

邢台震区深部构造与强震 孕育关系的探讨^{*}

肖兰喜^{1, 3)} 朱元清²⁾ 张少泉¹⁾
刘 旭²⁾ 郭 育²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国上海 200062 上海市地震局

3) 中国济南 250014 山东省地震局

摘要 将地壳介质视为马克斯威尔体, 运用三维有限元方法, 探讨分层地壳结构中存在高速体、低速体和深部断裂时, 地壳应力的集中及应力集中随时间演化的特征. 计算结果表明: ① 由于地壳的非均匀性, 在高速体内形成高平均应力集中条带, 在高速体内和深部断裂附近形成水平最大剪应力(以下简称最大剪应力)高集中区. 平均应力扰动值随时间的变化趋势, 导致在漫长的地质年代内, 平均应力在地壳内有趋向一致的变化趋势. 最大剪应力扰动值随时间的变化, 导致低速体内的剪切应变能向高速体内转移; ② 当地幔以 1 cm/a 速率上隆时, 平均应力扰动值随时间的变化比较复杂, 高速体和低速体的边界已不是那么明显. 在高速体内沿 x 方向的两个边区, 最大剪应力扰动值随时间更加高速地增长, 这种应力演化更有利于实现低速体内的剪切应变能向高速体内转移; ③ 在深部断裂带的下半段附近, 平均应力和最大剪应力扰动值随时间的变化趋势, 导致在较长时间内积累较高的剪应力, 最后引起深部断裂失稳和沿断层方向的加速蠕滑; ④ 深部断裂沿断层方向的加速蠕滑, 可以使深部断层两侧地表面垂直位移的变化, 与邢台地震震前一年的地表面垂直位移变化趋势非常一致. 深部断裂的加速蠕滑可能是震前地表垂直位移异常变化的原因之一.

关键词 马克斯威尔体 应力集中 包体 深部断裂 数值模拟

引言

随着对华北强震区地壳精细结构研究的深入, 以及 CT 技术在大陆地区深部结构研究中的应用, 使人们对地壳和地幔的非均匀性有了更清楚的认识. 曾融生等(1991)给出了华北盆地强震的震源模型. 其最重要的一点是地幔顶部在横向上温度的不均匀, 出现一些热区, 它的地震波速度较低. 刘福田等(1986)用华北地区地震台网的地震波资料, 研究华北地区的三维速度结构, 指出在华北地区的地幔顶部可能存在很多大小不同的低速区. 刘国

* 中国地震局“九五”重点项目资助. 中国地震局地球物理研究所论著 99AC1022.
1999-01-04 收到初稿, 1999-04-20 收到修改稿并决定采用.

栋等^①通过对邢台、唐山、怀来等强震区深部构造探测研究指出,在大震震源区附近有壳内低速-高导体发育.孙若昧等(1993)通过层析成像资料,提出我国大陆地震多发生在高速体与低速区的过渡带,且偏于高速带一侧.梅世蓉等^②通过大陆地震活动与大范围 CT 资料的对比研究,以及对唐山、邢台大地震的深入探索,提出了华北地区强震区地壳一般具有高速-低速相间分布的多层结构特征,上、中地壳的速度结构图象横向变化突出,壳内高速层与壳内多震层基本一致,特别指出上、中地壳内的高速体及其下方低速体的存在是强震孕育的重要基础.

滕吉文等(1975)根据元氏—济南折射剖面资料提出,剖面上存在多条穿透地壳并延伸至上地幔的高角度断裂;在东旺震区下方的震源部位存在断裂的局部错动;以及震源区下方 Moho 面上拱.邵学忠等(1993)根据转换波探测的结果,提出这一地区存在高角度断裂.王椿镛等(1994)根据深反射剖面结果,给出了深部高角度断裂的存在.在这一问题上,不同的地震学方法取得了相当一致的认识,因而,深部断裂被推断为是与邢台地震相关的发震断裂.

通过以上各方面的认识,可以初步认为,孕震的构造环境和震源的形成环境是华北地区强震的孕育基础.然而高、低速体与震源究竟是什么关系,高、低速体的作用是什么,以及深部高角度断裂又在其中扮演什么角色,这是当前需要解决的问题.近年来已有不少地震工作者在这方面进行了很有意义的尝试.尹京苑和梅世蓉(1998)利用邢台强震区深部构造探测资料,使用弹性三维有限元方法,讨论了地壳构造的非均匀性对地壳应力场变化的影响,对高、低速体的影响有了较深的了解.宋治平等(1998)对包体模型应力集中进行了定量研究.然而,上述工作只考虑了地壳非均匀性引起的弹性应力场的变化.事实上,邢台地震发生后,该区高速体、低速体和深部断裂等非均匀性引起的弹性应力场的扰动值依然存在.显然,地震的孕育和发生不仅仅与地壳非均匀性引起的弹性应力场的扰动值有关,更重要的是与该扰动值随时间的变化有关.地壳不仅可以弹性的方式发生变形,而且还可以类似流体的方式发生变形.一般来说,在较短的时间尺度内考虑地壳的变形,可以用弹性变化来近似.但是在强震的孕育过程中,就必需考虑岩石的蠕变.特别是当地壳非均匀性引起的弹性应力场变化达几十兆帕时,该应力变化将势必造成不同区域产生不同大小的流变变形,从而造成非均匀应力场的变化和转移.该非均匀应力场的变化和转移对地震的孕育和发生是非常关键的.另外,地幔上拱是在较长的地质年代演化过程中形成的,我们不能仅考虑地幔上隆几十米甚至几百米时引起的弹性应力场变化,必须同时考虑地幔上隆引起的应力场扰动值随时间的流变演化.

为此,本研究视地壳介质为马克斯威尔体.马克斯威尔体在短时间内的特性类似于弹性体,而在长时间内的特征则类似于流体,故能较好地模拟岩石的压溶流变.在计算方法上,在空间上采用三维有限元方法,在时间上采用差分方法.并以邢台地区的分层地壳介质为模型,讨论了地壳构造在远场应力场和上地幔上拱作用下,非均匀性对地壳应力场变化的影响,以及在较长时间内该应力场变化在地壳构造外力作用下的演化特征;同时也探

① 刘国栋,王椿镛,张先康,等.1995.地壳上地幔结构和板内强震孕育的物理模型、三维数值定量模型与潜在震源区预测研究.“八五”重点项目(85-907-02-04)二级课题报告.

② 梅世蓉,尹京苑,薛艳.1998.板内强震孕育模式的深入研究.中国地震局“九五”科技攻关项目(95-04-03-01-01).

讨论了当深部断裂加速蠕变时，地表面垂直方向的位移变化。

1 物理模型和计算方法

1.1 力学模型

采用的力学模型如图 1 所示. 该模型为一规则的长方体, 其长、宽、高分别为 163 km、81 km 和 38 km. 模型材料为各向同性的麦克斯威尔体. 根据梅世蓉等^①给出的邢台地震孕

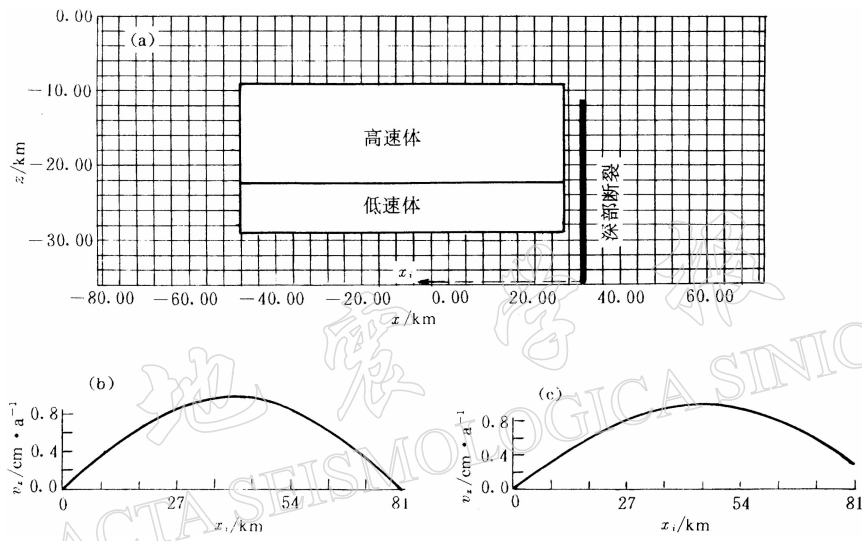


图 1 含有高速体、低速体和深部断裂的非均匀分层模型 x - z 剖面示意图
(a) 地幔上隆作用方式及上隆速率沿 x 方向分布 v_x 示意图. $v_x = \sin(3.14 \times x_i/81)$
(b) 地幔上隆作用方式及上隆速率沿 x 方向分布 v_x 示意图. $v_x = \sin[3.14(81 - x_i)/90]$

育发生的模型, 以及邢台地区多种地球物理测深资料, 根据每层的纵波平均速度、泊松比和密度, 再按公式

$$E = v_p^2 \rho (1 + \nu) (1 - 2\nu) / (1 - \nu)$$
 (1)

求得弹性模量 E . 然后, 将模型沿长、宽、高划分为 $20 \times 10 \times 20$ 个网格, 各层厚度及物理力学参数列于表 1.

在实际模拟计算中, 我们考虑模型内存在高速体、低速体和深部断裂时扰动应力场的分布和大小, 以及该扰动应力场的分布和大小在地壳构造外力下的演化特征, 故高速体和低速体均为长方体, 其长、宽分别为 81 和 45 km, 在 xy 平面上位于模型的中央, 其长、宽分别平行于 x, y 轴. 深部断裂位于 x 轴上高速体和低速体的一侧, 其沿 x 方向的宽度为 1 km, 沿 y 方向的长度为 81 km. 沿深度方向的位置如表 2, 3, 4 所示. 高速体、低速体和深部断裂的厚度及物理力学参数列于表 2、表 3 和表 4 中.

模型由 19 494 个 4 节点四面体单元组成, 采用自己编制的程序, 在 SUN 工作站 UL-TRA-II 上运行.

① 梅世蓉, 尹京苑, 薛艳. 1998. 板内强震孕育模式的深入研究. 中国地震局“九五”科技攻关项目(95-04-03-01-01).

表 1 邢台地区地壳分层模型的基本参数
(该模型共分 19 层)

层位	密度	泊松比	弹性模量	粘滞系数	厚度
	/kg·m ⁻³		/GPa	/YPa·s	/km
1	2 350	0.255	37	0.1	2
2	2 500	0.25	52	0.1	2
3	2 600	0.25	70	0.1	2
4	2 600	0.25	70	0.1	2
5	2 700	0.25	84	0.1	2
6	2 700	0.25	84	0.1	2
7	2 700	0.24	90	0.1	2
8	2 700	0.24	90	0.1	2
9	2 800	0.24	97	0.1	2
10	2 800	0.24	97	0.1	2
11	2 800	0.25	99	0.1	2
12	2 800	0.25	99	0.1	2
13	2 850	0.26	103	0.1	2
14	2 900	0.27	107	0.1	2
15	2 900	0.27	107	0.1	2
16	2 900	0.27	114	0.1	2
17	2 900	0.27	114	0.1	2
18	2 950	0.275	132	0.1	2
19	3 000	0.28	150	0.1	2

表 2 高速体各层的基本参数

层位	密度	泊松比	弹性模量	粘滞系数	厚度
	/kg·m ⁻³		/GPa	/YPa·s	/km
5	2 700	0.25	97	0.2	2
6	2 700	0.25	97	0.2	2
7	2 800	0.25	100	0.2	2
8	2 800	0.25	100	0.2	2
9	2 800	0.25	110	0.2	2
10	2 800	0.25	110	0.2	2
11	2 800	0.25	110	0.2	2
12	2 800	0.25	110	0.2	2

表 3 低速体各层的基本参数

层位	密度	泊松比	弹性模量	粘滞系数	厚度
	/kg·m ⁻³		/GPa	/ZPa·s	/km
13	2 700	0.27	66	10	2
14	2 700	0.27	66	10	2

1.2 边界条件

地壳内应力随深度的变化受 4 方面资料的制约: ① 地壳上部地应力的直接测量结果; ② 岩石自重对地壳内部应力场的影响; ③ 壳内温压影响造成的壳内岩石破裂强度的分布规律; ④ 各地区强震震源断层的基本力学性质. 尹京苑和梅世蓉(1998)考虑以上 4 方面制约, 给出了板内均匀地壳中 3 个主应力和 3 个最大剪应力随深度的变化曲线(图 2). 我们以上述曲线作为模型的边界约束条件, 边界条件按以下方式选取: 模型底部所有节点的位移在 x 和 y 方向不加限制, 而在 z 方向上设置为零; 模型上表面为自由表面; 在模型的侧面, 对于法线与 x 轴方向

表 4 深部断裂各层的基本参数

层位	密度	泊松比	弹性模量	粘滞系数	厚度
	/kg·m ⁻³		/GPa	/ZPa·s	/km
7	2 500	0.27	52	2.0	2
8	2 500	0.27	52	2.0	2
9	2 600	0.27	64	2.0	2
10	2 600	0.27	64	2.0	2
11	2 700	0.27	65	2.0	2
12	2 700	0.27	65	2.0	2
13	2 700	0.27	65	1.0	2
14	2 700	0.27	65	1.0	2
15	2 700	0.27	65	1.0	2
16	2 800	0.27	110	1.0	2
17	2 800	0.27	110	1.0	2
18	2 850	0.27	128	1.0	2
19	2 900	0.275	145	1.0	2

平行的两个侧面, 所有节点的位移在 y 和 z 方向上不加限制, 在 x 方向上加有指向模型内的荷载; 而对于法线与 y 轴方向平行的两个侧面, 所有节点的位移在 x 和 z 方向上不加限制, 在 y 方向上加有指向模型内的荷载. 荷载应力如图 2 所示.

1.3 上地幔上拱模型

以往, 人们在讨论地幔上隆对地壳内应力场的影响时, 总是在模型底部给出一较大的向上边界位移. 实际上, 上地幔上隆是非常缓慢的渐变过程, 不仅应考虑底边界位移对应力场的影响, 还应该考虑地幔上隆引起的弹性应力场随时间的流变演化. 本研究考虑了两种不同方式的地幔上隆过程: 上隆方式①: 底部边界节点在 z 方向上有一个向上的位移速

率,最大速率为 1 cm/a,在 xy 平面上位移速率分布为 $v_{xy} = \sin(3.14 \times x_i/81) \times \cos(3.14 \times y_i/45)$. 它在模型底部边界所占的范围为: x 方向,深部断裂左侧长 81 km 的区域,沿 x 方向的分布为 $v_x = \sin(3.14 \times x_i/81)$, x_i 如图 1 所示; y 方向,位于模型中央,长度为 45 km,沿 y 方向的分布为 $v_y = \cos(3.14 \times y_i/45)$. 其中 y_i 为沿 y 方向偏离中心点的距离. 底部其它节点 z 方向的位移为 0(图 1a). 上隆方式②: 为了考虑深部断裂垂直方向上的蠕变,我们以此上隆方式来加以实现. 断层的一侧固定,另一侧有一向上的蠕变,沿 x 方向的分布为 $v_x = \sin[3.14 \times (81 - x_i)/90]$,其它条件同上隆方式①(图 1b).

1.4 扰动应力场及扰动应力场变化的计算方法

为了计算模型内介质非均匀性引起的扰动应力场,首先计算在以上边界条件下均匀分层介质模型内应力值 $\sigma_{x_1}, \sigma_{y_1}, \sigma_{z_1}$, 然后计算在完全相同的边界条件下非均匀分层模型(包含高速体、低速体和深部断裂)内应力值 $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$. 将非均匀分层模型计算所得的应力值减去均匀分层介质模型计算所得的相应应力值,就得到了由模型内非均匀结构所产生的应力扰动值. 在著名的莫尔包络线的岩石破坏准则的函数关系 $\tau = f(\sigma)$ 中,决定岩石破裂的关键参数是最大剪应力和平均应力,因此,本文研究平均应力和最大剪应力的扰动值. 它们按下列公式计算: $\Delta\tau_{\max} = [(\sigma_x - \sigma_y) - (\sigma_{x_1} - \sigma_{y_1})]/2$, $\Delta\sigma_0 = [(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) - (\sigma_{x_1} + \sigma_{y_1} + \sigma_{z_1})]/3$, 正值为应力增加区,负值为应力减小区.

由于地壳岩石的流变特性和地幔的上隆,平均应力和最大剪应力的扰动值随时间发生变化. 为了计算该应力扰动值的变化,首先计算 $t=0$ 时刻弹性体的应力扰动值,然后计算 $t=t_n(t_n>0)$ 时刻应力扰动值, t_n 时刻应力扰动值减去 $t=0$ 时刻相应应力扰动值,就可以得到应力扰动值随时间的变化,从而确定应力扰动值在原有基础上是进一步增加还是减小,探讨应力集中的演化是否有利于强震的孕育和发生. 最大剪应力和平均应力扰动值的变化分别按下列公式计算:

$$\Delta(\Delta\tau_{\max}) = (\Delta\tau_{\max})|_{t=t_n} - (\Delta\tau_{\max})|_{t=0}$$
$$\Delta(\Delta\sigma_0) = (\Delta\sigma_0)|_{t=t_n} - (\Delta\sigma_0)|_{t=0}$$

正值表示应力扰动值在原基础上增加,负值表示应力扰动值在原基础上减小.

2 计算结果

2.1 模型内含高速体、低速体和深部断裂情况下的应力集中及应力集中随时间的变化

图 3a 为含高速体、低速体和深部断裂模型在远场应力场的作用下(没有上地幔上隆), $y=0$ km 处垂直剖面上平均应力扰动等值线图,整个低速体内平均应力较无低速体时的平均应力显著减小,在靠近低速体侧面的内边缘,平均应力值下降最大,达到 100 MPa 之多;

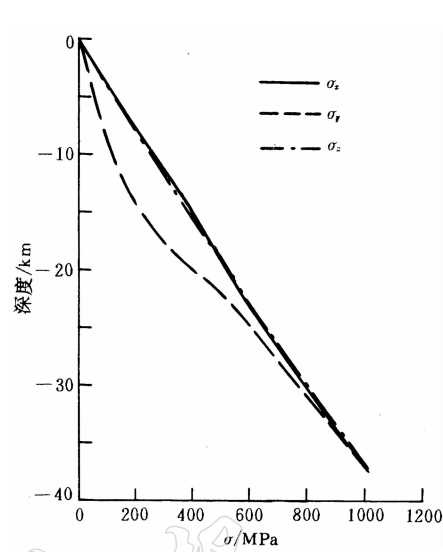


图 2 模型中边界最大水平主应力 σ_x 、最小水平主应力 σ_y 和垂直主应力 σ_z 随深度变化曲线图[据尹京苑和梅世蓉(1998)]

在高速体内,平均应力的扰动值则显著增加,在高速体内靠近深部断裂带的边缘处,平均应力扰动值上升最大,上升幅度达 65 MPa;在深部断裂附近平均应力的扰动值则减小,在深部断裂与低速体的结合部,平均应力值下降最大,达 160 MPa 之多.

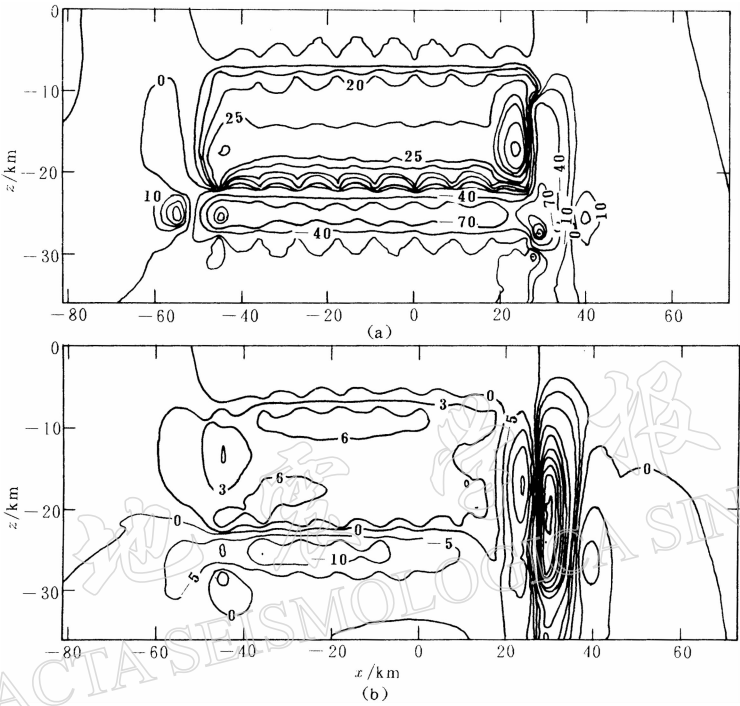


图 3 模型为包含深部断裂的非均匀体(含高速体和低速体),在 $y=0$ km 的垂直剖面上,由地壳非均匀性引起的平均应力扰动值等值线图(a)(单位:MPa)和最大剪应力扰动值等值线图(b)(单位:MPa)

图 3b 为该模型 $y=0$ km 处垂直剖面上最大剪应力扰动等值线图,在低速体内最大剪应力较无低速体时的最大剪应力减小,下降值最大可达 5 MPa 之多;在高速体内,最大剪应力的扰动值则增加,在高速体上部 11 km 处和靠近低速体的下部 20 km 处,最大剪应力扰动值上升最大,上升幅度达 6 MPa;在深部断裂附近及其两侧,最大剪应力的扰动值则正好相反,深部断裂的两侧最大剪应力的扰动值显著减小,最大可达 25 MPa;在深部断裂附近最大剪应力的扰动值显著增加,最大可达 65 MPa.

图 4a 为该模型在远场应力场的作用下(没有上地幔上隆), $y=0$ km 处垂直剖面上平均应力扰动值在 50 年内随时间变化的等值线图.整个低速体内和深部断裂带的上半段附近,平均应力扰动值在降低的基础上存在着回升的演化,在低速体内最大值为 180 kPa,在深部断裂带的上部最大值为 300 kPa;在高速体内平均应力扰动值在增加的基础上有回落的演化趋势,在高速体内靠近深部断裂带的边缘处,降低幅度最大达 175 kPa;在深部断裂带的下半段附近,平均应力的扰动值则进一步减小,降低幅度最大达 400 kPa.

图 4b 为该模型 $y=0$ km 处垂直剖面上最大剪应力扰动值随时间变化的等值线图.在低速体和高速体内,最大剪应力扰动值随时间的演化趋势与平均应力扰动值随时间的演化趋势相反.在高速体内靠近深部断裂带的边缘处和高速体的左下侧,最大剪应力扰动值在

原来增加的基础上增加，最大达 25 kPa；在低速体内，最大剪应力扰动值在原来降低的基础上降低，最大可达 50 kPa；在深部断裂上半部附近，最大剪应力扰动值在原来增加的基础上降低，最大可达 100 kPa 之多；在深部断裂下半部附近，最大剪应力扰动值在原来增加的基础上增加，最大可达 1 100 kPa 之多。

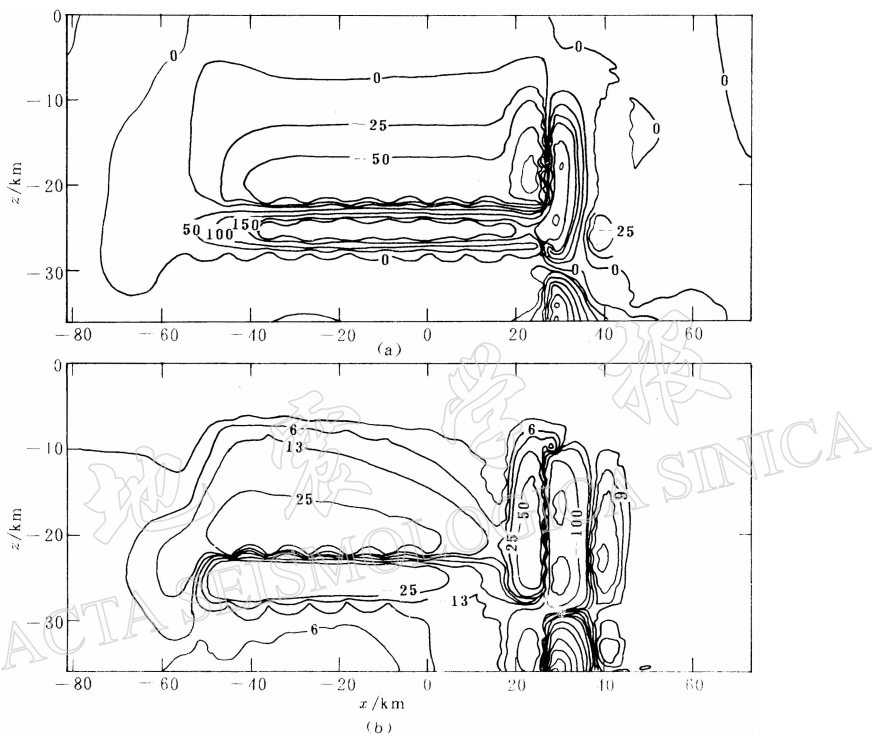


图 4 模型为包含深部断裂的非均匀体(含高速体和低速体)，在 $y=0$ km 的垂直剖面上，50 年内由地壳非均匀性引起的平均应力扰动值随时间变化的等值线图(a)(单位：kPa)和最大剪应力扰动值随时间变化等值线图(b)(单位：kPa)

2.2 模型内含高速体、低速体和深部断裂，并且模型底部具有局部上拱时的应力集中以及应力集中随时间变化的图象

因本模型在考虑地幔上隆时，是以 1 cm/a 的速率上升的，在每一年的内由地幔上隆引起的弹性应力变化很小，地幔上隆对地壳应力场的影响是经过漫长时间积累的结果，为方便计算和分析，只研究模型底部具有局部上拱时的应力集中随时间变化的图象，它既包括该时间段的弹性应力场变化，又包括该时间段内不均匀应力场的演化。

图 5a 为模型(图 1a 上隆方式)中 $y=0$ km 处，垂直剖面上平均应力扰动值 50 年内随时间变化的等值线图。图中高速体和低速体的边界已不那么明显，自模型的底部至上表面，平均应力扰动值随时间的变化由正变为负，在原来基础上增加的最大值为 1 200 kPa，降低的最大值为 200 kPa；在深部断裂带的上半段附近，平均应力扰动值随时间的变化为正，最大值为 200 kPa；在深部断裂的下半部附近，平均应力扰动值随时间的变化为负，最大值为 1 200 kPa。

图 5b 为模型(图 1a 上隆方式)中 $y=0$ km 处，垂直剖面上最大剪应力扰动值 50 年内

随时间变化的等值线图. 图中在低速体内和深部断裂带上半段附近区域, 最大剪应力扰动值在原有基础上降低, 在深部断裂上半部降低最大达 100 kPa; 在地壳内其它区域, 最大剪应力扰动值在原有扰动值增加的基础上较显著地增加. 在高速体内的沿 x 方向的两个边区形成两个进一步增长区, 最大达 75 kPa. 在深部断裂下半部附近形成进一步增长区, 最大可达 800 kPa.

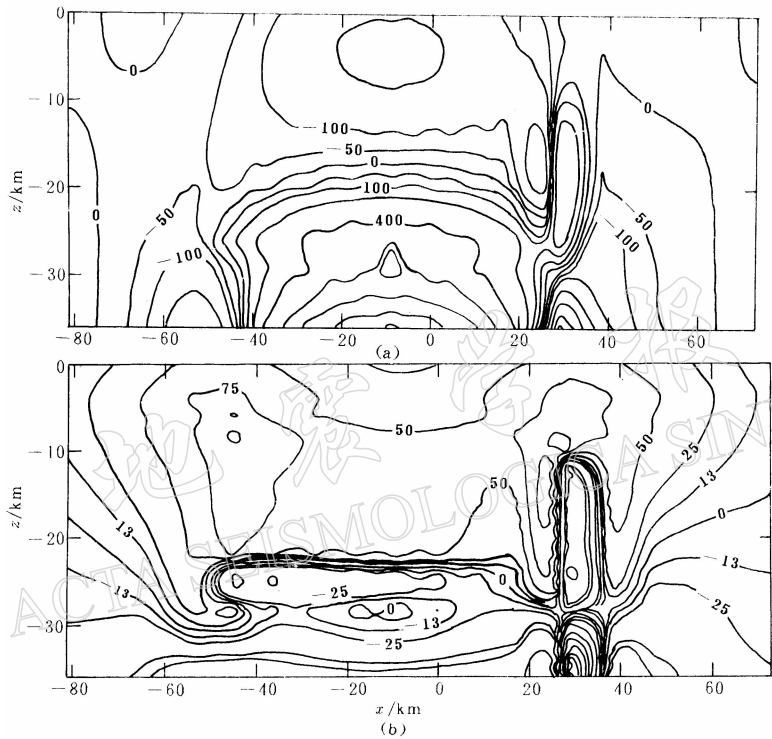


图 5 模型为包含深部断裂的非均匀体(含高速体和低速体), 在 $y=0$ km 的垂直剖面上, 50 年内由地壳的非均匀性和上地幔上隆(如图 1a 上隆方式引起的平均应力扰动值随时间变化等值线图(a)(单位: kPa)和最大剪应力扰动值随时间变化等值线图(b)(单位: kPa)

图 6 为模型(图 1b 上隆方式)中 $y=0$ km 处, 垂直剖面上 50 年内平均应力扰动值随时间变化的等值线图. 该图与图 5 的空间分布区别很小, 说明不同的上隆方式对应力集中随时间的积累和演化在空间位置上的分布没有多少区别; 但在强度上则有所变化, 在靠近深部断裂附近区域变化明显, 深部断裂在底边界有垂直相对蠕变模型的应力场变化要强于没有垂直相对蠕变模型的应力场变化.

2.3 模型内含高速体、低速体和深部断裂, 并且模型底部具有局部上拱时地表面垂直方向的位移

为了探讨深部断裂加速运动对地震孕育和发生的作用, 以及同地表的观测结果进行对比, 我们给出了地表的位移变化.

由以上不同模型最大剪应力的集中和最大剪应力集中随时间变化的模拟结果可知, 在深部断裂带的下半段及其外侧, 其变化趋势正好相反, 变化梯度非常大. 深部断裂附近最大剪应力扰动值在增加的基础上进一步增加, 其两侧扰动值在降低的基础上进一步降低.

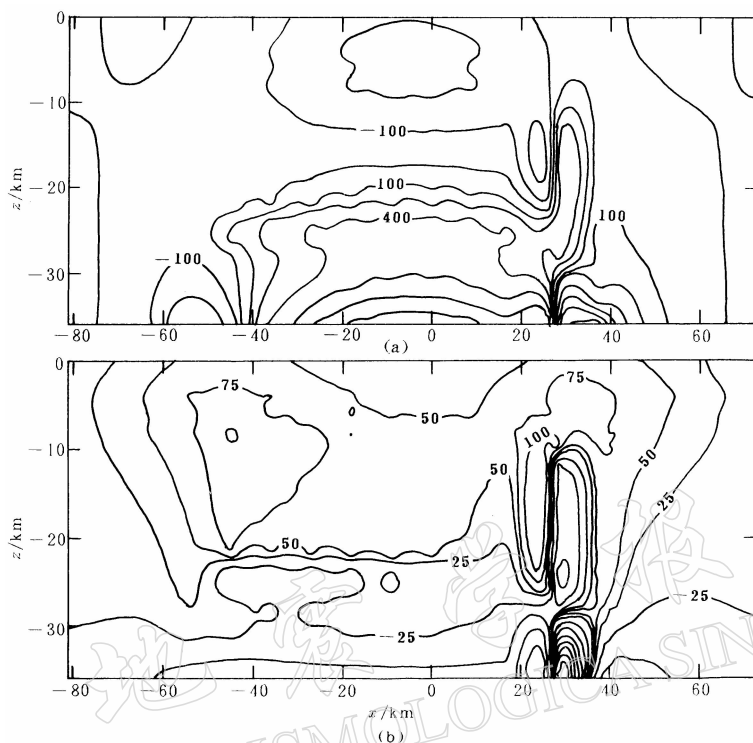


图 6 模型为包含深部断裂的非均匀体(含高速体和低速体),在 $y=0$ km 的垂直剖面上, 50 年内由地壳的非均匀性和上地幔上隆(如图 1b 上隆方式)引起的平均应力变化随时间的变化(a)(单位: kPa)和最大剪应力变化随时间的变化(b)(单位: kPa)

当最大剪应力积累到一定程度时,深部断裂将势必沿断层方向加速蠕滑。

图 7a 为模型包含深部断裂的非均匀体(含高速体和低速体),当地幔以图 1b 上隆方式上拱时,10 年内地表面垂直方向的位移,在地幔上隆的正上方,上升幅度最大可达 $5\sim 6$ mm/a;图 7b 为模型包含深部断裂的非均匀体(含高速体和低速体),当地幔以图 1b 上隆方式上拱,并且在底边界深部断裂沿 y 方向有一个 1 m/a 的加速蠕滑时,1 年内地表面垂直方向的位移,其空间分布同图 7a 相差很大,上升的幅度和位置也发生了很大变化。在断层两侧变化最大,原为上升的一部分区域变为下降区域,原为下降的部分区域变为上升区域,上升和下降的年速率也增大了许多。

3 结论与讨论

以上的数值计算结果表明:低速体、高速体和深部断裂的存在可以导致应力的扰动。在低速体内平均应力和最大剪应力的扰动值为负,而在高速体内则相反,这与以往人们的理论计算和数值模拟相一致。本次三维数值模拟不仅给出了应力的扰动值,而且给出了应力扰动值随时间的变化。探讨了高速体、低速体和深部断裂存在而引起的平均应力和最大剪应力扰动值随时间的演化过程,模拟结果如下:

(1) 当地壳内包含高速体、低速体和深部断裂,地幔不上隆时,在高速体内 $16\sim 20$ km 处形成一条高平均应力集中条带,在靠近深部断裂的边缘处平均应力集中最高;最大剪应

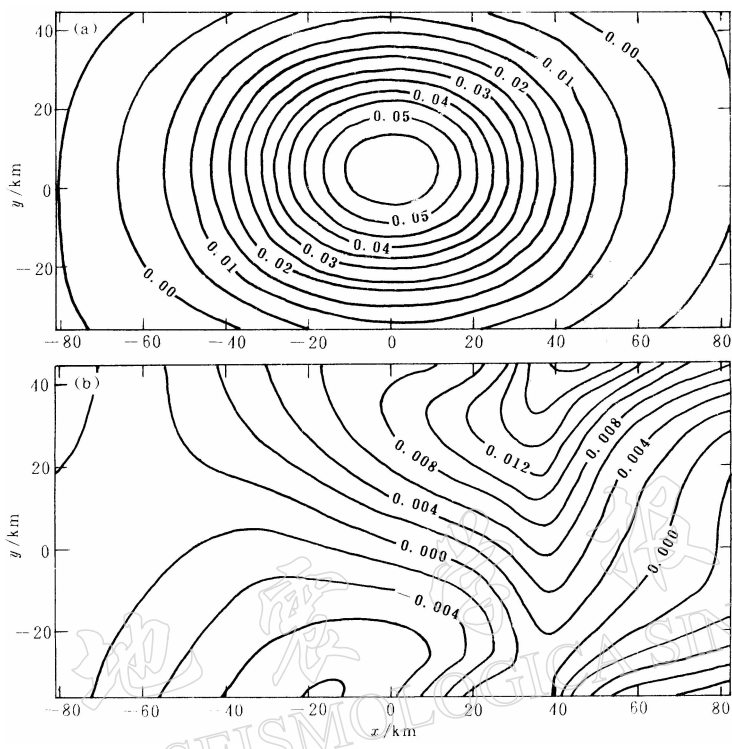


图 7 模型为包含深部断裂的非均匀体(含高速体和低速体),当深部断裂在底边界沿 y 轴方向不存在加速蠕滑时,模型上表面 10 年内垂直方向的位移(a)(单位: m)和当深部断裂在底边界沿 y 轴方向存在相对加速蠕滑(1 m/a)时,模型上表面 1 年内垂直方向的位移(b)(单位: m)

力在高速体内和深部断裂附近形成高应力集中区. 平均应力扰动值随时间的变化趋势是: 在高速体内部平均应力扰动值的变化为负, 在低速体和深部断裂附近平均应力扰动值的变化为正; 最大剪应力扰动值随时间的变化在高速体内为正, 在低速体和深部断裂附近为负. 扰动值这种变化趋势导致在漫长的地质年代内, 平均应力在地壳内有趋向一致的变化要求; 最大剪应力扰动值则在高速体内进一步逐渐增加, 从而实现低速体内的剪切应变能向高速体内转移, 导致了高速体在原有剪切应变能积累的基础上逐步积累剪切应变能.

(2) 当地壳内包含高速体、低速体和深部断裂, 地幔以 1 cm/a 速率上隆时, 不同年代地幔上隆对地壳的影响不同. 我们计算平均应力和最大剪应力扰动值随时间的变化, 其变化趋势是: 高速体和低速体的边界已不是那么明显, 自模型的底部至上表面, 平均应力扰动值的变化由正变为负, 在深部断裂上半部附近平均应力扰动值的变化为正. 最大剪应力扰动值随时间的变化在高速体内为正, 在高速体内沿 x 方向的两个边区, 形成两个最大剪应力在原扰动值增加的基础上进一步高速增长区, 在低速体和深部断裂带的上半段附近最大剪应力扰动值随时间的变化为负. 这种应力演化更有利于实现低速体内的剪切应变能向高速体内转移, 导致高速体在原有剪切应变能积累的基础上加速逐步积累剪切应变能. 地幔上隆对强震孕育非常重要.

(3) 以上各个模型, 在深部断裂带下半段附近, 平均应力和最大剪应力扰动值随时间

的演化趋势是: 平均应力扰动值在降低的基础上进一步减低, 最大剪应力扰动值在增加的基础上进一步增加, 变化的幅度非常大. 这种演化趋势能在较长时间内积累较高的剪应力, 最后引起深部断裂失稳和加速蠕滑. 我们可以推断, 深部断裂与华北强震的孕育和发生是密切相关的.

(4) 当模型底边界深部断裂沿 y 方向有一个 1 m/a 的相对加速蠕滑时, 根据地表面垂直位移的上升幅度和位置变化模拟结果可知, 深部断裂的加速蠕滑可以使地表面的垂直位移在断层两侧发生很大的变化. 原为上升的一部分区域变为下降区域, 原为下降的区域变为上升区域, 上升和下降的年速率也增大了许多. 这与邢台地震震前的地表面垂直位移变化趋势非常一致, 说明邢台地震震前地壳表面垂直方向的位移不仅与岩石的膨胀有关, 而且可能与地壳内深部断裂的加速蠕滑密切相关.

综上所述, 地壳内高、低速体和深部断裂的存在, 既是导致地壳内应力不均匀分布的重要基础, 又是导致地壳内应力不同演化趋势的重要原因. 高速体、低速体和深部断裂的存在只是有了孕育强震的基础. 现阶段邢台地区仍存在高速体、低速体和深部断裂, 但并不会孕育强震. 孕育强震的关键在于这些非均匀应力场扰动值随时间的变化及上地幔上隆, 它实现了剪切弹性应力从低速体向高速体内的转移. 深部断裂最终的加速蠕滑实现了下部地壳存储的能量在短期内向中、上部地壳内的快速转移, 并造成了震前地表面垂直位移异常变化. 邢台地震 $M_s \geq 5.0$ 的地震主要分布在 $9 \sim 20 \text{ km}$ 的深度, 这与在高速体和深部断裂上半部附近积累剪切应变能的结果相吻合; 强震的震源深度为 $9 \sim 10 \text{ km}$, 并且位于深部断裂上部, 这与深部断裂最终的加速蠕滑导致了下部地壳存储的能量在短期内向中、上部地壳内的快速转移, 并在中、上部地壳内的加速集中剪切应变能的结果相一致; 深部断裂的加速蠕滑所引起地表位移的变化, 与邢台地震前的地形变异常相吻合.

地壳的粘滞系数很难准确测定, 对计算应力随时间的变化量值有影响, 但对相对值和总体变化趋势没有影响. 本研究以 50 年的时间段为例, 给出了地壳流变对非均匀应力场产生影响的方式, 对研究几百到近千年的强震孕育过程是非常有意义的.

参 考 文 献

- 刘福田, 曲克信, 吴华, 等. 1986. 华北地区的地震层析成像. 地球物理学报, **29**(5): 442~449
- 邵学忠, 张家茹, 章思亚, 等. 1993. 邢台地震区深部构造背景的地震转换波探测和研究. 地球物理学报, **36**(5): 609~619
- 宋治平, 尹祥础, 陈学忠. 1998. 包体模型应力集中的定量研究. 地震研究, **21**(3): 247~255
- 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**(1): 44~54
- 滕吉文, 王国正, 刘道洪, 等. 1975. 华北平原中部地区深部构造背景及邢台地震. 地球物理学报, **18**(3): 196~207
- 王椿镛, 张先康, 林中洋, 等. 1994. 束鹿断陷盆地及其邻近的地壳结构特征. 地震学报, **16**(4): 472~479
- 尹京苑, 梅世蓉. 1998. 地壳应力状态及其在三维计算中的意义. 地震, **18**(3): 226~232
- 曾融生, 朱露培, 何正勤, 等. 1991. 华北盆地强震的震源模型兼论强震和盆地的成因. 地球物理学报, **34**(3): 288~