

三维热水驱流线油藏数值模拟

朱舟元^{1*}, 刘灿华², 孙念³, 陆扬霄⁴

1 中国石油大学(北京)安全与海洋工程学院, 北京 102249

2 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 克拉玛依 834000

3 中国石油辽河油田分公司勘探开发研究院, 盘锦 124010

4 德州大学达拉斯分校工程与计算机科学学院, 达拉斯 75080, 美国

* 通信作者, zhuzy02@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-07-22

国家自然科学基金项目“火烧油层前缘稳定性准则研究”(项目批准号: 51804315)资助

摘要 由于复杂的热耦合、较强的非线性以及用来捕捉复杂物理化学过程的小尺寸网格, 热力采油数值模拟的计算成本很高。因此, 业界急需快速、准确的热采模拟技术。基于流线的油藏数值模拟方法在模拟复杂地质和非均匀性强的大型油藏模拟问题方面尤其成功, 而这些问题对传统的油藏数值模拟技术来说是巨大的挑战。流线油藏数值模拟是基于非均质油藏中流体沿流线流动的时间尺度往往比流线位置发生显著变化的时间尺度快得多的现象。文中探索了流线数值模拟扩展到热力采油过程模拟的可行性, 在前期工作基础上, 构建了自行研制的三维流线热水驱油藏数值模拟器。在一个全局时间步中, 首先求解压力方程, 继而追踪三维油藏中的流线, 然后沿一维流线求解能量和质量的对流输运, 这可显著提高模拟的计算效率。最后, 将物理量映射回原始网格, 并求解包括热传导在内的非对流效应。该模拟器考虑了原油温黏和流体热膨胀效应, 能有效描述流体在油藏中的运动和分布状况, 并通过流线将其充分的可视化。在此基础上, 测试了包括高度非均质的SPE10和齐40热水驱在内的若干实际案例, 并与商业热采模拟器的计算结果进行了对比。热采流线模拟器成功地通过了具有挑战的多井组的SPE10的测试, 并成功地解决了真实的辽河油田齐40油藏热水驱模拟问题。结果表明, 该流线模拟器能够在保证精度的同时降低计算成本, 并可实现流场可视化和量化井间连通性, 这对于水驱管理和油藏产量预测优化具有重要意义。其为热采流线模拟技术的发展奠定了重要的基础。在此基础上, 可进而有望开发商业化的热水驱热流线模拟器。

关键词 流线模拟; 油藏数值模拟; 热水驱; 模拟精度; 计算效率

Three dimensional streamline reservoir simulation for hot water flooding

ZHU Zhouyuan¹, LIU Canhua², SUN Nian³, LU Yangxiao⁴

1 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 PetroChina Xinjiang Oilfield, Karamay 834000, China

3 PetroChina Liaohe Oilfield, Panjin 124010, China

4 School of Engineering and Computer Science, University of Texas at Dallas, Dallas 75080, USA

Abstract Thermal enhanced oil recovery simulation often has high computational costs, due to the complex thermal coupling,

引用格式: 朱舟元, 刘灿华, 孙念, 陆扬霄. 三维热水驱流线油藏数值模拟. 石油科学通报, 2021, 04: 595-603

ZHU Zhouyuan, LIU Canhua, SUN Nian, LU Yangxiao. Three dimensional streamline reservoir simulation for hot water flooding. Petroleum Science Bulletin, 2021, 04: 595-603. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.041

strong nonlinearity and small sized grid blocks used to capture the complex physical and chemical recovery processes. The upstream industry is in urgent need of fast and accurate thermal enhanced oil recovery reservoir simulation technology. Streamline-based flow simulation has been especially successful in the simulation of large geologically complex and strongly heterogeneous systems that are challenging for more traditional simulation techniques. The success of streamline simulation is based on the physical observation that in heterogeneous reservoirs the time scale at which fluids flow along streamlines is often much faster than the time scale at which the streamline locations change significantly. In this work, we explore the possibility of extending streamline simulation to the simulation of thermal enhanced oil recovery processes. Based on our previous work, a true three-dimensional streamline reservoir simulator for hot water flooding is constructed. The simulator takes into account the temperature dependent oil viscosity and thermal fluid expansion effects. In a global time step, it solves the pressure equation first, followed by tracing streamlines in three-dimensional reservoirs. Convective energy and mass transport are then solved along the one-dimensional streamlines, which could potentially significantly increase the computational efficiency of the simulation. Finally, the solutions are mapped back to the original grid, with the non-convective effects solved, including heat conduction. The streamlines can effectively describe the movement and distribution of fluids in the reservoir and fully visualize them through the use of streamlines. Several realistic cases including the highly heterogeneous SPE10 model and the Liaohe oil field Qi40 hot water flooding are tested and compared with the results from a commercial thermal reservoir simulator. Our streamline simulator successfully passed the challenging test of SPE10, with realistic multiple well pattern configurations. It also successfully solves the actual hot water flooding simulation problem for the Liaohe oil field Qi40 reservoir model. We have shown that the three-dimensional thermal streamline simulator can not only ensure the simulation accuracy, but also reduce the computational cost through computational complexity analysis. And the streamline simulation also assists flow visualization and quantification of inter-well connectivity, which may be highly useful in flood management and optimization for reservoir production predictions. This work serves as the foundation for the future development of thermal streamline simulation technology. A commercial thermal streamline simulator for hot water flooding may be developed based on this work.

Keywords streamline simulation; reservoir simulation; hot water flooding; simulation accuracy; computational efficiency

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2021.04.041

0 引言

热力采油作为稠油有效开发的主导技术,其相应的热采油藏数值模拟技术也日渐成熟。目前稠油热采数值模拟主要基于传统的有限体积方法,包括商业、学术热采油藏数值模拟器,其使用全隐式时间推进方法或自适应隐式方法^[1]。但由于热采模拟过程中复杂的热耦合、较强的非线性以及所使用的小网格尺寸来捕捉复杂的物理化学过程,导致热采模拟的计算成本很高。因此,业界急需快速、准确的热采模拟技术。

流线油藏数值模拟方法由于其计算效率高,被广泛应用于油藏工程领域,例如历史拟合和优化。相比于传统油藏数值模拟,流线数值模拟基于对物理现象的观察上,即在非均质油藏中,流体质点沿流线流动的时间尺度,一般远小于流线位置发生显著变化的时间尺度。即相比于流体的流动而言,流线的位置的改变相对缓慢。在等温条件下,可将三维流体输运问题解耦成一系列在流线上求解的规模更小的一维流动问题。因此,流线数值模拟在保持精度的基础上,具有计算速度快的优点,对处理大型油藏数值模拟问题具有独特的优势,尤其是对地质条件复杂及强非均质性的问题。早期的流线数值模拟无法考虑油藏中复杂的

物理化学变化,因此适用范围小^[2-3]。现代流线模拟技术利用算子分裂方法来描述重力和毛管力^[4-5],已被扩展来处理组分模拟、混相和非混相气驱过程^[6]、裂缝型油藏中的渗流^[7]、可压缩流动^[8-9]以及聚驱过程^[10-11],而且能够非常有效地实现并行计算^[12],大大提高了流线模拟方法的适用范围以及计算速度,但是流线模拟技术在稠油热采模拟中的应用研究依然很少。

利用流线模拟技术的优点,在前期工作的基础上^[13],进一步开发了三维热水驱流线模拟器。该模拟器考虑了原油黏温和流体热膨胀效应,能有效描述和可视化流场,并量化井间的连通性,在保证精度的同时,降低了稠油数值模拟计算成本,为热采流线模拟技术的发展奠定了重要的基础。

1 两相热水驱问题的控制方程组

在热水驱问题中,质量和能量守恒方程假设为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi \rho_w S_w + \nabla \cdot \rho_w \mathbf{u}_w = q_w \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \varphi \rho_o S_o + \nabla \cdot \rho_o \mathbf{u}_o = q_o \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[(1-\phi)U_r + \sum_{j=w,o} \phi \rho_j S_j U_j \right] + \nabla \cdot \sum_{j=w,o} h_j \rho_j \mathbf{u}_j + \nabla \cdot (-k_c \nabla T) = q_h \quad (3)$$

其中 ϕ 表示孔隙度； ρ_j 表示相密度， kg/m^3 ； S_j 表示相饱和度； \mathbf{u}_j 表示相 j 的速度， m/d ； q_j 表示质量源汇项， kg/d ； U_r 表示岩石的内能， kJ/m^3 ； U_j 表示相 j 的内能， kJ/kg ； h_j 表示相 j 的焓， kJ/kg ； k_c 表示导热系数， $\text{kJ/(m}\cdot\text{d}\cdot\text{K)}$ ； \tilde{q}_h 表示能量的源汇项， kJ/d 。其压力方程为：

$$c_t \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{\rho_o} \nabla \cdot (\rho_o \mathbf{u}_o) + \frac{1}{\rho_w} \nabla \cdot (\rho_w \mathbf{u}_w) = \frac{q_w}{\rho_w} + \frac{q_o}{\rho_o} \quad (4)$$

其中 $c_t = (1-\phi)c_R + \phi(S_w c_w + S_o c_o)$ 表示总压缩系数， $1/\text{kPa}$ 。热采提高采收率过程中的主要热效应包括原油降黏、体积膨胀、润湿性改变和油水界面张力的改变。黏度降低通常为热采提高采收率过程的主要机理，其次为流体热膨胀，文中考虑了这两种效应。水和油的黏度相应的关系式^[18]为：

$$\mu_j = A_j \exp\left(\frac{B_j}{T}\right) \quad (5)$$

其中 A_j 和 B_j 表示水、油温黏经验系数； T 表示温度， K 。油水密度关系式为：

$$\rho_j(T, P) = \rho_j^{sc} \exp\left[c_j (P - P_{sc}) - a_j (T - T_{sc}) \right] \quad (6)$$

其中 c_j 和 a_j 分别表示压缩系数和热膨胀系数； P 表示压力， kPa 。

2 热水驱流线数值模拟求解方法

2.1 热水驱流线模拟器的求解思路

该流线模拟器的单个全局时间步的整体求解思路如图1所示，包括以下步骤：

(1)先给定边界条件(包括井的条件)和初始条件(或当前解)，在三维原始网格上求解压力方程，并使用达西定律计算速度场。压力方程在本模拟器中使用常规LU分解法求解。

(2)给定总的相速度场，并使用Pollock的解析追踪方法来追踪流线^[2-3]。在追踪流线的过程中，记录下流线穿过每个网格的进出点间的飞行时间(Time of Flight, TOF)。由于初始沿着流线的一维TOF网格是非常不规则的，导致数值求解困难。通过后处理，将其转化为规则的TOF网格，从而使接下来的过程易于数

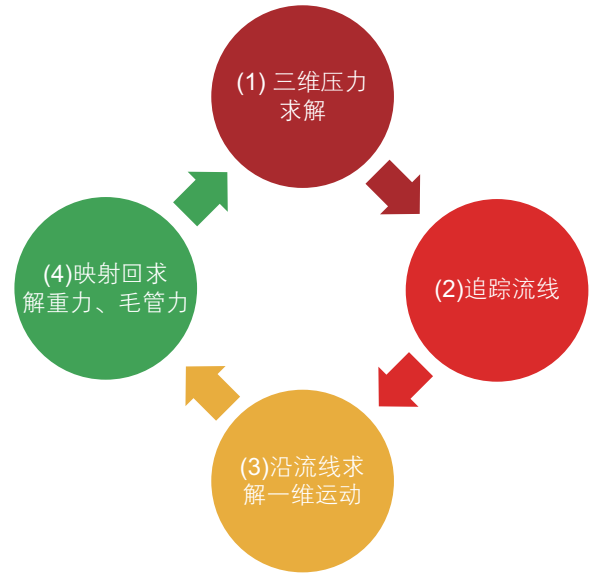


图1 热水驱流线模拟方法全局时间步的整体求解思路
Fig. 1 The steps in thermal streamline simulation for a global time step

值求解。

$$\mathbf{u}_t = \sum_{j=1}^{n_p} \mathbf{u}_j \quad (7)$$

(3) 将变量(饱和度和温度)从原始网格映射到流线上。沿着各流线，使用适当的数值算法求解质量和能量守恒方程中的对流项部分。求解时间为一个全局时间步长。在一个全局时间步内，流线位置假定为固定不变。可根据需要使用一阶迎风格式的显式算法或使用一阶隐式算法进行求解，其中隐式算法使用常规的牛顿迭代求解非线性方程组。

(4) 将计算得到的结果从流线映射回原始网格。使用算子分裂方法在原始网格上计算重力和热传导效应，完成整个全局时间步。在下一全局时间步中，从步骤1重新开始。

与常规的有限体积方法不同，流线模拟使用全局时间步进行求解，期间假定流线位置不变。适当的全局时间步大小取决于流场随时间的改变和非对流流动效应的大小(重力，毛细管力和热传导效应)。其不受数值稳定性条件的约束，取值的大小影响最终的模拟精度。

2.2 流线一维输运方程

为了便于描述，忽略了控制方程中的源汇项。通过质量和能量控制方程沿流线方向的重构，进而得到沿每条流线的控制方程：

$$\phi \frac{\partial}{\partial t} C_i + |\mathbf{u}_t| \frac{\partial}{\partial s} F_i + F_i (\nabla \cdot \mathbf{u}_t) + |g| \frac{\partial G_i}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(U_t) + |\mathbf{u}_t| \frac{\partial}{\partial s} \sum_{i=1}^{n_c} F_i h_i + \sum_{i=1}^{n_c} F_i h_i (\nabla \cdot \mathbf{u}_t) + |g| \frac{\partial G_u}{\partial z} = 0 \quad (9)$$

其中 s 为沿弧长坐标, C_i 表示组分物质浓度, kg/m^3 ; U_t 表示总内能, kJ/m^3 ; $F_j = \rho_j f_j$ 表示质量分流量, kg/m^3 ; G_j 和 G_u 表示质量和能量输运方程中的重力分异项。用飞行时间 $\tau = \int_0^s \frac{\varphi}{|\mathbf{u}_t|} d\xi$ 来替换方程中的流线弧长 s , 进而得到沿每条流线基于飞行时间坐标 τ 的物质和能量控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \rho_j S_j + \frac{\partial}{\partial \tau} F_j + F_j \frac{(\nabla \cdot \mathbf{u}_t)}{\varphi} + \frac{G_j}{\varphi} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{U_t}{\varphi} \right) + \frac{\partial}{\partial \tau} \sum_{j=w,o} F_j h_j + \sum_{j=w,o} F_j h_j \frac{(\nabla \cdot \mathbf{u}_t)}{\varphi} + \frac{G_u}{\varphi} = 0 \quad (11)$$

速度的非零散度在质量和能量输运方程中作为源汇项, 以 $F_j (\nabla \cdot \mathbf{u}_t) / \varphi$ 和 $\sum_{j=w,o} F_j h_j (\nabla \cdot \mathbf{u}_t) / \varphi$ 表示。在一维飞行时间网格上, 采用一阶显式或一阶隐式方法, 结合标准的迎风格式进行求解。使用隐式方法时, 采用标准的牛顿迭代求解非线性方程组。

2.3 计算热传导和重力

在全局时间步的最后, 计算原始网格上能量方程的热传导项, 同时使用算子分裂的方法来计算重力效

应^[4-5]。在这些修正后, 流体体积通常有微小的偏差, 与单元孔隙体积不相符。为此, 把体积偏差作为源汇项代入下一个全局时间步的三维压力方程中。

3 测试结果

为了测试模拟器的精度和可靠性, 测试了一系列热水驱问题的案例, 并将该流线模拟器的模拟结果与商业热采模拟器 CMG STARS 的模拟结果作进行了对比。

3.1 案例 1—均质单个反五点井组

模型的基础模型设置如表 1 所示, 油藏初始温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$, 初始压力 $13\ 000\ \text{kPa}$, 初始含油饱和度为 1.0 , 注入温度为 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的热水。水相和油相分别使用二次相对渗透率曲线 $k_{rw} = S_w^2$ 和 $k_{ro} = S_o^2$ 。

案例 1 采用单个反五点井组, 总体尺寸为 $310\ \text{m} \times 310\ \text{m} \times 15\ \text{m}$, 网格数为 $31 \times 31 \times 10$, 孔隙度为 0.3 , 渗透率为 $200\ \text{mD}$ 。流线模拟器捕获了案例 1 的流场信息, 如图 2 所示。此处流线的着色为依据不同的 4 口生产井。流线和传统有限体积油藏数值模拟结果如图 3 所示, 左右两列分别为流线模拟器及商业热采模拟器 STARS 的模拟结果。模拟时间为 $1000\ \text{d}$, 流线模拟

表 1 单个反五点井组和 4 个反五点井组模型基础输入参数

Table 1 Single inverted five spot pattern and four inverted five spot pattern simulation model basic input parameters

输入基础参数	数值	输入基础参数	数值
注入井压力/kPa	18 000	岩石比热容/[kJ/(m ³ ·K)]	2300
生产井压力/kPa	13 000	水比热容/(kJ/kg)	4.19
岩石热传导/[kJ/(m·d·K)]	302	油比热容/(kJ/kg)	2.02
水热传导率/[kJ/(m·d·K)]	51.8	水黏度影响系数 A_j /cp	0.5
油热传导率/[kJ/(m·d·K)]	51.8	水黏度影响系数 B_j /K	0
水密度/(kg/m ³)	1004.26	油黏度影响系数 A_j /cp	0.6541×10^{-5}
油密度/(kg/m ³)	981.76	油黏度影响系数 B_j /K	3969

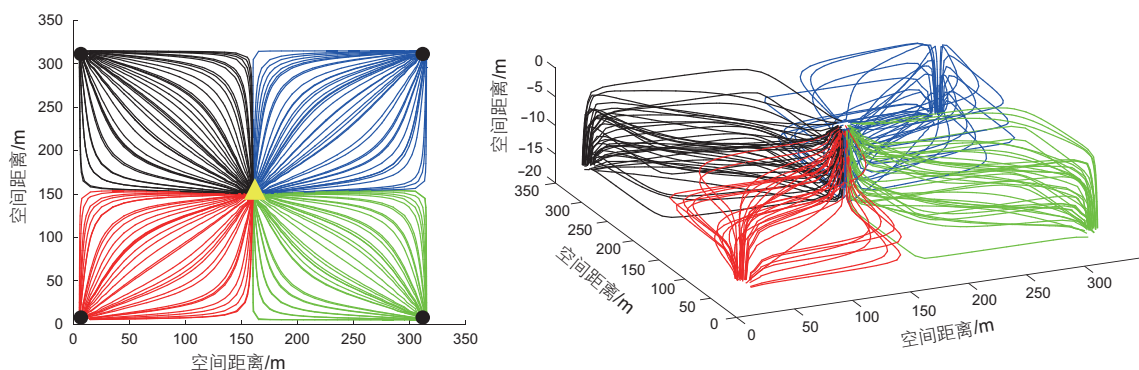


图 2 均质单个反五点井组模型的流线分布(初始时刻)

Fig. 2 Streamline distribution for homogeneous single inverted five spot well pattern (initial stage)

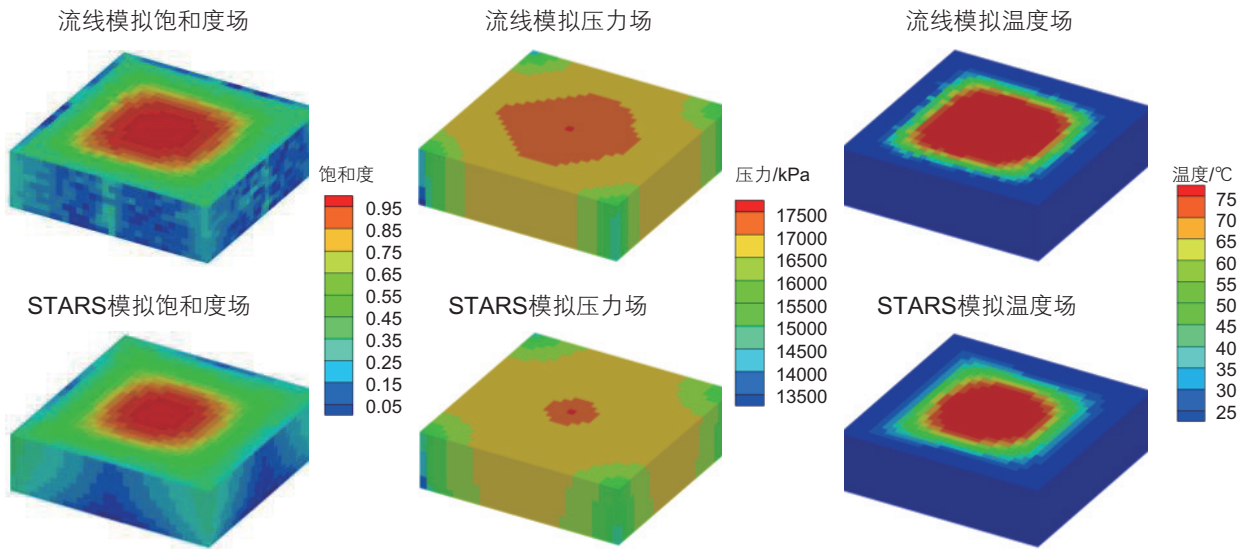


图3 1000 天时流线模拟结果与 STARS 模拟结果对比 (均质单个反五点井组)

Fig. 3 Comparison of simulation results between streamline method and STARS at 1000 days (homogeneous single inverted five spot well pattern)

使用了总共 20 个全局时间步。对比发现，两者具有良好的一致性，说明了该流线模拟器的精度与可靠性。

3.2 案例 2—SPE10 4 个反五点井组热水驱

案例 2 的基本模型设置同案例 1。案例 2 采用 4

个反五点井组，总体尺寸为 810 m × 600 m × 12 m，网格数为 81 × 60 × 4，渗透率取自高度非均质的 SPE10 测试渗透率场中的某一区域^[4]，图 4 为该模型 log₁₀(渗透率) 的分布。流线模拟的初始流线分布和流场信息如图 5 所示。此处流线的着色为依据 4 口

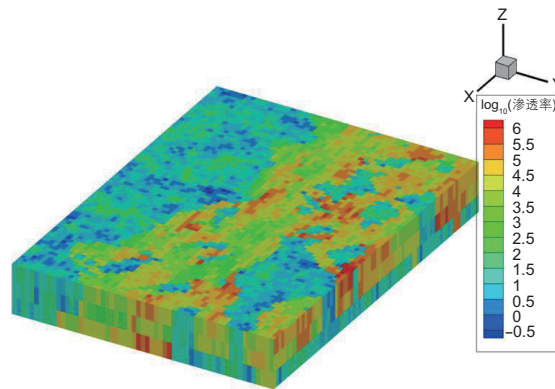


图 4 SPE10 4 个反五点井组模型 log₁₀(渗透率) 分布

Fig. 4 Permeability distribution (log₁₀ scale) for SPE10 four inverted five-spot well patterns

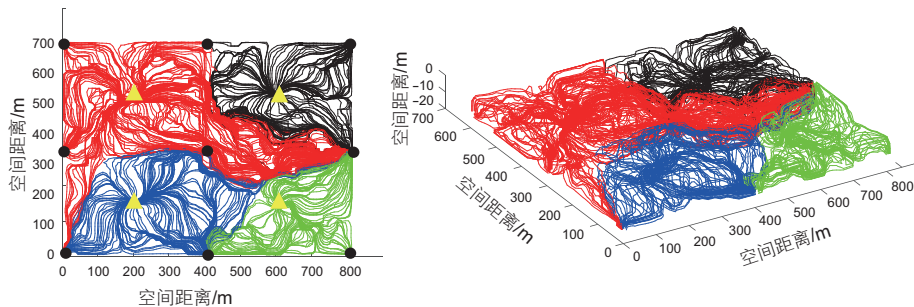


图 5 SPE10 4 个反五点井组模型的流线分布 (初始时刻)

Fig. 5 Streamline distribution for SPE10 four inverted five-spot well patterns

不同的注水井。流线数模采用了20个全局时间步模拟1000 d时间。图6展示了流线模拟器及商业软件STARS的模拟结果。对比发现,两者有良好的一致性。流线数模的数值弥散现象相对较轻,其可以更精确捕捉高度非均质油藏中的指进、水窜进等现象,而全隐式的STARS的结果数值弥散相对较大。同时,流线数值模拟有利于流场的可视化和量化井间连通性。

3.3 案例3—齐40反九点井组热水驱

案例3展示该热水驱流线模拟器在真实热采油藏工程问题中的运用。辽河油田齐40块油藏埋深625~1050 m,孔隙度平均0.315,渗透率平均2000 mD,属于高孔、高渗储层,油层净厚度平均37 m,50℃脱气原油黏度2600 cp,为中厚层状普通稠油油藏。于1987年投入蒸汽吞吐开发,1998年开始实施蒸汽驱先导试验,2003年进行了扩大,均采用

70 m井距反反九点井网开发。后期进入蒸汽突破阶段产量下降,经济效益变差,并于2009年9月开始实施热水驱。

本文选取其中的一个试验井组进行热水驱数值模拟。模型的基础模型设置如表2所示,油藏初始温度40℃,初始压力8500 kPa,初始含油饱和度为1.0,注入温度为150℃的热水。图7展示了齐40反九点井组热水驱模型渗透率和孔隙度分布。

图8为齐40反九点井组热水驱模型初始时刻的流线分布,充分显示了油藏中注采井间的连通性。流线模拟至2017年9月,共使用16个全局时间步。图9为流线模拟结果与STARS模拟结果对比(齐-40反九点井组模型第1层)。针对齐40热水驱问题,流线模拟可获得与常规有限体积数值模拟类似的结果。同时,流线模拟可提高计算速度和模拟效率,并有利于流场可视化、显示井间连通性及量化井间流量。

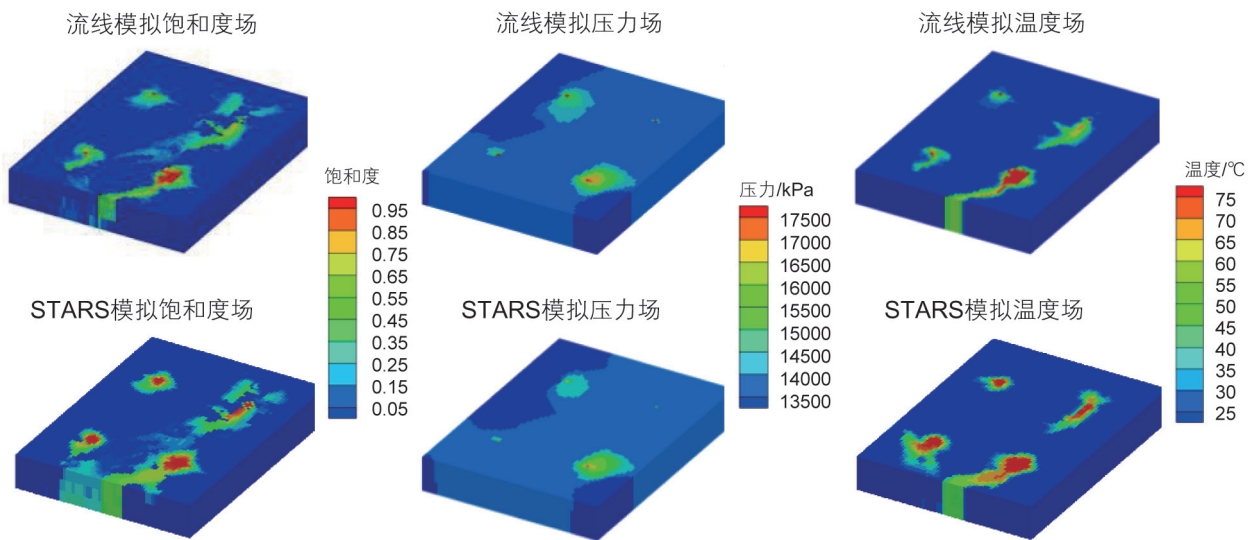


图6 1000 d时流线模拟结果与STARS模拟结果对比(SPE10 4个反五点井组)

Fig. 6 Comparison of simulation results between streamline method and STARS at 1000 days (SPE10 four inverted five-spot well patterns)

表2 齐40模型基础输入参数

Table 2 Qi40 simulation model basic input parameters

输入基础参数	数值	输入基础参数	数值
注入井压力/kPa	9000	岩石比热容/[kJ/(m ³ ·K)]	2280
生产井压力/kPa	8000	水比热容/(kJ/kg)	4.18
岩石热传导/[kJ/(m·d·K)]	160	油比热容/(kJ/kg)	2.02
水热传导率/[kJ/(m·d·K)]	53.5	水黏度影响系数 A_j /cp	0.5
油热传导率/[kJ/(m·d·K)]	11.5	水黏度影响系数 B_j /K	0
水密度/(kg/m ³)	985.8	油黏度影响系数 A_j /cp	6.387×10^{-9}
油密度/(kg/m ³)	962.6	油黏度影响系数 B_j /K	8592.8

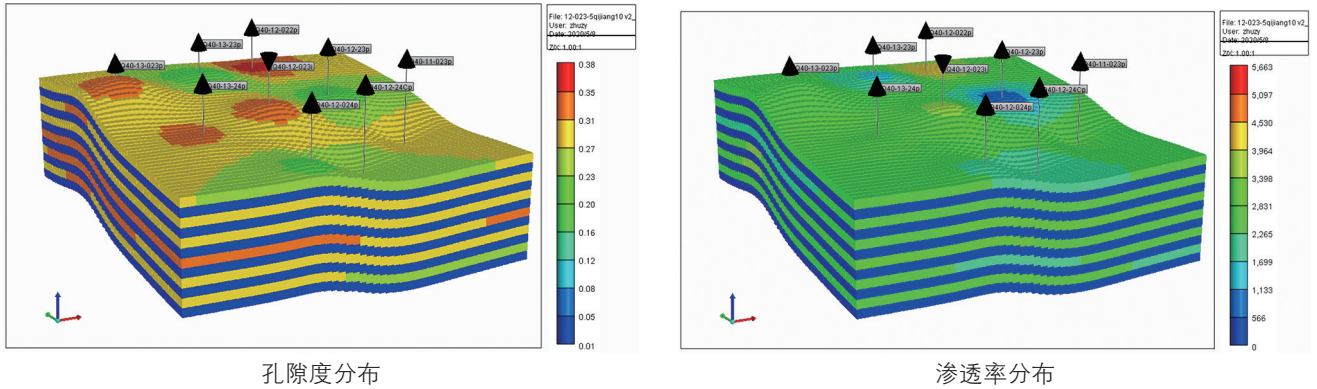


图 7 齐 40 反九点井组热水驱模型渗透率和孔隙度分布

Fig. 7 Permeability and porosity distribution for Qi40 inverted nine-spot well pattern

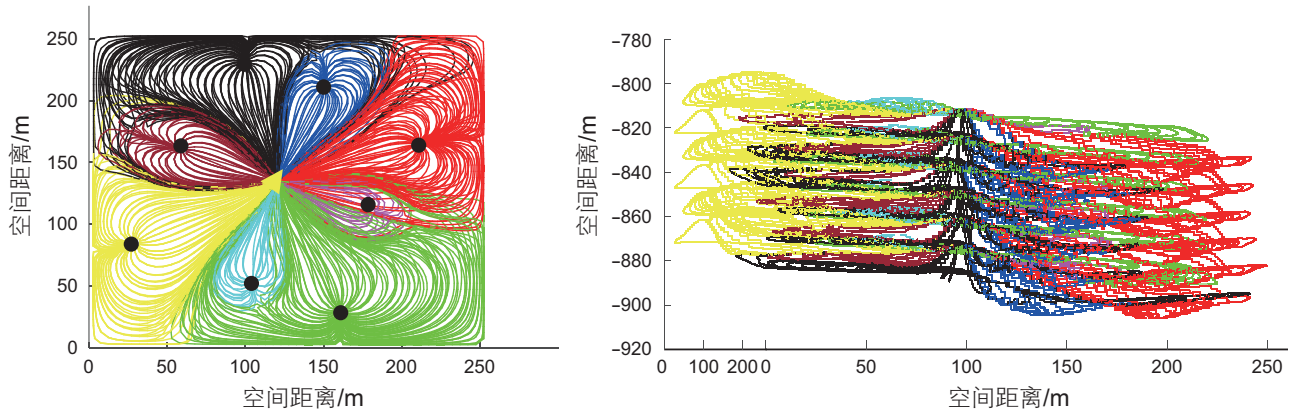


图 8 齐 40 反九点井组热水驱模型的流线分布 (初始时刻)

Fig. 8 Streamline distribution for Qi40 inverted nine-spot well pattern

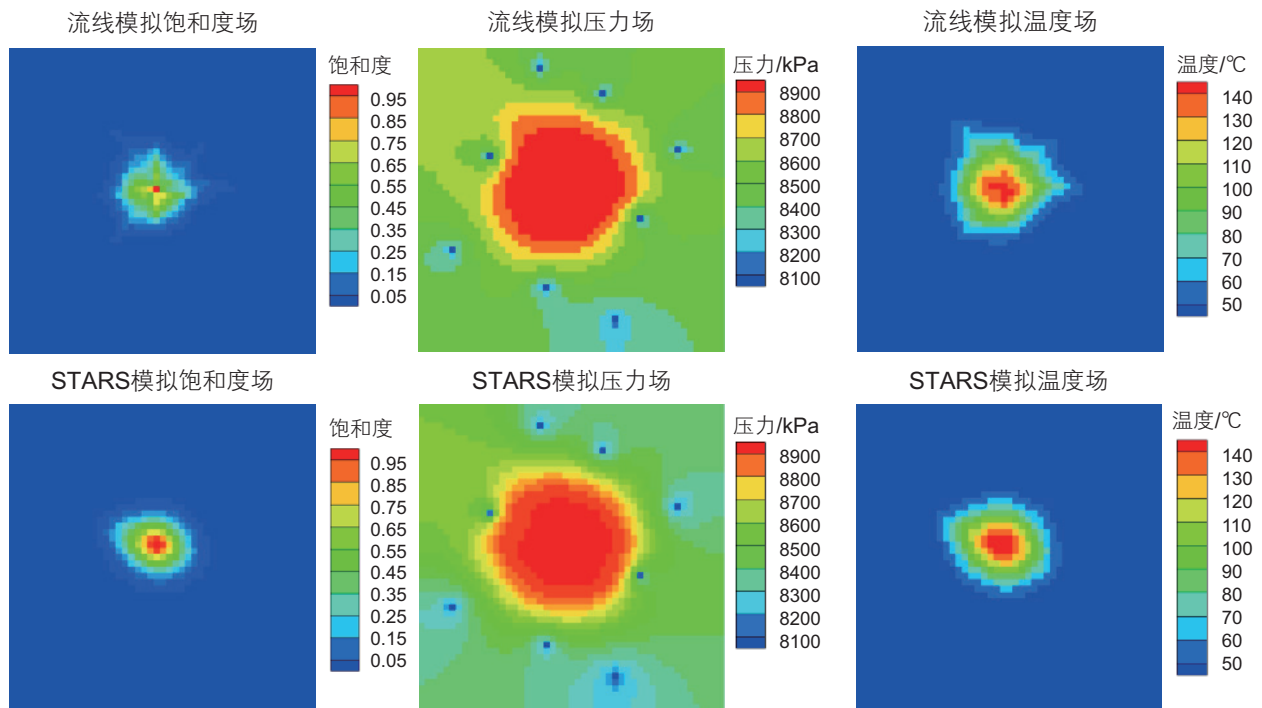


图 9 2017-9-1 时流线模拟结果与 STARS 模拟结果对比 (齐 40 反九点井组模型第 1 层)

Fig. 9 Comparison of simulation results between streamline method and STARS at 2017-9-1 (Qi40 inverted nine-spot well pattern layer 1)

3.4 方法评价

流线模拟对比传统的有限体积模拟方法有两大优势:

(1) 更低的计算成本和更高的模拟效率。流线模拟相关的计算成本通常低于传统的有限体积模拟方法。对于完全隐式的有限体积油藏数值模拟,其计算成本可估计为:

$$T_{\text{FIM}} = [c_{\text{solver}} N^m + c_{\text{jacobi}} N] k \times n_{\text{timestep}} \quad (12)$$

其中 N 是总未知数的数量, k 是平均的牛顿迭代次数, n_{timestep} 是总时间步数。此处假设线性方程组求解效率为未知数的 m 次方, c_{solver} 和 c_{jacobi} 为线性方程组求解和雅可比矩阵生成的计算复杂度的系数。相比之下,流线模拟的计算时间可以估计为:

$$T_{\text{SL}} = (c \cdot n_{\text{streamline}} \cdot M + t_{\text{other}}) \times n_{\text{timestep}} \quad (13)$$

其中 $n_{\text{streamline}}$ 是流线的数量, M 是每条流线上质量和能量输运计算的平均耗时, 而 t_{other} 是花费在压力求解、重力和热传导、映射和追踪流线等操作上的时间, 其计算耗时的主体部分来自于一维输运的计算。流线方法将一个大型矩阵问题降解为一系列未知数数量低很多的一维问题, 从而获得更高的模拟效率。流线方法的计算时间与网格数或总未知数数量呈近线性的关系。

(2) 流线方法是油藏流动可视化和分析井间连通性的有力工具。图6和图10通过流线展示了油藏中流动的轨迹, 按不同受效井或注水井的着色也对油藏进行了区域剖分。每条流线携带一定的流量, 对其进行汇总可计算井间的流量及连通性。更可计算注水井的注水效率: 即某注水井每注一体积的水, 在其流线相连的生产井侧可产出多少体积的油。根据此信息和一定的配注算法, 可对水驱过程进行注采调整和优化: 对于注水效率高的井多注水, 对于注水效率低的井少

注水, 从而达到提高采收率的目的。目前, 商业软件(如3DSL)和科研程序已实现了该注水调整和优化功能^[15-16]。

流线模拟对比传统的有限体积模拟方法的劣势是难以求解非对流项(如重力、毛管力和热传导)占主导的油藏问题。综合其优劣势, 流线方法适用于解决压力驱动或者对流占主导的大型复杂和非均质的油藏模拟问题^[2-3]。

4 结论

(1) 文中展现了三维流线热水驱油藏数值模拟技术。首先求解压力方程, 并计算相速度和追踪流线, 然后基于算子分裂方法沿着流线求解物质和能量守恒方程中的对流项, 最后将结果映射回原始网格, 并考虑了热传导和重力项的影响。

(2) 成功自行研制了三维流线热水驱油藏数值模拟器, 其考虑了黏温和热膨胀效应。进行了包括SPE10和齐40热水驱在内的各种数值模拟分析, 将流线模拟的结果与基于有限体积方法的商业模拟器进行了比较, 证实了该方法的准确性和可靠性。同时也说明了流线模拟在计算效率、可视化和井间连通性方面的优势。

5 展望

本文展现了三维流线热水驱油藏数值模拟技术, 积累的经验, 将有望被商业油藏数值模拟软件所运用(如Frontsim、3DSL), 进而开发出下一代含热水驱功能的商业软件, 从而为油藏工程领域添加新的工具。

三维热水驱问题的解决, 也为流线方法进一步运用于如蒸汽驱或火烧油层等更复杂的热采过程奠定了基础。流线方法有望在未来解决更复杂的热采问题。

参考文献

- [1] 韩大匡. 油藏数值模拟基础[M]. 北京: 石油工业出版社, 1993: 2-9. [HAN D K. Fundamentals of numerical reservoir simulation [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1993: 2-9.]
- [2] BATYCKY R P. A three-dimensional two-phase field scale streamline simulator[D]. Stanford University, 1997.
- [3] THIELE M R, BATYCKY R P, BLUNT M, et al. Simulating flow in heterogeneous systems using streamtubes and streamlines[J]. SPE Reservoir Engineering, 1996, 11(01): 5-12.
- [4] BRATVEDT F, GIMSE T, TEGNANDER C. Streamline computations for porous media flow including gravity[J]. Transport in Porous Media, 1996, 25(1):63-78.
- [5] BERRE I, DAHLE H K, KARLSEN K H, et al. A streamline front tracking method for two and three-phase flow including capillary forces[J]. Contemporary Mathematics, 2002, 295:49-61.
- [6] BERRITSEN M, JESSEN K, MALLISON B, et al. A fully adaptive streamline framework for the challenging simulation of gas-injec-

- tion processes[C]// SPE Annual Technical Conference and Exhibition. 2005.
- [7] DI DONATO G, BLUNT M J. Streamline-based dual-porosity simulation of reactive transport and flow in fractured reservoirs[J]. *Water Resources Research*, 2004, 40(4).
- [8] BERALDO V T, BLUNT M J, SCHIOZER D J. Compressible streamline-based simulation with changes in oil composition[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2009, 12(06):963–973.
- [9] OSAKO I. A rigorous compressible streamline formulation for black oil and compositional simulation[D]. Texas A&M University, 2006.
- [10] 赵林, 姜汉桥, 李俊键, 等. 基于流线的聚合物驱热降解数值模拟[J]. *油气地质与采收率*, 2016, 23(06): 76–81+86. [ZHAO L, JIANG H Q, LI J J, et al. Numerical simulation of thermal degradation of polymer flooding based on streamline[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2016, 23(06): 76–81+86.]
- [11] CLEMENS T, ABDEV J, THIELE M. Improved polymer-flood management using streamlines[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2011, 14(02):171–181.
- [12] BATYCKY R P, FOSTER M, THIELE et al. Parallelization of a commercial streamline simulator and performance on practical models[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2010, 13(03):383–390.
- [13] ZHU Z, GERRITSEN M, THIELE M. Thermal streamline simulation for hot waterflooding[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2010, 13(03):372–382.
- [14] CHRISTIE M A, BLUNT M J. Tenth SPE comparative solution project: A comparison of upscaling techniques [C]// SPE Reservoir Simulation Symposium. 2001.
- [15] ZHU Z, LEI Z, CHEN Z. Waterflood management using hybrid approach of streamline-based inter-well flux information and finite volume reservoir simulation[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- [16] THIELE M R, BATYCKY R P. Using streamline-derived injection efficiencies for improved waterflood management[J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2006, 9(02):187–196.

(责任编辑 李俊键 编辑 马桂霞)