

文章编号:1000-582X(2011)04-088-07

数字岩心孔隙结构的分形表征及渗透率预测

赵 明¹, 郁伯铭²

(1. 长江大学 物理科学与技术学院, 湖北 荆州 434023;

2. 华中科技大学 物理学院, 湖北 武汉, 430074)

摘 要:基于多孔介质孔隙结构的分形理论,对 9 种数字岩心样品的孔隙相和固体相结构进行了分形表征。计算结果表明固体相的分形维数通常要大于孔隙相的分形维数,其分形标度区间的宽度要小于孔隙相的标度区间宽度。这表明数字岩心是一种近似两相分形多孔介质。在此基础上,对 9 种数字岩心样品的孔隙度、体积分数和渗透率进行了预测。预测结果表明数字岩心孔隙结构的分形理论在描述介质的孔隙度和渗透率方面是有效的。而且在近似两相分形介质中,对固相的分形描述似乎更加有效。当用分形理论对数字岩心样品的渗透率进行预测时,其准确地确定最大孔隙尺寸至关重要。最后,通过对比发现,在预测渗透率方面,采用的 FT 方法要比目前国际上通用的 PNEM 方法更加准确,也更加具有普适性和计算成本更低。

关键词:数字岩心;分形表征;孔隙结构;渗透率;最大孔隙尺寸

中图分类号:O357.3

文献标志码:A

The fractal characterization of pore structure for some numerical rocks and prediction of permeabilities

ZHAO Ming¹, YU Bo-ming²

(1. School of Physics Science and Technology, Yangtze University, Jingzhou 434023, Hubei, P. R. China;

2. School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, P. R. China)

Abstract: This paper uses the fractal theory of pore structures for porous media to study the fractal characterization of pore structure for nine numerical rocks. The results show that the fractal dimension of solid phase is usually greater than the pore fractal dimension, and its fractal scaling regions is less than the one of pore phase. This indicates that the numerical rock is an approximate two-phase fractal porous media. The porosities, volume fractions and permeabilities of nine numerical rocks are predicted. The results show that the fractal theory about pore structures of numerical rocks is effective in describing the porosity and permeability. Moreover, it seems to be more effective for solid phase in approximate two-phase fractal porous media. When predicting permeability using the fractal theory, it is very important to accurately determine the maximum pore size and the range of statistical self-similarity. By comparing the two kinds of predicted permeabilities, it is found that the FT method used by this paper is more accurate, more general and less computational cost than the PNEM method which has been worldwide used.

Key words: numerical rock; fractal characterization; pore structure; permeability; maximum pore size

收稿日期:2010-12-11

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(10932010)

作者简介:赵明(1963-),男,长江大学副教授,主要从事多孔介质渗流物理、计算流体力学以及分形理论方向的研究,
(Tel)0716-8067614; (E-mail)zhaoming@yangtzeu.edu.cn.

在石油工业、土壤科学、人工复合材料制造业以及环境工程等领域,精确地确定多孔介质的宏观输运性质是至关重要的。然而诸如孔隙度、渗透率、饱和度等多孔介质的宏观输运性质是与介质的微观孔隙结构是密切相关的,因此长期以来人们寻求各种方法以准确地确定多孔介质的微观孔隙结构^[1]。对于地下的岩心资料,目前人们主要采用两类方法来获取岩心孔隙结构的三维数据。第一类是采用物理实验的方法,包括光学显微镜(或电镜)切片组合法^[2]、聚焦离子光束法^[3]、X射线 Micro-CT 扫描成像法^[4-5]等;第二类即所谓数值重构方法,包括高斯场模拟算法^[6]、模拟退火算法^[7]、过程模拟方法^[8]以及多点统计方法^[9-10]等。将通过上述方法所得到的三维岩心数据称为数字岩心(numerical rock),它们真实地反映了地下岩心孔隙的形状、大小和拓扑结构等。因此数字岩心对于在微观尺度上(微米量级)研究岩心中的流体输运性质是必不可少的。

由于数字岩心具有高度复杂的孔隙结构,各孔隙的形状、大小和位置等是随机分布的,各孔隙之间还形成曲折的毛细通道,因此其中流体的压力场以及速度场等也是随机分布的,这给研究岩心中孔隙尺度的细观流动带来了不小的困难。近年来,随着计算机科学和计算技术的飞速发展,采用数值模拟的方法研究多孔介质中的细观流动受到了广泛地关注,其中格子波尔兹曼方法^[11-13](LBM)和网络模型方法^[14-16](PNEM)最具有代表性。但是,LBM 以及其它数值模拟方法所得到结果一般都是针对特定对象的经验曲线和经验公式,不具有普遍性,这些经验公式背后的物理机理也往往是不清楚的。因此,寻找具有普遍意义的多孔介质中流体细观流动的解析解,就成为了摆在人们面前的重大课题。

笔者采用多孔介质的孔隙结构及其输运性质的分形理论,对若干数字岩心的孔隙结构进行了分形表征,通过确定孔隙相和固相的尺寸分维、最大孔隙尺寸和最小孔隙尺寸、最大固相尺寸和最小固相尺寸以及孔隙相的迂曲度分维等,对若干数字岩心的孔隙度和绝对渗透率进行了预测。

1 数字岩心孔隙结构表征的基本分形理论

1.1 孔隙相和固相分数维和标度区间

研究表明数字岩心孔隙结构是分形的,其自相似区间为 $(\lambda_{\min} - \lambda_{\max})$, λ_{\min} , λ_{\max} 分别为孔隙尺寸自相似区间的上、下限,即最小孔隙尺寸和最大孔隙尺寸。

数字岩心的孔隙度 ϕ_p 和孔隙尺寸分维 D_f 以及最大孔隙尺寸 λ_{\max} 和最小孔隙尺寸 λ_{\min} 的关系为^[17]

$$\phi_p = \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{D_e - D_f}, \quad (1)$$

式中 D_e 为欧氏维数。对于二维和三维空间,分别为 $D_e=2$ 和 $D_e=3$ 。

虽然数学上严格的两相分形并不存在,但在统计意义上,在一定近似程度上可以将数字岩心视为一种两相分形介质,因此固相的体积分数 ϕ_s 也可表为^[1]

$$\phi_s = \left(\frac{\lambda_{\min,s}}{\lambda_{\max,s}} \right)^{D_e - D_s}, \quad (2)$$

式中 D_s 为固相的尺寸分维, $\lambda_{\min,s}$ 和 $\lambda_{\max,s}$ 分别为固相颗粒的最小和最大尺寸

显然,应该有如下近似关系

$$\phi_p + \phi_s = 1. \quad (3)$$

1.2 弯曲毛细管的迂曲度分维

数字岩心中大量孔隙之间存在相互连通的通道,形成具有各个不同截面的弯曲毛细管束。因此流体在其中经过的是一系列弯曲路径。设数字岩心样品代表性尺寸为 L ,可得平均迂曲度为^[18]

$$\bar{\tau} = \frac{D_f}{D_f + D_t - 1} \left(\frac{L}{\lambda_{\min}} \right)^{D_t - 1}. \quad (4)$$

平均迂曲度 $\bar{\tau}$ 还可以通过实验方法测得,或者是通过某些几何模型解析地得到。Yun等^[19]通过三维立方颗粒模型得到的多孔介质中毛细管束平均迂曲度为

$$\bar{\tau} = 1 - \frac{\phi}{2} + \frac{\sqrt{1-\phi}}{4} + \frac{(\phi+1 + \sqrt{1-\phi}) \cdot \sqrt{9-5\phi-8\sqrt{1-\phi}}}{8\phi}, \quad (5)$$

联立求解式(1)、(4)和(5),通过确定孔隙尺寸分维 D_f 、最小孔隙尺寸 λ_{\min} 和最大孔隙尺寸 λ_{\max} ,能确定迂曲度维数 D_t 。

1.3 数字岩心渗透率的分形理论

通常,数字岩心中存在着两种类型的孔隙空间,一种具有较大截面尺寸和较大的空间体积,称为孔,另外一种连接各个孔之间的狭窄通道,它们具有较小截面尺寸,称之为喉。显然,相比喉道而言,孔对流体阻力要小得多,可以将其忽略不计。因此可以将数字岩心中的孔隙视为由大量喉道所组成的一束毛细管束,这些毛细管束的直径 λ 服从分形分布规律。根据单根毛细管中的 Poiseuille 流动,其流量由 Hagen-Poiseuille 方程^[20]给出。然后根据基本

分形理论得到渗透率解析表达式^[21]

$$K = \frac{\pi}{128} \frac{L^{1-D_t}}{A} \frac{D_f}{3+D_t-D_f} \lambda_{\max}^{3+D_t} \left[1 - \left(\frac{\lambda_{\min}}{\lambda_{\max}} \right)^{3+D_t-D_f} \right], \quad (6)$$

由于 $\lambda_{\min} \ll \lambda_{\max}$ 同时 $3+D_t-D_f \geq 1$, 因此式(6)可以简化为

$$K = \frac{\pi}{128} \frac{L^{1-D_t}}{A} \frac{D_f}{3+D_t-D_f} \lambda_{\max}^{3+D_t}. \quad (7)$$

对于数字岩心的立方体样品, $A=L^2$, 其中 L 为立方体边长。式(7)可以进一步简化为

$$K = \frac{\pi}{128} \frac{(\lambda_{\max})^{1+D_t}}{L} \frac{D_f}{3+D_t-D_f} \lambda_{\max}^2. \quad (8)$$

式(8)表明, 数字岩心的渗透率由孔隙尺寸分维 D_f 、迂曲度分维 D_t 以及岩心的结构参数 A , L 和 λ_{\max} 共同决定。式(8)还表明, 由于渗透率和最大孔隙尺寸 λ_{\max} 的 4 次方成正比, 因此最大孔隙尺寸对渗透率的影响是十分明显的。

2 数字岩心样品及岩心的三维图像重构

采用了 9 个不同的数字岩心样品(见表 1), 这些样品包括贝雷砂岩、一种碳酸盐岩、另外 5 种砂岩以及合成硅岩和沙堆模型。这些岩心样品的三维数据是通过位于伦敦的帝国理工学院材料系的桌面微 CT 扫描成像系统采集而来, 该系统能够获取分辨率在 $3 \sim 12 \mu\text{m}$ 的岩心样品三维图像。数字岩心的基本参数和实验数据如表 1 所示, 其中包括图像分辨率, 图像的边像素值, 样品尺寸, 样品的实际孔隙度以及平均渗透率。

表 1 9 种数字岩心样品基本参数和实验数据

代码	样品名称	分辨率 / μm	像素数	尺寸 / μm	孔隙度	渗透率 /mD
B1	Berea Sandstone B1	5.345	400	2 138.0	0.196	1 286.0
C1	Carbonate C1	2.850	400	1 140.0	0.233	1 102.0
S1	Sandstone S1	4.956	300	1 486.8	0.246	3 898.0
S2	Sandstone S2	3.997	300	1 199.1	0.211	4 651.0
S3	Sandstone S3	5.100	300	1 530.0	0.240	10 974.0
S4	Sandstone S4	4.803	300	1 440.9	0.250	6 966.0
S5	Sandstone S5	3.398	300	1 019.4	0.222	2 224.0
SP1	Sand Pack SP1	10.002	300	3 000.6	0.331	50 400.0
SS1	Synthetic Silica SS1	3.850	300	1 155.0	0.429	7 220.0

对于只存在孔隙相和固相的数字岩心, 其相函数定义为

$$Z(\bar{r}) = \begin{cases} 1, & (\bar{r} \in \text{pore}); \\ 0, & (\bar{r} \in \text{solid}). \end{cases} \quad (9)$$

借此重构了 9 种数字岩心样品的三维立体图像。图 1 为贝雷砂岩(berea sandstone)数字岩心的三维图像, 其中无色透明的部分代表孔隙, 有颜色的部分代表固体骨架, 而不同的颜色代表沿 Z 轴的不同高度。

图 2 表示贝雷砂岩三维图像在垂直于 Z 轴方向进行二维截图所得到二值图像, 其中白色像素代表孔隙相, 而黑色像素则代表固体相。

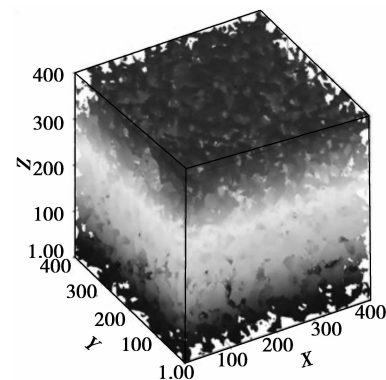


图 1 贝雷砂岩的三维图像重构
(像素分辨率 $5.34 \mu\text{m}$, 样品尺寸 2.138 mm)

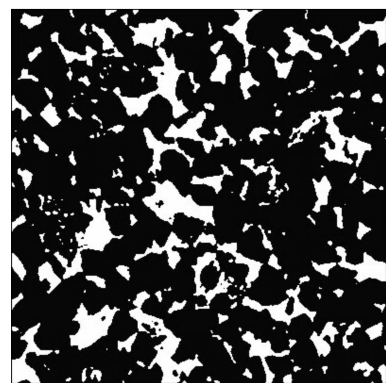


图 2 贝雷砂岩样品的二维截面
(像素分辨率 $5.34 \mu\text{m}$, 样品尺寸 2.138 mm)

3 数字岩心孔隙相和固体相结构的分形表征

对数字岩心的孔隙相和固体相结构进行分形表征, 就是要确定孔隙相和固体相的豪斯道夫维数 D_f 、 D_s 、与自相似区间相应的最大孔隙尺寸和最小孔隙尺寸 λ_{\max} 、 λ_{\min} 、最大固体颗粒尺寸和最小固体颗

粒尺寸 $\lambda_{\max,s}$ 、 $\lambda_{\min,s}$ 以及迂曲度维数 D_i 等,以便于采用上述第二节中关于孔隙结构的分形理论对数字岩心的孔隙度和渗透率进行描述和定量预测。

3.1 确定孔隙相和固相的豪斯道夫维数和自相似区间

采用计盒方法研究数字岩心样品的豪斯道夫维数和自相似区间。计盒法是基于三维图像像素分析技术的一种方法。将一个三维图像用尺寸为 r 的立方体盒子填满,数出被图像像素所占据的盒子数目 $N(r)$,当改变盒子尺寸时,如果图像是分形的,则满足如下的分形标度规律

$$N(r) \propto r^{-D_f}, \quad (10)$$

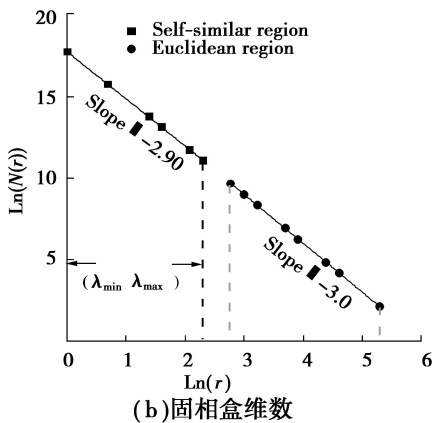
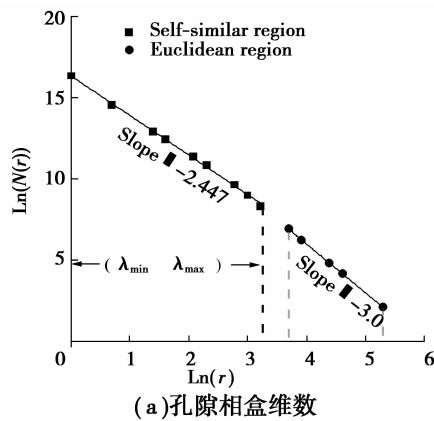


图 3 贝雷砂岩盒维数计算的 $N(r) \sim r$ 双对数图

则豪斯道夫维数 D_f 就可以通过双对数图 $N(r) \sim r$ 中的拟合直线斜率值得到。

图 3(a)为贝雷砂岩的孔隙相的 $N(r) \sim r$ 双对数图。对图中数据进行线性拟合的结果表明,在图中存在着 2 个区域,其中 1 个区域中的数据用红色点表示,这一部分数据的拟合直线斜率为 -3.0 ,表明该区域是非分形的,没有统计自相似的性质;另外 1 个区域中的数据用黑色点表示,这一部分数据的拟合直线斜率为 -2.45 ,这表明在该区域贝雷砂岩

的孔隙结构是分形的,其分形维数为 $D_f = 2.45$,而与自相似区间对应的最小和最大孔隙尺寸分别为 $\lambda_{\min} = 5.35 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_{\max} = 134.0 \mu\text{m}$ 。采用同样方法,得到了贝雷砂岩的固相分形维数为 $D_s = 2.90$,以及相应的最小和最大固体颗粒尺寸 $\lambda_{\min} = 5.35 \mu\text{m}$ 和 $\lambda_{\max} = 53.5 \mu\text{m}$ (如图 3(b)所示)。

采用上述方法,计算了 9 种数字岩心样品的孔隙相和固体相分形维数和相应的自相似区间(如表 2 所示)。对于孔隙相,其分形维数 D_f 从 2.45 (B1) 到 2.68 (SS1)。对比表 1 和表 2,发现孔隙分维越大的数字岩心样品,其孔隙度也就越大。这是因为更大的孔隙分维意味着孔隙相占据着更大的空间,这一点和式(7)也是一致的。最小孔隙尺寸(相当于一个像素的大小)从 $2.850 \mu\text{m}$ (C1)到 $10.002 \mu\text{m}$ (SP1),而最大孔隙尺寸从 $96.900 \mu\text{m}$ (C1)到 $330.066 \mu\text{m}$ (SP1)。对于 9 种数字岩心样品的固体相,其分形维数为从 2.78(SS1)到 2.92(S5),而最大固体颗粒尺寸为从 $53.5 \mu\text{m}$ (C1)到 $153.0 \mu\text{m}$ (S3)。

表 2 9 种数字岩心样品孔隙相和固体相分形维数和自相似区间

序代 号码	样品名称	λ_{\min} / μm	λ_{\max} / μm	D_f	$\lambda_{\min,s}$ / μm	$\lambda_{\max,s}$ / μm	D_s
Berea							
1	B1 Sandstone	5.345	125.608	2.45	5.345	53.450	2.90
Carbonate							
2	C1 Carbonate	2.850	96.900	2.60	2.850	71.250	2.91
Sandstone							
3	S1 Sandstone	4.956	133.812	2.54	4.956	59.472	2.88
4	S2 Sandstone	3.997	123.907	2.53	3.997	79.940	2.91
5	S3 Sandstone	5.100	173.400	2.60	5.100	153.000	2.91
6	S4 Sandstone	4.803	148.893	2.59	4.803	96.060	2.90
7	S5 Sandstone	3.398	98.542	2.51	3.398	101.940	2.92
Sand Pack							
8	SP1 Sand Pack	10.002	330.066	2.64	10.002	150.030	2.84
Synthetic							
9	SS1 Silica	3.850	77.000	2.68	3.850	57.750	2.78

表 2 中的结果还显示,数字岩心中的固体相分形维数一般要高于孔隙相的分形维数,这是因为上述 9 种数字岩心的固相比孔隙相占有更高的体积分数的缘故。如果孔隙相的孔隙度和固体相的体积分分数越接近(例如样品 SS1),则孔隙相和固体相的分形维数也会更加接近,这也证明了数字岩心可以看

作是统计意义上的近似两相分形体。然而,两相分形各自的标度区间是各不相同的,在最小孔隙/固体颗粒尺寸都为一个像素大小的情况下,最大孔隙尺寸通常要大于最大固体颗粒尺寸(样品 S5 例外),这意味着孔隙相通常具有更大的自相似范围。

3.2 确定迂曲度维数

多孔介质中流体路径的迂曲度通常采用实验方法^[22]或者是数值模拟方法^[23]确定。最近基于各种几何模型的迂曲度解析解也受到了广泛关注。文中确定数字岩心迂曲度维数的方法如下:首先按确定的样品孔隙尺寸分维 D_f 以及最小和最大孔隙尺寸 λ_{\min} 、 λ_{\max} 由式(1)得到样品的孔隙度 ϕ ,再由式(5)得到平均迂曲度 $\bar{\tau}$,最后将平均迂曲度 $\bar{\tau}$ 代入(4)式并进行数值求解,得到迂曲度分维 D_t 。

表3为9种数字岩心样品的平均迂曲度和迂曲度维数的计算结果。其平均迂曲度从1.550(SS1)到2.351(B1),以及迂曲度维数从1.082(SS1)到1.152(B1和S2)。更大的平均迂曲度意味着更加曲折的流体通道,同时也意味着更大的迂曲度维数,这一点也通过表3中的数据得到证明。

表3 9种数字岩心样品的平均迂曲度和迂曲度维数

代码	B1	C1	S1	S2	S3	S4	S5	SP1	SS1
$\bar{\tau}$	2.351	2.133	2.069	2.252	2.104	2.056	2.188	1.771	1.550
D_t	1.152	1.135	1.137	1.152	1.139	1.135	1.147	1.104	1.082

4 预测数字岩心的孔隙度和渗透率

4.1 预测数字岩心的孔隙度和固相的体积分数

基于数字岩心的分形表征理论,确定的样品分形参数 D_f 、 D_s 、 λ_{\min} 、 λ_{\max} 、 $\lambda_{\min,s}$ 以及 $\lambda_{\max,s}$,按照式(1)、(2)可以预测数字岩心样品的孔隙度 ϕ_p 和固相的体积分数 ϕ_s 。表4为9种数字岩心样品孔隙度和固相体积分数的实际值、预测值以及预测的相对误差。结果表明,对于所有的岩心样品,式(1)、(2)都能对孔隙度和体积分数做出较好的预测。其孔隙度预测值的相对误差 $\Delta\phi_p/\phi_p$ 为从1.8%(S3样品)到14.1%(SP1样品),而固相体积分数的预测值相对误差 $\Delta\phi_s/\phi_s$ 为从1.1%(B1和S4样品)到3.4%(SS1样品)。而且,孔隙度和体积分数两者之和很接近于1。表4中结果还表明与孔隙相相比,对固相体积分数的预测更加符合实际,其相对误差更小,这说明在数字岩心的两相近似分形中,其固相相是更加接近分形的,对固相结构采用分形描述似乎更加有效。

表4 9种数字岩心样品孔隙度 ϕ_p 和体积分数 ϕ_s 的预测结果

代码	ϕ_p	ϕ_p 预测值	E. R. /%	ϕ_s	ϕ_s 预测值	E. R. /%	ϕ_p + ϕ_s
B1	0.196	0.171	13.1	0.804	0.794	1.1	0.965
C1	0.233	0.244	-4.9	0.767	0.748	2.5	0.992
S1	0.246	0.220	10.8	0.754	0.742	1.5	0.962
S2	0.211	0.199	5.8	0.789	0.764	3.2	0.963
S3	0.240	0.244	-1.8	0.760	0.736	3.2	0.980
S4	0.250	0.245	2.3	0.750	0.741	1.1	0.986
S5	0.222	0.192	13.4	0.778	0.762	2.1	0.954
SP1	0.331	0.284	14.1	0.669	0.648	3.1	0.932
SS1	0.429	0.383	10.6	0.571	0.552	3.4	0.935

4.2 预测数字岩心的渗透率

岩心渗透率是描述岩心宏观渗流性质的一个重要参数。虽然测定岩心渗透率的各种实验或者是数值模拟方法有很多,但这些方法都是针对特定岩心样品进行的,其结果一般也不适用于其它类型的岩心,这主要是因为不同的岩心样品具有不同类型的细观孔隙结构所致。因此研究细观孔隙结构对渗透率的影响,从而解析地对各种岩心样品渗透率进行准确预测,仍然是一个很重要的科学问题。基于数值岩心孔隙结构的分形理论,通过确定的孔隙尺寸分维 D_f 、最大孔隙尺寸 λ_{\max} 和迂曲度维数 D_t 按照式(8)对9种数字岩心样品的渗透率进行了预测,结果如表5所示,其中第三列为数字岩心样品在 x, y, z 3个方向实际渗透率的平均值;第四列为采用上述分形理论对岩心样品渗透率的预测值;第五列为预测值的相对误差。

表5 9种数字岩心样品渗透率预测结果

代码	样品名称	渗透率 /mD	预测值 /mD	E. R. /%
B1	Berea Sandstone B1	1 286.0	1 211.69	-5.8
C1	Carbonate C1	1 102.0	1 985.35	80.2
S1	Sandstone S1	3 898.0	3 995.85	2.5
S2	Sandstone S2	4 651.0	4 355.27	-6.4
S3	Sandstone S3	10 974.0	11 600.28	5.7
S4	Sandstone S4	6 966.0	7 036.98	1.0
S5	Sandstone S5	2 224.0	2 373.31	6.7
SP1	Sand Pack SP1	50 400.0	45 508.25	-9.7
SS1	Synthetic Silica SS1	7 220.0	970.64	-86.6

预测结果表明式(8)能够较好地预测所有砂岩样品(包括贝雷砂岩 B1 和人工合成砂岩 SP1)的渗

透率,其预测值相对误差为从1.0%(S4样品)到9.7%(SP1样品)。而碳酸盐岩(C1)和合成硅岩(SS1)样品的渗透率预测值出现了较大误差。这是因为按照式(7)或者式(8),渗透率与最大孔隙尺寸 λ_{\max} 的4次方成正比,因此准确地确定最大孔隙尺寸对于精确预测岩心样品的渗透率至关重要。最大孔隙尺寸是通过计盒法来确定的,由于盒子尺寸取值的非连续性,因此在确定碳酸盐岩和合成硅岩样品的最大孔隙尺寸时存在较大的偏差,导致其渗透率预测也出现了较大偏差。

为了研究采用分形理论预测数字岩心渗透率方法的准确性和有效性,对比了8个样品渗透率的分形理论(FT)预测值和孔隙网络模拟(PNEM)预测值,其中PNEM预测数据来源于英国帝国理工大学Martin Blunt课题组的研究结果^[24]。两种方法的预测结果对比如表6所示。可以看出,FT预测除了少数2个(C1,SS1)样品外,其它样品的渗透率预测值相对误差(E. R.)均在10%以内;而PNEM方法的预测除了少数2个(S1,S3)样品外,其它样品渗透率预测相对误差(E. R.)均在10%以上。可见,在预测渗透率方面,FT方法要比目前国际上通用的PNEM方法更加准确。此外,FT方法还具有普适性(适用于所有具有分形孔隙结构的岩心及其它多孔介质)以及计算量较小等优越性。可以预见,分形理论和方法在多孔介质微观渗流研究领域将会有越来越广泛而深入的应用。

表6 渗透率预测2种方法的结果比较

代码	渗透率 /mD	FT 预测	E. R. /%	PNEM 预测	E. R. (%)
B1	1 286.0	1 211.69	-5.8	1111	-13.6
C1	1 102.0	1 985.35	80.2	556	-49.5
S1	3 898.0	3 995.85	2.5	3 950	1.3
S2	4 651.0	4 355.27	-6.4	5 369	15.4
S3	10 974.0	11 600.28	5.7	11 282	2.8
S4	6 966.0	7 036.98	1.0	7 926	13.8
S5	2 224.0	2 373.31	6.7	3 640	63.7
SS1	7 220.0	970.64	-86.6	8 076	11.9

5 结 论

基于数字岩心的分形理论,对数字岩心的孔隙相和固体相结构进行了分形表征,得到了9种数字岩心样品孔隙相和固体相的豪斯道夫维数 D_f 、 D_s ,与自相似区间相对应的最大孔隙尺寸和最小孔隙尺

寸 λ_{\max} 、 λ_{\min} ,最大固体颗粒尺寸和最小固体颗粒尺寸 $\lambda_{\max,s}$ 、 $\lambda_{\min,s}$,以及迂曲度维数 D_t 。计算结果表明不论孔隙相和固体相都具有统计自相似特征的分形标度区间和相应的分形维数,而固体相的分形维数通常要大于孔隙相得分形维数,其分形标度区间的宽度要小于孔隙相的标度区间宽度。这说明数字岩心是一种近似两相分形多孔介质。与此同时,采用数字岩心孔隙度和体积分数的解析表达式(1)、(2)以及渗透率的解析表达式(8),对9种数字岩心样品的孔隙度、体积分数和渗透率进行了预测。与实际值比较,其孔隙度预测值的相对误差为1.8%~14.1%,其体积分数预测值的相对误差为1.1%~3.4%,而对砂岩的渗透率预测值误差范围在1.0%~9.7%。这说明数字岩心孔隙结构的分形理论在描述介质的孔隙度和渗透率方面是有效的。而且在近似两相分形介质中,对固相的分形描述似乎更加有效,这一点从固相体积分数预测值和实际值更加接近上可以看出。当用分形理论对数字岩心样品的渗透率进行预测时,其准确地确定最大孔隙尺寸至关重要,因此寻找更加准确确定最大孔隙尺寸的方法,也就成了精确预测样品渗透率的必要条件。

把分形理论应用于岩心孔隙结构的表征以及渗流参数的描述和预测方面进行了初步的尝试。进一步的深入研究可考虑在如下几个方面进行:在孔隙结构方面1)寻找更加准确确定分形参数如豪斯道夫维数、最大和最小孔隙尺寸的方法;2)孔隙粗糙表面及其形状因子的分形表征;3)基于喉道迂曲度算法的孔隙网络分形模型。在渗流性质方面1)两相流的分形描述;2)饱和度及相对渗透率的分形预测方法;3)湿润性及毛细力的分形描述等。

参考文献:

- [1] YU B M. Analysis of flow in fractal porous media[J]. Appl Mech Rev, 2008,61(4):50-80.
- [2] TOMUTSA L, SILIN D, RADMILOVIC V. Analysis of chalk petrophysical properties by means of submicron-scale pore imaging and modeling[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2007, 10: 285-293.
- [3] FREDRICH J T, MENENDEZ B, WONG T F. Imaging the pore structure of geomaterials[J]. Science, 1995,68: 276-279.
- [4] ARNS C H, BAUGET F, LIMAYE A. Pore-scale characterization of carbonates using X-ray microtomography[J]. SPE Journal, 2005, 10(4): 475-484.

- [5] ADLER P M, JACQUIN C G, QUIBLIER J A. Flow in simulated porous media[J]. *Int J. Multiphase Flow*, 1996, 16(4): 169-712.
- [6] ADLER P M, JACQUIN C G, THOVERT J F. The formation factor of reconstructed porous-media [J]. *Water Resources Research*, 1992, 28: 1571-1576.
- [7] HAZLETT R D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow [J]. *Mathematical Geology*, 1997, 29 (4): 801-822.
- [8] BRYANT S, BLUNT M. Prediction of relative permeability in simple porous media [J]. *Physical Review A*, 1992, 46(4): 2004-2012.
- [9] OKABE H, BLUNT M J. Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-Point statistics[J]. *Physical Review E*, 2004, 70: 1-10.
- [10] WU K, DIJKE M I J V, 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.
- [11] XU Y S, LIU Y, HUANG G X. Using digital imaging to characterize threshold dynamic parameters in porous media based on lattice boltzmann method[J]. *China Phys. Lett.*, 2004, 21: 2454-2457.
- [12] MANWART C, ALTOSALMI U, KOPONEN A, et al. Lattice-boltzmann and finite-difference simulations for the permeability for three dimensional porous media [J]. *Physical Review E*, 2002, 66: 1103.
- [13] LIU C F, NI Y S. The fractal roughness effect of micro Poiseuille flows using the lattice Boltzmann method[J]. *International Journal of Engineering Science*, 2009, 47: 660-668.
- [14] LINDQUIST W B, LEE S M, COKER D, et al. Medial axis analysis of void structure in three-dimensional tomographic images of porous media[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B): 8297.
- [15] SILIN D, PATZEK T. Pore space morphology analysis using maximal inscribed spheres[J]. *Physica A*, 2006, 371: 336-360.
- [16] AL-KHARUSI A S, BLUNT M J. Network extraction from sandstone and carbonate pore space images[J]. *J Pet Science Engineering*, 2007, 56: 219-231.
- [17] YU B M, LI J H. Some fractal characters of porous media[J]. *Fractals*, 2001, 9: 365-372.
- [18] YU B M, CHENG P. A fractal model for permeability of Bi-Dispersed porous media [J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2002, 45: 2983-2993
- [19] YUN M J, YU B M, XU P, et al. Geometrical models for tortuosity of streamlines in three dimensional porous media[J]. *Can J. Chem. Eng.*, 2006, 84: 301-309.
- [20] DENN M M. *Process fluid mechanics* [M]. NJ: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1980.
- [21] YU B M, LEE L J, CAO H Q, et al. A fractal in-plane permeability model for fabrics [J]. *Polym. Compos*, 2002, 23: 201-221.
- [22] WYLLIE M R J, GREGORY A R. Fluid flow through unconsolidated porous aggregates [J]. *Ind. Eng. Chem.*, 47, 1955: 1379-1388.
- [23] KOPONEN A, KATAJA M, TIMONEN J. Tortuous flow in porous media[J]. *Phys. Rev. E*, 1996, 54: 406-410.
- [24] DONG H, BLUNT M. Pore-network extraction from micro-computerized-tomography images[J]. *Phys. Rev. E*, 2009, 80: 36-307.

(编辑 侯 湘)