

渤中坳陷中部地区构造应力场 光弹模拟实验研究

殷秀兰¹ 马寅生² 张西娟² 孟元林³ 张清久⁴

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;
3. 大庆石油学院秦皇岛分院, 河北 秦皇岛 266044; 4. 吉林油田分公司乾安采油厂, 吉林 乾安 138000)

摘要:在对渤中地区沉积构造详细分析的基础上,明确了其中部地区断裂的分布特征,采用以 E44-6101 型环氧树脂为基体,顺丁烯二酸酐为固化剂,邻苯二甲酸二丁酯为增塑所配制的材料制成渤中中部地质结构模型,对渤中坳陷中部地区构造应力场进行了光弹实验模拟,再现了近北东向和近东西向断裂在晚近构造格局下的应力状态及分布。试验证明,在构造应力场的作用下,油气往往由高应力值区向低应力值区迁移,而且渤中地区自新近系以来,最大主压应力方向比较稳定。基于试验结果的分析,对北东向和近东西向两组断裂在晚近应力场的作用下的构造特征及其对油气的控制作用进行讨论。由于渤中坳陷是中国的油气主要产地,通过研究盆地构造应力场的分布,可为盆地的油气勘探和开发提供依据。

关键词:光弹模拟试验;应力场;渤中坳陷

中图分类号:P736.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2007)06-1122-08

构造应力场研究是目前构造地质学和石油地质学的研究热点之一,研究构造应力场与油气运聚之间的关系能够为扩大油气储量、提高勘探成功率提供技术支撑。光弹物理模拟实验方法是确定和反演古应力场的一种途径,通过使新型材料受到与实际地质构造条件相似的作用,利用平面偏振光的双折射特性,得到所研究区域地质时期的应力场参量和分布规律。将光弹模拟实验方法应用于应力场与油气运聚研究中,具有理论研究和实际应用价值^[1-4]。

渤中坳陷中部地区构造应力场的光弹实验模拟,旨在重现盆地演化过程中应力场的分布特征,揭示盆地发展过程中构造的重要作用,进而可以探讨渤中坳陷形成演化的动力学机制。同时,由于渤中坳陷是中国的油气主要产地,通过研究盆地构造应力场的分布,也可作为盆地的油气勘探和开发提供依据。

1 渤中坳陷地质背景

渤中坳陷位于渤海湾盆地的中部(图 1)^[5-9],是渤海湾盆地的沉降中心。近年来,连续发现了绥中 36-1、秦皇岛 32-6、南堡 35-2、蓬莱 19-3、曹妃甸 11-1、蓬莱 9-1-1、曹妃甸

12-1 和渤中 25-1 等亿吨级的大油田^[5],使渤中逐渐成为油气盆地研究的焦点。

1.1 渤中坳陷的构造演化

渤中坳陷构造演化的主要特点是具有裂陷期和裂后期之分,盆地裂陷期具有多幕裂陷性,而裂后期构造活动明显(表 1)。

①在盆地裂陷阶段共有 4 个裂陷幕^[6,9-13]

第 I 幕裂陷发育于 56.5~42.1 Ma,主要控制了 Ek-Es₄ 期盆地发育,沉降速率相对较低,通常在 300 m/Ma 以下,而且分布范围小,呈现为相对孤立的小盆地。

第 II 幕裂陷发育于 42.1~35.4 Ma,主要控制了 Es₃ 期盆地发育,沉降速率明显增大,最大可大于 400 m/Ma。沉降面积增大,形成了几个主要的沉降中心。

第 III 幕裂陷发育于 35.4~29.3 Ma,主要控制了 Es₂₋₁ 期盆地发育,沉降速率与沉降区域明显降低和减小。

第 IV 幕裂陷发育于 29.3~23.5 Ma,主要控制了 Ed 期盆地发育,沉降速率达到最大,面积再次扩大,形成了相对统一的沉降中心。

②裂后阶段自 23.5 Ma—今,可分为裂后平静期和裂后

收稿日期:2007-03-02;改回日期:2007-06-26

基金项目:国家自然科学基金项目(40372102)资助。

作者简介:殷秀兰,女,1968 年生,博士,教授级高级工程师,主要研究方向为盆地构造与流体;E-mail:yinxl@mail.cigem.gov.cn。

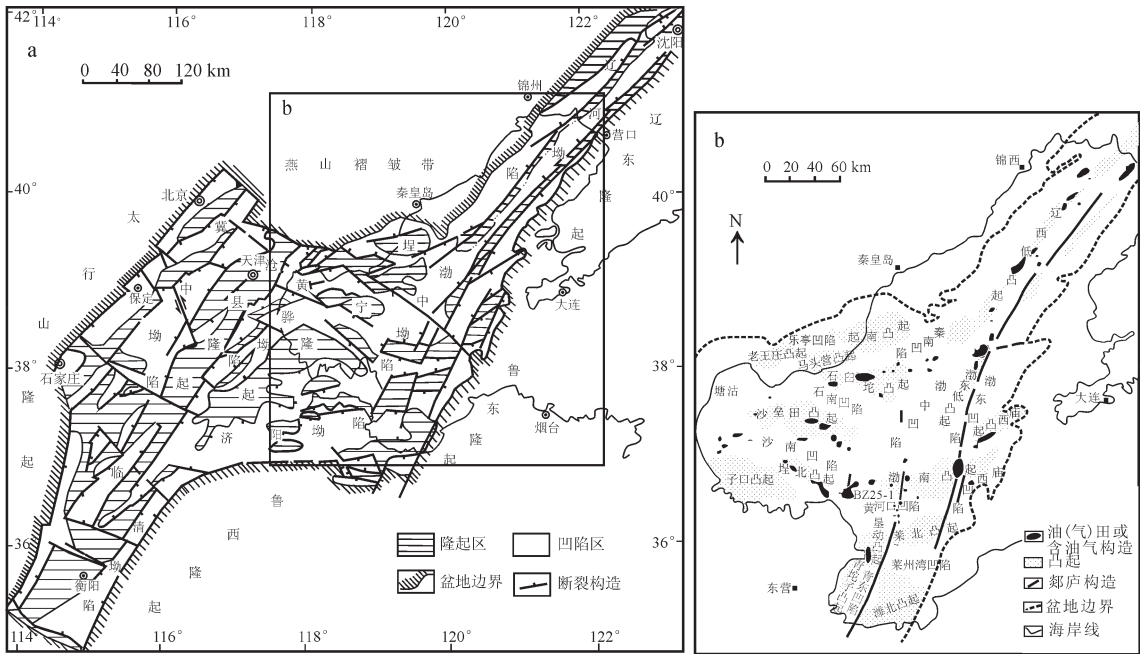


图 1 渤中坳陷构造位置

a—渤海湾盆地构造区划略图(据参考文献[5~6]修改); b—渤中坳陷构造位置(据参考文献[7~9]修改)

Fig.1 Tectonic framework of the Bohong depression

a-Tectonic divisions of the Bohai Gulf basin (modified from[5~7]);

b-Tectonic location of the Bohong depression (modified from[7~9])

表 1 渤中坳陷构造演化

Table 1 Structural evolution of the central Bohong depression

地 层	年龄(Ma)	盆地构造演化序列	
Qp	1.64	裂后阶段	裂后构造再活动期
Nm ^U			裂后平静期
Nm ^L			
Ng	16.3	裂陷阶段	裂陷IV幕
Ed ₁ -Ed ₂ ^U	23.5		
Ed ₂ ^L -Ed ₃	26		
Es ₁	29.3		裂陷III幕
Es ₂	35.4		
Es ₃			裂陷II幕
Es ₄	42.1	裂陷I幕	
Ek	50		
	56.5		

再活动期两个演化过程。

自 23.5~5.2 Ma 为裂后平静期,至 NmL 时盆地沉降速率达到最低(均小于 200 m/Ma),而且沉降面积大大缩小了。

自 5.2 Ma 开始逐渐加速和扩大,并达到最高、最大,从

而进入裂后再活动阶段。裂后再活动阶段所形成的浅层构造表现为束状或花状断裂和与之相伴生的反转构造。裂后构造再活动对现今渤中坳陷油气的成藏起了决定性作用。

1.2 渤中坳陷的断裂分布

渤中坳陷主要存在 4 组断裂系,分别是近东西向、南北向、北东向和北西向,它们控制了盆地的发育与演化^[14-17]。中部地区以近东西向纯伸展与近南北向走滑-伸展两组断裂体系为主(图 2)。

① 近东西向断裂体系

东西向断裂密度大,断面南倾,是研究区的主要断裂体系,在整个渤中坳陷内均有分布,主要特点是断距小,平面延伸短。该断裂体系主要控制了孔店组、沙河街组第四段至一段以及东营组的沉积,对后期油气重新分布起到明显的分隔作用。

② 南北向走滑-伸展断裂体系

断层总体以南北向为主,呈雁列式展布,断面西倾,上陡下缓,对东三段沉积有一定控制作用,在 PL19-3 和 SZ36-1 油气区比较发育。

③ 北东向走滑-伸展断裂体系

断裂体系呈北东向,以渤东凸起为轴线分布,为一组雁行状断裂,显示出与郯庐断裂密切相关,主要特点是断距大,平面延伸长,多为同生断层,对地层沉积厚度以及油气富集

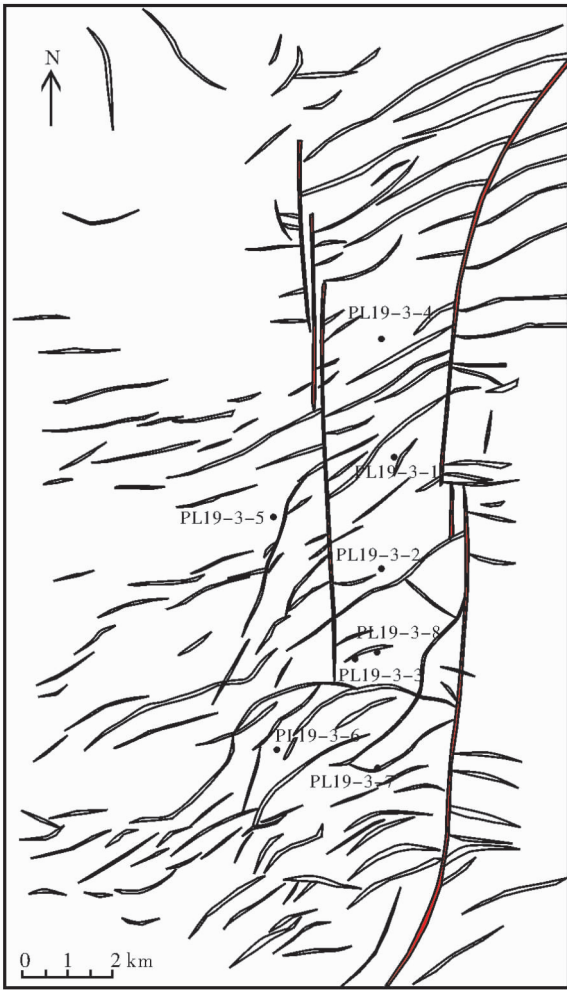


图 2 渤中坳陷中部地区断裂分布

Fig.2 Fault distribution in the central part of the Bozhong depression

起明显的控制作用。该断裂体系在剖面上为直立或花状,与 II、III、IV 幕裂陷末期发生的构造反转以及裂后期的构造再活动关系密切。

④北西向走滑-伸展断裂体系

该组断裂虽然在渤中中部地区不发育,但是在渤中坳陷乃至渤海湾盆地中都是重要的断裂带,具有区域地质意义,是盆地南北分块的重要横向构造带,渐新世以来主要表现为左旋走滑活动^[18-21]。新近纪以来它还是盆地主要的活动构造带,沿带仍然斜列分布有武清、歧口和渤中三大沉降中心,新近系和第四系厚度均超过 3000 m。此外,它还控制了地震活动,是华北地块一条重要的近东西向地震构造带^[19,22-24]。

2 光弹实验模拟的原理与方法

光弹实验是由光学和弹性理论相结合的,用以对研究对象进行应力分析的实验方法^[1]。就是用光弹性材料做成研究对象的相似模型,用仪器测定出模型在相似载荷作用下光学

性质的变化,以达到分析研究对象中应力分布的实验方法。即将测量对象所遭受的力学量转变为光学干涉条纹,使得微小的物理量变化可以达到人们直接测量感知的程度,进而来分析研究对象的应力分布。由于光弹实验方法具有直观性和全场性的优点,这种方法获得了迅速发展,应用也愈益广泛。用光弹实验方法模拟地质问题,主要是模拟构造应力场,进而通过应力场分析来解决各种地质问题的。

2.1 实验装置

光弹模拟实验方法能够反映和记录研究模型(研究区域)在外力作用下其内部的应力状态和特征。本次研究采用的是日本产 RIKEN PA-420 型三维光弹测试仪。

2.2 实验的材料

实验的光弹性材料是以 E44-6101 型环氧树脂为基体,顺丁烯二酸酐为固化剂,邻苯二甲酸二丁脂为增塑配制而成的。其重量比为:环氧树脂:顺丁烯二酸酐:邻苯二甲酸二丁脂=100:30:5。

2.3 实验过程

首先要根据研究区的地质情况,直接把研究区的构造图缩小到光弹仪的量程以内建立地质模型,必要时作适当简化;然后再根据地质模型和相似理论用光弹性材料制作研究对象的相似模型,将环氧树脂、顺丁烯二酸酐和邻苯二甲酸二丁脂按比例配好,搅匀,注入特制的模具内,在烘箱中恒温 65℃左右,固化 28h,称为一次固化。待材料不发粘时进行脱模,得到半固化的光弹性板材。用改装了的医用手术刀将该地区的构造线刻画到板材之上,然后把上述板材放入烘箱,以每小时 10~15℃升温至 115℃,恒温 4~5h,再以每小时 5~6℃降温至 60℃,将烘箱断电,使其自由降温至常温,进行二次固化。最后对四周余量进行加工,即可得到实验所用的模型。

实验时,分别将模型置于万能材料实验机上,使其按选定的边界条件加均布载荷,于光弹仪上分别摄取等色线图,得到该模型的等色线条纹图案。并在光弹仪上确定模型内各断裂的受力方式测定出模型在该边界条件下的应力分布,以达到分析该地质问题的构造应力场的目的。

2.4 实验原理及结果

根据二维应力光学定律:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{nf}{t} \tag{1}$$

其中: f 为光弹性材料材料条纹值(kg/cm 条);

t 为模型厚度(cm);

n 为等色线条纹级数。

当实验模型做好后, f 和 t 为常数,差应力($\sigma_1 - \sigma_2$)或最大剪应力 $\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$ 与条纹级数成正比。因此光弹实验的等色线条纹图案直接反映差应力或最大剪应力的分布。

由于控制断裂尖端邻域应力场强弱程度的主要特征量是应力强度因子,根据 Westergaord 函数,如果设 a 是裂纹长度, r 是到裂纹端点的距离,则可以得出平面问题断裂尖端附近 $r/a < 1$ 邻域内(图 3)应力分量的普遍表达式为:

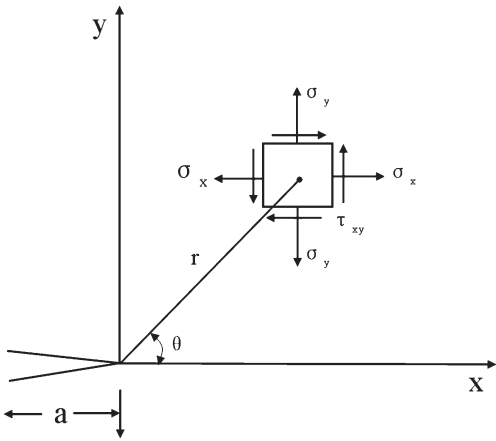


图 3 平面问题断裂尖端应力状态示意图
Fig.3 Stress regime at the fault tip on the plane

$$\sigma_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\gamma}} [K_1 \cos \frac{\theta}{2} (1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta) + K_2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta] \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = \frac{1}{\sqrt{2\pi\gamma}} [K_1 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta - K_2 \cos(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta)]$$

其中 K_1 为 I 型断裂的应力强度因子 ($\text{kg}/\text{cm}^{3/2}$); K_2 为 II 型断裂的应力强度因子 ($\text{kg}/\text{cm}^{3/2}$); σ_{ox} 是修正项 (kg/cm^2)。

光弹实验所得到的最基础成果是一套反映不同应力状态的由不同级数的等色线条纹组成的等色线图案,据此可以对实验模型和实验对象进行应力分析。

3 渤中坳陷中部光弹实验地质模型

在含油气盆地中,总是最晚的一期构造运动,调整、控制了盆地油气的最终成藏和油气田的分布,所以渤中地区构造应力场光弹实验模拟的主要方案是模拟北北东向以及近东西向断裂在晚近构造格局下的应力状态,以期研究应力状态对油气运移的影响。

3.1 实验地质模型

根据相似性原理,依据渤海湾中部地区的构造图,选取所有渤中地区主要断裂形成实验所需的地质模型(图 4)。

3.2 实验边界条件

根据华北地区新构造活动调查研究、震源机制解资源和现今地应力实测数据,渤海湾地区新近纪以来主要遭受北东东—南西西向的挤压作用,最大主应力方向为北东东—南西西向。因此,在实验过程中,笔者选择的边界条件为北东东—南西西向的挤压作用,即对模型施加北东 70° 的均匀挤压,压力由开始 100 kg、到 300 kg、500 kg、600 kg、700 kg,最后的压力为 800 kg。

4 实验结果

在北东东—南西西向的挤压外力作用下,实验结果如下。

4.1 各断裂受力方式

在北东 62° 的均匀挤压外力作用下,研究区北北东向断裂端点表现为二型条纹特征,反映该组断裂主要遭受了右旋剪应力作用,呈右旋剪切活动(图 5)。北东东向断裂端点表现为一型条纹特征,反映北东东向断裂主要受张应力作用,呈张性特征活动。光弹实验得到的应力作用方式与渤中地区北北东向断裂的现今活动方式一致。

4.2 应力大小

综合分析实验模型在遭受不同大小压力作用下的图像(图 6),绘制出渤中地区模型构造应力场光弹实验的等值线图像。依据实验原理,该等值线主要反映的是最大剪应力的分布,因此可以看出渤中地区在遭受北东向的挤压后,应力分布相对比较均匀。从图中可以看出,应力值的大小受断裂

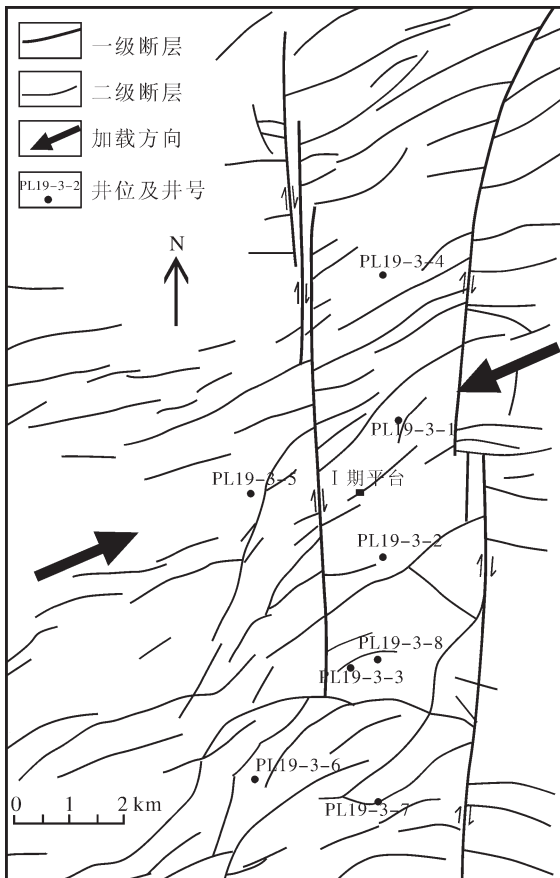


图 4 渤中坳陷中部地区构造应力场光弹实验模型图
Fig.4 Experimental photoelastic model of the tectonic stress field in the central part of the Bozhong depression

$$\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{2\pi\gamma}} [K_1 \cos \frac{\theta}{2} (1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3}{2}\theta) - K_2 \sin(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3}{2}\theta)] - \sigma_{ox}$$

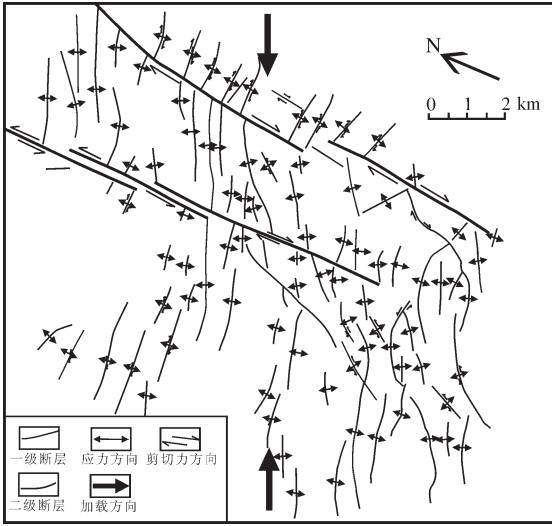


图5 渤中坳陷中部地区光弹模型断裂受力图
 Fig.5 Stress on the fault of the photoelastic model in the central part of the Bozhong depression

的控制;在断裂的端部,应力值集中,而在断裂之间,应力值相对较低,且展布的形状及范围和周边断裂的关系密切。由于该地区二级断裂密集,因此其应力分布特征明显,在北北东向断裂和近南北向断裂端部附近应力值相对较高。

5 实验结果分析和油气预测

在北东东向晚近应力场的作用下,渤中坳陷比较发育的北北东向和近东西向断裂带为控制性断层,主要表现为右行走滑(走滑量小于 100~200 m)。这种规模不大的右行走滑作用,在岩石强度不均一的部位、附近存在软弱的膏盐层的部位、或是在断层走向发生明显转折的部位,就容易出现构造变形,形成构造圈闭。由于北东向断层的走滑量最大,构造变形和圈闭主要表现为右行走滑的特征,单个圈闭常成南北向,一系列圈闭构造就可沿北东向右行走滑断裂呈左列雁行的格局排列。当然,如果地层的岩性特征十分不均匀或有其他断层影响时,雁行排列的特征就不一定明显。应该说,这种类型的断裂带附近不应是油气的聚集的最有利部位,但沿北东向断裂常形成一系列的中小型油气藏。

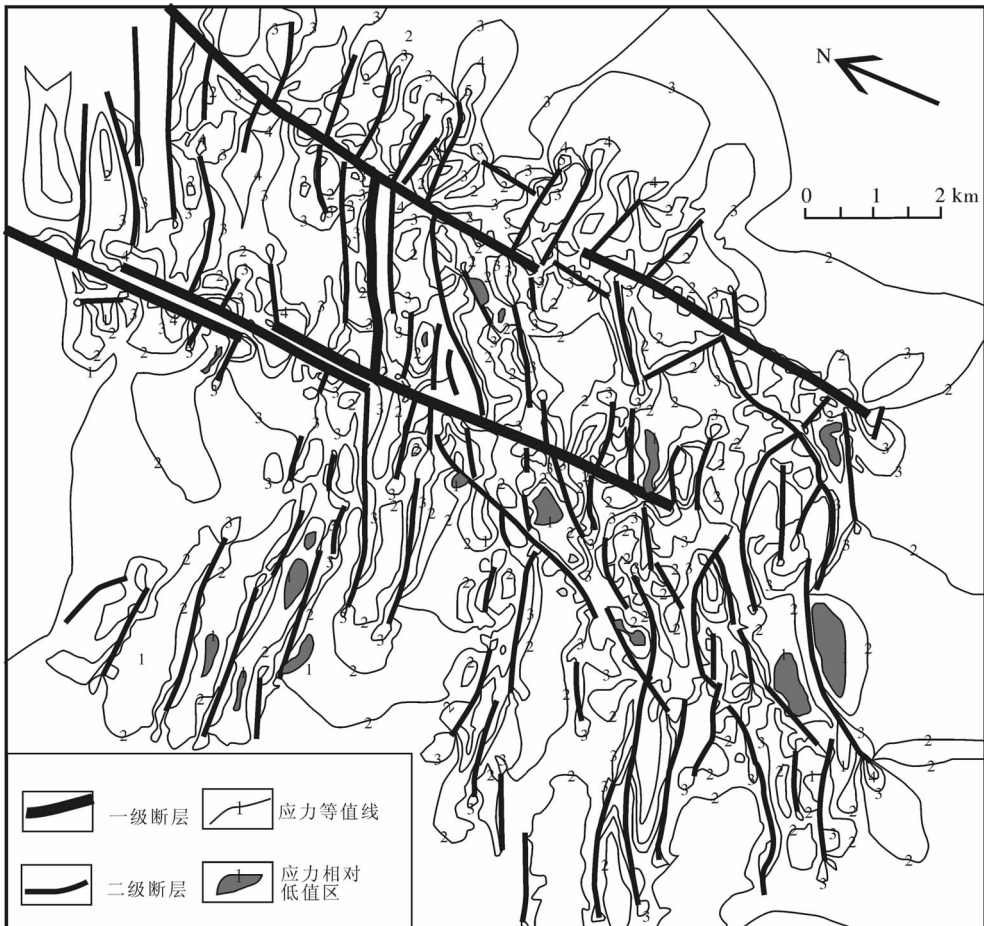


图6 渤中坳陷中部地区模型光弹实验等值线图(800 kg)
 Fig.6 Contour map of the photoelastic experiment in the central part of the Bozhong depression (800 kg)

在晚近应力场的作用下,近东西向断裂附近略微张开,成为油气二次运移的良好通道和聚集部位。在东西向断裂的附近,油气可以再次运移、相对富集,并从古近系储层适当地沿断层向浅部运移,有利于在较浅的部位获得油气藏。由于渤中坳陷的古近系埋深太大,坳陷中央相当部分的古近系储层可能会超过现行的最大勘探深度。因而,在地震勘探时应该不要忽视浅部断裂构造的发育,各种方向的浅层断裂,此类裂陷带有利于大型油气田的形成,是渤海湾地区最有利的油气聚集类型。

在北东向和东西向构造带的复合部位,有油气运移良好通道,因此油气运移势场有从洼陷中心向周围扩散运移之趋势,其周围是一系列应力低值区分布,为深层油气勘探的目标区。

6 讨论

实验结果表明,渤中坳陷中部现今各断裂的应力作用方式与断裂的实际活动方式一致,说明了实验所选边界条件和实验方法比较符合该地区的地质事实。从实验结果也可以看出,渤中地区应力高值区出现在断裂的端部和断裂的交汇部位,低值应力区发育在断裂之间或者由断裂围成的环状近封闭的区域内。

试验证明,在构造应力场的作用下,油气往往由高应力值区向低应力值区迁移,而且渤中地区自新近系以来,最大主压应力方向比较稳定,因此结合实际地质条件,分析渤中坳陷中部地区的地应力值分布区,进而预测该区可能的油气分布区。

参考文献 (References):

- [1] 马寅生, 曾庆利, 张兴. 黄骅坳陷新生代构造应力场演化的光弹模拟与石油地质条件分析[J]. 地质力学学报, 2002, 8(3):219-228.
Ma Yinsheng, Zeng Qingli, Zhang Xing. Photoelastic experimental modelling of evolution of Cenozoic tectonic stress field and analysis of petroleum geological condition in Huanghua Depression [J]. Journal of Geomechanics, 2002, 8 (3):219-228 (in Chinese with English abstract).
- [2] 单家增, 王捷, 王秉海, 等. 光弹物理模拟实验法在古应力场研究中的应用[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4):61-66.
Shan Jiazeng, Wang Jie, Wang Binghai, et al. Application of photoelastic experiments method to study of palaeotectonic stress field [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 2000, 24 (4):61-66 (in Chinese with English abstract).
- [3] Dickison W R. et al. The Dynamics of Sedimentary Basins [M]. Washington D C, National Research Council, 1997:43.
- [4] 佩罗东 A. 冯增模, 郭立言, 王殿凯译. 石油地质动力学 [M]. 北京:石油工业出版社, 1993:1-150.
Perrodon, A. translated by Feng Zengmo, Wu Liyan, Wang Diankai. Dynamics of Oil and Gas Accumulations [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993:1-150.
- [5] 张功成, 朱伟林, 邵磊. 渤海海域及邻区拉分构造与油气勘探领域[J]. 石油学报, 2001, 22(2):14-18.
Zhang Gongcheng, Zhu Weilin, Shao Lei. Pull-apart tectonic and hydrocarbon prospecting in Bohai Bay and its nearby area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22 (2):14-18 (in Chinese with English abstract).
- [6] 蔡东升, 罗毓晖, 武文来, 等. 渤海浅层构造变形特征、成因机理与渤中坳陷及其周围油气富集的关系 [J]. 中国海上油气 (地质), 2001, 15(1):35-43.
Cai Dongsheng, Luo Yuhui, Wu Wenlai, et al. Shallow tectonic deformation and its relationship to hydrocarbon enrichment in Bozhong depression and adjacent areas. Bohai Bay Basin [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001,15(1):35-43(in Chinese with English abstract).
- [7] 龚再升, 王国纯. 渤海新构造运动控制晚期油气成藏 [J]. 石油学报, 2001, 22(2):1-7.
Gong Zaisheng, Wang Guocun. Petroleum exploration neotectonism and late hydrocarbon accumulation in Bohai Sea [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2):1-7(in Chinese with English abstract).
- [8] 朱伟林, 王国纯. 渤海浅层油气成藏条件分析 [J]. 中国海上油气 (地质), 2000, 14(6):367-374.
Zhu Weilin, Wang Guochun. An analysis of conditions for shallow hydrocarbon accumulation in Bohai Sea [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2000,14(6):367-374(in Chinese with English abstract).
- [9] 米立军, 段吉利. 渤中坳陷中浅层油气成藏特点及其聚集规律[J]. 石油学报, 2001, 22(2):32-37.
Mi Lijun, Duan Jili. Characteristics of middle and shallow strata oil-gas reservoirs and oil-gas accumulation rule in the middle area of Bohai [J]. Acta Petrolei Sinica, 2001, 22(2):32-37(in Chinese with English abstract).
- [10] 徐振中, 陈世悦, 王永诗. 渤海湾地区中生代构造活动与沉积作用[J]. 中国地质, 2006,33(1):201-211.
Xu Zhenzhong, Chen Shiyue, Wang Yongshi. Mesozoic tectonic activities and sedimentation in the Bohai Gulf area [J]. Geology in China, 2006, 33(1):201-211(in Chinese with English abstract).
- [11] 何仕斌, 李丽霞, 李建红. 渤中坳陷及其邻区第三系沉积特征和油气勘探潜力分析[J]. 中国海上油气(地质), 2001, 15(1):61-71.
He Shibin, Li Lixia, Li Jianhong. Tertiary sedimentology and hydrocarbon potential in Bozhong depression and its adjacent area [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 2001, 15(1):61-71(in Chinese with English abstract).
- [12] 周毅, 张通彩, 何仕斌, 等. 渤中、渤东凹陷结构认识及有利勘探方向[J]. 中国海上油气(地质), 1997, 11(6):432-438.
Zhou Yi, Zhang Tongcai, He Shibin, et al. Geological configuration and potential exploration areas of Bozhong and Bodong sags [J]. China Offshore Oil and Gas (Geology), 1997, 11 (6):432-438(in Chinese with English abstract).
- [13] 龚再升, 等. 中国近海大油气田 [M]. 北京:石油工业出版社, 1997.

- Gong Zaisheng et al. The Major Oil and Gas Fields of China Offshore[M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 1997.
- [14] 高祥林. 渤海中部郟庐断裂带的近期活动与渤海新近纪新生断裂[J]. 地质科学, 2006, 41(2):355-364.
- Gao Xianglin. Recent activities of the Tan-Lu fault zone in the central bohai sea and newly generated faults during neogene in bohai [J]. Chinese Journal of Geology, 2006, 41 (2):355-364 (in Chinese with English abstract).
- [15] 韩文功, 季建清, 王金铎, 等. 郟庐断裂带古新世-早始新世左旋走滑活动的反射地震证据 [J]. 自然科学进展, 2005, 15(11): 1383-1388.
- Han Wengong, Ji Jianqing, Wang Jinduo, et al. Evidence from seismic reflection for sinistral strike-slip activity of Tan-Lu fault belt during Paleocene-early Eocene [J]. Development of Natural Science, 2005,15(11):1383-1388(in Chinese with English abstract).
- [16] 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, 31(1):15-22.
- Qi Jiafu. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation[J]. Geology in China, 2004, 31(1): 15-22(in Chinese with English abstract).
- [17] 万天丰, 王明明, 殷秀兰, 等. 渤海湾地区不同方向断裂带的封闭性[J]. 现代地质, 2004, 18(2):157-163.
- Wan Tianfeng, Wang Mingming, Yin Xiulan, et al. Sealing properties of different direction fault in the Bohai Bay area [J]. Geoscience, 2004, 18(2):157-163(in Chinese with English abstract).
- [18] 徐杰, 马宗晋, 邓起东, 等. 渤海中部渐新世以来强烈沉陷的区域构造条件[J]. 石油学报, 2004, 25(5):11-16.
- Xu Jie, Ma Zongjin, Dong Qidong, et al. Regional tectonic conditions for intensive subsidence of the middle Bohai Sea since Oligocene[J]. Acta Petrolei Sinica, 2004, 25(5):11-16(in Chinese with English abstract).
- [19] 徐杰, 宋长青, 楚全芝. 张家口-蓬莱断裂带地震构造特征的初步探讨[J]. 地震地质, 1998, 20(2):146-154.
- Xu Jie, Song Changqing, Chu Quanzhi. Discussion on the structural characteristics of Zhongjiakou-Penglai fault belt [J]. Seismology and Geology, 1998, 20 (2):146-154 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王琪, 张培震, Freymueller J T. 中国大陆现今地壳运动和构造变形[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(7):529-536.
- Wang Qi, Zhang Peizhen, Freymueller J T. Crustal movement and tectonic deformation of continental China [J]. Science in China, (Series D), 2001, 31(7):529-536 (in Chinese).
- [21] 高战武. 张家口-蓬莱断裂带地震地质特征的研究[R]. 北京:中国地震局地质研究所, 2001.
- Gao Zhanwu. Research on the seismic and geological feature of Zhangjiakou-Penglai fault belt [R]. Beijing:Institute of Geology, China Bureau of Seismology, 2001.
- [22] 陈国光, 徐杰, 马宗晋, 等. 渤海盆地现代构造应力场与地震活动[J]. 地震学报, 2004, 26(4):396-403.
- Chen Guoguang, Xu Jie, Ma Zongjin, et al. Recent tectonic stress field and major earthquakes of the Bohai Sea basin [J]. Acta Seismologica Sinica, 2004, 26(4):396-403(in Chinese with English abstract).
- [23] 张培震, 邓起东, 张国民. 中国大陆的强震与活动地块 [J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊):12-20.
- Zhang Peizhen, Deng Qidong, Zhang Guomin. Strong earthquake and active massifs in China [J]. Science in China (Series D), 2003, 33(Supp.):12-20(in Chinese).
- [24] 韩竹军, 徐杰, 冉勇康. 华北地区活动地块与强震活动 [J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(增刊):108-117.
- Han Zujun, Xu Jie, Ran Yongkang. Active massifs and strong earthquake in Northern China [J]. Science in China (Series D), 2003, 33(Supp.):108-117(in Chinese).

Photoelastic modeling of the tectonic stress field in the central part of the Bozhong depression

YIN Xiu-lan¹, MA Yin-sheng², ZHANG Xi-juan²,
MENG Yuan-lin³, ZHANG Qing-jiu⁴

(1. *China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing, 100081;*

2. *Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;*

3. *Daqing Petroleum College, Qinhuangdao 266044, Hebei, China;*

4. *Qianan Oil Extraction Factory, Subsidiary Company, Jilin Oil Field, Qianan 138000, Jilin, China)*

Abstract: Based on an intensive analysis of the sedimentary and tectonic evolution in the central part of the Bozhong depression, the paper reveals the characteristics of faults and their distribution in the area. A geological structural model of the central part of the Bozhong depression is constructed using E44-6101 type epoxy resin as matrix, maleic anhydride as a condensate and dibutyl phthalate C.P. as plasticizer, and experimental photoelastic modeling is performed for the tectonic stress field of the study area. Then the stress state and distribution of the nearly NNE- and nearly E-W-trending faults in the Neoid tectonic framework are reproduced. The experimental results show that under the action of the tectonic stress field petroleum usually migrates from the high-stress value zone to low-stress value zone and that the direction of the maximum principal compressional stress has been relatively stable in the Bozhong area since the Neogene. Based on an analysis of the experimental results, the paper discusses the characteristics of the NNE and nearly E-W sets of faults under the Neoid stress field and their controls on petroleum. As the Bozhong depression is China's major petroleum production area, the study of the distribution of the tectonic stress field of the basin can produce a basis for petroleum exploration and development of the basin

Key words: photoelastic experiment; stress field; Bozhong depression

About the first author: YIN Xiu-lan, female, born in 1968, P.h.D and senior engineer, her interests include basin geodynamics, fluids in tectonically active areas and basin modeling; E-mail: yinxl@mail.cigem.gov.cn.