



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112129482 B

(45) 授权公告日 2022. 11. 25

(21) 申请号 202010810490.7

(22) 申请日 2020.08.13

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112129482 A

(43) 申请公布日 2020.12.25

(73) 专利权人 中国石油天然气股份有限公司
地址 100007 北京市东城区东直门北大街9号

(72) 发明人 李武广 谢军 沈瑞 党录瑞

(74) 专利代理机构 北京三友知识产权代理有限公司 11127
专利代理师 谷敬丽 薛平

(51) Int. Cl.

G01M 9/00 (2006.01)

G01N 13/04 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 203241324 U, 2013.10.16

刘华等. 页岩储层多尺度渗流实验及数学模型研究.《西安石油大学学报(自然科学版)》.2018, (第04期),

Gao Shusheng. A coupling model for gas diffusion and seepage in SRV section of shale gas.《Natural Gas Industry B 4》.2017, 第120-126页.

审查员 刘园

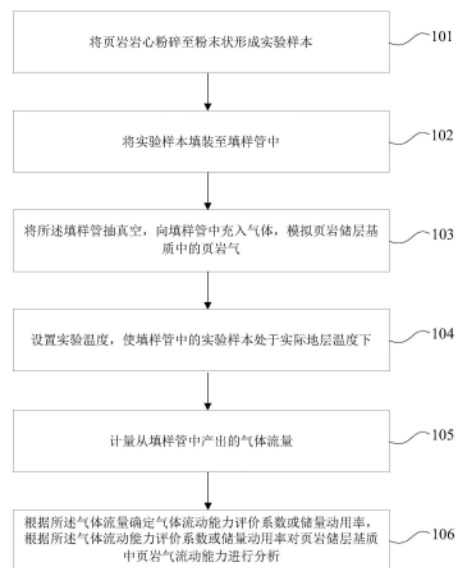
权利要求书3页 说明书11页 附图4页

(54) 发明名称

页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法及装置,该方法包括:将页岩岩心粉碎至粉末状形成实验样本;将实验样本填装至填样管中;将所述填样管抽真空,向填样管中充入气体,模拟页岩储层基质中的页岩气;设置实验温度,使填样管中的实验样本处于实际地层温度下;计量从填样管中产出的气体流量;根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率,根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。本发明深入的分析页岩储层基质中页岩气产出规律,进一步明确页岩气井的生产能力。



1. 一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法,其特征在于,包括:

将页岩岩心粉碎至粉末状,通过筛网对粉末状的页岩岩心进行筛选,获得实验样本,消除了天然裂缝的影响;所述粉末状的页岩岩心为球体形状;

基于页岩岩心变成粉末之后,粉末状球体中含有页岩气,粉末中的页岩气向外流动,满足菲克定律,进而建立页岩储层基质中页岩气流动能力分析模型;

将实验样本填装至填样管中;所述填样管包括填样管体、两端的填样管盖,两端端盖上均包含有一个孔径流动通道,通过该孔径流动通道气体进入和流出填样管,在填样管的两端都要加上一层不锈钢筛网;

将填样管抽真空,向填样管中充入气体,模拟页岩储层基质中的页岩气;

设置实验温度,使填样管中的实验样本处于实际地层温度下;

计量从填样管中产出的气体流量;

根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率,根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析;

所述气体流量包括气体的流出时间和流出体积;

根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数,包括:

根据产出的气体的流出时间、流出体积和标准条件下页岩气的密度,确定累计页岩气产出质量;

基于页岩储层基质中页岩气流动能力分析模型,根据累计页岩气产出质量确定气体流动能力评价系数;

所述页岩储层基质中页岩气流动能力分析模型如下:

$$\ln \left(M_q - \frac{4\pi R^3 N_0}{3} \right) = \ln \left(-4\pi \frac{N_0 \sin(\lambda_1 R)}{M_1 \lambda_1} \int_0^R \cos(\lambda_1 r) r^2 dr \right) - f \lambda_1^2 t;$$

其中, f 表示气体流动能力评价系数; N_0 为初始状态下气体质量浓度, g/cm^3 ; R 表示粉末状页岩样品的半径; M_q 表示单个页岩粉末球体的页岩气产出的质量; t 表示气体流出时刻; λ_1 是大于0的常数; M_1 表示流出的页岩气质量; r 表示半径变量, $r \in [0, R]$ 。

2. 如权利要求1所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法,其特征在于,根据所述气体流量确定储量动用率,包括:

根据所述气体流动能力评价系数确定储量动用率。

3. 如权利要求2所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法,其特征在于,按照如下公式确定储量动用率:

$$R' = \frac{M_q}{\frac{4\pi R^3 N_0}{3}};$$

其中, R' 表示储量动用率; M_q 表示单个页岩粉末球体的页岩气产出的质量; N_0 为初始状态下气体质量浓度, g/cm^3 ; R 表示粉末状页岩样品的半径。

4. 一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,包括:气体充入装置、填样管、温度控制装置、计量装置和分析装置;

所述填样管用于:填装实验样本,所述实验样本为将页岩岩心粉碎至粉末状,通过筛网

对粉末状的页岩岩心进行筛选而形成,消除了天然裂缝的影响;所述粉末状的页岩岩心为球形形状;所述填样管包括填样管体、两端的填样管盖,两端端盖上均包含有一个孔径流动通道,通过该孔径流动通道气体进入和流出填样管,在填样管的两端都要加上一层不锈钢筛网;

基于页岩岩心变成粉末之后,粉末状球体中含有页岩气,粉末中的页岩气向外流动,满足菲克定律,进而建立页岩储层基质中页岩气流动能力分析模型;

所述气体充入装置用于:为抽真空后的填样管中的实验样本提供并充入气体,模拟页岩储层基质中的页岩气;

所述温度控制装置用于:模拟实际地层温度,使填样管中的实验样本处于实际地层温度下;

所述计量装置用于:计量从填样管中产出的气体流量;

所述分析装置用于:根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率,根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析;

所述气体流量包括气体的流出时间和流出体积;

所述分析装置具体用于:

根据产出的气体的流出时间、流出体积和标准条件下页岩气的密度,确定累计页岩气产出质量;

基于页岩储层基质中页岩气流动能力分析模型,根据累计页岩气产出质量确定气体流动能力评价系数;

根据所述气体流动能力评价系数对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析;

所述页岩储层基质中页岩气流动能力分析模型如下:

$$\ln\left(M_q - \frac{4\pi R^3 N_0}{3}\right) = \ln\left(-4\pi \frac{N_0 \sin(\lambda_1 R)}{M_1 \lambda_1} \int_0^R \cos(\lambda_1 r) r^2 dr\right) - f \lambda_1^2 t;$$

其中, f 表示气体流动能力评价系数; N_0 为初始状态下气体质量浓度, g/cm^3 ; R 表示粉末状页岩样品的半径; M_q 表示单个页岩粉末球体的页岩气产出的质量; t 表示气体流出时刻; λ_1 是大于0的常数; M_1 表示流出的页岩气质量; r 表示半径变量, $r \in [0, R]$ 。

5.如权利要求4所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,所述气体充入装置包括注入泵、气体高压釜和盛水容器;

所述盛水容器、气体高压釜和注入泵用于:注入泵将盛水容器中的水注入气体高压釜下部,推动气体高压釜上部的气体注入实验样本中。

6.如权利要求5所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,所述气体充入装置还包括压力计量装置,用于计量所述气体高压釜的压力。

7.如权利要求4所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,所述温度控制装置包括加热装置和温度传感器,所述加热装置采用油浴加热,模拟实际地层温度;温度传感器用于监测加热温度。

8.如权利要求4所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,所述计量装置包括流量计,用于计量从填样管中产出的气体的流出时间和流出体积。

9.如权利要求4所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,所述分析装置用于:

根据所述气体流动能力评价系数确定储量动用率,所述储量动用率用于对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。

10.如权利要求9所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,按照如下公式确定储量动用率:

$$R' = \frac{M_q}{\frac{4\pi R^3 N_0}{3}};$$

其中, R' 表示储量动用率; M_q 表示单个页岩粉末球体的页岩气产出的质量; N_0 为初始状态下气体质量浓度, g/cm^3 ;R表示粉末状页岩样品的半径。

11.如权利要求4所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,还包括:气体收集装置,用于收集从所述填样管产出的气体。

12.如权利要求11所述的页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,其特征在于,还包括压力传感器,用于监测气体收集装置内气体的压力。

页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法及装置

技术领域

[0001] 本发明涉及页岩气特殊流动机理与页岩气井动态分析研究技术领域,尤其涉及页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法及装置。

背景技术

[0002] 本部分旨在为权利要求书中陈述的本发明实施例提供背景或上下文。此处的描述不因为包括在本部分中就承认是现有技术。

[0003] 目前页岩气已经实现工业化开采,但是页岩气是否有效益还有待评价,在不同沉积环境中或者同一沉积环境中、在同一区块或者不同区块中、在统一平台或者不同平台中的页岩气水平井表现出来的产量差异性很大,对于页岩储层中“气体是如何流动的?是如何流到改造缝网中的?”值得研究,直接关系到气井的产量,直接关系到是否能够实现最大产量和经济效益。目前关于页岩气流动机理的研究相对比较少,还仅限于在大宏观的实验机理层面,对于页岩储层基质中气体的流动机理以及产出机理研究很少,甚至于处于空白领域。

[0004] 因此,亟需提出一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法及装置。

发明内容

[0005] 本发明实施例提供一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析方法,用以解决现有技术中缺少对页岩气流动能力的研究,该方法包括:

[0006] 将页岩岩心粉碎至粉末状形成实验样本;

[0007] 将实验样本填装至填样管中;

[0008] 将填样管抽真空,向填样管中充入气体,模拟页岩储层基质中的页岩气;

[0009] 设置实验温度,使填样管中的实验样本处于实际地层温度下;

[0010] 计量从填样管中产出的气体流量;

[0011] 根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率,根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。

[0012] 本发明实施例还提供一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置,用以解决现有技术中缺少对页岩气流动能力的研究,该装置包括:气体充入装置、填样管、温度控制装置、计量装置和分析装置;

[0013] 所述填样管用于:填装实验样本,所述实验样本为将页岩岩心粉碎至粉末状而形成;

[0014] 所述气体充入装置用于:为抽真空后的填样管中的实验样本提供并充入气体,模拟页岩储层基质中的页岩气;

[0015] 所述温度控制装置用于:模拟实际地层温度,使填样管中的实验样本处于实际地层温度下;

[0016] 所述计量装置用于:计量从填样管中产出的气体流量;

[0017] 所述分析装置用于：根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率，根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。

[0018] 本发明实施例中，计量从填样管中产出的气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率，根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析，这样深入的分析页岩储层基质中页岩气产出规律，进一步明确页岩气井的生产能力。

附图说明

[0019] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案，下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍，显而易见地，下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例，对于本领域普通技术人员来讲，在不付出创造性劳动的前提下，还可以根据这些附图获得其他的附图。在附图中：

[0020] 图1为本发明实施例中页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置的结构框图；

[0021] 图2为本发明实施例中页岩储层基质中页岩气流动能力分析流程图；

[0022] 图3为本发明实施例中粉末状页岩样品(即球形)的气体流动模型；

[0023] 图4为本发明实施例中填样管的结构示意图；

[0024] 图5为本发明实施例中页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置具体连接图。

具体实施方式

[0025] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚明白，下面结合附图对本发明实施例做进一步详细说明。在此，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，但并不作为对本发明的限定。

[0026] 本发明提出一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置，图1为本发明实施例中页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置的结构框图，如图1所示，包括：气体充入装置1、填样管2、温度控制装置3、计量装置4和分析装置5，所述气体充入装置与所述填样管连接，所述填样管位于所述控制装置内，所述填样管还与计量装置连接，所述计量装置还与分析装置连接；

[0027] 所述填样管用于：填装实验样本，所述实验样本为将页岩岩心粉碎至粉末状而形成；

[0028] 所述气体充入装置用于：为抽真空后的填样管中的实验样本提供并充入气体，模拟页岩储层基质中的页岩气；

[0029] 所述温度控制装置用于：模拟实际地层温度，使填样管中的实验样本处于实际地层温度下；

[0030] 所述计量装置用于：计量从填样管中产出的气体流量；

[0031] 所述分析装置用于：根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率，根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。

[0032] 基于图1所示的装置，提出一种页岩储层基质中页岩气流动能力分析装置(即一种

实验流程方法),如图2所示,该方法包括:

[0033] 步骤101:将页岩岩心粉碎至粉末状形成实验样本;

[0034] 步骤102:将实验样本填装至填样管中;

[0035] 步骤103:将填样管抽真空,向填样管中充入气体,模拟页岩储层基质中的页岩气;

[0036] 步骤104:设置实验温度,使填样管中的实验样本处于实际地层温度下;

[0037] 步骤105:计量从填样管中产出的气体流量;

[0038] 步骤106:根据所述气体流量确定气体流动能力评价系数或储量动用率,根据所述气体流动能力评价系数或储量动用率对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。

[0039] 下面介绍一下实验样本。

[0040] 页岩储层中会有天然裂缝和一些微裂隙的存在,如果使用现场直接取上来的全尺寸岩心或者使用实验钻取的柱状岩心来分析页岩储层基质中页岩气的流动能力显然是比较理想的情况,没有在纯基质的环境下考虑,只有将实验样品弄的更小才能还原到基质环境,因此需要将页岩样品变为粉末状,消除天然裂缝的影响,足够小就可以近似看成一个微小的球体粉末(图3),页岩储层是有无数个微小的页岩球体组成,这些粉末状球体中含有大量的页岩气,在一个球体,他的球体内气体质量和球体外表面气体质量不同,在这种质量浓度差的作用下向外缓慢流动以及产出。

[0041] 基于此,在设计实验样本时,是将页岩岩心制成粉末,并通过筛网(0.1mm-1mm,根据需要选择,越小越好)进行筛选。

[0042] 在本发明实施例中,采用如下方式填充样本:把填样管2竖起,上紧填样端盖的一端朝下,视装入样品的总量将样品装入,并用压实机断向下夯实,装满后,上紧端盖,在填样管2的两端都要加上一层孔径为0.045mm的不锈钢筛网。

[0043] 图4为本发明实施例中填样管的结构示意图,填样管2包括填样管体21、两端的填样管盖22,两端端盖上均包含有一个 $2\mu\text{m}$ 的孔径流动通道23,通过该孔径流动通道23气体可以进入和流出填样管2。

[0044] 填样管2最高承受孔隙压力为70MPa。

[0045] 在本发明实施例中,如图5所示,所述气体充入装置1可以包括注入泵11、气体高压釜12和盛水容器13,所述盛水容器、注入泵、气体高压釜和填样管依次连接;

[0046] 所述盛水容器、气体高压釜和注入泵用于:注入泵将盛水容器中的水注入气体高压釜下部,推动气体高压釜上部的气体注入实验样本中。

[0047] 具体的,注入泵(ISC0泵)11通过直通阀14与气体高压釜12连接。

[0048] 如图5所示,气体充入装置1还可以包括压力计量装置(可以是压力表),所述压力计量装置15与所述气体高压釜连接;用于计量所述气体高压釜的压力。

[0049] 如图5所示,压力计量装置与气体高压釜、气体高压釜与填样管可以通过六通阀16连接。填样管还与计量装置通过六通阀16连接。

[0050] 在本发明实施例中,所述温度控制装置可以采用油浴加热,这样加热比较均匀稳定,从而模拟实际地层温度。温度控制装置3还可以包括温度传感器,用于监测加热温度。

[0051] 在本发明实施例中,如图5所示,所述计量装置4可以包括流量计41,用于计量从填样管中产出的气体的流出时间和流出体积。还包括气体收集装置42,与所述填样管连接,用于收集从所述填样管产出的气体。计量装置4与填样管2通过六通阀16连接,即流量计41、气

体收集装置42通过六通阀16连接填样管2。采用气体收集装置42可以减少排放,符合国家安全环保的原则。

[0052] 所述计量装置还可以包括压力传感器43,通过六通阀16与所述气体收集装置连接,用于监测气体收集装置内气体的压力。

[0053] 如图4所示,分析装置5可以包括巡检仪51和电脑52,用电脑进行数据分析。巡检仪51与压力传感器43连接,用于从压力传感器43获得气体收集装置内气体的压力,将所述压力发送至所述分析装置。

[0054] 在本发明实施例中,所述分析装置具体用于:

[0055] 根据产出的气体的流出时间、流出体积和标准条件下页岩气的密度,确定累计页岩气产出质量;

[0056] 基于页岩储层基质中页岩气流动能力分析模型,根据累计页岩气产出质量确定气体流动能力评价系数;

[0057] 根据所述气体流动能力评价系数对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。

[0058] 或,根据所述气体流动能力评价系数确定储量动用率,所述储量动用率用于对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析。

[0059] 在对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析时,也使用到压力,比如页岩气的密度等一些数据应该是在该压力下的数值。

[0060] 具体实验具体过程为:(1)将粉末状页岩岩心装入填样管,并用压实机断向下夯实。(2)连接填样管到系统,并进行抽真空。(3)关闭出口端六通阀,通过并向填样管中充入气体,然后关闭入口六通阀,待气体平衡稳定,充分吸收。(4)打开出口端六通阀,并记录计时间和气体体积。

[0061] 下面详细描述对页岩储层基质中页岩气流动能力进行分析相应的公式机器推导过程。

[0062] 1、页岩储层基质中页岩气流动能力评价数学方程推导

[0063] 由图3的物理模型建立相应的数学模型,页岩岩心在变成粉末之后,粉末中的气体向外流动,满足菲克定律,因此建立相应的数学模型。

[0064] 考察空间某物体G的流动问题,以函数 $N(x, y, z, t)$ 表示物体G在位置 (x, y, z) 及时刻 t 的质量浓度,它表示单位体积中所扩散物质的质量。

[0065] 物体在无穷小时段 dt 内沿法线方向 n 流过一个无穷小面积 dS 的质量 dM 与物体浓度沿曲面 dS 法线方向的方向导数 $\frac{\partial N}{\partial n}$ 成正比,即:

$$[0066] \quad dM = -f(x, y, z) \frac{\partial N}{\partial n} dS dt \quad (1)$$

[0067] 其中, $f(x, y, z)$ 称为物体G在点 (x, y, z) 处的流动能力评价系数,它应取正值。(1)式中负号的出现是由于质量浓度总是从浓度高的一侧流向浓度低的一侧,因此, dM 应与 $\frac{\partial N}{\partial n}$ 异号。

[0068] 在物体G内任取点 Γ ,它所包围的区域记为 Ω ,由(1)式从时刻 t_1 到 t_2 流进此闭曲面的全部质量为:

$$[0069] \quad M = \int_{t_1}^{t_2} \left[\iint f(x, y, z) \frac{\partial N}{\partial n} dS \right] dt \quad (2)$$

[0070] 其中, $\frac{\partial N}{\partial n}$ 表示沿 Γ 上单位外法线方向 n 的方向导数。

[0071] 流入的质量使物体内部浓度发生变化, 在时间间隔 (t_1, t_2) 中物体浓度从 $N(x, t_1)$ 变化到 $N(x, t_2)$, 它所应该增加的物体质量是:

$$[0072] \quad \iiint [N(x, y, z, t_2) - N(x, y, z, t_1)] dx dy dz \quad (3)$$

[0073] 假设函数 N 关于变量 x, y, z 具有二阶连续偏导数, 关于 t 具有一阶连续偏导数, 利用格林公式得:

$$[0074] \quad \int_{t_1}^{t_2} \iiint \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(f \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(f \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(f \frac{\partial N}{\partial z} \right) \right] dx dy dz = \iiint \left[\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial N}{\partial t} dt \right] dx dy dz \quad (4)$$

[0075] 交换积分次序, 就得到:

$$[0076] \quad \int_{t_1}^{t_2} \iiint \left[\frac{\partial N}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(f \frac{\partial N}{\partial x} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(f \frac{\partial N}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial z} \left(f \frac{\partial N}{\partial z} \right) \right] dx dy dz dt = 0 \quad (5)$$

[0077] 由于 t_1, t_2 和 Ω 都是任意的, 则得到:

$$[0078] \quad \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(f \frac{\partial N}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(f \frac{\partial N}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(f \frac{\partial N}{\partial z} \right) \quad (6)$$

[0079] 此时 f 为常数, 则得到:

$$[0080] \quad \frac{\partial N}{\partial t} = f \left(\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 N}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

[0081] 由于把粉末状页岩样品看成是球体, 球坐标与直角坐标的转换关系为:

$$[0082] \quad \begin{cases} x = r \cos \theta \cos \varphi \\ y = r \sin \theta \cos \varphi \\ z = r \sin \varphi \end{cases} \quad (8)$$

[0083] 这可得到球体内气体在球坐标情况下的流动数学方程为:

$$[0084] \quad \frac{\partial N}{\partial t} = f \left(\frac{\partial^2 N}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial N}{\partial r} \right) \quad (9)$$

[0085] 式中, r 表示半径变量, $r \in [0, R]$, mm。

[0086] 2、页岩储层基质中页岩气流动能力评价数学的定解条件

[0087] 如果知道了物体在边界上的质量浓度状况和物体初始时刻的质量浓度, 就可以完全确定物体在以后时刻的质量浓度, 因此数学方程最自然的一个定界问题就是在已给的初始条件和边界条件下求问题的解。

[0088] 初始条件:

$$[0089] \quad N(r, 0) |_{0 \leq r \leq R} = N_0 = Q_0 \times \rho_1 \times \rho_2 \quad (10)$$

[0090] 其中, $N(r, 0)$ 为初始状态下气体质量浓度, g/cm^3 ; Q_0 为页岩储层中气体原始气含量, m^3/t ; ρ_1 为页岩岩石密度, g/cm^3 ; ρ_2 为初始状态下气体密度, g/cm^3 。

[0091] 边界条件:利用物理学中牛顿定律,从岩样流出的页岩气质量与质量浓度差成正比:

$$[0092] \quad dM = \sigma (N_1 - N_2) dS dt \quad (11)$$

[0093] 其中, σ 为基质与裂缝的综合流动系数; N_1 为流动前质量浓度; N_2 为扩流动后质量浓度。

[0094] 考察流过岩样表面的质量,从岩样内部一侧来看它应由傅里叶定律确定,而从物体与介质接触面的流动规律来看,它应该由牛顿定律所决定,因此,成立着关系式:

$$[0095] \quad -f \frac{\partial N}{\partial r} dS dt = \sigma (N_1 - N_2) dS dt \quad (12)$$

[0096] 即

$$[0097] \quad -f \frac{\partial N}{\partial r} = \sigma (N_1 - N_2) \quad (13)$$

[0098] 这种边界条件可以写成

$$[0099] \quad -f \frac{\partial N}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (14)$$

$$[0100] \quad -f \frac{\partial N}{\partial r} \Big|_{r=R} = \sigma N \quad (15)$$

[0101] 由于,近似认为球体外部没有质量,这类边界条件称为页岩储层基质中页岩气流动数学方程的第三类边界条件,式中, R 为粉末球体的半径,mm。

[0102] 综合式(9)、(10)、(14)和(15)共同构成了页岩储层基质中页岩气流动数学模型的综合本构方程组。

[0103] 3、页岩储层基质中页岩气流动能力评价数学方程求解

[0104] 对于方程(8)首先做变换,我们发现分母上存在变量 r ,因此可以作变换来消除 r ,

方便求解,可令新函数 $C = Nr$,则 $N = \frac{C}{r}$,那么

$$[0105] \quad \frac{\partial N}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial t} \quad (16)$$

$$[0106] \quad \frac{\partial N}{\partial r} = \frac{r \frac{\partial C}{\partial r} - C}{r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \frac{C}{r^2} \quad (17)$$

$$[0107] \quad \frac{\partial^2 N}{\partial r^2} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial C}{\partial r} + \frac{2C}{r^3} \quad (18)$$

[0108] 将公式(16)、(17)、(18)代入式(9),可得到新的方程为

$$[0109] \quad \frac{\partial C}{\partial t} = f \frac{\partial^2 C}{\partial r^2} \quad (19)$$

[0110] 那么相对应的初始条件变为 $C_0 = N_0 r$,那么相对应的边界条件变为:

$$[0111] \quad -f \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \quad -f \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=R} = \sigma C。$$

[0112] 对于方程 (19) 是关于两个变量 t 和 r 的方程, 可采用分离变量法进行求解方程组, 即可令

$$[0113] \quad C(r, t) = X(r) T(t) \quad (20)$$

[0114] 这里的 $X(r)$ 和 $T(t)$ 分别表示仅与 r 有关和仅与 t 有关的函数, 把他们代入方程 (8) 中, 得到:

$$[0115] \quad X\dot{T} = f\ddot{X}T \quad (21)$$

[0116] 即

$$[0117] \quad \frac{\dot{T}}{fT} = \frac{\ddot{X}}{X} \quad (22)$$

[0118] 这等式只有两边均等于常数时才成立。令此常数为 $-\lambda^2$, λ 是大于 0 的常数, 则有

$$[0119] \quad \dot{T} + \lambda^2 fT = 0 \quad (23)$$

$$[0120] \quad \ddot{X} + \lambda^2 X = 0 \quad (24)$$

[0121] 对于式 (23), 有通解为

$$[0122] \quad T(t) = Ae^{-f\lambda^2 t} \quad (25)$$

[0123] 对于式 (24), 有通解为

$$[0124] \quad X(r) = B\cos(\lambda r) + E\sin(\lambda r) \quad (26)$$

[0125] 则得到 $C(r, t)$ 的通解为

$$[0126] \quad C(r, t) = Ae^{-\lambda^2 t} [B\cos(\lambda r) + E\sin(\lambda r)] \quad (27)$$

[0127] 先根据边界条件 (14) 和 (15) 求解方程 (26):

[0128] 对于边界条件

$$[0129] \quad -f \frac{\partial C}{\partial r} \Big|_{r=0} = -fT(t) \frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (28)$$

[0130] 由于 $T(t)$ 不等于 0, 则得到

$$[0131] \quad \frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad (29)$$

[0132] 对于边界条件 (15) 式

$$[0133] \quad \left(f \frac{\partial N}{\partial r} + \sigma N \right) \Big|_{r=R} = \left(fT(t) \frac{\partial X}{\partial r} + \sigma T(t) X(r) \right) \Big|_{r=R} = 0 \quad (30)$$

[0134] 同理, 由于 $T(t)$ 不等于 0, 则得到

$$[0135] \quad \left(f \frac{\partial X}{\partial r} + \sigma X(r) \right) \Big|_{r=R} = 0 \quad (31)$$

[0136] 根据 (26) 式求得

$$[0137] \quad X(r)' = -B\lambda \sin(\lambda r) + E\lambda \cos(\lambda r) \quad (32)$$

[0138] 将边界条件 (29) 代入 (32) 式

$$[0139] \quad X(0)' = -B\lambda \sin(0) + E\lambda \cos(0) = E\lambda = 0$$

[0140] 因为 $\lambda > 0$, 则得到 $E = 0$ 。

[0141] 则方程 (21) 和 (27) 变为

$$[0142] \quad X(r) = B \cos(\lambda r) \quad (33)$$

$$[0143] \quad X(r)' = -B\lambda \sin(\lambda r) \quad (34)$$

[0144] 将式 (33) 和式 (34) 代入 (31) 式

$$[0145] \quad DX(R)' + \sigma X(R) = -B\lambda \sin(\lambda R) + \sigma B \cos(\lambda R) = 0$$

$$[0146] \quad \lambda \sin(\lambda R) = \sigma \cos(\lambda R)$$

$$[0147] \quad \frac{\sin(\lambda R)}{\cos(\lambda R)} = \frac{\sigma}{\lambda}$$

[0148] 即

$$[0149] \quad \tan(\lambda R) = \frac{\sigma}{\lambda} \quad (35)$$

[0150] 方程 (35) 是一个超越方程的正解, 存在着无穷多公分固有值 $\lambda_k (k=1, 2, \dots)$ 。

[0151] 则对应的一系列固有函数为

$$[0152] \quad X_k(r) = B_k \cos(\lambda_k r) \quad (36)$$

$$[0153] \quad T_k(t) = A_k e^{-f\lambda_k^2 t} \quad (37)$$

$$[0154] \quad C_k(r, t) = A_k e^{-f\lambda_k^2 t} B_k \cos(\lambda_k r) = G_k e^{-f\lambda_k^2 t} \cos(\lambda_k r) \quad (38)$$

[0155] 由于方程 (8) 和边界条件 (14) 和 (15) 都是齐次的, 故可利用叠加原理构造级数形式的解

$$[0156] \quad C_k(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} G_k e^{-f\lambda_k^2 t} \cos(\lambda_k r) \quad (39)$$

[0157] 其中, $G_k = A_k \times B_k$ 。

[0158] 为求系数 G_k , 根据式 (10) 初始条件可得

$$[0159] \quad C_0 = \sum_{k=1}^{\infty} G_k \cos(\lambda_k r) \quad (40)$$

[0160] 为确定系数 G_k , 须先证明固有函数系 $\{X_k\} = \{\cos(\lambda_k r)\}$ 在 $[0, L]$ 上正交, 设固有函数 X_n 和 X_m 分别对应于不同 λ_n 和 λ_m , 则代入 (19) 式

$$[0161] \quad X_n'' + \lambda_n^2 X_n = 0 \quad (41)$$

$$[0162] \quad X_m'' + \lambda_m^2 X_m = 0 \quad (42)$$

[0163] 用 X_m 和 X_n 分别乘以式 (35) 和 (36), 得到

$$[0164] \quad X_m X_n'' + X_m \lambda_n^2 X_n = 0 \quad (43)$$

$$[0165] \quad X_n X_m'' + X_n \lambda_m^2 X_m = 0 \quad (44)$$

[0166] 式 (35) 和 (36) 相减并在 $[0, L]$ 上积分, 得到

$$[0167] \quad \int_0^L (X_m X_n'' - X_n X_m'') dx + (\lambda_n^2 - \lambda_m^2) \int_0^L X_n X_m dx = 0$$

$$\begin{aligned}
& (\lambda_n - \lambda_m) \int_0^L X_N X_m dx = \int_0^L (X_n X_m'' - X_m X_n'') dx = (X_n X_m' - X_m X_n') \Big|_0^L \\
& = X_n(L) X_m'(L) - X_m(L) X_n'(L) - X_n(0) X_m'(0) + X_m(0) X_n'(0) \\
& = X_n(L) X_m'(L) - X_m(L) X_n'(L) - X_n(0) X_m'(0) + X_m(0) X_n'(0) + \frac{\sigma}{D} X_n(L) X_m(L) \\
& \quad - \frac{\sigma}{D} X_n(L) X_m(L) = X_n(L) \left[X_m'(L) + \frac{\sigma}{D} X_m(L) \right] \\
& \quad - X_m(L) \left[X_n'(L) + \frac{\sigma}{D} X_n(L) \right] - X_n(0) X_m'(0) + X_m(0) X_n'(0)
\end{aligned}$$

[0168]

[0169] 由于 X_m 和 X_n 满足边界条件,则将边界条件式(24)和(26)代入(37)得:

$$(\lambda_n - \lambda_m) \int_0^R X_N X_m dr = 0$$

[0170]

[0171] 由于 $\lambda_n \neq \lambda_m$,故得固有函数系具有正交性:

$$\int_0^R X_N X_m dr = \int_0^R \cos(\lambda_n r) \cos(\lambda_m r) dr = 0$$

[0172]

[0173] 令

$$\begin{aligned}
M_k &= \int_0^R \cos^2(\lambda_k r) dx = \int_0^R \frac{1 + \cos(2\lambda_k r)}{2} dx = \int_0^R \frac{1}{2} + \frac{\cos(2\lambda_k r)}{2} dx \\
&= \frac{R}{2} + \frac{\sin(2\lambda_k R)}{4\lambda_k} = \frac{R}{2} + \frac{1}{4\lambda_k} \frac{2 \tan(\lambda_k R)}{1 + \tan^2(\lambda_k R)} \\
&= \frac{R}{2} + \frac{\sigma}{2(\lambda_k^2 + \sigma^2)}
\end{aligned}$$

[0174]

[0175] 在(39)式两边同时乘以 $\cos(\lambda_k r)$,再进行积分,利用正交性可得

$$\int_0^R C_k(r, t) \cos(\lambda_k r) dx = \int_0^R G_k e^{-f \lambda_k^2 t} \cos^2(\lambda_k r) dr$$

[0176]

$$\int_0^R C_k(r, 0) \cos(\lambda_k r) dx = \int_0^R \cos^2(\lambda_k r) dr = G_k M_k$$

[0177]

[0178] 则得到

$$G_k = \frac{1}{M_k} \int_0^R C_0 \cos(\lambda_k r) dx = \frac{C_0}{M_k \lambda_k} \sin(\lambda_k R) \quad (45)$$

[0179]

[0180] 将式(45)代入式(39)得到页岩气质量浓度分布表达式

$$C(r, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C_0 \sin(\lambda_k R)}{M_k \lambda_k} e^{-f \lambda_k^2 t} \cos(\lambda_k r) \quad (46)$$

[0181]

[0182] 将 $N = \frac{C}{r}$ 代入可得到公式,还原原来质量分布为

$$N(r, t) = \frac{C(r, t)}{r} = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{C_0 \sin(\lambda_k R)}{M_k \lambda_k} e^{-f \lambda_k^2 t} \cos(\lambda_k r) \quad (47)$$

[0183]

[0184] 4、页岩储层基质中页岩气流动能力评价

[0185] 根据(47)式进行球坐标积分,可得到任意时刻t累计流出的页岩气质量为 M_q :

$$\begin{aligned}
M_q &= \int_0^R \int_0^{2\pi} \int_0^\pi (N_0 - N(r, t)) r^2 \sin \varphi dr d\theta d\varphi = 4\pi \times \int_0^R (N_0 - N(r, t)) r^2 dr \\
&= \frac{4\pi R^3 N_0}{3} - 4\pi \int_0^R \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{r} \frac{C_0 \sin(\lambda_k R)}{M_k \lambda_k} e^{-f \lambda_k^2 t} \cos(\lambda_k r) r^2 dr \\
[0186] \quad &= \frac{4\pi R^3 N_0}{3} - 4\pi e^{-f \lambda_k^2 t} \int_0^R \sum_{k=1}^{\infty} \frac{N_0 \sin(\lambda_k R)}{M_k \lambda_k} \cos(\lambda_k r) r^2 dr \\
&= \frac{4\pi R^3 N_0}{3} - 4\pi e^{-f \lambda_k^2 t} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{N_0 \sin(\lambda_k R)}{M_k \lambda_k} \int_0^R \cos(\lambda_k r) r^2 dr
\end{aligned} \tag{48}$$

[0187] 由于式中存在因子 $e^{-f \lambda_k^2 t}$, 因此对于任意的 $t \geq 0$ 时, 级数收敛, 因此取第一项可满足要求, 则得到

$$[0188] \quad M_q = \frac{4\pi R^3 N_0}{3} - 4\pi e^{-f \lambda_1^2 t} \frac{N_0 \sin(\lambda_1 R)}{M_1 \lambda_1} \int_0^R \cos(\lambda_1 r) r^2 dr$$

$$[0189] \quad M_q - \frac{4\pi R^3 N_0}{3} = -4\pi e^{-f \lambda_1^2 t} \frac{N_0 \sin(\lambda_1 R)}{M_1 \lambda_1} \int_0^R \cos(\lambda_1 r) r^2 dr$$

$$[0190] \quad \ln \left(M_q - \frac{4\pi R^3 N_0}{3} \right) = \ln \left(-4\pi \frac{N_0 \sin(\lambda_1 R)}{M_1 \lambda_1} \int_0^R \cos(\lambda_1 r) r^2 dr \right) - f \lambda_1^2 t \tag{49}$$

$$[0191] \quad \text{令 } \ln \left(M_q - \frac{4\pi R^3 N_0}{3} \right) = y, \quad \ln \left(-4\pi \frac{N_0 \sin(\lambda_1 R)}{M_1 \lambda_1} \int_0^R \cos(\lambda_1 r) r^2 dr \right) = a, \quad -f \lambda_1^2 = b, \text{ 其}$$

中, 通过式 (48) 得到的是单个页岩粉末球体的页岩气产出的质量, 结合实验样品, 通过实验样品所用粉末体积与单个粉末球体体积之比, 就可得到整个实验样品页岩气产出质量:

$$[0192] \quad M_{qq} = \frac{VV}{V_q} \times M_q \tag{50}$$

[0193] M_{qq} 为实验样品页岩气产出质量, g; V_q 单个页岩粉末球体体积, cm^3 ; VV 为实验样品的体积, cm^3 。

[0194] 则 (49) 式为

$$[0195] \quad y = a + bt \tag{51}$$

[0196] 对于式 (51), y 和 t 是已知量, 即页岩储层基质中页岩气流动能力评价实验中随时间而测得的累计页岩气产出质量, 其中页岩气质量就是测得的气体体积乘以标准条件下页岩气的密度, 通过最小二乘法回归分析, 可得到系数 a 和系数 b 的值, 进而得到流动能力评价系数 f 和基质与裂缝的综合流动系数 σ 的值。

[0197] 流动能力评价系数值越大页岩气流动能力越强, 进一步可得到储量动用率 R' 为:

$$[0198] \quad R' = \frac{M_q}{\frac{4\pi R^3 N_0}{3}} \tag{52}$$

[0199] 通过储量动用率来评价页岩气的产出规律。动用率越大, 产出气体越多, 页岩气井的可采储量越大, 总之, 可通过这几个参数来综合评价页岩储层基质中页岩气流动能力。

[0200] 本发明实施例中, 本发明去除掉天然裂缝的影响, 研究基质中页岩气的流动能力

和产出规律,设计了相应的实验装置和实验流程,结合建立的页岩储层基质中气体流动能力评价理论,获得页岩储层基质中气体流动能力评价系数,评价页岩储层基质中气体流动能力,分析页岩储层基质中气体的产出规律,解决了不同沉积环境、不同区块、不同平台、不同井之间开发效果的差异性评价,为页岩气开发技术对策、页岩气井合理配产、页岩气井合理生产制度等重大决策提供技术支撑,应用效果明显,应用前景广阔。

[0201] 本领域内的技术人员应明白,本发明的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本发明可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本发明可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0202] 本发明是参照根据本发明实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0203] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制造品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0204] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0205] 以上所述的具体实施例,对本发明的目的、技术方案和有益效果进行了进一步详细说明,所应理解的是,以上所述仅为本发明的具体实施例而已,并不用于限定本发明的保护范围,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

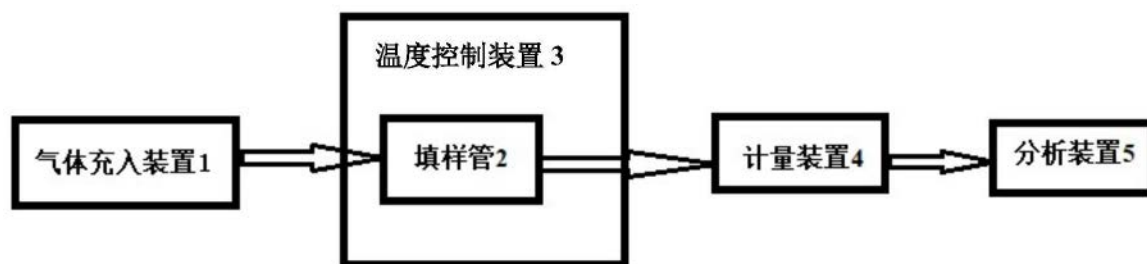


图1

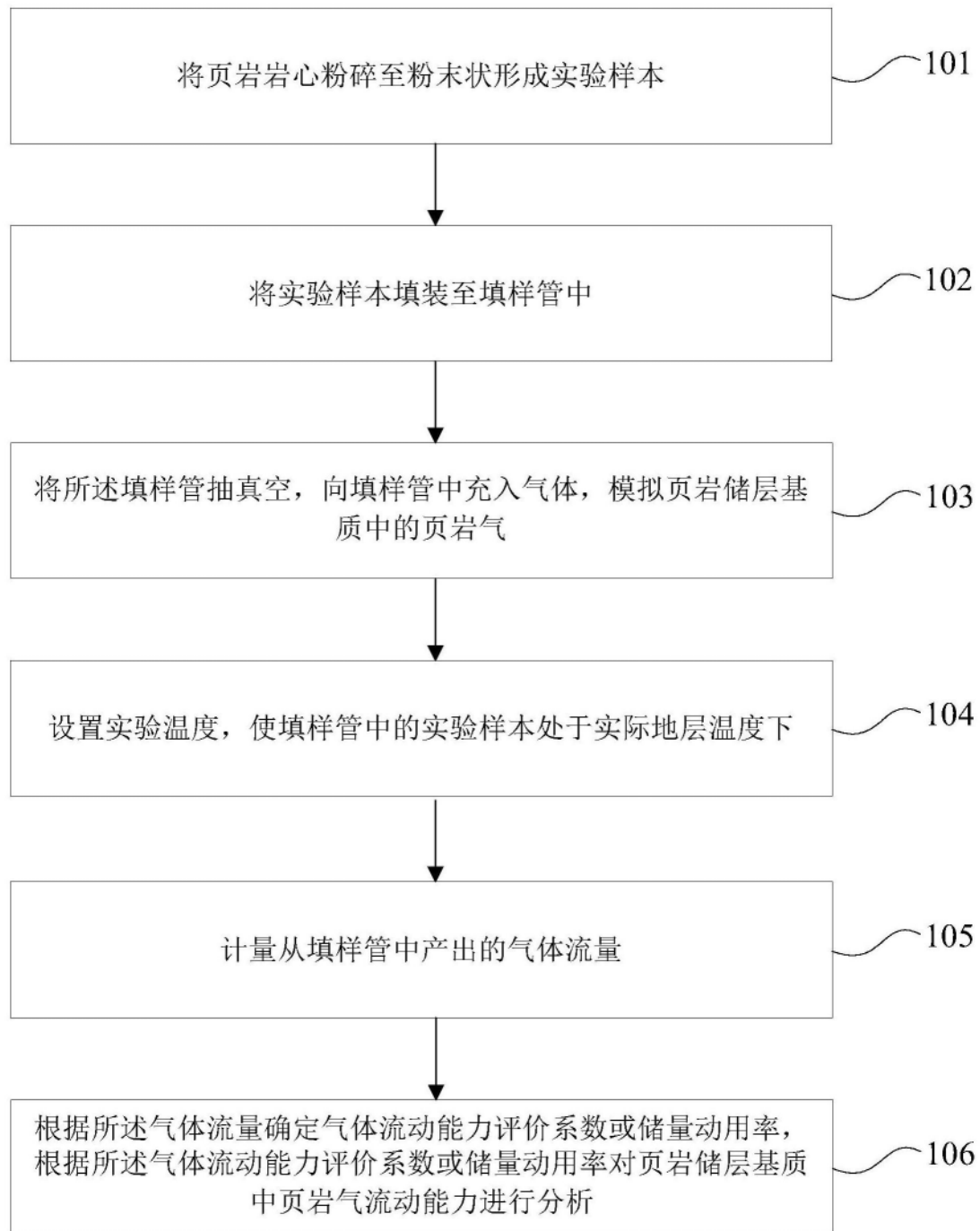


图2

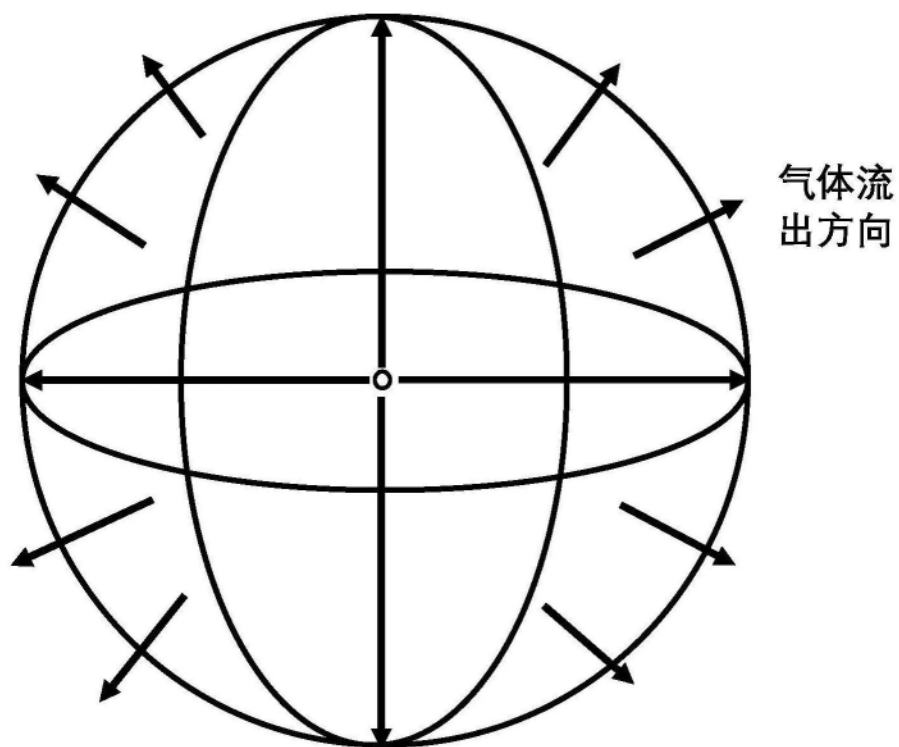


图3

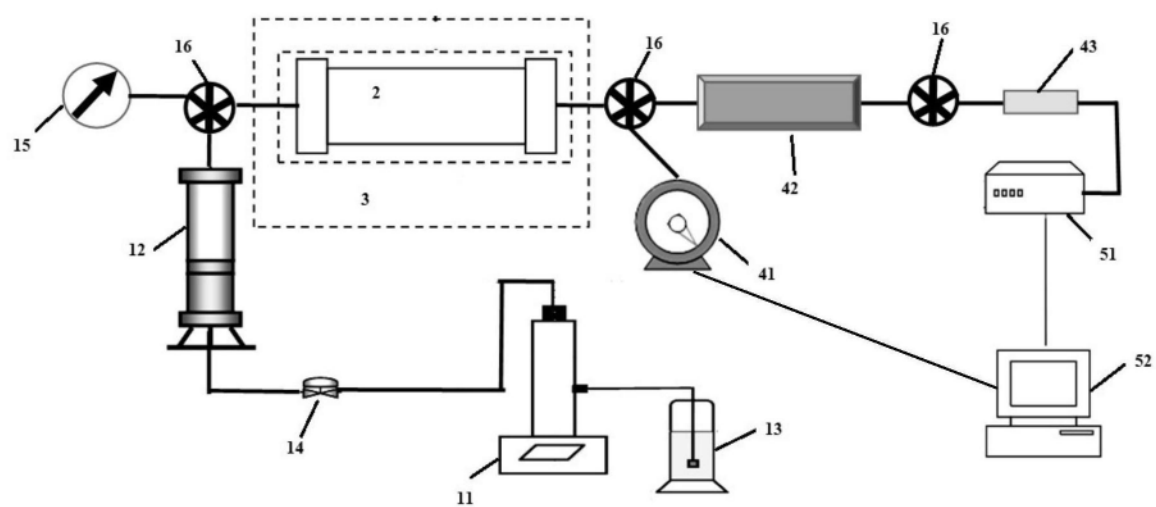


图4

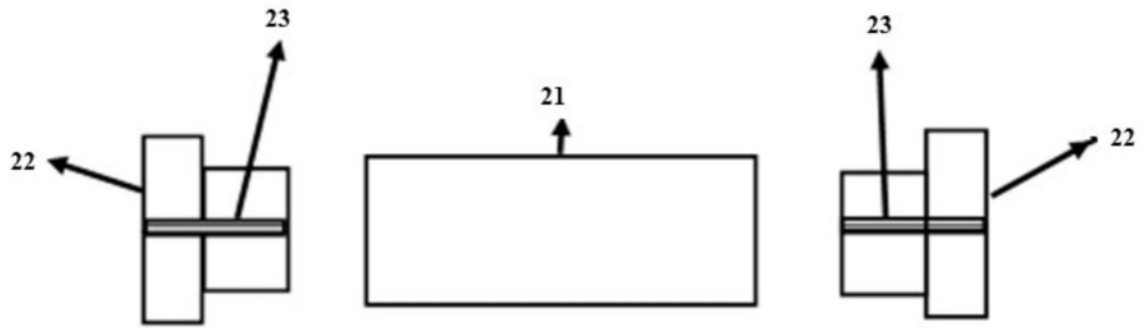


图5