

文章编号: 1001-1455(2013)01-0108-05

新型反应装甲结构对长杆弹小法线角侵彻的干扰分析和防护效能*

熊良平¹, 黄道业¹, 王凤英²

(1. 安徽国防科技职业学院机械工程系, 安徽 六安 237011;

2. 中北大学机械工程与自动化学院, 山西 太原 030051)

摘要: 针对防御小法线角入射的长杆弹的需要而设计出了一种新型反应装甲结构。通过分析新型反应装甲结构对长杆弹运动速度和姿态的干扰, 得出在长杆弹质量守恒的情况下的动力学方程, 并进行反应装甲抗长杆弹侵彻实验。结果表明, 新型反应装甲能够有效的干扰小角度长杆弹的飞行姿态并造成动能损失, 可提高对长杆弹的防护效果。

关键词: 爆炸力学; 新型反应装甲结构; 侵彻实验; 长杆弹

中图分类号: O385; TJ55

国标学科代码: 1303530

文献标志码: A

爆炸反应装甲(explosive reactive armor, ERA)是抵御反坦克武器的主要装备, 具有抗弹效益高、安全性好、质量轻、占用空间小等优点。由平板装药结构组成的反应装甲的防护效益在很大程度上与来袭弹头的命中角度(即弹轴方向与反应装甲表面法线之间的夹角, 也称为法线角)有关。实验表明, 爆炸反应装甲实现其最优性能的法线角是 $60^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 。当来袭弹头小角度入射时, 反应装甲的防护效果甚微; 特别当长杆弹相对目标垂直入射时, 反应装甲几乎没有任何防护能力。

本文中设计出一种新型的反应装甲结构, 并进行不同小法线角下长杆弹侵彻实验。结果表明, 新型反应装甲可有效干扰长杆弹的运动速度和姿态, 减小穿甲动能, 在法线角 $\theta < 30^{\circ}$ 的情况下, 能有效防御大口径长杆弹, 可提高坦克在战场上的生存能力^[1-4]。

1 新型反应装甲结构

新型反应装甲结构是在“三明治”式平板装药结构的基础上, 专门针对防御长杆弹小法线角侵彻而设计的。新型反应装甲中包括盒式外壳、3块“三明治”式平板装药单元、导爆索和1个爆炸冲击模块, 如图1所示。单元2与箱体相连接, 爆炸冲击模块通过导爆索与单元1相连接。新型反应装甲要达到的防护效果是: 在小法线角 $\theta < 30^{\circ}$ 的情况下, 使坦克装甲能防御大口径长杆弹。

当长杆弹以小法线角高速撞击反应装甲后, 引爆单元1内部的平板装药, 在爆轰产物的驱动下, 单元1中的金属面、背板向各自外法线方向高速运动, 在长杆弹上所形成力偶产生的横向运动使长杆弹弯曲、偏转; 但由于法线角较小, 弹杆可能不会断裂, 这是新型反应装甲对长杆弹一次干扰的主要形式。同时由于单元1与单元2下方的爆炸冲击模块用导爆索连接, 在长杆弹撞击单元1的同时, 立即引爆单元2下方的爆炸冲击模块。此时爆炸冲击模块对单元2产生1个向右的爆炸驱动力, 并同时伴随1个沿顺时针方向的力矩, 使得单元2高速沿顺时针方向转动, 经过一定的时间差之后, 最终与长杆弹相撞; 单元2与长杆弹杆作用后, 其结构中包含的面、背板始终带着1个顺时针的力矩沿各自外法线方向高速运动, 使得作用在长杆弹杆上的横向力偶比单元1更加剧烈, 加剧了弹杆的变形和速度损失, 甚至导致长杆弹杆的断裂。这是新型反应装甲对长杆弹的二次干扰。当长杆弹穿透单元2之后与单元3碰撞时,

* 收稿日期: 2011-10-24; 修回日期: 2012-07-10

基金项目: 教育部、财政部支持高等职业学校提升专业服务能力和项目

作者简介: 熊良平(1984—), 男, 硕士, 讲师。

由于单元3与单元2带有一定的夹角,则相应的,若长杆弹与单元3作用时,法线角显著增大。单元3结构中的面、背板对长杆弹杆所产生的横向力偶也会加剧,对长杆弹杆的运动姿态产生极大的影响,导致长杆弹杆的变形或断裂而丧失穿甲作用,这是新新型反应装甲对长杆弹的三次干扰。

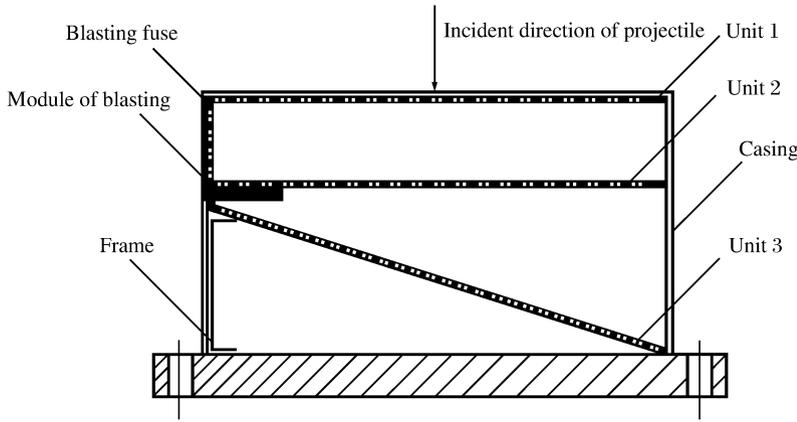


图1 新型反应装甲结构

Fig. 1 Schematic of new ERA structure

2 新型反应装甲结构对长杆弹干扰的动力学分析

新型反应装甲结构中装药单元1、2、3均为由面、背板和平板装药组成的“三明治”式反应装甲板。反应装甲在抵御长杆弹侵彻时,主要是通过3种途径来降低长杆弹侵彻效能:(1)通过平板装药的爆轰产物对长杆弹造成速度损失;(2)反应装甲结构中壳体反向撞击引起长杆弹运动速度的损失;(3)引爆平板装药后,面、背板对长杆弹杆产生运动姿态干扰^[5-7]。

2.1 引爆平板装药后爆轰产物造成长杆弹的速度损失

为研究平板装药爆轰产物压力对长杆弹运动速度的影响,设爆轰产物的起始压力是 p_m ,根据动量守恒定律

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{\pi}{4} d^2 p_m \left(\frac{\delta_0}{\sqrt{\delta_0^2 + 4v_n^2 t^2}} \right)^\gamma \left(\frac{\rho_0}{\rho_m} \right)^\gamma \quad (1)$$

令

$$a = \left(\frac{\pi}{4} \right) d^2 p_m \left(\frac{\rho_0}{\rho_m} \right)^\gamma / m \quad (2)$$

积分得出长杆弹受爆轰产物影响的速度损失

$$\Delta v(t) = v_1 - v_0 = -a \frac{\delta_0}{\sqrt{\delta_0^2 + 4v_n^2 t^2}} \quad (3)$$

式中: v_0 为长杆弹撞击反应装甲前的速度, v_1 为长杆弹受爆轰产物影响后的速度, v_n 为反应装甲壳体钢板在爆轰完成瞬时的法向运动速度,它是由于爆轰产物对反应装甲壳体钢板的作用使它具有了一个与长杆弹速度反方向的运动速度; m 为长杆弹的质量, d 为长杆弹直径, δ_0 为平板装药炸药层厚度, p_m 为爆轰产物的压力, t 为爆轰产物作用时间, ρ_0 为装药密度, ρ_m 为爆轰完成瞬间爆轰产物密度, $\rho_m = \frac{4\rho_0}{3}$; γ 为爆轰产物的质量热容比。

2.2 反应装甲结构中壳体引起长杆弹运动速度的损失

长杆弹穿透反应装甲壳体的整个过程可分为,壳体受力变形阶段和变形达到强度极限后的扩孔阶段。通过整个过程的分析,可以得到长杆弹穿透壳体后的速度损失

$$\Delta v(\chi) = \frac{\pi \rho h v_0}{m \cos \theta} (\chi \tan \beta)^2 \sin \beta \quad (4)$$

式中: ρ 为反应装甲结构中壳体密度, h 为装甲结构中壳体厚度, β 为长杆弹头部半锥角, θ 为法线角, χ 为弹形系数。

2.3 装药单元结构中面、背板对长杆弹杆运动姿态干扰

当装药单元 1 被引爆后, 它对长杆弹运动姿态的影响分为长杆弹从开始穿入面板至到达背板之前阶段和穿入背板之后阶段, 并作如下假设: (1) 面、背板与长杆弹的碰撞是全塑性的, 即碰撞后板与长杆弹以相同的速度运动; (2) 不考虑面、背板碰撞前后的变形和翻转, 也不考虑长杆弹受碰撞后的变形和破坏, 且认为面背板足够大; (3) 在反应装甲对长杆弹的诸多作用中, 只考虑面、背板对长杆弹的剪切破坏作用, 并且作用始终垂直于弹轴。基于上述假设, 长杆弹与装药单元面、背板相互作用的受力简图如图 2 所示。

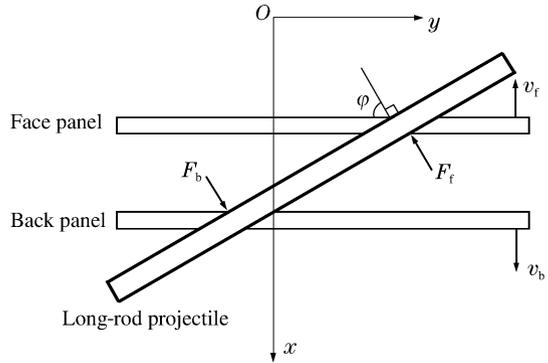


图 2 长杆弹与装药单元结构中面、背板相互作用受力简图
Fig. 2 Force diagrams of the interaction between the long-rod projectile and the armor

建立长杆弹杆体的动力学方程组

$$\left\{ \begin{array}{l} m \frac{dv}{dt} = -R \cos(\varphi - \theta + A) - (F_f + F_b) \sin(\varphi - \theta) \\ m v_0 \frac{d\theta}{dt} = -R \sin(\varphi - \theta + A) - (F_f + F_b) \cos(\varphi - \theta) \\ \frac{l}{3} \frac{d\omega}{dt} = -\frac{2}{m} R \sin A + \frac{4}{ml} (F_f S_f - F_b S_b) \\ \frac{d\varphi}{dt} = \omega \\ \frac{dx}{dt} = v_0 \cos(\varphi + A) \\ \frac{dy}{dt} = v_0 \sin(\varphi + A) \end{array} \right. \quad (5)$$

式中各物理量均为瞬时参量, l 为长杆弹杆长, φ 为长杆弹法线与面板的夹角; A 为长杆弹杆体头部速度与杆体轴线的夹角, 其表达式为 $A = \arctan \left[\frac{l\omega - v \sin(\varphi - \theta)}{v \cos(\varphi - \theta)} \right]$, ω 为杆体在侵彻过程中的摆动角速度;

R 为面、背板对倾彻长杆弹的正面抗力, 其大小可以用平板装药爆轰产物压力 p_m 来表示, $R = \frac{\pi d^2 p_m}{4}$,

$p_m = \frac{\rho_0 D^2}{8} \left(\frac{r_0}{r} \right)^3$, D 为炸药爆速, r_0 和 r 分别为面、背板原始间距和瞬时间距, $r = r_0 + (v_f + v_b)t$, v_f 、 v_b

分别为面、背板飞行速度, 可根据 Gurney 公式计算出; S_f 和 S_b 分别为面板和背板切割点到杆体质心的距离; 面、背板对杆体的作用力 F_f 和 F_b 可由剪切破坏原则得到, $F_f = 2\sigma_i h_f \Delta y_1$, $F_b = 2\sigma_i h_b \Delta y_2$, Δy_1 、 Δy_2 分别为平板装药起爆后面、背板受杆体作用裂开的横向距离, h_f 、 h_b 分别为平板装药起爆后, 面、背板运动的距离, σ_i 为杆体的剪切强度。

在杆的动力学方程中, 只有当杆的运动距离大于背板的运动距离时才可能存在 F_b 的作用。因此, 需考虑: 当 $x < \delta_0 + v_b t$ 时, $F_b = 0$; 当 $x \geq \delta_0 + v_b t$ 时, $F_b = 2\sigma_i h_b \Delta y_2$ 。同时, 在面板足够大的条件下, 也考虑作用力 F_f 的存在条件, 当 $x + v_f t \leq l \sin \varphi$ 时, $F_f = 2\sigma_i h_f \Delta y_1$, 当 $x + v_f t > l \sin \varphi$ 时, $F_f = 0$ 。

3 实验及结果分析

3.1 实验条件

采用100滑钢长杆弹,对均质装甲钢穿深可达280 mm,实验射程为200 m,反应装甲总质量为6.8 kg,有效装药体积为935 mm×200 mm×5 mm,实验布置如图3所示。

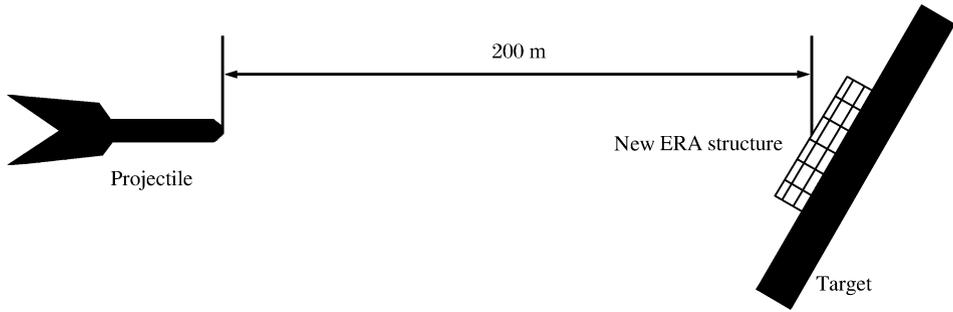


图3 实验布置图

Fig. 3 Experimental layout

3.2 实验结果

为了验证反应装甲的防护性能,使用长杆弹以不同的法线角侵彻覆盖反应装甲的靶板,进行3次实验,得到结果如下。

(1)当 $\theta=19.26^\circ$ 时,主靶板的最大侵彻尺寸为:表面孔尺寸,190 mm×85 mm;垂直穿深,74 mm,背鼓。

(2)当 $\theta=21.72^\circ$ 时,主靶板的最大侵彻尺寸为:表面孔尺寸,192 mm×87 mm;垂直穿深,66 mm。

(3)当 $\theta=27.60^\circ$ 时,主靶板的最大侵彻尺寸为:表面孔尺寸,200 mm×93 mm;垂直穿深,52 mm。

在第3次实验时,由于法线角选取比较大,长杆弹穿深比较浅。分析原因:(1)利用爆炸冲击模块爆炸后产生的动能给予单元2一个顺时针的力矩,驱动其面、背板改变飞散角度,增加作用在长杆弹上的力偶,使其更有效的切割弹杆,致使长杆弹变形或断裂,长杆弹将因失稳断裂而损失穿甲效能。(2)单元3与单元2存在一定的夹角,长杆弹以小法线角侵彻时,势必与单元3作用导致法线角增大,因此可以更有效的干扰长杆弹,并改变其运动速度和运动姿态。

3.3 局部防护系数的计算

防护系数 N 定义为由标准均质装甲钢半无限靶的密度与覆盖反应装甲后平均面密度的比值

$$N = \frac{T_b \rho_g}{T_i \rho_i} \quad (6)$$

式中: T_b 为以标准弹种射击标准均质装甲板时的穿入深度, ρ_g 为钢密度7.85 g/cm³, T_i 为覆盖反应装甲后同型标准弹种射击标准均质装甲板时的穿入深度, ρ_i 为覆盖反应装甲后反应装甲与均质装甲靶板的平均密度,由式(6)

当 $\theta=19.26^\circ$ 时,局部防护系数 N 为7.0。

当 $\theta=21.72^\circ$ 时,局部防护系数 N 为7.6。

当 $\theta=27.60^\circ$ 时,局部防护系数 N 为8.0。

由上述结果可以看出,新型反应装甲对长杆弹的局部防护系数均达到了大于5的指标。

4 结论

在长杆弹小法线角侵彻新型反应装甲进行动力学分析的基础上,通过实验测试了在新型反应装甲保护下主靶板的最大侵彻尺寸和局部防护系数,得出长杆弹经过新型反应装甲干扰后,有效穿深大大降低的结论,完全能够满足在法线角 $\theta < 30^\circ$ 时干扰长杆弹侵彻的目的。

参考文献:

- [1] 王凤英. 装甲防护技术的发展[J]. 测试技术学报, 2002, 16(2): 144-147.
Wang Feng-ying. The development of armor fence[J]. Journal of Test And Measurement Technology, 2002, 16(2): 144-147.
- [2] 张自强, 赵宝荣, 张锐生, 等. 装甲防护技术基础[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2000: 118-167.
- [3] 马晓青, 曾凡君, 沈晓军, 等. 反应装甲对脱壳穿甲弹干扰及引爆机理研究[J]. 兵工学报, 1995(4): 10-16.
Ma Xiao-qing, Zeng Fan-jun, Shen Xiao-jun, et al. Anti-piercing effect and projectile-impact shock initiation of a reactive arm[J]. Acta Armamentarii, 1995(4): 10-16.
- [4] 马世强. 坦克装甲倾角多大好[J]. 国外坦克, 2007(9): 17-19.
- [5] 李文彬, 赵国志, 王晓鸣. 杆式倾彻体冲击起爆反应装甲因素研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2003, 27(3): 230-233.
Li Wen-bin, Zhao Guo-zhi, Wang Xiao-ming, et al. Study on effect factors of the impact initiation by rod penetrator into explosive reactive armor[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Natural Science, 2003, 27(3): 230-233.
- [6] 武海军, 陈力, 王江波, 等. 反应装甲对射流干扰的数值模拟研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(7): 565-568.
Wu Hai-jun, Chen Li, Wang Jiang-bo, et al. Numerical simulation on reactive armor disturbing jet[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26(7): 565-568.
- [7] 李小笠, 赵国志, 杜忠华. 爆炸式反应装甲对长杆体倾彻的干扰作用[J]. 弹道学报, 2006, 18(3): 74-78.
Li Xiao-li, Zhao Guo-zhi, Du Zhong-hua. The model of long-rod penetrators disturbed by ERA[J]. Journal of Ballistics, 2006, 18(3): 74-78.

Protection effectiveness of a new explosive reactive armor against penetration of long-rod projectiles with small yaw angles*

Xiong Liang-ping¹, Huang Dao-ye¹, Wang Feng-ying²

(1. Department of Mechanical Engineering, Anhui Vocational College of Defense Technology,
Lu'an 237011, Anhui, China;
2. School of Mechanical Engineering & Automation, North University of China,
Taiyuan 030051, Shanxi, China)

Abstract: A new explosive reactive armor (ERA) structure was designed. A series of dynamic analyses were carried out on the interferences of the new ERA structure with the motion velocity and attitudes of the long-rod projectiles, the corresponding dynamic equations were obtained for the long-rod projectiles in the mass conservation condition, and the protection effectiveness of the new ERA structure was experimentally validated. Investigated results show that the new ERA can disturb effectively the motion attitudes of the long-rod projectiles with small yaw angles and induce their kinetic energy decrease markedly.

Key words: mechanics of explosion; new ERA structure; penetration experiment; long-rod projectile

* Received 24 October 2011; Revised 10 July 2012

Corresponding author: Xiong Liang-ping, xiongliangping@126.com