

导弹发射车抗毁伤能力分析与评估技术研究综述

高钦和^{1*}, 黄通¹, 钱秉文², 沈飞³, 王冬¹, 高蕾¹

(1. 火箭军工程大学 导弹工程学院, 陕西 西安 710025; 2. 西北核技术研究院, 陕西 西安 710024;
3. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:现代战争日趋透明给导弹发射车战场生存带来了严峻挑战。围绕发射车的抗毁伤能力分析和评估技术,分析了发射车面临的毁伤威胁和毁伤作用机理,从抗毁伤能力评估应用的角度阐述了冲击波、动能、热和电磁四种毁伤类型的研究现状,提出了不同毁伤类型在抗毁伤能力分析和评估中的应用方向;基于易损性分析空间理论,总结了装备易损性分析的发展历程,认为从物理空间到性能空间的逻辑传递关系是现阶段发射车易损性分析的核心所在,并从物理判据、性能判据和分级标准介绍了易损性判据的研究动态,提出了发射车易损性判据的关键;明确阐述了发射车抗毁伤能力的研究概念和分析方法面临的主要问题,研究结论可以为导弹发射车抗毁伤能力分析和评估相关研究提供参考。

关键词:毁伤威胁;作用机理;易损性分析空间;抗毁伤能力

中图分类号:O389 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):

文章编号:1001-2486(2024)02-182-15



听语音
与作者互动
聊科研

Technical research review on analysis and evaluation of anti-damage capability for missile launching vehicle

GAO Qinhe^{1*}, HUANG Tong¹, QIAN Bingwen², SHEN Fei³, WANG Dong¹, GAO Lei¹

(1. College of Missile Engineering, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China;

3. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: Increasing transparency of modern warfare has brought serious challenges to the survival of missile launching vehicle on the battlefield. Around the launcher anti-damage ability of analysis and evaluation technology, the threat of damage and damage mechanism faced by launcher were analyzed, current research status of four types of damage (shock wave, kinetic energy, thermal, and electromagnetic) from the perspective of the application of anti-damage capability assessment were elaborated, and different damage types in the evaluation of anti-damage capability and application directions in the analysis were putted forward; based on the vulnerability analysis space theory, the development process of equipment vulnerability analysis was summarized. It was considered that the logical transfer relationship from physical space to performance space was the key to the vulnerability analysis of launchers at present. Research trends of vulnerability criteria were introduced from the physical criteria, performance criteria and classification criteria, and the key criteria for vulnerability of launchers was proposed. Research concept and the main problems faced by analytical methods of the anti-damage capability of the launcher were explicitly described. Research conclusions can provide references for the analysis and evaluate related research of the anti-damage capability of the missile launching vehicle.

Keywords: mutilation threat; mechanism of action; vulnerability analysis space; anti-damage capability

随着智能信息化的不断发展,现代战争的维度和效率发生了巨大的改变,战争维度不再局限于对峙前沿,战争效率和打击反应也快速提高。导弹发射车作为执行重要作战任务的特种装备,担负着导弹武器的储存、运输和发射的重要功能,通常部署在远离对峙前沿的隐蔽纵深地域。然

而,近年来随着各类先进侦察和探测技术的快速发展,加之导弹发射车原本的高分辨典型特征,使得发射车在现代战争中被敌方侦察发现的概率增大,同时敌方各种远程精确制导运载体携带高性能先进战斗部,也给发射车在战场环境中的生存能力带来了严峻挑战。因此,研究发射车在战场

收稿日期:2021-10-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51905541);陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2020JQ487);陕西省高校科协青年人才托举计划资助项目(20190412)

*第一作者:高钦和(1968—),男,山东济宁人,教授,博士,博士生导师,E-mail:qhga0201@163.com

毁伤威胁作用下的抗毁伤能力成为提升发射车战场生存能力的迫切需求。

导弹发射车抗毁伤能力分析与评估技术是研究在毁伤威胁作用下发射车结构毁伤响应计算方法、抗毁伤防护设计方法以及抗毁伤程度评估方法的一门科学,涉及发射车结构力学和结构动力学以及爆炸力学等诸多学科交叉融合。如果能在进入作战区域之前,预先确定发射车的抗毁伤概率和生存概率,这不仅可以为指挥员决策提供辅助参考,同时也可以为武器装备的防护设计进行优化。导弹发射车抗毁伤能力分析与评估技术按照研究过程可以分为发射车面临的毁伤威胁和作用机理、发射车易损性分析和发射车抗毁伤能力评估三个方面。其中,毁伤威胁和作用机理是围绕战斗部毁伤威力场相关进行研究;易损性分析是基于发射车自身设计属性研究结构破坏和功能损失的逻辑关系;抗毁伤能力评估则是采用理论建模或数值模拟以及试验等方式对毁伤过程和抗毁伤效能进行分析计算和评估。

本文围绕导弹发射车的抗毁伤能力分析和评估技术,分别从发射车面临的毁伤威胁和作用机理、易损性分析和抗毁伤能力评估三方面进行阐述和梳理,分析发射车抗毁伤能力分析与评估技术发展面临的主要问题,以期提出抗毁伤能力分析与评估技术的研究需求,为发射车抗毁伤能力的后续研究提供相应参考。

1 发射车面临的毁伤威胁与作用机理

1.1 毁伤威胁与先进战斗部技术发展动态

导弹发射车在战场环境中面临的毁伤威胁主要来自敌方所配属的各类型远程打击战斗部。随着现代军工科技和作战理念的快速发展,各种先进战斗部技术也不断升级和完善,在核对抗日趋激烈的境况下,高科技常规武器威胁也越发多样,采用精确制导运载体携带的各类先进战斗部等毁伤威胁不断涌现并快速发展^[1]。根据毁伤效果可以将发射车面临的毁伤威胁分为三类:核战斗部、常规战斗部和特种战斗部。

1.1.1 核战斗部

核武器作为一种战略威慑武器在使用的开始就展现了巨大的毁伤能力,但这巨大的毁伤能力也进一步限制了核武器在后来战争中的使用,成为拥核国家战争冲突扩大化的警戒线。然而近年来随着国际局势的改变,世界各军事强国又开始重新审视核武器在大国冲突中的重要地位,特别是战术级核武器技术的快速发展,使得核武器在

未来战争中使用的可能性极大提高^[2]。核战斗部的毁伤类型主要包括冲击波毁伤、热毁伤和电磁毁伤。其中,冲击波毁伤是核战斗部的主要毁伤模式,其能量占核爆总能量的55%,冲击波动压和超压是导弹发射车面临的主要毁伤威胁。

美军采用洲际弹道导弹投送的陆基核武器主要是“民兵-Ⅲ”洲际弹道导弹携带的一枚30万t三硝基甲苯(trinitrotoluene, TNT)爆炸当量级的W87型核弹头或33.5万t TNT爆炸当量级的W78型核弹头,美国空军已向波音公司和诺斯罗普·格鲁曼公司授予开展下一代洲际弹道导弹“陆基战略威慑”(ground based strategic deterrent, GBSD)的研究计划,预期于2029年前后开始替换“民兵-Ⅲ”洲际弹道导弹,GBSD能够携带单个或多个核弹头,新弹头的设计以W87为原型,并配置Mk21A再入飞行器;其采用潜射弹道导弹投送的海基核武器主要是“三叉戟-Ⅱ/D5LE”潜射弹道导弹,配属了9万t TNT爆炸当量级的W76-1型核弹头或45.5万t TNT爆炸当量级的W88型核弹头,W76-1型核弹头爆炸当量低,但使用安全性较高,目前美军已经启动爆炸当量更低的5000~7000t的W76-2型低当量核弹头的研发生产工作;其采用战略轰炸机投送的空基核武器主要是B-2A和B-52H两型战略轰炸机,配属爆炸当量在1~5万t级可调的B61-7、B61-11和B83-1等重力核炸弹,以及采用AGM-86B空射巡航导弹搭载的20万t TNT爆炸当量级的W80-1型核弹头,同时,美国空军正在研究一种新型远程防区外导弹(long range standoff missile, LRSO),并计划于2030年开始使用LRSO代替现役的AGM-86B,LRSO将配属15万t TNT爆炸当量级的W80-4型核弹头^[3]。美军在核武器的发展中不再以更大的爆炸当量为重点,转而以更远的射程,更精确的打击精度,更通用化的投送方式为发展目标。低当量的核武器虽然能够在一定程度上减少对导弹发射车的毁伤效应,但增加了未来战争中核冲突的风险。

1.1.2 常规战斗部

具有精确制导能力的非核化的中近程弹道导弹、巡航导弹、增程火箭弹、航空炸弹、制导炮弹以及单兵火箭筒等常规毁伤武器在现代战争中承担着打击压制对方火力体系的作战任务,是核威慑下的现代常规战争的主要作战力量。近年来,在各地武装冲突和各类对抗演习的需求和刺激下,常规毁伤武器取得了长足发展,超高速武

器^[4]和超强毁伤技术^[5]是常规毁伤武器发展的典型代表。2019年12月俄罗斯首批“先锋”高超声速导弹列装,开始执行战斗执勤任务,标志着俄罗斯率先实现了高超声速武器的实战部署。“先锋”导弹属于陆基助推滑翔弹,其试验飞行速度已经达到了27马赫,随着“匕首”高超声速空射弹道导弹和“锆石”高超声速吸气巡航导弹的不断试验和发展,俄罗斯在超高声速武器方面居于国际领先水平。为了实现短期内尽快列装,美军也加快了高超声速武器的研制进度,美军主要高超声速武器的研发项目如表1所示^[4]。非核化的高超声速武器能够高效突破敌方的防御体系,进行精准的定点打击,其所具备的常规战略威慑效果对国际军事力量格局产生了深远的影响。同时也从根本上威胁到处于战略后方的导弹发射车的生存环境。

表1 美军主要高超声速武器的研发项目^[4]Tab.1 The U. S. military's major hypersonic weapons development program^[4]

研制时间	武器类型	型号项目	研发部门
2006年	助推滑翔	AHW ^①	陆军
2013年	吸气巡航	HAWC ^②	空军
2014年	助推滑翔	TBG ^③	空军
2017年	助推滑翔	ARRW ^④	空军
2019年	助推滑翔	LRHW ^⑤	陆军

注:①先进高超声速武器(advanced hypersonic weapon,AHW)。

②高超音速吸气式武器概念(hypersonic air-breathing weapon concept,HAWC)。

③战术增强滑翔导弹(tactical boost glide missile,TBG)。

④空中发射快速反应武器(air-launched rapid response weapon,ARRW)。

⑤远程高超声速武器(long-range hypersonic weapon,LRHW)。

美军始终坚持将先进毁伤技术作为国家安全的战略核心,长期大力投资以推动高能物质和毁伤技术的发展,其国家宇航局兰利研究中心首席科学家Dennis Bushnell曾预测,到2025年亚稳态纳米材料、气相爆轰材料、高张力键能释放材料将分别使弹药威力达到6倍、15倍和100倍TNT爆炸当量,彻底改变武器性能,美军已经率先合成表征了金属氢材料,领先世界^[5]。超强毁伤技术作为常规毁伤技术的提升,能够催生出新型超级毁伤武器,从而对发射车的防护提出更高的要求。

此外,面向隐蔽工事的温压战斗部^[6]也是发射车生存的主要威胁,俄罗斯继承了苏联最早发展温压武器的特点,目前已经发展形成了包括单

兵便携式温压火箭弹、多口径温压榴弹等战术级温压武器;美军则装备有既适合攻击地面目标的大口径温压航空炸弹,也有适合攻击地下硬目标的温压钻地炸弹,温压武器对于坑道作战的导弹发射车具有极大的威胁。

1.1.3 特种战斗部

随着现代科技发展和作战理念的变化,在爆炸冲击波和动能侵彻等常规毁伤之外,主要发展形成了面向电子对抗的电磁脉冲武器^[7]等特种毁伤武器。近年来随着战场信息环境和作战理念的发展,特种毁伤武器逐渐成为现代战争的重要组成部分,向着常规化快速迈进。电磁脉冲武器的毁伤作用主要是对电子设备进行高压击穿、器件烧毁、电涌冲击和瞬间干扰,使其丧失作战能力,电磁脉冲武器可以分为高空核电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse,HEMP)、高功率微波(high-power microwave,HPM)、超宽带微波(ultra-wideband,UWB)武器和电磁脉冲炸弹(electromagnetic bomb,E-bomb)。

除了磁爆压缩电磁脉冲炸弹以外,高功率微波武器也被美军认定为一项能够改变未来战争规则的先进技术,近年来连续推出了多种类型的高功率微波武器。采用B-52H发射的反电子高功率微波先进导弹项目(counter-electronics high-powered microwave advanced missile project,CHAMP)是其典型代表,CHAMP能够低空突入敌方空域辐射高功率脉冲,烧毁芯片等电子部件,使敌方电子设备失效,这对现阶段高度信息化和自动化发展的导弹发射车产生了重要的影响^[7]。

1.2 毁伤类型与作用机理发展动态

各类型毁伤威胁的战斗部,如核战斗部、常规战斗部和特种战斗部,对发射车的毁伤类型一般可分为四种:冲击波毁伤、动能毁伤、热毁伤和电磁毁伤。

1.2.1 冲击波毁伤

冲击波毁伤是指由爆炸产生的高温高压产物急剧膨胀,将周围空气从原来位置迅速排挤出去并强烈压缩,形成以超声速运动、状态参数有突跃变化的高压脉冲波对武器装备的破坏效应^[8]。冲击波毁伤作用主要取决于冲击波超压、冲击波动压和冲击波作用时间。其中,冲击波超压是指冲击波内超过周围大气压的那部分压力;冲击波动压是指冲击波波阵面后伴随的瞬时强力风所产生的冲击压力,动压的形成通常稍微滞后于超压,其对武器装备具有明显的冲击抛掷和弯折作用;冲击波作用时间也是冲击波毁伤的关键指标,通常用冲量进行表

征,特别是在作用时间非常短时,冲击波对武器装备的毁伤作用主要取决于冲量的大小。

冲击波是发射车面临的主要毁伤类型,发射车由于结构尺寸较大,质量质心较高,冲击波超压会造成发射车的拖曳和倾覆,美军认为机动式加固型洲际导弹发射车应能够承受至少 400 m/s 的动压毁伤。发射车装甲较薄,集成化程度较高,发射筒直径大,暴露面积大,冲击波超压会对发射车进行挤压破坏,美军认为机动式加固型洲际导弹发射车应能够承受至少 0.1 MPa 的超压毁伤。爆炸冲击波威力场的研究最早发源于国外的试验探究。1915 年 Hopkinsons 依靠大量试验数据,根据几何相似原理提出了爆炸相似率,在此基础上,文献[9]基于量纲分析方法提出了更具一般性的爆炸规律。随后 Baker 等对自由场爆炸试验冲击波传播规律进行了总结,并针对空气中爆炸时的超压计算作出了较为详细的描述^[10]。Henrych 对不同介质中爆炸冲击波的传播规律进行了分析,并给出了许多计算方法^[11],对爆炸冲击波威力场的理论分析产生了较为深远的影响,在近期的爆炸冲击波威力场相关计算中,Henrych 等经验公式依然得到沿用和一定程度上的修正^[12-14]。然而,随着新型炸药的化学组分和性质的日趋复杂,以及爆炸冲击波威力场参数精度要求增高,依照经验公式计算出的冲击波威力场参数与实际爆炸测量值存在一定的偏差,在一些精度要求较高的计算分析中难以满足,因此数值模拟冲击波威力场的方法开始逐渐被应用,并随着计算机技术的高速发展而日益便捷。

杨鑫等^[15]将 Henrych 等经验公式计算的冲击波超压结果与基于 LS-Dyna 数值模拟计算的结果进行比较后发现,经验公式计算结果高于数值模拟的计算结果,且近场偏差较大,远场偏差较小。周保顺等开展了爆炸冲击波的数值模拟和试验研究,对冲击波威力场计算模型进行了一定的修正^[16]。石磊等针对冲击波威力场数值模拟精度的问题,讨论了网格划分方法的影响^[17]。目前,冲击波威力场数值模拟研究中广泛使用的有 Autodyn 和 LS-Dyna 两种非线性显式动力学分析软件,相关研究学者依靠这两种数值仿真软件对冲击波毁伤效应进行了大量的研究。李向荣等^[18]、王显会等^[19]数值模拟分析了爆炸冲击波对轻型装甲车辆底装甲的毁伤规律。姚熊亮等^[20]、王树山等^[21]、朱锡^[22]和金键等^[23]研究了水下爆炸冲击波传播规律和毁伤效应。这些研究主要是面向爆炸冲击波作用下的防护材料动态响

应分析,属于不考虑装药运行速度的静爆研究,现代武器战斗部在爆炸的瞬时常伴有高速的飞行速度,该飞行速度对爆炸冲击波的威力有着重要的影响^[24]。聂源等对不同速度装药的空中爆炸冲击波场进行数值模拟计算,建立了动爆冲击波超压的工程计算模型,并将模型计算结果与动爆试验结果和数值模拟结果进行了对比^[25]。荣吉利等也利用 Autodyn 软件研究了动爆冲击波作用下的圆支圆板的动态响应^[26]。尽管爆炸毁伤试验成本昂贵,但充分的毁伤试验能够得到完备的毁伤数据。任鹏等进行了气背固支圆板在水下近爆载荷作用下的毁伤试验研究,分析比较了不同毁伤判据的判别能力^[27]。王新颖等进行了不同爆炸条件下生物目标的毁伤试验,拟合了不同毁伤等级的超压-冲量准则的表达式^[28]。

显然,针对冲击波毁伤的分析和研究方法主要有经验公式法、数值模拟法和试验法。经验公式法虽然精度相对较低,但计算方便;数值模拟法是现阶段毁伤效应研究的主要方法,可以与试验法结合对经验公式进行修正和完善;试验法能够有效解决毁伤判据的阈值问题,提出合理的毁伤等级。

1.2.2 动能毁伤

动能毁伤主要是由破片对发射车碰击引起的侵彻和破坏作用,尤其是对暴露在外的发射车装甲、轮胎和发射筒。发射车的设备舱分布在车体两侧,暴露面积大,装甲薄弱,设备重要程度高,因此动能毁伤的影响较为明显。动能毁伤是一个十分复杂的过程,需要考虑到弹体和目标之间的几何相容、弹塑性变形、应变率效应等问题,因此,相对纯粹的理论计算分析较为困难。为此相关研究学者将弹体和目标模型简化,在一定的假设条件下,对动能侵彻问题进行研究,并结合试验基础建立半经验计算公式^[29],其中,弹体对目标的打击迹线和极限穿透速度是衡量动能毁伤的重要指标,但是由于不同研究工况的弹体和目标存在差异,相对应建立的公式具有一定的局限性。徐文旭等基于 Mott、Shapiro 等经验公式建立了钨球对武装直升机的毁伤模型^[30]。牛冰等基于 THOR 方程射击线法研究了破片战斗部对武装直升机的威力评估^[31]。李茂等基于爆炸驱动预制破片分散原理,提出了求解等效缩比战斗部的装药和预制破片的相关参数的等效计算方法^[32]。在近期的爆炸破片威力场分析和评估研究中,此类半经验公式依然被广泛应用^[33-34]。

针对动能毁伤研究的数值模拟方法主要集中在破片威力场与侵彻毁伤仿真方面。目前,基于

预制破片和定向战斗部技术,以提高破片利用率、增强破片毁伤效果的破片威力场研究正在快速发展。有限元法的网格分析技术和光滑粒子动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)的无网格分析技术是数值分析的主要方法^[23,35]。严翰新等基于 LS-Dyna 分析了不同起爆方式对战斗部性能的影响^[36]。张鹏等采用 SPH 方法对爆炸驱动壳体膨胀及破碎过程进行了数值仿真^[37]。与理论分析计算相比,数值模拟方法对破片威力场的计算更加完整和精确,但存在计算周期较长,计算工具要求较高的问题。关于侵彻毁伤仿真方面的研究主要是以新型防护材料和新型防护结构为研究对象进行抗侵彻能力分析,秦庆华等^[38]、彭吉祥等^[39]采用试验和数值模拟的方法研究了斜孔结构装甲的抗侵彻能力。许多研究学者对复合结构靶板^[40]抗侵彻性能进行了深入的分析,以及对高性能混凝土^[41]进行了抗侵彻性能分析。这些抗侵彻性能研究主要包括了目标侵彻失效过程模拟和弹体侵彻速度计算,以此来表征目标的抗侵彻能力。相比于常规惰性破片只以动能毁伤目标,含能破片内含能材料释放的化学能可以提高破片对目标的毁伤效果。Lu 等研究发现 PTFE/Al/W 含能破片释放的化学能大约为动能的 5 倍^[42]。Ji 等发现含能破片释放的化学能还增强了液压水锤效应,使得燃油箱的结构毁伤更为严重^[43]。此外相关研究学者还研究了含能破片对靶板目标和装药的毁伤作用^[44]。

与冲击波毁伤计算公式相比,动能侵彻的半经验公式虽然更为完善,但是大多数的破片侵彻都伴随有冲击波的联合作用,因此单纯的侵彻半经验公式仍无法满足实际工程应用。数值模拟方法则可以进行冲击波和破片的联合毁伤模拟,其中,金乾坤基于 LS-Dyna 软件研究了破片和冲击波联合作用下的圆柱靶毁伤特性,并将仿真结果与试验相结合^[45],验证了数值模型的有效性。李茂等^[46]也针对破片与冲击波联合作用进行了相关的数值仿真研究和试验研究。

1.2.3 热毁伤

热毁伤不仅是核爆炸产生的一类重要的毁伤模式,而且随着大当量战斗部和燃料空气战斗部不断地加入现代战场,常规爆炸场所产生的热辐射温度更高,持续时间更长。特别是在发射车信息化发展的现代战争中,热辐射对于发射车电子信息元件的毁伤威胁加剧。热辐射源和大气传输是影响爆炸热毁伤空间分布的主要因素,其中,热辐射源是爆炸释放的巨大能量在大气中形成的高

温高压“火球”,基于这一特征现象,Baker 等通过对不同火球模型进行研究,根据相似性原理建立了一个通用化的火球模型^[10]。何志光等采用 Baker 模型和 Dorofeev 模型分别计算了爆炸火球的热辐射效应,比较认为 Baker 模型计算的热剂量值偏大,而 Dorofeev 模型计算结果更适合^[47-48]。Martinsen 等基于火球热辐射基础理论,建立了适合于过热可燃液体瞬间燃烧的火球热辐射模型^[49]。Baker 模型和 Martinsen 模型是热毁伤计算的两个最为普遍的模式,后来的研究人员大多采用这两种模型为基础进行热毁伤分析和模型改进。赵志宁等对 Baker 模型进行改进,分析了某新型燃油-空气弹药(fuel-air explosive, FAE)的热毁伤评估分析^[50]。仲倩等以 Martinsen 模型为基础,根据红外热成像仪所测的爆炸火球表征参量数据,对爆炸火球变化规律进行了定量的描述^[51]。此外,王艳平等还提出了一种发射药燃烧热辐射柱体理论模型,并利用燃烧试验验证了柱体理论的合理性^[52]。这些理论和经验计算公式及其改进能够快速估算出爆炸火球直径、温度持续时间和热辐射半径,这对于评估分析的应用是相对有效的。Autodyn 等有限元分析软件也可以对热毁伤进行分析^[53-54],但由于仿真软件在材料热分析定义中的局限性,与冲击波和破片数值分析相比,采用数值分析研究热毁伤的相对较少,转而以热辐射测试等试验研究较多^[55]。

1.2.4 电磁毁伤

电磁辐射也是核爆炸产生的一类重要的毁伤模式,在如今的信息化发展中受到了极大的重视并取得了长足的发展,特别是发射车高度集成化发展的如今。电磁毁伤是利用爆炸产生大量高速运动的电子,从而产生强大的电场和磁场,这些瞬间形成的电磁场辐射高功率电磁脉冲,通过目标天线和孔缝进入发射车内部,导致电子设备上出现感应电磁场,继而达到烧毁电子设备的目的。影响电磁辐射的主要因素有初始功率、增益空间分布规律和中心波束指向相对态势^[56]。

非核化的电磁脉冲武器开始于 Fowler 提出的炸药驱动的电磁场梯度发生器(electromagnetic field gradient generator, EMFGG)概念,后来的研究学者根据电磁脉冲耦合方式的不同,主要分为为了“前门耦合”和“后门耦合”,其中,电磁辐射能量通过天线传输线等媒介耦合到目标内称为“前门耦合”;电磁辐射能量通过孔缝耦合到目标内称为“后门耦合”^[57]。在“前门耦合”的天线模型上一般采用电磁计算的方法,研究电磁脉冲激励作

用下的感应电流响应问题,建立了线面天线、螺旋天线、短波天线等系统天线模型^[58-59]。天线模型的解析计算方法发展较为成熟,精度较高,目前在电磁脉冲的耦合问题中被广泛应用。但是在相对复杂的孔缝腔体的“后门耦合”研究中,由于多边界计算的限制,电磁脉冲的耦合分析已经难以用解析的方法进行解决,虽然随着计算机技术和数值计算方法的发展和应用,时域有限差分法、矩阵法等数值方法^[60-61]在电磁脉冲对孔缝耦合分析中取得了一定进展,但仍然存在求解技巧较高,应用范围有限的问题。因而现阶段电磁辐射毁伤研究主要是以试验研究为主,配合理论解析方法和数值模拟方法为辅,针对电磁辐射毁伤的数值模拟平台主要包括 HFSS 软件和 CST 软件, HFSS 软件适合于天线耦合分析计算, CST 软件更适合于孔缝耦合的目标系统内部分析计算^[62-64]。受制于电磁理论发展的影响,数值模拟研究主要是定性研究电磁脉冲对设备的耦合规律及机制,从而为试验提供参考和对比。

综上所述,伴随着现代科技和作战理念的快速发展,发射车在战场环境中面临的毁伤威胁也由原本的范围毁伤和常规毁伤,向着精准化、远程化、多元化的方向发展,各种先进战斗部和高精尖运载体陆续投入实战装备,不同毁伤类型的研究工作也逐渐深入,研究方法蓬勃发展。但从发射车抗毁伤性能评估研究的角度来说,由于各类毁伤威胁能力的快速提升,毁伤来源趋于多元,系统化的综合评估困难增大。但适用于抗毁伤评估的研究方法还相对较为落后,主要表现在两个方面:①针对发射车整体抗毁伤性能评估的毁伤方法以简化的经验公式为主;②较为详细和更为科学的理论方法和数值模拟方法主要面向发射车局部性能分析,缺乏发射车整体系统化的考虑。这是由发射车自身结构的复杂性所导致的,因此,对于发射车自身固有属性的研究工作也十分重要。

2 发射车易损性分析

2.1 易损性与易损性分析空间

武器装备易损性分析不仅是装备使用人员和装备毁伤人员所关心的问题,对装备设计者同样具有重要的研究意义。对于打击型装备设计者来说,倘若不知道所打击目标的易损特性,不但无法对所设计的打击武器进行威力评估,更重要的是丢失了该型装备的发展和前进方向;对于非打击型装备设计者来说,如果设计时未考虑所设计装备的易损特性,这对于进入作战域执行作战任务

的装备而言,将是致命性的缺陷。

在最开始的研究中,研究学者对易损性的定义和研究范畴有着不同认识和理解,随着各方面研究工作的深入,易损性开始有了一个较为统一的认识,即“指装备假定被一种或多种毁伤元素击中后,对于破坏的敏感性”^[65-66]。

文献[65]中报道了20世纪80年代末 Deitz 等提出了易损性分析空间的概念。易损性分析空间的概念不仅使得易损性分析过程变得更加立体,也为后来的易损性分析提供了符合逻辑特点的研究框架。易损性分析空间将易损性分析划分为四个层次,即几何空间、物理空间、性能空间和效能空间。其中,几何空间表示来袭弹药和遭袭装备的性能参数以及弹目交会的作用过程,包括了来袭弹药的爆心位置、威力场范围、遭袭装备的抗力等相关参数;物理空间表示弹目交会作用以后装备遭到破坏的物理现象,包括了破片的侵彻深度和散布、冲击波压力变形以及表面烧蚀等物理状况;性能空间表示物理损伤破片造成的装备性能的损失,对于不同的作战任务,性能空间存在着较大的差异;效能空间是最后的度量概率的表示,是易损性分析的结果。

尽管易损性分析空间的概念提出的时间较早,然其所蕴含的研究理念和研究框架,直到现在依然被广泛应用在各类武器装备的易损性分析以及作战效能评估等领域,并不断地发展。各类易损性分析方法就是分析易损性分析空间中的四个空间之间的传递表征方法。

2.2 易损性分析方法

武器装备易损性分析方法的蓬勃发展主要集中在20世纪中后期和21世纪之初,具有代表性的方法模型有:累计参数模型、期望值点爆炸模型和随机点爆炸模型^[66]。

累计参数模型是最早期的易损性分析模型之一,该模型将装备的主要部件按照物理特性进行分组,然后以组件为基础单位进行几何空间描述,因此又被称为组件水平模型。同时根据试验规律或经验估计出各个组件的物理空间损失量,然后将各组件的损失量进行合并计算,得出装备整体的损失概率。累计参数模型通常是采用试验得出的破坏关系,如毁伤评估表(damage assessment law, DAL),以此将几何空间、物理空间和效能空间进行传递表征,没有考虑性能空间的影响,因此局限性较强。期望值点爆炸模型考虑了装备复杂的内部结构,以部件为基础单位,因此比累计参数模型描述得更为详细。又引入了故障树法建立了

物理空间内部的装备子系统传递关系,然后仍然基于 DAL 法进行总体表征和计算。但该模型仍然没有考虑性能空间的传递关系,而且模型也主要分析动能侵彻的毁伤,未能考虑冲击波等其他毁伤的影响,因此也逐渐退出应用。随机点爆炸模型是为了改进期望值点爆炸模型不足而产生的,该模型基于蒙特卡罗模拟,以点爆炸模型为基础,对来袭弹药对装备的破坏作用进行反复模拟,以获取较为详细的预估值。同时,可引入降阶态(degraded states, DS)方法计算出性能损失量及其分布。随机点爆炸模型是一个较为开放的易损性分析模型,虽然计算时间较长,但基于该模型,后来人引申和开发了许多新的易损性分析模型^[67-69]。

2.2.1 武器装备易损性分析方法

目前,面向易损性分析方法的相关研究主要集中在打击型武器装备的毁伤评估和非打击型武器的抗毁伤能力评估中,胡净哲等^[70]、于滨等^[71]、李新其等^[72]、刘春美等^[73]分别研究了各类型武器装备在打击和抗打击过程中的毁伤问题,相应地建立了易损性分析模型,其普遍采用的都是基于随机点爆炸模型的改进方法,并且以破片作用为主。而针对易损性分析方法的研究相对较少,杨世荣等运用毁伤树分析方法建立了导弹发射车的毁伤树模型,将发射车按照功能划分为发射系统、电气系统、运动系统和控制系统,以及进行相应子系统的划分^[74]。刘钰等提出了基于主成分分析的群体层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)方法对复杂系统的易损性进行分析,采用专家群体评判意见的合成方法来克服传统 AHP 方法的权重分配^[75]。王海坤等结合毁伤树法、随机过程、模糊度、马尔可夫链法建立了一种基于模糊随机理论的舰船易损性评估模型^[76]。陈文等研究了导弹结构在爆炸冲击波作用下的动力学和毁伤特性,从动力学角度研究了冲击波作用下的导弹易损特性,具有重要的研究价值^[77]。

此外,随着计算机水平的发展,借助计算机仿真建模和数据库技术,一种“虚拟模型”的易损性分析方法依托着计算机三维建模被提出了,该模型主要由目标几何模型、目标特征数据库和目标部件功能结构树组成,可以较为完善地描述出装备的易损性^[78]。按照装备系统功能和结构的组成,“虚拟模型”通常是自顶向下地建模,模型分别按照“系统—组件—部件—几何形状”进行构建,并赋予相应的毁伤特征信息,然后根据结构功能建立毁伤树,实现对装备易损性逻辑关系的表征,“虚拟模型”在各类武器装备的易损性分析和

毁伤评估中开始广泛应用^[79-80]。

2.2.2 其他易损性分析方法

武器装备的易损性分析和评估研究基本是以军队院校为主,研究的目的大多侧重于作战应用,因此传统的装备易损性分析方法就能够满足研究的需要。工业部门和科研院校又通常侧重于基础属性和效能属性的研究,武器装备易损性研究工作发展相对缓慢。易损性分析除了在武器装备中应用以外,在桥梁建筑等领域也有着举足轻重的研究地位^[81]。

桥梁建筑领域易损性的研究工作开始于核电站结构的地震易损性,其后针对结构地震易损性的研究工作便快速地发展起来。与武器装备易损性的概念相似,结构地震易损性是指结构对不同强度地震破坏的敏感程度,目前结构地震易损性研究分为两个方法:①基于大量数据采用数理统计等理论分析方法;②采用有限元分析软件模拟的数值方法。鉴于统计方法对试验数据的依赖,同时计算机效率的增强,以非线性时程分析为基础的有限元分析方法备受研究人员青睐。Nielson总结了基于非线性时程分析建立桥梁地震易损性曲线的基本流程^[82]。庞于涛等提出了桥梁结构在地震作用下的性能演变分析方法,利用增量动力法分析了斜拉桥主塔材料的时变易损性^[83]。王伟等基于增量动力分析方法构建了相应结构的结构地震易损曲线^[84]。这些桥梁建筑领域易损性分析方法也可以应用到发射车等武器装备的易损性分析中去,根据车辆等基础结构理论进行等效建模,深入分析结构毁伤机理,就可以建立更深层次的发射车易损性分析模型。

2.3 易损性判据

易损性判据和分级标准是易损性分析的重要组成部分,从易损性分析空间的角度来讲,从几何空间传递到物理空间需要能够对物理状况进行判定的准则,从物理空间传递到性能空间需要能够对性能状况进行判定的准则,而从性能空间传递到效能空间则需要能够对效能进行划分和描述的分级标准。倘若对易损性分析空间采取逆向思考,从效能空间到性能空间的分级取决于各类作战任务和作战流程,不同的作战任务和作战流程其易损性的分级标准是不同的;从性能空间到物理空间的判据取决于装备的极限属性;从物理空间到几何空间的判据则取决于各毁伤类型的毁伤准则。目前,针对这三方面的研究,学者们已经开展了较为广泛的研究工作。

2.3.1 物理判据

物理判据是武器装备易损性分析的最基础的判定准则,它是不同毁伤类型作用下装备毁伤程度的量化指标,因此针对不同的毁伤类型有不同的物理判据。物理判据是目前使用频率最高、研究最为广泛的一类准则,其中,衡量冲击波对装备毁伤的准则有超压准则、冲量准则和超压-冲量准则^[85],超压准则认为只要冲击波超压高于临界值就会出现毁伤;冲量准则引入了持续时间和波形因素的影响,认为只有作用于装备的比冲量高于临界值才会出现毁伤;超压-冲量准则兼顾了前两者的作用,认为冲击波对装备的毁伤效应是由超压和冲量共同决定的,只有两者同时高于临界值,才能对装备造成毁伤。显然,超压-冲量准则更具有科学性和应用价值,因此在现阶段的毁伤研究中应用越来越多^[86-88]。

衡量破片等动能侵彻对装备毁伤的准则主要有动能准则、比动能准则、破片质量准则以及破片密度分布准则^[89]。其中,动能准则是以破片等侵彻体对装备产生作用的动能值来确定毁伤程度,而比动能准则和破片质量准则从本质上讲都是动能准则。只有破片密度分布准则不同,该准则认为判断破片毁伤效应时还应当考虑到破片的分布密度,但由于密度分布函数难以表达,因此也无法获得较为准确的表达结果。

衡量热辐射对装备毁伤的准则有热通量准则、热剂量准则、热通量-热剂量准则、热通量-时间准则和热剂量-时间准则^[90]。与冲击波准则相似,热通量准则认为装备所受的热通量高于临界热通量出现毁伤;热剂量准则在热通量准则基础上引入了作用时间的影响;热通量-热剂量准则综合了两者共同的优势。鉴于现阶段电磁辐射毁伤研究主要是以试验研究为主,衡量电磁辐射对装备毁伤的准则通常是依照试验获得的辐射功率密度阈值作为标准^[91],尚未出现具有明显特征的判据准则。也有相关研究是以电磁辐射所产生的热效应为主要对象^[92],则其对装备的毁伤判据可以归结到热毁伤准则中去。

2.3.2 性能判据

目前,针对性能判据的研究工作较少,大多集中在毁伤树和降阶态法这类功能毁伤度量上。虽然这些方法能够满足一些评估问题的需求,但由于对物理空间到性能空间的传递关系没有完全量化,且理解不统一,使得毁伤结论仍然呈现一个相对模糊难定的界限。但必须要说明的是,性能判据是发射车易损性分析与抗毁伤能力评估最为关

键的一环,不对这一环节进行明确,则无法构成发射车完整的易损性分析空间传递关系,也无法深刻地解决发射车整体性能评估问题。

2.3.3 分级标准

分级标准是易损性分析最终结果的量化分类,一般可分为基于物理毁伤程度和基于性能毁伤程度两种,通常采用试验数据统计分析进行等级划分,数据准确可靠。现有的分级标准研究工作基本是对武器装备静态作用的研究,未考虑各类作战任务和作战流程的影响,倘若能引入不同的作战任务和作战流程对易损性的分级标准的影响,则标准的制定将更为全面和科学。

综上所述,易损性作为表征武器装备自身敏感属性的一个重要的科学研究分支,在前期的探索发展中取得了突出的成果。然而随着现代武器装备研发和升级的节奏不断加快,易损性分析逐渐脱离了其最初的研究发展轨道,也脱离了易损性分析空间概念的核心,仅仅成为了现阶段各类打击型武器毁伤威力评估和非打击型武器装备性能评估的辅助手段。尽管现有的易损性分析方法能够实现发射车抗毁伤能力的分析和评估,但仍然存在两个突出的问题:①从物理空间到性能空间的传递关系尚未完全量化;②从性能空间到效能空间的传递关系缺乏引导。不解决这两个问题,则发射车的易损性分析仍然停留在物理空间层面,难以形成系统化的评估方法。而解决这两个问题,就需要从发射车的自身属性进行建模分析和从发射车的作战流程进行任务引导。

3 发射车抗毁伤能力评估方法与需求

3.1 抗毁伤能力概念

武器装备的主要功能是作战,因此装备在遭受到敌方毁伤武器打击后,可能会造成装备一定程度的毁伤,这些可能的毁伤应该在装备设计中就能给出较为准确的估计,这对于提高武器装备的战场生存能力具有重要的意义,抗毁伤能力评估就是进行这一工作的科学研究。但是由于长期和平环境和军工科技的快速发展,武器装备在飞速升级换代的同时缺乏相互对抗和验证,失去了其作为对抗工具的本质内涵,而成为高新科技凝结的工程表现,这对未来战争中的实际作战是不利的。因此,对武器装备的战场生存能力评估研究成为提升军队应急应激能力的迫切需求。

导弹发射车战场生存能力是其伪装隐蔽能力、抗毁伤能力和维修保障能力的综合体现。在目前大量的生存能力研究中普遍存在着“发现即

摧毁”的基础假设,该假设是建立在现阶段精确制导武器的快速发展基础上,认为只要被敌方侦察发现,即会被打击并伴随着被命中摧毁。显然,这样的假设过于简单且缺乏公正,因为发现后是否开始打击受被侦察武器装备重要度的影响;打击后是否被摧毁受打击武器效能和被打击装备易损性的影响。但在这样的假设下,发射车的抗毁伤能力评估研究逐渐被忽略,甚至于抗毁伤能力的概念和研究范畴也变得模糊。朱锡等指出,抗毁伤能力是装备固有的抵抗战争环境毁伤载荷,并将毁伤限制在一定允许程度和范围的能力^[93]。诚然,与易损性作为发射车的固有属性相比,抗毁伤能力的大小是相对于毁伤威胁来说的,是对毁伤威胁和易损性的统一,因此抗毁伤能力的好与坏是一个相对的概念,即是在某一特定的作战条件下评估武器装备的抗毁伤能力,而当作战条件改变时,由于毁伤威胁改变,其抗毁伤能力也发生改变。

3.2 抗毁伤能力评估方法

现阶段针对武器装备抗毁伤能力评估的研究相对较少,李彦彬等从敏感性、易损性、战伤抢修性和作战能力四个方面构建了飞机抗毁伤能力评估指标体系,采用相邻优属度法和熵权法确定权重,建立了飞机抗毁伤能力评估模型^[94]。余丽山等在文献[94]的基础上,提出了基于神经网络的飞机抗毁伤能力评估模型^[95]。以上研究是将重点放在了指标体系和指标权重的构建上,这也是一般评估类问题的重点。一般评估类问题的建模过程通常是:①确定待评估对象;②建立评估指标体系;③确定各指标权重系数;④构造综合评估模型。重点就是在指标体系和指标权重的构建上,确定指标权重的方法有层次分析法、秩和比法、Topsis法、模糊数学法、多元统计法、熵值法等众多方法,因此评估类问题的关键就在于如何科学地构建待评估对象的指标体系和分配指标权重。

目前,不仅是发射车,各类型武器装备评估模型中的指标体系都过于简化和笼统,末端指标不落地,评估计算时仍然存在模糊不定的现象。这主要是由于在装备自身易损性的建模分析中,没有全面系统地建立从物理空间到性能空间的逻辑传递关系,也就无法确定影响评估结果的基础指标。同样是指标体系构建的笼统,导致指标权重分配时受人为主观因素干预的影响较大,从而降低了评估结果的可信度。

3.3 抗毁伤能力评估需求与发展

导弹发射车抗毁伤能力分析 with 评估是研究在

毁伤威胁作用下发射车结构毁伤响应计算方法、抗毁伤防护设计方法以及毁伤程度评估方法的一门科学,其涉及发射车结构力学和结构动力学以及爆炸力学等诸多学科融合。对发射车抗毁伤能力进行研究和发 展,不仅能够对发射车在毁伤威胁作用下的抗毁伤能力和战场生存能力进行评估,同时也可以对发射车的防护设计提供参考。尤其是随着近年来国际政治局势发生变化,地区冲突加剧,这给发射车的抗毁伤能力分析和评估研究带来迫切需求。尽管现有的抗毁伤能力分析和评估方法能够在一定程度上解决问题,但是随着毁伤威胁的不断加 强,以及发射车设计的系统化程度增高,现有的抗毁伤能力分析和评估方法都有待进一步的发展和研究。

3.3.1 毁伤威力场的多元化、综合化

基于在第 1 节的分析:随着现代科技和作战理念的快速发展,发射车在战场环境中面临的毁伤威胁也由原本的范围毁伤和常规毁伤,向着精准化、远程化、多元化的方向发展,由于各类毁伤威胁能力的快速提升,毁伤来源也趋于多元化、综合化,各毁伤类型联合作用。核威胁带来的冲击波毁伤、热毁伤和电磁毁伤联合作用;常规威胁带来的冲击波毁伤和破片毁伤联合作用;温压武器带来的冲击波毁伤和热毁伤联合作用;电磁武器带来的电磁毁伤和热毁伤联合作用。面向抗毁伤能力分析和评估应用的毁伤威力场研究需要密切跟随这一变化,更精确有效地分析和评估发射车面临的毁伤威力场的相互耦合。

3.3.2 武器装备易损性分析的完整化

基于在第 2 节的分析:易损性作为表征发射车自身敏感属性的一个重要的科学研究分支,存在着两个突出的问题:①从物理空间到性能空间的传递关系尚未完全量化;②从性能空间到效能空间的传递关系缺乏引导。只有解决了这两个问题才能将发射车易损性分析过程完整化,即需要从发射车的各类作战任务和作战流程中对效能空间到性能空间进行分级,根据发射车的极限属性研究建立起从性能空间到物理空间的判据。

3.3.3 虚拟仿真评估技术

从目前的各类毁伤评估成果看,关于毁伤的评估技术已经不仅仅是对已有毁伤试验数据的总结与统计研究,而是在现有的试验数据基础上,借助计算机仿真建模和数据库技术,建立战斗部的威力模型和对打击装备的等效毁伤模型,并结合装备易损性模型和末端弹道参数模型,得到战斗部对装备的毁伤效能仿真模型。然后基于所建立

的毁伤效能仿真模型,获得更多的毁伤效能数据,以此更好地用于毁伤规划和打击决策支持。因此虚拟仿真技术将是发射车抗毁伤能力分析和评估的重要发展趋势。

4 总结

本文以导弹发射车的抗毁伤能力分析和评估技术为研究对象,从发射车面临的毁伤威胁和作用机理、易损性分析和抗毁伤能力评估方法三方面综述了研究现状。针对发射车抗毁伤能力分析与评估技术应用提出以下建议:

1) 抗毁伤能力评估方法的改进仍然是研究的重点,针对发射车这类复杂武器系统的抗毁伤能力评估模型中的指标体系过于简化和笼统,末端指标不落地,评估计算时仍然存在模糊不定,人为主观影响较大的现象。因此,需要针对不同的作战环境,科学地构建发射车的指标体系和分配指标权重,特别是指标体系的构建是抗毁伤能力评估模型的核心所在。

2) 基于易损性分析空间理论,分析了各子空间的逻辑传递关系,认为从几何空间到物理空间传递关系的研究已经较为成熟,而从物理空间到性能空间到效能空间的逻辑传递关系才是现阶段发射车易损性分析的关键所在。从效能空间到性能空间的分级取决于发射车作战任务和作战流程,从性能空间到物理空间的判据取决于发射车的极限属性。

3) 抗毁伤能力分析和评估技术可以与计算机仿真建模和数据库技术相结合,在现有的试验数据基础上建立发射车抗毁伤能力分析与评估的虚拟仿真模型,基于发射车虚拟仿真模型能够获得更多的毁伤效能数据,以此更好地用于毁伤规划和打击决策支持。

参考文献 (References)

[1] 李含健,朱鹤,张强,等. 2020年国外精确制导武器战斗部和引信技术发展分析[J]. 飞航导弹, 2021(2): 14-18.
LI H J, ZHU H, ZHANG Q, et al. Analysis on the development of warhead and fuze technology of precision guided weapons abroad in 2020[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2021(2): 14-18. (in Chinese)

[2] 陈波. “大规模报复”战略与美国海外核部署[J]. 世界历史, 2021(2): 89-101, 151.
CHEN B. The strategy of massive retaliation and the overseas nuclear deployment of the United States[J]. World History, 2021(2): 89-101, 151. (in Chinese)

[3] 张焰,伍浩松. 美国2020年核力量[J]. 国外核新闻,

2020(3): 7-13.
ZHANG Y, WU H S. America nuclear forces in 2020[J]. Foreign Nuclear News, 2020(3): 7-13. (in Chinese)

[4] 易鑫磊. 俄美高超声速武器的发展态势与战略影响[J]. 俄罗斯研究, 2021(2): 169-197.
YI X L. Hypersonic weapons development in Russia and the United States and its strategic impacts[J]. Russian Studies, 2021(2): 169-197. (in Chinese)

[5] 宋浦,肖川. 常规毁伤的新发展: 超强毁伤技术[J]. 含能材料, 2018, 26(6): 462-463.
SONG P, XIAO C. New development of conventional damage: super damage technology[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(6): 462-463. (in Chinese)

[6] 李根,卢芳云,李翔宇,等. 基于气固两相反应流的温压炸药能量释放规律数值模拟及实验验证[J]. 火炸药学报, 2021, 44(2): 195-204.
LI G, LU F Y, LI X Y, et al. Numerical simulation and experimental verification on the energy release law of thermostatic explosive based on gas-solid two-phase reaction flow[J]. Chinese Journal of Explosives, 2021, 44(2): 195-204. (in Chinese)

[7] 武晓龙,冯寒亮. 美国高功率微波技术发展态势研究[J]. 飞航导弹, 2019(9): 1-5, 15.
WU X L, FENG H L. Research on the development trend of high power microwave technology in the United States[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2019(9): 1-5, 15. (in Chinese)

[8] 任辉启,黄魁,吴祥云,等. 地面目标空气冲击波动压毁伤研究进展[J]. 防护工程, 2021, 43(1): 1-9.
REN H Q, HUANG K, WU X Y, et al. Research progress of dynamic pressure damage to ground targets by air shock wave[J]. Protective Engineering, 2021, 43(1): 1-9. (in Chinese)

[9] BISS M M, SETTLES G S. On the use of composite charges to determine insensitive explosive material properties at the laboratory scale[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2010, 35(5): 452-460.

[10] BAKER W E, COX P A, KULESZ J J, et al. Explosion hazards and evaluation[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1983.

[11] HENRYCH J. The dynamics of explosion and its use[M]. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.

[12] 高元浩. 榴弹战斗部引爆条件下毁伤评估方法研究[D]. 太原: 中北大学, 2016.
GAO Y H. Damage assessment method of shrapnel warhead under dynamic explosion conditions[D]. Taiyuan: North University of China, 2016. (in Chinese)

[13] 田力,王赛. 破片与冲击波复合作用下预应力混凝土T形梁损伤分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(7): 28-41.
TIAN L, WANG S. Damage analysis of a prestressed concrete T-beam subjected to combined loading of fragments and shock waves[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2021, 48(7): 28-41. (in Chinese)

[14] LIU Z H, JIANG N, ZHOU C B, et al. Damage effect of

- terrorist attack explosion-induced shock wave in a double-deck island platform metro station[J]. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2021, 65(1): 215–228.
- [15] 杨鑫, 石少卿, 程鹏飞. 空气中 TNT 爆炸冲击波超压峰值的预测及数值模拟[J]. *爆破*, 2008, 25(1): 15–18, 31. YANG X, SHI S Q, CHENG P F. Forecast and simulation of peak overpressure of TNT explosion shock wave in the air[J]. *Blasting*, 2008, 25(1): 15–18, 31. (in Chinese)
- [16] 周保顺, 张立恒, 王少龙, 等. TNT 炸药爆炸冲击波的数值模拟与实验研究[J]. *弹箭与制导学报*, 2010, 30(3): 88–90. ZHOU B S, ZHANG L H, WANG S L, et al. Numerical simulation and experimental research on TNT explosion shock wave[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2010, 30(3): 88–90. (in Chinese)
- [17] 石磊, 杜修力, 樊鑫. 爆炸冲击波数值计算网格划分方法研究[J]. *北京工业大学学报*, 2010, 36(11): 1465–1470. SHI L, DU X L, FAN X. A study on the mesh generation method for numerical simulation of blast wave[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2010, 36(11): 1465–1470. (in Chinese)
- [18] 李向荣, 田延泰, 李帅, 等. 爆炸冲击波对轻型装甲车辆底装甲毁伤效应数值仿真[J]. *弹箭与制导学报*, 2017, 37(2): 53–58. LI X R, TIAN Y T, LI S, et al. Numerical simulation on damage effects of shock wave to light armored vehicle bottom[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2017, 37(2): 53–58. (in Chinese)
- [19] 王显会, 师晨光, 周云波, 等. 车辆底部防护蜂窝夹层结构抗冲击性能分析[J]. *北京理工大学学报*, 2016, 36(11): 1122–1126. WANG X H, SHI C G, ZHOU Y B, et al. Impact resistance analysis of honeycomb sandwich structure for the vehicle bottom protection[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2016, 36(11): 1122–1126. (in Chinese)
- [20] 姚熊亮, 屈子悦, 张乐, 等. 水下爆炸圆柱壳冲击波绕射特性分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(1): 9–16. YAO X L, QU Z Y, ZHANG L, et al. Analysis of the underwater shock wave diffraction characteristics of cylindrical shell[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(1): 9–16. (in Chinese)
- [21] 王树山, 张静骁, 王传昊, 等. 水中爆炸冲击波对靶体结构的毁伤准则研究[J]. *火炸药学报*, 2020, 43(3): 262–270. WANG S S, ZHANG J X, WANG C H, et al. Damage criterion of underwater explosion shock wave on target[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2020, 43(3): 262–270. (in Chinese)
- [22] 朱锡. 水下爆炸简介[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 14. ZHU X. An introduction to underwater explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11): 14. (in Chinese)
- [23] 金键, 朱锡, 侯海量, 等. 大型舰船在水下接触爆炸下的毁伤与防护研究综述[J]. *爆炸与冲击*, 2020, 40(11): 15–39. JIN J, ZHU X, HOU H L, et al. Review on the damage and protection of large naval warships subjected to underwater contact explosions[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2020, 40(11): 15–39. (in Chinese)
- [24] 蒋海燕, 李芝绒, 张玉磊, 等. 运动装药空中爆炸冲击波特性研究[J]. *高压物理学报*, 2017, 31(3): 286–294. JIANG H Y, LI Z R, ZHANG Y L, et al. Characteristics of air blast wave field for explosive charge moving at different velocities[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31(3): 286–294. (in Chinese)
- [25] 聂源, 蒋建伟, 李梅. 球形装药动态爆炸冲击波超压场计算模型[J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(5): 951–956. NIE Y, JIANG J W, LI M. Overpressure calculation model of sphere charge blasting with moving velocity[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(5): 951–956. (in Chinese)
- [26] 荣吉利, 刘东兵, 赵自通, 等. 固支圆板在动爆冲击波作用下的动力响应[J]. *北京理工大学学报*, 2021, 41(5): 474–479. RONG J L, LIU D B, ZHAO Z T, et al. Dynamic response of fixed circular plate subjected to dynamic explosion shock wave[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2021, 41(5): 474–479. (in Chinese)
- [27] 任鹏, 田阿利, 张伟, 等. 水下冲击波载荷作用下气背固支圆板动态毁伤实验[J]. *爆炸与冲击*, 2016, 36(5): 617–624. REN P, TIAN A L, ZHANG W, et al. Failure mode of clamped air-back circular panel subjected to underwater shock loading[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2016, 36(5): 617–624. (in Chinese)
- [28] 王新颖, 王树山, 卢熹, 等. 空中爆炸冲击波对生物目标的超压-冲量准则[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 106–111. WANG X Y, WANG S S, LU X, et al. Overpressure-impulse damage criterion of air shock waves on biological targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 106–111. (in Chinese)
- [29] BACKMAN M E, GOLDSMITH W. The mechanics of penetration of projectiles into targets[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1978, 16(1): 1–99.
- [30] 徐文旭, 宋振铎, 张更宇, 等. 多用途导弹战斗部对武装直升机的终点毁伤建模及仿真[J]. *兵工学报*, 2007, 28(6): 671–676. XU W X, SONG Z D, ZHANG G Y, et al. Research on terminal damage model and simulation of multi-purpose guided missile warhead attacking on helicopter[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(6): 671–676. (in Chinese)
- [31] 牛冰, 谷良贤, 龚春林. 破片战斗部对武装直升机目标的威力评估[J]. *弹道学报*, 2011, 23(1): 68–71. NIU B, GU L X, GONG C L. Assessment of lethality of fragment warhead to armed-helicopter[J]. *Journal of Ballistics*, 2011, 23(1): 68–71. (in Chinese)
- [32] 李茂, 侯海量, 朱锡, 等. 模拟破片杀伤战斗部空爆冲击

- 波与高速破片群联合作用的等效试验方法[J]. 振动与冲击, 2020, 39(1): 184-190.
- LI M, HOU H L, ZHU X, et al. Equivalent test method to simulate combined damage action of air blast shock wave and high speed fragment group of fragment killing warhead[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1): 184-190. (in Chinese)
- [33] 刘东奇, 赵传, 兰宇鹏, 等. 典型榴弹自然破片质量分布的表征模型[J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44(3): 21-27.
- LIU D Q, ZHAO C, LAN Y P, et al. The representation model of natural fragment mass distribution of typical grenade[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2021, 44(3): 21-27. (in Chinese)
- [34] 高倩. 空间爆炸破片分布与目标毁伤关联建模研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2019.
- GAO Q. Study the correlation model between space explosive fragment distribution and target damage[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (in Chinese)
- [35] DONAHUE L, ZHANG F, RIPLEY R C. Numerical models for afterburning of TNT detonation products in air[J]. Shock Waves, 2013, 23(6): 559-573.
- [36] 严翰新, 姜春兰, 李明, 等. 不同起爆方式对聚焦战斗部性能影响的数值模拟[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 143-146, 151.
- YAN H X, JIANG C L, LI M, et al. Numerical simulation of effect of different initiation positions on a certain focusing fragment warhead [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2009, 17(2): 143-146, 151. (in Chinese)
- [37] 张鹏, 任杰, 王绪财, 等. 高强度钢壳体战斗部爆炸破碎无网格法数值仿真[J]. 兵器材料科学与工程, 2016, 39(4): 47-52.
- ZHANG P, REN J, WANG X C, et al. Numerical simulation on fragmentation of high strength steel warhead shell driven by explosion based on grid-free method[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2016, 39(4): 47-52. (in Chinese)
- [38] 秦庆华, 崔天宁, 施前, 等. 孔结构金属装甲抗弹能力的数值模拟[J]. 高压物理学报, 2018, 32(5): 135-143.
- QIN Q H, CUI T N, SHI Q, et al. Numerical study on ballistic resistance of metal perforated armor to projectile impact[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(5): 135-143. (in Chinese)
- [39] 彭吉祥, 崔天宁, 金永喜, 等. 斜孔结构装甲设计及抗弹性能研究[J]. 应用力学学报, 2021, 38(3): 893-901.
- PENG J X, CUI T N, JIN Y X, et al. Research on design and ballistic resistance of perforated armor with oblique holes[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2021, 38(3): 893-901. (in Chinese)
- [40] SONG J F, SHE J, CHEN D L, et al. Latest research advances on magnesium and magnesium alloys worldwide[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2020, 8(1): 1-41.
- [41] 周刚, 李名锐, 文鹤鸣, 等. 钨合金弹体对混凝土靶的超高速侵彻机理[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(2): 021407.
- ZHOU G, LI M R, WEN H M, et al. Mechanism on hypervelocity penetration of a tungsten alloy projectile into a concrete target [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(2): 021407. (in Chinese)
- [42] LU D W, WANG H F, LEI M A, et al. Enhanced initiation behavior of reactive material projectiles impacting covered explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(9): 1117-1123.
- [43] JI Y Z Y, LI X D, ZHOU L W, et al. Experimental and numerical study on the cumulative damage of water-filled containers impacted by two projectiles [J]. Thin-Walled Structures, 2019, 135: 45-64.
- [44] ZHANG F, GAUTHIER M, COJOCARU C V. Dynamic fragmentation and blast from a reactive material solid[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2017, 42(9): 1072-1078.
- [45] 金乾坤. 破片和冲击波毁伤圆柱靶的数值仿真[J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 215-218.
- JIN Q K. Simulation of cylindrical shell damage by fragments and shock waves[J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 215-218. (in Chinese)
- [46] 李茂, 高圣智, 侯海量, 等. 空爆冲击波与破片群联合作用下聚脲涂覆陶瓷复合装甲结构毁伤特性[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(11): 51-63.
- LI M, GAO S Z, HOU H L, et al. Damage characteristics of polyurea coated ceramic/steel composite armor structures subjected to combined loadings of blast and high-velocity fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(11): 51-63. (in Chinese)
- [47] 何志光, 陈网焯, 彭金华. 二次FAE的火球温度及热辐射效应研究[J]. 安全与环境学报, 2004, 4(增刊1): 183-185.
- HE Z G, CHEN W Y, PENG J H. Study on the fireball temperature and thermal radiation effect of secondary FAE[J]. Journal of Safety and Environment, 2004, 4(Suppl 1): 183-185. (in Chinese)
- [48] 何志光. FAE爆炸火球热辐射效应研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- HE Z G. Study on thermal radiation effect of FAE explosion fireball [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004. (in Chinese)
- [49] MARTINSEN W E, MARX J D. An improved model for the prediction of radiant heat flux from fireball[C]//Proceedings of International Conference and Workshop on Modeling Consequences of Accidental Releases of Hazardous Materials, 1999.
- [50] 赵志宁, 王辰. 新型弹药热辐射毁伤效应研究[J]. 军械工程学院学报, 2015, 27(1): 15-18.
- ZHAO Z N, WANG C. Research on damage effect of new type ammunition thermal radiation[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2015, 27(1): 15-18. (in Chinese)
- [51] 仲倩, 王伯良, 黄菊, 等. 火球动态模型在温压炸药热毁伤效应评估中的应用[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(5): 528-532.
- ZHONG Q, WANG B L, HUANG J, et al. Application of a dynamic model to thermal damage estimation of thermobaric

- explosives[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(5): 528-532. (in Chinese)
- [52] 王艳平, 曾丹, 张同来, 等. 发射药燃烧热辐射传播规律[J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 212-216.
WANG Y P, ZENG D, ZHANG T L, et al. Heat radiation propagation law of propellant combustion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 212-216. (in Chinese)
- [53] 郑沛, 孙瑞阳, 侯宇威. 基于有限元建模的爆炸场热毁伤效应研究[J]. *山东化工*, 2019, 48(22): 22-26, 28.
ZHENG P, SUN R Y, HOU Y W. Thermal damage effect of explosion field based on finite element modeling [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2019, 48(22): 22-26, 28. (in Chinese)
- [54] 吴克刚, 汪庆桃. 可燃气云爆炸作用下防爆墙抗爆效应数值模拟分析[J]. *采矿技术*, 2020, 20(6): 217-221.
WU K G, WANG Q T. Numerical simulation analysis of anti-explosion effect of explosion-proof wall under the action of combustible gas cloud explosion [J]. *Mining Technology*, 2020, 20(6): 217-221. (in Chinese)
- [55] 王凌宇, 杜红棉, 王玮, 等. 基于红外热像仪的弹药热毁伤测量误差消除方法研究[J]. *激光与红外*, 2019, 49(11): 1344-1349.
WANG L Y, DU H M, WANG W, et al. Research on error elimination method of ammunition thermal damage measurement based on infrared thermal imager[J]. *Laser & Infrared*, 2019, 49(11): 1344-1349. (in Chinese)
- [56] 姜斌, 梁敏, 霍贝. 非致命失能武器发展问题研究[J]. *舰船电子工程*, 2020, 40(7): 13-18, 96.
JIANG B, LIANG M, HUO B. Research on the development of non-lethal disabled weapons [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2020, 40(7): 13-18, 96. (in Chinese)
- [57] 夏明. 磁爆加载作用机理研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
XIA M. Research on the action mechanism of magneto-hydrodynamic explosive loading [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [58] 严雪飞, 朱长青. 线面结构天线的电磁建模与计算[J]. *微波学报*, 2018, 34(1): 6-10, 20.
YAN X F, ZHU C Q. Electromagnetic modeling and calculation of line-surface antenna [J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(1): 6-10, 20. (in Chinese)
- [59] 孙海峰, 杜林森, 梁贵书. 模块化多电平换流阀系统天线模型及其辐射电磁骚扰特性分析[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(3): 879-888.
SUN H F, DU L S, LIANG G S. Antenna model of MMC-HVDC converter valve system and its radiated electromagnetic disturbance analysis[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(3): 879-888. (in Chinese)
- [60] 韩雪峰, 李东. 基于时域有限差分法的机载天线电磁仿真分析[J]. *通信技术*, 2017, 50(11): 2472-2477.
HAN X F, LI D. Analysis on electromagnetic simulation for airborne antenna based on FDTD method [J]. *Communications Technology*, 2017, 50(11): 2472-2477. (in Chinese)
- [61] 张谦, 柴琳娜, 施建成. 双矩阵算法的 L 波段多角度玉米微波辐射参数化模型[J]. *遥感学报*, 2017, 21(2): 182-192.
ZHANG Q, CHAI L N, SHI J C. Parameterizing a multi-angular model of L-band microwave emissions from corn using matrix doubling algorithm [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2017, 21(2): 182-192. (in Chinese)
- [62] 王亦青, 赵伟, 李长坤. 基于 HFSS 的矿用分站抗电磁辐射干扰仿真研究[J]. *机电一体化*, 2014, 20(6): 50-53.
WANG Y Q, ZHAO W, LI C K. Simulation research on resistance to electromagnetic interference of mine-used substation based on HFSS[J]. *Mechatronics*, 2014, 20(6): 50-53. (in Chinese)
- [63] 胡晓, 邱扬, 田锦. 车载单极天线的电磁脉冲响应特性[J]. *强激光与粒子束*, 2018, 30(3): 033201.
HU X, QIU Y, TIAN J. Response characteristics of vehicle monopole antenna exposed to electromagnetic pulse[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2018, 30(3): 033201. (in Chinese)
- [64] 翟丹, 陈瑜, 樊友文. 基于 CST 的金属腔体电磁环境仿真分析[J]. *舰船技术*, 2014, 34(10): 66-69.
QU D, CHEN Y, FAN Y W. Electromagnetic environment simulation for the cabin based on CST software[J]. *Marine Electric & Electronic Engineering*, 2014, 34(10): 66-69. (in Chinese)
- [65] 巩建兴, 马宝华, 刘小玲. 目标易损性的概念空间分析[J]. *北京理工大学学报*, 1994, 14(4): 366-370.
GONG J X, MA B H, LIU X L. An investigation on the conceptual space of target vulnerability[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1994, 14(4): 366-370. (in Chinese)
- [66] 翟晓丽, 蒋浩征. 装甲车辆易损性分析模型综述[J]. *弹箭与制导学报*, 1997(2): 24-28, 35.
ZHAI X L, JIANG H Z. Summary of vulnerability analysis models for armored vehicles [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 1997(2): 24-28, 35. (in Chinese)
- [67] 王海福, 卢湘江, 冯顺山. 降阶态易损性分析方法及其实施[J]. *北京理工大学学报*, 2002, 22(2): 214-216.
WANG H F, LU X J, FENG S S. Degraded states vulnerability methodology and its implementation[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2002, 22(2): 214-216. (in Chinese)
- [68] 王国辉, 李向荣, 孙正民. 主战坦克目标易损性分析与毁伤评估仿真[J]. *弹箭与制导学报*, 2009, 29(6): 274-277.
WANG G H, LI X R, SUN Z M. Target vulnerability analysis and damage assessment of main battle tank [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009, 29(6): 274-277. (in Chinese)
- [69] 张高峰, 李向东, 周兰伟, 等. 典型坦克在破甲弹作用下的易损性评估[J]. *弹道学报*, 2018, 30(2): 67-74.
ZHANG G F, LI X D, ZHOU L W, et al. Vulnerability assessment of typical tank under the action of HEAT [J]. *Journal of Ballistics*, 2018, 30(2): 67-74. (in Chinese)
- [70] 胡净哲, 李向东, 周兰伟, 等. 武装直升机在杀爆弹打击

- 下的易损性及防护策略[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1214-1220.
- HU Z Z, LI X D, ZHOU L W, et al. Vulnerability and defense strategy for gunship against HE munition[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1214-1220. (in Chinese)
- [71] 于滨, 李翔宇, 卢芳云. 单破片对导弹舱段毁伤的易损性快速分析方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 82-86.
- YU B, LI X Y, LU F Y. Fast vulnerability analysis method of missile sections under the attack of fragment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 82-86. (in Chinese)
- [72] 李新其, 张欧亚, 王明海. 子母弹对舰载机作战保障系统毁伤计算分析方法[J]. 弹道学报, 2008, 20(3): 59-63.
- LI X Q, ZHANG O Y, WANG M H. Damage effectiveness analysis on operational guarantee system of carrier aircraft under attack of submunition[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(3): 59-63. (in Chinese)
- [73] 刘春美, 冯顺山, 张旭荣, 等. 破片对空间轨道目标的易损性分析及毁伤模型研究[J]. 弹道学报, 2007, 19(4): 47-50.
- LIU C M, FENG S S, ZHANG X R, et al. Research on vulnerability and lethality model for profile against orbital spacecraft[J]. Journal of Ballistics, 2007, 19(4): 47-50. (in Chinese)
- [74] 杨世荣, 刘伟, 王才宏. 导弹发射车易损性评估与建模[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(2): 41-44.
- YANG S R, LIU W, WANG C H. Vulnerability modeling and assessment of the multifunctional missile-launching vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2006, 26(2): 41-44. (in Chinese)
- [75] 刘钰, 董楠, 韩峰, 等. 群体AHP方法在复杂系统易损性分析中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(8): 152-158.
- LIU Y, DONG N, HAN F, et al. Assessment method for vulnerability of complex systems based on group AHP[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2014, 44(8): 152-158. (in Chinese)
- [76] 王海坤, 刘建湖, 张效慈, 等. 基于模糊随机理论的舰船易损性评估模型[J]. 兵工学报, 2016, 37(增刊1): 57-64.
- WANG H K, LIU J H, ZHANG X C, et al. Naval ship vulnerability assessment model based on fuzzy-random theory[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(Suppl 1): 57-64. (in Chinese)
- [77] 陈文, 张庆明. 爆炸冲击波下导弹结构动力分析模型初步研究[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 199-204.
- CHEN W, ZHANG Q M. A preliminary investigation on dynamic analysis models for missile structures subjected to blast wave[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2): 199-204. (in Chinese)
- [78] 卢永刚, 钱立新, 杨云斌, 等. 目标易损性/战斗部威力评估方法[J]. 弹道学报, 2005, 17(1): 46-52.
- LU Y G, QIAN L X, YANG Y B, et al. Vulnerability/lethality assessment method based on virtual model[J]. Journal of Ballistics, 2005, 17(1): 46-52. (in Chinese)
- [79] 肖师云, 冯成良, 陈文, 等. 目标易损性一体化建模[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(5): 217-222.
- XIAO S Y, FENG C L, CHEN W, et al. Integrative modeling of target vulnerability[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(5): 217-222. (in Chinese)
- [80] 王鑫. 装甲车辆目标易损性及数据库系统技术研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
- WANG X. Research on target vulnerability and database system technology of armored vehicle[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2020. (in Chinese)
- [81] 吴文朋, 李立峰, 胡思聪, 等. 公路桥梁地震易损性分析的研究综述与展望[J]. 地震工程与工程振动, 2017, 37(4): 85-96.
- WU W P, LI L F, HU S C, et al. Research review and future prospect of the seismic fragility analysis for the highway bridges[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2017, 37(4): 85-96. (in Chinese)
- [82] NIELSON B G. Analytical fragility curves for highway bridges in moderate seismic zones[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2005.
- [83] 庞于涛, 袁万城, 党新志, 等. 考虑材料劣变过程的桥梁地震易损性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 348-354.
- PANG Y T, YUAN W C, DANG X Z, et al. Stochastic fragility analysis of bridges with a consideration of material deterioration[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2013, 41(3): 348-354. (in Chinese)
- [84] 王伟, 胡书领, 邹超. 基于增量动力分析的梁贯通式支撑钢框架地震易损性研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(4): 42-49.
- WANG W, HU S L, ZOU C. Seismic fragility analysis of beam-through steel braced frames based on IDA method[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(4): 42-49. (in Chinese)
- [85] 翟成林, 陈小伟. 导弹战斗部打击下目标毁伤评估的研究进展[J]. 含能材料, 2021, 29(2): 166-180.
- ZHAI C L, CHEN X W. A Review on damage assessment of target hit by missile warhead[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2021, 29(2): 166-180. (in Chinese)
- [86] ABEDINI M, MUTALIB A A, RAMAN S N, et al. Pressure-impulse (P-I) diagrams for reinforced concrete (RC) structures: a review[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2019, 26: 733-767.
- [87] MARX J D, WERTS K M. The application of pressure-impulse curves in a blast exceedance analysis[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(3): 478-482.
- [88] ZHAI C L, CHEN X W. Damage assessment of the target area of the island/reef under the attack of missile warhead[J]. Defence Technology, 2020, 16(1): 18-28.
- [89] 余庆波, 刘宗伟, 金学科, 等. 活性破片战斗部威力评价方法[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(7): 661-664.
- YU Q B, LIU Z W, JIN X K, et al. Method for assessing lethality of reactive fragment warhead[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012, 32(7): 661-664. (in Chinese)
- [90] 安文书, 卢薇, 李红欣, 等. 基于Q准则的燃烧弹热辐射效果评估研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(4): 95-97, 136.
- AN W S, LU W, LI H X, et al. Assessment of damage in

- heat radiation of incendiary bomb on Q criterion[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(4): 95 - 97, 136. (in Chinese)
- [91] 高伟伟, 江志东, 曲家庆, 等. 电子信息系统对高功率微波武器防护措施研究[J]. 制导与引信, 2020, 41(1): 48 - 53.
GAO W W, JIANG Z D, QU J Q, et al. Research on the protective measures of electronic information system against HPM weapons[J]. Guidance & Fuze, 2020, 41(1): 48 - 53. (in Chinese)
- [92] 王明磊, 苏冠群, 徐长吉. 超高频 RFID 的电磁辐射标准与安全评估[J]. 中国标准化, 2019(16): 246 - 249.
WANG M L, SU G Q, XU C J. Electromagnetic radiation standards and security assessment of UHF RFID[J]. China Standardization, 2019(16): 246 - 249. (in Chinese)
- [93] 朱锡, 张振华, 梅志远, 等. 舰船结构毁伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
ZHU X, ZHANG Z H, MEI Z Y, et al. Damage mechanics of warship structure subjected to explosion [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [94] 李彦彬, 余丽山, 赵永龙, 等. 基于相邻优属度熵权的飞机抗毁伤能力评估[J]. 航空工程进展, 2017, 8(3): 262 - 267.
LI Y B, YU L S, ZHAO Y L, et al. Assessment of aircraft anti-damage capability based on adjacent important degree with entropy weight [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2017, 8(3): 262 - 267. (in Chinese)
- [95] 余丽山, 李彦彬, 赵永龙, 等. 基于 BP 神经网络的飞机抗毁伤能力评估[J]. 弹箭与制导学报, 2018, 38(1): 23 - 26.
YU L S, LI Y B, ZHAO Y L, et al. Assessment of aircraft anti damage capability based on BP neural network [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2018, 38(1): 23 - 26. (in Chinese)

(编辑: 王颖娟, 罗茹馨)