

文章编号: 1673-3193(2024)05-0565-08

# 基于石墨烯的充油高压压力传感器仿真设计

王吕昊, 曹咏弘

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 压力传感器在较大压力范围内的输出结果难以稳定, 传统压力传感器采用膜结构, 在大压力作用下会产生强非线性, 需要进行复杂的转化才能将测量数据转化为线性结果。本文基于石墨烯的压阻效应, 通过圆筒状敏感结构, 设计了一种高压压力传感器, 能够在400 MPa范围内实现压力值的线性输出。该传感器结构主要由弹性金属膜片、可压缩硅油、圆筒结构以及石墨烯敏感膜组成。采用理论与仿真分析对传感器结构进行了优化设计, 通过分析膜片厚度设计了在400 MPa压力范围内只产生弹性应变的金属膜片尺寸结构; 运用流固耦合方法对传感器整体结构进行了仿真分析, 明确了圆筒结构尺寸与外壁面应变大小的关系以及与整体结构固有频率的关系, 通过寻找最大应变部位得出石墨烯敏感膜安装的合理位置; 最后探究了圆筒结构外壁面的应变与传感器测量压力的线性关系。结果表明, 设计的传感器结构可在400 MPa压力内工作, 传感器圆筒结构的合适尺寸为长1.2 mm, 厚度0.08 mm。在此尺寸下传感器的固有频率为127 kHz, 圆筒结构外壁面应变最高可以达到2 082  $\mu\epsilon$ , 在应变最高处安装石墨烯敏感膜, 传感器结构的灵敏度可以达到5.205  $\mu\epsilon$ /MPa; 在0~400 MPa范围内传感器线性度结构线性度良好, 结构线性相对误差仅有0.37%。

**关键词:** 高压传感器; 弹性元件; 结构强度; 流固耦合; 固有频率

**中图分类号:** TP212

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.05.002

**引用格式:** 王吕昊, 曹咏弘. 基于石墨烯的充油高压压力传感器仿真设计[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(5): 565-572.

WANG Lühao, CAO Yonghong. Simulation design of oil-filled high-pressure sensor based on graphene[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(5): 565-572.

## Simulation Design of Oil-Filled High-Pressure Sensor Based on Graphene

WANG Lühao, CAO Yonghong

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The output result of the pressure sensor is difficult to be stable in a large pressure range. The traditional pressure sensor adopts the membrane structure, which will produce strong nonlinearity under the action of large pressure, and require complex transformation to convert the measured data into linear results. In this paper, based on the piezoresistive effect of graphene, a high-pressure sensor was designed through the cylindrical sensitive structure, which could realize the linear output of the pressure value within the pressure range of 400 MPa. The sensor structure was mainly composed of an elastic metal diaphragm, a compressible silicone oil, a cylinder structure and a graphene sensitive membrane. The sensor structure was optimized by theoretical and simulation analysis, and the metal diaphragm size structure

**收稿日期:** 2023-10-07

**作者简介:** 王吕昊(1997-), 男, 硕士生, 主要从事高压传感器的研究。

**通信作者:** 曹咏弘(1972-), 男, 副教授, 博士, 主要从事工程力学的研究。E-mail: caoyonghong@nuc.edu.cn。

which only produces elastic strain in the 400 MPa pressure range was obtained by analyzing the diaphragm thickness. Then the fluid-solid coupling method was used to simulate the deformation of the whole structure of the sensor, and the relationship between the cylinder structure size and the strain of the outer wall, the natural frequency of the whole structure was determined. The reasonable location of the graphene sensitive membrane was obtained by finding the maximum strain location. Finally, the linear relationship between the strain on the outer wall of the cylinder structure and the pressure measured by the sensor was investigated. The results show that the designed sensor structure can work within the pressure range of 400 MPa, and the appropriate size of the sensor cylinder structure is 1.2 mm in length and 0.08 mm in thickness. At this size, the natural frequency of the sensor is 127 kHz, and the maximum strain on the outer wall of the cylinder structure can reach  $2\ 082\ \mu\epsilon$ . The sensitivity can reach  $5.205\ \mu\epsilon/\text{MPa}$  when the graphene sensitive membrane is installed at the highest strain point. In the range of 0 to 400 MPa, the linearity of the sensor structure is good, and the relative error of structure linearity is only 0.37%.

**Key words:** high pressure sensors; elastic elements; structural strength; fluid-structure interaction; natural frequency

## 0 引言

高压压力传感器在石油开采<sup>[1]</sup>、化工<sup>[2]</sup>、生物医药<sup>[3]</sup>等领域的压力测量中广泛应用,如高静水压力灭活病原体技术<sup>[4]</sup>需要静水压力达到200~250 MPa,以及400 MPa内压的化学反应装置<sup>[5]</sup>。以美国 Kulite 和 Endevco 以及瑞士 Kistler 公司为代表的国外公司已经研发出了性能优良的耐高温高压压力传感器,如 Kulite 公司的 HEM-375 型号压力传感器,能够进行 170 MPa 范围内的冲击压力测量和冲击压力波研究。针对于大口径火炮全装药膛内压力波压力测试,冲击波压力能达到 300 MPa 以上<sup>[6]</sup>,上升时间小于 5 ms,且在测量过程中伴随着瞬态高温,因此需要传感器具有更高的量程、更高的固有频率且耐高温,以满足压力测试需求。石墨烯具有较高的断裂强度<sup>[7]</sup>,耐高温<sup>[8]</sup>、高灵敏度<sup>[9]</sup>等优良性质,是高压高频器件的理想材料。然而,石墨烯在恶劣环境下缺乏稳定性,需要对其进行封装。目前,石墨烯在传感器方面已经较多应用。例如,Zeng 等<sup>[10]</sup>将氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )膜覆盖在石墨烯上,制作了最大电阻温度系数为  $0.322\%/\text{C}^{-1}$  的高温高压压力传感器。Wang 等<sup>[11]</sup>通过 h-BN/石墨烯/h-BN 异质结和 Cu-Sn 固液共扩散键的保护制作了灵敏度达到  $2.9 \times 10^{-4}\ \text{kPa}^{-1}$  的高灵敏度压力传感器。但石墨烯在高压领域仍有所欠缺,难以测量上百兆帕的压力,需要对应的机械结构来配合。

传统压力传感器将压力敏感元件设计成圆形

薄膜、C型方膜、E型膜岛<sup>[12]</sup>等结构,有制作工艺简单,灵敏度高等优点,但为了提高灵敏度而减小弹性膜厚度可能会引起大挠度效应,使传感器线性误差增大。圆筒结构能够显著增大敏感元件的高应变区间,且显著减小传感器线性误差。本文基于石墨烯的压阻效应设计了一种介质隔离的大量程高频响压力传感器,运用圆筒结构对传感器敏感部位进行设计,通过理论及仿真分析圆筒结构尺寸对石墨烯压力传感器影响,设计了能够测量 400 MPa 压力的压阻式压力传感器,结构线性相对误差仅有 0.37%,整体结构的固有频率达到 127 kHz。

## 1 充油压力传感器工作原理

### 1.1 整体结构和工作原理

充油式压力传感器结构如图 1 所示,金属膜片为外部承压结构,与基壳、圆筒结构一起构成密封腔。腔内充满高温硅油,作为传递压力的介质。圆筒结构由钛合金制成,外筒壁上安装了石墨烯敏感膜。当传感器的金属膜片受到来自外界的压力之后产生形变,使得充满硅油的密封腔内产生压力,圆筒结构在硅油压力的作用下使得石墨烯敏感膜产生应变,由于石墨烯的压阻效应,石墨烯的电阻会发生变化。通过石墨烯电阻与应变的映射关系便能反映圆筒结构外壁的应变大小,最后利用圆筒结构外壁的应变外推得到传感器的测量压力。

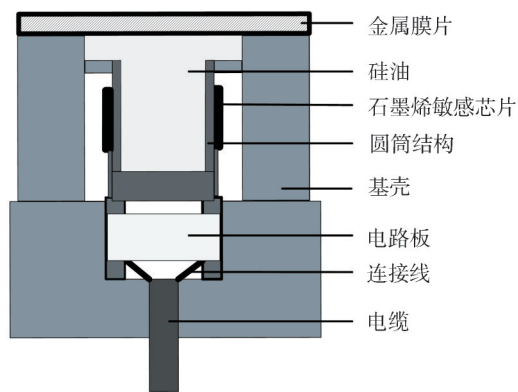


图 1 传感器结构简图

Fig. 1 Schematic diagram of the sensor structure

### 1.2 石墨烯敏感元件工作原理

石墨烯传感器的核心为石墨烯敏感膜，主要功能区为其中的石墨烯电阻，在压力作用下石墨烯电阻会发生变化，通过金属电极将电信号传递到惠斯通电桥当中，使电桥平衡被打破，输出电压信号，通过测量电压即可反映出压力的大小。图 2 为惠斯通电桥，其中， $R_1$ 、 $R_3$  为可变电阻， $R_2$ 、 $R_4$  为石墨烯电阻， $V_i$  为电桥供电电压， $V_0$  为电压输出信号。

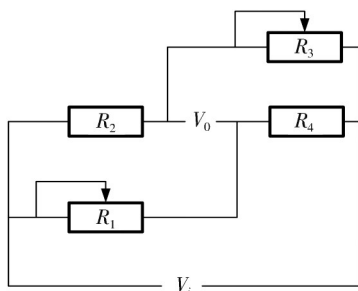


图 2 惠斯通电桥

Fig. 2 Wheatstone bridge

## 2 传感器结构设计

### 2.1 金属膜片结构设计

由于金属膜片是主要的承压结构，与外界环境直接接触，其变形是导致硅油体积改变的主要因素<sup>[13]</sup>，为此必须保证金属膜片在弹性范围内工作。为对标 Kulite 公司 HEM-375 型号传感器，传感器接头处采用 M10×1 螺纹设计，确定膜片整体半径为 5 mm。进行结构尺寸设计时，设置传感器的量程为 0~400 MPa，先运用薄板理论对膜片与基壳组合的外部结构承载能力进行估算，再通过有限元仿真验证，最终求得合理的膜片尺寸。

根据薄板理论<sup>[14]</sup>，圆形金属膜片受到厚度方向的均布载荷时，其任意位置径向应力  $\sigma_r$  与切向应力  $\sigma_\theta$  分别为

$$\begin{cases} \sigma_r = \frac{3p}{8h^2} [R^2(1+\mu) - r^2(3+\mu)], \\ \sigma_\theta = \frac{3p}{8h^2} [R^2(1+\mu) - r^2(1+3\mu)], \end{cases} \quad (1)$$

式中： $h$  为金属膜片的厚度； $\mu$  为材料泊松比； $r$  为任意金属膜片上点离圆心的距离； $R$  为圆形薄板与下方硅油接触区域的半径。

根据第四强度理论，等效应力为

$$\sigma = \sqrt{2(\sigma_r^2 + \sigma_\theta^2 + \sigma_z^2 - 2\sigma_r\sigma_\theta - 2\sigma_\theta\sigma_z - 2\sigma_r\sigma_z)}, \quad (2)$$

式中： $\sigma_z$  为垂直于中面的应力，根据薄板理论假设， $\sigma_z$  远小于平行于中面的应力分量，在此处忽略不计。

选取高强度弹簧钢 60Si<sub>2</sub>CrV 作为金属膜片材料，其具有良好的长期稳定性，经过热处理工艺后可以在高达 350 °C 的高温下工作，屈服强度可以达到 1 665 MPa。根据 GB/T 1222—2016，其材料属性如表 1 所示。

表 1 60Si<sub>2</sub>CrV 材料属性

Tab. 1 Material properties of 60Si<sub>2</sub>CrV

参数	数值
杨氏模量/GPa	205.8
泊松比	0.28
抗拉强度/MPa	1 860
屈服强度/MPa	1 665

当安全系数取 1.3<sup>[15]</sup> 时，60Si<sub>2</sub>CrV 弹簧钢的许用应力为 1 200 MPa。由式(1)及式(2)可知，当  $r=aR$  时，有

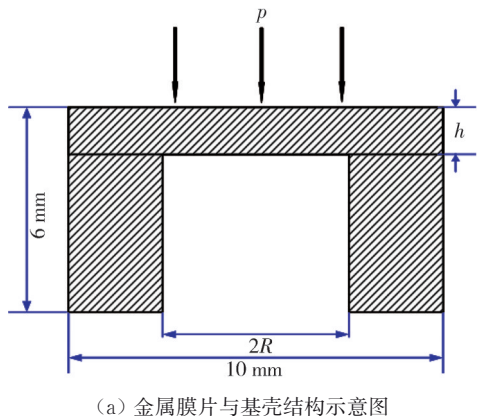
$$\sigma = \frac{3pR^2}{8h^2} \sqrt{6.416a^4 - 4.1984a^2 + 0.8192}。 \quad (3)$$

此时，应力  $\sigma$  可当作系数  $a$  的函数，当  $a=1$  时，即膜片边缘处应力  $\sigma$  达到最大值。在弹性范围之内，当传感器量程为 0~400 MPa 时， $R/h$  的值最大可以达到 2.185。根据薄板定义<sup>[14]</sup>

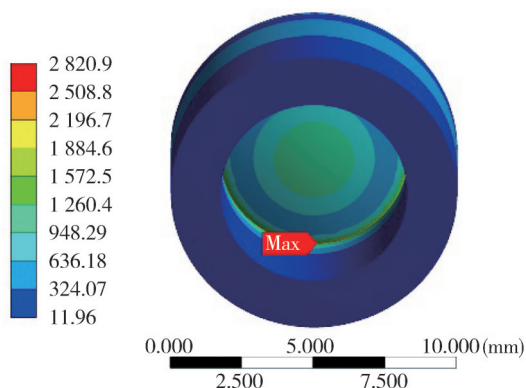
$$2.5 < R/h < 40。 \quad (4)$$

$R/h$  的值已经超出了此范围，因此需要进一步仿真分析  $R/h$  的值与结构最大等效应力的关系。将膜片厚度确定为 1.5 mm，根据  $R/h$  的值更改半径尺寸，以求得不同值下结构应力的最大值。在传感器的金属膜片上方施加 400 MPa 压力，并将传感器基壳周围固支，图 3(a) 为结构简图。当  $R/h$  的值为 2.185 时得到如图 3(b) 的应力云图，此时等效应力

最大可达到2 820.9 MPa,这是由于金属膜片与下方基壳连接处有明显应力集中现象而造成的。改进方法为在金属膜片与基壳接合处增加半径为1.5 mm的圆角以降低应力集中效应,使此处应力均匀分布。



(a) 金属膜片与基壳结构示意图



(b) 400 MPa压力下结构应力云图

图3 金属膜片的结构示意图及应力云图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure and stress cloud diagram of the metal diaphragm

设计多组  $R/h$  的值并求取膜片结构的最大等效应力,如图4所示。

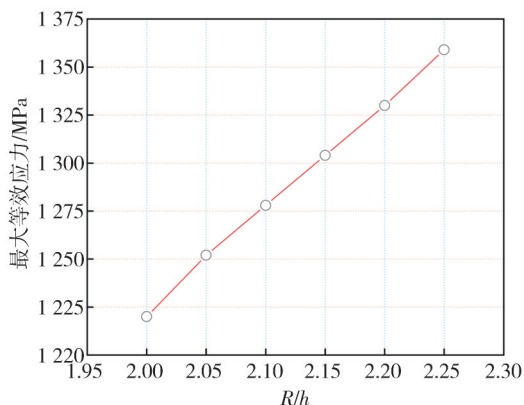


图4  $R/h$  的值与最大等效应力关系图

Fig. 4 Diagram of the value of  $R/h$  versus the maximum equivalent force

由图4可以看出,当  $R/h$  取2.1时,最大等效应力与60Si<sub>2</sub>CrV材料的许用应力相近,为最优值。

图5显示最优值设计中的最大应力为1 280 MPa,满足材料要求。继续增大载荷为500 MPa时,最大应力为1 420 MPa,此时应力仍在材料屈服强度之内,因此传感器可以承受500 MPa的过载。

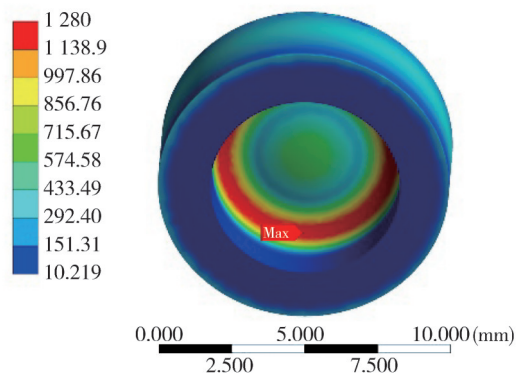


图5 400 MPa压力下改进结构的应力云图

Fig. 5 Improved structural stress cloud at 400 MPa pressure

## 2.2 内部结构设计

金属膜片与密封腔内的硅油直接接触,在受到压力作用后,金属膜片产生变形使得密封腔体积减小,腔内的硅油被压缩并产生压力作用在圆筒结构上,圆筒结构的壁面产生位移,致使圆筒外壁上的石墨烯敏感膜片发生应变,应变大小即能反映测量的压力。

要想得知圆筒结构外壁面上应变的大小,需要得知硅油压力。根据液体体积弹性模量  $E_v$  的定义<sup>[13]</sup>,有

$$E_v = \frac{\Delta p}{\Delta V} V_0 \quad (5)$$

式中:  $\Delta p$  为腔体内硅油的压力;  $\Delta p$  与  $V_0$ ,  $\Delta V$  直接相关;  $V_0$  为密封腔原始体积;  $\Delta V$  为测量压力与硅油压力共同作用下密封腔体积的改变量。由于硅油压力影响圆筒外壁面应变,而圆筒结构尺寸对硅油压力也有一定影响,因此,需要探究测量压力作用下的圆筒尺寸结构与圆筒外壁面应变大小的关系,并确定圆筒结构尺寸对固有频率的影响,从而确定合适的圆筒尺寸。

### 2.2.1 圆筒结构尺寸对圆筒外壁面最大应变的影响

由于圆筒为全封闭结构,内部充满硅油,可采用传感器无引线安装方法<sup>[16]</sup>,将石墨烯敏感膜安装在金属圆筒外侧,根据仿真结果得出的主应力方向来确定电阻安装方向。创建的几何模型由两部分组成,分别为由金属膜片、基壳、圆筒结构构成的固体部分以及硅油组成的流体部分,在两

者之间添加流固耦合,并设置硅油表面为流固耦合交界面。三维模型如图 6(a)所示。圆筒结构采用钛合金加工而成,表 2 为具体参数。网格采用结构化网格类型,并对传感器敏感元件所在位置进行了局部加密处理,网格质量均高于 0.3,满足一般工程计算精度要求,如图 6(b)所示。考虑到加工难度,固定圆筒结构的内径为 1 mm,在传感器模型顶部施加 400 MPa 压力载荷。

表 2 钛合金材料属性  
Tab. 2 Material properties of Titanium alloy

参数	数值
杨氏模量/GPa	96
泊松比	0.36
屈服强度/MPa	930

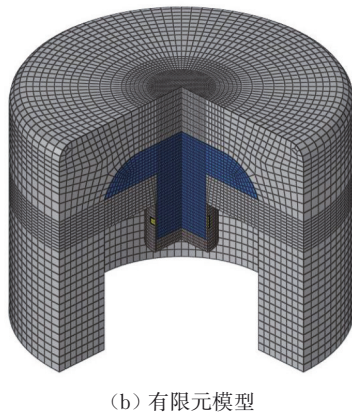
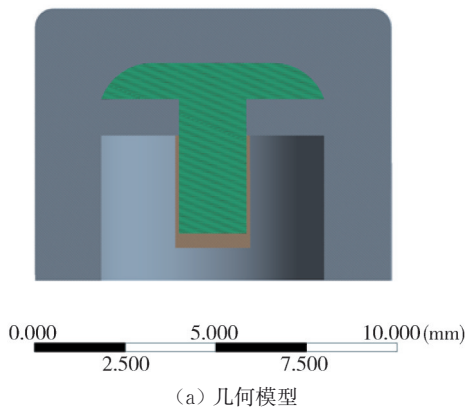


图 6 传感器流固耦合几何模型  
Fig. 6 Fluid-structure interaction geometry of the sensor

由于敏感元件需加工在圆筒结构外壁面上,其应变与外壁面应变相等,需要求得外壁面的应力分布,以明确加工的位置以及方向。图 7 给出圆筒外壁面主应力方向示意图,可以看到最大主应力的方向沿着圆筒外壁周向,圆筒外壁的周向应变较其他方向更大。更改圆筒尺寸,得到圆筒外壁面最大应变与圆筒壁厚和圆筒长度的关系如

图 8 所示。由图 8 可以看出,同一壁厚下的最大周向应变随着圆筒结构长度的增加先上升后下降,厚度 0.08 mm,长度 1.2 mm 对应的最大周向应变最大,而相同长度下圆筒壁厚越小,对应外壁面最大应变越大。

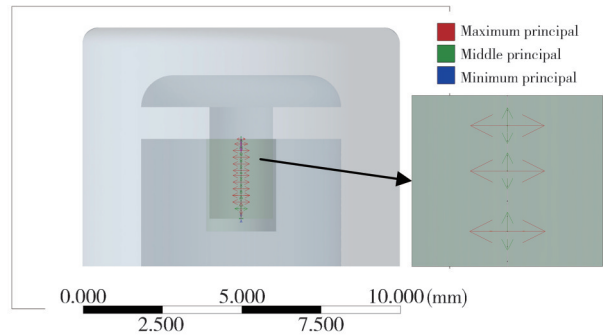


图 7 圆筒外壁面主应力方向示意图  
Fig. 7 Schematic diagram of the direction of principal stress on the outer wall of the cylinder

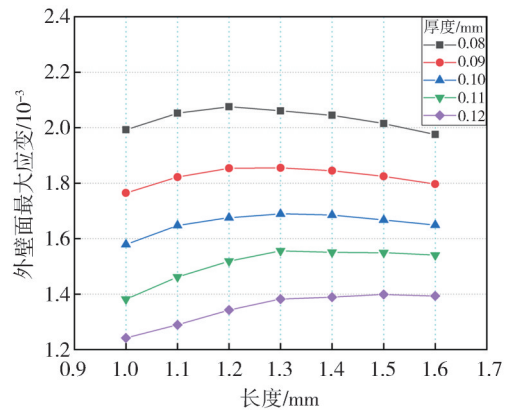


图 8 不同厚度下圆筒结构长度与最大应变的关系  
Fig. 8 Cylinder structure length and maximum strain at different thicknesses

### 2.2.2 圆筒结构尺寸对固有频率的影响

传感器的固有频率是重要的动态特性指标之一,它决定了传感器的适用范围。对于伴随有大体积液体的结构来说,固有频率会有所降低,因此需要对流固耦合结构进行固有频率仿真分析来判断硅油填充是否对传感器固有频率产生影响。

对于上述流固耦合结构进行模态分析,将液体模型定义为声学区域,固体部分为结构区域,流固耦合交界面选择流体模型与固体结构接触表面,压力传感器外壁面施加固定约束,求解类型设置为非对称。对不同圆筒尺寸下的流固耦合固有频率进行求解,并设计相同参数固体代替硅油的等效结构进行对比。表 3 为传感器等效结构与流固耦合结构固有频率数据的对比,流固耦合结构的固有频率明显较低,证明对传感器进行流固

耦合模态分析十分必要。

表3 等效结构与流固耦合结构固有频率仿真数据

Tab. 3 Natural frequency simulation data of equivalent structures and fluid-structure interaction structures

阶数	等效结构/kHz	流固耦合结构/kHz
1	133.35	127.07
2	163.88	135.88
3	183.47	168.19
4	292.21	182.81
5	300.51	201.60
6	311.94	274.40

图9给出传感器的一阶振型,从图中可以看出,传感器主要振动部位为承载石墨烯电阻的圆筒结构,一阶振动形式为圆筒结构弯曲振动,其振动形式会对测量数据产生影响,需要着重关注。

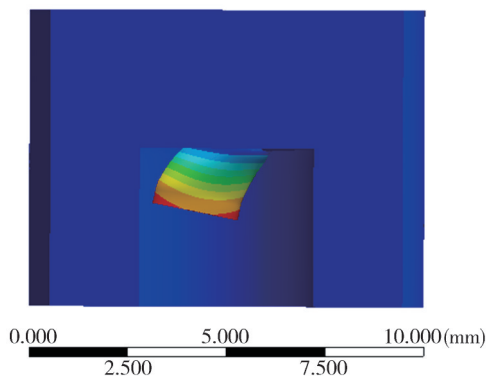


图9 传感器一阶振型

Fig. 9 The first-order mode shape of the sensor

图10为5种厚度情况下圆筒结构长度与固有频率的关系图。由图10可以看出,相对于筒壁厚度,圆筒结构长度的改变对整体固有频率的影响更明显,长度增大伴随着固有频率的下降。越厚的壁面代表固有频率越大,但改变筒壁厚度较改变圆筒长度对整体固有频率的影响较小。当圆筒结构长度为1.2 mm,壁厚为0.08 mm时,结构固有频率达到了127 kHz,而此时外壁面应变最高。综合考虑,此尺寸下的传感器圆筒结构最合适。

### 2.2.3 传感器结构灵敏度与线性度的计算

相同载荷下更大的应变能够提高传感器结构的灵敏度,根据上述分析,选择长度为1.2 mm,壁厚为0.08 mm圆筒结构加工的传感器,在400 MPa压力作用下,圆筒外壁面应变最大,达到 $2082 \mu\epsilon$ 。由于石墨烯敏感膜很薄,对圆筒结构的应变影响可以忽略不计。在石墨烯敏感膜安装时加上一定的应变,使得传感器的电阻值能够处于随应变线性变化的区域<sup>[17]</sup>。在石墨烯电阻灵敏度不变的情况下,单位压力变化对应石墨烯的应变

越大,传感器灵敏度越高,根据计算,此时传感器结构的灵敏度为 $5.205 \mu\epsilon/\text{MPa}$ 。

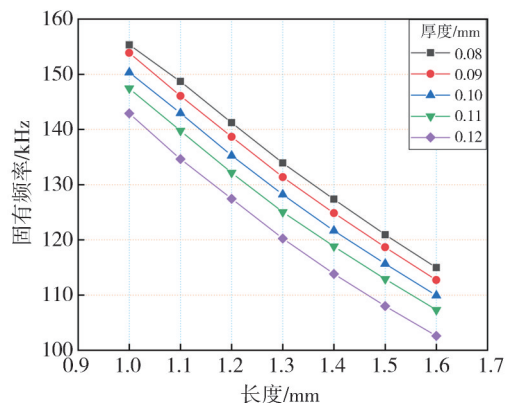


图10 不同厚度下圆筒结构长度与固有频率的关系

Fig. 10 Cylinder structure length and natural frequency at different thicknesses

在石墨烯的电阻值随着应变线性变化的区间内,压力 $p$ 与石墨烯应变必须保持良好的线性关系才能让传感器具有高线性度。当载荷达到最大时,圆筒在上述尺寸下筒壁仍应符合小挠度变形原则,即小于筒壁厚度的20%。此尺寸下当压力为400 MPa时,根据模拟结果,圆筒壁面挠度的最大值为0.007 5 mm,达到筒壁厚度的9.375%,符合小挠度理论要求。图11为圆筒外壁面最大周向应变与压力的关系图。

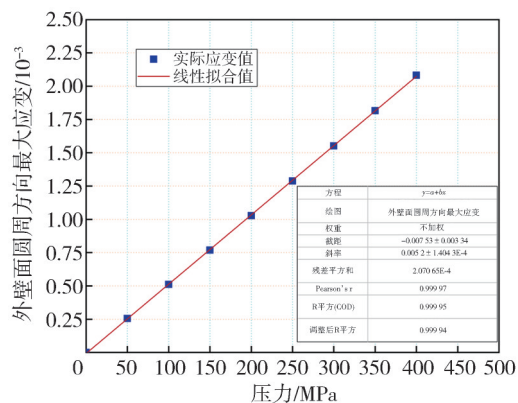


图11 圆筒外壁面最大周向应变与压力的关系

Fig. 11 The relationship between the maximum circumferential strain and pressure on the outer wall of the cylinder

由图11可以看出,采用圆筒状结构测量压力与石墨烯所在的外壁面应变时线性关系良好,模拟值与拟合曲线的最大差值仅为0.007 75,相对误差为0.37%。该结果表明传感器在兼顾灵敏度的同时,在宽量程范围内具有良好的线性关系( $R^2=0.99995$ )。

### 3 石墨烯安装的位置与方法

根据图 7,圆筒内壁由于受到硅油压力产生变形,外壁周向应力较其他方向最大,因此,传感器的石墨烯敏感膜应以周向进行安装。图 12 为圆筒外壁面周向应变与距离筒底位置的关系图,高应变区间为圆筒外壁面距离底面 0.42~0.62 mm 处,宽度为 0.2 mm,应变分布较为均匀,且应变大小均超过 2 000  $\mu\epsilon$ ,应将石墨烯敏感膜在此区域进行安装,这样可以在一定程度上避免安装误差。

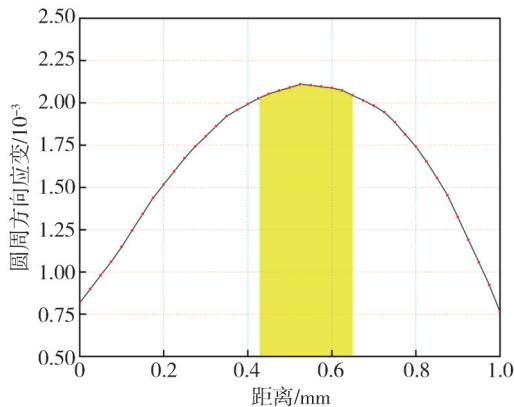


图 12 圆筒外壁面周向应变与位置的关系

Fig. 12 The relationship between circumferential strain and position of the cylinder exterior wall

选定好安装位置后,将金属筒壁外侧打磨至镜面光滑后在金属圆筒外壁上沉积一层氮化硼薄膜,然后将石墨烯电阻转移至圆筒外壁上,顶层再覆盖一层氮化硼<sup>[18]</sup>,其结构示意图如图 13 所示。



图 13 石墨烯敏感膜结构示意图

Fig. 13 Schematic diagram of graphene-sensitive membrane structure

石墨烯敏感膜采用氮化硼作为石墨烯的衬底,使得石墨烯与外界空气完全隔离。采用氮化硼作为石墨烯的衬底能够提高石墨烯的电子迁移率,而顶层氮化硼则能够为石墨烯提供保护<sup>[19]</sup>。金属电极布置在压敏膜的两侧,石墨烯比氮化硼略窄并与电极相连,再将金属电极接入惠斯通电桥,从而形成完整电路。根据关系进行数据处

理,最终输出测量压力值。

### 4 结 论

本文对一种新型结构充油压力传感器进行了理论与仿真分析,并采用流固耦合的方法来明确圆筒状元件结构尺寸对外壁面最大应变以及整体结构固有频率的影响。经计算,长度 1.2 mm,筒壁厚度 0.08 mm 规格的传感器圆筒外壁应变最大,该充油结构压力传感器能够适应高频高压冲击压力测量的需求,并且具有以下优点:

1) 传感器能在 0~400 MPa 压力范围内正常工作,并且在 500 MPa 过载压力冲击下整体结构仍旧保持在弹性区间。

2) 敏感元件的大应变区域宽度为 0.2 mm,此区域内应变可以达到 2 082  $\mu\epsilon$ ,传感器固有频率达到 127 kHz。

3) 传感器结构线性度良好,结构相对线性误差为 0.37%。

#### 参考文献:

[ 1 ] 薛兆康, 国旗, 刘善仁, 等. 油气井下光纤光栅温度压力传感器[J]. 中国光学, 2021, 14(5): 1224-1230.  
XUE Zhaokang, GUO Qi, LIU Shanren, et al. Fiber bragg grating temperature and pressure sensor for oil and gas well [J]. Chinese Optics, 2021, 14(5): 1224-1230. (in Chinese)

[ 2 ] MIURA H, KHOO P L, KOBAYASHI M. Deformation-restricted forging of Mg-8Al alloy under high pressure [J]. Scripta Materialia, 2023, 224: 115113.

[ 3 ] LI Q, LIU H, JIANG S, et al. The effects of high pressure treatment on the structural and digestive properties of myoglobin [J]. Food Research International, 2022, 156: 111193.

[ 4 ] YANG C, BIAN G, YANG H, et al. Development of high hydrostatic pressure applied in pathogen inactivation for plasma [J]. PLoS One, 2016, 11(8): e0161775.

[ 5 ] NGUYEN LE D T, PIN S, ANJOURS D, et al. Design of a high pressure system for pulse radiolysis studies up to 400 MPa with flow regulation [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 299: 1-7.

[ 6 ] 韩博, 张晓志, 王超, 等. 新型大口径火炮全装药膛

- 内压力波问题研究[J]. 火炸药学报, 2007, 30(6): 54-57. (in Chinese)
- HAN Bo, ZHANG Xiaozhi, WANG Chao, et al. Research on chamber-pressure variation of a new large-caliber full-charge propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2007, 30(6): 54-57.
- [7] LEE C, WEI X, KYSAR J W, et al. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene[J]. Science, 2008, 321(5887): 385-388.
- [8] SENESKY D G, JAMSHIDI B, CHENG K B, et al. Harsh environment silicon carbide sensors for health and performance monitoring of aerospace systems: A review [J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(11): 1472-1478.
- [9] 张海坤, 王俊强, 康裕, 等. 瞬态超高温MEMS石墨烯温度传感器设计[J]. 电子元件与材料, 2023, 42(3): 314-319.
- ZHANG Haikun, WANG Junqiang, KANG Yu, et al. Design of transient ultra-high temperature MEMS graphene temperature sensor [J]. Electronic Components and Materials, 2023, 42(3): 314-319. (in Chinese)
- [10] ZENG S M, TANG C, HONG C, et al. A novel high-temperature pressure sensor based on graphene coated by  $\text{Si}_3\text{N}_4$  [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3): 2008-2013.
- [11] WANG J Q, XIE C, LI M, et al. Highly sensitive pressure sensor based on h-BN/Graphene/h-BN heterojunction and Cu-Sn solid-liquid interdiffusion bonding [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2022, 69(8): 4521-4526.
- [12] 王峰, 谭晓兰, 张敏亮. 压阻式微压力传感器结构参数设计[J]. 自动化仪表, 2013, 34(3): 83-86.
- WANG Feng, TAN Xiaolan, ZHANG Minliang. Design of the structural parameters for piezoresistive micro pressure sensor [J]. Process Automation Instrumentation, 2013, 34(3): 83-86. (in Chinese)
- [13] 付敬奇, 范茂军, 单翌阳, 等. 400 MPa压阻式压力传感器[J]. 传感器技术, 1995, 14(1): 13-16.
- FU Jingqi, FAN Maojun, SHAN Yiyang, et al. 400 MPa F. S. piezoresistive pressure transducer [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 1995, 14(1): 13-16. (in Chinese)
- [14] 徐芝纶. 弹性力学简明教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018.
- [15] LI X, YANG Y, ZHANG W, et al. An FBG pressure sensor based on spring-diaphragm elastic structure for ultimate pressure detection [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(3): 2213-2220.
- [16] 董志超, 雷程, 梁庭, 等. SOI高温压力传感器无引线倒装式封装研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(11): 65-68.
- DONG Zhichao, LEI Cheng, LIANG Ting, et al. Research on leadless flip chip packaging of SOI high temperature pressure sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2021, 40(11): 65-68. (in Chinese)
- [17] 王燕山, 张梅菊, 刘德峰. 石墨烯柔性压力/应变传感器的研究进展[J]. 测控技术, 2021, 40(11): 39-47.
- WANG Yanshan, ZHANG Meiju, LIU Defeng. Research program of graphene flexible pressure/strain sensors [J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(11): 39-47. (in Chinese)
- [18] 谢长征, 王俊强, 李孟委. 氮化硼/石墨烯/氮化硼异质结构温度传感器[J]. 舰船电子工程, 2022, 42(9): 200-204.
- XIE Changzheng, WANG Junqiang, LI Mengwei. Boron nitride/graphene/boron nitride heterostructure temperature sensor [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42(9): 200-204. (in Chinese)
- [19] LI M, WU C, ZHAO S, et al. Pressure sensing element based on the BN-graphene-BN heterostructure [J]. Applied Physics Letters, 2018, 112(14): 143502.