

文章编号:0253-9985(2011)05-0792-05

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

苏娜^{1,2}, 段永刚¹, 于春生^{1,2}

(1. 中国石化 河南油田分公司 勘探开发研究院, 河南 南阳 473132; 2. 西南石油大学, 四川 成都 610500)

摘要: 为了提高气藏采收率, 从微观孔隙结构出发, 建立孔隙网络模型, 定量描述孔隙微观尺度上的渗流机理。以川西新场气田上沙溪庙组岩心为例, 开展孔隙结构三维重构研究。首先采用微CT技术对岩心进行扫描获得投影数据, 采用FDK算法重建岩心灰度图像, 然后以宏观孔隙度为基础利用二值分割法分割灰度图像, 最后使用光线跟踪算法得到三维孔隙结构图像, 即数字岩心。对数字岩心的相关性质进行统计分析, 得到的数字岩心孔隙度与岩心实验孔隙度基本一致, 相对误差约为0.1。这一数值与新场气田上沙溪庙组储层物性相吻合, 说明微CT扫描法重构微观孔隙结构是可行的。该研究为建立孔隙网络模型及开展后续微观渗流模拟研究奠定了基础。

关键词: 分辨率; 二值分割; 光线跟踪; 微CT扫描; 微观孔隙结构; 低渗气藏; 新场气田

中图分类号: TE122.2

文献标识码: A

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

Su Na^{1,2}, Duan Yonggang¹ and Yu Chunsheng^{1,2}

(1. Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Henan Oilfield Company, Nanyang, Henan 473132, China;

2. Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China)

Abstract: In order to enhance gas recovery, it is necessary to construct pore network model and quantitatively describe micro-pore-scale percolation mechanism based on micro-pore structure. Taking cores of the Upper Shaximiao Formation in the Xinchang gas field of western Sichuan Basin as an example, this paper studies 3D reconstruction of pore structure. First, using micro-CT to scan core to get projection data, and using the FDK algorithm for construction of grayscale images. Then based on experimental porosity, using 2-value segmentation to cut grayscale images and using ray tracing algorithm to get 3D pore structure image (digital core). Statistical analysis of the properties of digital core shows that the porosity of digital core is almost identical to the measured core porosity with a relative error of only 0.1, which is in coincide with the properties of Upper Shaximiao Formation in the Xinchang gas field. It shows that reconstruction of micro pore structure with micro-CT scanning is feasible. The study provides a solid foundation for pore network modeling and subsequent microscopic flow simulation study.

Key words: resolution, 2-value segmentation, ray tracing, micro-CT, microscopic pore structure, low permeability gas pool, Xinchang gas field

随着能源需求的增长, 人们对非常规天然气的关注日益增加。非常规天然气是指储藏在复杂地质条件储层中的天然气, 其储量远远大于常规

天然气, 但其开发难度也远大于常规气藏; 由于其特殊的吸附、解吸、扩散和渗流过程, 宏观定性分析不能满足开发需求, 因此, 需要从微观孔隙结构

收稿日期: 2010-06-25; 修订日期: 2011-09-13。

第一作者简介: 苏娜(1981—), 女, 博士, 油藏描述及数值模拟。

基金项目: 国家科技重大专项(2008ZX05022-001)。

出发,研究微观尺度上的渗流机理。目前,我国只有姚军等人^[1]针对中、高渗油藏进行微观孔隙结构研究。对低渗气藏的这方面研究几乎是空白。随着低渗气藏的开发,借助微观孔隙结构建立孔隙网络模型,在微观孔隙尺度上研究其渗流机理及提高采收率技术很有必要。

构建微观孔隙结构的方法包括物理实验法和数值重建法,其中最常用的是微CT扫描法^[2]、模拟退火法^[3]、过程模拟法^[4]及多点统计法^[5]等。大量研究表明,微CT扫描法是建立微观孔隙结构最直接也最准确的方法,随着微CT技术的快速发展,高空间分辨率也保障了微观孔隙结构的准确性。

本文对川西新场气田上沙溪庙组岩心进行微CT扫描,借助FDK算法得到连续二维岩心切片,使用基于孔隙度的二值分割法和光线跟踪算法得到三维孔隙结构图像,并评价重构的准确性。

1 微CT扫描的基本原理

目前,应用于石油领域的CT机主要有两类:台式CT机和同步加速CT机。本次岩心的微CT实验在中国工程物理研究院应用电子学研究所开展,采用的是台式CT机(μ CT160),使用工业管产生一束X射线作为一锥形光束,样品每旋转一个角度成像一次,完成整个扫描过程需要旋转 360° ,要拍下512张透视图。

CT成像原理的基础是X射线衰减,在扫描过程中,X射线的衰减主要取决于样品的材料组成、密度和光束方向的厚度,其衰减公式^[6]为:

$$I = I_0 e^{-\sum_i \mu_i x_i} \quad (1)$$

式中: I 为X射线穿过物体后的强度; I_0 为原始X射线强度; μ_i 为第 i 组分对X射线的衰减系数; x_i 为X射线通过第 i 组分的路径的长度。

2 CT投影数据重建岩心灰度图像

CT成像的核心是投影数据重建灰度图像。锥束CT图像重建算法分为解析法和迭代法两大类;本文采用的FDK重建算法^[7]属于解析法中的近似算法,由Feldkamp等人于1984年提出,被广泛采用,而且得到很大发展^[8-10],是CT系统中的主流算法(图1)。

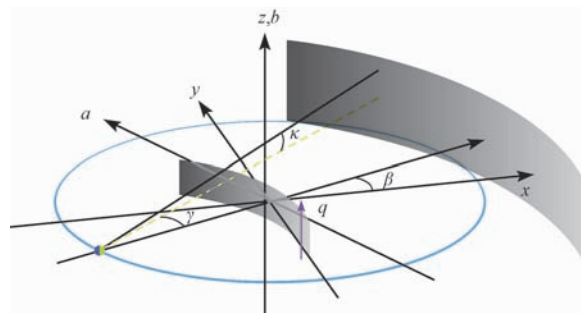


图1 FDK算法扫描结构示意图^[11]

Fig. 1 Schematic map showing scanning structure of FDK algorithm

相应的FDK算法用公式表示如下^[11]:

$$\tilde{p}(\beta, a, b) = \left(\frac{R}{\sqrt{RR + aa + bb}} p(\beta, a, b) \right) g''(a) \quad (2)$$

$$f_{\text{FDK}}(x, y, z) = \int_0^{2\pi} \frac{R^2}{U(x, y, \beta)^2} \tilde{p}(\beta, a, b) d\beta \quad (3)$$

其中,

$$a = R \tan \gamma, b = \frac{q}{\cos \gamma} \quad (4)$$

$$k = \arctan \frac{q}{R} = \arctan \frac{b}{\sqrt{RR + aa}} \quad (5)$$

$$U(x, y, \beta) = R + x \cos \beta + y \sin \beta \quad (6)$$

式中: $p(\beta, a, b)$ 是采集到的投影数据; $\tilde{p}(\beta, a, b)$ 是对投影数据的加权滤波; $f_{\text{FDK}}(x, y, z)$ 是对加权滤波投影数据的反投影重建; $g''(a)$ 是一维滤波器; R 是轨道半径; γ 是锥束的扇角; β 是锥束的锥角; a 和 b 是在探测器上的位置。

3 CT图像建立岩心微观孔隙结构

得到岩心灰度图像后,肉眼可以直接识别出孔隙,但孔隙与骨架的边缘比较模糊,需要借助图像二值化进行合理划分,即把灰度级大于2的多灰度级图像经过处理转变成二值图像^[12],“1”表示目标对象,“0”表示图像背景。

二值化的关键是阈值的选择,本文使用整体阈值法。假设阈值为 T ,输入灰度图像函数为 $f(x, y)$,输出二值图像函数为 $g(x, y)$,得目标对象的公式如下:

$$g(x, y) = \begin{cases} 1 & f(x, y) \geq T \\ 0 & f(x, y) < T \end{cases} \quad (7)$$

本文用于微 CT 扫描的岩心均采用物理实验方法测定了孔隙度,所以采用基于岩心孔隙度的图像二值分割法对图像进行分割,分割阈值 k^* 的求解公式如下:

$$f(k^*) = \min \left\{ f(k) = \begin{cases} \phi - \frac{\sum_{i=I_{\min}}^k p(i)}{I_{\max} - I_{\min}} & \text{当小灰度值表征孔隙时} \\ \phi - \frac{\sum_{i=k}^{I_{\max}} p(i)}{I_{\max} - I_{\min}} & \text{当大灰度值表征孔隙时} \end{cases} \right. \quad (8)$$

式中: ϕ 为岩心孔隙度; $I_{\max}$ 和 $I_{\min}$ 分别为图像的最大和最小灰度值, $p(i)$ 为灰度值, 是 i 的像素数。

图像分割以后,采用光线跟踪算法,将孔隙识别出来,生成一个新的数据体,完成三维可视化。光线跟踪算法由 Arthur Appel 于 1968 年首次提出,1980 年 Turner Whitted 做出改进^[13],是一个在二维屏幕上呈现三维图像的方法(图 2)。

计算视线 V 与各平面的交点,以 z 值最小的交点为可见交点 P_0 ;视线 V 在 P_0 处产生反射和透射,反射线和透射线作为新的视线与各平面求出新的交点 P_1, P_2 , 并分别产生新的反射和透射, $\dots$; 这样不断递归,直至所产生的视线射出场景。最终得到视线跟踪轨迹上的一系列交点 $P_0, P_1, P_2, \dots, P_n$; 再根据各点的光强及两表面交点之间的距离,调用光照模型及结合衰减系数,递推计算出 P_0 点处的光强,亦即得到屏幕像素处的亮度。

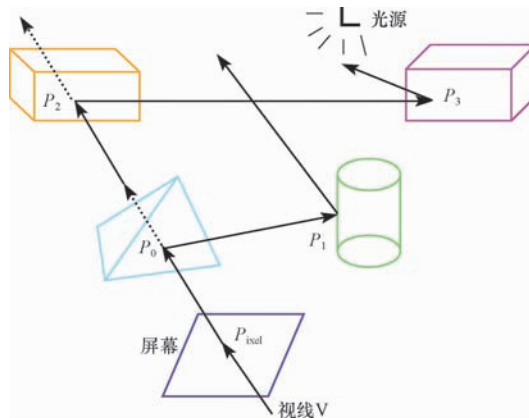


图2 光线跟踪示意图

Fig. 2 Schematic map showing ray tracing

4 实例及结果分析

新场气田上沙溪庙组气藏发现于 1990 年, 2000 年投入正式开发, 向上发育了 4 个小层 $J_s^{2(1)}, J_s^{2(2)}, J_s^{2(3)}, J_s^{2(4)}$, 气藏埋深 2 100 ~ 2 540 m, 具有储集能力的岩石类型主要为中-细粒岩屑长石砂岩, 岩石致密, 岩性单一, 厚度大。

本文对该气藏 10 块岩心开展微 CT 扫描实验, 并借助 FDK 算法获得岩心微 CT 切片图像(图 3)。

使用基于岩心孔隙度的图像二值分割法及光线跟踪算法重构岩心 3D 微观孔隙结构(图 4), 统计微观孔隙结构的相关性质(表 1), 并结合岩心实验资料对储层孔隙结构进行统计分析(表 2)。

由表 1 可以看出, 数字岩心孔隙度和岩心实验孔隙度存在细微差别, 差别产生的原因主要有两点: 1) 像素灰度值由 0 到 255 区间中的整数表示; 2) CT 扫描的岩心体积远小于实验岩心体积。该差别会随着图像分辨率的提高而减小, 因此, 该

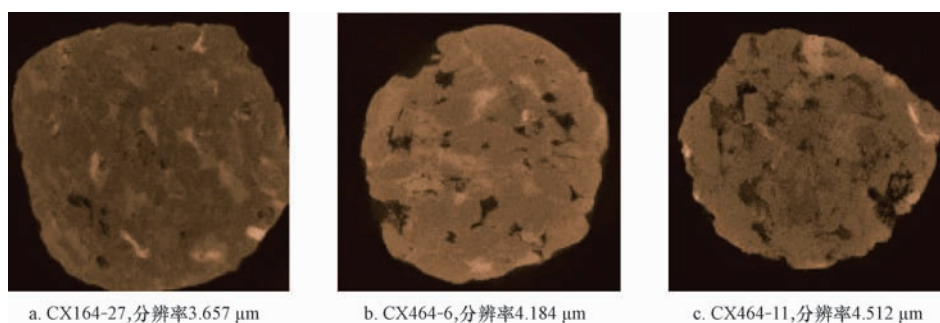


图3 新场气田上沙溪庙组岩心微 CT 二维切片

Fig. 3 2D slice of micro-CT of cores from the Upper Shaximiao Formation of Xinchang gas field

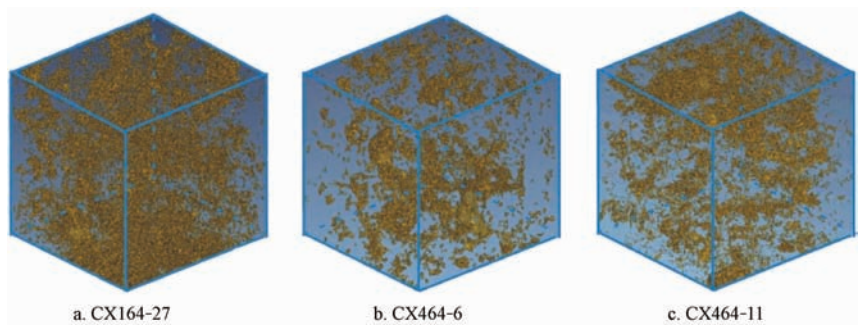


图 4 新场气田上沙溪庙组岩心 3D 孔隙结构图像

Fig. 4 3D pore structure images of cores form the Upper Shaximiao Formation of Xinchang gas field
(pore in yellow and matrix in blue)
(黄色表示孔隙;蓝色表示骨架)

表 1 新场气田上沙溪庙组岩心微 CT 扫描结果					
Table 1 Micro-CT scanning results of cores from the Upper Shaximiao Formation of Xinchang gas field					
岩心编号	深度/m	岩心 CT 图像分辨率/ μm	岩心扫描长度/mm	数字岩心孔隙度, %	岩心实验孔隙度, %
CX164-27	2 337.09	3.657	1.872	7.30	8.62
CX464-6	2 442.17	4.184	2.142	8.13	9.51
CX464-11	2 444.53	4.512	2.310	9.03	10.23

表 2 新场气田上沙溪庙组储层孔隙结构统计			
Table 2 Statistics of pore structure of reservoirs in the Upper Shaximiao Formation of Xinchang gas field			
砂体	平均孔隙度, %	孔隙均值/ μm	喉道均值/ μm
$J_s^{2(1)}$	9.11	100.3	<1
$J_s^{2(2)}$	11.70	59.6	
$J_s^{2(3)}$	9.18	66.2	
$J_s^{2(4)}$	11.15	67.7	

方法可以很好地表征微观孔隙结构。为建立孔隙网络模型及进行孔隙级流动模拟搭建了基础平台。

由表 2 可知, $J_s^{2(2)}$ 和 $J_s^{2(4)}$ 层是主力开发单元; 根据气藏对孔隙和喉道的分类标准, 孔喉组合关系有两种主要类型: 大孔-微喉, 中孔-微喉。

5 结论

- 1) 采用微 CT 扫描并借助 FDK 算法得到二维岩心切片,完整地表征了岩心的二维孔隙结构。
- 2) 使用基于孔隙度的图像二值分割法及光线跟踪算法重构三维孔隙结构图像,比较准确地表征了真实孔隙的微观结构。
- 3) 微 CT 扫描重建微观孔隙结构,为构建孔隙网络模型,在孔隙微观尺度上开展渗流机理研究奠定了坚实的基础。
- 4) 随着微 CT 向纳 CT 的发展,扫描精度将大

幅度提高,达到亚微米级,可以更好地表征低渗气藏的孔隙结构及进行微观渗流机理研究。

参 考 文 献

[1] 姚军, 赵秀才, 衣艳静, 等. 数字岩心技术的发展及展望[J]. 油气地质与采收率, 2005, 12(6): 52-54.
Yao Jun, Zhao Xiucui, Yi Yanjing, et al. The current situation and prospect on digital core technology[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12(6): 52-54.

[2] Dunsmuir J H, Ferguson S R, D'Amico K L, et al. X-ray micro-tomography: a new tool for the characterization of porous media[C]. SPE Annual Technical Conference, Dallas, Texas; Journal of Petroleum Science and Engineering, 1991: 423-430.

[3] Hazlett R D. Statistical characterization and stochastic modeling of pore networks in relation to fluid flow[J]. Mathematical Geology, 1997, 29(4): 801-822.

[4] Bakke S, Øren P E. 3-D pore-scale modeling of sandstones and flow simulations in the pore networks[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 1997, 2(2): 136-149.

[5] Okabe H, Blunt M J. Prediction of permeability for porous media reconstructed using multiple-Point statistics[J]. Physical Review E, 2004, 70, 066135.

[6] Kak A C, Slaney M. Principles of computerized tomographic imaging[M]. New York: IEEE Press, 1988.

[7] Feldkamp L A, Davis L C, Kress J W. Practical cone-beam algorithm[J]. Journal of the Optical Society of America, 1984, 1(6): 612-619.

- [8] Wang G, Liu Y, Lin T H, et al. Half-scan cone-beam x-ray micro tomography formula [J]. Scanning, 1994, 16 (4): 216–220.
- [9] Grass M, Köhler T, Proksa R. 3-D Cone-beam CT reconstruction for circular trajectories [J]. Physics in Medicine and Biology, 2000, 45(2): 329–347.
- [10] Liu Y, Liu H, Wang G. Half-scan Cone-beam CT fluoroscopy with multiple X-ray source. [J], Medical Physics, 2001, 28 (7): 1466–1471.
- [11] 翟静. 三维锥束 CT 中滤波反投影算法的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2008.
- Zhai jing. Research on filtered back projection algorithm in 3D cone-beam CT [D]. Taiyuan: North University of China, 2008.
- [12] 王培珍. 基于二维阈值化与 FCM 相混合的图像迅速分割方法 [J]. 中国图像图形学报, 1998, 3(9): 735–738.
- Wang Peizhen. Image segmentation based on fuzzy clustering and Two-dimensional Thresholding [J]. Journal of Image and Graphics, 1998; 3(9): 735–738.
- [13] Whitted T. An Improved illumination model for shaded display [J]. Communications of the ACM, 1980, 23(6): 343–349.
- [14] 叶泰然, 付顺, 吕其彪, 等. 多波地震联合反演预测相对优质储层——以川西深层致密碎屑砂岩为例 [J]. 石油与天然气地质, 2009, 30(3): 357–362, 369.
- Ye Tairan, Fu Shun, Lü Qibiao, et al. Application of multi-wave joint inversion to the prediction of relatively high-quality reservoirs—an example from the prediction of deep tight elastic sandstone reservoirs in the western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(3): 357–362, 369.
- [15] 张大伟. 加速我国页岩气资源调查和勘探开发战略构想 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(2): 135–139, 150.
- Zhang Dawei. Strategic concepts of accelerating the survey, exploration and exploitation of shale gas resources in China [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(2): 135–139, 150.
- [16] 戴金星, 黄士鹏, 刘岩, 等. 中国天然气勘探开发 60 年的重大进展 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 689–698.
- Dai Jinxing, Huang Shipeng, Liu Yan et al. Significant advancement in natural gas exploration and development in China during the past sixty years [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 689–698.
- [17] 孙家广. 计算机图形学 [M]. 第三版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- Sun Jiaguang. Computer graphics [M]. Third Edition. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

(编辑 高岩)

《中国前中生代构造—岩相古地理图集》简介

以郑和荣与胡宗全为主编, 30 余位石油地质学家参与完成的《中国前中生代构造—岩相古地理图集》, 是中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院为中国海相油气勘探的需要而编制的。

作者在王鸿祯先生创导的“构造活动论”思想和朱夏先生提出的“盆地原型”思想的启迪下, 充分运用层序地层学的基本原理, 借鉴全球活动古地理的先进思想, 建立了“以构造—沉积成因关系为主导, 以缝合带为其两侧盆地的联系枢纽, 以板块的岩相古地理再造为目标, 以前中生代油气地质条件为侧重点”的岩相古地理编图思想。并在该思想的指导下, 运用信息编图技术与软件平台, 根据近年来盆地内部海相层系的钻井资料、露头资料和造山带的构造研究成果, 编制了全国性的、从震旦纪到中三叠世共 38 个编图时段的构造—岩相古地理图集。该套图件清晰再现了中国前中生代(早震旦世—中三叠世)海相层系的构造—沉积盆地格局、古地理特征与岩相分布及演化, 明确了震旦纪—中三叠世中国经历了 3 个演化阶段, 即新元古代—早古生代早期(Z—O₂)的洋盆扩张阶段、早古生代晚期(O₃—S)的古中国陆形成阶段和晚古生代—中生代早期(D—T)的古亚洲陆形成于增生阶段, 基本明确了中国主要块体前中生代的洋—盆—陆—山的转换规律和沉积环境与岩相配置的演化过程。此外, 还对 3 个演化阶段的构造—沉积格局、海相层系的石油地质条件进行了分析, 是进行中国前中生代海相层系地质研究和油气勘探的基础图件。

该图集体现了创新的活动论编图思想、先进的信息编图技术、最新的构造—沉积基础资料的有机结合, 是进行中国前中生代海相层系沉积地质和油气勘探的参考性文献之一, 对于沉积学、层序地层学、岩相古地理、油气勘探、矿产勘查以及相关领域的研究人员具有很高的参考价值。

(董立 供稿)