第 20 卷 第 3 期
1998 年 9 月

西 北 地 震 学 报
NORTHWESTERN SEISMOLOGICAL JOURNAL

Vol. 20 No. 3
Sept. 1998

走滑型地震震源孕育的三维组合模式

刘 顺
（成都理工学院地质学系，成都 610059）

摘要 以走滑型地震为例提出了震源孕育的三维组合模式.在以往的组合模式基础上增加了震源下部的应力调整单元.这一应力调整单元由流变介质组成，孕震时不积累应力，而是将应力转移至上部的应力积累单元；在发震时该单元以其特有的粘滞性可以止裂；震后以其变形的时间依赖性可以控制余震发生.该调整单元的作用可以由地震后断层的蠕动曲线得到部分验证.

主题词 **组合模式** 应力调整单元 走滑型地震
中国图书分类号 **P**315.1

1 引言

中国地震工作者先后提出了多种震源模式[1]，包括组合模式、叠加模式、层间解缚模式及立交模式等.其中组合模式是最基本的模式，其它几种模式可以说是由它发展完善而来的.但是该模式实质上是一种二维的震源模式，未涉及有关震源下部介质在地震孕育过程中的作用.在本文中，作者对组合模式提出了一种改进意见，即考虑震源下部介质的作用，将其作为另一个调整单元，从而形成三维组合模式.

2 三维组合模式的构成

组合模式[1]由应力积累单元和其两端的应力调整单元构成.积累单元是走滑断层的闭锁段，它既可以是断层的粘住段，也可以是断层端部的未破裂段.其基本作用是震前积累应力及震时突然释放应力.调整单元是积累单元两端的软弱介质段或断层蠕滑段，其基本作用是震前将应力不断转移至积累单元，震时容纳积累单元的位移、制约积累单元应力的完全释放及终止地震破裂的无限传播等.这一模式未考虑震源底部介质的作用，因此实质上是一种二维模式.实际上，大陆板块内部的地震虽然一般发生于地壳上部 20 km 范围内，但地震的孕育却不限于此深度范围，而是要涉及更深范围介质的作用，特别是岩石圈深度范围的介质的作用，由于板块运动是作为一个力学性质上相对独立的整体而存在的，因此，震源下部介质在孕震过程中的作用就成了必须考虑的因素.

地球大陆岩石圈具有流变性质分层结构[2],①.按力学性质，岩石圈可分为 3 层：上地壳高强度脆性介质层、下地壳低强度韧性介质层及上地幔次高强度韧性介质层.这种分层主要是根

收稿日期：1997-09-17
作者简介：刘顺，男，1961 年 12 月生，博士，从事构造物理方面的研究.
① 刘顺.大陆下地壳流变性质的实验研究（博士学位论文）.1993.

据高温高压下岩石力学实验的结果给出的.当然,这是一个简化结构,实际的岩石圈流变结构要复杂得多.因为岩石的流变性质取决于温度、压力及岩性等多种因素,而实际岩石圈内这些因素的分布是复杂的.在多种地温梯度、岩性分布假设下所建立的岩石圈流变结构都大致符合上述 3 层结构①,[3].

从岩石变形机制上看,岩石圈上部属脆性变形层,岩石圈下部属韧性(或塑性)变形层,脆性层与韧性层之间有一个过渡带,称脆韧性转换带.脆性层及脆韧性转换带对应上述上地壳高强度介质层,韧性层对应于上述下地壳低强度层及上地幔盖层高强度层.因此,从岩石变形机制角度,可将上述岩石圈流变性质 3 层结构合并成 2 层结构,即上部的脆性半脆性层及下部的韧性层.

构造地震是岩石圈中构造应力作用下岩石破裂过程的表现,几乎所有的板内浅源地震都发生在上地壳脆性层及半脆性层中,因此,积累单元只能限定在上部脆性、半脆性层中.而下部韧性层是无震层,它是由一种低或高强度的处于韧性变形状态的流变介质构成,既可以是完整介质,也可以有同上部地震断层产状一致的韧性剪切带.这样一种介质可以看作是软弱介质,在岩石圈整体受力时因其产生流变不积累或较少积累应力,并将变形转移到上部的积累单元,使积累单元出现应力集中,也起到一种调整单元的作用.考虑到应力积累单元下部介质的作用后,则上述组合模式即成为三维组合模式,其不同于组合模式之处在于多了一个震源下部应力调整单元,如图 1 所示.

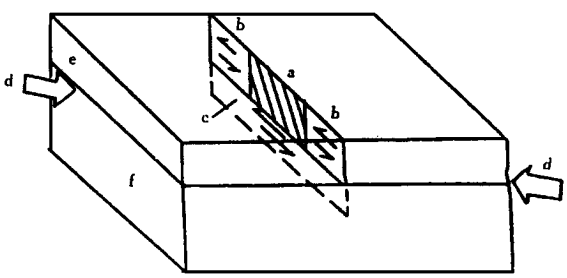

图 1 三维组合模式示意图

Fig. 1 Sketch of three dimensional combination model.

a 积累单元; b 两端调整单元; c 震源下部调整单元; 区域应力方向; e 上部岩石圈(半)脆性层; f 下部岩石圈韧性层

3 震源下部调整单元的作用

积累单元两端的调整单元在孕震、止裂及控制余震等方面的作用前人已详尽阐述[1],本文着重讨论震源下部调整单元的作用.

3.1 在孕震过程中的作用

图 2 给出了三维组合模式(两端调整单元已略去)积累单元的发震过程示意图.在斜交断层走向的区域主压应力作用下,闭锁的断层两盘及其下部介质整体发生弯曲变形.断层闭锁段(积累单元)两盘介质主要发生弹性弯曲,下部调整单元则以塑性流动变形为主,不积累应力,并将应力转移至上部积累单元,从而使积累单元底部出现应力集中.当变形达到一定程度后,可使闭锁段的应力水平达到该层的破裂强度或摩擦强度,从而发生地震.当然,下部调整单元的这种作用同两端调整单元的类似作用是同时进行的.但因两端调整单元的尺度有限,可能下部调整单元的这种作用有时还是主要的.

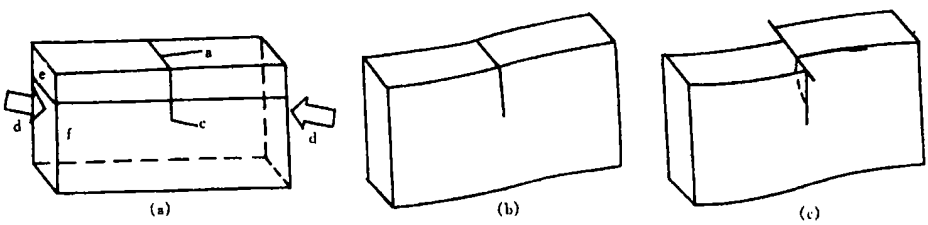

图 2 走滑断层发震过程示意图

Fig. 2 Earthquake process of strike-slip fault in three dimensional combination model.

a 积累单元; c 下部调整单元; e 上部岩石圈(半)脆性层; f 下部岩石圈韧性层; d 区域应力方向

3.2　止裂作用

地震发生后, 破裂向两侧同时也向下传播. 由于积累单元下部为流变介质, 破裂不能在其中传播, 于是, 破裂便中止于下部调整单元中. 换一个角度考虑, 当积累单元发生剪切破裂时, 由于剪切位移的存在, 给下部调整单元施加一个瞬间剪切力, 由于流变介质不能产生瞬时塑性变形(马克斯威尔体可产生瞬时弹性变形, 开尔文体不能产生瞬时变形), 必然使破裂中止于下部调整单元中.

3.3　对余震的控制作用

目前对余震成因的主要认识有: 余震是主震发生以后由应力再分配所引起的一种延后破裂过程; 破裂后存在与时间有关的"强度恢复"过程, 若应力恢复超过强度恢复则可发生余震等等. 总之, 余震过程可看作是主震后能量调整的过程或剩余能量释放的过程. 下部调整单元对余震控制作用的机理为: 当主震发生后, 由于下部调整单元介质的不可瞬时塑性变形性, 在积累单元破裂时它不可能给破裂提供较大的位移让位, 因而使积累单元的弹性应变能不能一次释放完, 剩余的弹性应变能的释放由下部调整单元的流变性质所控制. 其具体过程如下: 主震时积累单元的错动对震前基本无应力积累的下部流变介质施加了新的剪切应力(其大小取决于上部介质中的剩余弹性应变能), 使其发生流动变形, 随着时间的延长, 其中的剪切应力慢慢释放, 同时又将应力转移至上部积累单元. 积累单元因强度恢复或其它原因引起重新闭锁而又承受新的应力, 或者由主震发生时产生的一些分支断裂来承受新的应力. 当应力超过主断面的"恢复强度"或分支断裂的强度时可再次发生破裂, 这便是余震. 因"恢复强度"及分支断裂强度一般较小, 故余震震级也较小. 应力在积累单元和下部调整单元中的来回转移可能会出现多次, 直至上部介质中的弹性应变能释放完毕.

4　三维组合模式的检验

三维组合模式的两端调整单元仍在起作用, 积累单元特点也无特殊之处, 加之下部调整单元为非震层, 所以, 与三维组合模式有关的地震现象大部分同一般组合模式是一致的, 但有些现象可以反映下部调整单元的作用, 发震断层震后蠕动便是其中一例.

前已述及, 主震后, 震源处破裂位移对下部调整单元施加剪切应力使其发生蠕变, 同时, 下部物质的蠕变又控制着上部弹性层断裂的继续运动, 这种运动包括余震的突然错动和无震的连续滑动, 可以统称为震后蠕动. 主震后上层的剩余弹性变形量随着震后蠕动的进行会逐渐减小, 但由于区域应力场还在继续作用, 同时震后蠕动的幅度比起主震时的错动幅度要小得多, 因此, 在主震后一定时期内, 可近似认为上层剩余弹性变形量是不变的. 这样, 我们就可认为上层在主震后施加给下部流变介质的剪切力是不变的. 在这种不变的剪切力作用下的下层物质的蠕变过程可通过震后上层断层的蠕动反映出来.

岩石高温高压蠕变实验结果表明, 流变介质初始蠕变规律符合对数函数律①,[4], 可表达为:

$$L = a \lg t - b$$

式中 L 为位移, t 为时间, a, b 为待定常数. 若能在发震断层上观测到主震后蠕动符合上述函数律, 则可以从一个方面证明下部调整单元的作用.

以典型的走滑型断裂——鲜水河断裂上的具有震后断层位移观测资料的 1976 年炉霍7.6 级地震和 1981 年道孚 6.9 级地震为例. 李建中[5] 统计了这两次地震后地震破裂区跨断层短水准测量的资料, 其结果为

炉霍地震后虚虚场地 $\Delta H = 4.331 \lg\Delta t - 0.46$

炉霍地震后虾拉坨场地 $\Delta H = 7.331 \lg\Delta t - 0.25$

道孚地震后道孚场地 $\Delta H = 7.331 \lg\Delta t - 1.10$

式中：ΔH 为断层两盘高差变化，单位为mm；Δt 为时间，单位为月. 由上述3式可见，震后断层垂直位移符合对数函数律. 由于测量系统布设得不完善，震后仅观测到跨断层短水准变化，而缺乏跨断层短基线资料. 但其它测量资料[6]表明，鲜水河断裂各时段的水平位移与垂直位移具有恒定的比例，即6∶1. 由此可认为鲜水河断裂震后水平蠕动也符合对数函数律.

用发震断层震后蠕动规律检验震源下部调整单元的作用仅仅是一种初步的检验尝试，今后还需要用更多的方法以及相应的震例来进一步验证.

参考文献

1 郭增建，秦保燕. 地震成因和地震预报. 北京：地震出版社，1991.

2 Carter N L and Tsenn M C. Flow properties of continental lithosphere. Tectonophysics, 1987, 136: 27～63.

3 Ranali G, Murphy D C. Rheological stratification of lithosphere. Tectonophysics, 1987, 132: 281～295.

4 Yuen D A, Sabadini R C A, Gasperini P and Boschi E. On transient rheology and glacial isostasy. J Geophys Res, 1986, 91: 11420～11438.

5 李建中. 鲜水河断裂带的现今构造形变. 见：四川省地震局编，鲜水河断裂带地震学术讨论会文集. 北京：地震出版社，1985. 166～177.

6 葛培基. 鲜水河断裂上跨断层形变测量资料分析. 见：四川省地震局编，鲜水河断裂带地震学术讨论会文集. 北京：地震出版社，1985. 158～165.

THREE DIMENSIONAL COMBINATION MODEL OF FOCAL DEVELOPMENT OF THE EARTHQUAKE OF THE STRIKE-SLIP TYPE

LIU Shun

(*Department of Geology, Chengdu Institute of Technology, Chengdu* 610059)

Abstract

A three dimensional combination model has been put forward by means of adding an adjustment element under the fault in the combination model. The under adjustment element is composed of ductile material. It doesn't accumulate but transfers stress to the over accumulation element before earthquake, quits the boundless propagation of rupture by it's viscosity during earthquake, and controls the aftershock activity with dependence of it's deformation on time after earthquake. The acts of under adjustment element can be partly examined by creep curve of seismic fault.

Key words **Combination pattern**, Stress adjustment element, Earthquake of the strike-slip type