



引用格式: 吴君达, 李治平, 孙 妍, 等. 基于最小二乘支持向量机的二氧化碳驱油沥青质沉积对储层伤害的动态分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(24): 9856-9863

Wu Junda, Li Zhiping, Sun Yan, et al. Dynamic analysis of reservoir damage caused by carbon dioxide displacement asphaltene deposition based on least square support vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(24): 9856-9863

基于最小二乘支持向量机的二氧化碳驱油沥青质沉积对储层伤害的动态分析

吴君达¹, 李治平^{1*}, 孙 妍¹, 师 涛²

(1. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083; 2. 长庆油田分公司第八采油厂, 西安 710021)

摘 要 油田开发过程中注 CO₂ 驱替原油常会发生沥青质沉积现象, 沥青质沉积由于吸附和桥塞作用会伤害储层, 会降低储层的孔渗性。利用数值模拟方法研究沥青质沉积过程及对油田实际生产的影响。首先通过最小二乘支持向量机(LSSVM)机器学习算法拟合了沥青质沉积与气体浓度及压力之间的非线性关系; 之后运用渗透率伤害孔隙-喉道(GPT)模型建立并得到了砂岩储层沥青质沉积量与渗透率降低率的伤害模板; 最后建立了五点井网下的地质模型, 模拟计算得到相应工作制度下沥青质伤害前后的注入井注入能力、生产井生产能力及剩余油分布状况。结果表明: 最小二乘支持向量机(LSSVM)替代模型可以准确地预测不同条件下沥青质的沉积量, 避免了数值模拟中相态计算量过大的问题。在生产过程中, 沥青质沉积主要集中在近井地带, 对注入井的注入能力影响较大。同时沥青质对储层的伤害会增大渗流阻力, 减小气水的波及效率, 从而导致生产井产量的下降和最终采收率的降低。在考虑沥青质伤害后, 研究区 15 a 全区累计产油量由 $7.04 \times 10^4 \text{ m}^3$ 下降到 $5.67 \times 10^4 \text{ m}^3$, 下降了约 24.16%。

关键词 沥青质沉积; LSSVM 机器学习; 储层伤害; 动态分析

中图分类号 TE345;

文献标志码 A

Dynamic Analysis of Reservoir Damage Caused by Carbon Dioxide Displacement Asphaltene Deposition Based on Least Square Support Vector Machine

WU Jun-da¹, LI Zhi-ping^{1*}, SUN Yan¹, SHI Tao²

(1. School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Oil Production Plant No. 8 of Changqing Oilfields, Xi'an 710021, China)

[Abstract] Asphaltene deposition often occurs in CO₂-injected crude oil during oilfield development. Asphaltene deposition damages the reservoir due to adsorption and bridging and reduce the porosity and permeability of the reservoir. Therefore, the process of asphaltene deposition and its effect on oilfield production were studied by numerical simulation. Firstly, least square support vector machine (LSSVM) learning algorithm was used to fit the non-linear relationship among asphaltene deposition, gas concentration and pressure. Then the relationship of asphaltene deposition and the permeability reduction rate of sandstone reservoir was established by using the permeability damage grain-pore-throat (GPT) model. Finally, a geological model under the five-spot well pattern was established to simulate the injection capacity, production capacity and remaining oil distribution before and after asphaltene damage. The results show that LSSVM could accurately predict the amount of asphaltene deposition under different conditions and avoids the problem of excessive phase calculation in numerical simulation. In the production process, asphaltene deposit is mainly concentrated near the well, which has a greater impact on the injection capacity of the injection well. Meanwhile, due to the damage of asphaltene to the reservoir, the increase of seepage resistance could affect the gas-water sweep efficiency, resulting in the decrease of oil production and the final recovery rate. After considering asphaltene damage, the cumulative oil production in the study area decreased from $7.04 \times 10^4 \text{ m}^3$ to $5.67 \times 10^4 \text{ m}^3$ for 15 years, decreasing by 24.16%.

[Key words] asphaltene deposit; LSSVM machine learning; reservoir damage; dynamic analysis

随着世界石油需求的日益增长, 各种提高采收率的技术方法越来越受到重视。20 世纪以来注气

驱替采油的提高原油采收率技术(EOR)不断成熟, 被越来越广泛的运用于油田开发中。而这其中, 又

收稿日期: 2019-11-19; 修订日期: 2020-03-10

基金项目: 国家科技重大专项(2017ZX05009-005)

第一作者: 吴君达(1996—)男, 汉族, 安徽合肥人, 硕士研究生。研究方向: 油气田开发。E-mail: wujd510@163.com。

* 通信作者: 李治平(1963—)男, 汉族, 四川泸州人, 博士, 教授。研究方向: 油气田开发。E-mail: 2002011671@cugb.edu.cn。

投稿网址: www.stae.com.cn

以注入 CO₂ 技术的发展最为迅速。但由于中国原油的重质组分含量高,在注入 CO₂ 的过程中,CO₂ 气体会引起原油中沥青质、石蜡等物质的沉淀。这些沉淀会堵塞孔隙喉道,降低渗透率,伤害储层^[1-5],从而影响最终的原油采收率。

沥青质的沉积较为复杂,传统的计算沥青质沉积量的方法有文献[6-8]提出的 Flory-Huggins 聚合物模型、固液可逆的沥青质沉积模型、气液固三相模型等。但由于传统的相态计算过程较为复杂,很难将其运用于实际的数值模拟中。文献[9-10]将替代模型运用于水平井产能预测及注采参数的优化,效果较好。因此引出替代模型的概念来拟合沥青质沉积与相关参数间的非线性关系来简化计算过程。

前人对沥青质伤害储层的机理进行了大量的研究,文献[11-13]研究了孔隙结构对沥青质伤害储层程度的影响,发现沥青质沉积在较小的孔喉中堵塞率更高,因此沥青质对低渗低孔储层的伤害程度更大;文献[14-16]运用表皮因子定量描述了沥青质对近井地带的伤害及对油井产能的影响。同时部分学者也对实际生产过程沥青质伤害进行了描述;文献[17-18]分别用解析解和数值模拟的方法分析衰竭开发时的沥青质沉积对生产的伤害,但是并未考虑在有注入井补充地层压力时的生产动态。针对以上问题,提出基于最小二乘向量机的沥青质沉积替代模型结合孔隙-喉道伤害模型,通过数值模拟的方法动态分析评价了沥青质沉积在 CO₂ 驱油时对储层的伤害。

1 沥青质沉积相态计算

设混合物体系由 N_c 个组分构成,将沥青质定义为不可析出组分和可析出组分,分别为第 $N_c - 1$ 和 N_c 个组分。假设混合物物质的量为 1 mol,则:

$$n_g + n_l + n_s = 1 \quad (1)$$

式(1)中: n_g 、 n_l 、 n_s 分别为气相、液相和固相的物质的量, mol。

设混合物体系中第 i 个组分的物质的量浓度为 z_i ($i = 1, 2, \dots, N_c$); 第 i 个组分中的气相、液相的物质的量浓度分别为 x_{gi} 、 y_{li} ($i = 1, 2, \dots, N_c$)。而第 N_c 个组分为可析出组分,根据假设条件,固相中只有可析出组分(即 N_c 组分),不含其他组分,由物质平衡原理可得:

$$z_i = x_{gi}n_g + y_{li}n_l, \quad i = 1, 2, \dots, N_c - 1 \quad (2)$$

$$z_{N_c} = x_{gN_c}n_g + y_{lN_c}n_l + n_s \quad (3)$$

引入逸度及平衡常数,分别如式(4)、式(5)所示:

$$K_{gi} = \frac{x_{gi}}{y_{li}}, \quad i = 1, 2, \dots, N_c \quad (4)$$

$$K_{sN_c} = \frac{1}{y_{lN_c}} \quad (5)$$

式中: K_{gi} 为第 i 个组分的气液平衡常数; K_{sN_c} 为第 N_c 个组分的固液平衡常数。

根据物质平衡得到气体、液体组分物质的量的计算公式及迭代公式:

$$x_{gi} = \frac{K_{gi}z_i}{1 - n_s + (K_{gi} - 1)n_g} \quad (6)$$

$$y_{li} = \frac{z_i}{1 - n_s + (K_{gi} - 1)n_g} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{N_c} (x_{gi} - y_{li}) = \sum_{i=1}^{N_c} \frac{(K_{gi} - 1)z_i}{1 - n_s + (K_{gi} - 1)n_g} \quad (8)$$

$$\frac{z_{N_c} - n_s}{1 - n_s + (K_{gN_c} - 1)n_g} = \frac{1}{K_{gN_c}} \quad (9)$$

迭代计算后,根据收敛条件判断是否需要更新平衡常数,通过平衡常数的不断更新得到满足收敛条件的计算结果,得到最终的沥青质沉积量。

2 LSSVM 机器学习算法

沥青质三相平衡计算的方法可以帮助预测沥青质在不同注入气体、不同压力温度下的沥青质沉积量,但是由于其计算的复杂性,很难将其应用于实际的油藏数值模拟中进行计算,而在生产过程中对其动态沉积的模拟计算也更加难以实现。在这里本文通过引入最小二乘支持向量机的替代模型对沥青质沉积量与各参数之间的非线性关系进行了拟合,从而减小计算量。

最小二乘支持向量机是在支持向量机的基础上,引入最小二乘线性系统的概念,用训练误差代替松弛变量,通过变换将不等式约束问题转换为等式约束问题,使求解过程变为解一组线性方程,提高了训练效率与计算速度^[19-20]。其推导过程如下。

设有样本个数为 N 的训练集 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_N]^T$ 为训练样本的输入数据 $\mathbf{y} = [y_1, y_2, \dots, y_N]^T$ 为训练样本的输出数据,则 LSSVM 的问题描述为

$$\min J(\mathbf{w}, \boldsymbol{\rho}) = \frac{1}{2} \mathbf{w}^T \mathbf{w} + \frac{1}{2} \gamma \sum_{k=1}^N e_k^2 \quad (10)$$

$$\text{s. t. } y_k [\mathbf{w}^T \boldsymbol{\varphi}(x_k) + \mathbf{b}] = 1 - e_k, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中: J 为优化目标函数; $\mathbf{w} = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ 为权重向量, $\mathbf{w} \in \mathbf{R}^N$, \mathbf{R}^N 为 N 维实数集; $\mathbf{e} = [e_1, e_2, \dots, e_N]^T$ 为松弛因子, $\boldsymbol{\rho} \in \mathbf{R}^N$; γ 为正则化参数; x_k 为第 k 个训练样本的输入数据; y_k 为第 k 个训练样本

的输出数据; b 为偏移量 $b \in R$; $\varphi(x_k)$ 为核空间映射函数。

利用拉格朗日乘数法将问题转换为对单一参数 即 α 的求极大值问题。

$$L(w, b, \rho, \alpha) = J(w, \rho) - \sum_{k=1}^N \alpha_k \{ y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k \} \quad (12)$$

式(12)中: L 为拉格朗日函数; $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N]^T$ 为拉格朗日因子 $\alpha \in R^N$ 。

依次对各个变量进行求导,并使导数为0。

$$\frac{\partial L}{\partial w} = 0 \rightarrow w = \sum_{k=1}^N \alpha_k \varphi(x_k) \quad (13)$$

$$\frac{\partial L}{\partial b} = 0 \rightarrow \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \rho_k} = 0 \rightarrow \alpha_k = \gamma e_k \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha_k} = 0 \rightarrow y_k [w^T \varphi(x_k) + b] - 1 + e_k = 0 \quad (16)$$

联立式得到:

$$\begin{bmatrix} 0 & y^T \\ y & \Omega + \gamma^{-1} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_N \end{bmatrix} \quad (17)$$

式(17)中: I 为单位矩阵 $I_N = [1, 1, \dots, 1]^T$; Ω 为核函数矩阵, $\Omega = Z^T Z$; $Z = [\varphi(x_1), \varphi(x_2), \dots, \varphi(x_N)]^T$ 。

最后得到 LSSVM 分类表达式,如式(18)所示:

$$y(x) = \text{sign} \sum_{k=1}^N \alpha_k y_k K(x, x_k) + b \quad (18)$$

式(18)中: x 为某样本; $K(x_i, x_j)$ 为核函数。

3 渗透率伤害模型

岩石的孔隙度和渗透率是评价储集层的重要指标,通过回归方程可以拟合得到特定储集层岩性条件下孔隙度与渗透率的数学关系。通过文献调研,对 Chilingar^[21] 的 600 多组砂岩样品的孔渗数据进行了分类统计,并使用砂岩的孔隙度、渗透率数据进行了回归拟合,得到如表 1 所示的不同砂岩类型的孔隙度-渗透率幂函数数学关系。

表 1 砂岩储层孔隙度渗透率拟合幂函数关系
Table 1 Power function relationship of sandstone reservoir porosity and permeability fitting

参数	粗粒砂岩	中粒砂岩	细粒砂岩
颗粒直径/mm	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.1
孔渗关系	$K = 0.4815 \varphi^{2.947}$	$K = 0.0144 \varphi^{4.021}$	$K = 5 \times 10^{-5} \varphi^{5.624}$
孔隙度-渗透率幂函数关系指数 n	2.947	4.0209	5.6241

注入 CO_2 过程中所导致的沥青质沉积会堵塞岩石的孔隙,从而降低储层渗透率。利用表 1 中不同种类砂岩渗透率与孔隙度的幂函数公式,可以计算得到沥青质对储层的伤害:

$$\varphi = \varphi_0 - \varepsilon \quad (19)$$

$$K = a\varphi^n \quad (20)$$

式中: φ_0 为初始孔隙度; φ 为沥青沉淀后的孔隙度; ε 为沥青沉淀的岩石孔隙体积分数; K 为沥青沉淀后的绝对渗透率, mD; a 为孔隙度-渗透率幂函数关系的系数; n 为孔隙度-渗透率幂函数关系指数。

通过伤害前后渗透率的改变可以得到渗透率伤害率 $1/R_K$ 与沥青质含量的关系,如式(21)所示:

$$\frac{1}{R_K} = \frac{K}{K_0} = \left(\frac{\varphi_0 - \varepsilon}{\varphi_0} \right)^n \quad (21)$$

式(22)中: K_0 为初始绝对渗透率, mD; $1/R_K$ 为渗透率伤害率。

由式(21)可知,渗透率伤害率变化趋势与 n 密切相关, n 越大,渗透率的伤害趋势也越大,所以粗砂岩渗透率伤害趋势最大,粉砂岩的伤害趋势最小。渗透率伤害率的变化趋势随孔隙度的增长而逐渐减小。

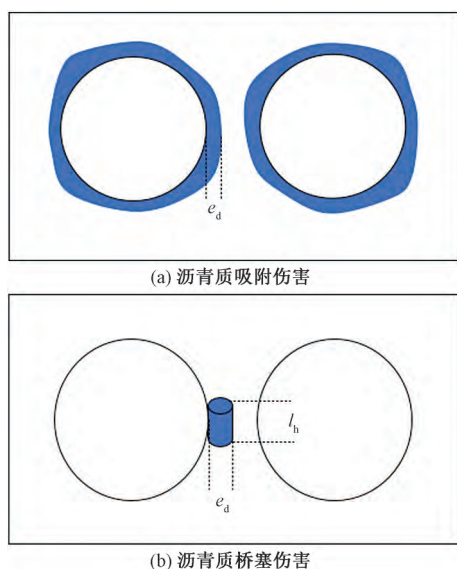
上述方法的计算过程较为简单,但仅考虑了沥青质堵塞岩石孔隙所造成的渗透率伤害,而实际上在 CO_2 注气过程中,除了沥青质堵塞以外,还存在大量的沥青质吸附作用所导致的渗透率伤害。Nabzar 等^[22] 在 1996 年提出 GPT 模型,通过流体在孔喉通道中的流动模拟岩石多孔介质中的流动问题,利用岩石孔隙度、喉道直径和喉道长度参数表征沥青质沉积对储层渗透率的影响,综合考虑了吸附作用和桥塞作用两种渗透率伤害的影响。

吸附作用的原理如图 1(a) 所示,一部分沥青吸附在岩石孔隙内表面,导致喉道变窄;桥塞作用的原理如图 1(b) 所示,另一部分沥青桥塞堵在喉道处,使流动空间减小。假设桥塞堵塞的沥青量为 f ,吸附的沥青量为 $\varepsilon - f$,渗透率降低率可用式(22)表示:

$$\frac{1}{R_K} = \left[1 - \frac{(1-f)\varepsilon C_1 d_g}{3f_s(1-\varphi_0)d_h} - \frac{f\varepsilon l_u(d_g + d_h)}{l_h d_h} \right]^4 \quad (22)$$

式(22)中: C_1 为固相沉积特征的系数; f_s 为表面形状因子; d_g 为岩石颗粒的直径, mm; d_h 为岩石初始喉道直径, mm; l_u 为 GPT 模型中单位元的大小, mm; l_h 为喉道长度, mm。

模拟中,设置 $f=0.2$ 。通过 GPT 模型可以建立不同砂岩粒径的模型,之后计算得到不同岩石粒径的渗透率伤害模板,如图 2 所示,进而可以得到不同



e_d 为沥青质沉积厚度; l_h 为喉道长度

图1 沥青质伤害示意图

Fig. 1 Schematic diagram of asphaltene damage

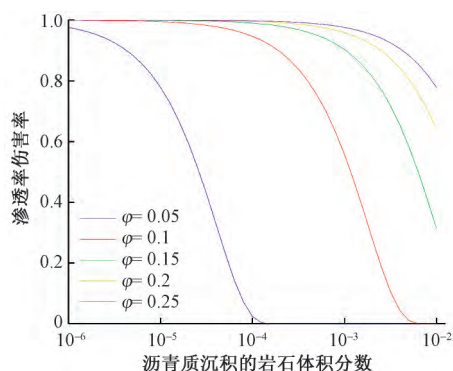


图2 细粒砂岩渗透率降低率与沥青沉淀量的关系

Fig. 2 Relationship between permeability reduction rate of fine sandstone and amount of asphalt precipitation

粒径砂岩在不同孔隙度下渗透率降低率与沥青质沉淀量的非线性关系。

4 实例计算分析

4.1 训练及验证沥青质沉积 LSSVM 预测模型

选取某油田实际原油组分对模型进行拟合。通过随机选取 1 500 组不同压力不同 CO_2 浓度条件下的沥青质沉积理论值对沥青质 LSSVM 预测模型进行训练,训练结果如图 3 所示。之后分别选取 16、20、24、28 MPa 下的沥青质沉积理论值对训练后得到的 LSSVM 预测模型进行验证,其验证结果如图 4 所示。从图 4 可以看出,该替代模型预测结果精度较高,可用于之后的实例计算。

4.2 建立地质模型及工作制度

建立孔隙度渗透率符合高斯分布的地质模

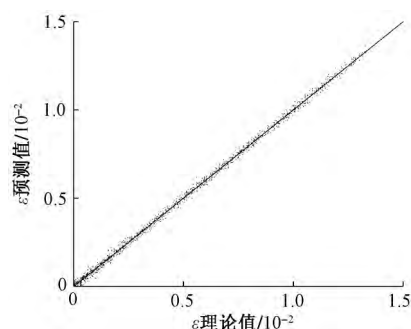


图3 沥青质预测 LSSVM 模型训练结果

Fig. 3 Training results of asphalt prediction LSSVM model

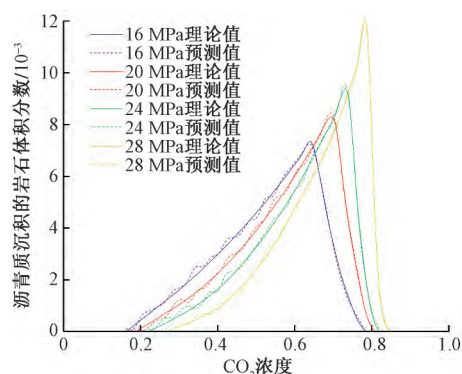


图4 沥青质预测 LSSVM 模型预测结果与理论值对比

Fig. 4 Comparison between prediction results of asphalt prediction LSSVM model and theoretical values

型,井网设置为 5 点井网(1 口注入井 I1; 4 口生产井, P1 ~ P4)。平面上 x 、 y 方向上各划分 50 个网格,网格步长为 20 m,纵向上分为 1 层,总网格数为 2 500 个。该模型的渗透率分布场如图 5 所示。

模型注入 CO_2 提高采收率主要采用气水交替注入的方式,气水各注入 3 个月,总共注入 15 a,形成 60 个段塞。限制注入井最大注入压力为 26 MPa,生产井的最低井底压力为 18 MPa。

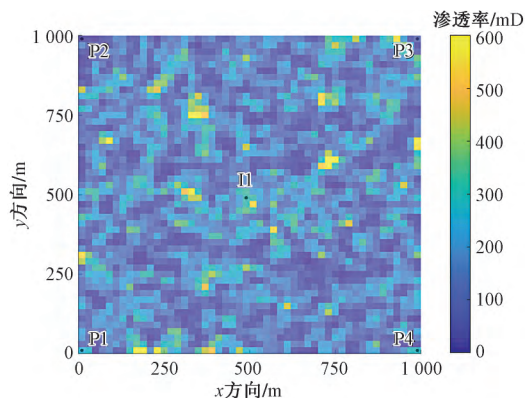


图5 渗透率分布场

Fig. 5 Permeability distribution field

4.3 沥青质沉积对产量的影响

在不考虑沥青质伤害储层的情况下,注水产液动态预测曲线如图 6(a) 所示,注气曲线如图 6(b) 所示。不考虑沥青质伤害时,注入井日注气量为 $5\,000 \sim 6\,000\text{ m}^3/\text{d}$,日注水量为 $10 \sim 20\text{ m}^3/\text{d}$;而在考虑沥青质伤害的情况下,注入井日注气量为 $4\,000 \sim 4\,500\text{ m}^3/\text{d}$,日注水量为 $6 \sim 10\text{ m}^3/\text{d}$ 。对比发现,沥青质伤害储层后,注入井的注气能力下降了 20% 左右,而注水能力下降了 40% 左右。

对比沥青质伤害前后全区日产油、日产水、日产气[图 7(a)]及全区累计产油、产气、产水[图 7(b)]可以看出,在进行水气交替注入 15 a 后,沥青质伤害储层使得全区的累计产油量由 $7.04 \times 10^4\text{ m}^3$ 下降到 $5.67 \times 10^4\text{ m}^3$,累计产油量下降了 24.16%。

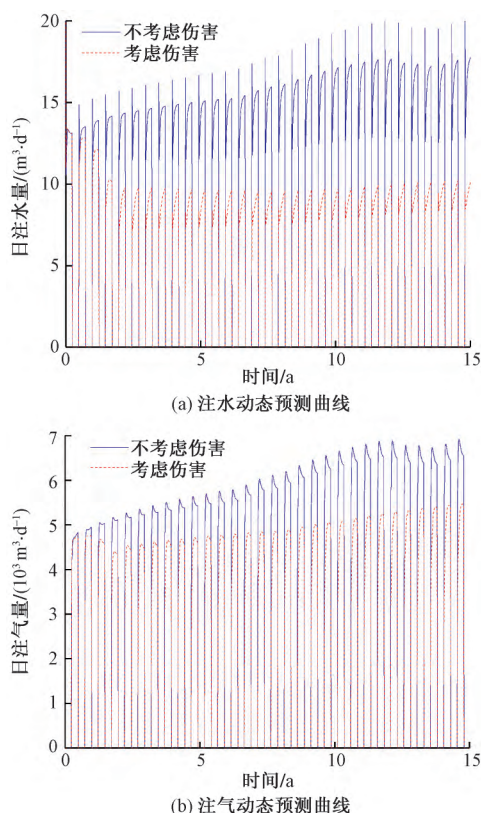


图 6 不考虑沥青质伤害和考虑沥青质伤害情况下注水、注气动态预测曲线

Fig. 6 Dynamic prediction curve of water injection and gas injection without considering asphaltene damage and considering asphaltene damage

4.4 沥青沉积对气水波及效果及地层压力的影响

不同生产时间下的全区渗透率伤害如图 8 所示,沥青质的沉积量随生产时间的延长逐渐增加。从图 8 可以看出,沥青质沉积主要集中在注入井近井地带约 100 m,越靠近井筒的地层沥青质沉积量越大、伤害程度也越大,这主要是因为注入井近井

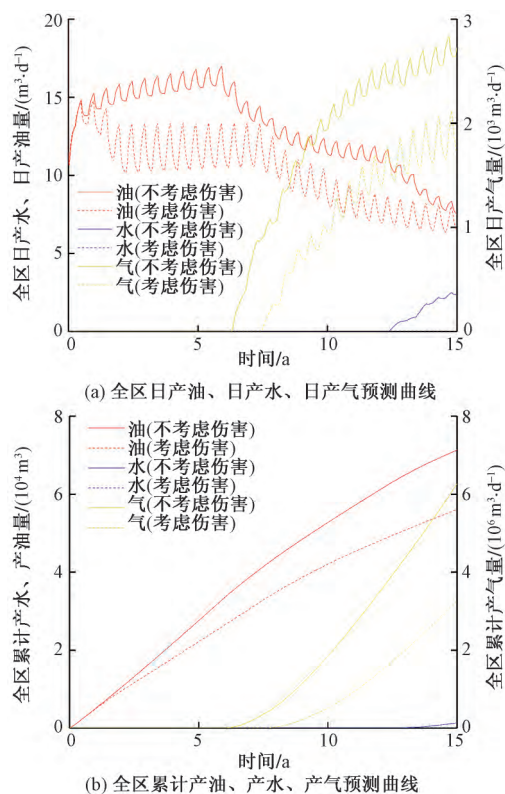


图 7 不考虑沥青质伤害和考虑沥青质伤害情况下全区日产油、日产水、日产气及全区累计产油、产气、产水预测曲线
Fig. 7 Daily oil, daily water and daily gas and cumulative oil, gas and water production without considering asphaltene damage and considering asphaltene damage

地带 CO_2 浓度及压力变化较大,易发生沉积。沥青质伤害前后含油、含气、含水饱和度分布场如图 9 ~ 图 11 所示,可以发现沥青质伤害使得气水波及效率显著下降,因此原油采收率也显著降低。

全区地层压力分布场如图 12 所示,可以看出沥青质伤害地层后的全区平均压力显著下降,这主要是因为沥青质损伤地层渗透率,导致油气水三相渗流阻力的增大,加大了对地层压力的损耗。

5 结论

通过 CO_2 驱油过程中沥青质沉积对油井产能影响的模拟计算研究,以及驱油生产过程中储层伤害的敏感性因素分析,主要得出以下结论。

(1) 回归拟合了 4 种颗粒尺寸砂岩的孔渗幂函数关系,综合分析了渗透率幂函数伤害模型和渗透率 GPT 伤害模型,发现 GPT 模型能够较好地反映喉道变窄引起的渗透率伤害,符合实际情况。

(2) 利用气-液-沥青三相沥青质沉积计算的结果,训练了沥青质沉积的 LSSVM 预测模型,该模型能够较好地拟合沥青质沉积与压力及 CO_2 浓度的非线性关系。

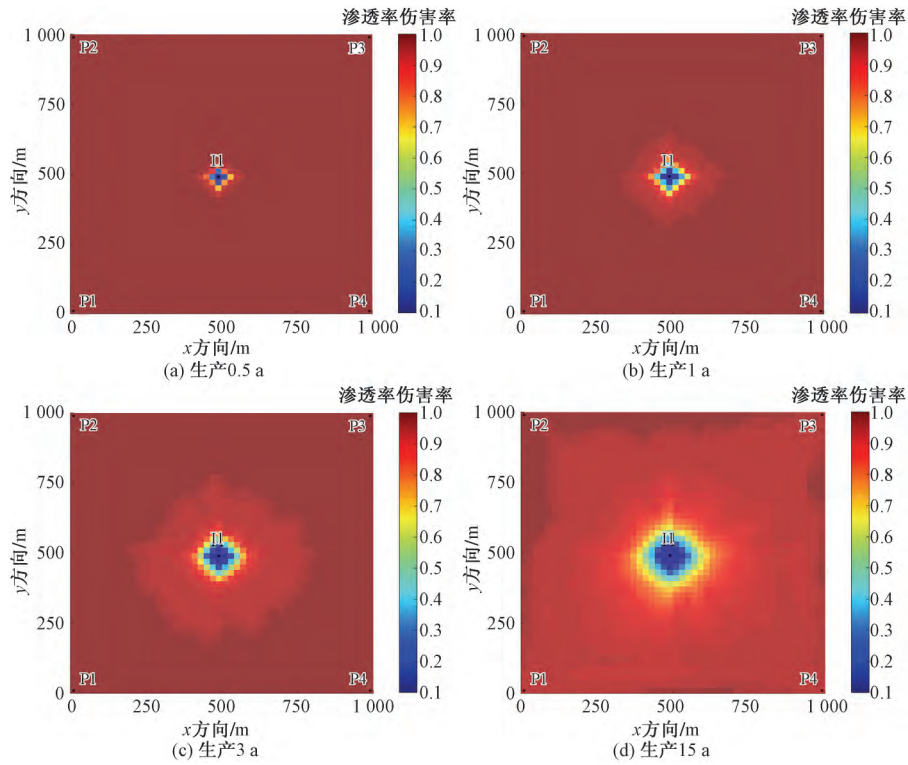


图8 不同生产时间的渗透率伤害率分布场

Fig. 8 Permeability damage rate distribution field with different production time

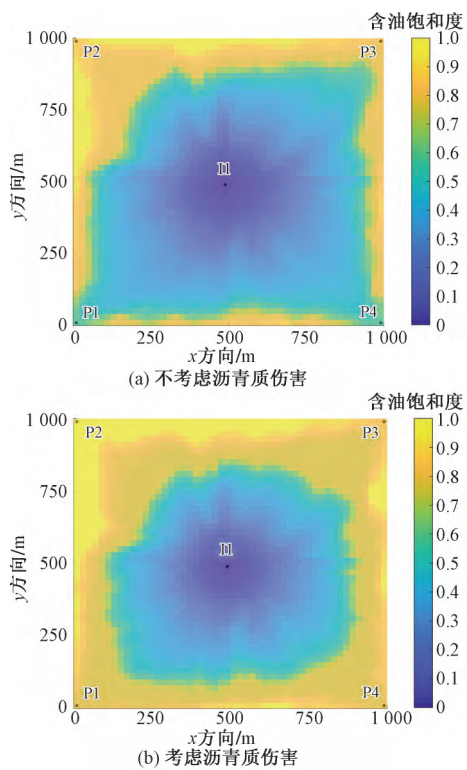


图9 不考虑沥青质伤害和考虑沥青质伤害情况下
含油饱和度分布

Fig. 9 Oil saturation distribution without considering asphaltene damage and with considering asphaltene damage

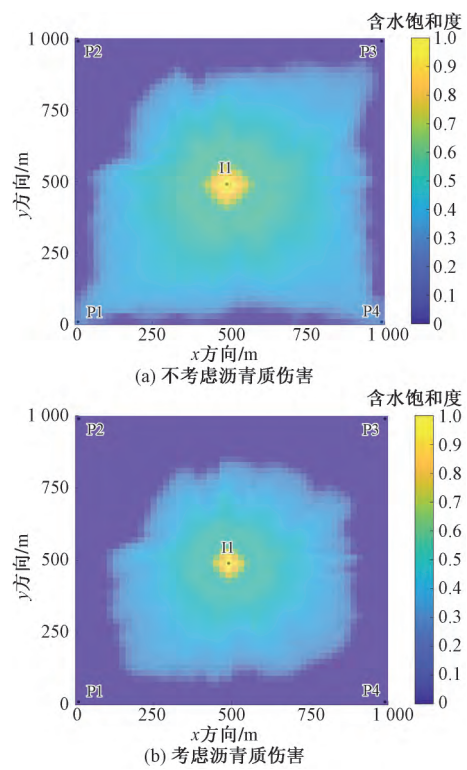


图10 不考虑沥青质伤害和考虑沥青质伤害情况下
含水饱和度分布

Fig. 10 Water saturation distribution without considering asphaltene damage and with considering asphaltene damage

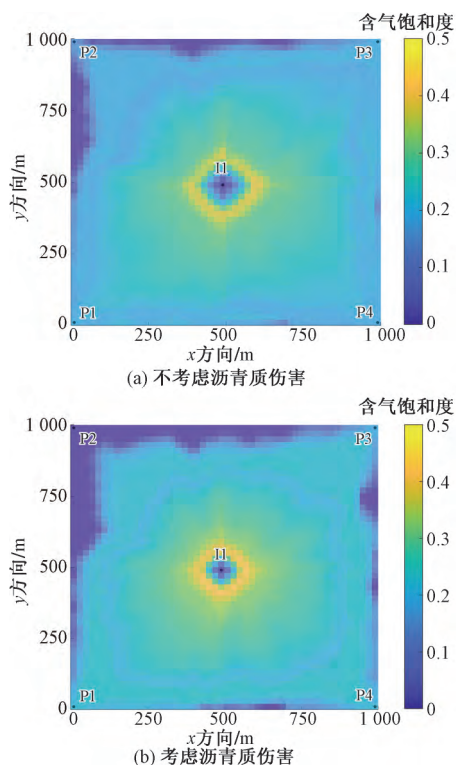


图 11 不考虑沥青质伤害和考虑沥青质伤害情况下含气饱和度分布

Fig. 11 Gas saturation distribution without considering asphaltene damage and with considering asphaltene damage

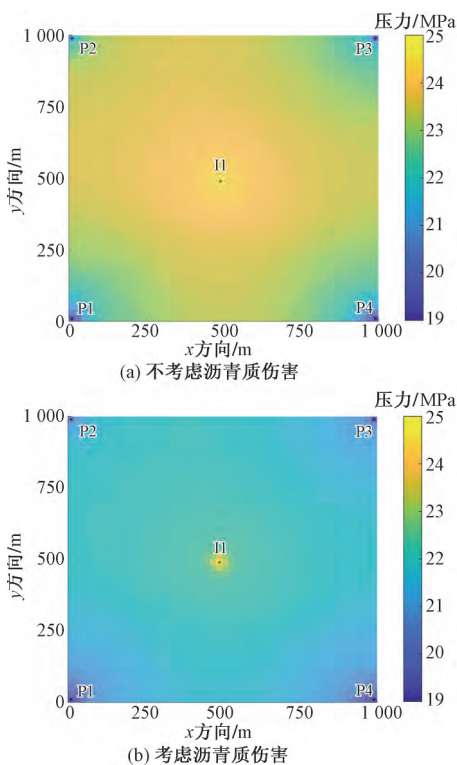


图 12 不考虑沥青质伤害和考虑沥青质伤害情况下压力场图

Fig. 12 Pressure field diagram without considering asphaltene damage and with considering asphaltene damage

(3) 在 GPT 模型和地质模型的基础上,结合原油组分模型以及相应的地层参数,建立了采用五点法生产的动态均值模型。在模拟气水交替注入生产的同时,考虑了沥青质沉积、吸附和桥塞作用的共同影响。计算结果显示 15 a 全区累计产油量由 $7.04 \times 10^4 \text{ m}^3$ 下降到 $5.67 \times 10^4 \text{ m}^3$,累计产油量下降了 24.16%。

(4) 分析了由沥青质沉积引起的储层渗透率伤害对气水波及效果的实际影响,并评价了生产过程中因渗透率降低所导致的渗流阻力增大对地层平均压力的影响。结果表明,沥青质沉积会降低气水的波及系数并使平均地层压力显著降低。

参考文献

- 1 赵凤兰, 鄢捷年. 沥青质沉积引起的储层损害与对策[J]. 油田化学, 2002, 19(4): 368-372.
Zhao Fenglan, Yan Jienian. Reservoir damage caused by asphaltene deposition and countermeasures[J]. Oilfield Chemistry, 2002, 19(4): 368-372.
- 2 杨彪, 于永, 李爱山. CO_2 驱对油藏的伤害及其保护措施[J]. 石油钻采工艺, 2002, 24(4): 42-44, 84.
Yang Biao, Yu Yong, Li Aishan. Damage to reservoir caused by CO_2 flooding and protective measures[J]. Petroleum Drilling and Production Technology, 2002, 24(4): 42-44, 84.
- 3 曹松, 杜政学, 吴仲岩, 等. 伊拉克 H 油田原油沥青质沉积趋势预测及分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(33): 36-40.
Cao Song, Du Zhengxue, Wu Zhongkui, et al. Prediction and analysis of the trend of asphaltene deposition in Iraq's H oil field[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(33): 36-40.
- 4 舒福昌, 张文秀. 伊朗 BA 原油沥青质沉积及抑制高压模拟实验[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(28): 87-92.
Shu Fuchang, Zhang Wenxiu. Simulation experiment on bitumen deposition and suppression of BA crude oil in Iran[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(28): 87-92.
- 5 钱坤, 杨胜来, 刘盼. 原油沥青质初始沉淀压力实验测定研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(31): 42-45.
Qian Kun, Yang Shenglai, Liu Pan. Experimental determination of initial precipitation pressure of crude asphaltene[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(31): 42-45.
- 6 Hirschberg A, de Jong L N J, Meijers J G, et al. Influence of temperature and pressure on asphaltene flocculation[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1984, 24(3): 283-293.
- 7 Chung T H. Thermodynamic modeling for organic solid precipitation[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Washington D. C.: Society of Petroleum Engineers, 1992: 869-878.
- 8 Nghiem L, Coombe D, Farouq S M. Compositional simulation of asphaltene deposition and plugging[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. New Orleans: Society of Petroleum Engineers, 1998: 129-140.
- 9 何芬, 石德佩, 李涛, 等. 水平井产能替代比模型研究与应用[J]. 录井工程, 2018, 29(2): 5-8, 107.
He Fen, Shi Depei, Li Tao, et al. Study and application of productivity replacement ratio model for horizontal wells[J]. Logging Engi-

- neering, 2018, 29(2): 5-8, 107.
- 10 王 链,张 亮,赖枫鹏,等. 基于替代模型的油藏注采参数多目标优化设计[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(26): 178-185.
Wang Lian, Zhang Liang, Lai Fengpeng, et al. Multi-objective optimization design of injection-production parameters for reservoir based on alternative model[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(26): 178-185.
- 11 唐梅荣,张同伍,白晓虎,等. 孔喉结构对 CO₂ 驱储层伤害程度的影响[J]. 岩性油气藏, 2019, 31(3): 113-119.
Tang Meirong, Zhang Tongwu, Bai Xiaohu, et al. Effects of pore throat structure on damage degree of CO₂ flooding reservoirs[J]. Lithologic Oil and Gas Reservoirs, 2019, 31(3): 113-119.
- 12 王 琛,李天太,赵金省,等. 利用核磁共振技术研究沥青质沉积对低渗储层孔隙结构的影响[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(4): 1700-1706.
Wang Chen, Li Tantai, Zhao Jinsheng, et al. Study on influence of asphaltene deposition on pore structure of low-permeability reservoirs by nuclear magnetic resonance technology [J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(4): 1700-1706.
- 13 王 琛,李天太,高 辉,等. CO₂ 驱沥青质沉积对岩心的微观伤害机理[J]. 新疆石油地质, 2017, 38(5): 602-606.
Wang Chen, Li Tantai, Gao Hui, et al. Microdamage mechanism of CO₂ driven asphaltene deposition on rock cores[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2017, 38(5): 602-606.
- 14 高 达,张乔良,米洪刚. 沥青质沉积对油井产能影响的模拟分析——以南海北部湾盆地 W-1 油田为例[J]. 中国海上油气, 2016, 28(6): 53-58.
Gao Da, Zhang Qiaoliang, Mi Honggang. Simulation analysis of influence of asphaltene deposition on oil well productivity: a case study of W-1 oilfield in Beibu Bay Basin, south China Sea[J]. China Offshore Oil & Gas, 2016, 28(6): 53-58.
- 15 姜汉桥,杨 滨,姚 凯,等. 胜利油田王斜区块高凝油油藏近井地带储层有机伤害试验研究[J]. 石油天然气学报, 2010, 32(2): 108-111, 401.
Jiang Hanqiao, Yang Bin, Yao Kai, et al. Experimental study on reservoir organic damage in near-well zone of high condensating oil reservoir in Wangxie block of Shengli oilfield[J]. Chinese Journal of Petroleum and Natural Gas, 2010, 32(2): 108-111, 401.
- 16 汪伟英,张公社,熊国荣. 沥青沉积引起的地层伤害表皮因子预测方法[J]. 石油钻采工艺, 2003, 25(1): 52-54, 85.
Wang Weiying, Zhang Gongshe, Xiong Guorong. Prediction method of formation damage cuticle factor caused by asphalt deposition[J]. Oil Drilling and Production Technology, 2003, 25(1): 52-54, 85.
- 17 崔传智,刘力军,武改红,等. 考虑沥青质沉积的储层压力场数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(35): 40-45.
Cui Chuazhi, Liu Lijun, Wu Gaihong, et al. Numerical simulation of reservoir pressure field considering asphaltene deposition[J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(35): 40-45.
- 18 廉培庆,马翠玉,张继龙,等. 衰竭开发沥青质析出相态及数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(25): 45-50.
Lian Peiqing, Ma Cuiyu, Zhang Jilong, et al. Phase separation and numerical simulation of asphaltene in depleted development [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(25): 45-50.
- 19 林关成,吴伟伟. 基于最小二乘支持向量机的阵列波束优化研究[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(2): 196-200.
Lin Guancheng, Wu Weiwei. Research on array beam optimization based on least square support vector machine[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(2): 196-200.
- 20 盛 怡,焦元钊. 基于 LSSVM 的小电流接地故障融合选线[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(33): 8874-8877, 8894.
Sheng Yi, Jiao Yuanzhao. Low current grounding fault fusion based on LSSVM [J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(33): 8874-8877, 8894.
- 21 Chilingar G V. Relationship between porosity, permeability, and grain-size distribution of sands and sandstones[J]. Developments in Sedimentology, 1964, 1: 71-75.
- 22 Nabzar L, Chauveteau G, Roque C. A new model for formation damage by particle retention [C]//SPE Formation Damage Control Symposium. Lafayette: Society of Petroleum Engineers, 1996: 1-16.