

# 碳酸盐岩双孔隙数字岩心结构特征分析

王晨晨, 姚 军, 杨永飞, 王 鑫, 汲广胜, 高 莹

(中国石油大学 石油工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**基于扫描电子显微镜(SEM),分别获取用来描述碳酸盐岩大孔隙和微孔隙特征的低分辨率岩心薄片和高分辨率岩心薄片,利用马尔可夫链蒙特卡洛方法构建相应的大孔隙数字岩心和微孔隙数字岩心,并通过叠加法构建出同时描述大孔隙和微孔隙性质的碳酸盐岩双孔隙数字岩心,最后对数字岩心的孔隙结构特征进行分析评价。结果表明:马尔可夫链蒙特卡洛法能够基于真实岩心薄片快速构建出三维数字岩心;叠加法构建的碳酸盐岩双孔隙数字岩心的孔隙连通体积比明显提高,微孔隙的叠加对提高整个碳酸盐岩双孔隙数字岩心的连通性有着重要影响;碳酸盐岩双孔隙数字岩心孔隙尺寸分布大体上遵从双峰分布,能够同时描述大孔隙和微孔隙特征。

**关键词:**碳酸盐岩;马尔可夫链蒙特卡洛法;叠加法;双孔隙数字岩心;孔隙结构特征

**中图分类号:**TE 312 **文献标志码:**A

## Structure characteristics analysis of carbonate dual pore digital rock

WANG Chen-chen, YAO Jun, YANG Yong-fei, WANG Xin, JI Guang-sheng, GAO Ying

(School of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

**Abstract:** Based on scanning-electron microscopy, the lower resolution images were collected to show macro pore properties while the high resolution images were collected to show micro pore properties, and Markov chain Monte Carlo (MCMC) method was used to construct the corresponding macro pore and micro pore digital rock respectively. Then superposition method was used to construct carbonate dual pore digital rock. Finally, pore structures of digital rocks were compared. The results show that MCMC method could reconstruct the 3D digital rock quickly. The carbonate dual pore digital rock constructed by superposition method has a higher percolating volume fraction, which shows that micro pore has an important influence on the total connectivity. The carbonate digital rock constructed by superposition method has a bimodal pore size distribution which could describe the macro pore and micro pore characteristics simultaneously.

**Key words:** carbonate; Markov chain Monte Carlo; superposition method; dual pore digital rock; pore structure characteristics

碳酸盐岩油藏在成岩过程中常伴随着二次沉淀、化学溶解、白云岩化等现象,具有发育良好的大孔隙和微孔隙系统,在孔隙尺度上建立一套准确描述碳酸盐岩微观渗流机制的理论体系,具有十分重要的意义。目前,基于数字岩心平台可对微观渗流进行研究<sup>[1]</sup>,数字岩心的构建方法主要有物理试验法<sup>[2-3]</sup>和数值重建法<sup>[4-8]</sup>。Arns等<sup>[9]</sup>通过X射线CT扫描构建了碳酸盐岩三维数字岩心,对同一块碳酸

盐岩岩心调整不同的扫描分辨率发现,当分辨率达到1 μm时,基于数字岩心计算的孔隙度仍远小于实验室孔隙度测量结果,这说明碳酸盐岩中存在大量尺寸小于1 μm的微孔隙。针对碳酸盐岩油藏中多尺度孔隙特征,笔者基于不同扫描分辨率岩心薄片构建的大孔隙数字岩心和微孔隙数字岩心,通过叠加法构建同时描述大孔隙和微孔隙性质的碳酸盐

收稿日期:2012-10-17

**基金项目:**国家自然科学基金项目(11072268;51234007);教育部科学技术研究重大项目(311009);山东省自然科学基金项目(ZR2011EEQ002);中央高校基本科研业务费专项(11CX04022A);高等学校学科创新引智计划("111计划");长江学者和创新团队发展计划(IRT1294)

**作者简介:**王晨晨(1986-),男,博士研究生,从事油气微观渗流理论与应用方面的研究。E-mail:wcc1220@163.com。

岩双孔隙数字岩心,最后对碳酸盐岩双孔隙数字岩心的孔隙结构特征进行分析评价。

## 1 碳酸盐岩双孔隙数字岩心的构建

### 1.1 二维岩心薄片分析

基于扫描电子显微镜,获取真实碳酸盐岩岩心在不同平面上的低分辨率和高分辨率扫描图像,通过最大类间距法进行图像分割得到碳酸盐岩岩心二值图

像<sup>[10]</sup>。图1为低分辨率下碳酸盐岩岩心各平面上的二值图像(白色表示岩石骨架,黑色表示岩石孔隙),主要用来描述碳酸盐岩各方向上大孔隙的特征,各图像相幅均为 $600 \times 400$ ,分辨率为 $1.34 \mu\text{m}/\text{像素}$ ;图2为高分辨率下碳酸盐岩岩心各平面上的二值图像,主要用来描述碳酸盐岩各方向上微孔隙的特征,各图像相幅均为 $600 \times 400$ ,分辨率为 $0.335 \mu\text{m}/\text{像素}$ ,高、低分辨率图像的分辨率比值为 $1:4$ 。

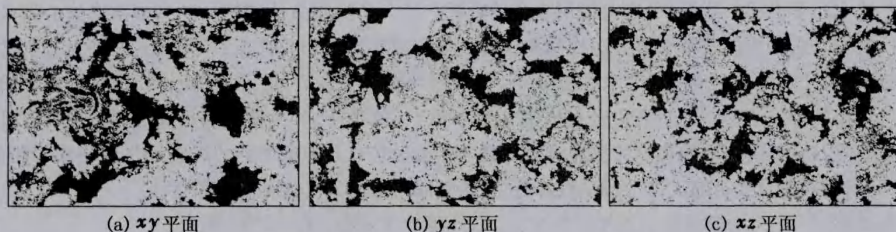


图1 碳酸盐岩岩心低分辨率二值图像

Fig.1 Low resolution binary images in carbonate rocks

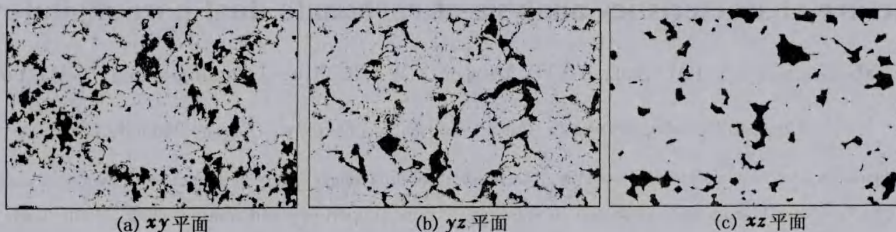


图2 碳酸盐岩岩心高分辨率二值图像

Fig.2 High resolution binary images in carbonate rocks

### 1.2 三维数字岩心重构

基于不同方向的岩心二值图像,通过马尔可夫链蒙特卡洛法(MCMC)构建三维数字岩心<sup>[11]</sup>。对一个特定的点 $s$ , $\Lambda_s$ 表示除 $s$ 之外的所有点。那么存在一个 $s$ 的邻居 $N_s$ 可表示为

$$P(x_s | x(\Lambda_s)) \approx P(x_s | x(N_s)). \quad (1)$$

假定: $V_{LMN} = \{(l, m, n) : 0 < l \leq L, 0 < m \leq M, 0 < n \leq N\}$ 表示具有 $L$ 行、 $M$ 列、 $N$ 层个正方体体素的长方体网格, $(i, j, k)$ 表示第 $i$ 行、第 $j$ 列和第 $k$ 层的相交体素,其相关状态表示为 $X_{ijk}$ 。 $V_{ijk}$ 表示长、宽、高分别为 $i$ 和 $k$ 长方体网格,其相关状态为 $X(V_{ijk})$ 。根据上述方程,可知对每个体素来说其随机马尔可夫场的条件概率为

$$P(x_{ijk} | \{x_{lmn} : (l, m, n) \neq (i, j, k)\}) = P(x_{ijk} | \{x_{lmn} : (l, m, n) \in N(ijk)\}). \quad (2)$$

式中, $N(ijk)$ 为 $(i, j, k)$ 的邻居。

选择双体素组合方法,基于岩心二值图像(状态为0或者1),利用 $xy$ 、 $yz$ 、 $xz$ 三个平面来同时构建三维马尔可夫链模型。分别基于碳酸盐岩 $xy$ 、 $yz$ 和

$xz$ 平面的高低分辨率二值图像,通过MCMC方法可构建出具有相同物理尺寸( $0.134 \text{ mm} \times 0.134 \text{ mm} \times 0.134 \text{ mm}$ )的大孔隙数字岩心和微孔隙数字岩心(图3)。其中大孔隙数字岩心孔隙度为 $0.254366$ ,

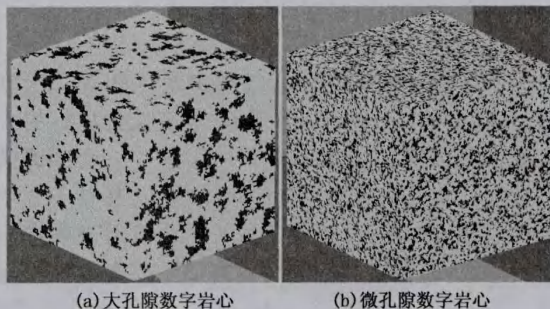


图3 基于马尔可夫链蒙特卡洛构建的不同数字岩心孔隙形态

Fig.3 Pore morphology of different digital rocks based on MCMC method

体素尺寸为 $100 \times 100 \times 100$ ,分辨率为 $1.34 \mu\text{m}/\text{像素}$ ;微孔隙数字岩心孔隙度为 $0.184643$ ,体素尺寸



为  $400 \times 400 \times 400$ , 分辨率为  $0.335 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。

### 1.3 叠加法

叠加法构建碳酸盐岩双孔隙数字岩心<sup>[12]</sup>的步骤如下:

(1) 进行大孔隙数字岩心的体素分割。如图4(a)所示, 根据大孔隙和微孔隙数字岩心的分辨率比值  $i(i=4)$ , 将大孔隙数字岩心中的体素分割成  $i \times i \times i$  个体素, 使大孔隙数字岩心和微孔隙数字岩心具有相同的体素尺寸。

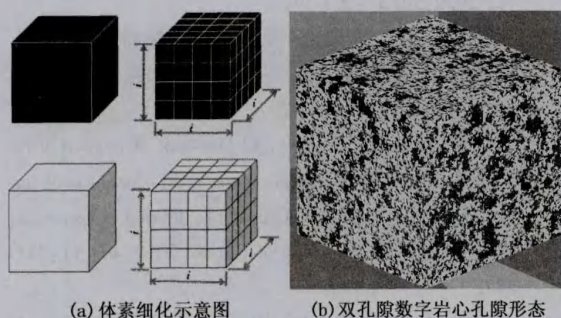


图4 基于叠加法的碳酸盐岩双孔隙数字岩心构造过程  
Fig.4 Construction of carbonate dual pore digital rock with superposition method

(2) 将大孔隙数字岩心的孔隙系统和微孔隙数字岩心的孔隙系统进行叠加, 则双孔隙数字岩心的孔隙系统空间  $I_s$  为

$$I_s = I_A \cup I_B.$$

式中,  $I_A$  和  $I_B$  分别为大孔隙和微孔隙数字岩心的孔隙系统。由于数字岩心的数据体是通过0(孔隙空间)和1(骨架空间)来进行表征的, 因此对大孔隙和微孔隙数字岩心的叠加操作为

$$0+0=0, 0+1=0, 1+0=0, 1+1=1. \quad (3)$$

图4(b)为基于叠加法构建的碳酸盐岩双孔隙

数字岩心, 其孔隙度为  $0.378967$ , 体素尺寸为  $400 \times 400 \times 400$ , 分辨率为  $0.335 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。

## 2 数字岩心结构特征

基于大孔隙数字岩心(图3(a))、微孔隙数字岩心(图3(b))和双孔隙数字岩心(图4(b)), 分别对描述数字岩心孔隙结构特征的主要参数连通体积比和孔隙尺寸分布函数进行计算<sup>[13]</sup>。

### 2.1 连通孔隙体积比

连通孔隙体积比  $f_p$  表示为

$$f_p = V^* / V. \quad (4)$$

式中,  $V^*$  为流体从岩心一侧流到另一侧所经过的孔隙体积,  $\text{m}^3$ ;  $V$  为岩心总的孔隙体积,  $\text{m}^3$ 。

通过计算可得到大孔隙数字岩心、微孔隙数字岩心和双孔隙数字岩心的连通体积比依次为  $81.5\%$ 、 $83.6\%$  和  $92.1\%$ 。可以看出, 大孔隙数字岩心和微孔隙数字岩心的连通体积比明显偏低, 这是由于碳酸盐岩的强烈非均质性造成的, 而叠加后的双孔隙数字岩心连通孔隙体积比明显增加, 这是由于微孔隙的添加增强了部分孤立大孔隙之间的连通作用, 对整个碳酸盐岩数字岩心的连通性提升有着重要影响。

### 2.2 孔隙尺寸分布函数

在孔隙空间中取一点, 假设该点到距其最近骨架点距离分布在  $\delta$  至  $\delta + d\delta$  的概率用  $P(\delta)$  表示,  $P(\delta)$  称为孔隙尺寸分布函数。其中,  $P(\delta)$  具有以下性质:

$$\int_0^\infty P(\delta) d\delta = 1, P(0) = \frac{s}{\varphi}, P(\infty) = 0. \quad (5)$$

式中,  $s$  为岩心的孔隙比面,  $\text{m}^{-1}$ ;  $\varphi$  为岩心孔隙度。

图5为各数字岩心孔隙尺寸分布。

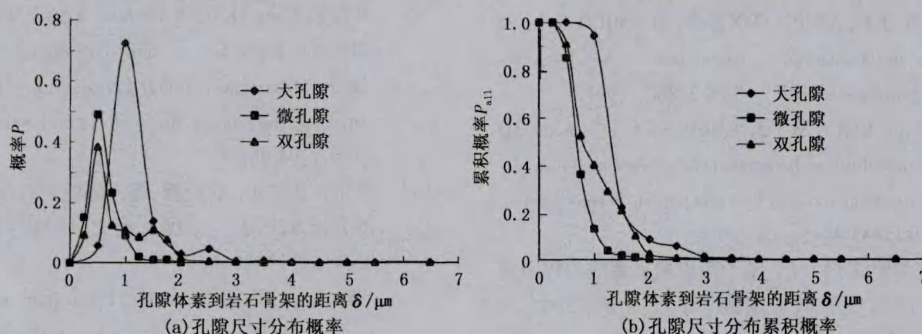


图5 孔隙尺寸分布函数

Fig.5 Pore size distribution function

其中, 大孔隙数字岩心的孔隙平均尺寸为  $1.3 \mu\text{m}$ , 主要描述碳酸盐岩孔隙尺寸大于  $1 \mu\text{m}$  的粒内

大孔隙特征; 微孔隙数字岩心的孔隙平均尺寸为  $0.54 \mu\text{m}$ , 主要描述碳酸盐岩孔隙尺寸小于  $1 \mu\text{m}$  的

粒内微孔隙特征;叠加法构建的碳酸盐岩双孔隙数字岩心孔隙尺寸分布大体上遵从双峰分布,能同时包含大孔隙和微孔隙数字岩心的孔隙尺寸分布,可用来描述碳酸盐岩粒内孔隙的多尺度分布特征。

### 3 结 论

(1) 马尔可夫链蒙特卡洛法能够从3个方向快速的构建不同尺度数字岩心,所建数字岩心的空间分布特征与真实岩心相似,但由于其约束函数较少,适合建立非均质性不是很强的碳酸盐岩数字岩心。

(2) 通过叠加法建立的碳酸盐岩双孔隙数字岩心孔隙连通体积比明显提高,微孔隙对提高整个岩心的连通性有着重要影响。

(3) 碳酸盐岩双孔隙数字岩心的孔隙尺寸分布大体上遵从双峰分布,能同时包含大孔隙和微孔隙数字岩心的孔隙尺寸分布,可用来同时描述碳酸盐岩粒内大孔隙和微孔隙分布特征。

**致谢** 英国赫瑞瓦特大学石油工程学院微观渗流研究小组为本工作提供了大量帮助和指导,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献:

- [1] 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, 2005,12(6):52-54.  
YAO Jun, ZHAO Xiu-cai, YI Yan-jing, et al. The current situation and prospect on digital core technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(6):52-54.
- [2] 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.
- [3] DUNSMUIR J H, FERGUSON S R, D'AMICO K L, et al. X-ray microtomography: a new tool for the characterization of porous media[R]. SPE 22860, 1991.
- [4] WU K J, van DIJKE M I J, COUPLES G D, et al. 3D stochastic modelling of heterogeneous porous media-applications to reservoir rocks[J]. Transport in Porous Media, 2006,65(3):443-467.
- [5] 赵秀才,姚军,陶军,等. 基于模拟退火算法的数字岩心建模方法[J]. 高校应用数学学报:A辑, 2007,22(2):127-133.  
ZHAO Xiu-cai, YAO Jun, TAO Jun, et al. A method of constructing digital core by simulated annealing algorithm[J]. Appl Math J Chinese Univ (Ser A), 2007,22(2):127-133.
- [6] LIU X, SUN J, WANG H. Reconstruction of 3-D digital cores using a hybrid method[J]. Applied Geophysics, 2009,6(2):105-112.
- [7] 刘学锋,孙建孟,王海涛,等. 顺序指示模拟重建三维数字岩心的准确性评价[J]. 石油学报, 2009,30(3):391-395.  
LIU Xue-feng, SUN Jian-meng, WANG Hai-tao, et al. The accuracy evaluation on 3D digital cores reconstructed by sequence indicator simulation[J]. Acta Petrolei Sinica, 2009,30(3):391-395.
- [8] 张挺,卢德唐,李道伦. 基于二维图像和多点统计方法的多孔介质三维重构研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2010,40(3):271-277.  
ZHANG Ting, LU De-tang, LI Dao-lun. A method of reconstruction of porous media using a two-dimensional image and multiple-point statistics[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2010,40(3):271-277.
- [9] ARNS C H, BAUGET F, LIMAYE A, et al. Pore-scale characterization of carbonates using X-ray microtomography[J]. SPE Journal, 2005,10:475-484.
- [10] 赵秀才. 数字岩心及孔隙网络模型重构方法研究[D]. 东营: 中国石油大学石油工程学院, 2009.  
ZHAO Xiu-cai. Numerical rock construction and pore network extraction[D]. Dongying: College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, 2009.
- [11] WU K J, NUNAN N, CRAWFORD J W, et al. An efficient Markov chain model for the simulation of heterogeneous soil structure[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004,68(2):346-351.
- [12] 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:自然科学版, 2012,36(6):94-98.  
WANG Chen-chen, YAO Jun, YANG Yong-fei, et al. The flow properties of carbonate digital rock based on lattice Boltzmann method[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2012, 36(6):94-98.
- [13] 姚军,赵秀才,衣艳静,等. 储层岩石微观结构性质的分析方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2007,31(1):80-86.  
YAO Jun, ZHAO Xiu-cai, YI Yan-jing, et al. Analysis methods for reservoir rock's microstructure[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2007,31(1):80-86.

(李志芬)