

文章编号: 1006-9941(2007)03-0265-04

杀爆战斗部破片对地面目标杀伤概率的工程算法

汪德武¹, 李卫平²

(1. 北京理工大学, 北京 100081;

2. 第二炮兵工程学院, 陕西 西安 710025)

摘要: 分析了破片场空间分布规律, 介绍了一种空爆型杀爆战斗部杀伤概率的工程计算方法。计算得到了战斗部杀伤概率、破片分布密度图像, 及不同杀伤概率下毁伤区域面积随爆高的变化曲线。结果表明, $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\theta_c = 70^\circ$ 时, 杀伤概率为 0.5 或 0.8 时, 毁伤区域面积存在峰值, 其对应的最佳爆高为 8 m; 战斗部不同方向上的破片分布密度曲线与实验结果吻合, 证明该算法的有效性。

关键词: 爆炸力学; 杀伤概率; 破片; 杀爆战斗部

中图分类号: TJ410.3⁺3; O385

文献标识码: A

1 引言

杀爆战斗部起爆后, 在爆轰产物作用下弹体快速膨胀变形, 在最薄弱环节处首先出现裂纹, 并逐步扩展, 形成具有很高速度及一定质量与空间分布的破片。

对战斗部杀伤概率进行计算时, 目前采取的方法主要有两种: 一种是借助统计学原理建立起破片在空间的分布规律, 向目标区域进行投影, 从而得出破片密度及杀伤概率; 另一种是通过对战斗部破片在飞散区内进行离散, 得到破片的空间飞行矢量, 从而求解出破片的弹道轨迹, 完成杀伤概率的计算^[1]。两种方法各有优缺点, 前者是建立在实验统计基础上的, 比较适合于自然破片战斗部, 对破片场的描述能够与实验结果吻合得很好, 但却无法得到破片的弹道参数; 后者则可计算出各破片的终点坐标及速度矢量, 从而能够对破片场进行直观显示, 缺点是计算量很大, 须对全部破片的飞行轨迹进行计算; 而且由于战斗部壳体材质、形状不同, 破片场离散所造成的误差可能会对结果产生很大影响。

本文采用前一种方法, 在分析破片的飞散特性及空间分布规律的基础上, 建立了杀爆战斗部杀伤概率计算模型, 通过对不同破片的杀伤概率进行编程计算, 最终得到破片的综合杀伤概率。

2 破片参数计算及空间分布规律

2.1 分段法计算破片数量、质量及初速

对于整体式战斗部产生的自然破片, 弹体的破碎

与弹体结构、装药种类、弹体材料等因素有直接关系。因此目前多半采用半经验公式计算破片数量。对于图 1 所示的整体式战斗部, 根据战斗部结构可分成四段 ($i = 4$) 来进行求解。

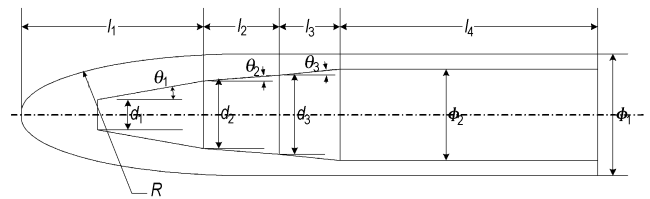


图 1 杀爆战斗部分段结构图

Fig. 1 Subsection structure of the blast-fragmentation warhead

采用 Gurney 公式, 则破片的平均初速 v_{0i} ^[2]

$$v_{0i} = \sqrt{2E} \sqrt{\frac{m_{ei} / m_{si}}{1 + 0.6(m_{ei} / m_{si})}} \quad (1)$$

式中, $\sqrt{2E}$ 为炸药的 Gurney 常数, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; m_{ei} 、 m_{si} 分别为战斗部该部位装药及壳体质量, kg。

根据 Mott 破片分布^[3], 得到破片平均质量的表达式

$$m_{fi} = 2A^2 \frac{\delta_i^2 (r_i + \delta_i)^3}{r_i^2} (1 + 0.5\alpha_i) \quad (2)$$

式中, r_i 、 δ_i 为该部位壳体的平均内径及壁厚, cm; A 为与装药有关的常数, $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})^{1/2}$, 如 B 炸药时, $A = 0.53$, 炸药为 TNT 时, $A = 0.42$; α_i 为该部位的质量比, $\alpha_i = m_{ei} / m_{si}$ 。

从而该部位的破片数量为:

$$N_i = \frac{m_{si}}{m_{fi}} \quad (3)$$

2.2 破片在空间的分布

破片密度在飞散球面上随纬角 Φ 变化。在静态情况下, 破片以其飞散平均方向角为对称轴呈正态分布^[4], 即

收稿日期: 2006-06-07; 修回日期: 2006-10-20

基金项目: 二炮装备部科研项目 (EP05020)

作者简介: 汪德武 (1967 -), 男, 研究员, 研究方向为火炮、自动武器与弹药工程。e-mail: davidwyy@sohu.com

$$f(\Phi_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i} \cdot \exp\left[-\frac{(\Phi_i - \Phi_{0i})^2}{2\sigma_i^2}\right] \quad (4)$$

式中, Φ_{0i} 为破片飞散平均方向角, 可以用 Taylor 公式^[4]计算:

$$\Phi_{0i} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1}\left(\frac{(s_{2i} - s_{1i})v_0}{2L_i \cdot v_D}\right)$$

式中, s_{1i} 为起爆点至等效圆筒前端内表面的距离, s_{2i} 为起爆点至等效圆筒后端内表面的距离, v_D 为炸药爆速, L_i 为等效圆筒长度。

σ_i 为 Φ_i 角的均方根差。设 Ω_i 为破片飞散角, 则有 $\sigma_i = \frac{\Omega_i}{3.3}$ 。对于战斗部不同部位的破片, 其飞散平均方向角 Φ_{0i} 和飞散角 Ω_i 也不相同。飞散平均方向角 Φ_{0i} 可由上式计算得到, 而对于飞散角, 圆柱段的破片, $\Omega_1 \approx 20^\circ$; 圆锥端破片, $\Omega_i = \Omega_1 + \Omega_2$, Ω_2 等于圆锥半顶角。

动态情况下, 由于战斗部落速的影响, 破片在空间中的分布有所变化, 其动态飞散方向角及分布函数分别为

$$\Phi_{vi} = \tan^{-1}\left(\frac{v_0 \sin \Phi_i}{v_c + v_0 \cos \Phi_i}\right) \quad (5)$$

$$f(\Phi_{vi}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{vi}} \cdot \exp\left[-\frac{(\Phi_{vi} - \Phi_{0vi})^2}{2\sigma_{vi}^2}\right] \quad (6)$$

式中, 下标 v 表示动态情况下相应参数的值。

3 杀伤概率计算模型

3.1 模型坐标系的建立

设战斗部在高度为 H 的空中爆炸。 O 点为炸点在地面上的投影, θ_c 为弹轴与地面的夹角, 即落角, 如图 2 所示。令 $OO_1 = R_x$, $BO_1 = R_2$, 则存在如下对应关系:

$$R_x = \frac{H}{\tan \theta_c}, \quad R_2 = \frac{H}{\sin \theta_c}$$

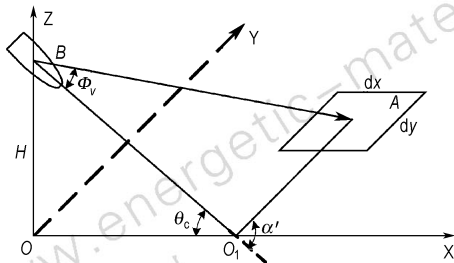


图2 计算模型

Fig.2 The calculation model

同时, 以 O_1 为坐标原点, 以顺时针方向角度 α 为辐角, OO_1 延长线为基线建立极坐标系。设地面上任一微元 A 的极坐标为 (r, α) , 令 $AB = R$, 则与 A 点对应的动态飞散角 Φ_v 为

$$\Phi_v = \cos^{-1}\left(\frac{R^2 + R_2^2 - r^2}{2RR_2}\right) \quad (7)$$

其中破片飞行距离

$$R = \sqrt{R_2^2 + r^2 + 2R_2r \cdot \cos(\alpha')} \quad (8)$$

$$\alpha' = \cos^{-1}(\cos \alpha \cdot \cos \theta_c)$$

3.2 杀伤概率的求解

战斗部破片的杀伤概率取决于单枚命中破片的杀伤概率 P_{hk} ^[5]、杀伤破片的分布密度 γ 和目标的暴露面积 A_e , 其表达式为

$$P_k = 1 - \exp(-P_{hk} \cdot \gamma \cdot A_e) \quad (9)$$

如图 3 所示, 由破片的分布规律可知, 若通过半径为 R 的飞散球面的破片总数为 N , 那么, 在纬角 Φ 处 $\Delta\Phi$ 球带上, 破片数目为:

$$N \cdot f(\Phi) \cdot \Delta\Phi$$

该球带的面积为:

$$R \cdot \Delta\Phi 2\pi R \cdot \sin\Phi$$

故破片密度 γ 为

$$\gamma = F(R) \cdot \Psi(\Phi) \quad (10)$$

式中, $F(R) = N/(2\pi R^2)$, $\Psi(\Phi) = f(\Phi)/\sin\Phi$

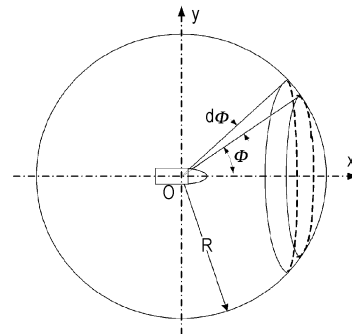


图3 破片飞散球面

Fig.3 The distributing sphere area of fragments

至此, 只要给定微元面积的极坐标值 $A(r, \alpha)$, 就可以由式(7)、(8)得到落入该微元面积内破片的飞行距离和动态飞散方向角 Φ_v , 并由式(5)得出几种不同初速破片的静态飞散方向角 Φ_i , 再由式(9)、(10)联合求解可计算出该微元处破片密度 γ_i , 即可求出不同破片在 A 点的杀伤概率 P_{ki} 。

$$P_{ki} = 1 - \exp(-P_{hk} \cdot A_e \cdot \gamma_i)$$

则 A 点对第 i 种破片而言, 其生存概率为

$$P_{Li} = 1 - P_{ki} = \exp(-P_{hk} \cdot A_e \cdot \gamma_i)$$

由于各类破片对目标的杀伤是相互独立的, 因此该杀爆战斗部对 A 点的综合杀伤概率为

$$P_k = 1 - P_L = 1 - \prod_{i=1}^n P_{Li} = 1 - \exp(-P_{hk} \cdot A_e \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_i) \quad (11)$$

4 结果分析

4.1 计算结果

某杀爆战斗部装药质量为 1.5 kg,壳体材料为 30CrMnSiA,密度 $7.83 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,其结构如图 1 所示。根据建立的模型对某杀爆战斗部进行了编程计算,得到的破片尺寸、平均质量、数量及初速见表 1 ($i=1 \sim 4$ 表示从战斗部的小端到大端部位)。

表 1 战斗部不同部位破片的初始参数

Table 1 The initial parameters of the fragments on the different parts of the warhead

No. (i)	size /mm × mm × mm	average mass / g	number	original velocity / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
1	21.3 × 8.5 × 4.3	5.10	644	892.8
2	15.2 × 6.0 × 3.0	1.85	482	1340.5
3	11.1 × 4.4 × 2.2	0.73	668	1553.7
4	10.8 × 4.3 × 2.2	0.68	2524	1476.6

杀爆战斗部落速 $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 落角 θ_c 在 $50^\circ \sim 80^\circ$ 范围内。图 4、5 所示为 70° 落角、不同爆高情况下的杀伤等概率曲线和破片密度分布曲线。从图 4、5 中可看出,战斗部毁伤区域是以炸点为圆心的近似圆周,且随落角、爆高的不同而发生变化。同时计算结果存在中心盲区现象,这是因为采取的破片分布模型是以 90% 破片在以平

均分散方向角为中心、破片分散角为范围的空间区域内散布的,破片无法到达中心区域,故在结果中存在盲区。实际上由于头部壳体破片的飞散,中心盲区并不存在。

图 6 为落角 $\theta_c = 70^\circ$ 、 $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时不同杀伤概率的毁伤区域面积随爆高变化曲线。从图 6 可看出,随着爆高增加,破片的散布范围越来越大,而杀伤概率较大时,对应的毁伤区域面积却在增大到一个峰值后逐渐减小。这是由于战斗部破片场是呈圆形分布,数量固定,而随着破片散布范围的增加,破片密度逐渐减小,从而导致总的毁伤区域面积增加而较大杀伤概率毁伤区域面积却在达到一个极值后开始减小,根据战标的要求,在某个杀伤概率下毁伤区域面积达到最大时的爆高值即为战斗部最佳爆高。则从图中得知,当 $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、 $\theta_c = 70^\circ$ 时,对于杀伤概率为 0.5 和 0.8 时,毁伤区域面积存在峰值,该峰值对应最佳爆高 $H_{opt} = 8 \text{ m}$ 。

4.2 与实验结果对比

在该型战斗部的静爆威力试验中,进行了战斗部破片分布密度的测量,用来验证计算模型是否正确。战斗部水平放置在爆心高度 3 m 的位置,在与弹轴夹角成 $50^\circ \sim 100^\circ$ 方向分别布置 8 块钢拦截靶,设置位置如图 7 所示。

将靶板上的破片穿孔和破片凹坑进行统计,得到不同方向上的破片密度。战斗部不同方向上破片密度的计算结果与实验结果如图 8 所示。

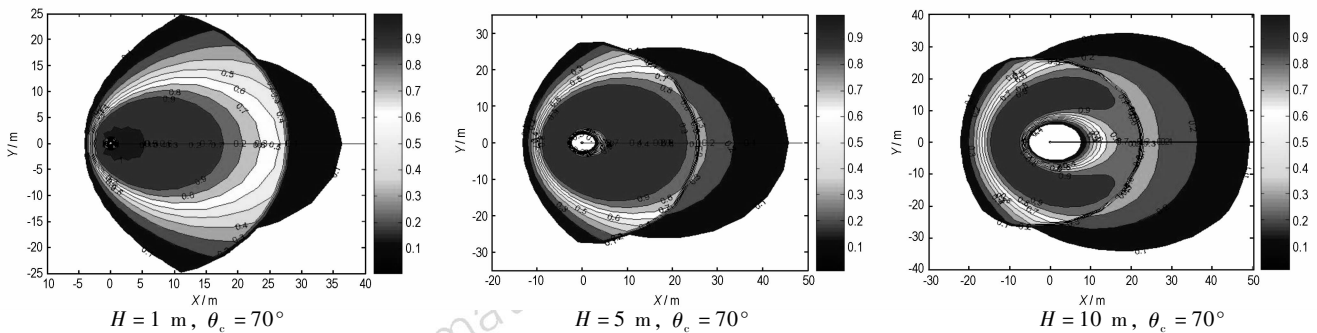


图 4 战斗部杀伤等概率曲线

Fig. 4 Contour curves of the lethal probability of the warhead

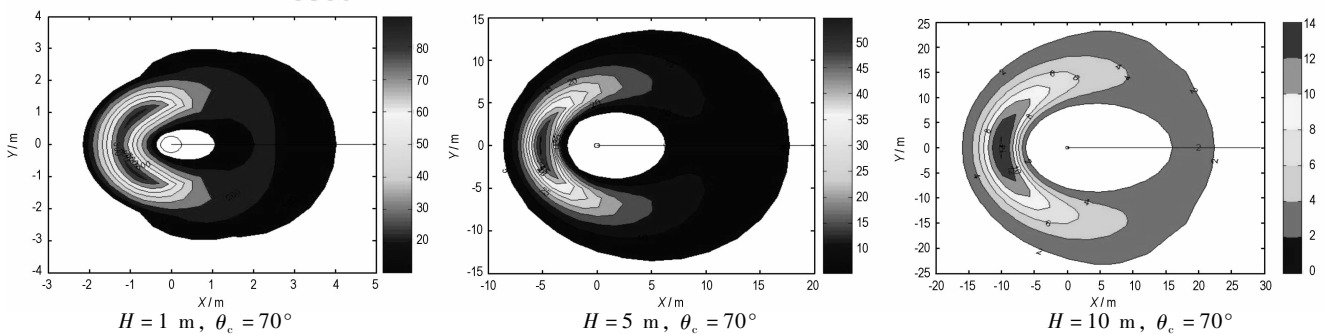


图 5 战斗部等分布密度曲线

Fig. 5 Contour curves of the density of fragments of the warhead

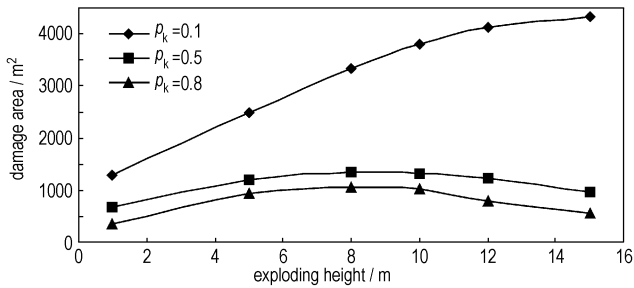


图6 不同杀伤概率下毁伤区域面积随爆高变化曲线

Fig. 6 Curves of the values of the damage area varied with the exploding height in different lethal probability

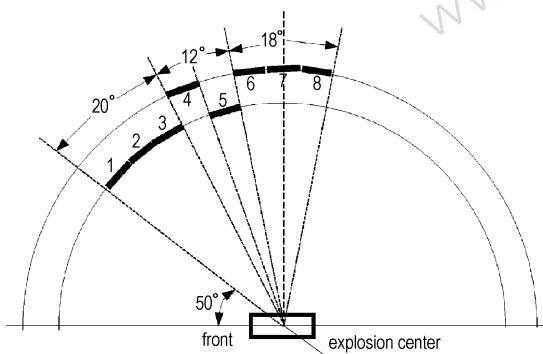


图7 试验靶板设置示意图

Fig. 7 Location of the experimental intercepting plates

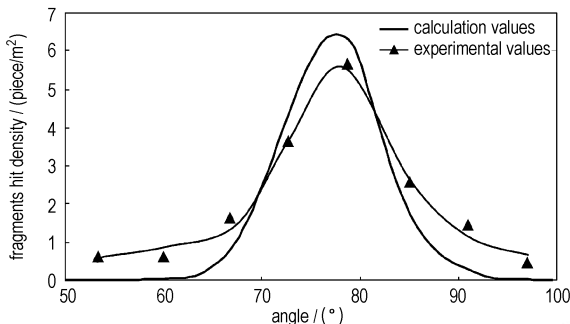


图8 战斗部不同方向上的破片密度曲线

Fig. 8 Curves of the fragments hit density on the different angles of warhead

从图8可以看出,实验结果所揭示出的统计规律与计算方法基本一致,在与弹轴在 78° 角附近的破片密度达到最大值,但实验结果略低于计算值。同时在角度小于 58° 、大于 98° 时密度的计算值基本为0,这与实验结果相比误差较大,这是由计算模型所造成的偏差,是可以接受的。

5 结论

本文对战斗部不同部位的破片数量、质量及初速进行了求解,并根据各自的空间分布对几种破片的杀伤概率分别进行了计算,最终得到了战斗部破片的综合杀伤概率。从计算结果可以看出,战斗部杀伤等概率曲线和破片密度分布曲线可以很好地揭示出对地面目标毁伤的真实物理图像。且破片分布密度曲线与实验结果基本相符,表明计算方法是正确的。

参考文献:

- [1] 钱立新, 屈明, 刘彤. 再入式大面积杀爆战斗部威力评定方法研究[J]. 弹道学报, 2001, 13(3): 42-46.
QIAN Li-xin, QU Ming, LIU Tong. Lethality assessment study of re-entry large scale blast fragmentation warhead[J]. *Journal of Ballistics*, 2001, 13(3): 42-46.
- [2] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [3] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [4] 肖刚, 张全虎, 李天柁. 大型杀爆战斗部动态威力计算[J]. 现代防御技术, 1997, 5: 24-30.
XIAO Gang, ZHANG Quan-hu, LI Tian-tuo. The calculation on dynamic lethality of large-scale blast-fragmentation warhead[J]. *Modern Recovery Technology*, 1997, 5: 24-30.
- [5] 杨辉耀. 常规导弹爆炸高度误差对毁伤效应的影响分析[J]. 火力与指挥控制, 2001, 26(2): 78-80.
YANG Hui-yao. The analysis to influence of the warhead exploding height error on damage effect of conventional ballistic missile[J]. *Fire Control & Command Control*, 2001, 26(2): 78-80.

Engineering Calculation Method for the Lethal Probability of Blast-fragmentation Warhead

WANG De-wu¹, LI Wei-ping²

(1. Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. The Second Artillery Engineering College, Xi'an 710025, China)

Abstract: The flying and distributing characteristic of the fragments was analyzed. The engineering calculation method for the lethal probability of the blast-fragmentation warhead exploding in the air was introduced. By this method, the contours of the lethal probability and fragments hit density were shaped, the curves of the damage area varied with the exploding height were described at the different lethal probability. The results show that the damage area has a peak value when $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $\theta_c = 70^\circ$, and the lethal probability is equal to 0.5 or 0.8. The peak value is corresponding to the optimal exploding height of 8 m. The curves of fragments hit density on the different direction of the warhead are coincident with the experimental value.

Key words: explosion mechanics; lethal probability; fragment; blast-fragmentation warhead