



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 108760109 B

(45) 授权公告日 2020.11.24

(21) 申请号 201810240527.X

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2018.03.22

G01L 1/24 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 108760109 A

审查员 李文娟

(43) 申请公布日 2018.11.06

(73) 专利权人 湖北省路桥集团有限公司  
地址 435216 湖北省黄石市阳新县韦源口  
镇湖北路桥项目部  
专利权人 华中科技大学

(72) 发明人 周乐木 殷源 李伟业 谢超  
孙开武 徐东升 周方圆

(74) 专利代理机构 华中科技大学专利中心  
42201  
代理人 周磊 曹葆青

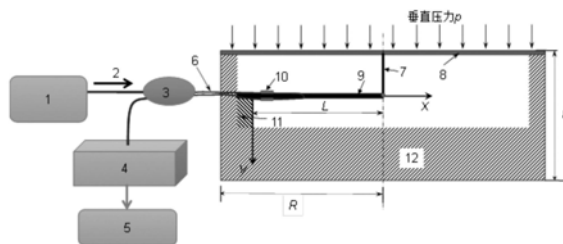
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54) 发明名称

基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量装置和方法

(57) 摘要

本发明属于土体内部压力测量方法领域,并公开了基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量方法,包括如下步骤:(1)根据被测对象的尺寸和测量要求,选择悬臂梁和薄膜的材料和尺寸;(2)将布拉格光纤光栅传感器安装在悬臂梁上,并使两者紧密结合,再通过刚性传力杆将悬臂梁的自由端与薄膜连接在一起,通过光纤将布拉格光纤光栅传感器与光纤信号分析处理设备相连接;(3)将悬臂梁的固定端固定在传感器腔体上,并将整个土压力传感器放置在被测对象里;(4)持续测量布拉格光纤光栅传感器的应变值,计算被测对象的局部压力。本发明能解决土体内部不同量程土压力的精密测量问题,满足大跨度量程的测量需求,传感器测量精度高,安全性高。



1. 一种可变量程土压力测量装置,其特征在于,包括悬臂梁、布拉格光纤光栅传感器、刚性传力杆、薄膜、传感器腔体和光纤信号分析处理设备,其中,

所述布拉格光纤光栅传感器安装在悬臂梁表面沿长度方向的中轴线处,并且两者紧密结合;

所述刚性传力杆将悬臂梁的自由端与薄膜连接在一起;

所述传感器腔体的一端敞口,所述薄膜覆盖在所述传感器腔体的敞口端;

所述悬臂梁的固定端固定在传感器腔体的内壁上;

所述光纤信号分析处理设备通过光纤与所述布拉格光纤光栅传感器连接,以用于获得布拉格光纤光栅传感器的应变;

所述光纤信号分析处理设备包括宽带光源、光源耦合器、光信号分析仪和信号采集处理器,所述宽带光源依次连接所述光源耦合器、光信号分析仪和信号采集处理器,所述光源耦合器还连接所述光纤;

通过光纤信号分析处理设备持续测量布拉格光纤光栅传感器的应变值,计算被测对象的局部压力:

$$p = \frac{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)}{3\pi(L-x)t_c R^4} \bullet \varepsilon_B$$

其中, $\varepsilon_B$ 为布拉格光纤光栅传感器的应变值与应变初值的差值, $E$ 和 $E_c$ 分别为所述薄膜和悬臂梁的弹性模量, $x$ 为所述布拉格光纤光栅传感器在悬臂梁上与固定端的距离, $L$ 为所述悬臂梁的长度, $t_c$ 为所述悬臂梁的厚度, $I_c$ 为所述悬臂梁的惯性矩, $\mu$ 为所述薄膜的泊松比, $R$ 为所述薄膜的直径, $t$ 为薄膜厚度。

2. 基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量方法,其特征在于,采用权利要求1所述的可变量程土压力测量装置实现,包括如下步骤:

(1) 根据被测对象的尺寸和测量要求,选择悬臂梁和薄膜的材料和尺寸,其中,所述悬臂梁由长方体或矩形片状的弹性金属片制成,薄膜由圆片状的弹性金属片制成;

(2) 将布拉格光纤光栅传感器安装在悬臂梁表面沿长度方向的中轴线处,并使两者紧密结合,并且,所述布拉格光纤光栅传感器安装在所述悬臂梁的固定端即 $x=0$ 处,再通过一根刚性传力杆将悬臂梁的自由端与薄膜连接在一起,将薄膜覆盖在所述传感器腔体敞口的一端,则布拉格光纤光栅传感器、悬臂梁、刚性传力杆和薄膜共同构成联结体,然后通过光纤将布拉格光纤光栅传感器与光纤信号分析处理设备相连接;

(3) 将联结体的悬臂梁的固定端固定在传感器腔体上,则联结体与传感器腔体共同构成土压力传感器,将整个土压力传感器放置在被测对象里,记下布拉格光纤光栅传感器应变初值;

(4) 通过光纤信号分析处理设备持续测量布拉格光纤光栅传感器的应变值,计算被测对象的局部压力:

$$p = \frac{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)}{3\pi(L-x)t_c R^4} \bullet \varepsilon_B$$

其中,  $\varepsilon_B$  为布拉格光纤光栅传感器的应变值与应变初值的差值,  $E$  和  $E_c$  分别为所述薄膜和悬臂梁的弹性模量,  $x$  为所述布拉格光纤光栅传感器在悬臂梁上与固定端的距离,  $L$  为所述悬臂梁的长度,  $t_c$  为所述悬臂梁的厚度,  $I_c$  为所述悬臂梁的惯性矩,  $\mu$  为所述薄膜的泊松比,  $R$  为所述薄膜的直径,  $t$  为薄膜厚度。

3. 根据权利要求2所述的基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量方法, 其特征在于, 所述布拉格光纤光栅传感器安装在所述悬臂梁的固定端即  $x=0$  处, 从而使联结体形成局部压力测试部件, 局部压力测试部件根据下式计算被测对象的监测部位的局部压力,

$$p = \frac{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)}{3\pi L t_c R^4} \bullet \varepsilon_B$$

4. 根据权利要求2或3所述的基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量方法, 其特征在于, 通过调节悬臂梁和薄膜的材料参数以及结构尺寸, 设定测量量程及灵敏度。

## 基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量装置和方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于土体内部压力测量方法领域,更具体地,涉及基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量装置和方法。

### 背景技术

[0002] 现有的土体表面局部压力测量采用电磁位移计,可以测量被测对象上下两个表面之间的位移,但是很难高精度测量被测对象中间局部的应变和变形。然而,局部的小位移会影响到被测对象的力学性能计算,如土体的局部小应变的力学特性关系到基坑开挖引起临近建筑物的变形计算,同时也会影响隧道开挖引起的沉降计算。

### 发明内容

[0003] 针对现有技术的以上缺陷或改进需求,本发明提供了基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量装置和方法,可以精确测量土体小应变情况下的力学特性,为工程设计和变形计算提供重要的参数。

[0004] 为实现上述目的,按照本发明,提供了一种可变量程土压力测量装置,其特征在于,包括悬臂梁、布拉格光纤光栅传感器、刚性传力杆、薄膜、传感器腔体和光纤信号分析处理设备,其中,

[0005] 所述布拉格光纤光栅传感器安装在悬臂梁表面沿长度方向的中轴线处,并且两者紧密结合;

[0006] 所述刚性传力杆将悬臂梁的自由端与薄膜连接在一起;

[0007] 所述传感器腔体的一端敞口,所述薄膜覆盖在所述传感器腔体的敞口端;

[0008] 所述悬臂梁的固定端固定在传感器腔体的内壁上;

[0009] 所述光纤信号分析处理设备通过光纤与所述布拉格光纤光栅传感器连接,以用于获得布拉格光纤光栅传感器的应变。

[0010] 优选地,所述光纤信号分析处理设备包括宽带光源、光源耦合器、光信号分析仪和信号采集处理器,所述宽带光源依次连接所述光源耦合器、光信号分析仪和信号采集处理器,所述光源耦合器还连接所述光纤。

[0011] 按照本发明的另一个方面,还提供了基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量方法,其特征在于,包括如下步骤:

[0012] (1) 根据被测对象的尺寸和测量要求,选择悬臂梁和薄膜的材料和尺寸,其中,所述悬臂梁由长方体或矩形片状的弹性金属片制成,薄膜由圆片状的弹性金属片制成;

[0013] (2) 将布拉格光纤光栅传感器安装在悬臂梁表面沿长度方向的中轴线处,并使两者紧密结合,再通过一根刚性传力杆将悬臂梁的自由端与薄膜连接在一起,将薄膜覆盖在所述传感器腔体敞口的一端,则布拉格光纤光栅传感器、悬臂梁、刚性传力杆和薄膜共同构成联结体,然后通过光纤将布拉格光纤光栅传感器与光纤信号分析处理设备相连接;

[0014] (3) 将联结体的悬臂梁的固定端通过固定部件固定在传感器腔体上,则联结体与

传感器腔体共同构成土压力传感器,将整个土压力传感器放置在被测对象里,记下布拉格光纤光栅传感器应变初值;

[0015] (4)通过光纤信号分析处理设备持续测量布拉格光纤光栅传感器的应变值,计算被测对象的局部压力:

$$[0016] \quad p = \frac{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)}{3\pi(L-x)t_c R^4} \cdot \varepsilon_B$$

[0017] 其中, $\varepsilon_B$ 为布拉格光纤光栅传感器的应变值与应变初值的差值,E和 $E_c$ 分别为所述薄膜和悬臂梁的弹性模量,x为所述布拉格光纤光栅传感器在悬臂梁上与固定端的距离,L为所述悬臂梁的长度, $t_c$ 为所述悬臂梁的厚度, $I_c$ 为所述悬臂梁的惯性矩, $\mu$ 为所述薄膜的泊松比,R为所述薄膜的直径,t为薄膜厚度。

[0018] 优选地,所述布拉格光纤光栅传感器安装在所述悬臂梁的固定端即 $x=0$ 处,从而使联结体形成局部压力测试部件,局部压力测试部件根据下式计算被测对象的监测部位的局部压力,

$$[0019] \quad p = \frac{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)}{3\pi L t_c R^4} \cdot \varepsilon_B。$$

[0020] 优选地,可通过调节悬臂梁和薄膜的材料参数以及结构尺寸,设定测量量程及灵敏度。

[0021] 优选地,所述光纤信号分析处理设备包括宽带光源、光源耦合器、光信号分析仪和信号采集处理器,所述宽带光源依次连接所述光源耦合器、光信号分析仪和信号采集处理器,所述光源耦合器还连接所述光纤。

[0022] 总体而言,通过本发明所构思的以上技术方案与现有技术相比,能够取得下列有益效果:

[0023] 1)能够解决土体内部土压力的大量程精密测量问题,满足土体内部压力的测量需求。

[0024] 2)本发明获得了光纤光栅测量土体压力的计算方法,可以通过调节参数达到控制FBG-LDT的测量范围和灵敏度。

[0025] 3)传感器测量精度高,安全性高,结构简单。

[0026] 4)具有抗电磁干扰以及耐腐蚀,并且不存在水中短路的问题。

## 附图说明

[0027] 图1为本发明的基于布拉格光纤光栅传感器的局部压力测量方法的变形模型;

[0028] 图2a和图2b为本发明的基于布拉格光纤光栅传感器的局部压力测量方法的结构示意图;

[0029] 其中:1-宽带光源、2-激光、3-光源耦合器、4-光信号分析仪、5-信号采集处理器、6-光纤、7-刚性传力杆、8-薄膜、9-悬臂梁、10-布拉格光纤光栅传感器、11-固定部件、12-传感器腔体。

### 具体实施方式

[0030] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。此外,下面所描述的本发明各个实施方式中所涉及到的技术特征只要彼此之间未构成冲突就可以相互组合。

[0031] 参照图1,一种可变量程土压力测量装置,包括悬臂梁9、布拉格光纤光栅传感器10、刚性传力杆7、薄膜8、传感器腔体和光纤信号分析处理设备,其中,

[0032] 所述布拉格光纤光栅传感器10安装在悬臂梁9表面沿长度方向的中轴线处,并且两者紧密结合;

[0033] 所述刚性传力杆7将悬臂梁9的自由端与薄膜8连接在一起;

[0034] 所述传感器腔体的一端敞口,所述薄膜8覆盖在所述传感器腔体的敞口端;

[0035] 所述悬臂梁9的固定端固定在传感器腔体的内壁上;

[0036] 所述光纤信号分析处理设备通过光纤6与所述布拉格光纤光栅传感器10连接,以用于获得布拉格光纤光栅传感器10的应变。

[0037] 本发明是利用布拉格光纤光栅传感器10,将布拉格光纤光栅传感器10安装于悬臂梁9的表面,通过刚性传力杆7与薄膜8相连,固定在被测对象的表面,当被测对象受到外荷载时,其变形会引起薄膜8的变形,薄膜8中心的轴向变形 $\delta_{dia}$ 由两部分组成:局部均布压力 $p$ 作用于薄膜8;由于悬臂梁9变形而产生的集中力 $\Delta p$ 作用于薄膜8中心:

$$[0038] \quad \delta_{dia}^p = \frac{pR^4}{64D} \quad (1)$$

$$[0039] \quad \delta_{dia}^{\Delta p} = \frac{(-\Delta p)R^2}{16\pi D} \quad (2a)$$

$$[0040] \quad \delta_{dia} = \frac{pR^4}{64D} - \frac{\Delta p R^2}{16\pi D} \quad (2b)$$

[0041] 其中, $D = Et^3/12(1-\mu^2)$ , $p$ 为作用于薄膜8表面的压力, $E$ 和 $\mu$ 分别是薄膜8的弹性模量和泊松比, $t$ 和 $R$ 分别是薄膜8的厚度和半径, $\Delta p$ 是由于悬臂梁9变形而产生的恒定的反作用力,设为未知。由于刚性传力杆7的存在,使得薄膜8中心处轴向位移等于悬臂梁9最大的挠度 $\Delta d_{max}$ 。

[0042] 进一步的,上述 $\Delta p$ 的反作用力作用于装有布拉格光纤光栅传感器10的悬臂梁9的自由端,悬臂梁9上的弯曲应变为:

$$[0043] \quad \varepsilon(x) = \frac{M(x)t_c/2}{E_c I_c} = \frac{\Delta P(L-x) \cdot t_c}{2E_c I_c} \quad (3)$$

[0044] 其中, $x$ 为布拉格光纤光栅传感器10在局部 $x$ 坐标系上的位置(以悬臂梁9固定端为坐标轴原点), $M(x)$ 为悬臂梁9上 $x$ 处的弯矩值, $L$ 为悬臂梁9的长度, $E_c$ 为悬臂梁9的弹性模量, $I_c$ 为悬臂梁9的截面惯性矩( $b_c$ 为截面宽度, $t_c$ 为截面厚度)。

[0045] 根据欧拉梁理论(Euler-Bernoulli),悬臂梁9由集中力 $\Delta p$ 产生的最大的挠度 $\Delta d_{max}$ 为:

$$[0046] \quad \Delta d_{max} = \frac{\Delta PL^3}{3E_c I_c} \quad (4)$$

[0047] 将式(4)代入式(3)可得:

$$[0048] \quad \varepsilon(x) = \frac{3\Delta d_{\max}(L-x) \cdot t_c}{2L^3} \quad (5)$$

[0049] 根据薄膜8中心轴向变形 $\delta_{dia}$ 等于悬臂梁9最大的挠度 $\Delta d_{\max}$ ,可求得集中力 $\Delta p$ 为:

$$[0050] \quad \Delta p = \frac{pR^4}{64D} \cdot \frac{1}{\frac{L^3}{3E_c I_c} + \frac{R^2}{16\pi D}} \quad (6)$$

[0051] 综合式(4)、式(5)和式(6),可得由布拉格光纤光栅传感器10测得的应变和待测表面压力的关系如下:

$$[0052] \quad \varepsilon(x) = \frac{3\pi(L-x)t_c R^4}{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)} \cdot p \quad (7)$$

[0053] 其中,弯曲应变可通过两个布拉格光纤光栅传感器10(即布拉格光纤光栅传感器A和布拉格光纤光栅传感器B)测得。当悬臂梁9处于弯曲状态时,梁截面上下两处的轴向应变大小相等,方向相反,因此,x处最大弯曲应变可通过下式获得:

$$[0054] \quad \varepsilon_B = \frac{1}{2}(\varepsilon_{FBG\_A} - \varepsilon_{FBG\_B}) \quad (8)$$

[0055] 其中 $\varepsilon_{FBG\_A}$ 和 $\varepsilon_{FBG\_B}$ 分别是悬臂梁上下两个布拉格光纤光栅传感器10的测量应变,这样便可以消除温度效应对应变测量带来的误差。

[0056] 根据式(7),可得作用于被测对象表面的压力为:

$$[0057] \quad p = C_2 \varepsilon_B \quad (9)$$

[0058] 其中 $C_2 = \frac{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)}{3\pi(L-x)t_c R^4}$ , $C_2$ 为作用于联结体表面压力与布拉格光纤光栅传感器10所测应变之间的系数。

[0059] 此公式为本发明的关键公式,公式表明了通过布拉格光纤光栅传感器10得到的应变与施加的外荷载 $p$ 有唯一的对应关系。这个关系与悬臂梁9和薄膜8的材料参数以及结构尺寸有关。如果布拉格光纤光栅传感器安装于悬臂梁9的固定端,也即 $x=0$ ,因此公式(7)可以简化为:

$$[0060] \quad p = \frac{8\left(\frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2\right)}{3\pi L t_c R^4} \cdot \varepsilon_B \quad (10)$$

[0061] 此公式表明了布拉格光纤光栅传感器安装于悬臂梁9的固定端位置情况下,布拉格光纤光栅传感器10得到的应变与作用于联结体表面压力 $p$ 的唯一对应关系。并且从公式可以看出,通过控制悬臂梁9和薄膜8的材料参数以及结构尺寸,可以调节测量的范围和灵敏度。

[0062] 基于上述推导过程,本发明提供了基于布拉格光纤光栅的可变量程的土体压力测量方法,其特征在于,包括如下步骤:

[0063] (1) 根据被测对象的尺寸和测量要求,选择悬臂梁9和薄膜8的材料和尺寸,其中,

所述悬臂梁9由长方体或矩形片状的弹性金属片制成,薄膜8由圆片状的弹性金属片制成;

[0064] (2) 将布拉格光纤光栅传感器10安装在悬臂梁9表面沿长度方向的中轴线处,并使两者紧密结合,再通过一根刚性传力杆7将悬臂梁9的自由端与薄膜8连接在一起,将薄膜8覆盖在所述传感器腔体12敞口的一端,则布拉格光纤光栅传感器10、悬臂梁9、刚性传力杆和薄膜8共同构成联结体,然后通过光纤6将布拉格光纤光栅传感器10与光纤信号分析处理设备相连接;

[0065] (3) 将联结体的悬臂梁9的固定在传感器腔体12上,则联结体与传感器腔体12共同构成土压力传感器,将整个土压力传感器放置在被测对象里,记下布拉格光纤光栅传感器应变初值;

[0066] (4) 通过光纤信号分析处理设备持续测量布拉格光纤光栅传感器的应变值,计算被测对象的局部压力 $p$ :

$$[0067] \quad p = \frac{8 \left( \frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2 \right)}{3\pi(L-x)t_c R^4} \cdot \varepsilon_B$$

[0068] 其中, $\varepsilon_B$ 为布拉格光纤光栅传感器10的应变值与应变初值的差值, $E$ 和 $E_c$ 分别为所述薄膜8和悬臂梁9的弹性模量, $x$ 为所述布拉格光纤光栅传感器10在悬臂梁9上与固定端的距离, $L$ 为所述悬臂梁9的长度, $t_c$ 为所述悬臂梁9的厚度, $I_c$ 为所述悬臂梁9的惯性矩, $\mu$ 为所述薄膜8的泊松比, $R$ 为所述薄膜8的直径, $t$ 为薄膜8厚度。

[0069] 所述光纤信号分析处理设备包括宽带光源1、光源耦合器3、光信号分析仪4和信号采集处理器5,所述宽带光源1依次连接所述光源耦合器3、光信号分析仪4和信号采集处理器5,所述光源耦合器3还连接所述光纤6,宽带光源1发出激光2到光源耦合器3上。

[0070] 进一步,所述布拉格光纤光栅传感器10安装在所述悬臂梁9的固定端即 $x=0$ 处,从而使联结体形成局部压力测试部件,局部压力测试部件根据下式计算被测对象的监测部位的局部压力,

$$[0071] \quad p = \frac{8 \left( \frac{4\pi EL^3 t^3}{3(1-\mu^2)} + 3E_c I_c R^2 \right)}{3\pi L t_c R^4} \cdot \varepsilon_B。$$

[0072] 进一步,可通过调节悬臂梁9和薄膜8的材料参数以及结构尺寸,设定测量量程。

[0073] 进一步,可通过调节悬臂梁9和薄膜8的材料参数以及结构尺寸,调节测量灵敏度。

[0074] 工作状态下,当土体试样受到外荷载时,其变形会引起薄膜8的变形,进而引起悬臂梁9的变形,从而导致悬臂梁9上的光纤光栅产生应变和波长的漂移,进而可以得到被测对象的压力,实现被测对象压力的精密测量。

[0075] 本发明采用这样的方法制作的:优选采用布拉格光纤光栅传感器10,分辨率为 $1.0 \mu\epsilon$ ,将两个布拉格光纤光栅传感器10分别安装在悬臂梁9上下表面上,本发明中用到的悬臂梁9为铜质材料,尺寸为40mm长,15mm宽,1mm厚,薄膜8为铜质材料,尺寸为0.6mm厚,90mm直径,整个的联结体尺寸为30mm厚,100mm直径,然后将布拉格光纤光栅传感器10用环氧树脂封装,布拉格光纤光栅传感器10通过光纤6连接到光纤光栅采集仪,显示、采集并储存数据。试验时,将固定部件11用环氧树脂固定在被测对象外表面,待固定部件11完全固定好后,将



本发明的悬臂梁9、刚性传力杆7等安装于两个固定部件11之间,通过光纤6连接到光栅采集仪就可以得到采集本发明的局部压力测量装置的试验数据,按照上述的材料参数和结构设计的选择,测量分辨率为 $0.105\text{kPa}/\mu\epsilon$ 。

[0076] 本发明所设计的测试方法,没有涉及到电信号,所以在水环境中不存在短路问题,本方法还可应用于岩石、混凝土的局部压力测试。

[0077] 本领域的技术人员容易理解,以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内所作的任何修改、等同替换和改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

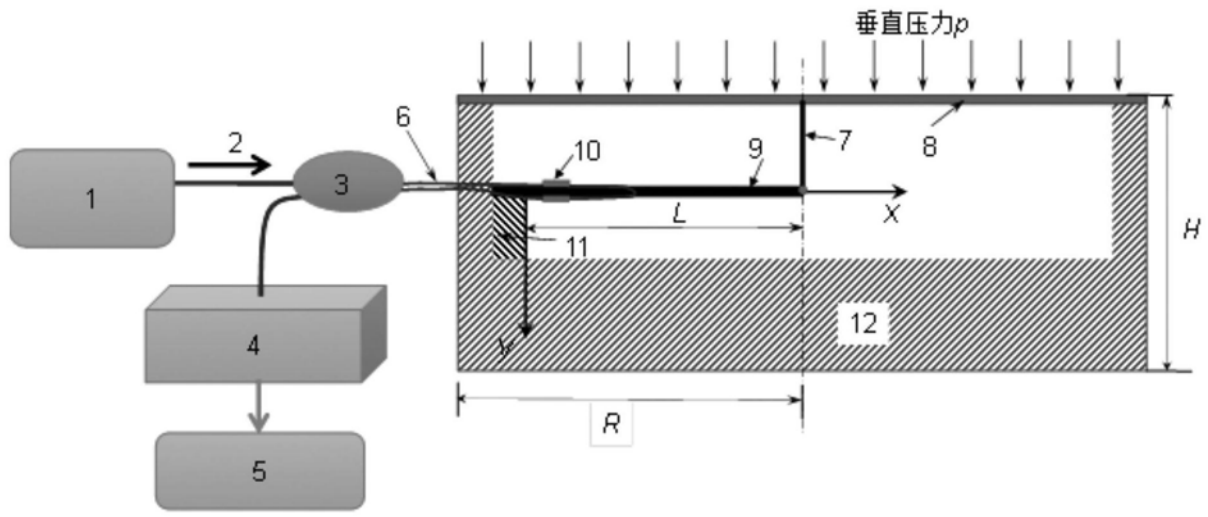


图1

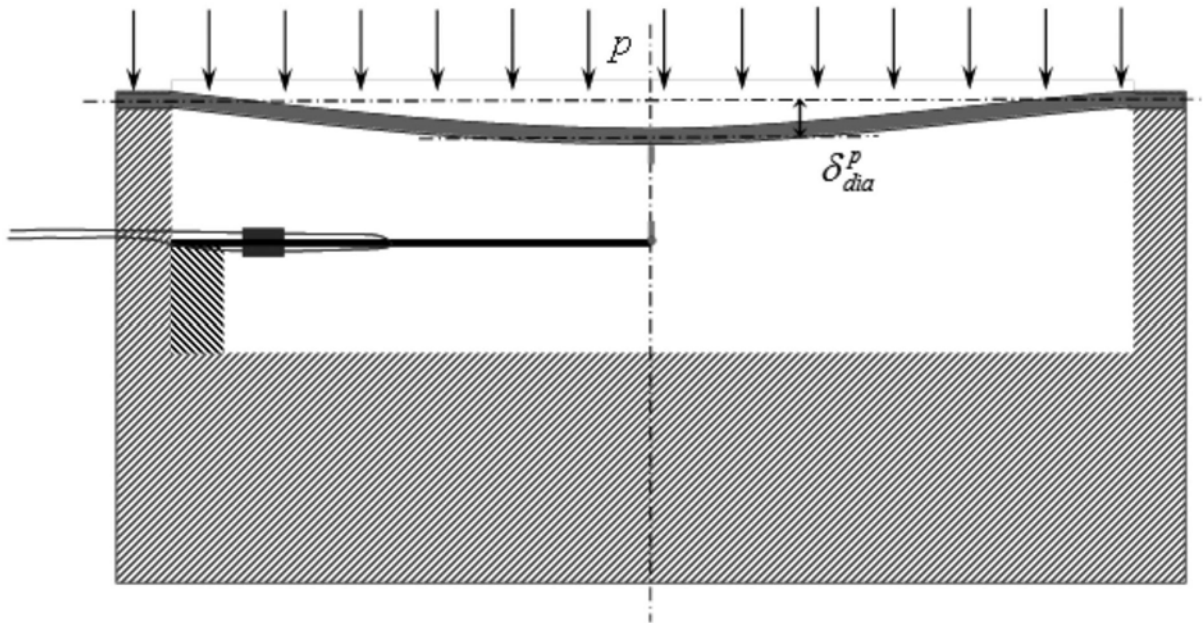


图2a

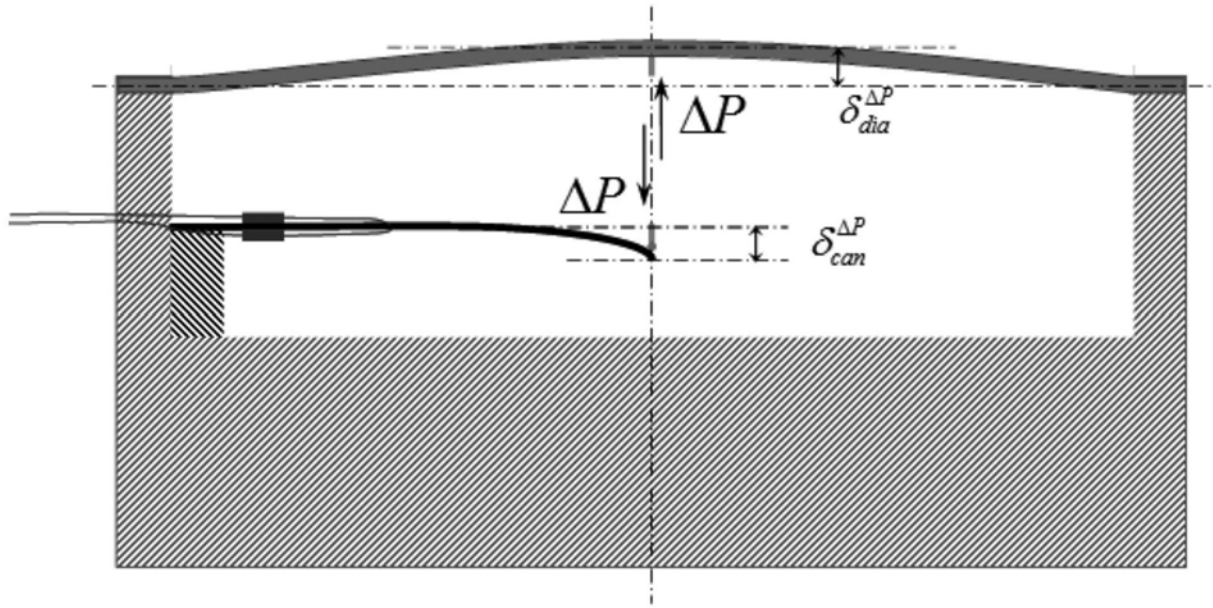


图2b