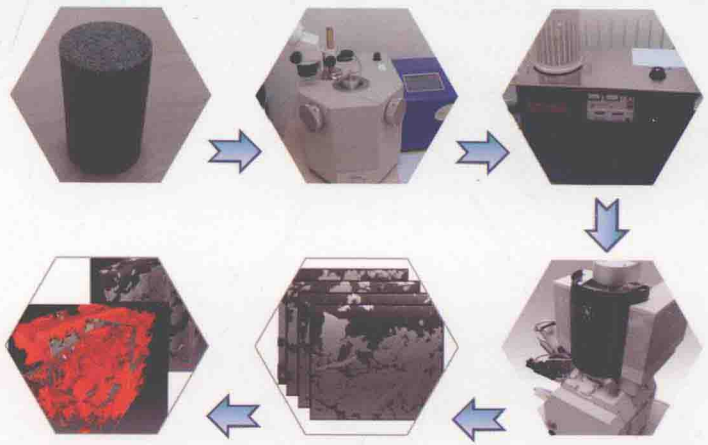
西安石油大学优秀学术著作出版基金资助

数字岩心技术在测井岩石物理中的应用

赵建鹏　姜黎明　著



中国石化出版社
HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

秀学术著作出版基金资助

数字岩心技术在测井岩石物理中的应用

赵建鹏　姜黎明　著



中国石化出版社
HTTP://WWW.SINOPEC-PRESS.COM

图书在版编目（CIP）数据

数字岩心技术在测井岩石物理中的应用 / 赵建鹏，姜黎明著. —北京：中国石化出版社，2018.12
ISBN 978-7-5114-5134-7

Ⅰ.①数… Ⅱ.①赵… ②姜… Ⅲ.①岩芯分析-应用-岩体测井-岩石物理学 Ⅳ.①P631.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 290241 号

未经本社书面授权，本书任何部分不得被复制、抄袭，或者以任何形式或任何方式传播。版权所有，侵权必究。

中国石化出版社出版发行
地址：北京市朝阳区吉市口路 9 号
邮编：100020 电话：(010)59964500
发行部电话：(010)59964526
http://www.sinopec-press.com
E-mail：press@sinopec.com
北京柏力行彩印有限公司印刷
全国各地新华书店经销
*
710×1000 毫米 16 开本 12.75 印张 210 千字
2018 年 12 月第 1 版 2018 年 12 月第 1 次印刷
定价：52.00 元

前　言

随着国民经济的飞速发展，人们对油气资源的需求日益增加，致密砂岩、碳酸盐岩、火成岩、变质岩、泥页岩、滩坝砂岩等复杂储层油气藏在油气勘探中的地位日趋重要。复杂储层油气藏岩性多样化、岩石矿物类型多样化、储集空间类型多样化、流体分布特征多样化，给岩石物理研究及测井解释评价带来很大挑战。认清储层测井响应机理是储层识别与评价的关键，而岩石物理实验作为研究岩石物理特征的一种主要手段则显得尤为重要。目前，利用常规岩石物理实验研究储层岩心物理特征时存在3个问题：一是对于碳酸盐岩、火成岩、变质岩等容易发育裂缝的储层，获取岩心比较困难，取心率比较低，成本较高，并且在岩心处理过程中，很容易对岩心造成伤害，产生新的次生孔隙空间；二是在研究饱和度与电阻率指数关系时，实验饱和度间隔控制困难，对于致密储层，进行流体驱替非常耗时，并且难以获取低饱和度情况下的岩电曲线；三是常规岩石物理实验难以进行储层岩石微观结构和岩石宏观物理属性间关系的研究。

随着计算机技术的发展，数值模拟已经成为十分经济且有效的科学研究方法，如数值模拟手段代替了核爆炸实验，蒙特卡罗粒子数值模拟代替了大多数放射性测量实验，等等。目前，岩石物理数值模拟已经成为岩石物理研究的重要手段。相比于岩石物理实验，其可以节省大量人力、物力，并且可以在微观尺度上定量考察各种因素对岩石物理属性的影响。另外，岩石物理数值模拟可以计算传统岩石物理实验所无法直接测量的物理性质，如三相相对渗透率等。早期，岩石物理微观数值模拟研究大都基于过于理想化的孔隙微观结构，如何反映真实岩心孔隙结构特征和准确重复

实验测量结果，成为岩石物理数值模拟的目标。随着X射线CT扫描及聚焦离子束－扫描电镜（FIB-SEM）技术在岩石物理实验中的应用，可以直接利用CT扫描、FIB-SEM切割扫描等物理实验法，或采用一些数值重建算法构建能够反映储层岩石真实孔隙空间结构特征的数字岩心，然后通过一定的数学物理算法以三维数字岩心为载体进行岩石物理模拟实验，从而计算储层岩石的宏观物理性质（如电阻率、弹性参数、渗透率等），也可以用来模拟岩石微观孔隙结构、裂缝、流体等因素对岩石弹性和电性的影响。三维数字岩心技术建立了岩心微观结构和宏观物理性质之间的桥梁，基于三维数字岩心的岩石物理数值模拟（即数字岩石物理实验）将在岩石物理理论研究和实际应用中发挥重要作用。

本书中有关数字岩心技术的研究过程，得到了中国石油大学（华东）孙建孟教授、刘学锋教授、崔利凯博士、闫伟超博士，中国石油勘探开发研究院西北分院闫国亮博士的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

本书组织编写过程中，参考了许多国内外专家、学者的优秀成果，为本书的顺利编写及自有体系的形成提供了不菲的帮助，在此一并表示感谢。

由于作者专业水平所限，书中难免有错误之处，敬请各位读者批评指正。

目　录

第一章　概述 …… 1
第一节　数字岩心构建方法概况 …… 2
第二节　岩石声电属性模拟方法概况 …… 9
第二章　数字岩心构建方法 …… 15
第一节　X 射线 CT 建立三维数字岩心的方法 …… 15
第二节　FIB-SEM 切割扫描构建泥页岩数字岩心 …… 21
第三节　过程模拟建立三维数字岩心的方法 …… 25
第四节　顺序指示模拟构建三维数字岩心的方法 …… 30
第五节　多点地质统计重构数字岩心的方法 …… 34
第六节　裂缝性储层三维数字岩心的构建方法 …… 38
第七节　层状结构三维数字岩心的构建方法 …… 41
第三章　数字岩心孔隙结构确定方法 …… 42
第一节　储层岩石孔隙模型发展的几个阶段 …… 42
第二节　最大球方法建立孔隙网络模型 …… 51
第三节　孔隙网络建模方法验证 …… 71
第四章　数字岩心孔隙空间流体分布确定方法 …… 81
第一节　数学形态学方法模拟孔隙空间流体分布 …… 81
第二节　格子玻尔兹曼方法确定孔隙空间流体分布 …… 87
第五章　复杂储层岩石电性数值模拟研究 …… 98
第一节　电性基本理论 …… 98
第二节　有限元法计算岩石的电阻率 …… 99
第三节　微观因素对天然气储层岩石电性影响规律研究 …… 110

第四节　致密砂岩微观孔隙结构对岩石电性的影响 …… 124
第五节　裂缝性储层岩石电性特征 …… 130
第六节　层状结构储层岩石电性特征 …… 136
第六章　复杂储层岩石弹性数值模拟研究 …… 142
第一节　弹性力学基本理论 …… 142
第二节　有限元方法计算三维数字岩心的弹性模量 …… 147
第三节　气层岩石声学特性模拟算法验证 …… 150
第四节　微观因素对气层岩石声学特性的影响 …… 157
第五节　裂缝性储层岩石弹性特征 …… 175
第六节　层状结构储层岩石弹性特征 …… 177
参考文献 …… 180

第一章 概 述

研究复杂储层岩石的结构特征对储层岩石电学和声学性质的影响具有非常重要的意义。传统的岩石物理实验很难定量的获取复杂储层的结构特征与岩石电性参数和弹性参数之间的定量关系，而通过数字岩石物理实验技术能够很好的弥补传统岩石物理实验的不足。数字岩石物理实验主要包含两部分，一是建立能够反映储层性质的三维数字岩心，二是采用合适的方法进行岩石物理属性模拟。

数字岩心技术是由孔隙结构建模发展起来的，为了研究微观孔隙特征对岩石电性及渗流的影响，许多学者开始将岩石的孔隙拓扑结构抽象为理想的岩石孔隙结构模型，例如毛细管模型、孔隙网络模型。毛细管模型是研究岩石孔隙结构应用较广泛的一类模型，也是提出较早的一类模型。按照其发展历程可以分为：等径平行毛管束模型、不等径平行毛管束模型和串联平行毛管模型。等径平行毛管束模型是将储层岩石孔隙结构近似等效为一束笔直的半径相同的平行毛细管；不等径平行毛管束模型是将岩石孔隙结构近似等效为一束笔直的半径不同的毛细管；串联毛管模型是每根毛管的直径沿轴向以规则或不规则的形式变化。由于毛管束模型仅沿毛细管轴向上导通，因此该类模型具有很强的各向异性。

Fatt（1956）在名为“The network model of porous media”系列文章中首次提出了“网络模型”的概念并就网络模型在多孔介质中的应用进行了详细的阐述。网络模型以毛细管模型为基础上，它将储层岩石的孔隙空间结构利用孔隙体和喉道两部分来表示，并且将储层岩石复杂的孔隙空间结构等效成相互连通的毛管束组成的网状结构。逾渗网络模型是在孔隙网络模型的基础上发展起来的，该模型首先将复杂多孔介质的孔隙空间划分为孔隙和喉道，然后通过一种特定的规则将孔隙和喉道连接起来，使之符合某种特定的拓扑结构，最后运用逾渗理论研究流体在复杂多孔介质中的传导规律。以上模型虽然对认识岩石的传导特性具有重要作用，但是过于简化没有考虑到岩石孔隙空间复杂的几何特征和岩石骨架特征。

随着计算机图像处理技术及计算方法的发展和 CT 扫描及聚焦离子束 - 扫描电镜（FIB-SEM）技术在岩石物理实验中的应用，可以直接利用 CT 扫描、FIB-

SEM 切割扫描等物理实验法或数值重建算法构建能够反映储层岩石真实孔隙结构的数字岩心。与孔隙网络模型相比，三维数字岩心不仅能够更加真实地反映岩石的三维孔隙空间结构，并且包含了岩石的骨架特征。基于数字岩心的数字岩石物理实验不仅可以弥补传统岩石物理实验的不足，而且与传统岩石物理实验相比，在样品结构以及实验参数控制方面更加灵活，具有自己独特的优势。

在数字岩心技术研究领域，国外起步比较早，近几年来国内数字岩心技术也获得了很大的发展，经过几年的发展，已形成了三大数字岩石物理实验室，主要有澳大利亚的与挪威的 Lithicon，斯坦福大学的 Ingrain Digital Rock Physics Lab，中国的 iRock Technologies。Lithicon 的前身是 Digitalcore Laboratory 和 Numerical Rocks，其中 Numerical Rocks 是 2004 年从挪威国家石油公司拆分出来的，主要创始人 Øren 和 Bakke；Digitalcore Laboratory 由澳大利亚国立大学（ANU）和新南威尔士大学的专家学者于 2009 年成立的，两家公司在 2013 年合并，随后在 2014 年 FEI 收购了 Lithicon 公司，在 2016 年 Thermo Fisher 又以 42 亿美元的价格收购了 FEI。目前该公司在数字岩心方面提供的服务主要包含以下几方面：基于岩屑或钻井岩心的 X 射线 CT 成像；润湿性与敏感性分析；多相流体流动分析；地层压实及储层损坏方面分析；储层酸化、水驱油及二氧化碳埋存方面分析。斯坦福大学的 Ingrain Digital Rock Physics Lab 基于斯坦福大学的科研团队 30 多年的研究成果由 Amos Nur 和 Henrique Tono 创建于 2007 年，目前该公司提供的服务主要包含以下几方面：①岩心柱高分辨率 3D 动态扫描；②亚毫米分辨率下的密度和有效原子序数测井；③孔隙度、渗透率、声电特性模拟；④孔隙结构分布；⑤毛管压力曲线模拟等，将数字岩心技术扩展到了复杂储层和非常规储层等方面。董虎基于英国帝国理工大学数字岩心小组的研究成果，于 2010 年在中国创建了数岩科技公司（iRock Technologies）。数岩科技致力于为各大油田和石油公司提供数字岩心分析解决方案，利用三维图像分析岩石的物理属性，利用微米 CT 成像获取岩石结构信息，帮助各油田和石油公司制定开发方案，达到提高采收率的目的。

目前这几大国际性的数字岩心公司运行良好，实验分析项目也越来越全面，为各石油公司提供了很多的岩心测试分析服务。

第一节　数字岩心构建方法概况

目前，数字岩心建模方法可以分为两大类，一是借助实验仪器直接获取储层

岩石图像的实验方法，例如借助共聚焦激光扫描显微镜（CSLM）、X 射线计算机层析成像仪（X-CT）和聚集离子束 - 扫描电镜（FIB-SEM）等高精度仪器直接获取岩心不同截面的二维图像，之后采用一定的数学方法对二维图像进行三维重建得到三维数字岩心；二是借助随机模拟或地质过程模拟方法间接构建三维数字岩心的数值重建法。数值重建法通过对岩心二维图像进行分析获取建模需要的统计信息（如变差函数、孔隙度、线性路径函数、两点概率函数等），之后采用特定的重建算法建立三维数字岩心，重建的数字岩心与岩心二维图像具有相同的统计特性。

一、物理实验法建立三维数字岩心

用以建立数字岩心的物理实验方法主要可以分为 X 射线 CT 扫描法、共聚焦激光扫描法、序列切片成像法。

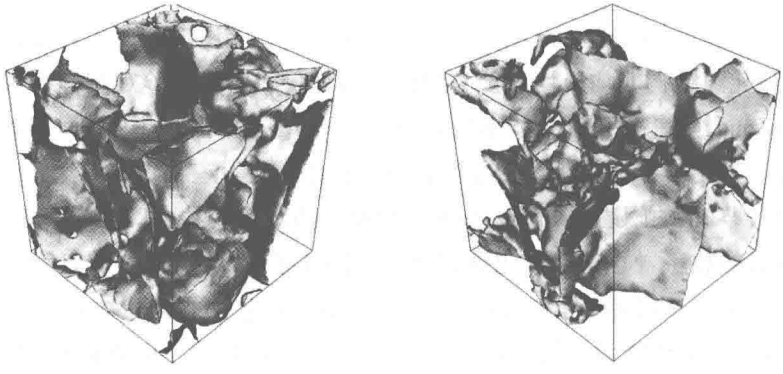
1. X 射线 CT 扫描法

X 射线 CT 扫描技术是一种应用比较广泛的构建数字岩心的方法，它具有不损坏岩心样品的优点，是一种无损扫描方法，目前已应用于储层岩石孔隙结构定量分析、孔隙度和渗透率计算、剩余油分布研究、储层毛管压力和流体饱和度分析、微观孔隙结构非均质性评价、储层伤害评价、驱替实验观测等领域。在 1991 年，Dunsmuir 等将 CT 扫描技术发展并应用于石油领域，构建了微米分辨率的 Berea 砂岩数字岩心，并对 X 射线源类型、操作模式、三维重建算法、数据三维显示做了比较基本的阐述。Rosenberg E（1999）利用 X 射线 CT 扫描得到了 Fontainebleau 砂岩的数字岩心。Arns 也通过 X 射线 CT 扫描得到了分辨率为 5.68μm/像素的 Fontainebleau 砂岩的三维数字岩心，随后又建立了碳酸盐岩的三维数字岩心。Gelb 等（2011）利用亚微米分辨率的 X 射线 CT（VersaXRM）和纳米分辨率的 X 射线 CT（UltraXRM）构建了泥页岩数字岩心。Yang 等（2013）采用能量为 35KeV 与 45KeV 双能 X 射线 CT 和数据约束模型构建了方解石胶结的砂岩数字岩心，可以得到胶结物的空间分布。Wang 等（2013）采用 25KeV 与 35KeV 双能 X 射线 CT 和数据约束模型建立了石灰岩数字岩心，并将骨架分为了方解石和白云石两部分。国内姚艳斌等（2010）利用能量为 ACTIS-225FFiCT/DR/RTR 微焦点 X 射线工业 CT 扫描仪扫描得到了煤的数字岩心并对煤的有效孔隙度、孔径分布、孔裂隙类型进行了定量表征。

目前主要有两种类型的微 CT 扫描系统用于构建储层岩石的数字岩心，一种是使用工业 X 射线发生器产生 X 射线的台式微 CT 扫描系统；另一种是采用同步

加速器作为 X 射线发生器的同步加速微 CT 扫描系统。虽然现在先进的台式微 CT 扫描系统可以获得分辨率为 5um 甚至更高分辨率的数字岩心，但是文献中高质量的数字岩心都是用同步加速微 CT 扫描系统获得的。澳大利亚国立大学于 2004 年建立了数字岩心实验室，应用自制的微 CT 扫描系统对数字岩心构建技术进行了广泛深入的研究，构建了直径为 5cm，最大视域为 55mm，分辨率小于 2μm 的柱塞岩心的数字岩心。柱塞岩心数字岩心的体素数为 2048^3，利用 128 个节点的并行机群运算了 4h。为澳大利亚国立大学 XCT 实验室应用自制 CT 扫描系统得到的砂岩和碳酸盐岩的数字岩心。

对于疏松砂岩数字岩心的构建，一般台式微 CT 扫描系统的分辨率已经足够胜任；对于致密岩石和碳酸盐岩，由于孔隙尺寸在亚微米级，需要应用同步加速微 CT 扫描系统。但是，由于同步加速仪器价格昂贵，不适合工业应用，随着 CT 技术的发展和计算机处理能力的提高，可以克服台式微 CT 扫描系统分辨率不足的问题。目前，美国 Xradia 公司生产的台式微 CT 扫描系统的分辨率已经可以达到 30nm。关于应用 X 射线 CT 扫描方法构建数字岩心的基本原理在第二章详细介绍。



(a)分辨率5.6μm　　(b)分辨率3.04μm

图 1－1　澳大利亚国立大学 XCT 实验室应用自制的微 CT 扫描系统得到的砂岩和碳酸盐岩的数字岩心

2. 共聚焦激光扫描法

共聚焦激光扫描显微镜最初应用在生物科学领域，在 20 世纪 90 年代开始应用于石油工程领域，用来研究储层岩石的孔隙网络。共聚焦激光扫描法建立三维数字岩心的基本过程可以分为以下几步：①将预处理后的岩样注入掺有荧光剂的环氧树脂；②采用激光扫描仪器照射岩心，在聚焦区域内的染色颗粒会产生荧光并被光电倍增器探测到；③通过计算机精确控制监测区域，通过沿着表面和不同

深度的移动扫描，可以得到一定尺度的三维数字岩心。Fredrich 等（1995）曾采用该方法建立了数字岩心。Petford 等（2001）应用 Bio-Rad MRC 800 共聚焦激光扫描显微镜建立了砂岩的数字岩心，如图 1－2 所示，其中灰色部分为孔隙，骨架透明。Shah 等（2013）详细介绍了共聚焦激光扫描过程中碳酸盐岩岩样的制备方法。采用聚焦扫描法可以得到分辨率为亚微米级的数字岩心图像，但是该方法构建的三维数字岩心厚度比较薄，在实际研究中较少应用。

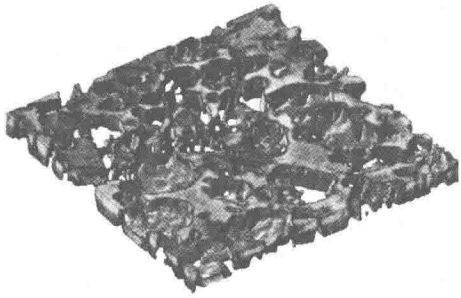


图 1－2 共聚焦激光扫描法构建的砂岩数字岩心（灰色部分为孔隙，透明部分为骨架）

3. 序列切片叠加成像法

序列切片叠加成像方法是将岩心截面用氩离子刨光后采用高分辨率照相仪器进行成像；然后切割掉一层表面，重新进行成像；如此重复，就可以得到一系列连续的二维切片图像；将所有图像按照扫描顺序进行叠加配准及校正就可以得到三维可视化的数字岩心。聚焦离子束－扫描电镜（FIB-SEM）技术是一种比较典型的序列切片叠加成像法，通过 FIB-SEM 技术获取三维数字岩心的流程图如图 1－3 所示。FIB-SEM 技术是 SEM 扫描电镜与 FIB 聚焦离子束的结合，打破传统的二维扫描电镜成像与单一的聚焦离子束刻蚀，利用扫描电镜成像与聚焦离子束切割，将二者结合起来用于样品内部三维立体成像。

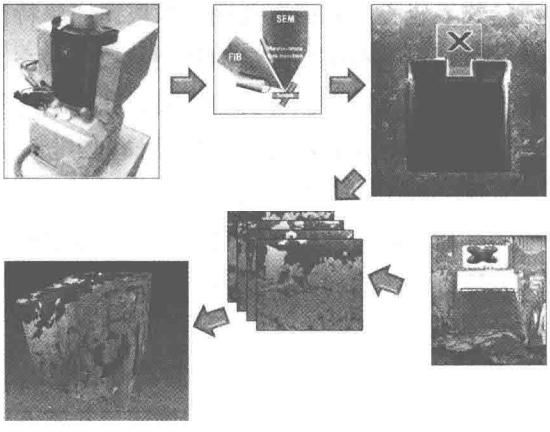


图 1－3 FIB-SEM 构建数字岩心流程图

FIB 聚焦离子束技术是把离子束斑聚焦到亚微米甚至纳米级尺寸，通过偏转系统实现微细束加工。SEM 扫描电子显微镜技术是利用高能电子与物质的相互作用，在样品上产生各种信息，如二次电子、背反射电子、俄歇电子、X 射线、阴极发光、吸收电子和透射电子等，这些信号通过探测器按顺序、成比例地转为视频信号，经过放大，调节光点亮度，形成了扫描电镜图像，图像分辨率可以达到纳米级。图 1 -4 为采用 FIB-SEM 技术构建的泥页岩的三维数字岩心。FIB-SEM 方法可以得到高分辨率的三维数字岩心（可以达到纳米级），但是由于建立数字岩心过程中需要大量的离子剖光和电子扫描处理，因此花费的时间比较长，而且建立数字岩心的尺度比较小。

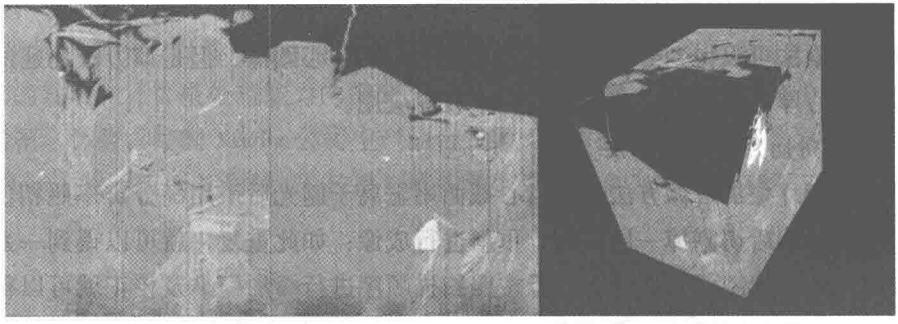


图 1 -4　FIB-SEM 构建的泥页岩数字岩心

二、数值重建法建立三维数字岩心

物理实验法构建三维数字岩心费用昂贵、耗时并且在储层非均质性较强时难以获得代表储层特征的数字岩心。数值重建法可以根据储层特征按需构建数字岩心，可以随需求调整参数，得到不同孔隙结构特征的数字岩心，与物理实验法相比具有一定的灵活性。在实际应用中，有关岩心微观孔隙结构的信息多局限于二维薄片数据，数值方法重建数字岩心就是通过对岩心二维薄片信息进行统计分析，采用数值模拟方法来重建三维数字岩心，目前主要包括随机模拟法和过程法。随机模拟方法主要有高斯场法、模拟退火法、顺序指示模拟方法、多点地质统计学方法和马尔科夫链方法。

1. 随机模拟法建立数字岩心

1974 年，Joshi 首次提出了构建数字岩心的高斯随机场法，该方法基于去顶高斯随机场，通过分析岩心铸体薄片，以岩心二维薄片孔隙空间的统计特性（孔隙度、两点相关函数）作为约束条件来构建了二维数字岩心。Quiblier（1984）

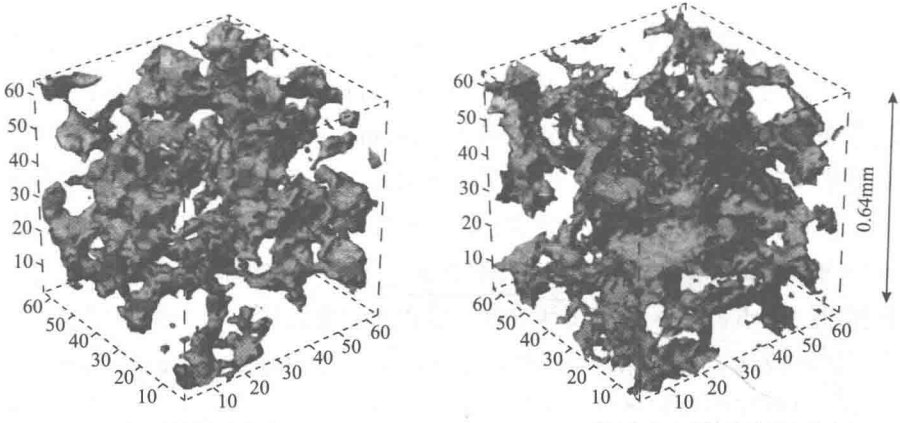
对 Joshi 算法做了进一步发展和改进，构建了三维数字岩心。Alder（1990）用 Quiblier 改进后的算法建立了枫丹白露砂岩的三维数字岩心。Ioannidis 等（1995）在 Quiblier 算法的基础上做了更深入的研究，在三维数字岩心构建过程中引入了快速傅立叶变换（FFT）方法，使重建三维数字岩心的速度有所提高。但是，仅用岩心孔隙度和自相关函数作为约束条件构建数字岩心不足以反映整个孔隙空间的结构特征，为了更好的反映孔隙空间的结构特征，Hilfer（1991）引入了局部孔隙度分布函数和局部渗流概率分布函数，Torquato 和 Lu（1993）引入孔隙尺寸分布函数来反映孔隙结构特征。这些函数的引入丰富了建模信息，提高了数字岩心建模的质量，但是，高斯法构建的数字岩心孔隙空间连通性依然很差。

1997 年，Hazlett 提出了模拟退火的方法，该算法在构建三维数字岩心过程采用孔隙度、两点概率函数、线性路径函数作为约束条件，在三维数字岩心重建过程中可以将反应岩石孔隙空间结构的更多的信息考虑进来，因此重建的三维数字岩心相比高斯场法更加接近真实岩心的孔隙空间结构。赵秀才（2007）也用模拟退火法构建了三维数字岩心，并用格子玻尔兹曼方法对数字岩心的连通性进行了评价，模拟退火法构建的数字岩心具有良好的各向同性，但是孔隙连通性与真实岩心相比偏低。模拟退火方法在数字岩心构建过程中可以引入任意的统计属性作为建模约束条件，但是随着约束条件的增多，重建过程变慢。

2003 年，Keehm 开发了构建数字岩心的顺序指示模拟（SISIM）算法。此后，朱益华和陶果等（2007）、刘学锋和孙建孟等（2008）也对顺序指示模拟算法进行了研究，该方法以岩心二维切片图像作为训练图像，利用反映岩石二维图像的孔隙度和反映岩石空间结构差异性的变差函数作为约束条件，利用地质统计学中的顺序指示模拟算法构建三维数字岩心。虽然重建的数字岩心与输入的二维图像具有相似的变差函数曲线，但是由于未能从根本上解决孔隙连通性的问题，该方法构建的三维数字岩心孔隙连通性依然较差。

2004 年，Okabe 和 Blunt 采用多点地质统计学方法构建了贝雷砂岩的数字岩心。该方法以岩心的二维切面图像作为训练图像，使用 9×9 的模板对统计并存储岩心切片图像中的孔隙空间结构信息，提取训练图像的孔隙和骨架点作为条件数据，并把统计得到的信息充分反映到所建的数字岩心中。该方法重建的数字岩心具有良好的长程连通性，图 1-5（b）为他们构建的 Berea 砂岩的数字岩心，与采用 CT 扫描方法建立的 Berea 砂岩的数字岩心［图 1-5（a）］相比，具有相似连通特征。但是该方法具在构建训练图像时只是通过旋转二维图像获得三维情况下的条件概率分布函数，并没有获得真正的三维训练图像，因此只适应于各向

同性数字岩心的建立。张丽和孙建孟等（2012）也应用多点地质统计方法构建了枫丹白露砂岩的数字岩心并用局部孔隙度函数和局部渗流概率函数对该方法的准确性进行了评价。



(a)CT扫描方法构建　　(b)Okabe采用多点地质统计学方法重建

图 1－5　Berea 砂岩的数字岩心（有色部分为孔隙，透明部分为骨架）

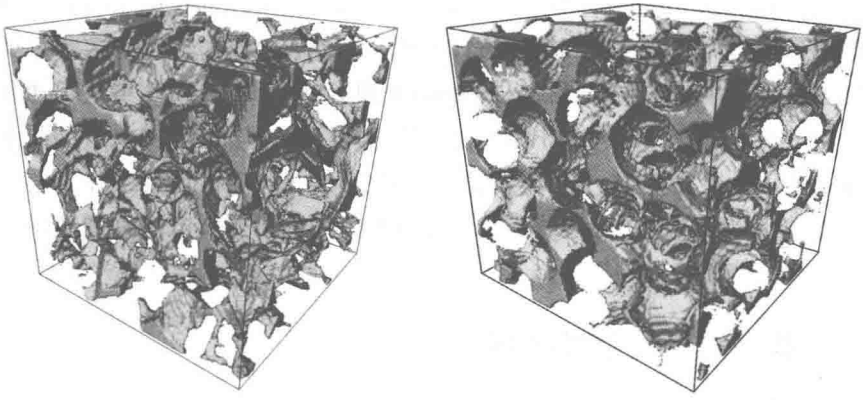
Wu 等提出了构建三维数字岩心的马尔科夫链蒙特卡洛方法（MCMC），该方法以马尔可夫随机滤网统计模型为基础，利用三个相互垂直的独立的二维图像作为训练图像，对每一个二维图像求取条件概率，然后利用三个方向的条件概率加权逐层遍历重构，从而重建三维数字岩心。该方法建立的三维数字岩心隙连通性较好，建模速度较快。

除马尔科夫链法，上述随机法都只能构建各向同性的岩心，在非均质性较强的复杂储层数字岩心构建上具有一定的局限性。

2. 过程模拟法建立数字岩心

与随机模拟方法重建数字岩心的思路不同，Øren 和 Bakke（1997）提出了模拟岩石颗粒沉积过程构建数字岩心的方法。该方法首先通过资料分析获取岩石的粒度信息，通过粒度信息得到岩石颗粒半径，然后通过对岩石地质形成过程的主要阶段（沉积过程、压实过程、胶结过程）进行模拟建立数字岩心。应用此方法，他们重建了枫丹白露砂岩的数字岩心（图 1－6），就形态学属性来说，过程模拟方法重建数字岩心的两点相关函数、局部孔隙度分布和局部渗流概率与 CT 扫描方法构建的数字岩心非常吻合。就岩石物理属性来说，过程模拟方法重建数字岩心的渗透率和地层因素与 CT 扫描方法构建的数字岩心也比较吻合。因此过程模拟法所构建三维数字岩心具有很好的连通性，可以重现真实岩石的几何特性

和传导特性。但是，由于该方法无法模拟复杂储层岩石的成岩过程，因而不适用这类岩石的建模，比如火成岩、碳酸盐岩、变质岩等。刘学锋和孙建孟等使用过程法和模拟退火法相结合的方法建立了枫丹白露砂岩的数字岩心，该方法以过程法构建的数字岩心作为模拟退火法的输入，与传统的模拟退火算法相比，该方法建模速度快，与真实岩心具有相似的均质性和孔隙连通性。



(a)CT扫描方法构建　　(b)Øren采用过程模拟方法重建

图 1-6　Fontainebleau 砂岩的数字岩心（灰色部分为孔隙，透明部分为骨架）

第二节　岩石声电属性模拟方法概况

目前，以数字岩心为载体的岩石物理属性数值模拟引起了国内外石油技术专家越来越多的关注。岩石物理属性数值模拟最关键也是最基本的问题是所构建的岩石物理数字模型是否能够真实有效地反映储层岩石的孔隙结构特征。随着数字岩心建模技术的发展，数值模拟手段也有了相应的进展。与传统的岩石物理实验手段不同，基于三维数字岩心的岩石物理属性数值模拟具有以下几个优点：

（1）计算速度快、费用低：三维数字岩心一旦建立，便可重复使用，得到常规岩石物理实验和特殊岩石物理实验的数据比实验室快得多。对于一些在实验室中需要 1～2 月完成的特殊岩石物理实验，通过数字岩心数值模拟可以在短时间内完成。

（2）测试样品选择灵活：常规实验室的分析需要高质量的柱塞岩样。数字岩心技术可以对从岩屑、疏松砂岩、老岩心、破损岩心和井壁取心等几乎所有的岩心样品进行三维数字岩心构建及数值模拟分析，可在一定程度上利用数字岩石

物理实验代替传统岩石物理实验。

（3）可控性强：数字岩心技术可以根据需要调整数字岩心的微观参数，利用数字岩石物理实验有利于认识岩石微观参数对储层宏观物理属性的影响。

（4）绿色环保：数字岩心技术在数值模拟过程中无需使用对环境有影响的化学试剂。

目前，基于数字岩心的物理属性模拟主要包含4个方面：电学特性模拟、声学特性模拟、渗流特性模拟和核磁特性模拟。国外，英国帝国理工大学、澳大利亚国立大学、斯坦福大学等高校以及Ingrain和Lithicon等公司从本世纪初开始进行了大量的研究工作。国内，中国石油大学（华东）、中国地质大学、西南石油大学等高校以及数岩科技、三英科技等公司也开展了相应的研究工作。本书主要基于三维数字岩心研究了储层岩石的声电特性，下面主要从电性和弹性两方面介绍岩石物理数值模拟方法概况。

一、岩石电性数值模拟概况

1942年，阿尔奇（Archie）建立了确定纯砂岩地层含水饱和度的实验模型，将电阻率测井与孔隙度测井有效联系起来，奠定了测井储层评价的基础，具有划时代的意义。由于地层水和油气在电性特征上具有明显差异，电法测井是储层评价和流体识别的一种基本的测井手段。早期，Wang、Suman以及国内的毛志强等利用三维孔隙网络模型研究了润湿性和孔隙结构对含油气岩石电阻率的影响。王克文和孙建孟等利用逾渗网络模型分析了储层岩石孔隙结构、润湿性、不同地层水矿化度下泥质对储层岩石电性特征的影响规律，随后又研究了不同孔渗岩心的电性特征。英国帝国理工大学数字岩心研究小组利用“最大球法”提取数字岩心孔隙网络拓扑结构获得球管模型，基于球管模型开展了渗流模拟和核磁响应模拟。与以上模型不同，数字岩心可以更加真实的反映岩石的孔隙空间，基于数字岩心可以直接计算岩石物理参数。目前基于数字岩心的电性数值模拟采用的方法主要分为4类：随机游走法、格子气自动机与格子玻尔兹曼法、基尔霍夫电路节点法、有限元法。

1. 随机游走法

随机游走方法模拟岩石电性的基本思路是基于稳定状态下分子的扩散和电流传导现象之间的相似性，从而推导出电学参数能够用空间迂曲度表示。Clennell（1997）论述了迂曲度的概念并指出了扩散迂曲度与电流迂曲度之间的相似性，为利用随机游走模拟岩石电性奠定了理论基础。Toumelin（2005）建立了颗粒堆