

贴合材料硬度对 PVDF 薄膜传感器冲击波测量的影响研究^{*}

潘绪仲 彭 澎 狄长安 张永建
(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘 要: 在人员毁伤效能评估中,体感冲击波值为重要的毁伤判据之一。为提高人员体表冲击波测试的准确性,同时保证传感器阻抗匹配的优势,提出了一种柔性膜片阻抗匹配下的冲击波测试技术,并对不同硬度的贴合材料对冲击波超压测量的影响展开了实验研究。首先在刚性表面对聚偏二氟乙烯薄膜(PVDF)传感器进行了冲击波标定实验,得到了 PVDF 传感器力电响应关系;在此基础上,对 4 种硬度的聚氨酯橡胶作为贴合材料的 PVDF 传感器加载不同强度冲击波,实验结果表明,与 PVDF 直接贴合在类生物组织上相比,硬度为 50A 的贴合材料能够改善横向效应的影响使得传感器灵敏度系数基本保持为常数,但贴合材料硬度增加为 70A 和 90A 时测量非线性度分别增加了 22.6%与 30.2%。

关键词: 体表冲击波;贴合材料;特征阻抗;聚偏二氟乙烯薄膜

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on the influence of hardness of adhesive materials on shock wave measurement of PVDF thin film sensors

Pan Xuzhong Peng Peng Di Chang'an Zhang Yongjian
(School of Mechanical Engineer, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the evaluation of personnel damage effectiveness, the value of somatosensory shock wave is one of the important damage criteria. To improve the accuracy of shock wave testing on personnel surface and ensure the advantages of sensor's impedance matching, a shock wave testing technique based on flexible membrane and impedance matching has been proposed, and experimental research was conducted on the influence of bonding materials with different hardness on shock wave overpressure measurement. Firstly, shock wave calibration experiments were conducted on the PVDF sensor on rigid surface to obtain the electromechanical response relationship of the PVDF sensor. On this basis, PVDF sensor using polyurethane rubber with four different hardness as bonding materials were loaded with different strength shock wave. The experimental results showed that compared with PVDF directly bonding to biological tissues, the bonding material with a hardness of 50A could improve the influence of lateral effect and keep the sensitivity coefficient of the sensor basically constant. However, when the hardness of the bonding material increased to 70A and 90A, the nonlinearity of measurement increased by 22.6% and 30.2%, respectively.

Keywords: body surface shock wave; adhesive material; characteristic impedance; polyvinylidene fluoride film

0 引 言

爆炸冲击波杀伤效应是研究冲击波作为致伤因素与生物效应的量效关系,其作为武器生物毁伤效应评估的重要部分,对武器威力的评估以及冲击伤的研究均具有重要

意义^[1-2]。冲击波对生物造成的损伤,主要受到冲击波超压峰值、正压持续时间、压力上升时间及周围环境等因素的影响^[3],因此,在毁伤评估和人员安全防护领域,是否准确获得其冲击波特征参数的真实值影响弹药杀伤效应最终评估结果的准确性。

收稿日期:2023-11-13

^{*} 基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(12102190)、KJW 基础加强技术领域基金(2022-JCJQ-JJ-0367)项目资助

目前,在体表冲击波超压的测试研究中,大多数研究人员采用在生物所处位置布设传感器的方式来获取该点的冲击波压力并作为生物受到的冲击波压力^[4],这种方式忽略了冲击波作用于不同冲击阻抗^[5]介质界面的差异,也忽略了生物体表结构对冲击波传播的影响,从而导致所测超压与实际值具有较大偏差。为解决传统冲击波压力传感器与生物体表组织阻抗失谐的问题,研究人员提出了使用声阻抗与组织相近的压电材料聚偏二氟乙烯(polyvinylidene difluoride, PVDF)制成的压力传感器进行体表冲击波超压测量。Liang 等^[6]使用微型 PVDF 压力传感器安装在新西兰兔与玉兰猪组织中,测量组织所受冲击波超压;Liu 等^[7]使用柔性传感器分别对冲击波在固体表面和动物的不同组织内部的压力数据进行了测量。然而,将 PVDF 柔性压力传感器直接贴合在非平整的组织表面^[8]会带来以下问题:1)由于生物体表结构复杂性,不同部位组织差异可能会影响 PVDF 响应特性而造成测量重复性差;2)生物组织与 PVDF 薄膜材质较柔软,冲击波作用时,两者会发生面内方向形变,会产生附加的电荷叠加在实测结果上,导致测量压力偏离真实值^[9]。

本文为提高体表冲击波测量的准确性,并保证 PVDF 阻抗匹配的优势,提出了在 PVDF 与生物组织间增加一层贴合材料的安装方式,并对贴合在不同硬度安装薄片上的 PVDF 薄膜传感器进行了激波管激励实验研究,观察在低压冲击波的作用下,安装薄片对 PVDF 薄膜传感器超压响应的影响。

1 PVDF 传感器的冲击波标定

1.1 传感器及测试系统

PVDF 薄膜传感器一般采用封装层-芯层-封装层式的夹层结构,如图 1(a)所示,封装层包括导电层和绝缘保护层热塑性聚酯(polyethylene terephthalate, PET)薄膜,芯层则为压电薄膜。为保证测试时传感器紧密贴合表面,本文采用某型具有柔性引线的 PVDF 压电传感器,该传感器具有标称 28 μm 厚的压电薄膜,外层为 PET,总厚度为



(a) PVDF 传感器结构

(a) Schematic diagram of PVDF sensor structure



(b) PVDF 传感器实物

(b) Physical image of PVDF sensor

图 1 PVDF 薄膜传感器

Fig. 1 PVDF thin film sensor

55 μm,面积为 3.6 cm²,压电薄膜静态压电系数 d_{33} 为 33 pC/N。工作于厚度模式下压电薄膜传感器产生电荷量与所受压力关系为^[10-11]:

$$q = d_{33} \cdot \sigma \quad (1)$$

式中: q 为表面电荷密度; σ 为单位面积上的作用力。通过式(1)大致估算 PVDF 压电薄膜产生的电荷量范围和多次实验,将电荷放大器增益设置为 0.02 mV/pC 可得到合适的输出信号。

激波管测试系统如图 2 所示,通过激波管加压使得膜片破裂产生冲击波向低压区传播,经过在端盖附近侧壁处两支标准压力传感器以测量入射压力值,最后冲击波作用于端盖处标准反射压传感器和 PVDF 薄膜传感器,PVDF 传感器输出电荷量经过电荷放大器转换为电压信号后与其他传感器一并被数据采集器采集。

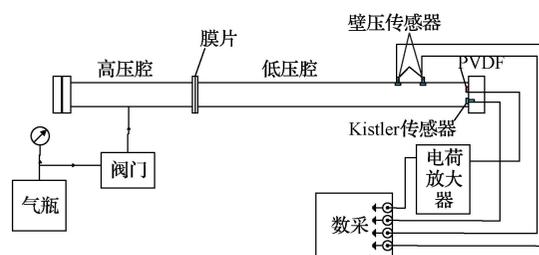


图 2 激波管测试系统

Fig. 2 Shock tube testing system

1.2 标定过程与结果

为得到 PVDF 薄膜传感器力电信号响应关系,使用激波管对传感器进行加载。标定实验中将标准壁面压力传感器配合工装安装于端盖面内,使用环氧树脂将 PVDF 薄膜粘贴于刚性端盖表面如图 3 所示。通过改变高压腔和低压腔之间的膜片厚度,产生不同强度的冲击波,以标准传感器测量的反射压作为标准压力信号对 PVDF 传感器进行标定实验。

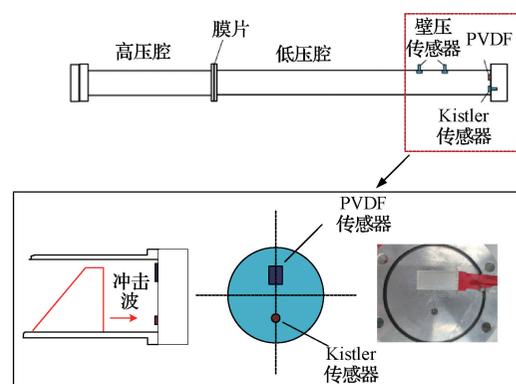


图 3 PVDF 安装于刚性表面

Fig. 3 PVDF installed on a rigid surface

图 4(a)、(b)所示分别为冲击波反射压 $P = 0.13, 0.33$ MPa 下标准壁面传感器和 PVDF 传感器的典型波

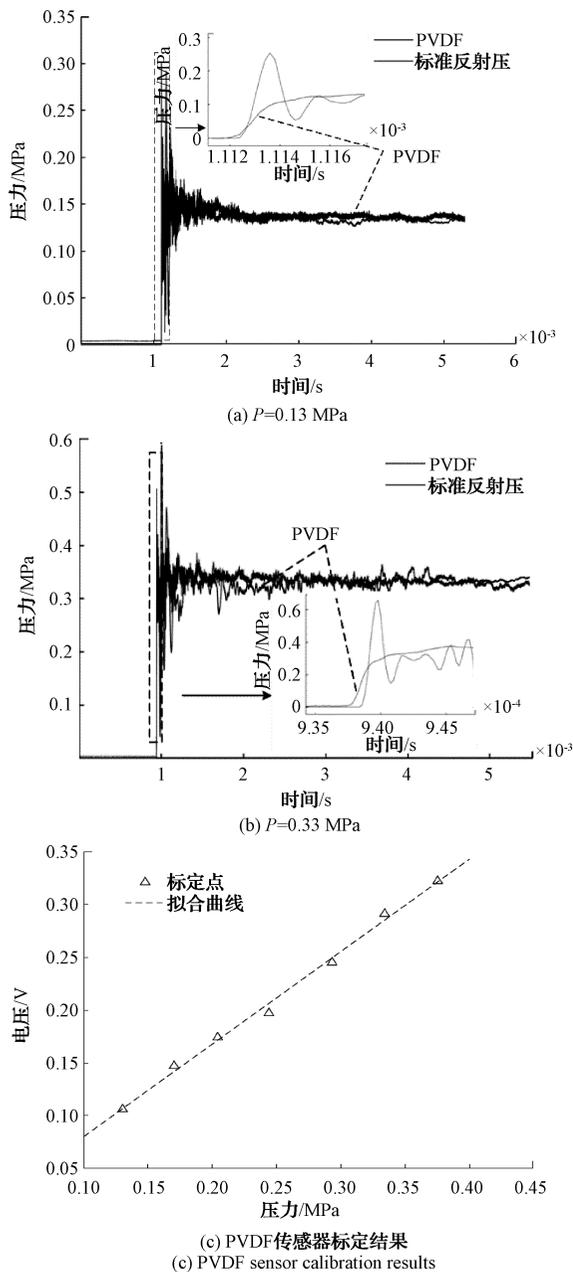


图4 PVDF传感器冲击波测量结果与力电响应
Fig. 4 Measurement results and electromechanical response of PVDF sensor shock wave

形。PVDF传感器位于端盖表面,观察波形曲线可知,PVDF传感器对阶跃激波的响应曲线与标准传感器基本一致,较好的反映了阶跃信号的特征,但对比两种传感器波形可发现,PVDF传感器在阶跃信号平台保持阶段发生了一定程度的畸变。此外,由于激波管产生的阶跃信号上升沿小于 $1\ \mu\text{s}$,标准传感器响应曲线中含有高频振荡信号;而PVDF压电薄膜具有较高的固有频率而未发生振荡。同时对比两种传感器的信号上升沿,发现PVDF传感器上升时间与标准壁压传感器相近,因此PVDF传感器性

能满足冲击波超压测试要求。

为避免偶然性,经过在 $0.1\sim 0.37\text{ MPa}$ 范围内多次正反行程取平均得到输出电压与冲击波压力的关系如图4(c)所示。拟合激励压力与PVDF输出电压得到的一元线性回归方程为 $y = 0.8755x - 0.0074$,相关系数为 0.9952 ,非线性度为 4.3% ,传感器灵敏度系数在该压力范围内为 $K = 122\text{ pC/N}$;并统计传感器在刚性表面上升时间 t_{50} ($5\%\sim 95\%$)如表1所示,不同压力响应曲线上升时间相近。综上可知,该PVDF传感器在标定加载压力范围内具有良好的线性力电响应关系,故可用于低强度冲击波的测量。

表1 刚性表面PVDF传感器上升时间

Table 1 Rise time of rigid surface PVDF sensor

压力/MPa	0.13	0.17	0.21	0.25	0.29	0.32	0.37
上升时间/ μs	2.14	2.28	2.21	2.37	2.17	2.26	2.28

2 横向效应影响对比实验

PVDF传感器在粘贴在组织表面测压时,会发生不同方向的变形如图5所示,而对于冲击波压力测量时,PVDF传感器工作于厚度模式即压电效应只在厚度方向发生,但传感器受压时会发生面内形变,从而导致在方向2与方向3产生拉伸效应造成方向1上电荷的叠加;这种与压电薄膜极化方向垂直的拉伸效应是压电薄膜横向效应^[12-13],这是实际应用中应尽量避免的。

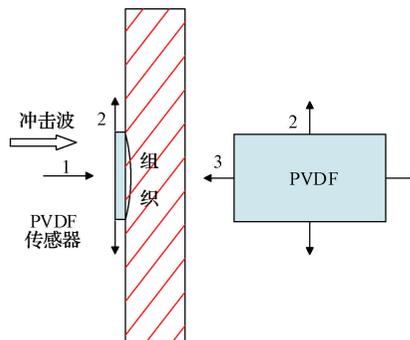


图5 PVDF在组织表面测压示意图

Fig. 5 Schematic diagram of PVDF for pressure measurement on tissue surface

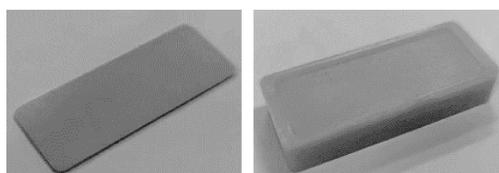
2.1 实验方法

相比于传感器直接贴合至组织表面,贴合薄片可一定程度抑制传感器的横向效应,提高测试的稳定性。然而,贴合材料的声阻抗特性与硬度均会影响冲击波作用于组织,会对冲击波压力测量结果产生影响。基于此,采用特征声阻抗与组织匹配的聚氨酯橡胶^[14](polyurethane rubber, PUR)作为贴合材料,并在制作时使用不同比例多元醇得到不同硬度的聚氨酯橡胶,不同硬度的PUR的材料

参数如表 2 所示。同时,为便于贴合片的安装,使用生物相容性好、物理性质与组织相近的肖氏硬度为 A0 的医用人体硅胶^[15]代替生物组织作为基底材料。使用上述材料设计制备了贴合薄片与基底模型用于实验如图 6 所示,贴合薄片的三维尺寸为 45 mm×17 mm×1 mm,基底模型为 50 mm×20 mm×10 mm 的矩形块,并在模型表面加工有和薄片尺寸相同的凹槽便于贴合薄片的安装。考虑到需保证冲击波到达 PVDF 薄膜传感器和标准传感器的条件一致,在激波管端盖加工了尺寸于基底模型相同的凹槽,使得贴合薄片与端盖平面平齐,使用环氧树脂粘合后的实验传感器如图 7 所示。另外,为对比贴合材料和人体硅胶组合体与生物组织^[16-17]作为基底时 PVDF 传感器响应区别,使用猪腹部组织制成凹槽尺寸并处理平整进行对比实验。

表 2 不同硬度的聚氨酯橡胶的材料参数
Table 2 Material parameters of polyurethane rubber with different hardness

肖氏硬度	30A	50A	70A	90A
密度/(kg·m ⁻³)	1062	1077	1090	1124
声速/(m·s ⁻¹)	1560	1603	1621	1626
特征声阻抗(MRayl)	1.65	1.72	1.77	1.82
拉伸强度/(kg·cm ⁻²)	20	50	80	180
杨氏模量/MPa	0.21	2.43	7.48	60
回跳弹性/%	58	60	56	50



(a) 贴合薄片 (a) Bonding sheeting
(b) 基底模型 (b) Substrate models

图 6 基底与贴合材料实物

Fig. 6 Physical image of substrate and bonding material

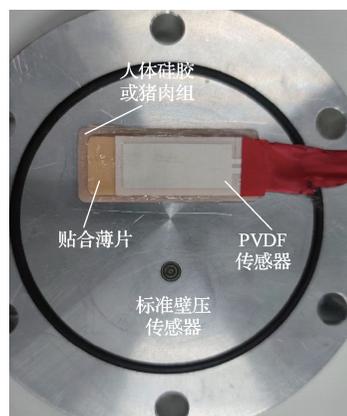


图 7 PVDF 薄膜安装于贴合薄片表面示意图

Fig. 7 Schematic diagram of PVDF film installation on the surface of laminated film

2.2 实验结果与分析

5 种基底条件下,对已标定 PVDF 传感器加载不同强度冲击波的实验结果如图 8 所示,为标准壁压传感器与 PVDF 传感器测得超压值的映射关系。可以看到,当 PVDF 直接贴合在猪肉组织上时,PVDF 测得压力均大于标准传感器测得的反射压且随着冲击波强度增加两者差距进一步拉大,这是由于薄膜传感器面内形变产生的横向效应导致;对于 30A 硬度贴合薄片与人体硅胶作为基底,在低强度冲击波激励由于贴合薄片与空气特征阻抗匹配度更好且压力导致的横向效应影响较弱,但随着激励压力增大形变程度增加,PVDF 传感器测得压力接近并大于标准传感器测得压力;硬度 50A 贴合薄片与人体硅胶作为基底时,由于 50A 硬度的聚氨酯橡胶杨氏模量^[18]等力学参数更大而受压时形变量较小,所以基底为 50A 硬度的贴合薄片横向效应的影响进一步减弱;而硬度进一步增加的 70A 和 90A 的贴合薄片与人体硅胶作为基底时,PVDF 传感器所测压力的增加幅度虽有一定增加,但没有低硬度情况下增幅大。

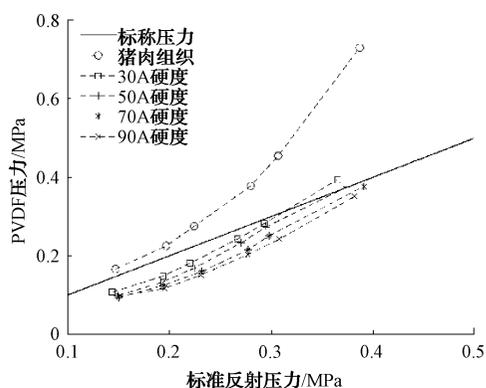


图 8 PVDF 传感器冲击波测量结果

Fig. 8 Shock wave measurement results of PVDF sensor

为了选择合适硬度的 PUR 作为传感器安装贴合材料,将实验结果进一步分析得到了不同硬度材料下 PVDF 传感器测量值与标称压力相关关系如图 9 所示,猪肉组织

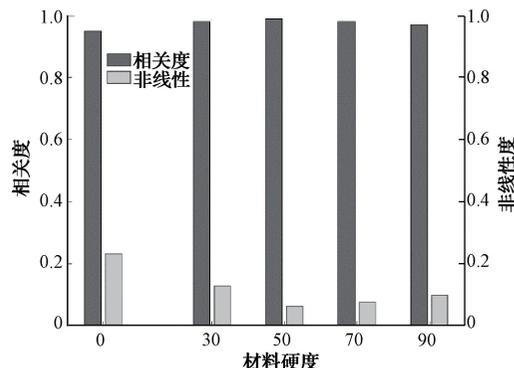


图 9 PVDF 传感器测压与标称压力的相关性

Fig. 9 The correlation between PVDF pressure measurement and nominal pressure

作为基底时两者的拟合相关系数 $R^2 = 0.95$, 非线性度为 23.2%, 此时传感器灵敏度系数差异大, 测量结果误差大; 而在 50A 硬度贴合材料下标准反射压与 PVDF 测量结果两者的相关系数为 $R^2 = 0.99$, 非线性度为 6.1%, 此时传感器灵敏度系数基本为常数, 测量结果误差较小; 同时从图 9 可以看出, 相关性及线性的变化趋势为先随贴合材料硬度的增加而增加, 但硬度超过 50A 后, 相关性及线性便开始下降。

不同基底情况除了会影响传感器压力值测量外, 其对薄膜传感器压力曲线的上升时间也产生不同程度的影响。不同基底情况下 PVDF 传感器响应曲线上升时间的统计结果如表 3 所示, 直方图如图 10 所示。可以看到相同基底条件下传感器上升时间变化不大, 上升时间基本随着贴合材料硬度增加减小, 硬度 30A 贴合薄片较猪肉组织作为基底时减少了 29%; 硬度 50A 较硬度 30A 减少了

0.75%; 硬度 70A 较硬度 50A 减少了 4.04%; 硬度 90A 较硬度 70A 减少了 8.16%。

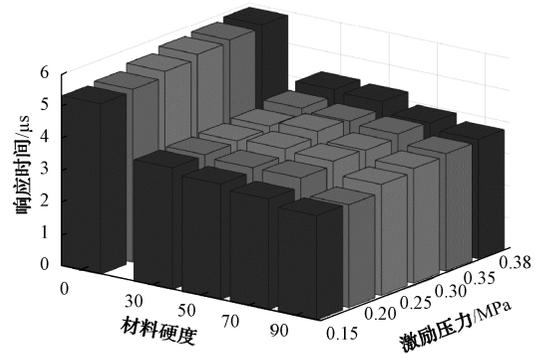


图 10 PVDF 传感器的上升时间直方图
Fig. 10 Rise time histogram of PVDF sensor

表 3 不同基底传感器上升时间

Table 3 Sensor rise time under different substrates

	猪肉组织	30A	50A	70A	90A
$\bar{t}_{st} (N=6)$	5.62 ± 0.2	3.99 ± 0.25	3.96 ± 0.35	3.80 ± 0.35	3.49 ± 0.3

综上所述, 增加一定硬度的贴合薄片作为 PVDF 传感器与基底间的贴合材料时, 能够一定改善横向效应的影响, 但实验结果同时也表明, 欲想得到较好的测试结果, 需要同时考虑 PVDF 传感器线性度, 从测量结果可知, 在 0.15~0.4 MPa 压力范围内, PVDF 传感器在 50A 硬度的贴合材料下测得压力与标准反射压的相关性最高, 且非线性误差最小; 因此, 可选择硬度为 50A 的 PUR 作为 PVDF 薄膜传感器的贴合安装材料。

3 结论

本文为减弱 PVDF 传感器直接贴合在组织表明时横向效应的影响, 同时保证 PVDF 薄膜传感器在体冲击波测量阻抗匹配的优势, 提出了在 PVDF 与生物组织间增加一层贴合材料的安装方式。通过使用不同硬度贴合薄片与人体硅胶组合体作为基底材料, 使用环氧树脂作为粘贴剂, 对标定后的 PVDF 传感器施加不同强度冲击波进行了实验研究, 得到如下结论。

1) PVDF 传感器直接贴合在猪肉组织上测试时, 由于引入的横向效应, 导致传感器在不同强度压力激励下的灵敏度系数产生较大差异, 并且测量结果较阻抗失谐严重的刚性传感器测量的反射压更大。

2) 增加一定硬度的贴合薄片作为 PVDF 传感器与基底间的贴合材料时, 能够一定改善横向效应, 使得传感器灵敏度系数基本保持为常数。但实验结果同时也表明, 欲想得到较好的测试结果, 需要同时考虑 PVDF 传感器线性度。因此, 对于不同范围的冲击波压力测量需要适配不同硬度的贴合薄片, 实验结果表明, 在 0.15~0.4 MPa 压

力范围内, 硬度 50A 的贴合薄片测量效果较好。

3) 此外, PVDF 传感器响应波形的上升时间随着贴合材料的硬度增加减小, 但其降低幅度与硬度大小不成线性关系。

参考文献

- [1] 陈家辉, 孔德仁, 徐春冬, 等. 坑道内冲击波压力测试与分析[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(12): 63-68. CHEN J H, KONG D R, XU CH D, et al. Shock wave pressure test and analysis in tunnel[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2022, 41(12): 63-68.
- [2] 覃彬, 王舒, 金永喜, 等. 水下爆炸冲击波对有生目标的一种致伤评估模型[J]. 兵工学报, 2016, 37(S1): 71-75. QIN B, WANG SH, JIN Y X, et al. An injury evaluation model for underwater explosion shockwave injuring the living targets[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(S1): 71-75.
- [3] 秦俊华. 爆炸冲击波对人体创伤效应评估软件设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2017. QIN J H. Software design of safety assessment of explosive shock wave on human[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [4] 吉彬. 人体关键部位冲击波超压测试方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2022. JI B. Research on the testing method for shock wave

- overpressure in key parts of the human body [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2022.
- [5] 汤文辉. 冲击波物理教程[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2016:258-259.
TANG W H. Shockwave Physics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2016:258-259.
- [6] LIANG S M, ZHENG K F, YAN J J, et al. Animal study on lysing adipose tissues by shock waves[J]. Journal of Medical & Biological Engineering, 2014, 30(3):145-151.
- [7] LIU Y, CHEN X, GUO A, et al. Quantitative assessments of mechanical responses upon radial extracorporeal shock wave therapy [J]. Advanced Science, 2018, 5(3): 1700797.
- [8] 沈意平, 刘缘, 王钢, 等. 基于 Lamb 波的压电陶瓷/环氧树脂复合材料传感器制备及应用[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(12):19-25.
SHEN Y P, LIU Y, WANG G, et al. Preparation and application of piezoelectric ceramic/epoxy resin composite sensor based on Lamb wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12):19-25.
- [9] 范志强, 马宏昊, 沈兆武, 等. PVDF 压力计在结构表面爆炸压力测量中的应用技术研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(S2):27-32.
FAN ZH Q, MA H H, SHEN ZH W, et al. Investigation on application of PVDF gauges in blast pressure measurement on structure surfaces[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(S2):27-32.
- [10] 翁斌辉. 基于 PVDF 压电薄膜的柔性压力传感器设计制作及应用研究[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2023.
WENG B H. Design, fabrication and application of flexible pressure sensor based on PVDF piezoelectric film[D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2023.
- [11] 邹文, 赵翠莲. 柔性压力传感器在呼吸气流检测中的性能比较[J]. 电子测量技术, 2020, 43(17):153-158.
ZOU W, ZHAO C L. Performance comparison of flexible pressure sensors in measurement of respiratory airflow [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(17): 153-158.
- [12] 王桂从, 赵鹏, 李映君, 等. 压电薄膜三维重载力传感器设计与实验[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(1):11-19.
WANG G C, ZHAO P, LI Y J, et al. Design and experiment of PVDF piezoelectric film 3-D heavy load force sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(1): 11-19.
- [13] 朱金海. PVDF 压电薄膜及其传感器的制备与性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
ZHU J H. Preparation and performance study of PVDF piezoelectric film and sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [14] 李珺杰, 顾晓红, 高远. 水声换能器高频透声橡胶声学及声性能研究[C]. 中国声学学会 2017 年全国声学学术会议, 2017:785-786.
LI J J, GU X H, GAO Y. Study on mechanical and acoustic properties of high frequency transparent-acoustics rubber for underwater acoustic transducer[C]. Proceedings of the 2017 National Acoustics Academic Conference of the Acoustical Society of China, 2017:785-786.
- [15] 陈玲. 可穿戴汗液收集微流控芯片的制备及其相关物理参数分析[D]. 湘潭:湘潭大学, 2020.
CHEN L. Wearable microfluidic devices for sweat sampling and their physical parameters optimization[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2020.
- [16] 崔世海, 段海彤, 李海岩, 等. 皮下脂肪组织本构模型及其生物力学性能研究进展[J]. 汽车工程学报, 2019, 9(4):277-284.
CUI SH H, DUAN H T, LI H Y, et al. Research progress of adipose tissue constitutive model and its biomechanical properties [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(4):277-284.
- [17] 陈业, 温垚珂, 闫文敏, 等. 基于 PVDF 薄膜传感器的猪肝动态压缩力学性能测试[J]. 实验力学, 2021, 36(2):269-278.
CHEN Y, WEN Y K, YAN W M, et al. Dynamic compression mechanical properties of porcine liver based on PVDF piezoelectric film sensor[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2021, 36(2):269-278.
- [18] 陈明华, 吴向垒. 橡胶硬度的本质探讨[J]. 中国计量, 2012(7):74-75.
CHEN M H, WU X L. Exploration of the essence of rubber hardness[J]China Metrology, 2012(7):74-75.

作者简介

潘绪仲, 硕士, 主要研究方向为体表冲击波超压测试。
E-mail:2173733517@qq.com