基于叠加数字岩心和孔隙网络模型的页岩基质储层孔隙空间表征方法

杨永飞^{1*}, 刘志辉¹, 姚军^{2*}, 王晨晨^{3*}, 孙海¹, 张磊¹, 刘磊¹, 赵建林¹, 安森友¹, 张文杰¹, 刘鹏飞¹

1. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 青岛 266580;

2. 中国石油大学(华东)油气渗流研究中心, 青岛 266580;

3. 长江大学非常规油气湖北省协同创新中心, 武汉 430100

* E-mail: yangyongfei@upc.edu.cn; RCOGFR_UPC@126.com; wcc1220@163.com

收稿日期: 2017-03-14; 接受日期: 2017-11-07; 网络版发表日期: 2018-04-24

国家自然科学基金项目(批准号: 51711530131, 51674280, 51490654, 51704033)、青岛市自主创新计划应用基础研究项目(编号: 16-5-1-38-jch)、中央高校基本科研业务费专项基金项目(编号: 17CX05003)、国家科技重大专项(编号: 2016ZX05010002005, 2016ZX0504004007)、长江学者和创新团队发展计划项目(编号: IRT_16R69)和高等学校学科创新引智计划项目(编号: B08028)资助

摘要 针对页岩样品基岩既包含无机孔隙, 又包含有机孔隙的特点, 本文建立了能同时描述两类孔隙的数字岩心和孔隙网络模型。首先基于模拟退火法和马尔可夫链蒙特卡罗法分别构建了无机孔隙数字岩心和有机孔隙数字岩心, 然后按照一定算法叠加两个数字岩心, 重构出了既包含无机孔隙信息又包含有机孔隙信息的叠加数字岩心; 对构建的表征不同孔隙类型的数字岩心, 分别提取其孔隙网络模型, 按照二者之间的连接信息, 将两个孔隙网络模型整合到一起, 建立了既包含无机孔隙信息又包含有机孔隙信息的双孔隙网络模型; 最后基于两大平台, 分析了页岩样品的几何拓扑结构性质, 孔隙半径分布和配位数与实验结果拟合程度较好, 验证了构建方法和数值分析方法的正确性。

关键词 页岩, 叠加数字岩心, 整合孔隙网络模型, 模拟退火法, 马尔可夫链蒙特卡罗法

1 引言

国家已制定页岩气规划纲要, 2015年页岩气产量44.71亿方, 2020年页岩气产量为600~1000亿方, 页岩气藏将成为我国能源新的增长点, 成为国家重要战略资源和有力补充, 但是由于勘探开发的困难, “十三五”的页岩气产量目标将下调50%^[1]。姚军等人^[2]指出,

要实现页岩气藏的高效开发, 研究气体在微纳米孔隙中运移机制是关键力学问题之一, 而数字岩心和孔隙网络模型是进行微纳尺度流动模拟的基础。因此, 进行页岩微纳米孔隙的识别和定量描述, 建立准确的页岩储层孔隙空间表征方法成为研究的重点和难点。

页岩孔隙结构复杂, 既有纳米级的有机质粒内孔隙、还发育无机矿物中纳米-微米级粒间孔隙, 以及微

引用格式: 杨永飞, 刘志辉, 姚军, 等. 基于叠加数字岩心和孔隙网络模型的页岩基质储层孔隙空间表征方法. 中国科学: 技术科学, 2018, 48: Yang Y F, Liu Z H, Yao J, et al. Pore space characterization method of shale matrix formation based on superposed digital rock and pore-network model (in Chinese). Sci Sin Tech, 2018, 48: doi: 10.1360/N092017-00076

米级-毫米级天然裂缝^[3]。泥页岩热演化程度不同,生成的孔隙类型不同。有机孔隙与无机孔隙中流体的相态具有较大区别,目前学者普遍认为页岩有机质中的有机孔隙是主要的存储空间,因此研究有机孔隙的比例和分布等对页岩气后续开发具有重要的理论和实践价值。图1展示了页岩样品中有机孔隙和无机孔隙的区别,从扫描电子显微镜图像上可以明显看出,有机质区域的组成成分不同,并且有机质一般呈现蜂窝状,灰度与周围的基质和无机孔隙也有差别。扫描电子显微镜结合能谱分析(EDS)可以得到岩石的矿物结构图(能谱分析能够得到岩石矿物结构组成),这样就可以根据孔隙周围的矿物成分区分有机孔隙和非有机孔隙,如有机孔隙一般是被有机质矿物包围,无机矿物包围着的孔隙为无机孔隙。本文中分别选取的有机孔隙和无机孔隙是通过带能谱分析的SEM设备扫描分析得到的^[4]。

由于页岩孔隙极小,目前常用来研究页岩孔隙结构的方法主要有,扫描电子显微镜(SEM)^[5]、聚焦离子束扫描电子显微镜(FIB-SEM)^[6]、原子力显微镜(AFM)^[7]、纳米CT^[8]、透射电子显微镜等扫描手段,结合能谱(ESD)或背散射图像(BEI)还可以实现不同矿物成分的三维分布图像^[9]。

基于上述设备,可以得到数字岩心,构建方法分为两大类,聚焦离子束扫描电子显微镜、纳米CT等物理构建法可以直接给出三维真实数字岩心,而扫描电子显微镜、原子力显微镜、透射电子显微镜等只能给出二维图像资料,需要利用随机算法重构数字岩心,常用的重构方法有^[10]:(1) 高斯模拟法。由Joshi^[11]于1974年提出,Quiblier^[12]将Joshi提出的算法改进后由二维拓展

到三维,Adler等人^[13]在Quiblier方法的基础上引入了周期性边界条件和傅里叶变换方法,使建模效果有所改善。但是,仅用孔隙度和两点相关函数无法充分反映孔隙空间的结构特征,孔隙空间的连通性较差。(2) 模拟退火法。Hazlett^[14]将模拟退火法应用于数字岩心的构建,Yeong和Torquato^[15]验证了该方法的数字岩心建模能力。模拟退火法在建立数字岩心时可以考虑更多的岩石信息,因此所建模型较高斯模拟法更接近真实多孔介质,本文采用该方法构建无机孔隙数字岩心。(3) 过程模拟法。Bryant和Blunt^[16]提出了通过模拟岩石的地质成岩过程来建立数字岩心的方法,Øren和Bakke^[17]在该领域做了更深入的研究。过程模拟法无法模拟复杂孔隙系统的成岩过程^[18]。(4) 多点统计法。Okabe和Blunt^[19]将这种方法应用到了碳酸盐岩数字岩心的重构中。中国科学技术大学的卢德唐等人^[20]同时使用软数据和硬数据,提出了一种利用多点地质统计法重构多孔介质三维结构的方法,该方法可以建立各向异性的多孔介质,适用范围广泛,但计算速度稍慢^[21];(5) 马尔可夫随机重建法。Wu等人^[22]建立了非均质土壤样品的二维马尔可夫链模型。Wu等人^[23]和Jiang等人^[24]又将这种方法应用到了三维油藏岩石的构建中。马尔可夫随机重建法是一种高效的随机统计计算方法,该方法建立的数字岩心具有良好的孔隙连通性,此外,它的建模速度很快,本文用来构建页岩有机孔隙数字岩心。

然而,如果只用单一的物理法构建或利用二维图像资料随机重构,只能构建单一尺度或单一成分的数字岩心,这对于非均质性很强的页岩来说都不够准确。因此,有学者建议进行工业CT-微米CT-纳米CT/FIB系

图1 (网络版彩图)美国某页岩样品SEM图像、能谱分析图以及分析得出的岩石矿物结构图

列扫描分析的特征手段^[9]. 因此, 构建既包含有机孔隙, 又包含无机孔隙的数字岩心和孔隙网络模型, 来表征页岩复杂的孔隙空间, 是本文研究的重点^[25].

本文将构建两个研究平台: 第一, 首先基于模拟退火和马尔可夫链蒙特卡罗(MCMC)两种方法分别构建无机孔隙数字岩心和有机孔隙数字岩心, 然后将两个数字岩心按照一定算法叠加, 重构既包含无机孔隙信息又包含有机孔隙信息的叠加数字岩心; 第二, 对构建的特征不同孔隙类型的数字岩心, 分别提取其孔隙网络模型, 按照整合法将二者重构出包含无机孔隙信息又包含有机孔隙信息的孔隙网络模型; 最后基于两大平台, 分析页岩样品的几何拓扑结构性质.

2 混合叠加法构建页岩数字岩心

在本文中, 无机孔隙尺寸相对较大, 可通过分辨率较低的图像进行描述, 采用模拟退火方法构建无机孔隙数字岩心主要是为了以后的研究中可通过添加更多的约束函数来保证无机孔隙的拓扑结构信息. 有机孔隙分布在有机质中, 孔隙尺寸相对较小, 需要分辨率较高的图像进行描述. 在发育成熟的有机质中有机孔隙密度相对较高, 内部连通性较好, 采用MCMC方法构建有机孔隙数字岩心既能够保证有机孔隙之间的连通特征, 更重要的为了提升建模速度, 以满足叠加法中对有机孔隙数字岩心数据体较大体素尺寸的要求, 进而可为以后的尺度升级研究提供保证^[26]. 下面拟采用模拟退火法建立无机孔隙数字岩心, 利用马尔可夫链蒙特卡罗法构建有机孔隙数字岩心, 提出一种叠加耦合算法, 建立既考虑无机孔隙又考虑有机孔隙的叠加数字岩心.

2.1 模拟退火法构建无机孔隙数字岩心

模拟退火算法是一种模拟退火物理过程的最优化算法, 随着温度的降低, 系统的能量减小, 稳定性逐渐增强^[14,15]. 在重建数字岩心过程中, 除了保证孔隙度不变, 还选取了两个统计函数作为建模过程中的待拟合量, 即: 自相关函数和线性路径函数^[27].

2.1.1 单点概率函数

假设多相系统中第 j 相所占区域为 v_j , 其在整个系统中的体积分数为 ϕ_j , 则定义第 j 相的相函数如下:

$$Z^j(\vec{r}) = \begin{cases} 1, & \vec{r} \in v_j, \\ 0, & \vec{r} \notin v_j, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\vec{r}$ 表示系统中的任意一点. 对于仅考虑孔隙和岩石骨架的两相系统, 可将相函数简化为

$$Z(\vec{r}) = \begin{cases} 1, & \vec{r} \in \text{孔隙}, \\ 0, & \vec{r} \notin \text{孔隙}. \end{cases} \quad (2)$$

于是, 系统的单点概率函数(即孔隙度 ϕ)可由统计平均值给出:

$$\phi = \overline{Z(\vec{r})}, \quad (3)$$

其中, $Z(\vec{r})$ 表示统计平均.

2.1.2 自相关函数

多相系统中第 j 相的自相关函数定义为

$$S_2^j(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = Z^j(\vec{r}_1) \times Z^j(\vec{r}_2), \quad (4)$$

其中, $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ 为系统中相距一定距离 r 的任意两点. 为方便, 令 r 的单位为像素数, 像素数与像素边长的乘积即物理长度; 对于三维情况, r 的单位为体素数.

2.1.3 线性路径函数

线性路径函数 $L^j(\vec{r}_1, \vec{r}_2)$ 是描述多孔介质微观结构的一个重要函数, 定义如下:

$$L^j(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \overline{P(\vec{r}_1, \vec{r}_2)}, \quad (5)$$

$$P(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \begin{cases} 1, & \vec{r}_x \in v_j, \\ 0, & \text{else}, \end{cases}$$

其中, $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ 为系统中相距一定距离 r 的任意两点, $\vec{r}_x$ 为连接 $\vec{r}_1$ 和 $\vec{r}_2$ 线段上的任意点. 与自相关函数相同, 在孔隙空间重建中以孔隙相为研究对象, $L^j(r)$ 可进一步简化为 $L(r)$ ^[28].

模拟退火法构建数字岩心具体步骤如下(图2): 初始时, 在指定大小的三维空间内随机产生由两种不同像素点组成的岩石孔隙和骨架体系. 由这两种体系组成的空间结构的孔隙度要与由薄片分析得来的孔隙度相同. 然后以像素点为基础, 利用模拟退火算法对两种体系的像素点进行演化. 即通过交换两种体系之间的像素点来改变整个系统的状态. 系统能否进行更新取决于新系统是否满足Metropolis准则.

图 2 模拟退火法建立数字岩心的程序流程

$$p = \begin{cases} 1, & \Delta E \leq 0, \\ \exp\left(-\frac{\Delta E}{T}\right), & \Delta E > 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$p \geq \text{RAN}(1, 0),$$

其中, p 为在第 $k+1$ 次搜索时状态的接受概率, $\Delta E = E^{k+1} - E^k$, T 为引进的控制参数, 称之为“温度”, $\text{RAN}(1, 0)$ 表示在 $[0.0, 1.0]$ 内选取的随机数。

在演化过程中孔隙度保持恒定不变, 拟合的目标函数为与孔隙空间结构有关的自相关函数和线性路径函数。

结合任意多个参考函数, 在建模过程中根据需要添加必要的参考信息, 所建立的数字岩心更加逼近真实岩心, 模拟退火算法所建立的数字岩心的孔隙空间分布相对均匀、孔隙形态更加类似真实岩心。岩心中孤立孔隙的数量大大减少, 孔隙的连通性得以增强,

这将给后续开展渗流机理研究奠定必要的和重要的基础。

2.2 马尔可夫链蒙特卡罗法(MCMC)构建有机孔隙数字岩心

马尔可夫链蒙特卡罗法(MCMC)是一种特殊的蒙特卡罗方法, 它将随机过程中的马尔可夫链应用到蒙特卡罗模拟中, 以实现动态模拟。马尔可夫链蒙特卡罗方法是以动态构造马尔可夫链为基础, 通过遍历性约束来实现模拟目标分布的一种随机模拟方法。马尔可夫链蒙特卡罗法构建数字岩心过程中, 能够从3个方向快速地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。马尔可夫随机重建法是一种高效的随机统计计算方法, 该方法建立的数字岩心具有良好的孔隙连通性, 此外, 它的建模速度很快, 可以用来构建页岩介质数字岩心^[23,29,30]。

MCMC的主要思想就是构造一个平稳分布为 $p(x)$ 的马尔可夫链。首先进行如下假定: $V_{LMN} = \{(l, m, n) : 0 < l \leq L, 0 < m \leq M, 0 < n \leq N\}$ 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} 表示的长宽高分别为 i, j 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:

$$p(x_{ijk} | \{x_{lmn} : (l, m, n) \neq (i, j, k)\}) = p(x_{ijk} | \{x_{lmn} : (l, m, n) \in N(ijk)\}), \quad (7)$$

其中, $N(ijk)$ 表示 (i, j, k) 的邻居。

选择双体素组合法, 基于岩心二值图像(状态仅为0或者1), 利用 xy , yz , xz 三个平面来同时来构建三维马尔可夫链模型。具体模拟步骤如下。

(1) 模拟一维链开始的体素, 采用薄片的孔隙度作为第1个体素状态为孔隙的条件概率(图3(a))。

(2) 沿 y 方向模拟第1层第1行上的体素。第1行第2个体素使用2邻居进行模拟, 从第3个体素开始均使用3邻居进行模拟。其条件概率通过 xy 平面的二维岩心薄片进行推导得出(图3(b))。

(3) 沿 x 方向模拟第1层各行体素进而构建该层所有体素。对于双体素 (i, j) 和 $(i, j+1)$, 在边缘体素使用3, 4邻居进行模拟, 内部体素使用5, 6邻居进行模拟。其条件概率通过 xy 平面的二维岩心薄片进行推导得出(图

3(c)).

(4) 沿 z 方向模拟各层体素进而构建三维模型. 对于双体素 (i, j, k) 和 $(i, j+1, k)$, 第2层的第1行跟第1层的第2行构造方法相似, 在边缘位置体素使用3, 4邻居进行模拟, 内部体素使用5, 6邻居进行模拟, 不同的是其

$$N_{15}(ijk; i, j+1, k) = \begin{bmatrix} (i-2, j, k-1) & (i-2, j+1, k-1) & (i-1, j, k-1) \\ (i-1, j+1, k-1) & (i, j-1, k-1) & (i, j, k-1) \\ (i, j+1, k-1) & (i-2, j, k) & (i-2, j+1, k) \\ (i-1, j-1, k) & (i-1, j, k) & (i-1, j+1, k) \\ (i, j-1, k) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

本文假设所建页岩数字岩心具有各向同性, 因此利用马尔可夫链蒙特卡罗方法构建数字岩心时可在3个方向上使用同一张切片图像.

2.3 页岩叠加数字岩心的构建

鉴于CT扫描方法获取三维数字岩心在图像分辨率和图像物理尺寸的限制, 某一特定分辨率下的三维数字岩心很难同时包含不同尺寸的有机孔隙和无机孔隙, 本文中提出叠加原理是为了建立一个能够既包含无机孔隙信息又包含有机孔隙信息的双孔隙网络模型研究平台.

基于页岩气藏岩心中的不同类型的孔隙, 基于叠加耦合方法, 建立了混合法生成同时考虑有机孔隙和无机孔隙数字岩心的构建理论与方法. 首先, 基于扫描电子显微镜获取不同类型的岩心二维图像, 通过图

条件概率由其他方向二维薄片的条件概率依次重构. 从第2层第2行开始, 边缘体素使用9, 10邻居进行模拟, 内部体素14, 15邻居进行模拟, 依次重构最后得到基于马尔可夫链蒙特卡罗方法的三维数字岩心(图3(d)). 其中三维15邻居可表示为

像处理得到分别描述页岩有机孔隙特征和无机孔隙特征的二值图像; 然后, 利用模拟退火法和马尔可夫链蒙特卡罗方法来分别建立尺寸相对较大的无机和尺寸相对较小的有机数字岩心, 并通过叠加算法建立同时考虑有机孔隙和无机孔隙的数字岩心. 通过叠加算法来构建的同时考虑有机孔隙和无机孔隙的数字岩心, 既保留了无机粒间孔隙的几何拓扑信息, 又保留了有机粒内微孔隙的空间位置信息, 能够同时描述页岩岩石特殊的孔隙分布特征^[32,33].

三维数字岩心的数据体是用二进制0和1来进行表示的. 基于物理尺寸相同的无机孔隙数字岩心和有机孔隙数字岩心, 叠加数字岩心构建步骤如下.

首先, 将低分辨数字岩心中每一个体素细化为 $i \times i \times i$ 个更小体素(图4), 这样细化后的无机孔隙数字岩

图3 (网络版彩图)基于马尔可夫链蒙特卡罗法的三维数字岩心构造图(白色实线表示正在遍历的体素, 白色虚线表示还未遍历的体素, 深色表示已经遍历的体素, 浅色表示正在遍历体素的其他邻居)^[31]

图4 (网络版彩图)低分辨率数字岩心的体素细化过程示意图^[31]

心和有机孔隙数字岩心的物理尺寸和体素尺寸都完全相同。其中, i 为无机孔隙数字岩心和有机孔隙数字岩心的分辨率之比, 图4中 $i=4$ 。

其次, 为了构建同时描述无机孔隙和有机孔隙特征的叠加数字岩心, 按照布尔叠加算法, 对二进制数据体进行操作, 这样便得到基于不同分辨率的无机孔隙数字岩心和有机孔隙数字岩心构建的页岩基质孔隙数字岩心^[34,35]。具体表达式如下所示:

$$\begin{aligned} \Omega &= \Omega_1 + \Omega_2, \\ \begin{cases} \Omega^s = \Omega_1^s + \Omega_2^s, \\ \Omega^{op} = \Omega_1^s + \Omega_2^{op}, \\ \Omega^{ip} = \Omega_1^{ip} + \Omega_2^s, \\ \Omega^{ip} = \Omega_1^{ip} + \Omega_2^{op}, \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

其中, Ω 表示页岩基质孔隙数字岩心, Ω_1 表示页岩无机孔隙数字岩心, Ω_2 表示页岩有机孔隙数字岩心, 上标 s , op 和 ip 分别表示岩心骨架、有机孔隙和无机孔隙。叠加前, 不论是无机孔隙数字岩心, 还是有机孔隙数字岩心均用1表示孔隙, 0表示骨架; 而叠加后, 用0代表骨架, 1代表有机孔隙空间, 2代表无机孔隙空间。则与式(9)相对应的叠加算法操作为: $0+0=0$, $0+1=1$, $1+0=2$, $1+1=2$ 。因此, $1+0=2$ 的物理意义是页岩无机孔隙数字岩心中的无机孔隙(用1表示)与页岩有机孔隙数字岩心中的骨架(用0表示)叠加后, 得到的是页岩基质孔隙数字岩心中的无机孔隙(用2表示)。

3 整合法构建页岩孔隙网络模型

孔隙网络模型相比于数字岩心具有相对简单的孔隙几何形状, 在模拟多相流方面计算量小, 还可以定量研究润湿性、界面张力等参数对渗流的影响, 具有巨大的优势, 国内外众多学者基于孔隙网络模型进行了多相流模拟研究^[36-38]。

以孔隙网络模型为研究平台, Jiang等人^[39]提出了一种孔隙网络模型的整合方法。首先, 分别构建出描述粒间孔隙特征的无机孔隙网络模型和粒内孔隙特征的有机孔隙网络模型; 然后, 为了获取孔隙网络模型的统计特征, 分析孔隙网络模型几何结构参数变量之间的相关性并通过相关强度描述变量之间的相关结构; 最后, 通过整合几何拓扑结构特征等价的无机孔隙网络和有机孔隙网络, 得到同时描述页岩粒间无机孔隙

图5 页岩叠加数字岩心的构建过程示意图

和粒内有机孔隙几何拓扑结构特征的双孔隙网络模型^[31]。

3.1 基于统计特征重构无机孔隙网络

在双孔隙网络模型的空间域中, 生成几何拓扑结构特征与原始无机孔隙网络模型等效的大孔隙、大喉道单元体。

(1) 确定无机孔隙网络重构的空间域 Ω_1 。定义尺度变化因子 ξ 来进行表征:

$$\xi = L/l = W/w = H/h, \quad (10)$$

其中, 原始无机孔隙网络模型体积 $V=lwh$, 并且 $l=w=h$, 双孔隙网络模型体积 $V'=LWH$, 并且 $L=W=H$ 。

通过尺度变化因子的定义, 得到等效无机孔隙网络中需要生成的大孔隙数目:

$$N'_p = \xi^3 N_p, \quad (11)$$

其中, N_p 为原始无机孔隙网络模型中的孔隙数目, N'_p 为双孔隙网络模型中要生成大孔隙的数目。

(2) 在无机孔隙网络空间域 Ω_1 中生成几何拓扑结构等效的网络。基于原始无机孔隙网络模型, 提取网络几何拓扑结构参数分布变量, 并得到相应的累积分布函数^[40]。

如果变量是直接通过累积概率分布函数来进行表征的, 那么, 对于变量 X 的连续累积分布函数 $F_X(x)$, 变量对应的参数数值可通过下式进行计算:

$$x = F_X^{-1}(u), \quad (12)$$

其中, u 为通过均匀分布函数 $U(0, 1)$ 产生的随机数.

在双孔隙空间域中随机生成的大孔隙中心坐标是随机分配的, 在一个半径为 r_k 的新孔隙 k 生成之前, 要确保它不会覆盖已生成的孔隙 $j(j=1, \dots, k-1)$, 满足判定条件:

$$r_k + r_j < d_{jk}, \quad (13)$$

其中, d_{jk} 为孔隙 j 和 k 之间的欧氏距离, 单位为 m .

(3) 添加大孔隙之间的连接喉道. 根据连通性函数的定义, 可得等效无机孔隙网络中需要添加的连接喉道数:

$$N'_l = N'_p - \chi_V \zeta^3 V = \zeta^3 N_p, \quad (14)$$

其中, N_l 为原始无机孔隙网络模型中的喉道数目, N'_l 为双孔隙网络模型中要生成喉道的数目, χ_V 为连通性函数比欧拉数.

$$\chi_V(r) = \frac{N_N(r) - N_B(r)}{V}, \quad (15)$$

其中, $N_N(r)$ 为半径大于 r 的孔隙数目, $N_B(r)$ 为半径大于 r 的喉道数目, V 为孔隙网络模型的体积.

根据连通性函数比欧拉数的定义, 需添加的喉道数目 N_{lk} 为

$$N_{lk} = N_p(r_k) - \chi_V(r_k) V', \quad (16)$$

其中, V' 为双孔隙网络的体积, 即无机孔隙网络空间域的大小.

3.2 基于无机孔隙网络骨架空间填充有机孔隙网络

在已生成的无机孔隙网络骨架空间中, 生成几何拓扑结构特征与原始有机孔隙网络模型等效的微孔隙、微喉道单元体.

(1) 确定有机孔隙网络填充的空间域. 有机孔隙网络填充的空间域为无机孔隙网络的骨架空间, 假设无机孔隙网络孔隙空间为 Ω_1 , 则有机孔隙网络的填充空间域:

$$\Omega_2 = \Omega - \Omega_1. \quad (17)$$

(2) 生成与原有有机孔隙网络几何拓扑结构等效的网络模型. 根据原始有机孔隙网络模型中孔隙的几何参数变量之间的概率分布函数和变量之间的相关性信

息, 参照式(12), 可以在有机孔隙网络模型空间域中生成同原始有机孔隙网络几何拓扑结构信息等效的有机孔隙, 并根据统计分析随机产生各有机孔隙单元的半径、体积、形状因子等, 使各变量的概率分布与原始有机孔隙网络模型一致. 在一个新的有机孔隙生成之前, 要确保它不会覆盖已经生成的有机孔隙, 判定条件同式(13).

(3) 添加有机孔隙之间的连接喉道. 在有机孔隙网络模型空间域中, 通过添加连通大孔隙之间的连通喉道来构建几何拓扑结构等效的有机孔隙网络. 按照连通性函数的定义(15), 使添加微喉道后有机孔隙网络的连通性函数与原始有机孔隙网络的连通性函数一致.

3.3 无机孔隙网络和有机孔隙网络的整合

上面两步新生成的无机孔隙网络和有机孔隙网络之间是不相连通的, 因此需要添加无机孔隙和有机孔隙之间的连通喉道来进行双孔隙网络的整合. 思路如下: 在原始有机孔隙网络中心, 放置无机孔隙网络中半径最小的孔隙体, 计算此孔隙体表面与周围有机孔隙喉道的配位数, 不断增加孔隙体的半径进而可得到一系列孔隙体表面和周围有机孔隙喉道的配位数, 进而得到无机孔隙和有机孔隙之间的配位数分布图, 根据无机孔隙和有机孔隙之间的配位数分布图来添加大孔隙与其相邻有机孔隙之间的连接喉道.

通过上述步骤, 可将与原始无机孔隙网络模型和有机孔隙网络模型几何拓扑结构信息等效的无机孔隙网络和有机孔隙网络进行整合, 构建出同时包含无机孔隙网络模型大孔隙喉道结构信息和有机孔隙网络模型小孔隙喉道结构信息的双孔隙网络模型. 构建出的页岩双孔隙网络, 能够同时描述页岩粒间无机孔隙和粒内有有机孔隙的几何拓扑结构特征, 大大增加了双孔隙网络模型的多样性和准确性. 课题组前期已将该方法应用于碳酸盐岩数字岩心的构建, 取得了理想的效果^[41].

4 实例分析及参数敏感性分析

4.1 图像二值化处理

本文选用四川盆地彭水志留系龙马溪组页岩样品为例进行研究, 志留系龙马溪组是一套碎屑岩和碳酸盐岩混合沉积, 是一套区域性优质烃源岩^[42]. 由X射线

衍射图谱分析可知该样品矿物成分以石英和黄铁矿为主, 含有少量的斜长石和黏土矿物, 有机碳含量(TOC) 6.5%, 孔隙度为5.3%^[43]。基于扫描电子显微镜(SEM), 获取真实页岩岩心在不同平面上的低分辨率无机孔隙和高分辨率有机孔隙扫描图像(图6)。常见的图像二值化方法有: Otsu法、迭代法、手动法、最大熵法、自适应阈值法、基本全局阈值法等。其中, Otsu法(又被称为大津法或最大类间方差法)被认为是最普遍和最稳定分割方法, 以前景和背景之间的类间方差最大来动态确定图像二值化的阈值^[31]。本文通过最大类间方差法进行图像分割得到页岩岩心二值图像(图7), 白色表示岩石骨架, 黑色表示岩石孔隙^[44]。无机孔隙图像和有机孔隙图相幅均为 411×326 , 页岩无机孔隙分辨率为 $0.022 \mu\text{m}/\text{像素}$, 有机孔隙分辨率为 $0.0044 \mu\text{m}/\text{像素}$, 无机孔隙和有机孔隙扫描电子显微镜图像的分辨率比值为5:1。以像素(pixel)为基础单位, 对二值图像进行分析, 即图像中像素位于页岩孔隙中时赋值为0, 像素位于页岩骨架上时赋值为1, 这样由一系列的0和1分布组成的数据体就表征了相应的岩心特征。

4.2 数字岩心构建

利用图6和图7中的页岩无机孔隙图像资料, 基于模拟退火法构建的页岩无机孔隙数字岩心见图8(a)。利用图6和图7中的页岩有机孔隙图像资料, 基于马尔

图6 页岩无机孔隙(a)和有机孔隙(b)代表性扫描电子显微镜图像

图7 页岩无机孔隙(a)和有机孔隙(b)SEM二值图像(白色表示岩石骨架, 黑色表示岩石孔隙)

图8 页岩无机孔隙数字岩心(a)、有机孔隙数字岩心(b)和二者叠加后的数字岩心(c)

可夫链蒙特卡罗法(MCMC)构建的页岩有机孔隙数字岩心见图8(b)。利用前面提出的叠加算法, 叠加后的数字岩心见图8(c)。

4.3 孔隙网络模型构建

对构建后的无机孔隙数字岩心和有机孔隙数字岩心, 按照中轴线理论与方法提取其孔隙网络模型, 主要步骤如下: 首先, 基于图像分析理论, 剔除岩心内部由人为原因产生的孤立孔隙及岩石骨架; 基于修正的LKC算法, 建立岩心孔隙空间中轴线体系, 之后删除该体系中由粗糙的岩石壁面引起的冗余枝节结构, 保证孔隙居中轴线系统准确表征岩心孔隙空间的拓扑结构; 在优化处理后的孔隙居中轴线体系上, 定位各孔隙中心位置, 分割局部孔隙空间得到孔隙、喉道; 最后, 度量孔隙、喉道的几何参数, 包括体积、内切圆半径、长度、形状因子等从而建立起具有真实岩心孔隙空间拓扑结构及几何特征的孔隙网络模型^[10,45]。无机孔隙网络模型图9(a)和有机孔隙网络模型图9(b)分别对应于图8中的无机孔隙数字岩心图8(a)和有机孔隙数字岩心图8(b)。

按照前面的整合网络模型算法, 把无机孔隙网络模型图9(a)和有机孔隙网络模型图9(b)整合在一起, 最终得到了既包含无机孔隙又包含有机孔隙的整合孔隙

图9 页岩无机孔隙网络模型、有机孔隙网络模型和二者整合后的网络模型。(a) 无机孔隙网络模型(红色喉道, 绿色孔隙); (b) 有机孔隙网络模型(红色喉道, 绿色孔隙); (c) 整合孔隙网络模型(蓝色无机喉道, 青色无机孔隙, 红色有机喉道, 黄色有机孔隙)

图 10 (网络版彩图)页岩无机孔隙和有机孔隙半径分布及配位数对比. (a) 半径分布; (b) 配位数

图 11 (网络版彩图)由页岩叠加数字岩心和整合孔网模型计算得到的孔隙半径分布和配位数对比. (a) 半径分布; (b) 配位数

网络模型图9(c).

4.4 页岩孔隙结构分析表征

基于上面得到的数字岩心和孔隙网络模型两大研究平台, 进行页岩孔隙空间的几何特征和拓扑特征进行评价^[46]. 页岩有机孔隙半径基本分布在3~25 nm, 页岩无机孔隙半径基本分布在10~120 nm(图10(a)). 叠加后的数字岩心和孔隙网络模型可以得到类似的孔隙半径分布, 大体分布在3~120 nm, 主要分布在3~20 nm, 并且与氮气吸附法获得的孔径分布结果基本吻合, 验证了数值计算方法的准确性(图11(a)). 氮气吸附法是目前用来表征页岩微孔隙结构的实验方法之一, 通过氮气吸附实验可以获得页岩的吸附和解吸等温线, 并进一步通过计算可以得到孔隙结构参数^[47,48]. 由图10(b)和图11(b)可知, 该页岩样品有机孔隙、无机孔隙、叠加数字岩心以及整合后孔隙网络模型的配位数

分布在2~5之间, 一致性较好.

5 结论

(1) 基于模拟退火法建立了无机孔隙数字岩心, 基于马尔可夫链蒙特卡罗法构建有机孔隙数字岩心, 提出了一种叠加耦合算法, 建立了既考虑无机孔隙又考虑有机孔隙的叠加数字岩心;

(2) 分别构建了无机孔隙网络模型和有机孔隙网络模型, 通过整合几何拓扑结构特征等价的孔隙网络, 建立了同时描述页岩粒间无机孔隙和粒内有机孔隙的双孔隙网络模型, 大大增加了孔隙网络模型的多样性和准确性;

(3) 对建立的数字岩心和孔隙网络模型, 进行了几何拓扑结构分析, 孔隙半径分布和配位数与实验结果拟合程度较好, 验证了构建方法和数值分析方法的正确性.

参考文献

- 1 潘继平. 对促进中国页岩气勘探开发若干问题的思考——2011年中国页岩气发展回顾与思考. *国际石油经济*, 2012, 35: 101–106
- 2 姚军, 孙海, 黄朝琴, 等. 页岩气藏开发中的关键力学问题. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43: 1527–1547
- 3 Wang F P, Reed R M. Pore networks and fluid flow in gas shales. In: *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. New Orleans, 2009
- 4 Walls J D, Diaz E, Cavanaugh T. Shale reservoir properties from digital rock physics. In: *Proceedings of the SPE/EAGE European Unconventional Resources Conference & Exhibition-From Potential to Production*. Vienna, 2012
- 5 Clarkson C R, Solano N, Bustin R M, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion. *Fuel*, 2013, 103: 606–616
- 6 Bai B, Elgmati M, Zhang H, et al. Rock characterization of Fayetteville shale gas plays. *Fuel*, 2013, 105: 645–652
- 7 Javadpour F. Nanopores and apparent permeability of gas flow in mudrocks (shales and siltstone). *J Can Petrol Technol*, 2009, 48: 16–21
- 8 邹才能, 朱如凯, 白斌, 等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值. *岩石学报*, 2011, 27: 1857–1864
- 9 崔景伟, 邹才能, 朱如凯, 等. 页岩孔隙研究新进展. *地球科学进展*, 2012, 27: 1319–1325
- 10 姚军, 赵秀才. 数字岩心及孔隙级渗流模拟理论. 北京: 石油工业出版社, 2010
- 11 Joshi M. A Class of Stochastic Models for Porous Media. Kansas: University of Kansas, 1974
- 12 Quiblier J A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous media. *J Colloid Interf Sci*, 1984, 98: 84–102
- 13 Adler P M, Jacquin C G, Thovert J F. The formation factor of reconstructed porous media. *Water Resour Res*, 1992, 28: 1571–1576
- 14 Hazlett R D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow. *Math Geol*, 1997, 29: 801–822
- 15 Yeong C L Y, Torquato S. Reconstructing random media. *Phys Rev E*, 1998, 57: 495–506
- 16 Bryant S, Blunt M. Prediction of relative permeability in simple porous media. *Phys Rev A*, 1992, 46: 2004–2011
- 17 Øren P E, Bakke S. Process based reconstruction of sandstones and prediction of transport properties. *Transp Porous Media*, 2002, 46: 311–343
- 18 陶军. 孔隙级油水两相渗流理论研究. 博士学位论文. 东营: 中国石油大学(华东), 2007
- 19 Okabe H, Blunt M J. Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-point statistics. *Phys Rev E*, 2004, 70: 066135
- 20 卢德唐, 张挺, 杨佳庆, 等. 一种基于软硬数据的多孔介质重构方法. *科学通报*, 2009, 54: 1071–1079
- 21 王波, 宁正福, 姬江. 多孔介质模型的三维重构方法. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 27: 54–57
- 22 Wu K, Nunan N, Crawford J W, et al. An efficient markov chain model for the simulation of heterogeneous soil structure. *Soil Sci Soc Am J*, 2004, 68: 346–351
- 23 Wu K, Van Dijke M I J, Couples G D, et al. 3D stochastic modelling of heterogeneous porous media—Applications to reservoir rocks. *Transp Porous Media*, 2006, 65: 443–467
- 24 Jiang Z, Wu K, Couples G D, et al. The impact of pore size and pore connectivity on single-phase fluid flow in porous media. *Adv Eng Mater*, 2011, 13: 208–215
- 25 Yang Y, Yao J, Wang C, et al. New pore space characterization method of shale matrix formation by considering organic and inorganic pores. *J Nat Gas Sci Eng*, 2015, 27: 496–503
- 26 Yang Y, Wang C, Yao J, et al. A new voxel upscaling method based on digital rock. *Int J Mult Comp Eng*, 2015, 13: 339–346
- 27 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. *高校应用数学学报: A辑*, 2007, 22: 127–133
- 28 赵秀才, 姚军, 衣艳静, 等. 基于择多算子的随机搜索法建立数字岩心的新技术. *岩土力学*, 2008, 29: 1339–1344
- 29 Chen L, Zhang L, Kang Q, et al. Nanoscale simulation of shale transport properties using the lattice Boltzmann method: Permeability and diffusivity. *Sci Rep*, 2015, 5: 8089
- 30 姚军, 王晨晨, 杨永飞, 等. 一种砂砾岩介质岩心表征的新方法. *岩土力学*, 2012, 33: 205–208
- 31 王晨晨. 碳酸盐岩介质双孔隙网络模型构建理论与方法. 博士学位论文. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013
- 32 Yao J, Wang C, Yang Y, et al. The construction of carbonate digital rock with hybrid superposition method. *J Pet Sci Eng*, 2013, 110: 263–267
- 33 杨永飞, 王晨晨, 姚军, 等. 页岩基质微观孔隙结构分析新方法. *地球科学*, 2016, 41: 1067–1073
- 34 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. *中国石油大学学报: 自然科学版*, 2013, 37: 71–74
- 35 Wang C, Yao J, Wu K, et al. Organic and inorganic pore structure analysis in shale matrix with superposition method. In: *Proceedings of the*

Unconventional Resources Technology Conference. Denver, 2014

- 36 杨永飞, 姚军, van Dijke M I J. 油藏岩石润湿性对气驱剩余油微观分布的影响机制. 石油学报, 2010, 31: 467–470
- 37 Blunt M J, Bijeljic B, Dong H, et al. Pore-scale imaging and modelling. *Adv Water Resour*, 2013, 51: 197–216
- 38 Yang Y, Liu P, Zhang W, et al. Effect of the pore size distribution on the displacement efficiency of multiphase flow in porous media. *Open Phys*, 2016, 14: 69
- 39 Jiang Z, van Dijke M I J, Sorbie K S, et al. Representation of multiscale heterogeneity via multiscale pore networks. *Water Resour Res*, 2013, 49: 5437–5449
- 40 Strelan J C, Nassaj F. Analysis and generation of random vectors with copulas. In: *Proceedings of the Proceedings of the 39th Conference on Winter Simulation: 40 Years! The Best is Yet to Come*. Piscataway: IEEE Press, 2007. 488–496
- 41 姚军, 王晨晨, 杨永飞, 等. 碳酸盐岩双孔隙网络模型的构建方法和微观渗流模拟研究. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43: 896–902
- 42 曾祥亮, 刘树根, 黄文明, 等. 四川盆地志留系龙马溪组页岩与美国Fort Worth盆地石炭系Barnett组页岩地质特征对比. 地质通报, 2011, 30: 372–384
- 43 孙海, 姚军, 张磊, 等. 基于孔隙结构的页岩渗透率计算方法. 中国石油大学学报(自然科学版), 2014, 38: 92–98
- 44 Dunsmuir J H, Ferguson S R, D’Amico K L, et al. X-ray microtomography: A new tool for the characterization of porous media. In: *Proceedings of the SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Richardson, 1991. 423–430
- 45 陶军, 姚军, 李爱芬, 等. 任意三角形毛细管中水力传导率与形状因子关系研究. 岩土力学, 2007, 28: 1729–1732
- 46 Yang Y, Zhang W, Gao Y, et al. Influence of stress sensitivity on microscopic pore structure and fluid flow in porous media. *J Nat Gas Sci Eng*, 2016, 36: 20–31
- 47 杨峰, 宁正福, 胡昌蓬, 等. 页岩储层微观孔隙结构特征. 石油学报, 2013, 34: 301–311
- 48 Barrett E P, Joyner L G, Halenda P P. The determination of pore volume and area distributions in porous substances. I. Computations from nitrogen isotherms. *J Am Chem Soc*, 1951, 73: 373–380

Pore space characterization method of shale matrix formation based on superposed digital rock and pore-network model

YANG YongFei¹, LIU ZhiHui¹, YAO Jun², WANG ChenChen³, SUN Hai¹, ZHANG Lei¹, LIU Lei¹, ZHAO JianLin¹, AN SenYou¹, ZHANG WenJie¹ & LIU PengFei¹

¹ School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

² Research Center of Oil & Gas Flow in Reservoir, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

³ Hubei Cooperative Innovation Center of Unconventional Oil and Gas, Yangtze University, Wuhan 430100, China

Aiming at the characteristics that both the organic and inorganic pores are existing in the shale matrix, digital core and pore network model which could describe these two kinds of pores at the same time are constructed in this paper. Firstly, the inorganic pore digital core and organic pore digital core are constructed based on simulated annealing method and Markov Chain Monte Carlo method. Secondly, the two digital cores are superposed together according to certain algorithms, which includes the shale organic and inorganic pores information. Meanwhile, pore network models of these two digital cores are extracted respectively. And they are integrated into one pore network model, which could represent the dual pore information. Finally, based on these two platforms, the geometry topology structure properties, pore radius distribution and coordination number of a shale sample are analyzed. The simulated results match well with the experimental results, which verify the correctness of the construction method and numerical analysis methods.

shale, superposition digital core, integrated pore network model, simulated annealing method, Markov Chain Monte Carlo method

doi: [10.1360/N092017-00076](https://doi.org/10.1360/N092017-00076)