

东辛地区营 26 断层变换带形成机制模拟

杨少春^{1,2}, 白青林¹, 路智勇^{1,3}, 汪 勇¹

(1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071; 3. 中国石化胜利油田有限公司东辛采油厂, 山东东营 257061)

摘要: 为了分析叠覆型断层变换带的形成机制, 揭示变换带内断裂体系的发育规律, 根据区域应力机制设计相应的张扭及底辟复合作用实验装置, 从湿度不同的砂、黏土及砂泥混合物中选取微湿的细砂作为实验材料, 并与应力场数值模拟相结合, 对东营凹陷东辛地区营 26 变换带沙河街组沉积期进行构造物理模拟。结果表明: 营 1 与营 31 断裂是沙河街组沉积前由 NE10° 的伸展作用同时形成的两条平行断裂, 二者向两侧的伸展位移在叠覆带边缘诱导出一条与伸展方向呈 50° 斜交的张扭性变换断层, 随着二者叠置程度的增大, 变换断层的发育程度也增大。之后, 区域性的右旋走滑运动形成一系列雁列式分布的变换断层, 其优势走向与剪切应力场方向一致, 后期的底辟作用加剧了断裂系统的复杂程度。断层的转折端、交汇和分叉处以及次级断层形成的局部小断块内, 最大主应力和最小主应力差值较大, 为低级序断层的优势发育区。另外, 平面上斜交的剪切断层在不同方向的走滑活动造成的局部断块的掀斜运动加剧了低级序断层复杂程度。

关键词: 东辛地区; 营 26 断层变换带; 形成机制; 应力场数值模拟; 构造物理模拟; 低级序断层; 东营凹陷

中图分类号: TE 121.3 **文献标志码:** A

引用格式: 杨少春, 白青林, 路智勇, 等. 东辛地区营 26 断层变换带形成机制模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2017, 41(1): 25-33.

YANG Shaochun, BAI Qinglin, LU Zhiyong, et al. Forming mechanism simulation of Ying 26 transfer zone in Dongxin area [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2017, 41(1): 25-33.

Forming mechanism simulation of Ying 26 transfer zone in Dongxin area

YANG Shaochun^{1,2}, BAI Qinglin¹, LU Zhiyong^{1,3}, WANG Yong¹

(1. College of Geosciences in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China;
3. Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company Limited, SINOPEC, Dongying 257061, China)

Abstract: An tenso-torsional experimental apparatus with diapirism is designed for Ying 26 overlapping transfer zone formed during Shahejie Formation depositional stage in responding to the regional stress field in Dongxin area, Dongying sag. The aim is to simulate the formation mechanism and to reveal the law of distribution and development in the fracture system. Moist arenilla is chosen as the experimental material from the sand, clay and their mixture with different moisture. Experimentation process is filmed in detail and interpreted accurately. The results of the experiment show that: The Ying1 fault and Ying31 fault did not result from an early fault dislocated by lately transfer fault; instead they formed as two parallel faults before the deposition of Shahejie Formation under the effect of the extension in about NE10°. As pre-existing faults, the extensional displacement of the two faults induced the first shearing transform fault in the transfer zone. The fault strike of transform fault is oblique with the stretching direction with 50-degree angle. The higher the overlap ratio of the two faults, the more developed

the transfer fault. Then dextral strike slipping formed a series of en-echelon faults and the dominant strike direction is in accord with the direction of shear stress field. At last, the diapirism complicated the fracture system in the late stage. Low-grade faults grew mostly on the cross, round and the crotch of faults, especially in small blocks closed or semi-closed by secondary faults due to large differences between minimum and maximum principal stress in this area. In addition, shear faults are oblique in the plane and strike-slip in different directions, forming tilted local blocks. As a result, the distribution of low-grade fault is more complex.

Keywords: Dongxin area; Ying 26 transfer zone; formation mechanism; stress field numerical simulation; structural physical simulation; low-grade faults; Dongying sag

断层变换带最早用来描述断裂带中首尾主逆冲断层之间的构造^[1],后来逐渐引申为伸展构造体系中沿构造走向出现的横切的、调节伸展变形的构造^[2-4]。目前有关断层变换带形成机制的研究,大部分是对区域性的变换构造从构造演化方面进行分析^[5-7],而针对复杂断块内的小型断层变换带形成机制的研究较少^[8-9],尤其是构造物理模拟方面的研究更是少见^[10]。东辛油田营 26 断块为一典型的同向叠覆型断层变换带,对其形成与演化过程存在着较大分歧:一种观点认为变换带为先存断裂被后期发育的断层切断而形成^[11-12],而另一种则认为变换带为同时发育的两条平行断裂所形成^[13-14]。针对以上问题,笔者以营 26 变换带为实验区,采用构造物理模拟的方法并参考应力场数值模拟的结果,重现断层变换带的形成过程,分析其形成机制,揭示区内低级序断层的发育及分布规律,为注采井网的调整及剩余油预测提供地质依据。

1 地质概况及构造分析

营 26 断层变换带位于东营凹陷中央隆起带中段东营穹隆背斜核部,由营 1 二级断层上升盘与营 31 二级断层下降盘首尾叠覆所形成(图 1)。断块东连辛镇长轴背斜,西接东营穹隆构造,总体形态为北西走向的宽条带状单斜构造,西北高,东南低,面积近 56 km²。沙河街组在区内平均厚度达 3000 m。

在沙河街组沉积期整个东营凹陷处于强烈的伸展断陷阶段,不仅遭受近南北向拉张作用,同时还叠加了郯庐断裂带活动所产生的右旋走滑作用。另外,在沙河街组末期又发育下伏孔店组膏盐层的底辟上拱作用^[15-19]。现有的构造演化资料等显示正是沙河街沉积期的构造活动在东辛地区形成了营 26 等一系列变换带。控块正断层营 1 和营 31 断层呈东西向延伸,3 条张剪性质的变换断层 a、b、c 呈右阶雁列式与其斜交,与该时期郯庐断裂带形成的右旋应力场相对应^[20-21],其中变换断层 a 的走向约为 NW320°,变换断层 b 与 c 走向大致为 NW310°,

尾端表现为燕尾状分支。选取典型的地震剖面,利用平衡剖面技术分析了断层的演化史,并计算了不同地质历史时期断层的生长指数。从断层生长指数分布图(图 2)中可以看出,3 条变换断层发育于沙四段沉积期,在沙三段沉积期活动强度达到巅峰,消亡于沙一段沉积期,最终连接了两条控块断层,并在

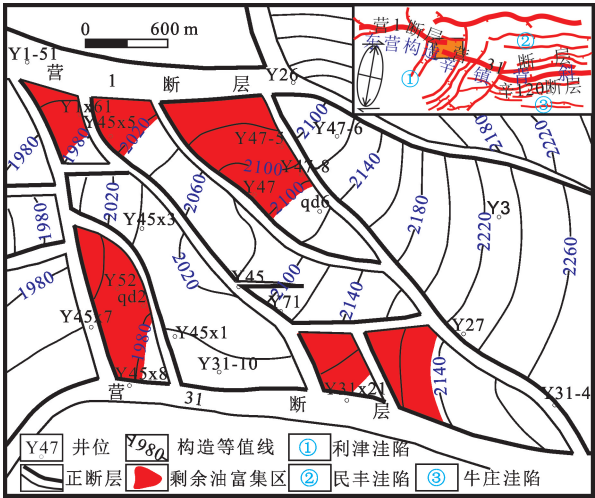


图 1 营 26 断层变换带沙一段顶面构造图
Fig.1 Top structure map of Sha 1 member in Ying 26 transfer zone

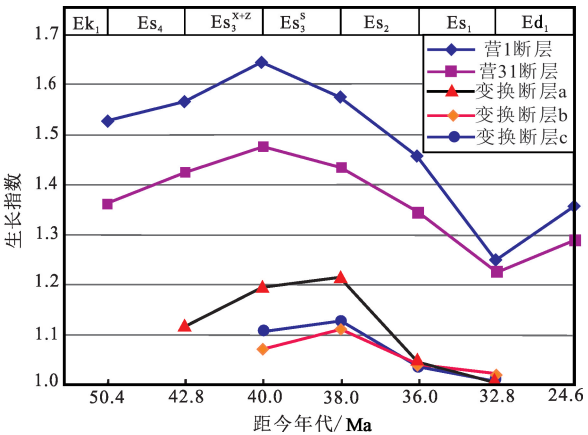


图 2 营 26 断层变换带内断层生长指数分布
Fig.2 Distribution of growth indexes of Ying 26 transfer zone

活动末期派生出一系列低级序断层,加剧了变换带内断裂系统的复杂程度,调节伸展变形的守恒。

2 模拟方案的设计及材料的选取

2.1 仪器的原理及设计

同前人较为单一的伸展、挤压或者剪切环境下的构造物理模拟相比^[22-24],本次模拟针对东辛地区沙河街组沉积期的构造活动特征,在张剪构造模拟仪基础上设计出一套早期伸展,中后期张剪,同时在后期伴有底辟上拱作用的复合构造物理模拟实验装置,能人工灵活地控制伸展、走滑及底辟作用的期次及强度。其工作原理如图 3(a)所示。

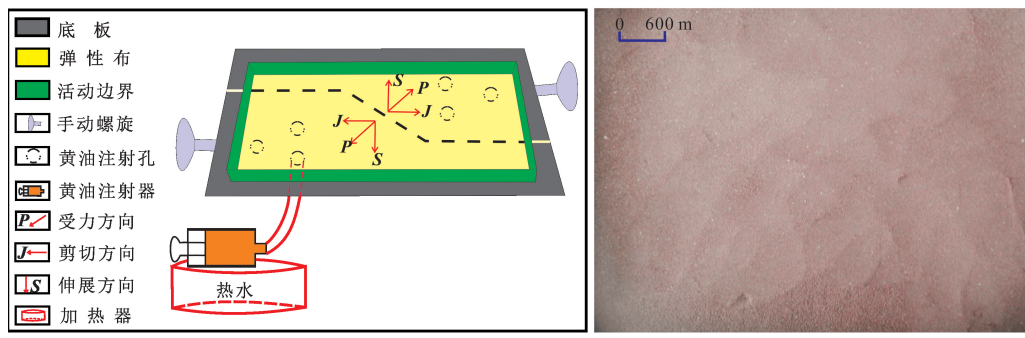


图 3 实验装置与原理示意图及铺好介质后的平面形态

Fig. 3 Schematic drawing of experimental apparatus and principle with plane form of sand box after putting medium

将弹性布固定在底板之上,使其随着底板一起活动,这样由底板相向运动产生的拉张与剪切作用便会遍布整个砂箱,形成一个复杂的张剪应力场。将弹性布的边缘粘贴在底板之上时,使弹性布在 S 方向上处于绷紧状态,在 J 方向上处于松弛状态。这样在转动手柄时,由于 S 方向上弹性布处于绷紧状态,首先会产生拉张作用,而剪切作用则须等到底板在 J 方向上的运动分量使弹性布紧绷时才会产生。弹性布的这种粘贴方式会在砂箱内形成与营 26 变换带相似的前期拉张、中后期张扭的复合应力场。

2.2 材料的选取

由于岩石的抗张强度较小,各岩层间的差异相对来说则更小,根据等比例原则将其按照模型与实际地质体的比例换算后基本上可以忽略,因此不考虑岩层间抗张强度的差异,以均匀的松散介质为材料^[25-26]。模拟时先后选取了湿度不同的细砂、黏土以及砂泥混合物等发现:材料过干,粒间吸附力太小,稳定性较差,早期产生的断裂在平面上不容易保存;材料的湿度太大则不利于小断层的产生,综合分析并实验后选取具有一定湿度的细砂作为模拟材料。

由于营 26 地区沙河街组地层厚度变化较小,采用等厚模型,在弹性布上铺设长、宽、高为 35 cm×25

左右两侧为两个旋转手柄,可以控制底板沿图中 P (所受外力, N) 方向产生相向运动。两块底板沿虚线位置对接在一起构成一个矩形。底板间的相向运动在 J (剪切力, N) 方向产生右旋剪切作用, S (拉张力, N) 方向产生拉张作用。底板上有若干个孔径约 2 cm 的黄油注射孔,外接带有橡皮管的注射器,注射器中的高黏度黄油经过盆中热水的加热流动性大幅度提高,当其进入砂箱内部后随着温度的降低流动性迅速减弱,能很好地模拟地下盐塑性地层的上拱,同时通过控制注入黄油的时间和速度控制底辟作用的期次与强度。

cm×10 cm 被染成淡红色的细砂,模型中的 1 cm 大致相当于实际的 300 m (图 3(b))。

3 模拟过程及解释

在完成模型设计、材料选择等流程后,开始进行模拟实验。当实验过程出现与实际情况不相符的受力状态或变形特征时,须终止实验,根据具体情况修改模型并调整施力方式。实验一共进行了 70 余次,其中较为理想的一次持续时间约为 30 min,实验过程中每隔 5 min 做一次具体的地质解释。此时,实验装置的摆放位置使其所受拉张力的方向呈 $NE10^\circ$,在南北方向的拉张量达到 1.2 cm 时,东西方向上开始产生剪切力,手动螺旋的速度对应于图 2 中不同沉积期断层的生长指数变化趋势,为一个由慢逐渐变快最后减慢的过程。结合着断层的演化史及生长指数分布特征等将模拟过程对应到地质历史时期,进行了针对性解释。

(1) 0~5 min 期间的模型(图 4(a))。此阶段相当于孔店组沉积末期—沙四段沉积早期,该期南北方向的拉张量约 0.5 cm,砂箱表面开始出现两条呈 $NW280^\circ$ 延伸的断裂,断裂面粗糙不平,尾端表现为树枝状分叉,为典型的张性断裂。北部的断裂不连续,

由若干条首尾不相接的侧列式展布的断层组合而成,东西方向上切穿将近 2/3 工区。南部的断裂延伸相

对较短,向西切穿不到 1/3 工区即行消失。其他地区构造相对稳定,未见地层的变形与断裂现象。

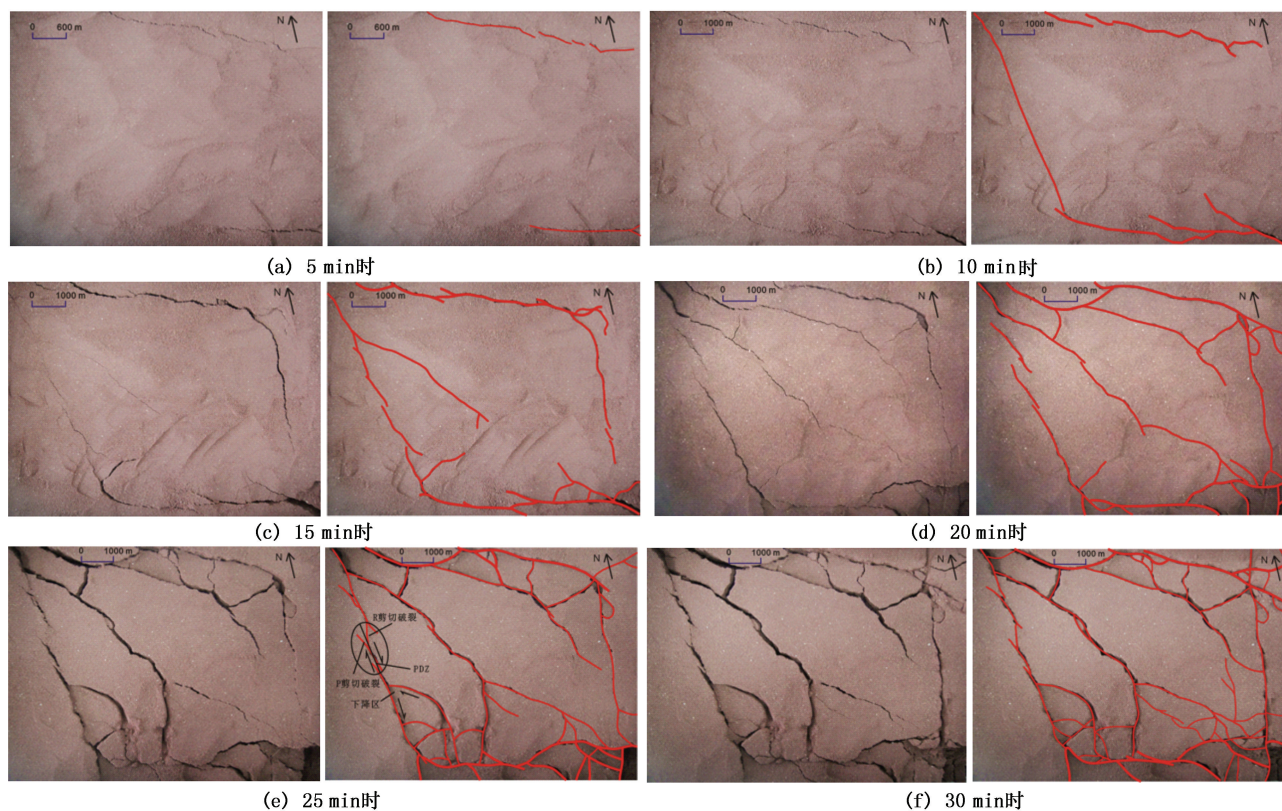


图4 构造物理模拟实验过程及对应的地质现象

Fig. 4 Process of structural physical simulation test and corresponding geological phenomena

(2) 5 ~ 10 min 期间的模型(图 4(b))。此阶段对应于沙四段沉积中—后期,伸展作用有所增强,南北方向拉张量约 0.7 cm,两端的两条断裂整体形态分别与营 31 和营 1 二级控块断层十分接近。北部的断裂在继续向西发育的同时,自身的连续性也得到增强,早期侧列式展布的断层已首尾相接形成一条连续的断裂。南部的断裂主要由 3 条首尾相接侧列式分布的断层组合而成。同时,主断层的伸展位移在叠覆带内部诱导出右旋剪应力^[31],致使西部发育一条 NW320°的转换断层 a,形态不明显,走向与张应力方向约呈 50°相交,符合库伦-莫尔破裂准则中剪切破裂线与最小主应力轴的夹角大于 45°的原则^[27]。总体来看,该时期的应力以张应力为主,由叠置的控块断层伸展位移诱导产生的右旋剪应力较弱。

(3) 10 ~ 15 min 期间的模型(图 4(c))。此阶段对应于沙三中—下亚段沉积期,伸展作用继续增强,南北方向的拉张量约 0.9 cm,右旋剪切开始作用于变换带,在营 1 与营 31 断层两侧产生了次级走滑断层系,使两条断层表现为明显的羽裂现象。羽裂面与营 1、营 31 断层中轴线的锐夹角指示了剪切

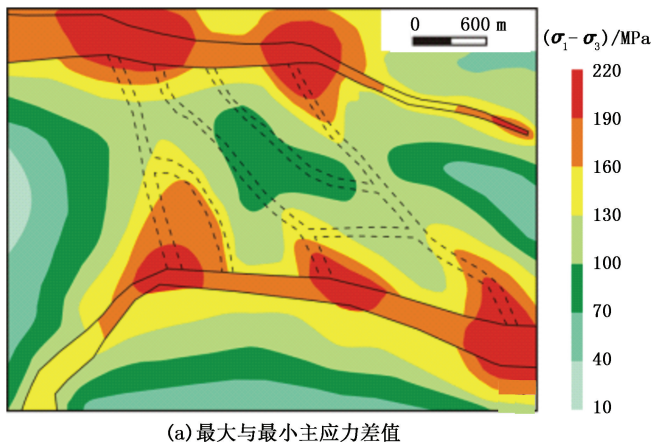
应力场为右旋性质,也反映断层变换带相对于其南北相邻断块做不同方向的走滑运动。变换断层 a 进一步发育,断层形态趋于明显,由一系列呈右阶斜列式展布的断层首尾相接组成,与伸展构造机制中右行走滑构造带中常出现右阶的剪切断裂现象吻合^[28]。在其东部又发育两条变换断层 b、c,走向分别为 NW310°和 NW345°,两条断层自南北向北切割变换带长度约 2/3 即行消失。

(4) 15 ~ 20 min 期间的模型(图 4(d))。此阶段对应于沙三上亚段沉积期,伸展作用的强度达到顶峰,南北方向的拉张量约 1.0 cm,右旋剪切作用不断增强。营 1 与营 31 断层在向南北两侧的移动过程中断裂特征发生明显变化,其中营 1 断层西段向区内发生弧形弯曲,东段则派生出一条约呈 NW320°尾端分叉的断裂。内部的断层 a、b、c 进一步发育形成连接主断层的主要变换断层。受变换断层 a 的影响,营 31 断层在与其交界处开始向南发育,东端则呈树枝状分叉,而断层 b 则以燕尾状分叉的样式与营 31 断层相交。

(5) 20 ~ 25 min 期间的模型(图 4(e))。此阶

段对应于沙二段沉积期,伸展作用开始减弱,南北方向拉张量约 0.6 cm,右旋剪切作用强度变化较小。同时,开始注入黄油模拟底辟上拱作用,加剧了断裂系统的复杂程度。营 1 与营 31 断层进一步向南北两侧发生位移,变换带面积扩大至整个砂箱,断层的平面断距也继续扩大,形成了明显的破碎带。变换断层 a、b、c 继续发育,断层的羽裂及分叉现象更加明显,可见剪切位移带(PDZ)两侧的同向 P 剪切断裂和里德尔 R 剪切破裂。断层的弯曲、尾端及交汇处派生出一系列低级序断层。在后期剪切作用形成的斜交式断层的右旋走滑活动下,中间所夹小断块呈掀斜式运动并诱发破裂^[29],碎落的砂粒则充填在断块的边缘,导致模型西南部弧形断裂的形态模糊不清。该阶段反映了在沙河街组沉积的后期变换带的整体构造格局已基本成型,张扭及底辟复合应力场开始在区内诱导出不同样式的低级序断层。

(6) 25 ~ 30 min 期间的模型(图 4(f))。此阶段对应于沙一段沉积期,伸展作用几乎消亡,南北方向拉张量只有 0.1 cm,右旋剪切作用也趋于停止,下伏地层的底辟作用也逐渐减弱。同上一阶段相比,该阶段模型的整体构造形态变化较小,只在 3 条变换断层 a、b、c 的尾端、分叉处及其与营 31 断层的交汇处产生了大量低级序断层,并使原有的低级序断层继续发育,限制终止于高级序断层之上,最终形成了复杂的断裂系统网络。



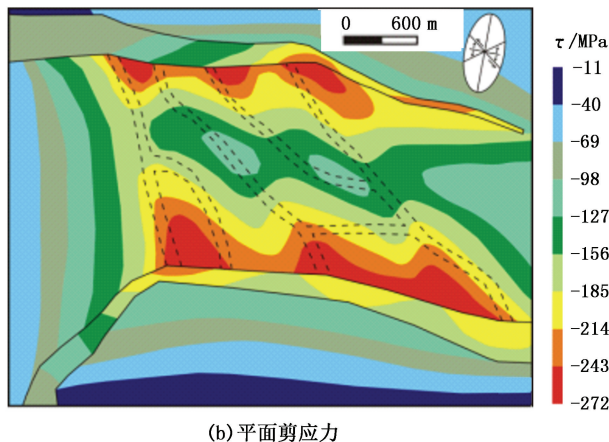
(a) 最大与最小主应力差值

4 断层变换带形成机制及演化模式

由于在断层演化史与活动性分析以及构造物理模拟中断层变换带最终成型于沙河街沉积末期,并且大量的低级序断层也是在该时期形成,为了更好地验证实验结果的力学合理性及分析断层的形成机制与低级序断层分布规律,在岩石力学实验分析的基础上将营 1 与营 31 断层作为先存断层,分别赋予地层和断层相应的力学参数,建立对应的模型,加载合理的边界条件,对沙河街末期开展三维应力场的数值模拟,分析变换带内尤其是变换断层发育部位(图 5 虚线所示)的应力分布特征。在反映岩石破裂的库伦-莫尔准则中,当截面上的剪应力 $\tau \geq$ 临界剪应力 $\tau_{\max}$ 时,截面就会发育剪切破裂^[30]。同时, τ 又可表示为

$$\tau = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)}{2} \sin(2\alpha) \quad (1)$$

式中, σ_1 为最大主应力, MPa; σ_3 为最小主应力, MPa; α 为截面法线与最大主应力的夹角。对某一固定截面来说,最大主应力与最小主应力差值越大,岩石的剪切破裂程度越强。另外,区内的应力场数值模拟结果显示 σ_1 直立, σ_2 (中间主应力, 单位 N) 和 σ_3 水平,在控制断层形成的安德森模式中, σ_1 增大或者 σ_3 减小都能诱发正断层的产生,即最大主应力与最小主应力差值的高值区有利于正断层的发生^[31]。



(b) 平面剪应力

图 5 营 26 断层变换带沙河街末期最大与最小主应力差值和平面剪应力

Fig. 5 Difference between the minimum and maximum principle stress and plane shearing stress of Ying 26 transfer zone in the end of Shahejie Formation sedimentary period

根据这一理论,将沙河街末期的最大主应力与最小主应力差值的分布(图 5(a))与最终的物理模拟实验结果结合分析发现,在变换断层与主断层的交界处即主断层发生转折的部位为差应力的高值区。正是这种较高的差应力诱导变换断层在此处发

育并逐渐向叠覆带内延伸,从而调节主断层的变形守恒。另外,越靠近主断层,差应力值越高,内部变换断层的交汇、分叉以及不同级别断层形成的闭合、半闭合局部小断块处的差应力值也较高,这些差应力高值区为低级序断层的优势发育区。变换带内由

于构造特征复杂,准确地识别低级序断层较为困难,严重降低了注采对应关系,导致了在油田开发后期剩余油多分布在这些区域(图1)。

营26变换带沙河街末期右旋剪切破裂线方向大约为 $NW315^\circ$,沙河街组沉积末期平面剪应力值为负(右旋),即该期发育右旋剪切应力场,因此在变换带内部发育了一系列优势走向为 $NW315^\circ$ 的变换断层,在平面上呈右阶雁列式分布(图5(b))。

根据对营26断层变换带的构造物理模拟和数值模拟,总结分析出其形成机制及演化过程(图6):①沙河街组沉积前,在近南北方向的区域性伸展作用下区内形成与拉张方向垂直的两条二级控块断裂营1与营31断层,二者在刚形成时并未叠置;②沙四段沉积早期,伸展应力场逐渐增强,营1与营31

断层不断向两侧延伸,最后在二者之间形成一个同向型的叠覆带;③沙四段沉积后期,两条控块断层向南北两侧的伸展位移在叠覆带内诱导出右旋剪切应力,导致叠覆带西部发育一条 NWW 方向的张剪性质的变换断层a;④沙三段沉积期,郯庐断裂带的走滑运动在区内产生强烈的右旋剪切应力场,在变换断层a的东侧依次发育张剪性断层b、c,3条断层呈雁列式展布;⑤沙二段—沙一段沉积期,下伏的孔店组地层在差异压实作用下底辟上拱,加剧了变换带内应力场的复杂程度。在高级序断层的分叉、交汇以及弯曲处派生出一系列低级序断层,同时,平面斜交式走滑断层的同旋向活动造成块体的掀斜运动加剧了低级序断层的复杂程度。

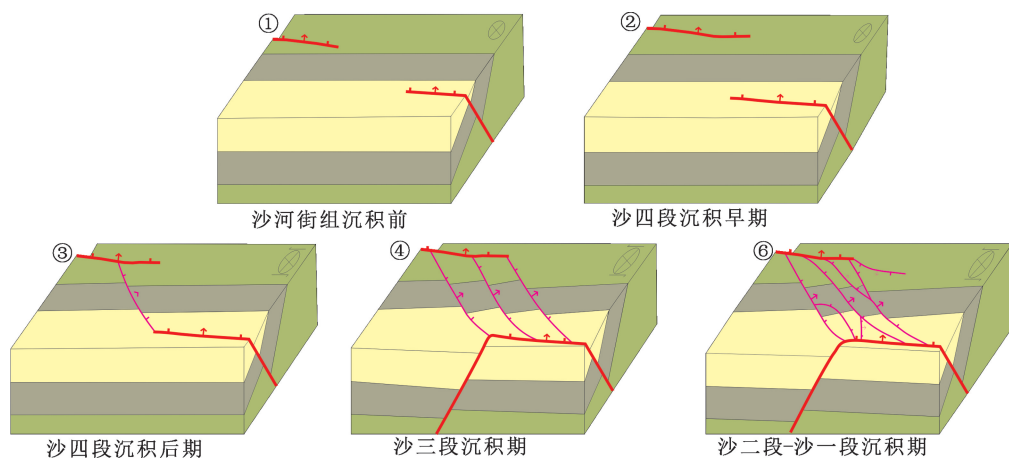


图6 营26断层变换带的形成机制及演化模式

Fig. 6 Formation mechanism and evolutionary model of Ying 26 transfer zone

5 结 论

(1)控制营26断层变换带形成的两条张性断裂为同期发育的两条平行断裂,并非一条张性大断裂经走滑断层剪切形成,其间的叠覆带是两条断层在向两侧延伸的过程中首尾相互叠置形成。

(2)区内沙河街组沉积期应力机制复杂,整体表现为沙四段沉积期南北向伸展,沙三段沉积期开始右旋剪切,沙二段沉积期发育底辟上拱的构造机制。叠置后的营1与营31断层向两侧的伸展运动会在叠覆带内诱导出右旋剪切力,控制了第一条变换断层a产生,而变换断层b、c则由沙河街组沉积中期郯庐断裂带所控制的区域性右旋剪切应力场形成。

(3)变换断层对主断层的构造活动具有明显的调节作用,在沙三上亚段沉积期伸展作用最强,但由

于变换断层叠加并吸收了部分主断层的变形,导致主断层的活动强度较沙三中一下亚段沉积期弱,而变换断层的活动强度却达到历史顶峰。

(4)叠覆型断层变换带的整体构造形态及内部的断裂组合样式与控制变换带形成的两条张性大断裂的叠置程度有关。叠置程度越大,变换带内部越易产生雁列式展布的变换断层,且变换断层与主干断层的夹角越小。

(5)变换断层的优势走向与区内剪切应力场的方向一致。断层的转折端、分叉和交汇处以及由其派生出的次级断层形成的闭合与半闭合的局部小断块内是最大主应力与最小主应力差值的高值区,极易诱发张扭性的低级序断层产生。另外,两条斜交的剪性断层在不同方向的走滑运动会使中间的块体发生掀斜运动,导致断块破碎,产生更加复杂的低级序断层系。

参考文献:

- [1] DAHLSTORM C D A. Blanced cross-sections [J]. Canada Journal Earth Science, 1969,6(4):743-757.
- [2] MORLEY C K, NELSON R A, PATTON T L, et al. Transfer zones in the East African Rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts [J]. AAPG, 1990,74(8):1234-1253.
- [3] GAWTHORPE R L, HURST J M. Transfer zones in extensional basins: their structural style and influence on drainage development and stratigraphy [J]. Journal of the Geological Society, 1993,150:1137-1152.
- [4] MOUSTAFA A R. Controls on the development and evolution of transfer zone; the influence of basement structure and sedimentary thickness in the Suez rift and Red sea [J]. Journal of Structural Geology, 1997,19(6):755-768.
- [5] 胡望水,王燮培. 松辽盆地北部变换构造及其石油地质意义[J]. 石油与天然气地质,1994,15(2):164-172. HU Wangshui, WANG Xiepei. Transform structures in northern part of Songliao Basin and its significance in petroleum geology [J]. Oil & Gas Geology, 1994,15(2):164-172.
- [6] 张永刚,汤良杰,金文正,等. 龙门山构造转换带对油气成藏的控制作用[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2000,33(5):30-35. ZHANG Yonggang, TANG Liangjie, JIN Wenzheng, et al. Control of transfer zones on hydrocarbon accumulation in Longmen Mountains thrust belt [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2000,33(5):30-35.
- [7] 刘恩涛,王华,李媛,等. 北部湾盆地福山凹陷构造转换带对层序及沉积体系的控制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(3):17-22. LIU Entao, WANG Hua, LI Yuan, et al. Control of transfer zone over sequences and depositional system in Fushan sag, Beibuwan Basin [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(3):17-22.
- [8] 李宝刚. 高邮凹陷断裂调节带发育特征及其石油地质意义[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2008,32(1):19-23. LI Baogang. Development characteristics of fault accommodation zone and its significances of petroleum geology in Gaoyou depression [J]. Journal of China Univerity of Petroleum (Edition of Natural Science), 2008,32(1):19-23.
- [9] 劳海港,陈清华. 济阳坳陷南部横向变换带构造演化及其油气聚集规律[J]. 地质论评,2012,58(5):893-900. LAO Haigang, CHEN Qinghua. The tectonic evolution of lateral transitional zone in Southern Jiyang Depression and its hydrocarbon accumulation [J]. Geological Review, 2012,58(5):893-900.
- [10] 王光付,王端平,单家增. 东营凹陷辛镇构造复杂低级序断裂体系形成的构造物理模拟实验[J]. 石油勘探与开发,2004,31(2):18-20. WANG Guangfu, WANG Duanping, SHAN Jiazeng. Structural modeling experiments of complex low-grade fracture system in the Xinzhen structure, Dongying Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004,31(2):18-20.
- [11] 云金表,赵利华. 东营凹陷中央隆起带构造特征、沙箱模拟与形成机制研究[J]. 地质力学学报,2003,9(12):113-121. YUN Jinbiao, ZHAO Lihua. Research on molding, structural feature and formation mechanism of the central uplift belt in Dongying depression, Jiyang [J]. Journal of Geomechanics, 2003,9(12):113-121.
- [12] 劳海港,陈清华,刘岩,等. 东营凹陷中央背斜变换带演化特征及其控油规律[J]. 高校地质学报,2013,19(1):133-140. LAO Haigang, CHEN Qinghua, LIU Yan, et al. Evolution and control of oil distribution of the transition zone in the central anticline transformation belt, Dongying sag [J]. Geological Journal of China Universities, 2013,19(1):133-140.
- [13] 王颖,赵锡奎,高博禹. 济阳坳陷构造演化特征[J]. 成都理工学院学报,2002,29(2):181-187. WANG Ying, ZHAO Xikui, GAO Boyu. Characters of tectonic evolution of the Jiyang depression [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2002,29(2):181-187.
- [14] 任建业,张青林. 东营凹陷中央背斜隆起带形成机制分析[J]. 大地构造与成矿学,2004,28(3):254-262. REN Jianye, ZHANG Qinglin. Analysis of development mechanism for center anticline high in Dongying depression [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004,28(3):254-262.
- [15] 吴智平,张林,李伟,等. 东营凹陷孔店期—沙四早期构造格局恢复[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2012,36(1):13-19. WU Zhiping, ZHANG Lin, LI Wei, et al. Early Paleogene (Ek-Es₄^x) structure framework restoration of Dongying sag [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012,36(1):13-

- 19.
- [16] 赵利,李理,张航. 东营凹陷新生代早期断裂系统的运动学特征及动力学机制[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014,38(3):18-24.
ZHAO Li, LI Li, ZHANG Hang. Fault system's kinematic characteristics and dynamic mechanism during early Cenozoic in Dongying sag[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(3):18-24.
- [17] 任建业,于建国,张俊霞. 济阳坳陷深层构造及其对中生代盆地发育的控制作用[J]. 地学前缘,2009,16(4):117-137.
REN Jianye, YU Jianguo, ZHANG Junxia. A Structures of deep bed in Jiyang Sag and their control over the development of Mesozoic and Cenozoic basins[J]. Earth Science Frontiers, 2009,16(4):117-137.
- [18] 胡贤根,谭明友,张明振. 济阳坳陷东部走滑构造及其形成机制[J]. 油气地质与采收率,2007,14(5):42-45.
HU Xiangen, TAN Mingyou, ZHANG Mingzhen. Strike-slip structures and their forming mechanism in the eastern Jiyang depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007,14(5):42-45.
- [19] 漆家福,肖焕钦,张卫刚. 东营凹陷主干边界断层(带)构造几何学、运动学特征及成因解释[J]. 石油勘探与开发,2003,30(8):8-12.
QI Jiafu, XIAO Huanqin, ZHANG Weigang. Geometry, kinematics and mechanism interpretation of the major boundary faults in Dongying Sag [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003,30(8):8-12.
- [20] 于建国,李三忠,王金铎,等. 东营凹陷盐底辟作用与中央隆起带断裂构造成因[J]. 地质科学,2005,40(1):55-68.
YU Jianguo, LI Sanzhong, WANG Jinduo, et al. Salt diapirism and faulting of the central uplift belt in the Dongying Sag, Bohai bay basin, north China [J]. Chinese Journal of Geology, 2005,40(1):55-68.
- [21] 王世虎,夏斌,陈根文,等. 济阳坳陷构造特征及形成机制讨论[J]. 大地构造与成矿学,2004,28(4):428-434.
WANG Shihu, XIA Bin, CHEN Genwen, et al. Characteristics of Jiyang depression and mechanism of basin formation [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004,28(4):428-434.
- [22] 时秀朋,李理. 鲁西隆起中—新生代伸展构造演化的模拟试验[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2010,34(3):25-29.
SHI Xiupeng, LI Li. Modeling experiments of structural evolution since late Mesozoic in west Shandong up lift, China [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2010,34(3):25-29.
- [23] 刘重庆,周建勋,张博. 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[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2013,37(4):15-22.
LIU Chongqing, ZHOU Jianxun, ZHANG Bo. Physical modeling of Cenozoic fold-thrust belts formation mechanism in northwestern Qaidam Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2013,37(4):15-22.
- [24] 冯振东,戴俊生,马晓明,等. 沙埕地区阜宁期构造物理模拟实验[J]. 西安石油大学学报(自然科学版),2010,25(4):14-18.
FENG Zhendong, DAI Junsheng, MA Xiaoming, et al. Physical simulation experiment of the structural in the Shanian area in Funing stage [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2010,25(4):14-18.
- [25] 李伟,刘超,张江涛,等. 北部湾盆地迈陈凹陷东部断裂系统成因演化机制的构造物理模拟[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(3):38-46.
LI Wei, LIU Chao, ZHANG Jiangtao, et al. Structure physical modeling experiment of evolutionary mechanism about fault system in eastern area of Maichen sag, Beibu-gulf Basin[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015,39(3):38-46.
- [26] 冯阵东,戴俊生,张继标,等. 伸展构造物理模拟中存在的问题及解决办法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2011,35(3):7-11.
FENG Zhendong, DAI Junsheng, ZHANG Jibiao, et al. Problems and solutions in physical simulation of extensional structures [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2011,35(3):7-11.
- [27] 彭文绪,张志强,姜立群,等. 渤海西部沙垒田凸起区走滑断层演化及其对油气的控制作用[J]. 石油学报,2012,33(2):204-212.
PENG Wenxu, ZHANG Zhiqiang, JIANG Liqun, et al. Evolution of strike-slip faults in the Shaleitian bulge of the western Bohai offshore and their control on hydrocarbons [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012,33(2):204-212.
- [28] 刘玉瑞,刘启东,杨小兰. 苏北盆地走滑断层特征与油气聚集关系[J]. 石油与天然气地质,2004,25(3):279-283.
LIU Yurui, LIU Qidong, YANG Xiaolan. Relation between features of strike-slip faults and hydrocarbon accu-

mulation in Subei basin[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(3): 279-283.

[29] 冯建伟. 准噶尔盆地乌夏断裂带构造演化及控油作用研究[D]. 东营:中国石油大学,2008.

FENG Jianwei. The tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon in Wuxia Fault belt of Junggar Basin [D]. Dongying: China University of Petroleum, 2008.

[30] 冯建伟,戴俊生,马占荣,等. 低渗透砂岩裂缝参数与应力场理论模型[J]. 石油学报,2011,32(4):664-671.

FENG Jianwei, DAI Junsheng, MA Zhanrong, et al. The theoretical model between fracture parameters and stress field of low-permeability sandstones [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011,32(4):664-671.

[31] 戴俊生,邹娟,赵贤正,等. 基于应力场模拟解释河西务构造带孔店—沙四期断层特征[J]. 天然气地球科学,2014,25(10):1529-1536.

DAI Junsheng, ZOU Juan, ZHAO Xianzheng, et al. Fault characteristic interpretation of Ek-Es4 sedimentary period in Hexiwu Tectonic Belt through stress field simulation [J]. Natural Gas Geoscience, 2014, 25(10): 1529-1536.

(编辑 修荣荣)