

DOI: 10.11883/bzycj-2025-0040

等效模拟爆炸加载试验技术研究进展*

姚术健^{1,2}, 王延靖^{1,2}, 陈奕恺^{1,2}, 陈斐鹏^{1,2}, 王志富^{1,2}, 张 舵³

(1. 中南大学极端流体力学前沿科学中心, 湖南 长沙 410075;

2. 中南大学交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075;

3. 国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410075)

摘要: 随着全球恐怖主义和工业事故的增加, 对基础设施在爆炸冲击下的安全性研究变得尤为迫切。试验作为探究材料和结构在爆炸冲击下动力响应和损伤特性的关键手段, 它能安全、高效、准确地模拟爆炸冲击加载技术成为了该领域的研究热点与挑战。综述了模拟远场爆炸荷载的等效加载试验技术的研究进展, 包括炸药驱动激波管、高压气体驱动激波管、落锤冲击试验机和液压驱动模拟器等。这些技术在模拟爆炸冲击波方面各有优势和局限, 但都致力于提供一个安全、可控的试验环境, 以复现爆炸产生的高速气流和冲击波。通过对比分析, 揭示了各种技术模拟爆炸载荷的准确性、适用性和操作便利性等, 并讨论了它们在实际应用中的潜力和挑战。最后, 介绍了一种基于液气相变膨胀的新型模拟爆炸加载试验技术并展望了后续研究方向。

关键词: 等效加载; 激波管; 爆炸模拟器; 结构响应; 毁伤评估

中图分类号: O383.3

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

A review of equivalent loading test techniques for simulating explosion load

YAO Shujian^{1,2}, WANG Yanjing^{1,2}, CHEN Yikai^{1,2}, CHEN Feipeng^{1,2}, WANG Zhifu^{1,2}, ZHANG Duo³

(1. *Frontiers Science Center for Extreme Flows and Energies, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;*

2. *School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;*

3. *College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410075, Hunan, China)*

Abstract: Against the backdrop of rising global terrorism and industrial accidents, research on infrastructure safety under blast impact has become critically urgent. As a pivotal approach for investigating dynamic responses and damage characteristics of materials and structures subjected to explosive loading, the equivalent blast-loading techniques, which show safe, efficient, and accurate, have emerged as both a research frontier and challenge. This review synthesizes advancements in equivalent blast-loading techniques for far-field explosion simulation, encompassing explosive-driven shock tubes, high-pressure gas-driven shock tubes, drop-weight impact testing machines, and hydraulically-actuated simulators. While each technique exhibits distinct advantages and limitations in simulating blast shockwaves, all strive to establish controlled and secure experimental environments that reproduce high-velocity air flow fields and pressure waves generated by explosions. Through comparative assessment, their performance in load replication fidelity, applicability, and operational efficiency are elucidated, alongside discussions on implementation challenges and potential. Finally, a novel blast simulation technique leveraging liquid-gas phase-transition-driven expansion is introduced and the follow-up research directions are prospected.

Keywords: equivalent loading; shock tube; blast simulator; structural response; damage assessment

* 收稿日期: 2025-02-14; 修回日期: 2025-07-04

基金项目: 国家自然科学基金(12272414); 湖南省自然科学基金项目(2021JJ30786)

第一作者: 姚术健(1988—), 男, 博士, 教授, yaoshujian@126.com

通信作者: 张 舵(1977—), 男, 博士, 教授, duo.zhang@163.com

21 世纪以来, 针对外交使团、商业枢纽、政府机关和民用基础设施的恐怖袭击事件显著增加。与此同时, 工业领域(如石油化工、采矿、弹药库储存等)和民用领域(如瓦斯爆炸、烟花制造/储存/运输等)的意外爆炸事故也频繁发生。统计显示, 2012–2021 年期间, 我国记录了 102 起涉及民爆物品爆炸的伤亡事故, 造成 479 人不幸遇难^[1]。从结构安全的角度来看, 这些事故凸显了现有基础设施在面临高压、瞬时爆炸载荷作用时的脆弱性。因此, 研究结构和材料在爆炸荷载作用下的动态响应和损伤破坏机理, 提高防护措施效率以及人员和设备在发生故意或意外爆炸时的生存能力至关重要^[2-4]。

为实现上述目的, 国内外学者们进行了大量的研究, 提出了许多高效经济的抗爆设计方法并形成了相关规范文件, 如 UFC3-340-02^[5]、ASCE/SEI 59-11^[6] 和 CSA S850-12^[7] 等。UFC3-340-02^[5] 中指出爆炸本质上是一个能量快速释放过程, 对结构产生的冲击过载表现出高峰值、短持时的特点, 这与静态加载相比有显著的区别^[8]。发生爆轰时, 炸药朝周围介质(通常为空气)突然释放能量, 形成以超音速向各个方向径向传播的激波^[9], 其特点是在激波锋面上的所有气体动力学参数(例如压力、速度、密度、温度等)几乎瞬间上升。随着激波锋面和接触面远离装药的核心, 激波逐渐减速, 可能产生二次甚至三次激波, 这些激波之间存在复杂的相互作用, 直至压力恢复正常^[10]。相比于近场爆炸(在爆炸火球最大膨胀范围内, 入射超压大于 1 MPa 的区域)^[11-12], 远场爆炸的波动力学参数随着爆炸距离的增大而单调减小, 其持续时间更长、爆炸波的再现性更高, 且不涉及爆炸产物的膨胀和复杂的相互作用^[13]。

在远离爆炸源的任一点, 其理想的爆炸特征曲线如图 1^[14] 所示。当爆炸冲击波在空气中运动, 经过时间 t_a 到达结构表面, 产生反射。先前到达的分子又被后面移动分子进一步压缩, 在结构上产生反射的超压。这表现在结构表面的初始环境压力 p_0 几乎瞬时增加到峰值超压 p^+ 。随后, 压力接近指数降低, 其形状通常由 Friedlander 方程^[15] 或修正的 Friedlander 方程^[16-18] 决定, 在 $t = t_a + t_+$ 时刻回到环境压力。压力继续下降形成低于环境压力的负压区, 然后这个压力 p^- 在 $t = t_a + t_+ + t_-$ 时刻又回到环境压力。正向持续时间 t_+ 压力曲线下的面积为正脉冲 I_s^+ , 同理, 负向持续时间 t_- 内压力曲线与时间轴围成的面积表示负脉冲 I_s^- 。结合以上参数, 典型 Friedlander 方程可表示为:

$$p(t) = p^+ \left(1 - \frac{t}{t_+}\right) e^{-\frac{\alpha t}{t_+}} \quad (1)$$

式中: α 为波形参数, 始终为正, 其大小取决于超压峰值 p^+ ^[19]。值得注意的是, 无论是原始的或修正的 Friedlander 方程, 还是其他爆炸波预测方法^[20-22], 都忽略了负相激波和二次激波的潜在影响。尽管在 UFC 3-340-02^[5] 中涉及到了相关负相激波参数, 但所依赖的数据记录在持续时间和质量上并不充分, 一些记录显示出可疑的峰值压力读数, 影响了相关结果的计算, Bogosian 等^[23] 的研究也证明了这一点。此外, Ismail 等^[13] 和 Rigby 等^[14] 指出, 负相结果高度依赖于炸药的燃烧过程, 而炸药之间的燃烧过程本身是变化的, 因此很难对其结果进行量化。

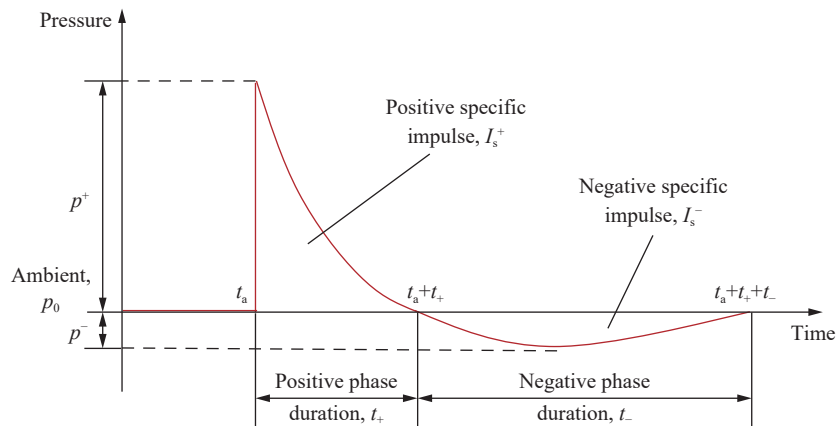


图 1 理想爆炸的压力-时间曲线^[14]

Fig. 1 Pressure-time history curve of ideal explosion^[14]

三硝基甲苯(TNT)当量是爆炸工程领域的重要量化概念,其本质是在相同爆炸距离下,单位质量炸药产生相同爆炸参数所需要的 TNT 质量。据此定义 TNT 当量因子 $E_{q,TNT}=W_{TNT}/W_{HE}$,其中 W_{TNT} 和 W_{HE} 分别为产生相同爆炸效果的 TNT 当量和实际炸药质量^[24]。根据 Hopkinson-Cranz 比例定律^[25],两个几何相似但尺寸不同的同种炸药在相同大气环境下爆炸,必然在相同的比例距离产生相似的冲击波。比例距离 $Z=R/W_{TNT}^{1/3}$,其中 R 为爆炸时目标点距离爆炸中心的距离。近年来,许多学者结合 TNT 当量因子和数值模拟技术开展了冲击波参数分析。Shin 等^[26]通过计算流体动力学方法模拟了球形 TNT 装药在自由场环境的爆炸,通过大量仿真数据拟合入射/反射的峰值超压、冲量及冲击波到达时间的多项式表达式,显著提高了近场区域参数的估算精度。王雅等^[27]借助 LS-DYNA 的仿真数据,建立了超压峰值的经验公式,并通过修正方程消除了不同经验模型的计算偏差。此类研究都基于对能量传递过程的等效,其核心目的是复现冲击波的 Friedlander 波形特征。

通常,为了研究结构和材料在爆炸荷载作用下的性能,理论计算和数值模拟无疑是有效的研究工具,Peng 等^[28]和 Dennis 等^[29]基于深度学习的爆炸荷载预测模型,使预测模型在不牺牲其快速性和准确性的前提下具备了一定的预测精度。但理论模型和数值模拟的预测准确性在很大程度上依赖于可靠的材料模型和精确的边界条件^[30-31]。然而,由于经验公式和 CFD(computational fluid dynamics)计算存在不确定性,以及新型建筑材料的不断涌现,现有的研究结果无法很好地表征结构爆炸响应特性,开展相应的爆炸试验研究显得尤为重要。目前,工程抗爆试验一般分为两类:现场试验^[32]和实验室爆炸波模拟试验^[33-34]。对于现场试验,在一次装药周围不同距离设置多个目标,炸药爆轰产生的强电磁辐射、大量带电粒子、固体颗粒、火光和高温使得测量环境变得极其复杂和严酷,传感器极易损坏,测量信号也容易受到严重干扰,大大降低了试验的可重复性,使得现场试验成本极高且效率低下^[35-38]。实验室爆炸波模拟试验提供了更好的控制条件,可以精确地设置和调整爆炸参数从而更准确地模拟爆炸波的特性和影响^[39]。其次,实验室模拟试验的可重复性高,可以多次进行相同条件下的试验,有助于收集可靠的数据并验证结果的一致性^[40],使其成为研究爆炸荷载作用下结构性能的主要方式。

本文总结目前关于模拟爆炸荷载的等效试验加载技术的研究现状,主要包括利用平面压力波加载的激波管和利用作动器加载的爆炸波模拟器。对各种技术的原理、适用范围、优缺点及其模拟爆炸荷载是否准确进行归纳和讨论,并提出未来发展方向。目前在实验室内精确模拟大当量或长持时的爆炸冲击、并拟合准确的爆炸超压-时程曲线的试验技术尚有很大难度,有待广大学者进一步研究。

1 激波管加载试验技术

在 1817 年,Davy^[41]在实验室内进行可燃物爆燃研究时,首次注意到管道中气体波动现象。而世界上第一个激波管是 Vieille^[42-43]于 1899 年研制成功的,该装置直径为 22 mm、通道长度为 6 m,在试验中成功产生了马赫数为 2 的激波。典型的激波管一般为具有圆形或矩形截面的长管,激波管被一个气密隔膜将容纳高压气体的驱动部分和包含低压区域的被驱动部分隔开,两端一般由固定的盖子所封闭,如图 2(a)^[44]所示。图 2 中, p 为压力, T 为温度, u 为速度, ρ 为密度, R 为稀疏波, C 为波阵面, S 为压缩波。工作时,通过一种特殊装置或机构使隔膜迅速打开(或破碎),高压室中工作气体冲入低压室内形成冲击波,而中心稀薄波则以相反的方向进入驱动部分,与此同时,两种气体之间由一个接触间断面分开^[45]。求解一维激波管问题是一个经典的黎曼问题,许多学者对此进行了探索^[46-47]。然而,这些求解通常基于一些理想化的假设,如流体被视为理想气体、忽略黏性损失和摩擦引起的能量损失等。尽管存在这些简化,这些研究为理解激波管内的复杂流动现象提供了重要的理论支持,并为后续的试验设计和数值模拟奠定了坚实的基础。

激波管作为一种试验设备,其核心价值是模拟爆轰物剧烈变化引起的空气压力波。随着相关研究的不断深入,已经形成了一个独立的研究领域。通过激波管模拟爆炸加载技术,研究人员能够在控制良好的环境中复现爆炸产生的高速气流,进而研究爆炸波的效应、材料在动态载荷下的响应以及冲击

波的传播规律。使用激波管模拟爆炸加载技术涉及到许多因素, 其中包括激波管几何设计、驱动气体和工作气体的选择等。这些因素的合理选择和设计是确保使用激波管模拟爆炸加载技术能够有效、安全、可控地进行试验研究的关键。根据驱动方式不同, 激波管可分为爆炸驱动和高压气体驱动两种。

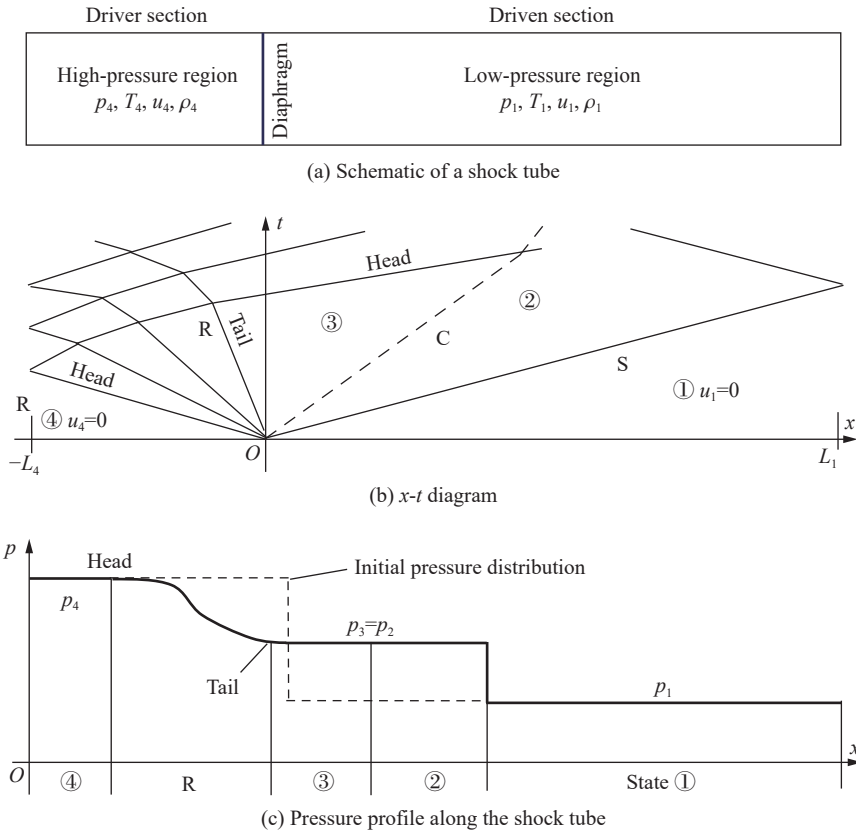


图 2 理想激波管内的事件^[44]

Fig. 2 Events in an ideal, classical shock tube^[44]

1.1 炸药驱动激波管

一般爆炸驱动激波管结构主要由驱动段、扩张段和试验段 3 部分组成, 如图 3^[48] 所示。驱动段前端设置爆炸点火装置, 通过调整所用的装药量, 来适应不同试验对冲击波性能参数的具体要求。试验段长度需满足不同试验工况要求: 一方面, 需保证激波阵面在到达试验效应物受力面前便形成相对稳定的气流层, 以达到平面波加载的条件; 另一方面, 为了阻止自试验段尾部开口端产生的向上游传播的稀疏波破坏爆炸波模拟效果, 也需要试验段有足够长度, 以便在稀疏波到达效应物前即完成模拟冲击波加载。

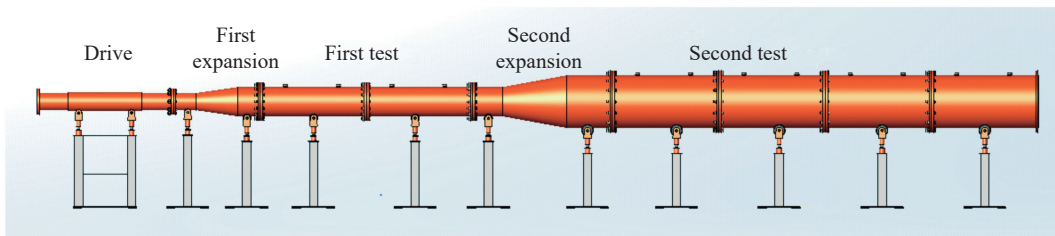


图 3 炸药驱动激波管^[48]

Fig. 3 Blast-driven shock tube^[48]

在结构冲击动态响应领域的研究中, 精确模拟爆炸荷载对材料的影响至关重要。Schimizza 等^[49] 制作了一种激波管, 利用炸药驱动气体, 对距离管口一定位置的试件施加特定的载荷。这种激波管产生的

载荷脉冲宽度,与大规模装药在远距离产生的爆炸效应相似。利用这一设施,对乙烯脘泡沫填充材料制成的夹层结构在爆炸冲击荷载下的缓冲性能进行了深入分析。胡洋等^[50]通过激波管模拟瓦斯爆炸事故,建立了一套中尺度瓦斯爆炸激波管道试验系统,通过测量瓦斯爆炸的压力及火焰传播数据,预测了瓦斯爆炸过程可能产生的灾害。此外,Louar 等^[30,51]通过炸药驱动激波管对铝板进行了一系列的试验,结合反演方法(inverse method)深入探讨了爆炸荷载作用下铝板的动态响应特性。他们通过 3D-DIC(three-dimensional digital image correlation)技术来测量铝板的全场变形,并与 Spranghers 等^[52-54]在自由空气爆炸的试验结果进行了对比,结果表明,与传统的自由空气爆炸相比,激波管试验能产生更高水平的超压和持续时间更长的压力脉冲,这一发现对于理解材料在极端爆炸环境下的力学行为具有重要意义。

1989 年,Zaleask 等^[55]设计了锥形激波管,用于美国海军研究实验室开展的相关冲击试验。以此为基础,Stewart 等^[56-58]使用 C4 炸药驱动 10°锥形激波管来近似空气爆炸环境,通过改变激波管测试段参数评估了不同配置对模拟自由场爆炸环境的影响。由图 4^[56]可知,使用外切方形截头,在锥形测试段能够最好地近似模拟自由场爆炸产生的冲击波环境,实现了较高的峰值压力和脉冲,与理论预测的 Friedlander 波形吻合良好。图 4 中,1 psi=6.895 kPa。郑监等^[59]研究了柱形装药条件下锥形水中爆炸激波管内的冲击波特性,结合 CFD 对不同圆锥角和不同柱形装药质量下锥形激波管内的冲击波传播过程进行了模拟。

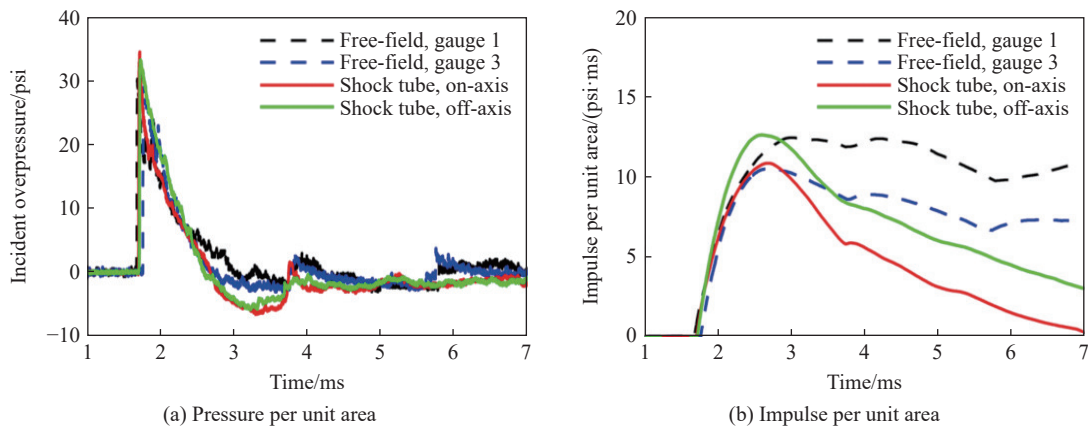


图 4 激波管出口处试验结果与自由场空气爆破试验结果对比^[56]

Fig. 4 Results of shock tube outlet test compared with those of free field air blasting test^[56]

为了降低试验成本,许多学者采用经验公式预测炸药驱动激波管的相关参数,并与试验结果进行了对比。张军等^[60]建立了炸药爆炸的多介质流动数值模型,总结了炸药驱动激波管内冲击波超压峰值与装药量、传播距离之间的关系,给出了直径为 2.5 m 的圆形激波管的超压预测公式。Guo 等^[61]将 BP(back propagation)神经网络引入到爆破峰值质点速度预测模型,利用惠州大亚湾实际爆破工程的监测数据对模型进行了训练和测试,并将模型预测结果与 7 种经验模型进行了对比。在此基础上,陈梓薇等^[62]建立了四层反向传播神经网络以预测爆炸用激波管试验段的峰值压力,其预测值与激波管爆炸试验的平均相对误差为 2.69%,能准确反映峰值压力与各影响因素之间的映射关系,节省了大量的人力和物力成本。

综上所述,炸药爆炸驱动的激波管作为传统的模拟爆炸荷载试验装置,以其卓越的可重复性和载荷分布的对称性,几十年来受到了大量学者的关注,为模拟远场爆炸产生的爆炸荷载提供了一种有效的试验手段。然而,在实际操作中它也面临着一些挑战,例如冲击波持续时间短、试验风险大、成本高、环境污染和重复性不足等问题。

1.2 高压气体驱动激波管

最初,高压气体驱动激波管是被设计来研究激波前后气体特性的,图 2(b)~(c)也说明了这一点。虽然高压气体驱动激波管在模拟爆炸冲击方面表现出色,被视为一种优秀的模拟器,但一个真正理想的模拟器应该能够精确复制远场爆炸产生的所有气动参数随时间的变化^[63]。高压气体驱动激波管在复制真

实爆炸环境的特性方面存在局限, Skotak 等^[64]筛选了 100 多篇冲击波相关的论文, 发现超过 97% 的文献报道了峰值超压这一参数。相比之下, 持续时间(51%)、冲量(18%)和采样频率(46%)的报道较少, 而超压上升时间基本上被忽略了, 仅占 2%。如果不仔细考虑所产生气体流动的特性, 爆炸模拟器可能会产生不正确、具有误导性的激波条件。而且, 在高压气体驱动激波管的常见设计中出现的流动问题(图 5)往往会引起各种流动异常^[65], 这也会导致试件的加载和响应结果具有欺骗性。

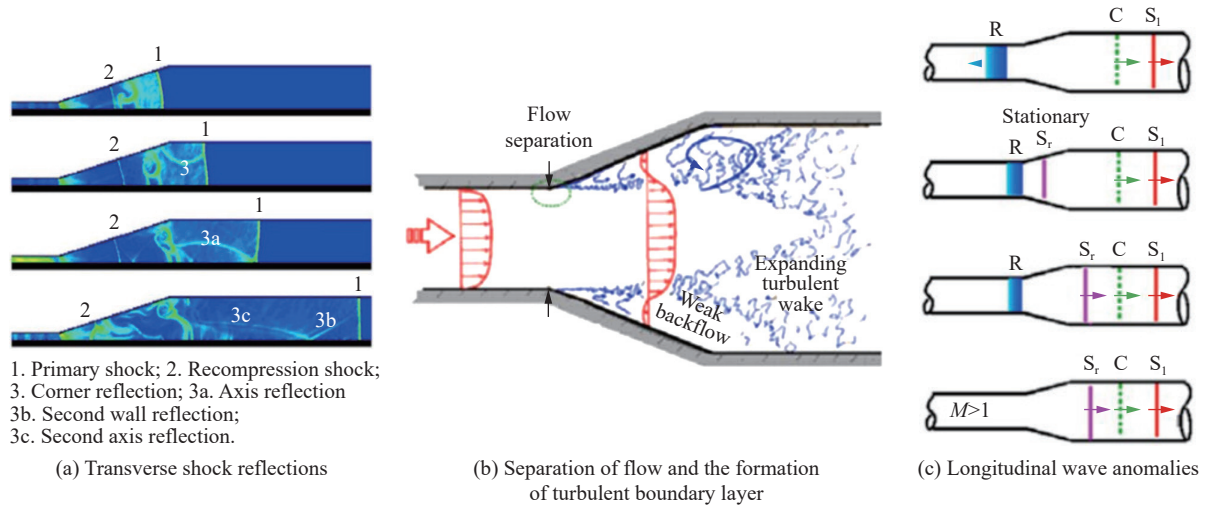


图 5 高压气体气动激波管各种流动异常^[65]

Fig. 5 Various flow anomalies of high-pressure gas pneumatic shock tube^[65]

气体驱动激波管系统以其安全性、可控性和可重复性等特点, 被广泛应用于结构冲击动态响应领域。加拿大渥太华大学的结构工程实验室配备的激波管系统^[66-67], 其驱动段长度在 0.305~5.185 m 之间可调节, 扩张段由直径为 0.597 m 的圆形截面扩张到 2.032 m×2.032 m 的方形截面。当冲击波到达膨胀段的后部时, 通风口自动打开, 将压力释放到大气中, 从而产生负相位, 并最大限度地减少管内发生的不必要的第 3 次反射。美国内布拉斯加大学林肯分校拥有的方形激波管如图 6(a)^[68]所示, 主要用于研究爆炸荷载引起的脑部损伤。驱动器部分长 295 mm、直径 101 mm, 过渡段的锥度为 5.9°, 以减少边界层与驱动段分离形成的湍流, 驱动截面 230 mm×230 mm, 长 6.2 m。使用氮气作为驱动气体, 进行 3 组重复试验, 结果如图 6(b)~(c)^[68]所示, 方管内不同测点位置的压力分布遵循 Friedlander 波形, 当冲击波离开管口后, 峰值超压急剧下降。Leblancd 等^[69-72]研制了一种圆锥形激波管, 用来模拟一种平面水下冲击波的扩散。通过该设备分别对玻璃纤维/环氧树脂复合板、玻璃纤维/乙烯基酯复合板和玻璃纤维/乙烯基酯弯曲复合板的冲击响应进行了研究, 采用 LS-DYNA 软件进行了有限元仿真并与实验结果进行了对比。Chennamsetty 等^[73]使用美国罗德岛大学的激波管装置研究了 Hastelloy®X 板在正常和倾斜冲击荷载下的动力学行为。该装置全长 8 m, 驱动部分内含高压氦气; 从动部分为渐缩段, 隔膜厚度为 0.254 mm。当气体压力差达到临界值时, 膜片破裂, 冲击波向下传播到从动部分, 穿过管口作用于靶板。周岳兰等^[39]为准确模拟空中爆炸冲击波特点, 对气体驱动激波管内压力脉冲演化特性进行了研究, 结合量纲分析, 建立了形成模拟空中爆炸冲击波所需的最小低压段长度, 以及所形成的激波峰值超压、正压持续时间等特征参量与激波管内压力、长度等参数之间的关系。

为准确模拟爆炸冲击荷载, 挪威科技大学的 Aune 等^[74-77]设计了如图 7 所示的气体驱动激波管装置。该装置能较好地模拟远场爆炸的正向脉冲的相关参数, 但从图 7(d)来看, 并没有产生正确的负向冲击或二次冲击。结合数值仿真与 DIC 技术, 总结了铝板和钢板在爆炸荷载作用下的响应特性。德国弗劳恩霍夫高速动力学研究所的 Stilz 等^[78]也设计与挪威科技大学类似的装置, 通过调整激波管的初始压力和高压段的长度来调节加载的冲击波强度, 可精确再现爆炸波均匀且垂直作用于靶板表面的工

况。Elveli 等^[79-80]利用该装置研究了强度-延性权衡对薄钢板在爆炸加载条件下的动态响应。研究结果显示,具有预成形缺陷的板材,特别是中等强度、高硬化指数的钢材,表现出优越的抗断裂性能。此外,预成形缺陷的几何形状对整体变形、抗裂纹扩展能力和断裂模式有显著影响。Li 等^[81]通过实验与数值

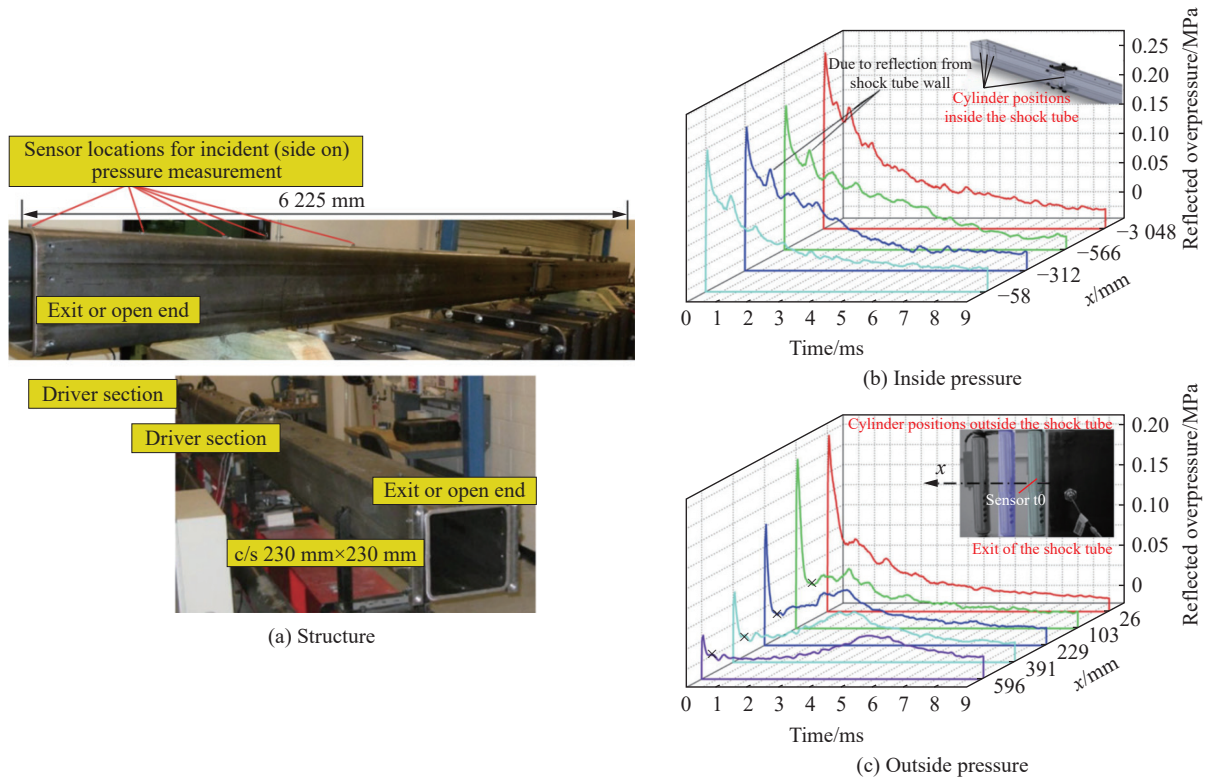


图 6 内布拉斯加大学林肯分校的方形激波管^[68]

Fig. 6 Square shock tube from University of Nebraska-Lincoln^[68]

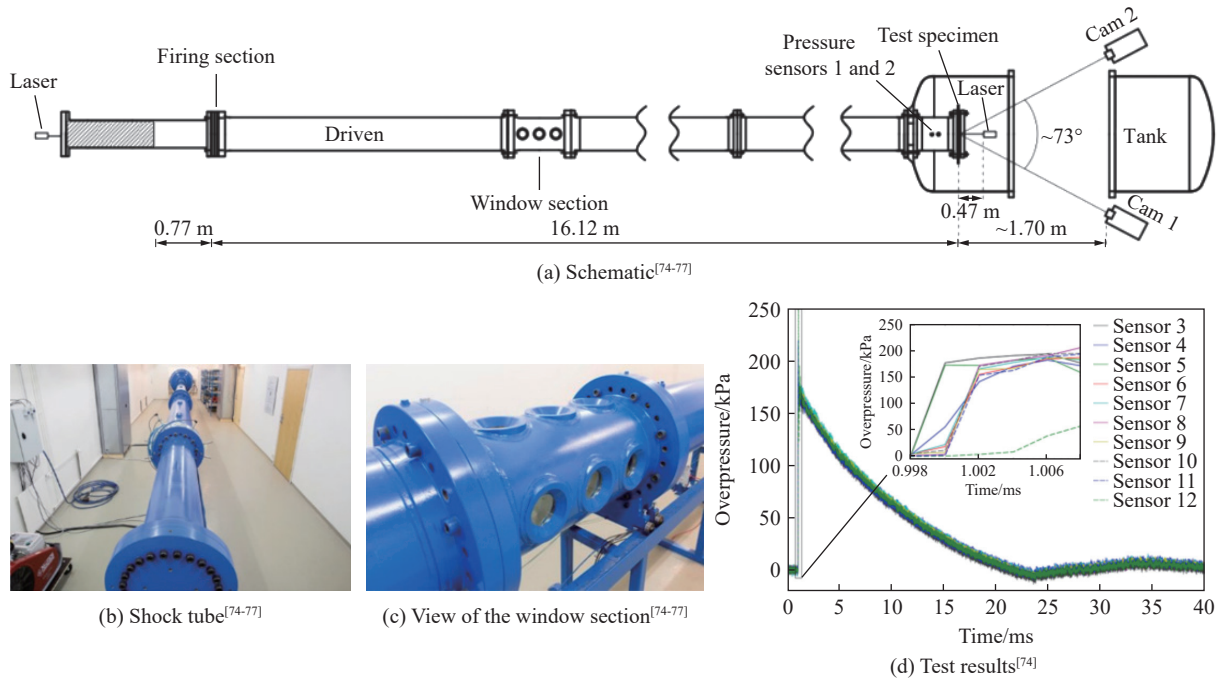


图 7 挪威科技大学的激波管设备^[74-77]

Fig. 7 Shock tube facility from Norwegian University of Science and Technology^[74-77]

模拟相结合的方法,研究了不同形状预制孔钢板在水下冲击波作用下的动态响应,分析了其损伤形态和裂纹扩展规律。为了研究爆炸冲击波直接导致的原发性损伤,陆军军医大学的王正国等^[82]在 20 世纪 80 年代研制了 BST(biological shock tube)系列生物型激波管。其中, BST- I 大型激波管总长 39 m,能够实现 10.3 MPa 的峰值超压加载。王峰等^[83]使用该装置对成年大鼠开展了冲击试验,试验结果显示,环境气压越低,冲击波对肺部的损伤越严重。在此基础上,袁丹凤等^[84]使用 BST- I 对幼年大鼠展开了相同的试验,发现幼年大鼠的肺组织血管更丰富,耐受冲击能力更强。中国科学技术大学空天飞行高温气动国家重点实验室的激波管^[85]获得了马赫数为 3.0 的强激波,通过驱动形式、膜片形式与结构设计的协同创新,实现了强激波的高效可控生成与界面演化机制的突破性观测。

更进一步地,为了生成与经典爆炸波形匹配的脉冲荷载,许多学者致力于研究激波管波形的控制方法。例如,加拿大渥太华大学的激波管^[86]和德国的 Blast-STAR 激波管^[87]均采用物理改变圆柱形驱动器的长度和体积的方法来控制模拟爆炸参数,获得不同的压力-冲量数据。尽管这种方法为试验室条件下波形的精确调控提供了可能,但其实际操作复杂且更换装置消耗的时间太长。澳大利亚卧龙岗大学的 NFPBS ABS 设施^[88-90]采用了一种创新的设计,如图 8 所示。驱动段采用渐扩的楔形轮廓,可以在炸药驱

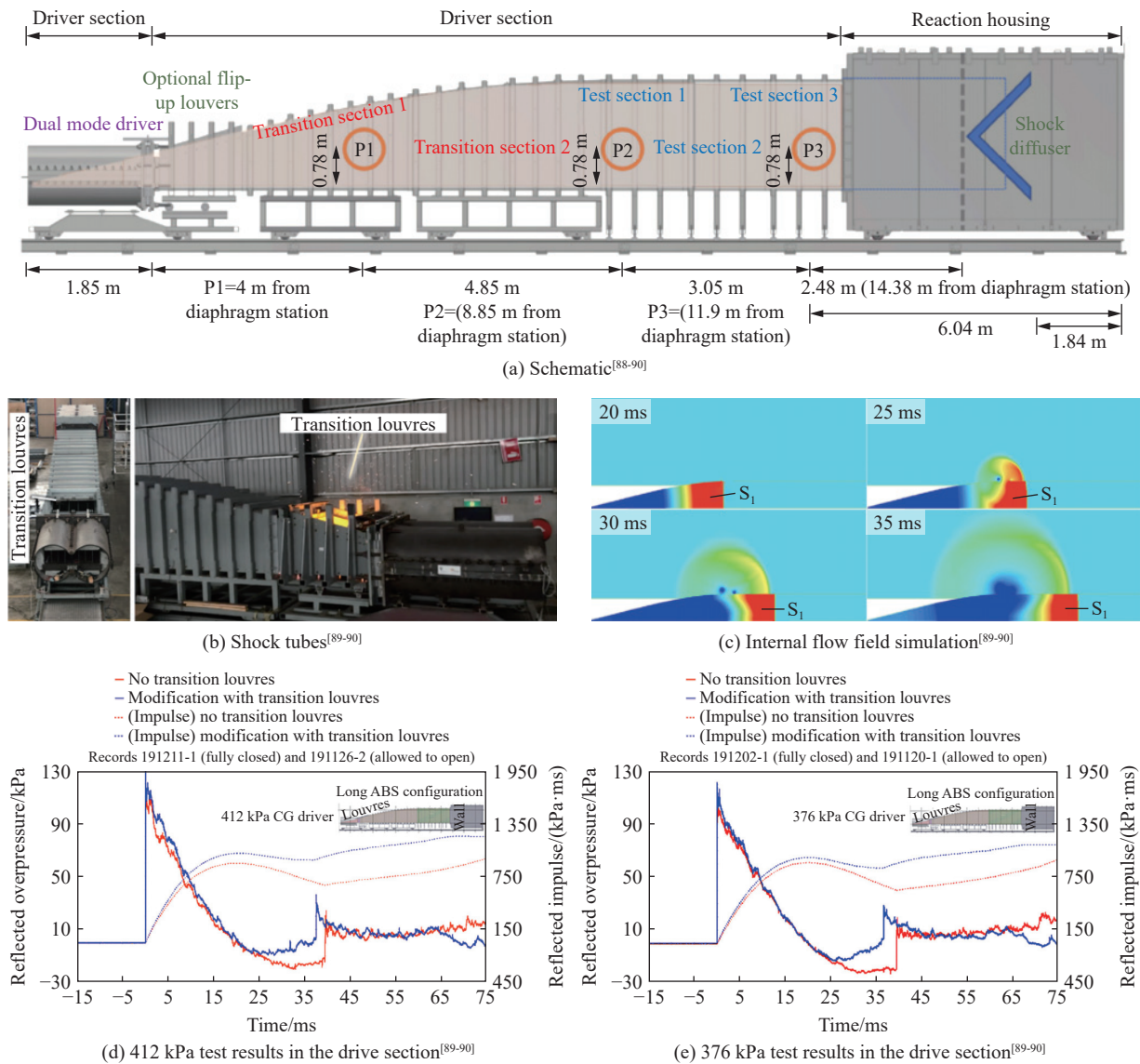


图 8 澳大利亚卧龙岗大学的 NFPBS ABS^[88-90]
 Fig. 8 NFPBS ABS, University of Wollongong, Australia^[88-90]

动和高压气体驱动模式下工作, 在受控的实验室环境中可以重现自由场爆炸的气体动力学参数, 通过对过渡段和试验段上方的百叶窗开口位置和大小精确控制, 实现了对冲击波形的有效调控。研究表明: 过渡段上游的开窗可调节峰值超压、正相持续时间、负相脉冲的大小, 降低二次冲击的影响; 试验段下游采用可控通风设计, 在不改变入射超压和反射超压的情况下, 提供了一种调节正相脉冲和持续时间方法。程帅等^[91] 则通过精细控制稀疏波和压缩波的反射与透射过程, 优化了冲击波的衰减特征, 使产生的冲击波在阶梯状衰减特征的基础上, 提前了各个压力阶梯的衰减时间, 提升了实验冲击波与标准爆炸波指数衰减过程的相似度, 从而实现了冲击波超压衰减历程的控制。

激波管膜片的几何参数和破裂行为对于确保模拟爆炸荷载能产生预期的冲击波特性至关重要^[92]。Andreotti 等^[93] 在研究双隔膜激波管装置性能时考虑了管端壁的压力损失, 该损失主要来自于管壁振动、有限管刚度、附面层和膜片开口机制, 其中, 膜片撕裂过程是最相关的耗散源, 图 9 展示了有限元模拟膜片开口过程的各个阶段。Houas 等^[94] 在研究激波管中冲击波传播的影响因素时, 使用铝箔材质的膜片在激波管中进行试验, 膜片处设置不同形状的开口的刚性支撑结构。研究发现: 不同开口面积的膜片都能形成激波, 而膜片开口面积越小, 形成的激波距离开口处越远, 激波强度也越低, 因此需要激波管膜片在试验中破开足够的面积。Kim 等^[95] 在激波管内进行了薄膜测试, 观测了金属和金属氧化物涂层表面的传热速率。在另一项研究中, Kim 等^[96] 将 4 个不同级别粗糙度的表面都涂上了钛和二氧化硅, 实验考察了钛表面粗糙度对氧催化的影响, 结果表明, 钛和二氧化硅涂层试样的氧重组效率随着表面粗糙度的提高而提高。

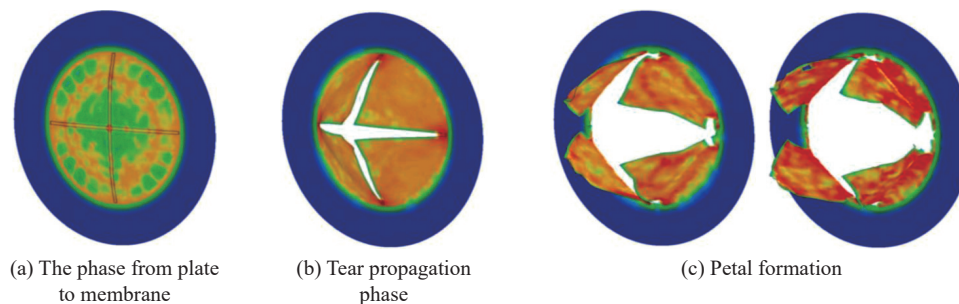


图 9 膜片破裂阶段

Fig. 9 Diaphragm rupture stages

综上, 相较于炸药爆轰驱动, 高压气体驱动的激波管更适合在实验室开展大量、可控的冲击加载试验。这类激波管因其内部的激波和膨胀波特性, 脉宽较长, 能有效模拟远场爆炸或核爆炸的载荷特性, 同时保障了良好的重复性。通过调整压缩气体的压力/温度、膜片的材质/厚度以及试验段的尺寸等参数, 可以精确地调节产生的冲击载荷。然而, 目前用于试验研究的压缩气体激波管在设计上通常注重激波的产生, 扩张段设计主要用于提高激波声速, 导致低压段出口的超压上限受限。此外, 由于高压室强度的限制, 压缩气体的压力/温度存在上限, 这限制了气体的内能和初始声速, 使得在模拟爆炸载荷时难以达到足够高的峰值压力。因此, 实际应用中能够模拟高压加载和适用于大尺寸试件的激波管较罕见, 表 1 列出了部分的激波管模拟爆炸试验装置。

表 1 激波管模拟爆炸加载试验装置

Table 1 Shock tube-based simulated explosion loading experimental setup

激波管	机构	尺寸	驱动方式	目的
EDST ^[30, 51]	比利时布鲁塞尔大学材料与结构力学系	内径168.2 mm, 长1 200 mm, 圆柱形激波管	C4炸药驱动, 无隔膜	研究材料在极端条件下的性能
炸药驱动激波管 ^[48, 91]	中国强脉冲辐射环境模拟与效应国家重点实验室	总长9.5 m, 驱动段长1.5 m内径0.14 m, 圆柱形激波管	TNT炸药驱动, 无隔膜	探究炸药驱动激波管内的冲击超压环境

表 1 (续)
Table 1 (Continued)

激波管	机构	尺寸	驱动方式	目的
锥形激波管 ^[56-58]	美国陆军研究实验室	长 193.04 cm, 圆锥角 17°, 起始直径 10.16 cm, 锥形激波管	C4 炸药驱动, 无隔膜	研究空气爆炸对防护材料相互作用和人员的影响
2 m 激波管 ^[66-67]	加拿大渥太华大学结构工程实验室	驱动段 0.305~5.185 m 可调, 扩张段为从 0.597 m 圆形扩张到 2.032 m 的方形截面	压缩空气驱动, 铝膜片分隔	用于测试结构部件在爆炸荷载下的响应
0.23 m 方形激波管 ^[68]	美国内布拉斯加大学林肯分校	驱动截面 0.23 m×0.23 m, 总长 6.2 m	氮气驱动, 单隔膜	爆炸荷载引起的脑部损伤的影响
SIMLab 激波管 (SSTF) ^[74-77]	挪威科技大学	圆柱形驱动段, 出口方形截面 0.3 m, 总长 18.355 m	压缩气体驱动, Melinex 片隔膜	研究复合材料和结构在水下爆炸荷载作用下的响应
BST-I 大型生物激波管 ^[82-83]	陆军军医大学	总长 39 m, 试验段直径 1 m	压缩空气驱动, 双夹模结构	研究爆炸冲击波对生物造成的原发性损伤
3 马赫激波管 ^[85]	中国科学技术大学空天飞行高温气动全国重点实验室	驱动段总长 13.16 m,	高压气体驱动, 聚酯薄膜	强激波诱导的 Richtmyer-Meshkov 不稳定性
Blast-STAR ^[86-87]	德国弗劳恩霍夫高速动力研究所	总长 22 m, 测试段为 3 m×3 m 的方形截面	高压气体驱动, 铝隔膜	分析部件对爆炸荷载的抵抗力, 指导建筑设计
NFPBS ABS ^[88-90]	澳大利亚卧龙岗大学	出口方形界面 1.5 m×2.0 m, 总长 19.79 m	高压气体或氧乙炔爆炸驱动, Valmex 隔膜	提供各种爆炸波加载状态, 探究军用和民用设施的爆炸毁伤特性

2 爆炸模拟器试验技术

2.1 落锤冲击试验机

在结构冲击响应试验中, 大型落锤式冲击试验机因其原理简单、调节方便和良好的环境适应性等优势而备受青睐。特别是在过去的二三十年间, 这类装置在美国、日本、欧洲以及中国经历了长足的发展, 并广泛应用于模拟爆炸荷载对结构构件力学响应的研究^[97-99]。试验过程中, 提升装置将落锤升至预定高度, 随后通过释放装置使落锤自由下落, 导轨系统能确保落锤沿垂直方向下落, 将落锤的势能转化为动能, 对试件进行局部冲击加载^[100]。

关于模拟爆炸荷载的冲击试验装置, 兰州理工大学的 Xian 等^[101]利用落锤试验台模拟爆炸冲击荷载, 对 18 种不同的方形 SRCFST (square steel-reinforced concrete-filled steel tubular) 试件进行了落锤冲击试验, 评估了试件在冲击过载下的响应特性。王宇等^[102]利用 Instron 公司生产的 9400 系列落锤冲击试验系统 (如图 10 所示), 研究了岩土在不同锤头冲击速度下的应力、速度和位移的响应规律, 进一步推导了落锤冲击荷载峰值应力和正压作用时间的计算公式。李腾飞等^[103]开发了一种新的基于落锤-弹簧碰撞原理的燃气爆炸荷载模拟装置及加载方法, 基于一维弹性碰撞理论建立了系统响应过程的运动方程, 并推导了载荷与时间之间的函数。程帅等^[104]基于落锤试验平台, 提出了一种通过液压原理产生半正弦波载荷的方法, 通过减小落锤质量、减小液压缸长度或增大液压缸截面积等方法可以获得持续时间较短、脉冲峰值较高的半正弦波载荷, 与爆炸冲击荷载的作用效果相似。但他们没有制造出实体装置, 其仿真结果有待进一步验证。

结合落锤冲击试验台原理, 跌落试验台也是试验室模拟爆炸冲击荷载的关键技术之一。任佳等^[105]针对防雷座椅台架试验, 提出了一种冲击波形模拟方法, 并建立了波形发生装置的设计与调试方法。他们给出了波形的设计原理、波形发生器设计方法, 并通过试验数据, 提出了波形的调试与修正方法, 验证了该方法的可行性和实用性。Bosch 等^[106]通过构建特定的跌落试验台, 完成了多型防雷座椅的乘员防护性能试验。Cheng 等^[107]比较了跌落试验和爆炸环境下防雷座椅对人员防护的异同点, 指出了采用跌

落试验方法评估防雷座椅的局限性。傅耀宇等^[108]通过设计跌落试验台,利用近似半正弦脉冲模拟爆炸冲击载荷,分析了加速度峰值和速度与假人损伤的相关性,结果表明,跌落试验能有效模拟车辆底部爆炸工况下防雷座椅的运动响应和假人损伤响应。

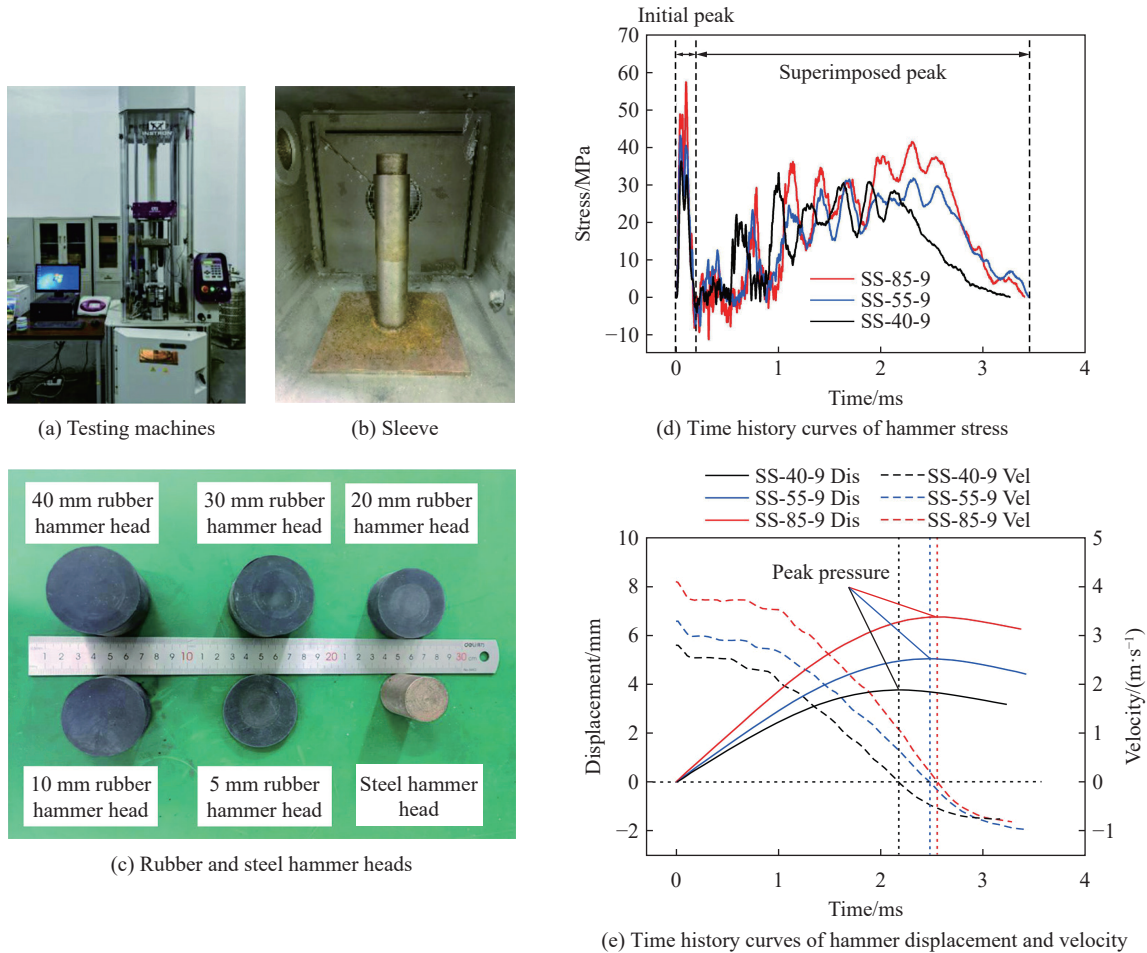


图 10 落锤冲击试验^[102]

Fig. 10 Drop hammer impact test^[102]

落锤试验装置因其操作便捷,被广泛应用于高校和研究实验室。这类装置不仅能模拟多种冲击载荷,通过适当调整和优化,还能复现部分爆炸载荷的特性。然而,落锤实验装置在模拟爆炸冲击载荷时存在一定的局限性,其荷载范围有限,难以精确调制出与实际爆炸冲击波匹配的载荷。尽管众多学者为此做出了诸多努力,但专门用于模拟爆炸载荷的落锤实验装置仍不多见,且这些装置难以产生持续时间较长的爆炸载荷,现有的试验技术和方法有待进一步改进。

2.2 液压驱动模拟器

2005年,美国加州大学和 MTS 公司联合开发了一种新的利用液压驱动模拟爆炸荷载的模拟器,简称 UCSD(the University of California, San Diego)模拟器^[109]。该装置的工作原理如图 11(a)^[110]所示,利用超高速液压驱动的计算机控制作动器,以精确的速度将动量传递给结构,从而产生类似实际爆炸中的爆炸荷载。Stewart 等^[111-113]采用不同的加载介质(如聚氨酯材料、水囊、金属质量块等)以匹配不同结构的响应需求,利用 UCSD 模拟器评估结构和机械组件在极端爆炸工况下的响应性能。在此基础上,Freidenberg 等^[114-115]对比了实际爆炸荷载与模拟器产生爆炸荷载的差异,结果表明,尽管 UCSD 爆炸模拟器能模拟类似实际爆炸荷载的冲击响应,但模拟的脉冲形状和持续时间与实际爆炸荷载仍存在显著

差异。此外,虽然模拟器的振荡噪声在高频振荡区域对积分得到的冲量没有影响,但噪声可能会干扰压力信号的稳定性。

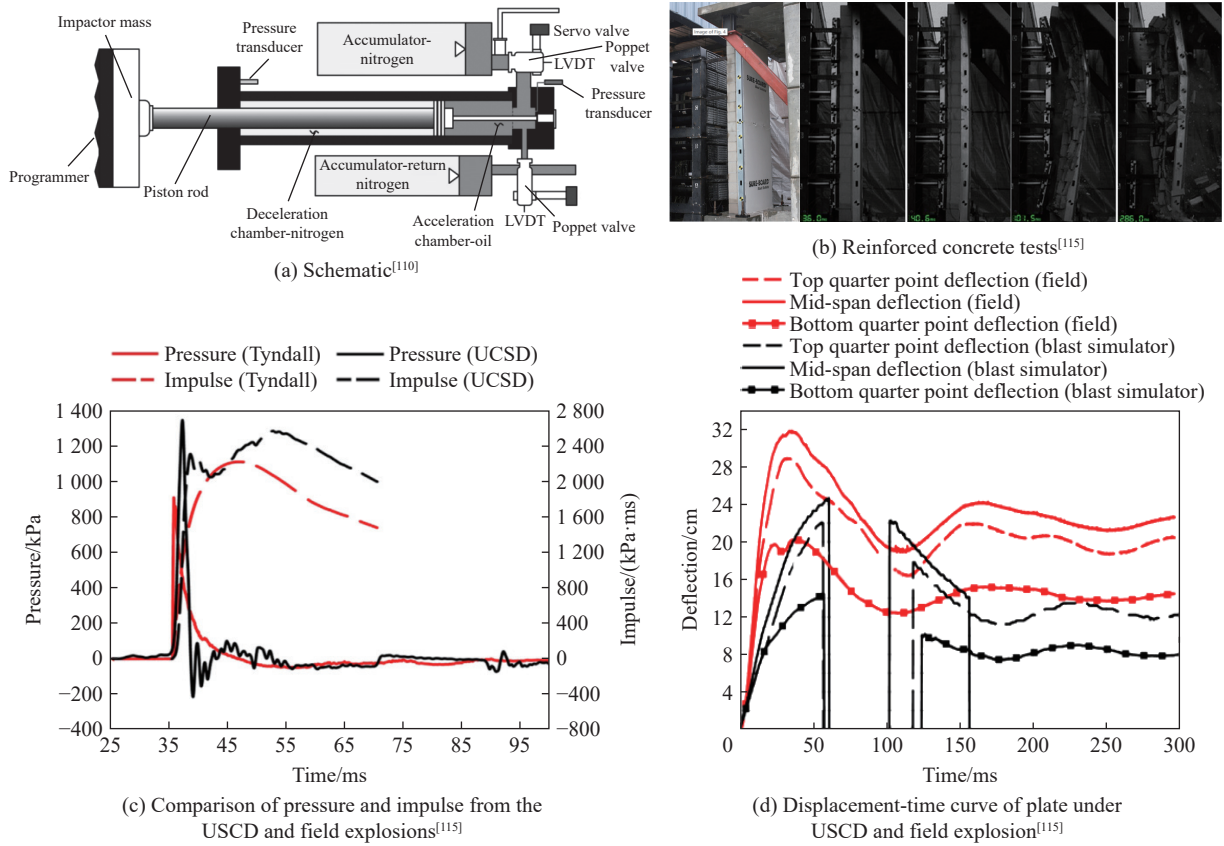
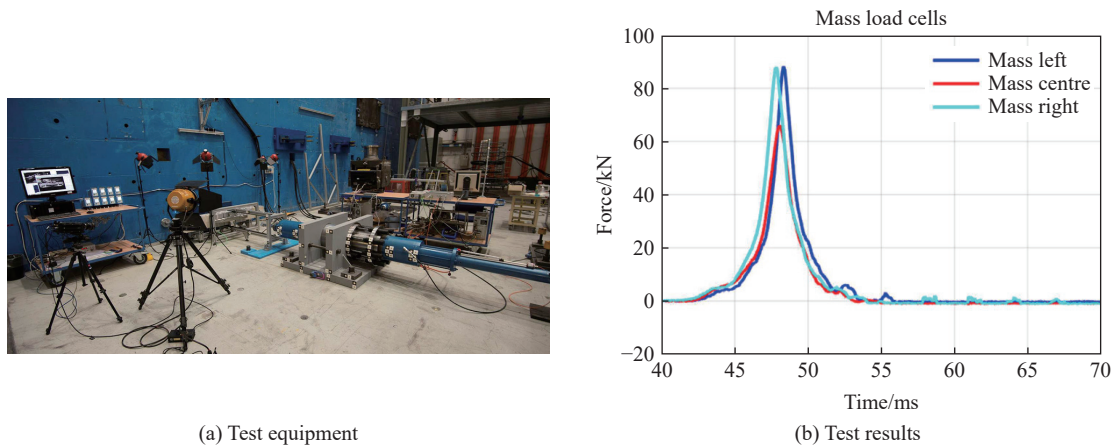


图 11 USCD 爆炸模拟器^[110, 115]
Fig. 11 USCD blast simulator^[110, 115]

受 UCSD 模拟器的启发,欧盟委员会联合研究中心安全防护研究所研制了如图 12 所示的爆炸模拟器^[116],通过液压缸拉动轴杆,压缩 Belleville 弹簧,在特定条件下使易碎螺栓突然断裂,活塞和轴杆迅速推动撞击质量块,实现对测试结构的短暂高压载荷。该模拟器的设计十分灵活,通过调整氮气压力及撞击器的质量、形状和速度,能复现不同特性的爆炸荷载。Xiong 等^[117]采用了不同厚度的平面橡胶和金字塔



(a) Test equipment (b) Test results

图 12 欧盟研制的液压驱动模拟器^[116]
Fig. 12 Hydraulically driven simulator developed by the European Union^[116]

形橡胶作为冲击缓冲材料,利用液压驱动的高速冲击装置对钢筋混凝土板进行了冲击,研究了冲击速度和橡胶厚度对冲击载荷的影响。总体来说,液压驱动模拟器能在一定程度上模拟爆炸荷载,但产生的载荷上升时间较长,衰减时间较短,且整体加载时间比实际爆炸荷载短,制约了液压驱动模拟器的进一步推广。

3 结论与展望

本文概述了模拟远场爆炸荷载的等效加载试验技术研究进展,包括炸药驱动激波管、高压气体驱动激波管、落锤冲击试验机和液压驱动模拟器等。讨论了每种技术的原理、适用范围、优缺点,并对它们模拟爆炸荷载的准确性进行了评估,详见表 2。其中,炸药驱动激波管因炸药的高能量密度适用于高强度爆炸模拟,但难以模拟较长的冲击波持续时间。高压气体驱动激波管因成本低、操作简便等优点被广泛应用于中等规模爆炸模拟,但它存在技术难度高和动压模拟精度不足等缺点。落锤冲击试验机和液压驱动模拟器提供了灵活的加载方式,可精确控制加载时间和强度。

表 2 比较各种模拟爆炸试验方法

Table 2 Comparison among various simulated explosion test methods

试验方法	优点	缺点	适用范围
炸药驱动激波管	模拟精度高,能够较好地复现爆炸冲击波的压力历程	冲击波脉管较短,安全性要求高,成本高,污染环境	高强度爆炸模拟,研究材料在极端条件下的性能
高压气体驱动激波管	安全性高,成本较低,操作简便	技术难度大,能量输出和脉冲持续时间调节范围有限	中等规模爆炸模拟,大量重复性模拟爆炸试验
落锤冲击试验机	操作简便,成本相对较低,重复性好	难模拟爆炸产生的复杂多维载荷,对于大尺度结构的模拟能力有限	结构部件的冲击响应测试,如桥梁、建筑结构等在局部冲击下的性能评估
液压驱动模拟器	能够精确控制加载的时间和强度,适用于模拟复杂载荷条件	设备成本高,技术难度大,产生的载荷上升时间较长,衰减时间较短	脉冲损伤占主要原因,对爆炸波精度要求不高环境

最近,中南大学提出了一种基于液气相变膨胀的新型模拟爆炸加载试验技术^[118],如图 13 所示。该技术通过二氧化碳相变装置释放的高温高压气体,经过激波管减压均压、平稳气态二氧化碳,产生脉冲压力波。根据等效爆炸荷载的需求调节激波管的几何尺寸、驱动段的介质物态参数,更加准确地模拟爆炸荷载。该技术具有结构简单、操作方便、成本较低、产生压力脉冲强等优点,对于模拟不同压力规模的爆炸加载试验具有重要意义。同时,该技术需要进一步开展的重点工作包括:优化激波管的结构设计,以适应更广泛的爆炸荷载模拟需求;结合实验数据和数值仿真,深入分析压力波的传播特性和作用机理;开展多尺度、多工况下的试验验证,以全面评估技术的可靠性和稳定性。通过这些工作,该技术有望在未来的爆炸冲击模拟领域发挥更积极的作用。

尽管现有技术在一定程度上能复现爆炸产生的冲击波,为结构和材料的抗爆设计提供了重要的试验数据,但每种技术都有局限。未来的研究将致力于提升模拟爆炸荷载技术的精度与安全性,降低成本和操作复杂程度;同时,开发高效的高压加载技术以适应大尺寸试件的需求,以及精确调制冲击波波形以更好地复现真实爆炸环境。通过这些努力,模拟技术将为结构抗爆设计提供更可靠的数据支持,有效应对安全挑战。

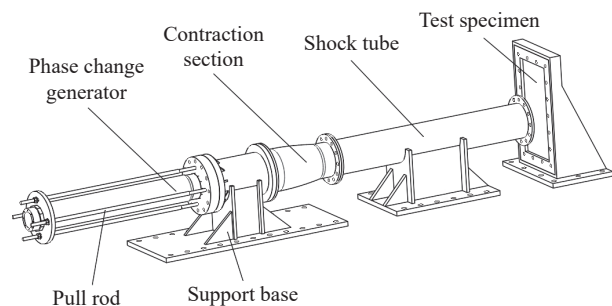


图 13 中南大学的液气相变驱动模拟器^[118]

Fig. 13 Liquid-gas phase change driving simulator at Central South University^[118]

参考文献:

- [1] 张飞燕, 张念思, 韩颖, 等. 近 10 年我国民爆物品爆炸事故统计及预测 [J]. *爆破*, 2022, 39(4): 192–200. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.028.
ZHANG F Y, ZHANG N S, HAN Y, et al. Statistics and prediction of civil explosive articles explosion accidents in China in recent decade [J]. *Blasting*, 2022, 39(4): 192–200. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.028.
- [2] 常笑康, 罗本永, 陈长海, 等. 近距离爆载荷作用下高韧钢的抗爆性能及影响因素研究 [J]. *高压物理学报*, 2024, 38(5): 054103. DOI: 10.11858/gywlb.20240732.
CHANG X K, LUO B Y, CHEN C H, et al. Study on the blast-resistant performance and influence factors of high-toughness steel subjected to close-range air-blasts [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(5): 054103. DOI: 10.11858/gywlb.20240732.
- [3] 赵春风, 张利, 李晓杰. 近场爆炸下波纹双钢板混凝土组合墙板的损伤破坏及抗爆性能 [J]. *高压物理学报*, 2024, 38(1): 014102. DOI: 10.11858/gywlb.20230727.
ZHAO C F, ZHANG L, LI X J. Damage failure and anti-blast performance of concrete-filled double steel corrugated-plate wall under near field explosion [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2024, 38(1): 014102. DOI: 10.11858/gywlb.20230727.
- [4] 毛致远, 段超伟, 宋浦, 等. 基于有效冲量的水下爆炸冲击波对平板结构的毁伤准则 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(2): 025103. DOI: 10.11858/gywlb.20220625.
MAO Z Y, DUAN C W, SONG P, et al. Criterion of plate structure damage caused by underwater explosion shock wave based on effective impulse [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(2): 025103. DOI: 10.11858/gywlb.20220625.
- [5] UFC. Structures to resist the effects of accidental explosions: UFC 3-340-02 [S]. Washington, DC, USA: UFC, 2008.
- [6] Canadian Standards Association. Design and assessment of buildings subjected to blast loads: S850-12 [S]. Toronto, Ontario, Canada: Canadian Standards Association, 2012.
- [7] American Society of Civil Engineers. Blast protection of buildings: ASCE/SEI 59-11 [S]. Reston, Virginia, USA: American Society of Civil Engineers, 2011.
- [8] 黄家蓉, 王幸, 周松柏. 飞行器地面模拟试验中电磁脉冲干扰分析与解决措施 [J]. *防护工程*, 2017, 39(1): 29–33.
HUANG J R, WANG X, ZHOU S B. Electromagnetic pulse interference analysis and solving method in the aircraft ground simulation test [J]. *Protective Engineering*, 2017, 39(1): 29–33.
- [9] BAKER W E. Explosions in air [M]. Austin: University of Texas Press, 1973: 55–136.
- [10] DEWEY J M. Measurement of the physical properties of blast waves [M]//IGRA O, SEILER F. *Experimental Methods of Shock Wave Research*. Cham: Springer, 2016: 53–86.
- [11] 孙远翔, 田俊宏. 近场水下爆炸载荷及舰船结构动态响应研究综述 [J]. *舰船科学技术*, 2019, 41(6): 1–8. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2019.06.001.
SUN Y X, TIAN J H. Review of near-field underwater explosion load and ship structure dynamic response [J]. *Ship Science and Technology*, 2019, 41(6): 1–8. DOI: 10.3404/j.issn.1672-7649.2019.06.001.
- [12] HE Z H, DU Z P, ZHANG L, et al. Damage mechanisms of full-scale ship under near-field underwater explosion [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 189: 110872. DOI: 10.1016/j.tws.2023.110872.
- [13] ISMAIL A, EZZELDIN M, EL-DAKHAKHNI W, et al. Blast load simulation using conical shock tube systems [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2020, 11(2): 135–158. DOI: 10.1177/2041419619858098.
- [14] RIGBY S E, TYAS A, BENNETT T, et al. The negative phase of the blast load [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2014, 5(1): 1–19. DOI: 10.1260/2041-4196.5.1.1.
- [15] FRIEDLANDER F G. The diffraction of sound pulses I. Diffraction by a semi-infinite plane [J]. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1946, 186(1006): 322–344. DOI: 10.1098/rspa.1946.0046.
- [16] 程祥, 杨明, 郭亚丽, 等. 修正的 Friedlander 方程指数衰减因子 [J]. *爆炸与冲击*, 2009, 29(4): 425–428. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0425-04.
CHENG X, YANG M, GUO Y L, et al. Analysis on an exponential attenuation factor in the modified Friedlander equation by overpressure tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(4): 425–428. DOI: 10.11883/1001-1455(2009)04-0425-04.

- [17] RUSHCHITSKY J J, YURCHUK V M. Distortion of a nonlinear elastic solitary plane wave with Friedlander profile [J]. *International Applied Mechanics*, 2022, 58(4): 389–397. DOI: 10.1007/s10778-022-01164-z.
- [18] DEWEY J M. The shape of the blast wave: studies of the Friedlander equation [C]//International Symposium on Military Aspects of Blast and Shock (MABS 21). Jerusalem, 2010: 1–9.
- [19] 杨科之, 刘盛. 空气冲击波传播和衰减研究进展 [J]. *防护工程*, 2020, 42(3): 1–10. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.03.001.
YANG K Z, LIU S. Progress of research on propagation and attenuation of air blast [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(3): 1–10. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1854.2020.03.001.
- [20] STEWART M G. Simplified calculation of air blast variability and reliability-based design load factors for spherical air burst and hemispherical surface burst explosions [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2022, 13(2): 144–160. DOI: 10.1177/20414196211043537.
- [21] SI D D, PAN Z F, ZHANG H P. Probabilistic assessment and expression of load factor design model for explosive blast loading [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2024, 242: 109802. DOI: 10.1016/j.res.2023.109802.
- [22] IOANNOU O, RIGOUTSOS G, VAMVATSIKOS D, et al. A baseline approach for probabilistic blast risk analysis of building cladding under external explosions [J]. *Structural Safety*, 2024, 109: 102472. DOI: 10.1016/j.strusafe.2024.102472.
- [23] BOGOSIAN D, FERRITTO J, SHI Y. Measuring uncertainty and conservatism in simplified blast models [C]// 30th Explosives Safety Seminar. Atlanta, Georgia, 2002.
- [24] XIAO W F, ANDRAE M, GEBBEKEN N. Air blast TNT equivalence concept for blast-resistant design [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, 185: 105871. DOI: 10.1016/j.ijmecsci.2020.105871.
- [25] RATCLIFF A, RIGBY S, CLARKE S, et al. A review of blast loading in the urban environment [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(9): 5349. DOI: 10.3390/app13095349. DOI: 10.3390/app13095349.
- [26] SHIN J, WHITTAKER A S, CORMIE D. Incident and normally reflected overpressure and impulse for detonations of spherical high explosives in free air [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(12): 04015057. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001305.
- [27] 王雅, 张宏, 陈翔. 大当量 TNT 空中爆炸超压的模拟与修正 [J]. *力学研究*, 2019, 8(4): 229–237. DOI: 10.12677/IJM.2019.84026.
WANG Y, ZHANG H, CHEN X. Simulation and correction of large equivalent TNT air explosion overpressure [J]. *International Journal of Mechanics Research*, 2019, 8(4): 229–237. DOI: 10.12677/IJM.2019.84026.
- [28] PENG W W, PAN M L, LENG C J, et al. Blast loading prediction in a typical urban environment based on Bayesian deep learning [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2025, 19(1): 2445765. DOI: 10.1080/19942060.2024.2445765.
- [29] DENNIS A A, RIGBY S E. The direction-encoded neural network: a machine learning approach to rapidly predict blast loading in obstructed environments [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2024, 15(3): 455–483. DOI: 10.1177/20414196231177364. DOI: 10.1177/20414196231177364.
- [30] LOUAR M A, BELKASSEM B, OUSJI H, et al. Explosive driven shock tube loading of aluminium plates: experimental study [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 86: 111–123. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.07.013.
- [31] 张云峰, 陈博, 魏欣, 等. 空气自由场爆炸冲击波数值建模及应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2023, 43(11): 114202. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0004.
ZHANG Y F, CHEN B, WEI X, et al. Numerical modeling and application of shock wave of free-field air explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(11): 114202. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0004.
- [32] BREWER T R, CRAWFORD J E, MORRILL K B, et al. Design, analysis, and testing of a blast-resistant building façade [J]. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2016, 4(3): 191–200. DOI: 10.2495/CMEM-V4-N3-191-200.
- [33] JACQUES E. Blast retrofit of reinforced concrete walls and slabs [D]. Ottawa: University of Ottawa, 2011: 40–122.
- [34] 张坤玉, 陈德, 吴昊. 高压气体驱动激波管的数值模拟与参数影响分析 [J]. *高压物理学报*, 2023, 37(3): 033301. DOI: 10.11858/gywlb.20220704.
ZHANG K Y, CHEN D, WU H. Numerical simulation and parametric analysis of high-pressure gas-driven shock tube [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2023, 37(3): 033301. DOI: 10.11858/gywlb.20220704.

- [35] PAYNE T, WILLIAMS A, WORFOLK T, et al. Large-scale explosive arena trials – is your target being loaded correctly? [J]. *Explosives Engineering*, 2016: 10–16.
- [36] 马亮亮, 吴昊. 爆炸作用下预应力 RC 梁桥的损伤评估 [J]. *工程力学*, 2025, 42(11): 159–172. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.0378.
- MA L L, WU H. Damage assessment of prestressed RC girderbridge under explosion [J]. *Engineering Mechanics*, 2025, 42(11): 159–172. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2023.05.0378.
- [37] RITCHIE C B, PACKER J A, SEICA M V, et al. Rectangular hollow sections subject to blast loading [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2017, 143(12): 04017167. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001922.
- [38] YAO S J, CHEN F P, WANG Y J, et al. Experimental and numerical investigation on the dynamic response and damage of large-scale multi-box structure under internal blast loading [J]. *Thin-Walled Structures*, 2023, 183: 110430. DOI: 10.1016/j.tws.2022.110430.
- [39] 周岳兰, 裴鲁, 龙仁荣, 等. 激波管内压力脉冲演化特性及模拟空爆冲击波的方法研究 [J]. *兵工学报*, 2023, 44(12): 3815–3825. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0284.
- ZHOU Y L, PEI L, LONG R R, et al. Study on the evolution characteristics of pressure pulse in shock tube and a method of simulating air explosion shock wave [J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(12): 3815–3825. DOI: 10.12382/bgxb.2023.0284.
- [40] KOCHAVI E, GRUNTMAN S, BEN-DOR G, et al. Design and construction of an in-laboratory novel blast wave simulator [J]. *Experimental Mechanics*, 2020, 60(8): 1149–1159. DOI: 10.1007/s11340-020-00650-0.
- [41] DAVY H. VII. Some researches on flame [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1817, 107: 45–76. DOI: 10.1098/rstl.1817.0008.
- [42] VIEILLE M. Étude sur le role des discontinuités dans les phénomènes de propagation [J]. *Journal of Physics: Theories and Applications*, 1900, 9(1): 621–644. DOI: 10.1051/JPHYSTAP:019000090062100.
- [43] VIEILLE P. Sur les discontinuités produites par la détente brusque de gaz comprimés [J]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 1889, 129: 1228.
- [44] IGRA O, SEILER F. Experimental methods of shock wave research [M]. Cham: Springer, 2016: 3–52. DOI: 10.1007/978-3-319-23745-9.
- [45] 汤文辉. 冲击波物理教程 [M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2016: 195–202.
- [46] COURANT R, FRIEDRICHS K O. Supersonic flow and shock waves [M]. New York: Springer, 1999: 83–99.
- [47] ANDERSON J D JR. Modern compressible flow: with historical perspective [M]. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [48] 殷文骏, 童念雪, 程帅, 等. 爆炸驱动激波管冲击波压力参数研究 [J]. *现代应用物理*, 2024, 15(2): 021003. DOI: 10.12061/j.issn.2905-6223.2024.021003.
- YIN W J, TONG N X, CHENG S, et al. Shock wave pressure parameters of blast-driven shock tube [J]. *Modern Applied Physics*, 2024, 15(2): 021003. DOI: 10.12061/j.issn.2905-6223.2024.021003.
- [49] 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.
- [50] 胡洋, 杨雨欣, 吴秋遐. 基于激波管系统对瓦斯爆炸的研究 [J]. *华北科技学院学报*, 2022, 19(4): 89–93. DOI: 10.19956/j.cnki.ncist.2022.04.015.
- HU Y, YANG Y X, WU Q X. Study on gas explosion based on shock tube system [J]. *Journal of North China Institute of Science and Technology*, 2022, 19(4): 89–93. DOI: 10.19956/j.cnki.ncist.2022.04.015.
- [51] LOUAR M A, BELKASSEM B, OUSJI H, et al. Estimation of the strain rate hardening of aluminium using an inverse method and blast loading [J]. *Journal of Dynamic Behavior of Materials*, 2017, 3(3): 347–361. DOI: 10.1007/s40870-017-0101-y.
- [52] SPRANGHERS K, VASILAKOS I, LECOMPTE D, et al. Full-field deformation measurements of aluminum plates under free air blast loading [J]. *Experimental Mechanics*, 2012, 52(9): 1371–1384. DOI: 10.1007/s11340-012-9593-5.
- [53] SPRANGHERS K, VASILAKOS I, LECOMPTE D, et al. Identification of the plastic behavior of aluminum plates under free air explosions using inverse methods and full-field measurements [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(1): 210–226. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2013.09.027.
- [54] SPRANGHERS K, VASILAKOS I, LECOMPTE D, et al. Numerical simulation and experimental validation of the dynamic response of aluminum plates under free air explosions [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 54: 83–95.

- DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2012.10.014.
- [55] ZALESK J F, POCHÉE L B. The shock test facility: an explosive-driven, water-filled conical shock tube [C]//Proceedings of a Conference Sponsored by the Department of Defense, the National Aeronautics and Space Administration, and the Department of Energy. Virginia Beach, 1989: 73–76.
- [56] STEWART J B, PECORA C. Explosively driven air blast in a conical shock tube [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2015, 86(3): 035108. DOI: 10.1063/1.4914898.
- [57] STEWART J B. Influence of explosively driven shock tube configuration on the mid-field blast environment [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1979(1): 160026. DOI: 10.1063/1.5045025.
- [58] STEWART J B. Approximating a free-field blast environment in the test section of an explosively driven conical shock tube [J]. *Shock Waves*, 2019, 29(2): 355–360. DOI: 10.1007/S00193-018-0811-7.
- [59] 郑监, 卢芳云, 陈荣. 柱形装药条件下锥形水中爆炸激波管内的冲击波特性 [J]. *爆炸与冲击*, 2021, 41(10): 103201. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0316.
- ZHENG J, LU F Y, CHEN R. Shock wave characteristics in a conical water explosion shock tube under cylindrical charge condition [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2021, 41(10): 103201. DOI: 10.11883/bzycj-2020-0316.
- [60] 张军, 黄含军, 王军评, 等. 炸药驱动式爆炸管的载荷计算 [J]. *装备环境工程*, 2021, 18(5): 21–27. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.004.
- ZHANG J, HUANG H J, WANG J P, et al. Simulation on the blast load inside the explosively driven shock tube [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(5): 21–27. DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.05.004.
- [61] GUO Q P, YANG S J, WANG Y C, et al. Prediction research for blasting peak particle velocity based on random GA-BP network group [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(15): 1351. DOI: 10.1007/s12517-022-10615-3.
- [62] 陈梓薇, 王仲琦, 曾令辉. 基于 BP 神经网络的爆炸用激波管峰值压力预测方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(5): 054101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0187.
- CHEN Z W, WANG Z Q, ZENG L H. A method for predicting peak pressure in an explosion shock tube based on BP neural network [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(5): 054101. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0187.
- [63] KANG Y, WANG J L, ZHANG S Z, et al. A review of the development of shock tubes for simulating blast waves [C]//2023 IEEE 16th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI). Harbin: IEEE, 2023: 416–425. DOI: 10.1109/ICEMI59194.2023.10269910.
- [64] SKOTAK M, ALAY E, CHANDRA N. On the accurate determination of shock wave time-pressure profile in the experimental models of blast-induced neurotrauma [J]. *Frontiers in Neurology*, 2018, 9: 52. DOI: 10.3389/fneur.2018.00052.
- [65] UY B, REMENNIKOV A, RITZEL D, et al. Development of the Australian National facility for physical blast simulation [C]//12th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures. Singapore, 2017: 15–16.
- [66] LLOYD A, JACQUES E, SAATCIOGLU M, et al. Capabilities of a shock tube to simulate blast loading on structures [J]. *Special Publication*, 2011, 281: 1–20. DOI: 10.14359/51683611.
- [67] LLOYD A, SAATCIOGLU M, PALERMO D. New shock tube testing facilities for simulated blast loading of structural and non-structural components [C]//2nd International Workshop on Performance, Protection & Strengthening of Structures under Extreme Loading. Hayama, 2009.
- [68] CHANDRA N, GANPULE S, KLEINSCHMIT N N, et al. Evolution of blast wave profiles in simulated air blasts: experiment and computational modeling [J]. *Shock Waves*, 2012, 22(5): 403–415. DOI: 10.1007/s00193-012-0399-2.
- [69] LEBLANC J, GARDNER N, SHUKLA A. Effect of polyurea coatings on the response of curved E-glass/vinyl ester composite panels to underwater explosive loading [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2013, 44(1): 565–574. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.02.038.
- [70] LEBLANC J, SHUKLA A. The effects of polyurea coatings on the underwater explosive response of composite plates [M]//GOPALAKRISHNAN S, RAJAPAKSE Y. Blast Mitigation Strategies in Marine Composite and Sandwich Structures. Singapore: Springer, 2018: 53–72. DOI: 10.1007/978-981-10-7170-6_3.
- [71] LEBLANC J M. Response of composite materials to dynamic and low temperature environments [D]. Rhode Island: University of Rhode Island, 2019: 52–58. DOI: 10.23860/thesis-leblanc-james-2019.
- [72] LEBLANC J, GAUCH E, JAVIER C, et al. The response of composite materials subjected to underwater explosive loading: experimental and computational studies [M]//LEE S W. Advances in Thick Section Composite and Sandwich Structures: an

- Anthology of ONR-Sponsored Research. Cham: Springer, 2020: 43–83. DOI: [10.1007/978-3-030-31065-3_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31065-3_2).
- [73] CHENNAMSETTY A R K, LEBLANC J, ABOTULA S, et al. Dynamic response of Hastelloy® X plates under oblique shocks: Experimental and numerical studies [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 85: 97–109. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2015.06.016](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2015.06.016).
- [74] AUNE V, FAGERHOLT E, LANGSETH M, et al. A shock tube facility to generate blast loading on structures [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2016, 7(3): 340–366. DOI: [10.1177/2041419616666236](https://doi.org/10.1177/2041419616666236).
- [75] AUNE V, VALSAMOS G, CASADEI F, et al. On the dynamic response of blast-loaded steel plates with and without pre-formed holes [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 108: 27–46. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2017.04.001](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.04.001).
- [76] AUNE V, VALSAMOS G, CASADEI F, et al. Numerical study on the structural response of blast-loaded thin aluminium and steel plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 99: 131–144. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2016.08.010](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2016.08.010).
- [77] AUNE V, VALSAMOS G, CASADEI F, et al. Fluid-structure interaction effects during the dynamic response of clamped thin steel plates exposed to blast loading [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2021, 195: 106263. DOI: [10.1016/j.ijmecsci.2020.106263](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.106263).
- [78] STOLZ A, FISCHER K, ROLLER C, et al. Dynamic bearing capacity of ductile concrete plates under blast loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 69: 25–38. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2014.02.008](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2014.02.008).
- [79] ELVELI B S, IDDBERG M B, BØRVIK T, et al. On the strength-ductility trade-off in thin blast-loaded steel plates with and without initial defects—an experimental study [J]. *Thin-Walled Structures*, 2022, 171: 108787. DOI: [10.1016/j.tws.2021.108787](https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108787).
- [80] ELVELI B S, BERSTAD T, BØRVIK T, et al. Performance of thin blast-loaded steel plates after ballistic impact from small-arms projectiles [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 173: 104437. DOI: [10.1016/j.ijimpeng.2022.104437](https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104437).
- [81] LI Y, JIANG X W, TANG Y, et al. Investigation on the dynamic response of steel plates with a pre-formed hole loaded by underwater shock wave [J]. *Thin-Walled Structures*, 2025, 210: 112926. DOI: [10.1016/j.tws.2025.112926](https://doi.org/10.1016/j.tws.2025.112926).
- [82] 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. DOI: [10.11883/1001-1455\(1993\)01-0077-7](https://doi.org/10.11883/1001-1455(1993)01-0077-7).
- 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. DOI: [10.11883/1001-1455\(1993\)01-0077-7](https://doi.org/10.11883/1001-1455(1993)01-0077-7).
- [83] 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](https://doi.org/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](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-4237.2008.06.026).
- [84] 袁丹凤, 杨傲, 麻超, 等. 冲击波强度与幼年大鼠肺冲击伤程度的量效关系 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2021, 38(6): 780–784. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2021.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2021.06.022).
- YUAN D F, YANG A, MA C, et al. Dose-effect relationship between shock wave intensity and blast lung injury in juvenile rats [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2021, 38(6): 780–784. DOI: [10.3969/j.issn.1005-202X.2021.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-202X.2021.06.022).
- [85] JIANG S S, CAI W, XIE J, et al. Realization of a shock-tube facility to study the Richtmyer-Meshkov instability driven by a strong shock wave [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2024, 95(8): 085114. DOI: [10.1063/5.0217768](https://doi.org/10.1063/5.0217768).
- [86] BURRELL R P, AOUBE H, SAATCIOGLU M. Response of SFRC columns under blast loads [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2015, 141(9): 04014209. DOI: [10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001186).
- [87] STOLZ A, MILLON O, KLOMFASS A. Analysis of the resistance of structural components to explosive loading by shock-tube tests and SDOF models [J]. *Chemical Engineering Transactions*, 2016, 48: 151–156. DOI: [10.3303/CET1648026](https://doi.org/10.3303/CET1648026).
- [88] GAN E C J, REMENNIKOV A, RITZEL D, et al. Approximating a far-field blast environment in an advanced blast simulator for explosion resistance testing [J]. *International Journal of Protective Structures*, 2020, 11(4): 468–493. DOI: [10.1177/2041419620911133](https://doi.org/10.1177/2041419620911133).
- [89] GAN E C J. Experimental and numerical investigation of shock wave propagation in an advanced blast simulator [D]. New South Wales: University of Wollongong, 2021: 89-179.
- [90] GAN E C J, REMENNIKOV A, RITZEL D. Blast waveform tailoring using controlled venting in blast simulators and shock tubes [J]. *Defence Technology*, 2024, 37: 14–26. DOI: [10.1016/j.dt.2023.11.026](https://doi.org/10.1016/j.dt.2023.11.026).
- [91] 程帅, 童念雪, 刘文祥, 等. 基于高压气体驱动的爆炸波模拟激波管冲击波衰减历程控制方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2024,

- 44(5): 052201. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0094.
- CHENG S, TONG N X, LIU W X, et al. A control method for attenuation history of shock wave generated by blast simulation shock tube based on high pressure gas driving technic [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(5): 052201. DOI: 10.11883/bzycj-2023-0094.
- [92] BALAN G S, RAJ S A. A review on shock tubes with multitudinous applications [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2023, 172: 104406. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2022.104406.
- [93] ANDREOTTI R, COLOMBO M, GUARDONE A, et al. Performance of a shock tube facility for impact response of structures [J]. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2015, 72: 53–66. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2015.02.010.
- [94] HOUAS L, BIAMINO L, MARIANI C, et al. The effects that changes in the diaphragm aperture have on the resulting shock tube flow [J]. *Shock Waves*, 2012, 22(4): 287–293. DOI: 10.1007/s00193-012-0372-0.
- [95] KIM I, PARK G. Experimental study of oxygen catalytic recombination on a smooth surface in a shock tube [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 156: 678–691. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.04.054.
- [96] KIM I, YANG Y, PARK G. Effect of titanium surface roughness on oxygen catalytic recombination in a shock tube [J]. *Acta Astronautica*, 2020, 166: 260–269. DOI: 10.1016/j.actaastro.2019.10.030.
- [97] HEITZER J. Dynamic interaction of a plate and an impactor [J]. *Computers & Structures*, 1996, 60(5): 837–848. DOI: 10.1016/0045-7949(95)00445-9.
- [98] KRAUTHAMMER T. Modern protective structures [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008: 24–103. DOI: 10.1201/9781420015423.
- [99] JONES N. Structural impact [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 377–424. DOI: 10.1017/CBO9780511820625.
- [100] 孙桂娟, 高伟亮, 刘瑞朝, 等. 爆炸近区荷载模拟试验技术研究进展 [J]. *防护工程*, 2019, 41(4): 66–73.
- SUN G J, GAO W L, LIU R Z, et al. Research progress of simulation test technology of load in near-field of explosion [J]. *Protective Engineering*, 2019, 41(4): 66–73.
- [101] XIAN W, CHEN W S, HAO H, et al. Experimental and numerical studies on square steel-reinforced concrete-filled steel tubular (SRCFST) members subjected to lateral impact [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 160: 107409. DOI: 10.1016/j.tws.2020.107409.
- [102] 王宇, 严鹏志, 范鹏贤. 岩土中爆炸冲击荷载的落锤模拟试验研究 [J]. *陆军工程大学学报*, 2023, 2(6): 60–67. DOI: 10.12018/j.issn.2097-0730.20230525001.
- WANG Y, YAN P Z, FAN P X. Physical simulation of explosion impact load in geomaterials by drop hammers [J]. *Journal of Army Engineering University of PLA*, 2023, 2(6): 60–67. DOI: 10.12018/j.issn.2097-0730.20230525001.
- [103] 李腾飞, 钟冬望, 何理, 等. 基于落锤-弹簧碰撞系统的燃气爆炸荷载模拟加载方法研究 [J]. *力学与实践*, 2024, 46(4): 796–802. DOI: 10.6052/1000-0879-23-461.
- LI T F, ZHONG D W, HE L, et al. Research on gas explosion load simulation loading method based on drop weight-spring collision system [J]. *Mechanics in Engineering*, 2024, 46(4): 796–802. DOI: 10.6052/1000-0879-23-461.
- [104] 程帅, 陈博, 刘文祥, 等. 基于落锤实验平台的爆炸荷载模拟装置原理性设计 [J]. *现代应用物理*, 2016, 7(4): 041002. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6223.2016.04.010.
- CHENG S, CHEN B, LIU W X, et al. Theoretical design of an explosive loading analogue device based on drop hammer test system [J]. *Modern Applied Physics*, 2016, 7(4): 041002. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6223.2016.04.010.
- [105] 任佳, 刘小川, 杨建波, 等. 防雷座椅台架试验冲击波形模拟技术 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(33): 13673–13679. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.33.023.
- REN J, LIU X C, YANG J B, et al. Waveform simulation technology for drop test of the mine protected seat [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(33): 13673–13679. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2020.33.023.
- [106] BOSCH K, HARRIS K, CLARK D, et al. Blast mitigation seat analysis-drop tower data review: SAE Technical Paper 2024-01-3496 [R]. Warren, Michigan, USA: SAE, 2014: 2. DOI: 10.4271/2024-01-3496.
- [107] CHENG M, DIONNE J P, MAKRIS A. On drop-tower test methodology for blast mitigation seat evaluation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2010, 37(12): 1180–1187. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.08.002.
- [108] 傅耀宇, 牛善田, 闫际宇, 等. 模拟爆炸冲击荷载的防雷座椅跌落试验研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2023, 44(6): 154–160. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.06.021.

- FU Y Y, NIU S T, YAN J Y, et al. Drop tests of lightning protection seats in simulation of explosion impact load [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2023, 44(6): 154–160. DOI: 10.11809/bqzbgcxb2023.06.021.
- [109] WOLFSONO J C. Blast damage mitigation of steel structures from near- contact charges [D]. San Diego: University of California, 2008: 30–75.
- [110] OESTERLE M G. Blast simulator wall tests: experimental methods and mitigation strategies for reinforced concrete and concrete masonry [D]. San Diego: University of California, 2009: 78–151.
- [111] STEWART L K. Experimental and computational methods for steel columns subjected to blast loading [J]. *WIT Transactions on The Built Environment*, 2012, 126: 157–168. DOI: 10.2495/SU120141.
- [112] STEWART L K, FREIDENBERG A, RODRIGUEZ-NIKL T, et al. Methodology and validation for blast and shock testing of structures using high-speed hydraulic actuators [J]. *Engineering Structures*, 2014, 70: 168–180. DOI: 10.1016/j.engstruct.2014.03.027.
- [113] STEWART L K. Computational modeling of steel columns subjected to experimentally simulated blasts [J]. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*, 2014, 2(3): 225–242. DOI: 10.2495/CMEM-V2-N3-235-242.
- [114] FREIDENBERG A, LEE C W, DURANT B, et al. Characterization of the blast simulator elastomer material using a pseudo-elastic rubber model [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2013, 60: 58–66. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.04.009.
- [115] FREIDENBERG A, AVIRAM A, STEWART L K, et al. Demonstration of tailored impact to achieve blast-like loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 71: 97–105. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2014.04.006.
- [116] PERONI M, SOLOMOS G, CAVERZAN A, et al. Blast simulator project: first tests on reinforced concrete beams [R]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2015. DOI: 10.2788/598353.
- [117] XIONG Z X, WANG W, YU G C, et al. Experimental and numerical study of non-explosive simulated blast loading on reinforced concrete slabs [J]. *Materials*, 2023, 16(12): 4410. DOI: 10.3390/ma16124410.
- [118] 姚术健, 王延靖, 陈奕恺, 等. 基于二氧化碳相变的模拟爆炸加载试验系统及方法: CN202411061136.3 [P]. 2024-10-22.
YAO S J, WANG Y J, CHEN Y K, et al. Simulated explosion loading test system and method based on carbon dioxide phase change: CN202411061136.3 [P]. 2024-10-22.

(责任编辑 王影)