

地震孕育过程的破裂特征和 破裂蠕动的拉伸作用

苏 刚

(陕西省地震局)

摘 要

本文从力学角度结合震源物理研究结果,讨论了地震孕育过程的破裂特征及与前兆的对应。讨论了震源体破裂蠕动对环境介质的拉伸作用,从动态方面说明了源外介质对大破裂的错动容纳,并对短临前兆中的‘收缩’现象和沿破裂线余震的不对称分布作了初步解释。

根据地震孕育中可能存在的多次膨胀、卸载现象,文中划分地震过程为:单过程、复过程、准复过程。它们的前兆表现不同。这可能是不能用一个模式预报不同地震的原因之一。

一、引言

就其性质而言,构造地震的孕育与发生是震源体岩石介质受力破裂或再破裂的全过程,相应的震源物理研究一直受到国内外重视。七十年代以来,已提出多种孕震模式。国外具有代表性的是DD模式和IPE模式;国内有红肿模式、积累—调整单元组合模式和膨胀蠕动模式等^[1,2,3]。比较国内外模式可看出,我国的几个代表模式既考虑了震源体本身,又注意到了源外介质在孕震中的作用,源场联系在思路上有其特色。这些模式从不同角度揭示了震源发展的物理过程,对认识前兆和预报实践起了一定的指导作用。本文根据国内几种模式讨论地震的破裂过程的发展问题。

二、地震破裂过程的基本特征

数以百计的大震说明,作为地壳运动的剧烈表现之一,它发生于大时空尺度中,其破裂长度可达几十、上百公里,甚至更大。在如此大的尺度上,断层面(或未来断裂面)的锯齿状啮合、介质强度差异等非均质因素在不太小的蠕裂速度(数量级达 10^{-1} 毫米/秒^[3])下,其影响将不容忽视。断层泥的存在也不同于气隙状态等。由于这些原因,大尺度的岩体破裂就必然存在一个发展过程,其时间可达几个月。这种时段的存在,给发现此过程提供了可能;震源体是在地下数公里处受围岩强约束下破裂的,与自由表面试件的破裂不同,有一个地震错动的容纳和介质物性异于地表的问题;从震源体所在地块加强运动所引起的孕震加载来看,一般可视为匀速的。但一地块加强运动中同时会有多个大震在孕育^[4]。由于不一致的孕震过程和发展时间,会引起地块的多次调整,使以后发震的过程复杂化。为便于讨论,下面对震源体与积累单元的提法不予区别。

三、震源体的破裂过程

物体中一点的应力状态一般是用张量描述的。它涉及六个分量。虽描述完整，但直觉性很差。为此在尝试把复杂的应力状态归为单纯拉伸（或压缩）时，人们引入了广义应力、应变概念。它使任一复杂的弹性、非弹性空间应力状态归为拉伸或压缩，图1-a所示为其变化曲线。其中还画出了试验所给简单卸载及重新加载的线性化回路BCDC'B。这样当假定震源区岩石属弹塑性介质后，借助广义应力、应变，可把复杂的震源体受力变化，利用杆件拉伸的结果来研究

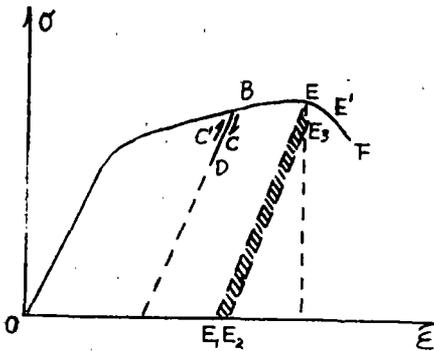


图1-a

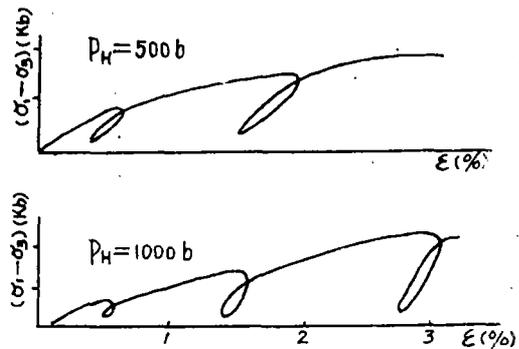


图1-b Saku-ishi致密凝灰岩在室温下压缩试验曲线

1、震源体破裂的开始。如〔3〕所述，震源孕育的弹塑性阶段积累单元端点是应力高度集中的位置，对大震它有较高的强度。当该处剪切应力达到临界摩擦应力时（如图1-a中的E点），断层局部启开，断裂区开始向积累单元内发展，并伴随着两侧介质的蠕动。这时局部启开的断裂区开始了卸载过程（如图1-a中的EF段变化），出现正应力下降、正应变反向的转折性变化。这使震源及周围一直增高的应力场开始转为下降，弹性应变能由积累转为予释放。与此对应地震前兆将显示转折，出现转折性的异常形态。我国近年的几次重要大震都总结出这种现象。海城7.3级震前的参窝震群；唐山7.8级震前的庙岛震群、大城4.4及和林格尔6.3级地震；松潘7.2级震前4、5月间南坪一带小震剧增，特别是5月11日松潘5.1级地震等，就认为是中长转短临的一种标志。随着这些地震的发生，震前几月内，多种宏、微观异常不断涌现。对参窝、庙岛震群的研究表明，它们是正应力下降的结果¹⁾。这和震源区破裂时正应力下降相适应。由此看出，以前兆转折为标志的短临期开始相当于震源体开始破裂，而短临前兆期相当于震前的破裂发展期，它们具有明确的物理意义。故总结和 research 前兆转折标志和识别方法，对短临预报不仅重要而且可能。

2、震源体破裂过程的加速蠕动是地震破裂的重要特征。震前震中区附近的蠕动现象已在地震中多次发现。庙山7.8级地震前，宁河短水准资料表明，约从76年4月起极震区上部地壳已开始前兆滑动；地震观测井井壁歪斜，水泥管位错，井孔钢管变形，废油井多次自喷²⁾。实测形变表明，震前异常形变量可达 5×10^{-5} ，当取唐山地震断层长度为100公里时（用地震波、余震、地形变分别给出115公里、130公里、84公里），则水平形变产生的可容许滑动位移量达500厘米。震前不但发现蠕动而且还观察到加速蠕动现象（图2）。

由于积累单元断层面间的锯齿状啮合和断层泥的存在增加了断裂发展的阻力，将此作用归为一动摩擦力时，计算结果表明断裂将以蠕动形式发展并且是加速的〔3〕。这表明理论研究 with 观测相吻合。

1) 秦保燕等，前兆震群产生的物理机制，兰州地震研究所，1981年

2) 牛志仁等，唐山地震的前兆物理机制和震源孕育过程，陕西地震局，1981.11.

从图 1—a 看出, 当岩石介质达到极限强度 (如 E 点) 后开始卸载, 随着广义应力值下降, 震源体中积累弹性能将开始预释放而变为动能。在构造运动引导下, 它成为破裂发展的能源之一 (如应力下降到 E' 时, 其大小定量地可由物理梯形 $EE_1E_2E_3$ 面积估算)。就是说, 地震破裂发展中有两种驱动力: 一是造成孕震过程的区域构造运动力 F_1 ; 一是破裂发展中由于卸载而释放所积累弹性能产生的驱动力 F_2 , 此力还随着破裂由端部向中间发展、释放能范围的逐渐扩大而增加。这就决定了在 F_1 、 F_2 联合作用下破裂发展必然是一加速蠕动 (裂) 的过程, 这是导致大尺度岩体急剧错动所需要的。这与破裂开始前仅有 F_1 作用不同, 也是区别于断层蠕变的重要之点。当然, 对较大地震其破裂过程不会是单一的, 但总趋势将是加速发展。特别是临震前蠕裂速度愈来愈快, 热、电磁、微破裂等预释能形式会相伴而生, 出现临震前兆。

破裂蠕动的加速现象作为震源体破裂的动态特征, 是短临前兆的重要物理基础。故寻找与破裂蠕动加速有关的前兆标志 (例如断层位移、超长周期蠕变波、断层蠕变速率等), 对短临预报可能是本质的。

3、破裂发展的复杂性。由于断层面间的非均质性, 也可能出现这种情形, 当破裂发展遇到尺度较大、强度较高的区段, 蠕裂驱动力小于临界摩擦应力时, 局部卸载被阻止, 出现重新加载现象。如图 1—a 所示, 从 B 点沿 BCD 段的卸载被阻止, 出现 $DC'B$ 段重新加载的能量积累过程。它类似图 1—b 岩石的循环加载试验。这类变化会在前兆场中有所反映。它可能使某些已出现的短临前兆终止, 又恢复到前期状况。即似乎要发生地震了, 结果未发生, 一些短临显示也消失了。因之前兆中的起伏间歇现象可能是自然的。这给分析判断带来了困难。

另一方面, 构造地震的运动学倾向由场致源的看法, 即把大震的发生与所在地块的运动联系在一起。于是会有这样的问题, 就地块而言, 一次运动加强可能会导致多处能量积累, 使同一时期酿成几次大震, 一般情况下它们的发生有先有后, 而每一次大震的发生整个应力场产生扰动, 导致后发地震出现多次卸载、膨胀现象。而当后发地震尚处于膨胀阶段, 先发震已进入破裂发展时, 因属同一地块, 部分应力将传递给先发地震, 使膨胀停止转入卸载, 直到大震发生重新调整后再出现膨胀。

问题在于第二次和以后的膨胀与第一次不同。在震源及邻近介质的前述假定下, 膨胀段卸载 (由于高围压不会是完全的) 再加载, 将有以下结果: 根据材料力学和岩石试验得出在较大应变下 (直到破裂点) 强化率趋于一个小的常数 (如图 1—b 所示曲线)。就是说, 二次膨胀时 (介质的塑性形变段相当膨胀段^[9]) 震源区介质塑性似有提高, 它使与脆性破裂有关的前兆现象如小震、突跳等减少, 而与塑性形变有关的蠕变现象增强。

按统计关系

$$\lg T = 0.76M - 1.83$$

和 T 具有膨胀至发震时段的含义^[6], 唐山 7.8 级地震的膨胀始于震前 31 年, 其间华北地块发生 7 级以上强震三次, 1966 年邢台 7.2、1969 年渤海 7.4、1975 年海城 7.3。依上述讨论, 它将出现多次膨胀、卸载现象。总结唐山地震前兆后发现^[2], 它至少经历了两次膨胀、卸载过程 (图 3), 一次是 1968~1973 年, 一次是 1974~1976 年。后发的唐山地震, 临震时震中区小震、突跳等前兆不明显, 而以蠕变

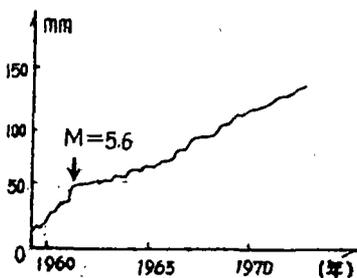


图 2 加利福尼亚霍利斯特附近西奈格酒庄的周期性蠕变

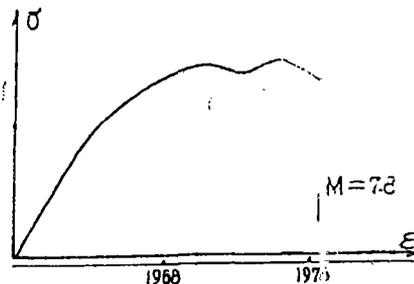


图 3 唐山 7.8 级地震前多次膨胀卸载示意图

为特征的前兆较突出，可能和这种多次膨胀、卸载有关。因此区别于一次性膨胀的单过程地震称为复过程地震。

显然，复过程地震不仅在中期前兆上会有大的起伏，短临前兆也与单过程地震不同。这可能是不能按一个模式预报不同地震的原因之一。不仅至此，还有一种地震，它发生在某大震近旁，时间上又较接近，虽自身不一定是复过程，但由于源区介质也经历了多次膨胀、卸载过程，其前兆特点将与复过程类似，称此为准复过程地震。海城7.3级地震三年多后近震中区发生的6级地震可能属此类型。

四、地壳局部的慢破裂过程

急剧破裂只是地壳局部破裂的一种形式。象断层滑动速率缓慢形成的慢地震和断层蠕变运动（图2），也是一种破裂，只是不如普通地震剧烈。蠕滑怎样致裂呢？引用〔3〕中弹塑性边界速度 $\frac{dx}{dt}$

与破裂边界速度 $\frac{d\bar{x}}{dt}$ 关系

$$\frac{dx}{dt} = \left\{ 1 + \frac{E_0 \epsilon_0 \operatorname{ch}^2 \left[\sqrt{\frac{\kappa}{E_0'}} \frac{2(x-\bar{x})}{a} \right]}{F \sqrt{\frac{E_0'}{\kappa}} \operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\kappa}{E_0'}} \frac{2(x-\bar{x})}{a} \right] + E_0' \epsilon_0 \operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\kappa}{E_0}} \frac{2x}{a} \right]} \right\}^{-1} \frac{d\bar{x}}{dt}$$

可做一说明。由弹塑性理论可知，对理想塑性体当其应力超过弹性极限时模量 $E_0' \rightarrow 0$ （断层蠕变一般认为和具有塑性的断层泥有关。当应力达到屈服应力时，断层泥失效而发生流动）。现设破裂边界 \bar{x} 与弹塑性边界 x 不重合， $\bar{x} \neq x$ ，那么上式中

$$\lim_{E_0' \rightarrow 0} \left\{ 1 + \frac{E_0' \epsilon_0 \operatorname{ch}^2 \left[\sqrt{\frac{\kappa}{E_0'}} \frac{2(\bar{x}-x)}{a} \right]}{F \sqrt{\frac{E_0'}{\kappa}} \operatorname{sh} \left[\sqrt{\frac{\kappa}{E_0'}} \frac{2(\bar{x}-x)}{a} \right] + E_0' \epsilon_0 \operatorname{sh}^2 \left[\sqrt{\frac{\kappa}{E_0}} \frac{2x}{a} \right]} \right\}^{-1} = 0$$

由于断层蠕变总有一定速度，即 $\frac{d\bar{x}}{dt} \neq 0$ ，又若 $\bar{x} \neq x$ ，代上式到前式中会看到， \bar{x} 将以无限大速度去逼近 x 。就是说，对断层蠕变而言，破裂与塑性形变将是同时发生的。当然由于非均质性，断层蠕变会有间歇波动，间有中小地震发生。这给已复杂多样的监测结果增添了新因素，使大震前兆识别更为困难。

五、震源体破裂蠕动对环境介质的拉伸作用

如所周知，处于地下数公里处的震源体其周围充满了岩石介质。因此，整个地震孕育过程中震源体的各种状态变化必然要与周围介质相协调。组合模式对此作了阐述，它特别说明了调整单元的作用，在孕震期间承担了向积累单元传递应力，发震时由于它能容纳断层的错动，提供了容许错动和使其终止的条件。可以设想，如无调整单元，则地壳局部运动的加强，将造成区域应力场值的一致增高，那么如发生破裂也将是区域性的，显然这与实际不符。这里将依组合模式来讨论破裂发展阶段调整单元在调整出容纳震源体大破裂错动时，前兆场是怎样变化的。

由于介质的连续性，积累单元与调整单元属统一运动系统。因之，第二节所述的加速蠕动，绝非

孤立于积累单元的事件，作为伴生结果它将牵拉调整单元介质发生变化。

如前所述，震源体破裂发展是以破裂蠕变形式进行，震前震中区发现有相对位移现象。但地下数公里处的积累单元震前还存在闭锁段，故断层两盘的整体蠕变不会发生。可能的主要运动形式是，在区域构造动力 F_1 的导引下，作破裂发展蠕变将牵拉调整单元介质（包括已部分断开的积累单元介质）压向尚未断开的闭锁段，结果调整单元介质被拉伸，使闭锁段分开的断层两侧出现相对位移。作一类比（图4），四条半无限长弹簧一端分别固结在闭锁段端部。其中 $A_1'B_1'$ 和 $A_2'B_2'$ 段的蠕变将被构造运动引向远处，它对破裂发展起牵拉作用； A_1B_1 和 A_2B_2 段在 F_1 作用下破裂蠕变被引向受压的 B_1 、 B_2 处，伴此，相连的 T_1 、 T_2 段的调整单元介质被拉伸。随着破裂发展拉伸逐渐积累。这就为大错动准备了回弹的容纳条件。自然，临震时的主要拉伸区界限，就成了大错动的限止界限（对相交断层限止这里不作讨论）。

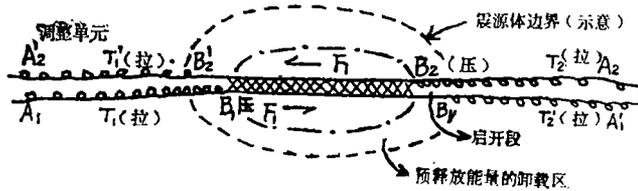


图4

发震时，在力 F_1 、 F_2 作用下加速发展着的蠕变使最后的闭锁段急速地启开，由于构造运动的控制作用，断层大错动将滑向 F_1 牵引方向，在被断层摩擦阻滑的同时，将被原拉伸的回弹朝 F_1 相反方向拉回，往返进行，形成震动。这种错动形式不一定要引起震源及邻近介质的极度破碎。这对理解围岩下的破裂，特别是短期内大震能在某地重复发生是有益的（如炉霍地区）。

另一方面，由于远离积累单元的 A_1 、 A_2 端处于非固定状态，随卸载区的不断扩大（正应力不断下降）和破裂向内部的发展，拉伸区将愈来愈靠近积累单元。与此相应，远场前兆区所积累能量不断传递到卸载区，使自身异常得以恢复。这一过程可能导致了‘前兆收缩’，即短期前兆动态变化呈现由外围向震中收拢现象。但‘收缩’主要将沿应力场变化最大的蠕变拉伸方向进行，它是前兆优势方向。因之从面上看，短临前兆不是均匀分布于震中周围，而有方向性，注意这种识别对未来震中的判别也是有益的。当闭锁区急剧变小将出现未启开段同时屈服（失稳）时，强烈受压的 B_1 、 B_2 处部分地失去动平衡，其中未抵消的部分挤压力会快速回返，这可能导致了临大错动前兆异常又由震中急速地向外扩张。

看来，地震破裂过程是在破裂蠕变发展的同时，牵拉源外介质引起拉伸，为大错动创造条件的‘自封闭’过程。当然拉伸不会是完全弹性的，会有象塑性的不可恢复部分。因之大错动前的拉伸长度比地震波确定的错距要大。

利用以上讨论可以得到单过程地震孕育的动态图象是：以积累单元剪切破裂开始为分界，在此之前，震源及邻近处于膨胀阶段，应力增长并由震源向外围扩张，伴此而来的前兆现象由震中向外围发展；此后，震源处于破裂蠕变阶段，伴此，前兆场将出现较多的短期异常并沿某较集中方向发生‘收缩’现象，由外围向震中发展，临震时又发生由震中向外围的急速回返。海城、松

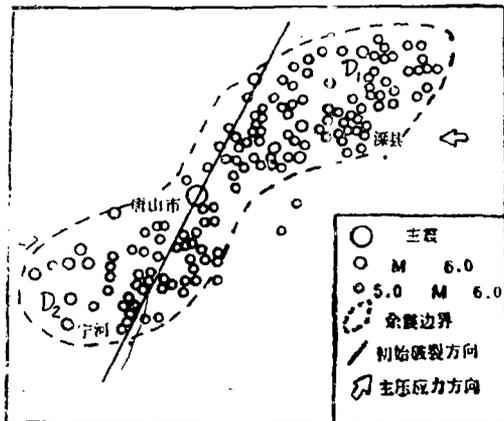


图5 唐山地震断裂面方向及余震分布

播等地震前都总结出这种现象。

唐山7.8级地震由地震波资料确定为双侧破裂，余震沿初始破裂线呈S形分布（图5）。用上述讨论可初步解释如下，以震中的锁住段（震前）分界，在箭头所示的区域构造应力作用下， D_1 、 D_2 分别为断层两侧的拉伸区，它们是破裂发展和震后调整的激烈变化区，故有密集的余震发生。

六、讨论

地震破裂是一种大时空尺度事件，在大错动前有个发展过程，尽管因介质非均质等影响会有曲折、起伏，但由于积累能的予释放，破裂蠕动的加速发展仍是主要特征。这点可能是本质的，围绕此特征并结合予释放能的其它形式找寻前兆信息，对短临预报尤为重要。其次，考虑了蠕动对环境介质的拉伸作用，对完整地反映整个地震过程的前兆动态是有益的。另外，注意不同类型地震前兆的识别，对预报判断可能是需要的。

参考文献

- [1] 付承义，地球十讲，科学出版社，1976。
- [2] 郭增建、秦保燕等，震源孕育模式的初步讨论，地球物理学报，16，3，1973。
- [3] 牛志仁，构造地震的前兆理论——震源孕育的膨胀蠕动模式，地球物理学报，21，3，1978。
- [4] 马宗晋等，渐进式地震预报及其三个理论问题的讨论，地震科学研究，1981。
- [5] 苏刚，震级与前兆持续时间关系的探讨，地震科学研究，1，1981。