

天然气开发

三维数字岩心流动模拟技术在四川盆地 缝洞型储层渗流研究中的应用

鄢友军^{1,2}, 李隆新^{1,2}, 徐伟^{1,2}, 常程^{1,2}, 邓惠^{1,2}, 杨柳^{1,2}

(1. 中国石油西南油气田分公司勘探开发研究院, 四川 成都 610041;

2. 国家能源高含硫气藏开采研发中心, 四川 成都 610041)

摘要:四川盆地多数碳酸盐岩缝洞型气藏储层压力高,主力产层段的取心整体破损较多,利用现有岩心开展室内流动模拟实验较为困难。数字岩心分析技术作为储层微观结构和渗流特征研究的又一项新兴的重要技术手段,具有可动态模拟地层条件下流动参数,不破坏岩心等特点,可以用于四川盆地碳酸盐岩缝洞型储层流动实验研究。以该类气藏真实岩心 CT 扫描结果为基础,建立数字岩心三维模型,并利用有限元三维数字岩心流动模拟技术,模拟分析了在地层条件下流体的流动情况,得出其流动规律:在缝洞型储层中裂缝是流体主要的渗流通道,流体主要按照溶洞、基质、裂缝、出口的流动秩序逐次进行,其气体能量损耗主要发生在缝洞间的基岩部分。三维数字岩心流动模拟技术应用数字化手段对储层渗流规律和机理进行综合分析,可为该类气藏的开发对策提供必要的数据支撑。

关键词:三维数字岩心;流动模拟;缝洞;有限元

中图分类号:TE319

文献标志码:A

文章编号:1672-1926(2017)09-1425-08

引用格式:Yan Youjin, Li Longxin, Xu Wei, *et al.* Application of 3D digital core flow simulation technique in the study of gas flow in fractured-vuggy gas reservoirs in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(9): 1425-1432. [鄢友军, 李隆新, 徐伟, 等. 三维数字岩心流动模拟技术在四川盆地缝洞型储层渗流研究中的应用[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(9): 1425-1432.]

0 引言

数字岩心分析技术作为储层微观结构和渗流特征研究的一项重要手段,是油田开发领域的又一新兴技术。数字岩心技术以真实岩样为基础,通过一系列的图像处理技术和一定的数值算法将岩心数字化,构建三维数字岩心,基于该模型对岩心中的物理场进行分析研究,指导认识储层各种特性。三维数字岩心流动模拟技术是在岩心三维数字化模型基础上,依据储层实际温度和压力等条件,对气藏流体流动进行动态模拟的一项新技术。

当前对于储层渗流规律的研究大多依赖于岩心

物理模拟实验。然而四川盆地碳酸盐岩裂缝—孔洞型(以下简称“缝洞型”)气藏主产层位由于温度压力高、裂缝和溶孔发育,所取得的岩心收获率低、整体破损严重,导致岩石物理实验开展较为困难。与物理室内实验相比,三维数字岩心流动模拟技术基于真实岩心的微观孔隙结构,构建三维数字岩心模型,实现了任意位置多种参数的精确计量,可以真实再现流动的过程,形态与规律。并且三维数字岩心流动模拟技术还可以在不破坏原岩心的情况下实现模拟多次可重复的流动^[1-9]。

因此可以应用数字岩心流动模型技术,对四川盆地碳酸盐岩缝洞型储层开展流动模拟分析,研究

其多重介质渗流规律。目前在真实岩心数字模拟流动分析方面,国内外主要是通过薄片电镜或者小岩心高分辨率 CT 扫描图像构建岩心三维模型,还原储层岩样的微观结构,利用流体力学的基本方程模拟流体在储层中的三维流动^[1-9]。该类方法的优势在于定量、直观。但是该类方法主要针对的是均质性较好、储集空间种类较少的岩心,往往只适于模拟样品尺寸或者流动单元较小、流动方式单一的情况。相对于地质条件复杂、非均质性强、缝洞发育的碳酸盐岩缝洞型储层,这类方法在模型尺度和流动规律分析表征上,难以满足孔洞缝多重介质流动特征描述的需求。

本文利用四川盆地碳酸盐岩缝洞型全直径岩心 CT 扫描图像和岩心常规物理实验结果,建立了数字岩心三维可视化模型,应用有限元法耦合流体在孔、洞、缝 3 种不同存储介质中的流动特征,实现了定量动态模拟地层条件下流体的流动情况,并将其应用于综合分析对比缝洞型和孔洞型储层流体渗流规律分析中,可为缝洞型气藏的试采和开发决策提供必要的数据支撑。

1 数字岩心三维模型的构建

数字岩心模型的构建是运用数字岩心技术开展分析研究的基础。利用岩心 CT 扫描的二维图像重构的三维模型是常用的一种建模方法。它具有精度高、不破坏样品等特点^[10-12]。

通过以下步骤完成数字岩心三维模型的构建,建模流程框图如图 1 所示。

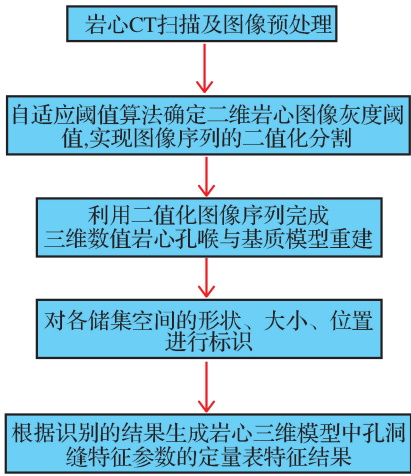


图 1 CT 扫描岩心三维数字化建模流程

Fig.1 3D digital modeling process of CT scan core

(1)图像预处理。对 CT 扫描获得的一系列岩心灰度图像,经过图像增强、图像去噪、图像平滑、图

像二值化分割等,获取能够清晰辨别储集空间与岩心骨架的二值化图像。

(2)数字岩心三维重构。用完成预处理的二值化图像,采用表面绘制的方法^[13],通过不同截面图像的拼接及拟合重构岩心内部结构的三维模型。

(3)储集空间类型识别。在构建的三维岩心模型中,进行数据点的逐行逐列扫描,利用“标签吸收法”提取岩心内部的储集空间^[14],具体划分标准见表 1。

表 1 不同类型储集空间的划分标准
Table 1 Classification criteria for different types of reservoir space

储集空间类型	形状特征	储集空间尺度	备注
孔隙	$F > 0.05$ 且	$< 2\text{mm}$	①形状因子 F : 当形状因子 F 趋近于 1 时,目标在空间中近似表现为一个球,当空间中形状因子趋近于 0 时,目标在空间中呈现面状
溶洞	$R_e/R_{\min} < 20$	$\geq 2\text{mm}$	② R_e 为等效球半径,是与目标体积相等的球的半径
裂缝	$F < 0.05$ 或 $R_e/R_{\min} > 20$		③ R_{\min} 为最小外接球半径

利用储层岩心 CT 二维图像切片信息,对岩心进行三维物理重构和建模。图 2 为 CT 二维图像切片及二值化处理及三维数字岩心建模结果。如图 2 所示,二值化处理后能比较清晰分辨孔隙、溶洞和裂缝。在重构的三维数字岩心模型中,依据表 1 中的孔洞缝划分标准,利用重构软件对 3 种不同储集空间进行标定划分和体积计量,就能够实现储集空间的三维分布形态和尺度大小的定量化和可视化。同时,储集空间类型的划分还为下一步开展流动模拟计算奠定了基础。

数字岩心三维建模所使用的二维图像质量和分辨率主要受限于 CT 扫描技术的精度。目前的 Micro-CT 扫描的精度可达到 $\leq 0.5\mu\text{m}$,但仍不能扫描到低渗致密岩心的所有孔隙和喉道。因此,为了减少数字岩心构建模型与室内常规分析得到的基础参数之间的误差,构建模型时将室内实验得到的岩心常规总孔隙度和渗透率等参数,赋值给数字岩心模型作为其基本的物性参数。

2 缝洞型储层岩心微观流动模拟研究

目前用于描述缝洞系统流动规律的数学模型主要有 3 种:三重介质模型、等效连续介质模型和离散介质模型^[15-18]。这 3 种数学模型均是由裂缝系统流

动模型发展而来的。然而这3种多重介质渗流模型,均是在宏观尺度下,根据不同的假设条件,对缝洞介质中流体流动过程进行了简化,但是会忽略掉部分微观流动细节。而在微观尺度下,针对具体且精细的岩心模型,流体在各类储集体中的流动可能呈现出不同的流动状态,如绕流、窜流、指进甚至紊流等。这些流动现象很可能就是影响微观渗流的关键因素。

如果仅仅采用上述的几种方法对其流动过程进行描述,这些微观渗流现象就会被忽略,很难真实地还原地下流动情况。因此,需要建立一种针对于岩心微观流动的数值模拟方法,用于研究缝洞介质的渗流规律。应用基于多流场耦合的微观数值模拟方法可以对缝洞介质在微观尺度下的流动规律进行研究。

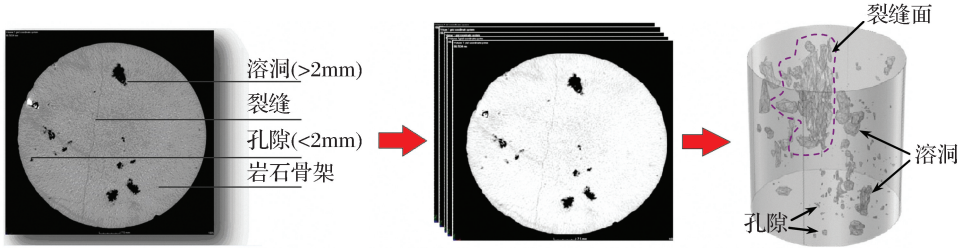


图2 CT扫描岩心图像和二值化处理及三维建模结果

Fig.2 CT scan core image, binarization processing and 3D modeling results

2.1 流动系统的划分

将构建的数字岩心划分为3个不同的流动系统。在流动系统内部,遵循以下流动的规律。

2.1.1 溶洞

在岩心中溶洞的分布较为离散,部分被裂缝沟通,具有良好的储集性能。这类储集空间中的流动可以看做是黏性流体的自由流动,可沿用流体力学中的基本方程N—S方程进行描述。

$$-2\mu \nabla \cdot D(u_s) + \nabla p_s = f \quad (1)$$

式中: μ 为流体的黏度; $\nabla \cdot D(u_s)$ 表示应变张量的散度; u_s 为所述溶洞区域中的流动速度; ∇p_s 为溶洞区域的压力的梯度; f 为流体的体积力。

2.1.2 裂缝

在岩心中裂缝的储集性能较小,但是可以起到改善渗流能力的作用。裂缝中的流动速度与裂缝的开度相关,目前主要可以通过立方率进行描述。

$$Q_f = \frac{b^3}{12\mu} \times \frac{\Delta p_f}{l} \quad (2)$$

式中: Q_f 为裂缝出口流量; l 为裂缝长度; b 为裂缝开度; Δp_f 是裂缝进出口的压差。

2.1.3 基岩

作为具有一定孔隙度和较低渗透性的基质区域,其中的流动仍然符合Darcy定律:

$$\mu \frac{k_m}{u_d} + \nabla p_d = f \quad (3)$$

式中: u_d 为流体的速度; k_m 为基质的渗透率; ∇p_d 为基质区域中压力梯度。

2.2 流动系统交界区域的流动耦合有限元求解

通过对流体流动计算方法的分析对比^[19-22],由于主要在裂缝和溶洞与基岩交界区域有流量的交换,因此对上述这些区域的选用了网格剖分和有限元法,对流动过程中裂缝和溶洞与基岩交界区域流动压力场和速度场进行耦合计算求解。

求解前有如下假设和初始条件:①岩心中的流动模拟井下储层中的流动,温度变化较小,考虑设为等温流动;②孔隙、溶洞和裂缝等不同介质流态不同,均存在储集和渗流能力;③考虑了流体、岩石骨架和孔隙的压缩性。由于储层岩石骨架及流体具有可压缩性,在衰竭式开采过程中会受到净应力增大的影响,可能会使储层孔喉或裂缝通道变小变窄,较为明显地影响流体流动能力^[23],因此需要考虑岩石骨架和孔隙的压缩性;④不同介质间存在窜流,并且窜流的流动是连续的。

(1) 裂缝与基质交界区域流动耦合有限元求解^[24]。

联立式(2)和式(3)对裂缝区域有限元耦合求解得到:

$$\begin{cases} \frac{K_m}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{K_m}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} + Q_{mf} = 0 \\ \frac{K_f}{\mu} \frac{\partial^2 P}{\partial L^2} + q_{fi} - Q_{mf} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: L 为沿裂缝轴向的线函数自变量; K_f 和 K_m 分别为基岩和裂缝的有效渗透率值; Q_{fm} 为基岩裂缝两系统之间的窜流量; q_{fi} 为第 i 条裂缝与其相交

裂缝之间的窜流量。可以把流动方程组写成积分的形式：

$$\int_{\Omega} F d\Omega = \int_{\Omega} F_m d\Omega + \int_f F_f d\Omega = - \int_{\Omega} q d\Omega \tag{5}$$

把上式写成矩阵形式就可以得到裂缝区域有限元流动计算形式：

$$DP = F \tag{6}$$

式中： D 为整体刚度矩阵； P 为求解的压力列向量； F 为由于域中存在源或者汇形成的方程右端项组成的列向量。求解此矩阵，可以获得裂缝发育区压力分布。

(2) 溶洞与基质交界区域流动耦合有限元求解。在流动交界区域的边界条件为：

$$u_s \cdot n_s + u_d \cdot n_d = 0 \tag{7}$$

$$p_s - 2\mu n_s \cdot D(u_s) \cdot n_s = p_s \tag{8}$$

式中： n_d 和 n_s 分别为基质和溶洞流动区域的单位外法向量； p_d 、 p_s 分别为基质和溶洞流动在交界面处的压力； u_d 、 u_s 分别为基质和溶洞流动在交界面处的流速。

联立边界条件[式(7)、式(8)]和流动方程[式(1)、式(3)]，用稳定化混合有限元法对方程进行求解^[24,25]，就能得到溶洞与基质边界耦合流动区域的压力和速度。

将岩心中流动方程及有限元耦合方程组求解，并利用图形处理软件将求解的结果在重构的三维数字岩心中用图形化的形式展现，如图3—图4所示。

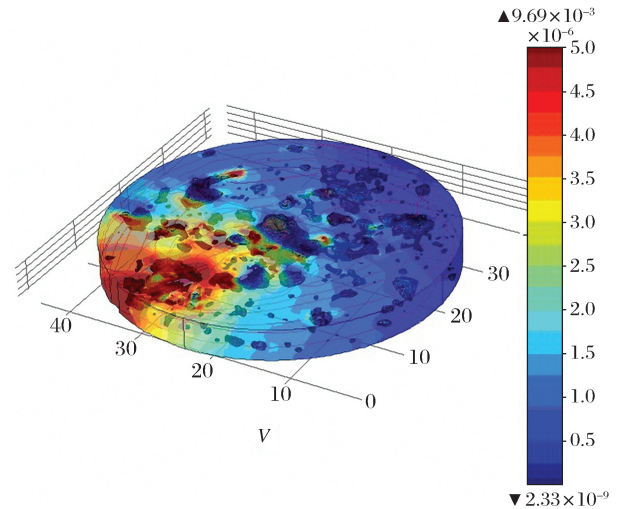


图3 缝洞模型中速度场分布

Fig.3 Velocity field distribution in fractured-vuggy model

可以直观得到如图示中流体在缝洞型储层岩心流动过程中即时的压力分布、流速分布、渗流路径等流动特征参数。利用上述流动模拟方法对4块缝洞型和

孔洞型数字岩心模型的渗透率进行计算。计算结果与室内实验实测结果对比如表2所示。数字岩心计算渗透率与室内岩心实验实测渗透率结果相关性较好，相对误差较小，说明本模拟计算方法具有较高的可靠性。

图3是缝洞型岩心模型在水平流动过程中某时刻岩心内部流速的分布情况；图4是该模型横截面上观察到的流动过程中压力的分布情况。由于三维数字岩心模型是反映的真实岩心内部三维结构，流体在该结构下的流动是真实渗流的体现，并且在构建流动物理模型的初始条件时可以将温度、压力以及压缩系数等参数设置到地层条件的状态，可进行不同地层条件下的模拟流动实验。

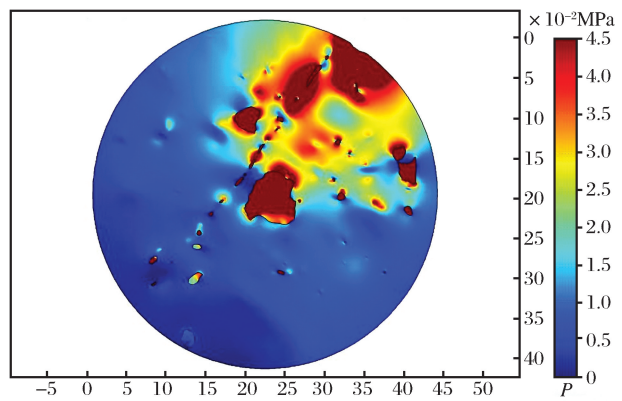


图4 缝洞模型横截面压力分布

Fig.4 Cross-section pressure distribution in fractured-vuggy model

表2 数字岩心渗透率模拟计算结果表

Table 2 Comparison between numerical simulation of core permeability and laboratory test results

岩心号	室内实验实测 渗透率 /($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	数字岩心模拟 计算渗透率 /($\times 10^{-3} \mu\text{m}^2$)	相对误差 /%
1-6	0.036	0.045	25.00
2-17	10.6	12.36	16.60
2-18	0.524	0.412	-21.37
3-20	0.653	0.716	9.65

3 数字岩心微观流动模拟技术应用

为了更为真实地了解缝洞型储层岩心中真实流动情况，并对比分析其主要渗流规律，本文利用四川盆地碳酸盐岩缝洞型储层 L-4 号和孔隙溶洞型(以下简称“孔洞型”)储层 DC-3 号岩心 CT 扫描后图像，建立了三维数字岩心模型(如图5、图6所示，模

型参数见表 3)。

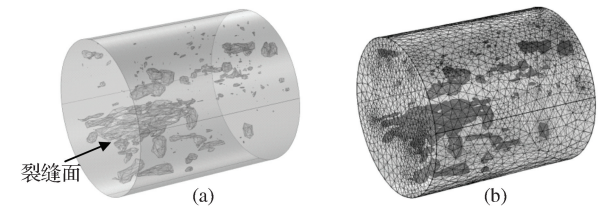


图 5 缝洞型岩心数字模型及网格剖分
Fig.5 Numerical model and mesh generation
for fractured-vuggy core

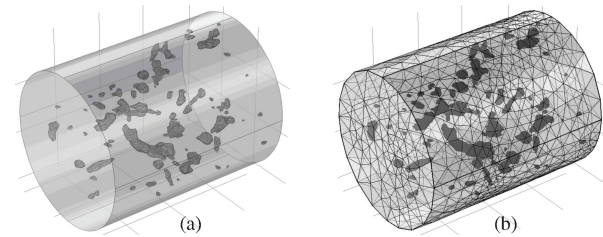


图 6 孔洞型岩心数字模型与网格剖分
Fig.6 Numerical model and mesh generation
for pore-cave core

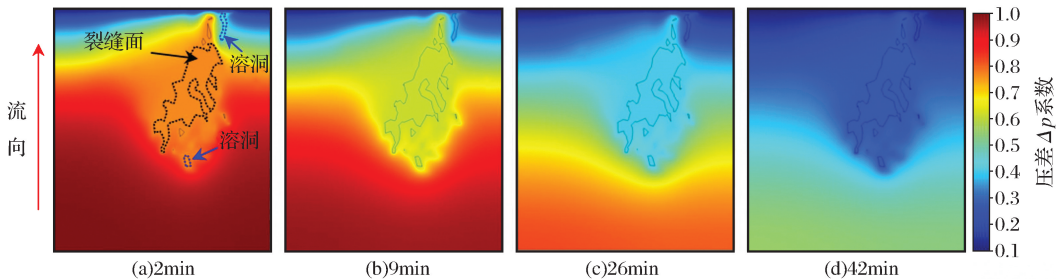


图 7 缝洞型岩心中截面压力随时间变化情况
Fig.7 The variation of cross-sectional pressure in fractured-vuggy core with time

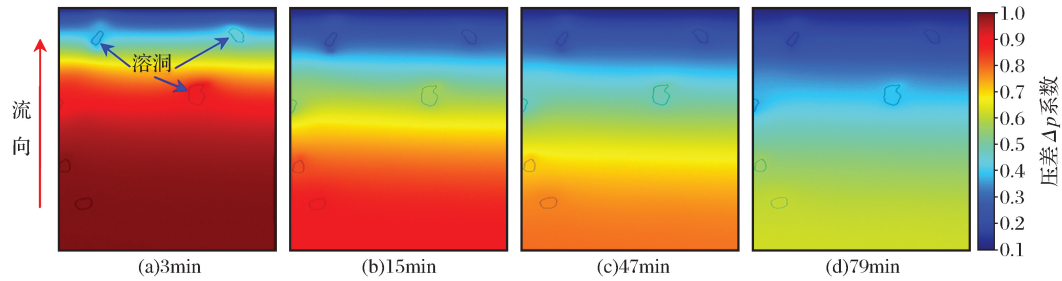


图 8 孔洞型岩心中截面压力随时间变化情况
Fig.8 The variation of cross-sectional pressure in pore-cave core with time

形状及岩石综合压缩系数变化情况。

从这些地层条件下缝洞型和孔洞型储层岩心的流动过程图中可以分析得出。

(1) 流动过程中裂缝和溶洞内的压降很小(图 7—图 10), 流线由远端向出口汇聚。缝洞型岩心压力降由出口端沿着裂缝向岩心内部逐渐向远处

为了更为集中地反映岩心中的主要渗流规律和计算方便,对模型进行了部分简化处理。利用三维数字岩心流动模拟技术模拟了这 2 个模型的衰竭式开采流动过程(图 7—图 11)。结合地层条件下压力梯度实际情况,模拟实验将压力梯度控制在一个较小的范围(0.485~0.545MPa,表 3)。

表 3 真实岩心数字三维模型参数对比
Table 3 Comparison of 3D digital model
parameters of real core

模型 类型	总孔隙 度/%	各储集空间所占比例/%			模型 网格数	压力梯度 (MPa/m)
		孔隙	裂缝	溶洞		
缝洞型	3.20	42.58	15.86	41.56	1,475,576	0.545
孔洞型	3.61	56.57	0	43.43	985,962	0.485

在模拟实验初始条件的设置时,通常会考虑到岩石综合压缩系数随之变化的情况,以使模拟过程更为接近流动实际。但在本文模拟衰竭实验过程中,由于饱和压力与流动出口压力相差很小,净应力变化也很小,因此本文模拟实验未考虑孔喉和裂缝

基岩扩展;而中小溶洞较多的孔洞型岩心压力下降较为均匀且缓慢。缝洞型岩心的汇聚流动现象比孔洞型岩心更加明显(图 11)。当裂缝中压力下降到接近出口压力时(裂缝储能衰竭中后期),其周围的气相从溶洞和基岩补充到裂缝中,通过裂缝向出口流动。

(2)由于溶洞和裂缝中流动的阻力都很小,流动过程中的主要能量消耗在缝与缝、洞与洞或者是缝洞之间的狭小基质部分。一旦包围溶洞的基岩区域被流体突破,建立了基岩与缝洞的渗流通道,就能保持较长时间的持续流动。

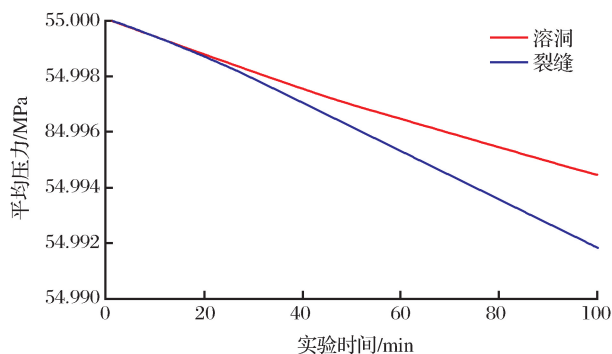


图9 缝洞模型中不同储集空间压力变化

Fig.9 Variation of pressure in different reservoir space in fractured-vuggy model

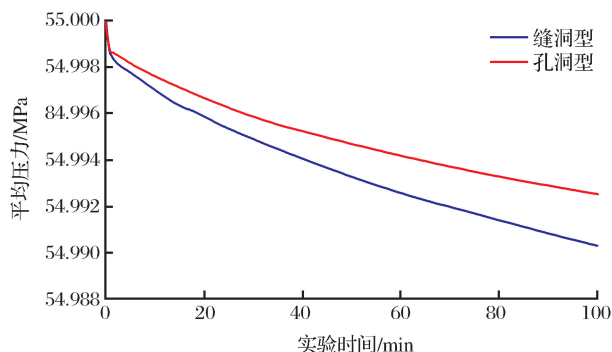


图10 流动过程中不同类型岩心内部平均压力变化

Fig.10 Variation of mean pressure in different types of core during flow

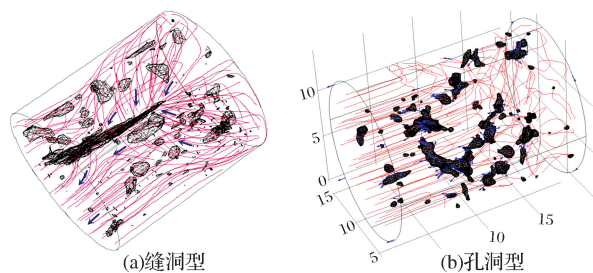


图11 缝洞型和孔洞型岩心衰竭式
流动实验时三维流线对比

Fig.11 Comparison of 3D flow lines in fractured-vuggy and pore-cave flow experiments

(3)和孔洞型岩心相比,缝洞型岩心由于有裂缝沟通基岩并减少了整体的渗流阻力,内部压力下降较孔洞型岩心快(图7—图9);同时缝洞型岩心内部

裂缝内部压力下降也是快于溶洞的(图10)。也就是说相同条件下缝洞型储层的初期产气量高于孔洞型储层,其采出程度也大于孔洞型储层。

4 结论

(1)利用岩心CT扫描的图像信息,建立三维数字岩心物理模型,并通过不同对储集空间流动特征的划分和流动耦合,应用网格剖分和有限元法,求解流动参数的三维数字岩心微观流动模拟技术,实现了岩心流动过程中压力分布,速度分布以及流动路径等多种流动参数的定量分析和可视化。

(2)通过流动模拟可以得知,裂缝—孔洞型储层中,裂缝是主要的渗流通道,基岩是能量主要消耗的区域,流动能量主要消耗在缝洞间的基岩部分。

在多重介质流动研究中,三维数字岩心流动模拟技术可与多相渗流理论和相似理论相结合,能够更加深入地研究多相流体的微观和宏观渗流机理,为该油气藏的开发对策提供必要的的数据支撑。

参考文献(References)

- [1] Gao Xingjun, Qi Yadong, Song Xinmin, *et al.* Parallel comparison of digital core analysis and real core test[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2015, 22(6): 93-96. [高兴军, 齐亚东, 宋新民, 等. 数字岩心分析与真实岩心实验平行对比研究[J]. 特种油气藏, 2015, 22(6): 93-96.]
- [2] Wang Chenchen, Yao Jun, Yang Yongfei, *et al.* Study on resolution selection for digital rock construction with CT scanning method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2013, 13(4): 1049-1052. [王晨晨, 姚军, 杨永飞, 等. 基于CT扫描法构建数字岩心的分辨率选取研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(4): 1049-1052.]
- [3] Cui Likai, Sun Jianmeng. Multiscale numerical simulation of seepage characteristics of tight sandstone reservoirs based on digital cores[C]. *Kunming: Proceedings of the Twentieth Annual Conference of Geophysics in China (Proceedings of the twenty-third annual)*, 2013, 10: 973. [崔利凯, 孙建孟. 基于数字岩心的致密砂岩储层岩石渗流特性多尺度数值模拟[C]. 昆明: 中国地球物理第二十九周年会第二十三专题论文集, 2013, 10: 973.]
- [4] Zhang Li, Sun Jianmeng, Sun Zhiqiang. Research in digital core modeling methods[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2012, 27(3): 35-40. [张丽, 孙建孟, 孙志强. 数字岩心建模方法应用[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2012, 27(3): 35-40.]
- [5] Liu Xuefeng, Zhang Weiwei, Sun Jianmeng. Methods of constructing 3-D digital cores: A review[J]. *Progress in Geophysics*

- (in Chinese), 2013, 28(6):3066-3072.[刘学锋, 张伟伟, 孙建孟. 三维数字岩心建模方法综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6):3066-3072.]
- [6] Yao Jun, Zhao Xiuchai, Yi yanjing, *et al.* The current situation and prospect on digital core technology[J]. Oil & Gas Recovery Technology, 2015, 12(6):52-54.[姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 数字岩心技术现状及展望[J]. 油气地质与采收率, 2015, 12(6):52-54.]
- [7] Wang Xin, Yao Jun, Yang Yongfei, *et al.* Research on Acquiring Physical Characteristical Paraments by Utilizing Digital Core Techniques[C]. Guilin: 16th China Fluid Mechanics Conference, 2012, 11.[王鑫, 姚军, 杨永飞, 等. 利用数字岩心技术获取岩心物性参数方法研究[C]. 桂林: 第七届全国流体力学学术会议, 2012, 11.]
- [8] Tomutsa L, Silin D B, Radmilovic V. Analysis of chalk petrophysical properties by means of submicron-scale pore imaging and modeling[J]. SPE Reservoir Evaluation and Engineering, 2007, 10(3):285-293.
- [9] Arns C H, Bauget F, Limaye A, *et al.* Pore scale characterization of carbonates using X-ray microtomography[J]. SPE Journal, 2005, 10(4):475-484.
- [10] Wang Chencheng, Yao Jun, Yang Yongfei, *et al.* Structure characteristics analysis of carbonate dual pore digital rock[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2013, 37(2):71-74.[王晨晨, 姚军, 杨永飞, 等. 碳酸盐岩双孔隙数字岩心结构特征分析[J]. 中国石油大学学报: 自然科学版, 2013, 37(2):71-74.]
- [11] Zhao Xiucui, Yao Jun. Construction of digital core and evaluation of it's quality[J]. Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition, 2007, 22(2):16-20.[赵秀才, 姚军. 数字岩心建模及其准确性评价[J]. 西安石油大学学报: 自然科学版, 2007, 22(2):16-20.]
- [12] Su Na, Duan Yonggang, Yu Chunsheng. Reconstruction of microscopic pore structure in low permeability gas reservoirs by Micro-CT scanning: An example from the Upper Shaximiao Formation in Xinchang Gasfield[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(54):792-796.[苏娜, 段永刚, 于春生. 微CT扫描重建低渗气藏微观孔隙结构——以新场气田上沙溪庙组储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(54):792-796.]
- [13] Takashi Totsuka, Levoy M. Frequency Domain Volume Rendering[C]. Anaheim, California: Computer Graphics Proceedings. Annual Conference Series, Acm Siggraph, August, 1993: 271-278.
- [14] Wang Xin, Yao Jun, Yang Yongfei. A new path reduction method using in the process of numerical rock image recognition[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(36):10863-10866.[王鑫, 姚军, 杨永飞. 一种新的基于图像的路径压缩优化方法及其在数字岩心中的应用[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(36):10863-10866.]
- [15] Xia Chongshuang, Liu Linqing, Zhang Li, *et al.* Optimization for the secondary development of old gas fields in the Sichuan basin and it's application[J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9):80-89.[夏崇双, 刘林清, 张理, 等. 四川盆地老气田二次开发优化技术及应用[J]. 天然气工业, 2016, 36(9):80-89.]
- [16] Liu Yuewu, Liu Ciqun. Study on the establishment of triple-porosity medium of reservoir model and percolation mechanism[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1993, 15(supplement 1):87-89.[刘曰武, 刘慈群. 三重介质油气藏数学模型的建立及其渗流机理的研究[J]. 西南石油学院学报, 1993, 15(增刊1):87-89.]
- [17] Wan Yizhao, Liu Yuewu. Three dimensional discrete-fracture-cavity numerical well test model for fractured-cavity reservoir[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2015, 47(6):1000-1008.[万义钊, 刘曰武. 缝洞型油藏三维离散缝洞数值试井模型[J]. 力学学报, 2015, 47(6):1000-1008.]
- [18] Xu Xuan, Yang Zhengming, Liu Xiangui, *et al.* The equivalent continuum media model for fractured cavernous carbonate reservoir[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2010, 38(1):84-88.[徐轩, 杨正明, 刘先贵, 等. 缝洞型碳酸盐岩油藏的等效连续介质模型[J]. 石油钻探技术, 2010, 38(1):84-88.]
- [19] Yao Jun, Zhao Xiucui. Numerical Core and Pore Grade Seepage Simulation Theory[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.[姚军, 赵秀才. 数字岩心及孔隙级渗流模拟理论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.]
- [20] Wang Chencheng, Yao Jun, Yang Yongfei, *et al.* Percolation properties analysis of carbonate digital core based on Lattice Boltzmann method[J]. Journal of China University of Petroleum: Edition of Natural Science, 2012, 36(6):94-98.[王晨晨, 姚军, 杨永飞, 等. 基于格子玻尔兹曼方法的碳酸盐岩数字岩心渗流特征分析[J]. 中国石油大学学报, 2012, 36(6):94-98.]
- [21] Wang Xin, Yao Jun, Yang Yongfei, *et al.* Pore network model construction and flow simulation study based on carbonate fracture-vug system[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(30):8900-8904.[王鑫, 姚军, 杨永飞, 等. 基于碳酸盐岩缝洞系统的孔网模型构建与流动模拟研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(30):8900-8904.]
- [22] Zhang Wenhui, Fu Liyun, Zhang Yan, *et al.* Computation of elastic properties of 3D digital cores from the Longmaxi shale[J]. Applied Geophysics, 2016, 13(2):364-374.[张文辉, 符力耘, 张艳, 等. 利用三维数字岩心计算龙马溪组页岩等效弹性参数(英文)[J]. 应用地球物理: 英文版, 2016, 13(2):364-374.]
- [23] Liu Jianjun, Liu Xiangui, Hu Yareng, *et al.* Study of fluid-solid coupling flow in low permeable oil reservoir[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(1):88-92.[刘建军, 刘先贵, 胡雅初, 等. 低渗透储层流-固耦合渗流规律的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(1):88-92.]
- [24] Li Longxin. Study of Numerical Simulation in Carbonate Fracture-vuggy Reservoir with Multi-scale Features[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2013:50-72.[李隆新. 多尺

度碳酸盐岩缝洞型油藏数值模拟方法研究[D].成都:西南石油大学,2013:50-72.]

[25] Fend Minfu,Qi Ruisheng,Zhu Rui,*et al.*Stabilized Crouzeix-Raviart element for the coupled Stokes and Darcy problem[J].Applied Mathematics and Mechanics,2010,31(3):369-372.[冯民富,祁瑞生,朱瑞,等.关于 Darcy 方程和 Stokes 方程耦合问题的非协调稳定化方法[J].应用数学和力学,2010,31(3):369-372.]

Application of 3D digital core flow simulation technique in the study of gas flow in fractured-vuggy gas reservoirs in Sichuan Basin

Yan You-jun^{1,2},Li Long-xin^{1,2},Xu Wei^{1,2},Chang Cheng^{1,2},Deng Hui^{1,2},Yang Liu^{1,2},

(1.Exploration and Development Research Institute,PetroChina Southwest Oil and

Gas Field Company,Chengdu 610041,China;

2.National Energy High-sour Gas Reservoir Exploitation and R & D Center,Chengdu 610041,China)

Abstract:Due to the high pressure of carbonate fractured-vuggy reservoirs in Sichuan basin,it is extremely hard to keep the integrity of core samples from main production layers during coring.This problem leads to very few flow experiments which can be carried out.Digital core is a new technology for reservoir micro-structure analysis and micro-flow characteristics research which can simulate seepage process in formation condition and calculate the relevant parameters without destroying the core.This technique can be applied to the flow experimental study of carbonate fractured-vuggy reservoirs in the Sichuan Basin.In this paper,based on core CT scan results,3D models of digital cores have been established.By using numerical simulation based on finite element method,the flow law in condition of stratigraphy has been revealed through analysis.Result shows fractures are the most important flow channel in the fractured-vuggy reservoirs.Gas flowed in sequence of vuggy,matrix,fracture,export and flow energy loss mainly occurs in the tight matrix between the fracture and the cave.This research demonstrates the 3D digital core is a useful method for analyzing reservoir seepage law and mechanism.And it can provide necessary data which provide supports for making appropriate countermeasures in gas reservoir development.

Key words:3D digital core;Flow simulation;Fractured-vuggy;The finite element analysis

会议消息

第十六届全国有机地球化学学术会议筹备会召开

2017 年 7 月 15—16 日“第十六届全国有机地球化学学术会议筹备会”在重庆召开。会议分组审阅了全部论文摘要,并从 567 篇论文摘要中遴选出会议大会报告、分会主题报告、分会报告和展板报告。筹备会还讨论了大会各项议程等相关事宜,“第十六届全国有机地球化学学术会议”主题为“古老油气系统中的地球化学”,共设有:①烃源岩与煤地球化学;②石油、天然气地球化学;③油气生成与成藏地球化学;④非常规油气地球化学;⑤深层—超深层油气生成与演化;⑥分子同位素有机地球化学;⑦生物与环境有机地球化学;⑧地球化学实验技术与方法共 8 个专题。本届会议将于 2017 年 12 月 9—11 日在重庆召开。具体事宜请参阅二号通知。

(据会议二号通知整理)