张飞鹏, 陈兴鹏, 吴佳朋, 等. X 型正断层构造特征及其构造物理模拟[J]. 海洋地质前沿, 2022, 38(9): 48-58.

ZHANG Feipeng, CHEN Xingpeng, WU Jiapeng, et al. Structural characteristics and physical simulation of X-shaped normal faults[J]. Marine Geology Frontiers, 2022, 38(9): 48-58.

X型正断层构造特征及其构造物理模拟

张飞鹏1,陈兴鹏2,吴佳朋1,雒蓉1,李会慎1,张文婷1

(1中国石油大港油田公司, 天津 300280; 2中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580)

摘 要:X型正断层是常见的伸展构造样式,其几何学特征、形成过程及成因机制缺乏系统研究。基于地震资料精细解释和构造物理模式实验,明确几何学特征,重构其形成过程,明确形成机制,并探讨控藏作用。研究结果表明,X型正断层分为新生型和继承型2大类。继承型X型正断层是基底断裂复活形成的,包括差异伸展和双向均匀伸展2种模式;新生型X正断层形成于张应力和剪应力配比关系为1:2~2:1 范围内的应力背景;继承型X型正断层具有较好油气运移、储层改造等优势并且形成多类型圈闭,具有"多层楼"式的成藏模式。X型正断层的研究丰富了构造样式研究的理论认识,建立了合理的地质模型,为构造精细解释提供依据。

关键词:构造特征;物理模拟;成因机制;油气成藏;X型正断层

中图分类号:P618.13;P54

文献标识码:A

DOI: 10.16028/j.1009-2722.2021.158

0 引言

X型正断层是指相向倾斜、走向相同的 2 条断裂相互切割形成的断裂组合,剖面呈简单或复杂 X形态^[1]。在野外露头和地震资料发现了厘米级至千米级的 X型正断层。现阶段国外学者从野外剖面几何学特征、构造物理模拟及数值模拟进行了大量的研究^[2-6]。但国内对此类断裂研究相对较少,周天成和周建勋(2008)^[7] 对南堡凹陷 X型断层形成过程、机制及其对油气的聚集控制进行了研究;余一欣等^[8] 对渤海湾地区 X型正断层进行了分析,明确了静态、动态特征,为该区域地质构造建模提供了依据;包项等^[9] 针对歧口凹陷馆陶组发育的X型正断层进行了分析,认为该构造样式是在张扭性应力背景下形成的; YUFS和 HEMIN KY^[10] 针对珠江口盆地非平行式共轭正断层进行了研究,提出几何学表征参数,并通过构造物理模拟,模拟其

收稿日期: 2021-06-03

资助项目: "渤海东部走滑断裂带形成机制及其控藏机理研究" (CCL 2017TITZL ST0864)

作者简介: 张飞鹏(1988—), 男, 博士, 主要从事油气区构造解析方面的研究. E-mail: fpzh2014@sina.com

形成过程。现阶段国内学者的研究集中在静态特征分析、形成过程及机理的定性描述,缺少基于静态特征研究,建立合理的地质模型,并通过构造物理模拟方法来揭示其形成过程和机理的研究。渤海海域石臼坨地区广泛发育 X 型正断层且具有丰富的三维地震资料(图 1)。本文将基于地震资料的精细解释,完成地质建模,针对不同类型 X 型正断层进行构造物理模拟,探讨其成因机制及油气地质意义。

1 X型正断层构造特征及分类

基于地震资料解释,分析 X 型正断层几何学特征,为构造物理模拟地质建模提供基础。

1.1 X型断层剖面特征

石臼坨凸起东侧缓坡带和渤中凹陷发育 X 型正断层,规模小,分布在明化镇组中;如图 2 所示,断层走向为 NEE 向,2 条断层呈平行式展布,分布于石臼坨 3 号断层尾端,与其它 NNE 向断层组合呈马尾状,具有右旋走滑的应力特点;剖面上,呈"漏斗型",对称分布,仅发育于明化镇组中,局部切割馆陶组。

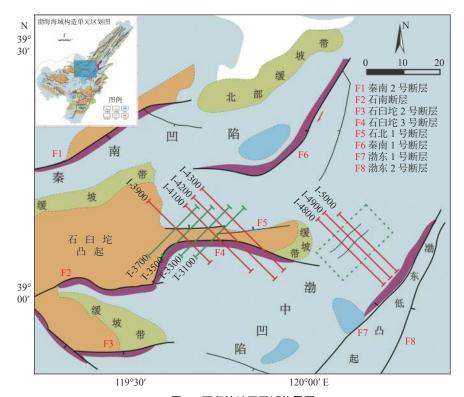


图 1 石臼坨地区区域位置图

Fig.1 Location of the Shijiutuo area

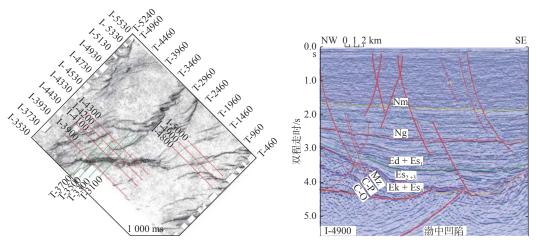


图 2 明化镇组发育的 X 型正断层典型剖面(测线位置见图 1)

 $Fig. 2 \quad Typical \ profiles \ of \ X-shaped \ normal \ faults \ in \ the \ N_m \ Formation \ (see \ Fig. 1 \ for \ location \ of \ the \ profiles)$

石臼坨凸起区发育的 X 型正断层组合样式,规模大,切穿古生界,发育在古近系及中、古生界之中;该组合样式由近 EW 基底断裂(包括石北 1号断层和石臼坨 3号断层)和多条 NEE 向次级断层组成,平面呈斜交式或梳状组合样式;剖面上呈"上部多级"Y"字形、下部地垒"的结构,下部为简单的地垒,上部为不对称的地堑,且主干断层一侧发育多级"Y"字形样式;发育规模自东向西逐渐减小(图 3)。

在前人研究的基础上[8-12],结合上述的地震剖

面和相干切片特征,将研究区发育的 X 型正断层划分为新生型和继承型 2 种类型。其中新生型为新生代形成的"漏斗形"的组合样式;继承型是指基底断层持续发育并受后期新生断层切割改造形成的组合样式。

1.2 不同类型断层几何参数特征

YUFS和HEMINKY^[10]引入了X型正断层的几何学表征参数,用于表征X型正断层几何学特征。X型断层几何学表征参数(图 4),如下所述:

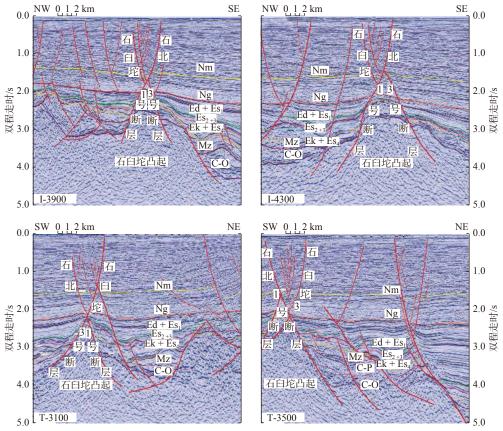


图 3 深层 X 型正断层典型剖面 (测线位置见图 1)

Fig.3 Typical profiles of X-shaped normal faults in the deep strata (see Fig.1 for location of the profiles)

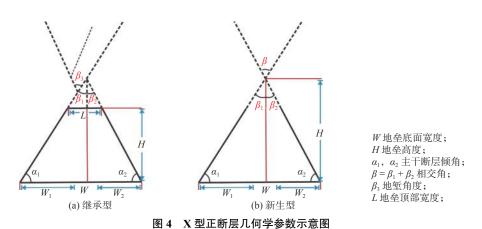


Fig.4 Schematic model of the geometric parameters of the X-shaped normal faults

① α_1 和 α_2 表征主干断层的倾角;② β 为基底断层复活相交的相交角($\beta=\beta_1+\beta_2$);③ β_3 为上部地堑的交角;④ W 为地垒宽度($W=W_1+W_2$);⑤ L 为地垒顶宽;⑥ H 为地垒高度。以 α_1 、 α_2 、 β_1 、 β_2 和 β_3 表征 X 型正断层的形态特征;以 W、H 和 L 参数表征 X 型正断层的发育规模。

新生型断层在研究区内发育较少,底角 α_1 为 69.6°~74.6°,底角 α_2 为 73.5°~78°,两底角大小相 近,地垒底面宽度为 1 750~2 700 m,从统计的几何

学参数可知: 新生型 X 型正断层规模较小, 具有对称性。继承型 X 型正断层地垒底面宽度为 3 000~8 000 m, 顶面宽度为 500~3 000 m, 表现为自东向西地垒发育规模逐渐变小; 地垒底角 α_1 为 60°~70°, 均值为 64.5°, 地垒底角 α_2 为 62°~70°, 均值为 68°, 多表现为非对称性; 继承型 X 型断层相交角 β 为 44°~57°, 均值为 47.5°; β_1 为 20°~30°, 均值为 25.5°, β_2 为 16°~27°, 均值为 22°; 地堑角度为 46°~57°, 均值为 52°, 从继承型 X 型正断层几何参数可知: 发

育规模大,基底地垒规模越大,上部地堑的角度越大,整体规模越大,多为非对称性,少数具有对称性

(表1)。

表 1 石臼坨地区 X 型正断层几何学参数 (测线位置见图 1)

Table 1	The geometric	parameters of X-shaped r	normal faults (see)	Fig.1 for lo	ocation of typical profiles)

类型	参数													
	α ₁ /(°)	a ₂ /(°)	β ₁ /(°)	β ₂ /(°)	β ₃ /(°)	H/m	W/m	L/m	测线号					
	74.5	78	25.5	22	47.5	1 567	2 700	0	I-5000					
新生型	74.6	76	25.4	14	39.4	1 550	2 025	0	I-4900					
	69.6	73.5	21.4	16.5	37.9	1 612	1 750	0	I-4800					
	66.4	62.8	23.6	27.2	53	2 593	7 875	3 150	I-4300					
	63.3	74	26.7	16	50	2 419	8 000	2 550	I-4200					
	60.1	63	29.9	27	45	2 494	4 905	1 000	I-4100					
/孙 - Z. 再归	65.6	68	24.4	22	46	2 281	5 400	1 800	I-3900					
继承型	61.6	70	28.4	20	48	2 333	6 075	1 912	T-3100					
	66.4	69.3	23.6	20.7	54	2 400	4 575	1 875	T-3300					
	70.7	66	19.3	24	45	2 000	3 225	525	T-3500					
	61.7	71	28.3	19	46	2 619	4 350	750	T-3700					

对比分析发现,新生型 X 型正断层主干断层 倾角较继承型 X 型正断层倾角陡,发育层位浅,规模小,数量少;对称性而言,新生型 X 型正断层 对称性较好,而继承型 X 型正断层多呈非对称的特征。

2 构造物理模拟实验及成因机制分析

基于 X 型正断层几何学特征分析, 建立合理的构造物理模拟模型, 进行不同控制因素下的模拟实验。

2.1 继承型 X 型正断层物理模拟实验

结合前人研究,设计构造物理模拟设备,通过 单因素分析方法,对比分析模拟结果,确定继承型 X型正断层形成的影响因素,明确形成过程及厘定 出断裂形成机理。

2.1.1 构造物理模拟装置

基于前人对继承型 X 型正断层的构造物理模拟^[10],结合研究区的继承型 X 型正断层构造几何学特征,改进设计了构造物理实验设备(图 5),模拟不同大小伸展应力背景下,形成的 X 型正断层剖面特征,并且揭示继承型 X 型正断层发育过程。

2.1.2 模型设计及参数设置

通过继承型 X型正断层几何学特征分析,按

照 1:2 万的比例尺,设置地垒底角均为 60°,以基底地垒顶部为变量,共设计 2 组模型(表 2),分别对地垒两侧进行均匀伸展和差异性伸展,模拟同沉积断层控制的继承型 X 型正断层的形成过程。

2.1.3 模拟结果分析

本实验选取 80~120 目的干燥石英砂, 用 120~160 目的彩色石英砂进行分层, 以伸展长度作为伸展量的表征。

(1)模型一:双向均匀伸展

模型一参数设置为地垒高度 H 为 12 cm, 地垒底角 α 1 和 α 2 为 60°, 地垒顶部宽度 L 为 4.5 cm; 共计设置了 5 次双侧均匀伸展。如图 6 所示, 初次伸展(4 cm)基底断裂 f1 和 f2 断裂复活, 向上延伸相

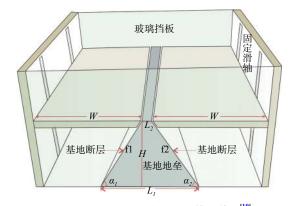


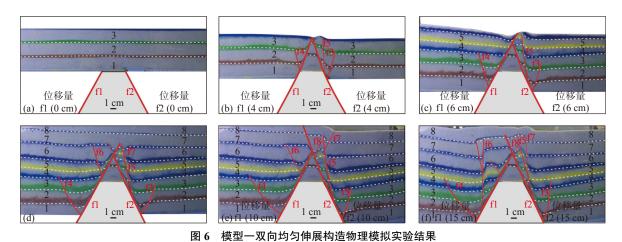
图 5 继承型 X 型正断层物理模拟装置[10]

Fig.5 Analogue modeling of the inherited X-shaped normal faults^[10]

表 2 继承型 X 型断层构造物理模拟模型参数

Table 2 Geometric parameters of analogue modeling of the inherited X-shaped normal faults

模			位移量				模型参	数		模		位移量				模型参	数	
型		序号	f1/cm	f2/cm	<i>α</i> ₁ /(°)	$\alpha_2/(\circ)$	H/cm	L1/cm)	L2/cm	型	序号	f1/cm	f2/cm	$\alpha_1/(\circ)$	$\alpha_2/(\circ)$	H/cm	L1/cm	L2/cm
		1	4	4	60	60	12	13.5	4.5		1	4	4	60	60	15	9	2
	双向	2	6	6	60	60	12	13.5	4.5	双向	_	6	6	60	60	15	9	2
	均匀	3	8	8	60	60	12	13.5	4.5	均々 伸見	` `	8	8	60	60	15	9	2
模型	伸展	4	10	10	60	60	12	13.5	4.5	模型	4	10	10	60	60	15	9	2
_		5	15	15	60	60	12	13.5	4.5	=	1	0	4	60	60	15	9	2
		1	0	4	60	60	12	13.5	4.5	差昇	<u> </u>	2	6	60	60	15	9	2
	差异 伸展	2	2	6	60	60	12	13.5	4.5	伸展	į 3	4	8	60	60	15	9	2
	11/12	3	4	8	60	60	12	13.5	4.5		4	6	10	60	60	15	9	2



因 6 侯主 从内约为师从内边物建侯派关照和木

Fig.6 The experimental results in Model 1 on bidirectional uniform extension

交, 断裂两侧发育反向次级断层 f3、f4 和 f5; 随着伸展量逐步增大, 断层相交点之上形成地堑, 对称发育多级 "Y"字形的伸展构造样式。整体表现基底断层复活、次级断裂对称发育。该模拟结果与研究区 X型正断层具有一致性(图 3-I-3900, 图 3-T-3100)。

(2)模型一:双向非均匀伸展

与模型一(双向均匀伸展)具有相同的实验条件。设置两侧差异性的伸展量,与模型一均匀伸展做对比实验,旨在探究差异性伸展对继承型 X型断层形成的影响。如图 7 所示,断层差异性复活,伸展量小的断层 f2 早期复活,而后交于断层

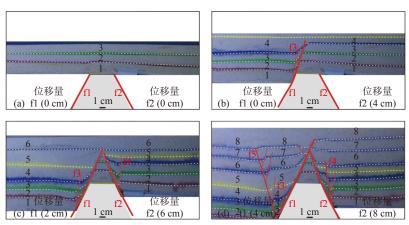


图 7 模型一双向非均匀伸展构造物理模拟实验结果

Fig.7 The experimental results in Model 1 on bidirectional non-uniform extension

f1之上,后期未持续活动,f1断层下盘也较f2断层下盘发育规模和数量更多的次级断层,发育多级"Y"字形构造样式。该模拟结果与研究区发育的X型正断层的剖面特征具有一致性(图 3-I-4300;图 3-T-3500)。

(3)模型二:双向均匀伸展

模型二改变了基底地垒顶部宽度,旨在模拟地垒顶部宽度对基底断裂复活影响。地垒高度 H为 15 cm, 地垒底角 α 1 和 α 2 为 60°, 地垒顶部宽度 L为 2.0 cm。初次双侧伸展(4 cm),基底断裂f1 和 f2 复活,发育相交,交叉点顶部形成地堑;随着双侧伸展量的增大,f1 和 f2 两侧同步发育次级伸展断层,组合成"Y"字型伸展构造样式(图 8)。与模型一双向均匀伸展相比,随着地垒顶部宽度的变小,基底断裂更容易复活相交,且表现出更好的对称性。

(4) 模型二:双向非均匀伸展

模拟结果显示如图 9 所示,首先在 f2 单侧拉伸, 基底 f2 断层复活,并发育了 f3 反向调节断层;进一 步差异伸展, f1 基底断层也复活, 截止于 f2 断面, 交 汇点上部发育地堑, 由于差异伸展基底断层两侧次 级断层发育差异明显, 伸展量大, 次级断层多, 规模 大, 两侧不对称特征明显。

该类型 X 型正断层在伸展应力背景下形成,基 底断裂复活的构造样式;双向均匀伸展和差异伸展 致使其剖面形成呈对称性和非对称性的几何形态 差异。

2.2 新生型 X 型正断层物理模拟实验

渤海海域新近纪-第四纪受控于 NNW-SSE 向伸展应力场和 NE-SW 向走滑应力场共同控制^[13],故设计了走滑、伸展配比实验 5 组实验。

2.2.1 构造物理模拟实验装置

该实验运用自主设计的多应力配比叠加的物理模拟实验装置,该设备具有可实现二维平面内多种性质应力、多期次、多角度叠加配比的物理模拟实验装置的理想模型(图 10)。

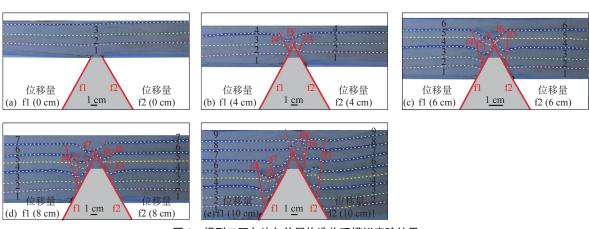


图 8 模型二双向均匀伸展构造物理模拟实验结果

Fig.8 The experimental results in Model 2 on bidirectional uniform extension

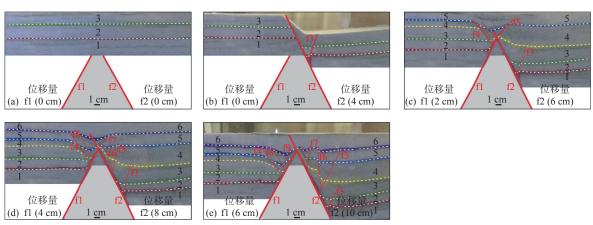


图 9 模型二双向非均匀伸展构造物理模拟实验结果

Fig.9 The experimental results in Model 2 on the non-uniform extension

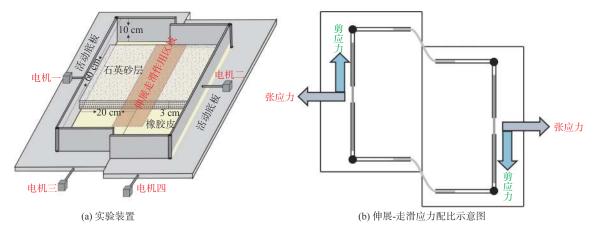


图 10 多应力叠加配比叠加装置及示意图

Fig.10 The experimental design and schematic model of the combination of multiple stresses

2.2.2 参数设置

本实验选取 160 目干燥石英砂作为实验材料, 120~160 目染色石英砂进行分层。应力叠加过程中走滑伸展的相对强弱关系用走滑和伸展位移量进行表征, 配比关系表征走滑和伸展作用相对强弱定量参数。本实验共设计了 5 组实验, 伸展、走滑配比关系分比为 4:1、2:1、1:1、1:2、1:4 (表 3)。

2.2.3 模拟结果分析

模拟过程中始终保持伸展速率和走滑速率的配比关系与最终位移量配比关系一致。模拟结果,断层平面发育 4 组性质的断层,一组为类似于纯走滑作用的"R 剪切断层",另一组为与伸展方向垂直的伸展断层,还存在一组与走滑方向反向相交的"P 剪切",在走滑带内还发育一条主走滑断层(PDZ)(图 11);伸展与走滑的配比关系控制了断层的性质、数量和走向特征。剖面形态特征,在伸展和走滑应力配比关系为 1:2、1:1 以及 2:1 的应力环境下,在缓坡带发育新生型 X 型正断层;在伸展/走滑配比关系为 1:4、1:2 和 1:1 应力环境下,凹陷区域发育负花状构造样式;在伸展/走滑配比关系为 2:1 和 4:1 应力环境下,凹陷发育"Y"字形或多级

"Y"字形构造样式。

实验结果表明新生型 X 型正断层形成环境相当于张扭应力环境下,用伸展和走滑应力的配比的关系来表征张扭的应力环境,研究表明并不是在所有的应力配比关系下都能够形成新生型 X 型正断层,仅在走滑和伸展应力相近的条件下形成,实验中伸展和走滑应力配比关系为 1:2、1:1 以及 2:1 的应力环境下能够形成此类构造样式(图 11)。

2.3 X型正断层发育模式

基于研究区 X 型正断层剖面发育特征和构造物理模拟实验,分别建立了继承型和新生型 X 型正断层发育模式。

2.3.1 继承型发育模式

研究发现继承型 X 型正断层包括差异伸展和 双向均匀伸展 2 种发育模式。如图 12 所示, 渤海湾盆地在新生代进入强烈裂陷期, 首先, 对于差异伸展模式而言, 双侧差异伸展应力的作用下基底断层复活, 一支强烈活动, 两支相交, 活动强度弱的一支停止活动, 形成 "T"形的构造样式(图 12b₃, b₄), 后期同沉积断层持续活动, 主干断层下降盘形成一系列次级断层, 形成多级 "Y"字形构造样式, 组合

表 3 伸展走滑配比实验参数

Table 3 Geometric parameters at different ratios of extension vs strike-slip

A N A D	张应	ž力作用	剪应	≡11.4 ₹		
实验序号	速率/(mm/s)	最终位移量/mm	速率/(mm/s)	最终位移量/mm	一 配比关系	
1	0.40	80	0.10	20	4:1	
2	0.20	80	0.10	40	2:1	
3	0.10	40	0.10	40	1:1	
4	0.10	40	0.20	80	1:2	
5	0.10	20	0.40	80	1:4	

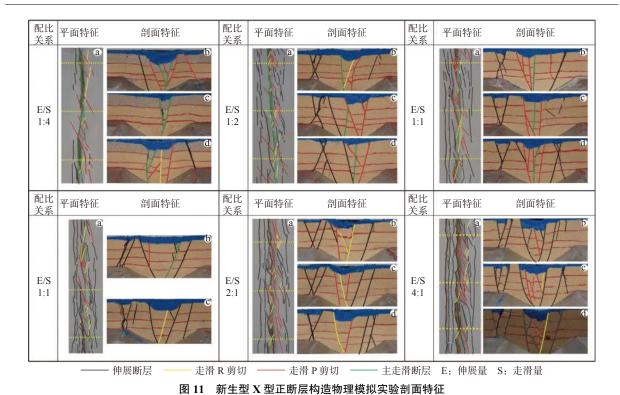


Fig.11 The characteristics of the incipient X-shaped normal faults shown in the experimental profiles

成继承型 X 型正断层构造样式,呈非对称式的发育特征(图 $12b_5$)。

双向均匀伸展模式为受双侧均匀伸展,基底断层复活,相交,形成地垒(图 12b₃'),在后续持续双向伸展,形成"上堑下垒"的地质结构特征,同沉积断层持续活动,形成反向"Y"字形的构造样式,组合成继承型 X 型正断层(图 12b₄',b₅'),呈对称性发育,这是与差异伸展的重要差别。

渤海湾盆地是典型的中、新生代叠合盆地,中生界经历了印支运动、燕山运动,中生代活动的的基底断裂广泛发育,这种基底断层复活而形成的继承型 X 型正断层在渤海湾盆地广泛发育,此次研究为后续的地震数据体精细解释,提供合理的地质模型。

2.3.2 新生型发育模式

渤海湾新生代盆地从剖面上分析存在 2 种构

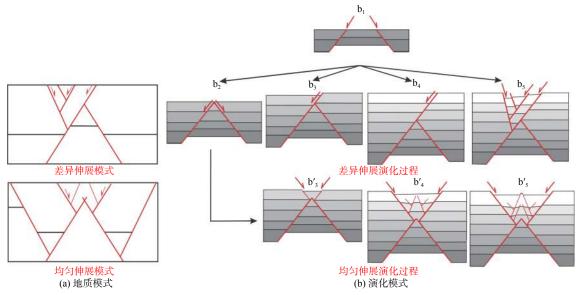


图 12 继承型 X 型正断层形成模式图

Fig.12 Model of development of inherited X-shaped normal faults

造系统,即伸展构造系统和走滑构造系统^[14],不同 沉积时期受控于不同性质应力场或两种性质应力 场共同作用。对于渤中凹陷明化镇组沉积之后出 现了强烈的构造运动,尤其以郯庐断裂及张家口-蓬 莱断裂两侧构造活动最为强烈,新近纪后期郯庐断 裂发生了剧烈的右旋走滑^[15]。受控于 NE 向郯庐

断裂强烈右旋走滑运动作用,出现 2 条同时发育的 共轭正断层, 2 条正断层同时、同步滑动,断层交汇 处产生特殊的地层变形,形成"X"形态;其形成过 程中会衍生出面积减小由断块旋转、脱盐作用、压 溶作用及沉积物压实作用共同作用来进行调节 (图 13)。

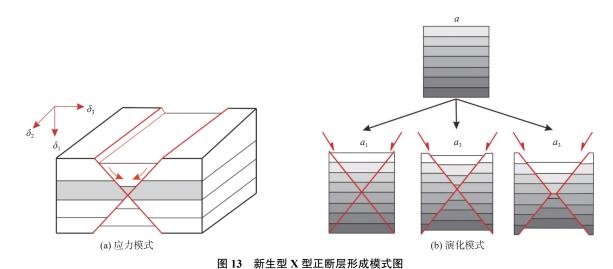


Fig.13 Model of development of incipient X-shaped normal faults

3 X型正断层油气意义

现今渤海湾盆地油气勘探发现与 X 型正断层控制的油气田,其储量可观,如 BZ13-1S、QHD34-3、BZ25-1S 和 BZ34-1 等^[8]。 X 型断层对油气运移、改善储层物性、多样类型油气藏具有密切关系。就油气运移而言,继承型具有切割古近系烃源岩、多期活动、活动时期长且跨度大,可作为有效油气运移通道^[7,9];"漏斗"上部地堑夹块受到两支主干断裂相互制约,挤压破碎,形成大量小断层,此级别断

层在地震剖面上难以识别,该级别断层易被断层泥封堵或后期胶结,阻碍油气垂向的疏导,有利于下部潜山油气藏的形成;若垂向运移受到阻碍,便会形成沿两支断层形成的空腔中的走向运移,形成远源的油气藏^[3,9,16]。继承型 X 型正断层改善储层物性,基底地垒遭受风化淋滤,形成溶蚀孔洞;后期多期伸展性质次级断层控制裂缝型次级裂缝的发育。X 型正断层控制形成了多种类型的圈闭,下部发育潜山油气藏,上部地堑形成断块油气藏以及断背斜油气藏^[17-18](图 14a)。

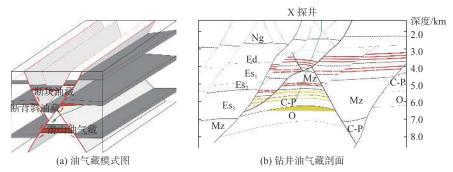


图 14 典型继承型 X 型正断层油气成藏模式

Fig.14 Models of hydrocarbon accumulations related to inherited X-shaped normal faults

近期大港油田在埕海地区所部署的预探井揭示了继承型 X 型正断层的油气成藏特征,证实了该成藏模式的可靠性。如图 14b 所示, X 探 1 井自上至下钻穿东营组、沙一段、沙二段、沙三段和侏罗系, 至二叠系完钻;通过录井荧光显示和测井综合解释, 在上部地堑沙一段、沙二段的粉砂岩中发现优质油藏和泥岩中发现页岩油; 在潜山中揭示了侏罗系和二叠系细砂岩中的气藏; 现阶段虽然尚未试油, 但已经揭示了该构造样式具有多层含油(气)、多种油气藏类型的特点, 呈"多层楼"式油气成藏模式, 其油气勘探具有极大的潜力。

4 结论

- (1)X型正断层划分为继承型和新生型正断层两大类。继承型 X型正断层,具有规模大、结构复杂、切割深度深的特点,主要分布在石臼坨凸起上,呈自东向西规模逐渐减小的特点;新生型 X型正断层,具有发育规模小、结构简单,主要分布于石臼坨凸起南部斜坡带和渤中凹陷内部。
- (2)继承型 X 型正断层是由在伸展应力背景下基底断层复活形成的断裂类型,包括差异伸展和双向均匀伸展两种模式,其差异体现在构造样式的对称性特征;同断层倾角下继承型 X 型正断层形成的难易程度,受控于基底地垒顶部的宽度。新生型 X 型正断层与郯庐断裂带右旋走滑有关,在张扭的作用下,张应力和剪应力配比关系在1:2~2:1 的范围内的应力背景下形成的,该类型在研究区内并不是广泛发育。
- (3)继承型 X 型正断层具有重要的勘探潜力, 具有油气运移、改善储层物性等优势,发育潜山油 气藏、断块油藏和断背斜油藏,具有"多层楼"式的 成藏模式。

致谢:感谢中海油天津分公司为论文研究提供的地震资料和匿名审稿专家的宝贵意见!

参考文献:

- [1] ANDERSON E M. The dynamics of faulting and dyke formation[M]. London:Oliver and Boyd, 1951.
- [2] FERRILL D A, MORRIS A P, STAMATAKOS J A, et al. Cross-

- ing conjugate normal faults[J]. AAPG Bulletin, 2000, 10(84): 1543-1559.
- [3] FERRILL D A, MORRIS A P, MCGINNIS R N. Crossing conjugate normal faults in field exposures and seismic date [J].
 AAPG Bulletin, 2009, 93(11): 1471-1488.
- [4] SCHWARZ H U, KILFITT F W. Confluence and intersection of interacting conjugate faults: a new concept based on analogue experiments[J]. Journal of Structural Geology, 2008, 30(9): 1126-1137.
- [5] BRETAN P G, NICOL A, WALSH J J, et al. Origin of some conjugate or "X" fault structures [J]. the Leading Edge, 2012, 15(7): 812,814,816.
- [6] ÇIFTÇI N B, LANGHI L. Evolution of the hourglass structures in the Laminaria High, Timor Sea: implications for hydrocarbon traps[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 36(36): 55-70.
- [7] 周天伟, 周建勋. 南堡凹陷晚新生代X型断层形成机制及其对油气运聚的控制[J]. 大地构造与成矿学, 2008, 32(1): 20-27.
- [8] 余一欣, 周心怀, 汤良杰, 等. 渤海湾地区X型正断层及油气意义[J]. 地质学报, 2009, 8(83): 1083-1088.
- [9] 包项, 季建清, 陶涛, 等. 渤海湾盆地沉积层中X型正断层的发育特征与油气意义[J]. 地质科学, 2010, 45(2): 395-410.
- [10] YU F S, KOYI H. Theoretical and experimental estimation of geometric relationship of non-parallel conjugate normal faults [J]. Tectonophysics, 2017, 703/704: 85-97.
- [11] 何永垚, 王英民, 卿元华, 等. 琼东南盆地X形共轭正断裂及其油气勘探意义[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(5): 527-530.
- [12] YU F S, KOYI H, ZHANG X T. Intersection patterns of normal faults in the Lufeng Sag of Pearl River Mouth Basin, China: insights from 4D physical simulations[J]. Journal of Structural Geology, 2016, 93: 67-90.
- [13] 李理, 赵利, 刘海剑, 等. 渤海湾盆地晚古生代-新生代伸展和走滑构造及深部背景[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 446-472.
- [14] 漆家福. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释[J]. 中国地质, 2004, 33(1): 15-22.
- [15] 万桂梅, 汤良杰, 周心怀, 等. 渤海海域新近纪—第四纪断裂特征及形成机制[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 591-595.
- [16] CAINE J S, EVANS J P, FORSTER C B. Fault zone architecture and permeability structure [J]. Geology, 1996, 24(11): 1025-1028.
- [17] WOODS E P. Vulcan Subbasin fault styles: implications for hydrocarbon migration and entrapment[J]. Australian Petroleum Production and Exploration Association Journal, 1992, 32(1): 138-158.
- [18] MORRIS A, FERRILL D A, HENDERSON D B. Slip tendency analysis and fault reactivation[J]. Geology, 1996, 24(3): 275-278

Structural characteristics and physical simulation of X-shaped normal faults

ZHANG Feipeng¹, CHEN Xingpeng², WU Jiapeng¹, LUO Rong¹, LI Huishen¹, ZHANG Wenting¹

(1 PetroChina Dagang Oilfied Company, Tianjin 300280, China;

2 School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: The X-shaped normal fault is a common extensional tectonic fracture. However, its geometric characteristics, formation process, and genetic mechanism are lack of systematic research. Based on fine interpretation of seismic data and physical modelling, the geometric characteristics are clarified, the formation process is reconstructed, the formation mechanism is confirmed, and the reservoir control effect is discussed. The research result indicates that the X-shaped normal fault can be divided into two types: incipient X-shaped normal faults and the inherited X-shaped normal faults. The inherited X-shaped normal faults are formed by the reactivation of basement faults, including two modes of differential extension and bidirectional uniform extension. The incipient X-shaped normal faults are formed under the stress background whose tensile stress vs shear stress ratio is 1:2 ~ 2:1. In addition, the inherited X-shaped normal faults have advantages of good oil and gas migration and reservoir reconstruction. Meanwhile, they form various traps and feature "multi-storey" -styled oil-gas accumulation. This research provided a reference for hydrocarbon exploration in Bohai Bay basin, enriched the theoretical understanding of the structural patterns with a geological cue for fine structural interpretation of similar cases.

Key words: structural characteristics; physical simulation; genetic mechanism; oil and gas accumulation; X-shaped normal faults