

文章编号：1006-6616(2002)02-0141-08

用物理模拟实验研究大陆伸展构造

周永胜，李建国，王绳祖，张 流

(中国地震局地质研究所，中国地震局构造物理开放实验室，北京 100029)

摘要：本文以岩石圈多层构造为基础，按照下地壳和岩石圈地幔塑性流动控制上地壳构造变形的思想，采用脆延性双层模型进行伸展构造模拟实验。模拟结果表明，延性层流动速度比脆性层运动速度大，对脆性层具有牵引作用；受挤压和边界流动控制，模型构造变形出现伸展区、过渡区和挤压区，其中以伸展区的“地堑-地垒”式伸展构造为主。模型表面标志点位移表明，模型脆性层变形量主要集中在断裂发育部位，而断裂之间块体变形量基本可以忽略不计。此外，实验中还观察到在脆性层断裂部位出现延性层被动上隆现象。

关键词：塑性流动；伸展构造；物理模拟

中图分类号：P542.2，P554

文献标识码：A

0 引言

按照通常的理解，伸展构造是引张力作用于地壳或岩石圈而引起的构造变形，区域性拉张是边界驱动力沿水平方向对地壳或岩石圈直接拉张作用的结果。然而，大量的岩石力学测试结果表明，岩石抗张强度很低，完整岩石情况下多数小于 $10 \sim 30\text{MPa}$ ，岩体断裂的情况下甚至趋于零。这就是说，通过脆性地壳直接的拉张作用，不可能形成区域性的拉张环境。在以往的伸展构造物理模拟实验中，人们已体会到，对于砂箱模型中砂层边界的拉张实际上只能为砂体的重力崩塌和断错提供“让位”条件，而为了造成砂层的水平伸展，不得不借助于对胶皮底板等的牵引。可见，板块边界或板块内部直接拉张时，因受先存或新生断裂的限制，脆性的上部地壳实际上并不具备继续传递拉张作用的能力，伸展构造变形驱动力的传递看来主要不在于上层。近年来，越来越多的研究表明，下地壳^[1~5]或下地壳和岩石圈地幔^[6,7]的横向塑性流动是上地壳产生伸展构造的主要原因。在岩石圈塑性流动网络与多层构造变形物理模拟研究的实践中^[8,9]，直观地体验了塑性流动控制上层构造变形的可能性以及相似理论用于构造变形研究的有效性。本文采用下层塑性流动牵引和控制上层构造变形的思路，进行大陆伸展构造成因机制的物理模拟研究。

收稿日期：2001-03-23

基金项目：地震科学联合基金项目(编号：196065)。中国地震局地质研究所论著：99B0042

作者简介：周永胜(1969-)，男，博士，中国地震局地质研究所副研究员，主要从事高温高压实验和构造物理模拟研究。

1 模型设计

在伸展模型实验研究中,部分研究者采用单层砂箱模型^[10~12]或单层半塑性模型^[13],另一部分虽然采用脆延性双层模型^[14~16],但延性层只起到缓冲作用,避免脆性层与模型底部直接接触。显然这些模型既没有体现岩石圈多层构造的特点,也不符合岩石圈脆延性转变的基本特征,不能反映延性层流动在伸展过程中的重要性。正因为如此,在伸展模型中不得不拉伸模型底部胶皮实现脆性层伸展,这与实际地质过程有一定的差别,不能满足岩石圈多层构造变形模拟的要求。与上述模型不同,Davy等^[17]采用脆延性四层模型模拟岩石圈挤压增厚的过程,在该模型中虽然没有明确提出通过延性下层流动实现应力远程传递和延性下层对上层的控制作用,但体现出岩石圈多层构造的特点;李建国等^[8,9]在岩石圈多层构造和塑性流动网络的模拟研究中,为了突出延性下层流动对脆性上层构造变形的控制作用,把岩石圈多层构造简化为脆延性双层模型。这些工作为大陆伸展构造模拟提供了新的方法。

在本模型设计中,主要强调延性下层塑性流动对脆性上层拉伸伸展的牵引和控制作用,因此,沿用李建国等^[8,9]的模型,把岩石圈多层构造模型简化为脆性上层和延性下层,忽略各层中的细层。延性层采用粘度可调的塑化松香,脆性层采用强度极小的松散玉米粉,并且对有关参数进行了测定^[18]。模型主体形态为平面状,模型长 250mm~300mm,宽 200mm~300mm,模型具有脆延性双层结构,延性层厚 8mm~12mm,脆性层厚 2mm~4mm,它可以很好地模拟上、下层的相互作用,并在一定程度上表明构造变形的空间分布特征,展示构造变形形迹的平面分布及演变。

在岩石圈多层构造变形的模拟中,边界推挤采用刚性推块^[8,9,17]。本模型强调延性层的流动作用,因此可以简化实验驱动装置,通过模型一端设置“高原”,利用“高原”延性物质流动产生的驱动力和“地形”差产生的重力势实现边界推挤作用;通过模型另一端设置“泄流”边界,使延性层可以自由流出,利用延性下层流动作用牵引上层伸展,在“高原”推挤与“泄流”边界拉伸的配合下,研究大陆伸展构造的发生发展过程。

模型相似性参照李建国等^[8]和周永胜等^[19],得出如下相似参数:

表 1 模型相似参数

Table 1 The similar parameters of models

温度/℃	延性层粘度/Pa·s 和配比 P/R	线长比	脆性层 强度比	时间相似比	时间对比 (Ma/h)*	速度相似比
20	1.64×10^3 (1/3.5) $\sim 6.30 \times 10^4$ (1/5)	5×10^6	2.37×10^7	$3.89 \times 10^{10} \sim$ 1.01×10^9	4.44~0.12	$1.29 \times 10^{-4} \sim$ 4.95×10^{-3}

* 时间对比:表示模型中 1 小时相当于实际地质时间 Ma。

2 模拟实验结果与分析

2.1 下层流动特征及其对上层的控制作用

在上隆-伸展实验中^[19]观测到模型下层流动前沿呈明显的抛物线锋面(图 1),这表明由于模型底部和两侧摩擦,延性层中间流动快,两边慢,具有速度梯度。在实际地质中,由于受到层间摩擦,下地壳和岩石圈地幔流动速率分布也具有类似的抛物线锋面^[20]。模型中轴线上设置的标

志点的位移表明，上、下层位移速率有明显的差别，下层速率大，上层小（图 2），因此下层位移超前，从而牵引上层产生构造变形。流体力学研究表明^[21]，在通道流中，由于流体压力梯度影响，流体存在速度梯度，速度在通道两侧低，中间高，速度剖面形态取决于流体粘度。对于牛顿流，速度剖面 and 流体前锋呈抛物线型；对于符合幂次流动的下地壳和岩石圈地幔而言，随着应力指数增加，流体粘度增大，在剪应力最大的通道流边界附近，速度梯度变大，在剪应力最小的通道流中部，速度梯度变小，使速度剖面 and 流体前锋抛物线顶部变缓。

本模型可以通过改变延性层流动速度达到控制伸展和挤压速率的目的，通过模型表面中轴线上布设的标志点的变化，定量研究伸展过程中的伸展、挤压变化规律以及位移、应变率和变形量等。

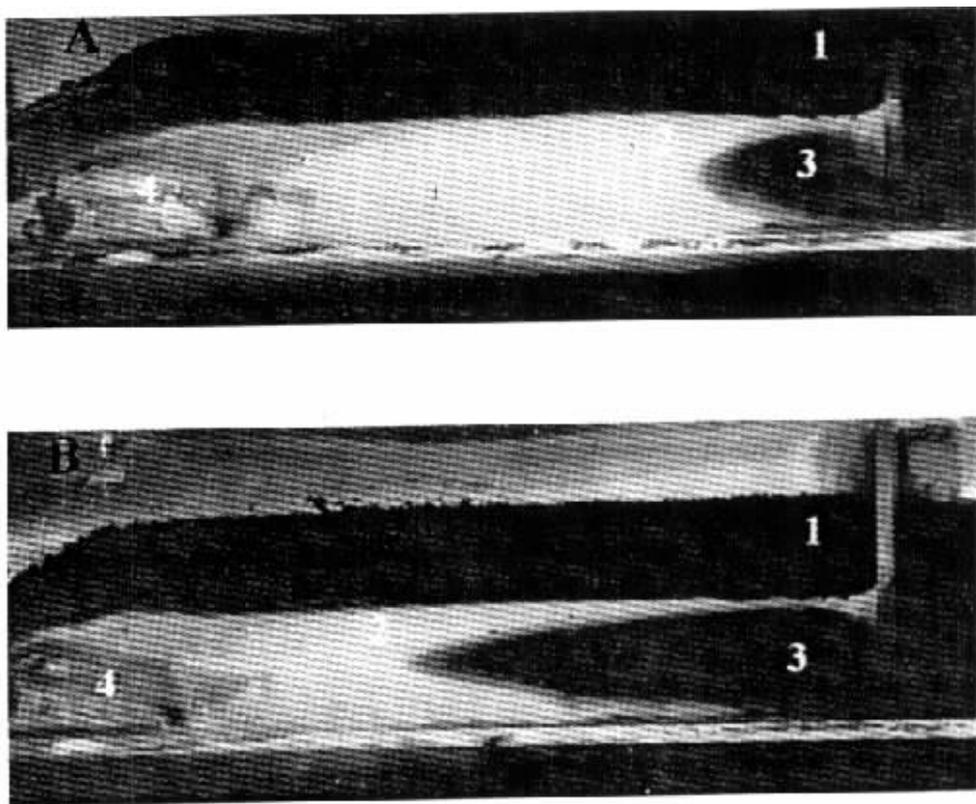


图 1 延性下层流动前缘呈抛物线型

Fig.1 Parabola type of flowing front in low ductile layer

1. 脆性层；2. 延性层；3. “高原”流动前缘；4. 上隆水囊

模型 E35 A：t = 0.33 小时，B：t = 14.83 小时

2.2 伸展模型实验结果

模型有关物理参数为：模型长度 175mm（模型 E09）~ 220mm（模型 E08）、宽度 300mm、脆性层厚度 3mm ~ 4mm、延性层厚度 8mm、脆性层内聚强度 15.4Pa、延性层粘度 $6.46 \times 10^3 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 、温度 20℃、空气相对湿度 66%，图 3 中 A1 和 A2 的时间分别是 6 小时和 10.5 小时（模型 E09），B 的时间是 3.5 小时（模型 E08）。

在伸展模型实验中，随下层流动伸展，上层伸展断裂从边界开始逐渐向内部发展，形成“泄流~伸展”断裂，但由于存在“高原”挤压作用，局部出现褶皱和沿褶皱轴部的伸展。因此，

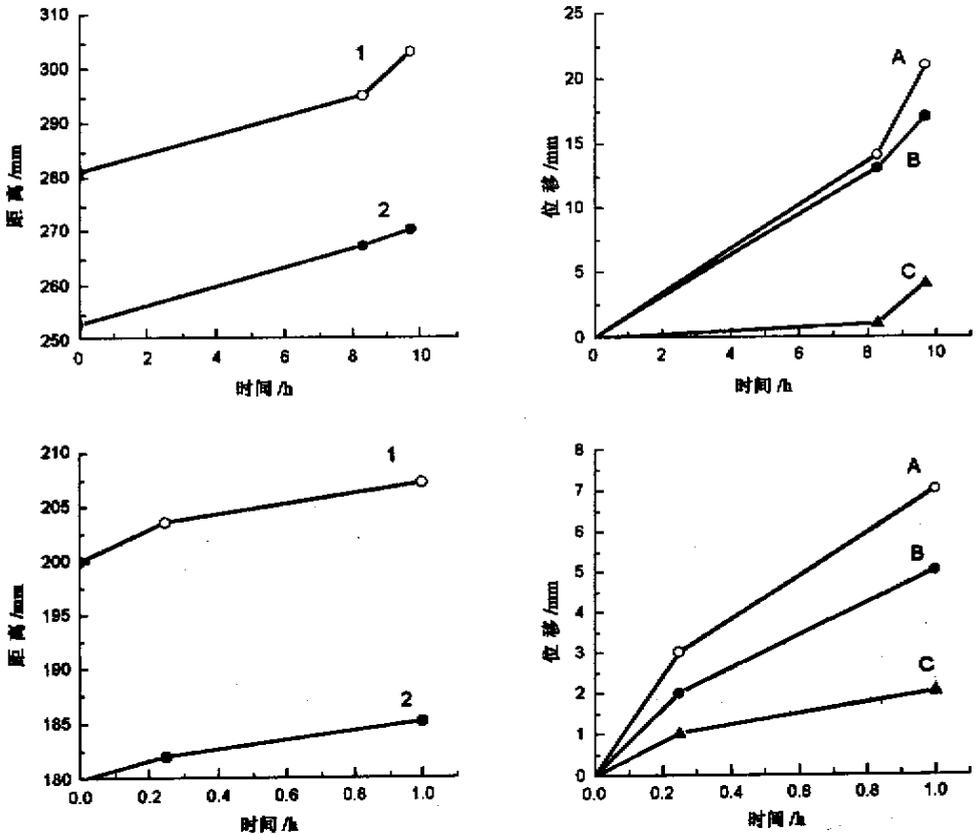


图2 “挤压~泄流”伸展模型上、下层位移比较

Fig.2 Comparing displacements between upper and low layers of “outflow-compression” extensional models

上: 模型 E06 下: 模型 E09; 1. 延性层标志点距离随时间变化; 2. 脆性层标志点距离随时间变化
A. 延性层标志点位移时间曲线; B. 脆性层标志点位移时间曲线; C. 两层位移之差随时间变化曲线

“高原”挤压和泄流伸展动力学特征决定了构造具有分区性，在靠近泄流出口部分出现张裂，构成明显的伸展区；靠近“高原”部分受压，形成挤压区；在模型中部，出现介于伸展与挤压之间的过渡区域。

2.2.1 伸展区构造变形特征

在边界泄流牵引作用下，上层在出口边界附近形成一系列张性断裂。断裂带基本平行于伸展边界，断裂间距约 5mm~8mm，断裂宽度约 0.5mm~1mm。随着下层流动量增加，受两侧边界阻力影响，流动前沿中部开始突出，形成弧形面，并且逐渐超出模型出口边界，到达倾斜的泄流板上；脆性上层中的断裂由出口边界向内部逐渐扩展，数量增加，宽度变大，组成了地堑-地垒系统。地堑-地垒的形态，可分为两种类型，其一是断裂带由一系列密集的小型分叉断裂或斜列断裂组成，把断裂之间的块体切成菱形或断续的长条形，单条断裂规模小，宽 0.5mm~2mm，间距 3mm~5mm，这些小断裂通过分岔、合并，组成复杂的地堑~地垒系统（图 3A1 和 A2）；其二由相对平直的近平行的断裂带组成，单条断裂基本贯穿整个模型，在模型两边断裂稍向伸展方向弯曲，断裂宽约 1mm~3mm，间距 5mm~8mm（图 3B）。随着伸展断裂张开，在断裂部位有不同程

度的被动上隆。

2.2.2 过渡区构造变形特征

在过渡区域，显著的特点是出现“成拱”现象。随着下层流动距离增加，两侧边界阻力影响加剧，流动前沿形成抛物线状锋面。在变形发展到一定程度，模型中部出现“成拱”现象，表现为断裂带中段向“高原”一侧突出，两侧向伸展边界一侧弯曲，形成拱形断裂（图 3）。拱的曲率与延性层粘度有关，粘度相对较小时，模型两侧接触边界阻力小，模型中部拱形曲率小。

2.2.3 挤压区的构造变形特征

在成拱带外侧与“高原”挤压前沿之间的区域构成了挤压区。本区构造类型比较复杂，主要发育有四种类型：伸展断裂、斜列状走滑断裂、挤压褶皱以及褶皱轴部伸展断裂等，这些构造类型与成拱带的规模、高原挤压程度、泄流伸展程度等因素有关。伸展断裂是成拱作用向挤压区的延续，随着伸展作用加强，伸展断裂宽度增加，而且在主要断裂之间逐渐形成新的小规模断裂（图 3A1 和 A2）。由于“高原”两侧不均匀压缩，产生斜列走滑断裂，该断裂与模拟两侧边界交角约 45° ，与伸展断裂的方向上截然不同（图 3B）。在“高原”挤压作用下，靠近“高原”的区域发生褶皱，随着褶皱加强，其轴部出现拉张，形成平行于挤压方向的伸展断裂（图 3B）。

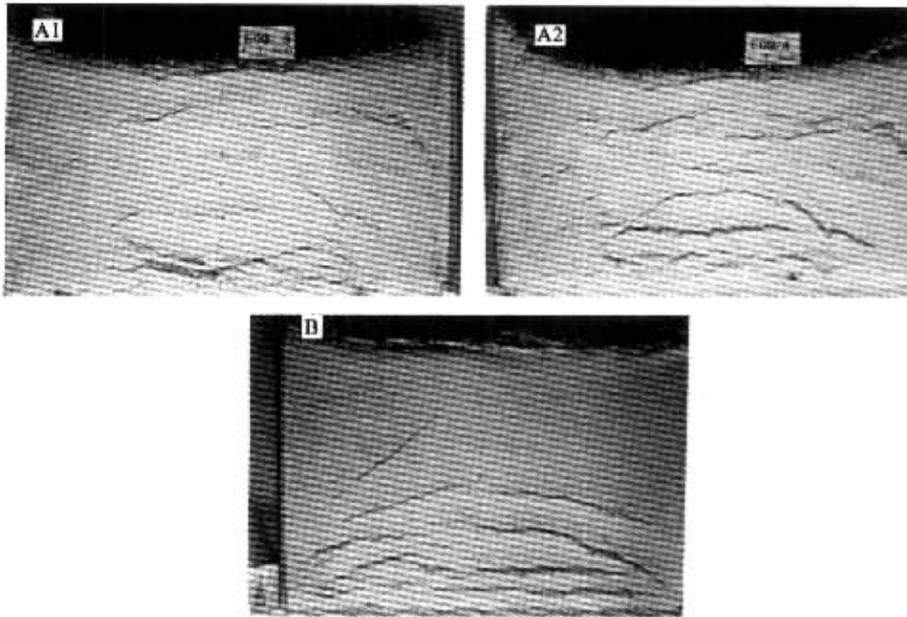


图 3 泄流 ~ 挤压模型中的伸展构造

Fig.3 The extensional structures of out flow-compression models

A 模型 E09：伸展区形成分叉断裂，过渡区出现成拱现象，挤压区靠近成拱外侧出现伸展断裂，A1 和 A2 的时间分别是 6h 和 10.5h；B 模型 E08：伸展区发育平直的伸展断裂，过渡区形成曲率比较小的拱形断裂，挤压区出现走滑断裂、褶皱等，B 的时间为 3.5h

从模型纵轴线上设置的标志点的变化情况来看（图 4），模型不同时期的累计变形量表明，主要变形量发生在泄流边界一侧和“高原”挤压一侧，模型中间部分相对较小，并且随着下层流动，模型靠近“泄流”边界的点逐渐流出模型边界；沿模型纵轴线应变量并非随流动距离而增大，而是伸长与压缩或不变形点相间出现，即使在伸展区也有局部挤压，在挤压区也有局部伸

展。这种现象与成拱作用有关，拱的出现改变了拱内外的变形情况，因拱的压缩性质，引起局部压缩，成拱作用越强，伸展与压缩相间现象越明显。另外，对比模型中的断裂与标志点变化曲线，发现模型变形量主要集中在断裂发育的部位，而断裂之间块体的变形量基本可以忽略不计。这一结果说明，在脆性层中形成断裂以后，其强度基本等于零，不能继续传递拉伸应力，延性层持续流动使断裂之间的块体逐渐被分离，也就是说脆性层自身不能伸展，延性层流动控制了伸展构造变形。

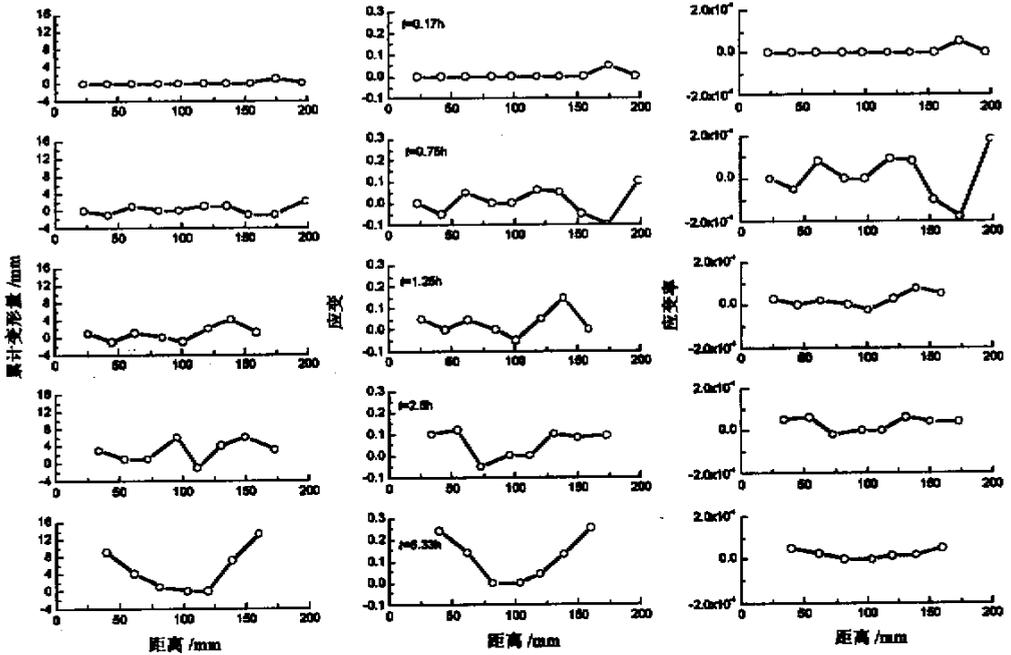


图 4 模型 E08 伸展模型的变形量、应变量与应变率随距离和时间的变化

Fig.4 The variations amount of deformation quantity , strain , strain rate with distance , time in extensional model E08

图中正值为伸展，负值为压缩

此外，在伸展过程中，脆性层因拉伸减薄或断裂，在重力均衡作用下，延性层被动上隆，隆起高度与变形量大小、延性层粘度、脆性层厚度等有关。隆起带具弧形上凸剖面，两侧坡面对称状况在模型不同部位有所不同：靠近伸展前缘部分，在伸展方向一侧坡度较缓，另一侧比较陡，表现出不对称的特点；在模型中部，部分隆起带两侧基本对称。

3 结论

本文以岩石圈多层构造为基础，以下地壳和岩石圈地幔塑性流动牵引和控制上地壳拉伸伸展为出发点，设计了脆延性双层模型，在充分考虑相似性的条件下，进行了伸展构造的模拟实验，与前人采用胶皮拉伸伸展的实验相比，在思路 and 实验方法上有所改进。模拟结果表明，延性层流动前锋呈抛物线形，其流动速度比脆性层运动速度大，对脆性层具有牵引作用。在伸展模型中通过“高原”挤压和“泄流”边界流动牵引和控制作用，模型构造变形出现分区，在伸展区形成

“地堑-地垒”系统，在过渡区出现“成拱”现象，在挤压区发育有伸展断裂、斜列状走滑断裂、挤压褶皱以及褶皱轴部伸展断裂等，在脆性层断裂的部位出现延性层的被动上隆。通过模型表面标志点位移得出，模型脆性层变形量主要集中在断裂发育的部位，而断裂之间块体的变形量基本可以忽略不计，即脆性层形成断裂以后，其强度基本等于零，不能继续传递拉伸应力，自身不能伸展，延性层流动控制了脆性层伸展构造变形。

参 考 文 献

- [1] Gans P B. An open-system, two-layer crustal stretching model for the eastern great basin [J]. *Tectonics*, 1987, 6 (1): 1 ~ 12.
- [2] Block L, Royden L H. Core complex geometries and regional scale flow in the lower crust [J]. *Tectonics*, 1990, 9 (4): 557 ~ 567.
- [3] Bird. Lateral extrusion of lower crust from high topography, in the isostatic limit [J]. *J. G. R.*, 1991, 96 (B6): 10275 ~ 10286.
- [4] Kruse S, McNutt M, Morgan P J, et al. Lithospheric extension near Lake Mead, Nevada: a model for ductile flow in the lower crust [J]. *J. G. R.*, 1991, 96 (B3): 4435 ~ 4456.
- [5] 马昌前. 莫霍面、下地壳与岩浆作用 [J]. *地学前缘*, 1998, 5 (4): 201 ~ 209.
- [6] 王绳祖. 大陆动力学与多级孕震结构构造体系 [A]. *地震监测预报的新思路和新方法* [C]. 北京:地震出版社, 1997.
- [7] 周永胜. 岩石圈塑性流动与大陆板内构造变形研究进展评述 [J]. *国际地震动态*, 1999, (2): 8 ~ 12.
- [8] 李建国, 周永胜, 王绳祖, 等. 岩石圈塑性流动网络与多层构造变形的物理模拟 [J]. *地震地质*, 1997, 19 (3): 248 ~ 257.
- [9] 李建国, 周永胜, 王绳祖. 中东亚大陆塑性流动网络控制下构造变形的物理模拟 [J]. *地震地质*, 1998, 20 (1): 63 ~ 72.
- [10] Buchaman P G, McClay K R. Sand box experiments of inverted listric and planar fault systems [J]. *Tectonophysics*, 1991, 188 : 97 ~ 115.
- [11] McClay K R, Scolt A D. Experimental models of hangingwall deformation in ramp-flat listric extensional fault systems [J]. *Tectonophysics*, 1991, 188 : 85 ~ 96.
- [12] Ishikawa M, Otsuki K. Effects of strain gradients on asymmetry of experimental normal fault systems [J]. *Jou. of Struct. Geo*, 1995, 17 (7): 1047 ~ 1053.
- [13] Sherman S I. Faulting in zones of lithospheric extension: Quantitative analysis of natural and experimental data [J]. *Pageoph*, 1996, 146 (3/4): .
- [14] Allemand B. Width of continental rifts and rheological layering of the lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1991, 188 : 63 ~ 69.
- [15] Mandal N, Chattopadhyay A. Modes of reverse reactivation of domino-type normal faults: experimental and theoretical approach [J]. *Jou. of Struct Geo*, 1995, 17 (8): 1151 ~ 1163.
- [16] Fossen R, Gabrielsen H. Experimental modeling of extensional fault systems by use of plaster [J]. *Jour of Struct Geo*, 1996, 18 (5): 673 ~ 687.
- [17] Davy P H, Cobbold P R. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1991, 188 : 1 ~ 25.
- [18] 周永胜, 王绳祖, 李建国, 等. 塑化松香: 岩石圈构造变形物理模拟实验理想的塑性材料 [J]. *世界地质*, 2000, 19 (4): 313 ~ 319.
- [19] 周永胜, 李建国, 王绳祖. 用物理模拟研究地幔上隆与大陆裂陷伸展 [J]. *地质力学学报*, 2000, 6 (1): 22 ~ 32.
- [20] 王绳祖. 岩石圈下层塑性流动与板缘驱动力远程传递 [J]. *长春科技大学学报*, 1999, (1): 1 ~ 8.
- [21] Turcotte D L, Schubert G. *Geodynamics, Applications of Continuum Physics to Geological Problems* [C]. USA, 1982.

PHYSICAL EXPERIMENTS ON CONTINENT EXTENSIONAL STRUCTURES

ZHOU Yong-sheng , LI Jian-guo , WANG Sheng-zu , ZHANG Liu
(*Institute of Geology , Laboratory of Tectonophysics , CSB , Beijing , 100029 , China*)

Abstract : According to the theory that plastic flow of the lower layer (including lower crust and upper mantle lithosphere) controls upper layer (upper crust) deformation in the multi-layer lithosphere , the paper studies the physical experiments of extensional structures adopted ductile/brittle double-layers model. The experiment results show that the lower ductile layer whose flow speed is larger than that of upper brittle layer. Controlled by compressed and free flow , the areas of model deformation can be divided into three parts : extensional region , transition region and compressive region. Among all , the main part is extensional region where “ graben-horst ” is characterized by major extensional structures. The displacements of mark points on upper face of models show that the deformation quantities of upper brittle layer are focus on the parts of faults. In addition , the passive uplifting of lower ductile layer is found at faults region of upper brittle layer in our models.

Key words : plastic flow ; extensional structure ; physical models