

· 石油地质 ·

# 真实砂岩微观模型活性水驱油实验研究

赵 阳 曲志浩 陈 蓉

(西北大学地质系, 西安, 710069)

**摘 要** 表面活性剂驱油是三次采油的主要方法之一。本实验采用真实砂岩微观模型驱替实验技术, 结合长<sub>2</sub>、长<sub>6</sub>油层来探讨表面活性剂的驱油机理及其对驱油效率的影响。实验表明, 利用该项技术进行活性水驱油实验来研究其对驱油效率的影响是可行的。

**关键词** 三次采油 真实砂岩微观模型 表面活性剂驱油 驱油效率

表面活性剂驱油是三次采油的主要方法之一。目前, 国内外关于这一问题的实验研究, 大多采用岩芯流动实验。这种方法无法对驱油效果和驱油方式进行直观观察。直接用岩芯制作成的真实砂岩微观模型, 既保持了岩芯的真实性, 又保留了光刻微观模型便于观察的优点。本实验即采用真实砂岩微观模型驱替实验技术, 通过直接观察进行研究。实验模型是在保持原岩芯的各类性质不变的条件下, 经洗油、烘干、切片、磨片等工序制作而成。模型尺寸一般长约为 2.5 cm, 宽约 2.5 cm, 厚度约 0.03 cm, 能够承受较高压力 (0.2~0.3 MPa), 耐高温能力 80℃。这些模型较好地保存了岩芯的孔隙结构及大部分填隙物, 实验观察更清晰、更直观, 具有很强的真实性, 而且进行拍照录像及计算机图像处理都很方便, 是室内水驱油实验比较理想的模型。

## 1 真实砂岩微观模型驱替实验

### 1.1 实验目的及模型层位概况

本实验的目的主要是尝试用微观模型来进行活性水驱油实验, 以靖安油田长<sub>2</sub>、长<sub>6</sub>油层为例, 探讨活性剂提高驱油效率的机理。

靖安油山位于陕西省靖边县与志丹县境内, 属于低渗透油田。长<sub>2</sub>、长<sub>6</sub>油层都是靖安油田的油层组之一, 其中长<sub>6</sub>油层的润湿性为中性—弱亲水, 长<sub>2</sub>油层的亲水性则明显高于长<sub>6</sub>油层。长<sub>2</sub>、长<sub>6</sub>油层的基本物性参数见表 1。

### 1.2 实验步骤

实验步骤: 先对模型依次抽真空饱和地层水, 油驱水至束缚水饱和度, 水驱油至残余油饱和度, 统计驱油效率, 然后在此基础上用活性剂溶液驱油, 观察其驱油效果并统计驱油效率。同常规水驱油进行比较, 并观察其驱油机理和对驱油效率的影响。整个实验均在常温下进

收稿日期: 1999-03-24

第一作者简介: 赵 阳, 男, 1976 年生。现为西北大学地质系硕士研究生。研究方向为煤田、油气地质与勘探专业。

行，具体过程见参考文献 1~2，在此不再赘述。

表 1 靖安油田长<sub>2</sub>、长<sub>6</sub>油层物性参数

| 层 位               | 平均渗透率<br>(10 <sup>-3</sup> μm <sup>2</sup> ) | 平均孔隙度<br>(%) | 平均排驱压力<br>(MPa) | 平均<br>分选系数 | 平均面孔率<br>(%) | 平均孔径<br>(μm) | 中值半径<br>(μm) |
|-------------------|----------------------------------------------|--------------|-----------------|------------|--------------|--------------|--------------|
| 长 <sub>6</sub> 油层 | 1.0                                          | 12.64        | 0.49            | 3.07       | 5.6          | 65           | 0.19         |
| 长 <sub>2</sub> 油层 | 20.6                                         | 16.97        | 0.1             | 4.34       | 16.6         | 160          | 0.85         |

1.3 实验流体

实验所用地层水和注入水均为采油现场所取。实验用油包括有采油现场取得的原油和由变压器油与煤油配制而成的模拟油。为便于观察，在油中加入少量油溶红。采用的表面活性剂有十二烷基苯磺酸钠、月桂醇醚硫酸钠和椰子烷基磺酸钠等三种。其中地层水、注入水、原油及表面活性剂均由长庆勘探研究院化验室提供。活性剂溶液均为常温下配制，与注入水的重度比均为 0.02，其它各流体粘度如下：

长<sub>2</sub>地层水（45℃）：0.637 MPa·s；长<sub>6</sub>地层水（50℃）：0.682 MPa·s；注入水（45℃）：0.611 MPa·s；原油（45℃）：4.8 MPa·s；模拟油（20℃）：2.3 MPa·s。

1.4 实验压力

因本次实验的几个模型的入口压力（水能进入空隙介质的最小压力）均在几百毫米水柱的范围内，为便于对比，采用的实验压力均较低，稳定在 0.01 MPa 左右。

2 实验结果分析与讨论

2.1 实验数据

为了分析和探讨表面活性剂驱油提高驱油效率的效果及其影响因素，我们对靖安油田长<sub>6</sub>、长<sub>2</sub>油层的模型分别作了详细的实验观察研究，实验结果如表 2。

由表 2 可见，采用活性剂水驱油后，对驱油效率的提高作用是不言而喻的。J<sub>29</sub>和 J<sub>59</sub>两模型在使用活性剂驱油的前后驱油效率的增量 ΔEd 比较接近，分别为 8.6%和 7.8%，这两个模型均使用 μ=2.3 MPa·s 的模拟油，渗透率也较低，分别为 5.32 md 和 3 md；而其它模型的驱油效率增量 ΔEd 比较显著，它们均使用的是 μ=4.8 MPa·s 的原油，同时它们的渗透率也较大。其中 J<sub>18</sub>的 ΔEd 的异常高可能是因为该模型在进行二次水驱油、油驱水时曾用石油醚清洗，致使模型的某些物性发生改变所致。

由此，表面活性剂对驱油效率的影响除了与其本身的性质有关外，可能还与模型的渗透率和原油的粘度有关。渗透率越大，原油与注入水的粘度差越大，则活性剂对残余油的驱油效果就越明显。

2.2 活性水驱油机理

众所周知，表面活性剂是具有两亲性的物质，它既具有亲水基团，又具有亲油基团，活性剂驱油就是利用它的这一基本性质。经过详细观察，发现在本次实验中，提高驱油效率的原因主要表现在以下几个方面。

表 2 实验结果综合表

| 模型<br>层位       | 模型号 | 液测渗透率<br>(md) | 常规水驱油<br>Ed (%) | 活性剂驱油<br>Ed (%) | Ed 增量<br>ΔEd (%) | 油样                 | 活性剂类别        |
|----------------|-----|---------------|-----------------|-----------------|------------------|--------------------|--------------|
| 长 <sub>6</sub> | J29 | 5.32          | 44.9            | 53.5            | 8.6              | 模拟油<br>μ=2.3 MPa·s | 十二烷基苯<br>磺酸钠 |
| 长 <sub>6</sub> | J59 | 3             | 27.7            | 35.5            | 7.8              | 模拟油<br>μ=2.3 MPa·s | 月桂醇醚<br>硫酸钠  |
| 长 <sub>6</sub> | J18 | 34.5          | 29.4            | 71.9            | 42.5             | 原 油<br>μ=4.8 MPa·s | 十二烷基苯<br>磺酸钠 |
| 长 <sub>2</sub> | J47 | 33.43         | 54.9            | 72.7            | 17.8             | 原 油<br>μ=4.8 MPa·s | 椰子烷基<br>磺酸钠  |
| 长 <sub>2</sub> | J34 | 22.99         | 28.08           | 34.83           | 10.75            | 原 油<br>μ=4.8 MPa·s | 十二烷基苯<br>磺酸钠 |
| 长 <sub>2</sub> | J48 | 57.33         | 32.59           | 49.44           | 16.85            | 原 油<br>μ=4.8 MPa·s | 十二烷基苯<br>磺酸钠 |
| 长 <sub>2</sub> | J37 | 80.16         | 32.14           | 45.24           | 13.1             | 原 油<br>μ=4.8 MPa·s | 十二烷基苯<br>磺酸钠 |
| 长 <sub>2</sub> | J54 | 212.28        | 43.9            | 54.35           | 10.45            | 原 油<br>μ=4.8 MPa·s | 十二烷基苯<br>磺酸钠 |

2.2.1 油水界面张力的降低,使残余油滴易于变形,扩大驱替液的波及面积 加入表面活性剂后,亲油链伸入油相中,亲水端伸入水相,迅速在油水界面上形成定向吸附,表面层上的净吸力大大减弱,结果表面收缩力明显减小,从而使油水的界面张力明显下降,油滴就更容易变形。油水界面张力的降低,大大减弱了细孔道中的贾敏效应,使通过喉道时的毛管阻力减小,使原来某些不能被水进入的细孔道绕流区被活性剂溶液驱及,从而扩大了水驱油的波及面积,提高驱油效率。同时还可使原来被卡在较小喉道处不能流动的残余油滴因易于变形而被驱替出来,成为可动油。油珠(滴)在喉道处的变形、受力情况如图 1 所示。

图 1 为假定有一变断面孔道,其中充满润湿相水。如果有一油滴要从粗端一侧通过细端,当此油滴抵达细端时,必然发生变形,从而使油滴两端具有不同的曲率半径  $R_1$  和  $R_2$ 。油滴要想通过孔道细端则必须克服这一毛管阻力  $P_c$ ,它等于

$$P_c=2\sigma\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$$

其中,σ为油滴的界面张力。油滴粗细两端的曲率半径  $R_2$  和  $R_1$  可以分别近似地视为孔隙半径和喉道半径,于是  $P_c$  便可认为是油滴要通过孔隙喉道所需要克服的毛细管阻力。由上式可见,随着界面张力的降低,通过喉道时的毛管阻力  $P_c$  将会明显减小,这也就是减弱贾敏效应,扩大波及面积的原因。

2.2.2 增加原油在水中的分散作用,使之易于被驱替液携带 实验过程中发现,常规水驱油后剩下的残余油块,当被含活性剂的水溶液波及后,即被一点一点刮去呈细小的油珠悬浮于

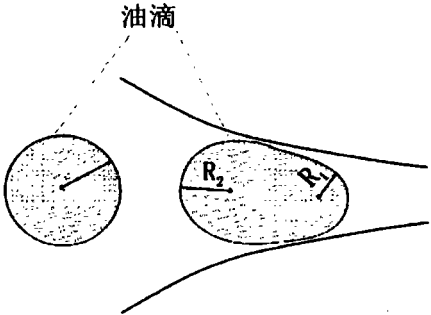
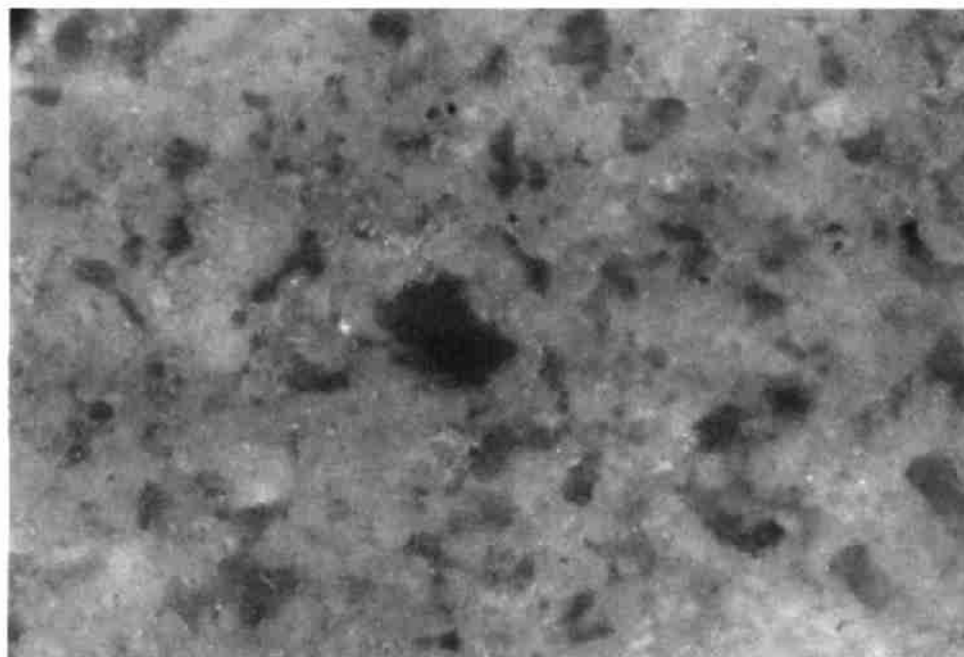


图 1 油珠(滴)在喉道处受毛管力示意图

溶液中随溶液一块流走。即随着界面张力的降低,原油可以被分割成极细小的油珠分散在活性水中呈乳浊液被带出,从整体上降低原油的粘度,从而减小在喉道处遇到的阻力并减小油滴被重新粘回岩石表面的可能性。同时,被活性剂溶液驱替以后的残余油的分布也更加分散,残余油滴大多处于孔道中央(照片1、2),有利于以后再次提高采收率的方法的进行。

**2.2.3 改变岩石表面的润湿性** 实验中明显可以观察到,被活性剂溶液波及的区域,残余油的状态基本呈圆珠状或椭圆状,表现出明显的亲水性(照片2),而长,油层原来的润湿性是偏中性的,即表面活性剂在岩石表面的吸附可使岩石的润湿性更加偏亲水,从而使原来偏亲油部分以油膜状态吸附于岩石表面的残余油脱离岩石表面而被驱替出来,驱替得更加干净。

**2.2.4 改变原油的流变性** 在注入水中加入表面活性剂以后,可使油的整体粘度减小,从而改善驱替液与原油的流度比,使吸水指数明显下降,出口端含水率下降,驱油效率提高,原油粘度越大,即原油与注入水的粘度差越大,流度比降低得就越明显, $\Delta E_d$ 就越明显。



照片1 模型J47

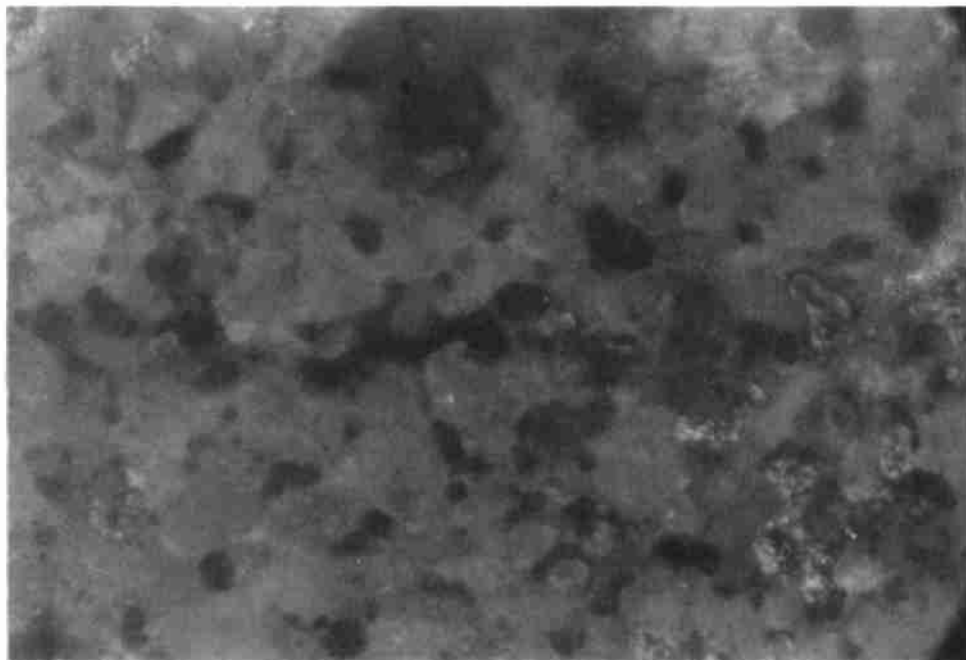
活性水驱后残余油滴的分散分布(深色为油)

### 3 结 论

从以上所述,可以得出以下结论:

1) 利用表面活性剂驱油是一种行之有效的三次采油方法,利用真实砂岩微观模型进行活性水驱油实验是研究三次采油的一种可行的实用技术。

2) 实验表明,活性水驱油可以降低油水界面张力,改变岩石润湿性,增加原油在水中的



照片 2 模型 J18

被活性水驱后残余油滴呈珠状或椭圆状, 呈现出明显亲水性 (深色为油)

分散作用, 扩大驱替液的波及体积, 提高驱油效率, 改善开发效果。

3) 实验结果分析表明, 使用表面活性剂驱油可以改变驱替液的流变性, 降低驱替液与原油的流度比, 提高驱油效率。

### 参 考 文 献

- 1 孔令荣等. 砂岩微观模型两相驱替实验. 石油勘探与开发, 1991, 18 (4)
- 2 贾红育、曲志浩. 低渗透油田油层结垢机理——砂岩微观孔隙模型实验研究. 石油勘探与开发, 1997, 24 (5)
- 3 罗蛰潭主编. 油层物理. 北京: 地质出版社, 1985
- 4 王云峰、张春光、侯万国等编. 表面活性剂及其在油气田中的应用. 北京: 石油工业出版社, 1995