



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109932298 A

(43)申请公布日 2019.06.25

(21)申请号 201910173766.2

(22)申请日 2019.03.08

(71)申请人 山东科技大学

地址 266590 山东省青岛市黄岛区经济技术开发区前湾港路579号

(72)发明人 张继成 陈中伟 王春光 程先振 梁伟

(74)专利代理机构 青岛智地领创专利代理有限公司 37252

代理人 邵朋程

(51)Int.Cl.

G01N 15/08(2006.01)

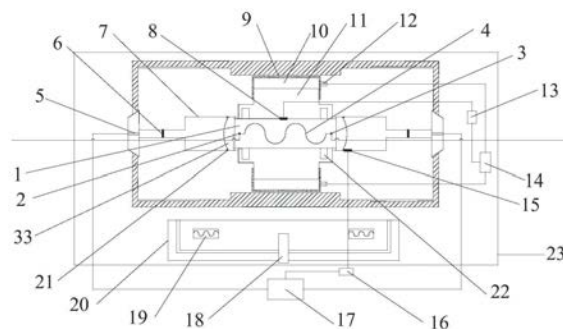
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

## (54)发明名称

一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置及方法

## (57)摘要

本发明公开一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,其包括外部系统和芯片夹持器系统。高精度液压泵通过流量计将液体以需要的流速注入到芯片刻画好的通道中,流量传感器时刻监测流体流量并反馈调节泵中的压力。在获取芯片通道内静态接触角时,逆流阀保障流体不会发生回流而破坏实验数据,结合进、出口压力计数值差可计算芯片通道的渗透率。芯片夹持器、芯片放置在显微镜的载物台上,三维显微镜将观察对象放大,高速摄像机抓拍流体流动全过程并时时将数据、图像传输到数据采集装置中。本发明可通过调控单一物理场变化观测某一个因素对于两项微观流动的影响,也可同时改变多个物理场的条件,保证高速摄像机对整个流动过程能够精确抓拍。



1. 一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,其特征在于:包括滑盖式玻璃箱,在滑盖式玻璃箱的内部设置有PMMA芯片试件,所述PMMA芯片试件的内部形成有裂隙通道;

在PMMA芯片试件的一端设置有入口孔,入口孔通过液体输入管道与第一液压泵连接,在液体输入管道上设置有第一流量计和逆流阀,在液体输入管道上还连接有流量传感器,流量传感器与第一液压泵连接;在PMMA芯片试件的另一端设置有出口孔,出口孔与液体输出管道连接,在液体输出管道上设置有第二流量计;

在PMMA芯片试件的两短边处设置有用于加压的第一加压装置,所述第一加压装置包括液压腔,在液压腔的内部设置有液压活塞,液压腔的一端与PMMA芯片试件的短边处连接,液压腔的另一端通过液压管道与第二液压泵连接;

在PMMA芯片试件的两长边处设置有用于加压的第二加压装置,所述第二加压装置包括压力槽,在压力槽的内部设置有气囊和橡胶塞,所述橡胶塞位于气囊和PMMA芯片试件之间,所述气囊通过气体管道与气泵连接;

在滑盖式玻璃箱的一侧设置有三维显微镜,三维显微镜通过转接线与高速摄像机连接,高速摄像机与数据处理装置连接。

2. 根据权利要求1所述的一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,其特征在于:在滑盖式玻璃箱的内部还设置有电热丝、散热片以及用于检测滑盖式玻璃箱内部温度的温度传感器。

3. 根据权利要求1所述的一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,其特征在于:所述液压腔包括相连通的第一腔室和第二腔室,第一腔室的截面面积小于第二腔室的截面面积,第二腔室位于第一腔室和PMMA芯片试件之间,所述液压活塞安装于第一腔室中,在第一腔室的端头处设置有密封塞。

4. 根据权利要求1所述的一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,其特征在于:在液压腔与PMMA芯片试件的连接处设置有半圆柱基座,半圆柱基座的平面部分与PMMA芯片试件接触,且半圆柱基座的平面部分设置为软层。

5. 根据权利要求1所述的一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,其特征在于:在PMMA芯片试件的长边处设置有第一压力感应片,第一压力感应片与第一压力传感器连接,第一压力传感器与气泵连接;在液压腔连接PMMA芯片试件的位置处设置有第二压力感应片,第二压力感应片与第二压力传感器连接,第二压力传感器与第二液压泵连接。

6. 一种耦合作用下微尺度流动可视化测试方法,采用如权利要求1-5中所述的装置,具体包括以下步骤:

(1) 将预制好的PMMA芯片试件放入滑盖式玻璃箱中,通过夹具固定,并与液体输入管道、液体输出管道、第一加压装置和第二加压装置连接起来;调整好三维显微镜,并将三维显微镜、高速摄像机与数据处理装置依次连接;

(2) 通过电热丝、散热片以及温度传感器实时调节滑盖式玻璃箱内部至合适试验温度;

(3) 通过第二液压泵、液压管道、液压活塞和液压腔向PMMA芯片试件的两短边施加液体压力,通过气泵、气体管道、气囊和橡胶塞向PMMA芯片试件的两长边施加气体压力;气体压力和液体压力分别通过第一压力感应片、第一压力传感器和气泵,以及第二压力感应片、第二压力传感器和第二液压泵进行调节;

(4) 通过第一液压泵、液体输入管道和入口孔向PMMA芯片试件的裂隙通道内注入液体,

PMMA芯片试件的裂隙通道内的液体通过出口孔和液体输出管道排出,分别通过第一流量计和第二流量计对液体输入管道内的液体流量以及液体输出管道内的液体流量进行测量;

(5) 通过三维显微镜和高速摄像机采集微观流动数据,并将数据传送至数据处理装置,利用数据处理装置进行处理分析。

7. 根据权利要求6所述的一种耦合作用下微尺度流动可视化测试方法,其特征在于:通过第一加压装置和第二加压装置结合使用模拟流动通道的应力场的改变;通过更换表征不同时刻煤岩裂隙形状、特性的芯片,观测其流动数据,通过多组实验衔接以模拟宏观试样动态变化。

8. 根据权利要求6所述的一种耦合作用下微尺度流动可视化测试方法,其特征在于:通过调控单一物理场变化观测某一个因素对于微观流动的影响;或同时改变多个物理场的条件,以观测多个因素改变对于微观流动的影响。

9. 根据权利要求6所述的一种耦合作用下微尺度流动可视化测试方法,其特征在于:水驱气实验中,对注入液体经过去离子化以及染色处理,以便于观测二者的前锋线、接触角、流动速度以及气泡变形。

## 一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及油气开发过程中的微尺度效应研究领域,特别是涉及一种多物理场耦合作用下微尺度流动可视化测试装置及方法。

### 背景技术

[0002] 煤层气是赋存在煤层及煤系地层的优质清洁能源,我国煤层气资源储量丰富但渗透性极低。煤基质作为气体主要储存场所,其流动特征及能力对煤层气产气效率起到决定性作用。煤基质中流体运移效率以及相对渗透率变化主要受基质中煤-气-液三相界面相互作用及水锁效应的控制。而现有研究工作①大多集中探讨孔隙(微观尺度)内气体吸附/解吸扩散与裂隙内(宏观尺度)渗流耦合,很少考虑流体在煤岩基质中煤-气-液三相相互作用特征。②基于煤层气流动的固-液润湿性研究多在常压下观测接触角,这种测试方法忽视赋存地质环境中压力、温度、流体离子浓度以及煤岩组分变化对湿润性影响。③微观尺度下的煤介质中水-气两相流的流动特征目前仍基于数值模拟,两相流在煤岩微尺度中的实际流动情况目前仍然没有直接的实验数据进行验证。针对煤岩孔隙结构的特征,考虑不同尺度下液-气两相流体的相互作用对于分析煤层气流动特征和准确预测产气量起着至关重要的作用。然而在多物理场微观领域目前暂无相关的实验装置,属于前沿课题。

### 发明内容

[0003] 基于上述技术问题,本发明提供一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置及方法。

[0004] 本发明所采用的技术解决方案是:

[0005] 一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,包括滑盖式玻璃箱,在滑盖式玻璃箱的内部设置有PMMA芯片试件,所述PMMA芯片试件的内部形成有裂隙通道;

[0006] 在PMMA芯片试件的一端设置有入口孔,入口孔通过液体输入管道与第一液压泵连接,在液体输入管道上设置有第一流量计和逆流阀,在液体输入管道上还连接有流量传感器,流量传感器与第一液压泵连接;在PMMA芯片试件的另一端设置有出口孔,出口孔与液体输出管道连接,在液体输出管道上设置有第二流量计;

[0007] 在PMMA芯片试件的两短边处设置有用于加压的第一加压装置,所述第一加压装置包括液压腔,在液压腔的内部设置有液压活塞,液压腔的一端与PMMA芯片试件的短边处连接,液压腔的另一端通过液压管道与第二液压泵连接;

[0008] 在PMMA芯片试件的两长边处设置有用于加压的第二加压装置,所述第二加压装置包括压力槽,在压力槽的内部设置有气囊和橡胶塞,所述橡胶塞位于气囊和PMMA芯片试件之间,所述气囊通过气体管道与气泵连接;

[0009] 在滑盖式玻璃箱的一侧设置有三维显微镜,三维显微镜通过转接线与高速摄像机连接,高速摄像机与数据处理装置连接。

[0010] 优选的,在滑盖式玻璃箱的内部还设置有电热丝、散热片以及用于检测滑盖式玻

璃箱内部温度的温度传感器。

[0011] 优选的,所述液压腔包括相连通的第一腔室和第二腔室,第一腔室的截面面积小于第二腔室的截面面积,第二腔室位于第一腔室和PMMA芯片试件之间,所述液压活塞安装于第一腔室中,在第一腔室的端头处设置有密封塞。

[0012] 优选的,在液压腔与PMMA芯片试件的连接处设置有半圆柱基座,半圆柱基座的平面部分与PMMA芯片试件接触,且半圆柱基座的平面部分设置为软层。

[0013] 优选的,在PMMA芯片试件的长边处设置有第一压力感应片,第一压力感应片与第一压力传感器连接,第一压力传感器与气泵连接;在液压腔连接PMMA芯片试件的位置处设置有第二压力感应片,第二压力感应片与第二压力传感器连接,第二压力传感器与第二液压泵连接。

[0014] 一种耦合作用下微尺度流动可视化测试方法,采用如上所述的装置,具体包括以下步骤:

[0015] (1)将预制好的PMMA芯片试件放入滑盖式玻璃箱中,通过夹具固定,并与液体输入管道、液体输出管道、第一加压装置和第二加压装置连接起来;调整好三维显微镜,并将三维显微镜、高速摄像机与数据处理装置依次连接;

[0016] (2)通过电热丝、散热片以及温度传感器实时调节滑盖式玻璃箱内部至合适试验温度;

[0017] (3)通过第二液压泵、液压管道、液压活塞和液压腔向PMMA芯片试件的两短边施加液体压力,通过气泵、气体管道、气囊和橡胶塞向PMMA芯片试件的两长边施加气体压力;气体压力和液体压力分别通过第一压力感应片、第一压力传感器和气泵,以及第二压力感应片、第二压力传感器和第二液压泵进行调节;

[0018] (4)通过第一液压泵、液体输入管道和入口孔向PMMA芯片试件的裂隙通道内注入液体,PMMA芯片试件的裂隙通道内的液体通过出口孔和液体输出管道排出,分别通过第一流量计和第二流量计对液体输入管道内的液体流量以及液体输出管道内的液体流量进行测量;

[0019] (5)通过三维显微镜和高速摄像机采集微观流动数据,并将数据传送至数据处理装置,利用数据处理装置进行处理分析。

[0020] 优选的,上述方法通过第一加压装置和第二加压装置结合使用模拟流动通道的应力场的改变;通过更换表征不同时刻煤岩裂隙形状、特性的芯片,观测其流动数据,通过多组实验衔接以模拟宏观试样动态变化。

[0021] 优选的,上述方法通过调控单一物理场变化观测某一个因素对于微观流动的影响;或同时改变多个物理场的条件,以观测多个因素改变对于微观流动的影响。

[0022] 优选的,水驱气实验中,对注入液体经过去离子化以及染色处理,以便于观测二者的前锋线、接触角、流动速度以及气泡变形。

[0023] 本发明的有益技术效果如下:

[0024] 1、滑盖式玻璃箱便于芯片的放置、夹持,其透光的特性可以保证不会对其他可视化设备的运行产生影响,其密封特征协助维持温度场的稳定。温度传感器检测密封箱内的温度,调节电热丝、散热片以控制温度场。

[0025] 2、利用流量传感器时时检测芯片进口管道中的流体速度,反馈调节高精度液压泵

和高精度流量计( $\mu\text{m}/\text{min}$ 级),严格控制注入流体的流量,以控制其渗流场。注液速度维持在 $1\mu\text{m}/\text{min}$ 附近,保证高速摄像机对整个流动过程能够精确抓拍。

[0026] 3、液压泵以及压力传感器的反馈调节可通过对液压腔不间断注液,通过液压活塞对芯片短边施加相同轴向压力,液压腔前段直径(活塞直径)小于后段直径,便于精确控制腔内的压力。

[0027] 4、短边受力活塞与芯片接触位置采用半圆柱基座接触面,可小幅度受力旋转,与芯片接触的平面部分质地较软,可自行补偿短边平面不平整引起的受力不均匀。

[0028] 5、将橡胶活塞套进压力槽内并与内部的气囊接触,利用气泵及反馈调节系统对气囊注气,气囊膨胀导致橡胶塞受力挤压芯片长边。液压腔以及芯片侧壁上附有压力感应片。两套受力装置结合使用可模拟流动通道的应力场的改变。

[0029] 6、本发明可通过调控单一物理场变化观测某一个因素对于两项微观流动的影响,也可同时改变多个物理场的条件,本发明装置最多可叠加三个物理场。

## 附图说明

[0030] 下面结合附图与具体实施方式对本发明作进一步说明:

[0031] 图1为本发明滑盖式玻璃箱部分的结构示意图;

[0032] 图2为本发明的整体结构示意图。

[0033] 图中:1-PMMA芯片试件;2-入口孔;3-出口孔;4-裂隙通道;5-密封塞;6-液压活塞;7-液压腔;8-第一压力感应片;9-压力槽;10-气囊;11-橡胶塞;12-密封塞;13-第一压力传感器;14-气泵;15-第二压力感应片;16-第二压力传感器;17-第二液压泵;18-温度传感器;19-电热丝;20-散热片;21-密封塞;22-芯片夹具;23-滑盖式玻璃箱;24-第一液压泵;25-第一流量计;26-流量传感器;27-逆流阀;28-数据处理装置;29-三维显微镜;30-F转C 转接卡口;31-高速摄像机;32-第二流量计;33-半圆柱基座。

## 具体实施方式

[0034] 为解决上述煤岩体复杂的微观结构、地应力及开采引发的结构演化、渗流、应力相互作用等“看不见”的物理力学过程或机制,改变以往宏观解决问题的“黑箱”实验方法,本发明提出了一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置及方法。基于最新实验室芯片技术可视化研究微尺度下气-液互相驱替过程中两相流态变化,设计多物理场可调节体系装置及实验方法,能够测试在温度场、渗流场和应力场耦合作用下微观结构、流动变化过程,满足多尺度微观两相流动过程中多物理参数的采集功能。为理解煤岩微尺度流动特征提供可靠的实验数据并建立煤-气-液相互作用的唯象关系。该装置将为预测和指导宏观试样实验以及现场尺度不同条件下煤层气井排水-采气工艺提供理论及模型依据。

[0035] 结合附图,一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置,包括滑盖式玻璃箱23,在滑盖式玻璃箱的内部设置有PMMA芯片试件1,所述PMMA芯片试件1的内部形成有裂隙通道4。在PMMA芯片试件1的一端设置有入口孔2,入口孔通过液体输入管道与第一液压泵24连接,在液体输入管道上设置有第一流量计25和逆流阀27,在液体输入管道上还连接有流量传感器26,流量传感器与第一液压泵24连接。在PMMA芯片试件的另一端设置有出口孔3,出口孔3与液体输出管道连接,在液体输出管道上设置有第二流量计32。

[0036] 在PMMA芯片试件的两短边处设置有用于加压的第一加压装置,所述第一加压装置包括液压腔7,在液压腔的内部设置有液压活塞6,液压腔的一端与PMMA芯片试件的短边处连接,液压腔的另一端通过液压管道与第二液压泵17连接。在PMMA芯片试件的两长边处设置有用于加压的第二加压装置,所述第二加压装置包括压力槽9,在压力槽的内部设置有气囊10和橡胶塞11,所述橡胶塞位于气囊和PMMA芯片试件之间,所述气囊10通过气体管道与气泵14 连接。

[0037] 在滑盖式玻璃箱23的一侧设置有三维显微镜29,三维显微镜29通过F转C转接卡口30 与高速摄像机31连接,高速摄像机31与数据处理装置28连接。

[0038] 上述滑盖式玻璃箱23采用透明玻璃材料制成,包括箱体和滑动式盖板。

[0039] 作为对本发明的进一步设计,在滑盖式玻璃箱的内部还设置有电热丝19、散热片20以及用于检测滑盖式玻璃箱内部温度的温度传感器18。

[0040] 更进一步的,所述液压腔7包括相连通的第一腔室和第二腔室,第一腔室的截面面积小于第二腔室的截面面积,第二腔室位于第一腔室和PMMA芯片试件之间,所述液压活塞6安装于第一腔室中,在第一腔室的端头处设置有密封塞5。

[0041] 进一步的,在液压腔与PMMA芯片试件的连接处设置有半圆柱基座33,半圆柱基座33的平面部分与PMMA芯片试件接触,且半圆柱基座的平面部分设置为软层。

[0042] 更进一步的,在PMMA芯片试件的长边处设置有第一压力感应片8,第一压力感应片8与第一压力传感器13连接,第一压力传感器13与气泵14连接。在液压腔连接PMMA芯片试件的位置处设置有第二压力感应片15,第二压力感应片15与第二压力传感器16连接,第二压力传感器16与第二液压泵17连接。

[0043] 一种耦合作用下微尺度流动可视化测试方法,采用如上所述的装置,具体包括以下步骤:

[0044] (1) 将预制好的PMMA芯片试件放入滑盖式玻璃箱中,通过夹具固定,并与液体输入管道、液体输出管道、第一加压装置和第二加压装置连接起来;调整好三维显微镜,并将三维显微镜、高速摄像机与数据处理装置依次连接;

[0045] (2) 通过电热丝、散热片以及温度传感器实时调节滑盖式玻璃箱内部至合适试验温度;

[0046] (3) 通过第二液压泵、液压管道、液压活塞和液压腔向PMMA芯片试件的两短边施加液体压力,通过气泵、气体管道、气囊和橡胶塞向PMMA芯片试件的两长边施加气体压力;气体压力和液体压力分别通过第一压力感应片、第一压力传感器和气泵,以及第二压力感应片、第二压力传感器和第二液压泵进行调节;

[0047] (4) 通过第一液压泵、液体输入管道和入口孔向PMMA芯片试件的裂隙通道内注入液体, PMMA芯片试件的裂隙通道内的液体通过出口孔和液体输出管道排出,分别通过第一流量计和第二流量计对液体输入管道内的液体流量以及液体输出管道内的液体流量进行测量;

[0048] (5) 通过三维显微镜和高速摄像机采集微观流动数据,并将数据传送至数据处理装置,利用数据处理装置进行处理分析。

[0049] 上述方法中,通过第一加压装置和第二加压装置结合使用模拟流动通道的应力场的改变;通过更换表征不同时刻煤岩裂隙形状、特性的芯片,观测其流动数据,通过多组实

验衔接以模拟宏观试样动态变化。

[0050] 上述方法中,通过调控单一物理场变化观测某一个因素对于微观流动的影响;或同时改变多个物理场的条件,以观测多个因素改变对于微观流动的影响。

[0051] 上述方法中,水驱气实验中,对注入液体经过去离子化以及染色处理,以便于观测二者的前锋线、接触角、流动速度以及气泡变形。

[0052] 本发明耦合作用下微尺度流动可视化测试装置能够可视化多物理场耦合作用下微尺度裂隙内气-液两相流动过程,分析气液流态演变特征及机理,大致如下:

[0053] 1、利用三维显微镜29和高速摄像机31系统采集微观流动数据。利用数据处理装置28 内的ImageJ软件以及Phantom处理分析所得物理参数。

[0054] 2、采用PMMA材质芯片刻画煤岩微观通道,该材质芯片受力状态便于控制。煤岩微观通道采用高分辨率的Micro-CT技术扫描获得,并对通道湿润性进行处理,使其更接近原始煤样湿润性。

[0055] 3、滑盖式玻璃箱23便于芯片的放置、夹持,其透光的特性可以保证不会对其他可视化设备的运行产生影响,其密封特征协助维持温度场的稳定。温度传感器18检测密封箱内的温度,调节电热丝19、散热片20以控制温度场。

[0056] 4、利用流量传感器26时时检测芯片进口管道中的流体速度,反馈调节第一液压泵24和第一流量计( $\mu\text{m}/\text{min}$ 级)25,严格控制注入流体的流量,以控制其渗流场。注液速度维持在 $1\mu\text{m}/\text{min}$ 附近,保证高速摄像机对整个流动过程能够精确抓拍。

[0057] 5、第二液压泵17以及第二压力传感器16的反馈调节可通过对液压腔不间断注液,通过液压活塞对芯片短边施加相同轴向压力,液压腔前段直径(活塞直径)小于后段直径,便于精确控制腔内的压力。

[0058] 6、短边受力活塞与芯片接触位置采用半圆柱基座33接触面,可小幅度受力旋转,与芯片接触的平面部分质地较软,可自行补偿短边平面不平整引起的受力不均匀。

[0059] 7、将橡胶活塞11套进压力槽9内并与内部的气囊10接触,利用气泵及反馈调节系统对气囊10注气,气囊膨胀导致橡胶塞受力挤压芯片长边。液压腔以及芯片侧壁上附有压力感应片。两套受力装置结合使用可模拟流动通道的应力场的改变。

[0060] 8、可通过调控单一物理场变化观测某一个因素对于两项微观流动的影响,也可同时改变多个物理场的条件,本发明装置最多可叠加三个物理场。

[0061] 9、水驱气实验中,液体经过去离子化以及染色处理便于观测二者的前锋线、接触角、流动速度以及气泡变形等。

[0062] 10、通过更换表征不同时刻煤岩裂隙形状、特性的芯片,观测其流动数据,通过多组实验衔接以模拟宏观试样动态变化。

[0063] 综上,本发明提供一种耦合作用下微尺度流动可视化测试装置及方法,其包括外部系统和芯片夹持器系统。高精度液压泵通过流量计将液体以需要的流速注入到芯片刻画好的通道中,流量传感器时刻监测流体流量并反馈调节泵中的压力。在获取芯片通道内静态接触角时,逆流阀保障流体不会发生回流而破坏实验数据,结合进、出口压力计数值差可计算芯片通道的渗透率。芯片夹持器、芯片放置在显微镜的载物台上,三维显微镜将观察对象放大,高速摄像机抓拍流体流动全过程并时时将数据、图像传输到数据采集装置中。芯片采用传统的长方体结构,PMMA材质,易于对通道不同的方向施加不同的应力场。长边接触面



积大,利用压力槽、气囊、橡胶塞等装置易于对长边施加应力且误差小。短边受力面积小,为防止出现因应力集中现象出现,采用液压控制系统对短边加压,接触处用一对半圆柱基座进一步缓解应力集中。滑盖玻璃箱便于芯片的取放,维持温度场的恒定,以及便于光线进入和图像采集,箱身材质为PDMS材料有利于保温。压力感应片及压力传感器记录芯片的受力变形。电热丝和温度传感器维持芯片的温度场保持不变。利用后处理软件ImageJ以及Phantom对静态、动态图像处理分析。所有的连接处均使用密封圈进行密封处理,严格保障各物理场的稳定。

[0064] 本发明的关键创新点大体体现在以下几个方面:

[0065] 1) 理论创新:现有实验装置均不可进行受力变形条件对于裂隙中两相流动的动态影响,本装置可以控制温度、气压等不变的条件,首先量化应力作用在单一裂缝时对两相渗流的影响,然后通过控制变量以及权重的方法整合各因素的影响,从而得到基于试验结果的新的微观流动理论本构模型。本发明装置可视化实验进程,精确的数据采集分析,不同于传统的“黑箱”操作试验系统。

[0066] 2) 方法创新:目前尚无实验装置可以描述煤岩基质中微尺度气-液两相流动多物理场耦合过程。煤相对渗透率的测试往往基于实验室标准样品进行试验,通过测试煤样中总的含水量的变化来反演相对渗透率曲线,仅从宏观尺度描述气、液在煤中流动过程。

[0067] 3) 设备创新:本发明设计封闭的可调节温度场、应力场、渗流场等系统,考虑试件湿润性、表面张力、表面粗糙度等因素之间制约关系。同时,本发明①通过定制芯片模拟煤岩固有的疏水性特征,克服了常压条件下湿润性测试结果容易受蒸发过程的影响、不确定性较大的缺点;②通过可调节应力芯片夹持设备来改变芯片裂隙通道受力状态,进而影响两相流动特征。克服了传统微观实验无法施加应力场与实际流动环境差别大的缺点。③可分别控制应力场、温度场以及渗流场的模拟条件,改变了现有设备无法进行多个物理场耦合的现象。

[0068] 上述方式中未述及的部分采取或借鉴已有技术即可实现。

[0069] 尽管已经示出和描述了本发明的实施例,对于本领域的普通技术人员而言,可以理解在不脱离本发明的原理和精神的情况下可以对这些实施例进行多种变化、修改、替换和变型,本发明的范围由所附权利要求及其等同物限定。

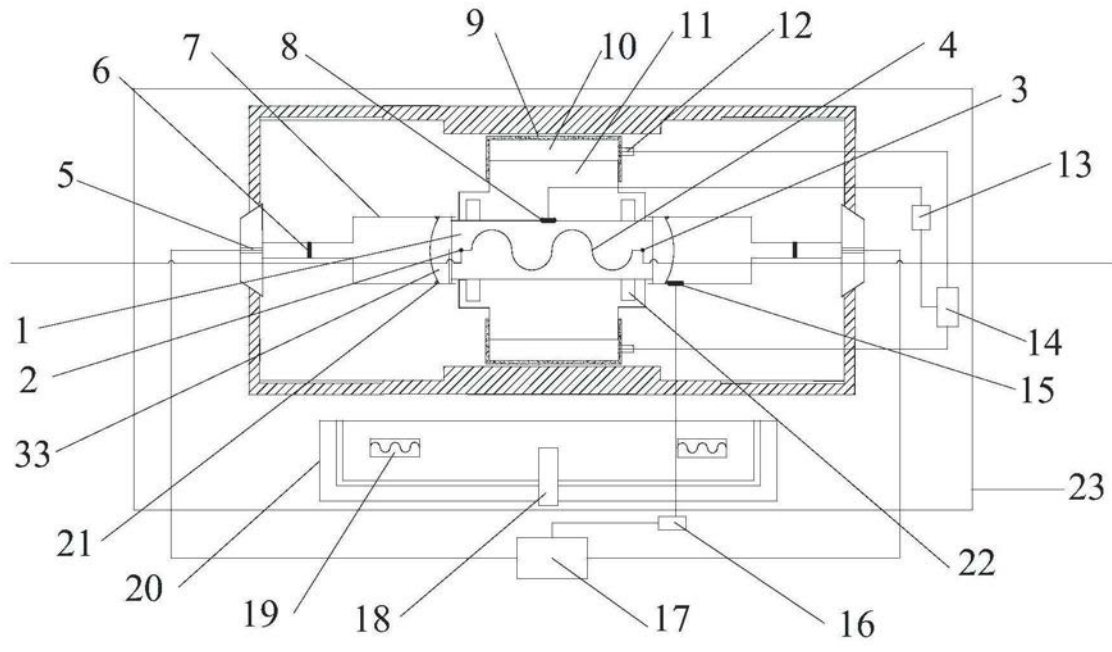


图1

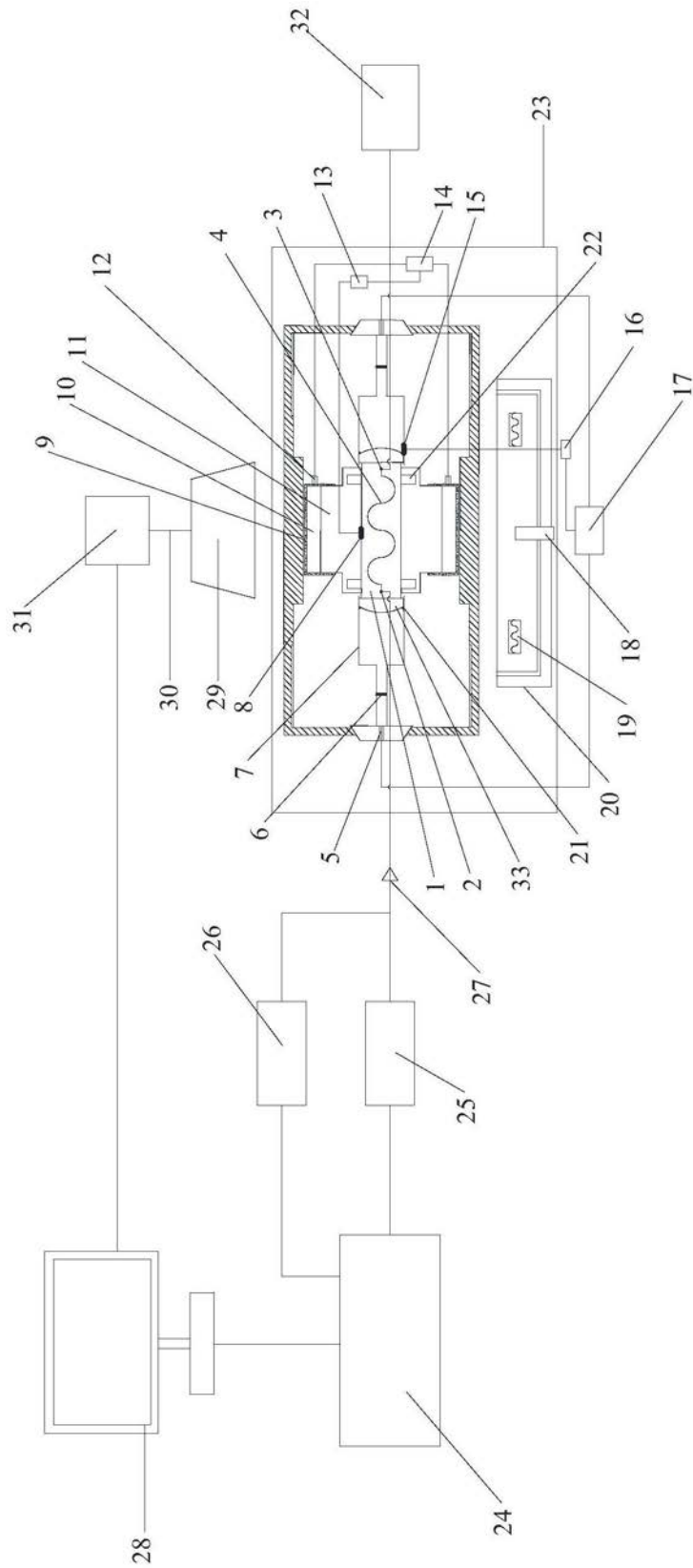


图2