



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 112761729 A

(43) 申请公布日 2021.05.07

(21) 申请号 202110031185.2

(22) 申请日 2021.01.11

(71) 申请人 中国矿业大学

地址 221116 江苏省徐州市大学路1号中国矿业大学南湖校区矿业科学中心

申请人 西安科技大学

(72) 发明人 秦伟 秦松 高杰 温庆杰 张宏贞

(74) 专利代理机构 南京瑞弘专利商标事务所 (普通合伙) 32249

代理人 张联群

(51) Int. Cl.

E21F 17/18 (2006.01)

E21F 17/00 (2006.01)

G06F 30/20 (2020.01)

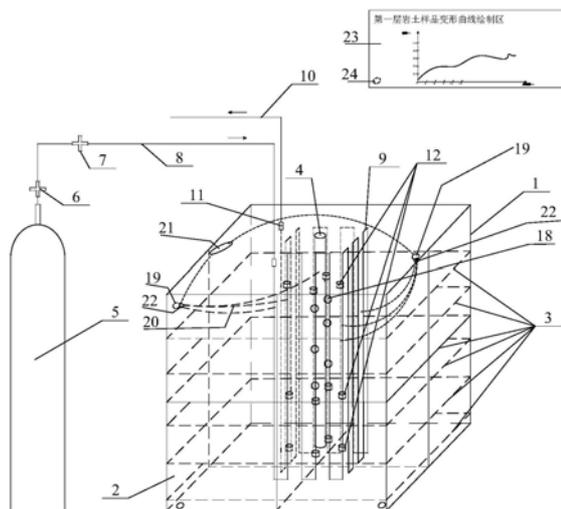
权利要求书2页 说明书4页 附图4页

(54) 发明名称

基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置及方法,包括模型框架、模拟井筒、液态二氧化碳钢瓶、进液管、不锈钢冻结管、管路温度传感器、光纤温度传感器;模型框架内部分层固定设置有岩土样品;岩土样品中间部位插接有模拟井筒;不锈钢冻结管上部固定设置有回液管。本发明布局严谨、科学,智能化程度高,代替单独施工监测孔并布设温度传感器的作业方式,借助于管路温度传感器、光纤温度传感器组成的温度监测系统实现了岩土层、井筒筒壁及管路的多点温度取样,借助于应变片感知实现了岩土层、井筒筒壁三维变形量的统计,实现了基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟,为优化施工提供了参数借鉴。



1. 一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,包括三维模型箱、冻结液循环系统和温度-位移监测系统;其特征在于:

所述的三维模型箱包括由模型框架(1)和有机玻璃密封板(2)围成的箱体,箱体内装有按模拟岩层分布的岩土样品(3),箱体的中部设有模拟井筒(4),模拟井筒(4)的四周对称布置有多根相连通的不锈钢冻结管(9);

所述的冻结液循环系统包括包括液态二氧化碳钢瓶(5)、设在液态二氧化碳钢瓶(5)上的卸压阀(6),液态二氧化碳钢瓶(5)的出口经进液管(8)与不锈钢冻结管(9)相连,进液管(8)上设有进液管阀门(7),不锈钢冻结管(9)的出口处连接有回液管(10);

所述的温度-位移监测系统包括管路温度传感器(11)、红外发射器(19)、AVR单片机(21)、多个光纤温度传感器(12)及应变片(18),所述的管路温度传感器(11)分别设在进液管(8)和回液管(10)上,所述的红外发射器(19)设在模型框架(1)上部,红外发射器(19)经信号线(20)与AVR单片机(21)相连,所述的多个光纤温度传感器(12)布设在模拟井筒(4)四周的不锈钢冻结管(9)上,AVR单片机(21)通过信号线(20)和转接头(22)分别与管路温度传感器(11)、光纤温度传感器(12)及应变片(18)相连;红外发射器(19)与三维模型箱外部设置的红外接收器(24)红外传输通信,红外接收器(24)布置在上位机(23)内。

2. 如权利要求1所述的基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,其特征在于:所述的模拟井筒(4)下部设有抗压强度为30MPa的混凝土结构井塔基础(13)。

3. 如权利要求1所述的一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,其特征在于:所述的红外发射器(19)为两个,布设在模型框架(1)上部的对角处。

4. 如权利要求1所述的一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,其特征在于:所述的多个光纤温度传感器(12)分层布置在围绕模拟井筒(4)呈圆环形分布的各不锈钢冻结管(9)上。

5. 如权利要求1所述的一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,其特征在于:所述的多个应变片(18)呈圆状且位于光纤温度传感器(12)之间交错布置,相邻光纤温度传感器(12)之间布置多个应变片(18),多个应变片(18)非等高且环形等距布置在岩土样品(3)中。

6. 如权利要求1或5所述的一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,其特征在于:所述的应变片(18)的直径定义为D,应变片(18)感测的应变数组组成的数组为 $\xi$ ,应变数组 $\xi$ 的元素为 $\xi_{ij}$ ,应变片(18)纵向圆心相连与重力线方向相同点定义为i,自上而下纵向任意一个应变片(18)的定义为 $i=1$ ,顺时针递增计数;应变片(18)环向圆心相连与模拟井筒(4)的水平剖面相平行点为j,沿着同一水平方向任意一个应变片(18)的平行点定义为 $j=1$ ,顺时针递增计数;应变片(18)感测的应变数组 $\xi_{ij}$ 对应的变形量数组为A;数组A中的元素为 $A_{ij}$ ,那么应变数组 $\xi$ 、变形量数组A及元素 $A_{ij}$ 的表达式为:

$$\xi = (\xi_{11}, \xi_{12} \dots \xi_{ij}) \quad (1)$$

$$A = (A_{11}, A_{12} \dots A_{ij}) \quad (2)$$

$$\xi_{ij} = \frac{A_{ij}}{\pi D} \quad (3)$$

获取特定温度场下的位移场演化规律。

7. 一种实施权利要求1-5任意项所述的基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置的实验方法,根据现场煤层顶底板为分析对象建立物理模拟实验装置,其特征在于,实验方法包括如下步骤:

①取样:从现场获取岩土样品(3),按照现场钻孔柱状将岩土样品(3)由下而上铺设在三维模型箱中;

②安装:在岩土铺设过程中,将模拟井筒(4)、不锈钢冻结管(9)、光纤温度传感器(12)预埋至岩土样品(3)中,将进液管(8)和回液管(10)接入不锈钢冻结管(9),并在进液管(8)和回液管(10)上安装管路温度传感器(11);

③试验:打开液态二氧化碳钢瓶(5)的泄压阀(6),并打开进液管阀门(7),液态二氧化碳通过进液管(8)进入不锈钢冻结管(9),在岩土样品(3)中循环并带走周围热量使岩土样品冻结,循环出的二氧化碳气体通过回液管(10)排除,在实验过程中,通过管道温度传感器(11)、光纤温度传感器(12)及应变片(18)对温度-位移进行监测;

④采集:通过上位机(23)接收到的温度-位移数据实时记录,掌握基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验数据,为现场确定合理冻结时间、冻结液温度、冻结孔的布置提供参考。

## 基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种温度-位移场模拟实验装置及方法,尤其是一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置及方法。

### 背景技术

[0002] 冻结法施工是利用人工制冷技术,通过埋设的冻结管,带走地层中的热量,使地层中的水结冰变成冻土,形成具有较高强度和稳定性的冻土帷幕,并隔绝地下水,而后在冻土帷幕的保护下进行地下工程作业的施工方法。

[0003] 目前,冻结法已广泛应用于煤矿井筒开凿和井筒修复等地下工程中。冻结法凿井施工过程中,地层中存在冻结壁的形成、发展和融解全过程,井筒周围温度-位移耦合场的分布对于冻结壁的交圈、强度以及变形有着重要的影响。因此,开展冻结法施工过程中井筒周围温度-位移耦合场变化规律研究对确定合理冻结时间、冻结液温度、冻结孔布置参数具有重要指导意义。

[0004] 目前的冻结法施工一般采用现场实测方法对冻结孔周围温度-位移耦合场进行监测,监测过程中需要单独施工监测孔并布设温度和位移传感器,费时费力,工程量大、监测成本高,最关键的缺陷是无法形成对冻结孔周围温度-位移耦合场的关联数据,有鉴于此,开发一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置就很有必要了。

### 发明内容

[0005] 技术问题:为本发明的目的是要克服现有技术中的不足之处,提供一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置及方法。

[0006] 技术方案:本发明的一种基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,包括三维模型箱、冻结液循环系统和温度-位移监测系统;

[0007] 所述的三维模型箱包括由模型框架和有机玻璃密封板围成的箱体,箱体内装有按模拟岩层分布的岩土样品,箱体的中部设有模拟井筒,模拟井筒的四周对称布置有多根相连通的不锈钢冻结管;

[0008] 所述的冻结液循环系统包括包括液态二氧化碳钢瓶、设在液态二氧化碳钢瓶上的卸压阀,液态二氧化碳钢瓶的出口经进液管与不锈钢冻结管相连,进液管上设有进液管阀门,不锈钢冻结管的出口处连接有回液管;

[0009] 所述的温度-位移监测系统包括管路温度传感器、红外发射器、AVR单片机、多个光纤温度传感器及应变片,所述的管路温度传感器分别设在进液管和回液管上,所述的红外发射器设在模型框架上部,红外发射器经信号线与AVR单片机相连,所述的多个光纤温度传感器布设在模拟井筒四周的不锈钢冻结管上,AVR单片机通过信号线和转接头分别与管路温度传感器、光纤温度传感器及应变片相连;红外发射器与三维模型箱外部设置的红外接收器红外传输通信,红外接收器布置在上位机内。

[0010] 所述的模拟井筒下部设有抗压强度为30MPa的混凝土结构井塔基础。

[0011] 所述的红外发射器为两个,布设在模型框架上部的对角处。

[0012] 所述的多个光纤温度传感器分层布置在围绕模拟井筒呈圆环形分布的各不锈钢冻结管上。

[0013] 所述的多个应变片呈圆状且位于光纤温度传感器之间交错布置,相邻光纤温度传感器之间布置多个应变片,多个应变片非等高且环形等距布置在岩土样品中。

[0014] 所述的应变片的直径定义为D,应变片感测的应变数据组成的数组为 $\xi$ ,应变数组 $\xi$ 的元素为 $\xi_{ij}$ ,应变片纵向圆心相连与重力线方向相同点定义为i,自上而下纵向任意一个应变片的定义为*i*=1,顺时针递增计数;应变片环向圆心相连与模拟井筒的水平剖面相平行点为j,沿着同一水平方向任意一个应变片的平行点定义为j=1,顺时针递增计数;应变片感测的应变数组 $\xi_{ij}$ 对应的变形量数组为A;数组A中的元素为 $A_{ij}$ ,那么应变数组 $\xi$ 、变形量数组A及元素 $A_{ij}$ 的表达式为:

$$[0015] \quad \xi = (\xi_{11}, \xi_{12} \dots \xi_{ij}) \quad (1)$$

$$[0016] \quad A = (A_{11}, A_{12} \dots A_{ij}) \quad (2)$$

$$[0017] \quad \xi_{ij} = \frac{A_{ij}}{\pi D} \quad (3)$$

[0018] 获取特定温度场下的位移场演化规律。

[0019] 一种实施权上述的基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置的实验方法,根据现场煤层顶底板为分析对象建立物理模拟实验装置,实验方法包括如下步骤:

[0020] ①取样:从现场获取岩土样品,按照现场钻孔柱状将岩土样品由下而上铺设在三维模型箱中;

[0021] ②安装:在岩土铺设过程中,将模拟井筒、不锈钢冻结管、光纤温度传感器预埋至岩土样品中,将进液管和回液管接入不锈钢冻结管,并在进液管和回液管上安装管路温度传感器;

[0022] ③试验:打开液态二氧化碳钢瓶的泄压阀,并打开进液管阀门,液态二氧化碳通过进液管进入不锈钢冻结管,在岩土样品中循环并带走周围热量使岩土样品冻结,循环出的二氧化碳气体通过回液管排除,在实验过程中,通过管道温度传感器、光纤温度传感器及应变片对温度-位移进行监测;

[0023] ④采集:通过上位机接收到的温度-位移数据实时记录,掌握基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验数据,为现场确定合理冻结时间、冻结液温度、冻结孔的布置提供参考。

[0024] 有益效果:由于采用上述技术方案,本发明与现有技术相比,具有如下优点:

[0025] 1. 工程量低,工作效率高:本发明中,通过三维模型箱将各个装置模块化设置,在进行冻结孔周围温度-位移耦合场进行监测作业时,代替单独施工监测孔并布设温度传感器的作业方式,工程量低,工作效率高。

[0026] 2. 测量精确,监测效果好:本发明设置有温度监测系统由管路温度传感器、光纤温度传感器及应变片组成,实现了管路温度传感器、光纤温度传感器对温度测量的同时对岩

土样品及筒壁变形的实施检测,借助于应变片体积小、测试准的特点以取代位移传感器不变、误差大的特点,最终温度-位移耦合场的数据被实施采集、并被上位机显示。

[0027] 3.提升冻结效果,效率高:本发明设置有冻结液循环系统,通过进液管和回液管接入内径为5mm的不锈钢冻结管,并在进液管和回液管上安装管道温度传感器,打开液态二氧化碳钢瓶的泄压阀,并打开进液管阀门,液态二氧化碳通过进液管进入不锈钢冻结管,在岩土样品中循环并带走周围热量实现岩土冻结,冻结效果得到提升,工作效率提高。

[0028] 4.合理化的布局,提升装置的模拟实验效果:本发明分为三维模型箱,冻结液循环系统和温度监测系统三个模块化设置,结构设置合理,有效的提升装置的模拟实验效果。

[0029] 5.降低监测成本,提高检测效率:本发明通过模块化设置实现可便捷安装拆除重复使用的,取代现有的单独布置操作复杂且不便拆除的作业模式,提高了检测效率,降低监测成本。

## 附图说明

[0030] 图1是本发明的实验装置结构示意图。

[0031] 图2是本发明的实验装置三维模型箱的结构示意图。

[0032] 图3是本发明的实验装置结构中光纤温度传感器、应变片的布置示意图。

[0033] 图4是本发明的实验装置中应变片环形剖面布置结构示意图。

[0034] 图中:1-模型框架;2-有机玻璃密封板;3-岩土样品;4-模拟井筒;5-液态二氧化碳钢瓶;6-卸压阀;7-进液管阀门;8-进液管;9-不锈钢冻结管;10-回液管;11-管路温度传感器;12-光纤温度传感器;13-井塔基础;14-冻结孔;18-应变片;19-红外发射器;20-信号线;21-AVR单片机;22-转接头;23-上位机;24-红外接收器。

## 具体实施方式

[0035] 以下结合附图中的实施例对本发明作进一步描述:

[0036] 如附图1所示,本发明的基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移耦合场物理模拟实验装置,主要由三维模型箱、冻结液循环系统和温度-位移监测系统构成;

[0037] 所述的三维模型箱包括由模型框架1和有机玻璃密封板2围成的箱体,箱体内装有按模拟岩层分布的岩土样品3,箱体的中部设有模拟井筒4,模拟井筒4的四周对称布置有多根相连通的不锈钢冻结管9;所述的模拟井筒4下部设有抗压强度为30MPa的混凝土结构井塔基础13。

[0038] 所述的冻结液循环系统包括包括液态二氧化碳钢瓶5、设在液态二氧化碳钢瓶5上的卸压阀6,液态二氧化碳钢瓶5的出口经进液管8与不锈钢冻结管9相连,进液管8上设有进液管阀门7,不锈钢冻结管9的出口处连接有回液管10;

[0039] 所述的温度-位移监测系统包括管路温度传感器11、红外发射器19、AVR单片机21、多个光纤温度传感器12及应变片18,所述的管路温度传感器11分别设在进液管8和回液管10上,所述的红外发射器19设在模型框架1上部,红外发射器19经信号线20与AVR单片机21相连,所述的红外发射器19为两个,布设在模型框架1上部的对角处。所述的多个光纤温度传感器12布设在模拟井筒4四周的不锈钢冻结管9上,呈圆环形分布,AVR单片机21通过信号线20和转接头22分别与管路温度传感器11、光纤温度传感器12及应变片18相连;红外发射

器19与三维模型箱外部设置的红外接收器24红外传输通信,红外接收器24布置在上位机23内。所述的多个应变片18呈圆状且位于光纤温度传感器12之间交错布置,相邻光纤温度传感器12之间布置多个应变片18,多个应变片18非等高且环形等距布置在岩土样品3中。

[0040] 所述的应变片18的直径定义为D,应变片18感测的应变数据组成的数组为 $\xi$ ,应变数组 $\xi$ 的元素为 $\xi_{ij}$ ,应变片18纵向圆心相连与重力线方向相同点定义为i,自上而下纵向任意一个应变片18的定义为i=1,顺时针递增计数;应变片18环向圆心相连与模拟井筒4的水平剖面相平行点为j,沿着同一水平方向任意一个应变片18的平行点定义为j=1,顺时针递增计数;应变片18感测的应变数组 $\xi_{ij}$ 对应的变形量数组为A;数组A中的元素为 $A_{ij}$ ,那么应变数组 $\xi$ 、变形量数组A及元素 $A_{ij}$ 的表达式为:

$$[0041] \quad \xi = (\xi_{11}, \xi_{12} \dots \xi_{ij}) \quad (1)$$

$$[0042] \quad A = (A_{11}, A_{12} \dots A_{ij}) \quad (2)$$

$$[0043] \quad \xi_{ij} = \frac{A_{ij}}{\pi D} \quad (3)$$

[0044] 获取特定温度场下的位移场演化规律。

[0045] 本发明实施上述基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验装置的实验方法,以某矿井的煤层顶底板为分析对象建立井筒分析模型,实验方法的步骤如下:

[0046] ①取样:从现场获取岩土样品3,按照现场钻孔柱状将岩土样品3由下而上铺设在 $2 \times 2 \times 2\text{m}$ 三维模型箱中;

[0047] ②安装:在岩土铺设过程中,将模拟井筒4、不锈钢冻结管9、光纤温度传感器12预埋至岩土样品3中,将进液管8和回液管10接入内径为5mm的不锈钢冻结管9,并在进液管8和回液管10上安装管路温度传感器11;

[0048] ③试验:打开液态二氧化碳钢瓶5的泄压阀6,并打开进液管阀门7,液态二氧化碳通过进液管8进入不锈钢冻结管9,在岩土样品3中循环并带走周围热量使岩土样品冻结,循环出的二氧化碳气体通过回液管10排除,在实验过程中,通过管道温度传感器11、多个光纤温度传感器12及应变片18对温度-位移进行监测;通过上述公式(1)、公式(2)及公式(3)得到每层岩土样品3空间应变量规律,进而得到空间变形量的分布规律,在模型框架1和有机玻璃密封板2围成的密闭箱体内,获取特定温度场下的位移场演化规律;

[0049] ④采集:通过上位机23接收到的温度-位移数据实时记录,掌握基于冻结法施工的矿井井筒温度-位移场耦合物理模拟实验数据,为现场确定合理冻结时间、冻结液温度、冻结孔的布置提供参考。

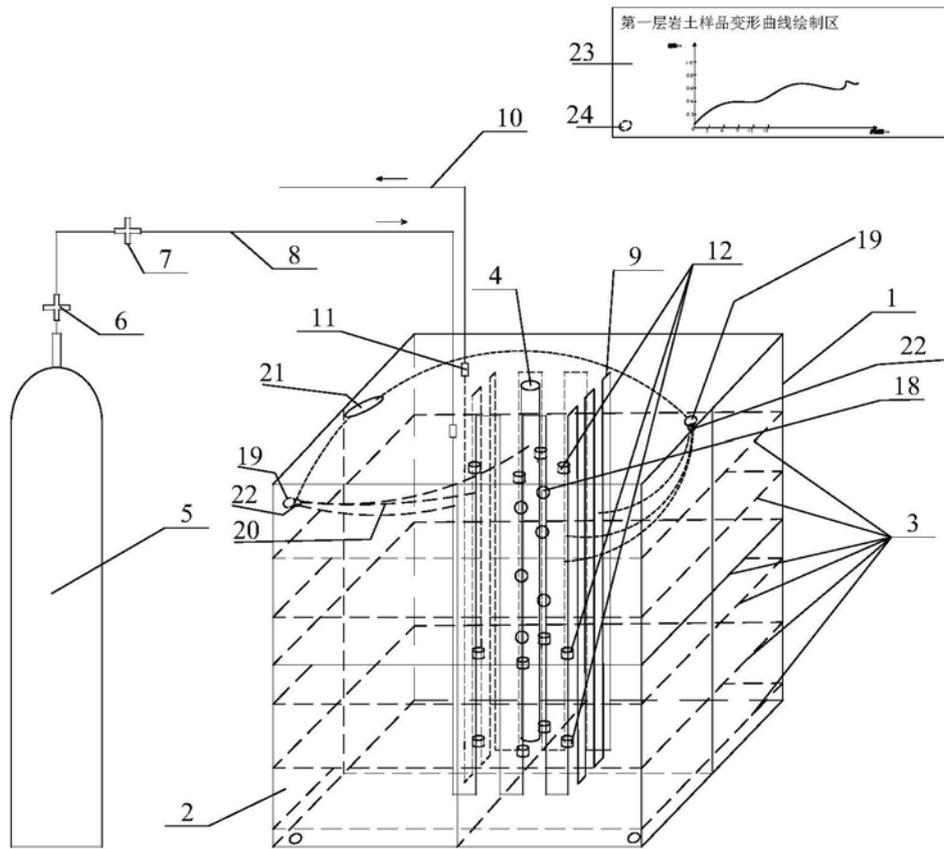


图1

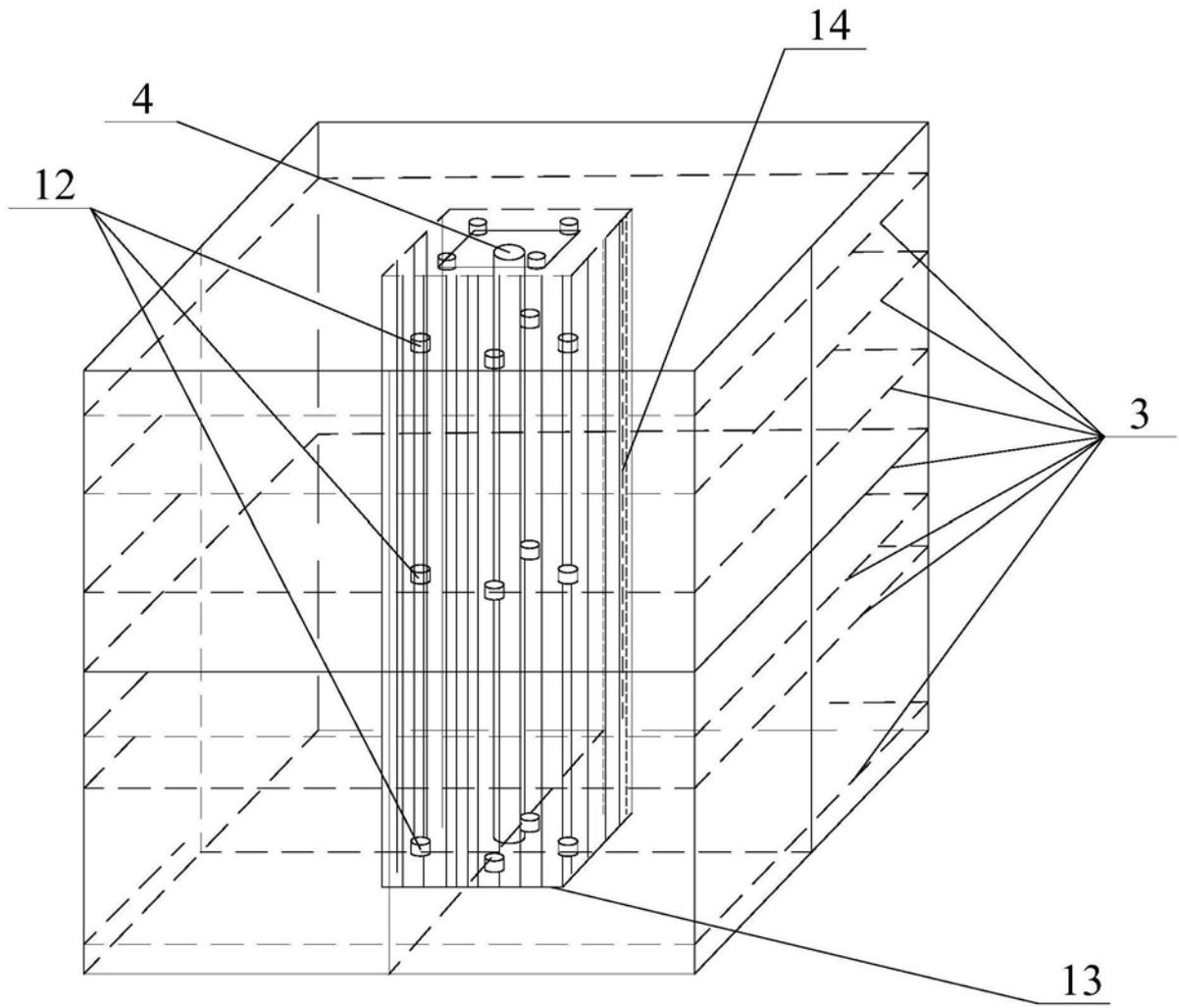


图2

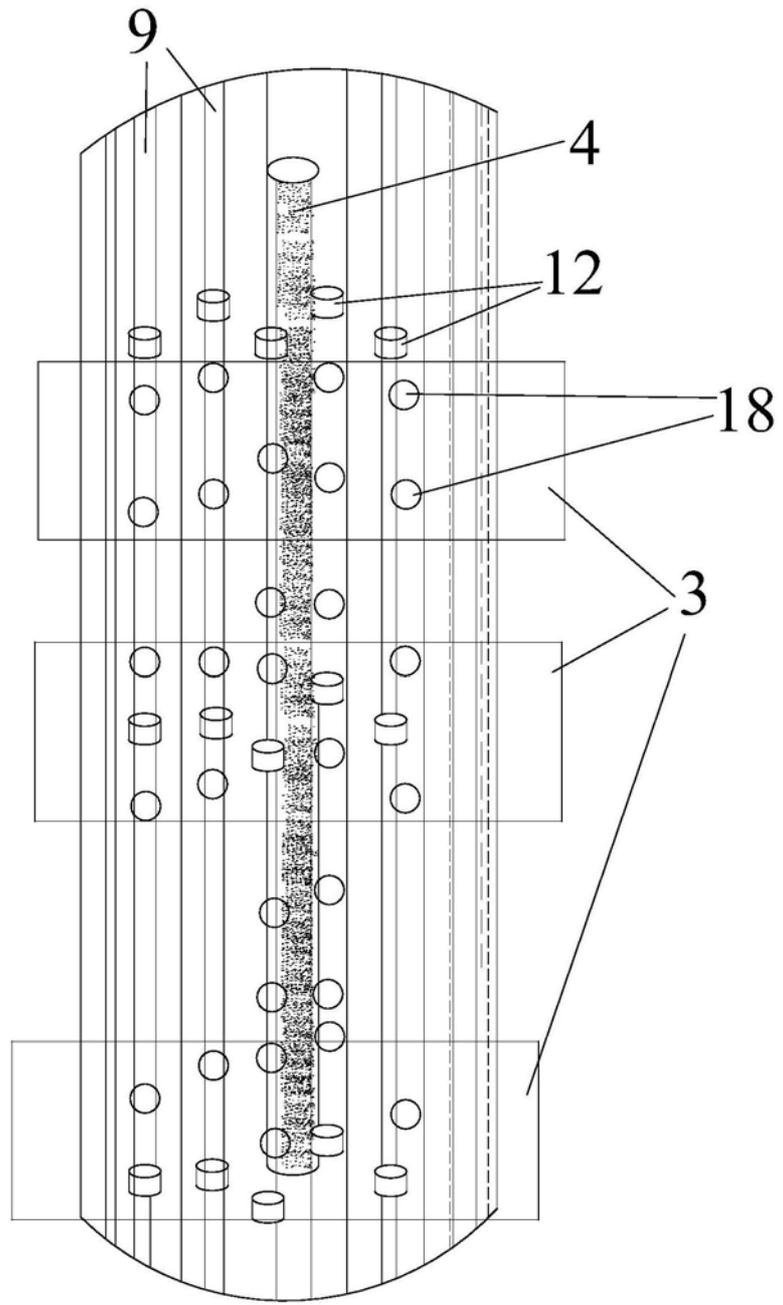


图3

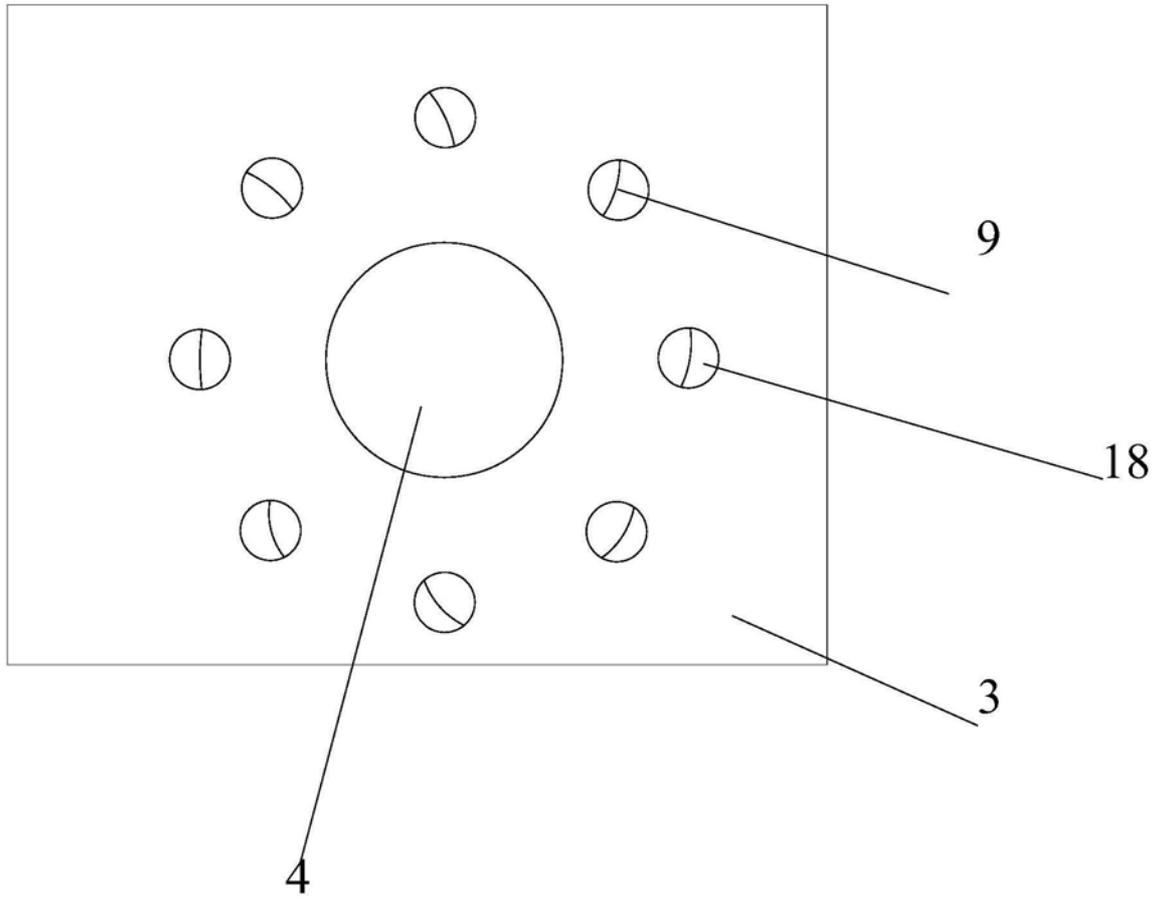


图4