



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112924354 B

(45) 授权公告日 2022.09.20

(21) 申请号 202110086065.2

CN 109827882 A, 2019.05.31

(22) 申请日 2021.01.22

CN 105259080 A, 2016.01.20

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 111235483 A, 2020.06.05

申请公布号 CN 112924354 A

CN 110967289 A, 2020.04.07

(43) 申请公布日 2021.06.08

CN 101082563 A, 2007.12.05

(73) 专利权人 西南石油大学

CN 107703023 A, 2018.02.16

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

CN 101059467 A, 2007.10.24

CN 103148888 A, 2013.06.12

CN 106501145 A, 2017.03.15

(72) 发明人 康毅力 赖哲涵 陈明君 游利军
白佳佳 刘江 陆钰 李佩松

郭为等.《页岩基质解吸-扩散-渗流耦合实验及数学模型》.《力学学报》.2015,第47卷(第6期),

(51) Int. Cl.

Yili Kang等.《An Experimental Study on Porosity and Permeability Stress-Sensitive Behavior of Sandstone Under Hydrostatic Compression: Characteristics, Mechanisms and Controlling Factors》.《Rock Mechanics and Rock Engineering》.2018,

G01N 15/08 (2006.01)

G01N 1/40 (2006.01)

李勇明等.《考虑应力敏感和水力裂缝方位角的页岩产能模型》.《西南石油大学学报(自然科学版)》.2019,第41卷(第6期), (续)

(56) 对比文件

CN 102879290 A, 2013.01.16

CN 110210157 A, 2019.09.06

CN 103063544 A, 2013.04.24

CN 108732061 A, 2018.11.02

US 4123390 A, 1978.10.31

CN 108733888 A, 2018.11.02

CN 112081583 A, 2020.12.15

JP 2002267097 A, 2002.09.18

CN 104897525 A, 2015.09.09

审查员 胡议文

权利要求书3页 说明书7页 附图1页

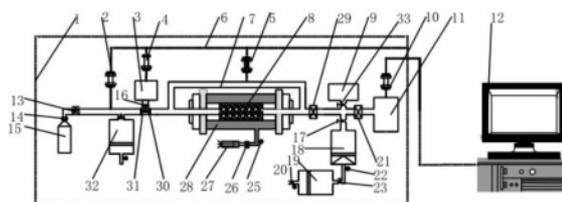
(54) 发明名称

一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法。将页岩柱塞样放入岩心夹持器中,施加等于平均应力的恒定围压,通过增压泵将等于地层孔隙压力的甲烷气体注入岩心,待甲烷吸附平衡后,通过岩心出口端的回压阀调整孔隙压力,模拟页岩气开采过程中,由于地层孔隙压力衰减而引发的页岩基块孔喉系统应力敏感性。基于页岩储层微观孔隙结构和气体赋存特征,并通过监测实验过程中岩心两

端压力变化,获得压力衰减数据,计算不同孔隙压力下甲烷扩散系数,定量评价地层孔隙压力衰竭对页岩甲烷传输能力的影响。本发明真实模拟页岩地层压力衰减过程中的扩散系数随有效应力变化的行为,为准确预测页岩气井产能和优化开发方案提供基础数据。



CN 112924354 B

[接上页]

(56) 对比文件

康毅力等.《储气库井注气压力剧变诱发微粒运移实验模拟》.《石油钻采工艺》.2020,第42卷(第6期),

Zhihang Li等.《Measurement of gas

diffusion coefficient and analysis of influencing factors for Shaanxi Debao coalbed methane reservoir in China》.《Journal of Petroleum Exploration and Production Technology》.2021,

1. 一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法,其特征在于,所采用的实验装置包括气源、中间容器一、岩心夹持器、回压阀、增压泵一、增压泵二、若干控制阀门、管线、围压泵、真空泵、中间容器二、计算机、恒温系统;气源通过管线依次连接到增压泵二、岩心夹持器、回压阀,在岩心夹持器中部侧面设有围压泵;

采用上述装置进行实验,具体包括以下步骤:

步骤S10.按照SYT5358-2010岩样制备方法制备页岩柱塞样;首先采用氮气钻取并切割直径为25.0mm、长度为30.0-40.0mm的页岩柱塞样,然后将岩样放入60℃的烘箱中,每隔24h将岩样取出并称量,直至相邻两次质量变化小于1.0%,认为岩样充分烘干;

步骤S20.将孔隙度为0的钢质柱塞放入岩心夹持器中,通过恒温系统维持稳定的温度环境;待系统内温度稳定后,通过围压泵向钢质柱塞施加一定的围压,标定管线7、钢质柱塞断面至控制阀七29和控制阀八30间的全部空间体积 V_D ,标定方法为:打开控制阀十33,启动真空泵对系统内部抽真空24h,关闭控制阀十33,关闭真空泵;打开控制阀二16、控制阀九31,通过增压泵二32向体积为 V_R 的中间容器一3中注入氦气;待到达额定压力且稳定后,记录压力 P_1 ,关闭控制阀九31,关闭增压泵二32;打开控制阀八30,将中间容器一3与岩心夹持器连接,待压力稳定后,记录此时的压力 P_2 ;根据下列方程可求得管线7、钢质柱塞断面至控制阀七29和控制阀八30间的全部空间体积 V_D ;

$$V_D = \left(\frac{P_1 Z_2}{P_2 Z_1} - 1 \right) V_R$$

式中 V_D —管线7、钢质柱塞断面至控制阀七29和控制阀八30间的全部空间体积, cm^3 ;

V_R —标准容器体积, cm^3 ;

Z_1 、 Z_2 —分别为压力 P_1 、 P_2 下氦气的偏差因子,无因次;

步骤S30.将页岩柱塞样放入岩心夹持器中,通过恒温系统维持稳定的温度环境,通过围压泵向岩心施加恒定围压;打开控制阀十33,启动真空泵对实验系统内部抽真空24h,关闭控制阀十33,关闭真空泵;

所述温度为设定的储层温度;所述围压为设定的平均应力;

步骤S40.通过增压泵二32向中间容器一3中注入甲烷,待到达额定压力且稳定后,关闭控制阀九31,关闭增压泵二32;打开控制阀八30,将中间容器一3与岩心夹持器连通,待压力瞬间平衡后,关闭控制阀八30,记录此时压力传感器5的压力值为 P_3 ;通过压力传感器和计算机记录甲烷在岩样流动过程中的气体压力衰减数据,待系统压力12h内降低小于1KPa,且实验时间不少于120h,认为气体压力已达到平衡,记录此时压力传感器5的压力值为 P_4 ;

所述甲烷气体压力略高于孔隙压力;

步骤S50.通过增压泵一19向回压阀设置压力;打开控制阀四21、控制阀七29,将多余气体排至中间容器二11中,关闭控制阀七29,记录此时压力传感器5的压力值为 P_5 ,通过压力传感器5和计算机记录甲烷在岩样流动过程中的解吸数据,待系统压力12h内上升小于1KPa,且实验时间不少于120h,认为气体压力再次达到平衡;记录此时压力传感器5的压力值为 P_6 ;重复上述实验直至压力降至废弃压力,在系统末端设置中间容器二11回收实验使用后的甲烷气体;

所述回压阀压力值略低于设定的孔隙压力,每次设定的回压阀压力值均需要低于上次

设定值；

步骤S60. 在甲烷吸附解吸实验过程中, 甲烷向岩样中流动, 根据物质平衡和气体状态方程, 可将实验测得的压力随时间变化关系转化为进入岩心且被吸附的甲烷质量随时间变化的关系:

$$M_t = \frac{V_{gc}M}{R} \cdot \frac{p_{ini}}{Z_{ini} \cdot T_{ini}} - \frac{(V_{gc} + V_p)M}{R} \cdot \frac{p(t)}{Z(t) \cdot T(t)}$$

式中 M_t —时刻 t 岩心的甲烷吸附质量, g;

t —时间, s;

V_{gc} —气体腔室体积, cm^3 ;

V_p —岩心孔隙体积, cm^3 ;

R —气体常数, $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

M —气体摩尔质量, g/mol ;

p_{ini} —初始状态下的气体压力, MPa;

T_{ini} —初始状态下的气体温度, K;

Z_{ini} —初始状态下的气体压缩系数, 无量纲;

$p(t)$ —时刻 t 的气体压力, MPa;

$T(t)$ —时刻 t 的气体温度, K;

$Z(t)$ —时刻 t 的气体压缩系数, 无量纲;

步骤S70. 根据页岩中吸附气的赋存特征, 将页岩中的吸附气向有机质内部的扩散过程简化为一维线性扩散; 根据菲克第二定律和质量守恒原理得到:

$$\frac{M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{D\pi^2}{4h^2}t\right) \right]$$

式中 M_∞ 、 M_t —平衡时刻和 t 时刻岩心的甲烷吸附质量, g;

D —甲烷在页岩岩心中的扩散系数, cm^2/s ;

h —气体能够扩散进入干酪根的平均深度, nm;

对上述方程变形取自然对数, 得出下列表达式:

$$\ln\left(1 - \frac{\pi^2}{8} \frac{M_t}{M_\infty}\right) = -\frac{D\pi^2}{4h^2}t$$

上式是关于时间 t 的一次函数, 根据实验数据作方程左边与 t 的关系图, 再线性回归的得到拟合直线的斜率 l ; 根据如下方程即可求得某一温度压力条件下甲烷在页岩岩心中的扩散系数 D :

$$l = -\frac{D\pi^2}{4h^2}$$

步骤S80. 依据上述实验结果, 结合各评价指标对应权重, 依据页岩基块应力敏感程度评价指标划分应力敏感程度, 计算基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感指数 IS_{SGD} , 计算方法如下:

$$IS_{SGD} = \frac{D_{Pe} - D_{ap}}{D_{Pe}} \times 100\%$$

其中： D_{ap} ——页岩气藏废弃压力下的基块孔喉扩散系数；

D_{Pe} ——页岩气藏原始地层压力下的基块孔喉扩散系数。

2. 根据权利要求1所述的一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法，其特征在于：实验样品为柱塞岩样，可在较大尺度下有效模拟在真实地层条件下，地层孔隙压力衰竭对页岩基质吸附气解吸和扩散能力的影响。

3. 根据权利要求1所述的一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法，其特征在于：在围压恒定条件下，通过增压泵二32向岩心两端输入甲烷气体，模拟真实条件下页岩气藏中的孔隙压力。

4. 根据权利要求1所述的一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法，其特征在于：通过回压阀调节岩心两端甲烷气体压力大小，模拟在真实生产过程中页岩气藏的孔隙压力变化。

5. 根据权利要求1所述的一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法，其特征在于：通过设置压力梯度，还原了页岩气井真实生产过程中吸附气不断解吸和扩散的过程，模拟了页岩基质孔隙压力持续衰减对吸附气解吸和扩散的影响。

一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法

技术领域

[0001] 本发明涉及石油与天然气工程技术领域,特别涉及页岩气开发技术领域,具体是一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法。

背景技术

[0002] 页岩气是主要的非常规天然气资源之一。与常规气藏不同,由于页岩中的微纳孔缝十分发育,页岩气藏在孔缝结构上具有更为明显的多尺度性,使得页岩气产出属于跨越多种尺度、历经多种传质的复杂过程。

[0003] 页岩中富含大量的吸附气。以1990年代开发的美国五大页岩气藏为例,其吸附气平均占比为20%~85%。当地层降至临界解吸压力后即会发生吸附气大量解吸并成为供给气源。相关研究已证实,页岩有机质的力学强度较弱,当有效应力增大时,气体的运输通道极容易发生变形,同时,吸附层厚度的变化对于基质渗透性的影响非常显著,并且当页岩基质中的吸附气解吸后,其岩石力学性质也会发生相应变化。因此,随着页岩气开采过程所伴随的地层压力衰减,基质中吸附气解吸和扩散对于地层压力衰减的响应会愈发明显。

[0004] 岩石的应力敏感性是指岩石的渗流能力随有效应力变化而变化的特征,目前针对页岩应力敏感性的评价是基于裂缝渗透率对有效应力变化的响应特征进行表征的,并没有专门针对基块孔隙应力敏感性的实验方法。页岩基质中的气体传输主要是通过吸附气解吸和扩散的方式进行的,尤其到气藏开采的中后期,其受到应力敏感性的影响不可忽略。

[0005] 通常页岩应力敏感性实验是在一定微小孔隙压力条件下,通过改变围压来改变有效应力的,而在气藏实际开采过程中,则是通过平均应力恒定,地层孔隙压力不断降低从而导致有效应力不断增大的。因而传统的应力敏感实验方法无法真实还原页岩地层孔隙压力衰减对实验结果的影响。

[0006] 常规吸附/解吸测试扩散系数实验通过分析吸附量与浓度或压强变化的对应曲线计算扩散系数,能充分反应甲烷气体在岩石内部吸附/解吸和扩散的过程。但常规吸附/解吸实验也存在以下不足:①通常选取粉状样品开展吸附/解吸实验,表征的样品尺度较小,并不能表征甲烷扩散系数受样品尺寸大小的影响,无法真实反映页岩气产出过程中跨越多种尺度、历经多种传质的系列过程;②粉状样品制样过程复杂,且无法承压,因此不能用于表征页岩基质应力敏感性对吸附/解吸和扩散能力的影响。

[0007] 常规吸附/解吸实验是通过甲烷吸附来表征不同孔隙压力条件下的吸附、扩散能力,而在实际页岩气井生产过程中,则是吸附气不断解吸、扩散的过程。

[0008] 常规吸附/解吸实验在每次实验结束后,都需要将实验气体排出,重新抽真空并设置压力,实验过程较为复杂繁琐,无法真实还原生产过程中孔隙压力持续降低这一过程,且造成了一定资源浪费,同时,将甲烷直接排到大气中也不符合绿色环保的理念,且具有一定危险性。

[0009] 因此,面对现有实验的不足,亟需通过改进实验方法,测试孔隙压力逐级降低条件下的页岩基质甲烷吸附气量和扩散系数,从而模拟真实地层条件下页岩气开采过程中,伴

随地层压力衰减,基质吸附气解吸和扩散能力的变化,探索一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法。

发明内容

[0010] 为克服现有技术中的不足之处,本发明提出了一种考虑基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法。本方法先使用钢质柱塞标定柱塞两端的空间体积。再将页岩岩心放入岩心夹持器中;开启恒温系统,将温度升至储层温度;待温度稳定后,将围压设置为平均应力,对实验装置抽真空24h;通过增压泵向中间容器中注入略高于孔隙压力的甲烷气体;将中间容器与岩心夹持器连通,待两端压力平衡后,将中间容器与岩心夹持器断开连接;通过压力传感器和计算机记录甲烷在岩样中流动时的气体压力衰减数据,直至气体压力达到平衡;设置回压阀压力略低于岩心夹持器中的压力,将多余气体排出至中间容器中,继续开展吸附/解吸实验直至孔隙压力到达气藏废弃压力。本发明综合考虑了页岩多尺度储渗空间、吸附气、地层温度、平均应力、孔隙压力、页岩气实际生产过程有效应力变化等因素对吸附气解吸和扩散能力的影响。通过本方法测得甲烷吸附气量和扩散系数,并根据不同有效应力下的甲烷吸附量和扩散系数的变化表征基质应力敏感性,由此获得的页岩基块应力敏感性真实可靠。

[0011] 本发明解决上述技术问题所提供的技术方案是:

[0012] 本发明公开了一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法,其特征在于,所采用的实验装置包括气源、中间容器、岩心夹持器、回压阀、控制阀门、管线、围压泵、真空泵、计算机、恒温系统;气源通过管线依次连接到增压泵、中间容器、岩心夹持器、回压阀、中间容器,在岩心夹持器中部侧面设有围压泵,在回压阀上连接有回压气源,在中间容器和岩心夹持器上都连接有压力传感器。

[0013] 采用上述装置进行实验,具体包括以下步骤:

[0014] 步骤S10.按照SYT5358-2010岩样制备方法制备页岩柱塞样;首先采用氮气钻取并切割直径为25.0mm、长度为30.0-40.0mm的页岩岩样,然后将岩样放入60℃的烘箱中,每隔24h将岩样取出并称重,直至相邻两次质量变化小于1.0%,认为岩样充分烘干;

[0015] 步骤S20.将钢质柱塞(孔隙度为0)放入岩心夹持器中,通过恒温系统维持稳定的温度环境;待系统内温度稳定后,通过围压泵向钢质柱塞施加一定的围压,标定管线7、钢质柱塞断面至控制阀29和控制阀30间的全部空间体积 V_D ,标定方法为:打开控制阀33,启动真空泵对系统内部抽真空24h,关闭控制阀33,关闭真空泵;打开控制阀16、31,通过增压泵向中间容器(已知体积为 V_R)中注入氦气;待到达额定压力且稳定后,记录压力 P_1 ,关闭控制阀31,关闭增压泵;打开控制阀30,将中间容器与岩心夹持器连接,待压力稳定后,记录此时的压力 P_2 ;根据下列方程可求得管线7、钢质柱塞断面至控制阀29和控制阀30间的全部空间体积 V_D ;

$$[0016] \quad V_D = \left(\frac{P_1 Z_2}{P_2 Z_1} - 1 \right) V_R$$

[0017] 式中 V_D —管线7、钢质柱塞断面至控制阀29和控制阀30间的全部空间体积, cm^3 ;

[0018] V_R —标准容器体积, cm^3 ;

[0019] Z_1 、 Z_2 —分别为压力 P_1 、 P_2 下氦气的偏差因子,无因次;

[0020] 步骤S30.将页岩柱塞样放入岩心夹持器中,通过恒温系统维持稳定的温度环境,通过围压泵向岩心施加恒定围压;打开控制阀33,启动真空泵对实验系统内部抽真空24h,关闭控制阀33,关闭真空泵;

[0021] 所述温度为设定的储层温度;所述围压为设定的平均应力;

[0022] 步骤S40.通过增压泵向中间容器(已知体积为 V_p)中注入甲烷,待到达额定压力且稳定后,关闭控制阀31,关闭增压泵;打开控制阀30,将中间容器与岩心夹持器连通,待压力瞬间平衡后,关闭控制阀30,记录此时压力传感器5的压力值为 P_3 ;通过压力传感器和计算机记录甲烷在岩样流动过程中的气体压力衰减数据,待系统压力12h内降低小于1kPa(实验时间不少于120h),认为气体压力已达到平衡,记录此时压力传感器5的压力值为 P_4 ;

[0023] 所述甲烷气体压力略高于孔隙压力;

[0024] 步骤S50.通过增压泵向回压阀设置压力;打开控制阀21、29,将多余气体排至中间容器11中,关闭控制阀29,记录此时压力传感器5的压力值为 P_5 ,通过压力传感器5和计算机记录甲烷在岩样流动过程中的解吸数据,待系统压力12h内上升小于1kPa(实验时间不少于120h),认为气体压力再次达到平衡;记录此时压力传感器5的压力值为 P_6 ;重复上述实验直至压力降至废弃压力;

[0025] 所述回压阀压力值略低于设定的孔隙压力,每次设定的回压阀压力值均需要低于上次设定值;

[0026] 步骤S60.在甲烷吸附解吸实验过程中,甲烷向岩样中流动,根据物质平衡和气体状态方程,可将实验测得的压力随时间变化关系转化为进入岩心且被吸附的甲烷质量随时间变化的关系:

$$[0027] \quad m_{st} = \frac{V_{gc}M}{R} \cdot \frac{P_{ini}}{Z_{ini} \cdot T_{ini}} - \frac{(V_{gc} + V_p)M}{R} \cdot \frac{p(t)}{Z(t) \cdot T(t)}$$

[0028] 式中 m_{st} —时刻 t 岩心的甲烷吸附质量, g;

[0029] t —时间, s;

[0030] V_{gc} —气体腔室体积, cm^3 ;

[0031] V_p —岩心孔隙体积, cm^3 ;

[0032] R —气体常数, $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$;

[0033] M —气体摩尔质量, g/mol ;

[0034] p_{ini} 、 T_{ini} 、 Z_{ini} —分别为初始状态下的气体压力(MPa)、温度(K)、压缩系数;

[0035] $p(t)$ 、 $T(t)$ 、 $Z(t)$ —分别为时刻 t 的气体压力(MPa)、温度(K)、压缩系数;

[0036] 步骤S70.根据页岩中吸附气的赋存特征,将页岩中的吸附气向有机质内部的扩散过程简化为一维线性扩散;根据菲克第二定律和质量守恒原理得到:

$$[0037] \quad \frac{M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{D\pi^2}{4h^2}t\right) \right]$$

[0038] 式中 M_∞ 、 M_t —平衡时刻和 t 时刻岩心的甲烷吸附质量, g;

[0039] D —甲烷在页岩岩心中的扩散系数, cm^2/s ;

[0040] h —气体能够扩散进入干酪根的平均深度, nm;

[0041] 对上述方程变形取自然对数,得出下表达式:

$$[0042] \quad \ln\left(1 - \frac{\pi^2 M_t}{8 M_\infty}\right) = \frac{D\pi^2}{4h^2} t$$

[0043] 上式是关于时间t的一次函数,根据实验数据作方程左边与t的关系图,再线性回归的得到拟合直线的斜率l;根据如下方程即可求得某一温度压力条件下甲烷在页岩岩心中的扩散系数D:

$$[0044] \quad l = -\frac{D\pi^2}{4h^2}$$

[0045] 步骤S80.依据上述实验结果,结合各评价指标对应权重,依据页岩基块应力敏感程度评价指标划分界限(表3),计算基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感指数(IS_{SGD}),计算方法如下:

$$[0046] \quad IS_{SGD} = \frac{D_{Pe} - D_{ap}}{D_{Pe}} \times 100\%$$

[0047] 其中: D_{ap} ——页岩气藏废弃压力下的基块孔喉扩散系数;

[0048] D_{Pe} ——页岩气藏原始地层压力下的基块孔喉扩散系数。

[0049] 本发明具有以下优点:

[0050] (1) 本发明采用将岩心围压恒定为平均应力、将孔隙压力由初始地层压力逐级降低的设定方法,能够更加真实地反映了页岩气开采过程中页岩的承压情况及孔隙压力变化。保持围压恒定,通过增压泵向岩心两端注入甲烷气体,其优势在于:①设定恒定围压可真实还原平均应力,且该应力在开采过程中是不变的;②通过增压泵注入岩心中的甲烷气体则真实还原了地层孔隙压力,为之后模拟生产过程中地层压力的不断降低提供了基础;

[0051] (2) 相比于常规吸附/解吸方法,本方法更加直观地反应页岩气开采过程中的有效应力变化对页岩吸附量和扩散能力的影响,其优势在于:①通过设置回压阀,还原了生产过程中孔隙压力不断衰减,有效应力持续增大的过程;②本方法通过压力梯度设定可持续获取模拟真实生产过程中吸附气解吸、扩散时,扩散系数和吸附量的变化;

[0052] (3) 相比常规吸附/解吸方法,本方法更加节能、环保、安全,其优势在于:①只需向装置中加气一次,实验操作更加简单,且避免了实验气体的浪费;②将实验使用后的气体回收至中间容器中,避免了环境污染,实现了实验气体的回收再利用,同时也增加了实验的安全性。

附图说明

[0053] 图1为本发明一种基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感实验评价方法流程图;

[0054] 图中:

[0055] 1—恒温装置;2、4、5、10—压力传感器;3/11—中间容器;6—导线;7—管线;8—岩心;9—真空泵;10—岩心夹持器;12—计算机;13、16、17、21、23、26、29、30、31—控制阀;14、22、25—压力表;15—甲烷气源;18—回压阀;19、32—增压泵;20—氮气气源;27—围压泵;28—岩心夹持器。

具体实施方式

[0056] 下面结合实例和附图对本发明做更进一步的说明。

[0057] 步骤S10.按照SYT5358-2010岩样制备方法制备页岩柱塞样;首先采用氮气钻取并切割直径为25.20mm、长度为38.20mm的页岩柱塞样,然后将岩样放入60℃的烘箱中,每隔24h将岩样取出并称重,直至相邻两次质量变化小于1.0%,认为岩样充分烘干;烘干后测得其孔隙度为3.57%;

[0058] 步骤S20.将钢质柱塞(孔隙度为0)放入岩心夹持器中,通过恒温系统维持稳定的温度环境;待系统内温度稳定后,通过围压泵向钢质柱塞施加一定的围压,标定管线7、钢质柱塞断面至控制阀29和控制阀30间的全部空间体积 V_D ,标定方法为:打开控制阀33,启动真空泵对系统内部抽真空24h,关闭控制阀33,关闭真空泵;打开控制阀16、31,通过增压泵向中间容器(已知体积为 V_R)中注入氦气;待到达额定压力且稳定后,记录压力 P_1 ,关闭控制阀31,关闭增压泵;打开控制阀30,将中间容器与岩心夹持器连接,待压力稳定后,记录此时的压力 P_2 ;根据下列方程可求得管线7、钢质柱塞断面至控制阀29和控制阀30间的全部空间体积 V_D 为60.2736 cm^3 ;

$$[0059] \quad V_D = \left(\frac{P_1 Z_2}{P_2 Z_1} - 1 \right) V_R$$

[0060] 式中 V_D —管线7、钢质柱塞断面至控制阀29和控制阀30间的全部空间体积, cm^3 ;

[0061] V_R —标准容器体积, cm^3 ;

[0062] Z_1 、 Z_2 —分别为压力 P_1 、 P_2 下氦气的偏差因子,无因次;

[0063] 步骤S30.将页岩柱塞样放入岩心夹持器中,通过恒温系统设定环境温度为83℃(地层温度),待系统内温度稳定后,通过围压泵向岩心施加59MPa围压(平均应力);打开控制阀33,启动真空泵对系统内部抽真空24h,关闭控制阀33,关闭真空泵;

[0064] 步骤S40.通过增压泵向中间容器(已知体积为 V_R)中注入甲烷,待到压力达到38MPa(地层孔隙压力)且稳定后,关闭控制阀31,关闭增压泵;打开控制阀30,将中间容器与岩心夹持器连通,待压力瞬间平衡后,关闭控制阀30,记录此时压力传感器5的压力值为 P_3 ;通过压力传感器和计算机记录甲烷在岩样流动过程中的气体压力衰减数据,待系统压力12h内降低小于1KPa,认为气体压力已达到平衡,记录此时压力传感器5的压力值为 P_4 (本次实验压力平衡时间约为130h);

[0065] 步骤S50.通过增压泵向回压阀设置压力为36MPa;打开控制阀21、29,将多余气体排至中间容器11中,关闭控制阀29,记录此时压力传感器5的压力值为 P_5 ,通过压力传感器5和计算机记录甲烷在岩样流动过程中的解吸数据,待系统压力12h内上升小于1KPa(本次实验压力平衡时间约为130h),认为气体压力再次达到平衡;记录此时压力传感器5的压力值为 P_6 ;重复上述实验直至压力降至废弃压力;

[0066] 步骤S60.在甲烷吸附解吸实验过程中,甲烷向岩样中流动,根据物质平衡和气体状态方程,可将实验测得的压力随时间变化关系转化为进入岩心且被吸附的甲烷质量随时间变化的关系如表1所示:

$$[0067] \quad m_{st} = \frac{V_{gc} M}{R} \cdot \frac{P_{ini}}{Z_{ini} \cdot T_{ini}} - \frac{(V_{gc} + V_p) M}{R} \cdot \frac{p(t)}{Z(t) \cdot T(t)}$$

[0068] 式中 m_{st} —时刻 t 岩心的甲烷吸附质量, g;

[0069] t —时间, s;

[0070] V_{gc} —气体腔室体积, cm^3 ;

[0071] V_p —岩心孔隙体积, cm^3 ;

[0072] R —气体常数, $8.314J/(mol \cdot K)$;

[0073] M —气体摩尔质量, g/mol;

[0074] p_{ini} 、 T_{ini} 、 Z_{ini} —分别为初始状态下的气体压力 (MPa)、温度 (K)、压缩系数;

[0075] $p(t)$ 、 $T(t)$ 、 $Z(t)$ —分别为时刻 t 的气体压力 (MPa)、温度 (K)、压缩系数;

[0076] 步骤S70. 根据页岩中吸附气的赋存方法, 将页岩中的吸附气向有机质内部的扩散过程简化为一维线性扩散; 根据菲克第二定律和质量守恒原理得到:

$$[0077] \quad \frac{M_t}{M_\infty} = \frac{8}{\pi^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{D\pi^2}{4h^2}t\right) \right]$$

[0078] 式中 M_∞ 、 M_t —平衡时刻和 t 时刻岩心的甲烷吸附质量, g;

[0079] D —甲烷在页岩岩心中的扩散系数, cm^2/s ;

[0080] h —气体能够扩散进入干酪根的平均深度, nm;

[0081] 对上述方程变形取自然对数, 得出下表达式:

$$[0082] \quad \ln\left(1 - \frac{\pi^2}{8} \frac{M_t}{M_\infty}\right) = \frac{D\pi^2}{4h^2}t$$

[0083] 上式是关于时间 t 的一次函数, 根据实验数据作方程左边与 t 的关系图, 再线性回归的得到拟合直线的斜率 l ; 根据如下方程即可求得某一温度压力条件下甲烷在页岩岩心中的扩散系数 D 如表2所示;

$$[0084] \quad l = -\frac{D\pi^2}{4h^2}$$

[0085] 步骤S80. 依据上述实验结果, 结合各评价指标对应权重, 依据页岩基块应力敏感指数评价指标划分界限 (表3), 根据初始地层压力和废弃压力下扩散系数, 计算基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感指数 (IS_{SGD}) 为36.72%, 其应力敏感程度为中等偏弱。

[0086] 表1孔隙压力与吸附量对应关系

[0087] 孔隙压力, MPa	38	28	23	13	5
吸附量 m_{st} , cm^3/g	2.161	2.130	2.111	1.872	1.197

[0088] 表2孔隙压力与扩散系数对应关系

[0089] 孔隙压力, MPa	38	28	23	13	5
扩散系数 D , m^2/s	2.56×10^{-9}	2.13×10^{-9}	1.87×10^{-9}	1.71×10^{-9}	1.62×10^{-9}

[0090] 表3基于气体扩散系数的页岩储层应力敏感指数评价指标

[0091] 应力敏感指数, %	$IS_{SGD} \leq 5$	$5 < IS_{SGD} \leq 30$	$30 < IS_{SGD} \leq 50$	$50 < IS_{SGD} \leq 70$	$70 < IS_{SGD} \leq 90$	$IS_{SGD} > 90$
应力敏感程度	无	弱	中等偏弱	中等偏强	强	极强

[0092] 以上所述, 并非对本发明作任何形式上的限制, 虽然本发明已通过上述实施例揭示, 然而并非用以限定本发明, 任何熟悉本专业的技术人员, 在不脱离本发明技术方案范围

内,当可利用上述揭示的技术内容作出变动或修饰为等同变化的等效实施例,但凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属于本发明技术方案的范围。

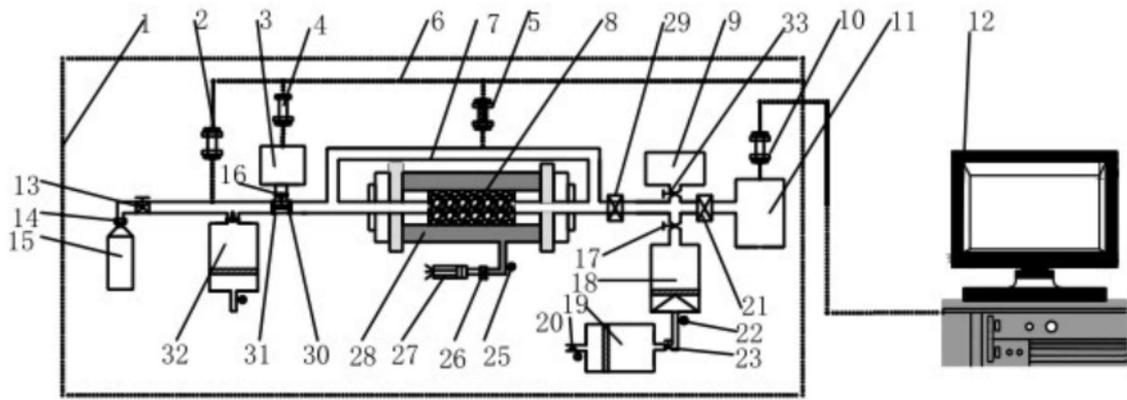


图1