

文章编号:1673-5005(2007)01-0080-07

储层岩石微观结构性质的分析方法

姚 军¹, 赵秀才¹, 衣艳静², 陶 军¹

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

摘要:介绍了用以分析储层岩石微观结构性质的若干函数,以模拟退火算法建立的数字岩心为基础,详细讨论了各个函数的应用方法,并用这些方法进行了实例计算。研究表明,连通孔隙体积比能够准确描述岩心中孔隙的整体连通性;孔隙尺寸分布函数可以定量表征岩心孔隙的分布;局部孔隙度分布函数不但可以对岩心中孔隙、岩石骨架的最大发育规模进行定量评价,而且能够对岩心均质性进行定性分析;测量单元标准差分布曲线可以为岩心均质性分析时测量单元边长的合理选取提供重要依据;借助局部渗流概率函数能够对岩心的连通性能及是否为各向同性作出合理的定性判断。格子 Boltzmann 方法计算数字岩心渗透率简便易行、结果准确,可以作为评价数字岩心可靠性的重要标准。

关键词:储集层; 岩石微观结构; 孔隙尺寸; 孔隙连通性; 格子 Boltzmann 方法

中图分类号:TE 311 **文献标识码:**A

Analysis methods for reservoir rock's microstructure

YAO Jun¹, ZHAO Xiu-cai¹, YI Yan-jing², TAO Jun¹

(1. College of Petroleum Engineering in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. International Research Center, China National Petroleum Corporation, Beijing 100083, China)

Abstract: Several functions for analyzing reservoir rock's microstructure were introduced, whose application methods were discussed in detail based on the digital core constructed by simulated annealing algorithm. The results show that the total connectivity of the rock pore can be precisely depicted by connecting volume fraction. Pore-size distribution function gives quantitative characterization of the pore sizes distribution while local porosity distribution function can offer qualitative analysis of the core's homogeneity as well as quantitative assess for the size of the largest grain and pore. Reasonable side length of the measurement cell for core's homogeneity analysis can be suggested by the variance curve of the local porosity fluctuations, and the local percolation probability function can make good qualitative assess for both the pore's connectivity and isotropy. Furthermore, lattice Boltzmann method was introduced to calculate the core's permeability and shows to be a reliable standard to judge the core's quality for its easy application and correct result.

Key words: reservoir; rock's microstructure; pore size; pore's connectivity; lattice Boltzmann method

储层岩石的微观结构是影响油气储集及渗流特性的重要因素。然而,由于岩石骨架及孔隙空间分布极其复杂以致骨架颗粒的几何形状、孔隙空间的分布形态等均无法用表示其边界曲面的方程来确定,因此,通常借助于实验手段获得反映骨架、孔隙空间几何性质的参数,如粒度组成、比面、孔隙度、渗透率等。显然,此类参数反映的均为岩石的宏观性质,无法给出微观尺度上的孔隙、骨架结构特征^[1]。

另一方面,随着成像设备的改进和图像处理技术的发展,包含岩心微观结构特征的重要信息可以通过扫描电镜图、CT 图及核磁共振资料获得^[2-3]。通过核磁共振资料二值分离可直接得到由孔隙和骨架组成的数字岩心,该数字岩心能够准确地表征真实岩心的微观结构特征。此外,以扫描电镜图、CT 图为基础借助各种数值方法如高斯场法^[4]、模拟退火法^[5-6]、过程模拟法^[7-8]等也可以构建数字岩心,并

收稿日期:2006-09-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90610015)

作者简介:姚军(1964-),男(汉族),山东平邑人,教授,博士,博士生导师,长期从事油气田开发工程的教学与科研工作。

且随着对算法的不断改进,这类通过数值方法建立的数字岩心越来越逼近真实岩心。数字岩心本身即作为一种认识岩石微观结构的良好中介,笔者以此为基础,通过研究给出若干数值方法,为分析储层岩石微观结构性质提供新的思路。

1 岩心微观结构性质分析

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 ,定义第 j 相的相函数为

$$Z_j(r) = \begin{cases} 1, & r \in v_j; \\ 0, & r \notin v_j. \end{cases} \quad (1)$$

对于仅考虑孔隙和岩石骨架的两相系统——数字岩心,相函数可以简化为

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

此时,两相系统孔隙度 φ 可由统计平均值给出:

$$\varphi = \overline{Z(r)}. \quad (3)$$

式中, p 为孔隙空间; r 为系统中的某一点;上划线“—”表示统计平均。

孔隙度是描述岩心孔隙空间特征的最基本的量,定义为孔隙在整个岩心系统中所占的份额。

1.2 孔隙尺寸分布函数

在孔隙空间中任取一点,如果该点到最近骨架点的距离分布于 $[\delta, \delta + d\delta]$ 间的概率可用 $P(\delta)d\delta$ 表示,则 $P(\delta)$ 称为孔隙尺寸分布函数^[9]。通过函数 $P(\delta)$ 可求出平均孔隙半径 $\bar{\delta}$ 及孔隙尺寸累积分布函数 $F(\delta)$,表达式为

$$\bar{\delta} = \int_0^{\infty} \delta P(\delta) d\delta. \quad (4)$$

$$F(\delta) = \int_0^{\infty} P(z) dz. \quad (5)$$

函数 $P(\delta)$, $F(\delta)$ 具有以下性质:

$$\int_0^{\infty} P(\delta) d\delta = 1, P(\infty) = 0,$$

$$F(0) = 1, F(\infty) = 0.$$

1.3 连通孔隙体积比

由于物理实验以及数值重建过程中的相关误差,导致核磁共振方法或数值重建方法获得的数字岩心内部含有孤立的岩石颗粒和孔隙。由于流体只能通过相互连通的孔隙渗流,因此为表征孔隙空间的连通程度引入连通孔隙体积比^[6] f_p ,

$$f_p = \frac{V^*}{V}. \quad (6)$$

式中, V^* 和 V 分别为岩心内相互连通的孔隙体积和总孔隙体积。

1.4 局部孔隙度分布函数

定义 $K(r, L)$ 为多孔介质内部以 r 点为中心、边长为 L 的立方体,则 $K(r, L)$ 实际上定义了一个测量单元。测量单元 $K(r, L)$ 的孔隙度定义为

$$\varphi(r, L) = \frac{V(P \cap K(r, L))}{V(K(r, L))}. \quad (7)$$

局部孔隙度分布函数^[10]为

$$\mu(\varphi, L) = \frac{1}{m} \sum_r \delta(\varphi - \varphi(r, L)). \quad (8)$$

式中, $V(G)$ 为某集合 $G \subset R^d$ 的体积; m 为系统中测量单元 $K(r, L)$ 的个数; $\delta(x)$ 为狄拉克分布函数。

理想情况下,所有的测量单元都不应交叠,但这样会使测量结果的统计性较差。因此,实际操作中通常保证相邻测量单元中心间距不小于 L/x ($x \geq 1$ 须根据情况选取)。对于具有统计均质性的系统,借助局部孔隙度分布函数可求出局部平均孔隙度:

$$\bar{\varphi}(L) = \int_0^1 \varphi \mu(\varphi, L) d\varphi. \quad (9)$$

理论上,局部平均孔隙度 $\bar{\varphi}(L)$ 应等于系统孔隙度 $\varphi(S)$,但实际上 $\bar{\varphi}(L)$ 与 $\varphi(S)$ 有一定偏差,造成这种偏差的原因一部分是真实岩心并非完全均质,另一部分是测量单元在选取时发生了交叠。局部孔隙度 $\bar{\varphi}(L)$ 的差异程度可由方差来衡量,

$$\sigma^2(L) = (\varphi(L) - \bar{\varphi}(L))^2. \quad (10)$$

1.5 局部渗流概率函数

局部渗流概率是用来衡量相应于某一局部孔隙度测量单元的连通性能的函数,定义渗流特征函数如下:

$$\Lambda_\alpha(r, L) = \begin{cases} 1, & K(r, L) \text{ 在 } \alpha \text{ 方向具有渗透性;} \\ 0, & K(r, L) \text{ 在 } \alpha \text{ 方向不具有渗透性.} \end{cases} \quad (11)$$

式中, α 的取值可为 $x, y, z, 3$, c_0 。单元 $K(r, L)$ 在 x, y, z 方向具有渗透性是指流体在 $K(r, L)$ 内可分别沿 x, y, z 方向由单元一端渗透至另一端; $\Lambda_3 = 1$ 表明 $K(r, L)$ 在 x, y, z 方向均有渗透性; $\Lambda_c = 1$ 表明 $K(r, L)$ 在 x, y, z 中至少一个方向具有渗透性。

定义局部渗流概率函数^[10]为

$$\lambda_\alpha(\varphi, L) = \frac{\sum_r \Lambda_\alpha(r, L) \delta(\varphi - \varphi(r, L))}{\sum_r \delta(\varphi - \varphi(r, L))}. \quad (12)$$

可见, $\lambda_\alpha(\varphi, L)$ 给出了边长为 L 且孔隙度为 φ 的所有立方体中在 α 方向具有渗透性的单元所占的比例。

以局部渗流概率函数为基础,经局部孔隙度分布函数加权积分后可得平均渗流概率函数,由于函数中孔隙度项积分后被消除,故该函数仅依赖于测量单元的边长,定义如下:

$$P_a(L) = \int_0^1 \mu(\varphi, L) \lambda_a(\varphi, L) d\varphi. \quad (13)$$

式中, $P_a(L)$ 给出了边长为 L 的立方体的平均渗流概率,它是重建岩石孔隙空间的重要指标。

2 格子 Boltzmann 方法

格子 Boltzmann 方法(下文简称 LBM)是 20 世纪 80 年代中期发展起来的一种流场计算方法^[11]。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进行了研究并取得了很好的效果^[12-13]。

采用 LBGK 模型中最常用的 DnQb 系列模型^[14],本文中为三维问题,故选用 D3Q19 模型(图 1)来计算数字岩心渗透率,现将 D3Q19 模型的各要素整理如下。

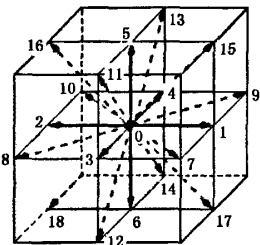


图1 D3Q19模型网格结构图

离散速度方向为

$$e_i = \begin{cases} (0,0,0), & i=0; \\ (\pm 1,0,0), (0,\pm 1,0), (0,0,\pm 1), & i=1,\dots,6; \\ (\pm 1,\pm 1,0), (0,\pm 1,\pm 1), (\pm 1,0,\pm 1), & i=7,\dots,18. \end{cases} \quad (14)$$

演化方程为

$$f_i(\mathbf{x} + \mathbf{e}_i \Delta t, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{x}, t) - \frac{1}{\tau} (f_i(\mathbf{x}, t) - f_{eqi}(\mathbf{x}, t)). \quad (15)$$

平衡态分布函数为

$$f_{eqi} = t_o \rho \left[1 + 3 \frac{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u}}{c^2} + 4.5 \frac{(\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{u})^2}{c^4} - 1.5 \frac{u^2}{c^2} \right]. \quad (16)$$

宏观密度和速度为

$$\rho = \sum_i f_i(\mathbf{x}, t), \quad (17)$$

$$\rho \mathbf{u} = \sum_i f_i(\mathbf{x}, t) \mathbf{e}_i. \quad (18)$$

式中, $f_i(\mathbf{x}, t)$ 为格点 $\mathbf{x}$ 处 t 时刻沿 i 方向的粒子分布函数; τ 为弛豫(松弛)时间; $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ 为格子速度,其中 Δx 和 Δt 分别为网格步长和时间步长; 权系数为 $t_o = 1/3 (i=0)$, $t_o = 1/18 (i=1, \dots, 6)$, $t_o = 1/36 (i=7, \dots, 18)$ 。

式(14)~(18)构成了 LBM 迭代模型。在实际计算中,由于数字岩心为一个立方体,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分隔起来。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^[15],出入口施加一定压力梯度 Δp 。

3 实例计算及其结果分析

由于没有获得真实岩心的核磁共振资料,故本文中以岩心 CT 图像为基础采用模拟退火算法建立数字岩心,以此为测试资料对上述各个函数和方法进行应用说明和分析。

3.1 数字岩心的建立

关于模拟退火算法建立数字岩心的具体方法可查阅文献[5,6]。图2为岩心 CT 图像经二值分离后的黑白图, 376×337 个像素,每个像素点对应的实际值为 $5 \mu\text{m} \times 5 \mu\text{m}$ 。图中白色对应孔隙空间,黑色代表岩石骨架。图像孔隙度为 0.259,与真实岩心孔隙度 0.26 基本一致。借助模拟退火算法建立规模为 $200 \times 200 \times 200$ 个体素的数字岩心,由于模拟退火算法所采取的独特系统优化策略,使数字岩心的孔隙度自动保持与 CT 二值图像孔隙度一致,由式(3)统计所得孔隙度为 0.259。

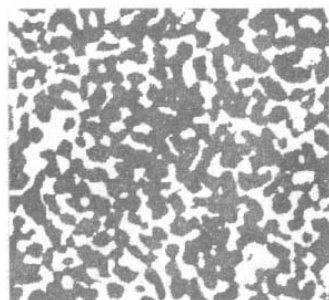


图2 二值分离后的岩心 CT 图像

图3为采用模拟退火算法建立的数字岩心的单层及透视图像(骨架透明)。

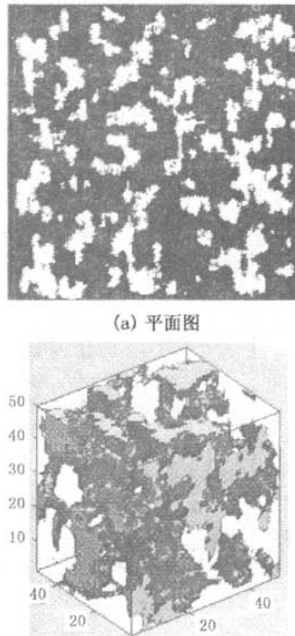


图 3 模拟退火算法建立
的数字岩心图像

3.2 岩心孔隙尺寸分布的定量表征

计算的孔隙尺寸分布函数曲线及其累积分布函数曲线见图 4,5。

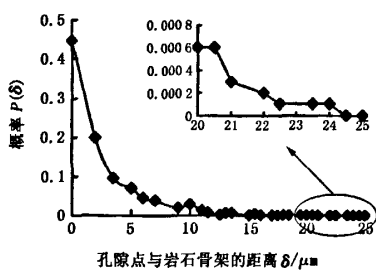


图 4 孔隙尺寸分布函数曲线

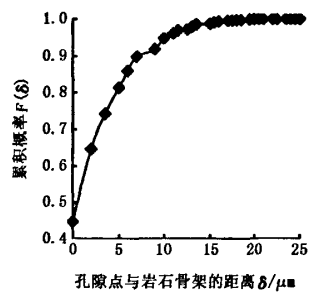


图 5 孔隙尺寸累积分布函数曲线

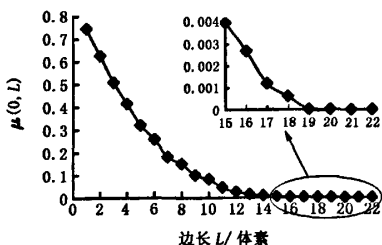
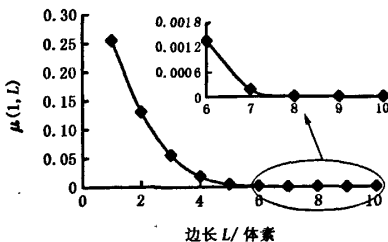
孔隙尺寸分布函数描述了岩心中任意孔隙点到岩石骨架不同距离的分布概率,它反映孔隙空间的发育情况,对孔隙尺寸的分布给出了定量表征。曲线递减到 0 之前的最小概率所对应的距离即为岩心中的最大孔隙半径 $r_{\max}$,此处 $r_{\max} = 24 \mu\text{m}$ 。此外,由式(4) 计算得平均孔隙半径为 $6.43 \mu\text{m}$ 。

3.3 岩心连通孔隙体积比

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,由 1,2,3,4,7,8,9,10,11,32,44,50,63,67,90,95,102,105,109,121,126,139,244,268,354 个体素组成的孤立孔隙个数分别为 2394,37,2,2,1,2,1,3,2,3,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1;由 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,14,15,16,17,18,19,20,21,22,25,33 个体素组成的孤立岩石颗粒数目分别为 71 199,13 010,3 427,983,390,215,110,69,33,28,16,8,4,5,6,1,1,1,4,1,1,1,1。计算得孤立孔隙占总孔隙的 0.224%,故连通孔隙体积比为 99.776%。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 1.98%,因此,尽管孤立岩石颗粒的数量众多,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,因此分别将两者转变为岩石骨架和孔隙,以便采用 LBM 计算数字岩心渗透率。

3.4 岩心骨架、孔隙最大发育规模的定量分析

由于局部孔隙度分布函数 $\mu(\varphi, L)$ 刻画了岩心内部边长为 L (单位:体素)且孔隙度为 φ 的立方体的存在概率,因此,孔隙度分别取 0 和 1 时,函数 $\mu(0, L)$ 和 $\mu(1, L)$ 可以分别表征岩心中完全位于岩石骨架和孔隙空间中的不同边长立方体的存在概率,它们可以从总体上反映岩石骨架和孔隙空间的发育情况。显然,小尺寸立方体更易于完全分布在骨架或孔隙空间中,因此函数 $\mu(0, L)$ 和 $\mu(1, L)$ 的取值必然会随 L 的增大而减小;在递减到 0 之前,两函数的最小值所对应的距离 L^* 即为岩心骨架和孔隙空间中所能容纳的最大立方体的边长,该值是刻画岩心微观结构的重要参数,分别反映了骨架和孔隙发育的最大规模。对数字岩心统计得两函数曲线见图 6,7。曲线规律与上述分析完全吻合,对于该岩心,对应骨架和孔隙的特征长度 L^* 的取值分别为 18 个体素和 7 个体素。

图6 $\mu(0, L)$ 函数曲线图7 $\mu(1, L)$ 函数曲线

3.5 岩心发育均质程度的定性分析

函数 $\mu(\varphi, L)$ 是双自变量函数, 当 L 值固定时, $\mu(\varphi, L)$ 将反映立方体的孔隙度分布概率, 对于均质程度较好的岩心, $\mu(\varphi, L)$ 将分布在以岩心孔隙度为中心的较小区间内。

图8中给出了不同边长立方体的局部孔隙度分布曲线。可以明显看出: ① 边长很小 ($L=8, 15$) 时, $\mu(0, L) \neq 0$, 说明部分立方体完全分布在骨架中; 此外, 函数曲线起伏小、开口大, 几乎分布在孔隙度为 $[0, 1]$ 的整个区间, 说明统计均质性较差。② 随着 L 的增大, $\mu(0, L) = 0$, 且曲线起伏幅度增大、开口减小, $\mu(\varphi, L)$ 的狄拉克分布特征更加明显, 统计均质性增强。可见, 局部孔隙度曲线的开口将随 L 的增大而减小, 即岩心的统计均质性随 L 的增大而加强; 反之, 当 L 值一定时, 曲线开口越小表明岩心越均质。因此, 通过对局部孔隙度曲线开口的分析可以对岩心的均质程度作出合理的定性判断。

在计算局部孔隙度分布函数时, 测量单元构成的总体标准差 σ 可以由公式(10) 计算得到, σ 值反映了测量单元之间孔隙度的差异程度。对本文中所建数字岩心统计得 $\sigma(L)$ 曲线如图9所示。 $\sigma(L)$ 值随边长 L 的增大而减小, 即孔隙度的差异减小, 统计均质性增强。显然, 岩心均质性越强, $\sigma(L)$ 曲线的递减速度越快, 曲线递减到0时对应的 L 值越小, 因此, 借助 $\sigma(L)$ 曲线斜率绝对值和 $\sigma(L) = 0$ 所对应的最小 L 值可以对不同岩心的均质程度作出可靠的评价。当 $\sigma(L)$ 接近0时, 说明以 L 为边长的立方体

具有良好的统计均质性。因此, 通过 $\sigma(L)$ 曲线还可以以为 $\mu(\varphi, L)$ 中 L 值的选取提供重要参考。本例中 L 选取40体素即可, 而分析得到的表征骨架最大发育规模的特征长度为18体素。因此, 对边长为40体素的立方体进行统计时, 即使是骨架发育规模最大的位置也能够完全容纳进来, 且能够包含大量的孔隙空间。所以, 选取 $\sigma(L)$ 曲线逼近0时对应的以 L 为边长的立方体进行统计测量是十分合理的。

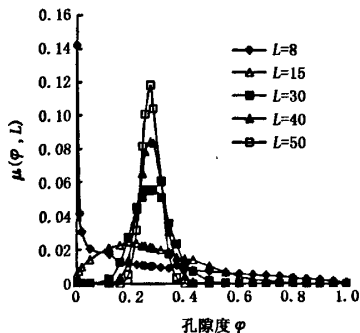


图8 不同边长立方体的局部孔隙度分布曲线

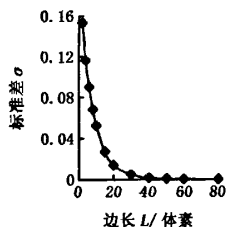


图9 测量单元总体方差随边长的变化曲线

3.6 岩心渗流概率分析

局部渗流概率函数 $\lambda_\alpha(\varphi, L)$ 表示边长为 L 且孔隙度为 φ 的所有立方体中在 α 方向具有渗透性的单元所占的比例。当边长 L 一定时, 对于各向同性岩心, 因 $\lambda_\alpha(\varphi, L)$ 在其各个方向的取值相同, 故沿 x, y, z 3个方向的函数曲线必然重合; 对于各向异性岩心, 沿连通性好的某个方向统计得到的函数曲线将位于沿连通性差的方向统计所得函数曲线的上方, 即函数曲线将彼此分离, 且各向异性程度越严重, 曲线将越分散。因此, 根据岩心沿 x, y, z 方向上的函数曲线的分布关系, 即可对岩心在某个方向的连通性能及岩心是否各向同性作出准确的定性评价。

此外, 由于在连通性好的岩心中, $\lambda_\alpha(\varphi, L)$ 值随 φ 的增大而增长速度较快, 因此根据 $\lambda_\alpha(\varphi, L)$ 曲线的增长速度可判断岩心在该方向上的连通性能。与 $\lambda_\alpha(\varphi, L)$ 类似, 根据平均渗流概率函数 $P(L)$ 沿 $x,$

y, z 方向的曲线分布是否紧凑,可判断岩心是否各向异性,根据曲线的增长速度可判断该方向的连通性能。

根据公式(12),(13)对所建岩心统计分析得图10,11。如图所示,无论局部渗流概率还是平均渗流概率,岩心沿 x, y, z 方向的函数分布曲线几乎完全重叠,说明岩心是各向同性的。同时,曲线增幅速度快,说明该岩心具有良好的连通性。

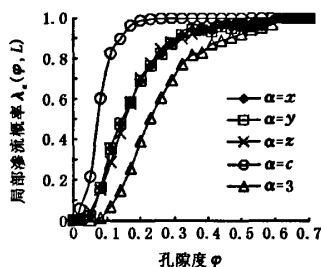


图10 局部渗流概率分布函数曲线

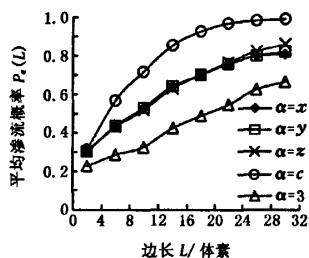


图11 平均渗流概率函数分布曲线

3.7 LBM 方法计算数字岩心渗透率

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 1000 kg/m^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: $c = 1, \tau = 0.75, \Delta p = 1.45 \text{ MPa/m}$ 。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 1.03, 1.043, $1.035 \mu\text{m/s}$,由达西公式计算可得 3 个方向的渗透率分别为 $0.710, 0.719, 0.714 \mu\text{m}^2$ 。可见,所建立的数字岩心具有很好的渗透性和各向同性。由于渗透率直接反映了多孔介质对流体的传导性能,因此,借助 LBM 方法可对数字岩心的传导性作出准确评价,此外分别沿 3 个主轴方向计算出渗透率的值并加以比较可以对岩心是否具有各向同性作出准确判断。

4 结论

(1) 连通孔隙体积比能够准确描述岩心中孔隙的整体连通性;孔隙尺寸分布函数可以定量表征岩

心孔隙尺寸的分布,函数曲线递减到 0 之前的最小概率值所对应的距离即为岩心中的最大孔隙半径。

(2) 局部孔隙度分布函数不但可以对岩心中孔隙、岩石骨架的最大发育规模进行定量评价,而且能够对岩心均质性进行定性分析,测量单元边长一定时,函数曲线开口越小岩心越均质。

(3) 利用测量单元标准差分布曲线的递减速度和曲线减小至 0 时对应的测量单元边长,可以判断岩心的均质性,递减越快岩心越均质,边长越小岩心越均质。

(4) 借助局部渗流概率函数能够对数字岩心的连通性能以及是否各向同性作出合理的定性判断,函数曲线上升速度越快则连通性越好;函数沿各个方向的曲线分布越紧凑则岩心沿各个方向的性质越相近。

(5) LBM 方法能够轻易实现对任意复杂边界的简单处理,计算数字岩心的渗透率简便易行,结果准确,可以作为评价数字岩心可靠性的重要标准。

参考文献:

- [1] 何更生. 油层物理 [M]. 北京:石油工业出版社,1994: 1-25.
- [2] SPANNE P, THOVERT J F, JACQUIN C J, et al. Synchrotron computed microtomography of porous media: topology and transports [J]. Physical Review Letters, 1994, 73(14): 2001-2004.
- [3] 王夕宾,刘玉忠,钟建华,等. 乐安油田草 13 断块沙四段储集层微观特征及其与驱油效率的关系 [J]. 石油大学学报:自然科学版,2005,29(3): 6-10.
WANG Xi-bin, LIU Yu-zhong, ZHONG Jian-hua, et al. Reservoir microscopic characteristics and displacement efficiency in the fourth member of Shahejie formation of Cao 13 fault block in Le'an Oilfield [J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science). 2005, 29(3): 6-10.
- [4] 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.
- [5] HAZLETT R D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow [J]. Mathematical Geology, 1997, 29(6): 801-822.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] SCHEIDEGGER A E. The physics of flow through porous media[D]. Toronto: University of Toronto, 1974.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] QIAN Y H, HUMIERES D D, LALLEMAND P. Lattice BGK models for the Navier-Stokes equation[J]. *Europhys Letters*, 1992, 17(1): 479-484.
- [15] MEI R, SHYY W, YU D, et al. Lattice Boltzmann method for 3-D flows with curved boundary[J]. *J Comput Phys*, 2000, 161(2): 680-699.
- (编辑 李志芬)

(上接第 75 页)

- [7] 李根生, 沈忠厚, 周长安, 等. 自振空化射流冲击压力脉动特性实验研究[J]. *水动力学研究与进展*, 2003, 18(5): 570-575.
- LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou, ZHOU Chang-shan, et al. An experimental study on impact pressure characteristics of self-resonant cavitating jets[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2003, 18(5): 570-575.
- [8] 李根生, 沈忠厚. 常压下淹没自振空化射流冲刷岩石效果的实验研究[J]. *华东石油学院学报*, 1987, 11(3): 12-21.
- LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou. Experimental study on rock erosion efficiency of submerged self-resonant cavitating jets under atmospheric pressure[J]. *Journal of Huadong Petroleum Institute*, 1987, 11(3): 12-22.
- [9] 张德斌, 李根生, 沈忠厚. 围压作用下自振空化射流脉动特性实验研究[J]. *中国安全科学学报*, 1999, 9(专辑): 6-11.
- ZHANG De-bin, LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou. An experimental study on self-resonant cavitating jet under ambient pressure[J]. *China Safety Science Journal*, 1999, 9(special): 6-11.
- [10] 易灿, 李根生, 张定国. 围压下自振喷嘴空化起始能力试验及应用研究[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(6): 218-223.
- YI Can, LI Gen-sheng, ZHANG Ding-guo. Laboratory and field study of enhancing cavitation effect with self-resonating nozzle under ambient pressure[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(6): 218-223.
- [11] 易灿, 李根生, 张定国. 喷嘴结构对空化起始的影响研究[J]. *实验流体力学*, 2005, 19(1): 52-55.
- YI Can, LI Gen-sheng, ZHANG Ding-guo. Experimental study on cavitation inception of nozzles with different geometries[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2005, 19(1): 52-55.
- [12] 李根生, 沈忠厚. 风琴管自振空化喷嘴设计原理[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1992, 16(5): 35-39.
- LI Gen-sheng, SHEN Zhong-hou. Design of principle of organ-pipe cavitating jet nozzles[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1992, 16(5): 35-39.
- [13] 严焱培, 吴小薇, 李正开, 等. 用超声波提高油气渗流速度的研究[J]. *石油大学学报: 自然科学版*, 1989, 13(6): 72-78.
- YAN Chi-pei, WU Xiao-wei, LI Zheng-kai, et al. Experimental study on increasing flow rate in porous media by using ultrasonic wave[J]. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)*, 1989, 13(6): 72-78.
- (编辑 李志芬)