的变形
(孔隙压力 $P_0 = 30$ 巴的试样组(1), $P_0 = 1000$ 巴的试样组(2), 有效压力 $P_e = 1000$ 巴, 温度 $T = 600^\circ\text{C}$, 应变速率 $\dot{\epsilon} = 10^{-4}/\text{秒}$)

正应变速率为 $3 \times 10^{-4}/\text{秒}$ ⁽²⁾。在以上条件相同的情况下,改变实验时的温度。如图所示,在低温下 ($20^\circ\text{--}250^\circ\text{C}$) 标本强度高,并且表现为粘滑。随着温度增高,标本强度逐渐降低,并且表现为稳滑,这与一般岩石变形的温度效应一致。

(1) 马瑟, Moore, D., Sunmets, R., Bverlee, J., 温度、压力、孔隙压力对页岩变形的效应, 1954 年。

图 3 表示沿与轴向呈 30° 方向切开, 填充花岗岩粉断层泥标本的变形。断层泥厚度为 0.65 毫米。标本和断层泥均以水饱和。实验时孔隙压力为 1000 巴, 应变速率为 $10^{-4}/\text{秒}$ 。由图可见, 围压由 2 千巴增至 3.5 千巴时, 强度增高。但温度由 200°C 增至 600°C , 对强度和变形特点没有什么影响。当孔隙压力为 30 巴时¹⁾, 这种趋势不变。

图 4 表示在前述类似的标本中含有蛇纹石断层泥的变形情况。孔隙压力为 30 巴, 应变速率为 $10^{-4}/\text{秒}$ 。由图可见, 围压由 1 千巴增至 2.5 千巴, 强度提高。与此同时, 当温度由 200°C 增至 600°C 时, 强度明显增高, 而且由稳滑变为粘滑。

上面三种介质对温度响应有明显的差别。对方解石断层泥说, 温度增高的作用是降低强度, 抑制粘滑。对花岗岩碎屑断层泥说, 温度增高, 几乎不起作用。对蛇纹石断层泥说, 温度增高却是增加强度, 促进粘滑。

孔隙压力的作用

图 5 表示含蛇纹石断层泥的标本在温度、有效压力、应变速率相同, 而孔隙压力不同时变形曲线。在孔隙压力较低时, 强度高, 并且有强烈的粘滑。孔隙压力增高(有效压力不变)引起强度降低, 并抑制了粘滑。含伊利石和蒙脱石断层泥的标本显示了类似的效果²⁾。

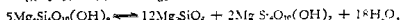
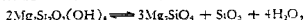
讨 论

基于以上事实, 我们作如下讨论

1) 在常温下, 不同介质对围压的响应没有趋势性差别, 这是因为在常温下不同介质由于围压变化引起的变形机制的变化是相同的。在这里, 围压的作用只是一种机械作用, 一种抑制变形的作用。

2) 粘土类、碳酸盐类和硅酸盐类断层泥是三种常见的断层带物质, 它们对温度的响应是不同的。这是因为温度引起它们变形的机制不同。在低温下, 断层泥的变形基本上表现为碎屑物质的变形, 是碎裂流动机制。但在高温下, 方解石断层泥的变形机制为晶内位错; 花岗岩类断层泥的变形机制仍为碎裂流动; 而蛇纹石则发生了脱水作用, 其结果, 变形介质由蛇纹石变成了镁橄榄石, 强度发生了很大的变化。因此, 温度起了改变矿物成份和结构变化的作用。温度能否促进变形则由变化的产物在新条件下的变形机制确定。如果我们仅根据不同围压下不同介质在变形上无大的差异来否认介质的作用, 显然是片面的。温度与介质这两个因素是相互影响的。

3) 在低温下 (200°C), 蛇纹石在变形后成份不变, 因为变形前后 X 射线衍射图没有变化。而在高温下, 蛇纹石在变形后成份发生了变化(图 6)。变形后, 介质的 X 射线衍射图中出现了镁橄榄石、石英和滑石。这说明在脱水过程中伴随了两种化学过程:



与孔隙压力不同时变形产物的 X 射线衍射图, 发现产生高压下有更多的蛇纹石和滑

1) 见 Moore, D., Summers, W., Bivens, J., 强震、应力、应变、温度、介质、二、1984年。

2) 同上。

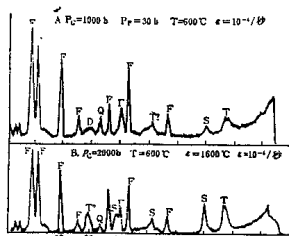


图5 由于孔隙压力不同,蛇纹石变形后成份的变化^[1]

断层带中广泛存在多种粘土质断层泥。这些粘土矿物中存在着吸附水、结晶水和结构水。当它们处于地壳中一定深度条件下,很可能产生脱水作用。不同粘土矿物脱水的条件可能不同,对它们说,孔隙压力不只是影响了有效压力,它还可能影响化学反应速度,从而影响力学性状。

4) 在低温下,对蛇纹石断层泥说,压力起着增加强度,促进粘滑的作用,是一种机械作用。在高温下,同样对蛇纹石,压力却起着降低强度,抑制粘滑的作用。这是因为围压愈高,介质渗透率愈低。高温下蛇纹石中脱出的水一时不能与外界达到平衡,造成了断层带中较高的孔隙压力所致。

5) 由以上实验结果可见压力、温度、孔隙压力和介质成份的作用是相互影响的。一种因素起什么作用是与其它因素的条件相关联的,也是与这些条件下的变形机制相连系的。脱离了其它条件,脱离了具体的变形机制,侈谈什么因素会起什么作用是危险的。

地球是一个整体,一个地区发生地震和变形的条件是各种因素的综合结果。在地震工作中有很多孕震模式,它们往往是与具体地区条件相脱离,从单因素和双因素出发的模式。以上实验表明在实验室研究多种因素的交叉影响、变形机制和多维模式图,在特定地区研究具体的环境条件是理解地震成因和开展确定性地震预报研究的一个必要途径。

参 考 文 献

- [1] D. E. Moore, R. Summers, J. D. Byerlee, Strengths of Clay and Non-clay Fault Gouges at Elevated Temperatures and Pressures 24th U. S. SYMPOSIUM on Rock Mechanics, 1983.
- [2] J. M. Logan, N. G. Higgs, M. Friedman, Laboratory Studies on Natural Gouge from the U. S. Geological Survey Drv Lake Valley No. 1 Well, San Andreas Fault Zone, Eds. N. L. Carter, Mechanical Behavior of Crustal Rocks, 1981.
- [3] W. F. T., Mineralogy and Physical Nature of Clay Gouge, Pure and Appl. Geophys, 116, 655—659 1978.
- [4] Anderson, J. L., Osborne, R. H., Palmer, D. F., Petrogenesis of Cataclastic Rocks within the San Andreas Fault Zone of Southern California USA, Tectonophysics, 67, 221—249, 1980.
- [5] R. G. 科尔曼,蛇纹岩,地质出版社,1982.

1. J. D. Moore, R. Summers, R. Byerlee, J. 蛇纹石与硅酸盐矿物的物理性质,地质出版社,1982.

- [6] Wang, C. Mao N., and Wu, F. T., Mechanical Properties of Clays at High Pressure, J. G. R., 83, 1462—1468, 1980
- [7] Chu, C. L., Wang, C. Y. and Lin, W., Permeability and Frictional Properties of San Andreas Fault Gouges. Geophys. Research Letters 8, 565—568, 1981
- [8] Toshihiko Shimamoto, J. M. Logan, Effects of Simulated Fault Gouge on the Sliding Behavior of Tennessee Sandstone: Nonclay Gouges. J. G. R. 86 B4, 1981.
- [9] R. Summers, J. Byerlee, A Note on the Effect of Fault Gouge Composition on the Stability of Frictional Sliding, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Geomech. Abstr. 14, 155—160, 1977.
- [10] Logan, J. M., Friedman, M., Higgs, N., Dengo, C. and Shimamoto, T., Experimental Studies of Simulated Gouge and Their Application to Studies of Natural Fault Zones, *Open file of USGS*, 1979.

CROSS EFFECTS OF DIFFERENT FACTORS ON EARTHQUAKE OCCURENCE

Ma Jin

(Institute of Geology, State Seismological Bureau)

Abstract

The conditions, under which the earthquake and the deformation occur, are a synthesis of effects of the different factors. Some uncomplete Understandings may be got by studying only single factor. The effect of the same factor, sometimes, can lead the different authors to a different conclusion because the other factors probably don't keep the same.

The author of this paper analyzed the results of the experiments under different conditions and found out that the effect of the same factor may be different with the change of the other factors. The responses of the different kinds of material to the confining pressure have the same character with the room temperature and dry sample. The effect of material seems to be unimportant in this case. The effect of the material become significant under the rising temperature when the confining pressure keeps the same. The effect of confining pressure on the same material —serpentine, for example, is the promotive effect on stick slip with low temperature, but it becomes restrictive on stick slip under the elevated temperature instead. All the changes of the mechanical behavior are related with the physico-chemical process and the mechanism of deformation.

The environments in different regions are not the same. From this point of view, it is necessary for the earthquake prediction to discriminate the type of environment in different regions and study the cross effect of different factors on the occurrence of the earthquake in the laboratory.

温度压力孔隙压力对断层泥强度及滑动性质的影响

马 瑾

(国家地震局地质研究所)

D. E. Moore, R. Summers
and J. D. Byerlee

(美国内务部地质调查所)

提 要

在不同的压力、温度和孔隙压力下进行了含四种不同断层泥标本的强度试验。碎屑型断层泥对压力很敏感,对温度无反应,对孔隙压力的反应符合有效应力律。粘土类断层泥则对温度和孔隙压力有明显响应。这些力学性质的差别反映了具体变形机制的差别。

一、引 言

断层带是地壳中变形最强烈的地方,断层滑动时要产生断层泥。为了研究断层带的力学性状,以及与之有关的地震活动性,人们逐渐把研究光滑断层面摩擦性质的兴趣转向研究含断层泥的断层带上来。很多工作表明断层泥的矿物成份、结构对断层带的强度和滑动特性是有影响的。不同成份的断层泥对物理环境的响应也不同。两篇最新结果^(1,2)表明在温度增加的情况下,一些断层泥的特性与一般岩石不同,也与在仅有围压下断层泥的性状不同。花岗岩粉、石英质的断层泥对温度的变化不敏感。蛇纹石、伊利石、斑脱石和由沿圣安德列斯断层带干湖谷钻孔中采集的天然断层泥(DLV)由于温度增高,不但强度增大,而且由稳滑变为粘滑。其中,绿泥石表现为强度增高,滑动特性不变。二者的不同之处如下:后者得到断层泥滑动特性在温度进一步升高后,可能又变为稳滑,强度也可能下降。后者的结果则是在温度升高到800℃前,断层泥强度增高、粘滑加强的趋势不变。产生这种差别的原因是个值得探讨的问题。孔隙压力和应变速率可能是造成不同的原因。本文着重报道在一种新的孔隙压力下不同断层泥对温度和压力的响应。

二、实验条件与方法

标本为直径19毫米,长41.3毫米的韦斯特里花岗岩圆柱体。标本被切割成光滑的与轴向呈30°的斜面。切开的两块花岗岩中间的断层泥厚0.65毫米。标本两侧为耐高温、强度大的碳化钨垫块,和一种由高温烧结而成的氧化铝的隔热绝缘垫块。这些部件都装在退过火的铜套中。铜套与炉子间用导热性好、导电性差的氯化硼填充,使炉子的温度能很好地传给标本(图1)。标本中央打一个小孔,小孔端部与断层泥相距1.5毫米,孔隙水可由此孔进入断层泥

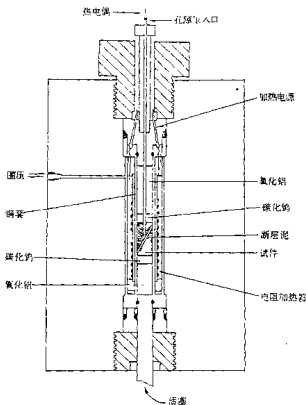


图1 实验装置图

Fig. 1 Experimental assembly.

带。实验一般在位移达到3毫米时结束。

为了更好地与以往实验比较,实验中采用了D.E. Moore文中所用的断层泥⁽¹⁾。它们分别为花岗岩粉、蛇纹石、伊利石和由圣安德列斯断层附近干湖谷粘土中605米深处取得的天然断层泥(以下用DLV或干湖谷断层泥表示,表1)。

三、实验结果

为了检验结果的可靠性,各种实验至少反复两次以上来互相印证。为使图面清晰,只用一条曲线作代表。

实验表明(图2)在围压为3.5千巴下不同断层泥的强度多比相应条件下围压为2千巴时高,说明所有断层泥对压力均有响应,但粘土类断层泥800℃时例外。不同断层泥对温度的响应不同。花岗岩粉(图2a)在围压相同、温度不同的情况下的曲线几乎是重叠的。几种粘土类断层泥在相同围压、不同温度下的曲线是分离的。说明温度对它们的强度是有影响的。在此孔隙压力条件下,大多数应力位移曲线表现为稳定滑动,只有在部分实验条件下含伊利石(400℃, 2kb)和蛇纹石(400℃, 3.5kb)断层泥的标本表现为粘滑。为了更清楚地表示这些断层泥对压力、温度和孔隙压力的响应,以下我们分别进行讨论。由于这些应力位移曲线类型相同:大多数实验在位移为0.5—0.7毫米时已产生屈服,所有条件下的实验均能坚持到位移

层,变形时,断层泥又不可能由孔中挤出。热电偶也由此孔插入。实验前标本置于蒸馏水中,以负30巴抽真空24小时,然后在100巴压力下保持12小时以上,使水充分进入岩石孔隙。为了使孔中的孔隙压力与断层带中的孔隙压力保持平衡,在实验中要使标本在所要求的实验条件下保持一段时间 t 后,才开始实验。所需时间 t 按下式估算⁽²⁾:

$$V = -k \frac{\partial p}{\partial x}$$

其中 V 是流动速度, k 是渗透系数。花岗岩的渗透系数约为 10^{-9} 达西, $\partial p / \partial x$ 是孔隙压力梯度(大气压/厘米)。由此得出,在我们的实验条件下(2000巴围压), t 约为5000秒。

大多数实验是在围压分别为2000巴和3500巴(传压介质为氩气)、孔隙压保持在1000巴下进行的。实验的温度为200℃、400℃和600℃,应变速率为 10^{-4} /秒。围压和应变速率由计算机控制,温度由调节器控制。应力、围压、位移、温度、孔隙压力均由计算机每1秒或2秒读一次数,并将数字记入磁

1.5毫米以上,所以我们取位移为1.5毫米处的数据进行比较,可以利用最多的资料。以下讨论均以1.5毫米处的差应力值为基础。因为此值与强度成比例,故利用此值来讨论各种因素对强度的影响。

1. 压力对强度的影响

不同断层泥对压力的响应不同(图3)。在低温下,所有断层泥的强度均随围压增大而增大,但三种粘土类断层泥在温度为600℃, $P_p=1000$ 巴的结果例外。在 P_p 为1000 巴时,400℃时强度随围压增加的速率也明显减小,图中的值是几次相近实验的平均结果。

所有条件下断层泥强度在围压增高一千巴时所引起的强度增量值(千巴)表明含花岗岩粉断层泥的标本强度在低孔隙压和高孔隙压下强度变化率(平均1.47千巴)类似。即当围压增加一千巴时,强度约增大1.47千巴。R. Summers用花岗岩粉断层泥进行实验的结果表明,一直到4千巴围压下,强度的变化率改变不大。粘土类断层泥在低孔隙压下,强度的变化率与花岗岩粉类似。在高孔隙压下,当温度为200℃时,仍然类似。但在400℃和600℃的情况下断层泥强度不论在变化的速率和变化的趋势上均与花岗岩粉不同。说明孔隙压力和温度对它们的强度有很大影响。

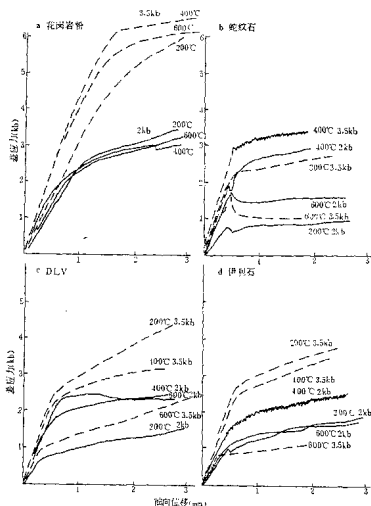


图2 不同断层泥的应力位移曲线
Fig.2 The stress displacement curve for experiments with gouges under different condition.

2. 温度对强度的影响

不同断层泥对温度的响应不同。花岗岩粉对温度无明显响应。粘土类断层泥对温度有明显的响应,它们的特点与仅有围压没有高温下的结果有很大差别。在孔隙压力为30 巴时⁽⁴⁾,三种粘土类断层泥在600℃以前,强度随温度单调增加(图4)。每增加100℃,强度约增加600 巴。但是在孔隙压力为1000 巴时,这种趋势发生了变化。蛇纹石和伊利石在400℃时强度最高,200℃和600℃时强度均较低。干湖谷断层泥(DLV)的强度虽然仍随温度单调增加,但在

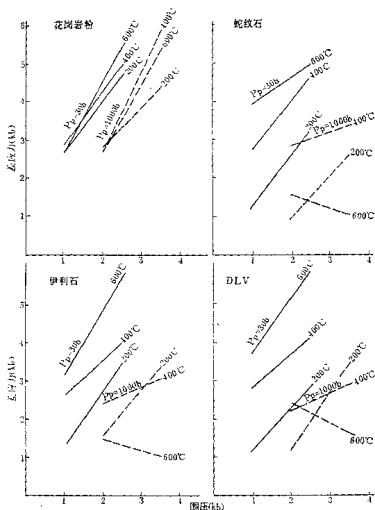


图3 不同断层泥强度的压力效应

Fig.3 The effect of pressure on strength of different gouges.
实线为 $P_p = 30$ 巴时的结果, 虚线为 $P_p = 1000$ 巴时的结果

中得到的结果示于图5。图上 P_p 相等的点连成线。直线两端的强度差代表在 P_p 增加1000巴下断层泥强度的变化。

P_p 增大, 花岗岩粉强度变化趋势不明显, 属于由误差引起的变化(图5)。粘土类断层泥的情况则较复杂。在200°C时, 各类粘土类断层泥的强度由于 P_p 增加, 引起的变化不大。但在高温下(400°C—600°C), 由于 P_p 增大, 粘土类断层泥强度下降。这种趋势在高 P_p 下更明显。

孔隙压力的另一个效应是使断层滑动性质发生变化。在 P_p 为30巴的实验中, 大多数粘土在 $P_p = 1000$ 巴, 温度为400°C至600°C时产生粘滑。但由图2可见, 在其它条件相同的情况下, 仅仅由于 P_p 绝对值增加, 就使滑动性质变为稳滑。只有伊利石和蛇纹石在400°C时仍产生粘滑, 但粘滑时的应力降也显然比 P_p 为30巴时减小了。说明孔隙压力增大使滑动性质稳定化了。

400°C后强度增加速率也明显变缓。在有效压力为2500巴时, 高温下强度减弱的趋势更为明显。

在低孔隙压力下, 花岗岩粉在200°C时的强度比粘土类断层泥高, 但在400°C下, 不同断层泥强度无明显区别。在600°C下, 粘土类断层泥的强度比花岗岩碎屑还高。但当孔隙压力高(1000巴)时, 粘土类断层泥强度比花岗岩碎屑低得多。

3. 孔隙压力对强度的影响

围压增大, 断层泥强度增大(图3)。孔隙压力增大, 强度减小。但按一般常用的有效压力律, 有效压力 $P_e = P_c - SP_p$, 其中 P_c 为围压, P_p 为孔隙压力。 S 是一个常数, 往往被当作1。在有效压力律成立的情况下, P_p 为30巴, P_c 为1000巴的实验与 P_p 为1000巴, P_c 为2000巴的实验相当, 因为 P_e 几乎相等。在 P_c 相同, 而 P_p 值不同的情况下, 强度应相等。实验

4. 断层泥矿物成分随温度压力的变化

为了研究引起强度的压力效应、温度效应和孔隙压力效应的原因, 我们把本次实验中的标本进行X射线衍射分析, 分析中用定向薄片, 采用 $\text{CuK}\alpha$ 辐射⁽¹⁾, 并与低孔隙压力下的结果进行了比较。利用X射线衍射角 2θ 与一定的结晶学方位的面网间距 d 之间的关系来鉴定矿物。峰值高度表示衍射强度。在相同衍射条件下, 相应面网的衍射强度在某种意义上代表了矿物的相对含量, 而它的锐度在一定程度上显示了结晶度。

在不同条件下变形断层泥中矿物的峰值高度是变化的。由于每块标本取料不同, 一般选一种相对稳定的矿物作为标准以作比较。对伊利石、花岗岩粉、干湖谷断层泥, 我们取石英($2\theta=20.85^\circ$)的峰值高度为1, 以其为标准来分析其它峰相对石英的变化。

花岗岩碎屑中的主要矿物为斜长石(P)、钾长石(F)、石英(Q)、白云母(Mu)和黑云母(B), 原始成分中还有少量绿泥石(C)(表1A)。其中白云母和黑云母含量较少, 变化也不大。而斜长石和钾长石在高围压和低围压下变化趋势不同。估计是由于这种矿物原始颗粒较大, 取样时不够均匀所致。在变形中微量的绿泥石消失了。

干湖谷断层泥中主要碎屑矿物有石英、钾长石和斜长石。粘土矿物有蒙脱石(M)、绿泥石(C)高岭石(K)、伊利石(I)(表1B)。显微镜下观察到碎屑矿物以较大的颗粒混杂在粘土矿物中。从X射线衍射分析结果看, 它们的峰值高度虽然有起伏, 但很可能是取样不均匀的结果。粘土矿物中蒙脱石和绿泥石的峰值高度在高温下略有减少。伊利石在 2θ 为 8.9° 的峰值高度在 400°C 以后增大了。把它与低孔隙压力下的结果相比, 发现在高孔隙压力下粘土矿物蒙脱石和绿泥石的峰值只是减少或略有减少, 而在低孔隙压力下却是消失或接近消失。

伊利石断层泥中含有三种矿物: 伊利石、绿泥石、高岭石和石英(表1C)。实验中我们

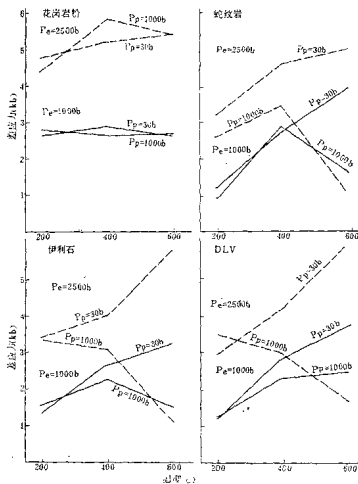


图4 不同断层泥强度的温度效应

Fig.4 The effect of temperature on strength of different gauges.

实线为 $P_e = 1000$ 巴, 虚线为 $P_e = 2500$ 巴的结果

原
书
缺
页

原
书
缺
页

蛇纹石断层泥(在围压为2000巴, 孔隙压为1000巴, 温度为200℃, 应变速率为 10^{-1} /秒下变形。在X射线衍射图上, 标本在 2θ 为 12° ($d=7.375\text{ \AA}$)、 19.5° ($d=4.533\text{ \AA}$)和 24.5° ($d=3.622\text{ \AA}$)处有三个峰, 说明这里只有蛇纹石(图6)。但是当其它条件不变, 变形处于600℃的温度下, 断层泥中成分发生了很大的变化。代替单纯的蛇纹石, 介质中出现了镁橄榄石、石英和滑石(图7)。这说明高温下矿物成分发生了变化。

蛇纹石断层泥在不同温度、压力下不仅产生了新矿物, 蛇纹石本身也发生了变化。对比蛇纹石中三个峰的高度, 发现随温度升高在 $2\theta=12^\circ$ 和 $2\theta=24.5^\circ$ 的两个峰的峰值高度相对减小。这可能意味着蛇纹石内部结构的变化。

对比在其它条件相同, 而孔隙压力不同时的结果(图6), 发现在孔隙压力较低的情况下, 蛇纹石几乎不再存在, 而滑石的含量也显然少得多。

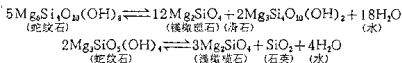
四、讨 论

1. 由上述结果可见四种断层泥对压力和温度的响应基本上可分为两类。花岗岩粉为一类, 粘土类矿物为另一类。这与该条件下断层泥内部的变形条件和变形机制有关。

花岗岩粉在压力作用下主要表现为压实作用。从X射线衍射结果分析, 温度变化, 碎屑内部并未产生明显的矿物变化。它的强度与压力关系较密切, 与温度关系不大。在孔隙压为1000巴的条件下, 其中的石英颗粒在600℃下发生过部分熔结作用, 但未对强度产生明显影响。这与石英碎屑的结果类似。它代表了碎屑型断层泥的变形特点和对环境的响应。

几类含粘土类矿物的断层泥产生了共同的变化。在低温下它们的强度随压力明显变化。与此同时, 它们的强度与变形特点与温度有密切关系。孔隙压力的变化也能改变它们对温度响应的趋势。在变形过程中这里不仅发生物理上的压实作用, 而且发生了矿物成分与内部结构的变化。代表了粘土类断层泥的变形特点和对环境的响应。

2. 粘土类断层泥在断层带中很普遍^[9-11]。为了理解粘土类断层泥在不同温度、压力条件下的行为, 我们不妨从它们的分子式和结晶格架上来讨论。我们所使用的断层泥基本上属于层状硅酸盐, 其中都含有水。水在粘土矿物中主要有三种状态: 不参加晶格的吸附水; 以水分子形式存在于矿物的结晶格架中固定位置上的结晶水, 以及以 H^+ 和 OH^- 参加晶格的结构水, 以及介于结晶水和吸附水之间的沸石水、层间水等形式。这些不同形式的水在粘土矿物中的变化, 我们以蛇纹石为例来加以说明。蛇纹石在实验中的变化有如下两种形式^[9]:



在一定条件下蛇纹石中的结构水脱出, 变为镁橄榄石等。但在另一些条件下镁橄榄石等又可吸收水分变为蛇纹石。式子右侧为不含水矿物, 左侧为含水矿物。在高孔隙压下左侧比低孔隙压时稳定, 这就造成了平衡点向左移动。因此, 高孔隙压下变形后残留的蛇纹石较多, 强度比低孔隙压时低。我们认为蛇纹石断层泥在400℃时的强度升高, 与颗粒间吸附水的逸出有关。但到600℃时, 蛇纹石中结构水脱出, 短时间内可能造成局部高孔隙压力, 这就是600℃时强度又变低的原因。高围压中600℃时强度更低, 这是由于围压愈高, 体系愈封闭, 渗透系

数愈低,脱出的水不易在很短的时间内渗透出去,从而增加了断层泥层中的局部孔隙压力。如果减慢应变速率,增加预热时间,高温时的强度可能增加。Logan 实验中孔隙压力虽然不高,但应变速率较高,这就造成他的结果与我们在高孔隙压力下的结果相似。

其它两类粘土虽然没有发现蛇纹石这样明显的矿物变化,但在蒙脱土 $Mg_3(OH)_2[Si_4O_{10}(OH)_2] \cdot nH_2O$, 伊利石 $K_2(Al, Fe, Mg)_3(Si, Al)_2O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$ 和绿泥石 $(Mg, Al, Fe)_{12}(Si, Al)_4O_{20}(OH)_{16}$ 中都含有结晶水或结构水。在变形过程中这些水的变化需要认真分析。

综上所述,粘土类断层泥的强度在不同条件下的变化与粘土矿物在该条件下的脱水情况脱水速率有关,因而也就与变形时局部孔隙压力条件、介质的结构状态及其渗透率的变化有关。关于此我们在另文中详细讨论^[9]。但是,可以认为,对粘土类断层泥的变形行为的剖析不仅需要从温度、压力条件出发考虑,而且需要从物理化学条件出发考虑其变化的势态。这就是它与一般岩石对温度压力的响应不同的原因。

3. 有效压力律对碎屑型断层泥说成立。对200℃以下的粘土类断层泥也成立,因为它基本属于碎屑状态。在高温下,有效压力律对粘土矿物似乎不存在了,这是由介质内部结构变化和渗透率变化所引起。而这种结构变化又与温度、压力、孔隙压力以及其它一些因素有关。所以,不能脱离具体条件讨论前述有效压力律中S的变化。而需要深入研究变化的机制。

4. 以往对地震发生条件更多地是从物理环境条件考虑,即讨论在什么样的温度、压力下可能发生地震。我们认为这只是地区的外因。而最近这些实验结果表明断层所在地点的地质条件,如断层的几何条件、介质条件也是重要的,这是地区的内因。内因的不同造成了对外部环境的不同响应。因此,调查具体地区的地质条件是十分重要的。另一方面,从目前的实验结果分析,除温度、压力是影响变形的十分重要的因素外,孔隙压力、应变速率都对变形起了重要的作用。其中,水和温度的作用在一些条件下把压力的作用掩盖了。它们应是影响变形的更敏感的因素。因此,在实验室条件下研究不同介质的多维变形模式图应是地震研究的一项基础工作。

(1984年1月收到)

参 考 文 献

- [1] Moore, D. E. et al., 1983, Strength of clay and non-clay fault gouges at elevated temperatures and pressures, 24th U. S. Symposium on Rock Mechanics.
- [2] Logan, J. M. et al., 1981, Laboratory studies on natural gouge from the Geological Survey Dry Lake Valley No. 1 Well San Andreas fault zone, Mechanical Behavior of Crustal Rocks, eds. N. L. Carter et al.
- [3] 邱格, J. C. 和 N. G. W. 库克(中国科学院工程力学所译), 1981, 岩石力学基础, 科学出版社。
- [4] 贵阳地球化学所, 1978, 矿物X射线粉末鉴定手册, 科学出版社。
- [5] Wu, F. T., 1978, Mineralogy and physical nature of clay gouge, Pure Appl. Geophys., V. 116, pp. 655—689.
- [6] Chu, C. T., et al., 1981, Permeability and frictional properties of San Andreas fault gouges, Geophys. Research Letters, V. 8, pp. 565—568.
- [7] Anderson, J. L. et al., 1980, Petrogenesis of cataclastic rocks within the San Andreas fault zone of southern California USA., Tectonophysics, V. 67, pp. 221—249.
- [8] Turner, F. J., 1968, Metamorphic petrology: mineralogical and field aspects, McGraw Hill New York book Co.
- [9] Moore, D. E. et al., 1984, The effect of pore pressure and heating time on the strength and sliding stability of a serpentinite gouge, 25th U. S. Symposium on Rock Mechanics.

THE EFFECT OF TEMPERATURE, PRESSURE AND PORE PRESSURE ON THE STRENGTH AND SLIDING BEHAVIOR OF THE GOUGES

Ma Jin

(Institute of Geology, State Seismological Bureau)

D. E. Moore R. Summers J. D. Byerlee

(U. S. Geological Survey)

Abstract

The strength of the samples with different fault gouges was studied under different pressure, temperature and pore pressure. The fault gouges included crushed granite, serpentine, illite and a natural fault gouge (DLV), collected from borehole along the San Andreas fault.

Based on the response of the gouges to the pressure, temperature and pore pressure, the fault gouges were classified into two groups: the gouges of clastic type and the gouges of clay type. For the gouge of clastic type, such as crushed granite, its strength was very sensitive to the pressure. When the confining pressure increased 1 kb, the strength of the gouges got a raise of 1.47 kb. It hasn't seen any response of the gouge to the temperature. Its response to the pore pressure is consistent with the effective pressure law. The rest three are gouges of clay type. The general character of them are as follows. There was an outstanding effect of the temperature on the mechanical behavior of the clay type gouges. The change of pore pressure exerted influence on the trend of the response to the temperature. The effect of pressure for clay type gouges only can be seen when the temperature is lower than 200°C.

The results of X-ray diffraction indicate that no mineral change has been found in crushed granite gouge up to 600°C and the strength of it was controlled by the compaction. The mechanical behavior of clay type gouge reflect the change of clay mineral composition, structural state of gouge material and probably, the change of permeability. Pore pressure has an effect on the chemical process. So it is clear that need pay attention to the effect of the physico-chemical environment on the strength.