



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 109186935 B

(45)授权公告日 2019.07.23

(21)申请号 201810896871.4

G01N 15/08(2006.01)

(22)申请日 2018.08.08

(56)对比文件

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 109186935 A

CN 103411751 A, 2013.11.27,
CN 106645158 A, 2017.05.10,
CN 102419303 A, 2012.04.18,
CN 101871876 A, 2010.10.27,
JP 2000279407 A, 2000.10.10,
US 3809480 A, 1974.05.07,

(43)申请公布日 2019.01.11

(73)专利权人 武汉大学
地址 430072 湖北省武汉市武昌区珞珈山
武汉大学

审查员 李瑞丽

(72)发明人 杨志兵 薛松 郑小康 陈益峰
赵先进

(74)专利代理机构 武汉科皓知识产权代理事务
所(特殊普通合伙) 42222
代理人 张火春

(51)Int.Cl.

G01M 10/00(2006.01)

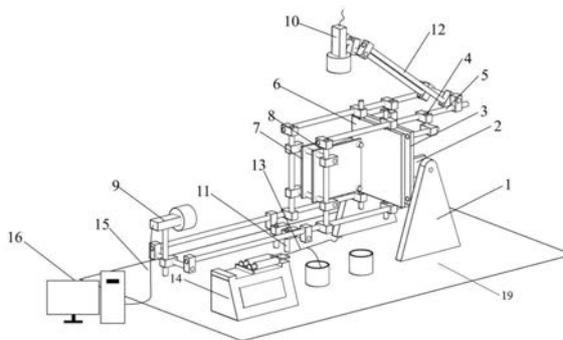
权利要求书2页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置
及方法

(57)摘要

本发明公开了一种模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置及方法,包括一个交叉裂隙模具和观察交叉裂隙渗流的试验装置。所述的交叉裂隙模具内部为T字形交叉的裂隙结构,所述试验装置包括固定装置、流量控制装置和数据采集装置。该试验装置利用了光透射原理,实现了透明交叉裂隙渗流过程的定量化观测研究,同时在机械结构上实现了相机、光源与裂隙模具间的相对位置的灵活调整,实现了对交叉裂隙渗流过程的三维实时观测。



1. 一种模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置,其特征在於:包括基准平板、支撑板、底座、透明裂隙模具、水平相机、垂直相机、固定架、供液系统和控制主机,所述基准平板通过转轴安装在两个支撑板顶部,两个支撑板固定在底座上,基准平板前侧面设有与其平行的平板光源,所述固定架固定连接在基准平板上,所述透明裂隙模具通过夹板固定后安装在平板光源前侧的固定架上,固定架远离转轴处设有支撑在底座上的支撑调节杆,当基准平板处于竖直位置时,所述透明裂隙模具也处于竖直姿态且与基准平板所在平面垂直;所述水平相机和垂直相机也安装在固定架上,其中水平相机用于对透明裂隙模具顶部水平裂隙面拍摄,所述垂直相机用于对与平板光源相对一侧的透明裂隙模具侧边的垂直裂隙面拍摄,水平相机和垂直相机通过数据线与控制主机相连,所述供液系统通过管道与透明裂隙模具的液体出入口分别相连,通过控制主机控制供液系统的供液量进行裂隙渗流可视化试验;

所述透明裂隙模具为采用透明方块玻璃拼接而成的单边T字型交叉裂隙,透明裂隙模具顶部设有通过玻璃胶连接的入口边界接头,所述入口边界接头上设有与透明裂隙模具顶部裂隙连通的入口孔,入口孔顶部设有用于连接供液管道的螺孔,透明裂隙模具底部设有通过玻璃胶连接的出口边界接头,所述出口边界接头上设有与透明裂隙模具底部裂隙连通的出口孔,出口孔底部设有用于连接排液管道的螺孔。

2. 如权利要求1所述的可视化试验装置,其特征在於:所述固定架由水平方向的支杆和竖直方向的支杆组成,支杆与支杆之间通过杆夹相连。

3. 如权利要求2所述的可视化试验装置,其特征在於:所述杆夹采用金属制成,杆夹本体上设有多个供支杆穿过的安装孔,安装孔在一侧裂开分成两半,两半安装孔之间通过螺栓紧固,支杆穿过安装孔后,拧紧螺栓即可保持支杆与杆夹本体相对固定。

4. 如权利要求1所述的可视化试验装置,其特征在於:所述支撑调节杆为可调节高度的伸缩杆,其包括固定块和设于固定块上的调节螺栓,固定块固定安装在固定架底部,调节螺栓通过竖直方向的螺孔安装在固定块上,拧动调节螺栓即可调整其底部伸出高度,与转轴一起配合即可调整基准平板的倾斜角度。

5. 如权利要求1所述的可视化试验装置,其特征在於:所述供液系统为注射泵、储液槽和废液回收槽,所述注射泵通过管道与储液槽及透明裂隙模具顶部的液体入口相连,透明裂隙模具底部的液体出口通过管道与废液回收槽相连。

6. 如权利要求5所述的可视化试验装置,其特征在於:所述管道采用聚四氟乙烯材料制成,注射泵、储液槽和透明裂隙模具顶部的液体入口之间通过三通阀控制液体流向。

7. 如权利要求6所述的可视化试验装置,其特征在於:所述透明裂隙模具的透明方块玻璃之间的裂隙内设有间隙片,通过间隙片控制裂隙开度,所述间隙片通过光固化胶粘结于裂隙边缘处。

8. 一种利用权利要求1所述的可视化试验装置模拟交叉裂隙渗流的可视化试验方法,其特征在於,包括以下步骤:

步骤1、安装调整好平板光源、透明裂隙模具、垂直相机以及水平相机的相对位置,调整好垂直相机和水平相机焦距、曝光强度;

步骤2、利用染色流体进行裂隙面渗流试验;

步骤3、通过垂直相机和水平相机以预设的拍摄速率连续采集裂隙面渗流过程的图像,

利用Matlab图像处理函数对图像进行去背景、二值化和滤波处理,并统计渗透过程中液体的几何特征;

步骤4、利用实际尺寸与照片像素尺寸的比例还原裂隙面内液面的真实尺寸,计算公式如下:

$$D = D' \frac{S}{S'}$$

上式中,D为液面真实尺寸,D'为液面像素尺寸,S为标定点实际距离,S'为标定点像素距离。

9.如权利要求8所述的可视化试验方法,其特征在于,步骤3中,对图像进行去背景、二值化和滤波处理,并统计渗透过程中液体的几何特征具体步骤如下:

步骤a:选取一张液体还未进入裂隙面的图像作为初始图像P₁;

步骤b:依次将采集到的试验过程的图像减去初始图像P₁,得到去除背景的图像P₂;

步骤c:将图像P₂二值化得到图像P₃,使得液体存在部分为白色,其余部分为黑色,通过Matlab程序获取竖直裂隙面和水平裂隙面的液面形态随时间变化的数据。

一种模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及裂隙渗流模型试验的装置及方法,具体涉及一种模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置及方法。

背景技术

[0002] 地下渗流是岩土工程领域的重要前沿基础科学问题,其与诸多领域的国家重大工程安全有着紧密的联系,如水利工程中地基渗漏问题,石油工程中地下油库存储安全问题,二氧化碳地质封存问题,污染物在地下介质中的迁移问题等。因此,研究岩体渗流对工程安全评估与危害防治,地下水污染评价和修复等方面的问题有着重要的意义。

[0003] 岩体由完整的块状岩石和复杂结构面组成。岩石作为一种相对致密的多孔介质,其本身通常具有强度高、渗透性低等特点;而结构面是岩石与岩石之间的接触面,其具有相对较大的开度,可为岩体渗流提供易于流动的通道,因而裂隙作为控制岩体渗流的主要结构,对地下渗流的规律起着主导性的作用。

[0004] 由于普遍位于覆盖层之下,岩体渗流研究缺乏有效的原位、实时观测手段。目前,针对裂隙渗流的研究多依赖野外染色示踪渗流试验,最后通过现场开挖确定相应的渗流特性,由于无法观测到试验过程中渗流的具体过程,其性质上类似于黑箱模型,十分不利于科学研究和工程活动。目前,国内外对裂隙渗流的研究多集中于野外宏观尺度方面,而在细观机理方面研究较少;而针对机理的研究则多集中于单一裂隙,对于交叉裂隙的研究较少。因此急需一种试验方法和装置以实现交叉裂隙渗流的实时观测分析。

发明内容

[0005] 本发明的主要目的在于,克服现有技术的不足,提供一套模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置及方法,该装置采用光透射原理实现了裂隙渗流过程的可视化、量化观测,同时兼具有三维多角度的实时观测功能、不同重力梯度下的试验功能;此外该设备结构简单,成本低廉,可扩展性强。

[0006] 为了达到上述目的,本发明采用的技术方案是:

[0007] 一种模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置,其特征在于:包括基准平板、支撑板、底座、透明裂隙模具、水平相机、垂直相机、固定架、供液系统和控制主机,所述基准平板通过转轴安装在两个支撑板顶部,两个支撑板固定在底座上,基准平板前侧面设有与其平行的平板光源,所述固定架固定连接在基准平板上,所述透明裂隙模具通过夹板固定后安装在平板光源前侧的固定架上,固定架远离转轴处设有支撑在底座上的支撑调节杆,当基准平板处于竖直位置时,所述透明裂隙模具也处于竖直姿态且与基准平板所在平面垂直;所述水平相机和垂直相机也安装在固定架上,其中水平相机用于对透明裂隙模具顶部的水平裂隙面拍摄,所述垂直相机用于对与平板光源相对一侧的透明裂隙模具侧边的垂直裂隙面拍摄,水平相机和垂直相机通过数据线与控制主机相连,所述供液系统通过管道与透明裂隙模具的液体出入口分别相连,通过控制主机控制供液系统的供液量进行裂隙渗流可视化

试验。

[0008] 作为改进,所述固定架由水平方向的支杆和竖直方向的支杆组成,支杆与支杆之间通过杆夹相连。

[0009] 作为改进,所述杆夹采用金属制成,杆夹本体上设有多个供支杆穿过的安装孔,安装孔在一侧裂开分成两半,两半安装孔之间通过螺栓紧固,支杆穿过安装孔后,拧紧螺栓即可保持支杆与杆夹本体相对固定。

[0010] 作为改进,所述支撑调节杆为可调节高度的伸缩杆,其包括固定块和设于固定块上的调节螺栓,固定块固定安装在固定架底部,调节螺栓通过竖直方向的螺孔安装在固定块上,拧动调节螺栓即可调整其底部伸出高度,与转轴一起配合即可调整基准平板的倾斜角度。

[0011] 作为改进,所述供液系统为注射泵、储液槽和废液回收槽,所述注射泵通过管道与储液槽及透明裂隙模具顶部的液体入口相连,透明裂隙模具底部的液体出口通过管道与废液回收槽相连。

[0012] 作为改进,所述管道采用聚四氟乙烯材料制成,注射泵、储液槽和透明裂隙模具顶部的液体入口之间通过三通阀控制液体流向。

[0013] 作为改进,所述透明裂隙模具为采用透明方块玻璃拼接而成的单边T字型交叉裂隙,透明裂隙模具顶部设有通过玻璃胶连接的入口边界接头,所述入口边界接头上设有与透明裂隙模具顶部裂隙连通的入口孔,入口孔顶部设有用于连接供液管道的螺孔,透明裂隙模具底部设有通过玻璃胶连接的出口边界接头,所述出口边界接头上设有与透明裂隙模具底部裂隙连通的出口孔,出口孔底部设有用于连接排液管道的螺孔。

[0014] 作为改进,所述透明裂隙模具的透明方块玻璃之间的裂隙内设有间隙片,通过间隙片控制裂隙开度,所述间隙片通过光固化胶粘结于裂隙边缘处。

[0015] 一种模拟交叉裂隙渗流的可视化试验方法,其特征在于,包括以下步骤:

[0016] 步骤1、安装调整好平板光源、透明裂隙模具、垂直相机以及水平相机的相对位置,调整好垂直相机和水平相机焦距、曝光强度;

[0017] 步骤2、利用染色流体进行裂隙面渗流试验;

[0018] 步骤3、通过垂直相机和水平相机以预设的拍摄速率连续采集裂隙面渗流过程的图像,利用Matlab图像处理函数对图像进行去背景、二值化和滤波处理,并统计渗流过程中液体的几何特征;

[0019] 步骤4、利用实际尺寸与照片像素尺寸的比例还原裂隙面内液面的真实尺寸,计算公式如下:

$$[0020] \quad D = D' \frac{S}{S'}$$

[0021] 上式中,D为液面真实尺寸,D'为液面像素尺寸,S为标定点实际距离,S'为标定点像素距离。

[0022] 作为优选,步骤3中,对图像进行去背景、二值化和滤波处理,并统计渗流过程中液体的几何特征具体步骤如下:

[0023] 步骤a:选取一张液体还未进入裂隙面的图像作为初始图像P₁;

[0024] 步骤b:依次将采集到的试验过程的图像减去初始图像P₁,得到去除背景的图像P₂;

[0025] 步骤c:将图像P₂二值化得到图像P₃,使得液体存在部分为白色,其余部分为黑色,通过Matlab程序获取竖直裂隙面和水平裂隙面的液面形态随时间变化的数据。

[0026] 采用上述结构,本发明能带来一下技术效果:

[0027] 本发明通过通孔和转轴连接直角板和支撑板,实现了基准平板自由转动,从而实现任意重力梯度下的入渗试验模拟;连接于支杆上相机、模具、平板光源通过支杆和杆夹相连可实现相对位置的精确调整;旋转臂的拼接实现了对水平裂隙任意角度的观测;精密注射泵的使用实现了不同渗流流速的精确调节;支杆和杆夹构成的框架结构牢固的固定了试验装置的相对位置保证了试验结果的精确性;通过编写基于Matlab的数据采集程序可自动采集数据。

[0028] 本发明可模拟交叉裂隙中水气相互驱替,水、污染物相互驱替等不同渗透过程,同时可捕捉整个裂隙渗流过程中流体流动特征,并且实现了无人值守式自动采集且操作简便,适用于岩土工程中长时间对非饱和入渗的研究。

附图说明

[0029] 图1为本发明可视化试验装置三维立体图正面;

[0030] 图2为本发明可视化试验装置三维立体图背面;

[0031] 图3为透明裂隙模具立体图;

[0032] 图4为透明裂隙模具的入口边界接头示意图;

[0033] 图5为透明裂隙模具的出口边界接头示意图;

[0034] 图6为本发明可视化试验装置的管道连接示意图。

[0035] 其中有:1-支撑板,2-直角板,3-基准平板,4-杆夹,5-支杆,6-平板光源,7-夹板,8-透明裂隙模具,9-垂直相机,10-水平相机,11-支撑调节杆,12-旋转臂,13-注射管道,14-注射泵,15-数据线,16-控制主机,C、D、E-三通阀,F-入口,G-出口,17-入口边界接头,18-出口边界接头19-底座,20-T字型交叉裂隙。

具体实施方式

[0036] 下面结合说明书附图和实施例对本发明作进一步说明。

[0037] 本发明所要解决的技术问题是提供结构简单、成本低廉、实用性和可扩展性强的交叉裂隙渗流可视化试验装置,不仅实现裂隙渗流过程的可视化、定量化观测,同时兼具有三维多角度的实时观测功能和不同重力梯度下的试验功能。

[0038] 本发明的模拟交叉裂隙渗流的可视化试验装置,包括基准平板3、支撑板1、底座19、透明裂隙模具8、水平相机10、垂直相机9、固定架、供液系统和控制主机16,所述基准平板3通过转轴安装在两个支撑板1顶部,两个支撑板1底部固定在底座19上,基准平板3前侧面设有与其平行的平板光源6,所述固定架固定连接在基准平板3上,固定架由水平方向的支杆5和竖直方向的支杆5组成,支杆5与支杆5之间通过杆夹4相连;所述透明裂隙模具8通过夹板7固定后安装在平板光源6前侧的固定架上,固定架远离转轴处设有支撑在底座19上的支撑调节杆11,当基准平板3处于竖直位置时,所述透明裂隙模具8也处于竖直姿态且与基准平板3所在平面垂直;所述水平相机10和垂直相机9也安装在固定架上,其中水平相机10用于对透明裂隙模具8顶部水平裂隙面拍摄,所述垂直相机9用于对与平板光源6相对一

侧的透明裂隙模具8侧边的垂直裂隙面拍摄,水平相机10和垂直相机9通过数据线15与控制主机16相连,所述供液系统通过管道与透明裂隙模具8的液体出入口分别相连,通过控制主机16控制供液系统的供液量进行裂隙渗流可视化试验。

[0039] 基准平板3后方固定有两个与其垂直的直角板2,两个直角板2通过转轴安装在两个支撑板1顶部,使得基准平板3可以绕转轴转动,从而调整其倾斜角度;基准平板3和固定在其上的固定架一起构成仪器框架,固定架由水平的支杆5和竖直的支杆5通过杆夹4相连组成,并位于平板光源6前方,透明裂隙模具8、水平相机10和垂直相机9分别安装在固定架上相应位置,透明裂隙模具8通过夹板7固定安装在平板光源6前方的固定架上;透明裂隙模具8通过注射管道13与注射泵14相连,透明裂隙模具8前方的通过支杆5和杆夹4固定有垂直相机9,所述垂直相机9用于拍摄透明裂隙模具8前方垂直侧边的裂隙面拍摄,透明裂隙模具8上方通过旋转臂12将水平相机10安装在固定架上;水平相机10和垂直相机9通过数据线15与控制主机16连接,旋转臂12由支杆5通过杆夹4相连拼接组成,用以调整水平相机10的位置和拍摄角度。

[0040] 其中,直角板2与支撑板1通过通孔和转轴相连,基准平板3通过内六角螺丝固定在直角板2上,整体可绕通孔所在转轴旋转,以此作为整个结构的支撑点;透明裂隙模具8由夹板7夹持并通过杆夹4固定于平板光源6前方(具体可为两个夹板7通过螺栓相连将透明裂隙模具8夹紧固定在中间,夹板7上的螺栓或者螺杆通过杆夹4固定在支杆5上),夹板7上贴不透光膜,以减少光线反射对成像的影响;旋转臂12由支杆5和杆夹4拼接组成,用于调整水平相机10的位置;注射管道13采用聚四氟乙烯材料制成,通过三通阀调整液体流向;支撑调节杆11底部支撑在试验平台上,顶部与固定架底部的支杆5相连;注射泵14采用精密流量注射泵14;垂直相机9和透明裂隙模具8位于同一平面内,且该平面与平板光源6垂直,并且三者位于同一条中心线上,其相对位置保持固定,支撑调节杆11底部支撑在试验平台上,顶部与支杆5相连,其高度可调节,基准平板3和支撑调节杆11共同作用达到调整透明裂隙模具8倾角的目的。

[0041] 透明裂隙模具8采用透明方块玻璃拼接而成,如图3,交叉裂隙结构为单边T字型交叉裂隙,组成模具的方块玻璃分别是一块5cm*5cm*10cm的石英玻璃和两块5cm*5cm*5cm的石英玻璃,三块玻璃拼接的接触面之间通过厚度已知的金属垫片(即间隙片)隔开一定的宽度,分别记为竖直裂隙面和水平裂隙面的开度。在模具的上下边界加装了的玻璃接头,入口边界接头17的通孔对准竖直裂隙面上边界,通孔周围通过玻璃胶与模具粘连,使得液体只能从通孔所在位置进入裂隙面,接头通过螺纹孔接金属外丝从而与管道相连,出口边界接头18的开槽位置对准竖直裂隙面下边界,用玻璃胶将接头与模具粘连在一起,使得向下排出的液体可以顺利进入接头的槽内,接头通过螺纹孔接金属外丝从而与管道相连。

[0042] 为实现对裂隙渗流过程的可视化、量化观测,本发明采用透明方形玻璃拼接构建裂隙模具,并通过间隙片控制裂隙开度,通过间隙片控制裂隙开度,并通过边界接头来控制流体的稳定注入和排出。

[0043] 本实施例中,供液系统为注射泵14、储液槽和废液回收槽,所述注射泵14为精密注射泵14,通过管道与储液槽及透明裂隙模具8顶部的液体入口相连,透明裂隙模具8底部的液体出口通过管道与废液回收槽相连,管道采用聚四氟乙烯管材和三通阀组合,其连接方式如图6所示,其中三通阀可以控制任意两个方向或三个方向相通。

[0044] 本实施例中组成固定架的所述杆夹4采用金属制成,杆夹本体上设有多个供支杆5穿过的安装孔,安装孔在一侧裂开分成两半,两半安装孔之间通过螺栓紧固,支杆5穿过安装孔后,拧紧螺栓即可保持支杆5与杆夹本体相对固定,杆夹4上安装孔的数量和位置根据需要进行设置,比如需要连接两个平行的支杆5,那么杆夹本体上就设置两个平行的安装孔,需要连接两个垂直的支杆5,那么就设置两个轴线垂直的安装孔,当然本实施例中杆夹4还可以替换为现有技术中任何连接杆件的杆夹4,不限于本上述结构,比如可以采用大恒光电生产的GCM-55系列支杆夹或者类似于脚手架扣件结构等等。

[0045] 本实施例中,所述支撑调节杆11为伸缩杆,通过伸缩杆与转轴可以调整基准平板3和与其相对固定的透明裂隙模具8的倾斜角度;所述伸缩杆为固定块和设于固定块上的调节螺栓,固定块固定安装在固定架底部,调节螺栓通过竖直方向的螺孔安装在固定块上,拧动调节螺栓即可调整其底部伸出高度,与转轴一起配合即可调整基准平板3的倾斜角度,具体支撑调节杆11有多个,由于基准平板3通过转动副安装在转轴上,其只能绕着转轴转动,因此在固定架底部设置一个支撑调节杆11,即可支撑整个仪器框架,调整支撑调节杆11的长度即可调整整个仪器框架倾斜角度,同时整个仪器框架上的各部件由于是固定安装,因此基准平板3、平板光源6、透明裂隙模具8、垂直相机9和水平相机10之间相对位置均保持不变。

[0046] 采用上述结构和模具时,模拟交叉裂隙渗流的可视化试验方法如下:

[0047] 一、试验前准备工作如下:

[0048] 步骤1、染色试验液体配置,利用容量瓶和烧杯配置一定浓度(本例采用 $\frac{1}{16}g/L$)的亮蓝染色溶液(具体可采用考马斯亮蓝染色脱色液)作为试验液体;

[0049] 步骤2、注射泵14校准,利用天平实时称重的方法标定注射泵14注射精度,并对相关注射参数进行调整;

[0050] 步骤3、试验装置组装固定,根据试验要求通过转轴与支撑调节杆11的伸缩调节好基准平板3的旋转角度(即调整透明裂隙模具8倾角),通过杆夹4和支杆5固定好垂直相机9、水平相机10、透明裂隙模具8以及平板光源6的相对位置;

[0051] 步骤4、光学仪器调节,将垂直相机9和水平相机10与控制主机16,通过Maltab数据采集程序实现图像预览并调节相机焦距使聚焦于渗流裂隙面上,调节采集幅面大小对应于整个裂隙面尺寸,固定相机光圈使曝光于一个合适的光强(可以通过试验前多次拍摄,选择图片最清晰的光圈作为合适的光圈),调节试验采集时数据采集的帧率(根据试验所需时间判断,所需时间长帧率可以低一些,所需时间短,帧率需要高一些);

[0052] 步骤5、管道调节,如图6所示,调整三通阀C,通过B→C→A通路向注射泵14内吸取试验所需液体,调整三通阀D,使A→C→D→F连通,通过注射泵14将液体注射至透明裂隙模具8上部边界。

[0053] 二、试验过程中具体操作如下:

[0054] 步骤1、记录透明裂隙模具8的倾角(即基准平板3绕着转轴的转动角度),通过注射泵14设置液体的注射流速;

[0055] 步骤2、打开数据采集程序,开启注射泵14,开始向透明裂隙模具8内注射试验液体,采集试验过程中时间、液体运动过程图片直至裂隙内部形成多次稳定的循环过程;

[0056] 步骤3、试验完成之后,将透明裂隙模具8拆下来,排出其中的液体,清洗并烘干透明裂隙模具8,以备下次试验使用;

[0057] 步骤4、改变注射流速、透明裂隙模具8倾角、透明裂隙模具8的裂隙开度等试验条件,重复上述步骤。

[0058] 三、试验后数据处理

[0059] 试验之后利用Matlab图像处理函数对图片进行二值化,滤波等处理,并统计渗透过程中液体的几何特征,其中包含以下步骤:

[0060] 步骤1:选取一张液体还未进入裂隙面的图像作为初始图像 P_1 ;

[0061] 步骤2:依次将采集到的试验过程的图像减去初始图像 P_1 ,得到去除背景的图像 P_2 ;

[0062] 步骤3:将图像 P_2 二值化得到图像 P_3 ,使得液体存在部分为白色(值为1),其余部分为黑色(值为0),通过程序获取竖直裂隙面和水平裂隙面的液面形态随时间变化的数据(均为像素尺寸);

[0063] 步骤4、利用实际尺寸与照片像素尺寸的比例还原裂隙面内液面的真实尺寸,计算公式如下:

$$[0064] \quad D = D' \frac{S}{S'}$$

[0065] 上式中, D 为液面真实尺寸, D' 为液面像素尺寸, S 为标定点实际距离, S' 为标定点像素距离。

[0066] 上述虽然结合附图对本发明的具体方案进行了描述,但并非对本发明保护范围的限制,所属领域技术人员应该明白,在本发明的技术方案的基础上,本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围内。

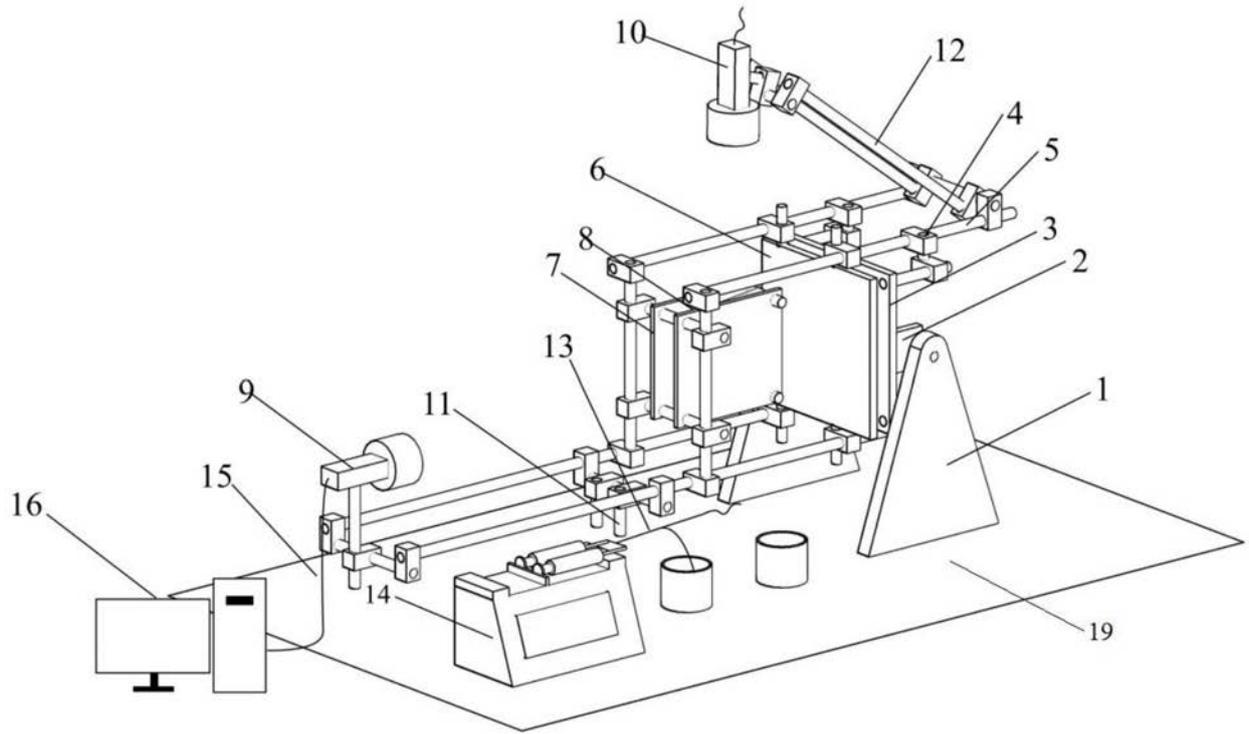


图1

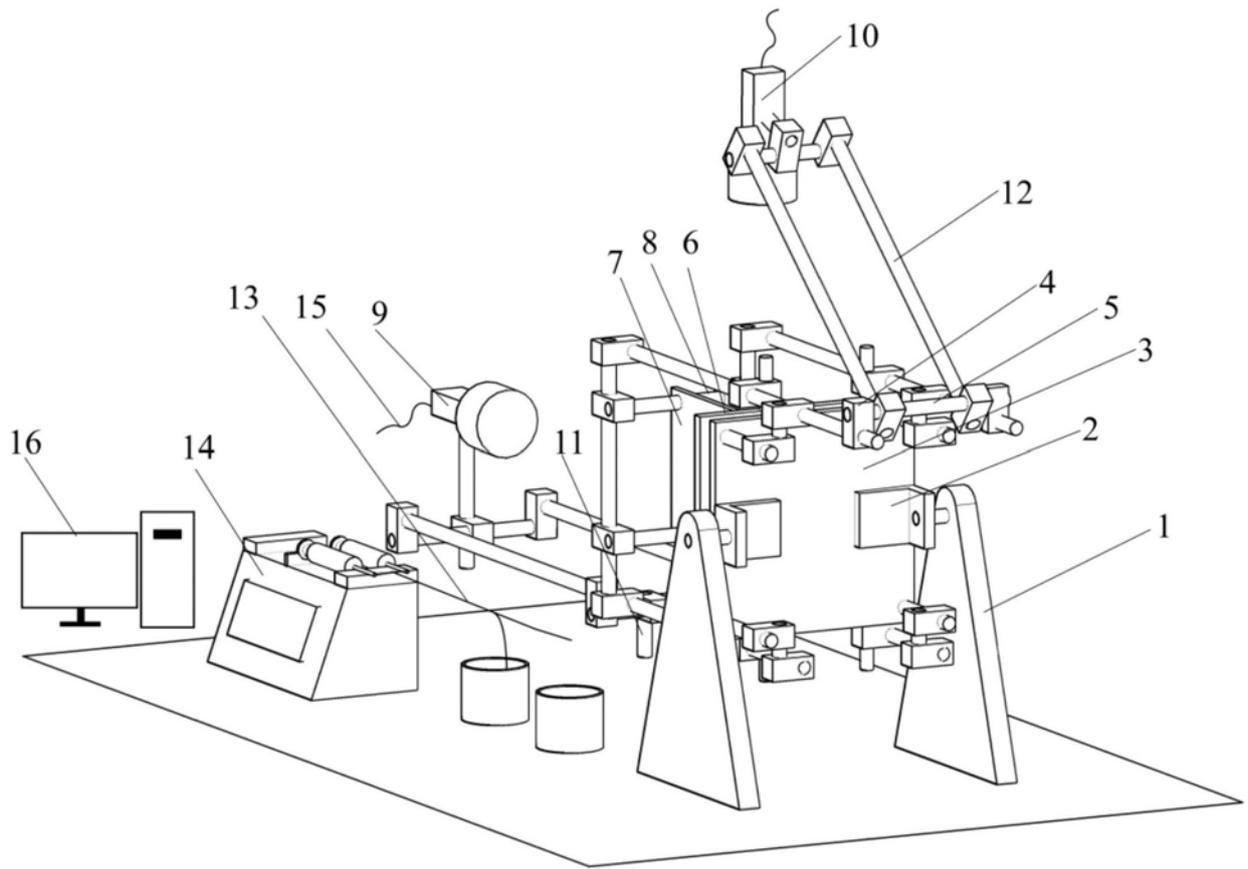


图2

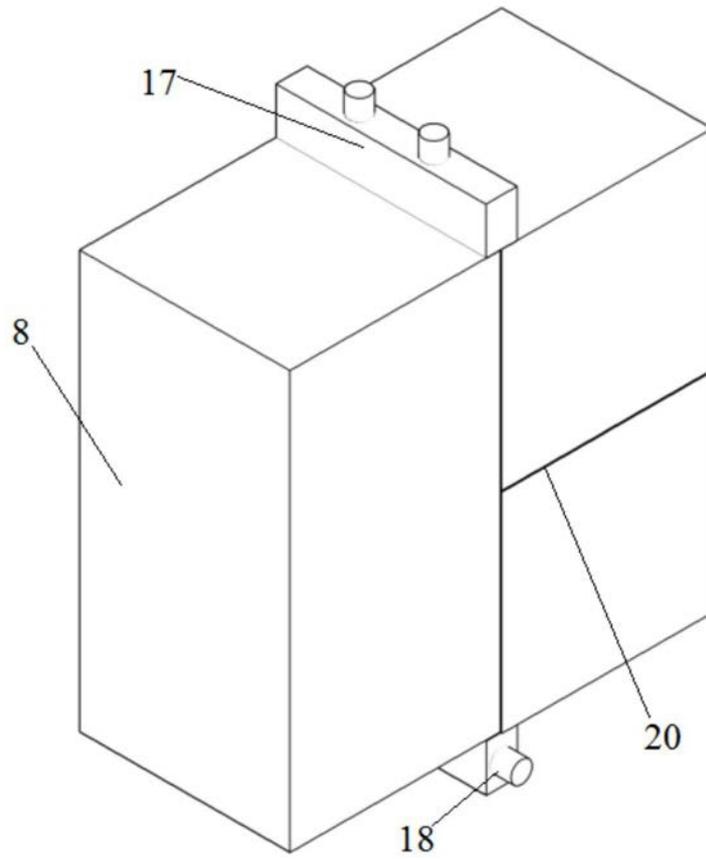


图3

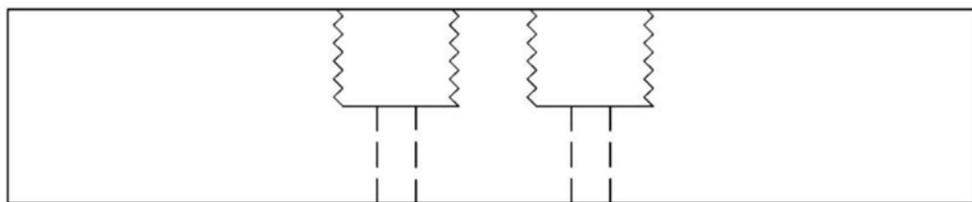


图4

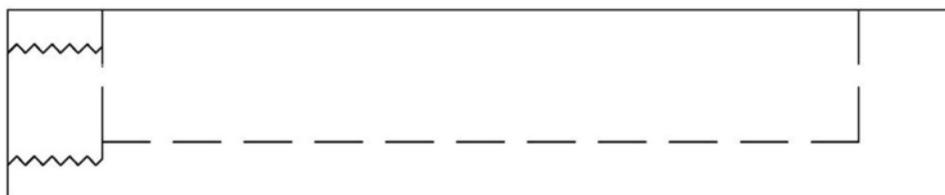


图5

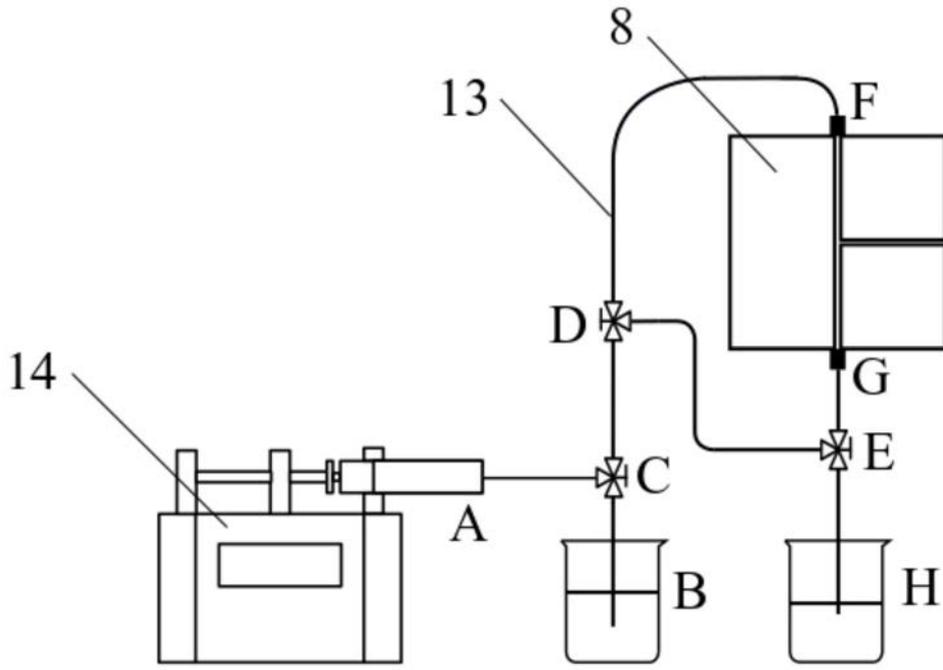


图6