

文章编号: 1000-7598(2012)03-0773-05

低渗透岩芯水驱油试验相似理论

沈瑞^{1,2}, 熊伟², 高树生²

(1. 中国科学院渗流流体力学研究所, 河北廊坊 065007; 2. 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

摘要: 以相似理论为基础, 考虑低渗透多孔介质非达西渗流特性, 研究了油水两相渗流模拟试验理论。应用方程分析法, 推导出油水两相渗流控制方程的无量纲形式, 获得了低渗透岩芯水驱油模拟试验的相似准则。采用隐式求解压力、显式求解饱和度的方法 (IMPES) 对无量纲控制方程进行求解, 得到包含相似准数的数值模拟器。通过敏感性分析, 得到了每个相似准数对试验结果的影响程度, 并通过实际低渗透岩芯的水驱油试验结果进行了验证。结果表明, 敏感因子大的相似准数对试验结果影响较大, 反之影响则较小。因此, 在设计物理模拟试验时, 当无法满足模型和原型所有相似准数相等时, 应该优先满足敏感因子较大的相似准数相等。

关键词: 相似准则; 低渗透; 非达西渗流; 水驱; 物理模拟

中图分类号: TE311; TU 458

文献标识码: A

Similarity theory of waterflooding experiment in low permeability cores

SHEN Rui^{1,2}, XIONG Wei², GAO Shu-sheng²

(1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, China Academy of Sciences, Langfang, Hebei 065007, China;

2. Langfang Branch, Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Langfang, Hebei 065007, China)

Abstract: Based on similarity theory and considered non-Darcy character in low permeability porous media, the theory about simulation experiments on the oil-water two-phase flows were researched. The dimensionless forms of controlled equations about oil-water two-phase flows were derived by the equation analysis method; and the similarity criterion about the waterflooding simulation experiment in low permeability cores was obtained. The dimensionless controlled equations were solved by the IMPES method; so the numerical simulator including similarity criterion was obtained. Through sensitivity analysis, the influence degree of every similarity criterion on experimental results was calculated and verified by waterflooding experimental results of low permeability cores. Results show that the similarity criterion whose sensitive factor is larger has greater influence on the experimental result. Contrarily, it has little influence on the experimental result. Therefore, when the physical model is designed and not all similarity criterions between the prototype and the model are equal, the larger similarity criterion should be given priority to be equal.

Key words: similarity criteria; low permeability; non-Darcy flow; waterflooding; physical simulation

1 引言

相似理论是物理试验的基础, 它可将影响现象发展的全部物理量适当地组合成几个无因次的相似准则, 然后把这些相似准则作为一个整体, 来研究各个物理量之间的函数关系^[1], 这种方法的优点不仅会减少试验工作量, 而且推广了试验结果的应用范围, 把个别试验结果推广到相似现象群中去。

目前, 关于低渗透油藏非线性渗流机制方面的试验研究很多^[2-8], 但低渗透油藏物理模拟相似理论方面的研究则较少, 因此, 在前人关于水驱油及

3次采油物理模拟相似性研究的基础上^[9-16], 采用方程分析法对低渗透岩芯水驱油试验的相似准则进行研究, 通过对相似准数的畸变分析, 研究了相似准数对低渗透岩芯水驱试验采收率的影响程度, 并通过实际岩芯水驱油试验数据进行了验证。

2 低渗透岩芯水驱油数学模型及相似准则

2.1 数学模型

低渗透岩芯水驱试验为一维渗流的物理模拟, 所以可采用考虑拟启动压力梯度的一维油水两相渗

收稿日期: 2010-10-26

基金项目: 国家科技重大专项 (No. 2008ZX05013-003)。

第一作者简介: 沈瑞, 男, 1982年生, 博士研究生, 主要从事油气藏开发与数值模拟研究工作。E-mail: shenrui523@126.com

流控制方程进行描述^[17-19]:

油相:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_o k_o A_x}{\mu_o} \left(\frac{\partial p_o}{\partial x} - g_o \right) \right] \Delta x = A_x \Delta x \frac{\partial (\rho_o \phi S_o)}{\partial t} - q_o \quad (1)$$

水相:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_w k_w A_x}{\mu_w} \left(\frac{\partial p_w}{\partial x} - g_w \right) \right] \Delta x = A_x \Delta x \frac{\partial (\rho_w \phi S_w)}{\partial t} - q_w \quad (2)$$

式中: ρ_o 、 ρ_w 分别为油相和水相密度 (kg/m^3); k_o 、 k_w 分别为油相和水相有效渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$); p_o 、 p_w 分别为油相和水相压力 (MPa); A_x 为横截面积 (m^2); q_o 、 q_w 分别为油和水的汇源项 (kg/d); S_o 、 S_w 分别为含油和含水饱和度, 无量纲; μ_o 、 μ_w 分别为油和水的黏度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$); ϕ 为孔隙度, 无量纲; g_o 、 g_w 分别为油相和水相的拟启动压力梯度 (MPa/m).

在式 (1)、(2) 中,

$$\left. \begin{aligned} q_o &= \frac{\rho_o k_o \Delta y \Delta z (p_{wf} - p_o + g_o \Delta x)}{\mu_o \Delta x} \delta(x - x_p) \delta(y - y_p) \\ q_w &= \frac{\rho_w q_l}{h} \delta(x) \delta(y) + \frac{\rho_w k_w \Delta y \Delta z (p_{wf} - p_w + g_w \Delta x)}{\mu_w \Delta x} \delta(x - x_p) \delta(y - y_p) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: x_p 、 y_p 为出口位置坐标 (m); h 为厚度 (m); p_{wf} 为出口端压力 (MPa); q_l 表示注入量 (kg/d); $\delta(x - x_p) \delta(y - y_p)$ 的意义为在 (x_p, y_p) 所在网格等于 1, 在其他网格等于 0 (无量纲).

饱和度方程:

$$S_o + S_w = 1 \quad (4)$$

初始条件:

$$\left. \begin{aligned} p_o|_{t=0} &= p_{oi} \\ S_w|_{t=0} &= S_{wi} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

2.2 相似准则分析

从水驱油两相流动的控制方程出发, 利用方程分析法推导相似准则. 首先, 引入下列无因次量.

无因次自变量:

$$\left. \begin{aligned} x_D &= \frac{x}{x_R}, \quad y_D = \frac{y}{y_R} \\ z_D &= \frac{z}{h}, \quad t_D = \frac{q_l t}{\phi \Delta x_D y_R h \Delta S} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

无因次因变量:

$$\left. \begin{aligned} p_{lD} &= \frac{p_l k_{row} h}{q_l \mu_w}, \quad \text{其中 } l \text{ 为 } o \text{ 或 } w \\ g_{lD} &= \frac{g_l k_{row} h x_R}{q_l \mu_w}, \quad \text{其中 } l \text{ 为 } o \text{ 或 } w \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

无因次参量:

$$\mu_{oD} = \frac{\mu_o}{\mu_w}, \quad \rho_{oD} = \frac{\rho_o}{\rho_w}, \quad c_{lD} = \frac{c_l q_l \mu_w}{k_{row} h} \quad (8)$$

含水饱和度和相对渗透率归一化:

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_w &= \frac{S_w - S_{cw}}{1 - S_{cw} - S_{ro}} = \frac{S_w - S_{cw}}{\Delta S} \\ \bar{S}_o &= \frac{S_o - S_{ro}}{\Delta S}, \quad k_{oD} = \frac{k_o}{k_{cwo}}, \quad k_{wD} = \frac{k_w}{k_{row}} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: x_R 、 y_R 分别为长度和等效宽度 (m); $\Delta S = 1 - S_{cw} - S_{ro}$, S_{cw} 、 S_{ro} 分别为束缚水和残余油饱和度 (无量纲); k_{cwo} 、 k_{row} 分别为束缚水下的油相有效渗透率和残余油下的水相有效渗透率 ($10^{-3} \mu\text{m}^2$), c_l 为综合弹性系数 (MPa^{-1}).

将式 (6) ~ (9) 代入式 (1)、(2) 可得:

$$\left. \begin{aligned} &\frac{k_{cwo} y_R}{x_R k_{row}} \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\frac{\rho_{oD} k_{oD}}{\mu_{oD}} y_D h_D \left(\frac{\partial p_{oD}}{\partial x_D} - g_{oD} \right) \right] \Delta x_D = \\ &\Delta x_D y_D h_D \frac{\partial (\rho_{oD} \phi_D \bar{S}_o)}{\partial t_D} + \Delta x_D y_D h_D \frac{S_{ro}}{\Delta S} \frac{\partial (\rho_{oD} \phi_D)}{\partial t_D} - \\ &\frac{k_{cwo}}{k_{row}} \frac{2 y_R}{x_R} \frac{\rho_{oD} \Delta y_D \Delta z_D [p_{wfD} - p_{oD} + g_{oD} \Delta x_D]}{\mu_{oD} \Delta x_D} \\ &\frac{k_{cwo}}{k_{row}} \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\frac{\rho_{wD} k_{wD}}{\mu_{wD}} y_D h_D \left(\frac{\partial p_{wD}}{\partial x_D} - g_{wD} \right) \right] \Delta x_D = \\ &\Delta x_D y_D h_D \frac{\partial (\rho_{wD} \phi_D \bar{S}_w)}{\partial t_D} + \Delta x_D y_D h_D \frac{S_{cw}}{\Delta S} \frac{\partial (\rho_{wD} \phi_D)}{\partial t_D} - \\ &\left\{ 1 + \frac{2 y_R}{x_R} \frac{\rho_{wD} \Delta y_D \Delta z_D [p_{wfD} - p_{wD} + g_{wD} \Delta x_D]}{\mu_{wD} \Delta x_D} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

将式 (10) 中的微商用差商代替:

$$\left. \begin{aligned} &a_{oi} p_{oDi+1}^{n+1} + c_{oi} p_{oDi}^{n+1} + b_{oi} p_{oDi-1}^{n+1} = \\ &d_{oi} + \frac{\phi \rho_{oD} (\bar{S}_{oi}^{n+1} - \bar{S}_{oi}^n)}{\Delta t_D} \\ &a_{wi} p_{wDi+1}^{n+1} + c_{wi} p_{wDi}^{n+1} + b_{wi} p_{wDi-1}^{n+1} = \\ &d_{wi} + \frac{\phi \rho_{wD} (\bar{S}_{wi}^{n+1} - \bar{S}_{wi}^n)}{\Delta t_D} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:

$$a_{oi} = \frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i+1/2}} \left(\frac{\rho_{oD} k_{oD}}{\mu_{oD}} \right)_{i+1/2}$$

$$b_{oi} = \frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i-1/2}} \left(\frac{\rho_{oD} k_{oD}}{\mu_{oD}} \right)_{i-1/2}$$

$$c_{oi} = - \left[\frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i+1/2}} \left(\frac{\rho_{oD} k_{oD}}{\mu_{oD}} \right)_{i+1/2} + \frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i-1/2}} \left(\frac{\rho_{oD} k_{oD}}{\mu_{oD}} \right)_{i-1/2} + \frac{\rho_{oD} \phi c_{iD}}{\Delta t_D} (\pi_3 + \bar{S}_{oi}) \right]$$

$$d_{oi} = \pi_1 \pi_2 \left(\frac{\rho_{oD} k_{oD}}{\mu_{oD}} \right)_{i+1/2} - \pi_1 \pi_2 \left(\frac{\rho_{oD} k_{oD}}{\mu_{oD}} \right)_{i-1/2} - \frac{S_{ro}}{\Delta S} \frac{\rho_{oD} \phi c_{iD}}{\Delta t_D} p_{oDi}^n - q_{oD}$$

$$a_{wi} = \frac{\pi_2}{x_{i+1/2}} (\rho_{wD} k_{wD})_{i+1/2}$$

$$b_{wi} = \frac{\pi_2}{x_{i-1/2}} (\rho_{wD} k_{wD})_{i-1/2}$$

$$c_{wi} = - \left[\frac{\pi_2}{x_{i+1/2}} (\rho_{wD} k_{wD})_{i+1/2} + \frac{\pi_2}{x_{i-1/2}} (\rho_{wD} k_{wD})_{i-1/2} + \frac{\rho_{wD} \phi c_{iD}}{\Delta t_D} (\pi_4 + \bar{S}_{wi}) \right]$$

$$d_{wi} = \pi_2 (\rho_{wD} k_{wD} g_{wD})_{i+1/2} - \pi_2 (\rho_{wD} k_{wD} g_{wD})_{i-1/2} - \frac{S_{cw}}{\Delta S} \frac{\rho_{oD} \phi c_{iD}}{\Delta t_D} p_{wDi}^n - q_{wD}$$

式中: i 表示第 i 个网格; n 表示第 n 个时间步。

无量纲饱和度方程:

$$\bar{S}_o + \bar{S}_w = 1 \quad (12)$$

无量纲初始条件:

$$p_{oD}|_{t_D=0} = p_{oiD} \quad (13)$$

$$\bar{S}_w|_{t=0} = \bar{S}_{wi} \quad (14)$$

从以上分析中可以得到以下 20 个无量纲量:

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \frac{y_R}{x_R}, \quad \pi_2 = \frac{k_{cwo}}{k_{row}}, \quad \pi_3 = \frac{S_{ro}}{\Delta S}, \quad \pi_4 = \frac{S_{cw}}{\Delta S}, \\ \pi_5 &= \frac{k_o}{k_{cwo}}, \quad \pi_6 = \frac{k_w}{k_{row}}, \quad \pi_7 = \frac{x_p}{x_R}, \quad \pi_8 = \frac{y_p}{y_R}, \\ \pi_9 &= \frac{\mu_o}{\mu_w}, \quad \pi_{10} = \frac{S_{wi} - S_{cw}}{\Delta S}, \quad \pi_{11} = \frac{\rho_{o0}}{\rho_{w0}}, \end{aligned}$$

$$\pi_{12} = \pi_{13} = \pi_{14} = \pi_{15} = \frac{p_1 k_{row} h}{q_1 \mu_w}, \quad l \text{ 为 } oi, o0, w0 \text{ 或 } wf;$$

$$\pi_{16} = \pi_{17} = \pi_{18} = \frac{c_1 q_1 \mu_w}{k_{row} h}, \quad l \text{ 为 } o, w \text{ 或 } \phi \text{ (岩石)};$$

$$\pi_{19} = \frac{g_o k_{row} h x_R}{q_1 \mu_w}, \quad \pi_{20} = \frac{g_w k_{row} h x_R}{q_1 \mu_w}.$$

$\pi_1 \sim \pi_{18}$ 的物理意义在文献[20]中进行了阐述, π_{19} 和 π_{20} 分别为无量纲油相和无量纲水相启动压力梯度。

去掉自变量和因变量, 低渗透岩芯油水两相渗流的参变量共计 23 个, 根据 π 定理可知, 在选定 3 个独立的基本量 (时间、长度和质量) 之后, 即可确定控制水驱油两相渗流的相似准数共计 20 个, 这与上述方程分析法得到的相似准数个数是相等的, 证明了所推导的相似准则的正确性。

3 相似准数的敏感性分析与验证

3.1 相似准数敏感性分析

根据隐式求解压力、显式求解饱和度(IMPES)方法, 对式 (10) ~ (14) 进行求解, 便可以得到参变量包含相似准数的数值模拟器, 通过对某一相似准数进行畸变, 而其他准数不变, 便可研究该相似准数对试验结果的影响。畸变系数可定义为^[21-22]

$$\omega_i = \frac{\pi_{im} - \pi_{ip}}{\pi_{ip}} \quad (15)$$

以水驱油试验的采收率为目标函数, 通过对比某一相似准数畸变前后的采收率变化, 就可以判断某一相似准数对试验结果的影响程度。

$$A_p = \int_0^{T_D} R_p(\pi_{1p}, \pi_{2p}, \dots, \pi_{Np}, t_D) dt_D \quad (16)$$

式中: A_p 为模型与原型完全相似时采出程度曲线和无因次时间轴所围的面积, T_D 为无因次开发时间。

敏感因子可定义为

$$S_i = \int_0^{T_D} \left| R_m(\pi_{1m}, \pi_{2m}, \dots, \pi_{Nm}, t_D) - R_p(\pi_{1p}, \pi_{2p}, \dots, \pi_{Np}, t_D) \right| dt_D \quad (17)$$

式中: S_i 为第 i 个相似准数畸变后的采出程度曲线与完全相似时采出程度曲线的偏离程度。通过比较敏感因子的大小, 即可分析相似准数对低渗透岩芯水驱油试验结果的影响程度。

采用数值模拟方法对各个相似准数的敏感性进行分析, 图 1 展示了相似准数的敏感因子, 可以看出, π_3 和 π_{10} 的敏感因子较大, π_3 表示残余油和可流动油饱和度之比, π_{10} 表示初始折算含水饱和度,

这两个相似准数对低渗透岩芯水驱油试验结果影响较大。

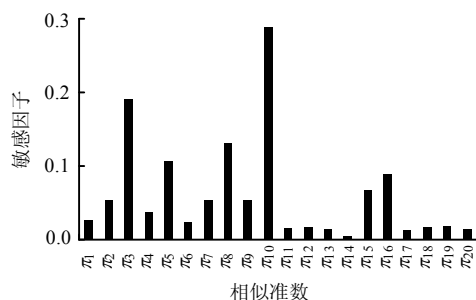


图1 相似准数敏感因子

Fig.1 Sensitive factors of similarity criterion

3.2 敏感性验证

为了说明相似准数敏感性对试验结果的影响,通过实际低渗透岩芯水驱油试验加以验证。由于水驱油试验所用岩芯都要制造束缚水,原始含水饱和度即束缚水饱和度,根据公式可知相似准数敏感因子最大的 π_{10} 为 0; 水驱油试验采用的岩芯夹持器出口和入口均处于岩芯横截面的圆心处,即敏感因子较大的 π_8 均相等; 本次水驱油试验中,所选岩芯均从同一块天然岩芯钻取,油水相对渗透率变化规律相近,即敏感因子较大的 π_5 也相等。因此,检验敏感因子第 2 大的 π_3 对试验结果的影响程度,另外对比了敏感因子居中的 π_1 对试验结果的影响。

图 2 为 3 块低渗透岩芯水驱油试验的采出程度随注入孔隙体积倍数的变化关系,3 块岩芯是从同一块天然岩芯上钻取的,每块岩芯直径为 2.5 cm、长度为 4.5 cm、气测渗透率为 $0.355 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,3 块岩芯试验条件相同,1#岩芯与 2#岩芯完全相似,3#岩芯与 1#、2#岩芯除了 π_3 不等之外,其余相似准数均相等。从图中可以看出 1#岩芯和 2#岩芯的采出程度变化曲线较为接近,而 3#岩芯的采出程度与二者相比则有较大差距。

图 3 为 2 块低渗透岩芯水驱油试验的采出程度随注入体积倍数的变化曲线,2 块岩芯是从同一块天然岩芯上钻取的,气测渗透率为 $0.369 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,在试验条件相同的情况下,2 块岩芯除 π_1 明显不等外,其他相似准数近似相等,从图 3 中可以看出,两条采出程度曲线几乎重合,因此, π_1 的改变对水驱油试验采出程度的影响较小。

通过上述试验数据验证了相似准数敏感因子的大小确实可以反映出相似准数对试验结果的影响程度,同时也说明,当试验中无法满足原型和模型所有相似准数完全相等的条件时,要优先满足敏感因子较大的相似准数相等,只有这样,部分相似模型

的模拟结果才更能够反映原型的物理现象。

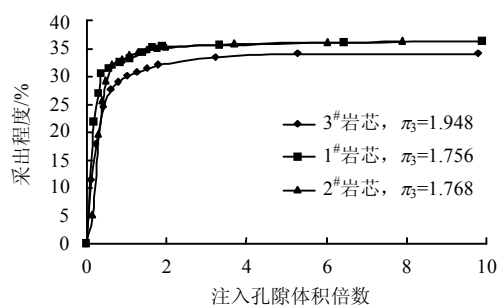


图2 π_3 对试验结果的影响

Fig.2 Influence of π_3 on test result

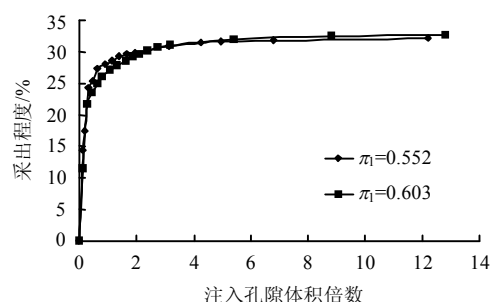


图3 π_1 对试验结果的影响

Fig.3 Influence of π_1 on test result

4 结 论

(1) 采用方程分析法对低渗透岩芯油水两相的控制方程进行无因次化,获得 20 个相似准数,并通过隐式求解压力、显式求解饱和度(IMPES)方法,对参变量包含相似准数的方程进行求解,得到了参变量包含相似准数的数值模拟器,通过对每个相似准数进行畸变和敏感分析,模拟计算得到每个相似准数的敏感因子。

(2) 通过实际低渗透岩芯水驱油试验证明:敏感因子大的相似准数,其改变对试验结果影响较大,反之,影响则小。

(3) 对于低渗透岩芯水驱油试验,在不能设计完全相似模型时,应优先满足敏感因子大的相似准数,这样才能保证试验结果更加可靠。

参 考 文 献

- [1] 徐挺. 相似理论与模型试验[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982: 3-5.
- [2] 高永利, 邵燕, 张志国, 等. 特低渗透油藏水驱油特征实验研究[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2004, 23(5): 53-56.
GAO Yong-li, SHAO Yan, ZHANG Zhi-guo, et al. Experimental study of the water-flooding characteristics in super-low permeability reservoirs[J]. Journal of Xi'an Shiyou University(Natural Science Edition), 2004,

- 23(5): 53—56.
- [3] 曲志浩, 孔令荣. 低渗透油层微观水驱油特征[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2002, 32(4): 329—334.
QU Zhi-hao, KONG Ling-rong. A study of characteristics of low permeability formation with water flooding using micro-model experiment[J]. **Journal of Northwest University(Natural Science Edition)**, 2002, 32(4): 329—334.
- [4] 赖南君, 叶仲斌, 陈洪, 等. 低张力体系改善低渗透油藏水驱渗流特征实验[J]. 石油天然气与地质, 2007, 28(4): 520—522.
LAI Nan-jun, YE Zhong-bin, CHEN Hong, et al. Experiment of low-tension system for improving percolation behaviors in waterflooding low-permeability reservoirs[J]. **Oil & Gas Geology**, 2007, 28(4): 520—522.
- [5] 宋付权, 刘慈群. 低渗透油藏水驱采收率影响因素分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(1): 30—36.
SONG Fu-quan, LIU Ci-qun. Factors effecting the water flooding recovery in low permeable reservoirs[J]. **Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing**, 2000, 19(1): 30—36.
- [6] 张人雄, 毛中源, 李晓梅. 宝浪油田低渗透油藏水驱渗流特征实验研究[J]. 特种油气藏, 1999, 6(2): 49—54.
ZHANG Ren-xiong, MAO Zhong-yuan, LI Xiao-mei. Experimental study of percolation features of water drive of low permeability reservoir in Baolang oil field[J]. **Special Oil & Gas Reservoirs**, 1999, 6(2): 49—54.
- [7] 王瑞飞, 孙卫. 特低渗透砂岩微观模型水驱油实验影响驱油效率因素[J]. 石油实验地质, 2010, 32(2): 93—97.
WANG Rui-fei, SUN Wei. Main controls for oil displacement efficiency by the micro-model water flooding experiment in ultra-low permeability sandstone reservoir[J]. **Petroleum Geology & Experiment**, 2010, 32(2): 93—97.
- [8] 苏玉亮, 李涛. 平面非均质性对特低渗透油藏水驱油规律的影响[J]. 油气地质与采收率, 2009, 16(1): 69—71.
SU Yu-liang, LI Tao. Effects studies of areal heterogeneity on oil-water displacement laws in extra-low permeability reservoirs[J]. **Petroleum Geology and Recovery Efficiency**, 2009, 16(1): 69—71.
- [9] BAI Yu-hu, ZHOU Ji-fu, LI Qing-ping. Designing of partial similarity models and evaluation method in polymer flooding experiment[J]. **Transport in Porous Media**, 2008, 75(12): 401—412.
- [10] ZHOU Ji-fu, LI Jia-chun. An optimization approach to the similarity criteria of flows and its application[J]. **Progress in Natural Science**, 2006, 16(3): 241—247.
- [11] SHEN Ping-ping. Flow and transport of oil and water in porous media[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 115—116.
- [12] 彭克谔, 丁海军, 姚恒申. 聚合物驱油物理模拟的相似准则[J]. 石油学报, 1993, 14(3): 84—92.
PENG Ke-cong, DING Hai-jun, YAO Heng-shen. Scaling criteria for polymer flooding experiment[J]. **Acta Petroiei Sinica**, 1993, 14(3): 84—92.
- [13] 李宜强, 孙连荣, 杨凤波, 等. 三元复合驱物理模拟相似原理[J]. 大庆石油学院学报, 2003, 27(2): 89—92.
LI Yi-qiang, SUN Lian-rong, YANG Feng-bo, et al. Similarity principle of the physical simulation of ASP ternary complex flooding[J]. **Journal of Daqing Petroleum Institute**, 2003, 27(2): 89—92.
- [14] 李宜强, 张素梅, 刘书国, 等. 泡沫复合驱物理模拟相似原理[J]. 大庆石油学院学报, 2003, 27(2): 93—95.
LI Yi-qiang, ZHANG Su-mei, LIU Shu-guo, et al. Similarity principle of the physical simulation of foam complex flooding[J]. **Journal of Daqing Petroleum Institute**, 2003, 27(2): 93—95.
- [15] 白玉湖, 周济福. 油藏复杂驱体体系物理模拟相似准则研究进展[J]. 力学进展, 2009, 39(1): 58—68.
BAI Yu-hu, ZHOU Ji-fu. The advance in the scaling criteria of physical simulation for the complex flows system in reservoir[J]. **Advance in Mechanics**, 2009, 39(1): 58—68.
- [16] 孔祥岩, 陈峰磊, 裴柏林. 水驱油物理模拟理论和相似准则[J]. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 56—60.
KONG Xiang-yan, CHEN Feng-lei, PEI Bo-lin. Similar theory, similar rule and data conversion software for water drive modeling[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 1997, 24(6): 56—60.
- [17] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 30—31.
- [18] 黄延章. 低渗透油层非线性渗流特征[J]. 特种油气藏, 1997, 4(1): 9—14.
HUANG Yan-zhang. Nonlinear percolation feature in low permeability reservoir[J]. **Special Oil & Gas Reservoirs**, 1997, 4(1): 9—14.
- [19] 杨正明, 于荣泽, 苏致新. 特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J]. 石油勘探与开发, 2010, 37(1): 94—98.
YANG Zheng-ming, YU Rong-ze, SU Zhi-xin. Numerical simulation of the nonlinear flow in ultra-low permeability reservoirs[J]. **Petroleum Exploration and Development**, 2010, 37(1): 94—98.
- [20] 白玉湖. 复杂油气藏渗流体系模拟及其相似准则的敏感性分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2006.
- [21] BAI Yu-hu, LI Jia-chun, ZHOU Ji-fu, et al. Sensitivity analysis of dimensionless parameters for physical simulation of water-flooding reservoir[J]. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 2005, 48(4): 441—453.
- [22] BAI Yu-hu, LI Jia-chun, LI Qing-ping. Sensitivity analysis of the dimensionless parameters in scaling a polymer flooding reservoir[J]. **Transport in Porous Media**, 2008, 73(5): 21—37.