

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0197

# 爆炸冲击伤发生机制及防护材料研究进展\*

阮洪伟<sup>1</sup>, 范思宇<sup>1</sup>, 曾 灵<sup>1,2</sup>, 蒋建新<sup>1,2</sup>, 张安强<sup>1,2</sup>

(1. 陆军军医大学大坪医院战创伤医学中心, 重庆 400042;

2. 陆军军医大学大坪医院创伤与化学中毒国家重点实验室, 重庆 400042)

**摘要:** 爆炸冲击伤是我国面临的重大公共卫生问题, 呈现高发、群发、难防的特点, 并且危重伤多, 感染发生率高, 诊治难度大。对爆炸冲击伤施以有效的防护胜过任何最可靠的救治。爆炸冲击伤防护是涉及医学、材料学、爆炸冲击力学等多学科的复杂问题, 需要建立起爆炸冲击波传播、伤情评估、材料设计制备及材料衰减性能性能评测等方面的关系。基于此, 本文从爆炸冲击波的产生、传播及爆炸冲击伤的发生机制出发, 介绍了肺部、颅脑爆炸伤致伤机制, 给出了不同程度的肺部、颅脑冲击伤的损伤力学指标, 并系统的综述了爆炸冲击伤防护材料的研究现状及进展, 讨论了不同材料的防护机理, 重点针对目前广泛使用的爆炸冲击波防护材料, 如多孔材料、水凝胶、聚脲等进行综述。此外, 针对防护材料衰减爆炸冲击波性能评估方法不统一的问题, 对材料衰减爆炸冲击波性能, 如生物评估法, 引测试法等评估方法进行了全面的调研并分析各种评估方法的优缺点。最后展望了在爆炸冲击波防护性能评测, 动物爆炸冲击伤伤情和材料防护性能与人员防护之间的尺度关系, 材料力学指标与防护性能之间的关系等方面的发展趋势。本文以期为人防爆炸冲击伤防护材料的设计制备、应用和测试提供技术、理论参考。

**关键词:** 爆炸冲击伤; 发生机制; 防护; 材料

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

## Research progress on the mechanism of explosion impact injury and protective materials

RUAN Hongwei<sup>1</sup>, FAN Siyu<sup>1</sup>, ZENG Ling<sup>1,2</sup>, JIANG Jianxin<sup>1,2</sup>, ZHANG Anqiang<sup>1,2</sup>

(1. *Wound Trauma Medical Center, Daping Hospital, Army Medical University, Chongqing 400042, China;*

2. *State Key Laboratory of Trauma and Chemical Poisoning, Daping Hospital, Army Medical University, Chongqing 400042, China*)

**Abstract:** Explosion shock injury is a major public health problem facing China, characterized by high incidence rate, mass occurrence, and difficulty in prevention, with many critical injuries, high infection rates, and difficult diagnosis and treatment. Effective protection against explosive shock injuries is superior to any reliable treatment. Explosion shock injury protection is a complex problem involving multiple disciplines such as medicine, materials science, and explosion shock mechanics. It requires establishing relationships between the propagation of explosion shock waves, injury assessment, material design and preparation, and evaluation of material attenuation performance. Based on this, starting from the generation, propagation of explosion shock wave and the occurrence mechanism of explosion shock injury, this paper introduces the injury mechanism of lung and brain explosion injury, gives the injury mechanics indexes of different degrees of lung and brain explosion injury, systematically reviews the research status and progress of protective materials for explosion shock injury, discusses the

\* 收稿日期: 2024-06-21; 修回日期: 2024-10-20

基金项目: 军委科技委基础加强计划重点基础研究项目(2020-JCJQ-ZD-254-05); 陆军特色医学中心人才创新能力培养计划(ZXYZZKY03); 陆军军医大学青年培育项目(2023XQN48)

第一作者: 阮洪伟(1995—), 男, 博士, 助理研究员, [ruanhw0519@tmmu.edu.cn](mailto:ruanhw0519@tmmu.edu.cn)

通信作者: 张安强(1985—), 男, 博士, 副研究员, [zhanganqiang@tmmu.edu.cn](mailto:zhanganqiang@tmmu.edu.cn)

protection mechanism of different materials, and focuses on the widely used protective materials for explosion shock wave, such as porous materials, hydrogels, polyurea, etc. In addition, in response to the problem of inconsistent evaluation methods for the attenuation of explosive shock wave performance of protective materials, a comprehensive investigation was conducted on the evaluation methods of material attenuation of explosive shock wave performance, such as biological evaluation method, lead testing method, etc., and the advantages and disadvantages of various evaluation methods were analyzed. Finally, the development trends in the evaluation of explosion shock wave protection performance, the scale relationship between animal explosion shock injury severity and material protection performance and personnel protection, and the relationship between material mechanics indicators and protection performance were discussed. This article aims to provide technical and theoretical references for the design, preparation, application, and testing of protective materials for personnel explosion and impact injuries.

**Keywords:** explosion impact injury; mechanism of occurrence; protection; material

爆炸的主要致伤因素是爆炸过程中产生的破片、冲击波和瞬时高温。针对爆炸过程中产生的破片对人员的致伤机制和防护研究已较成熟,主要致伤机制包括破片直接损伤、破片的压力波致伤、空腔效应和远达效应等<sup>[1-2]</sup>。基于此开发了一系列的防护材料,如高性能陶瓷和高强纤维等,其主要的防护策略是通过材料阻止破片的侵彻实现对人体的保护<sup>[3]</sup>。爆炸产生的瞬时高温是烧伤的致伤因素,虽然爆炸产生的瞬时高温可达数千摄氏度,但瞬时高温的持续时间仅为毫秒级,普通的耐高温织物就可实现瞬时高温的有效防护<sup>[3]</sup>。冲击波也是爆炸过程中主要的致伤因素,冲击波击中人体时释放出的能量会造成各种损伤,即爆炸冲击伤,会导致肺、胃肠和鼓膜等含气器官的损伤,同时对颅脑造成较长期的影响<sup>[4]</sup>。爆炸冲击伤是平、战时面临的重大公共卫生问题,在平时每年因爆炸事故造成的人员伤亡和财产损失十分严重。以天津港“8·12”爆炸为例,共造成1000余人伤亡,直接经济损失68.66亿元<sup>[5]</sup>。由于作战样式的变化以及各种爆炸性武器的大量使用,爆炸冲击伤已成为现代战争中军事人员在执行作战任务时的主要伤类<sup>[1]</sup>。在最近的俄乌冲突、巴以冲突中,因爆炸冲击波导致的伤亡人数占总伤亡的80%。爆炸冲击伤呈现高发、群发、难防的特点,并且危重伤多,感染发生率高,救治难度大,死亡率高<sup>[6]</sup>。然而,与破片伤等机械性创伤不同的是,爆炸冲击伤表现为“外轻内重”,即无明显外伤而内部脏器损伤严重。这将导致伤员伤情发现不及时、诊治难度大,进而导致更高的死亡率<sup>[6-7]</sup>。此外,与破片伤机制、防护材料、防护装具研究较完备相比,目前对于爆炸冲击伤的发生机制研究较少,并且对于防护材料的设计、爆炸冲击波衰减评测方法等仍不完善。基于此,本文主要对爆炸冲击伤的发生机制、防护材料的设计制备及评测等方面的研究进展展开综述,以期对相关领域的进一步研究提供技术和理论参考。

## 1 爆炸冲击伤及其发生机制

对爆炸冲击波的产生、传播机制及爆炸冲击伤发生机制的研究是开展爆炸冲击伤防护研究的基础。因此,本节中综述了爆炸冲击波的产生、传播以及对人体不同器官的损伤机制。

### 1.1 爆炸冲击波的产生及传播机制

爆炸冲击波是爆炸时能量突然释放的物理现象,具有频率高(峰值区域的频率约为2~8 kHz<sup>[8]</sup>)、频段宽、波长短(波长范围约为120~200 nm<sup>[9]</sup>)的特点,其作用时间通常为2~10 ms<sup>[10]</sup>,爆炸瞬时的压力急剧上升,远高于大气压力。正压上升(“超压”)压缩周围介质(空气、水等),导致爆炸冲击波的传播,然后以径向方式向外延伸,在空气中传播时会形成类似双层球形的区域,超压之后是压力下降和负波(“负压”),最后回到大气压状态<sup>[11-12]</sup>,爆炸冲击波的压力随着传播距离的增大而降低。此外,封闭或半封闭环境(如建筑物、巷道或车辆)附近或内部的爆炸冲击波强度可以放大2~9倍。这是因为,在封闭或半封闭环境中,冲击波与周围结构相互作用并产生多次波反射,这些波反射与主波相互作用在彼此之间产生复杂波,并且会导致冲击波增强以及压力增大<sup>[13-16]</sup>。

## 1.2 爆炸冲击波的产生及传播机制

爆炸冲击伤的发生机制不同于一般的机械性创伤(如破片致伤),破片是以“点”击中人体,而在一定范围内冲击波“超压”和“负压”以“面”击中人体。这导致爆炸冲击波作用面积大,受损伤部位多。此外,与破片伤具有明显的外表损伤不同,爆炸冲击伤表现为无明显外伤而内部脏器损伤严重即“外轻内重”的特点,这将导致伤员伤情发现不及时、诊治难度大、致死率高。

在临床研究发现冲击波可以导致人体多种器官发生损伤,如肺<sup>[17]</sup>、听器<sup>[18]</sup>、眼<sup>[19]</sup>、颅脑<sup>[20]</sup>、心脏<sup>[21]</sup>和胃肠道<sup>[22]</sup>等,并且损伤程度与冲击波强度呈正相关。爆炸冲击伤的主要发生机制是爆炸冲击波的“超压”和“负压”直接作用于人体导致:(1)血流动力的变化,即超压作用于体表后压迫胸腹壁,使胸腹压急剧增加,导致下腔静脉血大量涌入心肺,造成心肺血容量急剧增加和血管损伤;(2)不同组织的压力差,即组织内液体和气体压力变化不同导致压力差,引起压力高的液体流向压力低的气体,造成小血管破裂出血<sup>[23]</sup>;(3)破裂效应,即压力波从较致密部位向较疏松部位传导时在两者界面上引起反射,导致较致密部位的压力突然升高而损伤<sup>[24]</sup>;(4)内爆效应,即“超压”过后含气组织被压缩,“负压”过后含气组织急剧膨胀;(5)惯性作用,即密度不同的组织收到相同的压力作用时,运动速度不同导致组织撕裂、出血<sup>[25]</sup>。除冲击波“超压”和“负压”的直接致伤外,冲击波动压可使人体跌倒或被抛掷造成各种机械性损伤。与肝、肾等实质性器官相比,冲击波造成严重损伤的主要“靶器官”是肺。这是因为,肺是人体中含气较多的组织,当爆炸性冲击波穿过胸腔时,爆炸冲击波主要在肺泡-空气界面耗散动能,导致肺泡的破裂、出血、气胸<sup>[17]</sup>,肺冲击伤是爆炸冲击伤早期死亡的主要原因之一。冲击波对肺脏的主要损伤机制有:(1)内爆效应,即冲击波“超压”经过后肺泡被压缩然后超压之后的“负压”经过肺导致其快速、过度扩张而造成损伤<sup>[26]</sup>;(2)血流动力效应,即血液从腹腔大量涌入胸腔致使肺组织损伤;(3)过牵效应,即肺泡在经过“负压”时被过度拉伸,当拉伸超过一定程度时肺泡的上皮细胞对小溶质的渗透压增强造成肺水肿<sup>[17]</sup>。我们在采用小鼠进行爆炸冲击伤试验时也发现冲击波击中小鼠后,小鼠肺部有明显的出血症状。冲击波的强度大于 350 kPa 时会导致大多数伤者肺部的损伤,而大于 550 kPa 时会导致严重的肺损伤并且死亡率明显升高<sup>[27, 28]</sup>。

在分子生物学层面,爆炸冲击波对肺部的损伤主要是冲击波致伤肺部后造成肺部炎症反应<sup>[29-30]</sup>、氧化应激<sup>[31-32]</sup>和细胞凋亡<sup>[33]</sup>,严重时将会导致脓毒症,最终导致伤员死亡。从分子层面研究爆炸冲击波的损伤机制为冲击伤治疗药物的研发打下了坚实的基础。

颅脑在冲击波作用下也极易受伤,与肺部爆炸冲击伤相比,颅脑冲击伤不易造成致死性伤害,但是会对人体造成长期的神经和精神伤害,如图 1 所示,我们在研究过程中发现,小鼠肺部发生严重损伤时脑部仅有少量出血。爆炸冲击波对颅脑的损伤机制大致有:(1)直接冲击,即冲击波直接冲击大脑,通过颅骨弯曲以及应力和剪切力的传播造成组织损伤<sup>[23, 34-35]</sup>;(2)压力传递,即冲击波产生超音速流,导致脑组织出血、水肿、血管收缩和凋亡<sup>[35]</sup>;(3)流体动力脉冲,即冲击胸部的冲击波可以在主要血管中引起流体动力脉冲,将动能传递到大脑,导致小静脉周围炎症和反应性星形胶质细胞病<sup>[36]</sup>;(4)血脑屏障破坏,即冲击波会破坏血脑屏障,导致认知、记忆功能障碍和随后的炎症和氧化应激引起的情感障碍,甚至会给伤

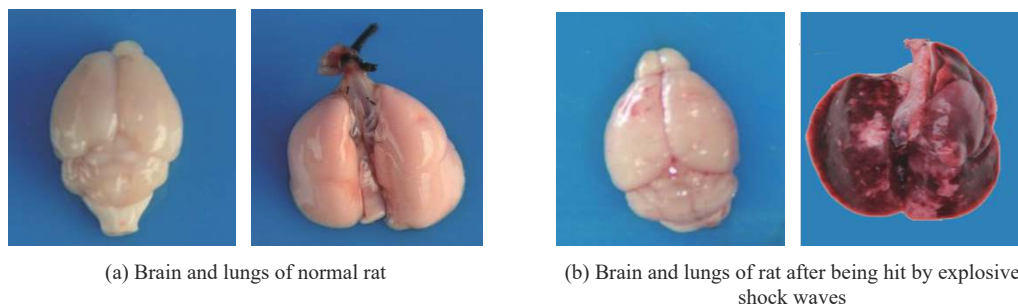


图 1 正常小鼠和爆炸冲击波击中后小鼠的脑和肺部

Fig. 1 Brains and lungs of a normal rat and one hit by explosive shock waves

者带来如自杀、暴力犯罪等一些社会问题<sup>[37-39]</sup>。与肺冲击伤相比, 颅脑冲击伤的研究更具有挑战性, 在相同强度的爆炸冲击波作用下, 肺部表现出明显的损伤, 而颅脑并未表现出明显的出血、挫裂伤等。康越等<sup>[40]</sup>通过数值模拟研究了颅脑冲击伤的发生机制, 为颅脑冲击伤的发生及防护研究提供了一种新的思路。但未来仍需要在精确测量颅脑组织不同部位的冲击波强度、不同颅脑损伤与冲击波强度的对应关系等方面开展大量研究。

除致伤机制和损伤表现外, 引起人体损伤的力学指标也是人们十分关注的问题。如图 2 所示, 在不同的冲击波压力作用下, 人体头部及肺部损伤的 50% 生存率具有明显差异, 可以看出, 头部相比于肺部能够承受的冲击波超压更高、持续时间更长, 有防护较无防护时肺部能够承受更高的冲击波超压、更长的持续时间。而针对头部防护下的冲击波耐受情况仍不清楚, 有待进一步研究。

爆炸冲击波对人体的损伤程度主要取决于 5 个因素: (1) 超压峰值, 690~1 724 kPa 的超压被认为是致命压力<sup>[41]</sup>; (2) 超压持续时间; (3) 爆炸介质; (4) 与爆心的距离; (5) 由于受限区域或墙壁等引起的冲击波反射<sup>[42-44]</sup>。

### 1.3 小 结

与破片等性机械损伤不同, 爆炸冲击波主要通过“超压”、“负压”直接作用于人体致伤, 具有损伤部位多、伤情复杂、危重伤多和“外重内轻”等特点。对含气组织(肺、听器、胃肠)的损伤较严重, 对颅脑也会造成长期性的损伤, 并且爆炸冲击波对人体的损伤与冲击波超压及作用时间正相关。因此, 接下来我们将围绕爆炸冲击伤的防护和评估等方面的科学问题, 系统介绍研究现状和相关成果。

## 2 爆炸冲击伤的防护

### 2.1 爆炸冲击伤防护策略

从上述爆炸冲击伤发生机制的研究可知爆炸冲击波通过压缩周围介质形成“超压”, “超压”击中人体后在体内传播, 造成多个器官发生损伤。在爆炸冲击波击中人体前通过防护材料将其绕射、反射、结构共振、形变等方式耗散, 是防护爆炸冲击波所致损伤的有效策略。

### 2.2 爆炸冲击伤防护材料

针对现有使用的防弹材料(如芳纶纤维)防护爆炸冲击波性能测试显示软质防弹材料(如芳纶纤维)不能有效实现爆炸冲击波的衰减<sup>[45]</sup>, 硬质防弹材料(如陶瓷)虽然能够衰减部分爆炸冲击波, 但硬质防弹材料硬度较高、密度较大, 穿戴舒适性低, 此外, 现有研究认为硬质防弹材料与人体之间会形成空隙, 这将导致冲击波“绕过”防弹材料造成人体损伤。笔者所在团队前期采用大鼠对目前常用的防弹材料进行了爆炸冲击波生物防护效应评估。从大鼠肺部解剖图像可以发现防弹材料在爆炸冲击波作用下无法实现有效的防护, 甚至会加重肺部损伤<sup>[46]</sup>。因此, 需要设计制备加强爆炸冲击波防护的材料。本节综述目前常用的爆炸冲击波防护材料, 并探究其适用的防护场景及对爆炸冲击波的防护机理。

#### 2.2.1 多孔材料

多孔材料是一种由相互贯通或封闭的孔洞构成网络结构的材料, 多孔材料与密实材料相比可实现爆炸冲击波的衰减, 这主要是通过孔隙结构的屈服压缩和孔壁的坍塌吸收、耗散爆炸冲击波能量。根据制备工艺和材料的不同, 适用于爆炸冲击波防护的多孔材料主要有泡沫材料, 多孔拉胀材料等。

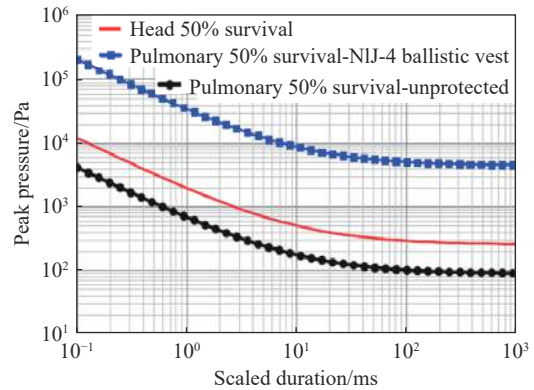


图 2 人体头部及肺部冲击波超压耐受曲线<sup>[28]</sup>

Fig. 2 Shock wave overpressure tolerance curves of human head and lung<sup>[28]</sup>

泡沫材料主要有聚合物基泡沫和金属基泡沫。在聚合物基泡沫方面, Jia 等<sup>[47]</sup>研究了不同厚度和密度(200.0(F-200)、400.0 kg/m<sup>3</sup>(F-400))的聚氨酯泡沫对冲击波防护的性能差异, 发现聚氨酯泡沫冲击波防护性能的强弱与其厚度、密度和微观特性相关。冲击波超压峰值和冲量随试样厚度的增大呈指数衰减。在相同厚度下, 一定密度范围内高密度的 F-400 的防护性能优于低密度的 F-200。当材料孔隙结构不被破坏时, 厚度大于 10.0 mm 的 F-200 和厚度大于 4.0 mm 的 F-400 均可以使超压峰值衰减 90.0% 以上。冲击波与聚氨酯泡沫相互作用后衰减为弱的压力扰动, 实现了爆炸冲击波的防护。金属基泡沫也可实现爆炸冲击波的衰减。Sun 等<sup>[48]</sup>研究了不同的多孔铁镍泡沫衰减瓦斯爆炸冲击波超压, 发现铁镍泡沫衰减爆炸冲击波的效果良好, 衰减率为 12.9%~73.8%; 孔径、相对密度及厚度是影响其衰减冲击波性能的重要因素, 适当降低孔径、增大相对密度和厚度有利于提高铁镍泡沫材料对冲击波的衰减性能, 而其中铁镍基体材料成分的比例对其衰减超压的效果影响不大。孔隙结构是影响泡沫爆炸冲击波衰减性能的重要参数。Hu 等<sup>[49]</sup>采用数值模拟的方法研究了聚氨酯泡沫孔隙结构对冲击波衰减性能的影响, 模拟结果表明孔隙塌陷形成局部应力波, 导致冲击波具有复杂的多波结构。冲击波峰值衰减的幅度随聚氨酯泡沫密度的提高而减小。在孔隙塌陷直至完全压实的过程中, 局部应力逐渐增大, 最终导致应力松弛。

与传统的泡沫材料相比, 3D 打印技术可以制备具有高度复杂几何形状孔隙结构的泡沫材料, 并且可以实现对微观孔隙结构的调控, 这些结构难以通过传统的制造方法(如铸造和挤压)生产<sup>[50]</sup>。Branch 等<sup>[51]</sup>通过相差成像和有限元建模研究了 3D 打印开孔泡沫中的孔径与冲击波衰减的关系。发现孔径的分布和每个孔径的接近度产生了一个随机拓扑结构, 该拓扑结构导致高应变点在更高速度的冲击波中产生不规则性。将发泡制备的多孔材料与具有相似密度的增材制造的多孔材料冲击波衰减性能进行比较, 通过调节增材制造过程中的微观孔隙结构可实现对爆炸冲击波衰减性能的调控。Kader 等<sup>[52]</sup>通过 3D 打印的方式制备了具有不同孔隙结构(球形、椭圆形)的丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物, 实验结果表明所设计的闭孔结构均匀分布使材料获得了均匀的应力分布和大变形的优点, 从而具有高强度和高能量吸收效率。适当的孔隙结构设计, 可以提高多孔材料的能量吸收效率。

具有负泊松比的多孔材料由于其特殊的力学性能近年来引起了广泛关注。与传统的多孔材料和结构类似, 这类多孔材料在本体结构内仍具有相互连接的孔隙网络, 网络是由各种几何构型的孔壁组成。在爆炸冲击波的作用下, 孔壁通过不同的机制(如弯曲和拉伸<sup>[53-55]</sup>以及刚性旋转<sup>[56-57]</sup>)发生变形。孔壁的变形实现爆炸冲击波能量的吸收。此外, 由于结构中较高的孔隙率, 其质量较低, 具有较高的比吸能。这类多孔结构的能量吸收能力远高于传统的多孔材料<sup>[58]</sup>。Fila 等<sup>[59]</sup>采用分离式霍普金森压杆冲击试验表征了具有负泊松比的多孔材料能量吸收性能。具有负泊松比的多孔材料在与其填充物协同作用时表现出优异的应力-应变性能, 当应力卸载时应变恢复。在爆炸冲击波防护方面, 拉胀材料的性能优于传统多孔材料<sup>[60-61]</sup>。这是因为由于材料的负泊松比效应, 夹层通过将材料逐渐拉入局部加载区而有效地适应动态加载<sup>[62-63]</sup>, 因此, 在爆炸过程中可实现对爆炸冲击波的有效防护。

多孔材料的孔隙结构(孔径、孔隙率)是影响爆炸冲击波衰减性能的主要因素, 通过制备工艺的调控可实现对多孔材料的孔径和孔隙率的调控, 进而达到调控爆炸冲击波衰减能力的目的。然而, 多孔材料由于孔隙的存在相比于实心材料而言机械强度较差, 未来在实现爆炸冲击波衰减的同时还需考虑如何增强多孔材料的机械强度。与此同时, 爆炸冲击波衰减性能依赖于材料的厚度, 当厚度减小时衰减冲击波的能力打折扣, 然而人员防护材料的厚度有严格限制。此外, 当孔隙结构屈服压缩无法回弹和大部分孔壁发生坍塌时, 多孔材料难以再次吸收爆炸冲击波能量。这些都是未来在设计制备用于防护爆炸冲击波的多孔材料时需要充分考虑的。

### 2.2.2 水凝胶

水凝胶是一类极为亲水的三维网络结构, 由不同的分子通过化学交联和物理交联的方法聚合而成。不同的原料、条件所制备的水凝胶表现出不同的性能。适用于爆炸冲击波防护的水凝胶应具有高含水率、高形变量的特性, 与其他防护材料相比, 水凝胶因其含有大量的水, 还可实现爆炸过程中瞬时光

温的防护。水凝胶在爆炸冲击波作用下,因链状大分子与内部的水相互作用需要时间,因此变形往往滞后于应力的变化,这种滞后在一定范围内十分明显。变形滞后的同时会消耗能量,达到衰减爆炸冲击波的效果。Magnus 等<sup>[64]</sup>研究发现水凝胶的弹性变形可将冲击波峰值压力降低 20%~25%。此外,防护材料与人体之间存在空隙会影响材料的冲击波衰减能力,水凝胶可通过改变自身形状来减小防护材料与人体之间的空隙,但是水凝胶在干燥的地方容易失水,这将会显著降低其防护性能。此外,水凝胶的机械性能随着其含水量的增加而降低。Sun 等<sup>[65]</sup>、Ni 等<sup>[66]</sup>、Liu 等<sup>[67]</sup>、Fan 等<sup>[68]</sup>和 Matsuda 等<sup>[69-70]</sup>在高强度水凝胶领域开展了大量的研究,但并未对其爆炸冲击波防护性能进行评估,未来在高强度水凝胶的爆炸冲击波防护方面仍需进行探索。

### 2.2.3 聚脲

聚脲是一种新型的高分子弹性体,通常由异氰酸酯与胺基化合物反应生成的一种聚合物<sup>[71]</sup>。聚脲弹性体具有成本低、无毒、密度低,物理性能多变、优异的机械韧性、耐磨性和耐腐蚀性等特点<sup>[72]</sup>,在军事装备及建筑物的爆炸冲击防护中备受关注<sup>[73-75]</sup>。聚脲通常由硬段和软段组成,其爆炸冲击波防护归因于硬/软链段的微相分离导致冲击波散射<sup>[76-77]</sup>,对冲击波的防护主要归因于硬段的贡献。硬段通常由芳香族的二异氰酸酯和扩链剂组成,而软链段由聚醚或聚酯多元醇组成。软段的玻璃化转变温度低于室温,在室温下处于高弹态,模量低,柔性好,呈无规卷曲状,赋予了聚脲较好的柔韧性。硬段的玻璃化转变温度较高,在室温下处于玻璃态,模量高,塑性差,赋予了材料较高的强度和硬度<sup>[77]</sup>,使其在抗冲击性能中发挥了关键作用<sup>[78]</sup>。

Iqbal 等<sup>[79]</sup>研究了不同硬段含量对聚脲力学性能的影响,发现当硬段含量在 61% 时聚脲表现出最优的力学性能。Zhang 等<sup>[74]</sup>研究了低硬度(邵氏硬度 65~75 HA)和高硬度(邵氏硬度 85~95 HA)聚脲涂层涂覆在金属板上的防护性能,发现正面涂覆高硬度聚脲涂层的金属板表现出最佳的防护性能。涂层由于制备方便,可大面积制备,因此聚脲涂层也是目前常用的爆炸冲击波防护材料。Zhang 等<sup>[72]</sup>研究了不同力学性能的聚脲涂层对金属圆管的爆炸冲击波防护性能,在现场实爆试验后,他们利用金相显微镜和扫描电子显微镜技术测试了聚脲涂层铝管的宏观和微观损伤特性。结果表明,聚脲能显著提高铝合金圆管的爆炸冲击波防护性能,在高动态负载下具有更好能量吸收效果。然而,聚脲涂层在爆炸过程中的脱附和变形将直接影响聚脲涂层的防护性能,如何在降低聚脲爆炸冲击波防护性能的同时增强聚脲涂层的黏附力是目前仍需解决的问题。聚脲不仅可以单独作为爆炸冲击波防护材料使用,还可与其他材料复合制成复合材料。Liang 等<sup>[80]</sup>在聚脲中加入 UHMWPE(ultra-high molecular weight polyethylene,超高分子量聚乙烯)纤维网,并研究了爆炸冲击波和破片耦合作用下的防护性能、失效机理及聚脲的自修复效应。研究结果表明聚脲增强了复合材料的延展性并防止了破片的分散,而 UHMWPE 纤维网提高了复合材料的强度并阻止了裂纹发展。超高分子量聚乙烯纤维网可以改善聚脲基体的载荷传递、整体性和抗断裂性能,甚至可以改变材料的破坏模式,由剪切破坏转变为拉伸破坏。

此外,聚脲在防护插板的涂覆位置也可能会影响冲击波的衰减性能。Zhang 等<sup>[81]</sup>研究了分别在钢板的外侧、内侧和内外两侧涂覆聚脲后复合板材的破片-爆炸冲击波耦合防护性能。结果表明,外层涂覆聚脲的损毁程度大于内层涂覆聚脲的损毁程度,两侧均涂覆聚脲后的爆炸冲击波-破片耦合防护性能最佳。聚脲涂覆在钢板外侧时,在破片-爆炸冲击波耦合作用下表现出明显的压缩剪切破坏特征,而聚脲涂覆在钢板内侧时,表现出明显的拉伸断裂特征。此外,红外光谱结果表明,聚脲的能量吸收与其羰基和氢键的断裂密切相关。聚脲虽然表现出优异的爆炸冲击波防护性能,但是其防护机制仍不清楚:现有研究表明聚脲的软硬链段微相分离、多重氢键、硬度等均影响爆炸冲击波的衰减能力。各个因素如聚脲层厚度、涂覆位置、氢键多少等,共同决定了聚脲的爆炸冲击波衰减性能,但是其对爆炸冲击波的耗散、散射、反射和吸收的具体机理仍不清楚,未来仍需对聚脲的冲击波衰减机制进行深入研究,以此指导聚脲材料的设计制备。

### 2.2.4 纳/微米增强材料

纳米/微米材料虽然不能作为单一材料用于防护爆炸冲击波,但是通过在基材中加入纳米/微米颗粒

增强材料是常用的防护材料改性方法, 本节综述了目前常用于提升基材衰减爆炸冲击波性能的纳米/微米增强材料。

石墨烯、富勒烯、碳纳米管等常作为增强相分散在其他聚合物基材中, 从而增强基材的能量吸收性能。Tessari 等<sup>[82]</sup>研究了高密度聚乙烯薄膜-芳纶织物板材中添加石墨烯纳米片后性能的改变。力学性能测试、子弹冲击和霍普金森压力测试的结果均表明, 添加了质量分数为 0.5% 和 1% GNP 的 HDPE 薄膜-芳纶织物板材表现出最高的能量吸收和变形最小。石墨烯的加入能够提高基材的抗冲击性能可能的原因在于石墨烯片优异的力学性能, 使得基材与石墨烯的复合材料的强度和韧性得以提升。我们通过在聚脲中添加一定比例的氧化石墨烯后, 发现石墨烯-聚脲复合材料的爆炸冲击波衰减性能优于未添加石墨烯的聚脲, 在聚脲中添加 0.3% 的氧化石墨烯后对冲击波衰减提升了 15%。石墨烯作为增强材料使用时材料制备方法简单, 用量可控, 材料的结构和性能也可控, 是目前石墨烯材料在爆炸冲击波防护领域中的最常见的使用方式。

碳纳米管(carbon nanotube, CNT)是由柱状二维石墨烯片构成, 具有高纵横比、高导热性和优异的机械性能。CNT 具有 200 GPa 的拉伸强度、高于 1 TPa 的模量和相对较低的密度, 使得 CNT 复合材料广泛应用于破片防护、高强度和高能量吸收<sup>[83-84]</sup>。Marchetti 等<sup>[85]</sup>研究了多壁碳纳米管(multi-walled carbon nanotubes, MWCNT)增强环氧树脂复合材料的抗冲击性能, 对添加了不同比例多壁碳纳米管的环氧树脂进行夏比冲击试验。结果表明, 添加 MWCNT 的质量分数为 0.5% 的环氧树脂韧性最高。此外, Ma 等<sup>[86]</sup>系统地研究了在环氧树脂中添加相同比例的富勒烯、石墨烯、碳纳米管后的爆炸冲击波衰减能力。结果表明, 与纯环氧树脂相比, 在环氧树脂中添加富勒烯颗粒后使复合材料的爆炸冲击波超压峰值降低了 16.5%, 添加石墨烯和碳纳米管的环氧树脂使复合材料的冲击波超压峰值的衰减率相似, 分别衰减了 29.6% 和 31.7%。

空心玻璃微珠是一种粒径为 10~180  $\mu\text{m}$  的空心玻璃球体, 属于无机非金属材料, 具有密度低、耐热性高和抗冲击性能优异等特点。空心玻璃微珠常用于改性聚合物, 在降低复合材料密度的同时能够提高抗冲击性能<sup>[87]</sup>。Wang 等<sup>[88]</sup>研究了在环氧树脂和聚氨酯互穿网络(epoxy resin and polyurethane interpenetrating network, PU/EP IPN)填充空心玻璃微珠后材料的阻尼性能, 即材料在振动时由于材料的晶粒相互摩擦等内部原因引起的机械振动能量损耗的现象。在受到外界冲击时, 空心玻璃微珠的加入增强了 PU/EP IPN 与玻璃微珠间的摩擦损耗, 从而实现对冲击能量的吸收, 但该研究中比较欠缺的是未进行现场实爆环境下的爆炸冲击波防护性能试验, 未能真正检测材料的冲击波耗散性能。Drdlová 等<sup>[89]</sup>研究了在泡沫材料中填充中空玻璃微珠后的爆炸能量吸收性能, 发现在环氧树脂泡沫中添加玻璃微珠后可提升复合材料的冲击能量吸收性能, 这是因为玻璃微珠的破碎过程可吸收冲击能量。冲击能量的吸收性能与添加玻璃微珠的量呈正相关, 但添加玻璃微珠的量较大降低材料的压缩强度和弯曲强度。因此, 在基材中添加玻璃微珠的同时也需添加其他纳米增强材料如碳纳米管等以增强材料的压缩、弯曲强度。

除上述的增强材料外, 纳米二氧化硅、纳米氮化硼等常被用作增强材料添加在基材中<sup>[90]</sup>。此外, 在实际使用过程中为了达到更好的防护性能, 在聚合物基体中往往会添加多种增强材料。需要注意的是, 在使用过程中增强材料在基体中的分散要均匀, 避免纳米颗粒的团聚。虽然有很多纳米/微米颗粒可以改善材料的爆炸冲击波衰减性能, 但是纳米/微米颗粒衰减爆炸冲击波的具体机制仍不清晰, 未来需要将现场试验与理论模拟相结合, 以全方面地解释材料对爆炸冲击波的衰减机制。

### 2.3 小 结

材料<sup>[47-48, 73, 91-94]</sup>对爆炸冲击波的衰减机制主要是通过材料对冲击波的吸收、耗散、反射和折射, 但是其中的衰减过程极其复杂, 材料的具体性能指标与爆炸冲击波衰减之间的关系尚未完全厘清, 并且对防护材料的爆炸冲击波衰减性能缺乏规范、科学、严谨的评估方法, 这些都限制了爆炸冲击伤防护技术的发展。未来仍需开展大量的研究, 为材料的设计制备提供基础。

### 3 防护材料的爆炸冲击波衰减性能测试方法

如表 1 所示<sup>[95-98]</sup>, 目前报道了多种防护材料爆炸冲击波衰减性能的评测方法, 但是想要精确测量冲击波衰减性能仍存在一定难度。目前常用于评估材料爆炸冲击波防护性能的方法是利用各类传感器记录防护前后爆炸冲击波压力强度的变化, 其中冲击波的产生实验室内主要是采用激波管, 而在实爆条件下采用弹药产生爆炸冲击波。与防弹材料的防护性能测试具有完整的测试标准(GA/T 1709—2020)不同, 对于防护材料的爆炸冲击波衰减性能测试目前还没有确定的执行标准。与此同时, 利用传感器记录防护材料前后的爆炸冲击波压力值受外界影响较大导致冲击波压力值无法准确记录, 笔者团队在实验过程中发现如果材料没有将传感器完全包覆其中, 冲击波可能会绕过材料, 对冲击波的记录造成影响; 如果传感器包覆在材料中, 材料轻微的变形会挤压传感器, 导致记录的数值出现明显的过大或过小。Boutillier 等<sup>[99]</sup>为了能够更精确地测量防护材料后的爆炸冲击波超压峰值, 将传感器埋置于硅胶中, 然后将防护材料置于硅胶表面, 以模拟真人佩戴防护材料的形态用于测试防护材料的爆炸冲击波衰减能力。虽然将传感器埋置于硅胶中可避免部分爆炸冲击波的影响, 但是仍然难以完全避免爆炸冲击波绕行对材料后人体的影响。因此, 我们长期致力于通过生物防护效应结合传感器测量爆炸冲击波衰减以评估防护材料的爆炸冲击波衰减性能, 即将防护材料穿戴在实验动物(大鼠、山羊等)表面, 在激波管内或外场实爆条件下进行测试, 实验前将实验动物麻醉, 实验完毕后对实验动物进行解剖, 观察其伤情。通过实验动物的伤情评估结合传感器测量爆炸冲击波强度, 能够更全面地反映材料的防护性能。这种方法可以直观地评估材料的防护效能, 即佩戴防护材料的动物伤情越重表明防护材料的防护效能越差, 反之伤情越轻材料的防护效能越弱。通过多种评估方法联合使用的方式能够更全面地评估材料对爆炸冲击波的衰减性能, 但是需要耗费更多的人力、物力, 未来仍需在爆炸冲击波评估方面继续研究, 以期开发出高效、准确的爆炸冲击波衰减性能评测方法。

表 1 常见的爆炸冲击波衰减性能测试方法<sup>[95]</sup>

Table 1 Common testing methods for attenuation performance of explosion shock waves<sup>[95]</sup>

测试方法	特点	优点	缺点
等效压力罐法 <sup>[96]</sup>	依据实验现场安放的薄铁皮罐在爆炸后的毁伤状况对冲击波威力进行评估	成本低, 操作简单, 可测冲击波超压	定量性不准确; 适用近场超压
生物评估法 <sup>[97]</sup>	对生物实验体的受伤程度进行冲击波强度评估	直接有效	专业性强
高速摄影法 <sup>[98]</sup>	利用高速摄像机拍摄到爆炸过程以及波阵面的运动过程, 推算冲击波压力	记录完整、直观	不准确
存储测试法	将引线、传感器、适配器和数据采集器集合为一个整体, 能够独立采集、存储信息	无需引线布置, 测试精确	设备昂贵, 信息易丢
引线测试法	将传感器安装在测试现场, 通过电缆将信号传输到仪表, 最后使用计算机分析数据	完整记录冲击波传播情况, 测量精确	易受环境和电磁干扰, 布设麻烦, 成本高且易损坏

### 4 总结与展望

无论是在战时还是平时, 爆炸冲击伤由于难防难治、群发等特点, 严重威胁着人员安全。对爆炸冲击伤施以高效的防护胜过任何救治手段。本文系统综述了爆炸冲击波的传播、爆炸冲击伤的发生机制、爆炸冲击伤防护材料及评测方法的研究进展, 尽管过去的研究取得了较大进展, 但还有许多待探索和改进的地方:

(1) 需要建立规范统一的爆炸冲击波防护性能测试标准, 如准确测试防护材料后爆炸冲击波压力强度具体数值的方法、防护材料后压力传感器的布放规则等。

(2) 需要建立动物伤情和防护指标与人员防护之间的尺度关系, 建立不同冲击波、破片作用下的动物伤情, 实现可通过测量动物伤情测试转换成人体爆炸冲击波伤情评估。



(3) 加强爆炸冲击波防护材料及单兵装备的优化设计, 需建立材料力学指标与爆炸冲击波衰减之间的关系, 基于此对现有的单兵防护装备进行优化和升级, 提升防护装备的性能。

### 参考文献:

- [1] WANG J M. The features of explosive fragments induced injury and management [M]//FU X B, LIU L M. *Advanced Trauma and Surgery*. Singapore: Springer, 2017: 79–103. DOI: [10.1007/978-981-10-2425-2\\_6](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2425-2_6).
- [2] TSUKADA H, NGUYEN T T N, BREEZE J, et al. The risk of fragment penetrating injury to the heart [J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2023, 141: 105776. DOI: [10.1016/j.jmbbm.2023.105776](https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2023.105776).
- [3] DHARANI KUMAR S, SAMVEL R, ARAVINDH M, et al. Ballistic studies on synthetic fibre reinforced polymer composites and it's applications –A brief review [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023. DOI: [10.1016/j.matpr.2023.03.679](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.679).
- [4] NEEDHAM C E, YOUNG L R, CHAMPION H R. Blast physics and biophysics [M]//CALLAWAY D W, BURSTEIN J L. *Operational and Medical Management of Explosive and Blast Incidents*. Cham: Springer, 2020: 19–33. DOI: [10.1007/978-3-030-40655-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-40655-4_2).
- [5] 杨策, 蒋建新, 杜娟, 等. 天津港“8·12”特大爆炸事件对爆炸冲击伤诊治的警示 [J]. *中华诊断学电子杂志*, 2016, 4(1): 30–32. DOI: [10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.009](https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.009).  
YANG C, JIANG J X, DU J, et al. Vigilance and enlightenment from diagnosis and therapy of blast injury in the “8·12” giant explosion in Tianjin harbor [J]. *Chinese Journal of Diagnostics (Electronic Edition)*, 2016, 4(1): 30–32. DOI: [10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.009](https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.009).
- [6] 杨策, 蒋建新, 杜娟, 等. 2000 年至 2015 年国内 174 起爆炸事故冲击伤诊治分析 [J]. *中华诊断学电子杂志*, 2016, 4(1): 36–40. DOI: [10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.011](https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.011).  
YANG C, JIANG J X, DU J, et al. Analysis of the current situation of diagnosis and therapy in Chinese severe explosion accidents over the past 15 years [J]. *Chinese Journal of Diagnostics (Electronic Edition)*, 2016, 4(1): 36–40. DOI: [10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.011](https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.2095-655X.2016.01.011).
- [7] 王正国. 原发肺冲击伤 [J]. *中华肺部疾病杂志 (电子版)*, 2010, 3(4): 231–233. DOI: [10.3877/cma.j.issn.1674-6902.2010.04.001](https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.1674-6902.2010.04.001).  
WANG Z G. Primary blast lung injury [J]. *Chinese Journal of Lung Diseases (Electronic Edition)*, 2010, 3(4): 231–233. DOI: [10.3877/cma.j.issn.1674-6902.2010.04.001](https://doi.org/10.3877/cma.j.issn.1674-6902.2010.04.001).
- [8] 李向荣, 马翔闻, 李帅, 等. 爆炸冲击波峰值区域频率分布特性研究 [J]. *北京理工大学学报*, 2019, 39(2): 125–130. DOI: [10.15918/j.tbit1001-0645.2019.02.003](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2019.02.003).  
LI X R, MA Y W, LI S, et al. Research on frequency distribution of peak area of blast shock wave [J]. *Transactions of Beijing institute of Technology*, 2019, 39(2): 125–130. DOI: [10.15918/j.tbit1001-0645.2019.02.003](https://doi.org/10.15918/j.tbit1001-0645.2019.02.003).
- [9] BYKOVA N G, ZABELINSKII I E, IBRAGIMOVA L B, et al. Radiation characteristics of air in the ultraviolet and vacuum ultraviolet regions of the spectrum behind the front of strong shock waves [J]. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2018, 12(1): 108–114. DOI: [10.1134/S1990793118010165](https://doi.org/10.1134/S1990793118010165).
- [10] ZHUO Z, LIU Z L. Mechanical mechanisms and simulation of blast wave protection [M]//WANG Z G, JIANG J X. *Explosive Blast Injuries: Principles and Practices*. Singapore: Springer, 2023: 89–97. DOI: [10.1007/978-981-19-2856-7\\_5](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2856-7_5).
- [11] KHRISTOFOROV B D. Effect of properties of the source on the action of explosions in air and water [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2004, 40(6): 714–719. DOI: [10.1023/B:CESW.0000048277.31127.06](https://doi.org/10.1023/B:CESW.0000048277.31127.06).
- [12] FRIEDLANDER F G. *Propagation of a pulse in an inhomogeneous medium* [M]. New York: New York University, 1955.
- [13] WANG X, DU J, ZHUANG Z, et al. Incidence, casualties and risk characteristics of civilian explosion blast injury in China: 2000—2017 data from the state Administration of Work Safety [J]. *Military Medical Research*, 2020, 7(1): 29. DOI: [10.1186/s40779-020-00257-5](https://doi.org/10.1186/s40779-020-00257-5).
- [14] KOBAYASHI S, HENMI H. Dispersion of shock wave transmitted into non-uniform materials [C]//*Proceedings of ASME 2017 Fluids Engineering Division Summer Meeting*. Waikoloa: ASME, 2017. DOI: [10.1115/FEDSM2017-69501](https://doi.org/10.1115/FEDSM2017-69501).
- [15] BANDAK F A, LING G, BANDAK A, et al. Injury biomechanics, neuropathology, and simplified physics of explosive blast

- and impact mild traumatic brain injury [J]. *Handbook of Clinical Neurology*, 2015, 127: 89–104. DOI: 10.1016/B978-0-444-52892-6.00006-4.
- [16] BEN-DOR G, IGRA O, ELPERIN T. Handbook of shock waves, three volume set [M]. New York: Academic, 2000.
- [17] SCOTT T. Primary blast lung injury [M]//BULL A M J, CLASPER J, MAHONEY P F. Blast Injury Science and Engineering: A Guide for Clinicians and Researchers. 2nd ed. Cham: Springer, 2023: 193–199. DOI: [10.1007/978-3-031-10355-1\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-031-10355-1_18).
- [18] REICHENBACH T. Hearing damage through blast [M]//BULL A M J, CLASPER J, MAHONEY P F. Blast Injury Science and Engineering: A Guide for Clinicians and Researchers. 2nd ed. Cham: Springer, 2023: 209–216. DOI: [10.1007/978-3-031-10355-1\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-031-10355-1_20).
- [19] MORLEY M G, NGUYEN J K, HEIER J S, et al. Blast eye injuries: a review for first responders [J]. *Disaster Medicine and Public Health Preparedness*, 2010, 4(2): 154–160. DOI: 10.1001/dmp.v4n2.hra10003.
- [20] OU Y, CLIFTON B A, LI J H, et al. Traumatic brain injury induced by exposure to blast overpressure via ear canal [J]. *Neural Regeneration Research*, 2022, 17(1): 115–121. DOI: 10.4103/1673-5374.314311.
- [21] ZHONG Q J. Heart blast injury [M]//WANG Z G, JIANG J X. Explosive Blast Injuries: Principles and Practices. Singapore: Springer, 2023: 349–355. DOI: [10.1007/978-981-19-2856-7\\_23](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2856-7_23).
- [22] TURÉGANO-FUENTES F, PÉREZ-DÍAZ D, SANZ-SÁNCHEZ M, et al. Abdominal blast injuries: Different patterns, severity, management, and prognosis according to the main mechanism of injury [J]. *European Journal of Trauma and Emergency Surgery*, 2014, 40(4): 451–460. DOI: 10.1007/s00068-014-0397-4.
- [23] CHAVKO M, WATANABE T, ADEEB S, et al. Relationship between orientation to a blast and pressure wave propagation inside the rat brain [J]. *Journal of Neuroscience Methods*, 2011, 195(1): 61–66. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2010.11.019.
- [24] LOGAN N J, ARORA H, HIGGINS C A. Evaluating primary blast effects *in vitro* [J]. *Journal of Visualized Experiments*, 2017(127): 55618. DOI: 10.3791/55618.
- [25] RUBIO J E, UNNIKRISHNAN G, SAJJA V S S S, et al. Investigation of the direct and indirect mechanisms of primary blast insult to the brain [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 16040. DOI: 10.1038/s41598-021-95003-9.
- [26] SUN Y L, QIAN X M, SHU C M, et al. Effects of explosion shock waves on lung injuries in rabbits [J]. *Shock and Vibration*, 2021, 2021: 6676244. DOI: 10.1155/2021/6676244.
- [27] 王正国. 爆炸伤概述 [J]. 野战外科通讯, 2004, 29(4): 1–4.
- [28] 王正国, 蒋建新. 爆炸冲击伤原理与实践 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2020.  
WANG Z G, JIANG J X. Explosive blast injury principles and practices [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2020.
- [29] 王鸿, 高俊宏, 张文娟, 等. 肺爆震伤的分子机制研究进展 [J]. *中华创伤杂志*, 2020, 36(8): 749–754. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2020.08.014.  
WANG H, GAO J H, ZHANG W J, et al. Research progress in molecular mechanism of blast lung injury [J]. *Chinese Journal of Trauma*, 2020, 36(8): 749–754. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1001-8050.2020.08.014.
- [30] BARNETT-VANES A, SHARROCK A, EFTAXIOPOULOU T, et al. CD43Lo classical monocytes participate in the cellular immune response to isolated primary blast lung injury [J]. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 2016, 81(3): 500–511. DOI: 10.1097/TA.0000000000001116.
- [31] ELSAYED N M, ARMSTRONG K L, WILLIAM M T, et al. Antioxidant loading reduces oxidative stress induced by high-energy impulse noise (blast) exposure [J]. *Toxicology*, 2000, 155(1/2/3): 91–99. DOI: 10.1016/s0300-483x(00)00281-x.
- [32] WANG H, ZHANG W J, LIU J R, et al. NF-κB and FosB mediate inflammation and oxidative stress in the blast lung injury of rats exposed to shock waves [J]. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, 2021, 53(3): 283–293. DOI: 10.1093/abbs/gmaa179.
- [33] SEITZ D H, PERL M, MANGOLD S, et al. Pulmonary contusion induces alveolar type 2 epithelial cell apoptosis: role of alveolar macrophages and neutrophils [J]. *Shock*, 2008, 30(5): 537–544. DOI: 10.1097/SHK.0b013e31816a394b.
- [34] NAKAGAWA A, OHTANI K, ARMONDA R, et al. Primary blast-induced traumatic brain injury: lessons from lithotripsy [J]. *Shock Waves*, 2017, 27(6): 863–878. DOI: 10.1007/s00193-017-0753-5.
- [35] Nakagawa A, MANLEY G T, GEAN A D, et al. Mechanisms of primary blast-induced traumatic brain injury: Insights from shock-wave research [J]. *Journal of Neurotrauma*, 2011, 28(6): 1101–1119. DOI: 10.1089/neu.2010.1442.

- [36] SIMARD J M, PAMPORI A, KELEDJIAN K, et al. Exposure of the thorax to a sublethal blast wave causes a hydrodynamic pulse that leads to perivenular inflammation in the brain [J]. *Journal of Neurotrauma*, 2014, 31(14): 1292–1304. DOI: 10.1089/neu.2013.3016.
- [37] DE LANEROLLE N C, HAMID H, KULAS J, et al. Concussive brain injury from explosive blast [J]. *Annals of Clinical and Translational Neurology*, 2014, 1(9): 692–702. DOI: 10.1002/acn3.98.
- [38] DANG B Q, CHEN W L, HE W C, et al. Rehabilitation treatment and progress of traumatic brain injury dysfunction [J]. *Neural Plasticity*, 2017, 2017: 1582182. DOI: 10.1155/2017/1582182.
- [39] 徐召溪, 徐国政. 爆炸冲击波致轻型颅脑损伤患者血脑屏障损伤机制及其与迟发性神经功能障碍的关系 [J]. *解放军医学杂志*, 2016, 41(5): 425–429. DOI: 10.11855/j.issn.0577-7402.2016.05.15.  
XU Z X, XU G Z. Mechanism of blood-brain barrier impairment after mild traumatic brain injury caused by blast shock waves and its relationship with delayed nerve dysfunction [J]. *Medical Journal of Chinese People's Liberation Army*, 2016, 41(5): 425–429. DOI: 10.11855/j.issn.0577-7402.2016.05.15.
- [40] 康越, 马天, 黄献聪, 等. 颅脑爆炸伤数值模拟研究进展: 建模、力学机制及防护 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(6): 061101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0521.  
KANG Y, MA T, HUANG X C, et al. Advances in numerical simulation of blast-induced traumatic brain injury: modeling, mechanical mechanism and protection [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(6): 061101. DOI: 10.11883/bzycj-2022-0521.
- [41] CHAMPION H R, HOLCOMB J B, YOUNG L A. Injuries from explosions: physics, biophysics, pathology, and required research focus [J]. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 2009, 66(5): 1468–1477. DOI: 10.1097/TA.0b013e3181a27e7f.
- [42] PRAT N J, DABAN J L, VOIGLIO E J, et al. Wound ballistics and blast injuries [J]. *Journal of Visceral Surgery*, 2017, 154 Suppl 1: S9–S12. DOI: 10.1016/j.jvisurg.2017.07.005.
- [43] VAN DER WOERD J D, WAGNER M, PIETZSCH A, et al. Design methods of blast resistant façades, windows, and doors in Germany: a review [J]. *Glass Structures & Engineering*, 2022, 7(4): 693–710. DOI: 10.1007/s40940-022-00213-w.
- [44] 孔霖, 苏健军, 李芝绒, 等. 几种不同爆炸冲击波作用的能量谱分析 [J]. *火炸药学报*, 2010, 33(6): 76–79. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.06.018.  
KONG L, SU J J, LI Z R, et al. Energy spectrum analysis of several kinds of explosive blast [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(6): 76–79. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2010.06.018.
- [45] PHILLIPS Y Y, MUNDIE T G, YELVERTON J T, et al. Cloth ballistic vest alters response to blast [J]. *The Journal of Trauma: Injury, Infection, and Critical Care*, 1988, 28(1): S149–S152. DOI: 10.1097/00005373-198801001-00030.
- [46] SINGH K, RAJ R, RAJAGOPAL A K, et al. Shock wave attenuation using sandwiched structures made up of polymer foams and shear thickening fluid [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2023, 37(3): 1311–1316. DOI: 10.1007/s12206-023-0217-z.
- [47] JIA S Y, WANG C, XU W L, et al. Experimental investigation on weak shock wave mitigation characteristics of flexible polyurethane foam and polyurea [J]. *Defence Technology*, 2024, 31: 179–191. DOI: 10.1016/j.dt.2023.06.013.
- [48] 孙建华, 李艳霞, 魏春荣, 等. 泡沫铁镍金属抑制瓦斯爆炸冲击波的实验研究 [J]. *功能材料*, 2013, 44(10): 1390–1394. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2013.10.005.  
SUN J H, LI Y X, WEI C R, et al. Experimental study on the porous foam iron-nickel metal inhibition of explosion wave [J]. *Journal of Functional Materials*, 2013, 44(10): 1390–1394. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2013.10.005.
- [49] HU Z Q, SHAO J L, JIA S Y, et al. Propagation properties of shock waves in polyurethane foam based on atomistic simulations [J]. *Defence Technology*, 2024, 31: 117–129. DOI: 10.1016/j.dt.2023.01.020.
- [50] GAO Y Y, LALEVÉE J, SIMON-MASSERON A. An overview on 3D printing of structured porous materials and their applications [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2023, 8(17): 2300377. DOI: 10.1002/admt.202300377.
- [51] BRANCH B, IONITA A, PATTERSON B M, et al. A comparison of shockwave dynamics in stochastic and periodic porous polymer architectures [J]. *Polymer*, 2019, 160: 325–337. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.10.074.
- [52] KADER M A, HAZELL P J, BROWN A D, et al. Novel design of closed-cell foam structures for property enhancement [J].

- [Additive Manufacturing](#), 2020, 31: 100976. DOI: 10.1016/j.addma.2019.100976.
- [53] FARACI D, DRIEMEIER L, COMI C. Bending-dominated auxetic materials for wearable protective devices against impact [J]. [Journal of Dynamic Behavior of Materials](#), 2021, 7(3): 425–435. DOI: 10.1007/s40870-020-00284-2.
- [54] WANG M Z, WU H Z, YANG L, et al. Structure design of arc-shaped auxetic metamaterials with tunable Poisson's ratio [J]. [Mechanics of Advanced Materials and Structures](#), 2023, 30(7): 1426–1436. DOI: 10.1080/15376494.2022.2033890.
- [55] TANCOGNE-DEJEAN T, KARATHANASOPOULOS N, MOHR D. Stiffness and strength of hexachiral honeycomb-like metamaterials [J]. [Journal of Applied Mechanics](#), 2019, 86(11): 111010. DOI: 10.1115/1.4044494.
- [56] GAO Y, WEI X Y, HAN X K, et al. Novel 3D auxetic lattice structures developed based on the rotating rigid mechanism [J]. [International Journal of Solids and Structures](#), 2021, 233: 111232. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2021.111232.
- [57] PLEWA J, PŁOŃSKA M, LIS P. Investigation of modified auxetic structures from rigid rotating squares [J]. [Materials](#), 2022, 15(8): 2848. DOI: 10.3390/ma15082848.
- [58] BOHARA R P, LINFORTH S, GHAZLAN A, et al. Performance of an auxetic honeycomb-core sandwich panel under close-in and far-field detonations of high explosive [J]. [Composite Structures](#), 2022, 280: 114907. DOI: 10.1016/j.compstruct.2021.114907.
- [59] FÍLA T, ZLÁMAL P, JIROUŠEK O, et al. Impact testing of polymer-filled auxetics using split Hopkinson pressure bar [J]. [Advanced Engineering Materials](#), 2017, 19(10): 1700076. DOI: 10.1002/adem.201700076.
- [60] IMBALZANO G, LINFORTH S, NGO T D, et al. Blast resistance of auxetic and honeycomb sandwich panels: comparisons and parametric designs [J]. [Composite Structures](#), 2018, 183: 242–261. DOI: 10.1016/j.compstruct.2017.03.018.
- [61] JIN X C, WANG Z H, NING J G, et al. Dynamic response of sandwich structures with graded auxetic honeycomb cores under blast loading [J]. [Composites Part B: Engineering](#), 2016, 106: 206–217. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.037.
- [62] YANG S, QI C, WANG D, et al. A comparative study of ballistic resistance of sandwich panels with aluminum foam and auxetic honeycomb cores [J]. [Advances in Mechanical Engineering](#), 2013, 2013: 589216. DOI: 10.1155/2013/589216.
- [63] ZHANG J J, LU G X, YOU Z. Large deformation and energy absorption of additively manufactured auxetic materials and structures: a review [J]. [Composites Part B: Engineering](#), 2020, 201: 108340. DOI: 10.1016/j.compositesb.2020.108340.
- [64] MAGNUS D, SORY D R, LEE J, et al. Study of soft material blast mitigation effects using a shock tube [J]. [AIP Conference Proceedings](#), 2020, 2272(1): 040009. DOI: 10.1063/1.5120017.
- [65] SUN J Y, ZHAO X H, ILLEPERUMA W R K, et al. Highly stretchable and tough hydrogels [J]. [Nature](#), 2012, 489(7414): 133–136. DOI: 10.1038/nature11409.
- [66] NI J H, LIN S T, QIN Z, et al. Strong fatigue-resistant nanofibrous hydrogels inspired by lobster underbelly [J]. [Matter](#), 2021, 4(6): 1919–1934. DOI: 10.1016/j.matt.2021.03.023.
- [67] LIU J, LIN S T, LIU X Y, et al. Fatigue-resistant adhesion of hydrogels [J]. [Nature Communications](#), 2020, 11(1): 1071. DOI: 10.1038/s41467-020-14871-3.
- [68] FAN H L, WANG J H, GONG J P. Barnacle cement proteins-inspired tough hydrogels with robust, long-lasting, and repeatable underwater adhesion [J]. [Advanced Functional Materials](#), 2021, 31(11): 2009334. DOI: 10.1002/adfm.202009334.
- [69] MATSUDA T, NAKAJIMA T, GONG J P. Fabrication of tough and stretchable hybrid double-network elastomers using ionic dissociation of polyelectrolyte in nonaqueous media [J]. [Chemistry of Materials](#), 2019, 31(10): 3766–3776. DOI: 10.1021/acs.chemmater.9b00871.
- [70] MATSUDA T, KAWAKAMI R, NAMBA R, et al. Mechanoresponsive self-growing hydrogels inspired by muscle training [J]. [Science](#), 2019, 363(6426): 504–508. DOI: 10.1126/science.aau9533.
- [71] LI T, ZHANG C, XIE Z N, et al. A multi-scale investigation on effects of hydrogen bonding on micro-structure and macro-properties in a polyurea [J]. [Polymer](#), 2018, 145: 261–271. DOI: 10.1016/j.polymer.2018.05.003.
- [72] ZHANG L, WANG Y T, WANG X, et al. Investigation on the influence mechanism of polyurea material property on the blast resistance of polyurea-steel composite plate [J]. [Structures](#), 2022, 44: 1910–1927. DOI: 10.1016/j.istruc.2022.09.001.
- [73] CHU D Y, WANG Y G, YANG S L, et al. Analysis and design for the comprehensive ballistic and blast resistance of polyurea-coated steel plate [J]. [Defence Technology](#), 2023, 19: 35–51. DOI: 10.1016/j.dt.2021.11.010.
- [74] ZHANG P, WANG Z J, ZHAO P D, et al. Experimental investigation on ballistic resistance of polyurea coated steel plates

- subjected to fragment impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 144: 106342. DOI: 10.1016/j.tws.2019.106342.
- [75] 冯加和, 董奇, 张刘成, 等. 聚脲弹性体在爆炸防护中的研究进展 [J]. *含能材料*, 2020, 28(4): 277–290. DOI: 10.11943/CJEM2019135.
- FENG J H, DONG Q, ZHANG L C, et al. Review on using polyurea elastomer for enhanced blast-mitigation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2020, 28(4): 277–290. DOI: 10.11943/CJEM2019135.
- [76] LEE J, JING B B, PORATH L E, et al. Shock wave energy dissipation in catalyst-free poly(dimethylsiloxane) vitrimers [J]. *Macromolecules*, 2020, 53(12): 4741–4747. DOI: 10.1021/acs.macromol.0c00784.
- [77] 郭国吉, 陈彩英, 王向明, 等. 聚脲弹性体防护材料的研究进展 [J]. *中国表面工程*, 2021, 34(6): 1–20. DOI: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210602001.
- GUO G J, CHEN C Y, WANG X M, et al. Research progress of polyurea elastomer protective materials [J]. *China Surface Engineering*, 2021, 34(6): 1–20. DOI: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210602001.
- [78] HARIS A, LEE H P, TAN V B C. An experimental study on shock wave mitigation capability of polyurea and shear thickening fluid based suspension pads [J]. *Defence Technology*, 2018, 14(1): 12–18. DOI: 10.1016/j.dt.2017.08.004.
- [79] IQBAL N, TRIPATHI M, PARTHASARATHY S, et al. Polyurea spray coatings: tailoring material properties through chemical crosslinking [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2018, 123: 201–208. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2018.07.005.
- [80] LIANG M Z, ZHOU M, LI X Y, et al. Synergistic effect of combined blast loads on UHMWPE fiber mesh reinforced polyurea composites [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2024, 183: 104804. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2023.104804.
- [81] ZHANG L, JI C, WANG X, et al. Strengthening and converse strengthening effects of polyurea layer on polyurea–steel composite structure subjected to combined actions of blast and fragments [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 178: 109527. DOI: 10.1016/j.tws.2022.109527.
- [82] DE TOMASI TESSARI B, VARGAS N, DIAS R R, et al. Influence of the addition of graphene nanoplatelets on the ballistic properties of HDPE/aramid multi-laminar composites [J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2022, 61(4): 363–373. DOI: 10.1080/25740881.2021.1988966.
- [83] PANDYA K S, NAIK N K. Analytical and experimental studies on ballistic impact behavior of carbon nanotube dispersed resin [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 49–59. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.09.003.
- [84] MYLVAGANAM K, ZHANG L C. Energy absorption capacity of carbon nanotubes under ballistic impact [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 89(12): 123127. DOI: 10.1063/1.2356325.
- [85] LAURENZI S, PASTORE R, GIANNINI G, et al. Experimental study of impact resistance in multi-walled carbon nanotube reinforced epoxy [J]. *Composite Structures*, 2013, 99: 62–68. DOI: 10.1016/j.compstruct.2012.12.002.
- [86] MA D, WANG C, XU W L, et al. Investigate of shock wave mitigation performance of nano-carbon fillers modified epoxy composites [J]. *Polymer Composites*, 2022, 43(10): 7463–7472. DOI: 10.1002/pc.26833.
- [87] AMOS S E, YALCIN B. Hollow glass microspheres for plastics, elastomers, and adhesives compounds. Amsterdam: William Andrew, 2015: 273–280. DOI: 10.1016/b978-1-4557-7443-2.18001-6.
- [88] WANG T M, CHEN S B, WANG Q H, et al. Damping analysis of polyurethane/epoxy graft interpenetrating polymer network composites filled with short carbon fiber and micro hollow glass bead [J]. *Materials & Design*, 2010, 31(8): 3810–3815. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.03.029.
- [89] DRDLOVÁ M, FRANK M. Mechanical properties of glass microsphere/epoxy foams modified by carbon nanotubes and nanosilica [J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2016, 75: 365–370.
- [90] SHIRA S, BULLER C. Mixing and dispersion of hollow glass microsphere products [M]//AMOS S E, YALCIN B. Hollow Glass Microspheres for Plastics, Elastomers, and Adhesives Compounds. Amsterdam: William Andrew, 2015: 241–271. DOI: 10.1016/B978-1-4557-7443-2.00011-6.
- [91] THORAT M, SAHU S, MENEZES V, et al. Shock loading of closed cell aluminum foams in the presence of an air cavity [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(12): 4128. DOI: 10.3390/app10124128.
- [92] XIAO F, CHEN Y, HUA H X. Comparative study of the shock resistance of rubber protective coatings subjected to underwater explosion [J]. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2014, 136(2): 021402. DOI: 10.1115/1.

- 4026670.
- [93] GORDON S, ABIDI N. Cotton fibres: characteristics, uses and performance [M]. New York: Nova Science Publishers, 2017.
- [94] GORE P M, KANDASUBRAMANIAN B. Functionalized aramid fibers and composites for protective applications: a review [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2018, 57(49): 16537–16563. DOI: 10.1021/acs.iecr.8b04903.
- [95] 叶希洋, 苏健军, 姬建荣. 冲击波测试效应靶法综述 [J]. *兵器装备工程学报*, 2019, 40(12): 55–61,124. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2019.12.012.
- YE X Y, SU J J, JI J R. Review of effect target method for shock wave measurement [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(12): 55–61,124. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2019.12.012.
- [96] 熊祖钊, 白春华. 燃料空气炸药武器威力评价指标研究 [J]. *火炸药学报*, 2002, 25(2): 19–22. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2002.02.008.
- XIONG Z Z, BAI C H. Study of fuel-air explosive weapon power evaluation indexes [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, 25(2): 19–22. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2002.02.008.
- [97] 王峰, 杨志焕, 朱佩芳, 等. 高原冲击伤伤情特点的实验研究 [J]. *创伤外科杂志*, 2008, 10(6): 549–551. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2008.06.026.
- WANG F, YANG Z H, ZHU P F, et al. Experimental study on characteristics of blast injury at high altitude [J]. *Journal of Traumatic Surgery*, 2008, 10(6): 549–551. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4237.2008.06.026.
- [98] 杨立云, 许鹏, 高祥涛, 等. 数字激光高速摄影系统及其在爆炸光测力学实验中的应用 [J]. *科技导报*, 2014, 32(32): 17–21. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.32.002.
- YANG L Y, XU P, GAO X T, et al. Digital laser high-speed photography system and its application in photomechanical tests with blast loading [J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(32): 17–21. DOI: 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.32.002.
- [99] BOUTILLIER J, CARDONA V, MAGNAN P, et al. A new anthropomorphic mannequin for efficacy evaluation of thoracic protective equipment against blast threats [J]. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 2022, 9: 786881. DOI: 10.3389/fbioe.2021.786881.

(责任编辑 张凌云)