

文章编号: 1000-7598-(2008)05-1339-07

# 基于择多算子的随机搜索法建立数字岩心的新技术

赵秀才<sup>1</sup>, 姚 军<sup>1</sup>, 衣艳静<sup>2</sup>, 杨永飞<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 石油工程学院, 山东 东营 257061; 2. 中油国际海外研究中心, 北京 100083)

**摘 要:** 介绍了用于刻画岩心孔隙空间特征的两点概率函数、线性路径函数, 提出了建立数字岩心的新方法——基于择多算子的随机搜索法, 系统阐述了该方法的建模理论及基于择多算子的孔隙点、骨架点的随机搜索策略, 指出搜索孔隙点、骨架点的择多算子的适宜取值区间分别为[9, 12]和[4, 7]。研究表明, 该法进行数字岩心建模不仅可行而且效果良好。它不受岩性地限制; 所建数字岩心的孔隙形态及空间分布特征与真实岩心孔隙相似; 尽管岩心含有一定数量的孤立孔隙和岩石颗粒, 但其规模很小; 岩心具有良好的孔隙连通性、各向同性和渗透性, 故可用来研究多孔介质中流体的分布和渗流等问题; 由于该法建立的数字岩心的连通性随孔隙度的减小而变差, 故该法更适于建立大孔隙度岩心。

**关 键 词:** 数字岩心; 随机搜索; 择多算子; 格子 Boltzmann 方法

中图分类号: TB 115

文献标识码: A

## A new method of constructing digital core utilizing stochastic search algorithm based on majority operator

ZHAO Xiu-cai<sup>1</sup>, YAO Jun<sup>1</sup>, YI Yan-jing<sup>2</sup>, YANG Yong-fei<sup>1</sup>

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum(East China), Dongying 257061, China;

2. CNPC International Research Center, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Two point probability function and linear path function depicting the characteristics of core's pore space are introduced. A new method of constructing digital core named stochastic search algorithm based on majority operator is presented. Its theory of constructing digital core and the stochastic search strategy for both pore voxel and grain voxel based on majority operator are illustrated in detail. Good intervals for majority operators when searching pore voxel and grain voxel are suggested to be [9,12], [4,7] respectively. Study shows that this method, without being constrained to lithology, can construct digital core with good quality. The constructed digital core's pore space gains good topology and distribution which is similar to the genuine rock pore. Although a number of isolated pore and rock phase units appear in the core, their total fraction is quite small. The core's pore space connection, isotropy and permeability are all good enough to make it a good tool for study of fluid distribution and flow in porous media. As the core's connectivity becomes poor with its porosity decreasing, the method presented here can be better used for constructing digital core with large porosity.

**Key words:** digital core; stochastic search; majority operator; lattice Boltzmann method

## 1 引 言

合理完善的微观渗流理论是实现微观尺度上大幅度提高原油采收率技术的基础, 数字岩心作为微观渗流理论的研究平台发挥着至关重要的作用, 文献[1]中论述, 尽管用于构建数字岩心的方法有多种, 但以岩心薄片分析为基础的图像重建方法更受学者青睐, 比如高斯场法<sup>[2]</sup>、模拟退火法<sup>[3,4]</sup>和基于

过程模拟<sup>[5,6]</sup>的方法等; Biswal<sup>[7]</sup>, Manwart<sup>[8]</sup>, Oren, Bake<sup>[6]</sup>等研究指出, 就所建立的数字岩心的整体连通性而言, 基于过程模拟的方法优于高斯场法和模拟退火法, 然而, 由于基于过程模拟的方法只能通过沉积、压实和成岩过程形成的碎屑岩体系进行模拟, 故无法应用到碳酸盐岩体系的岩心建模中。本文给出了一种用于建立数字岩心的新方法, 通过实例证明该法具有较好的建模效果, 且不受岩性限制。

收稿日期: 2006-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目的部分研究成果 (No.90610015)。

作者简介: 赵秀才, 男, 1982 年生, 博士研究生, 主要从事储层岩石微观结构建模及微观渗流理论的研究与应用。E-mail: zhaoxiucui1234@126.com

## 2 建立数字岩心的基本资料

本文以岩心薄片图像为基础提取建模资料而后通过数值算法建立数字岩心，建模资料包括孔隙度、两点概率函数及线性路径函数<sup>[4]</sup>。

### 2.1 孔隙度

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  $\phi_j$ ，定义第  $j$  相的相函数为式 (1) 中的第 1 式；对于仅考虑孔隙和岩石骨架的两相系统，相函数简化为式 (1) 中的第 2 式，此时，两相系统孔隙度  $\phi$  可由统计平均值式 (1) 中的第 3 式给出：

$$\left. \begin{aligned} Z^j(\bar{r}) &= \begin{cases} 1, & \bar{r} \in v_j \\ 0, & \bar{r} \notin v_j \end{cases} \\ Z(\bar{r}) &= \begin{cases} 1, & \bar{r} \in v_p \\ 0, & \bar{r} \notin v_p \end{cases} \\ \phi &= \overline{Z(\bar{r})} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中： $v_p$  为孔隙空间； $\bar{r}$  为系统中的某一点；上划线表示统计平均（下文同）。孔隙度是描述岩心孔隙空间特征的最基本的量，它给出了孔隙在整个岩心系统中所占的份额。

### 2.2 两点概率函数

多相系统中第  $j$  相的两点概率函数定义如下：

$$\left. \begin{aligned} S^j(\bar{r}_1, \bar{r}_2) &= \overline{Z^j(\bar{r}_1)Z^j(\bar{r}_2)}; \\ S^j(r) &= \overline{Z^j(\bar{r})Z^j(\bar{r}+r)} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中： $\bar{r}_1$ 、 $\bar{r}_2$  为系统中的相距一定距离  $r$  的任意两点。为计算方便，令  $r$  的单位为体素数，体素数与体素棱长的乘积即物理长度（下文所有长度单位与此同）。对于二维图像  $r$  的单位是像素数。对于各向同性系统， $S^j(\bar{r}_1, \bar{r}_2)$  只取决于  $\bar{r}_1$ 、 $\bar{r}_2$  两点的距离  $r = |\bar{r}_1 - \bar{r}_2|$ ，因此，式 (2) 中第 1 式可简化为式 (2) 中的第 2 式。不难看出， $S^j(r)$  具有以下性质： $S^j(r=0) = \phi_j$ 。

对于只考虑孔隙和骨架两相的系统而言，建模过程中通常以孔隙相为研究对象，故以  $S(r)$  来简化表示（下文将两点概率函数简称为函数  $S(r)$ ）。函数  $S(r)$  表征了在系统中随机选取的两点分布于同一相中的概率，在此该概率值将描述系统中孔隙的空间分布特征。一般情况下，函数  $S(r)$  曲线的长度截取至曲线达到某一稳定值或水平波动不大时即可。

### 2.3 线性路径函数

线性路径函数  $L^j(\bar{r}_1, \bar{r}_2)$  是描述多孔介质内同一相局部连通性能的重要函数，定义为

$$\left. \begin{aligned} L^j(\bar{r}_1, \bar{r}_2) &= \overline{P(\bar{r}_1, \bar{r}_2)}; \\ P(\bar{r}_1, \bar{r}_2) &= \begin{cases} 1, & \bar{r}_x \in v_j \\ 0, & \text{else} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $\bar{r}_x$  为连接  $\bar{r}_1$ 、 $\bar{r}_2$  线段上的任意点。在各向同性系统中， $L^j(\bar{r}_1, \bar{r}_2)$  只取决于两点距离  $r$ ，故表达式可简化为  $L^j(r)$ 。对第  $j$  相相体积分数为  $\phi_j$  的系统有  $L^j(r=0) = \phi_j$ 。此外， $L^j(r)$  随  $r$  值的增大而减小，直至为 0。与函数  $S(r)$  相同，在数字岩心建模中以孔隙相为研究对象， $L^j(r)$  可进一步简化为  $L(r)$ （下文将线性路径函数简称为函数  $L(r)$ ）。函数  $L(r)$  的计算长度选取到其值减小到 0 的值即可。

## 3 基于择多算子的随机搜索法建立数字岩心的方法

### 3.1 建模方法

本文所要建立的数字岩心为仅考虑骨架和孔隙的两相系统，由于流体的储渗空间为孔隙，故以孔隙空间为分析对象计算各个函数。首先在经二值化处理后的岩心图像（CT 图或扫描电镜图）上统计得到用于建立数字岩心的基本资料  $\phi$ 、 $S(r)$ 、 $L(r)$ ，设从随机搜索法建立的数字岩心中计算所得的对应函数为  $S_r(r)$ 、 $L_r(r)$ （孔隙度采用下文所述方法处理），定义目标函数如下：

$$E = \sum_i \alpha_i [S_r(r_i) - S(r_i)]^2 + \sum_i \beta_i [L_r(r_i) - L(r_i)]^2 \quad (4)$$

式中： $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  为对应不同自变量的函数的权重值。

建模过程：随机生成孔隙度为  $\phi$  的三维 0, 1 (0 表示岩石骨架，1 代表孔隙) 数字岩心，开始建模进程。设某时刻计算出数字岩心对应的函数  $S_r(r)$ 、 $L_r(r)$ ，由式 (4) 计算出此时数字岩心（称原系统）所对应的目标函数  $E$ 。之后，按照基于择多算子的随机搜索策略见下文在孔隙空间和岩石骨架空间中分别随机选取一孔隙点和骨架点，将两者位置互换得到一个新系统。可见，采用该方案生成的新系统可以在整个优化过程中自动保持孔隙度与岩心图像孔隙度的一致性。计算新系统对应的函数  $S_r(r)$ 、 $L_r(r)$  和目标函数值  $E'$ ，如果  $E' \leq E$ ，新系统被接受，并用其更新原系统；否则，新系统被抛弃而原系统被保留（称更新失败），以此使系统不断优化。最终，当目标函数值降低到某一极小值  $E_{\min}$  或原系统更新失败的次数  $Num$  足够大时，输出此时的数字岩心结束建模进程。建模过程程序框如图 1 所示。

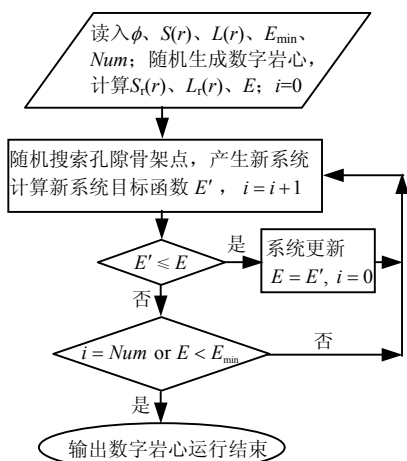


图 1 随机搜索法建立数字岩心的程序框图

Fig.1 Program flowchart of constructing digital core by stochastic search algorithm

### 3.2 基于择多算子的随机搜索策略

借助二值模式的空间体素的 26 邻域定义择多算子<sup>[9]</sup>如下：对于 3×3×3 空间模式的中心体素，如果在其 26 邻域中二值状态与它相同的体素的数目大于等于  $n$ （具体数值根据所求问题设定），则将该中心体素输出为与输入相同或相反的二值状态。

基于择多算子的概念且考虑到以下事实：在数字岩心中随机选取一个孔隙点，随着其 26 邻域中状态为孔隙的体素数目的逐步增加，该邻域经多次更新后成为孔隙空间的概率不断增大，成为岩石骨架的概率逐渐减小，因此，该孔隙点越来越不适宜被选中，并转化为骨架点，规定岩心中孔隙点的随机搜索方法如下：随机选取一个孔隙点，如果其 26 邻域中孔隙点数目大于等于  $n$ ，则抛弃该点重新选择，否则该点被选中。经测试， $n$  值过小将导致生成的孔隙细小杂乱，且到程序运行后期很难找到满足条件的孔隙点； $n$  值过大将导致原先已经生成的孔隙不断被破坏使运行时间增大甚至无法结束，适宜地取值区间为[9, 12]。

骨架点选取的基本原理与孔隙点类似，但实现方法有所差异：随机选取一个骨架点，如果其 26 邻域中孔隙点数目大于等于  $n$ ，则该点被选中，否则抛弃该点重新选择。测试知： $n$  值过小将导致生成的骨架不断被破坏，使运行时间增加甚至无法结束， $n$  值过大将使程序运行后期很难找到满足条件的骨架点，适宜地取值区间为[4, 7]。

## 4 数字岩心准确性的评价方法

### 4.1 连通孔隙体积比

由于流体只能通过相互连通的孔隙渗流而岩心

内的一些孔隙实际呈孤立状态，因此，为表征孔隙空间的连通程度引入连通孔隙体积比  $f_p$ ，定义如下：

$$f_p = \frac{v^*}{v} \quad (5)$$

式中： $v^*$ 、 $v$  分别为岩心内相互连通的孔隙体积和总孔隙体积。显然，借助  $f_p$  值的大小可以对数字岩心孔隙空间的连通程度进行准确的定量评价，继而对算法构建数字岩心的能力给出合理评判。

### 4.2 格子 Boltzmann 方法计算数字岩心渗透率

格子 Boltzmann 方法（简称 LBM）是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种流场计算方法，该方法的发展历程、主要设计思想及边界处理等问题见文献[10]。与其他数值计算方法相比，LBM 所用的边界处理方法较简单，这使得该方法在处理多孔介质流动等具有复杂几何边界条件的计算问题时有很大的优势。已有学者通过该方法对流体在多孔介质中的渗流问题作过研究并取得了很好的效果<sup>[11,12]</sup>。

本文同样也采用 LBGK 模型中最常用的 DnQb 系列模型<sup>[13]</sup>，此处为三维问题，故选用 D3Q19 模型来计算数字岩心渗透率，现将 D3Q19 模型的各个要素整理如下，其网格结构见图 2。

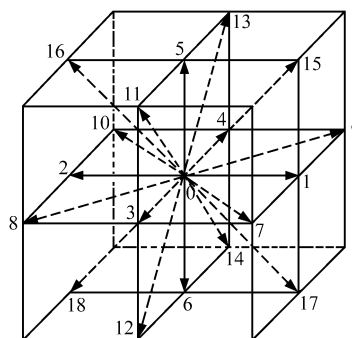


图 2 D3Q19 模型网格结构图

Fig.2 The D3Q19 lattice structure model

离散速度方向为

$$e_i = \begin{cases} (0,0,0) & , i = 0 \\ (\pm 1, 0, 0), (0, \pm 1, 0), (0, 0, \pm 1) & , i = 1, \dots, 6 \\ (\pm 1, \pm 1, 0), (0, \pm 1, \pm 1), (\pm 1, 0, \pm 1) & , i = 7, \dots, 18 \end{cases} \quad (6)$$

演化方程为

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(x, t) - \frac{1}{\tau} (f_i(x, t) - f_i^{eq}(x, t)) \quad (7)$$

平衡态分布函数为

$$f_i^{eq} = t_\sigma \rho \left[ 1 + 3 \frac{e_i u}{c^2} + 4.5 \frac{(e_i u)^2}{c^4} - 1.5 \frac{u^2}{c^2} \right] \quad (8)$$

宏观密度、宏观速度为

$$\rho = \sum_i f_i(x, t); \quad \rho u = \sum_i f_i(x, t) e_i \quad (9)$$

式(6)~(9)构成 LBM 迭代模型, 其中  $f_i(x, t)$  为格点  $x$  处  $t$  时刻沿  $i$  方向的粒子分布函数;  $\tau$  为弛豫(松弛)时间;  $c = \Delta x / \Delta t$  为格子速度;  $\Delta x$  和  $\Delta t$  分别为网格步长和时间步长; 权系数为:  $t_\sigma = 1/3, i = 0; t_\sigma = 1/18, i = 1 \dots 6; t_\sigma = 1/36, i = 7 \dots 18$ 。

在实际计算中, 由于数字岩心为一立方体, 所以首先设定流体渗流的方向, 此后将其余四面用一层骨架点封隔起来。为保证二阶计算精度, 孔隙与岩石骨架之间采用曲线边界条件<sup>[14]</sup>, 出入口施加一定压力梯度  $\nabla p$ 。

## 5 建模实例

### 5.1 建模资料及建模函数的提取

图 3 为孤岛油田一疏松砂岩岩心的 CT 扫描图像二值化处理后的结果(黑色为岩石骨架, 白色为孔隙, 下文图 6 和图 7(a)与此同), 大小为  $300 \times 300$  像素, 每个像素点对应的实际尺寸为  $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。试验测得该岩心的孔隙度、水测渗透率分别为 0.341,  $0.824 \mu\text{m}^2$ 。统计图 3 内的黑白像素点并计算得: 孔隙度  $\phi = 0.345$ , 与试验孔隙度值吻合良好, 故图 3 可以准确反映岩心孔隙空间特征。由式(2)和式(3)分别计算函数  $S(r)$ 、 $L(r)$ , 结果如图 4 所示,  $L(r) = S(r) = 0.345 = \phi$ ,  $r$  增到一定值后函数  $S(r)$  值趋于稳定而函数  $L(r)$  值逐步减小直至为 0, 与前述理论吻合。

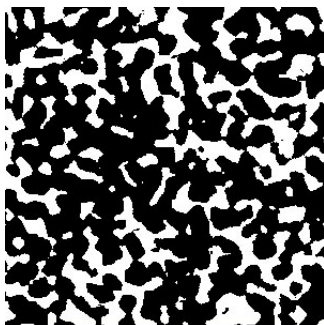


图 3 真实岩心 CT 图二值化后的黑白图像  
Fig. 3 A binary CT image of the real rock core

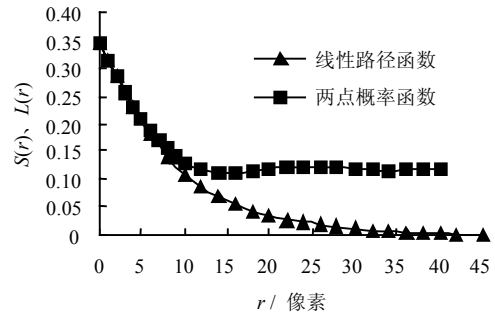


图 4 真实岩心 CT 图像的概率、路径函数曲线  
Fig.4 Probability and lineal-path function curves measured on Fig.3

### 5.2 随机搜索法建模参数设置

取建模规模为  $200 \times 200 \times 200$  个体素, 函数  $S(r)$ 、 $L(r)$  的取值长度分别为 40 和 45 个体素, 考虑到从算法建立的数字岩心和从实际岩心 CT 图上计算得到的函数  $S(r)$ 、 $L(r)$  在自变量  $r$  较小时差异较大, 并随  $r$  值的增大而减小, 故设定  $\alpha_i$ 、 $\beta_i$  的值在  $r \leq r_{\max} / 2$  范围内是  $r_{\max} / 2 < r \leq r_{\max}$  范围内的 1.5 倍来突出差异, 加快优化速度, 即

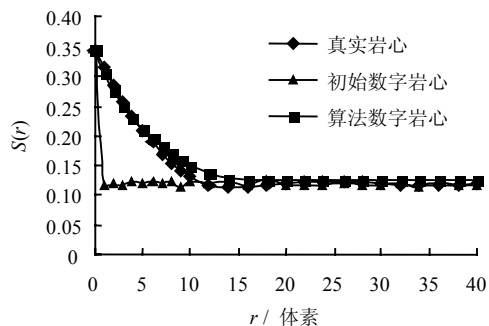
$$\left. \begin{aligned} \alpha_i &= \begin{cases} 1.5, & 0 \leq r \leq 20 \\ 1, & \text{else} \end{cases} \\ \beta_i &= \begin{cases} 1.5, & 0 \leq r \leq 22 \\ 1, & \text{else} \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

用于随机选取孔隙点和岩石骨架点的择多算子对应的  $n$  值分别取 10, 6;  $E_{\min}$ 、 $Num$  分别取值  $10^{-5}$  和  $10^4$ 。初始岩心的产生方法为: 先将  $200 \times 200 \times 200$  个体素均赋初值 0 (骨架), 此后按照均匀分布随机选取  $200 \times 200 \times 200 \times 0.345$  个点赋值 1 (孔隙), 以此保证系统的孔隙度为 0.345。

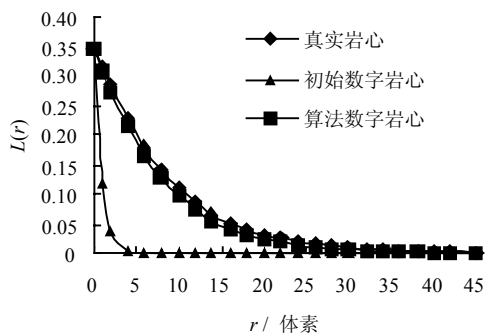
### 5.3 建模结果及可靠性分析

#### (1) 参考函数对比及孔隙空间特征分析

将最初随机生成的数字岩心简称初始数字岩心, 由算法建立的数字岩心简称算法数字岩心。由图 5 明显看出, 初始数字岩心与实际岩心差异很大, 无论函数  $S(r)$ , 还是函数  $L(r)$  均如此, 反映了初始数字岩心的无序。如图 6 所示, 孔隙点几乎均匀分布, 无法反映岩心孔隙空间的任何特征。初始数字岩心经算法处理后性能显著改善, 其函数  $S(r)$ 、 $L(r)$  与实际岩心的差异均很小 ( $E \approx 10^{-5}$ ), 说明算法数字岩心与真实岩心类似, 其内部孔隙不仅具有良好的空间分布特征, 而且具有良好的局部连通性。此外, 由图 7 可见, 数字岩心孔隙空间特征明显, 具有十分良好孔隙形态。



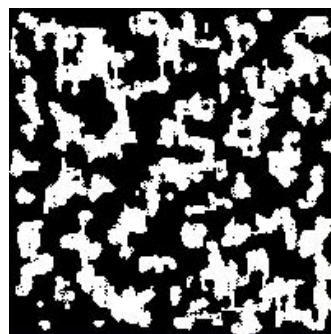
(a) 两点概率函数比较



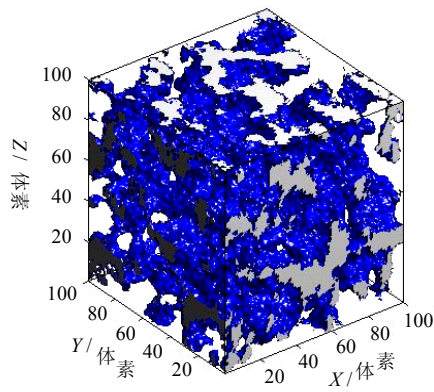
(b) 线性路径函数比较

图 5 由不同系统计算所得的函数比较

Fig.5 Comparison of the real rock core, initial random configuration and the reconstructed system



(a) 岩心单层图



(b) 岩心透视图 (骨架透明)

图 7 算法数字岩心图

Fig.7 Reconstructed digital core

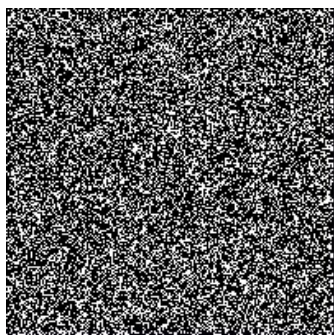


图 6 初始数字岩心单层图

Fig.6 A slice from the initial random configuration

(2) 数字岩心孔隙空间的整体连通性分析

分析并统计得到数字岩心内部孤立的孔隙和岩石骨架颗粒, 结果见表 1 和表 2。由表 1 计算得孤立孔隙占总孔隙的比例为 0.132 %, 故连通孔隙体积比为 99.868 %。可见, 岩心孔隙的整体连通性非常好。同理, 计算得孤立岩石颗粒占岩石骨架的比例为 0.236 %, 因此, 尽管孤立岩石颗粒的数量众多(表 2)但其总体规模很小。由于孤立孔隙对传导流体毫无贡献, 而孤立岩石颗粒在实际岩心中不存在, 故分别将两者转变为岩石骨架和孔隙, 此后岩心孔隙度变为 0.346 4, 与实际孔隙度 0.341 相差很小。

表 1 数字岩心内孤立孔隙统计表

Table 1 Isolated regions of pore phase in the reconstructed digital core

孤立孔隙大小/体素	1	2	3	4	7	29	41	52	54	65	77	96	106	146	191	220	222	245	304	507
孤立孔隙个数	211	14	3	2	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

表 2 数字岩心内孤立岩石颗粒统计表

Table 2 Isolated regions of matrix phase in the reconstructed digital core

孤立岩石颗粒大小/体素	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	20	21	26	31	44
孤立岩石颗粒个数	9 684	874	157	57	46	48	38	26	19	14	7	10	4	2	3	1	2	1	2	1	2	1

### (3) 数字岩心渗透性分析

应用 LBM 方法计算数字岩心的渗透率, 选择水作为测试流体, 其密度取  $1.0 \text{ g/cm}^3$ , 格子长度取单个像素分辨率  $5 \mu\text{m}$ , 其余参数取值如下:  $c=1$ ,  $\tau=0.75$ ,  $\nabla p=1.45 \text{ MPa/m}$ 。令流体分别沿  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向渗流, 流动稳定后沿 3 个方向的流速分别为 1.325, 1.318,  $1.327 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ , 由达西公式计算可得 3 个方向的渗透率分别为 0.914, 0.909,  $0.915 \mu\text{m}^2$ 。可见, 基于择多算子的随机搜索法建立的数字岩心具有很好的渗透性和各向同性。然而, 与试验渗透率 ( $0.824 \mu\text{m}^2$ ) 相比, 所建数字岩心的渗透率普遍偏高, 这是由于所建立的数字岩心中孔隙空间分散程度不够、孔隙尺寸偏大造成的, 尽管如此, 良好的孔隙空间连通性和渗透性, 使本文提出的方法所建的数字岩心完全能够用来研究流体在多孔介质中的微观分布及渗流等一系列问题。

由以上分析可知, 基于择多算子的随机搜索法进行数字岩心建模不但可行, 而且效果良好, 因而该法是建立数字岩心的强有力的工具。对于多相系统建模及考虑多种建模资料的情况, 只需在式 (4) 中添加函数即可。此外, 由于建模过程未涉及岩石形成过程的具体因素, 故该法不受岩性限制, 既适用于碎屑岩, 也可适用于碳酸盐岩的岩心建模。

最后需要指出的是: 经多次检验, 本文所述方法建立的数字岩心的连通性受到孔隙度的明显影响: 大孔隙度 (约大于 0.20) 岩心的连通性能良好, 小孔隙度岩心仅具有小范围连通性。这对于渗流问题的研究极为不利, 本文所述方法更适用于大孔隙度的岩心建模。

## 6 结 论

(1) 基于择多算子的随机搜索法进行数字岩心建模不但可行, 而且效果良好, 尽管数字岩心内部含有一定数量的孤立孔隙, 但其总体规模很小, 故岩心孔隙空间的连通性好。此外, 岩心具有良好的孔隙空间分布特征和孔隙形态, 故适于用来研究流体在多孔介质中的分布形态等问题。

(2) 基于择多算子的随机搜索法建立的数字岩心含有大量的孤立岩石颗粒, 但孤立颗粒的总体规模很小, 故清除后无碍于渗流理论研究。采用 LBM 计算岩心渗透率, 结果表明, 岩心具有良好的各向同性; 尽管岩心中孔隙尺寸偏大造成其渗透率高于真实岩心, 但良好的渗透性使其能够用来进行流体在多孔介质中的渗流等一系列问题的研究。此外, 本文所提出的方法不受岩性限制, 因此它是建立数

字岩心的强有力的工具。

(3) 尽管文中并未详细讨论, 但孔隙、骨架点的随机搜索策略中择多算子的设置是十分重要的, 一般, 孔隙点、骨架点 26 邻域中  $n$  的适宜取值区间分别为 [9, 12], [4, 7]。此外, 本文方法所建数字岩心的连通性受到岩心孔隙度的显著影响, 大孔隙度 (约大于 0.20) 岩心的连通性良好, 小孔隙度岩心仅具有小范围连通性。因此, 本文所述方法更适于建立大孔隙度的数字岩心。

## 参 考 文 献

- [1] 姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 数字岩心技术的发展及展望[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 52—54.  
YAO Jun, ZHAO Xiu-cai, YI Yan-jing, et al. Developments and prospect on digital core technology[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2005, 12(6): 52—54.
- [2] QUIBLIER J A. A new three-dimensional modeling technique for studying porous media[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1984, 98(1): 84—102.
- [3] HAZLETT R D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow[J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29(6): 801—822.
- [4] YEONG C L Y, TORQUATO S. Reconstructing random media, II: three-dimensional media from two-dimensional cuts[J]. *Physical Review(E)*, 1998, 58(1): 224—233.
- [5] BAKKE S, OREN P E. 3-D pore-scale modeling of sandstones and flow simulations in the pore networks[J]. *SPE Journal*, 1997, 2(2): 136—149.
- [6] OREN P E, BAKKE S. Process based reconstruction of sandstones and predictions of transport properties[J]. *Transport in Porous Media*, 2002, 46(2-3): 311—343.
- [7] BISWAL B, MANWART C, HILFER R, et al. Quantitative analysis of experimental and synthetic microstructures for sedimentary rocks[J]. *Physica(A)*, 1999, 273(3-4): 452—475.
- [8] MANWART C, TORQUATO S, HILFER R. Stochastic reconstruction of sandstones[J]. *Physical Review(E)*, 2000, 62(1): 893—899.
- [9] WILLIAM K PRATT. 数字图像处理[M]. 邓鲁华, 张延恒, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2005: 269—275.
- [10] 郭照立. 模拟不可压流体流动的格子 Boltzmann 方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2000.

- 水利电力出版社, 1994: 326—327.
- [2] XING Z. Three-dimensional stability analysis of concave on plan view[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, 1977, 103: 971—986.
- [3] HUNGER O. An extension of Bishop's simplified method of slope stability analysis to three-dimension [J]. **Geotechnique**, 1987, 37:113—117.
- [4] 李同录, 王艳霞, 邓宏科. 一种改进的三维边坡稳定性分析方法[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(5): 611—614.  
LI Tong-lu, WANG Yan-xia, DENG Hong-ke. An improved method for three-dimensional slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(5): 611—614.
- [5] 陈胜宏, 万娜. 边坡稳定分析的三维剩余推力法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(3): 69—73.  
CHEN Sheng-hong, WAN Na. Study on three dimensional residual thrust method for slope stability analysis[J]. **Engineering Journal of Wuhan University**, 2005, 38(3): 69—73.
- [6] 陈祖煜, 弥宏亮, 汪小刚. 边坡稳定三维分析的极限平衡方法[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(5): 525—529.  
CHEN Zu-yu, MI Hong-liang, WANG Xiao-gang. A three-dimensional limit equilibrium method for slope stability analysis[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2001, 23(5): 525—529.
- [7] 陈胜宏. 高坝复杂岩石地基及岩石高边坡稳定分析[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [8] CHEN Z Y, WANG X G, Haberfield C, et al. A three-dimensional slope stability analysis method using the upper bound theorem, part I: theory and methods[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2001, 38: 369—378.
- [9] MOWEN X, TETSURO E, MEIFENG C. A GIS-based method for locating the critical 3-D slip surface in a slope[J]. **Computers and Geotechnics**, 2004, 31: 267—277.
- [10] 玄光男, 程润伟, 遗传算法与工程设计[M]. 汪定伟等译. 北京: 科学出版社, 2000.
- [11] DAVID L. Genetic algorithms and optimizing chemical oxygen-iodine lasers[J]. **Developments in Theoretical and Applied Mechanics**, 1996, XVIII: 411—424.
- [12] MICHALEWICZ Z. A survey of constraint handling techniques in evolutionary computation methods [J]. **Evolutionary Programming**, 1995: 135—155.
- [13] MICHALEWICZ Z, DASGUPTA D, RICHE L, et al. Evolutionary algorithms for constrained Engineering problems[J]. **International Journal of Computers and Industrial Engineering**, 1996, 30(4): 851—870.
- [14] 秦卫星, 陈胜宏, 陈士军. 有限单元法分析边坡稳定的若干问题研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(4): 586—590.  
QIN Wei-xing, CHEN Sheng-hong, CHEN Shi-jun. A study on some issues for slope stability analysis by finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(4): 586—590.
- [15] 冯树仁, 丰定祥, 葛修润, 等. 边坡稳定性的三维极限平衡分析方法及应用[J]. 岩土工程学报, 1999, 21(6): 657—661.  
FENG Shu-ren, FENG Ding-xiang, GE Xiu-run, et al. 3-D limit equilibrium method for slope stability and its application[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1999, 21(6): 657—661.

#### 上接第 1344 页

- [1] 阎广武, 胡守信, 施卫平. 用 Lattice Boltzmann 方法确定多孔介质的渗透率[J]. 计算物理, 1997, 14(1): 63—67.  
YAN Guang-wu, HU Shou-xin, SHI Wei-ping. Determining permeabilities of porous media by lattice boltzmann method[J]. **Chinese Journal of Computational Physics**, 1997, 14(1): 63—67.
- [12] 钱吉裕, 李强, 宣益民, 等. 确定多孔介质流动参数的格子 Boltzmann 方法[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 655—657.  
QIAN Ji-yu, LI Qiang, XUAN Yi-min, et al. Application of lattice-Boltzmann scheme on determining flow parameters of porous media[J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2004, 25(4): 655—657.
- [13] QIAN Y H, HUMIERES D d, LALLEMAND P. Lattice BGK models for the Navier-Stokes equation[J]. **Europhysics Letters**, 1992, 17(1): 479—484.
- [14] MEI R, SHYY W, YU D, et al. Lattice boltzmann method for 3-D flows with curved boundary[J]. **Journal of Computational Physics**, 2000, 161(2): 680—699.