

# 岩石微焦 CT 扫描的三轴仪及其初步应用

李小春<sup>1</sup>, 曾志姣<sup>1</sup>, 石露<sup>1</sup>, 高桥学<sup>2</sup>, 白冰<sup>1</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071;

2. 日本经济产业省产业技术综合研究所, 日本 筑波 305-8567)

**摘要:** 为了观察和度量岩石空隙结构随应力的变化, 研制一种能和微焦 X 射线 CT 系统配套使用的三轴仪, 该设备轻便, 能够施加三轴压力, 并在不卸载压力情况下对试样进行 CT 扫描和渗透系数的测量, 且能够实时记录压力和变形等数据。利用研制的 CT 三轴仪得到了 Berea 砂岩在加载过程中的一系列 CT 图像, 结合 3DMA 空隙结构计算方法, 获得 Berea 砂岩在不同应力状态下的有效孔隙半径分布、有效喉道半径分布以及弯曲度分布等定量细观几何特征。同时采用瞬态脉冲法测量 Berea 砂岩不同方向的渗透率随有效围压的变化规律。结合围压对细观空隙结构参数的影响, 认为细观空隙结构的变化是导致渗透发生改变的根本原因, 当有效围压从 0 增至 15 MPa 时, 半径 40~100  $\mu\text{m}$  的孔隙数量减少、孔喉半径减小以及 Z 方向的迂曲度增加, 是导致 Berea 砂岩渗透率随有效围压增大而降低的主要原因。

**关键词:** 岩石力学; CT; 三轴仪; Berea 砂岩; 孔隙结构; 渗透率

**中图分类号:** TU 45

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-6915(2015)06-1128-07

## TRIAXIAL APPARATUS FOR MICRO-FOCUS CT SCAN OF ROCK AND ITS PRELIMINARY APPLICATION

LI Xiaochun<sup>1</sup>, ZENG Zhijiao<sup>1</sup>, SHI Lu<sup>1</sup>, Takahashi Manabu<sup>2</sup>, BAI Bing<sup>1</sup>

(1. *State key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan, Hubei 430071, China*; 2. *National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Tsukuba 305-8567, Japan*)

**Abstract:** In order to measure the structural characteristics of rock void under different stress conditions, a triaxial instrument working with the micro focus X-Ray computerized tomograph was developed. The weight of the apparatus is light. The apparatus can exert the triaxial pressure on rock specimen, and carry out the CT scanning and the permeability measurement on the specimen without the unloading of pressure. Besides, it can record the pressure and deformation in real time. Using this device, a series of CT images during triaxial loading process for Berea sandstone were generated. Combined with the 3DMA computational package for analyzing the void structure, some quantitative microscopic geometric characteristics of Berea sandstone in the different stress states, such as the size distribution of the effective pore radii, the size distribution of the effective throat radii and the tortuosity distribution were obtained. The permeability of Berea sandstone in different directions under various effective confining pressures was measured with a transient pulse technique. According to the results from the permeability test together with the computed ones about the influence of the confining pressure on the parameters of microscopic void structures, the change of microscopic void structures was found to be the fundamental cause of the change of permeability. When the effective confining pressure was increased from 0 to 15 MPa, the

**收稿日期:** 2014-07-07; **修回日期:** 2014-11-05

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(41172285, 11102220)

**作者简介:** 李小春(1964-), 男, 博士, 1984年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现任研究员、博士生导师, 主要从事二氧化碳地质封存方面的教学与研究工作。E-mail: xcli@whrsm.ac.cn

**DOI:** 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0979

permeability reduction was caused by the decrease in the population of pores with the radii of 40–100  $\mu\text{m}$ , the decrease of the magnitude of the pore and throat radii, and the increase in the tortuosity in Z direction for the stressed Berea sandstone.

**Key words** : rock mechanics ; computerized tomography ; triaxial test apparatus ; Berea sandstone ; pore structure ; permeability

## 1 引言

储层的渗透率是油气开采、CO<sub>2</sub>地质封存等评价的重要参数，其会随着应力环境的改变而变化，这主要是因为岩石孔隙特征发生了变化<sup>[1-2]</sup>。因此，为了研究岩石在不同应力条件下渗透率的变化规律，则需要采取有效的手段来观察和度量岩石在不同应力条件下细观空隙结构特征的变化。

目前岩石细观结构观测方法主要有 3 种，即扫描电子显微镜方法、声发射方法和 X 射线计算机断层扫描技术(computed tomography, 简称 CT)<sup>[3]</sup>。其中由于 CT 方法能实现对材料任意断面无损观测，同时具有较高的分辨能力，使得这一技术在岩土等材料的细观观测中得到了越来越广泛的应用<sup>[4-10]</sup>。在这些应用中被监测试件基本处在自由状态下。

随着研究的需要深入，越来越多的文献报道了有关 CT 技术应用于三轴压力环境下岩土样变形和破坏等细观观测的研究成果。葛修润等<sup>[11]</sup>研制了岩石三轴 CT 专用试验系统，实现了不卸载扫描，并用该系统完成了单轴和三轴荷载作用下煤岩破坏全过程的细观损伤演化规律的即时动态 CT 试验，在此设备基础上，杨更社等<sup>[12-15]</sup>研究了岩石内部裂纹的演化与 CT 数的关系。C. O. Karacan 和 E. Okandan<sup>[16]</sup>利用 CT 研究煤岩空隙中的瓦斯的吸附和输运。

以上研究采用医用 CT，其空间分辨率较低，难以获取储层的结构特征。工业微焦 CT(简称  $\mu\text{-CT}$ )的发展，使得其空间分辨率较常规医用 CT 提升 2 个数量级以上，能定量地提供物体内部的结构特性，如缺陷的位置，被国际无损检测界称为最佳无损检测手段<sup>[17]</sup>。目前，工业微焦 CT 已经用于测量砂岩<sup>[18-19]</sup>、页岩<sup>[20]</sup>等细观空隙结构测量中。然而，不同于医用 CT 在测试过程中保持检测物静止，工业 CT 一般是被检测物体旋转和平移。因此，如果需要测量三轴应力环境下储层岩样的细观空隙结构，则需要加载装置跟随试样在旋转台上一起旋转。

本文研制出用于工业微焦 CT 扫描的三轴压力室。该设备在未扫描时能够进行应力路径的加卸载，

并预留流体接口，可采用恒流法、恒压法或者瞬态脉冲法进行当前应力状态下试样的渗透系数测量；在进行 CT 扫描的过程中能够维持三轴压力。利用该设备，获得了 Berea 砂岩在常规三轴变形过程中的一系列 CT 图像，并结合 3DMA(3D medial axis method)空隙结构计算方法，得出 Berea 砂岩在不同应力状态下的有效孔隙半径分布、有效喉道半径分布以及弯曲度分布，最后结合不同静水压力下 Berea 砂岩的渗透率变化试验结果，从细观层面上分析引起 Berea 砂岩渗透率改变的内在原因。

## 2 $\mu\text{-CT}$ 及三轴压力室

### 2.1 CT 检测原理

CT 机工作的基本原理是利用 X 射线穿透物体某断面进行扫描，并收集 X 射线经过断面不同物质衰减后的信息，再对收集到的信息进行数据处理，从而得到断面上所有物质点的 X 射线吸收系数值，并形成一幅物体断面的数字图像。技术的本质是重建图像，正是重建图像克服了常规 X 射线机的影像重叠弊病。

### 2.2 $\mu\text{-CT}$ 装置

本试验所用的 CT 设备为 TESCO 公司组装生产的 HMX225 微焦 CT 系统，由 X 射线源、CT 成像系统和 CT 探测器三大部分组成，如图 1 所示。与常规的 X 射线 CT 系统不同，微焦 CT 三轴仪中的电子束在到达 X 射线源之前会变窄，正因为这样，使得微焦 CT 三轴仪较常规的 X 射线 CT 系统有更高的空间分辨率，HMX225 微焦 CT 系统的空间分辨率为 5  $\mu\text{m}$ 。试样放置在由电脑控制的旋转操作台上，试验中 X 射线源不动而试样在水平方向从 0°~360°匀速旋转，从而实现 X 射线对试样的多角度二维面扫描。在旋转过程中，X 光透过样品并发生衰减。在通过图像加强器以后，X 射线被转换成光电子或可见光，数码相机再将这种模拟信号转化成数字信号，利用高分辨率 CCD 采集衰减后的信号并存储为 tiff 格式 12 bit 投影图像。图像的放大倍数由 X 射线源到探测器的距离与 X 射线源到试样距离的比值决定。

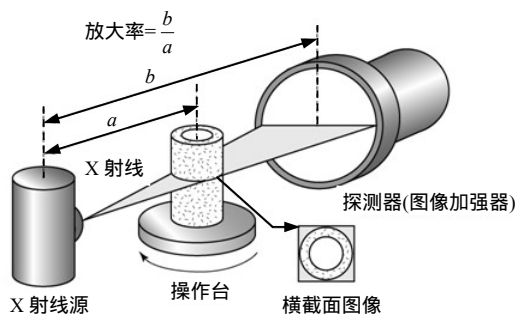


图 1 微焦 CT 系统示意

Fig.1 Sketch of micro focus X-Ray CT system

### 2.3 用于 $\mu$ -CT 扫描的三轴压力室研制

研制用于 CT 扫描的三轴压力室如图 2 所示，目前用于活塞位移测量的直线位移传感器 LVDT 还没有安装。为了能和 $\mu$ -CT 系统配套使用，并且满足本次试验的测试需求，所设计的 CT 三轴压力室具有一些与常规力学试验的三轴压力室不同的特征。

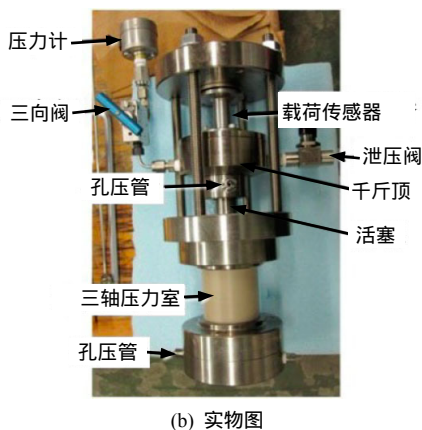
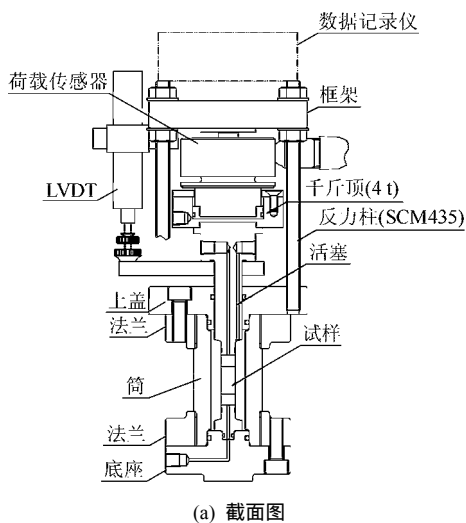


图 2 CT 三轴压力室

Fig.2 CT triaxial pressure vessel

首先，由于 CT 图像的放大倍数由 X 射线源到探测器的距离与 X 射线源到试样距离的比值决定，

试样距离 X 射线源越近，则获取的 CT 图像越大，因此，为了获得更大的 CT 图像，应尽可能采用小尺寸压力室。本文设计的 CT 压力室内径为 20 mm，外径为 30 mm，可以对直径 10 mm、高度 20 mm 的圆柱形试样进行试验。

其次，由于压力室放置在旋转操作台上，受到操作台所能承受重量极限的限制，压力室应采用质量较轻的材料。同时压力室在试验过程中需承受数十兆帕的高压，这就要求制作压力室的材料必须要具有足够的强度。此外，还要求 X 射线能够穿透该材料。综合这些因素，压力室筒壁最终选用 PEEK 材料制作而成。除反力柱采用 SCM435 合金钢外，其余部件均采用钛合金，在满足强度的同时，最大程度降低装置的质量以满足旋转台的要求。

最后，压力室满足同时施加围压、孔隙水压力和轴向压力的要求。上下游孔隙水压力和围压压力管路都配有高压针阀。上下游孔隙水压力管路分别与活塞和压力室底座上的接头相连，并通过一根直径 1/16 英寸的不锈钢管和一道密封 O 型圈与围压系统分隔开。本压力室能施加的最大围压和孔隙压力均为 42 MPa，最大轴向力为 40 kN。

### 3 Berea 砂岩细观特征观测试验

由于外接的瞬态脉冲法装置正在调试的原因，本次试验主要测量砂岩在不同应力状态下的空隙细观结构的变化。同时作为对比试验，测量了该砂岩在不同有效应力下渗透系数的变化。

#### 3.1 试验方案

本次试验采用 Berea 砂岩。该砂岩颗粒很细且有棱角，因此常用作磨石和建构筑物材料。Berea 砂岩具有较高的孔隙度(约 18%)和渗透率，在油气开采、CO<sub>2</sub> 地质封存、核废料地下储存等工程中是一种很好的储集层岩石。用于 $\mu$ -CT 三轴压缩试验中，Berea 砂岩被加工成直径 10 mm、高度 20 mm 的圆柱形试样。

在试样装入三轴压力室之前，利用 $\mu$ -CT 对试样进行扫描，获取试样在自由状态下的 CT 图像。

试样装入 CT 三轴压力室以后，先在试样上施加 15 MPa 的围压，然后施加轴向荷载使试样产生偏应力和变形，获取了偏压为 80 MPa 的 CT 图像。

此外，在同一样本上取如图 3 所示的不同方向，取 3 块 $\phi$ 50 mm $\times$ 100 mm 标准岩芯，利用瞬态脉冲法测量了 Berea 砂岩在有效围压从 0 增至 15 MPa 过程中其渗透率的变化。

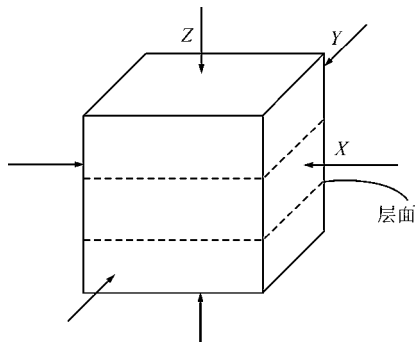


图 3 Berea 砂岩的取样方向

Fig.3 Sampling direction of Berea sandstone

### 3.2 3DMA 空隙结构计算方法

3DMA(three-dimensional medial axis)空隙结构计算方法是由 W. B. Lindquist 和 A. Venkataraman<sup>[21]</sup>开发的计算软件包,该软件包通过分析 3 维 CT 数据,来获取孔径、孔喉和迂曲度等几何信息<sup>[22]</sup>。

CT 数据中的灰度值可以相对反映出试样内部密度的差异,灰度值小的地方密度越小,而灰度值大的地方密度越大。但灰度值绝对大小没有严格的物理意义,不能简单通过比较 CT 数据的灰度值大小来确定像元所表征的是何种物质。要想得到空隙空间结构的量化特征,必须先采用合适的方法对图像进行一定的分析处理,提取出描述试样空隙结构的二值化图像。3DMA 空隙结构分析所采用的 Kriging 算法是基于图像灰度空间相关分析的阈值分割法。对于阈值分割法而言,阈值的选择是关键。阈值选得较低时,孔隙没有被完全提取出来,会使计算得到的孔隙率偏低。相反,阈值选得较高时,部分基体也被提取出来当作孔隙,计算得到的孔隙率偏高。可结合试验测定的试样孔隙率采用逆分析法来确定分割阈值,使得基于 CT 图像计算得到的孔隙率与通过传统试验测得的孔隙率是相等的或相近的,从而分割得到二值化孔隙图像。

3DMA 空隙结构计算方法将多孔介质材料中的空隙分为孔隙和喉道 2 种基本单元<sup>[21]</sup>如图 4 所示。孔隙通常被多个骨架颗粒包围,喉道通常为颗粒间的管状通道,孔隙通过喉道互相联系起来。孔隙的中轴是通过其中心点的直线,喉道的中轴是其旋转对称轴。这样,多孔介质材料的空隙空间就被概化为很多路径和节点构成的网状结构。

孔喉定义为中性轴表征的通道的面积最小横截面。当节点的配位数(共节点的路径数目)大于 3 时,那么该节点处的由各孔喉和颗粒表面所圈闭的空间定义为孔隙,称节点孔隙。图 4 中,若  $V_1$  和  $V_2$  之间的长度小于 2 点分别到颗粒边缘距离的较大值,那

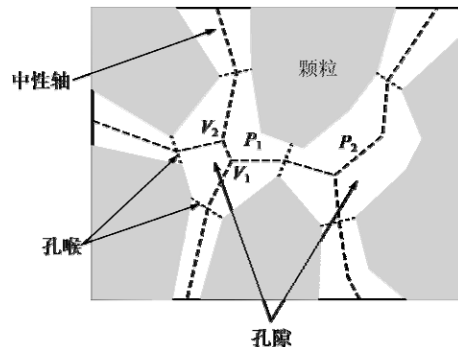


图 4 采用中性轴方法定义孔隙和喉道二维示意图<sup>[21]</sup>

Fig.4 Two-dimensional illustration of pore and throat defined by medial axis method<sup>[21]</sup>

么将  $V_1$  和  $V_2$  融合成一个点,该点的配位数将变成 4。由此很容易理解,配位数为 3 的孔隙是一个喉道分叉成 2 个喉道位置,而配位数为 4 的孔隙则是 2 个喉道交叉的位置。有了表征孔隙和喉道的网状结构图则很容易计算出节点之间的迂曲度。

作为验证,采用 600  $\mu\text{m}$  直径的玻璃珠堆积体进行 CT 扫描<sup>[23]</sup>,如图 5 所示,通过直观观察分析结果是准确的,M. Takahashi 等<sup>[23]</sup>利用不同直径的玻璃珠自由堆积进行了 CT 扫描后,利用 3DMA 获取孔隙度,得出自由堆积的孔隙度介于四方楔形和立方四面体 2 种理论堆积的孔隙度之间。

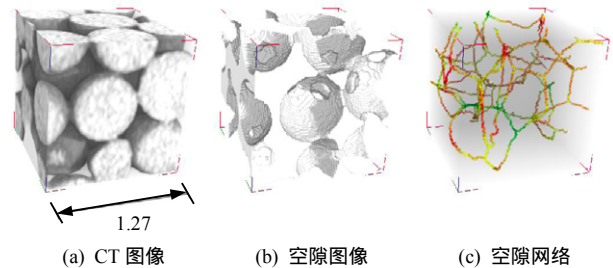


图 5 利用 3DMA 分析 600  $\mu\text{m}$  玻璃珠堆积<sup>[23]</sup>

Fig.5 Three-dimensional image of medial axis in glass beads with diameter of 600  $\mu\text{m}$ <sup>[23]</sup>

### 3.3 试验结果分析

#### (1) Berea 砂岩 CT 扫描结果

为了避免边界部分的影响,选取试样中边长 3 mm 的立方体元进行图像分析。图 6 为截取的自由状态下 Berea 砂岩的 CT 图像,图 7 为从中提取的空隙分布,利用空隙数据计算的自由状态、15 MPa 静水压力以及 80 MPa 的偏压下砂岩的孔隙率分别为 16.68%, 16.36%和 16.10%。

利用 3DMA 方法,获取了自由状态下和 15 MPa 静水压力下路径分布图,如图 8 所示。受压力的影响,砂岩的部分路径被关闭,且路径的截面半径也有所减小。

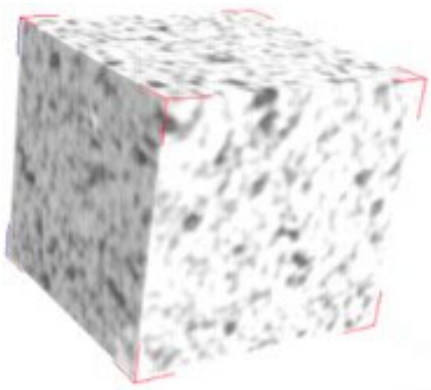


图 6 自由状态下 Berea 砂岩 CT 图像  
Fig.6 CT image of Berea sandstone at free status

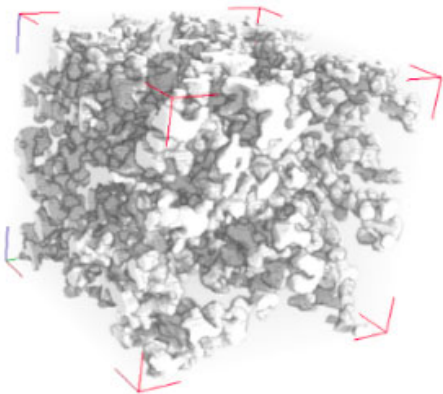


图 7 自由状态下 Berea 砂岩 CT 数据中提取出的空隙  
Fig.7 Extracted pores from Berea sandstone CT volume data at free status

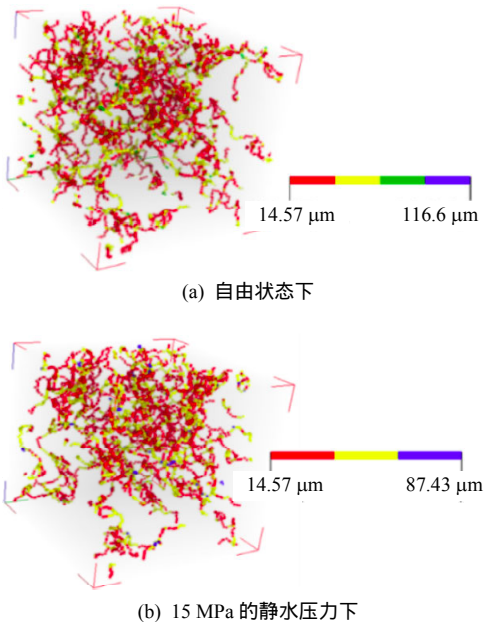


图 8 获取的 Berea 砂岩路径分布图

Fig.8 Extracted path computed by 3DMA method for Berea sandstone

对比分析了自由状态下、15 MPa 静水压力下以及 80 MPa 的偏压下砂岩的有效孔隙半径和喉道半

径的变化,如图 9 所示,图中,纵坐标体现了对应各半径的孔隙或喉道所占的体积分数。从图中可以看出,与自由状态相比,15 MPa 静水压力下的孔隙半径在 40~90 μm 和大于 150 μm 区间有明显较小;砂岩的喉道半径在上述 3 种压力条件下总体上表现一定程度的减小。

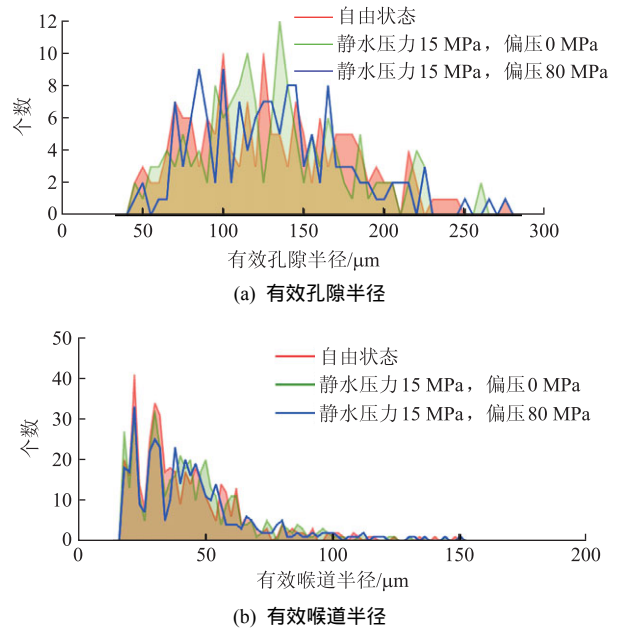
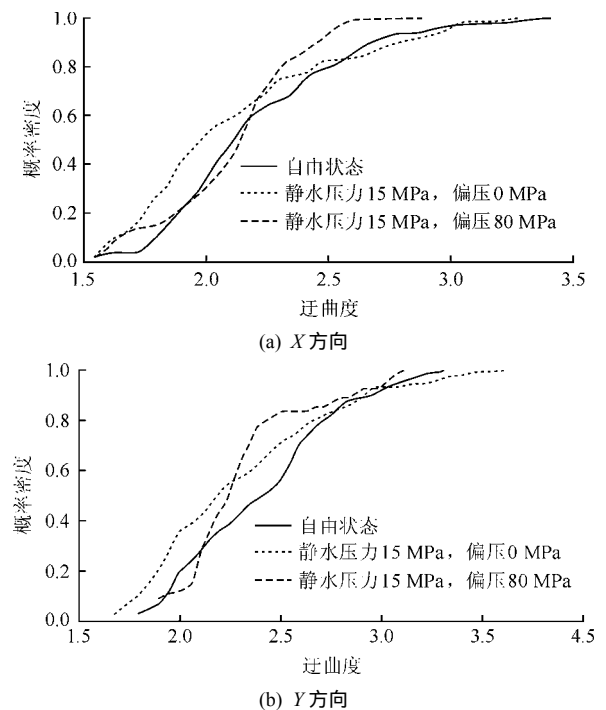


图 9 Berea 砂岩的有效孔隙半径和有效喉道半径分布  
Fig.9 Distribution of pore radii and throat radii of Berea sandstone

图 10 为 Berea 砂岩不同方向的迂曲度,由图中可知,各个方向的迂曲度变化随压力的变化没有特别明显的规律,但基本上 X 和 Y 方向的迂曲度变化较小,Z 方向的迂曲度随围压增大明显增大。



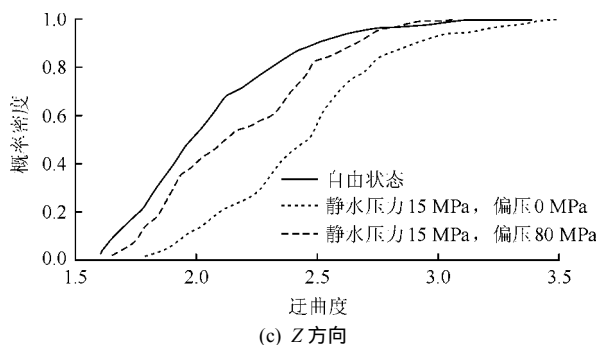


图 10 Berea 砂岩不同方向的迂曲度

Fig.10 Tortuosity distribution in different directions of Berea sandstone

### (2) Berea 砂岩渗透率测试结果

采用瞬态脉冲法测量了 Berea 砂岩在有效围压从 0 增至 15 MPa 过程中其渗透率的变化,如图 11 所示。

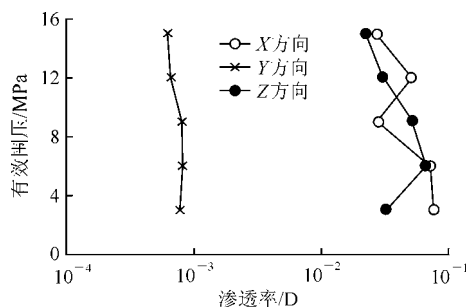


图 11 不同围压下 Berea 砂岩渗透率

Fig.11 Permeability under different effective confining pressures of Berea sandstone

从图 11 中可以看出,整体上渗透率随着有效围压的增大而减小,此外 X 和 Z 方向的渗透系数基本上相同,且与有效围压的关系也是基本相同。但是, Y 方向的渗透率则小约 2 个数量级,这与直观想象砂岩受层面的影响,从而 X 和 Y 方向渗透率相当而与 Z 方向相异的推断不同。

此外,渗透率在有效压力初始增大表现出小幅的增大,这个与 C. David 等<sup>[24]</sup>研究基本一致。

### (3) Berea 砂岩空隙结构变化对渗透特性影响

随着有效围压的增加,静水压力状态下 Berea 砂岩渗透率持续降低。对比有效围压为 0 和 15 MPa 两种静水压力状态下 Berea 砂岩的微观解析图(见图 9, 10)不难发现,随着静水压力的增加,半径 40~100 μm 的孔隙,喉道数量和孔喉半径减少,以及 Z 方向的迂曲度增加,这是导致 Berea 砂岩渗透率降低的主要原因。

## 4 结 论

本文在 μ-CT 平台的基础上,研制了可进行工业

级 CT 扫描的三轴压力装置,利用该装置进行了 Berea 砂岩在不同压力下的 CT 扫描,结合 3DMA 空隙结构计算方法,获取了其微观空隙结构,并与该砂岩的宏观渗透参数进行对比,形成如下结论:

(1) CT 技术能有效应用于材料微观结构的无损检测,本文成功研制了一种能和微焦 X 射线 CT 系统配套使用的三轴仪。其优点在于:能实现对材料的工业级 CT 扫描,空间分辨率高(5 μm),可用于观测细颗粒材料在常规三轴变形过程中的微观结构变化;此外,可同时施加围压、孔隙水压力和轴向压力,并预留流体接口,可采用恒流法、恒压法或者瞬态脉冲法进行当前应力状态下试样的渗透系数测量。

(2) 利用研制的微焦 X 射线 CT 三轴仪,获得了 Berea 砂岩在三轴加载过程中的一系列 CT 图像,结合 3DMA 空隙结构计算方法,得到了 Berea 砂岩在不同应力状态下的孔隙度、有效孔隙半径分布、有效喉道半径分布以及弯曲度分布,充分证明了微焦 X 射线 CT 三轴仪的研制是成功的。

(3) 基于不同围压下 Berea 砂岩的渗透率试验结果,对比有效围压为 0 和 15 MPa 两种静水压力状态下 Berea 砂岩的微观解析图,可以看出,渗透率随围压大小发生变化主要是由于其内部的微观结构特征发生了改变,微观空隙结构的变化是引起渗透率改变的根本原因。

## 参考文献(References):

- [1] 谢青,牛聪,李道伦,等. 基于数字岩芯的微观孔隙体参数对渗透率影响的机理研究[C]// 第七届全国流体力学学术会议论文摘要集. [S. l.]: [s. n.], 2012: 84.(XIE Qing, NIU Cong, LI Daolun, et al. The influence of the microscopic pore parameters to permeability based on the digital core[C]// The 7th National Conference on Fluid Mechanics Abstract Set. [S. l.]: [s. n.], 2012: 84.(in Chinese))
- [2] LI X C. Permeability change in sandstones under compressive stress conditions[Ph. D. Thesis][D]. Hitachi: Ibaraki University, 2001.
- [3] 丁卫华, 仵彦卿, 曹广祝, 等. 三轴条件下软岩变形破坏过程的 CT 图像分析[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(3): 32-35.(DING Weihua, WU Yanqing, CAO Guangzhu, et al. The CT image analysis on the soft rock deformation and damage process under triaxial condition[J]. Coal Geology and Exploration, 2003, 31(3): 32-35.(in Chinese))
- [4] 马文国, 刘傲雄. CT 扫描技术对岩石孔隙结构的研究[J]. 中外能源, 2011, 16(7): 54-56.(MA Wenguo, LIU Aoxiong. The study of the pore structure parameters in rocks by CT scanning technology[J]. Sino-global Energy, 2011, 16(7): 54-56.(in Chinese))
- [5] 杨更社, 张全胜, 蒲毅彬. 冻结温度影响下岩石微观损伤演化 CT

- 扫描[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2004, 24(6): 40–46.(YANG Gengshe, ZHANG Quansheng, PU Yibin. CT scanning test of meso-damage propagation of rock under different freezing temperature[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(6): 40–46.(in Chinese))
- [6] 刘波, 李东阳, 刘璐璐, 等. 冻土正融过程 CT 扫描试验及图像分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(12): 2 014–2 019.(LIU Bo, LI Dongyang, LIU Lulu, et al. CT scanning and images analysis during frozen soil thawing[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2 014–2 019.(in Chinese))
- [7] 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 Yangsheng, MENG Qiaorong, KANG Tianhe, 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))
- [8] 高建, 刘鹏, 柳汉明, 等. 应用 CT 成像进行碳酸盐岩储层孔隙表征[J]. 西部探矿工程, 2010, (4): 36–39.(GAO Jian, LIU Peng, LIU Hanming, et al. Study of carbonate core porosity distribution features using X-ray CT[J]. West-China Exploration Engineering, 2010, (4): 36–39.(in Chinese))
- [9] 周念清, 宋玮, 大谷顺, 等. 应用 CT 扫描研究非饱和砂土中污染物的迁移规律[J]. 水文地质工程地质, 2010, 37(6): 97–101.(ZHOU Nianqing, SONG Wei, JUN Otani, et al. A study of the pollutant migration in unsaturated sand by CT scanning[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2010, 37(6): 97–101.(in Chinese))
- [10] 赵碧华. 用 CT 扫描技术观测岩心中液流特性[J]. 石油学报, 1992, 13(1): 91–97.(ZHAO Bihua. An observation on the feature of fluid flow through rock core by means of CT scanning[J]. Acta Petrolei Sinica, 1992, 13(1): 91–97.(in Chinese))
- [11] 葛修润, 任建喜, 蒲毅彬, 等. 煤岩三轴细观损伤演化规律的 CT 动态试验[J]. 岩石力学与工程学报, 1999, 18(5): 497–502.(GE Xiurun, REN Jianxi, PU Yibin, et al. A real-in-time ct triaxial testing study of meso-damage evolution law of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1999, 18(5): 497–502.(in Chinese))
- [12] 杨更社, 谢定义, 张长庆. 岩石损伤 CT 数分布规律的定量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(3): 279–285.(YANG Gengshe, XIE Dingyi, ZHANG Changqing. The quantitative analysis of distribution regulation of CT values of rock damage[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1998, 17(3): 279–285.(in Chinese))
- [13] 任建喜, 葛修润, 蒲毅彬. 岩石破坏全过程的 CT 细观损伤演化机理动态分析[J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 12–15.(REN Jianxi, GE Xiurun, PU Yibin. CT Real-time analysis of meso-damage propagation law of the whole process of rock failure[J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(2): 12–15.(in Chinese))
- [14] 丁卫华, 仵彦卿, 蒲毅彬, 等. 受力岩石密度损伤增量及其数字图像[J]. 西安理工大学学报, 2000, 16(1): 61–64.(DING Weihua, WU Yanqing, PU Yibin, et al. The density damage increment and its digital image of rock in compression[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2000, 16(1): 61–64.(in Chinese))
- [15] 仵彦卿, 丁卫华, 蒲毅彬, 等. 压缩条件下岩石密度损伤增量的 CT 动态观测[J]. 自然科学进展, 2000, 10(9): 830–835.(WU Yanqing, DING Weihua, PU Yibin, et al. CT Real-time observation of rock density damage increment under compression condition[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(9): 830–835.(in Chinese))
- [16] KARACAN C O, OKANDAN E. Adsorption and gas transport in coal microstructure: investigation and evaluation by quantitative X-ray CT imaging[J]. Fuel, 2001, 80(4): 509–520.
- [17] 郭海燕. 图像分割算法研究及在工业 CT 中的应用[硕士学位论文][D]. 重庆: 重庆大学, 2009.(GUO Haiyan. Study on image segmentation algorithm and application in industrial CT[M. S. Thesis][D]. Chongqing: Chongqing University, 2009.(in Chinese))
- [18] 苏娜, 段永刚, 于春生. 微 CT 扫描重建低渗气藏微观孔隙结构——以新场气田上沙溪庙组储层为例[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 792–796.(SU Na, DUAN Yonggang, YU Chunsheng. Reconstruction of microscopic pore structure in low permeability gas reservoirs by micro-CT scanning: an example from the upper Shaximiao formation in Xinchang gas field[J]. Oil and Gas Geology, 2011, 32(5): 792–796.(in Chinese))
- [19] 白斌, 朱如凯, 吴松涛, 等. 利用多尺度 CT 成像表征致密砂岩微观孔隙结构[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(3): 329–333.(BAI Bin, ZHU Rukai, WU Songtao, et al. Multi-scale method of Nano (mirco)-CT study on microscopic pore structure of tight sandstone of Yanchang formation, Ordos basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(3): 329–333.(in Chinese))
- [20] 崔景伟, 邹才能, 朱如凯, 等. 页岩孔隙研究新进展[J]. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1 319–1 325.(CUI Jingwei, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. New advances in shale porosity research[J]. Advances in Earth Science, 2012, 27(12): 1 319–1 325.(in Chinese))
- [21] LINDQUIST W B, VENKATARANGAN A. Investigating 3D geometry of porous media from high resolution images[J]. Physics and Chemistry of the Earth Part A, 1999, 25(7): 593–599.
- [22] LINDQUIST W B, VENKATARANGAN A, DUNSMUIR J, et al. Pore and throat size distributions measured from synchrotron X-ray tomographic images of Fontainebleau sandstones[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(B9): 21 509–21 527.
- [23] TAKAHASHI M, KATO M, SATO M, et al. Three-dimensional geometrical information of preexisting pores under poroelastic deformation of Berea sandstone[C]// Proceedings of the 2012 World Congress on Advances in Civil, Environmental, and Materials Research. Seoul: [s. n.], 2012: 31–42.
- [24] DAVID C, WONG T F, ZHU W, et al. Laboratory measurement of compaction-induced permeability change in porous rocks: implications for the generation and maintenance of pore pressure excess in the crust[J]. Pure and Applied Geophysics, 1994, 143(1/3): 425–456.