



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111650234 B

(45) 授权公告日 2021. 07. 13

(21) 申请号 202010547211.2

(22) 申请日 2020.06.16

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 111650234 A

(43) 申请公布日 2020.09.11

(73) 专利权人 北京大学
地址 100871 北京市海淀区颐和园路5号
专利权人 北京斯派克科技发展有限公司

(72) 发明人 王为民 马德铭 朱涛涛

(74) 专利代理机构 北京万象新悦知识产权代理有限公司 11360

代理人 黄凤茹

(51) Int. Cl.
G01N 24/08 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 109900732 A, 2019.06.18

CN 102768347 A, 2012.11.07

CN 105190366 A, 2015.12.23

CA 2634104 A1, 2008.12.08

Fei Tian et al..Rock-Type Definition and Pore Characterization of Tight Carbonate Rocks Based on Thin Sections and MICP and NMR Experiments.《Applied Magnetic Resonance》.2018,第49卷

刘春杨 等.用核磁共振和常规测井资料预测毛细管压力曲线方法.《测井技术》.2010,第34卷(第6期),

审查员 王超

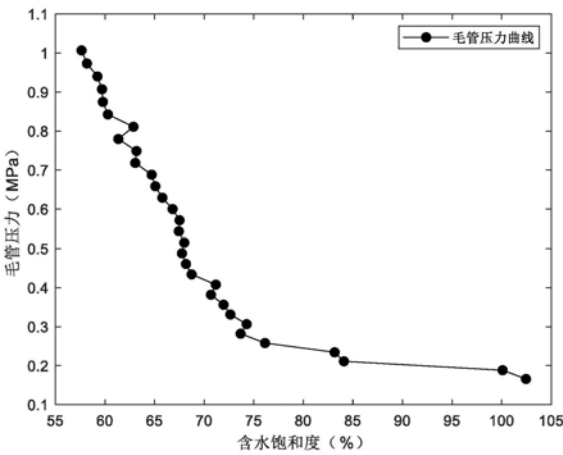
权利要求书3页 说明书9页 附图6页

(54) 发明名称

致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法和系统

(57) 摘要

本发明公布了一种致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法和系统,包括:磁体、梯度线圈、样品移动平台、核磁共振射频线圈、核磁共振谱仪、射频功率放大器、梯度放大器、电源、水冷机、包括主机和显示器的计算机、前置放大器;梯度线圈内配备有水冷系统;通过设计具有较短回波时间的纯相位编码脉冲序列,实现采集致密岩心内的快衰减信号,结合离心设备获得致密岩心中的油水两相共存时流体饱和度分布,用于测试致密岩心的油水毛管压力曲线,更适合油藏开发现场使用。



1. 一种致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法,通过设计具有较短回波时间的纯相位编码脉冲序列采集致密岩心内的快衰减信号,结合离心设备获得致密岩心中的油水两相共存时流体饱和度分布,用于测试致密岩心的油水毛管压力曲线;包括如下步骤:

1) 将致密岩心进行洗油、烘干处理,并测试氦气孔隙度;

2) 将致密岩心抽真空后饱和常规模拟地层水,并进行加压饱和处理,确保流体饱和度大于95%,得到饱和常规模拟地层水状态的致密岩心样品;

3) 使用岩心标准样对核磁共振设备进行初始化调试:

核磁共振设备的主磁体具有防涡流层,核磁共振谱仪配有多组数学波形预增强参数,对短时间内快速变化的梯度电流进行涡流补偿,使得在纯相位编码序列快速编码期间,梯度线圈无涡流产生;

在核磁共振设备的梯度线圈内布管进行水冷降温,针对线圈不同部位的发热量不同进行布管,对线圈磁场影响小,散热效率高,避免用于纯相位序列编码的梯度电流施加在梯度线圈上聚集热量;

将岩心标准样置入核磁共振设备的核磁共振射频线圈中;

射频线圈接收核磁共振的FID信号,通过显示与操作平台对FID信号进行傅里叶变换,得到FID信号的中心频率,并将获得的中心频率置入核磁共振参数主频中,同时通过改变射频脉冲的能量获得核磁共振设备的90°翻转角参数,置入核磁共振设备相应参数中;即完成核磁共振设备的初始化调试;

4) 将步骤2)得到的饱和常规模拟地层水状态的致密岩心样品使用不产生磁共振信号的四氟乙烯密封带包裹后,放入试管;

5) 将步骤4)得到的装有岩心样品的试管垂直置入核磁共振射频线圈内;

6) 设计纯相位编码序列 α -SPI,将核磁共振设备加载纯相位编码序列;包括:

激励脉冲采用小角度硬脉冲,多次小角度硬脉冲激励和信号采集均在阶梯相位编码的情况下进行;

全部相位编码过程由一维k空间中心变化至正最大编码梯度,等待弛豫到稳态等待的时间RD后,编码梯度再次由k空间中心变化至负最大编码梯度,完成由双半一维K空间组成1维K空间填充的过程;

纯相位编码序列的最短回波时间TE表示为公式1:

$$TE = \frac{T_{RF}}{2} + t_p \quad \text{公式 1}$$

其中, T_{RF} 为小角度硬脉冲激励的时间, t_p 为相位编码时间;

全部相位编码过程中的磁共振信号衰减表示为公式2:

$$S = M_0 \exp\left(-\frac{t_p}{T_2^*}\right) \sin(\alpha) \quad \text{公式 2}$$

其中, M_0 为平衡态时的磁化矢量, t_p 为相位编码时间, T_2^* 为有效横向弛豫时间, α 为翻转角度, M_0 与流体量成正比;

将核磁共振设备加载纯相位编码序列,在显示与操作平台输入测试样品轴向测试范围,参考步骤3)得到的90°翻转角参数,输入小角度硬脉冲激励的时间参数 T_{RF} 、相位编码时

间参数 t_p ;

核磁共振设备运行序列 α -SPI,对得到的信号进行傅里叶变换,得到饱和状态致密岩心的流体饱和度分布;

7) 将步骤5)中的饱和常规模拟地层水状态的致密岩心样品去除四氟乙烯密封带后烘干至恒重,饱和使用氧化氙配置的模拟地层水;然后将岩心样品置入充满模拟油的离心杯中,采用离心机进行油驱水状态的离心操作;

8) 将油驱水状态的岩心样品从离心杯中取出,重复步骤5)~6),获得油驱水状态致密岩心沿轴向的油相饱和度分布;

9) 根据油水含烃因子的不同,将致密岩心油驱水状态的油相轴向饱和度分布转换为离心后水相轴向饱和度分布结果;

10) 分别计算得到岩心上不同位置毛细管压力值;

11) 以不同位置含水饱和度为横轴,对应毛细管压力为纵轴,绘制致密岩心内油水两相共存时毛管压力曲线;

通过上述步骤,实现采用核磁共振纯相位编码对致密岩心的油水毛管压力进行测试。

2. 如权利要求1所述致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法,其特征是,核磁共振谱仪具体配有12组数学波形预增强参数对短时间内快速变化的梯度电流进行涡流补偿。

3. 如权利要求1所述致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法,其特征是,在核磁共振设备的梯度线圈内布局铜质水管进行水冷降温,针对线圈不同部位的发热量不同进行布管。

4. 如权利要求1所述致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法,其特征是,岩心标准样的长度大于等于待测致密岩心的长度;岩心标准样的孔隙度大于等于20%。

5. 如权利要求1所述致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法,其特征是,步骤10)具体通过公式3计算得到岩心上不同位置毛细管压力值:

$$P_c(r) = 0.5 * \Delta \rho * \omega^2 * (r_2^2 - r^2) \quad \text{公式 3}$$

其中, $P_c(r)$ 为致密岩心样品不同位置的油水毛管压力, r 为致密岩心样品某一位置距离离心机转轴轴心的径向距离, $\Delta \rho$ 为步骤7)中使用的模拟地层水与模拟油之间的密度差, ω 为离心机转速, r_2 为致密岩心样品距离离心机转轴轴心最远处的径向距离。

6. 一种实现权利要求1~5所述致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法的核磁共振纯相位编码测试系统,包括:磁体、梯度线圈、样品移动平台、核磁共振射频线圈、核磁共振谱仪、射频功率放大器、梯度放大器、电源、水冷机、包括主机和显示器的计算机、前置放大器;梯度线圈内配备有水冷系统;

梯度线圈固定在磁体上;样品移动平台固定在磁体上;核磁共振射频线圈固定在样品移动平台上;被测试样品置于核磁共振射频线圈中;水冷机连接到梯度线圈的水冷系统;梯度放大器与梯度线圈相连接;计算机与核磁共振谱仪相连接;射频功率放大器与核磁共振射频线圈相连接;核磁共振射频线圈与前置放大器相连接;前置放大器与核磁共振谱仪相连接;

磁体用于提供 B_0 静磁场;梯度线圈用于提供X\Y\Z三个方向的梯度场;核磁共振射频线圈用于产生磁共振 B_1 射频场,激发并接收样品产生的磁共振信号;核磁共振谱仪用于控制

脉冲序列所需的射频发射、梯度发射、数据采集滤波、增益放大、正交解调、K空间排布；

射频功率放大器用于提供脉冲序列所需的射频能量；梯度放大器用于提供脉冲序列所需的梯度电流，最大输出电流150A，最快爬升时间60 μ s，具有过流过压自动保护功能；电源用于为梯度放大器提供直流电压；水冷机连接到梯度线圈的水冷系统，通过制冷机带走循环水的温度；计算机主机用于安装脉冲序列编辑程序、脉冲序列测试程序、数据采集分析显示程序；计算机显示器用于显示测试信息；前置放大器用于对射频线圈中样品产生的核磁共振信号进行放大。

7. 如权利要求6所述的核磁共振纯相位编码测试系统，其特征是，所述梯度放大器为X、Y、Z方向梯度放大器；和/或，所述磁体为U型结构，均匀区为长300mm*直径250mm的圆柱体，均匀度 ≤ 30 ppm。

8. 如权利要求6所述的核磁共振纯相位编码测试系统，其特征是，还可包括电子机柜和操作台，电子机柜用于放置并固定电子部件，提供各电子部件的良好接地；操作台用于放置计算机，提供核磁共振操作人员的工作环境。

9. 如权利要求6所述的核磁共振纯相位编码测试系统，其特征是，所述梯度线圈用于为测试系统提供三个方向的梯度场；通过150安培电流时，产生梯度场 ≥ 130 mT/m。

10. 如权利要求6所述的核磁共振纯相位编码测试系统，其特征是，所述射频功率放大器的工作频率范围为1MHz-350MHz，最大功率350W；和/或，所述前置放大器的增益 ≥ 30 dB，工作频率范围为1MHz-60MHz，噪声系数 ≤ 0.1 dB。

致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法和系统

技术领域

[0001] 本发明属于核磁共振技术领域,涉及一种致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法和系统。

背景技术

[0002] 致密油作为非常规油气资源,储量丰富,大大改变了我国能源结构,具有重要的战略意义及商业开发前景,其储层岩心物性参数的测试分析显得尤其重要,毛管压力曲线作为岩心的重要物性参数,在渗流机理研究、储层开发评价、储层成藏勘探等领域起到非常重要的作用。

[0003] 目前毛管压力曲线核磁共振的测试方法中是通过常规医用核磁共振成像技术(Magnetic Resonance Image)结合离心设备对样品进行流体饱和度分布的测试,并根据离心力计算公式,获得样品毛管压力曲线的分布;此方法仅适用于高孔隙度、高渗透率的岩心,由于高孔高渗的岩心内部流体丰度高,核磁共振信号较强且弛豫时间长,核磁共振成像信号容易采集,采用常规医用核磁共振成像技术即可满足应用需求。

[0004] 致密岩心由于其孔隙度小(流体丰度低)、渗透率低、黏土含量高,多以小孔径为主等物性特征,导致其被激发出的核磁共振信号强度低,衰减快(即弛豫时间短),10ms以上的弛豫组份少,而常规医用核磁共振成像技术的重要参数回波时间TE(Time to Echo,回波时间)较长,以0.3T核磁共振成像设备为例,其一维成像脉冲序列见图1,回波时间TE-3由图中90°软脉冲-1、180°软脉冲-2、采样时间-4、读出梯度补偿梯度-5共同决定,最短回波时间TE-3在根本上受频率编码方法的限制,即使提高硬件水平,由于TE与分辨率正相关,也就决定了该方法高分辨率与较短TE不能同时兼顾,一维成像时最短回波时间约为15ms,多用于肌肉、脂肪、组织液等长弛豫特征的核磁共振成像分析,而致密岩心为短弛豫,横向弛豫时间T₂均小于1ms,故目前已存在的毛管压力曲线核磁共振的测试技术不适用于致密岩心毛管压力曲线的核磁共振分析,且目前已存在的毛管压力曲线核磁共振的测试技术难以对石油工业实际开发生产中岩心内油水两相共存时的毛管压力曲线进行测试分析。

发明内容

[0005] 为了克服上述现有毛管压力曲线核磁共振测试技术的不足,本发明提供一种致密岩心的油水毛管压力曲线的方法和系统,通过设计具有较短回波时间的纯相位编码脉冲序列,实现采集致密岩心内的快衰减信号,结合离心设备获得致密岩心中的油水两相共存时流体饱和度分布,再根据离心力公式,计算得到油水毛管压力曲线。

[0006] 本发明的核心是:

[0007] 为了使得核磁共振设备能够采集到致密储层岩芯的信号,本发明采用纯相位编码技术,设计具有短回波时间的纯相位编码序列 α -SPI(α -single-point imaging, α 角度的单点采集序列,也称为纯相位编码序列),如图3。采用硬脉冲设计以缩短激发时间;激励脉冲采用小角度硬脉冲,多次小角度硬脉冲激励和信号采集均是在阶梯相位编码的情况下进

行,全部相位编码过程由一维k空间中心变化至正最大编码梯度,等待RD(Relaxation Delay,弛豫到稳态等待的时间)后编码梯度再次由k空间中心变化至负最大编码梯度,完成由双半一维K空间组成1维K空间填充的过程。

[0008] 纯相位编码序列的最短回波时间TE由以下公式1给出:

$$TE = \frac{T_{RF}}{2} + t_p \quad \text{公式 1}$$

[0010] 其中, T_{RF} 为小角度硬脉冲激励的时间, t_p 为相位编码时间(Time of Phase Coding)。使得在较短TE时间内(约100微秒)可以采集到岩心内流体产生的核磁共振信号;

[0011] 全部相位编码过程中磁共振信号衰减见公式2:

$$S = M_0 \exp\left(-\frac{t_p}{T_2^*}\right) \sin(\alpha) \quad \text{公式 2}$$

[0013] 其中, M_0 为平衡态时的磁化矢量, t_p 为相位编码时间, T_2^* 为有效横向弛豫时间, α 为翻转角度, M_0 与流体量成正比;

[0014] 整个测试过程中,测试样品呈现为质子密度加权,测试样品的磁共振信号不再受到纵向时间T1和TR的影响,同时纯相位编码技术在很大程度上不受磁化率引起的磁场变化、化学位移和顺磁杂质引起的磁共振信号的影响;在本发明采用的纯相位编码序列中,用于编码的梯度电流在短时间内快速变化,梯度线圈会产生涡流,进而干扰样品产生的核磁共振信号。为此本发明使用的核磁共振设备的主磁体具有防涡流层,核磁共振谱仪配有12组数学波形预增强参数对短时间内快速变化的梯度电流进行涡流补偿,使得在纯相位编码序列快速编码期间,梯度线圈无涡流产生,不会影响样品产生的核磁共振信号;

[0015] 在本发明采用的纯相位编码序列中,用于编码的梯度电流长时间施加在梯度线圈上,会导致梯度线圈积聚热量。为了避免热量聚集,温度升高影响信号采集,本发明在核磁共振设备的梯度线圈内布局铜质水管进行水冷降温,针对线圈不同部位的发热量不同进行布管,对线圈磁场影响小,散热效率高;

[0016] 本发明的测试样品为致密岩心,核磁共振信号信噪比低,为了避免信号传输过程中的信号进一步损耗,核磁共振谱仪采用光纤传输模式,致密岩心样品产生的核磁共振信号经过前置放大器放大后由电信号转换为光信号,经光纤传输至核磁共振谱仪中;

[0017] 为了区分测试样品致密岩心中的油与水,本发明使用氧化氘(D_2O)配置的模拟地层水作为被测试致密岩心的润湿相,同时使用模拟油作为被测试致密岩心的非润湿相,致密岩心中油水两相共存时,仅有油相产生核磁共振信号。通过油水不同的含烃因子将离心后岩心中油相流体饱和度分布换算成水相流体饱和度分布,进而得到致密岩心内油水毛管压力曲线,更适合油藏开发现场使用。

[0018] 本发明提供的技术方案是:

[0019] 一种致密岩心的油水毛管压力曲线的测试方法致密岩心,通过设计具有较短回波时间的纯相位编码脉冲序列采集致密岩心内的快衰减信号,结合离心设备获得致密岩心中的油水两相共存时流体饱和度分布,用于测试致密岩心的油水毛管压力曲线,包括如下步骤:

[0020] 1) 将致密岩心进行洗油、烘干处理,并测试氦气孔隙度。

[0021] 2) 将致密岩心抽真空后饱和常规模拟地层水,并进行加压饱和处理,确保流体饱

和度>95%，得到饱和常规模拟地层水状态的致密岩心样品备用。

[0022] 3) 使用岩心标准样对核磁共振设备进行初始化调试：

[0023] 首先将标准样置入核磁共振射频线圈中，要求标准样的长度大于等于待测致密岩心的长度，标准样的孔隙度大于等于20%。射频线圈在显示与操作平台测试核磁共振的FID (free induction decays) 信号，对FID信号进行傅里叶变换得到FID信号的中心频率，并将获得的中心频率置入核磁共振参数主频中，同时通过改变射频脉冲的能量获得核磁共振设备的90°翻转角参数，置入核磁共振设备相应参数中。核磁共振设备初始化调试结束。

[0024] 本发明使用的核磁共振设备的主磁体具有防涡流层，核磁共振谱仪配有12组数学波形预增强参数对短时间内快速变化的梯度电流进行涡流补偿核，使得在纯相位编码序列快速编码期间，梯度线圈无涡流产生。在本发明采用的纯相位编码序列中，用于编码的梯度电流长时间施加在梯度线圈上，会导致梯度线圈积聚热量。为了避免热量聚集，温度升高影响信号采集，本发明在核磁共振设备的梯度线圈内布局铜质水管进行水冷降温，针对线圈不同部位的发热量不同进行布管，对线圈磁场影响小，散热效率高。

[0025] 4) 将步骤2) 得到的饱和常规模拟地层水状态的致密岩心样品使用不产生磁共振信号的四氟乙烯密封带包裹后，放入试管。

[0026] 5) 将步骤4) 得到的装有样品的试管垂直置入核磁共振射频线圈内。

[0027] 6) 设计纯相位编码序列；

[0028] 核磁共振设备加载纯相位编码序列，在显示与操作平台输入测试样品轴向测试范围(大于标准样的长度)，参考步骤3) 得到的90°翻转角参数，输入 T_{RF} 、 t_p 参数。核磁共振设备运行 α -SPI序列，对得到的信号进行傅里叶变换，得到饱和状态致密岩心的流体饱和度分布。

[0029] 其中， T_{RF} 为小角度硬脉冲激励的时间， t_p 为相位编码时间。如公式1中，核磁共振设备在较短TE时间内(约100微秒)可以采集到测试样品的核磁共振信号；这样足以采集致密岩心内的快衰减信号。

[0030] 7) 将步骤5) 中的饱和常规模拟地层水状态的致密岩心样品去除四氟乙烯密封带后烘干至恒重，饱和使用氧化氘(D_2O) 配置的模拟地层水，然后将岩心样品置入充满模拟油的离心杯中，离心机进行油驱水状态的离心操作。

[0031] 8) 将油驱水状态的岩心样品从离心杯中取出，重复步骤5)、步骤6)，获得油驱水状态致密岩心沿轴向的油相饱和度分布。

[0032] 9) 根据油水含烃因子的不同，将致密岩心油驱水状态的油相轴向饱和度分布转换为离心后水相轴向饱和度分布结果。

[0033] 10) 分别计算岩心上不同位置毛细管压力值。

[0034] 具体计算公式为：

$$P_c(r) = 0.5 * \Delta \rho * \omega^2 * (r_2^2 - r^2) \quad \text{公式 3}$$

[0036] 其中， $P_c(r)$ 为致密岩心样品不同位置的油水毛管压力， r 为致密岩心样品某一位置距离离心机转轴轴心的径向距离， $\Delta \rho$ 为步骤7) 中使用的模拟地层水与模拟油之间的密度差， ω 为离心机转速， r_2 为致密岩心样品距离离心机转轴轴心最远处的径向距离。

[0037] 11) 以不同位置含水饱和度为横轴，对应毛细管压力为纵轴，绘制致密岩心内油水

毛管压力曲线。

[0038] 通过上述步骤,实现采用核磁共振纯相位编码对致密岩心的油水毛管压力进行测试。

[0039] 本发明还提供一种核磁共振纯相位编码测试系统(见图二),包括:磁体、梯度线圈、样品移动平台、核磁共振射频线圈、核磁共振谱仪、射频功率放大器、梯度放大器(X、Y、Z方向)、电源、水冷机、计算机(包括主机和显示器)、前置放大器;整个梯度线圈被固定在磁体上;样品移动平台被固定在磁体上,核磁共振射频线圈被固定样品移动平台上;被测试样品置于核磁共振射频线圈中;水冷机连接到梯度线圈的水冷系统;梯度放大器(X、Y、Z方向)与梯度线圈相连接;计算机与核磁共振谱仪相连接;射频功率放大器与核磁共振射频线圈相连接;核磁共振射频线圈与前置放大器相连接;前置放大器与核磁共振谱仪相连接;

[0040] 核磁共振纯相位编码测试系统还可包括电子机柜和操作台,电子机柜用于放置并固定电子部件,提供各电子部件的良好接地;操作台用于放置计算机(包括主机和显示器),提供核磁共振操作人员的工作环境;

[0041] 其中:

[0042] 磁体用于为测试系统提供B0静磁场,磁体为U型结构,均匀区为长300mm*直径250mm的圆柱体,均匀度 $\leq 30\text{ppm}$ 。

[0043] 梯度线圈用于为测试系统提供X\Y\Z三个方向的梯度场,通过150安培电流时,产生梯度场 $\geq 130\text{mT/m}$,梯度线圈内配备有水冷系统;

[0044] 核磁共振射频线圈用于产生磁共振B1射频场,激发并接收样品产生的磁共振信号。

[0045] 光纤核磁共振谱仪用于控制整个系统中脉冲序列的所需射频发射、梯度发射、数据采集滤波、增益放大、正交解调、K空间排布。

[0046] 射频功率放大器用于提供脉冲序列所需的射频能量,工作频率范围1MHz-350MHz,最大功率350W。

[0047] X、Y、Z方向的梯度放大器用于提供脉冲序列所需的梯度电流,最大输出电流150A,最快爬升时间60us,具有过流过压自动保护功能。

[0048] 电源为X、Y、Z梯度放大器提供150V直流电压。

[0049] 水冷机连接到梯度线圈的水冷系统,通过制冷机带走循环水的温度。

[0050] 计算机主机安装有脉冲序列编辑程序、脉冲序列测试程序、数据采集分析显示程序。

[0051] 计算机显示器用于显示测试信息。

[0052] 前置放大器用于对射频线圈中样品产生的核磁共振信号进行放大,前置放大器增益 $\geq 30\text{dB}$,工作频率范围1MHz-60MHz,噪声系数 $\leq 0.1\text{dB}$ 。

[0053] 与现有技术相比,本发明的有益效果是:

[0054] 针对现有技术无法满足致密岩心磁共振信号采集的问题,本发明方法通过实现具有较短回波时间的纯相位编码脉冲序列以及相关硬件配置,解决了致密岩心毛管压力曲线核磁共振测试的问题。

[0055] 对比现有技术,本发明方法被测样品中流体的核磁共振信号呈现为质子密度加权,磁共振信号不被纵向时间T1和TR影响,并且不受磁化率引起的磁场变化、化学位移和顺

磁杂质引起的磁共振信号的影响,为致密岩心核磁共振流体饱和度分布测试较为理想的方法。

[0056] 本发明方法依据氧化氘 (D_2O) 不包含 1H 同位素,无法产生核磁共振信号,且物性与普通水相同等特点,使用氧化氘 (D_2O) 配置模拟地层水溶液,致密岩心内仅有油相产生核磁共振信号,从而实现被测样品中油、水核磁共振共信号的区分,计算获得油、水的流体饱和度分布,进而得到致密岩心内油水毛管压力曲线,更适合油藏开发现场使用。致密岩心。

附图说明

[0057] 图1是现有常规0.3T核磁共振成像设备的一维成像脉冲序列;

[0058] 其中,1—90度激发软脉冲;2—180度激发软脉冲;3—回波时间;4—回波数据采集;5—读出梯度补偿梯度;6—读出梯度。

[0059] 图2是本发明实施例所提供的核磁共振岩心分析测试系统的结构框图;

[0060] 其中,7—永磁磁体;8—梯度线圈;9—样品移动平台;10—待测试岩心;11—核磁共振射频线圈;12—核磁共振电子机柜;13—核磁共振谱仪;14—核磁共振射频功率放大器;15—核磁共振X方向梯度功率放大器;16—核磁共振Y方向梯度功率放大器;17—核磁共振Z方向梯度功率放大器;18—梯度放大器供电电源;19—水冷机;20—计算机;21—操作台;22—前置放大器。

[0061] 图3是本发明实施例中使用的纯相位编码脉冲序列 α -SPI时序图;

[0062] 其中,23—小角度激发硬脉冲;24—数据采集;25—正向梯度阶梯变化;26—重复时间 (Time of Repeation);27—相位编码时间 (Time of Phase Coding);28—正向编码梯度变大值;29—弛豫时间 (Relaxation Delay)。

[0063] 图4是本发明实施例中使用的离心杯结构图;

[0064] 其中,30—密封盖;31—岩心样品;32—穿孔聚四氟乙烯衬套;33—多孔挡板。

[0065] 图5是本发明实施例中使用的离心机的工作转盘示意图;

[0066] 其中,34—离心杯;35—转轴。

[0067] 图6是本发明实施例中致密岩心饱和水状态的纯相位编码投影测试结果。

[0068] 图7是本发明实施例中致密岩心离心后的水相换算投影结果。

[0069] 图8是本发明实施例中致密岩心离心后的氧化氘换算投影结果。

[0070] 图9是本发明实施例中致密岩心油水毛管压力曲线计算结果。

具体实施方式

[0071] 下面结合附图,通过实施例进一步描述本发明,但不以任何方式限制本发明的范围。

[0072] 本发明提供一种致密岩心核磁共振纯相位编码测试油水毛管压力曲线的方法和系统,通过设计较短回波时间的纯相位编码脉冲序列采集致密岩心内的快衰减信号,结合离心设备获得致密岩心中的油水两相共存时流体饱和度分布,再根据离心力公式,计算得到油水毛管压力曲线。

[0073] 为了在梯度编码作用下能够采集到致密岩心产生的快弛豫信号,本发明硬件上包括一台具备一维以上强梯度磁场和脉冲序列开发平台功能的核磁共振设备及一台离心机,

该核磁共振设备的梯度磁场最高梯度强度不低于300mT/m,约为常规医用磁共振成像系统的10倍,梯度最短爬升时间为10 μ s。核磁共振设备包括极环、极板、磁钢、磁体、磁共振谱仪。

[0074] 具体实施时,致密岩心核磁共振纯相位编码测试油水毛管压力曲线的系统结构如图2所示,包括的部件具体为:

[0075] A.7是核磁共振纯相位编码测试系统的磁体部分,为测试系统提供B₀静磁场,磁体为U型结构,均匀区为长300mm*直径250mm的圆柱体,均匀度 $\leq$ 30ppm。

[0076] B.8是核磁共振纯相位编码测试系统的梯度线圈部分,为测试系统提供X\Y\Z三个方向的梯度场,通过150安培电流时,产生梯度场 $\geq$ 130mT/m,梯度线圈内配备有水冷系统,整个梯度线圈被固定在磁体上。

[0077] C.9是核磁共振纯相位编码测试系统的样品移动平台部分,样品移动平台被固定在磁体上,核磁共振射频线圈被固定样品移动平台上。

[0078] D.10是核磁共振纯相位编码测试系统的被测试样品,被放置于核磁共振射频线圈中。

[0079] E.11是核磁共振纯相位编码测试系统的核磁共振射频线圈,用于产生磁共振B₁射频场,激发并接收样品产生的磁共振信号。

[0080] F.12是核磁共振纯相位编码测试系统的电子机柜,用于放置并固定电子部件,提供各电子部件的良好接地。

[0081] G.13是核磁共振纯相位编码测试系统的光纤核磁共振谱仪,用于控制整个系统中脉冲序列的所需射频发射、梯度发射、数据采集滤波、增益放大、正交解调、K空间排布。

[0082] H.14是核磁共振纯相位编码测试系统的射频功率放大器,用于提供脉冲序列所需的射频能量,工作频率范围1MHz-350MHz,最大功率350W。

[0083] I.15、16、17对应为核磁共振纯相位编码测试系统X、Y、Z方向的梯度放大器,用于提供脉冲序列所需的梯度电流,最大输出电流150A,最快爬升时间60 μ s,具有过流过压自动保护功能。

[0084] J.18是核磁共振纯相位编码测试系统的电源部分,为X、Y、Z梯度放大器提供150V直流电压。

[0085] K.19是核磁共振纯相位编码测试系统的水冷机,连接到梯度线圈的水冷系统,通过制冷机带走循环水的温度。

[0086] L.20是核磁共振纯相位编码测试系统的计算机主机部分,主机安装有脉冲序列编辑程序、脉冲序列测试程序、数据采集分析显示程序。

[0087] M.21是核磁共振纯相位编码测试系统的计算机显示器,用于显示计算机程序。

[0088] N.22是核磁共振纯相位编码测试系统的前置放大器部分,用于射频线圈中样品产生的核磁共振信号,前置放大器增益 $\geq$ 30dB,工作频率范围1MHz-60MHz,噪声系数 $\leq$ 0.1dB。

[0089] 致密岩心核磁共振纯相位编码测试中,快速突变的相位编码梯度场会在核磁共振设备的极环、极板、磁钢等金属部件中产生涡流,涡流会使实际的梯度磁场的前后沿变缓和幅度减小,同时它又迟后于梯度场的消失,会造成了磁共振信号的相位编码线性度混淆、变形,出现错误的测试结果,本发明使用的核磁共振设备的磁体具备防涡流层,且核磁共振谱仪共有12组数学波形预增强参数对梯度快速切换时进行涡流补偿,确保在梯度快速编码期间无涡流影响样品产生的核磁共振信。

[0090] 高分辨率短TE的脉冲序列运行期间会产生大量的热量,对梯度线圈的稳定性要求极高,为保证样品测试过程中温度不变,且磁体不会因为梯度线圈发热产生频率漂移带来的测量误差,本发明摒弃常规梯度线圈,进行重新规划设计。在梯度线圈内布局铜质水管进行水冷降温,针对线圈不同部位的发热量不同进行布管,对线圈磁场影响小,散热效率高。图2为核磁共振设备示意图,梯度线圈-8为水冷梯度线圈,被固定在磁体极环上,并通过滤波器与梯度功率放大器输出端相连,同时水冷梯度线圈内铜质水管与外部水冷循环系统相连接,带走样品测量过程中的梯度电流产生的热量。

[0091] 现有常规核磁共振设备多使用射频线缆进行信号的传输,致密岩心核磁共振信号弱,射频线缆及射频转接头会引起一定的核磁共振信号的损耗,且容易引入外界干扰,本发明使用的核磁共振谱仪13为光纤传输模式,致密岩心样品产生的核磁共振信号经过前置放大器22放大后由电信号转换为光信号,经光纤传输至核磁共振谱仪中。

[0092] 本方法通过填充一维K空间,并对一维K空间进行傅里叶变换获得岩心不同位置流体饱和度的分布,本方法核磁共振脉冲序列 α -SPI时序见图3,RF-23为射频硬脉冲,TR (Time of Repeation)-26为重复时间, t_p -27为梯度编码时间,0为k空间中心编码梯度值,Gmax-28为k空间边缘编码梯度值,RD (Relaxation Delay)-29为弛豫到稳态等待的时间。每个TR内完成一次被测样品的磁共振信号激发、一步相位编码和一次磁共振信号采集。

[0093] 全部相位编码过程由k空间中心变化至正最大编码梯度,等待RD后编码梯度再次由k空间中心变化至负最大编码梯度,完成由双半K空间组成组成1维K空间填充的过程;编码过程中为缩短激发时间我们采用硬脉冲设计,同时为了充分提高横向磁化矢量的使用效率以及消除纵向弛豫T1的加权影响,本方法激励脉冲采用小角度硬脉冲,多次小角度硬脉冲激励和信号采集均是在阶梯相位编码的情况下进行,最短回波时间TE由以下公式1给出:

$$[0094] \quad TE = \frac{T_{RF}}{2} + t_p \quad \text{公式 1}$$

[0095] 其中, T_{RF} 为小角度硬脉冲激励的时间, t_p 为相位编码时间 (Time of Phase Coding)。使得在较短TE时间内 (约100微秒) 可以采集到岩心内流体产生的核磁共振信号。

[0096] 全部相位编码过程中磁共振信号衰减见公式2:

$$[0097] \quad S = M_0 \exp\left(-\frac{t_p}{T_2^*}\right) \sin(\alpha) \quad \text{公式 2}$$

[0098] 其中, M_0 为平衡态时的磁化矢量, t_p 为相位编码时间, T_2^* 为有效横向弛豫时间, α 为翻转角度, M_0 与流体量成正比,整个测试过程中呈现为质子密度加权,磁共振信号不再受到纵向时间T1和TR的影响,同时纯相位编码技术在很大程度上不受磁化率引起的磁场变化、化学位移和顺磁杂质引起的磁共振信号的影响,为致密岩心核磁共振流体饱和度分布测试较为理想的方法。

[0099] 在水、油毛管压力曲线的测量中,需要对油水核磁共振信号进行识别。由于氧化氘(D_2O)具有不包含 1H 同位素,无法产生核磁共振信号,且物性与普通水相同等特点。本方法使用氧化氘(D_2O)配置的模拟地层水作为被测试致密岩心的润湿相,同时使用模拟油作为被测试致密岩心的非润湿相,致密岩心中油水两相共存时,仅有油相产生核磁共振信号,通过油水不同的含烃因子将离心后岩心中油相流体饱和度分布换算成水相流体饱和度分布,进而得到致密岩心内油水毛管压力曲线,更适合油藏开发现场使用。

[0100] 实施例选用了一块致密砂岩,岩心孔隙度为8.3%,渗透率为0.91毫达西,岩心为直径26mm*45mm圆柱体形状。

[0101] 1.使用有机溶剂对岩心进行洗油处理,使岩心荧光级别小于3级。

[0102] 2.将岩心在116℃条件下烘干至恒重,并放入干燥器中冷却至室温,将岩心样品置于真空条件下保持。

[0103] 3.根据SY/T5336-2006规定测试岩心氦气孔隙度为8.3%,渗透率为0.91毫达西,岩心直径为26mm,长度为45mm。

[0104] 4.使用蒸馏水(H_2O)配置模拟地层水1,使用蒸馏水(D_2O)配置模拟地层水2,然后将模拟地层水1和2按照SY/T5336规定的方法抽真空保持。

[0105] 5.配置模拟油,然后按照SY/T5336规定的方法抽真空保持。

[0106] 6.开启核磁共振岩心分析设备,将孔隙度为25%、长度为50mm的标准样放入核磁共振射频线圈中,加载FID脉冲序列,使用默认参数搜索当前磁体氢核对应的共振频率为15.00788665MHz,改变射频脉冲的能量获得被测样品的90度翻转角以及180度翻转角,P90为6us,P180为12us。加载 α -SPI序列,设置Z方向梯度纯相位编码的测试范围为70mm,平均次数NS=4,接收增益控制RG=30,获得高SNR的一维双半K空间结果,对一维双半K空间结果进行傅里叶变换,得到标准样的核磁共振信号分布。根据结果不断调整岩心样品轴向位置,直至岩心大致处于设备视野中心,标记岩芯标准样中心位置。

[0107] 7.按照SY/T5336规定的方法,对步骤3的岩芯样品进行加压饱和模拟地层水1处理,最终含水饱和度为98.5%,称重。

[0108] 8.岩芯饱和完成后,使用不产生磁共振信号的四氟乙烯密封带包裹岩芯样品,以减少样品内部液体的蒸发,将包裹好的放入试管并垂直置入磁共振射频线圈内,参考步骤6标记的位置。

[0109] 9.对样品进行质子(1H)一维中心扫描的 α -SPI核磁共振测量,加载 α -SPI序列,设置Z方向梯度纯相位编码的测试范围为60mm,设置平均次数NS=64,接收增益控制RG=100,获得高SNR的一维双半K空间结果,对一维双半K空间结果进行傅里叶变换,并根据岩心样品的总水量进行了归一化处理。得到了 H_2O 在样品长度上的分布,见图6。

[0110] 10.重复步骤2、步骤7,用模拟地层水2代替模拟地层水1。

[0111] 11.步骤10饱和完成后取出岩芯,去除四氟乙烯密封带,在岩心样品的圆柱表面覆盖一热缩聚四氟乙烯管,以保持岩心内的纵向流体流动。采用穿孔聚四氟乙烯衬套支撑岩心,置入充满模拟油的离心杯中,如图4(1是密封盖,2是岩心样品,3是穿孔聚四氟乙烯衬套,4是多孔挡板)。对4个相同的离心杯进行配重处理后置入离心机的工作转盘中,如图5(1为离心杯,2为转轴)。

[0112] 12.设置离心机温度为5℃,设置离心机转速为20000RPM,离心时间2小时,进行油驱水状态的离心操作。

[0113] 13.将油驱水状态的岩心样品从离心杯中取出,称重,重复步骤8、9,并进行了归一化处理,得到了油相在样品长度上的分布,见图7。

[0114] 14.根据油水含烃因子将致密岩心油驱水状态油相轴向核磁共振信号分布换算为对应水核磁共振信号沿岩心长度的分布,由初始饱和模拟地层水1磁共振信号与换算的水信号作差,得到油驱水后 D_2O 的核磁共振信号分布。

[0115] 15. 根据离心后 D_2O 核磁共振信号分布除以初始饱和状态的 H_2O 核磁共振信号分布, 得到离心后岩心样品中水相饱和度(S_w)沿岩心长度的分布, 见图8。

[0116] 16. 根据公式 $P_c(r) = 0.5 * \Delta\rho * \omega^2 * (r_2^2 - r^2)$ 分别计算岩心上不同位置的油水毛细管压力值。

[0117] 17. 以不同位置含水饱和度为横轴, 对应水的毛管压力为纵轴, 绘制致密岩心内油水毛管压力曲线, 见图9。

[0118] 需要注意的是, 公布实施例的目的在于帮助进一步理解本发明, 但是本领域的技术人员可以理解: 在不脱离本发明及所附权利要求的精神和范围内, 各种替换和修改都是可能的。因此, 本发明不应局限于实施例所公开的内容, 本发明要求保护的范围以权利要求书界定的范围为准。

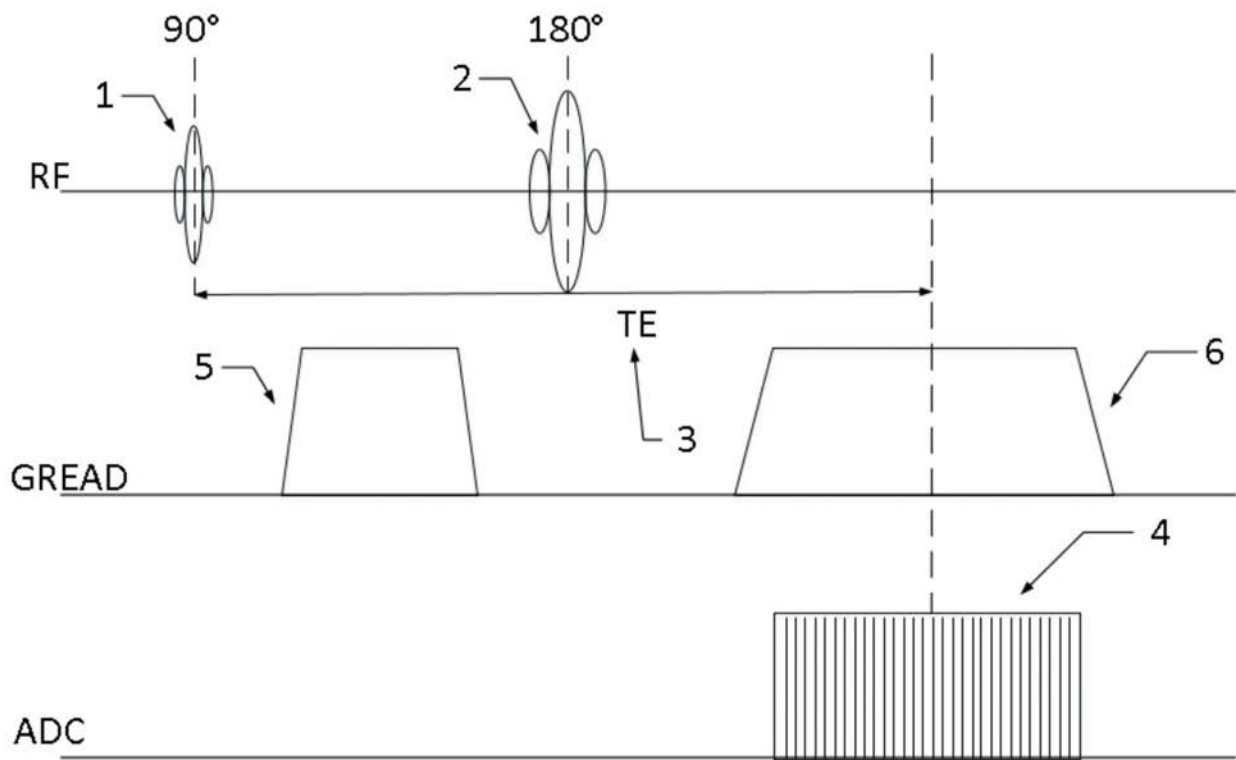


图1

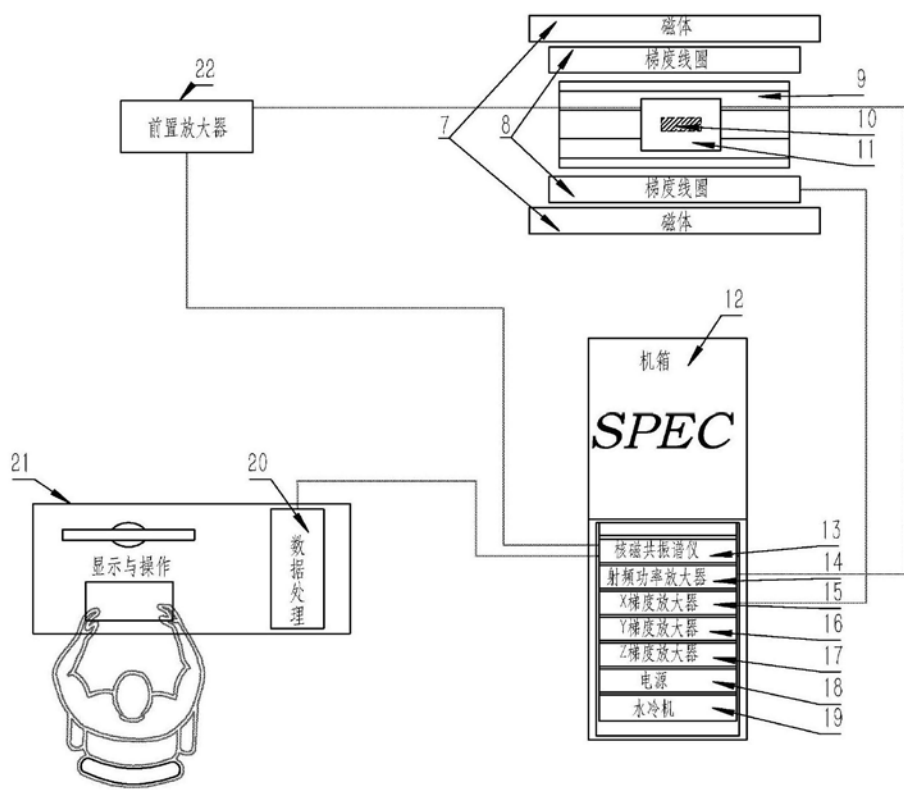


图2

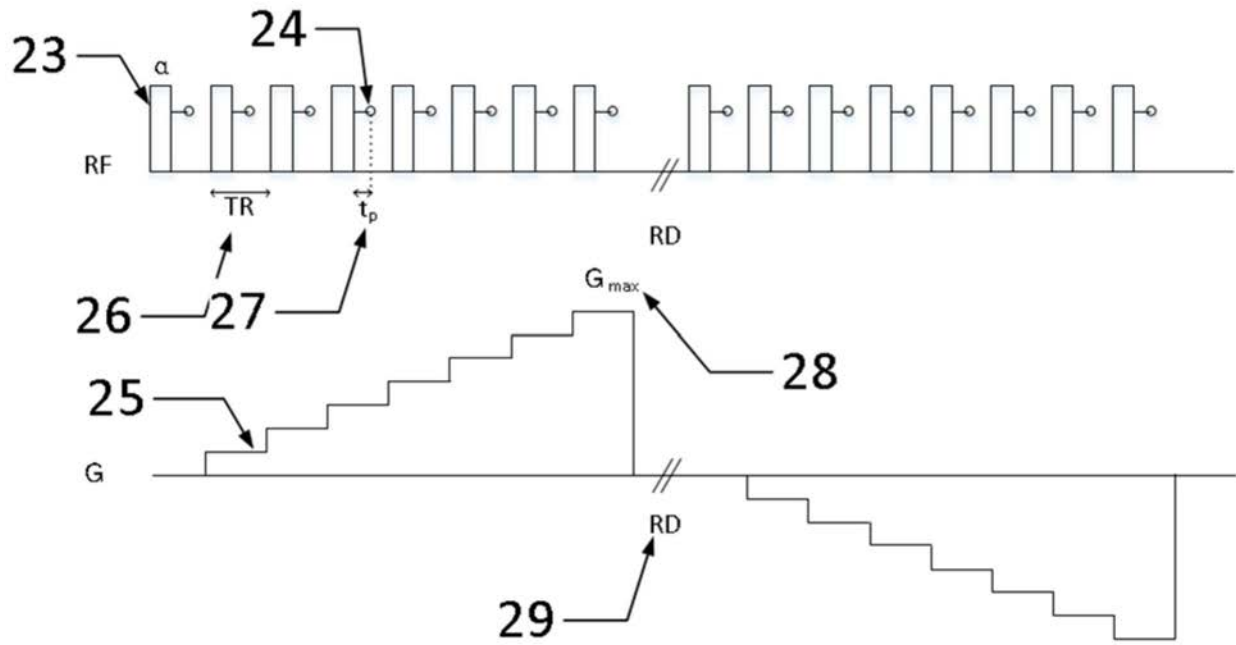


图3

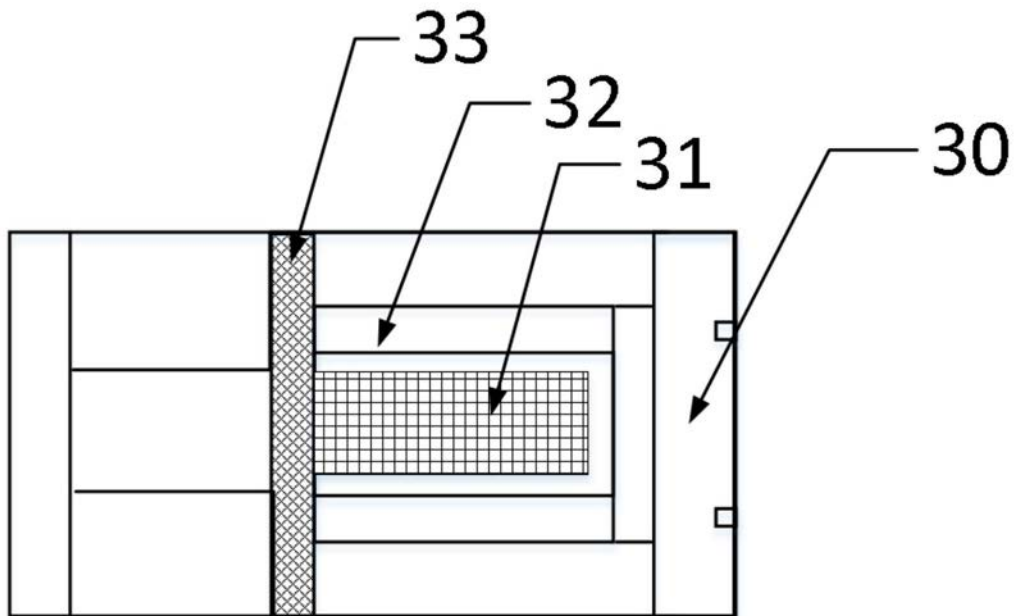


图4

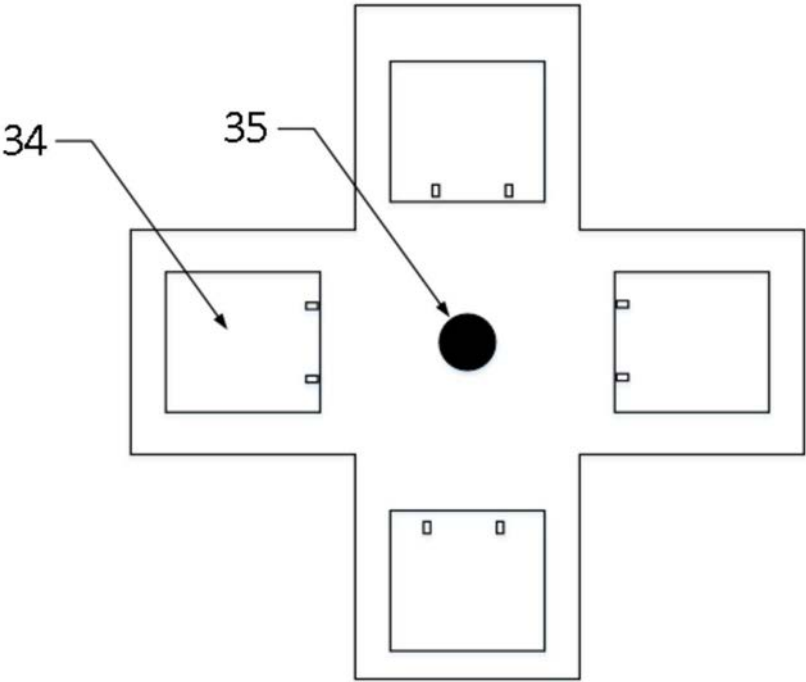


图5

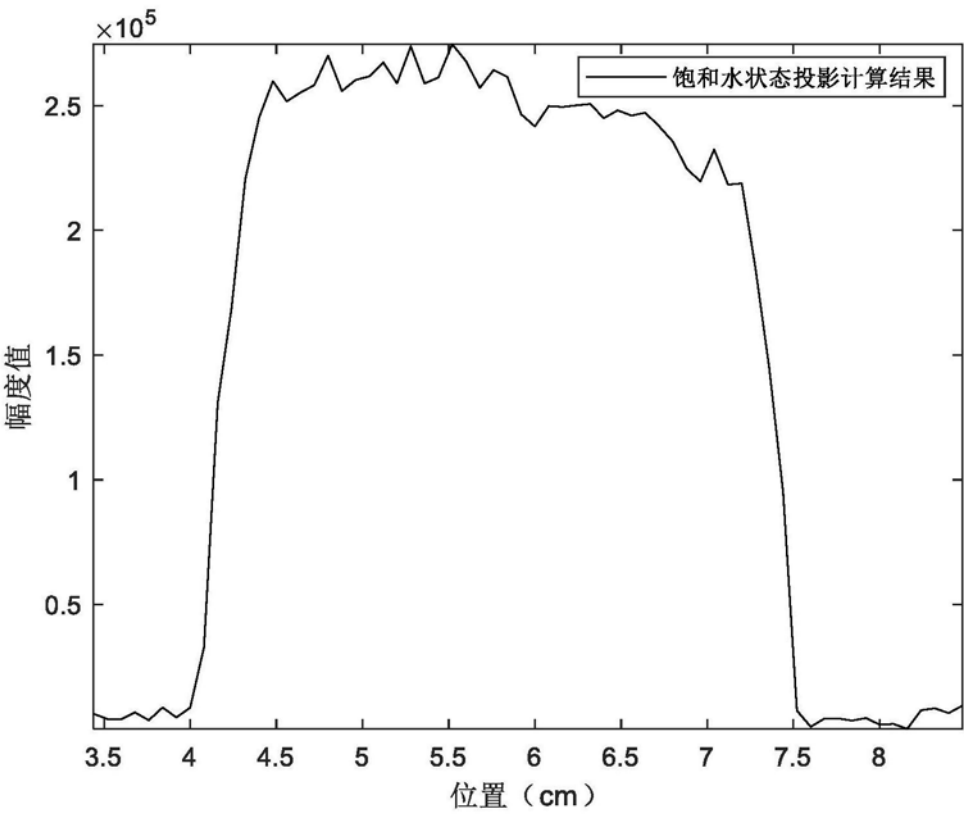


图6

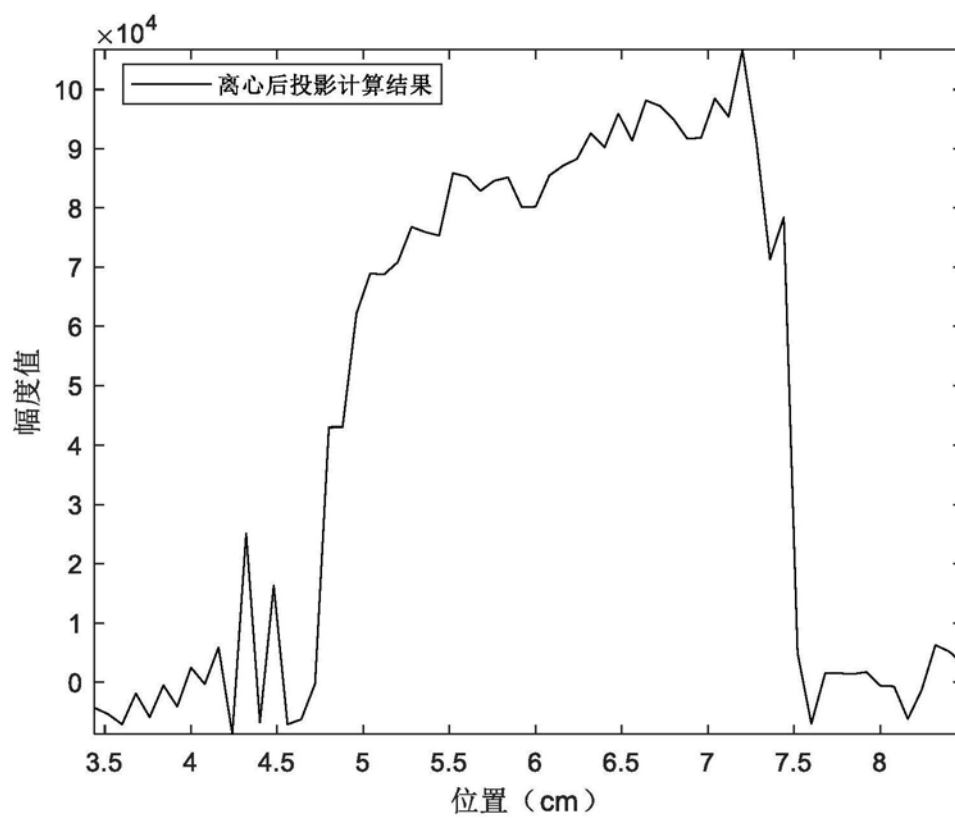


图7

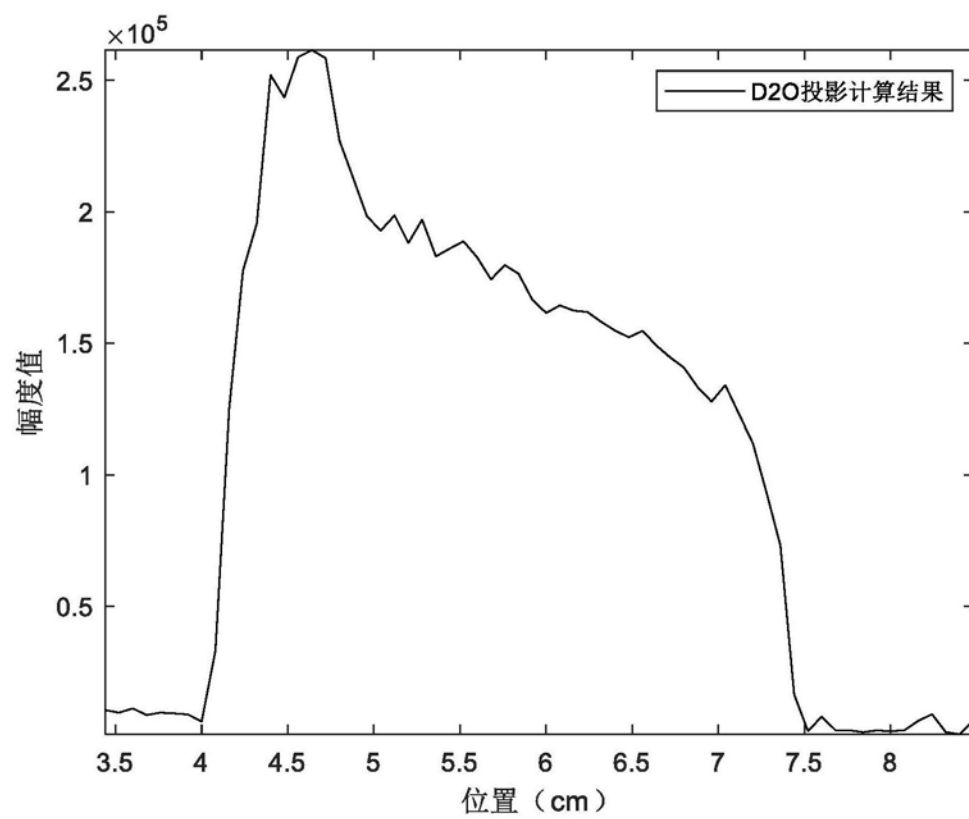


图8

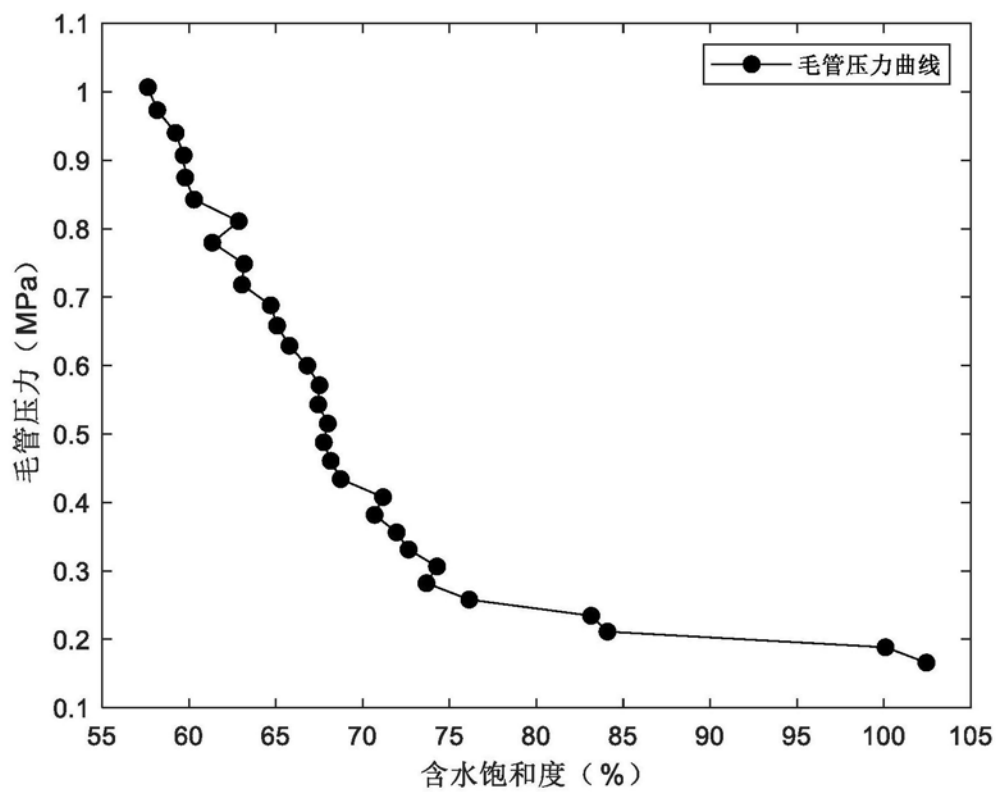


图9