

文章编号: 0253-9985(2007)02-0229-06

低渗透砂岩石油运移及成藏特征模拟实验

朱志强^{1,2}, 曾溅辉^{1,2}, 吴河勇³, 冯子辉³, 张 顺³, 梁晓东³, 盛晓峰^{1,2}

(1. 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

(2. 中国石油大学(北京)石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249)

(3. 中国石油天然气股份有限公司大庆油田有限责任公司勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712)

摘要: 采用计算机控制和改变低渗透岩心中流体注入压力的方法, 研究低渗透砂岩中石油运移及成藏的特征。模拟实验初步研究结果表明: 1) 低渗透岩层石油运移表现为非达西流, 渗流曲线主要为上凹型曲线, 其次为变性达西流曲线; 2) 岩心渗透率大小对渗流曲线的位置、非线性段的曲率和变化范围及直线段在压力梯度轴的截距具有很大的影响; 3) 低渗透岩心中含油饱和度的增大过程可划分为快速增长、缓慢增长和稳定 3 个阶段, 其最终含油饱和度大部分在 35% ~ 60%; 4) 低渗透岩心的含油饱和度与孔隙度、渗透率的关系并不是简单的线性关系, 但是充注动力与含油饱和度具有相对较好的正相关关系。

关键词: 非达西流; 模拟实验; 石油运移; 低渗透砂岩

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A

An experimental study on oil migration and accumulation in low-permeability sandstone

Zhu Zhiqiang^{1,2}, Zeng Jianhui^{1,2}, Wu Heyong³, Feng Zhihui³, Zhang Shun³, Liang Xiaodong³, Sheng Xiaofeng^{1,2}

(1. Basin and Reservoir Research Center, China University of Petroleum, Beijing 102249)

(2. Key Laboratory of Hydrocarbon Accumulation of Ministry of Education, China University of Petroleum, Beijing 102249)

(3. Daqing Institute of Exploration & Development, PetroChina Daqing Oil Company Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712)

Abstract An experimental study of oil migration and accumulation in low-permeability sandstone is performed through injecting fluid into core samples from low-permeability sandstone under computer-controlled pressures. The preliminary results indicate that (1) oil migration in low permeability beds presents the features of non-Darcy flow and most of the flow curves take the concave upward shape and some of them are modified Darcy flow curves; (2) the core permeability has a strong impact upon the locations of flow curves, curvatures and variation range of the non-linear parts, and the intercepts of the linear portions on the pressure gradient axis; (3) the oil saturation in low-permeability cores increases in three stages, including rapid, slow and stable growth, with the final oil saturation mainly ranging from 35% to 60%; and (4) the relationship between oil saturation and porosity or permeability in low permeability cores is not simple linear relationship, but a positive correlation exists between the injection pressure and the oil saturation.

Key words non-Darcy flow; simulated experiment; oil migration; low-permeability sandstone

目前关于低渗透砂岩没有明确的界限, 一般是指渗透率小于 $50 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的砂岩^[1]。低渗透油气藏在国内外分布非常广, 占有很大的资源量和储量。我国石油总资源量为 $940 \times 10^8 \text{ t}$ 其中低

渗透资源量 $210.7 \times 10^8 \text{ t}$ 占 22.41%。至 2000 年底, 全国累计探明储量 $212.89 \times 10^8 \text{ t}$ 其中低渗透储层的探明储量 $97.97 \times 10^8 \text{ t}$ 约占 43%^[2,3]。

随着国内外低渗透油气藏的开发, 许多学者

收稿日期: 2007-02-25

第一作者简介: 朱志强(1979—), 男, 博士研究生, 油气成藏机理

从油气开发的角度通过模拟实验等方法研究了水驱油过程中低渗透储层油、气的渗流特征。研究表明,低渗透油气藏中存在着流体低速非达西渗流现象,油、气、水的渗流表现为非达西流,存在着“启动压力梯度”^[4~13]。与油气开发过程相反,油气成藏过程表现为油或气驱替水的过程,即在饱含水的岩层中发生油气运移。但是,在低渗透砂层中油气的运移表现为何种渗流特征,是否呈现非达西流,什么条件下表现为达西流,什么条件下表现为非达西流,其判别方法或标准是什么,含油气饱和度如何增长,对油气成藏造成怎样的影响等等,这些还很少有研究。为此,我们在吴河勇提出的松辽盆地向斜油藏成藏机理的基础上^[14],与大庆油田研究院讨论并设计了实验,试图在模拟实验研究的基础上,研究低渗透砂岩石油运移的渗流特征,认识低渗透储层的油气运移和聚集过程,探讨低渗透储层油气成藏机理,从而有效指导低渗透砂岩中的油气勘探。

2 实验条件和实验方法

1.1 实验条件

实验装置由 5 部分组成,分别是流体注入系统、流体驱替系统、温压控制系统、流体测定系统和数据采集与处理系统,各系统均由计算机全程自动控制(图 1)。

实验岩心取自松辽盆地北部,渗透率范围主要集中在 $0.01 \times 10^{-3} \sim 10 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,孔隙度主要分布在 15% ~ 20%,有关参数如表 1 所示。根据松辽盆地北部地层水的特征,在室内配置了矿化度为 7.4 g/L 的地层水作为实验用水,实验温度为 50℃,围压为 5~ 30 MPa

1.2 实验方法和步骤

实验采用恒压法,即选定不同的岩心前压力,

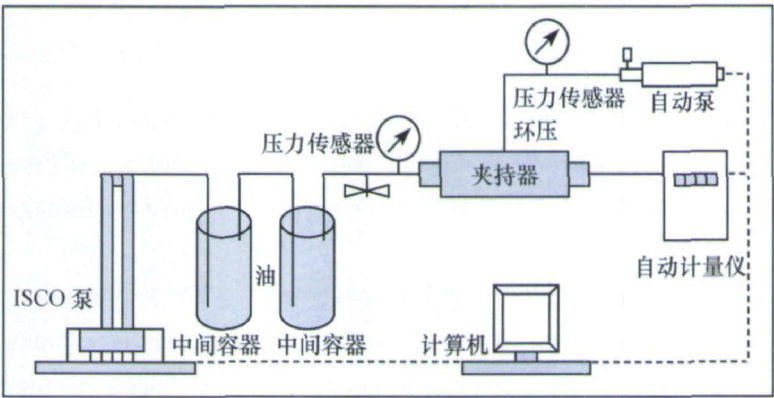


图 1 石油运移实验装置和流程图

Fig.1 Facilities and flow chart for oil migration experiment

表 1 岩心物性及实验条件

Table 1 Physical properties of sandstone core and experimental conditions

实验编号	岩心编号	直径 /cm	长度 /cm	孔隙度, %	渗透率 /($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	水粘度 /(mPa·s)	油粘度 /(mPa·s)
1	1-1	2.524	7.69	18.1	14.00	1.14	6.53
2	2-2	2.52	5.86	17.3	2.30	1.14	6.53
3	2-1	2.52	6.19	17.0	1.71	1.14	6.53
4	11-1	2.52	5.07	18.7	6.19	1.14	6.53
5	1-2	2.52	7.482	17.9	7.21	1.14	6.53
6	5-2	2.53	5.01	17.3	7.61	1.14	6.53
7	5-1	2.53	5.04	17.5	4.35	1.14	6.53
8	6-1	2.53	5.06	18.4	0.48	1.14	6.53
9	11-2	2.53	4.53	17.2	0.87	1.14	6.53
10	6-2	2.53	5.10	18.5	0.73	1.14	6.53
11	9-2	2.53	4.98	14.3	0.44	1.14	6.53

直至出口流速与流体注入速度平衡时(进、出口端压差基本趋于恒定时为参考),记录出口流速;改变注入岩心前压力,至出口与入口流速再次平衡时,记下出口流速;依次类推,共选取 6 个不同的注入岩心前压力,并记录数据,直至实验结束。实验时,首先进行地层水渗流模拟实验,研究地层水在低渗透岩心中的渗流特征;然后充注油,进行石油运移模拟实验,探讨低渗透岩心中的石油运移特征。具体实验步骤为:

1) 将实验的岩心装入岩心夹持器内,拧紧两端,连接好管线,岩心夹持器的进口端通过压力表、中间容器(内装实验用油)与 ISCO 相连接,出口下方接通精密自动计量仪(图 1);

2) 用环压泵给岩心加围压(围压始终保持比岩心前压力大 2 MPa),主要是使流体在通过岩心断面时不至于因为围压减小而沿岩心与岩心夹持器接触的壁通过;

3) 启动 ISCO 泵,先设定恒定压力 P_1 ,等注入流速基本稳定后,记录此时出口的流速 Q_1 和出口排出的水量 V_1 ,然后改变压力为 P_2 继续实验,等稳定后记录出口的流速 Q_2 和出口排出的水量 V_2 ,依次类推,分别记录 P_3, P_4, P_5, P_6 恒定压力下对应的出口的流速 Q_3, Q_4, Q_5, Q_6 和出口排出的水量 V_3, V_4, V_5, V_6 。

2 实验结果与讨论

2.1 石油运移渗流曲线类型

根据前人的实验研究,低渗透储层流体的渗流主要表现为非达西流,渗流曲线主要有两种基本类型,其他类型的曲线都可以由它们的组合来得到。

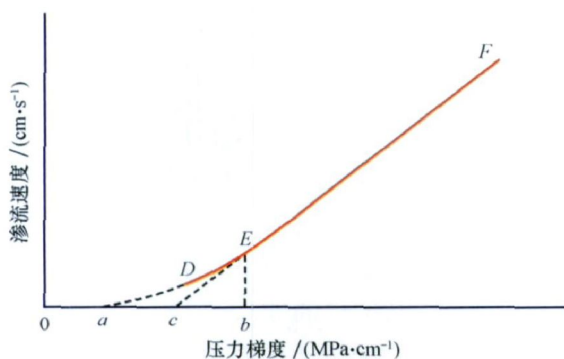


图 2 上凹型渗流曲线示意图

Fig. 2 Sketch map showing a concave upward flow curve

1) 上凹型渗流曲线:这类渗流曲线部分凹向流速轴;随着压力梯度的提高,渗流速度缓慢提高(图 2);采用分段方程表示时把 DE 段用幂函数关系来描述, EF 段用直线来描述,相应的数学方程为

$$\begin{cases} v = 0 & \left| \text{当 } \frac{\Delta P}{L} \leq a \text{ 时} \right| \\ v = \frac{K}{\mu} \left| \frac{\Delta P}{L} - a \right|^2 & \left| \text{当 } a \leq \frac{\Delta P}{L} \leq b \text{ 时} \right| \\ v = \frac{K}{\mu} \left| \frac{\Delta P}{L} - a \right| & \left| \text{当 } \frac{\Delta P}{L} \geq b \text{ 时} \right| \end{cases} \quad (1)$$

式中: v 是渗流速度, cm/s ; K 是渗透率, $10^{-3} \mu\text{m}^2$; μ 是粘度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; $\frac{\Delta P}{L}$ 是压力梯度, MPa/cm ; a, b, c 是常数。

2) 变性达西流渗流曲线:这类渗流曲线在该区间上是一条直线,但这条直线延长后不经过坐标原点,即在压力梯度轴上有一截距;随着压力梯度的提高,渗流速度迅速提高(图 3);采用分段方程表示时,用带启动压力梯度的线性定律来描述低渗透油藏的渗流,相应的数学方程为

$$\begin{cases} v = 0 & \left| \text{当 } \frac{\Delta P}{L} \leq c \text{ 时} \right| \\ v = \frac{K}{\mu} \left| \frac{\Delta P}{L} - c \right| & \left| \text{当 } \frac{\Delta P}{L} \geq c \text{ 时} \right| \end{cases} \quad (2)$$

模拟实验结果表明,当视流度 (K/μ) 即砂岩的渗透率与石油粘度之比小于等于 1 时,低渗透岩心石油运移的曲线为上凹型渗流曲线(图 4);当视流度大于 1 时,为变性达西流渗流曲线(图 5)。

根据曲线描述公式进行运算,可以获得低渗透砂岩石油运移特征判断图版(图 6)。利用这个图版可以判断石油在低渗透砂岩中的渗流特征:先由计算得到实际测试地区的驱动压力和砂岩渗

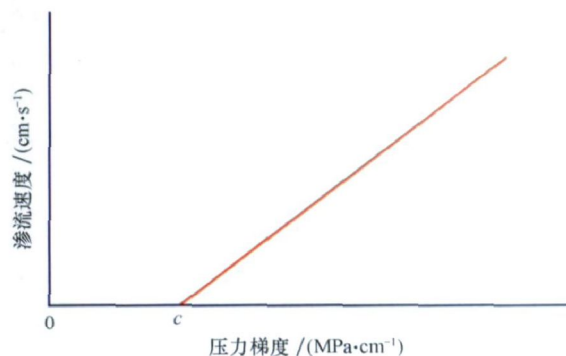


图 3 变性达西渗流曲线示意图

Fig. 3 Sketch map showing a modified Darcy flow curve

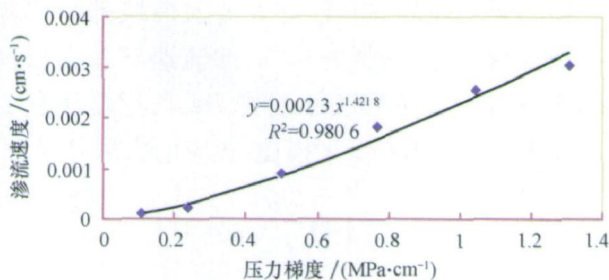


图 4 1-2 号岩心石油运移渗流曲线

Fig. 4 Flow curve of oil migration in core No. 1-2

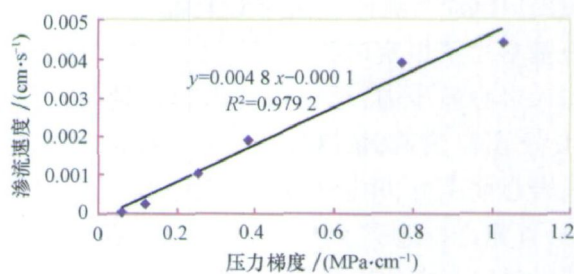


图 5 1-1 号岩心石油运移渗流曲线

Fig. 5 Flow curve of oil migration in core No. 1-1

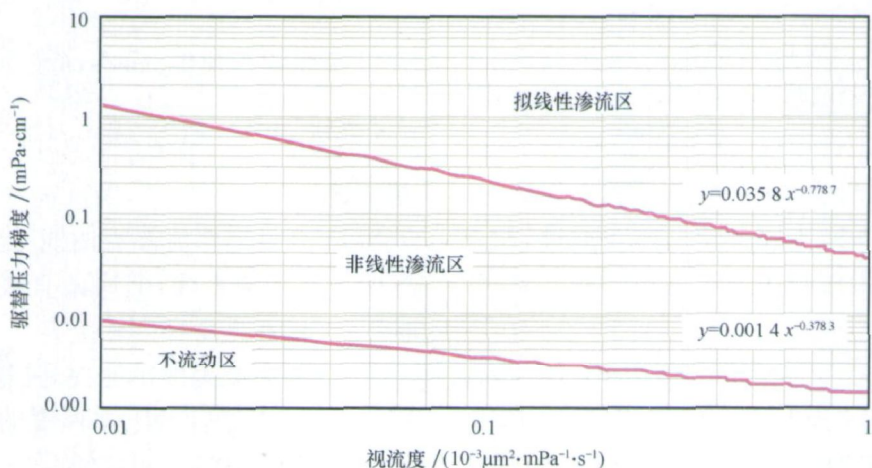


图 6 石油在低渗透砂岩中运移特征判断图版

Fig. 6 Chart board for determining the characteristics of oil migration in low-permeability sandstone

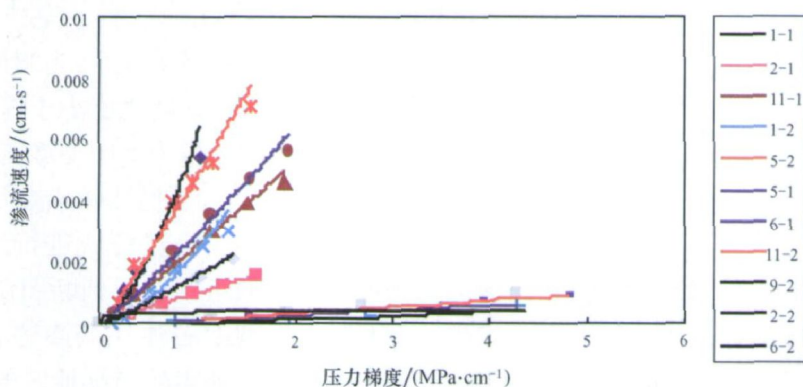


图 7 低渗透岩心石油运移渗流曲线

Fig. 7 Flow curve of oil in low-permeability sandstone cores

渗透率与砂岩中石油粘度之比, 再把数据点投影到这个图版上。如果点落在不流动区, 则石油在砂岩中是静止的; 如果点落在非线性渗流区, 则石油是以非线性状态渗流; 如果点落在拟线性渗流区, 则石油在砂岩中是以拟线性状态渗流。

2.2 石油运移渗流特征及影响因素

根据实验结果绘制的石油在低渗透砂岩中的

运移渗流曲线表明 (图 7) 显示:

1) 在低渗流速度下, 渗流曲线呈现非线性关系, 而且曲线段多凹向速度轴。随着渗流速度的增大, 曲线的非线性段向线性段连续过渡。

2) 石油渗流曲线的非线性段相对地层水流曲线的非线性段要长, 而且非线性段的起始点一般不通过坐标原点, 即非线性渗流存在明显的起始压力, 但这个起始压力值很小。石油渗流的

起始压力要大于地层水的起始压力。

3) 岩心渗透率不同, 渗流曲线的位置、非线性段的曲线曲率和变化范围及直线段在压力梯度轴的截距也不同。岩心渗透率越低, 渗流曲线越偏向压力梯度轴; 岩心渗透率越高, 渗流曲线越偏向流速轴。岩心渗透率越低, 则渗流曲线非线性段延伸越长, 曲线曲率越小, 直线段在压力梯度轴的截距也越大。

2.3 低渗透砂层油气成藏特征

油气成藏的过程表现为石油运移过程中储层含油饱和度增长的过程。因此, 通过研究低渗透砂层含油饱和度的增长规律, 可以认识低渗透砂层的油气成藏特征。

前人的研究表明, 在低渗透储层或致密储层中, 一般具有含油或含气饱和度低 (大多 $< 60\%$)、含水饱和度高 ($> 40\%$) 的特点。低渗透岩心成藏模拟实验结果亦表明, 岩心中的含油饱和度大部分在 $35\% \sim 60\%$ (图 8)。含油饱和度大于 60% 时的充注动力 (压力梯度) 一般大于 3 MPa/cm ; 而一般情况下低渗透储层油气充注动力都小于 3 MPa/cm , 因此低渗透储层的含油饱和度一般小于 60% 。

随着石油充注动力的增大, 岩心中的含油饱和度也不断增大, 增大的过程可划分为 3 个阶段, 即快速增长阶段、缓慢增长阶段和稳定阶段 (图 9 图 10)。这 3 个阶段的充注动力和含油饱和度大小与岩心的物性密切相关。在相同、孔渗条件下, 充注动力即压力梯度与含油饱和度具有相对较好的关系。充注动力越大, 则含油饱和度越高, 表明相对于岩心物性而言, 充注动力对含油饱和度的影响更大 (图 8)。在不同孔、渗条件下, 含油饱和度与充注动力的关系较复杂。如对于样品 9-2, 渗透率为 $0.44 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其快速增长阶段的含油饱和度可达 42.2% , 对应的压力梯度则高达 0.96 MPa/cm ; 而对于样品 1-1, 渗透率为 $14.00 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 其快速增长阶段含油饱和度可达 48.6% , 对应的压力梯度却只有 0.06 MPa/cm 。同时, 缓慢增长阶段和稳定阶段的含油饱和度和压力梯度亦存在明显的差异 (图 9 图 10)。

一般来说, 岩心的含油饱和度随着孔隙度和渗透率的增大而增大。但是实验结果表明, 岩心的含油饱和度与孔隙度和渗透率之间的关系并不是简单的线性关系, 其关系比较复杂 (图 11, 图 12)。

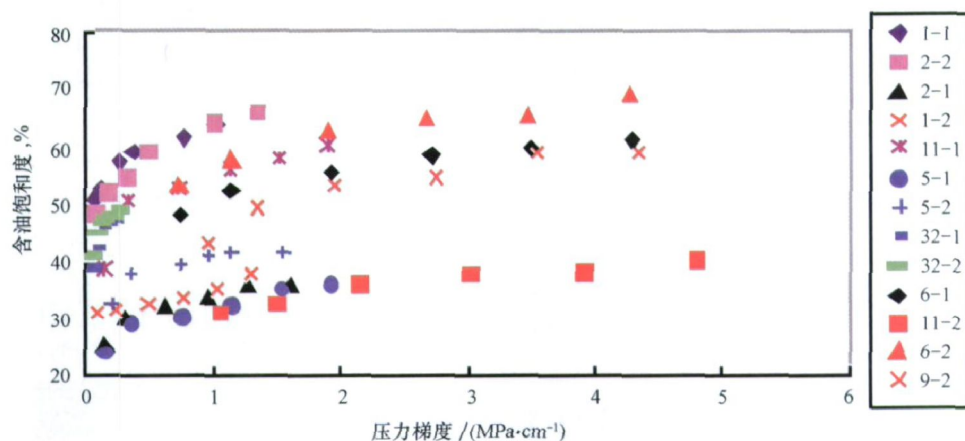


图 8 低渗透岩心中含油饱和度与压力梯度之间的关系

Fig. 8 Oil saturation vs. pressure gradient in low-permeability sandstone cores

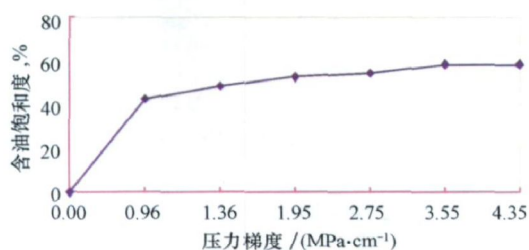


图 9 9-2 号岩心含油饱和度随压力梯度变化折线图

Fig. 9 Broken line graph showing the growth of oil saturation with the increase of pressure gradient in core No. 9-2

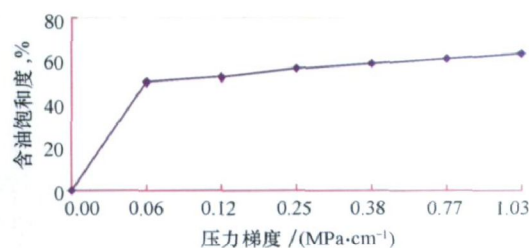


图 10 1-1 号岩心含油饱和度随压力梯度变化折线图

Fig. 10 Broken line graph showing the growth of oil saturation with the increase of pressure gradient in core No. 1-1

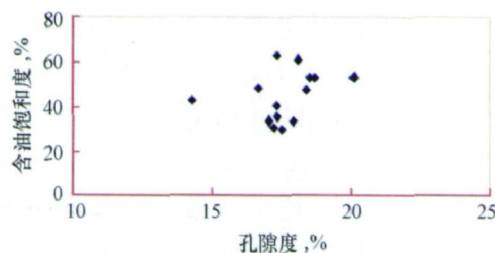


图 11 含油饱和度与孔隙度之间的关系

Fig. 11 The relationship between oil saturation and porosity

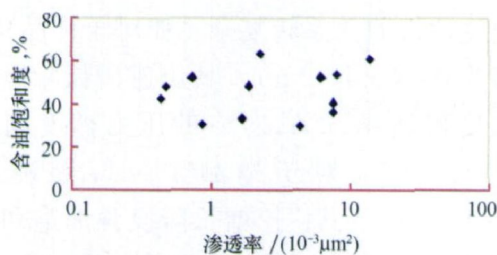


图 12 含油饱和度与渗透率之间的关系

Fig. 12 The relationship between oil saturation and permeability

这一方面说明,含油饱和度除了受孔隙度和渗透率的影响外,还受其他因素,例如充注动力的影响;另一方面也说明,含油饱和度受岩心的孔隙结构的影响,即虽然岩心的孔隙度和渗透率基本一致,但由于孔隙结构的差异,也会导致含油饱和度的差异。这有需要在以后的工作中进一步分析。

3 结论

1) 低渗透岩层石油运移表现为非达西流的特点,渗流曲线主要为上凹型渗流曲线,其次为变性达西渗流曲线。

2) 岩心渗透率不同,渗流曲线的位置、非线性段的曲线曲率和变化范围及直线段在压力梯度轴的截距也不同。岩心渗透率越低,渗流曲线越偏向压力梯度轴;岩心渗透率越高,渗流曲线越偏向流速轴。岩心渗透率越低,则渗流曲线非线性段延伸越长,曲线曲率越小,直线段在压力梯度轴的截距也越大。

3) 随着石油充注动力(压力梯度)的增大,低渗透岩心中的含油饱和度不断增大。增大的过程可划分为快速增长、缓慢增长和稳定 3 个阶段。

低渗透岩层的最终含油饱和度大部分在 35% ~ 60%。

4) 低渗透岩心的含油饱和度与孔隙度和渗透率的关系并不是简单的线性关系,其关系比较复杂;但是充注动力(压力梯度)与含油饱和度具有相对较好的关系。充注动力越大,则含油饱和度越高,表明相对于岩心物性而言,充注动力对含油饱和度的影响更大。

参 考 文 献

- 1 游秀玲,张玲,罗云秀.原油采收率影响因素探讨及油藏综合分类[J].石油与天然气地质,2004,25(3):314~318
- 2 蒋凌志,顾家裕,郭彬程,等.中国含油气盆地碎屑岩低渗透储层的特征及形成机理[J].沉积学报,2004,22(1):13~18
- 3 张莉,岳乐平,杨亚娟.鄯善油田地应力、裂缝系统与油田开发[J].石油与天然气地质,1999,20(4):330~332
- 4 阮敏,何秋轩.低渗透非达西渗流临界点及临界参数判别法[J].西安石油学院学报,1999,14(3):9~10
- 5 任晓娟,阎庆来,何秋轩,等.低渗气层气体的渗流特征实验研究[J].西安石油学院学报,1997,12(3):22~25
- 6 姚约东,葛家理.低渗透油层非达西渗流规律的研究[J].新疆石油地质,2000,21(3):213~215
- 7 姚约东,葛家理,魏俊之.低渗透油层渗流规律研究[J].石油勘探与开发,2001,28(4):73~75
- 8 Prada A, Civan F. Modification of Darcy's law for the threshold pressure gradient[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1999, 22(4): 237~240
- 9 Merrikh A A, Mohamad A A. Non-Darcy effects in buoyancy driven flows in an enclosure filled with vertically layered porous media[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(21): 4305~4313
- 10 阎庆来,何秋轩,尉立岗.低渗透油层中单相液体渗流特征的实验研究[J].西安石油学院学报,1999,5(2):1~6
- 11 王昔彬,刘传喜,郑荣臣.大牛地致密低渗透气藏启动压力梯度及应用[J].石油与天然气地质,2005,26(5):698~702
- 12 李智武,刘树根,罗玉宏,等.川东北地区致密碎屑岩动静弹参数实验研究[J].石油实验地质,2006,28(3):286~291,295
- 13 康毅力,张浩,陈一健,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田致密砂岩气层应力敏感性综合研究[J].天然气地球科学,2006,17(3):335~338,344
- 14 吴河勇,梁晓东,向才富,等.松辽盆地斜油藏特征及成藏机理探讨[J].中国科学(D辑),2007,37(2):185~191

(编辑 李 军)