

煤岩结构多尺度各向异性特征的 SEM 图像分析

宫伟力^{1,2}, 李 晨^{1,2}

(1. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国矿业大学 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 多孔介质微、细观结构的非透明一直是阻碍深入认识深部条件下岩体损伤及煤与瓦斯突出机制的难题。为此, 基于小波多分辨分析, 提出一种复杂孔隙介质微、细观结构的可视化及多尺度、各向异性的精细描述方法。为验证方法的可行性, 对不同地区的 6 种煤岩试样进行扫描电镜观测; 应用小波多尺度变换、图像分割、以及图像重建技术对煤样的 SEM 图像进行“亚像素”尺度分析; 利用小波细节系数重建煤基质的水平、垂直、对角占优的微观孔隙图像; 计算微孔的孔喉、孔穴随特征尺度的分布密度, 以及微孔与节理的孔隙度与分形维数。用小波多分辨分析方法分割的宏观孔隙具有微米量级, 微孔具有纳米尺度。各煤样的宏观裂隙的孔隙度与分维数均大于微观孔隙; 孔喉特征尺度分布均具有相似的单峰形式, 峰值点决定流体运移的阻力; 孔穴的特征尺度分布呈现出单峰、或多峰形态, 代表流体的储存能力。研究成果为深入认识复杂孔隙结构对岩体非线性力学行为的影响, 提供几何边界、结构参数基于显微图像分析的可行方法。

关键词: 采矿工程; 深部开采; 煤岩结构; 小波; 多尺度; 基质微孔

中图分类号: TD 713

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)增 1 - 2681 - 09

MULTI-SCALE AND ANISOTROPIC CHARACTERIZATION OF COAL STRUCTURE BASED ON SEM IMAGE ANALYSIS

GONG Weili^{1,2}, LI Chen^{1,2}

(1. *State Key Laboratory for Deep Geomechanics and Underground Engineering, Beijing 100083, China;*

2. *School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China*)

Abstract: Non-transparency of microstructures for the porous media has long been the obstacle for a deep understanding of the mechanisms of rock damage and coal and rock outbursts at depth. As an attempt, a methodology based on wavelet multi-resolution analysis(MRA) for visualization and multiscale-anisotropic-detailed characterization of pore space for complex porous media at meso- and microscopic scales is proposed. In order to validate the proposed approach, observations are made on the six groups of coal rock specimens by using scanning electron microscope(SEM), sampled from six different underground mining districts; the integrated image processing schemes are conducted for the so called “sub-pixel” scale analysis of the resulting SEM images, including multi-scale wavelet transform, image segmentation and reconstruction. The detail sub-bands coefficients of the wavelet transform are used to reconstruct images of the horizontal, vertical and diagonal dominant micropores of the microporous matrix. In addition, the probability density distribution of the characteristic length for the pore throat and cavity, the porosity and fractal dimensions for the pores at multiple scales are calculated. The segmented macro-fractures by the MRA are at micron scale while the micro-pores are at nano-scale. The macro-fractures of all the specimens have much larger fractal dimension value than that of the micro-pores. The profiles of the pore throat distribution for all the specimens take on the shape of single peak, and the peak value is the measure of the drag forces for the fluid transport, whereas the curves of the pore cavity take on the shapes of single or multiple

收稿日期: 2009 - 11 - 01; **修回日期:** 2009 - 12 - 11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB202200); 教育部创新团队发展计划(IRT0656)

作者简介: 宫伟力(1955 -), 男, 1982 年毕业于辽宁科技大学流体传动与控制专业, 现任副教授, 从事流体力学、岩石力学等方面的教学与研究工作。E-mail: gwl@cumt.edu.cn

peaks, and the maximal peak value represents the storage capacity for the fluids. The obtained results validate the applicability of the microscopic image based approach for characterization of the geometrical boundary and structural features of fractured rocks, which will certainly contribute to a deep understanding of the influences of the complex pore structures on the nonlinear behaviour of the rock masses at depth.

Key words: mining engineering; deep mining; coal structure; wavelet; multiple scale; microporous matrix

1 引言

在深部岩体的高地应力、高地温条件下,瓦斯运移对岩体的力学行为有着重要影响^[1],在采矿的扰动下,由于煤裂隙中甲烷的解吸与扩散,能量释放与动应力非常高,从而,在深部具有高浓度甲烷的地方,即甲烷气体解吸使气体压力达到 3.5~8.2 MPa 的范围内,当煤层处于临界或亚临界平衡状态,受到扰动即可引发煤与瓦斯突出或岩爆^[2]。煤与瓦斯突出研究的首要问题是研究创造有利于瓦斯解吸与突出的条件。关于突出条件,是属于地下采煤的区域或工作面突出预测的内容,而瓦斯解吸及运移机制,是属于微、细观力学的研究范畴。长期以来,对瓦斯解吸与运移机制认识的主要困难是多孔介质微、细观结构的非透明性问题。

煤岩中的孔隙是一个多尺度的复杂系统,可以看作是双模式分布^[3]:即其中包含了节理、层理面等缺陷,具有较大的尺度,以及被节理、层理所分割的煤基质微孔系统。研究表明,煤基质中微孔具有很非常大的比表面(可达 200 m²/g),占煤的总表面的 97.3%,微孔直径小于 10⁻⁶ cm,只有几个分子的数量级^[4, 5]。煤基质微孔系统是气体赋存的主要场所,在深部,90%~95%的煤层甲烷以吸附的状态赋存^[6, 7]。煤层中存在 2 种流动,即达西流动与菲克扩散。达西流发生宏观孔隙中,扩散发生于煤基质孔中,对应于吸附、溶解(以下统称吸附)等物理化学过程。气体的吸附与溶解可以引起煤基质的膨胀或收缩,引起煤基质的比表面和微孔隙体积改变,从而改变菲克扩散过程,同时也会改变节理及层理等裂纹的宽度,导致煤的渗透率的改变^[8, 9],因此,瓦斯解析机制研究的关键是煤基质微孔中吸附或解析构成的扩散运移问题,而煤基质中微孔结构的可视化,则是解决这一问题的必要条件。

煤岩的宏观裂隙与微观孔隙系统结构模型如图 1 所示^[10]:图中示出的宏观—微观孔隙结构中含有自由气体、吸附与吸着气体;宏观裂隙是自由气

体的流动通道,服从达西定律;具有微孔结构的煤

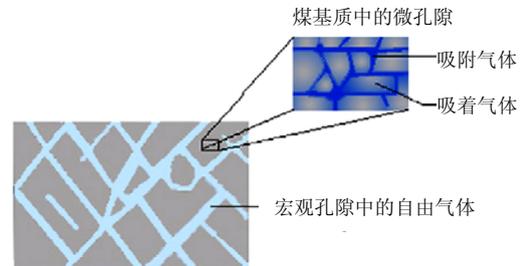


图 1 煤岩的二重离散孔隙结构模型原理图^[10]

Fig.1 Schematic diagram of bidisperse coal rock structure^[10]

基质是吸附气体与吸着(或称溶解)气体赋存的空间。对于这些纳米级孔隙,通过显微分析很难直接观察到其结构。由于对微孔隙结构的认识,如孔隙的尺寸,几何结构,孔喉和孔穴的连接拓扑等是研究瓦斯吸附和解吸机制,以及流体运移的微、细观模拟数值建模的基础^[11],因此在煤基质微孔结构的可视化基础上的精细描述,对岩体中流体运移及煤与瓦斯突出机制的认识具有重要意义。

现代微、细观成像技术的发展,为多孔介质结构的观测提供了试验手段。例如,利用扫描电镜(SEM)观测大理石试件在单轴压缩下表面裂纹扩展过程,描述岩石变形与破坏过程的分形演化方程^[12];研究在不同应力水平下裂隙网络的演化^[13],研究岩石的裂纹分叉,分形维数以及损伤演化^[14]等。运用图像处理技术对岩石的显微照片进行分析,计算孔隙结构的统计参数来描述岩石微结构的非均匀性特征^[15];通过对砂岩的 CT 图像进行分析,计算表达孔隙连通特征的配位数分布,建立孔隙的网络模型^[16];利用微分算子检测,提取煤岩孔隙的特征^[17]等。这类研究对于图像中裂纹特征的提取多以阈值或微分算子分割法为主,只能对大尺度的节理、裂隙进行清楚观测与描述。

岩石孔隙在一定分辨率下的显微成像中仅有较大尺度的裂纹与节理等可以直接观测,而较小的微孔则很难直接观测或不能清楚地观测。因此,必须利用一定的数学方法将图像中不同尺度的裂隙分

离, 对其中的微孔利用一定的数学方法进行尺度变换(相当于用倍数更大的显微镜观测), 以实现微孔的观测与描述。有着“数学显微镜”之称的小波变换, 为多孔介质图像的多尺度分析提供了有力工具。例如, 应用小波变换, 对非均匀介质中的流体运移进行模拟^[18-19]。利用小波多尺度分析, 对平面轮廓线的角隅进行多尺度检测^[20]; 对于均匀、各向同性的弹性孔隙骨架, 进行流体饱和多孔介质孔隙率的反演^[21]; 对一维双相介质的孔隙率进行反演^[22]; 反演多孔介质的均质系数^[23]; 对非均匀介质孔隙度的多尺度谱特征进行研究^[24]; 利用各向异性 Morlet 小波变换, 识别砂岩的层理的主倾角^[25]等。然而对于煤基质中的微孔网络, 上述基于小波变换的多尺度分析是以参数的反演、细节谱特征及小波系数表征孔隙的多尺度特征, 远未达到对微观孔隙可视化与精细描述的要求。

本文基于小波多分辨分析理论, 提出一种多孔介质微观结构可视化图像分析方法, 以实现煤基质微孔结构的快速、精细描述。为验证方法的可行性, 对来自不同地区的 6 种煤岩试样进行了扫描电镜观测, 利用本文提出的方法对这些煤岩样的 SEM 图像进行分析, 实现煤岩基质微孔可视化与精细描述。研究的目的是解决多孔介质微观结构的透明性问题, 为认识煤岩中瓦斯解吸机制提供流体运输的几何边界及结构分析基础。本文假定岩石介质在某一特定的图像分辨率下, 人眼可直接观测到的裂纹、层理、节理等具有较大尺度的缺陷, 均称之为“裂隙”或“节理”; 煤基质微孔与节理的尺度之间有量级的差别, 均称之为“微孔”; 而“孔隙”这一术语, 则是指节理(裂隙)与微孔的总称。煤基质的微孔在同一图像分辨率下通常无法清楚地观测, 要通过数学变换对图像进行所谓的“亚像素”分析, 这是本文核心任务。

2 煤岩样的 SEM 观测

针对潞安屯留矿、王庄矿、龙口北皂矿、沁水煤田成庄矿、大同矿以及龙口梁家矿(编号依次为 1#~6#), 在煤剖面上不少于 3 点进行定向采取煤岩样, 采样深度为 600~1 000 m, 取与原剖面平行的节理面小片制作了 6 组扫描电镜观测试样。煤样的微观形态分析在中国矿业大学(北京)煤炭资源与安

全开采国家重点实验室的 SEM 高温疲劳试验机上, 对各个煤样分别在 35, 100, 350, 500, 750, 1 000, 2 000, 3 500, 5 000, 7 500, 10 000 和 20 000 倍放大倍数下, 对煤的孔隙状态进行观察, 并拍摄扫描电镜图片。SEM 原图的大小为 495×660 像素, 在 7 500 放大倍数下, 一个像素点代表的物理尺寸为 0.028 6 μm。通过对煤样在不同 SEM 放大倍数试验观测后发现, 在 7 500 放大倍数下煤样 SEM 图像反映了煤样表面节理形态的同时, 有足够的放大倍数。因而取在 7 500 放大倍数下拍摄的 SEM 图像分析, 各煤样的 SEM 原图如图 2 所示。

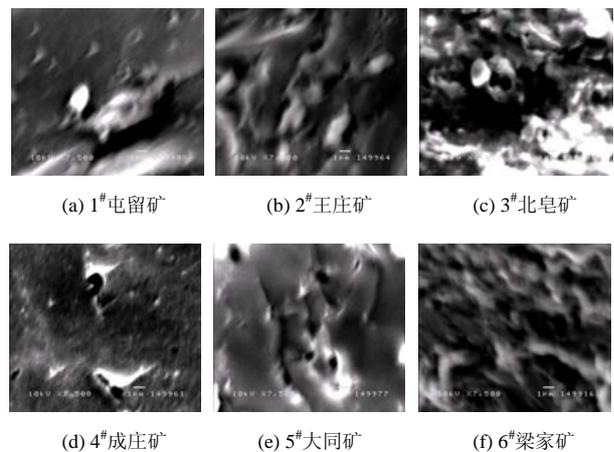


图 2 各煤样在 7 500 放大倍数下的 SEM 原图
Fig.2 Original SEM photos of samples at magnification of 7 500

3 图像的小波多尺度分析

小波变换在时间、空间两域都具有表征信号局部特征的能力, 可以对岩石的孔隙进行多尺度分析, 得到不同分辨率下的参数(即小波系数)或影像(重构的图像)细节。设二维尺度空间 V_j 可以分解为 2 个相同的一维矢量空间的张量积, 这时二维尺度函数可分解为 2 个相同的一维尺度函数的乘积: $\varphi(x, y) = \varphi(x)\varphi(y)$ 。数字图像信号 $f(x, y)$ 的低频逼近信号定义为下述内积^[26]:

$$a_j(n, m) = \langle f(x, y), \varphi_{j, n}(x)\varphi_{j, m}(y) \rangle \quad (1)$$

式中: $\varphi_{j, n}(x)\varphi_{j, m}(y)$ 分别为 $\varphi(x, y)$ 以参数 2^{-j} 的二进伸缩和平移而成的尺度空间的正交基; j, n 和 m 分别为尺度参数、沿 x 和 y 方向的平移参数, 均取正整数 Z 。 a_j 的物理意义为图像 $f(x, y)$ 的低频概貌或逼近。

设 $\psi(x)$ 是与 $\varphi(x)$ 相对应的一维小波, 则下列 3

个小波： $\psi^i(x, y) = \varphi(x)\psi(y)$, ($i=1, 2, 3$) 经二进伸缩和平移形成的函数族 $\{\varphi_{j,n}(x)\psi_{j,m}^i(y)\}_{j,m,n \in \mathbb{Z}}$ ($i=1, 2, 3$) 是二维小波空间 \tilde{W}_j 的正交规范基。则图像 $f(x, y)$ 的 3 个离散细节信号表示为内积：

$$d_j^i = \langle f(x, y), \varphi_{j,n}(x)\psi_{j,m}^i(y) \rangle \quad (i=1, 2, 3) \quad (2)$$

式中： d_j^1 为 $f(x, y)$ 的高频水平边缘，反映了水平方向占优的细节； d_j^2 为高频垂直边缘，为垂直方向占优细节； d_j^3 为 2 个对角线方向的边缘，为对角方向占优的细节；下标 j 为尺度参数，上标 $i=1, 2, 3$ 分别表示水平、垂直以及对角 3 个方向。图像的多尺度分解采用了 Daubechies 小波，由二维函数的 Mallat 算法^[26]，利用 Matlab7.0 图像处理小波工具箱实现。

设原始图像 $f(x, y)$ 共有 $N \times N$ 个像素，即图像分辨率为 N^2 ，尺度参数 $j=0$ (尺度因子为 2^{-0} ， $f(x, y) = V_0$)。由原始图像开始进行递推分解，在第 j 级分解，小波系数矩阵 a_j, d_j^1, d_j^2, d_j^3 分别有 $(2^{-j}N)^2$ 个像素(分辨率降低了 2^{-j})。由于因子 j 即表示分解级数，又与图像的分辨率相关，因此常将 j 称作分辨率或分解尺度。 j 的增大是不断降低分辨率，移近观察的过程。尺度 j 越大，观察到的孔隙尺度就越小。以二维数字图像 $f(x, y)$ 的三级小波分解为例，其小波系数分布如图 3 所示。图 3 中的子区域表示分解后各级小波系数矩阵的大小。按数字信号处理的观点，小波变换是对上一级进行 2:1 亚抽样后再进行变换的过程，例如，图 3 中的如第 2 级分解的各小波系数是第 1 级进行 2:1 亚抽样后再变换的结果。

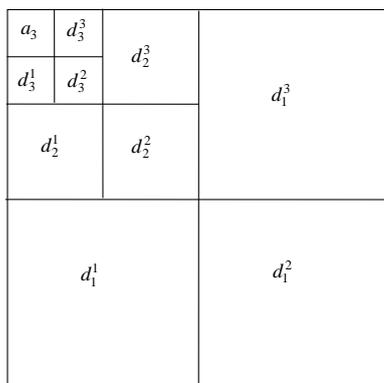


图 3 三级小波分解及系数矩阵分布图

Fig.3 Three-level wavelet decomposition and coefficient distribution

对于分解后的小波系数 $\{a_j, d_j^i\}$ ，一种方法是直接用细节系数 d_j^i 进行分析、反演；另一种方法是进行图像重建。目前可用于小波分析的商业软件，当分解的尺度 $j > 3$ 时重建的图像不清楚，难以辨认与分析其中的细节，这也是阻碍小波变换在孔隙结构分析中应用的原因。所谓图像重建，是将数字矩阵用来重建一个可以观察的连续图像。本文致力于任意尺度的小波细节系数的图像重建，从而使任意尺度小波变换得到的微孔细节可视化。图像重建有着复杂的理论与方法(限于篇幅，不详细讨论)。本文中小波系数的图像重建应用了“松弛的迭代”技术，相应的重建理论详见章毓晋^[27]的研究。以 1# 屯留矿煤样 9 尺度小波变换的水平细节系数 $d_1^1 \sim d_9^1$ 的图像重建为例，重构的 9 个尺度水平方向的微孔图像如图 4 所示(图中尺度即分辨率，尺度的增大是移近观察的过程)。为简便，以下仍用与小波系数相同的符号表示重构的图像。

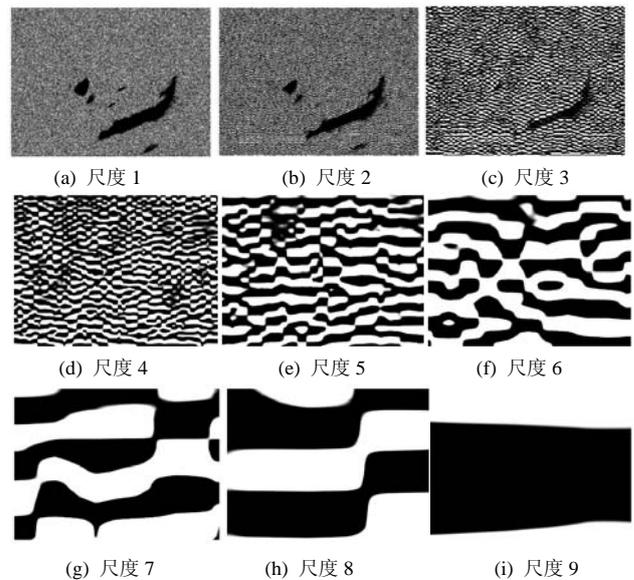


图 4 1# 屯留煤样 9 尺度分解水平细节图像 $d_1^1 \sim d_9^1$

Fig.4 Horizontal detail images $d_1^1 \sim d_9^1$ of 9-level wavelet decomposition for Tunliu coal sample No.1

各级细节系数 $d_1^1 \sim d_9^1$ 是一个逐渐移近观察的过程。由图 4 可见：重建的图像非常清楚，基质微孔在尺度 1~3 ($d_1^1 \sim d_3^1$) 的图像尚不能精细描述；在尺度 4~6 ($d_4^1 \sim d_6^1$) 的图像中，观察者已移至充分近处，煤基质中的微孔清晰可见；尺度 7 和 8 (d_7^1 和 d_8^1) 显示的是个别微孔的结构；尺度 9 (d_9^1) 的放大倍数过大或分辨率太低，不适合用于观测。比较可知，

尺度 6 重构的细节图像在保持了微孔网络结构同时, 又展现了单个孔道的结构细节, 适合于进行微孔结构的分析。需要说明的是, 分析的 SEM 原图为 495×660 个像素, 其像素分辨率为 $0.0286 \mu\text{m}/\text{像素}$ 。而尺度 6, 图像分解到了 $495 \times 2^{-6} \times 660 \times 2^{-6} \approx 8 \times 10$ 像素, 其像素分辨率为 $0.5000 \text{ nm}/\text{像素}$, 达到了“亚像素分析”的精度。因此, 在下面的分析中, 均采用在尺度 6 上重建的细节图像。

图 5 为在尺度 6 上对 1#屯留矿煤样小波分析的结果。图中分别给出了煤岩样中的大尺度裂隙 a_1 , 以及煤基质中在水平 d_6^1 、垂直 d_6^2 、对角 d_6^3 这 3 个方向上的微孔的重建图像。值得注意的是, 图 5 中连通的微孔是面裂隙, 盲孔为端裂隙。图 1 中的多孔介质结构是人们长期以来提出的理论模型, 而图 5 则是对图 1 孔隙多尺度模型的真正实现。

4 煤岩孔隙结构分析

煤岩基质块微孔隙的形态可以分为 2 类, 一类是固体颗粒之间狭窄的孔隙空间, 称作孔喉; 另一类是固体颗粒之间空隙较大的空间, 称作孔穴(或孔隙体)。孔喉是孔穴之间连通的通道, 孔穴决定流体的赋存能力, 孔喉决定了孔穴之间的连通性及扩散流动阻力的大小。由孔穴与孔喉的统计分布, 可以描述孔隙与孔喉在吸附与解吸过程中的作用。而无论是压汞法, 还是体视学法都无法反映孔隙、孔喉

形态变化的细节。小波多尺度分解的细节图像给出了孔穴、孔喉结构的细节, 由各细节图像中单个像素的物理尺寸可以对细节图像的微孔隙尺寸进行计算。孔穴半径和孔喉的计算方法(见图 6)为: 测量孔穴中的最大与最小半径 $r_{\text{max}}, r_{\text{min}}$, 孔穴半径由其平均值来定义: $r = (r_{\text{max}} + r_{\text{min}}) / 2$; 孔喉半径则直接测量孔喉处半径的最小值得到。

SEM 图像小波变换的低频信号 a_j 反映了煤岩大尺度裂隙的概貌。图 7 为各煤样 SEM 原图在尺度 1 小波变换下, 由低频逼近系数 a_1 重构的图像, 提取的是煤岩的节理。由于对节理结构的观测与统计, 如产状、几何形状、倾角、面积比、孔隙度、渗透率以及分形维数等特征有许多成熟的方法, 因而本文不做研究。

取尺度 6 下的小波变换细节系数 $d_6^i (i=1, 2, 3)$ 进行 2D 图像重建。图 8~10 分别为水平方向、垂直方向、以及对角方向煤基质微孔的重建图像。从这些细节图像中可清楚的观测到基质微孔的结构。根据尺度 6 的小波细节系数的像素分辨率, 可以计算微孔系统的孔穴与孔喉半径值 r_k , 及其分布密度 $p(r_k)$:

$$p(r_k) = \frac{k}{\sum k} \tag{3}$$

式中: k 为半径 r 的孔穴或孔喉的数量, $p(r_k)$ 为相应的分布密度(%), $\sum k$ 为所有尺度上孔穴或孔喉的总数。图 11~13 分别水平、垂直以及对角细节微孔的孔穴、孔喉的分布密度。其图中的横坐

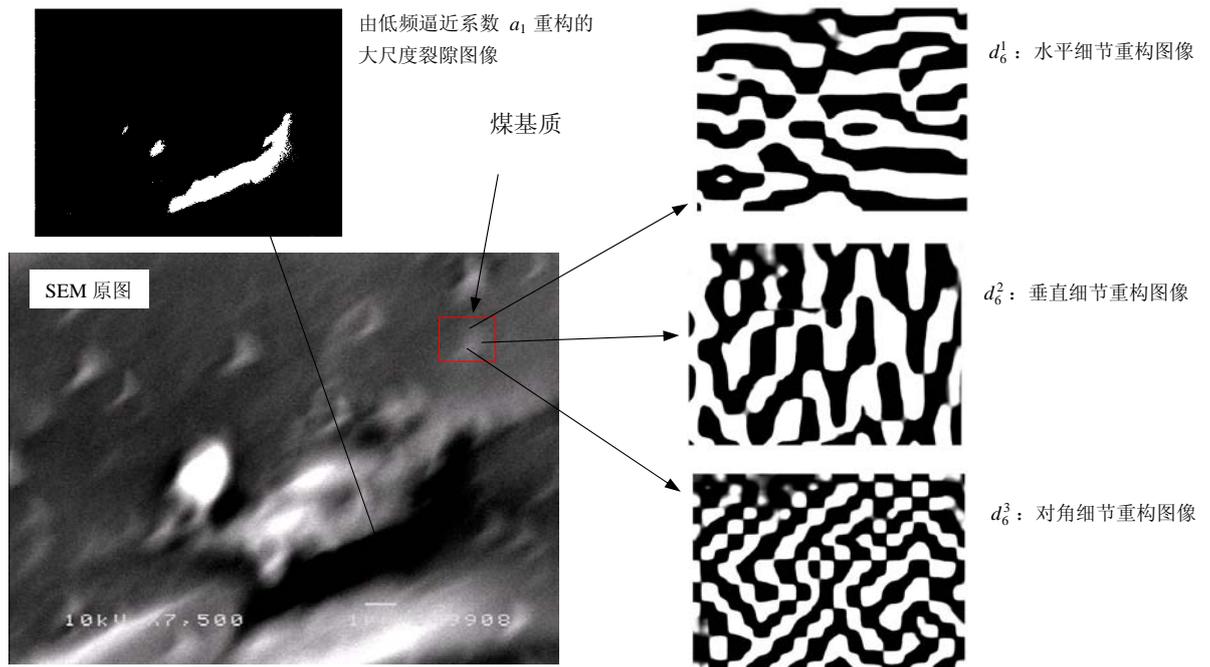


图5 1#屯留矿煤样 SEM 图像的尺度 6(j=6)小波分解重构图像

Fig.5 Reconstructed SEM images by 6th sub-band wavelet coefficients for Tunliu coal sample No.1

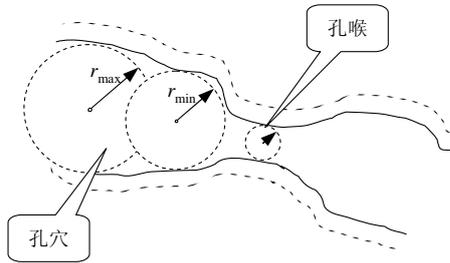


图6 煤基质微孔隙结构

Fig.6 Structure of micro-pores in the matrix

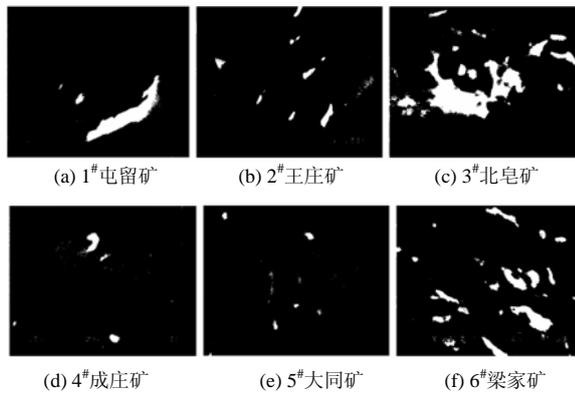


图7 各煤样尺度 1 小波变换的逼近图像

Fig.7 Approximation of wavelet transformation at scale 1 of various coal samples

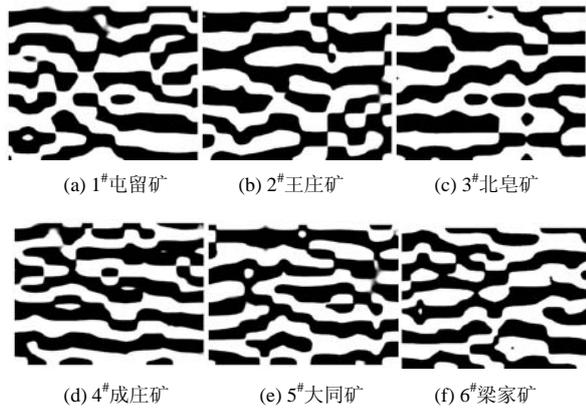
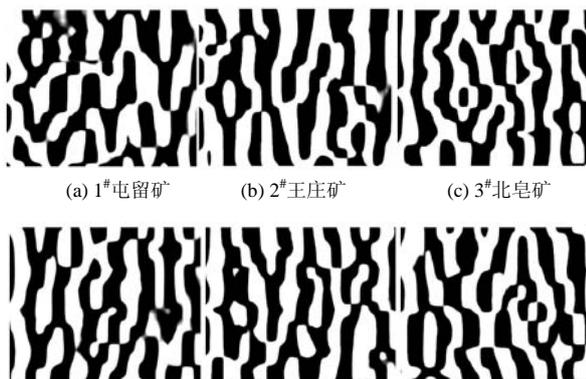


图8 各煤样在尺度 6 小波分解的水平细节

Fig.8 Horizontal details at scale 6 for coal samples



(d) 4#成庄矿 (e) 5#大同矿 (f) 6#梁家矿

图9 各煤样在尺度 6 小波分解的垂直细节

Fig.9 Vertical details at scale 6 for various coal samples

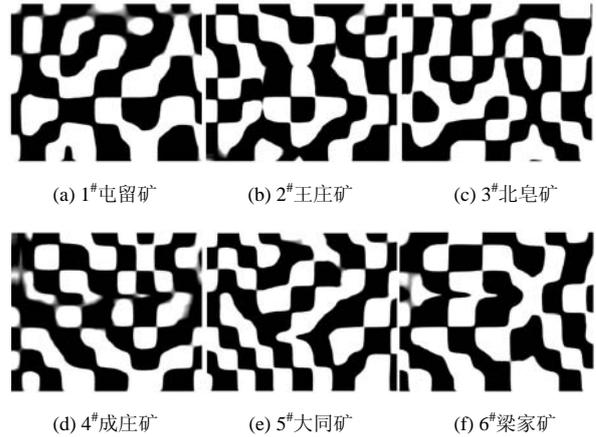
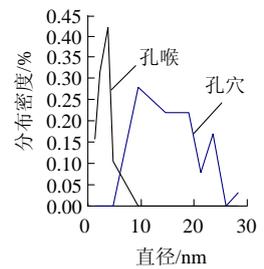
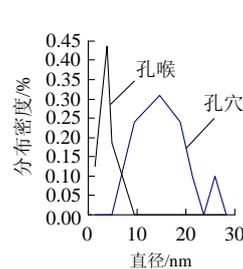
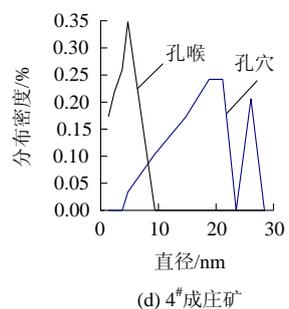
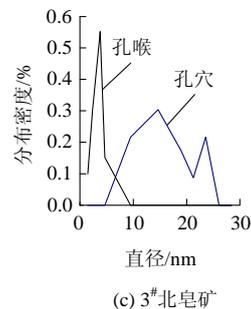
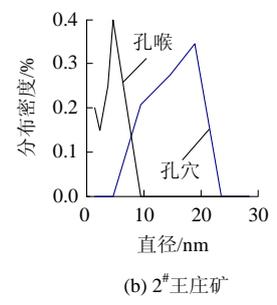
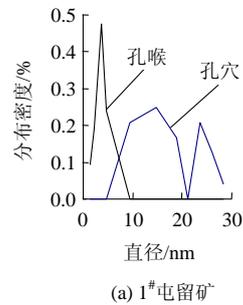


图10 各煤样在尺度 6 小波分解的对角细节

Fig.10 Diagonal details at scale 6 for various coal samples



(e) 5#大同矿 (f) 6#梁家矿

图 11 各煤样水平细节孔隙、孔喉分布

Fig.11 Distribution of cavity and pore throat for horizontal details

标为孔隙和孔喉半径(单位为 nm), 纵坐标为孔隙半径、孔喉半径在不同尺度下的分布密度 $p(r_k)$ 。其分布规律可以总结如下: (1) 水平、垂直、以及对角细节孔喉的分布具有大致相同的特征, 即孔喉半径分布于 1.42~4.72 nm 相对较小的区间, 大

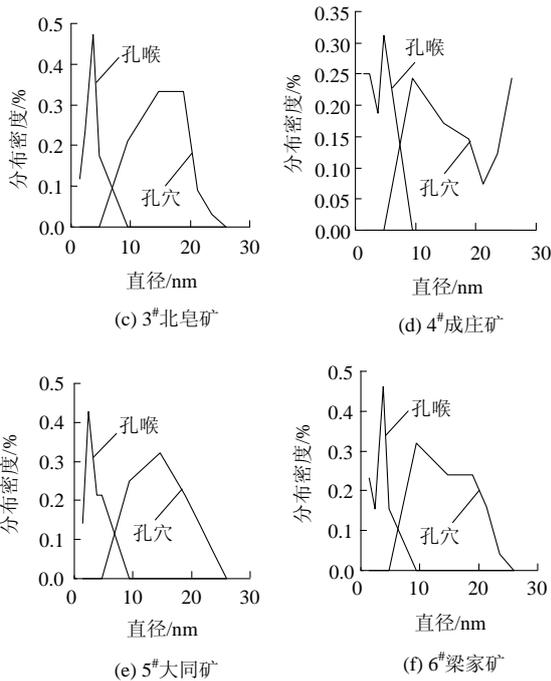
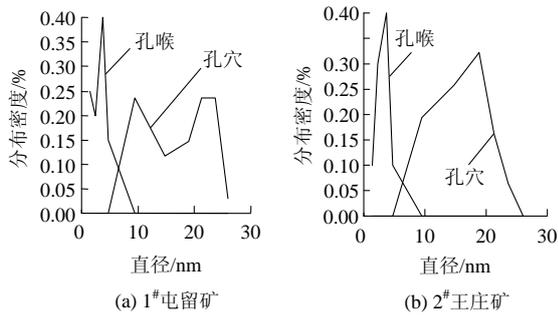


图 12 各煤样垂直细节孔隙、孔喉分布

Fig.12 Distribution of cavity and pore throat for vertical details of various coal samples

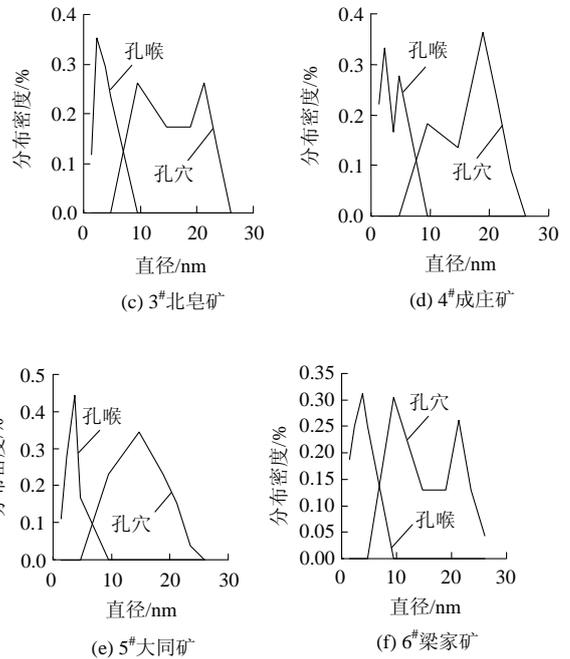
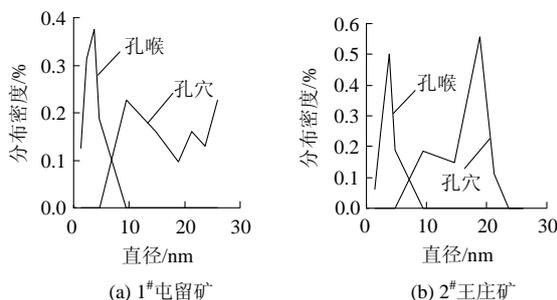


图 13 各煤样对角细节孔隙、孔喉分布

Fig.13 Distribution of cavity and pore throat for diagonal details of various coal samples

多具有单峰分布, 其峰值点尺度的大小可以作为煤岩基质中流体运移阻力的代表性尺度。由于各个煤样的孔喉分布的峰值点不同, 不同煤样微孔系统的扩散与渗流阻力的大小也不同; (2) 各个煤样的水平、垂直和对角细节的孔隙半径分布呈现出多模态特征, 分布于 9.45~28.35 nm 之间, 即单峰分布、双峰分布与多峰分布。由于孔隙空间代表了煤岩基质微孔全部孔隙空间的绝大部分, 是流体储存的主要空间, 因此孔隙半径的分布情况决定了煤岩中瓦斯储存能力。

5 孔隙特征描述

应用本文的方法可以计算裂隙—孔隙类双重介质的多尺度各向异性分形维数, 孔隙度等特征参数。分形介质孔隙度 $\phi(r)$ 和分形维数 D 的关系为

$$\phi(r) = \phi_0 (r / r_0)^{D-d} \tag{4}$$

式中: r_0 与 ϕ_0 分别为某个标度下的岩石裂隙的特征尺度与孔隙度, r 分形标度尺度, d 为欧氏维数

($d = 2$)。

式(4)中的 ϕ_0 可以利用像素点统计法对 SEM 图像进行统计得到, 即对节理与微孔隙的二值图像中的 0, 1 像素个数进行统计求和, 由两者的比值求得 ϕ_0 。图 14 给出了微孔孔隙度在水平、垂直及对角 3 个方向孔隙度的统计平均值。由图 14 可见, 微孔的孔隙度远大于节理的孔隙度, 这与微孔是流体的赋存空间, 而节理是渗流通道的认识相吻合。

孔隙的特征尺度 r_0 定义为微孔的孔穴与孔喉半径的统计平均值(对水平、垂直及对角 3 个细节图像进行统计), 以及节理的平均宽度, 如图 15 及表 1 所示。由图 15 可见, 各煤岩样微孔的孔穴和孔喉的平均尺度均在纳米量级, 孔喉平均半径为 3.145 7~

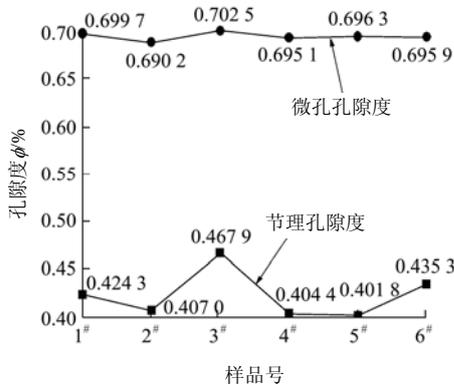


图 14 煤岩样多尺度孔隙度

Fig.14 Multiple scale porosity for coal rock samples

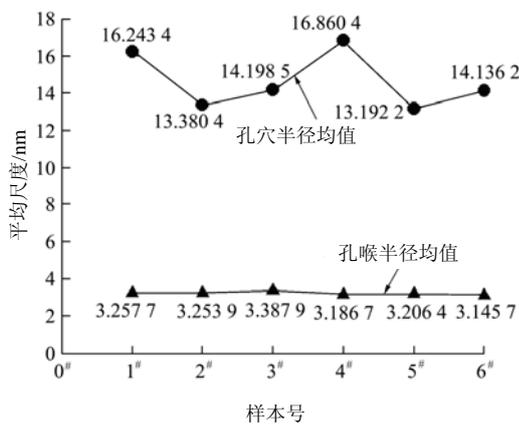


图 15 煤岩基质微孔平均尺度

Fig.15 Mean lengths of the micropores for coal matrix

3.387 9 nm; 孔穴的平均半径为 13.192 2~16.860 4 nm。由表 1 可见, 各煤岩样节理的平均宽度均为微米量级, 分布在 0.98~5.86 μm 之间。两者之间存在尺度上的差别。

表 1 煤样节理平均宽度

煤样地点	$r_0/\mu\text{m}$	煤样地点	$r_0/\mu\text{m}$
屯留矿	2.29	成庄矿	1.63
王庄矿	0.98	大同矿	1.15
北皂矿	5.86	梁家矿	3.06

将小波分析得到的低频逼近图像及高频细节图像二值化, 计算图像的计盒维数, 可以得到煤岩样的多尺度、各向异性分形特征。基于图像分割的计盒维数算法详见宫伟力等^[17]的研究。图 16 为微孔(见图 8~10)水平、垂直和对角 3 个方向的分形维数 D_H , D_V , D_D , 以及节理(见图 7)的分形维数。由图 16 可见, 微孔的分形维数为 1.900 0~1.925 2,

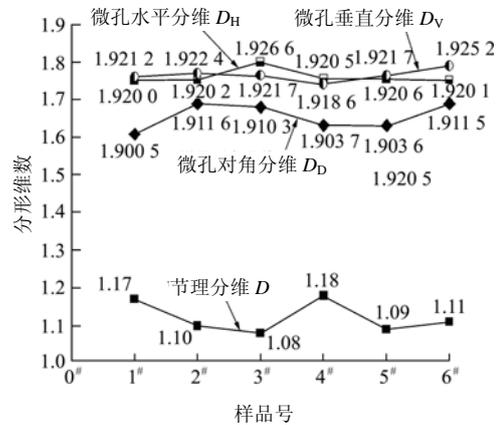


图 16 煤岩样多尺度各向异性分形特征

Fig.16 Multi-scale-anisotropy fractals for various coal rock samples

接近于欧氏拓扑维 2, 说明其在平面上具有复杂的网络结构。而节理的分形维数为 1.08~1.18, 接近于欧氏拓扑维数 1, 说明其在平面分布形状上接近于欧氏曲线。

6 结 论

(1) 煤岩基质微孔的水平、垂直、以及对角孔喉的分布具有统计意义上相似的特征, 即具有单峰特点, 峰值点的尺度可以作为微孔的代表性尺度, 表征了对流体运移阻力的大小; 各煤岩样微孔峰值点不同, 代表其流体运移阻力的不同。微孔在上述 3 个方向上的孔穴分布呈现多模态特征, 为单峰、双峰、及多峰分布, 其峰值点尺度代表了流体的储存能力。

(2) 基于小波多分辨分析的图像分析方法, 可

以提取煤岩节理与微孔不同方向的几何特征; 节理的尺度为微米量级, 微孔为纳米量级, 实现了煤岩孔隙系统尺度、各向异性的精细描述。由于节理与微孔在流体运移及岩体损伤中的作用不同, 由得到的节理与微孔的分维数、孔隙度可以建立多尺度、各向异性力学参数模型, 为深入认识深部条件下裂隙岩体的非线性力学行为提供了详细的几何边界、结构参数的分析基础。本文的研究过程给出了复杂孔隙介质微观结构可视化与精细描述可行方法。

致谢 在本文介绍的研究与论文完成过程中, 何满潮教授与作者进行了详细的讨论并提出了许多宝贵意见, 在此, 表示衷心感谢。

参考文献(References):

- [1] 何满潮, 吕晓俭, 景海河. 深部工程围岩特性及非线性动态力学设计概念[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(8): 1 215 - 1 224.(HE Manchao, LU Xiaojian, JING Haihe. Characters of surrounding rockmass in deep engineering and its non-linear dynamic mechanical design concept[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(8): 1 215 - 1 224.(in Chinese))
- [2] LI T, CAI M F, CAI M. Earthquake-induced unusual gas emission in coalmines—a km-scale in-situ experimental investigation at Laohutai mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2007, 71(2 - 3): 209 - 224.
- [3] CUI X J, BUSTIN R M, DIPPLE G. selective transport of CO₂, CH₄ and N₂ in coals: insights from modeling of experiments gas adsorption data[J]. Fuel, 2004, 83: 293 - 303.
- [4] KARACAN C O. Heterogeneous sorption and swelling in a confined and stressed coal during CO₂ injection[J]. Energy Fuels, 2003, 17(6): 1 595 - 1 608.
- [5] SIRIWARDANE H, HALJASMAA I, MCLENDON R, et al. Influence of carbon dioxide on coal permeability determined by pressure transient methods[J]. International Journal of Coals Geology, 2009, 77(1 - 2): 109 - 118.
- [6] LARSEN J W. The effects of dissolved CO₂ on coal structure and properties[J]. International Journal of Coal Geology, 2004, 57(1): 63 - 70.
- [7] MEDEK J, WEISHAUPTOVA Z, KOVAR L. Combined isotherm of adsorption and absorption on coal and differentiation of both processes[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2006, 89(1 - 3): 276 - 283.
- [8] ROMANOV V N, GOODMAN A L, LARSEN J W. Errors in CO₂ adsorption measurements caused by swelling[J]. Energy Fuels, 2006, 20: 415 - 416.
- [9] SHI J, DURUCAN S. A model for changes in coalbed permeability during primary and enhanced methane recover[J]. SPE Reservoir Evaluation Engineering, 2005, 8(4): 291 - 299.
- [10] JUN Y, YÜCEL A I, ÖZGEN K C, et al. Gas sorption and transport in coals: a poroelastic medium approach[J]. International Journal of Coal Geology, 2009, 77(1 - 2): 137 - 144.
- [11] YUAN S C, HARRISON J P. A review of the state of the art in modeling progressive mechanical breakdown and associated fluid flow in intact heterogeneous rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(7): 1 001 - 1 022.
- [12] ZHAO Y H. Crack pattern evolution and a fractal damage constitutive model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(3): 349 - 366.
- [13] HOMAND F, HOXHA D, BELEM T, et al. Geometric analysis of damaged microcracking in granites[J]. Mechanics of Materials, 2000, 32(6): 361 - 376.
- [14] XIE H P, GAO F. The mechanics of cracks and a statistical strength theory for rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(3): 477 - 488.
- [15] ZHU W C, LIU J, YANG T H, et al. Effects of local rock heterogeneities on the hydromechanics of fractured rocks using a digital-image-based technique[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2006, 43(8): 1 182 - 1 199.
- [16] NAKASHIMA Y, NAKANO T, NAKAMURA K. Three-dimensional diffusion of non-sorbing species in porous sandstone: computer simulation based on X-ray microtomography using synchrotron radiation[J]. Journal of Contaminant Hydrology, 2004, 74(3): 253 - 364.
- [17] 宫伟力, 张艳松, 安里千. 基于图像分割的煤岩孔隙多尺度分形特征[J]. 煤炭科学技术, 2008, 36(6): 28 - 32.(GONG Weili, ZHANG Yansong, AN Liqian. Multi-scale fractal features of coal and rock porosity based on image segmentation[J]. Coal Science and Technology, 2008, 36(6): 28 - 32.(in Chinese))
- [18] EBRAHIMI F, SAHIMI M. Multiresolution wavelet coarsening and analysis of transport in heterogeneous media[J]. Physica, 2002, 316(1 - 4): 160 - 188.
- [19] PANCALDI V, KING P R, CHRISTENSEN K. Wavelet-based up scaling of advection equations[J]. Physica, 2008, 387(19 - 20): 4 760 - 4 770.
- [20] GAO X T, SATTAR F, QUDDUS A, et al. Multiscale contour corner detection based on local natural scale and wavelet transform[J]. Image and Vision Computing, 2007, 25(6): 890 - 898.
- [21] ZHANG X M, LIU K A, LIU J Q. The wavelet multiscale method for inversion of porosity in the fluid-saturated porous media[J]. Applied Mathematics and Computation, 2006, 180(2): 419 - 427.
- [22] 张新明, 刘家琦, 刘克安. 一维双相介质孔隙率的小波多尺度反演[J]. 物理学报, 2008, 57(2): 654 - 660.(ZHANG Xinming, LIU Jiaqi, LIU Kean. Porosity inversion of 1D two phase medium with wavelet multiscale method[J]. Acta Physical Sinica, 2008, 57(2): 654 - 660.(in Chinese))

- [23] HE Y, HAN B. A wavelet adaptive-homotopy method for inverse problem in the fluid-saturated porous media[J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2009, 208(1): 189 - 196.
- [24] FRANTZISKONIS G. Wavelet-based analysis of multiscale phenomena: application to material porosity and identification of dominant scales[J]. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 2002, 17(4): 349 - 357.
- [25] NEUPAUER R M, POWELL K L. A fully-anisotropic Morlet wavelet to identify dominant orientations in a porous medium[J]. *Computers and Geosciences*, 2005, 31(4): 465 - 471.
- [26] BURRUS C S, GOPINATH R A, GUO H T. Introduction to wavelets and wavelet transforms[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [27] 章毓晋. 图像工程(上册)图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.(ZHANG Yujin. Image engineering (I) image processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.(in Chinese))