论文

球形破片侵彻明胶运动模型对比研究

刘坤¹, 宁建国¹, 吴志林², 李忠新², 任会兰^{1*}

1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094

* E-mail: huilanren@bit.edu.cn

收稿日期: 2017-06-05; 接受日期: 2017-09-05; 网络出版日期: 2017-09-27

国家自然科学基金(批准号: 11372137, 11572049, 11602025)资助项目

摘要 为准确描述破片与目标相互作用, 揭示致伤机理, 将Sturdivan, Segletes, Liu侵彻模型与考虑明胶应变率效应的改进模型进行对比, 并分析模型差异. 分别选取 $\phi 3$, $\phi 4$ 和 $\phi 4.8$ mm球形破片为杀伤元, 对破片在明胶中运动规律进行了实验研究. 同时, 对4种运动模型进行数值计算, 并与实验结果进行了对比分析. 结果表明, 考虑应变率效应的改进运动模型理论值与实测值误差较小, 一致性较好, 能较为准确描述球形破片在明胶中运动规律, 可为轻武器弹药设计和战伤救治提供理论参考.

关键词 球形破片, 侵彻, 明胶, 运动模型, 致伤机理

1 引言

目前, 杀伤暴露有生目标的榴弹, 多采用预制破片结构. 由于球形破片具有良好的工艺性, 弹体爆炸后破片形状、质量及弹道一致性较好, 且体积小, 散布密集, 命中率高. 因此, 在杀伤枪榴弹中得到较为广泛的应用^[1-5].

在现代战争中, 破片杀伤较为常见, 各种弹药破片造成的伤亡率高达80%. 近代小型杀伤枪榴弹中的球形破片质量逐渐减小、速度不断提高. 因此, 研究不同质量、不同速度球形破片的致伤效应, 对于战伤救治及弹药设计具有十分重要的意义.

创伤弹道学作为终点弹道学一部分, 它是研究弹头、破片等杀伤元在人体内运动规律及其致伤作用的一门学科^[6-8]. 长期以来, 主要借助于非生物模拟实验

对枪弹致伤效应展开研究. 由于实验现象复杂, 影响因素较多, 无法准确评测枪弹致伤效果和杀伤威力. 随着国内外枪弹迅速发展, 亟待建立评测致伤效应的理论模型. 明胶作为创伤弹道研究中一种常见的非生物模拟物, 是一种与肌肉组织非常相似的黏弹性介质, 且均匀透明, 能较好再现枪弹侵彻肌肉组织过程, 已成为创伤弹道研究的标准介质之一^[9-19]. 近几十年, 许多学者已对球形破片侵彻明胶运动模型展开研究. Dzimirian^[20]和Stone^[21]考虑了压强阻力、黏性阻力、塑性流阻力对破片的作用, 认为球形破片侵彻明胶过程由Poncelet方程描述, 但未给出模型具体形式. Sturdivan^[22]认为球形破片在明胶中仅受到惯性阻力和黏性阻力的作用, 建立了破片(球形、立方形、圆柱形、薄片形)侵彻明胶的黏性流体阻力模型. Nennstiel^[23]假设球形破片在明胶中仅受到惯性阻力作用, 且阻力系数为与速

引用格式: 刘坤, 宁建国, 吴志林, 等. 球形破片侵彻明胶运动模型对比研究. 中国科学: 技术科学, 2017, 47: 1081-1092
Liu K, Ning J G, Wu Z L, et al. A comparative investigation on motion model of spherical fragments penetration into gelatin (in Chinese). Sci Sin Tech, 2017, 47: 1081-1092, doi: 10.1360/N092017-00168

度和明胶特性相关的函数. Peters^[24]将破片在明胶中受力简化为惯性阻力和明胶自身强度, 且明胶强度的大小取决于特征速度. Segletes^[25]通过改进Sturdivan模型, 考虑了侵彻速度对强度阻力的影响, 提出一种球形破片侵彻明胶简化运动模型. 可见, 现有研究主要考虑破片受惯性阻力和黏性阻力作用, 忽略明胶抗力影响, 而同时考虑3种阻力及明胶应变率效应的运动模型未见报道. 课题组前期在杀伤元侵彻明胶运动模型方面已开展大量工作^[10-16], 取得了一定成果. 先后建立了同时考虑惯性阻力、黏性阻力及明胶抗力的球形破片侵彻明胶黏性流体运动模型^[16](为表述简明, 下文统称为Liu模型); 基于明胶力学性质, 引入应变率效应影响的球形破片侵彻明胶改进运动模型.

本文在引入应变率效应的改进运动模型基础上, 与Sturdivan, Segletes, Liu模型进行对比, 分析模型差异, 并进行球形破片侵彻明胶实验, 对比分析实验结果和理论值, 验证模型的合理性和准确性, 力求为弹药设计和致伤研究提供理论参考.

2 运动模型

2.1 改进运动模型

破片在明胶中的运动规律主要受靶标作用力影响, 其受力情况复杂, 主要表现为惯性阻力、黏性阻力、明胶抗力, 如图1所示.

(1) 惯性阻力

侵彻过程中, 包裹破片的明胶质点势必在其推动下同时向前运动, 这部分明胶质点从静止状态至向前运动状态首先需克服自身惯性, 这种惯性作用体现为惯性阻力.

(2) 黏性阻力

图1 (网络版彩图)球形破片侵彻明胶过程受力分析

由于明胶具有黏性, 破片运动过程中周围形成“边界层”, 使其受到黏性切应力作用, 亦在其表面产生摩擦力, 体现为黏性阻力.

(3) 明胶抗力

明胶自身具有抵抗破坏的能力, 体现为明胶抗力.

明胶为高密度各向同性黏弹性介质($\rho_{\text{明胶}}/\rho_{\text{空}} \approx 822$), 具有触变性, 在一定压力下可发生液化. 破片周围由边界层包围, 即存在一薄层黏性流体, 且该边界层为固态与液态并存的混合态明胶, 破片运动过程如图2所示.

建模前引入如下基本假设: (1) 破片为刚体; (2) 忽略破片重力; (3) 明胶为不可压缩流体; (4) 明胶为应变率相关材料.

由黏性流体力学理论可知惯性阻力与速度平方成正比, 黏性阻力与速度成正比. 根据牛顿第二定律破片在明胶中受力情况可描述为

$$\begin{cases} F = -m \frac{dv}{dt}, \\ F = F_I + F_V + F_r, \\ F_I = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_I, \\ F_V = C_V A v, \\ F_r = A \sigma_Y, \end{cases} \quad (1)$$

式中, F 为破片所受阻力, F_I 为惯性阻力, F_V 为黏性阻力, F_r 为明胶抗力, ρ 为明胶密度, m 为破片质量, v 为破片速度, A 为破片横截面积, C_I 为惯性阻力系数, C_V 为黏性阻力系数, σ_Y 为明胶剪切屈服强度.

考虑到明胶材料的应变率效应, 假设其屈服强度为

$$\sigma_Y = \sigma_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^2 \right], \quad (2)$$

图2 球形破片在明胶中运动过程

式中, $\dot{\varepsilon}$ 为靶标在侵彻速度作用下的应变率, $\dot{\varepsilon}_0$ 为特征应变率, σ_0 为明胶在特征应变率时的屈服强度.

由于应变率与侵彻速度有关, 应变率可表示为

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2v}{d}, \quad (3)$$

式中, d 为破片侵彻明胶过程中受作用区域的特征长度, 通常为破片直径^[26].

联立方程式(1)~(3), 运动方程可表示为

$$-m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} C_1 \cdot \rho \cdot A_0 \cdot v^2 + C_v \cdot A_0 \cdot v + A_0 \cdot \sigma_0 \cdot \left[1 + \left(\frac{v}{v_0} \right)^2 \right]. \quad (4)$$

2.2 Sturdivan运动模型

结合破片在明胶中运动特点, Sturdivan^[23]提出了破片(球形、立方形、圆柱形、薄片形)侵彻明胶的黏性流体阻力模型, 建模前引入如下假设:

- (1) 明胶为不可压缩流体;
- (2) 忽略明胶自身强度对破片作用.

破片在明胶中运动方程可表示为

$$-m \frac{dv}{dt} = C_1 \rho A v^2 + C_v \frac{\mu}{b} A v, \quad (5)$$

式中, μ 为速度系数, b 为边界层厚度.

μ 和 b 为与明胶有关的未知量, 可通过实验确定. 对于钢和钨2种材料制成的破片(质量为0.031~14.7 g), 模型参数如表1所示.

该模型在一定速度范围内(100~1500 m/s)可用来计算破片侵彻深度、速度衰减、能量损失等, 但不适用于高速和低速阶段^[23].

2.3 Segletes运动模型

Segletes^[26]认为明胶为应变率相关材料, 并将球形破片在明胶中受力与应变率关联, 运动方程可表示为

$$\begin{cases} \frac{F}{A_p} = \frac{1}{2} \rho \left[b v^2 + v_c^2 \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_c} \right)^\alpha \right], \\ \dot{\varepsilon} = \frac{2v}{d}, \end{cases} \quad (6)$$

式中, A_p 为破片浸入面积, v_c 为特征速度, $\dot{\varepsilon}_c$ 为特征应变率, b 和 α 为经验常数.

模型参数可通过实验数据拟合获得, 如表2所示.

表1 Sturdivan模型参数^[23]

破片类型	C_1	$C_v \frac{\mu}{b}$
球形	0.1	3000
立方形、圆柱形	0.175	3000
薄片形	0.15	5000

表2 Segletes模型参数^[26]

参数	数值
α	0.5
b	0.34
$d_c(\text{mm})$	4.445
$v_c(\text{m/s})$	85

该模型对不同直径破片($\phi 2.38 \sim 6.35 \text{ mm}$)在一定速度下(50~2229 m/s)侵彻明胶运动规律进行了计算, 并与实验进行了对比^[26].

2.4 Liu运动模型

刘坤等人^[16]针对现有模型仅考虑惯性阻力和黏性阻力的局限性, 建立了同时考虑惯性阻力、黏性阻力及明胶抗力的球形破片侵彻明胶运动模型(简称Liu运动模型), 模型中引入如下基本假设:

- (1) 明胶为不可压缩流体;
- (2) 明胶为应变率无关材料;
- (3) 忽略破片重力.

破片在明胶中运动方程可表示为

$$-m \frac{dv}{dt} = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_1 + C_v A v + A \sigma, \quad (7)$$

式中, σ 为明胶屈服强度.

根据最小二乘法原理, 确定最佳惯性阻力系数和黏性阻力系数, 其中惯性阻力系数和黏性阻力系数分别为0.35和4316.

该模型选用不同直径($\phi 3 \sim 4.8 \text{ mm}$)破片为杀伤元, 对不同侵彻速度下(696~980 m/s)运动模型进行数值计算, 通过与侵彻明胶实验结果进行对比, 验证模型参数选取合理性和准确性^[16].

3 实验验证与结果分析

3.1 实验方法

为研究球形破片在明胶中运动规律, 进行不同速度下(700~1000 m/s)破片侵彻明胶实验. 实验采用7.62 mm弹道枪作为发射装置, 共射击5发, 选取 $\phi 3$, $\phi 4$, $\phi 4.8$ mm球形破片为杀伤元, 其中 $\phi 3$ 和 $\phi 4.8$ mm各2发, $\phi 4$ mm破片1发. 发射装置和杀伤元分别如图3和4所示, 破片具体参数如表3所示. 本实验选用4℃, 配比为10%明胶作为靶标(其尺寸为350 mm×250 mm×200 mm), 采用高速摄像机进行拍摄(Phantom V12.1, 分辨率1024×512, 帧频15001fps), 通过光电靶测量破片靶前和靶后速度, 实验流程如图5所示.

图3 (网络版彩图)发射装置

图4 (网络版彩图)球形破片

表3 各口径球形破片参数

$d(\text{mm})$	$m(\text{g})$	$v_0(\text{m/s})$
3	0.111	700 715
4	0.262	754
4.8	0.453	763 1000

实验原理及场景如图6所示, 光电靶置于距靶标2 m处测量入靶速度, 靶标沿弹道方向置于综合靶架上, 光幕和气体灯置于距明胶侧1 m处(气体灯置于光幕后), 高速摄像机置于距明胶另一侧1.5 m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.

3.2 实验结果与理论计算对比分析

3.2.1 $\phi 3$ mm球形破片

以破片入靶时刻为计时起点, 出靶时刻为计时终点, 第1发破片入靶速度实测值为700 m/s, 侵彻明胶过程如图7所示, 破片最终停留在目标内.

图8(a)给出了速度随时间变化曲线. 可见, Sturdivan, Segletes, Liu及改进模型所得破片在靶标中运动时间分别为2700, 763, 8000和2500 μs , 实测值为2524 μs . Sturdivan模型所计算出靶速度为39.8 m/s, 运动时间为20000 μs 时, 破片停止运动. 破片位移随时间变化曲线如图8(b)所示. 由图8(b)可知, 4种模型所得侵彻位移理论值分别为0.413, 0.118, 0.268和0.239 m, 实测值为0.237 m. 速度、位移误差棒曲线分别如图9(a)和(b)所示. 可见, 4种模型所得靶标中运动时间误差分别为176, 1761, 5476和24 μs ; 位移误差分别为0.176, 0.119, 0.031和0.002m, 相对误差分别为74%, 50%, 13%和0.08%.

加速度与时间关系曲线如图10(a)所示. 由图10(a)可知, 破片与目标相互作用过程为变减速运动, 初始阶段速度衰减较快, Sturdivan, Segletes, Liu及改进模型所得撞击明胶瞬间加速度分别为-3442038.2, -5629183.3, -5983197.5和-5020171.1 m/s^2 . 随着侵彻位移增大加速度不断减小, Sturdivan模型所计算出靶加速度为-86199.1 m/s^2 . 图10(b)给出了各阻力关系曲线, 侵彻初期惯性阻力起主要作用, Sturdivan, Liu和改进模型

图 5 (网络版彩图)实验流程

图 6 (网络版彩图)实验原理及场景. (a) 实验原理; (b) 实验现场

图 7 第1发 $\phi 3$ mm破片侵入明胶过程. (a) $t=600 \mu\text{s}$; (b) $t=1200 \mu\text{s}$; (c) $t=1800 \mu\text{s}$; (d) $t=2400 \mu\text{s}$

图 8 (网络版彩图)第1发 $\phi 3$ mm破片理论曲线与实验曲线对比. (a) 速度随时间变化曲线; (b) 位移随时间变化曲线

图 9 (网络版彩图)第1发 $\phi 3$ mm破片误差棒曲线. (a) 速度误差棒曲线; (b) 位移误差棒曲线

图 10 (网络版彩图)第1发 $\phi 3$ mm破片加速度变化曲线

图 11 (网络版彩图)第1发 $\phi 3$ mm破片各阻力关系曲线

所计算惯性阻力与黏性阻力比值分别为24.7, 30.8和11.3. 同时, Segletes, Liu和改进模型所计算侵彻初期惯性阻力与明胶抗力比值分别为5.9, 4544.8和1809.5.

随着速度衰减惯性阻力与黏性阻力、明胶抗力比值不断减小, 表明侵彻过程中黏性阻力和明胶抗力所占比重增加, 对破片的作用越来越明显, 因而模型中黏

性阻力和明胶抗力不可忽略.

第2发破片入靶速度实测值为715 m/s, 侵彻过程如图12所示. 可见, 第2发与第1发实验结果类似, 破片最终也停留在靶标中. 以200 μs 为时间步长, 其速度(v)、位移(x)理论值与实验值如表4所示.

由表4可知, 运动时间为2800 μs 时, Sturdivan, Segletes, Liu及改进模型所得速度理论值分别为36.5, 0, 17.7和12.5 m/s, 实测值为8 m/s; 位移理论值分别为0.361, 0.119, 0.241和0.246 m, 实测值为0.245 m. 可见,

4种模型所得速度误差分别为28.5, 8, 9.7和4.5 m/s; 侵彻位移误差为0.116, 0.126, 0.004和0.001 m, 相对误差分别为47%, 51%, 1.6%和0.004%.

3.2.2 $\phi 4$ mm球形破片

破片入靶速度实测值为754 m/s, 侵彻过程如图13所示, 破片最终停留在明胶内.

破片速度、位移随时间变化实测曲线分别如图14(a)和(b)所示. 由图14(a)可知, Sturdivan, Segletes,

图12 第2发 $\phi 3$ mm破片侵彻明胶过程. (a) $t=600 \mu\text{s}$; (b) $t=1200 \mu\text{s}$; (c) $t=1800 \mu\text{s}$; (d) $t=2400 \mu\text{s}$

表4 第2发 $\phi 3$ mm破片各模型速度、位移理论值与实测值

$t(\mu\text{s})$	Sturdivan模型		Segletes模型		Liu模型		改进模型		实测值	
	$v(\text{m/s})$	$x(\text{m})$	$v(\text{m/s})$	$x(\text{m})$	$v(\text{m/s})$	$x(\text{m})$	$v(\text{m/s})$	$x(\text{m})$	$v(\text{m/s})$	$x(\text{m})$
0	715	0	715	0	715	0	715	0	715	0
200	353.4	0.099	234.8	0.072	255.8	0.082	280.2	0.088	262	0.078
400	231.7	0.156	90.7	0.104	152.3	0.121	166.3	0.130	151	0.119
600	170.6	0.195	21.4	0.117	106.6	0.147	114.1	0.158	126	0.145
800	133.9	0.225	0	0.119	80.8	0.165	84.2	0.177	91	0.164
1000	109.5	0.249	—	—	64.3	0.180	64.9	0.192	65	0.182
1200	92	0.269	—	—	52.8	0.191	51.6	0.203	45	0.194
1400	78.9	0.287	—	—	44.3	0.201	41.9	0.213	38	0.203
1600	68.8	0.301	—	—	37.9	0.209	34.5	0.220	30	0.214
1800	60.7	0.314	—	—	32.7	0.216	28.7	0.227	25	0.221
2000	54.1	0.326	—	—	28.6	0.222	24.1	0.232	18	0.231
2200	48.6	0.336	—	—	25.2	0.228	20.3	0.236	14	0.234
2400	43.9	0.345	—	—	22.3	0.233	17.2	0.24	10	0.239
2600	39.9	0.354	—	—	19.8	0.237	14.6	0.243	9	0.241
2800	36.5	0.361	—	—	17.7	0.241	12.5	0.246	8	0.245

图 13 $\phi 4$ mm 破片侵彻明胶过程. (a) $t=700 \mu\text{s}$; (b) $t=1400 \mu\text{s}$; (c) $t=2100 \mu\text{s}$; (d) $t=2800 \mu\text{s}$

图 14 (网络版彩图) $\phi 4$ mm 破片理论曲线与实验曲线对比. (a) 速度随时间变化曲线; (b) 位移随时间变化曲线

Liu 及改进模型所得破片在靶标中运动时间分别为 1400, 1155, 5700 和 2800 μs , 实测值为 2896 μs . Sturdivan 和 Liu 模型所计算出靶速度分别为 105.6 和 8.1 m/s, 分别在 25000 和 9000 μs 时, 破片停止运动. 由图 14(b) 可知, 4 种模型所得侵彻位移理论值分别为 0.651, 0.175, 0.365 和 0.319 m, 实测值为 0.318 m. 速度、位移误差棒曲线分别如图 15(a) 和 (b) 所示. 可见, 4 种模型所得靶标中运动时间误差分别为 1496, 1741, 2804 和 96 μs , 位移误差分别为 0.333, 0.143, 0.047 和 0.001 m.

3.2.3 $\phi 4.8$ mm 球形破片

第 1 发破片入靶速度实测值为 763 m/s, 侵彻明胶过程如图 16 所示, 破片最终穿出靶标.

破片速度、位移随时间变化实测曲线分别如图 17(a) 和 (b) 所示. 由图 17(a) 可知, Sturdivan,

Segletes, Liu 及改进模型所得破片在靶标中运动时间分别为 1100, 1492, 2700 和 2200 μs , 实测值为 2284 μs . Sturdivan, Liu 和改进模型所计算出靶速度分别为 154.9, 35.7 和 43.3 m/s, 实测值为 30 m/s, 分别在 35000, 12300 和 9500 μs 时, 破片停止运动. 由图 17(b) 可知, 运动时间为 2300 μs 时, 4 种模型所得侵彻位移理论值为 0.477, 0.219 (Segletes 模型所计算运动时间为 1492 μs 时, 破片停止运动), 0.332 和 0.353 m, 实测值为 0.351 m. 速度、位移误差棒曲线分别如图 18(a) 和 (b) 所示. 可见, 4 种模型所得靶标中运动时间误差分别为 1184, 792, 416 和 84 μs . 运动时间为 2300 μs 时, 位移误差分别为 0.126, 0.132, 0.019 和 0.02 m, 相对误差分别为 36%, 38%, 5.4% 和 0.06%.

第 2 发破片入靶速度实测值为 1000 m/s, 侵彻过程如图 19 所示. 可见, 破片最终穿出靶标.

图 15 (网络版彩图) $\phi 4$ mm破片误差棒曲线. (a) 速度误差棒曲线; (b) 位移误差棒曲线

图 16 第1发 $\phi 4.8$ mm破片侵彻明胶过程. (a) $t=500 \mu\text{s}$; (b) $t=1000 \mu\text{s}$; (c) $t=1500 \mu\text{s}$; (d) $t=2000 \mu\text{s}$

图 17 (网络版彩图)第1发 $\phi 4.8$ mm破片理论曲线与实验曲线对比. (a) 速度随时间变化曲线; (b) 位移随时间变化曲线

破片速度、位移随时间变化实测曲线分别如图20(a)和(b)所示. 由图20(a)可知, Sturdivan, Segletes,

Liu及改进模型所得破片在靶标中运动时间分别为 800, 1501, 1900和1500 μs , 实测值为1600 μs . Sturdivan,

图 18 (网络版彩图)第1发 $\phi 4.8$ mm破片误差棒曲线. (a) 速度误差棒曲线; (b) 位移误差棒曲线

图 19 第2发 $\phi 4.8$ mm破片侵彻明胶过程. (a) $t=500\ \mu\text{s}$; (b) $t=1000\ \mu\text{s}$; (c) $t=1500\ \mu\text{s}$; (d) $t=2000\ \mu\text{s}$

图 20 (网络版彩图)第2发 $\phi 4.8$ mm破片理论曲线与实验曲线对比. (a) 速度随时间变化曲线; (b) 位移随时间变化曲线

Liu和改进模型所计算出靶速度分别为215.4, 55.1和73.9 m/s, 分别在35000, 12400和9600 μs 时, 破片停止运动. 由图20(b)可知, 运动时间为2000 μs 时, 4种模型所得侵彻位移理论值分别为0.507, 0.253(Segletes

模型所计算运动时间为1492 μs 时, 破片停止运动), 0.352和0.379 m, 实测值为0.374 m. 速度、位移误差棒曲线分别如图21(a)和(b)所示. 可见, 4种模型所得靶标中运动时间误差分别为800, 99, 300和100 μs . 运动时

图 21 (网络版彩图)第2发 $\phi 4.8$ mm破片误差棒曲线。(a)速度误差棒曲线;(b)位移误差棒曲线

间为2000 μs 时, 位移误差分别为0.133, 0.121, 0.022和0.005 m, 相对误差分别为36%, 32%, 6%和1.3%。

综上所述, 通过对比可知, 改进模型相较Sturdivan, Segletes, Liu模型考虑了明胶抗力的影响, 并引入靶标材料应变率效应, 运动模型理论计算结果与实测值误差较小, 一致性较好, 进一步证明了明胶抗力在运动过程中的重要性, 该力学模型能较为准确描述球形破片在明胶中运动规律。

4 结论

采用理论分析和实验研究相结合手段, 对现有4

种球形破片侵彻明胶运动模型进行了对比研究, 并分析了模型差异。选取 $\phi 3$, $\phi 4$ 和 $\phi 4.8$ mm球形破片为杀伤元, 对破片在明胶中运动规律进行了实验研究, 得出各时刻速度、位移变化规律。同时, 对4种运动模型进行了数值计算, 获得了各模型下运动规律, 并将理论计算结果与实测值进行对比分析。结果表明, 改进模型相较Sturdivan, Segletes, Liu模型考虑了明胶抗力的作用, 并引入靶标应变率效应影响, 模型理论值与实测值误差较小, 一致性较好, 可更为准确描述球形破片在明胶中运动规律, 为轻武器弹药设计和战伤救治提供理论参考。

参考文献

- 1 王晓民. 枪榴弹——一种有益的尝试. 现代兵器, 1989, 1: 21–24
- 2 王少然. 近战“杀手”枪榴弹. 现代军事, 2002, 12: 38–39
- 3 马玉媛. 从创伤效应探讨破片发展趋势. 弹箭与制导学报, 1985, 9: 26–29
- 4 傅荣向, 马玉媛, 冯天顺, 等. 球形破片致伤特征量的工程估算. 轻兵器, 1993, 1: 21–23
- 5 马玉媛. 小型预制破片的速度衰减和侵彻深度的研究. 兵工学报, 1981, 1: 52–58
- 6 刘荫秋, 王正国, 马玉媛. 创伤弹道学. 北京: 人民军医出版社, 1991
- 7 Kneubuehl B P, Coupland R M, Rothschild M A, et al. Wound Ballistics Basics and Applications. Berlin: Springer, 2011
- 8 Sellier K G, Kneubuehl B P. Wound Ballistics and the Scientific Background. Amsterdam: Elsevier, 1994
- 9 Nicholas N C, Welsch J R. Institute for non-lethal defense technologies report: Ballistic gelatin. Technical Report, DTIC Document, 2004
- 10 刘坤, 吴志林, 徐万和, 等. 弹头侵彻明胶的运动模型. 爆炸与冲击, 2012, 32: 616–622
- 11 刘坤, 吴志林, 徐万和, 等. 弹头侵彻明胶运动模型参数研究. 高压物理学报, 2013, 27: 677–684
- 12 Liu K, Ning J G, Wu Z L, et al. A comparative investigation on motion model of rifle bullet penetration into gelatin. *Int J Impact Eng*, 2017, 103: 169–179
- 13 莫根林, 吴志林, 刘坤. 球形破片侵彻明胶的瞬时空腔模型. 兵工学报, 2013, 34: 1324–1328
- 14 莫根林, 吴志林, 冯杰, 等. 步枪弹侵彻明胶的表面受力模型. 兵工学报, 2014, 35: 164–169
- 15 莫根林, 吴志林, 冯杰. 长方体破片侵彻明胶的运动模型与实验研究. 兵工学报, 2015, 36: 463–468
- 16 刘坤, 吴志林, 徐万和, 等. 球形破片侵彻明胶修正力学模型. 南京理工大学学报(自然科学版), 2012, 36: 755–761

- 17 Janzon B. High energy missile trauma. A study of the mechanisms of wounding of muscle tissue. Dissertation of Doctoral Degree. Gothenburg: University of Gothenburg, 1983
- 18 Jussila J. Preparing ballistic gelatine—Review and proposal for a standard method. *Forensic Sci Int*, 2004, 141: 91–98
- 19 Jussila J. Wound ballistic simulation: Assessment of the legitimacy of law enforcement firearms ammunition by means of wound ballistic simulation. Dissertation of Doctoral Degree. Helsinki: University of Helsinki, 2005
- 20 Dzimian A J. The penetration of steel spheres into tissue models. CWLR Technical Report, 1956
- 21 Stone G W. Projectile penetration into representative targets. Sandia Report, 1994
- 22 Sturdivan L M. A mathematical model of penetration of chunky projectiles in a gelatin tissue simulant. ARCSL-Technical Report, 1978
- 23 Nennstiel R. Once again-spheres in gelatin. *J Trauma*, 1990, 6: 119–123
- 24 Peters C E. A mathematical-physical model of wound ballistics. *J Trauma*, 1990, 6: 303–318
- 25 Segletes S B. Modeling the penetration behavior of rigid spheres into ballistic gelatin. ART Technical Report, 2008

A comparative investigation on motion model of spherical fragments penetration into gelatin

LIU Kun¹, NING JianGuo¹, WU ZhiLin², LI ZhongXin² & REN HuiLan¹

¹State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

Gelatin is a popular tissue simulant in biomedical applications. The behavior of a spherical fragment and the effects of penetrating a simulant are similar in biological tissue. In order to accurately describe the interaction between a spherical fragment and muscle tissue, this paper discusses the wounding mechanism and the difference between the Sturdivan model, the Segletes model, the Liu model, and an improved motion model previously established considering the effect of strain rate by us based on the properties of gelatin. In addition, experiments conducted into spherical fragment penetration into gelatin, with fragment diameters 3, 4 and 4.8 mm, and acquisition of the corresponding motion law are discussed. Numerical calculations reveal that the motion model has a better fit with experimental values than the Sturdivan, Segletes and Liu models. Further, it more accurately describes the motion of a spherical fragment penetrating gelatin than other models and also has good generality. Thus, it can provide a theoretical reference for small arms ammunition design and wound treatment.

spherical fragments, penetration, gelatin, motion model, wounding mechanism

doi: 10.1360/N092017-00168