

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

油气藏成藏期构造应力场与油气聚集

邓俊国 刘泽容

(石油大学油藏地质研究所, 山东东营)



本文重点讨论桥口油田成藏期构造应力场研究方法和分布规律, 论述了构造应力场对构造体系、沉积体系及油气形成和分布的控制作用; 提出了NNE向主导构造控制研究区油气的形成和分布, 预测了有利含油气区。

关键词 成藏期构造应力场 油气聚集 应力驱动

众所周知, 油气藏形成的重要因素是应力驱动, 尤其是成藏期构造应力场直接控制油气聚集和分布。研究表明, 局部应力低值区是油气富集高产区。因而只要正确揭示研究区的构造面貌, 主干构造体系的类型、特征、演化和成藏期构造应力场, 就能预测油气富集高产区。

所谓成藏期构造应力场是指油气藏在形成期的构造应力场。建立成藏期构造应力场应先鉴定油田内各种构造成分的性质, 序次, 进行构造组合, 确定构造型式。对多期活动的构造, 还应鉴定其演化历史, 再由构造演化史反演出区内构造应力场的演化历史, 之后确定成藏期构造应力场, 进而揭示在成藏期构造应力场作用下油气形成和分布规律。

1 成藏期构造应力场的建立

桥口油田位于东濮凹陷黄河南中央隆起带北段。区内主要发育第三纪沙河街、东营、馆陶、明化镇等期地层。沙二下、沙三1、三沙2、沙三3为主要含油气层系。

桥口构造复杂, 断裂极为发育。主要发育NNE向黄河断裂系, NNE-ENE向李屯弧形断裂系与ENE向玉皇庙等三组断裂体系。它们控制了研究区沉积体系的发育及油气的形成和分布。

研究表明, 区内构造体系经历了复杂的发展演化过程, 早期NNE向断裂体系形成于沙三期, 由一系列同生断裂组成。东营期, 本区在东西向挤压和南北向反扭的联合应力场作用下, 形成了NNE及NNE-ENE向弧形压扭性断裂带。油气藏的形成是在NNE向构造体系应力场作用下形成的。故晚期NNE向构造体系是成藏构造体系, 成藏是在东西向挤压和南北向反扭应力场联合作用下形成的。

2 成藏期构造应力场有限元模拟

为了研究桥口地区构造应力场演化规律, 构造形态、分布特征及构造应力场的控油规律, 依据桥口构造格架对该区构造应力场力学模型进行简化。

取一矩形区域，东以兰聊断裂为界，西以黄河断裂（黄河 I、II、III 号）为界，北至黄河，南至唐庄附近。在东西两侧边界加东西向挤压及逆时针剪切，整个模型视为弹性的和各向同性的，模型内只有成藏前构造（图 1）。

划分四边形和三角形单元，单元密集度在整个模型内是不均匀的，断裂带中单元密集。共划分 613 个单元，628 个节点。

根据岩芯分析资料及储层孔隙度、渗透率的空间分布情况，将研究区分为四种材料。以桥口沙二下粉砂岩的实测值为依据，参考国内外各种岩石力学常数，确定研究区各种岩石力学常数如下：

	E 表示弹性模量（单位：MP）	μ 表示泊松比
粉砂质泥岩：	E=3300	$\mu=0.18$
粉砂岩：	E=2600	$\mu=0.21$
泥岩：	E=2000	$\mu=0.24$
断层：	E=500	$\mu=0.28$

采用弹性平面四边形有限元程序^[1]计算各单元应力，从而得到成藏期构造应力场。

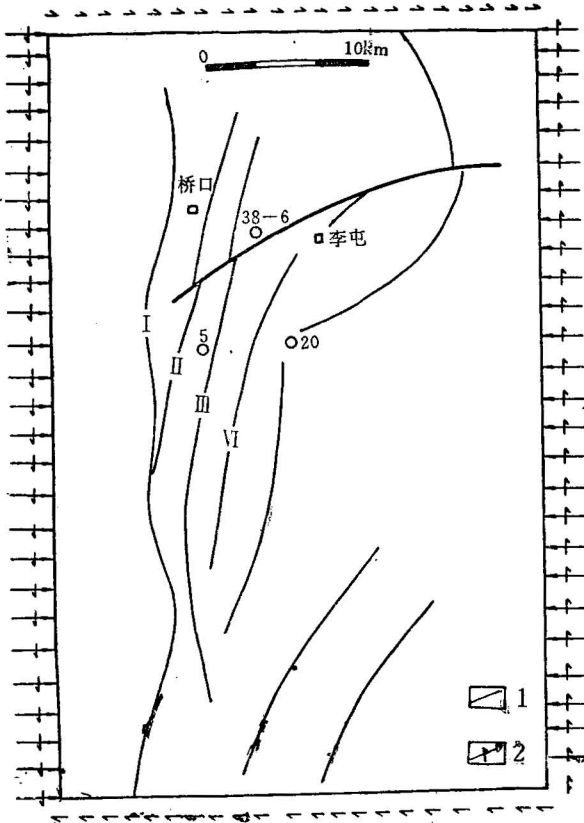


图 1 桥口地区构造应力场力学模型

Fig. 1 Mechanical model of the tectonic stress of Oiaokou area

1—断层；2—作用在边界上力的方向；3—圆圈为井位
1—Fault; 2—direction of boundary; 3—O—well position

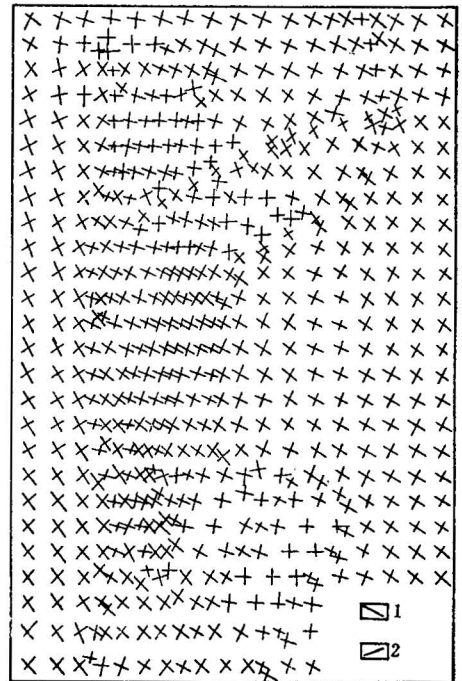


图 2 桥口地区应力迹线图

Fig. 2 Trajectory map of the stresses of Oiaokou area

1—最大主应力 σ_1 ；2—最小主应力 σ_2
1—Maximum principal stress; 2—minimum principal stress

3 桥口地区应力场分布规律

描述应力场的参数主要包括最大主应力 σ_1 、最小主应力 σ_2 、最大剪应力 T_{max} 及和应力 $(\sigma_1 + \sigma_2)/2$ 。下面分别描述各种参数的分布规律。

从主应力迹线图 2 可以看出，研究区西部隆起区和东南部葛岗集洼陷区的最小主应力迹线呈 NNE 向展布，东北部玉皇庙一带最小主应力迹线呈 NE, ENE 向展布，它们的展布方向均与该区主要构造带展布方向一致。最大主应力迹线呈 NW—WNW 向展布，与主干构造垂直。这表明建立的模型和加载方式与地质实际情况较一致。

最大主应力变化范围在 42—100 MPa 之间，平均 71MPa。高值区分布在桥口构造北部、葛岗集洼陷区，黄河断层带西部及新霍一带；低值区沿黄河断层带及李屯断阶带分布，最大低值区分

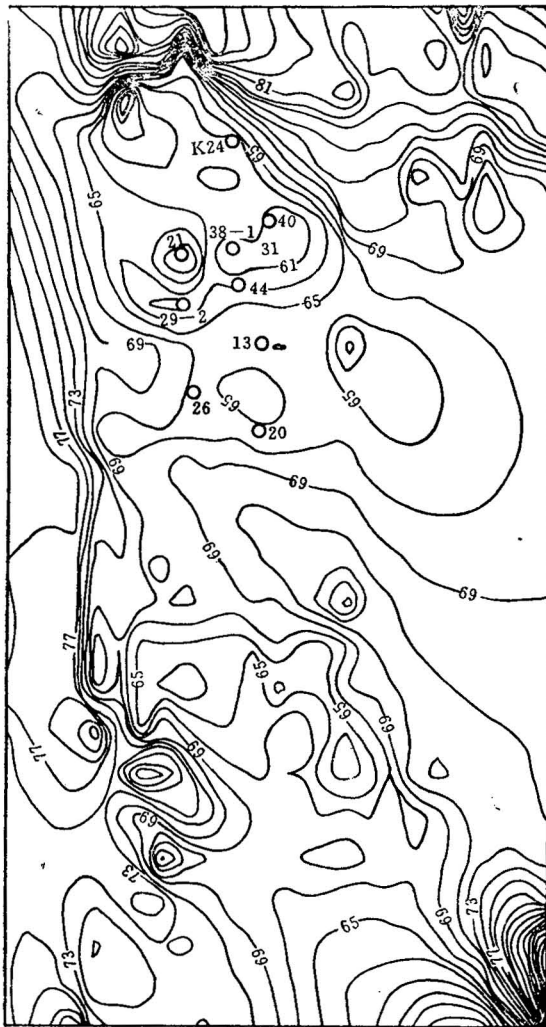


图 3 桥口地区最大主应力等值图（单位：MPa）
 Fig. 3 Maximum Principal stress isogram of Oiaokou
 ○—井位; ○—Well location

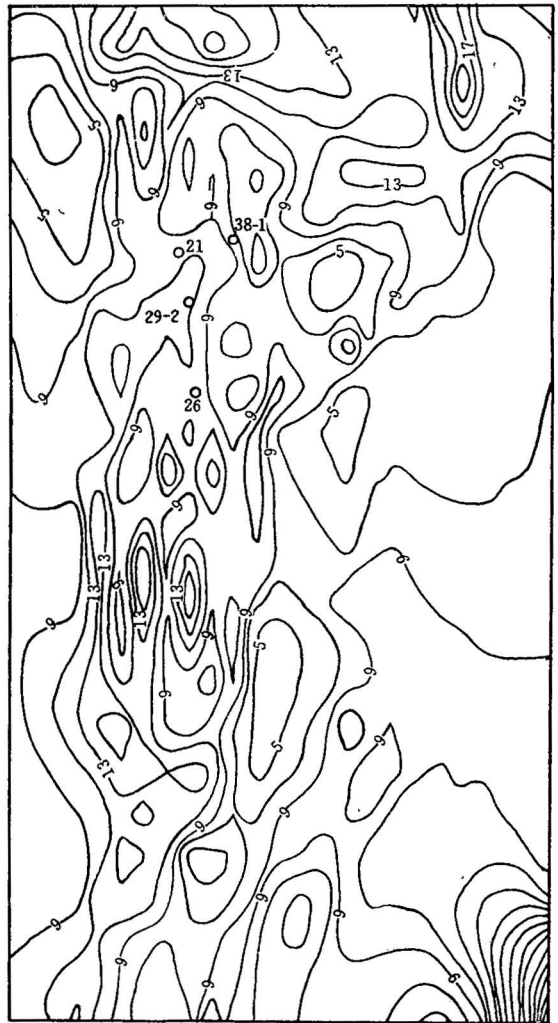


图 4 桥口地区最大剪应力等值图（单位：MPa）
 Fig. 4 Maximum shearing stress isogram of Oiaokou
 ○—井位; ○—Well location

布在桥 38, 桥 21 断块区及桥 20 井区, 与油气富集区一致 (图 3)。最小主应力及和应力分布规律与最大主应力分布规律基本相同。最大剪应力变化范围在 0.7—12 MPa 之间, 平均 6.4 MPa, 高值区沿黄河断阶带及李屯断阶带分布, 在该带最大剪应力圈闭线密集, 应力梯度大, 呈圆形或椭圆形, 低值区分布在李屯断裂系以东及桥口北部外围区块, 此处圈闭线稀疏平缓 (图 4)。

4 构造应力场与油气的关系^[2]

4.1 构造应力场演化控制构造和沉积微相带的发育

地壳变形的主因是地应力作用和构造应力场的变化。构造应力场演化导致构造形迹特别是断裂的多次活动和力学性质的演化, 同时也控制了沉积微相带的发育。研究表明, 该区应力场演化经历了下述四个阶段:

4.1.1 沙四期——初始张裂期 沙四期, 本区在区域拉张和右旋剪切应力场联合作用下, 原有的基底断裂兰聊断裂开始掀斜活动, 其它断裂尚不发育。此时地势高差大, 气候干燥, 水体较浅, 沉积了一套以河流相为主的红色沉积, 在兰聊断裂下降盘陡坡带, 由于靠近剥蚀区, 山间河流发育, 多发育冲积扇。

4.1.2 沙三期——强烈拉张期 沙三期, 区域构造应力场为右旋剪切和东西向挤压联合应力场, 本区为 NNW-SSE 向拉张应力场。断块掀斜活动十分强烈。李屯断阶带及黄河断阶带开始形成, 与之伴生或派生的断裂系也开始发育。各主要断裂系均表现为同生断裂。致使盆地范围扩大, 水体加深、沉积类型多, 分布广, 故这个时期是构造微相带发育类型最多, 最完善时期。

沙三期是桥口构造带发育的兴盛时期, 李屯断裂系和黄河断裂系强烈活动, NEE 向南掉断断裂系也开始形成。同生断裂活动达到高峰, 各断裂增长指数均达到最大。李屯断裂增长指数为 1.5, 黄河断裂增长指数为 2.37, NEE 向断裂增长指数为 1.81。由于 NNE 向黄河断裂系和李屯断裂系的节节西掉, 李屯断阶带和黄河断阶带形成, 在断层根部或复合部位下陷较深, 形成断阶槽, 导致重力流沉积物沿断阶槽流动, 形成李屯和黄河断阶重力流水道微相, 在断槽翼部则形成轴向重力流水道侧缘沉积。

4.1.3 沙三 1 期——收敛期 沙三 1 期, 区域拉张活动减弱, 同生断裂活动趋于停止, 各断裂增长指数接近于 1, 此时各构造亚带发育完善, 并形成各种断块圈闭。桥口地区整体抬升, 发育了三角洲前缘亚相带。三角洲沉积体系主要沿黄河断阶带和李屯断阶带分布, 三角洲前缘水下分支河道主线分布在黄河 II 号—黄河 III 号断层之间, 砂体排列方向及储层物性高值带的展布方向也与黄河断阶带的走向一致, 充分反映了构造对沉积微相带的控制作用。

4.1.4 沙二-东营末期——结束期 沙二-东营末期, 除黄河断裂和南部断裂仍有活动外, 其它断裂活动明显减弱或停止活动, 构造运动以升降运动为主。在沙二早期, 桥口地区继续抬升, 发育了曲流河沉积。沙一期, 水域有所扩大, 在桥口地区形成滩坝沉积, 到东营末期, 黄河南盆地整体抬升, 湖水退缩, 发育了曲流河沉积。老第三纪末期的东营运动, 结束了黄河南地区的引张状态, 区域构造应力场为东西向挤压叠加左旋剪切, 在本区表现为 WNW-ESE 向挤压。在此压应力场的作用下, NNE 向黄河断裂系及 NNE-ENE 向弧形断裂系的力学性质由张性断层转化为压性和压扭性断层。东营运动末期, 本区强烈抬升, 长期遭受风化剥蚀, 致使新第三系与老第三系呈角度不整合接触。

4.2 主干断裂系控制油气聚集和分布

NNE 向黄河断裂系及 NNE-ENE 向李屯弧形断裂系是由一系列压性和压扭性断裂组成, 构

成区内两大主干断裂系, 封闭性较强, 在油气运移和聚集中起遮挡作用, ENE向玉皇庙断裂系为张扭性断裂, 该断裂在剖面上呈上陡下缓凹面向上的勺状, 根部顺层插入葛岗集洼陷。该断裂主要活动期为东营期, 也是东濮凹陷油气大规模生成运移时期, 该断层成为油气自深层向浅层运移的良好通道。在 ENE 向断裂供油、NNE 向断裂遮挡的双重控制作用下, 油气聚集在屋脊式断块中, 形成油气富集带。

4.2.1 NNE 向黄河断裂系控制沙二下一沙三 2 油气的聚集和分布 NNE 向黄河断裂系由四条近平行的压扭性断裂所组成, 将桥口构造分成四大条带, 形成了屋脊式断块区, 控制了沙二下一沙三 2 油气的聚集和分布。譬如黄河 II、III 号断层控制了沙三 1、沙三 2 油气的聚集。黄河 II、III 号断层所控制的构造带位于桥口背斜的东翼高部位, 构造相对简单。该构造带除发育 NNE 向压扭性断裂及 ENE 向张扭性断裂外, 还发育一组低序次的近南北向断裂, 它们是在黄河 III 号和李屯 VI 号断裂上下错动过程中派生的局部拉张应力场作用下形成的, 为油气运移的通道。该带砂体发育, 储油物性好, 构造、岩相和物性异常带的良好配置使该带油气更为富集。如沙三 1 油层主要分布在黄河 II、III 号断层上升盘, 在平面上主要分布在桥 21 断块、桥 38 断块及桥 7 断块, 其中以桥 21 断块区最富集。桥 21—7 井油藏高度高达 125.5m, 自喷日产 51.4 t; 其次是桥 38 块。

4.2.2 李屯弧形断裂系和黄河 IV 号断层控制了深层天然气分布 李屯弧形断裂系由三条弧形压扭性断层组成, 分布在桥口构造东南翼较低部位, 紧临葛岗集洼陷, 断面上陡下缓呈勺形, 其深部倾角仅 20°。断层封闭性综合评价结果表明, 李屯断裂系在桥口地区三个主要断裂系中封闭性最强, 其封闭性最好的最大隶属度为 0.864 黄河断裂系封闭性也较强, 其最大隶属度为 0.691, 它们将明化镇组以来形成的凝析油和湿气遮挡在桥口背斜的东南翼和东北翼, 形成沙三 3—沙三 4 天然气富集区。

4.3 局部应力低值区是油气富集高产区

研究表明, 油气移聚的重要因素是应力驱动。在地应力作用下, 生油层中分散的油气通过岩石介质变形所产生的应力梯度变化而实现应力聚集。在这种作用下, 油气从生油凹陷高压低孔隙地带向着构造高部位的低压高孔隙带运移。在此带应力释放, 压力、能量最低, 剪应力较大, 微裂隙发育, 油气易于聚集其中。从应力场模拟和计算结果及油气分布现状都证实上述结论。

譬如桥 21 块、桥 38 块是本区沙三 1、沙三 2 油气最富集区块, 在图 3、图 4 上, 它们均对应本区最大主应力低值区和最大剪应力较高值区, 并被最大主应力高值区所包围。桥 21 块最大主应力为 61 MPa, 最小主应力为 45 MPa, 最大剪应力平均为 10 MPa, 而其外围区块最大主应力

表 1 桥口地区应力场参数统计表

Table 1 Statistic table of the stress parameter of Oiaokou

断块参数	σ_1	σ_2	τ_{max}	$\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2}$	断块评价
桥 38 块	61.5	47	8	54.0	最有利断块
桥 21 块	61.0	45	10	53.0	最有利断块
桥 26 块	67.0	52	10	59.5	较有利断块
桥 31 块	61.5	47	8	54.0	有利断块
桥 40 块	63.0	47	7	55.0	有利断块
桥 7 块	63.0	48	8	50.5	有利断块
桥 20 块	66.0	48	11	57.0	较有利断块
桥 41 块	83.0	56	14	70.0	较差断块
桥口西外围	72.5	60	6	66.0	不含油区
桥口东外围	68.5	56	7	62.0	不含油区

均高于 68 MPa, 最小主应力均高于 56 MPa, 而最大剪应力低于 7 MPa (表 1)。区内日产大于 10 t 的高产井附近最大主应力均小于 63 MPa, 最小主应力均小于 47 MPa, 最大剪应力大于 9 MPa (表 2)。如 29—2 井, 最大主应力和最小主应力分别为 61 MPa 和 40 MPa, 最大剪应力为 11.5 MPa。本区产油井均位于 $\sigma_1=67$ MPa、 $\sigma_2=47$ MPa 的等值线所包围的应力低值区。故预测桥 21 块、桥 38 块为最富集的含油断块, 而桥 7 块、桥 31 块、桥 40 块为油气富集断块, 桥 26 井、桥 20 井所在断块为较富集含油断块, 这与油藏综合评价结果基本一致, 表明应力场预测是成功的。

4.4 地应力是油气聚集的主要动力

岩石的渗透性除与岩石孔隙度等因素有关外, 还受应力状态影响。两个水平应力不相等, 即水平应力的各项异性可以引起岩石的各项异性, 卡尔森通过现场地应力研究和压水实验发现, 在瑞典佛尔马期马克地区两个水平应力之比为:

$$\frac{\sigma_H}{\sigma_h} = 4.3$$

式中: σ_H 为最大水平主应力, σ_h 为最小水平主应力。而液体在岩石中的传导系数为:

$$\frac{B_H}{B_h} = 4.3$$

式中: B_H 为沿最大水平主应力方向的传导系数, B_h 为沿最小水平主应力方向的传导系数。由此可见, 沿最大水平主应力方向传导系数大, 液体更易沿此方向流动。

桥口地区两个水平主应力的比值为 1.1—2.4, 即 NW—SE 方向的传导系数大于 NE—SW 方向传导系数。因此, 该区的油气沿 NW—SE 方向由生油区向圈闭中运移是更容易的。

表 2 应力场参数与储能关系

Table 2 The reiation of the stress field parameter and oil-bearing capability

井号	层位	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	τ_{max} (MPa)	(产能 t/日)
29—2	S_3^{1-3+5}	61.0	40.0	11.5	46.5
21—7	S_3^{1-5}	61.5	43.0	11.3	32.3
21	S_3^{1-6}	57.0	46.0	10.0	31.9
32		60.0	49.0	10.5	
38—1	S_3^{2-1}	60.5	43.0	9.0	36.4
44	S_3^{1-3}	62.5	48.0	9.5	17.8
26	S_3^{1-3}	76.0	47.5	8.9	4.6

桥口油田构造应力场与油气聚集关系的主要特点是: 构造应力场演化控制构造、沉积微相带的发育, 主导断裂系控制油气的形成和分布, 局部应力低值区是油气富集高产区。应用上述研究成果已成功地预测了有利含油气区, 并被勘探成果所证实。实践表明, 只要正确揭示研究区成藏期构造应力场控油规律, 就能找到油气高产富集区, 可少打评价井, 节省投资。

参 考 文 献

- 1 谢贻权等. 弹性和塑性力学中的有限元法. 北京: 机械工业出版社, 1981. 10—87页.
- 2 中国地质科学院地质力学研究所刊. 北京: 地质出版社, 1989. 1—71页.

THE TECTONIC STRESS FIELD DURING THE FORMATION OF OIL AND GAS ACCUMULATIONS AND THE ACCUMULATION OF OIL AND GAS

Deng Junguo and Liu Zerong

(*University of Petroleum, Dongying, Shandong*)

Abstract

This paper mainly discusses the study method and distribution pattern of the tectonic stress field during the formation of petroleum accumulations in the Qiaokou oil field and the controlling effects of the tectonic stress field on the tectonic system, sedimentary system and generation and distribution of oil and gas. It is proposed that the NNE-trending major structures controlled the formation and distribution of oil and gas in the study region, and favorable petroliferous areas have been predicted.

Key words: tectonic stress field, oil and gas accumulation, stress-driving

作者简介

邓俊国, 1957年生。1982年毕业于长春地质学院地质系, 1989年获长春地质学院构造学硕士学位。现为石油大学油藏地质研究所讲师, 从事油藏构造及油藏评价方面的研究。通讯地址: 山东省东营市石油大学勘探系。邮政编码: 257062。