

文章编号: 1001-1455(2007)05-0468-05

导弹目标在破片式战斗部作用下的易损性评估*

李向东¹, 苏义岭¹, 韩永要²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 江苏 南京 210094;

2. 解放军炮兵学院, 安徽 合肥 230031)

摘要: 对导弹目标的功能、结构、毁伤机理进行了分析和研究, 给出了导弹目标的毁伤级别、毁伤树以及各舱段的毁伤准则, 在此基础上建立了导弹目标在破片式战斗部作用下的易损性评估模型, 根据该模型对某导弹目标的易损性进行了计算, 得到了该导弹的易损性与舱段易损特性、炸点相对目标的方位及距离的关系。

关键词: 爆炸力学; 易损性; 评估模型; 导弹; 战斗部; 破片

中图分类号: O383; TJ012.4

国标学科代码: 130 · 3599

文献标志码: A

1 引言

易损性是指目标被探测到的条件下, 在弹药的毁伤元素作用下被毁伤的可能性。目标的易损性研究对目标生存能力的提高、防护的设计与改进、战场目标的操纵与使用都具有非常重要的意义。随着导弹目标在战争中的广泛应用, 它已成为战场上的主要目标之一, 美国在飞机易损性研究的基础上开发了导弹易损性评估系统, 并且实现了真实弹目交汇条件下的易损性适时评估, 同时增加多个威胁作用下目标的易损性分析^[1], 而国内在导弹目标易损性方面的研究较少。为了研究导弹目标的生存能力以及反导弹药的效能, 在本文中建立了导弹目标在破片式战斗部作用下的易损性评估模型, 并对某导弹的易损性进行了评估。

2 目标分析

2.1 目标的功能和结构分析

一枚发射成功的导弹要完成既定的战斗任务, 需要具有寻的、飞行、姿态控制、终点毁伤等功能, 这些功能分别由导弹的制导系统、动力系统、控制系统和战斗部系统完成, 任何系统的毁伤都将导致其不能完成相应的功能, 从而使目标不能完成战斗任务。在研究导弹目标易损性时, 根据导弹总体结构将其分为制导、战斗部、燃料、控制和发动机 5 个舱段。

2.2 导弹毁伤模式及机理分析

导弹的战场使命是准确制导, 将导弹战斗部运送到目标区, 并适时可靠地引爆战斗部从而毁伤目标。导弹可能的毁伤模式有: (1) 不能准确的飞向攻击目标(偏航); (2) 不能引爆战斗部(哑弹); (3) 灾难性毁伤(解体)。导致这些毁伤模式的机理非常复杂, 例如, 导弹在破片或冲击波作用下, 弹体的局部压跨、变形、折弯、翼片的折断、变形等都可能引起气动力的不对称而使导弹偏航, 导引头以及控制系统毁伤、燃料泄漏、发动机失效等也能引起导弹不能准确飞向攻击的目标。导弹的引信及传爆序列受到损坏, 可能出现哑弹。如果导弹所携带的易燃易爆部件(如战斗部、燃料舱)受到高速破片的撞击, 可能出现燃烧或爆炸现象, 从而导致整个导弹的解体。

部件的毁伤机理与作用在部件上的毁伤元有关, 如破片毁伤元的撞击、侵彻可能使部件功能部分或全部丧失, 结构强度减弱, 引燃或引爆易燃易爆部件。冲击波则使目标的结构毁伤。本文中, 仅考虑目标

* 收稿日期: 2006-03-15; 修回日期: 2006-06-08

作者简介: 李向东(1969—), 男, 博士, 副研究员。

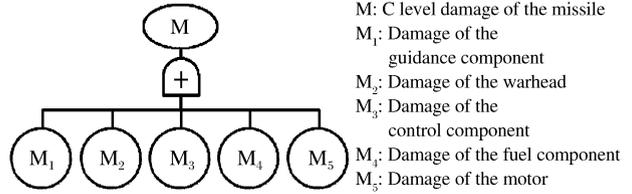
在破片毁伤元作用下的易损性。

2.3 目标毁伤级别和毁伤树

根据导弹的毁伤模式，将导弹的毁伤分为两个级别：(1) K 级毁伤（解体）；(2) C 级毁伤（偏航或哑弹）。

对于导弹解体常常是由于战斗部、燃料舱爆炸或被直接命中情况下引起的，对于破片毁伤元经过试验研究发现很难造成该级别的毁伤，所以只研究导弹的 C 级毁伤。

而制导舱、战斗部舱、燃料舱、动力舱、控制舱的毁伤都可能导致巡航导弹不能完成预定作战任务，造成 C 级毁伤，其毁伤树如图 1 所示。



M: C level damage of the missile
 M₁: Damage of the guidance component
 M₂: Damage of the warhead
 M₃: Damage of the control component
 M₄: Damage of the fuel component
 M₅: Damage of the motor

图 1 导弹的 C 级毁伤树图

Fig. 1 C level damage tree of missile

3 舱段的毁伤准则

毁伤准则就是判断舱段或部件是否毁伤的判据。常用的针对撞击毁伤的准则主要有 3 种形式，分别是：毁伤元作用下的毁伤概率 ($P_{k/h}$ 函数)、面积消除准则和能量密度准则^[2]。采用的形式为 $P_{k/h}$ 函数，该函数以概率的形式表示舱段的毁伤，其值是命中舱段的有效破片（指能够穿透导弹的蒙皮、舱段的壳体，并具有一定毁伤后效的破片）数的函数，与舱段的易损特性有关。

舱段的易损特性与舱段的抗破片侵彻能力及毁伤舱段所需破片密度有关，而舱段的抗破片侵彻能力与舱段的蒙皮、壳体厚度、材料及内部关键零件的抗弹性能等很多因素有关，毁伤舱段所需的破片密度与舱段内零部件的特性及分布有关。

各舱段的内部结构非常复杂，因此用等效靶厚度来表示各舱段的抗破片侵彻能力。等效靶建立的原则是：几何外形接近实物，模拟迎弹面积；不同舱段等效靶厚度不同，模拟破片抗侵彻能力，厚度的具体值通过下面的方法确定。

等效靶由舱段蒙皮、部件壳体及所需的后效三部分等效而成。首先要确定等效靶的材料，然后将不同部分的材料等效为等效靶材，最后将同一种材料的间隔靶等效为最终的等效靶。如图 2 所示。

因各舱段的特性不同，毁伤不同的舱段所需的破片密度（或破片数）不同。舱段的毁伤准则为^[3]

$$P_{k/h} = 1 - e^{-\frac{n_c}{n_s}} \quad (1)$$

式中： n_s 为毁伤舱段所需的破片数， $n_s = A_c \rho_s$ ， A_c 为舱段的迎弹面积， ρ_s 为毁伤舱段所需的破片数密度（面密度）， n_c 为命中舱段的有效破片数。计算所用导弹的主要几何及易损特性数据如表 1 所示^[4]。

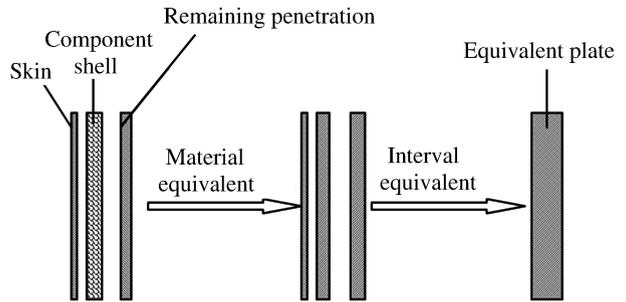


图 2 等效靶厚度确定方法示意图

Fig. 2 Definition method of equivalent plate's thickness

表 1 目标特性数据
 Table 1 Target property data

舱室	L/m	d/m	h_e/m	$\rho_t/(枚/m^2)$
制导舱	1.555	0.5	0.004	27.2
战斗部	1.980	0.5	0.025	58.3
燃油舱段	1.410	0.5	0.010	19
控制舱	0.695	0.5	0.020	60
发动机舱	0.923	0.5	0.015	19

4 导弹目标的易损性评估

目前常用杀伤概率和易损面积来度量目标的易损性,采用导弹目标在破片战斗部作用下的毁伤概率来衡量目标的易损性。

4.1 战斗部爆炸形成的动态破片场

破片式战斗部爆炸后,形成动态的破片飞散锥,可以通过静态破片锥叠加导弹速度得到,如图3所示。破片静态的最小和最大飞散方位角

$$\varphi_{\min} = \varphi_0 \quad (2a)$$

$$\varphi_{\max} = \varphi_0 + \Delta\varphi \quad (2b)$$

式中: φ_0 为破片的静态飞散倾角; $\Delta\varphi$ 为破片静态飞散角。

叠加战斗部末段速度后,得破片动态区间角

$$\varphi'_{\min} = \arctan\left(\frac{v_0 \sin\varphi_{\min}}{v_0 \cos\varphi_{\min} + v_m}\right) \quad (3)$$

$$\varphi'_{\max} = \arctan\left(\frac{v_0 \sin\varphi_{\max}}{v_0 \cos\varphi_{\max} + v_m}\right) \quad (4)$$

式中: v_0 为静态战斗部爆炸后破片的初速, v_m 为导弹末段速度。

叠加战斗部终点速度后的破片速度为

$$v_{d0} = \sqrt{v_0^2 + v_m^2 + 2v_0 v_m \cos\varphi} \quad (5)$$

式中: φ 是战斗部静爆时破片初速和战斗部轴线的夹角。飞散区间内破片的动态速度是飞散角 φ 的函数。

4.2 破片场与目标的交汇分析

终点处战斗部爆炸形成的破片和目标遭遇,部分破片以不同的姿态命中目标的不同舱段,为了评估目标在战斗部作用下的易损性,必须确定命中目标各舱段的破片参数及有效破片数目。

4.2.1 破片的入射参量

破片命中目标舱段时,目标在运动,破片的入射速度 $v_p = v_f - v_t$,其中 v_f 为破片命中目标时的速度矢量; v_t 为目标运动速度矢量。

破片的入射角为 v_p 与入射点处目标外法线反向矢量 γ 的夹角,用 ζ 表示,则

$$\zeta = \arccos \frac{v_p \cdot \gamma}{|v_p| |\gamma|} \quad (6)$$

4.2.2 破片对等效靶的侵彻

球形破片对等效靶的极限穿透速度公式为^[5]

$$v_i = a \left(\frac{h}{d \cos\zeta} \right)^b \frac{\rho_t^{0.3}}{\rho_p^{0.8}} \sigma_b^{0.5} \quad (7)$$

式中: h 为舱段等效靶厚度,mm; ζ 为破片的入射角; d 为球形破片直径,mm; ρ_p 为破片材料密度, g/cm^3 ; ρ_t 为靶板材料密度, g/cm^3 ; σ_b 为靶板材料强度极限,MPa; a 、 b 为取决于弹靶条件的试验系数。

4.2.3 命中舱段的有效破片数

如果破片的速度大于舱段等效靶的极限穿透速度,认为该破片为有效破片,否则为无效破片。将动态破片场划分为很多破片微元束,用飞散角 φ 及位偏角 ξ 定义破片束,则微元束内破片数为

$$dn = \rho d\varphi d\xi \quad (8)$$

式中: ρ 为破片束内的破片密度(角密度)。如果破片在飞散区间内均匀分布,则破片在单位立体角内的密度为

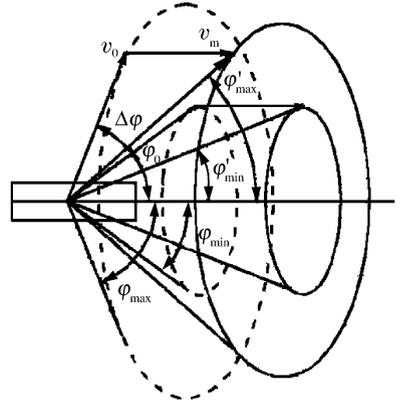


图3 破片动态飞散角示意图

Fig. 3 Dynamic ejection angle of fragments

$$\rho = \frac{N}{2\pi(\cos\varphi'_{\max} - \cos\varphi'_{\min})} \tag{9}$$

式中： N 为破片总数。

则命中各舱段的破片数目

$$n_{ht}^{(j)} = \iint J_h^{(j)} dn = \iint \rho J_h^{(j)} d\varphi d\xi \tag{10}$$

式中： $J_h^{(j)}$ 为判断破片束是否命中舱段 j 的一个因子，如果命中舱段 j 其值为 1，否则为 0。式(10)的积分范围为 $\varphi'_{\min} \leq \varphi \leq \varphi'_{\max}$ 和 $0 \leq \xi \leq 2\pi$ 。

命中各舱段的有效破片数目为

$$n_e = n_E \tag{11}$$

式中： n_{ht} 为击中部件或舱段的破片总数； E 为判断破片是否穿透等效靶的一个系数。当 $v_p \geq v_j$ 时， $E=1$ ；当 $v_p < v_j$ 时， $E=0$ 。

4.3 目标易损性计算

根据各舱段的毁伤准则(式(1))及命中各舱段的有效破片数，即可计算得到各舱段的毁伤概率，再结合目标的毁伤树图，可以得到整个目标的毁伤概率为

$$P_t = 1 - \prod_{j=1}^w (1 - P_c^{(j)}) \tag{12}$$

式中： P_t 为整个目标的毁伤概率； $P_c^{(j)}$ 为舱段 j 的毁伤概率； w 为目标的舱段数目。

4.4 计算结果及分析

以某战斗部为例，在一定的终点条件下，对导弹目标的易损性进行了计算。主要的计算条件为：破片平均质量 2 kg，破片总数 2 000 枚，破片静态飞散方位倾角 80° ，破片飞散角 30° ，破片材料密度 17.8 g/cm^3 ，破片平均初速 2 100 m/s，战斗部终点速度 800 m/s，目标速度 300 m/s，偏航角 180° ，俯仰角 0° 。图 4 所示为通过导弹轴线铅垂面内的毁伤等概率曲线。

由结果可知，通过导弹轴线铅垂面内的目标毁伤等概率曲线呈蝴蝶形，战斗部在导弹前或后面爆炸时对目标的毁伤概率极小，在目标侧围爆炸对目标的毁伤概率较大。后端爆炸(图中 x 正向)，破片不能命中目标，战斗部在目标前面爆炸，目标从破片环中穿过，所以对目标的毁伤概率很小。侧向相对目标不同位置，目标的毁伤概率不同，这是由于目标不同舱段易损特性不同引起的。毁伤等概率曲线两端比较密集，中间稀疏，主要是因为导弹在目标两端爆炸时，只有破片飞散区间的一部分覆盖目标，覆盖区间的大小对弹目相对位置非常敏感，导致命中目标的破片数变化较大。

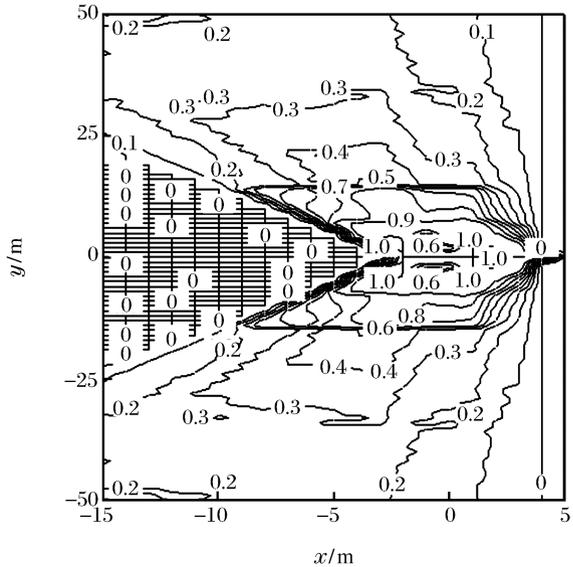


图 4 目标毁伤的等概率曲线

Fig. 4 Contour curves of target damage

5 结论

根据计算结果可以得到如下结论：(1) 由于导弹目标侧面迎弹面积大，所以战斗部在侧围爆炸时，

目标更易损;(2) 随着战斗部炸点相对目标位置的增加,目标易损性降低;(3) 炸目距离相同时,炸点相对目标轴向位置不同,目标的易损性不同,这是由于各舱段的易损特性不同引起的。此外,所建模型可用于分析战斗部对目标的毁伤效能以及引战配合效率,对战斗部、引战配合以及目标的设计都具有一定的指导作用。

参考文献:

- [1] Wasmund T L. New model to evaluate weapon effects and platform vulnerability: AJEM[J]. WSTIAC NEWSLETTER, 2001,2:1-3.
- [2] Reinard B E. Target vulnerability to air defense weapons[R]. AD-A155033, 1984: 71-76.
- [3] 李向东. 目标毁伤理论及工程计算[D]. 南京:南京理工大学,1996:65-66.
- [4] 李向东,张运法,魏惠之. AHEAD弹对导弹目标的毁伤[J]. 兵工学报,2001,22(4):556-559.
LI Xiang-dong, ZHANG Yun-fa, WEI Hui-zhi. A study on the destruction effect of the "AHEAD" projectile to a missile target[J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 556-559.
- [5] 于宪峰. 预制破片弹对导弹的毁伤[D]. 南京:南京理工大学,1997:38-39.

Vulnerability assessment of the missile subjected to the fragment warhead

LI Xiang-dong^{1*}, SU Yi-ling¹, HAN Yong-yao²

(1. School of Mechanics, Nanjing University of Science and Technology,

Nanjing 210094, Jiangsu, China;

2. Artillery Academy of PLA, Hefei 230031, Anhui, China)

Abstract: The function, structure and damage mechanism of the missile were studied to analyze the missile vulnerability to the fragment warhead. The damage levels, tree and damage criterion of every component of the missile were given. Based on these, the vulnerability assessment model of the missile to the fragment warhead was built. According to the model, the vulnerability of a missile was calculated, and the relations between target vulnerability and vulnerability of components, orientation of warhead explosion and distance to the target were obtained.

Key words: mechanics of explosion; vulnerability; assessment model; missile; warhead; fragment

* Corresponding author: LI Xiang-dong

E-mail address: lixiangdong692003@yahoo.com.cn

Telephone: 86-25-84317634