

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

初论断裂的形成和发展 及其与地震的关系

张文佑 鍾嘉猷 叶 洪 从柏林

(一)

断裂是一个复杂过程,大致可分为形成和发展两个阶段:在形成阶段包括晶格中质点位错的累积和一个或几个微裂面的开始;在发展阶段表现为物体中一个或几个裂面的伸展。

断裂形成阶段 该阶段也可以说是酝酿期,或应力累积期,由剪切引起滑移条带,相当于受应力后金属光面上的“吕德氏纹”(Lüders Bands),在单晶和粗粒多晶材料以及有定向排列的材料中都可以看到。变质岩中的片麻理、片理和叶理等都可与之相当。我们在用泥饼作模拟实验¹⁾时,其表面最初所出现的 X-型交叉剪切面就具有滑移条带性质。实验过程中在双目镜下观察这种滑移条带是极为清晰的,而且在镜下观察岩石薄片所发现的这种滑移条带,也常是沿着一定结晶面而发生滑动的。但是岩石和模拟实验用的泥饼都是多晶结合体,滑移方向常受到不同晶体内的结晶面和晶粒边界以及先存缺陷的干扰或阻碍,而在相交处产生应力集中,即在物体内部的滑动处集中,形成一个或几个微裂面。

断裂的发展阶段 该阶段也可称为破开期或应力释放期。物体内部应力集中后,如再受力,则内部已形成的一个或几个破裂面就开始传播到物体表面,这时张应力作用成为主导,于是形成锯齿状的张性断裂,而使物体破开。

岩石圈内部的浅源地震是由断裂造成的。这一看法,已被绝大多数地球物理和地质工作者所承认,所以地震形成的过程也与上述断裂形成的过程相似。

岩石圈形成以后,在地球自转运动以及重力作用和热力作用影响下,它们被破坏,形成许多断块(也就是板块构造学说所称的各种大大小小的板块)。从地质力学观点来看,这许多断块既然彼此之间有相对运动,其内部也必然有剪切、拉伸和挤压应力存在。它们内部的应力状态是由它们之间的相对运动和边界条件所决定的。我们已经在《中国大地构造基本特征的初步探讨》一文中作了简略讨论。这些断块,不仅它们彼此之间有相对运动,表现为断裂带和地震带,而且在每个断块的内部,上层与下层(例如盖层和基底)之间还有层面滑动,而层面滑动则可形成“地震层”^[2]。

近来,国外有人提出扩容理论,作为地震前兆现象的一种物理解释。我们认为,扩容实际上是断裂形成阶段的一种伴生现象。我们以前曾根据野外观测和室内泥饼模型实验多次说明:断裂的发生和发展过程一般是由剪切应变开始,由张性应变发展并完成。剪切应力先在模型内部集中,后在标本表面出现 X-型交叉网状剪切滑移条纹。在剪切滑移条带出现的同时,标本表面变粗并形成鼓包。鼓包内有微小孔隙发生。这一现象说明,岩

1) 小块岩石在短期力作用下是强而脆的,而巨型岩体在长期力作用下则是柔而韧的,因此大多数地质工作者都认为,用泥饼模拟大型地质体(如褶皱山脉等)是符合相似原理的。

石形变时由于微小孔隙的发生体积曾有所膨胀,与最近国外所提出与地震发生有关的扩容现象^[3]是类似的。但是,扩容现象的明显程度与形变介质的物理力学性质有很大关系。如在实验时较硬的泥饼表面的剪切滑移条带只伴有变粗现象,而不出现鼓包,这可能由于脆性物质剪切应力传播较快,来不及在内部造成大量微小孔隙,以致不能形成明显的体积膨胀。所以,扩容理论虽然已经比较成功地解释了某些地震的前兆现象,但是由于震源区岩石物理力学性质的不同,有些地震前则没有明显的扩容现象,这一点是值得大家注意的。

另一方面,震源机制分析的一对P波节面,实际上是一对最大剪应力面,它们和我们所提出的X-型交叉剪切网格大致相当,实际的剪切面由于内摩擦的存在交角恒小于 90° ,这个小于 90° 的方向就是挤压力的方向。在相对挤压的两个象限内为挤压应变区,而在与之垂直的两个相对拉伸象限内则为拉伸应变区。我们设想,在这两个不同的应变区内,情况会有所不同,在挤压区域内扩容现象可能没有,或很不明显;在拉伸区域内则有较明显的扩容现象,这也是值得今后继续研究的一个问题。

此外,我们以前在研究矿田构造时,曾发现岩脉或矿脉充填到围岩中有两种情况:一种是侵入边界非常清楚,没有蚀变现象;另一种侵入边界则不清楚,交代作用明显呈浸染状。这固然与侵入体的温度、压力以及所含成分如挥发成分等有关。但与围岩性质及其在形变过程中微裂隙的发育程度及体积变化也有关。一般侵入边界不清楚者在成矿过程初期围岩体积胀大比侵入边界清楚者明显,而在成矿过程末期,则相反。这也可被认为是构造形变中的一种扩容现象。

还有,构造的不同部位也对扩容现象有影响,如在背斜或隆起顶部比较明显,可能与

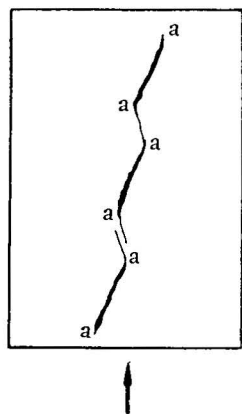


图1 玻璃受挤压后产生的锯齿状破裂

[据 W. F. Brace, E. G. Brombolakis:
Jour Geophysical Res., Vol. 68,
No. 12, 3709—3713, Fig. 4]

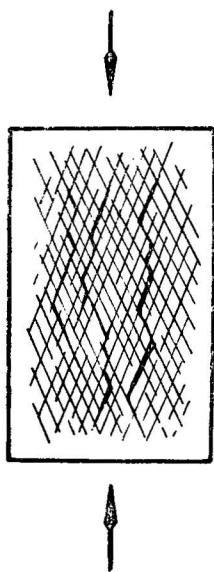


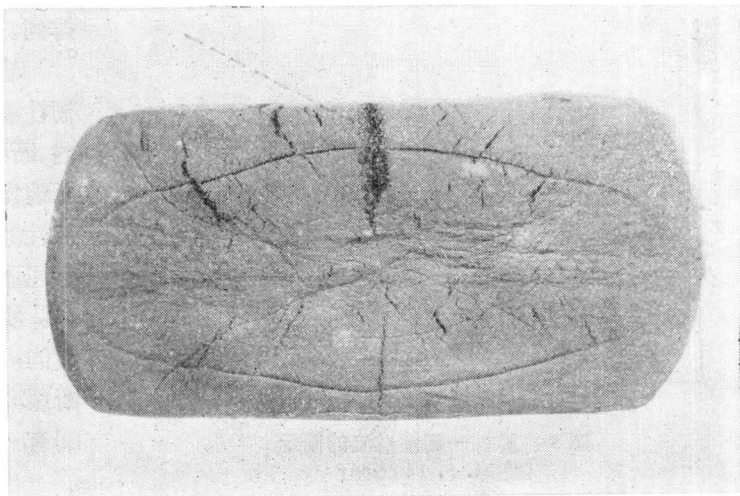
图2 泥饼受挤压后“牵就”X-型交叉网状剪切滑移条纹出现的锯齿状张性断裂与玻璃受挤压后的断裂相同

硬岩层在背斜顶部常出现脱空和软岩层在背斜顶部滑动增厚有关。另外,断裂的破碎程度和有无粘土类矿物形成,也可影响扩容现象,也应加注意。扩容现象的显著与否又取决于围压的大小,因而断裂位置的深浅,又是影响扩容现象的另一因素。

当泥饼试样继续受力,则交替沿着X-型交叉网状剪切滑移条纹,出现锯齿状张性断裂,这种现象我们曾称之为“牵就”,李四光教授命名为“追踪”。布雷斯(W. F. Brace)挤压玻璃薄片所产生的

的裂缝排列可与此相当(图1、2,与照片1)。这种锯齿状断裂出现的速度比X-型交叉

网状剪切滑移条纹快得多。至于泥饼的最后裂开以及岩石标本在压机下的裂开更是突然的,而且后者还发生爆炸声(相当于地震)。X-型剪切网发展成为锯齿状断裂的牵就(或追踪)过程,就是断裂进一步发展的过程。国外有人提出地震形成的粘滑学说,把断层滑动分为稳定滑动与粘滑(不稳定滑动)两类。稳定滑动



照片 1 泥饼受挤压后产生 X-型交叉网状剪切滑移条纹,裂开呈锯齿状。在标本的两侧端还可看出初期的小鼓包现象。

表现为断层蠕动;粘滑表现为地震。一般认为,影响粘滑最重要的参数是矿物、孔隙度、断层泥厚度、有效压力、温度和水存在。我们认为,在断层进一步发展过程中(断裂牵就过程中)确实可以发生稳定滑动与粘滑这两种不同的方式,但粘滑的发生除了与上述因素有关外,最主要的还是与断裂面的不均一性(锯齿状形态)所引起的摩擦系数的不同有关。这一点在野外观测和室内实验中都表现得很明显。国外某些人片面强调单项试验研究的结果而不综合考虑各项因素的总作用,这样是不能全面说明断裂和地震的关系的。

由上,我们初步认为扩容现象和粘滑现象是断裂形成发展过程中两个相继发生的作用,前者发生在断裂形成阶段,因而可作为一种地震的前兆现象。后者则与地震的发生直接有关。“因为一切客观事物本来是互相联系的和具有内部规律的,人们不去如实地反映这种情况,而只是片面地或表面地去看它们”,所以往往就不能准确地预报地震。

我们在用泥饼作断裂模拟试验时,也曾在标本表面撒过少许水或酒精,用以缩短断裂形成的过程,加速断裂的产生,并且这时标本上没有出现相当于扩容现象的小鼓包。这可相当于孔隙水的压力作用,也就是孔隙水的存在可以促进断裂的发生和发展。与国外近来所提出的孔隙水压力对于断裂的形成和发展有关的理论作比较^[6]。不仅水库地震与此有关,而且可用水文的变化预报地震,因为在实验过程中当标本受力作用时首先表现为表面变暗,在镜下观察,这时表面的水分明显下降,向标本的纵深部分运移。这与地震前的水位变化很相似。当然,各地震前的水位升降变化不是千篇一律的,它取决于该地区受力状态,并与当地的构造背景和区域岩性有关,需作具体分析,不能简单套用。

(二)

岩石受力时,由于温度和压力以及矿物组成,水的存在和应变速度的变化,而表现出不同程度的破裂形变和塑性形变。在破裂形变过程中,破裂遍及全体,沿破裂错动,受摩擦力控制,压力影响很大,例如,砂质粘土和其他粒状介质的形变。在塑性形变过程中,常出现晶面滑动和双晶以及晶粒边界滑动,在高温下还有扩散作用引起的结晶颗粒的重新

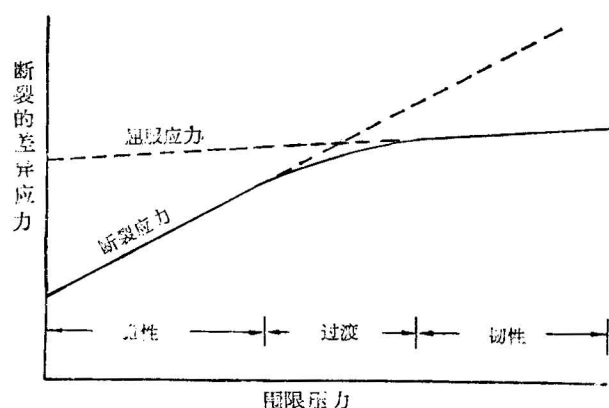


图3 脆性—韧性过渡的简示
【据 M. S. Paterson】

排列。

岩石断裂可分为脆性断裂和韧性断裂两大类。在脆性范围内，断裂应力低于屈服应力，所以断裂发生时，没有屈服现象；在韧性范围内，在断裂应力达到前有屈服阶段，断裂在屈服之后出现。实际上脆性和韧性是渐变过渡的。围限压力的增高可使脆性断裂向韧性断裂过渡，在两者之间有一个过渡区(图3)。

当岩石中粘土矿物、含水矿物和片状矿物等较多时，容易发生塑性形变和韧性断裂；反之，则否。含水矿物可在形变过程中失水，而矿物失水则使岩石表现脆性。粗粒和多孔岩石一般比细粒和致密岩石表现脆性更强些。岩石常由于所含矿物的排列方位不同，而表现出不均一性。定向排列的层状矿物易滑动，比较软，常表现出韧性；而另外一些非定向排列的矿物则不易滑动，于是比较硬和脆。韧性断裂一般传播较慢，而脆性断裂则传播较快，前者一般在破裂时震动微弱或没有震动，而后者则震动较强。

从爆破所产生的断裂面看来，岩石的断裂面大致也有两大类：韧性面和脆性面。前者常出现于细软、粘土质、层理较明显的岩石中，断裂传播较慢，一般近于半声波速度。由破裂开始点呈放射状拖曳线(Tear Line)及阶梯状破裂起伏断口；后者则发生于粗硬、石英质、块状岩石中，断裂传播较快，一般近于声波速度，由破裂开始点呈放射状拖曳线及环状起伏断口，类似石英或玻璃的蚌壳状断口(图4)。显然前者震动现象不明显，而后者则可产生显著震动现象。

另外，在一般矿物和岩石裂开面上也常看到上述两种断口：蚌壳状和羽扇状。前者为脆性断口，后者属韧性断口。断口面上的拖曳线由粗到细以及由蚌壳状到羽扇状的变

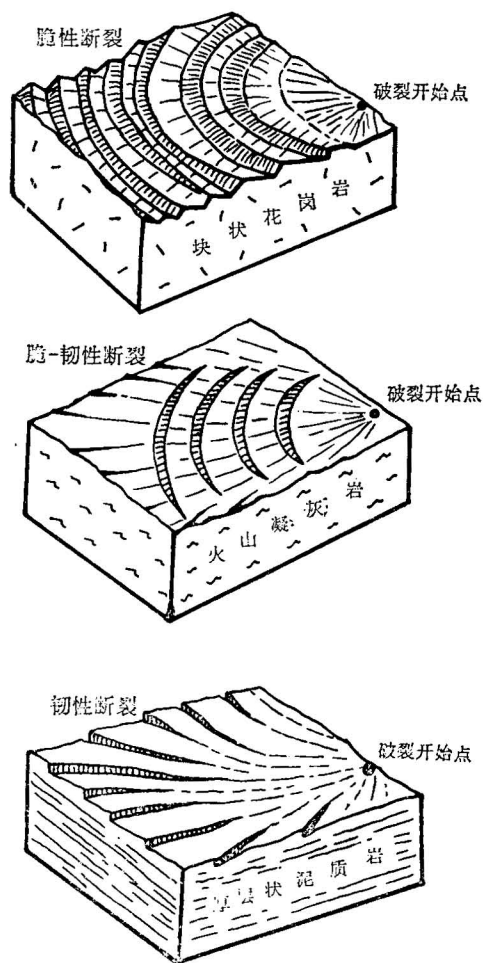


图4 脆性岩石及韧性岩石破裂后
断裂面表现的不同形式

化,大致可代表脆性到韧性的过渡(图 5)。

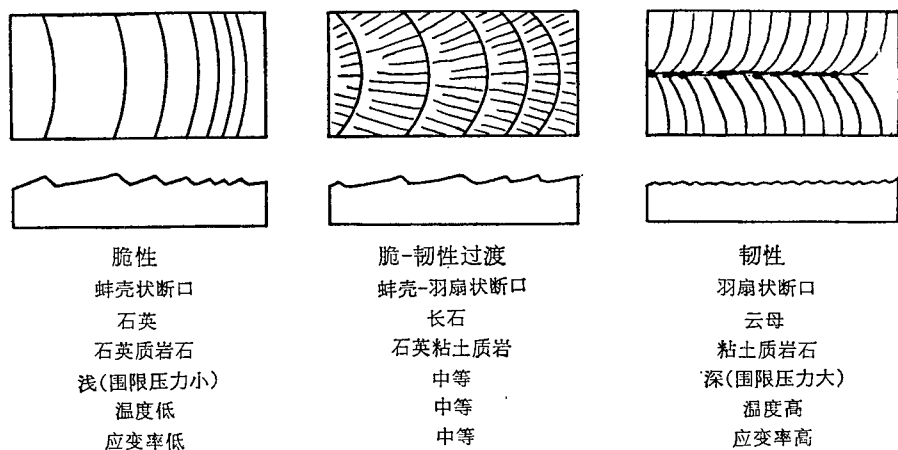


图 5 蚌壳状断口到羽扇状断口的变化过程

关于岩石断裂面(断口)上所形成的拖曳线,我们曾根据横梁弯曲所产生的应力状态加以解释。横梁弯曲所产生的应力状态大致分为挤压区和拉伸区,它们随应力波的传播相互交替出现,并逐步变窄变低(图 6)。

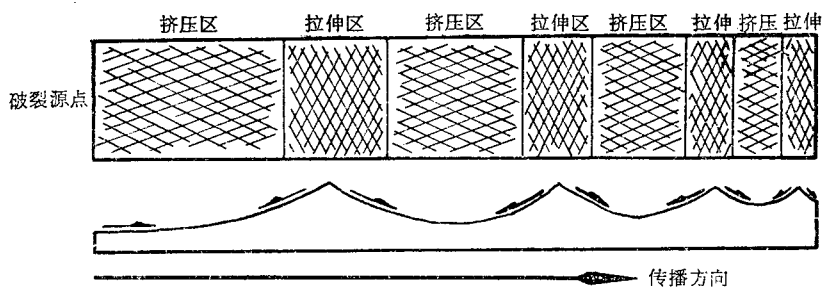


图 6 岩石断裂面上所形成的拖曳线在剖面上的受力状态

断口拖曳线的形成,在国外是有争论的。有人认为属于剪切应变形成的;有人认为具有张应变性质;也有人倾向于剪应变,并提出张应变有问题,但并不能忽视张应变的可能性^[8]。我们根据野外观察和室内试验结果,主张它们是由剪应变开始,而后由张应变发展和完成的。另外,断口的形成固然主要取决于应力波在物体内的传播(压缩波与剪切波),但也不能排除面波的作用。

从金属断口所呈的河流分支状来看,断口表面也多是高低不平的阶梯锯齿状(图 7)。

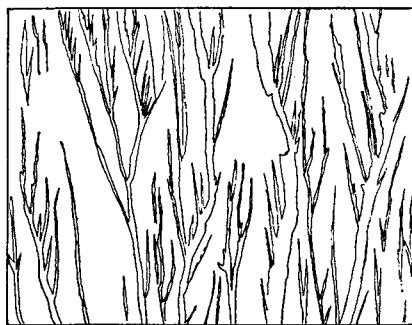


图 7 金属所表现的河流分支状断口
(据 Low, J. R.: 1956, Deformation and Flow of Solids, p. 60, Springer-Verlag Berlin.)

(三)

从断裂的发生和发展过程来看,断层的活动一般可分为剪切、拉开和挤压三种形式,也就是一般所说的平移断层,正断层和逆断层(或逆掩断层)。但是一条断裂,尤其是断裂带,各段的活动性往往不同,活动性质也不一样。

锯齿状断裂从其活动方式来看,大体可分为剪切-拉开和剪切-挤压两大类型(图8)。锯齿状断裂的各个段落的活动方式是不同的,沿着某一个方向表现为挤压(或拉开),沿着另一个方向则表现为剪切。而且这两大类型的断裂又可因时期不同而互相转换(图9)。

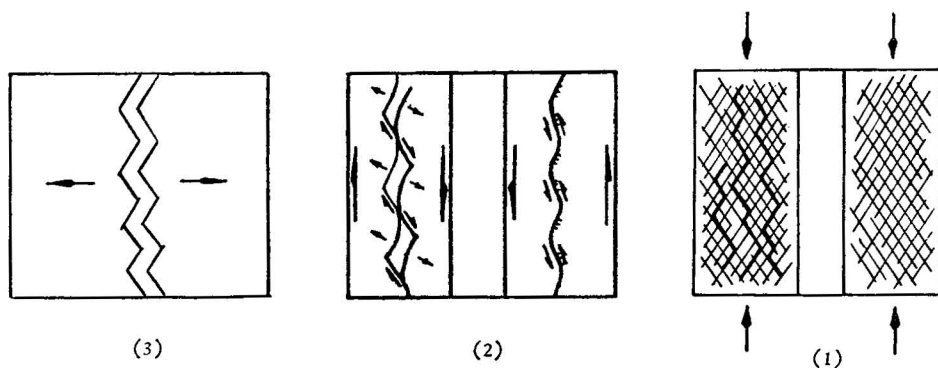


图8 锯齿状断裂活动方式: 剪切-拉开; 剪切-挤压的发展过程

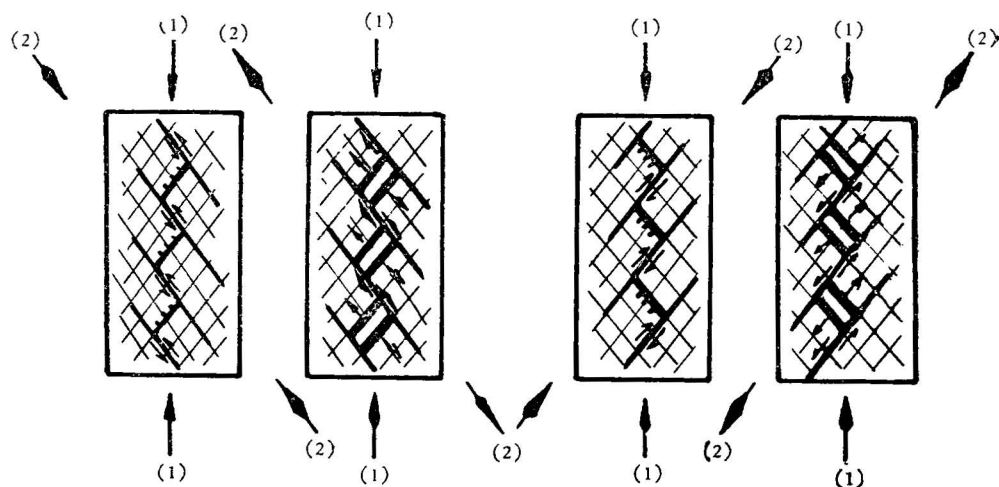
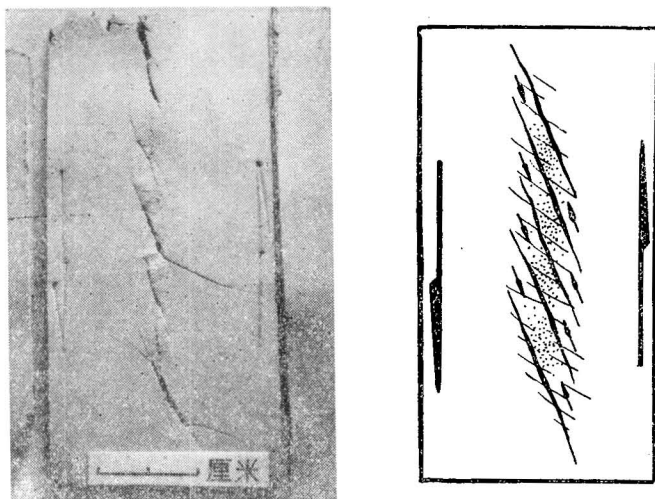


图9 剪切-拉开与剪切-挤压两大类型的断裂相互转换类型

现在的洋脊,实际上是一条剪切-拉开的锯齿状断裂带。泥饼模拟实验可以充分证明这一点(照片2)。太平洋边缘岛弧及海沟则是一条剪切-挤压的巨型锯齿状断裂(图10)。西昆仑山-阿尔金山-北祁连山在古生代以前也是一条大型剪切-拉开的锯齿状断裂带,经加里东运动后又变为一条剪切-挤压的锯齿状断裂带(图11)。山西中部的地堑带基本上也是由一条剪切-拉开的锯齿状断裂带造成的。运城盆地、临汾盆地、太原盆地、定襄盆地、代县盆地、大同盆地等是该断裂带的拉开段,而各盆地之间的狭窄部分则为剪切段(图



照片 2 及素描 泥饼模拟实验在剪切作用下所产生的破裂带，有虚点的部分是挤压区并有微小隆起



图 10 太平洋边缘的巨型锯齿状断裂

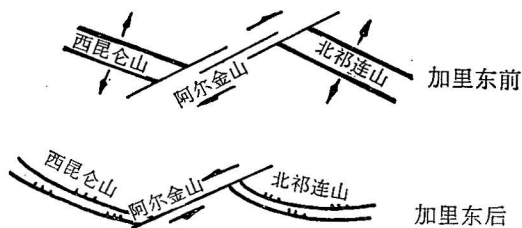


图 11 西昆仑山—阿尔金山—北祁连山巨型锯齿状断裂在历史上的变化过程

12)。纵贯我国中部的由贺兰山、六盘山、龙门山、横断山组成的近南北向地震带，也是在巨型的锯齿状断裂带上产生的，而且各段本身又受次一级锯齿状断裂的控制，如贺兰山（图 13）。此外，东部的营口—庐江地震带以及我国台湾省和我国西部地区的地震带，都具有锯齿状断裂性质。所有这些锯齿状断裂带，其各个段落的活动方式与活动性质都是不相同的，而较大地震多数发生在剪切段与拉开段或挤压段交接处，如山西中部地堑的大地震就都发生在这些部位（图 12）。这些地方都是锯齿的折点，是应力最容易集中的部位，从粘滑的观点来看，就是滑动易受阻碍，摩擦力最大的部位。

上面谈到的锯齿状断裂主要是地壳水平面上的，在垂向上断裂同样具有锯齿状形态，

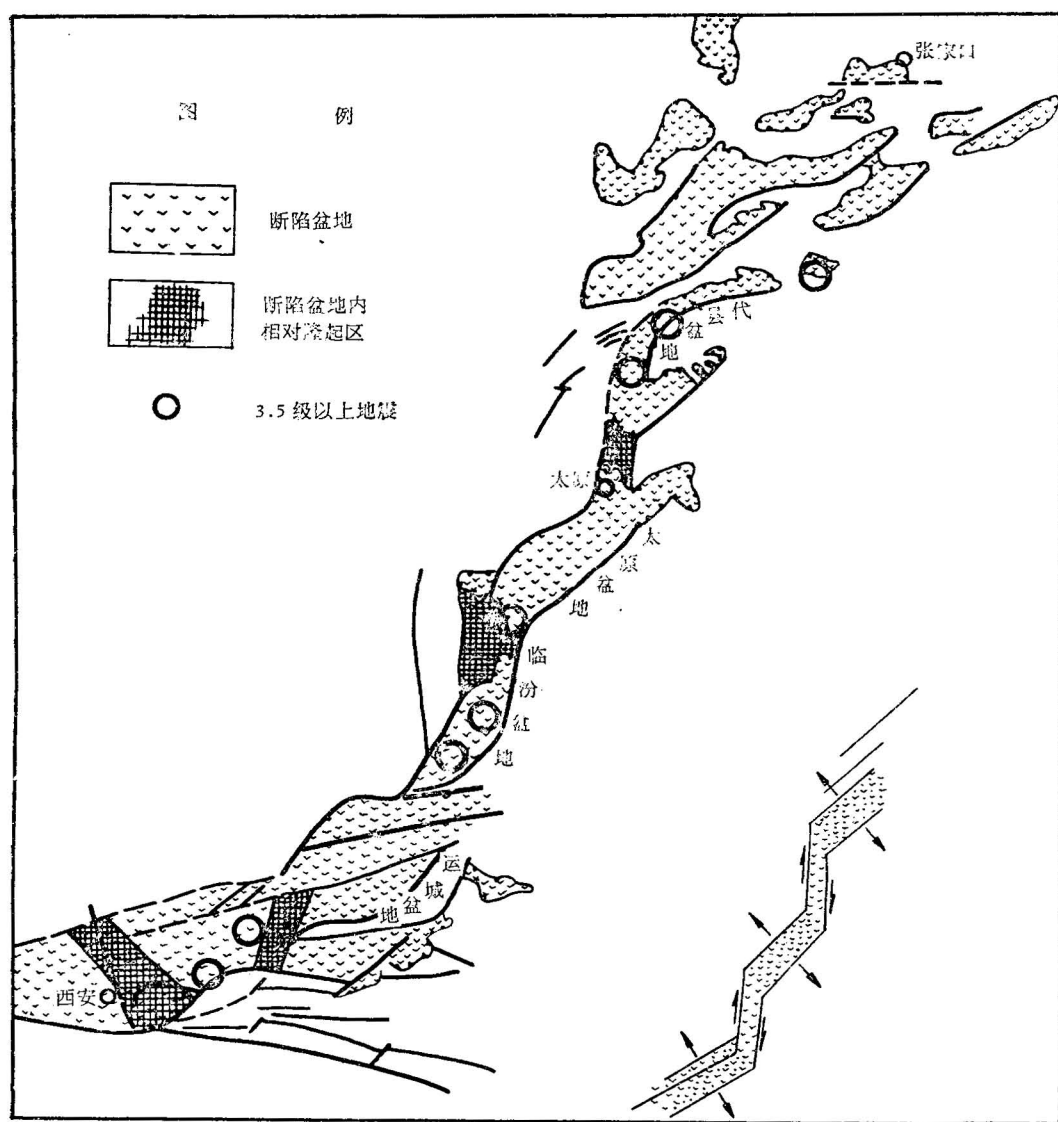


图 12 山西断陷盆地呈明显的剪切-拉开锯齿状断裂带

从模拟实验可知,其活动方式和地震的分布情况与地表相似(图 14、15)。

综上所述,我们认为,根据野外观测和室内模拟实验的初步分析结果,不仅可以判断一条锯齿状断裂带各段的活动性与地震活动性是不均匀的,而且还可以进一步推测:在剪切-拉开型的锯齿状断裂带上,剪切段大多发生小震,拉开段震级稍大,但震源一般均较浅;在剪切-挤压型的锯齿状断裂上,剪切段也是以小震为主,挤压段的震级较大,且震源一般较深;而在剪切段与拉开段,以及剪切段与挤压段的交接处,即锯齿状断裂的转折部位,则常有大震发生。不仅我国各地震带的地震分布有此规律,而且世界其他各地,如美国的圣安德列斯断裂带,其各段活动的不一致,以及大小地震分布的不均一性也同样可以由此得到说明。

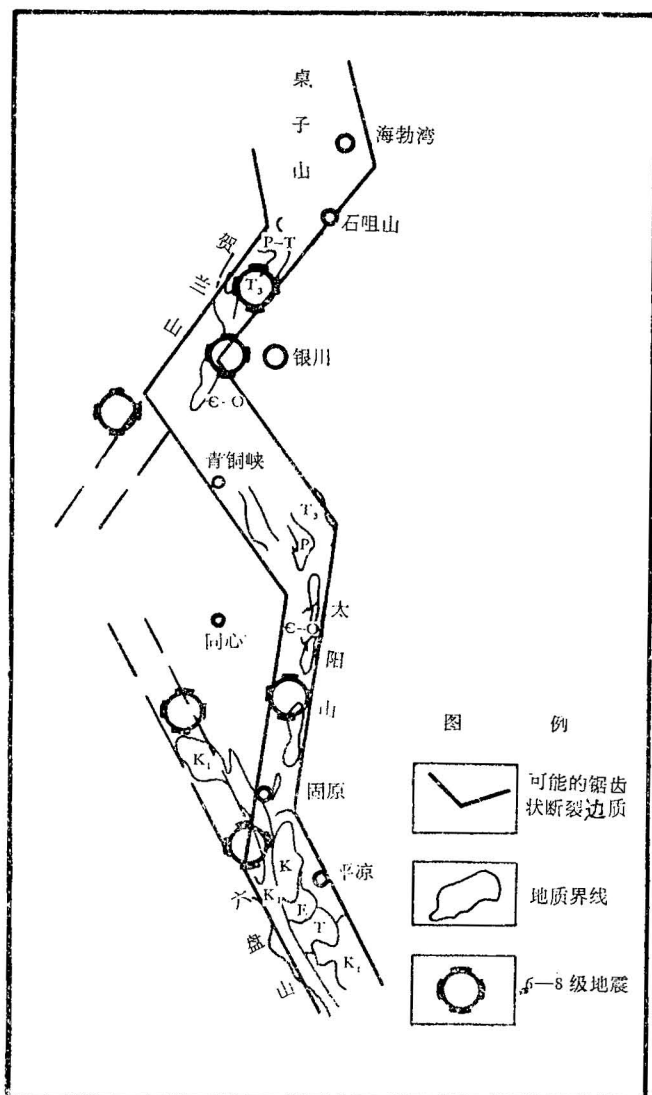


图 13 贺兰山—六盘山构造线总的方向呈明显的锯齿状是挤压型的

另外，从模拟实验结果看脆性破裂的速度一般比韧性破裂快。因此，拉伸段的大地震其前震阶段可能短而不明显，而挤压段则可能较长而明显。当然，这还与震源处的岩石不均一性有关，不能一概而论，但这些问题的考虑，对于更有效地利用小震预报大震肯定是有益的，所以很值得研究。里克特 (C. F. Richter) 曾把世界地震活动分为连续型和突发型两大类^[40]，看来，也主要是受断裂形成与发展过程中所表现出来的形变不均一性所控制的。而形变的不均一性又与岩石介质(成分、结构、形态)和受力(方向、大小、时间)的不均一性有关。

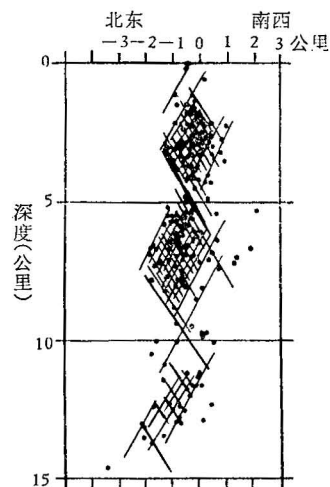


图 14 萨金特断层的地震 (1968 年 3 月—1969 年 4 月) 震源呈垂向的锯齿状断裂带

(据 J. H. Nealy: Tectonophysics, 9(1972) 259—282)

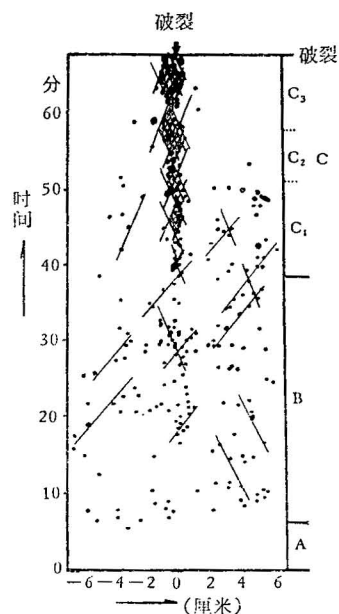


图 15 岩石标本花岗岩弹性震源的位置随时间的变化

A, B, C, C₁, C₂, 和 C₃ 表示不同阶段，呈明显的锯齿状。

(据 Hiroo Kanamor, Tectonophysics, 9(1970) 283—290)

以上所述,仅系我们研究断裂形成发展过程的一些初步看法,有许多问题还有待于今后进一步研究。

参 考 资 料

- [1] 张文佑、钟嘉猷 1962 锯齿状断裂的力学形成机制。地质构造问题, 3—14 页, 科学出版社。
- [2] 张文佑、叶 洪、钟嘉猷、张木生 1973 从断块错动和层间滑动初步探讨震源空间分布和震源力学状态的关系。地质科学, 第四期, 273—280 页。
- [3] 中国科学院地质研究所大地构造编图组 1974 中国大地构造基本特征及其发展的初步探讨。地质科学, 第一期, 1—16 页。
- [4] A. Nadai 1950 Theory of flow and fracture of solid. Vol. 1, McGraw-Hill.
- [5] W. R. Muehlberger 1961 *J. Geol.* Vol. 69, pp. 211—219.
- [6] P. C. Badgley 1965 Structural and tectonic principles. Harper.
- [7] W. F. Brace, B. W. Paulding Jr. and C. Scholz 1966 Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. *J. Geophys. Res.* Vol. 71, pp. 3939—3953.
- [8] Amos. Nur and Gene Simmons 1969 The effect of saturation on velocity in Low porosity rocks. *Earth. Planet. Sci. Lett.* Vol. 7, pp. 183—193.
- [9] M. S. Paterson, H. L. D. Pugh (ed) 1970 Mechanical behaviour of material under pressure. Elsevier. p. 202.
- [10] P. J. Syme Gash 1971 A study of surface features relative to brittle and semi-brittle fracture. *Tectonophysics.* Vol. 12, pp. 349—391.
- [11] C. F. Richter 1971 Sporadic and continuous seismicity of faults and regions. in B. W. Collins and Ronald Fraser (ed) Recent Crustal Movement, *Roy. Soc. New Zealand Bull.* 9, pp. 171—173.
- [12] Amos. Nur. 1972 Dilatancy. Pore fluids and premonitory variation of its travel times. *Bull. Science. Soc. Am.* Vol. 62, No. 5, pp. 1217—1222.
- [13] W. F. Brace 1972 Laboratory studies of stick-slip and their application to earthquakes. *Tectonophysics.* Vol. 14, pp. 189—200.

PRELIMINARY NOTE ON THE ORIGIN AND DEVELOPMENT OF ROCK-FRACTURE AND ITS BEARING ON EARTHQUAKES

CHANG WEN-YU CHUNG CHIA-YU YEH HUNG CONG BO-LIN

Abstract

(1) Rock deformation consists essentially of flow and fracture. The fracture generally owes its development to stress concentration which varies with inhomogeneity of rocks of different composition, texture and shape as well as the forces applied in various magnitude, direction and time-rate.

(2) The development of rock-fractures was studied by means of model experiments with wet clay-cakes. Under compression, the smooth surface of the clay-cake began to appear rough, to be followed often immediately by small wrinkles, and then conjugate X-shaped incipient shear nets, corresponding to Lüders' bands with intersecting acute angles pointing to the direction of compression. With further compression in the second step, zig-zag tensile fractures were developed causing one of the two arms of each X-shaped shear failure planes alternately with their general strike parallel to compression. Rock-fractures as observed in the field seem to have been developed much in the same way as shown in laboratory experiments. It may be concluded, therefore, that rock-fracturing usually originates in shearing with slowly discontinuous slips and finally reaches its full-development due to tension with quick and sharp separation. The facts mentioned above indicate that the occurrence of wrinkles on the clay surface is comparable with dilatation, the beginning of fracture-development may correlate to certain stage of "stick-slip", and the final crack-separation may correspond to the outburst of earthquake.

(3) The model-experiments of fracture-development with clay-cakes also show that the fractures usually appear more quickly and more sharply when the clay surface is wetted with water or alcohol. This phenomenon is considered to be the effect of pore fluid pressure.

(4) There is a transitional phase between brittle and ductile fractures, as is shown in stress-strain curve and fractography. In general, dilatation is absent in brittle fracture-development and stick slip is not so significant in brittle fracture as in ductile one; however, the effects of temperature, confining pressure, stress-history and nature of rock are usually present.

(5) It must be emphasized that dilatation, stick slip and pore pressure of water be considered a regular sequence in the development of fracture.

(6) The distribution of earthquakes is controlled by the zig-zag fractures which usually consist either of shear and tensile segments or of shear and compressional ones. Large earthquakes usually concentrate on the turning points of the zig-zag fractures, where the tensile segments or the compressional segments intersect the shear segments. Moderate and small earthquakes often follow the shear segments. Shallower earthquakes usually occur on the tensile segments, while deeper ones, on the compressional segments.