



## (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106370804 A

(43)申请公布日 2017.02.01

(21)申请号 201610802188.0

(22)申请日 2016.09.05

(71)申请人 中国科学院南京土壤研究所

地址 210008 江苏省南京市玄武区北京东路71号

(72)发明人 宋昕 魏昌龙 王晴

(74)专利代理机构 南京经纬专利商标代理有限公司 32200

代理人 唐循文

(51) Int. Cl.

G01N 33/18(2006.01)

G01N 1/10(2006.01)

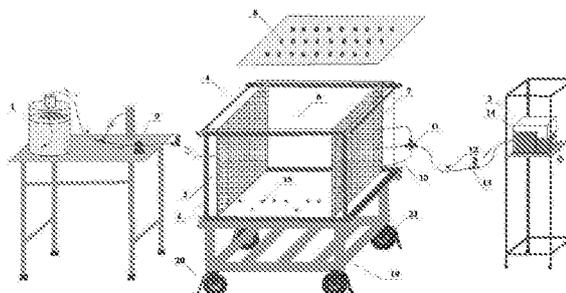
权利要求书1页 说明书6页 附图2页

### (54)发明名称

一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置

### (57)摘要

一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置。包括依次连接的供水装置、模拟装置和蓄水装置，所述模拟装置为一个带有上盖的方形槽体，槽体内通过两个不锈钢丝网装置将槽体内空间分隔为入水池、含水层和出水池，所述供水装置与入水池相连，所述蓄水装置与出水池相连，且槽体位于含水层区域的侧壁上以及上盖上均设有一组采样装置。该装置通过设计不同类型的填充介质以模拟地下非均质含水层，设置地下含水层的不同流水场等条件，设计科学合理的取样方法，同时连续监测不同水位的污染物和示踪剂等浓度，分析目标污染物在不同时间、空间的分布与转化，适用于三维尺度研究污染物在地下饱和非均质含水层环境中的迁移转化。



1. 一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于包括依次连接的供水装置(1)、模拟装置(2)和蓄水装置(3),所述模拟装置(2)为一个带有上盖的方形槽体,槽体内通过两个不锈钢丝网装置(4)将槽体内空间分隔为入水池(5)、含水层(6)和出水池(7),所述供水装置(1)与入水池(5)相连,所述蓄水装置(3)与出水池(7)相连,且槽体位于含水层区域的侧壁上以及上盖上均设有一组采样孔,采样孔内设有采样装置。

2. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述供水装置通过带有流量计的蠕动泵(9)与入水池管道连接。

3. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述出水池设有三根出水管(10),所述出水管通过四通管(11)汇入一个总出水管后与蓄水装置(3)连接,所述总出水管上设有二通阀(12)和取样阀(13)。

4. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述蓄水装置内设有隔板(14),所述隔板用于固定水头。

5. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述采样装置为带有鲁尔接口的19-gauge不锈钢取样针(25),取样针的一端由槽体侧壁或上盖垂直插入含水层,另一端与带有鲁尔接口的止通阀(26)连接,止通阀的外接口设有鲁尔注射器(27)。

6. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述不锈钢丝网装置(4)由不锈钢管架(16)、不锈钢丝网(17)和不锈钢管架外裹(18)构成,不锈钢管架外裹(18)固定于不锈钢管架(16)上,所述不锈钢管架外裹(18)上设有凹槽,不锈钢丝网(17)插入凹槽内,且可在凹槽内滑动。

7. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述模拟装置设于推车(19)上,推车底部设有转向轮(20),每个转向轮均设有制动装置(21)。

8. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述上盖为厚10mm的有机玻璃板,玻璃板上设有孔径为3mm的孔,纵向孔间距为10cm,横向孔间距为15cm。

9. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述含水层模拟装置长为120cm、宽为60cm、高为85cm。

10. 根据权利要求1所述模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,其特征在于所述采样装置深浅间隔呈中心对称分布,其中浅取样设于相对的两个侧壁上,自上而下按每行个数2-3-4-3-2布置,深取样设于单个侧壁上,自上而下按每行个数4-5-4布置。

## 一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及土壤和地下水污染修复领域,具体涉及一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置。

### 背景技术

[0002] 土壤和地下水作为重要的自然资源,在维护我国经济社会健康发展和生态环境等方面发挥了重要作用。然而,随着经济社会的快速发展,土壤和地下水污染却日趋严重。对于土壤和地下水的污染修复离不开污染物在地下环境中的迁移行为与转化规律研究,理论上可通过建立野外大型试验场获取污染物浓度的时空分布及水文地质条件,结合数值模型模拟预测污染特征及修复规律,但野外原位试验的密集采样存在操作复杂、成本高等特点,难以实施。因此,通过搭建科学可行的地下水环境试验装置来模拟污染物迁移规律可为地下水污染防治工作提供技术指导。

[0003] 针对地下水环境是一个三维、水文条件复杂的系统,目前室内针对地下水环境中污染物的迁移行为研究主要限于一维柱试验或二维水槽模拟装置,且对于地下环境中非均质含水层影响污染物迁移规律的研究相对较少,以致其难以真实反映野外水文地质情况。含水层的宏观非均质性影响了污染物的迁移,宏观非均质地层通常由高透水带和低透水带紧密交错,使得污染物在透水带以对流为主,在低透水带以分子扩散为主,当高透水带的污染物浓度低于低透水带浓度时,污染物将通过扩散返回高透水带,因此,在这类系统中去除污染物所需时间较长。模拟研究该类系统中污染物的三维尺度迁移行为尤为迫切,这将为地下环境中土壤和地下水污染修复提供参数指导,可为修复技术选择和方案设计提供了理论支撑。此外,模拟装置中目标污染物的取样方法(如取样频率、取样体积和取样速度)对于含水层的流水场影响很大,合理的取样方法对于模拟的精确性至关重要。而且现有装置多为有机玻璃和PVC等材质,因其成分含酞酸脂类等污染物,导致无法开展部分有机物的研究,该类型材质可能含有毒添加剂和增塑剂,老化后易造成环境污染及危害实验人员健康。因此需要选择一种大尺度模拟装置用以模拟地下三维水文环境,并通过设置污染物投放方式、介质填充装置、取样装置、污染物检测装置等条件,设计适宜的取样体积和取样速度等参数,使得该发明可三维尺度模拟饱和非均质含水层中污染物的迁移及转化研究。

### 发明内容

[0004] 解决的技术问题:本发明目的在于针对上述存在不足,提供一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置。该装置通过设计不同类型的填充介质以模拟地下非均质含水层,设置地下含水层的不同流水场等条件,设计科学合理的取样方法,同时连续监测不同水位的污染物和示踪剂等浓度,分析目标污染物在不同时间、空间的分布与转化,适用于三维尺度研究污染物在地下多孔介质中的迁移转化。

[0005] 技术方案:一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装

置,包括依次连接的供水装置、模拟装置和蓄水装置,所述模拟装置为一个带有上盖的方形槽体,槽体内通过两个不锈钢丝网装置将槽体内空间分隔为入水池、含水层和出水池,所述供水装置与入水池相连,所述蓄水装置与出水池相连,且槽体位于含水层区域的侧壁上以及上盖上均设有一组采样孔,采样孔内设有采样装置。

[0006] 所述供水装置通过带有流量计的蠕动泵与入水池管道连接。

[0007] 所述出水池设有三根出水管,所述出水管通过四通管汇入一个总出水管后与蓄水装置连接,所述总出水管上设有二通阀和取样阀。

[0008] 所述蓄水装置内设有隔板,所述隔板用于固定水头。

[0009] 所述采样装置为带有鲁尔接口的19-gauge不锈钢取样针,取样针的一端由槽体侧壁或上盖垂直插入含水层,另一端与带有鲁尔接口的止通阀连接,止通阀的外接口设有鲁尔注射器。

[0010] 所述不锈钢丝网装置由不锈钢管架、不锈钢丝网和不锈钢管架外裹构成,不锈钢管架外裹固定于不锈钢管架上,所述不锈钢管架外裹上设有凹槽,不锈钢丝网插入凹槽内,且可在凹槽内滑动。

[0011] 所述模拟装置设于推车上,推车底部设有转向轮,每个转向轮均设有制动装置。

[0012] 所述上盖为厚10mm的有机玻璃板,玻璃板上设有孔径为3mm的孔,纵向孔间距为10cm,横向孔间距为15cm。

[0013] 所述含水层模拟装置长为120cm、宽为60cm、高为85cm。

[0014] 所述采样装置深浅间隔呈中心对称分布,其中浅取样设于相对的两个侧壁上,自上而下按每行个数2-3-4-3-2布置,深取样设于单个侧壁上,自上而下按每行个数4-5-4布置。

[0015] 有益效果:①本发明装置可根据野外研究区的水文地质情况,最大程度按比例开展室内的物理模拟装置,鉴于地下水环境的复杂情况,该三维模拟装置更能准确反映野外实际水文地质条件,能够满足地下水污染修复中污染物的多维迁移需求,使研究更具实际的代表性和针对性。②该实验装置中含水层装置采用槽体顶部采样和侧壁采样相结合的方式,一方面避免因侧壁钻孔过多而影响装置的稳固,增加了装置的安全性,同时减少了侧壁钻孔及安装取样阀门的成本,顶部采样设置也提高了采样的效率。③通过布设一定孔径的取样针、设定合适的取样速度与取样频率,更加科学地模拟地下水环境中污染物的迁移规律。④该实验装置中含水层装置的槽体材质为非钢化玻璃,其具有亲水表面,避免优先流的产生,此外对污染物的适应性范围扩大,能够涵盖全部种类有机污染物的模拟研究。⑤该实验装置中,通过设置存放含水层槽体的底部装置和槽体四周的可拆卸的加固装置,使得该实验装置具有更好的可移动性和稳固性。⑥该实验装置中,含水层槽体内固定的不锈钢丝网隔网装置,可根据模拟研究不同填充介质的需要,进行更换所需孔径的不锈钢丝网,使得填充层的选择更灵活和便捷。⑦本发明结构设计灵活,检测数据准确,能够很大程度上降低污染物迁移与转化模拟的成本,提高模拟研究的工作效率,具有广泛的应用价值。

## 附图说明

[0016] 图1为该模拟装置的结构示意图;

[0017] 图2为该模拟装置中隔网装置示意图;

[0018] 图3为该模拟装置中槽体稳固架构示意图；

[0019] 图4为该移动模拟装置中槽体侧壁取样装置示意图(俯视)。

[0020] 供水装置1、模拟装置2、蓄水装置3、不锈钢丝网装置4、入水池5、含水层6、出水池7、上盖采样孔8、蠕动泵9、出水管10、四通管11、二通阀12、取样阀13、隔板14、侧壁采样孔15、不锈钢管架16、不锈钢丝网17、不锈钢管架外裹18、推车19、转向轮20、制动装置21、螺丝22、螺杆23、不锈钢框24、带有鲁尔接口的19-gauge不锈钢取样针25、止通阀26、鲁尔注射器27。

## 具体实施方式

[0021] 以下实施例只为说明本发明的技术构思及特点,其目的在于让熟悉此项技术的人是能够了解本发明的内容并据以实施,并不能以此限制本发明的保护范围。凡根据本发明精神实质所做的等效变换或修饰,都应涵盖在本发明的保护范围之内。

[0022] 实施例1

[0023] 一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置,包括依次连接的供水装置1、模拟装置2和蓄水装置3,所述模拟装置2为一个带有上盖的方形槽体,槽体内通过两个不锈钢丝网装置4将槽体内空间分隔为入水池5、含水层6和出水池7,所述供水装置1与入水池5相连,所述蓄水装置3与出水池7相连,且槽体位于含水层区域的侧壁上以及上盖上均设有一组采样孔,采样孔内设有采样装置。

[0024] 所述供水装置通过带有流量计的蠕动泵9与入水池管道连接。

[0025] 所述出水池设有三根出水管10,所述出水管通过四通管11汇入一个总出水管后与蓄水装置3连接,所述总出水管上设有二通阀12和取样阀13。

[0026] 所述蓄水装置内设有隔板14,所述隔板用于固定水头。

[0027] 所述采样装置为带有鲁尔接口的19-gauge不锈钢取样针25,取样针的一端由槽体侧壁或上盖垂直插入含水层,另一端与带有鲁尔接口的止通阀26连接,止通阀的外接口设有鲁尔注射器27。

[0028] 所述不锈钢丝网装置4由不锈钢管架16、不锈钢丝网17和不锈钢管架外裹18构成,不锈钢管架外裹18固定于不锈钢管架16上,所述不锈钢管架外裹18上设有凹槽,不锈钢丝网17插入凹槽内,且可在凹槽内滑动。

[0029] 所述模拟装置设于推车19上,推车底部设有转向轮20,每个转向轮均设有制动装置21。

[0030] 所述上盖为厚10mm的有机玻璃板,玻璃板上设有孔径为3mm的孔,纵向孔间距为10cm,横向孔间距为15cm。

[0031] 所述含水层模拟装置长为120cm、宽为60cm、高为85cm。

[0032] 所述采样装置深浅间隔呈中心对称分布,其中浅取样设于相对的两个侧壁上,自上而下按每行个数2-3-4-3-2布置,深取样设于单个侧壁上,自上而下按每行个数4-5-4布置。

[0033] 实施例2

[0034] 一种模拟地下环境中污染物在多孔介质中迁移转化的三维可视模拟装置及其取样方法,包括供水装置1、模拟装置2和蓄水装置3。如图1所示,所述移动模拟装置的主体为

顶部带有盖的方形槽体,将储存人工地下水的供水装置1放置在平台,通过蠕动泵9将流体泵入水池5,并采用流量计校正蠕动泵流速。出水池端通过聚四氟乙烯穿板接头将出水管与出水池7连通,三个出水管10通过四通管11汇入一个水管,出水管接有二通阀12和取样阀13。出水端最终接入蓄水装置3,蓄水装置内通过隔板14隔开用于固定水头,蓄水装置3放置在可自由调节高度的卡槽支架。槽体采用12mm厚的非钢化玻璃加工而成,在非钢化玻璃板外侧通过不锈角钢进行加固,并固定于底部可移动推车19上,加固方式具体见图3,槽体四周由不锈钢框24架包裹固定,槽体两侧的不锈钢框架为厚度3mm、宽40mm的不锈角钢制成,槽体两侧框架的下边分别钻有3个直径10mm孔,通过螺丝22固定于推车19底部,在该框架的四角位置分别有直径20mm孔,在槽体与框架支架填充5mm厚缓冲物,继而通过4根螺杆23将槽体两侧的框架箍紧。同样,在槽体底部两端分别在角钢与玻璃之间填充5mm缓冲物,然后通过螺丝22将角钢固定于槽体底部的推车19上。槽体装置底部的推车材质为不锈钢,底部装有可承重的转向轮20,每个轮分别配备制动装置21。其中不锈钢丝网装置如图2,由不锈钢管架16、不锈钢丝网17和不锈钢架外裹18构成,不锈钢管架近含水层一侧等间距钻有24个孔,将不锈钢丝网覆盖于不锈钢管架,然后将不锈钢管架外裹卡在不锈钢管架上,通过螺丝联合固定,最后将该装置装入水槽中,并将不锈钢管架外裹与玻璃接触的地方用玻璃胶黏合固定,不锈钢管架外裹上端留有开口槽,便于含水层填充不同介质需要进行更换不同孔径的不锈钢丝网。为模拟地下饱和含水层的非均质性,宏观非均质性常见模式为低透水带的地段与高透水带地段相互紧密交错。可分两层分别填充低渗透介质和高渗透介质,每层介质的厚度为40cm,同时通过安装不同长度的取样针分析污染物在不同空间的浓度,研究污染物在不同渗透系数介质之间的质量传输系数,最终研究污染物在饱和非均质含水层的迁移规律。针对本发明的样品采集方式,若仅采用侧壁钻孔取样方式,需在侧壁钻孔41个,其中需安装30cm取样针13枚,15cm取样针28枚。若仅采用顶端垂直取样,则无法满足采集同一垂向不同深度的样品。为此,含水层采样装置分为侧壁设置采样和顶端设置采样,侧壁采样装置见图4(俯视图),将带有鲁尔接口的19-gauge不锈钢取样针25由侧壁垂直插入含水层,并通过玻璃胶将其固定,不锈钢针的外端与带有鲁尔接口的聚四氟乙烯止通阀26连接,平常保持阀门处于关闭状态。在进行一定时间间隔采集样品时,旋转止通阀至开通状态,然后通过鲁尔注射器27插入止通阀的接口进行样品采集,一次取样约2~4mL,并根据填充含水层介质设置一定取样速度。在槽体顶部覆有厚10mm有机玻璃板,玻璃板钻有孔径为3mm的孔,纵向孔间距为10cm,横向孔间距为15cm。该实施例中,含水层模拟装置长为120cm、宽为60cm、高为85cm。所述采样装置深浅间隔呈中心对称分布,其中浅取样设于相对的两个侧壁上,自上而下按每行个数2-3-4-3-2布置,深取样设于单个侧壁上,自上而下按每行个数4-5-4布置。

[0035] 表1该发明中不同填充介质的水体取样速度(以水力梯度 $I=0.005$ 为例)

	介质类型	粒径/mm	渗透系数/(m/d)	取样速度/(mL/min)
[0036]	黏土	<0.002	0.05-0.1	0.008
	粉土	0.002-0.075	0.5-1.0	0.08
	粉砂	0.05-0.1	1.0-1.5	0.12
	细砂	0.1-0.25	5.0-10.0	0.8
[0037]	中砂	0.25-0.5	10.0-25	2.0
	粗砂	0.5-1.0	25-50	4.0

[0038] 该模拟装置为了满足有机物等污染物在地下水环境中迁移行为的需求,可通过设计不同填充介质及厚度以模拟污染物在非均质含水层中的迁移规律。

[0039] 本发明的工作原理:

[0040] 本装置可根据野外地层的实际水文地质,等比例缩小以模拟野外不同地层。当研究目标污染物的面源污染时的迁移行为,可通过将污染物稀释到地下水中由蠕动泵连续泵入槽体,也可将目标污染物放置于含水层中作为点源污染研究。根据填充介质粒径更换所需孔径的不锈钢丝网,根据污染物的分析方法确定污染物取样体积,根据填充介质的渗透系数和水力梯度设置取样速度。通过同时连续监测不同水位的污染物和示踪剂等浓度,分析目标污染物在不同时间、空间的分布与转化,适用于三维尺度研究污染物在地下环境中迁移转化。

[0041] 该模拟装置具体操作步骤包括以下内容:

[0042] (1) 模拟装置的密闭性和稳固性测试

[0043] 模拟装置的密闭性和稳固性测试分三步进行,①首先在安装取样针及隔网装置前,将硅酮玻璃胶密封玻璃槽体的钻孔,经过24h胶体固化后,槽体贮满水测试玻璃板连接处及钻孔的密封效果,并确保无渗透且钻孔密封性能良好;②其次将取样针和穿板接头分别安装在槽体侧壁和槽体两端,并通过玻璃胶黏合固定,然后水槽注水测试取样针及穿板接头是否有渗漏情况;③在确保前面两步无渗透现象,在水槽内侧两端分别安装隔网装置,并贮满水检查装置的密封效果。

[0044] (2) 填充非均质含水层介质

[0045] 本装置中含水层可通过填充石英砂或野外土壤,分层填充不同渗透系数的介质模拟地下含水层的非均质性,其中石英砂需分别经过一定浓度的硝酸和氢氧化钠等浸泡若干时间,然后用去离子水洗净,最后高温烘干;而野外土壤则需经过烘干、研磨成粉和过筛等步骤,使得含水层介质的粒径约为0.1~0.8mm。通过填充不同渗透系数的介质模拟地下非均质含水层环境,含水层介质的渗透系数介于 $2 \times 10^{-5} \sim 6 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ ,高渗透含水层的渗透系数高于低渗透含水层10倍。填充含水层介质选择湿法填充方式,以保证含水层始终处于饱水状态,避免含水层中的空气残留。具体填充过程为始终保持高于含水层5cm的自由水面,然后通过烧杯均匀铺设含水层,为保持隔网的稳固,在入水池和出水池中同时填充直径2~4cm的鹅卵石,并使得鹅卵石的填充高度与含水层的填充高度保持一致。

[0046] (3) 投加目标污染物与示踪剂

[0047] 配制人工模拟地下水矿物营养盐溶液,模拟地下水中的大量元素( $\text{FeSO}_4$ 、 $\text{MgSO}_4$ 、 $\text{NH}_4\text{Cl}$ 、 $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ )和微量元素( $\text{MnCl}_2$ 、 $\text{CoCl}_2$ 、 $\text{CaSO}_4$ 、 $\text{ZnSO}_4$ 等),可将污染物和示踪剂溶解在地下水溶液中,然后根据测定含水层渗透系数值设定地下水流速,并通过蠕动泵将含有目标污染物和示踪剂的地下水溶液连续泵入槽体入水池。

[0048] (4) 污染物取样方法

[0049] 装置正常稳定运转之后,为获取目标污染物和示踪剂的时间、空间分布情况,需按照目标污染物分析方法和地下水流速大小等进行设置取样体积和取样频率,为降低取样对含水层流场的影响,取样速度不得超过槽体水流速度的5%,本装置的采样速度在1~2mL/min,在保证足够样品用于化学定量分析的前提下,每个取样孔的单次取样体积在2~4mL。

[0050] (5) 含水层定期消毒处理

[0051] 为抑制含水层中微生物的生长,将一定量甲醛混匀在缓冲溶液中,并通过蠕动泵定期进行冲刷含水层,避免微生物繁殖代谢对含水层渗透性及污染物迁移和转化行为造成干扰。

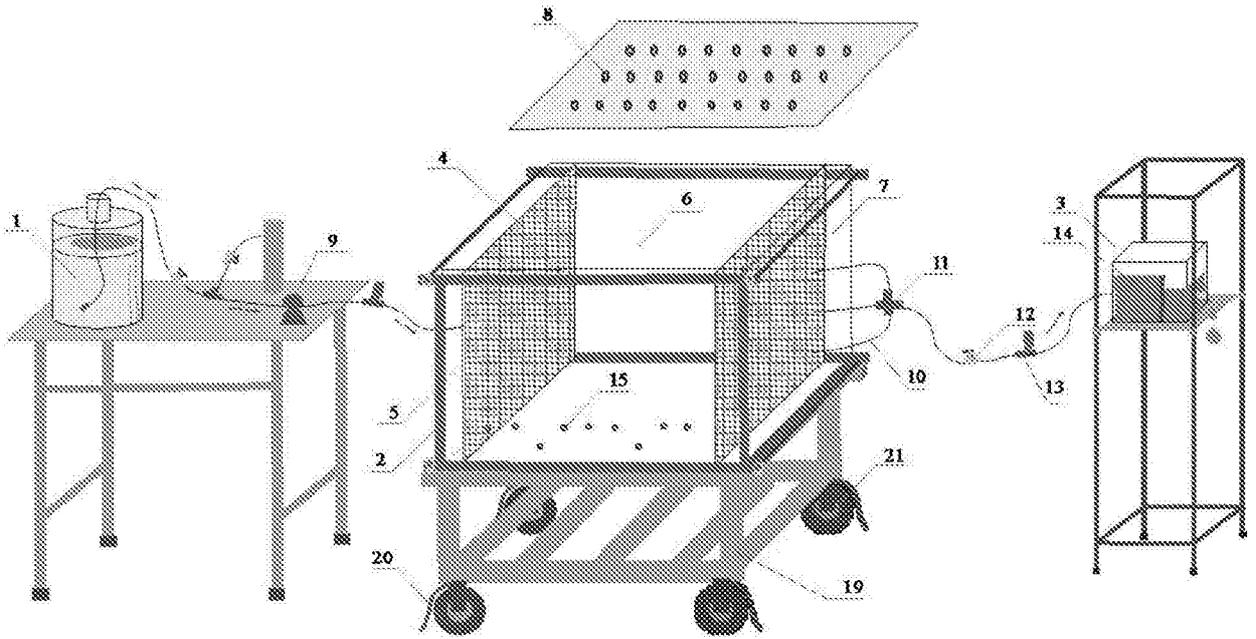


图1

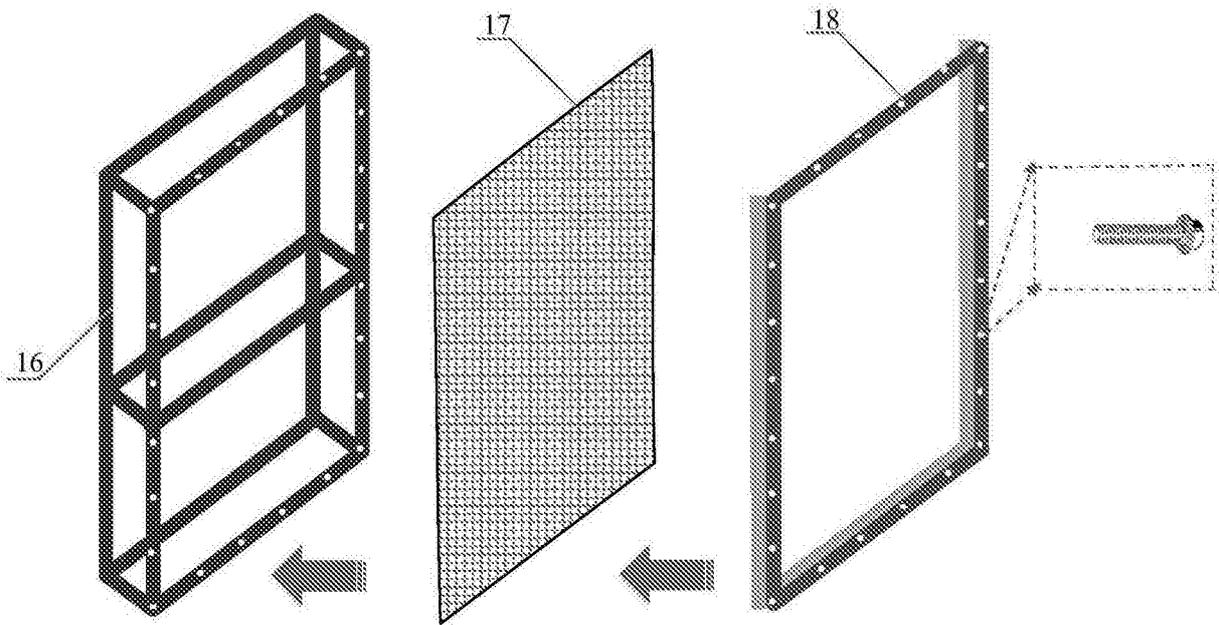


图2

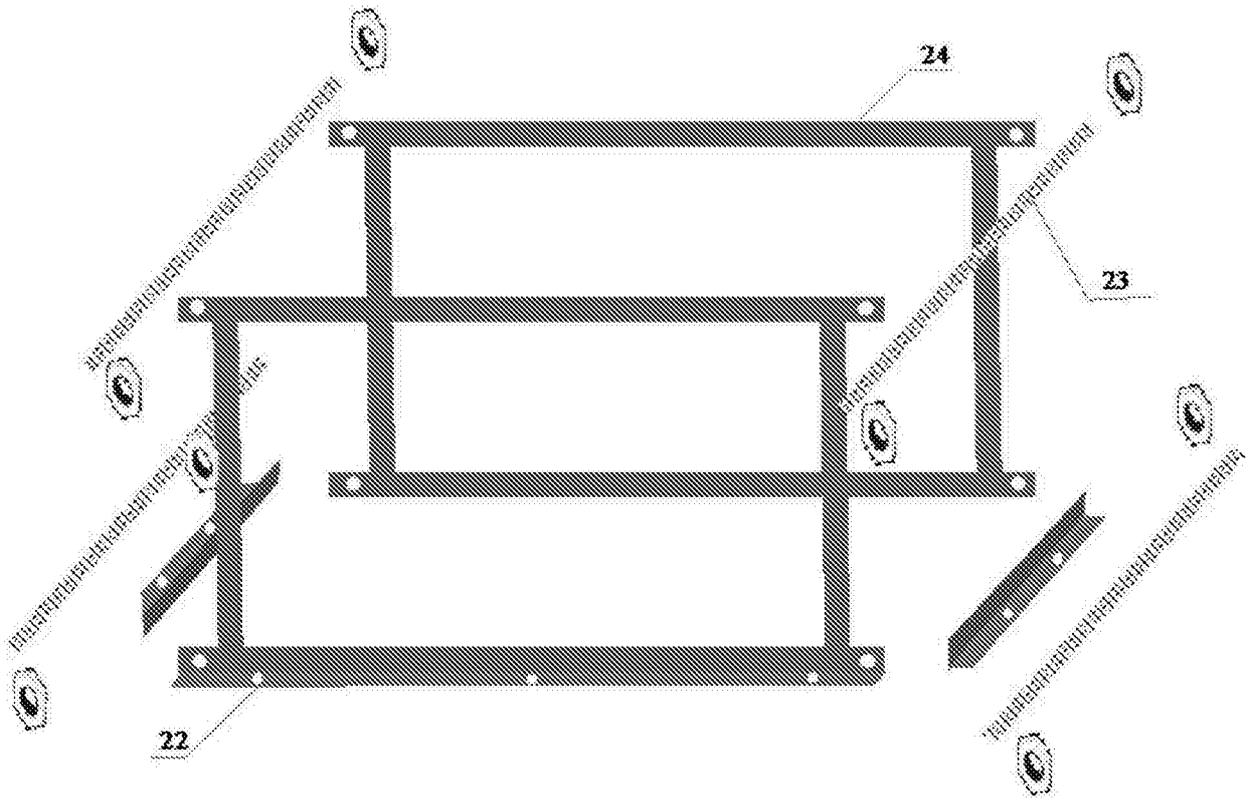


图3

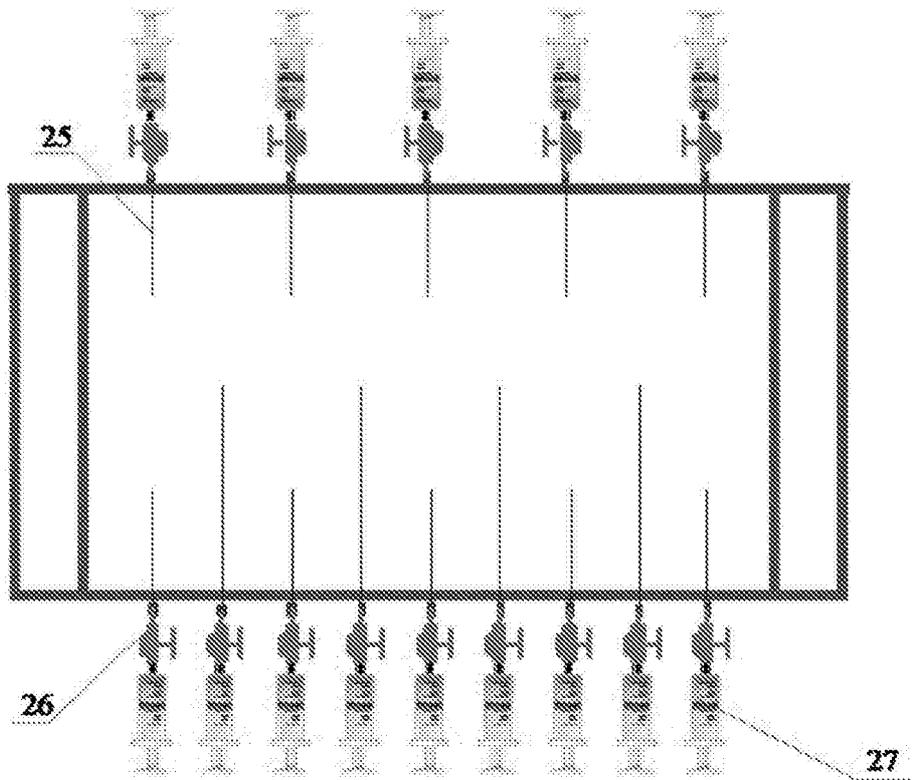


图4