

基于 EnKF 的致密气藏离散裂缝模型自动历史拟合

廉培庆 赵华伟 吴 双 商晓飞 段太忠

中国石化石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要:近年来,离散裂缝模型是描述裂缝水淹的常用模拟模型,但由于涉及的地质和流体参数较多,手动修改参数工作量大、效率低,而自动化历史拟合是提高离散裂缝模型拟合精度的有效方法。以四川须家河组致密气藏为例,建立了基于集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)的致密气藏离散裂缝模型自动历史拟合方法。将裂缝划分为大、中、小三个级别,大裂缝采用离散裂缝模型,中、小裂缝采用等效介质模型,运用 EnKF 方法对须家河组 X2 区块气水生产数据进行了历史拟合,通过自动调整各砂组水体能量和生产井周围孔渗使得生产井的整体拟合符合率达到 86%。基于 EnKF 的离散裂缝自动历史拟合方法为裂缝性致密气藏数值模拟提供了有效借鉴。

关键词:致密气藏;离散裂缝;集合卡尔曼滤波;自动历史拟合

DOI:10. 3969 /j. issn. 1006-5539. 2023. 02. 010

Automatic history matching of discrete fracture model of tight gas reservoir based on EnKF method

LIAN Peiqing, ZHAO Huawei, WU Shuang, SHANG Xiaofei, DUAN Taizhong

Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing, 100083, China

Abstract: Discrete fracture model is a commonly used numerical simulation model to describe fracture water flooding in recent years. Due to many geological and fluid parameters involved, artificially modifying these parameters requires a lot of work, yet is inefficient. The automatic history matching method is an effective method to improve the matching accuracy of discrete fracture models. Taking Xujiahe tight gas reservoir in Sichuan province as an example, this paper establishes an automatic history matching method for discrete fracture model of tight gas reservoir based on Ensemble Kalman Filter (EnKF). The fractures are divided into three levels: large, medium and small scales. Discrete fractures model are used for large fractures, and equivalent methods are used for small and medium fractures to establish a geological model. The EnKF method is used for historical matching of gas and water production data of X2 block, Xujiahe formation. By automatically adjusting the water energy of each sand zone and the porosity and permeability around the production wells, the overall matching rate reaches 86%, which provides an effective reference

收稿日期:2022-11-28

基金项目:国家自然科学基金“基于多点地质统计学的离散裂缝网络建模新方法”(41702359);中国石油化工股份有限公司基础前瞻项目“基于应力场数值模拟与智能优化的裂缝建模方法”(P22208-2)

作者简介:廉培庆(1983-),男,山东菏泽人,研究员,博士,主要从事油气渗流理论和油气田开发工程方向研究。E-mail: lianpq. syky@ sinopec. com

for numerical simulation of fractured tight gas reservoirs.

Keywords: Tight gas reservoir; Discrete fracture; Ensemble Kalman Filter (EnKF); Automatic history matching

0 前言

裂缝性油气藏储层内幕结构复杂,裂缝位置、几何尺寸和孔渗等参数非均质性显著。为了模拟致密砂岩气藏内裂缝的水淹过程,可把大尺度的裂缝单独提出来,形成离散裂缝模型,中、小尺度裂缝仍通过近似建立等效介质模型。由于该方法更贴近油气藏实际特征,是近年来描述裂缝水淹的常用模型^[1-3]。离散裂缝模型中涉及的参数极多,常规方法通过油藏工程师手动修改储层(或渗流)参数进行历史拟合,工作量较大、拟合时间过长、效率低。自动化历史拟合手段可大幅减少油藏工程师的工作量,提高工作效率。目前,关于致密砂岩气藏离散裂缝模型参数多、裂缝内气水前缘不确定性等问题,尚未有学者研究如何通过自动历史拟合方法提高生产动态的拟合精度^[4-6]。

集合卡尔曼滤波(Ensemble Kalman Filter, EnKF)方法作为近年来最受关注的历史拟合方法,由以往只能获取一种历史拟合数据的参数估计,转化为同时获取历史拟合数据的参数估计和参数估计的不确定性,这使得该方法相比于传统历史拟合方法更具优势^[7-10]。该方法只需计算存储状态向量中各个元素与观测数据之间的协方差信息,可以较为容易地处理多种油藏参数,方便与各种油藏数值模拟软件相结合^[11-14]。本文采用 EnKF 方法对致密砂岩气藏离散裂缝模型进行自动化历史拟合,以提高生产动态历史拟合符合率,并降低油气藏工程人员的工作量,简化油气藏生产历史拟合工作流程。

1 离散裂缝模型建立方法

不同尺度的裂缝流动能力不同,在进行油藏建模和数值模拟的时候需要加以区分与处理。按照裂缝尺寸、发育规模以及连通性可将裂缝分为大、中、小三个级别,大尺度裂缝用离散裂缝模型进行表征,而中、小尺度裂缝则用等效介质模型进行处理^[15]。

1.1 主级裂缝提取

裂缝性油藏发育多组裂缝体系,图1为须家河组 X2 区块裂缝解释结果,根据裂缝尺度(如高度、宽度及开度)、裂缝充填率、裂缝导流能力以及裂缝连通情况等,将模型中的大尺度、离散状的裂缝抽取出来,标记为主级裂缝,剩下的中、小裂缝标记为次级裂缝。

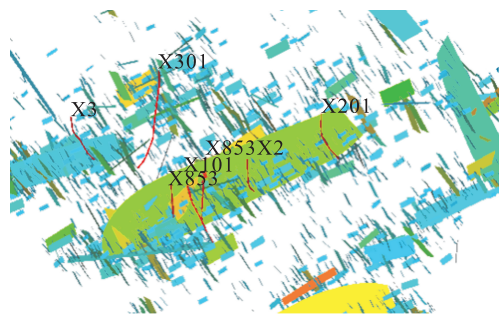


图1 须家河组 X2 区块裂缝分布图

Fig.1 Fracture distribution of Well X2 block of Xujiahe formation

主级裂缝抽取的标准为:设定主级裂缝分级参数,包括临界长度 L_1 、临界开度 d_1 、临界渗透率 k_1 ,则裂缝网络 F 中,子集 F_1 即为主级裂缝集合。

$$F_1 = \{f \in F \mid L_f > L_1 \text{ 且 } d_f > d_1 \text{ 且 } k_f > k_1\} \quad (1)$$

式中: L_f 为裂缝长度,m; d_f 为裂缝开度,mm; k_f 为裂缝渗透率,mD。

1.2 非结构化网格剖分

适用于油藏数值模拟的非结构化网格主要有三棱柱网格和四面体网格。高质量的四面体网格要求网格尽量均匀,即网格各边长度趋于相近。由于油藏平面延伸距离远大于油藏高度,因此四面体必须剖分到足够细小才能保留地层的分层信息,造成网格数过多,模型计算时间过长。针对离散裂缝模型,本文采用分层三棱柱网格生成技术:平面上采用三角形网格剖分,垂向上采用角点网格生成的层间拓扑关系约束生成网格模型。相比于四面体网格,分层三棱柱网格生成过程快速稳定,可根据裂缝走向剖分网格,并具备分层描述的能力,可适应于复杂的离散裂缝系统。

首先,根据角点网格系统,生成模型的外边界,作为非结构化网格的外约束面;然后提取主级裂缝几何多边形,作为非结构化网格内约束面;最后剖分非结构化网格,该网格作为最终混合格网的载体,即基于该网格最终得到的数值模拟模型。提取主级裂缝进行非结构化网格剖分得到基础网格示意图2-a)。在上述非结构化网格基础上,将角点网格的属性等效为非结构化网格的属性,根据非结构网格的连通关系计算网格间传导率,最终得到一个等效基质模型和离散裂缝模型混合的地质模型,其中孔隙度分布见图2-b)。

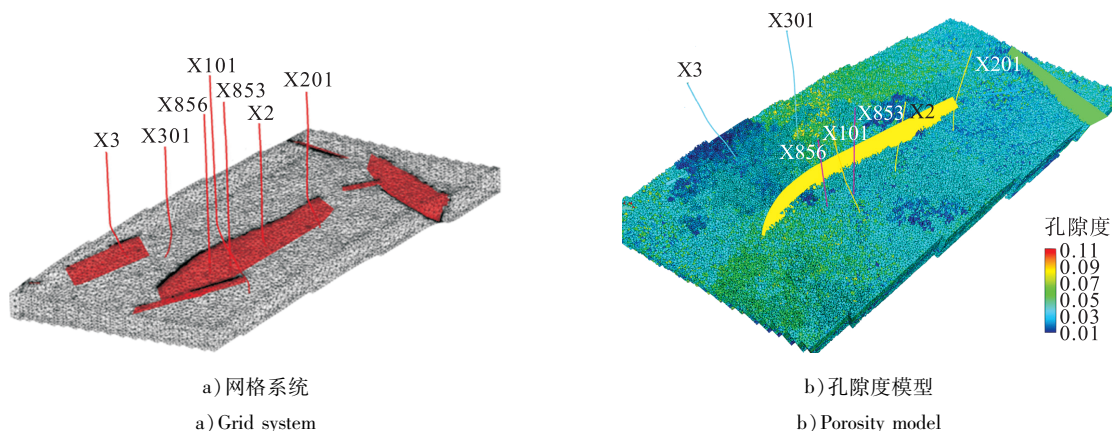


图 2 基于主级裂缝模型剖分得到的非结构化网格图

Fig. 2 Unstructured grid generated based on primary fracture model

2 致密气藏生产动态自动拟合方法

2.1 基于 EnKF 的历史拟合流程

油气藏自动历史拟合也被称作参数反演,其本质上是求解油气藏目标函数最小值的方法。求解函数最小值的方法可以分为两种:基于梯度的方法(如牛顿法)与非梯度方法(如遗传算法),不同参数反演方法的差异在于选取哪种最优化算法^[16-17]。

EnKF 方法根据先验信息产生的一组初始模型估计(初始样本集合),平行地进行模型预测,并在数据获取时刻同时更新,更新所需数据与状态向量之间的相关性信息由样本统计获得。相比牛顿法等传统自动历史拟合方法,该方法在处理大规模问题上有明显优势^[18-20]。

为了使模型预测过程能够顺序的实现(即在同化当前数据后,模型预测只需从当前时刻运行到下一数据时刻),需要在同化数据时不仅更新模型参数,也要更新模型状态变量,因为从当前时刻到下一数据时刻的模型预测不仅依赖于当前时刻的模型参数,还依赖于当前时刻的模型状态。

自动历史拟合的步骤如下。

1) 使用先验信息生成与地质属性和生产参数(如孔隙度、渗透率等)相关的 M 个实现 $Z_k (k=1, \dots, M)$, 形成初始样本集合。

2) 选择 P 个扰动参数,并为这些参数生成 N 组初始值: $\theta_i^0 = (\theta_{i,1}^0, \dots, \theta_{i,P}^0) (i=1, \dots, N)$ 。这些初始值将被视为同化过程中的静态变量。

3) 对于每个新的同化时间 $t^n, n > 0$; 依次使用 N 组参数集合 $\theta_i^{n-1}, i=1, \dots, N$, 将参数化技术应用于初始样本集合,产生与地质属性和生产参数相关的 N 个实现: $Y_i^{n-1} = f(\theta_i^{n-1}, Z_1, \dots, Z_M) (i=1, \dots, N)$, 定义了模拟样本集合。

4) 为模拟样本集合的每个元素 Y , 预测从时间 t^{n-1}

到时间 t^n 的值,这提供了一组预测的动态变量 S_i^n 和井点处的生成响应 $D_i^n (i=1, \dots, N)$ 。

5) 将 EnKF 的分析步骤应用于向量 $(\theta_i^{n-1}, S_i^n, D_i^n) (i=1, \dots, N)$, 计算出卡尔曼增益,通过卡尔曼增益得到的更新向量 $(\theta_i^n, S_i^n, D_i^n)$, 用于下一次同化时预测的初始状态。

2.2 离散裂缝模型自动拟合方法

在应用 EnKF 方法自动拟合之前,要指定需要拟合的参数,即扰动参数。拟合参数包括:地质模型参数和数值模拟参数两类,给出各参数的相关属性及取值范围后,通过 EnKF 自动迭代计算实现预测结果与观测结果的统一。

2.2.1 拟合参数设置

由于建模过程中涉及的裂缝对象数量较少,因此首先需要选中所要拟合的裂缝对象。同时选择对裂缝对象的“操作”,主要有平移、旋转、缩放 3 种几何修改操作和加、乘、赋新值 3 种属性修改操作。

在选择几何操作时,还需要设置方向,从而实现对某个方向的平移、旋转和缩放,其中旋转和缩放都是以该裂缝对象的起点为轴修改。在指定了要拟合的变量(如孔隙度、渗透率等)后,需要设置每个变量的变化范围和相关特征,如数据类型、最小值、最大值、数据格式、初始分布和文本说明等。

原则上数值模拟中出现的所有参数均可进行调整及拟合,但考虑到流体高压物性数据和渗流参数来源于室内的高压物性实验和渗流实验,准确度较高,因此目前不对该类数据进行修改。其余油藏参数均可作为拟合变量进行调整。

2.2.2 自动拟合过程

除参数信息外,还需要指定全部算例的个数(即样本数量)以及并行的算例数。算例的个数不能太少,一般来说应该为变量的 2 倍左右;并行的算例数取决于计算机线程数,原则上 1 个线程可运行 1 个算例。但考虑到计算机的正常操作及软件界面的使用需求,推荐并行

算例数为计算机的总线程数减2。

在指定了以上全部信息后,即可采用 EnKF 方法开展自动历史拟合。该方法是通过迭代进行的。每个迭代步都会并行运行全部实现。全部实现计算完成后,EnKF 方法会读取所有实现的计算结果,计算预测值的协方差矩阵,再结合实际观测值,修正各拟合变量。

修正完拟合变量后,重新生成全部算例,开始下一个迭代步,最终获得的参数场即是所要的结果。在更新步内,每个实现的参数场都得到了更新,理想的状态是所有的实现,无论初始参数场如何,最终更新得到的参数场都将收敛到真实场。

3 须家河组致密气藏自动拟合实例

3.1 X2 区块数值模拟模型建立

X2 区块是位于须家河组的致密砂岩气藏,非均质性极强,天然裂缝发育,基质低孔低渗^[21-23]。首先对裂缝系统按大、中、小3个尺度进行分级,大尺度裂缝延伸范围长($L_f > 50$ m),开度较大($d_f > 0.1$ mm),且渗透率远大于基质渗透率($k_f > 10$ mD),是边水窜进的主要通道,采用离散裂缝模型表征大尺度裂缝,刻画大尺度裂缝的真实几何形态和渗流特征;中—小尺度裂缝的孔隙度和渗透率通常较小,可直接将裂缝属性等效到基质属性中,从而减少网格数量并提高模拟效率。通过非结构化网格剖分和等效介质处理,得到最终的三维地质模型,总网格数为 68×10^4 个。

X2 区块须二段含气层自上至下划分为 X2-2 至 X2-8 共7个砂组,砂组之间发育稳定隔层,南北两侧存在边底

水,每个砂组可划分为独立的平衡区,分别对应一个气水界面深度。X2 区块从 2003 年开始开发,目前共有7口生产井,各井见水时间和产水量差别较大。基于该气藏储层渗流和流体的实测数据,建立了数值模拟模型,初始状态下气水模型分布见图3。

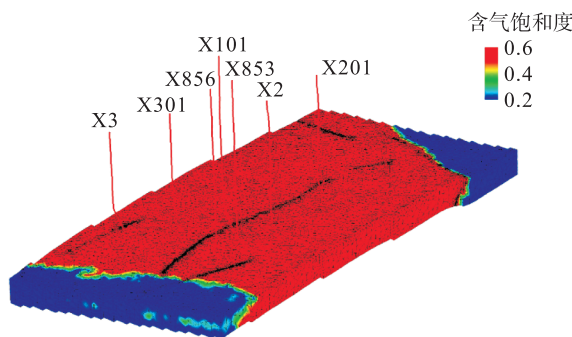


图3 数值模拟模型中初始气水分布图

Fig.3 Initial gas-water distribution in numerical simulation model

3.2 自动历史拟合结果

初步数值模拟试算表明,加入强水体后,含水率上升过快,而无水体条件下,含水率上升过缓,因此水体对数值模拟结果影响较大。另外,部分井拟合过程中存在能量不足的情况,表明井附近的基质或裂缝的物性参数与实际不符。因此,该区块整体开发特征(见水规律)受砂组内部非均质性和水体影响较大,在自动历史拟合过程中,更侧重于井点处非均质性刻画及水体的调整。

基于以上认识确定了自动历史拟合调整参数,见表1。

表1 生产动态自动历史拟合参数调整表

Tab.1 Adjustment of automatic matching parameters for production performance

现象	分析	拟合对策	水体参数
强水体含水率上升过快,无水体含水率上升过缓	见水特征受水体影响大	为每组砂体设置独立水体,且水体的能量在一个范围内变化	水体体积: $5.0 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ 水侵指数: $1\ 000 \sim 10\ 000 \text{ m}^3/\text{d}/\text{MPa}$
部分井产能计算结果低于实际值	部分井周围孔、缝设置过低	井周区域添加基质渗透率、裂缝渗透率和裂缝孔隙度乘子	基质渗透率乘子:[0.5,2] 裂缝渗透率乘子:[0.2,5] 裂缝孔隙度乘子:[0.5,2]

各砂组设置了独立水体,并给定了水体的能量范围(包括水体规模和水侵量);调整了每口井附近基质渗透率、裂缝渗透率和裂缝孔隙度,提高单井的产气能力。通过5轮次迭代,运行了25个模型,耗时53 h,全流程自动化完成了生产动态的历史拟合,拟合时间从2003年12月至2019年12月。拟合完成后致密气藏含气饱和度分布见图4。

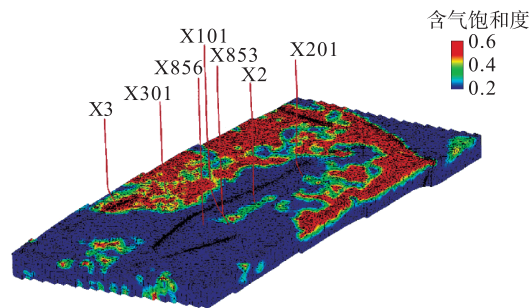


图4 自动历史拟合后含气饱和度分布图

Fig.4 Gas saturation distribution after automatic history matching

采用 EnKF 方法可以较为便捷地实现数值模拟过程中生产动态历史拟合。对于见水重点井,拟合曲线可以较好包裹住真实生产数据,见图 5。当多轮次迭代结束

时,优选的拟合模型预测的见水时间与实际见水时间吻合较好,产水量变化与实际情况基本一致,整体拟合符合率达到 86%,不同时刻的裂缝含气饱和度分布见图 6。

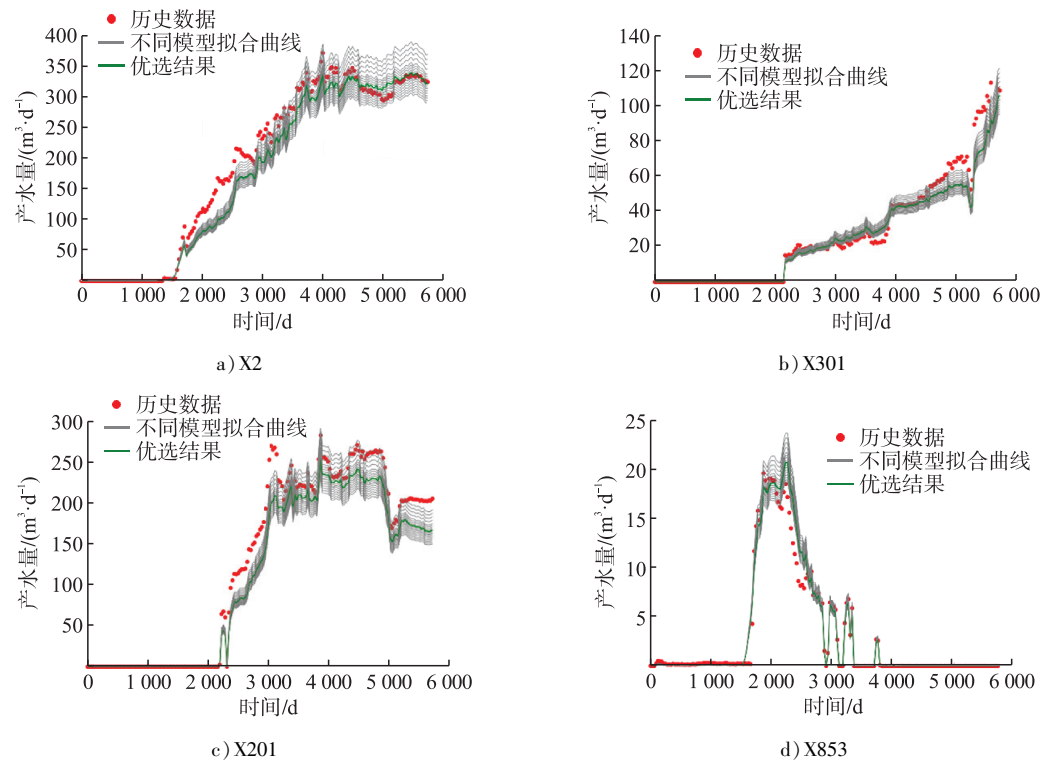


图 5 基于 EnKF 方法的不同单井生产动态历史拟合结果图

Fig. 5 Production performance matching results of different wells based on EnKF method

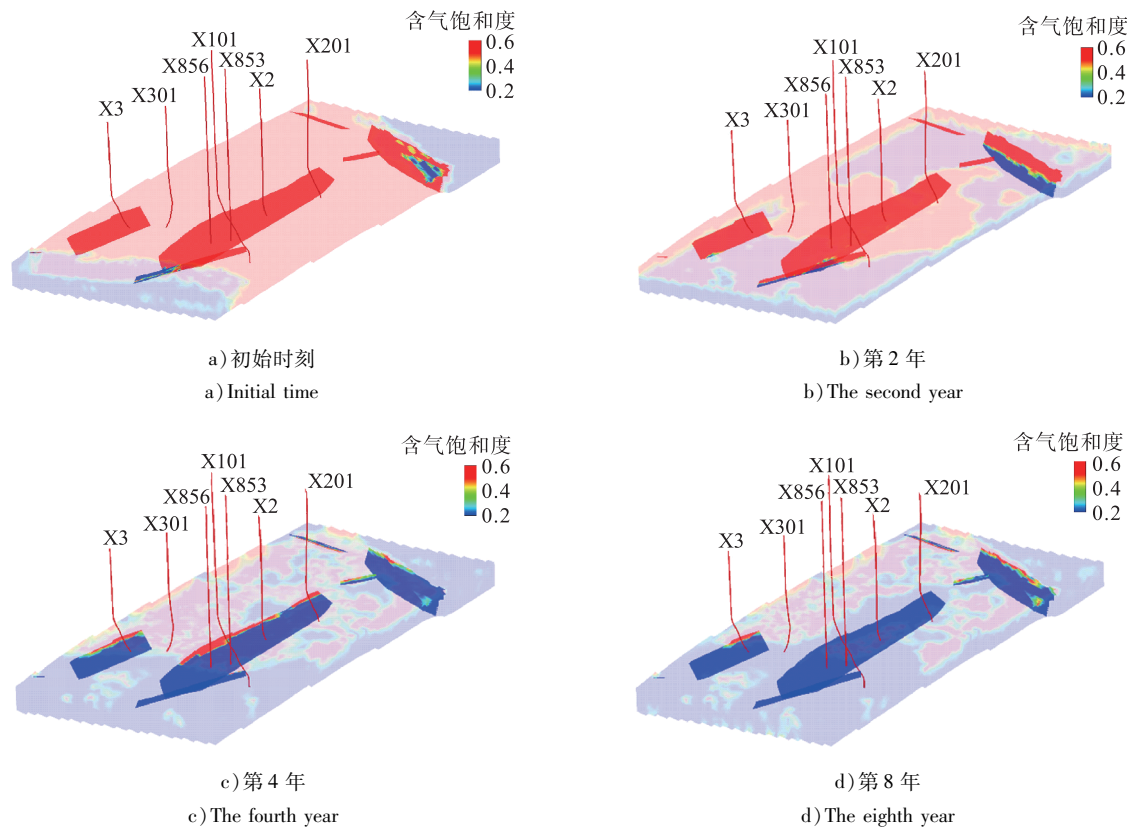


图 6 不同年的裂缝含气饱和度变化图

Fig. 6 Change of gas saturation of fractures in different yearst

由图6可看出,边水沿大型裂缝窜流是生产井见水的主要原因。基于生产动态自动历史拟合结果,可有效确定剩余气的分布,为X2区块致密气藏下一步开发调整提供有效指导。

4 结论及建议

1) 将致密气藏的裂缝划分为大、中、小三个级别,大裂缝采用离散裂缝模型,中、小裂缝采用等效介质模型。以模型边界作为外约束面,主级裂缝几何多边形作为内约束面进行非结构化网格剖分,根据非结构网格的连通关系计算传导率,形成了离散裂缝模型构建方法。

2) 采用EnKF方法对须家河组X2区块离散裂缝数值模型的气水生产数据进行了历史拟合,通过自动调整边水水体规模以及生产井附近的储层物性,完成了生产动态的历史拟合,见水时间与实际吻合较好,整体拟合率达86%,为X2区块致密气藏开发调整提供有效指导。

3) EnKF方法的计算精度受样本量影响。较大的样本量可提高状态向量与观测数据之间协方差矩阵的计算精度,但增加了计算负担;较小的样本量可以有效减少计算量,但可能导致在计算协方差矩阵的时候出现奇异值。因此需要在计算时间可承受的条件下选择尽可能多的样本。

参考文献:

- [1] 屈雪峰,谢启超,兰正凯,等. 基于微地震离散裂缝与自动历史拟合的数值模拟[J]. 特种油气藏, 2021, 28(3): 62-68.
QU Xuefeng, XIE Qichao, LAN Zhengkai, et al. Numerical simulation based on microseismic discrete fractures and automatic history matching [J]. Special Oil & Gas Reservoir, 2021, 28(3): 62-68.
- [2] 薛亮,吴雨娟,刘倩君,等. 裂缝性油气藏数值模拟与自动历史拟合研究进展[J]. 石油科学通报, 2019, 4(4): 335-346.
XUE Liang, WU Yujuan, LIU Qianjun, et al. Advances in numerical simulation and automatic history matching of fractured reservoirs [J]. Petroleum Science Bulletin, 2019, 4(4): 335-346.
- [3] 张道伟,戴城,陈硕思,等. 考虑多尺度裂缝表征的致密油藏CO₂吞吐智能历史拟合[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(1): 160-167.
ZHANG Daowei, DAI Cheng, CHEN Shuosi, et al. Intelligent history matching of CO₂ huff-n-puff in tight oil reservoirs considering multi-scale fracture characterization [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(1): 160-167.
- [4] 邓宝荣,袁士义,李建芳,等. 计算机辅助自动历史拟合在油藏数值模拟中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2003, 30(1): 71-74.
DENG Baorong, YUAN Shiyi, LI Jianfang, et al. Applying computer-aided history matching to the numerical simulation of reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2003, 30(1): 71-74.
- [5] 闫霞,张凯,姚军,等. 油藏自动历史拟合方法研究现状与展望[J]. 油气地质与采收率, 2010, 17(4): 69-73.
YAN Xia, ZHANG Kai, YAO Jun, et al. Review on automatic history matching methods for reservoir simulation [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2010, 17(4): 69-73.
- [6] SIAVASH E, BEHNAM J. Dynamic fracture characterization from tracer-test and flow-rate data with Ensemble Kalman Filter [J]. SPE Journal, 2018, 23(2): 449-466.
- [7] LEILA H, VERONIQUE G, MICKAELE R, et al. History matching of petroleum reservoir models by the Ensemble Kalman Filter and parameterization methods [J]. Computers & Geosciences, 2013, 55: 84-95.
- [8] 张巍,邱元,吴玉树. 基于集合卡尔曼滤波的油藏辅助历史拟合[J]. 大庆石油学院学报, 2009, 33(5): 74-78.
ZHANG Wei, QI Yuan, WU Yushu. Assisted history-matching method based on Ensemble Kalman filter [J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009, 33(5): 74-78.
- [9] 李琳琳,廉培庆,刘彦锋. 基于网格过水倍数提高油藏历史拟合精度的方法[J]. 中国科技论文, 2018, 13(21): 2482-2485.
LI Linlin, LIAN Peiqing, LIU Yanfeng. Improving reservoir historical matching accuracy based on grid displacing multiple factor [J]. China Sciencepaper, 2018, 13(21): 2482-2485.
- [10] 刘伟,赵辉,雷占祥,等. 基于单井敏感性局域化EnKF的油藏辅助历史拟合方法[J]. 石油学报, 2019, 40(6): 716-725.
LIU Wei, ZHAO Hui, LEI Zhanxiang, et al. Reservoir assisted history matching method using a local ensemble Kalman filter based on single-well sensitivity region [J]. Acta Petrolei Sinica, 2019, 40(6): 716-725.
- [11] 闫霞,李阳,姚军,等. 基于流线EnKF油藏自动历史拟合[J]. 石油学报, 2011, 32(3): 495-499.

- YAN Xia, LI Yang, YAO Jun, et al. Automatic history matching of reservoirs using the streamline-based EnKF method [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2011, 32 (3): 495-499.
- [12] 王鸣川,段太忠,孙红军,等.油藏自动历史拟合研究进展[J].科技导报,2016,34(18):236-245.
- WANG Mingchuan, DUAN Taizhong, SUN Hongjun, et al. Research progress in reservoir automatic history matching [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34 (18): 236-245.
- [13] 王玉斗,李茂辉.基于EnKF的油藏自动历史拟合方法对三相相对渗透率的反演[J].西安石油大学学报(自然科学版),2011,26(4):33-37.
- WANG Yudou, LI Maohui. Inversion of three-phase relative permeability using the automatic reservoir history fitting method based on ensemble Kalman filter [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2011, 26 (4): 33-37.
- [14] SHUAI Yuanyuan, WHITE, SUN Ting, et al. A gathered EnKF for continuous reservoir model updating [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, 139: 205-218.
- [15] 戴城,胡小虎,方思冬,等.基于微地震数据和嵌入式离散裂缝的页岩气开发渗流数值模拟[J].油气藏评价与开发,2019,9(5):70-77.
- DAI Cheng, HU Xiaohu, FANG Sidong, et al. Numerical simulation for seepage of shale gas reservoir development based on microseismic data and embedded fracture modeling [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2019, 9 (5): 70-77.
- [16] 李威,李伟,闫正和,等.考虑相渗时变的数值模拟历史拟合方法及应用[J].天然气与石油,2021,39(1):67-73.
- LI Wei, LI Wei, YAN Zhenghe, et al. Numerical simulation historical matching method and its application considering the relative permeability time-dependent [J]. *Natural Gas and Oil*, 2021, 39 (1): 67-73.
- [17] LIU Ning, OLIVER D. Critical evaluation of the Ensemble Kalman Filter on history matching of geologic facies [J]. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2005, 8 (6): 470-477.
- [18] 张小龙,杨志兴,王群超,等.数值模拟辅助历史拟合新方法研究及应用[J].天然气与石油,2018,36(1):76-80.
- ZHANG Xiaolong, YANG Zhixing, WANG Qunchao, et al. Research and application of new method for numerical simulation aided historical matching [J]. *Natural Gas and Oil*, 2018, 36 (1): 76-80.
- [19] 李雕.基于集合卡尔曼滤波的裂缝性页岩气藏数据同化方法研究[D].北京:中国石油大学(北京),2018.
- LI Diao. The research of data assimilation in fractured shale gas reservoir using Ensemble Kalman Filter [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [20] ZHANG Yanfen, OLIVER D. History matching using the Ensemble Kalman Filter with multiscale parameterization: A field case study [J]. *SPE Journal*, 2011, 16 (2): 307-317.
- [21] 商晓飞,王鸣川,李蒙,等.基于VBM方法的油气藏高精度地层格架建模——以川西坳陷新场构造带须二段为例[J].油气藏评价与开发,2022,12(2):302-312.
- SHANG Xiaofei, WANG Mingchuan, LI Meng, et al. High precision stratigraphic framework modeling for oil and gas reservoirs based on VBM algorithm: A case study of Xu2 Formation in Xinchang tectonic zone, western Sichuan depression [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2022, 12 (2): 302-312.
- [22] 刘忠群,徐士林,刘君龙,等.四川盆地川西坳陷深层致密砂岩气藏富集规律[J].天然气工业,2020,40(2):31-40.
- LIU Zhongqun, XU Shilin, LIU Junlong, et al. Enrichment lows of deep tight sand stone gas reservoirs in the western Sichuan depression, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40 (2): 31-40.
- [23] 吴双,段太忠,商晓飞,等.川西坳陷XC区块须二段气藏生产模式分类及其对气藏类型的启示[J].东北石油大学学报,2020,44(3):84-96.
- WU Shuang, DUAN Taizhong, SHANG Xiaofei, et al. Production mode classification and their insight into the gas reservoir type of Xu2 member gas reservoir in XC block, western Sichuan depression [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020, 44 (3): 84-96.