

## 低渗透碳酸盐岩油藏水驱油相似理论研究

史兴旺<sup>1,2</sup>,杨正明<sup>2,3</sup>,段小浪<sup>4</sup>,张亚蒲<sup>2,3</sup>,朱光亚<sup>3</sup>,肖前华<sup>5</sup>,王向阳<sup>1,2</sup>

(1.中国科学院大学,北京 100049; 2.中国科学院大学 渗流流体力学研究所,河北 廊坊 065007;

3.中国石油勘探开发研究院,北京 100083; 4.中国石油西南油气田分公司,四川 成都

610051; 5.重庆科技学院 石油与天然气工程学院,重庆 401331)

**摘要:**为更好地指导低渗透碳酸盐岩油藏水驱油物理模拟实验方案及模型参数的设计,进一步对油、水两相渗流模拟相似理论进行研究。从变形介质渗流理论出发,考虑渗透率应力敏感变化规律和启动压力梯度特征,建立了双重介质孔隙模型的非线性渗流数学模型;应用方程分析法推导出低渗透碳酸盐岩油藏水驱油物理模拟实验的相似准则;利用IMPES方法对无量纲方程进行求解,通过畸变和敏感性分析,定量确定了各相似准数的主次关系,并通过实际岩样的应力敏感实验和水驱油实验结果进行了验证。研究表明,基于相似理论的油、水两相渗流模型能够有效表征低渗透碳酸盐岩油藏水驱油动态变化规律。21个相似准数对目标函数的影响程度各异,可知在物理模拟设计中,当无法满足模型和原型完全相似时,应优先满足多孔介质的渗透率和饱和度、多相流体的粘度和密度以及孔隙结构的相似。

**关键词:**低渗透 碳酸盐岩 相似理论 渗透率应力敏感 两相流

中图分类号:TE312

文献标识码:A

## Study on similarity theory of water flooding in low permeability carbonate reservoir

SHI Xingwang<sup>1,2</sup>, YANG Zhengming<sup>2,3</sup>, DUAN Xiaolang<sup>4</sup>, ZHANG Yapu<sup>2,3</sup>,

ZHU Guangya<sup>3</sup>, XIAO Qianhua<sup>5</sup>, WANG Xiangyang<sup>1,2</sup>

(1. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing City, 100049, China; 2. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics,

University of Chinese Academy of Sciences, Langfang City, Hebei Province, 065007, China; 3. PetroChina Research

Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing City, 100083, China; 4. PetroChina Southwest

Oil & Gas Field Company, Chengdu City, Sichuan Province, 610051, China; 5. School of Petroleum

Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing City, 401331, China)

**Abstract:** To offer better guidance to the physical simulation experiment scheme and model parameters design of water flooding in low permeability carbonate reservoirs, the similarity theory on the oil-water two-phase seepage simulation was analyzed further. Starting from seepage theory of deformation media, mathematical model of nonlinear flow for dual porosity media was established considering variation regularity of stress sensitivity of permeability and starting pressure gradient. The similarity criteria of physical water flooding simulation in the low permeability carbonate reservoir was deduced by analytic equation method. The dimensionless equation was solved using IMPES method, and the principal and subordinate relations of various similarity criteria were determined quantitatively by distortion and sensitivity analysis, which were verified by the results of stress sensitivity experiment and water flooding experiment. Results show that this model veritably represents the regularity of water flooding in the low permeability carbonate reservoir. Twenty-one similarity criteria have various effects on objective function. When the model and prototype are not completely similar in the physical simulation de-

收稿日期:2017-09-09。

作者简介:史兴旺(1991—),男,甘肃庆阳人,在读硕士研究生,从事油气田开发方面研究。联系电话:(010)83596796, E-mail:shixingwang15@mails.ucas.ac.cn。

基金项目:国家科技重大专项“超低渗油藏物理模拟方法与渗流机理”(2017ZX05013-001)。

sign, the permeability and saturation of the porous medium and the viscosity and density of multiphase fluids should be given priority, as well as the pore structure similarity.

**Key words:** low permeability; carbonates; similarity theory; stress sensitivity of permeability; two-phase flow

近年来,随着中国石油海外业务的拓展,低渗透碳酸盐岩油藏的合理开发已成为石油行业备受关注的焦点之一,如中国石油承担的伊拉克哈法亚油田即为一典型超巨型低渗透碳酸盐岩油藏。目前随着开发的进行,能量衰竭严重,急需进行注水补充地层能量开采<sup>[1]</sup>。中国的低渗透碳酸盐岩油藏主要以溶洞、裂缝型为主,且通常采用衰竭开采后注水驱油方式<sup>[2-3]</sup>,对哈法亚孔隙型碳酸盐岩油藏注水驱油开发方式的参考价值很小,需要进行水驱油物理模拟实验研究,而相似理论又是物理模拟参数设计的基础,是确定物理模拟实验方案、模型设计参数以及整理实验数据,并将室内实验结果转化为矿场原型参数的重要依据<sup>[4]</sup>。相似理论研究不仅可以大大减少实验的工作量,还可以将具体某岩样的实验结果推广到整个相似现象群中,对油藏的开发具有一定的指导作用。目前关于低渗透油藏相似理论方面的研究较多<sup>[5-9]</sup>,诸多学者<sup>[10-13]</sup>提出适用于不同模型条件的相似现象群,并利用数值模拟技术对各相似准则进行敏感性分析。但针对低渗透碳酸盐岩油藏的研究相对较少,且尚无考虑渗透率的变化规律<sup>[11-13]</sup>。

笔者在前人关于低渗透油藏水驱油非线性渗流模型的基础之上<sup>[14-20]</sup>,考虑低渗透碳酸盐岩油藏变形介质的压敏效应,采用方程分析法对低渗透碳酸盐岩油藏水驱油过程的相似理论进行研究,通过相似准则的敏感性分析<sup>[21]</sup>,定量确定了各相似准则对水驱油实验影响程度的主次关系,优选出该区块物理模拟的核心参数,并通过实际岩样水驱油实验结果进行验证。

## 1 数学模型

### 1.1 非线性渗流数学模型

低渗透碳酸盐岩油藏的渗流规律已经不再符合达西定律,主要表现为启动压力梯度<sup>[17-18]</sup>和非线性<sup>[19-20]</sup>的特征。针对这一特点,建立低渗透碳酸盐岩油藏含启动压力梯度的非线性渗流模型。由于低渗透碳酸盐岩油藏中水相的非线性特征比油相的弱<sup>[21]</sup>,故可以忽略不计。

数学模型的基本假设条件包括:①驱替过程是等温的。②地层是均质和等厚的。③储层岩石是

不可压缩的,流体是微可压缩的。④不考虑重力和毛管力作用。⑤束缚水和残余油在整个岩样中是均匀分布的。⑥考虑有动边界条件的影响。

根据黄延章提出的描述低渗透油藏水驱油渗流规律的非线性渗流模型<sup>[15]</sup>,油、水两相运动方程分别为

$$v_o = \frac{KK_{rw}}{\mu_o} \times \frac{\partial p_o}{\partial x} \left( 1 - \frac{\lambda_c}{\frac{\partial p_o}{\partial x} + \lambda_c - \lambda_a} \right) \quad (1)$$

$$v_w = -\frac{KK_{rw}}{\mu_w} \times \frac{\partial p_w}{\partial x} \quad (2)$$

低渗透碳酸盐岩油藏中油、水两相控制方程分别为

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{\rho_o K_o A_x}{\mu_o} \times \frac{\partial p_o}{\partial x} \left( 1 - \frac{\lambda_c}{\frac{\partial p_o}{\partial x} + \lambda_c - \lambda_a} \right) \right] \Delta x = A_x \Delta x \frac{\partial(\rho_o \phi S_o)}{\partial t} - q_o \quad (3)$$

$$-\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho_w K_w A_x}{\mu_w} \times \frac{\partial p_w}{\partial x} \right) \Delta x = A_x \Delta x \frac{\partial(\rho_w \phi S_w)}{\partial t} - q_w \quad (4)$$

其中

$$q_o = \frac{\rho_o K_o \Delta y \Delta z (p_{wf} - p_o + \lambda_o \Delta x)}{\mu_o \Delta x} \delta(x - x_p) \quad (5)$$

$$q_w = \frac{\rho_w q_l}{h} \delta(x) + \frac{\rho_w K_w \Delta y \Delta z (p_{wf} - p_w)}{\mu_w \Delta x} \delta(x - x_p) \quad (6)$$

饱和度方程为

$$S_o + S_w = 1 \quad (7)$$

初始条件为

$$\begin{cases} p_o|_{t=0} = p_{oi} \\ S_w|_{t=0} = S_{wi} \end{cases} \quad (8)$$

### 1.2 渗透率应力敏感数学模型

固体力学理想模型表明,岩样在受到挤压后,孔隙内的流体会承受较大的固液界面作用,从而产生较强的非线性渗流效应,甚至不再允许流体通过<sup>[22]</sup>。陈祖安等研究了大庆砂岩油藏渗透率随静压力变化的规律<sup>[23]</sup>,表明当压力为60 MPa时,岩样地层渗透率相比地面渗透率降低70%~85%,变化幅度较大,因此建立油、水两相渗流模型时必须考虑渗透率的应力敏感性规律。

为了从理论上研究渗透率和压力之间的关系,

假定理想的多孔介质模型中,地层是由孔隙和裂缝2种介质组合而成,孔隙作为油气主要的储集空间,裂缝作为油气的渗流通道,油气经基质孔隙流向裂缝,经裂缝流向井底,最终被采出。假设双重孔隙模型总的渗透率为基质孔隙渗透率与裂缝渗透率之和,且满足指数函数形式,即

$$K_i = K_m + K_f = K_0 e^{-\alpha p C_0} \quad (9)$$

其中

$$C_\phi = -\frac{1}{\phi} \times \frac{d\phi}{dp} \quad (10)$$

$$\alpha = \left( \frac{\phi_m + \phi_f}{\phi_m C_m + \phi_f C_f} \right) \left( \frac{6r^2 \phi_m C_m + 6w^2 \phi_f C_f}{3r^2 \phi_m + 2w^2 \phi_f} \right) \quad (11)$$

$\alpha$  表征了岩样孔隙几何特征,它是储层岩样在不同应力状态下的孔隙结构变化的综合体现,孔隙类型不一样,那么孔渗在不同应力作用下的变化规律也不一样。当基质孔隙模型(图1a)中裂缝的渗透率和孔隙度均为0时,则  $\alpha=2$ ; 当裂缝模型(图1b)中基质的渗透率和孔隙度均为0时,则  $\alpha=3$ ; 当双重介质孔隙模型(图1c)中基质的毛管半径与裂缝尺度相当,即  $w \approx r$  时,则  $2 < \alpha < 3$ ; 当裂缝尺度远大于孔隙尺度,即  $w \gg r$  时,则  $\alpha > 3$  [24]。

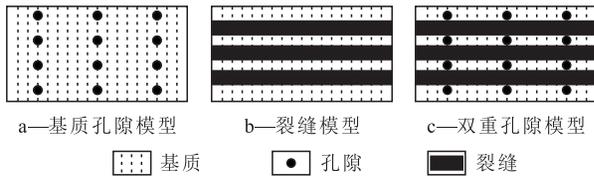


图1 多孔介质模型

Fig.1 Porous media model

## 2 相似准则及敏感性分析

### 2.1 相似准则分析

将建立的数学模型按照隐式方式进行差分离散,为此引入以下无量次量。

无量次自变量为

$$x_D = \frac{x}{x_R} \quad (12)$$

$$y_D = \frac{y}{y_R} \quad (13)$$

$$z_D = \frac{z}{h} \quad (14)$$

$$t_D = \frac{q_i t}{\phi \Delta x_D y_R h \Delta S} \quad (15)$$

其中

$$\Delta S = 1 - S_{cw} - S_{ro} \quad (16)$$

无量次因变量为

$$p_{oD} = \frac{p_o K_{row} h}{q_i \mu_w} \quad (17)$$

$$p_{wD} = \frac{p_w K_{row} h}{q_i \mu_w} \quad (18)$$

$$\lambda_{oD} = \frac{\lambda_o K_{row} h x_R}{q_i \mu_w} \quad (19)$$

无量次参量为

$$\mu_{oD} = \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad (20)$$

$$\rho_{oD} = \frac{\rho_o}{\rho_{oi}} \quad (21)$$

$$\rho_{wD} = \frac{\rho_w}{\rho_{wi}} \quad (22)$$

$$c_{oD} = \frac{c_o q_i \mu_w}{K_{row} h} \quad (23)$$

$$c_{wD} = \frac{c_w q_i \mu_w}{K_{row} h} \quad (24)$$

$$c_{\phi D} = \frac{c_\phi q_i \mu_w}{K_{row} h} \quad (25)$$

$$c_{ID} = \frac{c_i q_i \mu_w}{K_{row} h} \quad (26)$$

含水饱和度和相对渗透率归一化后,得

$$\bar{S}_w = \frac{S_w - S_{cw}}{1 - S_{cw} - S_{ro}} = \frac{S_w - S_{cw}}{\Delta S} \quad (27)$$

$$\bar{S}_o = \frac{S_o - S_{ro}}{\Delta S} \quad (28)$$

$$K_{oD} = \frac{K_o}{K_{cwo}} \quad (29)$$

$$K_{wD} = \frac{K_w}{K_{row}} \quad (30)$$

将上述无量次量代入控制方程中,得

$$\frac{K_{cwo} y_R}{K_{row} x_R} \times \frac{\partial}{\partial x_D} \left[ \frac{\rho_{oD} K_{oD} e^{-\alpha p_{oD} C_{oD}}}{\mu_{oD}} y_D h_D \frac{\partial p_{oD}}{\partial x_D} \times \left( 1 - \frac{\frac{\lambda_{oDc}}{x_{Rc}}}{\frac{\partial p_{oD}}{\partial x_D} \times \frac{1}{x_R} + \frac{\lambda_{oDc}}{x_{Rc}} - \frac{\lambda_{oDa}}{x_{Ra}}} \right) \Delta x_D = x_R y_D h_D \frac{\partial}{\partial t_D} (\rho_{oD} \bar{S}_o) + x_R y_D h_D \frac{S_{ro}}{\Delta S} \times \frac{\partial \rho_{oD}}{\partial t_D} - \frac{K_{cwo} y_R}{K_{row} x_R} \times \frac{\rho_{oD} K_{oD} \Delta y_D \Delta z_D}{\mu_{oD} \Delta x_D} e^{-\alpha p_{oD} C_{oD}} (p_{wD} - p_{oD} + \lambda_{oD} \Delta x_D) \right] \quad (31)$$

$$\frac{y_R}{x_R} \times \frac{\partial}{\partial x_D} \left( \rho_w K_{wD} e^{-\alpha p_{wD} C_{wD}} y_D h_D \frac{\partial p_{wD}}{\partial x_D} \right) \Delta x_D = x_R y_D h_D \frac{\partial}{\partial t_D} (\rho_w \bar{S}_w) + x_R y_D h_D \frac{S_{cw}}{\Delta S} \times \frac{\partial \rho_w}{\partial t_D} - \left[ \frac{\rho_w}{h} + \frac{y_R}{x_R} \times \frac{\rho_w K_{wD} \Delta y_D \Delta z_D}{\mu_w \Delta x_D} (p_{wD} - p_{oD}) \right] \quad (32)$$

用有限差分法对式(31)和式(32)进行离散,空间差分和时间差分均采用中心差分式,忽略方程中的极小项  $\frac{\partial}{\partial x_D} \left( \frac{\rho_{od} K_{odD}}{\mu_{od}} y_D h_D \lambda_{od} \right)$ ,油水相离散后的方程分别为

$$a_{oi} p_{od,i+1}^{n+1} + c_{oi} p_{od,i}^{n+1} + b_{oi} p_{od,i-1}^{n+1} = \rho_{od} \frac{\bar{S}_o^{n+1} - \bar{S}_o^n}{\Delta t_D} + d_{oi} \quad (33)$$

$$a_{wi} p_{wd,i+1}^{n+1} + c_{wi} p_{wd,i}^{n+1} + b_{wi} p_{wd,i-1}^{n+1} = \rho_w \frac{\bar{S}_w^{n+1} - \bar{S}_w^n}{\Delta t_D} + d_{wi} \quad (34)$$

其中

$$a_{oi} = \frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i+\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{od} C_{\phi od}} \left( \frac{\rho_{od} K_{od}}{\mu_{od}} \right)_{i+\frac{1}{2}} \quad (35)$$

$$b_{oi} = \frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i-\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{od} C_{\phi od}} \left( \frac{\rho_{od} K_{od}}{\mu_{od}} \right)_{i-\frac{1}{2}} \quad (36)$$

$$c_{oi} = - \left[ \frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i+\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{od} C_{\phi od}} \left( \frac{\rho_{od} K_{od}}{\mu_{od}} \right)_{i+\frac{1}{2}} + \frac{\pi_1 \pi_2}{x_{i-\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{od} C_{\phi od}} \left( \frac{\rho_{od} K_{od}}{\mu_{od}} \right)_{i-\frac{1}{2}} \right] \quad (37)$$

$$d_{oi} = \frac{S_{ro}}{\Delta S} \times \frac{\Delta \rho_{od}}{\Delta t_D} - \frac{\pi_1 \pi_2}{x_R y_D h_D} q_{od} + \frac{\lambda_{odc}}{x_{Rc}} \frac{\pi_1 \pi_2 e^{-\alpha_{od} C_{\phi od}} y_D h_D}{\frac{p_{od,i+1}^{n+1} - p_{od,i}^{n+1}}{\Delta x_D} \times \frac{1}{x_R} + \frac{\lambda_{odc}}{x_{Rc}} - \frac{\lambda_{oda}}{x_{Ra}}} \quad (38)$$

$$q_{od} = \frac{\rho_{od} K_{od} \Delta y_D \Delta z_D}{\mu_{od} \Delta x_D} e^{-\alpha_{od} C_{\phi od}} (p_{wd} - p_{od} + \lambda_{od} \Delta x_D) \quad (39)$$

$$a_{wi} = \frac{\pi_1}{x_{i+\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{wd} C_{\phi wd}} (\rho_w K_{wd})_{i+\frac{1}{2}} \quad (40)$$

$$b_{wi} = \frac{\pi_1}{x_{i-\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{wd} C_{\phi wd}} (\rho_w K_{wd})_{i-\frac{1}{2}} \quad (41)$$

$$c_{wi} = - \left[ \frac{\pi_1}{x_{i+\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{wd} C_{\phi wd}} (\rho_w K_{wd})_{i+\frac{1}{2}} + \frac{\pi_1}{x_{i-\frac{1}{2}}} e^{-\alpha_{wd} C_{\phi wd}} (\rho_w K_{wd})_{i-\frac{1}{2}} \right] \quad (42)$$

$$d_{wi} = \frac{S_{cw}}{\Delta S} \times \frac{\Delta \rho_{od}}{\Delta t_D} - \frac{\pi_1}{x_R y_D h_D} q_{wd} \quad (43)$$

$$q_{wd} = \frac{\rho_w}{h} \times \frac{x_R}{y_R} + \frac{\rho_w K_{wd} e^{-\alpha_{wd} C_{\phi wd}} \Delta y_D \Delta z_D}{\mu_w \Delta x_D} (p_{wd} - p_{od}) \quad (44)$$

$$\pi_1 = \frac{y_R}{x_R} \quad (45)$$

$$\pi_2 = \frac{K_{cwo}}{K_{row}} \quad (46)$$

无量纲饱和度方程式为

$$\bar{S}_o + \bar{S}_w = 1 \quad (47)$$

无量纲初始条件为

$$\begin{cases} p_{od}|_{t=0} = p_{od} \\ \bar{S}_w|_{t=0} = \bar{S}_w \end{cases} \quad (48)$$

从上述分析中得到无量纲参数,并依次标记为

$$\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{21}, \text{其表达式分别为 } \frac{y_R}{x_R}, \frac{K_{cwo}}{K_{row}}, \frac{S_{ro}}{\Delta S}, \frac{S_{cw}}{\Delta S}, \frac{K_o}{K_{cwo}}, \frac{K_w}{K_{row}}, \frac{x_p}{x_R}, \frac{y_p}{y_R}, \frac{\mu_o}{\mu_w}, \frac{S_{wi} - S_{cw}}{\Delta S}, \frac{\rho_{o0}}{\rho_{w0}}, \frac{p_{oi} K_{row} h}{q_1 \mu_w}, \frac{p_{o0} K_{row} h}{q_1 \mu_w}, \frac{p_{wo} K_{row} h}{q_1 \mu_w}, \frac{p_{wf} K_{row} h}{q_1 \mu_w}, \frac{C_o q_1 \mu_w}{K_{row} h}, \frac{C_w q_1 \mu_w}{K_{row} h}, \frac{C_\phi q_1 \mu_w}{K_{row} h}, \frac{\lambda_o K_{row} h x_{Ra}}{q_1 \mu_w}, \frac{\lambda_o K_{row} h x_{Rc}}{q_1 \mu_w}, \left( \frac{\phi_m + \phi_f}{\phi_m C_m + \phi_f C_f} \right) \left( \frac{6r^2 \phi_m C_m + 6w^2 \phi_f C_f}{3r^2 \phi_m + 2w^2 \phi_f} \right)$$

以上21个相似准数中,  $\pi_1, \pi_7, \pi_8$  是几何相似参数;  $\pi_2, \pi_5, \pi_6, \pi_{21}$  是表征多孔介质的相似准数,其中  $\pi_{21}$  是考虑中东地区低渗透碳酸盐岩储层渗透率随应力变化而引起孔隙结构发生改变的参数;  $\pi_3, \pi_4, \pi_{10}$  是表征储层饱和度特征的相似准数;  $\pi_9, \pi_{11}$  是表征储层流体性质的相似准数;  $\pi_{12}, \pi_{13}, \pi_{14}, \pi_{15}$  是表征驱动压力的相似准数;  $\pi_{16}, \pi_{17}, \pi_{18}$  是表征驱替体系的相似准数;  $\pi_{19}, \pi_{20}$  是表征低渗透油藏中流体渗流存在非线性渗流特征的相似准数,是低渗透油藏区别于中、高渗透油藏的重要参数。

### 2.2 相似准数敏感性分析

相似准数的敏感性分析主要是采用数值实验的方法分析相似准数的微小改变对于目标函数的影响程度,通过比较影响程度的大小来判断相似准数的主次关系<sup>[10]</sup>。根据白玉湖等定义的敏感因子<sup>[10]</sup>

$$S_i = \frac{\partial \left[ \frac{f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)}{f_p} \right]}{\partial \left( \frac{\pi_i}{\pi_{ip}} \right)} \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (49)$$

在水驱油两相渗流实验中,定义  $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$

为  $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N) = \int_0^{t_D} \eta(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N, t_D) dt_D$ 。

在实际数值计算中,敏感因子可以写成

$$S_i = \frac{\frac{\Delta a_{im}}{a_0}}{|w_i|} \quad (50)$$

其中

$$\Delta a_{im} = \int_0^{t_D} \left| \eta_m(\pi_{1m}, \pi_{2m}, \dots, \pi_{Nm}, t_D) - \eta_p(\pi_{1p}, \pi_{2p}, \dots, \pi_{Np}, t_D) \right| dt_D \quad (51)$$

$$a_0 = \int_0^{t_D} \eta_p(\pi_{1p}, \pi_{2p}, \dots, \pi_{Np}, t_D) dt_D \quad (52)$$

$$w_i = \frac{\pi_{im} - \pi_{ip}}{\pi_{ip}} \quad (53)$$

通过计算比较各个相似参数敏感因子即可分析相似参数对于实验结果的影响程度。采用该方法,对提出的21个相似准数进行求解,得到相似准数的敏感因子(图2)。

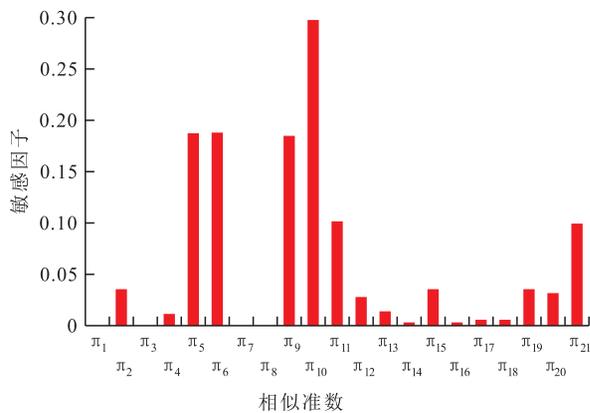


图2 相似准数敏感因子

Fig.2 Sensitive factors of similarity criteria

从图2中可以看出,各个相似准数的敏感因子大小不一致,这也说明了不同相似准数对于采出程度的影响程度不一样。敏感因子大,说明该相似准数对于实验结果影响程度大;敏感因子小,说明该相似准数对于实验结果的影响程度小,从而定量地确定了各个相似准数的主次关系。定义敏感因子大于0.1的相似准数是主要参数,则从图2中可以看出主要的相似准数为  $\pi_5, \pi_6, \pi_9, \pi_{10}, \pi_{11}$  和  $\pi_{21}$ ,这6个相似参数是影响流体在变形介质中渗流的主要参数。第1,第2和第4个参数说明:模拟多相流体在多孔介质中渗流时,渗透率和饱和度关系必须满足相似原则;第3和第5个参数反映了多相流体的粘度和密度必须满足相似原则;第6个参数反映了影响渗透率的孔隙结构必须满足相似原则,其他因素则相对次要一些。因此,当不能设计出与原型完全相似的模型时,应优先满足这6个参数的相似原则。

### 3 实验结果分析与验证

#### 3.1 渗透率应力敏感性分析

为保证式(9)能够真实反映该地区低渗透碳酸盐岩油藏实际生产过程中的渗透率变化状况,选取中东典型低渗透碳酸盐岩油藏3块不同渗透率级别的岩样,采用稳态法变围压实验方法进行应力敏感性测试。以储层原始平均有效应力36 MPa为基准,上下浮动12 MPa,分别测试岩样的渗透率。不同岩样应力敏感性测试及拟合结果如图3所示。由于指数形式对渗透率相关系数较高,故以指数形式对应力敏感曲线进行拟合,拟合后得到无因次渗透率与有效应力之间的关系(表1)。从表1中可以看出:不同渗透率级别岩样的无因次渗透率和无因次渗透率损失有所差异。有效应力由24 MPa增加到48 MPa时,无因次渗透率损失为4.15%~41.88%,应力敏感系数随着渗透率的增大而增大,整体表现出裂缝渗透率的应力敏感性更强。总体来看,实验结果与式(9)相吻合,相关性较好,能真实地反映该地区低渗透碳酸盐岩油藏渗透率的变化规律。

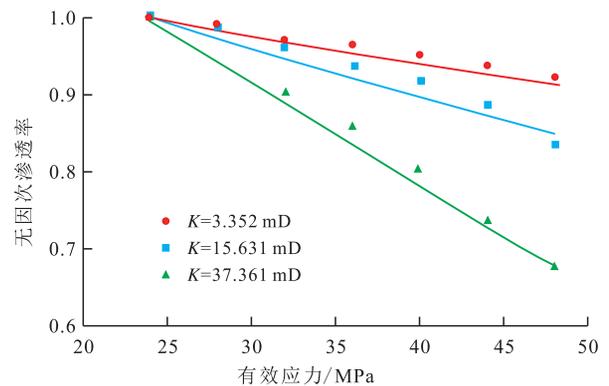


图3 不同岩样应力敏感性测试及拟合结果

Fig.3 Stress sensitivity test and fitting results for different core samples

表1 岩样应力敏感性评价结果

Table1 Evaluation results of stress sensitivity of cores

岩样编号	渗透率/mD	孔隙度/%	无因次渗透率	无因次渗透率损失/%	$K/K_0$	应力敏感系数/ $10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$	$R^2$
155	3.532	28.02	0.922	4.15	$e^{-0.0012P}$	0.325	0.994 4
172	15.631	28.09	0.837	24.04	$e^{-0.0021P}$	0.679	0.933 7
125S	37.361	25.55	0.679	41.88	$e^{-0.0053P}$	1.338	0.983 6

#### 3.2 相似准数敏感性验证

为了对所得的6个主要相似准数的正确性及可靠性进行验证,对所选中东典型低渗透碳酸盐岩油藏3块岩样进行了水驱油室内模拟实验。选取储层真实岩样保证多孔介质的相似,选取与地层原油粘度相同的模拟油和矿化度相同的复配水,按照换算

比例保证驱替压力、渗透率和饱和度关系的相似,得到含水率和采出程度随时间的变化曲线,并与数值解进行对比(图4)。从图4中可见:数值模拟结果和实验结果吻合性较好,表明上述相似准则能够真实地反映水驱油过程中的主要影响因素。当物理模拟实验无法满足所有相似准数完全相等时,应优先满足这6个相似准数的相等,只有这样,局部相似模型才能够真实地反映原型物理现象,室内物理模拟实验的结果才能够真实地代表矿场实际的结果。

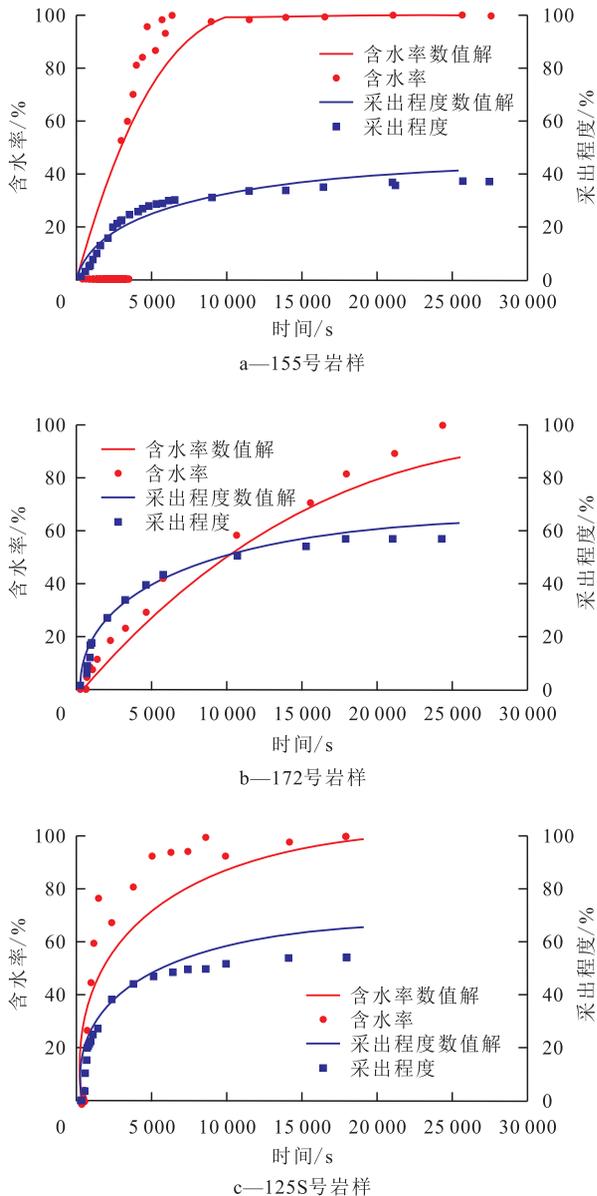


图4 不同岩样含水率和采出程度随时间变化的实验值与数值解

Fig.4 Variation of experimental and numerical results of water cut and recovery percent with time for different core samples

## 4 结论

引入表征岩样几何形状因子的孔渗幂指数来

体现渗透率的变化规律,通过岩样应力敏感性分析验证了其中东低渗透碳酸盐岩油藏的适用性,完善了水驱油物理模拟相似理论,获得了低渗透碳酸盐岩油藏水驱油过程中应满足的21个相似准数。

采用数值模拟方法对各个相似准数进行畸变和敏感性分析,确定了中东低渗透碳酸盐岩油藏水驱油物理模拟实验的核心影响因素是多孔介质的渗透率和饱和度、多相流体的粘度和密度以及在开发过程中的孔隙结构,应优先满足这些关键参数的相似。

通过中东低渗透碳酸盐岩岩样水驱油实验进行验证,数值结果与实验结果相吻合,精度较高,充分验证了数学模型及关键相似准数的准确性,可为之后进行物理模拟实验设计提供一定的理论依据和设计指导。

### 符号解释:

$v_o$  ——油相的渗流速度,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $K$  ——绝对渗透率,  $\text{mD}$ ;  $K_{ro}$  ——油相的相对渗透率;  $\mu_o$  ——油相的粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $p_o$  ——油相的压力,  $\text{MPa}$ ;  $x$  ——轴向距离,  $\text{m}$ ;  $\lambda_c$  ——最大启动压力梯度,  $\text{MPa/m}$ ;  $\lambda_n$  ——最小启动压力梯度,  $\text{MPa/m}$ ;  $v_w$  ——水相的渗流速度,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $K_{rw}$  ——水相的相对渗透率;  $\mu_w$  ——水相的粘度,  $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ;  $p_w$  ——水相的压力,  $\text{MPa}$ ;  $\rho_o$  ——油相的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $A_x$  ——横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\phi$  ——孔隙度;  $S_o$  ——含油饱和度;  $q_o$  ——油相汇源项,  $\text{kg/d}$ ;  $t$  ——时间,  $\text{s}$ ;  $\rho_w$  ——水相的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $S_w$  ——含水饱和度;  $q_w$  ——水相汇源项,  $\text{kg/d}$ ;  $y$  ——径向距离,  $\text{m}$ ;  $z$  ——垂向距离,  $\text{m}$ ;  $p_{wf}$  ——出口端压力,  $\text{MPa}$ ;  $\delta$  ——Dirac函数,  $\delta(x-x_p)$  表示在  $x_p$  所在网格等于1,在其他网格等于0;  $x_p$  ——出口位置,  $\text{m}$ ;  $q_i$  ——注入体积流量,  $\text{kg/d}$ ;  $h$  ——厚度,  $\text{m}$ ;  $K_l$  ——总渗透率,  $\text{mD}$ ;  $K_m$  ——基质孔隙的渗透率,  $\text{mD}$ ;  $K_f$  ——裂缝的渗透率,  $\text{mD}$ ;  $K_0$  ——初始状态下的渗透率,  $\text{mD}$ ;  $\alpha$  ——孔渗幂指数;  $p$  ——岩石所承受的应力,  $\text{MPa}$ ;  $C_\phi$  ——孔隙压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $\phi_m$  ——基质的孔隙度;  $\phi_f$  ——裂缝的孔隙度;  $C_m$  ——基质的孔隙压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $C_f$  ——裂缝的孔隙压缩系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $r$  ——毛管半径,  $\text{cm}$ ;  $w$  ——裂缝宽度,  $\text{cm}$ ;  $x_D$  —— $x$ 方向的无量纲自变量;  $x_R$  —— $x$ 方向的参考长度,  $\text{m}$ ;  $y_D$  —— $y$ 方向的无量纲自变量;  $y_R$  —— $y$ 方向的参考长度,  $\text{m}$ ;  $z_D$  —— $z$ 方向的无量纲自变量;  $t_D$  ——无因次驱替时间;  $S_{cw}$  ——束缚水饱和度;  $S_{om}$  ——残余油饱和度;  $p_{od}$  ——无因次油相压力;  $K_{row}$  ——残余油下的水相有效渗透率,  $\text{mD}$ ;  $p_{wd}$  ——无因次水相压力;  $\lambda_{od}$  ——无因次油相启动压力梯度;  $\lambda_o$  ——油相启动压力梯度,  $\text{MPa/m}$ ;  $\mu_{od}$  ——无因次油相动力粘性系数;  $\rho_{od}$  ——无因次油相密度;  $\rho_{os}$  ——指定的某一压力状态下的油相密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $\rho_{od}$  ——无因次水相密度;  $\rho_{ws}$  ——指定的

某一压力状态下的水相密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $C_{\text{od}}$  ——无因次油相压缩系数;  $C_{\text{wd}}$  ——无因次水相压缩系数;  $C_{\text{rod}}$  ——无因次岩石孔隙压缩系数;  $C_{\text{id}}$  ——无因次综合弹性系数;  $C_i$  ——综合弹性系数,  $\text{MPa}^{-1}$ ;  $K_{\text{od}}$  ——无因次油相有效渗透率, mD;  $K_{\text{cwo}}$  ——束缚水下的油相有效渗透率, mD;  $K_{\text{wd}}$  ——无因次水相有效渗透率, mD;  $K_{\text{rod}}$  ——初始压力状态下的油相无因次有效渗透率;  $\rho_{\text{od}}$  ——初始压力状态下的油相无因次密度;  $p_{\text{od}}$  ——无因次初始油相压力;  $C_{\text{rod}}$  ——无因次初始岩石孔隙压缩系数;  $\lambda_{\text{odc}}$  ——无因次油相最大启动压力梯度;  $x_{\text{rc}}$  ——最大启动压力梯度方向的参考长度, m;  $\lambda_{\text{oda}}$  ——无因次油相最小启动压力梯度;  $x_{\text{ra}}$  ——最小启动压力梯度方向的参考长度, m;  $h_0$  ——无因次纵向变量;  $p_{\text{wd}}$  ——无因次初始水相压力;  $i$  ——网格数;  $n$  ——时间步长;  $u_j^n$  —— $u(x_j, t_n)$  的近似值;  $S_i$  ——第  $i$  个相似准数的敏感因子;  $f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N)$  ——评价物理模拟实验结果的目标函数;  $t_D$  ——无因次开发时间;  $N$  ——第  $N$  个相似准数;  $\eta(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N, t_D)$  ——采出程度;  $\Delta a_{\text{im}}$  ——第  $i$  个相似准数畸变后的采收率曲线与完全相似时采出程度曲线的偏离程度;  $a_0$  ——完全相似时采出程度曲线与横轴所围成的面积;  $w_i$  ——畸变系数;  $\eta_m$  ——模型的采出程度;  $\eta_p$  ——油藏原型的采出程度。

#### 参考文献:

- [1] 刘晓蕾, 朱光亚, 熊海龙, 等. 注入水性质对中东地区碳酸盐岩油藏驱油效果的影响[J]. 油气地质与采收率, 2017, 24(2): 116-120.  
LIU Xiaolei, ZHU Guangya, XIONG Hailong, et al. Effect of injected water properties on oil displacement effect in Middle East carbonate reservoirs [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(2): 116-120.
- [2] 李生青, 廖志勇, 杨迎春. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏缝单元注水开发分析[J]. 新疆石油天然气, 2011, 7(2): 40-44.  
LI Shengqing, LIAO Zhiyong, YANG Yingchun. A discussion on water flooding in the multi-well fractured-vuggy units of carbonate reservoirs in Tahe oilfield [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2011, 7(2): 40-44.
- [3] 陈丽祥, 牛成民, 李慧勇, 等. 渤海湾盆地渤中21-2构造碳酸盐岩储层发育特征及其控制因素[J]. 油气地质与采收率, 2016, 23(2): 16-21.  
CHEN Lixiang, NIU Chengmin, LI Huiyong, et al. Carbonate reservoir characteristics and its controlling factors in Bozhong21-2 structure, Bohai Bay Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(2): 16-21.
- [4] 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.  
XU Ting. Similarity theory and model test [M]. Beijing: China Agricultural Mechanical Press, 1982: 3-5.
- [5] 孔祥言, 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 Xiangyan, CHEN Fenglei, PEI Bolin. Similar theory, similar
- lar urles and data conversion software for water drive modeling [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6): 56-60.
- [6] 滕起, 杨正明, 刘学伟, 等. 特低渗透油藏水驱油物理模拟相似准则的推导和应用[J]. 科技导报, 2013, 31(9): 40-45.  
TENG Qi, YANG Zhengming, LIU Xuewei, et al. Similar criteria derivation for the physical simulation of water flooding in the plate model of ultra-low permeability reservoir and its applications [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(9): 40-45.
- [7] 顾蒙, 郭平, 田东红, 等. 水驱油物理模拟相似准则研究[J]. 特种油气藏, 2016, 23(1): 123-126.  
GU Meng, GUO Ping, TIAN Donghong, et al. Study on similarity criteria of physical modeling for displacement of oil by water [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2016, 23(1): 123-126.
- [8] 袁忠超. 水平井蒸汽驱相似准则研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2011.  
YUAN Zhongchao. Study on scaling criteria of horizontal well steamflooding [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2011.
- [9] 贾大雷. 水平井蒸汽驱物理模拟相似原理研究[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(4): 68-70.  
JIA Dalei. Similarity principle of physical simulation of steam flooding for horizontal well [J]. Natural Gas Exploration & Development, 2015, 38(4): 68-70.
- [10] 白玉湖, 周济福. 油藏复杂驱动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 Yuhu, ZHOU Jifu. The advance in the scaling criteria of physical simulation for the complex flows system in reservoir [J]. Advances in Mechanics, 2009, 39(1): 58-68.
- [11] 闫存章, 秦积舜, 郭文敏, 等. 水驱油藏含水率及采出程度相似理论研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2005, 29(1): 56-61.  
YAN Cunzhang, QIN Jishun, GUO Wenmin, et al. Similarity theory of recovery percent and water cut in water flooding reservoir [J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science, 2005, 29(1): 56-61.
- [12] BAI Yuhu, LI Jiachun, LI Qingping. Sensitivity analysis of the dimensionless parameters in scaling a polymer flooding reservoir [J]. Transport in Porous Media, 2008, 73(5): 21-37.
- [13] 王冰冰. 孤岛中二油藏蒸汽驱相似准则研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2010.  
WANG Bingbing. Similarity criterion study of steam flooding in Gudao Zhongerzhong reservoir [D]. Dongying: China University of Petroleum (East China), 2010.
- [14] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 30-100.  
HUANG Yanzhang. Study on seepage mechanism of low permeability oil layer [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 30-100.
- [15] 黄延章, 杨正明, 何英, 等. 低渗透多孔介质中的非线性渗流理论[J]. 力学与实践, 2013, 35(5): 1-8.  
HUANG Yanzhang, YANG Zhengming, HE Ying, et al. Nonlinear porous flow in low permeability porous media [J]. Mechanics in Engineering, 2013, 35(5): 1-8.

- [16] 徐运亭,徐启,郭永贵,等.低渗透油藏渗流机理研究及应用[M].北京:石油工业出版社,2006:15-64.  
XU Yunting, XU Qi, GUO Yonggui, et al. Study and application of porous flow mechanism in low permeability reservoirs [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2006: 15-64.
- [17] 计秉玉,赵宇,宋考平,等.低渗透油藏渗流物理特征的几点新认识[J].石油实验地质,2015,37(2):129-133.  
JI Bingyu, ZHAO Yu, SONG Kaoping, et al. New insights into the physical percolation features of low-permeability reservoirs [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2015, 37(2): 129-133.
- [18] 李玉丹,董平川,张荷,等.低渗透油藏渗透率及启动压力梯度应力敏感性分析[J].油气地质与采收率,2016,23(6):57-63.  
LI Yudan, DONG Pingchuan, ZHANG He, et al. Stress sensitivity analysis of permeability and threshold pressure gradient in low-permeability reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(6): 57-63.
- [19] 朱苏青,王洪君,陈江,等.中东地区孔洞型碳酸盐岩油藏非线性渗流机理[J].大庆石油地质与开发,2016,35(4):88-92.  
ZHU Suqing, WANG Hongjun, CHEN Jiang, et al. Nonlinear flow mechanism of the vuggy carbonate oil reservoirs in Middle East [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(4): 88-92.
- [20] 杨仁锋,姜瑞忠,刘世华,等.特低渗透油藏非线性渗流数值模拟[J].石油学报,2011,32(2):299-306.  
YANG Renfeng, JIANG Ruizhong, LIU Shihua, et al. Numerical simulation of nonlinear seepage in ultra-low permeability reservoirs [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(2): 299-306.
- [21] 赵伦,陈焯菲,宁正福,等.异常高压碳酸盐岩油藏应力敏感实验评价——以滨里海盆地肯基亚克裂缝孔隙型低渗透碳酸盐岩油藏为例[J].石油勘探与开发,2013,40(2):194-200.  
ZHAO Lun, CHEN Yefei, NING Zhengfu, et al. Stress sensitive experiments for abnormal overpressure carbonate reservoirs: A case from the Kenkiyak low-permeability fractured-porous oilfield in the littoral Caspian Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(2): 194-200.
- [22] 丰定国.工程结构抗震[M].北京:地震出版社,2002.  
FENG Dingguo. Engineering structure anti-seismic [M]. Beijing: Earthquake Press, 2002.
- [23] 陈祖安,伍向阳,孙德明,等.砂岩渗透率随静压力变化的关系研究[J].岩石力学与工程学报,1995,14(2):155-159.  
CHEN Zu'an, WU Xiangyang, SUN Deming, et al. Study on relationship between permeability of sandstone and hydrostatic pressure [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1995, 14(2): 155-159.
- [24] 张睿,宁正福,杨峰,等.页岩应力敏感实验与机理[J].石油学报,2015,36(2):224-231.  
ZHANG Rui, NING Zhengfu, YANG Feng, et al. Shale stress sensitivity experiment and mechanism [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(2): 224-231.

编辑 王星

(上接第81页)

- [12] 汪益宁,李洪,曹淑慧,等.各向异性底水油藏长水平井产能公式[J].油气地质与采收率,2016,23(4):108-111,116.  
WANG Yining, LI Hong, CAO Shuhui, et al. Productivity formula of long horizontal well in anisotropic bottom-water reservoir [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2016, 23(4): 108-111, 116.
- [13] 汤勇,刘琦.低渗透应力敏感性油藏的合理开发[J].油气地质与采收率,2017,24(4):105-109.  
TANG Yong, LIU Qi. Rational exploitation in low permeability oil reservoir with stress sensitivity [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2017, 24(4): 105-109.
- [14] 孙兵,刘立峰,丁江辉.致密油水平井产能主控地质因素研究[J].特种油气藏,2017,24(2):115-119.  
SUN Bing, LIU Lifeng, DING Jianghui. Main geologic factors controlling the productivity of horizontal wells in tight oil reservoirs [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2017, 24(2): 115-119.
- [15] 刘忠群.鄂尔多斯盆地大牛地致密砂岩气田水平井开发气藏工程优化技术[J].石油与天然气地质,2016,37(2):261-266.  
LIU Zhongqun. Engineering optimization technique of horizontal well development for Daniudi tight sandstone gas field in Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 261-266.
- [16] 宋付权,刘慈群.低渗透油藏中水平井的非牛顿幂律流体不稳  
定渗流的研究[J].油气井测试,2000,9(1):1-6.  
SONG Fuquan, LIU Ciqun. Study of unsteady flow of non-Newtonian power law liquid in horizontal wells of low permeability reservoir [J]. Well Testing, 2000, 9(1): 1-6.
- [17] 纪天亮,卢双舫,唐明明,等.致密油藏水平井压裂后产能预测方法[J].大庆石油地质与开发,2016,35(2):165-169.  
JI Tianliang, LU Shuangfang, TANG Mingming, et al. Productivity predicting method of the fractured horizontal well in the tight oil reservoirs [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2016, 35(2): 165-169.
- [18] 张善杰.矢量分析、圆柱函数和球函数[M].南京:南京大学出版社,2011:169-170.  
ZHANG Shanjie. Vector analysis, cylindrical function and spherical function [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2011: 169-170.
- [19] 邓英尔,刘慈群.两相流体椭圆渗流数学模拟与开发计算方法[J].石油学报,1999,20(5):48-53.  
DENG Yinger, LIU Ciqun. Mathematical simulation of two phase percolation in the direction of normal of ellips and calculation of development indexes [J]. Acta Petrolei Sinica, 1999, 20(5): 48-53.

编辑 常迎梅