

防暴动能弹侵彻效应评估与结构优化研究

崔亭亭

武警工程大学, 陕西西安, 中国

【摘要】针对防暴动能弹效应机理不明、评估方法不统一、结构设计依赖经验等问题, 本文梳理三类评估手段, 对比国际等效靶标方案, 构建以 400 μm TPU+20%明胶为等效载体、RBIFS 弹丸为基准、LS-DYNA 为仿真工具的研究体系。通过模型标定与校验, 建立临界比动能与明胶侵彻深度的映射关系, 揭示关键参数对侵彻效应的影响规律。结果表明, 球头弹综合性能最优, 7.5mm 壁厚可平衡效能与安全性, 采用 LAGRANGE-DEM 耦合方法可准确模拟布袋弹侵彻过程。研究形成一体化评估体系, 为防暴动能弹性能优化与标准构建提供支撑。

【关键词】防暴动能弹; 终点效应; 侵彻仿真; 参数优化

1. 引言

防暴动能弹作为非致命武器装备的核心类型[1], 其效能与安全平衡问题一直是研究重点。国际案例表明, 不合理的设计会导致 50% 以上的穿透伤发生率[2], 亟需建立科学的评估体系。与传统杀伤弹药不同, 防暴动能弹的核心矛盾是效能与安全的平衡: 威力不足无法有效压制目标, 威力过强则易造成皮肤穿透、骨折、内脏损伤甚至死亡。近年来国内外大量案例显示, 穿透伤在动能弹意外伤害中占比超过 50%[3], 近距离射击、弹头结构不合理、材料刚度过大是导致过度损伤的主要原因。传统防暴动能弹研发高度依赖实弹射击、木板/牛皮纸筒易靶标测试与经验试错, 存在评估手段粗糙、变量不可控、结果离散性大、伦理限制严格等问题, 难以支撑精细化设计与安全边界精准界定。随着装备种类增多、应用场景复杂化, 在效应机理、评估方法、统一判据、设计反馈等方面的短板日益突出。数值仿真技术为解决上述问题提供了高效、低成本、可重复的研究手段。LS-DYNA 显式动力学软件在高速冲击、大变形、动态接触、材料破坏等领域具有显著优势, 可实现侵彻过程应力、应变、能量传递、接触力时程的全维度可视化表征, 能够弥补物理试验的诸多局限。为此, 本文整合终点效应评估方法与侵彻数值仿真两条技术路线, 系统开展评估手段梳理、等效靶标选型、数字模型标定、穿透判据建立、关键参数影响分析及安全优化方向研究, 形成一套完整、可工程化的研究体系, 推动防暴动能弹由“经验设计”向“参数化精准设计”转型, 为装备安全服役与标准化建设提供支撑。

2. 防暴动能弹终点效应评估方法与研究现状

防暴动能弹终点效应是指弹丸命中目标后产生的钝击、侵彻、损伤与失能效果, 受弹体材料、结构、速度、入射角度、目标部位、介质特性等多因素耦合控制。当前主流评估方法包括动物靶标试验、仿生替代靶试验、人体尸体 (PMHS) 试验三类, 各自在真实性、重复性、经济性与工程适用性上存在明显差异。

2.1 动物靶标试验方法

动物靶标是早期应用最广泛的生物试验方法, 常用猪、羊等动物, 其皮肤、肌肉组织的力学特性与人体较为接近。通过射击不同距离、不同部位, 可获得直观的损伤形态、肿胀、出血、骨折等病理结果, 能够反映真实生物介质的动态响应。但该方法存在明显局限: 不同物种组织耐受性差异大, 结果难以直接外推至人类; 个体离散度高、重复性差; 伦理与成本限制强, 不适合大批量参数筛选。

2.2 仿生替代靶试验方法

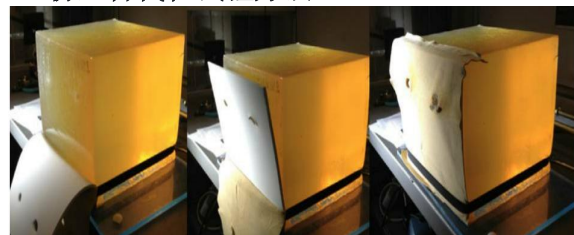


图 1. 仿生替代靶标 (明胶/肥皂) 冲击试验示意图

为解决生物试验的缺陷, 研究普遍采用肥皂、明胶、SEBS 凝胶等合成材料构建仿生靶标[4]: 肥皂靶可观测冲击空腔与痕迹; 明胶靶可表征侵彻深度与趋势; SEBS 凝胶一致性与稳定性更优。这类方法成本低、可重复性高、便于多组对比, 是工程筛选与趋势分析的主流工具 (见图 1)。

2.3 人体尸体 (PMHS) 试验

PMHS 试验最接近真实人体响应,可获得不同部位、不同速度下的穿透临界速度与比动能,是国际公认的金标准。韦恩州立大学基于 PMHS 试验得到:人体前胸肋部皮肤最薄弱,50%穿透风险临界比动能为 $23.99\text{J}/\text{cm}^2$,对应 RB1FS 弹丸临界速度约 $137\text{m}/\text{s}$ 。但其伦理限制严格、样本量少、个体差异大、成本极高,难以工程化推广。

2.4 现有评估体系存在的突出问题

(1) 作用机理阐释不充分:多停留在现象总结,缺少接触应力演化、能量耗散路径、多层介质耦合的定量描述;(2) 评价判据不统一:靶标类型、工况、判定标准差异大,结果难以横向对比,无法形成通用设计准则;(3) 工程设计反馈不足:试验与优化脱节,未形成“评估—设计—验证—再优化”闭环;(4) 个体差异与长期效应关注不足:年龄、性别、体型、防护条件的影响研究较少,普适性受限。

3.等效靶标选型与数字仿真体系构建

为实现可重复、标准化、可数字化的效应评估,必须选择工程化等效靶标并建立经试验验证的数字模型。

3.1 国际主流等效靶标方案对比

国际形成两套标准化皮肤等效靶标方案:北约 APE-94 方案采用鹿皮+泡沫+明胶三层结构,材料离散性大、重复性差;加拿大简化方案采用 $400\mu\text{m}$ TPU 薄膜+20%明胶两层结构,材料稳定、应力传递直接、重复性优异,与 RB1FS 弹丸 $V50\approx 140\text{m}/\text{s}$,与尸体试验临界速度高度吻合。

3.2 仿生替代靶试验方法

为解决生物试验的缺陷,研究普遍采用肥皂、明胶、SEBS 凝胶等合成材料构建仿生靶标:肥皂靶可观测冲击空腔与痕迹;明胶靶可表征侵彻深度与趋势;SEBS 凝胶一致性与稳定性更优。这类方法成本低、可重复性高、便于多组对比,是工程筛选与趋势分析的主流工具。明胶因密度、黏性与人体软组织高度接近,成为创伤弹道学中应用最广泛的等效介质,被北约与多国标准化机构采纳为标准试验载体。

其不足在于:多数为均质材料,难以还原皮肤-脂肪-肌肉-骨骼的多层耦合响应;宏观侵彻深度、空腔与内部应力、损伤风险的映射关系[4]尚未完全建立,结果需修正验证。

3.3 人体尸体 (PMHS) 试验

PMHS 试验最接近真实人体响应,可获得不同部位、不同速度下的穿透临界速度与比动

能,是国际公认的金标准[5]。韦恩州立大学基于 PMHS 试验得到:人体前胸肋部皮肤最薄弱,50%穿透风险临界比动能为 $23.99\text{J}/\text{cm}^2$,对应 RB1FS 弹丸临界速度约 $137\text{m}/\text{s}$ [6]。但其伦理限制严格、样本量少、个体差异大、成本极高,难以工程化推广。

3.4 现有评估体系存在的突出问题

(1) 作用机理阐释不充分:多停留在现象总结,缺少接触应力演化、能量耗散路径、多层介质耦合的定量描述;(2) 评价判据不统一:靶标类型、工况、判定标准差异大,结果难以横向对比,无法形成通用设计准则;(3) 工程设计反馈不足:试验与优化脱节,未形成“评估—设计—验证—再优化”闭环;(4) 个体差异与长期效应关注不足:年龄、性别、体型、防护条件的影响研究较少,普适性受限。

4.等效靶标选型与数字仿真体系构建

为实现可重复、标准化、可数字化的效应评估,必须选择工程化等效靶标并建立经试验验证的数字模型。

4.1 国际主流等效靶标方案对比

表 1.皮肤等效靶方案对比

对比项目	北约 APE-94 标准	加拿大简化方案
结构组成	鹿皮+泡沫+明胶 (三层)	TPU 膜+明胶(两 层)
材料稳定性	天然材料,离散性 大	合成材料,一致 性好
试验重复性	较差	优异
工程适用性	低	高
参考弹丸	RB1FS	RB1FS

国际皮肤等效靶标研究形成了两套标准化方案。为建立统一的评价标准,本文对两种方案进行了系统对比(见表 1):北约 APE-94 方案采用鹿皮+泡沫+明胶的三层复合结构。该方案因涉及多种异质材料,存在材料离散性大、测试结果重复性差等固有缺陷。加拿大简化方案采用 $400\mu\text{m}$ TPU 薄膜+20%明胶的两层结构。该方案结构简单,材料性能稳定,应力传递路径直接,测试重复性优异。通过对比验证, $400\mu\text{m}$ TPU+20%明胶被确定为最优等效载体[5]:与 RB1FS 弹丸的仿真误 $<5\%$ [6];其 $V50$ 约为 $140\text{m}/\text{s}$,与尸体试验的临界速度高度吻合;皮肤穿透临界比动能为 $23.99\text{J}/\text{cm}^2$ [6]。综合考量结果一致性、测试重复性及操作便捷性,本文选定加拿大 $400\mu\text{m}$ TPU+20%明胶方案作为统一等效靶标。

4.2 基准弹丸选定:RB1FS 标准弹丸

本文以 RB1FS 橡胶弹丸为唯一基准弹丸

(见图2), 北约与加拿大方案均采用其作为标准试验弹, 几何、质量、材料参数明确, 试验数据体系完整[5]。关键参数: 直径 18.4 mm, 质量 6.7g, 橡胶超弹性材料, 临界比动能 23.99J/cm², 对应临界速度 137m/s。

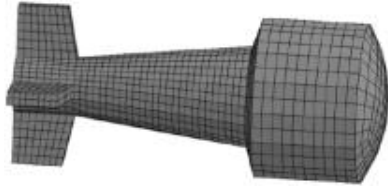


图 2.RB1FS 基准弹丸

4.3 数字弹丸与数字靶标建模及标定

防暴动能弹橡胶材料采用 Mooney—Rivlin 超弹性本构, 通过 34m/s、60m/s、90m/s 三速度刚性壁冲击标定, 确保仿真与试验误差 <5%[6]。明胶采用弹塑性流体动力学本构, 经 4.5mm 钢球 179m/s 穿深校验, 满足 3.81~7.62cm 合格范围。

4.4 皮肤穿透等效判据建立

为实现“皮肤穿透状态→明胶侵彻深度”定量映射, 开展 RB1FS 弹丸 137m/s 侵彻纯明胶专项仿真, 得到临界等效侵彻深度 $d_{eq}=43\text{mm}$, 建立全文统一穿透判据[7]: $dsim \geq 43\text{mm}$ 判定存在皮肤穿透风险, 该判据为所有仿真评估提供统一标尺。

5.基于 LS-DYNA 的侵彻效应数值仿真与参数影响规律

在验证数字模型基础上, 采用单变量控制法, 系统研究弹头形状、入射角度、弹体壁厚三类关键参数, 揭示其对侵彻效应的影响规律。

5.1 弹头形状对侵彻效应的影响

弹头形状是影响侵彻模式的首要因素[8] (见表2)。球头弹应力扩散均匀、综合性能最优; 平头弹侵彻浅、安全性高; 尖头弹应力集中、侵彻风险最高[9]。仿真结果表明, 尖头弹侵彻深度最大、应力水平最高, 穿透风险显著高于其他头形; 球头弹在侵彻深度、应力分布与能量传递上表现均衡, 综合性能最优。

表 2.弹头形状对侵彻效应

弹头类型	侵彻深度/mm	最大应力/MPa	风险等级
球头	28.5	0.85	中等
平头	22.1	1.12	低
尖头	34.8	1.45	高

5.2 入射角度对侵彻效应的影响

实战中以斜入射为主, 30°斜侵彻可降低有效侵彻深度与穿透风险 (见表3), 但会导致弹丸偏转、弹道稳定性下降, 工程设计必须

考虑斜入射工况[10]。与垂直侵彻相比, 斜侵彻条件下法向有效动量减小, 接触力呈现非对称分布, 弹丸易发生侧向滑移与弯曲, 因此在结构设计与使用规范中均应纳入斜侵彻校核。

表 3.入射角度对侵彻效应

弹头类型	工况	侵彻深度/mm	最大应力/MPa	风险等级
球头	垂直侵彻	28.5	0.85	中等
球头	30°斜侵彻	23.2	0.72	低
平头	垂直侵彻	22.1	1.12	低
平头	30°斜侵彻	18.6	0.98	低
尖头	垂直侵彻	34.8	1.45	高
尖头	30°斜侵彻	27.9	1.21	中等

5.3 弹体壁厚对侵彻效应的影响

壁厚决定弹体刚度与能量分配[11] (见表4): 5mm 壁厚偏软、安全性高但效能不足; 10mm 壁厚刚性高、侵彻风险显著提升; 7.5mm 壁厚在效能与安全间达到最优平衡。随着壁厚增大, 弹体自身变形减小, 更多动能传递至靶体, 侵彻深度与接触力均呈上升趋势[11], 7.5mm 可作为空心橡胶弹的推荐设计值。

表 4.弹体壁厚对侵彻效应

壁厚/mm	侵彻深度/mm	最大接触力/N	风险趋势
5	25.3	351	低
7.5	28.5	416	中等
10	31.2	422	高

5.4 多参数耦合影响与风险评级

综合 9 组工况, 穿透风险由高到低排序: 尖头垂直 > 球头垂直 10 mm 壁厚 > 尖头斜侵彻 > 球头垂直 7.5mm 壁厚 > 球头斜侵彻 > 球头垂直 5mm 壁厚 > 平头垂直 > 平头斜侵彻。尖头、大壁厚、垂直入射为高风险组合[12]; 球头+7.5mm 壁厚为最优平衡组合, 可在保证压制效能的同时将皮肤穿透风险控制较低水平。

6.复合结构布袋弹侵彻效应与 LAGRANGE-DEM 耦合仿真

布袋弹为“尼龙袋+铅珠”复合结构, 传统连续介质方法无法描述颗粒动态重分布行为。本文建立 LAGRANGE-DEM 耦合模型 (见图3): 有限元模拟外壳与靶标, 离散元模拟颗粒运动, 实现力与位移双向传递。

仿真表明, 布袋弹冲击分为两个阶段: 0~0.3ms 颗粒惯性前冲、应力集中; 0.3~1.5ms 颗粒横向扩散、应力均匀化。针对大口径差异, 引入截面积比修正系数 $\lambda=0.4$, 修正临界深度 17.2mm, 实现大小口径弹丸统一评估。该方法有效弥补了连续介质模型无法描述颗粒运动的缺陷, 可为布袋弹类柔性复合弹丸提供可

靠仿真手段。

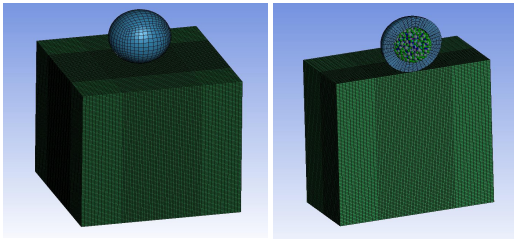


图 3. LAGRANGE-DEM 耦合模型架构

7.面向安全服役的防暴动能弹优化设计方向

基于评估与仿真规律，提出五项优化原则：（1）弹头优选球头结构，严格限制尖头；（2）设计必须考虑 30°斜侵彻工况；（3）空心橡胶弹壁厚优选 7.5mm；（4）布袋弹优化颗粒填充与织物延展性，促进横向扩散；（5）统一采用加拿大 TPU+明胶靶标与 43mm 临界深度判据。上述原则可直接用于装备研发、性能验证与安全规范制定。

8.数值仿真方法的技术价值

LS-DYNA 数值仿真相较传统试验具有显著优势：低成本高效率、可重复性强、可获取全物理场信息、无伦理风险、可体系化拓展。LAGRANGE-DEM 耦合方法更填补了复合结构弹丸仿真空白，可实现从刚性橡胶弹到柔性布袋弹的全类型覆盖，工程应用前景广阔，可为非致命动能武器的精细化设计与标准化评估提供核心技术支撑。

9.结论与展望

9.1 主要结论

（1）构建以加拿大 400 μ mTPU+20%明胶为等效靶标、RB1FS 弹丸为基准、23.99 J/cm² 为临界比动能、43mm 为明胶临界侵彻深度的数字化评估体系；（2）完成数字弹丸与靶标标定，模型误差 $<5\%$ ，为仿真提供可信基础；（3）揭示参数规律：尖头风险最高，球头最优，平头最安全，斜侵彻降风险，7.5mm 壁厚为最佳平衡点；（4）建立 LAGRANGE-DEM 耦合方法与修正判据，解决布袋弹仿真难题；（5）形成系统优化原则，支撑装备研发、评估与标准制定。

9.2 研究展望

未来可拓展宽速度区间仿真、考虑环境与衣物因素、开展多弹种建模、构建一体化仿真平台，进一步完善非致命动能弹数值仿真评估

体系，推动装备向更安全、更可控、更标准化方向发展。

参考文献

- [1] Hubbs K, Klinger D. Impact munitions: data base of use and effects [R]. U.S. National Institute of Justice, 2004.
- [2] Suyama J, Panagos P D, et al. Injury patterns related to use of less-lethal weapons during a period of civil unrest [J]. Journal of Emergency Medicine, 2003,25:219-227.
- [3] Haar R J, et al. Death, injury and disability from kinetic impact projectiles in crowd-control settings: a systematic review [J]. BMJ Open, 2017, 7 (12): e18154.
- [4] 蒲利森, 徐鹏等.38mm 软体变形弹致伤效能评估[J].测试技术学报, 2014, 28 (1) : 21-26.
- [5] Bir C A, Ressler M, Stewart S. Skin penetration surrogate for the evaluation of less lethal kinetic energy munitions [J]. Forensic Science International, 2012, 220 (1-3): 126-129.
- [6] Robbe C, Papy A, Nsiampa N, et al. NATO standardized method for assessing the skin penetration of kinetic energy non-lethal weapons [J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2023, 7(1): 1-12.
- [7] 汪送.防暴动能弹发展现状及趋势分析[J].兵器装备工程学报, 2021.42 (4) : 6-11.
- [8] 熊漫漫, 覃彬, 王舒, 等.橡皮弹对生物钝击损伤效应试验研究[J].兵工学报, 2020, 41 (2) : 262-269.
- [9] 张文璈.防暴动能弹的人体非致命效应浅析[J].中国设备工程, 2022, (11): 219-221.
- [10] 江星, 汪送.防暴动能弹致伤威力影响因素层次结构研究[J].弹箭与制导学报, 2020, 40 (1) : 59-64.
- [11] 朱永杰, 翟晓军, 董旭丹.97 式 18.4mm 动能痛块弹终点效应实验[J].火力与指挥控制, 2013, 38 (2) : 94-97.
- [12] 江星, 汪送.防暴动能弹钝击损伤评估方法研究综述[J].兵器装备工程学报, 2019, 40 (12) : 78-84.