(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 114354764 B
(45)授权公告日 2023.09.22

(21)申请号 202210018279.0
(22)申请日 2022.01.07
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114354764 A
(43)申请公布日 2022.04.15
(73)专利权人 天津大学
地址 300350 天津市津南区海河教育园雅观路135号天津大学北洋园校区
(72)发明人 王毅泽 陆琦
(74)专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201
专利代理师 刘子文
(51)Int.Cl.
G01N 29/22(2006.01)
(56)对比文件
CN 112304741 A,2021.02.02
US 2014250579 A1,2014.09.11
WO 2014190314 A2,2014.11.27
JP 2016161375 A,2016.09.05
US 2006184033 A1,2006.08.17
CN 107121500 A,2017.09.01
CN 107505355 A,2017.12.22
US 2009199643 A1,2009.08.13
Qi Lu等.Nonreciprocal Head-on Collision Between Two Nonlinear Solitary Waves in Granular Metamaterials with an Interface.《Acta Mechanica Solida Sinica》.2021,第35卷(第1期),全文.
Yajie Feng等.Multiple Impacts and Multple-Compression Process in the Dynamics of Granular Chains.《Journal of Computational and Nonlinear Dynamics》.2019,第14卷(第12期),全文.
李明智;刘秀成;刘宗发;王鹤萤;肖婷;何存富;吴斌.基于有限元法的一维球链中高非线性孤立波传播特性.北京工业大学学报.2018,(第05期),全文.
韩闯;于树华;时胜国;何盼盼;时洁.基于水平阵的柱面声源高分辨时反聚焦定位方法.振动与冲击.2015,(第22期),全文.
审查员 吴宝群

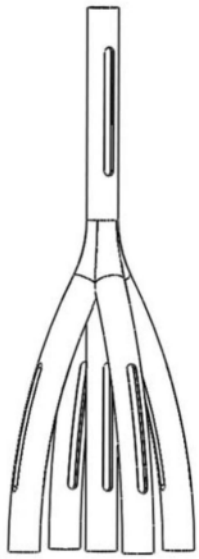
权利要求书1页 说明书5页 附图5页

(54)发明名称

一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置

(57)摘要

本发明公开一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置,包括弯曲腔体轨道、竖直腔体轨道、散体颗粒群、信号采集颗粒。弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道均是由树脂组成的圆管形结构,散体颗粒群均为直径为19mm的Q235不锈钢颗粒均匀分布在腔体轨道中,所述信号采集颗粒由圆形压电片与两个球颗粒组成。压垫片直径19mm,厚度0.3mm,嵌入两个半球之间,并用聚酰亚胺薄膜使压电片与半球颗粒进行隔离。半球颗粒直径为19mm,材质为Q235不锈钢,嵌入匀质颗粒链中用于接收非线性孤立波信号。



CN 114354764 B

1.一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，其特征在于，包括弯曲腔体轨道、竖直腔体轨道、散体颗粒群、信号采集颗粒；所述弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道均是由白色树脂组成的圆管形结构；若干所述弯曲腔体轨道的一端连接在竖直腔体轨道的中部，另一端用于与待测试件接触，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道的内部相互贯通；竖直腔体轨道的上部和竖直腔体轨道的下部均对称设有两条沿竖直腔体轨道长度方向的窄缝，每个弯曲腔体轨道上均对称设有两条沿弯曲腔体轨道长度方向的窄缝；所述弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道内均填充有散体颗粒群，竖直腔体轨道和每个弯曲腔体轨道内均设有一个信号采集颗粒，信号采集颗粒内设有压电片，所述压电片通过导线和开孔与外界电路连接，所述竖直腔体轨道的顶部开孔用于冲击颗粒自由进入。

2.根据权利要求1所述一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，其特征在于，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道的弹性模量材料常数E＝2.65GPa，泊松比v为0.41，密度ρ为0.5kg/m^3。

3.根据权利要求1所述一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，其特征在于，散体颗粒群及冲击颗粒均由直径为19mm的Q235不锈钢颗粒球组成。

4.根据权利要求1所述一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，其特征在于，信号采集颗粒由压电片和两个半球颗粒组成，圆形压电片材料为DM-5H，直径19mm，厚度0.3mm，两个半球颗粒为直径18.7mm的Q235不锈钢，两个半球颗粒的对接面上均粘贴有聚酰亚胺薄膜，聚酰亚胺薄膜之间粘贴有所述压电片。

5.根据权利要求1所述一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，其特征在于，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道的外径为21mm，内径为19mm。

6.根据权利要求1所述一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，其特征在于，弯曲腔体轨道共设置有四个，彼此互成90度连接在竖直腔体轨道的中部。

7.根据权利要求1所述一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，其特征在于，窄缝宽度为10mm，方便将导线引出和调整颗粒。

一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置

技术领域

[0001] 本发明涉及人工弹性波超构材料技术领域，尤其涉及一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置。

背景技术

[0002] 近年来，周期结构以及弹性波超材料的研究逐渐开始兴起和发展，其中一类材料常数呈周期性变化的人工结构的一种弹性波超材料被称为声子晶体。颗粒链作为非线性声子晶体领域最基本的周期结构，因其一些有趣的动力学特性而受到广泛关注。国内外众多学者针对球形颗粒链中非线性孤立波的传播特性及相关应用都做了广泛的研究。目前针对非线性孤立波传播特性的分析方法主要是基于赫兹接触理论，一维匀质(材料、尺寸相同)小球颗粒链可以看作是采用非线性弹簧作为连接条件的颗粒链力学模型。通过改变颗粒材料的特性，例如密度、弹性模量与泊松比、颗粒的几何形状、尺寸、静态预应力等条件对非线性孤立波的传播特性进行调节。此类多点非线性孤立波信号检测特性可以有效地运用在构件健康诊断、厚度测量等诸多领域。

[0003] 孤立波无损探伤检测有很多优点。首先，一维颗粒链不依赖于外部功率放大器就可以产生稳定的孤立波，且孤立波的可控性好；此外，孤立波探伤有体积小、便携性高、不依赖媒介、不依赖压电转换等优点。本装置通过采用非线性孤立波多轨道同时传播的结构形式，使得在同一激发非线性孤立波信号下，实现多通道的信号检测。通过多轨道特性来实现同一输入信号不同点同时检测的效果，达到了同时多点非线性孤立波信号无损检测的目的，提高了利用孤立波进行无损探伤检测的效率，对于非线性孤立波传播特性研究具有重要意义。

发明内容

[0004] 本发明的目的是为了克服现有技术中的不足，提供一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置。

[0005] 本发明的目的是通过以下技术方案实现的：

[0006] 一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，包括弯曲腔体轨道、竖直腔体轨道、散体颗粒群、信号采集颗粒；所述弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道均是由白色树脂组成的圆管形结构；若干所述弯曲腔体轨道的一端连接在竖直腔体轨道的中部，另一端用于与待测试件接触，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道的内部相互贯通；竖直腔体轨道的上部和竖直腔体轨道的下部均对称设有两条沿竖直腔体轨道长度方向的窄缝，每个弯曲腔体轨道上均对称设有两条沿弯曲腔体轨道长度方向的窄缝；所述弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道内均填充有散体颗粒群，竖直腔体轨道和每个弯曲腔体轨道内均设有一个信号采集颗粒，信号采集颗粒内设有压电片，所述压电片通过导线和开孔与外界电路连接，所述竖直腔体轨道的顶部开孔用于冲击颗粒自由进入。

[0007] 进一步的，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道的弹性模量材料常数E＝2.65GPa，泊松

比v为0.41，密度ρ为0.5kg/m^3。

[0008] 进一步的，散体颗粒群及冲击颗粒均由直径为19mm的Q235不锈钢颗粒球组成。

[0009] 进一步的，信号采集颗粒由压电片和两个半球颗粒组成，圆形压电片材料为DM-5H，直径19mm，厚度0.3mm，两个半球颗粒为直径18.7mm的Q235不锈钢，两个半球颗粒的对接面上均粘贴有聚酰亚胺薄膜，聚酰亚胺薄膜之间粘贴有所述压电片。

[0010] 进一步的，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道的外径为21mm，内径为19mm。

[0011] 进一步的，弯曲腔体轨道共设置有四个，彼此互成90度连接在竖直腔体轨道的中部。

[0012] 进一步的，窄缝宽度为10mm，方便将导线引出和调整颗粒。

[0013] 本发明还提供一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置的应用，弹性波超材料装置采用非线性孤立波若干轨道同时传播的结构形式，使得在同一激发非线性孤立波信号下，应用于多通道的信号检测。

[0014] 与现有技术相比，本发明的技术方案所带来的有益效果是：

[0015] 1.本发明装置通过多轨道特性来实现同一输入信号不同点同时检测的效果，达到了同时多点非线性孤立波信号无损检测的目的。与以往非线性孤立波信号无损装置不同的是，本发明利用多轨道结构，这样可以在同一激发非线性孤立波信号下，实现多通道的信号检测，具有多信号检测的优点，可以用于需要同时对同一信号激励下不同点信号检测的情况。

[0016] 2.本装置采用散体颗粒作为孤立波信号的传播介质，可通过改变颗粒材料的特性实现对孤立波信号的调控，装置的可控性较好。

[0017] 3.本发明装置包括一条竖直腔体轨道和四条90度连接在竖直腔体轨道的中部的弯曲腔体轨道，竖直腔体轨道和每个弯曲腔体轨道内均设有一个信号采集颗粒，可以实现多点的非线性孤立波信号无损检测，提高了利用孤立波进行无损探伤检测的效率。

[0018] 4.本发明的非线性孤立波信号无损检测装置结构形式简单，不依赖于外部功率放大器就可以产生稳定的孤立波检测信号，并且尺寸灵活，安装方便，可适用于多种环境。

[0019] 此外本发明附加的方面和优点将在下面的描述中部分给出，这些将从下面的描述中变得明显，或通过本发明的实践了解到。

附图说明

[0020] 图1为本发明实施例提供的一种超材料装置的结构示意图。

[0021] 图2为图1中超材料装置的俯视结构示意图。

[0022] 图3为本发明实施例提供的装有散体颗粒的装置的半剖视图。

[0023] 图4为本发明实施例提供的弯曲腔体轨道、竖直腔体轨道之间的爆炸结构示意图。

[0024] 图5为本发明实施例提供的信号采集颗粒的结构示意图。

[0025] 图6为本发明实施例提供的静态预压下散体颗粒群组成的匀质颗粒链示意图。

[0026] 图7为本发明实施例提供的在竖直腔体轨道1顶端处激发0.313m/s的冲击颗粒时，实验过程中竖直腔体轨道1底部信号采集颗粒记录的信号响应图。

[0027] 图8为本发明实施例提供的在竖直腔体轨道1顶端处激发0.313m/s的冲击颗粒时，实验过程中弯曲腔体轨道2底部信号采集颗粒记录的信号响应图。

[0028] 图9为本发明实施例提供的在竖直腔体轨道1顶端处激发0.313m/s的冲击颗粒时，实验过程中弯曲腔体轨道3底部信号采集颗粒记录的信号响应图。

[0029] 图10为本发明实施例提供的在竖直腔体轨道1顶端处激发0.313m/s的冲击颗粒时，实验过程中弯曲腔体轨道4底部信号采集颗粒记录的信号响应图。

[0030] 图11为本发明实施例提供的在竖直腔体轨道1顶端处激发0.313m/s的冲击颗粒时，实验过程中弯曲腔体轨道5底部信号采集颗粒记录的信号响应图。

具体实施方式

[0031] 下面详细描述本发明的实施方式，实施方式的示例在附图中示出，其中自始至终相同或类似的标号表示相同或类似的元件或具有相同或类似功能的元件。下面通过参考附图描述的实施方式是示例性的，仅用于解释本发明，而不能解释为对本发明的限制。

[0032] 见图1至图6，本发明实施例提供了一种具有多点孤立波无损检测性能的弹性波超材料装置，由于非线性孤立波信号可以在匀质小球颗粒中稳定传播，从而实现在多点位置对非线性孤立波进行信号检测。本发明提供贯通的轨道结构使弹性波超材料达到同一激励信号多轨道传播的效果。弹性波超材料装置具体包括弯曲腔体轨道2、3、4、5、竖直腔体轨道1、散体颗粒群、信号采集颗粒；4个弯曲腔体轨道的一端连接在竖直腔体轨道的中部，另一端用于与待测试件接触，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道1的内部相互贯通；竖直腔体轨道的上部和竖直腔体轨道的下部均对称设有两条沿竖直腔体轨道长度方向的窄缝6，每个弯曲腔体轨道上均对称设有两条沿弯曲腔体轨道长度方向的窄缝7；弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道内均填充有散体颗粒群，竖直腔体轨道和每个弯曲腔体轨道内均设有一个信号采集颗粒，信号采集颗粒内设有压电片，压电片通过导线和开孔与外界电路连接，竖直腔体轨道1的顶部开孔用于冲击颗粒自由进入。

[0033] 上述弹性波超材料装置具体应用如下：在装置的竖直腔体轨道1顶端处释放高度为5mm的冲击颗粒(冲击颗粒与颗粒链中小球颗粒材质尺寸相同)，施加瞬时冲击激励，并用弯曲腔体轨道底部的信号采集颗粒接收和检测激发信号。测试在同一冲击速度下，不同的接收端的响应信号，实现同一激励信号多点检测的目的。

[0034] 本实施例中为保证孤立波信号可以完整地穿过信号采集颗粒，进而采集到完整地信号，信号采集颗粒相对位于弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道的下部，夹在散体颗粒之间，信号采集颗粒下方还有几个散体小球颗粒。且竖直腔体轨道的底部和各弯曲腔体轨道的底部齐平。

[0035] 本发明实施例提供的超材料装置的结构如图1所示，弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道1均是由白色树脂组成的圆管形结构；弹性模量材料常数E＝2.65GPa，泊松比v为0.41，密度ρ为0.5kg/m^3。图2为上述装置的俯视结构示意图，弯曲腔体轨道2、3、4、5和竖直腔体轨道1的外径均为21mm，内径均为19mm。

[0036] 见图3，填充在弯曲腔体轨道和竖直腔体轨道1内的散体颗粒群由直径为19mm的Q235不锈钢颗粒构成。

[0037] 见图4，本实施例中弯曲腔体轨道2、3、4、5彼此互成90度连接在竖直腔体轨道的中部，每条竖直腔体轨道的管壁上对称开有两条沿轨道的长度方向的窄缝7，窄缝7宽度为10mm，方便将导线引出和调整颗粒。位于竖直腔体轨道上的窄缝6的宽度和窄缝7宽度相同。

[0038] 见图5，信号采集颗粒由圆形压电片与两个半球颗粒组成。压电片直径为19mm，厚度为3mm，嵌入两个半球之间，并用聚酰亚胺薄膜使压电片与半球颗粒进行隔离。半球颗粒直径为18.7mm，材质为Q235不锈钢。半球颗粒、聚酰亚胺薄膜和压电片均通过粘贴方式相互连接，每个信号采集颗粒中的其中一个半球颗粒的对接面上设有凹槽，用于容纳导线。

[0039] 图6为本发明实施例提供的静态预压下散体颗粒群组成的匀质颗粒链示意图，由相同的实心颗粒小球组成的典型一维匀质球形颗粒链。颗粒材质为Q235不锈钢。图4中，颗粒-颗粒间接触区域的变形过程满足赫兹接触定律：

[0040] $F=k\delta^{3/2}$

[0041] 式中，F代表动接触力，k代表颗粒间的接触刚度，δ代表相邻两颗粒球心的位移差。其中，接触刚度k与颗粒的弹性模量、几何参数相关，其表达式为：

[0042] $$k=\frac{E\sqrt{2R}}{3(1-\nu^2)}$$

[0043] 式中，E代表颗粒的弹性模量，υ代表动颗粒的泊松比，R代表颗粒的半径。

[0044] 在无外在冲击载荷时，第n个小球颗粒的运动方程可以描述为：

[0045] $$m\frac{d^2u_n}{dt^2}=k(u_{n-1}-u_n)^{3/2}-k(u_n-u_{n+1})^{3/2}$$

[0046] 式中，m代表小球颗粒的质量；u_n代表第n个小球颗粒相对于初始位置的位移。

[0047] 上述实施例中涉及的多点非线性孤立波信号无损检测性能的弹性波超材料装置的工作原理如下：

[0048] 离散颗粒模型是颗粒动力学一种常用的数值模型，被广泛应用于颗粒材料力学行为的研究。将颗粒简化为质点，同时颗粒间采用非线性弹簧连接。通过计算颗粒-颗粒间相互作用的运动方程，分析颗粒材料的波动性为。当冲击颗粒通过撞击颗粒链而引入能量，形成了以稳定速度传播的入射非线性孤立波，信号采集颗粒记录的非线性孤立波信号为中心处压电片的形变力所产生。

[0049] 图7为竖直腔体轨道1底部信号采集颗粒记录的瞬态激励信号图，在装置的竖直腔体轨道1顶端处释放高度为5mm的冲击小球颗粒，给颗粒链施加瞬时冲击激励以产生非线性孤立波信号，并在竖直腔体轨道1底部检测系统中传播的非线性孤立波信号，此时孤立波到达信号采集颗粒的时间约为0.54ms。在上述模型中，当冲击颗粒与颗粒链中的颗粒一致时，冲击颗粒撞击颗粒链引入入射非线性孤立波，入射非线性孤立波的传播速度v可以表示为：

[0050] $v=(16/25)^{1/5}(2R)(0.682Vk^2/m^2)^{1/5}$

[0051] $\approx 1.694R(Vk^2/m^2)^{1/5}$

[0052] 式中，v代表非线性孤立波的入射速度，V代表冲击颗粒的撞击速度。

[0053] 图8至图11为实验过程中弯曲腔体轨道2至弯曲腔体轨道5底部信号采集颗粒检测到的瞬态激励信号图。同一冲击速度下，利用各弯曲腔体轨道中的信号采集颗粒检测系统中传播的非线性孤立波信号，此时到达各点处的时间均约为0.54ms。

[0054] 综上，相比以往非线性孤立波信号无损检测装置，本发明采用多轨道来检测小球颗粒链中非线性孤立波的传播，通过对同一激励信号的不同传播轨道的信号检测，从而达到多点检测、提高无损检测效率的目的。

[0055] 本发明的超材料装置只测试了某特定瞬态冲击激励，但是通过调节激励信号，可以实现不同初始速度的冲击颗粒所产生非线性孤立波信号的检测。

[0056] 本发明超材料装置整体由白色树脂通过3D打印组成。该装置的结构设计简单，易于采购装配，设计完成后非常易于操作。

[0057] 本领域普通技术人员可以理解：附图只是一个实施例的示意图，附图中的模块或流程并不一定是实施本发明所必须的。

[0058] 以上所描述的装置及系统实施例仅仅是示意性的，其中所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性劳动的情况下，即可以理解并实施。

[0059] 本技术领域技术人员可以理解，除非特意声明，这里使用的单数形式“一”、“一个”、“所述”和“该”也可包括复数形式。应该进一步理解的是，本发明的说明书中使用的措辞“包括”是指存在所述特征、整数、步骤、操作、元件和/或组件，但是并不排除存在或添加一个或多个其他特征、整数、步骤、操作、元件、组件和/或它们的组。应该理解，当我们称元件被“连接”或“耦接”到另一元件时，它可以直接连接或耦接到其他元件，或者也可以存在中间元件。此外，这里使用的“连接”或“耦接”可以包括无线连接或耦接。这里使用的措辞“和/或”包括一个或更多个相关联的列出项的任一单元和全部组合。

[0060] 最后需要指出的是：以上实例仅用以说明本发明的计算过程，而非对其限制。尽管参照前述实例对本发明进行了详细的说明，本领域的普通技术人员应当理解，其依然可以对前述实例所记载的计算过程进行修改，或者对其中部分参数进行等同替换，而这些修改或者替换，并不使相应计算方法的本质脱离本发明计算方法的精神和范围。

[0061] 本发明并不限于上文描述的实施方式。以上对具体实施方式的描述旨在描述和说明本发明的技术方案，上述的具体实施方式仅仅是示意性的，并不是限制性的。在不脱离本发明宗旨和权利要求所保护的范围情况下，本领域的普通技术人员在本发明的启示下还可做出很多形式的具体变换，这些均属于本发明的保护范围之内。

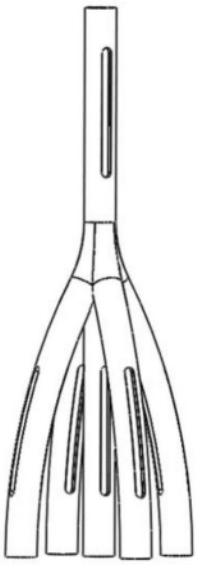


图1

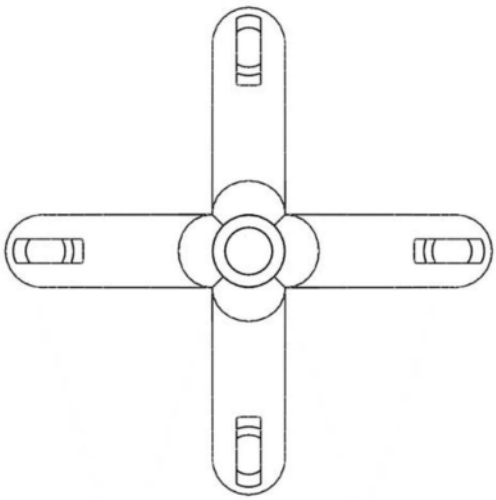


图2

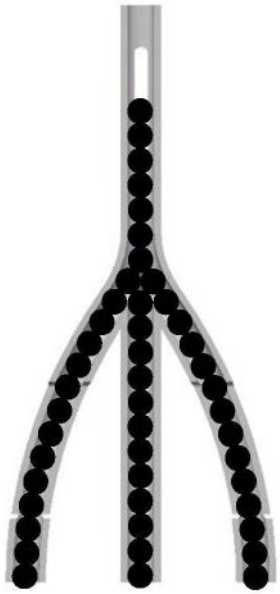


图3

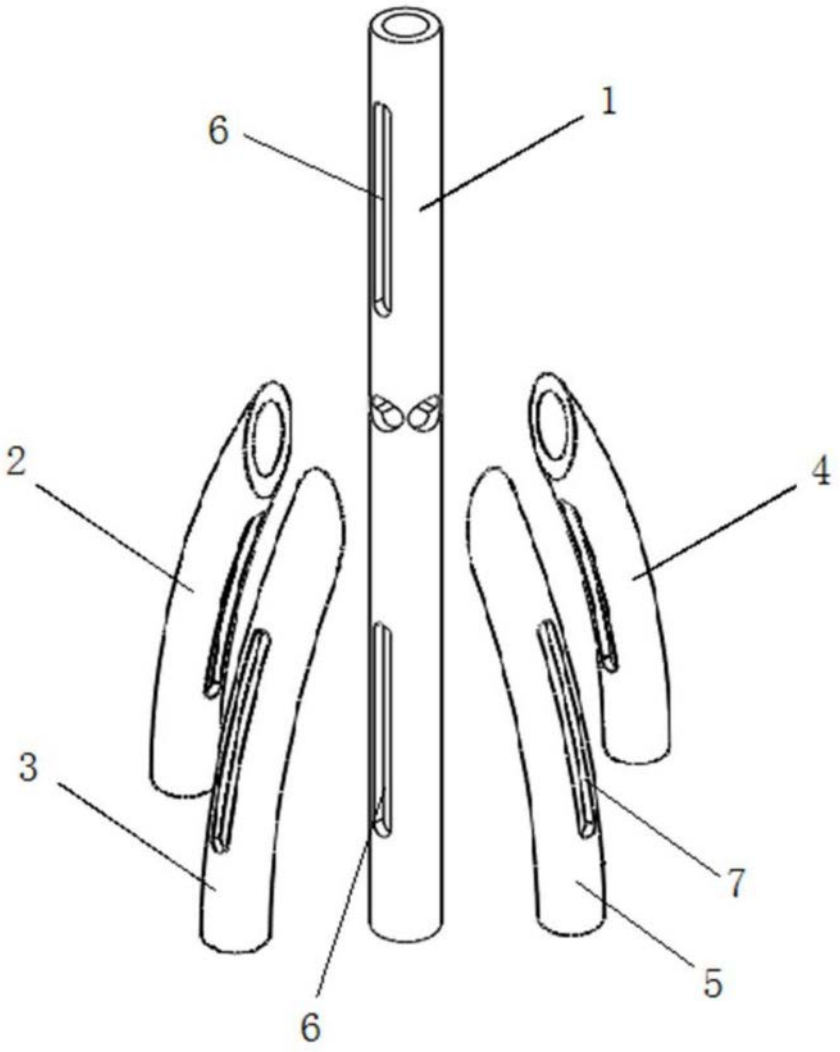


图4

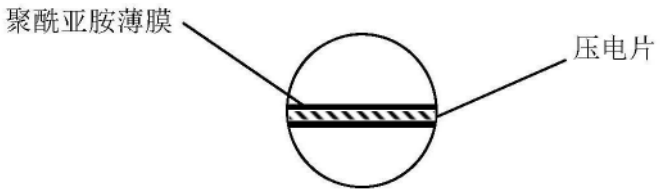


图5

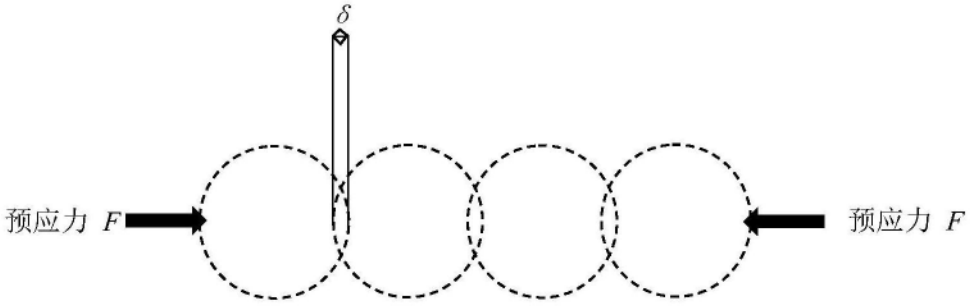

δ
预应力 F
预应力 F

图6

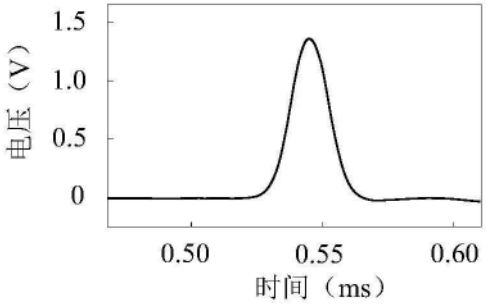

1.5
1.0
0.5
0
电压（V）
0.50
0.55
0.60
时间（ms）

图7

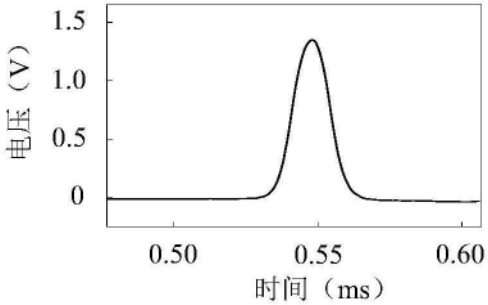

1.5
1.0
0.5
0
电压（V）
0.50
0.55
0.60
时间（ms）

图8

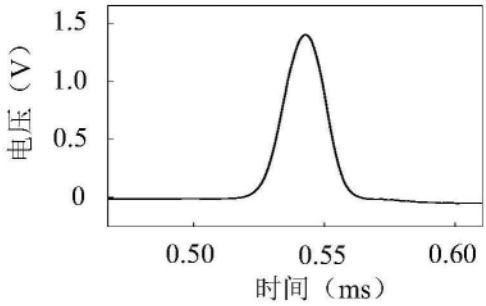

1.5
1.0
0.5
0
电压（V）
0.50
0.55
0.60
时间（ms）

图9

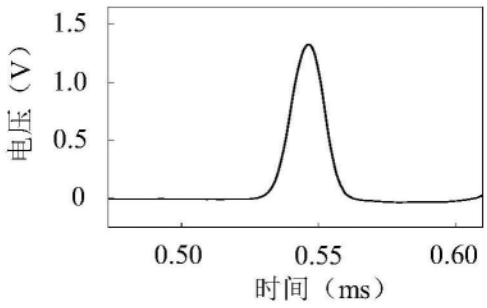


图10

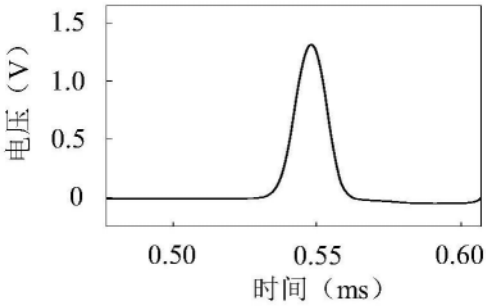


图11