(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 113984590 A
(43)申请公布日 2022.01.28

(21)申请号 202111284191.5

(22)申请日 2021.11.01

(71)申请人 大连理工大学
地址 116024 辽宁省大连市甘井子区凌工路2号

(72)发明人 赵越超 宋永臣 黄明星 毛晓坤 张毅 杨明军 郑嘉男

(74)专利代理机构 大连理工大学专利中心 21200
代理人 温福雪 侯明远

(51)Int.Cl.
G01N 13/00(2006.01)
G01N 15/08(2006.01)
G01N 24/08(2006.01)

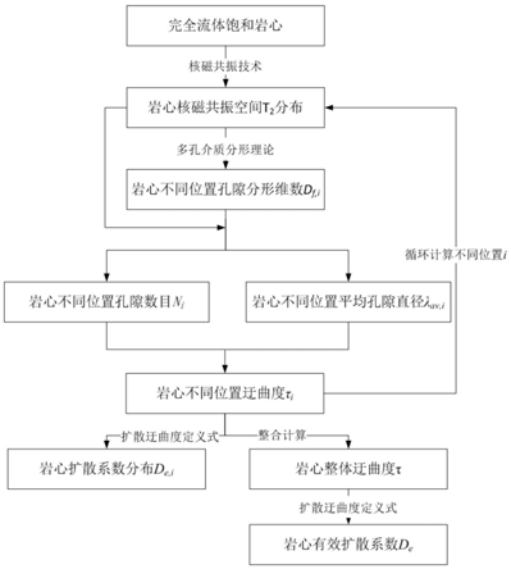
权利要求书2页 说明书5页 附图5页

(54)发明名称

一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法

(57)摘要

本发明提出了一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法，属于地质与石油工程技术领域。本发明所述方法利用低场核磁共振获取一维质子密度分布和空间T_2分布，充分考虑岩石非均质特性对气体在完全液体饱和岩石中扩散的影响，对岩石各个位置的孔隙结构进行精准的定量表征，获得非均质岩石各个位置迂曲度和气体扩散系数分布，具有无损、准确、省时、省力、省钱等显著优势，完全满足岩心分析行业标准化和批量化要求，适合推广应用。



CN 113984590 A

1.一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

步骤一:岩心样品准备

将待测岩石制成柱塞状岩心样品,将岩心加热烘干至恒重,然后冷却至室温,测量岩心直径和长度参数;再将岩心放入流体中,抽真空至完全饱和;

步骤二:获取完全流体饱和非均质岩心的一维质子密度分布和空间T_2分布

利用低场核磁共振获取步骤一得到的完全流体饱和非均质岩心的一维质子密度分布和空间T_2分布;一维质子密度分布和空间T_2分布将待测量的非均质岩心分为n层,每层厚度相同,其中n为正整数;一维质子密度分布反映每个片层的含水量$V_{w,i}$,i为非均质岩心的各个位置,i=1,2,…,n;由非均质岩心各个位置的含水量$V_{w,i}$及各个位置的体积V_i得到各个位置的孔隙率$\varphi_i=V_{w,i}/V_i$;

步骤三:基于核磁共振理论和多孔介质分形理论,通过岩心空间T_2分布计算其各个位置的孔隙分形维数;

步骤四:计算非均质岩心各个位置孔隙通道迂曲度

通过空间T_2分布获得非均质岩心不同位置的孔隙半径分布;基于多孔介质分形理论和空间T_2分布计算非均质岩心各个位置的孔隙数目与平均孔隙直径;通过非均质岩心各个位置的平均孔隙直径、孔隙数目和孔隙体积得到非均质岩心各个位置的孔隙通道平均长度,进而得到非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度;

步骤五:计算非均质岩心中气体有效扩散系数分布

通过不同温压条件下气体在大体积纯流体中的扩散系数,通过非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度对气体在大体积纯流体中的扩散系数进行修正,得到气体在饱和非均质岩心中的有效扩散系数分布:

$$D_{e,i}=\frac{D}{\tau_i} \quad (1)$$

式中,$D_{e,i}$为各个位置气体在流体饱和岩心中有效扩散系数,D为气体在大体积纯流体中的扩散系数;τ_i为非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度;

步骤六:整合计算非均质岩心整体孔隙通道迂曲度和扩散系数

由于非均质岩心在各个位置上处于串联形式,通过公式(2)对非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度τ_i进行整合计算得到非均质岩心整体孔隙通道迂曲度τ:

$$\tau=\frac{\tau_1+\tau_2+\cdots+\tau_n}{n} \quad (2)$$

则岩心中气体有效扩散系数为:

$$D_e=\frac{D}{\tau} \quad (3)$$

式中,D_e为气体在流体饱和岩心中的有效扩散系数。

2.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述步骤三的计算过程为:

利用非均质岩心的空间T_2分布,计算各个位置的$T_{2,i}$对应的流体体积$V_{T2,i}$所占该位置总流体体积$V_{w,i}$的百分比$S_{v,i}$:

$$S_{v,i}=\frac{V_{T2,i}}{V_{w,i}} \quad (4)$$

岩石毛细管压力P_c与弛豫时间T_2之间的关系：

$$P_c=\frac{2\sigma\cos\theta}{F_s\rho}\times\frac{1}{T_2} \quad (5)$$

式中，F_s是几何形状因子；ρ是孔隙表面的T_2弛豫强度，μm/ms；r是孔隙半径，cm；P_c是当孔径为r时的毛细管压力，Mpa；σ为孔隙流体的表面张力，mN/m；θ为孔隙流体与孔隙表面间的接触角；

已知岩心毛管压力曲线的分形表达式如公式(6)，基于公式(5)、(6)得到非均质岩心不同位置的分形表达式如式(7)所示：

$$S_v=\left(\frac{P_c}{P_{cmin}}\right)^{D_f-3} \quad (6)$$

$$S_{v,i}=\left(\frac{T_{2max,i}}{T_{2,i}}\right)^{D_{f,i}-3} \quad (7)$$

其中，P_{cmin}为孔径为r时的毛细管压力，$T_{2max,i}$为岩心中最大孔隙所对应的横向弛豫时间，$D_{f,i}$为岩心各个位置的孔隙分形维数；

对式(7)两边取对数得：

$$\lg S_{v,i}=(3-D_{f,i})\lg T_{2,i}+(D_{f,i}-3)\lg T_{2max,i} \quad (8)$$

通过公式(8)进行循环计算得到非均质岩心各个位置的孔隙分形维数$D_{f,i}$，对非均质岩心复杂的孔隙通道结构进行准确的定量表征。

3.根据权利要求1或2所述的方法，其特征在于，所述步骤四的计算过程如下：

设非均质岩心中各个位置中的孔隙通道是由相同长度与相同孔径的平行通道组成；基于多孔介质分形理论和岩心空间T_2分布计算各个位置岩心的孔隙通道数目N_i：

$$N_i=(\lambda_{max,i}/\lambda_{min,i})^{D_{f,i}} \quad (9)$$

式中，N_i为非均质岩心各个位置的孔隙数目，$\lambda_{max,i}$、$\lambda_{min,i}$分别为非均质岩心各个位置的最大孔隙通道直径和最小孔隙通道直径；

计算非均质岩心各个位置平均孔隙直径$\lambda_{av,i}$：

$$\lambda_{av,i}=\int_{\lambda_{min,i}}^{\lambda_{max,i}}\lambda_i f(\lambda_i)d\lambda_i=\frac{D_{f,i}\lambda_{min,i}}{D_{f,i}-1} \quad (10)$$

通过已获得非均质岩心各个位置的平均孔隙直径$\lambda_{av,i}$和孔隙数目N_i以及非均质岩心各个位置的孔隙体积，计算得到非均质岩心各个位置的孔隙通道平均长度，进而得到非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度：

$$\tau_i=\frac{L_{av,i}}{L_i}=\frac{4\varphi_i A}{N_i\pi(\lambda_{av,i})^2} \quad (11)$$

式中，τ_i为非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度，$L_{av,i}$为非均质岩心各个位置的孔隙通道平均长度，L_i为非均质岩心各个位置的长度，φ_i为非均质岩心各个位置的孔隙率，A为非均质岩心的横截面积。

一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法

技术领域

[0001] 本发明属于地质与石油工程技术领域，涉及一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法。

背景技术

[0002] 扩散作用是地下气体资源(天然气、二氧化碳、氦气等)形成、运移、聚集和散失这一整个地质过程中气体分子的主要运动方式之一，由于地下岩石孔隙中通常被流体(油、气、水等)所饱和，因此，气体分子在岩石中的扩散，主要是在浓度差作用下通过这些孔隙流体介质的扩散。扩散系数是衡量气体分子扩散能力大小的物理量，也是定量描述地下气体资源成藏与开发过程的关键参数之一。

[0003] 目前，对于地下岩石中气体扩散系数是主要通过实验测量，已经形成了相关的行业标准(SY/T 6129-2016岩石中烃类气体扩散系数测定方法)，并且，Liu等人(New insights into natural gas diffusion coefficient in rocks[J].Petroleum Exploration and Development,2012,39(5):597-604.)对常用的测量方法进行了详细介绍和总结。然而，上述测量实验方法设备昂贵、操作繁琐、耗时较长、实验结果精准性受实验条件和人员操作的影响较大，不适合批量岩心实验测量(岩石中烃类气体扩散系数测定技术细节浅析[J]；石油和化工设备；2019年05期)。另外，上述测量方法将岩心作为一个“黑箱”均质模型，没有考虑岩石结构的非均质性对气体扩散系数的影响。而在漫长的地质历史中，在经历了沉积、成岩以及后期构造作用的综合影响，使得岩石的空间分布以及内部的各种属性(如孔隙度、渗透率、孔隙结构等)都存在非均质特性，岩石的非均质性是绝对的、无条件的、无限的，因此，为了提高气体扩散系数测量的准确性，必须考虑岩石的非均质性影响。

发明内容

[0004] 为了解决上述问题，本发明提供了一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法，提高扩散系数测量方法的准确性。为获取非均质岩石非均质特性，利用低场核磁共振技术测量完全被流体(水、油等含氢流体)饱和非均质岩心的一维质子密度分布和空间T_2分布，分别获得非均质岩心各个位置的孔隙率和各个位置的孔隙分布。假设非均质岩心中各个位置中的孔隙通道是由相同长度与相同孔径的平行通道组成，各个位置的孔隙长度与孔隙孔径具有差异。基于核磁共振理论和多孔介质分形理论，计算得到非均质岩心各个位置的孔隙数目与平均孔隙直径，再通过非均质岩心各个位置孔隙率计算得到非均质岩心各个位置孔隙通道迂曲度。通过非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度对气体(天然气、二氧化碳、氦气等)在大体积介质(如水、油、气等)中的扩散系数进行修正得到空间有效扩散系数分布。最后，将非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度进行整合计算得到非均质岩心整体迂曲度，通过非均质岩心整体迂曲度修正气体在大体积介质中的扩散系数，从而得到气体在完全饱和非均质岩心中的整体有效扩散系数。

[0005] 本发明采用的技术方案是：

[0006] 一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法，步骤如下：

[0007] 步骤1：岩心样品准备

[0008] 将待测岩石制成柱塞状岩心样品，将岩心放入恒温箱内去除岩心内部水分，然后冷却至室温，测量岩心直径和长度参数。再将岩心放入流体(水、油等含氢流体)中，抽真空至完全饱和。

[0009] 步骤2：获取完全流体饱和非均质岩心的一维质子密度分布和空间T_2分布

[0010] 利用低场核磁共振获取步骤1得到的完全流体饱和非均质岩心的一维质子密度分布和空间T_2分布；一维质子密度分布和空间T_2分布将待测量的非均质岩心分为n层，每层厚度相同，其中n为正整数；一维质子密度分布反映岩心含水量的分布情况，每个数据点表示的就是所在位置片层的含水量$V_{w,i}$，i为非均质岩心的各个位置，i＝1,2,…,n；空间T_2分布反映岩心内含^{1}H质子的流体的空间横向弛豫时间分布，通过空间T_2分布得到岩心内不同片层的含^{1}H质子的流体在不同尺度孔隙内的含量分布。

[0011] 此外，由非均质岩心直径和每个层的厚度计算得到非均质岩心各个位置体积为V_i，则非均质岩心各个位置的孔隙率为：

[0012] $$\varphi_i=V_{w,i}/V_i \quad (1)$$

[0013] 步骤3：计算非均质岩心各个位置孔隙分形维数

[0014] 利用非均质岩心的空间T_2分布，通过公式(2)计算各个位置的$T_{2,i}$对应的流体体积$V_{T2,i}$所占该位置总流体体积$V_{w,i}$的百分比$S_{v,i}$：

[0015] $$S_{v,i}=\frac{V_{T2,i}}{V_{w,i}} \quad (2)$$

[0016] 由核磁共振横向弛豫机制可知，当岩心孔隙由一种流体饱和时，弛豫时间T_2与孔隙半径r成正相关：

[0017] $$\frac{1}{T_2}=F_s\frac{\rho}{r} \quad (3)$$

[0018] 由岩石物理学可知，岩石毛细管压力和孔径间存在关系：

[0019] $$P_c=\frac{2\sigma\cos\theta}{r} \quad (4)$$

[0020] 通过公式(3)、(4)得到岩石毛细管压力P_c与弛豫时间T_2之间的关系：

[0021] $$P_c=\frac{2\sigma\cos\theta}{F_s\rho}\times\frac{1}{T_2} \quad (5)$$

[0022] 式中，F_s是几何形状因子；ρ是孔隙表面的T_2弛豫强度(μm/ms)；r是孔隙半径(cm)；P_c是当孔径为r时的毛细管压力(Mpa)；σ为孔隙流体的表面张力(mN/m)；θ为孔隙流体与孔隙表面间的接触角。

[0023] 已知岩心毛管压力曲线的分形表达式如公式(6)，基于公式(5)、(6)得到非均质岩心不同位置的分形表达式如式(7)所示：

[0024] $$S_v=\left(\frac{P_c}{P_{cmin}}\right)^{D_f-3} \quad (6)$$

[0025] $$S_{v,i}=\left(\frac{T_{2max,i}}{T_{2,i}}\right)^{D_{f,i}-3} \quad (7)$$

[0026] 其中，P_{cmin}为孔径为r时的毛细管压力，$T_{2max,i}$为岩心中最大孔隙所对应的横向弛豫时间，$D_{f,i}$为岩心各个位置的孔隙分形维数。

[0027] 对式(7)两边取对数得：

[0028] $$\lg S_{v,i}=(3-D_{f,i})\lg T_{2,i}+(D_{f,i}-3)\lg T_{2max,i} \quad (8)$$

[0029] 通过低场核磁共振空间T_2分布，获得非均质岩心各个位置的T_2分布，通过公式(8)进行循环计算得到非均质岩心各个位置的孔隙分形维数$D_{f,i}$，对非均质岩心复杂的孔隙通道结构进行准确的定量表征。

[0030] 步骤4：计算非均质岩心各个位置孔隙通道迂曲度

[0031] 假设非均质岩心中各个位置中的孔隙通道是由相同长度与相同孔径的平行通道组成。通过空间T_2分布获得非均质岩心不同位置的孔隙结构信息，由公式(3)，得到弛豫时间T_2与孔隙直径λ关系公式，T_2与孔隙直径λ理论上呈正比关系：

[0032] $$T_2=\frac{r}{\rho F_s}=C\lambda \quad (9)$$

[0033] 式中，λ是孔隙直径，$C=\frac{1}{2\rho F_s}$为转换系数。

[0034] 基于多孔介质分形理论和岩心空间T_2分布计算各个位置岩心的孔隙通道数目N_i：

[0035] $$N_i=(\lambda_{max,i}/\lambda_{min,i})^{D_{f,i}} \quad (10)$$

[0036] 式中，N_i为非均质岩心各个位置的孔隙数目，$\lambda_{max,i}$、$\lambda_{min,i}$分别为非均质岩心各个位置的最大孔隙通道直径和最小孔隙通道直径。

[0037] 孔隙分布概率公式(11)表示在孔隙直径为λ的孔隙数目占孔隙数目的百分比，根据式(11)得到非均质岩心各个位置平均孔隙直径$\lambda_{av,i}$如式(12)：

[0038] $$f(\lambda)=D_f\lambda_{min}^{D_f}(\lambda)^{-(D_f+1)} \quad (11)$$

[0039] $$\lambda_{av,i}=\int_{\lambda_{min,i}}^{\lambda_{max,i}}\lambda_i f(\lambda_i)d\lambda_i=\frac{D_{f,i}\lambda_{min,i}}{D_{f,i}-1} \quad (12)$$

[0040] 通过已获得非均质岩心各个位置的平均孔隙直径$\lambda_{av,i}$和孔隙数目N_i以及非均质岩心各个位置的孔隙体积，计算得到非均质岩心各个位置的孔隙通道平均长度，进而得到非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度：

[0041] $$\tau_i=\frac{L_{av,i}}{L_i}=\frac{4\varphi_i A}{N_i\pi(\lambda_{av,i})^2} \quad (13)$$

[0042] 式中，τ_i为非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度，$L_{av,i}$为非均质岩心各个位置的孔隙通道平均长度，L_i为非均质岩心各个位置的长度，φ_i为非均质岩心各个位置的孔隙率，A为非均质岩心的横截面积。

[0043] 由于非均质岩心各个位置的孔隙率和T_2分布的不同，得到的非均质岩心各个位置孔隙数目、平均孔隙半径和孔隙通道迂曲度具有较大差异。因此，对气体在岩石中的扩散问题需要充分考虑岩心孔隙结构非均质的影响。

[0044] 步骤5:计算非均质岩心中气体有效扩散系数分布

[0045] 步骤4中已得到非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度,并经查阅资料获得不同温压条件下气体(天然气、二氧化碳、氦气等)在大体积纯流体(油、气、水等)中的扩散系数,利用非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度对气体在大体积纯流体介质中的扩散系数进行修正,得到空间有效扩散系数分布如式(14):

[0046] $$D_{e,i}=\frac{D}{\tau_i} \quad (14)$$

[0047] 式中,$D_{e,i}$为各个位置气体在流体饱和岩心中的有效扩散系数,D为气体在大体积纯流体中的扩散系数。

[0048] 步骤6:整合计算非均质岩心整体孔隙通道迂曲度和扩散系数

[0049] 由于非均质岩心在各个位置上处于串联形式,通过公式(15)对非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度τ_i进行整合计算,得到非均质岩心整体孔隙通道迂曲度τ:

[0050] $$\tau=\frac{\tau_1+\tau_2+\cdots+\tau_n}{n} \quad (15)$$

[0051] 则岩心中气体有效扩散系数为:

[0052] $$D_e=\frac{D}{\tau} \quad (16)$$

[0053] 式中,D_e为气体在流体饱和岩心中的有效扩散系数。

[0054] 本发明的有益效果:本发明所述一种计算非均质岩石空间迂曲度和气体扩散系数分布的方法,利用低场核磁共振获取一维质子密度分布和空间T_2分布,充分考虑岩石非均质特性对气体在完全液体饱和岩石中扩散的影响,对岩石各个位置的孔隙结构进行精准的定量表征,获得非均质岩石各个位置迂曲度和气体扩散系数分布,具有无损、准确、省时、省力、省钱等显著优势,完全满足岩心分析行业标准化和批量化要求,适合推广应用。

附图说明

[0055] 图1是方法流程框图。

[0056] 图2非均质岩心孔隙率分布。

[0057] 图3是完全盐水饱和状态下非均质岩心核磁共振空间T_2分布。

[0058] 图4是非均质岩心各个位置的分形维数。

[0059] 图5是非均质岩心各个位置的孔隙数目。

[0060] 图6是非均质岩心各个位置的平均孔隙半径。

[0061] 图7是非均质岩心各个位置的迂曲度。

[0062] 图8是非均质岩心扩散系数分布。

具体实施方式

[0063] 下面结合附图和技术方案对本发明作进一步说明。

[0064] 如图1所示,一种计算非均质岩石迂曲度和气体扩散系数的方法,包括以下步骤:

[0065] 步骤1:岩心样品准备

[0066] 选取典型的露头砂岩Berea(渗透率250～350md)作为待测岩石,将待测岩石制成

柱塞状岩心，将岩心放入恒温箱内加热110℃烘干内部水分至恒重，然后放入干燥器中冷却至室温，测量岩心直径2.52cm、长度4.40cm。然后将岩心放入盐水中，用真空泵抽真空至无气泡溢出，保持真空48h以上，让岩心充分饱和盐水，取出已经完全盐水饱和的岩心。

[0067] 步骤2：利用核磁共振获取完全流体饱和非均质岩心的一维质子密度分布和空间T_2分布

[0068] 非均质岩心长度4.40cm，共分为40层，每层厚度为0.11cm。利用低场核磁共振获取步骤1得到的完全流体饱和非均质岩心的一维质子密度分布和空间T_2分布，进而得到非均质岩心每层的含水量和T_2分布。计算得到每层岩心体积2.20cm^3，通过非均质岩心每层的含水量和每层岩心体积得到每层岩心孔隙率。

[0069] 步骤3：计算非均质岩心各个位置的孔隙分形维数

[0070] 通过步骤2中测得的完全盐水饱和状态下非均质岩心的空间T_2分布，得到每层岩心T_2分布。分别计算出每层不同T_2值时对应的流体体积V_{T2}所占该层总流体体积$V_{w,i}$的百分比$S_{v,i}$。直接对每层岩心T_2分布的$lgT_{2,i}$与$lgS_{v,i}$数据进行线性回归分析，拟合直线的斜率$K_i=3-D_{f,i}$，解得每层岩心孔隙分形维数$D_{f,i}$。

[0071] 步骤4：计算非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度

[0072] 根据核磁共振原理，完全盐水饱和非均质岩心的T_2分布可以反映岩石内部结构，横向弛豫时间T_2与孔径r理论上呈线性正比关系。因此，通过饱和非均质岩心空间T_2分布，可以得到各个位置岩心的孔径分布。基于多孔介质分形理论和岩心空间T_2分布计算得到非均质岩心中的各个位置孔隙数目和平均孔隙直径，再计算得到非均质岩心中各个位置的迂曲度。

[0073] 步骤5：计算非均质岩心中气体有效扩散系数分布

[0074] 根据文献资料(Guo HR,Chen Y,Lu WJ,et al.In situ Raman spectroscopic study of diffusion coefficients of methane in liquid water under high pressure and wide temperatures)，当地下深度为3km时，压力31Mpa，温度为403K，甲烷在纯盐水中的扩散系数$D=9.34*10^{-9}(m^2/s)$，利用步骤4得到的非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度计算得到在该条件下甲烷在纯盐水饱和非均质岩心中各个位置的有效扩散系数。

[0075] 步骤6：整合计算非均质岩心整体孔隙通道迂曲度和扩散系数

[0076] 将步骤4得到的非均质岩心各个位置的孔隙通道迂曲度进行整合计算得到非均质岩心整体孔隙通道迂曲度$\tau=6.63$。

[0077] 此外，通过电阻率法测得该岩心的整体迂曲度为6.77，与本方法计算结果吻合较好。将非均质岩心整体孔隙通道迂曲度对当地下深度为3km时，压力31Mpa，温度为403K，甲烷在纯盐水中的扩散系数进行修正得到该条件下甲烷在纯盐水饱和非均质岩心中整体扩散系数$D_e=1.41*10^{-9}(m^2/s)$。

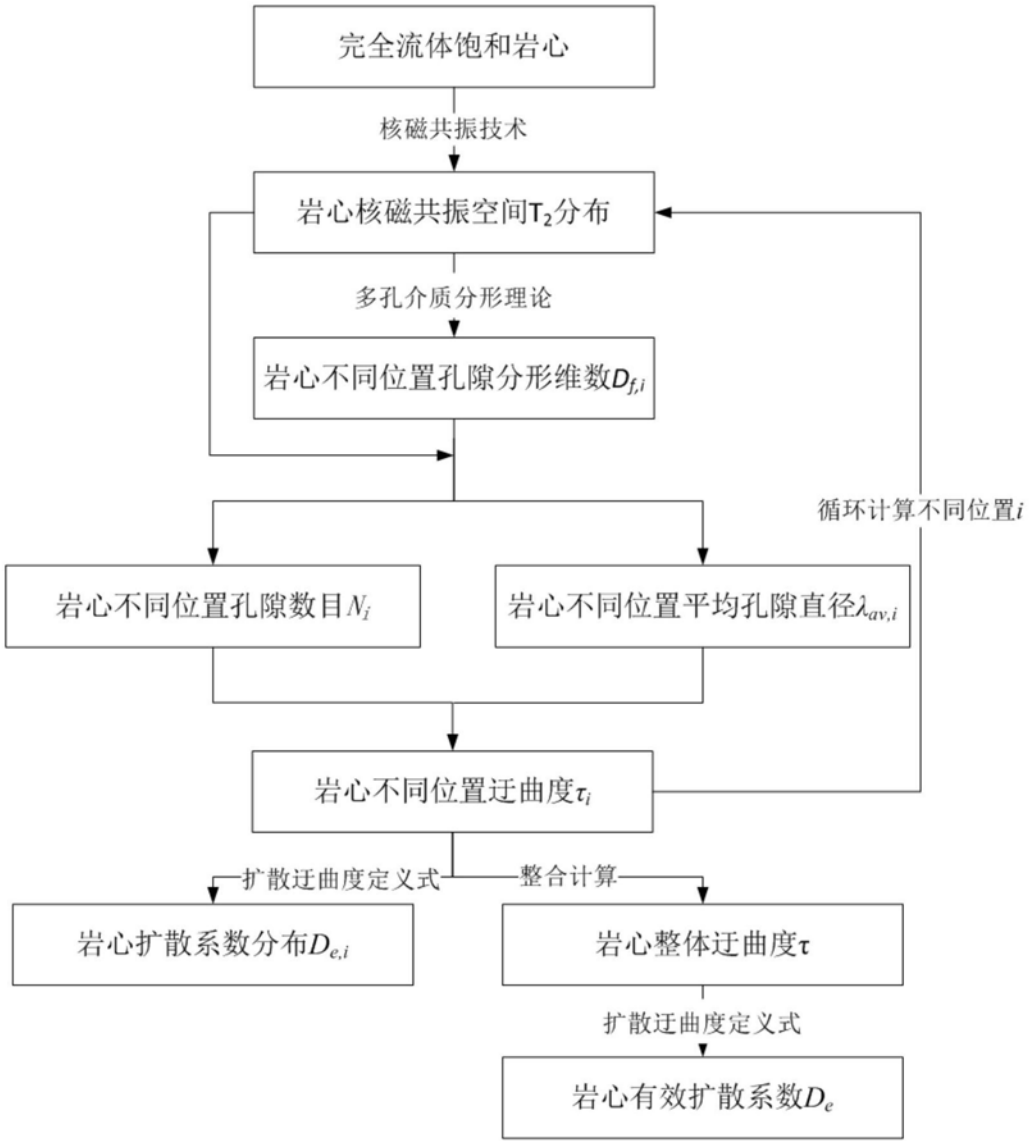

完全流体饱和岩心
核磁共振技术
岩心核磁共振空间T_2分布
多孔介质分形理论
岩心不同位置孔隙分形维数$D_{f,i}$
循环计算不同位置i
岩心不同位置孔隙数目N_i
岩心不同位置平均孔隙直径$\lambda_{av,i}$
岩心不同位置迂曲度τ_i
扩散迂曲度定义式
整合计算
岩心扩散系数分布$D_{e,i}$
岩心整体迂曲度τ
扩散迂曲度定义式
岩心有效扩散系数D_e

图1

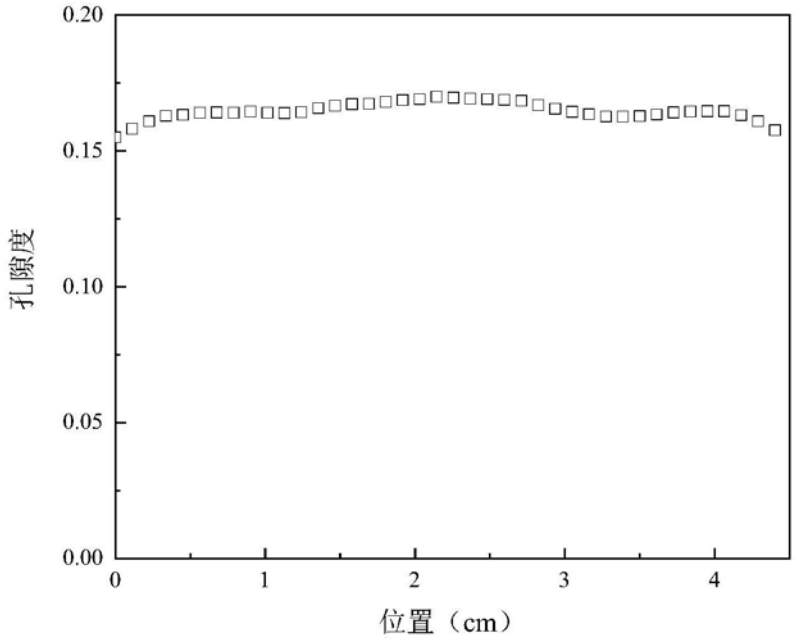

0.20
0.15
0.10
0.05
0.00
孔隙度
0
1
2
3
4
位置（cm）

图2

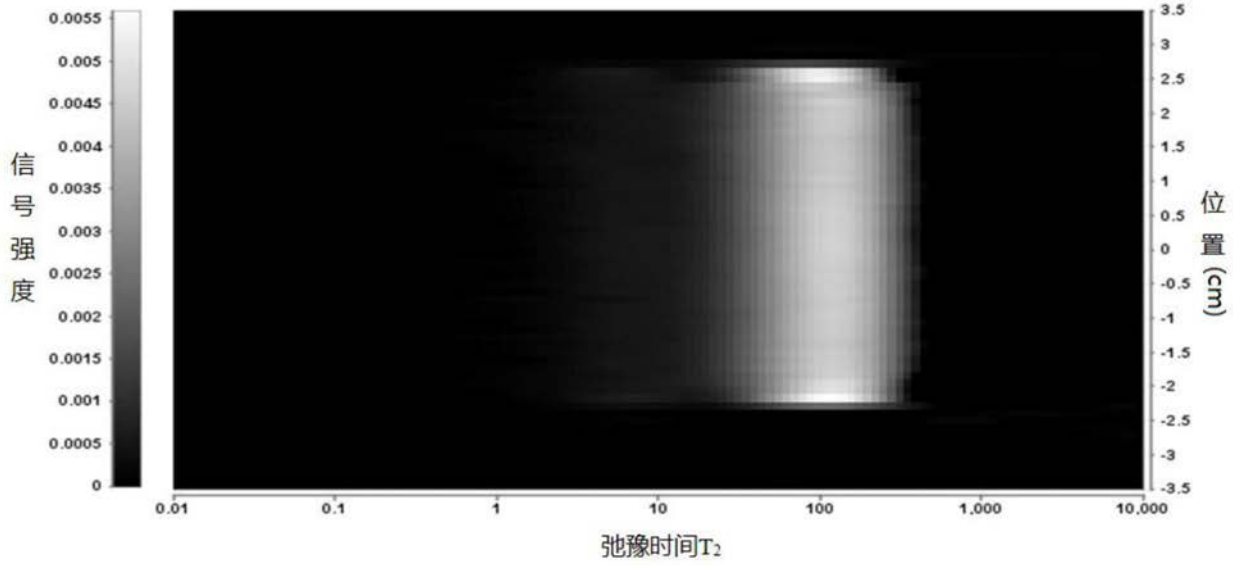

0.0055
0.005
0.0045
0.004
0.0035
0.003
0.0025
0.002
0.0015
0.001
0.0005
0
信号强度
3.5
3
2.5
2
1.5
1
0.5
0
-0.5
-1
-1.5
-2
-2.5
-3
-3.5
位置(cm)
0.01
0.1
1
10
100
1,000
10,000
弛豫时间T2

图3

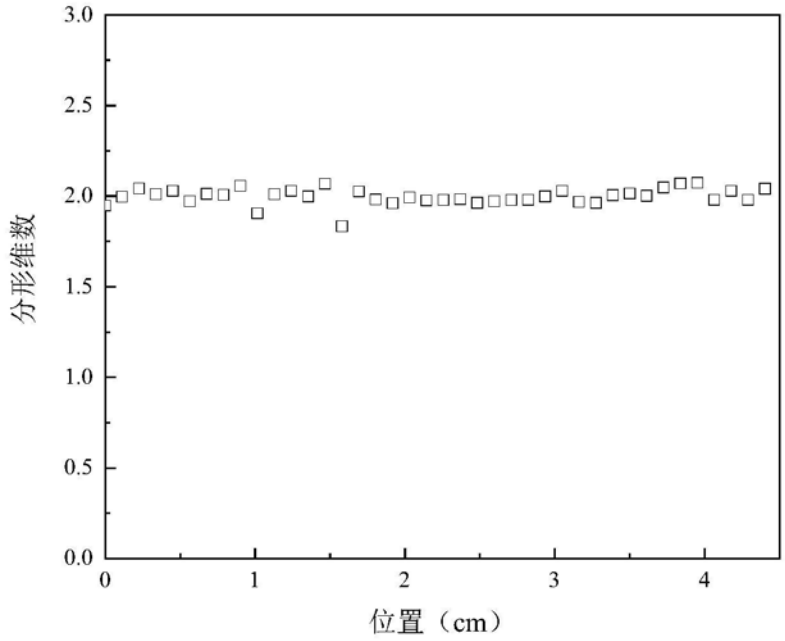

3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
分形维数
0
1
2
3
4
位置（cm）

图4

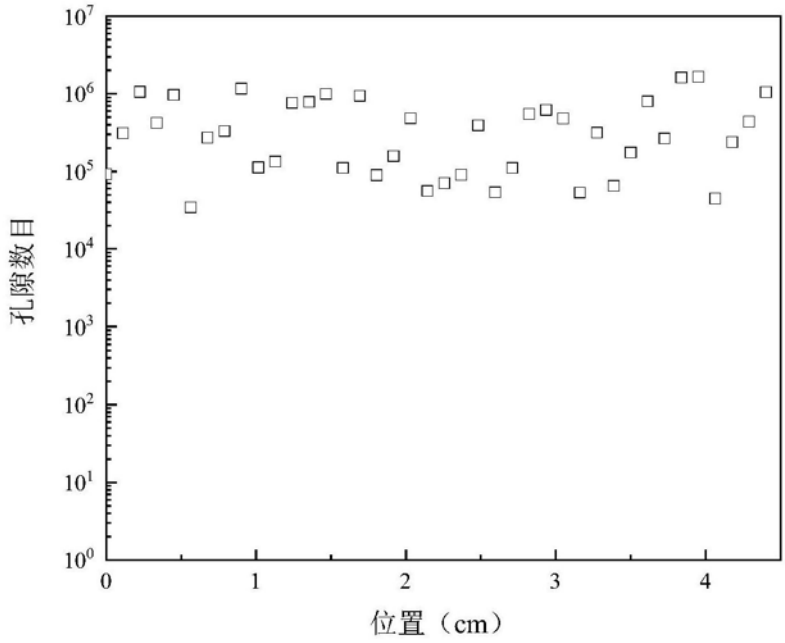

10^7
10^6
10^5
10^4
10^3
10^2
10^1
10^0
孔隙数目
0
1
2
3
4
位置（cm）

图5

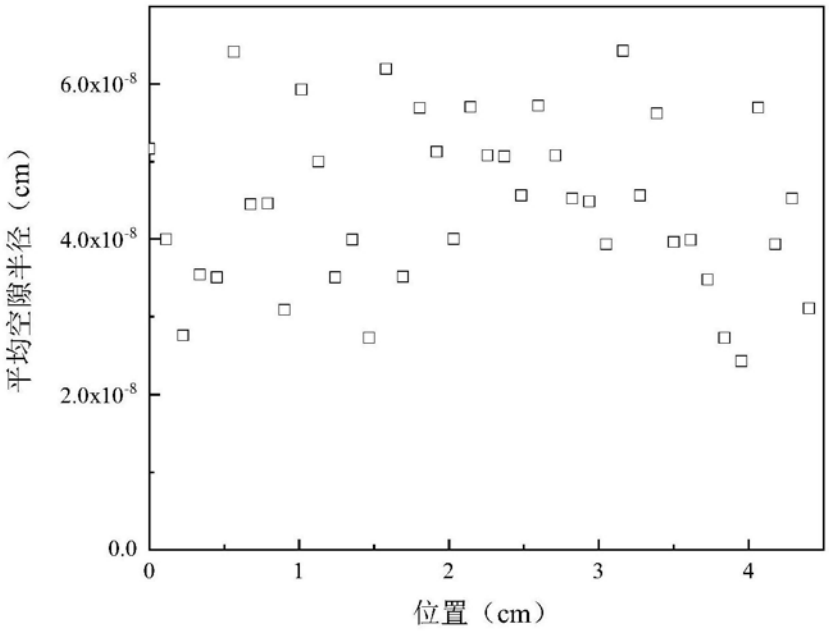

平均空隙半径（cm）
6.0x10-8
4.0x10-8
2.0x10-8
0.0
0
1
2
3
4
位置（cm）

图6

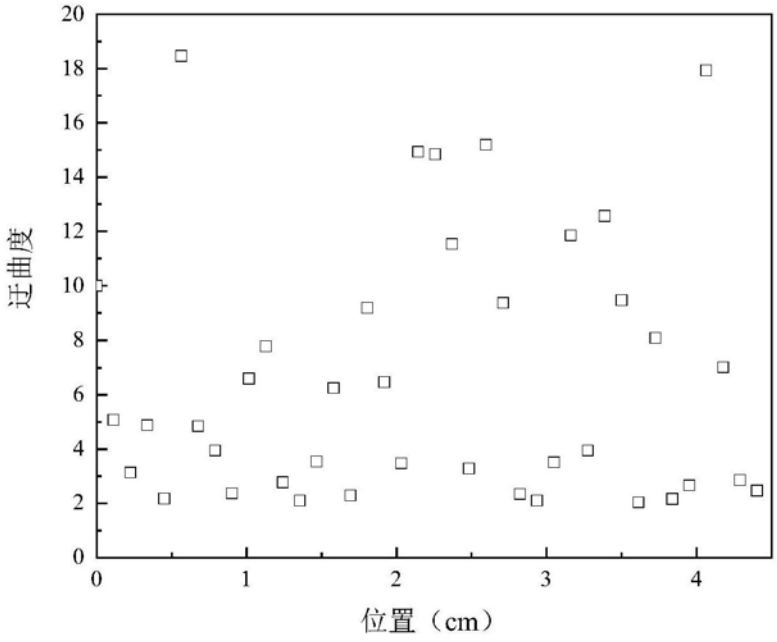

迂曲度
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0
1
2
3
4
位置（cm）

图7

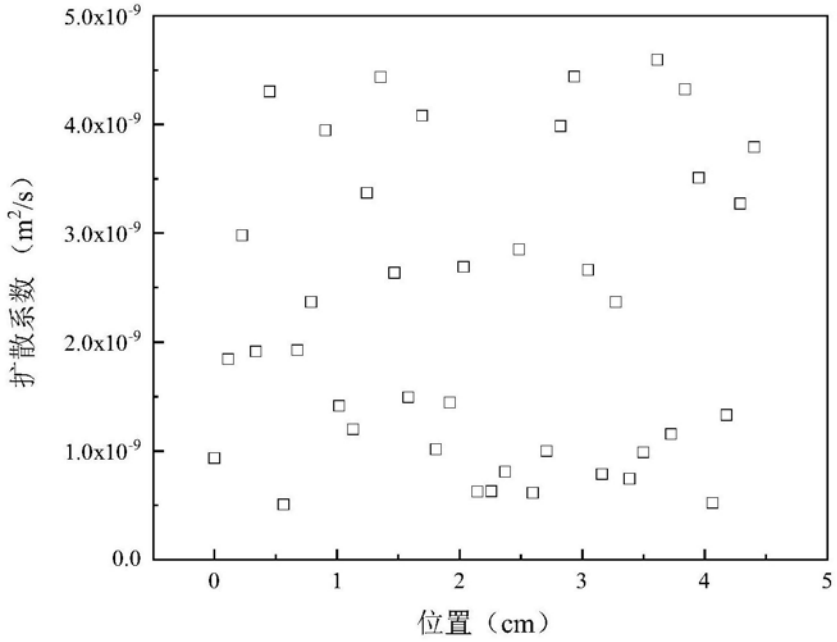


图8