



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111458274 A

(43)申请公布日 2020.07.28

(21)申请号 202010312940.X

(22)申请日 2020.04.20

(71)申请人 福州大学

地址 350108 福建省福州市闽侯县福州大学城乌龙江北大道2号福州大学

(72)发明人 冯嵩 詹良通 郭行凯 刘红位

(74)专利代理机构 福州元创专利商标代理有限公司 35100

代理人 郭东亮 蔡学俊

(51)Int.Cl.

G01N 15/08(2006.01)

G01N 13/04(2006.01)

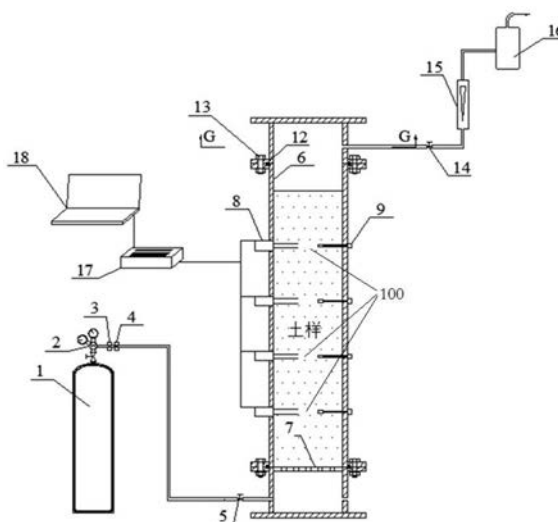
权利要求书3页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置及方法

(57)摘要

本发明提出测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置及方法,所述土柱装置包括供气装置、测量装置、尾气处理装置和数据采集装置;所述测量装置包括柱形容器;所述柱形容器内腔中以分层的方式装载多种土样;各层土样之间的分界面处设有与数据采集装置相连的传感器组件;所述柱形容器的底部以进气阀门与供气装置相通;本发明所述技术方案只需获得测量点及其相邻点的气压与示踪气体浓度,代入气体渗透与扩散系数的计算公式,即可获得土样在不同含水量与吸力下的气体渗透与扩散系数。本发明操作简单,计算方便,能够获得土样在不同含水量与吸力下的气体渗透与扩散系数,应用前景广阔。



1. 测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述土柱装置包括供气装置、测量装置、尾气处理装置和数据采集装置; 所述测量装置包括柱形容器(6); 所述柱形容器内腔中以分层的方式装载多种土样; 各层土样之间的分界面处设有与数据采集装置相连的传感器组件; 所述柱形容器的底部以进气阀门与供气装置相通。

2. 根据权利要求1所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述柱形容器顶部封闭, 柱形容器顶部以排气阀门(14)、气体体积流量计(15)与尾气处理装置相通; 所述尾气处理装置包括尾气吸收塔(16)。

3. 根据权利要求2所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述土样之间的分界面为测量装置的测量截面; 所述传感器组件包括含水量传感器(8)、张力计(9)、示踪气体浓度传感器(10)和气体压强传感器(11)。

4. 根据权利要求3所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述供气装置包括贮气瓶(1); 所述贮气瓶与柱形容器进气阀门之间的连接气路上顺序设有减压阀(2)、调压阀(3)和流量控制器(4)。

5. 根据权利要求3所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述数据采集装置包括数据采集器(17)和电脑(18)。

6. 根据权利要求3所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述柱形容器内腔中的土样放置于多孔板(7)上; 所述多孔板下方设置柱形容器的进气阀; 当土柱装置进行测量作业时, 所述供气装置可向测量装置供应体积浓度为5%~10%的示踪气体。

7. 根据权利要求6所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述柱形容器和多孔板均以亚克力材料成型。

8. 根据权利要求6所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置, 其特征在于: 所述柱形容器的顶部、中部和底部之间以密封橡胶圈(12)和连接螺栓(13)连接。

9. 测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的方法, 其特征在于: 所述测量方法采用权利要求6中所述的土柱装置, 测量方法包括以下步骤:

步骤A1、制备一定含水量的松散土体, 按照土样的干密度区分为不同的土样, 在柱形容器底部的多孔板上, 分层放置土样并击实;

步骤A2、在各层土样之间的分界面上分别安装含水量传感器、张力计、示踪气体浓度传感器与气体压强传感器;

步骤A3、开启柱形容器底部进气阀门及顶部排气阀门, 由供气装置向柱形容器底部输送示踪气体, 示踪气体在供气装置压力下透过柱形容器内腔中的土样后, 经顶部排气阀门输出至尾气吸收塔;

步骤A4、通过流量控制器控制进气体积流量 Q_1 , 通过柱形容器顶部安装的气体体积流量计, 测量流出气体体积流量 Q_2 , 通过柱形容器各测量截面处安装的气体压强传感器与示踪气体浓度传感器分别测量各层土样的气体压强与示踪气体浓度;

步骤A5、当各测量截面测量点处的气体压强与示踪气体浓度保持恒定, 且 $|Q_1 - Q_2|/Q_1 \leq 5\%$, 则体系达到稳态, 记录此时各测量点气体压强与示踪气体浓度。

10. 根据权利要求9所述的测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的方法, 其特征在于: 所述测量方法还包括以下步骤:

步骤A6、计算土体的气体渗透系数，

计算公式为 $k_j = \frac{Q\rho_g g}{Ai_j}$ (公式一);

式中, k_j 为第 j 个测量点土样的气体渗透系数 (m s^{-1}); Q 为通过土样的气体体积流量 (m^3 ; $Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$); ρ_g 为气体的密度 (kg m^{-3}); g 为重力加速度 (9.8 m s^{-2}); A 为试样的横截面积 (m^2); i_j 为测量点 j 的气体压强梯度 (Pa m^{-1}), 按下式计算:

$$\begin{aligned} \bar{i}_j &= \frac{i_{j-1,j} + i_{j,j+1}}{2} \\ i_{j-1,j} &= \frac{u_j - u_{j-1}}{L_{j-1,j}} \\ i_{j,j+1} &= \frac{u_{j+1} - u_j}{L_{j,j+1}} \end{aligned} \quad (\text{公式二});$$

式中, $i_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的气体压强梯度 (Pa m^{-1}); $i_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之间的气体压强梯度 (Pa m^{-1}); u_j 与 u_{j-1} 分别为测量点 j 与 $j-1$ 处的气体压强 (Pa); $L_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的土层厚度 (m); $L_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之间的土层厚度 (m);

基于上述步骤, 结合测量点 j 处分别由含水量传感器与张力计测量的含水量与吸力, 可得到土样在不同含水量与吸力下的气体渗透系数;

步骤A7、计算土体气体扩散系数;

所用公式为 $D_j = \frac{F_j}{An_j}$ (公式三);

式中, D_j 为测量点 j 处土体的气体扩散系数 ($\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$);

F_j 为示踪气体扩散通量 ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$); n_j 为测量点 j 处示踪气体体积浓度梯度 (m^{-1});

$F_j = Qc_0 - Qc_j$ (公式四);

式中, c_0 为输入的气体中示踪气体的体积浓度 ($\text{m}^3_{\text{示踪气}} \text{m}^{-3}_{\text{混合气}}$); c_j 为测量点 j 处示踪气体体积浓度 ($\text{m}^3_{\text{示踪气}} \text{m}^{-3}_{\text{混合气}}$);

$$n_j = \frac{c_{j-1,j} + c_{j,j+1}}{2} \quad (\text{公式五})$$

$$c_{j-1,j} = \frac{(c_j - c_{j-1})}{L_{j-1,j}} \quad (\text{公式六})$$

$$c_{j,j+1} = \frac{c_{j+1} - c_j}{L_{j,j+1}} \quad (\text{公式七})$$

式中, $c_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的示踪气体体积浓度梯度; $c_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之间的示踪气体体积浓度梯度; $L_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的土层厚度; $L_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之

间的土层厚度；

基于上述步骤,结合第j点测量的含水量与吸力,可获得土样在不同含水量与吸力下的气体扩散系数。

测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置及方法

技术领域

[0001] 本发明涉及环境岩土工程技术领域,尤其是测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置及方法。

背景技术

[0002] 气体是非饱和土的重要组成部分,评价非饱和土体中气体的运移具有重要的科学和工程应用价值。例如含甲烷与臭气的污染性填埋气在城市生活垃圾填埋场中的运移,直接影响填埋场污染性填埋气排放;污染土体修复研究涉及的挥发性有机污染物气体在非饱和土中的运移,直接影响污染土体的修复效果;煤层中的瓦斯气体在地下土层中的迁移,直接影响地下采煤工程的安全。气体渗透系数和扩散系数是气体在非饱和土中运移的关键控制参数,有必要测量非饱和土体的气体扩散系数和渗透系数,为揭示污染性气体在土体中的运移机理提供基本参数,为实际工程建设提供科学指导。

[0003] 目前已有测量非饱和土体气体渗透系数和扩散系数的试验装置,这些装置具有以下缺点:(1)需要通过复杂的解析解或者数值模拟对测量结果进行非线性拟合,才能确定气体渗透系数与扩散系数,计算过程复杂且繁琐,难以在工程中广泛应用;(2)土样较小(一般高度小于15cm),无法考虑现场土体不均匀性对测量结果的影响,且测量过程中,需要施加远大于实际工况的气体压力梯度,无法反映实际工况下的气体运移情况,使得测量结果与实际值存在偏差;(3)试验过程中无法监控同一个试样含水量与吸力变化,无法基于同一个试样测量不同含水量与吸力下的非饱和土体气体渗透系数与扩散系数。

发明内容

[0004] 本发明提出测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置及方法,可通过测量气体气压与示踪气体浓度随土柱高度的分布,代入气体渗透系数与扩散系数的计算公式,即可分别得到非饱和土体的气体渗透系数与扩散系数;可基于同一个试样,测量土体含水量与吸力变化,从而测量不同含水量与吸力下的土体的气体渗透系数与扩散系数。

[0005] 本发明采用以下技术方案。

[0006] 测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置,所述土柱装置包括供气装置、测量装置、尾气处理装置和数据采集装置;所述测量装置包括柱形容器(6);所述柱形容器内腔中以分层的方式装载多种土样;各层土样之间的分界面处设有与数据采集装置相连的传感器组件;所述柱形容器的底部以进气阀门(5)与供气装置相通。

[0007] 所述柱形容器顶部封闭,柱形容器顶部以排气阀门(14)、气体体积流量计(15)与尾气处理装置相通;所述尾气处理装置包括尾气吸收塔(16)。

[0008] 所述土样之间的分界面为测量装置的测量截面(100);所述传感器组件包括含水量传感器(8)、张力计(9)、示踪气体浓度传感器(10)和气体压强传感器(11)。

[0009] 所述供气装置包括贮气瓶(1);所述贮气瓶与柱形容器进气阀门之间的连接气路上顺序设有减压阀(2)、调压阀(3)和流量控制器(4)。

[0010] 所述数据采集装置包括数据采集器(17)和电脑(18)。

[0011] 所述柱形容器内腔中的土样放置于多孔板(7)上;所述多孔板下方设置柱形容器的进气阀;当土柱装置进行测量作业时,所述供气装置可向测量装置供应体积浓度为5%-10%的示踪气体。

[0012] 所述柱形容器和多孔板均以亚克力材料成型。

[0013] 所述柱形容器的顶部、中部和底部之间以密封橡胶圈(12)和连接螺栓(13)连接。

[0014] 所述测量方法采用以上所述的土柱装置,测量方法包括以下步骤;

[0015] 步骤A1、制备一定含水量的松散土体,按照土样的干密度区分为不同的土样,在柱形容器底部的多孔板上,分层放置土样并击实;

[0016] 步骤A2、在各层土样之间的分界面上分别安装含水量传感器、张力计、示踪气体浓度传感器与气体压强传感器;

[0017] 步骤A3、开启柱形容器底部进气阀门及顶部排气阀门,由供气装置向柱形容器底部输送示踪气体,示踪气体在供气装置压力下透过柱形容器内腔中的土样后,经顶部排气阀门输出至尾气吸收塔;

[0018] 步骤A4、通过流量控制器控制进气体积流量 Q_1 ,通过柱形容器顶部安装的气体体积流量计,测量流出气体体积流量 Q_2 ,通过柱形容器各测量截面处安装的气体压强传感器与示踪气体浓度传感器分别测量各层土样的气体压强与示踪气体浓度;

[0019] 步骤A5、当各测量截面测量点处的气体压强与示踪气体浓度保持恒定,且 $|Q_1-Q_2|/Q_1 \leq 5\%$,则体系达到稳态,记录此时各测量点气体压强与示踪气体浓度。所述测量方法还包括以下步骤;

[0020] 步骤A6、计算土体的气体渗透系数,

[0021] 计算公式为 $k_j = \frac{Q \rho_g g}{A i_j}$ (公式一);式中, k_j 为第j个测量点土样的气体渗透系

数(m s^{-1}); Q 为通过土样的气体体积流量(m^3 ; $Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$); ρ_g 为气体的密度(kg m^{-3}); g 为重力加速度(9.8 m s^{-2}); A 为试样的横截面积(m^2); i_j 为测量点j的气体压强梯度(Pa m^{-1}),按下式计算:

$$[0022] \quad \bar{i}_j = \frac{i_{j-1,j} + i_{j,j+1}}{2}$$

$$[0023] \quad i_{j-1,j} = \frac{u_j - u_{j-1}}{L_{j-1,j}}$$

$$[0024] \quad i_{j,j+1} = \frac{u_{j+1} - u_j}{L_{j,j+1}} \quad (\text{公式二});$$

[0025] 式中, $i_{j-1,j}$ 为测量点j-1和j之间的气体压强梯度(Pa m^{-1}); $i_{j,j+1}$ 为测量点j和j+1之间的气体压强梯度(Pa m^{-1}); u_j 与 u_{j-1} 分别为测量点j与j-1处的气体压强(Pa); $L_{j-1,j}$ 为测量点j-1和j之间的土层厚度(m); $L_{j,j+1}$ 为测量点j和j+1之间的土层厚度(m);

[0026] 基于上述步骤,结合测量点j处分别由含水量传感器与张力计测量的含水量与吸力,可得到土样在不同含水量与吸力下的气体渗透系数;

[0027] 步骤A7、计算土体气体扩散系数;

[0028] 所用公式为 $D_j = \frac{F_j}{An_j}$ (公式三);

[0029] 式中, D_j 为测量点j处土体的气体扩散系数 (m^2s^{-1});

[0030] F_j 为示踪气体扩散通量 (m^3s^{-1}); n_j 为测量点j处示踪气体体积浓度梯度 (m^{-1});

[0031] $F_j = Qc_0 - Qc_j$ (公式四);

[0032] 式中, c_0 为输入的气体中示踪气体的体积浓度 ($m^3_{示踪气体}m^{-3}_{混合气}$); c_j 为测量点j处示踪气体体积浓度 ($m^3_{示踪气体}m^{-3}_{混合气}$)。

[0033] $n_j = \frac{c_{j-1,j} + c_{j,j+1}}{2}$ (公式五)

[0034] $c_{j-1,j} = \frac{(c_j - c_{j-1})}{L_{j-1,j}}$ (公式六)

[0035] $c_{j,j+1} = \frac{c_{j+1} - c_j}{L_{j,j+1}}$ (公式七)

[0036] 式中, $c_{j-1,j}$ 为测量点j-1和j之间的示踪气体体积浓度梯度; $c_{j,j+1}$ 为测量点j和j+1之间的示踪气体体积浓度梯度; $L_{j-1,j}$ 为测量点j-1和j之间的土层厚度; $L_{j,j+1}$ 为测量点j和j+1之间的土层厚度;

[0037] 基于上述步骤,结合第j点测量的含水量与吸力,可获得土样在不同含水量与吸力下的气体扩散系数。

[0038] 本发明的有益效果为通过输入含体积浓度为5%-10%的示踪气体,待土体气压与示踪气体浓度分布稳定后,可同时测量土柱各个测量截面上的非饱和土体的气体渗透系数与扩散系数;本发明中只需获得测量点及其相邻点的气压与示踪气体浓度,即可通过简单计算方法,获得各个测量点的非饱和土体的气体渗透系数与扩散系数,避免通过复杂的解析解或者数值计算对测量结果进行拟合;试样尺寸较大,可以测量并反映土体非均匀性对其气体渗透系数与扩散系数的影响;基于同一个试样,可以通过监控土体含水量与吸力变化,从而获得土样在不同含水量与吸力下的气体渗透系数与扩散系数。

附图说明

[0039] 下面结合附图和具体实施方式对本发明进一步详细的说明:

[0040] 附图1是本发明的示意图;

[0041] 附图2是测量截面处传感器的位置示意图;

[0042] 附图3是柱形容器底部多孔板的示意图;

[0043] 附图4是供气装置的示意图;

[0044] 附图5是尾气吸收塔的示意图;

[0045] 附图6是数据采集装置的示意图;

[0046] 图中:1-贮气瓶;2-减压阀;3-调压阀;4-流量控制器;5-进气阀门;6-柱形容器;7-

多孔板;8-含水量传感器;9-张力计;10-示踪气体浓度传感器;11-气体压强传感器;12-密封橡胶圈;13-连接螺栓;14-排气阀门;15-气体体积流量计;16-尾气吸收塔;17-数据采集器;18-电脑;100-测量装置的测量截面。

具体实施方式

[0047] 如图1-6所示,测量非饱和土体气体渗透及扩散系数的土柱装置,所述土柱装置包括供气装置、测量装置、尾气处理装置和数据采集装置;所述测量装置包括柱形容器6;所述柱形容器内腔中以分层的方式装载多种土样;各层土样之间的分界面处设有与数据采集装置相连的传感器组件;所述柱形容器的底部以进气阀门5与供气装置相通。

[0048] 所述柱形容器顶部封闭,柱形容器顶部以排气阀门14、气体体积流量计15与尾气处理装置相通;所述尾气处理装置包括尾气吸收塔16。

[0049] 所述土样之间的分界面为测量装置的测量截面100;所述传感器组件包括含水量传感器8、张力计9、示踪气体浓度传感器10和气体压强传感器11。

[0050] 所述供气装置包括贮气瓶1;所述贮气瓶与柱形容器进气阀门之间的连接气路上顺序设有减压阀2、调压阀3和流量控制器4。

[0051] 所述数据采集装置包括数据采集器17和电脑18。

[0052] 所述柱形容器内腔中的土样放置于多孔板7上;所述多孔板下方设置柱形容器的进气阀;当土柱装置进行测量作业时,所述供气装置可向测量装置供应体积浓度为5%-10%的示踪气体。

[0053] 所述柱形容器和多孔板均以亚克力材料成型。

[0054] 所述柱形容器的顶部、中部和底部之间以密封橡胶圈12和连接螺栓13连接。

[0055] 所述测量方法采用以上所述的土柱装置,测量方法包括以下步骤;

[0056] 步骤A1、制备一定含水量的松散土体,按照土样的干密度区分为不同的土样,在柱形容器底部的多孔板上,分层放置土样并击实;

[0057] 步骤A2、在各层土样之间的分界面上分别安装含水量传感器、张力计、示踪气体浓度传感器与气体压强传感器;

[0058] 步骤A3、开启柱形容器底部进气阀门及顶部排气阀门,由供气装置向柱形容器底部输送示踪气体,示踪气体在供气装置压力下透过柱形容器内腔中的土样后,经顶部排气阀门输出至尾气吸收塔;

[0059] 步骤A4、通过流量控制器控制进气体积流量 Q_1 ,通过柱形容器顶部安装的气体体积流量计,测量流出气体体积流量 Q_2 ,通过柱形容器各测量截面处安装的气体压强传感器与示踪气体浓度传感器分别测量各层土样的气体压强与示踪气体浓度;

[0060] 步骤A5、当各测量截面测量点处的气体压强与示踪气体浓度保持恒定,且 $|Q_1-Q_2|/Q_1 \leq 5\%$,则体系达到稳态,记录此时各测量点气体压强与示踪气体浓度。所述测量方法还包括以下步骤;

[0061] 步骤A6、计算土体的气体渗透系数,

[0062] 计算公式为 $k_j = \frac{Q\rho_g g}{A i_j}$ (公式一);式中, k_j 为第j个测量点土样的气体渗透系

数 (m s^{-1}); Q 为通过土样的气体体积流量 (m^3 ; $Q = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$); ρ_g 为气体的密度 (kg m^{-3}); g 为重力加速度 (9.8 m s^{-2}); A 为试样的横截面积 (m^2); $\bar{i}_j$ 为测量点 j 的气体压强梯度 (Pa m^{-1}), 按下式计算:

$$[0063] \quad \bar{i}_j = \frac{i_{j-1,j} + i_{j,j+1}}{2}$$

$$[0064] \quad i_{j-1,j} = \frac{u_j - u_{j-1}}{L_{j-1,j}}$$

$$[0065] \quad i_{j,j+1} = \frac{u_{j+1} - u_j}{L_{j,j+1}} \quad (\text{公式二});$$

[0066] 式中, $i_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的气体压强梯度 (Pa m^{-1}); $i_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之间的气体压强梯度 (Pa m^{-1}); u_j 与 u_{j-1} 分别为测量点 j 与 $j-1$ 处的气体压强 (Pa); $L_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的土层厚度 (m); $L_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之间的土层厚度 (m);

[0067] 基于上述步骤, 结合测量点 j 处分别由含水量传感器与张力计测量的含水量与吸力, 可得到土样在不同含水量与吸力下的气体渗透系数;

[0068] 步骤A7、计算土体气体扩散系数;

[0069] 所用公式为 $D_j = \frac{F_j}{An_j}$ (公式三); 式中, D_j 为测量点 j 处土体的气体扩散系数 ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$);

[0070] F_j 为示踪气体扩散通量 ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); n_j 为测量点 j 处示踪气体体积浓度梯度 (m^{-1});

[0071] $F_j = Qc_0 - Qc_j$ (公式四);

[0072] 式中, c_0 为输入的气体中示踪气体的体积浓度 ($\text{m}^3_{\text{示踪气}} \text{m}^{-3}_{\text{混合气}}$); c_j 为测量点 j 处示踪气体体积浓度 ($\text{m}^3_{\text{示踪气}} \text{m}^{-3}_{\text{混合气}}$).

$$[0073] \quad n_j = \frac{c_{j-1,j} + c_{j,j+1}}{2} \quad (\text{公式五})$$

$$[0074] \quad c_{j-1,j} = \frac{(c_j - c_{j-1})}{L_{j-1,j}} \quad (\text{公式六})$$

$$[0075] \quad c_{j,j+1} = \frac{c_{j+1} - c_j}{L_{j,j+1}} \quad (\text{公式七})$$

[0076] 式中, $c_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的示踪气体体积浓度梯度; $c_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之间的示踪气体体积浓度梯度; $L_{j-1,j}$ 为测量点 $j-1$ 和 j 之间的土层厚度; $L_{j,j+1}$ 为测量点 j 和 $j+1$ 之间的土层厚度;

[0077] 基于上述步骤, 结合第 j 点测量的含水量与吸力, 可获得土样在不同含水量与吸力下的气体扩散系数。

[0078] 本例中, 示踪气体可采用惰性气体氦气。

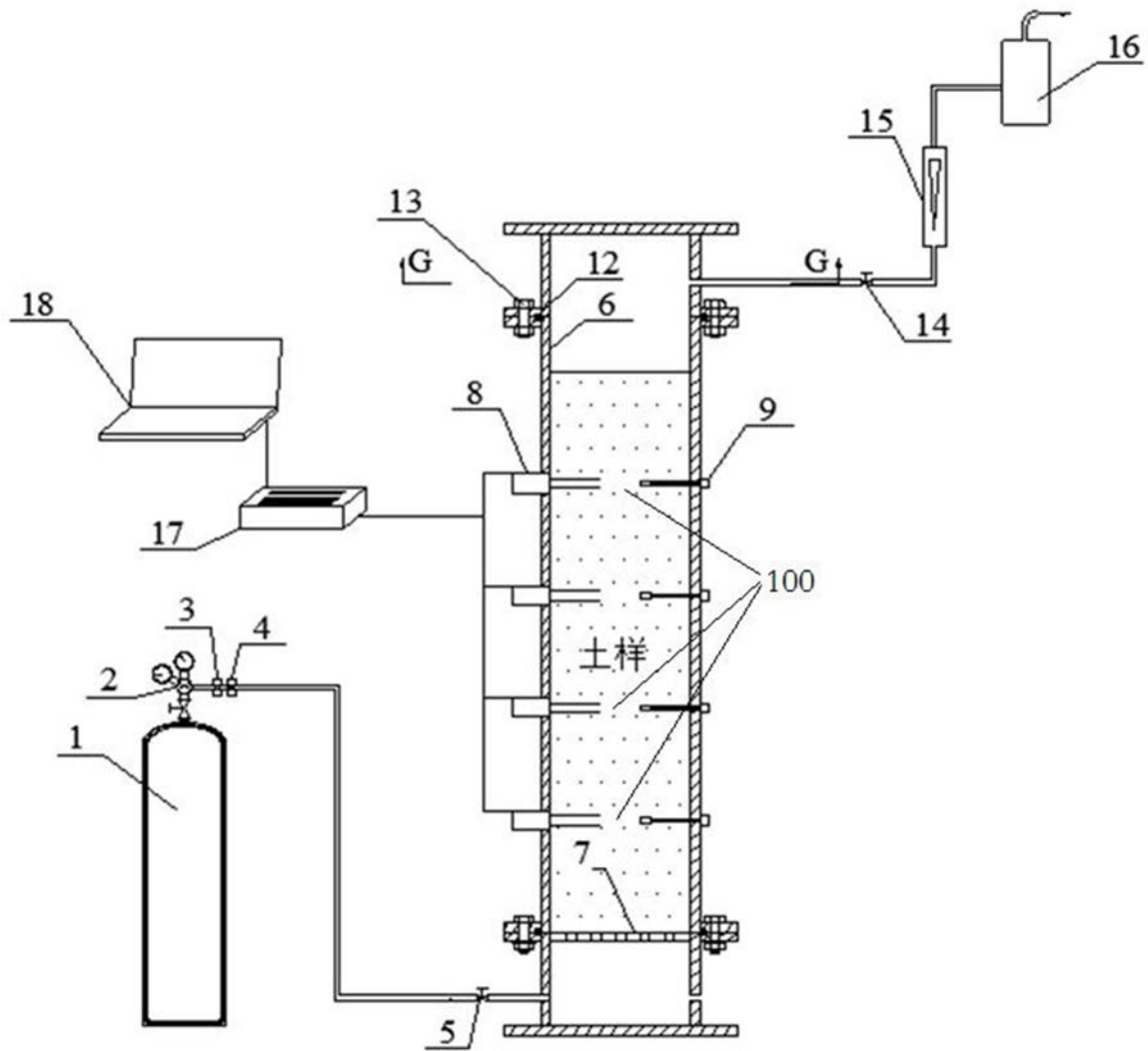


图1

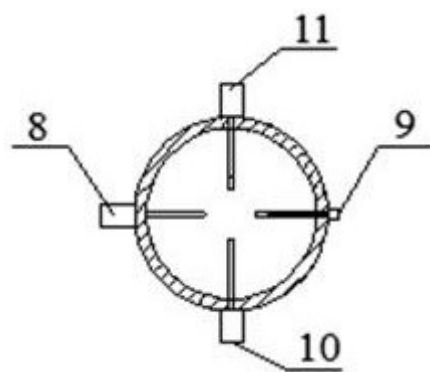


图2

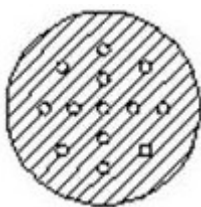


图3

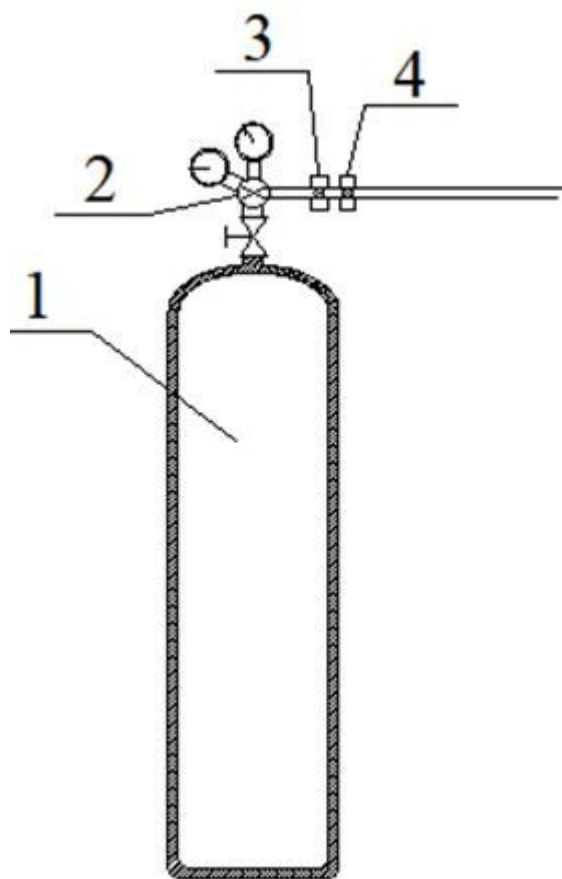


图4

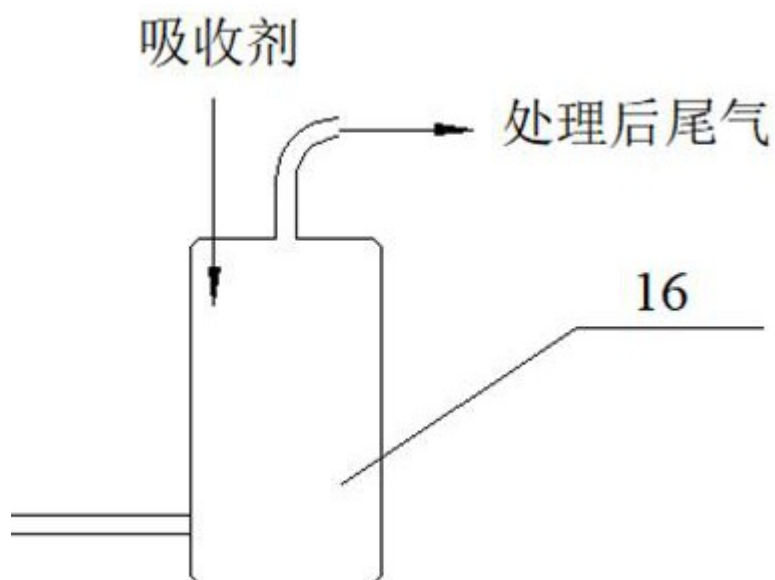


图5

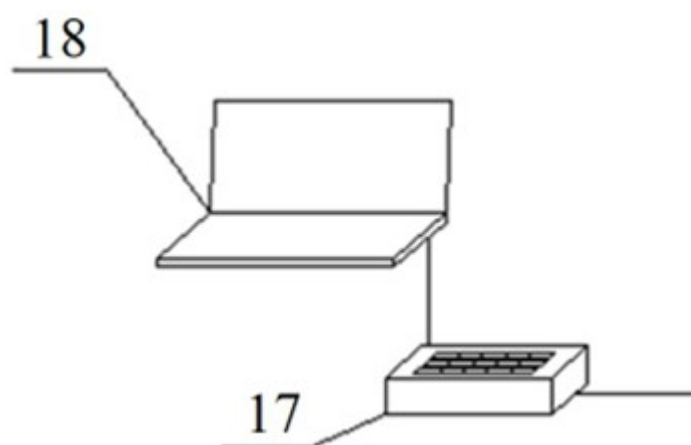


图6