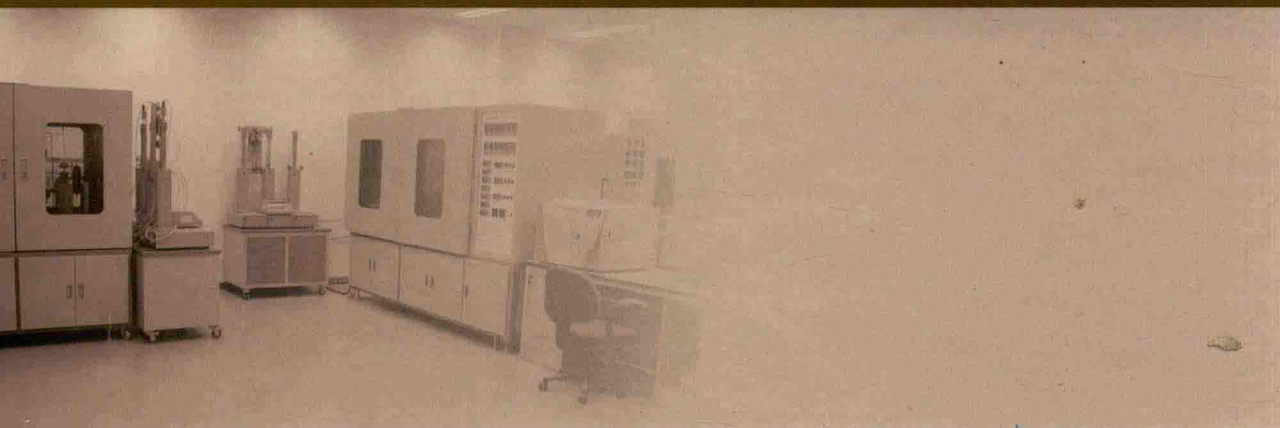




中国石油勘探开发研究院出版物

构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术系列丛书·卷二

主编 赵孟军 刘可禹 柳少波 宋 岩



非常规油气地质 实验技术与应用

柳少波 田 华 马行陟 等◎编著

Laboratory Analytical Techniques for
Unconventional Oil and Gas Research and
Their Application



科学出版社



中国石油勘探开发研究院出版物

构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术系列丛书·卷二

主编 赵孟军 刘可禹 柳少波 宋 岩

非常规油气地质 实验技术与应用

柳少波 田 华 马行陟 等◎编著

Laboratory Analytical Techniques for
Unconventional Oil and Gas Research and
Their Application

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了非常规油气地质实验技术方法,包括孔隙形貌观察与三维重构,孔隙度测量与孔径分析,油气运移相关的岩石物理性质分析,岩石力学性质测定与脆性评价,同位素测年与示踪,煤、页岩和致密砂岩含油气性测定等内容,并介绍了相应技术的实验操作流程和应用实例。

本书适合非常规油气实验研究人员和相关专业人员阅读,也可作为高等院校相关专业的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非常规油气地质实验技术与应用=Laboratory Analytical Techniques for Unconventional Oil and Gas Research and Their Application/柳少波等编著. —北京:科学出版社,2016. 1

(构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术系列丛书·卷二/赵孟军,刘可禹,柳少波,宋岩主编)

ISBN 978-7-03-046379-1

I. ①非… II. ①柳… III. ①石油天然气地质 IV. ①P618. 130. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 272639 号

责任编辑:吴凡洁 刘翠娜 / 责任校对:桂伟利

责任印制:张倩 / 封面设计:无极书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 1 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2016 年 1 月第一次印刷 印张:10 1/2

字数:233 000

定价:96.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

进入 21 世纪以来,我国油气勘探进入一个新的阶段,以湖盆三角洲为主体的岩性油气藏、复杂构造为主体的前陆冲断带油气藏、复杂演化历史的古老碳酸盐岩油气藏、高温高压为特征的深层油气藏、低丰度连续分布的非常规油气藏已成为勘探的重要对象,使用传统的手段和实验技术方法解决这些勘探难题面临较大的挑战。自 2006 年以来,由中国石油天然气集团公司科技管理部主导,先后在中国石油下设研究机构和油田公司建立起了一批部门重点实验室和试验基地,依托中国石油勘探开发研究院的盆地构造与油气成藏重点实验室成为其中一个。“构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术”系列丛书是该重点实验室建设成果的总结,也是组织、参与实验室建设的广大科研人员和实验人员集体智慧的结晶。

盆地构造与油气成藏重点实验室建立之初,实验设备和实验技术基本为空白。重点实验室围绕油气勘探面临的复杂构造解释、油气藏评价和富油气区预测关键科学问题,引进国外先进实验设备 35 台/套,自主设计研发物理模拟等实验装置 11 台/套。

通过实验室建设形成了物理模拟、数值模拟、成藏年代学、成藏参数测定四大技术系列,取得了五个方面的实验技术方法重点成果:自主设计制造了全自动定量分析构造变形物理模拟系统,建立了相似性分析参数模板,形成了应变分析和三维重构技术;利用构造几何学和运动学分析,构建三维断层、地层结构,定量恢复三维模型构造应变分布,形成了构造分析与建模技术;自主研发了油气成藏物理模拟系统,形成 13 个单项技术,支撑油气运移动力学、运聚过程、变形与油气运移、成藏参数测定 5 个方面研究;引进创新形成了以流体包裹体、储层沥青、自生伊利石测年等为核心的多技术综合应用的油气藏测年技术,有效解决了多期成藏难题;利用引进的软件平台,开发了适合我国地质条件的盆地模拟技术、断层分析评价技术和非常规油气概率统计资源评价方法。

“构造变形与油气成藏实验和数值模拟技术”系列丛书是对实验室形成的技术方法的全面总结,丛书由五本专著构成,分别是:《油气成藏年代学实验分析技术与应用》(卷一)、《非常规油气地质实验技术与应用》(卷二)、《油气成藏数值模拟技术与应用》(卷三)、《油气成藏物理模拟技术与应用》(卷四)、《构造变形物理模拟与构造建模技术与应用》(卷五)。丛书中介绍的实验技术与方法来自三个方面:一是实验室建设过程中研究人员与实验人员共同开发的技术成果,其中也包括与国内外相关机构和实验室的合作成果;二是来自对前人建立的实验技术与方法的完善;三是基于丛书主线和各专著需求,总结国内外已有的实验技术与方法。

我们衷心希望通过丛书的出版,让更多的研究人员和实验人员关注构造与油气成藏实验技术,推动实验技术的发展;同时,我们也希望通过这些技术方法在相关研究中的应用,带动构造与油气成藏学科的发展,为国家的油气勘探和科学研究做出一份贡献。

赵孟军 刘可禹 柳少波 宋 岩

2015年7月1日

非常规油气指无法用常规技术手段进行经济性勘探开发的资源,包括致密气、致密油、煤层气、页岩气等。近年来非常规油气勘探开发取得重大突破,产量和储量快速增长,对全球油气行业产生巨大影响,甚至带来供需格局的转变。

非常规油气革命核心是技术革命,除工程技术外,传统实验技术与方法面临严峻挑战:岩石孔隙度低,纳米级孔喉占主体,需要提高观测分辨率和测试精度;油气呈游离态和吸附态等多相态赋存,运移动力复杂,含油气性预测需要新的手段;储层评价主要基于储层改造的适用性,新的参数和标准需要制订;具有近源和源内成藏特点,成藏过程分析和油气来源示踪技术需要创新和完善。非常规油气地质实验技术向三维高分辨率、高精度、服务油气开发的趋势发展。

本书介绍了非常规油气地质实验技术方法,包括孔隙形貌观察与三维重构,孔隙度测量与孔径分析,油气运移相关的岩石物理性质分析,岩石力学性质测定与脆性评价,同位素测年与示踪,煤、页岩和致密砂岩含油气性测定等内容。根据非常规油气实验技术的特点,本书有以下侧重。

(1) 侧重室内实验技术,保证最高的测试精度,取得准确全面的数据。目前部分关键非常规实验测试有统一的方法,如页岩等温吸附测定和超低基质渗透率测定,不同单位和不同测试方法取得的结果差别较大,本书结合国际实验室的研究成果,对实验方法进行了改进和完善,对数据解释进行了说明。实验结果可用于机理和规律研究,也可以对测井、试井等现场数据进行标定。

(2) 侧重实验的应用,详细介绍各种方法的适用条件,突出技术优势,便于实际应用中根据研究目的选择合适的方法,并介绍简要的应用实例。

(3) 侧重实验操作流程,在实验原理和仪器构成的基础上,介绍操作流程,虽然不同型号仪器具体操作步骤有所区别,但大体操作流程类似,方便科研人员了解实验过程,在实际操作过程中作为参考。

(4) 侧重近年来新兴的、针对非常规油气的改进的实验技术,成型的传统实验虽然在非常规油气中有应用,但是技术本身没有太大变化的技术(如有机碳、热解等常规地球化学实验)不进行重复介绍。

本书共七章,前言由柳少波、田华编写;第一章、第二章、第四章由田华、柳少波编写;第三章由田华、范俊佳、张洪、郝加庆编写;第五章由马行陟、柳少波编写;第六章由马行陟、田华、郝加庆编写;第七章由公言杰、张洪、桂丽黎、柳少波编写。本书最后由柳少波、田华统稿。

由于时间和水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请各位专家学者不吝指正。

编著者

2015年6月24日

目 录

丛书序

前言

第一章 孔隙形貌观察与三维重构	1
第一节 CT 成像与三维重构	1
一、工作原理	2
二、仪器构成	3
三、样品与测定流程	5
四、三维重构与参数分析	6
第二节 激光扫描共聚焦显微镜观测	7
一、工作原理与仪器构成	8
二、样品与测定流程	9
三、准三维重构与参数分析	10
第三节 场发射扫描电镜观测	13
一、原理与仪器构成	13
二、样品与操作流程	16
三、三维重构与参数分析	18
第二章 孔隙度测定与孔径分析	22
第一节 孔隙度测定	22
一、原理与仪器构成	23
二、样品与测定流程	26
三、结果解释	27
第二节 高压压汞法	28
一、原理与仪器构成	28
二、样品与测定流程	29
三、结果解释	29
第三节 气体吸附法	30
一、原理与仪器构成	30
二、样品与测定流程	31
三、结果解释	32
第四节 小角散射法	33
一、原理与仪器构成	33

二、样品与测定流程	33
三、结果解释	33
第三章 油气运移相关的岩石物理性质分析	36
第一节 基质渗透率	36
一、原理与仪器构成	37
二、样品与测定流程	40
第二节 润湿性	44
一、原理与仪器构成	44
二、样品与测量流程	46
三、应用实例	47
第三节 毛细管压力	48
一、原理与仪器构成	48
二、样品与测定流程	51
三、应用实例	51
第四章 岩石力学性质测定与脆性评价	55
第一节 岩石力学性质测定	55
一、岩石弹性参数与强度参数	55
二、样品与测试方法	60
三、应用实例	66
第二节 岩石脆性评价	67
一、矿物成分评价方法	67
二、力学参数评价方法	71
三、其他岩石脆性评价方法	73
第五章 同位素测年与示踪	74
第一节 地层水碘同位素测年	74
一、 ¹²⁹ I 测年原理	74
二、样品制备及测试流程	76
三、 ¹²⁹ I 年龄计算和校正	77
四、应用实例	78
第二节 地层水稳定氢、氧同位素示踪	81
一、稳定同位素 D 和 ¹⁸ O 的测定	82
二、水的氢、氧同位素组成及来源判别	85
三、应用实例	88
第三节 天然气碳、氢和稀有气体同位素示踪	91
一、碳、氢同位素示踪与天然气来源识别	92
二、稀有气体同位素示踪与天然气来源判别	96

第六章 煤和页岩含油气性测定和预测	100
第一节 含气量测定	100
一、煤和页岩含气量的构成	100
二、含气量的测定方法	101
三、应用实例	102
第二节 岩石吸附能力测定	105
一、测定原理与仪器构成	105
二、样品制备与测试流程	107
第三节 煤和页岩含气能力预测	115
一、煤含气能力的预测模型	115
二、页岩含气能力的预测模型	121
第七章 致密砂岩含油气性测定和预测	123
第一节 致密油充注孔喉半径下限确定方法	123
一、场发射扫描电镜观察法	124
二、岩心观察与压汞分析法	130
三、理论计算法	135
第二节 致密储层含油性颗粒荧光检测	138
一、定量荧光与颗粒荧光技术原理	138
二、实验方法与流程	141
三、应用实例	143
第三节 含油饱和度测定方法	146
一、抽提法	146
二、饱压取心分析法	147
三、核磁共振法	148
四、束缚水饱和度法	148
第四节 非均质储层含油饱和度预测	149
参考文献	152

第一章 孔隙形貌观察与三维重构

致密储层是非常规油气的主要储集岩石类型。致密储层不同于常规储层,储集空间不连续且尺度小,主要为微米级,甚至纳米级孔隙。常规的显微观察手段和孔径分析方法难以用于致密储层储集空间的描述。因此,迫切需要采用新的测试分析技术系统刻画致密储层的孔隙特征,并查明影响储集能力的主控因素。

致密储层孔隙中的油气因受孔隙表面的影响和制约,其赋存形式和活动性与孔隙的尺寸和表面属性联系密切。针对煤岩、泥页岩和致密砂岩等致密储层开展研究,孔隙形貌观察与三维重构是页岩孔隙直观研究的重要方面,利用高分辨率的 CT(computed tomography)扫描、激光共聚焦显微镜(CLSM)、场发射扫描电子显微镜(FESEM)和二维聚焦离子显微镜(FIBSEM)等微区观察技术对孔隙进行观察并采集图像,以获得泥页岩中的孔隙大小、形状、分布及颗粒的接触情况等信息。结合三维重构技术,获得孔隙的三维分布,结合统计学方法还能获取孔隙度、孔径分布等定量信息(Fredrich et al., 1995)。为岩石三维空间的孔隙连通性,以及与矿物的赋存规律进行深入研究提供有力手段。

第一节 CT 成像与三维重构

CT,即计算机断层扫描技术,是利用射线(X射线或 γ 射线)穿过物质后强度的衰减作用研究物质内部结构的无损检测技术,随着科技的发展,CT扫描在油气地质及开发领域的应用也越来越广泛,它具有穿透性、无损伤、速度快、三维空间、分辨率高等特点,并且不同物质具有不同的CT值(X射线密度)。利用CT扫描技术可以测量岩心的基本参数(密度、孔隙度、饱和度、孔隙直径或半径、配位数等),对储集岩孔隙或裂缝进行三维重构,研究充填物分布及颗粒表面结构、储层的微观孔隙结构及多孔介质中(多相)流体的流动机制等(王新建,1995;李玉斌等,1999,2000;陈杰等,2005;孙卫等,2006;王瑞飞等,2008;张军等,2008;关振良等,2009;刘义坤等,2010;马文国和刘傲,2011;苏娜等,2011)。按其分辨率与发展阶段可分为常规CT、显微CT、纳米CT三类,其分辨率分别为毫米级、微米级与纳米级。按照用途可将CT划分为医用CT(MCT)和工业CT(ICT),二者的主要区别在于射线强度和载样、扫描系统。常规工业CT的分辨率一般在次毫米级,商业公司为扫描地质岩心样设计的专用CT提供了更便捷的操作和更高的分辨率,如GEOTEK公司的MSCL-XCT能连续扫描长度155cm、直径15cm的岩心样并获取分辨率高达100~150 μm 的图像。显微CT通过射线源和CCD的改进将分辨率进一步提升,达到数微米至几十微米。纳米CT主要有基于传统结构(纳米级微焦点)、基于可见光光学系统、基于同步辐射源三种类型,其分辨率分别为大于150nm、大于200nm及大于10nm。现有的纳米CT一般要求扫描的物体较小,使用的样品尺寸通常为微米级别,分辨率为几十纳米的高分辨率纳米CT要求样品尺寸不大于10 μm (李光等,2013),为样品预制过程带来了困难。

CT 技术无损分析的特性及三维重建的能力对于页岩气储层孔隙的研究十分有利,工业 CT、显微 CT 与纳米 CT 提供了不同的表征尺度,目前较为成熟的工业 CT 与显微 CT 虽然分辨率有限,但连续扫描与三维重构能力能揭示孔隙的连续变化,有效应对页岩各向异性强烈的特点,为有利层位优选提供依据。目前来说,纳米 CT 技术还存在诸多不足,但已有学者将其应用于非常规储层孔隙的研究(邹才能等,2011;白斌等,2013),随着重建算法的改进、微纳米加工技术的进步及针对地质样品的专门优化会使纳米 CT 在泥页岩孔隙研究中发挥更大的作用。

一、工作原理

1. CT 扫描原理

CT 识别技术与一般的辐射成像方法完全不同。一般的辐射成像方法是通过将三维空间物体投影至二维平面中而成像,在二维平面中各层面的影像发生重叠,进而造成干扰,因此,不仅导致图像模糊,还损失了图像中的深度信息,不能满足工程分析评价的需要及要求。而 CT 识别技术是将被检测三维物体中的所检测二维扫描层面单独孤立出而成像,这样就避免了三维物体中其余部分的干扰及影响,从而提高图像质量,更加清晰并准确地展示出所检测三维物体中内部结构的位置关系、物质构成及其损伤缺陷情况。

CT 识别技术是通过发射 X 射线使其围绕物体旋转并收集 X 射线的衰减信息,以此来重建 CT 图像的先进无损检测技术。CT 识别技术的工作原理可表述为:将 X 射线源与检测接收器固定在同一机架上,将其与被检测物体进行同步联动扫描,扫描机架每转动一个角度就进行一次扫描,在每次扫描结束后,扫描机架转动到下一个角度再进行下一次的扫描,如此反复重复上述过程,就可以采集到很多组扫描数据。假如扫描机架每平移一次,扫描一次,最后这些扫描信息进行处理后,则可得被检测物体某一扫描层面的真实数字图像。

CT 识别技术的数学基础及原理可表述为:CT 扫描设备主要由放射源及探测器组成。其中放射源所发出的 X 射线可以穿透任何非金属材料,而当 X 射线的波长不同时,所具有的穿透能力也不同。不同非金属材料对相同波长的 X 射线的吸收能力也不相同。一般物质密度越大、组成物质的原子序数越高的物质,对 X 射线的吸收能力也就越强。当 CT 机中的放射源所发出的 X 射线穿透被检测物体时,X 射线的强度由于被物体吸收而发生衰减,当射线以不同方向和位置穿过该物质面,对应的所有路径上的衰减系数线积分值,均可照此求出,从而得到一个线积分集合。该集合若是无穷大,则可精确无误地确定该物质面的衰减系数二维分布,否则,将是具有一定误差的估计。因为物质的衰减系数与物质的质量密度直接相关(当然还与原子序数有关),故衰减系数的二维分布也可体现为密度的二维分布,由此转换成的断面图像能够展现其结构关系和物质组成。实际的射线束总具有一定的截面,只能与具有一定厚度的切片或断层物质相互作用,故所确定的衰减系数或密度的二维分布及它们的图像表示,是一定体积的积分效应(杨更社和张长庆,1998)。

因此,CT 图像就是由大量的投影数据而求解出来的与被检测物质密度有关的分布

函数 $\mu(x, y)$, 显示图像的重建方式有很多, 常用卷积反投影的方法对显示图像进行重建, 计算公式为

$$\mu(x, y) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{L^2} P g(\alpha) d\beta \quad (1.1)$$

式中, $g(\alpha)$ 为卷积核函数, 是在牺牲密度分辨率的前提下消除由于探测器间隔而造成的伪影, 以便减小中心与边缘的反投影计算误差; $\mu(x, y)$ 为被检测点的 X 射线的吸收系数, 通常将其视作为 CT 数, 即 H 值; β 为扫描过程中样品的旋转角度; P 为扫描过程中的投影值; L 为样品距离, mm。

2. CT 图像的形成

CT 扫描机工作时, X 射线管围绕探测器中心旋转, X 射线管发出的 X 射线穿透物体层面后被探测器接收, 然后进行光电转换, 并通过模数转换器进行模拟信号与数字信号的转换, 把转换后的投影数据按一定数学算法进行图像的显示与重建, 最终可以得出反映扫描层面上各点物质对 X 射线的吸收系数的数据, 形成一幅扫描层面的数字扫描图像。

CT 识别技术将实验岩样的某一扫描层面划分为若干立方体块, 这些小立方体块称为体素, 当 X 射线穿透实验岩样时可以测得每一体素的密度, 密度的变化通过灰度来反映, 这些小立方体块即为 CT 图像上的基本单位, 在 CT 图像中称为像素, 它们排列成行、列方阵, 显示成图像矩阵。当 X 射线源从某一方向发出 X 射线并穿过选定的扫描层面时, 沿射线发出方向的体素会吸收部分 X 射线, 使其发生衰减。

当 X 射线穿透扫描层面而被探测器接收时, X 射线的总量已经衰减很多, 大部分被检测物质吸收, 其衰减量为沿 X 射线方向所有体素衰减之和。当 X 射线球管转动到下一个角度时, 再沿该方向发出 X 射线, 则探测器测得第二次发出的 X 射线方向所有体素衰减之和; 重复上述过程, 在不同方向对选定扫描层面进行连续多次 X 射线扫描, 即可获得沿若干个方向的衰减值总和。在以上扫描过程中, 每扫描一次, 可以得到一个重建方程, 在方程中 X 射线衰减总量已测得, 为已知值, 这样就形成衰减总量的各体素的 X 射线衰减值为未知值的方程组。经过连续扫描, 可以得到联立方程组, 运用计算机解出此方程组, 求出每一体素的 X 射线衰减量, 再经过数/模转换, 使具有不同衰减值的各像素形成不同灰度, 而这些灰度不同的像素就形成了一幅矩阵数字图像, 即成为该扫描层面具有不同密度结构的 CT 图像(刘慧, 2013)。

CT 图像的本质是衰减系数 μ 成像。通过计算机对获取的投影值进行一定的算法处理, 可求解出各个体素的衰减系数值, 获得衰减系数值的二维分布(衰减系数矩阵)。再按 CT 值的定义, 把各个体素的衰减系数值转换为对应像素的 CT 值, 得到 CT 值的二维分布(CT 值矩阵)。然后, 图像面上各像素的 CT 值转换为灰度, 就得到图像面上的灰度分布, 此灰度分布就是 CT 影像(刘义坤等, 2010)。

二、仪器构成

一部完整的 CT 系统主要包括扫描部分(线阵排列的电子辐射探测器、高热容量调线

球管和旋转机架),快速计算机硬件和先进的图像重建、显示、记录与图像处理系统及操作控制部分。具体来讲,CT设备主要有以下三部分:①扫描部分,由X线管、探测器和扫描架组成;②计算机系统,将扫描收集到的信息数据进行贮存运算;③图像显示和存储系统,将经计算机处理、重建的图像显示或用激光照相机记录(图1.1.1)。

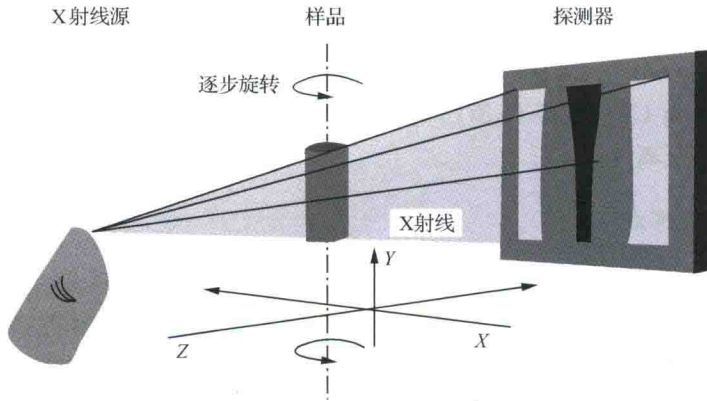


图 1.1.1 CT 结构示意图(据关振良等,2009)

美国 Xradia 公司^①设计和制造的高分辨率三维 X 射线显微成像系统,能够在微米和纳米尺度进行成像,可以无损地对样品内部结构进行三维成像。在普通显微 CT 系统上要获得高的放大倍率,必须要使样品无限靠近光源,这对于较大样品扫描时产生的旋转半径,以及进行原位装置搭载的实验,具有很大的局限性。三维 X 射线显微成像系统可以基于投影放大原理实现一级光学放大,再通过一系列光学物镜,形成二级光学放大(图 1.1.2),实现样品无需靠近光源,即可满足用户获得高放大倍率的需求,特点是不受样品

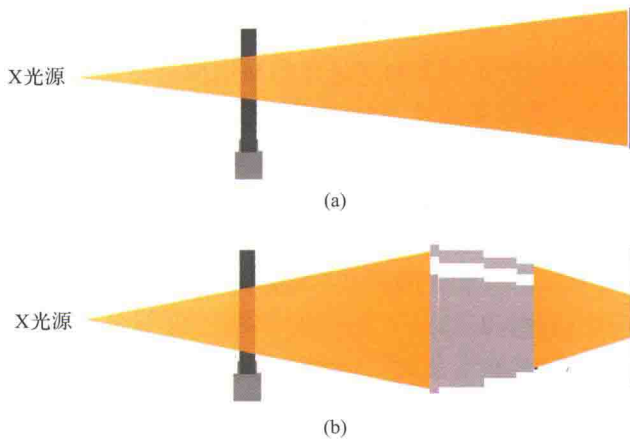


图 1.1.2 三维 X 射线显微成像系统工作原理^②

(a)普通显微 CT; (b)三维 X 射线显微成像系统

① 美国 Xradia 公司已于 2013 年被德国 ZEISS 公司收购。

② 资料来源: <http://www.sypi.com.cn>。

尺寸或工作距离的限制,能始终保持较高的空间分辨率。VersaXRM 系列可以达到 $0.7\mu\text{m}$, UltraXRM 系列最高分辨率可达 50nm 。国内的天津三英精密仪器有限公司依托国家仪器重大专项的支持,也开发了多款 X 射线三维显微成像设备。

三、样品与测定流程

以美国通用公司的 Nanotom 系列为例,简要说明应用显微 CT 进行样品分析的主要流程(图 1.1.3)。

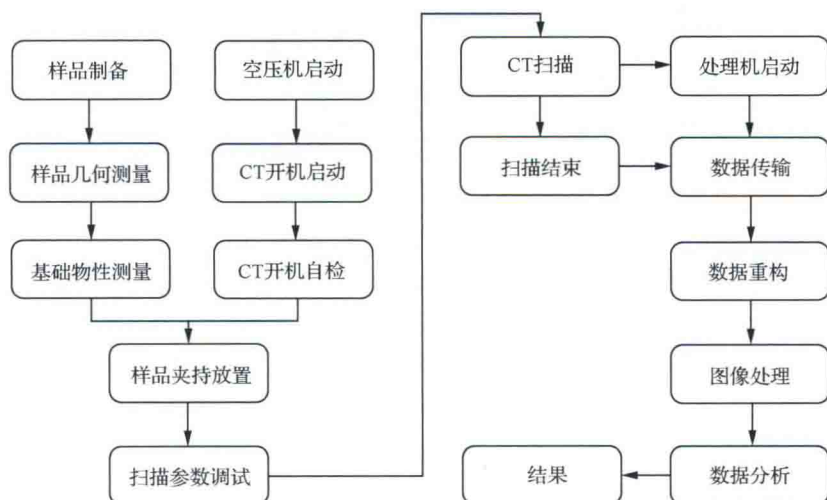


图 1.1.3 用 CT 进行样品分析流程图

(1) 第 1 步,样品制备。

将岩石样品制备成圆柱体,根据分辨率选择样品直径,一般来说,分辨率越高,样品直径越小, 2.5cm 直径的样品分辨率可以达到 $10\mu\text{m}$ 。要求形状规则、底面平整,将样品放置在样品台上,调节高度和距离 X 射线源的距离。

(2) 第 2 步,X 射线扫描。

① 仪器抽真空,打开射线源;

② 进行样品扫描位置调节,将研究区调整至视域范围内,打开图像进行中心校准;

③ 记录位置,调整样品台 Z 轴,将研究目标区移出视域中心,进行空白校准,选取合适的电流、电压值;

④ 将研究目标区再次移至视域中心,设置样品的旋转次数,当岩心旋转 360° 后,在每一步长旋转后对其进行“照相”,总共对切片进行了 1500 次照相,重构后得到 1500 幅二维的图像,小步长、多图像也保证了后期三维重构的精确性,设置完成后开始扫描;

⑤ 扫描结束后,关闭 X 射线源,取出样品,放置校正棒,打开 X 射线源,进行中心校正;

⑥ 校正结束后,关闭射线源,实验结束。

(3) 第 3 步, 数据处理。

① 设定岩心样品的扫描区域, 目的是确定对图像进行灰度处理所需要的阈值范围, 理论上扫描区域越大, 精度越高, 但同时也越耗时, 无形中增加了实验成本。

② 根据灰度值进行图像分割, 在分割区域中提取出感兴趣的地区, 从而实现对这些被提取出的部分进行三维重建, 以达到观察和分析的目的。依据图像像素的灰度、小区域的灰度、灰度方差、小区域的灰度分布、灰度纹理、像点或小区域的颜色等, 根据灰度值的这种差异将 CT 图像分割成骨架、孔隙、裂隙等区域。

③ 将代表不同区域的图像提取出来, 进行单独分析, 例如可以将孔隙结构单独提取出来, 进行孔隙形貌观察、孔径大小统计、连通性分析等。

四、三维重构与参数分析

通过 CT 数据得到孔隙结构模型, 孔隙半径是表征孔隙大小的储层微观参数。在水湿情况下, 毛细管力是油气运移的阻力, 随着孔隙半径的增加, 阻力逐渐减小, 孔隙中的油气充注难度降低, 含油气饱和度增大, 容易形成有利储层。以致密砂岩为例介绍孔隙三维形貌特征与分布规律, 通过显微 CT 三维成像扫描库车拗陷致密砂岩储层砂岩样品的孔隙结构, 并进行了致密砂岩样品三维数据体结构重建, 获得孔隙结构三维信息。结果表明, 不同地区的致密砂岩孔隙类型与孔隙结构分布具有明显规律性。大北地区主要发育 NW—SE 走向和 EW 走向有效裂缝, 裂缝性质多为高角度张裂缝。由 CT 扫描的储层三维孔隙图像(图 1.1.4)可见, 储层孔隙结构以微孔居多, 孔隙直径多小于 200nm, 孔隙之间由细小的喉道与高角度微裂缝连通。克深地区样品三维图像(图 1.1.5)显示孔隙以微米级为主, 孔隙之间连通性较差, 微裂缝不发育, 储层孔喉的分布定向性较差, 孔隙之间主要由喉道连通。

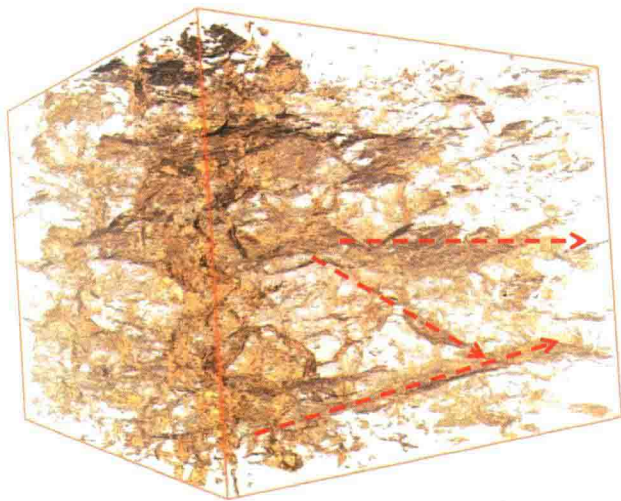


图 1.1.4 大北 202 井致密砂岩储层孔隙三维空间分布特征(5716.2m)

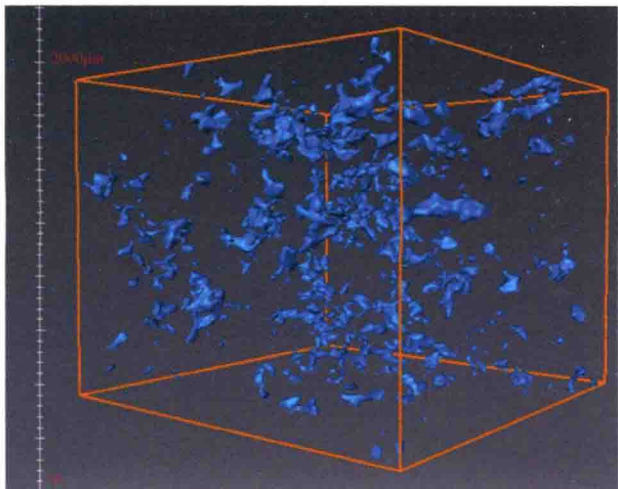


图 1.1.5 克深 205 致密砂岩储层孔隙三维空间分布特征(7204.9m)

孔隙三维模型分布的最大特点是直观可视、能够突破二维空间的限制,对孔隙的三维形态进行深入分析,能够在三维空间提取孔隙度、渗透率、平均孔喉半径、相对分选系数、歪度、形状因子、配位数等多种参数。

真实储层中的孔隙空间的形状是非常复杂的,在网络模型中采用等价规则的几何形状近似描述,形状因子是描述孔隙形状的参数之一。在三维网络模型中,喉道的截面形状主要有圆形、正方形和三角形,圆形截面形状因子为 0.0796,正方形截面形状因子为 0.0625,三角形截面形状因子为 $0 \sim 0.0481$ (罗国平等,2010;刘义坤等,2010),其中三角形截面更能接近实际的孔隙空间。形状因子越大,孔隙形状越规则,角隅越少,微观孔隙结构越均质,流体流动的越通畅,从而提高了原油的采收率,降低了剩余油质量分数。

配位数是指与孔隙相连通的喉道的个数,是表征储层连通程度的参数。配位数越大,表示连通性越好,流体的流动通道越多。随着配位数的增加,与孔隙相连通的喉道增多,网络模型中的渗流通道越多,有利于流体的流动,充注阻力小,含油气饱和度高;在较小的配位数的情况下,油气运移通道减少,阻力增大,有些孔隙甚至成为盲端,使得含油气饱和度降低。

三维孔隙模型是构建数字岩心的基础,对岩石的润湿性、渗流特征、流体饱和度、岩石力学特征等参数进一步定义,可以深入研究岩石物理参数,研究微观渗流机理与驱替机理(姚军等,2005),以及油藏生产动态的模拟和预测等。

第二节 激光扫描共聚焦显微镜观测

激光扫描共聚焦显微镜(confocal laser scanning microscope, CLSM 或 LSCM),简称共聚焦显微镜,是 20 世纪 80 年代发展起来的一项具有划时代意义的高科技产品,它是在荧光显微镜成像基础上加装了激光扫描装置,利用计算机进行图像处理,把光学成像的分辨率提高了 $30\% \sim 40\%$ 。LSCM 利用共聚焦系统使用紫外光或可见光激发荧光探针(李楠等,1996),有效地排除了焦点以外的光信号干扰,提高了分辨率,显著改善了视野的广

度和深度,使无损伤的光学切片成为可能,达到了最佳三维空间定位(霍霞等,2001)。除具有成像功能外,LSCM 还具有图像处理功能,尤其是三维图像重建的功能。

LSCM 已被逐渐引入地学研究,在致密储层的孔隙结构研究中发挥重要作用,测定致密储层的孔喉大小及面孔率,研究碳酸盐岩、煤岩的显微特征(张敏等,1996;应凤祥等,2002),判断油层水淹状况及含油率,进行原油乳化机理研究,有机包裹体立体成像及分析等(孙先达等,2004)。

一、工作原理与仪器构成

1. 工作原理

LSCM 的工作原理是:照明针孔与探测针孔相对于物镜焦平面是共轭的,激光光源经照明针孔,经由分光镜反射至物镜,并聚焦于样品上,对标本内焦平面上的每一点进行扫描。然后,激发出的荧光经原来入射光路直接反向回到分光镜,通过探测针孔时先聚焦,聚焦后的光被光电倍增管(photomultiplier tube, PMT)或冷电耦器件(CCD)探测收集,再经过信号处理,在计算机监视屏上形成图像。在这光路中,焦平面以外区域射来的光线在检测小孔平面是离焦的,不能通过小孔,只有在焦平面上的光才能穿过探测针孔被观测到。共焦显微系统仅对样本焦平面成像,有效地避免了衍射光和散射光的干扰,而具有比普通显微镜更高的分辨率(李楠等,1996;王伟,2011)。

2. 仪器构成

LSCM 的基本结构比光学显微镜要复杂,它除了包括光学显微镜部分之外,主要由激光光源、扫描装置、检测器、计算机系统(包括数据采集、处理、转换、应用软件)、图像输出设备、光学装置和共聚焦系统(如光学滤片、分光器、共聚焦针孔及相应的控制系统)(图 1.2.1)等部分组成。由此可见,两种显微镜在构造上最大的区别就在于 LSCM 具有结构复杂的计算机系统、激光系统、扫描装置和共聚焦系统(霍霞等,2001)。

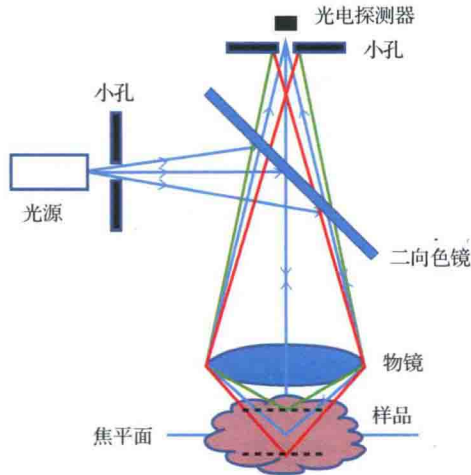


图 1.2.1 激光共聚焦扫描显微镜示意图