

# 基于地壳双层结构假设的大陆强震孕震机制探讨

雷东宁<sup>1</sup>, 樊光明<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学研究生院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:**通过对地壳低速高导层和地震震源深度等有关资料的分析研究, 在对地震发生前兆、特征及物理机制研究的基础上, 初步提出了一个简单的地壳双层孕震模式: 地壳存在有两层孕震结构, 上层为主孕震层, 是地震应力集中积聚和发震后释放应变能的地方, 主要是岩石发生脆性变形层, 深度在中上地壳范围内; 下层为低速高导层, 是诱发和加强上层脆性层岩石变形、应变能积累和破裂的主要因素之一, 处于岩石脆—韧性变形的过渡带, 强震的发生与本层有着密切的关系, 深度在中下地壳范围内。同时基于该双层孕震假设讨论了强震的孕育环境及作用。

**关键词:** 地壳双层模式; 低速高导层; 孕震机制

中图分类号: P315.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-0844(2006)02-0114-04

## Discussion on Seismogenic Mechanism of Continental Strong-shocks Based on the Hypothesis of Double-storey Pattern for the Crust

LEI Dong-ning<sup>1</sup>, FAN Guang-ming<sup>2</sup>

(1. Graduate student school, Chian University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

2. Faculty of Earth Science, China University of Geoscience, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Through detailed analyses for available data concerning low-velocity and high conductive layer beneath the crust and seismic depths, based on the studying of seismic precursors, characteristics and physical mechanisms, a simple double-storey seismogenic hypothesis of the crust for continental strong shocks is preliminarily presented in this paper. The upper layer in mid-upper crust is main earthquake pregnant layer where stress concentrats and strain energy releases in earthquakes events, and is a brittle deformation layer of rocks. The lower one in mid-lower crust with high conductive and low velocity of P wave, is believed that it is one of the most important factors inducing and enhancing brittle deformation, strain energy cumulation and crack in the upper rocks. The latter layer locates in a transitional zone of rock deformation from brittle to ductile, which is closely associated with the occurrence of strong shocks. Meanwhile, seismogenic environment and significance for strong shocks based on the double-storey pattern are discussed in paper.

**Key words:** Double-storey pattern of the crust; Low-velocity and high conductive layer; Seismogenic mechanism

## 0 引言

地震预报是世界性的难题, 地震预报的成功有赖于对地球圈层结构的认识程度、地震发震机理的基础研究程度, 同时也与人们使用的地震监测、探测手段和方法有关。对于大陆强震发震机制的研究, 前人做了不少工作, 国内外许多学者提出了许多地

震孕震模式。例如: 弹性回跳模式<sup>[1]</sup>、组合模型<sup>[2]</sup>、扩容-渗透模式<sup>[3-5]</sup>、雪崩模式<sup>[6]</sup>、膨胀-蠕变模式<sup>[7]</sup>、坚固体模式<sup>[8]</sup>、地壳硬夹层模型<sup>[9]</sup>等。这些模型都是从不同角度对于大陆强震孕震机理的解释, 但这些模式基本上都没有从地壳特殊结构进行过探索, 不能很好的解释地震大陆强震的孕育过程。

收稿日期: 2005-06-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(40302029); 国土资源部区域地质调查项目(200413000007)

作者简介: 雷东宁(1980—), 男(汉族), 甘肃宁县人, 在读硕士研究生, 主要从事构造地质学及地震机理等方面的研究。

通过大地电磁测深、地壳应力场三维有限元数值模拟及地震层析成像等多手段、多方法的综合分析表明,地壳中存在一特殊低速高导层。该层在地壳中的深度和厚度存在横向的差异,表现出区域性分布的不连续和不均匀。许多人认为这个层很可能与强震的孕育和产生有密切关系<sup>[9-10]</sup>。本文针对此问题结合大陆强震震源深度分布规律,进行了综合分析,提出了一种基于地壳双层结构假设的强震孕震机制初步的设想,并进行了探讨。

## 1 中国大陆震源深度分布与地壳厚度的相依关系

大陆强震震源深度问题一直是地震学家关注的问题<sup>[11-14]</sup>,通过研究发现中国大陆地震的震源深度分布与地壳厚度间存在相依关系。张国民等<sup>[14]</sup>以1970年1月至2000年5月间中国大陆  $M_s > 2.0$  的地震研究表明,中国大陆平均震源深  $(16 \pm 7)$  km,东部地区为  $(13 \pm 6)$  km,西部为  $(18 \pm 8)$  km,东部比西部平均偏浅 5 km,呈现出区域性的差异,这与大陆区域地壳厚度差异是相关的。

震源深度与相应的 Moho 面深度之间也存在简单的线性关系:震源深度大的地方其相应的 Moho 面深度也越大,即地壳越厚。如东部震源深度峰值为 5~14 km,西部震源深度峰值为 10~24 km;东部约有 90% 的地震深度在 5~24 km 深度范围内,而西部约有 90% 的震源深度在 5~34 km 范围。总体上说,中国大陆地区地震震源深度呈现西深东浅、北深南浅的规律,这与地壳厚度呈现西厚东薄、北厚南薄的特点是一致的。平均震源深度与地壳厚度的比值大体上稳定在 0.4 附近。各活动地块震源深度下界与地壳厚度的比值一般为 0.6 左右<sup>[14]</sup>,这和图 1 所反映的情况基本吻合。可以看出,大陆地震震源深度大都在中上地壳深度范围内。

## 2 地壳内低速高导层的存在及其研究意义

根据 MT、CT 探测的资料,中下地壳中发育有高导低速层,其电阻率较其上下邻层低 2~3 个数量级<sup>[16]</sup>,其弹性波速度 P 较上下邻层可低 10%~20%。这个高导低速层顶板埋深一般为十几到二十几公里,个别地区为几公里或几十公里<sup>[9]</sup>。

在世界范围内的很多地区,如阿尔卑斯、东非裂谷和北美等地区也有类似的低速高导体存在,而且几乎都是强震多发区,如图 2 所示。在中国的唐山、

邢台、海原和张北等强震区下方也有这种低速高导体存在<sup>[17]</sup>。如 1975 年海城 7.3 级大震,震中区地壳中的低速-高导层也是一个高温层,其温度为 500~640 °C,比两侧同一深度的温度高 130~200 °C。海城主震及其前震和余震大都发生于该层以上地壳内<sup>[18]</sup>。

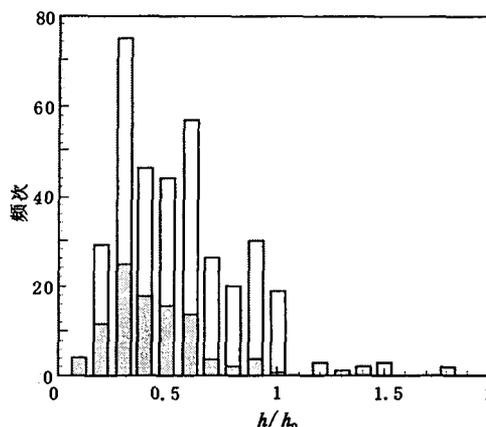


图 1 中国大陆地震频次随相对深度变化直方图 (实心柱为一类资料;空心柱为二类资料;柱的高度为两类之和)<sup>[15]</sup>

Fig. 1 Histogram of earthquake frequency variations with relative depth (Solid column as first data; Empty column as second data; The height of column as the sum of two data) (From Shi, 2003).

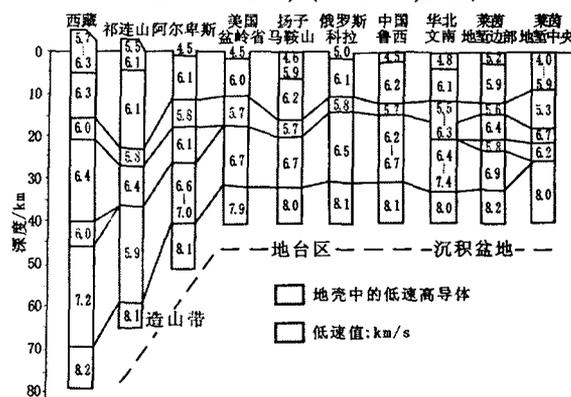


图 2 地壳中低速高导层普遍性图<sup>[20]</sup>

Fig. 2 The popularity for low-velocity and high conductive layers in the crust (From Yang, 1998).

为了证实其存在的客观性和可靠性,不同研究者从各自的研究领域进行了实验研究和论证,如顾芷娟<sup>[10]</sup>进行了高温高压下一些含水岩石(矿物)特性变化实验研究;徐常芳<sup>[16]</sup>进行了高温高压下含盐水岩石的电导率实验研究;高平<sup>[19]</sup>研究了中国华北地壳低速高导层的成因等。其中顾芷娟实验研究认为地壳低速高导层是由于地壳岩石在高温高压下发生岩石弱化强度降低而形成的,成为地壳中的软弱带。在中国大陆地区(特别是华北地区),低速高导

层埋深大约 15 ~ 25 km, 此软弱带与相邻地壳层物质性状差异所发生的层间滑动及应变能积累, 成为浅源地震多发区域——“多震层”<sup>[11]</sup>。

壳内低速高导层是地壳岩石变形机制转变和应变速率增加、地壳深部局域应变和地球物理场的异常带及壳内岩浆的发源地和高级变质作用的重要场所, 也是大陆动力学研究的重要组成部分<sup>[21]</sup>。因此搞清楚壳内低速高导层成因、特征、分布和性质不仅有助于人们理解大陆内部的构造运动、岩浆和变质过程, 而且对研究地震有着重要的意义。由于强震的发生与壳内低速高导层存在空间和成因上的相关性<sup>[9, 22]</sup>, 所以对地壳低速高导层的研究成为地震科学中的一个热点问题。

### 3 岩石圈内岩石及其强度随深度的变形特征

经典的断层岩石变形模式是 R. H. Sibson (1977) 提出的双层模式, 他认为在岩石圈 1 ~ 4 km 深度岩石主要表现出脆性变形或破裂; 当在地下 10 ~ 15 km 深度, 温度约为 300 °C 时, 岩石变形转变为塑性变形。然而, 现有研究结果和震源深度分布特点表明, 此深度可能会更大一些。随着温度、压力条件的变化, 岩石变形的差异、应力状态的不同, 在地下壳深部则出现韧性变形。近几十年来, 国内外对于岩石流变性和蠕变性质的研究越来越多, 这种变形主要出现在壳幔深度的过渡带或更深部位。

在一般不考虑温度、压力和化学活动性流体等因素的影响时, 最简单的准则是由库仑于 1773 年提出的“摩擦”准则:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (1)$$

式中  $\tau$  为剪切面上的剪应力(剪切强度);  $\sigma$  为剪切面上的正应力;  $c$  为粘结力(或内聚力)(应力单位);  $\varphi$  为内摩擦角<sup>[23]</sup>。但是地下深处的岩石受各种因素的影响, 岩石变形机制较为复杂, 因此库仑准则已不能满足要求。

对于深部地壳和地幔, 由于温度较高, 变形以幂律蠕变为主, 差应力为

$$\Delta \sigma = (\sigma_1 - \sigma_3) = 2\tau \\ = (\varepsilon/A)^{1/n} \exp(E/nRT) \quad (2)$$

式中  $\varepsilon$  为应变速率;  $R$  为气体常数;  $E$  为激活能;  $T$  为绝对温度;  $A$  和  $n$  为与岩流变性质有关的参数。当岩石所受力达到上两式中较低者时, 岩石即发生破裂或流动<sup>[15]</sup>。岩石圈岩石强度随深度的增加而变化情况如图 3 所示。

刘俊来<sup>[25]</sup>等通过日本万成花岗岩在围压 1.5 GPa, 温度 25 ~ 650 °C, 应变速率  $2 \times 10^{-6}$  次/s 的实验条件下, 得出的地壳岩石强度随深度变化关系如图 3(c) 所示, 与 Scholz(图 3(a)) 和 Shimamoto 等人(图 3(b)) 的实验结果有很大的不同。有意思的是, 地壳岩石强度随着深度的变化也呈小周期的变化。在大约 7 ~ 8 km 处有一个强度峰值, 而在 15 km 处岩石强度达到最大, 说明这和大陆的强震是有很大大关系的, 这个深度很可能是孕震层深度。这也从另一个角度表明地壳内部结构有可能存在多层结构<sup>[15]</sup>。

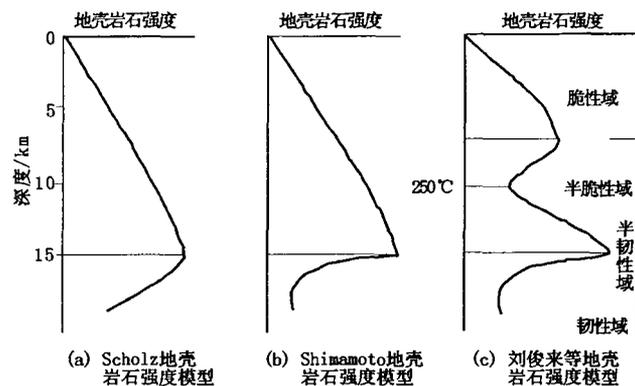


图 3 地壳岩石强度随深度变化

Fig. 3 The variation for rock strength with depth in the crust.

### 4 讨论

根据以上大陆地震震源深度分布规律以及地壳不同深度岩石变形特征, 结合中下地壳普遍存在低速高导层的地球物理事实, 建立了地壳双层孕震结构假设, 并基于该假设对于强震孕育的环境进行初步的探讨。

该地壳双层孕震假设认为地壳存在有两层孕震结构, 上层是主孕震层, 深度在中上地壳范围内, 它是地震应力集中积聚和发震后释放应变能的地方, 主要为岩石发生脆性变形层。该层相当于浅源地震多发区域——“多震层”<sup>[11]</sup>; 下层为低速高导层, 该层是诱发和加强上层脆性层岩石变形、应变能积累和破裂的主要因素, 它处于岩石脆-韧性变形的过渡带, 强震的发生与本层有着密切的关系, 该层深度在中下地壳范围内。大陆强震的孕育和发生是两者共同作用的结果。地壳岩石强度最大一般在 6 ~ 15 km 深度处(如图 3), 此深度处岩石变形行为主要表现为弹性变形、脆性破裂。而中国大陆震源平均深度为  $(16 \pm 7)$  km<sup>[14]</sup>, 显然这两者之间深度基本是一致的, 因为岩石变形只有弹性变形才能够积累足够的应变能。而位于中下地壳的低速高导层是地壳中

的软弱带,此软弱带与相邻地壳层物质性状差异容易发生层间滑动及应变能积累<sup>[11]</sup>,促使其上主孕震层发生变形积累应变能。

大陆强震孕育主要是在以近于水平挤压为主的构造环境下孕育的,通过不同级别的块体运动、相互作用表现出来,各块体边界驱动力主要通过岩石弹性层进行作用,即本假设的主孕震层。主孕震层在挤压背景下逐渐积累弹性应变能,其下层的低速高导层也积累了一部分应变能,并发生一定的层间滑动。在这样的构造环境下,当变形达到地壳脆性岩石极限强度,就容易产生许多微裂隙。由于低速高导层存在一定的活动性流体,极易因压力差进入脆性岩石的微裂隙,产生裂隙流体压力,使得岩石强度弱化<sup>[9]</sup>,导致微裂隙贯通,直至岩石发生完全破裂,这种突然瞬时破裂会释放出巨大的能量,发生强烈地震。

强震的孕育是在特定的地质构造背景下进行的,不同活动块体边界及块体内部构造软弱带(或隐伏的构造软弱带)是容易破坏的构造部位。位于中上地壳内岩石脆性变形带是积累弹性应变能的主要地带,本地带应该是相对“封闭”的,即处于复杂的区域应力场中,不利于形成应力释放,而是有利于应力集中积聚,积累应变能直到岩石发生完全破坏。而地下流体活动对于强震促震具有重要的意义,能导致岩石强度的弱化,并使岩石微裂隙贯通。因此,强震的孕育多是在地壳岩石变形机制转变和应变速率增加、地壳深部局域应变和地球物理场异常的环境下进行的。这种特殊的构造、地球物理环境容易形成复杂的构造应力场,上层的主孕震才能和下层的低速高导层形成特殊耦合,在壳内活动流体的作用下,形成强震的孕震条件和深部环境。

基于地壳双层孕震假设的这些认识,是对于研究强震的孕育机制是一次有益的尝试。当然,本假设的建立及探讨只是初步的,还需要做更多的工作,尤其是需要许多地球物理、地震等资料的证据,对于主孕震层和低速高导层之间特殊的耦合孕震关系是怎样的,都有待进一步研究。

本文在写作过程中得到了杨萍同志的支持和帮助,贵刊编委为本文多次提出了许多宝贵的意见和建议,在此笔者表示衷心的感谢!

#### [参考文献]

[1] Reid H F. The mechanism of the earthquake [A]. in: The California Earthquake of April 18, 1906, Report of the State Earthquake Investigation Commission, 2 [R]. Washington D C: Carnegie Insti-

tution, 1910. 1 - 192.

- [2] 郭增建,秦保燕,徐文耀,等. 震源孕育模式的初步讨论[J]. 地球物理学报, 1973, 16(1): 43 - 48.
- [3] Nur A. Dilatancy, pore fluids and premonitory variations of ts/tp travel times [J]. Bull. Seism. Soc. Amer., 1972, 62(5): 1217 - 1222.
- [4] Whitcomb J H, Garmany J D, Anderson D L. Earthquake prediction: a physical basis [J]. Science, 1973, 181: 803 - 809.
- [5] Scholtz C H, Sykes L R, Aggrawal Y P. Earthquake prediction: a physical basis [J]. Science, 1973, 181: 803 - 809.
- [6] Myachkin V I, Brace W F, Sobolev G A. Two models for earthquake forerunners [J]. Pure Appl. Geophys., 1975, 113(1 - 2): 169 - 182.
- [7] 牛志仁. 构造地震的前兆理论 [J]. 地球物理学报, 1978, 21(3): 199 - 212.
- [8] 梅世蓉. 地震前兆场物理模式与前兆时空分布机制研究(一) [J]. 地震学报, 1995, 17(3): 273 - 282.
- [9] 车用太,刘五洲,鱼金子,等. 板内强震的中地壳硬夹层孕震与流体促震假设 [J]. 地震学报, 2000, 22(1): 93 - 101.
- [10] 顾芷鹃,郭才华,李彪,等. 壳内低速高导体成因的初步探讨 [J]. 中国科学 B 辑, 1995, 25(1): 108 - 112.
- [11] 马宗晋,薛峰. 中国大陆地震深度分布与“易震层”初探 [J]. 地震科学研究, 1983, 3: 43 - 46.
- [12] 段星北. 中国地震震源深度的地理分布 [J]. 地震学报, 1997, 19(6): 590 - 599.
- [13] 陈立军. 中国地震震源深度与强震活动状态研究 [J]. 地震地质, 2000, 22(4): 360 - 370.
- [14] 张国民,汪素云,李丽,等. 中国大陆地震震源深度及其构造含义 [J]. 科学通报, 2002, 47(9): 663 - 668.
- [15] 石耀霖,朱守彪. 中国大陆震源机制深度变化反映的地壳 - 地幔流变特征 [J]. 地球物理学报, 2003, 46(3): 359 - 365.
- [16] 徐常芳. 地壳内高导层成因、高温高压下卤水物态及其电导率(二) [J]. 地震学报, 1996, 18(3): 352 - 357.
- [17] 施锦,刘耀炜,高安泰. 甘肃天水强震多发区中地壳低速高导体的成因探讨 [J]. 地震研究, 2004, 27(4): 318 - 321.
- [18] 卢造勋,姜德禄,白云,等. 东北地区地壳上地幔结构的探测与研究 [J]. 东北地震研究, 2005, 21(1): 1 - 8.
- [19] 高平. 中国华北地区壳内低速高导层(体)成因模式的探讨 [J]. 中国地震, 1997, 13(3): 223 - 232.
- [20] 杨文采. 全球流体通道网 [J]. 地球物理学报, 1998, 45(5): 621 - 652.
- [21] 杨晓松,金振民. 壳内部分熔融低速层及其研究意义 [J]. 地球物理学进展, 1998, 13(3): 38 - 45.
- [22] 姜本鸿,袁登维,吴玉华. 壳内低速层与地震活动关系 [J]. 地质科技情报, 1992, 11(4): 9 - 15.
- [23] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [24] Hyndman R D, Wang K. Thermal constraints on the zone of major thrust earthquake failure: The Cascadia subduction zone [J]. J. Geophys. Res., 1993, 98: 2039 - 2060.
- [25] 刘俊来,岛田充彦. 大陆地壳多震层成因与一个新的地壳断层带模式 [J]. 科学通报, 2000, 45(10): 1085 - 1091.