DOI: 10. 19650/j. cnki. cjsi. J2311428

# 基于赝电容的高线性度柔性压力传感器研究

刘中艳,刘 妍,胡佳飞,杨诚修,潘孟春 (国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

摘 要:基于可逆氧化还原反应的赝电容式柔性压力传感器具备高灵敏性能,可用于微弱压力检测,然而,目前赝电容式柔性压力传感器线性度较差,只能在有限压力区间内保持较高灵敏度。为此,本文利用 MXene 材料作为电极,设计了一种内部具有孔隙且表面粗糙的双尺度随机微结构离子凝胶膜,增加了其压缩过程中的缓冲空间,使凝胶膜应力变形更加均匀,确保了灵敏度在受压过程中保持稳定。实验数据表明,传感器在 0~1 MPa 范围内具有超高的线性度(相关系数~0.994),优异的灵敏度(~2 133.7 kPa<sup>-1</sup>)、快速的响应和恢复时间(分别为~15 和~23 ms),较低的检测限(~2.5 Pa)和优异的机械稳定性。将传感器用于水下,可高线性检测水深,同时传感器可以高灵敏检测到不同水深下螺旋桨扰动产生的微弱水流变化。

关键词: 赝电容;柔性压力传感器;超高线性度;MXene 电极;高灵敏度

中图分类号: TH823 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4020

# Research on high linearity flexible pressure sensor based on pseudocapacitance

Liu Zhongyan, Liu Yan, Hu Jiafei, Yang Chengxiu, Pan Mengchun

(College of Intelligent Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract**: The pseudo capacitive flexible pressure sensor based on reversible redox reaction has high sensitivity and can be used for weak pressure detection. However, currently, the linearity of the pseudo capacitive flexible pressure sensor is poor and can only maintain high sensitivity within a limited pressure range. For this reason, this paper uses MXene material as the electrode to design a double scale random microstructure ionic gel film with pores inside and rough surface, which increases the buffer space during the compression process, makes the stress deformation of the gel film more uniform, and ensures that the sensitivity remains stable during the compression process. Experimental data shows that the sensor has ultra-high linearity (correlation coefficient ~ 0. 994) in the range of  $0 \sim 1$  MPa, excellent sensitivity (~2 133.7 kPa<sup>-1</sup>), fast response and recovery time (~15 and~23 ms respectively), low detection limit (~2.5 Pa), and excellent mechanical stability. The sensor can be used underwater to detect water depth with high linearity, and at the same time, the sensor can detect weak water flow changes caused by propeller disturbances at different water depths with high sensitivity. **Keywords**; pseudocapacitance; flexible pressure sensor; ultrahighly linearity; MXene electrode; high sensitivity

## 0 引 言

高灵敏柔性压力传感器可以检测压力的微弱变化, 在水下微弱流场探测<sup>[1-3]</sup>、机器人触觉感应<sup>[4-6]</sup>、人体生理 信号检测<sup>[7-9]</sup>等领域得到了广泛应用。对高灵敏柔性压 力传感器商业化生产的探索已经成为目前研究的重点, 制备具有高灵敏度的柔性压力传感器是提高灵巧手、机 械臂等智能感知设备的基础。

近期,西安电子科技大学 Gao 等[10]、国防科技大学

Yang 等<sup>[11]</sup>分别提出了基于可逆法拉氧化还原反应的赝 电容式柔性压力传感器,界面上原子尺度距离(~1 nm) 内能够产生极高的能量密度,达到数百 µF/cm<sup>2</sup> 的界面 电容值,比传统的平行板电容器高约 6 个数量级<sup>[12]</sup>。在 目前电容式压力传感器中具有最高的界面电容和电容灵 敏度,在下一代高灵敏压力传感器中具有很大的潜 力<sup>[13-15]</sup>。然而,目前的赝电容式压力传感器线性度较差, 随着压力的提升,由于敏感层塑性硬化的影响,导致灵敏 度下降,一般仅能在中低压力范围内保持高灵敏性能,而 在传感器整体工作范围内线性度较差。对于水下等一些

收稿日期:2023-05-16 Received Date: 2023-05-16

大压力范围的工作场景,线性度具有重要意义,如果大压 力范围内线性度降低,将会导致传感器在深水区内对于 水流等压力场扰动不敏感,限制传感器的使用范围。传 感器具有良好的线性度有利于降低后端检测电路计算量 和能耗,因为线性区间较窄的传感器需要分段校准和设 计复杂的后端校准电路,这样阻碍了电路低功耗和小型 化设计,限制了传感器的应用<sup>[16-17]</sup>。因此,有必要开发一种 新型的赝电容式压力传感器,在大压力范围内保持高线性。

具有独特微观结构的离子凝胶膜已被证明是提高灵 敏度和线性度的一种实用方法,包括由规则凸起的阵列 形成的微观结构(如圆顶阵列和微柱阵列)和由随机分 布的凸起阵列(如砂纸和树叶)形成的微观结构。2021 年,南方科技大学 Lu 等<sup>[18]</sup>设计了柱状微结构电极与凝 胶介质层,这种结构设计较好的解决了局部工作区间内 的线性度问题,然而,其不能在大压力范围下应用。2022 年,该团队又设计了一种由微穹顶阵列与带有次级微柱 的微穹顶(分级微穹顶)阵列所构成的分级互锁结构<sup>[19]</sup>, 在较宽工作范围内(0~485 kPa)灵敏度为 49.4 kPa<sup>-1</sup>.这 种结构设计较好的解决了整体工作区间内的线性度问 题。同年,该团队又设计使用高孔隙率的开孔聚氨酯泡 沫作为连续的三维网络骨架<sup>[20]</sup>,这种结构设计下传感器 灵敏度最高可达9280 kPa<sup>-1</sup>,但随着压强的增大,灵敏度 会逐渐降低,传感器线性度较差。因此,有必要开发一种 新型的微观结构,使具有该微观结构离子凝胶膜的赝电 容式压力传感器能够在大压力范围内保持高线性。

针对高灵敏赝电容式压力传感器线性化低的问题, 本文提出了一种基于 MXene 电极和双尺度随机微观结 构(two-scale random microstructure, TRM)离子凝胶膜的 的赝电容式压力传感器。该传感器在较宽的工作范围内 (0~1 MPa)实现了良好的灵敏度(2133.7 kPa<sup>-1</sup>)和线性 度(相关系数 R<sup>2</sup>=0.994)。将传感器应用于水下可以检 测出水深变化,测试深度范围内灵敏度保持一致;进一步 将传感器置于水缸中,可高灵敏检测到由螺旋桨搅动产 生的压力波动。

#### 1 传感器结构设计及检测原理

本文设计的传感器如图 1(a) 所示, 对称设置上下 PET 封装层、金集流器层、MXene 电极层, 以及中间的 TRM 离子凝胶膜。传感器尺寸为 1.5 cm×2 cm, 通过在 每个电极的边缘粘贴 0.5 mm 宽的导电铜箔带来实现欧 姆接触, 传感器实物如图 1(b) 所示。在 20 μm 厚的 PET 薄膜上电子束蒸发沉积二氧化钛作为过渡层, 然后沉积 一层 100 nm 厚的顶部金电极。为了使电极与集流器紧 密结合,将 MXene 水溶液(mg/ml)通过喷枪(Sibongd 喷 枪, 喷嘴尺寸为 0.3 mm, 工作压力为 100 psi) 喷在底层铜 箔上 10 min, 自然风干后, 形成约 4 μm MXene 电极层。

TRM 离子凝胶膜是以 P(VDF-HFP)、「EMIM] 「TFSI](HPLC≥98%)和丙酮(HPLC≥99.5%)分别作为 结构聚合物、离子电解质和溶剂。将 12.5 wt% P(VDF-HFP)颗粒加入丙酮中,搅拌直到颗粒溶解形成粘性液 体。然后将「EMIM」「TFSI]滴加入不同浓度比的 P(VDF-HFP)-丙酮溶液中,并完全混合。以40kHz的频 率超声照射 30 min,用#400 目碳化硅砂纸为模板,以 300 rpm 的速度涂覆复合材料 60 s,薄膜晾干后,然后用 热热枪加热模具,将薄膜从模板中释放出来一层厚度约 为 100 μm 的 TRM 离子电子薄膜,如图 1(c) 所示。TRM 薄膜是一种高度柔性和半透明的独立离子电子膜。通过 超声处理预混溶液,离子电解质和结构聚合物分子链有 序聚合,同时刺激预混溶液内部产生松散的多孔微结构, 形成 TRM 的一级微观结构;其次,TRM 中粗糙的大尺度 微观结构是指以预设的模式为模板,在离子凝胶表面形 成较大的不均匀形貌,形成 TRM 的二级微观结构。TRM 薄膜的扫描电镜图像(SEM)如图 1(d)所示。在粗糙大 尺度微观结构的设计上,砂纸是一种方便易得的模板,表 面具有随机粗糙形貌,可以高效、经济地将微结构转移到 到离子凝胶电子膜上<sup>[21-22]</sup>。作为对比,将省略超声预处 理的混合溶液直接旋涂在#400 目碳化硅砂纸上,得到只 有大尺度微结构的单一尺度随机微观结构(single-scale random microstructure, SRM)离子凝胶膜。

MXene 电极与 TRM 薄膜的粗糙表面之间形成了一 个纳米级厚度的界面。由于 MXene 表面带负电,当中间 层 TRM 与电极发生接触时,在正电压下,EMIM+阳离子 会发生可逆插层/脱插层。当电极在一定压力下与 TRM 薄膜接触时,薄膜中 EMIM+阳离子插入 Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>T<sub>x</sub> 层之间,伴随着钛原子发生可逆的氧化还原反应。由 于可逆氧化还原反应仅发生在电极与介质层的纳米级 厚度接触间,界面电容与 TRM 变形引起的面积变化成 正比,因此所制造的传感器的灵敏度取决于界面之间 接触面积的变化。图 1(e)展示了赝电容压力传感器在 压力循环过程中的传感机理,该过程包括初始、加载和 释放 3 个关键阶段。

### 2 高线性分析

当外界压力作用于电极表面时,MXene电极与TRM 薄膜接触产生的电容值C<sub>PSE</sub>与单位面积电容值(UAC)和 接触面积(A)有关:<sup>[23]</sup>

$$C_{PSE} = UAC \times A \tag{1}$$

传感器在灵敏度方面的巨大优势在于赝电容效应引起的极高 UAC。经过长时间的研究, UAC 主要是由电极和凝胶层的材料属性, 与离子种类和浓度, 介电常数, 电极的表面电位, 环境的温度有关。这些材料参数在压力



图 1 传感器结构及受压过程

Fig. 1 Structure diagram of the sensor sensor pressure process diagram

响应过程中保持不变,因此 UAC 可以在一个给定的系统 中被视为一个常数,因此电容信号的变化只与接触面积 的变化有关。

大量的离电式柔性压力传感器具有类似 SRM 的结构,这些传感器通常在较大的传感范围内表现出较差的响应线性度,这可以用接触力学中的经典的泊松接触理论解释。泊松接触将上表面与粗糙面的接触简化为一系列压力变形下的粗糙峰,每个粗糙峰近似为球体,如图 2(a)所示,其受到的法向压力(P)与接触面积(A)满足以下公式<sup>[25]</sup>:

$$\begin{cases} \delta = \left(\frac{9P^2}{16E^2R}\right)^{1/3} \\ a = \left(\frac{3PR}{4E}\right)^{1/3} \\ P = \frac{4}{3}ER^{1/2}\delta^{3/2} \\ A = \pi a^2 = \pi R\delta \end{cases}$$
(2)

其中, *E* 是弹性模量,δ,*a*,*R* 分别为几何参数,δ 表示 压缩后粗糙峰的法向变形,*a* 表示通过法向压力变形后 的单个粗糙峰接触面积(*A*) 的半径,*R* 表示粗糙峰近似 为球体时的球体半径。对于整个粗糙表面,如图2(b)所 示,粗糙峰在基面上方的最大高度为*h*,压缩后粗糙峰的 法向变形为*h*-*d*。假设每个粗糙度峰值承受相同载荷,结 合式(2)可得出接触面积与法向压力之间的关系如下:

$$A = P^{2/3} \cdot \pi \sqrt[3]{\frac{9R^2}{16E^2}}$$
(3)

可以看出,顶部电极与凝胶之间接触面积与器件上的法向压力的 2/3 次方成正比,说明在线性响应方面, SRM 类器件存在固有缺陷。

故本文在 SRM 的基础上设计了 TRM 微结构,理想 模型如图 2(c)所示,使用商业软件包 Abaqus/标准 2019,对传感器界面微观结构的力诱导变形进行了有限 元分析(FEA),如图 2(d)所示。参数设置方面,由 SEM 图像如图 3(a)和(b)所示,近似获得了大小半球半径 *R*=10µm与*r*=1µm。采用经典的超弹性材料双参数 Mooney-Rivlin模型。为了模拟经典微观结构与 TRM 之 间的差异,在研究中分别建立了相应的二维几何模型。 将下板设置为固定约束,指定上板的法向位移。界面接 触摩擦系数设置为 0.2,输出的离子凝胶与上电极之间 的接触面积作为压力的函数输出,接触面积-压力响应曲 线如图 3(c)所示。通过有限元分析,可以深入阐明其高 线性变形机理。与 SRM 传感器相比,TRM 传感器的响应 曲线更具线性。

简言之,信号的高线性度在于离子凝胶与柔性基底 电极之间的模量匹配。超声波处理增加了离子膜的杨氏 模量,使电极和凝胶处于微妙的平衡状态,最终实现了传 感器线性度的增加。为了进一步验证 TRM 的线性优化 效果,实验中 MXene 电极和不同结构的电解质膜的电容-压力响应曲线如图 3(d)所示。只有二尺度微观结构的 器件的相对电容变化曲线与其他使用砂纸接枝微观结构 的工作的结果相似,它的线性范围不如使用 TRM 薄膜的 柔性离子电子传感器好。采用最小二乘拟合法估计了









 (b)离子凝胶膜的等效球形粗糙表面的接触示意图
(b) Schematic diagram of contact on the equivalent spherical rough surface of ionic gel membrane



(c) TRM微结构理想模型 (c) Model of TRM microstructure (d) SRM和TRM离子凝胶膜在压缩时变形的有限元分析 (d) Finite element analysis of SRM and TRM ionic gel membranes

#### 图 2 离子凝胶膜的理想模型与有限元分析

Fig. 2 Ideal model and finite element analysis of ionic gel membranes



Fig. 3 Scanning electron micrographs and pressure response curves of ionic gel membrane microstructures

传感器的响应曲线。 $R^2 = 0.994$ 特别需要注意的是,由于加压前与电极接触,实际值小于模拟结果。

#### 3 传感器性能测试

灵敏度是传感器最关键的参数之一,灵敏度 S 定义为:  $S = \delta(\Delta C/C_0)/\delta P$  (4) 其中,  $C_0$  为初始电容,  $\Delta C$  为施加压力下的电容变 化。对比 TRM 薄膜和 SRM 薄膜传感器的灵敏度曲线, 如图 4(a) 所示, 基于 TRM 的柔性压力传感器灵敏度高 达 2 133.7 kPa<sup>-1</sup>, 约为 SRM 薄膜传感器的两倍。在整个 工作范围内, TRM 薄膜传感器的整体线性度指数  $R^2 >$ 0.99, 明显高于 SRM。采用 TRM 薄膜结构, 极大地提升 了传感器范围和整体线性度, 如表 1 所示。

	表1	传感器线性度与灵敏度调研表	
Table 1	Sense	or linearity and sensitivity research t	abl

文 献	工作范围/kPa	工作区间分段	线性指数 R <sup>2</sup>	灵敏度
本文	0~1 000	1	0. 993	2 133.7
[21]	0 2 2 20	2	0. 97	131. 5 11. 73
	0~2,2~30		0. 924	
[22]	Below 0. 2,0. 2~2,2~8	3	-	S <sub>max</sub> = 9. 55
[24]	2~20,20~60,60~114	3	-	9 280 1 811. 4 627. 7
[26]	0.08~10,10~100,100~360	3	-	3 302. 9 671. 7 229. 9
[ 27 ]	Below 0. $5, 0.5 \sim 10, 10 \sim 40, 40 \sim 115$	4	-	54. 31 30. 11 8. 42 10. 3
[28]	Below 0. 1,0. 1~2	2	-	44. 5 0. 55
			-	
[29]	Below $6_{5}6 \sim 12_{1}2 \sim 176$	3	-	7.49,17.76,33.16
			0. 999	
[ 30 ]	Below 12,30~50,80~160	3	-	26. 75 162. 90 16. 78

此外,还研究了TRM 薄膜传感器其他关键参数。 为了测试设备的响应和恢复时间,在传感器上施加 10 kPa 的重量压力,如图 4(b) 所示,电容随施加的压 力突然增加,当压力撤走后,传感器电容值迅速恢复初 始状态,响应和恢复时间分别为15和23ms,快速的响 应速度来自于 TRM 薄膜内部含有大量的孔洞和空隙, 存在足够的内部空间来存储和释放能量,以降低电极-凝胶膜界面的粘弹性。此外,超轻的压力检测能力体 现了所制备传感器的压力分辨率,在传感器表面依次 施加轻微压力,如图4(c)所示,传感器可以感受到 10 mg(~2.5 Pa)的轻微压力变化,证明了传感器对于 超轻压力的响应能力。传感器的稳定性是决定其长期 可靠运行的重要指标,在 60 kPa 的加载压力下,通过 10 000 次循环测试,传感器表现出良好的性能和稳定 响应,显示出低信号漂移,这是因为在去除压力后,具 有回弹性能的 TRM 薄膜能够迅速恢复到初始状态。经 过10000次压缩释放循环后,响应曲线略有波动,传感 器的灵敏度和线性度略有下降,但线性度指数仍然高 达 0.95, 如图 4(d) 所示。

#### 4 高线性度传感器应用

目前,多数传感器线性测量范围有限,在高水压环境 中需要进行额外的线性校准,才能够精确测量周围流场 压力。本文设计了两个实验来验证传感器在水下环境中 所具备的高线性、高灵敏优势。

在传感器上下旋涂聚二甲硅氧烷(polydimethylsiloxane, PDMS)作为防水封装层,80℃下固化3h,在铜箔接口处 引出防水漆包线,将传感器置于可测试 0~100 m (0~ 1 MPa)水深变化的液压密封箱中测试深度-电容响应曲 线,采用 LCR 测试仪记录传感器电容数据,设定扫描频 率为100 Hz,电压为0.25 V,随着逐渐将监测系统沉入 一个水箱中,并在距水面 0.5、1、1.5 m 处连续停留 10 s. 记录电容随时间的关系如图 5(a) 所示, 随着水深的增 加,系统的电容呈阶梯式增加,与增加的静压成正比。最 终传感器的深度-电容响应曲线如图 5(b) 所示,随着水 深的增加,电容有增加的趋势,且即使在水下环境,响应 曲线仍然保持了较高的线性度( $R^2 > 0.99$ )。为了进一 步说明设备的响应速度在具体应用中的体现,采用可调 转速的直径 250 mm 的轴系螺旋桨搅动水波引发水流场 扰动,通过对高频区域检测到的电容波形进行时频变换, 可以清楚地分辨出螺旋桨的旋转频率在 16 Hz 左右 (图5(c)),这表明我们的设备响应速度非常快,分辨率 也非常高。为了进一步验证柔性传感器在水下的高灵敏 特性,将传感器贴附在水深分别为1m和2m的玻璃池 壁上,采用可调转速的直径250 mm 的轴系螺旋桨搅动水 波引发水流场扰动,调整螺旋桨转速至100 rad/s。 图 5(d) 表示在 1 m 深度检测到了几组具有近似振幅的



图 5 传感器的水下应用测试曲线 Fig. 5 Test curves of sensors for underwater applications 电容信号波形,导致振幅变化约为800 nF。随后将传感器移动到2m水深处,随着深度的增加,由于螺旋桨引起的振动耗散,电容值的振强减弱,振幅下降到130 nF左右,仍然可以识别出规律的波峰信号,如图5(e)所示。 实验表明,所制备的传感器不需要额外的线性校准系统,即可以高灵敏检测水压深度变化和周围流场扰动。

#### 5 结 论

本文提出了一种高度线性(在整个工作范围内)的 赝电容式柔性压力传感器,这种高线性度得益于 TRM 凝 胶。有限元模拟和实验结果表明,TRM 凝胶相对于传统 SRM 凝胶在压力作用下与电极的接触面积变化更平稳, 线性度更高。同时,采用 MXene 作为电极材料,利用界 面产生的赝电容效应,极大地提升了界面电容值和灵敏 度。本文为微结构离子凝胶和活性电极材料的设计提供 了一种优化的方法,不仅扩大了线性范围,而且具有良好 的灵敏度。将所设计的传感器应用于水下环境中,可以 检测出水深和水下微弱流场扰动,为柔性传感器的水下 应用提供了理论和方法基础。

#### 参考文献

- [1] ZHANG S, ZHU J, ZHANG Y, et al. Standalone stretchable RF systems based on asymmetric 3D microstrip antennas with on-body wireless communication and energy harvesting[J]. Nano Energy, 2022, 96: 107069.
- [2] YI N, GAO Y, VERSO JR A L, et al. Fabricating functional circuits on 3D freeform surfaces via intense pulsed light-induced zinc mass transfer [J]. Materials Today, 2021, 50: 24-34.
- QU X, LIU Z, TAN P, et al. Artificial tactile perception smart finger for material identification based on triboelectric sensing [J]. Science Advances, 2022, 8(31): eabq2521.
- [4] AN X, WANG C, SHAO R, et al. Advances and prospects of triboelectric nanogenerator for self-powered system [J]. International Journal of Smart and Nano Materials, 2021, 12(3): 233-255.
- [5] JIA Y, JIANG Q, SUN H, et al. Wearable thermoelectric materials and devices for self-powered electronic systems [J]. Advanced Materials, 2021, 33(42): 2102990.
- [6] RUTH S R A, FEIG V R, TRAN H, et al. Microengineering pressure sensor active layers for improved performance [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(39): 2003491.
- [7] HAMMOCK M L, CHORTOS A, TEE B C K, et al. 25th anniversary article: The evolution of electronic skin

(e-skin): A brief history, design considerations, and recent progress [ J ] . Advanced Materials, 2013, 25(42): 5997-6038.

- [8] MISHRA R B, EL-ATAB N, HUSSAIN A M, et al. Recent progress on flexible capacitive pressure sensors: From design and materials to applications [J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(4): 2001023.
- [9] CHEN X, LI R, NIU G, et al. Porous graphene foam composite-based dual-mode sensors for underwater temperature and subtle motion detection [J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 444: 136631.
- [10] GAO L, WANG M, WANG W, et al. Highly sensitive pseudocapacitive iontronic pressure sensor with broad sensing range[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13: 1-14.
- [11] YANG C, HU J, WU S, et al. An ultrahighly pressure sensitive electronic fish skin for underwater wave sensing[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023.
- [12] TANG Z, SCRIVEN L E, DAVIS H T. A threecomponent model of the electrical double layer [J]. The Journal of Chemical Physics, 1992, 97(1): 494-503.
- [13] HUANG Y, FAN X, CHEN S C, et al. Emerging technologies of flexible pressure sensors: Materials, modeling, devices, and manufacturing [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(12): 1808509.
- [14] ZHAN Z, LIN R, TRAN V T, et al. Paper/carbon nanotube-based wearable pressure sensor for physiological signal acquisition and soft robotic skin[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(43): 37921-37928.
- [15] LOU Z, CHEN S, WANG L, et al. An ultra-sensitive and rapid response speed graphene pressure sensors for electronic skin and health monitoring[J]. Nano Energy, 2016, 23: 7-14.
- [16] ZHU Z, LI R, PAN T. Imperceptible epidermaliontronic interface for wearable sensing [J]. Advanced Materials, 2018, 30(6): 1705122.
- [17] EOM J, HEO J S, KIM M, et al. Highly sensitive textile-based strain sensors using poly (3, 4ethylenedioxythiophene): Polystyrene sulfonate/silver nanowire-coated nylon threads with poly-L-lysine surface modification[J]. RSC Advances, 2017, 7(84): 53373-53378.
- [18] LU P, WANG L, ZHU P, et al. Iontronic pressure sensor with high sensitivity and linear response over a wide pressure range based on soft micropillared electrodes[J]. Science Bulletin, 2021, 66 (11): 1091-1100.
- [19] NINGNING B, LIU W, YIHENG X, et al, Graded interlocks for iontronic pressure sensors with high

sensitivity and high linearity over a broad range[J]. ACS Nano, 2022, 16: 4338-4347.

- [20] LIU Q, LIU Y, SHI J, et al. High-porosity foam-based iontronic pressure sensor with superhigh sensitivity of 9280 kpa-1[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14: 1-12.
- [21] CHHETRY A, KIM J, YOON H, et al. Ultrasensitive interfacial capacitive pressure sensor based on a randomly distributed microstructured iontronic film for wearable applications [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 11(3): 3438-3449.
- [22] YOON S G, PARK B J, CHANG S T. Highly sensitive piezocapacitive sensor for detecting static and dynamic pressure using ion-gel thin films and conductive elastomeric composites [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(41): 36206-36219.
- [23] CHANG Y, WANG L, LI R, et al. First decade of interfacial iontronic sensing: From droplet sensors to artificial skins[J]. Advanced Materials, 2021, 33(7): 2003464.
- [24] LI S, PAN N, ZHU Z, et al. All-in-one iontronic sensing paper [J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29(11): 1807343.
- [25] WEN S, HUANG P. Principles of tribology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012: 219-220.
- [26] BAI N, WANG L, WANG Q, et al. Graded intrafillable architecture-based iontronic pressure sensor with ultrabroad-range high sensitivity[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 209.
- [27] QIU Z, WAN Y, ZHOU W, et al. Ionic skin with biomimetic dielectric layer templated from calathea zebrine leaf[J]. Advanced Functional Materials, 2018, 28(37): 1802343.
- [28] 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.

- [29] LU P, WANG L, ZHU P, et al. Iontronic pressure sensor with high sensitivity and linear response over a wide pressure range based on soft micropillared electrodes [J]. Science Bulletin, 2021, 66(11): 1091-1100.
- [30] WANG P, LI G, YU W, et al. Flexible pseudocapacitive iontronic tactile sensor based on microsphere-decorated electrode and microporous polymer electrolyte for ultrasensitive pressure detection [J]. Advanced Electronic Materials, 2022, 8(7): 2101269.

#### 作者简介



**刘中艳**,2019年于国防科技大学获得博 士学位,现为国防科技大学副教授,主要研 究方向为智能传感与探测。

E-mail:liu.zhongyan2008@163. $\mathrm{com}_{\circ}$ 

Liu Zhongyan, received his Ph. D. degree from National University of Defense Technology

(NUDT) in 2019. He is currently an associate professor at NUDT, with the main research interests in intelligent sensing and detection.



杨诚修(通信作者),2018年于空军 工程大学获得学士学位,2020年于空军 工程大学获得硕士学位,现为国防科技大 学博士研究生,主要研究方向为智能传感 与探测。

E-mail: ycx96123@123.  $com_{\circ}$ 

Yang Chengxiu (Corresponding author), received his B. Sc. de ree from Air Force En ineerin University in 2018, and M. Sc. de ree from Air Force En ineerin University in 2020. He is currentl a Ph. D. student at NUDT, with a major research interest in intelli ent sensin and detection.