

doi: 10.7690/bgzd.2013.08.003

对抗主动防护系统的 EFP 战斗部设计

郭希维¹, 姚志敏¹, 赵昉²

(1. 军械工程学院四系, 石家庄 050003; 2. 军械工程学院军械技术研究所, 石家庄 050000)

摘要: 为了确立反坦克导弹在战场上的主动地位, 采用 EFP 战斗部对抗主动防护系统。在介绍主动防护系统基本原理的基础上, 采用反应时间对比的方法对 EFP 战斗部对抗主动防护系统的可行性进行了分析。总结了 EFP 的形成机理与特点, 给出了 EFP 战斗部的设计依据, 利用几何相似律设计了串联 EFP 战斗部, 计算出了战斗部的最近起爆距离。该研究可为 EFP 战斗部进一步的详细设计奠定基础。

关键词: 主动防护系统; EFP 战斗部; 对抗; 设计

中图分类号: TJ811 **文献标志码:** A

Design of EFP Warhead for Countering Active Protecting System

Guo Xiwei¹, Yao Zhimin¹, Zhao Fang²

(1. No. 4 Department, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. Ordnance Technology Research Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: In order to assure the active position for anti-tank missile, the EFP warhead is used to counter active protecting system (APS). Firstly, based on introduction of the principle of APS, the feasibility for EFP to counter APS is demonstrated by the comparison of reaction time. Secondly, the mechanism and characteristics of EFP are also analyzed, the designing gist of EFP is given, and the structure of EFP is designed according to the geometric similarity. At last, the minimum initiation distance of warhead is calculated. The research is laying a foundation for further detailed design of EFP warhead.

Key words: active protecting system (APS); EFP warhead; counter; design

0 引言

对于坦克和其他装甲车辆来说, 其传统的防护手段主要是各种装甲, 以坚固的装甲抵御反坦克武器的攻击。随着反坦克武器威力的日益增强, 尤其是攻击坦克顶部武器的出现, 传统的防护手段已难以确保坦克的安全, 于是坦克主动防护系统应运而生。如何突破主动防护系统, 确立战场上的主动地位, 成为反坦克导弹新的发展方向。笔者采用 EFP 战斗部对抗主动防护系统, 对其可行性进行分析, 并进行结构设计。

1 主动防护系统的基本原理

坦克装甲车辆的主动防护系统是指通过各种传感器(雷达、激光、红外)探测装置获得来袭弹药的运动特征, 然后通过计算机控制对抗装置, 使来袭弹药无法命中车辆的一组或一套防护设备。为此, 需要连续采取 3 个措施^[1]:

- 1) 必须在一定距离内探测并跟踪来袭的导弹;
- 2) 根据探测到的目标信息, 经逻辑判断、运算决策, 适时发出控制信号;
- 3) 将来袭导弹拦截在预定的距离上, 让其在未

命中坦克装甲之前就被摧毁, 或显著的降低战斗部的威力。

如图 1 所示, 主动防护系统一般由探测机、中央计算机和迎击发射机构成。

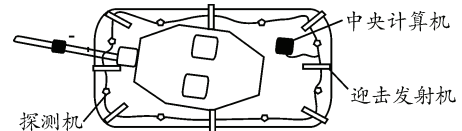


图 1 主动防护系统的构成

探测机和中央计算机构成一个完整的探测控制系统, 每个探测头监视一个特定的扇面, 通过中央计算机与其相关的发射器相连, 而每套发射器负责该扇面的防护。凡有目标飞近车辆, 负责对出现目标的扇面进行监视的探测头就会探测出来, 中央计算机对目标进行逻辑判断, 识别真伪, 当发现是构成威胁的导弹时, 立刻发出控制信号, 击发发射器, 发射主动防护弹拦截来袭的导弹。

2 可行性分析

由于主动防护技术本身就是一种新技术, 所以反主动防护技术的研究起步更晚。反映这一方面研究进展的文献也比较少。美国在 2000 年前后提出了

收稿日期: 2013-02-04; 修回日期: 2013-03-13

基金项目: 军械工程学院原始创新资金资助项目

作者简介: 郭希维(1977—), 男, 山西人, 博士, 讲师, 从事控制系统设计及仿真研究。

反主动防护技术的 3 个研究方向。一是避免被坦克主动防护系统的探测器探测到，主要途径是采用隐身技术或欺骗、堵塞敌方的探测器。二是设法躲避敌方反击火力的攻击。考虑到坦克主动防护系统发射的弹药一般在距离坦克比较近的位置起爆迎击反坦克导弹，所以可以使反坦克导弹的战斗部在反击弹药攻击距离以外起爆。起爆后，弹丸飞行速度非常快而且体积要远远小于导弹本身，所以能够躲避反击弹药的攻击。三是弹道硬化技术，即使反坦克导弹本身受到了反击弹药的攻击，它也仍能保持预定的飞行弹道，并准确击中目标。目前，还没有文献对更详细的技术细节进行论述。

笔者从远射战斗部的思路出发，研究对抗主动防护系统的技术。就现有的主动防护系统而言，用雷达探测导弹是最常见的方法。但由于反坦克导弹的飞行高度较低，一般在 2 m 左右，所以雷达需贴近地面使用。这样，即使是采用微波技术和定向天线技术，只要探测距离稍远，就会受到地杂波干扰信号的影响，以此干扰信号为背景，不仅距离探测精度不易保证，要探测出导弹也较为困难^[2]。主动防护系统存在的弱点就是探测距离近。这样，起爆迎击距离就更近了，一般在 20 m 以内。表 1 列出了几种典型的主动防护系统的迎击距离。主动防护系统能否对来袭弹丸产生毁伤，主要依赖于主动防护系统本身的反应时间。纵观目前已有的主动防护系统，其中最短系统反应时间为德国研制的 AMAP 主动防护系统，现在仅仅停留在样品阶段。就已经比较成熟的主动防护系统来说，俄罗斯生产的“竞技场”的反应时间最短，为 70 ms，其余普遍分布于 200~400 ms 之间。而对于 EFP 的 2 000 m/s 左右的飞行速度来说，如果反坦克导弹的 EFP 战斗部在 20 m 以外或更远的距离起爆，弹丸高速飞行，则从战斗部起爆到 EFP 击中坦克装甲的时间大约为 10 ms(按 20 m 起爆计算)，远小于绝大多数主动防护系统的反应时间，即主动防护系统无法对 EFP 进行跟踪、火控诸元解算和装订、拦截，从而 EFP 可以成功突破主动防护系统。

表 1 典型主动防护系统的迎击距离

系统名称	竞技场	AMAP	“鹁” 2	阿威斯	铁拳
拦截距离/m	1.3~3.9	1.5	7	10~20	5~20

3 EFP 战斗部结构设计

3.1 EFP 的形成机理及特点

EFP 有时也称为自锻破片 (self-forging

fragment, SFF)、爆炸成型侵彻体、P 装药 (Project-ile Charge) 等，是由大锥角药型罩或球缺罩翻转变形产生的。聚能装药药形罩一般分成高速射流和一个很大的低速运动的杵体，最后相互分开。射流约占药形罩质量的 15%，其余为杵体。随药形罩半锥角的增大，向内压垮的猛烈程度变小，相应地，射流与杵体间的速度差亦变小。如图 2，当药形罩半锥角 α 接近 75° 时，射流与杵体接近同样的速度，且难以区分。所以，就形成为 EFP。EFP 将以 2 000 m/s 左右的速度冲击靶板，传递约 10 亿瓦的能量，使被攻击对象失去工作效能^[3]。

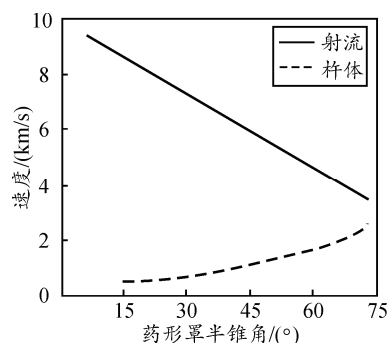


图 2 药型罩形状与射流、杵体速度关系曲线

EFP 是聚能装药技术的一个重要分支，就穿甲深度而言，并不能与聚能装药形成的高速射流相比，但与其他破甲战斗部相比具有以下优点^[4]：

1) 可在极大炸高下穿透装甲目标，通常破甲弹的炸高距离为 5~6 倍的装药直径，而 EFP 的炸高距离可达 1 000 多倍装药直径。

2) 不受旋转的影响。采用聚能装药结构的破甲弹体旋转会导致破甲性能下降，EFP 的穿甲过程类似穿甲弹，旋转不会影响它的破甲，相反还会起到稳定飞行的作用。特别对于长径比较大的 EFP，高速旋转更能促进稳定飞行。

3) 破甲后效明显增大。由于 EFP 战斗部爆炸后仅形成一枚密实的弹丸，故弹丸的质量远高于射流的质量，可以达到整个药型罩质量的 80% 以上。另外，该弹丸靠动能贯穿装甲，可在靶板上形成较大的孔并导致较大的破甲后效。

4) 集穿、破甲优势于一体。EFP 具有破甲弹不受射程局限、破甲性能与初速无关的优点，它的终点效能又融合了穿甲弹威力大、后效大的特点。

3.2 EFP 战斗部设计依据

已经有很多学者对影响 EFP 形成的因素进行了分析。笔者主要从装药长径比，药型罩形状和厚度 2 个方面进行分析和归纳。

3.2.1 装药长径比的影响

对于 EFP 战斗部来说, 一个非常重要的技术指标就是弹丸的飞行速度, 因为飞行速度直接影响了战斗部对装甲的侵彻性能。而战斗部装药的长径比与弹丸的飞行速度有着直接的关系。文献[4]对装药长径比与弹丸速度之间的关系进行了研究, 并通过数值模拟和拟合, 得到了如下公式:

$$v/v_p = 1.1(L/D)^{0.36} \quad (1)$$

式中: L/D 为装药长径比; v_p 为标准装药的 EFP 弹丸速度。

由公式 (1) 可推知, 当 L/D 增加时, EFP 的速度也相应增加, 其速度增加幅度随着装药长径比的变大而逐渐减小。当 L/D 超过 1.5 后, 再增大装药长径比对增加 EFP 速度意义不大^[5]。

3.2.2 药型罩形状和厚度的影响

由 EFP 形成的机理可知, 形成 EFP 的药型罩结构主要有大锥角药型罩和球缺形药型罩 2 种。通过研究发现, 用大锥角药型罩形成 EFP 时总是伴有前驱射滴及包心的存在^[6]; 因此, 球缺形药型罩是学者们研究的重点。球缺形药型罩有 2 个参数对 EFP 的形成影响很大, 分别是曲率半径和壁厚。药型罩的曲率半径关系到炸药汇聚能量的比率, 曲率半径过小, 药型罩在轴线的汇聚能量大, 罩体微元轴向速度梯度大, 易于断裂, 形不成 EFP; 曲率半径过大, 则聚能效应小, 炸药赋予药型罩的汇聚能量小, 药型罩的翻转变形就小, 形成的 EFP 形状较差。药型罩壁厚太薄, 则在翻转过程中由于罩体各部分速度梯度差异, 罩体可能被拉断, 形不成 EFP。太厚则由于药型罩抵抗变形能力增强, 其翻转变形不易, 形成的 EFP 形状不好。

文献[7]对药型罩的曲率半径对 EFP 的影响进行了研究, 并得出结论: 对于铝壳装药结构, 药型罩的曲率半径最佳的选择范围一般在 $0.7 \sim 0.85D_k$ 之间; 钢壳体条件下要形成理想的 EFP 外形, 药型罩的曲率半径一般为 $0.8 \sim 1.0D_k$ 。文献[8]对药型罩壁厚对 EFP 的影响进行了研究, 认为在一定 EFP 装药条件下药型罩壁厚与罩口径的最佳匹配关系为 $0.043 < \sigma/D_k < 0.046$ 。其中 σ 为药型罩壁厚, D_k 为装药直径。

3.3 EFP 战斗部结构设计

EFP 战斗部设计需考虑 EFP 的形成、飞行和对目标的侵彻 3 个阶段的作用过程。对于 EFP 的形成

和飞行过程, 已经有大量文献进行了研究, 并得到了一些可借鉴的研究成果, 部分结论在上节已经做了引用。对于 EFP 对目标的侵彻过程, 也有一些文献进行了研究, 但多数是在某一距离上静态起爆, 研究对装甲的侵彻情况。笔者则提出了一个新的思路, 研究将 EFP 战斗部应用到反坦克导弹上, 来突破主动防护系统的拦截。为了能够尽快给出一个 EFP 的总体设计, 为后续仿真计算和试验提供依据, 笔者在参考已有研究成果的基础上, 运用几何相似律, 推算 EFP 的飞行参数和破甲性能。关于几何相似律的合理性, 在北京理工大学冯顺山教授指导的研究生论文中已经进行了研究和验证。

综合考虑 EFP 形成的因素, 结合对国内外现有反坦克导弹结构的分析, 笔者设计的 EFP 战斗部结构如图 3。该战斗部采用两级串联结构, 其中前级 EFP 主要用于对付坦克的反应装甲, 后级 EFP 用于攻击主装甲, 两级战斗部起爆时间有一个精确延时。战斗部结构尺寸按 3.2 节的约束设计如下: 前级装药直径为 40 mm, 药高 60 mm, 药型罩曲率半径为 30 mm, 壁厚 2 mm; 后级装药直径为 130 mm, 药高 195 mm, 药型罩曲率半径为 95 mm, 壁厚 4 mm。

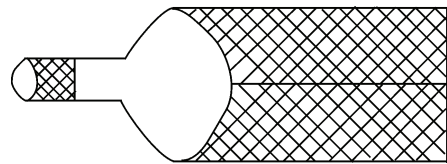


图 3 串联 EFP 战斗部结构

根据爆炸成型过程的几何相似律, 参照文献[9-10]研究结果, 前级战斗部所形成的 EFP 速度约为 1 800 m/s, 延时飞行 20 m 击中反应装甲时, 速度降为约 1 500 m/s, 头部直径约为 7.4 mm, 根据文献[8]中给出的判据, 射流冲击起爆炸药的临界条件值为 $v_j^2 d_j = 16.65 \text{ mm}^3/\mu\text{s}$, 其中 v_j 为射流速度、 d_j 为弹丸头部直径。而爆炸反应装甲所用的 PBX9504 炸药的临界常数 $\text{const} = 53.12 \text{ mm}^3/\mu\text{s}$, 即 $v_j^2 d_j < \text{const}$ 。所以, 前级 EFP 并不引爆反应装甲, 只是在反应装甲上开了一个通道, 供后级 EFP 顺利通过。

由于试验条件有限, 笔者仅对 76.2 mm 口径的 EFP 单级战斗部进行了试验, 结果在 15 m 的距离上穿透了 76.2 mm 厚的均质装甲。根据几何相似律, 笔者设计的后级 EFP 战斗部的破甲深度应在 97.5 mm 左右, 这样的威力可以对付重型坦克的车体侧甲以及炮塔后部和顶部的装甲, 同时也可以攻击轻型坦克除正面装甲以外的其他部位。坦克的防

护能力如表 2 所示。

表 2 坦克的防护水平一览表 mm

部位	炮塔正面	车体侧甲	炮塔侧甲	车体和炮塔后部	炮塔顶	车体顶、低
防护能力(主战)	600~800	50~60	250~300	40~70	50~60	20~30
防护能力(轻型)	70~100	30~40	30~40	25~35	15~25	10~15

注：水平方向折合均质装甲厚度

4 起爆距离的计算

笔者设计的 EFP 战斗部的目的是突破主动防护系统，实现对装甲目标的攻击，而战斗部的起爆距离很显然会影响到这一作战目标的实现。因为起爆距离越远，主动防护系统的反应时间就越充分，弹丸也就越容易遭受攻击，同时 EFP 的速度衰减也越多，攻击效果也越差。如果起爆距离过近，就有可能使得战斗部还没有起爆，反坦克导弹本身就已经遭受了攻击；因此，EFP 战斗部的起爆距离应该在一个合适的区间内。

文献[11]中计算了主动防护系统的最短摧毁距离(MDD)，它与主动防护系统反应时间(T)、来袭威胁的飞行速度(V)、拦截点与平台外部结构之间的距离(P)有关。要想突破主动防护系统，反坦克导弹的 EFP 战斗部的最远起爆距离要小于主动防护系统的最短摧毁距离。同时，EFP 战斗部本身也对最远攻击距离有一个限制，即 1 000 倍装药直径以内，对于文中设计的战斗部而言，约为 40 m(参考前级战斗部装药直径)。这样，战斗部的最远起爆距离应该受上述 2 个方面的共同限制。

EFP 战斗部的最近起爆距离首先受主动防护系统的起爆迎击距离的限制。即 EFP 战斗部的最近起爆距离要远于主动防护系统的迎击起爆距离。笔者将进一步分析最近起爆距离与主动防护系统拦截弹的速度、反坦克导弹的飞行速度、EFP 战斗部速度的关系。采用常速度(CV)模型进行分析，如图 4。

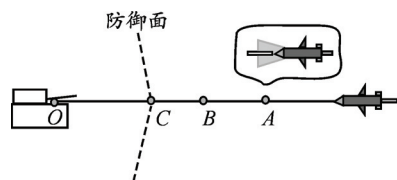


图 4 EFP 战斗部攻击坦克示意图

设反坦克导弹、EFP 及主动防护系统拦截弹做匀速直线运动，且飞行轨迹在同一直线上。O 点为坦克所在点，C 点为主动防护系统防御面与导弹飞行轨迹交汇点(即在原有导弹飞行状态下拦截弹与目标导弹的弹目交汇点)，反坦克导弹飞行至 A 点

时两级战斗部先后起爆，此后母弹与 EFP 同时飞向目标(考虑到主动防护系统无法跟踪 EFP 并对其进行火控数据的装订，所以设拦截系统按原计划发射，此处忽略战斗部爆炸对母弹飞行状态的影响，认为母弹飞行状态不变)，反坦克导弹飞行至 B 点时，主动防护系统拦截弹发射，临界状态下此时前级 EFP 恰好飞行至 O 点击中坦克。根据时间对应关系：

$$S_{OC}/V_L = S_{BC}/V_M$$

$$S_{AB}/V_M = S_{AO}/V_{EFP}$$

$$S_{AO} = S_{OC} + S_{BC} + S_{AB}$$

其中： V_L 为拦截弹速度； V_M 为反坦克导弹母弹速度； V_{EFP} 为 EFP 飞行速度。对于笔者设计的战斗部，取 $S_{OC} = 4$ m， $V_L = 1\ 500$ m/s， $V_M = 300$ m/s， $V_{EFP} = 2\ 000$ m/s 时，计算可得 $S_{AO} \approx 5.65$ m，此即为战斗部的最近起爆距离。

5 结论

在主动防护系统的基本原理的基础上，分析了对抗主动的防护系统的基本思路，论证了用 EFP 战斗部对抗主动防护系统的可行性。依据影响 EFP 战斗部形成的主要因素，笔者参照国内外现有反坦克导弹战斗部的结构，设计了串联 EFP 战斗部。就 EFP 战斗部的破甲威力来说，可以应用到攻顶反坦克导弹上。最后，对起爆距离进行了计算，为下一步战斗部的详细设计奠定了基础。

参考文献：

- [1] 张卫东. 国外装甲车辆主动防护系统发展[J]. 国外坦克, 2008(2): 7-10.
- [2] 段战胜, 韩崇昭. 极坐标系中带 Doppler 量测的目标跟踪[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 2860-2863.
- [3] 侯妮娜, 池建军. EFP 战斗部的形成过程及影响因素[J]. 四川兵工学报, 2008(4): 62-63.
- [4] 周翔, 龙源, 岳小兵. 76 mm 口径 EFP 成形过程数值模拟及影响因素研究[J]. 弹道学报, 2003, 15(2): 59-63.
- [5] 王钦钊, 谷晓伟, 李小龙, 等. 基于高机动条件下的坦克火控系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 19-21.
- [6] 曹兵. EFP 成形机理及关键技术研究[D]. 南京理工大学博士后论文, 2001: 6-18.
- [7] 蒋建伟, 等. 结构参数对 EFP 成型影响的数值模拟[J]. 北京理工大学学报, 2004(11): 939-941.
- [8] 顾文彬, 等. 药型罩壁厚对 EFP 成型性能影响试验[J]. 解放军理工大学学报, 2005(2): 162-165.
- [9] 王健, 曹红根, 周箭隆. EFP 侵彻爆炸反应装甲过程研究[J]. 南京理工大学学报, 2008(1): 9-12.
- [10] 熊瑞红, 袁志华, 王昭明. 球缺形药型罩形成 EFP 的数值模拟及其优化设计[J]. 沈阳理工大学学报, 2008(1): 9-12.
- [11] 周燕, 王雄高. “硬杀伤”主动防护系统——不同系统概念的分析与评估[J]. 国外坦克, 2010(7): 25-26.