

文章编号: 0524-5357(2008)01-0029-04

## 鄂尔多斯盆地西峰地区长8砂岩微观非均质性的实验分析

刘林玉, 王震亮, 柳益群

(西北大学地质系, 大陆动力学国家重点实验室(西北大学), 陕西 西安 710069)

**摘要:** 通过真实砂岩微观模型实验, 客观地分析了鄂尔多斯盆地西峰地区长8砂岩的微观非均质性特征, 发现该区长8储层为致密型砂岩, 直观地显示出长8砂岩储层具有很强的微观非均质性, 砂岩的成岩作用和孔隙结构是影响鄂尔多斯盆地西峰地区长8砂岩储层微观非均质性的主要原因。在低渗透砂岩中, 引起砂岩产生强烈的非均质性, 而这些砂岩则形成长8砂岩储层的高渗带。

**关键词:** 微观非均质性; 真实砂岩微观模型; 实验分析; 长8砂岩; 鄂尔多斯盆地

**中图分类号:** TE122.2; P618.130.2

**文献标识码:** A

### Micro-anisotropic Experimental Analysis on Chang-8 Sandstone in Xifeng Area of Ordos Basin

LIU Lin-yu, WANG Zhen-liang, LIU Yi-qun

(State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China)

**Abstract:** Based on the micro-model experiments for authentic sandstone samples, the micro-anisotropic characteristics of Chang-8 sandstones from the reservoirs in Xifeng area of Ordos Basin was analyzed. The results show that Chang-8 reservoirs belong to compact-type sandstone with intense micro-anisotropy. And the diagenesis and porous structure of the sandstones are the main factors leading to the microanisotropy of Chang-8 reservoirs. The low permeable sandstones result in the intense microanisotropy of Chang-8 sandstone and form the high permeable zone of Chang-8 reservoirs.

**Key words:** microanisotropy; authentic sandstone micro-model; experimental analysis; Chang-8 reservoir; Ordos Basin

鄂尔多斯盆地原属大华北盆地的一部分, 中生代三叠纪后期逐渐与大华北盆地分离, 其面积约25 km × 104 km。西峰研究区位于鄂尔多斯盆地东部斜坡带上, 区域构造为一东高西低的单斜, 地层倾角小于1°。鄂尔多斯盆地西峰地区三叠系延长组长8砂岩的岩石类型以灰色长石砂岩、长石岩屑砂岩为主, 分布残余孔隙、溶蚀孔隙、纹层缝、裂缝

孔隙和致密微孔隙等孔隙空间<sup>①</sup>。

砂岩储层的非均质性特征是油气储层地质学研究的重要内容之一<sup>[1-4]</sup>。在砂岩储集层的微观非均质性研究过程中, 本文利用了真实砂岩微观模型, 这是西北大学大陆动力学国家重点实验室的一项专利技术。通过真实砂岩微观模型的实验分析, 发现研究区长8砂岩储集层具有很强的微观非均质性。

收稿日期: 2007-06-29; 修订日期: 2007-09-03

基金项目: 国家973重点基础研究发展计划项目资助(2003CB214605); 国家自然科学基金项目资助(40472099)

作者简介: 刘林玉(1965-), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 主要从事油气储层地质、开发地质与沉积学研究。

E-mail: yulinliu2008@126.com。

① 刘林玉, 李红, 曹青, 等. 西峰地区白马南长8<sub>1</sub>储层地质建模. 2004.

## 1 实验部分

### 1.1 实验仪器设备

微观模型实验系统包括真实砂岩微观模型、显微观察系统(以实体显微镜为主,配有照相、录相系统,监控并观察实验过程,同时可以照相、录像)、加压系统三部分。

实验所使用的模拟油是机械泵油加煤油配制而成,模拟水是蒸馏水。为了在实验中观察方便,实验前在油中加入少量油溶红,在水中加入少量甲基蓝,其目的是在实验照片中油呈现红色,水呈现蓝色。

### 1.2 样品选择

实验所用的西峰地区长8砂岩模型样品是根据研究区油层的试油结果、常规薄片的观察、铸体薄片观察等有关资料进行综合分析后,制出10个真实砂岩微观模型。这些岩心样品几乎遍布了整个研究区,所以实验的结果具有真实性和代表性。在10个真实砂岩微观模型中,沉积成岩作用引起砂岩的孔隙结构和物性不同<sup>[5-16]</sup>,导致西峰地区长8砂岩储层的孔隙结构和物性特征具有很强的非均质性。

## 2 实验过程及结果

通过西峰地区长8真实砂岩微观模型实验,共分出残余孔隙驱替型、溶蚀孔隙驱替型、纹层缝驱替型和致密型等5种油水驱替类型。

### 2.1 残余孔隙实验型油水驱替实验

选择残余粒间孔隙发育的砂岩样品,某井砂岩铸体薄片残余孔隙发育,泥质杂基发育,面孔率0.5%~8%,孔径0.01~0.03 mm;另一井砂岩铸体薄片中铁泥质充填,杂基含量高,局部方解石胶结,局部有残余粒间孔现象,面孔率1%~4%;还有一井中砂岩被泥质杂基充填,有残余粒间孔,面孔率3%。局部也有长石溶蚀现象。在实验中油进入砂岩基质的速度较快,局部残余孔隙为油道的形成提供了有利条件,但流体流经的范围非常有限,加压后油区范围很难扩大。水驱油时,加压驱油范围扩大不明显,驱油的通道仍是这些局部的残余孔隙发挥作用,流动现象不易观察,仅能看见最终的驱油范围。流体经过的范围仅占整个模型的1/3,水的波及面积并不是很大,路径呈指状(图1),其余区域流体均未进入,显示出残余孔隙的分布是储层微观非均质性的重要特征之一。

### 2.2 溶蚀孔隙实验型油水驱替实验

砂岩中长石碎屑和少量方解石发生溶解,产生大量自生高岭石晶体<sup>[17-24]</sup>,同时形成大量溶蚀型次生

孔隙。实验时流体进入的速度很大,动态现象很难捕捉到。油驱水时,仅仅在颗粒之间的孔隙能见到油,岩石上很少粘有油迹现象;水驱油时,不易发现水的路径,仅看见水以涌动形态出现。水驱油后在岩石表面明显残留着水的痕迹,驱油较完全(图2)。

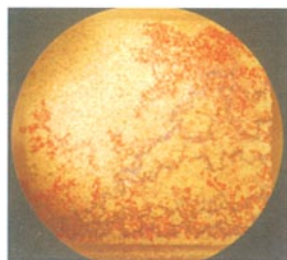


图1 水驱油全视域指状现象

Fig. 1 The complete visual field nail phenomena of water-drive oil

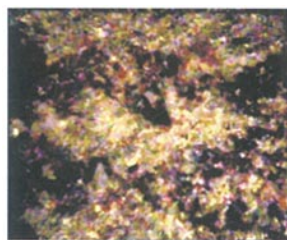


图2 溶蚀孔隙型水驱油现象

Fig. 2 The water-drive oil phenomena of vugular-solution type

### 2.3 纹层缝孔隙实验型油水驱替实验

在某井岩心观察其砂岩颗粒致密,但云母层理上碎片较发育,云母条带沿地层延伸。整个岩心油浸的现象多见。水驱油实验时,在云母的纹层缝周围油进入的较多,且流速较快(图3)。水驱油时水沿云母纹层缝进入,但明显少于油进入的数量。

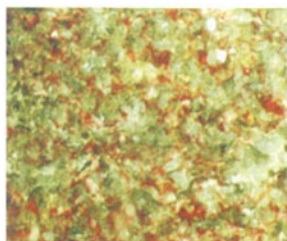


图3 油驱水在纹层缝中的现象

Fig. 3 The oil-drive water phenomena in laminae seam

2.4 裂缝孔隙实验型油水驱替实验

对某井的岩心观察表明,油浸现象较多,变形层理常见,云母发育。实验中油刚进入的时候沿云母暗色条带压裂后形成的裂缝前进,随着时间的持续向暗色条带两边渗流。水驱油时裂缝中和裂缝附近基质中的油较容易被驱走(图 4),其余部分油本身就不多,因此这些油就以残留油的形式保留下来。

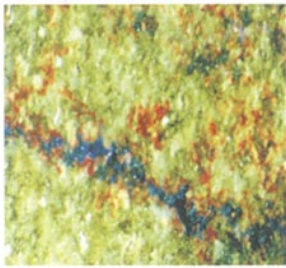


图 4 裂缝型水驱油现象

Fig. 4 The water-drive oil phenomena of fissure typ

2.5 致密微孔隙实验型油水驱替实验

薄片观察表明,西 167 井(1)的方解石胶结致密。在进行砂岩模型实验中,流体不易进入;因此,油进入时的压力较大,且从基质一侧进入;但水驱油时,在压力达到 200 kPa 的时候,水仍不进入基质,而此时的压力已经超过了生产实际的压力。

3 实验数据计算

3.1 驱油效率的计算

驱油效率( $D$ )的计算常采用以下公式<sup>①</sup>:

$$D = \frac{S_{oi} - S_{or}}{S_{oi}} \tag{1}$$

式(1)中, $S_{oi}$ 为原始的含油饱和度; $S_{or}$ 为残余油饱和度。

根据公式(1)计算后得到鄂尔多斯盆地西峰地区长 8 砂岩储集层中 10 个真实砂岩微观模型的驱油效率(表 1)。

3.2 渗透率的计算

真实砂岩微观模型渗透率( $K$ )的计算公式为:

$$K = \frac{Q_v \cdot u \cdot L}{A \cdot \Delta p} \tag{2}$$

式(2)中, $Q_v$ 为体积流量; $u$ 为液体的黏度; $\Delta p$ 为岩样两端的压差; $A$ 和 $L$ 分别为岩样的横截面积和长度。

根据公式(2)计算得到鄂尔多斯盆地西峰地区长 8 砂岩储集层中 10 个真实砂岩微观模型的渗透率(表 1)。由于每个砂岩模型的实验受到时间的限制,不可能真实反映砂岩的驱油效率,但具有系统误差的实验数据已经充分反映了鄂尔多斯盆地西峰地区长 8 砂岩储集层具有很强的微观非均质性。

表 1 实验数据统计

Table 1 The statistics of the experimental data

| 模型<br>编号 | 残余油<br>饱和度<br>$S_{or}/\%$ | 渗透率<br>$K/10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 驱油效率<br>$D/\%$ | 模型<br>编号 | 残余油<br>饱和度<br>$S_{or}/\%$ | 渗透率<br>$K/10^{-3}\mu\text{m}^2$ | 驱油效率<br>$D/\%$ |
|----------|---------------------------|---------------------------------|----------------|----------|---------------------------|---------------------------------|----------------|
| 1        | 10                        | 0.0001                          | 76             | 6        | 8                         | 0.0130                          | 75             |
| 2        | 13                        | 0.0284                          | 72             | 7        | 14                        | 0.0308                          | 72             |
| 3        | 22                        | 0.0185                          | 33             | 8        | 5                         | 0.0128                          | 76             |
| 4        | 28                        | 0.0027                          | 15             | 9        | 7                         | 0.0440                          | 63             |
| 5        | 14                        | 0.0181                          | 46             | 10       | 11                        | 0.0227                          | 56             |

4 真实砂岩微观模型实验的分析

4.1 影响砂岩微观非均质性的因素

影响砂岩微观非均质性的因素很多,其主要影响因素表现为砂岩的孔隙结构和沉积成岩作用特征。

(1) 研究区砂岩发育大量的碳酸盐胶结物,堵塞了一些孔隙和喉道。同时一些孔隙由于被粘土及绿泥石膜保护起来形成残余孔隙,这些残余孔隙连通起来,为流体提供了有利的通道。这就使得此地区有严重的非均质性。也正是这种严重的非均质性,使低渗透层很容易在沉积作用形成的纹层缝、破裂作用形成的裂缝和溶蚀作用形成的溶蚀孔隙的改造下产生高渗透区,试油结果发现单井日产原油超过 20 t。

(2) 本区纹层缝的发育是造成非均质性强的另一个因素。大量岩心显示砂岩纹层缝是沉积作用的产物,在纹层缝周围含油现象较多。纹层缝的接触区常是应力发育的薄弱带,在这些地方容易产生一定的空间,流体容易进入,这也是造成储层非均质性的重要原因之一。

(3) 裂缝是影响非均质性的另一个重要因素。液体总是最先进入畅通、容易进入的区域,所以裂缝

① 刘林玉,李红,曹青,等.西峰地区白马南长 8<sub>1</sub> 储层地质建模. 2004.

一般是流体最容易进入的区域,而在周围基质中很少有油迹现象,这就造成了裂缝分布严重的非均质性。

#### 4.2 残余油的形成及分布表现砂岩的非均质性

残余油的类型多种多样,由于注入水在进入孔隙之后总是首先沿孔隙边缘夹缝或者纹层缝流动,这样很容易把孔隙中央的油包围起来形成残余油。在一个厚油层内部,有的水洗油很干净,有的部位水进不去形成“死油区”,影响了这些油层更好地发挥作用。另外,裂缝型的残余油分布又有它的特点:一般在裂缝中或周围的基质中均有油进入(只是在基质中进入的很少),而在水驱油时,水常常容易驱走裂缝中的油,而基质中的油基本上没有被驱走,所以致使基质中的油被保留下来。这也是油田中常常提到的由于裂缝的存在导致水的窜流,影响孔隙发挥作用。总之,根据它们存在的形态,可以将残余油分为两大类:一类是占较多孔隙的连片状残余油,另一类是占据较少孔隙的一部分分散型残余油。实验过程中水驱油时致密区形成的残余油往往连成片状;而在水较容易进入的区域,这种分散型残余油主要以孤岛状、油丝状分布。

鄂尔多斯盆地西峰地区长8砂岩油层总体上非均质性很强。低渗储层的非均质性对油气田的开发具有重要影响作用<sup>[3,25]</sup>。本次实验中西峰油区长8砂岩驱油范围较小,仅有很少一部分孔隙是连通的,提供了驱油的通道。低渗储层产能较低,但有些井段的出油能力强,这是由于低孔低渗储层具有很强的非均质性,在残余孔隙、溶蚀孔隙和裂缝孔隙等孔隙发育的地区形成了孔隙结构很好的高孔高渗油层。

### 5 几点认识

(1) 鄂尔多斯盆地西峰地区长8砂岩储集层具有裂缝、纹层缝、溶蚀型孔隙、残余型孔隙和致密微型微孔隙等多种孔隙类型,一个真实砂岩微观模型中一旦有较大的孔隙通道时,加入的液体很容易进入并进行油水驱替,而孔隙较小或连通性较差时,即使加压,液体也难以进入。这说明研究区长8砂岩储集层的非均质性较强。

(2) 砂岩微观非均质性的影响因素很多。西峰地区砂岩的沉积成岩作用和孔隙结构是导致砂岩储集层非均质性的主要原因。非均质性的存在会导致在油层开发中低渗透砂岩中形成大量的残余油。

(3) 对于研究区而言,在低渗透砂岩储层中,孔隙结构的均质性好并非意味着驱油效果好;在有些地区,强烈的溶蚀作用导致砂岩孔隙很发育,但分布很不均一,此类地区砂岩储层孔隙结构的非均质性较强,其驱油效果反而较好,形成砂岩储层的高渗带。

### 6 参考文献

- [1] 黄继新. 储集层参数随机建模方法在扇三角洲储集层非均质性研究中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 52-55.
- [2] 赵跃华. 王集油田储层孔隙结构及微观非均质性研究[J]. 石油勘探与开发, 1992, 19(4): 96-106.
- [3] 唐俊伟. 苏里格低渗非均质性气田开发技术对策探讨[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(1): 107-110.
- [4] 刘林玉. 张强凹陷沙海组碎屑岩储层的非均质性[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2002, 32(6): 663-666.
- [5] 杨帆. 用成岩岩相分析法剖析轮南东斜坡东河砂岩非均质性储集层[J]. 石油勘探与开发, 2006, 33(2): 136-139.
- [6] 王寿庆. 双河油田储层非均质性特征和非均质模式[J]. 石油勘探与开发, 1987, 14(1): 62-69.
- [7] Houseknecht D W. Assessing the Relative Importance of Compaction Processes and Cementation to Reduction of Porosity in Sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(6): 633-643.
- [8] Baker J C, Harvord P J, Martin K R, et al. Diagenesis and Petrophysics of the Early Permian Moogooloo Sandstone, Southern Marnarvon Basin, Weseten Austealia [J]. *AAPG Bulletin*, 2000, 84: 250-265.
- [9] Marchant M E, Smalley P C, Haszeldine R S, et al. Note on the Importance of Hydrocarbon Fill for Reservoir Quality Prediction in Sandstones [J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(9): 1561-1571.
- [10] Wescott W A. Diagenesis of Cotton Valley Sandstone (Upper Jurassic), East Texas: Implication for Tight Gas Formation Pay Recognition [J]. *AAPG Bulletin*, 1983, 67(6): 1002-1013.
- [11] Surdam R C, Crossry L J, Hagen E S. Organic-Inorganic Interactions and Sanstone Diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73(1): 1-23.
- [12] 刘林玉, 邸世. 吐鲁番坳陷中侏罗统沉积与储层孔隙发育特征[J]. 石油与天然气地质, 1997, 18(3): 247-251.
- [13] 李斌, 孟自芳, 李相博, 等. 靖安油田上三叠统长6成岩作用研究[J]. 沉积学报, 2005, 23(4): 574-583.
- [14] 蔡进功, 谢忠怀, 田芳, 等. 济阳坳陷深层砂岩成岩作用及孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(1): 84-88.

(参考文献下转第36页)

比较谱线 Fe 533.33 nm 的强度比值:1<sup>#</sup>样品为 0.176, 2<sup>#</sup>样品为 1.22, 3<sup>#</sup>样品为 1.35, 4<sup>#</sup>样品为 2.88。利用这组量化比值很容易鉴别 4 种牌号的材料。例如,测定出样品的谱线强度比值为 1.33,在 3<sup>#</sup>样品的 1.35 附近,可判定所测定的样品牌号是 3<sup>#</sup>。

对于鉴别一些铬含量较为接近的铁基合金时,人眼判定很容易出错,但借助数字化分析系统能够很好地解决这个问题。如果遇到现场无法解决的难题时,可使用系统的记录功能,将观测区的视场即时记录成电子谱图,后期再进行分析处理。

### 3 结语

可见光谱分析技术自引入我国已有 50 多年的历史,科研人员在技术上的探索研究一直未间断,快速分析的特点使可见光谱分析技术在工业生产过程中发挥了重要作用。进入 21 世纪后,一些技术推广性的成果常见诸于文献<sup>[8-9]</sup>,分析技术的精度<sup>[10]</sup>、技术改进<sup>[11]</sup>和分析方法<sup>[12]</sup>等方面也有人在进行探索研究,但文章中实际谱图很少见到,基本采用线描谱图。由于现有的仪器设备无法进行谱图记录,胶卷相机的谱图质量不稳定且无法即时看到记录效果,限制了可见光谱分析技术的应用范围和技术改进。

数字技术的发展为对可见光谱进行数字化采样和记录提供了基础,在铁基合金铬元素分析中的应用得到理想的结果。谱图可以即时记录成数字谱图并存储于计算机硬盘等介质中,谱图的量化分析也可以利用计算机自动进行而摆脱人眼视觉误差的影

响。由于数字分析技术使得光谱的观测分析可以多人同时进行,方便了技术交流和人员培训,对可见光谱分析技术的推广和深入研究都有重要意义。

本工作只是初步探索,希望得到光谱分析领域专家的指导,愿有更多的科研技术人员在数字化技术上进行更深入的研究工作。

### 4 参考文献

- [1] 斯文齐茨基 H C. 看谱镜[M]. 周鸿吉, 韦雅文, 译. 北京:中国工业出版社, 1963: 8-11.
- [2] 孙相诚. 看谱分析[M]. 北京:新时代出版社, 1982: 37-59.
- [3] 洛阳轴承厂. 看谱分析图谱与标志[M]. 北京:机械工业出版社, 1974: 1-4.
- [4] 李国华, 徐秋心. 金属材料看谱分析手册[M]. 成都:四川大学出版社, 2000: 57-85.
- [5] 冶金工业部情报产品标准研究所. 光谱线波长表[M]. 北京:中国工业出版社, 1971: 640-647.
- [6] 刘平, 庞晓辉, 杨军红, 等. 棱镜看谱镜线色散率及应用研究[J]. 材料工程, 2006(1): 27-31.
- [7] 刘平, 庞晓辉, 杨军红, 等. 铁基合金中钨元素的看谱分析技术应用研究[J]. 中国钨业, 2005, 20(6): 41-44.
- [8] 曾澄光, 刘广宇. 看谱分析技术及其应用[J]. 硬质合金, 2002, 19(1): 54-56.
- [9] 李栋梁, 李寒青. 看谱分析的特点及应用[J]. 油气田地面工程, 2001, 20(2): 59-60.
- [10] 戴沅, 钟万里, 林丁. 看谱半定量分析准确度的探讨[J]. 硬质合金, 2001, 18(1): 39-41.
- [11] 谭宗礼. 普通火花光源激发钢中铝的看谱分析[J]. 理化检验:化学分册, 2000, 36(1): 29-32.
- [12] 李广明. 快速看谱分析高速钢[J]. 冶金分析, 2000, 20(1): 58-59.
- [15] 黄思静, 谢连文, 张萌, 等. 中国三叠系陆相砂岩中自生绿泥石的形成机制及其与储层孔隙保存的关系[J]. 成都理工大学学报:自然科学版, 2004, 31(3): 273-281.
- [16] 刘林玉, 张龙, 王震亮, 等. 鄂尔多斯盆地镇北地区长 3 储层微观非均质性的实验分析[J]. 沉积学报, 2007, 25(2): 224-229.
- [17] 刘林玉, 陈刚, 柳益群, 等. 碎屑岩储集层溶蚀型次生孔隙发育的影响因素分析[J]. 沉积学报, 1998, 16(2): 97-101.
- [18] 刘林玉, 柳益群, 陈刚. 吐鲁番坳陷中-上侏罗统碎屑岩中的自生黏土矿物特征及其成岩意义[J]. 岩石学报, 1998, 14(2): 258-268.
- [19] 李汶国, 张晓鹏, 钟玉梅. 长石砂岩此生溶孔的形成机理[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(2): 220-223.
- [20] 刘林玉, 王震亮, 张龙. 鄂尔多斯盆地镇北地区长 3 砂岩的成岩作用及其对储层的影响[J]. 沉积学报, 2006, 24(5): 690-697.
- [21] 朱国华. 陕甘宁盆地上三叠统延长组低渗透砂岩和次生孔隙砂体的形成[J]. 沉积学报, 1985, 3(2): 1-17.
- [22] 刘林玉. 吐鲁番-哈密盆地中生界砂岩次生孔隙研究[J]. 石油实验地质, 1996, 18(3): 317-24.
- [23] 刘林玉, 邸世祥, 薛祥煦. 民和盆地巴州坳陷储集层成岩作用[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(1): 58-61.
- [24] 柳益群, 李文厚. 鄂尔多斯盆地东部上三叠统含油长石砂岩的成岩特点及孔隙演化[J]. 沉积学报, 1996, 14(3): 87-96.
- [25] 尹志军. 陆相储层非均质性及其对油藏采收率的影响[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(1): 106-117.