

doi: 10.7690/bgzdh.2020.03.005

一种基于某新型超近程主动防护系统的防护效果评估方法

刘一鸣¹, 熊自明¹, 王德荣¹, 孙善政¹, 胡家锋²

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室, 南京 210007;

2. 中国人民解放军 75714 部队, 湖南 衡阳 421000)

摘要: 为解决武器装备中拦截效能评估存在评价指标选取不全面、确定评价权重主观性强等问题, 提出一种基于某新型超近程主动防护系统的拦截防护效果评估方法。采用 PCDM 公式, 依据《防护工程防常规武器结构设计规范》, 结合美国 TM585 计算软件, 从爆炸震塌厚度、冲击波、破片 3 个角度, 对来袭弹体的拦截爆炸, 给防护目标造成的防护风险和破坏作用进行分析。分析结果表明, 该方法可为新型防护系统的防护效果评估提供参考。

关键词: 超近程主动防护系统; 防护效果评估; 爆炸震塌厚度; 爆炸冲击波; 破片分析

中图分类号: TJ760.2 **文献标志码:** A

Protective Effect Evaluation Method Based on a New Ultra-short Range Active Protection System

Liu Yiming¹, Xiong Ziming¹, Wang Derong¹, Sun Shanzheng¹, Hu Jiafeng²

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Mitigation of Explosion & Impact, PLA University of Army Engineering, Nanjing 210007, China; 2. No. 75714 Unit of PLA, Hengyang 421000, China)

Abstract: In order to solve the problems existing in the evaluation of interception effectiveness of weapons and equipment, such as incomplete selection of evaluation index and strong subjectivity of determining evaluation weight, a method for evaluating the effectiveness of interception protection based on a new type of ultra-short range active protection system is proposed. Based on the PCDM formula, according to the Code for the Design of Conventional Weapon Structures for Protection Engineering and the TM585 calculation software of the United States, the protective risks and damage effects caused by the interception and explosion of incoming projectiles on the protection targets are analyzed from 3 angles: explosive collapse thickness, shock wave and fragments. The analysis results show that this method can provide a reference for the evaluation of the protective effect of the new protective system.

Keywords: ultra-short range active protection system; evaluation of protective effect; explosive collapse thickness; explosive shock wave; fragment analysis

0 引言

近年来, 随着国防科技的高速发展, 重要目标的防护也由传统的提高目标结构抗击打能力向主动的信息化综合拦截防护转变。国内外针对主动防护系统开展了大量的课题研究和探索实践, 如俄罗斯的“鸫”^[1]、美国的“毒刺”^[2]、中国的“倚天”^[3]等。国内针对主动防护系统的研究主要集中在对于装甲目标的主动防护上^[4-6], 关于飞机隐蔽库、油库等重要高价值目标的超近程主动防护的研究较少; 因此, 关于超近程主动防护系统的拦截防护效能评估的研究也较少。

当前对研发新型武器系统的效能评估多采用模糊层次分析^[7]、ADC 评估^[8]、贝叶斯网络^[9]等方法。进行风险评估时, 往往存在评价指标选取不全面、不客观, 确定评价权重主观性强等缺点问题。该新

型超近程主动防护系统预定拦截范围为距离防护目标几十米的空域, 来袭目标在几公里时雷达进行探测预警, 控制系统解算出拦截坐标, 随动系统发射拦截装置对来袭目标进行拦截, 在实现拦截后, 防护目标的防护风险主要来自于来袭弹体被拦截诱爆后形成的空中爆炸, 因此, 做好对该风险源的防护效能评估非常重要。

为便于开展研究, 笔者假设来袭弹体速度为 340~480 m/s, 对于短延时装药, 最大延时 60 ms, 即弹体诱爆后可能最远飞行 20~30 m。如果弹药垂直着靶, 由于拦截高度在距离防护目标几十米的范围, 能够保证来袭弹体被拦截后, 距离目标表面 10 m 以上触爆。如果弹药以一定攻角倾斜攻击, 则引爆点距离目标表面更加大。风险评估以 C30 混凝土面临 MK82, MK83, MK84 打击为例, 通过目标表面

收稿日期: 2019-10-29; 修回日期: 2019-12-06

基金项目: 国家自然科学基金青年项目(51608529); 博士后基金(2017M611816)

作者简介: 刘一鸣(1994—), 男, 山东人, 学士, 从事防灾减灾工程及防护工程、综合信息防护研究。E-mail: LiuYiming940926@163.com。

10 m 产生的空中爆炸对结构的破坏风险进行分析。

1 爆炸震塌厚度分析

空中爆炸时结构的震塌厚度计算采用 PCDM (puffed collapse degree method) 公式^[10](美国空军 1989 年出版的《防护结构设计手册》)。

$$h_z = 0.048 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-0.3} \left(\frac{W}{W+C} \right)^{-0.3} W^{-1/3} \quad (1)$$

PCDM 公式在 1993 年修正为

$$h_z = 0.0115 \left(\frac{R}{W^{1/3}} \right)^{-0.7} \left(\frac{W}{W+C} \right)^{-1.31} W^{-1/3} \quad (2)$$

式中: W 为弹体的装药量; C 为射弹壳体质量; R 为射弹爆炸时到结构的距离。

接触爆炸和侵入后爆炸震塌厚度计算采用规范公式:

$$h_z = h_q - e + mK_z \sqrt[3]{W} \quad (3)$$

其中: e 为装药高度; m 为填塞系数; K_z 为不震塌系数, 取钢筋混凝土整体式工事无防塌层类别为 2.0。对于装药高度 e 及填塞系数 m 的计算参考文献[11]。

1.1 MK80 系列爆炸震塌厚度分析

将式(2)和(3)代入表 1, 可以计算得到结构震塌厚度与弹药爆炸时, 到结构距离的关系曲线如图 1 和图 2 所示。其中爆炸时到结构的距离为负号代表在防护层上部爆炸, 正号为侵入到层内爆炸。

表 1 美国 MK80 系列弹药参数

弹药参数	MK84	MK83	MK82
	907 kg 级低阻 爆破炸弹	454 kg 级低阻 爆破炸弹	227 kg 级低阻 爆破炸弹
质量/kg	894	447	241
长度/m	3.84	3	2.21
直径/mm	460	350	273
壳体材料	钢	钢	钢
当量系数	1.35	1.35	1.35
炸药类型	Tritonal,	Tritonal,	Tritonal,
质量/kg	H6PBXN-109/ 428	H6PBXN-109/ 202	H6PBXN-109/ 89
装填系数	0.479	0.452	0.369

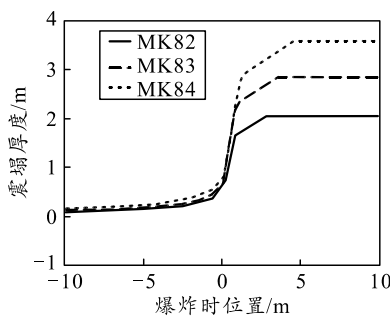


图 1 空爆 MK82、MK83、MK84 震塌厚度与爆炸位置关系

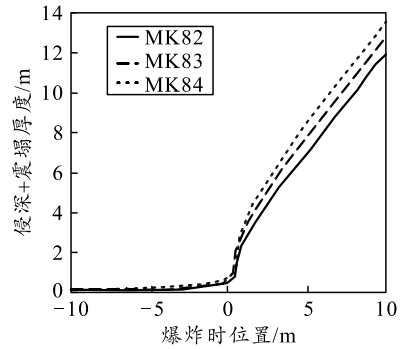


图 2 MK82、MK83、MK84 侵入深度、震塌厚度与爆炸位置关系

由图 1 和图 2 可以看出: 空爆 1 m 以上引起的爆炸震塌深度小于 0.2 m, 而侵入后由侵入和爆炸引起的破坏深度呈几何式上升。因来袭弹体在距离防护目标十几米处被诱爆, 故给防护目标造成的防护风险较小。

1.2 不同弹种之间的爆炸震塌厚度对比分析

防护目标面临的打击威胁是多样化的, 来袭弹体并不局限于 MK80 系列航空炸弹, 还包括火箭弹、空地导弹和巡航导弹等。为进一步验证爆炸震塌厚度对防护风险的评估效果, 采用 MK84 航空炸弹和 BGM-109D 巡航导弹(战斧巡航导弹)进行对比分析。弹药参数如表 2 所示。

表 2 MK84 航空炸弹和 BGM-109D 巡航导弹弹药参数

弹药参数	MK84	BGM-109D
	907 kg 级低阻爆破炸弹	亚音速多用途巡航导弹
质量/kg	894	1 440
长度/m	3.84	6.25
直径/mm	460	520
壳体材料	钢	铝合金
当量系数	1.35	1.59
装药质量/kg	428	685
装填系数	0.479	0.546

2 种弹体在攻击过程中空爆、触爆及侵入后, 对结构造成的震塌厚度与弹药爆炸时到结构距离的关系曲线如图 3 和图 4 所示。

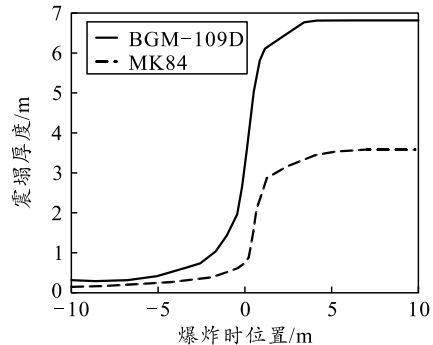


图 3 空爆 MK84 与 BGM-109D 震塌厚度与爆炸位置关系对比

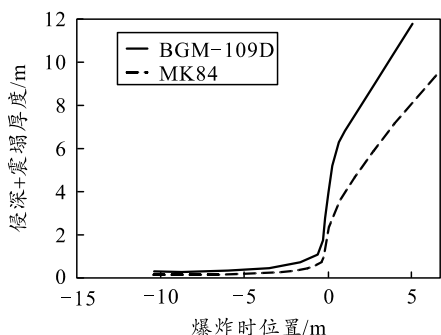


图 4 MK84 与 BGM-109D 侵彻深度、震塌厚度与爆炸位置关系对比

由图 3 和图 4 可以看出：2 种弹种在空爆 1 m 以上引起的爆炸震塌深度小于 1 m，而侵爆后由侵彻和爆炸引起的破坏深度则呈几何式上升。MK84 与 BGM-109D 的变化规律均是如此，符合计算规律，而来袭目标未及防护目标时，在距离十几米处已经爆炸，对防护目标造成的威胁较小。

2 冲击波超压与冲击波冲量分析

依据《防护工程防常规武器结构设计规范》(GJBz 20419.2-9)，冲击波超压采用下式计算：

当 $0.473 \leq R/\sqrt[3]{C} \leq 7.60$ 时，

$$\Delta p_m = 0.658 \left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^3 + 0.261 \left(\frac{\sqrt[3]{C}}{R}\right)^{1.5} \quad (4)$$

其中： Δp_m 为入射冲击波超压峰值，MPa； C 为等效 TNT 装药量，kg； R 为爆心至所求点的距离，m。

对于 MK84 航空炸弹，炸药为 428 kg 高爆炸药，其 TNT 当量系数为 1.35，等效 TNT 装药量为 577.8 kg。假如爆高为 10 m，计算得到的冲击波超压峰值为 0.865 MPa。

依据《防护工程防常规武器结构设计规范》(GJBz 20419.2-9)，冲击波冲量采用下式计算：

当 $0.473 \leq R/\sqrt[3]{C} \leq 7.60$ 时，

$$i = 1.65 \times 10^{-4} (\sqrt[3]{C}/R)^{1.23} C^{1/3} \quad (5)$$

当 $0.210 \leq R/\sqrt[3]{C} \leq 0.473$ 时，

$$i = 1.88 \times 10^{-4} (\sqrt[3]{C}/R)^{1.06} C^{1/3} \quad (6)$$

当 $0.024 \leq R/\sqrt[3]{C} \leq 0.21$ 时，

$$i = 2.79 \times 10^{-4} (\sqrt[3]{C}/R)^{0.80} C^{1/3} \quad (7)$$

当 $0 \leq R/\sqrt[3]{C} \leq 0.024$ 时，

$$i = 5.51 \times 10^{-3} C^{1/3} \quad (8)$$

式中 i 为冲击波冲量， $N \cdot s/mm^2$ 。

假如爆高为 10 m，对于 MK84 航空炸弹，计算得到的冲击波冲量为 $0.001\ 098\ N \cdot s/mm^2$ ；对于

BGM-109D 巡航导弹，计算得到的冲击波冲量为 $0.001\ 758\ N \cdot s/mm^2$ 。

从以上分析可以看出，对于 MK84 和 BGM-109D 在 10 m 高空中爆炸，对地面空气冲击波压力及冲量在防护工程防护能力以内。

3 破片分析

采用美国 TM585 计算软件，得到 MK84 航空炸弹在不同爆高下产生的破片速度如图 5 所示。

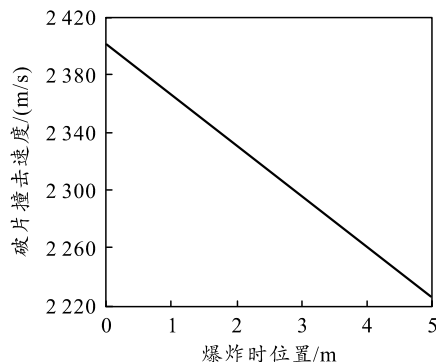


图 5 不同爆高破片撞击速度

空中爆炸产生的破片最大速度为 2 402 m/s，破片质量为 18.43 g。选取 C30 混凝土为对象，MK84 爆炸产生的破片对 C30 混凝土的侵彻深度使用 TM585 来计算：

$$X = \frac{222 \times p_p d v}{f'_c} + 0.5d \quad (9)$$

式中： X 为侵彻深度； p_p 为局部压力； d 为直径； v 为速度； f'_c 为混凝土的抗压强度。其计算结果如图 6 所示。

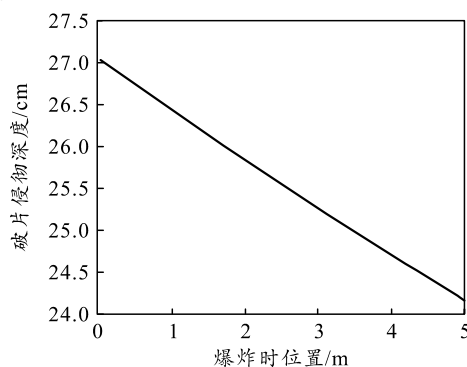


图 6 最大破片侵彻深度

由上述分析可见：来袭弹药被拦截后产生的破片，在 C30 混凝土中最大侵彻深度为 27.13 cm，给防护目标带来的破坏风险较小，当前防护工程的结构能够承受住此类较小侵深的破坏，不影响防护目标的正常使用。

2796-2800, 2806.

- [3] 康俊民, 赵祥模, 徐志刚. 无人车行驶环境特征分类方法[J]. 交通运输工程学报, 2016, 16(6): 140-148.
- [4] 陈元枝, 邓艳, 史绍亮, 等. 基于 Zxing 的彩色 QR 码生成与识别方法[J]. 桂林电子科技大学学报, 2016, 36(4): 333-337.
- [5] 畅毅, 王亮, 黄劲松, 等. 基于 BD930 板卡的 RTK 测量系统研制[J]. 测绘通报, 2017(1): 97-101, 105.

(上接第 9 页)

- [8] 李邦复. 遥测系统(上)[M]. 北京: 宇航出版社, 1999: 397-401.
- [9] 尚丽娜, 刘嫚婷. 1553B 接口信息文件自动导入软件的设计与实现[J]. 测控技术, 2014, 33(6): 120-122.
- [10] 刘洋, 李宗德, 丁雪静, 等. 基于 XTCE 的卫星遥测数据处理方法[J]. 遥测遥控, 2017, 38(2): 27-31.
- [11] 舒传华, 王竞克, 唐海波, 等. 基于遥测全帧的延时数据弥补方法研究与应用[J]. 遥测遥控, 2016, 37(4): 14-19.
- [12] 赵源, 姜小峰. 基于多线程技术的自动测试系统优化设计[J]. 计算机应用, 2014, 34(7): 2124-2128.

(上接第 21 页)

4 结束语

该新型主动防护拦截系统在距离防护目标十几米时对来袭弹体实现诱爆。为了明晰诱爆引发的空中爆炸给防护目标造成的防护风险, 笔者从爆炸震塌厚度、冲击波、破片 3 个角度进行分析。从结果可以看出: 目标的防护能力能够承受破坏作用造成的安全风险, 对于小于 60 ms 短延时装定的来袭弹体, 该系统可以保证在 10 m 以上实现空中诱爆, 满足防护指标要求, 能够有效控制空中爆炸带来的防护风险, 防护效果较好。

参考文献:

- [1] 周平, 赵辰霄, 梅林, 等. 现代坦克主动防护系统发展现状与趋势分析[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(2): 132-136.
- [2] 李开文. 追杀低空目标的“毒刺”——美军三种近程防空武器系统[J]. 现代军事, 2003, 45(12): 26-28.

- [6] 简毅, 卢峥, 蒲永材, 等. 基于遗传优化 GRNN 神经网络的人脸识别算法[J]. 兵器装备工程学报, 2018(2): 131-135.
- [7] ZHAO L. 3D Obstacle Avoidance for Unmanned Autonomous System (UAS)[D]. University of Nevada, Las Vegas, 2015.
- [8] 许心德, 关胜晓. 未知环境下基于 VFH* 的机器人避障[J]. 计算机仿真, 2010, 27(3): 156-160.

- [13] 睦俊华, 刘慧娜, 王建鑫. 多核多线程技术综述[J]. 计算机应用, 2013, 33(S1): 239-242, 261.
- [14] EKANAYAKE J, FOX G. High performance parallel computing with clouds and technologies[C]//Cloud Computing, Lecture Notes of the Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering 34. Berlin: Springer-Verlag, 2010: 20-38.
- [15] CARTER N P, AGRAWAL A, BORKAR S, et al. Runnemed: An architecture for ubiquitous high-performance computing[C]//Proceedings of the 19th IEEE International Symposium on High Performance Computer Architecture. Shenzhen, China, 2013: 198-209.

- [3] 袁杨. “倚天”防空导弹武器系统[J]. 兵器知识, 2010, 41(4): 44-46.
- [4] 张卫东. 国外装甲车辆主动防护系统发展[J]. 国外坦克, 2008, 41(2): 7-14.
- [5] 任晓刚. 国外坦克装甲车辆主动防护系统[J]. 火力与指挥控制, 2010, 44(S1): 4-6.
- [6] 赵晓凡. 坦克装甲车辆主动防御系统研究[J]. 车辆与动力技术, 2002, 41(3): 53-57.
- [7] 罗佳, 杨世平. 一种信息系统安全风险的灰色模糊综合评估方法[J]. 微型机与应用, 2010, 38(13): 44-46.
- [8] 王世学, 李兆耿. 基于改进 ADC 模型的坦克作战效能评估[J]. 兵工自动化, 2009, 28(7): 14-16.
- [9] 付钰, 吴晓平, 严承华. 基于贝叶斯网络的信息安全风险评估方法[J]. 武汉大学学报(理学版), 2006, 52(5): 631-634.
- [10] 郑全平, 钱七虎, 周早生, 等. 钢筋混凝土震塌厚度计算公式对比研究[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 47-53.
- [11] 钱七虎. 防护工程计算原理[M]. 南京: 解放军理工大学, 2009: 70-73.