

基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构算法研究

李建胜^{1, 2}, 王东¹, 康天合^{*1}

(1. 太原理工大学采矿工艺研究所, 山西 太原 030024; 2. 山西焦煤集团有限责任公司, 山西 太原 030024)

摘要: 在对煤系地层泥岩样进行显微 CT 无损伤探测及其图像分析的基础上, 用 Matlab 语言对岩石孔隙结构(孔隙孔径和孔隙率)的算法进行了研究。结果表明: 显微 CT 扫描、数字图像处理和三维重构三者的结合为岩石类材料孔隙结构的定量研究提供了一种简单可行的新方法。对显微 CT 试验得到的 CT 单张横截面图像进行数字图像处理, 计算出了基于 CT 单张图像的岩石孔隙率。对 CT 单张横截面图像进行压缩, 生成不同分辨率的新图像, 以新图像的像素大小作为孔径尺度, 确定了基于 CT 单张图像的岩石孔径尺度和孔隙率之间的变化规律。将 CT 单张图像进行处理生成 CT 图像序列, 用可视化重构算法中的体绘制算法对其进行三维重构, 生成岩石的三维数字图像, 计算了基于 CT 图像序列的岩石孔径、孔隙率及其二者之间的变化规律。以煤系地层中的泥岩为例, 泥岩的孔隙率随孔径尺度的增加呈负指数规律减少, 其计算结果与压汞法测定的孔径分布相吻合。

关键词: CT 图像; 孔隙结构; Matlab; 图像处理; 三维重构

中图分类号: P584; TU45 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2010)11-1703-06

作者简介: 李建胜(1960-), 男, 山西临猗人, 教授级高级工程师, 主要从事煤炭开采方面的科研、技术与管理工作。

E-mail: li_j_s1960@163.com

Algorithmic study on rock pore structure based on micro-CT experiment

LI Jian-sheng^{1, 2}, WANG Dong¹, KANG Tian-he¹

(1. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Shanxi Coking Coal Group Co., Ltd., Taiyuan 030024, China)

Abstract: The clay rock in coal stratum is scanned non-destructively by micro-CT, and the algorithm of rock pore structure (the porosity and the pore aperture) is studied by use of Matlab based on the micro-CT image. The results show that the combination of micro-CT scanning, digital image processing and three-dimensional reconstruction can provide a new, simple and feasible method for the analysis of rock pore structure. The computer system of micro-CT experiment can generate CT single section and the porosity of rock is calculated by use of digital image processing. The new images with different resolutions are generated by image compression. When the pixel sizes of the new images are taken as the pore aperture, the rules of the rock porosity variation with the pore aperture are estimated on micro-CT single image. The volume rendering algorithm of visualized reconstruction can make the sequences which stem from the single image generate three-dimensional digital image, by which the rock porosity and the pore aperture are computed. For example, with the increase of the pore aperture, the porosity of clay rock in coal stratum is reduced by the negative exponent rule, and the result is identical with the aperture distribution measured by mercury porosimeter method.

Key words: CT image; pore structure; Matlab; image processing; three-dimensional reconstruction

0 引言

CT (Computerized tomography) 是计算机断层扫描的简称, 主要由 X 射线成像系统和计算机系统两部分组成。CT 扫描时, 由 X 射线成像系统中的微焦点 X 光机产生 X 射线并垂直透过被测试物体, 衰减后的 X 射线被探测器所采集, 通过模数转换, 在监视器上显示扫描后所获得的图像; 由计算机系统对扫描得到的 CT 图像进行重建, 得到高密度分辨率的横截面图

像。由于 CT 具有能够无损探测物体的内部结构和生成高密度分辨率的横截面图像等特点, 而被广泛应用于机械^[1]、岩土^[2-6]、医学^[7]、电子^[8]和农林业^[9]等诸多领域的科学研究。

CT 中的计算机系统主要是对 CT 图像进行数字图

基金项目: 国家自然科学基金项目(50974093, 51004075, 50474057)

收稿日期: 2009-10-09

*通讯作者

像处理和三维重建,生成三维数字图像。研究三维数字图像的目的,主要有以下两点^[1, 10-12]:①使用可视化重构算法中的面绘制算法生成三维数字图像,提取其表面的几何信息和定量测量;②使用可视化重构算法中的体绘制算法生成三维数字图像,对其进行剖切、剥离和显示其内部结构特征等。利用 CT 扫描对岩石进行无损伤探测,其目的之一就是对岩石的微结构进行分析研究。李玉彬^[13]、赵秀才^[14]和易敏^[15]等基于岩芯,吴爱祥^[16]等基于岩石粉体分别对其孔隙率进行了研究,但这些试验工作全部是基于 CT 计算机系统生成的原始 CT 单张图像,且没有进一步研究岩石的孔隙孔径和孔隙率。吕兆兴^[17]采用 VC++语言基于原始 CT 单张图像通过数字图像处理和三维重构对岩石的孔隙孔径和孔隙率进行了研究,但只能建立最大为 $200 \times 200 \times 200$,即 800 万像素的三维数字图像。为此,本文采用 Matlab 语言对基于显微 CT 试验的岩石孔隙结构的算法进行了研究,通过对 CT 单张图像和 CT 图像序列的数字图像处理和三维重构,进行了岩石孔隙孔径和孔隙率的计算,并得出了煤系地层泥岩孔隙率随孔径尺度的变化规律。

1 显微 CT 试验系统简介

1.1 显微 CT 试验系统的 X 射线成像系统

试验是在太原理工大学与中国工程物理研究院应用电子研究所共同研制的 μ CT225kVFCB 型高精度显微 CT 试验系统上进行的,图 1 为 X 射线成像系统照片。该试验系统中的 X 射线成像系统主要由高精度工作转台和夹具、微焦点 X 光机、数字平板探测器、水平移动机构、机座和采集分析系统等结构部分组成。可以实现对金属及非金属材料进行三维 CT 扫描分析,岩石试件尺寸为 $\Phi 1 \sim 50$ mm, 放大倍数为 1~400 倍, 扫描单元分辨率为 $0.5 \mu\text{m} \sim 0.194$ mm, 可以分辨 μm 级的裂隙和孔隙。

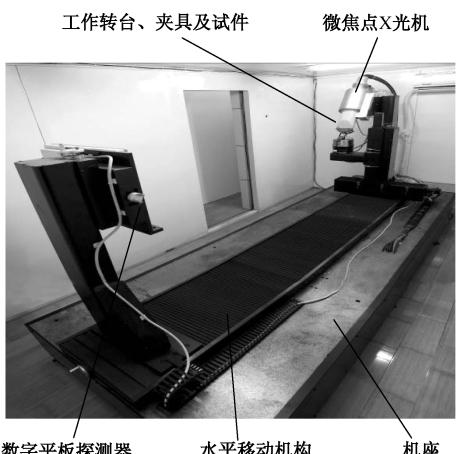


图 1 μ CT225kVFCB 型高精度显微 CT 试验系统

Fig. 1 Micro-CT experimental system μ CT225kVFCB

1.2 显微 CT 试验系统的计算机系统

计算机系统可以对显微 CT 图像进行数字图像处理和 CT 重建,由 CT 重建和二进制两部分模块组成。在重建模块中,采用大锥角三维重建模式,可以实现对 CT 图像进行反色、阈值分割、中值滤波和 CT 重建,生成高密度分辨率的横截面图像等功能;在二进制模块中,可以实现对 CT 图像进行图像格式转换和生成图像序列等功能。

2 基于 CT 单张图像岩石孔隙结构的计算

试验所用岩石样取自山西高平唐安煤矿 3410 工作面回风顺槽距四盘区轨道运输巷 300 m 处顶板,属二叠系下统山西组地层,为陆相碎屑沉积泥岩。该泥岩的主要矿物成分为伊利石 45%、高岭石 10%、石英 38% 和钙长石 7%。从泥岩样上采集加工试件,试件为 $\Phi 1.73$ mm \times 10 mm 的近似圆柱体。CT 扫描焦距为 2217 mm, 物距为 23.7738 mm, 扫描直径为 1.73 mm, 放大倍数为 132 倍, 投影数为 400 张。

2.1 显微 CT 图像

由显微 CT 试验系统的 X 射线成像系统扫描得到试件的 400 张冠状面图像,通过显微 CT 计算机系统的滤波和重建,生成 1200 张 bmp 位图格式的横截面图像。图 2 为随机抽取的一张横截面图像,为第 300 层横截面图像,图像类型为索引图像,图像大小为 2041×2041 像素,每个像素位数为 8 位,灰度范围为 0~255。图中黑色点表示物质密度较低,白色点表示物质密度较高,由黑到白表示物质密度由低到高的变化。

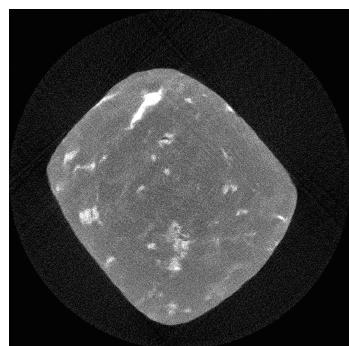


图 2 试件的 CT 横截面图像

Fig. 2 CT section of sample

2.2 基于 CT 单张图像孔隙孔径和孔隙率的算法

在 CT 图像中,空气部分的灰度值为 0, 试件部分的灰度值为 0~255, 每个像素点的灰度值对应于试件在该处的物质密度。对 CT 图像进行阈值分割,灰度值为 0 时,表示该像素点为孔隙;灰度值不为 0 时,表示

该像素点为试件中的固体成分。基于阈值分割, 对 CT 图像进行二值化处理, 将灰度值为 0 的像素点置 0, 灰度值不为 0 (即灰度值取值范围为 1~255) 的像素点置 1, 统计 CT 图像中试件部分灰度值为 0 的像素点个数与灰度值为 0 和 1 的像素点总个数, 可以得到基于 CT 单张图像试件的孔隙率

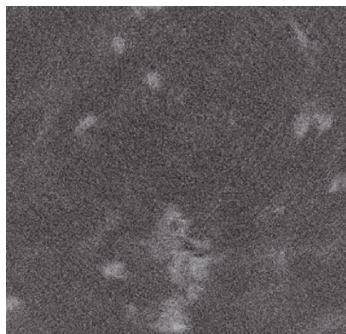
$$n = \frac{N_0}{N} \times 100\% \quad (1)$$

式中 N_0 为 CT 图像中试件部分灰度值为 0 的像素点个数; N 为灰度值为 0 和 1 的像素点总个数; n 为基于 CT 单张图像试件的孔隙率。

2.3 基于 CT 单张图像试件孔隙孔径和孔隙率之间的关系

以图 2 所示的 CT 单张图像为例, 图像为 2041×2041 像素, 每个像素为边长 $1.47 \mu\text{m}$ 的正方形, 以像素的边长作为试件孔隙孔径的直径, 即孔径尺度为 $1.47 \mu\text{m}$ 。

图 3 为图 2 所示的第 300 层图像的数字图像处理过程。其中, 图 3 (a) 是对第 300 层图像进行剪取, 尽可能大地生成试件部分的统计区域, 该区域为一个起始点位置为 $(600, 800)$, 边长为 800 像素的正方形统计区域; 图 3 (b) 是对图 3 (a) 800×800 像素的统计区域进行二值化处理, 生成的二值化图像。根据式 (1) 分别统计出图 3 (b) 中的灰度值为 0 的像素点个数 N_0 和所有像素点个数 N , 就可以确定出试件在孔隙尺度为 $1.47 \mu\text{m}$ 时, 800×800 像素区域内的孔隙率。



(a) 剪取

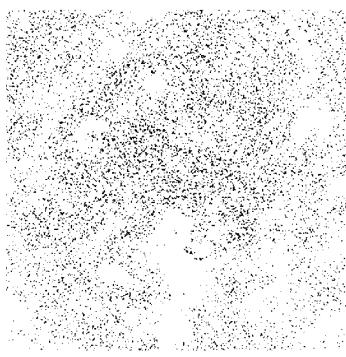


图 3 CT 单张图像的数字图像处理过程

Fig. 3 Digital image processing of CT single image

岩石的孔隙率是相对于一定尺度的孔隙孔径而言的。如果对 CT 单张图像进行压缩, 将一幅 $M \times M$ 像素的图像压缩成 $M/x \times M/x$ 像素的新图像, 压缩后像素的尺寸增加 x 倍。以像素的大小作为试件的孔隙孔径, 对压缩后的新图像进行数字图像处理, 并重新计算新图像的孔隙率, 从而可以确定基于 CT 图像试件孔隙孔径和孔隙率之间的关系。

CT 单张图像的压缩算法为: 在 x 轴方向上依次保留原图像的奇数行, 在 y 轴方向上依次保留原图像的奇数列, 保留下的奇数行和奇数列作为新的矩阵, 生成压缩后的新图像, 新图像的像素大小将增加一倍。依次循环便可生成不同分辨率的图像。

将图 2 所示的试件第 300 层 CT 图像进行压缩, 压缩后新生成的图像分别为 1021×1021 , 511×511 , 256×256 , 128×128 像素, 孔隙孔径分别为 2.94 , 5.88 , 11.76 , $23.52 \mu\text{m}$ 。图 4 为第 300 层 CT 图像的孔隙率随孔隙孔径的变化曲线。

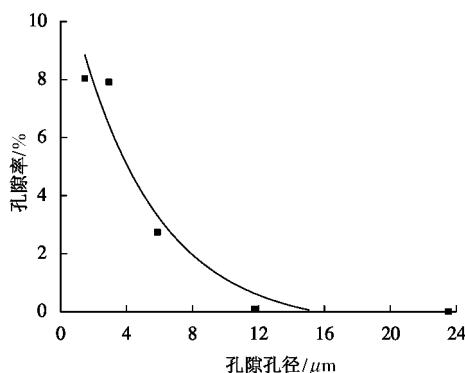


图 4 基于 CT 单张图像试件孔隙率随孔隙孔径的变化曲线

Fig. 4 Porosity variation with pore aperture based on CT single image

从图 4 中可以看出, 试件孔隙孔径为 $1.47 \mu\text{m}$ 时, 孔隙率为 8.04% ; 孔隙孔径为 $2.94 \mu\text{m}$ 时, 孔隙率为 7.91% 。孔隙孔径在 $1.47 \sim 2.94 \mu\text{m}$ 范围内, 试件的孔隙率变化较小, 随着试件孔隙孔径的增加, 孔隙率逐渐减少。孔隙孔径为 $11.76 \mu\text{m}$ 时, 孔隙率为 0.09% ; 孔隙孔径为 $23.52 \mu\text{m}$ 时, 孔隙率为 0 。

从 1200 张试件横截面图像中随机抽取一定量的 CT 单张图像, 分别计算其孔隙率, 取其均值作为试件的孔隙率。表 1 为随机抽取的 20 张 CT 单张图像, 统计区域为 800×800 像素, 对这 20 张 CT 单张图像的孔隙率取均值, 得到试件在孔隙尺度为 $1.47 \mu\text{m}$ 时平均孔隙率为 6.87% 。

3 基于 CT 图像序列岩石孔隙结构的计算

将 CT 单张图像进行剪取、二值化和压缩等数字

图像处理，并按照一定算法排列，生成 CT 图像序列，对其进行三维重构，生成二值化的三维数字图像。根据三维数字图像就可计算出试件的孔隙率，再进一步分析试件孔隙率随孔隙孔径的变化规律。

表 1 20 张 CT 图像的孔隙率

Table 1 Porosities of 20 CT images

图像编号	统计区域/像素	单张图像孔隙率/%
第 300 层	800×800	8.04
第 301 层	800×800	7.62
第 302 层	800×800	6.58
第 303 层	800×800	6.52
第 304 层	800×800	5.82
第 305 层	800×800	5.98
第 306 层	800×800	5.09
第 307 层	800×800	6.43
第 308 层	800×800	7.22
第 309 层	800×800	7.80
第 310 层	800×800	6.97
第 311 层	800×800	6.76
第 312 层	800×800	7.44
第 313 层	800×800	8.69
第 314 层	800×800	6.52
第 315 层	800×800	7.65
第 316 层	800×800	8.42
第 317 层	800×800	6.22
第 318 层	800×800	5.76
第 319 层	800×800	5.82

注：孔隙尺度为 $1.47 \mu\text{m}$ ，平均孔隙率为 6.87%。

3.1 CT 图像序列的三维重构

CT 图像序列三维重构的步骤主要为：CT 图像的获取、CT 图像的读取、生成三维数据集、图像预处理和三维可视化等。

CT 单张图像的获取是来自显微 CT 试验系统的计算机系统，即 CT 单张横截面图像。使用 Matlab 读取 CT 单张横截面图像，以 (600, 800) 作为起始点，对一定边长的图像进行剪取和二值化等数字图像处理，生成三维数据集。

在图像预处理的过程中，由于 CT 图像的孔隙率是以图像的灰度等级为基础，所以不对图像进行灰度直方图均衡化、图像锐化和彩色处理等步骤，只对图像进行插值和图像平滑。CT 单张图像层与层之间的距离是一个像素，在此为 $1.47 \mu\text{m}$ ，层间距较小。采用灰度插值算法，计算式为

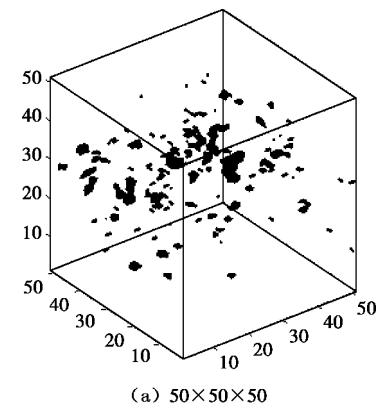
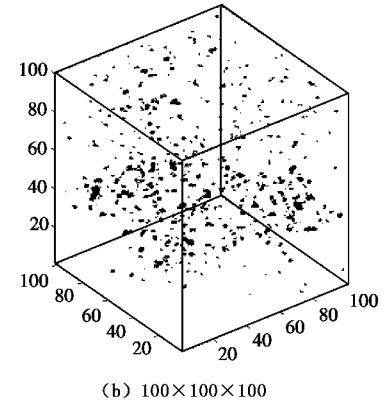
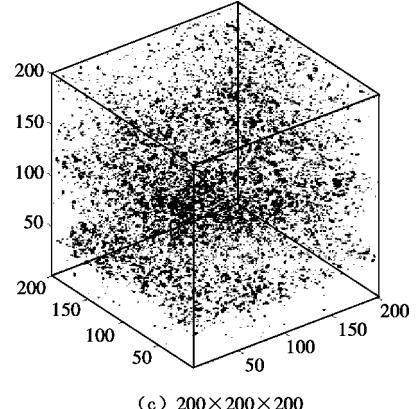
$$V(x, y, z_i) = \frac{[V(x, y, z_2) - V(x, y, z_1)]i}{K + 1} + V(x, y, z_1) \quad (2)$$

式中 x, y, z 为 CT 图像的三坐标轴； $V(x, y, z)$ 为 CT 图像在 (x, y, z) 处的灰度值； $i = 1, 2, \dots, K$ ； K 为读取的

CT 图像层数。图像平滑采用 gaussian 滤子。

三维可视化采用可视化重构体绘制算法中的光线投射法，通过计算所有体素对光线的作用得到二维投影图像，以显示试件的孔隙结构。

图 5 为三维重构的部分三维数字图像，由图 5 (a) 可见，试件三维数字图像的尺寸为 $50 \times 50 \times 50$ ，即 12.5 万像素；由图 5 (b) 可见，试件三维数字图像的尺寸为 $100 \times 100 \times 100$ ，即 100 万像素；由图 5 (c) 可见，试件三维数字图像的尺寸为 $200 \times 200 \times 200$ ，即 800 万像素；由图 5 (d) 可见，试件三维数字图像的尺寸为 $300 \times 300 \times 300$ ，即 2700 万像素。使用 Matlab 对 CT 图像序列进行三维重构，可以生成所需尺寸的三维数字图像。本试验用的 CT 工作站上最大可以重构 $800 \times 800 \times 800$ ，即 51200 万像素的三维数字图像。

(a) $50 \times 50 \times 50$ (b) $100 \times 100 \times 100$ (c) $200 \times 200 \times 200$

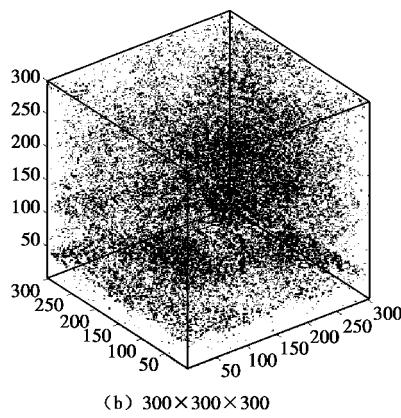


图5 试件的三维数字图像

Fig. 5 Three-dimensional digital image of sample

3.2 基于CT图像序列试件孔隙孔径和孔隙率之间的关系

采用上述的CT图像压缩算法, 对CT单张图像进行压缩。压缩后新生成的图像分别为 1021×1021 , 511×511 , 256×256 , 128×128 , 64×64 像素, 孔隙孔径分别为 2.94 , 5.88 , 11.76 , 23.52 , $47.03 \mu\text{m}$ 。这5种孔隙孔径的新图像剪取均以(600, 800)点为起始点, 边长为100像素的正方形区域作为重建区域, 分别进行三维重构, 生成试件的三维数字图像。根据试件的三维数字图像, 仍以灰度值0作为孔隙, 其它值为固体成分。统计立方体中灰度值为0的像素点个数 N_0 和所有像素点个数 N , 就可以确定试件三维数字图像的孔隙率, 并可以确定其孔隙孔径和孔隙率之间的变化关系。图6为 $100 \times 100 \times 100$, 即100万像素试件三维数字图像孔隙率随孔隙孔径的变化曲线。

从图6可以看出, 试件的孔隙孔径在 $1.47 \sim 2.94 \mu\text{m}$ 范围内, 其孔隙率变化较小, 为 $7.79\% \sim 7.63\%$, 随着试件孔隙孔径的增加, 其孔隙率逐渐减少。当孔隙孔径为 $23.52 \mu\text{m}$ 时, 孔隙率为 0.12% ; 孔隙孔径为 $47.03 \mu\text{m}$ 时, 孔隙率为0。拟合方程为

$$n = 10.34 \exp(-0.13d) - 0.21 \quad (3)$$

式中 d 为试件的孔隙孔径; n 为试件的孔隙率。式(3)的相关系数 $R^2 = 0.973$ 。

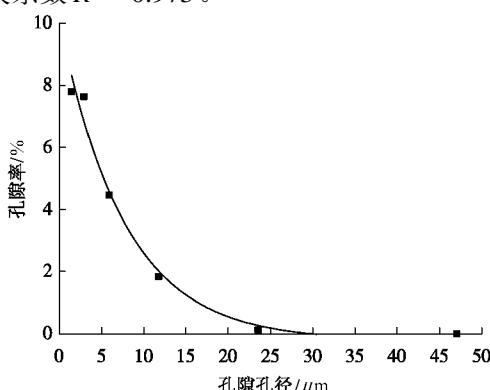


图6 基于三维数字图像孔隙率随孔隙孔径的变化曲线

Fig. 6 Porosity variation with pore aperture based on three-dimensional digital image

从式(3)中可以看出, 试件的孔隙率随着孔隙孔径的增加呈负指数规律减少。采用压汞法测试该泥岩样的孔径分布, 当孔隙孔径分别为 1.32 , 2.56 , 4.94 , 11.34 , 21.35 , $45.46 \mu\text{m}$ 时, 与其对应的孔隙率分别为 8.22% , 7.83% , 5.52% , 2.25% , 0.98% 和 0.68% , 该结果与本试验的计算结果相吻合。采用密度法测试该泥岩样的孔隙率, 为 2.52% , 由式(3)可知, 对应的孔隙孔径为 $10.24 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

(1) 显微CT试验系统能够无损探测岩石的孔隙结构, 与数字图像处理和三维重构技术的结合为研究岩石的孔隙结构提供了一种简单可行的新方法, 具有广阔的应用前景。

(2) 由显微CT试验系统的计算机系统得到CT单张横截面图像, 对其进行剪取和二值化等数字图像处理, 可以计算出基于CT单张图像岩石的孔隙率; 对其进行压缩, 生成分辨率为 $M/x \times M/x$ 像素的新图像, 以新图像的像素大小作为孔隙孔径, 可以确定基于CT单张图像岩石孔隙率随孔隙孔径的变化规律。

(3) 将CT单张图像进行数字图像处理, 生成CT图像序列, 使用可视化重构算法中的体绘制算法对其进行三维重构, 生成岩石的二值化三维数字图像。根据岩石的二值化三维数字图像就可以计算出岩石的孔隙率; 对岩石的CT单张图像进行压缩, 再进行数字图像处理和三维重构, 生成不同分辨率的岩石二值化三维数字图像, 就可以确定基于CT图像序列岩石的孔隙率随孔隙孔径的变化规律。试验泥岩样的测定与计算结果表明, 该泥岩样的孔隙率随孔隙孔径的增大呈负指数规律减小。

参考文献:

- [1] 段黎明, 刘元宝, 吴志芳, 等. 基于工业计算机断层成像技术的三维CAD模型重构方法[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(3): 169 - 171. (DUAN Li-ming, LIU Yuan-bao, WU Zhi-fang, et al. Method of reconstructing 3D CAD model based on industrial computed tomography[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(3): 169 - 171. (in Chinese))
- [2] GUO Li-ping, CARPINTERI A, SUN Wei, et al. Measurement and analysis of defects in high-performance concrete with three-dimensional micro-computer tomography[J]. Journal of Southeast University, 2009, 25(1): 83 - 88.
- [3] 李树春, 许江, 杨春和, 等. 循环荷载下岩石损伤的CT细观试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(8): 1604

- 1609. (LI Shu-chun, XU Jiang, YANG Chun-he, et al. Study of CT meso-experiment of rock damage under cyclic load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(8): 1604 - 1609. (in Chinese))
- [4] 丁卫华, 陈厚群, 尹小涛, 等. 类岩石材料 CT 动载试验装置的关键技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, **28**(8): 1620 - 1628. (DING Wei-hua, CHEN Hou-qun, YIN Xiao-tao, et al. Study of key techniques of dynamic loading CT test device for rock-link material[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, **28**(8): 1620 - 1628. (in Chinese))
- [5] 赵阳升, 孟巧荣, 康天合, 等. 显微 CT 试验技术与花岗岩热破裂特征的细观研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(1): 28-34. (ZHAO Yang-sheng, MENG Qiao-rong, KANG Tian-he, et al. Micro-CT experimental technology and meso-investigation on thermal fracturing characteristics of granite[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(1): 28 - 34. (in Chinese))
- [6] 杨更社, 谢定义. 岩石损伤特性的 CT 识别[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, **15**(1): 48 - 54. (YANG Geng-she, XIE Ding-yi. CT identification of rock damage properties[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, **15**(1): 48 - 54. (in Chinese))
- [7] 宋卫卫, 苏铁明, 欧宗瑛, 等. 基于 CT 图像反求技术的人体股骨头修复建模[J]. 大连理工大学学报, 2009, **49**(2): 221 - 227. (SONG Wei-wei, SU Tie-ming, OU Zong-ying, et al. Modeling for rehabilitation of femoral head based on CT images and reverse engineering[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2009, **49**(2): 221 - 227. (in Chinese))
- [8] 练秋生, 郝鹏鹏. 基于压缩传感和代数重建法的 CT 图像重建[J]. 光学技术, 2009, **35**(3): 422 - 4225. (LIAN Qiu-sheng, HAO Peng-peng. Image reconstruction for CT based on compressed sensing and ART[J]. Optical Technique, 2009, **35**(3): 422 - 4225. (in Chinese))
- [9] 张汝楠, 孙丽萍. 基于 X-ray CT 技术原木三维重建检测缺陷方法的初步探讨[J]. 森林工程, 2008, **24**(5): 25 - 31. (ZHANG Ru-nan, SUN Li-ping. A preliminary study on log three-dimensional reconstruction defect based on X-ray CT[J]. Forest Engineering, 2008, **24**(5): 25 - 31. (in Chinese))
- [10] Gonzalez R C. 数字图像处理[M]. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2003. (GONZALEZ Rafael C. Digital image processing[M]. RUAN Qiu-qi, RUAN Yu-zhi, tran. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003. (in Chinese))
- [11] 王鸣鹏. CT 检查技术学[M]. 上海: 复旦大学出版社, 2004. (WANG Ming-peng. Technique of CT Scanning[M]. Shanghai: Fudan Publishing House, 2004. (in Chinese))
- [12] 赵俊, 庄天戈. CT 图像分块重建算法[J]. 上海交通大学学报, 2004, **38**(2): 197 - 199. (ZHAO Jun, ZHUANG Tian-ge. CT image block reconstruction algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2004, **38**(2): 197 - 199. (in Chinese))
- [13] 李玉彬, 李向良, 李奎祥. 利用计算机层析(CT)确定岩心的基本物理参数[J]. 石油勘探与开发, 1999, **26**(6): 86 - 90. (LI Yu-bin, LI Xiang-liang, LI Kui-xiang. Using computed tomography to determine the basic petrophysical properties of cores[J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, **26**(6): 86 - 90. (in Chinese))
- [14] 赵秀才, 姚军, 房克荣. 合理分割岩心微观结构图像的新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009, **33**(1): 64 - 67. (ZHAO Xiu-cai, YAO Jun, FANG Ke-rong. A new reasonable segmentation method for microstructure image of reservoir rock[J]. Journal of China University of Petroleum(Natural Science), 2009, **33**(1): 64 - 67. (in Chinese))
- [15] 易敏, 黄瑞瑶, 孙良田, 等. 测量储层多孔介质孔隙度及其分布的新方法[J]. 西南石油学院学报, 2004, **26**(1): 43 - 46. (YI Min, HUANG Rui-yao, SUN Liang-tian, et al. Reservoir core porosity and porosity distribution measurement using technology of rays industrial computerized tomography[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2004, **26**(1): 43 - 46. (in Chinese))
- [16] 吴爱祥, 杨保华, 刘金枝, 等. 基于 X 光 CT 技术的矿岩散体浸出过程中孔隙演化规律分析[J]. 过程工程学报, 2007, **7**(5): 960 - 965. (WU Ai-xiang, YANG Bao-hua, LIU Jin-zhi, et al. Analysis of pore structure evolution of ore granular media during leaching based on X-ray computed tomography[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, **7**(5): 960 - 965. (in Chinese))
- [17] 吕兆兴. 孔隙裂隙双重介质逾渗理论及应用研究(博士学位论文)[D]. 太原: 太原理工大学, 2008. (LÜ Zhao-xin. The theory and its application of percolation in pore and fracture double-medium(Ph D Thesis)[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese))