

断裂控油的物理模拟实验研究

——以准噶尔盆地西北缘红车断裂带为例

尚尔杰¹, 金之钧², 袁龙¹, 张义杰³, 曾 斌⁴, 王洪玉⁴

1. 中国地质大学, 北京 100083; 2. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083;
3. 中国石油新疆油田分公司, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中国石油大学, 北京 102200

摘要: 对准噶尔盆地西北缘红车断裂带的断裂控油模式进行了研究, 并进一步转化为实验模型, 模拟了单一相(油相)连续、稳态流体运动条件下, 断裂输导体系中石油运移和聚集的过程。通过观察实验过程和对实验结果的分析, 结合构造应力场特征和断裂控油的流体地球化学研究成果, 对该断裂带的控油特征进行了分析。

关键词: 物理模拟; 断裂控油模式; 断裂输导体系; 红车断裂带; 准噶尔盆地

中图分类号: TE122. 1

文献标识码: A

断裂控油的实质是对油气运移和聚集的控制问题^[1-6]。断裂既是含油气流体运移的一种重要输导体, 又是含油气流体运移的封隔体^[7-9]。断裂输导体的时空展布控制着含油气流体运动的方向、路径和分布。断裂对油气的输导作用, 主要集中在两个方面, 即断裂带本身的构造属性和断裂两盘的岩性对接关系。随着物理模拟实验理论、方法、技术的不断完善, 已能够在实验室条件下, 模拟各种断裂输导体系中油气运移和聚集的过程^[10-11]。

1 实验模型

1.1 模型设计

根据准噶尔盆地西北缘红车断裂带的断裂控油模式, 在充分考虑了该地区的断层组合样式、断层规模、活动强度及断层与储盖层配置关系、断裂(带)渗透性、储层物性和非均质程度的基础上, 设计出了红车地区断裂输导体系中石油运聚模拟的实验模型(图 1)。

模型中各层系储层粒径(均值 D) 的选取主要参照了已知油气藏中相应含油层系实测储层物性参数 ϕ 、 K (表 1)。模型中不同粒级对应的渗透率值 K 与储层粒径 D 的关系为: $K = D^2 \times 74\ 000\ \text{md}$, 区域性盖层设计为硅胶层。

断裂带宽度根据断层规模的相对大小选取, 西北缘红车断裂的宽度取 2 cm, 倾角为 50°; 号断裂和车前断裂的宽度取 1 cm, 倾角分别为 40°和 65°。临近昌吉生油凹陷的逆断层下盘, 在风城组 P_{1f}) 和下乌尔禾组 P_{2w}) 烃源岩层的中部分别设置两个注油口。断裂带顶部和断层两侧储层中不设流体出口, 即实验是在封闭体系内进行的。

实验目的是为了分析在保存条件好和断层相对开启的状态下, 断裂带及两侧岩层组合和储层物性差异对油气运移和聚集的影响; 了解石油在断裂输导体系中的运移优势方向、路径、聚集位置及聚油量; 再现红车地区断裂输导体系中石油运移和聚集的过程和特征。

文中研究的油气二次运移和聚集模拟为二维小模型, 它主要由 4 部分组成: 即模型本体、流体注入系统、测量系统和数据采集处理系统。

1) 模型本体是模拟实验装置的核心, 各项参数见表 2。

2) 流体注入系统主要由注水、注油、注气和注添加剂等支路组成。根据试验对象不同, 这些支路可作适当调整。除了注气支路用气瓶通过减压阀直接注气外, 其它支路用泵输送流体。目前使用的注入泵为美国 ISCO100DX 微量注射泵。流量和注入压力大小可通过注射泵调节和计量。

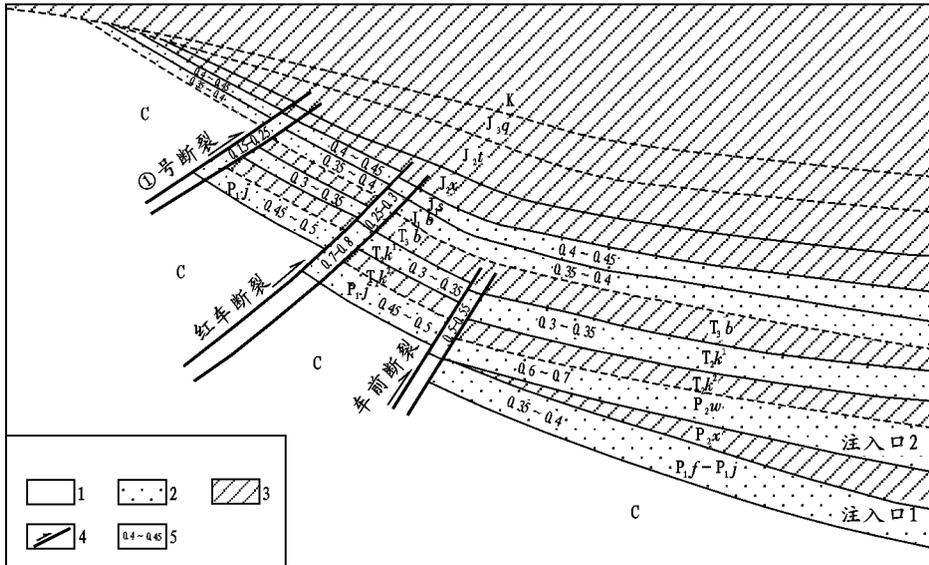


图 1 准噶尔盆地西北缘红车断裂带断裂控油实验模型

1. 基底; 2. 储层; 3. 盖层; 4. 断裂带; 5. 断裂带、储层粒径/mm

Fig. 1 Experimental model of the Hongche faults controlling oil in the Northwest of Junggar Basin

表 1 实验模型中储层物性参数选取

Table 1 Reservoir parameters in the experimental model

| 层系 | 储层岩性、厚度 | 孔隙度, % | 渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$ | 储层质量 | 模型中储层粒径/mm |
|---------------------|--|---------------------------------|--------------------------------------|-----------|------------|
| 三工河组 J_{1s}) | 河流相砂坝、心滩, 以中细砂岩、砂砾岩为主, 30~ 150 m | $\frac{0.94 \sim 33.7}{16.11}$ | $\frac{0.02 \sim 9\ 859.3}{29.5}$ | 好 | 0.4~ 0.45 |
| 八道湾组 J_{1b}) | 河流相砂体, 以中砂岩、砂砾岩为主, 25~ 120 m | $\frac{0.74 \sim 29.6}{13.5}$ | $\frac{< 0.01 \sim 7\ 896.2}{9.5}$ | 较差 | 0.35~ 0.4 |
| 克拉玛依组 T_2k^1) | 扇三角洲相, 以砂岩、砂砾岩夹泥岩为主, 20~ 80 m | $\frac{11.64 \sim 26.11}{14.7}$ | $\frac{0.02 \sim 8\ 518.0}{13.5}$ | 较好, 分布不稳定 | 0.3~ 0.35 |
| 佳木河组 P_{ij}) | 冲积扇及近火山口相, 以细砂岩、砂砾岩、含砾砂岩及火山喷发角砾岩、安山岩、玄武岩、凝灰岩为主, 裂缝发育, 250m | $\frac{2.4 \sim 30.89}{15.74}$ | $\frac{< 0.01 \sim 4\ 757.8}{53.99}$ | 好, 分布稳定 | 0.45~ 0.5 |

注: 分式含义为 $\frac{\text{最小值} \sim \text{最大值}}{\text{平均值}}$ 。

表 2 二维小模型参数

Table 2 Parameters of 2D experimental model

| | |
|---------------------------------------|----------------------------------|
| 几何尺寸 ($l \times b \times h$, cm) | $50 \times (2 \sim 4) \times 30$ |
| 工作压力/MPa | 0.5 |
| 工作温度/°C | 150 |
| 倾角/°) | 0~ 20 |
| 旋转角度/°) | 0~ 360 |
| 测量孔数 | 60 |
| 注入、输出孔数 | 24 |

温度由热电偶测定; 压力用电容式压力传感器测定。

4) 数据采集和处理系统主要由 HP 公司 HD-2000 型数据采集器、OLymPus 数码相机和计算机组成。其中温度和压力均由 HD-2000 型数据采集器采集和处理。油气运移和聚集图象采集由 OLymPus 数码相机和计算机完成。

1. 2 实验材料

实验用砂为沈阳玻璃珠厂生产的各种粒度的纯净白色石英砂。石英砂为亲水性、润湿角近于 0° 。

实验用油为中性煤油, 密度为 0.75 g/cm^3 , 粘度 25°C) 约 $42 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。实验用水为蒸馏水, 密度为 1.0 g/cm^3 , 粘度 25°C) 为 $1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

3) 测量系统主要包括注入、输出流体流量测量、温度和压力测量。注入流体流量和压力由注射泵控制器调节和测定; 输出流体用玻璃量筒收集并计量;

为了使油水间有明显的反差,用微量天然色素将煤油染成棕红色。

1.3 实验步骤

1) 根据实验内容和实验目的设计制作实验模型。首先将模型充满水,然后将不同粒度的亲水石英砂分层装入模型,边装边振动和压实,以便使砂子充分压实。

2) 确定孔隙度和渗透率。

3) 用平流泵向模型注入蒸馏水,将模型中的气体驱出,直到注入量等于输出量,使模型中饱含水为止。

4) 用 ISCO100DX 泵注入油,根据实验情况确定油的注入量和注入速率,注入量和注入速率可通过 ISCO100DX 泵计量,一般注入速率为 0.05~0.1 ml/min,采出液的油、水量用玻璃量筒收集并读数计量。

5) 对油的运移聚集过程进行观察和照相,同时记录注入量、注入压力。

6) 测定含油饱和度。实验结束后,将含油的砂子取出,用二氯甲烷将油洗出,然后在 40℃左右的温度下抽提。由于二氯甲烷的沸点为 38~40℃,因此,抽提一段时间后,只剩下油和水,计量油和水的数量。通过计算油在油、水总量中的百分比可得到含油饱和度。

2 实验过程与结果分析

2.1 实验过程

1) 先给制作的实验模型饱含水,再以 2 ml/min 的速率注入水,直到注入量等于输出量,则认为模型已饱和含水,然后关闭出水口。

2) 从模型注入口 1 以 0.1 ml/min 的速率注油,注入的油沿佳木河组和风城组 ($P_{1j} + P_{1f}$) 砂层顺斜坡带逐渐向上倾方向运移,此相当于红车断裂带东部的昌吉凹陷中下二叠统佳木河组和风城组烃源岩开始大量排烃,并不断地向红车断裂带方向运移。当注入时间为 2 h 59 min、注油量为 18.3 ml 时,油已完全充满佳木河组和风城组 ($P_{1j} + P_{1f}$) 砂层,并运移到了红车断阶带前缘断裂下部,然后沿此断裂快速向上运移,沿断裂上盘内物性好分布稳定的佳木河组 (P_{1j}) 砂层迅速运移到了开启性好(活动性强)的红车断裂内。随着油的不断注入(供油),红车断裂内含油饱和度不断增加,油沿红车断裂和车前断裂继续向上运移,同时,油在红车断裂上盘物性较好的石炭系储层和车前断裂上盘的克拉玛依组一段 (T_2k^1) 储层中向上倾方向运移。继续增加注油量,

红车断裂上盘的石炭系储层和车前断裂上盘的克拉玛依组一段储层中含油饱和度不断增加,断层内的油继续向上运移。

3) 当注入时间为 3 h 41 min、注入油量为 22.43 ml 时,关闭注入口 1,并开始从注入口 2 注油,即相当于下乌尔禾组 (P_{2w}) 烃源岩开始大量排油。随着油量的不断增加,下乌尔禾组 (P_{2w}) 输导层中的油迅速到达红车断裂带,并沿断层向上运移到达顶部,同时,油向断层上倾方向输导层中大量运移。由于油供给充足和扩散作用,少量的油开始向断裂下盘的储层中运移。继续增加注油量,断层带及其两侧储层中的含油饱和度也不断增加,油在靠近山前的断裂(号断裂)中沿断层向上运移,随后到达该断层上盘超覆尖灭带中的八道湾组 (J_1b) 储层中。此时,红车断裂和车前断裂及其两侧储层中的含油饱和度继续增加,油沿储层向前运移。总注油量达 95.01 ml 时,结束注油。

4) 测量断裂及两侧储层中的含油饱和度。结果是:在断裂带和断裂的上盘上倾方向中的储层含油饱和度较大,在 82%~90% 之间,储层中油量聚集较多,含油丰富;而在断裂下盘的储层中,含油饱和度较低,为 10%~20%,含油量约 2~3 ml。

2.2 实验结果分析

通过对物理模拟实验过程的观察和断裂、储层中聚集油量的测量结果可以得出以下结论:

1) 断裂是油气优势运移的通道,油气在断裂带中具有快速运移的特点。断裂带渗透率大小决定着油气的运移方向和路径。在断裂带开启(高渗透带)的条件下,当断层带的渗透率明显大于其两侧砂层的渗透率时,油气主要沿断层垂向运移,断裂两侧砂层不发生石油的运移。

2) 在断层带开启但顶部存在封闭的条件下,当断层带的渗透率明显大于其两侧砂层渗透率时,油倾向于在与断层相连且紧邻区域性盖层 (T_2k^2 、 J_2x-K) 之下物性好的砂层中运移和聚集成藏,如浅层三工河组二段 (J_1s^2) 和深层二叠系佳木河组 (P_{1j}) 砂层中大量石油的聚集。

3) 断层渗透率较大时,石油在断层中不均匀地向上运移,断层带中含油饱和度增加顺序为由上而下,在含油饱和度向下增大的过程中,油优先进入断裂上盘渗透率较大的砂层中,如下侏罗统三工河组二段 (J_1s^2) 砂岩层、佳木河组 (P_{1j}) 砂层,随后再进入断裂下盘相应的砂层中。随着断裂带含油饱和度的进一步增加,储层物性好的砂层中进油量不断增加,油在此砂层中进行侧向运移,并最终成藏。而物性

较差的砂层很少有油进入,如八道湾组 J_{1b}) 砂层。

4) 模拟实验进一步验证了断裂带是含油气流体运移的优势通道和油气在断裂带中的运移受地震泵作用控制的认识。首先,在油气成藏的几个关键时期,伸入烃源区的深层逆断裂,在平面和剖面上均表现为最大主压应力低值带特征。这表明在构造应力作用下,断裂处于相对开启的状态,可以成为油气运移的良好通道,而且在多期构造应力作用下,由于断裂的多期活动,使断裂多次抽提深层油气,并沿断裂呈“幕式”垂向运移。表现出油气沿断裂的垂向运移是受“地震泵”作用的控制^[12]。其次从断裂带及其两侧储层含油气流体活动的历史记录看,断裂带中的确存在着多次含油气流体进入的活动。储层中的含油气流体是经由断裂带进入的,即断裂带是沟通烃源岩区油气或深层油气藏的油气向断裂两侧储层中运移的优势通道。

5) 验证了在有良好盖层条件配置的情况下,封盖层之下的断裂在输导油气向上运移时,油气在浮力及构造应力和流体压力梯度作用下,断裂带内的含油气流体优先进入断层带两侧物性好的(排替压力低)储层中。那些排替压力较大,物性较差的储层中,进油量则很少,如八道湾组 J_{1b}) 砂层和中下三叠统 T₁₋₂) 砂层。但随着断裂带含油饱和度自上而下增加,后期在较高流体压力梯度作用下,也会有少量的油进入这些储层。油气更多地是进入断裂上盘储层,而同时代物性相近的下盘储层,流体进入的较少。

上述实验过程揭示的断裂输导体系中石油运移和聚集特征,也可以由断裂带两侧流体地球化学研究结果得到佐证:a、离断裂越近,有机包裹体丰度越高;b、断裂下盘记录的含油气流体的次数和丰度均

明显小于上盘;而均一化温度、盐度变化范围,断裂上盘要大于断裂下盘。这些特征均反映油气的确是沿断裂带)进入储层。而且断裂上盘储层中含油气流体进入的期次多、持续时间长,有机包裹体丰度高,进油量多。这与物理模拟实验观察到油在断裂两侧储层中的运移情况完全相符。

参考文献:

- 1 鲁国明,朱光,李学田等. 郯庐断裂带对合肥盆地油气地质条件的控制[J]. 石油实验地质, 2002, 24(3): 216~ 222
- 2 鲁兵,丁文龙. 断层封闭性研究进展[J]. 地质科技情报, 1998, 17(3): 75~ 80
- 3 张云银. 郯庐断裂带含油气性研究[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 28~ 32
- 4 樊光明,朱志澄. 断裂构造研究的进展和趋势[J]. 地球科学进展, 1999, 7(6): 25~ 30
- 5 于俊吉,罗群,张多军等. 北部湾盆地海南福山凹陷断裂特征及其对油气成藏的控制作用[J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 241~ 248
- 6 罗群,白新华. 断裂控烃理论与实践—断裂活动与油气聚集研究[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999. 206
- 7 赵阳,刘震,宋书君. 渤海湾盆地东营凹陷南区通王断裂带下第三系成藏动力及输导体系特征[J]. 石油实验地质, 2004, 26(6): 557~ 561
- 8 童亨茂. 断层开启与封闭的定量分析[J]. 石油与天然气地质, 1998, 19(3): 215~ 219
- 9 孙宝珊,周新桂,邵兆刚. 油田断裂封闭与通道作用研究[J]. 地质力学学报, 1995, 2(2): 1~ 7
- 10 曾溅辉,金之钧. 油气二次运移与聚集物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000. 243
- 11 王颖,王英民,赵锡奎. 构造模拟实验在构造研究中的应用—以桩西潜山为例[J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 308~ 312
- 12 华保钦. 构造应力场、地震泵和油气运移[J]. 沉积学报, 1995, 13(2): 77~ 85

STUDY ON PHYSICAL SIMULATION EXPERIMENT FOR THE CONTROLLING OF FAULTS TO OIL —TAKING THE HONGCHE FAULTS IN THE NORTHWEST OF JUNGGAR BASIN AS AN EXAMPLE

Shang Erjie¹, Jin Zhijun², Ding Wenlong¹, Zhang Yijie³, Zeng Jianhui⁴, Wang Hongyu⁴

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China; 3. Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. China University of Petroleum, Beijing 102200, China)

Abstract: This thesis researched the mode of the controlling of faults to oil migration and accumulation in the northwest of Junggar Basin, and then defined it to experimental model. when the oil is injected conti-

nued and steady into the model, we simulated the process of the oil migration and accumulation in the faults and the reservoir. By observing the process of experiment and analysing the result and studying the character of tectonic stress field and the proof of fluid geochemistry for the controlling of faults to oil, this paper analyzed the character for the controlling of reverse faults to the oil in this area clearly.

Key words: physical simulation experiment; fault transport system; fault controlling oil mode; the Hongche Faults; Junggar Basin

(continued from page 408)

SEAL MECHANISMS OF DIFFERENT TRANSPORTING PASSWAYS OF FAULT AND THEIR RESEARCH METHODS

Fu Guang, Liu Hongxia, Duan Haifeng

(Daqing Petroleum Institute, Daqing, Heilongjiang 163318, China)

Abstract: Based on the study of types and characteristics of transporting passways in faults, two types of vertical seal mechanisms of faults were divided. A vertical seal mechanism of fault is tight and heal seal mechanism for tip fractures or connected pores of fault zone filled mainly with mudstone. Another vertical seal mechanism of fault is diagenetic cementation seal mechanism for vertical fractures or connected pores of fault zone filled mainly with sandstone. A method studying the tight and heal seal mechanism of fault was established by using the relationship between surround pressure on fault and plastic deformation limit of mudstone. Another method studying the diagenetic cementation seal mechanism of fault was established by using whether deposition of silica and carbonate or not. These methods were applied in studying the vertical seal mechanism of main fault in the first member of Damoguaihe Formation, the north of Wuerxun Depression in the Hailar Basin. The research results are accordant with actual geological conditions. It indicates that the methods are practical to study the seal of different transporting passways of fault.

Key words: fault; transporting passways; fractures; connected pores; tight and heal; diagenetic cementation