

文章编号: 0253-3782(2005)03-0276-06

1995 年 7 月 20 日河北沙城 $M_L 4.1$ 地震 序列破裂过程中应力变化的研究^{*}

陈学忠¹⁾ 许向彤¹⁾ 翟文杰²⁾

1) 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

2) 中国沈阳 110031 辽宁省地震局

摘要 根据地震破裂动力学,研究了 1995 年 7 月 20 日河北沙城 $M_L 4.1$ 地震序列破裂过程中,视应力和静态应力降与动态应力降之差的变化.结果表明,主震的视应力约为 5 MPa,而余震的视应力平均约为 0.047 MPa.在破裂过程中,主震的动态应力降大约为静态应力降的 1.6 倍,其差值约为 2.7 MPa;余震的动态应力降一致小于静态应力降,其差值平均约为 -0.75 MPa.因此,主震发生时,最终应力大于动摩擦应力,与断层突然锁住的模式相符;余震发生时,最终应力小于动摩擦应力,与地震断层错动过头的模式相符.因此,主震和余震的发生过程是有差别的.

关键词 沙城地震序列 视应力 应力降 应力变化

中图分类号: P315.72+7

文献标识码: A

引言

目前,基于对地震发生过程的认识,地震是地壳介质受应力作用而发生破裂或错动的结果.在这个过程中,应力的变化可能起着至关重要的作用.因此,研究地震过程中应力状态及其变化,将有助于我们更加深入认识地震发生过程.视应力定义为地震效率和震源平均应力的乘积,可以反映震源断层错动时断层面上平均应力在震前和震后的平均值的高低.Wyss(1970)的研究表明,洋脊和海沟地区的视应力几乎没有差别.Choy 和 Boatwright(1995)估计了全球地震的视应力,得到全球地震平均视应力的大小为 4.7×10^5 Pa.同时,不同震源机制类型的地震,其视应力的大小不同(Choy, Boatwright, 1995).Ide 和 Beroza(2001)认为视应力几乎不随地震矩而变化.Izutani 和 Kanamori(2001)则认为视应力随地震矩而增加.吴忠良的研究表明,对于不同震源机制的地震,其视应力随地震矩的变化不同(Wu, 2001).

计算一次地震的视应力可以估计地震时震源断层面上平均应力的强弱,这对于理解地震的发生是很有意义的.在一次地震序列的破裂过程中,视应力经历怎样的变化?这个问题对深入认识地震发生的力学过程,进而建立地震发生模型都是重要的.本文将利用 1995 年 7 月 20 日河北沙城 $M_L 4.1$ 地震序列资料,对这个问题进行研究.

^{*} 中国地震局地球物理研究所论著 05AC1014.
2003-11-10 收到初稿,2004-10-27 收到最后修改稿并决定采用.

1 理论分析

对一个地震断层, 设初始应力为 σ_0 , 最终应力为 σ_1 . 在滑动过程中, 动摩擦应力为 σ_d . 则静态应力降为 $\Delta\sigma_s = \sigma_0 - \sigma_1$, 动态应力降为 $\Delta\sigma_d = \sigma_0 - \sigma_d$.

视应力为 (Savage, Wood, 1971; 陈运泰, 2003):

$$\sigma_{app} = \eta \bar{\sigma} = \frac{\mu E_s}{M_0} = \Delta\sigma_d - \frac{1}{2} \Delta\sigma_s \quad (1)$$

即
$$\Delta\sigma_d = \sigma_{app} + \frac{1}{2} \Delta\sigma_s \quad (2)$$

上式表明, 动态应力降、静态应力降、视应力之间存在简单的线性关系. 利用地震波资料可以得到 E_s , M_0 和 $\Delta\sigma_s$. 根据式(1)和(2), 就可以得到视应力和动态应力降.

若用 $\Delta\sigma_{ds}$ 表示动态应力降与静态应力降之差, 则

$$\Delta\sigma_{ds} = \Delta\sigma_d - \Delta\sigma_s = (\sigma_0 - \sigma_d) - (\sigma_0 - \sigma_1) = \sigma_1 - \sigma_d = \sigma_{app} - \frac{1}{2} \Delta\sigma_s \quad (3)$$

所以, 可以通过动态应力降与静态应力降之差值 $\Delta\sigma_{ds}$, 来研究地震过程中最终应力和动摩擦应力的相对变化. 如果 $\Delta\sigma_{ds} > 0$, 则 $\sigma_1 > \sigma_d$. 这种情况下, 在断层错动过程中, 可能会发生突然被锁住的情况; 如果 $\Delta\sigma_{ds} = 0$, 则 $\sigma_1 = \sigma_d$, 这种情况断层面上可能由于摩擦产生大量的热量而发生熔融, 使剪切应力为零, 全部能量都可以用于地震辐射; $\Delta\sigma_{ds} < 0$, 则 $\sigma_1 < \sigma_d$, 此时, 断层可能会发生错动过头的现象. 因此, 通过 $\Delta\sigma_{ds}$ 的数值, 可以了解在震源破裂过程中断层错动的情况.

2 资料

1995 年 7 月 20 日河北沙城发生了一次显著的 $M_L 4.1$ 地震, 其后紧跟着发生许多余震. 这是华北地区在 1995 年发生的一次显著的地震事件, 随后的 2~3 年中, 华北地区先后发生了 1996 年 5 月 3 日包头 6.4 级、1996 年 11 月 9 日南黄海 6.1 级以及 1998 年张北 6.2 级等多次强震. 显然, 这次地震事件对华北地区强震活动具有指示意义. 研究这样的地震发生时的应力状态及其在破裂过程中的变化显然是一件有意义的事情. 这次地震之前, 中国地震局地球物理研究所和英国地质调查局的地震学家合作在怀来盆地架设了一个小孔径、三分向地震台网(王培德等, 1995; Chen, 1996), 该台网很好地记录了这次地震序列的地震. 许向彤等(1997)用 P 波初动数据研究了这次地震序列的主震的震源机制断层面解, 并利用经验格林函数方法, 反演了这次地震序列的主震的震源时间过程、破裂传播方向、破裂长度和速度等参数(许向彤等, 1999); 他们还用单个经验格林函数提取了这次序列中另外 13 次 $M_L \geq 2.1$ 地震的震源时间函数, 用远场地动位移频谱测量了这次序列中 $0.9 \leq M_L \leq 4.1$ 的 29 次地震的地震矩、应力降和破裂半径(许向彤等, 2001). 表 1 为许向彤等(2001)得到的这 29 次地震的地震矩和应力降结果. 本文利用这些结果, 研究这次地震序列在破裂过程中应力状态的变化.

3 地震视应力的计算

地震视应力由下式计算:

表 1 1995 年 7 月 20 日河北沙城 M_L 4.1 地震序列地震矩和应力降结果(许向彤等, 2001)

序号	发震时刻		$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	M_L	地震矩 / 10^{12} N \cdot m	应力降 /MPa
	年-月-日	时:分					
1	1995-07-20	12:51	115.448	40.326	4.1	81.5	4.6
2	1995-07-20	12:57	115.445	40.329	3.1	58.9	4.0
3	1995-07-20	13:26	115.442	40.339	2.3	4.49	1.44
4	1995-07-20	14:49	115.447	40.323	2.0	4.52	2.25
5	1995-07-20	17:11	115.445	40.323	2.1	3.72	2.36
6	1995-07-21	09:10	115.458	40.333	2.0	4.72	3.16
7	1995-07-23	15:12	115.448	40.325	1.5	1.468	0.33
8	1995-07-25	18:04	115.455	40.341	2.0	4.13	0.77
9	1995-08-01	10:36	115.431	40.328	2.4	2.1	1.29
10	1995-08-02	20:39	115.443	40.327	1.5	1.5	0.57
11	1995-08-03	16:42	115.441	40.322	2.0	6.32	0.28
12	1995-08-05	14:07	115.447	40.330	2.3	7.74	1.84
13	1995-08-19	06:33	115.453	40.333	2.0	3.06	0.80
14	1995-10-02	17:02	115.424	40.317	2.1	2.89	1.49
15	1995-10-09	08:55	115.433	40.331	2.1	3.34	1.81
16	1995-10-10	18:04	115.419	40.315	2.1	3.74	2.09
17	1995-10-13	23:15	115.423	40.323	2.2	4.49	1.66
18	1995-10-14	19:33	115.430	40.329	2.5	7.73	2.86
19	1995-10-16	03:31	115.437	40.333	2.3	5.06	2.77
20	1995-12-01	19:07	115.451	40.328	1.8	2.64	0.82
21	1995-12-01	19:18	115.454	40.336	0.9	0.434	0.12
22	1995-12-11	13:46	115.442	40.329	2.2	5.43	1.49
23	1995-12-12	14:59	115.442	40.320	2.0	2.78	0.77
24	1995-12-12	15:14	115.434	40.326	2.3	9.62	2.06
25	1995-12-12	21:04	115.438	40.327	2.1	4.01	0.89
26	1995-12-29	03:54	115.462	40.479	2.1	23.84	1.58
27	1996-03-12	09:15	115.452	40.505	2.1	19.15	1.44
28	1996-05-11	03:26	115.463	40.478	2.6	40.58	3.03
29	1996-05-22	16:31	115.541	40.475	2.1	14.61	0.45

$$\sigma_{app} = \frac{\mu E_s}{M_0} \tag{4}$$

根据地震能量与震级 M_s 的经验换算关系 $\lg E_s = 4.8 + 1.5 M_s$, 可以得到地震能量 E_s . 震级 M_s 可通过关系 $M_s = 1.13 M_L - 1.08$, 由 M_L 换算得到(徐果明, 周蕙兰, 1982). μ 取 3.0×10^4 Pa. 利用表 1 中给出的地震矩 M_0 , 由式(4) 计算各次地震的视应力.

需要说明的是: 地震辐射能量通常是对震源谱的整个频段进行积分的结果, 而震级却常常是针对一个比较窄的频段测量得到的. 因此, 从震级来换算地震辐射能量, 可能出现偏差. 但是, 本研究所涉及的是同一个震源区发生的地震序列, 地震波射线经过的地壳介质和接收仪器等都相同. 这种情况下, 尽管震级是针对某个窄的单一频段测定的, 由震级换算的地震辐射能量存在的是系统偏差, 对序列中各次地震来讲, 是可比的. 我们的目的不是测定这些地震的绝对地震辐射能量, 而更侧重其相对变化, 因为知道其相对变化就足够说明问题了. 因此, 这个问题不致使本文的结果发生本质的变化.

4 破裂过程中应力的变化

4.1 视应力

在这次地震序列破裂过程中, 主震时视应力约为 5 MPa. 余震的视应力比主震要低很多, 平均为 0.047 MPa, 约为主震的 0.9%. 这是可以理解的, 主震发生时, 这个地区(至少在震源处)应力水平处于较高水平, 主震发生后将应力释放, 使得震源区的应力水平显著降低, 因此余震的视应力自然要比主震的低.

视应力为地震效率 η 与断层面上震前应力与震后应力的平均值的乘积. 到目前为止, 我们对地震效率 η 知之甚少. 但 Båth 和 Duda(1964)根据 Berckhemer 的模型, 在假定 η 正比于断层面积与震源体积之比的条件得到 η 与震级有关, 导出了以下公式:

$$\lg \eta = -2.00 + 0.23 M_s \quad (5)$$

而 Aki 在假定不同震源尺度的地震间有相似的几何与物理性质的前提下, 指出 η 随 M_s 的增加而减小(Aki, 1967). 根据 Aki 的结果, 震级越大, η 越小. 在这种情况下, 不同震级地震的相同数值的视应力可能反映不同的震源断层面上震前与震后的平均应力, 震级越大, 所反映的平均应力越高. 对本次地震序列破裂过程而言, 主震破裂时视应力反映的断层面上地震时的平均应力比余震高. 根据 Båth 和 Duda(1964)的结果, $M_L 4.1$ 地震的 η 约为 $M_L 0.9$ 地震的 6.8 倍. 本次地震序列中, 余震最小震级为 $M_L 0.9$, 而主震的视应力约为余震平均视应力的 106 倍.

根据 Båth 和 Duda(1964)的结果, 主震平均应力约为余震的 16 倍, 即主震的平均应力约比余震平均应力大 1 个数量级. 如果按照 Aki(1967)的理论, 辐射效率 η 随地震的增大而减少, 则主震平均应力至少为余震的 106 倍, 即主震的平均应力约比余震平均应力至少大 2 个数量级. 因此, 无论是根据 Båth 和 Duda(1964)的结果, 还是根据 Aki(1967)的结果, 本次地震序列的主震视应力反映的震源断层面上地震前后的平均应力明显比余震的高.

图 1 是余震的视应力随时间的变化曲线. 从图 1 可知, 余震的视应力是随时间呈逐渐起伏下降趋势变化的. 可以分为 3 个阶段: 第一个阶段从 1995 年 7 月 20 日~8 月 19 日, 平均视应力为 0.06 MPa, 视应力起伏波动幅度大; 第二阶段从 1995 年 10 月 2 日~12 月 12 日, 平均视应力为 0.047 MPa, 视应力起伏波动幅度明显比第一阶段小; 第三阶段从 1995 年 12 月 29 日~1996 年 5 月 3 日, 平均视应力为 0.014 MPa, 视

应力变化平稳. 余震视应力的这种变化特征可能与主震后震源区应力调整过程相联系, 视应力的起伏波动变化反映的是震源区在应力调整阶段的应力变化. 这正说明了视应力可以反映震源区应力状态. 所以, 从余震视应力的变化过程可以看出, 在地震过程中, 主震时震源区的应力大幅度释放, 然后通过余

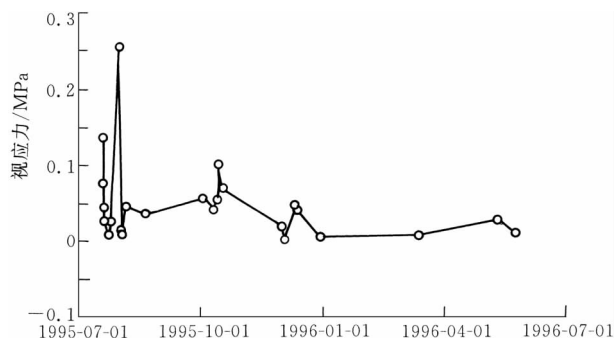


图 1 1995 年 7 月 20 日沙城 $M_L 4.1$ 地震
余震视应力随时间的变化

震继续释放，最后达到较低水平。

4.2 动态应力降与静态应力降之差值

根据式(3)，利用所求得的视应力和表1中的应力降，可以得到动态应力降与静态应力降之差。在数值上，动态应力降与静态应力降之差等于最终应力与动态摩擦应力之差。图2是动态应力降与静态应力降之差值 $\Delta\sigma_{ds}$ 随时间的变化曲线，反映了断层面终止应力与动摩擦应力之差的变化。

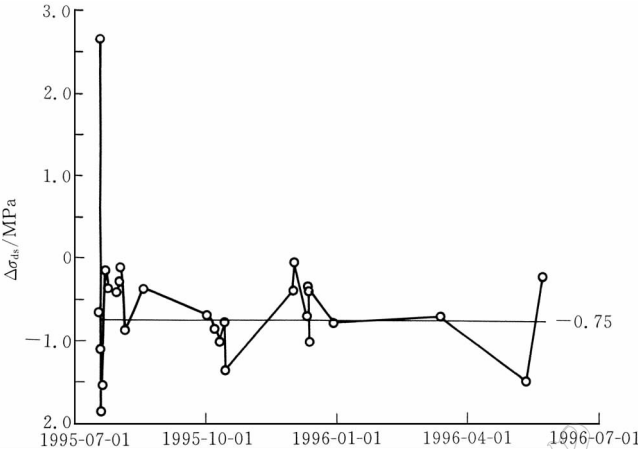


图2 1995年7月20日沙城 $M_L4.1$ 地震序列
 $\Delta\sigma_{ds}$ 随时间的变化

从图2可看出，主震时， $\Delta\sigma_{ds}$ 处于较高的水平，其后立即降至小于0的低水平。余震的 $\Delta\sigma_{ds}$ 就在这个低水平上平稳地变化，其平均值约为 -0.75 MPa 。主震时 $\Delta\sigma_{ds}$ 为正，而余震时为负。这说明，主震发生时终止应力高于动摩擦应力；而在余震发生过程中，终止应力一致低于动摩擦应力。所以，主震时断层面有可能受阻；而余震发生时，断层面有可能错动过头。这个结果清楚地表明主震破裂与余震破裂过程存在明显的差别。

5 讨论和结论

通过对1995年7月20日沙城 $M_L4.1$ 地震序列的视应力、静态和动态应力降之差值在破裂过程中的变化研究，得出以下结果：

- 1) 主震的视应力比余震的视应力明显高，主震的视应力约为 5 MPa ，余震的视应力平均为 0.047 MPa 。
- 2) 在破裂过程中，主震的动态应力降大于静态应力降，其差值约为 2.7 MPa ；余震的动态应力降一致小于静态应力降，其差值平均约为 -0.75 MPa 。因此，主震发生时，最终应力高于动摩擦应力，与地震断层突然锁住的模式相符；余震发生时，最终应力低于动摩擦应力，与断层错动过头的模式相符。因此，主震和余震的发生过程是有差别的。其原因可能是，由于震源断层面的非均匀性，在断层面上可能存在阻挡破裂传播的“障碍物”，使主震发生时发生断层被锁住的现象，而余震正是这些障碍物继续破裂的结果。一方面由于主震发生时断层面可能会由于摩擦生热降低摩擦，使余震期间发生地震时断层面的错动更加容易；另一方面由于余震发生时，小的障碍物相对均匀，没有次一级的障碍物阻碍这些障碍体的破裂。因此，使得余震发生时断层面错动可能会发生错动过头的现象。

参 考 文 献

陈运泰. 2003. 地震能量和地震效率[A]. 见：中国地震局监测预报司编. 地震参数——数字地震学在地震预测中的应用[C]. 北京：地震出版社，51~72

- 王培德, 王鸣, 任道容, 等. 1995. 中国-欧共体地震科学合作项目“北京西北延庆-怀来盆地地震学研究”进展[J]. 地震地磁观测与研究, **16**(6): 8~14
- 徐果明, 周蕙兰. 1982. 地震学原理[M]. 北京: 科学出版社, 339
- 许向彤, 陈运泰, 王培德. 1997. 怀来盆地的构造应力场[J]. 地震地磁观测与研究, **18**(1): 1~8
- 许向彤, 陈运泰, 王培德. 1999. 1995 年 7 月 20 日怀来盆地 $M_L=4.1$ 地震的破裂过程[J]. 地震学报, **21**(6): 570~582
- 许向彤, 陈运泰, 王培德. 2001. 1995 年 7 月 20 日怀来盆地 $M_L 4.1$ 地震序列震源参数的精确测定[J]. 地震学报, **23**(3): 225~238
- Aki K. 1967. Scaling law of seismic spectrum[J]. *J Geophys Res*, **72**: 1 217~1 231
- Báth M, Duda S J. 1964. Earthquake volume, fault plane area, seismic energy, strain, deformation, and related quantities[J]. *Ann Geofis Rome*, **17**: 353~368
- Chen Y T. 1996. Seismological study of the Yanqing-Huailai basin, northwest of Beijing[A]. In: Department of International Scientific and Technological Cooperation SSTC, China ed. *Successful Sino-European Science and Technology Cooperation 1981~1995*[C]. Beijing: Tsinghua University Press, 134~139
- Choy G L, Boatwright J L. 1995. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress[J]. *J Geophys Res*, **100**: 18 205~18 228
- Ide S, Beroza G C. 2001. Does apparent stress vary with earthquake size? [J]. *Geophys Res Lett*, **28**: 3 349~3 352
- Izutani Y, Kanamori H. 2001. Scale-dependence of seismic energy-to-moment ratio for strike-slip earthquakes in Japan [J]. *Geophys Res Lett*, **28**: 4 007~4 010
- Savage J C, Wood M D. 1971. The relation between apparent stress and stress drop[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **61**: 1 381~1 388
- Wu Z L. 2001. Scaling of apparent stress from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its focal mechanism dependence[J]. *Earth Planets Space*, **53**: 943~948
- Wyss M. 1970. Apparent stresses of earthquakes on ridges compared to apparent stresses of earthquakes in trenches[J]. *Geophys J R astr Soc*, **19**: 479~484

VARIATION OF STRESS DURING THE RUPTURE PROCESS OF THE 1995 $M_L=4.1$ SHACHENG, HEBEI, CHINA, EARTHQUAKE SEQUENCE

Chen Xuezhong¹⁾ Xu Xiangtong¹⁾ Zhai Wenjie²⁾

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Liaoning Province, Shenyang 110031, China

Abstract: According to the rupture dynamics of earthquakes, variations of the apparent stress and the difference between the static stress drop and the dynamic stress drop during the rupture of earthquakes are analyzed for the July 20, 1995 $M_L=4.1$ Shacheng, Hebei, China, earthquake sequence. Results obtained show that the apparent stress for mainshock is about 5 MPa, and the average apparent stress for aftershocks 0.047 MPa. During the rupture of the mainshock, the dynamic stress drop is approximately 1.6 times greater than the static stress drop with the difference of nearly 2.7 MPa. The dynamic stress drop is less than the static stress drop for all aftershocks with the average difference of -0.75 MPa. Therefore, when the mainshock occurs the final stress on the focal fault is higher than the dynamic frictional stress, corresponding to that the fault is abruptly locked. When the aftershocks occur the final stress on the focal fault is lower than the dynamic frictional stress, corresponding to that the fault overshoots. It can be seen from the above results that there could be some differences in the physic processes between the mainshock and the aftershocks.

Key words: Shacheng earthquake sequence; apparent stress; stress drop; variation of stress