

文章编号: 2095-4980(2015)05-0788-07

数字岩心重建与孔隙参数分析

吴运强¹, 赵增义¹, 王子强¹, 左琛², 滕奇志²

(1.中石油新疆油田分公司实验检测研究院, 新疆维吾尔自治区 克拉玛依 834000; 2.四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对岩心物性实验周期长且难以复现等问题, 利用数字岩心图像分析技术进行岩心物性研究。以岩心铸体薄片图像为训练图像, 根据模拟退火算法进行三维重建, 获得岩心三维重建图像。通过计算机断层扫描(CT)技术, 获得同组岩心序列图像。在2种方式获得的图像中利用最大球模型提取岩心孔隙结构, 计算孔隙与喉道尺寸及分布, 将结果与压汞法测定的岩心毛管分布进行比较, 分析了当前数字岩心技术与物性实验之间的区别与原因。结果表明, 铸体薄片图像和CT图像可以有效表征岩心大尺寸孔隙特征, 但物性实验方法可以测定微小孔隙尺寸, 由于成像设备所限, 数字岩心不能刻画该类孔隙特征。

关键词: 三维重建; 模拟退火算法; 最大球模型; 计算机断层扫描; 岩心物性实验; 岩心孔隙结构

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201505.0788

Reconstruction of digital core and analysis of pore parameters

WU Yunqiang¹, ZHAO Zengyi¹, WANG Ziqiang¹, ZUO Chen², TENG Qizhi²

(1.Institute of Xinjiang Oilfield Detection, PetroChina, Kelamayi Xinjiang 834000, China;

2.College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610065, China)

Abstract: Digital core image analysis technique is utilized in the core physical study in order to solve the problems such as time-consuming and difficult to reproduce of the core physical properties experiments. Taking the two-dimensional(2D) slices of the core as the training images, a three-dimensional(3D) image is reconstructed by the simulated annealing algorithm. A 2D image sequence of the same series is acquired by Computed Tomography(CT) technique. The pore structures are extracted from these two sets of images. Pore-throat sizes and their distribution are calculated by maximal balls model. By comparing the results with that of the mercury intrusion method experiments, distinctions and reasons between the current digital core analysis technique and traditional core physical properties experiments are analyzed. Results show that the large pores could be depicted in 2D slices and CT images. However, the core physical properties experiments are able to measure the size of micro pores, while the digital core reconstruction method could not due to the limitations of imaging equipments.

Key words: three-dimensional reconstruction; simulated annealing algorithm; maximal balls model; Computed Tomography; core physical properties experiments; core pore structure

岩心物理特性实验, 如压汞法测定毛管压力实验、稳态法测定油水相对渗透率实验等, 都是研究储集层物理特性, 特别是渗流特性的有效手段, 但物理实验周期长、过程繁琐, 同时也存在着实验结果难以复现等问题。近年来, 数字岩心成为了热门研究课题。以几张岩心二维图像为训练图像, 通过数学建模方法构建三维图像, 分析储集层岩心物理特性。数字岩心分析方法运算周期短, 可以重复多次对同一块岩心进行实验, 且实验结果可以进行动态显示。

模拟退火重建^[1-3]是构建数字岩心的经典算法, 本文将岩心铸体薄片图像作为训练图像, 利用模拟退火算法重建岩心三维结构。同时利用计算机断层扫描技术(CT), 扫描同组岩心样本, 获得序列图像。利用最大球模型^[4]提取岩心二维图像和三维图像的拓扑结构, 在链路的基础上划分孔隙与喉道, 计算孔隙结构参数^[5]。将得到的孔

收稿日期: 2014-10-21; 修回日期: 2014-12-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.61372174; 60972130)

隙尺寸分布状态与压汞法测定的毛管束分布状态进行比较, 分析了数字岩心分析方法与岩心物性实验的区别。

1 实验方法

1.1 压汞法测定毛管压力曲线

储层岩石的毛管压力和湿相饱和度的关系称为毛管压力曲线, 随着相关研究工作的开展, 有关储层的几乎全部参数, 如束缚水饱和度、残余油饱和度、孔隙度、孔喉大小分布等, 在某种程度上都可以利用毛管压力资料来确定^[6]。目前主要有3种方法测定岩心毛管压力曲线: 半渗透隔板法、压汞法、离心法。压汞法测量速度快, 对样品的形状、大小并无特殊要求, 因而在石油勘探领域获得广泛应用。

汞对于绝大部分岩心都是非润湿相, 如果对汞施加的压力大于或等于孔隙喉道的毛管压力, 汞就能够克服毛管阻力进入孔隙。根据进汞的孔隙体积分数和对应压力, 就能得到毛管压力与岩心含汞饱和度的关系, 生成压汞法毛管压力曲线^[7]。假设孔隙空间是由不同半径的毛管束组成, 则毛管压力与毛管半径之间的关系如式(1)所示:

$$p_c = \frac{2\sigma \cos\theta}{r_c} \quad (1)$$

式中: p_c 为毛管压力; σ 为表面张力; θ 为润湿接触角; r_c 为毛管半径。

利用式(1), 可以获得岩心毛管束分布。实验室条件下, $\sigma=0.48 \text{ N/m}$, $\theta=140^\circ$, 则:

$$p_c = \frac{0.735}{r_c} \quad (2)$$

1.2 二维图像处理

利用岩心二维图像可以有效刻画岩心孔隙结构, 为了方便对比研究, 本文选择铸体薄片图像和 CT 序列图像作为研究对象。

1.2.1 铸体薄片图像

将玻璃单晶通过加压注入到岩石孔隙空间中, 待玻璃单晶固化后磨制成为岩石薄片, 由于孔隙空间中充满了有色胶体, 在显微镜下可以方便地观察孔隙空间形态。图 1(a) 为某岩心样本的铸体薄片图像, 暗灰色部分为玻璃单晶, 表征孔隙相, 其余部分表征岩石相。根据颜色或灰度值对图像进行二值化处理, 就可以得到图 1(b), 图中用白色表示孔隙相, 黑色表示岩石相。

1.2.2 CT 序列图像

CT 技术利用 X 射线围绕岩心进行断面成像, 可以在无损条件下直观地展示岩心内部的结构^[8]。在图像中, 由于孔隙相与岩石相对 X 射线的穿透性不同, 通过像素灰度值区分孔隙相与岩石相, 获得岩心孔隙空间结构。

从 CT 序列图像中抽出其中一张, 如图 2(a) 所示, 由于部分容积效应, 圆柱形岩心的表面部分成像并不清晰, 选择白色方框内的部分为处理区域, 依据灰度值进行二值化处理, 得到图 2(b)。

1.3 岩心三维重建

在得到了岩心二维孔隙结构分布后, 利用模拟退火算法重建岩心三维结构。算法从训练图像中提取统计特征函数, 如孔隙度、两点相关函数、线性路径函数^[1]等作为约束, 通过迭代逼近最优结果。模拟退火算法本质上是一种优化算法, 可以整合多张图像、多种统计函数, 增强算法的灵活性与通用性, 能够保证在训练图像并不理想的情况下依然得到合格的结果。模拟退火算法主要包括以下 3 个环节^[3]:

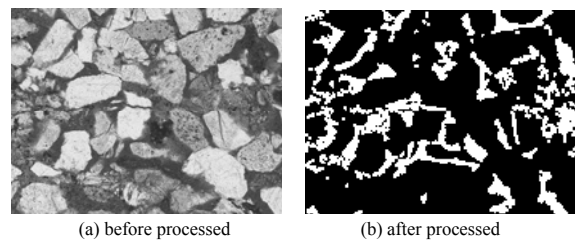


Fig.1 Two-dimensional slice images of core
图 1 岩心二维铸体薄片

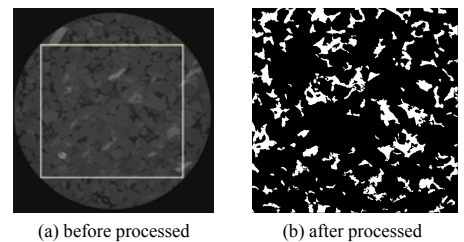


Fig.2 CT images of core
图 2 岩心 CT 图像

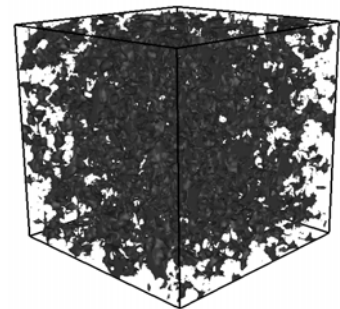


Fig.3 Reconstruction results of simulated annealing algorithm
图 3 模拟退火算法重建结果

1) 建立数学模型, 确定解空间、目标函数和初始解。解空间就是重建结果可能的解的集合, 目标函数就是统计特征函数, 初始解是算法开始迭代的初始状态。

2) 确定状态产生函数, 关键是确定候选解的产生方式和概率分布。在三维重建中根据概率, 通过交换 2 个点的位置产生候选解, 候选解产生的概率分布可以是均匀分布、正态分布、泊松分布等。

3) 确定初始温度和温度更新函数。“温度”变量用于控制迭代的速度, 一般来说, 初始温度越高, 获得最优解的概率越大, 但所需时间也越长。因此, 初始温度的确定应平衡考虑优化效果和优化效率的关系。温度更新函数给出了温度的下降方式, 下降速度必须与状态产生函数相匹配。初始温度和温度更新函数构成冷却进度表, 控制算法进程, 使模拟退火算法逼近渐进收敛性, 在有限的迭代次数内返回一个近似的最优解。

利用图 1(b)作为训练图像, 通过模拟退火算法构建的岩心三维结构如图 3 所示。其中, 孔隙相使用灰色显示, 岩石相则不显示。利用两点相关函数曲线和线性路径函数曲线衡量建模质量, 图 4 列出了重建结果在 X,Y,Z 方向以及训练图像在 X,Y 方向上的两点相关函数曲线和线性路径函数曲线。重建结果和训练图像的统计特性曲线基本相符, 从统计学角度验证了重建的有效性。

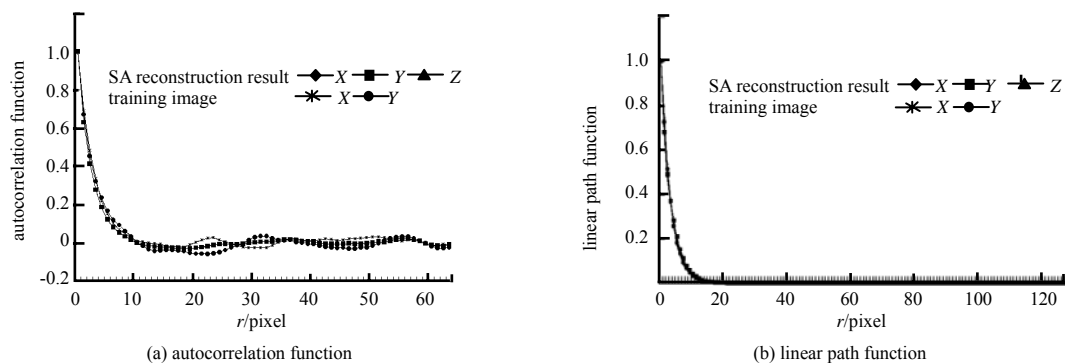


Fig.4 Statistical function curves of reconstruction and training image

图 4 重建结果与训练图像统计函数曲线

1.4 最大球模型

获得岩心二维与三维图像后, 为了计算岩心孔隙参数, 需要提取孔隙空间拓扑结构并构建数学模型。最大球模型是提取孔隙拓扑结构的有效方法, 以孔隙中的某点为中心生成一个球, 不断增加球的半径, 直到球面接触到岩石点, 就得到了该点的最大内切球。遍历所有孔隙点, 获得每个孔隙点的最大内切球, 随后去除掉冗余球, 孔隙空间中就充满了彼此重叠的球, 组合这些球就构成了链路, 这些互联互通的链路就反映了孔隙空间的拓扑结构。在链路的基础上对孔隙与喉道进行划分, 以局部最大球为孔隙的起点, 局部最小球为喉道的起点, 以两者之间的某一球作为分隔球, 将链路划分为孔隙与喉道。孔喉划分结束后, 通过计算链路长度和内切球半径, 就可以得到孔隙大小分布、平均孔喉比、平均孔隙半径等参数。该部分具体算法可见参考文献[4,9]。

2 实验数据

利用本文所述的方法, 对多组岩心样本进行实验, 均获得了类似的实验结论, 由于文章篇幅所限, 在这里列出 2 组实验结果。

2.1 实验 1

2.1.1 图像分析

图 1(a)是一张铸体薄片图像, 图像大小为 $1\,290 \times 972$ 像素, 点长度 $1.09 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。对该张图像进行二值化处理, 可得到孔隙空间的分布状态如图 1(b)所示。以图 1(b)为训练图像, 利用模拟退火算法进行重建, 可得到三维图像, 即图 3, 该图像大小为 $128 \times 128 \times 128$ 像素, 点长度为 $8.28 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。利用最大球模型分别对这 2 张图像进行孔喉尺寸计算, 得到结果如表 1 所示。

对岩心进行 CT 扫描, 可获得序列图像, 如图 2 所示。图像高 980 个像素, 宽 1 013 个像素, 点长度 $3.41 \mu\text{m}/\text{pixel}$ 。完成整套 CT 扫描, 共获得 990 张图像。采用章节 1.2.2 中所述方法进行批处理, 并去除序列图像首尾效果较差的部分, 得到 800 张二维二值图像, 组成了一个长宽高均为 800 个像素、共 512×106 个体素点的三维立方体。首先从 800 张图像中沿垂直方向每隔 10 张抽取 1 张图像, 共 80 张二维图像, 在二维平面内进行孔喉划分与参数计

算，并对结果求平均，获得二维分析结果。随后，直接将三维图像输入到最大球模型中进行分析，获得三维分析结果。两项结果均列在表 1 当中。

表 1 实验 1 计算机图像分析结果

Table1 Results of computer image analysis in experiment 1

	porosity/%	average pore radius/ μm	average throat diameter/ μm	pore throat ratio
slice image	13.57	12.95	12.34	3.23
reconstruction result	13.57	15.94	16.06	3.39
2D CT image	11.90	27.59	28.05	3.37
3D CT image	11.42	20.91	20.03	4.31

岩心孔隙大小的分布状态对于油层储集与渗流特性有重要影响，实验通过绘制直方图的方式，可以直观地呈现孔隙大小分布状态，由表 1 中 4 组分析所得的结果如图 5 所示。

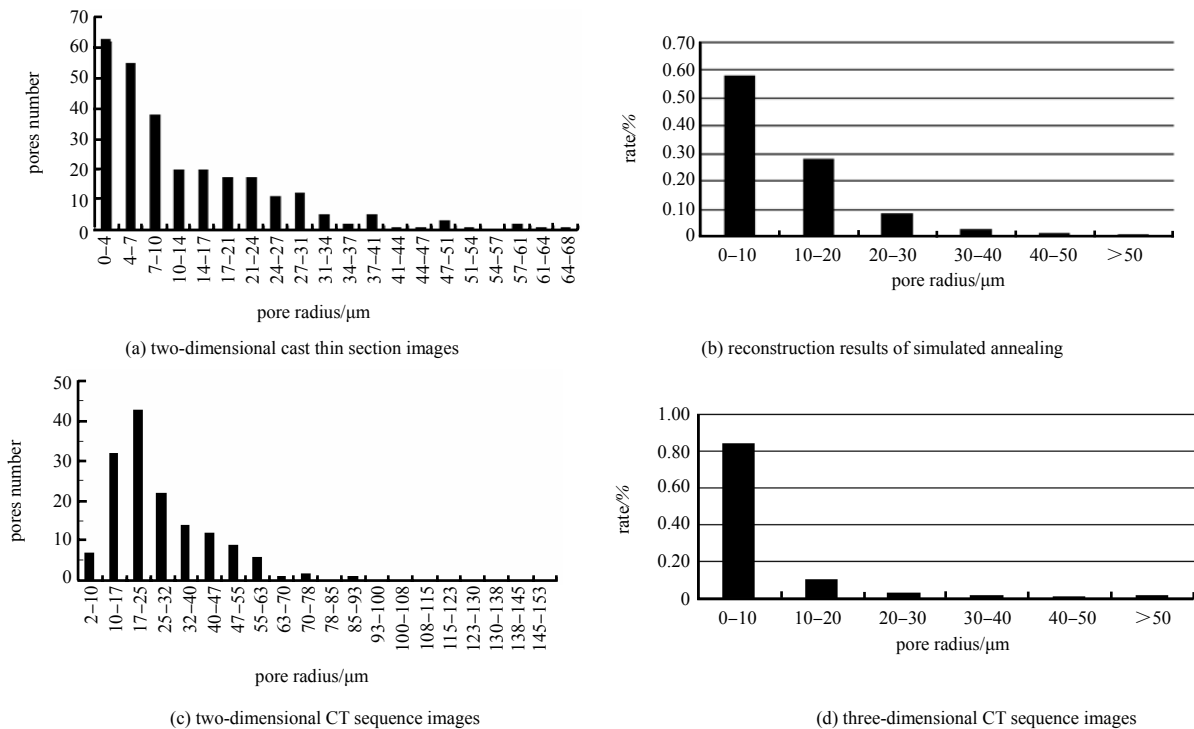


Fig.5 Histogram of the pore radius in experiment 1

图 5 实验 1 孔隙半径分布图

2.1.2 压汞法测量毛管压力曲线

对同组岩心，利用压汞法测定毛管压力曲线，换算得到岩心毛管半径大小及分布状态，实验结果如图 6，左侧图像为毛管压力曲线图，其中位于上方的曲线为进汞曲线，位于下方的曲线为退汞曲线，右侧直方图为毛管分布直方图。实验数据见表 2。

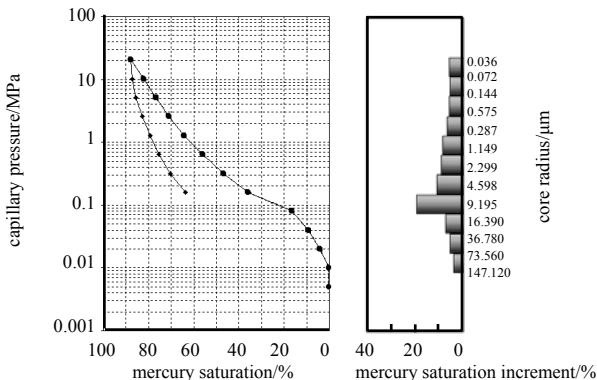


Fig.6 Curve of mercury porosimetry in experiment 1

图 6 实验 1 压汞法测量结果

表 2 实验 1 压汞法测量结果

Table2 Results of mercury porosimetry in experiment 1

parameters	value	parameters	value
porosity	20.2%	average capillary radius	7.16 μm
displacement pressure	0.02 MPa	max capillary radius	31.02 μm
median saturation pressure	0.43 MPa	median saturation radius	1.70 μm

2.2 实验 2

选择另一组岩心进行实验,采用与实验 1 相同的方法进行分析,将数字岩心分析结果与压汞实验结果分别呈现在表 3、图 7、表 4、图 8 当中。

表 3 实验 2 计算机图像分析结果

Table3 Results of computer image analysis in experiment 2

	porosity/%	average pore radius/ μm	average throat diameter/ μm	pore throat ratio
slice images	13.78	24.92	25.33	3.74
reconstruction result	13.78	20.90	12.37	3.41
2D CT images	12.62	25.82	25.42	3.36
3D CT images	11.42	22.25	24.13	4.12

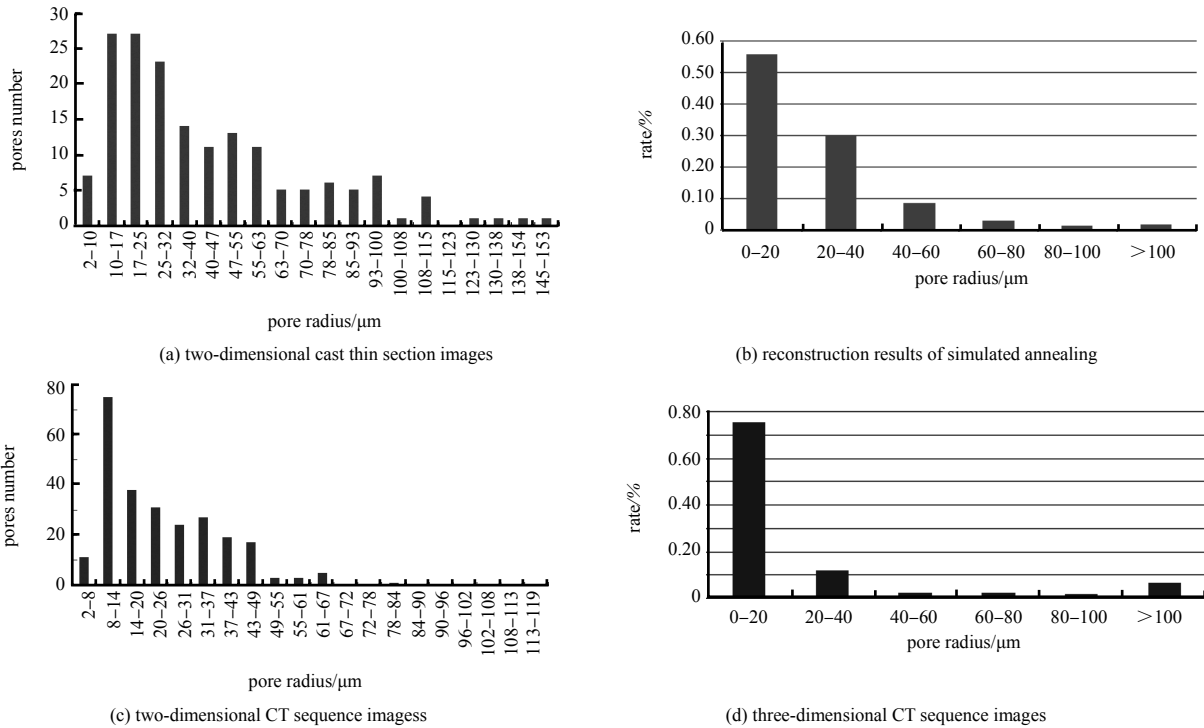


Fig.7 Histogram of the pore radius in experiment 2
图 7 实验 2 孔隙半径分布图

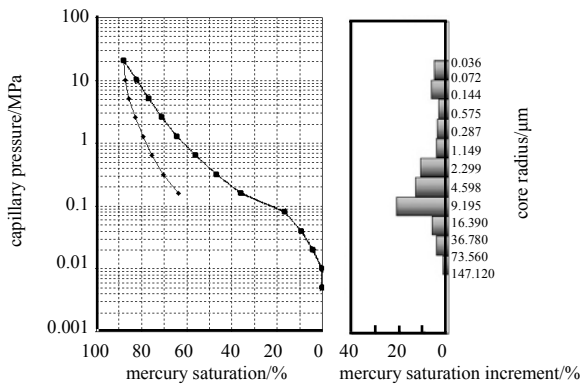


Fig.8 Curve of mercury porosimetry in experiment 2
图 8 实验 2 压汞法测量结果

表 4 实验 2 压汞法测量结果

Table4 Results of mercury porosimetry in experiment 2

parameters	value	parameters	value
porosity	20.9%	average capillary radius	5.73 μm
displacement pressure	0.03 MPa	max capillary radius	22.96 μm
median saturation pressure	0.37 MPa	median saturation radius	2.00 μm

2.3 实验结果分析

首先单独分析表 2 和表 4。在压汞实验中,饱和度中值压力 p_{c50} 是指在驱替毛管压力曲线上汞饱和度为 50%

时的毛管压力值, 相应的毛管半径就是饱和度中值半径 r_{50} , 一般可以等效于平均毛管半径。然而在该实验中, 饱和度中值半径与平均毛管半径存在较大的差距, 这说明 2 组岩心都具有较强的非均质性, 毛管束半径分布不均匀, 孔隙空间结构较为复杂。在图 6 和图 8 中, 进汞毛管压力曲线的中间平缓段较短, 曲线走势曲折, 验证了岩心毛管束分布的强烈非均质性。

在表 1 和表 3 中对比铸体薄片分析结果与模拟退火重建结果。由于模拟退火算法在设定初始状态时, 保证初始状态的孔隙度与训练图像孔隙度相同, 收敛过程中, 只进行像素点之间的交换, 因而可以保持孔隙度不变。对比两者的孔隙喉道尺寸, 重建结果与训练图像基本一致, 算法在三维空间中成功复现了二维图像的信息, 证明了重建算法的有效性。

将表 1 中的数据与表 2 中相比, 发现 CT 序列图像所得到的结果中孔隙度最小, 孔喉半径最大, 而压汞法测量得到结果的则是孔隙度最大, 孔喉半径最小, 铸体薄片图像所得数据位于两者之间。对比表 3 和表 4 中的数据, 可以得到相似的结论。考虑到岩心的强非均质性、铸体薄片的制作过程以及 CT 扫描原理, 就可以解释该现象。

在铸体薄片的制作过程中, 将玻璃单晶注入到岩心当中, 并通过磨制得到二维薄片。因为注入玻璃单晶的压力要远小于压汞实验中的进汞压力, 导致岩心当中的很多微小孔隙并未被注入玻璃单晶。同时, 采集铸体薄片的显微镜设备分辨力也远大于岩心微小孔隙尺寸。这 2 个原因导致铸体薄片图像只能反映较大孔隙的分布情况, 岩心中的很多微小孔隙不能得到表征。通过铸体薄片图像进行分析, 所得到的孔隙度低于压汞法所测定的孔隙度, 孔隙尺寸也大于压汞法所测定的毛管尺寸。

同理, 在当前研究阶段, CT 扫描所获得的岩心 CT 图像, 其分辨力仍然较低, 空间分辨力与密度分辨力之间存在着矛盾, 同时由于部分容积效应和周围间隙现象, 岩相与孔隙相的边缘也比较模糊。通过 CT 平扫获得的岩心图像, 其精细度相比铸体薄片图像更低, 点长度更大, 只能反映更大的孔隙分布情况, 对于较小孔隙则不能显示。所以, 通过 CT 技术进行岩心孔隙结构分析, 只能得到较大孔隙的分布情况, 小孔隙无法得到表征。

3 结论

本文对铸体薄片图像、模拟退火算法三维重建图像、CT 序列二维图像以及 CT 序列三维图像这 4 种数字岩心图像进行了孔隙参数分析, 将计算结果与压汞法所测量结果进行比较, 说明当前由于研究技术的限制, 通过岩心图像只能获得岩心中大孔隙的分布状态, 并不能获得小孔隙的分布状态, 因而利用数字岩心, 只能获得孔隙空间的基本形态, 还有很多孔隙得不到表征。在今后的研究中, 如果能够通过技术方法获得更高分辨力的图像, 就能够更有力地支撑数字岩心的研究。同时在数字岩心构建中, 通过优化数学模型, 提升模拟退火算法的重建精确度, 并通过并行计算的方法提高运算效率, 加大重建结果的整体尺寸, 从而更加准确地捕获岩心孔隙结构信息, 为接下来的岩心物理特性分析, 特别是渗流特性分析提供可靠的数学模型。

参考文献:

- [1] Yeong C, Torquato S. Reconstructing random media. II. Three-dimensional media from two-dimensional cuts[J]. Physical Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 1998, 58(1): 224-233.
- [2] Gommers C J, JIAO Y, Torquato S. Microstructural degeneracy associated with a two-point correlation function and its information content[J]. Review E Statistical Physics Plasmas Fluids & Related Interdisciplinary Topics, 2012, 85(5): 747-761.
- [3] 方莹莹, 滕奇志, 何小海, 等. 岩石三维图像重建算法分析[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2013, S1(43): 11-15. (FANG Yingying, TENG Qizhi, HE Xiaohai, et al. Analysis for three-dimensional reconstruction technique of sandstone[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2013, S1(43): 11-15.)
- [4] 刘雨晨, 滕奇志, 何小海, 等. 岩心三维图像孔喉分割优化算法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, S1(44): 171-176. (LIU Yuchen, TENG Qizhi, HE Xiaohai, et al. Improved throat finding algorithm of 3D core images[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, S1(44): 171-176.)
- [5] 刘伟, 滕奇志, 王正勇. 岩石孔隙结构及渗流性质分析计算的优化方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2013, 11(3): 440-445. (LIU Wei, TENG Qizhi, WANG Zhengyong. Optimization for analyzing the microstructure and percolation-properties of reservoir rock[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2013, 11(3): 440-445.)
- [6] 何更生, 唐海. 油层物理[M]. 2 版. 北京: 石油工业出版社, 2011. (HE Gengsheng, TANG Hai. Reservoir Physics[M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011.)