

地震前兆场物理模式与前兆时空 分布机制研究(一) ——坚固体孕震模式的由来与证据^{*}

梅世蓉

(中国北京 100036 国家地震局分析预报中心)

摘要

首先针对“地震前兆场物理模式建立”项目的需要,阐述了该项目的研究思路与必须研究的若干科学问题,强调了强震孕育条件与过程的研究是其中的核心。文中先对笔者 80 年代提出的“坚固体孕震模式”的由来与发展作了概述;进而从深部构造、力学分析、破裂实验三个方面论证了该模式的合理性。从华北北部层析成像研究结果看出:强震震源都分布在高速块体内,或高速块体与低速块体接触地带,但偏于高速体一侧。通过硬、软包体力学模型研究,确认:硬包体(即坚固体)是大量应变能高度集中的重要条件。岩石失稳条件的理论与实验研究一致表明:只有震源体的刚度大于环境刚度时才可能导致岩体失稳、突然破裂与应力降的产生。

主题词 坚固体模式;包体理论模型;应力集中;块体层次结构;高、低速块体;破裂失稳

引言

关于地震前兆模式研究从 60 年代后期就已开始。文献中已有模式不少于二三十个,如著名的 DD 模式、IPE 模式、DC 模式、组合模式等。但是,这些模式大多涉及震源的孕育过程,而很少涉及地震前兆场的问题。除了原苏联学者 Добровольский (1991)提出的“地震孕育的固结模型”对前兆场的几个特征有所解释外,其它的模式很少涉及这方面,尤其是有关强震前震中区内外广大区域内所出现的主要异常,及其时空特征的机制研究甚少。正是由于对地震前兆场的时空分布规律缺乏理性认识,不能从实质上去鉴别哪些震前异常与大震孕育密切相关,因此,根据震前异常进行的地震预报命中率不高。为了提高地震预报水平,我国“八五”科研攻关计划提出了“地震前兆场物理模式建立及前兆空间分布特征物理机制研究”项目,希望通过此项研究,找到一些与震源孕育密切

* 国家地震局“八五”科研攻关项目。

1995 年 2 月 20 日收到初稿,1995 年 3 月 14 日决定采用。

相关的信息，为从经验预报走向物理预报奠定基础。

地震前兆是地震孕育到特定阶段才出现的现象。所以，要想认识地震前兆场的时空分布规律，不能就前兆论前兆，必须将地震前兆研究与地震成因和孕育过程联系起来。这就不能不触及到地震学的基本问题和基本概念。迄今，所有的震源模式都立足于一个基本概念，即地震是连续块体裂缝破坏的结果。虽然基于这个概念成功地解决了许多地震学中的基本问题，如地震波的传播，地球内部速度结构及震源参数的测定等等。但是，应用这个概念来研究地震孕育过程是远远不够的，因为地球固体层并不是一个连续介质，地震过程也不只是裂缝发育过程。按照非线性地球物理学的观点（Садовский и Писаренко, 1989），地球是一个巨大的开放系统，参与与外界的能量质量交换；地球物理介质是由各种规模的块体组成，其尺度大小服从几何级数定律；组成系统的块体被夹层所分割；块体内的强度大于夹层；块体之间也进行能量质量交换；在此过程中，当某些块体的能量达到一定值时，该系统就变得不稳定；最后，到了某个时刻，在不稳定的、能量饱和的介质中发生动力学破裂，并伴随着弹性波发生，使积累的弹性位能转变为其它形式——地震能、热能和电磁能等形式；释放弹性位能的岩石体被称为地震震源，或叫地震活动块。失稳的块体尺度越大，地震的强度也就越大。

按照以上观念，地震是地壳、上地幔物质在构造力作用下长期变形的结果，是岩石层块体层次结构中一部分块体与周围介质发生能量、质量交换后，产生某个块体或块体集合的应力高度集中，并导致这些块体失稳、破裂的结果。地震孕育过程是一个非线性、不稳定的过程，伴随着性质不同的大量随机现象。由此出发研究强地震的孕育、发生规律，并建立相应的地震前兆场模式，必须运用地球物理学方法研究一系列基本问题，诸如强震孕育的基本条件和基本过程是什么？能大量积累弹性应变能，并发生突然破裂失稳的块体应具备哪些结构特征和力学性质？构造块体中应力集中的过程、时空分布规律及其与地震活动、地震前兆的关系？地震前兆的复杂性与构造块体的结构、力学性质及地球内部过程与边界动力作用的关系？等等。此外，还必须引入非线性理论，研究强震前，反映孕震场整体特征及其变化规律，尤其是地震孕育短临阶段（远离平衡态）的前兆特征、规律与机制的揭示，更需要借助于这个理论。

但是，必须强调的是：强震孕育的条件与过程是上述问题中的核心和关键。因此，必须首先在这个问题上取得明确的认识，其它问题才能沿着正确的思路继续深入。“坚固固体孕震模式”的提出和发展就是适应这个要求提出的。

1 坚固体孕震模式的由来与发展

坚固体孕震模式从思想萌芽，发展至今经历了 20 多年的时间，其间经历了三个阶段：

第一阶段（1970—1976 年）硬包体孕震思想开始产生。70 年代初期笔者根据华北地区 60 次地震前普遍出现地震空区的事实曾提出：“由于地壳内介质具有不均匀性，岩石的破裂强度各处并不相同。假如应力场中存在一个破裂强度特高的块体，当应力增高到相当水平时，周围地区内由于破裂强度较低，故先发生大量小断裂，因而产生小地震，从而形成地震周围的空白区，直到大断裂在该块体内发生为止”（梅世蓉，1970）。

第二阶段(1976—1988年)开始提出坚固体孕震模式。唐山大地震后笔者反复研究了唐山大地震的各种观测资料，特别注意到大震前地震空区的存在与该区Q值较高，震中区缺乏与7.8级地震相应的活动断裂，震前小震应力降较高等事实，强化了震源区岩石具有较高破裂强度的思想。同时详细地研究了唐山地震序列与前兆的规则性与复杂性，剖析了复杂性产生的原因，提出岩石膨胀、断层蠕动、物质迁移三个因素的联合作用是规则性、复杂性产生的主要原因(梅世蓉，1982)。

1982年以后，研究了海城、松潘、龙陵等大震的各类观测资料及其地质构造背景，从中发现我国大陆地区的强地震按其前兆的总体特征可以分为两大类：断错型地震与走滑型地震。前者发生在断块内部或断裂带汇而不交的地区，后者发生在走滑断裂带上。断错型地震的前兆种类较多，分布较广，持续时间较长；走滑型地震的前兆种类较少，分布范围较小，持续时间较短。

根据以上前兆特征，结合两类地震的构造背景，明确提出：“…我国许多大地震前，其震中区长时期表现为地震空区。现在看来，这相当于地壳中镶嵌着一个硬包体，它必然成为高应力集中区，当应力积累到一定程度时，岩层内要发生膨胀及裂隙生长、发展、串通等过程，逐步形成裂隙集中区，介质强度减弱。由此形成震源的“胚胎”。随着应力的加强和裂隙的进一步发展，震源区介质的性质随着时间不断变化，相当于一个软包体。它的存在和变化必然要引起周围介质中应力场的变化。”这就是坚固体孕震模式的初期表述(梅世蓉，1985)。

1985年以后，根据坚固体孕震模式，尝试进行了孕震过程与前兆机理的数值模拟，采用二维马克斯威尔粘弹体模型，按以下条件进行了计算：①在边界上的动力作用不变；②介质力学性质上的非均匀性是应力应变场不均匀分布的原因；③用多个较硬的小块体模拟(即具有比周围介质更高的刚性与粘性系数)多个地震的同期孕育；④当弹性应变能积累到极限，地壳岩石的力学性质发生显著变化，从而引起各种前兆现象。按照这些条件分两步进行计算：第一步进行较大范围的概略计算，以了解定常边界力作用下，由于介质的非均匀性造成应力、应变场的概貌；第二步以第一步为基础，计算唐山块体内岩石膨胀与断层蠕动引起的应力、应变场变化，进而研究这个变化与唐山地震前兆异常的关系。

根据数值模拟计算，明确提出了唐山地震的孕育模式——坚固体模式(或硬包体模式)。其主要内容是：“唐山地震震源体的形成是在定常边界力作用下，由于地壳介质力学性质的非均匀，在局部地区应变能长期积累的结果。应变能之所以在这里积累是由于唐山断块区上地壳存在坚固体与断层面的障碍体，它们具有较强的抵抗变形的能力，而一系列震前异常的发生则与应变能积累到后期，引起应变加速过程并伴随岩石膨胀密切相关。这相当于坚固体软化过程(梅世蓉等，1989；梅世蓉、梁北援，1989)。

第三阶段(1989年至今)为求证、扩展和深化阶段，即为坚固体孕震模式寻找多方面的证据，包括深部构造证据，力学分析证据，岩石破裂实验证据等。同时，从观测资料分析、理论计算及岩石破裂实验方面，研究按这个模式孕育地震时，应力、应变场的发展过程及地震前兆场的时空分布和演化规律，探讨地震前兆复杂性的原因，从复杂性中寻找地震预报的有效途径。本文所述是第一方面的研究结果。

2 坚固体孕震模式的深部构造证据

为了弄清坚固体是否真正存在于强震发生地区的地壳中，需要取得强震发生地区的深部构造资料。在这个领域，刘福田等已取得了许多重要结果。孙若昧先后应用他发展的方法于渤海与邻区及京津唐张地区，为本课题提供了有力的支持。

2.1 渤海及其邻区的地震层析成像与地震活动

孙若昧等(1993)利用渤海及其周围地区内近70个台站对1983—1988年发生的207个区域地震和震中距大于 15° 的57个远震记录，反演得出了这个地区的三维速度结构。笔者利用她的研究结果进行了三维速度结构与地震活动关系的研究。将地震投影在与震源深度相当的速度扰动切面图上，以便对比分析。图1a, b是17 km, 32⁻ km的速度扰动图。图上虚线所围部分是高速区，圆圈代表地震($M \geq 6.0$)。由图1b可以清楚看出，京津唐地区的强震全部位于17 km的高速区内；渤海地区的强震则位于32⁻ km的高速区或其边缘。辽东湾及其以东地震(包括海城7.3级地震)也位于17 km的高速区。突出的低速区内没有强震发生。如此规则的强震分布很难用任何偶然因素解释(梅世蓉等，1993)。

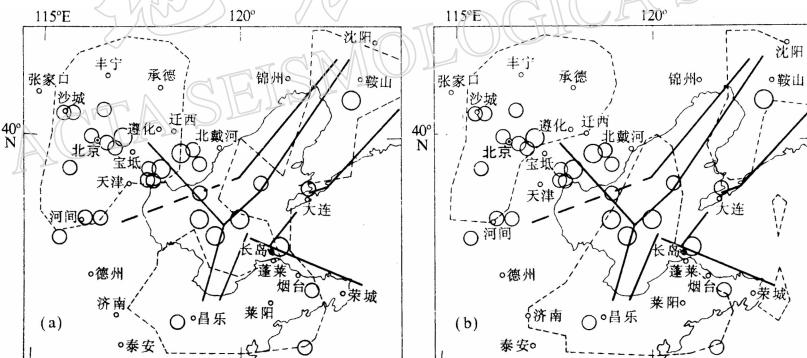


图1 渤海及其邻区速度结构与地震活动对比

(a) 底图为17 km深的速度切面，(b)底图为32⁻ km深的速度切面

2.2 华北北部地震层析成像与地震活动

近年来，为了弄清华北北部地区强震震源区的深部速度结构，孙若昧、刘福田对京津唐张地区(北纬37°—41°，东经112.5°—120°)的三维速度结构进行了仔细地研究。研究中应用了北京台网、天津台网及河北省地震局、山西省地震局部分台站资料。地震到时资料取自这些台网记录的1984—1991年发生在该区内的地震(2505个地震)22234条地震波到时数据，其误差小于±0.2 s。为了得到比以往更精细的地壳构造结果，将研究区按 0.5×0.5 平方度的网格划分离散化。根据前人的研究成果，选取唐山、张家口、阳高、北京、高丽营及邢台等地区的10个地震，用试错法进行射线模拟，选用了表1给出的初始模型，其中34 km深度为莫霍面的位置，34⁻，34⁺分别代表莫霍面以上和以下的深度。不同深度间的速度值按线性增加。

表 1 P 波初始速度模型

深度/km	0	3.0	10	15	20	25	30	34 ⁻	34 ⁺	40	50
速度/km·s ⁻¹	3.5	5.0	5.9	6.1	6.2	6.38	6.6	7.0	7.6	7.8	7.9

穿过唐山、北京、邢台震区的射线数多达几千条。丰富的资料为反演结果的可靠性提供了保证。图版 I 照片 a—c 是孙若昧、刘福田的最新研究结果。它们是不同深度处的速度相对扰动图象，其数值以色标表示。红色代表低速区，蓝色代表高速区，图中网格为经纬度线。自左向右的经线位置分别是东经 $112.5^{\circ}, 114^{\circ}, 115^{\circ}, 116^{\circ}, 117^{\circ}, 118^{\circ}, 119^{\circ}, 120^{\circ}$ ；纬线位置自下向上分别是北纬 $37^{\circ}, 38^{\circ}, 39^{\circ}, 40^{\circ}$ 和 41° 。照片 a(见图版 II) 中的黑线表示断裂及渤海海岸线。鉴于该区震源深度的优势分布为 $10\text{--}20\text{ km}$ ，故将公元 1 000 年以来 $M \geq 5.5$ 地震投影在 15 km 的速度图象上照片 a(见图版 II)。地震投影由白色圆圈表示。由图可见： $M \geq 5.5$ 地震几乎都分布在高速块体内或高速块体与低速块体的交界部位的高速体一侧。例如，唐山、滦县一带的地震；三河-平谷 8 级大震；邢台强震群都发生在高速块体同低速带相邻的速度陡变带且偏高速体的一侧。

从穿过地震序列的地震垂直剖面图上更能看清震源分布与速度结构的关系。

照片 b(见图版 II) 是过唐山 7.8 级主震、滦县 7.1 级地震及宁河 6.9 级地震的 P 波速度扰动北东向纵剖面。图中竖直线表示经度，左边界为东经 116.5° 到右边界 119.5° ，间隔为半度。水平线表示深度，由上至下依次是地表， $10\text{ km}, 25\text{ km}, 34\text{ km}, 50\text{ km}$ 。图中白色圆圈表示 $M \geq 5.0$ 的余震。由图可见，滦县-卢龙区和宁河区分别发生在规模不等、深浅不同的两个高速体，其间由一个相对低速的条带连接。宁河地震发生区的高速块体规模比唐山-滦县-卢龙区要小得多，震源深度要大一些。

照片 c(见图版 II) 是过邢台 7.2 级震中区的北东向垂直剖面图。图中竖直线表示经度，左边界为东经 114.7° ，右边界为 116° 。水平线表示深度，由上至下依次是 $3\text{ km}, 10\text{ km}, 15\text{ km}, 20\text{ km}, 25\text{ km}, 30\text{ km}, 34\text{ km}, 40\text{ km}, 50\text{ km}$ 。图中黑色圆圈表示邢台地震序列中 $M \geq 6$ 地震的震源。由图可见，所有这些地震均发生在高速扰动区内，只有两次 6 级多地震发生在高速、低速区的边界上。统计 1966 年 3 月 8 日至 1992 年 12 月 31 日邢台地区共发生 49 次 $M \geq 5.0$ 地震，除 4 次发生在低速区外，其余 45 次均发生高速扰动区内，占总数的 92%。

3 坚固体孕震模式的力学分析

地震的孕育、发生需要两个基本条件：①具有积累大量弹性应变能的条件；②具有发生突然应力降的条件。为了满足这两个条件，既需要一定规模的震源体积，又需要与周围介质的力学差异性。否则，能量或无法在局部地区集中，或集中后不以突然破裂方式释放，而以缓慢破裂或稳定滑动方式释放。

3.1 硬包体是造成应力集中的重要条件

从文献中可以看到硬包体与软包体造成应力集中的主张(Добровольский, 1991; Brady, 1975)。为了弄清哪种包体更有利于高应力集中和高能量密度的出现，冯德益等

以唐山地震为例, 考虑含有地表断裂及深部断裂的分层岩石圈模型, 不对称加载方式, 用长方形体的硬包体、软包体、硬-软包体等不同模型来模拟不同阶段的震源体; 采用三维非线性有限元 NFE 程序包计算地面与地下不同深度处的位移场与应力场的各个分量。计算结果表明: 硬包体模式比较合理(冯德益等, 1995)。

图 2 是唐山地震孕育区块体计算模型。岩石圈表面及深部某些单元含有断裂。各层介质(分含断裂与不含断裂两类)的弹性模量 E (杨氏模量)、泊松比(ν)、容重(P)见表 2。

表 2 唐山地区岩石圈各层的介质参数

层序号	深度 km	含 断 裂 的 介 质			不 含 断 裂 的 介 质		
		$\times 10^4 E/\text{MPa}$	ν	$P/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	$\times 10^4 E/\text{MPa}$	ν	$P/\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$
1	0—3	0.192	0.21	10.8	0.335	0.23	11.8
2	3—6	7.252	0.22	22.5	8.603	0.24	23.5
3	6—11	6.545	0.22	22.5	7.577	0.24	23.5
4	11—13	8.418	0.24	24.5	9.539	0.25	25.5
5	13—19	7.137	0.24	25.5	8.125	0.26	26.5
6	19—21	8.515	0.26	27.4	9.584	0.28	28.4
7	21—26	7.698	0.26	27.4	8.720	0.28	28.4
8	26—31	11.036	0.26	30.4	12.265	0.28	31.4
9	31—40	11.715	0.26	30.4	12.976	0.28	31.4
10	40—70				16.000	0.28	32.3
11	70—100				18.500	0.40	32.9

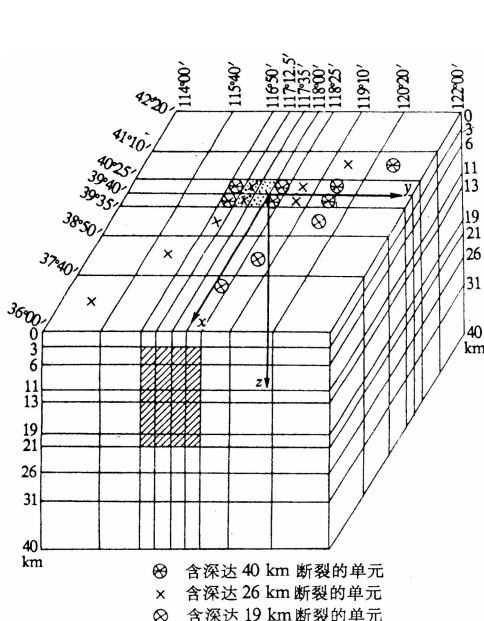


图 2 唐山地震孕育块体计算模型

震源体取 3 种模型: ①硬包体, 其内的弹性模量比外围介质大 $1/3$; ②软包体, 其内的弹性模量比外围介质减小 $1/3$; ③硬-软包体, x 方向上最当中的两部分单元为软包体, 其余 6 部分包围它们的单元为硬包体。该块体东西受太平洋板块向西的挤压压力, 南部受印度板块指向北东的推挤力; 四面受外围介质侧向的压力; 沿 z 方向承受重力; 设底面固定不动; 地面($z=0$)为不受力的自由面。实际上, 按 8 个方案计算: ①既无断裂, 又无包体; ②无断裂时的软包体; ③无断裂时的硬包体; ④有断裂, 无包体; ⑤有断裂时的软包体; ⑥有断裂时的硬包体; ⑦无断裂时的硬包体中含软包体; ⑧有断裂时的硬包体中含有软包体。得出了地面 $z=0$ 及 $z=13$ 与 19 km 的应力场与位移场各个分量的节点值; 主应力及其对应的主轴方向; 最大

剪应力，平均水平应力及垂直向位移分量 W ，水平向位移矢量。

由大量计算结果得出了若干有意义的认识，与本文直接有关的有以下 3 点：

(1) 介质无断裂与含断裂情况下的应力场和位移场有一定的差别。总的结论是：当含断裂时，应力要减小，位移要增大。

(2) 当孕震体内存在断裂时，有无硬包体存在差别很大。在无包体情况下，含断裂与无断裂介质中的垂直位移最多只相差 0.05，而在有包体的情况下则可以相差 0.4 左右。应力值的差别也是如此。换句话说，硬包体的存在可导致应力增加 8 倍。

(3) 图 3a—d 为 4 种情况下的平均水平压应力分布图。由图可见，只有在硬包体情况下，中心部位才出现高应力点(图上以黑圆点表示)。

以上结果充分表明：硬包体的存在是高应力集中的重要条件。

3.2 硬包体是造成岩石失稳的重要条件

然而，集中的弹性应变能是否一定以突然破裂的形式释放，还要取决于震源体的刚度与周围环境刚度之比是否满足岩石失稳的必要条件。这一点可以从以下的分析看出。

陈颤(1982)曾采用单自由度加载系统的力学模型(图 4a)。在这个模型中，把加载系统看成是一个弹簧。岩样上端坐标为 x 。当岩样不受力时，弹簧另一端的坐标记为 x 。当弹簧上端发生位移时，岩样上端位移为 u (向下取为正)。弹簧施加于岩样的力 F 与弹簧的相对伸长成正比，即 $F = K(u_0 - u)$ 。式中， K 为弹簧的弹性常数，被称为加载系统的刚度。在平衡条件下，岩石样品受力 $f(u) = F$ ，故有

$$f(u) + Ku = Ku_0 \quad (1)$$

式中， u_0 相当于加载系统的位移(亦称远场位移)， u 为岩体位移。失稳条件是方程(1)的解。 u 对于边界位移 u_0 的无穷小的变化具有有限的变化。对(1)式求偏微分，得

$$K\delta u_0 = [K + f'(u)]$$

所以失稳条件为

$$K + f'(u) = 0 \quad (2)$$

由于弹簧刚度 $K > 0$ ，所以失稳条件必须有

$$f'(u) < 0 \quad (3)$$

由图 4b 可知，只有在峰值应力(图上的 C 点)以后，应力-应变曲线才出现 $f'(u) < 0$ 的情况，即介质必须出现滑动软化以后，失稳才可能发生。但是，必须指出，这个失稳条件只是一个必要条件，还不一定是充分条件。当超过峰值以后，系统是否稳定，取决于 K

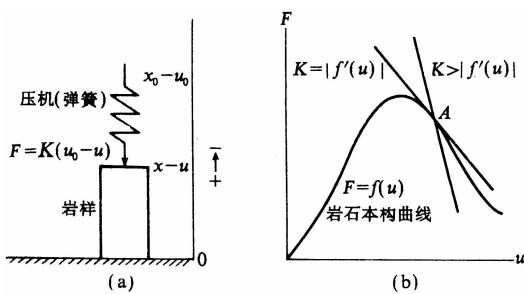


图 4 岩体失稳分析图. (a)单自由度加载系统示意图,(b)岩石变形失稳分析

取决于震源区的力学性质, 还与环境刚度密切相关. 当环境刚度小于震源体等效刚度时(柔性加载), 突发应力降(失稳)才是可能的. 坚固体孕震模式要求的震源体正符合这样的条件, 即强震孕育、发生在高速区内(坚固体), 邻近地区为刚度相对较小的低速区.

4 坚固体孕震模式的实验证据

为了进一步研究压机刚度对岩体破裂失稳和粘滑行为的影响, 张流等(1995)采用应力-应变线性组合控制原理, 通过改变两种信号的比例, 模拟了压机刚度的变化. 在多种实验条件下测定了若干岩石的变形行为, 并对变形、破坏(或滑动)过程中应变响应比与系统失稳间的关系作了一些计算和讨论. 应变响应比和系统失稳度的定义如下:

应变响应比

$$F_e = (\Delta \varepsilon_1 / \Delta \sigma_1) / (\Delta \varepsilon_0 / \Delta \sigma_0)$$

系统的失稳度

$$Y_e = 1 - (1/F_e)$$

式中, σ_1, ε_1 分别为轴向应力和应变; σ_0, ε_0 分别为轴向线弹性段的应力与应变.

类型 I 其特点是从岩石承受差应力直至峰值位置均为线性(图 5a). 峰值点后系统破坏并失稳, 形成突然的应力降. 破坏前非线性成分很少, F_e 始终等于 1 或接近于 1, Y_e 等于或接近于零. 破坏前难于觉察异常. 室温单轴条件下坚硬或较坚硬的岩石, 如花岗岩、石英岩, 甚至一部分灰岩、砂岩以及温度和围压不太高的情况下的坚硬岩石都可能具备这样的特点. 低温并具有一定围压或正应力条件下的坚硬岩块间的粘滑过程也可能具备

值和岩样等效刚度 f' 的相对大小. 如果压机刚度足够大, 以致在峰值应力之后的位移弱化阶段, 仍然始终是 $K+f'(u)>0$, 则系统永远不会失稳, 岩石将稳定地变形. 这种情况叫做刚性加载. 从这里可以看到, 滑动弱化是失稳的必要条件, 但不是充分条件. 如果压机刚度不够大, 则可能满足式(3), 岩石变形在峰值应力后某一点发生失稳, 并伴有强烈的破坏, 这种加载方式被称为柔性加载.

由此可见, 岩石是否失稳, 不仅取

决于震源区的力学性质, 还与环境刚度密切相关. 当环境刚度小于震源体等效刚度时(柔性加载), 突发应力降(失稳)才是可能的. 坚固体孕震模式要求的震源体正符合这样的条件, 即强震孕育、发生在高速区内(坚固体), 邻近地区为刚度相对较小的低速区.

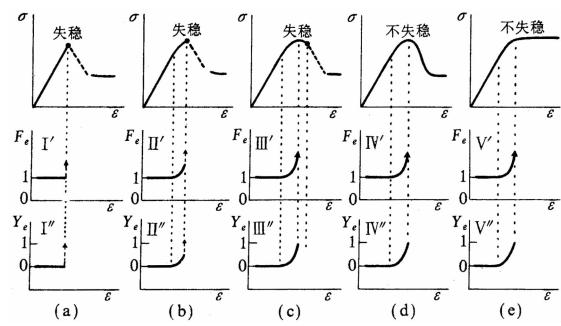


图 5 实验变形岩体应力-应变、应变响应比、系统失稳度曲线 (a), (b), (c), (d), (e)
分别代表 5 种岩石类型

这样的特点。

类型Ⅱ 其特点是岩石的变形达到屈服点以后，出现较为明显的非线性，表现出一定量的塑性变形，但直至峰值点产生破坏、失稳之前，曲线的斜率均大于0。在此非线性变形段内 $1 < F_e < \infty$, $0 < Y_e < 1$ (图 5b)。单轴条件下的大部分岩石和一定温压范围内的坚硬岩石和较坚硬岩石都具备这个特点。大部分的粘滑过程也会具备这样的特点。它们是应用响应比理论最理想的场合。

类型Ⅲ 其特点是除了在屈服点后出现明显的非线性变形外，这一趋势一直持续到峰后，即曲线出现负坡。系统的失稳发生在峰后，而不是峰值顶点。相当一部分坚硬岩石在一定的温度、围压条件下，出现这样的特点。这时响应比与系统的失稳度的数值与原来期望的情况会有偏离(图 5c)。

类型Ⅳ 岩石具备完整的含有峰后部分的应力-应变曲线，破坏是渐进式发展的。整个过程不会导致系统发生失稳。较软的，特别是在一定范围内较高温度下的岩石，以及较大系统刚度和环境刚度下变形的岩石具备这样的特点(图 5d)。

类型Ⅴ 岩石在达到屈服点以后，明显地表现出非线性变形，应力达到强度值后，出现稳态滑动或沿破裂带、破裂面的稳态滑移，曲线无峰值点，即不出现弱化现象，系统不失稳。软的以及较高温度下的岩石和稳定滑动过程会表现出这样的特点(图 5e)。

以上结果表明：只有坚硬岩石才会发生破裂失稳，并出现响应比异常；相反的情形，即有响应比异常出现，岩石不一定都失稳。

5 结语

综上所述，深部构造、力学分析与岩石实验三方面的研究都为坚固体孕震模式提供了支持性的证据，说明这个模式是可以成立的。不过本文中所讨论的情况还比较简单，是实际情况的近似。震源体内、外更复杂的非均匀性、非均质性尚没有充分考虑。不过，增加这些因素，只会加大现象的复杂性，如应力、应变过程的多次起伏及其时空分布与演化图象的复杂性，不会改变失稳破裂的必然性。

至于高强度的孕震体具有哪些形式和内容？是有待揭示的问题。从形式上说，坚固体本身可以包含多种情况，如不含宏观破裂的较完整的块体；存在小规模断层的块体；粘接牢固的几个块体的集合；大断裂带上的强闭锁段等等。它们在地壳内的存在形式也可以多种多样，它们可以顺着某个活动带分布，其间被强度较低的块体隔离；或散布在某个大活动块体内，其间被低速区分隔；或几个坚固体粘结在一起，外围某些部分被低速区包围等等。这些不同情况无疑对地震活动的时空分布及其前兆场带来复杂的影响。

坚固体的规模大小肯定是决定地震大小的关键因素。规模越大，积能越多，这是不言而喻的。不过积累的弹性应变能是以一次大震或多次地震释放？这就不能不联系到坚固体的内部结构。显然，坚固体有、无断层存在？断层按什么方式排列？坚固体是单个块体抑或多个块体集合？这些因素都将影响到坚固体失稳破裂时能量的释放方式，并决定着地震的大小和地震序列的性质。

坚固体的力学性质是否是时间的函数？是一个没有研究而又必须研究的问题。如果它随着时间而改变，其原因何在？效果如何？这不仅关系到地震的孕震时间过程，也关

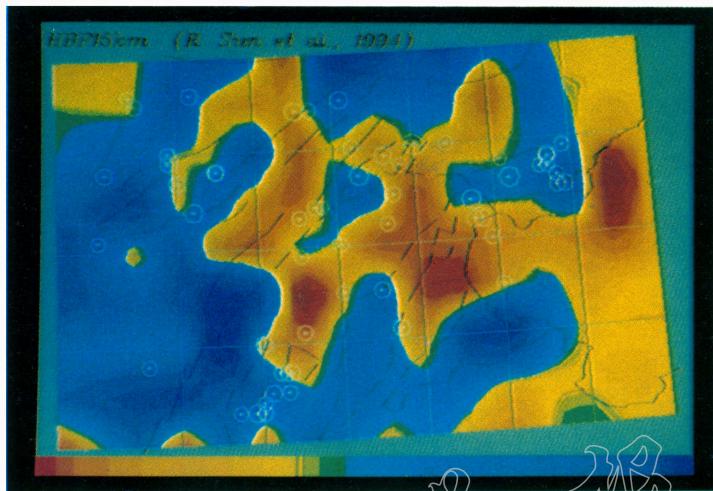
系到地震前兆的空间分布与时间演变.

坚固体周围介质的结构与力学性质对坚固体的形成和发展的影响? 是另一个没有研究而又必须研究的问题.

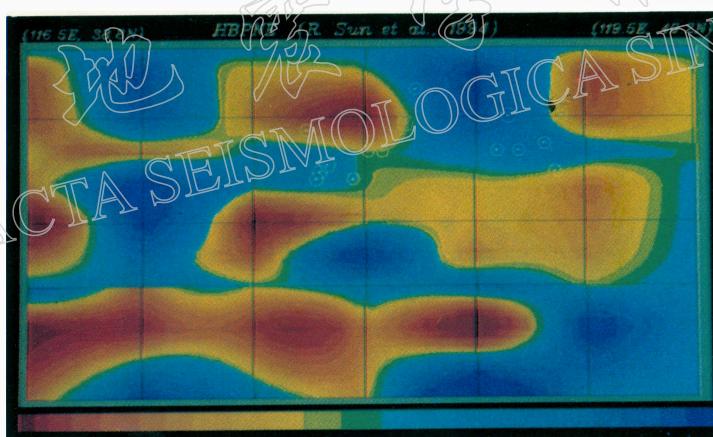
总而言之,由坚固体孕震模式引出的问题很多,随着这些问题的逐步明朗,这个模式必将更加完善,并可说明更多的问题.

参 考 文 献

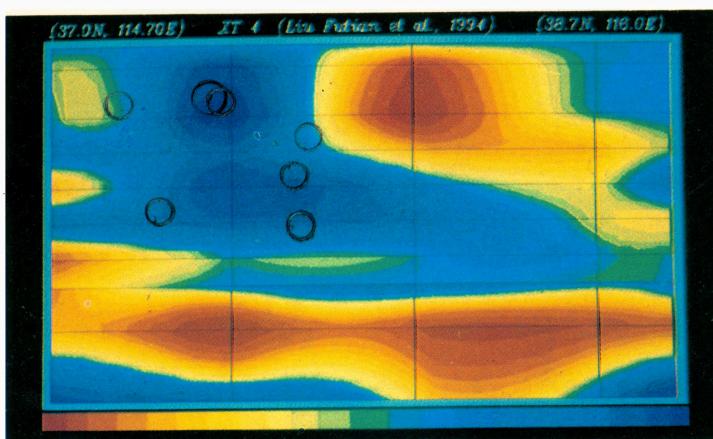
- 陈颙、郝晋升、严维玲、刘晓红, 1982. 单轴压缩时压机刚度对岩石样品声学性质的影响. 国家地震局科技监测司编, 大陆地震和地震预报国际学术讨论会论文集, 409—415. 地震出版社, 北京.
- 冯德益、舒立德、刘喜兰、梅世蓉、何伯荣, 1995. 华北北部地区地震前兆场时空演化模型的研究: 以唐山地震为例. 国家地震局科技监测司编, “八五”地震短临预报攻关研究三级课题论文集(待出版). 地震出版社, 北京.
- 梅世蓉, 1982. 唐山地震的启示. 一九七六年唐山地震, 429—447. 地震出版社, 北京.
- 梅世蓉, 1970. 从华北地震活动的规则性看危险区划分的一个途径. 地震战线. 学术讨论专辑(一), 1—11.
- 梅世蓉, 1985. 地震前兆的地区性. 中国地震, 1, 2, 17—22.
- 梅世蓉、梁北援、朱岳清, 1989. 唐山地震前兆机制的数值模拟. 中国地震, 5, 2, 27—34.
- 梅世容、梁北援, 1989. 唐山地震孕震过程的数值模拟. 中国地震, 5, 3, 9—17.
- 梅世蓉、赵燕来, 1993. 渤海及其邻区三维速度结构与地震活动的关系. 梅世蓉地震科学论文选集, 391—411. 地震出版社, 北京.
- 孙若昧、赵燕来、梅世蓉, 1993. 渤海及其邻区的地震层析成像. 地球物理学报, 36, 44—54.
- 孙若昧、刘福田, 1995. 京津唐地区地壳结构与强震发生——P 波速度结构. 地球物理学报(待刊).
- 张流、肖晓辉、何昌荣、赵树清、王玉玲, 1995. 岩石变形破坏过程中的非线性行为及其与系统失稳之间的关系. 国家地震局科技监测司编, “八五”地震短临预报攻关三级课题研究论文集(待出版). 地震出版社, 北京.
- Brady, B. T., 1975. Theory of earthquakes inclusion theory of crustal earthquakes. *Pure Appl. Geophys.*, 113, 1/2, 149—168.
- Добровольский, И. П., 1991. Теория Подготовки Тектонического Землетрясения, 1—30. ИЗВ АН СССР, Москва.
- Садовский, М. А., Писаренко, В. Ф., 1989. Дискретные иерархические модели геофизической среды. Комплексные Исследования по Физике Земли, 9—26. Наука, Москва.



照片(a) 华北北部地区地震层析成像 15 km 横切面图



照片(b) 宁河—唐山—滦县垂直剖面层析成像图



照片(c) 穿过邢台地震区北东向垂直剖面层析成像图