

# 新型集成装甲对 EFP 侵彻性能的影响

赵慧英, 沈兆武

(中国科学技术大学力学与机械工程系, 合肥 230026)

**[摘要]** 根据平板装药和陶瓷复合装甲与爆炸成型弹丸(EFP)相互作用的原理,提出了新型集成装甲与EFP作用的计算模型;据此模型进行了EFP残余速度计算,证明了在相同面密度的新型集成装甲和陶瓷复合装甲防护下,EFP的残余速度有明显差异;根据该计算模型可进行集成装甲的优化和EFP的反装甲目标设计。

**[关键词]** EFP;集成装甲;平板装药;陶瓷复合装甲;残余速度

**[中图分类号]** TJ410.3; TJ413; TJ811 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)09-0085-05

## 1 引言

大锥角药型罩或球缺药型罩在炸药爆轰能量作用下发生极大的塑性变形,锻成具有一定质心速度和一定形状的爆炸成型弹丸(EFP, explosive formed projectile),以动能侵彻装甲。EFP是介于射流和动能弹之间的新型弹种,初速可达2 000 m/s以上,在1 000倍装药口径的距离上可以穿透厚度相当于1倍装药口径的均质装甲<sup>[1]</sup>。这种弹丸经常被用于未敏弹武器系统以攻击坦克装甲顶部。

笔者提出的新型集成装甲改变了传统复合装甲依靠增强陶瓷复合装甲背板的韧性来吸收动能弹丸能量的方式,在弹丸或射流到达陶瓷复合装甲之前降低弹丸速度,将平板装药与陶瓷复合装甲集成为防护效果好、质量轻并具有爆炸式反应装甲和陶瓷装甲优点的装甲;利用动能弹侵彻复合装甲理论和起爆平板装药之后平板与动能弹之间的动量守恒理论来研究新型集成装甲对EFP侵彻深度的影响,为优化EFP和提高装甲防护能力提供理论依据。

## 2 EFP弹丸与平板装药的作用过程

以较高速度运动的EFP撞击平板装药盖板后产生足够大的应力波,装药在冲击波的作用下被引

爆,爆轰波在炸药层中的传播方向与平板装药的板平行。炸药层与金属板的直接接触对金属板形成加载,稳定的爆轰波阵面掠过瞬间,使该处的金属板受到强激波作用而发生弯曲、运动和加速。由于炸药层长度和宽度有限,在此过程存在侧向稀疏波,这是一个复杂的二维爆炸力学过程<sup>[2]</sup>。做以下假设,则可以认为平板运动是一维过程:**a.**忽略平板运动中空气阻力的影响;**b.**只考虑在爆炸载荷下平板的刚体运动,忽略平板本身的变形;**c.**认为炸药具有足够大的加载面积,忽略侧向卸载波对爆炸载荷的影响。在爆轰瞬间金属板的速度达到最大,Gurney公式是根据简单的能量关系建立的描述一维金属板运动的最大速度与单位面积上的装药量和金属板质量之间关系的公式,其表达式为<sup>[2]</sup>:

$$v_{pm} = \sqrt{2E} \left( \frac{0.6R}{1 + 0.2R + 0.8/R} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中 $v_{pm}$ 是一维平板运动最大速度; $E$ 是一个具有量纲的参数,由试验数据来确定; $R$ 是单位面积上的装药量与金属板质量之比。

假设爆轰产物的初始压力是 $p_m$ ,则有:

$$m_d \frac{dv_d}{dt} = -\frac{\pi}{4} d_d^2 p_m \left( \frac{\delta_0}{\sqrt{\delta_0^2 + 4v_{pm}^2 t^2}} \right)^\gamma \left( \frac{\rho_0}{\rho_m} \right)^\gamma \quad (2)$$

令 $a = \frac{\pi}{4} d_d^2 \frac{p_m}{m_d} \left( \frac{\rho_0}{\rho_m} \right)^\gamma$ ,则式(2)可简化为:

[收稿日期] 2005-09-20;修回日期 2006-01-10

[作者简介] 赵慧英(1979-),女,山西定襄县人,中国科学技术大学博士研究生

$$\frac{dv_d}{dt} = -a \left( \frac{\delta_0}{\sqrt{\delta_0^2 + 4v_{pm}^2 t^2}} \right)^\gamma,$$

$$\text{积分得} \quad a \left( \frac{\delta_0 t}{\sqrt{\delta_0^2 + 4v_{pm}^2 t^2}} \right) = v_1 - v_d \quad (3)$$

式中  $v_1$  为弹丸碰撞前板时的瞬时速度;  $m_d$ ,  $d_d$ ,  $v_d$  为弹丸质量、直径和  $t$  时刻的水平速度;  $\delta_0$ ,  $\rho_0$  为炸药层的厚度和装药密度;  $\rho_M$  为爆轰完成瞬时爆轰产物的密度,  $\rho_M = 4\rho_0/3$ ;  $\gamma$  为爆轰产物的多方指数;  $v_{pm}$  为装甲板在爆轰完成瞬时的最大速度。

由式 (2)、式 (3) 可以看出, 在平板装药性能参数确定的情况下, 爆轰波对 EFP 速度的影响与 EFP 材料的线密度有关, 线密度大时, 爆轰波作用所产生的负加速度小。利用式 (2)、式 (3) 可计算出撞击速度为 1 700 m/s、直径为 60 mm 的铜质 EFP 撞击装药为 DH, 装药厚度为 4 mm, 前后板厚度为 2 mm 的平板装药, 速度减少了 17.6 m/s, 从而证明爆轰波对 EFP 的干扰很小, 可以忽略不计。对 EFP 的干扰主要来自平板装药的前后板。

EFP 高速撞击平板装药的前板时, 产生的冲击应力超过前板的强度极限, 使前板发生断裂。考虑到炸药层有一定的厚度, 爆轰波到达后板有一定的延迟, 且后板是从速度为零开始运动的, 因此 EFP 在一定的时间内可以追上并撞击穿透后板, 其作用过程如图 1 所示。因此平板装药起爆后, EFP 在前后板的作用下发生轴向减速偏转甚至会翻转, 降低了其穿甲深度和精度。

### 3 陶瓷复合装甲与 EFP 作用过程分析

陶瓷复合装甲与 EFP 的作用过程主要是二者粉碎耗能、机械化学耗能和应力波耗能的过程, 陶瓷复合装甲的抗动能弹丸的能力与多层靶板的厚度比例, 材料的性质, 金属板的分布, 夹层的结构材料、厚度、结构形式、约束条件, 弹丸的形状、撞击速度以及陶瓷复合板靶板放置的倾角有关。实验和理论研究表明, 在弹丸形状一定的情况下, 复合陶瓷装甲随着陶瓷厚度的增加和弹速的降低, 其抗弹性能增强<sup>[3]</sup>。因此在陶瓷靶板确定的情况下, EFP 弹丸撞击速度是决定其侵彻能力的主要因素。

## 4 新型集成装甲抗弹原理及其对 EFP 穿深的影响

### 4.1 新型集成装甲抗弹原理

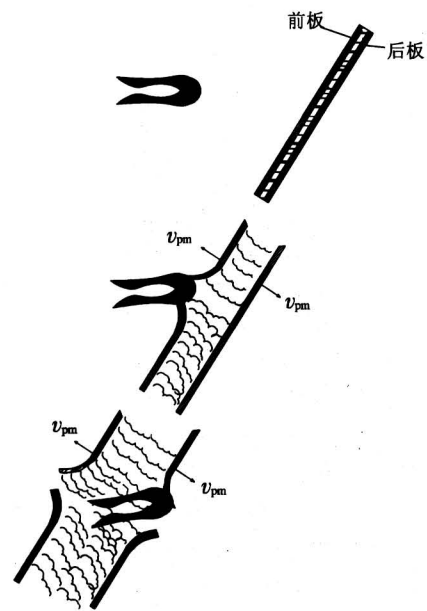


图 1 EFP 与平板装药作用过程

Fig.1 Process of EFP interacting with plate cover charge

新型集成装甲主要是利用平板装药降低侵彻体的速度, 再利用陶瓷复合装甲消耗侵彻体的动能。某集成装甲主要抗弹部分如图 2 所示。其中  $x$  为平板装药与陶瓷复合装甲之间的垂直距离。平板装药临界起爆常数与 EFP 速度和直径的关系是  $k \leq v_r^2 d$ ,  $k = 27 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ,  $v_r$  是穿透前后板后的剩余速度<sup>[4]</sup>, 故平板装药被 EFP 冲击起爆后, EFP 仍然会撞击到陶瓷复合装甲上。

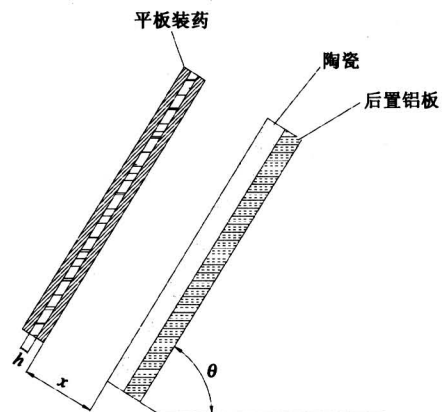


图 2 集成装甲主要抗弹部分

Fig.2 Protection system of integrated armor

### 4.2 EFP 与新型集成装甲作用过程分析

EFP 首先撞击并起爆平板装药, 前后金属板在

爆轰压力作用下沿表面法线方向相向运动。EFP 穿透前板但未穿透后板时，EFP 和前后板遵循动量守恒定律，表达式为：

$$(m_d + m_{b1})v_{L1} = m_d v_d - m_{b1} v_{b1} \cos\theta \quad (4)$$

$$(m_d + m_{b1})v_{T1} = m_{b1} v_{b1} \sin\theta \quad (5)$$

$$\tan\alpha_1 = \frac{v_{T1}}{v_{L1}} \quad (6)$$

式中  $v_{L1}$  为前板与 EFP 水平方向的速度； $v_{T1}$  为前板与 EFP 垂直方向的速度； $v_d$  为 EFP 沿水平方向的初始速度； $v_{b1}$  为沿平板装药表面法线方向运动的前板初速； $m_d$  为 EFP 的质量； $m_{b1}$  为前板的有效质量； $\theta$  为平板装药表面与水平方向的夹角； $\alpha_1$  为 EFP 偏转角度。

EFP 继续向前运动，与后板作用并穿透后板，同样遵守动量守恒定律，表达式为：

$$(m_d + m_{b1} + m_{b2})v_{L2} = (m_d + m_{b1})v_{L1} + m_{b2} v_{b2} \cos\theta \quad (7)$$

$$(m_d + m_{b1} + m_{b2})v_{T2} = (m_{b1} + m_d)v_{T1} + m_{b2} v_{b2} \sin\theta \quad (8)$$

$$\tan\alpha_2 = \frac{v_{T2}}{v_{L2}} \quad (9)$$

式中  $v_{L2}$  为前后板与 EFP 沿水平方向的速度； $v_{b2}$  为沿平板装药表面法线方向运动的后板初速； $m_{b2}$  为后板的有效质量； $\alpha_2$  为 EFP 偏转角度。

EFP 继续向前运动与陶瓷复合装甲作用。假定撞击过程为刚性弹体撞击由陶瓷金属组成的复合靶板，陶瓷为面板，金属铝板为背板，则靶板极限穿透速度与靶板厚度的关系为<sup>[5]</sup>：

$$v^2 = \frac{\alpha \varepsilon_2 \sigma_2 h_2 z [(\rho_1 h_1 + \rho_2 h_2) z + m]}{0.91 m^2} \quad (10)$$

文献[6~8]阐述的由弹丸提供给靶板的动量与弹丸的极限速度无关的理论以及求弹丸极限速度的方法隐含着式为：

$$\frac{v_{imp}}{v} - \frac{v_{res}}{v} = 1 \quad (11)$$

式(10)、式(11)中， $z = \pi(r + 2h_1)^2$ ； $v$  为靶板极限穿透速度； $\alpha$  为实验确定的常数， $\alpha = 1$ <sup>[6]</sup>； $\varepsilon_2$  为背板的断裂应变系数； $\rho_1$ ， $\rho_2$  分别为陶瓷面板和金属背板的密度； $\sigma_1$ ， $\sigma_2$  分别为陶瓷面板和金属背板的抗拉强度； $h_1$ ， $h_2$  分别为陶瓷面板和金属背板的厚度； $m$  为弹丸质量； $r$  为弹丸半径； $v_{imp}$  为 EFP 侵彻陶瓷复合装甲的速度； $v_{res}$  为

EFP 的残余速度。

如果在 EFP 弹丸撞击集成装甲中陶瓷靶板的速度  $v_{imp} < v$ ，则面板和背板厚度分别为  $h_1$ ， $h_2$  的陶瓷复合靶板不会被穿透。

在集成装甲结构确定的情况下，由式(4)至式(11)可以计算出某 EFP 是否可以穿透集成装甲，以及穿透后的剩余速度。

应用式(1)和式(4)至式(11)，以质量为 135 g、长径比为 1.5、撞击速度为 1 300 m/s 的铜质 EFP 弹丸为例，进行集成装甲对 EFP 侵彻影响的计算。集成装甲中平板装药和陶瓷复合装甲的结构参数如表 1 至表 3 所示。

表 1 平板装药的有关参数 (装药为 DH)

Table 1 Parameters of reactive armor (the explosive in it is DH)

药室尺寸 /mm·mm	药室钢板厚度 /mm	钢板密度 /g·cm <sup>-3</sup>	药厚 /mm	装药密度 /g·cm <sup>-3</sup>	与主装甲间的倾角 / (°)
100×100	1.2	7.8	5	1.4	68

表 2 Al23 陶瓷的性能参数

Table 2 Performance parameters of Al23 ceramic

弹性模量/MPa	泊松比	密度/kg·m <sup>-3</sup>	抗拉强度/MPa
5.0×10 <sup>3</sup>	0.3	3.8×10 <sup>3</sup>	6.63×10 <sup>3</sup>

表 3 铝的有关参数

Table 3 Parameters of aluminum

弹性模量/MPa	密度/kg·m <sup>-3</sup>	抗拉强度/MPa	断裂应变系数
7.3×10 <sup>3</sup>	2.8×10 <sup>3</sup>	3.0×10 <sup>3</sup>	0.15

由式(1)得反应装甲被起爆后的最大速度  $v_{pm} = 1 349$  m/s；由式(4)至式(11)得 EFP 的残余侵彻速度为 273.1 m/s。由计算值可以看出由于受到集成装甲的干扰，EFP 的速度明显降低。

## 5 EFP 和集成装甲的优化

以 EFP 的残余速度表示其侵彻性能，在确定集成装甲的面密度和材质组成的情况下，不同初始侵彻速度的 EFP 弹丸在集成装甲干扰下具有不同的残余速度。某尺寸为 100 mm×100 mm 的集成装甲主要抗弹部分组成结构按与主装甲距离从远到近排序为：平板装药/间隙 (9 mm)/陶瓷 (3.5 mm)/铝板 (10 mm)，面密度为 3.2 g/cm<sup>2</sup>，材料的其他参数可参考表 1 至表 3。EFP 模拟弹的数据及在集成装甲防护作用下和与集成装甲相同面密度的

陶瓷复合装甲防护作用下的残余速度试验和计算结果如表4所示。

表4 EFP参数及残余速度

Table 4 Parameters and residual velocities of EFP

弹号	弹重/g	初速 $v_d/m \cdot s^{-1}$	集成装甲防护下	陶瓷复合装甲防护
			的残余速度 (计算值/实验值) $v_{res}/m \cdot s^{-1}$	下的残余速度 (计算值) $v_{res}/m \cdot s^{-1}$
1	135	1 300	273.1/285	911.7
2	135	1 200	231/227	812
3	135	1 500	356/370	1 112
4	135	1 400	315/298	1 012

由表4可以看出,由于受到集成装甲的干扰,EFP弹丸速度明显降低,EFP初始侵彻速度 $v_d$ 与残余速度 $v_{res}$ 的关系曲线如图3所示。

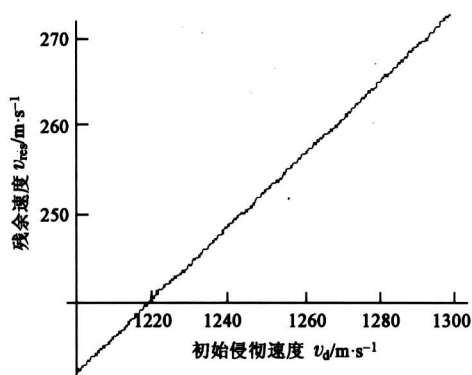


图3 初始侵彻速度与残余速度的关系

Fig.3 Relationship between the initial impacting velocity and residual velocity

由图3可知,EFP弹丸的侵彻能力随着初始侵彻速度的增加而增加,当EFP弹丸的初始撞击速度低于700 m/s时,集成装甲防护的主装甲基本不受破坏。

根据EFP侵彻集成装甲计算模型分析和陶瓷复合装甲抗弹性能分析,通过理论计算可以得到在EFP质量、材质等参数确定的情况下,集成装甲中陶瓷的厚度与初始侵彻速度的关系如图4所示。图4表明,如果陶瓷厚度与弹丸速度的关系落在曲线的下方,则集成装甲不会被击穿,可以以此为据,根据EFP弹丸的速度大小和防护要求设计优化集成装甲。

## 6 结论

1) 根据平板装药与EFP弹丸作用过程的动量

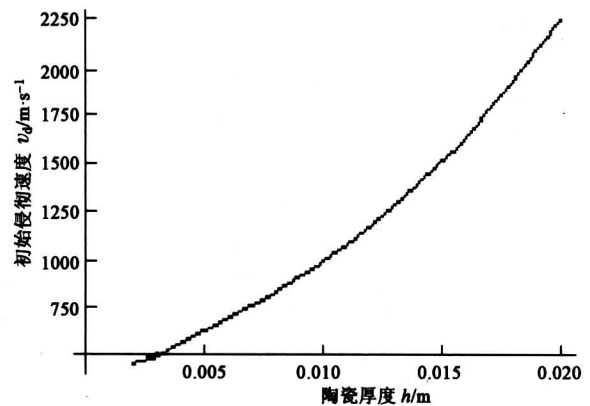


图4 集成装甲不被击穿的陶瓷临界厚度

Fig.4 Critical thickness of ceramic of integrated armor not been penetrated by EFP

守恒和陶瓷复合装甲极限速度计算方法,可以计算出EFP与集成装甲作用后的用以表征EFP侵彻性能的残余速度。

2) 相同面密度的集成装甲比陶瓷复合装甲的抗弹性能明显提高。

3) 可以依据不同的抗弹性能要求来设计集成装甲中陶瓷的临界厚度。

4) 平板装药的抗弹性能取决于前后板的速度,在保证安全起爆的情况下,可以通过装药参数提高集成装甲的抗弹性能。

5) EFP弹丸与新型集成装甲作用后的残余速度与EFP初始的侵彻速度基本呈线性相关。

## 参考文献

- [1] 王儒策. 弹药工程[M]. 北京:北京理工大学出版社,2002. 127~130
- [2] 郑哲敏,杨振声,等. 爆炸加工[M]. 北京:国防工业出版社,1981. 332~333
- [3] 杜忠华,赵国志,李文彬. 长杆弹侵彻复合装甲的机理研究[J]. 弹道学报,2001,13,(1):27~31
- [4] 李文彬,赵国志,王晓鸣,等. 干式侵彻体垂直侵彻反应装甲影响因素研究[J]. 南京理工大学学报,2003,27,(3):230~233
- [5] Ben-Dor G, Dubinsky A. Optimization of two component ceramic armor for a given impact velocity [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2000, 33: 185~190
- [6] Hetherington J G, Rajagopalan B P. Investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armours [J]. Int J Impact Eng, 1991, 11(1): 33~40

- [ 7 ] Hetherington J G, Rajagopalan B P. Correspondence on an investigation into the energy absorbed during ballistic perforation of composite armors [J]. *Int J Impact Eng*, 1992, 12(2): 325 ~ 327
- [ 8 ] Hetherington J G. Energy and momentum changes during ballistic perforation [J]. *Int J Impact Eng*, 1996, 18(3): 319 ~ 337
- [ 9 ] Florence A L. Interaction of projectiles and composite armor, Part 2 [R]. Stanford Research Institute, Menlo Park, AMMRC - CR - 69 - 15, August 1969

## The Influence of New Type of Integrated Armor on the Penetration Efficiency of EFP

Zhao Huiying, Shen Zhaowu

( *Department of Mechanics Engineering, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China* )

[ **Abstract** ] The principles implied in the process of EFP (explosively formed projectile) impacting the plate covered explosive and the ceramic composite armor have provided the evidence for calculating the residual velocity of EFP (explosive formed projectile) impacting a new integrated armor, and a calculation model has been induced. It is proved that although the integrated armor and the ceramic composite armor have the same facial density, the protective performance of integrated armor is better than the ceramic composite armor. This calculation model can be used in the design of integrated armor. Meanwhile, according to this model the goal of EFP resistance armor can be established.

[ **Key words** ] EFP; integrated armor; plate covered explosive; ceramic composite armor; residual velocity

( cont. from p.84 )

quantization are studied. Principle of "level-superposed" of the grade of security is brought forward. Analyzing the possibility of all kinds of calamities to take place, confirming the grade of security relative to city of the kind calamity, and superposing its coefficient correlation in certain proportion, this paper gets the synthetical security atlas similar to the real one based on urban geography and urban resource. The evaluation index of social risk is set up based on the distributed comprehensive density of population, thus comprehensive safe planning to the dangerous source in the city can be carried on. At last, an example for providing the visual safe grade of city and the divided electronic map is given. The exploration work of this text can offer reference for relevant research work, which is also significant to improve the engineering level of urban assessment of risk, to prevent and control the emergence of great malignants accidents effectively such as fire, explosion, poisonous substance leakage, etc., and to offer the scientific decision basis for city safety management.

[ **Key words** ] major hazards; assessment of risk; level-superposed; grade of security; GIS