

柴达木盆地西北部新生代褶皱-冲断带 形成机制的物理模拟

刘重庆¹, 周建勋¹, 张博²

(1. 中国石油大学油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 贵州省煤田地质局地质勘察研究院, 贵州贵阳 550008)

摘要:通过构造物理模拟的方法,根据柴达木盆地西北部实际地质条件设计模型,对该区反S形褶皱-冲断带的形成机制进行研究。结果表明:柴达木盆地西北部褶皱-冲断带的形成受赛什腾山弧形刚性边界和巨厚下侏罗统泥岩滑脱层的控制;褶皱-冲断带自北东向南西逐步扩展,其形态也从弧形逐渐过渡为直线形;挤压应变主要集中在褶皱两侧的逆冲断裂之中,最大值通常出现在新产生的活跃构造带上,剪切应变集中在与挤压方向斜交的褶皱部位。

关键词:构造地质学;地质模型;柴达木盆地;褶皱-冲断带;形成机制;物理模拟

中图分类号:P 542

文献标志码:A

Physical modeling of Cenozoic fold-thrust belts formation mechanism in northwestern Qaidam Basin

LIU Chong-qing¹, ZHOU Jian-xun¹, ZHANG Bo²

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting in China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

2. Geological Surveying Institute, Guizhou Coal Geology Bureau, Guiyang 550008, China)

Abstract: By tectonic physical modeling, geologic models were developed based on the geological conditions of the northwestern part of Qaidam Basin. And the formation mechanisms of fold-thrust belts were studied in this region. The results show that the formation of fold-thrust belts in the region is controlled by rigid arc-shaped boundary of Saishenteng mountain and detachment layer of Jurassic mudstone with huge thickness. Fold-and-thrust belts were gradually propagated from the northwest to the southeast, with the shapes changing from curved to straight. The shortening strains accumulated mainly on the thrusts on the both sides of anticlines and their extremum concentrated in the newly generated active part of the fold-thrust belts. The shear strain distributed at the fold-thrust belt intersected with extrusion direction.

Key words: tectonics; geologic model; Qaidam Basin; fold-and-thrust belt; formation mechanism; physical modeling

柴达木盆地西北部的褶皱-冲断带以反S形态为主要特色,其形成机制有不同观点。孙殿卿等提出其形成与旋卷构造体系有关,这一观点曾得到广泛的采纳,进而与阿尔金断裂的走滑运动相联系^[1]。然而,Yin等^[2]根据褶皱-冲断带在与阿尔金断裂直接接触部位无明显牵引弯曲的现象,指出阿尔金断裂的走滑运动对柴达木盆地的侧向牵引作用十分有限,不赞成将反S形褶皱-冲断带的形成与阿尔金断裂的走滑运动相联系。周建勋等^[3]曾基于物理模拟试验结果,提出该区反S形褶皱-冲断

带的形成可能与块体间弧形边界的联合作用有关,但受当时条件的局限,试验模型仅采用了摩擦基底条件,未充分考虑该区存在巨厚下侏罗统泥岩的实际情况。现有的研究充分表明,挤压块体的边界形态和基底的力学性质是控制褶皱-冲断带构造特征和形成过程的关键因素^[4-5]。因此,笔者依据研究区的实际地质条件,充分考虑下侏罗统泥岩因素,设计3组三维模型开展系统试验,研究该区褶皱-冲断带的形成机制及过程,为进一步认识柴达木盆地西北部反S形褶皱-冲断带的形成机制提供依据。

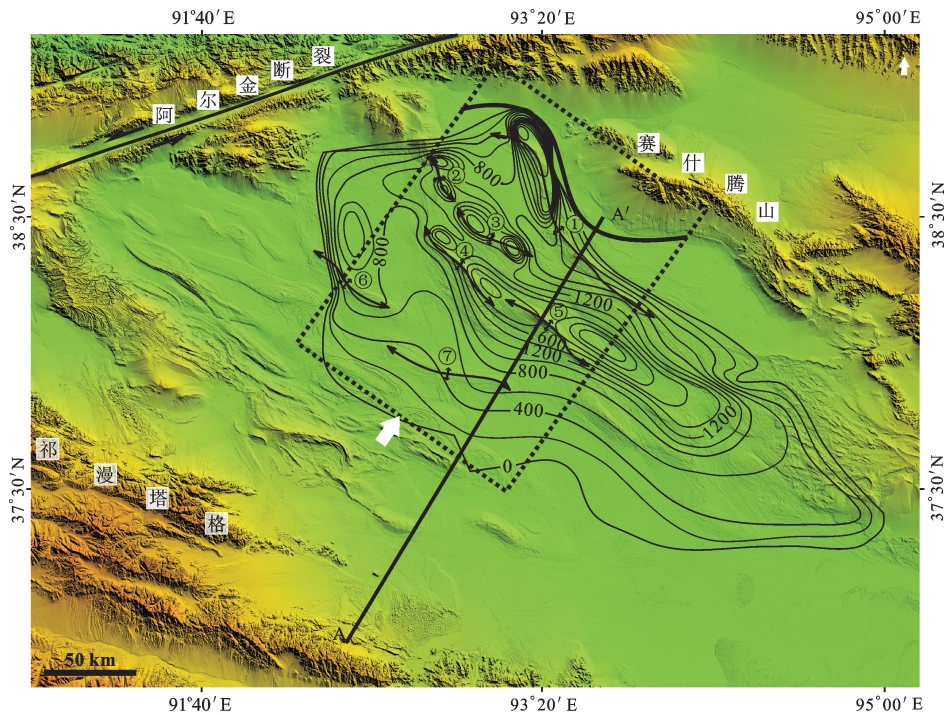
1 构造特征

研究区中-新生代的沉积地层相对较全,其中作为滑脱层的下侏罗统泥岩是本研究关注的重点,包括湖西山组(J_{1h})、小煤沟组(J_{1x})和大煤沟组(J_{2d}),以陆相湖泊、河流和沼泽相沉积为主^[6]。冷湖-南八仙构造带基本为下侏罗统沉积上超尖灭带(图1),右行同生断层作用下形成的右行雁列次凹决定了下侏罗统的沉积、沉降中心及其总体展布。鄂博梁 I 号次凹残余下侏罗统最厚可达 2 600 m,在鄂博梁 II 号次凹最厚可达 1 600 m,冷湖西次凹最厚达 2 400 m,伊北次凹最厚达 1 600 m,冷湖 V 号构造残余下侏罗统厚达 1 700 m^[7]。这些带状并排展布的巨厚滑脱层使得该区地层变形强度水平方向上差异悬殊,必然导致上覆地层构造变形的复杂化。

柴达木盆地西部褶皱-冲断带发育非常广泛,与大多数挤压性盆地中褶皱-冲断带集中分布于造山带前缘、盆地中部较为平坦的地貌特征明显不同。褶皱-

冲断带总体呈北西走向(图1,据陈迎宾^[8]修改),其形态与组合特征存在显著空间差异:北东部褶皱-冲断带主要呈反 S 形,每个一级反 S 形构造带由一个以上规模较小的二级反 S 形构造组成;中部褶皱-冲断带弧度略小,主要呈北西西走向,并构成雁列组合;西南部山前褶皱-冲断带较为平直,总体呈稳定的北西走向,且紧密平行排列。从北东至南西,褶皱-冲断带由显著的弧形逐渐过渡到较为平直,延伸长度增大,核部出露的地层年龄依次变新,发育时代也渐晚,并至今都处于隆升状态。

为充分认识该区构造演化特征进行了构造平衡剖面恢复,结果表明柴达木盆地西部新生代构造演化具有以下特点:在南西-北东向挤压下,盆地两端处于同步变形增厚状态;自渐新世起,北东、南西两端均有断裂开始发育;至中新世,北东侧变形强度变大、断裂活动更为活跃,这一趋势在后续的变形中进一步加强,使得地表褶皱-冲断带的发育从北东向南西逐步扩展(图2, L 为总缩短量, e 为缩短率)。



①冷湖构造带; ②鄂博梁 I 号构造带; ③葫芦山构造带; ④鄂博梁 II 号构造带; ⑤鄂博梁 III 号构造带; ⑥碱山构造带; ⑦红三旱构造带。

图1 柴达木盆地西部 SRTM 数字地貌及下侏罗统厚度等值线图

Fig. 1 Map of SRTM digital geomorphology and contour of Lower Jurassic thickness in western of Qaidam Basin

2 研究方法

2.1 模型设计

模拟范围如图1中虚线框所示,长、宽分别为 160 km 和 100 km,模型挤压方向(图中白色箭头)

与区域挤压应力^[9]及地体运动方向^[10]一致。研究中以冷科1井沉积盖层厚度 4 700 m 限定模型总厚度,对应的模型长 60 cm,宽 40 cm,总厚度为 1.6 cm(表1)。模型北部以阿尔金山、赛什腾山南缘为边界^[11],呈弧形((图3(a)模型平面示意图),由厚度

为 0.9 cm 的密度板模拟(模型装置剖面示意图纵向以 3 倍比例显示),代表不发生变形的刚性地块;南

部以祁漫塔格北缘作为平直刚性边界。

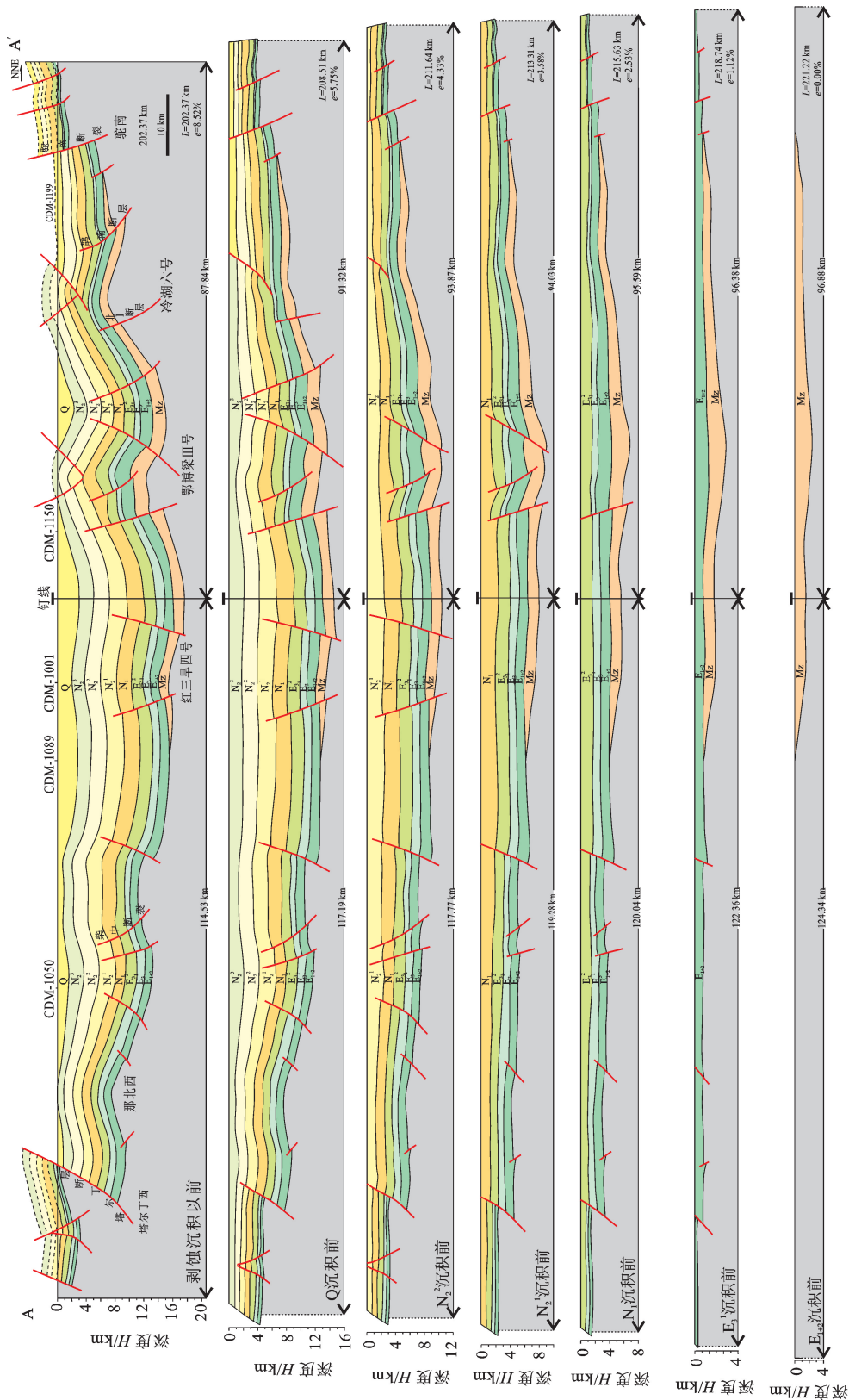


图 2 柴达木盆地 CDM 200 测线构造演化平衡剖面

Fig. 2 Balanced cross-section restoration of geological section CDM 220 in Qaidam Basin

表1 研究区范围与模型数据

Table 1 Data of study area and model dimension

名称	长 L / km	宽 b / km	盖层厚度 δ_1 /m	滑脱层厚度 δ_2 /m
研究区	170	110	4.7×10^3	0.8×10^3 (均一化)
模型	0.6×10^{-3}	0.4×10^{-3}	0.16×10^{-4}	0.3×10^{-5}
相似比例	2.8×10^5	2.8×10^5	2.9×10^5	2.7×10^5

为了充分考察滑脱层在柴达木盆地西部褶皱-冲断带形成过程中的作用,设计3组模型(图3)进行对比分析。

模型 I: 水平累积性收缩基底挤压模型(图3(b))。模型底部为厚度1 mm的橡皮,预拉伸11

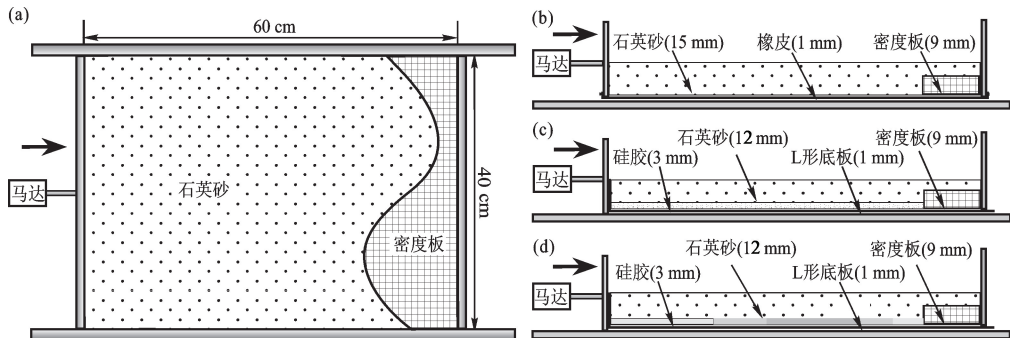


图3 模型装置示意图

Fig. 3 Sketch map of sandbox model

模型 III: 不等厚滑脱层均匀收缩基底挤压模型(图3(d))。与膏盐岩不同的是,泥岩的能干性更易受其空间展布及流体压力的影响^[12]。因此,该模型重点考察滑脱层厚度差异对构造变形的影响。由于研究区下侏罗统泥岩残余厚度差异巨大,如果按同一相似比设置,会导致滑脱层因上覆盖层差异负荷作用而发生变形,改变模型初始设置。因此,依据滑脱层的厚度增大等效于黏度减小的原则,将实际地质条件中的滑脱层厚度差异转变为同一厚度(800 m)下的黏度差异。代表不同厚度滑脱层的硅胶黏度分别为 2.2×10^4 、 1.4×10^4 和 9.4×10^3 Pa·s,并按研究区不同厚度下侏罗统泥岩的位置铺设(黏度越大的硅胶代表厚度越薄的滑脱层),上覆12 mm厚石英砂代表脆性变形层。该模型与模型 II 对比考察滑脱层厚度对构造变形的影响。

试验所用干燥、松散石英砂粒径 0.25 ~ 0.38 mm,内摩擦角 31° ,其力学性质符合库仑摩尔破裂准则,内聚力接近零,是模拟地壳浅层次构造变形的最佳材料。模拟滑脱层的硅胶混有少量杂质,这种材料在较高挤压速率下表现出近似非牛顿流体的性质,适合模拟变形强度小、流变性较弱的泥岩滑脱层的变形。

cm,代表水平累积性收缩的滑脱层,具有摩擦基底性质,上覆15 mm石英砂,考察滑脱层水平累积性收缩条件下的变形特征。

模型 II: 等厚滑脱层均匀收缩基底挤压模型(图3(c))。模型底部为厚1 mm L形铝板,可以随活动挡板发生平移,带动上覆3 mm厚硅胶层(代表实际厚度为800 m的滑脱层)及12 mm厚砂层发生变形,模拟均厚滑脱层在基底均匀收缩条件下的挤压变形。该模型与模型 I 对比考察两类不同收缩性质的滑脱层对构造变形的影响。

试验在中国石油大学(北京)构造物理实验室进行,由软件控制的步进马达驱动活动挡板,以提供稳定准确的0.2 mm/min的挤压速度,挤压位移均为10 cm,即缩短率为17%,这与该区多条平衡剖面所获得的总缩短率的最大值一致^[13]。试验过程由数码相机通过电脑控制自动等时间间隔拍照,并应用PIV(particle image velocimetry)技术,获得试验不同变形阶段挤压应变和剪切应变数据。三维扫描技术为量化分析模型表面高程变化提供了技术保障。

2.2 PIV 应变计算

PIV是一种最初用于流体力学研究的测速方法,近年被引入到物理模拟试验应变分析中。该技术能够瞬时记录大量空间粒子的位置信息,并通过互相关性分析处理序列图像(图4),获得粒子的位移矢量,以此为基础计算出挤压、伸展、剪切、旋转等应变的大小和分布。

假设系统在 t_0 以及 $t_0 + \Delta t$ 这两个时刻分别获取图4(a)和图4(b),在图中相同位置获取两个相同尺寸的判读区 $f(m, n)$ 以及 $g(m, n)$, (m, n) 表示 f 与 g 分别在图4(a)与图4(b)中的相对位置。对 f 与 g 进行处理就可以获得此判读区增量位移 s (图4(c))。以增量位移为基础数据,通过以下公式计算

即可获得挤压应变 E_{xx} 和剪切应变 E_{xy} [14]: $E_{xx} = \frac{dD_x}{dx}$,

$E_{xy} = \frac{dD_x}{dy}$, 其中, D_x 为 x 轴方向(本文中挤压方向)增量位移。本文计算应变所选增量位移为 2 mm, 即 E_{xx} 和 E_{xy} 分别表示从某一瞬时起, 活动挡板推挤 2 mm 后模型各处平行于挤压方向的挤压应变和剪切应变的大小。

亚像素拟合技术的应用使 PIV 矢量精度达到 0.05 ~ 0.2 个像素水平, 大位移量的计算可以通过迭代算法来实现。本试验所用 PIV 系统矢量精度为 0.1 像素, 换算到 3 300 × 2 220 分辨率的试验照片中, 其空间分辨率为 0.018 mm, 位移提取误差为 0.6 %。

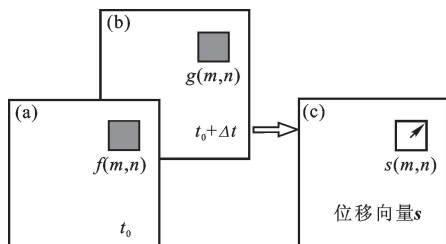


图 4 PIV 互相关计算示意图

Fig. 4 Schematic drawing of cross-correlation computation

3 试验结果

3.1 模型 I

挤压缩短 0.6 cm 时, 弧形边界处开始发生明显的应变集中化, 表明该处地体正在发生应变积累, 其应变场图像表现为一条沿着弧形刚性边界的高值条带(应变绝对值太小, 经色标统一化之后无法有效显示, 故不在文中展示, 下同)。挤压至 2.0 cm 时, 沿赛什腾山刚性边界处的地体发育反 S 形褶皱(图 5(a)), 该褶皱是由前冲断层和反冲断层组成的冲起构造, Koons [15] 对其变形机制做过详细描述。挤压应变集中于褶皱两侧逆冲断裂处, 形成两条反 S 形应变条带, 强度较低(图 5(d))。剪切应变高值条带首尾两端为左旋剪切, 中部为右旋剪切(图 5(g))。随着挤压的进行, 褶皱隆升幅度增大, 达到临界高度后, 褶皱-冲断带开始向东北方向逆冲推覆。挤压至 6.0 cm, 剪切应变左旋、右旋三段式分布特征更加显著(图 5(h))。此后的变形中, 仅有剪切应变进一步增大(图 5(i))。需要指出的是, 沿着模型两侧边的平直剪切带为基底橡皮边缘收缩引起周围地体运动速率不同所致, 属于试验误差, 在此略去不计。

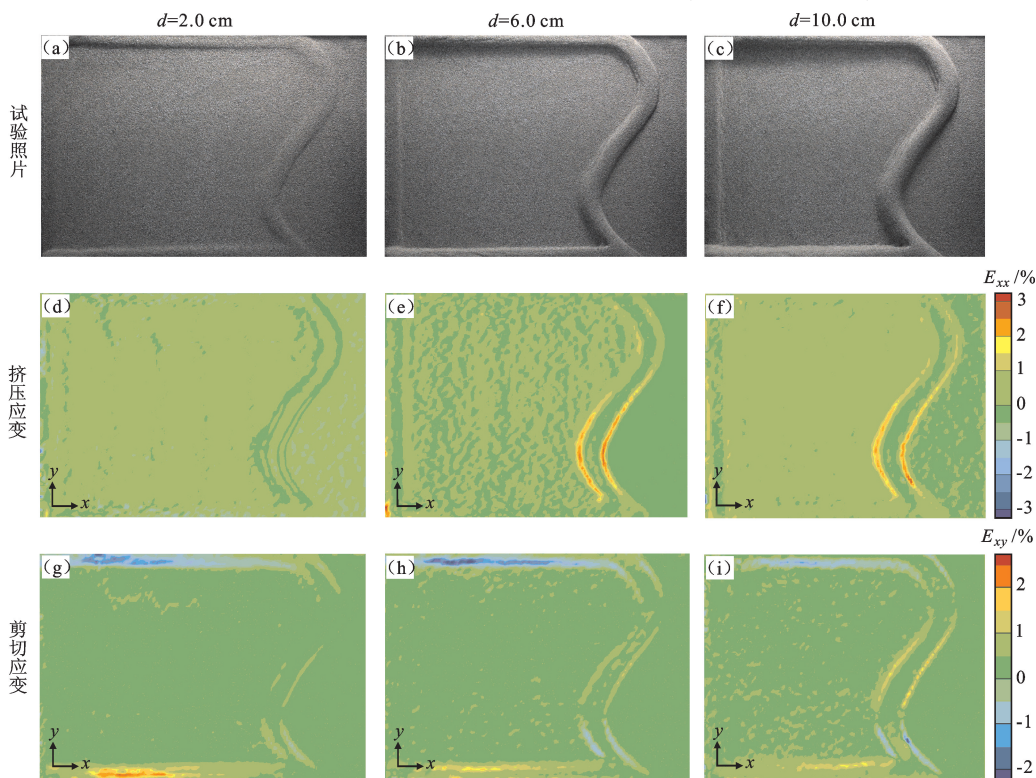


图 5 模型 I 不同试验阶段照片及其应变场

Fig. 5 Photographs of different phase of model I and their strain fields

对比图 5 中各阶段试验照片可知, 变形过程差异仅为褶皱隆升幅度的不同, 即水平累积性收缩滑

脱层参与的变形中, 褶皱-冲断带仅发育于模型刚性边界处。然而三维扫描数据显示, 模型中发生收

缩但未发育褶皱的区域整体增厚了 0.1 cm,意味着除了褶皱隆升之外,地体挤压后发生的较为均匀的垂向增厚吸收了部分应变。

3.2 模型 II

挤压至 0.3 cm 时发生应变集中化,明显早于模型 I 的 0.6 cm 时的应变状态,表明基底收缩性质的差异对应变传递影响显著。挤压 2.0 cm 时,褶皱-冲断带的数量及形态与模型 I 相近(图 6(a)),但固定端一侧挤压应变值高于活动端一侧(图 6(d)),剪切应变仅有右旋剪切强度较大(图 6(g))。挤压 6.0 cm 时,模型中部数条褶皱-冲断带紧邻赛

什腾弧形边界发育,隆升幅度均较小,延伸长度短(图 6(b))。挤压和剪切应变随着新构造的产生分散于各褶皱-冲断带上(图 6(e)、(h))。挤压至 10.0 cm,模型中部的褶皱近平行密集分布,形态平直(图 6(c))。后期形成的褶皱-冲断带大都由次级褶皱雁列组合而成,其首尾由转换带相连,形成贯穿模型的大型褶皱-冲断带。挤压应变最大值位置由变形前期的固定端一侧(图 6(d))过渡为变形后期活动端一侧(图 6(f)),即挤压应变极值始终出现在最新形成的褶皱且靠近固定端一侧。

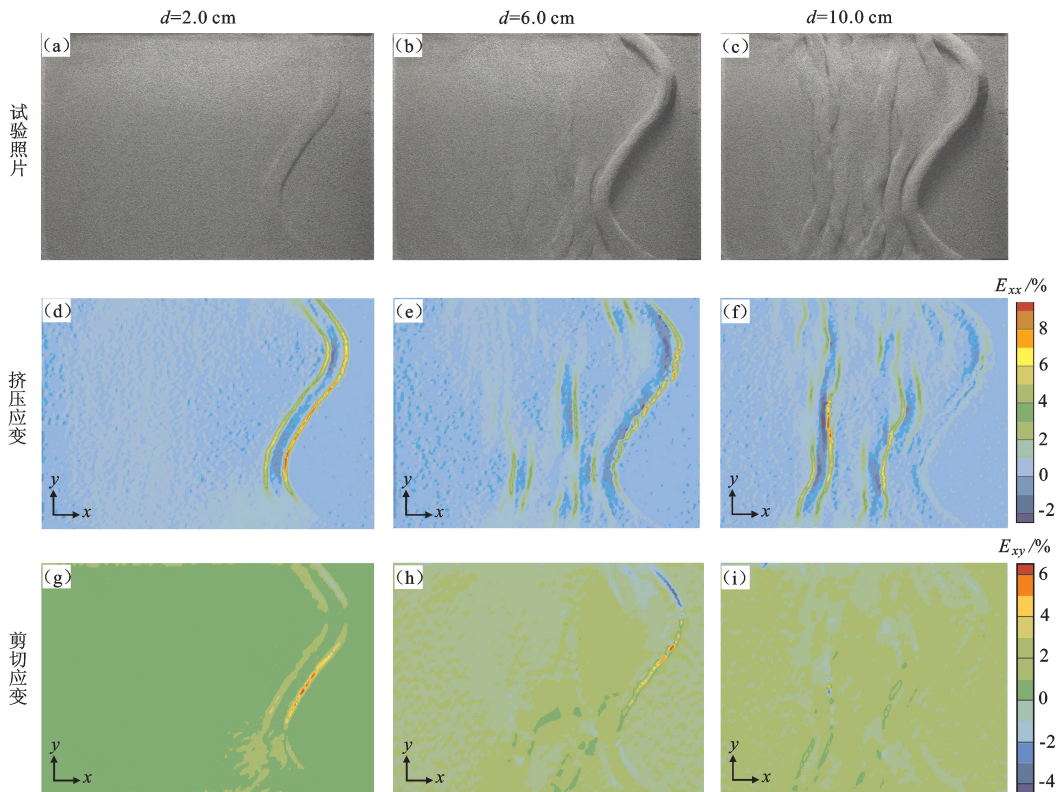


图 6 模型 II 不同试验阶段照片及其应变场

Fig. 6 Photographs of different phase of model II and their strain fields

3.3 模型 III

该模型中应变集中起始时间为挤压至 0.4 cm 时,随着试验的进行,应变积累逐渐增大,地层发生褶皱、隆升。挤压 2.0 cm 时,沿赛什腾山刚性边界发育反 S 形褶皱-冲断带(图 7(a)),褶皱两侧挤压应变集中的条带较之模型 II 更窄,剪切应变强度明显大于同一变形阶段的其他两个模型。挤压至 6.0 cm 时,模型中部开始发育褶皱-冲断带(图 7(b)),这与紧邻弧形边界以后展方式发育新构造的模型 II 差异显著。随着挤压持续进行,中部褶皱迅速增高,

在该褶皱与赛什腾山刚性边界之间陆续发育其他褶皱-冲断带。至试验末期,褶皱-冲断带扩展到紧邻活动端的部位,由 3 条次级褶皱首尾相连形成一条贯穿模型的大型褶皱-冲断带(图 7(c))。挤压应变在模型中条带状均匀分布(图 7(f)),剪切应变则以右旋为主(图 7(i)),且应变强度较大,而相同变形阶段的模型 II 已无明显剪切应变发育(图 6(i))。该模型褶皱-冲断带的形态发生有规律的变化:早期形成的褶皱-冲断带形态为弧形,后期形成的过渡到较为平直。

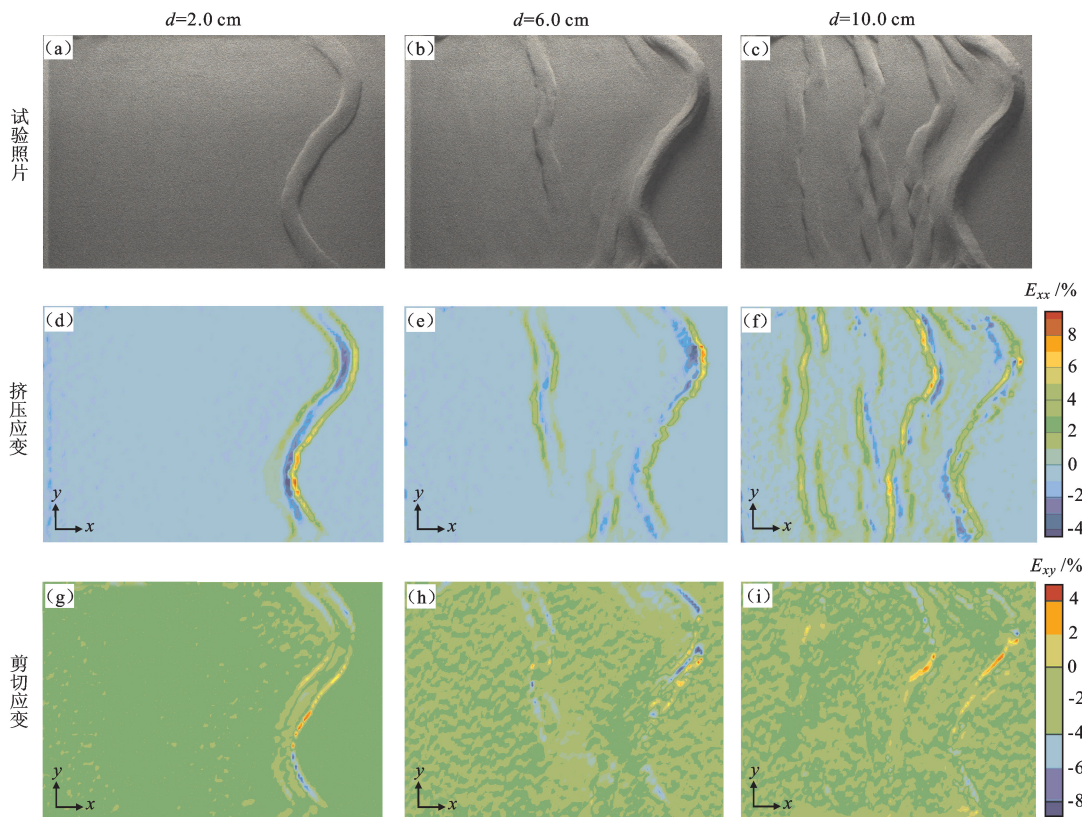


图 7 模型Ⅲ不同试验阶段照片及其应变场

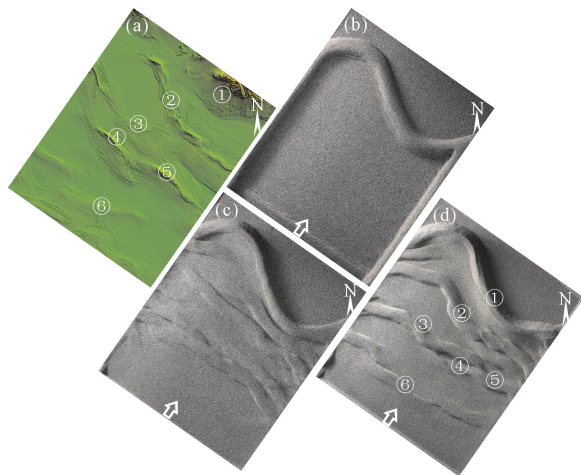
Fig. 7 Photographs of different phase of model III and their strain fields

4 结果讨论

4.1 试验模型对比

研究区数字高程图与各模型模拟结果对比见图 8。模型 I 条件下,褶皱-冲断带仅发育于赛什腾山刚性边界处,盆地内部地形平坦(图 8(b))。这一试验结果与柴达木盆地西部褶皱-冲断带广泛发育的地貌特征不符,即单纯的脆性挤压变形难以形成柴达木盆地西部现今构造样式及其分布格局。模型 II 试验结果表现出褶皱-冲断带在盆地内部广泛发育的特点,但只有紧邻赛什腾山弧形边界的褶皱形态弯曲,其他褶皱-冲断带较为平直(图 8(c)),与研究区实际构造弧形形态存在明显差异。模型 III 的试验结果与研究区实际构造面貌具有较好的相似性:褶皱-冲断带广泛发育、其形态自北东至南西由反 S 形逐渐过渡为平直形态、大多数一级褶皱都由若干二级褶皱雁列组合而成,且主要构造带的形态和位置也具有较好的对应性(图 8(d))。

上述试验结果表明柴达木盆地西北部下侏罗统泥岩滑脱层的存在是该区褶皱-冲断带广泛发育的关键因素。褶皱-冲断带弧形形态的成因除弧形刚性边界的影响外,滑脱层厚度不均造成的变形强度横向差



①赛什腾刚性边界褶皱; ②冷湖构造带; ③葫芦山构造带; ④鄂博梁 II 号构造带; ⑤鄂博梁 III 号构造带; ⑥红三旱构造带。

图 8 研究区数字高程图与各模型模拟结果对比
Fig. 8 Contrast between DEM of study area and results of model

异也起到了一定的作用。褶皱-冲断带形态的变化跟变形地体与刚性弧形边界的距离有关,距离越近,所受刚性边界的影响越大,形态越弯曲。同时受地体下伏滑脱层空间分布的影响,西北部基底次凹多,下侏罗统厚度变化复杂,加剧了地表构造形态的弯曲;西南部下侏罗统等厚线平直且梯度较小,地层变形强度

变化较小,褶皱-冲断带形态较为平直。

各模型应变场分布存在以下规律:均匀收缩基底变形过程中应变传递速度比累积性收缩基底更快;均厚滑脱层比横向厚度不均的滑脱层传递应变快。挤压应变集中于褶皱-冲断带两侧的逆冲断裂,且固定端一侧应变强度高于活动端一侧,原因可能是近活动端一侧的部分应变被褶皱和断裂调节,而固定端一侧只能原地积累。同一模型的应变场在不同变形阶段也呈现不同特点。挤压应变和伸展应变的高值区域在挤压初期为连续的条带,至挤压中后期,随着构造带的增多,其分布也变得分散。挤压应变极值始终集中在新发育(图6(f))或最为活跃(图7(f))的褶皱-冲断带上。

4.2 反S形褶皱-冲断带形成机制

印度板块与欧亚板块的持续碰撞及羌塘、松潘-甘孜等地块的北移使柴达木地块受到南西-北东向挤压^[10],这一挤压方向与带状展布的下侏罗统滑脱层的条带式展布方向垂直,加之东北部受刚性地块阻挡,滑脱层的易变形性得以充分发挥。由于东北部刚性边界及沉积巨厚泥岩的次凹边界几何形态均呈弧形,地层在不均匀的挤压应力下发生褶皱、扭曲,形成弧形褶皱-冲断带,并从北东向南西扩展,这种扩展顺序与该区平衡剖面获得的结论(图2)一致。这些褶皱大多并排分布,但昆特依凹陷处滑脱层厚度较薄,其变形能力相对于两侧的冷湖和鄂博梁地区较弱,因此该区地表表现为弱变形区,发生相对沉降。盆地西南部地体因远离弧形刚性边界,所受应力的方向和强度较为均匀,形成的褶皱-冲断带形态也较为平直。

5 结 论

(1) 赛什腾山弧形刚性边界和巨厚下侏罗统泥岩滑脱层控制了该区褶皱-冲断带的形成,其中赛什腾山弧形刚性边界和下侏罗统泥岩的厚度差异是控制反S形褶皱-冲断带形成的关键因素,下侏罗统泥岩的存在是该区褶皱-冲断带普遍发育的主要原因。

(2) 褶皱-冲断带的发育顺序为自北东向南西扩展,先期形成的褶皱呈弧形形态,后期褶皱因变形地体与弧形刚性边界之间距离较大及滑脱层展布较为规则而过渡到直线形,且大部分一级褶皱为次级褶皱雁列组合而成。

(3) 挤压应变集中于褶皱两侧的逆冲断裂中,因应变调节空间不同使固定端一侧应变值高于活动

端一侧,应变极值通常出现在新产生或最活跃的构造上。剪切应变集中在与挤压方向斜交的褶皱部位,且因斜交方向不同而形成左行剪切和右行剪切应变分段分布的格局。

参考文献:

- [1] 刘永江,葛肖虹,叶慧文,等. 晚中生代以来阿尔金断裂的走滑模式[J]. 地球学报,2001,22(1):23-28.
LIU Yong-jiang, GE Xiao-hong, YE Hui-wen, et al. Strike-slip model for Altyn Tagh fault developed since late Mesozoic[J]. Acta Geoscientia Sinica,2001,22(1):23-28.
- [2] YIN An, HARRISON T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000,28:211-280.
- [3] 周建勋,徐凤银,曹爱锋,等. 柴达木盆地北缘反S形褶皱冲断带变形机制的物理模拟研究[J]. 地质科学,2006,41(2):202-207.
ZHOU Jian-xun, XU Feng-yin, CAO Ai-feng, et al. A physical modeling on mechanism of reverse S-shaped fold-and-thrust belts in the northern Qaidam Basin[J]. Chinese Journal of Geology,2006,41(2):202-207.
- [4] AGARWAL K K, AGRAWAL G K. Analogue sandbox models of thrust wedges with variable basal frictions[J]. Gondwana Research,2002,5(3):641-647.
- [5] COSTA E, VENDEVILLE B C. Experimental insights on the geometry and kinematics of fold-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic decollement [J]. Journal of Structural Geology,2002,24:1729-1739.
- [6] 段宏亮,钟建华,马锋,等. 柴西阿尔金山前中、下侏罗统展布及油气勘探方向[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2006,30(6):13-18.
DUAN Hong-liang, ZHONG Jian-hua, MA Feng, et al. Lower-middle Jurassic distribution and oil-gas exploration direction on the southern Altyn Tagh in the western Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2006,30(6):13-18.
- [7] 高长海,查明. 柴达木盆地北缘冷湖-南八仙构造带油气成藏条件及成藏模式[J]. 中国石油大学学报:自然科学版,2007,31(4):1-7.
GAO Chang-hai, ZHA Ming. Oil-gas reservoir forming conditions and patterns in Lenghu-Nanbaxian structural belt in the northern margin of Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science),2007,31(4):1-7.