

文章编号:0253-9985(2008)04-0533-04

# 石油二次运移不同模式条件下含油饱和度测量

侯平<sup>1</sup>, 罗晓容<sup>2</sup>, 樊长江<sup>1</sup>, 周波<sup>3</sup>

(1. 中国海洋石油总公司 国际海外研究中心, 北京 100083; 2. 中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029;  
3. 中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院, 北京 100083)

**摘要:**石油二次运移具有活塞式、指进式、优势式3种不同模式。利用湿填模型,在仅有浮力作为运移动力、以泵压和浮力综合作用作为运移动力的实验条件下,用不同粒度、不同充填介质填充的玻璃管模型系统,观测在3种运移模式条件下路径含油饱和度、残余油饱和度及残余油在通道中所占比例等变化规律。结果表明,路径含油饱和度和残余油量占通道的比例因运移模式不同而明显不同,残余油饱和度则基本不受运移模式的影响。

**关键词:**含油饱和度;残余油饱和度;运移模式;二次运移;模拟实验

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

## An experimental study of oil saturation in different secondary migration modes

Hou Ping<sup>1</sup>, Luo Xiaorong<sup>2</sup>, Fan Changjiang<sup>1</sup>, Zhou Bo<sup>3</sup>

(1. CNOOC International Research Center, Beijing 100083, China;

2. Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing 100029, China;

3. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China)

**Abstract:** There are three modes of secondary oil migration, including stable displacement mode, fingering mode, and spring mode. In order to observe the changing patterns of oil saturation, residual oil saturation, and the ratio of residual oil volume to pathway space under these three migration modes, glass cylinder systems with mediums of different materials and different grain sizes packed with wet-packing method were used to carry out experiments with buoyancy as the only driving force or pumping pressure and buoyancy as the combined driving force. The results show that the oil saturation of the migration pathway and the ratio of residual oil volume to inner space of cylinder vary greatly under different migration modes, while the residual oil saturation remains almost the same.

**Key words:** oil saturation; residual oil saturation; migration mode; secondary migration; simulation experiment

越来越多的证据表明,油气二次运移是一个极不均一的过程,即便是在十分均匀的孔隙介质内,油气的运移也是沿着有限的通道运移的<sup>[1~14]</sup>。这种认识促使地质学家们想知道石油二次运移路径占全部输导层的比例究竟有多大。国内外学者采用理论计算、实验模拟及地质观察等手段估算石油二次运移含油饱和度(石油二次运移油体积占全部输导层的比例),但遗憾的是,该数值差别

较大,目前尚未获得统一认识。Schowalter(1979)认为该值在1%~10%之间,Dembicki and Anderson(1989)认为该值在10%~15%,Hirsch and Thompson(1995)认为该值不大于1%。笔者认为,测量对象不同可能是造成该值差别较大的主要原因之一。

近些年研究表明,石油二次运移路径有3种不同运移模式,分别为活塞式、指进式、优势式,不

收稿日期:2008-01-17。

第一作者简介:侯平(1972—),男,博士,油气藏形成机理与分布规律研究。

基金项目:国家重点基础研究发展规划(973)项目(G1999043310)。

同的运移模式其运移特征明显不同,含油饱和度差别也很大<sup>[15-17]</sup>。

## 1 不同运移模式含油饱和度测量方法及过程

笔者利用湿填模型的方法<sup>[17]</sup>,在以染色煤油为充注流体、以仅有浮力作为运移动力(表1中实验编号17-19项)和以泵压+浮力综合作用作为运移动力(表1中实验编号1-17、20-21项)两种实验条件下,用不同粒度、不同充填介质(玻璃微珠和河沙)填装的玻璃管模型进行了物理模拟实验。

## 2 不同运移模式路径含油饱和度测量

为了避免理解上产生分歧,定义运移通道为具有一定孔渗能力的介质;运移路径为油气在运移通道中实际运移中占据的空间。当仅有浮力作为二次运移的动力时,路径含油饱和度是指运移

结束时参与运移的油占全部运移通道中的体积百分比,即油运移结束时,在初始油柱界面以上实际发生运移的油体积与该界面以上玻璃管孔隙体积之比。在注入条件下,路径含油饱和度为从运移开始到运移结束驱替出的水体积与玻璃管总的孔隙体积之比:

$$S_o = \frac{qt}{V\Phi}$$

式中: $S_o$ 为路径含油饱和度,小数; $q$ 为注入流速, $\text{cm}^3/\text{min}$ ;  $t$ 为从开始注入至运移结束的时间, $\text{min}$ ;  $V$ 为玻璃管总体积, $\text{cm}^3$ ;  $\Phi$ 为玻璃管模型的孔隙度,小数。

实验结果表明,无论是在何种运移动力条件下,不同运移模式对应的路径含油饱和度均具有很好的规律性。活塞式运移模式的路径含油饱和度均大于50%、优势式路径含油饱和度均小于20%、指进式路径含油饱和度介于二者之间。且不同运移模式下路径的含油饱和度有随注油速率增加而增加的趋势,最终趋于一个定值,约为80%(表1;图1)。

表1 不同运移模式下含油饱和度实验数据

Table 1 Experimental data of oil saturation under different migration modes

| 实验<br>编号 | 颗粒疏松<br>紧密程度 | 粒度直径/<br>mm | 注入或运移<br>油量/ $\text{cm}^3$ | 玻璃管总<br>体积/ $\text{cm}^3$ | 孔隙度,<br>% | 总孔隙<br>体积/ $\text{cm}^3$ | 路径含<br>油饱和度 | 残余油<br>饱和度 | 残余油占<br>通道的比例 | 运移模式 |
|----------|--------------|-------------|----------------------------|---------------------------|-----------|--------------------------|-------------|------------|---------------|------|
| 1        | 紧密           | 0.38~0.83   | 77.2                       | 270.0                     | 39.43     | 106.5                    | 0.725       | 0.238      | 0.173         | 活塞式  |
| 2        | 紧密           | 0.38~0.83   | 73.1                       | 270.0                     | 39.43     | 106.5                    | 0.686       | 0.223      | 0.153         | 活塞式  |
| 3        | 紧密           | 0.38~0.83   | 69.5                       | 270.0                     | 39.43     | 106.5                    | 0.653       | 0.231      | 0.151         | 活塞式  |
| 4        | 紧密           | 0.38~0.83   | 64.4                       | 270.0                     | 39.43     | 106.5                    | 0.605       | 0.244      | 0.148         | 活塞式  |
| 5        | 紧密           | 0.38~0.83   | 69.5                       | 270.0                     | 39.43     | 106.5                    | 0.725       | 0.216      | 0.157         | 活塞式  |
| 6        | 疏松           | 0.38~0.83   | 60.0                       | 251.3                     | 39.60     | 99.5                     | 0.603       | 0.198      | 0.119         | 活塞式  |
| 7        | 疏松           | 0.18~0.25   | 67.0                       | 254.4                     | 35.84     | 91.2                     | 0.735       | 0.357      | 0.262         | 活塞式  |
| 8        | 疏松           | 0.25~0.38   | 74.0                       | 257.0                     | 37.88     | 97.4                     | 0.760       | 0.286      | 0.217         | 活塞式  |

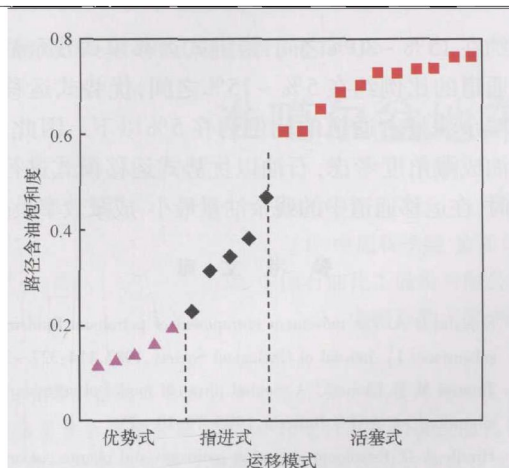


图1 不同运移模式下路径含油饱和度

Fig. 1 The oil saturation of migration pathway under different secondary migration modes

### 3 不同运移模式残余油饱和度测量

实验表明,油运移结束后,原先连续的油运移路径会发生收缩、分离形成残余油,不同运移模式

刚形成时及运移结束后形成残余油情形见图2所示。

残余油饱和度是指运移结束后运移路径上残余的油量占原运移路径上油量的百分比。原运移路径上的油量可由前面所述方法获得,而结束后运移路径上残余的油量可通过取出管内对应运移路径上的玻璃微珠及其孔隙中的油和水,用水洗法获得该部分油的体积。

实验结果表明,无论是在仅有浮力作为运移动力还是以泵压和浮力综合作用作为运移动力条件下,不同运移模式对应的残余油饱和度差别不大,约在20%~40%之间(表1;图3)。这一实验结果与周波等(2005)<sup>[18]</sup>通过核磁共振观察填充玻璃微珠的玻璃管模型得到的20%~40%的残余油饱和度及实际测量岩心样品获得的25%~35%残余油饱和度相一致,说明模型的粒度是影响残余油饱和度的重要因素(表1)。在其他实验条件相同的情形下,充填模型的介质粒度越小、模型充填的越致密,其残余油饱和度越大,分析其原因,这可能主要是由于模型孔渗物性变差,孔隙介质中的油难于流动更易形成残余油所致。

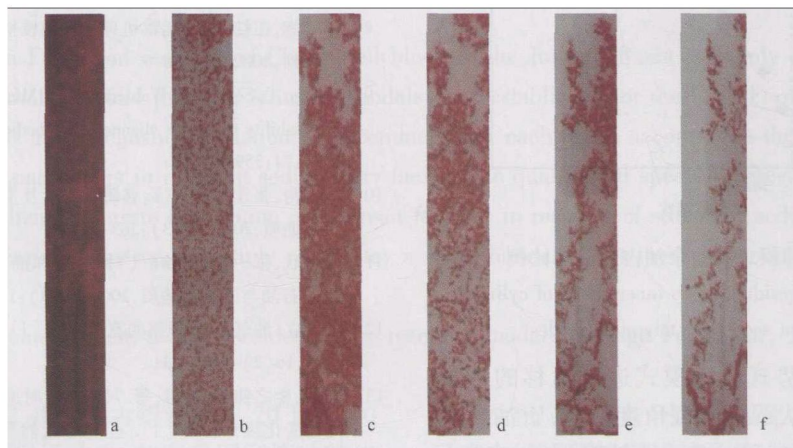


图2 不同运移模式刚形成时及运移结束后形成残余油情形

Fig. 2 Sketch map showing the formation of residual oil at the onset and ending of secondary oil migration under different modes

- a. 活塞式运移模式运移刚结束时, b. 活塞式运移模式残余油情形; c. 指进式运移模式运移刚结束时, d. 指进式运移模式残余油情形; e. 优势式运移模式运移刚结束时, f. 优势式运移模式残余油情形

### 4 不同运移模式残余油占通道的比例

在不同运移模式条件下,残余油量占通道的比例即为路径含油饱和度和残余油饱和度之积。实验结果表明,无论是在上述何种运移动力条件

下,不同运移模式条件下残余油量占通道的比例均差别明显。活塞式运移模式残余油量占通道的比例约在15%~30%之间,指进式运移模式残余油量占通道的比例约在5%~15%之间,优势式运移模式残余油量占通道的比例约在5%以下(表1;图4)。可见,以活塞式运移模式进行运移的残

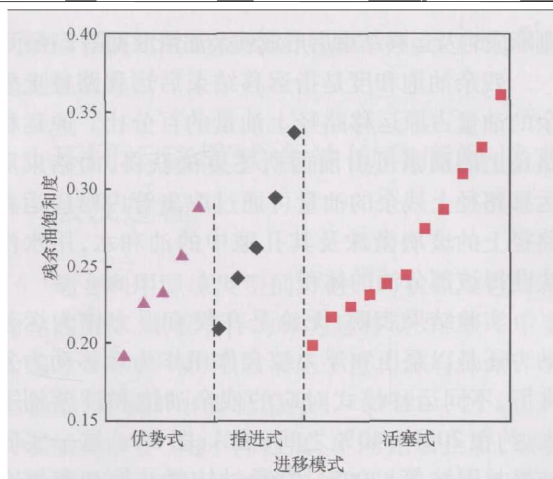


图3 不同运移模式下残余油饱和度

Fig. 3 Residual oil saturation under different secondary migration modes

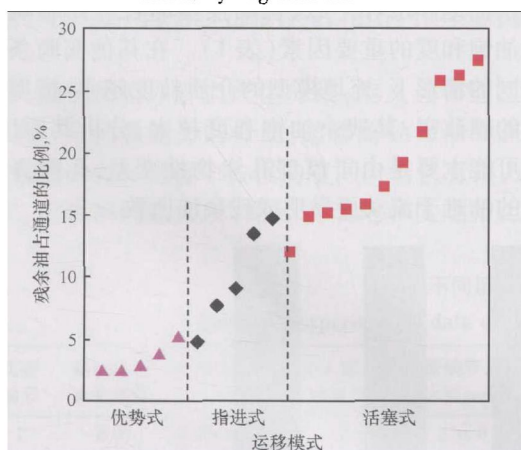


图4 不同运移模式下残余油占通道的比例

Fig. 4 The ratio of residual oil to inner space of cylinder under different secondary migration modes

余油量最大,以优势式运移模式进行运移的残余油量最小。因此,从石油成藏角度考虑,石油以优势式运移模式进行运移时其成藏效率更高。

## 5 结论

不同运移模式对应的路径含油饱和度均具有很好的规律性。活塞式运移模式的路径含油饱和度均大于50%,优势式运移模式的路径含油饱和度均小于20%,指进式运移模式的路径含油饱和度介于二者之间。而不同运移模式对应的残余油饱和度差别不大,约在20%~40%之间。

不同运移模式条件下,残余油量占通道的比例明显不同。活塞式运移模式残余油量占通道的比

例约在15%~30%之间,指进式运移模式残余油量占通道的比例约在5%~15%之间,优势式运移模式残余油量占通道的比例约在5%以下。因此,从石油成藏角度考虑,石油以优势式运移模式进行运移时,在运移通道中的残余油量最小,成藏效率最高。

## 参考文献

- England D A. The movement entrapment of petroleum fluid in the subsurface[J]. Journal of Geological Society, 1987, 114: 327-347
- Thomas M M, Clouse J A. Scaled physical model of secondary oil migration[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 19-29
- Hindle A D. Petroleum migration pathways and charge concentration: a tree-dimensional model[J]. AAPG Bulletin, 1997, 81: 1451-1481
- Schowalter T T. Mechanics of secondary hydrocarbon migration and entrapment[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63: 723-760
- Hirsch L M, Thompson A H. Minimum saturations and buoyancy in secondary migration[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79: 696-710
- Dembicki H J, Anderson M J. Secondary migration of oil: experiments supporting efficient movement of separate, buoyant oil phase along limited conduits[J]. AAPG Bulletin, 1989, 8: 1018-1021
- Catalan L, XiaoWen F, Chatzis I, et al. An experimental study of secondary oil migration[J]. AAPG Bulletin, 1992, 76: 638-650
- 曾熾辉, 王捷. 油气运移机理及物理模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2002. 1-186
- Dreyer T, Scheie A, Walderhuug O. Miniperimeter-base study of permeability trends in channel sand bodies[J]. AAPG Bulletin, 1990, 74: 359-374
- 金之钧, 张发强. 油气运移研究现状及主要进展[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(3): 263-270
- 王志欣, 张一伟. 含油(气)饱和度和油(气)运移的关系[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(3): 197-213
- 陈荷立. 油气运移研究的有效途径[J]. 石油与天然气地质, 1995, 16(2): 126-131
- 周波, 金之钧, 罗晓容, 等. 尺度放大时逾渗模型中的油气运移路径变化规律探讨[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(4): 175-180
- 叶加仁, 王连进, 邵荣. 油气成藏动力学中的流体动力场[J]. 石油与天然气地质, 1999, 20(2): 182-185
- Tokunaga T, Mogi K, Matsubara O, et al. Buoyancy and interfacial force effects on two-phase displacement patterns: an experimental study[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84: 65-74
- 张发强, 罗晓容, 苗盛, 等. 石油二次运移的模式及其影响因素[J]. 石油实验地质, 2003, 25(1): 67-74
- 侯平, 周波, 罗晓容. 石油二次运移路径模式分析[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(增刊1): 162-168
- 周波, 侯平, 王为民, 等. 核磁共振成像技术分析油运移过程中含油饱和度[J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(6): 78-81

(编辑 高岩)