

爆炸冲击载荷作用下车辆和人员的损伤与防护¹⁾

张钱城* 郝方楠* 李裕春† 于 渤* 刘剑锋* 金 峰*,2) 卢天健*,3)

*(西安交通大学航天航空学院, 机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

†(解放军理工大学野战工程学院, 南京 210007)



金峰, 西安交通大学航天航空学院教授、博士生导师. 教育部新世纪优秀人才. 第八届固体力学专业委员会智能材料与结构专业组成员. 主要研究方向为超轻多孔材料与点阵结构吸声、吸能、抗冲击性能及在防护工程领域内的应用, 同时也开展了智能材料与结构、表面声波器件、谐振器力学性能设计等方面的基础理论研究. 现主持国家重点基础研究 973 计划项目一级课题 1 项, 国家自然科学基金项目 1 项, 曾完成国家自然科学基金及 973 计划课题等科研项目 8 项, 在学术期刊上发表论文 60 余篇, 被 SCI 检索 50 余篇, 获授权国家发明专利 6 项.

摘要 在当前反恐战争和地区武装冲突迫切形势下, 如何提高车辆及人员的防护能力是诸多学科工作者面临的共同挑战. 综述了威胁车辆安全的常见爆炸物、其作用原理和影响爆炸物作用载荷的因素, 阐述了爆炸物爆炸冲击对车辆的破坏和人员损伤的各类不同形式. 在此基础上分析了相关的实验、表征和模拟技术的研究进展, 总结了国内外车辆爆炸防护结构的研究现状, 包括轻质防护材料和结构的研发趋势, 展望了车辆爆炸防护结构设计的研究趋势.

关键词 装甲车辆, 地雷, 人员防护, 多孔材料和结构, 吸能缓冲

中图分类号: O389 文献标识码: A doi: 10.6052/1000-0879-13-539

RESEARCH PROGRESS IN THE INJURY AND PROTECTION TO VEHICLE AND PASSENGERS UNDER EXPLOSIVE SHOCK LOADING¹⁾

ZHANG Qiancheng* HAO Fangnan* LI Yuchun† YU Bo* LIU Jianfeng* JIN Feng*,2) LU Tianjian*,3)

*(School of Aerospace, State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

†(College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract With ever increasing threat during terrorism war and regional conflict, providing improved protection for vehicle and its passengers is the common challenge for researchers in materials science, mechanical engineering, biomedical engineering and many other disciplines. This article presents an overview of the potential threat of common explosives to vehicle safety, the underlying mechanisms, the influence of key factors on explosive loading, and the different types of blast injury to armored vehicles and passengers. Based on the analysis of existing experimental technology, characterization methods and finite element simulation results,

本文于 2013-12-19 收到.

1) 广东省科技厅粤港关键领域重点突破项目(新一代轻质夹层结构半挂油罐运输车的研发及产业, 2011A091200008), 国家 973 计划项目(2011CB610305) 和国家自然科学基金项目(11102152, 11072188, 11021202) 资助.

2) 金峰, 博士, 教授, 主要研究方向为多孔结构和材料力学特性. E-mail: jinzhao@mail.xjtu.edu.cn

3) 卢天健, 博士, 教授, 主要研究方向为多孔结构和材料多功能特性. E-mail: tjlu@mail.xjtu.edu.cn

the current research status of explosion protection designs for both military and civil vehicles are summarized, including the development trend of novel lightweight protective materials and structures, and future trends in explosion-protection design for armored vehicles are discussed.

Key words armored vehicles, landmine, personal protection, porous materials and structure, energy absorption

装甲车辆(包括坦克)、工程车辆、直升机及其他现代化武器装备在大幅度提高部队的作战机动能力^[1]的同时,亦催生了反机动斗争的蓬勃发展.地雷作为一种有效的反机动手段,在历次战争中均发挥了重要作用^[2],如:越南战争中,地雷导致了70%的美军坦克损失和33%的人员伤亡.在高技术兵器云集的海湾战争中,地雷对装甲车辆^[3]及特种车辆(如后勤运输车)^[4]造成了严重阻滞和破坏,美军战损的M1A1型坦克中近半数系触雷而致.在伊拉克和阿富汗战争中,除了地雷,简易爆炸装置(improvised explosive devices, IED)和路边炸弹作为一种非对称作战的方式也对美军构成了严峻威胁^[5],尤其是装备有爆炸成形弹丸(explosively formed projectile, EFP)战斗部的简易爆炸装置,已经成为反美武装分子对抗美军及其盟军的有效作战武器,常用于攻击不具备防护能力或仅具备轻型防护能力的车辆.

在目前的反恐战争和未来的武装冲突中,提供能够对付日益严重的IED/EFP威胁的作战车辆已经成为部队的主要需求.国内外目前均极为关注针对各种类型车辆装甲防护的研究,例如:为了应对作战部队在伊拉克和阿富汗遭遇简易爆炸装置的威胁,美国开展了防地雷反伏击战车(mine resistant ambush protected, MRAP)的研究.如何提高装甲车辆对地雷等爆炸物的防护能力,特别是如何保障车内人员的安全,已经作为一个多学科交叉前沿研究课题受到日益关注.该文综述了在爆炸冲击载荷作用下车辆和车内人员的损伤及防护等相关问题的国内外研究现状,以期为我国的高性能缓冲轻质材料和结构以及车辆和人员防护技术的发展提供参考和支持.

1 威胁车辆安全的常见爆炸物及其作用原理

依爆炸作用原理,威胁车辆安全的常见爆炸物可分为三大类:爆破、聚能和破片.本文的爆炸物主要指爆破地雷、路边炸弹^[6]、IED^[7]等,其中地雷通常采用扁平结构的集团装药或短直列装药,而路边炸弹或简易爆炸装置泛指一种制作简单但威力巨大的爆炸装置,一般用手榴弹、炮弹甚至工业炸药(包

括雷管)中的爆炸物组装而成.此外,爆炸物周围的介质类型对爆炸物的毁伤机制和效能有巨大影响.

1.1 爆炸物在地面上爆炸

爆炸物爆炸后,爆轰产物的能量传递给空气,在空气中形成冲击波,并以近似球面波的形式向四周扩散,其毁伤媒介是爆炸后在近区形成高压的爆轰产物以及空气冲击波,其速度可达1000~3000m/s,冲击波的超压和动压(或冲量)作用对目标产生毁伤. IED的装药量通常较大,其爆炸瞬间能够造成巨大的人员伤亡和设备的损伤,具有极大的威慑作用.图1显示在伊战中被IED摧毁的美洲狮装甲车.

爆炸物(如杀爆型地雷)在产生爆破作用的同时,往往伴随着破片的杀伤作用^[8],形成的破片对车辆及内部人员的毁伤效应鲜有研究报道,这对于无装甲车辆尤为值得关注.



图1 被IED摧毁的美洲狮装甲车

1.2 有被覆层的爆炸物的爆炸效应

爆炸物埋藏在土壤内爆炸比地面上爆炸更为复杂,难以用简单物理模型来描述,目前的主要工作侧重于试验和模拟研究.下面分三部分阐述:爆炸物爆炸的物理过程;地雷爆炸作用于靶体的载荷;影响爆炸物载荷的因素.另外值得关注的是亦有一些研究试图对土壤中爆炸物爆炸的问题进行简化,如:Neuberger等^[9-10]通过姊妹篇首先比较研究了空气和土壤中爆炸物爆炸对板的挠曲变形影响,发现后者中产生的板的挠曲要显著高于前者,然后系统对比了爆炸物在土壤和空气中爆炸冲击效应,发现可

以通过前者乘以适当的放大因子来近似获得土壤中产生爆炸对结构的冲击响应, 从而大为简化了土壤内爆炸对结构冲击响应的问题.

1.2.1 爆炸物爆炸的物理过程

爆炸物在土壤内爆炸的物理过程可分为 3 个阶段^[11-13], 如图 2 所示, 即: 炸药的爆轰和爆炸产物与周围土壤的初期相互作用; 爆轰产物的扩张; 土壤的抛射.

在第 1 阶段, 爆炸物被触发后发生爆轰, 随着

爆轰波在炸药内部的传播, 炸药内部迅速的化学变化产生大量的高温、高压气体产物, 这些气体产物压缩周围的土壤介质并形成向四周传播的压缩波和畸变波以及沿表面传播的瑞利波. 当压缩波到达土壤与空气的界面时, 部分冲击波透射到空气中, 同时反射形成向下传播的拉伸波. 在复杂应力波的作用与气体产物的推动下, 爆炸物与空气之间的土壤出现破坏, 导致部分土壤被抛射到空中. 该阶段决定了对靶体做功的总能量的大小, 因此至关重要.

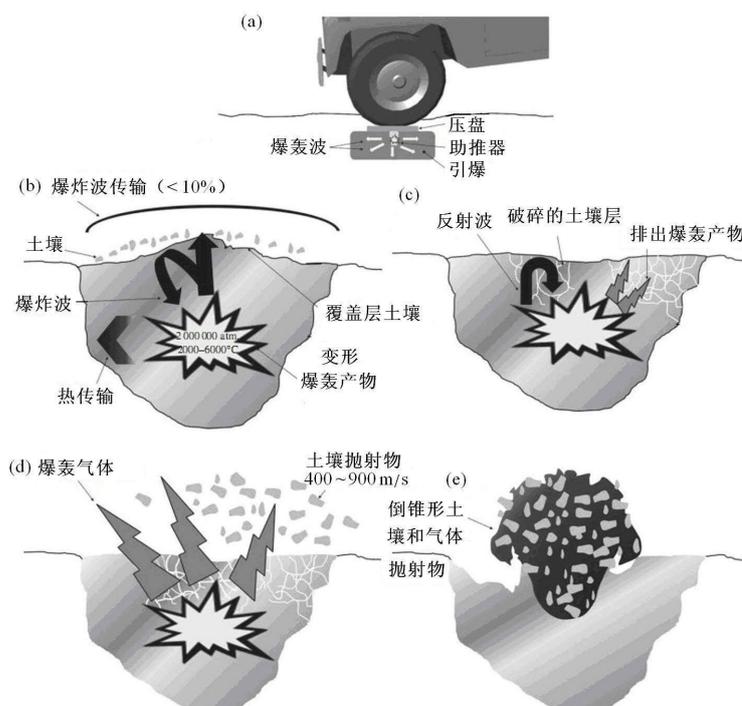


图 2 地雷爆炸的物理过程^[13]

在第 2 阶段, 爆轰产生的高温高压气体推动地雷上方的土壤以超音速向外扩张, 扩张的方向以及气体的多少和土壤的性质密切相关. 这一过程一般持续数毫秒. 随后, 高压气体和高速抛射的土壤与车体底盘接触, 导致底盘快速产生局部的大变形及损坏.

在第 3 阶段, 地雷爆炸在土壤内形成一个坑洞, 在爆炸产物的持续作用下, 土壤沿着坑洞的边界向上抛射(图 2), 土壤的抛射物呈空心倒圆锥形, 锥角一般为 $45^{\circ}\sim 120^{\circ}$, 此锥角随着掩埋深度的增加和土壤紧密程度的增加而减小. 此过程中抛射的土壤相对少于第 2 阶段, 产生的载荷也远小于气体产物扩张形成的载荷, 但此过程持续时间可达几十毫秒乃至上百毫秒, 故仍会使车体获得一定的向上的冲

量, 导致车体的变形并对车内人员造成伤害.

1.2.2 影响爆炸物载荷的因素

(1) 炸药的当量和形状

炸药的种类很多, 如 TNT (trinitrotoluol)、RDX (cyclotrimethylenetrinitramine)、PETN (pentaerythritol tetranitrate) 等. 为了对不同种类的炸药进行比较, 炸药的装药量可通过乘以一个转化因子转化为具有同等比能量的 TNT 炸药装药量, 称为 TNT 当量. 对于不同当量的爆炸物及其形状对土壤抛射的影响目前还缺乏系统对比研究. Peles 等^[14]研究了爆炸物的几何形状(立方形、水平放置方形、垂直放置方形和球形)对爆炸能量集中的影响, 从而得到爆炸所产生的压力和脉冲载荷对靶体结构的影响.

(2) 土壤的性质

土壤通常由不同尺寸的矿物和有机颗粒组成,可以根据大小将土壤中的颗粒分为不同的类别^[12]:黏土、粉土、沙土、沙砾、粗砾和砾石。不同的土壤成分决定了土壤的强度、可压缩性等力学性能,进而影响地雷爆炸后传递到靶体的载荷大小及分布。为了排除土壤成分不同引致的实验结果的差异,提高实验的可重复性,实验时应该采用成分固定的土壤,如直径约 200 μm 的 SiO_2 玻璃球^[15],其颗粒尺寸分布可以通过筛选分析 (sieve analysis) 获得。

(3) 土壤的含水量

土壤的含水量对爆炸冲击载荷的影响很大。Anderson 等^[16]发现沙土密度随着湿度增加而增加,沙土密度增加 22% 将导致传输到平板的冲量增加 27%,这是由于土壤中含水量的增大一方面会减小土壤的剪切强度,使土壤更容易被爆炸产物驱动,另一方面土壤的孔隙中充满水分增加了土壤的体积模量,导致被土壤吸收的能量减少,从而提高最终传递到靶体的能量。

相关的实验研究、理论分析及数值模拟亦引起关注。Bragov 等^[17]实验研究了冲击加载条件下含有不同饱和度水的土壤的力学响应。在此基础上,Grujicic 等^[18]首先利用实验对一种新的沙子材料模型进行参数化研究,然后采用该模型计算分析爆炸过程,发现其能更好地描述实验结果^[19]。

(4) 掩埋深度

地雷对靶体造成的破坏主要是由土壤的抛射物造成的,当地雷置于地面上或在土壤中掩埋的很浅^[18]时,作用在靶体上的载荷主要来自爆炸产物气体的膨胀,没有或只有少量的土壤被抛射到空中并作用于靶体;虽然透射到空气中与靶体作用的冲击波有所增强,但靶体获得的总冲量仍显著减少。与此相反,如果地雷掩埋得太深,大量的能量被土壤吸收,从而会减少被抛射起来的土壤甚至根本不产生土壤抛射物。Hlady^[20]的实验表明,对 25 g C4 炸药在土壤中爆炸而言,存在一个最优掩埋深度,使地雷爆炸传递到靶体上的能量达到最大值。

(5) 靶体距离地面的高度

理论上,当靶体与地面接触时,地雷爆炸产生的冲击波绝大部分通过土壤直接传递到靶体上,因而造成的损坏最大。但是,在实际应用中,除坦克履带外,靶体距离地面通常有一定的高度。随着靶体距地面高度的增加,透射到空气中的冲击波可忽略

不计,爆炸产物气体以及土壤抛射物的作用范围扩大,但强度有所减小。

(6) 靶体的形状

同样质量的靶体,在地雷爆炸作用范围内的受力面积越大,获得的动量就越大。Uribe 等^[21]研究了相关参数对地雷爆炸传输给刚性体的能量的影响,发现带有角度的凸板(如 V 形板)能够使膨胀的爆炸气体产物和土壤抛射物向两侧或四周偏离,因此相对于平板或凹板可以在一定程度上削弱地雷爆炸对靶体的作用。

1.3 聚能装药和破片结构地雷

按照毁伤机理的不同,除了爆破型地雷,还有聚能装药地雷。聚能装药地雷在爆炸后通过聚能作用,形成高温、高压、高速的金属射流或 EFP,穿透底装甲。由于车体底甲板通常较薄,因此只需消耗一小部分的主装药能量即可破甲,大量的残余能量可以用于破甲后的二次效应。其中 EFP 装药结构的地雷的毁伤元主要是爆炸成型加速的侵彻体,与穿甲战斗部造成的损伤非常相似,威力在于其较强的穿甲能力,侵彻体的速度可达到 2 000~3 000 m/s,破甲厚度可达十几至几十毫米,能够有效对付车体底部装甲较厚的重型坦克。

2 爆炸冲击载荷对车辆和车内人员的损伤

在常规弹药的爆炸作用下,坦克履带和行驶部件、轻型车辆及其货物和乘员易受毁伤。但是,由于爆炸物类型众多,其毁伤机制呈多样化,而影响因素又众多,导致不同类型车辆和车内人员毁伤程度评判标准不一。

2.1 爆炸冲击对车辆的损伤破坏

爆炸冲击对车辆或目标物^[21]的损伤破坏程度受到诸多因素的影响,包括爆炸物当量、爆炸物类型、爆炸物周围介质类型和参数^[20]、车辆类型、爆炸作用于车辆的部位^[22]以及防护措施等。爆炸物在车辆底板下面爆炸将产生严重的毁伤效应。Absil 等^[23]、Niekerk^[24]以及 Bird^[25]开展了地雷爆炸下车辆目标易损性试验研究,通过分析车辆结构、运动特性和毁伤机理确定车辆目标的关键部件。在强烈的冲击波或者土壤抛射物作用下,底板会产生一个明显的向内的弹塑性变形,严重时破裂,断裂长度可达数十厘米,导致车体剧烈变形和损坏。与此同时,被击中的车体会产生很大的车体加速度和底板剧烈振动,引发一系列后果^[26]:车内的物品、设备

等从支架上下落; 焊接或栓接在底板上的座椅及其他安装件从座椅基座上扯落 (车内乘员因而会猛烈地从座椅上朝着侧面或顶部方向弹出); 蓄电池和油箱破裂, 导致内部物质泄漏; 车内电线电缆被扯断, 引起短路; 武器、弹药及其他内部装备以极高的速度在战斗室内喷射; 舱门和舱盖与其锁定和铰接部位分离, 导致舱盖和舱门被锁死。

空心装药破甲弹能侵彻重型装甲, 并通过后效作用毁伤车内乘员及各种设备; 塑性炸药碎甲弹可贴附在装甲外表面上爆炸, 导致装甲内表面崩落, 由此产生大量高速破片, 毁伤车内乘员和设备。

2.2 爆炸冲击对车内人员造成的伤害

按照严重程度, 爆炸物对车内乘员造成的伤害 (图 3) 可从低到高分为 4 个等级^[11,13,26]:

(1) 一级伤害

一级伤害源于爆炸冲击波的伤害, 其后果表现为截肢, 软组织变形, 爆炸震力造成的骨折, 肺部震伤, 胃肠伤害等。

(2) 二级伤害

二级伤害源于地雷爆炸产生的碎片 (或弹丸)、高速飞溅的土壤或土块以及车辆产生的碎片造成的伤害。其后果表现为对身体 (下肢尤甚) 产生的穿透伤害、玻璃等碎片造成的表皮伤害、直接冲击或碎片造成的下肢骨折。

(3) 三级伤害

车体底板的变形将对车内乘员, 尤其是对直接位于爆炸点上方或附近的乘员 (如驾驶员) 造成严重的振荡和冲击伤害。三级伤害源于车辆获得的整体加速度以及底板变形产生的局部加速度^[27], 前者表现为整体加速度超出人体的耐受极限, 巨大的轴向载荷造成对下肢^[28] (特别是脚后跟)、骨盆和脊柱^[7,29] 的伤害, 后者表现为头部与车顶撞击造成的脑部伤害。该类型伤害目前最为严重: 近来对伊拉克和阿富汗战争的研究结果表明, 极度伤害占到伤亡量的 70%, 而下肢伤害就占到伤亡的 45%。此外, 对造成伤亡情况的总结来看, 下肢伤害占到造成伤亡量的 87%。除了下肢伤害, 脊柱伤害也较为严重。尽管人员存活率随着装甲防伏击车辆的出现大为提高, 但大当量的爆炸可将车辆高高抛起, 导致脊柱伤害量不断提高^[30], 不仅带来高额的医疗费用, 而且其伤害和影响程度远较截肢严重^[31]。



图 3 车内乘员损伤机制^[13]

(4) 四级伤害

四级伤害源于爆炸产生的热量伤害, 其后果表现为烧伤。

3 面向地雷爆炸和防护的实验、表征和模拟技术研究进展

由于实际尺寸地雷爆炸实验的局限性, 实验室条件下的小尺寸缩比实验被广泛应用于对地雷爆炸载荷以及与靶体相互作用的科学研究中。小尺寸缩比模型中的参数可通过立方根相似律与实际尺寸的模型联系起来。实际尺寸的实验一般采用报废的车辆或者很大的金属板进行试验, 一般需要合理布置大量的传感器等设备, 成本高, 准备周期长, 而且受场地和环境的限制。

目前已形成了地雷爆炸及其防护的相关测量和模拟技术, 概述如下。

3.1 观察地雷爆炸的物理过程

通过在土壤中和地雷上方的空气中设置压力传感器, Bergeron 等^[12] 获得了 100 g C4 炸药爆炸后土壤以及空气中冲击波的波形、冲击波到达时间和峰值等信息, 并通过 X 光摄影设备观察到锥形土壤抛射物产生的过程和形状。

Grujicic 等^[32] 采用 AUTODYN 软件计算了爆炸物埋设不同深度水分饱和的沙中爆炸所形成坑的尺寸和形状, 发现爆炸后短时内的计算结果和实验吻合较好, 但是最终结果不能令人满意, 分析认为这种不一致归因于计算时采用的沙子本构模型并不完善。近年来, 为了建立更准确的本构模型, 人们发展了多种实验技术来描述各类型土壤在不同载荷强度和应变率下的动态力学行为, 以期建立相关的数据库。Bragov 等^[33-34] 采用改进的 Kolsky 法, 实验研究了在约 10^3 s^{-1} 应变量级下软土壤 (石英砂)

的动态性能,发现随着动态载荷和应变率的提高,土壤压缩机制发生变化:既有颗粒移动,还包含颗粒断裂. Bragov 等^[17]采用两个互补的实验技术,研究了在 $10^3 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$ 应变量级以及 50 MPa~5 GPa 动态载荷下软土壤的动态力学性能. Grujicic 等^[19]发现,在本构模型中引入湿度和应变率对沙子压缩曲线的影响可使模拟结果和实验结果更为吻合.

3.2 测量地雷爆炸传递到靶体的动量

开发量化测量地雷爆炸传递到靶体的动量实验技术以及相应减少冲量传递的对策是近年来的研究重点. Genson^[35]将平板和 V 形铝制靶板无约束地置于地面上一定高度,在靶板垂直下方引爆 0.636 g 炸药,通过高速摄影获得了靶板在爆炸产生的载荷作用下的位移曲线,进而计算出靶板获得的动能. 采用类似的方法, Benedetti^[36]进一步应用速度传感器获得了自由靶板受地雷爆炸作用后的速度曲线,得到了靶板获得的动能. Anderson 等^[16]通过图 4 所示的实验台以及双电缆测得板位移-时间曲线计算的板初始跳跃速度,并通过加速度传感器取得靶板在爆炸载荷下的动能信息.

上述方法无需设计、制造固定靶板的夹具,也不

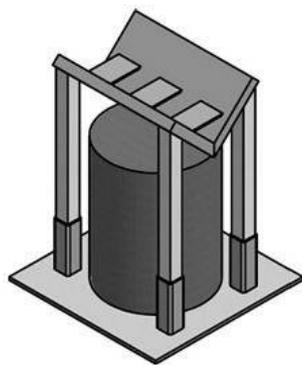


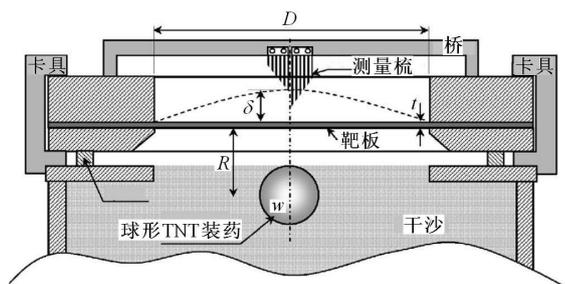
图 4 90 度角 V 型钢板的实验配置示意图^[16]

需要在强载荷下布置压力传感器(压力传感器在地雷爆炸载荷下很快损坏,不仅测量数据的偏差大,还提高了实验成本). 采用装有活塞的特殊装置, Hlady^[20]和 Uribe 等^[21]通过测试活塞的垂直位移计算了爆炸传递至刚体目标靶板的能量. Held 等^[37]开发的自主诊断设备可以记录钢板受到反坦克雷爆炸冲击后凸起处的位移、速度和加速度,并成功应用于防雷试验台. 针对大尺寸原形实验, Taylor 等^[38]开发了一套垂直脉冲测量夹具装置用于测试地雷爆炸对目标结构的冲量,9 组使用饱和沙介质的实验结果表明,间隔距离对湿沙传递的冲量有显著影响.

采用单一尺寸球颗粒, Deshpande 等^[39]建立了简化的一维本构模型来揭示地雷爆炸后通过土壤对目标结构的加载,该模型考虑两种状态:当颗粒处于普遍分散状态时,颗粒之间的接触按碰撞处理;当颗粒密度高时,采用 Drucker-Prager 模型描述颗粒的变形和摩擦. 结果表明,转化给结构的冲量主要取决于第二种状态的初始密度;在干沙情况下,颗粒可以充分弥散,而湿沙情况下,颗粒形成团簇,对目标结构产生更高的冲击力.

3.3 测量固支靶体的变形

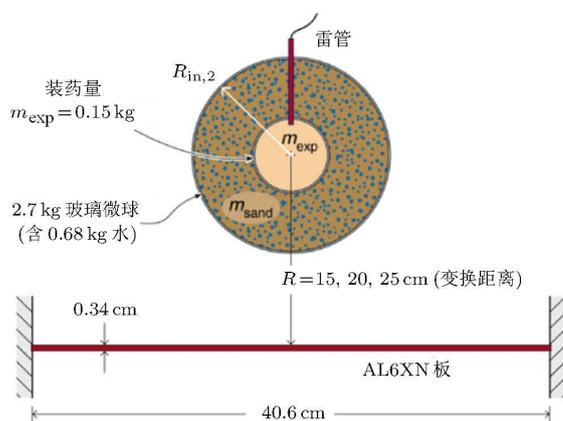
图 5(a)和图 5(b)分别给出了可以测量固支靶体变形的两种实验技术,前者将爆炸物埋设在沙土中^[10],后者将爆炸物置入球形沙土罐中^[15]. 前一种方法较为普遍,如 Williams 等^[40]采用方形钢架和一定质量的重物将方形的铝板和钢板固支于地面上方一定高度,引爆下方土壤中的 6 kg C4 炸药,测量了靶板的永久变形及破坏模式. 但是, Børvik 等^[15]指出以沙土包裹爆炸物的方法可以简化实验装置. 此外,剑桥大学的轻质材料和结构课题组提出了采用泡沫铝弹丸来近似模拟地雷爆炸冲击的理论方法,并开发了相关实验技术.



(a) 示意图及矩形土壤容器^[10]



图 5 测量靶体变形的两种试验台



(b) 示意图及沙土包裹的球形爆炸物 [15]

图 5 测量靶体变形的两种试验台 (续)

3.4 车辆内部人员的毁伤分析

为了研究地雷对车辆内部人员的毁伤, 目前主要将假人模型放入与车辆内部相似的空间环境进行实验, 较为普遍的是采用 Hybrid III 人体模型研究人体各部位 (头、脚等) 的易损性 [24,41]。但是, 鉴于 Hybrid III 人体模型不能逼真地反映出人体各部位在地雷爆炸后的毁伤标准, Pandelani 等 [42] 采用单个部件替代人体相关部位进行实验, 如将腿部以假肢替代, 通过数值仿真和实验研究了腿部的易损性, 另外结合数值模拟和实验研究了人员在装甲车内的动态毁伤变化过程、空中姿态等, 计算了地雷爆炸过程中人体各部位的承载力随时间的变化情况。Bir 等 [43] 采用下肢替代品作为损伤评估工具, 验证了由于反车辆地雷引起地板的冲击响应; Newell 等 [44] 采用尸体和人体测量装置, 评估了车底爆炸导致的双腿损伤; Ahmed 等 [45] 开发了一种小腿冲击试验机对下肢损伤标准进行了辅助研究; Funk 等 [46] 研究了人的脚/脚踝复合体在临床实际轴向载荷作用下的损伤度, 以及轴向载荷作用下跟腱张力对脚/脚踝复合体断裂模式和损伤度的影响。

利用数值模拟还可以研究车辆内多名乘员的毁伤情况。例如, Williams 等 [40] 采用 LS-Dyna 有限元软件对乘员在车辆内部不同位置的动态毁伤变化过程进行了仿真计算 (图 6), 并获得了乘员各个部位的毁伤数据。

4 国内外车辆爆炸防护结构的研究现状

无论反车底雷还是 IED, 由于其威力巨大, 毁伤效应强, 可击穿装甲车辆的底甲板, 破坏其内部设备和杀伤乘员, 造成车毁人亡的严重后果, 因此在所有

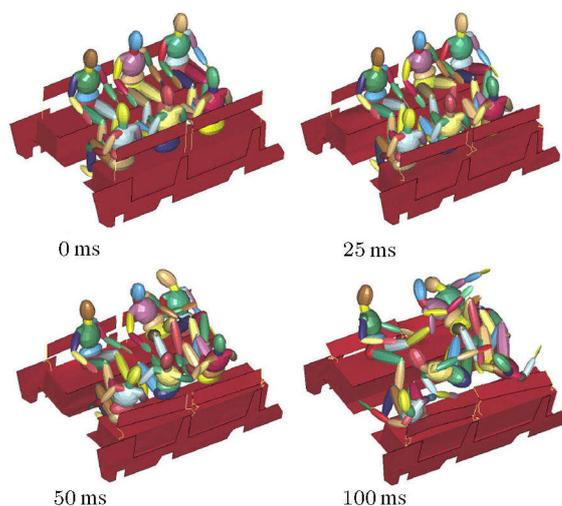


图 6 车辆内多名乘员毁伤的数值仿真: 车辆左车轮位置受到地雷爆炸冲击后 GEBOD 假人的系列响应 [40]

来自战车底部的威胁中, 对反车底雷的防护最为重要。由于车底地雷特别是大当量的威胁日益增大, 相关的防护技术及其基础和应用研究得到国内外广泛重视。

4.1 高性能轻质防爆结构材料的开发

近年来, 伴随着泡沫金属、点阵金属等超轻多孔金属材料的发展, 开发了具有高效吸能特性的新一代多孔金属材料及其夹层结构, 如图 7(c) 所示。研究发现附加在车体底部的轻质多孔金属夹层及其复合结构具有高效吸收爆炸能量的特性, 甚至还具有一定抗破片穿甲侵彻的性能, 具有有效抵御不同毁伤机理地雷攻击的潜力, 从而为新型装甲防护结构的研发及其轻量化提供了新的思路。

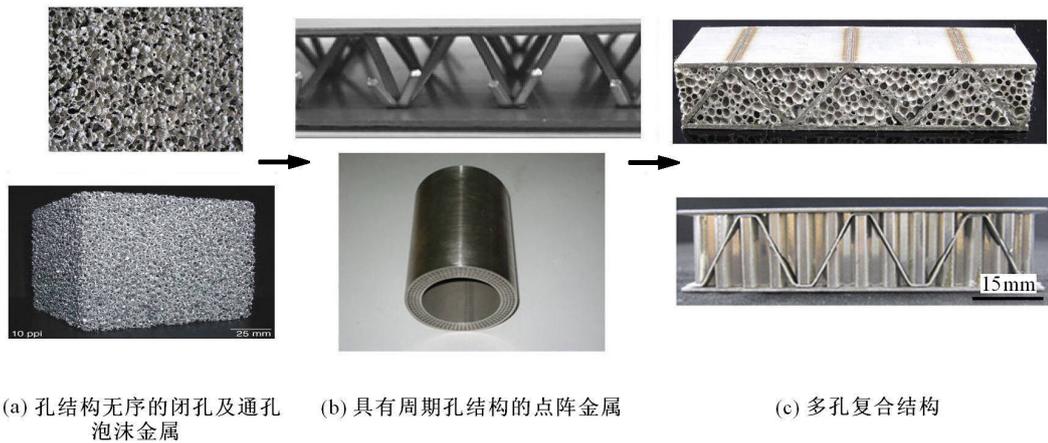


图7 超轻多孔金属材料的衍变

第一代多孔金属材料,其孔形貌呈无序分布状态,在静动态压缩载荷作用下,既能承受大应变又能保持低应力水平,具有优异的能量吸收特性,代表性材料包括闭孔泡沫铝^[47]和烧结金属纤维毡^[48-49].通过控制材料组分以及孔结构(胞体尺寸、孔隙率和孔形貌),可以系统改变压缩应力-应变曲线上平台段的峰值应力水平,从而控制材料能量吸收性能的水平,进而针对不同应用需求研发不同类型的轻质能量吸收器.张钱城等^[50]系统整理了闭孔泡沫铝孔结构控制的相关研究结果,发现并确定了胞体尺寸、孔隙率和孔形貌三者之间的内在关系,建立了熔体发泡法影响孔结构控制的工艺技术框架.鉴于凝固过程对闭孔泡沫金属孔结构的最终形成具有显著影响,张斌等^[51]和Zhang等^[52]通过理论、有限元以及实验揭示了基于孔结构的熔体泡沫冷却规律,量化了多边形孔、类球形孔、球形孔等不同孔形貌对泡沫凝固过程的影响.

由于闭孔泡沫金属在承受静动态压缩载荷时呈现的优异吸能特性,在多样化高技术目标牵引下,这类新型材料已经被广泛应用于抵抗冲击、爆炸等工程防护领域.何德坪^[47]系统研究了闭孔泡沫铝的不同孔形貌(即多边形孔、类球形孔、球形孔)对应的不同力学行为和工程应用.对于低速冲击防护问题,Li等^[53]通过落锤冲击实验和有限元模拟发现高孔隙率闭孔泡沫铝(多边形孔)的抗冲击缓冲效果明显,且在低速冲击条件下其变形特征与准静态变形类似.李斌潮等^[54]进一步将该泡沫铝作为大质量结构抗低速冲击的缓冲材料,根据受保护结构的最大缓冲时间,定义了泡沫材料进入密实压缩阶段的临界冲击速度,并研究了不同冲击速度条件下结构响应的最小加速度和临界加速度.随后,以载人航

天器返回舱为应用背景,Li等^[55]开展了冲击载荷作用下泡沫材料的塑性变形过程与受保护结构内连接部件的振动耦合特性的研究,建立了双自由度弹簧-阻尼-泡沫碰撞理论模型,模拟了闭孔泡沫铝保护下的舱体结构与内部座椅-人员在返回舱着陆过程中的动态响应,讨论了包括弹簧刚度、阻尼、结构质量比、冲击速度以及泡沫铝厚度等结构参数对内部连接部件最大冲击载荷的影响,揭示了冲击载荷衰减机理和影响冲击力大小的关键因素,根据不同的抗冲击强度要求开展了泡沫金属吸能器最小轻量化设计研究.这些成果为成功研制适合神舟号飞船着陆的轻质能量吸收材料、保证航天员的安全着陆做出了重要贡献.

针对高速冲击防护问题,张健等^[56]开展了闭孔泡沫铝的应变率敏感性研究,并提出了率相关本构模型^[57].赵桂平等^[58]利用有限元方法分析比较了泡沫铝合金夹层板、方孔蜂窝形夹层板和波纹形夹层板在泡沫子弹冲击载荷下的动态响应,发现泡沫金属夹层板吸收能量最多,底面变形最小,是结构性能相对最优的夹层板.Zhang等^[59]进一步研究了两端固支的梯度结构泡沫铝夹层板在冲击脉冲载荷下的动态响应,发现尽管均匀泡沫铝结构的后面板中间挠曲最小,含低-高分布梯度孔结构的泡沫铝芯体却获得最大平均压缩应变,并且吸收最大内能.Liu等^[60]研究比较了梯度结构与均匀结构芯体新型轻质防爆罐,发现受到相同空气爆炸载荷作用时,前者径向挠度更小,抗爆阻力更佳.在上述基础上,以车辆的抗爆吸能底板为应用背景,本文作者还开展了高速冲击载荷作用下多孔金属材料(包括泡沫铝)的塑性变形过程与受保护结构内连接部件的振动耦合特性的研究,由此开发的基于泡沫铝材料的

抗高冲击过载软支撑防护技术为我国新型远程特种导弹的成功研制做出了重要贡献。

但是, 必须指出的是, 尽管泡沫金属具有优异的吸能特性, 但其制备工艺复杂, 尤其是其金属骨架刚度和强度均较低, 严重限制了其在结构承载方面的应用。相关的理论研究很多, 较有代表性的是 Chen 等 [61] 建立了基于孔结构的细观力学模型和三维超级胞元模型, 准确预测了制备过程中产生的 6 类孔结构缺陷 (胞壁弯曲度、非均匀胞壁厚度、胞元尺寸变量、胞壁裂纹、胞壁偏差以及胞元缺失) 对泡沫金属多轴屈服行为的影响, 发现在静水压力下孔结构缺陷的存在促使孔壁的变形机制从拉压向弯曲转化, 即孔结构胞壁在力学上属于弯曲主导型结构 [62]。该研究一方面揭示了孔结构无序的泡沫材料承载能力有限, 但可发挥其吸能、散热、吸声等特性, 另一方面推动了国内外多孔材料研究向有序的高强度点阵金属 (lattice metal) 和点阵金属复合结构的研发进程。

第二代多孔金属是优异的结构承载材料, 其孔形貌呈有序分布状态, 包括三维点阵金属材料 [63] 以及目前已得到广泛应用的蜂窝 [64]、波纹结构材料 [65], 其胞壁在力学上属于拉伸主导型结构, 无论刚度和强度均较第一代多孔金属 (即泡沫金属) 大幅度提高。Tian 等 [66] 以及 Liu 等 [67-69] 就学术界所关注的点阵金属材料的细观力学建模和孔结构优化进行了一系列探索。Wadley [70] 总结了点阵金属的典型胞元结构、制备技术以及多功能应用, Lu 等 [63] 和张钱城等 [71] 则系统整理并发展了点阵金属的力学性能强化方法, 包括拓扑结构调整、梗的中空化强化、加工硬化强化、复合结构强化等, 据此发现并成功制备了力学性能较金字塔构型更为优越的 X- 型点阵构型 [72-73], 随后将加工硬化强化方法应用于不同构型点阵金属结构的加工 [74-75], 并发现点阵金属复合陶瓷结构具有优异的抗侵彻性能 [76]。由于点阵金属较泡沫金属具有更佳的力学性能, 近年来将点阵金属结构应用于抗冲击和爆炸防护的理论和实验研究受到广泛关注, 涉及的结构有 Y 型结构 [77-78], 波纹结构 [65,79-81] 及其多层结构 [82], 三角形蜂窝结构 [83], 四方蜂窝结构 [64,84], 金字塔结构 [85-86] 等。

虽然点阵金属材料的结构承载能力强, 但是在压缩、剪切等载荷作用下, 其孔结构往往在峰值应力水平时产生塑形屈曲, 呈现应力迅速下降现象, 故吸收能量的能力有限。针对该问题以及抗高当量

爆炸防护的新需求, 本文作者开发了新一代多孔金属复合结构。例如, 将波纹金属结构与闭孔泡沫铝复合 [87] 带来新的破坏模式变化, 从而发生力学性能质变, 且其具有结构更紧凑、综合力学性能 (尤其是能量吸收) 更高的特点。基于这种新的复合机制, 我们又开发了一系列具有自主知识产权的轻质复合结构, 如波纹-蜂窝复合结构 [88]、菱形点阵金属-泡沫铝复合结构 [89] 等, 将该类新型材料应用于抗冲击和爆炸防护亦成为我们的研究重点。

4.2 防护结构设计

针对聚能装药型反车底雷的防护原则主要是尽可能减小射流和破片侵彻体的穿破甲效应, 目前采取的具体措施包括增强车体底板、加装附加装甲等。对于爆破型反车底雷, 防护原则主要是减弱空气冲击波及其爆炸产物对战车的伤害, 可以通过能量吸收、能量致偏、尽可能远离爆炸源等措施来实现。Ramasamy 等 [11] 总结了车辆地雷防护从第 1 代到第 4 代的发展历史, 分析了罗得西亚战争 (1972—1980) 中 2212 例地雷爆炸事件的伤亡数据 [90], 发现简单的车辆改进 (V 型结构、增加离地间隙、扩大车轴间距、增加车重、爆炸偏流装置等) 对降低地雷爆炸引起的死亡率和受伤率有显著作用。

4.2.1 车底 V 型防护结构

为了提高车辆的防地雷攻击能力, 可将其底板设计成 V 形或在底板下加装 V 形爆炸波致偏板 [90-91]。V 形车底设计率先应用于南非的“水牛”和“卡斯皮”防地雷车上, 随后被越来越多的现代防地雷车辆采用, 如德国“GeFaS”4×4 装甲车、南非 RG-31 防地雷装甲车、澳大利亚“大毒蛇”轮式装甲车 (4×4) 等。V 形车底结构可以有效地分散爆炸冲击能量, 使部分爆炸冲击波从车辆侧下方泄出, 而采用传统平板设计的底板在冲击波反射和凝聚下将产生高于初始压力许多倍的作用力 [92]。一般而言, 同样质量的靶体, 在地雷爆炸作用范围内的受力面积越大, 其获得的动量就越大。有角度的凸板 (如 V 形板) 能够使膨胀的爆炸气体产物和土壤抛射物向两侧或四周偏离, 故相对于平板或凹板可以在一定程度上削弱地雷爆炸对靶体的作用。

以距离地面 20 cm 的平板为参照, Anderson 等 [93] 采用有限元模拟发现 120° 和 90° V 型板可以分别消减 17% 和 36% 的爆炸冲击能量, 实验结果则表明 120° 和 90° V 型板能分别消减 40% 和 60% 的爆炸冲击能量, 因此有必要针对 V 形结构开展进

一步的理论和实验研究。

4.2.2 车内结构设计

就车内结构设计而言,座椅设计^[94-97]是减少人员伤亡的关键。“锯脂鲤”IIIIC装甲车、“皮兰哈”8×8 IV轮式装甲车以及法国VBCI步兵战车的乘员舱均按照防雷要求进行了精心设计,具体措施包括:座椅采用与车顶相连接的安装方式,以使座椅的振动负荷最小,或将座椅固定在车辆侧壁,并采用减震式悬挂措施,以尽可能降低座椅传递给乘员的加速度;将吸能部件应用于座椅设计,如采用具有较高的减震和加速度衰减性能的座椅支撑部件,以及采用更为舒适的座椅衬垫;采用单人座椅,而非长条式座椅;在载员舱下方增加脚撑并将其连接到悬挂式座椅上,而不是固定在车辆底板上;为乘员配备可快速解脱的4点或5点式安全带,以免乘员从座椅中抛出;在座椅与车辆底板之间保留足够的自由空间,尽量不放置和安装任何设备等。目前,美军亦开展了通过改进座椅设计来吸收冲击能量和减少伤亡的研究,同时评估改进方案对脊椎损伤的影响。

乘员舱内装备/设备的位置及固定方式也很重要,重点是防备它们从支架上掉落,造成二次撞击。此外,需要认真考虑发动机、变速箱、前差速器、分动器、后差速器等的布置及固定方式,以消除这些零部件在爆炸冲击波作用下“飞入”乘员舱的危险。

4.2.3 其他防护设计

其他防护设计措施包括:采用高强度装甲材料制备车体底板,取消设置在地板上的所有舱盖和检修门,尽可能减少焊接造成的抗冲击薄弱部位^[98]或在焊缝区域使用加强筋以提高强度,从而避免爆炸冲击波将焊缝撕开后气浪及爆炸产物进入车内。

4.3 综合防护措施

地雷爆炸当量的逐步提高对车辆及车内人员的防护提出了更高的要求。针对不同伤害等级,结合国内外研究现状,可对车辆的综合防护措施概述如下:

(1) 一级伤害

可采取的防护措施包括:①车体保持密封,避免能为气体提供入口的开口或焊接裂缝等;②车底板采用更具延展性、更柔软的装甲金属,以降低底板产生裂纹的风险;③采用更厚的车底板或双层板等结构,但这会显著增加车体的重量;④增加车底板到地面的距离,但这同时会减少车内空间并降低车

辆的隐蔽性;⑤在车底板下方增设V形或凸形挡板,以削弱爆炸波及爆炸气体产物的威力;⑥在车底板增加吸能材料,如泡沫金属^[99]、三明治板^[100]等。

(2) 二级伤害

防护措施包括:①避免在车体内设置松动的设备或零件;②在车轮后安装挡板;③在车底板内侧安装装甲板。

(3) 三级伤害

防护措施包括:①采用阻力系数更低的车体结构设计,如V形底板结构;②将座椅固定在车辆侧壁或者车顶,避免乘员的下肢与底板直接接触;③乘员佩戴安全带与头盔;④在车底板增加吸能材料,以降低爆炸冲击对车体的加速度。

(4) 四级伤害

采用防火材料以及可延缓燃烧的车辆内饰和乘员服装。

5 展望

现代车辆抗爆炸防护战略的发展是多方面的,需要工程师、科学家和临床医生之间的精诚合作,充分理解爆炸与车辆相互作用原理和规律,及其与人体伤害的相互关系。在8kg以上TNT当量、破片侵彻和冲击波的耦合作用、地雷群等严酷条件下,如何对车辆及其人员进行防护的综合设计尤显重要。目前,针对车辆抗爆炸防护结构的设计多侧重于单方面问题的研究,缺乏系统的协调设计,如美军防地雷反伏击战车的应用虽然减少了人员伤亡,但是也带来了脊椎损伤等严重伤害的增加,其原因是没有对关键部件(如防护结构材料与座椅)进行系统设计,尤其是缺乏防护结构-人-椅子三位一体的协调设计。

参考文献

- 1 Grujicic M, Arakere G, Nallagatla H, et al. Computational investigation of blast survivability and off-road performance of an up-armoured high-mobility multi-purpose wheeled vehicle. *Journal of Automobile Engineering*, 2009, 223(79): 301-325
- 2 耿海军. 形形色色的“智能地雷”. 百科知识, 1996, 10(6): 34
- 3 Barnat W, Niezgoda T, Panowicz R. Analysis of a light caterpillar vehicle loaded with blast wave from detonated IED. *Journal of KONES Powertrain and Transport*, 2010, 17(4): 27-34
- 4 Law E, Tremblay J, Bergeron D, et al. Protection of soft-skinned vehicle occupants from landmine blasts. *Conventional Weapons Technology*, Bonn, 1998

- 5 Ritenour AE, Blackburne LH, Kelly JF, et al. Incidence of primary blast injury in US military overseas contingency operations: a retrospective study. *Annals of Surgery*, 2010, 251(6): 1140-1144
- 6 Ramasamy A, Harrison SE, Clasper JC, et al. Injuries from roadside improvised explosive devices. *The Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 2008, 65(4): 910-914
- 7 Ragel BT, Allred CD, Brevard S, et al. Fractures of the thoracolumbar spine sustained by soldiers in vehicles attacked by improvised explosive devices. *Spine*, 2009, 34(22): 2400-2405
- 8 郭仕贵, 张中英, 刘自力等. 反坦克车底地雷威力数值计算分析. *兵工学报*, 2010, 31(7): 967-970
- 9 Neuberger A, Peles S, Rittel D. Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part I: air-blast loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(5): 859-873
- 10 Neuberger A, Peles S, Rittel D. Scaling the response of circular plates subjected to large and close-range spherical explosions. Part II: buried charges. *International Journal of Impact Engineering*, 2007, 34(5): 874-882
- 11 Ramasamy A, Hill A, Hepper A, et al. Blast mines: physics, injury mechanisms and vehicle protection. *Journal of the Royal Army Medical Corps*, 2009, 155(4): 258-264
- 12 Bergeron D, Walker R, Coffey C. Detonation of 100-gram anti-personnel mine surrogate charges in sand-A test case for computer code validation. Defense Research Establishment Suffield, Ralston ALTA, Canada, 1998
- 13 Ramasamy A, Masouros SD, Newell N, et al. In-vehicle extremity injuries from improvised explosive devices: current and future foci. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2011, 366(1562): 160-170
- 14 Peles S, Touati D, Azulay I, et al. Numerical simulation of mine detonation beneath a generalized add-on armor structure. 24th International Symposium on Ballistics, New Orleans, USA, 2008
- 15 Børvik T, Olovsson L, Hanssen A, et al. A discrete particle approach to simulate the combined effect of blast and sand impact loading of steel plates. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2011, 59(5): 940-958
- 16 Anderson CE, Behner T, Weiss CE. Mine blast loading experiments. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(8-9): 697-706
- 17 Bragov A, Lomunov A, Sergeichev I, et al. Determination of physicomechanical properties of soft soils from medium to high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 967-976
- 18 Grujicic M, Pandurangan B, Cheeseman B. The effect of degree of saturation of sand on detonation phenomena associated with shallow-buried and ground-laid mines. *Shock and Vibration*, 2006, 13(1): 41-61
- 19 Grujicic M, Pandurangan B, Qiao R, et al. Parameterization of the porous-material model for sand with different levels of water saturation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2008, 28(1): 20-35
- 20 Hlady SL. Effect of soil parameters on landmine blast. In: Proc. of 18th International symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Bad Reichenhall, Germany, 2004
- 21 Uribe J, Poveda V, Rodriguez J. Effect of set up parameters of landmine blast over transferred energy to a rigid body: experimental and computational study. In: Proc. of 26th International Symposium Ballistics, Miami, USA 2011
- 22 Mikhail A. Off-center explosion of blast land mine under ground vehicles: variation in lethality. In: Proc. of 21st International Symposium Ballistics, Adelaide, Australia, 2004
- 23 Absil L, Verbeek H, Weerheijm J. Combined experimental and numerical study of mine detonations in the vicinity of vehicles. In: Proc. of 15th International symposium on the Military Aspects of Blast and Shock, Banff, Alberta, Canada, 1997
- 24 Niekerk B. Land mine protection—dealing with the uncertainties. 10th European AFV Attack and Survivability Symposium, Shrivenham, UK, 2001
- 25 Bird R. Protection of vehicles against landmines. *Journal of Battlefield Technology*, 2001, 4(4): 14-17
- 26 韩辉, 焦丽娟, 徐平. 战车底部防雷技术研究. *四川兵工学报*, 2007, 28(3): 11-13
- 27 Tabiei A, Nilakantan G. Reduction of acceleration induced injuries from mine blasts under infantry vehicles. 6th European LS-DYNA Users' Conference, Gothenburg, Sweden, 2007
- 28 Wang J, Bird R, Swinton B, et al. Protection of lower limbs against floor impact in army vehicles experiencing landmine explosion. *Journal of Battlefield Technology*, 2001, 4(3): 11-15
- 29 Blair JA, Possley DR, Petfield JL, et al. Military penetrating spine injuries compared with blunt. *The Spine Journal*, 2011, 12(9): 762-768
- 30 Zoroya G. Spinal injuries up among troops. *USA Today*, 2009-11-03
- 31 Cross JD, Ficke JR, Hsu JR, et al. Battlefield orthopaedic injuries cause the majority of long-term disabilities. *Journal of the American Academy of Orthopaedic Surgeons*, 2011, 19 (S1): 1-7
- 32 Grujicic M, Pandurangan B, Huang Y, et al. Impulse loading resulting from shallow buried explosives in water-saturated sand. *Journal of Materials: Design and Applications*, 2007, 221(1): 21-35
- 33 Bragov A, Grushevsky G, Lomunov A. Use of the Kolsky method for studying shear resistance of soils. *Dymat Journal*, 1994, 3(1): 253-259
- 34 Bragov A, Grushevsky G, Lomunov A. Use of the Kolsky method for confined tests of soft soils. *Experimental Mechanics*, 1996, 36(3): 237-242
- 35 Genson KW. Vehicle shaping for mine blast damage reduction. [PhD Thesis]. Maryland: University of Maryland, 2006
- 36 Benedetti R. Mitigation of explosive blast effects on vehicle floorboard. [PhD Thesis]. Maryland: University of Maryland, 2008
- 37 Held M, Heeger P, Kiermeir J. Displacement device to measure the acceleration of the bulge of RHA plates under anti

- tank mine blast. 22nd International Symposium on Ballistics, Vancouver, BC, Canada, 2005
- 38 Taylor LC, Skaggs RR, Gault W. Vertical impulse measurements of mines buried in saturated sand. *Fragblast*, 2005, 9(1): 19-28
- 39 Deshpande V, McMeeking R, Wadley H, et al. Constitutive model for predicting dynamic interactions between soil ejecta and structural panels. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57(8): 1139-1164
- 40 Williams K, Fillion-Gourdeau F. Numerical simulation of light armoured vehicle occupant vulnerability to anti-vehicle mine blast. In: Proc. of 7th International LS-DYNA Conference, Salzburg, 2002
- 41 Bergeron DM, Coley GG, Rountree MS. Assessment of foot protection against anti-personnel landmine blast using a frangible surrogate leg: canadian centre for mine action technologies. UXO Forum, Bergeron, Coley, 2001
- 42 Pandelani T, Reinecke D, Beetge F. In pursuit of vehicle landmine occupant protection: evaluating the dynamic response characteristic of the military lower extremity leg (MiL-Lx) compared to the Hybrid III (HIII) lower leg. In: Proc. of CSIR Conference 2010, Pretoria, South Africa, 2010
- 43 Bir C, Barbir A, Dosquet F, et al. Validation of lower limb surrogates as injury assessment tools in floor impacts due to anti-vehicular land mines. *Military Medicine*, 2008, 173(12): 1180-1184
- 44 Newell N, Masouros SD, Ramasamy A, et al. Use of cadavers and anthropometric test devices (ATDs) for assessing lower limb injury outcome from under-vehicle explosions. In: Proc. of the International Research Council on the Biomechanics of Injury Conference: International Research Council on Biomechanics of Injury, Dublin, Ireland, 2012
- 45 Ahmed R, Reinecke D, Snyman I, et al. Design and implementation of a lower leg impact tester to assist in lower limb injury criteria research. In: Proc. of CSIR 3rd Biennial Conference 2010, Pretoria, South Africa, 2010
- 46 Funk JR, Crandall JR, Tourret LJ, et al. The effect of active muscle tension on the axial injury tolerance of the human foot/ankle complex. *The Bone & Joint Journal*, 2001, 84(SI): 9-12
- 47 何德坪. 超轻多孔金属. 北京: 科学出版社, 2008
- 48 Qiao J, Xi Z, Tang H, et al. Compressive property and energy absorption of porous sintered fiber metals. *Materials Transactions*, 2008, 49(12): 2919-2921
- 49 Jin MZ, Chen CQ, Lu TJ. The mechanical behavior of porous metal fiber sintered sheets. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2013, 61(1): 161-174
- 50 张钱城, 卢天健, 何思渊等. 闭孔泡沫铝的孔结构控制. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 255-270
- 51 张斌, 金东范, 卢天健. 非均质材料凝固过程分析——理论和实验. 中国科学: E 辑, 2009, 39(2): 206-213
- 52 Zhang B, Kim T, Lu TJ. Solidification in a continuous medium with periodically distributed two-dimensional circular pores. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2010, 24(2): 348-354
- 53 Li BC, Zhao GP, Lu TJ. Low strain rate compressive behavior of high porosity closed-cell aluminum foams. *Science China E—Technological Sciences*, 2012, 55(2): 451-463
- 54 李斌潮, 赵桂平, 卢天健. 闭孔泡沫铝低速冲击防护的临界条件与优化设计. 固体力学学报, 2011, 32(4): 325-338
- 55 Li BC, Zhao GP, Lu TJ. Large mass protection with closed-celled metallic foams under low velocity impact: spring-damper-foam collision model. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2012, 13(1): 39-47
- 56 张健, 赵桂平, 卢天健. 闭孔泡沫铝应变率效应的试验和有限元分析. 西安交通大学学报, 2010, 44(5): 97-101
- 57 寇玉亮, 陈常青, 卢天健. 泡沫铝率相关本构模型及其在三明治夹芯板冲击吸能特性的应用研究, 2011, 32(3): 217-227
- 58 赵桂平, 卢天健. 多孔金属夹层板在冲击载荷作用下的动态响应. 力学学报, 2008, 40(2): 194-206
- 59 Zhang J, Zhao G, Lu T. Dynamic responses of sandwich beams with gradient-density aluminum foam cores. *International Journal of Protective Structures*, 2011, 2(4): 439-452
- 60 Liu XR, Tian XG, Lu TJ, et al. Blast resistance of sandwich-walled hollow cylinders with graded metallic foam cores. *Composite Structures*, 2012, 94(8): 2485-2493
- 61 Chen C, Lu T, Fleck N. Effect of imperfections on the yielding of two-dimensional foams. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1999, 47(11): 2235-2272
- 62 Deshpande VS, Ashby MF, Fleck NA. Foam topology bending versus stretching dominated architectures. *Acta Materialia*, 2001, 49(6): 1035-1040
- 63 Lu TJ, Zhang QC. Novel strengthening methods for ultralightweight sandwich structures with periodic lattice cores. *Science China E—Technological Sciences*, 2010, 53(3): 875-877.
- 64 Dharmasena KP, Wadley HNG, Xue ZY, et al. Mechanical response of metallic honeycomb sandwich panel structures to high-intensity dynamic loading. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(9): 1063-1074.
- 65 Wadley HNG, Borvik T, Olovsson L, et al. Deformation and fracture of impulsively loaded sandwich panels. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2013, 61(2): 674-699.
- 66 Tian YS, Lu TJ. Optimal design of compression corrugated panels. *Thin-Wall Structures*, 2005, 43(3): 477-498
- 67 Liu T, Deng ZC, Lu TJ. Design optimization of truss-cored sandwiches with homogenization. *International Journal of Solids and Structures*, 2006, 43(25): 7891-7918
- 68 Liu T, Deng Z, Lu T. Minimum weights of pressurized hollow sandwich cylinders with ultralight cellular cores. *International Journal of Solids and Structures*, 2007, 44(10): 3231-3266
- 69 Liu T, Deng ZC, Lu TJ. Bi-functional optimization of actively cooled, pressurized hollow sandwich cylinders with prismatic cores. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2007, 55(12): 2565-2602
- 70 Wadley HNG. Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2006, 364(1838): 31-68

- 71 张钱城, 卢天健, 闻婷. 轻质高强度点阵金属材料的制备及其力学性能强化的研究进展. *力学进展*. 2010, 40(2): 157-169
- 72 Zhang QC, Han YJ, Chen CQ, et al. Ultralight X-type lattice sandwich structure (I): concept, fabrication and experimental characterization. *Science China E—Technological Sciences*, 2009, 52(7): 2147-2154
- 73 Zhang QC, Chen AP, Chen CQ, et al. Ultralight X-type lattice sandwich structure (II): micromechanics modeling and finite element analysis. *Science China E—Technological Sciences*, 2009, 52(8): 2670-2680
- 74 Zhang Q, Lu T. Experimental and simulated compressive properties of work-hardened X-type lattice truss structures. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2012, 25(2): 111-116
- 75 卢天健, 张钱城, 陈常青等. 一种应变强化金字塔结构夹层板的制备方法. 中国专利, 200810231703. 2008-10-10
- 76 Ni CY, Li YC, Xin FX, et al. Ballistic resistance of hybrid-cored sandwich plates: numerical and experimental assessment. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2013, 46: 69-79
- 77 Rubino V, Deshpande VS, Fleck NA. The dynamic response of end-clamped sandwich beams with a Y-frame or corrugated core. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(8): 829-844
- 78 Rubino V, Deshpande VS, Fleck NA. The dynamic response of clamped rectangular Y-frame and corrugated core sandwich plates. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2009, 28(1): 14-24
- 79 Kilicaslan C, Guden M, Odaci IK, et al. The impact responses and the finite element modeling of layered trapezoidal corrugated aluminum core and aluminum sheet interlayer sandwich structures. *Materials & Design*, 2013, 46(1): 121-133
- 80 Rimoli JJ, Talamini B, Wetzel JJ, et al. Wet-sand impulse loading of metallic plates and corrugated core sandwich panels. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(10): 837-848
- 81 Odaci IK, Kilicaslan C, Tasdemirci A, et al. Projectile impact testing of glass fiber-reinforced composite and layered corrugated aluminium and aluminium foam core sandwich panels: a comparative study. *International Journal of Crashworthiness*, 2012, 17(5): 508-518
- 82 Dharmasena K, Queheillalt D, Wadley H, et al. Dynamic response of a multilayer prismatic structure to impulsive loads incident from water. *International Journal of Impact Engineering*, 2009, 36(4): 632-643
- 83 Wei Z, Deshpande VS, Evans AG, et al. The resistance of metallic plates to localized impulse. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008, 56(5): 2074-2091
- 84 Mori LF, Queheillalt DT, Wadley HNG, et al. Deformation and failure modes of i-core sandwich structures subjected to underwater impulsive loads. *Experimental Mechanics*, 2009, 49(2): 257-275
- 85 Dharmasena KP, Wadley HNG, Williams K, et al. Response of metallic pyramidal lattice core sandwich panels to high intensity impulsive loading in air. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38(5): 275-289
- 86 McShane GJ, Radford DD, Deshpande VS, et al. The response of clamped sandwich plates with lattice cores subjected to shock loading. *European Journal of Mechanics—A Solids*, 2006, 25(2): 215-229
- 87 张钱城, 卢天健, 闫雷雷等. 一种点阵金属—泡沫铝复合材料的制备方法. 中国专利, 201110233384. 8. 2011-08-16
- 88 张钱城, 王博, 卢天健等. 一种波纹-铝蜂窝复合结构夹层板及其制备方法. 中国专利, 201210271402. 6. 2012-08-01
- 89 韩宾, 张钱城, 卢天健等. 一种多层菱形点阵金属—泡沫铝复合结构夹层板及其制备方法. 中国专利, 201210418669. 3. 2012-10-26
- 90 Ramasamy A, Hill AM, Masouros SD, et al. Evaluating the effect of vehicle modification in reducing injuries from landmine blasts. An analysis of 2212 incidents and its application for humanitarian purposes. *Accident Analysis & Prevention*, 2011, 43(5): 1878-1886
- 91 Chung Kim Yuen S, Langdon G, Nurick G, et al. Response of V-shape plates to localised blast load: experiments and numerical simulation. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 46(1): 97-109
- 92 Baker W, Cox P, Westine P, et al. *Explosion Hazards and Evaluation*. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Co. 1983
- 93 Anderson Jr CE, Behner T, Weiss CE, et al. Mine blast loading: experiments and simulations. ARL Research in Ballistic Protection Technologies Workshop, Herndon, 2009
- 94 Fai T, Delbressine F, Rauterberg M. Vehicle seat design: state of the art and recent development. In: Proc. of World Engineering Congress, Penang Malaysia, 2007
- 95 Dong YP, Lu ZH. Analysis and evaluation of an anti-shock seat with a multi-stage non-linear suspension for a tactical vehicle under a blast load. *Journal of Automobile Engineering*, 2012, 226(8): 1037-1047
- 96 Nilakantan G. Design and development of an energy absorbing seat and ballistic fabric material model to reduce crew injury caused by acceleration from mine/IED blast. [Master Thesis]. Ohio: University of Cincinnati, 2006
- 97 McAndrew B. Shock isolation parameters based on a damped harmonic oscillator model for mine blast protected seating. Army Research Laboratory, 2007
- 98 Gaudreault P, Bouamoul A, Durocher R, et al. Finite element modeling of light armoured vehicle welds heat affect zone subjected to an anti-vehicular blast landmine, a summary of the numerical model and field experiments. 22nd Int Symp Ballistics, Lancaster, 2005
- 99 Li QM, Meng H. Attenuation or enhancement—a one-dimensional analysis on shock transmission in the solid phase of a cellular material. *International Journal of Impact Engineering*, 2002, 27(10): 1049-1065
- 100 Christou GA, Young LR, Goel R, et al. Shock attenuation of PMMA sandwich panels filled with soda-lime glass beads: a fluid-structure interaction continuum model simulation. *International Journal of Impact Engineering*, 2012, 47(1): 48-59