

文章编号 :1000-0550( 2001 )04-0592-06

# 反韵律砂层石油运移模拟实验研究<sup>①</sup>

曾溅辉 王洪玉

(石油大学石油与天然气成藏机理教育部重点实验室 北京 102249)

**摘要** 反韵律砂层油的运移二维模拟实验研究表明 (1)反韵律砂层在油的运移过程中表现为顶部含油饱和度高,含油厚度小,含油层段平均运聚效率高,含油饱和度具有从上到下逐步降低的特点 (2)在反韵律砂层,油气的运移方向、路径和通道总体表现为自下而上,由复杂趋于简单,并主要受油气充注方向、充注速率和渗透率级差等条件的影响 (3)水动力既可以增加反韵律砂层油的运移效率,减小散失量,亦可以降低油的运移效率,增加散失量。注水速率较小时,可以增加反韵律砂层油的运移效率,但注水速率较大时,主要表现为降低油的运移效率 (4)水动力作用降低了反韵律砂层中油的运移速率。

**关键词** 反韵律砂层 油的运移 模拟实验

**第一作者简介** 曾溅辉 男 1962 年出生 博士 副教授 水文地质和石油地质

**中图分类号** TE122.1+2 **文献标识码** A

## 1 前言

许多油气输导层和储集层如三角洲前缘相席状砂体等具有反韵律砂体的特点,表现为由砂层底部向顶部粒度由细变粗,孔隙度由小变大而渗透率亦由低变高。油气勘探结果表明,在反韵律砂层,由底部向顶部随着孔隙度和渗透率由低到高的变化,含油饱和度亦由小变大。例如在东营凹陷胜坨油田二区的反韵律砂体内,原始含油饱和度一般由下向上变高。在三角洲前缘的河口坝反韵律砂体中,垂向上有效孔隙度、渗透率和原始含油饱和度值由下往上变化趋势均为由小到大。值得注意的是,当渗透率级差超过一定值时,一些较低渗透率的储层则可能成为干层甚至水层(由于油气充注不足)。但是,有关反韵律砂层中油气运移和聚集特征、机理及其影响因素研究得较少,还不十分清楚。本文在前人的油气运移和聚集模拟实验研究<sup>[1~4]</sup>基础上,利用二维模拟实验装置,认识反韵律砂层油气分布规律,探讨油的运移和聚集机理。

## 2 实验模型与实验方法

实验模型如图 1 所示。实验模型大小为 50cm × 30cm × 2cm,模型前面为玻璃板,可以直接观察油的运移和聚集,用直径很小的不锈钢管线将三个出口置于同一高度,均高于模型 4.0 cm。模型中 4 个砂层分别由粒度不同的水湿石英砂组成,其物性参数见表 1,盖层由橡胶构成,其孔隙度和渗透率近似可看成 0。砂

层 4 的渗透率最大,其目的是使注入的油很快在砂层 4 中饱和,并均匀地侧向充注于反韵律砂层,同时尽量降低注入压力对砂层 1、2 和 3 中油运移的影响。利用 ISCO 泵连续注入煤油。煤油的密度为 0.75 g/cm<sup>3</sup>,同时加入微量红色色素,以便于观测,加入的纯水的密

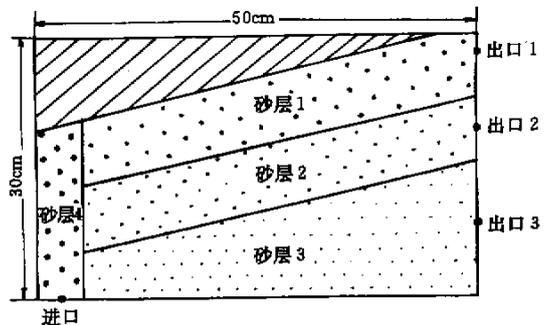


图 1 实验模型示意图

Fig.1 Sketch of experimental model

表 1 实验模型砂体物性参数

Table 1 Grain size, porosity and permeability of the sands in experimental model

砂层	粒径/mm	孔隙度	渗透率/ $\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$
砂层 1	0.25 ~ 0.3	0.35	5 596.3
砂层 2	0.15 ~ 0.2	0.32	2 266.3
砂层 3	0.05 ~ 0.1	0.30	416.3
砂层 4	0.7 ~ 0.8	0.35	41 600

① 中国石油天然气集团公司“九五”重点科技攻关项目( No. 960007 )部分成果

收稿日期 2000-10-18 收修改稿日期 2001-02-06

度为  $1.0 \text{ g/cm}^3$ 。分别进行静水和动水条件下反韵律砂层油的运移模拟实验。动水条件下,在模型左下端设置一注水口。实验时注油速率比注水速率大 10 倍,分别为  $0.1 \text{ ml/l}$ 、 $0.01 \text{ ml/l}$ 、 $0.3 \text{ ml/l}$ 、 $0.03 \text{ ml/l}$ 、 $0.5 \text{ ml/l}$ 、 $0.05 \text{ ml/l}$  和  $1.0 \text{ ml/l}$ 、 $0.1 \text{ ml/l}$ 。实验步骤和方法同参考文献<sup>[5-8]</sup>。

### 3 实验结果

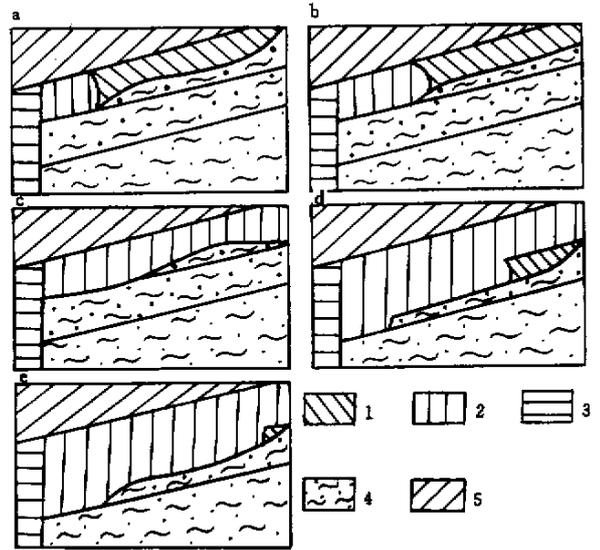
#### 3.1 油的运移过程

##### 3.1.1 静水条件下

以  $0.1 \text{ ml/min}$  的注油速率向模型中注入油,随着注油量的增加,油主要沿砂层 1 的上倾方向向上运移,运移速率较快,约为  $0.0968 \text{ cm/min}$ 。当注油 10 小时 39 分,注油量  $63.89 \text{ ml}$  时,砂层 1 中油的运移前锋到达顶部(图 2a),随后砂层 1 中的出口 1 开始出油。注油至 23 小时 36 分,注油量  $141.58 \text{ ml}$  时,砂层 1 中注油量等于出油量,即模型中油的运移达到稳定状态(图 2b)。因此当注油速率为  $0.1 \text{ ml/min}$  时,油的运移仅局限在渗透率最大的砂层 1 中,但是含油饱和度不大,含油厚度也不大。将注油速率增加到  $0.3 \text{ ml/min}$ ,注油 1 小时 24 分,注油量  $25.26 \text{ ml}$  时,注油量等于出油量,模型中油的运移快达到稳定状态。在这个过程中,油仍然在砂层 1 中运移,表现为颜色加深,含油饱和度增大,但含油厚度变化不大(图 2c)。将注油速率分别增加到  $0.5$  和  $1.0 \text{ ml/min}$ ,油仍然仅在砂层 1 运移,同时含油饱和度不断增加。进一步将注油速率增加到  $5 \text{ ml/min}$ ,当注油 18 分钟,注油量  $90.09 \text{ ml}$  时,部分油进入砂层 2,至注油 1 小时 8 分,砂层 1 完全被油充满,同时砂层 2 中的油运移至顶部,少部分油进入砂层 3(图 2d)。注油 3 小时 40 分钟达到稳定时,砂层 2 下倾部位全部充注油,而上倾部位只有靠近砂层 1 的顶部才充注油,砂层 3 基本没有充注油(图 2e)。将注油速率进一步增加到  $7 \text{ ml/min}$ ,在 2 小时内达到稳定,各砂层内油的分布情况变化不大。

##### 3.1.2 动水条件下

首先分别以  $0.1 \text{ ml/min}$  和  $0.01 \text{ ml/min}$  的速率向模型中同时注入油和水(注油速率比注水速率大 10 倍),油主要在上部渗透率最大的砂层 1 中运移,运移速率约为  $0.048 \text{ cm/min}$ 。当注油量为  $102.74 \text{ ml}$ ,注水量为  $10.29 \text{ ml}$  时,砂层 1 中的油运移至右侧边界,运移通道逐渐加宽,含油饱和度不断增大。当注油量和注水量分别达到  $258.44 \text{ ml}$  和  $25.83 \text{ ml}$  时,进出口的注油量和注水量近于相等,此时模型中的油/水运移基本达到稳定状态(图 3a)。随后,将注油速率和注水



1、2、3—不同含油饱和度的油层(其中从 1-2-3 含油饱和度逐渐变大) 4—水层 5—盖层

a. 注油量  $63.89 \text{ ml}$  注油时间 10 小时 39 分;

b. 注油量  $141.58 \text{ ml}$  注油时间 23 小时 36 分(达稳定);

c. 注油量  $25.26 \text{ ml}$  注油时间 1 小时 24 分(稳定);

d. 注油量  $340.0 \text{ ml}$  注油时间 1 小时 8 分;

e. 注油量  $1100.0 \text{ ml}$  注油时间 3 小时 40 分。

(a、b—注油速率  $0.1 \text{ ml/min}$  c—注油速率  $0.3 \text{ ml/min}$  d、e—注油速率  $5.0 \text{ ml/min}$ )

图 2 静水条件下反韵律砂层油的运移和聚集过程示意图

Fig.2 Sketch of oil migration and accumulation

in the coarsening upwards sands with hydrostatic condition

速率分别增加到  $0.3 \text{ ml/min}$  和  $0.03 \text{ ml/min}$ ,油仍然仅在砂层 1 中运移,但砂层 1 中油的颜色逐渐变淡,说明此时水动力作用对模型中油的运移构成了重要影响。由于这种影响,导致砂层 1 中的油的聚集量减少,含油饱和度降低,主要起输导油的作用。当注油量达到  $460.24 \text{ ml}$ ,注水量达到  $46.02 \text{ ml}$  时,达到稳定状态(图 3b),此时砂层 1 下部油的颜色较淡,含油饱和度降低。继续将注油速率和注水速率分别加大到  $0.5 \text{ ml/min}$  和  $0.05 \text{ ml/min}$ ,这时,油仍然只在砂层 1 中运移,但与注油和注水速率分别为  $0.3 \text{ ml/min}$  和  $0.03 \text{ ml/min}$  相比,砂层 1 中油的颜色加深,含油饱和度增大,说明此时水动力对砂层 1 中油的运移的影响比注油速率为  $0.3 \text{ ml/min}$ ,注水速率为  $0.03 \text{ ml/min}$  时水动力的影响小。当注油量达到  $644.46 \text{ ml}$ ,注水量达到  $64.45 \text{ ml}$  时,达到稳定(图 3c)。再次将注油速率和注水速率分别加大到  $1.0 \text{ ml/min}$  和  $0.1 \text{ ml/min}$ ,油仍然仅在砂层 1 中运移,但油的颜色变得很深,含油饱和度很大,说明此时水动力对砂层 1 中油的运移影

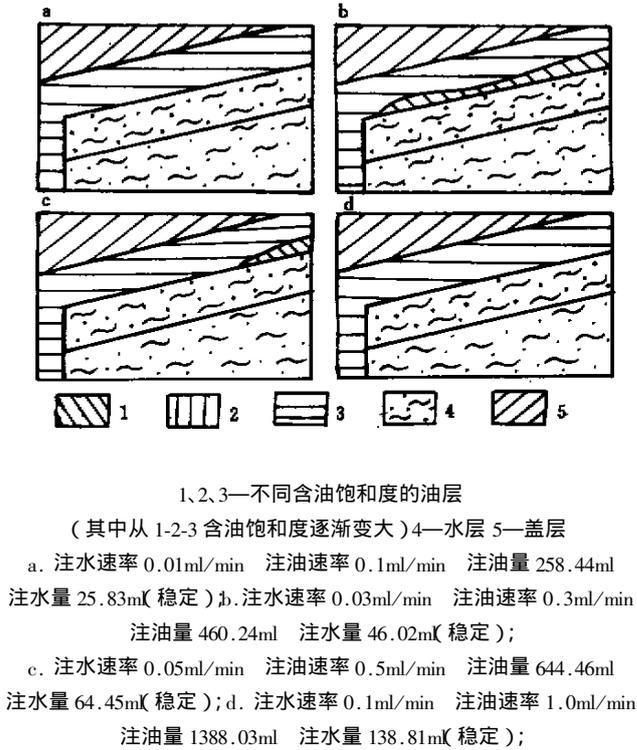


图 3 动水条件下反韵律砂层油的运移和聚集过程示意图

Fig.3 Sketch of oil migration and accumulation

in the coarsening upwards sands with hydrodynamic condition

响不大,当注油量达 1 388.03 ml,注水量达 138.81 ml 时,达到稳定(图 3d)。

### 3.2 注入压力变化

一般,注入压力的变化综合反映了油/水运移过程中的受力、运移通道、运移路径以及含油饱和度的变化,因此,通过注入压力随时间的变化可以深入探讨油的运移过程。在静水和动水条件下,注入压力均随时间呈波动状变化,反映了反韵律砂层中油的运移表现为脉冲式和跳跃式的特点。注入压力可直接从 ISCO 注入泵读取。该压力并不是油/水运移过程中的实际压力值,而是反映油/水运移过程中相对压力的大小,因此,它是相对压力。

图 4 为动水条件下相对注油压力和相对注水压力随时间的变化。从图中可知:注油速率由 0.1 ml/min 至 0.3 ml/min 和 0.5 ml/min 相对注油压力的最大值和最小值均逐渐减小,至注油速率为 1.0 ml/min 时,又逐渐增大。这些变化反映了油运移的方向、路径和通道及运移过程中的受力情况。当注油速率为 0.1 ml/min 时,在 A<sub>1</sub> 点,油已充满高渗透带砂层 4,开始克服砂层 1 的毛管阻力,进入砂层 1。进入砂层 1 之后,注油压力降低,当运移前锋到达右侧边界时,注油达到最低(B<sub>1</sub> 点)。随着注油量不断增大,油将充注砂层 1 中

的一些较小的孔隙和孔喉,这时注油压力也逐渐增大,至 C<sub>1</sub> 点时,砂层 1 油的颜色最深。随后出口 1 开始出油,其结果导致注油压力迅速下降(D<sub>1</sub> 点),但含油饱和度仍然逐渐增加,油的颜色逐渐加深。增大注油速率至 0.3 ml/min,这时注油压力也急剧增加(E<sub>1</sub> 点)随着水动力作用对油的冲刷,注油压力逐渐下降,油的颜色也逐渐变浅,含油饱和度减小,在 F<sub>1</sub> 点,含油饱和度最小。在注油速率增大到 0.5 ml/min 时,注油压力又由大→小变化,在 G<sub>1</sub> 点压力最大,油

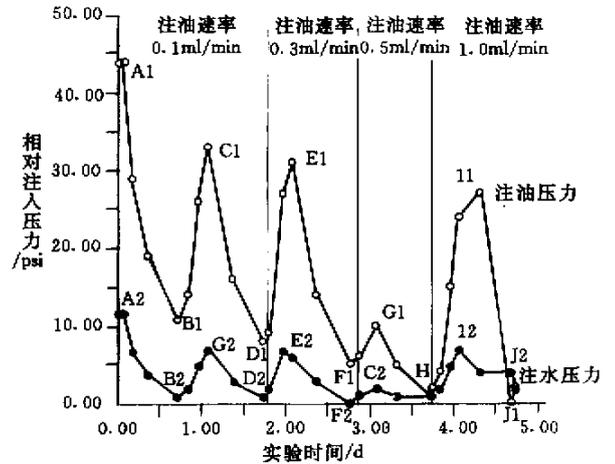


图 4 相对注油压力和注水压力随实验时间的变化

Fig.4 Correlation between oil injection pressure, water injection pressure and experimental time

的颜色也加深,含油饱和度加大,但由于水动力作用,导致注油压力下降,在 H 点,注油压力最低,油的颜色明显变浅,含油饱和度也减小。其主要原因在于注油速率增大到 0.3 ml/min 或 0.5 ml/min 时,由于注入压力的增加,导致油的运移路径更通畅,更多的油从砂层中排出。另外相对注油压力均高于相对注水压力,说明在水湿介质中,油运移过程中所受的阻力大于水运移时所受的阻力。

### 3.3 排油/水过程

静水条件下,在注油速度 0.1 ml/min 时,除了实验开始不久,出口 1 和 2 排水外,其余时间均不排水。当注油速度加大到 0.5 ml/min 以上时,出口 1 才排水。

在动水条件下,整个实验过程中,只有出口 1 排油,并且随注油量的增大,排油量也增大,但排油量总小于注油量,即一部分油聚集在砂层 1 中。注油速率从 0.1 ml/min→0.3ml/min→0.5ml/min,注油量与排油量之间的差值具有减小的趋势。注油速率为 0.1 ml/min 时,注油量与排油量之间的差值较大,即注入的油

在砂层1中聚集得较多,从而导致排出的油量相对较少。随着砂层1中含油饱和度的增加,在注油速率为0.3和0.5 ml/min时,水动力对油起冲刷作用,油的颜色逐渐变浅,砂层1中聚集的油量越来越少,这时注入的油大部分通过出口1排出,导致注油量与排油量之间相差很小。在注油速率为1.0 ml/min时,注油量与排油量之间的差值逐渐变大,反映在较大的注油速率

(注油压力)下,油可以进入砂层1中更小的孔径和孔隙,导致含油饱和度进一步增加,颜色变深,因此排油量与注油量之间的差值增大。另外,在整个实验过程中,油主要在砂层1中运移,并且随着注油量的增加,砂层1输导的油量也增大(图5)。

从图6可知,在实验过程中,出口1、出口2和出口3均排水,其中出口3排出的水量最大,并且一直在

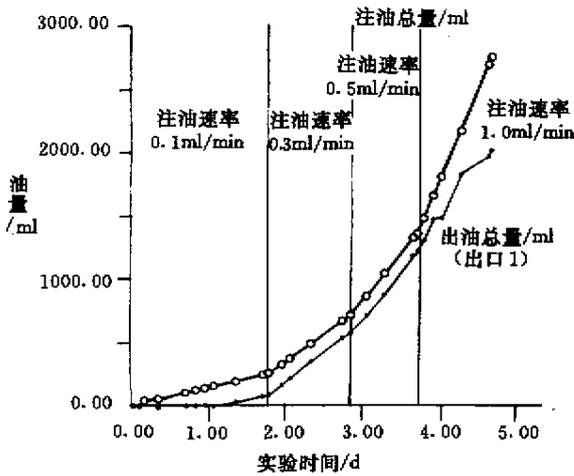


图5 注油量和排油量随实验时间的变化

Fig.5 Correlation between quantity of oil injection and oil ejection and experimental time

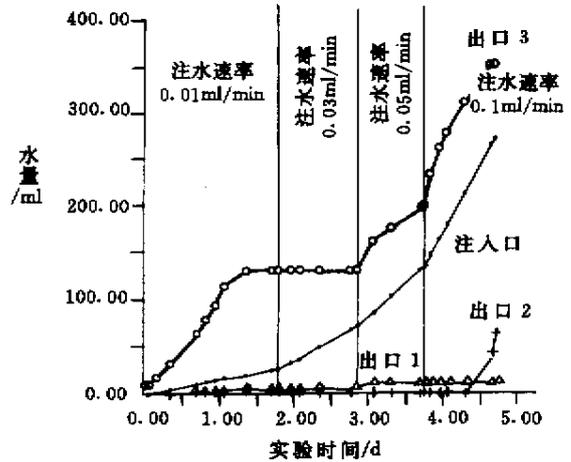


图6 注水量和排水量随时间的变化

Fig.6 Correlation between quantity of water injection and water ejection and experimental time

排水。出口1和出口2排水量较少。从出口3排水量与时间之关系,可以认识油的运移过程。首先,在整个实验过程中,出口3的排水量均高于注水量,即出口3除了排出注入的水量之外,还排出了一部分油驱替的水量。注油速率由0.1 ml/min→0.3 ml/min→0.5 ml/min→1.0 ml/min,排水量均大于注水量,但排水量与注水量之间的差距逐渐减小,这表明在整个实验过程中,均出现油驱水的过程,即以成藏过程为主,但油驱水的强度逐渐降低。值得注意的是,在注水速率0.03 ml/min,注油速率0.3 ml/min时,随着注水量的增加,排水量并不增加,而排油量增加,表明此时发生了水动力冲刷油的作用,油运移观察结果也证实了这一点。其次,出口1基本不排水,说明油驱替的水主要向下排替,从出口3中排出。

## 4 讨论

(1) 油运移和聚集的基本特征 反韵律砂层表现为顶部颗粒粗、渗透率高,底部颗粒细、渗透率低。因此,在浮力和渗透率非均质性双重作用下,注入油首先沿顶部渗透层快速运移,随着注油量的增大,浮力作

用不断使油上浮,进入上部高渗透层,而毛细管力作用竭力阻止油进入下部低渗透层,从而更加加剧了层内高低渗透层段含油饱和度的差异。随着顶部含油饱和度的迅速增大,高渗透层段内油相运移阻力下降,油更容易向顶部运移。越向下部,油的运移越缓慢。因此,反韵律砂层在油的运移和聚集过程中表现为顶部含油饱和度高,含油厚度小,含油层段平均运聚效率高,含油饱和度差异大(从上到下含油饱和度逐步降低)的特点。反韵律砂层中油的运移表现为脉冲式和跳跃式的特点。

(2) 油的运移方向、路径和通道 在反韵律砂层,油气的运移方向、路径和通道总体表现为自下而上,由复杂趋于简单,并主要受油气充注方向、充注速率和渗透率级差等条件的影响。

① 油气垂向充注时,油气首先进入反韵律砂层的底部,然后在浮力作用下,垂直向上运移,穿过砂层3顶部和砂层2,进入砂层1,并沿砂层1上倾方向侧向运移。此时砂层1为油气的运移路径和优势通道。但是当油气的充注速率大于砂层1的输导能力,并且砂层2的渗透率也较大时,亦有一部分油气沿砂层2上

倾方向侧向运移,这时油气的主要运移路径为砂层 1 和 2,但砂层 1 仍然为油气运移的优势通道。由于油气在砂层 2 和 3 向上运移过程中,要散失一部分油气,导致运移效率的降低。

② 油气侧向充注时,油气可以充注砂层 1、2、3,但由于各砂层之间渗透率的差异,导致进入砂层 2 和砂层 3 的油气在浮力作用下,垂直向上运移,很快进入渗透率最大的砂层 1,并沿砂层 1 上倾方向侧向运移,这时砂层 1 为油气运移路径和优势通道。但是当油气的充注速率大于砂层 1 的输导能力,并且砂层 2 的渗透率也较大时,一部分油气将沿砂层 2 上倾方向侧向运移,砂层 1 和 2 均可以成为油气运移路径和优势通道。由于油气垂向运移较少,散失的油气也较少,因此油气侧向充注时,油气的运移效率较高。

(3) 水动力对油气运移的影响 水动力既可以增加反韵律砂层油的运移效率,减小残余油量(散失量)亦可以降低油的运移效率,增加残余油量(散失量)。注水速率较小时,可以增加反韵律砂层油的运移效率,但注水速率较大时,虽然注油速率也较大,则主要表现为降低油的运移效率。根据实验结果,当注油速率为 0.1 ml/min 时,静水条件下的运移效率(排油量与注油量之间的百分比)为 43.09%,散失率(残留在砂层中的油量即散失量与注油量之间的百分比)为 56.91%,而动水条件下(注水速率 0.01 ml/min)的运移效率为 31.34%,散失率为 68.66%,运移效率和散失率分别小于和大于静水条件下的运移效率和散失率。随着注油速率和注水速率的增加,水动力将明显增加反韵律砂层中的运移效率,降低散失量。在注油速率 0.3 ml/min,注水速率 0.03 ml/min 和注油速率 0.5 ml/min,注水速率 0.05 ml/min 时,反韵律砂层油的运移效率分别为 80.56% 和 89.28%,散失率分别为 19.44% 和 10.72%,即此时,注入反韵律砂层中的油,在水动力作用下,大部分通过高效运载层砂层 1 中运移出去,仅有少部分油残余或散失在反韵律砂层 1 中。在静水条件下,注油速率为 0.3 ml/min 和 0.5 ml/min 时,反韵律砂层油的运移效率分别为 47.05% 和 52.67%,远低于动水条件,而散失率分别为 52.95% 和 47.33%,远高于动水条件。因此,在静水条件下,注入反韵律砂层中的油,近一半残留在反韵律砂层中,另一半通过砂层 1 运移出去。

水动力作用降低了反韵律砂层中油的运移速率。静水条件下砂层 1 中不同区段油的运移速率分别为 0.046 0、0.061 0 和 0.076 2 cm/min,而动水条件下砂层 1 中相同区段油的运移速率分别为 0.035 5、0.036 2 和

0.049 7 cm/min,均低于静水条件。在反韵律砂层,由于浮力作用,油主要通过上部高渗透率的砂层 1 运移,而由于重力作用导致水主要沿下部渗透率不高的砂层 2 和 3 运动。由于油和水的运移路径不一致,导致水动力不能加快油的运移速率,同时水动力作用导致高运动能量区主要分布在水的运动区域砂层 2 和 3,而油的运移区域砂层 1 为低能量区,从而导致砂层 1 中油的运移速率较低。

## 5 结论

(1) 在水湿介质中,油运移过程中所受的阻力大于水运移时所受的阻力。

(2) 反韵律砂层在油的运移过程中表现为顶部含油饱和度高,含油厚度小,含油层段平均运聚效率高,含油饱和度差异大(从上到下含油饱和度逐步降低)的特点。

(3) 在反韵律砂层,油气的运移方向、路径和通道总体表现为自下而上,由复杂趋于简单,并主要受油气充注方向、充注速率和渗透率级差等条件的影响。

(4) 水动力既可以增加反韵律砂层油的运移效率,减小残余油量(散失量),亦可以降低油的运移效率,增加残余油量(散失量)。注水速率较小时,可以增加反韵律砂层油的运移效率,但注水速率较大时,虽然注油速率也较大,则主要表现为降低油的运移效率。

(5) 水动力作用降低了反韵律砂层中油的运移速率。

## 参 考 文 献

- 1 Dembicki H Jr, *et al.* Secondary Migration of Oil Experiments Supporting Efficient Movement of Separate, Buoyant Oil Phase Along Limited Conduits [J]. AAPG, 1989, 73: 1 018 ~ 1 021
- 2 Catalan L, Xiaowen F, Chatzis I, Dullien F A L. An Experimental Study of Secondary Oil Migration [J]. AAPG, 1992, 76: 638 ~ 650
- 3 Sell O M. *et al.* Experimental Verification of Low-dip, Low-rate, Two-phase (secondary) Migration by Means of R-ray Absorption. Geofluids '93 [M]. 1993
- 4 Thomas M M, Clouse J A. Scaled Physical Model of Secondary Oil Migration [J], AAPG Bulletin, 1995, 79: 19 ~ 29
- 5 曾溅辉,王洪玉. 输导层和岩性圈闭中石油运移和聚集模拟实验研究 [J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1999, 24(2): 193 ~ 196
- 6 曾溅辉. 正韵律砂层中渗透率级差对石油运移和聚集影响的模拟实验研究 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 102 ~ 105
- 7 曾溅辉,王洪玉. 层间非均质砂层石油运移和聚集的模拟实验研究 [J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(4): 108 ~ 111
- 8 曾溅辉,金之钧著. 油气二次运移和聚集物理模拟 [M]. 北京:石油工业出版社, 2000. 243

## Experimental Study of Oil Migration in Coarsening upwards Sands

ZENG Jian-hui WANG Hong-yu

( Key Laboratory for Petroleum Mechanism of Ministry of Education ,P. R. China ,Petroleum University ,Beijing 102249 )

### Abstract

Experimental study of oil migration in coarsening upwards sands have carried out by 2-D experimental model. The following results have been obtained ( 1 ) Near the top of the coarsening upwards sands ,the oil saturation is higher ,the thickness of oil sand is smaller ,and the average efficiency of oil migration in the parts of oil-bearing sands is higher. In the sands the oil saturation is decreasing downwards ;( 2 ) The direction and pathway of oil migration generally become more simple upwards in coarsening upwards sands and they are mainly depended by the rate and direction of oil injection ,the permeability difference of carrier beds and so on ;( 3 ) Hydrodynamics not only increase the efficiency of oil migration but also decrease it. When the rate of water injection is low ,hydrodynamics can increase the efficiency of oil migration , whereas it will decrease the efficiency of oil migration ;( 4 ) Hydrodynamics can decrease the rate of oil migration .

**Key words** coarsening upwards sands , oil migration , simulation experiment