

文章编号: 1006-9941(2021)02-0166-15

导弹战斗部打击下目标毁伤评估的研究进展

翟成林^{1,2}, 陈小伟^{1,3}

(1. 北京理工大学 爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 3. 北京理工大学 前沿交叉科学研究院, 北京 100081)

摘要: 随着远程作战的理念在现代战争中不断深化和发展, 导弹打击已成为各种作战方式中不可或缺组成部分。导弹战斗部对目标的毁伤评估则成为近年来毁伤研究的重点。本文围绕导弹战斗部打击目标过程所涉及的毁伤评估研究进行总结概述, 分别从目标毁伤评估模型、毁伤过程主体、分类目标毁伤、毁伤评估手段四方面进行阐述, 梳理现有主要成果。指出目前存在毁伤程度判定不规范、毁伤映射关系不清晰以及毁伤概率求解不准确等主要问题, 并针对存在的问题和研究不足提出未来研究方向的见解, 可为相关领域的研究提供参考。

关键词: 远程作战; 毁伤评估; 评估模型; 易损性分析; 评估分析手段

中图分类号: TJ4

文献标志码: A

DOI: 10.11943/CJEM2020316

1 引言

随着军事科学技术的高速发展, 远距离作战已成为现代战场的主要作战模式之一。导弹作为其中重要的组成部分, 得到世界各国的大力发展。在此背景下, 导弹打击下目标毁伤评估也随之成为研究热点。

导弹打击下目标毁伤评估是一个基于多学科知识的复杂系统过程, 是指对目标实施打击效果的确定, 可分为战斗部毁伤评估、目标易损性分析以及毁伤过程评估三方面, 分别对应的评估主体为导弹战斗部、被打击目标及二者之间的相互作用。其中, 战斗部毁伤评估是指围绕战斗部毁伤能力开展相关研究, 包含毁伤效能、毁伤威力等; 目标易损性分析则是基于被毁伤目标特征进行的结构破坏或功能丧失程度的研究; 而毁伤过程评估则是借助于数值模拟与仿真、理论与方法评估或现场试验等手段, 从毁伤机理、影响因素等方面开展过

程分析评估^[1]。三者研究所获结果广泛应用于弹药设计优化、目标防护改进以及作战策略制定等方面。

围绕毁伤评估的相关研究, 已有学者基于不同侧重开展综述总结。王华等^[2]与樊胜利等^[3]针对不同场景下武器装备的毁伤评估方法进行讨论, 黄寒砚和王正明^[4]侧重于总结武器的毁伤效能, 而马茂春等^[5]则对武器装备的毁伤评估方法、试验、系统和规范进行综述。针对具体目标的毁伤, 傅常海等^[6]总结梳理了导弹战斗部对复杂目标毁伤效能评估的一般方法和关键技术。显然, 以上工作皆是在特定范围内针对毁伤评估方式、方法或毁伤效能评估等进行总结, 而毁伤评估研究涉及范围广泛, 综述难以全面涵盖。

着眼于导弹战斗部打击目标毁伤评估研究的总体, 本文重点探讨冲击波、破片对不同目标毁伤过程中的评估模型、毁伤主体和评估手段等内容, 给出毁伤评估模型、毁伤过程主体、分类目标毁伤、毁伤评估手段等四方面的归纳评述, 而对引战配合、弹目交汇等非重点探讨内容仅作粗略分析, 详细框架如图 1 所示。相关分析可为后续研究提供相应参考。

2 目标毁伤评估模型

军事技术和功能需求的升级促使被打击的目标变

收稿日期: 2020-12-10; 修回日期: 2020-12-25

网络出版日期: 2020-12-28

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11872118)

作者简介: 翟成林(1990-), 男, 博士研究生, 主要从事毁伤评估研究。e-mail: 3120170141@bit.edu.cn

通信联系人: 陈小伟(1967-), 男, 教授, 主要从事超高速碰撞、穿甲与侵彻、毁伤评估等研究。e-mail: chenxiaoweintu@bit.edu.cn

引用本文: 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 Cheng-lin, CHEN Xiao-wei. A Review on Damage Assessment of Target Hit by Missile Warhead[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2021, 29(2):166-180.

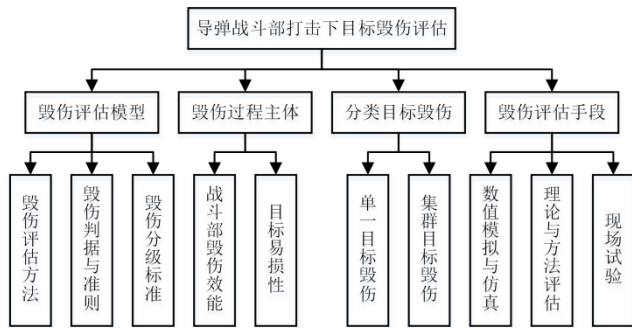


图1 导弹战斗部打击下目标毁伤评估概述框架

Fig.1 The framework of target damage assessment under missile warhead strike

得越来越复杂和多样,对其进行毁伤程度研究时需要考虑众多方面因素,包括如何选取适当的方法对目标或目标区域进行毁伤评估,如何对目标或目标区域进

表1 典型毁伤评估方法对比

Table 1 Comparison of typical damage assessment methods

名称	特征	优缺点
DEA方法 ^[7]	以相对效率概念为基础发展起来的效率评价方法	不需要确定投入指标和产出指标之间关系的任何形式表达式
AHP方法 ^[8]	多方案或多目标的决策方法	层次清晰、计算简便,但要素之间比较困难且未考虑关联性
模糊综合评估法 ^[9]	基于模糊数学的综合评价方法	能对模糊对象做出比较科学、合理评价,但计算复杂
贝叶斯网络法 ^[10]	基于概率的不确定性推理方法	满足信息不确定、不完整条件下的评估需求
毁伤树 ^[11]	根据关键事件以及它们之间的逻辑关系所建立的树形结构的定量分析方法	描述因果关系直观,思路清晰,逻辑性强,既可定性分析,又可定量分析
BP神经网络 ^[12]	交互式评价方法	既能避免人为计取权重的不精确性,又能避免相关系数求解的复杂性,但需要大量数据
主成分分析法 ^[13]	把多指标转化为少数指标的多变量分析统计方法	消除指标间相关影响,减少指标选择工作量,但具有一定的模糊性
灰色关联分析法 ^[14]	根据因素之间发展趋势的相似或相异程度进行评判	对样本量和分布规律要求低,且计算量小,但目前仍不完善,应用受限
聚类分析法 ^[15]	研究分类的一种多元统计方法	过程直观、结论简明,但当样本量较大时,结论获取困难

毁伤评估作为一个多学科交叉的研究领域,需要应用多方面的知识。由表1可知,当前应用的毁伤评估方法多是来源于管理学、统计学等学科或是由其中相关方法演变而来。除表1总结的方法之外,应用于毁伤评估还有串并联模型、线性回归、网络图模型、加权求和、降阶态法、嫡权法、D-S证据理论、相邻优属度等方法。

毁伤评估的目的在于尽可能通过已知信息预测或评价目标毁伤状态,而毁伤评估方法均有着自身的适用环境,需要基于被评估对象以及评估过程的特征进行倾向性选择。例如,曲婉嘉等^[16]针对较多不确定因素影响下目标毁伤评估问题,提出了一种新型的基于贝叶斯网络云模型的毁伤评估方法;该课题组^[17]还针对雷达阵地毁伤评估问题,提出一种基于GA-动态BP

神经网络的评价方法;而杨青青等^[18]应用突变理论和模糊数学理论组合成一种多属性决策方法——突变决策方法。

2.1 毁伤评估方法

毁伤评估方法作为毁伤评估模型的核心,决定着目标毁伤评估过程的准确性、合理性和简便性。自二战以来,各国高度重视毁伤研究工作,不断改进并探究新方法,使毁伤评估方法得到进一步发展。

发展和应用毁伤评估方法的目的,在于对目标毁伤程度进行精确评估。表1总结给出了应用于毁伤评估方面的方法,并给出对应的特征和优缺点。

需指出的是,通过现有方法对比可以发现,对目标仅采用单一的方法进行毁伤评估,不可避免地受到方法本身劣势的影响,且通常需要被评估的对象较为简单、常规。而随着军事技术的发展,目标变得更加复杂,应用现有方法对其进行毁伤评估可能受到较大局限。仅靠单一的毁伤评估方法很难获得准确的毁伤结果,必须针对目标特点,在最适合方法的基础上,引入其他理论、方法以克服其不足。因此,有必要对现有评估方法进行改进,如基于评价过程的特征对方法进行组合,进而发挥出方法各自的优势。

改进方法已成为毁伤评估方法的研究趋势,其研

究难点则是针对目标特点,如何选取最合适的方法以及如何对方法进行改进,以求达到最好的毁伤评估效果。Zhai和Chen^[19]在导弹打击下岛礁目标区域的毁伤评估中进行了评估方法的探究,结合灰色关联度法和层次分析法解决了不同岛礁设施重要性的量化,又应用模糊综合评价法对岛礁目标区域进行了综合评价。根据目标特征以及对应的研究需求,选取和整合恰当的毁伤评估方法,以准确评估目标毁伤程度的方面,仍可开展更广泛的研究。

另一方面,除已被引入到毁伤评估研究的方法和理论之外,相关学科仍存在未得到开发利用的理论和方法,且新理论和新方法也在不断建立。因此,毁伤评估方法的研究仍在继续深入。

2.2 毁伤判据与准则

目标毁伤判据与准则是评判目标毁伤程度的量化指标,是将定性描述转换成定量判定的评估基础。国外对其研究较早,目前已形成较为完善的毁伤判据与准则体系,且广泛应用于毁伤评估中。与之相比,国内则是从20世纪80年代才陆续开展毁伤判据与准则的研究,其研究的深度与广度均存在一定的差距。

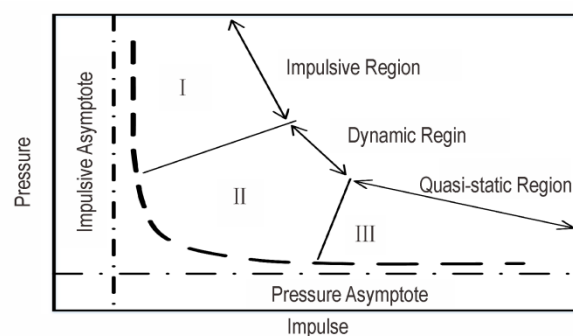
综合以往研究,本文将其分为两类,一是基于能量的角度来判别、量化目标毁伤的研究;二是基于数量、百分比的角度衡量目标毁伤的研究。需要阐明的是:毁伤判据与准则的研究侧重、目标层级不尽相同,从构件到系统再到目标整体均有涉及。

研究导弹打击下目标的毁伤判据与准则即是研究毁伤元对系统构件、子系统和目标整体的毁伤判据与准则。依据文中对毁伤判据与准则相关研究的分类,首先从基于能量角度的研究评述,其毁伤判据与准则是以某一界限进行划分,且相关研究主要集中于冲击波和破片两个方面。

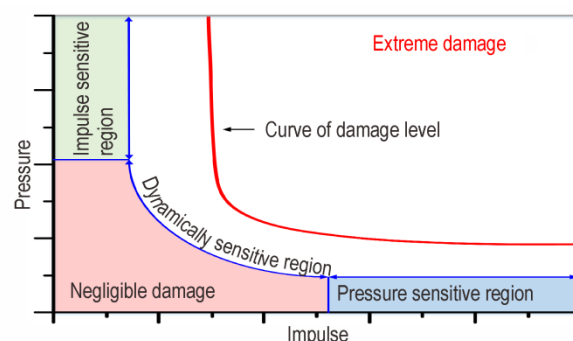
2.2.1 冲击波毁伤准则

衡量冲击波对目标的毁伤能力依据其自身的超压和冲量。当前冲击波毁伤准则有超压准则、冲量准则和超压-冲量准则^[20]。其中,超压准则认为,只有当冲击波超压大于或等于某一临界值时,才会对目标造成一定程度的毁伤。超压准则是以冲击波超压作为唯一衡量标准,由于未考虑超压持续时间,其存在严格的适用范围。冲量准则认为,只有当作用于目标的比冲量达到或超过某一临界值时,才能对目标造成一定程度的毁伤。虽然冲量准则同时考虑了冲击波超压、持续时间和波形等因素,相比于超压准则更加全面,但其忽略了目标毁伤存在临界超压的事实,应用时仍有严格

的适用范围限制。超压-冲量准则认为,冲击波对目标的毁伤效应由超压和冲量共同决定,只有二者同时达到或超过某一临界值,才能对目标造成一定程度的毁伤。显然,超压-冲量准则更具科学性和普遍意义,其评判结果将更具有应用价值。 $p-I$ 曲线的主要特征如图2所示。



a. a typical pressure-impulse diagram



b. description of the $p-I$ damage curve

图2 $p-I$ 曲线特征^[21]

Fig.2 The characteristics of $p-I$ curve^[21]

关于冲击波毁伤准则方面,Pape等^[22]研究爆炸对结构的影响,应用超压-冲量准则、有限元分析预测爆炸毁伤结果。Marx等^[23]应用超压和冲量分析评估建筑物毁伤,并探讨了 $p-I$ 曲线在建筑毁伤中的应用。Zhai和Chen^[19]在评估导弹战斗部对建筑目标毁伤时,采用了超压-冲量准则判定建筑目标的毁伤程度。这些学者均是基于超压-冲量准则对建筑目标进行预测和判定以获取更为准确的结果。而在研究目标毁伤过程中,应用单一准则只能进行简单的预测,不能满足精准评估毁伤的研究需求。除超压或冲量在目标毁伤中是绝对主导或简化某一因素不影响目标毁伤分析,目前大部分研究还是基于超压-冲量准则在开展相关研究。

2.2.2 破片毁伤准则

破片毁伤准则有动能准则、比动能准则、破片质量准则^[24]。其中,动能准则是以破片对固定目标和活动

目标产生作用的动能值来确定目标毁伤程度。比动能准则以单位迎风面积上的破片动能作为判定标准。破片质量准则是以破片质量判定毁伤能力的准则,其本质仍为动能准则。这些准则以能量作为标准,虽然标准单一,但由于简便,应用广泛。

一些学者针对破片的毁伤准则进行了一些研究。Konokman等^[25]评估破片战斗部打击下的军用飞机脆弱性,以剩余质量和速度来度量破片,通过不同方向的模拟最终得到飞机的毁伤概率。余庆波等^[26]从活性破片毁伤机理和毁伤模式出发,以破片动能以及空间分布密度作为判定准则,建立了一种活性破片战斗部威力评价模型。王林等^[27]在某型155 mm榴弹静爆威力试验中,基于比动能准则对战斗部杀伤威力进行了评价。

虽然相关学者已对冲击波和破片的毁伤准则进行一定研究,但由于冲击波和破片毁伤目标的过程不能被完全量化,且毁伤程度本身就是一个相对模糊难以界定的概念。因此,研究冲击波和破片的毁伤准则过程中,仍需要更深入探究以求更精确地判定目标的毁伤程度。

除了从能量角度开展毁伤判据与准则的研究外,还有则是从数量、百分比的角度开展的毁伤判据与准则的研究。这类研究通常比较分散,不同目标、场景、方法的情况下都会存在差异。因此,研究内容相对复杂,但这是在方法、模拟评估中判定目标毁伤程度所不可或缺的研究。破片的密度分布准则^[24]便是其中之一。该准则认为判定破片毁伤能力时,除考虑破片速度、质量外,还应考虑破片的分布密度。王光源等^[28]运用马尔可夫过程理论建立多次拦截反舰导弹的概率模型,其中对战斗部预制破片进行量化分析,建立了破片的面密度模型,以 $P_{k/n}$ 函数作为毁伤准则。应用密度分布准则首先需要确定密度分布函数,由于受多种因素的影响,使其存在较大误差,往往无法很好表达最后的毁伤结果。

除此之外,还有一些学者针对具体目标、情形开展相应毁伤判据与准则研究。卢熹等^[29]根据水中爆炸冲击波特性参量的一般形式,提出了一种毁伤准则,给出基于毁伤规律概率“0-1”分布函数的毁伤准则与判据的获取方法。吴国东等^[30]结合子母弹毁伤区域及目标区域的特点,建立一种新的子母弹对面目标毁伤效能评估准则。李伟等^[31]在空地导弹对两种停放方式飞机的毁伤研究中,针对侵彻爆破战斗部对掩蔽库内飞机毁伤,构建了以不同程度毁伤比例为标准的毁

伤准则。这些研究均是针对各自场景,给出对应的毁伤准则或是对毁伤准则的确定方式进行研究。

必须指出,虽然国内不同单位近年已开展一些目标的毁伤判据与准则的相关研究,但由于理解不一,存在等级划分不规范、体系架构不清晰、界限不明确且没有形成系统的研究理念等诸多难以解决的问题。与此同时,毁伤判据与准则的制定在一定程度上需要试验数据作为支撑,欧美国家相关研究由于起步早,相关数据积累丰富且多为保密数据。目前受限于基础科学发展以及数据积累程度,难以在短时间内赶超。因此,在毁伤判据与准则制定的标准化方面以及多学科交叉融合方面有待进一步探索。

2.3 毁伤分级标准

在毁伤判据与准则的基础上,毁伤分级标准也是毁伤评估中必不可少的一环。毁伤分级可以量化出目标的毁伤状态,有助于对应方案的制定和选取。毁伤分级标准以毁伤评估角度的不同可分为判定目标物理毁伤程度和功能毁伤程度两方面。同时,毁伤分级标准需要以毁伤判据与准则、试验数据统计结果或作战毁伤要求作为划分依据。前文所提到冲击波和破片的毁伤判据与准则便是毁伤分级标准的划分依据之一。

相关学者针对目标的毁伤分级标准进行了许多基础性的探索性研究。其中,杨延平^[32]对建筑目标进行毁伤研究,给出一般建筑物毁伤程度的分级标准。王树山等^[33]以撞击目标单位面积上的有效破片数量制定目标的毁伤分级标准。王城成等^[34]基于导弹功能失效的模式,从部件毁伤效果描述,给出导弹目标的毁伤等级。曾涛等^[35]给出了导弹打击下军用机场跑道的毁伤等级标准。倪春雷和姜鹏^[36]研究反舰导弹战斗部对舰船毁伤,建立了以损伤典型标志为代表的毁伤分级标准。

当前在毁伤分级标准方面,一般从物理和功能两个层面将目标的毁伤程度分为3个及以上的毁伤等级,用于对目标毁伤程度的描述。其中,如何制定和完善毁伤分级标准仍是主要研究方向。由于缺乏明确的标准划分框架,很多情形下只能依据具体特征进行相对主观的毁伤分级标准划分。另外,还有基于现场试验数据或统计分析数据进行毁伤等级划分,这种方式相对可靠,但需要有大量数据支撑,且对于不同目标通用性差,无法得到广泛应用。

毁伤判据、准则和分级标准是评估目标毁伤的重要组成部分,且当前均存在很多问题需要进一步研究,仍存在很大的探索空间。毁伤判据与准则和毁伤分级

标准的本质是阈值的确定,而阈值的准确与否直接影响目标的毁伤评估结果。

总之,如何基于被评价对象的特征,引入、组合并确定最理想的方法以达到最为准确的评估结果依然是毁伤评估方法目前研究的重点和难点。对于毁伤判据与准则的研究,其难点主要集中于明确、规范等级界限的划分,以及毁伤数据积累、运用方面。对于毁伤分级标准的研究,由于其在一定程度上需借助于毁伤准则与判据,除毁伤判据与准则所面临的难点外,将定性描述准确转换成定量判定亦是另一个难点。

3 毁伤过程主体分析

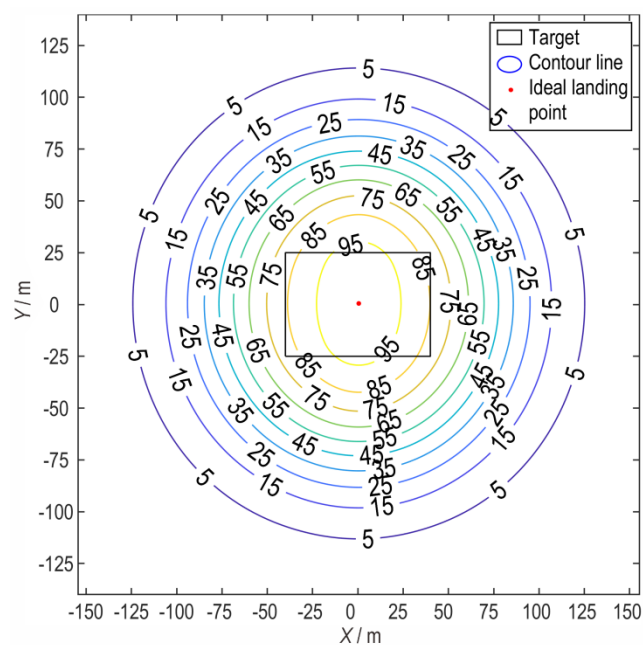
3.1 战斗部毁伤效能

战斗部作为导弹系统中直接对目标进行毁伤的部件,其毁伤效能直接影响着毁伤效果。战斗部的毁伤效能是指在可靠前提下,战斗部能对目标造成何种程度毁伤的毁伤概率。它包含两层含义:(1)在打击目标的过程中,导弹战斗部可以造成毁伤的概率;(2)导弹战斗部产生的毁伤元对目标造成的毁伤程度。

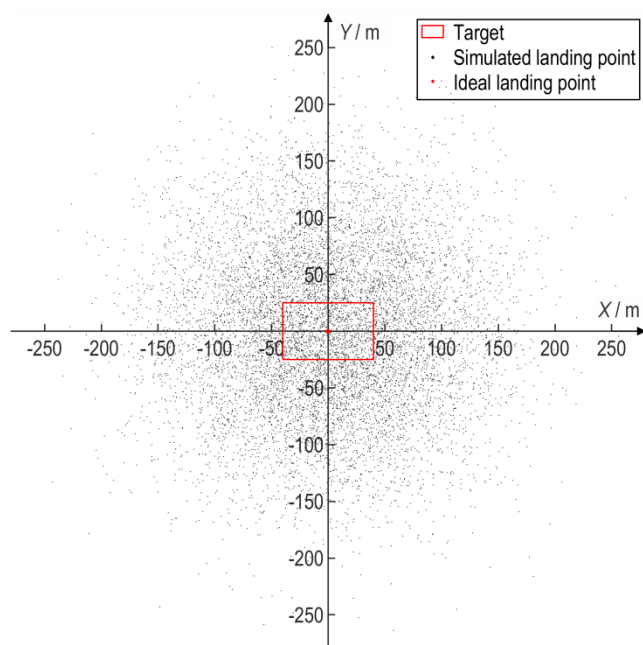
其中毁伤元意指不同类型战斗部对目标直接产生破坏作用的物质,如冲击波、破片、侵彻体、射流、高温等。由于毁伤元具有一定的毁伤倾向性,在分析其对目标造成何种毁伤时,不但需要考虑战斗部威力,还要分析目标特征。导弹打击目标是一个受多因素影响的复杂过程,而战斗部毁伤效能研究在其中占有重要地位,因此相关研究非常必要。

3.1.1 战斗部毁伤概率

按照导弹战斗部毁伤效能概念可知,求解导弹战斗部打击目标的毁伤概率包含求解战斗部的落点概率。国内外许多学者利用蒙特卡罗方法^[37-38]模拟打击效果以及模拟特定射击方式下的落点分布,是当前应用较多的替代方式之一。相较于解析法模拟与仿真目标系统的落点分布,采用蒙特卡罗方法的优势在于其可以简化过程,并且基于蒙特卡罗方法的目标毁伤评估可以精确得到毁伤概率值,其中,落点分布多采用二维正态分布^[39]。刘国国等^[40]应用蒙特卡罗方法,通过对大样本量统计,准确计算出圆概率误差(CEP)。Zhai和Chen^[41]针对导弹战斗部打击建筑目标的毁伤概率问题,应用蒙特卡罗方法对导弹战斗部进行落点模拟。在毁伤等势线的基础上,连续地表征了导弹打击下建筑目标毁伤概率与毁伤程度的关系,如图3给出某矩形(俯视)建筑目标的毁伤概率求解结果。



a. damage contour map



b. distribution map of landing points

图3 某矩形建筑目标的概率毁伤图^[41]

Fig.3 Probability damage of a rectangle building^[41]

除直接应用蒙特卡罗方法进行落点模拟研究外,还有一部分学者基于蒙特卡罗方法对导弹落点精度开展研究。Morio等^[42]针对蒙特卡罗模拟不能有效估计稀有分位数,提出一种改进的稀有事件估计方法。Guo和Zhang^[43]提出了几种与蒙特卡罗方法相结合的方差减小技术。王永杰^[44]提出了一个基于蒙特卡罗统计仿真的估计方法,有效提高了落点概率的估计精

度。郑小兵等^[45]应用蒙特卡罗方法设计了一种基于制导工具误差的模拟打靶试验统计方法。

总结这些研究可以发现,在应用蒙特卡罗方法进行战斗部落点模拟时,目前主要考虑影响因素并对其进行改进,使落点模型更加符合真实情况。由于影响因素不一,相关研究仍以具体目标为主,缺乏通用性和系统性。后续工作需要在计算战斗部落点概率方法的通用性和精确性进行更深入的研究。

除了研究导弹战斗部落点概率外,还需要考虑导弹战斗部近炸过程中是否能对目标产生有效的毁伤,即引战配合。导弹战斗部和目标的交会过程中,引信通过利用所获信息,再配合控制系统,适时引爆战斗部对目标进行有效毁伤。目标、引信和战斗部之间协调程度的好坏直接影响导弹战斗部打击目标的毁伤效果,一般用引战配合效率进行表征。

随着现代战场环境愈加复杂以及武器装备越发多样,对引信的要求也越高,不但需要可以探测并识别不同速度下的各种目标,还要具备足够的抗干扰能力。针对引战配合,相关研究主要围绕着引战配合数学模型、引战配合参数设计优化以及试验、评价方法等方面。其中,在引战配合数学模型方面,熊森才等^[46]基于末端姿态角、炸点位置等参数,建立了导弹战斗部运动过程中与目标毁伤之间的数学关系。赵宏伟和陈云俊^[47]研究了弹道末端弹目交汇过程中引战配合现象,并建立了高精度数学模型。朱景伟等^[48]基于导弹制导系统和引信信息,建立了任意空间交会下战斗部起爆延时的数学模型。张祥金和冯颖^[49]在三维垂直惯性坐标系内建立了最佳起爆延时和起爆方位角的模型。在引战配合参数设计优化方面,Nyongesa等^[50]针对引战配合的最佳起爆延时问题,利用遗传规划(GP)进行起爆延时求解,有效提高了延时运算的时效性。阚飞等^[51]提出了一种高效引战配合方法,解决了针对高速目标,传统引信延迟控制算法的滞后问题。刘松等^[52]基于命中点模型,对巡飞弹的引战配合进行设计,通过计算进而确定最佳起爆延时时间。无论是对引战配合进行模型分析还是参数优化,均是围绕着如何使导弹战斗部更准确地对目标进行毁伤。由于目标种类变多且目标之间差异明显,如何探索更有效的方法探测识别目标并确定最佳起爆延时时间依然是目前主要探究的方向之一。

在试验、评价方法方面,吕鸿鹏等^[53]研究引战配合的弹目交会毁伤概率问题,提出了一种虚拟试验方法,并设计了弹目交会仿真系统。韩波等^[54]提出了一

种针对引战配合效率的评估方法,可以对导弹打击下目标的引战配合效率进行评估。洛强等^[55]设计了一个引战配合虚拟试验系统,并对其子系统模型的实现方法进行了探究。由于引战配合试验成本高,而准确的数据又是对其进行评价和设计的基础,因此,开发可代替真实试验的虚拟试验方法也成为目前需要解决的问题。

3.1.2 战斗部威力

毁伤倾向性导致某种毁伤元仅对某类目标可能具有显著的破坏能力,因此需针对不同类型毁伤元对不同类型目标的毁伤研究。常规导弹战斗部仍以冲击波与破片为主要毁伤元,故本文主要围绕二者对战斗部威力进行概述。

冲击波对目标的毁伤主要源于超压和冲量。Marx和Werts^[56]探索了 $p-I$ 曲线在建筑破坏中的应用。Ferradás等^[57-58]给出了一种估算球形容容器爆炸产生的冲击波对建筑影响的分析方法。Alonso等^[59-61]提出了一种在已知爆炸物TNT当量前提下,其产生超压对建筑影响的分析方法。Cullis等^[62]将爆炸冲击与结构之间交互作用中的建模功能与具有广泛应用的脆弱性模型相结合,使其能够适用更多的情况。Luccioni等^[63]对爆炸载荷作用下钢筋混凝土结构的破坏进行了分析,并再现了炸药爆炸到完全破坏的整个过程。Held^[64]讨论了爆炸波传播及其与目标结构相互作用所涉及的参数,以指出TNT等效方法的固有误差和适用范围。Zhai和Chen^[41]基于PROBIT等式,给出冲击波的超压、冲量与建筑目标毁伤程度的关系,并据此关系计算得到建筑目标的毁伤等势线。再利用蒙特卡罗法模拟导弹战斗部的落点,最终获得建筑目标的概率毁伤结果。

上述这些研究主要集中于在某些模型下,如何准确表征冲击波超压或冲量的关系,其次是对现有方法进行改进,使其对相应情景更具有适用性。但无论是对冲击波的模型或是其对目标的毁伤,仍需要探索更准确的方式表征冲击波的特征以及其对目标的毁伤模型。

破片对目标造成的毁伤受其质量、速度、尺寸和分布等众多因素的影响,毁伤示意如图4所示。针对破片对目标破坏过程,宋文渊^[65]通过统计杀爆弹战斗部自然破片的大量外形数据,分析其分布规律。韩夫亮^[66]计算了在爆炸载荷作用下预制破片驱动过程和飞散分布的特性,获得预制破片在爆炸载荷作用下的主要物理参数变化规律。孔祥韶等^[67]数值模拟战斗

部壳体产生的破片空间分布及速度特性,探讨了破片尺寸的影响因素。安振涛等^[68]研究了常规弹药爆炸后破片与冲击波的作用规律,分析认为两者同时到达目标的距离与破片形状和质量关系不大。这些研究主要针对破片物理参数或是分布特征进而分析破片的毁伤过程,本质是研究破片自身特性。

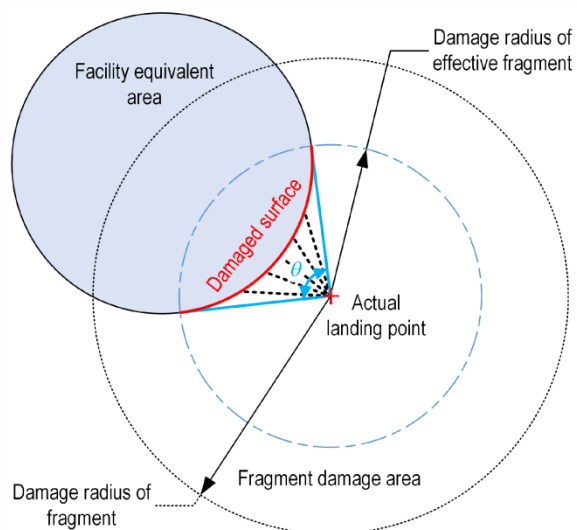


图4 破片毁伤示意图^[19]

Fig.4 Top view of fragment damage^[19]

除此之外,还有应用破片毁伤模式开展相关研究,讨论破片特性及其影响因素。张辉等^[69]为解决传统自然破片战斗部命中精度不高、毁伤效率低等问题,提出利用大质量定向破片群提高毁伤目标的效能。余庆波等^[70]从活性破片毁伤机理和毁伤模式出发,提出了一种活性破片战斗部威力评价方法,并建立相应的威力评价模型。而另一部分学者针对战斗部类型或目标进行具体的研究。Moxnes等^[71]运用AUTODYN对155 mm的杀爆战斗部进行试验和仿真研究,计算战斗部的破片质量分布和初速。印立魁等^[72]运用AUTODYN分析已有试验的爆炸驱动过程,建立立方体破片的初速计算模型。李翔宇和卢芳云^[73]用有限元动力学程序LS-DYNA模拟了具有相同结构口径、相同装药类型的可变形战斗部和传统周向均匀战斗部的飞散过程。

对于具体战斗部和目标的破片毁伤研究会随着军事科学技术发展而不断进步。目前存在的主要问题之一是,战斗部种类以及目标模型少,不能很好地开展战斗部毁伤效能评估。因此,无论是对于破片特性,还是破片毁伤目标的过程,均存在一定的研究空间。

3.2 目标易损性

目标易损性研究是指当目标受到导弹战斗部的打

击后,对其结构、功能损失的毁伤分析,分析的主体为被打击目标。目标易损性研究是毁伤方式选择、毁伤方案设计的基础。

欧美等发达国家对目标易损性的研究较早,积累了丰富的研究经验和易损性数据^[74-75]。国内相对起步较晚,还没有形成完善、实用的易损性分析技术,且目前的研究成果到实际应用还存在一定距离。现有对于目标易损性的研究,集中于研究方法、易损性建模以及具体目标的易损性分析。

针对目标易损性研究方法,卢永刚等^[74]提出了基于“虚拟模型”的目标易损性/战斗部威力评估系统方法;肖师云等^[76]基于目标真实结构和目标毁伤律模型,提出一种“目标毁伤虚拟模型”的一体化目标易损性描述及建模方法。

针对易损性模型及具体目标的易损性分析,杨云斌等^[75]建立了战斗部威力/目标易损性评估软件的基本原则和总体框架。巩建兴等^[77]以目标系统效能对各种毁伤元素的敏感程度来定义目标易损性,并给出了目标易损性的数学模型。王玉等^[78]提出依据毁伤元打击方向,将易损部件投影到呈现面的二维结构易损性等效结构建模方法。对模型的研究存在的问题是易损性模型适用范围有限,针对不同的目标需要开发对应的易损性模型。因此,在易损性模型方面,需要提高模型应用的广泛性。

在易损性模型基础上,一些学者还开发了易损性分析系统。掌亚军^[79]介绍了空中目标易损性建模的程序、内容、方法。王国辉等^[80]建立了典型反坦克弹药对目标毁伤的数学模型,利用VC++平台开发了主战坦克目标易损性分析与毁伤评估仿真系统。秦宇飞等^[81]对某型飞机弹目交会条件下的目标易损性进行了分析,并设计开发了该型飞机的目标易损性分析系统。

开发对应的易损性分析系统可以更加快速得到目标的易损性结果,但目前的易损性系统都互相独立,不利于推广使用,因此,可以在易损性系统标准开发方面进行一定的探索。

战斗部毁伤效能研究可分为战斗部毁伤概率研究与战斗部威力研究。其中,在战斗部毁伤概率方面,如何改进落点模型使其更加符合真实情况以及如何探测、识别目标以确定最佳起爆延时仍是主要的难点问题。在战斗部威力方面,准确表征冲击波、破片特征以及二者对目标的毁伤模型则是研究的重点和难点。对于目标易损性研究,其难点主要集中于易损性研究方法开发、易损性建模和具体目标易损性分析等方面。

4 分类目标毁伤研究

4.1 单一目标毁伤

单一目标并非简单目标,是打击过程中的单一个体目标,包含单一建筑目标与装备目标。随着精确打击的发展,对单一目标毁伤已成为毁伤评估研究中重要组成部分。目前国内外已开展的毁伤评估研究中,大部分是围绕单一目标开展的,如建筑类的机场、指挥大楼等,设备类的舰艇、飞机、坦克、雷达等。

在建筑目标毁伤方面,Cizelj等^[82]针对建筑物结构的爆炸载荷问题,重新探究了简单而可靠的结构分析方法,并提出它们在爆炸载荷结构易损性评估中的应用。Heckötte等^[83]通过数值模拟与试验对建筑目标的高能冲击毁伤进行研究,最终得到相应的毁伤模型。Kelliher等^[84]将蒙特卡罗法与一个简化但保守的连续倒塌结构模型进行组合,进而生成数据集,并对爆炸载荷下的钢筋混凝土框架建筑物进行毁伤分析。Atkinson等^[85]描述了建筑物的破坏模型,给出评估内部和外部毁伤程度的方法。这些研究的焦点主要集中在建筑的毁伤模型上,研究建筑目标如何损坏。以毁伤模型为基础,有些学者开展了建筑目标毁伤应用研究,如刘瑞朝等^[86]对几种精确制导武器攻击典型通信指挥大楼开展了毁伤效果评估研究,建立了典型地面建筑毁伤元快速工程算法。Stewart和Netherton^[87]描述了冲击波和破片的概率安全和风险模型如何更好地为定量爆炸风险评估提供依据。刘卫兵等^[88]针对机场的特点,从物理毁伤、功能毁伤以及恢复能力等角度出发,建立了机场目标二级模糊综合评估指标体系。

建筑目标的毁伤研究主要基于物理强度和结构分析目标的物理毁伤程度。相较于设备系统的毁伤,其研究思路相对固定。而设备往往多样且不能看作简单个体,尤其是随着科技发展,设备的复杂性和系统性越来越高,其毁伤研究便越发复杂。谢卓杰等^[89]针对子母弹打击航空母舰的毁伤进行了评估研究。司凯等^[90]建立了破片式战斗部对飞机类目标的毁伤评估模型。李向荣等^[91]利用计算机仿真方法进行杀爆弹对主战坦克毁伤评估。李超等^[92]建立了破片式战斗部对相控阵雷达的毁伤评估模型。由于设备目标种类繁多,研究需求、方式和方法相对各异,因此,难以进行统一规范。

对于单个目标的毁伤评估,存在的一个主要问题是目标物理毁伤和功能毁伤之间的映射关系不清晰,

这也是当前毁伤评估的难点。目前关于毁伤响应函数的获取研究一般从物理分析和数学分析两个角度展开,为方便描述,通常会基于经验构建一些简单的毁伤关系函数,但其建模和使用都是基于对毁伤进行宏观大致描述,精度不高。另一方面,从纯数据分析的角度构造毁伤响应函数是将毁伤过程看作是一个黑盒,利用回归分析来归纳关系,不能从理论角度对目标进行具体解释。因此,在物理毁伤到功能毁伤的映射关系方面仍有较大的研究空间。

4.2 集群目标毁伤

当导弹同时毁伤的目标不止一个时,可认为其毁伤的目标为集群目标。集群目标可以为同类型目标,亦可为不同类型目标。衡量集群目标毁伤程度的重要参数有最优瞄准点和最大毁伤面积比。对于集群目标的毁伤,相关研究包括同时毁伤多个目标的毁伤评估,以及开发各种毁伤算法。

针对同时毁伤多个目标的研究中,Ambrosini等^[93]提出了一种在弹坑位置难以获得情况下,确定恐怖袭击中爆炸物位置和重量的方法。Ghajari等^[94]研究了爆炸破坏载荷下目标区域的物理脆弱性。Zhai和Chen^[19]对导弹打击下岛礁区域内的各类目标同时毁伤进行了研究,在不同类型目标毁伤模型的基础上,量化了岛礁区域内的总体毁伤程度,如图5所示。

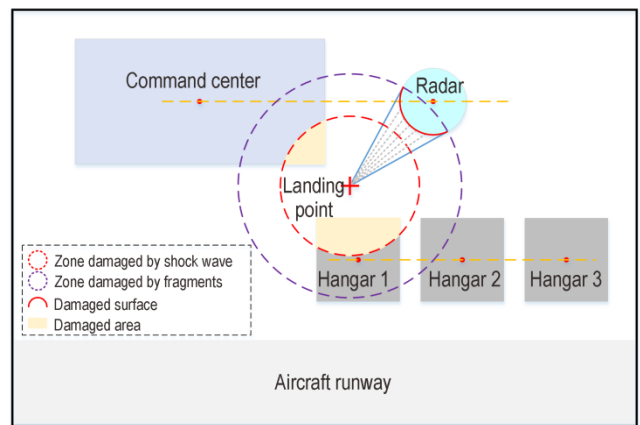


图5 某岛礁区域内目标的毁伤量化示意图^[19]

Fig.5 Schematic diagram of the damage quantification of an area in island/reef^[19]

同时针对多个目标的毁伤效应研究相对匮乏,更多研究集中于目标的打击顺序上。李义文等^[95]根据信息化条件下炮兵作战任务的特点,建立了炮兵火力打击目标价值评估的指标体系。张艳辉等^[96]在构建珊瑚岛礁直接火力准备目标指标体系基础上,对目标进行加权关联度排序分析,从而得到目标最优排序结

果。侯亮和袁山增^[97]在评判指标下计算目标的单指标优度,然后经模糊综合评判得到目标的总体优度,并据此对目标进行排序。

这类研究往往依据所建立的指标体系仅给出打击顺序,无法量化对目标的毁伤程度,参考价值受限。而在现有毁伤技术的前提下,单枚导弹战斗部对多个目标造成毁伤已经十分容易实现。同时,由于战斗部存在落点误差,使其对于区域内目标总体毁伤程度的研究更具有意义。因此,需要进一步研究导弹战斗部对于多个目标的毁伤评估的量化方法,以及进一步开发在目标打击顺序基础上多个目标的毁伤研究。

总之,对于单一目标毁伤的研究,如何表征物理毁伤和功能毁伤之间的映射关系依然是目前的重点和难点。对于集群目标毁伤的研究,其难点主要集中在对于多种多个目标的毁伤评估量化方法和算法方面。

5 毁伤评估研究手段

毁伤评估手段是获得毁伤评估结果的方式,对于导弹战斗部打击下目标的毁伤评估过程,不同毁伤评估手段的结果是一致的。但在针对不同目标、工况以及目标时,不同方式获得被评估对象毁伤结果的难易程度和准确程度不一样。目前获得导弹战斗部威力或目标毁伤程度的主要手段包括数值模拟与仿真、理论与方法评估以及现场试验。各种手段都有各自的优劣势,且都存在着各自适应的范围。因此,在进行导弹战斗部打击下目标毁伤评估研究时,应根据具体的情况和研究手段的优劣势进行综合确定,数值模拟与仿真、理论与方法评估及现场试验三种方式的特点及其相互之间的关系如图6所示。

数值模拟与仿真是通过建立导弹战斗部或目标的数值模型,利用各种差分格式计算并获得最终的毁伤评估结果。计算机和软件技术的快速发展构成了数值模拟与仿真的基础,试验与模拟仿真之间的巨大成本差异构成了其发展的动力。由于数值模拟具有可重复性,这使得数值模拟与仿真在导弹战斗部打击目标毁伤评估领域迅速推广。但与此同时,在导弹战斗部或目标建模时,对参数需求较多。如若对应数值模型建立不良,网格精度与计算误差控制不当,不但会影响最后的计算结果,亦会耗费大量的时间。即使在可控的时间成本内得到了较为准确的导弹战斗部打击目标毁伤评估的结果,受限于参数模型、计算场景等因素,使得所得到的计算结果不能或极有限被借鉴。

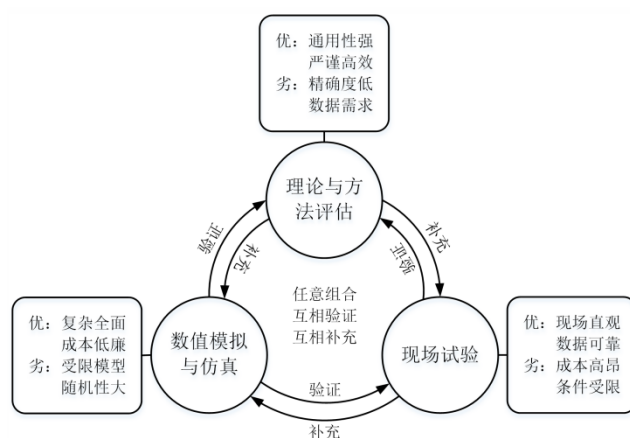


图6 毁伤评估手段之间的关系及优劣势

Fig.6 The relationship between damage assessment methods and their advantages and disadvantages

目前应用于导弹战斗部打击下目标毁伤评估的软件有LS-DYNA、AUTODYN和ABAQUS等有限元分析软件以及Matlab、Mathematics等科学计算软件。计算的对象包含建筑、飞机和舰船等单一目标以及由单一目标所构成的集群目标。应用模拟与仿真软件来获取和评估各类目标毁伤程度的研究已在前文中进行一定介绍,此处不再阐述。

理论与方法评估本质上是一种经验方式,是基于现有数据或理论推算出某种情况下被评价目标可能的毁伤状态。由于需要以数据作为基础,而对于导弹战斗部打击目标的毁伤评估问题中,在很多情景下并没有足够的数据用于分析,使得应用该方式研究导弹战斗部打击目标的毁伤评估仍有很大的空白可以开拓。

对于冲击波和破片,目前已形成较为完善的经验公式,并且一些学者已对此进行大量研究^[60,98-100]。相关经验公式已变成相应的研究工具,后续研究可以依据公式的适用条件进行具体应用。而对于数据分析方面,尤其是对于建筑物数据,在强冲击作用下建筑结构毁伤数据不多,且非常零散,只能大致判断。而建筑物千差万别,也就难于依据这些数据准确地判定出整个建筑毁伤情况。因此,在理论分析计算方面仍需要探究更多毁伤元和拓展现有经验公式的使用途径,使其具有更广泛的适用性。同时,对于数据归纳方面,仍需要对不同目标、不同场景的数据进行收集分析。

对于同一目标同一工况下,数值模拟与仿真、理论与方法评估以及现场试验均可以获得导弹战斗部打击下目标毁伤评估结果,且理论上三者所获得结果应是一致的。数值模拟与仿真可以获得相对精确且直观的结果,但其对模型的依赖性非常高,不准确的模型将会

造成巨大的误差。理论与方法评估需要基于毁伤数据评估导弹战斗部打击下目标的毁伤程度,但评估结果相对模糊。现场试验一般能够获取真实可靠的毁伤评估结果,但成本消耗巨大。

目前三种方式在导弹战斗部打击下目标毁伤评估的研究方面均得到了广泛的应用,且三种方式是相互联系,相互支持。而近年来的研究也多集中在根据研究对象的特点和研究问题的具体需求,选取最适合的手段,或开发和改进现有经验公式、数值模型和方法,并将所得到的结果与试验测得数据进行对比分析,以获取更具有说服力的毁伤评估结果。

6 总结与展望

6.1 总结

以导弹战斗部打击目标的毁伤评估研究作为主线,将评估过程中所涉及相关问题,即毁伤评估模型、毁伤评估主体、分类目标毁伤、毁伤评估手段等,依次进行归纳总结,并开展评述展望。虽然该领域目前已有大量研究,但对于区域内不同类型多目标毁伤评估模型,目标功能分布对毁伤结果的影响以及如何通过理论方法获得目标的毁伤概率等相关研究仍存在不足。

毁伤评估模型作为目标毁伤量化方式的综合,通过搭建基本框架并对评估方法、毁伤判据、毁伤准则等进行最优组合,以达到对目标毁伤程度最准确的描述。现有评估方法繁多,但仍无法得到广泛性毁伤评估方法。而对于毁伤判据与准则研究,目前存在的最主要问题是等级划分不规范,体系架构不清晰,使其无法形成统一系统,可借鉴性差。

导弹战斗部毁伤概率是决定能否对目标造成有效毁伤的主要影响因素。目前对落点概率的通用性和精确性仍需要进行更深入研究。而在战斗部毁伤效能上,缺乏更多场景和战斗部的毁伤元的研究。作为毁伤过程中的另一主体,目前对不同目标的易损性的研究相对完备,但在目标易损性系统开发方面仍存在一定欠缺。

被毁伤目标可分为单一目标和集群目标。单一目标研究较多,但对于目标物理与功能之间的映射关系表征不清晰,现有研究仅是宏观大致描述、精度不高,无法很好的将物理毁伤转换成功能降低。集群目标的毁伤多集中于对同类多个目标的毁伤,对于多个且不同类型目标的毁伤研究十分匮乏。

毁伤评估手段作为毁伤评估的基本方式,相互补充,相互验证。数值模拟与仿真可能存在数值模型不准确,计算结果误差大,需要反复调整等问题。在理论与方法评估方面,所研究的毁伤元和经验公式有限。现场试验则是在一定条件下对数值模拟与仿真、理论与方法评估进行补充验证,但目前受物理条件限制,很多试验并不能进行,这需要依赖综合技术的发展。

6.2 展望

综上,在现有关于导弹战斗部打击下目标毁伤评估问题的研究中,某些方面仍存在有较大的研究空间。故针对于此,提出以下研究建议:

(1) 评估方法改进仍是研究重点,但目前得到普适性评估方法并不实际。因此,需针对某场景,以准确性为第一准则,尽可能开发适用性广泛且简单的评估方法。

(2) 毁伤判据、毁伤准则缺乏统一标准,可针对此开展基本标准框架的研究,使其具有良好的借鉴和移植性。

(3) 在蒙特卡罗方法的基础上,应用其对误差、落点的模拟,降低模拟与实际落点之间的差异,提高战斗部落点概率预测精度。

(4) 对于战斗部毁伤元,可开展除冲击波、破片以外更多毁伤元的理论计算方法。而对于目标易损性,亟待开发简单、高效、准确的易损性评估系统。

(5) 目前单一目标无法准确量化物理毁伤与功能降低之间的关系,需发展各类型目标的物理与功能之间映射关系及可扩展性的表征方法。集群目标可针对多个不同类型的毁伤评估进行扩展研究,给出综合毁伤等级。

(6) 在数值模拟与仿真方面,对实物建模的准确性进行研究。在理论与方法评估方面,扩展更多的毁伤元,并获得相关经验公式。在现场试验方面,则需要当前技术条件下,探索更为理想的试验方法。

参考文献:

- [1] Joint Chiefs of Staff. Joint Publication 1-02: Department of defense dictionary of military and associated terms[M]. Washington DC: Department of Defense, 2010.
- [2] 王华,辛腾达,崔村燕,等.武器装备毁伤评估研究方法综述[J].装备学院学报,2017,28(1):105-110.
WANG Hua, XIN Teng-da, CUI Cun-yan, et al. Summary of weapon damage assessment research methods[J]. *Journal of Equipment Academy*, 2017, 28(1): 105-110.
- [3] 樊胜利,张宇飞,姚涛,等.武器装备战场毁伤评估方法研究综述[J].装甲兵工程学院学报,2013,27(1):21-26.
FAN Sheng-li, ZHANG Yu-fei, YAO Tao, et al. Research sum-

- mary of battlefield damage assessment methods on arms and equipments [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2013, 27(1): 21-26.
- [4] 黄寒砚, 王正明. 武器毁伤效能评价综述及系统目标毁伤效能评估框架研究[J]. 宇航学报, 2009, 30(3): 827-836.
HUANG Han-yan, WANG Zheng-ming. Review of the damage efficiency assessment and framework of the damage efficiency assessment of system target[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(3): 827-836.
- [5] 马春茂, 孙卫平, 李炎, 等. 武器装备毁伤评估研究进展[J]. 火炮发射与控制学报, 2019, 40(4): 96-101.
MA Chun-mao, SUN Wei-ping, LI Yan, et al. Research progress in damage assessment of weapon equipment[J]. *Journal of Gun Launch & Control*, 2019, 40(4): 96-101.
- [6] 傅常海, 黄柯棣, 童丽, 等. 导弹战斗部对复杂目标毁伤效能评估研究综述[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(19): 5971-5976.
FU Chang-hai, HUANG Ke-di, TONG Li, et al. Assess damage effectiveness for warhead to complex targets[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(9): 5971-5976.
- [7] Cooper W W, Seiford L M, Tone K. Data envelopment analysis: a comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2007.
- [8] Saaty T L. Analytic hierarchy process [M]. New York: Springer, 2001.
- [9] Tesfamaraim S, Saatcioglu M. Seismic risk assessment of RC buildings using fuzzy synthetic evaluation[J]. *Journal of Earthquake Engineering*, 2008, 12(7): 1157-1184.
- [10] 王凤山, 张宏军. 基于贝叶斯网络的军事工程毁伤评估模型研究[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(12): 242-245, 248.
WANG Feng-shan, ZHANG Hong-jun. Research of military engineering damage assessment based on Bayesian network [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2011, 47(12): 242-245, 248.
- [11] Roach L K. Fault tree analysis and extensions of the V/L process structure [R]. Army Research Lab Aberdeen Proving Ground MD, 1993.
- [12] 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 Li-shan, LI Yan-bin, ZHAO Yong-long, 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.
- [13] Abdi H, Williams L J. Principal component analysis [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 2010, 2(4): 433-459.
- [14] GU Hui, SONG Bi-feng. Study on effectiveness evaluation of weapon systems based on grey relational analysis and TOPSIS [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2009, 20(1): 106-111.
- [15] Everitt B S, Landau S, Leese M, et al. Cluster analysis [M]. 5th ed London: John Wiley & Sons, 2011.
- [16] 曲婉嘉, 徐忠林, 张柏林, 等. 基于贝叶斯网络云模型的目标毁伤评估方法[J]. 兵工学报, 2016, 37(11): 2075-2084.
QU Wan-jia, XU Zhong-lin, ZHANG Bo-lin, et al. Battle damage assessment method based on BN-cloud model [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(11): 2075-2084.
- [17] 曲婉嘉, 徐忠林, 刘颖. 基于GA-动态BP神经网络的雷达毁伤效果评估[J]. 战术导弹技术, 2016(6): 51-57.
QU Wan-jia, XU Zhong-lin, LIU Ying. Damage assessment of radar position based on GA-dynamic BP neural network [J]. *Tactical Missile Technology*, 2016(6): 51-57.
- [18] 杨青青, 樊桂花, 张天齐, 等. 基于突变决策方法的建筑物毁伤效果评估[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(10): 185-190.
YANG Qing-qing, FAN Gui-hua, ZHANG Tian-qi, et al. Battle damage assessment of building based on catastrophe decision-making method [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(10): 185-190.
- [19] ZHAI Cheng-lin, CHEN Xiao-wei. Damage assessment of the target area of the island/reef under the attack of missile warhead [J]. *Defence Technology*, 2020, 16(1): 18-28.
- [20] 惠君明, 刘荣海, 彭金华, 等. 燃料空气炸药威力的评价方法[J]. 含能材料, 1996, 4(3): 123-128.
HUI Jun-ming, LIU Rong-hai, PENG Jin-hua, et al. An evaluation method of FAE power [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 1996, 4(3): 123-128.
- [21] 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.
- [22] Pape R, Mniszewski K R, LOniginow A, et al. Explosion phenomena and effects of explosions on structures. III: methods of analysis (explosion damage to structures) and example cases [J]. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 2010, 15(2): 153-169.
- [23] 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.
- [24] 金丽, 赵捍东, 曹红松, 等. 预制破片对地面人员目标的杀伤威力分析计算[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(4): 157-159.
JIN Li, ZHAO Han-dong, CAO Hong-song, et al. Analysis and calculation on the lethality of premade fragments to the personnel targets on the ground [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2006, 26(4): 157-159.
- [25] Konokman H E, Kayran A, Kaya M. Aircraft vulnerability assessment against fragmentation warhead [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 67: 215-227.
- [26] 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 Qing-bo, LIU Zong-wei, JIN Xue-ke, et al. Method for assessing lethality of reactive fragment warhead [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(7): 661-664.
- [27] 王林, 李晓辉, 刘永付, 等. 基于比动能标准的战斗部杀伤威力评价方法研究[J]. 测控技术, 2012, 31(增刊): 88-90.
WANG Lin, LI Xiao-hui, LIU Yong-fu, et al. Study of anti-personnel warhead killing power based on the specific kinetic energy lethality criteria [J]. *Measurement & Control Technology*, 2012, 31(Suppl.): 88-90.
- [28] 王光源, 毛世超, 李建华. 基于马尔可夫链的舰艇反导毁伤决策研究[J]. 电光与控制, 2019, 26(1): 87-91.
WANG Guang-yuan, MAO Shi-chao, LI Jian-hua. Warship anti-missile decision-making based on Markov chain [J]. *Electronics Optics & Control*, 2019, 26(1): 87-91.
- [29] 卢熹, 王树山, 王新颖. 水中爆炸对鱼雷壳体的毁伤准则和判据

- 研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8):1469-1475.
LU Xi, WANG Shu-shan, WANG Xin-ying. Research on damage criterion of torpedo shell subjected to underwater explosive shock waves[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8):1469-1475.
- [30] 吴国东, 贾伟, 王志军, 等. 子母弹对面目标的毁伤效能研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(4):739-744.
WU Guo-dong, JIA Wei, WANG Zhi-jun, et al. Damage effectiveness research for sub-munitions to the area target [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20 (4) : 739-744.
- [31] 李伟, 方洋旺, 王晓云, 等. 空地导弹对飞机掩蔽库的毁伤效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2016, 41(5):52-55, 61.
LI Wei, FANG Yang-wang, WANG Xiao-yun, et al. Study on damage assessment methods of typical hard-target [J]. *Fire Control & Command Control*, 2016, 41(5):52-55, 61.
- [32] 杨延平. 基于图像变化检测的毁伤效果评估技术研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
YANG Yan-ping. Study of battle damage effect assessment based on image change detection[D]. Xi'an: Xidian University, 2013.
- [33] 王树山, 韩旭光, 王新颖. 杀伤爆破弹综合威力评估方法与应用研究[J]. 兵工学报. 2017, 38(7):1249-1254.
WANG Shu-shan, HAN Xu-guang, WANG Xin-ying. Research on evaluation method of comprehensive power of high explosive warhead and its application[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(7):1249-1254.
- [34] 王诚成, 谢晓方, 孙涛, 等. 反舰导弹易损性模型分析[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(1):67-69, 76.
WANG Cheng-cheng, XIE Xiao-fang, SUN Tao, et al. Vulnerability analysis of typical anti-ship missile[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33 (1) : 67-69, 76.
- [35] 曾涛, 胡昆, 罗三定. 战术导弹打击机场跑道毁伤概率[J]. 火力与指挥控制, 2009, 34(4):156-159, 162.
ZENG Tao, HU Kun, LUO San-ding. Research on damage probability for striking airdrome runway by the tactical missiles [J]. *Fire Control & Command Control*, 2009, 34 (4) : 156-159, 162.
- [36] 倪春雷, 姜鹏. 反舰导弹战斗部对舰船毁伤效能试验评估方法研究[J]. 飞航导弹, 2020(2):76-79.
NI Chun-lei, JIANG Peng. Research on evaluation method of damage effectiveness test of anti-ship missile warhead to ship [J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2020(2):76-79.
- [37] Spanier J. Monte Carlo methods [J]. *Nuclear Computational Science*, 2010:117-165.
- [38] Hammersley J M, Handscomb D C. Monte Carlo methods [M]. London: Chapman and Hall; 2013.
- [39] Kotulski Z A, Szczepiński W. Error Analysis with Applications in Engineering [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2009.
- [40] 刘国国, 王鹏辉, 周旭宜. 导弹圆周概率误差的仿真评估[J]. 电子质量, 2019(6):29-31.
LIU Guo-guo, WANG Peng-hui, ZHOU Xu-yi. Simulation and evaluation of the missile CEP[J]. *Electronics Quality*, 2019 (6):29-31.
- [41] ZHAI Cheng-lin, CHEN Xiao-wei. Probability damage calculation of building targets under the missile warhead strike[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020; 202:107030.
- [42] Morio J, Pastel R, Le Gland F. Missile target accuracy estimation with importance splitting[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 25(1):40-44.
- [43] GUO Ying-ying, ZHANG Zhi-gang. Simple application of variance reduction techniques in Monte Carlo and missile simulation[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 962-965:2760-2765.
- [44] 王永杰. 基于蒙特卡洛方法求取故障导弹飞行落点概率方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(4):682-685.
WANG Yong-jie. Research on probabilistic method of flight impact point for trouble missile with Monte Carlo method [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(4):682-685.
- [45] 郑小兵, 董景新, 张志国, 等. 基于蒙特卡罗法的弹道导弹落点密集度验前估计[J]. 中国惯性技术学报, 2011, 19(1):116-121.
ZHENG Xiao-bing, DONG Jing-xin, ZHANG Zhi-guo, et al. Monte Carlo evaluation for fall point dispersion of ballistic missile based on prior information [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(1):116-121.
- [46] 熊森才, 祝学军, 刘丽辉, 等. 基于模拟退火算法的自适应引战配合优化设计[J]. 战术导弹技术, 2020, (3):98-104.
XIONG Sen-cai, ZHU Xue-jun, LIU Li-hui, et al. Optimized design of adaptive fuze warhead coordination based on simulated annealing algorithm [J]. *Tactical Missile Technology*, 2020, (3):98-104.
- [47] 赵宏伟, 陈云俊. 杀伤战斗部打击预警机引战配合效果分析[J]. 弹箭与制导学报, 2019, 39(4):131-134.
ZHAO Hong-wei, CHEN Yun-jun. Analysis of fragment warhead coordinate efficiency of early warning airplane [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019, 39 (4):131-134.
- [48] 朱景伟, 胡昌振, 谭惠民. 利用弹上信息确定引信最佳延时研究[J]. 探测与控制学报, 2000, 22(3):24-27.
ZHU Jing-wei, HU Chang-zhen, TAN Hui-min. The study on determining the optimal initiating delay time of a fuze by using the information on missile [J]. *Journal of Detection & Control*, 2000, 22(3):24-27.
- [49] 张译金, 冯颖. 定向起爆部脉冲激光方位探测引信系统时间空间匹配特性[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12):3197-3202.
ZHANG Xiang-jin, FENG Ying. Time and space matching characteristics of pulsed laser position detection fuze for aimed warhead [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23 (12):3197-3202.
- [50] Nyongesa H O, Kent S, O'Keefe R. Genetic programming for anti-air missile proximity fuze delay-time algorithms [J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 2001, 16(1):41-45.
- [51] 阚飞, 伍旭东, 刘华宁. 一种基于相控阵引信自适应波束的高效引战配合方法研究[J]. 制导与引信, 2019, 40(3):21-25.
KAN Fei, WU Xu-dong, LIU Hua-ning. Research of high efficiency fuze-warhead coordination based on adaptive beam of phased array fuze [J]. *Guidance & Fuze*, 2019, 40(3):21-25.
- [52] 刘松, 范宁军, 杨喆. 基于命中点的巡飞弹引战配合设计[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(9):1013-1016.
LIU Song, FAN Ning-jun, YANG Zhe. Fuze warhead coordination design of loitering munitions in view of hit point [J].

- Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, 30(9): 1013-1016.
- [53] 吕鸿鹏, 骆强, 孙卫平, 等. 基于引战配合的弹目交会毁伤概率仿真研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(6): 33-36.
LV Hong-peng, LUO Qiang, SUN Wei-ping, et al. Damage probability simulation of missile-target encounter model based on fuze-warhead matching[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(6): 33-36.
- [54] 韩波, 张凯, 蒋涛. 基于视景仿真的引战配合效率评估方法[J]. 上海航天, 2019, 36(1): 29-33.
HAN Bo, ZHANG Kai, JIANG Tao. Fuze-warhead coordination efficiency evaluation based on visual simulation[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(1): 29-33.
- [55] 洛强, 吕鸿鹏, 孙卫平, 等. 基于虚拟试验的引战配合系统实现方法研究[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(4): 50-54.
LUO Qiang, LV Hong-peng, SUN Wei-ping, et al. Research on system implementation method of fuze-warhead matching based on virtual experiment[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(4): 50-54.
- [56] 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.
- [57] Ferradás E G, Alonso F D, Miñarro M D, et al. Consequence analysis by means of characteristic curves to determine the damage to buildings from bursting spherical vessels[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2008, 86(3): 175-181.
- [58] Ferradás E G, Alonso F D, Pérez J F S, et al. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for vessel burst[J]. *Process Safety Progress*, 2006, 25(3): 250-254.
- [59] Alonso F D, Ferradás E G, Miñarro M D, et al. Consequence analysis by means of characteristic curves to determine the damage to buildings from the detonation of explosive substances as a function of TNT equivalence[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2008, 21(1): 74-81.
- [60] Alonso F D, Ferradás E G, Pérez J F S, et al. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for the detonation of explosives, pyrotechnics or unstable substances[J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(6): 724-728.
- [61] Alonso F D, Ferradás E G, Pérez J F S, et al. Characteristic overpressure-impulse-distance curves for vapour cloud explosions using the TNO Multi-Energy model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 137(2): 734-741.
- [62] Cullis I G, Schofield J, Whitby A. Assessment of blast loading effects-types of explosion and loading effects[J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2010, 87(9): 493-503.
- [63] Luccioni B M, Ambrosini R D, Danesi R F. Analysis of building collapse under blast loads[J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(1): 63-71.
- [64] Held M. TNT-Equivalent[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1983, 8(5): 158-167.
- [65] 宋文渊. 杀爆弹战斗部自然破片有限元建模分析[J]. 火箭与制导学报, 2008(3): 121-122, 130.
SONG Wen-yuan. Modeling analysis of nature fragments of pill warhead[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2008(3): 121-122, 130.
- [66] 韩夫亮. 预制破片战斗部爆炸威力场数值模拟分析[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
HAN Fu-liang. The simulation analysis of prefabricate fragment warhead explosion power field[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [67] 孔祥韶, 吴卫国, 杜志鹏, 等. 圆柱形战斗部爆炸破片特性研究[J]. 工程力学, 2014, 31(1): 243-249.
KONG Xiang-shao, WU Wei-guo, DU Zhi-peng, et al. Research on fragments characteristic of cylindrical warhead[J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(1): 243-249.
- [68] 安振涛, 王超, 甄建伟, 等. 常规弹药爆炸破片和冲击波作用规律理论研究[J]. 爆破, 2012, 29(1): 15-18.
AN Zhen-tao, WANG Chao, ZHEN Jian-wei, et al. Theoretical research on action law of fragment and shock wave of traditional ammunition explosion[J]. *Blasting*, 2012, 29(1): 15-18.
- [69] 张辉, 钱建平, 牛公杰. 轴向前置破片战斗部破片场及毁伤效能分析[J]. 计算机仿真, 2011, 28(10): 13-17.
ZHANG Hui, QIAN Jian-ping, NIU Gong-jie. Simulation and damage analysis about performed fragments of axial forward projection fragment warhead[J]. *Computer Simulation*, 2011, 28(10): 13-17.
- [70] 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 Qing-bo, LIU Zong-wei, JIN Xue-ke, et al. Method for assessing lethality of reactive fragment warhead[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2012, 32(7): 661-664.
- [71] Moxnes J F, Prytz A K, Frøyland Ø, et al. Experimental and numerical study of the fragmentation of expanding warhead casings by using different numerical codes and solution techniques[J]. *Defence Technology*, 2014, 10(2): 161-176.
- [72] 印立魁, 蒋建伟, 门建兵, 等. 立方体预制破片战斗部破片初速计算模型[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 1967-1971.
YIN Li-kui, JIANG Jian-wei, MEN Jian-bing, et al. An initial velocity model of explosively-driven cubical fragments[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(12): 1967-1971.
- [73] 李翔宇, 卢芳云. 三种类型战斗部破片飞散的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2007, 30(1): 44-48.
LI Xiang-yu, LU Fang-yun. Numerical simulation on fragments dispersion of three type warheads[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(1): 44-48.
- [74] 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 Yong-gang, QIAN Li-xin, YANG Yun-bin, et al. Vulnerability/lethality assessment method based on virtual model[J]. *Journal of Ballistics*, 2005, 17(1): 46-52.
- [75] 杨云斌, 钱立新, 卢永刚. 战斗部威力/目标易损性评估软件研究[J]. 现代防御技术, 2008, 36(6): 66-70, 164.
YANG Yun-bin, QIAN Li-xin, LU Yong-gang. Study on warhead lethality/target vulnerability assessment software for conventional warhead[J]. *Modern Defence Technology*, 2008, 36(6): 66-70, 164.
- [76] 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 Shi-yun, FENG Cheng-liang, CHEN Wen, et al. Integrative modeling of target vulnerability[J]. *Journal of Ordnance*

- Equipment Engineering*, 2020,41(5):217-222.
- [77] 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 Jian-xing, MA Bao-hua, LIU Xiao-ling. An investigation on the conceptual space of target vulnerability[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 1994,14(4):366-370.
- [78] 王玉,张兵,唐凯,等.复杂系统目标易损性等效结构建模与毁伤律分析方法[J].弹箭与制导学报,2019,39(5):99-102,106.
WANG Yu, ZHANG Bing, TANG Kai, et al. Vulnerability equivalent structure modeling and damage law analysis method for complex system target[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2019,39(5):99-102,106.
- [79] 掌亚军.空中目标易损性建模及应用[J].航空兵器,2008(1):17-20.
ZHANG Ya-jun. Modeling and application of vulnerability of air target[J]. *Aero Weaponry*, 2008(1):17-20.
- [80] 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 Guo-hui, LI Xiang-rong, SUN Zheng-min. Target vulnerability analysis and damage assessment of main battle tank [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2009,29(6):274-277.
- [81] 秦宇飞,刘晓山,冯海星.某型飞机目标易损性分析系统设计[J].机电产品开发与创新,2010,23(1):18-20.
QIN Yu-fei, LIU Xiao-shan, FENG Hai-xing. Design of target vulnerability analyzing system for some aircraft [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2010,23(1):18-20.
- [82] Cizelj L, Leskovic M, Čepin M, et al. A method for rapid vulnerability assessment of structures loaded by outside blasts[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2009,239(9):1641-1646.
- [83] Heckötter C, Vepsä A. Experimental investigation and numerical analyses of reinforced concrete structures subjected to external missile impact[J]. *Progress in Nuclear Energy*, 2015,84(6):56-67.
- [84] Kelliher D, Sutton-Swaby K. Stochastic representation of blast load damage in a reinforced concrete building [J]. *Structural Safety*, 2012,34(1):407-417.
- [85] Atkinson G. Blast damage to storage tanks and steel clad buildings[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2011,89(6):382-390.
- [86] 刘瑞朝,周朝阳,任新见,等.精确制导武器打击典型地面建筑毁伤效果评估研究[C]//第3届全国工程安全与防护学术会议论文集,2012:121-126.
LIU Rui-chao, ZHOU Chao-yang, REN Xin-jian, et al. The damage assessment of precise guided weapons attack typical ground construction [C]//The 3rd National Conference on engineering safety and protection, 2012:121-126.
- [87] Stewart M G, Netherton M D. A probabilistic risk-acceptance model for assessing blast and fragmentation safety hazards[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2019,191.
- [88] 刘卫兵,李水旺,郗笃刚,等.机场打击效果评估模型与方法[J].测绘科学技术学报,2015,32(1):36-41.
LIU Wei-bing, LI Shui-wang, XI Du-gang, et al. Method and model of the airports battle damage assessment [J]. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 2015,32(1):36-41.
- [89] 谢卓杰,王玉惠,王文敬,等.航空子母弹打击大型水面舰艇的毁伤评估[J].电光与控制,2016,23(4):37-41.
XIE Zhuo-jie, WANG Yu-hui, WANG Wen-jing, et al. Damage assessment for large surface ship under the attacking of aviation shrapnel [J]. *Electronics Optics & Control*, 2016,23(4):37-41.
- [90] 司凯,李向东,郭超,等.破片式战斗部对飞机类目标毁伤评估方法研究[J].弹道学报,2017,29(4):52-57.
SI Kai, LI Xiang-dong, GUO Chao, et al. Research on damage assessment method of fragmentation warhead against airplane targets [J]. *Journal of Ballistics*, 2017,29(4):52-57.
- [91] 李向荣,王国辉,徐峰.杀爆弹对主战坦克毁伤评估仿真[J].装甲兵工程学院学报,2009,23(2):44-47.
LI Xiang-rong, WANG Guo-hui, XU Feng. Damage evaluation simulation of blast fragmentation warhead to main battle tank [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2009,23(2):44-47.
- [92] 李超,李向东,葛贤坤,等.破片式战斗部对典型相控阵雷达毁伤评估[J].弹道学报,2015,27(1):80-84.
LI Chao, LI Xiang-dong, GE Xian-kun, et al. Assessment of fragmentation warhead damaging typical phased array radar [J]. *Journal of Ballistics*, 2015,27(1):80-84.
- [93] Ambrosini D, Luccioni B, Jacinto A, et al. Location and mass of explosive from structural damage [J]. *Engineering Structures*, 2005,27(2):167-176.
- [94] Ghajari Y E, Alesheikh A A, Modiri M, et al. Urban vulnerability under various blast loading scenarios: Analysis using GIS-based multi-criteria decision analysis techniques [J]. *Cities*, 2018,72:102-114.
- [95] 李文义,王志伟,张乐阳.基于灰色关联分析的炮兵火力打击目标价值评估[J].四川兵工学报,2011,32(1):141-143.
LI Yi-wen, WANG Zhi-wei, ZHANG Yue-yang. Evaluation of target value under artillery firepower based on grey relational analysis [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2011,32(1):141-143.
- [96] 张艳辉,周亮,越国光.珊瑚岛礁直接火力准备打击目标排序问题分析[J].舰船电子工程,2013,33(2):26-28.
ZHANG Yan-hui, ZHOU liang, YUE Guo-guang. Analysis of targeting priorities during direct fire preparation for attacking coral islands [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013,33(2):26-28.
- [97] 侯亮,袁山增.基于模糊综合评判法的空中打击目标排序[J].四川兵工学报,2012,33(6):28-29,32.
HOU Liang, YUAN Shan-zeng. Attack sequencing of aerial targets based on fuzzy comprehensive evaluation [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2012,33(6):28-29,32.
- [98] Dorofeev S B, Sidorov V P, Kuznetsov M S, et al. Effect of scale on the onset of detonations [J]. *Shock Waves*, 2000,10(2):137-149.
- [99] Strømsøe E, Ingebrigtsen K O. A Modification of the Mott Formula for prediction of the fragment size distribution [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2010,12(5):175-178.
- [100] Keshavarz M H, Semnani A. The simplest method for calculating energy output and Gurney velocity of explosives [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006,131(1):1-5.

A Review on Damage Assessment of Target Hit by Missile Warhead

ZHAI Cheng-lin^{1,2}, CHEN Xiao-wei^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. Advanced Research Institute of Multidisciplinary Science, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: With the deepening and development of the concept of long-range operations, long-range strike of missile has become an indispensable part of modern warfare. Therefore, the damage assessment of target hit by missile warhead has been the focus of damage research in recent years. Research of damage assessment in the process of missile warhead striking the target are summarized from four aspects: damage assessment model of target, main subjects in damage process, damage of classified targets, and methods of damage assessment, respectively. Problems such as non-standard judgment of damage degree, unclear relationship of damage mapping and inaccurate solution of damage probability in current stage are pointed out. According to the insufficiency of current study, some suggestions are proposed for the research in the future, which can provide reference for the investigations in the related fields.

Key words: long-range operations; damage assessment; assessment model; vulnerability analysis; evaluation and analysis methods

CLC number: TJ4

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2020316

(责编: 王艳秀)