

铅砂动能弹冲击仿生靶标数值模拟与安全分析*

欧阳的华^{1,2}, 刘雨涵¹, 潘家正¹, 李哲¹, 郭晓强¹, 汪送³, 刘星雨³

(1. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710082;

2. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094;

3. 武警工程大学装备管理与保障学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 为提高国内现役 38 mm 防暴枪用非致命动能弹的安全性, 采用有限元-离散元法, 对填充铅砂的 38 mm 球形动能弹丸冲击人体仿生靶标过程进行了数值模拟, 利用刚性壁实验进行了建模方法和参数选取的间接验证, 获得了弹丸冲击仿生靶标过程的形变过程、动能、速度、位移、能量传递率等变化数据。在此基础上, 对不同弹体速度和壁厚进行了对比分析, 提出了安全射击建议。结果表明: 弹丸冲击仿生靶标时产生较大形变, 弹丸形变至圆饼状, 靶标产生圆形凹陷, 两者形变均可在一定程度上恢复; 弹丸致伤威力随着速度的增加而增加, 随着壁厚的增加而减小; 当弹丸壁厚为 5、7、9 mm 时不造成腹部皮肤穿透损伤的最小射击安全距离分别 122.40、64.62、31.26 m。

关键词: 动能弹; 冲击动力学; 非致命效应; 仿生靶

中图分类号: O347; O521.9 **文献标识码:** A

非致命动能弹是动能非致命武器 (KE-NLWS) 的重要成员, 又称防暴痛感弹, 通过弹丸飞行动能撞击有生目标, 造成损伤和痛感, 从而使其丧失抵抗或抑制行动能力^{Error! Reference source not found.}。美国、以色列、中国等多个国家生产了七十余种不同类型的弹药与发射装置^{Error! Reference source not found.}。典型的非致命动能弹丸包括: 警棍弹、布袋弹、尾翼稳定橡胶弹、多球弹、橡胶球弹以及海绵榴弹等^{Error! Reference source not found.}。这些弹丸通常以相对较低初速射向目标, 但这些弹丸具有截然不同的特性, 有纯金属、金属内芯包覆橡胶、纯橡胶和软木材等多种材料, 弹体尺寸和质量也完全不同, 这表明现有弹丸性能未达到最优状态, 还有进一步优化空间^{Error! Reference source not found.}。

现有弹丸由于设计或使用中的诸多安全隐患, 实际作战应用中过度致伤案例屡屡发生, 临床医疗案例报道层出不穷。Ashish^{Error! Reference source not found.}等报道了一起弹丸类型为 2 英寸见方的布袋, 内装铅弹, 重约 40g 的动能弹在撞击时布袋破裂, 导致内部多颗铅制豆子嵌入人员手臂造成左侧肋骨骨折的事件; Wahl 等^[6]在文献中报道了一名男性在被直径 44mm, 质量 28g 的橡胶弹击中造成颅脑损伤的案例; 向爱和^[7]报道了一起中国 2002 年警方使用重 8.6g 的 18.4mm 橡皮弹击中一名距离 25m 处的男性, 导致心肺严重损伤死亡的案例; Balouris^[8]报道了多起以色列安全部队使用重约 20 克的金属球外覆 1-2mm 厚的橡胶或塑料涂层的橡胶弹造成如眼球破裂眼眶骨折等多种眼外伤的案例。Rohini 等^[9]对 1990 年至 2017 年期间多种类型动能弹造成的死亡、伤害的案例进行了总结。这些因不同类型非致命动能弹导致的过度伤害的案例表明, 当前现役的非致命动能弹在设计或使用中存在显著安全隐患, 亟须进行参数优化, 设计出一种符合当今需求的非致命动能弹, 通过致伤威力研究来摸清其性能底数, 提高其安全性和有效性。

非致命动能弹的致伤威力可以通过弹丸射击生物实验如人尸体^[10]、动物^[11]进行研究, 但是由于其成本高、难度大、程序复杂且受伦理道德的约束, 通常会采用模拟替代物, 如肥皂^[12]、明胶^[13]、粘土^[14]、假人^[15]等, 通过获取模拟物的破坏情况, 判定弹药的致伤威力。随着技术的发展, 数值模拟评估技术成为了一个强大工具, 这种技术能够对具有复杂形状的结构进行建模, 并间接量化其

*收稿日期: 2025-09-08; 修回日期: 2025-11-01

作者简介: 欧阳的华 (1983-), 男, 博士, 副教授, 主要从事特种弹药技术研究. E-mail: oydh2020@njust.edu.cn

在任何理论点上的复杂力学行为, 直观高效地演示冲击过程, 获得精确的结果, 与实验相比具有经济、安全、高效、可重复性高、无伦理约束的优势, 能够为后期的弹丸参数优化提供有效的数据支撑。

王文^[16]等指出防暴动能弹多采用密度较小的柔性材料制成, 根据战术要求, 可以通过在橡胶体内填充密度较大的物质来增加弹丸质量, 也可以在弹丸内注入化学剂来达到多重打击效果。江星等^[17]通过数值模拟研究分析了形变、能量转移率等对弹丸的致伤威力的影响, 认为质量和速度为最强影响因素; 万小庆等^[18]通过数值模拟分析了弹头形状对侵彻靶标性能的影响; 黄东等^[19]选取碰撞速度以及入射角度两个参数, 运用数值模拟软件研究了速度以及入射角度与非致命效应之间的关系; 刘硕等^[20]基于数值模拟的方法研究了射击距离对橡皮撞击弹钝击人体效应的影响; 孙宪照等^[21]从数值仿真的角度探讨了壁厚、速度等一系列影响因素; Wang 等^{Error! Reference source not found.}通过数值模拟方法分析弹丸在五种壁厚下撞击胸部靶标的变化, 分析了不同冲击载荷特性下弹体的致伤能力。

通过上述研究可以看出, 通过改变动能弹相关参数可以调整其致伤威力。目前内装填充物的代表性弹丸包括内装铅砂或其他填充物的软质布袋的弹丸, 如 18.4mm 布袋弹^[22], 以及采用易碎中空结构内装填充物的弹丸, 如 FN303^{Error! Reference source not found.}但此类弹丸在外壳破裂或展开不充分的情况下容易产生严重伤害, 许多学者针对此类弹丸开展了不同射击部位及不同靶标致伤效应的研究^{Error! Reference source not found.}^[-29], 但是未探讨改变弹丸填充物相关参数对致伤威力的影响。中国警用 38mm 转轮防暴发射器的初速指标为 $60 \pm 15 \text{ m/s}$, 初速较低, 目前开展了针对 38mm 口径防暴枪的实心橡胶弹^[4]、中空球形橡胶弹^[21]和柔性橡胶弹^[28]相关研究, 其研究表明此类口径纯橡胶弹丸致伤威力较低, 安全速度阈值较高, 可以通过填充密度较大的物质来增加弹丸质量以提高其有效性以应对远距离或低初速场景, 符合部分战术要求。

针对以上问题, 本文提出了一种采用橡胶外壳避免破裂以及填充物穿透, 同时保证弹丸延展性以扩大接触面积减小贯穿概率, 内部填充铅砂颗粒, 以壁厚控制其弹丸质量的, 适用于 38mm 系列防暴枪的球形非致命动能弹丸, 系统研究了填充铅砂的 38mm 球形橡胶动能弹在多种壁厚和速度下的冲击行为与安全性。提出了填充铅砂 38mm 球形橡胶非致命动能弹丸冲击仿生标靶的模型, 基于 LS-DYNA 有限元模拟软件, 利用实验数据对模型进行验证校核, 对动能、速度、位移、形变、能量传递率等冲击结果数据进行对比分析, 研究弹丸速度及壁厚对此类具有金属颗粒填充物的弹丸致伤威力的影响, 基于动能、比动能标准计算其损伤风险阈值, 确定其安全速度与距离, 进一步提升 38mm 非致命动能弹的本征安全性设计, 为开发适用于国内现役 38mm 防暴枪的弹丸安全设计研究提供了借鉴参考。

1 有限元模型构建

填充铅砂式动能弹由壳体和填充物两部分构成, 其二分之一剖面图如图 1 所示, 弹丸直径为 38mm, 内壁厚度分别为 5mm、7mm、9mm。弹体外壳为橡胶材料, 选择 Mooney-Rivlin 模型 MAT_HYPERELASTIC RUBBER 关键字定义, 材料参数见表 1。模型网格采用 Solid164 八节点实体单元中的映射六面体单元, 采用 Lagrange 网格, 网格大小控制在 0.8mm-1mm。

弹体内部填充物为直径不等的球形金属铅砂颗粒, 颗粒呈现球形, 直径为 0.6mm-1.2mm, 具有不均匀以及随机性。采用离散元法对填充物在壳体中的变形流动过程进行仿真, 即将填充物区域整体离散为 DEM 粒子单元, 进行随机填充。壁厚 5mm、7mm、9mm 时填充颗粒数分别约为 14800、9200、7800。填充物颗粒采用线弹性模型 MAT_ELASTIC 关键字定义, 材料参数见表 2。进行冲击效果对比的填充铅砂式动能弹在壁厚为 5mm、7mm、9mm 时总质量分别为 87.68g、65.70g、50.16g。

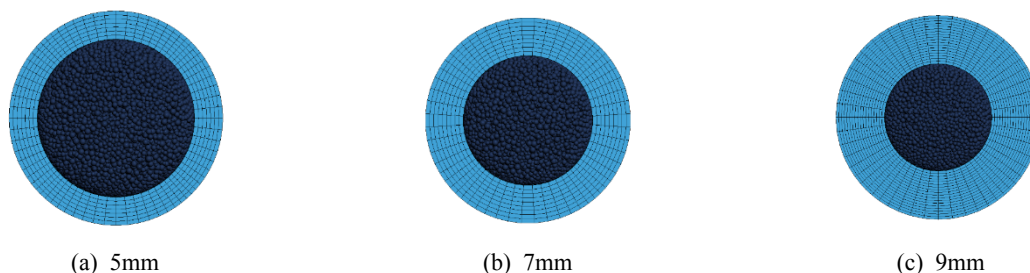


图1 不同壁厚动能弹有限元模型

Fig.1 Finite element model of kinetic energy projectile with different wall thicknesses

仿生靶标的选取借鉴 Ouyang 等^[1]建立的经过验证的三层皮肤仿真模型, 皮肤尺寸为 $0.3\text{m} \times 0.3\text{m}$, 其表皮层厚 0.2mm , 模型选用弹塑性模型 MAT_PLASTIC_KINEMATIC 关键字定义, 真皮层厚 1.5mm , 选用 Mooney-Rivlin 模型 MAT_HYPERELASTIC_RUBBER 关键字定义, 皮下组织与脂肪厚度取 30mm , 模型采用 Ogden 超弹模型 MAT_QUASILINEAR_VISCOELASTIC 关键字定义, 材料参数见表 3-5, 仿生靶标模型网格均采用 Solid164 八节点实体单元中的映射六面体单元, 采用 Lagrange 网格, 网格大小控制在 $0.6\text{mm}-0.7\text{mm}$ 之间。

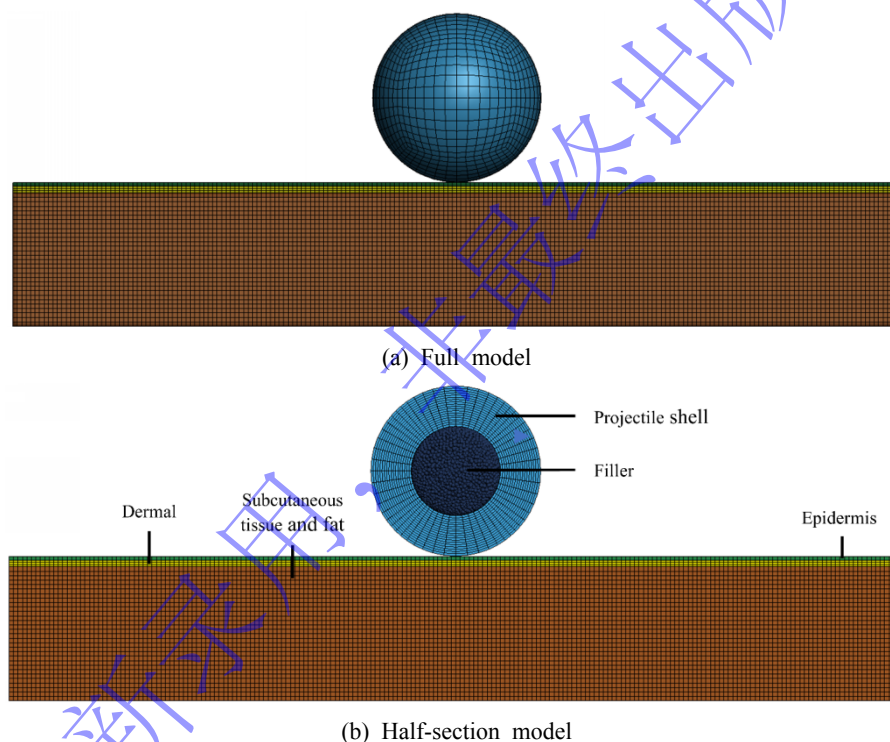


图2 壁厚 9mm 动能弹丸冲击仿生靶标有限元模型

Fig.2 Finite element model of a kinetic energy projectile with a wall thickness of 9mm impacting biomimetic target

为约束颗粒的流动过程, 弹体结构与靶标结构冲击过程的几何模型采用全模型, 如图 2(a)所示。为防止靶标模型位移, 设置在靶标模型四周添加固定约束。

为定义不确定接触避免填充物穿透逸散, 选用 CONTACT_AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE 接触, 选用包含所有字段。填充物颗粒与颗粒间的摩擦系数为 0.39, 用 CONTROL_DISCRETE_ELEMENT 关键字定义。填充物颗粒与橡胶外壳间的摩擦系数为 0.4, 阻尼系数为 0.86, 选用 DEFINE_DE_TO_SURFACE_COUPLING 关键字定义。由于皮肤模型上表面与橡胶弹丸接触的硬度差异显著, 容易导致网格异常接触穿透。因此采用 CONTACT_AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE 接触, 软约束公式选项的约束比例因子设置为 0.85, 以避免接触面异常穿透。

为了避免冲击速度出现偏差, 同时节省飞行过程计算资源, 弹丸与仿生靶标尽量贴近, 设置计算时间结束为 3.5ms 。涉及软材料与较大形变, 为了避免单元失效, 调整时间步长为 0.1, 处理结果

数量设置为 100，使用 LS RUN 2025R1 进行求解。

表 1 弹丸外壳材料模型参数

Table. 1 Material parameters of projectile shell

Material	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	PR	G/Pa	C_{10}	C_{01}
Projectile shell	1030	0.49	1.953×10^7	5.473×10^5	2.152×10^5

表 2 填充物材料模型参数

Table. 2 Material parameters of filler

Model parameters	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	E/Pa	PR
Filler	1.104×10^4	2.00×10^{11}	0.3

表 3 表皮层材料模型参数 Error! Reference source not found.

Table. 3 Material parameters of the epidermis model

Material	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	PR	E/Pa	SRC	SRP
Epidermis	1300	0.47	7.73×10^6	50	6

表 4 真皮层材料模型参数 Error! Reference source not found.

Table. 4 Material parameters of dermal model

Material	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	PR	G/Pa	C_{10}	C_{01}
Dermis	1030	0.48	2.548×10^6	6.89×10^5	5.85×10^5

表 5 皮下组织与脂肪层材料模型参数 Error! Reference source not found.

Table. 5 Material parameters of subcutaneous tissue and fat model

Material	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	K	N	M
Subcutaneous tissue and fat	920	5.00×10^5	6.00	6.00

2 模型验证

OUKARA 等 Error! Reference source not found.提出的一种通过刚性壁冲击实验表征和验证可变形非致命弹丸的方法，为弹丸有限元模型准确性的验证提供有力的数据支撑。实验采用弹道气炮系统 Error! Reference source not found.进行刚性壁试验，实验装置如图 3 所示，弹丸由压缩空气气炮发射，通过改变发射压力控制弹丸撞击集成力传感器的刚性壁面的速度，弹丸垂直于刚性壁面进行射击，偏航角为 0° 。嵌入刚性壁面中的力传感器记录了撞击力随时间变化的数据，通过数据采集设备导出撞击力数据，由于固定在刚性壁上的传感器的振动会发生振荡，这些振荡不作考虑，需进行过滤，主要参考最大撞击力的数值。同时基于侧视高速摄像机对弹丸飞行轨迹、变形模式等图像进行采集。



图 3 实验装置图

Fig.3 Experimental Setup Diagram

因为含有填充物的弹丸结构较为复杂，因此分两步对弹丸材料参数进行验证以提高验证结果准确性。第一步开展 38mm 实心纯橡胶弹丸冲击刚性壁实验，验证橡胶材料相关参数有效性，第二步进行含有铅砂填充物壁厚 9mm 的直径 38mm 橡胶外壳弹丸冲击刚性壁实验，验证弹丸相关参数有效性，减少因内部填充物颗粒的粒径分布随机性对结果的影响。因弹道实验存在误差，每种弹丸进行三次实验，取三次实验平均值以减小误差，实验弹丸相关参数如表 7 所示。

刚性壁数值模拟实验中弹丸材料参数见表 1 和表 2，初始速度与对应种类弹丸实验三次平均速度保持一致，刚性壁实验中壁面理论上相对于弹丸为绝对刚性，因此在有限元模型中采用 RIGIDW ALL_PLANAR 来表示刚性壁面（见图 4），并在所有方向上受到约束，选用 MAT_RIGID 关键字定义，材料参数如表 6 所示。2 种弹丸冲击刚性壁数值模拟与实验形变过程对比及撞击力结果对比如图 5 所示。

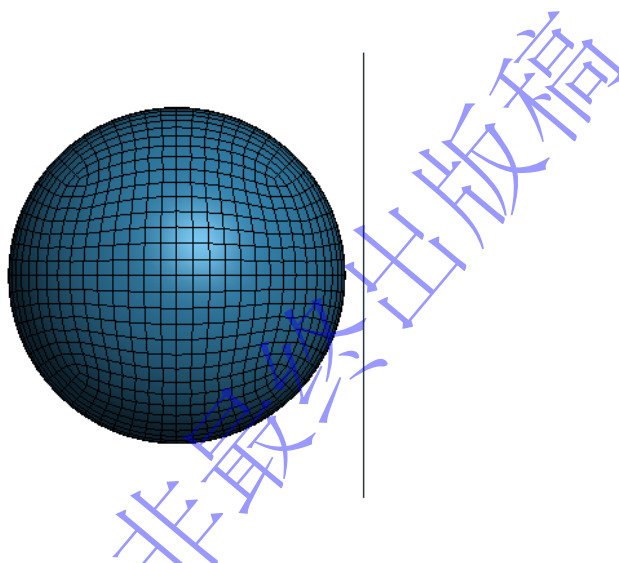


图 4 弹丸冲击刚性壁有限元模型

Fig.4 Finite element model of a projectile impacting a rigid wall.

表 6 刚性壁材料模型参数

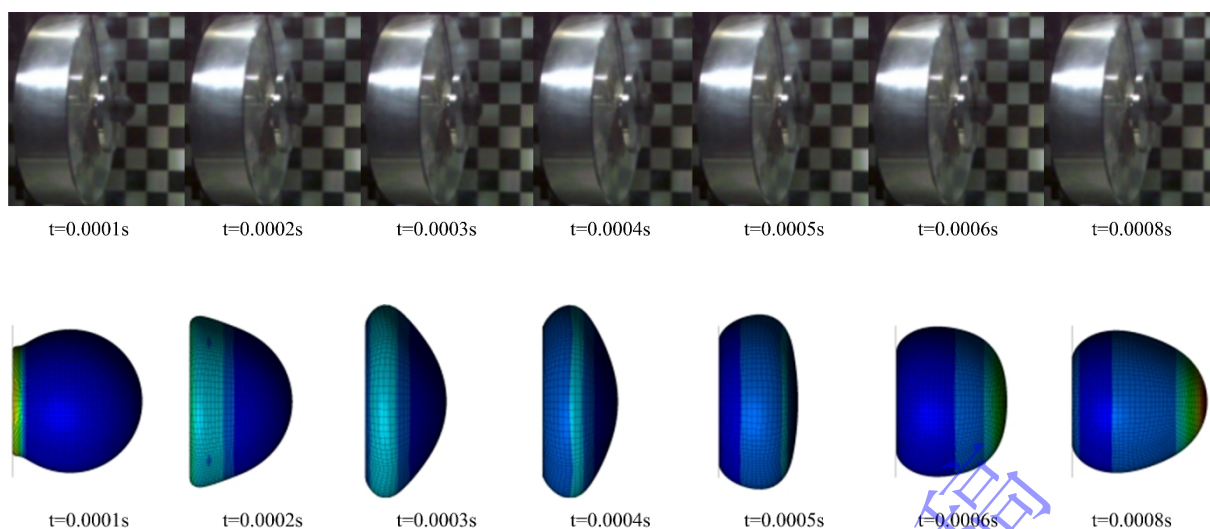
Table 6 Material parameters of rigid wall

Material	$\rho_0/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	PR	E/Pa
Rigid wall	7850	0.3	2×10^{11}

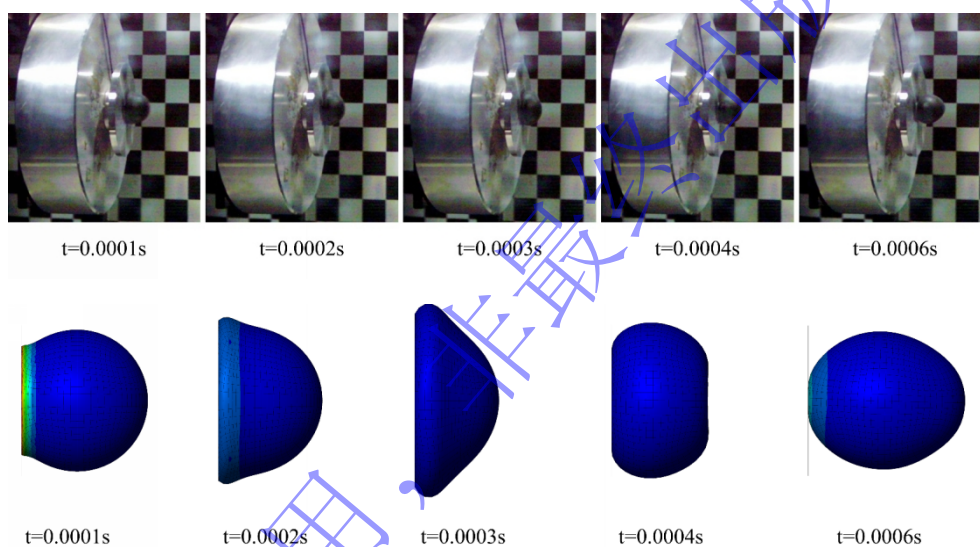
表 7 刚性壁实验 2 种弹丸实验数据

Table 7 Experimental data of two types of projectiles in rigid wall experiment

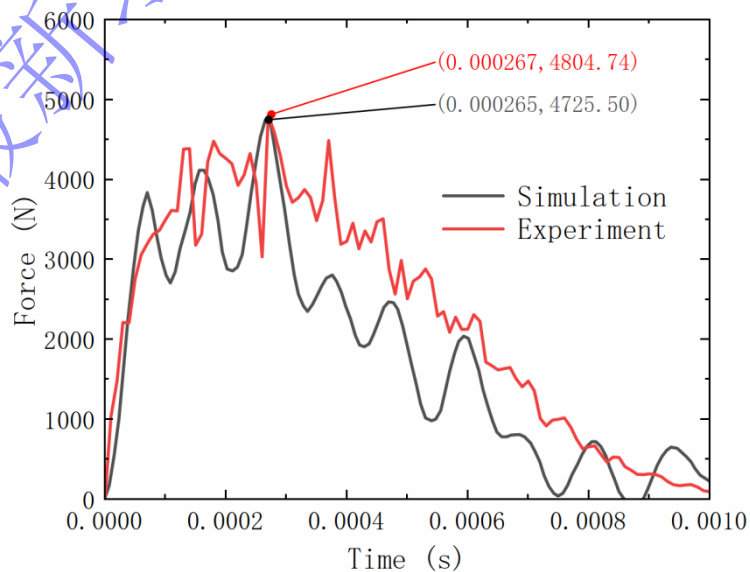
Projectile	Mass/g	Velocity/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Impact force/N
Solid rubber projectile1	29.49	56.20	4617.50
Solid rubber projectile2	29.50	56.20	4888.40
Solid rubber projectile3	29.44	56.80	4813.60
Lead shot projectile with 9mm wall thickness1	52.86	51.70	11848.70
Lead shot projectile with 9mm wall thickness2	51.73	51.50	11723.20
Lead shot projectile with 9mm wall thickness3	51.67	50.90	11422.10



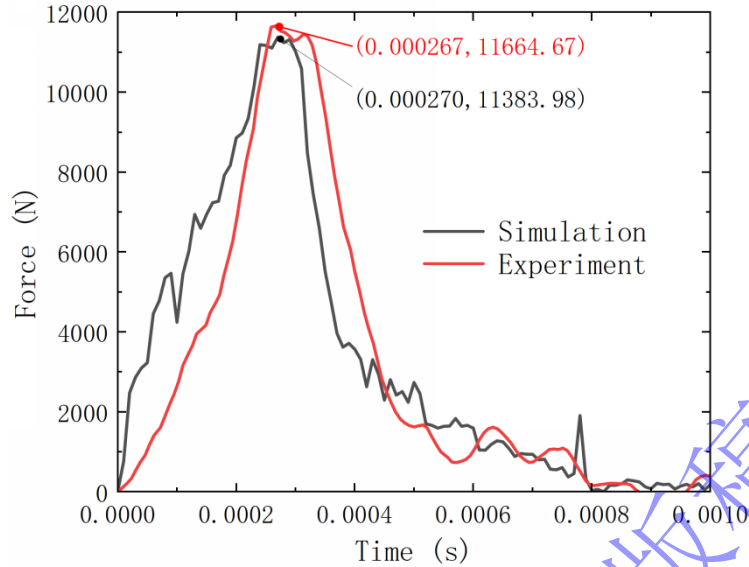
(a) Comparison of solid rubber projectile deformation process between numerical simulation and experiment



(b) Comparison of the lead shot projectile with 9mm wall thickness deformation process between numerical simulation and experiment



(c) Comparison of solid rubber projectile impact force between numerical simulation and experiment



(d) Comparison of the lead shot projectile with 9mm wall thickness impact force between numerical simulation and experiment

图 5 弹丸冲击刚性壁数值模拟与实验对比

Fig.5 Comparison between numerical and experimental results for projectile impact on a rigid wall

图 5(c)、(b)显示了两种工况下数值模拟接触力与实验接触力随时间变化状况的比较,数值模拟结果与实验结果吻合较好,模拟与实验达到峰值的时间相近,实心橡胶弹与壁厚 9mm 铅砂动能弹相对误差分别为 0.749%、1.12%,接触力峰值的相对误差分别为 1.65%、2.41%这表明仿真结果与实验曲线具有高度相关性,研究所建立的有限元模型是有效的。

3 数值模拟结果及分析

3.1 冲击过程结果分析

经过求解运算,将生成的结果文件在 LS-PrePost 中进行数据导出分析处理,以填充铅砂的 9mm 壁厚 38mm 球形动能弹初速度为 50m/s 时冲击人体腹部仿生靶标的过程为例,将模型部分隐藏,其冲击过程二分之一剖面图如图 6 所示,可以直观看到弹丸及靶标形变过程及铅砂流动过程。

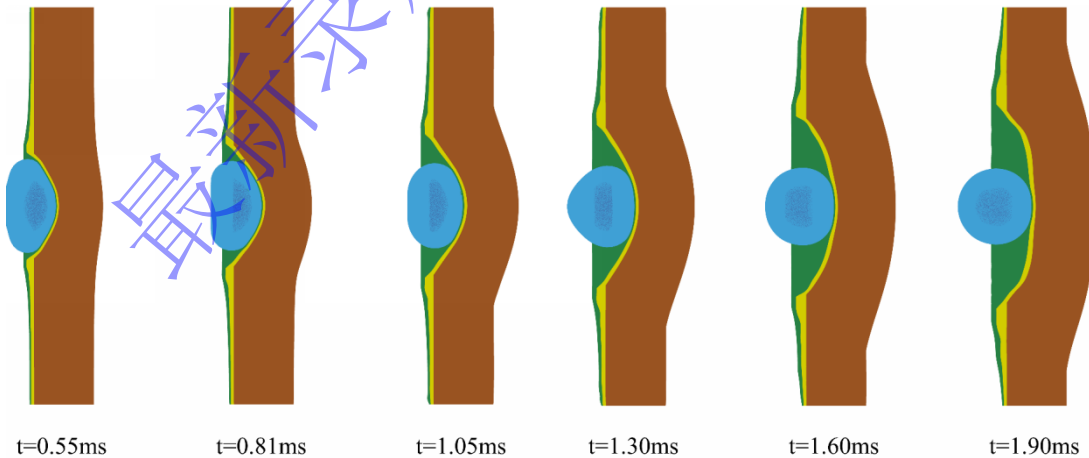
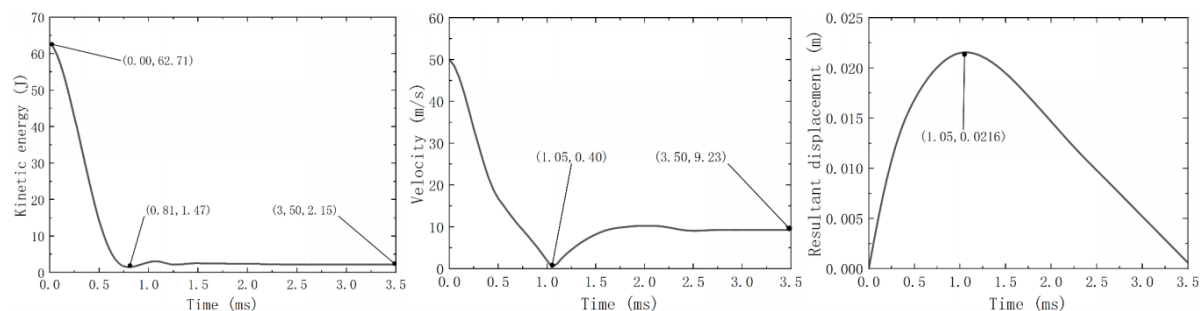


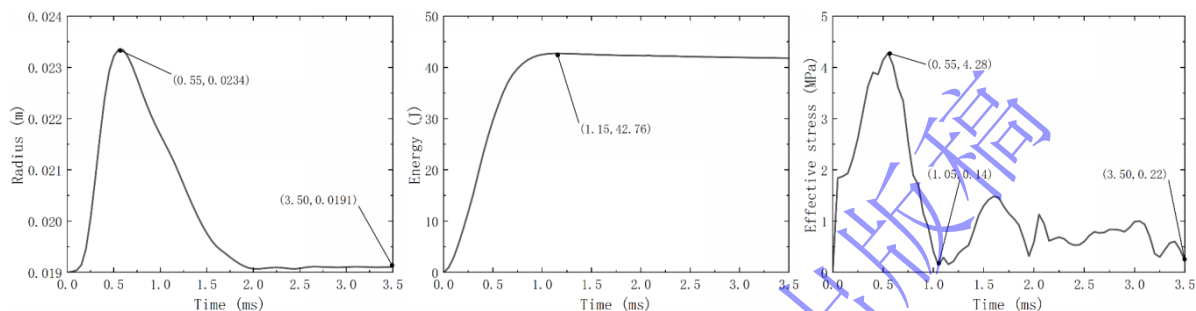
图 6 弹丸冲击仿生靶标过程图

Fig.6 Projectile impact process on a bionic target

从图 6 可以看出,0-1.05ms 冲击时间内弹丸向靶标方向持续运动,弹丸被压缩至椭球体,铅砂不断被挤压向冲击方向集中,弹丸与靶标接触区域持续凹陷,皮肤靶标呈现圆形水波效应,1.05ms 之后弹丸开始反弹,仿生靶标形变过程持续。



(a) Projectile kinetic energy (b) Projectile velocity(c)Projectile displacement



(d)Impact surface radius of projectile (e) Biomimetic target total energy (f) Biomimetic target effective stress

图7 壁厚9mm 弹丸冲击仿生靶标数据变化曲线

Fig.7 Data history for a 9mm wall projectile impacting biomimetic target at a velocity of 50 m/s

由图 7(a)可知该类型弹丸的接触动能为 62.70J，冲击过程中弹丸和仿生靶标产生了较大形变导致能量衰减，在 0.81ms 将能量传递给靶标且不再下降，随后进行反弹，冲击结束后动能弹丸动能逐渐稳定在 2.15J，稳定动能与靶标对不同能量的吸收和耗散能力有关。可得出弹丸的能量传递率

$$E_T = \frac{E_K - E_R}{E_K} \times 100\% = 96.57\%$$

其中 E_R 为橡胶弹回弹动能， E_K 为弹丸接触动能。

由图 6、图 7(b)、图 7(c)可知，弹丸速度呈现先下降后反弹再趋于稳定的趋势，在速度迅速下降能量主要沉积期，弹体与靶标剧烈相互作用，其动能被迅速转化为压缩、撕裂、破坏仿生组织所做的功和推动靶标材料向四周运动的动能以及摩擦生热能等耗散。

当弹体急剧减速时，铅砂因其惯性会继续向前运动，猛烈地挤压和压缩前部的橡胶外壳。这个被压缩的橡胶外壳像一个被压紧的弹簧，储存了弹性势能。当弹体的整体速度降至零时，开始回弹，赋予弹体一个反向的速度，同时，靶标本身也具有粘弹性，其被压缩后的回弹也会对弹体产生一个反向的推力。运动分离期。弹体与靶标的剧烈相互作用结束。弹体以剩余的动量以较低速度被弹出，并以一个相对稳定的剩余速度继续运动。

弹丸速度在约 1.05ms 时降至 0m/s，同一时刻弹丸达到最大位移 21.56mm，随后开始反向运动，开始弹性恢复与动量传递期，反弹后速度逐渐趋于稳定，速度衰减率约 81.5%。弹丸在达到最大深度后有一定程度的回退，这个过程中弹丸持续冲击靶标进行压缩，动能在弹丸及靶标之间不断传递。靶标在高速撞击下表现出明显的弹塑性行为，位移的增加量在减小，这表明靶标材料的阻力随着侵入深度的增加而显著增大，弹丸并非在均匀介质中运动。

由图 7(d)可知，弹丸与靶标接触后冲击面半径迅速扩大，发生径向扩张，在 0.55ms 左右时，弹丸达到 Y 方向最大冲击面半径相较于球体半径的增加量 0.44cm。冲击面半径 $r=R+\Delta Y$ ，R 为动能弹丸 Y 方向上初始半径， ΔY 为最大冲击面半径相较于球体半径的增加量，由此可得弹丸冲击面半径最大达到 2.33cm，冲击面积 $A=\pi (R+\Delta Y)^2$ ，由此可得弹丸与靶标最大接触面积达到 17.13cm²。达到最大半径后，冲击面开始回缩，接触面逐渐减小，最终趋于稳定，稳定半径 19.10mm 接近弹丸半径初始值，说明弹丸弹性恢复良好。

由图 7(e)仿生靶标总能量变化图可以看出，仿生靶标开始时总能量为 0，与弹丸接触后能量开

始进行传递均呈现上升趋势，这表明在撞击的过程中能量由弹丸不断地传递到仿生靶标中，使得其总能量逐渐增加。在 1.15ms 时总能量达到最大 42.76J，之后缓慢下降并趋于稳定，但未归零。假设弹丸的部分动能转化为自身应变能，传递至靶标的另一部分能量完全转化为靶标内能，忽略短距离内重力影响，弹体接触皮肤时速度无衰减（即等于初始速度），可计算靶标能量吸收率 $E_A = \frac{E_{Imax}}{E_K}$

$\times 100\% = 68.18\%$ ， E_{Imax} 为靶标最大内能， E_K 为弹丸接触动能。

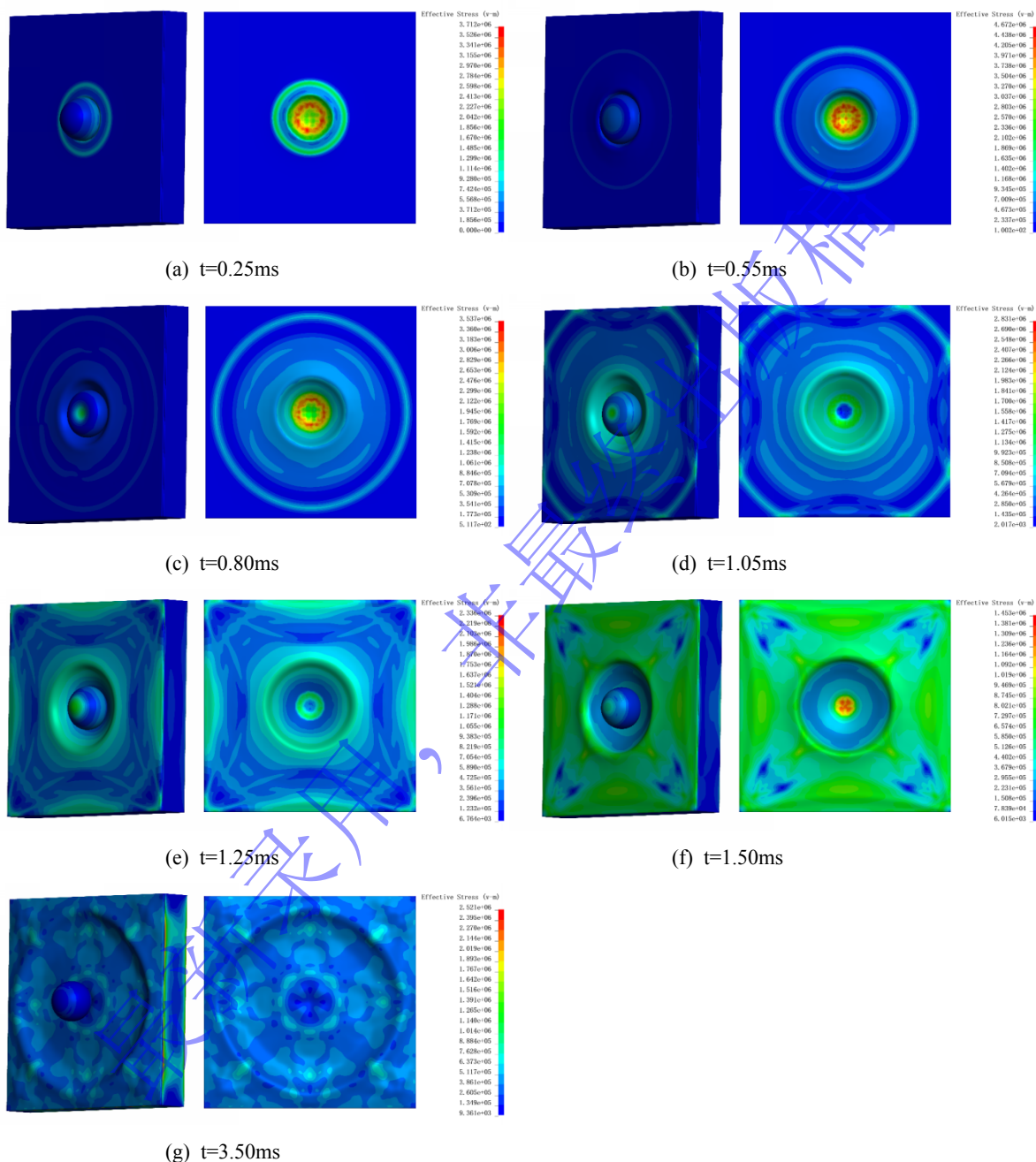


图 8 弹丸冲击仿生靶标 Von mises 应力云图

Fig.8 Von Mises stress contour plot of the projectile impacting biomimetic target

图 8 为填充铅砂的 9mm 壁厚的动能弹丸以 50m/s 的速度冲击仿生靶标时的应力分布图，仿生靶标上的应力分布有以下几个特点：

在开始阶段，随着弹丸与仿生靶标产生接触，能量瞬时传递给靶标，如图 8(b)、图 7(f)所示，初始阶段应力迅速上升达到第一个峰值，中期阶段应力出现波动，有多个小峰值，反映能量在靶标内的传播与反射，后期阶段应力逐渐衰减，但仍存在波动，说明靶标仍在动态响应中，峰值应力直

接决定了组织是否会发生屈服和损伤, 靶标与弹丸模型正前方接触中心应力集中值最大, 0.55-1.05 ms 应力波持续向下传播, 随着皮肤模型塑性形变扩大发展, 应力集中现象逐渐减弱, 应力峰值减小, 应力波向四周扩散, 应力作用范围随着弹丸与仿生靶标接触面积的增大而增大, 在 1.05ms 左右时, 仿生靶标上的应力减小为 0.14MPa; 1.05ms 后弹丸停止回弹后开始反弹, 应力波达到模型边缘时向中心汇聚, 最后趋于平稳。

3.2 不同速度冲击效果对比

通过改变填充铅砂的壁厚 9mm 的动能弹丸冲击速度为 60m/s、50m/s、40m/s, 得到如图 9 所示不同速度冲击效果对比图, 分析不同速度对该弹丸冲击仿生靶标的影响:

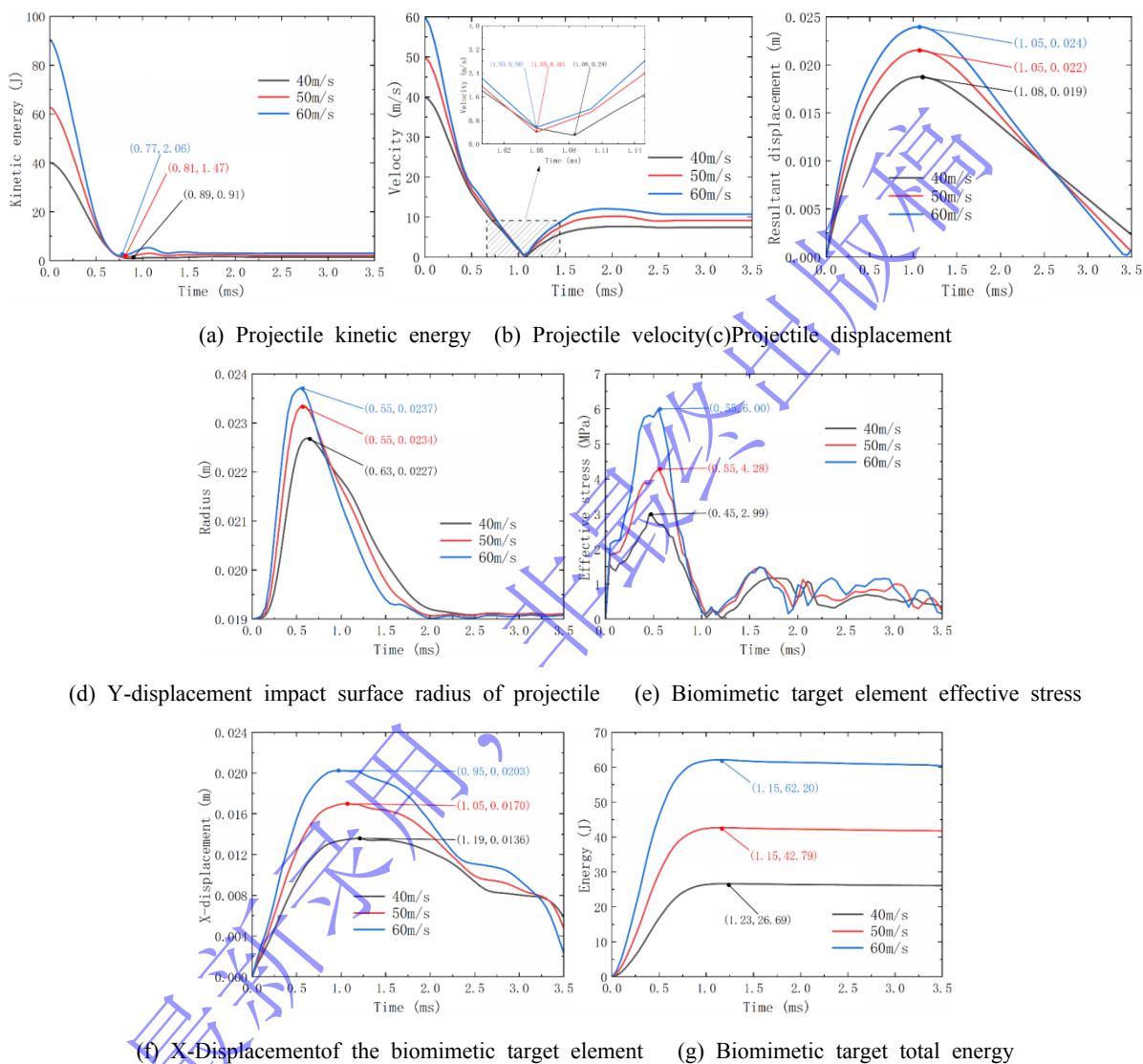


图 9 不同速度弹丸冲击仿生靶标数据变化曲线

Fig.9 Comparison of data curves for projectile impacting biomimetic target across different velocities

由图 9(a)可以看出, 弹丸的接触动能在速度 60m/s、50m/s、40m/s 时分别为 90.29J、62.70J、和 40.13J, 初速度越高, 接触动能越大, 符合动能公式, 达到最低动能时间随速度增加而提前, 高速冲击下动能衰减更快, 能量传递的速率更快, 靶标对高速冲击的能量吸收更集中相互作用更为剧烈, 能量能够在更短的时间内被靶标吸收和耗散。不同速度下稳定动能的差异可能与靶标对不同能量的吸收和耗散能力有关。速度较大的弹体在撞击时携带更多能量, 靶标虽然会吸收一部分能量, 但由于能量输入较大, 最终达到稳定时的动能也相对较高, 靶标对于高能量的冲击存在一定的承受和缓冲极限。动能平均值随速度增加而显著增加, 40m/s 时的平均动能 5.83J, 50m/s 时的平均动能 8.49J, 60m/s 时的平均动能 11.57J。

由图 9(b)可以看出, 所有速度组均呈现先迅速下降后反弹再趋于稳定的趋势。弹丸初始速度 40 m/s 时反弹速度趋于 7.49m/s, 速度衰减率约 81.3%; 初始速度 50m/s 时反弹速度趋于 9.23m/s, 速度衰减率约 81.5%; 初始速度 60m/s 时时反弹速度趋于 10.77m/s, 速度衰减率约 82.0%。在不同初始速度下, 速度降为 0 的时间点非常接近, 这表明动量交换的过程极其迅速, 且与初始速度关系不大, 更多地取决于仿生靶标的固有特性, 是人体组织遭受冲击, 损伤发生的关键时刻。三种冲击初速度下速度衰减率相差不大, 说明靶标对动能吸收的效率在不同初速度下较为稳定, 超过 80% 的能量被靶标吸收, 说明这种相互作用模式效率非常高。能量几乎没有被弹体带走, 而是几乎全部释放在了靶标内部。稳定速度随初速度增加而增加, 但增幅逐渐减小, 符合非线性能量吸收特征。

由图 9(c)可以得到, 初速度越高, 弹丸最大位移越大, 靶标最大形变深度越大, 但回弹比例也越高, 60m/s 回弹最多。

由图 9(d)可以得到, 不同速度下弹丸撞击后冲击面半径迅速扩大, 在 60m/s、50m/s、40m/s 冲击速度下弹丸冲击面半径最大增量分别为 0.47cm、0.43cm 和 0.37cm, 更高速度意味着内部铅砂具有更大的惯性动量, 对橡胶外壳的挤压更猛烈, 导致更剧烈的塑性流动和径向扩张。三种速度下的最大冲击面半径分别为 2.37cm、2.33cm、2.27cm, 初速度越高, 最大扩张半径越大, 但增幅逐渐减小, 可能是由于材料非线性或能量饱和。所有速度组回弹后半径接近初始值 19.00mm, 说明三种速度下弹体弹性均恢复良好。最大冲击面积分别为 17.66cm²、17.13cm²、16.18cm², 速度越高, 冲击面半径和冲击面积越大, 较大的冲击面积意味着弹丸的冲击力会分散在更大的区域上, 这可能会影响到靶标表面损伤的范围。

由图 9(e)可以看出随着弹丸冲击速度的增加, 靶标的应力峰值也在增加, 且应力上升速率更快, 达到峰值的时间提前, 反映出弹丸致伤威力的增加, 高速撞击导致更强烈的应力集中, 靶标材料更容易达到屈服或失效阈值。40m/s 时应力峰值较低, 衰减较快, 后期波动较小, 50m/s 时应力峰值明显提高, 衰减较慢, 后期仍有明显波动, 60m/s 时应力峰值最高, 衰减最慢, 后期波动幅度大, 说明能量吸收和释放过程更复杂, 能量输入更高, 靶标需要更长时间恢复。

图 9(f)反映了仿生靶标在 X 方向上形变情况, 随着速度增加仿生靶标产生的形变也加大, 反映出弹丸致伤威力的增加。位移上升速率更快, 达到最大形变的时间随速度增大而提前, 说明惯性效应增强, 靶标响应更快, 且时间点与之前数据分析中冲击面半径达到最大、应力达到峰值的时间点高度吻合, 这表明弹丸动能的主要沉积过程时间内不仅驱动了弹丸的径向膨胀, 也同时驱动了靶标组织的剧烈横向运动, 形成了凹陷。所有速度下靶标均发生回弹, 但回弹行为有一定差异, 由于组织的粘弹性和塑性耗散, 它无法完全恢复到原始状态, 最终稳定在一个位移上, 曲线后期的波动反映了多次微弱应力波的传播。

由图 9(g)可以看出随着时间的推移, 三种不同速度对应的仿生靶标总能量均呈现上升趋势, 40 m/s 时对应的仿生靶标总能量曲线处于最低位置。这意味着在该速度下, 弹丸传递给仿生靶标的能量相对较少。较低的速度使得弹丸具有的动能较小, 在撞击过程中转化为仿生靶标总能量的部分也相应较少。速度越高, 能量积累越快, 峰值能量也越高。所有速度下, 由于靶标材料的弹性回弹或能量耗散机制, 能量在达到峰值后都有轻微回落并趋于稳定。经过计算, 40m/s 弹丸传递给靶标的能量比为 66.51%, 50m/s 弹丸传递给靶标的能量比为 68.18%, 60m/s 弹丸传递给靶标的能量比为 68.89%, 增加速度情况下弹体所传递给靶标的能量比也增加。

3.3 不同壁厚冲击效果对比

通过改变弹丸壁厚, 得到如图 10 所示在 50m/s 冲击速度不同弹丸冲击效果对比图, 分析壁厚对该弹丸冲击仿生靶标的影响:

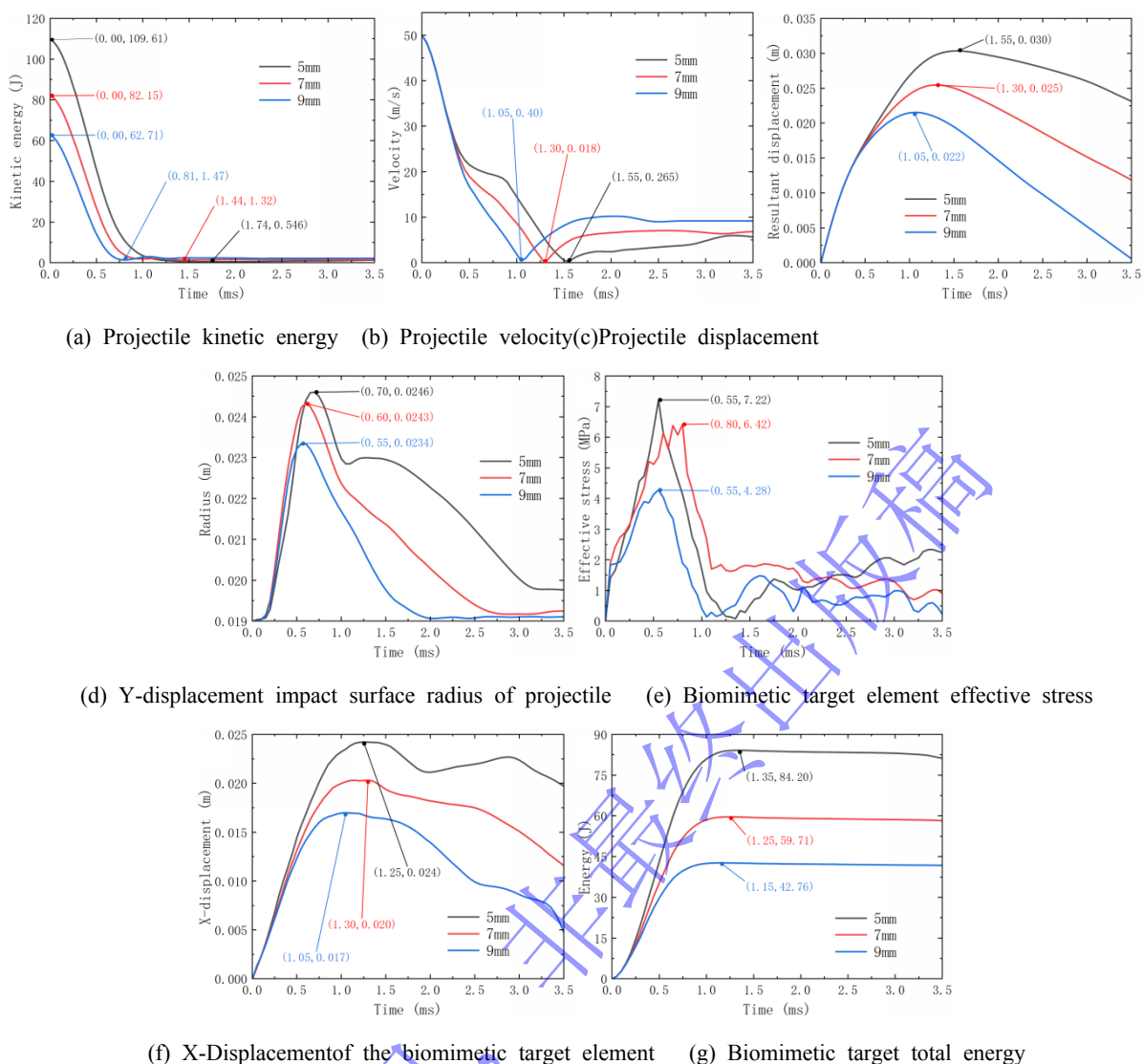


图 10 不同壁厚弹丸冲击仿生靶标数据变化曲线

Fig.10 Comparison of data curves for projectile impacting biomimetic target across different wall thicknesses

由图 10(a)可以看出随着壁厚的增加，接触动能逐渐减小。这可能是因为壁厚增加，弹丸内部灌装铅砂的空间相对减少，整体质量分布发生变化，导致接触动能不同，在发射条件相同的情况下，壁厚较小的弹丸能够获得更大的初始能量，具有更强的初始冲击力，弹丸内部铅砂的分布或整体结构在冲击瞬间更有利于能量的释放。

弹丸将能量传递给靶标不再下降的时间随壁厚增加而减缓，壁厚的增加可能使得弹丸与靶标之间的相互作用更为剧烈和集中，导致能量能够在更短的时间内被靶标吸收和耗散，从而更快地达到动能的稳定状态。靶标对不同壁厚弹丸能量的吸收和耗散能力存在差异，厚壁弹丸携带的能量更多，尽管靶标会吸收一部分，但由于能量输入较大，最终达到稳定时的动能也相对较高，反映出靶标对于更高能量的冲击存在一定的承受和缓冲极限。5mm 壁厚平均动能 16.75J，7mm 壁厚平均动能 11.52J，9mm 壁厚平均动能 8.49J 动能平均值随壁厚减小而显著增加，壁厚较薄的弹丸在整个冲击过程中平均传递的能量更高。

由图 10(b)可以看出 5mm 壁厚弹丸反弹后稳定速度约 6.02m/s，速度衰减率约 88%，7mm 壁厚稳定速度约 6.87m/s，速度衰减率约为 86.3%，9mm 壁厚稳定速度约 9.23m/s，速度衰减率约为 81.5%。壁厚越薄，弹丸停止越慢，但反弹速度反而更低，这意味着薄壁弹丸的能量沉积率更高，有更多的能量被弹体自身的弹性变形所吸收，并以回弹动能的形式带走。壁厚越薄，速度衰减越慢，因为薄壁弹丸更容易变形，导致更多能量耗散在靶标内，说明薄壁弹丸更具侵彻性，能量释放更缓慢。壁

厚越厚, 越早出现回弹, 说明厚壁弹丸更容易被靶标反弹, 能量传递更集中、更剧烈。

由图 10(c)可以看出壁厚越薄, 最大形变深度越大, 5mm 壁厚弹丸的形变深度比 9mm 壁厚高出约 40.7%, 壁厚越厚, 达到最大位移的时间越早, 说明厚壁弹丸更快达到最大能量。

薄壁弹丸会产生更深的侵入深度, 这意味着它可能将能量更集中地传递到更深的组织, 对深层器官的损伤风险更高。而厚壁弹丸将能量更多地耗散在浅层组织的剧烈压缩中, 造成更严重的浅表组织损伤如大面积挫伤, 但侵入深度较浅。

由图 10(d)可知在壁厚为 5mm、7mm、9mm 时弹丸最大冲击面半径分别为 2.46cm、2.43cm、2.34cm。壁厚越薄, 最大冲击面半径越大, 弹丸变形能力越强, 冲击面扩张越显著, 壁厚越厚, 达到峰值的时间越早。最大冲击面积分别为 19.02cm²、18.60cm²、17.12cm²。薄壁更易发生大变形, 能量通过径向扩张和靶标压缩吸收, 适合高能量传递场景; 厚壁变形小, 能量主要通过弹性回弹释放, 适合低损伤、可恢复应用。冲击面半径越大, 接触面积越大, 应力分布更均匀, 有利于减少靶标局部损伤。三种壁厚条件下弹丸达到最大半径后, 冲击面均开始回缩, 最终均趋于稳定, 所有速度组回弹后半径接近初始值, 说明弹性均恢复良好。

由图 10(e)可知, 随着弹丸壁厚的增加, 靶标的应力峰值逐渐减小。薄壁弹丸在靶标内部造成了更为严重的应力集中, 意味着它造成严重内部损伤的风险最高, 厚壁弹丸的峰值应力相对较低。应力从上升到峰值的速度, 反映了冲击的剧烈程度, 9mm 壁厚上升最快, 这表明其冲击非常猛烈和突然, 5mm 和 7mm 弹丸上升速率相对平缓, 表明能量释放和应力积累的过程更为持续。应力达到峰值后开始下降, 但仍存在多次波动, 表明靶标内部存在应力重分布和弹性振荡。5mm 壁厚弹丸应力波动更剧烈, 说明其动态响应更复杂, 9mm 壁厚振荡较平缓, 说明厚壁弹丸冲击条件下靶标恢复更快。

由图 10(f)可知, 靶标形变与弹丸侵入深度的趋势基本一致, 与之前弹丸达到最大侵入深度的时间点高度吻合。5mm 壁厚导致的位移最大, 且回弹较慢, 说明能量传递更充分, 靶标整体形变更大, 大部分能量留在靶标形变中, 薄壁弹丸对靶标的整体形变影响更显著。9mm 壁厚的位移最小, 但回弹更快, 说明厚壁弹丸能量传递更集中, 整体形变较小。壁厚越薄, 最大形变深度越大, 壁厚越厚, 达到峰值的时间越早。下降阶段位移逐渐减小, 但 5mm 和 7mm 壁厚下降较缓, 9mm 壁厚下降更快, 位移逐渐减小, 但未完全回弹至零, 说明存在塑性变形或残余凹陷, 壁厚越厚, 后期回弹越明显, 弹性恢复能力最强。

由图 10(g)可以看出随着时间的推移, 三种不同壁厚对应的仿生靶标总能量均呈现上升趋势, 能量吸收速率和峰值能量随壁厚减小而增加, 壁厚越薄, 靶标吸收能量越多, 相对较薄的壁厚使得弹丸在撞击时更容易发生形变, 且填充铅砂的比例较高, 质量更大从而将更多的能量传递给仿生靶标。经过计算, 5mm 弹丸传递给靶标的能量比为 76.82%, 7mm 弹丸传递给靶标的能量比为 72.68%, 9mm 弹丸传递给靶标的能量比为 68.18%, 增加弹丸壁厚可以显著减小其向仿生靶标传递能量的效率。

3.4 以皮肤穿透为风险的射击安全性评估

朱永杰⁰等以明胶模拟皮肤, 提出理想非致命终点效应的比动能为 8.2J/cm², 防暴动能弹威力标准中对目标造成轻度损伤(II 级)时的比动能范围为 4~12J/cm², 美国陆军^[34]认为动能阈值在 40~120J 之间被认为会造成危险伤害。Bir^{Error! Reference source not found.}等将能量密度标准作为预测弹丸皮肤穿透的损伤标准。北约 AEP94^[36]等文件阐述了专门为评估弹丸穿透风险而开发的实验和数值方法, 指出人体皮肤最易穿透的部位是前肋处, 其能量密度为 23.99 J/cm², 由此推算各类型弹丸穿透概率为 50%时对应撞击速度。

本文选取的仿生靶标为人体腹部靶标, 因此选取腹部皮肤穿透比动能阈值为风险评价指标, 根据 Ouyang^[30]的研究表明, 腹部皮肤损伤极限比动能为 7.88J/cm², 由比动能计算公式可得不同壁厚弹丸其造成穿透皮肤、侵入人体深部组织的终点速度阈值。

比动能计算公式为:

$$e = \frac{E_k}{A} = \frac{2mv^2}{\pi d^2}$$

式中：e 为弹丸比动能 (J/cm²)；E_k 为弹丸动能 (J)；A 为弹丸撞击截面积 (cm²) (若弹丸垂直撞击，截面积按圆形计算)；m 为弹丸质量 (kg)；v 为弹丸撞击速度 (m/s)；d 为弹丸直径 (cm)。该标准适用于邵氏硬度小于 90 的弹丸。

Nsiampa^[26]等人通过拟合得到弹丸飞行过程中的速度衰减方程：

$$V_x = V_0 \exp(-\lambda x)$$

$$\lambda = \frac{\pi d^2 \rho C D_0}{8m}$$

式中：V_x 为弹丸飞行 x 米后的衰减速度 (m/s)；V₀ 为弹丸初始速度 (m/s)；d 为弹丸直径 (m)；ρ 为空气密度 (kg/m³)，取 1.29 kg/m³；C D₀ 为空气阻力系数 (可近似为球形结构，故取 0.5)；m 为弹丸质量 (kg)。

我国 38mm 防暴枪发射速度最高为 75m/s，结合上式可计算不同壁厚弹丸理论穿透极限距离，即当弹丸对人体的射击距离小于理论穿透极限距离时，存在穿透皮肤、侵入人体深部组织，造成肌肉与内脏损伤的风险，计算结果如表 8 所示，结果应上界取小，下界取大。

表 8 不同壁厚动能弹丸最小射击安全距离与皮肤穿透速度阈值

Table 8 Minimum shooting safety distance and skin penetration velocity threshold of kinetic projectiles with different wall thicknesses

Wall thickness/ mm	Velocity / (m·s ⁻¹)	Distance / m
5	45.03	122.40
7	51.99	64.62
9	59.50	31.26

4 结 论

本文利用 LS-DYNA 仿真模拟软件建立了具有铅砂颗粒填充物的 38mm 球形橡胶动能弹丸冲击仿生靶进行了数值模拟研究，基于刚性壁实验对弹丸进行了模型验证。基于已验证的模型对该类型弹丸在不同速度及不同壁厚下冲击仿生靶标的冲击过程进行了对比分析，并基于比动能标准对该类弹丸与安全速度及安全距离范围提出了建议，主要结论如下

(1) 本文建立的具有铅砂颗粒填充物的 38mm 球形橡胶动能弹丸有限元模型在与刚性壁实验数据比较中，冲击力峰值与峰值到达时间的最大误差均小于 3%，仿真模型与实验结果有较强的相关性。

(2) 弹丸冲击仿生靶标过程中被逐渐压缩至椭球体，铅砂不断被挤压向冲击方向集中，弹丸与靶标接触区域持续凹陷，接触面积逐渐扩大，靶标表面呈现圆形水波效应，能量不断传递；弹丸与靶标在达到最大形变后会进行反弹，弹丸回弹效应较好，弹丸能量部分被靶标永久吸收。

(3) 随着弹丸冲击速度的增加，弹丸动能增大，靶标表面损伤的范围增大，形变更加剧烈，应力峰值增高，能量积累得越快，比动能逐渐增加但未超过损伤上限，反映出弹丸致伤威力随速度增加而提高；随着弹丸壁厚的增加，弹丸接触动能逐渐减小，速度衰减越快，能量释放更快，靶标损伤深度减小但损伤面积增大，能量传递效率减小，比动能逐渐减小未超过损伤上限，反映出弹丸致伤威力随壁厚增加而减小。

(4) 填充铅砂式动能弹壁厚 5mm 时最小射击安全距离为 122.40m，壁厚 7mm 时最小射击安全距离为 64.62m，壁厚 9mm 时最小射击安全距离为 31.26m，以防穿透皮肤并侵入人体造成内部组织损伤。

本研究结果表明,通过调整壁厚和初速的匹配关系,可以有效地在保证防爆效能的同时,将填充型动能弹的致伤风险控制在非致命范围内。未来的工作可进一步考虑不同入射角度、目标部位(如胸、头部)以及更复杂的生物力学环境,以构建更为完善的安全性评估体系。

致谢:本论文实验部分得到了武警工程大学多位老师及研究生同学的帮助,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Sanjana R ,O. K L ,Bryce A W , et al.Kinetic impact projectiles and craniofacial trauma: a case series and literature review[J].Face,2023,4(3):397-403.
- [2] Small Arms Survey, Geneva. Procurement and policy: Police use of emerging weapons technology[M].Small Arms Survey 2011: States of Security. Cambridge: Cambridge University Press, 2011:69-100.
- [3] L. KOENE, A. PAPY. Towards a better, science-based, evaluation of kinetic non-lethal weapons[J].International journal of intelligent defence support systems,2011,4(2):169-186.
- [4] Wang S .Simulation design of non-lethal hollow spherical kinetic energy projectile based on A NSYS LS-DYNA[J].Lecture notes in mechanical engineering,2025:269-283.
- [5] Ashish ,Sehgal , et al.The flexible baton TM-12: a case report involving a new police weapon [J].The journal of emergency medicine,1997,15(6):789-791.
- [6] Wahl P, Schreyer N, Yersin B. Injury pattern of the Flash-Ball®, a less-lethal weapon used for law enforcement: report of two cases and review of the literature[J]. The Journal of emergency medicine, 2006, 31(3): 325-330.
- [7] 向爱和. 防暴枪弹致死 2 例分析[J]. 中国法医学杂志, 2003, 18(5): 311-316.
Xiang Aihe. Analysis of 2 cases of death caused by riot guns[J]. Chinese Journal of Forensic Medicine, 2003, 18(5): 311-316.
- [8] Balouris C A. Rubber and plastic bullet eye injuries in Palestine[J]. The Lancet, 1990, 335(8686): 415.
- [9] Haar R J, Iacopino V, Ranadive N, et al. Death, injury and disability from kinetic impact projectiles in crowd-control settings: a systematic review[J]. BMJ open, 2017, 7(12): e018154.
- [10] Frank M,Bockholdt B, Peters D, et al. Blunt Criterion trauma model for head and chest injury risk assessment of cal. 380 R and cal. 22 long blank cartridge actuated gundog retrieval devices[J]. Forensic science international, 2011, 208(1-3): 37-41.
- [11] Prat N,Rongieras F, de Freminville H, et al. Comparison of thoracic wall behavior in large animals and human cadavers submitted to an identical ballistic blunt thoracic trauma[J]. Forensic science international, 2012, 222(1-3): 179-185.
- [12] Coupland R M, Thali M, Rothschild M A. Wound ballistics: basics and applications[M]. Springer Nature, 2022.
- [13] Lyon D H, Bir C A, Patton B J. Injury evaluation techniques for non-lethal kinetic energy munitions[R]. 1999.
- [14] Armor P B. Ballistic Resistance of Personal Body Armor NIJ Standard-0101.04[J]. National Institute of Justice, US Department of Justice, Washington, DC, accessed Nov, 2008, 1: 2024.
- [15] Roberts J C, Merkle A C, Biermann P J, et al. Computational and experimental models of the human torso for non-penetrating ballistic impact[J]. Journal of biomechanics, 2007, 40(1): 125-136.
- [16] 王文,刘斌胜,赵志亮. 防暴动能弹弹丸设计原则[J]. 山西科技,2010,25(5):103-104.
WANG Wen, LIU Binsheng, ZHAO Zhiliang.Designing principles of the projectiles of riot kinetic energy

- tic energy missiles[J]. Shanxi Science and Technology, 2010, 25(5): 103-104.
- [17] 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.
JIANG Xing, WANG Song. Research on hierarchical structure of injury power influence factors of anti-riot kinetic energy ammunitions[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2020, 40(1): 59-64.
- [18] 万小庆,赵雁. 防暴动能弹头部形状对侵彻影响的数值模拟研究[J].现代科技(现代物业下旬刊), 2009,8(11):66-67.
WAN Xiaoqing, ZHAO Yan. Numerical simulation research on the influence of warhead shape on penetration for riot kinetic energy projectile[J]. Modern Science and Technology (Modern Property Management Late Issue), 2009, 8(11): 66-67.
- [19] 黄东,何帆,李其祥,等.防暴动能弹对人体非致命效应的模拟研究[J].军械工程学院学报,2016,28(01): 11-15.
HUANG Dong, HE Fan, LI Qixiang, et al. A simulation study on the non-lethal effect on the human body of a riot control kinetic energy ammunition[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2016, 28(01): 11-15.
- [20] 刘硕,陈毅雨,朱光涛,等.基于 LS-DYNA 的橡皮碰击弹非致命效应仿真研究[J].计算机测量与控制,2016,24(11):171-173+214.
LIU Shuo, CHEN Yiyu, ZHU Guangtao, et al. Simulation to non-lethal efficiency of rubber hit grenade based on LS-DYNA[J]. Computer Measurement & Control, 2016, 24(11): 171-173+214.
- [21] 孙宪照,汪送.38mm 中空球形弹冲击仿生靶标的有限元模拟[J].计算机仿真,2022,39(10):12-17.
SUN Xianzhao, WANG Song. Finite element simulation of 38mm hollow sphere projectile impact biomimetic target[J]. Computer Simulation, 2022, 39(10): 12-17.
- [22] 汪送.布袋式防暴动能弹冲击损伤模式研究进展[J].中国法医学杂志,2020,35(05):522-527.
WANG Song. Study on impact injury patterns of bean bag anti-riot kinetic energy projectiles[J]. Chinese Journal of Forensic Medicine, 2020, 35(05): 522-527.
- [23] Tawell M G. Kinetic energy less lethal weapons and their associated blunt trauma injuries[J]. Cranfield university, 2010.
- [24] Papy A, Pirlot M C. Evaluation of kinetic-energy non-lethal weapons[C]//International Symposium on Ballistics vol.1; 20070416-20; Tarragona(ES). 2007:1211-1218.
- [25] Klinger D. Impact munitions: a discussion of key information[J]. Policing: An International Journal of Police Strategies & Management, 2007, 30(3): 385-397.
- [26] Ndompetelo N. Numerical assessment of non-lethal projectile thoracic impacts[M]. Universite de Liege (Belgium), 2016.
- [27] 蒲利森,黄宇宏,李绪强,等.10mm 布袋弹的生物损伤效应特点研究[J].创伤外科杂志,2014,16(03):253-256.
PU L S, HUANG Y H, LI X Q, et al. Experimental study of the biological wounding effects caused by 10mm bag bullet[J]. Journal of Traumatic Surgery, 2014, 16(03): 253-256.
- [28] 蒲利森,李绪强,徐鹏,等.柔性防暴弹致伤威力评估技术研究[J].兵工学报,2016,37(02):253-259.
PU L S, LI X Q, XU P, et al. Study of wounding assessment methods for flexible anti-riot kinetic-energy projectiles[J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(02): 253-259.
- [29] 于小牧,汪送.非致命动能弹头部冲击响应分析[J].兵器装备工程学报,2022,43(04):67-73.
YU X M, WANG S. Analysis of head impact response for non-lethal kinetic energy projectiles[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(04): 67-73.
- [30] Ouyang D, Qin C, Qin X, et al. Numerical study on the blocking effect of skin on Flash-Ball impact and damage assessment[J]. Defence Technology, 2024, 33(03): 532-545.

- [31] Amar O ,NestorN ,CyrilR , et al.Injury risk assessment of non-lethal projectile head impacts[J].The open biomedical engineering journal,2014,8(01):75-83.
- [32] 汪送.防暴动能弹钝性弹道冲击实验测试研究综述[J].兵器装备工程学报,2020,41(12):1-7.
WANG S.Review on experimental testing of blunt ballistic impact of anti-riot kinetic energy projectiles[J].Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(12):1-7.
- [33] 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.
ZHU Y J, ZHAI X J, DONG X D. Research on experiment terminal effect of 97 type 18.4mm kinetic energy pain block bullet [J]. Fire Control & Command Control, 2013, 38(2): 94-97.
- [34] Rothschild M A, Coupland R M, Thali M J. Wundballistik: Grundlagen und anwendungen[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [35] Bir C A , Stewart S J , Wilhelm M .Skinpenetration assessment of less lethal kinetic energy munitions[J].Journal of Forensic Sciences, 2005, 50(6):1426-1429.
- [36] 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(1):7.

Numerical Simulation and Safety Study of Kinetic Energy Projectiles Filled with Lead Sand Impacting Bionic Targets

OUYANG Dihua^{1,2}, LIU Yuhan¹, PAN Jiazheng², LI Zhe¹, GUO Xiaoqiang¹, WANG Song³, LIU Xingyu³

- (1. School of Resource Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710082, Shaanxi, China;*
- 2. School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*
- 3. Equipment Management and Guarantee Institute, Engineering University of Armed Police Force of China, Xi'an 710055, Shaanxi, China)*

Abstract: To enhance the safety of the non-lethal kinetic energy ammunition used in the current 38 mm riot control guns, the finite element - discrete element method was employed to simulate the impact process of the 38mm spherical kinetic energy projectile filled with lead sand on a human body-like target. The modeling method and parameter selection were indirectly verified through a rigid-wall experiment, and data on the deformation process, kinetic energy, velocity, displacement, and energy transfer rate during the projectile impacting on the target were obtained. Based on this, comparative analysis was conducted on different projectile velocities and wall thicknesses, and safety related shooting suggestions were proposed. The results show that the projectile undergoes significant deformation upon impact with the target, transforming into a disc like shape, while the target exhibits a circular indentation, with both deformations being partially recoverable to some extent. The wounding power of the projectile increases with velocity and decreases with wall thickness. The minimum safe shooting distances without causing abdominal skin

penetration injuries for projectile wall thicknesses of 5, 7, and 9 mm are 122.40, 64.62, and 31.26 m, respectively.

Keywords: kinetic projectile; impact dynamics; non-lethal effects; bionic targets

最新录用，非最终出版稿