

文章编号: 1006-6616 (2003) 01-0001-13

用物理模拟实验研究走滑断裂和拉分盆地

周永胜, 李建国, 王绳祖

(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, 在考虑模型相似性的条件下, 通过延性层流动驱动脆性层进行走滑断裂和拉分盆地模拟实验。实验结果表明, 在左行走滑阶段发育两条“S”型左行右阶断裂带; 在右行走滑改造阶段, 早期左行右阶断裂带被改造为“Z”型右行右阶断裂带。走滑断裂发育过程中共有三种类型的拉张伸展: (1) “S”型破裂逐渐伸展, 形成多个菱形盆地; (2) 几个相邻的斜列“S”型断裂在剪切作用下端部被错断连通, 形成“地堑—地垒”构造; (3) 在右行走滑阶段, 沿右行右阶断裂拉张形成拉分盆地。先存的上隆拱张断裂限制了走滑断裂的位置和方向。脆性层强度对走滑断裂的形成和发展具有约束作用, 脆性层结构对脆延性的层间耦合作用和走滑断裂特征具有显著影响。

关键词: 走滑断裂; 拉分盆地; 塑性流动; 物理模拟

中图分类号: P542.2, P554

文献标识码: A

0 引言

许多大陆裂陷盆地形成于走滑环境^[1], 如山西地堑^[2,3]。与拉张裂陷盆地相比, 走滑型盆地同时受走滑断层和正断层控制, 其形成演化历史比较复杂^[4~8]。物理模拟实验是研究走滑型盆地的有效方法之一。有关走滑断裂和拉分伸展的模拟实验比较多^[9~19], 这些模拟实验无论是脆性单层还是脆延性双层, 走滑驱动力主要来源于模型底部活动板的相对走滑运动, 走滑带范围被底部活动板的位置限定, 即使有延性层, 也仅起到调节和缓冲作用^[20]。众多研究表明, 岩石圈下层塑性流动是大陆板内构造变形的主要控制因素^[21,22]。以多层构造和下层塑性流动为驱动进行的模拟实验, 如挤压褶皱^[23]、塑性流动网络^[24,25]、地幔上隆和裂陷伸展^[26], 为模拟走滑断裂和拉分盆地提供了新的思路。本文利用延性层流动作为走滑驱动力, 代替模型底部活动板, 通过对走滑断裂形成与改造的研究, 讨论走滑型盆地的形成与演化。

收稿日期: 2001-04-05

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: 2002B0023

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

本模型主要强调延性下层流动对脆性上层的牵引和控制作用，因此，沿用了李建国等^[24,25]和周永胜等^[26]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^[27]。在模型中，模型底板为完整玻璃，两侧固定，两端各设置两个玻璃槽，充填延性物质后即成为“高原”，通过两个对角方向“高原”的流动力驱动延性层实现走滑（图1）。走滑带的位置不受底板限制，完全由“高原”驱动力的大小和方向决定。为了保证两端驱动力趋于均衡，要求两个“高原”大小相等，这样走滑带基本位于模型中部，减小了边界影响。模型相似性参照李建国等^[24,25]和周永胜等^[26]，得出如下相似参数（表1）。下面各模型中有关符合的物理含义为： L 模型长度、 W 模型宽度、 h_b 脆性层厚度、 h_d 延性层厚度、 C_0 脆性层内聚强度、 η 延性层粘度、 T 温度、 q 空气相对湿度、 τ 时间。

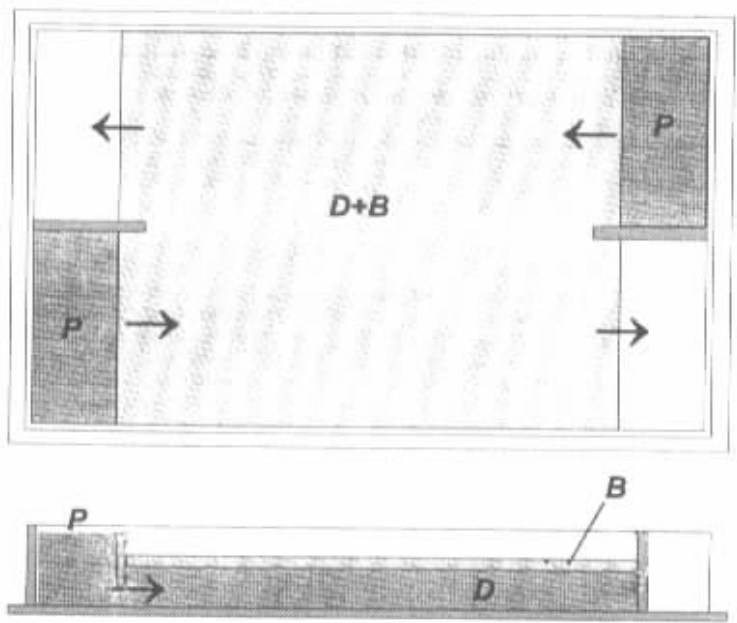


图1 走滑断裂模拟实验装置图

Fig.1 Experimental apparatus on models of strike-slip fault

$D+B$ 模型主体中的延性层和脆性层； P 驱动延性层流动的“高原”；箭头为延性层流动方向
上：平面图；下：剖面图

表1 模型相似参数*

Table 1 The similar parameters of models

粘度/Pa.s 和配比/P/R	线长比	时间相似比	时间对比/Ma/h	速度相似比	脆性层强度比
1.64×10^3 (1/3.5) ~ 6.30×10^4 (1/5)	5×10^6	3.89×10^{10} ~ 1.01×10^9	4.44 ~ 0.12	1.29×10^{-4} ~ 4.95×10^{-3}	2.37×10^7

注：时间对比 Ma/h 表示模型中 1 小时相当于实际地质时间数/Ma。

P/R 表示松节油/松香。

2 走滑断裂模拟实验与结果分析

2.1 左行走滑断裂特征及其应力场

2.1.1 左行走滑断裂特征

在左行走滑阶段,通过模型对角“高原 A、B”驱动延性层向相反方向流动,牵引脆性层形成走滑断裂(图 2a)。走滑断裂 F_1 首先出现于“高原 A”前面,从模型边界向内部逐渐扩展,断裂由不连续的右斜列“S”型小断裂组成。随着延性层流动,在“高原 B”前方出现另一条走滑断裂 F_2 ,该断裂从“高原 B”前呈右斜列型式断续延伸到模型中部,与早期走滑断裂 F_1 构成两条大的斜列断裂带,在两条断裂带之间是相对稳定的“岩桥”。其中,走滑断裂 F_1 发育成由多条“S”型断裂组成的左行右阶复杂断裂,在靠近“高原 A”的部分,“S”型断裂中部拉张变宽,局部出露延性层,两端窄,形成小型菱形“盆地”;断裂带的其他部分由多个“S”型斜列断裂复合成辫状断裂,局部地段出现两个“S”型断裂围成的菱形块体,单个“S”型断裂内部由更小的斜列裂纹组成(图 2b)。相比之下,后形成的断裂 F_2 要简单的多,它基本上由单条右斜列断裂组成。根据模型表面标志点运动得出的位移场表明,主走滑带两侧位移方向相反,把原来处于同一直线上的标志点显著地错位(图 2c)。

在“高原”持续驱动下,断裂 F_1 出现拉张伸展,宽度增加。在靠近“高原 A”的部分,早期几个小菱形“盆地”进一步拉开,彼此连通,形成“纺锤形”盆地,并且有“延性层—地幔”被动上隆;断裂 F_1 的其他部分,早期“S”型斜列断裂的端部被错断,首尾相连,形成两条近平行的走滑断裂及其夹在其间的条带状稳定块体,构成“地堑—地垒”的构造格局,“S”型断裂中间弯曲段把这些“地堑—地垒”分割(图 3a、b)。原来斜列的断裂 F_2 贯通,与 F_1 断裂构成左行右阶断裂带。此外,在靠近“高原 B”一侧形成压性断裂 F_3 和褶皱(图 3b),其走向基本平行于“高原 B”的挤压前沿,把断裂 F_1 的末端与 F_2 连接起来。从 F_1 断裂中部延伸出另一条斜列断裂 F_4 ,与断裂 F_2 端部相连(图 3a、b)。在四条断裂围成的大菱形块体内,原来相对稳定的岩桥逐渐破碎,形成一系列与 F_1 、 F_2 断裂小角度相交的张裂,它基本平行于“S”型断裂的两个拉张端部,它们是在挤压作用下形成的纵向张裂。与主走滑断裂带相比,张裂宽度小,而且基本平直,斜列特征不明显(图 3a、b)。

2.1.2 左行走滑断裂带的应力场分析

从断裂带的发育过程和特征表明,左行走滑断裂带由多个斜列的“S”型断裂组成。分析这些小“S”型断裂的微细结构发现,在“S”型断裂的中间转变部位是剪切,两个端部都是拉张或张剪(图 3b),它们与岩桥部位的微小纵向张裂平行,该方向就是主挤压方向。对于这种构造形式的成因有两种理论解释:其一是剪切带首先从端部拉张开始,形成平行与最大主应力的张裂纹,然后在剪应力作用下形成剪切裂纹,把张裂纹连接起来,形成剪切带^[28];其二是在剪应力作用下首先形成剪切裂纹,在剪切破坏的同时,剪切破裂的两端拉张撕裂而成张性。根据这些剪切、拉张断裂的展布规律,结合“高原”挤压方向和标志点的位移场,确定出最大主应力平行于张裂,最小主应力在其垂直方向(图 3b)。

2.2 右行反向走滑过程中断裂的继承、改造及其应力场

2.2.1 右行反向走滑过程中断裂的继承与改造特征

在上述左行走滑断裂的基础上,改变“高原”驱动方向,使左行走滑应力场转变为右行

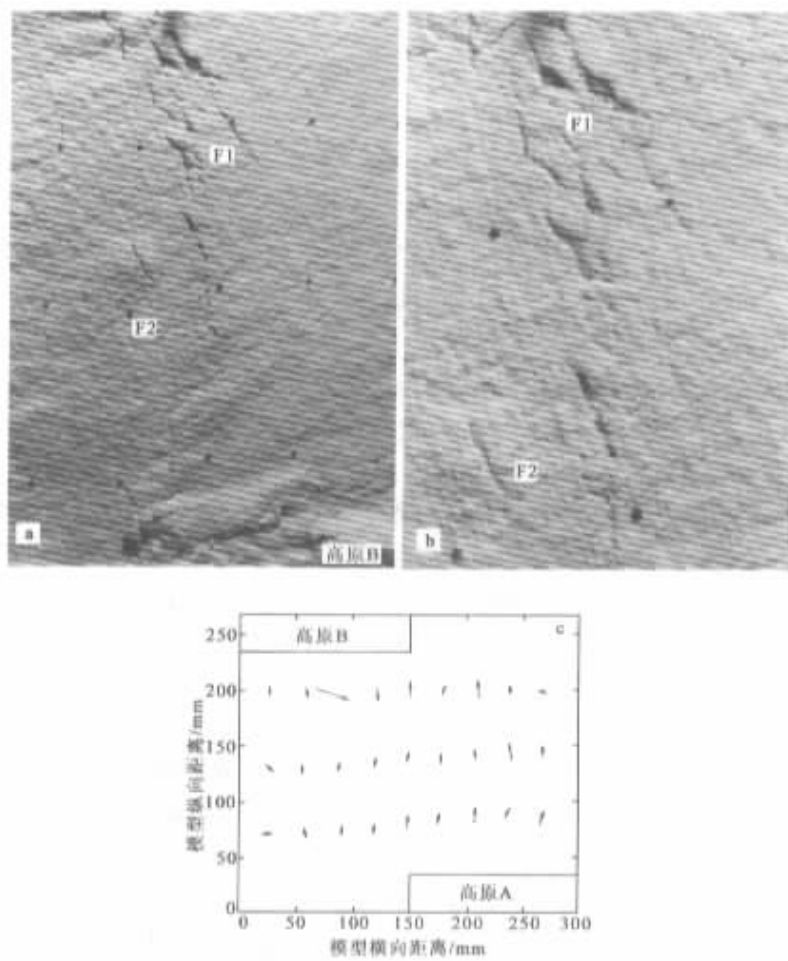


图2 左行走滑断裂带的初期特征及其位移场

Fig.2 The early-stage fault character and displacement field of sinistral strike-slip fault zones

a. 模型驱动方向和早期走滑断裂展布特征; b. F1 断裂的局部放大; c. 左行走滑断裂的位移场

模型 E11 $L = 300\text{mm}$, $W = 270\text{mm}$, $h_b = 3\text{mm}$, $h_d = 10\text{mm}$, $q = 66\%$,

$C_0 = 33.2\text{Pa}$, $\eta = 6.46 \times 10^3\text{Pa} \cdot \text{s}$ ($P/R = 1:4$), $T = 20^\circ\text{C}$, $t = 11.17\text{h}$

走滑应力场, 原来左行走滑断裂发生了显著的变化 (图 4a): 图 3 中的岩桥部位的微小张裂以及 F_4 基本闭合; 断裂 F_1 中靠近“高原 A”的菱形“盆地”变窄, 由贯通的“S”型斜列断裂组成的“地堑—地垒”系消失, “S”型断裂两端受压变窄, 中段开始闭合, 成为断续的右行断裂; 在相邻的“S”型断裂的“小岩桥”部位, 新形成与左行走滑阶段最大主应力方向垂直的拉张断裂 (图 4a); 图 3 中连接两条走滑断裂的逆断层 F_3 转变为拉张断层; 断裂 F_2 中间段开始闭合, 形成断续的压剪破裂, 靠近模型边部段被改造成右行走滑拉张断裂, 并与图 3 中的 F_3 连通构成断裂 F_5 (图 4a)。根据这些断裂活动特征, 确定的应力状态见图 4a。随着右行反向走滑作用的加强, 模型表面标志点的位移场清楚地显示出模型两侧反向位移的特点 (图 4b), 而且早期左行走滑阶段被错开的标志点的位错距离逐渐缩小。

在右行反向走滑的持续作用下，图 4 中的断裂 F_2 大部分闭合， F_5 逐渐与断裂 F_1 连通构成“Z”型右行右阶断裂（图 5a、b），这种“Z”型断裂组合构成了典型的同行阶断裂。在断裂 F_1 中段，原来走滑构造内部的次级张剪断裂消失，“S”型断裂的中部完全闭合，两端虽然被继承下来，但与新形成的拉张断裂连接，被改造成“Z”型右斜列断裂带（图 5a、b）；图 2 中断裂 F_1 靠近“高原 A”一侧斜列的菱形破裂转变为长条形，出露的延性层和隆起形态也随之发生变化。在后续的右行改造作用下，断裂 F_1 中“Z”型断裂的两端逐渐被剪切错断，形成两条近平行的右行断裂带，并与断裂 F_5 连通（图 5a、b）。在右行走滑同时，新形成平行于“Z”型断裂中部的张裂，它们与挤压方向基本一致，这些张裂把 F_1 断裂带切割成若干段。这样，整个断裂带就由两条平行的弧形断裂及其内部的条带状块体组成一个“地堑—地垒”系统，中间被平行于挤压方向的张裂分割（图 5a、b）。

2.2.2 右行反向走滑阶段断裂的继承、改造与应力场

根据上述右行断裂特征，把反向走滑断裂的继承与改造概括为以

下几点：早期左行走滑形成的左行右阶断裂在右行反向走滑过程中消失，被改造成由弧形右行右阶断裂组成的“地堑—地垒”系统；左行阶段的逆断层转化为拉张正断层；在左行走滑阶段，“S”型破裂中部剪切，两端拉张（图 6a），在右行反向走滑过程中，“S”型断裂中间转变部位受压闭合（图 6b），两端被改造成右行剪切，并且通过新形成的张裂把相邻的这些断裂连接起来，构成“Z”型断裂组合（图 6c）；早期平行于挤压方向的纵向张裂闭合，新形成一系列与“Z”型断裂中段平行的张裂。由于断裂的这种转变，使早期沿“S”型断裂形成的菱形盆地闭合，取而代之的是右行右阶的“Z”型断裂之间形成的拉分盆地。根据反向走滑阶段断裂性质和组合特征，“Z”型断裂的两端是右行走滑断裂，中段为拉张断裂，而且有大量同方向的拉张断裂。结合反向走滑阶段的位移场特征，判断最大主应力基本平行于

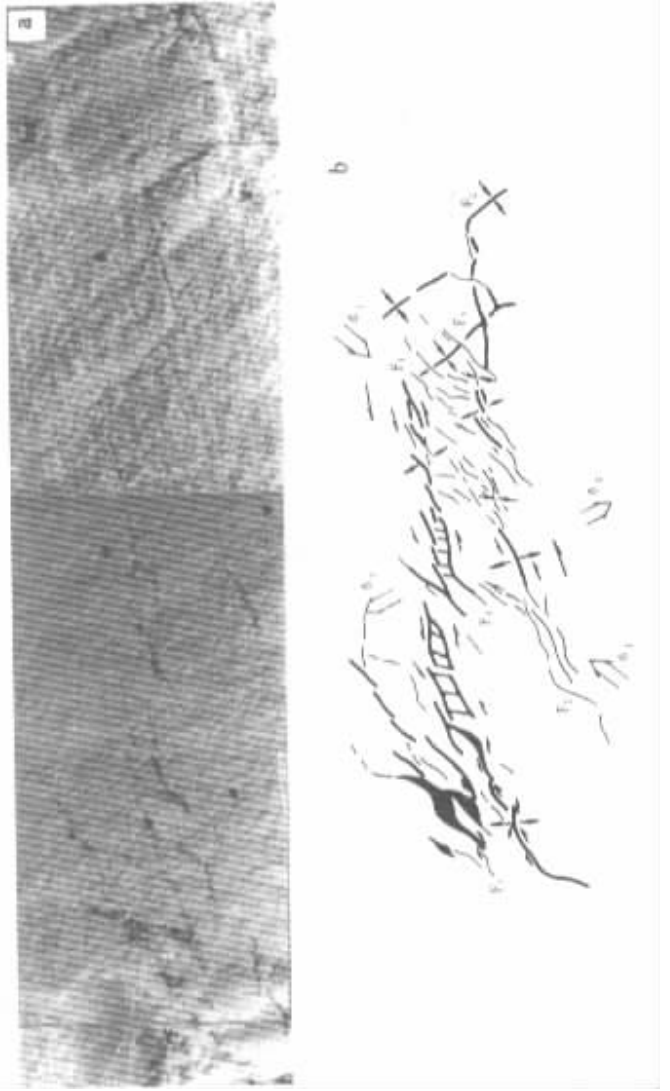


图 3 左行走滑断裂带晚期特征及应力场

Fig.3 The final-stage fault character and stress field of sinistral strike-slip fault zones

a. 走滑断裂带特征；b. 走滑断裂组合方式及应力场（ $t = 96.5h$ ）

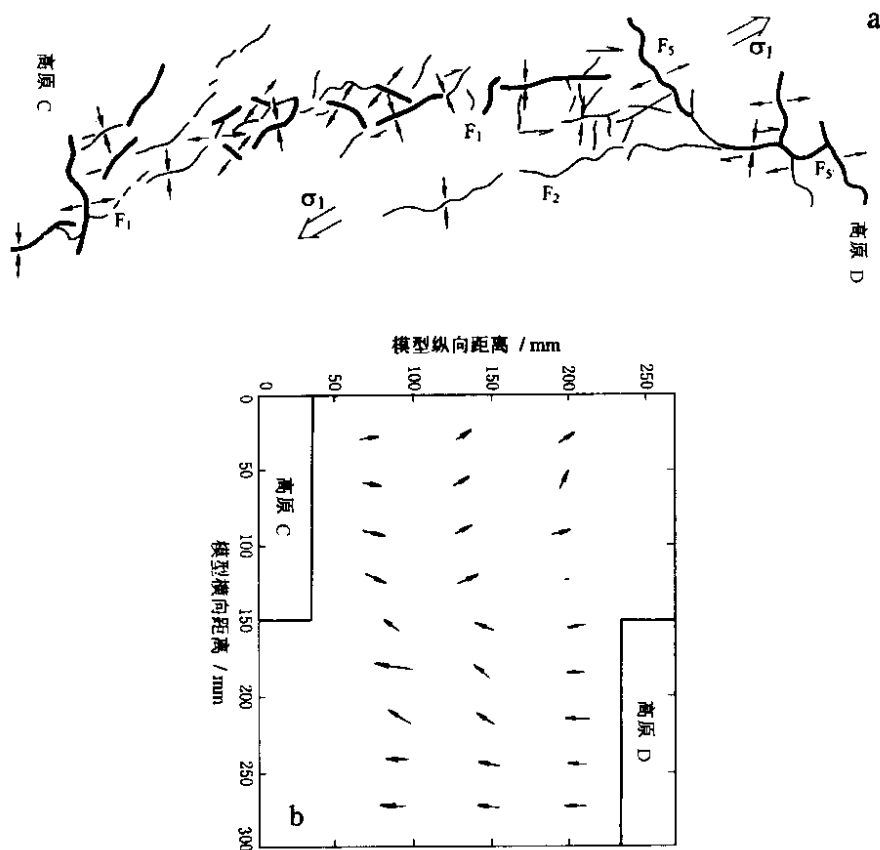


图4 右行反向走滑初期的断裂特征、应力场及位移场

Fig.4 The early-stage fault character, stress field and Displacement field of dextral strike-slip fault zones

a. 右行反向走滑初期的断裂活动性质与应力场；b. 模型表面标志点的位移场

“Z”型断裂的中段(图5b)。

2.3 走滑断裂形成过程中的拉张伸展及拉分盆地成因讨论

在本模型实验中,共观察到三种类型的拉张伸展。其中,左行走滑阶段,主要存在两种类型的拉张伸展。其一是“S”型破裂逐渐拉开、伸展,形成多个菱形盆地,局部还出露延性层,如剪切带 F_1 靠近“高原A”的区域(图3,图7a)。前人^[7,8]在砂箱模型实验中也观测到类似的伸展现象,提出拉分盆地的形成机制是多个菱形剪切破裂逐渐聚集,最终形成大型盆地。其二是几个相邻的斜列“S”型断裂在持续的剪切作用下端部被错断,首尾相连,形成“地堑—地垒”的构造格局(图3,图7b)。Aydin等^[29]把这种相邻的小型走滑盆地聚集在一起形成的大型盆地作为拉分盆地的成因。这两种拉张伸展形成的盆地都是菱形。在右行反向走滑阶段,“S”型断裂被改造成“Z”型断裂,组成同行阶断裂,沿同行阶断裂拉张形成拉分盆地(图5,图7c)。

根据模型标志点的位移场计算得出的两个走滑阶段伸展量等值线图(图8)表明,拉张伸展主要集中在模型中部的带状区域内,但两期最大伸展的位置不完全一致,这与走滑断裂带的位置和走滑方向相当。此外,“高原”前缘受到强烈挤压,纵向张裂发育,也形成比较

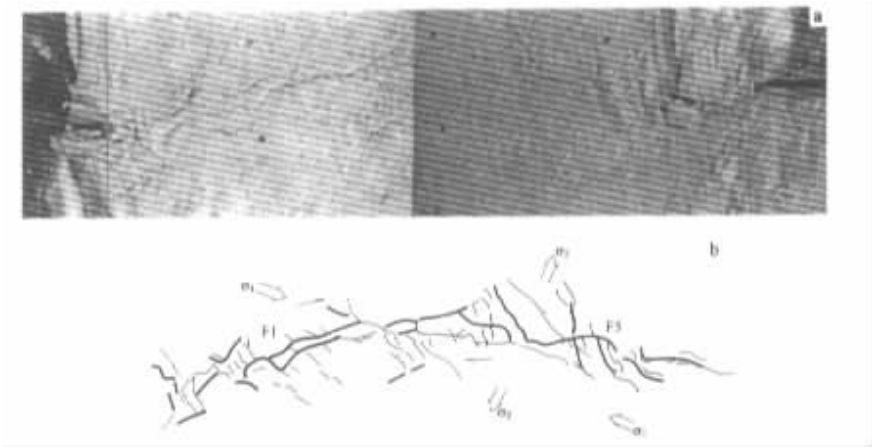


图 5 右行反向走滑晚期断裂特征与应力状态

Fig.5 The final-stage fault character and stress field of dextral strike-slip fault zones

a. 右行走滑断裂特征；b. 右行右阶断裂组合及应力场 (t = 128h)

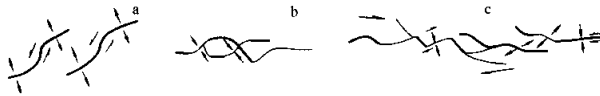


图 6 走滑断裂的继承与改造

Fig.6 The inheritance and reconstruction of strike-slip faults

a. 左行走滑阶段“S”型断裂两端拉张，中部剪切；b. 右行反向走滑阶段“S”型断裂中部闭合，两端被改造成右行剪切，相邻“S”型断裂的“岩桥”部位产生新的拉张断裂；c. 右行反向走滑使“S”型断裂被改造成“Z”型断裂

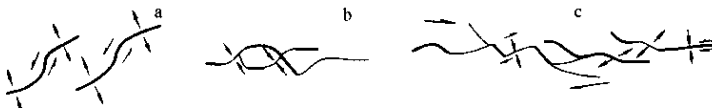


图 7 走滑断裂模型实验中的三种伸展盆地

Fig.7 Three-type extensional basins in strike-slip fault models

a. 左行走滑阶段“S”型断裂被拉张形成菱形“盆地”；b. 左行走滑阶段相邻“S”型断裂两端错断贯通，形成“地堑—地垒”型剪切伸展“盆地”；c. 右行反向走滑阶段，“S”型断裂被改造成“Z”型断裂，组成同行阶断裂，沿同行阶断裂拉张形成拉分盆地

大的拉张区域。

伸展量大小与走滑位移量相关，图 9 是走滑模型中早期左行走滑阶段剪切位错量与伸展量关系统计，从图中看出，伸展量随剪切量增大而增大，剪切量是伸展量的 4~5 倍，但伸展量达到一定程度时，随剪切量增加的趋势减小。

Mann 等^[7]把拉分盆地的形成机制概括为四种模型，其中有两种与模型中单向剪切阶段出现伸展型式类似，即沿“S”型断裂拉张形成的菱形“盆地”和相邻的“S”型断裂在剪切作用下贯通，形成“地堑—地垒”式盆地；另外两种拉分盆地主要是沿斜列走滑断裂的岩桥部位的拉分伸展。作者以为左行走滑阶段形成的菱形盆地不是真正意义上的拉分盆地，

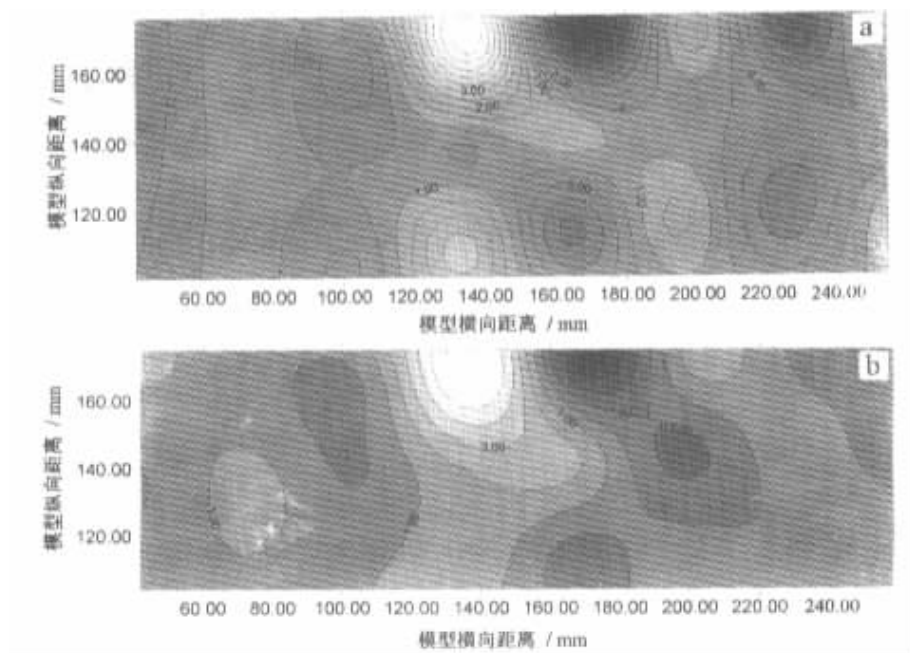


图 8 根据模型标志点计算出的伸展量等值线图

Fig.8 The extensional isoline calculated from signs of models

a. 左行走滑阶段伸展量等值线; b. 右行走滑阶段伸展量等值线

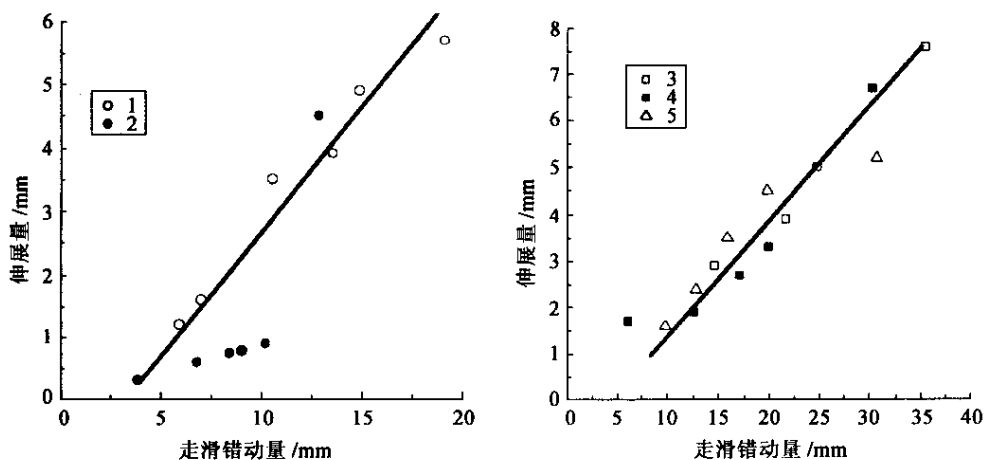


图 9 走滑位错量与伸展量关系统计图

Fig.9 The statistic plot between strike-slip displacements and extensional quantities

1. 模型 E11 (A 排标志点); 2. 模型 E11 (B 排标志点)

3. 模型 E44 (A 排标志点); 4. 模型 E44 (B 排标志点); 5. 模型 E44 (C 排标志点)

拉分盆地主要指发生在斜列断裂岩桥部位的拉张伸展盆地。上面实验表明,在单向走滑阶段,斜列断裂的运动性质与斜列状态相反,即异行阶(左行右阶),岩桥部位处于挤压状态,而不是拉分,只有在反向走滑过程中,断裂的运动性质与斜列状态相同,即同行阶(右行右

阶)。在其它模型实验^[5,10-14,18,19]中也发现类似的现象。如果在模型中直接设置同行阶断裂,不需要反向走滑,也能出现拉分伸展。因此,在实际地质中,拉分盆地的成因可能包含断裂的反向走滑过程,或者先存断裂为拉分盆地的发育奠定了基础。

3 先存断裂对走滑断裂和拉分盆地的影响

先存断裂对拉分盆地形成具有重要的影响,为了进一步研究早期存在的断裂对走滑断裂和拉分盆地的影响,把上隆伸展和走滑拉分模拟结合起来。

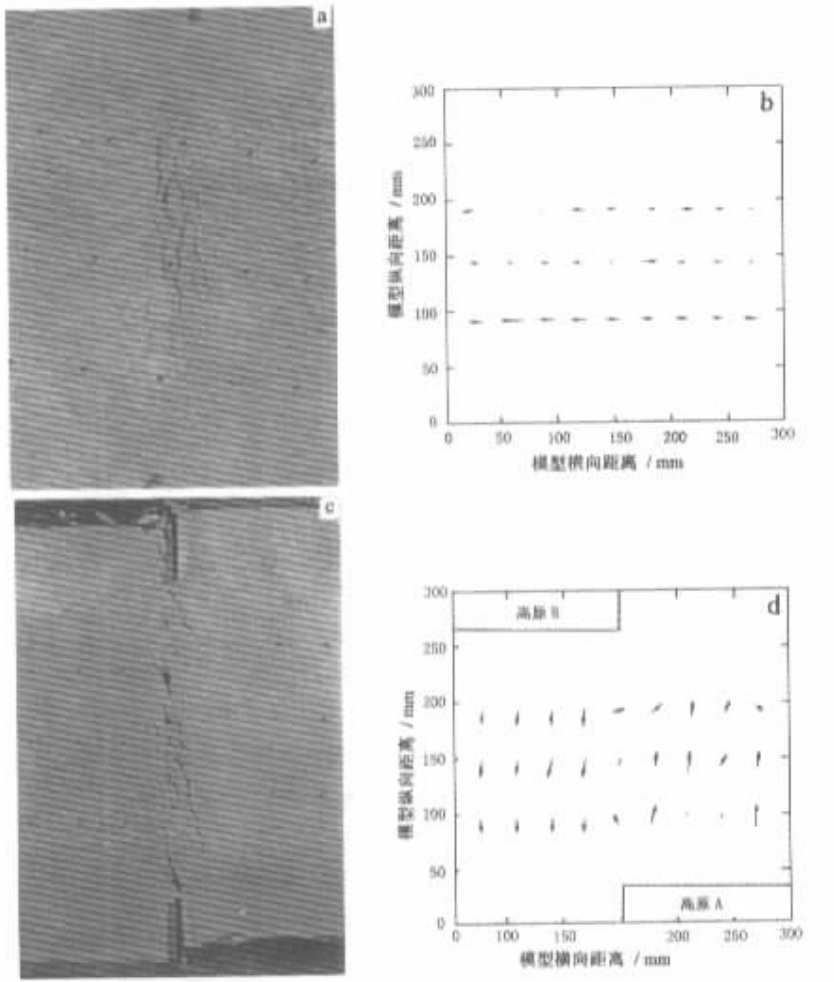


图 10 先存断裂对走滑断裂的影响

Fig. 10 The effect of existed fault to strike-slip faults

a. 上隆产生的断裂; b. 上隆阶段位移场; c. 左行走滑改造后的断裂; d. 左行走滑位移场

模型 E45 $L = 300\text{mm}$, $W = 300\text{mm}$, $h_b = 3\text{mm}$, $h_d = 10\text{mm}$, $q = 66\%$,

$C_0 = 33.2\text{Pa}$, $\eta = 3.09 \times 10^4 \text{Pa}\cdot\text{s}$ ($P/R = 1:5$), $T = 20^\circ\text{C}$, $t = 17.5\text{h}$

(1)“地幔”上隆阶段：在走滑模型基础上，通过模型中轴线设置的上隆水囊实现“地幔”上隆。注水后水囊缓慢隆起，脆性层开始出现拱张断裂。在上隆高度达到 3mm 时，拱张断裂遍布隆起带，主要断裂平行于模型纵轴线（图 10a）。模型表面标志点位移场清楚地反映出从中轴线向两侧运动的趋势（图 10b），体现了主动上隆使延性层从隆起中心向两侧分流的趋势。

(2)左行走滑改造阶段：在上隆拱张基础上叠加左行走滑，首先在模型两端新产生了左行右阶走滑断裂。而上隆阶段产生的与延性层流动方向大角度相交的次级断裂基本闭合，与延性层流动方向近平行的拱张断裂主体基本被继承，它们与新产生的走滑断裂连接，构成一条左行走滑断裂带，局部拉张形成“S”型小盆地。拱张断裂之间的长条形稳定块体转变为菱形，（图 10c）。显然，上隆特征基本消失，被完全改造为走滑断裂。这种断裂展布特征表明先前存在的上隆拱张断裂基本限定了走滑断裂的位置，走滑断裂以继承和改造先存断裂为主，新产生的断裂为辅，这与上一节中出现的两条左行走滑断裂（模型 E11）有很大区别。模型表面标志点位移场清楚地反映出左行走滑特征（图 10d），但位于模型中轴线上的三个标志点位移量比较小，显示出由于上隆拱张断裂的影响，走滑作用主要沿先存断裂活动，中间保留了一个相对稳定的区域。

4 脆性层对走滑断裂的影响

4.1 脆性层强度对走滑构造的影响

上文中模型有关参数是以表 1 给出的相似性为依据而选取，其中脆性层的强度为 33.2Pa。本节通过增加脆性层强度（取 45.7Pa）来研究脆性层对走滑构造的影响。模型主要结构与上文中的模型一致，仍然采用左行走滑驱动力。在“高原”推挤下，首先在“高原”前面出现挤压褶皱，随后产生两条走向大致平行的左行右阶断裂带，中间有一个稳定的“岩桥”区。每条断裂带主要由两条右斜列“S”型断裂组成，“S”型断裂的两端与模型中轴线近平行，“S”型断裂的中段与模型中轴线有近 30°的交角（图 11）。在持续的走滑作用下，“S”型断裂中段拉开，局部出露延性层；在挤压褶皱前沿新产生两条挤压断裂，把两条走滑断裂连接起来，构成菱形块体（图 11）。

上述模型构造形迹表明，走滑构造的基本格局与 2.1 节中模型 E11 类似，但次级构造有明显差别，其中断裂带中的“S”型构造表现的最为显著。每条断裂结构简单，基本上是由两个大的“S”型断裂组成，缺少模型 E11 中出现的若干小“S”断裂。这主要是因为脆性层强度偏大，导致应力集中，仅在有限的部位产生破裂。脆性层破裂后，在破裂部位其强度变的极小，容易被进一步拉张，这样阻碍了其它部位破裂的产生。由于脆性层强度偏大，形成走滑断裂需要强大的驱动力，致使延性层褶皱。

4.2 脆性层结构对走滑断裂的影响

本模型脆性层采用双层结构，下层强度低（15.7Pa），上层强度高（45.7Pa），主要研究脆性层层间耦合与解耦作用及其对走滑构造的影响。在左行走滑驱动下，模型主要出现三种构造形迹（图 12）：①“高原”前面通过褶皱和逆冲断裂形成隆起带；②模型中部产生一条大的断裂带，该断裂带由多条次级断裂组成，这些次级断裂分两种类型，平行于“高原”挤压方向的断裂呈剪切或张剪性质，垂直于挤压方向的断裂呈压剪或压性；③断裂带中段的压性断裂把主断裂分成两个区域，一侧由次级张剪和压剪断裂把脆性层切成若干菱形块体，这

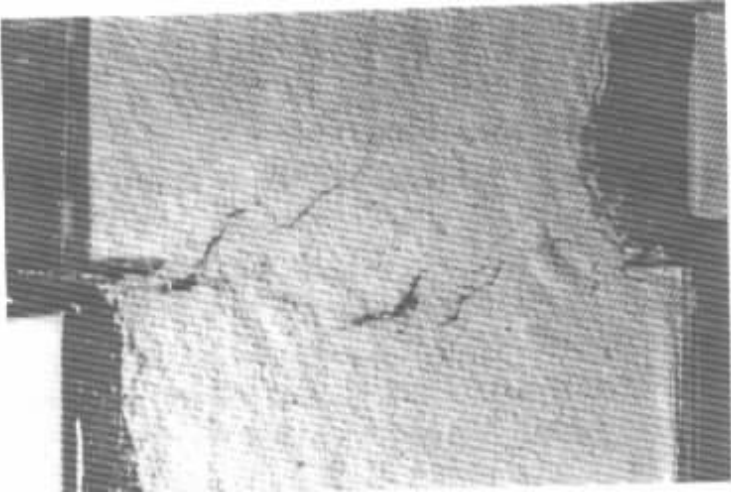


图 11 脆性层强度对走滑断裂的影响

Fig. 11 The effect of strength in brittle-layer to strike-slip faults

模型 E44 $L = 300\text{mm}$, $W = 270\text{mm}$, $h_b = 3\text{mm}$, $h_d = 9\text{mm}$, $q = 66\%$,

$C_0 = 45.7\text{Pa}$, $\eta = 3.09 \times 10^4 \text{Pa}\cdot\text{s}$ ($P/R = 1:5$), $T = 22^\circ\text{C}$, $t = 66.8\text{h}$

些块体上层与下层解耦脱开，上层沿挤压方向仰冲；另一侧由张剪或拉张断裂把脆性层切成条带状，这些条带上下层耦合在一起，局部发生旋转。这些特征与上文各模型构造形迹截然不同，表明脆性层结构对走滑构造有显著影响，特别是上下层的耦合程度和解耦过程直接控制了断裂之间块体的运动方式。

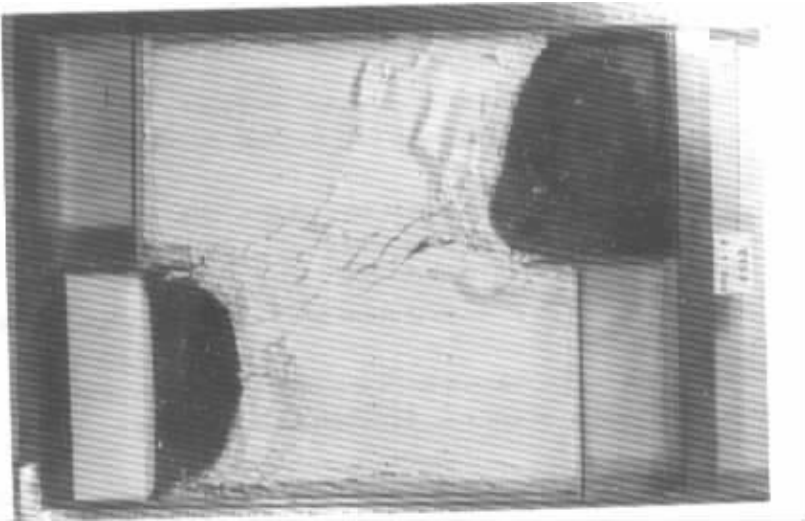


图 12 脆性层结构对走滑断裂的影响

Fig. 12 The effect of structure in brittle-layer to strike-slip faults

模型 E13 $L = 300\text{mm}$, $W = 270\text{mm}$, $h_b = 4\text{mm}$, $h_d = 10\text{mm}$, $q = 66\%$,

$C_{0\text{上}} = 45.7\text{Pa}$, $C_{0\text{下}} = 15.7\text{Pa}$, $\eta = 6.46 \times 10^3 \text{Pa}\cdot\text{s}$ ($P/R = 1:4$)

5 结论

本文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,在考虑模型相似性的条件下,通过延性层流动驱动脆性层进行走滑断裂和拉分盆地模拟实验。实验结果表明,在左行走滑阶段形成两条左行右阶断裂带,断裂内部由若干“S”型小断裂组成;在右行反向走滑改造过程中,早期左行右阶断裂带被改造为右行右阶断裂带,原来“S”型断裂两端闭合,中段被继承,并改造为“Z”断裂。根据模型表面标志点的位移场和断裂走滑特征确定出走滑各阶段的应力场为最大主应力平行于拉张或张剪断裂。走滑断裂发育过程中共有三种类型的拉张伸展:①“S”型破裂逐渐伸展,形成多个菱形盆地;②几个相邻的斜列“S”型断裂在剪切作用下端部被错断连通,形成“地堑—地垒”构造;③在右行反向走滑阶段,沿同行阶(右行右阶)断裂拉张形成拉分盆地。先存的上隆拱张断裂限制了走滑断裂的位置和方向。脆性层强度对走滑断裂的形成和发展具有约束作用,脆性层结构对脆延性的层间耦合作用和走滑断裂特征具有显著影响。

参 考 文 献

- [1] 周永胜,王绳祖. 裂陷盆地成因研究现状综述与讨论 [J]. 地球物理学进展, 1999, 14 (3): 29 ~ 46.
- [2] Ye Hong. The Cenozoic tectonic evolution of the Great North China: twotypes of rifting and crustal necking in the Great North China and their tectonic implications [J]. Tectonophysics, 1987, 133 : 217 ~ 227.
- [3] Xu Xiwang, Ma Xingyuan. Geodynamics of the Shanxi rift system, China, in: Ziegler P A, ed. Geodynamics of Rifting, Volume I. Case History Studies on Rifts: Europe and Asia [J]. Tectonophysics, 1992, 208 : 325 ~ 340.
- [4] Biddle K T, Christie-Blick N (editors). Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation [J]. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. , Spec. Publ. , 1986, 37 : 386.
- [5] Christie-Blick N, Biddle K T. Deformation and basin formation along strike-slip faults. In: Biddle K T, Christie-Blick N, ed. Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation [J]. Soc. Econ. Paleontol. Mineral. Spec. Publ. , 1985, 37 : 1 ~ 34.
- [6] Sylvester A G. Strike-slip faults [J]. Geological Society of America Bulletin, 1988, 100 : 1666 ~ 1703.
- [7] Mann P, Hempton R, Bradley C. Development of pull-apart basins [J]. J. Geol. , 1983, 91 : 529 ~ 554.
- [8] Allen P A 著. 盆地分析—原理与应用 [M]. 陈全茂, 等译. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [9] Buchaman P G, McClay K R. Sand box experiments of inverted listric and planar fault systems [J]. Tectonophysics, 1991, 188 : 97 ~ 115.
- [10] Richard P, Krantz R W. Experiments on fault reactivation in strike-slip mode [J]. Tectonophysics, 1991, 188 : 117 ~ 131.
- [11] Richard P, Krantz R W. Experiments on simultaneous faulting and folding above a basement listric fault [J]. Tectonophysics, 1991, 188 : 133 ~ 141.
- [12] Tron V, Brun J. Experiments on oblique rifting in brittle-ductile systems [J]. Tectonophysics, 1991, 188 : 71 ~ 84.
- [13] Smith J V, Durney D W. Experimental formation of brittle structural assemblages in oblique divergence [J]. Tectonophysics, 1992, 216 : 235 ~ 253.
- [14] Schreurs G. Experiments on strike-slip faulting and block rotation [J]. Geology, 1994, 22 : 567 ~ 570.
- [15] Davison I. Fault slip evolution determined from crack-seal veins in pull-aparts and their implications for general slip models [J]. J. Struct. Geol. , 1995, 17 : 1025 ~ 1034.
- [16] McClay K, Dooley T. Analogue models of pull-apart basins [J]. Geology, 1995, 23 : 711 ~ 714.
- [17] An L, Sammis C G. Development of strike-slip faults: shear experiments in granular materials and clay using a new technique [J]. Jour. of Stru. Geol. , 1996, 18 (8): 1061 ~ 1077.

- [18] Basile C, Brun J P. Transtensional faulting patterns ranging from pull-apart basins to transform continental margins : an experimental investigation [J]. *J. Struct. Geol.*, 1999, 21 (1): 23 ~ 37.
- [19] Rahe B, Ferrill D A, Morris A P. Physical analog modeling of pull-apart basin evolution [J]. *Tectonophysics*, 1998, 285 : 21 ~ 40.
- [20] 周永胜. 岩石圈构造变形的物理模拟实验研究现状 [J]. *世界地质*, 1999a, 18 (3): 7 ~ 14.
- [21] 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.
- [22] 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*, 1999b, (2): 8 ~ 12.
- [23] Davy P, Cobbold P R. Experiments on shortening of a 4-layer model of the continental lithosphere [J]. *Tectonophysics*, 1991, 188 : 1 ~ 25.
- [24] 李建国, 周永胜, 宋瑞卿, 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.
- [25] 李建国, 周永胜, 王绳祖. 中西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.
- [26] 周永胜, 李建国, 王绳祖. 用物理模拟研究地幔上隆与大陆裂隙伸展 [J]. *地质力学学报*, 2000, 6 (1): 22 ~ 32.
- [27] 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.
- [28] Scholz 著. 地震与断层力学 [M]. 马胜利, 等译. 北京 : 地震出版社, 1996.
- [29] Aydin A, Nur P. Evolution of pull-apart basins and their scale independence [J]. *Tectonics*, 1982, 1 : 91 ~ 105.

PHYSICAL EXPERIMENTAS ON STRIKE-SLIP FAULT AND PULL-APART BASIN

ZHOU Yong-sheng, LI Jian-guo, WANG Sheng-zu

(*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 strike-slip fault and pull-apart basin adopted ductile/brittle double-layers model. The experiment results show that strike-slip model developed sinistral right-step fault zone which consisted of a lot of “ S ” -type faults during sinistral strike-slip stage. The early fault zone was reconstructed and became dextral right-step “ Z ” -type fault during dextral strike-slip stage. There are three-type extensions in the strike-slip fault zone : (1) a lot of diamond basins formed with stretching of “ S ” -type fault ; (2) the “ graben-horst ” structure appeared when the ends of adjacent “ S ” -faults were sheared and connecting ; (3) the pull-apart basins formed along right steps of dextral faults during the second strike-slip stage. The stretching faults formed in the stage of uplifting limit the location and the direction of strike-slip faults. Strength of brittle-layer restricts the forming and the development of strike-slip faults , and the texture of brittle-layer influences coupling of brittle-plastic layers and characters of strike-alip faults.

Key words : strike-slip ; pull-apart basin ; plastic flow ; physical models