

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.02.007

ERA对长杆穿甲弹减速作用的数值模拟

陈宁^{1,2}, 段卫东^{1,2}, 陈沛³, 余福进^{1,2}, 徐华建⁴

(1. 武汉科技大学, 武汉 430065; 2. 湖北省智能爆破技术研究中心, 武汉 430065;

3. 中铁四院集团工程建设有限责任公司, 武汉 430063; 4. 武汉爆破有限公司, 武汉 430023)

摘要: 为了研究爆炸反应装甲(ERA)对长杆式钨钢穿甲弹的减速作用,以英国尾翼稳定脱壳穿甲弹L23A1为背景,利用LS-DYNA有限元软件设计了长杆穿甲弹模型,并建立长杆式穿甲弹以不同速度和攻角侵彻爆炸反应装甲的数值模型,对不同工况下侵彻全过程和穿甲弹弹体各部位速度进行了分析。结果表明:爆炸反应装甲对长杆式穿甲弹具有明显的减速作用,且与穿甲弹轴线和反应装甲法线所夹角有关,攻角越大,减速作用越好,爆炸反应装甲的防护性能越强;弹体在侵彻过程中所受减速作用具有滞后性,距离弹头越远减速开始的时间越滞后,并由此设计了一种具有两级弹头的新型对爆炸反应装甲穿甲弹,为反装甲武器系统设计者在弹体结构优化方面提供有益的借鉴与参考。

关键词: 爆炸反应装甲;长杆式穿甲弹;爆炸力学;数值模拟

中图分类号: TJ410 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2021)02-0045-06

Numerical Simulation of Deceleration Effect of Explosive Reactive Armor on Long Rod Armor Piercing Projectile

CHEN Ning^{1,2}, DUAN Wei-dong^{1,2}, CHEN Pei³, YU Fu-jin^{1,2}, XU Hua-jian⁴

(1. Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;

2. Hubei Province Intelligent Blasting Technology Research Center, Wuhan 430065, China;

3. China Railway Siyuan Group Engineering Construction Co., Ltd., Wuhan 430063, China;

4. Wuhan Blasting Company, Wuhan 430023, China)

Abstract: In order to study the deceleration effect of explosive reactive armor(ERA) on long rod type tungsten steel armor piercing projectile, the long rod armor piercing projectile model was designed by using LS-DYNA finite element software, and the numerical model of long rod armor piercing projectile penetrating explosive reaction armor with different speeds and angles of attack was established and the penetration process and speed of each part of the armor-piercing projectile were analyzed. The results show that the explosive reactive armor has obvious deceleration effect on the long rod penetrator, which is related to the attack angle between the axis of the penetrator and the normal of the reaction armor. The larger the angle of attack is, the better the deceleration effect is, and the stronger the protection performance of the explosive reaction armor is; the deceleration effect of the projectile body in the process of penetration has hysteresis, and the farther away from the warhead, the slower the starting time of deceleration. A new type of explosive reaction armor piercing projectile with two-stage warhead is designed, which can provide useful reference for the designers of anti-Armor Weapon System in the aspect of structure optimization.

Key words: explosive reactive armor; long rod armor piercing projectile; explosion mechanics; numerical simulation

战争的需要是推动科技进步的源动力之一,随着火炸药的使用,武器从冷兵器发展到热兵器,攻击方和防守方对于武器性能的要求促进了武器破坏力和防御力的提升。随着坦克在陆战中的投入使用,其强大的攻防能力很快确立了坦克在陆地战争中的统治地位,极大地促进了反坦克武器和装甲防护的研发^[1,2]。由于长杆式穿甲弹具有穿透能力强、精度高和毁伤后效好等优良特点,目前已成为反坦克、反装甲的有效打击手段。长杆式穿甲弹一般选用钨合金作为弹芯材料,国内外均对其破坏机理进行了深入研究^[3-5]。装甲的防护能力是坦克赖以生存和保证持续作战能力的主要指标之一,自坦克诞生以来各国从未停止过对坦克装甲的研发,爆炸反应装甲(Explosive Reactive Armor, ERA)是位于主装甲外面,其基本结构是上下两层钢靶板中间夹着钝感炸药,最先与攻击武器接触,依靠本身爆炸场和由其推动的靶板对来袭炮弹、金属射流等进行削弱、破坏或干扰的一种半主动装甲,其与主装甲共同作用,最大程度提升防护效果^[6,7]。爆炸反应装甲自 M Held 提出以来,由于其优异的防护性能、较低的使用成本和较广的使用场景,得到了广泛关注。国内外学者通过实验和数值仿真等方式对其防护原理、性能及各项工艺参数进行了深入研究和改进^[8,9]。如在普通“平板式”爆炸反应装甲的基础上研发出聚能型爆炸反应装甲结构、双层平板装药 ERA、双层楔形装药结构 ERA 等,进一步提高和优化了爆炸反应装甲对聚能射流、穿甲弹的防护性能。

以英国分装式 L23A1 型号穿甲弹为现实参考,利用 LS_DYNA 3D 软件建立长杆式钨钢穿甲弹侵彻爆炸反应装甲的数值计算模型,穿甲弹以不同攻击角度对 ERA 进行侵彻,通过对侵彻全过程的数值模拟,分析不同攻击角度下长杆式穿甲弹攻击能力和爆炸反应装甲的防护性能,并根据模拟结果对穿甲弹结构提出可以行改进方案,为今后在爆炸反应装甲和穿甲弹方面的研究提供参考。

1 建立模型及其材料参数

倾角为穿甲弹轴线与爆炸反应装甲法线的夹角,为了研究爆炸反应装甲对不同倾角下长杆穿甲弹侵彻过程的干扰作用,采用控制变量法设置四种

工况,长杆穿甲弹保持相同轴向速度 1550 m/s 分别以 0°、30°、45°、60° 四种倾角侵彻爆炸反应装甲。

1.1 数值模型

为研究单层平板装药 ERA 对长杆式钨钢穿甲弹的防护效果,利用 LS-DYNA 软件,建立三维数值仿真模型。在长杆穿甲弹侵彻爆炸反应装甲的数值仿真中,反应装甲会产生大的变形运动,导致高应变和高应变率,采用 ALE 流固耦合算法可有效解决单元严重畸变引起的数值计算困难。穿甲弹和爆炸反应装甲由空气围绕,其中炸药和空气采用 ALE 算法计算,长杆穿甲弹与反应装甲上下飞板均采用 Lagrange 算法计算,上下飞板与夹层炸药采用滑移接触控制,为防止爆炸波运动到空气边界时发生反射,从而对数值模拟的精确性造成影响,故在建模过程中设置非反射边界条件。

对于长杆穿甲弹,以英国第一代尾翼稳定脱壳穿甲弹(Armor Piercing Fin Stabilized Discarding Sabot, APFSDS) L23A1 为研究参考,其弹芯材料为钨合金。利用 ANSYS/LS-DYNA 3D 软件,设计得到三维对称长杆式钨钢穿甲弹模型,穿甲弹长 48 cm,弹体直径 2.4 cm,由于弹体为不规则实体模型,直接进行扫掠(Sweep)操作得到的网格较为粗糙,可能会导致计算过程中网格发生较大畸变从而产生较大计算误差,为提高网格划分质量,采用 ICEM CFD 网格划分工具,通过创建块的方式,提高穿甲弹的弹头、弹体和尾翼等位置的网格质量,有效避免了尾翼连接处网格不规则问题,从而避免了计算过程中的网格畸变。最终得到长杆穿甲弹模型单元数为 6192,节点数为 51845, L23A1 型穿甲弹及穿甲弹网格划分模型如图 1 所示。

爆炸反应装甲基本结构为上下两层钢靶板中间夹着高能炸药的“三明治”结构,其中上下钢靶板尺寸一致,钢靶板厚度为 0.5 cm,长 30 cm、宽 18 cm,中间炸药厚度为 2 cm,其余尺寸与钢靶板相同。因为 ERA 模型较为规则,直接运用 LS-DYNA 中自带的 Mesh 功能模块通过扫掠(Sweep)操作对 ERA 的上下钢靶板进行网格划分,即可得到质量较好的规则六面体网格。建立整体数值计算模型如图 2 所示,采用 cm-g- μ s 单位制,数值计算模型共生成节点 608 740 个,生成单元 566 832 个。

1.2 材料参数

长杆穿甲弹所用材料为钨合金,钨合金密度大可达到钢比重的 2.3 倍,并具有极好的热稳定性,为较好的模拟穿甲弹的侵彻过程,假设穿甲弹在塑性

收稿日期:2021-01-24

作者简介:陈 宁(1994-),男,武汉科技大学硕士,主要从事控制爆破方面研究,(E-mail)847538450@qq.com。

通讯作者:段卫东(1965-),男,博士,武汉科技大学教授,从事特种爆破方面研究,(E-mail)199377168@qq.com。

变形过程中,加载面的大小和形状不变,仅整体地在应力空间中作平动,钨钢穿甲弹采用 Plastic_Kinematic 弹塑性随动硬化材料模型^[10,11]。本构方程为

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{1/p} \right] (\sigma_0 + \beta E_p \overline{\epsilon_p}) \quad (1)$$

式中: σ 为屈服应力; $\dot{\epsilon}$ 为应变率; σ_0 为材料静屈服应力; C, p 为应变率参数; E_p 为塑性硬化模量; β 为硬化参数; $\overline{\epsilon_p}$ 为等效塑性应变(失效应变)。

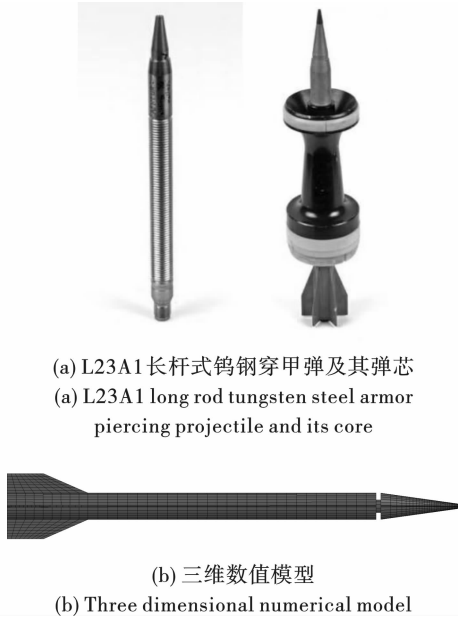


图1 长杆穿甲弹计算模型

Fig. 1 Calculation Model of long rod armour piercing projectile

表2 爆炸反应装甲上下靶板材料及状态方程参数

Table 2 Materials and state equation parameters of upper and lower target plates of explosive reactive armor

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$G/(GPa)$	A/GPa	B/GPa	n	C	m	T_m	S_1	S_2	$C/(m \cdot s^{-1})$	V_0
7.83	77	0.792	0.51	0.26	0.014	1.03	1793	1.49	0	4569	1

表3 爆炸反应装甲 Comp_B 炸药参数

Table 3 Explosive reaction armor comp_B explosive parameters

$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	G/GPa	a	b	XP_1	XP_2	r_1/GPa	r_2/GPa
1.712	3.54	524.2	7.678	4.2	1.1	778.1	-0.05

2 数值模拟分析与计算

爆炸反应装甲在长杆穿甲弹侵彻瞬间起爆,爆炸冲击波推动上下钢靶板沿法线方向运动并与穿甲弹作用,不同倾角下的穿甲弹在爆炸冲击波和飞散的靶板作用下减速效果明显,不同倾角(0°、30°、45°、60°)工况下的侵彻过程如图3所示。对比发现,攻角越大,爆炸反应装甲对穿甲弹的减速作用越好,爆炸反应装甲的防护性能越强,同时穿甲弹飞行姿态更容易受到干扰,当攻角为60°时,穿甲弹在侵

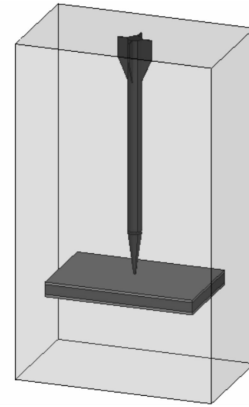


图2 整体三维计算模型

Fig. 2 Overall 3D calculation model

上下钢靶板采用 Johnson_Cook 材料模型,状态方程为 Gruneisen 方程;所夹炸药为 Comp_B 高能炸药,假定爆炸反应装甲瞬间起爆,采用 Elastic_Plastic_Hydro 弹塑性模型,状态方程为 Ignition_and_Growth 点火与增长状态方程;穿甲弹和爆炸反应装甲外围包裹的空气采用线性多项式(LINEAR_POLYNOMIAL)状态方程进行描述。穿甲弹、炸药及钢靶板的材料模型参数如表1至表3所示。

表1 穿甲弹材料参数

Table 1 Material parameters of armor piercing projectile

材料	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	E/GPa	μ	σ/GPa
钨合金	14.5	345	0.29	1.6

彻过程中飞行姿态不稳定,发生较为明显的滑移和弯曲变形。

对不同工况下爆炸反应装甲作用始末穿甲弹弹头尖端速度进行统计,如表4所示,同时为清楚的对比侵彻角度对穿甲弹侵彻的影响,将爆炸反应装甲作用前后穿甲弹尖端始末速度 V_0, V_1 进行对比,得到爆炸反应装甲对穿甲弹的减速效率 P ,即减速效率

$$P = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \times 100\% = \frac{\Delta V}{V_0} \times 100\% \quad (2)$$

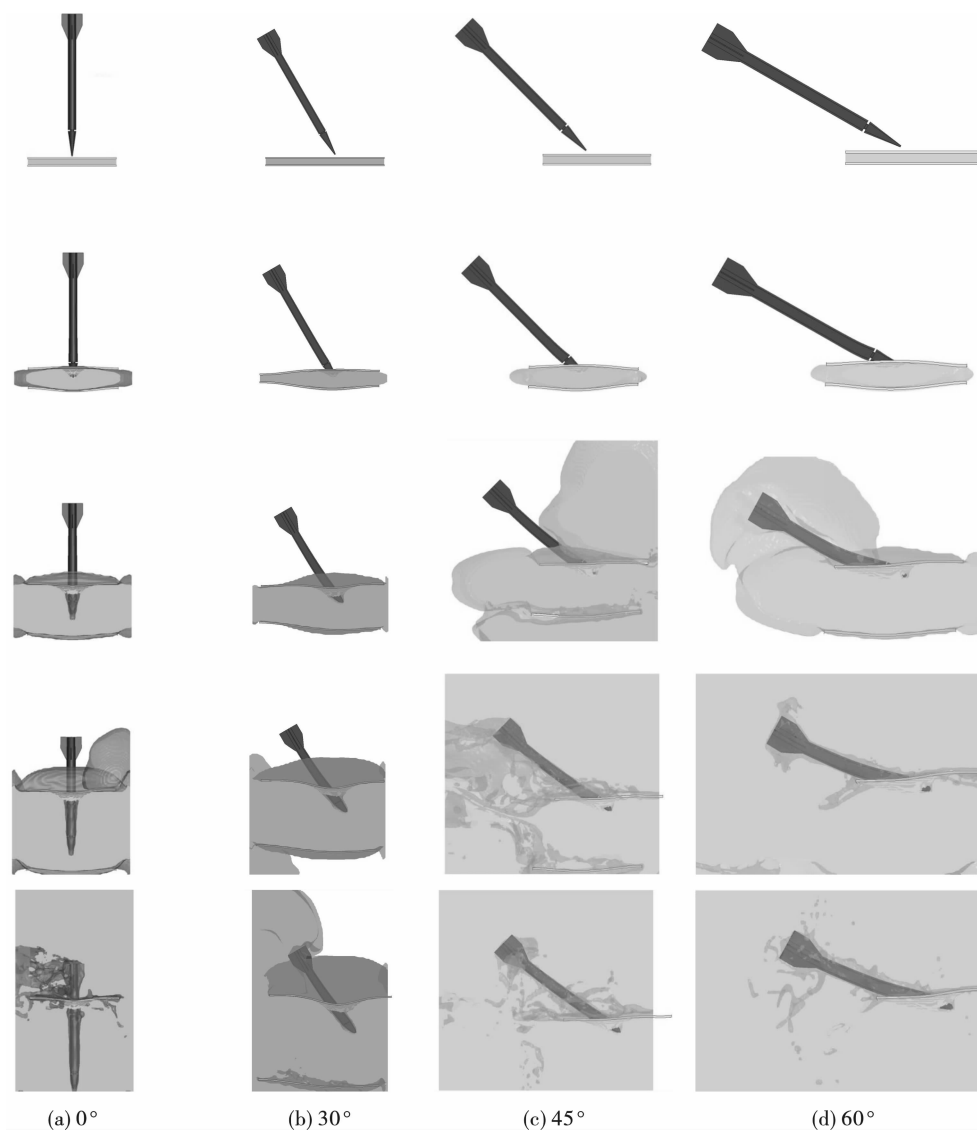


图3 不同倾角下穿甲弹侵彻爆炸反应装甲效果

Fig. 3 Penetration effect of penetrator into explosive reactive armor under different obliquity

表4 4种倾角工况下穿甲弹尖端速度

Table 4 Tip velocity of armour piercing projectile under four obliquity conditions

侵彻角度 $\alpha/^\circ$	速度方向	入射速度 $V_0/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	剩余速度 $V_1/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	速度变量 $\Delta V/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	减速效率 $P/\%$
0	轴向	1550	1233	317	20.1
	轴向	1550	602	948	61.2
30	X方向	775	478	297	38.3
	Y方向	1342	366	976	72.7
45	轴向	1550	852	698	45.0
	X方向	1096	822	274	25.0
60	Y方向	1096	223	873	79.7
	轴向	1550	982	568	36.6
60	X方向	1342	981	361	26.8
	Y方向	772	23	749	97.0

对表 4 数据进行分析可知,爆炸反应装甲对长杆穿甲弹 Y 方向的减速效果明显高于 X 方向,且对长杆穿甲弹 Y 方向的减速效率 P 随着倾角的增大而提升,在倾角为 60° 时 Y 方向减速效率达到最大 97.0% ,此时 Y 方向剩余速度仅为 23 m/s ,且穿甲弹倾角进一步发生偏转,几乎失去了对主装甲的侵彻能力。主要是由于反应装甲上下靶板在爆炸冲击波的作用下沿竖直(Y)方向运动并与穿甲弹作用,且随着穿甲弹倾角的增大,穿甲弹弹体与装甲靶板的接触面积不断增加,从而导致爆炸反应装甲对穿甲弹 Y 方向速度削弱效果增强。

为了进一步分析爆炸反应装甲对穿甲弹的减速作用,在穿甲弹弹体上轴线上成型设置四个观测点 (A 、 B 、 C 、 D) 如图 4 所示。

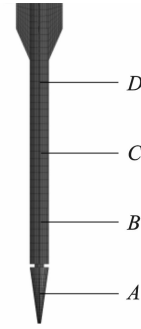
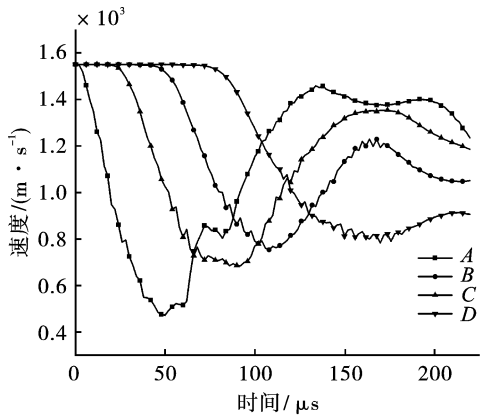


图 4 穿甲弹速度观测点

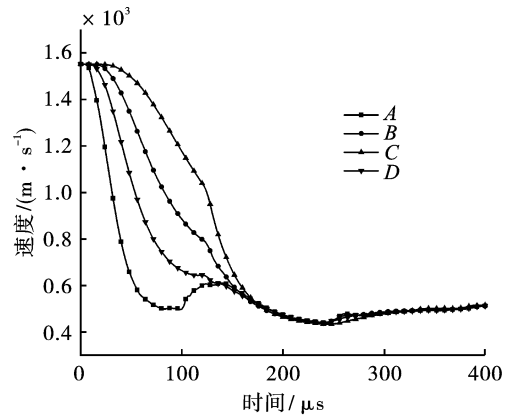
Fig. 4 Velocity observation points of armor piercing projectile

分别对 0° 、 30° 、 45° 、 60° 四种工况下穿甲弹弹体各观测点速度进行统计分析,并绘制不同工况下的速度分布图如图 5 所示。



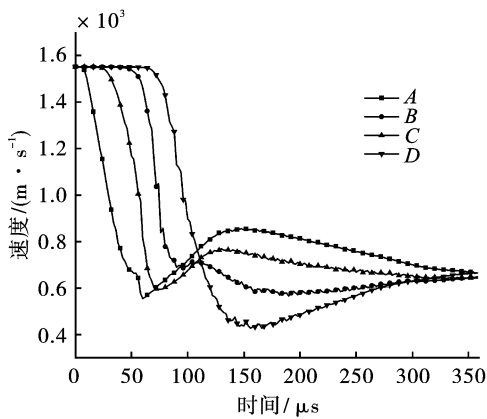
(a) 0° 攻角速度梯度曲线

(a) Velocity gradient curve at 0° angle of attack



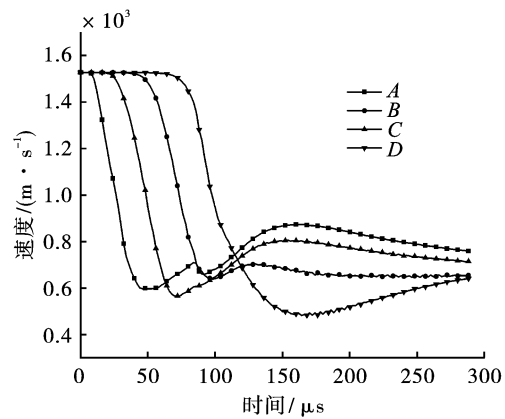
(b) 30° 攻角速度梯度曲线

(b) Velocity gradient curve at 30° angle of attack



(c) 45° 攻角速度梯度曲线

(c) Velocity gradient curve at 45° angle of attack



(d) 60° 攻角速度梯度曲线

(d) Velocity gradient curve at 60° angle of attack

图 5 四种工况下穿甲弹体轴线上的速度分布

Fig. 5 Velocity distribution along the axis of armor piercing projectile under four working conditions

对穿甲弹弹体轴线上的速度分布图进行分析可知,各工况下弹体在侵彻过程中受到爆炸反应装甲的减速作用具有滞后性,距离弹头越远减速开始的时间越滞后。弹体各部位速度均经历先急剧下降后波动回升的过程,越靠近弹头部位这种过程越剧烈,

对于整个弹体来说,该过程不是间断孤立的,而是微观连续且迅速的。主要由于穿甲弹在侵彻爆炸反应装甲过程中,以观测点 A 为例,首先受到装甲靶板的干扰作用, A 位置速度急剧下降,随后由于惯性作用,弹体动能传递,该位置速度回升,最终在侵彻过

程完成后弹体各部位速度趋近一致。

在上述研究的基础上改变穿甲弹初始速度作为对比工况,通过多次数值模拟,观察爆炸反应装甲对穿甲弹的减速作用与穿甲弹攻击速度的关系,研究发现,随着长杆穿甲弹速度的提升反应装甲的干扰作用不断减弱,穿甲弹飞行姿态更加稳定。

根据弹体在侵彻过程中受减速作用的滞后性,距离弹头越远减速开始的时间越滞后,由此可考虑设计一种新型对爆炸反应装甲穿甲弹,如下图6所示。该穿甲弹设有两级弹头,一级弹头将反应装甲引爆,对反应装甲靶板进行开坑处理,并在极短时间内主动脱落;再由二级弹头及长杆穿甲弹主体对目标继续侵彻。在穿甲弹体失去因反应装甲爆炸阻挡的一级弹头后,由于速度滞后,二级弹体可继续以较高初速度侵彻目标物普通装甲,保留了较高的动能;同时由于一级弹头的保护,穿甲弹能保持较为稳定的飞行姿态,降低了弹体的滑移趋势,从而可能提高穿甲弹对目标的打击能力。

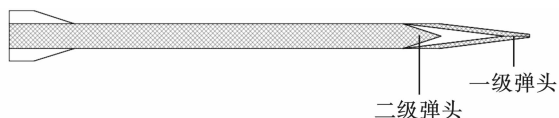


图6 新型主动断裂穿甲弹

Fig. 6 New active fracture armor piercing projectile

3 结论

(1)爆炸反应装甲对长杆型穿甲弹具有明显的减速作用,且与穿甲弹轴线和反应装甲法线所夹角有关,攻角越大,减速作用越好,爆炸反应装甲的防护性能越强。当攻角大于 60° 时,在爆炸反应装甲的作用下,长杆穿甲弹丧失对主装装甲的进一步侵彻能力。适当提高穿甲弹速度可以有效减少爆炸反应装甲对其的干扰作用。

(2)穿甲弹体轴线上的速度分布表明,弹体在侵彻过程中所受减速作用具有滞后性,距离弹头越远减速开始的时间越滞后,由此可考虑设计一种新型对爆炸反应装甲穿甲弹,该穿甲弹设有两级弹头,一级弹头在受到爆炸反应装甲作用后主动脱落。在穿甲弹体失去因反应装甲爆炸阻挡的一级弹头后,由于速度滞后,二级弹体将以较高初速度和较为稳定的飞行姿态继续侵彻目标物普通装甲,从而可能提高穿甲弹对目标的打击能力。为弹体结构优化设计提供了较为可行的参考依据。

参考文献 (References)

[1] 孙庚辰,吴锦云,赵国志,等.长杆弹垂直侵彻半无限

厚靶板的简化模型[J].兵工学报,1981,2(4):1-8.

- [1] SUN G C, WU J Y, ZHAO G Z, et al. Simplified model for vertical penetration of long rod projectile into semi infinite thick target [J]. Acta Ordnance, 1981, 2(4): 1-8. (in Chinese)
- [2] 沈晓军,王晓鸣,张先锋.射弹冲击引爆反应装甲数值模拟研究[J].弹箭与制导学报,2005,25(SD):897-899.
- [2] SHEN X J, WANG X M, ZHANG X F. Numerical simulation of projectile impact initiation reaction armor [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2005, 25(SD): 897-899. (in Chinese)
- [3] 高光发,李永池,黄瑞源.长杆弹侵彻半无限靶板的影响因素及其影响规律[J].弹箭与制导学报,2014,34(3):56-56.
- [3] GAO G F, LI Y C, HUANG R Y. Analysis of influencing factors and influencing laws of long rod projectile penetrating semi infinite target vertically [J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2014, 34(3): 56-56. (in Chinese)
- [4] 何雨.长杆弹撞击下金属靶板侵彻与穿透的进一步研究[D].合肥:中国科学技术大学,2013.
- [4] HE Y. Further study on penetration and penetration of metal target under long rod projectile impact [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013. (in Chinese)
- [5] 王杰.钨合金长杆弹及钨纤维复合材料弹侵彻半无限钢靶的研究[D].西安:西安科技大学,2014.
- [5] WANG J. Study on penetration of tungsten alloy long rod projectile and tungsten fiber composite projectile into semi infinite steel target [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] LI X D, YANG Y S, LV S T. A numerical study on the disturbance of explosive reactive armors to jet penetration [J]. Defence Technology, 2014, 10(1): 66-75.
- [7] ADAM K, DARIUSZ P, MIROSLAW B, et al. Metallographic analysis of piercing armor plate by explosively formed projectiles [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2018, 18(4): 1686-1697.
- [8] 高永宏,张明,刘迎彬,等.双层楔形装药 ERA 干扰聚能射流的数值模拟[J].高压物理学报,2018,32(6):131-137.
- [8] GAO Y H, ZHANG M, LIU Y B, et al. Numerical simulation of era interference on shaped charge jet by double wedge charge [J]. Acta High Pressure Physics, 2018, 32(6): 131-137. (in Chinese)