



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 114354809 A

(43) 申请公布日 2022. 04. 15

(21) 申请号 202210014957.6

(22) 申请日 2022.01.07

(71) 申请人 重庆地质矿产研究院

地址 401120 重庆市渝北区空港兰馨大道
111号

申请人 重庆大学

(72) 发明人 陆朝晖 卢义玉 周建坤 潘哲君

汤积仁 李大华 程礼军 贾云中

刘军 周军平

(74) 专利代理机构 重庆华科专利事务所 50123

代理人 康海燕

(51) Int. Cl.

G01N 30/02 (2006.01)

G01N 33/00 (2006.01)

G01D 21/02 (2006.01)

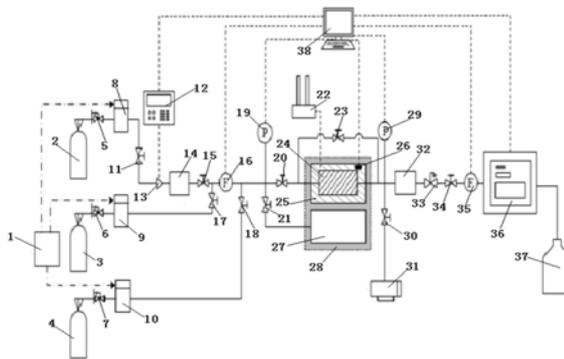
权利要求书6页 说明书14页 附图1页

(54) 发明名称

一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统及实验评价方法

(57) 摘要

本发明涉及一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统及实验评价方法。实验系统包括依次相连的气体供应系统、脉冲控制系统、储层环境模拟系统、数据采集处理系统和尾气回收系统；气体供应系统输出的二氧化碳通过脉冲控制系统转换成脉冲气体，脉冲气体进入储层环境模拟系统缩短二氧化碳驱替置换甲烷的时间，通过数据采集处理系统实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据，实时反映动态驱替过程，明确驱替评价指标与驱替时间的关系。本发明还提供了一种实验评价方法，包括所述的实验系统。本发明解决了现有二氧化碳驱替置换甲烷的装置存在驱替置换时间长，以及无法实时反映动态驱替过程，导致无法明确驱替评价指标与驱替时间的关系的问题。



1. 一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,其特征在于,包括依次相连的气体供应系统、脉冲控制系统、储层环境模拟系统、数据采集处理系统和尾气回收系统;

所述气体供应系统为所述储层环境模拟系统提供气源,气源包括二氧化碳、甲烷和惰性气体;

所述脉冲控制系统为气源提供脉冲,使通过脉冲控制系统的气体转换成脉冲气体;

所述储层环境模拟系统为模拟不同储层的温度和压力环境;

所述数据采集处理系统为实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据;

所述尾气回收系统为将储层环境模拟系统的尾气进行回收处理;

气体供应系统输出的二氧化碳气体通过脉冲控制系统转换成脉冲气体,脉冲气体进入储层环境模拟系统缩短二氧化碳气体驱替置换甲烷的时间,通过数据采集处理系统实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据,实时反映动态驱替过程,明确驱替评价指标与驱替时间的关系。

2. 根据权利要求1所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,其特征在于,所述气体供应系统包括通过气管相互并联的二氧化碳供应系统、甲烷供应系统和惰性气体供应系统;

所述二氧化碳供应系统和甲烷供应系统并联后连接有第一流量计,再与惰性气体供应系统并联后与所述储层环境模拟系统相连。

3. 根据权利要求2所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,其特征在于,所述二氧化碳供应系统包括依次连接的二氧化碳气瓶、二氧化碳气体减压阀、第一活塞和第二截止阀;

所述甲烷供应系统包括依次连接的甲烷气瓶、甲烷气体减压阀、第二活塞和第三截止阀;

所述惰性气体供应系统包括依次连接的惰性气体气瓶、惰性气体减压阀、第三活塞和第四截止阀;

三个活塞均连接有液压泵,第二截止阀和第三截止阀的出口端并联后与所述第一流量计的进口端相连,所述第一流量计的出口端与所述第四截止阀的出口端并联。

4. 根据权利要求3所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,其特征在于,所述脉冲控制系统包括依次连接的脉冲发生器、脉冲电磁阀和上游缓冲室;

所述二氧化碳供应系统中的第一活塞和第二截止阀之间通过第一截止阀连接所述脉冲电磁阀和上游缓冲室,通过脉冲发生器对流过脉冲电磁阀中的二氧化碳气体施加脉冲,缩短二氧化碳驱替置换甲烷的时间;

所述脉冲发生器与所述数据采集处理系统相连,以实时记录和反馈脉冲参数。

5. 根据权利要求4所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,其特征在于,所述储层环境模拟系统包括恒温水浴装置,所述恒温水浴装置中设有标定罐和岩心夹持器,所述标定罐和岩心夹持器的进口端分别通过第五截止阀和第六截止阀与所述第一流量计和所述第四截止阀并联后的气管相连,所述第五截止阀、第六截止阀的进口端还连接有第一压力传感器,所述岩心夹持器的出口端通过第八截止阀连接有真空泵和第二压力传感器;

所述岩心夹持器中固定有岩心实验件和温度传感器;

所述岩心夹持器的进口端和出口端之间并联有第七截止阀;

所述岩心夹持器还连接有柱塞泵。

6. 根据权利要求5所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,其特征在于,所述脉冲控制系统还包括依次连接的下游缓冲室和回压阀,下游缓冲室的进口端连接所述岩心夹持器的出口端,回压阀的出口端依次连接有第九截止阀和第二流量计。

7. 根据权利要求6所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,其特征在于,所述数据采集处理系统包括所述的第一流量计、第二流量计、第一压力传感器、第二压力传感器和温度传感器;

还包括数据采集终端,所述第一流量计、第二流量计、第一压力传感器、第二压力传感器和温度传感器均与所述数据采集终端相连,所述脉冲发生器与所述数据采集终端相连;

所述尾气回收系统包括相互连接的气相色谱仪和尾气回收罐,气相色谱仪的进口端连接所述第二流量计的出口端,气相色谱仪还与所述数据采集终端相连。

8. 一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验评价方法,其特征在于,包括如权利要求1至权利要求7任一所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统。

9. 根据权利要求8所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验评价方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、设置初始条件:在储层环境模拟系统中安装岩心实验件,调节岩心实验件周围的温度和压力到达设定值,打开数据采集处理系统中的数据采集终端,检查各仪器是否正常工作,设置完成后关闭所有截止阀;

S2、检查装置气密性:打开气体供应系统中的惰性气体,并对惰性气体加压至压力高于最大实验压力,加压后的惰性气体进入管道,待压力趋于稳定并等于加压压力时,关闭阀门;静置,如压力没有下降,则进行后续操作;

S3、标定自由空间体积:排出气管及岩心实验件中的惰性气体;待压力不再下降后,对管道及岩心实验件进行抽真空处理,等压力稳定时,关闭阀门;打开惰性气体管路,通入惰性气体后,关闭惰性气体管路上的阀门;记录稳定后的压力;

使气管中的惰性气体进入标定罐,待压力再次稳定后记录此时压力;根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的第一个公式;

继续通入惰性气体后,关闭惰性气体管路上的阀门,待压力稳定后,记录此时的压力;打开岩心实验件进气口的阀门,待压力稳定后,记录此时的压力;根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的第二个公式;

打开岩心实验件进气口和出气口相连的阀门,待压力稳定不再下降后,记录此时的压力;根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的第三个公式和第四个公式;

通过第一个公式、第二个公式、第三个公式和第四个公式可计算得到自由空间体积;

S4、抽真空处理:完成S3的操作后,排出气管及岩心实验件中的气体;待压力不再明显下降后,对气管及岩心实验件进行抽真空处理;待压力稳定时,依次关闭阀门;

S5、甲烷预先吸附饱和:对甲烷气体加压至设定吸附压力后,将甲烷注入岩心实验件;待压力达到设计吸附压力,且稳定不变时,认为甲烷气体在岩心实验件中已吸附至饱和;

S6、二氧化碳脉冲驱替置换甲烷:对二氧化碳气体加压至脉冲峰值压力;通过脉冲控制系统使二氧化碳气体形成二氧化碳脉冲气体后到达岩心实验件,驱替置换其中的甲烷气体

后,对混合气体成分及含量分析后,排出到尾气回收系统;

S7、驱替结束后驱替评价指标计算:驱替结束后,根据理想气体状态方程得二氧化碳的总封存量和封存甲烷的总回收量,从而得到驱替置换比;

S8、改变条件,进行下一组实验:待以上步骤完成,根据实验设计方案改变脉冲参数和环境条件,重复步骤S1-S7,从而模拟不同脉冲参数和环境条件下的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的效果,针对不同储层环境,确定二氧化碳脉冲压力参数,从而提高甲烷回收率与开采效率。

10. 根据权利要求9所述的实验评价方法,其特征在于,包括以下步骤:

S1、设置初始条件:在储层环境模拟系统的岩心夹持器中安装岩心实验件,打开恒温水浴装置,使其加热到设定温度,调节柱塞泵使岩心实验件围压到达设定压力,打开数据采集终端,检查各个传感器、流量计是否正常工作,设置完成后关闭所有截止阀;

S2、检查装置气密性:打开第四截止阀、第五截止阀、第六截止阀、第七截止阀,打开惰性气体减压阀,通过液压泵与第三活塞对惰性气体加压至压力略高于最大实验压力,加压后的惰性气体进入管道,待第一压力传感器与第二压力传感器的读数趋于稳定并等于液压泵的加压压力时,依次关闭第四截止阀、惰性气体减压阀和液压泵;

静置,如第一压力传感器与第二压力传感器的读数没有下降,则装置气密性良好,可以进行后续操作;否则,检查管路连接后重复此步骤;

S3、标定自由空间体积:保持其他阀门开闭状态不变,打开第九截止阀,排出气管及岩心实验件中的惰性气体;待压力传感器读数不再下降后,关闭第九截止阀,打开第八截止阀,并开启真空泵,对管道及岩心实验件进行抽真空处理,等压力传感器读数稳定时依次关闭第八截止阀、真空泵;关闭第五截止阀、第六截止阀和第七截止阀,打开第四截止阀,打开惰性气体减压阀通入一定压力惰性气体后,关闭第四截止阀与惰性气体减压阀;记录第一压力传感器稳定后的读数为 P_1 ;

打开第六截止阀,使气管中的惰性气体进入标定罐,待第一压力传感器读数再次稳定后记录此时压力为 P_2 ;此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式I;

$$p_1 V_1 = p_2 (V_R + V_1) \quad (I)$$

打开惰性气体减压阀与第四截止阀,继续通入一定量的惰性气体后,关闭第四截止阀和惰性气体减压阀,待第一压力传感器读数稳定后,记录此时的压力为 P_3 ;打开第五截止阀,待第一压力传感器读数稳定后,记录此时的压力为 P_4 ;此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式II:

$$p_3 (V_R + V_1) = p_4 (V_R + V_1 + V_2) \quad (II)$$

打开第七截止阀,待第二压力传感器与第一压力传感器读数相等时,记录此时压力为 P_5 ;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数稳定不再下降后,记录此时的压力为 P_6 ,此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式III和公式IV;

$$p_4 (V_R + V_1 + V_2) = p_5 (V_R + V_1 + V_2 + V_3) \quad (III)$$

$$p_4 (V_R + V_1 + V_2) = p_6 (V_R + V_1 + V_2 + V_3 + V_D) \quad (IV)$$

式中, V_R 表示标定罐及其与第六截止阀之间连接气管的自由空间体积,连接气管的自由空间体积可以根据气管的内径、长度得到; V_1 表示第二截止阀、第三截止阀、第四截止阀、第

五截止阀、第六截止阀之间连接气管的自由空间体积,包括第一压力传感器与进气管之间连接气管的体积; V_2 表示岩心实验件进气端与第五截止阀、第七截止阀之间连接气管的自由空间体积; V_3 表示岩心实验件出气端与第七截止阀、第八截止阀、第九截止阀之间连接气管的自由空间体积,包括第二压力传感器与出气管之间连接气管的自由空间体积以及下游缓冲室的自由空间体积; V_p 表示岩心实验件内部自由空间体积;

通过公式I、II、III和IV可计算得到自由空间体积 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_p ;

S4、抽真空处理:完成S3的操作后,打开第九截止阀,排出气管及岩心实验件中的气体;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数不再明显下降后,关闭第九截止阀,打开第一截止阀、第二截止阀、第三截止阀、第六截止阀,并开启真空泵,对气管及岩心实验件进行抽真空处理;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数不再下降时,依次关闭第一截止阀、第二截止阀、第三截止阀、第六截止阀、第七截止阀、第八截止阀门、真空泵;

S5、甲烷预先吸附饱和:调节甲烷气体减压阀,通过液压泵与第二活塞对甲烷气体加压至设定吸附压力后,打开第三截止阀,将甲烷注入岩心实验件,利用第一流量计实时监测甲烷注入速率 v_{CH_4} ;

待第一压力传感器读数达到设计吸附压力时,关闭甲烷气体减压阀、第三截止阀、液压泵,记录气体注入时间为 t_1 ;

静置2h,待第一压力传感器读数等于第二压力传感器读数且稳定不变时,认为甲烷气体在岩心实验件中已吸附至饱和,记录此时的温度为 T ,压力为 P_{11} ,根据理想气体状态方程得:

$$\begin{cases} Q_{CH_4} = \int_0^{t_1} v_{CH_4} dt \\ Q_{CH_4-free} = \frac{p_{11} (V_1 + V_2 + V_3)}{Z_{CH_4-11} RT} V_m \\ Q_{CH_4-storage} = Q_{CH_4} - Q_{CH_4-free} \end{cases} \quad (V)$$

式中, Z_{CH_4-11} 表示甲烷气体在 P_{11} 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; R 表示摩尔气体常数; V_m 表示气体摩尔体积; Q_{CH_4} 表示注入的甲烷气体的总量; Q_{CH_4-free} 表示气管自由空间中游离态甲烷气体的量; $Q_{CH_4-storage}$ 表示封存在岩心实验件中以吸附或游离形式存在的甲烷气体的量;

S6、二氧化碳脉冲驱替置换甲烷:预先设置液压泵,使其与第一活塞共同作用能够对二氧化碳气体加压至脉冲峰值压力;

设置脉冲发生器使通过脉冲电磁阀的二氧化碳气体形成具有一定振幅、频率、波形的脉冲压力;

依次打开液压泵、二氧化碳气体减压阀、脉冲发生器、第一截止阀、第二截止阀、第九截止阀、气相色谱仪,使二氧化碳脉冲气体依次经过上游缓冲腔室、第二截止阀、第一流量计、第五截止阀后到达岩心实验件,驱替置换其中的甲烷气体后,混合气体通过下游缓冲腔室、回压阀、第九截止阀、第二流量计后到达气相色谱仪,经气相色谱仪对混合气体成分及含量分析后,排出到尾气回收罐;

驱替过程中采用第一流量计、第二流量计分别监测二氧化碳气体注入速率 v_{CO_2} 及混合

气体的排出速率 v_{mixed} ,采用气相色谱仪,实时分析混合气体中二氧化碳气体含量 φ_{CO_2} ,监测结果实时传输到数据采集终端;

在驱替实验开始 t_i 时间后,其中, $i=0,1,2,\dots,N$, N 为正整数; t_i 表示时刻,相邻时刻的时间间隔相等,则在 t_i 时刻时,第二压力传感器读数为 P_i ,得到回收气体中甲烷的总量为 $Q_{CH_4-recovery(i)}$, t_i 时刻气管自由空间中游离态甲烷的总含量 $Q_{CH_4-free(i)}$,则根据理想气体状态方程得:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{CH_4-recovery(i)} = \int_0^{t_i} v_{mixed} (1 - \varphi_{CO_2}) dt \\ Q_{CH_4-free(i)} = \frac{P_i V_3}{Z_{CO_2-i} RT} V_m \cdot (1 - \varphi_{CO_2(i)}) \\ Q_{CH_4-replace(i)} = Q_{CH_4-recovery(i)} - (Q_{CH_4-free} - Q_{CH_4-free(i)}) \\ R_{CH_4-storage(i)} = \frac{Q_{CH_4-replace(i)}}{Q_{CH_4-storage}} \times 100\% \end{array} \right. \quad (VI)$$

式中, Z_{CO_2-i} 表示二氧化碳气体在 P_i 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; $\varphi_{CO_2(i)}$ 表示 t_i 时刻由气相色谱仪得到的混合气体中二氧化碳的总含量; $Q_{CH_4-replace(i)}$ 表示 t_i 时刻封存在岩心实验件中甲烷的总回收量; $R_{CH_4-storage(i)}$ 表示 t_i 时刻封存的甲烷的实时回收率;

当排出气体检测不到甲烷时,认为设定条件下二氧化碳脉冲驱替置换甲烷结束,关闭第一截止阀、第二截止阀、第九截止阀、二氧化碳气体减压阀、液压泵,记录驱替时间为 t_N ,第一压力传感器读数等于第二压力传感器读数且稳定不变时,记录压力为 P_N ,则从式VI中可得到封存甲烷的最终回收率 $R_{CH_4-storage-final}$;

S7、驱替结束后驱替评价指标计算:驱替结束后,则:二氧化碳注入总量 Q_{CO_2} ,回收气体中二氧化碳含量 $Q_{CO_2-recovery}$,气管自由空间中二氧化碳含量 Q_{CO_2-free} ,得到封存在岩芯试件岩心实验件中的二氧化碳含量 $Q_{CO_2-storage}$,根据理想气体状态方程得:

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{CO_2} = \int_0^{t_N} v_{CO_2} dt \\ Q_{CO_2-recovery} = \int_0^{t_N} v_{mixed} \varphi_{CO_2} dt \\ Q_{CO_2-free} = \frac{P_N (V_1 + V_2 + V_3)}{Z_{CO_2-N} RT} V_m \\ Q_{CO_2-storage} = Q_{CO_2} - Q_{CO_2-recovery} - Q_{CO_2-free} \end{array} \right. \quad (VII)$$

式中, Z_{CO_2-N} 为二氧化碳气体在 P_N 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; Q_{CO_2} 表示二氧化碳注入的总量; $Q_{CO_2-recovery}$ 表示回收气体中二氧化碳的总含量; Q_{CO_2-free} 表示气管自由空间中二氧化碳的总含量; $Q_{CO_2-storage}$ 表示封存在岩心实验件中的二氧化碳的总封存量;

在 t_N 时刻时,即驱替结束,封存在岩心实验件中甲烷的总回收量 $Q_{CH_4-replace}$ 可从式VI中得到,则驱替置换比 β :

$$\beta = \frac{Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}}{Q_{\text{CH}_4\text{-replace}}} \quad (\text{VIII})$$

式中, $Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}$ 表示二氧化碳的总封存量; $Q_{\text{CH}_4\text{-replaxe}}$ 表示封存甲烷的总回收量;

S8、改变条件,进行下一组实验:待以上步骤完成,根据实验设计方案改变脉冲参数和环境条件,重复步骤S1-S7,从而模拟不同脉冲参数和环境条件下的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的效果,针对不同储层环境,确定二氧化碳脉冲压力参数,从而提高甲烷回收率与开采效率。

一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统及实验评价方法

技术领域

[0001] 本发明涉及天然气开采技术领域,具体涉及一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统及实验评价方法。

背景技术

[0002] 石油天然气作为国家重要的战略能源,在国家经济发展中具有重要的意义。近年来,非常规天然气包括煤层气、页岩气等在国内也发展迅速,石油天然气高效的开采利用可以有效地缓解能源紧张。二氧化碳作为温室气体,大规模的排放会造成严重的环境破坏,造成气温升高,海平面上升。通过二氧化碳置换和驱替石油天然气,可以有效地降低石油的粘度,置换天然气,提高油气采收率,另外,通过驱替和置换石油天然气还可以把二氧化碳水合物永久封存在地下储层中,是一种可行的减少二氧化碳排放的方法。二氧化碳驱替和置换油气的优势在于:二氧化碳注入到地层中,可以提高油气层的能量,降低石油的粘度,有利于石油在地层中的流动。二氧化碳对页岩、煤岩的吸附能力大于甲烷,当注入二氧化碳时,可有效地提高甲烷置换效率,提高天然气的产量。一方面随着温室气体减排压力的增加,二氧化碳注入地层中驱替和置换油气,可减少大气中二氧化碳的排放,并保持了油气储层的稳定性,兼具环保价值和经济价值。

[0003] 目前,二氧化碳应用于油气的开发技术尚不成熟,提高采收率效果受控于不同的油气储层地质背景,不同的天然气在地层中的附存状态差别较大,如石油的粘度、天然气在地层中的赋存状态。不同的地层还具有不同的构造形态,如断裂发育情况,地层倾角等。关于不同油气地层地质背景下二氧化碳置换和驱替效率和效果不明确,不同的油气饱和度和天然气附存状态对二氧化碳置换和驱替的置换效果尚没有定量的评价,因此,需要实验设备进行模拟。

[0004] 现有技术中,已经有一些学者针对二氧化碳驱替置换储层甲烷的效果进行研究,并设计了实验装置对驱替过程进行模拟。然而,由于煤层、页岩等非常规天然气赋存层位往往具有低孔隙度、低渗透率等特性,使得气体在其中的流动性很差,导致稳态(恒压或恒流)二氧化碳驱替置换甲烷的过程需要很长时间。同时,现有二氧化碳驱替置换甲烷的装置,只能在驱替结束后得到最终驱替置换指标,无法实时反映动态驱替过程,导致无法明确驱替评价指标与驱替时间的关系。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统及实验评价方法,以解决现有二氧化碳驱替置换甲烷的装置存在驱替置换时间长,以及无法实时反映动态驱替过程,导致无法明确驱替评价指标与驱替时间的关系的问题。

[0006] 为了实现上述目的,本发明采用的技术方案如下:

[0007] 一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,包括依次相连的气体供应系统、脉冲控制系统、储层环境模拟系统、数据采集处理系统和尾气回收系统;

- [0008] 所述气体供应系统为所述储层环境模拟系统提供气源,气源包括二氧化碳、甲烷和惰性气体;
- [0009] 所述脉冲控制系统为气源提供脉冲,使通过脉冲控制系统的气体转换成脉冲气体;
- [0010] 所述储层环境模拟系统为模拟不同储层的温度和压力环境;
- [0011] 所述数据采集处理系统为实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据;
- [0012] 所述尾气回收系统为将储层环境模拟系统的尾气进行回收处理;
- [0013] 气体供应系统输出的二氧化碳气体通过脉冲控制系统转换成脉冲气体,脉冲气体进入储层环境模拟系统缩短二氧化碳气体驱替置换甲烷的时间,通过数据采集处理系统实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据,实时反映动态驱替过程,明确驱替评价指标与驱替时间的关系。
- [0014] 优选的,所述气体供应系统包括通过气管相互并联的二氧化碳供应系统、甲烷供应系统和惰性气体供应系统;
- [0015] 所述二氧化碳供应系统和甲烷供应系统并联后连接有第一流量计,再与惰性气体供应系统并联后与所述储层环境模拟系统相连。
- [0016] 优选的,所述二氧化碳供应系统包括依次连接的二氧化碳气瓶、二氧化碳气体减压阀、第一活塞和第二截止阀;
- [0017] 所述甲烷供应系统包括依次连接的甲烷气瓶、甲烷气体减压阀、第二活塞和第三截止阀;
- [0018] 所述惰性气体供应系统包括依次连接的惰性气体气瓶、惰性气体减压阀、第三活塞和第四截止阀;
- [0019] 三个活塞均连接有液压泵,第二截止阀和第三截止阀的出口端并联后与所述第一流量计的进口端相连,所述第一流量计的出口端与所述第四截止阀的出口端并联。
- [0020] 优选的,所述脉冲控制系统包括依次连接的脉冲发生器、脉冲电磁阀和上游缓冲室;
- [0021] 所述二氧化碳供应系统中的第一活塞和第二截止阀之间通过第一截止阀连接所述脉冲电磁阀和上游缓冲室,通过脉冲发生器对流过脉冲电磁阀中的二氧化碳气体施加脉冲,缩短二氧化碳驱替置换甲烷的时间;
- [0022] 所述脉冲发生器与所述数据采集处理系统相连,以实时记录和反馈脉冲参数。
- [0023] 优选的,所述储层环境模拟系统包括恒温水浴装置,所述恒温水浴装置中设有标定罐和岩心夹持器,所述标定罐和岩心夹持器的进口端分别通过第五截止阀和第六截止阀与所述第一流量计和所述第四截止阀并联后的气管相连,所述第五截止阀、第六截止阀的进口端还连接有第一压力传感器,所述岩心夹持器的出口端通过第八截止阀连接有真空泵和第二压力传感器;
- [0024] 所述岩心夹持器中固定有岩心实验件和温度传感器;
- [0025] 所述岩心夹持器的进口端和出口端之间并联有第七截止阀;
- [0026] 所述岩心夹持器还连接有柱塞泵。
- [0027] 优选的,所述脉冲控制系统还包括依次连接的下游缓冲室和回压阀,下游缓冲室的进口端连接所述岩心夹持器的出口端,回压阀的出口端依次连接有第九截止阀和第二流

量计。

[0028] 优选的,所述数据采集处理系统包括所述的第一流量计、第二流量计、第一压力传感器、第二压力传感器和温度传感器;

[0029] 还包括数据采集终端,所述第一流量计、第二流量计、第一压力传感器、第二压力传感器和温度传感器均与所述数据采集终端相连,所述脉冲发生器与所述数据采集终端相连。

[0030] 优选的,所述尾气回收系统包括相互连接的气相色谱仪和尾气回收罐,气相色谱仪的进口端连接所述第二流量计的出口端,气相色谱仪还与所述数据采集终端相连。

[0031] 本发明还提供了一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验评价方法,包括本发明所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统。

[0032] 优选的,二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验评价方法,包括以下步骤:

[0033] S1、设置初始条件:在储层环境模拟系统中安装岩心实验件,调节岩心实验件周围的温度和压力到达设定值,打开数据采集处理系统中的数据采集终端,检查各仪器是否正常工作,设置完成后关闭所有截止阀;

[0034] S2、检查装置气密性:打开气体供应系统中的惰性气体,并对惰性气体加压至压力高于最大实验压力,加压后的惰性气体进入管道,待压力趋于稳定并等于加压压力时,关闭阀门;静置,如压力没有下降,则进行后续操作;

[0035] S3、标定自由空间体积:排出气管及岩心实验件中的惰性气体;待压力不再下降后,对管道及岩心实验件进行抽真空处理,等压力稳定时,关闭阀门;打开惰性气体管路,通入惰性气体后,关闭惰性气体管路上的阀门;记录稳定后的压力;

[0036] 使气管中的惰性气体进入标定罐,待压力再次稳定后记录此时压力;根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的第一个公式;

[0037] 继续通入惰性气体后,关闭惰性气体管路上的阀门,待压力稳定后,记录此时的压力;打开岩心实验件进气口的阀门,待压力稳定后,记录此时的压力;根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的第二个公式;

[0038] 打开岩心实验件进气口和出气口相连的阀门,待压力稳定不再下降后,记录此时的压力;根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的第三个公式和第四个公式;

[0039] 通过第一个公式、第二个公式、第三个公式和第四个公式可计算得到自由空间体积;

[0040] S4、抽真空处理:完成S3的操作后,排出气管及岩心实验件中的气体;待压力不再明显下降后,对气管及岩心实验件进行抽真空处理;待压力稳定时,依次关闭阀门;

[0041] S5、甲烷预先吸附饱和:对甲烷气体加压至设定吸附压力后,将甲烷注入岩心实验件;待压力达到设计吸附压力,且稳定不变时,认为甲烷气体在岩心实验件中已吸附至饱和;

[0042] S6、二氧化碳脉冲驱替置换甲烷:对二氧化碳气体加压至脉冲峰值压力;通过脉冲控制系统使二氧化碳气体形成二氧化碳脉冲气体后到达岩心实验件,驱替置换其中的甲烷气体后,对混合气体成分及含量分析后,排出到尾气回收系统;

[0043] S7、驱替结束后驱替评价指标计算:驱替结束后,根据理想气体状态方程得二氧化

碳的总封存量和封存甲烷的总回收量,从而得到驱替置换比;

[0044] S8、改变条件,进行下一组实验:待以上步骤完成,根据实验设计方案改变脉冲参数和环境条件,重复步骤S1-S7,从而模拟不同脉冲参数和环境条件下的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的效果,针对不同储层环境,确定二氧化碳脉冲压力参数,从而提高甲烷回收率与开采效率。

[0045] 更优选的,所述的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验评价方法,包括以下步骤:

[0046] S1、设置初始条件:在储层环境模拟系统的岩心夹持器中安装岩心实验件,打开恒温水浴装置,使其加热到设定温度,调节柱塞泵使岩心实验件围压到达设定压力,打开数据采集终端,检查各个传感器、流量计是否正常工作,设置完成后关闭所有截止阀;

[0047] S2、检查装置气密性:打开第四截止阀、第五截止阀、第六截止阀、第七截止阀,打开惰性气体减压阀,通过液压泵与第三活塞对惰性气体加压至压力略高于最大实验压力,加压后的惰性气体进入管道,待第一压力传感器与第二压力传感器的读数趋于稳定并等于液压泵的加压压力时,依次关闭第四截止阀、惰性气体减压阀和液压泵;

[0048] 静置,如第一压力传感器与第二压力传感器的读数没有下降,则装置气密性良好,可以进行后续操作;否则,检查管路连接后重复此步骤;

[0049] S3、标定自由空间体积:保持其他阀门开闭状态不变,打开第九截止阀,排出气管及岩心实验件中的惰性气体;待压力传感器读数不再下降后,关闭第九截止阀,打开第八截止阀,并开启真空泵,对管道及岩心实验件进行抽真空处理,等压力传感器读数稳定时依次关闭第八截止阀、真空泵;关闭第五截止阀、第六截止阀和第七截止阀,打开第四截止阀,打开惰性气体减压阀通入一定压力惰性气体后,关闭第四截止阀与惰性气体减压阀;记录第一压力传感器稳定后的读数为 P_1 ;

[0050] 打开第六截止阀,使气管中的惰性气体进入标定罐,待第一压力传感器读数再次稳定后记录此时压力为 P_2 ;此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式I;

$$[0051] \quad p_1 V_1 = p_2 (V_R + V_1) \quad (I)$$

[0052] 打开惰性气体减压阀与第四截止阀,继续通入一定量的惰性气体后,关闭第四截止阀和惰性气体减压阀,待第一压力传感器读数稳定后,记录此时的压力为 P_3 ;打开第五截止阀,待第一压力传感器读数稳定后,记录此时的压力为 P_4 ;此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式II:

$$[0053] \quad p_3 (V_R + V_1) = p_4 (V_R + V_1 + V_2) \quad (II)$$

[0054] 打开第七截止阀,待第二压力传感器与第一压力传感器读数相等时,记录此时压力为 P_5 ;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数稳定不再下降后,记录此时的压力为 P_6 ,此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式III和公式IV;

$$[0055] \quad p_4 (V_R + V_1 + V_2) = p_5 (V_R + V_1 + V_2 + V_3) \quad (III)$$

$$[0056] \quad p_4 (V_R + V_1 + V_2) = p_6 (V_R + V_1 + V_2 + V_3 + V_p) \quad (IV)$$

[0057] 式中, V_R 表示标定罐及其与第六截止阀之间连接气管的自由空间体积,连接气管的自由空间体积可以根据气管的内径、长度得到; V_1 表示第二截止阀、第三截止阀、第四截止阀、第五截止阀、第六截止阀之间连接气管的自由空间体积,包括第一压力传感器与进气

管之间连接气管的体积; V_2 表示岩心实验件进气端与第五截止阀、第七截止阀之间连接气管的自由空间体积; V_3 表示岩心实验件出气端与第七截止阀、第八截止阀、第九截止阀之间连接气管的自由空间体积,包括第二压力传感器与出气管之间连接气管的自由空间体积以及下游缓冲室的自由空间体积; V_p 表示岩心实验件内部自由空间体积;

[0058] 通过公式I、II、III和IV可计算得到自由空间体积 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_p ;

[0059] S4、抽真空处理:完成S3的操作后,打开第九截止阀,排出气管及岩心实验件中的气体;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数不再明显下降后,关闭第九截止阀,打开第一截止阀、第二截止阀、第三截止阀、第六截止阀,并开启真空泵,对气管及岩心实验件进行抽真空处理,持续2h;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数不再下降时,依次关闭第一截止阀、第二截止阀、第三截止阀、第六截止阀、第七截止阀、第八截止阀门、真空泵;

[0060] S5、甲烷预先吸附饱和:调节甲烷气体减压阀,通过液压泵与第二活塞对甲烷气体加压至设定吸附压力后,打开第三截止阀,将甲烷注入岩心实验件,利用第一流量计实时监测甲烷注入速率 v_{CH_4} ;

[0061] 待第一压力传感器读数达到设计吸附压力时,关闭甲烷气体减压阀、第三截止阀、液压泵,记录气体注入时间为 t_1 ;

[0062] 静置2h,待第一压力传感器读数等于第二压力传感器读数且稳定不变时,认为甲烷气体在岩心实验件中已吸附至饱和,记录此时的温度为 T ,压力为 P_{11} ,根据理想气体状态方程得:

$$[0063] \begin{cases} Q_{CH_4} = \int_0^{t_1} v_{CH_4} dt \\ Q_{CH_4-free} = \frac{P_{11}(V_1 + V_2 + V_3)}{Z_{CH_4-11}RT} V_m \\ Q_{CH_4-storage} = Q_{CH_4} - Q_{CH_4-free} \end{cases} \quad (V)$$

[0064] 式中, Z_{CH_4-11} 表示甲烷气体在 P_{11} 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; R 表示摩尔气体常数; V_m 表示气体摩尔体积; Q_{CH_4} 表示注入的甲烷气体的总量; Q_{CH_4-free} 表示气管自由空间中游离态甲烷气体的量; $Q_{CH_4-storage}$ 表示封存在岩心实验件中以吸附或游离形式存在的甲烷气体的量;

[0065] S6、二氧化碳脉冲驱替置换甲烷:预先设置液压泵,使其与第一活塞共同作用能够对二氧化碳气体加压至脉冲峰值压力;

[0066] 设置脉冲发生器使通过脉冲电磁阀的二氧化碳气体形成具有一定振幅、频率、波形的脉冲压力;

[0067] 依次打开液压泵、二氧化碳气体减压阀、脉冲发生器、第一截止阀、第二截止阀、第九截止阀、气相色谱仪,使二氧化碳脉冲气体依次经过上游缓冲腔室、第二截止阀、第一流量计、第五截止阀后到达岩心实验件,驱替置换其中的甲烷气体后,混合气体通过下游缓冲腔室、回压阀、第九截止阀、第二流量计后到达气相色谱仪,经气相色谱仪对混合气体成分及含量分析后,排出到尾气回收罐;

[0068] 驱替过程中采用第一流量计、第二流量计分别监测二氧化碳气体注入速率 v_{CO_2} 及混合气体的排出速率 v_{mixed} ,采用气相色谱仪,实时分析混合气体中二氧化碳气体含量 ϕ^{CO_2} ,

监测结果实时传输到数据采集终端；

[0069] 在驱替实验开始 t_i 时间后,其中, $i=0,1,2,\dots,N$, N 为正整数; t_i 表示时刻,相邻时刻的时间间隔相等,则在 t_i 时刻时,第二压力传感器读数为 P_i ,得到回收气体中甲烷的总量为 $Q_{CH_4-recovery(i)}$, t_i 时刻气管自由空间中游离态甲烷的总含量 $Q_{CH_4-free(i)}$,则根据理想气体状态方程得:

$$[0070] \begin{cases} Q_{CH_4-recovery(i)} = \int_0^{t_i} v_{mixed} (1 - \varphi_{CO_2}) dt \\ Q_{CH_4-free(i)} = \frac{P_i V_3}{Z_{CO_2-i} RT} V_m \cdot (1 - \varphi_{CO_2(i)}) \\ Q_{CH_4-replace(i)} = Q_{CH_4-recovery(i)} - (Q_{CH_4-free} - Q_{CH_4-free(i)}) \\ R_{CH_4-storage(i)} = \frac{Q_{CH_4-replace(i)}}{Q_{CH_4-storage}} \times 100\% \end{cases} \quad (VI)$$

[0071] 式中, Z_{CO_2-i} 表示二氧化碳气体在 P_i 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; $\varphi_{CO_2(i)}$ 表示 t_i 时刻由气相色谱仪得到的混合气体中二氧化碳的总含量; $Q_{CH_4-replace(i)}$ 表示 t_i 时刻封存在岩心实验件中甲烷的总回收量; $R_{CH_4-storage(i)}$ 表示 t_i 时刻封存的甲烷的实时回收率;

[0072] 当排出气体检测不到甲烷时,认为设定条件下二氧化碳脉冲驱替置换甲烷结束,关闭第一截止阀、第二截止阀、第九截止阀、二氧化碳气体减压阀、液压泵,记录驱替时间为 t_N ,第一压力传感器读数等于第二压力传感器读数且稳定不变时,记录压力为 P_N ,则从式VI中可得到封存甲烷的最终回收率 $R_{CH_4-storage-final}$;

[0073] S7、驱替结束后驱替评价指标计算:驱替结束后,则:二氧化碳注入总量 Q_{CO_2} ,回收气体中二氧化碳含量 $Q_{CO_2-recovery}$,气管自由空间中二氧化碳含量 Q_{CO_2-free} ,得到封存在岩心实验件中的二氧化碳含量 $Q_{CO_2-storage}$,根据理想气体状态方程得:

$$[0074] \begin{cases} Q_{CO_2} = \int_0^{t_N} v_{CO_2} dt \\ Q_{CO_2-recovery} = \int_0^{t_N} v_{mixed} \varphi_{CO_2} dt \\ Q_{CO_2-free} = \frac{P_N (V_1 + V_2 + V_3)}{Z_{CO_2-N} RT} V_m \\ Q_{CO_2-storage} = Q_{CO_2} - Q_{CO_2-recovery} - Q_{CO_2-free} \end{cases} \quad (VII)$$

[0075] 式中, Z_{CO_2-N} 为二氧化碳气体在 P_N 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; Q_{CO_2} 表示二氧化碳注入的总量; $Q_{CO_2-recovery}$ 表示回收气体中二氧化碳的总含量; Q_{CO_2-free} 表示气管自由空间中二氧化碳的总含量; $Q_{CO_2-storage}$ 表示封存在岩心实验件中的二氧化碳的总封存量;

[0076] 在 t_N 时刻时,即驱替结束,封存在岩心实验件中甲烷的总回收量 $Q_{CH_4-replace}$ 可从式VI中得到,则驱替置换比 β :

$$[0077] \quad \beta = \frac{Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}}{Q_{\text{CH}_4\text{-replace}}} \quad (\text{VIII})$$

[0078] 式中, $Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}$ 表示二氧化碳的总封存量; $Q_{\text{CH}_4\text{-replaxe}}$ 表示封存甲烷的总回收量;

[0079] S8、改变条件,进行下一组实验:待以上步骤完成,根据实验设计方案改变脉冲参数和环境条件,重复步骤S1-S7,从而模拟不同脉冲参数和环境条件下的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的效果,针对不同储层环境,确定二氧化碳脉冲压力参数,从而提高甲烷回收率与开采效率。

[0080] 本发明的有益效果:

[0081] 1) 本发明的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,通过设置依次连接的气体供应系统、脉冲控制系统、储层环境模拟系统、数据采集处理系统和尾气回收系统,在气体供应系统输出的二氧化碳气体通过脉冲控制系统转换成非稳态的脉冲气体,脉冲气体进入储层环境模拟系统缩短二氧化碳驱替置换甲烷的时间,提高了二氧化碳驱替置换甲烷的效率和甲烷的回收率,同时,通过数据采集处理系统实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据,实时反映动态驱替过程,从而可准确得到驱替评价指标与驱替时间的关系。解决了现有二氧化碳气体驱替置换甲烷的装置存在驱替置换时间长,以及无法实时反映动态驱替过程,导致无法明确驱替评价指标与驱替时间的关系的问题。

[0082] 2) 本发明的二氧化碳气体驱替置换甲烷的实验评价方法,通过在驱替过程中,利用数据采集处理系统和传感器元件实时监测气体流量、压力、温度及排出气体组分含量的变化,借助数据处理软件实现对动态驱替过程中甲烷回收率的实时计算,以及驱替完成后,驱替置换比、二氧化碳封存量等指标的分析,一方面针对二氧化碳气体脉冲驱替置换甲烷效果建立完善的实验评价方法,另一方面通过二氧化碳气体脉冲驱替置换甲烷,提高采出效率与甲烷回收率,为实际的非常规天然气的开采提供了有利的参考价值,在天然气开采技术领域,具有推广应用价值。。

附图说明

[0083] 图1为本发明的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统的结构示意图;

[0084] 图2为脉冲二氧化碳气体驱替过程中封存甲烷的实时回收率与稳态驱替过程中封存甲烷的实时回收率的对比图。

[0085] 其中,1-液压泵;2-二氧化碳气瓶;3-甲烷气瓶;4-惰性气体气瓶;5-二氧化碳气体减压阀;6-甲烷气体减压阀;7-惰性气体减压阀;8-第一活塞;9-第二活塞;10-第三活塞;11-第一截止阀;12-脉冲发生器;13-脉冲电磁阀;14-上游缓冲腔室;15-第二截止阀;16-第一流量计;17-第三截止阀;18-第四截止阀;19-第一压力传感器;20-第五截止阀;21-第六截止阀;22-柱塞泵;23-第七截止阀;24-岩心实验件;25-岩心夹持器;26-温度传感器;27-标定罐;28-恒温水浴装置;29-第二压力传感器;30-第八截止阀;31-真空泵;32-下游缓冲腔室;33-回压阀;34-第九截止阀;35-第二流量计;36-气相色谱仪;37-尾气回收罐;38-数据处理终端。

具体实施方式

[0086] 以下将参照附图和优选实施例来说明本发明的实施方式,本领域技术人员可由本说明书中所揭露的内容轻易地了解本发明的其他优点与功效。本发明还可以通过另外不同的具体实施方式加以实施或应用,本说明书中的各项细节也可以基于不同观点与应用,在没有背离本发明的精神下进行各种修饰或改变。应当理解,优选实施例仅为了说明本发明,而不是为了限制本发明的保护范围。

[0087] 需要说明的是,以下实施例中所提供的图示仅以示意方式说明本发明的基本构想,遂图式中仅显示与本发明中有关的组件而非按照实际实施时的组件数目、形状及尺寸绘制,其实际实施时各组件的型态、数量及比例可为一种随意的改变,且其组件布局型态也可能更为复杂。

[0088] 实施例1

[0089] 如图1所示,一种二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统,包括依次相连的气体供应系统、脉冲控制系统、储层环境模拟系统、数据采集处理系统和尾气回收系统;

[0090] 气体供应系统为储层环境模拟系统提供气源,气源包括二氧化碳、甲烷和惰性气体;

[0091] 脉冲控制系统为气源提供脉冲,使通过脉冲控制系统的气体转换成脉冲气体;

[0092] 储层环境模拟系统为模拟不同储层的温度和压力环境;

[0093] 数据采集处理系统为实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据;

[0094] 尾气回收系统为将储层环境模拟系统的尾气进行回收处理;

[0095] 气体供应系统输出的二氧化碳气体通过脉冲控制系统转换成脉冲气体,脉冲气体进入储层环境模拟系统缩短二氧化碳气体驱替置换甲烷的时间,通过数据采集处理系统实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据,实时反映动态驱替过程,明确驱替评价指标与驱替时间的关系。

[0096] 通过设置依次连接的气体供应系统、脉冲控制系统、储层环境模拟系统、数据采集处理系统和尾气回收系统,在气体供应系统输出的二氧化碳气体通过脉冲控制系统转换成非稳态的脉冲气体,脉冲气体进入储层环境模拟系统缩短二氧化碳驱替置换甲烷的时间,提高了二氧化碳驱替置换甲烷的效率和甲烷的回收率,同时,通过数据采集处理系统实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据,实时反映动态驱替过程,从而可准确得到驱替评价指标与驱替时间的关系。解决了现有二氧化碳气体驱替置换甲烷的装置存在驱替置换时间长,以及无法实时反映动态驱替过程,导致无法明确驱替评价指标与驱替时间的关系的问题。

[0097] 本实施例中,惰性气体包括氦气(He)、氖气(Ne)和氩气(Ar)等。

[0098] 本实施例中,脉冲气体产生的原理为:在不同的实验阶段,通过设置脉冲发生器,可以使气体通过脉冲电磁阀后在出口处转换成具有一定脉冲参数的脉冲气体;同时数据处理终端与脉冲发生器连接,实时反馈压力数据,对脉冲过程进行监测;另外,脉冲发生器可设置不同的脉冲振幅、频率、压力,从而转换成不同脉冲参数的脉冲气体。

[0099] 其中,数据采集处理系统的内部,同时具传感器记录模块与数据处理单元,能够实时记录实验过程中气体流量、压力、温度等数据变化,并实现动态驱替过程中以及驱替完成后驱替置换评价指标的计算。

[0100] 气体供应系统包括通过气管相互并联的二氧化碳供应系统、甲烷供应系统和惰性气体供应系统；

[0101] 二氧化碳供应系统和甲烷供应系统并联后连接有第一流量计16,再与惰性气体供应系统并联后与储层环境模拟系统相连。

[0102] 二氧化碳供应系统包括依次连接的二氧化碳气瓶2、二氧化碳气体减压阀5、第一活塞8和第二截止阀15；

[0103] 甲烷供应系统包括依次连接的甲烷气瓶3、甲烷气体减压阀6、第二活塞9和第三截止阀17；

[0104] 惰性气体供应系统包括依次连接的惰性气体气瓶4、惰性气体减压阀7、第三活塞10和第四截止阀18；

[0105] 三个活塞均连接有液压泵1,第二截止阀15和第三截止阀17的出口端并联后与第一流量计16的进口端相连,第一流量计16的出口端与第四截止阀18的出口端并联。

[0106] 脉冲控制系统包括依次连接的脉冲发生器12、脉冲电磁阀13和上游缓冲室14；

[0107] 二氧化碳供应系统中的第一活塞8和第二截止阀15之间通过第一截止阀11连接脉冲电磁阀13和上游缓冲室14,通过脉冲发生器12对流过脉冲电磁阀13中的二氧化碳气体施加脉冲,缩短二氧化碳驱替置换甲烷的时间,其中,脉冲发生器12可设置不同的脉冲振幅、频率和压力,以使气体转换为不同脉冲参数的脉冲气体；

[0108] 脉冲发生器12与数据采集处理系统相连,以实时记录和反馈脉冲参数。储层环境模拟系统包括恒温水浴装置28,恒温水浴装置28中设有标定罐27和岩心夹持器25,标定罐27和岩心夹持器25的进口端分别通过第五截止阀20和第六截止阀21与第一流量计16和第四截止阀18并联后的气管相连,第五截止阀20、第六截止阀21的进口端还连接有第一压力传感器19,岩心夹持器25的出口端通过第八截止阀30连接有真空泵31和第二压力传感器29；

[0109] 岩心夹持器25中固定有岩心实验件24和温度传感器26；

[0110] 岩心夹持器25的进口端和出口端之间并联有第七截止阀23；

[0111] 岩心夹持器25还连接有柱塞泵22。

[0112] 本实施例中的岩心实验件包括页岩、煤、砂岩等低渗透性、非常规天然气储层岩石。

[0113] 脉冲控制系统还包括依次连接的下游缓冲室32和回压阀33,下游缓冲室32的进口端连接岩心夹持器25的出口端,回压阀33的出口端依次连接有第九截止阀34和第二流量计35。

[0114] 数据采集处理系统包括第一流量计16、第二流量计35、第一压力传感器19、第二压力传感器29和温度传感器26；

[0115] 还包括数据采集终端38,第一流量计16、第二流量计35、第一压力传感器19、第二压力传感器29和温度传感器26均与数据采集终端38相连,脉冲发生器12与数据采集终端38相连。

[0116] 其中,数据采集终端已经内嵌数据处理计算公式,可满足二氧化碳脉冲驱替置换甲烷实验过程中实时数据处理与分析。

[0117] 尾气回收系统包括相互连接的气相色谱仪36和尾气回收罐37,气相色谱仪36的进

口端连接第二流量计35的出口端,气相色谱仪36还与数据采集终端38相连。

[0118] 其中,尾气回收系统中的气相色谱仪,可以实时分析流出气体的组分及相对含量,并将数据传输至数据采集终端,从而达到判断驱替进程的目的。

[0119] 为了确保实验管路的密闭性与抗腐蚀性能,气体管路全部选用316L材质的不锈钢管连接,管路与阀门之间采用锥形密封。

[0120] 实施例2

[0121] 一种基于实施例1中的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统的实验评价方法,包括以下步骤:

[0122] S1、设置初始条件:在储层环境模拟系统的岩心夹持器中安装岩心实验件,打开恒温水浴装置,使其加热到设定温度,调节柱塞泵使岩心实验件围压到达设定压力,打开数据采集终端,检查各个传感器、流量计是否正常工作,设置完成后关闭所有截止阀;

[0123] S2、检查装置气密性:打开第四截止阀、第五截止阀、第六截止阀、第七截止阀,打开惰性气体减压阀,通过液压泵与第三活塞对惰性气体加压至压力略高于最大实验压力,加压后的惰性气体进入管道,待第一压力传感器与第二压力传感器的读数趋于稳定并等于液压泵的加压压力时,依次关闭第四截止阀、惰性气体减压阀和液压泵;

[0124] 静置2h,如第一压力传感器与第二压力传感器的读数没有下降,则装置气密性良好,可以进行后续操作;否则,检查管路连接后重复此步骤;

[0125] S3、标定自由空间体积:保持其他阀门开闭状态不变,打开第九截止阀,排出气管及岩心实验件中的惰性气体;待压力传感器读数不再下降后,关闭第九截止阀,打开第八截止阀,并开启真空泵,对管道及岩心实验件进行抽真空处理,持续2h,等压力传感器读数稳定时,依次关闭第八截止阀、真空泵;关闭第五截止阀、第六截止阀和第七截止阀,打开第四截止阀,打开惰性气体减压阀通入一定压力惰性气体后,关闭第四截止阀与惰性气体减压阀;记录第一压力传感器稳定后的读数为 P_1 ;

[0126] 打开第六截止阀,使气管中的惰性气体进入标定罐,待第一压力传感器读数再次稳定后记录此时压力为 P_2 ;此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式I;

$$[0127] \quad p_1 V_1 = p_2 (V_R + V_1) \quad (I)$$

[0128] 打开惰性气体减压阀与第四截止阀,继续通入一定量的惰性气体后,关闭第四截止阀和惰性气体减压阀,待第一压力传感器读数稳定后,记录此时的压力为 P_3 ;打开第五截止阀,待第一压力传感器读数稳定后,记录此时的压力为 P_4 ;由于气体在气管中的流动速度远大于在岩心中,因此认为压力达到 P_4 时还没有气体渗入岩心实验件;此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式II:

$$[0129] \quad p_3 (V_R + V_1) = p_4 (V_R + V_1 + V_2) \quad (II)$$

[0130] 打开第七截止阀,待第二压力传感器与第一压力传感器读数相等时,记录此时压力为 P_5 ;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数稳定不再下降后,记录此时的压力为 P_6 。同样认为压力达到 P_5 时还没有气体渗入岩心实验件,而 P_6 为气体通过岩心实验件内部自由空间后达到平衡状态时的压力,因此 P_6 小于 P_5 。此时,根据气体状态方程和波义耳定律可得到计算气管自由空间体积的公式III和公式IV;

$$[0131] \quad p_4 (V_R + V_1 + V_2) = p_5 (V_R + V_1 + V_2 + V_3) \quad (III)$$

$$[0132] \quad p_4(V_R+V_1+V_2) = p_6(V_R+V_1+V_2+V_3+V_p) \quad (IV)$$

[0133] 式中, V_R 表示标定罐及其与第六截止阀之间连接气管的自由空间体积,因为标定罐尺寸大小提前设计好,连接气管的体积可以根据内径、长度得到,于是 V_R 可以提前计算得到; V_1 表示第二截止阀、第三截止阀、第四截止阀、第五截止阀、第六截止阀之间连接气管的自由空间体积,包括第一压力传感器与进气管之间连接气管的体积; V_2 表示岩心实验件进气端与第五截止阀、第七截止阀之间连接气管的自由空间体积; V_3 表示岩心实验件出气端与第七截止阀、第八截止阀、第九截止阀之间连接气管的自由空间体积,包括第二压力传感器与出气管之间连接气管的自由空间体积以及下游缓冲室的自由空间体积; V_p 表示岩心实验件内部自由空间体积;

[0134] 通过公式I、II、III和IV可计算得到自由空间体积 V_1 、 V_2 、 V_3 和 V_p ,即

$$[0135] \quad \begin{cases} V_1 = \frac{p_2}{p_1 - p_2} V_R \\ V_2 = \frac{p_1(p_3 - p_4)}{p_4(p_1 - p_2)} V_R \\ V_3 = \frac{p_1 p_3(p_4 - p_5)}{p_4 p_5(p_1 - p_2)} V_R; \\ V_p = \frac{p_1 p_3(p_5 - p_6)}{p_5 p_6(p_1 - p_2)} V_R \end{cases}$$

[0136] S4、抽真空处理:完成S3的操作后,打开第九截止阀,排出气管及岩心实验件中的气体;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数不再明显下降后,关闭第九截止阀,打开第一截止阀、第二截止阀、第三截止阀、第六截止阀,并开启真空泵,对气管及岩心实验件进行抽真空处理,持续2h;待第二压力传感器与第一压力传感器的读数不再下降时,依次关闭第一截止阀、第二截止阀、第三截止阀、第六截止阀、第七截止阀、第八截止阀门、真空泵;

[0137] S5、甲烷预先吸附饱和:调节甲烷气体减压阀,通过液压泵与第二活塞对甲烷气体加压至设定吸附压力后,打开第三截止阀,将甲烷注入岩心实验件,利用第一流量计实时监测甲烷注入速率 v_{CH_4} ;

[0138] 待第一压力传感器读数达到设计吸附压力时,关闭甲烷气体减压阀、第三截止阀、液压泵,记录气体注入时间为 t_1 ;

[0139] 静置2h,待第一压力传感器读数等于第二压力传感器读数且稳定不变时,认为甲烷气体在岩心实验件中已吸附至饱和,记录此时的温度为 T ,压力为 P_{11} ,根据理想气体状态方程得:

$$[0140] \quad \begin{cases} Q_{CH_4} = \int_0^{t_1} v_{CH_4} dt \\ Q_{CH_4-free} = \frac{p_{11}(V_1 + V_2 + V_3)}{Z_{CH_4-11} RT} V_m \\ Q_{CH_4-storage} = Q_{CH_4} - Q_{CH_4-free} \end{cases} \quad (V)$$

[0141] 式中, Z_{CH_4-11} 表示甲烷气体在 P_{11} 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应

关系图表可直接得到;R表示摩尔气体常数; V_m 表示气体摩尔体积; Q_{CH_4} 表示注入的甲烷气体的总量; Q_{CH_4-free} 表示气管自由空间中游离态甲烷气体的量; $Q_{CH_4-storage}$ 表示封存在岩心实验件中以吸附或游离形式存在的甲烷气体的量;

[0142] S6、二氧化碳脉冲驱替置换甲烷:预先设置液压泵,使其与第一活塞共同作用能够对二氧化碳气体加压至脉冲峰值压力;

[0143] 设置脉冲发生器使通过脉冲电磁阀的二氧化碳气体形成具有一定振幅、频率、波形的脉冲压力;

[0144] 依次打开液压泵、二氧化碳气体减压阀、脉冲发生器、第一截止阀、第二截止阀、第九截止阀、气相色谱仪,使二氧化碳脉冲气体依次经过上游缓冲腔室、第二截止阀、第一流量计、第五截止阀后到达岩心实验件,驱替置换其中的甲烷气体后,混合气体通过下游缓冲腔室、回压阀、第九截止阀、第二流量计后到达气相色谱仪,经气相色谱仪对混合气体成分及含量分析后,排出到尾气回收罐;

[0145] 驱替过程中采用第一流量计、第二流量计分别监测二氧化碳气体注入速率 v_{CO_2} 及混合气体的排出速率 v_{mixed} ,采用气相色谱仪,实时分析混合气体中二氧化碳气体含量 φ_{CO_2} ,监测结果实时传输到数据采集终端;

[0146] 在驱替实验开始 t_i 时间后,其中, $i=0,1,2,\dots,N$,N为正整数; t_i 表示时刻,相邻时刻的时间间隔相等,第二压力传感器读数为 P_i ;得到回收气体中甲烷的总量为 $Q_{CH_4-recovery(i)}$, t_i 时刻气管自由空间中游离态甲烷的总含量 $Q_{CH_4-free(i)}$,则根据理想气体状态方程得:

$$[0147] \begin{cases} Q_{CH_4-recovery(i)} = \int_0^{t_i} v_{mixed} (1 - \varphi_{CO_2}) dt \\ Q_{CH_4-free(i)} = \frac{P_i V_3}{Z_{CO_2-i} RT} V_m \cdot (1 - \varphi_{CO_2(i)}) \\ Q_{CH_4-replace(i)} = Q_{CH_4-recovery(i)} - (Q_{CH_4-free} - Q_{CH_4-free(i)}) \\ R_{CH_4-storage(i)} = \frac{Q_{CH_4-replace(i)}}{Q_{CH_4-storage}} \times 100\% \end{cases} \quad (VI)$$

[0148] 式中, Z_{CO_2-i} 表示二氧化碳气体在 P_i 压力下的压缩系数,根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; $\varphi_{CO_2(i)}$ 表示 t_i 时刻由气相色谱仪得到的混合气体中二氧化碳的总含量; $Q_{CH_4-replace(i)}$ 表示 t_i 时刻封存在岩心实验件中甲烷的总回收量; $R_{CH_4-storage(i)}$ 表示 t_i 时刻封存甲烷的实时回收率;

[0149] 当排出气体检测不到甲烷时,认为设定条件下二氧化碳脉冲驱替置换甲烷结束,关闭第一截止阀、第二截止阀、第九截止阀、二氧化碳气体减压阀、液压泵,记录驱替时间为 t_N ,第一压力传感器读数等于第二压力传感器读数且稳定不变时,记录压力为 P_N ;

[0150] 则从式VI中可得到封存甲烷的最终回收率 $R_{CH_4-storage-final}$;

[0151] 在S6中,当脉冲发生器设置为气体直接通过模式,即不对二氧化碳气体进行脉冲处理,则该实验评价方法可实现二氧化碳稳态驱替置换甲烷的目的,并实时获取稳态驱替过程中封存甲烷的实时回收率;

[0152] S7、驱替结束后驱替评价指标计算:驱替结束后,则:

$$[0153] \quad \begin{cases} Q_{\text{CO}_2} = \int_0^{t_N} v_{\text{CO}_2} dt \\ Q_{\text{CO}_2\text{-recovery}} = \int_0^{t_N} v_{\text{mixed}} \varphi_{\text{CO}_2} dt \\ Q_{\text{CO}_2\text{-free}} = \frac{p_N (V_1 + V_2 + V_3)}{Z_{\text{CO}_2\text{-N}} RT} V_m \\ Q_{\text{CO}_2\text{-storage}} = Q_{\text{CO}_2} - Q_{\text{CO}_2\text{-recovery}} - Q_{\text{CO}_2\text{-free}} \end{cases} \quad (\text{VII})$$

[0154] 式中, $Z_{\text{CO}_2\text{-N}}$ 为二氧化碳气体在 p_N 压力下的压缩系数, 根据甲烷压缩系数与压力对应关系图表可直接得到; Q_{CO_2} 表示二氧化碳注入的总量; $Q_{\text{CO}_2\text{-recovery}}$ 表示回收气体中二氧化碳的总含量; $Q_{\text{CO}_2\text{-free}}$ 表示气管自由空间中二氧化碳的总含量; $Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}$ 表示封存在岩心实验件中的二氧化碳的总含量;

[0155] 在 t_N 时刻时, 即驱替结束, 封存在岩心实验件中甲烷的总回收量 $Q_{\text{CH}_4\text{-replace}}$ 可从式 VI 中得到, 则驱替置换比 β :

$$[0156] \quad \beta = \frac{Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}}{Q_{\text{CH}_4\text{-replace}}} \quad (\text{VIII})$$

[0157] 式中, $Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}$ 表示二氧化碳的总封存量; $Q_{\text{CH}_4\text{-replace}}$ 表示封存甲烷的总回收量;

[0158] S8、改变条件, 进行下一组实验: 待以上步骤完成, 根据实验设计方案改变脉冲参数 (振幅、频率、波形) 和环境条件 (包括温度, 压力), 重复步骤 S1-S7, 从而模拟不同脉冲参数和环境条件下的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷效果, 针对不同储层环境, 确定最佳二氧化碳脉冲压力参数, 从而提高甲烷回收率与开采效率。

[0159] 图2中为, 非稳态 (即: 脉冲二氧化碳气体) 驱替过程中封存甲烷的实时回收率与稳态驱替过程中封存甲烷的实时回收率的对比图, 其中, $R_{\text{CH}_4} = 1$ 表示回收率为 100%, $t_{\text{稳}}$ 表示稳态过程的驱替结束时刻, $t_{\text{脉}}$ 表示非稳态过程中的驱替结束时刻。从图2中对比分析可知, 在同一时刻, 脉冲二氧化碳气体驱替过程中, 封存甲烷的实时回收率明显大于稳态驱替过程中封存甲烷的实时回收率。从而证明了, 采用脉冲二氧化碳气体驱替甲烷, 可提高储层中封存甲烷的回收率 (R_{CH_4})。

[0160] 在本实施例2中的公式, 已提前内嵌入数据采集终端中, 随着二氧化碳气体脉冲驱替甲烷实验过程的进行, 通过实验数据可直接得到封存甲烷的实时回收率 $R_{\text{CH}_4\text{-mrag}(i)}$ 与驱替时间的关系, 并得到封存甲烷的最终回收率 $R_{\text{CH}_4\text{-storage-final}}$, 二氧化碳含量 $Q_{\text{CO}_2\text{-storage}}$ 以及驱替置换比 β 等驱替评价指标。通过与稳态驱替过程对比, 分析可知, 二氧化碳脉冲驱替置换甲烷具有驱替时间短、甲烷回收率高、驱替效果更好的优点。

[0161] 综上, 本发明的二氧化碳脉冲驱替置换甲烷的实验系统, 通过设置依次连接的气体供应系统、脉冲控制系统、储层环境模拟系统、数据采集处理系统和尾气回收系统, 在气体供应系统输出的二氧化碳气体通过脉冲控制系统转换成非稳态的脉冲气体, 脉冲气体进入储层环境模拟系统缩短二氧化碳驱替置换甲烷的时间, 提高了二氧化碳驱替置换甲烷的效率和甲烷的回收率, 同时, 通过数据采集处理系统实时记录和分析处理储层环境模拟系统的实验数据, 实时反映动态驱替过程, 从而可准确得到驱替评价指标与驱替时间的关系。

解决了现有二氧化碳气体驱替置换甲烷的装置存在驱替时间长,以及无法实时反映动态驱替过程,导致无法明确驱替评价指标与驱替时间的关系的问题。

[0162] 本发明的二氧化碳气体驱替置换甲烷的实验评价方法,通过在驱替过程中,利用数据采集处理系统和传感器元件实时监测气体流量、压力、温度及排出气体组分含量的变化,借助数据处理软件实现对动态驱替过程中甲烷回收率的实时计算,以及驱替完成后,驱替置换比、二氧化碳封存量等指标的分析,一方面针对二氧化碳气体脉冲驱替置换甲烷效果建立完善的实验评价方法,另一方面通过二氧化碳气体脉冲驱替置换甲烷,提高采出效率与甲烷回收率,为实际的非常规天然气的开采提供了有利的参考价值,在天然气开采技术领域,具有推广应用价值。

[0163] 以上实施例仅是为充分说明本发明而所举的较佳的实施例,本发明的保护范围不限于此。本技术领域的技术人员在本发明基础上所作的等同替代或变换,均在本发明的保护范围之内。

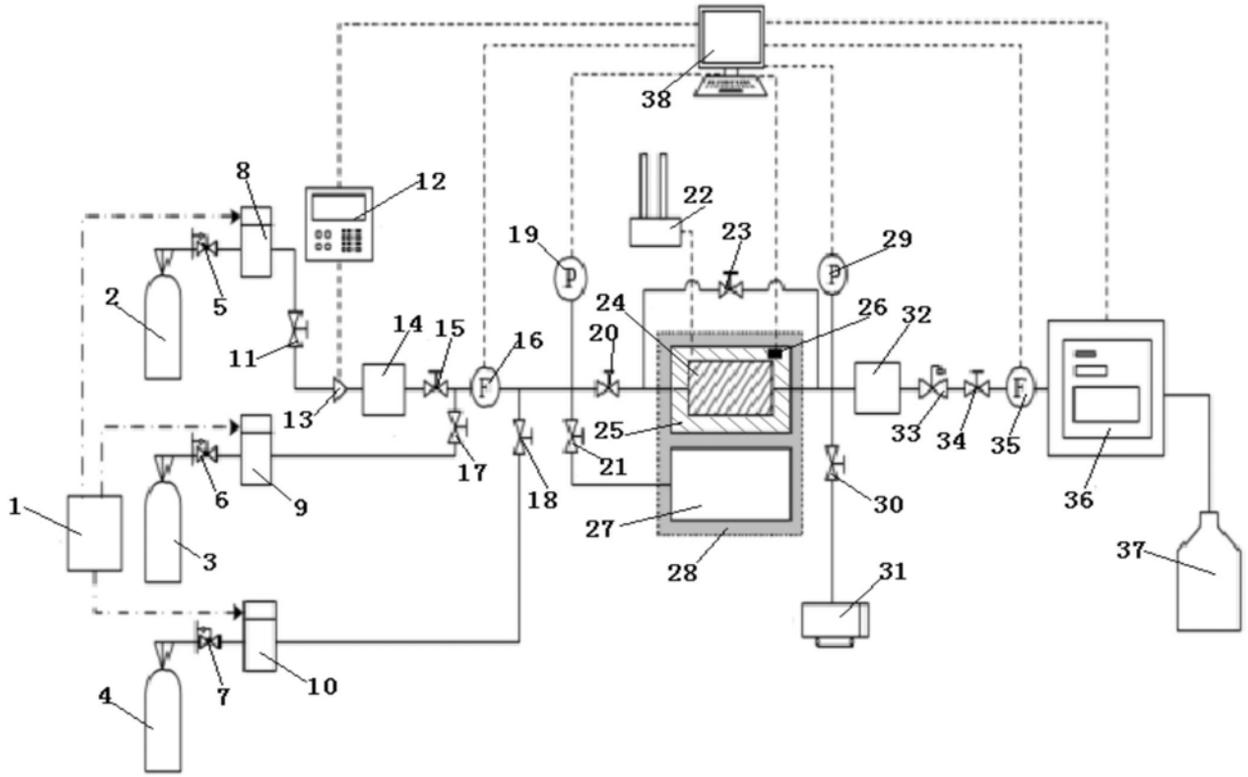


图1

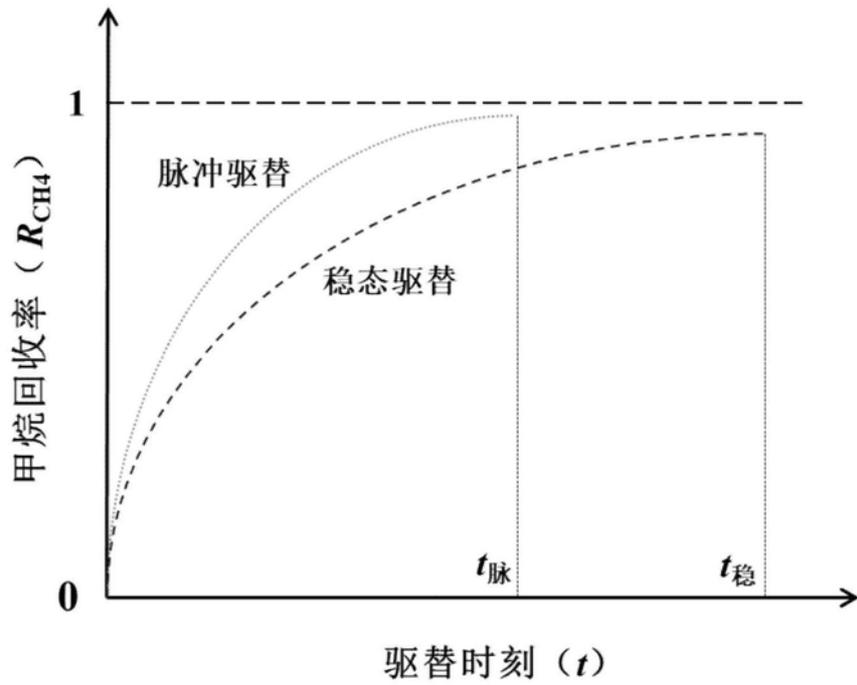


图2