



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103726837 B

(45) 授权公告日 2016. 04. 13

(21) 申请号 201310491973. 5

(22) 申请日 2013. 10. 18

(73) 专利权人 中国科学院力学研究所

地址 100190 北京市海淀区北四环西路 15
号

(72) 发明人 张召彬 易智星 林缅

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390
代理人 王艺

(51) Int. Cl.

E21B 49/00(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 202937246 U, 2013. 05. 15,
CN 102518421 A, 2012. 06. 27,
CN 202132036 U, 2012. 02. 01,
CN 102979516 A, 2013. 03. 20,
CN 202493263 U, 2012. 10. 17,
CN 2527707 Y, 2002. 12. 25,
CN 202866787 U, 2013. 04. 10,

CN 201218811 Y, 2009. 04. 08,

CN 202181891 U, 2012. 04. 04,

CN 103114850 A, 2013. 05. 22,

CN 103256045 A, 2013. 08. 21,

US 7716968 B2, 2010. 05. 18,

WO 2010130037 A1, 2010. 11. 18,

WO 2013058822 A1, 2013. 04. 25,

王雷, 窦之林 等. 缝洞型油藏注水驱油可视化物理模拟研究. 《西南石油大学学报(自然科学版)》. 2011, 第 33 卷(第 2 期),

郭小美, 孙雷 等. 裂缝性油藏大尺度可视化水驱油物理模拟实验. 《特种油气藏》. 2011, 第 18 卷(第 3 期),

审查员 杨健

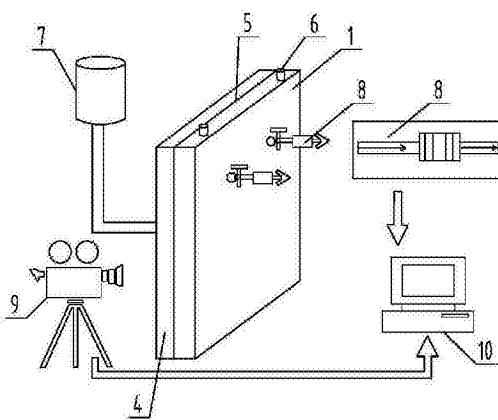
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置及
实验方法

(57) 摘要

一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，
包括水箱、蠕动泵，模拟主体，所述水箱用于存储
染色液体，所述模拟主体的结构为在玻璃面板之
间，依次设置有染色液体层、弹性薄膜层、打孔的
硅胶板层和弹性多孔介质层，所述模拟主体中的
染色液体层通过管路与水箱相连接，在所述模拟
主体的顶部安装有排气阀门，所述模拟主体一侧
的玻璃面板上安装有蠕动泵，所述模拟主体的底
部安装有注油口，所述蠕动泵与数据采集终端相
连接，所述数据采集终端与监测模拟主体变化的
监测装置连接。本发明具有如下的优点：将弹性
CN 和重力的作用在一次实验中反映出来。



1. 一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，其特征在于，包括水箱、蠕动泵，模拟主体，所述水箱用于存储染色液体，所述模拟主体的结构为在玻璃面板之间，依次设置有染色液体层、弹性薄膜层、打孔的硅胶板层和多孔介质层，所述模拟主体中的染色液体层通过管路与水箱相连接，在所述模拟主体的顶部安装有排气阀门，所述模拟主体一侧的玻璃面板上安装有蠕动泵，所述模拟主体的底部安装有注油口，所述蠕动泵与数据采集终端相连接，所述数据采集终端与监测模拟主体变化的监测装置连接。

2. 如权利要求 1 所述的一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，其特征在于，所述水箱的直径约为 60cm。

3. 如权利要求 1 所述的一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，其特征在于，所述监测装置为摄像机。

4. 如权利要求 1 所述的一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，其特征在于，所述弹性薄膜层由 0.2mm 厚乳胶薄膜制成。

5. 如权利要求 1 所述的一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，其特征在于，所述玻璃面板为无色的光学玻璃面板，且玻璃面板的厚度为 19mm。

6. 如权利要求 1 所述的一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，其特征在于，所述染色液体层的周围设置有硅胶密封环。

7. 如权利要求 1 所述的一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置，其特征在于，所述模拟主体的两侧玻璃面板之上设置有紧固钢板。

8. 采用权利要求 1 所述的用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置的实验方法，其特征在于，包括如下步骤，

(1) 基本数据准备，需要根据实际地层的参数通过计算来估计本实验的相应参数，相应的实验参数包括模拟主体内部的压力、以及在实验过程中模拟主体压力的可能最大变化量、蠕动泵的流动速度、介质的弹性参数；

(2) 调整模拟主体的厚度，将染色层一侧厚度设为 0mm，将模拟主体竖直放置，打开模拟主体的顶部的排气阀门，然后从模拟主体的底部缓慢注入石油，注入完毕后关闭排气阀门；

(3) 配备染色液体，所述染色液体为水和墨汁的混合液，根据估算得到的压力的变化量以及介质的弹性参数，估算在实验的过程中染色层液体厚度的变化范围，根据估算得到的染色层液体的厚度变化范围配比水和墨汁的比例；

(4) 测量染色层厚度和颜色的对应关系，设定光照，设定摄像机参数，并使得光照和摄像机参数在后续的实验中不发生改变，将模拟主体水平放置，调整两层玻璃面板之间的厚度，得到给定厚度的染色液体层，用摄像机记录颜色，然后对于不同的染色液体层的厚度，均在给定的摄像机参数和光照环境下得到了对应的颜色，这种染色液体厚度的颜色的一一对应关系将在后续通过颜色反推变形的时候去使用；

(5) 调整模拟主体的厚度，使得染色液体层的厚度为 0.5mm，将连接的水箱调整到合适的高度，使得其恰好能够提供所需的压力，然后将模拟主体缓慢调整到竖直方向，准备开始实验；

(6) 根据需要模拟的实际开发过程，设定蠕动泵的流动速度，并打开蠕动泵开始抽油，同时摄像机记录另外一侧染色液体层的颜色在各个位置的实时变化；

(7) 采用预先编写的数据处理程序处理得到的视频数据,反推得到弹性多孔介质层在各个位置的变形,进而计算得到各个位置的弹性能的变化,通过变形也可以得到压力场的变化,从而能够计算得到重力能的做功,这样最终得到弹性能和重力能在开发过程中的实时变化。

一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置及实验方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种油藏模拟实验技术领域,具体涉及一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置。

背景技术

[0002] 目前辽河油田兴隆台厚层块状油藏含油幅度达 2345 米,为此制定了多层水平井的“立体开发”对策,初步均取得了较好效果,但在在开发部署与调整、动态分析与跟踪调控、持续稳产与规模推广中还存在诸多问题:生产过程中重力是否发挥作用以及发挥多大作用?弹性能何时耗尽、何时重力开始发挥主导作用?重力作用的持续时间有多长,从什么时候开始重力能耗尽,不得不额外补充能量?

[0003] 这些都是当前困扰油田方面的主要问题,从理论上回答这些问题有助于对“立体开发”过程的更为清晰的认识。针对“弹性”和“重力”在开发过程中的强烈作用,以及两种机制在开发过程不同阶段所起作用的相互转化,特提出此弹性重力驱模拟实验。

[0004] 针对厚层油藏的立体开发,目前尚没有相关的技术将立体开发过程的弹性能和重力能在一个实验中体现出来。一般仅能够去反映重力的作用,比如有利用离心机进行实验的,也有增加模型的在纵向上的尺寸来模拟重力的作用的。

[0005] 和弹性重力驱替实验最为接近的是重力驱的实验,如果将现有的重力驱实验应用到的厚层油藏,则存在以下问题:

[0006] (1) 利用离心机的方法来反映重力的作用是不现实的。加速度大的离心机一般体积都比较小,然而大型的离心机一般不能提供非常大的加速度,因此不可能模拟实际 2300 米厚的地层。另外,利用离心机的实验室是昂贵的,并且在离心机内做实验不利用观察测量。

[0007] (2) 通过增加模型的尺寸也是不现实的,油田方面提供的数据显示,现在实验室进行的实验装置的最大高度是 18 米,而这个大小和实际的 2300 米相比还是太小。所以单纯利用增加实验模型的高度来模拟立体开发过程是不现实的。况且这样的实验的代价也是昂贵的。

[0008] 因此,亟需一种实验装置和实验方法,可以达到以下的实验效果和目的:

[0009] (1) 将立体开发过程中弹性能和重力能的作用定量地描述,研究弹性能和重力能的相互竞争关系;(2) 为厚层油藏立体开发过程的开发阶段划分提供依据,为开发方式转换时机的选择提供理论的支持;(3) 研究弹性和重力对产量的影响。

发明内容

[0010] 本发明的目的在于针对上述的问题,本发明提供一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置。

[0011] 为实现上述目的,采用以下技术方案:

[0012] 一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置,包括水箱、蠕动泵,模拟主体,所述水

箱用于存储染色液体，所述模拟主体的结构为在玻璃面板之间，依次设置有染色液体层、弹性薄膜层、打孔的硅胶板层和多孔介质层，所述模拟主体中的染色液体层通过管路与水箱相连接，在所述模拟主体的顶部安装有排气阀门，所述模拟主体一侧的玻璃面板上安装有蠕动泵，所述模拟主体的底部安装有注油口，所述蠕动泵与数据采集终端相连接，所述数据采集终端与监测模拟主体变化的监测装置连接。

- [0013] 优选地，所述水箱的直径约为 60cm。
- [0014] 优选地，所述监测装置为摄像机。
- [0015] 优选地，所述弹性薄膜层由 0.2mm 厚乳胶薄膜制成。
- [0016] 优选地，所述玻璃面板为无色的光学玻璃面板，且玻璃面板的厚度为 10mm。
- [0017] 优选地，所述染色液体层的周围设置有硅胶密封环。
- [0018] 优选地，所述模拟主体的两侧玻璃面板之上设置有紧固钢板。
- [0019] 一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置的实验方法，包括如下步骤，
 - [0020] (1) 基本数据准备，需要根据实际地层的参数通过计算来估计本实验的相应参数，相应的实验参数包括模拟主体内部的压力、以及在实验过程中模拟主体压力的可能最大变化量、蠕动泵的流动速度、介质的弹性参数；
 - [0021] (2) 调整模拟主体的厚度，将染色层一侧厚度设为 0mm，将模拟主体竖直放置，打开模拟主体的顶部的排气阀门，然后从模拟主体的底部缓慢注入石油，注入完毕后关闭排气阀门；
 - [0022] (3) 配备染色液体，所述染色液体为水和墨汁的混合液，根据估算得到的压力的变化量以及介质的弹性参数，估算在实验的过程中染色层液体厚度的变化范围，根据估算得到的染色层液体的厚度变化范围配比水和墨汁的比例；
 - [0023] (4) 测量染色层厚度和颜色的对应关系，设定光照，设定摄像机参数，并使得光照和摄像机参数在后续的实验中不发生改变，将模拟主体水平放置，调整两层玻璃面板之间的厚度，得到给定厚度的染色液体层，用摄像机记录颜色，然后对于不同的染色液体层的厚度，均在给定的摄像机参数和光照环境下得到了对应的颜色，这种染色液体厚度的颜色的一一对应关系将在后续通过颜色反推变形的时候去使用；
 - [0024] (5) 调整模拟主体的厚度，使得染色液体层的厚度为 0.5mm，将连接的水箱调整到合适的高度，使得其恰好能够提供所需的压力，然后将模拟主体缓慢调整到竖直方向，准备开始实验；
 - [0025] (6) 根据需要模拟的实际开发过程，设定蠕动泵的流动速度，并打开蠕动泵开始抽油，同时摄像机记录另外一侧染色液体层的颜色在各个位置的实时变化；
 - [0026] (7) 采用预先编写的数据处理程序处理得到的视频数据，反推得到弹性多孔介质层在各个位置的变形，进而计算得到各个位置的弹性能的变化，通过变形也可以得到压力场的变化，从而能够计算得到重力能的做功，这样最终得到弹性能和重力能在开发过程中的实时变化。
 - [0027] 本发明的有益效果：由于发明设置弹性薄膜层、打孔的硅胶板层和多孔介质层来模拟地层，其中弹性薄膜层所采用的柔软的材料可以在实验室尺度内，在重力可提供的压力作用下发生明显的变形，从而使得弹性和重力的作用之比和真实过程保持一致；通过染色层的颜色变化监测压力场，针对实验采用打孔的硅胶板层的特点，建立材料变形和压力

的关系,再将压力的变形通过颜色反映出来,从而通过摄像机监测颜色的变化,就能够通过数据处理得到原始的压力分布,并且这种监测是极度灵敏的、零干扰的、全场的、实时的。因此本发明所述的实验及其实验方法具有如下的优点:将弹性和重力的作用在一次实验中反映出来;实验装置的整体尺寸小(1米量级),实验的成本较低;实验灵敏,能够反映微弱的压力变化;利用颜色变化的测量方式,实验对流动的过程无干扰,能够真实反映内部的流场;能够清晰地观察到流场的实时的变化过程。

附图说明

- [0028] 下面根据实施例和附图对本发明作进一步详细说明。
- [0029] 图1是本发明各个组成部分的连接关系示意图;
- [0030] 图2是本发明的模拟主体的结构示意图;
- [0031] 图3是本发明的模拟主体的组成部分的示意图。
- [0032] 图中:
 - [0033] 1、玻璃面板;2、多孔介质层;3、打孔的硅胶板层;4、染色液体层;5、弹性薄膜层;6、排气阀门;7、水箱;8、蠕动泵;9、摄像机;10、数据采集终端;11、弹性薄膜的变形程度;12、钢板;13、硅胶密封环

具体实施方式

[0034] 本发明提供一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置,如图1至图3所示,包括水箱7、蠕动泵8,模拟主体,模拟主体的结构为在玻璃面板1之间,依次设置有染色液体层4、弹性薄膜层5、打孔的硅胶板层3和弹性多孔介质层2,模拟主体的两侧由钢板12将模拟主体的各组成层紧固成一体结构,为了保证染色液体层4具有良好的封闭性,在染色液体层4的四周设置硅胶密封环13,所以本发明的模拟主体是一个结构稳定且密封良好的实验装置,模拟主体中的染色液体层4通过管路与水箱7相连接,模拟主体的顶部安装有排气阀门6,模拟主体一侧的玻璃面板1上安装有蠕动泵8,模拟主体的底部安装有注油口,蠕动泵8与数据采集终端10相连接,数据采集终端10与监测模拟主体变化的监测装置连接。优选地,本发明中所采用的观测模拟主体变化的监测装置为摄像机9。

[0035] 水箱7用于存放染色液体,以及对模拟主体所构成的实验装置提供一个恒定的外压环境。水箱7的液面高度需要根据实际地层中油层的深度、压力信息通过相似理论计算得到。水箱7中液体通过管道和模拟主体的染色液体层4相互连通。所以任何时候水箱7中的液体和染色液体层4中液体的组分是完全相同的。

[0036] 在实验的过程中,随着弹性多孔介质层2中的石油抽出,会有一定量的染色液体从水箱7进入到染色液体层4中。为了保证“恒定”的外压环境,在液体从水箱7进入到染色液体层4中时,水箱7中的水面高度不应该发生明显的变化,因此水箱7的直径不能过小,本发明中水箱的直径约为60cm,足以保证液面无明显变化。

[0037] 蠕动泵8用于精确限定微小的流动速度,主要用于模拟恒定产量生产的过程。

[0038] 数据采集终端10用于数据的实时记录,将摄像机9的图像信息,蠕动泵8的流量信息传入数据采集终端10的计算机用于后期的处理。

[0039] 摄像机9用于记录染色液体层4的颜色的变化。由于本发明采用弹性多孔介质模

拟地层，即采用打孔的硅胶板层 3 和弹性多孔介质层 2 来模拟地层，因此当石油从弹性多孔介质层 2 中抽出之后，各个位置的弹性多孔介质层 2 的厚度会发生变化。弹性多孔介质层 2 发生变化后会进一步带动染色液体层 4 厚度的变化，进而引起染色液体颜色的变化。摄像机 9 记录染色液体层 4 颜色的变化，在事实上间接记录了弹性多孔介质层 2 在各个位置的形变的变化。

[0040] 染色液体层 4 由水和墨汁组成，其功能和作用为通过颜色的变化来反映厚度的变化。当水和墨汁的比例一定时，这层染色液体层 4 的厚度和表观的颜色变形成了一一对应的关系。染色液体层 4 的厚度越厚，那么看起来颜色就会越深。通过高分辨率的摄像机 9 将颜色在各个位置的事实变化记录下来，再通过反处理便得到了各个位置的弹性形变。

[0041] 弹性薄膜层 5 采用柔性隔水材料制成，优选地，由 0.2mm 厚的乳胶薄膜构成，其功能和作用为：1、密封作用，这层薄膜的一侧为染色液体层 4，即采用水和墨汁组成的混合液，另外一侧为模拟主体中的石油。实验要观察的真正对象是石油的流动，染色液体层 4 是提供外部压力以及通过颜色变化来反映弹性多孔介质层 2 的厚度的变化。所以这两层液体必须完全分开。由于弹性多孔介质层 2（包含石油的一层）在各个位置的厚度是实时变化的，所以只有选用这种非常柔软有弹性的乳胶薄膜才能够将两侧液体很好地分开。2、提供额外的弹性形变，使得颜色监测更加灵敏。由于当前选用的弹性介质的弹性模量仍然偏大，所以仅仅靠弹性多孔介质层 2 在 1 米的水压下仍无法产生足够的、可以明显观察到的变形。通过在硅胶板上打上一些孔，形成打孔的硅胶板层 3，这样由于 0.2mm 厚的乳胶薄膜在这些孔的位置是没有任何支撑的，所以两侧压力任何微小的变化都会造成薄膜位置的变化，如图 2 中的弹性薄膜的变形程度 11 所示，从而通过相应位置的颜色的变化反应出来。

[0042] 模拟主体中的玻璃面板 1 的作用和功能在于：1、提供固定厚度的空间，这里，我们的实验是纵向二维的实验，实验装置主要有两层组成，一层是弹性的多孔介质层 2，另外一层是染色液体层 4。通过染色液体层 4 的厚度的变化来间接监测弹性多孔介质层 2 的厚度的变化，所以必须保证两层的总厚度，即两块玻璃板 1 之间的厚度是完全固定的。为此，我们选用比较厚的 19mm 的玻璃板，以使得在实验的压力下不会有任何变形。2、观察窗，染色液体层 4 颜色的变化需要通过玻璃面板 1 来观察到，所以这要求玻璃面板 1 具有较好的透光性能。在实验的过程中，为了保证 19mm 厚的玻璃面板的透光性能，我们选用无色的光学玻璃面板进行实验。

[0043] 排气阀门 6 的功能和作用在于：在实验的准备阶段，需要预先将石油通过模拟主体的注油口进入到弹性多孔介质层 2 内，为了保证过程不会有气泡残留在模拟主体内部，必须在模拟主体的顶部设置排气阀门 6。在石油填充完毕后，开始实验时，需要将排气阀门 6 关闭。

[0044] 本发明的实验的原理为：

[0045] 地层中，油在弹性能和重力势能联合作用下的流动过程受如下方程控制，

$$[0046] \nabla \left[\frac{K}{\mu} \nabla (p - \rho g D) \right] + \frac{\partial \phi \rho}{\partial t} = 0$$

[0047] 其中 K 为渗透率，μ 为粘性系数，p 为压力，ρ 为密度，g 为重力加速度，D 为参考高度，φ 为孔隙度。方程涉及：粘性、弹性、重力三种力。

[0048] 基于这样的流动控制方程来选择相似准则。

[0049] 相似准则 1 : 几何相似

[0050] 要求实验的油藏形状和真实的油藏形状一致,但由于潜山油藏的复杂性,无法在实验室重建如此复杂的结构,故该相似准则无法完全保证。

[0051] 基于理论研究的范畴,我们重点关注重力的作用,故实验时保证 : 对于选取的水平井,保证水平井在油藏中竖直方向上的相对位置的相似。

[0052] 相似准则 2 : 重力和弹性之比

[0053] 利用开发过程中的重力压降和弹性压力降之比来表征。因为油藏在纵向上的厚度(压力差)决定了重力可做功的最大值,而地层压降决定了弹性做功的极限由此的无量纲参数为 :

$$[0054] \Pi_2 = \frac{\rho g h}{\Delta p}$$

[0055] 其中 Δp 为石油开发(实验)过程中的地层压力降, h 为油藏的特征厚度。该相似准则保证弹性和重力做功之比是可比较(对于实验和现场)的,只要能够保证该参数满足,那么描述多孔介质的实验材料本身是没有影响的(因为无量纲参数没有对材料的要求,如孔隙度和渗透率)。选择材料和意义在于 : 在满足该无量纲数的条件下,实验过程中重力和弹性的做功是可测的。

[0056] 相似准则 3 : 粘性和弹性之比

[0057] 利用达西定律来确定粘性的量级,利用弹性压力降来表征弹性能的作用,得到无量纲参数。

$$[0058] \Pi_3 = \frac{\mu L \Delta \phi}{K t \Delta p}$$

[0059] 其中 t 为开发的总的时间, L 为油藏的特征尺度, $\Delta \phi$ 是孔隙度变化量,该相似准则保证,粘性和弹性做功是可比较的,确定实验的时间,根据实验产量反推开发过程的对应产量。

[0060] 相似准则 4 : 弹性重力下的可采储量

[0061] 实验压力下的最大变形量

$$[0062] \Pi_4 = \frac{\Delta \phi}{\phi}$$

[0063] 该相似准则保证在弹性重力驱阶段结束后,开采的比例,由于实验压力下的取决于材料的弹性,故该参数是选择实验材料的重要依据,该参数无需严格满足,但至少应近似满足,且变形量应可测。

[0064] 由于本发明用于辅助数模的理论研究,不考虑厚层油藏的隔夹层、断层等复杂结构,故选择均匀材料,关注的参数为渗透率 K 、压缩系数 C_p , 主要依据相似准则 2、3、4。

[0065] 根据相似准则 4

$$[0066] C_{p,1} \Delta p_1 = C_{p,2} \Delta p_2$$

[0067] 其中下标 1 指实际油藏的值,下标 2 指实验值,下同。根据相似准则 2,由此得到 :

$$[0068] \frac{\Delta p_1}{g_1 L_1} = \frac{\Delta p_2}{g_2 L_2}$$

[0069] $C_{p,1}g_1L_1 = C_{p,2}g_2L_2$

[0070] 弹性做功的功率为石油压力和体积随时间的变化速度的乘积,即

$$[0071] \sum \frac{\partial V_i}{\partial t} p_i$$

[0072] 其中 V 为一个打孔的位置的石油的体积, p 为相应的压力。因为弹性薄膜建立了压力差和变形量的关系,所以体积和压力都可以通过颜色直接反推得到,重力做功可以通过检测重力势能的变化得到,已知整个实验装置内石油的重力势能之和为,

[0073] $\Sigma V_i \rho_i g h_i$

[0074] 其中 ρ 为石油密度,是一个确定的值, g 为重力加速度, h 为一个点在纵向上的高度。将重力势能之和对时间求偏导便得到重力做功的功率。因此,通过颜色变化可以计算得到弹性和重力的做功。

[0075] 一种用于油藏弹性重力驱模拟的实验装置的实验方法,包括如下步骤,

[0076] (1) 基本数据准备,需要根据实际地层的参数通过计算来估计本实验的相应参数,相应的实验参数包括模拟主体内部的压力、以及在实验过程中模拟主体压力的可能最大变化量、蠕动泵的流动速度、介质的弹性参数;

[0077] (2) 调整模拟主体的厚度,将染色液体层一侧厚度设为 0mm,将模拟主体竖直放置,打开模拟主体的顶部的排气阀门,然后从模拟主体的底部缓慢注入石油,注入完毕后关闭排气阀门;

[0078] (3) 配备染色液体,所述染色液体为水和墨汁的混合液,根据估算得到的压力的变化量以及介质的弹性参数,估算在实验的过程中染色液体层液体厚度的变化范围,根据估算得到的染色液体层液体的厚度变化范围配比水和墨汁的比例;

[0079] (4) 测量染色层厚度和颜色的对应关系,设定光照,设定摄像机参数,并使得光照和摄像机参数在后续的实验中不发生改变,将模拟主体水平放置,调整两层玻璃面板之间的厚度,得到给定厚度的染色液体层,用摄像机记录颜色,然后对于不同的染色液体层的厚度,均在给定的摄像机参数和光照环境下得到了对应的颜色,这种染色液体厚度的颜色的一一对应关系将在后续通过颜色反推变形的时候去使用;

[0080] (5) 调整模拟主体的厚度,使得染色液体层的厚度为 0.5mm,将连接的水箱调整到合适的高度,使得其恰好能够提供所需的压力,然后将模拟主体缓慢调整到竖直方向,准备开始实验;

[0081] (6) 根据需要模拟的实际开发过程,设定蠕动泵的流动速度,并打开蠕动泵开始抽油,同时摄像机记录另外一侧染色液体层的颜色在各个位置的实时变化;

[0082] (7) 采用预先编写的数据处理程序处理得到的视频数据,反推得到弹性多孔介质层在各个位置的变形,进而计算得到各个位置的弹性能的变化,通过变形也可以得到压力场的变化,从而能够计算得到重力能的做功,这样最终得到弹性能和重力能在开发过程中的事实变化。

[0083] 本发明的变形和压力的信息靠染色液体层的颜色的变化来采集,流量的信息通过

蠕动泵来设定，因此不需要额外的传感器。因为装置采用 0.2mm 厚的乳胶薄膜作为弹性薄膜层，这种薄膜非常柔软，所以压力的微弱变化就能够造成薄膜的变形，这使得测量非常的灵敏。

[0084] 本发明设置了打孔的硅胶板层和多孔介质层，并采用染色液体层的变坏监测该弹性多孔介质的变形，使得将弹性和重力的作用在一次实验中同时得到实验装置尺寸小（1米量级），并在这样小尺寸的条件下测量得到重力的作用实验灵敏，能够反映微弱的压力变化利用颜色变化的测量方式，实验对流动的过程无干扰，能够真实反映内部的流场能够清晰地观察到流场的实时的变化过程。

[0085] 以上所述仅为本发明的优选实施例而已，并不用于限制本发明，对于本领域的技术人员来说，本发明可以有各种更改和变化。凡在本发明的精神和原则之内，所作的任何修改、等同替换、改进等，均应包含在本发明的保护范围之内。

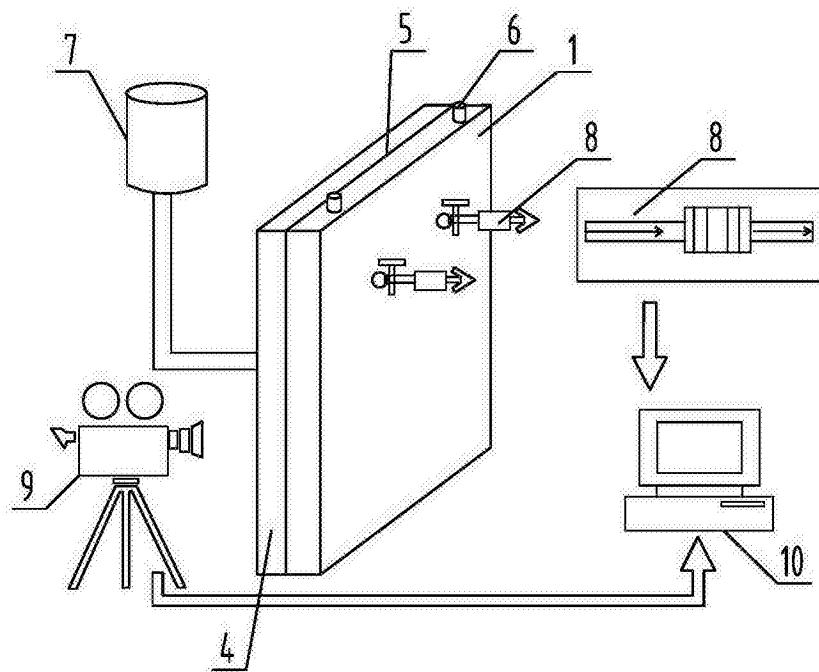


图 1

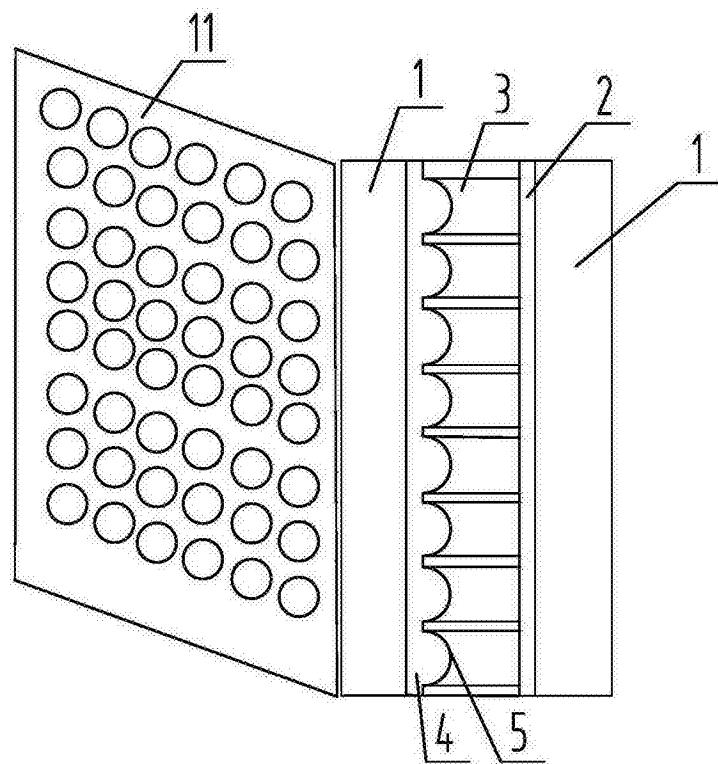


图 2

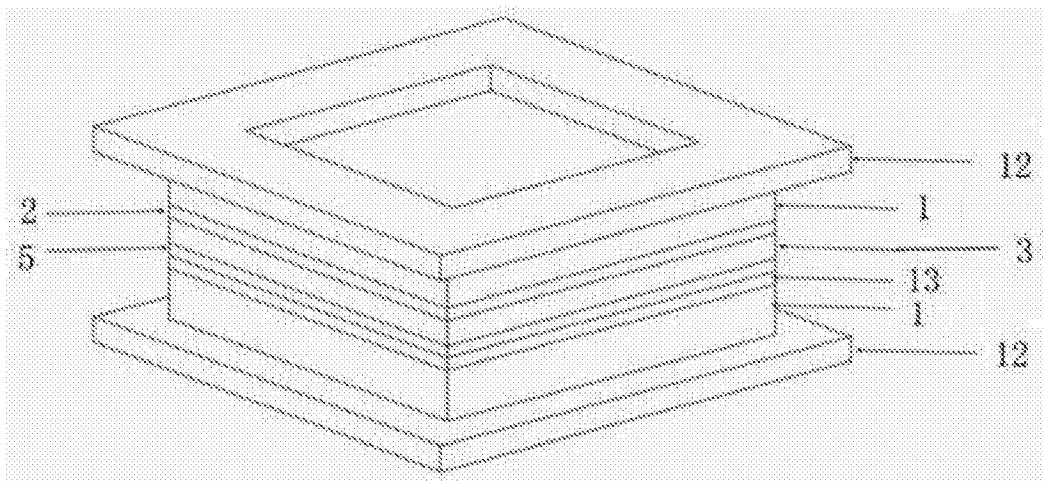


图 3