

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202601008

武器弹药毁伤效能仿真评估研究综述

徐恒威, 卢永刚*, 卢正操, 李军润, 冯晓伟, 吕 晓
(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 绵阳 621900)

摘 要: 在智能化与精准化军事需求的驱动下, 武器弹药毁伤效能的仿真评估技术已成为作战决策制定与装备体系优化的重要支撑手段。围绕毁伤效能仿真评估的评估方法、评估模型与评估软件展开系统综述, 梳理了相关领域的发展脉络与代表性研究成果。重点分析了以基于虚拟模型的目标易损性/战斗部威力评估法为代表的仿真评估方法, 系统评述了战斗部威力模型、目标易损性描述模型、弹目作用模型与目标毁伤评估模型的研究进展与存在问题。通过归纳国内典型仿真评估软件的技术特征, 揭示了当前在多样化需求适配性与系统兼容性方面的关键技术瓶颈。面向未来作战形态的演进趋势, 提出了战斗部威力场建模技术的标准化、毁伤效应分析方法的精细化以及人工智能在评估方法中的深度融合等重点研究方向, 旨在为后续技术攻关与体系构建提供理论支撑与路径指引。

关键词: 武器弹药; 毁伤效能; 评估方法; 评估模型; 评估软件

中图分类号: E87

文献标志码: A

开放科学标识码(OSID):

文章编号: 2097-2741(2026)01-0079-18



听语音
与作者
互动
聊科研

随着信息化与智能化战争形态的持续演进, 现代作战模式正由“武器主导型”向“任务导向型”与“目标适配型”加速转变。在这一背景下, 武器毁伤效能的精准评估已成为作战体系优化与武器系统迭代升级的关键环节。毁伤评估不仅为打击方案的制定提供量化依据, 也为装备性能论证、战场资源配置与作战成本控制提供重要支撑, 对整体作战效能提升具有基础性意义。

传统毁伤效能评估方法主要依赖实弹试验与战场数据统计。尽管其具备较高的现实可信度, 但仍存在明显局限。一是试验成本高昂, 需消耗大量弹药资源与靶场条件; 二是评估周期较长, 难以支撑快速决策需求; 三是试验场景的可控性与复现性有限, 难以全面覆盖高动态、高复杂度的实战环境。相比之下, 仿真评估技术通过构建物理模型、引入数学算法及融合试验与战例数据, 即可实现对弹目毁伤过程的高效模拟, 具有成本

低、效率高、可重复性强等显著优势, 特别适用于现代作战背景下的毁伤快速评估任务。

近年来, 随着试验数据库的逐步积累与建模体系的持续完善, 仿真评估技术在精度、鲁棒性和响应速度等方面不断提升, 逐步成为武器效能分析的主流手段, 并在武器研发、作战规划与战场推演等多个领域得到广泛应用。

作为对实战过程的系统建模与量化分析, 毁伤效能仿真评估通常涉及多个学科与关键技术环节。例如, 以某型防空导弹系统打击空中目标为例, 其评估任务涵盖目标探测与识别、电磁散射建模、导弹制导控制、空气动力学分析、终点弹道计算、空间几何构型推演及系统可靠性建模等多个领域。面对如此复杂的建模需求, 弹药工程技术人员在实际应用中, 通常将评估范围聚焦于“终端毁伤阶段”——即弹目交会后武器对目标的直接毁伤过程, 该阶段不仅直接决定毁伤效果,

收稿日期: 2025-06-23

修回日期: 2025-08-05

录用日期: 2025-08-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (12202424)

第一作者: 徐恒威 (1998—), 男, 博士研究生, 主要从事冲击动力学研究。E-mail: 3071548369@qq.com

***通信作者:** 卢永刚 (1973—), 男, 研究员, 主要从事武器弹药毁伤评估研究。E-mail: lygcaep@263.net

引用格式: 徐恒威, 卢永刚, 卢正操, 等. 武器弹药毁伤效能仿真评估研究综述[J]. 火箭军工程大学学报, 2026, 40 (1): 79-96.
XU Hengwei, LU Yonggang, LU Zhengcao, et al. Review of simulation-based evaluation of weapons and ammunition damage effectiveness [J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2026, 40 (1): 79-96.

也是评估任务的关键环节。为提升评估效率与工程适应性,研究中往往通过概率模型对弹目交会条件进行描述,并基于毁伤机制开展效应建模与仿真分析,从而实现对典型作战场景下毁伤效能的快速、可靠预测。尽管仿真评估技术具备广泛应用前景,但其发展仍面临一系列挑战。一方面,由于涉及专业领域众多、技术链条长、模型结构复杂,单一研究团队难以独立完成全流程研发,发展过程高度依赖多个单位之间的协同合作。另一方面,仿真评估具有明显的涉密特征,不同单位间在信息共享、成果转化与利益协调方面存在现实障碍,制约了技术体系的高效集成与应用推广。更为关键的是,毁伤评估结果通常以概率形式呈现,需综合考虑目标结构特性、战场环境变量与毁伤机制耦合等多种不确定性因素,其验证难度远高于常规物理模型。实弹试验受限于成本高、复现性差等问题,评估结果难以通过有限试验实现系统验证,成为当前技术应用与推广的关键瓶颈。因此,亟需构建具备代表性、可操作性与高效性的验证体系,提升仿真评估结果的可信度与工程适用性。

结合对国内外研究内容范围的分析,将武器弹药“终端”毁伤效能仿真评估研究划分为仿真评估方法、仿真评估模型与仿真评估软件3个核心内容,并围绕其展开综述。其中,仿真评估方法从宏观层面对评估流程进行结构化划分,构建多个相对独立的研究模块;仿真评估模型用于刻画不同毁伤元对目标的作用过程及毁伤结果;仿真评估软件则是方法、模型、数据及软件工程能力的高度集成体现。本文在系统性梳理国内外研究进展的基础上,归纳总结了该领域的典型技术路径与代表性成果,分析了当前研究存在的关键问题,并进一步展望了未来发展趋势,旨在为后续相关研究提供理论依据与框架性参考。

1 仿真评估方法

武器弹药毁伤效能评估是综合考虑作战目的、作战环境及目标对象等多因素影响,对武器弹药的实际毁伤效果进行评估的系统性过程,其研究内容涉及目标的几何参数、结构组成与功能属性建模,以及战斗部威力场构建、弹目作用分析与毁伤结果评估等多个核心环节。为有效完成武器弹药毁伤评估任务,首先要对任务内容进行科学分类。20世纪80年代初,美国率先开展了毁伤效

能仿真评估的理论体系研究,逐步建立了涵盖终点毁伤效应分析、评估方法构建与计算程序实现的完整框架。空间映射方法是该理论体系中的代表性成果之一,其清晰界定了目标易损性研究的任务,并在传统的结构易损性基础上有了更全面的认识,通过构建目标结构、功能、系统与任务四度空间的映射关系^[1]实现目标易损性评估,具有较强的逻辑直观性,但其在实施步骤的具体化和权重分配的合理性上存在缺陷。Klopcic等^[2]在空间映射法的基础上,提出以“层面”替代“空间”的概念,构建了基于目标易损性/战斗部威力(vulnerability/lethality, V/L)的分层评估框架,并通过映射($O_{1,2}$)、($O_{2,3}$)和($O_{3,4}$)表示各层面之间的转换关系。V/L分层法从攻击与防御2个维度出发,对毁伤评估问题进行双向剖析,进一步加深了对毁伤效能形成机制的理解,为系统建模提供了结构化的分析路径。随后,学者们在该理论上对评估框架进行了扩展,分别向前因(层面0、-1、-2等)和后果(层面5、6等)方向延伸。Klopcic^[3]又在原有结构中新增了“层面0”,用于表征武器与目标的初始设定条件,并提出将5层V/L分层结构作为通用的毁伤效能评估框架。针对复杂评估任务,可将其解析为多个嵌套的V/L分层结构,采用“前一结构的‘层面4’作为后一结构的‘层面0’”的逻辑递推方式,构建出条理清晰的分析流程。尽管适度拓展该分层法有助于更精确地界定研究内容,但若拓展过度,可能会削弱其基本逻辑结构的清晰性和实用性^[4]。图1展示了常见的6层V/L分层法结构,可以看出,无论是面向武器威力评估还是目标易损性分析,其核心工作均集中于“层面1”至“层面4”的转换过程,而最终目标则是获取“层面3”和“层面4”的评估结果。综上所述,V/L分层法有效厘清了毁伤、能力与效能的度量关系,明确了毁伤效能评估的研究任务,为后续建模与系统性分析提供了坚实的理论基础^[4]。

卢永刚等^[5]提出了一种基于虚拟模型的目标易损性/战斗部威力评估方法(lethality assessment system method based on virtual model, LAS-BVM),创新性地毁伤效能仿真评估研究划分为目标易损性建模、战斗部威力建模、弹目作用模型和目标毁伤结果评估4个方面。该方法以“虚拟目标”的高精度建模为核心,结合离散面元技术精确模拟复杂目标的表面形态,并通过“功能矩阵”和“毁伤矩阵”的映射转换,系统地实现

了从结构毁伤到功能毁伤及任务能力的全流程仿真评估。LASBVM不仅清晰界定了毁伤评估的研究内容, 还科学划分了各模块的工作界面与分工形式, 且进一步明确了仿真评估软件的基本架构, 为目标毁伤评估的高精度和高效率实施奠定了坚实的理论与技术基础^[6]。

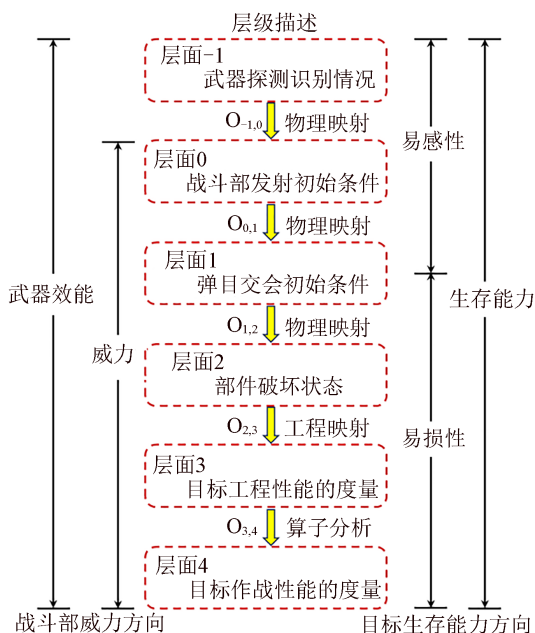


图1 6层V/L分层法结构^[4]

Fig. 1 Six-level V/L stratification structure^[4]

2 仿真评估模型

仿真评估模型作为仿真评估技术体系的核心基础, 其本质是对武器弹药打击下目标毁伤全过程的系统化建模与综合表征。依据LASBVM方法框架, 仿真模型可分为战斗部威力模型、目标易损性描述模型、弹目作用评估模型与目标毁伤评估模型4类。各类模型在功能上相对独立, 但在评估流程中高度耦合, 常因研究侧重与建模视角不同而存在交叉重叠, 共同构成了完整的毁伤评估建模链条。

从广义上看, 仿真评估模型不仅包括基于物理机理推导的理论模型、融合试验数据与工程经验的半经验模型、依据统计规律构建的数学模型以及面向工程应用开发的技术模型, 还涵盖支撑上述模型构建与运行的关键方法与实现机制, 如毁伤准则与判据和目标毁伤评估方法等。在实际应用中, 相关模型需嵌入仿真程序, 与算法流程和数据库系统协同集成, 实现复杂战场条件下毁伤过程的多维建模与可重复评估。下面将围绕上

述4类仿真评估模型展开综述, 重点分析其研究进展及代表性成果, 并简要指出当前研究存在的不足与改进方向。

2.1 战斗部威力模型

战斗部威力是其固有破坏能力的量化表征, 主要由装药类型、结构构型及起爆方式等设计参数决定, 与目标类型无关。根据毁伤元类型, 当前常规战斗部主要可分为爆破战斗部、破片战斗部、侵彻战斗部和聚能装药战斗部4类。其中, 侵彻战斗部的动能由发射平台提供, 属于外部输入参数, 且在评估中作为已知量, 故不作展开。

2.1.1 爆破战斗部

爆破战斗部是现代武器系统中的关键毁伤单元, 其毁伤机制为战斗部在环境介质中爆炸, 产生的爆轰产物与冲击波对目标施加瞬时的破坏作用。在实际作战与试验评估中, 环境介质以空气和水为主, 因此, 聚焦于爆破战斗部在2类典型介质中的威力场建模。

1) 空气中爆炸。爆炸空气冲击波威力场通常以峰值超压与冲量作为主要衡量指标。对于自由场条件, 已有大量成熟的冲击波威力预测模型, 如萨道夫斯基公式、Brode公式及亨里奇公式等^[7]。针对裸露的TNT球形或近似球形的装药在无限空气域中爆炸, 萨道夫斯基公式将峰值超压表示为

$$\Delta p = \frac{0.84}{\bar{r}} + \frac{2.7}{\bar{r}^2} + \frac{7.0}{\bar{r}^3} \quad 1 \leq \bar{r} \leq 15 \quad (1)$$

式中: $\bar{r}$ 为比距离, $\bar{r} = r / \sqrt[3]{w}$; w 和 r 分别为 TNT 当量和测点到爆心的距离。

相比之下, 封闭空间内的爆炸情形更加复杂, 冲击波在传播过程中会发生多次反射, 具有显著的多波耦合效应。针对该类问题, 现有2种建模路径: 一种是基于试验和数值模拟数据直接拟合建立^[8-10]; 另一种则是引入镜像源理论, 将封闭空间内的冲击波传播视为爆源及其多个镜像源共同作用的结果^[11-13]。镜像源理论因其建模简洁、参数可控, 已成为表征封闭空间内爆炸载荷分布的主流手段。然而, 需指出的是, 此类模型在大当量情形下的准确性与适用性仍有待系统验证。此外, 关于局部约束条件下冲击波传播规律与威力表征模型的研究仍较为薄弱, 亟需进一步深入研究。

2) 水中爆炸。与空气介质相比, 水中爆炸的物理过程更为复杂, 其主要毁伤效应包括水中冲击波与气泡脉动效应。在水中爆炸时, 战斗部的主要毁伤元为冲击波与气泡, 相应的威力表征模

型多是基于爆炸相似律构建经验公式,并辅以水池试验进行系数标定,具体过程详见文献[14]。当前研究重点聚焦于复杂边界条件下经验模型的适用性修正与外推能力提升^[15]。然而,在气泡动力学的耦合建模、非理想炸药能量释放过程模拟以及多毁伤元联合作用机制方面,相关研究仍不充分。值得注意的是,现有多数研究集中于水下单点或两点爆炸情况下冲击波与气泡的传播特性^[16],而在多点同步或异步爆炸场景中,不同爆源之间相互作用产生的波耦合效应与气泡干涉机制尚未得到系统性研究,这一领域存在显著的研究空白,亟待拓展。

2.1.2 破片战斗部

破片战斗部通过爆炸产生的爆轰产物驱动金属壳体破碎,形成大量高速飞散的破片对目标实施毁伤。对于破片毁伤元而言,初速度、飞散方向和质量分布是表征其威力场的重要参量。Gurney^[17]基于装药能量全部转化为破片动能的假设,提出了破片初速的计算公式为

$$v_0 = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{m_e}{m_s + 0.5m_e}} \quad (2)$$

式中: $\sqrt{2E}$ 为Gurney常数,表示单位质量炸药完全爆轰释放的能量; m_e 和 m_s 分别为装药质量和壳体质量。

然而,Gurney公式未考虑能量损耗,导致其计算结果往往高于实际测量值^[18]。为解决这一问题,相关研究通过引入修正系数进行改进,并进一步考虑了起爆方式、装药长径比、战斗部运动速度等关键因素的影响^[19]。在理想条件下,现有模型的预测误差范围可控制在10%以内,为破片战斗部的威力场表征提供了重要的理论依据。

飞散方向是表征破片战斗部威力场的另一关键指标。Talyor^[20]首次提出了飞散方向角的计算模型,后经Shapiro^[21]改进,使其适用于不同形状的战斗部。国内学者也陆续开展了各种异形战斗部飞散特性的研究,例如D型战斗部^[22]与椭圆变截面战斗部^[23],但相关研究大多停留在定性分析阶段,尚未建立定量表征模型。此外,偏心起爆与稀疏波效应等因素对飞散方向的影响尚未得到系统性研究,亟需通过试验与数值模拟相结合的方式进一步揭示其内在规律。

破片质量分布通常采用Mott公式^[24]或Held公式^[25]等半经验公式描述破片数量随质量的分布规律,并假设破片质量在空间上呈均匀或随机分布。然而,试验与仿真结果表明^[26],圆柱形破片战斗

部爆炸后,破片质量在中间区域较大而端部较小,呈现出显著的非均匀性。针对该问题,Grisaro等^[27]提出了一个简化模型,能够有效预测破片在防护墙上的空间质量分布。

从方法层面来看,Qian等^[28]提出的“射击迹线”破片战斗部威力构建方法是一项标志性成果,其基于计算机仿真技术诞生的破片场仿真技术,内涵是每个破片的弹道被相应的射击迹线来模拟,而且具有确定的标志数、指定的质量、速度、起点和方向,能够反映破片的“宏观”可控性和“微观”随机性,具有实用性和合理性。该方法改变了传统破片战斗部仅以破片速度、数量、质量、飞散角等简单几个参数来描述的粗略方法,使得后续对目标毁伤的评估分析可以实现精确及概率分析。后续国内几乎所有关于破片战斗部毁伤评估仿真中均沿用了该方法。

2.1.3 聚能装药战斗部

聚能装药战斗部是一种利用特殊结构设计使装药爆轰能量沿轴向集中,从而驱动药型罩坍塌并形成高速侵彻体,以实现目标高效毁伤的战斗部类型^[29]。

在射流成型理论体系发展历程中,Birkhoff等^[30]于1948年建立的定常流体力学理论具有里程碑意义。该理论将药型罩视为理想不可压缩流体,并假设药型罩各部分压垮速度相同。由此推导出射流速度 v_j 和射流质量 m_j 的计算公式,为聚能射流威力场表征奠定了理论基础。

$$v_j = v_i \frac{\cos(\beta - \alpha - \delta)}{\sin\beta} \quad (3)$$

$$m_j = m \sin^2 \frac{\beta}{2} \quad (4)$$

式中: v_i 为药型罩压垮速度; m 为药型罩质量; α 为药型罩的半锥角; β 、 δ 分别为药型罩的压合角和变形角。

然而,定常流体力学理论未考虑药型罩压垮速度的空间分布特性,Pugh等^[31]提出的准定常理论(PER理论)通过引入压垮速度梯度场假设,建立了沿药型罩轴向的压垮速度衰减模型,但其仅适用于平面起爆的锥形罩和楔形罩。在此基础上,Carleon等^[32]改进了PER理论,建立了一般射流形成理论。孙传杰等^[33]综合考虑了壳体、药型罩、装药等因素对压垮过程中的影响,建立了修正的聚能射流理论计算方法,并形成了一套完整的计算程序。

随着研究的深入,研究人员相继建立了涵盖

异形药型罩结构特征^[34]、爆轰波形状^[35]以及药型罩-炸药动态耦合效应^[36]的理论模型,已基本能够满足常规聚能装药的威力场表征需求。随着新质毁伤技术的提出,高熵合金、金属/非晶复合材料及活性功能材料等新型药型罩材料已逐渐成为聚能毁伤领域的研究热点。现有理论模型在新型材料的动态压垮行为表征、多相介质耦合作用机制及非理想射流形成规律等方面存在显著不足。因此,亟需建立更为准确的理论体系,以精确表征新型药型罩材料应用场景下聚能射流威力场。

2.2 目标易损性描述模型

目标易损性描述模型是客观描述目标几何结构和功能特点的模型,需综合考虑目标的结构特征、材料属性及功能构成等多维要素。作为毁伤评估的基础支撑,目标易损性描述模型精度直接决定了毁伤评估结果的准确性与有效性,其发展大致经历了以下3个阶段^[37]:①基于点、线、面的二维简化模型;②简单几何体组合的三维模型;③融合功能特征的高分辨率虚拟模型。

在早期阶段,受限于计算资源,建模方法普遍采用二维简化手段,以牺牲空间结构细节换取更高的计算效率,主要用于大规模目标群的快速毁伤估算。随着精确制导武器的发展,战斗部毁伤效应呈现出明显的空间方向性与区域分布特性,目标结构参数如壁厚、方位、防护层配置等对毁伤结果的影响愈发显著,传统简化模型已难以满足现代毁伤过程的精细化建模需求。20世纪90年代以来,计算机图形学与数据库技术的快速发展显著提升了目标特性的数字化描述能力,实现了从点状目标、简化轮廓模型向高精度三维仿真目标的转变。同时,毁伤评估方法也由“命中即毁”向“等级量化评估”演进,推动了高精度、高保真目标易损性描述模型体系的构建。以美国弹道实验室(ballistic research laboratory, BRL)开发的BRL-CAD系统为代表,该系统引入OpenGL图形接口,开发出一套面向毁伤评估的目标建模平台,可通过基本几何元的叠加构建复杂目标结构,并关联各组件的功能关系与命中后果,为后续研究奠定了重要基础。在此基础上,多个国家相继研发了具有本国特色的目标建模系统^[38-39]。例如:瑞典在目标易损性评估方面的研究一直较为领先,建立了包括空中目标、地面目标的易损性评估模型及程序;荷兰的TNO(the netherlands organization for applied scientific research)实验室研制了主战坦克目标易损性的评估程序TAR-VAC

(TARget vulnerability assessment code);德国IABG(industrieanlagen-aetriebsgesellschaft mbH)公司构建的UniVeMo通用易损性模型可覆盖从基础设施、防空阵地、地面装甲车辆到空中目标等多种目标类型;日本防卫厅技术研究与发展所研发了易损性分析仿真器VAS(vulnerability assessment simulator),可用于分析地面车辆、舰船及飞机等军事装备的整体易损性。

国内高分辨率目标易损性描述模型的研究虽起步较晚,但近年来已取得一系列具有自主创新性的成果。卢永刚团队^[1, 6]提出的基于“虚拟目标”的高精度建模方法,结合三维建模与数据库技术,将复杂曲面结构离散为有限面元,适配基于射线追踪的破片打击路径计算方法,有效提升了建模精度与求解效率。所构建的虚拟目标数据库不仅涵盖目标内部复杂结构及其功能映射关系,还建立了与毁伤评估准则的关联模型,利用“功能矩阵-毁伤矩阵”映射机制,实现了结构毁伤、功能毁伤与作战任务能力之间的统一评估。同时,该方法自主开发了可视化与数据转换模块,支持多种商业建模软件与标准接口格式,提升了系统的通用性与可扩展性。肖师云等^[40]则提出了一种基于虚拟模型的目标易损性一体化建模方法,采用标准几何体与四边形面元对目标组件进行等效建模,并赋予各组件毁伤率模型,再通过毁伤树结构计算目标整体毁伤概率。针对装甲车辆目标,梁振刚等^[41]提出了目标易损性描述模型快速建模技术,将复杂目标简化为标准几何组合体,并通过数据库技术整合目标易损性数据,进而构建目标易损性描述模型。综上所述,国内外在高分辨率、高保真目标易损性描述模型研究上已取得阶段性突破,建模方法已从“简化模型”向“融合功能特征的高分辨率模型”迈进。然而,高精度模型虽具评估精确性,但计算开销大,难以适应实时仿真需求;而简化模型虽然高效,但评估结果精度受限,难以反映复杂战场环境下的真实毁伤场景。因此,未来研究亟需突破传统“精度-效率”对立的约束困境,发展跨尺度耦合建模方法与基于数据驱动的自适应建模策略。

2.3 弹目作用评估模型

弹目作用评估是连接战斗部威力与目标易损性的关键桥梁,用于评估实际弹目交会条件下毁伤元对目标的作用结果。弹目作用评估研究涉及多个方面,包括弹目交会空间关系、毁伤元与目标交会关系及终点毁伤效应等。鉴于相关内容较

为宽泛, 仅讨论战斗部终点毁伤效应。终点毁伤效应模型旨在通过理论解析或数值方法定量表征武器或毁伤元命中目标后所产生的物理破坏作用, 重点反映关键部件的毁伤程度。

2.3.1 破片贯穿/侵彻模型

美国弹道研究所提出的 Thor 方程是动能侵彻理论的重要代表。该方程基于破片质量、入射角、撞击面积与靶板厚度等参数之间的经验关系, 能够预测破片贯穿靶体后的剩余速度, 广泛应用于金属靶体的毁伤评估中。Thor 方程包含弹道极限速度 V_{bl} 、靶体贯穿后的残余速度 V_r 和残余质量 M_r 3 项计算公式, 分别为

$$V_{bl} = 0.3048 \times 10^{c_1} (61023.74hA)^{\alpha_1} (15432.36m_s)^{\beta_1} \cdot (\sec \theta)^{\gamma_1} \quad (5)$$

$$V_r = V_s - 0.3048 \times 10^c (61023.74hA)^\alpha \cdot (15432.36m_s)^\beta (\sec \theta)^\gamma (3.2808V_s)^\lambda \quad (6)$$

$$M_r = M_s - 6.48 \times 10^{-5} \times 10^c \times (61023.74hA)^\alpha \cdot (15432.36m_s)^\beta (\sec \theta)^\gamma (3.2808V_s)^\lambda \quad (7)$$

式中: V_s 为破片打击速度; h 为靶体厚度; A 为破片撞击面积; M_s 为破片初始质量; θ 为侵彻弹道与靶板法线的夹角; α_1 、 β_1 、 c_1 和 γ_1 均为拟合参数。

然而, 作为经验模型, Thor 方程在处理高长径比破片、非金属材料靶体以及大攻角等复杂工况时, 存在显著的预测偏差。舒张忆南等^[42]在 Thor 方程的基础上, 引入了破片形状、速度和质量修正系数, 构建了精度更高的破片穿甲深度计算方程。韩晓明等^[43]引入等效截面积理论, 以增强对大攻角弹道的建模能力; 童超慧^[44]基于钢化玻璃冲击响应试验数据, 修正了破片残余速度预测模型, 显著提高了其适应性。程玉等^[45]基于 93W 钨合金破片对装甲钢侵彻性能的试验结果, 对 Thor 方程进行了修正, 修正后的模型可用于预测圆柱形和立方体破片的弹道极限速度。毛亮等^[46]采用试验研究与量纲分析相结合的方法, 构建了钨合金球形破片侵彻陶瓷/DFRP 复合靶的弹道极限速度经验关系。针对超高速侵彻条件, 刘铁磊等^[47-48]依据球形破片的侵彻特征, 建立了描述宽速域下球形破片对低碳钢的弹道极限速度理论模型。赵丽俊等^[49]研究了方形、柱形、球形等不同破片形状、着靶姿态以及靶板参数对弹道极限速度的影响规律, 并进一步推导了极限穿透速度理论模型。当前, 针对低速垂直冲击条件下破片侵彻/穿透金属靶板的研究已开展了大量工作, 拓展了 Thor 方程等经典经验公式的应用范围, 也

建立了许多计算模型。但相当一部分研究成果仅适用于特定的试验工况, 移植性有待加强。另一方面, 在高速条件下, 破片对靶板的变形侵彻行为尚未被完全深入理解, 如何确定侵彻模式转变时的临界速度仍有较大的研究空间。

2.3.2 爆炸冲击模型

爆炸载荷对各类结构的破坏效应是现代毁伤评估中的一个关键研究领域, 尤其在建筑结构方面, 爆炸载荷不仅会直接威胁人员安全和设施功能, 还可能引发次生灾害。因此, 准确评估爆炸载荷作用下建筑结构的破坏效应, 具有重要的实际意义。

在爆炸载荷作用下, 建筑结构的破坏效应计算主要依赖于单自由度 (single degree of freedom, SDOF) 理论体系。SDOF 方法将实际结构简化为质量-弹簧-阻尼系统, 通过计算等效系统在爆炸冲击荷载下的动态响应, 来反映结构的实际响应。汪维^[50]采用 SDOF 方法计算了爆炸冲击荷载作用下钢筋混凝土 (reinforced concrete, RC) 板、梁的破坏效应, 并通过试验验证了该方法在建筑结构分析中的有效性。陈德等^[51]基于单向砌体填充墙抗力模型建立的 SDOF 方法, 较好地预测了均布爆炸载荷作用下单向砌体填充墙的动力响应; 吕晋贤等^[52]采用 SDOF 方法计算了建筑构件在爆炸载荷作用下的响应结果, 并结合构件重要性系数确定了整个房间的毁伤等级; 彭琦等^[53]开展了长持时平面爆炸波作用下 RC 梁的动态响应研究, 结果表明, 连续工况下, SDOF 方法会低估 RC 梁的跨中最大位移; 苏琼等^[54]基于非线性抗力方程和 SDOF 理论模型, 评估了爆炸载荷下的超高性能混凝土 (ultrahigh performance concrete, UHPC) 板的弯曲损伤等级。Feldgun 等^[55]通过非线性等效 SDOF 模型研究了矩形弹性薄板在爆炸载荷下的变形响应; Rigby 等^[56]基于 SDOF 方法研究了有限目标靶体在爆炸荷载作用下的动态响应。SDOF 方法因其高效性和准确性, 已被广泛应用于多种建筑物快速评估软件中, 例如美军的 CEDWAW 毁伤评估系统和 FACEDAP 防护设计平台。

然而, SDOF 方法在处理复杂工况时仍存在理论局限。一是难以表征非均匀爆炸载荷的空间分布特性; 二是无法反映近距离爆炸导致的局部剪切破坏模式; 三是缺乏对复杂爆炸载荷分布的描述能力。这些局限性在一定程度上限制了 SDOF 方法在更广泛场景中的应用。因此, 探索如何改进 SDOF 方法以提高其预测准确性, 尤其

在处理复杂爆炸荷载时,仍然是当前研究中的一个难点与热点。

2.3.3 杆弹钻地侵彻模型

钻地侵彻是指弹体依靠发射平台提供的动能侵入目标的过程,主要关注弹体的侵彻深度。虽然不同目标介质与结构形式会导致理论模型的差异,但其力学建模过程具有一定的共性特征。因此,本节以半无限混凝土靶为研究对象,系统梳理钻地侵彻理论模型的发展脉络。

根据撞击速度的不同,弹体对半无限混凝土靶体的侵彻模式可分为3种类型^[57],如图2所示。一是刚体侵彻,此时弹体保持结构完整性,未发生明显形变;二是变形/侵蚀侵彻,弹体发生塑性变形,并伴随质量损失;三是销蚀侵彻,弹体经历剧烈形变,动能迅速耗散。

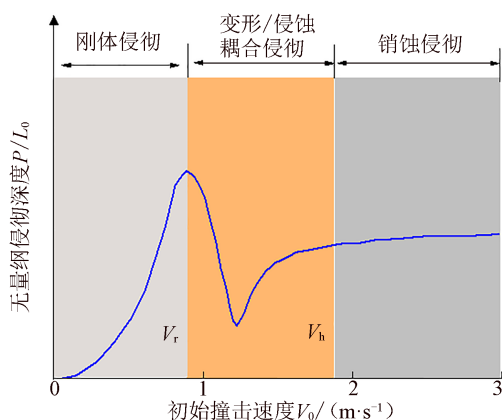


图2 不同速度下弹体侵彻模式划分^[57]

Fig. 2 Division of projectile penetration modes at different velocities^[57]

早期的刚体侵彻模型通常是基于大量试验数据拟合而成的经验模型,如别列赞公式、Young公式、ACE (army corps of engineers) 公式以及修正 NDRC (national defense research council) 公式等。然而,这些模型的适用性和预测精度受到特定试验条件的限制^[37]。进入20世纪90年代,Forrestal等^[58]提出了具有里程碑意义的半经验模型,结合阻力函数与运动学方程的耦合关系,建立了侵彻深度预测的理论框架,为后续的研究工作提供了重要的理论依据和方法支撑。近年来,Chen等^[59-61]进一步完善了低速侵彻阶段的理论体系,提出了准刚体侵彻模型,显著提升了计算精度与适用范围。针对异形弹体侵彻问题,吴昊等^[62]基于混凝土动力球型空穴膨胀理论,提出了综合考虑弹头形状、成坑阶段、弹靶摩擦阻力的刚性弹体垂直侵彻混凝土/岩石的侵彻深度计算模型。程月

华等^[63]根据所开展的5发100 mm和203 mm口径缩比钻地弹侵彻混凝土试验结果以及数值模拟结果,对经典计算公式的适用性进行了评价。随着超高速武器系统的发展,侵彻动力学研究面临新挑战。在中高速至超高速侵彻过程中,弹体发生塑性变形、结构屈曲及动能衰减等现象,导致侵彻效能呈非线性下降。尽管学者们通过理论建模^[64-68]、数值仿真^[69]和试验研究^[70-72]等手段已取得了重要进展,但由于缺乏足够的大尺寸弹体侵彻试验数据验证,现有模型的普适性和准确性仍存疑。

目前,低速和超高速条件下的理论体系较为成熟,而中高速条件下的变形/侵蚀耦合侵彻过程仍有较大的研究空间。特别是弹体结构和弹靶材料等因素对侵彻模式转变、弹体变形(如弯曲、缴粗)、质量损失的影响机制及规律尚未进行充分的定量分析。相关规律的揭示将为更精细的钻地侵彻效应分析模型的建立提供理论支持。

2.3.4 射流破甲模型

Birkhoff等^[30]基于流体动力学理论将射流视作速度恒定的连续杆,并结合理想不可压缩流体假设推导了射流破甲深度计算模型^[36]。然而,实际射流具有显著的速度梯度和直径变化特征,与定常破甲理论的假设存在本质差异。为解决上述问题,研究人员基于虚拟原点概念构建了纳入速度梯度考量的侵彻深度计算模型,即准定常破甲理论^[73]:

$$H = (h_b - b) \left[\left(\frac{v_{j0}}{v_j} \right)^{\sqrt{\rho_j/\rho_t}} - 1 \right] \quad (8)$$

式中: b 为虚拟高度,通常由试验数据反推得到; h_b 为炸高; v_{j0} 、 v_j 分别为射流头部和射流尾部速度; ρ_j 、 ρ_t 分别为射流密度和靶体密度。

然而,定常破甲理论与准定常破甲理论仅适用于连续射流场景。在大炸高情况下,射流拉伸至特定程度时会发生断裂,断裂射流侵彻性能相较于连续射流大幅削弱。鉴于此,Dipersio等^[74]依据射流断裂时序特征,将侵彻过程中的射流划分为未断裂、侵彻中断裂以及侵彻前断裂3种状态,并建立了综合考虑射流状态的侵彻深度理论模型。王静等^[75]基于虚拟原点概念和离散元思想,分析了运动过程中射流半径的变化规律,并结合准定常侵彻理论建立了描述射流侵彻过程中孔径随深度变化的工程模型。随着研究的深入,聚能射流侵彻模型不断拓展至新型药型罩材料(如贫铀合金^[76]、活性材料^[77])及复杂侵彻场景(动态加载^[78]、多层间隔靶^[79]、复合装甲^[80-81])等。尽管

已取得诸多成果,但现有模型大多聚焦于轴对称装药结构,对非圆截面聚能装药的破甲特性缺乏系统性研究。此外,静态爆炸与动态工况下射流行为的显著差异亦尚未被完全揭示,后续亟需建立二者间的定量关联模型,以实现动态工况下聚能射流破甲深度的高精度预测。

2.4 目标毁伤评估模型

在现代军事对抗中,高价值目标正朝着复合化与多样化的方向发展。同时,目标毁伤评估已从传统的物理破坏分析,转变为基于功能毁伤的系统效能评估体系。目标毁伤评估模型通过构建“部件物理毁伤—部件功能下降—目标整体功能下降”的多层级评估框架,实现从各部件毁伤效应到目标整体作战能力、生存能力折减的映射。

2.4.1 目标毁伤评估方法

目标毁伤评估方法的核心在于建立部件物理毁伤与目标整体结构/功能毁伤之间的映射关系,进而表征武器弹药在不同作战条件下对目标的毁伤程度和效果^[82]。自第二次世界大战以来,武器弹药打击下目标的毁伤评估已从“命中即毁伤”发展到详细的毁伤概率、毁伤等级以及目标剩余战术能力的评估^[38]。

1) 试验数据统计法。试验数据统计法作为传统的评估方法,其核心是利用实弹试验和战场战例分析数据,建立目标命中弹药数与毁伤状态之间的关系数据库,从而评估实战中目标受到打击后的生存能力和弹药威力。其优点在于直观明了,能够考虑一些难以用数学方法描述的因素,且数据可靠;缺点是实际操作难度较大,如何获得末端弹目交会及相关信息,并准确测量相关毁伤状态,仍是难以实现的问题。此外,该方法需要大量实弹数据支持,通常用于型号产品的验收鉴定。

2) 图解法。图解法是一种近似评估方法,在充分收集大量资料后,通过绘制主要效率指标公式中的关键因素的曲线,再结合所设计的战斗部的数据与弹目交会条件,于曲线数据图库中查找,进而得到战斗部毁伤效率的近似值。图解法具有简单、快捷的特点,但其结果依赖于已获得的数据曲线,因此灵活性较为有限。

3) 概率密度积分法。概率密度积分法的原理是基于导弹单发杀伤概率的全概率公式,在求出制导误差分布概率密度、引信启动点概率分布密度和三维坐标杀伤规律的基础上,采用解析方法或数值积分方法计算单发杀伤概率。解析算法仅在充分简化条件下能获得分析解,其最大优点

是直观,但只适用于初步设计。同时,对于复杂目标及交会条件下的毁伤,解析法难以提供解答。数值积分法通过选取合适的数值积分方法进行多重数值积分运算,求得积分近似解,虽然是一种常用方法,但随着积分次数的增加,其计算量显著增大。

4) 蒙特卡罗仿真模拟法。蒙特卡罗仿真模拟法是一种基于随机数试验的统计计算方法,其基本思想是将随机事件的概率特征转化为数学模型,通过大量随机样本的生成与统计分析,估算期望值、概率等统计量,为问题求解提供数值近似解。自 20 世纪 70 年代末以来,蒙特卡罗方法作为一种科学有效的毁伤评估手段,已广泛应用于武器弹药对目标打击过程的仿真建模中^[38, 83]。该方法通过模拟导引误差、引信启动、空间交会和终点毁伤等多个环节中的不确定因素,反复执行随机抽样,统计不同毁伤事件的发生频率,从而实现毁伤概率的逼近计算。该方法的有效应用高度依赖于计算机技术的发展。一方面,随机抽样需在大样本条件下进行,计算效率直接影响评估速度;另一方面,复杂目标的建模、弹目交会解算及毁伤特征提取均需借助计算机辅助完成。近年来,随着硬件性能提升与仿真软件能力增强,蒙特卡罗方法已可在复杂场景中实现快速、高精度的毁伤评估,逐步成为当前仿真评估的主流手段之一。

5) 毁伤评估表法。毁伤评估表法最初用于装甲车辆毁伤程度的定量判定,其核心思想是基于大量实验数据与专家经验,构建标准的毁伤数据表,以描述各类关键部件受损导致的整车功能丧失情况。该方法操作简便、使用效率高,适用于快速评估任务。然而,毁伤评估表法主要依赖经验数据与主观判断,其数学基础相对薄弱,缺乏严格的建模逻辑,评估结果通常仅具有统计意义,难以反映目标毁伤的实际情况。因此,基于此法得到的结果存在一定的不确定性。

6) 降阶态评估法。降阶态评估法是 20 世纪末美军弹道实验室提出的一种新的系统毁伤评估方法。该方法通过划分目标系统基本功能可能出现的毁伤状态,进而实现目标毁伤评估的数学描述。其核心是建立部件毁伤状态与目标功能降阶态工程度量之间的转化关系,并以目标功能降阶态概率分布的统计分析值为度量指标,对目标进行毁伤评估^[84]。从本质上看,降阶态代表了目标功能的毁伤等级,并将“未受毁伤”也列入其中一个状态,构成了数学上的“完备划分”。与毁伤评估

表法相比，降阶态评估法引入了易损性空间及易损性矢量概念，建立了有数学逻辑关系的评估模型，因此，其评估结果更加精确。

各方法的优劣性汇总如表1所示。

表 1 典型目标毁伤评估方法对比
Table 1 Comparison of typical target damage evaluation methods

名称	优点	缺点
试验数据统计法	数据准确可靠	试验成本高昂,操作难度大
图解法	简单、快捷	依赖于已得到的等毁伤包络线,灵活度有限
概率函数分析法	解析模型数学严谨,结果直观	复杂交会条件建模困难
蒙特卡罗仿真模拟法	支持复杂场景评估	建模过程必须借助计算机辅助,计算速度慢
毁伤评估表法	操作简便高效	无法提供目标毁伤的实际情况
降阶态评估法	具有严格的数学意义,评估结果可靠	评估精度受目标易损性模型的精细、准确程度影响

2.4.2 毁伤准则和判据

毁伤准则与毁伤判据共同构成了从定性描述到定量评估目标部件毁伤程度的理论基础，二者在功能定位和理论内涵上既有本质区别，又存在紧密的逻辑关联^[14]。由于毁伤判据是毁伤准则在特定工况下的量化阈值，其数值须结合靶体特性与载荷条件，且通过试验或仿真手段标定获得，所以具有较强的专属性和条件依赖性。本节侧重于毁伤准则的共性归纳，故不对毁伤判据作详细展开。根据毁伤元作用机理的差异，现有理论体系主要包括冲击波毁伤准则和破片毁伤准则等典型类别。

1) 冲击波毁伤准则。在冲击波毁伤场景中，常用的毁伤准则包括超压准则、冲量准则以及超压-冲量准则^[82]。超压准则通过峰值超压衡量冲击波对目标的破坏能力，强调爆炸产生的瞬时压力对目标的毁伤作用；冲量准则关注压力持续时间的累积效应，认为只有当冲量达到某一阈值时，才会对目标造成实质性破坏；超压-冲量准则通过综合考虑冲击波超压和冲量，能够更全面地评估目标毁伤程度。需要注意的是，超压准则和冲量准则可视为超压-冲量准则的2种极限状态^[85]。当冲击波作用时间足够长时，冲量对毁伤效果起主导作用，此时超压-冲量准则简化为冲量准则；当冲击波持续时间极短时，超压峰值成为决定性因素时，则简化为超压准则。超压-冲量准则不仅能

够更精确地评估目标在冲击波作用下的毁伤程度，还具有广泛的适用性，能够涵盖不同爆炸条件和目标。王新颖等^[86]基于超压-冲量准则建立了爆炸空气冲击波对生物目标的伤害预测模型；Dragos等^[87]应用超压-冲量曲线成功评估了爆炸荷载作用下超高性能混凝土板的毁伤情况；Zhai等^[88]应用超压-冲量准则评估导弹战斗部对建筑目标的毁伤情况；苏琼等^[64]应用超压-冲量曲线快速评估了爆炸荷载作用下超高性能混凝土板的弯曲损伤等级；李军润等^[89]对比分析了冲量准则和超压准则在RC箱型结构内爆炸工况中的毁伤评估的适用性。在实际工程中，冲击波对目标的毁伤作用往往是超压和冲量共同作用的结果。因此，相关研究多采用超压-冲量准则来评估目标的毁伤情况。对于某些超压或冲量对目标毁伤占主导地位的场景，也可单独采用超压准则或冲量准则。

2) 破片毁伤准则。破片毁伤准则体系主要分为能量型和非能量型2类。能量型准则包括动能准则、比动能准则和质量准则，现阶段已形成较为成熟的研究框架。其中，动能准则以单个破片的动能为依据，判定其毁伤能力；比动能准则通过引入单位面积上的动能这一概念，突出了作用面积大小对毁伤效果的关键影响；质量准则则从破片自身质量出发，为毁伤评估提供了重要的补充视角^[90]。这3类准则既可以独立应用于毁伤评估场景，又能根据实际需求灵活组合使用，以更好地适应多种复杂场景下的毁伤评估要求。随着研究的深入，非能量型毁伤准则逐渐发展起来，但普遍存在理论体系不完善、适用范围有限等问题，其有效性仍需大量试验数据支撑。破片密度分布准则便是其中的重要代表。王光源等^[91]针对航空导弹拦截反舰导弹的问题，以破片密度毁伤准则建立了毁伤概率模型。吴国东等^[92]基于密度毁伤准则评估了子母弹对目标的毁伤情况。近年来，国内多数军工类院校已积极开展毁伤判据与准则的研究，但由于各类准则和判据的基本内涵及出发点存在差异，且尚未形成统一规范，导致相关成果难以全面推广^[82]。因此，后续研究应加强毁伤准则与判据制定的标准化工作，建立统一的战斗部毁伤效应试验数据库，并探索引入其他学科的知识，推动多学科交融与发展。

2.4.3 毁伤等级

毁伤等级旨在明确目标整体毁伤程度所达到的具体等级，其本质是对目标功能或任务能力损失程度的定性描述，为作战决策、战略规划以及

战损评估等宏观决策提供重要依据。由于毁伤等级划分结果具有主观性,且受研究视角差异以及涉密问题等因素的影响,目前国内外学术界尚未就毁伤等级的划分标准达成统一共识。本节仅简要综述部分典型目标的毁伤等级划分结果。

战斗人员的毁伤等级划分相对复杂,尤其是在评估非致死性伤害对作战能力影响时更为突出。王树山等^[14]提出了一种基于作战能力的战斗人员毁伤等级划分方案,将战斗人员作战能力下降,仍能继续完成任务,但难以圆满完成的判定为轻度受伤;作战能力基本丧失,无法完成预定任务,需医疗救护的定义为重度受伤;彻底丧失所有作战能力的归类为立即死亡。事实上,战场人员的作战能力与任务类型及四肢功能之间存在密切关联。例如,腿部功能受损对步兵作战机动性的限制显著大于对狙击手的影响。美军通过构建四肢功能与任务类型的关联关系,提出了一套适用于战斗人员等级划分的标准^[84]。

装甲车辆的毁伤等级划分主要依据其机动能力和射击能力的受损情况。当车辆完全丧失行动能力或仅部分保留机动能力时判定为轻度毁伤;主炮、机枪等武器系统功能完全或部分丧失时定义为中度毁伤;车辆整体功能完全丧失则归类为重度毁伤^[14]。

舰艇作为多系统集成海上作战平台,其毁伤等级划分呈现出更高的复杂性。舰艇毁伤等级划分需综合考量指挥控制系统、武器系统、动力系统等关键分系统的功能完整性^[14]:轻度毁伤表现为部分分系统受损导致的综合作战能力下降;中度毁伤指指挥控制系统受损或关键分系统部分失效引发的作战功能丧失;重度毁伤则对应指挥控制系统瘫痪或关键系统完全损毁;最终级毁伤表现为舰体沉没或必须弃舰的彻底损毁状态。

周旭^[93]提出了一种针对钢筋混凝土框架结构的毁伤等级划分标准,如表2所示,划分为轻度毁伤、中度毁伤、重度毁伤和摧毁4个等级。表中对毁伤内涵的描述增加了构件毁伤比率的内容,其本质是从部件毁伤角度反映目标整体毁伤程度,即根据目标易损性分析结果,构建构件毁伤比率与目标整体毁伤之间的映射关系。

上述毁伤等级的内涵描述主要依据目标的物理和功能毁伤。此外,还可以根据加载条件划分目标的毁伤等级。如当冲击波超压小于20 kPa时,人员目标的毁伤等级为无毁伤。然而,无论采用何种方式,都需确保各层级描述之间的自洽性。

具体而言,在同一毁伤等级下,由加载条件计算得到的目标物理毁伤程度应与毁伤内涵描述中的现象一致,并与该毁伤等级对应的功能毁伤程度相匹配。

表2 钢筋混凝土框架结构毁伤等级^[93]

Table 2 Damage level classification of reinforced concrete frame structure^[93]

毁伤等级	毁伤内涵描述			
	物理毁伤描述	构件毁伤比率	修复难度	功能损伤
轻度	玻璃、门窗轻度破坏,内隔墙开裂	10%以内楼板、内隔墙破坏	不需动用大型设备修复	可继续使用
中度	门窗轻度破坏,部分楼板、墙体开裂崩塌;少数梁、柱变形开裂	10%~30%楼板或内隔墙中度及以上破坏;10%以内柱轻度破坏	承载构件破坏,需大型设备修复	修复后使用
重度	门窗、内隔墙多数破坏;梁柱部分发生中度及以上破坏,出现局部倒塌	30%~50%楼板或内隔墙中度及以上破坏;10%~30%柱发生中度及以上破坏	难以修复,需要评估修复的价值	不能使用
摧毁	多数框架梁、柱变形或断裂,建筑物大面积倒塌	超过50%楼板或内隔墙中度及以上破坏;超过30%柱发生中度及以上破坏	不能修复	不能使用

3 仿真评估软件

3.1 技术特点

仿真评估软件是实现武器弹药毁伤效能快速、准确评估的重要工具。该类软件通过模拟武器弹药与目标之间的相互作用,进行毁伤效能的定量分析,从而为武器系统的设计优化、性能改进及作战效能评估提供科学依据。作为毁伤效能评估领域的综合性成果,仿真评估软件集成了评估方法、建模技术、基础数据及软件开发能力,广泛应用于军事研究与实践的多个方面。

然而,国内学界和行业内对于毁伤效能仿真评估软件存在一定的认识误区,常将其与数值模拟软件相混淆。仿真评估软件专注于武器系统末端毁伤效能的综合评估,而数值模拟软件则侧重于毁伤作用过程中的物理场精细模拟^[94]。因此,仿真评估软件是支撑毁伤效能综合仿真的直接依托工具,而数值模拟软件仅作为评估流程中的物理建模手段之一。尽管二者均服务于毁伤效能研究领域,但其技术特征及应用侧重点存在本质性差异,具体表现如下。

1) 理论框架的差异性。仿真评估软件一般采

用混合建模方法,其理论框架具有显著的包容性,既能基于物理机制建立模型,也可以根据试验数据构建经验模型,甚至允许引入统计分析与模糊判断方法。相比之下,数值模拟软件严格遵循力学基本原理,必须依赖精确的物理方程进行数值模型构建。

2) 建模信息需求的差异。数值模拟软件对输入参数要求极为严格,需要精确获取武器与目标的作用参数,并合理选择材料本构模型及参数。然而,在针对敌方非协作目标进行毁伤效能评估时,这些信息通常难以获得。相较之下,仿真评估软件建模过程具备较好的参数容差能力,仅需获取基础的弹目作用参数即可开展有效分析,因此,在战场环境下的快速评估中具有明显优势。

3) 计算效率的数量级差异。以典型防空导弹拦截场景为例,仿真评估软件在秒级时间内即可完成上万枚破片毁伤概率的计算,即使考虑参数随机性而进行上千次蒙特卡罗抽样,其耗时也能控制在分钟量级之内。而数值模拟软件进行单次仿真通常需要数小时至数日的计算资源,若进行同样规模的参数抽样,计算成本则呈指数级增长。

4) 评估输出的功能差异。数值模拟软件的输出主要集中于物理场的精确描述,如应力分布、结构变形等,但无法直接转化为作战效能指标。相比之下,仿真评估软件可以直接输出目标毁伤等级、剩余生存能力等作战效能指标,使其能够直接服务于武器系统效能评估。

3.2 研究进展

自20世纪80年代初,美国便开始研究高分辨率目标易损性描述模型及仿真评估方法,逐步建立了涵盖毁伤效应、评估方法及计算机应用技术的完整理论体系,并形成了一批体系化、系列化的典型毁伤效能仿真评估软件成果,包括射击线与易损性建模程序、易损面积与维修时间分析程序、交战与终端效应模拟程序、战役仿真程序以及联合终端效能模型等。与此同时,部分欧洲国家亦高度重视毁伤评估技术的研究,逐渐构建出较为完善的理论与技术体系,并开发出一系列仿真评估软件^[39]。例如,瑞典开发了AVAL(assessment of vulnerability and lethality)软件包,可针对空中、水面等多类型目标实施毁伤效能评估;荷兰TNO实验室研发了适用于陆海空三军通用的评估软件TARVAC;德国IABG公司开发了Uni-VeMo模型,能够评估基础设施、防空阵地、车辆等目标的毁伤效能;日本防卫厅研发了VAS仿真

器,具备评估军事装备整体易损性的能力。相比之下,中国在毁伤效能仿真评估软件领域的研究起步较晚,最初仅作为毁伤评估研究的附属成果提供给用户。经过多年的持续研究与开发,国内在该领域已取得显著进展。目前,公开的软件成果主要特点如下。①依附式开发:依托商业可视化仿真软件架构,嵌入自行开发的计算分析模块,但普遍缺乏完全独立的自主知识产权;②联合开发:部分科研机构与商业软件企业合作,共同开发计算分析模块,然而在扩展性、数据安全性与知识产权保护方面仍面临一定挑战;③独立自主开发:少数研究团队已实现从模型构建、仿真计算到可视化展示的全流程自主研发,但软件在工程化规范、标准化应用方面尚存在改进空间。

根据公开资料,目前仅有卢永刚团队^[5-6]和卢芳云团队^[84]掌握全过程独立研发并具备自主知识产权的毁伤效能仿真评估软件开发能力。其中,卢永刚团队根据国内用户的实际需求,提出了以“功能定制”为特点的产品开发模式,在统一的目标建模数据库与求解器基础上,开发出面向不同应用方向的仿真评估软件。经过十多年的发展,卢永刚团队已经形成了系列化的战斗部辅助设计及威力分析软件、目标易损性数据库和武器毁伤效能评估软件。这些软件集成了战斗部建模、目标易损性描述与毁伤效果计算等关键功能模块,具备较强的可视化分析与操作交互能力。

3.3 技术瓶颈

当前,国内在武器弹药仿真评估领域已初步建立较完整的方法论体系,并在软件开发领域取得显著进展。然而,随着新型武器系统的不断涌现及作战环境复杂性日益提高,仿真评估软件在实际应用中仍面临诸多技术瓶颈。经系统性分析当前技术现状,存在的主要问题如下。

1) 软件平台多样化需求。单一仿真软件平台难以充分满足不同用户在数据输入、信息获取、分析精度及结果输出等方面的多样化需求。因此,软件界面设计应以用户需求为核心,提供更为灵活的定制功能,以适应不同用户层次的应用需求。

2) 跨军种与跨平台兼容性。未来武器毁伤效能评估将向跨军种、跨平台和多维协同发展,仿真软件需具备对多种操作系统、数据格式及应用环境的兼容能力,以实现跨平台协同仿真。然而,目前国内仿真软件在跨系统兼容性方面存在明显不足,严重制约了软件的推广应用及其在实际作战中的效能发挥。

3) 数据库与求解器的规范化建设。弹药威力数据库、目标易损性数据库以及经过认证的求解器模块是仿真软件实现精确评估的核心要素,其标准化和规范化建设是保障仿真结果准确性与可靠性的基础。目前国内尚缺乏统一的数据库与求解模块标准体系,导致部分仿真结果差异明显,直接影响评估结果的可信度与实际应用效果。

4 未来发展趋势

在系统梳理武器毁伤效能评估技术现状、深入分析理论基础及工程应用逻辑的基础上,结合未来作战环境的多样化与智能化趋势,提出以下发展建议。

1) 战斗部威力场建模技术标准化。现代战争对毁伤评估的精度与响应效率要求日益提高,推动战斗部威力场建模朝标准化、结构化、智能化方向发展。但当前仍存在试验规范缺失、数据格式不统一、建模手段单一等问题,限制了模型在多场景和多平台下的适应能力。为提升模型的通用性与适配效率,可从以下几个方面推进。一是建立覆盖多种弹药类型的统一试验规范体系,明确试验流程、靶标设置与数据采集标准;二是构建多分辨率的标准化数据格式体系,增强高效跨平台兼容能力;三是融合实测数据、数值模拟与经验建模方法,构建结构完备、可动态更新的武器弹药威力场统一数据库。

2) 武器弹药毁伤效应分析技术精细化。毁伤效应分析作为武器弹药仿真评估体系的核心环节,其分析精度与计算效率直接影响评估结果的可靠性与工程应用价值。目前,国内外在穿甲、侵彻和爆炸等典型效应方面已建立多种分析模型,其中穿甲和侵彻效应的计算误差在理想状态下可控制在 10% 以内。然而,面对建筑结构、舰艇舱室等复杂目标的内部爆炸破坏效应,现有模型在精度与效率之间仍难以兼顾。为突破这一瓶颈,建议重点加强对复杂靶标多层结构下穿透与后效的耦合建模能力,提升对内部关键构件毁伤过程的刻画能力;同时,构建融合冲击波、破片杀伤、热辐射等多机制耦合效应的复合模型体系;发展支持大场景的快速仿真技术,优化资源调度机制,提升在战场环境下的实时响应性能。

3) 基于人工智能的毁伤评估方法优化。近年来,人工智能技术在理学与工学等多个领域展现

出优越性能,为毁伤评估方法的智能化转型提供了新的发展契机。后续研究可在现有模型体系基础上,引入多模态融合思路,推动人工智能技术在传统评估方法中的融合应用。一方面,可利用实弹试验数据与战场观测信息构建训练样本,建立命中目标的弹药数量、打击位置、弹药类型与毁伤状态及毁伤等级之间的映射关系模型。另一方面,结合深度学习、特征融合与模式识别等人工智能方法,有望实现对不同武器型号与弹目交会条件下目标毁伤效果的快速预测与精确评估,从而显著提升毁伤评估方法在复杂作战环境中的智能化水平与适应能力。

4) 仿真评估体系的持续完善与自主构建。仿真评估体系的持续完善与自主构建是武器弹药毁伤效能研究的重要发展方向。未来应从战略高度出发,以实战需求为导向,逐步构建适应未来战争形态的自主仿真评估体系。为实现这一目标,应借鉴国外先进经验,推动多层次的自主创新,加强顶层平台建设,通过有效整合军方、科研机构及高校等多方资源,针对具体作战目标与任务需求开展系统化、深入化的研究。同时,还需建立贯穿理论建模、模型开发、平台实现与应用验证的完整技术链条,依托实践迭代与试验反馈持续提高体系的可靠性和工程应用水平,实现评估体系由被动适配向主动引领的转变。这一过程并非短期内即可实现,需各相关单位保持战略定力,加强协作,稳步推进长期规划。需特别注意的是,在具体实施过程中,务必高度重视保密工作,确保关键技术和敏感信息安全,最终实现我国武器弹药毁伤仿真评估技术的根本性突破。

参考文献

- [1] DEITZ P H, OZOLINS A. Computer simulations of the abrams live-fire field testing[R]. ADA209509, 1989.
- [2] KLOPCIC J T, STARKS M W, WALBERT J N. A taxonomy for the vulnerability/lethality analysis process[R]. ADA250036, 1992.
- [3] KLOPCIC J T. The vulnerability/lethality taxonomy: a general analytical procedure[R]. DA364475, 1999.
- [4] 黄寒砚, 王正明. 武器毁伤效能评估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 H Y, WANG Z M. 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] 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.
- [6] 刘彤, 卢永刚, 钱立新, 等. 基于虚拟模型的目标易损性评估计算机仿真系统的开发[J]. *弹箭与制导学报*, 2005, 25(4): 49-52.
LIU T, LU Y G, QIAN L X, et al. Vulnerability/lethality assessment method based on virtual model[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2005, 25(4): 49-52.
- [7] 吴艳青, 刘彦, 黄风雷, 等. 爆炸力学理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021: 202-213.
- [8] 王明涛, 程月华, 吴昊. 柱形装药空中运动爆炸冲击波荷载计算模型[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44(7): 107-125.
WANG M T, CHENG Y H, WU H. Calculation model for the blast wave load by explosion of air-moving cylindrical charges[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44(7): 107-125.
- [9] 宫婕, 汪泉, 李志敏, 等. 柱形爆炸容器内爆炸冲击波的传播规律研究[J]. *爆破*, 2017, 34(4): 17-21, 51.
GONG J, WANG Q, LI Z M, et al. Research on propagation law of explosive shock wave in cylindrical explosion containment vessel[J]. *Blasting*, 2017, 34(4): 17-21, 51.
- [10] Kim H J, Hwang K, Yoon Y H, et al. Numerical analysis of the effect of afterburning on damage to the concrete structure under interior explosion[J]. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2022, 16(1): 1-21.
- [11] 柏小娜, 李向东, 杨亚东. 封闭空间内爆炸冲击波超压计算模型及分布特性研究[J]. *爆破器材*, 2015, 44(3): 22-26.
BAI X N, LI X D, YANG Y D. Calculation model and the distribution of wave pressure under internal explosion in closed space[J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(3): 22-26.
- [12] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 长方体密闭结构内爆炸冲击波传播与叠加分析模型[J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1449-1455.
YANG Y D, LI X D, WANG X M. An analytical model for propagation and superposition of internal explosion shockwaves in closed cuboid structure[J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1449-1455.
- [13] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣, 等. 钢筋混凝土结构内爆炸相似模型试验研究[J]. *南京理工大学学报*, 2016, 40(2): 135-141.
YANG Y D, LI X D, WANG X M, et al. Experimental study on similarity model of reinforced concrete structure under internal explosion[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2016, 40(2): 135-141.
- [14] 王树山, 马峰, 郭勋成, 等. 武器弹药终点毁伤评估[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021: 233-240.
- [15] 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(11): 1-8.
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(11): 1-8.
- [16] 武海军, 成乐乐, 陈文戈, 等. 典型舰船结构的水下爆炸耦合毁伤研究进展[J]. *北京理工大学学报*, 2023, 43(5): 439-459.
WU H J, CHENG L L, CHEN W G, et al. Review on coupling damage effects of underwater explosion on typical ship structures[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2023, 43(5): 439-459.
- [17] GURNEY R W. The initial velocities of fragments from bombs, shell and grenades[R]. Aberdeen, MD, US: Ballistics Research Laboratories, 1943.
- [18] 诸葛鼎. 多弹威力态势目标毁伤建模与仿真研究[D]. 西安: 西安工业大学, 2024: 8-10.
ZHUGE D. Research on modeling and simulation of target damage based on multi-missile power situation[D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2024: 8-10.
- [19] 姜金佐, 徐翔云, 任王军, 等. 战斗部动态爆炸破片威力场综述[J]. *兵工学报*, 2023, 44(S1): 1-8.
JIANG J Z, XU X Y, REN W J, et al. Overview of fragmentation power field of warhead under dynamic explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2023, 44(S1): 1-8.
- [20] 全远, 聂源, 李德贵, 等. 爆炸驱动下独立结构破片初速分析[J]. *空天防御*, 2024, 7(2): 42-46, 73.
TONG Y, NIE Y, LI D G, et al. Initial velocity analysis of separate structural fragment under explosion[J]. *Air & Space Defense*, 2024, 7(2): 42-46, 73.
- [21] 张生, 李述涛, 王振清, 等. 数据驱动的自然破片飞散角计算模型[J/OL]. *工程力学*, (2025-05-19) [2025-06-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595>.

- o3.20250517.1442.002.
- ZHANG S, LI S T, WANG Z Q, et al. A data-driven computational model for natural fragment scattering angles[J/OL]. Engineering Mechanics, (2025-05-19) [2025-06-18]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20250517.1442.002>.
- [22] 李翔宇, 李振铎, 梁民族. D型战斗部破片飞散性及威力场快速计算[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(4): 137-144.
- LI X Y, LI Z D, LIANG M Z. Dispersion properties and rapid calculation of fragment force field of D-shaped fragmentation warhead[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(4): 137-144.
- [23] 张璐, 刘海鹏, 刘彦, 等. 椭圆变截面侵爆战斗部破片飞散特性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2025, 46(3): 137-144.
- ZHANG L, LIU H P, LIU Y, et al. Study on fragmentation scattering characteristics of elliptical variable-section intrusive warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2025, 46(3): 137-144.
- [24] MOTT N F. A theory of the fragmentation of shells and bombs[M]//Fragmentation of Rings and Shells. Berlin, Heidelberg: Springer, 2006: 243-294.
- [25] HELD M. Fragment mass distribution of HE projectiles[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1990, 15(6): 254-260.
- [26] UGRČIĆ M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles[J]. Scientific Technical Review, 2013, 63(2): 47-57.
- [27] GRISARO H Y, DANCYGIER A N. Spatial mass distribution of fragments striking a protective structure[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 112: 1-14.
- [28] QIAN L X, LIU T, ZHANG S Q, et al. Fragment shot-line model for air-defence warhead[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2000, 25(2): 92-98.
- [29] 徐恒威. 宏观制造偏差对聚能装药射流成型及侵彻性能影响研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2023: 11-12.
- XU H W. Influence of manufacturing deviation on jet forming and armor breaking performance of shaped charge[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2023: 11-12.
- [30] BIRKHOFF G, MACDOUGALL D P, PUGH E M, et al. Explosives with lined cavities[J]. Journal of Applied Physics, 1948, 19(6): 563-582.
- [31] PUGH E M, EICHELBERGER R J, ROSTOKER N. Theory of jet formation by charges with lined conical cavities[J]. Journal of Applied Physics, 1952, 23(5): 532-536.
- [32] CARLEON J, CHOU P C. A one-dimensional theory to predict the strain and radius of shaped-charge jets[C]//Proceeding of the First International Symposium on Ballistics. Orlando: ADP Association, 1974: 13-15.
- [33] 孙传杰, 卢永刚, 李会敏. 基于PER理论的聚能装药射流理论计算方法[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(4): 99-102.
- SUN C J, LU Y G, LI H M. Model of theoretical calculation of shaped charge with modified PER theory[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(4): 99-102.
- [34] 蒋文灿, 程祥珍, 梁斌, 等. 一种组合药型罩聚能装药战斗部对含水复合结构毁伤的数值模拟及试验研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(8): 93-107.
- JIANG W C, CHENG X Z, LIANG B, et al. Numerical simulation and experimental study on the damage of water partitioned structure by a shaped charge warhead with a combined charge liner[J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(8): 93-107.
- [35] 徐恒威, 梁斌, 刘俊新, 等. 起爆偏心对聚能装药射流成型过程及威力参量的影响[J]. 高压物理学报, 2023, 37(1): 129-140.
- XU H W, LIANG B, LIU J X, et al. Effect of initiation eccentricity on shaped charge jet forming process and power parameters[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2023, 37(1): 129-140.
- [36] NING J G, CHEN Q D, LI J Q, et al. Improved shaped charge formation model based on the effective charge[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2025, 295: 110223.
- [37] 吴艳青, 刘彦, 黄风雷, 等. 爆炸力学理论及应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2021.
- [38] 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 C H, HUANG K D, TONG L, et al. Assess damage effectiveness for warhead to complex targets[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(19): 5971-5976.
- [39] 徐豫新, 蔡子雷, 吴巍, 等. 弹药毁伤效能评估技术研究现状与发展趋势[J]. 北京理工大学学报, 2021, 41(6): 569-578.
- XU Y X, CAI Z L, WU W, et al. Current research and development of ammunition damage effect assessment technology[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(6): 569-578.
- [40] 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, 4(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, 4(5): 217-222.
- [41] 梁振刚, 王鑫, 赵书超, 等. 装甲车辆目标易损性描述模型快速建模技术[J]. 弹箭与制导学报, 2020, 40(1): 105-109.
- LIANG Z G, WANG X, ZHAO S C, et al. Rapid modeling technique for target vulnerability model of armored vehicle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 105-109.
- [42] 舒张忆南, 梁争峰, 阮喜军, 等. 多种因素影响下钨合金破片的穿甲深度研究[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(4): 25-30.
- SHU Z Y N, LIANG Z F, RUAN X J, et al. Research on penetration depth of tungsten alloy fragments under influence of many factors[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(4): 25-30.
- [43] 韩晓明, 朱枫, 陈俊杰. 考虑攻角的动能杆条对TBM目标穿甲模型研究[J]. 弹箭与制导学报, 2016, 36(3): 35-39.
- HAN X M, ZHU F, CHEN J J. Model research of KE-rod piercing armor anti-TBM considering attack angle[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2016, 36(3): 35-39.
- [44] 童超慧. 钢化玻璃抗侵彻性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2024: 28-30.
- TONG C H. Research on penetration resistance of tempered glass[D]. Taiyuan: North University of China, 2024: 28-30.
- [45] 程玉, 陈智刚, 杨芮, 等. 无量纲参数对破片弹道极限速度的影响[J]. 弹道学报, 2022, 34(4): 8-14, 51.
- CHENG Y, CHEN Z G, YANG R, et al. Influence of dimensionless parameters on ballistic limit velocity of fragments[J]. Journal of Ballistics, 2022, 34(4): 8-14, 51.
- [46] 毛亮, 王华, 姜春兰, 等. 钨合金球形破片侵彻陶瓷/DFRP复合靶的弹道极限速度[J]. 振动与冲击, 2015, 34(13): 1-5.
- MAO L, WANG H, JIANG C L, et al. Ballistic limit velocity of tungsten alloy spherical fragment penetrating ceramic/DFRP composite target plates[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(13): 1-5.
- [47] 刘铁磊, 徐豫新, 王晓锋, 等. 钨合金球形破片侵彻低碳钢的弹道极限速度计算模型[J]. 兵工学报, 2022, 43(4): 768-779.
- LIU T L, XU Y X, WANG X F, et al. Ballistic limit calculation model of tungsten alloy spherical fragments penetrating into low carbon steel plate[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(4): 768-779.
- [48] 刘铁磊, 王晓锋, 徐豫新, 等. 一种考虑球体变形的钨球侵彻低碳钢深度计算模型[J]. 兵工学报, 2024, 45(5): 1625-1636.
- LIU T L, WANG X F, XU Y X, et al. A calculation model for penetration depth of tungsten ball against low-carbon steel considering sphere deformation[J]. Acta Armamentarii, 2024, 45(5): 1625-1636.
- [49] 赵丽俊, 焦志刚, 李晓婕, 等. 预制破片侵彻均质装甲钢的极限穿透速度[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 183-190.
- ZHAO L J, JIAO Z G, LI X J, et al. Critical penetration velocity of prefabricated fragment in penetrating homogeneous armor steel plate[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 183-190.
- [50] 汪维. 钢筋混凝土构件在爆炸载荷作用下的毁伤效应及评估方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012: 75-76.
- WANG W. Study on damage effects and assessments method of reinforced concrete structural members under blast loading[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012: 75-76.
- [51] 陈德, 吴昊, 方秦. 爆炸荷载作用下单向砌体填充墙动态响应计算方法[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(10): 197-210.
- CHEN D, WU H, FANG Q. Dynamic responses calculation method of one-way masonry infill wall under blast loadings[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(10): 197-210.
- [52] 吕晋贤, 吴昊, 卢永刚, 等. 爆炸作用下建筑结构高效毁伤评估方法[J]. 爆炸与冲击, 2025, 45(1): 135-152.
- LYU J X, WU H, LU Y G, et al. High-efficiency assessment method of damage to building structures under explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(1): 135-152.
- [53] 彭琦, 吴昊, 方秦, 等. 长持时平面爆炸波作用下RC梁动力响应研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(3): 87-101.
- PENG Q, WU H, FANG Q, et al. Dynamic responses of RC beams under long-duration near-planar blast waves[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(3): 87-101.
- [54] 苏琼, 程月华, 吴昊. 爆炸荷载作用下UHPC板的弯曲损伤评估[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(12):

- 125-140.
- SU Q, CHENG Y H, WU H. Flexural damage assessment for UHPC panels under blast loadings [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2023, 43(12): 125-140.
- [55] FELDGUN V R, YANKELEVSKY D Z, KARINSKI Y S. A nonlinear SDOF model for blast response simulation of elastic thin rectangular plates [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2016, 88: 172-188.
- [56] RIGBY S E, TYAS A, BENNETT T. Single-degree-of-freedom response of finite targets subjected to blast loading-the influence of clearing[J]. *Engineering Structures*, 2012, 45: 396-404.
- [57] 徐恒威, 卢永刚, 李军润, 等. 考虑变形/侵蚀耦合的弹体横截面理论模型[J]. *兵工学报*, 2024, 45(S1): 97-104.
- XU H W, LU Y G, LI J R, et al. A theoretical model for the cross-sectional area of a projectile considering deformation and erosion coupling [J]. *Acta Armamentarii*, 2024, 45(S1): 97-104.
- [58] FORRESTAL M J, ALTMAN B S, CARGILE J D, et al. An empirical equation for penetration depth of ogive-nose projectiles into concrete targets [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1994, 15(4): 395-405.
- [59] LI Q M, CHEN X W. Dimensionless formulae for penetration depth of concrete target impacted by a non-deformable projectile[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2003, 28(1): 93-116.
- [60] CHEN X W, LI X L, HUANG F L, et al. Normal perforation of reinforced concrete target by rigid projectile[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35(10): 1119-1129.
- [61] CHEN X W, HE L L, YANG S Q. Modeling on mass abrasion of kinetic energy penetrator[J]. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2010, 29(1): 7-17.
- [62] 吴昊, 方秦, 龚自明. 考虑刚性弹头形状的混凝土(岩石)靶体侵彻深度半理论分析[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(6): 573-580.
- WU H, FANG Q, GONG Z M. Semi-theoretical analyses for penetration depth of rigid projectiles with different nose geometries into concrete (rock) targets[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(6): 573-580.
- [63] 程月华, 姜鹏飞, 吴昊, 等. 考虑尺寸效应的典型钻地弹侵彻混凝土深度分析[J]. *爆炸与冲击*, 2022, 42(6): 85-99.
- CHENG Y H, JIANG P F, WU H, et al. On penetration depth of typical earth-penetrating projectiles into concrete targets considering the scaling effect[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2022, 42(6): 85-99.
- [64] LI J, WANG M Y, CHENG Y H, et al. Analytical model of hypervelocity penetration into rock [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 122: 384-394.
- [65] 王明洋, 邱艳宇, 李杰, 等. 超高速长杆弹对岩石侵彻、地冲击效应理论与实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(3): 564-572.
- WANG M Y, QIU Y Y, LI J, et al. Theoretical and experimental study on penetration in rock and ground impact effects of long rod projectiles of hyper speed[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(3): 564-572.
- [66] TANG Q Y, CHEN X W, DENG Y J, et al. An approximate compressible fluid model of long-rod hypervelocity penetration[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 155: 103917.
- [67] LU Y Y, ZHANG Q M, XUE Y J, et al. Hypervelocity penetration of concrete targets with long-rod steel projectiles: experimental and theoretical analysis[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021, 148: 103742.
- [68] 卢正操, 张元迪, 文鹤鸣, 等. 长杆弹侵彻半无限混凝土靶的理论研究[J]. *现代应用物理*, 2018, 9(4): 17-28.
- LU Z C, ZHANG Y D, WEN H M, et al. Theoretical study on the penetration of long rods into semi-infinite concrete targets[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, 9(4): 17-28.
- [69] ZHANG Y D, LU Z C, WEN H M. On the penetration of semi-infinite concrete targets by ogival-nosed projectiles at different velocities[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2019, 129: 128-140.
- [70] LIU C, ZHANG X F, CHEN H H, et al. Experimental and theoretical study on steel long-rod projectile penetration into concrete targets with elevated impact velocities[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2020, 138: 103482.
- [71] 李干, 宋春明, 邱艳宇, 等. 超高速弹对花岗岩侵彻深度递减现象的理论与实验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(1): 60-66.
- LI G, SONG C M, QIU Y Y, et al. Theoretical and experimental studies on the phenomenon of reduction in penetration depth of hyper-velocity projectiles into granite[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(1): 60-66.

- [72] KONG X Z, WU H, FANG Q, et al. Projectile penetration into mortar targets with a broad range of striking velocities: test and analyses[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 106: 18-29.
- [73] 卢芳云, 李翔宇, 田占东, 等. 武器毁伤与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 50-55.
- [74] DIPERSIO R, SIMON J. The penetration-stand-off relation for idealized shaped charge jets[R]. Aberdeen: Ballistic Research Laboratory, 1964.
- [75] 王静, 王成, 宁建国. 聚能射流侵彻的理论模型与孔径计算[J]. 工程力学, 2009, 26(4): 21-26.
WANG J, WANG C, NING J G. Theoretical model for shaped charge jets penetration and cavity radius calculation[J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(4): 21-26.
- [76] 龚柏林, 李明, 初哲, 等. 贫铀合金药型罩聚能破甲性能实验研究[J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 83-88.
GONG B L, LI M, CHU Z, et al. Penetration performance of depleted uranium alloys liner[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(3): 83-88.
- [77] 郭焕果, 卢冠成, 何锁, 等. 活性复合罩聚能装药侵彻增强行为[J]. 北京理工大学学报, 2020, 40(12): 1259-1266.
GUO H G, LU G C, HE S, et al. Penetration enhancement behavior of reactive material double-layered liner shaped charge[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2020, 40(12): 1259-1266.
- [78] 张雪朋, 吉庆, 伊建亚, 等. 聚能战斗部动态侵彻毁伤效应数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(8): 68-73.
ZHANG X P, JI Q, YI J Y, et al. Numerical simulation of dynamic penetration damage effect of shaped charge warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(8): 68-73.
- [79] 史进伟, 罗兴柏, 蒋建伟, 等. 射流侵彻水夹层间隔靶的理论和实验研究[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 213-218.
SHI J W, LUO X B, JIANG J W, et al. Numerical simulation and experimental study on the cratering stage of shaped charge jet penetrating into target[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2016, 24(3): 213-218.
- [80] 李中泽, 高旭东, 董晓亮. 玻璃纤维复合装甲抗射流侵彻的性能研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(9): 126-131.
LI Z Z, GAO X D, DONG X L. Performance of glass fiber composite armor against shaped charge jet[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(9): 126-131.
- [81] 刘念念, 宋丹丹, 金辉, 等. 半球形聚能装药对复合靶板结构的毁伤数值仿真与试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 153-159.
LIU N N, SONG D D, JIN H, et al. Numerical simulation and experimental study on the damage characteristics of hemispherical shaped charge on composite armor[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 153-159.
- [82] 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.
- [83] 魏庆栋, 王忠, 江光德, 等. 导弹打击目标的毁伤效果评估方法研究综述[J]. 战术导弹技术, 2023(3): 76-88.
WEI Q D, WANG Z, JIANG G D, et al. Review on damage effect evaluation method of missile attacking target[J]. Tactical Missile Technology, 2023(3): 76-88.
- [84] 卢芳云, 彭永, 张克钊, 等. 目标易损性分析—共性方法[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2023: 235-238.
- [85] 王芳, 冯顺山, 俞为民. “超压-冲量”毁伤准则及其等毁伤曲线研究[J]. 弹箭与制导学报, 2003, 23(2): 126-130.
WANG F, FENG S S, YU W M. Research on over-pressure & impulse criteria and its iso-damage curve[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2003, 23(2): 126-130.
- [86] 王新颖, 王树山, 卢熹, 等. 空中爆炸冲击波对生物目标的超压-冲量准则研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(1): 106-111.
WANG X Y, WANG S S, LU X, et al. Over-pressure-impulse damage criterion of air shock waves on biological targets[J]. Explosion and Shock Waves, 2018, 38(1): 106-111.
- [87] DRAGOS J, WU C Q, HASKETT M. Derivation of normalized pressure-impulse diagrams for assessing the flexural response of ultra-high-performance concrete panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2018, 144(6): 1-10.
- [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] 李军润, 卢永刚, 冯晓伟, 等. RC 箱型结构内爆炸载荷特性和动力行为分析[J/OL]. 爆炸与冲击, (2025-01-17) [2025-05-08]. <http://link.cnki.net/urlid/51.1148.o3.20250116.1650.009>.
- LI J R, LU Y G, FENG X W, et al. Analysis of internal explosion load characteristics and dynamic behavior in RC box structures[J/OL]. Explosion and Shock Waves, (2025-01-17) [2025-05-08]. <http://link.cnki.net/urlid/51.1148.o3.20250116.1650.009>.
- [90] 王浩喆. 爆炸事故中破片伤害准则综述[J]. 安全、健康和环境, 2022, 22(4): 11-16.
- WANG H Z. Review of fragment damage criterion in explosion accidents[J]. Safety Health & Environment, 2022, 22(4): 11-16.
- [91] 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 G Y, MAO S C, LI J H. Warship anti-missile decision-making based on Markov Chain[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(1): 87-91.
- [92] 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 G D, JIA W, WANG Z J, et al. Damage effectiveness research for sub-munitions to the area target[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4): 739-744.
- [93] 周旭. 导弹毁伤效能试验与评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 165-167.
- [94] 王杰, 王景焘, 黄超, 等. 一种面向舰船结构毁伤的大变形流固耦合数值计算方法[J]. 计算力学学报, 2024, 41(2): 335-343.
- WANG J, WANG J T, HUANG C, et al. A numerical method for fluid-structure interaction with large deformation towards the damage of warship structures[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(2): 335-343.

Review of Simulation-Based Evaluation of Weapons and Ammunition Damage Effectiveness

XU Hengwei, LU Yonggang*, LU Zhengcao, LI Junrun, FENG Xiaowei, LYU Xiao
(Institute of System Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT: Driven by the demands for intelligent and precision-based warfare, simulation-based evaluation technologies for weapons and ammunition damage effectiveness have become critical support tools in operational decision-making and equipment system optimization. This study provided a systematic review of evaluation methodologies, models, and software, tracing the development trajectory and representative research achievements in these areas. Particular emphasis was placed on simulation-based evaluation methods, represented by virtual model-based target vulnerability and explosive warhead evaluation methods. A comprehensive review of the research progress and existing challenges in warhead lethality, target vulnerability, ammunition-target interaction models, as well as overall damage assessment frameworks was provided. By comparing the technical characteristics of typical domestic simulation evaluation software, the key technological bottlenecks were identified in terms of adaptability to diversified combat needs and system interoperability. In view of future combat evolution trends, the study proposed key research directions for the standardization of warhead effect field modeling, refinement of damage effect analysis methods, and deep incorporation of artificial intelligence into evaluation frameworks, aiming to provide theoretical support and strategic guidance for future technological breakthroughs and system development.

KEYWORDS: weapons and ammunition; damage effectiveness; evaluation methodology; evaluation model; evaluation software

(编辑: 于福兴)