



(21) 申请号 202411063351.7

(22) 申请日 2024.08.05

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 118564238 A

(43) 申请公布日 2024.08.30

(73) 专利权人 天津大港油田圣达科技有限公司  
地址 300000 天津市滨海新区大港油田幸福路866号

(72) 发明人 王哲 邬传威

(74) 专利代理机构 北京慧加伦知识产权代理有限公司 16035  
专利代理师 齐记(51) Int. Cl.  
E21B 47/11 (2012.01)

(56) 对比文件

CN 112360441 A, 2021.02.12

CN 113027429 A, 2021.06.25

审查员 赵刚

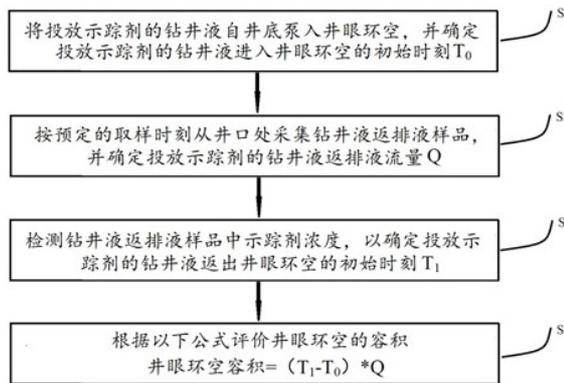
权利要求书2页 说明书13页 附图2页

## (54) 发明名称

一种用于评价井眼环空容积的方法

## (57) 摘要

本公开的实施例提供一种用于评价井眼环空容积的方法,该方法包括:将投放示踪剂的钻井液自井底泵入井眼环空,并确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻;按预定的取样时刻从井口处采集钻井液返排液样品,并确定投放示踪剂的钻井液返排液流量;检测钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻;评价井眼环空的容积:井眼环空容积= $(T_1-T_0)*Q$ , $T_1$ 表示投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻; $T_0$ 表示投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻; $Q$ 表示投放示踪剂的钻井液返排液流量。本方法能够科学且简便地评价出井眼环空容积,为精准设计固井用水泥浆量提供准确依据。



1. 一种用于评价井眼环空容积的方法,其特征在于,所述方法包括:

将投放示踪剂的钻井液自井底泵入井眼环空,并确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻;

按预定的取样时刻从井口处采集钻井液返排液样品,并确定投放示踪剂的钻井液返排液流量;

检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻;

根据以下公式评价所述井眼环空的容积:

$$\text{井眼环空容积} = (T_1 - T_0) * Q \quad (1);$$

$T_1$ 表示投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻;

$T_0$ 表示投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻;

$Q$ 表示投放示踪剂的钻井液返排液流量;

所述检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻的步骤包括:将采集到的所有钻井液返排液样品进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度的示踪剂对应的取样时刻确定为投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻;

所述确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻的方式为:以初始开启用于泵入投放示踪剂的钻井液的钻井液泵的时刻 $T_{\text{初始开启钻井液泵}}$ ,加上投放示踪剂的钻井液从钻杆顶部运行至底部的时间,确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻 $T_0$ :

$$T_0 = T_{\text{初始开启钻井液泵}} + V_{\text{钻杆内}} / Q_{\text{钻井液}} \quad (2);$$

$$V_{\text{钻杆内}} = \pi * [(R_{\text{钻杆}} - d_{\text{钻杆}}) * 2]^2 / 4 * L_{\text{钻杆}} \quad (3);$$

$V_{\text{钻杆内}}$ 表示钻杆内容积, $Q_{\text{钻井液}}$ 表示钻井液流量, $R_{\text{钻杆}}$ 表示钻杆外径, $d_{\text{钻杆}}$ 表示钻杆壁厚, $L_{\text{钻杆}}$ 表示钻杆实际进尺。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻的步骤包括:将采集到的所有钻井液返排液样品进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻确定为投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻。

3. 根据权利要求2所述的方法,其特征在于,确定所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻的方法包括以下步骤:根据示踪剂浓度与取样时刻的对应关系绘制钻井液返排液示踪剂浓度时间曲线图,获得反映所述投放示踪剂的钻井液返排液稳定返排期间的示踪剂浓度峰平台,以所述示踪剂浓度峰平台起点对应的取样时刻为所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻。

4. 根据权利要求1-3任一项所述的方法,其特征在于,对所述钻井液返排液样品进行消解处理后再检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度。

5. 根据权利要求4所述的方法,其特征在于,所述消解为微波消解,所述微波消解的程

序包括:将所述钻井液返排液样品与消解液于消解罐中混合后置于微波消解仪中,将所述微波消解仪升温至消解温度以对所述样品进行微波消解。

6.根据权利要求5所述的方法,其特征在于,所述消解液为浓硝酸与浓盐酸的混合物;所述浓硝酸与浓盐酸的体积比为(1~6):1;

和/或,所述消解液的使用量为每0.5g所述钻井液返排液样品使用的消解液体积至少为9ml;

和/或,所述升温的方式为梯度升温;

和/或,所述消解温度不大于190°C;

和/或,还包括对微波消解后的样品进行赶酸的步骤。

7.根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述示踪剂选自过渡金属元素的氧化物、过渡金属元素的氢氧化物、过渡金属元素的盐、过渡金属元素的络合物中任一种。

8.根据权利要求7所述的方法,其特征在于,所述示踪剂选自稀土元素的氧化物、稀土元素的氢氧化物、稀土元素的盐、稀土元素的络合物中任一种;

所述稀土元素选自镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铽、镱、铟、铊、铋、镱、镱、镱、镱中任一种。

## 一种用于评价井眼环空容积的方法

### 技术领域

[0001] 本公开的实施例涉及石油、天然气开采工程领域,具体地,涉及一种用于评价井眼环空容积的方法。

### 背景技术

[0002] 在油气勘探以及开采过程中,一口井固井质量的好坏在很大程度上取决于固井水泥浆量的测算。固井的过程是水泥浆驱替套管外部环形空间(即井眼环空)钻井液,并在水泥浆充满井眼环空后,凝固形成水泥墙的过程,从而实现对井壁的封固。在这个过程中,要达到好的固井效果,必须保证水泥浆具有好的顶替效率。如果水泥浆量不足,导致顶替不彻底,在水泥浆凝固的过程中,受残余钻井液影响,会在封固井段形成钻井液槽,影响固井质量,容易出现窜槽的现象;如果水泥浆量过量较多,会造成水泥浪费,增加固井成本。

[0003] 在固井施工之前,通常需要进行井径测量,并结合套管尺寸计算井眼环空容积,用以估算固井用水泥浆量。传统的井径测量方法常用的是利用机械式多臂井径仪测井径,这种仪器用电机驱动机械测量臂下到测量井段,并伸开测量臂并使之紧贴井壁进行测量。由于这种多臂井径仪在下井前测量臂收拢,导致在大斜度井、长水平段水平井等特殊井中使用,存在仪器下入难度大、在井下复杂工作条件下易出现遇阻和遇卡现象。若不进行井径测量,直接以井身结构设计数据中的钻头直径估算井径,由于钻头在实际钻井过程中以震动态向下旋进,使得实际井径往往与钻头直径存在较大误差,且实际井径存在不规则性,导致利用井身结构设计数据估算的井眼环空容积与实际井眼容积存在较大误差,以此估算的水泥浆量也存在较大误差。

### 发明内容

[0004] 为了解决以上技术问题,本文中描述的实施例提供了一种用于评价井眼环空容积的方法。

[0005] 本发明的技术方案:

[0006] 根据本公开的第一方面,提供了一种用于评价井眼环空容积的方法。所述方法包括:

[0007] 将投放示踪剂的钻井液自井底泵入井眼环空,并确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻;

[0008] 按预定的取样时刻从井口处采集钻井液返排液样品,并确定投放示踪剂的钻井液返排液流量;

[0009] 检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻;

[0010] 根据以下公式评价所述井眼环空的容积:

[0011] 井眼环空容积 =  $(T_1 - T_0) * Q$  (1)

[0012]  $T_1$ 表示投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻;

[0013]  $T_0$ 表示投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻；

[0014]  $Q$ 表示投放示踪剂的钻井液返排液流量。

[0015] 在本公开的一些实施例中,所述检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻的步骤包括:将采集到的所有钻井液返排液样品进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度的示踪剂对应的取样时刻确定为投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻。

[0016] 示踪剂本底浓度是指钻井液原液/钻井泥浆原液(即未投放示踪剂的钻井液)中所天然含有的示踪剂的浓度。

[0017] 在本公开的一些实施例中,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度5倍以上的示踪剂对应的取样时刻确定为投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻。

[0018] 在本公开的一些实施例中,所述检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻的步骤包括:将采集到的所有钻井液返排液样品进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻确定为投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻。

[0019] 在本公开的一些实施例中,确定所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻的方法包括以下步骤:根据示踪剂浓度与取样时刻的对应关系绘制钻井液返排液示踪剂浓度时间曲线图,获得反映所述投放示踪剂的钻井液返排液稳定返排期间的示踪剂浓度峰平台,以所述示踪剂浓度峰平台起点对应的取样时刻为所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻。

[0020] 在本公开的一些实施例中,实际钻井液返排液的示踪剂浓度峰平台的每个示踪剂浓度与投放示踪剂的钻井液中的示踪剂初始浓度偏差较大且存在一定波动。这主要是由于井眼环空内残存的部分泥浆、地层岩土等混入钻井液返排液、地层水浸入钻井液返排液、以及样品处理测量过程引入的偏差等引起的。

[0021] 在本公开的一些实施例中,所述示踪剂浓度峰平台的确定方式为:浓度峰平台的每个示踪剂浓度与浓度峰平台的平均示踪剂浓度的相对偏差在20%以内,即示踪剂浓度峰平台起点之前的若干个测量点的示踪剂浓度与示踪剂浓度峰平台的平均示踪剂浓度的相对偏差超过20%,自起点开始的若干个测量点的示踪剂浓度与平均示踪剂浓度的相对偏差

位于20%以内的所有点组成示踪剂浓度峰平台。即  $\text{Value} = \left| \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \right| \leq 20\%$ ;

$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ , 其中,  $x_i$  表示浓度峰平台上的某个示踪剂浓度值,  $\bar{x}$  表示浓度峰平台的平均

示踪剂浓度,  $n$  表示浓度峰平台上所含有的点的总数。

[0022] 在本公开的一些实施例中,所述投放示踪剂的钻井液中的示踪剂初始浓度大于检

测仪器的检测限,并且大于钻井液原液中所含有的示踪剂本底浓度的20倍以上,以排除示踪剂本底浓度的干扰,提高 $T_1$ 的准确性。

[0023] 在本公开的一些实施例中,在固井前循环钻井液过程中将所述投放示踪剂的钻井液自井底泵入井眼环空。

[0024] 在本公开的一些实施例中,所述确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻的方式为:以初始开启用于泵入投放示踪剂的钻井液的钻井液泵的时刻 $T_{\text{初始开启钻井液泵}}$ ,加上投放示踪剂的钻井液从钻杆顶部运行至底部的时间,确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻 $T_0$ :

$$[0025] \quad T_0 = T_{\text{初始开启钻井液泵}} + V_{\text{钻杆内}} / Q_{\text{钻井液}} \quad (2);$$

$$[0026] \quad V_{\text{钻杆内}} = \pi * [(R_{\text{钻杆}} - d_{\text{钻杆}})^2 / 4] * L_{\text{钻杆}} \quad (3);$$

[0027] 其中, $V_{\text{钻杆内}}$ 表示钻杆内容积,其可通过公式(3)计算得出; $Q_{\text{钻井液}}$ 表示投放示踪剂的钻井液流量,其可通过泵入管线上设置的流量计读出; $R_{\text{钻杆}}$ 表示钻杆外径, $d_{\text{钻杆}}$ 表示钻杆壁厚, $L_{\text{钻杆}}$ 表示钻杆实际进尺,这些均为已知数据。

[0028] 在本公开的一些实施例中,以初始开启用于泵入投放示踪剂的钻井液的钻井液泵的时刻为0时刻为基准,分别确定 $T_0$ 、 $T_1$ 和 $(T_1 - T_0)$ ,以简化计算过程。

[0029] 在本公开的一些实施例中,投放示踪剂的钻进液返排液流量可通过排出管线上设置的流量计读出。

[0030] 在本公开的一些实施例中,所述按预定的取样时刻从井口处采集钻井液返排液样品的步骤包括:预测投放示踪剂的钻井液从井口处返出的起始时刻;从预测的返出的起始时刻开始按照0.2~1min的取样间隔确定取样时刻;取样前,对取样瓶编号,并将取样瓶编号与取样时刻对应;采集钻井液返排液样品。

[0031] 在本公开的一些实施例中,根据投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻 $T_0$ 、其从井眼环空底部运行至顶部的时间,预测投放示踪剂的钻井液从井口处返出的起始时刻 $T_{\text{返出的起始时刻}}$ :

$$[0032] \quad T_{\text{返出的起始时刻}} = T_0 + V_{\text{井眼环空}} / Q_{\text{钻井液}} \quad (4);$$

[0033] 对于不存在变径段的井眼,井眼环空容积的估算公式为:

$$[0034] \quad V_{\text{井眼环空}} = \pi / 4 * (R_{\text{井眼}}^2 - R_{\text{套管}}^2) * L \quad (5);$$

[0035] 对于存在两个变径段的井眼,井眼环空容积的估算公式为:

$$[0036] \quad V_{\text{井眼环空}} = \pi / 4 * (R_{\text{1井眼}}^2 - R_{\text{1套管}}^2) * L_1 + \pi / 4 * (R_{\text{2井眼}}^2 - R_{\text{2套管}}^2) * L_2 \quad (6);$$

[0037] 其中, $T_0$ 表示投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻,其通过公式(2)计算得出; $V_{\text{井眼环空}}$ 表示通过井身结构设计数据和套管尺寸估算的井眼环空容积; $Q_{\text{钻井液}}$ 表示投放示踪剂的钻井液流量,其可通过泵入管线上设置的流量计读出; $R_{\text{井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井眼外径, $R_{\text{套管}}$ 表示套管外径, $L$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井深, $R_{\text{1井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井段1的井眼外径, $R_{\text{2井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井段2的井眼外径, $R_{\text{1套管}}$ 表示井段1的套管外径, $R_{\text{2套管}}$ 表示井段2的套管外径, $L_1$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井段1的井深, $L_2$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井段2的井深,这些数据均为已知数据。

[0038] 公式(6)仅以含有两个变径段的井眼为例进行说明,同理,若存在多个变径段,则以多个变径段的井眼环空容积之和为总的井眼环空容积。

[0039] 在本公开的一些实施例中,为了避免错过实际返出的起始时刻,按照预测的返出

的起始时刻提前5~10min开始取样。

[0040] 在本公开的一些实施例中,根据预测的返出的起始时刻、投放示踪剂的钻井液总泵入量在井眼环空内的运行时间,预测投放示踪剂的钻井液从井口处返出的结束时刻。

[0041] 在本公开的一些实施例中,直到预测的返出的结束时刻后10~20min结束取样,以确保取样时刻涵盖实际返出的结束时刻。

[0042] 在本公开的一些实施例中,对所述钻井液返排液样品进行消解处理后再检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度。

[0043] 在本公开的一些实施例中,所述消解为微波消解,所述微波消解的程序包括:将所述钻井液返排液样品与消解液于消解罐中混合后置于微波消解仪中,将所述微波消解仪升温至消解温度以对所述样品进行微波消解。

[0044] 在本公开的一些实施例中,所述消解液为浓硝酸与浓盐酸的混合物;所述浓硝酸与浓盐酸的体积比为(1~6):1。

[0045] 所述浓盐酸指浓度大于30%(质量分数,g/100g)的盐酸;所述浓硝酸指浓度大于60%(质量分数,g/100g)的硝酸。

[0046] 在本公开的一些实施例中,所述消解液的使用量为每0.5g所述钻井液返排液样品使用的消解液体积至少为9ml。

[0047] 在本公开的一些实施例中,所述升温的方式为梯度升温。

[0048] 在本公开的一些实施例中,所述消解温度不大于190℃。

[0049] 在本公开的一些实施例中,还包括对微波消解后的样品进行赶酸的步骤。

[0050] 在本公开的一些实施例中,所述示踪剂选自过渡金属元素的氧化物、过渡金属元素的氢氧化物、过渡金属元素的盐、过渡金属元素的络合物中任一种。

[0051] 优选的,所述示踪剂选自稀土元素的氧化物、稀土元素的氢氧化物、稀土元素的盐、稀土元素的络合物中任一种;

[0052] 所述稀土元素选自镧、铈、镨、钕、钐、铈、钆、铽、镱、铟、铊、铋、镱、镱、镱中任一种。

[0053] 本发明的有益技术效果:

[0054] 本公开的实施例提供的一种用于评价井眼环空容积的方法,通过钻井液示踪的方式,实现了在实际井眼中循环的钻井液在井眼环空内实际运行时间( $T_1 - T_0$ ,min)的准确追踪,再结合钻井液返排液流量( $Q, m^3/min$ ),从而准确的评价出实际井眼环空容积。由于该方法在实际运行过程中进行测量,因而能够规避实际井眼直径的不规则性以及实际井径与钻头直径的偏差所引起的误差,使得井眼环空容积评价更加准确;该方法操作简便,无需测井仪下井作业,不存在卡井等风险。因此,该方法能够科学且简便地评价出井眼环空容积,为精准设计固井用水泥浆量提供准确依据,解决测井仪在大斜度井、长水平段水平井等特殊井下入难度大的问题,以及使用井身结构设计数据估算的水泥浆量存在较大误差的问题。另外,该方法用时短,且与钻井固井施工作业同步,不干扰正常的钻井施工作业,无需延后钻井固井作业的工期;且该方法成本低。

[0055] 该方法的科学之处还在于如何确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻,可以钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度的示踪剂对应的取样时刻确定,此时的钻井液返排液样品中通常含有部分未投放示踪剂的钻井液,使得投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻提前,以此评价的环空容积比实际值略小。或以所述钻井

液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻确定,此时投放示踪剂的钻井液返排液处于集中返排期的初期,钻井液返排液样品反映的是投放示踪剂的钻井液,其不含有未投放示踪剂的钻井液,以此评价的环空容积比实际值略大。二者评价出的环空容积与实际环空容积均非常接近,因而均能确保水泥浆返至设计深度。优选为后者,不仅能够确保水泥浆返至设计深度,而且可将钻井液与水泥浆掺混界面排出环空,顶替更加彻底,固井质量更优。

[0056] 该方法先对钻井液返排液样品进行微波消解,通过控制消解液成分、比例、用量、消解温度、升温方式等,保证能够将钻井液返排液样品完全消解成澄清液体,使得样品中示踪剂的测量浓度更真实地体现示踪剂的真实浓度,钻井液返排液中的示踪剂的回采率可以达到98.9%以上。

### 附图说明

[0057] 为了更清楚地说明本公开的实施例的技术方案,下面将对实施例的附图进行简要说明,应当知道,以下描述的附图仅仅涉及本公开的一些实施例,而非对本公开的限制,其中:

[0058] 图1是本发明实施例提供的一种用于评价井眼环空容积的方法的流程示意图;

[0059] 图2是本发明实施例的钻井液返排液示踪剂浓度时间曲线图;

[0060] 图3是本发明应用例的钻井液返排液示踪剂浓度时间曲线图。

### 具体实施方式

[0061] 为了使本公开的实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图,对本公开的实施例的技术方案进行清楚、完整的描述。显然,所描述的实施例是本公开的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于所描述的本公开的实施例,本领域技术人员在无需创造性劳动的前提下所获得的所有其它实施例,也都属于本公开保护的范围。

[0062] 实施例和应用例中使用的试剂如下:

[0063] 超纯水,电阻率 $\geq 18\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ ;浓硝酸: $\rho(\text{HNO}_3)=1.42\text{g/ml}$ (硝酸的质量分数为71.6%),优级纯;浓盐酸: $\rho(\text{HCl})=1.19\text{g/ml}$ (盐酸的质量分数为40%),优级纯;外标标准溶液:稀土元素Yb标准溶液, $\rho=10\mu\text{g/ml}$ ;内标标准溶液(用于考察仪器测量的稳定性):Rh标准溶液( $\rho=100\mu\text{g/ml}$ ),Re标准溶液( $\rho=100\mu\text{g/ml}$ );质谱仪调谐液: $\rho=10\mu\text{g/L}$ 。

[0064] 实施例和应用例中使用的仪器和设备如下:

[0065] 电感耦合等离子体质谱仪;分析天平:精度为0.0001g;微波消解仪;石墨消解仪;过滤装置;超纯水仪。

[0066] 实施例1

[0067] 本实施例的一种用于评价井眼环空容积的方法,适用于普通井,也适用于大斜度井、长水平段水平井等特殊井,图1是本发明实施例提供的一种用于评价井眼环空容积的方法的流程示意图,如图1所示,所述方法包括以下步骤:

[0068] S1、将投放示踪剂的钻井液自井底泵入井眼环空,并确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻 $T_0$ 。

[0069] 在具体的实施方式中,确定投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻 $T_0$ 的方

式为:以初始开启用于泵入投放示踪剂的钻井液的钻井液泵的时刻为0时刻,加上投放示踪剂的钻井液从钻杆顶部运行至底部的时间确定:

$$[0070] \quad T_0 = V_{\text{钻杆内}} / Q_{\text{钻井液}} \quad (2);$$

$$[0071] \quad V_{\text{钻杆内}} = \pi * [(R_{\text{钻杆}} - d_{\text{钻杆}})^2 / 4] * L_{\text{钻杆}} \quad (3);$$

[0072] 其中,  $V_{\text{钻杆内}}$  表示钻杆内容积;  $Q_{\text{钻井液}}$  表示投放示踪剂的钻井液流量,其可通过泵入管线上设置的流量计读出;  $R_{\text{钻杆}}$  表示钻杆外径,  $d_{\text{钻杆}}$  表示钻杆壁厚,  $L_{\text{钻杆}}$  表示钻杆实际进尺,这些均为已知数据。

[0073] 在具体的实施方式中,在固井前循环钻井液过程中将投放示踪剂的钻井液自井底泵入井眼环空。

[0074] 示例性的,在钻井液罐仓灌口处,缓慢往  $10\text{m}^3$  左右钻井液原液中投放示踪剂溶液 20L,用配浆泵循环4个小时,同时罐内搅拌浆叶一直不停搅拌,确保示踪剂与钻井液混合均匀,得到投放示踪剂的钻井液;在固井前循环钻井液过程中将投放示踪剂的钻井液自井底泵入井眼环空。

[0075] 在具体的实施方式中,在泵入投放示踪剂的钻井液前,多次采集投放示踪剂的钻井液样品,以通过检测得知其中示踪剂初始浓度。

[0076] 在具体的实施方式中,投放示踪剂的钻井液中的示踪剂初始浓度大于检测仪器的检测限,并且大于钻井液原液中所含有的示踪剂本底浓度的20倍以上,以排除示踪剂本底浓度的干扰,提高  $T_1$  的准确性。

[0077] 在具体的实施方式中,作为示踪剂的物质是过渡金属元素的氧化物、过渡金属元素的氢氧化物、过渡金属元素的盐、过渡金属元素的络合物中任一种。进一步的,作为示踪剂的物质是稀土元素的氧化物、稀土元素的氢氧化物、稀土元素的盐、稀土元素的络合物中任一种。稀土元素可以是镧、铈、镨、钕、钐、铕、钆、铈、铉、铊、镱、镱、镱、镱中任一种。

[0078] S2、按预定的取样时刻从井口处采集钻井液返排液样品,并确定投放示踪剂的钻井液返排液流量  $Q$ 。

[0079] 在具体的实施方式中,投放示踪剂的钻进液返排液流量  $Q$  可通过排出管线上设置的流量计读出。

[0080] 在具体的实施方式中,按预定的取样时刻从井口处采集钻井液返排液样品的步骤包括:根据投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻  $T_0$ 、其从井眼环空底部运行至顶部的时间预测投放示踪剂的钻井液从井口处返出的起始时刻;从预测的返出的起始时刻开始按照  $0.2 \sim 1\text{min}$  的取样间隔确定取样时刻;取样前,对取样瓶编号,并将取样瓶的编号与取样时刻对应;采集钻井液返排液样品。

[0081] 示例性,投放示踪剂的钻井液从井口处返出的起始时刻  $T_{\text{返出的起始时刻}}$  可根据以下公式预测:

$$[0082] \quad T_{\text{返出的起始时刻}} = T_0 + V_{\text{井眼环空}} / Q_{\text{钻井液}} \quad (4);$$

[0083] 对于不存在变径段的井眼,井眼环空容积的估算公式为:

$$[0084] \quad V_{\text{井眼环空}} = \pi / 4 * (R_{\text{井眼}}^2 - R_{\text{套管}}^2) * L \quad (5);$$

[0085] 对于存在两个变径段的井眼,井眼环空容积的估算公式为:

$$[0086] \quad V_{\text{井眼环空}} = \pi / 4 * (R_{1\text{井眼}}^2 - R_{1\text{套管}}^2) * L_1 + \pi / 4 * (R_{2\text{井眼}}^2 - R_{2\text{套管}}^2) * L_2 \quad (6);$$

[0087] 其中,  $T_0$  表示投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻,其通过公式(2)计算

得出; $V_{\text{井眼环空}}$ 表示通过井身结构设计数据和套管尺寸估算的井眼环空容积, $Q_{\text{钻井液}}$ 表示投放示踪剂的钻井液流量; $R_{\text{井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井眼外径, $R_{\text{套管}}$ 表示套管外径, $L$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井深, $R_{1\text{井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井段1的井眼外径, $R_{2\text{井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井段2的井眼外径, $R_{1\text{套管}}$ 表示井段1的套管外径, $R_{2\text{套管}}$ 表示井段2的套管外径, $L_1$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井段1的井深, $L_2$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井段2的井深,这些均为已知数据。

[0088] 公式(6)仅以含有两个变径段的井眼为例进行说明,同理,若存在多个变径段,则以多个变径段的井眼环空容积之和为总的井眼环空容积。

[0089] 在具体的实施方式中,为了避免错过实际返出的起始时刻,按照预测的返出的起始时刻提前5~10min开始取样。

[0090] 在具体的实施方式中,根据预测的返出的起始时刻、投放示踪剂的钻井液泵入量在井眼环空底部运行至顶部的时间,预测投放示踪剂的钻井液从井口处返出的结束时刻。

[0091] 示例性的,投放示踪剂的钻井液从井口处返出的结束时刻 $T_{\text{返出的结束时刻}}$ 可通过以下公式预测:

$$[0092] \quad T_{\text{返出的结束时刻}} = T_{\text{返出的起始时刻}} + V_{\text{钻井液}} / Q_{\text{钻井液}} \quad (7);$$

[0093] 其中, $T_{\text{返出的起始时刻}}$ 通过公式(4)计算得出, $V_{\text{钻井液}}$ 表示投放示踪剂的钻井液泵入量, $Q_{\text{钻井液}}$ 表示投放示踪剂的钻井液流量。

[0094] 在具体的实施方式中,直到预测的返出的结束时刻后10~20min结束取样,以确保取样时刻涵盖实际返出的结束时刻。

[0095] 示例性的,按照预测的返出的起始时刻提前10min开始采集钻井液返排液样品,直到预测的返出的结束时刻后10min结束采样,采样前10min期间取样间隔为0.5min,采样中间10min期间内取样间隔为0.33min,最后10min期间内取样间隔为0.5min。

[0096] 在具体的实施方式中,可以根据钻井液返排液的流速和实际工况调整取样时间间隔;另外,取样过程中实时对取样工具进行多次润洗。

[0097] S3、检测钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻 $T_1$ 。

[0098] 在具体的实施方式中,检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻的具体过程包括:将采集到的所有钻井液返排液样品进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度的示踪剂对应的取样时刻 $T_1'$ 确定为投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻 $T_1$ 。

[0099] 在具体的实施方式中,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度5倍以上的示踪剂对应的取样时刻确定为投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻。

[0100] 示例性的,通过电感耦合等离子体质谱仪检测所有钻井液返排液样品中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,如表1和图2所示,从初始开启用于泵入投放示踪剂的钻井液的钻井液泵(0时刻)的10.00min后开始取样;取样时刻10.00min~19.00min期间,钻井液返排液样品中示踪剂浓度为1.085 $\mu\text{g}/\text{L}$ ~2.697 $\mu\text{g}/\text{L}$ 之间,反映的是钻井液原液中所含有的示踪剂本底浓度;19.50min时,钻井液返排液样品中示踪剂浓度为124.358 $\mu\text{g}/\text{L}$ ,超过

示踪剂本底浓度5倍以上,因此,投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻 $T_1$ 为19.50min。

[0101] 表1. 示踪剂浓度与取样时刻对应表

取样时刻/min	10.00	10.50	11.00	11.50	12.00	12.50	13.00	13.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	2.431	2.508	1.106	1.335	1.085	1.692	2.004	1.292
取样时刻/min	14.00	14.50	15.00	15.50	16.00	16.50	17.00	17.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	1.275	1.797	1.640	1.157	2.574	2.502	2.358	1.735
取样时刻/min	18.00	18.50	19.00	19.50	20.00	20.33	20.67	21.00
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	2.359	1.953	2.697	124.358	352.03	354.309	348.407	353.528
取样时刻/min	21.33	21.67	22.00	22.33	22.67	23.00	23.33	23.67
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	346.669	351.167	352.375	349.682	351.619	353.254	349.598	352.297
取样时刻/min	24.00	24.33	24.67	25.00	25.33	25.67	26.00	26.33
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	350.113	352.877	350.44	348.041	351.000	349.000	352.000	350.000
取样时刻/min	26.67	27.00	27.33	27.67	28.00	28.33	28.67	29.00
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	351.000	348.000	349.000	350.000	351.000	352.000	350.000	349.000
取样时刻/min	29.33	29.67	30.00	30.50	31.00	31.50	32.00	32.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	348.000	351.000	350.000	201.178	1.982	1.934	2.283	1.540
取样时刻/min	33.00	33.50	34.00	34.50	35.00	35.50	36.00	36.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	1.410	1.290	1.940	1.477	1.149	1.179	1.655	1.976
取样时刻/min	37.00	37.50	38.00	38.50	39.00	39.50	40.00	
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	1.821	1.838	1.564	1.098	1.231	1.890	1.885	

[0103] 注:投放示踪剂的钻井液中的示踪剂初始浓度为359.921 $\mu\text{g/L}$ 。

[0104] 在具体的实施方式中,对所述钻井液返排液样品进行微波消解处理后再进行质谱检测。其中微波消解处理参考标准为《HJ832-2021土壤和沉积物金属元素总量的消解微波消解法》;质谱检测参考标准为《HJ700-2014水质65种元素的测定电感耦合等离子体质谱仪》。

[0105] 在具体的实施方式中,对所述钻井液返排液样品进行消解处理后再检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度。所述消解为微波消解,所述微波消解的程序包括:将所述钻井液返排液样品与消解液于消解罐中混合后置于微波消解仪中,将所述微波消解仪升温至消解温度以对所述样品进行微波消解。

[0106] 在具体的实施方式中,所述消解液为浓硝酸与浓盐酸的混合物;所述浓硝酸与浓盐酸的体积比为(1~6):1;所述浓盐酸指浓度大于30%(质量分数,g/100g)的盐酸;所述浓硝酸指浓度大于60%(质量分数,g/100g)的硝酸;所述消解液的使用量为每0.5g所述钻井液返排液样品使用的消解液体积至少为9ml;所述升温的方式为梯度升温;所述消解温度不大于190 $^{\circ}\text{C}$ 。

[0107] 示例性的,所述微波消解的程序包括:称取0.5g钻井液返排液样品,置于消解罐

中,依次加入6ml浓硝酸、3ml浓盐酸,使样品和消解液充分混匀后,将消解罐装入消解罐支架后放入微波消解仪的炉腔中,按照表2的梯度升温程序将所述微波消解仪依次升温至各消解温度并保持对应的时间,以对所述样品进行微波消解,程序结束后冷却。待罐内温度降至室温后在防酸通风橱中取出消解罐,缓缓泄压放气,打开消解罐盖。

[0108] 表2微波消解梯度升温程序

程序	消解温度	保持时间
1	室温→90℃	5min
2	90℃→120℃	5min
3	120℃→190℃	60min

[0110] 在具体的实施方式中,还包括对微波消解后的样品进行赶酸的步骤。

[0111] 示例性,通过石墨消解进行赶酸,具体的,将消解罐移至石墨炉消解仪中,将加热温度设置为120℃,在沸腾状态下进行赶酸30min。

[0112] 在具体的实施方式中,还包括对赶酸后的样品进行定容和过滤的步骤。

[0113] 示例性的,取出消解罐,将罐中的残液转移至50ml离心管中,用浓度2%(质量分数,g/100g)的硝酸溶液冲洗消解罐内壁,洗涤液一并转移至离心管内,然后用浓度2%(质量分数,g/100g)的硝酸溶液定容50g,摇匀,静置60min后过滤离心管内液体得到滤液,取出10ml滤液转移至测试管内待测。

[0114] 在具体的实施方式中,通过电感耦合等离子体质谱仪检测所述钻井液返排液样品以及钻井液样品中示踪剂浓度的测试步骤包括:点燃等离子体后,仪器预热30min,然后使用质谱仪调谐液对仪器的灵敏度、氧化物和双电荷进行调谐;使用过渡金属元素标准溶液配制一系列待测元素标准溶液,用电感耦合等离子体质谱仪测定待测元素标准溶液,绘制待测元素标准曲线;最后对每个样品中作为示踪剂的待测元素浓度进行测定,测定前,用浓度2%(质量分数,g/100g)的硝酸溶液冲洗系统直到信号降至最低,待分析信号稳定后开始测定样品。

[0115] S4、根据以下公式评价井眼环空的容积:

$$[0116] \text{井眼环空容积} = (T_1 - T_0) * Q \quad (1)$$

[0117] 其中, $T_1$ 表示投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻,min,其在步骤S3中确定,为所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度的示踪剂对应的取样时刻 $T_1'$ ;  $T_0$ 表示投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻,min,其在步骤S1中确定;  $Q$ 表示投放示踪剂的钻井液返排液流量, $m^3/\text{min}$ ,其在步骤S2中确定。

[0118] 实施例2

[0119] 本实施例的一种用于评价井眼环空容积的方法,与实施例1不同在于S3步骤中确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻 $T_1$ 的方式,以及对应的S4步骤公式中使用的 $T_1$ ,下面将分别说明不同之处。

[0120] 在具体的实施方式中,检测所述钻井液返排液样品中示踪剂浓度,以确定投放示

踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻的具体过程包括:将采集到的所有钻井液返排液样品进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻 $T_1'$ 确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻 $T_1$ 。

[0121] 在具体的实施方式中,确定所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻的方法包括以下步骤:根据示踪剂浓度与取样时刻的对应关系绘制钻井液返排液示踪剂浓度时间曲线图,获得反映所述投放示踪剂的钻井液返排液稳定返排期间的示踪剂浓度峰平台,以所述示踪剂浓度峰平台起点对应的取样时刻为所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻 $T_1'$ 。

[0122] 在具体的实施方式中,所述示踪剂浓度峰平台的确定方式为:浓度峰平台的每个示踪剂浓度与浓度峰平台的平均示踪剂浓度的相对偏差在20%以内,即示踪剂浓度峰平台起点之前的若干个测量点的示踪剂浓度与示踪剂浓度峰平台的平均示踪剂浓度的相对偏差超过20%,自起点开始的若干个测量点的示踪剂浓度与平均示踪剂浓度的相对偏差位于20%以内的所有点组成示踪剂浓度峰平台。

[0123] 示例性的,通过电感耦合等离子体质谱仪检测所有钻井液返排液样品中示踪剂浓度,并将示踪剂浓度与取样时刻对应,如表1和图2所示,从初始开启用于泵入投放示踪剂的钻井液的钻井液泵(0时刻)的10.00min后开始取样;取样时刻10.00min~19.00min期间,钻井液返排液样品中示踪剂浓度为 $1.085\mu\text{g/L}$ ~ $2.697\mu\text{g/L}$ 之间,反映的是钻井液原液中所含有的示踪剂本底浓度;19.50min时,钻井液返排液样品中示踪剂浓度为 $124.358\mu\text{g/L}$ ,超过示踪剂本底浓度5倍以上,与示踪剂浓度峰平台的平均示踪剂浓度 $350.562\mu\text{g/L}$ 的相对偏差超过20%;在取样时刻20.00min~30.00min期间,示踪剂浓度位于 $346.669\mu\text{g/L}$ ~ $354.309\mu\text{g/L}$ 之间(与示踪剂初始浓度接近,这是忽略了各种实际影响的理想化状态),与示踪剂浓度峰平台的平均示踪剂浓度 $350.562\mu\text{g/L}$ 的相对偏差均位于20%以内,形成示踪剂浓度峰平台;在30.50min,钻井液返排液样品中示踪剂浓度为 $201.178\mu\text{g/L}$ ,与示踪剂浓度峰平台的平均示踪剂浓度 $350.562\mu\text{g/L}$ 的相对偏差超过20%;在取样时刻31.00~40.00min期间,钻井液返排液样品中示踪剂浓度为 $1.098\mu\text{g/L}$ ~ $2.283\mu\text{g/L}$ 之间,回归示踪剂本底浓度。因此,以所述示踪剂浓度峰平台起点对应的取样时刻确定的投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻 $T_1$ 为20.00min。

[0124] 在具体的实施方式中,评价井眼环空的容积采用的公式为:

$$[0125] \quad \text{井眼环空容积} = (T_1 - T_0) * Q \quad (1)$$

[0126] 其中, $T_1$ 表示投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻,min,其在步骤S3中确定,为所述钻井液返排液样品初始检测到超过示踪剂本底浓度且浓度稳定的示踪剂对应的取样时刻 $T_1'$ ,即所述示踪剂浓度峰平台起点对应的取样时刻;

[0127]  $T_0$ 表示投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻,min,其在步骤S1中确定;

[0128]  $Q$ 表示投放示踪剂的钻井液返排液流量, $\text{m}^3/\text{min}$ ,其在步骤S2中确定。

[0129] 对比例1

[0130] 现有技术的一种估算井眼环空容积的方法,通过井身结构设计数据和套管尺寸进行估算,采用的公式如下:

[0131] 对于不存在变径段的井眼,井眼环空容积的估算公式为:

$$V_{\text{井眼环空}} = \pi/4 * (R_{\text{井眼}}^2 - R_{\text{套管}}^2) * L \quad (5);$$

[0133] 对于存在两个变径段的井眼,井眼环空容积的估算公式为:

$$V_{\text{井眼环空}} = \pi/4 * (R_{1\text{井眼}}^2 - R_{1\text{套管}}^2) * L_1 + \pi/4 * (R_{2\text{井眼}}^2 - R_{2\text{套管}}^2) * L_2 \quad (6);$$

[0135] 其中, $R_{\text{井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井眼外径, $R_{\text{套管}}$ 表示套管外径, $L$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井深, $R_{1\text{井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井段1的井眼外径, $R_{2\text{井眼}}$ 表示利用钻头直径估算的井段2的井眼外径, $R_{1\text{套管}}$ 表示井段1的套管外径, $R_{2\text{套管}}$ 表示井段2的套管外径, $L_1$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井段1的井深, $L_2$ 表示利用设计钻杆进尺估算的井段2的井深,这些均为已知数据。

[0136] 公式(6)仅以含有两个变径段的井眼为例进行说明,同理,若存在多个变径段,则以多个变径段的井眼环空容积之和为总的井眼环空容积。

[0137] 应用例1

[0138] 将实施例1的方法应用于评价实际采油井井眼环空容积。

[0139] 该采油井为大斜度井,采用传统的测井仪存在仪器下入难度大、在井下复杂工作条件下易出现遇阻和遇卡现象。

[0140] 该采油井的井身结构设计数据:一开设计  $\phi 311.1\text{mm}$  钻头钻至500m;二开  $\phi 215.9\text{mm}$  钻头钻至1722m。

[0141] 套管选型:一开设计  $\phi 244.5\text{mm} \times 500\text{m}$  套管;二开设计  $\phi 139.7\text{mm} \times 1718\text{m}$  套管。

[0142] 钻杆外径127mm,壁厚7.52mm,钻杆实际进尺1743m,投放示踪剂的钻井液流量为  $2\text{m}^3/\text{min}$ ,投放示踪剂的钻井液返排液流量为  $2\text{m}^3/\text{min}$ 。

[0143] 以初始开启用于泵入投放示踪剂的钻井液的钻井液泵的时刻为0时刻,则投放示踪剂的钻井液进入井眼环空的初始时刻  $T_0 = \pi * [(127 - 7.52 * 2)^2 / 4] * 1743 / 1000000 = 17.16\text{m}^3 / 2 \text{m}^3/\text{min} = 8.58\text{min}$ ;

[0144] 通过井身结构设计数据和套管尺寸估算的环空容积  $V_{\text{井眼环空}}$  为  $40.54\text{m}^3$ ;

$$V_{\text{井眼环空}} = \pi/4 * (311.1^2 - 244.5^2) * 500 / 1000000 + \pi/4 * (215.9^2 - 139.7^2) * (1722 - 500) / 1000000 = 40.54\text{m}^3;$$

[0146] 预测投放示踪剂的钻井液从井口处返出的起始时刻  $T_{\text{返出的起始时刻}} = T_0 + V_{\text{井眼环空}} / Q_{\text{钻井液}} = 8.58 + 40.54 / 2 = 28.85\text{min} \approx 29\text{min}$ ;

[0147] 预测投放示踪剂的钻井液从井口处返出的结束时刻  $T_{\text{返出的结束时刻}} = T_{\text{返出的起始时刻}} + V_{\text{钻井液}} / Q_{\text{钻井液}} = 29 + 10.02 / 2 = 34.01\text{min}$ 。

[0148] 该方法包括以下步骤:

[0149] 将含有镱的络合物的钻井液  $10.02\text{m}^3$  (示踪剂初始浓度  $C_{(\text{Yb})} = 359.921\mu\text{g}/\text{L}$ ) 自井底泵入井眼环空,同时确定含有镱的络合物的钻井液泵入井眼环空的初始时刻  $T_0$  为8.58min:

[0150] 按照预测的返出起始时刻提前7~8min(即22min时)从井口处开始采集钻井液返排液样品,直到预测的返出结束时刻后18min(即52min时)结束采样;

[0151] 对采集到的所有钻井液返排液样品进行微波消解处理后进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,将钻井液返排液样品中示踪剂浓度与取样时刻对应,如表3和图3所示,以所述钻井液返排液样品中初始检测到超过示踪剂本底浓度5倍以上的示踪剂对应的取样时刻36.00min确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻  $T_1$ ;

[0152] 评价该井井眼环空的容积为 $54.84\text{m}^3$ ：

[0153] 井眼环空容积 $= (T_1 - T_0) * Q = (36.00 - 8.58) * 2 = 54.84\text{m}^3$ 。

[0154] 表3. 实际油井的示踪剂浓度与取样时刻对应表

取样时刻/min	22.00	22.50	23.00	23.50	24.00	24.50	25.00	25.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	8.431	7.508	9.106	4.335	8.085	9.692	9.004	9.292
取样时刻/min	26.00	26.50	27.00	27.50	28.00	28.50	29.00	29.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	8.275	8.797	5.640	8.157	4.574	7.502	2.358	8.735
取样时刻/min	30.00	30.50	31.00	31.50	32.00	32.33	32.67	33.00
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	4.359	8.953	5.697	9.358	2.661	7.477	8.921	7.679
取样时刻/min	33.33	33.67	34.00	34.33	34.67	35.00	35.33	35.67
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	5.372	7.252	2.617	8.439	4.782	8.537	6.455	9.694
取样时刻/min	36.00	36.33	36.67	37.00	37.33	37.67	38.00	38.33
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	171.042	85.562	257.03	304.309	275.407	343.528	316.669	261.167
取样时刻/min	38.67	39.00	39.33	39.67	40.00	40.33	40.67	41.00
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	322.375	309.682	361.619	253.254	316.598	335.297	390.113	342.877
取样时刻/min	41.33	41.67	42.00	42.50	43.00	43.50	44.00	44.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	280.440	36.041	161.946	12.178	113.982	44.934	99.283	11.540
取样时刻/min	45.00	45.50	46.00	46.50	47.00	47.50	48.00	48.50
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	8.410	5.290	6.940	8.477	7.149	9.179	6.655	9.976
取样时刻/min	49.00	49.50	50.00	50.50	51.00	51.50	52.00	
示踪剂浓度/ $\mu\text{g/L}$	6.821	8.838	6.564	7.098	6.231	6.890	5.885	

[0155] 注：钻井液原液中所含有的示踪剂本底浓度为 $2.358\mu\text{g/L} \sim 9.694\mu\text{g/L}$  (对应的取样时刻为 $22.00\text{min} \sim 35.67\text{min}$ )；投放示踪剂的钻井液中的示踪剂初始浓度 $C_{(Yb)} = 359.921\mu\text{g/L}$ ；示踪剂浓度峰平台 (对应的取样时刻为 $36.67\text{min} \sim 41.33\text{min}$ ) 的平均示踪剂浓度为 $311.568\mu\text{g/L}$ 。

[0156] 应用例2

[0157] 采用实施例2的方法评价应用例1的实际采油井井眼环空容积,该方法包括以下步骤：

[0158] 将含有镉的络合物的钻井液 $10.02\text{m}^3$  ( $C_{(Yb)} = 359.921\mu\text{g/L}$ ) 自井底泵入井眼环空,同时确定含有镉的络合物的钻井液泵入井眼环空的初始时刻 $T_0$ 为 $8.58\text{min}$ ：

[0159] 按照预测的返出起始时刻提前 $7 \sim 8\text{min}$  (即 $22.00\text{min}$ 时) 从井口处开始采集钻井液返排液样品,直到预测的返出结束时刻后 $18\text{min}$  (即 $52.00\text{min}$ 时) 结束采样；

[0160] 对采集到的所有钻井液返排液样品进行微波消解处理后进行检测,分别获得其中示踪剂浓度,将钻井液返排液样品中示踪剂浓度与取样时刻对应,绘制钻井液返排液示踪剂浓度时间曲线图,如表3和图3所示,获得反映所述投放示踪剂的钻井液返排液稳定返排期间的示踪剂浓度峰平台 (对应的取样时刻为 $36.67\text{min} \sim 41.33\text{min}$ ) ,以示踪剂浓度峰平台

起点对应的取样时刻36.67min确定投放示踪剂的钻井液返出井眼环空的初始时刻 $T_1$ ;

[0162] 评价该井井眼环空的容积为 $56.18\text{m}^3$ ;

[0163] 井眼环空容积 $= (T_1 - T_0) * Q = (36.67 - 8.58) * 2 = 56.18\text{m}^3$ 。

[0164] 应用例3

[0165] 采用对比例1的方法估算应用例1的实际采油井井眼环空容积,结果如下:

[0166]  $V_{\text{井眼环空}} = \pi/4 * (R_{\text{1井眼}}^2 - R_{\text{1套管}}^2) * L_1 + \pi/4 * (R_{\text{2井眼}}^2 - R_{\text{2套管}}^2) * L_2$

[0167]  $= \pi/4 * (311.1^2 - 244.5^2) * 500/1000000 + \pi/4 * (215.9^2 - 139.7^2) * (1722 - 500) / 1000000$

[0168]  $= 40.54\text{m}^3$ 。

[0169] 固井效果:

[0170] 分别采用应用例1-3评估的井眼环空容积用于估算固井用水泥浆量,并进行实际固井。

[0171] 结果表明:采用应用例1-2估算的水泥浆可返至设计深度,保证固井质量,而采用应用例3估算的水泥浆量由于明显不足而无法返至设计深度。同时由于应用例2估算的井眼环空容积略大于实际井眼环空容积,可将钻井液与水泥浆掺混界面排出环空,因而可进一步提高固井质量。

[0172] 除非上下文中另外明确地指出,否则在本文和所附权利要求中所使用的词语的单数形式包括复数,反之亦然。因而,当提及单数时,通常包括相应术语的复数。相似地,措辞“包含”和“包括”将解释为包含在内而不是独占性地。同样地,术语“包括”和“或”应当解释为包括在内的,除非本文中明确禁止这样的解释。在本文中使用术语“示例”之处,特别是当其位于一组术语之后时,所述“示例”仅仅是示例性的和阐述性的,且不应当被认为是独占性的或广泛性的。

[0173] 适应性的进一步的方面和范围从本文中提供的描述变得明显。应当理解,本申请的各个方面可以单独或者与一个或多个其它方面组合实施。还应当理解,本文中的描述和特定实施例旨在仅说明的目的并不旨在限制本申请的范围。

[0174] 以上对本公开的若干实施例进行了详细描述,但显然,本领域技术人员可以在不脱离本公开的精神和范围的情况下对本公开的实施例进行各种修改和变型。本公开的保护范围由所附的权利要求限定。

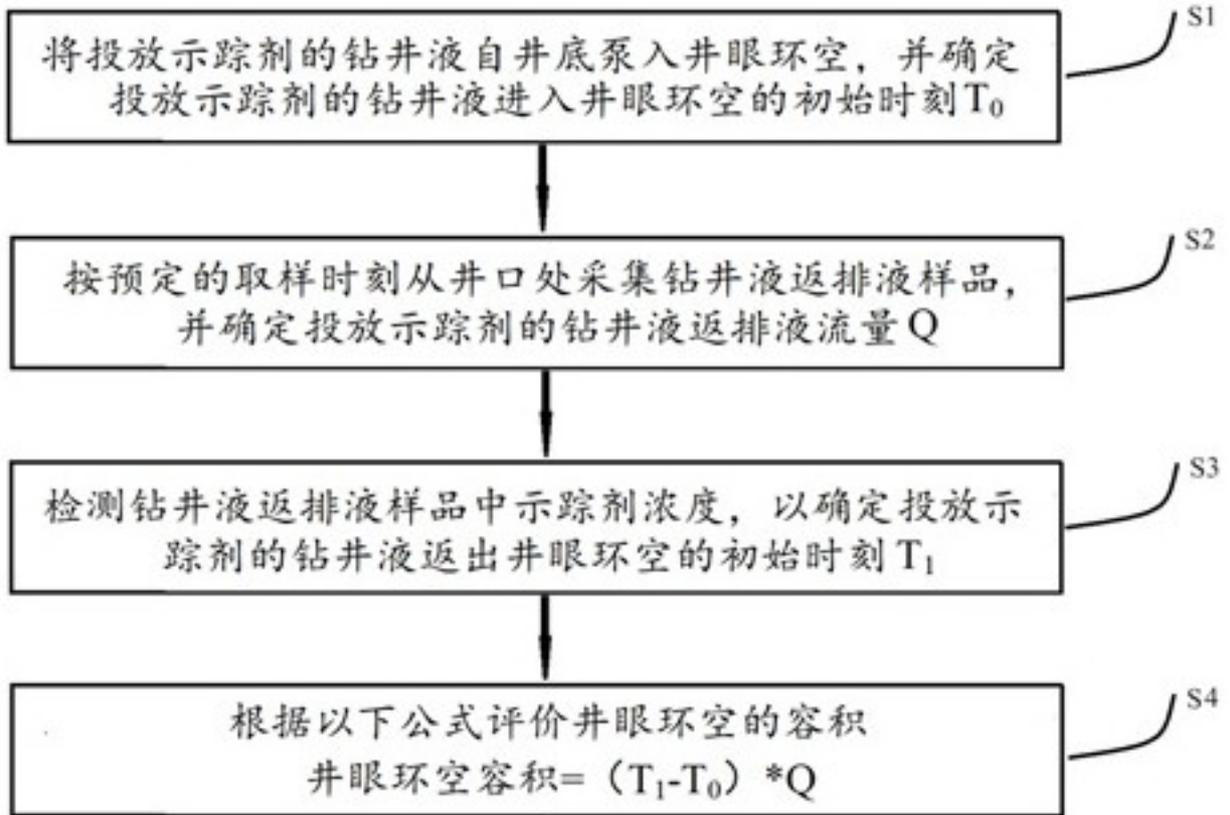


图 1

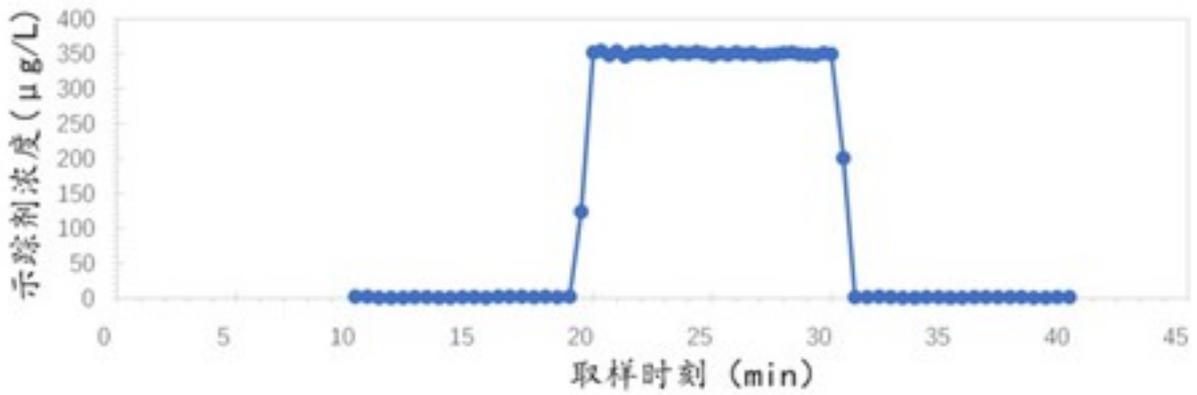


图 2

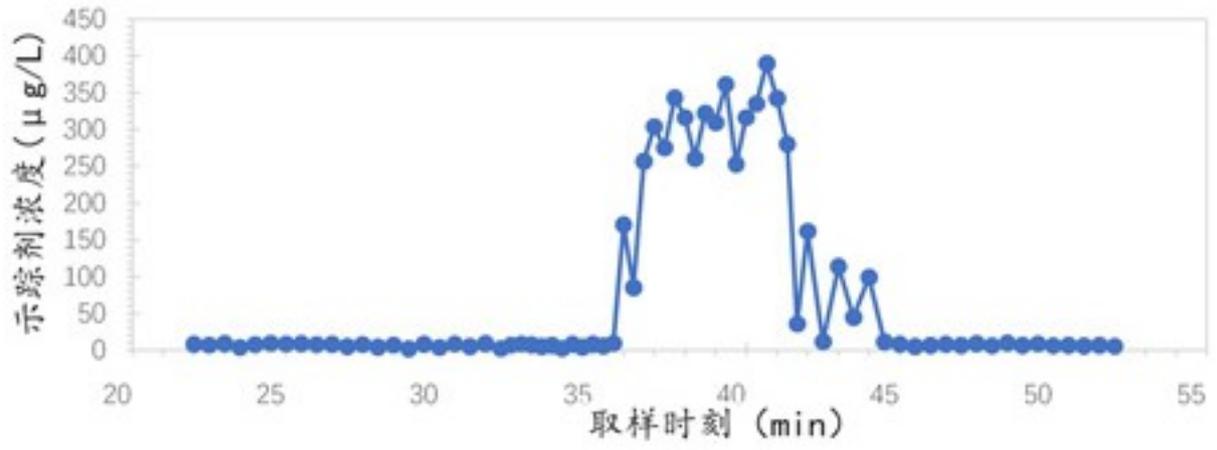


图 3