

文章编号:1009-9603(2021)06-0054-09

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.06.007

基于应力敏感的稠油油藏变启动压力 梯度渗流模型与数值模拟研究

姜瑞忠¹,倪庆东¹,张春光²,张凤博¹,郜益华³,蔺靖淇¹

(1.中国石油大学(华东)石油工程学院,山东 青岛 266580; 2.中海石油(中国)有限公司上海分公司,
上海 200335; 3.中海油研究总院有限责任公司,北京 100028)

摘要:稠油油藏由于其高黏度特性,因此在多孔介质中的流动表现出非达西渗流的特点。以达西模型为基础的数值模拟软件未充分考虑变启动压力梯度与压敏效应对油田生产指标的影响。鉴于实际储层的非均质性,在考虑压敏效应的基础上,将启动压力梯度处理成与流度相关的变量并考虑其方向性,从而建立稠油油藏变启动压力梯度数学模型。对数学模型进行离散化与线性化,全隐式求解压力与饱和度,将模拟器前后处理模块对接ECLIPSE,对典型稠油区块进行数值模拟研究。模拟器应用于矿场实际模型研究渗流场分布特征,结果表明:考虑启动压力梯度会减小水驱波及面积,加剧非活塞现象与层间矛盾,同时压敏效应会降低驱油效率。

关键词:稠油油藏;非均质;变启动压力梯度;压敏效应;数值模拟

中图分类号:TE319*.1

文献标识码:A

Research on seepage model and numerical simulation of variable starting pressure gradient for heavy oil reservoirs based on pressure sensitive effect

JIANG Ruizhong¹, NI Qingdong¹, ZHANG Chunguang², ZHANG Fengbo¹, GAO Yihua³, LIN Jingqi¹

(1.School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Qingdao City, Shandong Province, 266580, China;
2.CNOOC Shanghai Branch, Shanghai City, 200335, China; 3.CNOOC Research Institute Co., Ltd., Beijing City, 100028, China)

Abstract: Due to high viscosity, heavy oil shows the non-Darcy flow in porous media. The numerical simulation software based on the Darcy model fails to fully consider the influence of variable starting pressure gradients and pressure sensitive effect on oilfield production indicators. In light of the heterogeneity of actual reservoirs and pressure sensitive effect, the starting pressure gradient was converted into a variable related to fluidity and its directionality was taken into account. Then a mathematical model of variable starting pressure gradients was constructed for heavy oil reservoirs, which was discretized and linearized to solve pressure and saturation in a fully implicit manner. The pre-processing and post-processing modules of the simulator were connected to ECLIPSE for the numerical simulation of typical heavy oil blocks, and the simulator was applied to a field model to characterize seepage field distribution. The results demonstrate that the starting pressure gradient will reduce the water flooding swept area, aggravate the non-piston phenomenon and the inter-layer contradiction, and the pressure sensitive effect will impair oil displacement efficiency.

Key words: heavy oil reservoir; heterogeneity; variable starting pressure gradient; pressure sensitive effect; numerical simulation

稠油油藏储量在未动用油藏中占比较大,具有
较高的开发潜能^[1-2]。基于稠油油藏黏度高、渗流阻

力大的特点^[3],考虑变启动压力梯度的数值模拟研
究用于稠油油藏开发^[4]。张跃雷通过测量不同黏度

收稿日期:2021-03-23。

作者简介:姜瑞忠(1964—),男,江苏溧阳人,教授,博士,从事油气田开发工程工作。E-mail:19870005@upc.edu.cn。

基金项目:国家科技重大专项“厚层非均质性气藏产能评价及预测技术研究”(2016ZX05027004-004)。

稠油的流变性,对启动压力梯度与塑性黏度之间的关系做出了进一步的确定^[5]。王泊等分别用数学模型以及实验的方法对非线性渗流启动压力梯度进行研究^[6-7]。张芹月提出启动压力梯度与流度之间存在幂律关系^[8]。张代燕等通过对实验数据进行回归,得到了有关启动压力梯度的经验公式^[9],并且提出稠油流动的非线性程度可用启动压力梯度来表征^[10]。刘英宪等基于压敏效应得出启动压力梯度与生产井产量之间的关系^[11-13],同时严利咏等也提出启动压力梯度和压力敏感系数对地层压力的影响较为显著^[14-15]。通过对特低渗透油藏的研究,李承龙等考虑压敏效应与启动压力梯度会对生产指标有显著影响^[16-19]。目前稠油油藏非线性渗流数值模拟方法在模型求解过程中,未同时考虑储层的非均质性以及压敏效应和启动压力梯度变化^[20-22],一些简单的模型难以解决现场复杂区块的生产状况。

为此,笔者基于储层的非均质性以及稠油油藏在多孔介质中表现出非达西渗流的特点,应用启动压力梯度表征的油相视黏度与流动修正系数,描述稠油油藏黏度异常的现象,将压力梯度处理成与流度相关的变量并考虑其方向性,同时在考虑压敏效应的基础上建立全隐式数值模型。对模拟器进行相关测试并对典型稠油油藏区块进行数值模拟,探究启动压力梯度和压敏效应对稠油油藏开发生产指标的影响。

1 稠油油藏渗流实验规律

Y油田是典型的高孔高渗透、高原油黏度的稠油油田。其渗透率为63.5~4 524.9 mD,原油黏度为13~424 mPa·s,低黏度原油在总储量中所占比例较小。为了提高数值模拟的准确性,从Y油田选取2个断块来研究不同储层条件下原油的临界黏度以及不同流度下的启动压力梯度。

通过岩心取样,在岩心渗透率和黏度随机的情况下测量了启动压力梯度。若不能测得启动压力梯度,则需增加其黏度,直到实验能测得启动压力梯度为止;若一开始就存在启动压力梯度,则其黏度应降低,直至启动压力梯度消失。通过对实验数据的回归分析,确定了不同黏度条件下原油的临界黏度^[23](图1):不同渗透率的岩心启动压力梯度所对应的临界黏度不同,且临界黏度随岩心渗透率的增加而升高,增加范围趋于平缓。当临界黏度位于曲线的上方时,说明此时在稠油油藏中存在启动压

力梯度,该启动压力梯度存在的临界黏度约为47~54 mPa·s。

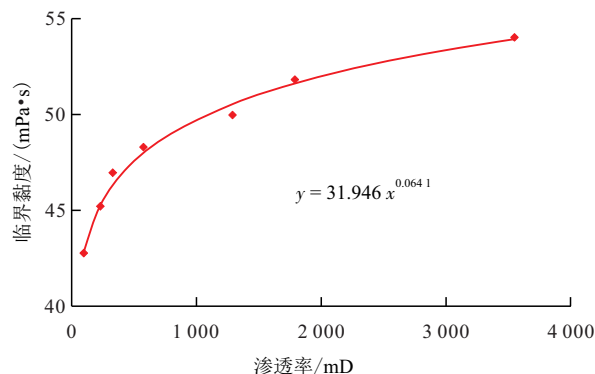


图1 临界黏度与渗透率的关系

Fig.1 Relationship between critical viscosity and permeability

为了进一步确定启动压力梯度与稠油流动的关系,通过Y油田2个断块矿场试验中的启动压力梯度与流度的变化关系可得,稠油油藏渗流曲线的早期弧度不明显、过渡较快,当驱替压力梯度达到稠油油藏流动的临界值后原油即按拟线性渗流段流动,因此通常将启动压力梯度处理成流度的乘幂关系^[24]。从图2可以看出:启动压力梯度与流度之间有着明显的乘幂关系,且随着流度的减小,启动压力梯度先缓慢变大,当流度减小到临界流度时,启动压力梯度迅速增加,所以在评价稠油油藏流动时可用流度的乘幂关系处理启动压力梯度。

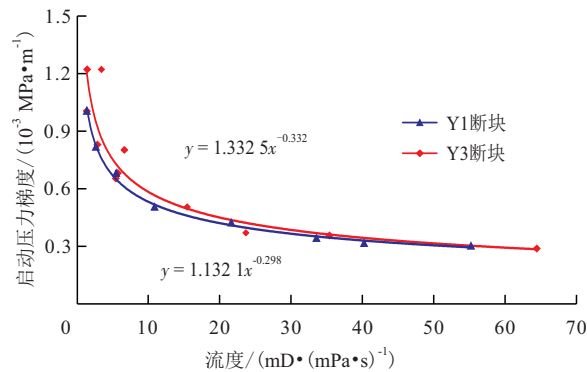


图2 启动压力梯度与流度的关系

Fig.2 Relationship between starting pressure gradient and fluidity

2 渗流数学模型

2.1 模型建立

稠油油藏非线性渗流数值模拟的关键就是变启动压力梯度和压敏效应如何在模型中具体表征,建立数学模型的基本假设包括:①气体溶解于油水两相并且油水两相不互溶。②稠油油藏在渗流过程中为等温渗流。③考虑油相的启动压力梯度且

气、水两相仍满足达西定律。④考虑毛管压力和重力。⑤考虑压敏效应的影响。

鉴于储层的非均质性,同时基于压敏效应将渗透率处理成与压力有关的函数,所以油、气、水相3组分的运动方程式分别为:

$$v_o = \begin{cases} 0 & |\nabla\Phi_o| < G \\ -\frac{K(\Delta p)K_{ro}}{\mu_o} \left(1 - \frac{G}{|\nabla\Phi_o|}\right) \nabla\Phi_o & |\nabla\Phi_o| \geq G \end{cases} \quad (1)$$

$$v_g = -\frac{K(\Delta p)K_{rg}}{\mu_g} \nabla\Phi_g \quad (2)$$

$$v_w = -\frac{K(\Delta p)K_{rw}}{\mu_w} \nabla\Phi_w \quad (3)$$

由于稠油油藏储层的启动压力梯度主要由黏度异常引起^[25-26],引入油相流动修正系数与油相视黏度来解释稠油油藏的黏度异常,在此基础上考虑了流动修正系数的方向性。根据实际情况,油相流动修正系数定义为:

$$f = \begin{cases} 0 & |\nabla\Phi_o| < G \\ 1 - \frac{G}{|\nabla\Phi_o|} & |\nabla\Phi_o| \geq G \end{cases} \quad (4)$$

油相视黏度可表示为:

$$\mu_{oa} = \frac{\mu_o}{f} = \begin{cases} \infty & |\nabla\Phi_o| < G \\ \frac{\mu_o}{1 - \frac{G}{|\nabla\Phi_o|}} & |\nabla\Phi_o| \geq G \end{cases} \quad (5)$$

为了实现非均质油藏的客观模拟,基于油相的运动方程并结合启动压力梯度与流度的变化关系模型,得到稠油油藏启动压力梯度的表达式为:

$$G = a \left(\frac{K_o}{\mu_o}\right)^b \quad (6)$$

2.2 模型求解

渗流方程 结合运动方程与连续性方程得到流动方程,通过转化形式并添加定解条件形成完整的油、水、气相组分的数学模型分别为:

$$\Delta \left[T_w^{k+1} R_{sw}^{k+1} \Delta\Phi_w^{k+1} \right] + \Delta \left[F_o^{k+1} T_o^{k+1} R_{so}^{k+1} \Delta\Phi_o^{k+1} \right] + \Delta \left[T_g^{k+1} \Delta\Phi_g^{k+1} \right] + Q_{vg}^{k+1} = \frac{V_b}{\Delta t} \left\{ \left[\phi \frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{so}S_o}{B_o} + \frac{R_{sw}S_w}{B_w} \right]^{k+1} - \left[\phi \frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{so}S_o}{B_o} + \frac{R_{sw}S_w}{B_w} \right]^k + \bar{\delta} \left[\phi \frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{so}S_o}{B_o} + \frac{R_{sw}S_w}{B_w} \right] \right\} \quad (16)$$

$$\nabla \cdot \left[\frac{K(\Delta p)K_{ro}}{B_o\mu_o} f \nabla(p_o - \rho_o g D) \right] + q_{vo} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right) \quad (7)$$

$$\nabla \cdot \left[\frac{K(\Delta p)K_{rw}}{B_w\mu_w} \nabla(p_w - \rho_w g D) \right] + q_{vw} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \left[\frac{R_{sw}K(\Delta p)K_{rw}}{B_w\mu_w} \nabla(p_w - \rho_w g D) \right] + \\ & \nabla \cdot \left[\frac{R_{so}K(\Delta p)K_{ro}}{B_o\mu_o} f \nabla(p_o - \rho_o g D) \right] + \\ & \nabla \cdot \left[\frac{K(\Delta p)K_{rg}}{B_g\mu_g} \nabla(p_g - \rho_g g D) \right] + q_{gv} = \\ & \frac{\partial}{\partial t} \left[\phi \left(\frac{S_g}{B_g} + \frac{R_{so}S_o}{B_o} + \frac{R_{sw}S_w}{B_w} \right) \right] \end{aligned} \quad (9)$$

辅助方程 饱和度与毛管压力方程分别为:

$$S_o + S_w + S_g = 1 \quad (10)$$

$$\begin{cases} p_{cow} = p_o - p_w \\ p_{cog} = p_g - p_o \end{cases} \quad (11)$$

初始条件 初始压力和饱和度分别为:

$$p_i(x, y, z, 0)|_{t=0} = p^0(x, y, z) \quad (12)$$

$$S_i(x, y, z, 0)|_{t=0} = S_i^0(x, y, z) \quad (13)$$

边界条件 外边界条件(封闭)表达式为:

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial\Phi_o}{\partial n} \right|_r = \frac{\partial(p_o - \rho_o g D)}{\partial n} \Big|_r = 0 \\ \left. \frac{\partial\Phi_w}{\partial n} \right|_r = \frac{\partial(p_w - \rho_w g D)}{\partial n} \Big|_r = 0 \\ \left. \frac{\partial\Phi_g}{\partial n} \right|_r = \frac{\partial(p_g - \rho_g g D)}{\partial n} \Big|_r = 0 \end{cases} \quad (14)$$

通过有限差分对已建立的三维三相数学模型进行油、气、水相3组分的隐式差分,其表达式分别为:

$$\Delta \left[F_o^{k+1} T_o^{k+1} \Delta\Phi_o^{k+1} \right] + Q_{vo}^{k+1} = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right)^{k+1} - \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right)^k + \bar{\delta} \left(\frac{\phi S_o}{B_o} \right) \right] \quad (15)$$

$$\Delta \left[T_w^{k+1} \Delta \Phi_w^{k+1} \right] + Q_{vw}^{k+1} = \frac{V_b}{\Delta t} \left[\left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right)^{k+1} - \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right)^k + \bar{\delta} \left(\frac{\phi S_w}{B_w} \right) \right] \quad (17)$$

其中:

$$Q_{vo} = V_b q_{vo} \quad (18)$$

$$Q_{vw} = V_b q_{vw} \quad (19)$$

$$Q_{vg} = V_b q_{vg} \quad (20)$$

$$F_o = 1 - \frac{G}{|\nabla \Phi_o|} \quad (21)$$

$$T_1 = \frac{K(\Delta p) K_d A}{B_1 \mu_1 L} \quad (22)$$

对油、气、水相3组分的隐式差分方程展开,在 $m+1$ 个时间步长和 $k+1$ 个迭代步长的计算中,忽略 $\Delta[(\dots)\delta S_w] \cdot \Delta[(\dots)\delta p_o]$ 和 $\Delta[(\dots)\Delta p_o] \cdot \Delta[(\dots)\delta p_o]$ 等二阶小量,并整理上述方程式。将输出项代入模型,并求解未知数为 $\delta p_o, \delta S_w$ 和 δS_o 的块元素矩阵方程。通过以上步骤,建立了渗流微分方程的数值模型,并对流量校正系数等参数进行了处理,最终实现了全隐式解。

3 模拟器编制与测试

3.1 模拟器编制

稠油油藏变启动压力梯度数值模拟计算流程(图3)主要包括:①确定稠油油藏区块的物性参数并建立稠油油藏变启动压力梯度的数值模拟模型。②初始化压力和饱和度场。③采用全隐式迭代方法求解稠油油藏区块的压力和饱和度。④进行收敛条件与物质平衡检查。⑤检查是否达到模拟结束时刻,是则输出稠油油藏区块的启动压力梯度场、压力场以及饱和度场,否则重复上述步骤。

3.2 模拟器测试

软件成功编译后,对软件进行黑油模型测试以及非线性和压力敏感模型测试,以满足软件在工程计算中的需求,无论是黑油还是非线性模型验证,均可通过对机理模型和实际模型进行多维测试来实现。

3.2.1 黑油模型测试

为了验证新开发模拟器的合理性和准确性,主要从对称性与ECLIPSE开发指标的对比利用软件进行测试。建立了与稠油油藏油层特征相吻合的反五点机理模型A,用于模拟验证。该模型的主要参数包括:储层大小为 $310 \text{ m} \times 310 \text{ m} \times 15 \text{ m}$;网格大

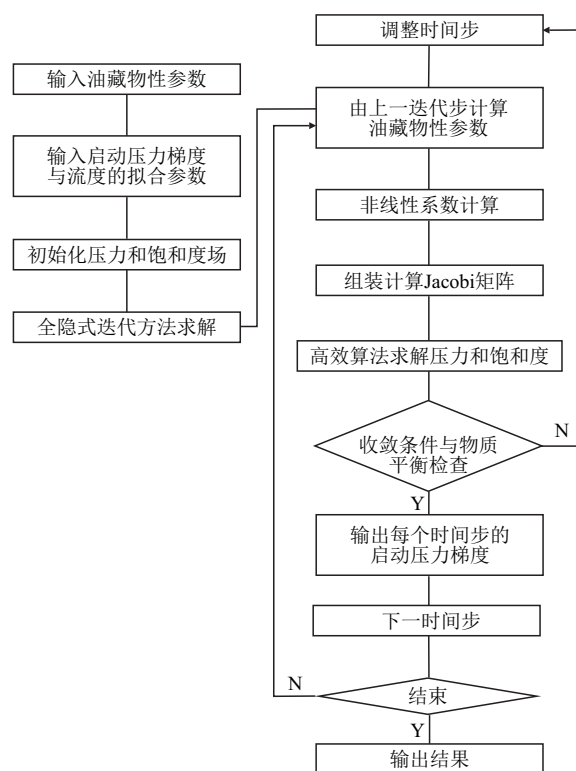


图3 数值模拟计算流程

Fig.3 Flowchart of numerical simulation

小分别为 $\Delta x = \Delta y = 10 \text{ m}$, $\Delta z = 3 \text{ m}$;深度为 1500 m ;机理模型共有5个小层,各层的渗透率在 x, y, z 方向上分别为:1-2层为 $1500 \text{ mD} \times 1500 \text{ mD} \times 150 \text{ mD}$, 3-4层为 $1200 \text{ mD} \times 1200 \text{ mD} \times 120 \text{ mD}$, 5层为 $1000 \text{ mD} \times 1000 \text{ mD} \times 100 \text{ mD}$;孔隙度为0.34;水的密度为 1.00 g/cm^3 ,油的密度为 0.93 g/cm^3 ;水的黏度为 $0.50 \text{ mPa} \cdot \text{s}$,油的黏度为 $100 \text{ mPa} \cdot \text{s}$;水的体积系数为1.05,油的体积系数为1.15。井距为 250 m ,水井注入速度为 $160 \text{ m}^3/\text{d}$,油井定产液量为 $40 \text{ m}^3/\text{d}$,保持注采比为1:1,模拟10 a,在均质模型中建立对称井网模式,设置每个井网的相同参数,并观察压力场和饱和度场是否对称。通过数值模拟研究,饱和度场和压力场随时间步的变化仍具有较好的对称性(图4),且生产井周围未波及区的形状也相同,证明了模拟器的计算结果可靠稳定。

当自研模拟器达到稳定性要求后,为了验证新开发模拟器的合理性与准确性,通过ECLIPSE等商业软件和自研模拟器分别计算同一个模型,查看模拟结果的误差,判断自研软件的稳定性与精度。通过比较产油速度和含水率,可发现2个模拟器的误差均较小,证明了自研模拟器具有合理性和准确性(图5,图6)。

3.2.2 线性与非线性模型对比

自研模拟器的合理性与准确性达到要求后,为

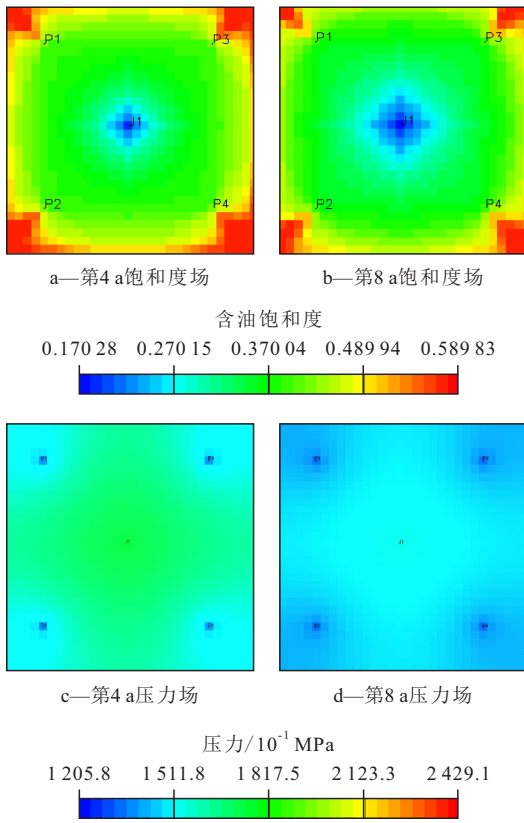


图4 模型A饱和度场和压力场分布

Fig.4 Distribution of saturation field and pressure field in Model A

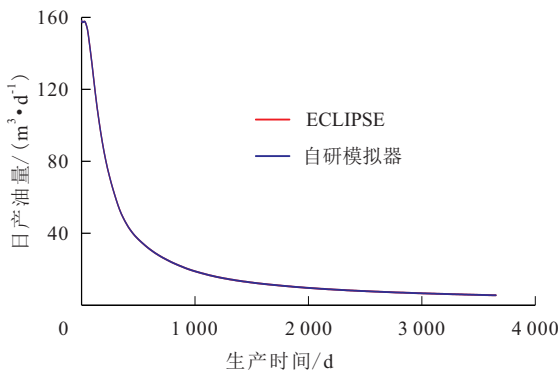


图5 自研模拟器与ECLIPSE计算的区块日产量对比

Fig.5 Comparison between oil production rates calculated by self-developed simulator and ECLIPSE

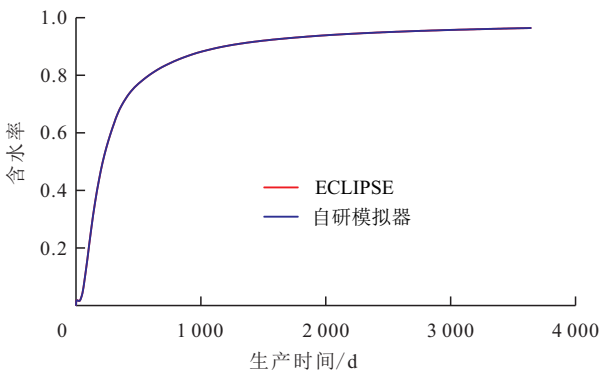


图6 自研模拟器与ECLIPSE计算的区块含水率对比

Fig.6 Comparison between water cuts calculated by self-developed simulator and ECLIPSE

了测试软件的创新型,将Y3区块启动压力梯度与流度的关系曲线代入模型A中,并且加入非线性关键字,通过压力场与饱和度场的变化体现变启动压力梯度的影响,压力场与饱和度场如图7所示。

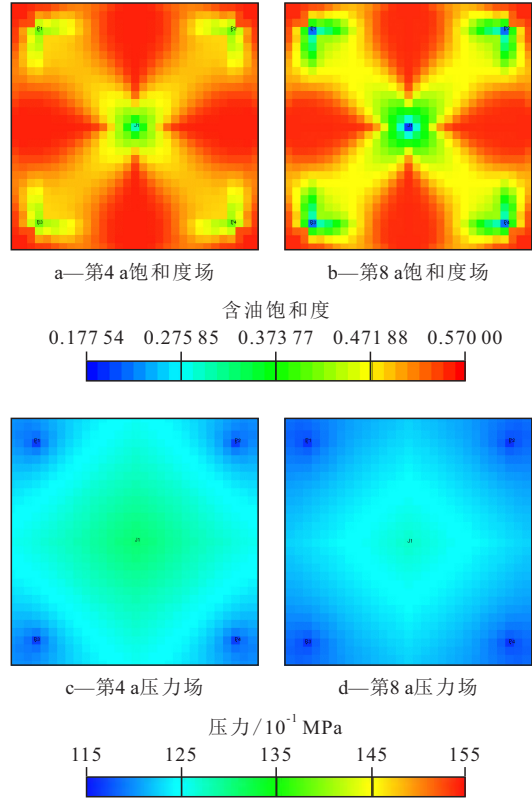


图7 非线性模型的饱和度场和压力场分布

Fig.7 Distribution of saturation field and pressure field in nonlinear model

压力场与饱和度场的变化表明,启动压力梯度的存在相当于稠油油藏驱替过程中的一个附加阻力,从而对累积产油量、含水率等指标产生巨大影响,导致开发效果变差。分别在考虑与不考虑启动压力梯度2种情况下模拟,并将开采指标进行对比(图8)。启动压力梯度对生产指标影响显著:从含水率指标来看,启动压力梯度的存在会加剧水相的指进现象,加快生产井见水时间;同时考虑启动压力梯度会降低累积产油量,影响最终采收率,开发效果变差。

3.2.3 压敏效应的影响

自研模拟器的创新点不止在于考虑启动压力梯度对稠油油藏的影响,同时考虑了压敏效应对油井生产能力的影响。为了验证压敏效应对稠油油藏的具体影响,分别从累积产油量以及含水率2个生产指标来验证。

考虑压敏效应会直接导致区块的早期含水率升高并且累积产油量降低,其原因在于考虑压敏效应会引起生产井井底的压力降低更快,间接导致渗

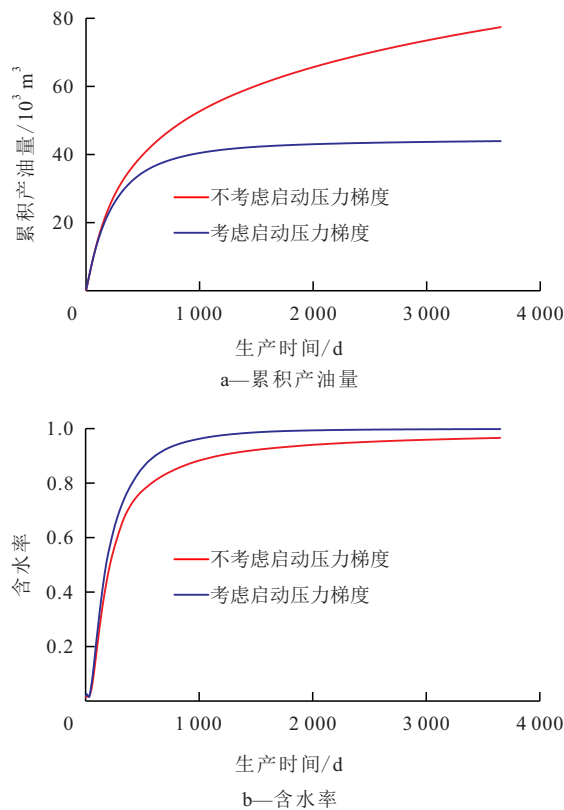


图8 启动压力梯度对生产指标的影响
Fig.8 Influence of starting pressure gradient on production index

透率下降幅度变大,从而引起井的传导阻力增大,导致开发效果变差^[27](图9)。

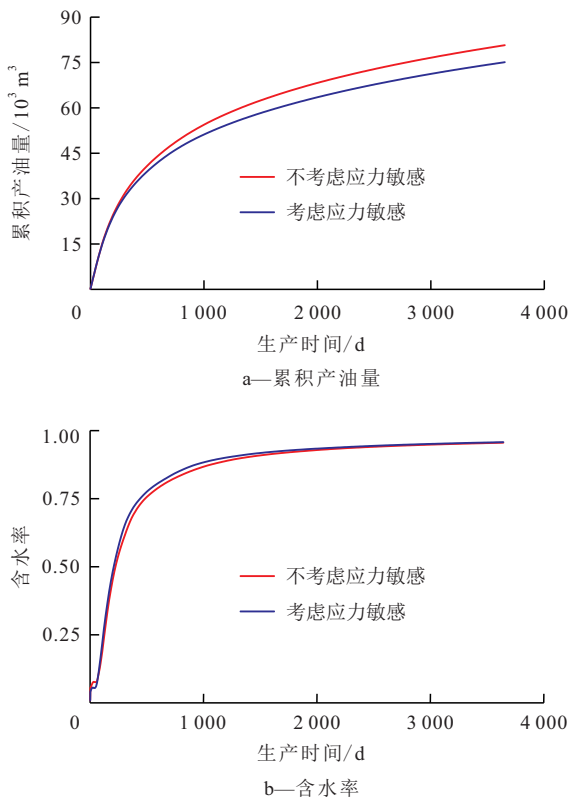


图9 应力敏感对生产指标的影响
Fig.9 Influence of pressure sensitivity on production index

4 模拟器的应用与分析

由于目标区块属于典型的稠油油藏,因此仍使用ECLIPSE软件来匹配整个区域的采油速度和含水率,而无需考虑稠油油藏的非线性渗流。根据采油速度和含水率的历史拟合效果可以看出,忽略启动压力梯度与压敏效应的存在,将对稠油生产指数产生重大影响,而拟合效果不如预期。

基于稠油油藏渗流机理和矿场试验,将自行研发的模拟器和新增的注水稠油关键词用于历史匹配。加入非线性渗流关键字并且考虑压敏效应后,开发曲线的拟合效果明显提高,这为客观地研究稠油油藏渗流场变化规律及优化调整提供了重要的指导作用(图10)。

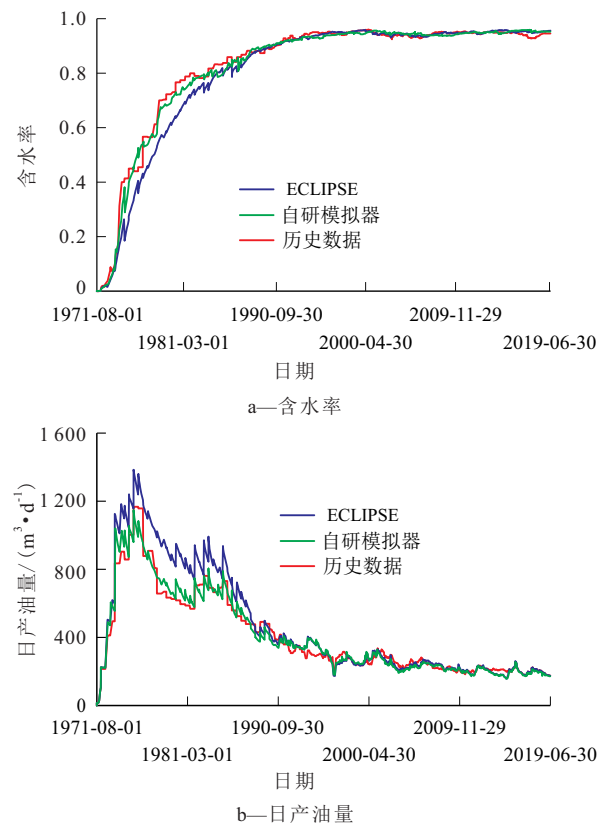


图10 Y3区块含水率和日产油量拟合曲线对比
Fig.10 Comparison of fitting curves of water cuts and oil production rates in Y3 block

通过引入有效驱替压力梯度(驱替压力梯度减去启动压力梯度)的概念,用数值模拟方法输出目标层位的有效驱替压力梯度场(图11)。当有效驱替压力梯度大于0,该网格的流体方可有效驱替,灰色区域代表有效驱替压力梯度小于0,即原油未得到有效驱动。该场图可以初步定位稠油油藏区块的弱驱替区,即当前时间步稠油油藏的滞留区,为

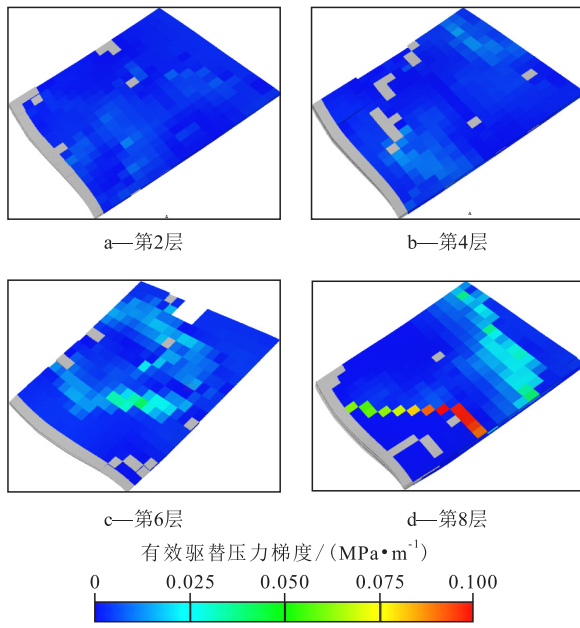


图11 油组有效驱替压力梯度场
Fig.11 Effective displacement pressure gradient field of oil formations

剩余油的挖潜工作提供依据。

5 结论

在实验基础上提出了基于应力敏感的稠油油藏变启动压力梯度模型,并且通过自研模拟器的编制及测试,得出无论是机理模型还是矿场实际模型,计算结果与ECLIPSE基本一致。模拟器非线性模型以及压敏效应的测试结果也表明,启动压力梯度会加快最小渗流阻力通道的形成,减小水驱波及面积,加剧水相的指进现象;压敏效应会导致含水率快速上升,驱油效率大幅降低。将自研模拟器应用于矿场实际模型,可以客观地描述稠油油藏的非线性渗流情况,显著提高了历史拟合的准确性以及对油井生产指数的预测能力,模拟结果更加符合实际;同时模拟器输出的有效驱替压力梯度场为后续的稠油油藏开采提供了技术支持。

符号解释

- a, b ——渗流实验拟合参数;
- A ——网格面积, m^2 ;
- B_1 ——体积系数;
- D ——油藏埋深, km ;
- f ——油相流动修正系数;
- F_o ——油相势梯度模大于启动压力时的修正系数;
- g ——重力加速度, m/s^2 ;
- G ——启动压力梯度, MPa/m ;

- l ——取 o, w, g , 分别代表油相、水相、气相;
- L ——网格 x, y, z 3 个方向的长度, m ;
- k ——迭代次数;
- K ——油藏的绝对渗透率, mD ;
- K_o ——油相有效渗透率, mD ;
- K_{rl} ——油、气、水相相对渗透率;
- m ——时间步;
- n ——油藏外边界 Γ 的法线方向;
- p ——地层压力, MPa ;
- Δp ——地层压力分别与油、气、水相压力的差值, MPa ;
- p_l ——油、气、水相压力, MPa ;
- p_{cow} ——油、水两相间的毛管压力, MPa ;
- p_{cog} ——油、气两相间的毛管压力, MPa ;
- $p^0(x, y, z)$ ——初始条件下的原始地层压力分布, MPa ;
- q_{vo}, q_{vg}, q_{vw} ——标况下油、气、水相流体在单位时间下单位体积岩石中流入或采出的体积, m^3/s ;
- Q_{vg} ——标况下气相流体在单位时间下网格块中流入或采出的体积, m^3/s ;
- Q_{vo} ——标况下油相流体在单位时间下网格块中流入或采出的体积, m^3/s ;
- Q_{vw} ——标况下水相流体在单位时间下网格块中流入或采出的体积, m^3/s ;
- R_{so}, R_{sw} ——溶解气在油相和水相的溶解气油比;
- S_l ——油、气、水相饱和度;
- $S_l^0(x, y, z)$ ——初始条件下地层中的含水、含油饱和度分布;
- t ——时间, s ;
- T_l ——油、气、水相传导率, $mD \cdot m$;
- v_o, v_g, v_w ——油、气、水相流体的渗流速度, m/s ;
- V_b ——网格块的体积, m^3 ;
- x, y, z ——地层坐标;
- x_w, y_w, z_w ——井点坐标;
- Γ ——油藏外边界;
- $\bar{\delta}$ —— $m+1$ 时间步 p_o, S_w 等参数第 $k+1$ 次与第 k 次迭代的差值;
- μ_l ——油、气、水相黏度, $mPa \cdot s$;
- μ_{oa} ——油相视黏度, $mPa \cdot s$;
- ρ_o, ρ_g, ρ_w ——油、气、水相流体的密度, kg/m^3 ;
- ϕ ——孔隙度;
- Φ_o, Φ_g, Φ_w ——油、气、水相流体的流动势, MPa 。

参考文献

- [1] LIU Yang, CHENG Qinglin, WANG Xuxu, et al. Multi level analysis of field synergy in the displacement mechanisms of heavy oil thermal recovery[J]. Acta Geotechnica, 2014, 9(1): 59-65.
- [2] KAVEH Mohammadi, FOROUGH Ameli. Toward mechanistic understanding of Fast SAGD process in naturally fractured heavy oil reservoirs: Application of response surface methodology and genet-

- ic algorithm[J].Fuel, 2019, 253: 840–856.
- [3] 焦焕, 代玉杰, 王学慧, 等. 稠油渗流研究现状及发展趋势[J]. 石油化工, 2019, 48(12): 1 283–1 288.
JIAO Huan, DAI Yujie, WANG Xuehui, et al. Current status and development trend of heavy oil seepage[J]. Petrochemical Technology, 2019, 48(12): 1 283–1 288.
- [4] 李剑辉. 稠油热化学驱渗流数学模型及数值模拟研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.
LI Jianhui. Study on mathematical model and numerical simulation of heavy oil thermal chemical flooding[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [5] 张跃雷, 程林松, 李春兰, 等. 稠油流变性及启动压力梯度的实验研究[J]. 新疆石油天然气, 2007, 3(3): 28–30.
ZHANG Yuelei, CHENG Linsong, LI Chunlan, et al. Experimental study on rheological property and threshold pressure gradient of heavy oil[J]. Xinjiang Oil & Gas, 2007, 3(3): 28–30.
- [6] 王泊. 多孔介质中稠油的非线性渗流特征实验与分析[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(25): 187–190, 194.
WANG Bo. Experiments and analysis of nonlinear seepage characteristics of heavy oil in porous media[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(25): 187–190, 194.
- [7] 王子强, 张代燕, 杨军, 等. 普通稠油油藏渗流特征实验研究——以新疆油田九-4区齐古组油藏为例[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(2): 302–306.
WANG Ziqiang, ZHANG Daiyan, YANG Jun, et al. Experimental study on percolation characteristics of ordinary heavy oil reservoirs: a case study from the Qigu Formation reservoir in Nine-4 Block of Xinjiang oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(2): 302–306.
- [8] 张芹月. 低渗透油藏井网及参数优化研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.
ZHANG Qinyue. The research on well pattern and optimization of parameters in low permeability reservoir[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [9] 张代燕, 彭军, 谷艳玲, 等. 稠油油藏启动压力梯度实验[J]. 新疆石油地质, 2012, 33(2): 201–204.
ZHANG Daiyan, PENG Jun, GU Yanling, et al. Experimental study on threshold pressure gradient of heavy oil reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2012, 33(2): 201–204.
- [10] 姚同玉, 黄延章, 李继山, 等. 孔隙介质中稠油流体非线性渗流方程[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 106–110.
YAO Tongyu, HUANG Yanzhang, LI Jishan, et al. Nonlinear flow equations for heavy oil in porous media[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(1): 106–110.
- [11] 刘英宪, 尹洪军, 苏彦春, 等. 具有压敏特征的稠油油藏水平井产能分析[J]. 东北石油大学学报, 2012, 36(5): 56–60.
LIU Yingxian, YIN Hongjun, SU Yanchun, et al. Analysis of production of horizontal wells in heavy oil reservoir with pressure sensitive characteristic[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(5): 56–60.
- [12] 姚泾利, 刘晓鹏, 赵会涛, 等. 鄂尔多斯盆地盒8段致密砂岩气藏储层特征及地质工程一体化对策[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(2): 186–195.
YAO Jingli, LIU Xiaopeng, ZHAO Huitao, et al. Characteristics of He8th member tight sandstone gas reservoir and solution based on geology–engineering integration in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(2): 186–195.
- [13] 张宇, 李承龙. 考虑变启动压力和压敏效应的蒸汽吞吐产能计算新方法[J]. 特种油气藏, 2020, 27(1): 89–95.
ZHANG Yu, LI Chenglong. A new method for steam stimulation productivity calculation by considering variable starting pressure and pressure–sensitivity[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(1): 89–95.
- [14] 严利咏, 贾标, 党战锋, 等. 低渗压力敏感性油藏数值试井分析[J]. 油气井测试, 2013, 22(2): 1–3.
YAN Liyong, JIA Biao, DANG Zhanfeng, et al. Numerical well test analysis of low permeability pressure sensitivity reservoir[J]. Well Testing, 2013, 22(2): 1–3.
- [15] 陈元千, 刘攀, 雷丹凤. 对启动压力梯度和压敏效应的反思、推导与评论[J]. 油气藏评价与开发, 2021, 11(1): 7–13.
CHEN Yuanqian, LIU Pan, LEI Danfeng. Rethink, derivation and review on the starting pressure gradient and pressure sensitivity effect[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 7–13.
- [16] 李承龙, 李敏, 何鑫迪. 基于压敏效应的变启动压力梯度渗流模型[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 40(1): 81–89.
LI Chenglong, LI Min, HE Xindi. Seepage model of the variable starting pressure gradient based on the pressure sensitive effect[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 40(1): 81–89.
- [17] 杨金欣, 陈民锋, 屈丹, 等. 低渗透油藏垂直裂缝井有效动用半径研究[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(5): 119–125.
YANG Jinxin, CHEN Minfeng, QU Dan, et al. Study on the effective radius of vertical fractured wells in low permeability reservoirs[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(5): 119–125.
- [18] 姜瑞忠, 刘秀伟, 崔永正, 等. 非稳态窜流多段压裂水平井井底压力分析[J]. 油气地质与采收率, 2019, 26(5): 86–95.
JIANG Ruizhong, LIU Xiuwei, CUI Yongzheng, et al. Bottomhole pressure analysis of multistage fractured horizontal well during unsteady crossflow[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(5): 86–95.
- [19] 曹仁义, 马明, 郭西峰, 等. 基于流管模型的低渗透油藏水驱平面波及系数计算方法[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(2): 100–108.
CAO Renyi, MA Ming, GUO Xifeng, et al. Calculation method of plane sweep coefficient for water flooding in low permeability reservoir based on flow tube model[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(2): 100–108.
- [20] 韩洪宝, 程林松, 张明禄, 等. 特低渗油藏考虑启动压力梯度的物理模拟及数值模拟方法[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 2004, 28(6): 49–53.
HAN Hongbao, CHENG Linsong, ZHANG Minglu, et al. Physical simulation and numerical simulation of ultra-low permeability reservoir in consideration of starting pressure gradient[J]. Journal of the University of Petroleum, China: Edition of Natural Science,

- 2004, 28(6):49-53.
- [21] 李承龙, 赵国忠. 基于压敏效应的变启动压力梯度面积井网产量计算模型[J]. 断块油气田, 2020, 27(3):327-334.
LI Chenglong, ZHAO Guozhong. Production calculation model of areal well pattern with variable start-up pressure gradient based on pressure sensitive effect [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(3):327-334.
- [22] 赵国忠. 变启动压力梯度三维三相渗流数值模拟方法[J]. 石油学报, 2006, 27(增刊):119-123, 128.
ZHAO Guozhong. Numerical simulation of 3D and three-phase flow with variable start-up pressure gradient [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(Supplement):119-123, 128.
- [23] 汪伟英, 喻高明, 柯文丽, 等. 稠油非线性渗流测定方法研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(4):464-467.
WANG Weiyong, YU Gaoming, KE Wenli, et al. Experimental study of nonlinear seepage for heavy oil [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(4):464-467.
- [24] 刘丽, 闵令元, 孙志刚, 等. 济阳坳陷页岩油储层孔隙结构与渗流特征[J]. 油气地质与采收率, 2021, 28(1):106-114.
LIU Li, MIN Lingyuan, SUN Zhigang, et al. Pore structure and percolation characteristics in shale oil reservoir of Jiyang Depression [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2021, 28(1):106-114.
- [25] 张旭, 姜瑞忠, 崔永正, 等. 考虑束缚水时变的致密气藏数值模拟研究[J]. 中国海上油气, 2017, 29(5):82-89.
ZHANG Xu, JIANG Ruizhong, CUI Yongzheng, et al. Numerical simulation study on tight gas reservoir considering the variation of irreducible water saturation with time [J]. China Offshore Oil and Gas, 2017, 29(5):82-89.
- [26] 孙建芳. 胜利油区稠油非达西渗流启动压力梯度研究[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(6):74-77, 116.
SUN Jianfang. Threshold pressure gradient study on non-Newtonian flow of heavy oil reservoirs in Shengli oilfield [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(6):74-77, 116.
- [27] 宋春涛. 考虑应力敏感和启动压力梯度的低渗透油藏数值模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(25):6 319-6 326.
SONG Chuntao. Numerical reservoir simulation considering threshold pressure gradient and stress sensitive phenomenon [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(25):6 319-6 326.

编辑 王星