

doi:10.19509/j.cnki.dzkq.2019.0510

崔书岳,康志江,邸元.基于多相流模型的缝洞型油藏数值模拟软件研制与应用[J].地质科技情报,2019,38(5):97-104.

基于多相流模型的缝洞型油藏 数值模拟软件研制与应用

崔书岳¹, 康志江¹, 邸元²

(1.中石油石油勘探开发研究院, 北京 100083; 2.北京大学工学院, 北京 100871)

摘要:缝洞型碳酸盐岩油藏储集空间由溶洞、裂缝、溶蚀孔洞组成,溶洞是该类油藏的主要储集空间,也是区别于其他类型油藏的最主要特点。现有的多重介质模拟方法无法准确描述未充填溶洞内流体流动的特征。为此,在多相流模型和有限体积数值解法的基础上,建立了溶洞内多相流体计算模型,实现了溶洞内多相流体流动的描述,并针对缝洞型油藏特点研制了数值模拟软件平台。该软件实现了缝洞型油藏数值模拟的数据管理、方案管理、模拟计算、数据显示等功能。应用实例表明该软件能够实现缝洞型油藏数值模型建立、生产历史拟合、剩余油定量描述、潜力区域分析等工作。

关键词:缝洞型油藏;油藏数值模拟;非达西高速流动;溶洞;剩余油;塔河油田

中图分类号:P618.13;TB115

文献标志码:A

文章编号:1000-7849(2019)05-0097-08

Development and Application of Numerical Simulation Software Platform for Fractured-Cave Reservoir Based on Multiphase Flow Model

Cui Shuyue¹, Kang Zhijiang¹, Di Yuan²

(1.Petroleum Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;

2.College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The reservoir space of fractured-cave carbonate reservoirs consists of karst caves, fractures and dissolved pores. The karst cave is the main reservoir space of this kind and is also the main characteristic different from other types. Existing multi-media simulation methods can not accurately describe the characteristics of fluid flow in unfilled caves. Based on the multiphase flow model and finite volume numerical method, this paper establishes a multiphase fluid calculation model in karst cave, realizes the description of multiphase fluid flow in karst cave, and develops a software platform for numerical simulation according to the characteristics of fractured-cave reservoirs. The software realizes the data management, scheme management, simulation calculation and data display for numerical simulation of fractured-cave reservoirs. The practical application shows that the software can realize the establishment of numerical model of fractured-cave reservoirs, production history fitting, quantitative description of remaining oil and potential region analysis.

Key words: fractured-cave reservoir; reservoir numerical simulation; non-Darcy high speed flow; cave; remaining oil; Tahe Oilfield

塔河油田是目前中国储量规模最大的缝洞型碳酸盐岩油藏,其储集空间类型可划分为溶洞、溶蚀孔洞和裂缝。裂缝是主要流动通道,溶洞是该类油藏最有效的储集空间类型^[1]。对缝洞型油藏而言,裂缝内高速非达西流动和未充填溶洞内流体自由流动是其区别于常规砂岩油藏的主要特征,也是实现该类油藏数值模拟的关键所在。以达西渗流为基础的多孔介质数值模拟方法较为成熟,并在油藏开发工作中普遍应用。20 世纪 60 年代, Barenblatt 等^[2]、Warren 等^[3]提出了双重介质模拟方法,实现了裂缝型油气藏的模拟。在此基础上,一些学者提出了多重介质模型^[4-7],并将各介质视为空间重叠的连续体,认为裂缝介质是主要流动通道。另一些学者^[8-10]将缝洞型油藏划分成基质、裂缝、溶洞 3 类介质,归纳了溶蚀孔洞、裂缝、溶洞的组合模式,提出了适用于缝洞型油藏的三重介质模型。对于缝洞型油藏内的大尺度裂缝、溶洞间的高速非达西流动及溶洞内多相流体的重力分异问题,现有模型并没有很好地解决。离散缝洞网络模型^[11-12]将油藏内的基质和裂缝定义为渗流区域,采用 Darcy 方程模拟,将溶洞定义为自由流动区域,用 Navier-Stokes 方程模拟,通过边界条件对两类区域进行耦合,可较为准确地模拟缝洞型油藏,该模型用于油藏尺度模拟时在建模、计算量等方面存在困难,现主要用于机理方面的研究。

为实现缝洞型油藏尺度的数值模拟,笔者在三重介质模型基础上,通过定义溶洞单元的流相流动分数计算未充填溶洞与相邻网格间的流体交换,实现未充填溶洞内流体流动特征的模拟;采用有限体积法对数学模型进行离散,用全隐式格式并通过 Newton-Raphson 迭代法进行求解。

目前,发展成熟、占据国内市场的商用油藏数值模拟软件^[13],如 Eclipse、CMG、VIP、tNavigator 等,都有较为完善的前后处理模块。基于缝洞型油藏数值模拟方法研究,设计采用 Visual Studio、OpenGL 编制数值模拟软件平台,并开展缝洞单元数值模拟研究,实现模型建立、生产历史拟合、剩余油定量描述、潜力区域分析等工作。

1 缝洞型油藏数值模拟方法

1.1 控制方程

将油藏考虑为等温系统,储集空间分为溶洞、溶蚀孔洞、裂缝 3 类,流体为油、气、水 3 相。每相流体在压力、重力和毛细管力的共同作用下按照 Darcy 定律或 Forchheimer 定律流动。储集空间内油、气、水 3 组分的质量平衡方程分别为:

$$\begin{cases} -\nabla \cdot [\bar{\rho}_o v_o]_v + q_{vo} + \tau_{fvo} + \tau_{mvo} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_o \bar{\rho}_o)_v \\ -\nabla \cdot [\rho_g v_g + R_{so} \bar{\rho}_{dg} v_o]_v + q_{vg} + \tau_{fvg} + \tau_{mvg} \\ + R_{so} \tau_{fvo} + R_{so} \tau_{mvo} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_g \rho_g + R_{so} \varphi S_o \bar{\rho}_{dg})_v \\ -\nabla \cdot [\rho_w v_w]_v + q_{vw} + \tau_{fvw} + \tau_{mvw} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_w \rho_w)_v \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} -\nabla \cdot [\bar{\rho}_o v_o]_f + q_{fo} - \tau_{fvo} + \tau_{mvo} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_o \bar{\rho}_o)_f \\ -\nabla \cdot [\rho_g v_g + R_{so} \bar{\rho}_{dg} v_o]_f + q_{fg} - \tau_{fvg} + \tau_{mvg} \\ - R_{so} \tau_{fvo} + R_{so} \tau_{mvo} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_g \rho_g + R_{so} \varphi S_o \bar{\rho}_{dg})_f \\ -\nabla \cdot [\rho_w v_w]_f + q_{fw} - \tau_{fvw} + \tau_{mvw} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_w \rho_w)_f \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} -\nabla \cdot [\bar{\rho}_o v_o]_m + q_{mo} - \tau_{mvo} - \tau_{mfo} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_o \bar{\rho}_o)_m \\ -\nabla \cdot [\rho_g v_g + R_{so} \bar{\rho}_{dg} v_o]_m + q_{mg} - \tau_{mvg} - \tau_{mfg} \\ - R_{so} \tau_{mvo} - R_{so} \tau_{mfv} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_g \rho_g + R_{so} \varphi S_o \bar{\rho}_{dg})_m \\ -\nabla \cdot [\rho_w v_w]_m + q_{mw} - \tau_{fvw} - \tau_{mvw} = \frac{\partial}{\partial t} (\varphi S_w \rho_w)_m \end{cases} \quad (3)$$

式中:下标 v, f, m 为溶洞单元、裂缝单元、溶蚀孔洞单元;下标 o, w, g 为油、水、气; ρ 为流体密度; $\bar{\rho}_o$ 为油相中油组分的密度; $\bar{\rho}_{dg}$ 为油相中气组分的密度; q 为源汇项; R_{so} 为溶解气油比; φ 为孔隙度; S 为饱和度; v_o, v_g, v_w 分别为流体组分的渗流速度; τ_{fvl} 为单位体积内 l 相 (l 相可以代 o, w, g) 从裂缝单元到溶洞单元的窜流量; τ_{mvl} 为单位体积内 l 相从溶蚀孔洞单元到溶洞单元的窜流量; τ_{mfl} 为单位体积内 l 相从溶蚀孔洞单元到裂缝单元的窜流量; t 为时间。

$$\tau_{ijl} = \frac{\alpha_{ij} \rho_l k_{rl} (P_i - P_j)}{\mu_l} = \frac{\alpha_{ij} \rho_l k_{rl} (\psi_i - \psi_j)}{\mu_l} \quad (4)$$

式中: α_{ij} 为单元 i 与 j 之间的窜流系数; k_r 为相对渗透率; P 为压力; ψ 为流动势; μ 为黏度; l 为 l 相流体 ($l = o, w, g$)。

式(1)~(3)中 v_l 为 l 相的渗流速度,当单元间流体流动为达西流动时:

$$v_l = -\frac{k k_{rl}}{\mu_l} (\nabla P_l - \rho_l g \nabla D) = -\frac{k k_{rl}}{\mu_l} \nabla \psi \quad (5)$$

当节点间流动为非达西高速流动时,流速由式(6)的 Forchheimer 定律解出:

$$-(\nabla P_l - \rho_l g) = \frac{\mu_l}{k k_{rl}} v_l + \beta_l \rho_l v_l |v_l| \quad (6)$$

式中: k 为绝对渗透率; g 为重力加速度; D 为节点

的埋深; β 为高速非达西流系数。

1.2 数值解法

将油藏划分成网格,以网格为控制体,以网格中心点为节点,控制体内的变量定义在节点上(图1)。采用有限体积法对基本控制方程式(1)~(3)进行空间离散、时间离散^[14]。为表述方便,略去式中定义储集空间类型的下标 v 。对式(1)中油组分的控制方程在控制体体积 V 和时间步长 Δt 上积分,可得:

$$-\int_{\Delta t} \int_V \nabla \cdot (\bar{\rho}_o v_o) dV dt + \int_{\Delta t} \int_V q_o dV dt + \int_{\Delta t} \int_V (\tau_{fvo} + \tau_{mvo}) dV dt = \int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_V \varphi S_o \bar{\rho}_o dV \right) dt \quad (7)$$

根据高斯散度定理,式(7)左端第一项变为:

$$-\int_{\Delta t} \int_V \nabla \cdot (\bar{\rho}_o v_o) dV dt = \int_{\Delta t} \int_A \bar{\rho}_o v_o \cdot (-n) dA dt = \int_{\Delta t} \left(\sum_{j=1}^{\eta_i} F_{oj} \right) dt \quad (8)$$

式中: n 为控制体 V 界面 A 的单位外法线向量; i 为控制体 V 的中心点; j 为与 i 相邻的控制体中心点; η_i 为控制体 i 界面的个数; F_{oj} 为控制体 j 经过界面 A_{ij} 流入控制体 i 的油组分的质量流动项。

当控制体间流体流动为达西流动时,式(8)中的流动项可写为:

$$\begin{aligned} F_{\beta ij} &= A_{ij} \left(\frac{\rho_\beta k k_{r\beta}}{\mu_\beta} \right)_{ij+1/2} \frac{(\psi_{\beta j} - \psi_{\beta i})}{d_i + d_j} \\ &= \rho_\beta \left(\frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \right)_{ij+1/2} \left(\frac{A_{ij} k_{ij+1/2}}{d_i + d_j} \right) (\psi_{\beta j} - \psi_{\beta i}) \\ &= \rho_\beta \lambda_{\beta ij+1/2} \gamma_{ij} [\psi_{\beta j} - \psi_{\beta i}] \end{aligned} \quad (9)$$

式中:下标 β 为流体类型; A_{ij} 为控制体 V_i 与控制体 V_j 间的界面; d_i, d_j 为 V_i, V_j 到 A_{ij} 的垂直距离; γ_{ij} 为溶洞和裂缝介质的节点 i 到节点 j 的传导系数; $\lambda_{\beta ij+1/2}$ 为节点 i 到节点 j 的流度,取 A_{ij} 中心点 c 处的值。

同理,可得到油组分控制方程式(7)中裂缝单元和溶洞单元之间的窜流项为:

$$\int_V \tau_{fvo} dV = \rho_o \lambda_{oij+1/2} \alpha_{ij} [\psi_{oj} - \psi_{oi}] \quad (10)$$

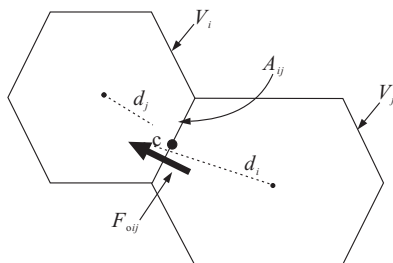


图1 控制体示意图
Fig.1 Control volume

式中: i 和 j 分别是溶洞和裂缝介质节点。

将式(9)和式(10)带入式(7),并采用隐式格式进行时间离散,可得到节点 i 的离散方程:

$$[(\varphi S_o \bar{\rho}_o)_i^{n+1} - (\varphi S_o \bar{\rho}_o)_i^n] \frac{V_i}{\Delta t} = \sum_{j=1}^{\eta_i+2} F_{oj}^{n+1} + Q_{oi}^{n+1} \quad (11)$$

式中:上标 $n, n+1$ 分别表示 n 时刻和 $n+1$ 时刻; $j=1 \sim \eta_i$ 时, F_{oj}^{n+1} 为节点 j 到节点 i 的流动项,按照式(9)计算; $j=\eta_i+1$ 时, F_{oj}^{n+1} 为裂缝介质节点 j 到溶洞介质节点 i 的窜流项,根据式(12)计算; $j=\eta_i+2$ 时, F_{oj}^{n+1} 是溶蚀孔洞介质节点 j 到溶洞介质节点 i 的窜流项,根据式(13)计算; Q_{oi}^{n+1} 为节点 i 的源汇项,根据式(14)计算。

$$F_{oj}^{n+1} = \rho_o (\lambda_{oij+1/2})^{n+1} \alpha_{fvi} [\psi_{oj}^{n+1} - \psi_{oi}^{n+1}] \quad (12)$$

$$F_{oj}^{n+1} = \rho_o (\lambda_{oij+1/2})^{n+1} \alpha_{mvi} [\psi_{oj}^{n+1} - \psi_{oi}^{n+1}] \quad (13)$$

$$Q_{oi}^{n+1} = \int_{\Delta t} \int_V q_o dV dt = \bar{q}_o V_i \Delta t \quad (14)$$

式中: α_{fvi} 为裂缝介质节点同溶洞介质节点之间的窜流系数; α_{mvi} 为溶蚀孔洞介质节点同溶洞介质节点之间的窜流系数; $\bar{q}_o$ 为控制体 V_i 单位时间内单位体积油组分的平均流入量。

采用同样的离散方法可以得到气组分、水组分的离散方程。对离散后的数学模型通过 Newton-Raphson 迭代求解,采用共轭梯度法(CGSTAB)和广义极小残差法(GMRES)求解线性方程组。

1.3 未充填溶洞内多相流体计算模型

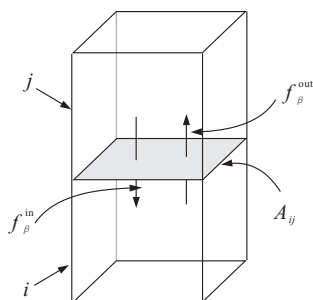
大型溶洞是缝洞型油藏主要的储集空间,实现该类储集体的准确模拟是该类油藏数值模拟的关键。油藏中溶洞可分为充填溶洞和未充填溶洞。充填溶洞内的流体可以用连续介质方法计算;未充填溶洞内流体的流动为自由流动,通常用 Navier-Stokes 方程描述。用该方程描述未充填溶洞内流体的流动时边界条件复杂、计算量大,难以实现油藏尺度模型的计算。假设溶洞内多相流体能够瞬时平衡,气、油、水3相流体处于重力分异状态,相间毛细管力可以忽略,且不存在过渡带^[15-16]。基于上述假设,以2个纵向上相邻网格间(图2)油水两相流动为例说明溶洞内多相流体流动的模拟方法。

假设网格 i 为未充填溶洞。传统方法在计算网格间的流动项时, β 相的流度如下计算:

$$\lambda_{\beta, ij+1/2} = \left(\frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \right)_{ij+1/2} \quad (15)$$

式中: $k_{r\beta}$ 是 β 相流体的相对渗透率。网格 i 和网格 j 的相对渗透率由初始的输入数据给定,式(15)中 $k_{r\beta}$ 在计算过程中用上游权法确定。显然,这一处理方法不能描述溶洞内部油水两相流体的重力分异。

笔者定义溶洞单元的流相流动分数 f_β ,溶洞网



i, j 为网格编号; A_{ij} 为网格 i 与网格 j 间的界面; f_{β}^{out} 为网格 i 的 β 相流出流动分数; f_{β}^{in} 为网格 i 的 β 相流入流动分数

图 2 网格 i 同网格 j 之间的连接

Fig.2 Connection between grid i and grid j

格 i 与网格 j 间的流动项按式(9)进行计算,按式(16)来计算 β 相的流度:

$$\lambda_{\beta, ij+1/2} = \left(\frac{f_{\beta}}{\mu_{\beta}} \right)_{ij+1/2} \quad (16)$$

f_{β} 的取值由相邻网格的介质类型、流动方向、接触位置决定。在图 2 所示的 2 个网格的空间连接关系中,根据网格 j 介质的不同,分 2 种情况:

(1)若网格 j 为溶蚀孔洞或充填溶洞,网格 i 的流入流动分数 $f_{\beta}^{\text{in}} = k_{r\beta}$;流出流动分数 f_{β}^{out} 计算如下:

$$f_{\beta}^{\text{out}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq S_{wi} < 1 \\ 0, & S_{wi} = 1 \end{cases} \quad (17)$$

$$f_{\beta}^{\text{in}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq S_{wi} < 1 \\ 1, & S_{wi} = 1 \end{cases}$$

式中: S_{wi} 为网格 i 的含水饱和度。

(2)若网格 j 为未充填溶洞,由于网格 j 内的流体处于重力分异状态,所以网格 i 的流入流动分数 f_{β}^{in} 计算如下:

$$f_{\beta}^{\text{in}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq S_{wj} < 1 \\ 1, & S_{wj} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

$$f_{\beta}^{\text{out}} = \begin{cases} 1, & 0 \leq S_{wj} < 1 \\ 0, & S_{wj} = 0 \end{cases}$$

式中: S_{wj} 为网格 j 的含水饱和度。

流出流动分数 f_{β}^{out} 按式(17)计算。

该方法通过定义流相流动分数,实现了未充填溶洞与外界网格间流体流动的模拟,不需网格加密,适用于油藏尺度的数值模拟计算。

2 缝洞型油藏数值模拟软件平台研制

2.1 缝洞型油藏数值模拟器验证

(1)黑油模型验证

设计概念数值模拟模型,用油水两相黑油模型对模拟器进行验证。模型网格为角点网格,网格规模为 $11 \text{ m} \times 11 \text{ m} \times 5 \text{ m}$,网格平面尺寸为 $20 \text{ m} \times 20$

m ,纵向为 5 m ,如图 3 所示。生产井位于模型中央,顶层射开,计算参数如表 1 所示。

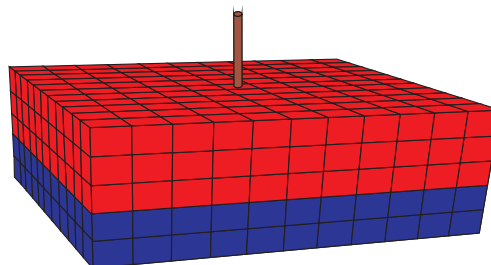


图 3 模型网格

Fig.3 Grid of the simulation model

表 1 模型参数

Table 1 Parameters for the simulation model

参数	取值
水相密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 147.3
油相密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	913.1
孔隙度/%	30
X 方向渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	100
Y 方向渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	100
Z 方向渗透率/ $10^{-3} \mu\text{m}^2$	10
岩石压缩系数/ MPa^{-1}	3.29×10^{-4}
生产制度/($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	2
油水界面深度/m	1 015
参考压力/MPa	10

计算结果与商业软件 Eclipse 结果相比,累产水、井底压力、油藏压力关键指标的误差均在 2% 以内(图 4)。

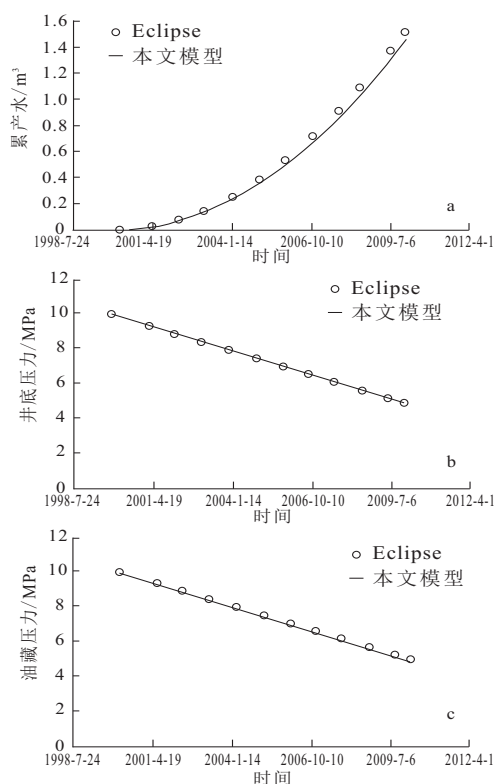


图 4 本文模型与商业软件计算结果对比

Fig.4 Comparison between this model and commercial software

(2) 未充填溶洞内多相流体计算模型验证

设计如图2所示的2个垂向连接的正六面体网格,网格大小均为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}\times 10\text{ m}$ 。假设网格*i*为未充填溶洞,网格*j*为多孔介质。网格*i*底部设计1口注水井,网格*j*顶部设计1口采油井,注入和采出速度均为 $10\text{ m}^3/\text{d}$,其他参数采用表1中的值。根据物理实验结果^[15-16],网格*i*内油水界面水平抬升,网格*j*的理论见水时间为第100 d。分别采用传统方法和本文提出的方法进行模拟计算,结果(图5)表明本文方法能够通过网格*j*的见水时间描述溶洞网格*i*内流体的流动特征。

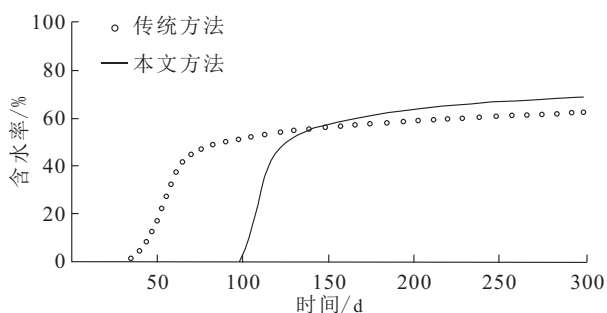


图5 网格*j*含水率曲线

Fig.5 Water cut curve of grid *j*

2.2 缝洞型油藏数值模拟软件平台开发

基于上述缝洞型油藏数值模拟研究,开发了缝洞型油藏前后处理平台用于数值模拟模型建立、模拟计算、生产历史拟合、剩余油分析、方案预测等工作。系统开发环境为 Visual Studio 2010、OpenGL,适用环境为 Windows XP 或更高版本。软件分3个模块:前处理、模拟计算、后处理(图6)。前处理模块实现地质模型、生产动态、流体、模拟结果等数据的导入、存储,历史拟合方案、预测方案的管理;模拟计算模块包括缝洞型油藏数值模拟器和运行监视功能;后处理模块实现生产曲线等二维数据显示,模型孔隙度、渗透率、饱和度、剩余储量丰度等三维数据显示,多窗口之间的联动以及剩余储量统计等功能。

模块之间数据相互依赖,按照先后顺序完成数值模拟研究工作,流程如图7所示。首先输入地质

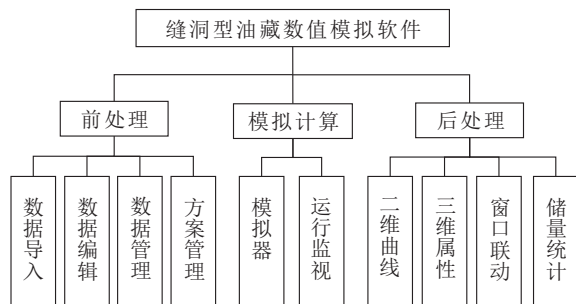


图6 软件功能模块

Fig.6 Software function module

模型、生产动态等动、静态数据;通过方案管理生成历史拟合或预测需要的模拟器输入文件,并进行模拟计算,计算过程可以对生产动态指标的拟合情况进行实时显示;计算结束后软件自动将模拟结果数据加载到软件中,从而对各动态指标、模型属性、剩余油等进行分析。

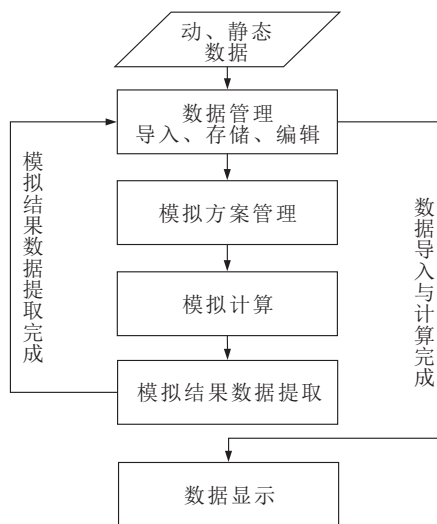


图7 软件运行流程

Fig.7 Software flow chart

3 缝洞型油藏数值模拟软件应用

应用本软件对塔河油田一缝洞单元进行了数值模拟研究。该缝洞单元位于塔河西部构造轴部,经多次构造运动和溶蚀作用,溶洞、断裂发育。储集空间以大型溶洞、不同尺度裂缝和溶蚀孔洞为主。溶洞沿断裂发育,类型以未充填和垮塌充填洞为主。油藏平均深度5 500 m,地质储量 $2\ 273\times 10^4\text{ t}$,2000年9月开始投产,初期单井产油85 t/d,截止至2013年8月,开井20口,其中注水井4口,采油井16口,单井平均日产油15.4 t/d,综合含水率42.3%,采油速度0.4,累产油 $368.2\times 10^4\text{ t}$,采出程度16.2%。PVT资料显示,该缝洞单元原始地层压力60.51 MPa,地层温度128.7℃。地层体积系数为1.239 6,地层原油密度为 $0.818\ 5\text{ g/cm}^3$,流体的饱和压力为13.20 MPa。在三维地质建模基础上,使用本软件建立数值模拟模型,开展生产历史拟合、剩余油及潜力区域分析。

3.1 生产历史拟合

采用油井定液量生产、注水井定注入速度、未充填溶洞采用溶洞内多相流体计算模型,对油藏压力、含水率进行了历史拟合,结果如图8所示;部分井含水率拟合如图9所示,其中图9-a,b为钻遇大型溶洞的生产井,采用本文方法得到了较好的拟合效果。

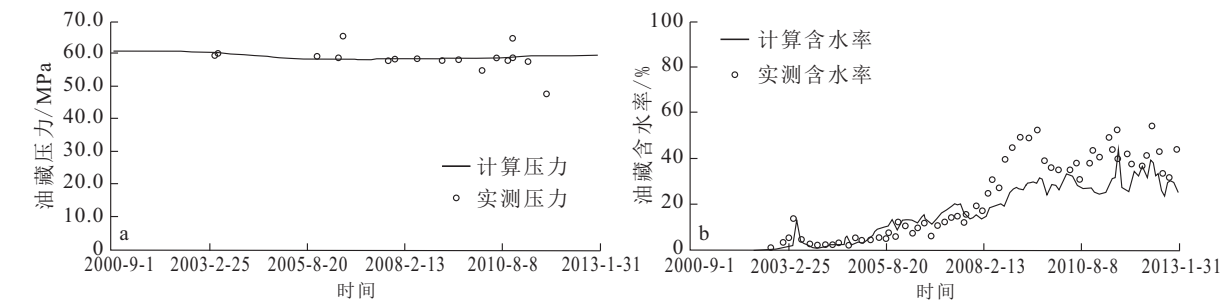


图 8 单元压力与含水率拟合曲线

Fig.8 Pressure and water cut curve

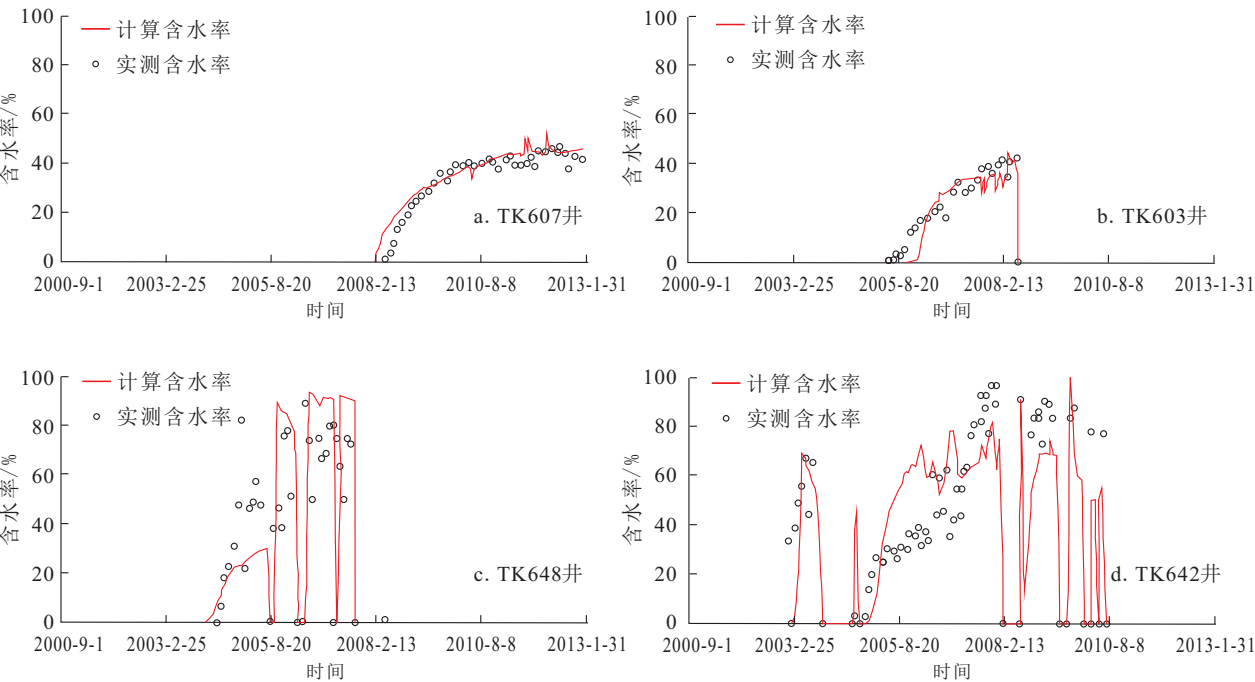


图 9 部分井含水率拟合曲线

Fig.9 Water cut curves of wells

3.2 剩余油分析

完成生产历史拟合后,利用本软件开展了剩余油研究。拟合后单元剩余储量丰度如图 10 所示,利用软件的区域剖切功能对剩余储量丰度高点进行了逐个分析,并根据储集体类型、井储关系对剩余油进行了类型划分^[17-18],单元剩余储量富集区域的剩余油类型分布如表 2 所示。

表 2 剩余油分类统计

Table 2 Remaining oil statistics

剩余油类型	剩余储量/ 10^4 m^3
洞顶剩余油	101.5
高导流通道屏蔽的剩余油	103.3
井间剩余油	109.4
边角剩余油	95.7

3.3 潜力区域分析

利用该软件进行潜力分析的方法可总结为如下

3 个步骤:

(1)用剩余储量丰度图在平面上确定潜力区域。以 T801(K)井为例,从剩余油储量丰度图上看,T801(K)井附近剩余油富集(图 11)。

(2)利用任意区域剖切统计出剩余储量,评价是否具有挖潜潜力。根据 T801(K)井位及井周大裂缝的分布,剖切出该井的井控区域(图 12)并统计其剩余储量(表 3),根据剩余储量,判断该井具备挖潜条件。

表 3 T801(K)井井控区域剩余油分类统计

Talbe 3 Residual oil statistics around T801(K)

储集体类型	剩余储量/ 10^4 m^3
溶洞	9.61
溶蚀孔洞	26.71

(3)利用剖面储量分布图,确定潜力层位和挖潜措施。通过储量分布图可明确剩余油富集在井附近

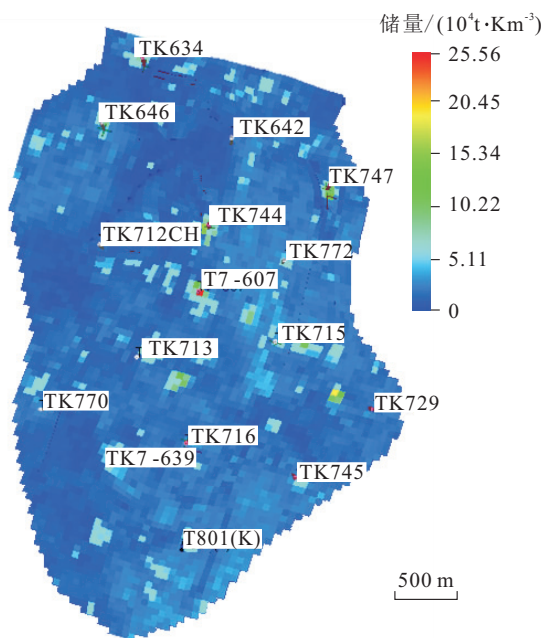


图10 油藏剩余储量丰度

Fig.10 Remaining oil reserves abundance

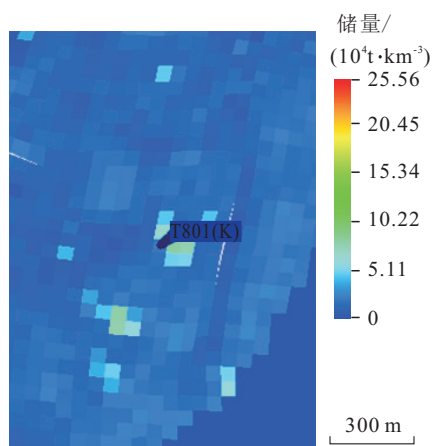


图11 T801(K)井剩余油储量丰度

Fig.11 Remaining oil reserves abundance around T801(K)

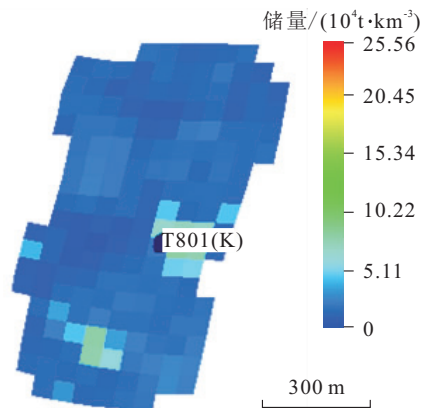


图12 T801(K)井井控区域

Fig.12 Well controlled area of T801(K)

的构造高点(图13),结合剩余油储量(表3),建议该井采取注气措施提高采收率。

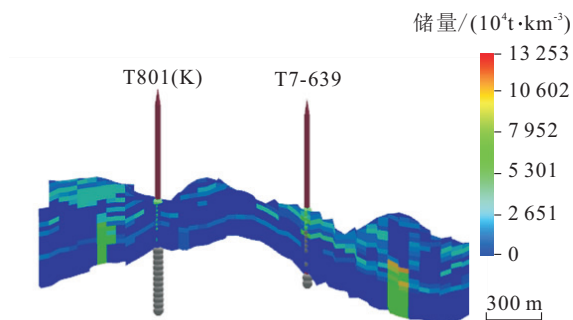


图13 T801(K)井连井剖面储量分布

Fig.13 Reserve distribution profile of T801(K)

4 结 论

(1)在多相流模型和有限体积数值解法的基础上,建立了未充填溶洞内多相流体流动计算模型,并通过概念模型验证了方法的正确性。

(2)针对缝洞型油藏特点研发了软件,实现了数值模拟计算及前后处理功能,为缝洞型油藏数值模拟研究提供了工作平台。

(3)通过缝洞单元实例展示了该软件在剩余油研究中的应用,总结了缝洞型油藏剩余油潜力分析的方法,为软件的推广应用提供了参考。

参考文献:

- [1] 窦之林.论碳酸盐岩缝洞型油藏的滚动开发[J].新疆石油地质,2013,34(3):300-302.
- [2] Barenblatt G I, Zheltov I P, Kochina I N. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [J]. Journal of Applied Mathematics & Mechanics, 1960, 24(5): 852-864.
- [3] Warren J E, Root P J. The behavior of naturally fractured reservoirs [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1963, 3(3): 245-255.
- [4] Closmann P J. The aquifer model for fissured fractured reservoir [J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1975, 15(5): 385-398.
- [5] Hill A C, Thomas G W. A new approach for simulating complex fractured reservoirs [M]. [S.l.]: Soc. Pet. Eng. AIME, Pap., 1985: 13537.
- [6] Abdassah D, Ershaghis I. Triple-porosity system for representing naturally fractured reservoirs [J]. SPE Formation Evaluation, 1986, 1(2): 113-127.
- [7] Bai M, Elsworth D, Roegiers J C. Multiporosity/multipermeability approach to the simulation of naturally fractured reservoirs [J]. Water Resources Research, 1993, 29(6): 1621-1634.
- [8] Wu Y S, Liu H H, Bodvarsson G S. A triple-continuum ap-

- proach for modeling flow and transport processes in fractured rock [J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 73(1): 145-179.
- [9] Wu Y S, Di Yuan, Kang Zhijiang, et al. A multiple-continuum model for simulating single-phase and multiphase flow in naturally fractured vuggy reservoirs[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2011, 78(1): 13-22.
- [10] 李毅, 张可霓, 胡立堂, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏并行模拟器及其应用研究[J]. 地质科技情报, 2018, 37(1): 223-230.
- [11] 姚军, 黄朝琴, 王子胜, 等. 缝洞型油藏的离散缝洞网络流动数学模型[J]. 石油学报, 2010, 31(5): 815-819.
- [12] Arbogast T, Brunson D S. A computational method for approximating a Darcy-Stokes system governing a vuggy porous medium[J]. Computational Geosciences, 2007, 11(3): 207-218.
- [13] 关振良, 杨庆军, 段成刚. 油藏数值模拟技术现状分析[J]. 地质科技情报, 2000, 19(1): 73-76.
- [14] 邸元, 彭浪, Wu Yushu, 等. 缝洞型多孔介质中多相流的有限体积法数值模拟[J]. 计算力学学报, 2013, 30(增刊 1): 144-149.
- [15] 王太, 李会雄, 李雷, 等. 缝洞型油藏溶洞内底水锥进现象的可视化研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(6): 989-992.
- [16] 郑小敏, 孙雷, 王雷, 等. 缝洞型油藏大尺度可视化水驱油物理模拟实验及机理[J]. 地质科技情报, 2010, 29(2): 77-81.
- [17] 康志江, 崔书岳. 塔河油田缝洞型碳酸盐岩油藏剩余油分布特征[J]. 大庆石油地质与开发, 2012, 31(6): 54-58.
- [18] 刘中春. 塔河缝洞型油藏剩余油分析与提高采收率途径[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(2): 62-68.

(上接第 96 页)

参考文献:

- [1] 邹丙方, 吴兴录. 笔架岭构造带反向正断层与油气聚集关系研究[J]. 断块油气田, 1999, 6(5): 14-16.
- [2] 王鹏, 王伟锋, 黄龙威, 等. 胡庆油田反向正断层形成机理与油气聚集关系[J]. 断块油气田, 2004, 11(3): 7-9.
- [3] 罗群. 陆相断陷盆地坡折带成因类型及控砂模式: 以南堡凹陷为例[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(6): 10-13, 111.
- [4] 应丹琳, 潘懋, 李忠权, 等. 乌尔逊凹陷反向断层及与油气的关系[J]. 成都理工大学学报: 自然科学版, 2012, 39(3): 244-250.
- [5] Cloos H. Über antithetische Bewegungen [J]. Geologische Rundschau, 1928, 19(3): 246-251.
- [6] Barth T F W. Structural and petrologic studies in Dutchess County, New York; Part II. Petrology and metamorphism of the Paleozoic rocks [J]. Geological Society of America Bulletin, 1936, 47(5/8): 775-856.
- [7] 张之一, 李旭. 石油构造分析理论基础[M]. 北京: 地质出版社, 1994.
- [8] 张文佑. 断块构造导论[M]. 北京: 石油工业出版社, 1984.
- [9] 张占文, 张凤莲, 曹滨海. 断块运动与西部凹陷潜山油气藏的形成[J]. 断块油气田, 1995, 2(6): 1-5.
- [10] 朱光, 朴学峰, 张力, 等. 合肥盆地伸展方向的演变及其动力学机制[J]. 地质论评, 2011, 57(2): 153-166.
- [11] 万天丰. 侏罗纪地壳转动与中国东部岩石圈转型[J]. 地质通报, 2004, 23(9): 966-972.
- [12] 孙永河, 史盼盼, 杨帆, 等. 海拉尔—塔木察格盆地中部断陷带构造演化与富油构造带成因机制分析[J]. 地质科学, 2012, 47(3): 700-713.
- [13] 付晓飞, 陈哲, 闫百泉, 等. 海拉尔—塔木察格盆地中部断陷带油气富集主控因素分析: 断层和盖层双控模式[J]. 中国科学: 地球科学, 2013, 43(8): 1338-1351.
- [14] 于丹. 海塔盆地塔南凹陷断层系统及其控藏机理研究[D]. 黑龙江大庆: 东北石油大学, 2010.
- [15] 谯汉生, 王明明. 中国东部深部层系反向断层遮挡聚油原理与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 1999, 26(6): 10-13.
- [16] 张忠涛, 施和生, 秦成岗, 等. 番禺低隆起—白云凹陷北坡断层封闭性研究[J]. 断块油气田, 2010, 17(1): 24-27.
- [17] 付晓飞, 王勇, 渠永红, 等. 被动裂陷盆地油气分布规律及主控因素分析: 以塔木察格盆地塔南坳陷为例[J]. 地质科学, 2011, 46(4): 1119-1131.
- [18] 宿雯, 牛成民, 陈磊, 等. 走滑—伸展复合区断层侧封定量研究: 以垦利 A 区东营组为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 65-70.
- [19] 刘刚, 张义杰, 姜林. 断层输导下储集层排驱压力对油气成藏影响作用[J]. 地质科技情报, 2015, 34(1): 118-122.