

特低渗透油藏水驱油物理模拟相似准则的推导和应用

滕起¹, 杨正明^{1,2}, 刘学伟², 熊生春², 于荣泽^{2,3}, 冯骋¹

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
3. 国家能源页岩气研发(实验)中心, 河北廊坊 065007

摘要 为了完善水驱油物理模拟相似理论, 本文在前人研究基础上, 针对特低渗透油藏的特点, 并考虑特低渗透油藏中流体非线性渗流特征的基本方程, 应用检验分析法推导出了特低渗透油藏水驱油物理模拟相似准则, 分析了各相似准数的物理意义, 确定了模型参数与油藏参数进行转换的关系。提出通过选取与实际油藏储层对应的露头岩心, 可以实现模型与原型中两相渗流特征、毛管力特征和非线性渗流特征的相似。所得结论为特低渗透油藏水驱油物理模拟提供了理论指导。

关键词 特低渗透; 物理模拟; 相似理论; 水驱油

中图分类号 TE312

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.09.006

Similar Criteria Derivation for the Physical Simulation of Water Flooding in the Plate Model of Ultra-low Permeability Reservoir and Its Applications

TENG Qi¹, YANG Zhengming^{1,2}, LIU Xuewei², XIONG Shengchun², YU Rongze^{2,3}, FENG Cheng¹

1. Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Langfang 065007, Hebei Province, China
2. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development-Langfang, Langfang 065007, Hebei Province, China
3. National Energy Shale Gas R&D (Experiment) Center, Langfang 065007, Hebei Province, China

Abstract In order to improve the water flooding physical simulation similar theory, on the basis of previous studies, the similarity rules of water flooding in the ultra-low permeability reservoir are deduced with the basic equation considering the nonlinear seepage characteristic of fluid in ultra-low permeability reservoirs. By using the inspectional analysis method, the physical significance of each similar rule is analyzed, and the conversion relationships between the model parameters and reservoir parameters are determined. Through the selection of the corresponding outcrop rock with the actual reservoir, the simulation scheme is able to realize the similarity of two phase flow characteristics, capillary force characteristics, and nonlinear seepage characteristics in between the model and the reservoir prototype. The conclusions are able to provide the theoretical guidance for the physical simulation of water flooding in the ultra-low permeability reservoirs.

Keywords ultra-low permeability; physical simulation; similar theory; water flooding

0 引言

利用检验分析法对油藏水驱油过程进行相似理论研究是从 Geertsma 开始的。其后, 国内外许多学者对水驱油系统相似准则也都进行了不同方面的研究。Geertsma 等^[1]用检查

分析法和量纲分析法导出了冷水驱、热水驱和溶剂驱的相似准则, 并且进行了可行性讨论。Perkins 等^[2]在两相流动控制方程的基础上推导出水驱油的相似参数, 提出了用折算饱和度和折算渗透率表示相渗曲线, 以解决不同多孔介质和驱替体

收稿日期: 2012-11-16; 修回日期: 2013-01-16

基金项目: 国家油气重大专项(2011ZX05013-006)

作者简介: 滕起, 博士研究生, 研究方向为特低渗透油藏渗流理论, 电子信箱: tengqi09@163.com

系中相渗曲线形状差异很大的问题。Khan 等^[3]采用模型实验研究底水锥进情况,认为除非把油井的产量控制在经济极限以下,否则是不可能消除底水锥进的。田启华等^[4]根据考虑重力和毛细管力的油、水两相油藏数学模型,运用方程量纲分析方法,找出了影响厚油层水驱油过程的相似准数。孔祥言等^[5]以五点法井网为基础,推导了水驱油物理模拟相似准则,推导过程中忽略重力影响、且假定束缚水和残余油饱和度在全场是均匀分布。朱志宏^[6]详细探讨了低压物理模拟水驱的可行性,认为无论是高压模型还是低压模型都没有完全模拟油藏弹性能量。白玉湖等^[7]提出了相似参数的敏感性分析方法,为定量确定水驱油物理模拟主要相似参数,实现部分相似提供了理论依据和设计原则。沈瑞等^[8]以相似理论为基础,考虑拟启动压力梯度的一维油水两相渗流控制方程研究了油水两相渗流模拟试验理论。

特低渗透油藏中流体渗流出现非线性渗流现象^[9-16],流体渗流规律不再符合达西定律。针对特低渗透油藏中流体渗流的这一特点,从考虑特低渗透油藏中流体非线性渗流特征的基本方程出发,应用检验分析法推导出了特低渗透油藏水驱油物理模拟相似准则,分析了各相似准数的物理意义,完善了水驱油物理模拟相似理论。

1 基本假设和基本方程

1.1 基本假设

假设:(1) 驱替过程是等温的;(2) 多孔介质中流体流动满足非线性渗流方程;(3) 地层是均质和等厚度的;(4) 储层岩石和流体的微可压缩;(5) 油水的黏度保持不变;(6) 束缚水饱和度和残余油饱和度在全流场是均匀的;(7) 考虑毛管力和重力的影响。

1.2 基本方程:

根据杨清立等^[17]提出的描述流体在特低渗透油藏中渗流规律的非线性渗流模型:

$$v = \frac{K}{\mu} \nabla P \left(1 - \frac{1}{a+b|\nabla P|} \right)$$

其中, v 为渗流速度, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$; K 为多孔介质的绝对渗透率, μm^2 ; ∇P 为岩心柱两端压力梯度, $10^5 \text{Pa} \cdot \text{cm}^{-1}$; a 为拟合系数, 无量纲; b 为拟合系数, $10^{-5} \text{Pa}^{-1} \cdot \text{cm}$; μ 为流体黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$ 。

储层岩石基质中油水两相控制方程可分别写成如下形式:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_w K_w}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \left(1 - \frac{1}{a+b \frac{\partial P_w}{\partial x}} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho_w K_w}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial y} \left(1 - \frac{1}{a+b \frac{\partial P_w}{\partial y}} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_w K_w}{\mu_w} \frac{\partial (P_w - \rho_w g z)}{\partial z} \left(1 - \frac{1}{a+b \frac{\partial (P_w - \rho_w g z)}{\partial z}} \right) \right] = \\ & \partial(\phi \rho_w S_w) / \partial t \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\rho_w K_w}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial x} \left(1 - \frac{1}{a+b \frac{\partial P_w}{\partial x}} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\rho_w K_w}{\mu_w} \frac{\partial P_w}{\partial y} \left(1 - \frac{1}{a+b \frac{\partial P_w}{\partial y}} \right) \right] + \\ & \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\rho_w K_w}{\mu_w} \frac{\partial (P_w - \rho_w g z)}{\partial z} \left(1 - \frac{1}{a+b \frac{\partial (P_w - \rho_w g z)}{\partial z}} \right) \right] = \\ & \partial(\phi \rho_w S_w) / \partial t \end{aligned} \quad (2)$$

其中, K_o 为模型中油相渗透率, μm^2 ; K_w 为模型中水相渗透率, μm^2 ; μ_o 为模型中油相黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; μ_w 为模型中水相黏度, $\text{mPa} \cdot \text{s}$; P_o 为油相压力, 10^5Pa ; P_w 为水相压力, 10^5Pa ; ρ_o 为模型中油相密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_w 为模型中水相密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ϕ 为模型孔隙度, 无量纲; g 为模型中重力加速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$; S_o 为模型中油相饱和度, 无量纲; S_w 为模型中水相饱和度, 无量纲。

状态方程

$$\rho_o = \rho_{o0} [1 + C_o (P_o - P_{o0})] \quad (3)$$

$$\rho_w = \rho_{w0} [1 + C_w (P_w - P_{w0})] \quad (4)$$

$$\phi = \phi_0 \left[1 + C_\phi \left(\frac{P_o + P_w}{2} - \frac{P_{o0} + P_{w0}}{2} \right) \right] \quad (5)$$

其中, ρ_{o0} 为油藏原始压力下油相密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; P_{o0} 为油藏原始状态下油相压力, 10^5Pa ; ρ_{w0} 为油藏原始压力下水相密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; P_{w0} 为油藏原始状态下水相压力, 10^5Pa ; ϕ_0 为油藏原始状态下孔隙度, 无量纲; C_ϕ 为岩石压缩系数, 10^{-5}Pa^{-1} 。

毛管力方程

$$P_c = P_o - P_w = \sigma \cos \theta \sqrt{\phi_0 / K} J(S_w) \quad (6)$$

其中, σ 为模型中界面张力, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; θ 为模型中润湿角, $^\circ$; $J(S_w)$ 为模型中 J 函数, 无量纲。

饱和度方程:

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

初始条件:

$$\begin{aligned} P_o|_{t=0} &= P_{o0} \\ S_w|_{t=0} &= S_{w0} \end{aligned} \quad (8)$$

外边界条件:

推导中认为图 1 中油藏的 4 个边界为封闭边界, 则在封

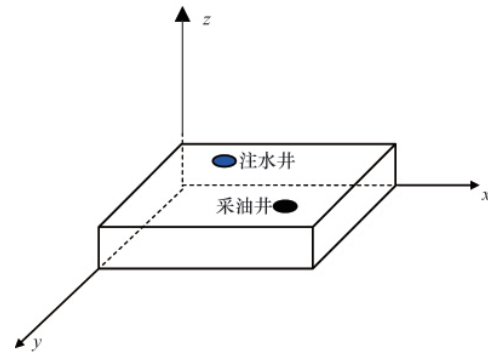


图 1 油藏原型示意

Fig. 1 Schema of reservoir prototype

闭边界处有

$$\frac{\partial P_o}{\partial x} = 0, \frac{\partial P_o}{\partial y} = 0, \frac{\partial P_o}{\partial z} + \rho_o g = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial P_w}{\partial x} = 0, \frac{\partial P_w}{\partial y} = 0, \frac{\partial P_w}{\partial z} + \rho_w g = 0 \quad (10)$$

内边界条件:

注水井定注水量 q_1 , 在注水井处油相源汇项为 0, 水相源汇项为 $\rho_w q_1$;

生产井定井底流压 P_{wf} .

2 相似准则的推导

引入无因次自变量:

$$x_D = \frac{x}{x_R} \quad y_D = \frac{y}{y_R} \quad z_D = \frac{z}{z_R}$$

$$t_D = \frac{q_1 t}{\phi_0 x_R y_R z_R (1 - S_{cw} - S_{ro})} = \frac{q_1 t}{\phi_0 x_R y_R z_R \Delta S}$$

无因次因变量:

$$P_{oD} = \frac{P_o K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \quad P_{wD} = \frac{P_w K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \quad P_{cD} = \frac{P_c K_{row} z_R}{q_1 \mu_w}$$

另外, 引入以下无因次参量:

$$\mu_{oD} = \frac{\mu_o}{\mu_w} \quad \rho_{oD} = \frac{\rho_o}{\rho_w} \quad \rho_{wD} = \frac{\rho_w}{\rho_w} \quad c_{oD} = \frac{c_o q_1 \mu_w}{K_{row} z_R} \quad c_{wD} = \frac{c_w q_1 \mu_w}{K_{row} z_R}$$

$$c_{\phi D} = \frac{c_{\phi} q_1 \mu_w}{K_{row} z_R} \quad P_{w0D} = \frac{P_{w0} K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \quad P_{o0D} = \frac{P_{o0} K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \quad P_{wfD} = \frac{P_{wf} K_{row} z_R}{q_1 \mu_w}$$

含水饱和度和相对渗透率归一化处理:

$$\bar{S}_w = \frac{S_w - S_{cw}}{1 - S_{cw} - S_{ro}} = \frac{S_w - S_{cw}}{\Delta S} \quad K_{oD} = \frac{K_o}{K_{cwo}} \quad K_{wD} = \frac{K_w}{K_{cwo}}$$

其中, $\Delta S = 1 - S_{cw} - S_{ro}$, x_R, y_R, z_R 分别为油藏 3 个方向的特征长度; S_{cw}, S_{ro} 分别为束缚水饱和度和残余油饱和度, 无量纲; K_{cwo}, K_{row} 分别为束缚水条件下的油相的渗透率和残余油条件下水相的渗透率。

把这些表达式带到储层岩石基质中油相控制方程中, 得到

$$\frac{\rho_{oD} K_{cwo} q_1 \mu_w}{x_R^2 \mu_w K_{row} z_R} \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\frac{\rho_{oD} K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{x_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D} \right) \right] +$$

$$\frac{\rho_{oD} K_{cwo} q_1 \mu_w}{y_R^2 \mu_w K_{row} z_R} \frac{\partial}{\partial y_D} \left[\frac{\rho_{oD} K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{y_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D} \right) \right] +$$

$$\frac{\rho_{oD} K_{cwo} q_1 \mu_w}{z_R^2 \mu_w K_{row} z_R} \frac{\partial}{\partial z_D} \left[\frac{\rho_{oD} K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial \left(P_{oD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{oD} g z_R z_D \rho_{oD} \right)}{\partial z_D} \right.$$

$$\left. \left[1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{z_R K_{row} z_R} \frac{\partial \left(P_{oD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{oD} g z_R z_D \rho_{oD} \right)}{\partial z_D} \right] \right] =$$

$$\frac{\rho_{oD} q_1}{\phi_0 x_R y_R z_R} \frac{\partial (\phi \rho_{oD} \bar{S}_o)}{\partial t_D} + \frac{\rho_{oD} q_1 S_{ro}}{\phi_0 x_R y_R z_R \Delta S} \frac{\partial (\phi \rho_{oD})}{\partial t_D} \quad (11)$$

式(11)两边同时除以 $\frac{\rho_{oD} q_1}{x_R y_R z_R}$, 整理得

$$\frac{K_{cwo}}{K_{row}} \frac{y_R}{x_R} \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\frac{\rho_{oD} K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{x_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D} \right) \right] + \frac{K_{cwo}}{K_{row}} \frac{x_R}{y_R} \frac{\partial}{\partial y_D} \left[\frac{\rho_{oD} K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{y_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D} \right) \right] +$$

$$\frac{K_{cwo}}{K_{row}} \frac{x_R y_R}{z_R^2} \frac{\partial}{\partial z_D} \left[\frac{\rho_{oD} K_{oD}}{\mu_{oD}} \frac{\partial \left(P_{oD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{oD} g z_R z_D \rho_{oD} \right)}{\partial z_D} \right.$$

$$\left. \left[1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{z_R K_{row} z_R} \frac{\partial \left(P_{oD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{oD} g z_R z_D \rho_{oD} \right)}{\partial z_D} \right] \right] =$$

$$\frac{1}{\phi_0} \frac{\partial (\phi \rho_{oD} \bar{S}_o)}{\partial t_D} + \frac{S_{ro}}{\phi_0 \Delta S} \frac{\partial (\phi \rho_{oD})}{\partial t_D} \quad (12)$$

同理, 采用同样的方法对储层岩石基质中水相控制方程进行处理, 得

$$\frac{\rho_{wD} K_{row} q_1 \mu_w}{x_R^2 \mu_w K_{row} z_R} \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{x_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D} \right) \right] +$$

$$\frac{\rho_{wD} K_{row} q_1 \mu_w}{y_R^2 \mu_w K_{row} z_R} \frac{\partial}{\partial y_D} \left[\rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{y_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D} \right) \right] +$$

$$\frac{\rho_{wD} K_{row} q_1 \mu_w}{z_R^2 \mu_w K_{row} z_R} \frac{\partial}{\partial z_D} \left[\rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial \left(P_{wD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{wD} g z_R z_D \rho_{wD} \right)}{\partial z_D} \right.$$

$$\left. \left[1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{z_R K_{row} z_R} \frac{\partial \left(P_{wD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{wD} g z_R z_D \rho_{wD} \right)}{\partial z_D} \right] \right] =$$

$$\frac{\rho_{wD} q_1}{\phi_0 x_R y_R z_R} \frac{\partial (\phi \rho_{wD} \bar{S}_w)}{\partial t_D} + \frac{\rho_{wD} q_1 S_{cw}}{\phi_0 x_R y_R z_R \Delta S} \frac{\partial (\phi \rho_{wD})}{\partial t_D} \quad (13)$$

式(13)两边分别除以 $\frac{\rho_{wD} q_1}{x_R y_R z_R}$, 整理得

$$\frac{y_R}{x_R} \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{x_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D} \right) \right] +$$

$$\frac{x_R}{y_R} \frac{\partial}{\partial y_D} \left[\rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D} \left(1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{y_R K_{row} z_R} \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D} \right) \right] +$$

$$\frac{x_R y_R}{z_R^2} \frac{\partial}{\partial z_D} \left[\rho_{wD} K_{wD} \frac{\partial \left(P_{wD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{wD} g z_R z_D \rho_{wD} \right)}{\partial z_D} \right.$$

$$\left. \left[1 - \frac{1}{a+b} \frac{q_1 \mu_w}{z_R K_{row} z_R} \frac{\partial \left(P_{wD} - \frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{wD} g z_R z_D \rho_{wD} \right)}{\partial z_D} \right] \right] =$$

$$\frac{1}{\phi_0} \frac{\partial (\phi \rho_{wD} \bar{S}_w)}{\partial t_D} + \frac{S_{cw}}{\phi_0 \Delta S} \frac{\partial (\phi \rho_{wD})}{\partial t_D} \quad (14)$$

状态方程无量纲化, 得到

$$\rho_{od}=1+C_{od}(P_{od}-P_{oD}) \quad (15)$$

$$\rho_{wd}=1+C_{wd}(P_{wd}-P_{wD}) \quad (16)$$

$$\phi=\phi_0\left[1+C_{\phi D}\left(\frac{P_{od}+P_{wd}}{2}-\frac{P_{oD}+P_{wD}}{2}\right)\right] \quad (17)$$

毛管力方程无量纲化,得到

$$P_{cD}=P_{oD}-P_{wD}=\frac{\sigma\sqrt{\phi_0 K} \cos\theta K_{rw} z_R}{q_1 \mu_w} J(\bar{S}_w) \quad (18)$$

饱和度方程

$$\bar{S}_o+\bar{S}_w=1 \quad (19)$$

初始条件

$$P_{oD}|_{t_0=0}=P_{oD} \quad (20)$$

$$\bar{S}_w|_{t=0}=\bar{S}_{wi}$$

外边界条件

$$\frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D}=0 \quad \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D}=0 \quad \frac{\partial P_{oD}}{\partial z_D}+\frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{oD} g z_R \rho_{oD}=0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D}=0 \quad \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D}=0 \quad \frac{\partial P_{wD}}{\partial z_D}+\frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{wD} g z_R \rho_{wD}=0 \quad (22)$$

内边界条件:注水井定注水量 q_1 , 相当与在注水井处油相源汇项为 0, 水相源汇项为 $\frac{\rho_w q_1}{\Delta x \Delta y \Delta z}$ 除以 $\frac{\rho_w q_1}{x_R y_R z_R}$ 无因次化, 得到水相无因次源汇项为

$$\frac{x_R y_R z_R}{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

生产井定井底流压 p_{wf} , 无因次化得到无因次井底流压为

$$p_{wD}=\frac{p_{wf} K_{row} z_R}{q_1 \mu_w}$$

至此, 就可以得到水驱油体系无量纲控制方程组。

岩石基质中无量纲油相控制方程

$$\pi_1 \pi_2 \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\frac{\rho_{oD} \pi_{22}}{\pi_9} \frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D} \left(1 - \frac{1}{\pi_{18} + \pi_{19}} \frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D} \right) \right] + \frac{\pi_1}{\pi_2} \cdot$$

$$\frac{\partial}{\partial y_D} \left[\frac{\rho_{oD} \pi_{22}}{\pi_9} \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D} \left(1 - \frac{1}{\pi_{18} + \pi_{20}} \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D} \right) \right] +$$

$$\pi_1 \pi_2 \pi_3^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left[\frac{\rho_{oD} \pi_{22}}{\pi_9} \left(\frac{\partial P_{oD}}{\partial z_D} - \pi_{10} \rho_{oD} \right) \cdot$$

$$\left[1 - \frac{1}{\pi_{18} + \pi_{21}} \left(\frac{\partial P_{oD}}{\partial z_D} - \pi_{10} \rho_{oD} \right) \right] =$$

$$\frac{1}{\pi_7} \frac{\partial(\phi \rho_{oD} \bar{S}_o)}{\partial t_D} + \frac{\pi_4}{\pi_7 \pi_6} \frac{\partial(\phi \rho_{oD})}{\partial t_D} \quad (23)$$

岩石基质中无量纲水相控制方程为

$$\pi_2 \frac{\partial}{\partial x_D} \left[\rho_{wD} \pi_{23} \frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D} \left(1 - \frac{1}{\pi_{18} + \pi_{19}} \frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D} \right) \right] + \frac{1}{\pi_2} \cdot$$

$$\frac{\partial}{\partial y_D} \left[\rho_{wD} \pi_{23} \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D} \left(1 - \frac{1}{\pi_{18} + \pi_{20}} \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D} \right) \right] +$$

$$\pi_2 \pi_3^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left[\rho_{wD} \pi_{23} \left(\frac{\partial P_{wD}}{\partial z_D} - \pi_{11} \rho_{wD} \right) \cdot$$

$$\left[1 - \frac{1}{\pi_{18} + \pi_{21}} \left(\frac{\partial P_{wD}}{\partial z_D} - \pi_{11} \rho_{wD} \right) \right] =$$

$$\frac{1}{\pi_7} \frac{\partial(\phi \rho_{wD} \bar{S}_w)}{\partial t_D} + \frac{\pi_5}{\pi_7 \pi_6} \frac{\partial(\phi \rho_{wD})}{\partial t_D} \quad (24)$$

无量纲状态方程

$$\rho_{oD}=1+\pi_{12}(P_{oD}-\pi_{15}) \quad (25)$$

$$\rho_{wD}=1+\pi_{13}(P_{wD}-\pi_{16}) \quad (26)$$

$$\phi=\pi_7 \left[1 + \pi_{14} \left(\frac{P_{oD} + P_{wD}}{2} - \frac{\pi_{15} + \pi_{16}}{2} \right) \right] \quad (27)$$

无量纲毛管力方程

$$P_{cD}=P_{oD}-P_{wD}=\pi_8 \pi_{24} \quad (28)$$

无量纲饱和度方程

$$\bar{S}_o + \bar{S}_w = 1 \quad (29)$$

无量纲初始条件:

$$P_{oD}|_{t_0=0}=\pi_{15} \quad (30)$$

$$\bar{S}_w|_{t=0}=\frac{\pi_{25}-\pi_4}{\pi_6}$$

无量纲外边界条件:

$$\frac{\partial P_{oD}}{\partial x_D}=0 \quad \frac{\partial P_{oD}}{\partial y_D}=0 \quad \frac{\partial P_{oD}}{\partial z_D}+\pi_{10} \rho_{oD}=0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial P_{wD}}{\partial x_D}=0 \quad \frac{\partial P_{wD}}{\partial y_D}=0 \quad \frac{\partial P_{wD}}{\partial z_D}+\pi_{11} \rho_{wD}=0 \quad (32)$$

无量纲内边界条件:

在注水井处油相源汇项为 0, 水相源汇项为

$$\frac{x_R y_R z_R}{\Delta x \Delta y \Delta z}$$

生产井无因次井底流压为

$$p_{wD}=\frac{p_{wf} K_{row} z_R}{q_1 \mu_w}$$

由以上分析可以得到特低渗透油藏水驱油物理模拟相似准数共有以下 25 个:

$$\pi_1=\frac{K_{cwo}}{K_{row}}, \text{ 为束缚水条件下油相渗透率和残余油条件下}$$

$$\text{水相渗透率之比; } \pi_2=\frac{y_R}{x_R}, \pi_3=\frac{x_R}{z_R}, \text{ 为表征几何相似的准数;}$$

$$\pi_4=S_{cw}, \text{ 为束缚水饱和度; } \pi_5=S_w, \text{ 为残余油饱和度; } \pi_6=\Delta S, \text{ 为可}$$

$$\text{动油饱和度; } \pi_7=\phi_0, \text{ 为原始状态下储层的平均孔隙度; } \pi_8=\frac{\sigma\sqrt{\phi_0 K} \cos\theta K_{row} z_R}{q_1 \mu_w}, \text{ 为毛管力和注入量为 } q_1 \text{ 时的驱动压差}$$

$$\text{之比; } \pi_9=\frac{\mu_o}{\mu_w}, \text{ 为油水黏度之比; } \pi_{10}=\frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \rho_{oD} g z_R, \pi_{11}=\frac{K_{row} z_R}{q_1 \mu_w} \cdot$$

$$\rho_{wD} g z_R, \text{ 分别为油相和水相重力和驱动力之比; } \pi_{12}=\frac{C_o q_1 \mu_w}{K_{row} z_R},$$

$$\pi_{13}=\frac{C_w q_1 \mu_w}{K_{row} z_R}, \pi_{14}=\frac{C_\phi q_1 \mu_w}{K_{row} z_R}, \text{ 分别为注入量为 } q_1 \text{ 时的驱动压差}$$

引起的油、水和岩石体积相对变化量; $\pi_{15} = \frac{P_{00}K_{row}z_R}{q_1\mu_w}$, $\pi_{16} = \frac{P_wK_{row}z_R}{q_1\mu_w}$, 分别为油相和水相在原始地层压力下和在注入量为 q_1 时的驱动压差之比; $\pi_{17} = \frac{P_{wf}K_{row}z_R}{q_1\mu_w}$, 表示在生产井井底流压和在注入量为 q_1 时的驱动压差之比; $\pi_{18} = a$, $\pi_{19} = b - \frac{q_1\mu_w}{x_R K_{row}z_R}$, $\pi_{20} = b - \frac{q_1\mu_w}{y_R K_{row}z_R}$, $\pi_{21} = b - \frac{q_1\mu_w}{z_R K_{row}z_R}$, 表示低渗透储层中流体渗流非线性渗流特征的相似准数; $\pi_{22} = \frac{K_0}{K_{c00}}$, $\pi_{23} = \frac{K_w}{K_{row}}$, 分别表示无因次油相和水相渗透率曲线; $\pi_{24} = J(\bar{S}_w)$, 表示无因次 J 函数曲线; $\pi_{25} = S_{wi}$, 表示初始含水饱和度。

以上 25 个相似准数中, π_{18} 、 π_{19} 、 π_{20} 、 π_{21} 是表征低渗透储层中流体渗流非线性渗流特征的相似准数, 是特低渗透油藏水驱油实验中区别于中、高渗透油藏水驱油实验所应该重点考虑的。其中, $\pi_{18} = a$ 表明影响非线性渗流凹形曲线段的影响因子 a 在模型中和原型中必须相等, 这是实验能反映原型非线性流动规律的必要条件; π_{19} 、 π_{20} 、 π_{21} 中 b 相当于非达西模型中拟启动压力梯度的倒数; 表达式 $\frac{q_1\mu_w}{x_R K_{row}z_R}$, $\frac{q_1\mu_w}{y_R K_{row}z_R}$, $\frac{q_1\mu_w}{z_R K_{row}z_R}$ 分别代表 x 、 y 、 z 方向的压力梯度, 这 3 个相似准数同时满足是实验能反映原型非线性流动规律的必要条件。

3 模型与原型之间参数换算关系的确定

在两相流动物理模拟中, 若模型与原型采用相同的孔隙介质, 可以保证模型中反映两相流动规律的相渗曲线、毛管力曲线与原型相同, 对于特低渗透储层, 还可以同时保证非线性渗流特征相同; 若无法满足模型与原型采用相同的孔隙介质, 则很难同时满足这 3 个方面, 那么模型与原型流动结果没有对比价值。从以上 25 个相似准则来看, π_1 、 π_8 、 π_{10} 、 π_{11} 、 π_{12} 、 π_{13} 、 π_{14} 、 π_{15} 、 π_{16} 、 π_{17} 、 π_{22} 、 π_{23} 是含有 K_{c00} 或 K_{row} 的受相渗规律影响的准则; π_{24} 是反映毛管力曲线特征的准则; π_{18} 、 π_{19} 、 π_{20} 、 π_{21} 是反映特低渗透储层非线性渗流特征的参数。与这 3 个方面相关的准数共有 17 个, 说明了其在物理模拟中的重要性。

π_7 是反映储层孔隙度的准则, 若模型与原型采用相同的孔隙介质, 这一准则自动满足。

π_4 、 π_5 、 π_6 、 π_{25} 是反映储层饱和度特征的准则, 若模型与原型采用相同的孔隙介质, 在实验过程中容易实现。

π_2 、 π_3 是反映几何尺寸特征的准则, 在实验过程中容易实现。

π_9 是反映两相流体黏度比例的准则, 在模拟实验中容易实现。

满足了模型与原型采用相同的孔隙介质后, 下面以某实际油田井组物理模拟实验为例来说明模型与原型之间参数

换算关系如何确定。

为了达到实验室条件下模拟油藏生产的需要, 要求模型长度相对于原型长度要缩小。在井组物理模拟实验中, 所研究井组长度为 700m, 宽度为 532m。实验室模型长度最大可做到 50cm, 从而可以确定长度比尺为 1400 倍, 即模型长度比尺为 1400。由此确定模型宽度为 38cm。

由 π_{10} 、 π_{11} 可知, 在保证流体密度和黏度不变的情况下若要满足这两个相似准则, 则注水速度比尺应为长度比尺的平方, 其值为 1.96×10^6 。按井组注水井注水强度 $40 \text{ m}^3/\text{d}$ 计算, 模型注水速度应为 $0.014 \text{ mL}/\text{min}$ 。实验室内可以通过高精度驱替泵实现。

由注水速度的定义, 可求得时间比尺为长度比尺的立方除以注水速度比尺, 其值为 1400, 即模型生产 1d, 对应油藏生产 1400d。由此可得模型预测油藏生产 50a 需要约 13d。

由 π_{15} 、 π_{16} 、 π_{17} 可知, 若要满足这 3 个相似准则, 则模型中所有压力缩小了 1400 倍。

π_8 是反映和毛管力有关的相似准数, 在长度比尺和注水速度比尺都已经确定的情况下, 若想同时满足这一相似准则, 需要把油水界面张力缩小 1400 倍。在不改变油水黏度和密度的情况下, 可以通过在水中加入高效表面活性剂的方法来实现。

至此, 在模型与原型采用了相同的孔隙介质后, 长度比尺, 压力比尺, 注水速度比尺, 表面张力比尺可以相应确定。满足了以上 25 个相似准则中的 22 个。对于 π_{12} 、 π_{13} 、 π_{14} , 在长度比尺和注水速度比尺都已经确定的情况下, 若想同时满足这 3 个相似准则, 需要把油相、水相和岩石的压缩系数分别提高 1400 倍, 实验室条件下很难满足。

4 结论

(1) 本次水驱油物理模拟相似准则推导过程考虑了特低渗透油藏中流体的非线性渗流特征, 完善了水驱油物理模拟相似理论。 π_{18} 、 π_{19} 、 π_{20} 、 π_{21} 是表征低渗透储层中流体渗流非线性渗流特征的相似准数, 是特低渗透油藏水驱油实验中区别于中、高渗透油藏水驱油实验所应该重点考虑的。

(2) 从力的角度上, 特低渗透油藏的平板模型水驱油实验可同时实现驱动力、黏滞力、毛管力和重力的相似, 很难实现弹性力(即流体和岩石的压缩性)的相似。

(3) 从两相渗流特征的角度上, 通过选取与实际油藏储层对应的露头岩心, 可以实现模型与原型两相渗流特征的相似, 这在物理模拟实验中是至关重要的, 它是模型实验能否反应实际油藏开发特征的重要条件。

参考文献 (References)

- [1] Geertsma J, Croes G A, Schwarz N. Theory of dimensionally scaled models of petroleum reservoirs[J]. AIME, 1956, 207: 118-127.
- [2] Perkins Jr F M, Collins R E. Scaling laws for laboratory flow models of

- oil reservoirs[J]. Journal of Petroleum Technology, 1960, 12(8): 69-71.
- [3] Khan A R. A scale study of water coning[J]. Journal of Petroleum Technology, 1970, 22(6): 771-776.
- [4] 田启华. 厚油层水驱过程的相似准数及其应用[J]. 大庆石油地质与开发, 1983, 2(4): 281-291.
Tian Qihua. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 1983, 2(4): 281-291.
- [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. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6): 56-60.
- [6] 朱志宏. 低压物理模型模拟水驱的可行性[J]. 新疆石油科技, 1997, 7(2): 16-22.
Zhu Zhihong. Xinjiang Petroleum Science and Technology, 1997, 7(2): 16-22.
- [7] 白玉湖, 李家春, 周济福. 水驱油两相流物理模拟相似参数的敏感性分析[J]. 中国科学, E辑: 工程科学 材料科学, 2005, 35(7): 761-772.
Bai Yuhu, Li Jiachun, Zhou Jifu. Science in China, Ser E: Engineering and Materials Science, 2005, 35(7): 761-772.
- [8] 沈瑞, 熊伟, 高树生. 低渗透岩芯水驱油试验相似理论[J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 773-776.
Shen Rui, Xiong Wei, Gao Shusheng. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 773-776.
- [9] 冯文光. 非达西低速渗流的研究现状与进展[J]. 石油勘探与开发, 1986, 13(4): 76-80.
Feng Wenguang. Petroleum Exploration and Development, 1986, 13(4): 76-80.
- [10] 闫庆来, 何秋轩, 尉立岗, 等. 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, 1990, 5(2): 1-6.
Yan Qinglai, He Qiuxuan, Wei Ligang, et al. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1990, 5(2): 1-6.
- [11] 黄延章. 低渗透油层渗流机理[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
Huang Yanzhang. Fluid mechanics in low-permeability reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998.
- [12] 邓英尔. 低渗介质单相与两相流体非达西渗流研究[D]. 廊坊: 中国科学院渗流流体力学研究所, 1999.
Deng Yinger. Low permeability medium single and two phase flow non-Darcy seepage flow research[D]. Langfang: Institute of Porous Flow and Fluid Mechanics, CAS, 1999.
- [13] 吴景春, 袁满, 张继成. 大庆东部低渗透油藏单相流体低速非线性渗流特征[J]. 大庆石油学院院报, 1999, 23(2): 82-85.
Wu Jingchun, Yuan Man, Zhang Jicheng. Journal of Daqing Petroleum Institute, 1999, 23(2): 82-85.
- [14] 陈永敏, 周娟, 刘文香, 等. 低速非达西渗流现象的实验论证[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2000(S1): 59-61.
Chen Yongmin, Zhou Juan, Liu Wenxiang, et al. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2000(S1): 59-61.
- [15] 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.
Yao Yuedong, Ge Jiali. Xinjiang Petroleum Geology, 2000, 21(3): 213-215.
- [16] 贾振岐, 王延峰, 付俊林, 等. 低渗低速下非达西渗流特征及影响因素[J]. 大庆石油学院院报, 2001, 25(3): 73-76.
Jia Zhenqi, Wang Yanfeng, Fu Junlin, et al. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2001, 25(3): 73-76.
- [17] 杨清立, 杨正明, 王一飞, 等. 特低渗透油藏渗流理论研究[J]. 钻采工艺, 2007, 30(6): 52-54.
Yang Qingli, Yang Zhengming, Wang Yifei, et al. Drilling & Production Technology, 2007, 30(6): 52-54.

(责任编辑 刘志远)

· 学术动态 ·

“中国科协年会”简介

中国科协年会是我国科技领域高层次、高水平、大规模的科技盛会。其前身为中国科协学术年会。

1999年,为深入贯彻落实科学发展观,认真落实胡锦涛总书记在纪念中国科协成立50周年大会上的讲话精神,按照中国科协“三服务一加强”的工作定位及“大科普、学科交叉、为举办地服务”的年会定位,以科技创新为主线,以公众、科技工作者、政府和企业为服务对象,围绕交叉学科的前沿学术选题,搭建学术交流活动平台,促进学科交叉融合和科技创新发展;围绕公众和社会普遍关注的科技问题,搭建科普活动平台,进一步形成讲科学、爱科学、用科学的社会风尚;围绕福建省经济社会发展的实际需求,搭建专题论坛活动平台,拓展科技服务经济社会发展和专家建言献策的渠道,为促进经济发展方式转变、确保经济社会平稳较快发展作贡献。