



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112577979 B

(45) 授权公告日 2021.10.19

(21) 申请号 202011441351.8

审查员 李占

(22) 申请日 2020.12.08

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 112577979 A

(43) 申请公布日 2021.03.30

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 江文滨 林緬 姬莉莉 曹高辉

徐志朋 郑思平

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理

事务所(普通合伙) 11390

代理人 焦海峰

(51) Int.Cl.

G01N 23/046 (2018.01)

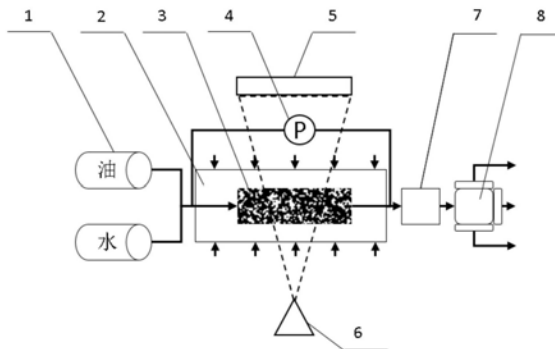
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54) 发明名称

一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置及方法

(57) 摘要

本发明属于石油科研技术领域。针对当前岩石内流体饱和和分布的定量分析并未达到孔隙尺度的现状,本发明提供了一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置及方法,覆压状态下无液体、注入流体岩心三维成像D1、D2,D1和D2三维配准;由D2采样得到与D1匹配的D3;基于覆压孔隙度确定阈值T1,D1转换为空隙、基质二值矩阵;基于总流体饱和度确定阈值T2,根据D3中空隙像素的灰度,修改D1中相应像素取值;基于D1的空隙像素提取孔隙网络,获得孔隙、孔喉与对应像素列表;统计孔隙、孔喉中两种流体所占像素数及总像素数,得到孔隙流体饱和度;统计不同流体饱和度的孔隙数量、空间分布及与形状因子关系。本发明能够无损、定量获得岩心内部孔隙尺度的流体饱和度的空间分布。



1. 一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,采用一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置进行数据采集,再进行数据分析,其特征在于,具体包括如下步骤:

(1) 首先在夹持器中放入经过烘干后、孔隙中不含液体的岩石样品,施加一定的环压和轴压,待稳定后,进行CT扫描,获得第1个三维数据体,D1,像素灰度与对X射线吸收能力正相关;

(2) 以一定的流速或一定的压力向岩石样品中注入某种流体或两种流体,待稳定后,进行CT扫描,获得第2个三维数据体,D2,像素灰度与对X射线吸收能力正相关;

(3) 对于D1和D2数据体进行三维配准,采用图像配准算法进行D1和D2数据体的三维配准,通过重采样算法,获得D1数据体中各像素点对应的D2值,该数据体命名为D3,即,D1和D3数据体中每个像素对应的是岩石中三维空间中的同一个点;

(4) 对D1数据体,以相同覆压状态下氦气测孔隙度为约束,确定孔隙和岩石骨架像素的划分阈值T1,使得划分后的孔隙像素数占岩石总像素数的比例与氦气测孔隙度一致,将D1数据转换为三维二值矩阵,其中孔隙为1,骨架为0;对于D1数据中骨架像素,将D3中相应像素的值设为0;

(5) 对于D3数据体,以入口端注入两相流体量和出口端计量的两相流体量之差确定的样品内的流体饱和度为约束,确定两相流体的划分阈值T2,对于D1数据体中取值为1的所有像素,如果D3中对应像素的灰度大于阈值T2,则D1中像素值改为2;

(6) 对D1数据,以取值为1或2的像素为孔隙像素,采用中轴-最大球孔隙网络抽提算法,进行孔隙网络抽提,得到若干的孔隙和孔喉,获得孔隙和孔喉的参数和孔隙与孔喉的拓扑连接关系,建立孔隙和孔喉与D1数据体中对应像素的映射关系;

(7) 遍历所有的孔隙和孔喉,基于映射关系确定D1数据体中的对应像素,统计其中取值为1的像素个数及总的像素个数,两者之比即为该孔隙/孔喉中对X射线吸收较少的流体的饱和度S1,像素个数乘以像素尺寸的三次方即为该流体占据的体积;1-S1即为该孔隙/孔喉中另一流体的饱和度S2,像素个数乘以像素尺寸的三次方即为另一流体占据的体积;

(8) 统计S2分别为从0%到100%、以10%为间隔的孔隙的数量分布,统计沿流动方向和垂直到流动方向上S2大于一定值的孔隙数量与总的孔隙数量的比值变化,统计不同形状因子孔隙的S2平均值;

所述一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置,其特征在于,包括X射线三维显微成像系统,

所述X射线三维显微成像系统包括射线源、夹持器、样品台和接收器,所述射线源和接收器相互对应安装;岩石样品设置为圆柱体形状,其安装于X射线穿透的夹持器中,夹持器固定安装在样品台上,通过样品台转动控制夹持器转动;成像时,夹持器随着样品台转动,接收器记录不同角度的图像,通过三维重建算法建立三维数据体。

2. 根据权利要求1所述一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,其特征在于,还设置有岩心流体注入系统,所述岩心流体注入系统在夹持器上分别设有环压加载腔体和轴压加载腔体,环压加载腔体和轴压加载腔体通过柔性管线分别和相应的柱塞泵连接,通过相应的柱塞泵注入流体进行加压;环压加载腔体设有入口和出口,通过恒温循环泵实现环压流体与恒温浴的热交换达到恒温控制。

3. 根据权利要求1或2所述一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,其特征在于,所述夹持器两端设有与岩石连通的柔性管线,上游连接注入泵,注入泵上设有计量计对注入流体进行计量,上游管线与加热带并排被包裹在保温管中,上游管线上设有温度传感器,与恒温控制器联合实现上游管线的恒温控制,柔性管线的上游、下游分别设置压力传感器,通过压力传感器记录岩石上游、下游压力,柔性管线的上游、下游设置有差压传感器,通过差压传感器记录岩石上、下游的压力差,柔性管线的出口通过回压阀依次设置有三相分离器和计量器,通过计量器对出口流体进行多相分离后分别计量,回压阀和柱塞泵连接,通过柱塞泵控制出口压力。

4. 根据权利要求1或2所述一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,其特征在于,所述夹持器采用PEEK、聚酰亚胺或碳纤维材质制备而成,承受围压、轴压和流体压力强度的同时具备X射线穿透性。

5. 根据权利要求1所述一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,其特征在于,所述步骤(1)中D1数据必须在覆压状态下采集;所述步骤(2)中的一种流体中加入可溶、且对X射线吸收较强的化合物。

6. 根据权利要求1所述一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,其特征在于,所述步骤(6)中孔隙和孔喉的参数为孔隙的直径、体积、形状因子、中心三维坐标、孔喉的直径、长度、体积、形状因子。

7. 根据权利要求1所述一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,其特征在于,所述步骤(6)中对于孔隙和孔喉,分别采用按顺序递增的数字编号,每个编号对应一个二维矩阵,每一行分别有三个元素,该孔隙或孔喉像素在D1数据体中的三维坐标,总行数等于该孔隙或孔喉对应的像素数。

一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置及方法

技术领域

[0001] 本发明属于石油科研技术领域,涉及岩石内部流体饱和度的测试技术,尤其涉及一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置及方法。

背景技术

[0002] 含油气储层岩石是一种典型的多孔介质。油气成藏过程中,油气在烃源岩中生成后在一定驱动力作用下通过输导体系运移到储层,将孔隙中原始饱和水驱替出来。油气开发过程中,常采用注水或注气驱替等方式提高油气采收率。由于孔隙结构的复杂性、流体与岩石壁面的相互作用等因素的影响,无法将某一种流体完全排驱干净。因此,岩石孔隙中通常含有两种或以上的流体,例如油-水、水-气或油-气-水。流体饱和度是描述储层岩石孔隙中流体充满程度的物理量,是评价储层的关键特征参数之一。

[0003] 在孔隙中同时存有多种流体时,某种流体所占的体积百分数即为该种流体的饱和度。顾名思义,流体饱和度是流体体积与孔隙体积的比值,以水为例, $S_{\text{water}} = V_{\text{water}} / V_{\text{pore}}$ 。常用的测量方法包括溶剂蒸馏法、热解法。溶剂蒸馏法采用合适的溶剂进行洗油、加热蒸馏测定原始质量、抽提得到的水和油的质量 M_{water} 和 M_{oil} ,进而求得油、水和气所占体积 V_{oil} 、 V_{water} 、 V_{gas} ($V_{\text{pore}} = V_{\text{oil}} + V_{\text{water}} + V_{\text{gas}}$),除以参照标准所测得的孔隙体积 V_{pore} ,得到流体饱和度 S 。热解法采用不同温度区间分别蒸发水和油,通过冷凝收集读取油、水体积。上述方法测得的是储层岩石的整体流体饱和度。

[0004] 核磁共振技术也可用于测量流体饱和度。核磁共振可测得岩石内部富含氢核 1H 的水的信号,获得不同孔径(对应不同 T_2 弛豫时间)孔隙的含水量。以图1为例, T_2 弛豫时间与岩石孔隙孔径存在对应关系,曲线对应为不同孔径的孔隙中含氢核 1H 流体的含量。当岩石孔隙中饱含水时,所测的就是岩心中不同大小的孔隙体积占总孔隙体积的比例。当多相(例如气水)并存时,所得的是具有核磁信号(例如含氢核 1H)的部分流体在不同孔径的孔隙中的相对含量。核磁共振成像可获得三维图像,由于分辨率较低(最高百微米量级),仅能大致获得空间上不同位置具有核磁信号流体的相对量,且难以分辨孔隙,因此无法得到岩石内部三维空间不同位置的孔隙和孔喉中流体饱和度(流体体积占孔隙、孔喉体积的百分比)信息。

[0005] 除了核磁共振以外,X射线计算机断层扫描(Computed Tomography,CT)技术也可无损地获得岩石的三维图像。所得的是每个体素的X射线衰减系数或吸收系数,黑色为低吸收区,对应低密度区,白色为相对高吸收区,对应高密度区。CT具有较高的密度分辨能力,可分辨相对较小的密度差异。原理与结果如图2所示,采用微焦点X射线CT可获得分辨率最高到亚微米的岩石三维数字图像。

[0006] 图3示了某砂岩的CT扫描断面图像,左图为右图中水平横线所示位置的XY断面,右图为左图中竖直线所示位置的XZ断面。其中,黑色为低密度区域,对应于空隙(此时岩石内无液体),其余为岩石骨架。

[0007] 当岩石孔隙中含水或油时,由于油、水对X射线的吸收系数较低,采用CT扫描所得

的灰度图像中难以将流体部分和空隙区分。通过向油或水中分别添加碘癸烷或碘化钾、碘化钠、氯化铯等物质,配置成一定质量分数的溶液后,对X射线具有较高的吸收系数,所得CT图像相应部分的灰度与空隙的灰度存在明显差异。

[0008] 通过比较不含流体和加入溶液的岩心进行扫描,将两次结果进行对比,分析对应像素的灰度差异,可确定被溶液占据的体素,并进行三维可视化渲染。

[0009] 中国专利文献CN102183532B公开了一种提高CT测量流体饱和度精度的方法。该方法通过测量在岩心夹持器内、外与干燥、含水条件下的岩心断层CT值,以及夹持器外盐水、实验用油和外围空气的CT值,通过公式计算得到夹持器内的盐水的CT值,并采用计量法测试得到的束缚水饱和度计算夹持器内油的CT值,最终计算得到驱替过程不同时刻的油水饱和度。该方法测试的是岩心整体的两相饱和度,无空间分布结果。

[0010] 中国专利文献CN107271460A公开了一种多孔材料内部水分饱和度变化空间分布的定量表征方法。该方法对同一个样品水分变化前后分别进行CT测试,获得对应的三维灰度数据,通过异位数字体积相关法确定两组数据中一定大小立方体的对应关系,并计算两个立方体的灰度平均值之差(由于含水的变化引起体素灰度的改变),与水的灰度之比定义为饱和度的变化;对三维数据体中的不同体素,计算以该体素为中心的立方体的饱和度变化,可获得饱和度变化的空间分布。与本专利所属领域的“饱和度”定义不同。从计算过程可以看出,前者的饱和度是一定的子块体内的含水量,不存在孔隙体积这一概念,并非含水体积与孔隙体积之比,且侧重的是饱和度的相对变化量,而非其绝对值。此外,实际操作上还存在一些问题:1)由于成像质量和分辨率的影响,在空间上不同位置的水的灰度值可能存在一定的变化,难以用单一值表示;2)由于两次扫描期间,仪器稳定性和噪声等潜在因素,即便水分不变的条件下整体的灰度值可能都存在一定的偏移,采用直接灰度相减确定含水变化的方法可能将这部分偏移也包含在内,导致虚假的偏差,因此直接用于表征饱和度的绝对值并不现实。

[0011] 中国专利文献CN104076046A公开了一种多孔介质中剩余油微观分布图像采集与定量表征方法。该方法通过确定水驱油后剩余油的灰度值,识别剩余油的连通子块,计算子块的总数、不同剩余油子块的平均体积和接触面积等参数。所述的连通子块可能占据了多个孔隙和孔喉,并未涉及流体饱和度的计算。

[0012] 孔隙网络模型是一种对多孔介质内空隙空间的抽象和简化;孔隙指的是空隙空间中相对较大的部分,两个孔隙间连接的狭窄部分为孔喉。孔隙网络模型包含了多孔介质内部的孔径大小分布、孔隙连通性(配位数、孔隙所连通的喉道数量)和孔隙形状因子(孔隙截面的形状)等特征。基于孔隙网络模型,假设孔隙是流体贮存的空间,孔喉是流动的主要通道,给定对应的孔喉流动关系式,可进行单相或多相流动的模拟,具有比直接模拟更高的效率。已经发展了包括中轴线、最大轴等方法对二值数字图像提取对应的孔隙网络模型。图4显示了孔隙和孔喉关系及空隙空间抽提孔隙网络模型范例。

[0013] 中国专利文献CN107271460A公开了一种基于侵蚀-膨胀算法的数字岩心两相流模拟结果定量表征方法。该方法的步骤包括,获得数字岩心几何结构文件(三维二值矩阵)和两相流模拟结果(两相对应2个三维矩阵,每个元素表示对应体素中对应流体相的饱和度);对几何结构文件采用侵蚀-膨胀算法提取孔隙网络(孔隙和喉道相互连通组成的网络);通过对孔隙孔喉对应像素点饱和度求和取平均的方式计算每个孔隙的两相流体饱和度;统计

相同直径的孔隙的平均饱和度。该方法针对的是岩石内部孔隙空间数字化后进行数值模拟得到的流体饱和度数据,本质上是对具有确定值的三组(几何结构、流体1饱和度和流体2饱和度)三维矩阵数据进行空间识别和定量统计。而实际岩石的流体充注或驱替过程,所得的是具有连续灰度的图像,存在实际岩石样品不同流体注入状态的数字图像如何获得、岩石骨架、空隙、不同相流体的划分方式、阈值和依据如何确定等该发明未披露的问题。

发明内容

[0014] 针对当前岩石内流体饱和分布的定量分析并未达到孔隙尺度,主要还是以岩石整体或者局部平均为主的现状。本发明实际要解决的技术问题或要达到的效果是能够无损、定量获得岩心内部流体饱和度的空间分布,具体指不同空间位置、大小的孔隙和孔喉中的两相流体饱和度。

[0015] 本发明采取的技术方案为:

[0016] 一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置,包括X射线三维显微成像系统,

[0017] 所述X射线三维显微成像系统包括射线源、夹持器、样品台和接收器,所述射线源和接收器调整相对位置后分别固定安装,岩石样品设置为圆柱体形状,其安装于X射线穿透的夹持器中,夹持器固定安装在样品台上,样品台转动控制夹持器转动;成像时,夹持器随着样品台转动,接收器记录不同角度的图像,通过三维重建算法建立三维数据体。

[0018] 进一步的,还设置有岩心流体注入系统,所述岩心流体注入系统在夹持器上分别设有环压加载腔体和轴压加载腔体,环压加载腔体和轴压加载腔体通过柔性管线分别和相应的柱塞泵连接,通过相应的柱塞泵注入流体进行加压;环压加载腔体设有入口和出口,通过恒温循环泵实现环压流体与恒温浴的热交换以达到恒温控制的目的。本系统支持分别控制加载的轴压和环压大小,且可在不同于室温的指定温度下工作。柔性管线可保证夹持器随样品台进行360°旋转。

[0019] 进一步的,所述夹持器两端设有与岩石连通的柔性管线,上游连接注入泵,注入泵上设有计量计对注入流体进行计量,上游管线与加热带并排被包裹在保温管中,柔性管线上设有温度传感器,与恒温控制器联合实现上游管线的恒温控制,通过注入泵单独注入某种流体或按照一定比例混合后进行注入,管线的上游、下游分别设置压力传感器,通过压力传感器记录岩石上游、下游压力,柔性管线的上游、下游设置有差压传感器,通过差压传感器记录岩石上、下游的压力差,柔性管线的出口设有回压阀,通过回压阀控制出口压力,回压阀后端依次设置有三相分离器和计量器,通过计量器对出口流体进行多相分离后分别计量,回压阀和柱塞泵连接,通过柱塞泵进行出口压力控制。系统支持入口端和出口端的不同流体的流量计量,为注入流体后扫描图像的流体充注像素阈值分割提供了依据。入口端恒温控制可在不同于室温的指定温度下开展测试。

[0020] 进一步的,所述夹持器采用PEEK、聚酰亚胺或碳纤维材质制备而成,可满足围压、轴压和流体压力强度的同时具备X射线穿透性。常规的金属夹持器强度虽高,但是对X射线吸收强,影响夹持器内岩心的成像质量。一般说来,要达到较高的成像分辨率,则要求夹持器尺寸尽可能小,壁厚尽可能薄;要达到较高的耐压,则要求夹持器的强度较高;可根据岩石的成像分辨率,加载的压力上限和材料的强度性能等参数,选择合适的夹持器材料和尺

寸设计。

[0021] 一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,通过一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置进行数据采集,再进行数据分析,具体包括如下步骤:

[0022] (1) 首先在夹持器中放入经过烘干后、孔隙中不含液体的岩石样品,施加一定的环压和轴压,待稳定后,进行CT扫描,获得第1个三维数据体,D1,像素灰度与对X射线吸收能力正相关;该状态下孔隙中无液体,对X射线吸收能力较弱,其灰度值较低,容易与基质像素进行区分,基于该数据体进行孔隙网络的抽提,可排除流体的影响,构建代表岩石的孔隙和孔喉相连的空间几何模型;

[0023] (2) 以一定的流速或一定的压力向岩石样品中注入某种流体或两种流体,待稳定后,进行CT扫描,获得第2个三维数据体,D2,像素灰度与对X射线吸收能力正相关;流体中加入了X射线吸收能力较强的化合物,进入孔隙后将使得孔隙像素对X射线的吸收能力增强,灰度值增大;

[0024] 实际岩石均具有一定的弹性,由于岩石受到环压和轴压后,孔隙可能受压缩存在一定的变化,骨架颗粒的位置也会发生位移,为了保证两个数据体更为接近,所述步骤(1)中D1数据必须在覆压状态下采集。如果是在无覆压状态下采集,将为后续处理增加难度和工作量,可能导致无法达到预期效果。

[0025] 进一步的,所述步骤(2)中的一种流体中加入可溶、且对X射线吸收较强的化合物。常用的实验流体例如水,对X射线吸收较弱,在CT扫描中难以与气体进行显著区分,信噪比较低,因此需要加入一种可溶解且对X射线吸收较强的化合物以区分不同流体。(3) 对于D1和D2数据体进行三维配准,由于装置精度和采集过程中夹持器或样品的轻微移动,可能导致两个数据体相同像素对应的并非样品的同一位置,采用图像配准算法进行D1和D2数据体的三维配准,通过重采样算法,获得D1数据体中各像素点对应的D2值,该数据体命名为D3,即,D1和D3数据体中每个像素对应的是岩石中三维空间中的同一个点;由于三维显微成像的精度高,任何微小的机械运动或样品姿态改变都可能导致两次扫描间样品中各部分的空间坐标发生改变。直接对两次扫描所得的三维矩阵进行求差分析,可能由于错位而带来较大的误差,影响最终的分析精度,因此有必要进行三维空间的配准,并重新采样到统一的网格中;

[0026] (4) 对D1数据体,为了降低阈值划分的不确定性,以相同覆压状态下氦气测孔隙度为约束,确定空隙和岩石骨架像素的划分阈值T1,使得划分后的孔隙像素数占岩石总像素数的比例与氦气测孔隙度一致,将D1数据转换为三维二值矩阵,其中孔隙为1,骨架为0;对于D1数据中骨架像素,将D3中相应像素的值设为0;

[0027] (5) 对于D3数据体,以入口端注入两相流体量与出口端计量的两相流体量之差确定的样品内的流体饱和度为约束,确定两相流体的划分阈值T2,对于D1数据体中取值为1的所有像素,如果D3中对应像素的灰度大于阈值T2,则D1中像素值改为2;以实测岩石样品内流体饱和度数据为依据,提高两相流体阈值划分的精度,确保基于该阈值划分所得的代表对X射线吸收能力强的像素数与总孔隙像素数的比值与对应流体饱和度一致;

[0028] (6) 对D1数据,以取值为1或2的像素为空隙像素,采用中轴-最大球孔隙网络抽提算法,进行孔隙网络抽提,得到若干的孔隙和孔喉,获得孔隙和孔喉的参数和孔隙与孔喉的拓扑连接关系,建立孔隙和孔喉与D1数据体中对应像素的映射关系;现有的孔隙网络抽提

方法并不给出该映射关系,这里通过该映射关系的建立,为统计各个孔隙中被X射线吸收能力强流体所占据的像素数量提供了便利;

[0029] (7) 遍历所有的孔隙和孔喉,基于映射关系确定D1数据体中的所有对应像素,统计其中取值为1的像素个数及总的像素个数,两者之比即为该孔隙/孔喉中对X射线吸收较少的流体的饱和度S1,像素个数乘以像素尺寸的三次方即为该流体占据的体积;1-S1即为该孔隙/孔喉中另一流体的饱和度S2,像素个数乘以像素尺寸的三次方即为另一流体占据的体积;阈值分割后的D1数据体仅给出了空间中每个像素点包含流体的信息,数据量过大且难以与空隙空间特征进行关联分析;结合基于D1数据抽提的孔隙网络,可进一步明确各个孔隙和孔喉中流体所占的百分比,为分析流体注入特征与孔隙与孔喉的连通性和几何参数相关性提供了关键的基础数据;

[0030] (8) 在确定每个孔隙和孔喉内流体饱和度分布的基础上,还可以进一步结合孔隙和孔喉的空间坐标、形状因子和流体饱和度参数,得到更多的统计分布特征,更多方位地认识流体注入空隙空间的特点。统计S2分别为从0%到100%、以10%为间隔的孔隙的数量分布,统计沿流动方向和垂直流动方向上S2大于一定值的孔隙数量与总的孔隙数量的比值变化,统计不同形状因子孔隙的S2平均值。

[0031] 进一步的,所述步骤(6)中孔隙和孔喉的参数为孔隙的直径、体积、形状因子、中心三维坐标、孔喉的直径、长度、体积、形状因子。上述参数为孔隙网络的主要特征参数。

[0032] 进一步的,所述步骤(6)中对于孔隙和孔喉,分别采用按顺序递增的数字编号,每个编号对应一个二维矩阵,每一行分别有三个元素,该孔隙或孔喉像素在D1数据体中的三维坐标,总行数等于该孔隙或孔喉对应的像素数。基于该映射关系,可快速、准确地找到该孔隙/孔喉对应的所有像素,为统计该孔隙/孔喉的流体饱和度提供了极大便利。

[0033] 本发明的有益效果为:

[0034] (1) 通过X射线三维显微成像系统和岩心流体注入系统的同时工作,可获得一定温度条件下流体以一定压力或流量注入到承受轴、环压加载的样品中并分布于空隙中的图像数据,功能更全面,较现有非覆压状态扫描下更为接近岩石在实际地下的情况,较断面扫描可获得三维空间上的数据。

[0035] (2) 通过图像配准和重采样可提高不同次成像数据之间的匹配程度,降低不可避免的机械运动和样品姿态变化对注入流体识别精度的影响,可保证十微米级的成像精度,通过相同覆压状态下氦气测孔隙度约束空隙与骨架划分阈值,入口和出口流体量差约束两相流体划分阈值等方法具有更高的空隙与流体识别精度。

[0036] (3) 以无液体的样品扫描结果提取孔隙网络几何模型,建立孔隙/孔喉与对应像素的映射关系,结合注入流体后成像并进行配准、重采样、阈值划分的结果,统计所有孔隙/孔喉内注入流体的体积及饱和度,使得对岩石内流体饱和度分布分析达到孔隙尺度、定量,可识别空间差异。一方面,可以为认识孔隙结构对流体分布的影响提供必要的定量数据;另一方面,为岩石孔隙尺度两相流动的数值模拟提供更为全面的对比和验证数据,更为深入地理解岩石内多相流动的微观机理,进而为建立更为合理、有效的宏观流动模型提供技术支撑和基础。

附图说明

- [0037] 图1为现有技术中低渗岩石的T2弛豫时间谱示例图；
- [0038] 图2为现有技术中X射线三维显微成像原理及结果图；
- [0039] 图3为现有技术中某砂岩的CT扫描断面图像图；
- [0040] 图4为现有技术中孔隙和孔喉关系范例图；
- [0041] 图5为本发明中岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置的结构示意图；
- [0042] 图6为本发明中岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法的流程示意图；
- [0043] 图7为本发明中不同注入流速下的注入流体分布图；
- [0044] 图8为本发明中不同注入流速下注入流体在不同孔隙内的注入量分布图；
- [0045] 图9为本发明中不同注入流速下不同饱和度的孔隙数量分布图；
- [0046] 图10为本发明中沿注入方向充注较充分孔隙的体积占比图；
- [0047] 图11为本发明中孔喉形状因子与注入流体占比的关系图；
- [0048] 其中,1、注入泵;2、夹持器;3、岩石样品;4、压力传感器;5、接收器;6、射线源;7、回压阀;8、三相分离器。

具体实施方式

[0049] 下面结合附图进一步说明本发明。

[0050] 实施例1

[0051] 如图5所示,一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置,包括X射线三维显微成像系统和岩心流体注入系统,

[0052] 所述X射线三维显微成像系统包括射线源6、夹持器2、样品台和接收器5,所述射线源6和接收器5调整相对位置后分别固定安装,岩石样品3设置为圆柱体形状,其安装于X射线穿透的夹持器2中,夹持器2固定安装在样品台上,样品台转动控制夹持器2转动;成像时,夹持器2随着样品台转动,接收器5记录不同角度的图像,通过三维重建算法建立三维数据体;

[0053] 本发明提供的又一实施例,还设置有岩心流体注入系统,所述岩心流体注入系统在夹持器2上分别设有环压加载腔体和轴压加载腔体,环压加载腔体和轴压加载腔体通过柔性管线分别和相应的柱塞泵连接,通过相应的柱塞泵注入流体进行加压;环压加载腔体设有入口和出口,通过恒温循环泵实现环压流体与恒温浴的热交换以达到恒温控制的目的。

[0054] 本发明提供的又一实施例,夹持器2两端设有与岩石连通的柔性管线,上游连接注入泵1,通过注入泵1单独注入某种流体或按照一定比例混合后进行注入,注入泵1上设有计量计对注入流体进行计量,上游管线与加热带并排被包裹在保温管中,线路上设有温度传感器,与恒温控制器联合实现上游管线的恒温控制,管线的上游、下游分别设置压力传感器4,通过压力传感器4记录岩石上游、下游压力,管线的上游、下游设置有差压传感器,通过传感器记录岩石上、下游的压力差,管线的出口设有回压阀7,通过回压阀7控制出口压力,回压阀7后端依次设置有三相分离器8和计量器,通过计量器对出口流体进行多相分离后分别计量,回压阀7和柱塞泵连接,通过柱塞泵进行出口压力控制。

[0055] 夹持器2采用PEEK、聚酰亚胺或碳纤维材质制备而成,可满足围压、轴压和流体压

力强度的同时具备X射线穿透性。常规的金属夹持器2强度虽高,但是对X射线吸收强,影响夹持器2内岩心的成像质量。

[0056] 本发明提供的又一实施例,如图5和图6所示,一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析方法,通过一种岩石内部流体饱和度空间分布的定量分析装置进行数据采集,再进行数据分析,数具体包括如下步骤:

[0057] (1)首先在夹持器2中放入经过烘干后、孔隙中不含液体的岩石样品3,施加一定的环压和轴压,待稳定后,进行CT扫描,获得第1个三维数据体,D1,像素灰度与对X射线吸收能力正相关;

[0058] (2)以一定的流速或一定的压力向岩石样品3中注入某种流体或多种流体,其中一种流体中加入可溶、且对X射线吸收较强的化合物,待稳定后,进行CT扫描,获得第2个三维数据体,D2,像素灰度与对X射线吸收能力正相关;

[0059] 由于岩石受到环压和轴压后,孔隙可能受压缩存在一定的变化,为了保证两个数据体更为接近,所述步骤(1)中D1数据必须在覆压状态下采集。如果是在无覆压状态下采集,将为后续处理增加难度和工作量,可能导致无法达到预期效果。

[0060] (3)对于D1和D2数据体进行三维配准,由于装置精度和采集过程中夹持器2或样品的轻微移动,可能导致两个数据体相同像素对应的并非样品的同一位置,采用图像配准算法进行D1和D2数据体的三维配准,通过重采样算法,获得D1数据体中各像素点对应的D2值,该数据体命名为D3,即,D1和D3数据体中每个像素对应的是岩石中三维空间中的同一点;

[0061] (4)对D1数据体,以相同覆压状态下氦气测孔隙度为约束,确定空隙和岩石骨架像素的划分阈值T1,使得划分后的孔隙像素数占岩石总像素数的比例与氦气测孔隙度一致,将D1数据转换为三维二值矩阵,其中孔隙为1,骨架为0;

[0062] (5)对于D3数据体,以入口端注入两相流体量与出口端计量的两相流体量之差确定的样品内的流体饱和度为约束,确定两相流体的划分阈值T2,对于D1数据体中取值为1的所有像素,如果D3中对应像素的灰度大于阈值T2,则D1中像素值改为2;

[0063] (6)对D1数据,以取值为1或2的像素为空隙像素,采用中轴-最大球孔隙网络抽提算法,进行孔隙网络抽提,得到若干的孔隙和孔喉,获得孔隙和孔喉的直径、体积、形状因子、中心三维坐标、孔喉的直径、长度、体积、形状因子和孔隙与孔喉的拓扑连接关系;同时,对于孔隙和孔喉,分别采用按顺序递增的数字编号,每个编号对应一个二维矩阵,每一行有三个元素分别,该孔隙或孔喉像素在D1数据体中的三维坐标,总行数等于该孔隙或孔喉对应的像素数;

[0064] (7)遍历所有的孔隙和孔喉,基于映射关系确定D1数据体中的所有对应像素,统计其中取值为1的像素个数及总的像素个数,两者之比即为该孔隙/孔喉中对X射线吸收较少的流体的饱和度S1,像素个数乘以像素尺寸的三次方即为该流体占据的体积;1-S1即为该孔隙/孔喉中另一流体的饱和度S2,像素个数乘以像素尺寸的三次方即为另一流体占据的体积;

[0065] (8)统计S2分别为从0%到100%、以10%为间隔的孔隙的数量分布,统计沿流动方向和垂直流动方向上S2大于一定值的孔隙数量与总的孔隙数量的比值变化,统计不同形状因子孔隙的S2平均值。

[0066] 在中国科学院力学研究所自研的岩心多相流动在线三维显微成像系统上开展了

砂岩样品的流体注入在线成像的测试。该系统的最大加载轴压和环压为35MPa,流体注入压力上限为35MPa,定流量注入流速上限为30ml/min,实验温度范围为室温至100℃,夹持器样品直径为25mm,长度介于20至75mm,夹持器2最大耐压为15MPa,成像分辨率为14.96 μ m,成像尺寸为1920 \times 1920 \times 1536像素,成像数据采用16位存储,灰度取值0-65535,采用射线源6输出电压为170kV,电流为110 μ A,曝光时间为0.4s,每个样品每次进行1440帧扫描,单次扫描耗时约1小时。扫描得到了覆压状态干燥样品和以不同速度注入(1ml/min和10ml/min)盐水后达到稳定的样品的三维灰度图像。通过本发明,对不同次的图像进行了配准,分别进行阈值分割,确定盐水所占的像素,进行三维渲染展示,结果如图7所示,具体是,图7a为小注入流速下的注入流体分布图;图7b为大注入流速下的注入流体分布图。

[0067] 采用本发明的方法,获得了抽提得到的孔隙网络中每一个孔隙和孔喉中流体的注入体积占比,参见图8,每个球体代表一个孔隙,球体大小代表注入流体的绝对量。

[0068] 基于这一定量分析方法,进一步分析了所测试样品的流体注入的孔隙分布特征。发现单个孔隙的流体饱和度主要分布于10-40%和90-100%两个区间。注入流速减小,使得更多孔隙流体注入更充分(饱和度>90%以上,如图9所示)。大流速注入时,入口端附近孔隙注入相对充分,往出口方向快速衰减后稳定;小流速注入推进距离更远(如图10所示)。

[0069] 进一步分析了形状因子对流体注入占比的影响。样品孔隙以三角形截面为主,三角形和正方形截面孔喉数量相当。孔喉形状因子越大,所连接孔隙的注入流体占比越高。减小注入流速可使较小形状因子孔隙的流体注入更充分(如图11)所示。

[0070] 以上所述并非是对本发明的限制,应当指出:对于本技术领域的普通技术人员来说,在不脱离本发明实质范围的前提下,还可以做出若干变化、改型、添加或替换,这些改进和润饰也应视为本发明的保护范围。

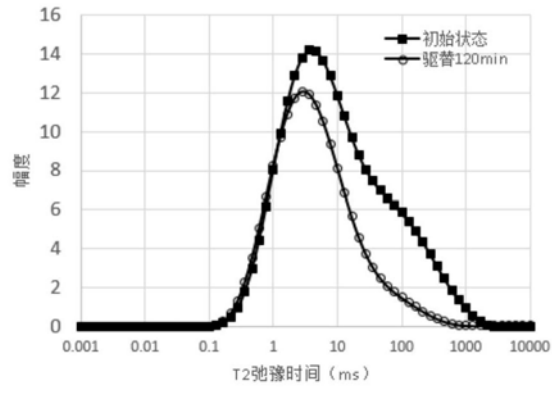


图1

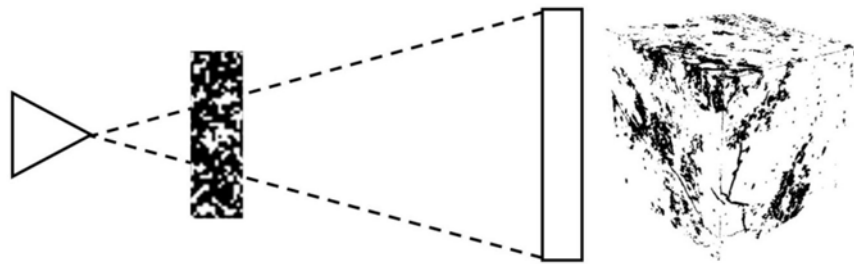


图2

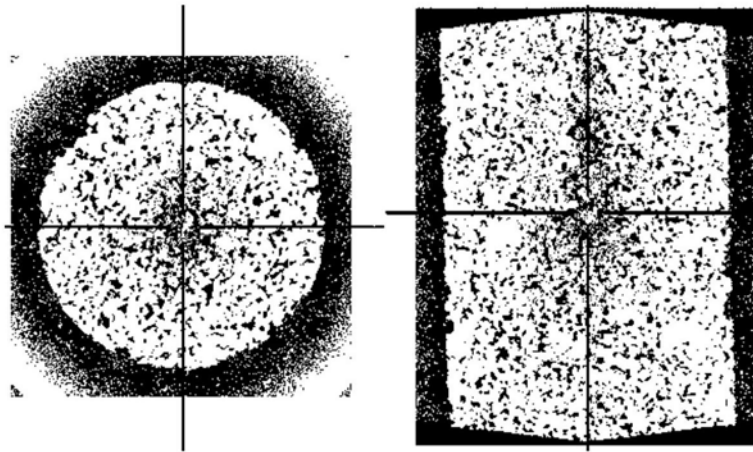


图3

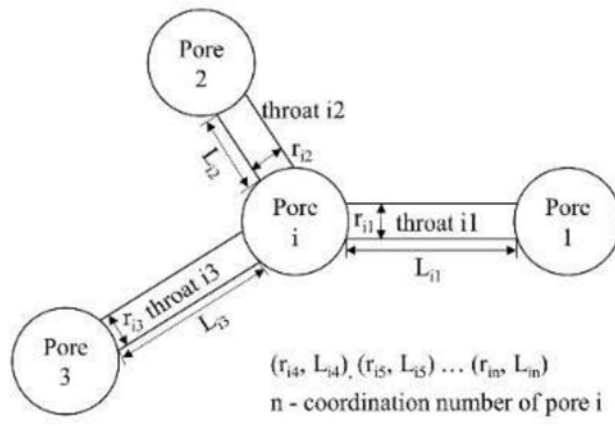


图4

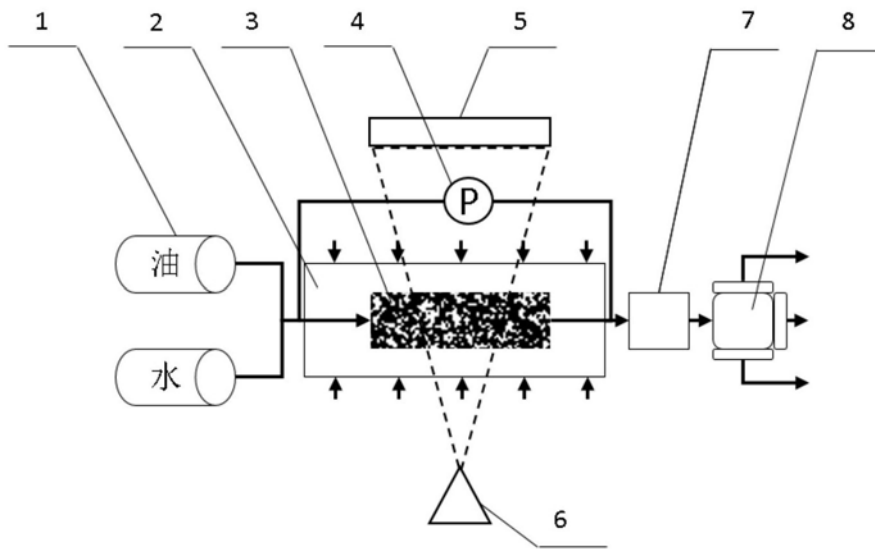


图5

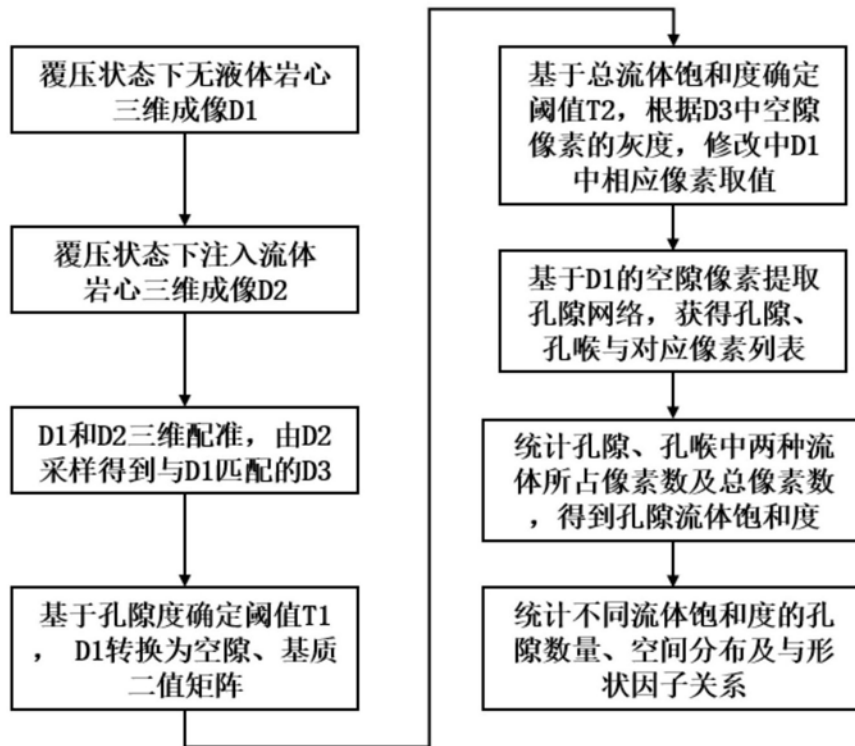


图6

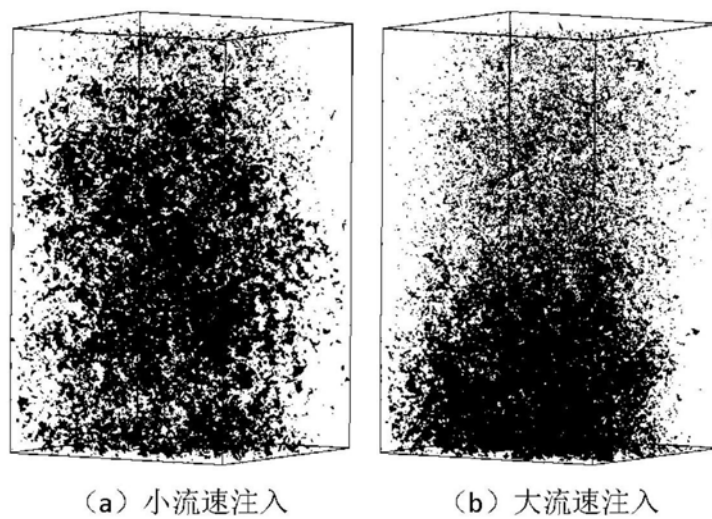


图7

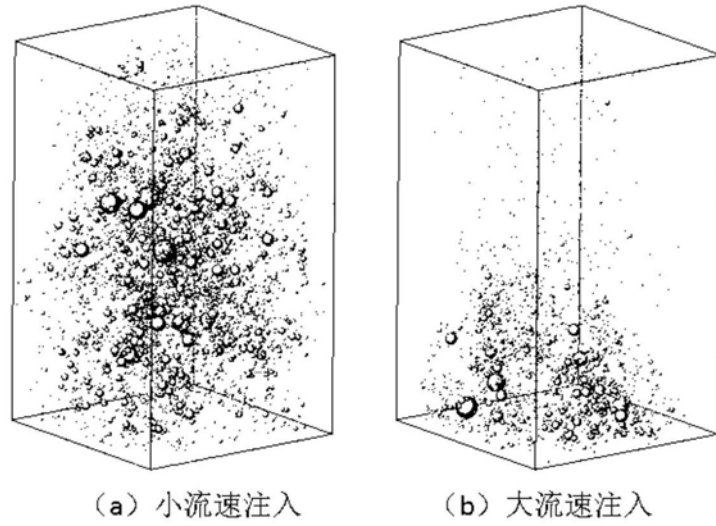


图8

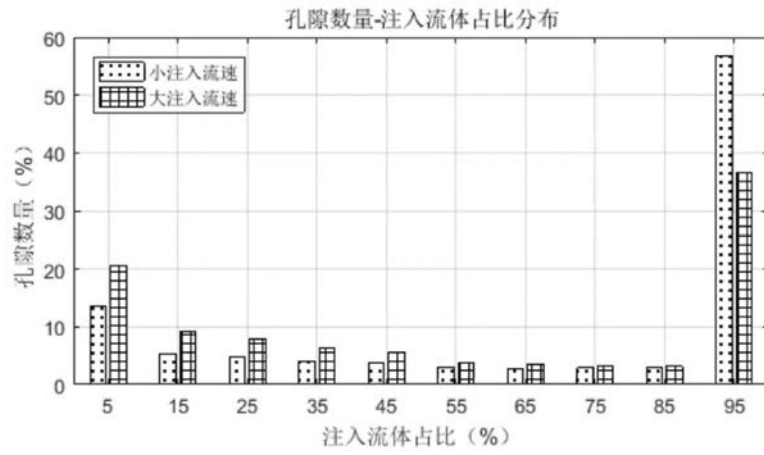


图9

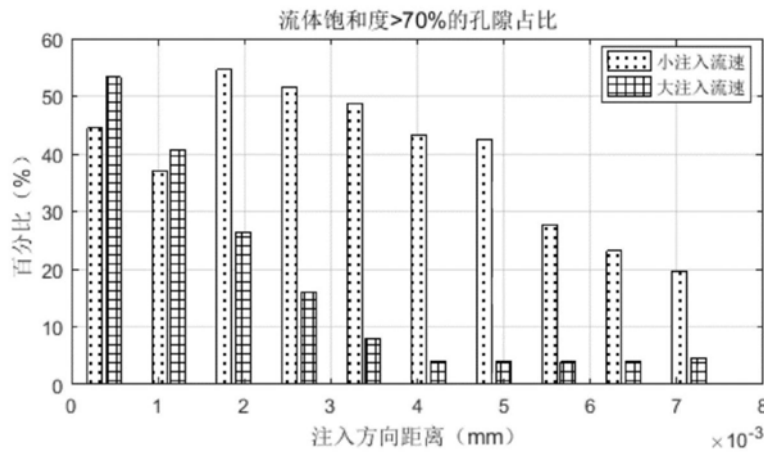


图10

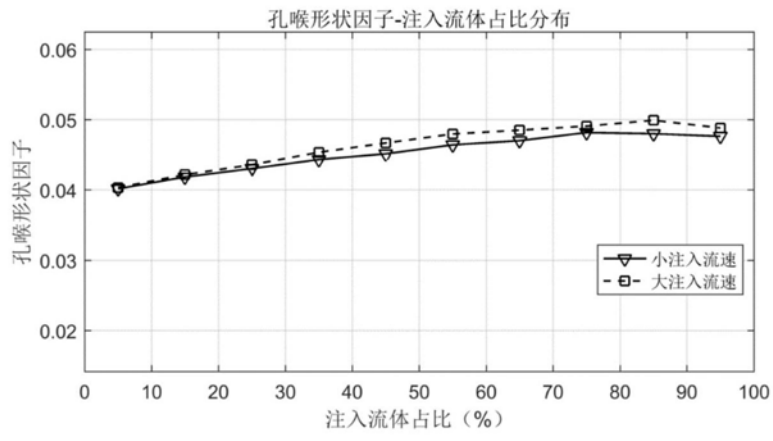


图11