

低动能易碎弹的致伤威力评估

梅宗书¹, 鲁昌兵², 覃亮¹, 柴明明¹, 陈鹏¹, 陈言坤¹

(1.核生化灾害防护化学全国重点实验室, 北京 102205; 2.中国人民解放军 93147 部队, 四川绵阳 621000)

摘要: 针对当前以橡皮弹为代表的传统防暴动能弹在应用过程中致伤致死概率较高问题, 为提高防暴动能弹的使用安全性, 基于现有非致命武器发射载具, 设计一款兼具壳体可靠破碎和粉体分散释能特点的新型低动能易碎弹。通过对假人靶标和明胶靶标的射击试验, 得到易碎弹钝击下两种靶标冲击动力响应。假人靶标试验中该易碎弹破碎可靠, 动能缓释效果明显, 计算得到的假人不同部位损伤评估指标均在安全阈值内, 通过与橡皮弹钝击试验结果进行对比分析, 表明该型易碎弹在保证致痛性能的同时安全性明显高于橡皮弹; 明胶靶标射击试验中, 相同质量及着靶速度下, 易碎弹和橡胶弹在明胶内部传感器产生的压强峰值相差约一个量级。试验结果表明, 新型低动能易碎弹通过弹丸壳体破碎和弹丸内部填充粉体飞散, 可有效衰减弹丸冲击压力峰值, 大幅降低动能弹致伤威力, 为提高防暴动能弹药使用安全性提供技术支持。

关键词: 易碎弹; 致伤威力; 假人靶标; 动态响应; 破碎释能

中图分类号: TJ012.37 国标学科代码: 13035 文献标识码: A

Experimental Study on Evaluating the Damage Power of Low Kinetic Energy Fragile Bombs

MEI Zongshu¹, LU Changbing², QIN Liang¹, CHAI Mingming¹,
CHEN Peng¹, CHEN Yankun¹

(1. State Key Laboratory of Chemistry for NBC Hazards Protection, Beijing 102205, China;
2. PLA Unit 93147, Mianyang 621000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the problem that traditional anti-riot kinetic energy projectiles represented by rubber bullets have a high probability of injury and fatality in practical application, a novel low-kinetic-energy frangible projectile with the characteristics of reliable shell fragmentation and powder dispersion energy release was designed based on the existing launch platforms of non-lethal weapons, to improve the application safety of anti-riot kinetic energy projectiles. Through shooting tests on anthropomorphic dummy targets and ballistic gelatin targets, the dynamic impact responses of the two targets under the blunt impact of the frangible projectile were obtained. In the dummy target tests, the frangible projectile achieved reliable fragmentation and exhibited a significant kinetic energy slow-release effect; the calculated injury assessment indicators for different parts of the dummy were all within the safety threshold. Comparative analysis with the blunt impact test results of rubber bullets shows that this type of frangible projectile has significantly higher safety than rubber bullets while maintaining effective pain-inducing performance. In the ballistic gelatin target shooting tests, under the same projectile mass and impact

*收稿日期: 2025-12-26; 修回日期: 2026-04-17;

第一作者: 梅宗书 (1991-), 男, 博士, 工程师. E-mail: meizongshu@163.com;

通信作者: 陈言坤 (1985-), 男, 博士, 高级工程师. E-mail: cyk19860110@163.com;

通信作者: 陈鹏 (1990-), 男, 硕士, 高级工程师. E-mail: xjy5555@qq.com。

velocity, the peak pressure generated in the gelatin measured by the internal sensor differed by approximately one order of magnitude between the frangible projectile and the rubber bullet. The test results show that the novel low-kinetic-energy frangible projectile can effectively attenuate the peak impact pressure of the projectile and greatly reduce its injury potential through the fragmentation of the projectile shell and the dispersion of the powder filled inside the projectile, which provides technical support for improving the application safety of anti-riot kinetic energy ammunition.

Key words: frangible projectile; injury potential; anthropomorphic dummy target; dynamic response; fragmentation and energy release

1 引言

防暴动能弹也称防暴致痛弹, 弹丸依靠动能的转移和钝器外伤来实现目标失能, 使其致伤致痛, 从而行动受到抑制^[1]。防暴动能弹的目的是造成可逆性疼痛伤害, 如腹部瘀伤等。但在实际应用中, 发生不可逆损伤甚至致残、致死的案例屡见不鲜^[2]。当前提高防暴动能弹药使用安全性研究主要集中在优化弹体材料、结构方面, 大致经历了硬质弹丸、橡胶弹丸、布袋弹丸和复合型弹丸四个发展阶段, 主要思路为通过材料的弹性变形和能量耗散设计, 降低弹丸致伤威力^[3], 并逐步发展出硬质弹体和软质弹头的复合型弹丸^[4]。复合型弹丸的软质弹头可由橡胶、泡沫等弹性材料组成, 起到撞击吸收和分散能量的目的, 还可综合染色标记、化学刺激剂或爆震效果, 达到动能冲击和特定效能叠加复合的综合性能^[5-8]。不同材料和结构的动能弹优化设计, 虽然一定程度有效降低对人体的穿透损伤和致命风险, 但在实际应用过程中尤其是不可避免存在打击到人体头部位置时, 人员致伤致死概率仍然较大, 因此亟需开展防暴动能弹能量缓释技术。

本文研究的易碎弹丸的作用机理与传统防暴动能弹有很大不同, 易碎弹丸撞击目标后发生破碎, 使得弹丸动能在一定程度上得到衰减和缓释, 从而降低弹丸的动能冲击损伤。本文设计的新型易碎弹, 可在撞击目标后可靠破碎, 弹头前端设计为中空结构并以 μm 级粒径粉末进行填充, 弹丸撞击破碎后粉体发生分散, 从而使弹体动能一部分转化为粉体的分散动能, 进一步作用于目标的动能, 降低弹丸致伤威力, 提高使用安全性。目前, 国内外对易碎弹的受力过程和能量转化过程的研究还存在较大空白, 为制备可用于飞机上反恐防暴的低穿透性易碎弹, 荣吉利^[9]采用金属与硫混合烧结形成复合材料, 并采用数值仿真研究了不同弹头形式对航空玻璃毁伤效果的差异, 结果表明尾部带钢珠空尖弹破碎效果最优, 对靶板损伤最小。由此可以初步说明, 弹头破碎效果越好, 其对目标的损伤越小, 分析原因有两个: 一是破碎消耗子弹能量; 二是破碎导致对目标的损伤更分散, 其中第二个因素可以从峰值压力和冲击时长的改变进行定量研究。

防暴弹威力评估需要选择适当的靶标进行模拟试验, 研究中通常采用明胶靶、假人靶和生物靶。覃彬^[10]通过球形橡皮弹射击活体猪弹道冲击试验, 提出钝击作用过程的水波效应、皮肤拉伸效应。罗棕木^[11]利用标准人体模型开展多种 TNT 当量的空中静爆试验, 获得头部损伤标准 (head injury criterion, HIC) 和头部撞击功率 (head impact power, HIP) 值, 定量分析头部损伤的风险等级。汪送^[12]基于胸部粘性准则 (viscous criterion, VC), 通过构建胸部损伤评估有限元模型, 揭示了橡皮弹对胸部的钝击损伤不在于冲击本身, 而在于能量的传递与扩散。本文通过假人靶标钝击试验, 获取靶标内置传感器动力响应参数, 并计算头部损伤标准值 γ_{HIC} 、胸部粘性损伤峰值 VC_{max} , 定量评估低动能易碎弹致伤威力。选取假人头部受力参数值, 与同等工况下传统橡皮弹的头部受力参数进行对比, 分析易碎动能弹在满足致痛拒止防暴性能的前提下安全性能的提升效能。通过明胶靶标测试, 得到模拟生物靶标钝击下的生物学特征, 开展易碎动能弹与传统橡皮弹明胶靶钝击试验, 对比分析两种弹丸撞击明胶靶标的瞬时压力波时程曲线, 定量分析易碎弹相比于传统橡皮弹在安全性方面的性能差异, 系统全面评估易碎弹丸的致伤威力。

2 人体特征假人射击试验

利用 30m 室内靶道开展射击试验，试验设备主要有：CHN50-A 男性假人靶标、高速摄像系统、测速系统、测压系统、QBS 09 式 18.4mm 霰弹枪、18.4mm 低动能易碎弹。选取霰弹枪为发射平台，低动能易碎弹为杀伤元，霰弹枪如图 1 所示，易碎弹如图 2 所示，易碎弹结构参数如表 1 所示。



图 1 QBS 09 式 18.4mm 霰弹枪
Fig.1 QBS-09 18.4mm Military Shotgun



图 2 18.4mm 低动能易碎弹
Fig.2 18.4 mm frangible low-energy cartridge

表 1 低动能易碎弹结构参数

Table 1 Structural parameters of low-kinetic-energy frangible projectile

直径 d/mm	质量 m/g	长 l/mm	密度 $\rho/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	粉体装填量 m_p/g	粉体粒径 $\text{MMD}/\mu\text{m}$
18.4	8.3	40	1.15	5.66~5.82	9.8

弹丸采用“弹体+风帽作为壳体，内装微粉”结构，根据材料抗压强度、射击强度和对不同目标射击的破碎情况，壳体采用聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate, PMMA)，为易碎非金属材料，弹体尾部设有尾翼，弹丸飞行时起稳定作用，弹丸结构设计如图 3 所示。弹丸撞击目标人员时弹丸冲击致痛形成拒止效果，同时壳体破碎致使装填的微粉分散进一步释能，本文采用滑石粉填充弹丸开展动能弹钝击靶标试验。

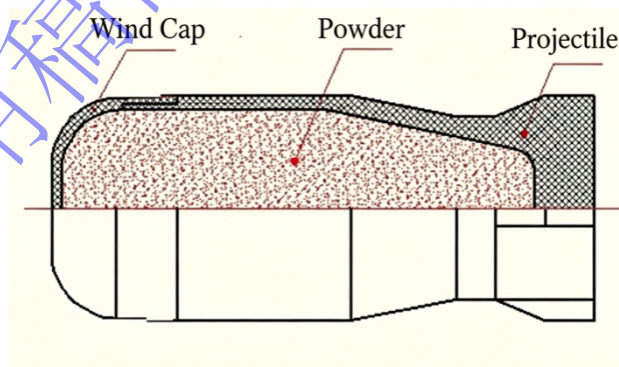


图 3 弹丸结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of projectile structure

2.1 CHN50-A 男性假人靶标

选用 CHN50-A 男性假人 (ZG1z50-000-00_SAF, 湖南赛孚汽车科技股份有限公司) 为模拟靶标，靶标内安装多种传感器，测试动能弹冲击作用下的力、力矩、加速度、变形量等力学参数，其传感器安装位置及参数分别如图 4、表 2 所示，假人穿戴 FDY-15 战术防弹衣 (北京安泰富源科贸有限责任公司) 防护等级 GA 2-3 级。

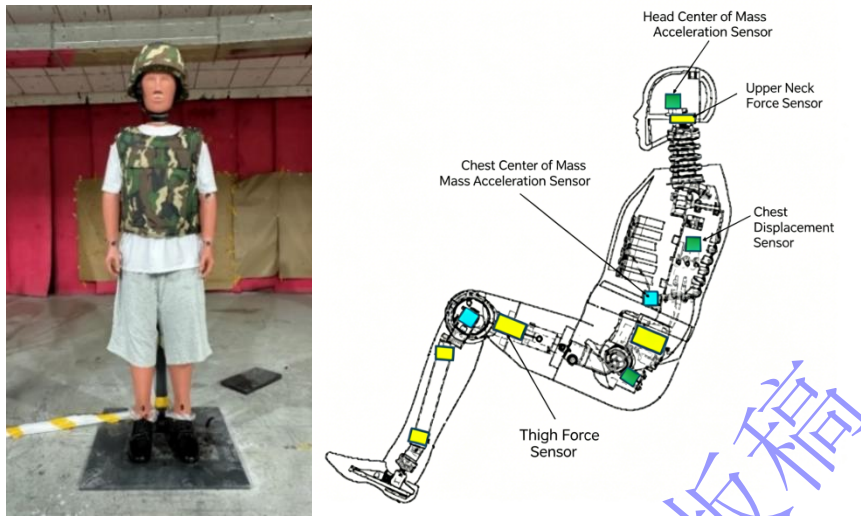


图 4 CHN50-A 男性假人靶标及传感器安装位置
Fig.4 CHN50-A male test dummy target and sensor location

表 2 CHN50-A 男性假人内部传感器参数
Table 2 Internal sensor parameters of CHN50-A male dummy

传感器	安装位置	测量数据	传感器数量 × 通道数	测量范围
头部加速度	头部质心	加速度	3×1	241~314/g
胸部加速度	胸部质心	加速度	3×1	241~314/g
胸部位移	胸部	变形量	1	50~68mm
大腿力	大腿骨下端	力	2×1	4.4~5.4kN

2.2 试验设计

在距离假人 5 米位置瞄准假人各不同部位进行射击，试验过程中通过 1 台高速摄像机用于拍摄弹丸与假人靶标相互作用过程，光幕靶置于距靶标 2m 处测量入靶速度，假人靶标保持立姿状态置于弹道方向，光幕和光源置于距靶标 1m 处，高速摄像机置于一侧距靶标 1.5m 处，高速摄像机镜头轴线与射击轨迹正交，动能弹钝击假人靶标试验原理及试验现场如图 5 所示。同时，通过数据采集系统记录钝击头部、胸部等关键部位瞬态形变和压力特性。

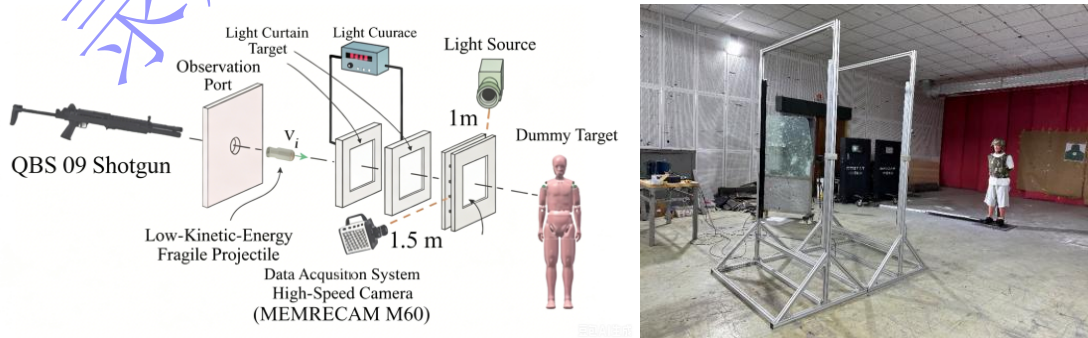


图 5 易碎动能弹钝击假人试验示意及实景

Fig.5 Schematic diagram and field test of a frangible kinetic-energy projectile blunt-impact dummy test

2.3 损伤评估标准

防暴动能弹对人体的冲击损伤评估标准主要有胸部粘性准则 $VC^{[13]}$ ，美军人体躯干损伤钝性标准 (blunt criterion, BC)，以及用于汽车安全考核的头部损伤标准 HIC，对于动能弹撞击头部损伤，主要以北约的《非致命动能弹头部冲击损伤评估》开展损伤评估。国内外学者通过对动物胸部钝击试验进行研究，依据软组织损伤耐受性与组织在冲击变形过程中吸收的能量或粘性反应相关，提出粘性标准以评估冲击载荷作用下生物组织的损伤程度。为预测 18.4mm 易碎弹致伤威力，选用胸部粘性损伤峰值 VC_{max} 评估其对假人胸腹部钝击损伤。 VC_{max} 可表示为胸腔变形速率与挤压变形速度的乘积，由粘性响应曲线的最大值定义，即：

$$VC_{max} = \max \left(v(t) \cdot \frac{C(t)}{C_0} \right) \quad (1)$$

式中， $C(t)$ 为胸部位移； $v(t)$ 为胸部变形速度，其等于 $C(t)$ 对 t 的微分； $C_0=0.236m$ 为人体胸部的初始厚度。 VC_{max} 值为 0.8m/s 可作为参考值，对应着 50% 概率发生胸部肋骨骨折损伤。

头部损伤标准 HIC 是在头部冲击剧烈程度指数 (severity index, SI) 基础上修改提出的^[14]，关系函数如下：

$$\gamma_{HIC} = \left[(t_2 - t_1) \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a(t) dt \right)^{2.5} \right]_{max} \quad (2)$$

式中， $a(t)$ 为头部合成加速度 (g)； t_1 、 t_2 为积分区间，为 γ_{HIC} 最大值时刻，该值综合考虑时间因素和头部的加权指数 2.5，并将其安全阈值设定为 700 (取 $t_2-t_1=15ms$)， γ_{HIC} 超过 700 代表 20% 的 AIS 3+ 头部冲击损伤风险。

2.4 试验结果分析

2.4.1 假人靶标各部位受力分析

试验对假人胸部进行目标靶射击，记录不同部位加速度、位移、力矩、压强峰值等动力学参数，计算 VC_{max} 、 γ_{HIC} 两种损伤评估指标。易碎弹对胸部钝击过程如图 6 所示，高速相机得到易碎弹着靶速度为 71.6m/s，着靶位置为假人胸部中间位置，弹体撞击胸部导致壳体破碎后释放出滑石粉，产生粉尘飞散效果。

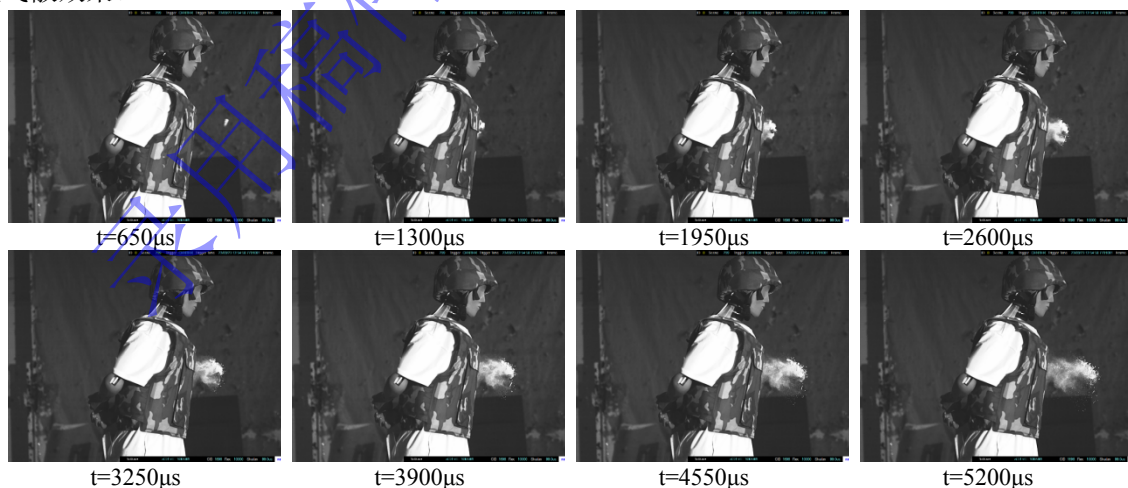


图 6 假人心脏着靶过程

Fig.6 The process of the dummy heart reaching the target

以假人为参照， x 正方向为正面向前， y 正方向为右手侧， z 正方向为正上方，所产生的头部 x 、 y 、 z 方向及合成加速度变化规律如图 7 所示。由图可知，头部各方向加速度呈周期波动变化，头

部合成加速度的变化幅度和周期与头部 x 方向加速度较为一致，说明假人胸部受钝击时，假人头部前后方向加速度变化占主导作用，冲击瞬间头部 z 方向加速度最大，表明此时头部向下的加速度相比于头部向前的加速度要显著。头部 x 方向加速度最大为 $-0.643g$ ， y 方向加速度最大为 $-0.201g$ ， z 方向加速度最大为 $-1.169g$ ，合成加速度最大为 $1.174g$ ， γ_{HC} 值为 0.0044 ，在安全阈值内。

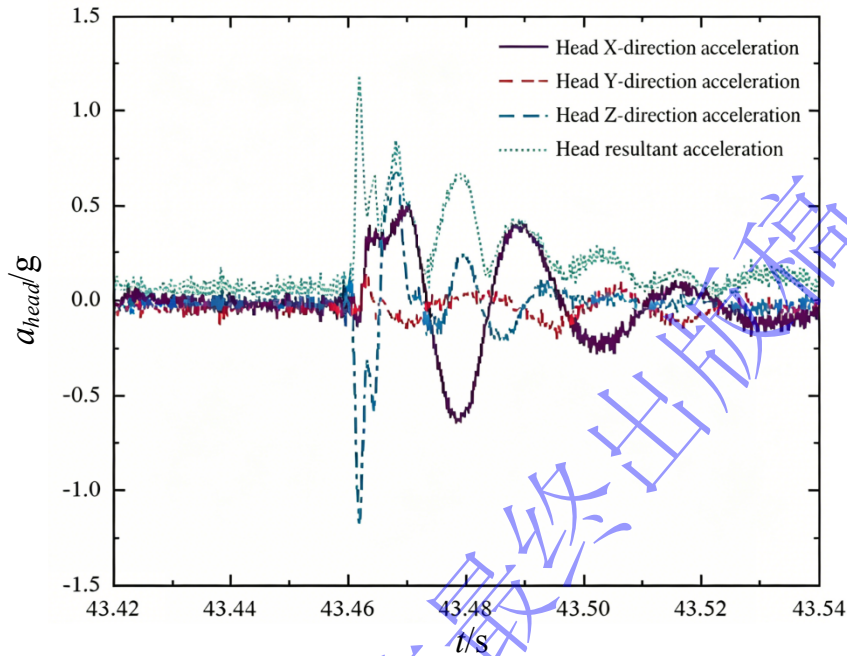
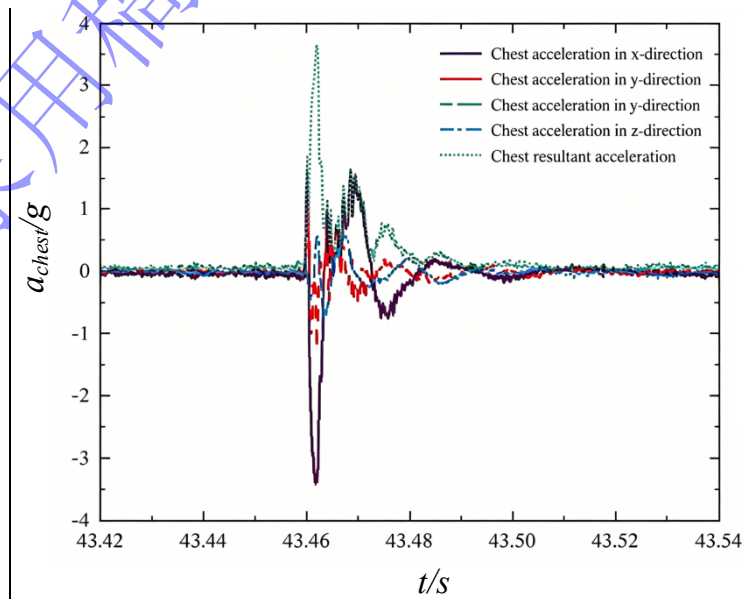


图 7 头部加速度时程曲线

Fig.7 The head acceleration time-history curve

胸部 x 、 y 、 z 方向及合成加速度变化规律如图 8(a)所示，相比于头部，胸部加速度变化幅度更大，波动周期更短，说明钝击胸部时，胸部加速度变化更为剧烈，同时因为质量更大，加速度趋于平缓的时长更短。胸部变化胸部位移变化曲线如图 8(b)所示，由图可知，胸部位移非波动变化，而是呈周期性突变趋势。胸部 x 方向加速度最大为 $-3.415g$ ， y 方向加速度最大为 $-1.254g$ ， z 方向加速度最大为 $-0.775g$ ，合成加速度最大为 $3.656g$ ，胸部位移最大为 $-1.145mm$ ，粘性损伤峰值 VC_{max} 为 $0.0035m/s$ 。



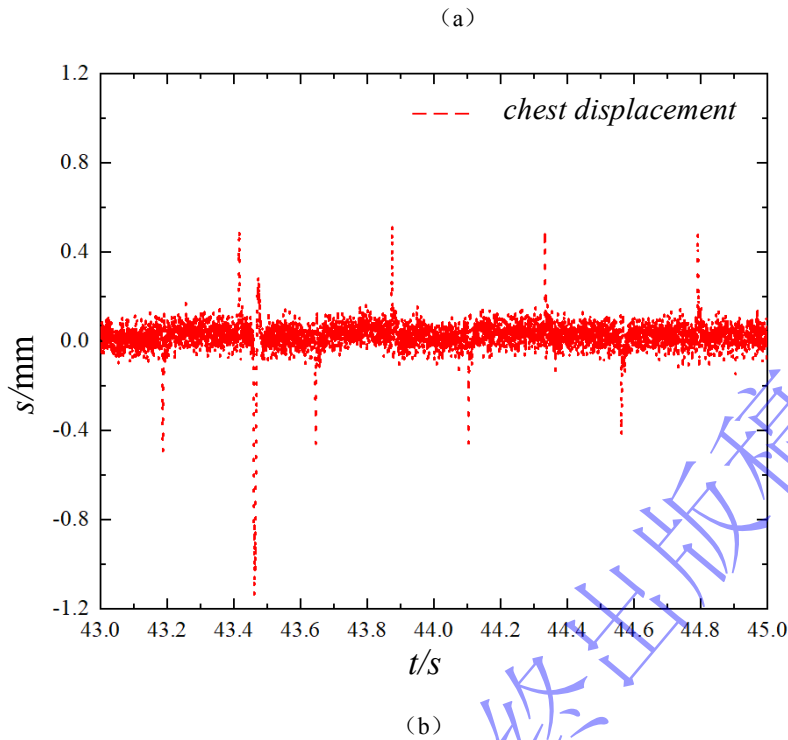


图 8 胸部动态响应时程曲线：(a) 加速度；(b) 位移

Fig.8 Time-history curve of chest dynamic response: (a) acceleration; (b) displacement

2.4.2 致伤威力对比分析

文献[15]中对不旋转尾翼稳定橡皮弹进行钝击试验，弹丸垂直冲击刚性壁，由刚性壁上的传感器获取冲击力信号，射击工况及弹丸参数如表 3 所示。将橡皮弹冲击刚性壁测量的最大冲击力换算成头部最大作用力（式 3），将其与易碎弹冲击假人头部产生的最大作用进行比较（式 4），可得易碎弹相较于橡皮弹的安全性优劣。

$$F_h = 0.677F_w^{0.742} \quad (3)$$

$$F'_h = m_h a_h \quad (4)$$

式中， F_h 为橡胶弹钝击实验中在人体头部最大接触力， F_w 为弹性冲击刚性壁的最大力， F'_h 为易碎弹假人试验中假人头部最大接触力， m_h 为假人头部质量， a_h 为假人头部传感器测得头部加速度。

在易碎弹钝击假人头部的试验中，测得假人头部合成加速度为 2.71g，假人头部质量参照结构参数为 4.2kg，通过式（4）可得头部最大作用力如表 3 所示，由表可知，相同钝击工况下，易碎弹对于头部的最大作用力只有橡皮弹的 1/4 左右，且头部加速度 2.71g 可产生明显痛感^[16]。易碎动能弹相对于传统橡皮弹，在相同冲击动能条件下，由于壳体破碎和粉体分散，使得冲击动能在打击头部时有效衰减及缓释，可大幅降低目标损伤威力，在保证致痛拒止效果的前提下，改善目标冲击受损情况，提高非致命弹药的使用安全性。

表 3 假人靶标头部受力

Table 3 Head impact force of dummy target

弹丸名称	弹丸质量/g	着靶速度/(m·s ⁻¹)	刚性壁最大冲击力/N	头部最大作用力/N
18.4mm 橡皮弹	8.54	73.84	6108.8	423.24
	8.57	74.31	6145.3	438.20
	8.57	74.15	6087.8	435.13

18.4mm 易碎 动能弹	8.31	75.9	/	111.54
------------------	------	------	---	--------

3 明胶靶撞击试验

为进一步评估低动能易碎弹致伤威力，开展易碎弹射击明胶靶标动态响应试验，基于明胶靶标嵌入式压力传感器，获得靶标内部所受冲击压强大小，并通过高速相机，表征弹丸破碎及粉体分散形貌。

3.1 明胶靶标设计

明胶靶标主要由一定比例明胶颗粒与水混合加热熬制而成，制备工艺主要包括浸泡、混合、水浴恒温、注模、冷却、恒温、脱模、包裹等多个环节。首先选取包头东宝照相明胶(type B, 250 Bloom)，将明胶颗粒放入冷水浸泡，使其膨化，再将膨化后明胶倒入水浴加热炉，加热至 60℃，直至充分溶解。将均匀的明胶溶液水浴保温 1h 后，浇注在模具中注模，随后进行冷却，并置于 4℃ 保温箱中放置 24h 以上再进行脱模，最后将脱模后的明胶试件置于 4℃ 保温箱中保温 1h 左右即可使用，靶标制作流程如图 9 所示。

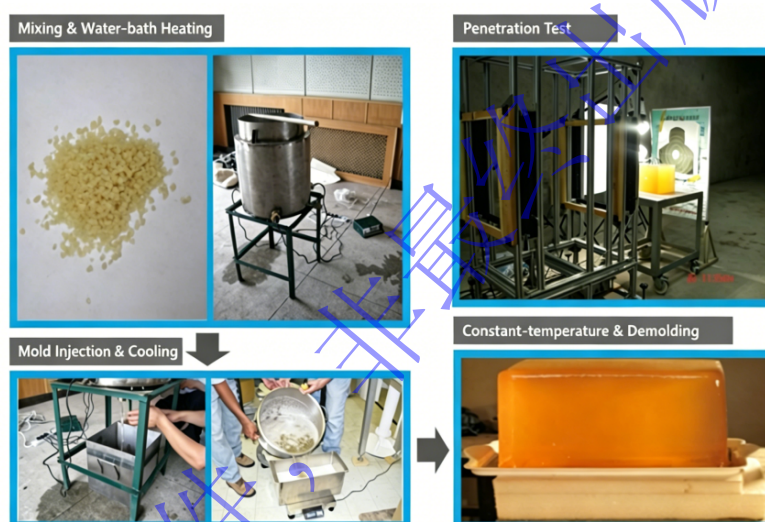


图 9 明胶靶标制备过程

Fig.9 Gelatin target preparation process

明胶靶标压力测试拟选用 KISTLER 公司的 Type 211B6 传感器，其头部最大直径 6.4mm，量程 0.34MPa，固有频率 250kHz，该系列传感器具有低阻抗、高电平电压信号、高固有频率等特点。为获得易碎弹钝击明胶靶标过程中多点压力效应变化过程，靶标中以线性方式布设 5 个传感器，传感器与弹着面间距 10cm，其中 1 个传感器位于明胶靶标弹着面中心，其余 4 个传感器位于以其为中心，边长为 10cm 的正方形的四角，明胶靶标预埋传感器如图 10 所示。

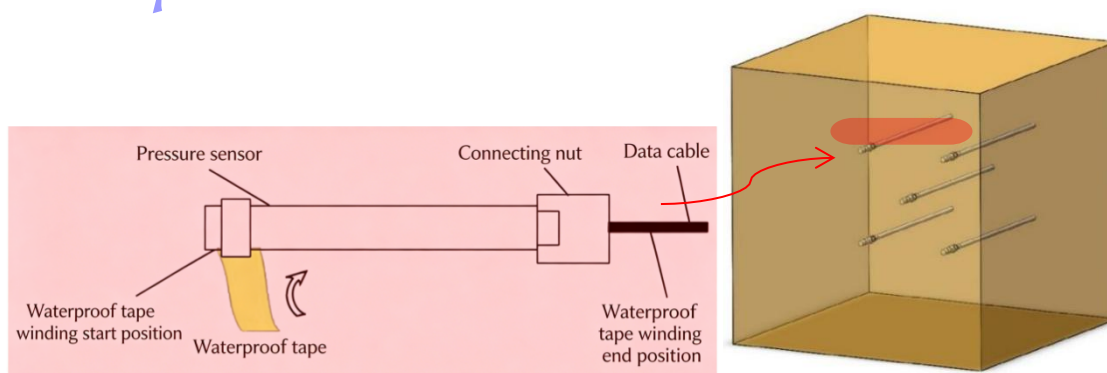


图 10 明胶靶传感器预埋

Fig.10 Pre-embedding of sensors in ballistic gelatin target

3.2 明胶撞击试验

试验选用 4℃, 20%浓度明胶作为靶标 (尺寸为 300mm×300mm×300mm), 单层猪皮和带脂肪的猪皮作为皮肤模拟物, 为保证皮肤与明胶紧密接触, 使用透明胶带缠绕将猪皮紧固在明胶上, 试验原理如图 11 所示。天幕靶置于距靶标 2m 处测量入靶速度, 靶标沿弹道方向置于综合靶架上。通过 1 台高速摄像机进行拍摄 (用于拍摄着靶状态和明胶空腔), 其置于距明胶另一侧 1.5m 处, 确保高速摄像机镜头轴线与弹道在同一平面内, 且与弹道方向垂直。

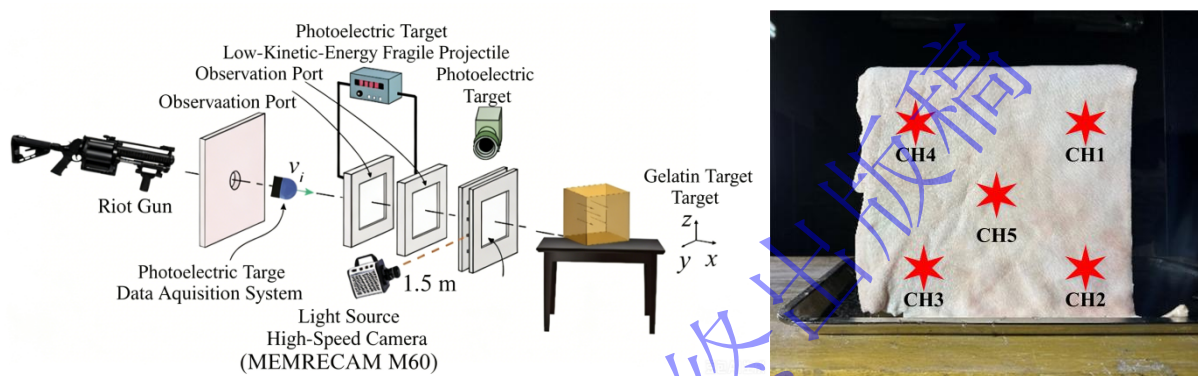


图 11 钝击明胶靶标试验原理及预埋传感器正向位置示意图

Fig.11 Schematic diagram of test principle for blunt impact on ballistic gelatin target and forward placement of pre-embedded sensors

3.3 试验结果

3.3.1 明胶靶钝击形貌分析

易碎弹着靶速度为 76.2m/s 时, 钝击带单层猪皮的明胶复合靶标, 靶标皮肤撞击点形貌如图 12(a) 所示, 撞击过程易碎弹破碎形貌如图 12(b)~(g) 所示。

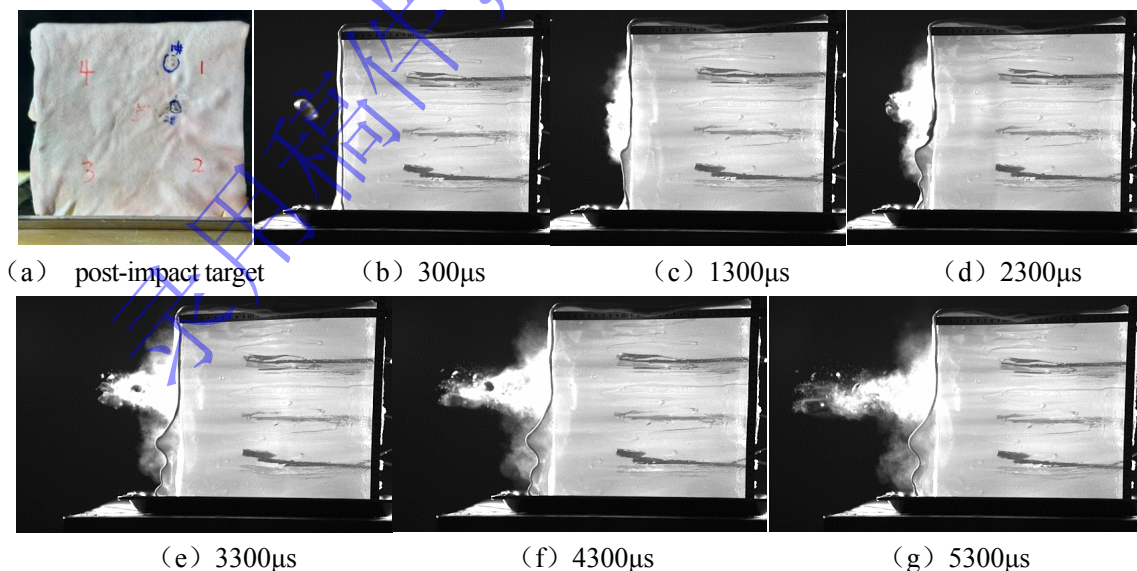


图 12 带猪皮明胶靶标钝击过程

Fig.12 Blunt impact process of porcine skin-covered ballistic gelatin target

由图 12(a)可知, 易碎弹冲击猪皮肤由于破碎耗能, 没有产生皮肤贯穿及破裂, 显示易碎弹具有较高的安全性。由图 12(b)~(g)可知, 易碎弹冲击明胶靶后, 壳体产生可靠、充分破碎, 碎片反弹率

高, 弹内粉体分散均匀, 耗能效应明显。明胶靶标受冲击后产生明显的应力波, 且应力波主要出现在弹着点的下方位置, 分析原因为靶标下方为固定壁面, 其他壁面为自由面。

3.3.2 动力学特性对比分析

开展易碎动能弹与传统橡皮弹明胶靶钝击试验, 提取两种弹丸撞击明胶靶标的瞬时压力波时程曲线, 定量分析易碎弹相比于传统橡皮弹在安全性方面的性能优劣。弹丸在撞击明胶靶标瞬间产生的压力波会在压力传感器产生迅速上升且呈尖峰状的压力曲线, 上升速率较快, 不同位置传感器测得压力峰值如表 4 所示。试验两种弹均射击 10 发, 橡皮弹速度平均值为 99.3m/s, 标准差为 4.15, 易碎弹 12 速度平均值 73.7m/s, 标准差为 3.12。

表 4 钝击试验压强对比

Table 4 Pressure comparison of blunt impact tests

靶标	弹药类型	质量/g	速度/m·s ⁻¹	动能/J	CH1/MPa	CH2/MPa	CH3/MPa	CH4/MPa	CH5/MPa
带皮肤	易碎弹	8.9	73.7	24.097	0.035	0.065	0.025	0.04	0.033
明胶靶	橡皮弹	9.0	99.3	44.408	0.599	0.156	0.09	0.334	0.412

对比试验中, 分别采用 09 式 18.4mm 霰弹枪和 97 式 18.4mm 防暴枪发射易碎弹和橡皮弹, 在射击距离均为 5 米的条件下, 易碎弹和橡皮弹着靶速度略有差别, 由表 4 可知, 易碎弹比橡皮弹着靶速度低 25.8%~30.6%, 动能约为橡皮弹的 1/2。明胶内部不同位置传感器所测的易碎弹压力峰值明显低于橡皮弹, 与后者的比值低于 3/7, 大多集中在 1/9 乃至更低(一个数量级), 试验结果可充分证明弹体破碎释能效果明显, 另外壳体内粉体飞散, 进一步消耗动能。

4 结论

动能防暴弹药的安全性是其区别于常规毁伤弹药最显著的特点, 当前提高防暴动能弹药的安全性技术手段主要集中在优化弹体材料方面, 在降低弹丸致伤威力方面未有明显进展, 同时对于采用弹体头部破碎的方式进行动能缓释、衰减试验研究较少, 本文创新设计易碎材料和粉体充填空腔结构弹头, 开展基于多种靶标的低动能易碎弹冲击试验研究, 通过高速摄影得到钝击明胶靶标易碎弹壳体可靠破碎、粉体分散形貌, 通过假人、明胶两种靶标钝击试验, 对比分析易碎动能弹与橡皮弹的冲击动力响应特性, 揭示易碎动能弹可有效降低传统弹丸致伤威力的优异性能, 为提高防暴动能弹药安全性提供有力技术支撑。

参考文献

- [1] 战仁军, 汪送, 马永忠. 非致命武器装备[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
ZHAN R J, WANG S, MA Y Z. Non-lethal Weapons [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [2] OLSON K A, HASELDEN L E, ZAUNBRECHER R D, et al. Penetrating injuries from "less lethal" beanbag munitions[J]. The New England Journal of Medicine, 2020, 383(11): 1081-1083. DOI: 10.1056/NEJMc2025923.
- [3] 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(1): 4. DOI: 10.1007/s41314-023-00062-7.
- [4] SCHALET G, DAVIS B, GOMEZ M, et al. Acute cardiac tamponade secondary to nonpenetrating injury from gunshot with beanbag round: A case report and literature review[J]. Trauma Case Reports, 2022, 42: 100733. DOI: 10.1016/j.tcr.2022.100733.

- [5] HAAR R J, IACOPINO V, RANADIVE N, et al. Health impacts of chemical irritants used for crowd control: A systematic review of the injuries and deaths caused by tear gas and pepper spray[J]. *BMC Public Health*, 2017, 17(1): 831. DOI: 10.1186/s12889-017-4814-6.
- [6] SCHENCK C S, LOKESHWAR S D, RIEDEL M D, et al. Penetrating deep pelvic injury due to "less-lethal" beanbag munitions: A case report and policy implications[J]. *Trauma Surgery & Acute Care Open*, 2021, 6(1): e000754. DOI: 10.1136/tsaco-2021-000754.
- [7] PEARL R C, TORBATI S, GEIDERMAN J M. Kinetic projectile injuries treated during civil protests in Los Angeles: A case series[J]. *Clinical Practice and Cases in Emergency Medicine*, 2021, 5(4): 385-389. DOI: 10.5811/cpcem.2021.7.52885.
- [8] SELIM M S, EL-SAFITY S A, SHENASHEN M A, et al. Advances in polymer/inorganic nanocomposite fabrics for lightweight and high-strength armor and ballistic-proof materials[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 493: 152422. DOI: 10.1016/j.cej.2024.152422.
- [9] 荣吉利, 葛迅, 李健, 等. 不同弹头形式的易碎弹冲击航空有机玻璃的数值分析[J]. *振动与冲击*, 2015, 34 (1): 200-205. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.01.035.
RONG J L, GE X, LI J, et al. Numerical analysis on fragile projectile with different warheads impacting against aviation organic glass [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2015, 34 (1): 200-205. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2015.01.035.
- [10] 覃彬, 王建民, 熊漫漫, 等. 非致命动能弹对目标作用的钝击水波效应与致伤机制研究[J]. *北京理工大学学报*, 2017, 37 (s2): 132-136.
QIN B, WANG J M, XIONG M M, et al. Research on water wave effect and injury mechanics for kinetic less-lethal bullet impacting target [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2017, 37 (s2): 132-136.
- [11] 罗棕木, 李克, 陈浩, 等. 爆炸冲击波作用下假人头部加速度响应测试与损伤分析[J]. *爆炸与冲击*, 2024, 44 (12): 121435. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0242.
LUO Z M, LI K, CHEN H, et al. Acceleration response test and damage analysis of dummy head under explosion shock wave [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2024, 44 (12): 121435. DOI: 10.11883/bzycj-2024-0242.
- [12] 汪送, 战仁军, 段雄义. 橡皮弹胸部钝击损伤的有限元法评估[J]. *系统仿真学报*, 2020, 32 (9): 1762-1770. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0119.
WANG S, ZHAN R J, DUAN X Y. Finite element method evaluation on chest blunt injury by rubber projectile[J]. *Journal of System Simulation*, 2020, 32 (9): 1762-1770. DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0119.
- [13] VIANO D C. Biomechanics of head injury-toward a theory linking head dynamic motion, brain tissue deformation and neural trauma[R]. SAE Technical Paper, 1988.
- [14] VERSACE J. A review of the severity index[C]//Proceedings of 15th Stapp Car Crash Conference. San Diego: Society of Automotive Engineers, 1971: 771-796. DOI: 10.4271/710881.
- [15] 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 (4): 67-73. DOI: 10.11809/bqzb-gcxb2022.04.012.
YU X M, WANG S. Head impact response analysis of non-lethal kinetic energy projectiles [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43 (4): 67-73. DOI: 10.11809/bqzb-gcxb2022.04.012.
- [16] HAN D, PARK M, CHOI J, et al. Assessment of pain onset and maximum bearable pain thresholds in physical contact situations[J]. *PLOS ONE*, 2022, 17(5): e0268057. DOI: 10.3390/s22082996.