

液态金属泡沫柔性压力传感器设计及试验*

张东光¹, 王鑫鑫¹, 杨嘉怡², 王志民¹, 吴亚丽¹, 熊晓燕¹

(1. 太原理工大学机械与运载工程学院 太原, 030024) (2. 西安科技大学计算机科学与技术学院 西安, 710054)

摘要 采用低弹性模量且具有高介电常数的材料作为电容式压力传感器的介电层, 是一种提高传感器灵敏度与初始电容信号的理想方法, 然而这 2 个材料特性往往相互冲突。针对这一问题, 提出了一种液态金属弹性体泡沫, 其具有较低的弹性模量(10.2 kPa)、较强的可压缩性(70%应变)与高介电常数(5.5~20.9)。以该泡沫作为介电层, 并设计带有屏蔽层的柔性电极, 研制了一种高灵敏度、大初始电容信号的柔性电容式压力传感器。试验结果表明, 该传感器灵敏度高达 0.36 kPa^{-1} , 响应/恢复速度快($< 49 \text{ ms}$), 迟滞低(8.7%), 同时可检测低至 4.9 Pa 的微小压力, 具有良好的稳定性与可靠性。此外, 通过弛张筛筛板弯曲挠度变化测试验证了所研发传感器的有效性, 与激光位移传感器的测量结果对比表明, 该柔性压力传感器可准确检测弛张筛筛板弯曲挠度的变化。

关键词 液态金属; 泡沫; 传感器; 弛张筛; 挠度

中图分类号 TP212; TH393

引言

压力传感器是一种将压力信号转换为电信号的电子设备, 根据传感机制可分为压阻式、压电式、摩擦式和压容式。其中, 电容式压力传感器由于其设计简单、抗干扰能力强、不依赖于温度、低功耗和高稳定性, 广泛应用于电子皮肤、机器人、人机交互和生物医学设备等领域。

柔性平行板电容式压力传感器由夹着柔性介电层的 2 个电极组成, 通过外界压力压缩介电层, 减小极板之间的距离, 导致电容信号的变化。灵敏度是电容式压力传感器的关键性能指标, 通常定义为单位压力下的电容变化率。由于在这种定义方式下具有低初始信号的传感器可以变相地获得较高的灵敏度, 因此本研究着力寻找同时具有较大的初始电容信号与高灵敏度的理想电容式压力传感器, 以满足低压检测($< 10 \text{ kPa}$)的需求。

减小介电层的弹性模量是获得高灵敏度的有效方法。利用空气囊微结构(例如: 金字塔^[1]、莲花微结构^[2]、玫瑰^[3]、粗糙纸表面^[4]以及弹性体泡沫^[5])可以有效降低介电层的弹性体模量, 且这些结构在变形过程中空气被置换, 可有效提高介电常数。弹性体泡沫是一种易于制备的空气囊微结构, 但因其具有较低的初始介电常数, 导致初始电容信号较小。

因此, 制备高介电常数的弹性体泡沫是一种实现较大初始电容信号和高灵敏度的理想方法。

将碳质颗粒添加到弹性体泡沫中会增大介电常数。文献[6]提出了一种基于填充导电炭黑粒子的复合泡沫材料的柔性电容传感器, 其在低压范围内($< 0.2 \text{ kPa}$)具有较高的灵敏度(0.25 kPa^{-1}), 但是碳质填料本质上是刚性的, 较大地增加了泡沫的弹性模量。相比之下, 液态金属作为一种柔性颗粒, 极易分散在弹性体(通常是聚二甲基硅氧烷 PDMS 或 Ecoflex 00-30)中, 形成具有高介电常数(60)、高变形性、高韧性和拉伸性(超过 500%)的液态金属弹性体复合材料^[7]。

本研究通过在液态金属弹性体中混合和溶解糖颗粒制备液态金属弹性体泡沫, 这种方式具有制备工艺简单、低成本和环保的优点。所制备的泡沫具有良好的柔性, 且其介电常数随应变变化显著。笔者以液态金属弹性体泡沫作为介电层, 设计带有屏蔽层的柔性电极, 研制了一种高灵敏度、大初始电容信号、快响应时间的柔性压力传感器。采用试验分析与有限元仿真的方法研究了传感器的工作机理, 并进行了压力试验测试。由于该柔性电容式压力传感器具有高灵敏度和快响应时间的特点, 可以准确检测弛张筛筛板弯曲挠度变化。

* 国家自然科学基金资助项目(51775364, 51805356, 62101432); 山西省科技重大专项资助项目(20181102009); 山西省省筹资金资助回国留学人员科研项目(2020-036)

收稿日期: 2021-08-31; 修回日期: 2022-02-17

1 传感器制备与试验方法

1.1 试验材料

试验材料包括: Ecoflex 00-30 溶液 (Smooth On, A, B 试剂混合质量比为 1:1); 液态金属 (共晶镓锡合金); 糖颗粒 (粒径 ≈ 1 mm)。

1.2 传感器的制备

平行板电容式压力传感器由中间介电层与上下 2 端电极板构成。通过糖模板法制备液态金属弹性体泡沫作为中间介电层, 该方法具有加工简单、成本低、孔径和孔隙率可调等优点, 并设计柔性电极板, 组装得到电容式压力传感器制备流程如图 1 所示。具体过程如下: ①采用平行搅拌器 (HMV600, 中国) 以 1 800 r/min 混合 Ecoflex 00-30 溶液的 A, B 部分 2 min, 得到 Ecoflex 00-30 弹性体溶液; ②将弹性体溶液与共晶镓锡合金 (EGaIn) 按设定体积比例 (10:0, 8:2, 6:4) 在搅拌器中以 1 800 r/min 混合 2 min, 得到液态金属弹性体溶液; ③将糖颗粒与液态金属弹性体溶液手动搅拌混合 2 min, 其中糖颗粒体积占比 60%, 然后倒入模具中, 70 °C 下固化 12 h; ④用水溶解糖颗粒得到液态金属弹性体泡沫; ⑤将柔性电极放置到介电层的上下两端, 得到电容式压力传感器。

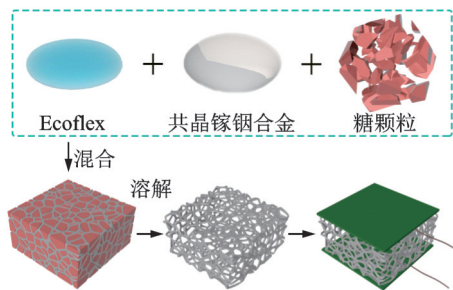


图1 柔性电容式压力传感器制备流程

Fig.1 Preparation process of flexible capacitive pressure sensor

1.3 表征与测试方法

采用显微镜 (JSM-IT500a, 日本) 对液态金属弹性体泡沫微观结构进行扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, 简称 SEM) 与能量色散谱仪 (energy dispersive spectrometer, 简称 EDS) 成像。

压力传感器的机械性能与传感性能主要通过电子万能试验机 (CMT6103, 中国)、LCR 测试仪 (HIOKI IM3536, 日本) 等完成。将传感器放置到万

能试验机的下端压头, 控制上端压头的位移, 将压力施加到传感器上, 采用 LCR 测试仪实时测量传感器的电容信号。

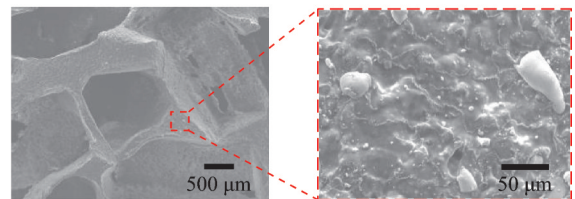
弛张筛模型中使用的信号发生器为 DH1301, 功率放大器为 DH5874, 激振器为 DH40500。将柔性压力传感器贴附到柔性筛板最大的弯曲挠度处, 在筛板弯曲过程中压缩传感器产生电容信号的变化来进行挠度测试, 并与激光位移传感器 optoNCDT LD1607-200 通过 TELEDYNE LECROY 示波器测量的挠度值进行对比。

2 传感器的形貌与结构表征

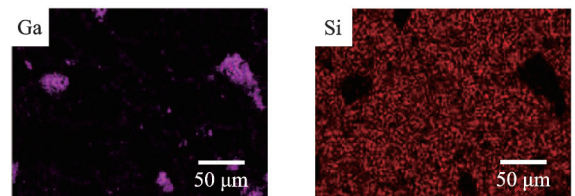
图 2 为液态金属弹性体泡沫形貌与结构表征。如图 2(a) 所示, 液态金属弹性体泡沫长宽高为 20 mm \times 20 mm \times 10 mm, 具有互相连通的多孔结构。为了更加直观地观察微孔结构的形貌, 采用 SEM 进行测试, 如图 2(b) 所示, 微孔尺寸与糖颗粒的粒径一致, 约为 1 mm。图 2(c) 为泡沫壁 SEM 图, 可以看到液态金属液滴包裹在弹性体基质中, 粒径约为 35 μ m。通过 EDS 分析图揭示了弹性体元素硅和镓的分布, 如图 2(d) 所示。



(a) 液态金属弹性体泡沫
(a) Liquid metal elastomer foam



(b) 微孔结构SEM图 (c) 泡沫壁SEM图
(b) SEM image of micropore structure (c) SEM image of foam wall



(d) 液态金属弹性体泡沫的EDS分析图
(d) EDS analysis chart of liquid metal elastomer foam

图2 液态金属弹性体泡沫形貌与结构表征

Fig.2 Morphology and structure characterization of liquid metal elastomer foam

平行板电容式传感器的边缘效应严重限制其检测精度^[8]。因此,设计了如图3所示的柔性电容式压力传感器电极与整体实物图。图3(a)所示的带有屏蔽层的柔性电极,材料为聚酰亚胺。图3(b)为电极结构图,屏蔽层与电极面积同,位于电极上方,衰减极板边缘向外发散的电场,减小测量过程中的边缘效应,提高检测精度^[9]。通过在液态金属弹性体泡沫的上下两侧放置柔性电极,组成柔性电容式压力传感器,如图3(c)所示。

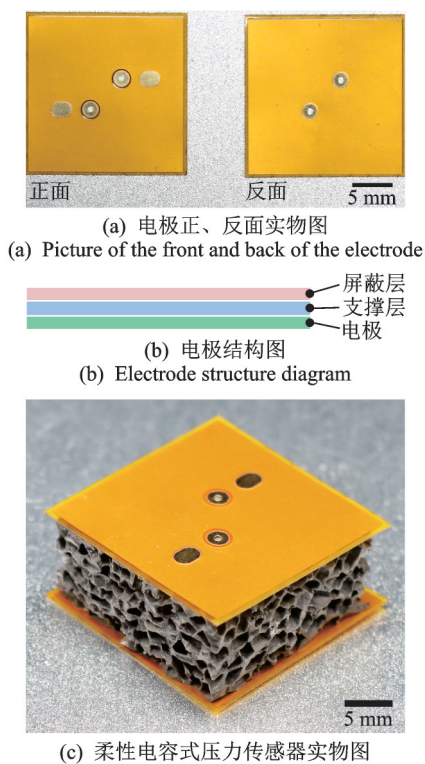


图3 柔性电容式压力传感器电极与整体实物图

Fig.3 Flexible capacitive pressure sensor electrode and overall physical picture

3 传感器原理与性能测试

3.1 传感器原理

平行板电容式传感器的电容为

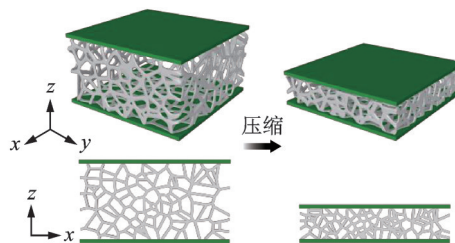
$$C = \epsilon_0 \epsilon_r A / d \quad (1)$$

其中: ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为介电层的相对介电常数(无量纲单位); A 为电极相对面积; d 为电极之间的距离。

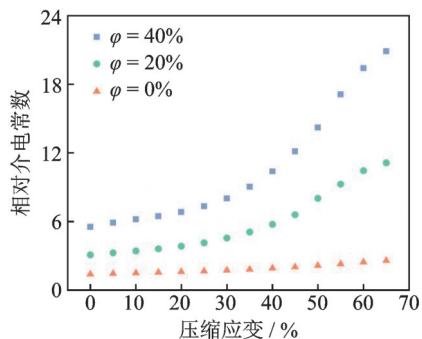
该柔性压力传感器的工作原理如图4所示。图4(a)中,在不施加压力的情况下,液态金属弹性体泡沫作为空气与液态金属弹性体的结合,具有较小的相对介电常数 ϵ_r ;施加压力载荷后,液态金属弹

性泡沫被压缩,一方面两电极之间的距离减小,另一方面微孔结构闭合,排出空气介质,泡沫的 ϵ_r 增加,导致电容 C 随着压力的增加而不断增大。

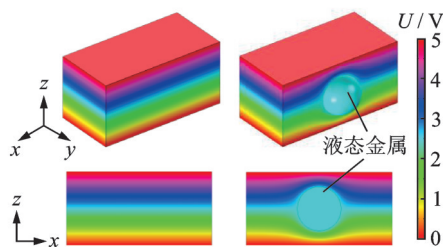
复合材料的介电常数一般与填充相浓度有关,填充浓度越高,介电常数越大。如图4(b)所示,在未压缩状态下,随着填充液态金属的体积分数 φ 的增大,液态金属弹性体泡沫的 ϵ_r 从1.4增大到5.5,使传感器的初始电容信号值增大了近4倍。该趋势表明液态金属对泡沫弹性体 ϵ_r 具有良好的增益效果,使传感器的灵敏度与初始电容信号有效提高。同时,有限元仿真进一步证明,液态金属液滴的填充有效增大了泡沫的 ϵ_r 。在图4(c)所示的仿真模型中,液态金属液滴作为一个等势体在泡沫基体中形成等势层,这种等势层减小了电极间的有效距离,增大了 ϵ_r 。



(a) 传感器工作机理图
(a) Sensor working mechanism diagram



(b) $\varphi = 0\%$, 20%, 40%的液态金属弹性体泡沫 s - ϵ_r 曲线
(b) $\varphi = 0\%$, 20%, 40% liquid metal elastomer foam s - ϵ_r curve



(c) 传感器压缩机理的有限元仿真
(c) Finite element simulation of sensor pressure-capacitance mechanism

图4 传感器工作原理

Fig.4 Analysis of the working principle of the sensor

3.2 机械性能

液态金属弹性体泡沫的三维多孔结构与液态金

属良好的柔性使其具有优异的机械性能。液态金属弹性体泡沫的机械性能见图5。如图5(a)所示,泡沫可以轻松地压缩变形60%以上,还可以在进行了较大程度的弯曲、拉伸后,完全恢复其初始形状。

采用万能电子试验机测量不同液态金属体积分数($\varphi = 0\%, 20\%, 40\%$)的弹性体泡沫应变-应力关系曲线。如图5(b)所示,泡沫的卸载曲线可以恢复到初始点,表明压缩后泡沫形状完全恢复,无塑性变形。如图5(c)所示,液态金属的填充增大了泡沫的弹性模量,其中, $\varphi = 40\%$ 的泡沫弹性模量为10.2 kPa,仍远低于纯Ecoflex 00-30弹性体(80 kPa)。

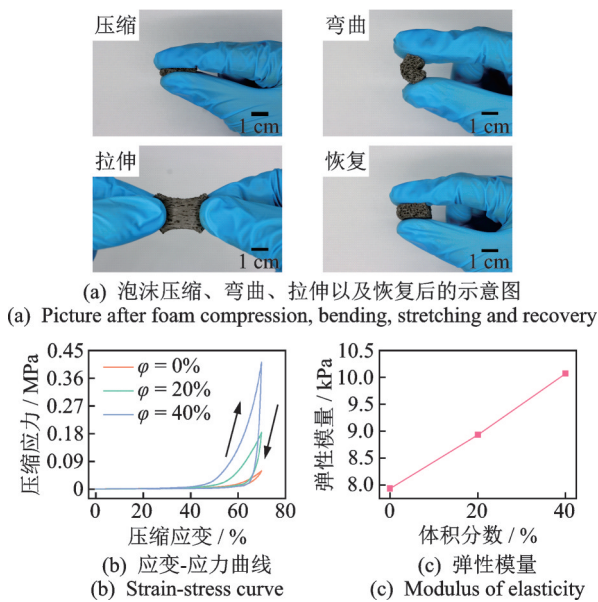


图5 液态金属弹性体泡沫的机械性能
Fig.5 Mechanical properties of liquid metal elastomer foam

3.3 传感性能

电容信号与介电常数曲线如图6所示。图6(a)描述了 $\varphi = 0\%, 20\%, 40\%$ 传感器电容和应力之间的关系。可以看到,随着压力的增大,电容信号先急剧上升,后变得较为缓慢,这是由于施加压力增大到一定值,液态金属弹性体泡沫气孔闭合, ϵ_r 不再增加(图6(b))。 φ 越大,传感器初始电容信号越大(0.47~2.1 pF),证明了液态金属的填充对初始电容信号的增益效果,有效降低了噪声对传感器的影响。

灵敏度是传感器性能的重要参数之一,代表传感器的对外界压力的敏感程度,反应了传感器的精度及有效性^[10]。电容式压力传感器的灵敏度公式为

$$S = \frac{\Delta C / C_0}{\Delta p} \quad (2)$$

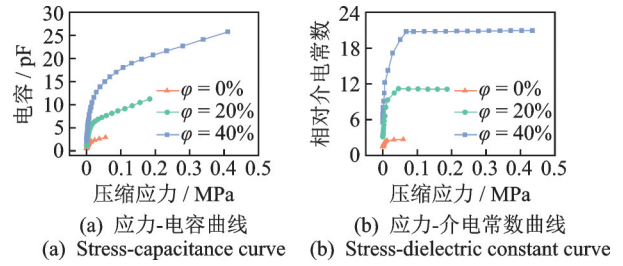


图6 电容信号与介电常数曲线

Fig.6 Capacitance signal and permittivity curve

其中: ΔC 为施加压力后传感器的电容变化量; C_0 为初始电容值; $\Delta C / C_0$ 为电容变化率(无量纲单位); Δp 为压力变化量。

灵敏度与线性度如图7所示。图7(a)中, $\varphi = 40\%$ 的传感器在较小的应力范围内(< 10 kPa)的灵敏度高达 0.36 kPa^{-1} ,是纯弹性体泡沫传感器的1.9倍。因此,将采用 $\varphi = 40\%$ 的传感器进行后续试验。

线性度值越小,表明拟合曲线与实测曲线偏差越小^[11]。如图7(b)所示,对传感器的线性度进行了分析。结果表明,在 $0 \sim 20$ kPa, $20 \text{ kPa} \sim 100$ kPa, $100 \text{ kPa} \sim 410$ kPa 3个压力范围内,柔性压力传感器的线性度分别为 8.2% , 6.6% 和 2.4% ,拟合曲线与实测曲线偏差较小。

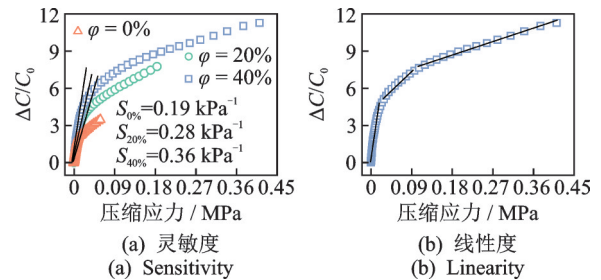


图7 灵敏度与线性度

Fig.7 Sensitivity and linearity

迟滞性越小,表明传感器在相同受压条件下加载和卸载周期内的输出差异越小。多孔泡沫结构降低了介电层的粘弹性,使得柔性传感器迟滞误差较小。在压缩应变为 50% 与 30% 时,该传感器的迟滞误差分别为 8.7% 与 3.1% ,低于文献^[12-13]。传感器的迟滞特性如图8所示。

通过在传感器上加/卸载 20 g 砝码测量传感器的响应与恢复特性。响应时间与最小压力测量极限如图9所示。图9(a)中,传感器的响应时间与恢复时间均小于 49 ms ,远小于人体对压力的响应时间 400 ms 。

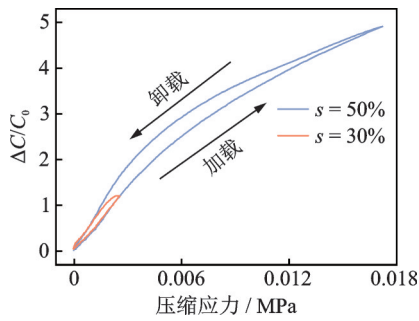
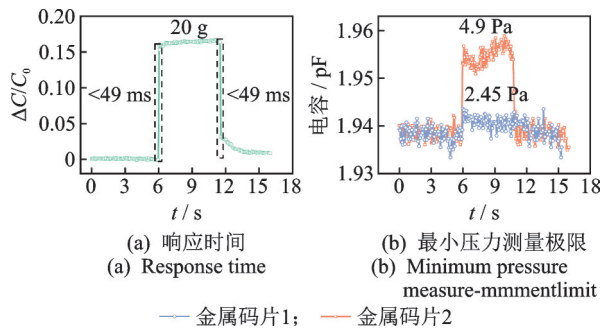


图 8 传感器的迟滞特性

Fig.8 Hysteresis characteristics of the sensor



(a) 响应时间 (a) Response time
(b) 最小压力测量极限 (b) Minimum pressure measurement limit

图 9 响应时间与最小压力测量极限

Fig.9 Response time and minimum pressure measurement limit

为了检测传感器的最小压力测量极限,将 0.1 g (2.45 Pa)的金属码片 1 与 0.2 g (4.9 Pa)的金属码片 2 置于传感器上方 5 s 后移开,如图 9(b)所示。结果表明:加载金属码片 1 后,传感器电容值增加了 0.002 pF,与噪声信号难以区分,无法实现有效测量;加载金属码片 2 后,传感器电容值增加了 1.8 pF,可以有效测量出 4.9 Pa 的微小压力。

相对标准偏差(relative standard deviation, 简称 RSD)通常用来表示分析测试结果的精密度,计算公式为

$$RSD = \frac{S}{\bar{x}} \times 100\% \quad (3)$$

其中:S 为标准偏差; \bar{x} 为平均值,当其小于 5% 时,表明测试数据的可靠性与稳定性。

为考察传感器的输出可靠性、稳定性和重复性,分别在不同应变(10%, 30%, 50%, 70%)、不同速率(5, 10, 30, 50 mm/min)下进行传感器的响应特性测试,以及在相同应变(50%)下进行 1 000 次循环测试。传感器稳定性测试如图 10 所示。

不同应变下传感器的电容变化率数值分析如表 1 所示。可以看到,幅值均值随应变逐渐增大,且相对标准偏差均小于 5%,表明了传感器的高稳定性和可重复性。

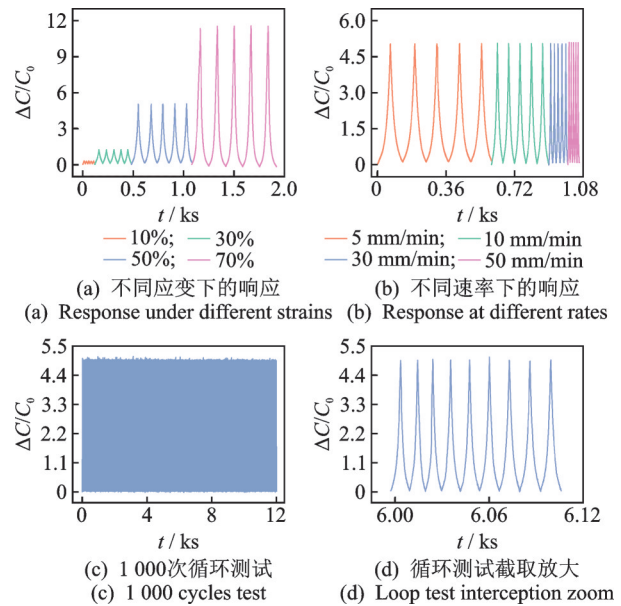


图 10 传感器稳定性测试

Fig.10 Sensor stability test

表 1 不同应变下传感器的电容变化率数值分析

Tab.1 Numerical analysis of the capacitance change rate of the sensor under different strains

应变/%	幅值均值	相对标准偏差/%
10	0.284 2	1.12
30	1.244 0	0.28
50	5.041 3	0.19
70	11.492 4	0.83

图 10(b)中,曲线的幅值均值为 5.053 3,相对标准偏差为 0.42%,证明传感器在不同速率下具有良好的稳定性。如图 10(c)所示,传感器在 1 000 次循环过程中电容变化率幅值的均值为 5.045 8,相对标准偏差为 0.73%。从图 10(d)可以看到,电容变化率曲线波形保持了良好的一致性,表明该传感器具有优异的可靠性和稳定性。

4 弛张筛筛板挠度测试

弛张筛是一种适用于高黏度、高含水和细粒物料筛分的设备^[14]。斜倒流筛板作为关键部件之一,通常由聚氨酯制成的,具有超弹性与一定的硬度。在弯曲与拉伸过程中,筛板的挠度发生变化,从而影响筛选能力和效率。因此,开展对筛板弯曲挠度测量试验与研究,对保障弛张筛稳定高效运行具有重要意义。

由于液态金属弹性体泡沫电容式压力传感器具有高灵敏度、快响应时间的特点,可以检测筛板弯曲

时的压力变化,实现弛张筛挠度测量。

图 11 为弛张筛筛板挠度的测试系统。如图 11(a) 所示,将信号发生器产生的信号通过功率放大器传输到激振器,以激振器作为弛张筛的动力源,选择柔性聚氨酯材料制备筛板,设计了一种弛张筛样机模型。将柔性压力传感器贴附在柔性筛板下方,放大图像如图 11(b) 所示。弛张筛工作时,筛板沿 y 方向向下弯曲,对柔性压力传感器施加向下的压力,采用 LCR 测试仪测量电容信号,通过标定电容信号与筛板弯曲挠度之间的关系来获取挠度值。同时,将激光位移传感器图 11(c) 放置到筛板下方 34 cm(零点位置),保持激光垂直照射到筛板中心最大弯曲挠度处。当筛板弯曲时,激光点向下移动,通过示波器捕获筛板弯曲挠度值,与柔性压力传感器测量的挠度值进行对比,验证柔性压力传感器挠度测量的准确性。

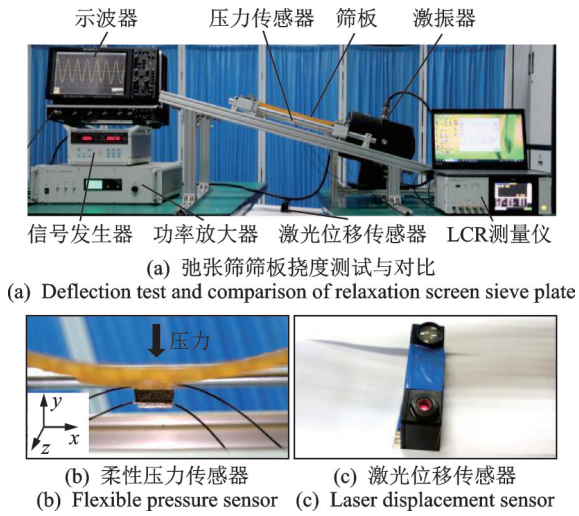


图 11 弛张筛筛板挠度的测试系统
Fig.11 Test system for deflection of sieve plate of flaccid sieve

挠度与电容变化率的标定如图 12 所示。图 12(a) 为筛板弯曲挠度的标定。将贴附柔性压力传感器的筛板试样放置在电子万能试验机上进行弯曲模拟试验。电子万能试验机记录时间与上端压头位移 Δy 关系的同时,LCR 测量仪记录时间 t 与传感器电容变化率 $\Delta C/C_0$ 的关系,以时间 t 为基准,即可得到 Δy 与 $\Delta C/C_0$ 的关系,如图 12(b) 所示。

图 12(c) 为筛板试样弯曲示意图,根据勾股定理得到筛板弯曲挠度为

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \left(\frac{L - \Delta y}{2}\right)^2} \quad (4)$$

其中: L 为筛板长度(30 cm); Δy 为试验机上端压头位移。

结合式(4)与 Δy 与 $\Delta C/C_0$ 的关系,得到挠度 Δx 与 $\Delta C/C_0$ 的关系,如图 12(d) 所示。可以看到,电容变化率随着筛板弯曲挠度的增大而增大。

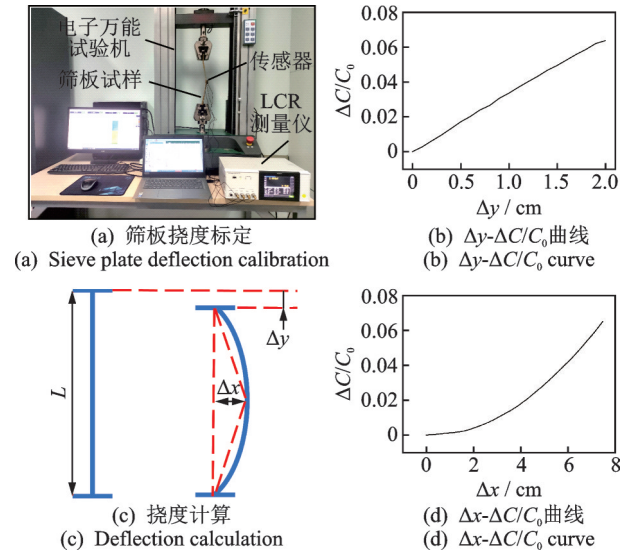


图 12 挠度与电容变化率的标定
Fig.12 Calibration of deflection and capacitance change rate

为了检测柔性压力传感器挠度测量效果,将激振器设定固定的振动频率(5 Hz),改变功率放大器的放大倍数(3~7 倍),实现筛板的弯曲挠度变化,采用柔性压力传感器与激光位移传感器进行对比测量。弛张筛不同功率放大倍数下的挠度测试如图 13 所示。图 13(a) 为压力传感器电容变化率与功率放大倍数之间的关系曲线。以图 12(d) 的标定曲线为基准,得到图 13(b) 中柔性压力传感器测量的挠度值。图 13(b) 中激光位移传感器测量的挠度值由示波器直接获取,可以看到 2 种传感器测量的挠度值随功率放大倍数的增大而增大。

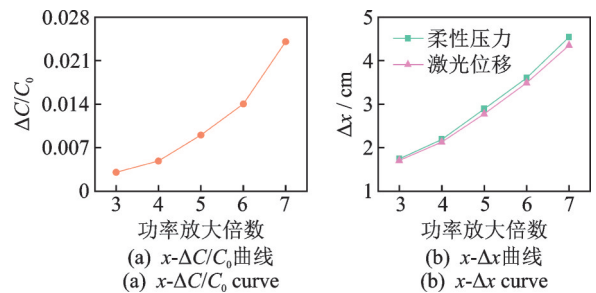


图 13 弛张筛不同功率放大倍数下的挠度测试
Fig.13 Deflection test of vibrating screen under different power magnifications

为了进一步验证柔性压力传感器挠度测量的准确性,笔者以激光位移传感器挠度测量值为参考基准,将柔性压力传感器与激光位移传感器挠度测量值进行对比,如表 2 所示,误差值均小于 5%。

表2 柔性压力传感器与激光位移传感器挠度测量值对比
Tab.2 Comparison of deflection measurement values of flexible pressure sensor and laser displacement sensor

功率放大 倍数	柔性压力传感器 挠度/cm	激光位移传感器 挠度/cm	相对 误差/%
3	1.74	1.71	1.72
4	2.19	2.13	2.71
5	2.89	2.78	3.11
6	3.60	3.49	3.15
7	4.54	4.35	4.36

5 结 论

1) 提出了基于液态金属弹性体泡沫的柔性电容式压力传感器,该传感器的介电层融合了泡沫结构低弹性模量与液态金属弹性体复合材料高介电常数的特性,实现了传感器的高灵敏度与大初始电容信号。通过数据分析与仿真模拟的方式研究了传感器的工作机理。

2) 机械性能测试结果表明,传感器具有良好的柔性及较低的弹性模量 10.2 kPa。传感性能测试结果表明,传感器灵敏度可以高达 0.36 kPa^{-1} 。同时,传感器展示出快速的响应与恢复时间 ($<49 \text{ ms}$) 与较低的迟滞性 (8.7%),可检测低至 4.9 Pa 的微小压力变化,具有良好的可靠性、稳定性和重复性。

3) 由于该柔性压力传感器具有高灵敏度与快速响应时间的特点,可以进行弛张筛板挠度检测,并通过不同放大倍数下的挠度检测试验,证明了传感器挠度检测的准确性与可靠性。

参 考 文 献

- [1] YANG J C, KIM J O, OH J, et al. Microstructured porous pyramid-based ultrahigh sensitive pressure sensor insensitive to strain and temperature [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2019, 11(21): 19472-19480.
- [2] WAN Y, QIU Z, HONG Y, et al. A highly sensitive flexible capacitive tactile sensor with sparse and high-aspect-ratio microstructures [J]. *Advanced Electronic Materials*, 2018, 4(4): 1700586.
- [3] WAN Y, QIU Z, HUANG J, et al. Natural plant materials as dielectric layer for highly sensitive flexible electronic skin[J]. *Small*, 2018, 14(35): 1870161.
- [4] LEE K, LEE J, KIM G, et al. Rough-surface-enabled capacitive pressure sensors with 3D touch capability[J]. *Small*, 2017, 13(43): 1700368.
- [5] KWON D, LEE T I, SHIM J, et al. Highly sensitive, flexible, and wearable pressure sensor based on a giant piezocapacitive effect of three-dimensional microporous elastomeric dielectric layer [J]. *Acs Applied Materials & Interfaces*, 2016, 8(26): 16922-16931.
- [6] PRUVOST M, SMIT W J, MONTEUX C, et al. Polymeric foams for flexible and highly sensitive low-pressure capacitive sensors [J]. *Npj Flexible Electronics*, 2019, 3(1): 1-6.
- [7] DICKEY M D. Stretchable and soft electronics using liquid metals[J]. *Advanced Materials*, 2017, 29(27): 1606425.
- [8] 熊葵容,倪德儒.电容传感器的边缘效应[J].*传感器世界*, 1998, 4(3): 16-19.
XIONG Kuirong, NI Deru. Edge effect of capacitive sensors[J]. *Sensor World*, 1998, 4(3): 16-19. (in Chinese)
- [9] ZHANG D, WANG X, WU Y, et al. Passive particle jamming variable stiffness material-based flexible capacitive stress sensor with high sensitivity and large measurement limit [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2021, 6(8): 2100106.
- [10] LI X P, LI Y, LI X, et al. Highly sensitive, reliable and flexible piezoresistive pressure sensors featuring polyurethane sponge coated with MXene sheets [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2019, 542: 54-62.
- [11] PIERRE C U, ZHAO G. Recent progress in flexible pressure sensors based electronic skin [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(5): 2001187.
- [12] LI M, LIANG J, WANG X, et al. Ultra-sensitive flexible pressure sensor based on microstructured electrode[J]. *Sensors*, 2020, 20(2): 371.
- [13] MANNFELD S C B, TEE B C K, STOLTENBERG R M, et al. Highly sensitive flexible pressure sensors with microstructured rubber dielectric layers[J]. *Nature materials*, 2010, 9(10): 859-864.
- [14] XIONG X, NIU L, GU C, et al. Vibration characteristics of an inclined flip-flow screen panel in banana flip-flow screens [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2017, 411: 108-128.



第一作者简介:张东光,男,1983年10月,博士,副教授。主要研究方向为柔性传感器设计及检测技术。曾发表《Passive particle jamming variable stiffness material-based flexible capacitive stress sensor with high sensitivity and large measurement limit》(《Advanced Materials Technologies》2021, Vol.6, No.8)等论文。

E-mail: zhangdongguang@tyut.edu.cn