DOI: 10.11883/bzycj-2024-0118

针对个体防护的冲击波检测评估技术*

胡 勇[1,2], 马 天[1], 王俊龙[1,3], 杜智博[2], 黄献聪[1], 嵇海宁[3], 魏慧琳[1], 柳占立[2], 康 越[1]
（1. 军事科学院系统工程研究院, 北京 100010;
2. 清华大学航天航空学院, 北京 100084;
3. 湘潭大学物理与光电工程学院, 湖南 湘潭 411105）

摘要： 随着新型弹药和大口径重炮的大规模使用, 由爆炸冲击所致非接触式杀伤模式正在快速替代原先由子弹、破片等造成的直接接触性杀伤, 其杀伤威力大、精度高等特点对作战人员和装备更具威胁。本文聚焦于爆炸冲击波检测评估技术, 尤其关注个体防护领域。综述了包括实爆试验和激波管试验等典型爆炸冲击波测试环境, 分析了电测法和非电测法等测试方法和手段的优劣; 探讨了压阻式、压电式和光纤等多类型传感器的研究现状, 强调了传感器向小型化、智能化的发展趋势, 并提出了发展新型传感技术的迫切需求。介绍了结合人工智能技术的冲击波信号处理和超压场重构技术, 研究了包括压缩感知技术、深度神经网络技术等新技术的应用落地成果; 概述了国外典型便携式爆炸冲击波传感系统的整体情况, 总结建议尽快开发具有我国自主知识产权的便携式爆炸冲击检测评估系统, 以期提升作战人员在极端环境下的综合防护和紧急救治能力。

关键词： 爆炸冲击波; 冲击波传感器; 信号处理; 个体防护; 冲击波测试

中图分类号： O384   **国标学科代码：** 13035   **文献标志码：** A

Shock wave detection and evaluation techniques for individual protection

HU Yong[1,2], MA Tian[1], WANG Junlong[1,3], DU Zhibo[2], HUANG Xiancong[1], JI Haining[3], WEI Huilin[1], LIU Zhanli[2], KANG Yue[1]
（1. *Institute of Systems Engineering*, *Academy of Military Science*, *Beijing* 100010, *China*;
2. *School of Aerospace Engineering*, *Tsinghua University*, *Beijing* 100084, *China*;
3. *School of Physics and Optoelectronics*, *Xiangtan University*, *Xiangtan* 411105, *Hunan*, *China*）

Abstract: With the extensive application of new-type ammunitions and large-caliber heavy artillery, the non-contact killing mode caused by explosive shock is rapidly substituting the original direct-contact killing induced by bullets, fragments, etc. Characterized by high lethality and precision, it poses a greater threat to combatants and equipment. This study focuses on the technology of explosion shock wave detection and evaluation, especially in the field of personal protection. It reviews typical explosion shock wave test environments, such as real-explosion tests and shock-tube tests, and analyzes the pros and cons of electrical and non-electrical test measurement methods. The progress of piezoresistive, piezoelectric, and optical-fiber sensors is discussed. The trend of sensors towards miniaturization and intelligentization is emphasized, and the urgent need for new sensing technologies is proposed. This study also introduces the shock-wave signal processing and over-pressure field reconstruction technologies integrated with artificial intelligence, and investigates the application of new technologies like compressed sensing technology and deep neural network technology. In addition, the overall situation of typical foreign portable explosion shock wave sensing systems are summarized. To enhance the comprehensive protection and emergency

* **收稿日期:** 2024-04-29; **修回日期:** 2024-12-24
基金项目: 国家自然科学基金(62103437)
第一作者: 胡 勇(1989—), 男, 博士研究生, 助理研究员, huyong21@mails.tsinghua.edu.cn
通信作者: 康 越(1989—), 男, 博士, 高级工程师, goodluckky@163.com

treatment capabilities of combatants in extreme environments, the necessity of rapidly developing a portable explosion shock wave detection and evaluation system with independent intellectual property rights is discussed.

Keywords: explosion shock wave; shock wave sensor; signal processing; personal protection; shock wave testing

美军伊拉克自由行动战伤统计数据显示，由爆炸冲击波导致的创伤性脑损伤(blast-induced traumatic brain injury，bTBI)占比最大，目前约有 20% 的士兵已经(或正在)遭受爆炸冲击致脑损伤之苦，这不仅会造成作战人员短暂意识丧失甚至昏迷等即时伤情，还可能引起迟发性神经损害，形成严重的战争后遗症[1-2]。因此，如何救治 bTBI 伤员并形成前置有效防护是目前战伤救治和装备研发领域的研究热点。除美军外，乌克兰的 Kazmirchuk 等[3] 将 2022 年战场士兵损伤数据与 2014 年至 2021 年间战伤数据进行比较，发现穿透性爆炸伤占比最大(75%)，且各个时段冲突所致人员损伤比例基本相同；“乌克兰危机”冲突期间，爆炸创伤比例有所升高，为 16%(2014 年至 2021 年间仅为 9%)；枪弹伤占比有所下降，为 8%(2014 年至 2021 年间为 14%)；烧伤比例与之前类似，降低了 1 个百分点，为 1%。这种致伤机制的变化可能是因为在本次冲突期间大量使用了航空炸弹、集束弹药和多管火箭发射系统等高动能武器，以及使用了更多的大口径火炮、坦克等大口径身管类武器装备所致。由此可知，相比于子弹、破片等直接接触性杀伤，大威力、高精度、广范围的爆炸冲击波对作战人员和武器装备更具威胁[4-5]。

作战人员遭受爆炸冲击伤主要有 2 个因素：一是由炸弹/简易爆炸装置爆炸所致[6-8]，二是由重型武器发射时(如大口径榴弹炮、单兵火箭筒等)产生的重复低水平爆炸冲击所致[9-10]。2018 年 4 月，新美国安全中心发布了“超级士兵”系列化报告《提高士兵生存能力的策略》和《保护士兵免受爆炸伤害》，其中建议美军应加大力度保护士兵免受爆炸损伤，加强爆炸损伤的试验、测试和头部防护装备研发等。研究表明，爆炸是在极短时间内释放出能量的过程，所形成的冲击波具有压力瞬态变化的特征。当冲击波超压峰值超过 0.035 MPa 时，开始对人体鼓膜造成损伤；当超压强度达到 0.2～0.3 MPa 时，就能对普通建筑物造成破坏。因此，冲击波超压峰值、持续作用时间和冲量等就成为衡量爆炸威力(或强度)的重要指标，是评估各类武器装备毁伤性能、致伤效果的“金标准”[11]。如何精准获取爆炸冲击波相关信息，还原爆炸冲击流场各参数动态变化过程，对了解爆炸冲击波的发生发展、研究爆炸冲击致伤机理、探索研发有效防护手段和措施，对爆炸冲击风险进行精准评估和提前预警都会起到关键作用。爆炸冲击波超压检测，尤其是针对近爆区的测量，对研究爆炸物性能和冲击波的产生、传播及相互作用具有重要意义。爆炸冲击波测试技术是以捕捉和处理燃烧、起爆、爆炸和冲击等快速反应过程的动态信息为目的的一门综合性技术。该区域冲击波压力信号超压峰值高、上升沿陡峭，被测对象具有高速、高温、高压、瞬时性、单次性和破坏性等特征，同时伴随剧烈的光电效应及大量固体颗粒和带电粒子，测试难度大。由于爆炸与冲击过程涉及时间和空间的跨尺度变化以及多种物理效应耦合的复杂性，理论和数值模拟技术难以完整描述和客观计算，因此测试技术是研究爆炸与冲击复杂过程的必备手段。若测试系统动态特性不佳，会造成信号发生畸变，因此爆炸冲击波检测技术一直是科研人员们研究的重点。

本文中，将从介绍爆炸冲击波典型测试环境和方法入手，首先通过综述爆炸冲击监测传感技术和爆炸冲击流场重构技术分析总结发展趋势，然后对外军便携式爆炸冲击波传感系统的应用情况进行简单介绍，以期为我国相关产品的研发提供借鉴经验。

1　爆炸冲击波典型测试环境及测量技术

“一战”、“二战”期间，科研人员对炸药当量和比例距离与爆炸威力的相对关系进行了深入研究，发现无量纲爆炸距离与测量点无量纲的压力、时间、比冲量及环境参数成单一函数关系[12]。随着军事科技的发展，各主要军事强国都对理想状态下(或极端特殊环境中)的爆炸冲击毁伤效应、爆炸冲击防治关键技术以及相应的测试、评价方法开展了大量研究。对爆炸冲击波测试系统而言，其适用性(系统的时间域、空间域或被测参数域(统称量程)是否满足在高速、高压条件下观测瞬态爆炸过程的需要)、精确性(主要包括精准度、正确性和分辨率等)、稳定性(应具备良好的系统稳定性、温度稳定性等)和可靠性(单次试

验获得有用信号的能力)直接决定了整体测试性能的优劣。如何提升测试系统的上述性能,尽可能还原爆炸现场的各指标参数,是科研人员不断追求的目标。由此催生了包括基于数值仿真计算方法[13-15]、利用激波管模拟爆炸环境[16-18]和实弹实爆测试环境[19-21]在内的多种典型测试环境和试验方法,形成了电测法[22-23]、等效靶板法[24-25]、生物实验法[26-27]和光学测量法[28-29]在内的多种测试评估手段,科学全面地促进了爆炸毁伤理论的发展。

1.1　爆炸冲击波典型测试环境

1.1.1　自由场实爆环境

外场实爆试验是开展爆炸冲击波防护性能评价最直接和有效的手段,其优点是最接近实际爆炸环境。外场实爆试验易受试验环境影响,如炸药类型、炸药当量、试验物品摆放状态和传感器种类及数量等。试验现场需提前准备爆炸装药、被试样品、传感器及数据采集分析系统和高速摄像等影像器材。具体试验时,以三硝基甲苯(TNT)[30-31]、黑索金(RDX)[32-33]、C4 塑胶炸药[19-21, 34-35]或 PE4 炸药[36]等类型炸药作为爆源,待测样品以特定距离围绕在爆源周围进行测试。根据待测样品的尺寸要求,外场实爆试验主要分为等比例测试和全尺寸测试。其中,当涉及研究结构复杂的非弹性变形问题时,应首选全尺寸测试方案;如果仅研究冲击波传播特性,依据相似律原则,可选择更安全、更便利的等比例测试方法。

21 世纪初,美国海军健康研究中心、加拿大国防发展研究中心以及美国陆军实验室等就对在外场实爆试验环境下不同材料、结构以及作战人员爆炸冲击波防护性能开展了深入的研究。基于高仿真物理模型,结合理论建模分析方法,各国科研人员对不同结构的防弹头盔进行了横向评测,发现佩戴头盔和合理设置头盔悬挂件结构等都对作战人员的头部形成了有效防护,通过增配护目镜可进一步降低正面爆炸冲击所造成的伤害[13-14, 37-39]。研究显示:头面部装备的防护性能与爆炸冲击波超压峰值、脉冲、爆炸冲击波波形及来波方向等暴露特征直接相关[34];且在单次爆炸冲击暴露情况下,作战人员颅脑致伤机制也并不唯一,冲击波既可以应力波的形式直接穿过颅骨(所形成的压缩波与拉伸波之间的高频振荡易造成脑组织的撕裂和剪切),也可与颅骨相互作用形成凹陷从而对大脑造成损伤[40]。同时,为了快速显示、快速评价爆炸冲击波对作战人员的致伤情况,Misistia 等[41]还对便携式爆炸冲击波传感器的各项性能指标进行了评测,为该产品的优化升级奠定了良好基础。近年来,我国的 Yang 等[42]、Liu 等[30]、Zhou 等[31]和康越等[43]也相继开展了基于实爆条件的测评试验,所得结果为我国在爆炸冲击防护领域的材料设计及产品开发提供了有利支持。

外场实爆试验虽然直接有效,但通常试验成本高、前期准备复杂、危险性较大。各国科学工作者一直致力于找到可替代(或部分可替代)外场实爆试验的测试方法,以期达到“减负增效”的目的。目前大都通过等效损伤准则开展模拟评估,利用冲击响应谱来确定爆炸冲击环境模拟的主要参数和标准。若被测产品在相当时间内承受了模拟冲击波响应谱的作用,则可认定为经受了同等效应的模拟爆炸冲击测试试验。目前,最常见的模拟环境包括激波管测试环境、机械碰撞模拟爆炸环境和爆炸室等。

1.1.2　激波管的测试环境

激波管是爆炸测试领域最常见和应用最广泛的试验工具,常被用于分析一维、非定常波的流动过程,可在实验室条件下针对高超声速动力学、高温气体物理化学特性和爆炸冲击动力学及防护等领域的基础科学和工程应用问题展开研究[44-47]。从 1949 年开始,传统(理想)激波管逐渐被改装为激波风洞,并应用于气体动力学或爆炸冲击防护等研究领域。当前激波管技术发展迅速,模拟气流的非均匀稳定性问题也得到了极大改善[48-52]。

近年来,科研人员利用激波管对生物体爆炸冲击致伤效应、装备/材料防护效果等开展了大量研究[53]。美国开展相关研究时间早、基础好,研究最深入和全面。其中,Chandra 等[54]着重探讨了激波管模拟实际爆炸场产生冲击波的相关问题,发现测试激波管装置的驱动气体种类、驱动气体压力、膜片材料(预制破裂结构)以及被测样品放置位置等都直接决定了该激波管能否有效模拟由爆炸产生的冲击波。2008 年至今,Tekalur 等[55]、Schimizze 等[56]和 Koumlis 等[57]利用激波管对不同组分、不同结构复合材料的防护性能进行评测,测试结果表明,通过增加聚脲(涂层)、(空心)微珠等微材料(结构)可大大提升复

合材料抗爆炸冲击性能；通过调节复合材料密度、阻抗匹配性以及孔隙率等参数可实现防护不同能量爆炸冲击波的能力。基于高仿真物理评价模型，Eynde 等[17]、Wood 等[58] 和 Skotak 等[59] 重点针对个体防护装备的防护性能进行了评测，发现激波管内不同位置形成的冲击波对高仿真物理模型（对应真实人体）的致伤效果有明显差异，但通过穿软质/硬质防弹衣和佩戴防护头盔等个人防护装备可有效提升人体躯干部、头部的爆炸冲击波防护能力。未来，通过对个体防护装备进行“材料-结构-功能一体化”设计及优化升级可进一步提升其爆炸冲击防护性能。除了对个体防护装备和防护材料进行评测外，Koliatsos 等[60]、Rafaels 等[61] 和 Yang 等[62] 还对不同冲击波强度下的生物体致伤机理进行了探索，研究发现，爆炸冲击对生物体头部的致伤（亡）阈值高于肺部，且对生物体中枢神经系统轴突束的影响较大，易导致脑干部硬膜下区域发生多灶性出血和多种标记物的改变，通过头部和躯干部防护可有效预防头颈部和神经系统损伤。我国于 20 世纪 90 年代开始将激波管装置用于研究爆炸冲击伤，杨志焕等[63]、王正国等[47]、康越等[43] 和 Du 等[64] 相继开展了爆炸冲击伤致伤机理、防护装备评价和防护材料研发等科研工作。

1.1.3　其他测试环境

机械碰撞模拟冲击系统：该类装置模拟产生爆炸冲击波的原理相似，即将试件固定于某块板或梁的特定部位，然后用落/摆锤或气炮等对被试样品进行撞击模拟爆炸冲击作用[27, 65-67]。依据碰撞方式的差异，一般可分为限制式跌落碰撞模拟冲击系统和摆锤式模拟冲击系统 2 类[68-69]。该技术对爆炸环境的中远场（冲击谱量级＜1×10^4g，频率范围＜10 kHz）参数模拟较真实，且试验设备建设资金投入小、试验成本低，但由于缺乏电子控制技术的支持，载荷谱控制仍不理想、调试周期较长。基于此，限制式跌落碰撞和摆锤式冲击机皆借助离散系统的谐振响应对试样进行加载，因此主要针对尺寸（或质量）较小的被试样品开展测试。今后，应着力在增大被试样品的质量和尺寸以及提高载荷谱可控性等方面进行突破性研究。

精确可控模拟冲击系统：为了在实验室环境中模拟相对可控的爆炸载荷环境，2005 年，美国加州大学圣地亚哥分校和 Millennium Technology Services (MTS) 公司合作，研发了一套名为 UCSD（University of California, San Diego’s）的爆炸模拟设备。该设备由多台爆炸发生器组成，利用高速液压驱动装置推动撞击模块撞击试件，产生类似炸药爆炸荷载作用于试件上，可结合计算机进行精确控制，是机械碰撞模拟冲击系统的升级。这就消除了由化学爆炸模拟产生冲击波（火球）等化学效应对测试仪器的干扰，确保了试验整体的可重复性和可控性[69]。

爆破室[70]：主要用于研究爆炸载荷及其响应、开发不同类型的防护材料和结构、销毁过期弹药等。爆破室一般呈球形、圆柱形或矩形结构，可设计承载多次爆破（多考虑弹性响应）或单次极端爆破（多考虑塑性响应）。测试时爆炸载荷放置于几何中心，其缺点在于经过壁面和待测试样的多次反射，爆破室内不同位置的爆炸冲击波波形并不均匀，待测试样也会历经多轮爆炸冲击波加载。

以上 5 种测试环境的优缺点对比如表 1 所示。在实际测试中，科研工作者可根据测试需求、目的以及检测成本等要求选择适合自己的测试环境，从而获得科学、合理的试验测试结果。

表 1　5 种测试环境的优缺点对比

Table 1　Comparison of advantages and disadvantages of five test environments

测试环境	优点	缺点
自由场实爆环境	可真实还原实际爆炸场景；适合大型（全尺寸）模型测试；可开展不同当量测试试验	受天气和环境因素影响较大；数据采集影响因素多；试验成本较高
激波管测试环境	测试环境可控，影响较小；试验安全性较高；试验成本较低	空间受限，无法开展全尺寸测试；后期维护成本高；无法完全模拟实际爆炸环境
机械碰撞模拟冲击系统	试验设备投入少，成本低	载荷谱控制不理想，调试周期较长；被试样品尺寸较小
精确可控模拟冲击系统	试验重复性、可控性较好； 在一定程度上消除了采集的“寄生”效应	
爆破室	测试环境安全； 可承载多次爆破或单次极端爆破	测试时由于壁面反射作用，导致产生爆炸冲击叠加效应； 不同位置爆炸冲击波波形并不均匀

本文中，介绍了自由场实爆环境、激波管测试环境以及其他模拟爆炸环境。在这些测试环境中，激波管环境测试条件相对可控、试验成本较低；自由场实爆环境最接近真实状态，但试验前期准备步骤较为复杂，试验成本较高。实际试验时，可考虑利用激波管及其他模拟爆炸环境开展日常评价测试，利用自由场实爆环境进行考核验证，两者互为补充。

1.2　爆炸冲击波测试方法

为了对不同型号弹药的毁伤能力进行准确评估，早在二战时期，各国就已开展了针对爆炸冲击波的现场测试和损伤评价工作。经过测试技术的发展和创新，已形成包括电测法、等效靶板法、生物实验法和高速摄像法（光学测量法）等一系列测试评价方法。

1.2.1　电测法

电测法主要通过记录传感器所采集的信号来表征冲击波超压随时间的发展历程，通过数据处理可对比分析冲击波信号的变化规律。按照传输存储方式，电测法可分为最常用的引线电测法和近些年迅速发展的储存式电测法[22-23, 71-72]。

引线电测法的基本原理是通过爆炸冲击激活超压（或加速度）感应模块，该模块接收到爆炸冲击信号后自动转换成电信号，后经引线传输至数据处理模块，待信号处理后存储于数据采集系统中，最后经数据分析软件计算、分析后得到压力-时时间曲线，实现测试评估[73]。引线电测法最早诞生于美国，随着电子技术的逐步成熟，1981 年，美国陆军试验与鉴定司令部对空气冲击波超压电测方法的试验装备、操作章程、数据处理及测试要求等进行了详细规定，并由此形成了试验检测操作标准《Electronic Measurement of Airblast Overpressure》[74]。

此后，各国科研人员沿用该技术进行爆炸冲击波检测并延续至今。引线电测法的测试技术最成熟，应用也最广泛，可有效记录爆炸冲击波的整个传播过程，并对载荷信息进行定量化采集（包括冲击波超压峰值和持续作用时间等变化历程），且通过读取超压-时间历程曲线可精确还原冲击波压力场信息，极大地促进了对所采集数据的理解、加工和分析。但该方法也有现场安装、调试和校准步骤繁琐（需通过低噪声长电缆连接，增加测试风险），易受由爆炸产生的高温、冲击、振动和电磁环境等威胁干扰和影响，易形成测试信号叠加或寄生输出等问题。

为了克服在爆炸冲击测试过程中引线测试法产生的“寄生”效应，进一步拓展其应用范围，基于存储式冲击波记录器（AVLSWR），奥地利 AVL 公司发展了存储式测试技术[22]。存储电测法是将压力传感模块、信号调理及数据采集模块、逻辑运算控制模块和 Flash 存储模块集成一体并置于爆炸冲击环境内，爆炸发生后采集装置被激活，载荷信息被存储、录入，待试验结束再通过相关软件读取已存储信息的方法。与引线电测法相比，存储电测法具有操作便捷、使用方便等优势，可以有效避免引线测试法中因导线过长导致的测量误差和信号衰减失真问题，但也存在因选择触发时机不当导致测试失败等缺陷[75]。近年来，随着电子测试技术和动态检测技术的发展，科学工作者逐步将远距离数据传输、多参数程控、多次连续触发存储、北斗授时和 Wi-Fi 组网等先进技术融入爆炸冲击波存储测试系统中[76-77]，优化了存储测试装置的远程控制、反馈和数据读取功能，拓展实现了单传感器多次触发、多传感器同时触发的功能，部分解决了存储电测法的现实难题。

1.2.2　非电测法

等效靶板法：该方法是根据爆炸后靶板的破坏程度（最大残余塑性变形量、最大变形挠度和破裂程度等）定性/定量地评估爆炸冲击波毁伤效能的方法[24-25]。虽然该方法不能获得定量化的冲击波流场信息（如超压随时间变化的超压-时程曲线等），但其具有布置简单、试验成本低等优点，常用于评估穿甲弹、破甲弹等弹药的爆炸毁伤能力和武器装备/大口径弹药的战斗部威力。

光学测量法：该方法是利用高速摄像机拍摄爆炸冲击波波阵面运动过程，继而利用相关软件将波阵面传播图像信息和图像拍摄帧率结合，计算/还原爆炸冲击压力（流场）信息和规律的测试方法[28-29]。该测量法难以得到准确的冲击波超压峰值和冲击波随时间变化的规律信息，但能实现爆炸冲击波波阵面及流场运动的可视化观测，是试验的重要辅助测试手段。

借助纹影测试技术与高速摄像技术可以清晰地观察到冲击波波纹及流场传播变化的整个过程。胡洋等[78] 和郑星等[79] 设计了 Z 形光路方案，通过高速电荷耦合元件(charge coupled device, CCD)成像单元，搭建了高速纹影系统，清晰地复现了整个爆炸过程，再结合冲击波超压传感器采集数据，为后续冲击流场信息分析奠定了坚实基础。李斌等[80] 和张雄星等[81] 分别利用光学纹影方法对爆炸冲击波波纹和加热平台的温度场进行测量，实现了爆炸冲击过程中温度场信息的定量化检测和流场信息的可视化监控。

生物实验法：该方法是将被试活体生物(通常为鼠、兔、羊或猪等)置于爆炸场中，通过观察不同当量炸药对生物体典型器官的破坏程度判断毁伤等级，以实现评估爆炸冲击波威力场能力的测试方法[26-27]。该方法测试所得爆炸冲击致伤结果较为真实、更具说服力，但具体试验时将受到社会伦理的严格限制，也有悖于人与自然和谐发展的理念。

5 种测试方法的优缺点详见表 2。总结发现，电测法应用最广泛，其余测试方法由于难以形成定量化分析结果，常作为辅助分析手段。对于实际测试，尤其是外场实弹实爆测试，爆炸毁伤过程转瞬即逝，高温、高压和冲击波(破片)等同时作用于测试系统，对测试仪器的影响非常严重。传统电测法(有线法)存在抗干扰性、验证性、环境生存能力及适应性差等问题，直接影响测试数据的可靠性和准确性，新型无线电测法应在时间同步性、数据传输等方面进一步发展。辅助分析手段中，等效靶板法的优点是使用方便、成本低、对冲击波敏感，能通过靶板形变间接反馈冲击载荷对待测试样的综合毁伤效应(如冲击波超压、比冲量和持续时间等综合作用效果)，同时能有效避免爆炸场测试信号“寄生效应”的影响；尤其适合大当量爆炸冲击环境的测试工作，可对传统电测系统形成有效补充。光学测试法需要进一步提高 CCD 相机的分辨率，将爆炸波光学测量从二维发展到三维，提升光学设备的环境适应能力，从而促进光学法与电测法结合发展。

表 2　5 种测试方法的优缺点对比

Table 2　Comparison of advantages and disadvantages of five testing methods

<table>
<tr><th>测试方法</th><th>优点</th><th>缺点</th><th>备注</th></tr>
<tr><td>等效靶板法</td><td>成本较低、布放简单，可定性/定量评估爆炸威力</td><td rowspan="2">定量测试结果不准确，不能准确测得冲击波超压峰值和冲击波随时间变化的曲线</td><td rowspan="3">非电测法</td></tr>
<tr><td>光学测量法</td><td>记录直观，实现爆炸冲击波波阵面及流场运动的可视化</td></tr>
<tr><td>生物实验法</td><td>测试结果直观，说服力强</td><td>受社会伦理严格限制，专业性较强</td></tr>
<tr><td>引线电测法</td><td>可完整记录冲击波的传播过程，还原冲击波流场信息</td><td>现场安装、调试和校准步骤繁琐，且易干扰，易形成测试信号叠加或寄生输出问题</td><td rowspan="2">电测法</td></tr>
<tr><td>存储测试法</td><td>不需引线，布置方便，抗干扰能力强</td><td>设备昂贵，容易丢失测试信息</td></tr>
</table>

2　冲击波传感检测关键技术研究

爆炸冲击效应由化学能瞬间释放产生，其能量主要集中于 0～40 kHz 的频段内，要求测试传感器的固有频率达到 0～2 MHz(即目标信号频率的 3～5 倍以上)[82]。常见的压阻式压力传感器的频响为 0～300 kHz[83]，压电式压力传感器的频响为 0～500 kHz[83]，光纤压力传感器的响应频率可达 4 MHz 以上[84]。除宽频带外，传感器还应具有高频响、良好检测线性度特性(能可靠记录冲击波压力的变化情况)，高信噪比、高灵敏度和良好的抗干扰特性(应降低温度、高冲击载荷产生的采集负效应)，体积小、质量轻特性(减少因体积引起的流场扰动难题)和良好的环境适应性。针对个体防护评估测试领域，目前科研/工业界最常使用的是压电式压力传感器，压阻式压力传感器更适用于微小空间和小压力测试环境，新型光纤传感器因体积小、测试性能优而呈现快速发展趋势。

从 20 世纪 50 年代科研工作者发现材料的压阻(压电)效应开始，爆炸冲击测试用传感器也历经了从实验室发明阶段到逐渐走向实际应用测试阶段。随着科学技术和试验技术的不断进步，传感器也不断朝着小型化、轻量化、测试精确化和智能集成化方向发展，不断提高其在爆炸冲击环境中的适用性。

实际测试中多采用压电式压力传感器构建的超压测试系统进行检测。系统整体性能通常由其静态特性和动态特性共同决定,系统内各组成仪器校准标定繁琐,且实验室校准环境(仅对传感器自身进行校准、标定)与试验现场环境(忽视了自由场测压安装结构、地表反射压测量安装结构、靶标壁面安装结构等实际安装方式对系统灵敏度及频率特性的影响)存在较大差异,对爆炸冲击波的信息采集而言,如何提升测试系统的动态特性,减少毁伤工况下复杂环境因素造成的“寄生效应”尤为重要,传感采集单元就是其核心关键因素。下面分别对其进行讨论。

2.1　超压传感器研究现状

2.1.1　压阻式压力传感器

1954 年, Smith[85] 首次发现了压阻效应,即由外界压力改变导致敏感材料(元器件)发生形变(或应变)而电阻值产生变化的现象。基于此原理,科研人员成功研制了压阻式压力传感器。许多金属或非金属、合金材料、半导体材料以及陶瓷材料等都具有压阻效应,其中,锰铜、碳、铬合金以及锰铜锡合金是目前研究(应用)较为广泛的压阻敏感材料[86]。锰铜是应用最早的压阻材料[86], 20 世纪 60 年代,科学工作者就已将基于锰铜材料的压力传感器应用于动态高压环境的测试中[87-88]。多年研究表明,在接近 120 GPa 的高压环境下,锰铜材料自身不会发生高压相变,状态相对稳定。因此,基于该材料研发的压阻式压力传感器具有量程大(最高可达 100 GPa 左右)、响应快、线性度好等特点[86]。该类型传感器应用极为广泛,胡宇[86] 针对水下爆炸冲击波检测的实际需求,研发了一系列测试量程由几百兆帕至 1 GPa、上升时间为 0.8 μs 的锰铜材料压阻式压力传感器,可满足不同压力环境的测试需求。20 世纪 70 年代以来,随着硅半导体材料的迅速发展,基于硅基敏感材料的压阻传感器逐步应用于动态测试领域。硅片复合压阻敏感材料是目前最常见的结构组成形式,作为基底的硅片除需满足力学挠度理论要求外,还需考虑测试采集电路以及相应导线的连接要求[89]。高温环境下,硅基压阻式压力传感器应进行温度补偿,尽量防止出现零点及测试灵敏度飘移现象[90],故大多数硅基压阻式压力传感器要求使用温度为−20～80 ℃。针对该类型传感器的测试缺陷, Aryafar 等[91]、王冰[92]、吴如兆[93]、杜红棉等[94]、张健中等[95] 通过提出新的被动温度补偿技术,在敏感材料表面覆盖保护薄膜、涂覆硅脂混合物等方式有效提升了传感器的耐温、耐光性能,提高了极限温度测试的准确性,拓展了应用范围。为了提升传感器的测试能力,拓展其适用范围,邬林等[96] 设计了一种陶瓷基压阻式压力传感器,该传感器基于厚膜电阻效应制备而成,当施加外力时,可改变导电颗粒间的相互作用状态,致使厚膜电阻阻值发生明显变化,该传感器被广泛应用于各类测力环境中。韩红彪等[97] 研发了一种齐平封装动态高频压阻高压传感器,通过在敏感材料中溅射光反射与阻挡金属层,在硅片中掺杂其他金属材料提高其在光、热环境中测试能力以及抗电磁干扰性能。20 世纪 90 年代开始,碳材料逐渐成为材料领域的研究热点,研究发现,碳材料的灵敏度是锰铜的 20 倍,是钇的 2 倍,基于碳材料的压力传感器的测试信噪比较高,满足低压力(10^7 Pa, 甚至 10^5 Pa)环境的测试要求[98]。其中,基于多层石墨烯薄膜材料的压力传感器,当薄膜共振频率为 4 MHz 时,可准确测量 8～1 000 mbar(1 mbar=10^2 Pa)的微小压力[99]。

近年来,随着半导体材料制备技术和微纳加工技术的不断进步,压阻式压力传感器尺寸体积越来越小(＜1 mm),测试量程不断增大(测试上限接近或超过 100 MPa),测试上升时间变短(＜0.5 μs),信噪比变优,测试耐温性及工作时长也逐步增加,这极大地拓展了压阻式压力传感器的适用范围,并逐步应用于高频动态测试。对于幅度较低的动态压力测量(如 1～1 000 MPa),压阻式压力传感器的 $\Delta R/R$ 值很小,不便直接检测,因此常将其转变为相应电流或电压值,用低压力量程的压阻法测试系统进行检测,因此由 4 个电阻构成的惠斯顿电桥便成为最常应用的结构形式[100]。在这种测压系统中,把压阻式传感器接入电桥测量电路,然后配置适当的增益运算放大器和记录器,可实现低压力量程的冲击波压力测试。研究发现,基于微机电系统(micro-electro-mechanical-system, MEMS)技术的压阻式压力传感器灵敏度多取决于压阻敏感材料本身的特性,如微观结构(丝状、箔片式或薄膜式等)[86],尺寸大小(面积、厚度)[101] 或与支撑膜片的相对位置[89] 等。阎文静等[89] 研究发现,压阻敏感材料薄膜越薄,平面尺寸越大,则压阻式压力传感器的灵敏度越高,且当压阻敏感材料为正方形时,灵敏度较好;折线形压阻敏感材料虽然灵敏

度较好，但线性度较差；当压阻敏感材料布置在支撑层边缘时，测试灵敏度较高。2017 年后，Riondet 等[102]和 Sanchez 等[103]分别研发了一种基于微纳结构硅基敏感材料的压阻式压力传感器，该类型传感器都具有很高的谐振频率，可用于精确测量爆炸冲击环境下冲击波的超压峰值。基于 MEMS 技术，Zhang 等[104]制备了一种锰铜薄膜超高压传感器，该传感器以氧化铝陶瓷为基底，依次溅射锰铜敏感元件和铜电极材料，并包覆聚酰亚胺绝缘层。测试发现，该传感器敏感材料压阻系数为 0.0125 GPa^{-1}（静态测试结果），响应时间为 37 ns（动态测试时，爆轰压力为 12.66 GPa），适合应用于微尺寸下的超高压测试。

在传感测量领域，国外研究起步早，产品种类丰富、适用性强。典型生产企业/制造商包括美国 Kulite、ENDEVCO、Entran 和法国新鲁母贝格等公司[105-106]。其中，美国 Kulite 公司在全球动态压力传感器行业久负盛名，其 XCL 系列（如 XCL/XCEL-072、XCL-100 等）和 XCQ 系列（如 XCQ-062 和 XCQ-080 等）微型动态传感器被广泛用于微小空间压力变化和动态气压变化检测。除此之外，该公司还拥有适用于各种高/低压环境和高冲击测试场景的传感器产品，服务于航空航天、船舶、汽车、防卫、石化和矿山等各个领域。ENDEVCO 公司成立于 1947 年，2019 年被 PCB 压电传感器公司收购，其制造的动态压阻式压力传感器产品以环境适应性强、使用耐久性好以及测试时间响应快而闻名于世，也是爆炸冲击和动态测量行业的先驱。我国压力传感器的研究开始于 20 世纪 60 年代，林俊德院士团队在 20 世纪 80 年代研发出首款具有我国自主知识产权的压阻式压力传感器（型号 CYG-40）[83]，该传感器量程为 490 kPa～12.25 MPa，固有频率和测量上升时间等指标较优。目前，我国有不少高校、研究（院）所类单位针对压阻式压力传感器开展研究，也有相当数量的企业（包括但不限于昆山双桥传感器测控技术有限公司、上海天沐传感器有限公司和杭州集普科技有限公司等）研制并生成了国产系列化传感器成品。在爆炸近场测量领域，与国外产品差距正在逐渐缩小。从报道的文章看，虽然某些型号的测量温度范围更宽，但在测试量程、精度，固有频率等方面仍需提高。

2.1.2　压电式压力传感器

压电效应是指某些材料在机械应力作用下两端面间产生电压的现象，压电式压力传感器正是基于此效应而设计研发的测试敏感器件，该器件的敏感单元和转换元器件均为压电材料[107]。压电式压力传感器受外力作用变形时，将机械信号直接转换为电信号，经电荷放大器和测试电路等变换处理后输出正比于所受外力的电量。该电量大小由压电式压力传感器中压电材料自身的性能（压电晶体常数、压电片面积）、外载荷大小及敏感单元微结构尺寸（安装间隙、相对位置）等因素共同决定[108]。

常见的压电材料包括无机材料、有机薄膜和复合材料等[109]。其中，以压电晶体（石英）、压电陶瓷和有机高分子薄膜类材料为基础制备的压电式压力传感器应用最广泛[110]。石英晶体材料是最早被人们发现并应用于制备压电式压力传感器的材料，其性能稳定，不易老化，工作范围较宽（−10～500 ℃），多用于复杂环境测试。但由于石英材料的压电系数较弱，目前已逐步被压电陶瓷材料（锆钛酸铅（PZT）、钛酸钡（BTO）和氧化铝（Al_2O_3））替代[111]。与石英晶体相比，压电陶瓷具有更好的机械和抗冲击性能、更高的压电系数以及较好的可塑性，适用范围和测试精度得到了大幅提升[111]。随着科学技术的不断进步，如何实现高精度、高可靠性测试一直是各国科研人员关注的重点。Liang 等[112]基于 PZT 厚膜压力敏感单元（厚度为 25～100 μm）设计制作了非晶结构压电式压力传感器，通过激波管测试发现，该传感器在给定压力范围内具有优异的电压-压力线性关系。与商用传感器相比，PZT 厚膜传感器结构简单、灵敏度高（813 mV/kPa），该传感器件为柔性化应用打下了良好基础。刘相果等[113]基于 PZT-PZN-PNN-PCN 五元压电体系制备了球面阵列式压力传感器，并对其性能进行了优化升级，实验证明了该类型传感器可完全满足爆炸冲击波压力和能量密度分布的测试要求，测试结果验证了爆炸冲击过程中冲击波空间分布状态不均匀的科学假设。近年来，有机高分子柔性薄膜材料（聚丙烯（PP）、聚碳酸酯（PC）和聚偏氟乙烯（PVDF））因其轻质高强（厚度仅为几十至几百微米）、易加工、低成本和优异的压电性能（高灵敏和高频响）等优势而成为研究的热点，其中对 PVDF 材料研究最广泛[111]。20 世纪 70 年代开始，各国科研工作者就对基于 PVDF 材料的薄膜压力传感器开展了各类研究，Bauer[114]分别采用霍普金森杆和冲击平板实验，对该类型传感器在 0.1～35 GPa 范围内的动态响应特性进行了测试，发现该器件测试重复性较好，可

满足爆炸冲击测试。PVDF 薄膜压力传感器主要应用于高载荷条件(兆帕到吉帕量级)，但针对千帕级别压力测量的研究相对较少(低压力作用下，力电响应呈非线性特征)[111]。

压电式压力传感器的测试精度除受到压电材料本身的影响外，敏感单元微结构、传感器本身形状结构以及测试环境(热作用、机械振动等寄生效应)等因素都具有重要影响[115]。基于激波管测试环境，杜红棉等[116] 发现，不同结构的自由场超压传感器(如笔式[117]、杆式[118] 和盘式传感器，见图 1)各有优劣：当点状爆源易定位时，建议选用笔式结构传感器；当冲击波流场较复杂、不易确定冲击波方向时，建议选用杆式结构传感器；当需要进行全方向测试时，可选用盘式结构传感器。常见的压电式压力传感器微观结构多为膜片型，即核心元器件(感应膜片)将输入压力转化为电量并进行数据采集和检测。研究发现，为了提高对以传统压电晶体和压电陶瓷为基础研发的压电式压力传感器的检测线性度，会特意减小底座膜片与压电材料间隙，采用预紧压缩方式进行安装，即压电材料在无外载荷的情况下仍会承受一定压力。此时，该结构中，间隙尺寸、引线长度、黏结材料和封装工艺等都会对传感器的测试性能产生影响。为了减小测试过程中瞬变温度对传感器的影响，可采用强制冷却(风冷、水冷)、贴覆隔热片/温度补偿片以及在感应端涂抹隔热材料等方式实现。邱艳宇等[119] 通过对比在传感器感应端前涂抹凡士林或包裹隔热纤维布 2 种方式，发现 2 种隔热措施都会减小传感器的高频响应，且包覆隔热纤维布的测试效果优于涂抹凡士林。为了减小因爆炸冲击引发地面振动而造成传感器的附加输出作用和加速度寄生效应，解决压电式压力传感器低频响应差等问题，我国科研人员通过增加附加结构(材料)结合数值模拟等方法，分别提出了对应冲击振动、冲击加速度和针对低频测试的动态补偿方案，使改进后的传感器性能大幅提升[73]。PVDF 材料的薄膜压力传感器应用范围较宽，不仅适用于空气、水下等不同爆炸冲击环境，也可根据表面形状进行剪裁定制，由于测试时应粘贴在待测物体表面，因此传感器界面两侧物质的物理特性对测试结果影响较大，测试时应避免 PVDF 薄膜压力传感器产生斜向形变以提升其测量精度。除此之外，外电极引线方式、敏感器件表面的粗糙度和可允许形变程度、封装用黏结剂以及外保护层等都会对 PVDF 薄膜压力传感器测试精度产生影响。王永强等[120] 采用不同封装保护材料(聚酰亚胺(PI)和聚对苯二甲酸类材料(PET))和黏结剂材料(单组份和双组份环氧树脂)对实验室制备的 PVDF 材料薄膜压力传感器的测试精度进行测试，发现单组份环氧树脂和 PET 薄膜封装保护材料的性能最优。谢林等[121] 研究了不同厚度阻尼层对 PVDF 材料薄膜压力传感器测试精度的影响，发现通过增加阻尼层能大幅降低过冲信号幅值，提高传感器测量信号的脉宽和频响。

(a) Pencil probe[117]　　(b) Blunt cylinder mount[118]　　(c) Skimmer plate[116]

图 1　不同传感器[116-118] 示意图

Fig. 1　Schematics of different sensors[116-118]

根据传感器内部是否放置电荷放大器，压电式压力传感器可分为电压输出型(IEPE 型或 ICP 型)和电荷输出型(PE 型)。电荷输出型传感器通常应用于准静态压力测量、极端(极低或极高)温度测试(传感器中无电子元件)或仅部署单个压力传感器的测量场景中[122]。得益于 MEMS 技术的发展，电压输出型传感器因电荷放大器内置，摆脱了测试过程中因插接线缆带来的采集问题，形成了低阻输出、高信噪比和高灵敏度采集的优势，从而被广泛应用于爆炸冲击及跌落碰撞等动态测试领域。近年来，科研人员先后将无线数据传输技术、动态补偿技术、节点互触发/多点同步触发技术及时统、多重触发技术融入测试系统，对其进行优化升级，有力地提升了系统测试的便利性和准确性。

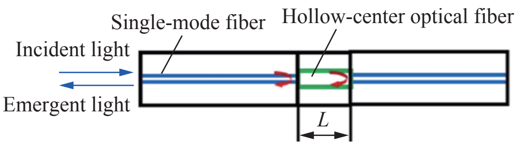
国外于 20 世纪 50 年代开始进行压电式压力传感器的工业化生产，经过几十年发展，目前全球势力较强的企业主要包括瑞士 Kistler 公司[106]、美国 PCB 公司[123] 和丹麦 B&K 公司[124]。其中，美国 PCB 公司处于压电传感器研究领域的“领头羊”地位，该公司研发出的以电气石、石英和压电陶瓷等材料作为敏

感元件的压电式压力传感器皆具备宽幅值(频率范围)和高频响的特点,被世界科研人员高度认可,尤其是由该公司生产的 PCB113B 系列、PCB137 系列和 PCB105C 系列传感器被广泛应用于爆炸冲击测试领域。我国在该领域的研究起步相对较晚,直到 1998 年,北京理工大学才成功研制出首款以压电陶瓷为敏感元件的 H-96 型声吸收杆式压电压力传感器和 HZP2-WA 型自由场压电压力计[125]。目前,我国相关企业(包括但不限于扬州科动电子技术有限公司等)主要生产以石英为敏感元件的压电式压力传感器,其典型代表产品 KD 系列压力传感器具有体积小、频响高、温度特性好、可靠性高和抗冲击性能优等特点,已被应用于多种压力测试环境。与国外同类产品相比,我国自主研发的压电式压力传感器的测试精度和准确性已无明显差距,但对于多次测试、长时存放和有效解决因爆炸产生的寄生效应等方面而言,我国研发产品的性能仍需优化提升。

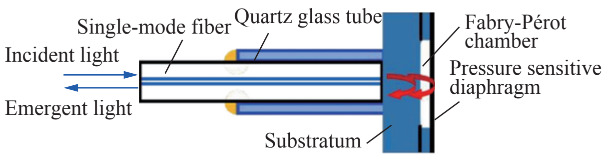
2.1.3　光纤传感器

光纤传感器是以光学量转换为基础,以光信号为变换和传输的载体,利用光导纤维输送光信号的一种传感器[126]。其原理是利用在扰动前后(如气体浓度、力、温(湿)度场或多种物理量同时存在的情况)光的全反射差值信息推导计算扰动信息,即光从 2 层透明介质之间入射并在高折射率介质中传播,入射角足够小时会形成全反射(100% 反射)现象,如果此时周围有扰动,光纤内部的反射光就无法形成全反射,导致接收光信号发生变化,经推导换算即可获得该扰动信息。光纤传感器可以直接将信号接入光谱仪等光学仪器中进行分析,也可以通过光探测器将光信号转换为电信号再进行分析[127]。常用的光纤传感器可分为非干涉型传感器(针对光强度进行调制)和干涉型传感器(针对光相位进行调制)[128],对于前者而言,扰动信息是通过与之对应的传输特性来测量的。传感器本身结构简单,使用广泛,但缺点是动态测试范围相对较窄;对后者而言,通常是通过单模光纤和干涉仪观察外部扰动产生的光干涉条纹,从而实现对扰动信息的测量,相位调制传感器的精度和灵敏度较高,但设备结构较复杂,易损坏。

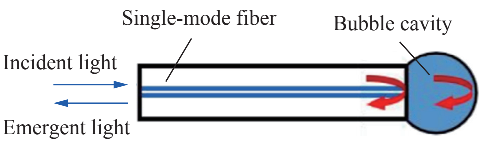
近年来,法布里-珀罗结构(Fabry-Pérot, F-P)光纤传感器是该领域的研究热点,开发应用也最广泛[129]。其由 2 个覆盖感应薄膜的平行端面构成,两端面间距为 F-P 腔体长度,当外界扰动(如压力、温度等)作用于膜片上时将造成形变导致 F-P 腔体长度变化,从而推导出扰动信息。F-P 光纤传感器以光纤是否作为敏感单元为标准,分为本征型 F-P 光纤传感器(intrinsic F-P interferometter, IFPI)和非本征型 F-P 光纤传感器(extrinsic F-P interferometer, EFPI)[130]。其中,针对 IFPI 的研究较早,光纤不仅作为光信号的传输载体,而且作为传感器的敏感单元。虽然该类型传感器结构简单,但在多物理场的耦合作用下测量误差较大。EFPI 应用最广泛,其光纤只作为光信号传输载体用于信号传输,实际测试时该类型传感器不易被干扰,但传输过程中光损耗较大,4 种典型 EFPI 的结构示意图见图 2[131]。



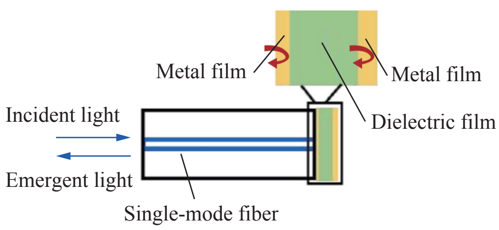
(a) Hollow-core fused silica fiber EFPI sensor



(b) Diaphragm-type EFPI sensor



(c) Bubble-type EFPI sensor



(d) Thin-film-type EFPI sensor

图 2　4 种典型的 EFPI 型光纤传感器结构示意图[131]

Fig. 2　Schematic structures of four typical EFPI-type fiber optic sensors[131]

F-P 光纤传感器膜片材料可选用金属及金属氧化物(如 Au、Al、Ag、Si 和 SiO_2 等)[132-134]、石英膜片[135]和有机物薄膜[136]等，EFPI 的 F-P 腔体可由空气、水、有机物和高聚物等充当填充介质[130]。F-P 腔体中，以空气为介质的非本征型 F-P 光纤传感器的敏感膜片对传感器的性能有重要影响，膜片越薄，感应模块承压能力越低，但响应时间越短，采集灵敏度也越高[84]。随着 MEMS 技术的不断发展，科研人员们通过引入物理(化学)沉积工艺、湿法刻蚀和飞秒激光等先进技术结合新材料不断设计研发新型 F-P 光纤传感器，并对其各项性能参数进行优化。Macpherson 等[137]基于单根光纤，利用铜薄膜和热蒸发技术制备了一型高带宽的光纤压力传感器，并将其运用于测试爆炸冲击波环境。Wu 等[138]基于单模光纤和多模光纤结合 SiO_2 薄膜(厚度为 3 μm)制作了全光纤压力传感器并用于冲击波测试。在 10 psi 压强测量范围内，该传感器灵敏度为 1.93 nm/psi(测量范围＜10 psi，1 psi=6.9 kPa)，响应时间小于 0.4 μs，经优化升级，响应时间可进一步缩短至 200 ns，谐振频率提高至 4.11 MHz(测量范围＜5 psi)。F-P 光纤传感器除了可以实现对单一物理量进行有效测量外，还可实现对多物理量进行联合测试。Bae 等[139]基于 MEMS 工艺和紫外光成型技术分别制备了具有双联构型的 F-P 腔体结构光纤传感器，两类传感器都可实现对“压力-温度”场信息的同步监测。Ma 等[140]利用 MEMS 技术，将多层石墨烯薄膜(厚度 100 nm)应用于光纤 F-P 传感器中，该传感器可对于声学信号特征和气体浓度等信息开展精准监测。近年来，彭丽[72]和张红柱[134]也对光纤传感器开展了大量研究并将其应用于空气流场、水下冲击波(声波)测试中，并取得了一系列重要成果。

F-P 腔体中，以实体为介质的非本征型 F-P 光纤传感器高频响应特性相对更好，具体结构表现为在光纤端面制作一定厚度但折射率不同的光学薄膜。Beard 等[136]在光纤端面采用镀膜方式制作了“金属-派瑞林-金属”F-P 腔体结构光纤传感器，实现了最大超压为 11 MPa 的压力测试。之后，随着湿法刻蚀工艺和飞秒激光技术的引入[141]，研究者们成功设计并制作出了具有实体介质结构的多样化的 F-P 腔体光纤传感器。但上述工艺会对光纤本身造成损伤，结构强度下降，使光纤变脆，降低了承压能力，缩短了使用寿命。借助沉积工艺、MEMS 工艺和 3D 打印技术制备的光纤传感器可使薄膜传感单元的厚度和形状向可控化、定制化方向发展，极大地拓宽了适用范围。近年来，随着 F-P 腔体和光纤光栅级联合光纤传感器、多层级不同折射率反射膜技术光纤传感器的问世，进一步提升了传感灵敏度，提高了信号的解调精度[142]。

表 3 统计了 5 种典型爆炸冲击波测试用压力传感器的性能参数[132-134]。总的来说，压阻式压力传感器制造工艺简单、易大规模量产，具有检测精度高、灵敏度好，后继电路简单、体积小等优点。但也有测

表 3　5 种典型爆炸冲击波超压传感器性能对比[132-134]

Table 3　Comparison of the performances of five typical explosive shock wave overpressure sensors[132-134]

品牌/公司	型号	压力测量范围/psi	灵敏度/(mV·psi^{-1})	分辨率/mpsi
PCB	105C系列	100/1 000/5 000	50/5/1	0.005/20/100
	113B 系列	50/100/200/500(1 000)	100/50/25/10	1/1/1/2
	137B 系列	50/250/500/1 000	100/20/10/1	10/0.7/1/8.5
Kistler	601CBA	22/50/100/200/500/1 000/3 626	230/99/49/25/9.9/4.9/1.4	
扬州科动	KD2004L系列	145/72.5/29/7.25/1.45	0.345/0.69/1.725/6.9/34.5	

品牌/公司	型号	谐振频率/kHz	上升时间/μs	非线性度/%	质量/g	温度范围/℃
PCB	105C系列	≥250	≤2	≤2	4.3～11.6	−73～121
	113B 系列	≥500	≤1	≤1	4.5～6	−73～135
	137B 系列	≥400	≤6.5	≤1		−73～135
Kistler	601CBA	＞215	≤1.4	≤1	3.6	−55～120
扬州科动	KD2004L系列	≥200	≤2	≤1	14	−40～120

注：1 psi=6.9 kPa

试量程小、非线性度差、易受温度/光照/振动等外界环境影响、测试“寄生效应”明显等不足，所以大多被应用于低频、低压力测试环境。压电式压力传感器具有结构简单、工作可靠、工作温度和测量范围宽等优点，但也存在高速上升脉冲前沿精确测量难度大（因输出阻抗高造成测试上升时间偏大）、实际测试低频响应差（无法实际静态测试、负压测试）、采集信号处理较复杂（测试噪声难以克服、测试电路绝缘性要求较高）和采集测试成本较高等缺点。压电式压力传感器被广泛应用于动态数据监测领域，是目前科研/工业界最常用的冲击测试装置。光纤传感器具有尺寸小、重量轻，抗高温高压、抗电磁干扰的特性，本身可以满足高频响要求，适用于各类复杂测试环境。

2.2　加速度传感器研究现状

借助加速度传感器可实现对过载数据、振动冲击和运动姿态等信息的采集、存储与分析，从而为识别目标状态、探求冲击致伤机理提供数据支撑。常规的力学加速度传感器通常可简化为一个由弹簧、质量块和阻尼器等组成的简单力学模型（二阶连续时间系统），其工作原理是基于牛顿第二定律进行力学（冲击、振动状态）与电学信息相互转换，从而完成对冲击（振动）信息的有效检测，即当有外力作用于传感器时，质量块结构为保持原有形态将产生惯性力作用，致使与其连接的制成结构（一般为连接梁构型）发生位移或结构（形状）变化，从而完成力-电信息转换，实现对外部加载加速度的精确测试[143]。量程是加速度传感器的一个重要指标，不同测试对象对加速度传感器的测量范围需求各有侧重。传统大口径弹药、钻地弹，甚至是核武器的触地加速度可以达到 10^3g～10^5g，目前常用的高 g 值商用传感器包括但不限于 PCB 350B21（最大冲击加速度为 10^5g）、Kistler 8743A1000（最大冲击加速度为 1.2×10^5g）和 ENDEVCO 2225M5A（最大冲击加速度为 10^5g）等[144-145]。针对炸弹爆炸条件下个人防护实际需求，由于在极端情况下人员可承受的最大瞬时加速度通常不会超过 $270g$，所以常采用量程小于 2 000g 的加速度传感器。鉴于苛刻的测试条件和检测环境，加速度传感器必须具备可承受高冲击振动、可在高温高湿等恶劣条件下工作的使用要求，还必须具备大量程、高谐振频率、强抗干扰能力和短响应时间特性。除此之外，体积越小、重量越轻、功耗越低的传感器件一直是各科研强国所追求的目标。借助 MEMS 工艺生产的传感器件一般采用“悬臂梁-质量块”简化结构模型进行描述，其中悬臂梁构型相当于传统结构中的“弹簧件”角色[146]。由该工艺加工制备的加速度传感器正朝着轻质、薄层、性能优异的方向持续发展，这也为适配个人防护检测需求奠定了坚实基础[147]。

根据不同感应原理，加速度传感器通常被划分为以下几种类型：压阻式加速度传感器、压电式加速度传感器、电容式加速度传感器、谐振式加速度传感器、电子隧道效应加速度传感器、热对流加速度传感器和光学加速度传感器（空间光加速度传感器、光纤加速度传感器）。评估加速度传感器的性能，通常会考虑其在静态（即加载信号不随时间发生变化的情况）和动态（输入信号随时间改变）测试环境的综合表现[143]。下面详细介绍。

2.2.1　压阻式加速度传感器

基于压阻效应研发的加速度传感器是最早形成批量生产能力的传感器，目前主要应用于大过载、高 g 值测试环境。与其他类型加速度传感器相比，压阻式加速度传感器虽然制作工艺简单、后期信号处理便利，但也存在频响范围较窄、温度系数大等缺点[148]。

1979 年，斯坦福大学研制出了世界上首款硅基压阻式加速度传感器，该传感器由单悬臂梁和质量块构成[149]。当传感器受到外载荷作用时，质量块产生惯性力，导致悬臂梁形变产生应力，该应力通过改变结合在悬臂梁结构上压阻材料的电阻值实现对外载荷的测量。对于压阻式加速度传感器，悬臂梁的刚度系数（谐振频率）和弹性梁的阻尼系数（灵敏度）共同决定了该传感器的性能。质量块质量越小，悬臂梁越长、越宽（即刚度系数越大，悬臂梁形变越难），其动态线性度就越好，谐振频率就越高，但同时灵敏度会受到影响[150]，如何平衡测试量程和检测灵敏度 2 个指标成为压阻式加速度传感器研究的热点。近些年，科研人员通过研发不同结构的传感器试，图找到兼顾检测量程和测试灵敏度的最佳方案，主要包括固支梁结构和混合结构[151]。研究发现，传统悬臂梁结构呈单端固定且尺寸结构远小于质量块，因此其灵敏度高、刚度低、一阶频率低、抗干扰能力差。升级后的固支梁结构多采用两端或四端固定的多梁结

构，因端部固定提高了悬臂梁的刚度，有效减小了非敏感方向输入载荷信息的干扰，对杂质信息起到了很好的抑制作用，该类型传感器多应用于高 g 值测试环境，测试灵敏度较低；再次升级后，由悬臂梁结构和固支梁结构相结合研发的双岛五梁结构传感器有效解决了“灵敏度-量程”相互矛盾的难题。基于此原理，压阻式加速度传感器中的压阻材料一般都与悬臂梁进行结合，在受到外载荷作用后，主要利用压敏材料的横向或纵向形变（即切应变作用）致其电阻发生变化，转换成电荷或电压后进行检测。对于横向应变，外力垂直作用于悬臂梁使其发生弯曲变形，此时梁结构各部位的形变程度不同且在根部和末端的形变最大，在此情况下，通常只会利用部分压阻材料参与检测（即在悬臂梁线性变化较好的区域），对其灵敏度影响较大；对后者（纵向应变）而言，由于外部载荷的作用方向平行于悬臂梁的轴向方向，无论梁结构是拉伸还是受压，附着于该梁结构上的压阻材料受力形变都相对均匀，因此检测灵敏度较高。

国外开展压阻式加速度传感器的研发较早，通过工艺更新升级，部分加速度传感器的测试量程提升较大，如美国 ENDEVCO 公司研发的 7270A 型传感器的量程高达 2×10^5g。我国在该领域也开展了大量研究，如 Mo 等[152]、王毓婷[150] 和陈嘉俊[153] 以及一些新型科技型企业，目前已研发产品的检测量程亦可高达 2×10^5g。

2.2.2　压电式加速度传感器

1943 年，丹麦 B&K 公司研发了首款商用压电式加速度传感器。20 世纪 90 年代后，美国国家标准技术学会推出了一系列传感器标准，加速了压电式加速度传感器的应用和研发。压电式加速度传感器是一类基于压电材料的、以“机械能-电能耦合作用”相互转换进行振动特性测量得到加速度的传感器件。该类型加速度传感器具有精度高、响应快、结构简单和高温适应性好等优点[154]。

传统压电式加速度传感器按照作用结构可分为压缩式压电加速度传感器和剪切式压电加速度传感器[154-155]，一般可简化为由质量块、基座和压敏元器件等组成的简单力学模型。对于压缩式压电加速度传感器，3 个主要组成模块通过螺栓结构或束缚带进行预先紧配，压敏材料经并/串联结构通过导线进行联通，并对整个传感器件的灵敏度、固有频率等参数信息进行调节。该类型传感器受外载荷的作用方向与压敏元器件的厚度方向一致，由于惯性力的作用，压敏元器件会受拉或受压而在压敏元器件上下表面产生等量异号电荷后，经处理得到加速度外载荷信息。对于剪切式加速度传感器，结构组成上多一个中心支柱，质量块、中心支柱、压电敏感元器件和底座经预先紧配固定。该类型传感器在受到外载荷作用时，将惯性力转化为与振动方向一致的摩擦力，在压敏元器件表面产生等量异号电荷后，经处理得到加速度信息。将这 2 种类型的加速度传感器相比可知，压缩式压电传感器结构简单，制备成本较低，且灵敏度较高，响应频率较宽；剪切式压电加速度传感器抗干扰能力较强，一般多用于特殊极端环境的检测[154]。

随着 MEMS 技术的发展，MEMS 压电材料加速度传感器随之兴起，体积减小，重量变轻，性能更优[156-157]。目前 MEMS 压电加速度传感器可分为单/多臂梁结构、悬臂梁结构和圆形膜结构等[158]，当外载荷垂直作用于压敏材料表面时，为了缓解水平方向因形变产生的横向电荷信号输出，多采用圆膜结构和多臂梁结构。IEPE 型加速度传感器是一种包含内置电路的压电式加速度传感器[159]，当压敏元器件表面因受力产生电荷后，内置的 IEPE 电路随即开始进行电压转换和放大输出，实现了低阻抗输出功能。该类型传感器解决了传统加速度传感器采集精度低、现场干扰大的难题，近年来应用十分广泛[154]。大量程高频响传感器也是科学和工业界研究的热点，与通用型压电式加速度传感器相比，该类型传感器主要在敏感元器件材料和结构强度上进行了升级，以适应极端环境的监测需求。

2.2.3　电容式加速度传感器

电容式加速度传感器是一种通过检测电容变化（如改变面积或调整电极板间距）实现加速度载荷信息测量的传感器件[160]，具备功耗低、噪声小、结构简单等优势，常应用于大型飞机、潜艇和导弹的加速度信息检测。电容式加速度传感器主要由质量块-弹性臂（或弹簧结构）、电容检测装置和检测电路组成，当外载荷作用于传感器时，质量块产生惯性力引起电容变化，在内置电路驱动下，电容信号转变为电压信号，经解调放大处理转化为电信号输出。随着技术的不断发展，MEMS 电容加速度传感器朝着微型化、集成化和多轴化发展[161]，根据检测需求的差异，又发展为叉指式（梳齿式）电容加速度传感器、平行

平板式电容加速度传感器和扭摆式电容加速度传感器[162]。其中，叉指式（梳齿式）电容加速度传感器电容间隙位于 4～6 μm，质量块较薄，但检测噪声大、偏置稳定性较差；平行平板式电容加速度传感器电容间隙位于 1～2 μm，由于质量块较厚，因此灵敏度高、检测噪声小、稳定性好；扭摆式电容加速度传感器电容间隙位于 2～10 μm，其灵敏度高，但非线性度差。

2.2.4　其他类型加速度传感器

除了上述类型加速度传感器件外，各国科学工作者还通过检测加速度外载荷与谐振梁振动频率变化规律研发了谐振式加速度传感器[163-164]；根据“隧道效应”研发了隧道式加速度传感器[165]；通过检测密闭空腔中热气团的温度变化研发了热对流式加速度传感器。此外，根据检测光学信息（如强度、振幅和相位等物理量）随加速度外载荷信息的变化关系研发了光纤式加速度传感器[166-169]，包括布拉格光栅式光纤加速度传感器和干涉型光纤加速度传感器[167]。

表 4 着重对 3 种主要加速度传感器的性能进行了对比分析。通过实际测试发现，将加速度传感器逐步推广应用于个人防护性能评价测试领域，可对基于长时致伤环境下的人员致伤机理、装备产品防护性能进行有效评估，但目前尚无非常明确的评价标准和评测方法，亟待开展大量研究。

表 4　3 种主要加速度传感器性能对比分析

Table 4　Comparison of the performances of three major acceleration sensors

类型	优点	缺点
压阻式加速度传感器	输出线性好； 制作简单，造价低； 信号处理电路简单	灵敏度较低， 受温度影响较大
电压式加速度传感器	响应速度快， 线性度较好	低频特性欠佳，不宜做静态加速度检测； 制作工艺复杂，与集成电路兼容性欠佳
电容式加速度传感器	功耗低， 灵敏度高， 温度漂移小	易受电磁干扰， 接口电路较复杂， 输出/输入间非线性度欠佳

3　冲击波信号处理和超压场重构

3.1　冲击波信号处理

爆炸冲击波信号是瞬时的，其上升快、时间短。为了获得有用信息，往往采用高频采集方法，其中会掺杂很多无用信息；在真实爆炸环境下，会受到爆炸物自身形状不规则、材质不均匀以及地面及周围环境实物的干扰；在测量过程中，存在爆炸冲击、振动、破裂等导致的寄生效应。这些特征导致必须对冲击波测量信号进行处理，既包括从整个场的角度对测点信号进行判断和修正[170]，又包括对单个测点谐振噪声的处理[171-172]。

为了解决谐振噪声问题，通常在传感器后串联滤波器进行动态补偿，广泛使用的高效补偿方法是群智能算法[173]。但是动态补偿方法属于数据后处理方案，存在复现困难、补偿函数单一、通用性差的不足，传感器在使用之前需要进行标定。压缩感知理论是一种解决高频动态采样数据冗余的新思路[174-175]，在正式采集数据之前，取低频稀疏的样本数据进行检测，当低频样本信号满足先验特性时，可以进行低频采样，并根据采集数据恢复得到高频数据。压缩感知方法可以大大降低数据采集、传输和存储要求。2021 年，豆佳敏[176] 将深度学习理论应用到压缩神经感知领域，发展了一种数据惰性学习方法和一种结合长短时记忆网络和压缩感知的算法，减少了数据需求，易于信号恢复，不需要设计稀疏矩阵，还能减少重构误差。

受爆炸冲击波自身瞬态、高压的影响，叠加周围环境对冲击波的作用，其测量信号往往存在大量的突变和尖峰，爆炸波的能量主要分布在低频信号。早期使用信号数字滤波器来处理爆炸波信号，其原理

是保留信号的低频部分，但是会使波形变得平滑而失真。张衍芳[177]、童晓[178] 研究了低频有效频率的范围对信号处理的影响，张立恒等[179] 对过滤高频信号引起的信号失真问题进行了研究。Donoho[180] 提出了小波阈值去噪法，在处理非平稳信号时能较好保留信号的突变。其原理是分析高低频信号时采用不同的时间窗口，利用阈值量化处理信号和噪声在小波分解后的信号系数，重构后得到滤波信号。童晓[178] 对比了小波阈值法和频域分析法在爆炸冲击波信号分析的结果，结果显示小波阈值法分析的效果更好。Mays 等[181]、张衍芳等[182]、张克刚等[183] 和赖富文等[184] 分别利用小波分析对不同冲击波信号进行了处理，得到了理想结果。小波阈值法需要事先对数据进行处理分析，选择合适的去噪参数，要求数据处理人员有相关的经验。为了克服小波阈值法的不足，刘文涛等[185]、王芳等[186] 提出了双树复小波变换的信号降噪方法，结果显示，在低频非冲击多峰值信号处理上明显优于小波变换，但尚未见该方法在冲击波信号处理上的应用结果。除此之外，梁晶等[187] 提出了联合降噪处理方法，采用经验模态分解与小波分解的联合数据处理方法，可以在实测数据中降低爆炸波的峰值误差；当采用希尔伯特-黄变换（Hilbert-Huang transform, HHT）与 Bessel 联合的爆炸冲击波信号处理方法时，可以进一步降低误差，提高信噪比和去噪精度，保留 70 kHz 以内的有用低频信号[188]。2022 年，戴英杰[172] 研究了基于压缩感知的冲击波去噪重构算法，激波管试验和实测试验表明，该技术能够对冲击波测试数据进行实时处理，为压缩感知技术在冲击波信号测试领域的实际应用奠定了基础，如图 3 所示。

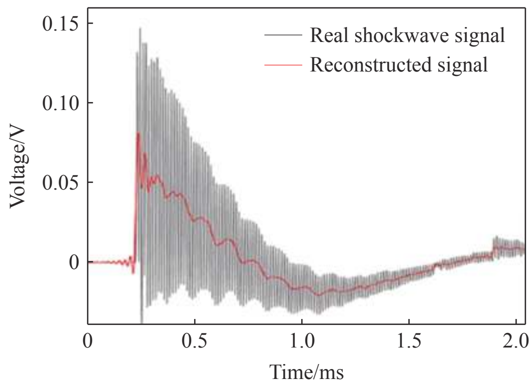


图 3　5 psi 传感器实测冲击信号及其重构信号时域图（1 psi=6.9 kPa）[172]

Fig. 3　Time-domain plots of the measured shock signal of the 5 psi sensor and its reconstructed signal (1 psi = 6.9 kPa) [172]

3.2　冲击波场重构技术

爆炸冲击波的主要毁伤参数包括超压峰值、正压作用时间和比冲量等，可以通过传统的实验或者计算模拟获得流场信息。众多学者开展了相关工作，Hristov 等[189]、Rehman 等[190]、赵海涛等[191] 和王杨等[192] 对爆炸进行了数值模拟，验证了爆炸波的传播规律，获得了波阵面和超压等值线等信息。张远平等[193]、Feng 等[194]、赖富文等[195] 和杨志等[196] 采用电测法对爆炸波进行测量，并通过插值手段绘制了冲击波超压等压线。白苗苗等[197] 研究发现：优化传感器布置方法和建模算法能提高流场建模精度，测点数量和数据质量对超压场建模影响很大；当数据量较小时，基于信息熵、灰度理论和统计的误差判别方法难以对超压峰值作出正确判断。Tugrul 等[198]、Stein[199] 和 Pouderoux 等[200] 研究了流场插值方法对超压场重构的影响，包括加权系数法、克里金插值算法和径向基函数插值算法等。

数值模拟在爆炸波预测方面发挥着重要的作用，但实际爆炸场是不均匀的，存在非均匀破裂、不对称装药、环境风场、地面不规则反射等影响因素。爆炸过程存在动网格、流固热声振光多场耦合等难点，其计算耗费大，对数值计算人员的要求较高[201]。与此同时，爆炸实验得到的有限资料，例如照片、视频、压力等数据也无法提供更精细完整的流场结构和信息，对实验数据结果的处理要靠丰富的主观经验[202]。采用实验数据进行流场重构时，除降噪处理外，还需要对测得的数据进行分类和判断，时间、金钱和人力成本高，制约了研究效率。因此，近些年研究人员一直在发展新的数据挖掘手段，可以准确、快速、全面地获得爆炸冲击波流场信息。

本征正交分解理论[203] 和动模态分解方法[204] 是经典数学降阶方法，已经在很多流场重构领域使用，其在确保流场结构有用信息和减小冗余信息之间取得了较好的平衡，大幅缩短了预测时间。但难以应用在爆炸冲击波这类多尺度、瞬态、强间断的过程。深度学习可以从理论数据、数值模拟数据和实验测量数据中提炼出有用的信息，利用优异的非线性函数拟合能力，既可以用来预测流场，也可以学习数值

模拟算法[205]。深度神经网络技术能够对数据进行时空高分辨率重构，显著降低计算成本、提高模拟结果的准确性，在爆炸冲击波流场准确快速重构方面具有很大的潜力[206]。在爆炸冲击波流场重构[207]中，可以利用 CFD (computational fluid dynamics) 算法获得各种爆炸过程的线下数据；利用卷积变分自编码器对 CFD 高维数据进行降维处理，得到隐空间变量；利用多层前馈神经网络建立爆炸波相关参数、时间与隐变量的映射关系；最后可以预测特定条件下爆炸场（见图 4）。

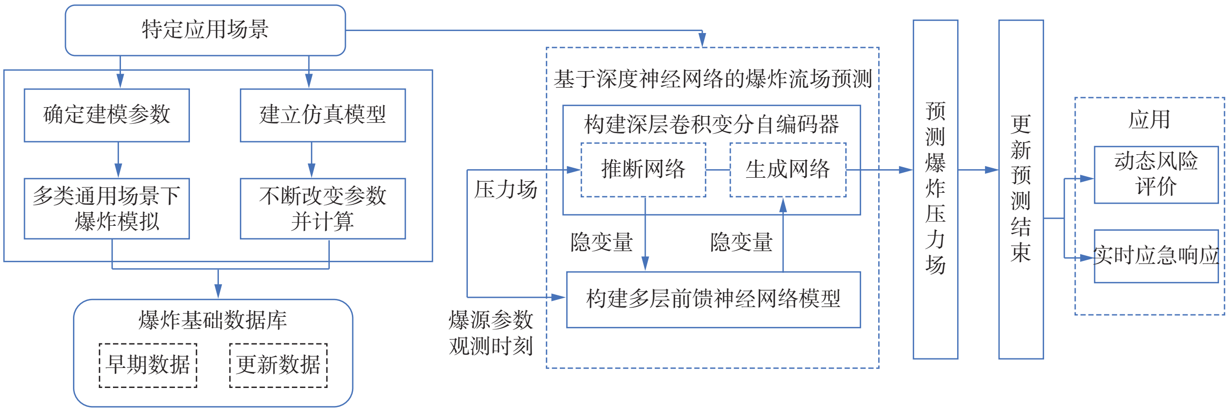


图 4　数模融合的实时框架流程图[207]

Fig. 4　Real-time framework diagram for numerical model fusion[207]

在信号处理方面，相比于小波阈值降噪法，联合降噪方法有明显的优势，压缩神经感知能显著降低数据冗余。在流场重构方面，利用深度神经网络技术能在保证数据精度的条件下，提高流场预测速度，解决真实爆炸场数据少的缺点。

4　针对个体防护的冲击波评估系统应用

复杂战场环境中，高强度爆炸冲击（如炮弹/弹药爆炸）或低强度冲击波（如车辆撞击、重型武器发射和军事训练等）对作战人员生理/心理都会造成巨大损伤，爆炸冲击致伤的主要特点是对肺部、脑部和四肢形成伤害，多表现为冲击脑损伤和肺损伤。为了减少因爆炸冲击带来的伤害，最大程度保护作战人员身心健康，美国国防部领导美陆军、海军和海军陆战队等单位相继开展了大量关于爆炸冲击波评估、防护和致伤机理方面的研究工作，并取得了重要进展。

军事行动中，针对爆炸冲击损伤的评估方法仍依赖运动损伤评价准则，尚无专门的评价方法，也无法提供任何客观的分析数据。因此，自 2011 年开始，美陆军在阿富汗战争中装备了分别由佐治亚理工学院研究所和罗切斯特理工学院研发的爆炸冲击传感套件（integrated blast effects sensor suite, I-BESS）系统和 Blast Gauge®传感器系统，以评估爆炸冲击波对作战人员的损伤情况[208]。其中，美国国防部下属的军队战场伤情分析及预防管理办公室（Joint Trauma Analysis and Prevention of Injury in Combat, JTAPIC）主要负责组织论证和编纂与轻度脑创伤/脑震荡有关的政策和指南，同时也大力支持对传感器采集到的数据进行综合分析。该程序收集战场作战人员遭受的爆炸信息和脑震荡伤情报告，并对该情况进行评估。此外，美国国防部 JTAPIC 联合卓越中心 mTBI 领域专家还将传感器采集到的信息与“全军医疗数据库中的伤情数据”和“国防和退伍军人脑损伤中心”进行对比分析，并将结果上报美国国防部专门负责健康防护和战备的国防部副部长助理办公室，并与美国联合指挥中心进行数据共享。

脑部是人体爆炸冲击波致伤影响最严重的部位。在多个项目中，美军对爆炸冲击致颅脑损伤进行了大量迭代支持工作，下面分别对其进行介绍。

4.1　美国海军研发的爆炸冲击波传感器

美国海军利用 MEMS 技术制造了一种可同时测量加速度和超压峰值的微型压阻传感器，该传感器的压力敏感单元基于多根长短不同的悬臂梁结构进行设计，衬底因受力形变最先接触到稍长的悬臂梁，

而后依次到达设计极限触碰到最短的悬臂梁，从而完成对超压峰值信息的采集。该传感器的惯性传感单元设置了多根交叠的悬臂梁结构，当感受到惯性压力即形成反向作用，所有悬臂梁被挤压时即达到最大惯量。传感器产品经过迭代发展，质量和体积均减小了 75%，极大地促进了该产品的实际应用。2010 年，Daniel 等[209] 基于压电聚合物研发了一款专门用于采集爆炸冲击波和噪声的微型传感器，该传感器体积小、能耗低，可测量范围覆盖 5～100 psi（1 psi=6.9 kPa）和 100～180 dB，传感器共振频率约为 21 kHz，响应时间小于 1 ms。

4.2　SHIELD 头部爆炸强度剂量判定系统

美国陆军医疗物资发展中心赞助 Oceanit 公司研发了一款新型头面部爆炸冲击极限剂量测定系统[210]。该传感测试系统可测量 3 个爆炸强度区间（分别为 30、45 和 60 psi（1 psi=6.9 kPa））。可轻松嵌套在现役各型头盔内，即将剂量计置于头盔衬垫和头部表面间，将重物从不同高度放下以模拟撞击过程。结果表明，传感系统内含染料可成功印染模拟头模表面，实现冲击信息的采集。该传感测试系统可记录冲击区域并区分撞击力大小，通过有色染料指示受力的强度和方向。为了贴近实战，还设计了在作战条件下使用紫外线笔灯进行检测的隐形墨水。

4.3　头盔系统

4.3.1　Gen Ⅰ HMSS

美国陆军航空医学研究实验室、海军卫生研究中心和相关企业共同开展了一个关于爆炸冲击信息感知、数据采集和影响分析的研究项目—helmet-mounted sight system (HMSS)。

该项目分 2 个阶段具体实施，其中，Gen Ⅰ HMSS 传感系统是一种爆炸冲击采集系统，包含 2 个型号的传感器，分别安装在先进战斗头盔（advanced combat helmet, ACH）的后部和内部，该传感器能够记录冲击加速度和爆炸冲击超压峰值。主要研究内容为：

(1) 评估 Gen Ⅰ HMSS 传感器的运行可靠性和采集准确性；

(2) 设计一种评价/计算方法，将 Gen Ⅰ HMSS 采集到的实际爆炸冲击数据转换为对人体脑部伤情评估有实际意义的冲击或爆炸“剂量”数据；

(3) 建立人体脑部伤情评估与实际采集数据之间的关联关系。

2007 年 12 至 2008 年 2 月，美军在 2 个旅级单位分别装备了 Gen Ⅰ HMSS 传感器共计 6 979 枚，此外，海军陆战队的营级单位也部署了该型传感系统共计 1 952 枚。Gen Ⅰ HMSS 传感器的研制与开发是该系统开展战场作战人员颅脑损伤筛查和评估的关键一步，为未来头面部防护系统的开发提供了数据支持。在 Gen Ⅰ HMSS 传感器充分实践应用的基础上，又升级开发了 Gen Ⅱ HMSS 传感器系统。

4.3.2　Gen Ⅱ HMSS

Gen Ⅱ HMSS 传感器系统主要安装在 ACH、ECH (enchanced combat helemt) 和作战车辆乘员头盔内部，质量约为 2.14 盎司（约合 60.67 g）。该传感器升级加装了能分别在 x、y 和 z 等 3 个轴向采集线性加速度和旋转加速度信息的采集模块，根据预设阈值触发进行数据信息采集并生成记录文件，还内置了一枚能连续运行 12 个月的纽扣电池作为动力（其通过 USB 接口充电）。

头盔系统本身设置有压力传感器，但由于其性能和可靠性问题，所记录的压力数据对后期头面部损伤评估的作用微乎其微。且这些传感器不是医疗设备，也不用于诊断创伤性脑损伤情况。然而，它们确实提供了一种记录战场环境下头面部因遭受爆炸冲击或撞击的方法，并为战场士兵伤情快速诊断和医疗评估提供了有力支撑。

除研发了专门针对爆炸冲击颅脑损伤的传感评估测试系统外，美军还开发了头部+身体的爆炸冲击波测试评估装置。主要包括美国国防部高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）主持研发的爆炸冲击波记录仪（Blast Gauge®）和集成爆炸传感套件系统（I-BESS）。

4.4　DARPA 爆炸冲击波记录仪

根据美国国防部高级研究计划局的要求，罗切斯特理工学院联合相应企业研发了一款爆炸冲击波

记录仪[211-212]，主要用于评估遭受爆炸袭击作战人员的伤亡情况，为快速定制医疗方案提供依据。2011 年，3 个旅级作战单位已装备该爆炸冲击波记录仪，由军队战场伤情分析及预防管理办公室具体负责分析采集数据并对产品进行迭代升级。

爆炸冲击波记录仪体积小、重量轻，3～4 个同类型传感器件为一组，通过 2 条松紧带结构与作战人员头盔(头颈部)、防弹衣(胸背部)等任何可连接部位结合。装置内含信息采集与数据处理芯片，与供电模块一起包覆于一体化模压成型的高聚物外壳内，具备防水/防尘能力。该装置可记录包括规定时程内的爆炸冲击波超压峰值和由此产生的加速度值，并通过 3 种不同颜色的爆炸超压暴露状态指示灯(红色、黄色或绿色)显示作战人员所遭受不同等级爆炸损伤的情况。

目前，科研人员多利用高仿真流体动力学模拟软件结合照片、视频等还原爆炸流场的方式获取冲击波超压峰值、持续作用时间等信息。研究表明，使用 CFD 重建爆炸事件非常有用，但非常耗时。为此，美国国防部专门研发了一款与爆炸冲击波记录仪配套使用的信息处理算法(fast automated signal transformation, FAST)，新算法是一种标准化的计算方法，适用于对装药量在 25.7～1×10^4 g 之间的爆炸冲击环境[213] 的冲击波特征信息进行识别并开展有效分类，经与经典爆炸理论对比分析后，推算爆炸原始信息，还原爆炸过程。与此同时，还开发了专用数据库，以累积战场环境下作战人员(车辆)遭受到的爆炸冲击数据信息，为每名军人建立独特的爆炸暴露档案，更好地制定重复暴露爆炸超压准则和快速诊疗方案。该算法已被应用于模拟计算爆源定位、非球形爆源信息估算和封闭环境爆破等多个场景，测试结果显示，在使用笔记本电脑进行计算的条件下，FAST 软件的处理时间比利用 CFD 模拟重建爆炸环境的方法要快得多[213]。

4.5　集成爆炸冲击传感套件(I-BESS)

I-BESS 系统是由陆军快速装备部队发起并由乔治亚理工学院开发的一整套集成的爆炸传感装置，旨在解决如何发现和评估爆炸冲击致作战人员颅脑损伤的问题[214-215]。

I-BESS 系统体积小、重量轻，可实现单兵随身携行、装甲车辆座椅及装甲外挂载，是一个无线集成测试系统，由 I-BESS 士兵系统、I-BESS 车辆系统、数据收集系统和系统数据库等多个子系统组成。该系统主要用于测量作战士兵或装甲车辆遭受的因爆炸产生的冲击加速度和冲击波超压峰值，每个子系统都可链接全球定位系统为其授时，从而为后期分析各个爆炸事件的关联性提供依据[208]。I-BESS 士兵系统主要围绕士兵及其防护装备开展可穿戴设备(系统)的设计与研发，由 4 个压力传感器件和 1 个三轴加速度传感器组成，其中 2 个压力传感器置于士兵躯体前部，2 个置于后侧，分别安装于耳部防护装备和防弹携行背心上。当附近有爆炸发生时，可同时测量作战人员头面部和躯干部的三轴加速度信息、超压峰值信息以及头部的角速度信息，I-BESS 士兵系统集成了多种通信协议，可实现与 I-BESS 车辆系统的无限制通联功能。I-BESS 车辆系统既是一个移动枢纽，又是一个大型传感器，由一系列安装在美国陆军车辆内(外)部的传感器组成，且可根据不同车辆型号进行差异化设置。I-BESS 车辆系统通过公共总线与中央计算机连接在一起，当附近有爆炸发生时，可同时测量该装甲车内外的三轴加速度信息、超压峰值信息以及车辆可能翻滚而产生的三轴角速度信息。数据收集系统基于装甲车辆内部集成的计算机系统，通过通用接口与 I-BESS 系统联接，可直接将收集到的信息汇总并直接传递回位于美国国内的陆军运营服务器上。

为确保 I-BESS 的战场适应性能，阿伯丁试验中心进行了严格的定型前测试，具体包括安全性能检测(电磁干扰和弹道碎片测试等)、冲击跌落测试、环境适应性试验(浸水和沙尘环境性能测试)和功能性测试(激波管防护冲击波性能评价试验、自由场爆炸试验和车辆实弹爆炸试验等)。定型测试结束后，美国陆军共接收了 1300 套 I-BESS 士兵系统和 50 套 I-BESS 车辆系统；还有 300 套改进型耳机系统，分发给了其他单位。

与 I-BESS 项目同时进行的还有一个配套项目，即战场损伤评估(battlefield damage assessment, BAD)，该项目致力于对已部署的各种以士兵为中心的爆炸记录设备进行数据建模，对采集信息进行特

征分析、评估和对比分析。BAD 项目的工作核心是建立“爆炸冲击超压峰值(加速度)等威胁源-作战人员损伤等级”映射关系，实现战场环境下作战人员爆炸冲击伤的快速分类和快速诊治。该项目着重从校准并提高传感元器件采集数据、开发传递函数将采集数据与人体动态响应相关联、将作战人员身体动态响应过程与人体各器官/组织损伤等级相关联，以及验证上述关联关系的正确性 4 个方面开展工作，并取得了重要成果。

5 总结与展望

对基于空气介质的爆炸冲击波检测评估技术进行了系统综述，重点围绕人员个体防护需求，探讨了冲击波传感检测手段、信号处理技术、流场重构方法以及超压场定量分析的发展现状。尽管目前已有诸多研究成果为个体装备防护设计和战场救治方案提供了一定参考，但仍需进一步加强从“人员需求”出发的精确化与实用化探索。

未来研究应紧密聚焦于人员个体防护实际场景，重点在以下 4 个方向发力。

(1) 传感器的小型化、标准化、集成化及智能化：爆炸冲击环境属于毁伤工况下的极端测试环境，单次测试可能造成传感器的批量损坏。因此，传感器件的标准化研究有助力于降低试验成本；针对个体防护的爆炸冲击波检测通常会与高仿真物理评测假人结合使用，传感器的体积、质量和安装方式等因素都会影响爆炸冲击流场信息采集及相互作用过程响应分析，甚至导致流场扰动。因此，传感器的小型化研究对于提升信号采集精度至关重要。随着新型材料及精密加工工艺的不断进步，冲击波传感器的集成化和智能化发展成为一种必然，应基于“材料-结构-性能”一体化设计，使敏感元器件与控制模块、通讯模块等高度集成，具备自动补偿、自主通讯和自我判断能力。

(2) 聚焦薄膜传感和光纤传感等关键技术，大力发展新型传感器件：通过探索研究敏感材料制备、感应单元微纳结构设计和元器件封装工艺等影响，不断提升新型传感器的耐腐蚀性和对复杂环境的适应性，逐步增强诸如颅内压瞬态测试等活体原位检测水平，为爆炸冲击致伤机理研究奠定技术基础。

(3) 提升传感器件的适应性，增加干扰抑制措施，优化传感器安装与外部流场相互耦合作用[78]：针对复杂爆炸场测试环境，应根据冲击波压力测量系统的实际使用情况和特点，分析毁伤工况下冲击波测试系统压力测量的不确定性因素，并进行分类定量评定，建立冲击波压力测量不确定度评定模型，为后续评估奠定可靠的数据基础。强化冲击波压力测试系统的动态特性研究，增加抑制动态误差的补偿技术，建立动态补偿模型评估准则函数，进一步提高传感器的测试精度、实用性和抗干扰能力。

(4) 深入研究有防护条件下人体周围局部冲击流场特性与“冲击波-人体”相互作用机理，大幅提升个体装备防护能力：将冲击波超压场重构与流体力学计算技术有机结合，统筹试验实测数据、CFD 数值模拟结果与人工智能算法的深度耦合，实现对个体暴露环境的动态重建与风险定量化评估。通过对多元数据的融合、识别与解析，清晰刻画冲击波与个体防护装备(如头盔、防弹衣等)在细观尺度下的相互作用机理，预测关键防护区域、优化装备选材和结构设计。

综上，唯有聚焦个体防护需求，深化流场重构与数值模拟技术的耦合运用，着力构建基于实测数据、数值模拟分析和损伤评价标准相结合的快速决策支持模型，将快速诊伤评估与预警机制嵌入便携式爆炸冲击检测评估系统中，才能使爆炸冲击波检测评估技术迈向更高精度、更高针对性和更高时效性的应用层面，以期实现在战时复杂极端条件下，对作战人员的伤情等级实现快速分类，即时可靠地提出诊疗决策和救治方案，从而达到优化医疗诊治策略、减小战伤亡比例的目的，为人员在极端环境下的有效防护和及时救治提供坚实的技术保障。

参考文献:

[1] MAC DONALD C L, JOHNSON A M, WIERZECHOWSKI L, et al. Prospectively assessed clinical outcomes in concussive blast vs nonblast traumatic brain injury among evacuated US military personnel [J]. JAMA Neurology, 2014, 71(8): 994. DOI: 10.1001/jamaneurol.2014.1114.

[2] TANIELIAN T, JAYCOX L H, ADAMSON D M, et al. Invisible wounds of war: psychological and cognitive injuries, their consequences, and services to assist recovery [M]. Santa Monica: RAND Corporation, 2008.

[3] KAZMIRCHUK A, YARMOLIUK Y, LURIN I, et al. Ukraine's experience with management of combat casualties using NATO's four-tier "changing as needed" healthcare system [J]. World Journal of Surgery, 2022, 46(12): 2858–2862. DOI: 10.1007/s00268-022-06718-3.

[4] TAYLOR P A, FORD C C. Simulation of blast-induced early-time intracranial wave physics leading to traumatic brain injury [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2009, 131(6): 061007. DOI: 10.1115/1.3118765.

[5] REGASA L E, AGIMI Y, STOUT K C. Traumatic brain injury following military deployment: evaluation of diagnosis and cause of injury [J]. Journal of Head Trauma Rehabilitation, 2019, 34(1): 21–29. DOI: 10.1097/HTR.0000000000000417.

[6] GOELLER J, WARDLAW A, TREICHLER D, et al. Investigation of cavitation as a possible damage mechanism in blast-induced traumatic brain injury [J]. Journal of Neurotrauma, 2012, 29(10): 1970–1981. DOI: 10.1089/neu.2011.2224.

[7] MEDIAVILLA V J, PHILIPPENS M, MEIJER S R, et al. Physics of IED blast shock tube simulations for mTBI research [J]. Frontiers in Neurology, 2011, 2: 58. DOI: 10.3389/fneur.2011.00058.

[8] TAYLOR P A, LUDWIGSEN J S, FORD C C, et al. Verification and validation of simulation framework for analysis of traumatic brain injury: SAND-2018-7372 [R]. Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2018. DOI: 10.2172/1529058.

[9] ENGEL C C, HOCH E, SIMMONS M, et al. The neurological effects of repeated exposure to military occupational blast: implications for prevention and health [C]//Proceedings, Findings, and Expert Recommendations from the Seventh Department of Defense State-of-the-Science Meeting. Santa Monica: RAND Corporation, 2019.

[10] TAN X G, MATIC P. Simulation of cumulative exposure statistics for blast pressure transmission into the brain [J]. Military Medicine, 2020, 185(S1): 214–226. DOI: 10.1093/milmed/usz308.

[11] 陈青青. 爆炸自由场冲击波测试系统设计 [D]. 太原: 中北大学, 2017.
CHEN Q Q. Design of shock wave measurement system for explosion in free field [D].Taiyuan: North University of China, 2017.

[12] SACHS R G. The Dependence of blast on ambient pressure and temperature: BRL Report No. 466 [R]. Aberdeen: Ballistic Research Laboratory, 1944.

[13] HUANG X Y, CHANG L J, ZHAO H, et al. Study on craniocerebral dynamics response and helmet protective performance under the blast waves [J]. Materials and Design, 2022, 224: 111408. DOI: 10.1016/j.matdes.2022.111408.

[14] RODRÍGUEZ-MILLÁN M, TAN L B, TSE K M, et al. Effect of full helmet systems on human head responses under blast loading [J]. Materials and Design, 2017, 117: 58–71. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.12.081.

[15] NYEIN M K, JASON A M, YU L, et al. In silico investigation of intracranial blast mitigation with relevance to military traumatic brain injury [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(48): 20703–20708. DOI: 10.1073/pnas.1014786107.

[16] MEJÍA-ALVAREZ R, KERWIN J, VIDHATE S, et al. Large cross-section blast chamber: design and experimental characterization [J]. Measurement Science and Technology, 2021, 32(11): 115902. DOI: 10.1088/1361-6501/ac12fc.

[17] EYNDE J O, YU A W, ECKERSLEY C P, et al. Primary blast wave protection in combat helmet design: a historical comparison between present day and World War Ⅰ [J]. Plos One, 2020, 15(2): e0228802. DOI: 10.1371/journal.pone.0228802.

[18] RENEER D V, HISEL R D, HOFFMAN J M, et al. A multi-mode shock tube for investigation of blast-induced traumatic brain injury [J]. Journal of Neurotrauma, 2011, 28(1): 95–104. DOI: 10.1089/neu.2010.1513.

[19] MAACH S, VON ROSEN B, MCCAULEY L, et al. Comparison of hybrid Ⅲ head response to shock tube and explosive blast loading [C]//Proceedings of International Research Council on Biomechanics of Injury. Antwerp: IRCOBI, 2017.

[20] RAPO M A, BAUMER T, CHAN P C, et al. Reducing the effects of blast to the head through load partitioning [C]// Proceedings of ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. San Diego: American Society of Mechanical Engineers, 2013. DOI: 10.1115/IMECE2013-63257.

[21] DALE BASS C R, DAVIS M, RAFAELS K, et al. A methodology for assessing blast protection in explosive ordnance disposal bomb suits [J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2005, 11(4): 347–361. DOI: 10.1080/10803548.2005.11076655.

[22] 闫宏彪. 无线分布式冲击波测试研究 [D]. 太原: 中北大学, 2016.

YAN H B. Research on wireless distributed shock wave test [D]. Taiyuan: North University of China, 2016.

[23] 柴栋梁, 王文廉. 柔性传感冲击波瞬态压力测试方法 [J]. 中国测试, 2018, 44(12): 91–95. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.12.016.

CHAI D L, WANG W L. Test method of transient pressure of flexible sensing shock wave [J]. China Measurement and Test, 2018, 44(12): 91–95. DOI: 10.11857/j.issn.1674-5124.2018.12.016.

[24] 陈艳. 基于等效靶的弹药空气中爆炸威力评估方法 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2019.

CHEN Y. An evaluation method for ammunition explosion power in the air based on equivalent target [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2022.

[25] 刘丁. 冲击波超压测试系统关键技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2018.

LIU D. Study on key technology of shock wave overpressure testing system [D]. Taiyuan: North University of China, 2018.

[26] FENG K, ZHANG L Y, JIN X, et al. Biomechanical responses of the brain in swine subject to free-field blasts [J]. Frontiers in Neurology, 2016, 7: 179. DOI: 10.3389/fneur.2016.00179.

[27] MA X T, ARAVIND A, PFISTER B J, et al. Animal models of traumatic brain injury and assessment of injury severity [J]. Molecular Neurobiology, 2019, 56(8): 5332–5345. DOI: 10.1007/s12035-018-1454-5.

[28] RUTTER B, SONG H L, DEPALMA R G, et al. Shock wave physics as related to primary non-impact blast-induced traumatic brain injury [J]. Military Medicine, 2021, 186(S1): 601–609. DOI: 10.1093/milmed/usaa290.

[29] OUELLET S, PHILIPPENS M. The multi-modal responses of a physical head model subjected to various blast exposure conditions [J]. Shock Waves, 2018, 28(1): 19–36. DOI: 10.1007/s00193-017-0771-3.

[30] LIU J Y, DONG Y X, AN X Y, et al. Reaction degree of composition B explosive with multi-layered compound structure protection subjected to detonation loading [J]. Defence Technology, 2021, 17(2): 315–326. DOI: 10.1016/j.dt.2020.02.004.

[31] ZHOU H Y, ZHANG X J, WANG X J, et al. Protection effectiveness of sacrificial cladding for near-field blast mitigation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 170: 104361. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104361.

[32] BANTON R, PIEHLER T, ZANDER N, et al. Experimental and numerical investigation of blast wave impact on a surrogate head model [J]. Shock Waves, 2021, 31(5): 481–498. DOI: 10.1007/s00193-021-01033-7.

[33] BANTON R, PIEHLER T, ZANDER N, et al. Comparison of numerical simulations with experiments of blast-induced pressure wave impact on a surrogate head model [M]//KIMBERLEY J, LAMBERSON L, MATES S. Dynamic Behavior of Materials: Volume 1. Cham: Springer, 2018: 181–187. DOI: 10.1007/978-3-319-62956-8_30.

[34] AZAR A, BHAGAVATHULA K B, HOGAN J, et al. Protective headgear attenuates forces on the inner table and pressure in the brain parenchyma during blast and impact: an experimental study using a simulant-based surrogate model of the human head [J]. Journal of Biomechanical Engineering, 2020, 142(4): 041009. DOI: 10.1115/1.4044926.

[35] DIONNE J P, LEVINE J, MAKRIS A. Acceleration-based methodology to assess the blast mitigation performance of explosive ordnance disposal helmets [J]. Shock Waves, 2018, 28(1): 5–18. DOI: 10.1007/s00193-017-0737-5.

[36] ALLEN R M, KIRKPATRICK D J, LONGBOTTOM A W, et al. Experimental and numerical study of free-field blast mitigation [J]. AIP Conference Proceedings, 2004, 706(1): 823–826. DOI: 10.1063/1.1780363.

[37] XU S, ZHANG G, GUO J F, et al. Helmet chinstrap protective role in maxillofacial blast injury [J]. Technology and Health Care, 2021, 29(4): 735–747. DOI: 10.3233/THC-202406.

[38] TAN X G, MATIC P. Optimizing helmet pad placement using computational predicted injury pattern to reduce mild traumatic brain injury [J]. Military Medicine, 2021, 186(S1): 592–600. DOI: 10.1093/milmed/usaa240.

[39] TSE K M, BIN TAN L, ALI BIN SAPINGI M, et al. The role of a composite polycarbonate-aerogel face shield in protecting the human brain from blast-induced injury: a fluid-structure interaction (FSI) study [J]. Journal of Sandwich Structures and Materials, 2019, 21(7): 2484–2511. DOI: 10.1177/1099636217733369.

[40] SUTAR S, GANPULE S. Investigation of wave propagation through head layers with focus on understanding blast wave transmission [J]. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 2020, 19(3): 875–892. DOI: 10.1007/s10237-019-01256-9.

[41] MISISTIA A, SKOTAK M, CARDENAS A, et al. Sensor orientation and other factors which increase the blast overpressure reporting errors [J]. Plos One, 2020, 15(10): e0240262. DOI: 10.1371/journal.pone.0240262.

[42] YANG F Y, LI Z J, ZHUANG Z, et al. Evaluating the blast mitigation performance of hard/soft composite structures through field explosion experiment and numerical analysis [J]. Acta Mechanica Sinica, 2022, 38(1): 121238. DOI: 10.1007/s10409-021-09001-x.

[43] 康越, 张仕忠, 张远平, 等. 基于激波管评价的单兵头面部装备冲击波防护性能研究 [J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(8): 085901. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0395.
KANG Y, ZHANG S Z, ZHANG Y P, et al. Research on anti-shockwave performance of the protective equipment for the head of a soldier based on shock tube evaluation [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(8): 085901. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0395.

[44] KANG Y, WANG J L, ZHANG S Z, et al. A review of the development of shock tubes for simulating blast waves [C]// Proceedings of the 2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement and Instruments. Harbin: IEEE, 2023: 416–425. DOI: 10.1109/ICEMI59194.2023.10269910.

[45] NAGARAJA S R, PRASAD J K, JAGADEESH G. Theoretical-experimental study of shock wave-assisted metal forming process using a diaphragmless shock tube [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2012, 226(12): 1534–1543. DOI: 10.1177/0954410011424808.

[46] COLOMBO M, DI PRISCO M, MARTINELLI P. A new shock tube facility for tunnel safety [J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(7): 1143–1154. DOI: 10.1007/s11340-010-9430-7.

[47] 王正国, 孙立英, 杨志焕, 等. 系列生物激波管的研制与应用 [J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(1): 77–83.
WANG Z G, SUN L Y, YANG Z H, et al. The design production and application of a series of bio-shock tubes [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(1): 77–83.

[48] 韩惠霖. 激波管的发展和应用 [J]. 浙江大学学报, 1980(3): 170–190.
HAN H L. Devlopment and application of the shock tubes [J]. Journal of Zhejiang University, 1980(3): 170–190.

[49] NING Y L, ZHOU Y G. Shock tubes and blast injury modeling [J]. Chinese Journal of Traumatology, 2015, 18(4): 187–193. DOI: 10.1016/j.cjtee.2015.04.005.

[50] SUNDARAMURTHY A, CHANDRA N. A parametric approach to shape field-relevant blast wave profiles in compressed-gas-driven shock tube [J]. Frontiers in Neurology, 2014, 5: 253. DOI: 10.3389/fneur.2014.00253.

[51] CELANDER H, CLEMEDSON C J, ERICSSON U A, et al. The use of a compressed air operated shock tube for physiological blast research [J]. Acta Physiologica Scandinavica, 1955, 33(1): 6–13. DOI: 10.1111/j.1748-1716.1955.tb01188.x.

[52] KURIAKOSE M, SKOTAK M, MISISTIA A, et al. Tailoring the blast exposure conditions in the shock tube for generating pure, primary shock waves: the end plate facilitates elimination of secondary loading of the specimen [J]. Plos One, 2016, 11(9): e0161597. DOI: 10.1371/journal.pone.0161597.

[53] NGO T D, MENDIS P A, GUPTA A, et al. Blast loading and blast effects on structures: an overview [J]. Electronic Journal of Structural Engineering, 2007(1): 76–91. DOI: 10.56748/ejse.671.

[54] CHANDRA N, SUNDARAMURTHY A, GUPTA R K. Validation of laboratory animal and surrogate human models in primary blast injury studies [J]. Military Medicine, 2017, 182(S1): 105–113. DOI: 10.7205/MILMED-D-16-00144.

[55] TEKALUR S A, SHUKLA A, SHIVAKUMAR K. Blast resistance of polyurea based layered composite materials [J]. Composite Structures, 2008, 84(3): 271–281. DOI: 10.1016/j.compstruct.2007.08.008.

[56] SCHIMIZZE B, SON S F, GOEL R, et al. An experimental and numerical study of blast induced shock wave mitigation in sandwich structures [J]. Applied Acoustics, 2013, 74(1): 1–9. DOI: 10.1016/j.apacoust.2012.05.011.

[57] KOUMLIS S, LAMBERSON L. Strain rate dependent compressive response of open cell polyurethane foam [J]. Experimental Mechanics, 2019, 59(7): 1087–1103. DOI: 10.1007/s11340-019-00521-3.

[58] WOOD G W, PANZER M B, SHRIDHARANI J K, et al. Attenuation of blast pressure behind ballistic protective vests [J]. Injury Prevention, 2013, 19(1): 19–25. DOI: 10.1136/injuryprev-2011-040277.

[59] SKOTAK M, ALAY E, ZHENG J Q, et al. Effective testing of personal protective equipment in blast loading conditions in shock tube: comparison of three different testing locations [J]. Plos One, 2018, 13(6): e0198968. DOI: 10.1371/journal.pone.0198968.

[60] KOLIATSOS V E, CERNAK I, XU L Y, et al. A mouse model of blast injury to brain: initial pathological, neuropathological, and behavioral characterization [J]. Journal of Neuropathology and Experimental Neurology, 2011, 70(5): 399–416. DOI: 10.1097/NEN.0b013e3182189f06.

[61] RAFAELS K, DALE BASS C R, SALZAR R S, et al. Survival risk assessment for primary blast exposures to the head [J]. Journal of Neurotrauma, 2011, 28(11): 2319–2328. DOI: 10.1089/neu.2009.1207.

[62] YANG Z S, ADEREMI O A, ZHAO Q W, et al. Early complement and fibrinolytic activation in a rat model of blast-induced multi-organ damage [J]. Military Medicine, 2019, 184(S1): 282–290. DOI: 10.1093/milmed/usy412.
[63] 杨志焕, 王正国, 唐承功, 等. 炮口冲击波的生物效应及其对人员内脏损伤的安全限值 [J]. 振动与冲击, 1994(4): 39–45. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.1994.04.007.
[64] DU Z B, LI Z J, WANG P, et al. Revealing the effect of skull deformation on intracranial pressure variation during the direct interaction between blast wave and surrogate head [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2022, 50(9): 1038–1052. DOI: 10.1007/s10439-022-02982-5.
[65] 蒋殿臣, 赵卓茂, 冯伟干, 等. 新型摆锤式冲击响应谱试验台波形的调试方法研究 [J]. 机械工程师, 2014(8): 98–99.
JIANG D C, ZHAO Z M, FENG W G, et al. Study on the debugging method of waveforms of a new pendulum-type impact response spectrum test bed [J]. Mechanical Engineers, 2014(8): 98–99.
[66] 卢红标, 周早生, 严东晋, 等. 爆炸冲击震动模拟平台的研制 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(3): 276–280. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0276-05.
LU H B, ZHOU Z S, YAN D J, et al. Development on shocking table for blast explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(3): 276–280. DOI: 10.11883/1001-1455(2005)03-0276-05.
[67] 田振强, 王冰, 蒋殿臣, 等. 新型摆锤式冲击响应谱试验台的研制 [J]. 强度与环境, 2013, 40(4): 59–64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3919.2013.04.011.
TIAN Z Q, WANG B, JIANG D C, et al. Research and design of a new type pendulum hammer shock machine for shock response spectra testing [J]. Structure and Environment Engineering, 2013, 40(4): 59–64. DOI: 10.3969/j.issn.1006-3919.2013.04.011.
[68] 毛勇建, 李玉龙. 爆炸分离冲击环境的模拟试验技术进展 [J]. 导弹与航天运载技术, 2007(4): 37–44. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7182.2007.04.010.
MAO Y J, LI Y L. Advances in simulation techniques of pyroshock environments [J]. Missiles and Space Vehicles, 2007(4): 37–44. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7182.2007.04.010.
[69] 杜建国, 谢清粮. 大型爆炸冲击震动环境模拟试验系统需求分析 [J]. 防护工程, 2018, 40(6): 23–29.
DU J G, XIE Q L. Requirements analysis of the large experiment device for simulation of explosion shock environments [J]. Protective Engineering, 2018, 40(6): 23–29.
[70] 成凤生. 密闭空间内爆炸冲击波压力测试及内壁超压分布研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
CHENG F S. Research on pressure testing of explosion shock waves and distribution of overpressure on inner walls in a closed space [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
[71] 李丽萍, 孔德仁, 苏建军. 毁伤工况条件下冲击波压力电测法综述 [J]. 爆破, 2015, 32(2): 39–46. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.02.007.
LI L P, KONG D R, SU J J. Review on electrometric test method of shockwave pressure on damage condition [J]. Blasting, 2015, 32(2): 39–46. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.02.007.
[72] 彭丽. 基于光纤 F-P 传感器的水下冲击波探测系统研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
PENG L. Research on underwater shock wave detection system based on optical fiber F-P sensor [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2015.
[73] 杨聪. 爆炸冲击波动态测量压电式压力传感器研究 [D]. 济南: 济南大学, 2019.
YANG C. Research on piezoelectric pressure sensor for dynamic measurement of explosion shock wave [D]. Jinan: University of Jinan, 2020.
[74] US Army Aberdeen Proving Ground. Electronic measurement of air blast overpressure: test operation procedure 4-2-822 [R]. Maryland: US Army Aberdeen Proving Ground, 1981.
[75] 梁頔, 马铁华, 刘一江, 等. 基于 PCB 压电传感器的小型冲击波存储测试系统 [J]. 电子器件, 2014, 37(1): 119–122. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2014.01.028.
LIANG D, MA T H, LIU Y J, et al. A small stored measurement system for shock wave based on PCB sensor [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(1): 119–122. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2014.01.028.
[76] 郑敬辰. 基于 ARM 的冲击波传感器阵列校时及数据传输系统研制 [D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020. DOI: 10.27123/d.cnki.ghlju.2020.000461.
ZHENG J C. Development of time calibration and data transmission system for shock wave sensor array based on ARM [D].

Haerbing: Heilongjiang University, 2020. DOI: 10.27123/d.cnki.ghlju.2020.000461.

[77] 许其容, 尤文斌, 马铁华, 等. 基于无线控制的爆炸场多参数存储测试系统 [J]. 电子器件, 2014, 37(2): 307–310. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2014.02.030.
MA Q R, YOU W B, MA T H, et al. Based on the wireless control parameters of shock wave storage test system [J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2014, 37(2): 307–310. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9490.2014.02.030.

[78] 胡洋, 尹尚先, ARNTZEN J B, 等. 矿井瓦斯/空气预混气体爆燃的激光纹影测试系统设计 [J]. 光学精密工程, 2019, 27(5): 1045–1051. DOI: 10.3788/OPE.20192705.1045.
HU Y, YIN S X, ARNTZEN J B, et al. Design of laser schlieren test system for mine gas/air premixed gas deflagration [J]. Optics and Precision Engineering, 2019, 27(5): 1045–1051. DOI: 10.3788/OPE.20192705.1045.

[79] 郑星, 黄海莹, 毛勇建, 等. 基于高速纹影技术的爆炸冲击波图像测量研究 [J]. 光学精密工程, 2022, 30(18): 2187–2194. DOI: 10.37188/OPE.20223018.2187.
ZHENG X, HUANG H Y, MAO Y J, et al. Research on image measurement of explosion shock wave based on high speed schlieren technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2022, 30(18): 2187–2194. DOI: 10.37188/OPE.20223018.2187.

[80] 李斌, 王雨, 周志强, 等. 爆炸冲击波威力高速纹影测量方法 [J]. 光学与光电技术, 2018, 16(2): 43–49. DOI: 10.19519/j.cnki.1672-3392.2018.02.008.
LI B, WANG Y, ZHOU Z Q, et al. High-speed schlieren photography for measuring the explosive blast wave power [J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2018, 16(2): 43–49. DOI: 10.19519/j.cnki.1672-3392.2018.02.008.

[81] 张雄星, 王伟, 刘光海, 等. 温度场纹影定量测量技术 [J]. 中国光学, 2018, 11(5): 860–873. DOI: 10.3788/CO.20181105.0860.
ZHENG X X, WANG W, LIU G H, et al. Quantative measuring technique for the temperature of flow fields in schlieren systems [J]. Chinese Optics, 2018, 11(5): 860–873. DOI: 10.3788/CO.20181105.0860.

[82] 施宇成, 孔德仁, 徐春冬, 等. 爆炸场冲击波压力测量及其传感器技术现状分析 [J]. 测控技术, 2022, 41(11): 1–10, 34. DOI: 10.19708/j.ckjs.2022.03.240.
SHI Y C, KONG D R, XU C D, et al. Status analysis of shock wave pressure measurement and sensor technology in explosion field [J]. Measurement and Control Technology, 2022, 41(11): 1–10, 34. DOI: 10.19708/j.ckjs.2022.03.240.

[83] 刘东来, 王伟魁, 李文博, 等. 冲击波超压传感器研究现状 [J]. 遥测遥控, 2019, 40(5): 7–15. DOI: 10.13435/j.cnki.ttc.003024.
LIU D L, WANG W K, LI B W, et al. Research status of shock wave overpressure sensor [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(5): 7–15. DOI: 10.13435/j.cnki.ttc.003024.

[84] 褚程雷. 面向冲击波测量的光纤法布里-珀罗腔压力传感器研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlgu.2021.000454.
CHU C L. Research on fiber optic Fabry-Pérot cavity pressure sensors for shock wave measurement [D]. Wuhan: Wuhan Institute of Technology, 2015. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlgu.2021.000454.

[85] SMITH C S. Piezoresistance effect in germanium and silicon [J]. Physical Review, 1954, 94(1): 42–49. DOI: 10.1103/PhysRev.94.42.

[86] 胡宇. 锰铜压阻式水下爆炸近场超压测试方法研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
HU Y. The mangnin test method research of near-field underwater explosion overpressure [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.

[87] FULLER P J A, PRICE J H. Electrical conductivity of manganin and iron at high pressures [J]. Nature, 1962, 193(4812): 262–263. DOI: 10.1038/193262a0.

[88] BERNSTEIN D, KEOUGH D D. Piezoresistivity of manganin [J]. Journal of Applied Physics, 1964, 35(5): 1471–1474. DOI: 10.1063/1.1713651.

[89] 阎文静, 张鉴, 高香梅. 压阻式压力传感器性能的研究 [J]. 传感器世界, 2012, 18(2): 14–17, 13. DOI: 10.16204/j.cnki.sw.2012.02.006.
YAN W J, ZHANG J, GAO X M. Research on performances of piezoresistive pressure sensor [J]. Sensor World, 2012, 18(2): 14–17, 13. DOI: 10.16204/j.cnki.sw.2012.02.006.

[90] OTMANI R, BENMOUSSA N, BENYOUCEF B. The thermal drift characteristics of piezoresistive pressure sensor [J]. Physics Procedia, 2011, 21: 47–52. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.10.008.

[91] ARYAFAR M, HAMEDI M, GANJEH M M. A novel temperature compensated piezoresistive pressure sensor [J]. Measurement, 2015, 63: 25–29. DOI: 10.1016/j.measurement.2014.11.032.

[92] 王冰. 高频动态压力传感器设计与应用 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
WANG B. Design and application of silicon piezoresistive high frequency dynamic sensor [D]. Xi’an: Xidian University, 2009.

[93] 吴如兆. 高频冲击波测量专用压力传感器研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2010.
WU R Z. Research on high frequency shock wave measurement special pressure sensor [D]. Shanghai: Fudan University, 2010.

[94] 杜红棉, 祖静, 张志杰. 压阻传感器 8530B 闪光响应规律研究 [J]. 测试技术学报, 2011, 25(1): 78–81. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2011.01.014.
DU H M, ZU J, ZHANG Z J. Research on photoflash response of piezoresistive transducers 8503B [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2011, 25(1): 78–81. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2011.01.014.

[95] 张健中, 杜红棉, 韩青林, 等. 压阻式压力传感器光干扰消除实验及测试 [J]. 仪表技术与传感器, 2014(1): 14–15, 18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.01.005.
ZHANG J Z, DU H M, HAN Q L, et al. Experiment and test of photoflash response elimination for piezoresistive pressure sensor [J]. Instrument Technique and Sensor, 2014(1): 14–15, 18. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2014.01.005.

[96] 邬林, 陈丛, 钱江蓉, 等. 基于压阻效应的陶瓷压力传感器 [J]. 仪表技术与传感器, 2017(6): 26–28. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2017.06.007.
WU L, CHEN C, QIAN J R, et al. Ceramic pressure sensor based on piezoresistive effect [J]. Instrument Technique and Sensor, 2017(6): 26–28. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2017.06.007.

[97] 韩红彪, 王冰, 李济顺, 等. 无线存储式爆炸冲击波压阻压力传感器研制 [C]//第五届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 西安: 中国力学学会爆炸力学实验技术专业组, 2008: 5.

[98] 果明明. 用碳压阻传感器测量低冲击波压力 [J]. 传感器技术, 1994(4): 21–26. DOI: 10.13873/j.1000-97871994.04.005.

[99] DOLLEMAN R J, DAVIDOVIKJ D, CARTAMIL-BUENO S J, et al. Graphene squeeze-film pressure sensors [J]. Nano Letters, 2016, 16(1): 568–571. DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b04251.

[100] 吴瑞瑞. 硅压阻式压力传感器系统设计及其温度补偿方法研究 [D]. 淮北: 淮北师范大学, 2023. DOI: 10.27699/d.cnki.ghbmt.2023.000049.
WU R R. System design and temperature compensation of silicon piezoresistive pressure sensor [D]. Huaibei: Huaibei normal university, 2023. DOI: 10.27699/d.cnki.ghbmt.2023.000049.

[101] 史宇. 一种柔性压阻式压力传感器的结构设计及其性能分析 [D]. 西安: 西安理工大学, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000752.
SHI Y. Structural design and performance analysis of a flexible piezoresistive pressure sensor [D]. Xi’an: Xi’an University of Technology, 2023. DOI: 10.27398/d.cnki.gxalu.2023.000752.

[102] RIONDET J, COUSTOU A, AUBERT H, et al. Design of air blast pressure sensors based on miniature silicon membrane and piezoresistive gauges [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 922: 012019. DOI: 10.1088/1742-6596/922/1/012019.

[103] SANCHEZ K, ACHOUR B, COUSTOU A, et al. Transient response of miniature piezoresistive pressure sensor dedicated to blast wave monitoring [J]. Sensors, 2022, 22(24): 9571. DOI: 10.3390/s22249571.

[104] ZHANG G D, ZHAO Y L, ZHAO Y, et al. A manganin thin film ultra-high pressure sensor for microscale detonation pressure measurement [J]. Sensors, 2018, 18(3): 736. DOI: 10.3390/s18030736.

[105] ENDEVCO. PCB piezotronics [EB/OL]. [2024-10-09]. https://endevco.com/.

[106] Kulite. The leader in pressure transducer technology [EB/OL]. [2024-10-09]. https://kulite.com.

[107] 王毅, 陆明, 丁士轩. 基于压电式压力传感器的冲击波载荷测试系统设计 [J]. 机械, 2014, 41(12): 62–66. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0316.2014.12.019.
WANG Y, LU M, DING S X. The design of testing system for explosive blast loading using piezoelectric type pressure transducer [J]. Machinery, 2014, 41(12): 62–66. DOI: 10.3969/j.issn.1006-0316.2014.12.019.

[108] YANG F, KONG D R, KONG L. Accurate measurement of high-frequency blast waves through dynamic compensation of miniature piezoelectric pressure sensors [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2018, 280: 14–23. DOI: 10.1016/j.sna.

2018.07.029.

[109] 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. DOI: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2023.000813.
WEN B H. Design, fabrication and application of flexible pressure sensor based on PVDF piezoelectric film [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2023. DOI: 10.27075/d.cnki.ghzdc.2023.000813.

[110] 蔡思康. 激波测量用高频动态压电式压力传感器研究 [D]. 济南: 济南大学, 2023. DOI: 10.27166/d.cnki.gsdcc.2023.000616.
CAI S K. Study on High frequency dynamic piezoelectric pressure sensor for shock wave measurement [D]. Jinan: University of Jinan , 2023. DOI: 10.27166/d.cnki.gsdcc.2023.000616.

[111] 何天明. 柔性压力传感器冲击波测量特性 [D]. 太原: 中北大学, 2022. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2022.000605.
HE T M. shock wave measurement characteristics of flexible pressure sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2023. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2022.000605.

[112] LIANG R J, WANG Q M. High sensitivity piezoelectric sensors using flexible PZT thick-film for shock tube pressure testing [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 235: 317–327. DOI: 10.1016/j.sna.2015.09.027.

[113] 刘相果, 程晋明, 祁双喜, 等. 球面阵列压力传感器的研究 [J]. 压电与声光, 2010, 32(1): 48–50, 54. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2474.2010.01.014.
LIU X G, CHENG J M, QI S X, et al. Study on spherical array pressure gauge [J]. Piezoelectrics and Acoustooptics, 2010, 32(1): 48–50, 54. DOI: 10.3969/j.issn.1004-2474.2010.01.014.

[114] BAUER F. PVDF gauge piezoelectric response under two-stage light gas gun impact loading [J]. AIP Conference Proceedings, 2002, 620(1): 1149–1152. DOI: 10.1063/1.1483741.

[115] 郭士旭, 余尚江, 陈晋央, 等. 压电式压力传感器动态特性补偿技术研究 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 136–140. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.02.022.
GUO S X, YU S J, CHEN J Y, et al. Dynamic compensation technique for piezoelectric pressure sensors [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 136–140. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.02.022.

[116] 杜红棉, 祖静, 马铁华, 等. 自由场传感器外形结构对冲击波测试的影响研究 [J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 85–89. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2011.11.004.
DU H M, ZU J, MA T H, et al. Effect of mount configuration of free-field transducers on shock wave measurement [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 85–89. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2011.11.004.

[117] PCB PIEZOTRONICS. Model 137B23B [EB/OL]. [2024-10-09]. https://www.pcb.com/products?m=137b23b.

[118] PCB PIEZOTRONICS. Model 113B21 [EB/OL]. [2024-10-09]. https://www.pcb.com/products?m=113b21.

[119] 邱艳宇, 卢红标, 蔡立艮, 等. 压电传感器受爆炸瞬变温度影响的试验研究 [J]. 爆破, 2010, 27(4): 31–34, 39. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2010.04.008.
QIU Y Y, LU H B, CAI L G, et al. Experimental research on effect of explosion transient temperature on piezoelectric sensors [J]. Blasting, 2010, 27(4): 31–34, 39. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2010.04.008.

[120] 王永强, 肖英淋, 刘长林. 封装材料对 PVDF 薄膜传感器激波响应的影响 [J]. 测试技术学报, 2015, 29(3): 256–260. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2015.03.015.
WANG Y Q, XIAO Y L, LIU C L. Effect of packaging material on shock wave response of PVDF film sensor [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2015, 29(3): 256–260. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7449.2015.03.015.

[121] 谢林, 刘迎彬, 范志强, 等. 基于复合压电效应的 PVDF 传感器测量性能调控 [J]. 高压物理学报, 2023, 37(4): 043401. DOI: 10.11858/gywlxb.20230645.
XIE L, LIU Y B, FAN Z Q, et al. Measurement performance regulation of PVDF sensor based on composite piezoelectricity [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(4): 043401. DOI: 10.11858/gywlxb.20230645.

[122] 袁佳艳, 狄长安, 徐天文, 等. 基于电荷输出型压电传感器的冲击波超压存储测试系统 [J]. 传感器与微系统, 2016, 35(11): 107–108, 112. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2016)11-0107-02.
YUAN J Y, DI C A, XU T W, et al. Storage and test system for shock wave pressure based on charge output type piezoelectric sensor [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016, 35(11): 107–108, 112. DOI: 10.13873/J.1000-9787(2016)11-0107-02.

[123] PCB PIEZOTRONICS. Sensors that measure up! [EB/OL]. [2024-10-09]. https://www.pcb-china.cn/Home.

[124] HBK. Sound and vibration measurement [EB/OL]. [2024-10-09]. https://www.bksv.com/en.

[125] 孙晓明, 黄正平, 白春华, 等. 一种新型的带放大器的压杆式压电压力传感器及其在爆炸测试技术中的应用 [J]. 中国安全科学学报, 1998(5): 60–63, 81. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.1998.05.013.
SUN X M, HUANG Z P, BAI C H, et al. A new type of piezoelectric pressure gauge with an amplifier and its application [J]. China Safety Science Journal, 1998(5): 60–63, 81. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.1998.05.013.

[126] 赵伟绩. 基于 MEMS 光纤压力传感器的研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
ZHAO W J. Research on MEMS based fiber optic pressure sensor [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2019.

[127] 隋丹丹. 面向接触力检测的柔性光纤压力传感器制造技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2021. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2021.000223.
SUI D D. Research on manufacturing technology of flexible optical fiber pressure sensor for contact force detection [D]. Taiyuan: North University of China, 2021. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2021.000223.

[128] 杨洋. 光纤 F-P 干涉传感器高分辨动态解调技术及应用研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2020. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.003792.
YANG Y. High resolution dynamic demodulation technology and application research of fiber optic F-P interferometric sensor [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022. DOI: 10.26991/d.cnki.gdllu.2020.003792.

[129] CHAVKO M, KOLLER W A, PRUSACZYK W K, et al. Measurement of blast wave by a miniature fiber optic pressure transducer in the rat brain [J]. Journal of Neuroscience Methods, 2007, 159(2): 277–281. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2006.07.018.

[130] 孙哲. 薄膜式光纤压力传感技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023. DOI: 10.27391/d.cnki.gxagu.2023.000331.
SUN Z. Research on thin-film fiber-optic pressure sensing technology [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. DOI: 10.27391/d.cnki.gxagu.2023.000331.

[131] 申佳鑫. 冲击波压力测量光纤传感与技术研究 [D]. 西安: 西安工业大学, 2023. DOI: 110.27391/d.cnki.gxagu.2022.0000171.
SHEN J X. Research on fiber-optic sensing and technology for shock wave pressure measurement [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2023. DOI: 110.27391/d.cnki.gxagu.2022.0000171.

[132] XU F, REN D X, SHI X L, et al. High-sensitivity Fabry-Pérot interferometric pressure sensor based on a nanothick silver diaphragm [J]. Optics Letters, 2012, 37(2): 133–135. DOI: 10.1364/OL.37.000133.

[133] 张红柱. 基于法布里-珀罗干涉的薄膜式光纤气压和气流传感器研究 [D]. 济南: 山东大学, 2022. DOI: 10.27272/d.cnki.gshdu.2022.004778.

[134] 许佳伟. 光纤-金膜短腔 F-P 水声传感单元研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlgu.2020.000529.
XU J W. Research of fiber-gold film short-cavity Fabry-Pérot underwater acoustic sensor unit [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2021. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlgu.2020.000529.

[135] 许健. 全石英光纤 F-P 压力传感器的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
XU J. Research of the quartz F-P cavity pressure sensor [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.

[136] BEARD P C, HURRELL A M, MILLS T N. Characterization of a polymer film optical fiber hydrophone for use in the range 1 to 20 MHz: a comparison with PVDF needle and membrane hydrophones [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2000, 47(1): 256–264. DOI: 10.1109/58.818769.

[137] MACPHERSON W N, GANDER M J, BARTON J S, et al. Blast-pressure measurement with a high-bandwidth fibre optic pressure sensor [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(2): 95–102. DOI: 10.1088/0957-0233/11/2/302.

[138] WU N, WANG W H, TIAN Y, et al. Ultra fast all-optical fiber pressure sensor for blast event evaluation [C]//Proceedings of the 21st International Conference on Optical Fiber Sensors. Ottawa: SPIE, 2011: 77535J. DOI: 10.1117/12.885104.

[139] BAE H, ZHANG X M, LIU H, et al. Miniature surface-mountable Fabry-Pérot pressure sensor constructed with a 45° angled fiber [J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1701–1703. DOI: 10.1364/OL.35.001701.

[140] MA J, XUAN H F, HO H L, et al. Fiber-optic Fabry-Pérot acoustic sensor with multilayer graphene diaphragm [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2013, 25(10): 932–935. DOI: 10.1109/LPT.2013.2256343.

[141] 罗小东. 光纤光栅加速度传感器的设计与传感性能研究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2022. DOI: 10.27292/d.cnki.gsxfu.2022.000744.

LUO X D. design and sensing performance study of fiber bragg grating acceleration sensor [D].Xi'an: Shaanxi Normal University, 2022. DOI: 10.27292/d.cnki.gsxfu.2022.000744.
[142] 张雯, 孟凡勇, 宋言明, 等. 飞秒刻写光纤 F-P 腔级联 FBG 传感特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2193–2199. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2017.09.013.
ZHANG W, MENG F Y, SONG Y M, et al. Research on the cascaded fiber F-P cavity fabricated by femtosecond laser with FBG and its sensing characterization [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9): 2193–2199. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2017.09.013.
[143] 康风霞. 高 *g* 值加速度传感器的动态特性研究 [D]. 太原: 中北大学, 2009.
KANG F X. The research of dynamic performance of high-*g* accelerometer [D].Taiyuan: North University of China, 2009.
[144] 杨杏敏. 大过载压阻式加速度计设计、封装与测试 [D]. 太原: 中北大学, 2011.
YANG X M. The design, packaging and testing of piezoresistive accelerometer with large overload [D]. Taiyuan: North University of China, 2011.
[145] 张中才. 大量程高频响压电加速度传感器设计技术研究 [D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.
[146] 王存玲. 新型压阻式加速度传感器的研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2011.
WANG C L. Research of new piezoresistive sensor [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
[147] 杨宇新. 高过载高固有频率压阻式加速度传感器芯片研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2022.001016.
YANG Y X. Study on piezoresistive acceleration sensor chip with high overload and high natural frequency [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022. DOI: 10.27322/d.cnki.gsgyu.2022.001016.
[148] 何洪涛. 新型 MEMS 压阻高冲击加速度传感器技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
HE H T. The research of the novel MEMS high shock piezoresistive accelerometer [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2012.
[149] ROYLANCE L M, ANGELL J B. A batch-fabricated silicon accelerometer [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1979, 26(12): 1911–1917. DOI: 10.1109/T-ED.1979.19795.
[150] 王毓婷. 压阻式三轴高 *g* 值加速度传感器设计 [D]. 太原: 中北大学, 2023. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000647.
WANG Y T. Design of piezoresistive triaxial high-*g* acceleration sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2011. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000647.
[151] 张旭. 压阻型大加速度计的研制 [D]. 南京: 东南大学, 2002. DOI: 10.7666/d.Y463444.
ZHANG X. Development of piezoresistive large accelerometer [D]. Nanjing: Southeast University, 2002. DOI: 10.7666/d.Y463444.
[152] MO Y M, YANG J, PENG B, et al. Design and verification of a structure for isolating stress in sandwich MEMS accelerometer [J]. Microsystem Technologies, 2021, 27(5): 1943–1950. DOI: 10.1007/s00542-020-04980-w.
[153] 陈嘉俊. 三轴高 *g* 值加速度计的优化设计及其在多层硬目标侵彻中的应用研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2020.001527.
[154] 肖峰. 压电加速度传感器频率特性及高温性能优化研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.003195.
XIAO F. Research on frequency characteristics and high temperature performance optimization of piezoelectric acceleration sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology. 2023. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.003195.
[155] 曾宏川. 压电加速度传感器优化设计与高温特性研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2021.000537.
ZENG H C. Research on optimal design and high temperature characteristics of piezoelectric acceleration sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2021. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2021.000537.
[156] 骆丹. MEMS 数字加速度计测试系统研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
LUO D. Research on MEMS Digital Accelerometer Test System[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2019.
[157] 林国鑫. MEMS 加速度计的误差补偿技术研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2022. DOI: 10.26939/d.cnki.gbhgu.2022.000728.
LIN G X. Research on error compensationtechnology of mems acceieromete [D]. Beijing: Beijing University of Chemical

Technology, 2022. DOI: 10.26939/d.cnki.gbhgu.2022.000728.

[158] 李文燕, 郭涛, 徐香菊. MEMS 高量程微加速度计温度补偿的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(10): 2857–2859. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2012.10.007.

LI W Y, GUO T, XU X J. Design of MEMS high-*g* micro accelerometer temperature compensation [J]. Computer Measurement and Control, 2012, 20(10): 2857–2859. DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2012.10.007.

[159] 张乐. IEPE 加速度传感器动态特性分析与实验研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2000. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.003977.

ZHANG L. Dynamic characteristics analysis and experimental research of IEPE accelerometer [D]. Chongqing : Chongqing University, 2000. DOI: 10.27670/d.cnki.gcqdu.2020.003977.

[160] 穆如旺. 电容式加速度计性能影响因素研究 [D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2018.

MU R W. Research on influence factors of capacitive accelerometer performance [D]. Langfang, Hebei: College of Disaster Prevention Technology, 2019.

[161] 张程浩. 一种 MEMS 加速度计的动力学特性测试研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2017.

ZHANG C H. The measurement study for dynamic characteristics of a MEMS accelerometer [D]. Beijing: North China University of Technology, 2017.

[162] 张萌. 高性能 MEMS 加速度计的研究与制备 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2020.

ZHANG M. The research and preparation of high performance MEMS accelerators [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2020.

[163] 王一翔. 基于氮化铝的压电谐振式 MEMS 加度计研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2017.

WANG Y X. AlN based piezoelectric resonant MEMS accelerameter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.

[164] 贡旭超. 硅微谐振式加速度计封装应力辨识及验证 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.002845.

GONG X C. Stress identification and verification of silicon microresonant accelerometer package [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021. DOI: 10.27241/d.cnki.gnjgu.2021.002845.

[165] 王玲. 硅微电容式、隧道式加速度计检测技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2007.

WANG L. The research on detection technology of capacitance accelerometer and tunneling accelerometer [D]. Taiyuan: North University of China, 2007.

[166] 张子豪. 微型光纤 F-P 加速度传感器及其热致振动测量研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2021. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlgu.2021.000639.

ZHANG Z H. Research on miniature fiber optic F-P acceleration sensor and thermal vibration measurement [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2023. DOI: 10.27381/d.cnki.gwlgu.2021.000639.

[167] 王晓云. 法布里-珀罗干涉型高精度光纤加速度计关键技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2022. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2022.003606.

WANG X Y. A dissertation submitted in partial fulillment of the requirements for the master degree in science [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2022.003606.

[168] 刘钦朋, 李星睿, 王丹洋, 等. 光纤 F-P 腔高灵敏加速度传感器理论模型研究 [J]. 光电子·激光, 2023, 34(9): 897–903. DOI: 10.16136/j.joel.2023.09.0705.

LIU Q P, LI X R, WANG D Y, et al. Research on theoretical model of fiber optic F-P cavity acceleration sensor with high sensitivity [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2023, 34(9): 897–903. DOI: 10.16136/j.joel.2023.09.0705.

[169] 石义春. 基于 F-P 腔的光纤加速度计解调技术 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.

SHI Y C. The demodulation technique of fiber optic accelerometer based on F-P cavity [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[170] 熊振宇. 爆炸冲击波信号处理方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2021. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2021.000772.

[171] 张春棋. 爆炸场冲击波信号处理方法及传播特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.

[172] 戴英杰. 基于压缩感知的冲击波去噪重构算法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2022. DOI: 10.26977/d.cnki.gccgc.2022.000410.

DAI Y J. Research on shock wave denoising and reconstruction algorithm based on compressed sensing [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2022. DOI: 10.26977/d.cnki.gccgc.2022.000410.

[173] XIA Y L, ZHAI Y. Dynamic compensation and its application of shock wave pressure sensor [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2016, 7(1): 48–53. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8042.2016.01.010.

[174] CAO J J, CAI Z C, LIANG W Q. A novel thresholding method for simultaneous seismic data reconstruction and denoising [J]. Journal of Applied Geophysics, 2020, 177: 104027. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2020.104027.

[175] 李娜娜, 李有明, 余明宸, 等. 水声通信中基于正则化阈值迭代的脉冲噪声抑制方法 [J]. 电信科学, 2019, 35(3): 76–83. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019010.

LI N N, LI Y M, YU M C, et al. Regularized threshold iteration method for impulsive noise suppression in underwater acoustic communication [J]. Telecommunications Science, 2019, 35(3): 76–83. DOI: 10.11959/j.issn.1000-0801.2019010.

[176] 豆佳敏. 基于深度学习的冲击波信号压缩感知方法 [D]. 长春: 长春理工大学, 2021. DOI: 10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000553.

DOU J M . shock wave signal compression sensing method base on deep learning [D]. Changchun : Changchun University of Science and Technology, 2021. DOI: 10.26977/d.cnki.gccgc.2021.000553.

[177] 张衍芳. 冲击波信号处理方法的研究 [D]. 太原: 中北大学, 2011.

ZHANG Y F. Research on shock wave signal processing method [D]. Taiyuan: North University of China, 2011.

[178] 童晓. 爆炸场冲击波压力测量及数据处理方法研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2015.

[179] 张立恒, 王少龙, 颜澎, 等. 爆炸冲击波测试数据处理方法研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(3): 107–110. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2010.03.001.

ZHANG L H, WANG S L, YAN P, et al. Study on blast wave test data processing methods [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(3): 107–110. DOI: 10.15892/j.cnki.djzdxb.2010.03.001.

[180] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3): 613–627. DOI: 10.1109/18.382009.

[181] MAYS B T. Shockwave and muzzle blast classification via joint time frequency and wavelet analysis [R]. Maryland: Army Research Laboratory Adelphi, 2001.

[182] 张衍芳, 杜红棉, 祖静. 冲击波信号后期处理方法研究 [J]. 工程与试验, 2010, 50(4): 15–18. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2010.04.006.

ZHANG Y F, DU H M, ZU J. Research on post treatment method for shockwave signals [J]. Engineering and Test, 2010, 50(4): 15–18. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3407.2010.04.006.

[183] 张克刚, 叶湘滨. 基于短时能量和小波去噪的枪声信号检测方法 [J]. 电测与仪表, 2015, 52(S1): 130–132, 138. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2015.z1.031.

ZHANG K G, YE X B. A method of the gunfire signal detecting based on short-time energy and wavelet denoising [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2015, 52(S1): 130–132, 138. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1390.2015.z1.031.

[184] 赖富文, 张志杰, 刘景江, 等. 基于炮口脉冲噪声信号的射速测试方法研究 [J]. 兵工学报, 2013, 34(9): 1180–1186. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.09.020.

LAI F W, ZHANG Z J, LIU J J, et al. Research on testing firing rate based on muzzle impulse noise [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(9): 1180–1186. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.09.020.

[185] 刘文涛, 陈红, 蔡晓霞, 等. 基于双树复小波变换的信号去噪算法 [J]. 火力与指挥控制, 2014, 39(12): 84–87.

LIU W T, CHEN H, CAI X X, et al. Signal denoising algorithm based on dual-tree complex wavelet transform [J]. Fire Control and Command Control, 2014, 39(12): 84–87.

[186] 王芳, 季忠, 彭承琳. 基于双树复小波变换的心电信号去噪研究 [J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(5): 1160–1166. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2013.05.029.

WANG F, JI Z, PENG C L. Research on ECG signal denoising based on dual-tree complex wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(5): 1160–1166. DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2013.05.029.

[187] 梁晶, 熊振宇, 裴东兴, 等. 爆炸冲击波信号的降噪处理 [J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(8): 79–84. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2022.08.013.

LIANG J, XIONG Z Y, PEI D X, et al. Research on noise reduction process of explosion shock wave signal [J]. Fire Control and Command Control, 2022, 47(8): 79–84. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0640.2022.08.013.

[188] 刘宇, 李新娥, 崔春生, 等. 去除爆炸冲击波信号高频噪声的联合处理方法 [J]. 探测与控制学报, 2023, 45(2): 61–66.

LIU Y, LI X E, CUI C S, et al. A joint processing method of removing high frequency noise from shock wave signal [J].

Journal of Detection and Control, 2023, 45(2): 61–66.

[189] HRISTOV N, KARI A, JERKOVIĆ D, et al. Simulation and measurements of small arms blast wave overpressure in the process of designing a silencer [J]. Measurement Science Review, 2015, 15(1): 27–34. DOI: 10.1515/msr-2015-0005.

[190] REHMAN H, HWANG S H, FAJAR B, et al. Analysis and attenuation of impulsive sound pressure in large caliber weapon during muzzle blast [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2011, 25(10): 2601–2606. DOI: 10.1007/s12206-011-0731-2.

[191] 赵海涛, 王成. 空中爆炸问题的高精度数值模拟研究 [J]. 兵工学报, 2013, 34(12): 1536–1546. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.12.008.

ZHAO H T, WANG C. High resolution numerical simulation of air explosion [J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(12): 1536–1546. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.12.008.

[192] 王杨, 姜孝海, 郭则庆. 膛口冲击波物理模型数值分析 [J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 57–60.

WANG Y, JIANG X H, GUO Z Q. Numerical analysis on physical model of muzzle blast wave [J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(1): 57–60.

[193] 张远平, 池家春, 龚晏青, 等. 爆炸冲击波压力测试技术及其复杂信号的处理方法 [C]//中国仪器仪表学会第九届青年学术会议论文集. 黄山: 中国仪器仪表学会青年工作委员会, 2007: 4.

[194] FENG H, ZHANG Z J. Reconstruction of shock wave pressure field based on distributed test system [J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2015, 6(1): 25–29. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8042.2015.01.005.

[195] 赖富文, 张志杰, 胡桂梅, 等. 某型舰炮炮口冲击波等压场测试方法 [J]. 传感技术学报, 2015, 28(1): 77–80. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2015.01.014.

LAI F W, ZHANG Z J, HU G M, et al. A method to measure muzzle shock wave pressure field for a naval gun [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2015, 28(1): 77–80. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2015.01.014.

[196] 杨志, 张志杰, 夏永乐. 基于 B 样条插值拟合的冲击波超压场重建 [J]. 科学技术与工程, 2016, 16(7): 236–240. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.07.040.

YANG Z, ZHANG Z J, XIA Y L. Resconstruction of shock ware overpressure filed based on B-spline interpolation [J]. Science Technology and Engineering, 2016, 16(7): 236–240. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2016.07.040.

[197] 白苗苗, 郭亚丽, 王黎明. 基于爆炸超压场重建的传感器优化布局技术研究 [J]. 传感技术学报, 2014, 27(7): 886–892. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.07.007.

BAI M M, GUO Y L, WANG L M. Study on optimal sensor placement method based on the reconstruction of explosion overpressure field [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(7): 886–892. DOI: 10.3969/j.issn.1004-1699.2014.07.007.

[198] TUGRUL B, POLAT H. Privacy-preserving inverse distance weighted interpolation [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2014, 39(4): 2773–2781. DOI: 10.1007/s13369-013-0887-4.

[199] STEIN M L. Interpolation of spatial data [M]. New York: Springer, 1999. DOI: 10.1007/978-1-4612-1494-6.

[200] POUDEROUX J, GONZATO J C, TOBOR I, et al. Adaptive hierarchical RBF interpolation for creating smooth digital elevation models [C]//Proceedings of the 12th Annual ACM International Workshop on Geographic Information Systems. Washington: ACM, 2004: 232-240. DOI: 10.1145/1032222.1032256.

[201] 黄炳潇. 爆炸场景数字建模与数值仿真研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.003285.

HUANG B X. Research on Digital modeling and numerical simulation of explosion scene [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2023.003285.

[202] 张健. 爆炸场冲击波数据处理方法研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000507.

ZHANG J. Research on data processing method of shock wave in explosion field [D]. Taiyuan: North China University, 2023. DOI: 10.27470/d.cnki.ghbgc.2023.000507.

[203] DOWELL E H, HALL K C, ROMANOWSKI M C. Eigenmode analysis in unsteady aerodynamics: reduced order models [J]. American Society of Mechanical Engineers, 1997, 50(6): 371–386. DOI: 10.1115/1.3101718.

[204] SCHMID P J. Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 656: 5–28. DOI: 10.1017/S0022112010001217.

[205] 曹晓峰, 李鸿岩, 郭承鹏, 等. 基于深度学习的二维翼型流场重构技术研究 [J]. 航空科学技术, 2022, 33(7): 106–112. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.07.012.

CAO X F, LI H Y, GUO C P, et al. Research on two-dimensional airfoil flow field reconstruction based on deep learning [J]. Aeronautical Science and Technology, 2022, 33(7): 106–112. DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.07.012.

[206] 韩仁坤, 刘子扬, 钱炜祺, 等. 基于深度神经网络的流场时空重构方法 [J]. 实验流体力学, 2022, 36(3): 118–126. DOI: 10.11729/syltlx20210124.

HAN R K, LIU Z Y, QIAN W Q, et al. Spatio-temporal reconstruction method of flow field based on deep neural network [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2022, 36(3): 118–126. DOI: 10.11729/syltlx20210124.

[207] 周沈楠, 王仲琦, 李其中. 基于物理模型分析与深度神经网络融合的爆炸流场实时模拟方法 [J]. 安全与环境学报, 2024, 24(5): 1681–1690. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2023.0758.

ZHOU S N, WANG Z Q, LI Q Z. Real-time explosion field modeling by fusing physical model-based analysis with deep neural network [J]. Journal of Safety and Environment, 2024, 24(5): 1681–1690. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2023.0758.

[208] LIU B, MEDDA A, WOODS D, et al. The integrated blast effects sensor suite: a rapidly developed, complex, system of systems [J]. Military Medicine, 2015, 180(S3): 195–200. DOI: 10.7205/MILMED-D-14-00455.

[209] DANIEL J, NG T N, GARNER S, et al. Pressure sensors for printed blast dosimeters [C]//Proceedings of Italian National Conference on Sensors. Waikoloa: IEEE, 2010: 2259–2263. DOI: 10.1109/ICSENS.2010.5690713.

[210] SHIELD [EB/OL]. [2024-10-09]. https://oceanit.com/products/shield/.

[211] WIRI S, NEEDHAM C. Reconstruction of improvised explosive device blast loading to personnel in the open [J]. Shock Waves, 2016, 26(3): 279–286. DOI: 10.1007/s00193-016-0644-1.

[212] NAKASHIMA A, VARTANIAN O, RHIND S G, et al. Repeated occupational exposure to low-level blast in the Canadian armed forces: effects on hearing, balance, and ataxia [J]. Military Medicine, 2022, 187(1/2): e201–e208. DOI: 10.1093/milmed/usaa439.

[213] WIRI S, NEEDHAM C, ORTLEY D, et al. Development of a fast-running algorithm to approximate incident blast parameters using body-mounted sensor measurements [J]. Military Medicine, 2022, 187(11/12): e1354–e1362. DOI: 10.1093/milmed/usab411.

[214] FAIN W B, PHELPS S, MEDDA A. Lessons learned from the analysis of soldier collected blast data [J]. Military Medicine, 2015, 180(S3): 201–206. DOI: 10.7205/MILMED-D-14-00431.

[215] MULKEY N, LIU B, MEDDA A. The integrated blast effects sensor suite: a rapidly developed, complex, system of systems [C]// Proceedings of the 8th International Conference on System of Systems Engineering. Maui: IEEE, 2013: 224–228. DOI: 10.1109/SYSoSE.2013.6575271.

(责任编辑　张凌云)