

微焦 X 射线扫描成像技术在岩石物性特征研究的现状

卢树参^{1,2,3,4}, 许红^{2,3,4*}, 陈勇¹, 张海洋^{1,2,3,4}, 王修齐^{2,3,4,5}, 张威威^{1,2,3,4}

(1 中国石油大学(华东), 青岛 266580; 2 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266071;

3 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071;

4 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266071; 5 中国地质大学(武汉), 武汉 430074)

摘要:微焦 X 射线扫描成像技术是在微米—纳米级尺度上对储层岩石物性特征的重构及透视表征,是目前国际范围内较为先进的储层定性定量研究技术。在系统文献资料研究基础上,对微焦 X 射线扫描成像技术的原理及研究主要内容进行归纳总结,指出该技术是为研究岩石基质及赋存于不同岩石孔隙空间之中的流体而开发建立的不断成熟起来的油气储层定性定量研究技术。可以实现岩石整体、岩石骨架和孔隙三维重构,能够以透视岩心成像的方式直观清晰地观察分析岩石内部三维孔隙空间的分布、大小及其连通性。通过阈值分割,可对孔隙三维组构、孔隙网络中流体流动、天然气水合物生成与分解等特征进行建模分析,达到四维研究的水平。分析探讨了原理及前人研究实例,对其在油气和天然气水合物实际勘探开发运用中的现状及前景做出展望。

关键词:微焦 X 射线扫描成像;岩石物性特征;天然气水合物动力学

中图分类号:P736.1;TE53

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2016.03009

微焦 X 射线层析扫描成像技术(简称“X-CT”)在国内外被广泛应用于医学、生物学、材料科学等诸多研究领域^[1]。近十年来微焦 X 光无损扫描成像技术在石油地质学的运用也逐渐收到广大地质工作者的重视,它能无损伤地对样品的格架和孔隙进行清晰直观的定量分析,并且在三维空间中展示其分布特征,这对于研究岩石的物

性来说,是其他实验方法不能与之媲美的地方。近几年国内学者在此做了比较多的研究,2014 年,章海宁等^[2]通过过程模拟法构建三维数字岩心,研究了颗粒尺寸比、颗粒大小以及颗粒分选性对岩石弹性特性的影响;孙海等^[3]采用马尔科夫链蒙特卡洛方法构建页岩三维数字岩心,并应用格子 Boltzmann 方法计算数字岩心的孔隙度和固有渗透率,得到固有渗透率和孔隙度的关系式并计算页岩的表观渗透率。在国外,CT 扫描在地质学领域的研究也有较大的突破,其中, P. Christe 等^[4]利用 X 射线层析成像技术用于测试一系列破碎的碳酸盐岩岩石蚀变程度,对每个样品的蚀变裂缝进行量化以及在不同压力下的裂缝变化,甚至进一步探索了缝合线的成因;Dewanckele 等^[5]对分散的、局部的、连通的和闭合的孔隙,以及个别似圆状的孔隙的估算,更好地阐述

收稿日期:2015-12-15

基金项目:油气重大专项(2011ZX05025-002-04);海洋保障地质工程专项(GZH201200510);973(2012CB956004);国家自然科学基金(41106064)

作者简介:卢树参(1990—),男,在读硕士,主要从事海洋油气地质与勘探方面的工作。E-mail:lss19901015@163.com

*** 通讯作者:**许红(1957—),男,博士,研究员,主要从事海域油气成藏与资源勘探评价的研究工作。E-mail:qdxhong@163.com

了石灰岩风化机理,获得了孔隙随时间变化特征以及岩石自然内部构造的四维模型。另外,该技术也成功应用于低孔低渗页岩储层储层评价、致密油评价和天然气水合物动力学的研究上^[6,9]。

1 CT 扫描实验与原理

1.1 实验仪器

目前国内应用于地质学研究的 CT 扫描仪有很多,这里主要介绍其中几类:

(1)比利时 SkyScan 公司生产的 1172 micro-CT 微焦点计算机扫描仪^[1],该扫描仪分辨率为 $1.0\ \mu\text{m}$ 以下,最大射线电压 $100\ \text{kV}$;

(2)Xradia XRM-500 型 CT 扫描仪,该扫描仪岩心实际扫描体元分辨率为 $2.68\ \mu\text{m}$,投影数为 1 200 张^[7];

(3)德国西门子公司的 Somation-plus 螺旋 CT 机,但其空间分辨率为 $0.35\ \text{mm} \times 0.35\ \text{mm}$,为了进一步提高 CT 扫描精度,胜利石油管理局地质科学研究院引进了 ACTIS 微焦点 X 射线计算机层析系统,太原理工大学与中国工程物理研究院应用电子研究所合作研制了 $\mu\text{CT}225\text{kVFCB}$ 型高精度显微 CT 实验系统,可以分辨微米级的裂隙和孔隙^[8];

(4)中国矿业大学(北京)煤炭资源与安全开采国家重点实验室与美国 BIR 公司合作研发了 ACTIS300-320/225CT/ DR 高分辨率工业 CT 实时成像系统,可以快速扫描得到微米量级分辨率的 16 位 CT 切片图像,该系统在样品直径为 $25\ \text{mm}$ 时,耗时 $50\ \text{s}$ 左右可以完成扫描重建基于 1 440 视图的 $1\ 024 \times 1\ 024$ 像素大小 16 位灰度图像,切片图像水平分辨率和厚度分辨率均达到 $10\ \mu\text{m}$ 左右;

(5)青岛海洋地质研究所的 phoenix v |tome|x 型工业 CT,扫描分辨率最高达到几个微米,主要应用于对天然气水合物的微观观测、对内部微结构成分进行断层扫描和三维立体重建。

1.2 实验原理

CT 是用 X 射线对一定厚度的层面进行扫描,当一定能量的射线穿过物体时,产生光电效

应、康普顿效应,射线部分被反射、散射以及吸收,使得射线的强度发生衰减,再由探测器接收透过该层面的 X 射线,转变为可见光后,由光电转换变为电信号,再经模拟/数字转换器(analog/digital converter)转为数字,输入计算机处理(图 1)。

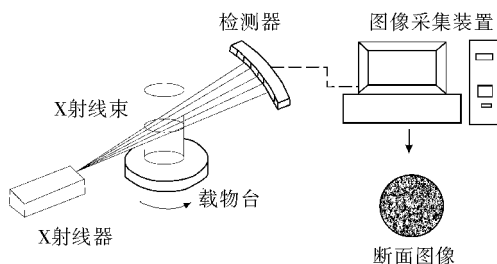


图 1 CT 扫描系统成像原理

Fig. 1 Principle of CT scanning system imaging

2 微焦 X 光扫描技术在岩石孔隙结构的研究

2.1 阈值分割孔隙表征法

阈值分割法是一种基于区域图像的分割技术。该法通过设定不同的阈值,将图像的像素分为若干份,以选定的阈值进行计算。由于岩石内部各种矿物物理性质的差异,造成在扫描过程中 X 射线的衰减强度的变化,使得计算机得到的数据在切片上呈现出颜色深浅不同的单元。因此,CT 切片本身并没有多大的物理意义,仅仅反映了岩石切片物理性质的差异。不能仅仅依靠灰度值的不同判断矿物的种类^[8]。但是,利用灰度值的不同进行二值分割,即阈值分割,就能很好的表征切片图像上孔隙结构的大小、形态、分布、连通性,并且可以计算出岩石切片的面孔率。该法以实现简单、计算量小、性能稳定而成为图像分割中最基本和运用最广泛的分割技术,然而传统孔隙度的计算就需要在特定的测试条件下进行。

彭瑞东等^[8]给出了利用 CT 扫描重建图像的本质特征,并从中提取研究了岩石的孔隙结构特征及空隙率随阈值大小变化而变化的特点。如图 2 所示,泥岩、人工砂岩和泡沫混凝土三者的同一切片在不同阈值分割的情况下,随着阈值的增大,孔隙直径变大,分布范围变广,孔隙率提高。

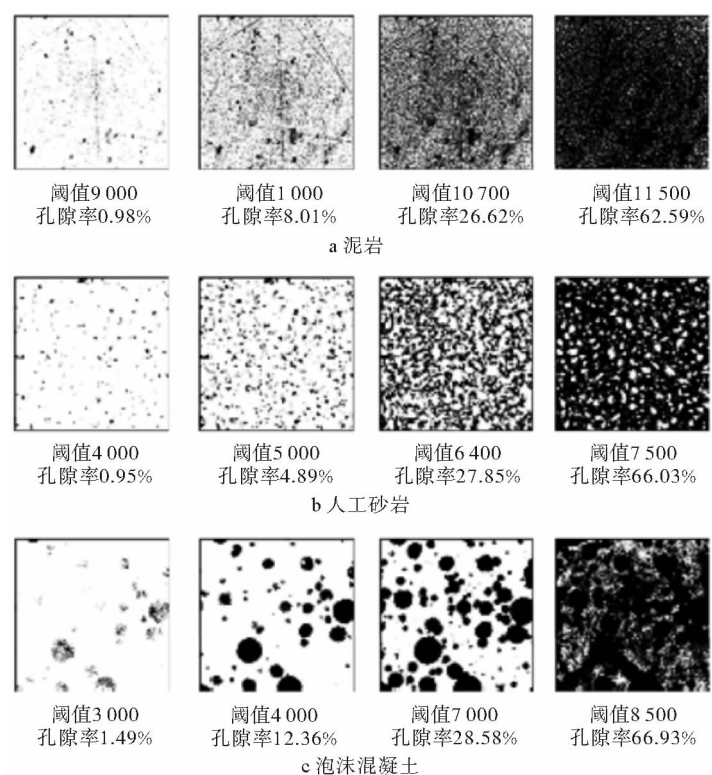


图 2 不同阈值下分割得到的二值化岩石孔隙图像(据文献[8])

Fig. 2 Binary rock pores image after different thresholding (from reference [8])

通过图 3 展示了经阈值分割后的孔隙分布。该法所使用的样品为生物碎屑白云岩,通过微焦 X 光扫描共得到 3 个轴向的 3 429 张切片,切片间的距离为 30~120 μm ,岩心中心切片间距小分辨率高边缘间距较大分辨率较低。使用 mimics CT 扫描解释软件,对切片进行二值分化,图 3a 为 Z 轴方向距第 1 张切片 $d=1.32\text{ mm}$ 的一张切片,图 3b 为 a 切片中孔隙展示。图 3a 中颜色较暗的为孔隙,灰白色为岩石基质,可以明显地看到切片中大量呈不规则长条状生物碎屑,切片右下方孔隙发育较好。为了更加清晰直观地展示孔隙的分布状况,进行阈值分割,将孔隙用红色表示出来,除孔隙外的岩石基质用蓝色为背景色(图 3b)。由图 3b 可以看出,该切片中孔隙分布杂乱,大小由几十微米到几毫米不等,切片中部至左上方孔隙分布中等,孔隙较小,连通性较差,孔隙喉道较小,有可能构成不连通的“死孔隙”。但是切片的右下方呈现了直径约 5 mm 左右的超大型孔隙,与图 4a 中比较来看,疑似晶间溶蚀孔隙。另外,可以看出切片的右下方整体孔隙发育较好,

孔隙喉道大,连通性好。然而整个岩心中裂缝也较为发育,裂缝在三维空间体系中连接众多孤立

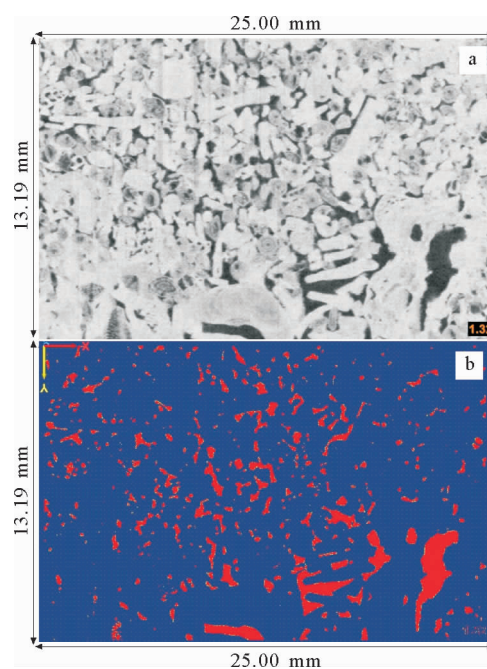


图 3 阈值分割后的空隙结构表征

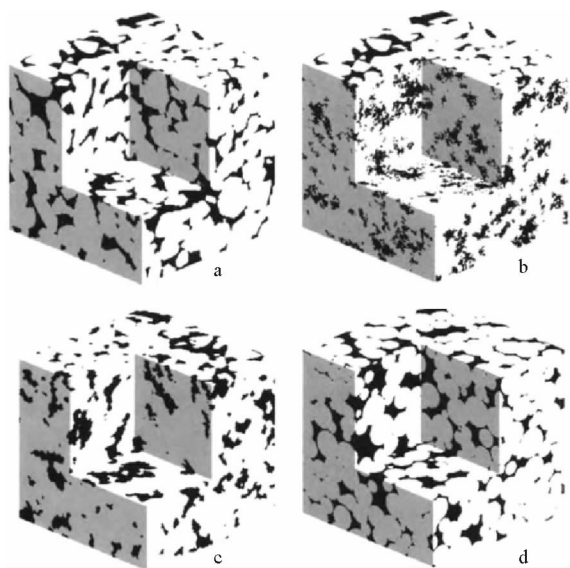
Fig. 3 Characterization of the void after thresholding

孔隙,形成粒间孔—微裂缝型孔隙结构,大大增强储层的孔隙度和渗透率,这在油气勘探中具有重要的意义。

2.2 孔隙三维空间建模

微焦 X 光扫描技术应用于岩石空隙结构表征最大的亮点就是实现样品的三维重构。三维重构包括岩石整体重构、岩石骨架重构和孔隙三维重构。

目前,三维数字岩心建模的方法主要有随机法和过程法 2 大类。随机法包括 X 射线 CT、顺序指示模拟和多点地质统计学 3 类。为了比较多种三维重构方法的准确性,刘学锋等^[10]以 CT 扫描技术构建的砂岩三维数字岩心为基础,选取其中的一个切面作为二维图像,分别采用顺序指示模拟法、多点地质统计学和过程法 3 种方法进行三维重构,得到最终的图像(图 4)。



(a) X 射线 CT; (b) 顺序指示模拟;
(c) 多点地质统计学; (d) 过程法

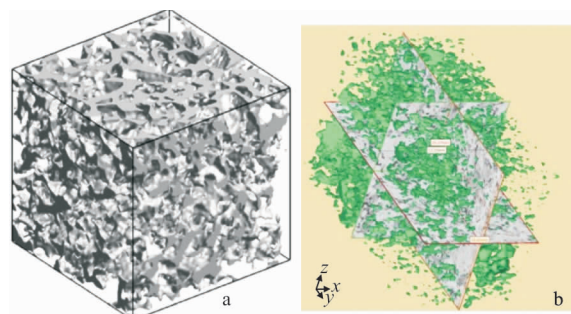
图 4 4 种方法建立的数字岩心(据文献[10])

Fig. 4 Digital core established from four methods
(from reference [10])

对比 4 种重构图发现,由于岩石在二维图像的基础上重建三维图像的多解性,使得 3 种方法重建的 3 位数字岩心图与 CT 扫描三维图存在大小不同的差异。由图 5 可以看出,过程法构建的三维数字岩心图(图 4d)与 CT 构建的 3 位数字

(图 4a)岩心具有相似的孔隙连通性,空隙分布及形态较为相似,多点地质统计学(图 4c)的方法次之,而顺序指示模拟方法构建的三维数字岩心(图 4b)则表现出较大的差异性。

就目前的研究来说,还是以孔隙三维空间重构为岩心三维建模的热点。图 5 展示了 2 类不同的孔隙三维的展示方法。图 5a 为侯建等^[11]以人工砂岩岩心为实验模型构造的孔隙三维展示,图中灰黑色代表孔隙空间。由图 6 可以看出,该砂岩孔隙分布较为均匀,非均质性较弱,孔隙连通性较好。图 5b 为笔者所采用的白云岩样品,图中已去掉岩石基质,绿色部分为孔隙空间。可以看出,该岩心孔隙分布不均匀,非均质性较强,岩心由坐标原点方向向 X 轴方向孔隙大小变小,连通性较差,出现部分孤立孔隙。



(a) 样品大小:2.45 mm×2.45 mm×2.45 mm (据文献[11]);
(b) 样品大小:25.00 mm×13.19 mm×16.19 mm
(生物碎屑白云岩)

图 5 岩心孔隙空间三维重构

Fig. 5 Core pore space three-dimensional reconstruction

3 微焦 X 光扫描成像应用于孔隙网络中流体的研究

近几年,随着高分辨率 X 射线 CT 技术的进步,岩心物性特征的研究也从宏观的描述阶段向更精细更准确的方向发展,研究水平明显提高。其中,利用 X 射线 CT 系统对孔隙结构和孔隙中的流体进行成像,系统研究流体在岩石内部孔隙中的形态分布取得了可喜的成果^[12,13],比如孙建孟等^[13]采用 X 射线扫描技术构建低渗透储层岩石的三维数字岩心,分析了裂缝及流体性质对其弹性模量的影响规律。

油气及地下水等资源储存在岩石的孔隙之中,储层岩石的多孔性使得地下流体在岩石内以“最大优势路径”迁移和扩散。但现有的孔渗性测试、镜下观察等实验技术在实验进行之前,都通过驱替或用各种溶剂抽提的方法把岩石中的流体清洗干净^[14],因此在流体在岩石孔隙中的流动、扩散和分布等的研究方面,以及现有的实验技术还是存在缺陷。而微焦 X 光扫描技术能提供较好的分辨率,不仅能清晰地识别孔隙中原始和残余的流体分布,也能比较清晰地识别孔隙内部流体的形态及配置关系^[15-17]。

侯建等^[11]在进行水驱实验过程中,通过构建

三维模型,清晰直观地展示了实验过程中水油两相流体在空间中的分布特征。如图 6 所示,在此岩石的三维重构中,红色部分为剩余油,黄色部分即为未被剩余油填充的孔隙空间,实际上即为水占据的空间部分,右方调色条表示网络模型孔隙中含油饱和度的大小。该图可以直观地反映了剩余油在孔喉中杂乱分布的特征,但主要分为 3 种赋存方式:①主要分布于微孔隙及孤立的“死孔隙”中的剩余油,呈颗粒、粒状孤立散乱分布;②分布于相互连通的中等孔隙中,呈条带状、网状、斑状;③分布于连通性好的大型及超大型孔隙或裂缝之中,以油水混合的状态存在。

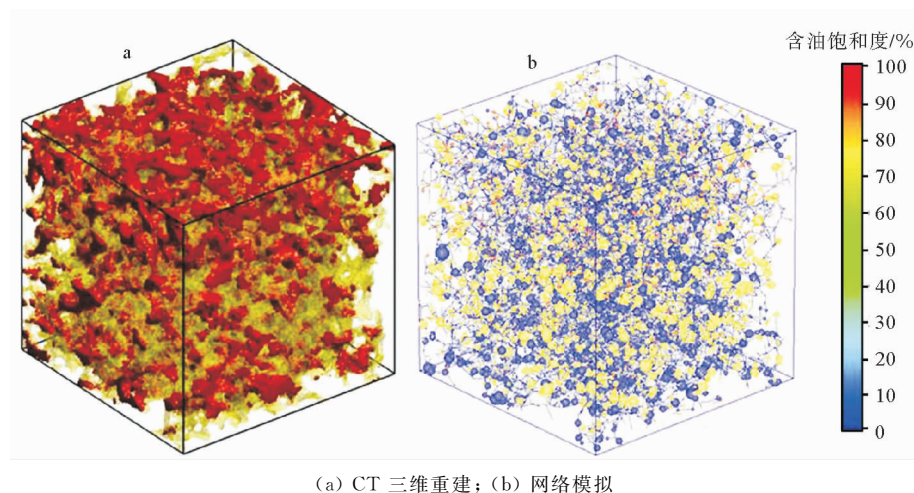


图 6 微观实验与网络模拟的剩余油分布对比(水驱至残余油阶段)(据文献[11])

Fig. 6 Comparative of distribution of remaining oil between microscopic experiment and network simulation (waterflood to residual oil phase) (from reference [11])

4 微焦 X 射线扫描技术在天然气水合物的研究

天然气水合物是天然气与水在高压低温的条件下形成的一种固态结晶化合物,主要分布于深海沉积物或陆域的永久冻土之中。如今天然气水合物作为一种新型的能源,其储量巨大已经引起了全世界的关注^[18]。探明天然气水合物的孔渗特征、结构、水合物的生成和分解动力学特征,对研究勘探和开发水合物具有非常重要的意义^[19]。

随着研究的深入,相关实验技术也应用于水合物的研究,如核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)、拉曼光谱(Laser Raman spectroscopy, LRS)、X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、中子衍射(neutron diffraction, ND)、低真空扫描电子显微镜(low-vacuum scanning electron microscopy, LVSEM)、高压差示扫描量热仪(high pressure differential scanning calorimetry, DSC)等^[20-25]。另外,微焦 X 射线扫描技术的运用,能实时、直观、准确地反映多孔介质中天然气水合物的生成和分解过程,对研究沉积物内部空间结构和水合物在多孔介质中生成与分解动力学过程有这极为重要的意义。目前仅有不多研究机构具备相关专用设备和技术研究条件及能力,青岛海洋地质研究所自 2009 年开始引进微焦 X 光扫描仪,至今已经在天然气水合物微焦孔渗层特征研究方面取得大量研究成果,在国内居

copy, LRS)、X 射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、中子衍射(neutron diffraction, ND)、低真空扫描电子显微镜(low-vacuum scanning electron microscopy, LVSEM)、高压差示扫描量热仪(high pressure differential scanning calorimetry, DSC)等^[20-25]。另外,微焦 X 射线扫描技术的运用,能实时、直观、准确地反映多孔介质中天然气水合物的生成和分解过程,对研究沉积物内部空间结构和水合物在多孔介质中生成与分解动力学过程有这极为重要的意义。目前仅有不多研究机构具备相关专用设备和技术研究条件及能力,青岛海洋地质研究所自 2009 年开始引进微焦 X 光扫描仪,至今已经在天然气水合物微焦孔渗层特征研究方面取得大量研究成果,在国内居

于领先水平。

4.1 含水沉积物的空间定量表征

对于含水水合物的测量,必须在一定温压条件下进行。利用高压反应釜,可在 278 K、5.1 MPa 下获得甲烷水合物沉积物的 CT 图像,以获取其内部结构特性。由获取的二维 CT 图像可清楚反映沉积物中游离气、水合物占(水合物+水+游离气)的比率,便可求得该水合物样品的饱和度。Jin 等^[26]通过微焦 CT 扫描得到的沙粒、水和水合物的空间分布情况(图 7)。利用该方法得到的各类饱和度数值与水合物质量体积法获得的数值基本一致,3 组样品偏差分别为 0.2%、0、3.3%,由此说明利用微焦 CT 扫描可以用来较好地测定介质孔隙中指定成分饱和度。

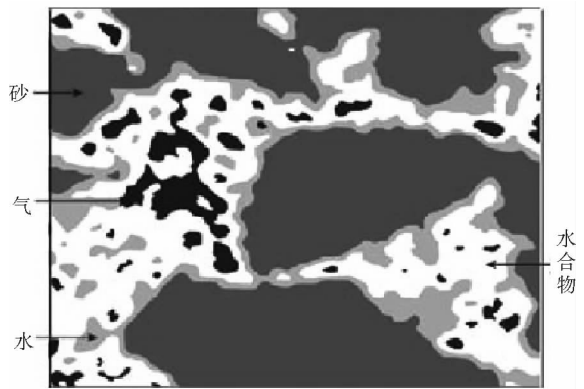
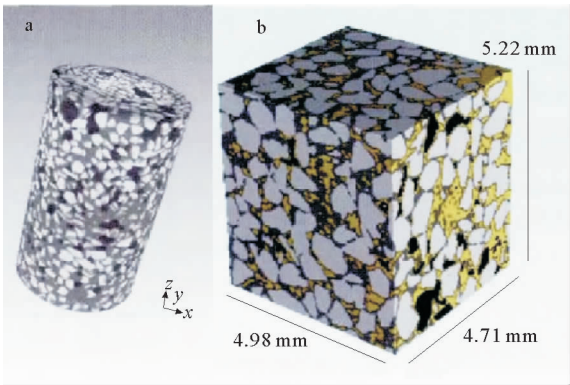


图 7 含水合物沉积物的二维 CT 图像 (据文献[24])

Fig. 6 Dimensional CT image of hydrate deposits (from reference [24])

一般在进行水合物形成研究实验,探讨水合物的饱和度变化情况时,可以利用微焦 X 射线扫描成像技术来展示水合物及其他成分在三维空间中的展布状态,并利用灰度图像来计算特定组分的饱和度。图 8 为整体样品和选取的局部区域重构后的三维图像,利用灰度值计算得出的水合物饱和度变化见表 1。由整体样品和选取区域的水合物饱和度对比可以看出,水合物形成过程中呈现较强的均一性,除个别时刻点外,整体水合物饱和度和选取区域的局部水合物饱和度差别不超过 2%。因此,利用灰度图像进行水合物的三维表征和饱和度定量分析具有可行性^[25]。



(a) 为整体样品三维图;
(b) 为选取区域三维图;黄色为甲烷水合物;
灰色为 NaCl 溶液;浅灰色为石英砂;黑色为甲烷气

图 8 整体样品和选取区域的三维图像 (据文献[25])
Fig. 8 Three-dimensional image of the entire sample and the selected area (from reference [25])

表 1 水合物形成过程中获取图像各时刻点
所对应的饱和度变化情况 (据文献[25])

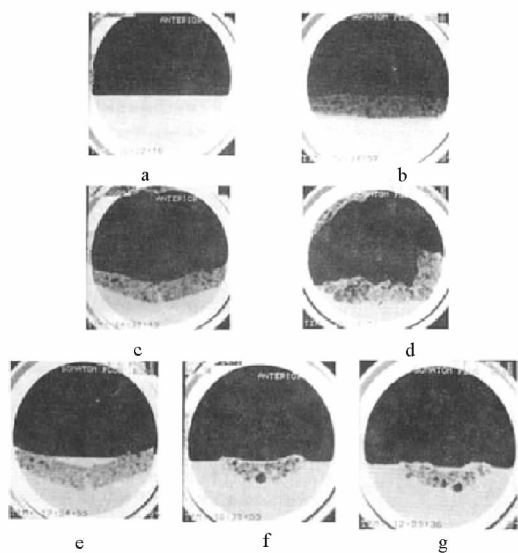
反应时间/h	96.5	100.5	107	119.5	131
整块样品中水合物饱和度/%	3.9	24.6	35.0	51.4	97.0
选取区域中水合物饱和度/%	4.0	28.5	33.4	51.6	99.0

4.2 水合物生成与分解动力学研究

天然气水合物生成与分解动力学的研究一直是众多学者关注的焦点。目前运用于其研究的实验检测方法主要有:传统实验方法、光学检测法、超声检测、电法检测、微焦 X 射线成像技术和核磁共振成像技术^[27]。比较而言,传统的实验方法简单性能好,但不能满足现阶段高精度实验的要求;光学检测造价低,但仅针对可视釜进行检测研究;声学与电学检测技术具有很好的性价比,唯一的缺点是不能生成直观图像,而微焦 X 射线成像技术和核磁共振成像技术是首选的实验检测技术,它们可以完成高精度高分辨率的实验研究。

在研究天然气水合物生成与分解的动力学时,可根据 X 射线扫描位置点所获取的 CT 图像

来展示水合物生成和分解的变化过程。蒋观利等^[28]在进行纯水和甲烷气体形成甲烷水合物实验的基础上,通过使用 X-CT 技术开展了砂土中甲烷水合物的生成和分解动力学研究。通过微焦 X 光扫描成像实验获得了一系列的图像(图 9),图中反应釜内浅灰色的为纯水,黑色的为液体。a—d 为水合物生成过程中的扫描图像,可以看出,水合物的生成过程中,由气液两相界面分离开始,开始出现疏松的水合物,后来成絮状,水合物的生成由疏松变紧密,最后逐步变得结实,从而形成甲烷水合物。e—g 为甲烷水合物的分解过程图像,由图中可以看出,水合物的分解则是一个不断释放甲烷气体,甲烷水合物由紧密变为疏松的过程。



a—d 为甲烷水合物生成过程图像;

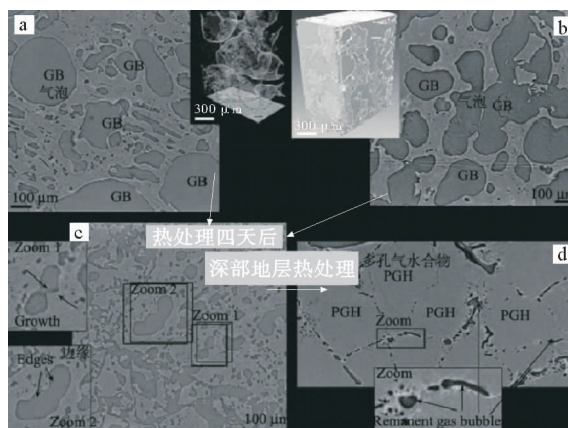
e—g 为甲烷水合物分解过程图像

图 9 甲烷水合物生成和分解过程的 X-CT 图 (据文献[28])

Fig. 9 X-CT image of hydrate formation and dissociation process (from reference [28])

由于蒋观利等^[28]所使用螺旋式 X-CT 的分辨率不高,无法从水合物的表面更加清晰细致地从微观角度再现和分析水合物的生成与分解过程。德国不莱梅大学的 Klapp 等^[29]应用高分辨率同步加速辐射 X 射线 CT 成像系统(SRX-CTM),观察到了沉积物中甲烷气泡边缘结晶的微观过程(图 10),以此模拟海底环境下水合物的

生长过程。同样,Bohrmann 等^[30]在对 ODP 204 站点的天然气水合物钻孔取样研究中,利用电子扫描显微镜图像,对天然气水合物的赋存状态及保存条件进行了探讨,图像清晰直观。这给我们一个启示,在研究水合物生成和分解的过程中,应加入岩心样品进行实验,以期达到天然气水合物生成时的真实温压及围岩条件。



(a) 纯甲烷气;(b) 甲烷、乙烷混合气;

(c) 经过 4d 结晶反应后的图像;

(d) 来自印度洋海域的天然水合物分布

图 10 水合物在气泡边缘早期结晶过程的 CT 图像 (据文献[29]修改)

Fig. 10 X-CT image of hydrate early crystallization process in bubble edge modified (from reference [29])

5 结论与展望

分析探讨了微焦 X 射线扫描成像技术原理及研究实例、研究现状,并对其在油气储层表征和天然气水合物模拟实验中的前景做出展望。

(1)微焦 X 光扫描成像技术作为目前较为领先的数字岩心技术,较传统的显微镜技术而言,能对样品进行无损检测,保证了样品的完整性。由于扫描图像为切片灰度图,在进行岩石学探讨时,无法对岩石矿物的成分、晶体大小和形态等进行更为准确的描述。

(2)通过阈值分割能将岩心的基质和孔隙分割开,可对其孔隙进行定性定量分析,二值化后的图像还能进行面孔率及孔隙度计算,这与岩石的物性实验相比更加简单有效。但是,二值化分割

存在一定的误差,阈值大小的选择直接决定了孔隙的大小及形态分布,并且决定面孔率及孔隙度。在进行油气储层评价,确定岩石物性的过程中,应该将成像解释与孔渗性实验结合起来。

(3)基于二值化分割后的三维结构图,比较准确地展示了岩心孔隙的空间展布特征,随着扫描仪器的不断革新,分辨率不断提高,孔隙的三维结构图像将更加清晰准确,可以有效地运用到低孔低渗的油气储层中。

(4)微焦X光扫描成像技术在孔隙网络模型中研究多相流体的流动,以及在微观尺度上的流体流动的模拟是该技术研究的一个重要领域。另外,该技术在化学驱动以及剩余油的预测方面也应该得到重视和发展。

(5)利用微焦X射线扫描技术进行天然气水合物生成及分解动力学模拟,结合具体实例,进行相关模拟实验对水合物的勘探和开发有着重要的理论指导意义。但水合物作为亚稳态天然能源,随着温压的变化,水合物的动态测量过程很难进行,这也是今后微焦X射线技术应用于天然气水合物研究领域的重要方向。

参考文献:

- [1] 马文国,刘傲雄. 扫描技术对岩石孔隙结构的研究[J]. 中外能源, 2011, 16(7): 54-56.
- [2] 章海宁,姜黎明,张金功,等. 岩石结构对碎屑岩储层弹性参数影响的数值研究[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2014, 50(6): 773-778.
- [3] 孙海,姚军,张磊,等. 基于孔隙结构的页岩渗透率计算方法[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38(2): 92-98.
- [4] Christe P, Turberg P, Labiouse V, et al. An X-ray computed tomography-based index to characterize the quality of cataclastic carbonate rock samples[J]. Engineering Geology, 2011, 117(3/4): 180-188.
- [5] Dewanckele J, De Kock T, Boone M A, et al. 4D imaging and quantification of pore structure modifications inside natural building stones by means of high resolution X-ray CT[J]. Science of the Total Environment, 2012, 416(2): 436-448. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.11.018
- [6] 李菊花,郑斌. 微观孔隙分形表征新方法及其在页岩储层中的应用[J]. 天然气工业, 2015, 35(5): 52-59.
- [7] 屈乐,孙卫,杜环虹,等. 基于CT扫描的三维数字岩心孔隙结构表征方法及应用——以莫北油田116井区三工河组为例[J]. 现代地质, 2014, 28(1): 190-196.
- [8] 彭瑞东,杨彦从,鞠杨. 基于灰度CT图像的岩石空隙分形维度计算[J]. 科学通报, 2011, 56(26): 2256-2266.
- [9] 王明磊,张福东,关辉,等. 致密油评价新方法及其应用——以鄂尔多斯盆地延长组长7段致密油为例[J]. 非常规油气, 2015, 2(2): 10-15.
- [10] 刘学锋,张伟伟,孙建孟. 三维数字岩心建模方法综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 3066-3072.
- [11] 侯健,李振泉,张顺康,等. 岩石三维网络模型构建的实验和模拟研究[J]. 中国科学, 2008, 8(11): 1563-1575.
- [12] 李玉彬,李向良,张奎祥,等. 微焦点X射线计算机层析(CMT)及其在石油研究领域的应用[J]. CT理论与应用研究, 2000, 9(3): 35-40.
- [13] 孙建孟,闫国亮,姜黎明,等. 基于数字岩心研究流体性质对裂缝性低渗透储层弹性参数的影响规律[J]. 中国石油大学学报:自然科学版, 2014, 38(3): 39-44.
- [14] 刘月田,郭分乔,涂彬,等. 全岩心非均匀径向渗流各向异性渗透率测定方法[J]. 石油学报, 2005, 26(6): 66-68.
- [15] 吴洁,刘成东,张守鹏,等. 显微CT技术在石油地质中的应用初探[J]. 江西科学, 2012, 30(5): 634-637.
- [16] Sato A. Analysis of the Tracer Diffusion Phenomena through Cracks in the Porous Media by Means of X-Ray CT[J]. Materials Sciences and Applications, 2013, 4(8): 18-31.
- [17] Hirono T, Takahashi M, Nakashima S. In situ visualization of fluid image within deformed rock by X-ray CT[J]. Engineering Geology, 2003, 70(3): 37-46.
- [18] Song Y C, Yang L, Zhao J F, et al. The status of natural gas hydrate research in China: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 31: 778-791. doi:10.1016/j.rser.2013.12.025
- [19] 刘昌岭,孟庆国. X射线衍射法在天然气水合物研究中的应用[J]. 岩矿测试, 2014, 33(4): 468-479.
- [20] Rojas Y, Lou X. Instrumental analysis of gas hydrate properties[J]. Asia-Pacific Journal Chemical Engineering, 2010, 5(2): 310-323.
- [21] 夏宁,刘昌岭,业渝光,等. 显微激光拉曼光谱测定天然气水合物的方法研究[J]. 岩矿测试, 2011, 30(4): 416-422.
- [22] 刘昌岭,孟庆国,业渝光. 固体核磁共振技术在气体水合物研究中的应用[J]. 波谱学杂志, 2012, 29(3): 465-474
- [23] 业渝光,刘昌岭. 天然气水合物实验技术及应用[M]. 北京:地质出版社, 2011: 275-295.
- [24] 李承峰,胡高伟,刘昌岭,等. X射线计算机断层扫描在天然气水合物研究中的应用[J]. 热带海洋学报, 2012, 31(5): 93-99.
- [25] 胡高伟,李承峰,业渝光,等. 沉积物孔隙空间天然气水合物微观分布观测[J]. 地球物理学报, 2014, 57(5): 1675-1682.
- [26] Jin S, Nagao J, Takeya S, et al. Structural investigation

- of methane hydrate sediments by microfocus X-ray computed tomography technique under high-pressure conditions[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2006, 45 (27): L714-L716.
- [27] 宋永臣, 杨明军, 刘 瑜, 等. 天然气水合物生成与分解实验检测技术进展[J]. 天然气工业, 2008, 28(8): 111-113.
- [28] 蒋观利, 吴青柏, 蒲毅彬, 等. 甲烷水合物形成过程的 CT 识别原理和成像特征[J]. 天然气地球科学, 2005, 16 (6): 814-817.
- [29] Klapp S A, Enzmann F, Walz P, et al. Fluid flow in natural gas hydrates revealed by X-ray tomographic microscopy[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Gas Hydrates. Scotland: [s. n.], 2011.
- [30] Bohrmann G, Kuhs W F, Klapp S A, et al. Appearance and preservation of natural gas hydrate from Hydrate Ridge sampled during ODP Leg 204 drilling [J]. Marine Geology, 2007, 244(1/4): 1-14.

CURRENT STATUS OF APPLICATION OF MICRO-FOCUS X-RAY SCAN IMAGING TECHNOLOGY TO RESERVOIR PROPERTIES DESCRIPTION

LU Shushen^{1,2,3,4}, XU Hong^{2,3,4*}, CHEN Yong¹, ZHANG Haiyang^{1,2,3,4},
WANG Xiuqi^{2,3,4,5}, ZHANG Weiwei^{1,2,3,4}

(1 China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2 Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, China;

3 Key Laboratory of Marine Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071, China;

4 Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology,

Qingdao 266071, China; 5 China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

Abstract: The micro-focus X-ray scanning and imaging technology, which has been applied to petrophysical characteristics study on micrometer - nanometer scale, is the most advanced mean for qualitative and quantitative reservoirs description for the time being. Literature research suggests that the technology is currently used to study the rock matrix and the liguid in different kinds of rock pores, and has become a matured qualitative and quantitative technology for oil and gas reservoir description. It can precisely identify the bulk sample, rock matrix and three-dimensional occurrence of pores; rapidly observe and analyze the three-dimensional distribution of rock internal pore space, size and connectivity by perspective imaging of cores. Through the threshold segmentation, we can carry out modeling of three-dimensional pore structure, pore fluid flow network and gas hydrate formation and decomposition for four-dimensional research level. In this paper, the authors analyzed and discussed the principles through application cases of previous studies, and made some suggestions.

Key words: micro-focus X-ray scanning and imaging; petrophysical characteristics; gas hydrate dynamics