

# 岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究<sup>1)</sup>

薛华庆<sup>\*,†,2)</sup> 胥蕊娜<sup>\*</sup> 姜培学<sup>\*</sup> 周尚文<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(热科学与动力工程教育部重点实验室, 清华大学热能工程系, 北京 100084)

<sup>†</sup>(中国石油非常规油气重点实验室, 中国石油勘探开发研究院廊坊分院, 河北廊坊 065007)

**摘要** 岩石微观结构特征研究对非常规油气藏的演化规律、油气赋存状态、运移方式、渗流特征等基础地质问题研究具有重要的科学意义. 利用 CT 扫描技术对油砂、致密砂岩和页岩样品微观结构表征研究, 并对比了常规测试方法与 CT 扫描表征技术的差异性. 对比 CT 扫描法和筛分法测试油砂矿物的粒度分布, 两者结果十分接近, 矿物颗粒大小分布总体趋势上差异小, 但小于  $96\mu\text{m}$  的颗粒矿物分布差异性稍大. CT 扫描结果显示致密砂岩样品的裂缝比较发育, 还发育溶蚀孔隙. 由于测试方法和样品大小的差异性, CT 扫描获得的孔隙度略大于氦气法孔隙度. 微米 CT 扫描可以表征页岩的层理发育情况, 但无法表征内部的微观孔隙结构. 与常规测试方法相比, 纳米 CT 扫描表征页岩中有机质和黄铁矿的含量等方面准确性好, 但孔隙度测试结果偏小. 纳米 CT 分辨率还不能完全满足表征页岩的微观孔隙结构的要求, 同时有机质和孔隙的灰度值差异较小, 两者区分难度大, 因此纳米 CT 还无法完全准确表征页岩微观孔隙结构.

**关键词** 岩石, 微观结构, 表征

中图分类号: TE122.2\*3 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-15-102

## 引言

岩石孔隙结构是指岩石所具有的孔隙和喉道的几何形状、大小、分布、相互连通情况, 以及孔隙与喉道间的配置关系等. 它反映岩石中各类孔隙与孔隙之间连通喉道的组合, 是孔隙与喉道发育的总貌. 与常规油气相比, 非常规油气储集层具有非均质性强, 孔隙喉道小, 以纳米级孔隙结构为主, 局部发育毫米-微米级孔隙, 不同微观尺度孔隙结构复杂多样, 储集层特征不清等特点. 非常规油气储集层的岩石孔隙结构特征研究, 对其演化规律、油气赋存状态、运移方式、渗流特征等基础地质问题研究具有重要的科学意义<sup>[1-7]</sup>.

目前, 岩石孔隙结构表征方法包括压汞法、低温氮气吸附法、扫描电镜法和 CT 扫描法等, 其中 CT 扫描法可以对岩心进行多尺度的结构表征, 同时不会对岩石内部结构造成损伤<sup>[8-11]</sup>. 该方法已经在岩石孔隙结构表征、岩石裂缝发育特征和储层流体特性

表征等方面得到了广泛的应用. 国内外学者利用 CT 扫描技术对岩石的孔隙结构、孔隙度、含水饱和度、含气饱和度和有机质含量等参数进行了研究. Yun 等<sup>[12]</sup> 和杨永明等<sup>[13]</sup> 利用 CT 扫描技术研究岩石的非均质性和层理的发育方向, 对岩石的导热性、流体流动特征和岩石力学性质的影响. Li 等<sup>[14]</sup> 和张顺康等<sup>[15]</sup> 利用 CT 扫描进行水驱油的实验, 研究油、水和残余油的分布状况. 王家禄等<sup>[16]</sup>, 鞠杨<sup>[17]</sup> 和 Andra 等<sup>[18]</sup> 利用不同数学模型对 CT 扫描的图片进行过滤处理, 可以得到不同的孔隙结构和孔隙度等效果. 这些 CT 扫描的分辨率都大于  $10\mu\text{m}$ , 研究对象主要为常规油气的储集层. 对于致密砂岩气和页岩气等非常规油气的储集层的微观表征, CT 扫描分辨率需要亚微米和纳米级别. 同时对于分辨率小于  $10\mu\text{m}$  微米甚至纳米级别的 CT 扫描技术在致密砂岩和页岩等致密岩石方面的研究报道较少.

针对现有 CT 扫描分辨率不能完全适用于纳米级孔隙发育的致密岩石的微观结构表征, 本文开展

2015-03-27 收稿, 2015-06-18 录用, 2015-06-25 网络版发表.

1) 国家自然科学基金项目 (51376104) 和国家“973”项目 (2013CB228001) 资助.

2) 薛华庆, 在读博士生, 主要研究方向: 非常规油气储层实验测试技术研究. E-mail: hqxue@petrochina.com.cn

**引用格式:** 薛华庆, 胥蕊娜, 姜培学, 周尚文. 岩石微观结构 CT 扫描表征技术研究. 力学学报, 2015, 47(6): 1073-1078

Xue Huaqing, Xu Ruina, Jiang Peixue, Zhou Shangwen. Characterization of rock microstructure using 3D x-ray computed tomography.

*Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(6): 1073-1078

了油砂、致密砂岩和页岩的微米 CT 扫描以及页岩的纳米 CT 的微观表征, 对比了常规测试方法与 CT 扫描结果, 为 CT 扫描技术表征致密岩石和页岩非均质性和孔隙结构等方面的提供一定的参考意义。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品

本次实验样品为油砂、致密砂岩和页岩, 分别采自准格尔盆地、鄂尔多斯盆地和四川盆地。按照国家标准 GB/T 29172-2012, 利用抽提法测得油砂样品的重量百分比含油率为 9.22%, 剩余矿物残渣含量为 85.73%。利用筛分法对抽提后的油砂矿物残渣进行的粒度分析, 结果见图 1。利用波义耳定律测得致密砂岩和页岩的氦气孔隙度分别为 4.52% 和 3.96%。按照国家标准 GB/T19145-2003 测得页岩中的总有机碳 (TOC) 含量为 1.95%。按照行业标准 SY/T 5163-2010, 对抽提后的油砂矿物残渣、致密砂岩和页岩的矿物组成成分进行分析, 结果见表 1。

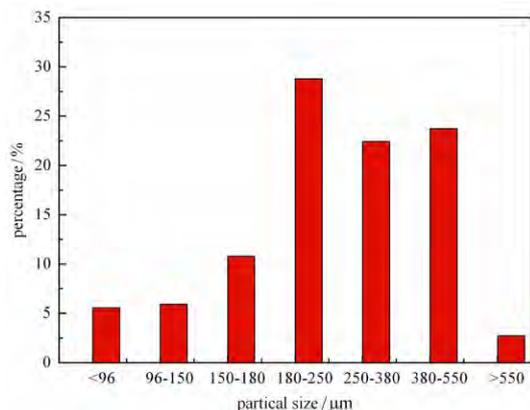


图 1 油砂矿物颗粒的粒度分布

Fig. 1 Size distribution of oil sand mineral particle

表 1 岩石样品的矿物组成成分分析

Table 1 Mineral component of rock samples

Sample	Mineral components / %				
	quartz	feldspar	carbonate	pyrite	clay
oil sand	76	20	Nd	Nd	4
tight sand	86	11	3	Nd	Nd
shale	31	16	17	2	34

Note: Nd—No detected

### 1.2 实验仪器

CT 扫描实验所采用仪器为 Xradia 公司生产的微米 CT 扫描仪 MicroXCT-400 (简称“微米 CT”) 和纳米 CT 扫描仪 UltraXRM-L200 (简称“纳米 CT”),

两者虽然放大倍数不一样, 但光学原理基本相同。微米 CT 仪器的 X 射线源电压为 40 ~ 150 kV, 最大测量样品的直径为 50 mm, 最大样品高度 40 mm。根据样品大小可以调整仪器的 X 射线源电压、放大倍数等参数, 来获得最佳的 CT 扫描图像, 仪器最大分辨率可以达到 0.7  $\mu\text{m}$ 。纳米 CT 的 X 射线源电压恒定为 40 kV, 射线的光子能量为 8 keV, 推荐样品尺寸为直径约 100  $\mu\text{m}$  的近似圆柱体, 仪器扫描模式分为两种: (1) 大视野模式 (large field of view), 视域为 65  $\mu\text{m}$ , 分辨率为 150 nm; (2) 高分辨率模式 (high resolution), 视域为 15  $\mu\text{m}$ , 分辨率为 50 nm。

在扫描的过程中, 始终保持 X 射线源和探测器的位置不变, 样品匀速从  $-180^\circ$  旋转至  $180^\circ$ , 每旋转  $n$  度拍摄 1 张图片。

## 2 结果与讨论

本次研究主要利用微米 CT 分别对油砂、致密砂岩和页岩进行了扫描实验, 利用纳米 CT 对页岩进行了扫描, 获取岩石样品的 CT 扫描的图像如图 2 所示, 其相应样品的图像的总张数和分辨率等参数, 见表 2。CT 扫描的原理是 X 射线穿透物质后, X 射线强度的衰减程度与物体的密度及物体的厚度成正比。CT 扫描图片的灰度值直接表现了 X 射线的衰减程度: 颜色由黑到白变化, 物质的密度越大, X 射线衰减程度高, 灰度值大; 而孔隙和裂隙的成分为

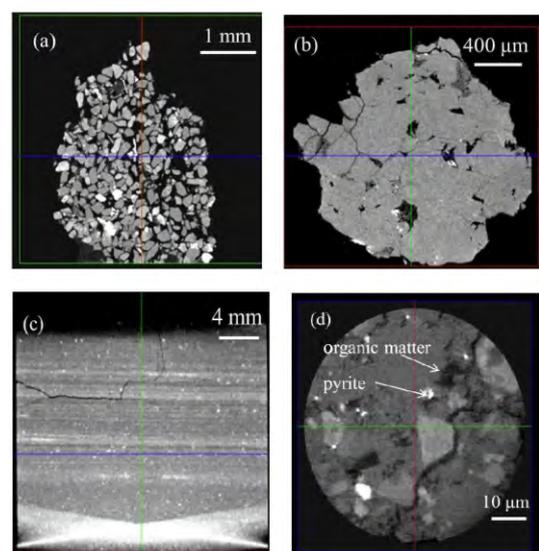


图 2 岩石样品 CT 扫描图像

(a) 油砂; (b) 致密砂岩; (c) 页岩 (微米 CT); (d) 页岩 (纳米 CT)

Fig. 2 CT images of rock samples

(a) Oil sand, (b) Tight sand, (c) Shale (Micro-CT), (d) Shale (Nano-CT)

表 2 样品 CT 扫描图像属性

Table 2 The CT scan image properties of samples

Sample	Apparatus	Image number	Resolution
oil sand	MicorCT	1 801	4.4 $\mu\text{m}$
tight sand	MicorCT	1 801	2.0 $\mu\text{m}$
shale	MicorCT	2 401	26.2 $\mu\text{m}$
	NanoCT	901	0.13 $\mu\text{m}$

空气, 密度小, X 射线衰减程度低, 表现为黑色, 灰度值小。

对 CT 扫描图像进行分析后, 利用 Avizo Fire 8.0 软件对图像进行数据处理, 并提取微观结构的信息与参数, 主要步骤依次为数据导入、图像过滤、分割和数据统计。

## 2.1 油砂

图 2(a) 为油砂样品的 CT 扫描图像, 其颗粒大小为  $2\text{ mm}\times 3\text{ mm}\times 3\text{ mm}$  左右, 其中颜色为灰色的部分为矿物颗粒, 矿物颗粒之间的黑色部分的油、水和气等低密度物质。从 CT 扫描图像可以发现, 油砂内部的矿物颗粒十分松散, 颗粒轮廓容易辨认, 同时矿物颗粒分布比较均匀, 分选较好, 但颗粒的磨圆度较差。

选取大小为  $1.5\text{ mm}\times 0.7\text{ mm}\times 1.6\text{ mm}$  数据体进行处理分析, 统计出油砂中矿物颗粒体积占总体积 60.78%。图 2(a) 可以看出, 油砂矿物颗粒骨架中基本充满了油砂油, 矿物颗粒骨架剩余部分为油砂油的体积约 40.0%。假设油砂油的密度约为  $0.90\text{ cm}^3/\text{g}$ , 已知石英和长石的密度约为  $2.60\text{ cm}^3/\text{g}$  [21], 计算出油砂中矿物颗粒的质量百分数约为 81.25%。与抽提法测量油砂中矿物残渣 (85.73%) 相比, 结果十分接近。对矿物的颗粒大小统计分类, 发现该样品的矿物颗粒大小主要分布在  $180\sim 550\ \mu\text{m}$ , 约占总量的 90.62% (图 3), 这也表明该样品的粒度分布比较均匀, 分选较好。

从图 1 可以看出筛分法得到矿物颗粒大小为  $150\sim 550\ \mu\text{m}$  的样品占总量的 85.76%, 而颗粒大小为  $180\sim 550\ \mu\text{m}$  的矿物占总量的 74.96%。从总体的趋势来看, 筛分法和 CT 扫描法获得的矿物颗粒分布结果较为相近, 小于  $96\ \mu\text{m}$  的矿物颗粒含量差异稍大。主要原因为筛分法是将抽提后的矿物残渣进行分析, 在长时间的抽提和筛分的过程中会对矿物的颗粒造成一定破坏, 而 CT 扫描是一种无损检测方法, 充分保证了矿物的原始结构; 同时 CT 扫描所选取的样

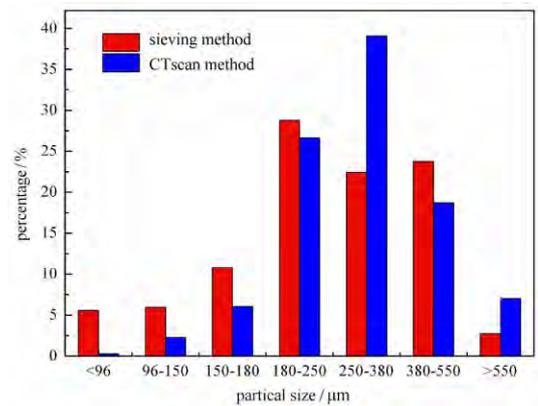


图 3 筛分法与 CT 扫描法的油砂矿物颗粒分布

Fig. 3 Size distribution of oil sand mineral particle by sieving method and CT scan method

品颗粒较小。因此, 直径小于  $96\ \mu\text{m}$  的矿物分布差异性较大。由于 CT 扫描是一种无损检测方法, 因此 CT 扫描图像分析得到的粒度分布结果更为可靠。

## 2.2 致密砂岩

图 2(b) 为致密砂岩的 CT 扫描图像, 颗粒大小约为  $1.0\text{ mm}\times 1.0\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$ 。该样品的主要成分为石英, 所以图像中灰色的部分主要为石英矿物。从图像上发现该样品的石英矿物颗粒很小, 用微米 CT 无法分辨出其的轮廓。CT 扫描图像中黑色部分为岩石孔隙, 该样品的裂缝比较发育, 还发育溶蚀孔隙。这些孔隙和裂缝为油气的储层提供了大量的空间, 裂缝为油气的运移和排采提供重要的通道。

选取约为  $1.0\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$  数据体, 进行图像处理, 分割出岩石内部的孔隙, 对孔隙大小进行统计分析 (图 4)。结果显示所选取区域样品的总孔隙度为 5.65%, 略大于与常规的氦气法测量孔隙度 (4.52%)。主要原因是常规孔隙度测试方法测得样品的孔隙度为有效孔隙度, 而 CT 扫描图像处理得到的孔隙度为总孔隙度; 同时该样品溶蚀孔隙较为发育, 选择图像处理的数据体部分孔隙较为发育, 所以测量结果偏大。

孔径分布统计结果发现该样品中存在两个连通性好的孔隙, 直径分别为  $949.25\ \mu\text{m}$  和  $852.01\ \mu\text{m}$ , 体积分别为  $1.19\times 10^7\ \mu\text{m}^3$  和  $7.55\times 10^6\ \mu\text{m}^3$  (图 5)。这两个孔隙的体积占孔隙总体积的 95% 左右, 两个孔隙的面积占孔隙总表面积的 90% 以上。直径小于  $200\ \mu\text{m}$  的孔隙, 主要为孤立的孔, 体积约占量的 5%, 面积约占总量的 10%。

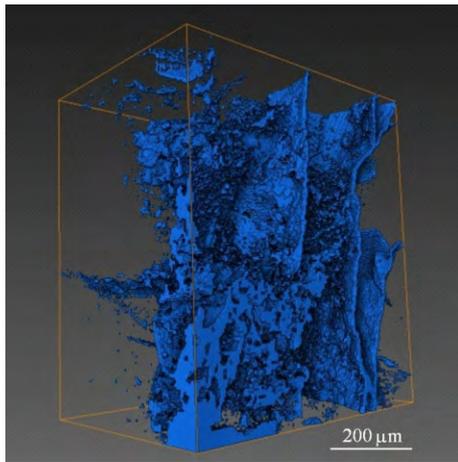


图 4 致密砂岩孔隙与裂缝的分割图

Fig. 4 The segmentation of pore and fracture in tight sand

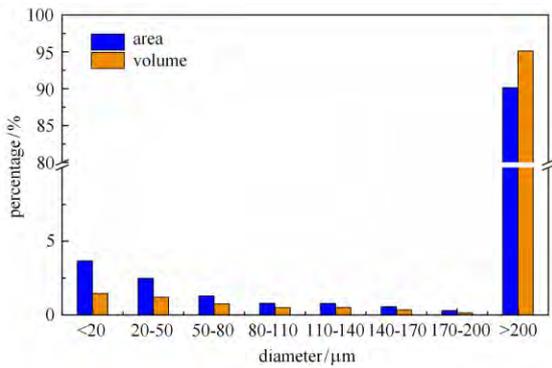


图 5 致密砂岩中孔隙的面积和体积分布图

Fig. 5 The pore area and volume distribution in tight sand

### 2.3 页岩

从图 2(c) 页岩的微米 CT 扫描图像可以看出, 页岩十分致密, 发育水平层理, 非均质性强, 内部基本不发育微米级的孔隙与裂缝, 但有一些人工钻取样品时产生的裂缝. 从整体来讲, 微米 CT 无法清晰的观察到页岩内部的微观孔隙结构. 因此, 需要利用分辨率更高的设备进行微观结构的表征.

由于纳米 CT 的视域只有  $65\ \mu\text{m}$ , 它样品的尺寸的要求也远远小于微米 CT. 本文对该页岩样品进行破碎, 选取直径约  $100\ \mu\text{m}$  的近圆柱体样品进行纳米 CT 扫描, 结果见图 2(d). 图 2(d) 为纳米 CT 扫描的整个视域, 图中灰度值低的块状和条带状的物质主要为低密度物质. 这些低密度物质内部还存在一些灰度值更低的物质, 即为孔隙. 国内外学者研究发现, 页岩的有机质中发育大量的孔隙, 是页岩气的吸附的主要空间 [19-20]. 因此, 可以推断这些灰度值低的块状和条带状物质为有机质. 由于 X 射线的吸收与

原子序数相关, 图像中灰度值高的白色矿物代表原子序数大, 因此白色矿物主要为黄铁矿和钙质矿物等. 由于黄铁矿的形态主要以莓球状、微粒状为主, 因此, 图像中球状的亮色矿物主要为黄铁矿.

选取直径为  $50\ \mu\text{m}$ , 高为  $35\ \mu\text{m}$  的圆柱体数据体进行处理, 对页岩中黄铁矿、有机质和孔隙进行分割, 结果见图 6. 统计发现页岩中黄铁矿、有机质和孔隙占样品总体积的比例分别为 0.74%, 2.55% 和 0.08%, 剩余的矿物体积为 96.63%. 假设剩余矿物 (石英、长石、方解石和白云石) 的密度为  $2.60\ \text{cm}^3/\text{g}$ , 已知黄铁矿的密度约为  $5.0\ \text{cm}^3/\text{g}$ , 有机质的密度约  $1.25\ \text{cm}^3/\text{g}$ . 将物质的体积分量转化为质量分量, 得到黄铁矿和有机质的质量百分比为 1.44% 和 1.09%, 这与 X 射线衍射法测得的结果基本相符. 统计黄铁矿的颗粒大小发现, 粒径大于  $3\ \mu\text{m}$  的矿物体积占黄铁矿总体积的 70%, 但其面积占总面积不足 50% (图 7).

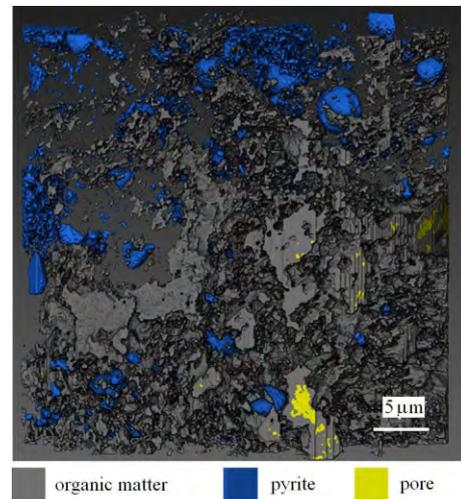


图 6 页岩中不同成分的分割图

Fig. 6 The segmentation of different component in shale

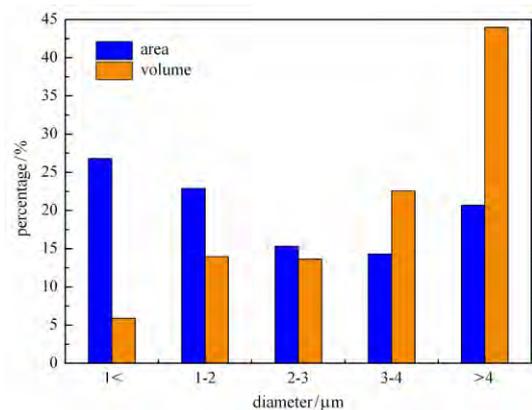


图 7 页岩中黄铁矿颗粒面积和体积分布图

Fig. 7 The pyrite area and volume distribution in shale

主要因为粒径小于  $2\ \mu\text{m}$  的样品数量较多, 使得黄铁矿样品虽然体积小, 但面积大。

与常规氦气孔隙度测试结果相比, 发现 CT 扫描表征页岩的孔隙度偏小。从孔径分布统计结果可以看出, 直径为  $0.25\sim 1.5\ \mu\text{m}$  的孔隙占主要部分 (图 8)。目前国内外学者研究发现, 页岩有机质孔的发育主要分布在  $0.8\times 10^{-2}\sim 5\times 10^{-2}\ \mu\text{m}^{[22]}$ , 这与纳米 CT 扫描表征页岩孔隙结构的结果存在很大差异。造成孔隙度和孔径分布结果差异较大的主要原因为纳米 CT 的分辨率 ( $150\ \text{nm}$ ) 还不能完全满足表征页岩中纳米级孔隙尺度的要求, 同时页岩中有机质和孔隙之间的灰度值相差较小, 对孔隙和有机质的分割造成很大的困难。

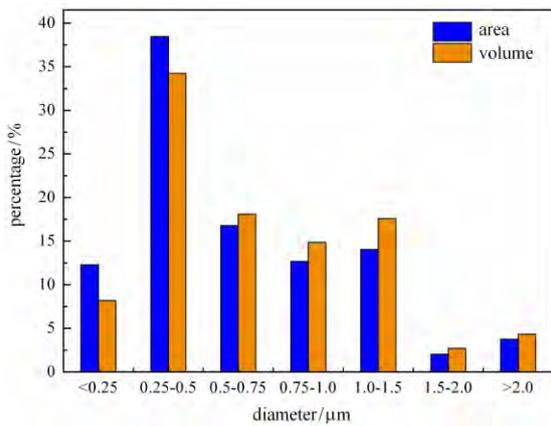


图 8 页岩中孔隙的面积和体积分布图

Fig. 8 The pore area and volume distribution in shale

### 3 结论

微米 CT 可以对油砂的颗粒粒度分布进行有效的表征, 得到油砂的矿物含量为 60.78% 和矿物颗粒大小主要分布在  $180\sim 550\ \mu\text{m}$ 。与筛分法相比, 该方法测量得到的矿物粒度分布总体趋势上差异小, 但小于  $96\ \mu\text{m}$  的颗粒矿物分布差异性稍大。

研究致密砂岩的微米 CT 扫描发现该样品的裂缝比较发育, 还发育溶蚀孔隙。CT 扫描法得到样品的总孔隙度为 5.65%, 略大于与常规的氦气法测量孔隙度。该样品中存在两个连通性好的孔隙, 占孔隙总体积的 95% 左右, 两个孔隙的面积占孔隙总表面积的 90% 以上。

微米 CT 扫描基本可以分辨出页岩的水平层理发育情况, 但是无法表征页岩的微观孔隙结构。纳米 CT 扫描表征页岩内部的有机质、黄铁矿和孔隙等微观结构, 发现页岩中有机质、黄铁矿和孔隙占总体积

的比例分别为 2.55%、0.74% 和 0.08%。对比 CT 扫描法与常规测试方法, 两者黄铁矿和有机质的测试结果基本相近, 但是 CT 扫描法的孔隙度结果偏小, 孔径分布不符页岩实际特征。因此, 纳米 CT 扫描在表征页岩内部的微观孔隙结构方面还需要进行相应的改进。

### 参 考 文 献

- 张曙光, 石京平, 刘庆菊等. 低渗致密砂岩气藏岩石的孔隙结构与物性特征. 新疆地质, 2004, 22(4): 438-441 (Zhang Shuguang, Shi Jingping, Liu Qingju, et al. Research on Pore structure and character of tight sand gas reservoirs. *Xinjiang Geology*, 2004, 22(4): 438-441 (in Chinese))
- 蔡忠. 储集层孔隙结构与驱油效率关系研究. 石油勘探与开发, 2000, 27(6): 45-46, 49 (Cai Zhong. The study on the relationship between pore structure and displacement efficiency. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(6): 45-46, 49 (in Chinese))
- Ross DJK, Bustin RM. The importance of shale composition and pore structure upon gas storage potential of shale gas reservoirs. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 26(6): 916-927
- Ioannidis MA, Chatzis I. Network modeling of pore structure and transport properties of porous media. *Chemical Engineering Science*, 1993, 48(5): 951-972
- 朱如凯, 白斌, 崔景伟等. 非常规油气致密储集层微观结构研究进展. 古地理学报, 2013, 15(5): 615-623 (Zhu Rukai, Bai Bin, Cui Jingwei, et al. Research advances of microstructure in unconventional tight oil and gas reservoirs. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15(5): 615-623 (in Chinese))
- 邹才能, 朱如凯, 白斌等. 中国油气储层中纳米孔首次发现及其科学价值. 岩石学报, 2011, 27(6): 1857-1864 (Zou Caineng, Zhurukai, Bai Bing, et al. First discovery of nano-pore throat in oil and gas reservoir in China and its scientific value. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(6): 1857-1864 (in Chinese))
- 王玉丹, 杨玉双, 刘可禹等. 非常规油气储集层多尺度连通性的定量显微 CT 研究. 矿物岩石地球化学通报, 2015, 34(1): 86-92 (Wang Yudan, Yang Yushuang, Liu Keyu, et al. Quantitative and multi-scale characterization of pore connections in tight reservoirs with micro-CT and DCM. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2015, 34(1): 86-92 (in Chinese))
- 马文国, 刘傲雄. CT 扫描技术对岩石孔隙结构的研究. 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. *Sino-global Energy*, 2011, 16(7): 54-56 (in Chinese))
- Peng RD, Yang YC, Ju Y, et al. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(31): 3346-3357
- Clarkson CR, Solano N, Bustin RM, et al. Pore structure characterization of North American shale gas reservoirs using USANS/SANS, gas adsorption, and mercury intrusion. *Fuel*, 2013, 103: 606-616
- 毕赫, 姜振学, 李鹏等. 渝东南地区龙马溪组页岩吸附特征及其影响因素. 天然气地球科学, 2014, 25(2): 302-310 (Bi He, Jian Zhenxue, Li Peng, et al. Adsorption characteristic and influence factors of longmaxi shale in southeastern chongqing. *Natural Gas*

- Geoscience*, 2014, 25(2): 302-310 (in Chinese))
- 12 Yun TS, Jeong YJ, Kim KY, et al. Evaluation of rock anisotropy using 3D X-ray computed tomography. *Engineering Geology*, 2013, 163: 11-19
  - 13 杨永明, 鞠杨, 刘红彬等. 孔隙结构特征及其对岩石力学性能的影响. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10): 2031-2038 (Yang Yongming, Ju Yang, Liu Hongbin, et al. Influence of porous structure properties on mechanical performances of rock. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(10): 2031-2038 (in Chinese))
  - 14 Li F, Hou J, Qiu MX, et al. CT experiments and image processing for the water-oil displacement at pore scale. *Procedia Engineering*, 2012, 29: 3831-3835
  - 15 张顺康, 陈月明, 侯建等. 岩心 CT 微观驱替实验的图像处理研究. *大庆石油地质与开发*, 2007, 26(1): 10-12 (Zhang Shunkang, Chen Yueming, Hou Jian, et al. Image processing for CT microscopic core flooding experiments. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2007, 26(1): 10-12 (in Chinese))
  - 16 王家禄, 高建, 刘莉. 应用 CT 技术研究岩石孔隙变化特征. *石油学报*, 2009, 30(6): 887-897 (Wang Jialu, Gao Jian, Liu Li. Porosity characteristics of sandstone by X-ray CT scanning system. *Acta*
  - Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 887-897 (in Chinese))
  - 17 Ju Y, Yang YM, Song ZD, et al. A statistical model for porous structure of rocks. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(11): 2040-2058
  - 18 Andrä H, Combaret N, Dvorkin J, et al. Digital rock physics benchmarks—Part I: Imaging and segmentation. *Computers & Geosciences*, 2013, 50: 25-32
  - 19 崔景伟, 邹才能, 朱如凯等. 页岩孔隙研究新进展. *地球科学进展*, 2012, 27(12): 1319-1325 (Cui Jingwei, Zou Caineng, Zhu Rukai, et al. New advances in shale porosity research. *Advances in Earth Sciences*, 2012, 27(12): 1319-1325 (in Chinese))
  - 20 Robert GL, Robert MR, Stephen C, et al. Morphology, genesis, and distribution of nanometer-scale pores in siliceous mudstones of the mississippian barnett shale. *Journal of Sedimentary Research*, 2009, 79(12): 848-861
  - 21 钱家麟, 尹亮. 油页岩——石油的补充能源. 北京: 中国石化出版社, 2008: 49-52 (Qian Jialin, Yin Liang. *Oil Shale—Supplement Energy of Petroleum*. Beijing: China Petrochemical Press, 2008: 49-52 (in Chinese))
  - 22 Nelson PH. Pore-throat sizes in sandstones, tight sand stones, and shales. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(3): 329-340

(责任编辑: 刘福海)

(责任编辑: 刘希国)

## CHARACTERIZATION OF ROCK MICROSTRUCTURE USING 3D X-RAY COMPUTED TOMOGRAPHY<sup>1)</sup>

Xue Huaqing<sup>\*,†,2)</sup> Xu Ruina<sup>\*</sup> Jiang Peixue<sup>\*</sup> Zhou Shangwen<sup>†</sup>

<sup>\*</sup>(Key Lab for Thermal Science and Power Engineering of Ministry of Education, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

<sup>†</sup>(Key Laboratory of Unconventional Oil & Gas, CNPC, Petro China Research Institute of Petroleum E & D Hebei, Hebei Langfang 065007, China)

**Abstract** The investigation on microstructure of rock is critical to the basic geology research in unconventional oil and gas reservoir, such as evolution, occurrence state of oil and gas, migration patterns and seepage characteristics. The advantages of pore structure characterization by computed tomography (CT) are multi-scale and without damage. The tar sand, tight sand and shale were scanned by the CT, and the results were compared between CT scan characterizations and normal measurements to show that the mineral total components are really close and the size distributions of mineral are overall small difference, and large difference in the mineral size less than 96 μm between CT scan and the sieving method on tar sand. The pore structure of tight sand was observed by the CT images. Due to the different measurements and sample size, the porosity tested by CT scan, is a little more. The layer structure of shale can be found by micro CT images, but the microstructure of pore are not distinguished by the micro CT. Compared with normal methods, the TOC and pyrite mineral are measured by the Nano CT scan, but the porosity test is smaller. It is due to the resolution of Nano CT is not high enough and the grey value between organic matter and pore are not easily separately.

**Key words** rock, micro-structure, characterization

Received 27 March 2015, accepted 18 June 2015, available online 25 June 2015.

1) The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (51376104) and National 973 program (2013CB228001).

2) Xue Huaqing, PhD candidate, research interests: unconventional oil and gas experiments. E-mail: hqxue@petrochina.com.cn