

基于参数统计的破片战斗部地面威力场及 人员毁伤矩阵模型

张启瑞, 彭 永*

(国防科技大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 为了解决破片毁伤求解采用传统蒙特卡洛算法时效率不高的问题, 针对破片战斗部打击地面目标的毁伤规律认知及快速评估需求, 提出了先计算并处理破片地面威力场及毁伤参数, 后结合相关毁伤判据进行人员毁伤评估的方法。在考虑重力的破片飞散模型基础上, 通过分析验证了重力在模型计算中的必要性; 通过计算地面威力场分布, 探讨了破片初始动能、战斗部飞散角和落角等多个因素对地面威力场的影响规律; 通过大破片量模拟, 统计得到关键毁伤参数, 构建地面人员毁伤矩阵模型, 并结合蒙特卡洛算法进行了模型有效性验证。结果表明: 在战斗部落角为 30° 和 60° 时, 利用参数统计法得到的毁伤矩阵模型能有效预测人员毁伤概率, 计算结果与蒙特卡洛方法结果的差异不超过 0.1。

关键词: 爆炸破片; 地面人员毁伤矩阵; 参数统计法; 地面威力场; 重力影响

中图分类号: TJ760

文献标志码: A

文章编号: 2097-2741(2024)04-014-010

Fragment Warhead Ground Power Field and Personnel Damage Matrix Model Based on Parameter Statistics

ZHANG Qirui, PENG Yong*

(College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan)

ABSTRACT: Aiming at the low solution efficiency of fragment damage by Monte Carlo algorithm, evaluation method for warheads fragments against ground targets was proposed with the consideration of the cognition of the damage law and the requirement of rapid assessment. Firstly, power fields and damage parameters of the fragment ground were calculated and processed. Then, the personnel damage was evaluated based on relevant damage criteria. Additionally, the necessity of gravity in the calculation of the proposed model was analyzed and verified based on a fragment dispersion model considering the gravity. Then, the ground power field distribution was calculated to explore the influence law of initial kinetic energy of the fragment and the dispersion angle and the falling angle of the warhead on the ground power field. Furthermore, key damage parameters were statistically analyzed through large-scale fragment simulation. Accordingly, a ground personnel damage matrix model was constructed. Finally, the proposed model was verified by Monte Carlo algorithm. Results showed that the damage matrix model obtained by the

收稿日期: 2024-04-22

第一作者: 张启瑞 (2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事武器毁伤与评估研究。E-mail: qrzhang-nudt@163.com

***通信作者:** 彭永 (1989—), 男, 博士, 副教授, 主要从事侵彻机理及武器毁伤效能评估研究。E-mail: pengy116@163.com

引用格式: 张启瑞, 彭永. 基于参数统计的破片战斗部地面威力场及人员毁伤矩阵模型[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38 (4): 14-23.

proposed method can effectively predict the damage probability when the warhead falling angles are 30° and 60° and the computational probability difference is no more than 0.1.

KEYWORDS: blast fragment; ground personnel damage matrix; parameter statistics; ground power field; influence of gravity

破片战斗部是一种被广泛应用的战斗部, 其爆炸产生的冲击波和破片对杀伤范围内的有生、装甲等目标都会造成一定程度的毁伤。在较远距离上, 冲击波已经不具备毁伤人员目标的能力, 而破片在爆炸作用下可以被推动较远距离, 使毁伤范围有所增加^[1-5]。地面威力场是破片对地面目标造成毁伤的相关参数分布场, 其中的破片落点及相应的落速等参数共同决定了破片战斗部的杀伤范围和效果。因此, 研究地面威力场特性对评估破片战斗部的毁伤能力具有重要意义。

现有的破片飞散计算程序大多忽略重力而只考虑气动力, 假设破片沿直线飞行^[6-9], 与实际情况存在差异, 无法求解战斗部触地爆炸时产生破片的飞散等问题。目前, 对破片战斗部打击目标的毁伤评估工作中, 通常采用对所有破片的轨迹进行遍历, 求解破片与目标交会状态和参数, 再结合相关判据进行评估的方法。该算法虽然直观, 但单次计算耗时长; 且由于破片分布的随机性, 单次模拟可能不具代表性。常需借助蒙特卡洛 (Monte Carlo) 算法进行多次模拟, 通过平均结果进行毁伤评估^[9-11]。这种方法的计算周期长、评估效率低、难以获得规律性认识。

对破片的地面威力场特性进行研究后, 总结一般规律, 运用参数统计方法, 可以达到“一次计算, 多次使用”的目的, 保证评估的时效性。周双玲等^[12]通过对破片空间位置和初速进行统计, 给出了杀伤元在靶目标上的分布及侵彻性能, 证明了参数统计法的科学性; Li 等^[13]根据破片分布密度计算了毁伤面积, 进而建立了毁伤概率计算模型, 在缩短计算时间的同时, 也保证了计算准确性。

本文建立了同时考虑重力和气动力作用的破片飞散场计算模型, 获得了不同条件下的破片地面威力场。通过与忽略重力作用的破片散布情况进行对比, 说明了重力在地面威力场评估中的必要性。对破片初始动能和战斗部飞散角、落角等因素的影响效果进行分析后, 归纳出各因素对破片威力场的影响规律。通过参数统计法, 得到了地面人员毁伤矩阵模型, 并验证了该模型的有效

性, 可为地面目标毁伤评估提供新的思路。

1 考虑重力作用的破片场计算模型

1.1 破片场的初始空间分布

为便于描述, 建立如图 1 (a) 所示的坐标系, 坐标原点为起爆点在地面的投影点。破片的初速度矢量为 v_0 , 定义初始方向角为 θ , 初始俯仰角为 φ 。战斗部在任意时刻的飞行姿态可以由偏航角、滚转角和落角 3 个参数确定。由于其绕 z 轴的旋转不影响破片威力场在地面的分布规律, 本文不考虑偏航角和滚转角, 并假定战斗部爆炸时沿 xOz 面对称。战斗部的落角为 α , 在炸高 Z_0 处的起爆姿态如图 1 (b) 所示。

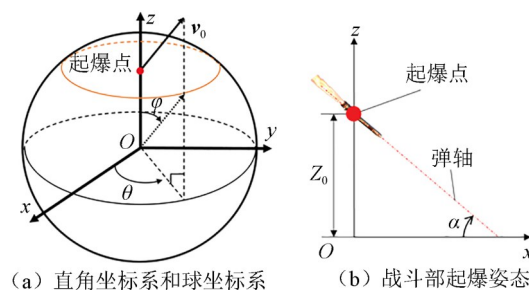


图 1 坐标系建立

Fig. 1 Establishment of coordinate system

通常认为常规战斗部以中心起爆方式爆炸后产生的破片沿周向是均匀飞散的^[14]。即破片的初始方向角 θ 满足均匀分布, 范围在 0° 到 360° 之间。假设有效破片为爆炸后形成的所有预制破片, 则 90% 的有效破片分布在图 2 (a) 所示的静态飞散角 Ω 内。当战斗部牵引速度为 v_T 时, 由于速度叠加效应, 静态飞散角变为度数较小的动态飞散角 Ω_d , 如图 2 (b) 所示。

定义战斗部垂直静爆 (即落角 $\alpha = 90^\circ$) 时为基态, 在基态下破片群的初始方位角满足 $\theta \in [0^\circ, 360^\circ)$, 初始俯仰角 φ 的取值由静态飞散角 Ω 决定。初始俯仰角 φ 以正态分布生成, 该正态分布的形式为

$$\varphi \sim N(90^\circ, (\Omega/3.29)^2) \quad (1)$$

此时, 90% 的有效破片处在飞散角内。

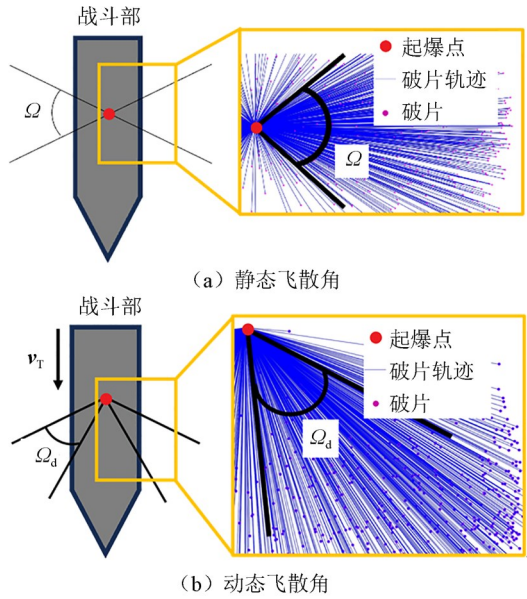


图 2 战斗部的两类飞散角

Fig. 2 Two types of dispersion angles of a warhead

基态下产生一枚初速度矢量为 v_0 的破片，在战斗部旋转到落角 α 后的速度矢量 v_α 为

$$v_\alpha = C v_0 \quad (2)$$

式中： C 为转换矩阵，依赖于战斗部落角 α ，表达式为

$$C = \begin{bmatrix} \sin \alpha & 0 & -\cos \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (3)$$

本文对破片静爆时的情况进行研究，不考虑战斗部的叠加速度 v_T 。

1.2 破片场计算模型

以牛顿第二定律为基础，结合质心弹道理论^[15]，得到求解单破片飞散的微分方程组：

$$\begin{cases} dx/dt = -avv_x \\ dy/dt = -avv_y - g \\ dz/dt = -avv_z \end{cases} \quad (4)$$

式中： a 为破片的速度衰减系数^[16]， $a = c_x \rho_A A / (2m)$ ， m^{-1} ； m 为破片质量， kg ； c_x 为速度衰减系数，是一个无量纲数，与破片的形状有关，破片为球形时取 0.97^[8, 17]； ρ_A 为空气密度， kg/m^3 ； A 为破片迎风面积， m^2 ，针对球形破片有 $A = 0.25S$ ， S 为破片表面积； v 为当前的破片速度， v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 3 个方向的分速度， m/s ； g 为重力加速度。

就单枚破片而言，其阻力系数、迎风面积以及质量等因素对破片飞行轨迹有重要影响。采用

随机数产生大量不同初始飞行参数的破片后，基于四阶 Runge-Kutta 算法求解破片场，可实现对破片飞散的模拟。图 3 和图 4 给出了一种典型破片场的轨迹示意图，图中：起爆高度 $Z_0 = 15 m$ ，落角 $\alpha = 60^\circ$ ，飞散角 $\Omega = 40^\circ$ 。战斗部产生 1 000 枚质量 m 为 5 g 的钢质球形预制破片。破片群初速度 v_0 满足均匀分布，即 $v_0 \sim U(1500, 1700)$ ，单位 m/s 。

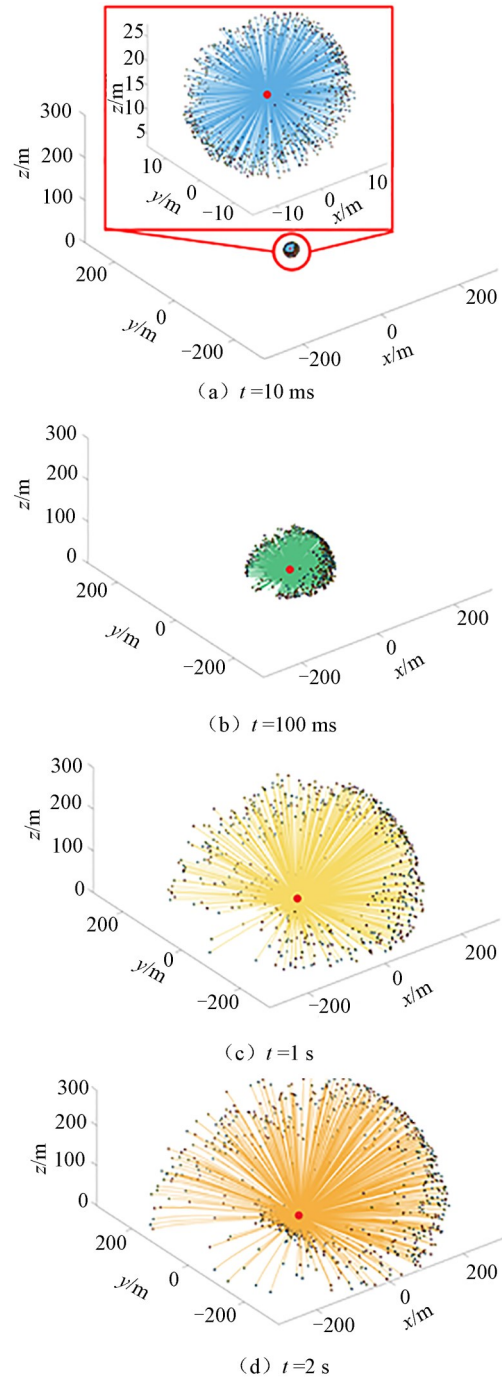


图 3 典型破片场不同时刻轨迹

Fig. 3 Trajectories of a typical fragments field at different moments

由图3和图4可以看出: 爆炸后的初期约2 s内, 重力对破片的轨迹影响不明显, 破片几乎沿直线飞散; 随着时间推移, 重力影响越来越明显, 轨迹明显向下弯曲。

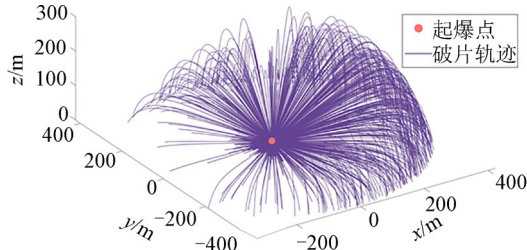


图4 典型破片场完整轨迹

Fig. 4 Entire trajectories of a typical fragments field

1.3 重力对毁伤判定带来的影响

不考虑重力影响而假设破片按照直线飞行, 实际上忽略了向上飞散的破片会落回地面的事实, 即无法对该部分破片打击地面目标的能力进行评估。图5采用与上节相同的算例, 展示了是否考虑重力对破片落点位置及落速 v_e 的影响。

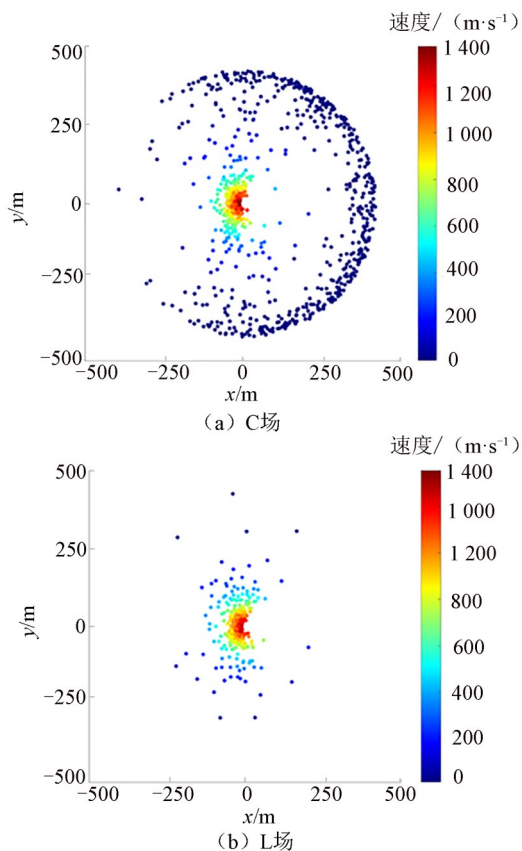


图5 破片落点位置及落速

Fig. 5 Landing points and falling velocities of fragments

由图5可以看出: 考虑重力时, 曲线破片场

(C场)中破片的最大飞行距离 L_M 为422.7 m, 对应最小落速 v_{em} 为28.3 m/s; 不考虑重力时, 直线破片场(L场)中破片的最大飞行距离 L_M 值达到427.3 m, 最小落速 v_{em} 则降低到13.6 m/s。通过对比发现, 二场的最大飞行距离 L_M 相差约1%, 最小落速 v_{em} 相差高达约52%, 且L场中大多数破片都集中在距中心点200 m的范围内, 与C场完全不同, 可见重力对破片场形态产生了很大影响。

图6给出了C场和L场中破片落速 v_e 的对数值分布情况。

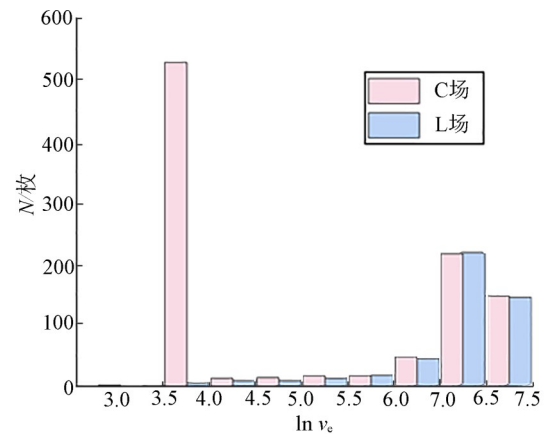


图6 破片落速对数分布

Fig. 6 Logarithmic distribution of fragment falling velocities

由图6可以看出: C场中的1 000枚破片全部落地, 其中52.8%的破片落速对数集中在3.5~4.0; 相较之下, L场中仅有465枚破片落地, 且仅有1.0% (5枚)的破片落入该区间。此外, 在C场中不存在落速对数小于3.5的破片, 而L场中有少量破片分布在这一范围。在其他区间内, 二场的落速对数值分布接近, 表明重力主要对低落速的破片产生显著影响。

经典的S-K方法^[18]给出了单枚破片命中人员目标后的条件毁伤概率为

$$P_{K/H} = 1 - \exp[-a(MV^{1.5} - b)^n] \quad (5)$$

式中: a 、 b 、 n 是3个与伤亡定义有关的系数; M 是破片的质量, 单位为gr (格令), $1 \text{ gr} = 6.48 \times 10^{-5} \text{ kg}$; V 是破片与人体碰撞时的速度, 单位为ft/s, $1 \text{ ft/s} = 0.3048 \text{ m/s}$ 。当 $MV^{1.5} < b$ 时, 破片无法侵入人体, 条件毁伤概率 $P_{K/H} = 0$ 。表1给出了不同失能定义下针对人员目标全身的系数。

图7给出了不同失能定义下破片质量 m 与临界速度 v_c 的关系。人体受到伤害的概率为0时的临界

速度用 v_{c0} 表示, 人体受到伤害的概率为 5% 时的临界速度用 v_{c5} 表示。

表 1 针对人员全身的系数

Tab. 1 Coefficients for the entire personnel body

失能定义	a	b	n
防守 30 s	$8.877\ 1\times 10^{-4}$	31 400	0.451 06
进攻 30 s	$7.644\ 2\times 10^{-4}$	31 000	0.495 70
进攻 5 min	$1.045\ 4\times 10^{-3}$	31 000	0.487 81
补给 12 h	$2.197\ 3\times 10^{-3}$	29 000	0.443 50

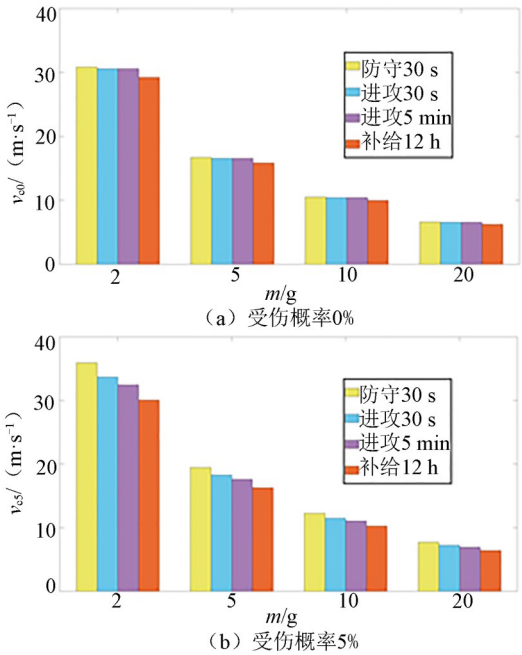


图 7 不同质量破片对应的临界速度

Fig. 7 Critical velocities of fragments of different mass

由图 7 可以看出: 随着破片质量的增加, 临界速度不断减小。

在 C 场中, 选取“防守 30 s”为失能定义, 以最小落速 v_{em} 落地的破片命中人员后造成毁伤的条件概率 $P_{K/H} = 14.64\%$, 显然不可被忽略。

以上分析说明如果在计算之前未对低落速下破片的毁伤能力进行考察, 而直接忽略重力的影响, 最终的评估结果可能会与实际情况完全相反。因此, 在进行正式的评估之前, 需要先进行试算, 再决定是否忽略重力的影响。特别是在评估破片的地面威力场时, 必须充分考虑重力带来的影响。

2 地面威力场影响因素分析

地面威力场中的落点位置、落速等参数受多

种因素影响, 并且随着这些参数的变化而发生改变, 研究这些参数的变化规律具有重要的实用价值。这些影响因素包括破片自身的性质、初始空间分布、战斗部参数和姿态等。

假设单次模拟时产生完全相同的钢质球形破片, 以下对破片的质量、初始动能、战斗部静态飞散角和落角几个因素进行重点分析。

2.1 破片初始动能

破片的初始动能与破片的飞散和杀伤密切相关, 其大小由破片的质量和初速决定。本节对破片的初始动能和相同初始动能下破片质量的影响进行分析。研究过程中, 取战斗部的静态飞散角 $\Omega = 40^\circ$, 落角 $\alpha = 60^\circ$, 起爆高度 $Z_0 = 15\text{ m}$, 选取不同的初始动能和同一初动能下不同的破片质量进行研究。

在图 1 (b) 所示的战斗部姿态下, 飞行距离 L 和落速 v_e 的极值都将出现在 x 轴上, 仅需讨论 x 正负轴上破片质量与飞行距离的关系即可。图 8 给出了几种初动能 E 下不同质量破片的飞行距离和落速。不同质量 m 的破片在不同初动能 E 下的 L_M 和 v_{em} 值如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同破片质量和初始动能下的最大飞行距离 L_M

Tab. 2 Maximum flight distances L_M under different mass and initial kinetic energies

破片质量/g	L_M/m			
	初始动能 1 500 J	初始动能 2 000 J	初始动能 2 500 J	初始动能 3 000 J
2	302.0	311.6	319.2	325.3
5	352.6	365.4	376.1	384.1
10	389.2	406.3	419.3	429.9
20	419.7	440.7	458.1	472.6

表 3 不同破片质量和初始动能下的最小落速 v_{em}

Tab. 3 Minimum falling velocities v_{em} under different mass and initial kinetic energies

破片质量/g	$v_{em}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$			
	初始动能 1 500 J	初始动能 2 000 J	初始动能 2 500 J	初始动能 3 000 J
2	22.5	22.8	22.6	22.6
5	26.0	26.4	26.0	26.8
10	28.9	29.0	29.0	29.2
20	32.7	33.1	33.6	32.3

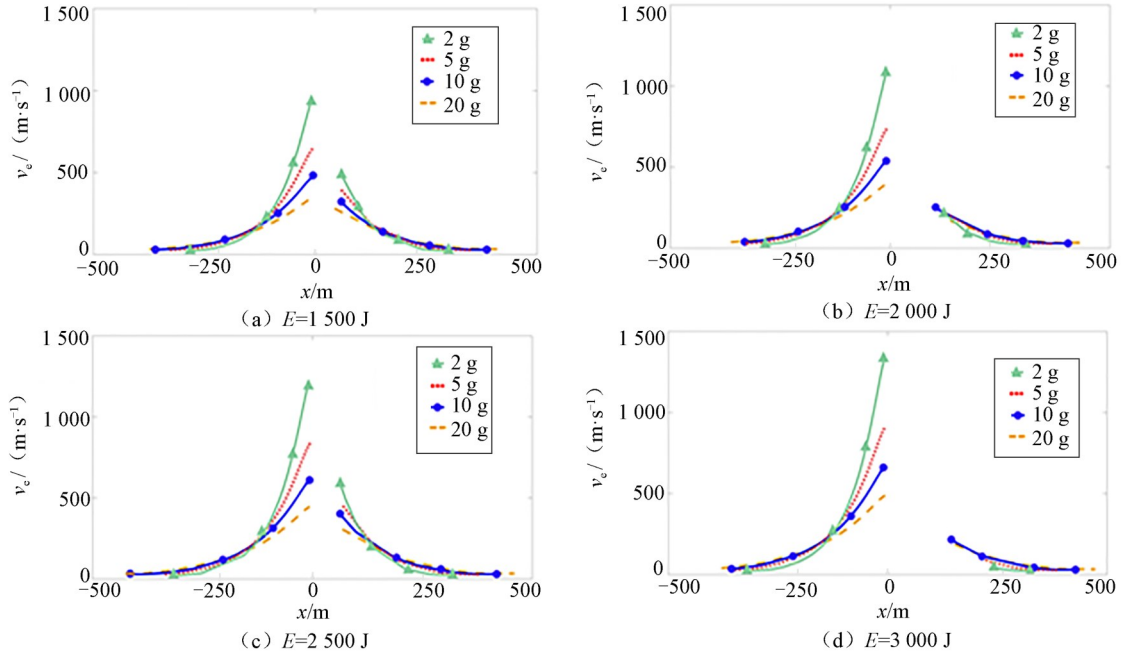


图 8 不同质量和初始动能下破片的飞行距离和落速

Fig. 8 Flight distances and falling velocities of fragments under different mass and initial kinetic energies

由表 2、表 3 和图 8 可以看出, 随着初始动能的增加, 4 种质量破片群的最大飞行距离 L_M 随之增加, 而最小落速 v_{em} 变化不大; 在所讨论的初始动能范围内, 最小落速 v_{em} 随破片质量 m 的增大而增大。

以各破片质量下 $E = 1500 \text{ J}$ 时的最大飞行距离 L_M 为基准, 分析相同破片质量下初始动能对飞行距离的影响, 不同质量破片在不同初动能下相对自身 1500 J 初动能下的 L_M 变化百分比如图 9 所示。

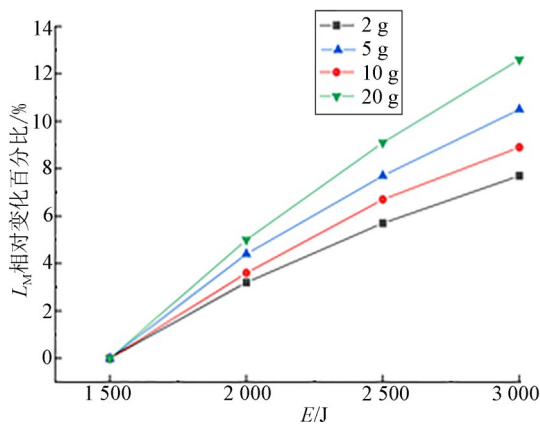


图 9 最大飞行距离相对变化百分比

Fig. 9 Percentages of relative change of maximum flight distance

从图 9 可以看出, 在研究的质量范围内, 当其他条件相同时, 初动能从 1500 J 增大至 3000 J 的

过程中, 破片质量越大, 最大飞行距离在相同初动能区间内的增幅越大。

2.2 静态飞散角和战斗部落角

静态飞散角直接影响破片的生成和打击区域, 战斗部落角影响破片初速的分布; 二者共同作用影响地面威力场的分布形态。下面分别对静态飞散角和落角展开研究, 本节中, 破片的质量 $m = 2 \text{ g}$, 初速 $v_0 = 1600 \text{ m/s}$, 起爆高度 $Z_0 = 15 \text{ m}$, 单次打击产生的破片数 $N = 3000$ 。图 10 给出了静态飞散角 Ω 分别为 40° 、 55° 、 70° 和 85° 下的破片落点及落速散布。

可以看出: 由于飞散角的存在, 在飞散角为 40° 和 55° 时, 沿 x 轴正负方向均出现了无破片落入的扇形区域; 随飞散角增大, 无破片扇形区面积逐渐减小, 沿 x 轴负向的扇区在飞散角增大到某一值后会消失。

图 11 给出了战斗部落角 α 为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 的落点及落速散布。

从图中可以看到落角对破片在 x 方向的飞散距离有显著影响: $\alpha = 0^\circ$ 时 x 方向的破片飞散范围非常小, 仅 133.7 m ; $\alpha = 30^\circ$ 时增加到 277.6 m ; $\alpha = 60^\circ$ 以及垂直爆炸时都有破片达到了最大距离 320.0 m 。此外, 在破片场边缘观察到大量破片聚集, 随 α 增大, 边缘聚集在周向上分布的范围逐渐扩大; 垂直静爆时全周向都出现了边缘聚集。

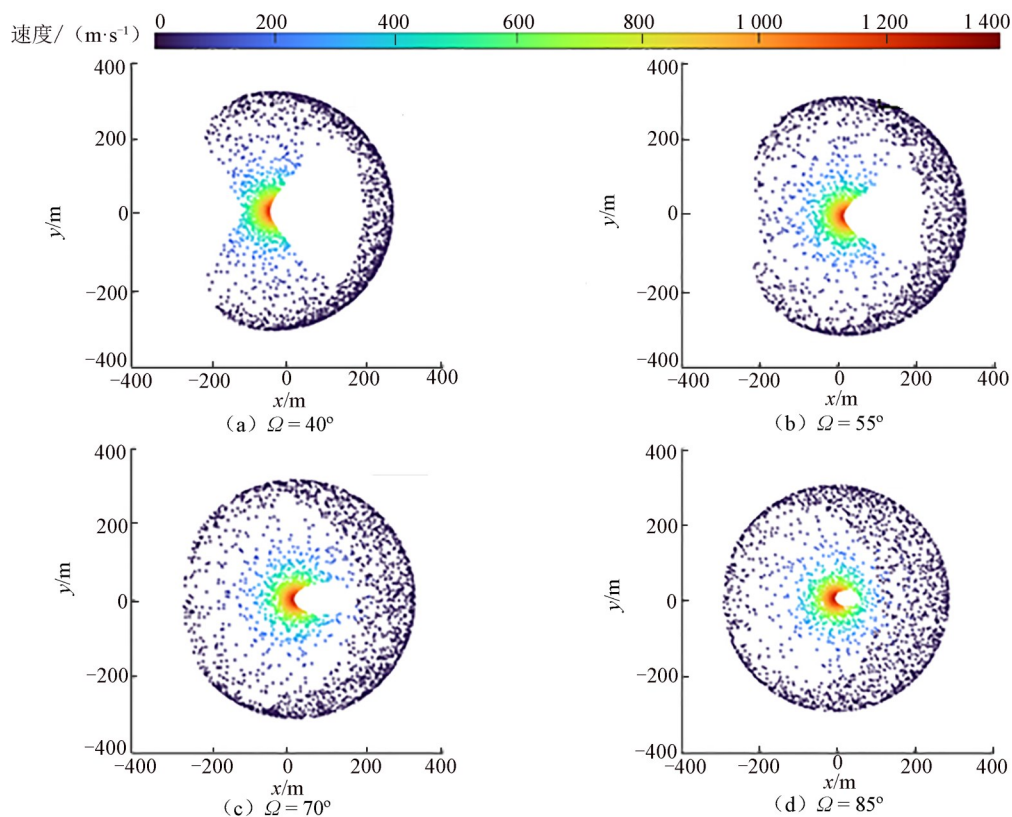


图 10 不同静态飞散角时的破片落点位置和落速散布

Fig. 10 Landing points and falling velocities of different static dispersion angles

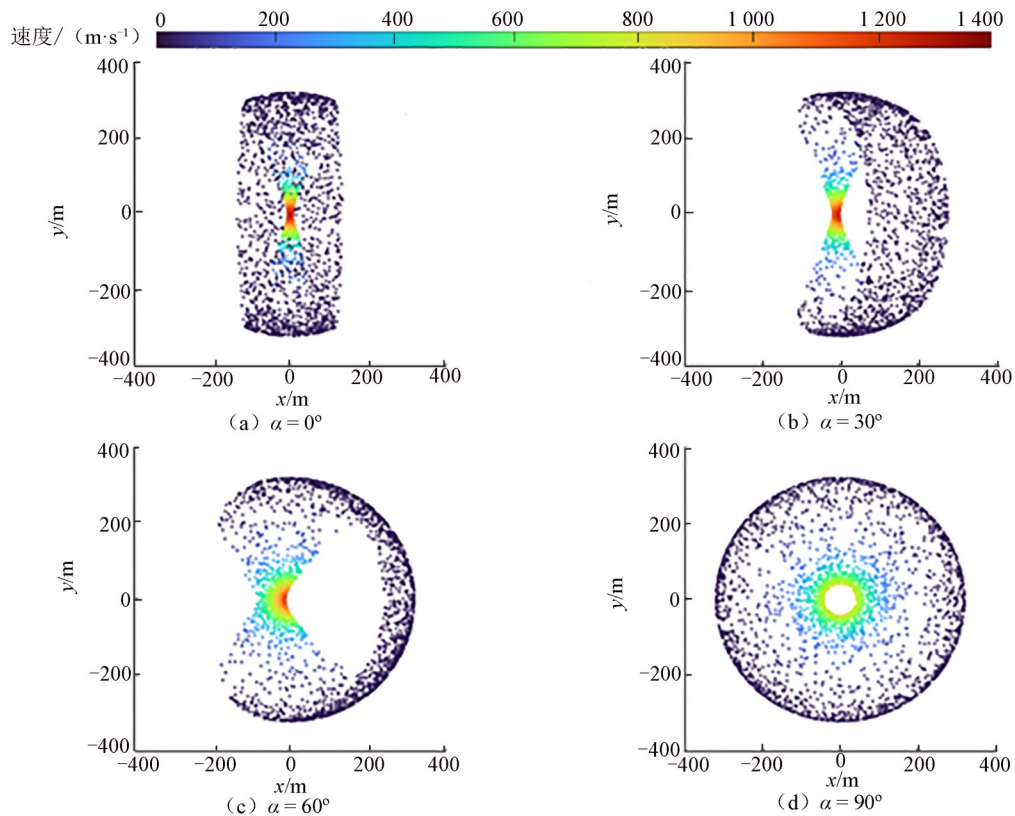


图 11 不同战斗部落角时的破片落点位置及落速散布

Fig. 11 Landing points and falling velocities of different falling angles of warheads

3 人员毁伤评估的参数统计方法

3.1 地面人员毁伤矩阵计算

地面所有位置处人员目标的毁伤概率通过计算毁伤矩阵获得。取统计元为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的正方形单元, 获取单位面积内的数据。依据大数定律, 当一次打击产生的破片数量足够多时, 统计元 i 内破片的频率近似为破片命中该统计元的概率 P_{Hi} ; 所有统计元的命中概率共同构成命中概率分布。通过命中概率分布可以预估一次打击下命中各统计元的破片数。

在单破片命中的情况下, 计算地面上各落点处对人员目标的毁伤概率, 拟合得到单破片毁伤概率分布。仅考虑人员站立时的情况, 假设任意位置处的人员背对爆心, 其毁伤概率近似为

$$P_{\text{di}} = 1 - (1 - P_{\text{K/Hi}})^{n_i} \quad (6)$$

式中: $P_{\text{K/Hi}}$ 为该统计元中点处受单枚破片打击时的毁伤概率; n_i 为命中该统计元的等效破片数。

将人员背面投影简化为长方形和椭圆, 以第 50 百分位数为基准, 取 18~25 岁成年男性的肩高 1.389 m、肩宽 0.391 m 作为长方形的长和宽; 取头宽 0.160 m 和头长 0.235 m 作为椭圆的短轴和长轴^[19], 求得正投影面积 S_p 为 0.57 m^2 。最终在地面投射出的有效面积为

$$S_{\text{ei}} = S_p / \tan \beta_i \quad (7)$$

式中: β_i 为第 i 个统计元内破片的平均落角; S_p 为人员简化几何模型背面正投影的面积; S_{ei} 为人员模型地面投影的面积。投射方式如图 12 所示。

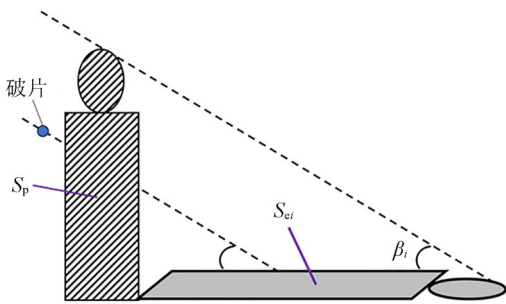


图 12 有效面积的计算原理

Fig. 12 Schematic diagram of effective area calculation

当单次打击产生 N 枚破片时, 命中统计元的等效破片数 n_i 为

$$n_i = NP_{\text{Hi}}S_{\text{ei}} \quad (8)$$

求解出各统计元的毁伤概率 P_{di} 后, 可求得得

到地面人员毁伤矩阵, 其计算流程如图 13 所示。

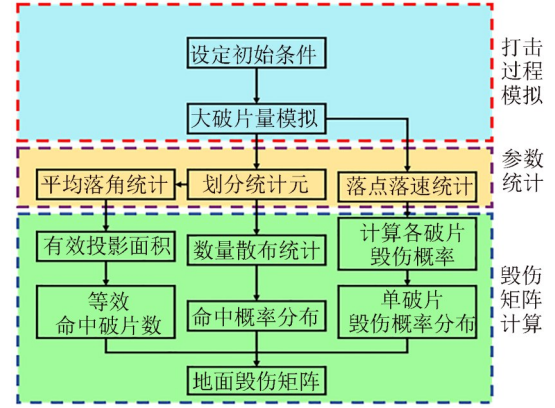


图 13 毁伤矩阵计算流程

Fig. 13 Calculation process of damage matrix

以“防守 30 s”为失能定义, 选取战斗部静态飞散角 $\Omega = 40^\circ$, 落角 $\alpha = 60^\circ$, 起爆高度 $Z_0 = 15\text{ m}$, 单次产生破片数 $N = 3000$, 破片质量 $m = 2\text{ g}$, 初速 $v_0 = 1600\text{ m/s}$, 求解得到地面人员毁伤矩阵。为了确保毁伤概率变化保持一定的连续性且保持数据的特征, 采用 2×2 最大池化方法对该矩阵进行处理, 结果如图 14 所示。

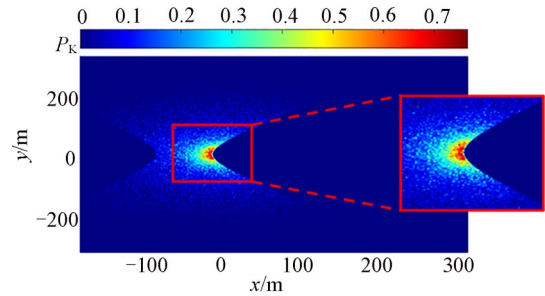


图 14 地面人员毁伤矩阵

Fig. 14 Ground personnel damage matrix

可以看到, 在无破片扇形区, 以起爆点的地面投影点为中心, 除去扇区后, 毁伤概率从中心大致呈放射状向四周减小。

3.2 模型有效性验证

在战斗部落角 α 为 30° 和 60° 时, 选取一些特定位置处 (如表 4 所示) 的人员目标, 通过 Monte Carlo 方法多次对单发打击造成的毁伤概率求解并取平均值, 作为这些位置处人员目标的毁伤概率。通过参数统计方法和 Monte Carlo 方法得到不同位置处的毁伤概率如图 15 所示。

由图 15 可以看出, 蒙特卡洛计算与毁伤矩阵预测概率的最大差值为 0.083, 地面人员毁伤矩阵模型能够在一定程度上替代 Monte Carlo 算法, 满

足快速计算的需求。

表 4 人员位置设置
Tab. 4 Personnel location settings

位置编号	x_{30}/m	y_{30}/m	x_{60}/m	y_{60}/m
1	-10	14	-14	6
2	-12	-20	-21	2
3	-19	16	-19	13
4	-21	36	-5	-35
5	-19	-61	-61	-5
6	50	152	18	70

注: x_{30} 和 y_{30} 、 x_{60} 和 y_{60} 分别为落角 30° 和 60° 时的人员位置处的横坐标和纵坐标; 位置编号越大, 与起爆点的距离越大。

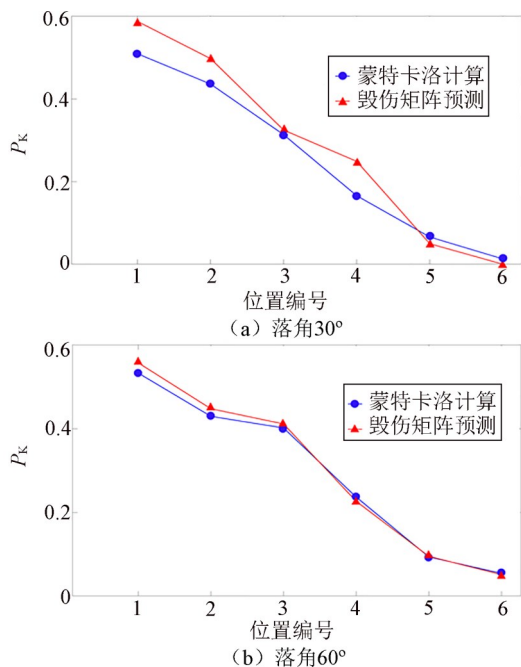


图 15 两种方法求解毁伤概率对比

Fig. 15 Comparison of damage probability solutions by two methods

4 结论

本文在考虑破片重力作用的基础上, 探讨了地面威力场特性, 采用参数统计方法构建了地面人员毁伤矩阵。得到以下主要结论。

1) 重力对破片场影响显著。本文在考虑重力的条件下建立起破片场模型, 通过与不考虑重力的情况对比, 发现重力对破片场形态有显著影响。因此在研究地面威力场时, 重力因素不可忽略。

2) 其他条件相同时, 在研究的质量范围内, 初动能从 1 500 J 增大至 3 000 J 的过程中, 破片质量越大, 最大飞行距离在相同初动能区间上的增幅越大。

3) 其他条件相同时, 随飞散角增大, 地面内无破片扇区面积减小; 战斗部落角越大, 破片边缘聚集在周向上分布的范围越大。

该方法的有效性较好, 为人员毁伤效能的快速评估提供了新途径。

参考文献:

- [1] 凌琦, 何勇, 何源. 定向战斗部破片飞散的数值模拟与试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3): 234-241.
- [2] LING Q, HE Y, HE Y. Numerical simulation and tests for fragments dispersion of an aimed warhead[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(3): 234-241.
- [3] 卢芳云, 李翔宇, 田占东, 等. 武器毁伤与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 152.
- [4] AN X Y, LIU J Y, YE P, et al. Axial distribution characteristics of fragments of the warhead with a hollow core[J]. International Journal of Impact Engineering, 2018, 122(12): 10-22.
- [5] BAI C H, WANG H Z, FENG C. Analysis of criteria for assessing safety distance for focused warhead fragments based on CDEM[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 25(9): 1-12.
- [6] GUO W F, LAN T, XU H F, et al. Analysis of factors influencing the killing space of a fragmentation warhead[C/OL]. 2023[2024-04-02]. <https://doi.org/10.1117/12.2675176>.
- [7] 洪豆, 郑宇, 李文彬, 等. 破片战斗部杀伤面积影响规律研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(5): 37-42.
- [8] HONG D, ZHENG Y, LI W B, et al. Research on influence law of fragment warheads killing area[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(5): 37-42.
- [9] 李峰梅, 熊国松, 王保, 等. 不同海拔高度下破片速度衰减模型的修正方法[J]. 含能材料, 2022, 30(1): 58-63.
- [10] LI F M, XIONG G S, WANG B, et al. A correction method for the velocity attenuation model of fragments based on altitudes[J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2022, 30(1): 58-63.
- [11] 刘建斌, 郭德龙, 任云燕, 等. 球形破片空气阻力系数和飞行特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2023,

- 43(7): 676-684.
- LIU J B, GUO D L, REN Y Y, et al. Air resistance coefficient and flight speed characteristics of spherical fragments[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(7): 676-684.
- [9] 田浩成, 卢芳云, 李志斌, 等. 基于改进毁伤矩阵的人员目标毁伤效能评估[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(7): 101-108.
- TIAN H C, LU F Y, LI Z B, et al. Evaluation of damage effectiveness of personnel target based on improved damage matrix[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(7): 101-108.
- [10] 于滨, 李翔宇, 卢芳云. 单破片对导弹舱段毁伤的易损性快速分析方法[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(12): 82-86.
- YU B, LI X Y, LU F Y. Fast vulnerability analysis method of missile sections under the attack of fragment[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(12): 82-86.
- [11] 张睿文, 裴扬, 侯鹏, 等. 破片式战斗部对预警机毁伤评估研究[J]. 北京理工大学学报, 2022, 42(4): 347-358.
- ZHANG R W, PEI Y, HOU P, et al. Research on damage evaluation of fragmentation warheads against early-warning aircraft[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2022, 42(4): 347-358.
- [12] 周双玲, 张新伟, 王顺虹. 基于Matlab的战斗部威力场仿真[J]. 兵器装备工程学报, 2015, 36(5): 53-56.
- ZHOU S L, ZHANG X W, WANG S H. Lethality simulation of warhead based on Matlab[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2015, 36(5): 53-56.
- [13] LI H S, ZHANG X Q, ZHANG X W. Calculation model and method of target damage efficiency assessment based on warhead fragment dispersion[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70(8): 1-8.
- [14] 王树山. 终点效应学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2019: 486.
- [15] 高旭东. 弹箭飞行原理与应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2018: 184.
- [16] 卢芳云, 蒋邦海, 李翔宇, 等. 武器战斗部投射与毁伤[M]. 北京: 科学出版社, 2013: 304.
- [17] 张华丽. 典型破片速度衰减规律实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2015: 21-32.
- [18] KOKINAKIS W, SPERRAZZA J. Criteria for incapacitating soldiers with fragments and flechettes[R]. Maryland: US Army Ballistic Research Laboratory (BRL), 1965.
- [19] 中国国家标准化管理委员会. 中国成年人人体尺寸: GB/T 10000—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 5-7.