

水驱油局部相似模型的设计及定量评价方法¹⁾

白玉湖 * 周济福 †,2)

*(中海石油研究中心, 北京 100027) †(中国科学院力学研究所, 北京 100190)

摘要 采用相似准数敏感性分析方法, 对各局部相似模型中所放松相似准数的敏感性进行分析, 得到应尽量减少放松的相似准数。提出了定量评价局部相似模型优劣的影响系数, 通过比较该影响系数的大小即可定量评价各局部相似模型。结果表明: 水驱局部相似模型的精度不仅取决于所满足的相似准数的个数, 还与相似准数的相对放松量有关。

关键词 水驱, 局部相似模型, 相似准数, 敏感性分析

中图分类号: TE35 文献标识码: A 文章编号: 1000-0879(2009)02-027-004

DESIGN OF PARTIAL SIMILARITY MODELS AND THEIR EVALUATION METHOD IN WATER FLOODING PHYSICAL SIMULATION¹⁾

BAI Yuhu* ZHOU Jifu^{†,2)}

*(Research Center, Technology Research Dept., China National Offshore Oil Corp., Beijing 100027, China)

†(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract To quantitatively evaluate the partial similarity models of water flooding, a new numerical approach of sensitivity analysis is proposed for the sensitivity of the relaxed dimensionless parameter. The sensitivity factor quantifying the dominance degree of the relaxed dimensionless parameter is defined. By solving the dimensionless governing equations including all dimensionless parameters, the sensitivity factor of each relaxed dimensionless parameter is calculated for each partial similarity model, thus the dominance degree of the relaxed one is quantitatively determined. Based on the sensitivity analysis, the influence coefficient of the partial similarity model is defined as a criterion to evaluate each partial similarity model. The partial similarity model with the smallest influence coefficient can be singled out. Results show that the precision of the partial similarity model is not only determined by the number of dimensionless parameters but also by the relative relaxation quantity.

Key words water flooding, partial similarity model, dimensionless parameter, sensitivity analysis

引言

我国部分油田含水率高达 80% 以上, 为指导油田开发方案的设计和优选, 以提高采收率, 必须对水驱后油气水分布进行精细研究。物理模拟是开展这一研究的重要途径之一, 其理论基础是相似理论^[1]。文献[2~4]从不同角度对水驱油的相似准则进行了研究。Bai 等^[5,6]提出了水驱相似准则敏感性分析方法以定量确定相似准数的主次关系。然而, 由

于多相渗流的复杂性, 物理模拟几乎不可能满足所有的相似准数。Pozzi 等^[7]指出如果精确模拟横向扩散就无法同时满足几何相似要求。Islam 等^[8,9]指出在聚合物驱模拟中不可能同时实现压力降、重力、毛管力、扩散、几何相似等模拟, 必须采用局部相似模型。局部相似模型对于研究某方面的机理是可行的, 但模拟结果是否真正反映了原型及其与原型的差别却是未知的, 仅从理论出发很难对这些局

2008-01-14 收到第 1 稿, 2008-09-24 收到修改稿。

1) 973 项目 (2005CB221300) 和中科院知识创新工程 (KJCX-SW-L08) 资助。

2) 周济福, 男, 1965 年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为环境流体力学, 泥沙运动学及河流动力学等。E-mail: zhoujf@imech.ac.cn

部相似模型做一全面的评价和比较。本文从水驱油的相似准则出发，设计了一系列的局部相似模型，并以所提出的相似准数敏感性分析方法为基础，定量地评价这些水驱油的局部相似模型。

1 水驱油局部相似模型的设计

考虑重力、毛管力、油水和岩石压缩性等因素的水驱油物理模拟相似准则为^[5]

$$\begin{aligned} & \frac{K_{cwo}}{K_{row}}, \frac{K_o}{K_{cwo}}, \frac{K_w}{K_{row}}, \frac{y_R}{x_R}, \frac{x_R}{z_R}, \frac{x_p}{x_R} \\ & \frac{y_p}{y_R}, \frac{r_{eo}}{x_R}, \frac{r_o}{x_R}, \frac{s_{cw}}{\Delta s}, \frac{s_{ro}}{\Delta s} \\ & \frac{s_{wi} - s_{cw}}{\Delta s}, \frac{\sigma \sqrt{\frac{\phi_0}{K}} \cos \theta K_{row} h}{q_I \mu_w} \\ & \frac{\mu_o}{\mu_w}, \frac{\rho_{o0}}{\rho_{w0}}, \frac{K_{row} h}{q_I \mu_w} \rho_{w0} g z_R \\ & \frac{C_o q_I \mu_w}{K_{row} h}, \frac{C_w q_I \mu_w}{K_{row} h}, \frac{C_\phi q_I \mu_w}{K_{row} h} \\ & \frac{p_{w0} K_{row} h}{q_I \mu_w}, \frac{p_{o0} K_{row} h}{q_I \mu_w}, \frac{p_{wf} K_{row} h}{q_I \mu_w} \\ & \frac{p_{oi} K_{row} h}{q_I \mu_w}, J(\bar{s}_w) \end{aligned}$$

把这 24 个无量纲参数依次标记为 $\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_{24}$ 。 π_1 表示束缚水条件下油相渗透率和残余油条件下水相渗透率之比； π_2 和 π_3 分别表示无因次油

相、水相渗透率； π_4 和 π_5 为几何相似准数； $\pi_6, \pi_7, \pi_8, \pi_9$ 分别表示井相对位置和井径相似的参数； π_{10} 和 π_{11} 分别表示束缚水饱和度、残余油饱和度和可流动油饱和度之比； π_{12} 表示初始折算含水饱和度； π_{13} 表示毛管力和层内压差之比； π_{14} 和 π_{15} 分别表示油水黏度和密度之比； π_{16} 表示重力和驱动力之比； $\pi_{17}, \pi_{18}, \pi_{19}$ 分别表示层内压差引起的油、水和岩石体积相对变化量； $\pi_{20}, \pi_{21}, \pi_{22}$ 和 π_{23} 分别表示油水的参考压力、生产井底流压、油层初始压力和层内压差之比； π_{24} 表示无因次毛管力函数。其中 p_o, p_w, p_c 分别为油相、水相压力及毛管力； p_{oi} 为初始压力； p_{o0}, p_{w0} 为油相和水相的参考压力； s_o, s_w 分别为油相和水相的饱和度； μ_o, μ_w 为油和水的动力黏性系数； K 为油层岩石的绝对渗透率； K_o, K_w 分别为油相和水相的有效渗透率； ρ_{o0}, ρ_{w0} 分别为指定的某一压力状态下的油相和水相的密度； C_o, C_w, C_ϕ 分别为油、水和岩石孔隙的压缩系数； ϕ_0 为某一个指定状态下的岩石的孔隙度； g 为重力加速度； x_p, y_p 为生产井的坐标； σ, θ 分别为油相和水相的表面张力和润湿角； r_o 为井眼半径； $J(s_w)$ 为毛管力函数； q_I 表示注入井在单位时间内向油层注入的水的体积。

以水驱油相似准则为基础，设计出以下 8 种局部相似模型，如表 1 所示。

表 1 水驱油局部相似模型设计

Cases	多孔介质	驱替体系	原油	几何条件	压力	相渗关系	岩石压缩性	油水压缩性	重力	压力分布	毛管力	残余油	束缚水
Case1	相同	相同	相同	相似	不同	✓	✗	✗	✓	✓	✗	✓	✓
Case2	相同	相同	相同	相似	相同	✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
Case3	相同	相同	放松	不同		✓	✗	✗	✓	✗	✓	✓	✓
Case4	相同	相同	放松	相同		✓	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
Case5	不同	相同	相同	相似	不同	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Case6	不同	相同	相似	相同		✗	✗	✗	✗	✓	✗	✗	✗
Case7	不同	相同	相同	放松	不同	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Case8	不同	相同	相同	放松	相同	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗	✗

注：✓ 表示可以实现的模拟，✗ 表示不能实现的模拟

在局部相似模型中，Case1 不能满足的相似准数为 $\pi_{13}, \pi_{17}, \pi_{18}, \pi_{19}$ ；Case2 不能满足的相似准数为 π_{16} ；Case3 不能满足的相似准数为 $\pi_5, \pi_{13}, \pi_{17}, \pi_{18}, \pi_{19}$ ；Case4 不能满足的相似准数为 π_5, π_{16} ；Case5 不能满足的相似准数为 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{13}, \pi_{17}, \pi_{18}, \pi_{19}, \pi_{24}$ ；Case6 不能满足的相似准数为 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{13}, \pi_{24}$ ；Case7 不能满足的相似准数为 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{13}, \pi_{17}, \pi_{18}$ ，

π_{19}, π_{24} ；Case8 不能满足的相似准数为 $\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_5, \pi_{10}, \pi_{11}, \pi_{13}, \pi_{24}$ 。以 Case1 为例，对局部相似模型作一阐述。Case1 模型与原型采用相同的孔隙介质，驱替体系相同，几何相似，压力不同。该方法可以模拟重力、黏性力，但不能模拟毛管力及与压力相关的性质（如油水岩石压缩性）的影响。由于采用了相同的多孔介质和驱替体系，因而可以模拟束缚水、残余油饱和度以及油水相对渗透率的影响。

2 局部相似模型的评价

局部相似模型的误差是由不得不对某些相似准数进行放松引起的。由于不同相似准数引入的误差不同，因而有必要对所放松的相似准数进行敏感性分析，确定它们对于局部模型的影响程度。作者曾采用数值实验的方法分析各个相似准数的微小改变对于表征实验结果的目标函数的影响程度^[5]，定义了表征目标函数对相似准数依赖程度的敏感因子 S_i ，通过比较敏感因子的大小来定量判断相似准数的主次关系。在本文中，为评价针对同一个原型所设计的不同的局部相似模型，我们定义影响系数 α

$$\alpha = \sum_i S_i R_i, \quad R_i = \left| \frac{\pi_i - \pi_{ipm}}{\pi_{ipm}} \right| \quad (1)$$

其中 S_i 为局部相似模型中所放松相似准数的敏感因子，其表达式如下

$$S_i = \frac{\partial [f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N) / f_{pm}]}{\partial (\pi_i / \pi_{ipm})}, \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

目标函数

$$f(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N) = \int_0^{T_D} \eta(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N, t_D) dt_D \quad (3)$$

其中 $\eta(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_N, t_D)$ 为采出程度，是所有相似准数及无量纲时间 t_D 的函数； π_i 表示第*i*相似准数；*N*表示完全相似所需满足的相似准数个数；*M*表示局部相似模型中所放松的相似准数个数；下标pm表示原型。 R_i 表示和 S_i 对应的相似准数的相对放松量。影响系数 α 为相似准数的敏感因子和其相对变化量的乘积求和。对一个局部相似模型而言，只要计算出所有放松的相似准数的敏感因子了，即可得到相似模型的影响系数，从而可对局部相似模型进行评价。

3 敏感因子的计算

经过推导，可得无量纲水驱油控制方程为

$$\begin{aligned} & \pi_1 \pi_4 \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\pi_2 \rho_{oD}}{\pi_{14}} \frac{\partial p_{oD}}{\partial x_D} \right) + \frac{\pi_1}{\pi_4} \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\pi_2 \rho_{oD}}{\pi_{14}} \frac{\partial p_{oD}}{\partial y_D} \right) + \\ & \pi_1 \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left(\frac{\pi_2 \rho_{oD}}{\pi_{14}} \frac{\partial p_{oD}}{\partial z_D} \right) + \\ & \pi_{16} \pi_1 \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left(\frac{\pi_{15} \pi_2 \rho_{oD}^2}{\pi_{14}} \right) + \\ & \pi_1 \rho_{oD} \frac{\pi \pi_2 (\pi_{22} - p_{oD})}{2 \pi_{14} \ln \pi_8 / \pi_9} \delta(x_D - \pi_6) \delta(y_D - \pi_7) = \\ & \frac{\partial (\phi_D \rho_{oD} \bar{s}_o)}{\partial t_D} + \pi_{11} \frac{\partial (\rho_{oD} \phi_{oD})}{\partial t_D} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \pi_4 \frac{\partial}{\partial x_D} \left(\frac{\pi_3 \rho_{wD} \partial p_{wD}}{\partial x_D} \right) + \frac{1}{\pi_4} \frac{\partial}{\partial y_D} \left(\frac{\pi_3 \rho_{wD} \partial p_{wD}}{\partial y_D} \right) + \\ & \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} \left(\frac{\pi_3 \rho_{wD} \partial p_{wD}}{\partial z_D} \right) + \\ & \pi_{16} \pi_4 \pi_5^2 \frac{\partial}{\partial z_D} (\pi_3 \rho_{wD}^2) + \\ & \rho_{wD} \left[\frac{1}{4} \delta(x_D) \delta(y_D) + \frac{\pi \pi_3 (\pi_{23} - p_{wD})}{2 \ln \pi_8 / \pi_9} \right. \\ & \left. \delta(x_D - \pi_6) \delta(y_D - \pi_7) \right] = \\ & \frac{\partial (\phi_D \rho_{wD} \bar{s}_w)}{\partial t_D} + \pi_{10} \frac{\partial (\rho_{wD} \phi_D)}{\partial t_D} \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \rho_{wD} &= 1 + \pi_{18} (p_{wD} - \pi_{20}) + \pi_{16} \pi_{18} z_D \\ \rho_{oD} &= 1 + \pi_{17} (p_{oD} - \pi_{21}) + \pi_{16} \pi_{17} \pi_{15} z_D \\ \phi_D &= 1 + \pi_{19} \left(\frac{p_{wD} + p_{oD}}{2} - \frac{\pi_{20} + \pi_{21}}{2} \right) + \\ & \frac{\pi_{19} \pi_{16} z_D}{2} (\pi_{15} + 1) \end{aligned}$$

用有限差分法对方程组进行离散，采用隐式求解压力、显式求解饱和度(IMPES)方法^[5,10]对控制方程组进行求解。为了验证数值程序，把数值解与 Buckley-Leverett 理论解^[11]进行比较。图 1 是 $t = 3000$ s, 7000 s 时等含水饱和度面移动规律的比较；图 2 是 $x = 10$ m 和 15 m 处的含水饱和度随时间变化规律的比较。可见，数值解和理论解符合良好。

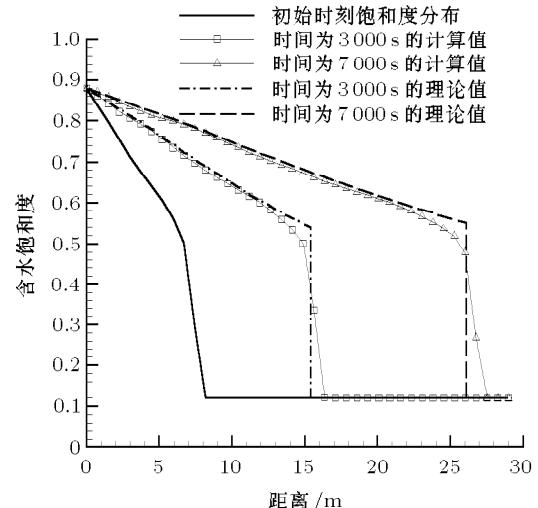


图 1 数值解和 Buckley-Leverett 理论解在等含水饱和度面移动规律方面的比较

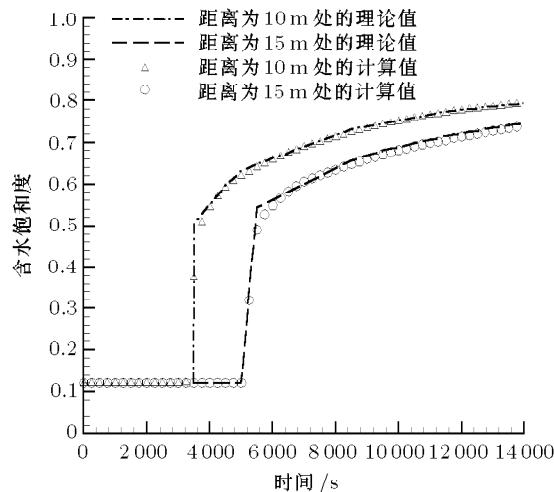


图2 空间两点 $x = 10\text{ m}, 15\text{ m}$ 处数值解和 Buckley-Leverett 理论解在含水饱和度随时间变化规律方面的比较

4 相似准数敏感性及局部相似模型评价

我们以某一水驱油藏为例(具体参数见表2), 评价该油藏不同的局部相似模型。首先得到 π_i 值依次为: $\pi_1 = 2.108$, $\pi_4 = 1$, $\pi_5 = 14$, $\pi_6 = 1$, $\pi_7 = 1$, $\pi_9 = 7.143 \times 10^{-4}$, $\pi_{10} = 0.294$, $\pi_{11} = 0.177$, $\pi_{12} = 0$, $\pi_{13} = 5.781 \times 10^{-3}$, $\pi_{14} = 5$, $\pi_{15} = 0.8$, $\pi_{16} = 4.533 \times 10^{-2}$, $\pi_{17} = 1.730 \times 10^{-3}$, $\pi_{18} = 1.081 \times 10^{-3}$, $\pi_{19} = 1.297 \times 10^{-3}$, $\pi_{20} = \pi_{21} = \pi_{23} = 5.55$, $\pi_{22} = 4.625$, π_2 , π_3 为无因次渗透率, π_{24} 为无因次毛管力函数。以此可以得到不同的局部相似模型中各个相似准数的敏感因子。以 Case1 为例, 经计算得到所放松的相似准数的敏感因子, 如表3所示。

从表中可以看出 π_{17} , π_{18} , π_{19} 的敏感性要远远大于 π_{13} , 这意味着若采用该局部相似模型, 应该尽

表2 水驱油藏基本参数值

变量	L	w	h	q_I	k_{row}	k_{cwo}	r_o	C_o	C_w
	/m	/m	/m	/m ³ s ⁻¹	$\times 10^{-12}/\text{m}^2$	$\times 10^{-12}/\text{m}^2$	/m	$\times 10^{-10}/\text{Pa}^{-1}$	$\times 10^{-10}/\text{Pa}^{-1}$
数值	140	140	10	8×10^{-3}	0.37	0.78	0.1	8.0	5.0
变量	x_p	y_p	g	C_ϕ	p_{wo}	p_{oo}	p_{wf}	p_{oi}	σ
	/m	/m	/ms ⁻²	$\times 10^{-10}/\text{Pa}^{-1}$	$\times 10^6/\text{Pa}$	$\times 10^6/\text{Pa}$	$\times 10^6/\text{Pa}$	$\times 10^6/\text{Pa}$	$\times 10^{-2}/\text{Nm}^{-1}$
数值	140	140	9.8	6.0	12.0	12.0	10.0	12.0	2.50

表3 Case1 中所放松相似准数的敏感因子

i	13	17	18	19
S_i	3.852×10^{-5}	2.623×10^{-2}	2.586×10^{-2}	2.590×10^{-2}

量减少对 π_{17} , π_{18} , π_{19} 的放松。同理可计算出其他不同局部相似模型中所放松的相似准数的敏感因子。继而, 根据式(1)得到各局部相似模型的影响系数, 如表4所示。

表4 水驱油不同局部相似模型的影响系数

局部相似模型	Case1	Case2	Case3	Case4
α	1.688 95	0.943 66	0.856 85	0.473 52
局部相似模型	Case5	Case6	Case7	Case8
α	1.634 74	1.133 12	0.819 09	0.478 44

从表中可以看出, Case4 的影响系数最小, 其次是 Case8, 这说明模型 Case4 最接近油藏原型, Case8 次之, 而 Case1 与原型相差最大。同时也可看出, 并不是放松相似准数越少模拟结果就越接近原型, 还取决于相似准数放松量的相对大小。如在 Case2 中, 虽然可以满足的相似准数的数量最多, 但由于其所放松的相似准数的相对放松量大而导致了其与原型有较大的差别。应该指出的是, 在 Case5 到

Case8 的局部相似模型中, 虽然采用了不同的孔隙介质, 但我们认为模型的介质和原型差别很小, 在分析中给定的模型渗透率等与多孔介质相关的参数与模型只有 1% 的差距。所以, 局部相似模型的结果和原型差距并不是非常大。但可以推断, 随着模型参数与理论值相差的增大, 其影响系数也会相应增加。总之, 局部相似模型的精度不仅与能满足的相似准数的多少有关, 还与相似准数的放松量有关。

5 结 论

本文提出了水驱局部相似模型中所放松相似准数敏感性的分析方法, 定义了表征所放松相似准数重要程度的敏感因子。在此基础上, 定义了表征各局部相似模型优劣的影响系数, 即局部相似模型中所有放松的相似准数的敏感因子与其放松量之积的求和, 通过比较影响系数的大小即可定量评价各局部相似模型。

以导出的水驱油的相似准则为基础, 设计了 8 种不同的局部相似模型, 分别得到了不同局部相似模型中所放松相似准数的敏感因子, 量化了所放松相似准数的重要程度。计算得到了不同的局部相似模

型的影响系数, 定量评价了各个局部相似模型的优劣。结果表明: 局部相似模型的精度不仅取决于所满足的相似准数的个数, 还与相似准数的放松量有关系。

致谢 本文作者非常感谢中国科学院力学研究所李家春院士给予的指导和帮助。

参 考 文 献

- 1 谢道夫. 力学中的相似方法与量纲理论. 北京: 科学出版社, 1983
- 2 Geertsma J, Croes GA, Schwart N. Theory of dimensionally scaled model of petroleum reservoir. *Trans AIME*, 1956, 207: 118~127
- 3 沈平平. 油水在多孔介质中的运动理论和实践. 北京: 石油工业出版社, 2000
- 4 孔祥言, 陈峰磊. 水驱油物理模拟理论和相似准则. 石油勘探与开发, 1997, 24(6): 56~60 (Kong Xiangyan, Chen Fen-
glei. Similarity criteria and physical simulation for water-flooding petroleum exploration and development. 1997, 24(6): 56~60 (in Chinese))
- 5 Bai YH, Li JC, Zhou JF. Sensitivity analysis of dimensionless parameters for physical simulation of water-flooding reservoir. *Sci China Ser E*, 2005, 48(4): 441~453
- 6 Bai YH, Li JC, Zhou JF. Effect of physical parameter range on dimensionless variable sensitivity in water flooding reservoirs. *Acta Mech Sinica*, 2006, 22(5): 385~391
- 7 Pozzi AL, Blackwell RJ. Design of laboratory models for study of miscible displacement. *SPE*, 1963, 4: 28~40
- 8 Islam MR, Farouq Ali SM. New scaling criteria for polymer emulsion and foam flooding experiments. *The Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1989, 28(4): 79~97
- 9 Islam MR, Farouq Ali SM. New scaling criteria for chemical flooding experiments. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 1990, 29(1): 29~36
- 10 Khalid A, Antonin S. Petroleum Reservoir Simulation. London: Applied Science Publishers, 1979
- 11 孔祥言. 高等渗流力学. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999

(责任编辑: 王 薇)