

破裂终止的实验研究及地震 断裂终止的讨论

汤 泉 贺玉亭

(兰州地震研究所)

摘 要

本文应用断裂力学中的止裂原理和用环氧树脂材料所做的破裂终止的实验结果,讨论了地震断裂的终止问题并提出了相应的地震地质条件:1.近期曾发生过中强地震的区域;2.历史上发生过七级以上大震的震源区;3.深大断裂及构造交汇区;4.一定规模的地块和横向隆起。依此条件可用来估计未来大震的强度,因而对中长期预报可能是有意义的。

目前普遍认为,地壳浅部的地震是岩石的破裂快速扩展的结果。按照断裂力学的观点,断裂的形成应经历这样一个过程:裂纹的萌生(包括亚临界裂纹扩展)、快速扩展和破裂的终止等几个阶段。其中破裂终止问题亦是震源力学中的一个重要问题,任何一个完整的描述地震过程的模式都应给出一个合理的终止条件。目前,众多的震源模式中,明确提出这一问题的却不多。此外,我国的地震破裂以双侧破裂居多,那末地震破裂两端终止点之间的距离就应等于地震断裂的长度 L 。众所周知, L 的大小和地震的震级是有关的,这方面已有许多经验公式。文献^[1]曾根据地表断裂长度的资料得出如下关系式:

$$M = 3.3 + 2.1 \lg L \text{ (公里)} \quad (1)$$

因此,研究地震破裂的终止点的条件,并寻求它的地震地质标志,这对于地震危险区的划分将是有益的。

1972年菊地正幸、竹内均^[2]开始讨论破裂传播的终止问题,提出了用限止应力和裂缝分叉的办法使破裂终止。1973年郭增建等提出的组合模式中的调整单元可起到使地震断裂终止的作用^[1],1977年刘正荣^[8]提出一些早期前震可以作为破裂终止点。

断裂力学是近廿多年来发展起来的一门专门研究破裂过程的学科。虽然断裂动力学的理论目前尚未成熟,但及时地把它的研究成果用于地震断裂的研究中,可能会是有益的。本文试图通过分析断裂力学中的止裂原理和用环氧树脂材料所作的模拟实验,来讨论地震断裂的终止问题。并在此基础上提出地震断裂终止的地震地质条件。

一、断裂力学的止裂原理

断裂力学的理论指出，任何一种材料对破裂的传播都存在阻力R。平面张开型裂纹的R可用下式表示

$$R = \frac{1}{E'} Y^2 \sigma^2 a \tag{2}$$

式中a是裂纹的半长度，σ是外加的应力，Y是一个与裂纹形状、加载方式以及试样的几何尺寸有关的量。

$$E' = \begin{cases} E & \text{(平面应力)} \\ \frac{E}{1-\nu} & \text{(平面应变)} \end{cases} \tag{3}$$

式中E是材料的杨氏弹性模量，ν为泊松比。

一般说来，R随着裂纹的扩展逐渐增大。例如当裂纹端部有塑性区时，由于进一步扩展需要消耗塑性功，而塑性功远大于克服表面能所需的功，因而阻力R也就增加。阻力曲线的示意图见图1，使裂纹扩展的动力用能量释放率，即裂纹扩展力G表示。显然要使裂纹扩展，必须满足G>R的条件。图1中的a₀就表示亚临界裂纹扩展的开裂点。这时裂纹扩展的速度很慢，破裂过程中的动能可以忽略不计。因此快速破裂的条件是：

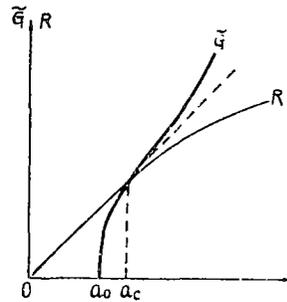


图1 阻力曲线

Fig.1 Curve of resistance

$$\begin{cases} G \geq R \\ \frac{\partial G}{\partial a} = \frac{\partial R}{\partial a} \end{cases} \tag{4}$$

如图1中的a_c点所示。

一旦快速破裂发生以后，动能将对破裂产生作用，裂纹扩展的动力用动态能量释放率G-tilde表示，

$$\tilde{G} = \frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} - \frac{dT}{da} \tag{5}$$

式中W为外力所做的功，U是应变能，T为动能。由此得出快速破裂终止的条件为：

$$\tilde{G} < R \tag{6}$$

要满足不等式(6)，显然只有增加R和减小G-tilde两条途径。由(2)式可知，当应力不变的情况下，增加R的有效途径是减小E'的值，即降低材料的弹性模量。当快速破裂在高模量的材料I中形成后，若在裂纹前进方向上遇到了低模量的材料II，则破裂将终止。其原理图见图2。动态裂纹扩展力G-tilde用曲线ACD表示，材料I、II的阻力曲线分别用AB、EF表示。快速破裂在a₀点发生后，扩展到a₁，遇到了材料II，此时裂纹扩展力G-tilde所做的功，除消耗在阻力R_I上外，尚有一部分能量转换为物体的动能，其大小等于图中曲边三角形ABC的面积，因此裂纹在材料II中要继续向前扩展一段，直到动能和消耗在阻力R_{II}上的功(等

于四边形CDEF的面积)相等时,破裂终止。

平面剪切型破裂的止裂原理和张开型相同。

二、实验方法及主要结果

本文采用的实验方法是,用环氧树脂制成 $7 \times 5 \times 2$ 毫米的薄板试件。在试件中预制了初始裂纹,为了控制破裂前进的方向,采用了图3所示的加载方式。这样快速破裂将沿着初始裂纹AB的延长线方向扩展。在破裂前进方向的E区预制了各种不同的特定条件来研究终止的可能性。为确保破裂首先从A点向E区扩展,在B点钻一小圆孔。试件在自制的加载装置上加载。试验中, $AB = 5$ 毫米, $AC = 20$ 毫米。

若E区内的材料和外部完全一样时,破裂快速通过该区,不会在E区内终止。当E区内的材料和外部不同的主要实验结果如下:

1. 软弱介质

当E区内嵌一块软弱的介质,如橡皮时,快速破裂前缘碰到E区的软介质后,破裂终止。

作为软介质的一个特例,E区内不充填任何物质,这时破裂也可以终止。实验表明,这种终止条件与小孔的大小有关。当小孔直径大于0.5毫米时,破裂遇到小孔就终止,但对于直径为0.1毫米左右的小孔,却无法阻止破裂的继续扩展。图4是一个在E区内安排了許多分布杂乱无章的直径小于0.1毫米的小孔的试件。实验发现,一旦快速破裂从A点发生,立即贯穿整个试件,并没有在E区终止。在破裂传播的路径上,穿过了两个小孔。

软介质的实验表明,软介质的低弹性模量特性,使它阻止了破裂的继续扩展。但软介质所占的区域较小时,这种作用就消失了,区域的大小和图2中 a_1, a_2 的长短有关。

2. 硬介质

实验中采用大理岩和钢作为硬介质,它们的弹性模量均高于环氧树脂板的弹性模量。但二者的实验结果是不同的。

岩石介质不能终止破裂,不仅破裂越过岩石继续前进,而且岩石本身也裂开了(见

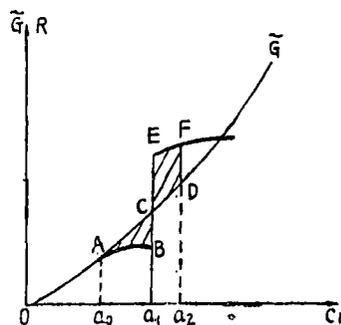


图2 裂终止裂原理图

Fig. 2 Theoretical figure of stopping cracking.

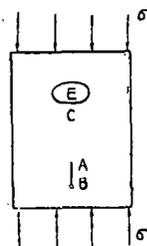


图3 实验试件原理图

Fig. 3 Theoretical figure of experimental example.

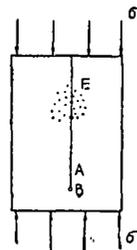


图4 小孔止裂实验

Fig. 4 The stopping-cracking experiment of small holes.

图5(1))。钢起到了终止破裂的作用(图5(2))。

造成这种差异的主要原因是钢的韧性好。要使钢扩展,必须消耗数量很大的塑性功,因此它的阻力 R 要比岩石大。这可以由二者的断裂韧性 K_{Ic} 的数值看出,钢的 K_{Ic} 约为 $400\text{kg}/\text{cm}^{3/2}$,而大理岩的 K_{Ic} 值仅有 $60\text{kg}/\text{cm}^{3/2}$ [4]。

3. 横向裂缝

实验表明,快速破裂在前进中遇到各种走向的横向穿透裂缝时,破裂均要终止。图6(1)是一条与破裂前进方向正交的穿透裂缝,(2)是一条与前进方向斜交的穿透裂缝。

但如果横向裂缝没有穿透,则它就不能起到终止作用。实验时,破裂穿过横向裂缝继续前进。

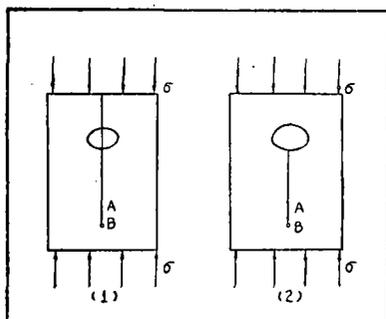


图5 硬介质实验结果

(1)岩石 (2)钢

Fig. 5 The experimental result of stiff material.

(1)rock, (2)steel

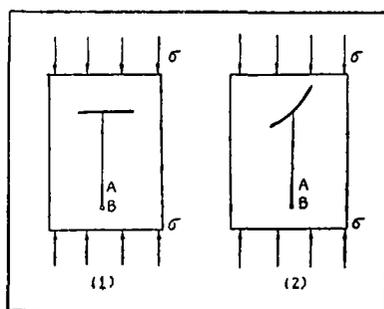


图6 横向穿透裂缝实验

(1)正交的 (2)斜交的

Fig. 6 The experimental result of transversal penetrating crack.

(1)perpendicular (2)slant

4. 横向突起

增加试件在E区的厚度,也可以起到终止破裂的作用。因为厚度的增加使破裂张开所需的表面能也增加,实际上增加了阻力 R 。

实验中,E区板的厚度与E区外板的厚度之比分别为2.0, 1.42和1.19。

三、地震断裂的终止及相应的地震地质条件

既然浅源地震是地壳中岩石的一次快速破裂,那末很自然它也存在一个破裂在何处终止的问题。地壳中的介质是极不均匀的,有坚硬的岩石,也有软弱的含水层及各种液、气体的包裹体;有些地区介质比较完整,有些则比较破碎;各地的温度也有差异;对地震过程起很大作用的断层有的是贯穿地壳的深大断层,有的则是仅处于一定深度的小断层。在这样复杂的地质环境中,哪些有利于地震断裂的终止呢?根据上一节的实验结果,我们认为下述条件是有利于地震断裂的终止的。

1. 深大断裂 根据不穿透的裂缝不能终止破裂的实验结果,并考虑到规模小的断裂在阻止破裂前进时,有可能不能抵消破裂时所产生的动能,而无法终止破裂,因此要能终止大地震的断裂必须是深大断裂。事实上,地震断层穿过小断层的例子是很多的。

2. 软弱介质 地壳中相对软弱的介质是多种多样的,但考虑到小孔不能终止破裂的实验结果,我们认为下述两种区域将对地震断裂的终止起重要作用。

(1) 已发生过中强以上地震的震源区,由于地震以后震源区比较破碎,热量又较为集中,因而可视为一个相对软弱的区域。根据实验结果这种区域可以终止破裂。不过考虑到震后介质的演变及我国大震的事实,又分为两种不同的情况。

谢原定〔7〕等在总结了我国大地震的重复性时指出,七级以上的大地震的极震区没有完全重复的现象。这说明历史上曾发生过七级以上大地震的地震断裂,不可能在原断裂段上再发生大于七级的地震(同一断层的邻区发生地震的地震断裂伸入原震源区的情况并不属于原断裂段上的地震,这正好说明原震源区的终止作用)。因此可以把历史上七级以上大地震的震源区作为以后大地震的终止点。

文献〔3〕曾提出早期前震可作为大地震的终止点。根据实验结果,对终止未来大地震的早期前震的大小应有一定的要求。不过它是未来大震的强度、构造应力的大小以及周围介质等多种因素的函数,目前要确定这个关系是困难的。在实际应用中,我们提出近期发生的中强地震作为终止条件,以区别于不能起终止作用的小地震。

(2) 多条构造交汇的地区,由于该地区介质比较破碎,这种区域实际上是横向裂缝和软弱介质复合作用的地区,其终止破裂的作用应更显著。

3. 一定规模的地块和横向隆起,稳定地块本身的介质比较完整,其抗破裂能力也高,因此它在一定程度上可起终止作用。实际上,地块四周往往存在断层,因而是一种复合的终止作用。

根据横向突起的实验结果,一定规模的横向隆起也可以终止破裂。

综上所述,终止大地震断裂的区域的地震地质条件为:

- (1) 近期曾发生过中强地震的区域。
- (2) 历史上发生了七级以上大震的震源区。
- (3) 深大断裂及构造交汇区。
- (4) 一定规模的地块或横向隆起。

上述条件的复合部位更有利于断裂的终止。本文提出的部分条件和文献〔5〕提出的寻找调整单元的指标是一致的,这说明组合模式中的调整单元在一定程度上可起到终止破裂的作用。

四、震 例

下面我们以上面提出的断裂终止的地震地质条件来讨论几个震例。

1. 1920年12月16日海原8.5级地震

文献〔3〕曾指出,该地震断裂的西部终止于1888年11月景泰附近发生的6.4级地震的震源区(图7a)。这和本文提出的终止条件一样。

至于地震断裂的东部,文献〔6〕曾认为,固原地区构造交汇,介质比较破碎,易于调整并容纳错入的岩体,使断层的传播在此终止。而固原地区有多条走向和海原地震断层相交的深大断裂,因此本文认为地震断裂终止于该区可能是横向断层和构造交汇区复合作用的结果。

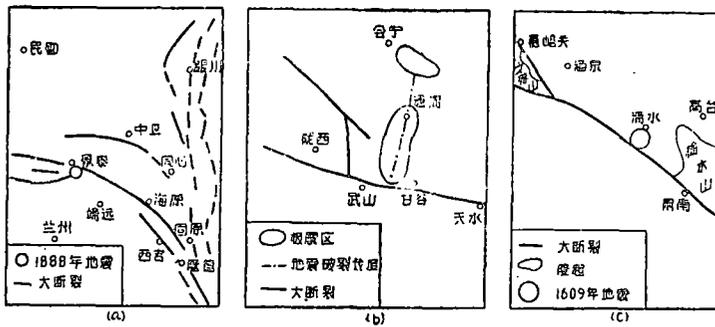


图 7

a. 1920年海原8.5级地震 b. 1718年通渭7 $\frac{1}{2}$ 级地震 c. 1609年清水7 $\frac{1}{4}$ 级地震

Fig. 7 a. The stopping range of the 1920 Haiyuan earthquake ($M_s=8.5$)
 b. The stopping range of the 1718 Tongwei earthquake ($M_s=7.5$)
 c. The stopping range of the 1609 Qingshui earthquake ($M_s=7\frac{1}{4}$)

2. 1718年6月19日通渭7 $\frac{1}{2}$ 级地震

该地震的极震区的长轴方向是近南北的，取该方向为地震断层的走向。

该地震的南部终止于东西向的深大断裂（图7b），而其北部曾于1352年4月在会宁发生过一次七级地震，其极震区的范围如图中所示。根据上述提出的终止条件，通渭地震的地震断层应终止于会宁地震的极震区。这样该地震的破裂长度为90公里（图7b中的点划线所示），若以公式（1）计算，求得的断层长度应为100公里，二者是比较接近的。实际上，根据第一节分析，可认为当地震断层进入会宁地震的震源区后，还会向前错动一段很小的距离，以消耗破裂时所产生的动能，这样二者的结果将更为接近。

3. 1609年7月11日清水红崖堡7 $\frac{1}{4}$ 级地震

该地震的发震断层是酒泉东盆地的南缘大断裂。其盆地的东侧是一个有相当规模的横向隆起——榆木山。西侧是横向断层（图7c）。按上节分析，这两者将是该次地震的终止部位。这两个终止条件之间的距离为90公里，按（1）式计算地震的震级应为7.4，和实际震级相差不多。

上述震例表明，本文所提出的终止条件可用来估计未来地震的断层长度，进而估计未来地震的强度，这对于地震危险区的划分将有一定的意义。此外，终止条件的研究对于震源过程的研究也是必不可少的。

最后需要指出，本文所提出的终止条件只是地震断裂终止的充分条件，而并非必要条件。此外由于实验条件的局限性，可能在实际中还存在另外的一些终止条件，这有待于结合地震事实进一步加以研究。

（本文1982年8月13日收到）

参 考 文 献

- [1] 郭增建、秦保燕、徐文跃、汤泉，震源孕育模式的初步讨论，地球物理学报，1973。
 [2] 菊地正幸、竹内均，割孔目传播の停止机构，地震，二辑，24卷，298—312，1972。

- [3] 刘正荣, 王绍晋, 早期前震与终止破裂点, 地震战线, №. 6, 1973.
- [4] B.K. Atkinson, Int. J. Rock Mechanics and min. Scie., 16, 1, 1979.
- [5] 郭增建、秦保燕, 震源组合模式与地震预报, 地震科学研究, №. 1, 1979.
- [6] 国家地震局兰州地震研究所、宁夏回族自治区地震队, 一九二〇年海原大地震, 地震出版社, 1980.
- [7] 谢原定、杨天锡, 大地震震源区地震重复图象的讨论, 西北地震学报, Vol. 5, No. 2, 1983.

THE LABORATORY STUDY ON THE CRACKING STOPPING AND THE
DISCUSSION ON THE STOPPING CONDITION OF
SEISMIC FRACTURE

Tang Quan He Yu—ting
(Lanzhou seismological Institute)

Abstract

Using the theory of stopping crack in the fracture mechanics and experimental results of stopping crack with photoelastic material, the problem about stopping condition of seismic fracture has been discussed. The suitable seismo—geological conditions of fracture—stop are suggested. These conditions are (1) the region in which a middling strong earthquake happened not long before (2) the source region in which a large earthquake ($M_s \geq 7$) occurred historically (3) the transversal fault and the intersecting region of some faults (4) the massive block and rise. Based upon these conditions, the strength of future strong earthquakes may be estimated. Therefore, it is perhaps of great significance to prediction of the moderate or long—term earthquake.