考虑微裂缝的数字岩心多点统计学构建方法

刘磊^{1,2}, 姚军^{1,2*}, 孙海^{1,2}, 张磊^{1,2}, 杨永飞^{1,2}

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

* 联系人, E-mail: RCOGFR_UPC@126.com

2018-03-10 收稿, 2018-08-20 修回, 2018-08-24 接受, 2018-10-09 网络版发表

国家自然科学基金(51490654, 51504276, 51711530131, 51674280, 51234007)、山东省自然科学基金(ZR2016EL09)、中央高校基本科研业务费专项资金(17CX02008A)、国家油气重大专项(2016ZX05061, 2016ZX05060)、长江学者和创新团队发展计划(IRT_16R69)和高等学校学科创新引智计划(B08028)资助

摘要 页岩的微观孔隙结构决定了其宏观性质和流动规律, 其微观孔隙结构呈现出典型多尺度特点, 孔隙尺寸从纳米到微米不等, 同时还伴有天然发育的微裂缝. 物理实验方法受限于分辨率和样品尺寸之间的矛盾, 无法获取能够同时含有微纳米孔隙信息和微裂缝特点的特征单元体, 因此数值重建算法显得尤为重要. 传统的重建算法只能构建单一孔隙类型的数字岩心, 针对页岩多尺度特点, 本文提出了一种基于模式的多点统计学方法, 结合训练图像和数据模板捕获模式库和条件概率函数, 利用模式法的插值方式对待模拟空间进行构建. 通过自相关函数、孔隙形态拓扑结构及渗透率方面, 对本文提出的数值重建算法进行评价. 在不同类型模拟算例中, 本文算法呈现较好的可靠性. 与传统重建算法相比, 本文算法能够构建页岩多相多尺度数字岩心.

关键词 多点统计学, 多尺度, 页岩, 数字岩心, 重构, 微裂缝

页岩油气藏作为一种重要的非常规油气资源其开发和生产日益受到重视. 页岩储层的岩石孔隙结构复杂, 呈现多尺度特点, 孔隙尺寸从纳米到微米不等, 同时还伴有天然发育的微裂缝^[1]. 页岩储层的宏观物理性质及流动特性取决于其本身的微观结构. 页岩油气在储层中的流动是一个复杂的多尺度过程, 包含黏性流、努森扩散、吸附解吸、和表面扩散等形式, 其流动机理明显不同于常规油气藏^[2~4]. 常规的实验手段和渗流方程只能对宏观尺度的流动特征进行定量描述, 而无法探究孔隙尺度的微观流动行为及其力学机制.

数字岩心分析技术作为近年来新近兴起的一项岩石物理技术, 在岩样内部微观孔隙结构的基础上结合数值算法模拟宏观特性及流动规律, 由于其具

有快速准确、成本低、数据重复使用等优势, 已经被广泛地应用到油气田开发中^[5]. 准确获取页岩储层的内部微观结构, 即数字岩心, 是利用该技术研究页岩储层流动规律的关键^[6].

目前, 数字岩心获取方法主要分为两大类: 物理实验方法和数值重建方法^[7,8]. 物理实验方法借助先进的光学仪器获取岩样的微观结构, 主要有连续切片法、聚焦粒子束法、X射线CT扫描、纳米CT等. 虽然物理实验法能够准确获取忠于岩样的真实结构, 但是该方法周期长、成本高并且图像分辨率和岩样尺寸之间存在相互制约的矛盾. 鉴于物理实验方法的局限, 有必要发展准确、稳定、高效的数值重建方法. 数值重建方法是借助少量的信息, 采用某种数学方法来重建数字岩心, 主要有3类: 第一类方法是过程

引用格式: 刘磊, 姚军, 孙海, 等. 考虑微裂缝的数字岩心多点统计学构建方法. 科学通报, 2018, 63: 3146–3157

Liu L, Yao J, Sun H, et al. Reconstruction of digital rock considering micro-fracture based on multi-point statistics (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 3146–3157, doi: 10.1360/N972018-00221

法^[9], 该方法模拟真实岩心沉降、压实和成岩过程, 但实现的孔隙结构较为理想, 不适用于复杂的储层岩样; 第二类方法是以二维图像中获取的连通性函数等统计信息为约束条件来重构三维数字岩心, 如高斯模拟场法^[10]、模拟退火法^[11]、马尔科夫连蒙特卡洛法^[12]. 由于只是利用了图像中的低阶统计信息, 因此难以再现孔隙空间的长连通性; 第三类方法是利用图像中高阶特征信息, 并使用多点统计法(multiple-point statistics, MPS)实现空间的不确定性插值来重构岩样的孔隙结构^[13]. 依照插值形式的不同又细化分为象元法和模式法两类. 虽然该方法广泛应用到砂岩等常规储层中, 但针对页岩非常规储层的应用还未见报道.

页岩孔隙结构非常复杂, 呈现典型的多尺度特征, 且发育着丰富的微裂缝^[14]. 采用单一的物理实验方法无法同时获得页岩孔隙和微裂缝的信息. 本文提出了基于MPS方法的考虑微裂缝的页岩多尺度数字岩心构建方法. 首先在物理实验方法获得的页岩图像上随机添加不同类型的微裂缝, 构成同时存在孔隙和微裂缝的多尺度页岩图像, 并将其作为训练图像, 该训练图像中包含了页岩孔隙-裂缝的各种特征模式. 将训练图像中的各种模式及相关概率通过数据模板提取出来, 形成一个“模式库”, 并存储在搜索树中. 在重建页岩多尺度数字岩心过程中, 依据条件概率函数将模式库中的各种特征随机地插值到模拟空间中. 为了评价本文方法的优劣, 将构建图像与训练图像在自相关函数、孔隙形态拓扑结构和渗透率方面进行一系列比较.

1 重建原理

1.1 MPS的基本概念

多点统计学是相对于传统的以变差函数为基础

图1 (网络版彩色)数据模板. (a) 一个9×9节点的数据模板; (b) 一个3×3×3节点的数据模板

Figure 1 (Color online) Data template. (a) A 2D template; (b) a 3D data template

的两点统计学提出的^[15]. 其核心的基本概念包括训练图像、数据模板和数据事件. 本文MPS中的训练图像是指包含了模拟区域中待重构的各种特征模式的图像, 它只是一种概念上的特征模式的集合, 不需要有很高的精确度或者符合某种特定的分布, 但需要保持平稳^[16,17].

数据模板是由 n 个向量组成的几何形态, 设为 $\tau_n = \{h_\alpha; \alpha = 1, 2, \dots, n\}$. 设模板中心位置为 u , 模板其他位置 $u_\alpha = u + h_\alpha (\alpha = 1, 2, \dots, n)$. 例如图1(a)就是一个9×9节点组成的二维数据模板, u_α 由中心 u 和80个向量 h_α 所确定. 而在三维空间中数据模板的定义也是适用的. 图1(b)是由3×3×3节点组成的三维数据模板, 模板中心点 u 用不同颜色表示.

假定一种属性 S 可取 m 个状态值 $\{s_k; k = 1, 2, \dots, m\}$. 由数据模板中的 n 个向量 u_α 位置的 n 个状态值所组成的“数据事件” $d(u)$ 可以定义为:

$$d(u) = \{S(u_\alpha) = S_{k_\alpha}; \alpha = 1, 2, \dots, n\}, \quad (1)$$

其中 $S(u_\alpha)$ 表示在 u_α 位置的状态值. $d(u)$ 表示 n 个向量的 $S(u_1), \dots, S(u_n)$ 分别为状态值 $s_{k_1}, \dots, s_{k_n}$. 图2(a), (b)所示为图1(a)的二维数据模板所捕获的2个数据事件, 数据模板中用颜色标记的节点表示已知数据. 具

图2 (网络版彩色)二维数据事件和三维数据事件. (a) 二维数据事件#1; (b) 二维数据事件#2; (c) 三维数据事件#1; (d) 三维数据事件#2

Figure 2 (Color online) 2D data event and 3D data event. (a) 2D data event #1; (b) 2D data event #2; (c) 3D data event #1; (d) 3D data event #2

有相同颜色的节点表示具有相同的状态值. 同理, 图2(c), (d)所示为图1(b)的三维数据模板所捕获的2个数据事件. 其中, 待模拟点 u 仍然位于 3×3 数据模板的中心; 未标记的节点表示未知数据的位置.

1.2 MPS构建数字岩心的基本原理

采用数据模板扫描训练图像来捕获数据事件, 这些数据事件又被称为模式特征, 可以视为训练数据的结构特征^[18]. 如果按照每次移动一个节点, 从左到右, 从上到下进行扫描, 那么就可以获得训练图像全部的模式库. 图3(a)表示利用 3×3 的数据模板扫描训练图像来捕获其中的模式, 图3(b)是捕获的模式库. 对于三维训练图像同理可以建立类似的模式库.

在应用任一给定的数据模板对训练图像扫描的过程中, 当数据模板捕获一个模式(由待模拟点 u 和其在数据模板内的条件数据所组成), 称为一个重复. 如果训练图像模式库中某种模式重复出现 N 次, 则称为 N 个重复. 对于任一待模拟点 u , 需要确定在给定 n 个条件数据值 $S(u_\alpha)$ 的情况下, 属性 $S(u)$ 取 K 个状态值中任一状态值的条件概率分布函数(cpdf, conditional probability distribution function). 根据贝叶斯条件概率公式, 该cpdf可表达为

$$\text{Prob}\{S(u) = s_k | d_n\} = \frac{\text{Prob}\{S(u) = s_k \cap S(u_\alpha) = s_{k_\alpha}; \alpha = 1, \dots, n\}}{\text{Prob}\{S(u_\alpha) = s_{k_\alpha}; \alpha = 1, \dots, n\}}, \quad (2)$$

式(2)中, 分母为某个模式出现的概率; 分子为模式和待模拟点 u 取某个状态值的情况同时出现的概率. 因此, 公式(2)也可以表示为

$$\text{Prob}\{S(u) = s_k | S(u_\alpha) = s_{k_\alpha}; \alpha = 1, \dots, n\} = \frac{c_k(d_n)}{c(d_n)}. \quad (3)$$

图3 (网络版彩色)获取训练图像的模式库. (a) 扫描整个训练图像; (b) 捕获的模式库

Figure 3 (Color online) The capture of pattern library by scanning the train image using a data template. (a) Scan the train image using a data template; (b) the captured pattern library

这里 $c(d_n)$ 为某个模式重复的总数量, $c_k(d_n)$ 为重复模式中待模拟点 $S(u)$ 等于 s_k 的数量.

通过采用“搜索树”的数据结构来存储cpdf以减少扫描训练图像次数节省内存空间^[19]. 多重数据模板^[20]的使用不但可以获取训练图像大尺度特征, 如微裂缝信息, 又可以包含孔隙特点.

目前MPS方法主要应用在宏观地质建模领域, 对于数字岩心构建, MPS方法应用较多的是均质的、两相(孔隙相和骨架相)砂岩岩心, 且主要以像元法为基础; 对于页岩的微观结构重建, 尤其是对多尺度多相的孔/裂隙页岩构建研究较少, 这是因为页岩的微观结构非均质性显著, 且裂隙与孔隙的长连通特性表现不一致. 在利用MPS方法进行数字岩心构建过程中, 需要在待模拟区域进行空间插值来恢复其岩心孔隙结构, 本文采用的是模式法来恢复岩心孔隙结构^[21-25], 如图4所示. 依据训练图像信息, 从模式库中依据条件概率, 生成一种模式并将其随机的放置在待模拟区域中, 通过更新条件概率函数, 根据指定的路径随机生成下一个模式特征. 通过重叠区域的指定来保证孔隙、裂缝和骨架的连通性, 当待模拟区域都被遍历一次之后, 整个待模拟区域的空间结构将被重建出来. 由于采用了概率估计的方法, 故模拟结果具有随机性. 此外, 整个过程是依据训练图像中的信息, 可以很好地揭示空间中各状态值的各种可能分布.

1.3 利用MPS方法构建页岩多尺度数字岩心的基本步骤和流程

步骤1: 在页岩灰度图像的基础上识别不同孔隙类型, 例如小尺度特点(孔隙相)和大尺度特点(裂缝

图4 (网络版彩色)MPS方法重建空间结构的流程

Figure 4 (Color online) The process of spatial structure reconstruction using MPS

相)以及骨架相的多尺度页岩图像;

步骤2: 将多尺度页岩图像作为训练图像, 结合多重数据模板进行扫描, 将获得的相组合(孔隙-裂缝)的模式库和cpdf存储在搜索树中;

步骤3: 指定一条随机路径访问待模拟区域的路径, 定义重叠区域的大小, 从模式库中依据条件概率生成一种模式, 该模式含有相组合(孔隙-裂缝)的特点, 并将其随机放置到路径中, 作为模拟的起点;

步骤4: 更新条件概率函数, 生成下一个模拟区域的模式类型, 依据重叠区域的大小和特点, 判断该模式是否合理;

步骤5: 重复步骤4继续模拟随机路径上的其他模拟区域, 直到待模拟区域中所有点构建完毕.

2 评价方法

在页岩的多尺度数字岩心构建成功之后, 需要对构建得到的页岩多尺度数字岩心的质量进行分析, 从而判断页岩多尺度数字岩心与训练图像之间的差别, 评价构建方法的效果. 本文提出了从自相关函数、孔隙结构和渗透率三方面展开比较.

2.1 自相关函数

MPS构建与传统构建方法有着较大的不同, 其中之一为评价重构优劣的标准不同^[26,27]. 传统重构方法中的重构图像与原始图像的相似度是由两者在每个相同位置具有相同状态值的体素占全部体素的比例来决定的. 在传统重构方法中, 该比例越高, 重构相似度就越高, 但是这个判定标准对于MPS重构并不适用. MPS模拟并不要求重构结果与训练图像完全一致, 它的真正作用在于捕捉训练图像的结构特征, 并将这些特征复制到重构图像中. MPS模拟存在多解性, 可以给出多个模拟结果, 这些结果是对训练图像结构特征的反映. 重构效果的优劣取决于这些结构特征是否被复制到重构图像中.

自相关函数能够反映变量在空间结构变化的相关性和变异性, 它被用作构建效果的评价依据. 如果两幅图像中的某个属性值的自相关函数具有相似的趋势, 那么可以说明这两幅图像中的该属性值具有相似的结构特点; 反之, 这两幅图像中的该属性值的结构差异较大. 对于页岩多尺度数字岩心的评价, 自相关函数定义为岩心图像中任选两个相距为 h 的节点属于同一相态的概率, 表示为

图5 MPS方法重构页岩数字岩心的流程图

Figure 5 The flow chart of shale digital rock reconstruction using MPS

$$S^j \equiv \overline{f^j(u) * f^j(u+h)}, \quad (4)$$

式(4)中, S^j 为第 j 相的自相关函数, $f^j(u)$ 和 $f^j(u+h)$ 分别表示位置向量 u 和 $u+h$ 的第 j 相的相函数, h 表示位置偏移.

2.2 孔隙形态拓扑结构

孔隙度作为储层岩石的重要物性参数可以通过统计孔隙占比多少来获取. 实际中, 不同类型的孔隙结构往往能形成类似的孔隙度, 但其流动特性却千差万别. 岩样中的孔隙结构是指孔隙的几何大小、分布及其相互连通关系, 受骨架颗粒形态大小和分布影响.

为了获取页岩多尺度数字岩心中的孔隙结构, 对整个孔隙空间进行膨胀、侵蚀和开运算之后, 对孔隙中的每一点计算得到最大内切球, 随后去除掉冗余球, 孔隙空间中就充满了彼此重叠的球, 这些互联互通的球就反映页岩图像的孔隙结构, 可以得到孔隙空间的球与孔隙半径大小的分布^[28-31]. 同样地, 对整个骨架空间进行类似地操作, 可以获得骨架颗粒的大小和分布. 通过识别孔隙和骨架的边界, 统计孔隙与边界处的像素点, 得到孔隙的累计周长.

利用分形理论可以用来描述页岩多尺度数字岩心的孔隙拓扑结构, 孔隙尺寸自相似区间为 $(\lambda_{\min}, \lambda_{\max})$, 上下限为即最大孔隙尺寸和最小孔隙尺寸. 数字岩心的孔隙度 ϕ_p 和孔隙尺寸分形维数 D_f 以及最大、最小孔隙尺寸的关系为

$$\phi_p = \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{D_e - D_f}, \quad (5)$$

式中 D_e 为欧式维数, 对于二维空间分为 $D_e=2$; D_f 是分形维数, 对于二维空间 $1 < D_f < 2$.

2.3 渗透率

孔隙的形态拓扑结构决定了流体在岩样中的流动规律. 为了进一步比较训练图像与构建图像的宏观性质的差异, 利用有限体积方法求解不可压的斯托克方程式(6)和(7)来模拟得到水平方向上页岩多尺度数字岩心的速度场, 其中入口和出口采用定压边界条件, 其他边界采用第二类边界条件, 根据式(8)来计算得到页岩多尺度数字岩心在水平方向上的渗透率^[32].

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \quad (6)$$

$$\mu \nabla^2 \mathbf{v} = \nabla p, \quad (7)$$

$$k = \mu \left(\frac{p_{\text{in}} - p_{\text{out}}}{L} \right) \left(\frac{1}{V} \int_V \mathbf{v} dV \right), \quad (8)$$

其中 $\mathbf{v}$ 表示水平方向上流动速度, μ 为黏度, p 为压力, p_{in} 为入口压力, p_{out} 为出口压力, L 为长度.

3 结果及分析

为了评价本文提出的方法在页岩多尺度数字岩心构建过程中的效果, 将本文方法依次应用到添加不同类型裂缝的页岩多尺度图像中, 从自相关函数、

孔隙形态拓扑结构和渗透率等方面, 对比重建得到页岩图像和训练图像.

3.1 无裂缝

利用X-CT技术对页岩岩样进行扫描, 其中扫描的分辨率为 $0.74 \mu\text{m}$, 对获取的灰度图像经过非线性中值滤波、分水岭二值分割处理之后, 得到能够代表孔隙空间和骨架空间的页岩数字岩心, 如图6所示. 选取一个 1000×1000 像素大小的页岩图像作为训练图像(图6(a)), 页岩图像中不同颜色分别代表孔隙空间和骨架空间, 且孔隙空间的占比低于骨架空间. 利用本文提到的MPS方法结合训练图像对页岩图像进行空间重构, 重构结果见图6(b)和(c), 并将其命名为构建结果#1和构建结果#2, 其中重构的大小为 1000×1000 像素.

将构建得到的页岩图像与训练图像比较, 从图像直观上不难发现, 构建得到的图像在水平方向和垂直方向与真实训练图像具有相似的不规则孔隙和骨架结构及分布. 为了进一步量化比较分析, 绘制孔隙和骨架颗粒的分布图, 见图7. 图中横坐标表示孔隙半径和骨架颗粒半径, 纵坐标为占比频率分布, 从图7可以看出, 与训练图像相比, 无论是孔隙半径分布还是骨架颗粒半径分布, 构建图像与训练图像呈现较好的一致性, 表明孔隙的长连通特征得到很好地再现. 绘制构建图像和训练图像的孔隙特征的自相关函数变化曲线图, 见图8, 其中横坐标为相关长度, 纵坐标为孔隙特征的自相关函数, 曲线趋于平滑稳定时所对应的相关长度为最小相关长度. 从图中得到, 构建图像的最小相关长度与训练图像的最小相关长度差别不大, 最小相关长度所对应的孔隙特征自相关函数值为孔隙度, 三者数值接近, 说明构

图6 (网络版彩色)无裂缝页岩数字岩心. (a) 训练图像; (b) 构建结果#1; (c) 构建结果#2

Figure 6 (Color online) Shale digital rock without fractures. (a) Train image; (b) realization#1; (c) realization#2

图7 (网络版彩色)页岩数字岩心孔隙结构特征分布图. (a) 孔隙半径分布; (b) 骨架颗粒半径分布
Figure 7 (Color online) Pore structure characteristics of shale digital rock. (a) Pore size distribution; (b) grain size distribution

图8 (网络版彩色)页岩数字岩心的自相关函数曲线图
Figure 8 (Color online) The autocorrelation function of shale digital rock

建图像与训练图像的孔隙结构非常接近。

将构建图像和训练图像的孔隙度、渗透率和孔隙结构参数统计到表1中,从表中不难得出,在孔隙结构和骨架颗粒结构方面,构建图像与训练图像无论是平均值还是标准差,数值非常接近,在相似的孔隙半径分布情况下,通过同时比较孔隙周长、最大孔隙半径以及分形维数发现,孔隙的形状特征也是一致的。通过比较渗透率的数值发现构建图像和训练图像的渗透率较为接近,表明孔隙之间的连通状态是相似的,也从客观上反映出本文提出的利用自相关函数和孔隙结构分布进行重建相似性评价的方法的

有效性。

3.2 正交裂缝

为了探究本文算法在页岩多尺度数字岩心构建上的效果,在获取的页岩图像上随机添加正交的裂缝,以形成同时含有小尺度特点(孔隙)和大尺度特点(微裂缝)的多尺度数字岩心,如图9(a)所示,并作为新的训练图像。结合本文提到的MPS方法对页岩多尺度数字岩心进行空间重构,重构结果见图9(b)和(c),并将其命名为构建结果#1和构建结果#2,其中重构的大小为1000×1000像素。

将构建得到的页岩多尺度数字岩心与训练图像比较不难发现,在裂缝方面,构建图像中的裂缝只存在于水平方向和垂直方向,与训练图像中的裂缝特点保持一致,且交叉裂缝的特点也客观地存在于构建图像中,表明本文所提的算法准确地获取训练图像中的裂缝特点,并且合理地还原到模拟空间中;孔隙方面,构建图像与训练图像具有相似的孔隙特点。

与无裂缝情况类似,绘制页岩多尺度数字岩心孔隙和骨架颗粒的分布图,见图10;绘制页岩多尺度数字岩心孔隙特征的自相关函数变化曲线图,见图11;统计页岩多尺度数字岩心的孔隙度、渗透率和孔隙结构参数,见表2。由于裂缝的存在,孔隙空间分

表1 页岩数字岩心的孔隙度、渗透率和孔隙结构参数表

Table 1 The porosity, permeability and pore structure parameter of shale digital rock

	孔隙度 (%)	渗透率 (mD)	分形维数	孔隙周长 (像素)	最大孔隙 半径(像素)	孔隙结构(像素)		骨架颗粒结构(像素)	
						平均值	标准差	平均值	标准差
训练图像	18.64	0.032	1.82	124262	16	3.42	1.43	11.98	5.39
构建图像#1	18.28	0.028	1.81	123257	18	3.40	1.38	12.02	5.45
构建图像#2	18.69	0.033	1.82	124839	17	3.44	1.43	12.00	5.42

图9 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含正交裂缝). (a) 训练图像; (b) 构建结果#1; (c) 构建结果#2

Figure 9 (Color online) Shale digital rock with orthogonal fractures. (a) Train image; (b) realization#1; (c) realization#2

图10 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含正交裂缝)孔隙结构特征分布图. (a) 孔隙半径分布; (b) 骨架颗粒半径分布

Figure 10 (Color online) The distribution of pore structure for shale digital rock with orthogonal fractures. (a) Pore size distribution; (b) grain size distribution

图11 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含正交裂缝)的自相关函数曲线图

Figure 11 (Color online) The autocorrelation function of shale digital rock with orthogonal fractures

布范围变大, 骨架颗粒呈现多峰分布, 渗透率数值变大. 从结果来看, 孔隙的长连通特征被如实地还原到构建结果中, 并且自相关函数、孔隙分布及连通性和孔隙度、渗透率等参数在重建图像中与训练图像中呈现较好的一致性, 体现了本方法在处理含有正交裂缝的页岩多尺度数字岩心上的能力.

3.3 倾斜裂缝

在实际中, 页岩储层岩样中的裂缝往往是倾斜的, 在获取的页岩图像上随机添加倾斜的裂缝, 以形成同时含所有小尺度特点(孔隙)和大尺度特点(裂缝)的页岩多尺度数字岩心, 如图12(a)所示, 并作为新的训练图像. 结合本文提到的MPS方法对页岩多尺度数字岩心进行空间重构, 重构结果见图12(b)和(c), 并将其命名为构建结果#1和构建结果#2, 其中重构的大小为1000×1000像素.

将构建得到的页岩多尺度数字岩心与训练图像比较不难发现, 在裂缝方面, 由于裂缝是倾斜的, 构建图像中的裂缝也是倾斜的, 在不同方面上的裂缝开度构建图像与训练图像之间呈现相似性, 且倾斜的主控方向也是相似的; 在孔隙方面, 构建图像和训练图像之间呈现出类似的孔隙结构分布特点, 骨架颗粒的多峰分布特点在重建图像中很好地体现出来, 见图13. 计算得到的重建图像的自相关函数与训练图像的自相关函数如图14所示, 无论是曲线趋势还是最小自相关长度都呈现一致. 从表3中不难发现,

表 2 页岩多尺度数字岩心(含正交裂缝)的孔隙度、渗透率和孔隙结构参数表

Table 2 The porosity, permeability and pore structure parameter of shale digital rock with orthogonal fractures

	孔隙 占比(%)	裂缝占比 (%)	渗透率 (mD)	分形 维数	孔隙周长 (像素)	最大孔隙 半径(像素)	孔隙结构(像素)		骨架颗粒结构(像素)	
							平均值	标准差	平均值	标准差
训练图像	17.45	9.95	76.3	1.78	120980	22	4.16	2.64	10.48	5.24
构建图像#1	15.70	10.47	58.4	1.79	113964	25	4.17	2.67	11.13	5.69
构建图像#2	16.83	7.34	71.8	1.75	117836	23	3.95	2.42	11.31	5.76

图 12 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含倾斜裂缝). (a) 训练图像; (b) 构建结果#1; (c) 构建结果#2

Figure 12 (Color online) Shale digital rock with dipping fractures. (a) Train image; (b) realization#1; (c) realization#2

图 13 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含倾斜裂缝)孔隙结构特征分布图. (a) 孔隙半径分布; (b) 骨架颗粒半径分布

Figure 13 (Color online) The distribution of pore structure for shale digital rock with dipping fractures. (a) Pore size distribution; (b) grain size distribution

图 14 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含倾斜裂缝)的自相关函数曲线图

Figure 14 (Color online) The autocorrelation function of shale digital rock with dipping fractures

在孔隙占比、孔隙结构和分形维数方面, 构建图像与训练图像呈现较好的相似性. 从客观上反映了本文方法在处理含有倾斜裂缝的页岩多尺度数字岩心上的能力, 能够准确地重建出页岩多尺度的特点. 由于构建图像#1中构建的裂缝基本贯穿整个空间, 因此造成渗透率数值偏大, 但构建图像#2的渗透率数值与训练图像渗透率数值差别不大.

3.4 粗糙裂缝

由于矿物充填以及成岩等地质原因, 页岩储层中的裂缝开度往往是变化的, 并且表面是粗糙的, 因此用理想的平板模型无法准确地刻画出裂缝的特点.

表 3 页岩多尺度数字岩心(含倾斜裂缝)的孔隙度、渗透率和孔隙结构参数表

Table 3 The porosity, permeability and pore structure parameter of shale digital rock with dipping fractures

	孔隙占比 (%)	裂缝占比 (%)	渗透率 (mD)	分形 维数	孔隙周长 (像素)	最大孔隙 半径(像素)	孔隙结构(像素)		骨架颗粒结构(像素)	
							平均值	标准差	平均值	标准差
训练图像	18.22	1.42	3.61	1.82	126117	21	3.63	1.74	10.86	5.23
构建图像#1	18.59	2.95	12.4	1.79	125255	21	3.70	2.01	10.86	5.38
构建图像#2	18.10	1.82	3.49	1.83	126440	22	3.63	1.85	10.90	5.46

本文通过引入分形函数来描述裂缝表面的粗糙度, 定义为:

$$R(y)=G^{D_s-1}\sum_{n=n_l}^{\infty}\frac{\cos(2\pi\gamma^n y)}{\gamma^{(2-D_s)n}}, \quad (9)$$

$$\sigma=\left[\frac{G^{2(D_s-1)}}{2\ln\gamma}\frac{1}{4-2D_s}\left(\frac{1}{w_l^{4-2D_s}}-\frac{1}{w_h^{4-2D_s}}\right)\right]^{0.5}, \quad (10)$$

其中 $R(y)$ 为粗糙表面的轮廓幅值函数, $D_s(1<D_s<2)$ 为表面的分形维数, 决定了表面的复杂程度, G 为尺度系数, γ 为频率常数, 取值为1.5, σ 为粗糙表面的均方差, w_l 为最小频率, 取决于取样长度, w_h 为最大频率, 取决于分辨率.

在本文中, 选取粗糙表面的均方差为2.2 μm , 粗糙表面的分形维数为1.5. 然后利用分形函数随机生成具有粗糙表面的裂缝, 并将其与选取的页岩图像

进行耦合, 得到带有粗糙裂缝的页岩多尺度数字岩心, 如图15(a)所示, 并作为训练图像. 结合本文提到的MPS方法对页岩多尺度数字岩心进行空间重构, 重构结果见图15(b)和(c), 并将其命名为构建结果#1和构建结果#2, 其中重构的大小为1000×1000像素.

将构建得到的页岩多尺度数字岩心与训练图像比较不难发现, 在裂缝方面, 由于裂缝既有水平方向也有倾斜方向的, 构建图像中的裂缝也同时存在水平方向和倾斜方向; 由于裂缝带有粗糙的表面, 重建图像中的裂缝也呈现出粗糙的表面, 在裂缝开度上也呈现变化; 在孔隙方面, 构建图像和训练图像之间呈现出类似的孔隙结构分布特点, 骨架颗粒的多峰分布特点在重建图像中很好地体现出来, 且构建图像中骨架颗粒分布曲线中峰值所在的位置及峰值与训练图像呈现较好的一致性, 见图16. 计算得到的重

图 15 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含粗糙裂缝). (a) 训练图像; (b) 构建结果#1; (c) 构建结果#2

Figure 15 (Color online) Shale digital rock with rough fractures. (a) Train image; (b) realization#1; (c) realization#2

表 4 页岩多尺度数字岩心(含粗糙裂缝)的孔隙度、渗透率和孔隙结构参数表

Table 4 The porosity, permeability and pore structure parameter of shale digital rock with rough fractures

	孔隙占比 (%)	裂缝占比 (%)	渗透率 (mD)	分形 维数	孔隙周长 (像素)	最大孔隙 半径(像素)	孔隙结构(像素)		骨架颗粒结构(像素)	
							平均值	标准差	平均值	标准差
训练图像	18.47	4.85	9.17	1.80	123810	22	3.82	2.24	10.75	5.23
构建图像#1	18.15	5.52	8.64	1.81	123115	28	3.86	2.31	10.86	5.15
构建图像#2	18.14	3.94	7.06	1.79	122610	25	3.75	2.05	11.01	5.57

图 16 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含粗糙裂缝)孔隙结构特征分布图. (a) 孔隙半径分布; (b) 骨架颗粒半径分布

Figure 16 (Color online) The distribution of pore structure for shale digital rock with rough fractures. (a) Pore size distribution; (b) grain size distribution

建图像的自相关函数与训练图像的自相关函数如图 17 所示, 无论是曲线趋势还是最小自相关长度都呈现一致. 从表 4 中不难发现, 在孔隙占比、裂缝占比、渗透率、孔隙结构和分形维数方面, 构建图像与训练图像呈现较好的相似性, 从客观上反映了本文方法在处理含有粗糙裂缝的页岩多尺度数字岩心上的能力, 能够准确地重建出页岩多尺度的特点. 由于本算例中训练图像中的裂缝接近于真实的页岩储层岩石中的裂缝, 并且孔隙是真实的页岩孔隙, 鉴于重建图像中的自相关函数、孔隙度、渗透率以及孔隙结构接近于训练图像, 客观表明本文方法在重建页岩多尺度数字岩心上的能力.

4 结论

本文提出一种页岩多相多尺度数字岩心重构方法. 该方法以多点统计学为基础, 结合训练图像, 利用模式法对待模拟空间进行重构. 针对不同类型微裂缝开展研究, 从裂缝特征、孔隙结构分布、骨架颗粒分布、分形维数、自相关函数、孔隙度、渗透率等方面, 对本文算法可靠性进行评价. 主要得到以下结论:

(1) 与传统数值重建算法相比, 本文算法对于实现两相、多相页岩多尺度数字岩心的构建有较好的效

果, 不仅能够再现页岩多尺度及长连通性的特点, 同时还具有模拟时间快、计算量小的优势.

(2) 利用数值模拟算法构建同时含有孔隙和裂缝的页岩多尺度数字岩心, 可以解决物理实验方法无法同时获取页岩多尺度数字岩心的困难, 实现多信息的融合.

(3) 本文算法的可靠性和实用性能够为下一步构建大尺寸三维模型提供保障.

图 17 (网络版彩色)页岩多尺度数字岩心(含粗糙裂缝)的自相关函数曲线图

Figure 17 (Color online) The autocorrelation function of shale digital rock with rough fractures

参考文献

- 1 Yao J, Sun H, Huang Z Q, et al. Key mechanical problems in the development of shale gas reservoirs (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2013, 43: 1527–1547 [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]
- 2 Wu K L, Li X F, Chen Z X. A model for gas transport through nanopores of shale gas reservoirs (in Chinese). Acta Petrol Sin, 2015, 36: 837–848 [吴克柳, 李相方, 陈掌星. 页岩气纳米孔气体传输模型. 石油学报, 2015, 36: 837–848]
- 3 Zhu G, Yao J, Sun H, et al. The numerical simulation of thermal recovery based on hydraulic fracture heating technology in shale gas reservoir. J Nat Gas Sci Eng, 2016, 28: 305–316

- 4 Song W, Yao J, Li Y, et al. Apparent gas permeability in an organic-rich shale reservoir. *Fuel*, 2016, 181: 973–984
- 5 Blunt M J, Bijeljic B, Dong H, et al. Pore-scale imaging and modeling. *Adv Water Resour*, 2013, 51: 197–216
- 6 Andrä H, Combaret N, Dvorkin J, et al. Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and Segmentation. *Comput Geosci*, 2013, 50: 25–32
- 7 Bultreys T, De Boever W, Cnudde V. Imaging and image-based fluid transport modeling at the pore scale in geological materials: A practical introduction to the current state-of-the-art. *Earth Sci Rev*, 2016, 155: 93–128
- 8 Yao J, Zhao X C, Yi Y J, et al. The current situation and prospect on digital core technology (in Chinese). *Petrol Geol Recov Effic*, 2005, 12: 52–54 [姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 数字岩心技术现状及展望. *油气地质与采收率*, 2005, 12: 52–54]
- 9 Bakke S, Øren P E. 3-D pore-scale modelling of sandstones and flow simulations in the pore networks. *Spe J*, 1997, 2: 136–149
- 10 Joshi M Y. A class of stochastic models for porous media. Doctor Dissertation. Kansas: University of Kansas, 1975
- 11 Zhao X C, Yao J, Tao J, et al. A method of constructing digital core by simulated annealing algorithm (in Chinese). *Appl Math A J Chin Univ*, 2007, 22: 127–133 [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]
- 12 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
- 13 Okabe H, Blunt M J. Pore space reconstruction using multiple-point statistics. *J Pet Sci Eng*, 2005, 46: 121–137
- 14 Ougier-Simonin A, Renard F, Boehm C, et al. Microfracturing and microporosity in shales. *Earth Sci Rev*, 2016, 162: 198–226
- 15 Guardiano F B, Srivastava R M. *Multivariate Geostatistics: Beyond Bivariate Moments*. Dordrecht: Springer, 1993
- 16 Lu D T, Zhang T, Yang J Q, et al. A reconstruction method of porous media integrating soft data with hard data. *Chin Sci Bull*, 2009, 54: 1876–1885 [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]
- 17 Mariethoz G, Renard P. Reconstruction of incomplete data sets or images using direct sampling. *Math Geosci*, 2010, 42: 245–268
- 18 Zhang T. Research on the reconstruction of porous media based on multiple-point geostatistics (in Chinese). Doctor Dissertation. Hefei: University of Science and Technology of China, 2009 [张挺. 基于多点地质统计的多孔介质重构方法及实现. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2009]
- 19 Strebelle S. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Math Geol*, 2002, 34: 1–21
- 20 Wang Y L, Liu J H, Bian W L, et al. Reconstruction of porous media using MPS and multi-grid templates (in Chinese). *Comput Sim*, 2011, 28: 238–241 [汪彦龙, 刘金华, 边文莉, 等. 基于 MPS 和多重模板的多孔介质重构方法. *计算机仿真*, 2011, 28: 238–241]
- 21 Feng J, Teng Q, He X, et al. Reconstruction of three-dimensional heterogeneous media from a single two-dimensional section via co-occurrence correlation function. *Comput Mater Sci*, 2018, 144: 181–192
- 22 Sun Q, Zhang N, Fadlilmula M, et al. Structural regeneration of fracture-vug network in naturally fractured vuggy reservoirs. *J Pet Sci Eng*, 2018, 165: 28–41
- 23 Moura P, Laber E, Lopes H, et al. LSHSIM: A locality sensitive hashing based method for multiple-point geostatistics. *Comput Geosci*, 2017, 107: 49–60
- 24 Tahmasebi P, Javadpour F, Sahimi M. Three-dimensional stochastic characterization of shale SEM images. *Transp Porous Media*, 2015, 110: 521–531
- 25 Tahmasebi P, Hezarkhani A, Sahimi M. Multiple-point geostatistical modeling based on the cross-correlation functions. *Computat Geosci*, 2012, 16: 779–797
- 26 Yuan H, Teng Q Z, Qing L B, et al. Fast calculation method for connected probability of two points in 3D model (in Chinese). *Comput Eng Appl*, 2015, 51: 181–185 [袁浩, 滕奇志, 卿麟波, 等. 三维模型两点连通概率函数的快速计算. *计算机工程与应用*, 2015, 51: 181–185]
- 27 Zhao X C, Yao J. Construction of digital core and evaluation of its quality (in Chinese). *J Xi'an Shiyou Univ (Nat Sci Ed)*, 2007, 22: 16–20 [赵秀才, 姚军. 数字岩心建模及其准确性评价. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2007, 22: 16–20]
- 28 Rabbani A, Jamshidi S, Salehi S. An automated simple algorithm for realistic pore network extraction from micro-tomography images. *J Pet Sci Eng*, 2014, 123: 164–171
- 29 Dong H, Blunt M J. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images. *Phys Rev E*, 2009, 80: 036307
- 30 Rabbani A, Jamshidi S, Salehi S. Determination of specific surface of rock grains by 2D imaging. *J Geol Res*, 2014, doi: 10.1155/2014/945387
- 31 Rabbani A, Ayatollahi S. Comparing three image processing algorithms to estimate the grain-size distribution of porous rocks from binary 2D images and sensitivity analysis of the grain overlapping degree. *Spec Topics Rev Porous Media*, 2015, 6: 71–89
- 32 Raeini A Q, Blunt M J, Bijeljic B. Modelling two-phase flow in porous media at the pore scale using the volume-of-fluid method. *J Comput Phys*, 2012, 231: 5653–5668

Summary for “考虑微裂缝的数字岩心多点统计学构建方法”

Reconstruction of digital rock considering micro-fracture based on multi-point statistics

Lei Liu^{1,2}, Jun Yao^{1,2*}, Hai Sun^{1,2}, Lei Zhang^{1,2} & Yongfei Yang^{1,2}

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

² Research Centre of Multiphase Flow in Porous Media, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China

* Corresponding author, E-mail: RCOGFR_UPC@126.com

The macroscopic transport properties of shale are determined by microscopic pore structure, which displays typical multi-scale characteristic with pore size ranging from nanometers to microns and well development of natural micro cracks. The physical experimental method is limited by the contradiction between the selected resolution and imaging sample size. Therefore it is significant to obtain the representative elementary volume to simultaneously incorporate nano-micro pore information and micro-fracture characteristics. To deal with this, numerical reconstruction algorithms are commonly applied to reconstruct pore structure based on easily obtained 2D images and in recent years are applied to reconstruct multi-scale shale porous media. The reconstruction algorithms mainly include the truncated Gaussian random field, simulated annealing, Markov chain Monte Carlo sequential indicator simulation, multiple-point statistics, phase-recovery algorithm and process-based method. In this study, a pattern based on multipoint statistics (MPS) method is proposed to account for multi-scale pore structure characteristics in shale. MPS comes from a statistical method to reconstruct large-scale patterns using pixel-based representations and can characterize the correlation between multiple points compared with traditional two-point statistics. First, different pore types and fractures are identified based on the gray scale shale image. Second, multi-scale shale images are constructed by containing formation of cracks with different properties as well as randomly pore-fracture distribution pattern and then treated as the basic training images. Next, the search tree is used to store and classify occurrences of all pore-fracture distribution patterns that are obtained after the multiple data template scanning the training image. Data template capturing pattern library and conditional probability functions are both stored in the search tree to reflect the long-range connectivity. Accordingly, a random path is defined to visit all unsampled voxels. For every new voxel, the data event is obtained by using the previous template and the conditional probability distribution function (CPDF) of this voxel is established from the search tree. The state value is taken stochastically and put into conditional events for the future voxel simulation. The following voxels are simulated on the random path until a new 2D image is produced. Finally, the type-method interpolation approach is employed to construct the potential simulation space. In order to evaluate the consequence of reconstruction, the constructed images are compared with the training image in terms of autocorrelation function, pore morphology, topology structure and permeability value. Different fracture distribution patterns including orthogonal fractures, dipping fractures and fractal rough fractures are generated. The structure and transport properties of generated pore-fracture models are compared with those of the training images to test the robustness of the proposed reconstruction algorithm. The results show that the constructed images display similar characteristics as training images and their property values are identical with each other under the conditions of adding different types of cracks, which verifies the rationality of proposed method.

multi-point statistics, multi-scale, shale, digital rock, reconstruction, micro-fracture

doi: 10.1360/N972018-00221