



国防科技大学学报

Journal of National University of Defense Technology

ISSN 1001-2486,CN 43-1067/T

《国防科技大学学报》网络首发论文

- 题目： 38 mm 复合型非致命动能弹等效模型构建与对比研究
作者： 张昭晖，汪送，杨晓银，刘星雨，陈斌
收稿日期： 2025-03-03
网络首发日期： 2026-01-15
引用格式： 张昭晖，汪送，杨晓银，刘星雨，陈斌. 38 mm 复合型非致命动能弹等效模型构建与对比研究[J/OL]. 国防科技大学学报.
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.t.20260114.1343.002>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字符、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.25030004

38 mm 复合型非致命动能弹等效模型构建与对比研究

张昭晖^{1,2}, 汪送^{2*}, 杨晓银², 刘星雨², 陈斌^{1,2}

(1. 武警工程大学 研究生大队, 陕西西安 710086; 2. 武警工程大学 装备管理与保障学院, 陕西西安 710086)

摘要: 为解决我国非致命钝性弹道冲击标准化验证弹丸缺失的问题, 以北约 SIR-X 弹丸为基准, 提出等密度缩放、等质量缩放及等体积缩放三种等效策略, 构建 38 mm 复合型弹丸有限元模型, 通过刚性壁与人体胸部靶标的冲击仿真实验, 结合动量、动能、比动能、钝性及粘性标准多维度验证模型等效性。结果表明, 等质量缩放弹丸 B 在冲击特性(位移-时程曲线平均绝对差值 ≤ 1.19 mm)与致伤效果($V_{c\max}$ 偏差 $\leq 2.53\%$)方面与 SIR-X 弹丸最为接近, 验证了其作为国内标准化测试弹丸的可行性, 为适配我军防暴枪口径的复合型非致命弹丸设计提供了理论依据, 所提出的基于多维损伤标准的综合评价方法可为新型非致命动能弹的本质安全化设计提供支撑。

关键词: 标准化弹丸; 有限元模型; 等效缩放; 粘性标准; 复合型非致命动能弹

中图分类号: TJ41

文献标志码: A

Construction and comparative study of equivalent model of 38 mm compound non-lethal kinetic energy projectile

ZHANG Zhaohui^{1,2}, WANG Song^{2*}, YANG Xiaoyin², LIU Xingyu², CHEN Bin^{1,2}

(1. Postgraduate Brigade, Engineering University of PAP, Xi'an, 710086, China; 2. Equipment Management and Guarantee Institute, Engineering University of PAP, Xi'an, 710086, China)

Abstract: To solve the problem of the lack of standardized verification projectiles for non-lethal blunt ballistic impacts in China, three equivalent strategies of equal density scaling, equal mass scaling and equal volume scaling were proposed based on NATO SIR-X projectile, and a finite element model of 38mm composite projectile was constructed. Through the impact simulation experiment of rigid wall and human chest target, the multi-dimensional equivalence of the model was verified by the criteria of momentum, kinetic energy, specific kinetic energy, bluntness and viscosity. The results show that the equal-mass scaled projectile B is the closest to SIR-X projectile in terms of impact characteristics (mean absolute difference between displacement-time curve ≤ 1.19 mm) and damage effect ($V_{c\max}$ deviation $\leq 2.53\%$), which verifies its feasibility as a domestic standardized test projectile, provides a theoretical basis for the design of composite non-lethal kinetic energy projectiles adapted to the caliber of riot guns in China. The proposed comprehensive evaluation method based on multi-dimensional damage criteria can provide support for the intrinsically safe design of new non-lethal kinetic energy projectiles.

Key words: standardized projectile; finite element model; equivalent scaling; viscosity standard; compound non-lethal kinetic energy projectile

非致命动能弹的设计初衷是通过动能打击使人员或装备暂时失能, 应用于需要诉诸武力但不致命的场景, 但使用中经常会造成严重伤害、永久残疾甚至死亡^[1-3]。Joao 等^[4]研究了 1972-2009 年发表的关于非致命动能弹造成胸部损伤的 19 篇英文文章, 共造成 865 例胸部损伤, 表现为肺挫伤、气胸、

肋(胸)骨骨折、心脏撕裂等症状。Florent Fémy 等^[5]研究了 2018 年法国“黄马甲”社会抗议运动中 152 例因橡胶子弹致伤的急诊患者, 其中 49% 的患者头部、面部损伤, 5% 的患者有眼部损伤。Olson 等^[6]研究了 2020 年美国反对种族不公正和警察暴行的抗议活动中 19 例遭受豆袋弹损伤的急诊患

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71401179); 中国博士后科学基金特别资助项目; 中国博士后科学基金面上资助项目(2019M664027); 陕西省自然科学基础研究计划一般项目(面上)资助项目(2022JM-8049)

第一作者: 张昭晖(1995—), 男, 河北衡水人, 硕士研究生, E-mail: 692437244@qq.com;

***通信作者:** 汪送(1984—), 男, 湖南衡阳人, 副教授, 博士, 硕士生导师, E-mail: onesoon@163.com

引用格式: 张昭晖, 汪送, 杨晓银, 等. 38mm复合型非致命动能弹等效模型构建与对比研究[J]. 国防科技大学学报,

Citation: ZHANG Z H, WANG S, YANG X Y, et al. Construction and comparative study of equivalent model of 38mm compound non-lethal kinetic energy projectile[J]. Journal of National University of Defense Technology,

者，其中 5 名头部损伤、2 名面部骨折、12 名胸部穿透性软组织损伤、躯干和胫骨撕裂等。

虽然执法人员使用武力受到法律规范约束，但他们使用的非致命动能弹却缺少完善且国际公认的技术或贸易标准^[7]，这种缺失导致非致命动能弹种类多、性能差异大，容易被滥用^[8]。目前，世界各国争相研发能够精确打击的非致命动能弹，并采取数值模拟方法精准表征弹丸特性和评估威力。Nsiampa 等^[9]构建 SIR-X 和 CONDOR NT901 弹丸有限元模型冲击刚性壁有限元模型，通过对比 Bir 生物力学走廊数据精准表征了复合型非致命弹丸特性。Bracq 等^[10]构建 Flash-Ball 和 eXact iM pact 弹丸有限元模型冲击人体躯干有限元模型 HUByx，确定了适合预测心肺挫伤模型相关数值指标。Dihua Ouyang 等^[11]构建了皮肤仿真模型和 Flash-Ball 橡胶子弹模型，对橡胶子弹在不同距离上对人体造成的损伤进行了安全性评价。

我国服役的主要非致命动能弹还停留在橡胶弹丸和硬质弹丸，而国外则多使用复合型弹丸^[12]。与前者相比，复合型弹丸在动能、比动能、动量数据分布上更为集中，有效射程范围跨度更大，最小安全射距更小，战术灵活性更大^[13]，较典型的有 MP-40-FX、ALS 4006D、SIR-X 等弹丸。2017 年以来，北约组织参考人类尸体、动物等实验发布了非致命动能弹钝性冲击皮肤（AEP-94）、人体胸部（AEP-99）、头部（AEP-103）等部位损伤评估的标准化文件，并将 SIR-X 弹丸作为标准化测试弹丸验证人体胸部、头部的实体和数字测试靶标。Robby 等^[14]通过复现标准化文件内容，认为这是目前评估此类影响的最科学的方法。同时也指出 SIR-X 弹丸作为标准弹丸的合理性，其可验证和校准测试靶标，然后用于损伤评估，但存在价格昂贵、不适合重复实验、不同批次制备弹丸性能差异等不足。由于国外这些直径以 40 mm 为主的弹丸，不匹配我国目前列装的非致命武器，外加国内大量实验证缺、非致命动能弹冲击损伤标准缺失，严重制约了我国新型非致命动能弹的设计研制、致伤评估与指导使用，难以有效配合军警执行维稳处突等任务。因此亟需借鉴国外成熟经验设计和制备一种适配我国防暴枪口径的标准化测试弹丸，以此探索开发适合我国复合型非致命动能弹钝击损伤评估的实验测试、数值模拟的弹丸、靶标以及钝击不同部位损伤评估的标准和标准化文件，减少非致命动能弹在固有安全性和使用安全性方面的风险。本文以北约组织框架内的参考弹 SIR-X 弹丸为基准，采取 3 种等效策略，构建 4 种 38 mm 复合型弹丸有限元模型，通过刚性壁与人体胸部靶标的冲击仿真实验，基于 5 种标准对比分析，遴选出与 SIR-X 弹丸特性最相似的 38 mm 复合型非致命动能弹，为适配我国防暴

枪口径的复合型非致命弹丸设计提供理论依据。

1 基准弹丸及等效策略

1.1 SIR-X 弹丸有限元模型构建

SIR-X 弹丸是 Brugger&Thomet 公司研制的 40 mm 复合型动能弹，由硬聚合物塑料弹体和泡沫材料制成的全实心半球形的可变形弹头两部分黏合组成。弹体实物如图 1 (a) 所示，标称直径 40.2 mm，质量 32 g，标称速度 105 m/s，弹头和弹体的质量分别为 7.2 g 和 24.8 g。SIR-X 弹丸有限元模型使用 SOLIDWORKS 软件进行几何建模，使用 HyperMesh 软件进行 8 节点六面体网格划分，使用 LS-DYNA 软件进行前后处理，弹丸材料属性如表 1 所示，其中，滞回（HU）因子和形状（shape）因子为弹头材料的卸载参数，用于在模型中引入耗散、有利于准确表征弹头的动压缩特性。SIR-X 弹丸有限元模型如图 2 所示。

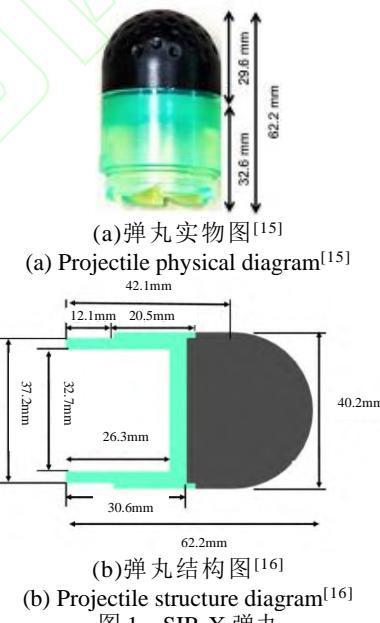


Fig.1 SIR-X projectile



图 2 SIR-X 弹丸有限元模型
Fig.2 SIR-X projectile finite element model

1.2 38 mm 等效弹丸构建

1945 年，Bishop 等人^[18]针对非致命动能弹冲击问题提出空腔膨胀理论。依据 Poncelet 阻力定律，

弹药设计因素同动能弹侵彻程度的关系，可由 Saldorfsky 公式来计算，其公式如式（1）所示。

$$L = \frac{2m}{Abj\pi d^2} \ln\left(\frac{1+bv_0^2}{1+bv^2}\right) \quad (1)$$

其中， m 为弹丸质量（kg）； d 为弹丸直径（m）； j 为与弹丸形状有关的系数； L 为侵彻行程（m）； A 、 b 为与介质有关的系数。当同种弹丸直径发生变化时，为保持相似或相近冲击效果，根据公式（1）因子应考虑弹丸质量、形状系数等因素影响。为探究弹丸质量、形状系数因素对 SIR-X 弹丸的影响，基于 SIR-X 弹丸按照等比例缩放方法保持形状系数一致，同时保持密度一致，构建 38 mm 等密度缩放弹丸有限元模型 A（以下简称弹丸 A）。调整弹丸 A 材料密度使弹头弹体分别与 SIR-X 弹丸的弹头弹体质量相同，构建 38 mm 等质量缩放弹丸有限元模型 B（以下简称弹丸 B）。在弹丸 B 基础上，改变弹体密度与弹丸 A 的弹体密度相同，同时增加弹体壁厚，保证弹体与弹丸 B 的弹体质量一致，构建 38 mm 等质量缩放弹丸有限元模型 C（以下简称弹丸 C）。在保持弹丸 A 材料密度不变的情况下，对其结构进行拉伸调整，使弹头弹体分别等同于 SIR-X 弹丸的弹头弹体质量和体积，构建 38 mm 等体积缩放弹丸有限元模型 D（以下简称弹丸 D）。SIR-X

弹丸与 4 种 38 mm 弹丸数据如表 2 所示。

1.3 力壁法及仿真设置

2021 年 7 月，北约组织非致命弹丸胸部损伤风险评估标准（AEP-99 版本 B）公开了 SIR-X 弹丸参数和力壁法验证 SIR-X 弹丸的有效方法。令 SIR-X 弹丸以 29 m/s 和 61 m/s 垂直冲击刚性壁，并输出力-时程曲线和位移-时程曲线数据。当满足 AEP-99 定义的区间内，SIR-X 弹丸有限元模型即验证成功。

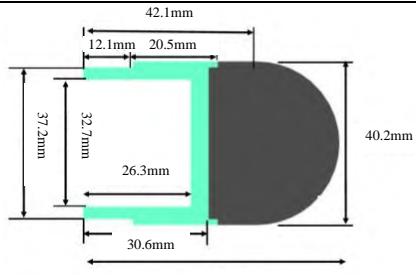
计算采用单点积分拉格朗日算法。考虑到弹头为软质材料，弹性模量较低，计算步长较大，通过计算定义了较为合适的步长比例因子 0.67 (*CONTACT_TIMESTEP_TSSFAC)。执行 *SET_PART_LIST 命令，创建 PART LIST ID 并输入弹头和弹体 PART ID，使之作为整体参与整个冲击仿真过程。在接触方面，为方便定义且简化计算时间，因此使用全局面对面接触 (*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE)。同时，考虑弹体和弹头自接触情况，设置自接触 (*CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE)。

表 1 SIR-X 材料特性表^[15, 17, 19]
Table 1 Material properties of SIR-X

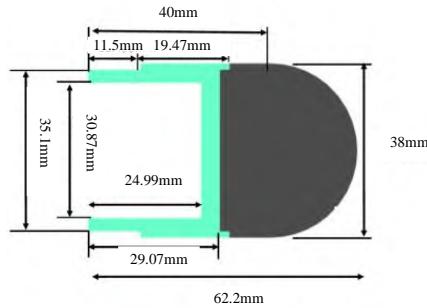
类别	密度 / (kg/m ³)	杨氏模量 / Pa	泊松比 PR	体积模量 / Pa	滞回因子 HU	形状因子 SHAPE
弹头	231		0.2	3×10^9	0.1	15
弹体	1354	2.3×10^{10}	0.387			

表 2 弹丸数据对比表
Table 2 Comparison of projectiles data

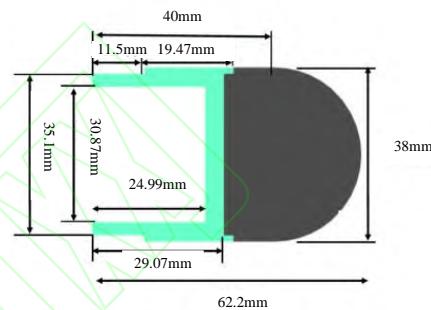
弹丸	弹丸直径 / mm	弹头质量 / g	弹体质量 / g	弹头密度 / (kg/m ³)	弹体密度 / (kg/m ³)	弹丸结构参数	
						弹头直径	弹体厚度
SIR-X 弹丸	40	7.2	24.8	231	1354	42.1mm	37.2mm



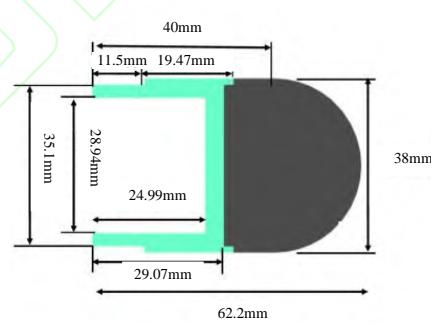
弹丸 A 38 6.09 21.11 231 1354



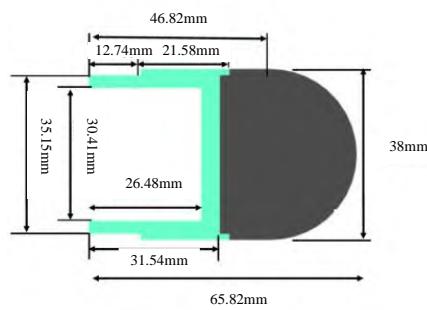
弹丸 B 38 7.2 24.8 273 1591



弹丸 C 38 7.2 24.8 273 1354



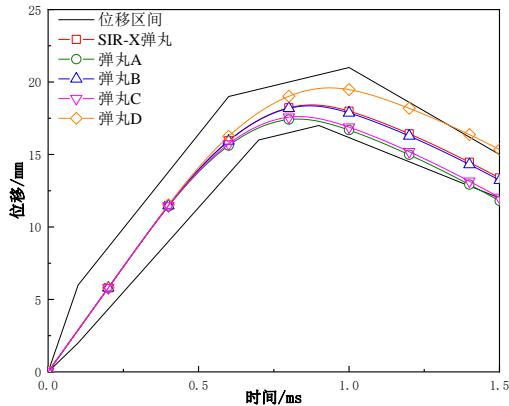
弹丸 D 38 7.2 24.8 231 1354



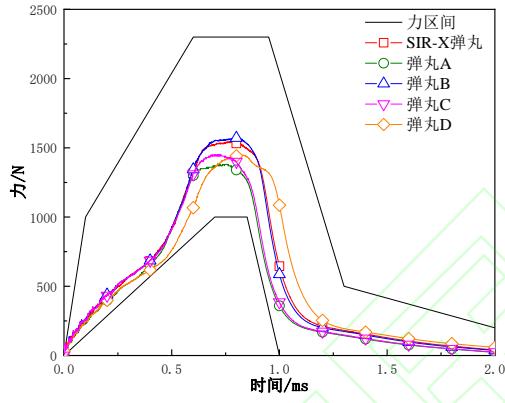
采取数据区间验证的方式进行比对，5 种弹丸数据对比如图 3、4、5 所示。在 29 m/s、61 m/s 速度下 SIR-X 弹丸位移-时程和力-时程峰值出现之前的曲线均在验证范围内，说明在 SIR-X 弹丸有限元模型冲击目标过程时的特性符合验证要求，5 种弹丸的位移-时程和力-时程曲线走势整体相近，但峰值及对应时间不同。为精确体现 38 mm 弹丸与 SIR-X 弹丸特性差异，每间隔 1 μ s 计算 38 mm 弹丸与 SIR-X 弹丸数据的绝对差值并求平均数。29 m/s 时，弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 0.73 mm、0.06 mm、0.61 mm、0.84 mm，平均时刻力绝

对差值分别为 81.37 N、14.43 N、64.69 N、81.32 N。61 m/s 时，弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 1.07 mm、1.19 mm、1.09 mm、1.20 mm，平均时刻力绝对差值分别为 1 118.8 N、1 727.9 N、1 233.4 N、1 487.2 N。29 m/s 时弹丸 B 与 SIR-X 弹丸在位移-时程和力-时程曲线更为接近，差值较小。61 m/s 时弹丸 A 与 SIR-X 弹丸更为接近。同时，弹丸 A、B、C 在位移-时程和力-时程曲线峰值出现时间靠前，弹丸 D 由于可变性弹头较长在冲击过程变形增大，时间增加，位移-时程和力-时程曲线峰值出现时间滞后，在位移-时程曲线峰值较大，但在力-时

程曲线峰值较小。在等速度条件下，无与 SIR-X 弹丸特性均相近的 38 mm 弹丸。



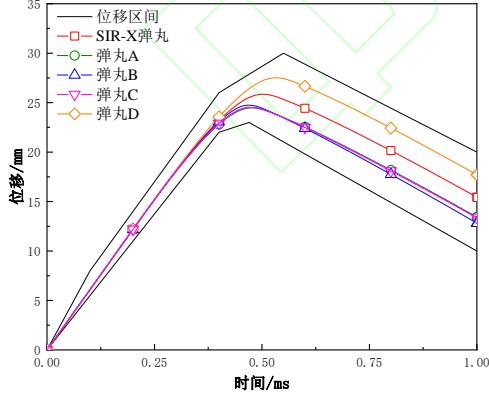
(a) 位移-时程曲线数据对比图
(a) Displacement-time curve data comparison



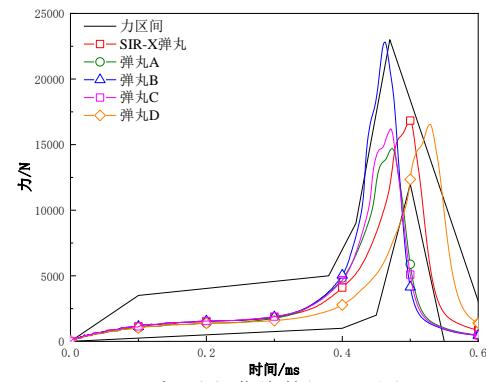
(b) 力-时程曲线数据对比图
(b) Force-time curve data comparison

图 3 弹丸 29 m/s 速度时数据对比图

Fig.3 Data comparison at 29 m/s of projectile



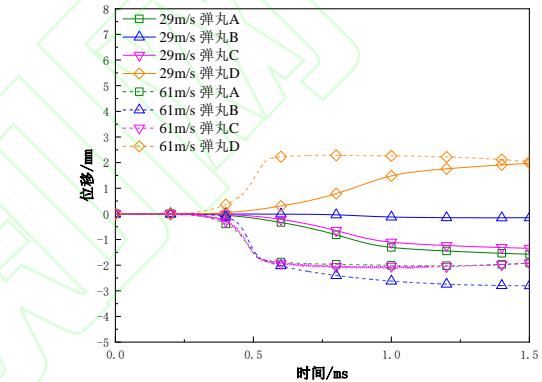
(a) 位移-时程曲线数据对比图
(a) Displacement-time curve data comparison



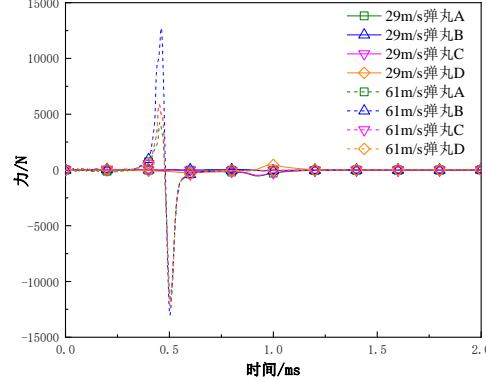
(b) 力-时程曲线数据对比图
(b) Force-time curve data comparison

图 4 弹丸 61 m/s 速度时数据对比图

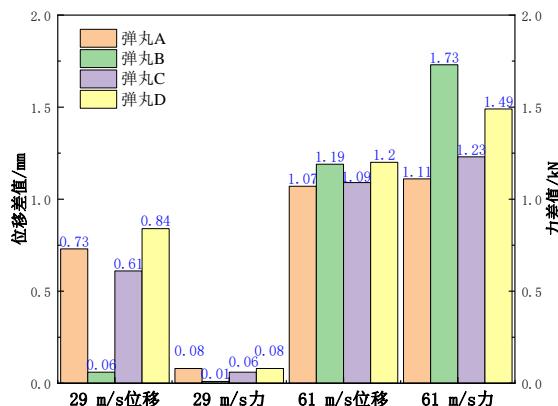
Fig.4 Data comparison at 61 m/s of projectile



(a) 同时刻位移差值数据对比图
(a) Displacement difference data comparison at the same time



(b) 同时刻力差值数据对比图
(b) Force difference data comparison at the same time



(c) 与 SIR-X 弹丸平均绝对差值对比图
(c) Comparison with SIR-X projectile mean absolute difference data

图 5 38mm 弹丸相同速度数据对比图

Fig.5 Comparison of data of 38mm projectile at the same speed

2 基于刚性壁冲击仿真实验的等效性验证

非致命动能弹造成钝性冲击损伤主要受 3 个关键因素影响^[20]: 弹丸特性、生物体特性和冲击环境。参考这些因素, 目前评估非致命动能弹致伤威力的标准包括动量标准、动能标准、比动能标准、钝性标准、粘性标准等。从动量标准到粘性标准, 研究人员将 3 个关键因素分解为具体指标, 并逐步纳入非致命动能弹致伤威力评估的量化参数, 以此来获取贴合实际的精确数值, 但单一标准很难对非致命弹丸的特性综合评价。参照上节 SIR-X 弹丸在 29 m/s 和 61 m/s 速度下冲击刚性壁实验工况的动能值、动量值、比动能值、 B_c 值等数据, 通过对分析 5 种弹丸的位移-时程曲线和力-时程曲线数据开展等效性验证。

2.1 基于相同初始动量值的等效性验证

在非致命动能弹冲击过程中, 动量的变化反映弹丸能量转移情况, 可评估非致命钝性弹道损伤。其公式如式(2)所示:

$$P = MV \quad (2)$$

其中, P 是动量 (kg·m/s), M 是物体的质量 (kg), V 是物体的速度 (m/s)。SIR-X 弹丸在 29 m/s 和 61 m/s 的动量分别是 0.928 kg·m/s 和 1.952 kg·m/s, 由于质量相同, 弹丸 B、C、D 与 SIR-X 弹丸速度保持一致, 弹丸 A 冲击速度分别调整为 30.22 m/s 和 63.57 m/s。

初始动量为 0.928 kg·m/s 时, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 0.66 mm、0.06 mm、0.61 mm、0.84 mm, 平均时刻力绝对差值分别为 77.88 N、14.43 N、64.69 N、81.32 N。初始动量为 1.952 kg·m/s 时, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 1.65 mm、1.19 mm、1.09 mm、1.2 mm, 平均时刻力差值分别为 2 093.4 N、1 727.9 N、1 233.04 N、1 487.2 N。基于相同初始动量值, 弹丸 A 速度微小改变并比没有其他弹丸有更符合 SIR-X 弹丸特性的表现, 位移-时程曲线没有较为明显的变化。Julien Pavie^[21] 等通过实验表明, 动量会影响弹丸终点效应, 但非唯一因素。通过基于相同初始动量值进行等效性验证, 无与 SIR-X 弹丸特性相近的 38 mm 弹丸, 但弹丸 B、C 平均时刻位移和力绝对差值较小, 与 SIR-X 数据较为接近。

2.2 基于相同初始动能值的等效性验证

动能标准主要考虑弹丸的质量和速度, 在非致命动能弹的设计和评估中, 通过计算子弹的动能, 可以预测其在冲击过程中可能传递给目标的能量, 从而评估其对目标的侵彻能力和潜在的致伤威力。其公式如式(3)所示:

$$E = \frac{MV^2}{2} \quad (3)$$

其中, E 为动能 (J), M 是物体的质量 (kg), V 是物体的速度 (m/s)。SIR-X 弹丸在 29 m/s 和 61 m/s 的动能分别是 13.456 J 和 59.536 J, 由于质量相同, 弹丸 B、C、D 与 SIR-X 冲击速度保持一致, 弹丸 A 冲击速度分别调整为 29.60 m/s 和 62.27 m/s。

初始动能为 13.456 J 时, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 0.66 mm、0.06 mm、0.61 mm、0.84 mm, 平均时刻力绝对差值分别为 77.57 N、14.43 N、64.69 N、81.32 N。初始动能为 59.536 J 时, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移差值为 1.31 mm、1.19 mm、1.09 mm、1.2 mm, 平均时刻力绝对差值分别为 1 620.05 N、1 727.87 N、1 233.04 N、1 487.2 N。非致命动能弹丸的致伤威力除了与弹丸的质量和速度相关, 与弹丸的截面积、材料特性也密切相关。由于质量和速度相近(同), 如果只考虑动能、动量, 则无法比较可变形弹丸的冲击特性, 因此基于相同初始动量、动能值的等效性验证没有与 SIR-X 弹丸性能相近的 38 mm 弹丸, 但弹丸 B、C 平均时刻位移和力绝对差值较小, 与 SIR-X 数据较为接近。

2.3 基于相同初始比动能值的等效性验证

基于动能标准, 比动能标准将弹丸撞击靶标瞬间的冲击截面积作为计算参数。其公式如式(4)所示:

$$E/D = \frac{mv^2}{2\pi R^2} \quad (4)$$

式中, E/D 为弹丸的比动能 (J/cm^2), D 为弹丸的冲击截面积 (cm^2); R 为弹丸的半径 (cm); M 为弹丸质量 (kg); V 为弹丸速度 (m/s)。SIR-X 弹丸在 29 m/s 和 61 m/s 的初始比动能分别约为 1.07 J/cm^2 和 4.74 J/cm^2 , 弹丸 A 速度分别为 28.12 m/s 和 59.16 m/s。弹丸 B、C、D 速度分别为 27.55 m/s 和 57.95 m/s。

初始比动能为 1.07 J/cm^2 时, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 0.97 mm、0.47 mm、0.99 mm、0.7 mm, 平均时刻力绝对差值分别为 93.9 N、35.43 N、84.73 N、114.6 N。初始比动能为 4.74 J/cm^2 时, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 0.94 mm、0.96 mm、0.89 mm、1.76 mm, 平均时刻力绝对差值分别为 613.39 N、276.16 N、572.32 N、2 292.04 N。通过数据对比, 结果与动能标准、比动能标准对比相同, 无法优选出与 SIR-X 弹丸性能相

近的 38 mm 弹丸。但通过弹丸 B、C 在位移-时程和力-时程曲线走势及峰值更贴近 SIR-X 弹丸。其部分原因是参考了弹丸的横截面积，弹丸 A、B、C、D 在不同速度下差异更加明显，对弹丸的特性表征更为精确具体。不过，复合型非致命动能弹撞击目标时展现出良好的延展性，其冲击截面积难以通过恒定数值表征，同时存在随着射击距离增加，其动能降低而比动能不变或增加的现象，这使得按照比动能标准难以准确判断复合型非致命动能弹的致伤能力，还需要配合其他标准进行验证。

2.4 基于相同初始 B_c 值的等效性验证

钝性标准 (blunt criterion, B_c) 是美国军队在 20 世纪 70 年代为了预测平头弹钝击人体的损伤情况而制定的损伤标准，曾是弹药设计制造的参考依据，在比动能标准的基础上，进一步考虑了生物体重和体壁厚度。其计算公式如式 (5) 所示：

$$B_c = \ln \frac{\frac{1}{2}MV^2}{\frac{1}{W^3TD}} \quad (5)$$

式中， M 为弹丸质量(kg)； V 为弹丸速度(m/s)； D 为弹丸直径(cm)； W 为被钝击目标体重(kg)； T 为目标体壁厚度(cm)。假定被钝击目标体重和目标体壁厚度相同，基于 SIR-X 弹丸 29 m/s 和 61 m/s 速度的相同钝性标准，弹丸 A 冲击速度分别调整为 28.86 m/s 和 60.70 m/s。弹丸 B、C、D 冲击速度分别调整为 28.27 m/s 和 59.46 m/s。

基于 29 m/s 时 SIR-X 弹丸相同初始 B_c 值，弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 0.77 mm、0.27 mm、0.8 mm、0.72 mm，平均时刻力绝对差值分别为 83.02 N、17.84 N、73.66 N、98.38 N。基于 61 m/s 时 SIR-X 弹丸相同初始 B_c 值，弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移绝对差值为 1.03 mm、1.08 mm、0.98 mm、1.45 mm，平均时刻力绝对差值分别为 992.22 N、943.46 N、601.66 N、1 987 N。综合动量、动能、比动能、钝性标准对比，无法优选出与 SIR-X 弹丸性能最近 38 mm 弹丸，但一致表明通过等质量缩放策略构建的弹丸 B、C 与 SIR-X 弹丸数据在位移-时程曲线和力-时程曲线误差小、性能近。但 B_c 标准未考虑弹丸和目标的材料特性。依据 B_c 标准，只要弹丸的初始动能和直径相同，即使弹丸的材料特性不同，其损伤效果也是相同的，这显然与实际不相符。由于可变形材料能吸收较多能量，且实际冲击面积较大，所以可变形弹丸与不可变形弹丸造成的损伤效果并不相同，但对于同种硬质弹丸，基于 B_c 标准可以对比分析其致伤威力。

3 基于人体胸部冲击仿真实验的等效性验证

人体胸部冲击实验用于研究非致命动能弹对人体胸部钝击的终点效应，可预测非致命动能弹致伤威力。本节基于 AEP-99 定义的人体胸部冲击仿真实验采取等效性验证方式，通过粘性标准对比数据和基于刚性壁冲击仿真实验的等效性验证综合分析，遴选出与 SIR-X 弹丸特性最相似的 38 mm 复合型非致命动能弹。

3.1 弹丸冲击胸部有限元模型仿真实验设置

根据 AEP-99^[16] 标准，令 SIR-X 弹丸以 56 m/s 和 86.5 m/s 垂直冲击人体胸部，并测量输出位移-时程曲线。胸部靶标为 Hybrid III 50 百分位有限元模型（以下简称模型），有 279 203 个节点，256 个梁单元、238 052 个壳单元、227 632 个实体单元，使用 mm-ms-kg-kN 单位系统，可以提供真实和详细的洞察假人在碰撞环境中所经历的载荷和变形。文献[17]验证了模型可用于非致命钝性弹道冲击人体胸部损伤评估。

考虑冲击距离较小，模型冲击部位单元网格较大以及变形较大，采用单点积分拉格朗日算法表征冲击过程精准变化。同时，模型多个材料为生物软质材料，弹性模量较低，计算步长较大，通过迭代计算定义了较为合适的步长比例因子（*CONTACT_TIMESTEP TSSFAC 赋值 0.67 DT2MS 赋值 -1.000E-07）。考虑复合型弹丸冲击人体方式，执行*SET_PART_LIST 命令，创建 PART LIST ID 并分别输入复合型弹丸和模型各部分 PART ID，使之作为整体参与整个冲击仿真过程。在接触方面，为方便定义且简化计算时间，因此使用全局面对面接触（*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE），考虑弹体和弹头自接触情况，设置自接触（*CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREA）。

3.2 基于相同冲击速度钝击人体胸部仿真实验设置的等效性验证

粘性标准 (visous criterion, V_c) 最早用于汽车领域胸部碰撞风险评估，它基于胸腔的动态偏转，并由粘性响应确定。标准。基于钝性标准，粘性标准考虑弹丸的形状、材质、截面密度和受冲击的生物体因素。Bir^[22]在进行尸体冲击实验测试后，提出了粘性标准作为非致命动能弹丸评估标准。其公式如式 (6)、(7)：

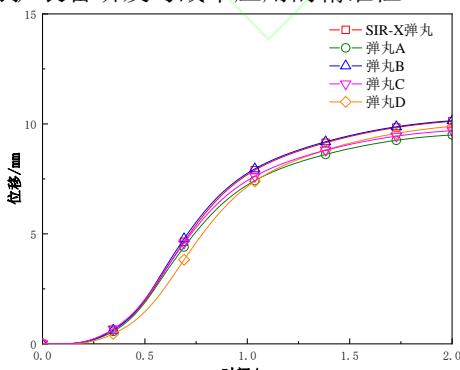
$$Visous response = V(t) \times C(t) \quad (6)$$

$$V_{c \max} = (V(t) \times C(t))_{\max} \quad (7)$$

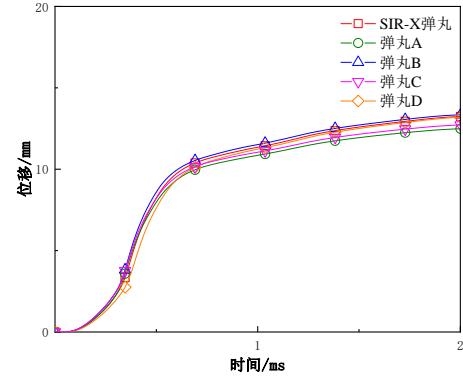
其中, 平均压缩 $C(t)$ 表示为冲击点测得的胸腔位移 $d(t)$ 与长度 $d_0=0.236$ m 之间的比率, 即胸腔的初始厚度, 并假设胸部后端在冲击过程中不移动。 $V(t)$ 是冲击点的速度。根据 AEP-99^[16]文件, 测试结果需经 CFC1000 过滤并归一化。数字滤波过程采用 ISO 648:2015, SAEJ211, 并输出位移-时程曲线, 计算粘性指数最大值 $V_{c \max}$, 如图 6、7、8 所示。

在 56 m/s 时, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移差值为 0.35 mm、0.05 mm、0.22 mm、0.37 mm, 38 mm 弹丸 A、B、C、D 的 $V_{c \max}$ 与 SIR-X 弹丸的 $V_{c \max}$ 比值分别为 82.05 %、100.01 %、91.14 %、92.61 %。基于 SIR-X 弹丸在 86.5 m/s 时相同初始人体胸部冲击仿真实验设置, 弹丸 A、B、C、D 平均时刻位移差值为 0.44 mm、0.17 mm、0.31 mm、0.19 mm, 弹丸 A、B、C、D 的 $V_{c \max}$ 与 SIR-X 弹丸的 $V_{c \max}$ 比值分别为 86.9 %、102.53 %、92.56 %、95.36 %。弹丸 B 的位移-时程和 $V_{c \max}$ 更贴近 SIR-X 弹丸, 表明与 SIR-X 弹丸对人体胸部钝性冲击时体现了较为相似的特性和损伤严重程度。但由于 38 mm 复合型非致命弹丸在冲击作用下柔性弹头变形较小, 减弱了缓冲效果, 导致弹头压缩时间变短, 最大损伤程度 $V_{c \max}$ 出现的时刻提前。因此基于人体胸部冲击仿真实验的等效性验证发现弹丸 B 与 SIR-X 弹丸特性较为符合。这进一步验证了动量、动能、比动能、钝性标准得出的结论, 并优选出与 SIR-X 弹丸性能最接近的 38 mm 弹丸。

研究局限性在于未考虑实际射击环境下的动态弹道特性(如空气阻力、旋转效应)及温度对材料变形的影响。未来需结合生物力学实验优化模型参数, 并制定适配我国人体特征的损伤评估标准, 以提升防护装备研发与战术应用的精准性。



(a) 56m/s 速度时位移-时程曲线数据图
(a) 56m/s displacement-time curve data



(b) 86.5m/s 速度时位移-时程曲线数据图
(b) 86.5m/s displacement-time curve data

Fig.6 Displacement-time curve data comparison

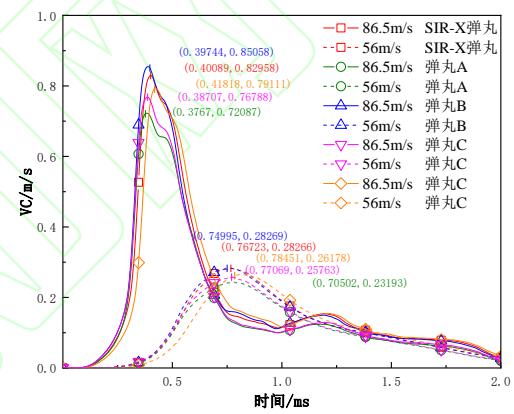
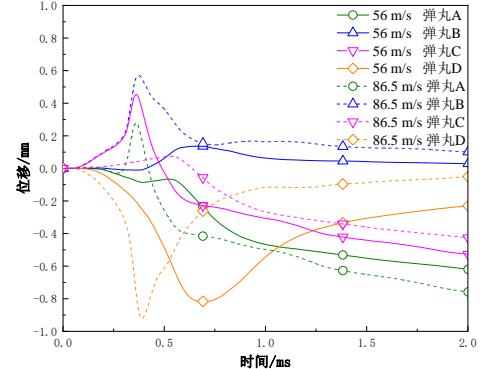
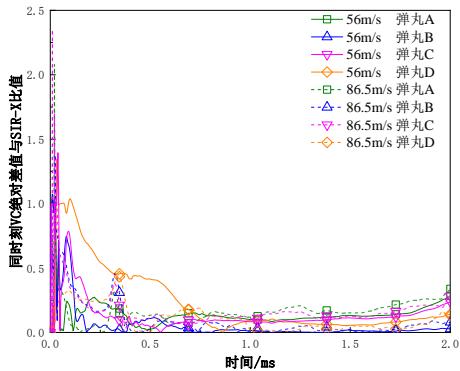


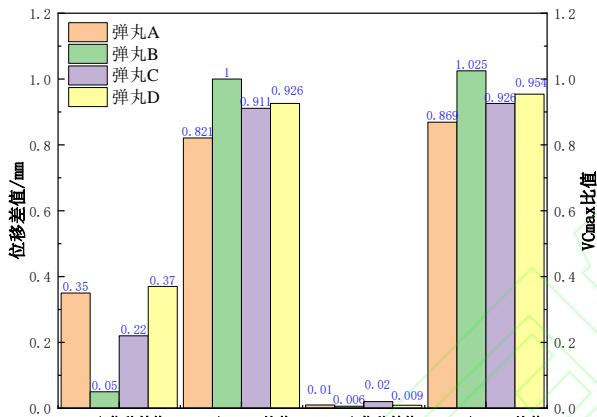
Fig.7 Comparison of projectile V_c data at the same initial speed



(a) 与 SIR-X 弹丸位移差值对比图
(a) Displacement difference data comparison at the same time



(b) 同时刻 V_c 绝对差值与 SIR-X 比值对比图
 (b) Comparison of the absolute difference of V_c and the SIR-X ratio at the same time



(c) 与 SIR-X 弹丸数据对比图
 (c)Comparison with SIR-X projectile data
 图 8 弹丸相同仿真设置数据对比图

Fig.8 Comparison of the same simulation setting data for projectiles

4 结论

采取有限元法对北约组织框架内标准化测试弹丸 SIR-X 有限元模型进行了构建验证，并基于该弹丸通过等密度、等质量、等体积缩放策略设计 4 种 38 mm 复合型非致命动能弹有限元模型，通过刚性壁冲击和人体胸部冲击仿真实验，在相等条件下的动量标准、动能标准、比动能标准、钝性标准、粘性标准筛选出与 SIR-X 弹丸特性最相近的 38 mm 复合型非致命动能弹有限元模型。其结论如下：

1) 等质量缩放策略（弹丸 B）因其在质量守恒基础上兼顾材料密度与结构参数，能够最大程度复现基准弹 SIR-X 的冲击动力学特性（位移-时程曲线平均绝对差值 $\leq 1.19 \text{ mm}$, $V_{c\max}$ 偏差 $\leq 2.53\%$ ）。这表明，质量守恒是复合型弹丸等效设计的核心约束条件，而单纯依赖几何比例或体积缩放可能导致材料属性失配，影响终点效应的一致性；

2) 单一标准（如动能、动量）难以全面评估复合型弹丸的致伤特性，需结合比动能、钝性标准(B_c)及粘性标准等多维指标进行综合评价。可结合刚性壁冲击的动力学响应与人体靶标的生物力学指标（如粘性标准），构建多维评价体系，可更精准量化弹丸的“可控失能”边界，为降低非致命武器滥用风险提供科学依据；

3) 通过“质量锁定-多维损伤标准-软质弹头能量耗散”闭环设计，在适配国产 38 mm 防暴枪口径的同时，实现动能上限控制与冲击能量衰减，本质性提升非致命动能弹的安全性能，并为国内新型 38 mm 大口径能量衰减型非致命动能弹的研发提供方法论、验证工具与标准体系三位一体的技术支撑，为国内测试数字靶标的构建与验证提供参照。

参考文献

- [1] KAUL N, CACHELIN S. Non-lethal weapons and the sensory repression of dissent in democracies[J]. Security Dialogue, 2024, 55(4): 368-385.
- [2] ANDREI A, ROBBE C, PAPY A, et al. Literature review of case reports regarding NLW thoracic impacts[J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2023, 7: 4.
- [3] KRÜSSELMANN K, AARTEN P, LIEM M. Missing the mark? a typology of lethal and non-lethal firearm violence in the Netherlands[J]. Crime & Delinquency, 2024.
- [4] REZENDE-NETO J, SILVA F D, PORTO L B, et al. Penetrating injury to the chest by an attenuated energy projectile: a case report and literature review of thoracic injuries caused by “less-lethal” munitions[J]. World J Emerg Surg, 2009, 4: 26.
- [5] FÉMY F, SULTAN-DUMENIL N, MARCIANO E, et al. Injuries caused by defensive bullet launchers and resource utilization during the French yellow vests protests: a retrospective study[J]. Am J Emerg Med, 2023, 72: 122-126.
- [6] OLSON K A, HASELDEN L E, ZAUNBRECHER R D, et al. Penetrating injuries from “less lethal” beanbag munitions[J]. New England Journal of Medicine, 2020, 383(11): 1081-1083.
- [7] MCEVOY M, CORNEY N, PARRAS M, et al. State violence against protesters[J]. Torture Journal, 1970, 34(1): 22-43.

- [8] DEMIR E E, TEKINER A M, TURAN A A I. The role of non-lethal weapons in public security[J]. Journal of Criminology and Criminal Law, 2022, 60(3): 59-75.
- [9] NSIAMPA N, ROBBE C, PAPY A. Non-lethal projectile characterisation method: application to 40-mm SIR-X and condor NT901 projectiles[J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2018, 2: 7.
- [10] BRACQ A, DELILLE R, BOUREL B, et al. Numerical recreation of field cases on a biofidelic human FE model involving deformable less-lethal projectiles[J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2019, 3: 5.
- [11] OUYANG D H, QIN C W, QIN X W, et al. Numerical study on the blocking effect of skin on Flash-Ball impact and damage assessment[J]. Defence Technology, 2024, 33: 532-545.
- [12] 孙映斌, 汪送, 乔玲龙. 复合型非致命动能弹冲击能量耗散特性数值模拟[J]. 火力与指挥控制, 2024, 49(2): 26-32.
- SUN Y B, WANG S, QIAO L L. Numerical simulation of energy dissipation characteristics of compound non-lethal kinetic energy projectile impact[J]. Fire Control & Command Control, 2024, 49(2): 26-32. (in Chinese)
- [13] 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.
- WANG S. Analysis of development status and trend of anti-riot kinetic energy projectile[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(4): 6-11. (in Chinese)
- [14] ROBBE C, PAPY A, NSIAMPA N, et al. NATO standardized method for assessing the thoracic impact of Kinetic Energy Non-Lethal Weapons[J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2023, 7: 7.
- [15] NSIAMPA N. Numerical assessment of non-lethal projectile thoracic impacts [D]. Brussels: Royal Military Academy, 2016.
- [16] NATO. Risk assessment of non-lethal projectiles[S/OL]. Brussels: NATO STANREC, 2021 [2025-02-25].
- <https://standards.globalspec.com/std/14396835/stanrec-4744>
- [17] CHEN C M, ZHAO F D, MA Z M. Numerical analysis of thorax injury caused by the blunt impact of SIR-X sponge grenade[J]. Human Factors and Mechanical Engineering for Defense and Safety, 2023, 7: 2.
- [18] 涂明聪, 汪送. 基于 ODI 方法的防暴动能弹钝击效应影响因素分析[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(11): 78-83.
- TU M C, WANG S. Analysis of the influence factors of anti-riot kinetic energy bomb based on ODI method[J]. Fire Control & Command Control, 2019, 44(11): 78-83. (in Chinese)
- [19] CHADWICK P. The quasi-static expansion of a spherical cavity in metals and ideal soils[J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1959, 12(1): 52-71.
- [20] 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.
- JIANG X, WANG S. Review of Research on Blunt Impact Injury Assessment Methods of Anti-Riot Kinetic Energy Ammunitions [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(12): 78-84. (in Chinese)
- [21] PAVIER J, LANGLET A, ECHEZ N, et al. On ballistic parameters of less lethal projectiles influencing the severity of thoracic blunt impacts[J]. Comput Methods Biomech Biomed Engin, 2015, 18(2): 192-200.
- [22] GRANGE J T, KOZAK R, GONZALEZ J. Penetrating injury from a less-lethal bean bag Gun[J]. J Trauma, 2002, 52(3): 576-578.