

爆炸冲击下某型装甲车内PBX装药的力学响应

于弘兴, 蔡宣明, 郭安肖, 韩林壮, 张 迅

(中北大学 航空宇航学院, 山西 太原 030051)

摘要: 爆炸冲击下装甲车内的弹药会发生弹跳现象, 亟需探明装甲车内弹药的运动趋势及弹药装药部的力学响应。通过建立基于典型毁伤源的流固耦合仿真模型, 对装载弹药的某型装甲车进行了毁伤数值模拟研究, 分析了不同毁伤源作用下装甲车内弹药的运动趋势及弹药装药部的力学响应。结果表明: 在毁伤源装药比近似相等的情况下, 毁伤源的长径比越大, 装甲车底板的形变程度越大, 底板因变形而对弹药施加的冲击载荷是直接导致弹药弹跳的原因, 弹药整体运动趋势呈现斜坡状; 不同毁伤源作用下装甲车底板的微小形变仍可对装甲车内弹药施加较大的冲击载荷, 弹药的颈部位置与底部位置会承受较大压力, 应作为重点防护区域。该研究可为含能材料的运输及防护提供参考依据。

关键词: 爆炸冲击载荷; 装甲车内弹药; PBX装药; 弹药防护

中图分类号: TJ55 **文献标识码:** A **doi:** 10.62756/jnuc.issn.1673-3193.2024.01.0026

引用格式: 于弘兴, 蔡宣明, 郭安肖, 等. 爆炸冲击下某型装甲车内PBX装药的力学响应[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2025, 46(1): 45-52.

YU Hongxing, CAI Xuanming, GUO Anxiao, et al. Mechanical response of PBX charge in a type of armored vehicle by explosive impact[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2025, 46(1): 45-52.

Mechanical Response of PBX Charge in a Type of Armored Vehicle by Explosive Impact

YU Hongxing, CAI Xuanming, GUO Anxiao, HAN Linzhuang, ZHANG Xun

(School of Aerospace Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: There are bounce phenomenon of vehicle mounted ammunitions caused by explosion impact, therefore it is urgent to find out the movement trend of vehicle mounted ammunitions and the mechanical response of the charge. In order to analyze the movement trend of vehicle mounted ammunitions and the mechanical response of the charge under different sources of damage, a typical damage source fluid-solid coupling simulation model was built, and the damage to a type of armored vehicle loaded with ammunitions was simulated. The results show that, in the case of approximately equal damage source charge ratios, the greater the length-diameter ratio of the damage source, the greater the degree of deformation of the armored vehicle's base plate, and the impact load exerted on the munition by the deformation of the base plate is the direct cause of the munition's bounce, the movement trend of vehicle mounted ammunitions is slope-like. When the damage sources are different, the small deformation of the bottom plate of

收稿日期: 2024-01-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(12272356); 省部共建动态测试技术国家重点实验室基金资助项目(2022-SYSJJ-03); 中北大学第19届研究生科技立项(20231974)

作者简介: 于弘兴(2001-), 男, 博士生, 主要从事毁伤技术及毁伤效应研究。

通信作者: 蔡宣明(1981-), 男, 教授, 博士, 主要从事毁伤技术及毁伤效应研究。E-mail: caixm@nuc.edu.cn.

the armored vehicle can still impose a large impact load on the vehicle mounted ammunitions. The neck position and the bottom position of the ammunitions are subjected to a large amount of pressure, and these locations should be considered as priority protection areas. This study can provide a reference basis for the transportation and protection of energetic materials.

Key words: explosive impact load; vehicle mounted munitions; PBX charge; ammunition protection

0 引言

PBX炸药因其高能低感特性和相对稳定的力学性能,被广泛应用于毁伤源的装药^[1-5],在现代战争中,作战车辆所处的战斗环境异常恶劣且复杂,而装甲车内毁伤源中的PBX炸药也势必会受到作战车辆传递的冲击载荷的影响,导致炸药内部产生微裂纹等损伤,引起毁伤源PBX装药意外点火^[6]。

屈可朋等^[7-8]对RDX基PBX炸药进行了撞击加载试验,发现随着应力率的增加,炸药的撞击安全性降低。王一鸣等^[9]对损伤累积下HMX基PBX炸药的点火行为进行了数值仿真,发现多次撞击提高了炸药的点火行为。石啸海^[10]、张馨予^[11]、谷鸿平^[12]等通过毁伤源侵彻混凝土靶板的数值仿真,分析了毁伤源装药的动态力学响应及损伤情况,提出了装药头部及尾部应重点防护的建议。

刘沐言^[13]、黄垂艺^[14]通过破片侵彻带壳装药的数值仿真,分析了含能材料在撞击后的力学响应及损伤情况,张广华等^[15-16]通过破片撞击带壳装药的试验,分析了破片撞击下带壳装药的反应机制,为带壳装药的设计提供了依据和方法。Martynenko等^[17]对武器毁伤源的运输过程进行了数值模拟,为毁伤源的操作设计 and 疲劳强度校核提供了依据。但是,针对爆炸冲击导致的装甲车内毁伤源PBX装药的力学响应还亟需研究。

本文首先建立装药比相同长径比不同的半预制破片战斗部,将其作为毁伤源,再建立基于典型毁伤源的流固耦合仿真模型,然后对装载弹药的某型装甲车进行毁伤数值模拟,以探明不同毁伤源下装甲车内弹药的运动趋势及装药部的力学响应,从而为含能材料的运输及防护提供参考依据。

1 数值仿真

1.1 半预制破片毁伤源及装药结构

图1所示为半预制破片毁伤源的径向截面图,该毁伤源是一个内径为35 mm,外径为39 mm

的空心圆柱体,其外表面刻有一系列相邻两边夹角为 2° 的轴向矩形凹槽,凹槽的深度为3 mm。图2所示为半预制破片毁伤源的轴向截面图,在轴向上,每隔3 mm刻有一系列相邻两边夹角为 2° 的径向矩形凹槽,凹槽的深度也为3 mm。该毁伤源的两端盖是半径为36 mm、厚度为1 mm的圆柱体。毁伤源的装药结构采用圆柱结构,起爆方式为端面中心点起爆。

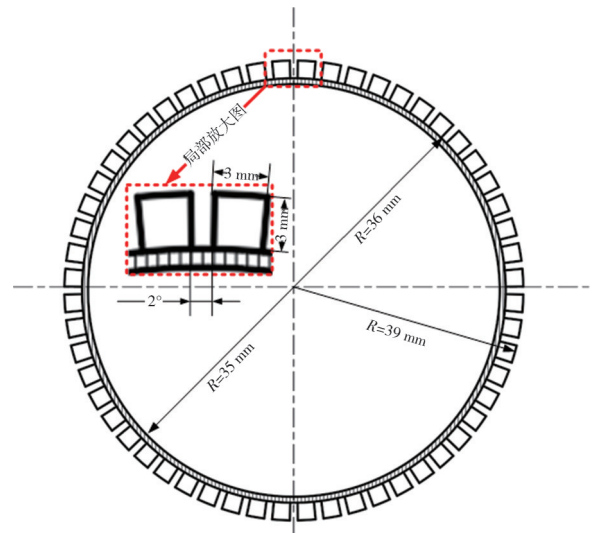


图1 毁伤源径向截面图

Fig. 1 Radial cross-section of the damage source

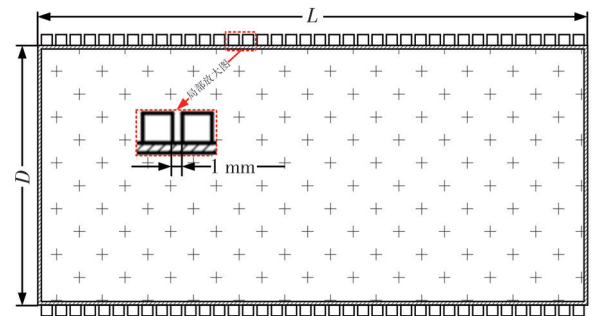


图2 毁伤源轴向截面图

Fig. 2 Axial cross-section of the damage source

图3所示为3种不同长径比的半预制破片毁伤源,为了确保装药比大致相等,通过调整长度 L 来实现,从左到右,毁伤源的长径比分别为1.5, 2和3。这3种毁伤源的装药比分别为0.716, 0.696和0.673。

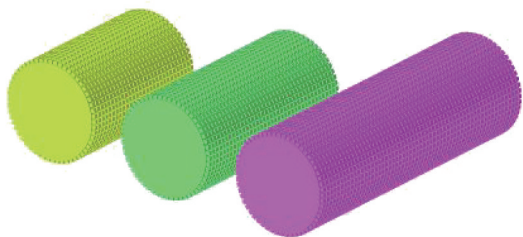


图 3 不同长径比的毁伤源

Fig. 3 The damage source with different length-diameter ratios

1.2 某型号装甲车及装甲车内弹药

图 4 为装甲车及装甲车内弹药位置图,在炮管的右下方设有一个存放弹药的储弹箱。该储弹箱的高度为 200 mm,厚度为 45 mm,储弹箱内部装有 6 枚互不接触的装甲车内弹药,装甲车内弹药的壳体厚度为 2 mm。在装甲车内弹药的壳体和装药部上分别设置 4 个观测点,相邻两观测点之间的距离相等,装甲车内弹药的尺寸及观测点位置如图 5 所示。图 5 中,红色方块标记处为装甲车内弹药壳体上的观测点位置,从左到右依次记为观测点 K_4 、观测点 K_3 、观测点 K_2 及观测点 K_1 ;棕色方块标记处为 PBX 装药上的观测点位置,从左到右依次记为观测点 Y_4 、观测点 Y_3 、观测点 Y_2 及观测点 Y_1 。

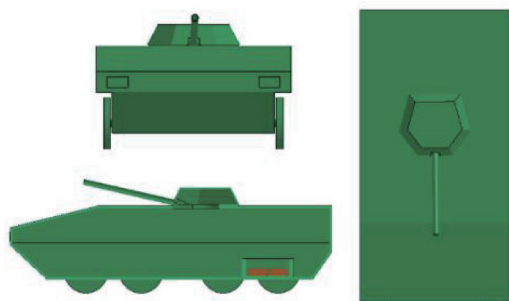


图 4 装甲车内弹药位置

Fig. 4 Position of the vehicle mounted ammunitions

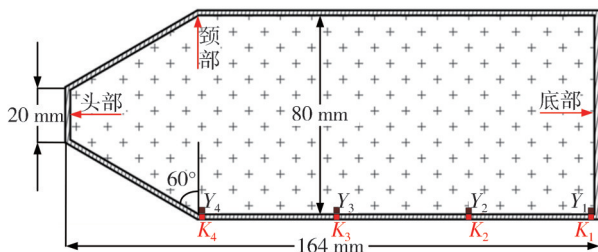


图 5 装甲车内弹药截面图

Fig. 5 Cross-section of vehicle mounted ammunitions

1.3 毁伤源毁伤有限元模型

有限元模型由毁伤源、装甲车、装甲车内弹药及空气域组成,毁伤源为端面中心点起爆并放置于装甲车尾部,具体如图 6 所示。毁伤源装药和空气域均采用欧拉网格,单元使用多物质 ALE 算法模拟爆轰过程中物质在单元间的流动,空气域的边界设置为无反射边界条件,防止空气域边界产生的应力波影响仿真结果,其余部件采用拉格朗日网格,且与毁伤源装药、空气域间采用耦合算法,实现流固耦合仿真。

空气域

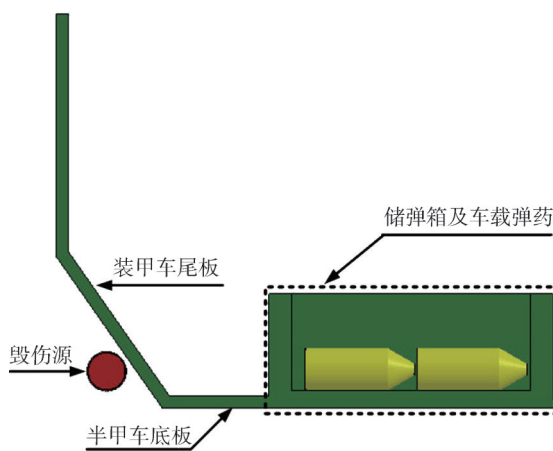


图 6 毁伤源毁伤的有限元模型

Fig. 6 Finite element model of damage source destory

1.4 材料模型及参数

空气用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程和 *MAT_NULL 材料模型定义,主要参数如表 1 所示。

表 1 空气材料参数

Tab. 1 Air material parameters

$\rho_{AIR}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	$C_0\sim C_3$	C_4	C_5
1.29×10^{-9}	0	0.4	0.4

毁伤源装药 TNT 用 *EOS_JWL^[18] 状态方程和 *MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN^[18] 材料模型定义,主要参数如表 2 所示。

表 2 TNT 材料参数

Tab. 2 TNT material parameters

$\rho_{TNT}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	p_{CJ}/GPa	R_1	R_2
1.63×10^{-6}	34.5	4.15	0.9
A/GPa	B/GPa	$D/(\text{mm}\cdot\text{ms}^{-1})$	ω
373.8	3.75	6 930	0.35

6枚装甲车内弹药的装药均为PBX炸药,用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC^[19]材料模型定义,主要参数如表3所示。

表3 PBX炸药材料参数

Tab. 3 PBX material parameters

$\rho_{\text{PBX}}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	E_r/GPa	σ_0/GPa
1.85×10^{-6}	6×10^{-4}	0.045
E/GPa	ν	β
10.1	0.3	1

用*MAT_JOHNSON_COOK^[20]材料模型定义45#钢,主要参数如表4所示。

表4 45#钢材料参数

Tab. 4 45# steel material parameters

$\rho_{45}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	E/GPa	A/GPa	B/GPa
7.8×10^{-6}	210	0.507	0.32
μ	n	c	m
0.3	0.28	0.064	1.06

半预制破片毁伤源及装甲车内弹药的弹壳材料为炮钢,用*MAT_JOHNSON_COOK^[21]材料模型定义,主要参数如表5所示。

表5 炮钢材料参数

Tab. 5 Gunmetal material parameters

$\rho_{\text{PG}}/(\text{kg}\cdot\text{mm}^{-3})$	E/GPa	A/GPa	B/GPa
7.8×10^{-6}	210	1.5	1.6
μ	n	c	m
0.3	0.14	-0.0025	1.5

2 仿真结果与分析

2.1 不同毁伤源作用下弹药的运动趋势

为方便描述,将长径比为3的毁伤源爆轰仿真称为仿真1,长径比为2的毁伤源爆轰仿真称为仿真2,长径比为1.5的毁伤源爆轰仿真称为仿真3。图7从左到右依次为仿真1、仿真2及仿真3中装甲车尾板的应变云图。在毁伤源爆轰作用下,装甲车尾板因变形导致装甲车底板形变,储弹箱内的装甲车内弹药将瞬间承受强冲击载荷作用,装甲车内弹药产生“弹跳”现象。

图8为仿真1中观测点K₁处的装甲车内弹药及装甲车底板的位移曲线,在毁伤源破片未到达目标之前,装甲车内弹药处于稳定状态,只受到重力及支撑力作用,装甲车内弹药的位置相对稳定。0.2 ms后,由于受到装甲车底板的冲击作用,观测点K₁处装甲车内弹药的位移随装甲车底板的变形而改变,短时间内,两者的位移大小及运动趋势基本相同。

最终,观测点K₁处装甲车内弹药与装甲车底板分离,装甲车底板发生回弹,两者间距不断增大,观测点K₂、观测点K₃及观测点K₄的运动趋势同观测点K₁的运动趋势相似,不再赘述。

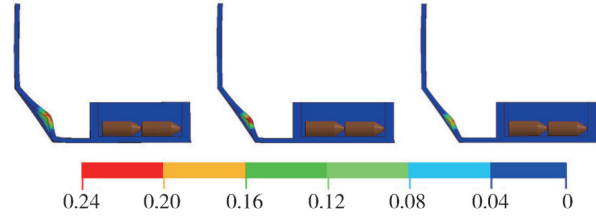
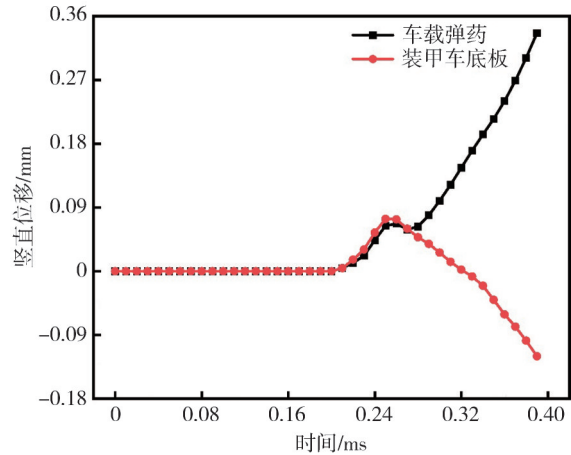
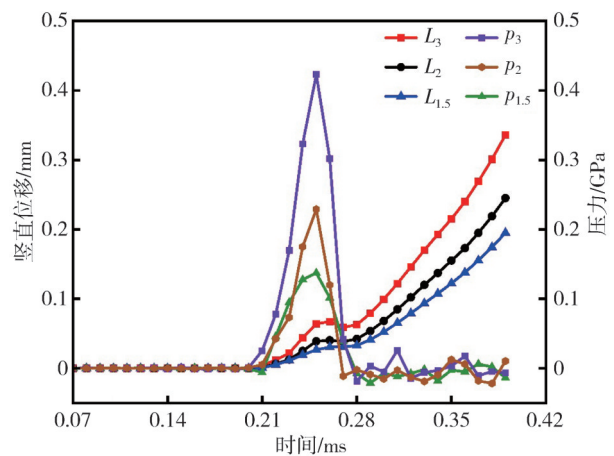


图7 装甲车应变云图

Fig. 7 Effective strain nephogram of armored vehicle

图8 观测点K₁处的弹药及装甲车底板的位移曲线Fig. 8 Displacement curves of vehicle mounted ammunitions and armored vehicle bottom plate at observation point K₁

如图9所示,红色、黑色及蓝色曲线分别代表仿真1、仿真2和仿真3在观测点K₁处的装甲车内弹药位移曲线;紫色、棕色和绿色曲线分别代表仿真1、仿真2及仿真3在观测点K₁处的装甲车内弹药的压力曲线。

图9 观测点K₁处的装甲车内弹药的位移及压力曲线Fig. 9 Displacement and pressure curves of vehicle mounted ammunitions at observation point K₁

仿真1、仿真2和仿真3在观测点 K_1 处的装甲车内弹药位移趋势和压力趋势相似。装甲车内弹药与装甲车底板接触后,观测点 K_1 处所承受的压力逐渐增至峰值,此时观测点 K_1 处的位移也增至峰值附近。随后,观测点 K_1 处所承受的压力迅速减小,可认为两者开始分离,间距逐渐增大。最终,观测点 K_1 处的压力趋于稳定。

如图 10 所示,在毁伤源对装甲车进行毁伤的过程中,装甲车内弹药底部位置与颈部位置受到的压力较大。仿真1中装甲车内弹药底部所受的压力分别比仿真2和仿真3高46%和68%;仿真1中装甲车内弹药颈部所受压力分别比仿真2和仿真3高22%和31%。

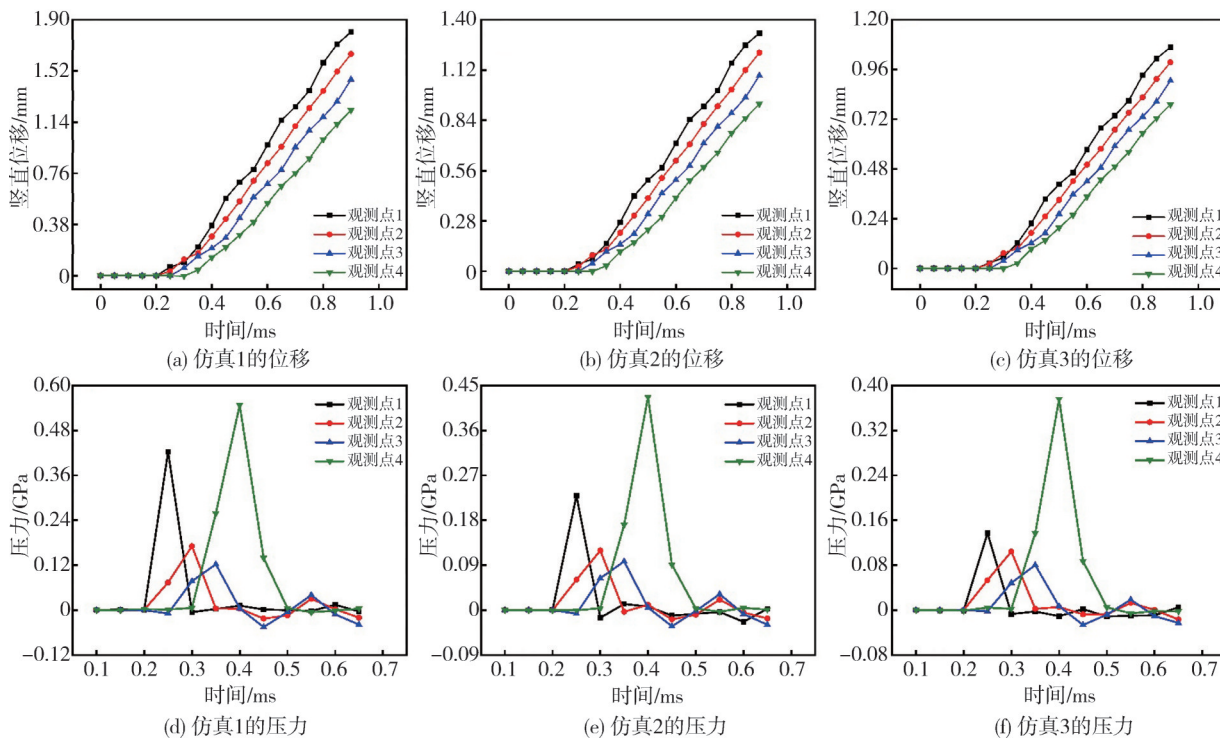


图 10 装甲车内弹药各观测点处位移及压力曲线

Fig. 10 Displacement and pressure curves at each observation point of vehicle mounted ammunitions

表 6 所示为不同毁伤源作用下装甲车内弹药的位移趋势。

表 6 装甲车内弹药的位移趋势

Tab. 6 Displacement trend of vehicle mounted ammunitions

t/ms	L/D		
	3(仿真1)	2(仿真2)	1.5(仿真3)
0			
0.45			
0.65			
0.85			

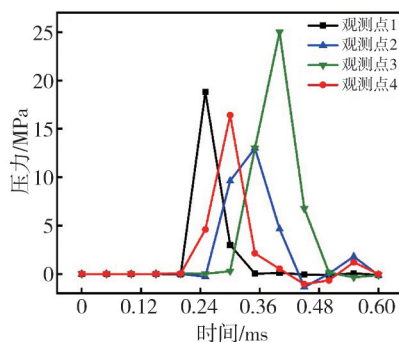
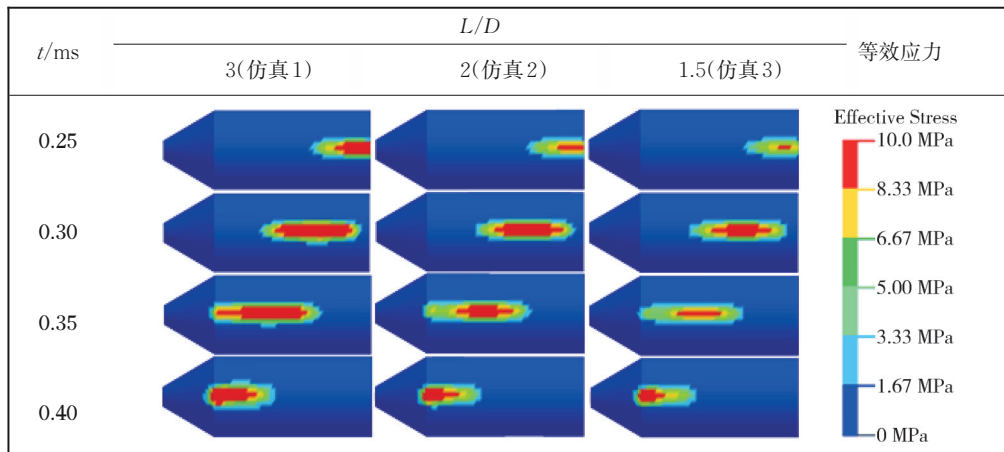
由表 6 可知: 0.45 ms 时, 装甲车内弹药与装甲车底板未完全分离, 仿真1中观测点1处的位移

分别比仿真2和仿真3中观测点1处的位移高26%和42%; 0.65 ms 时, 装甲车内弹药完全脱离装甲车底板, 各观测点的压力均趋于稳定; 0.85 ms 时, 装甲车内弹药“弹跳”现象明显, 装甲车内弹药底部至头部的位移逐渐减小, 呈斜坡状。

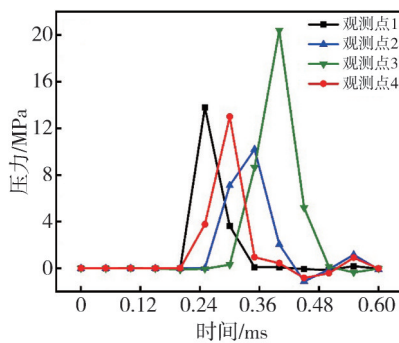
2.2 不同毁伤源作用下弹药装药部的力学响应

如表 7 所示, 当装甲车内弹药装药部的受压位置首先发生在弹药底部时, 装药部所受到的压力超过 10 MPa。随着装甲车内弹药底部与装甲车底板的分离, 装药部受压位置有从底部向颈部运动的趋势, 这种趋势与装甲车内弹药壳体所受压力趋势相同。装药部上各观测点处的压力曲线如图 11 所示, 可以看出, 仿真1中装药部底部所受压力分别比仿真2和仿真3高27%和33%, 仿真1中PBX装药部颈部所受压力分别比仿真2和仿真3高21%和26%。

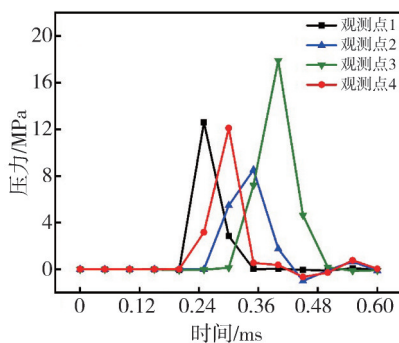
表7 PBX装药部压力云图比较
Tab. 7 Comparison of PBX charge pressure nephogram



(a) 仿真1



(b) 仿真2



(c) 仿真3

图11 PBX装药部各观测点处的压力曲线

Fig. 11 Pressure curve at each observation point of PBX charge

在装药比相同的情况下, 毁伤源的长径比越大, 对装甲车内弹药的冲击作用越强, 弹药装药部底部位置与颈部位置所受的压力越大, 严重情况下会导致装药部压溃, 从而降低装药部的可靠性及预期威力, 更严重时可造成装药部意外爆炸, 机械刺激可能成为装药部点火的主控机制^[16]。

3 结论

1) 不同毁伤源作用下, 装甲车底板因变形对弹药施加的冲击载荷是直接导致弹药发生“弹跳”现象的原因, 由于弹药受冲击作用的位置有从底部向顶部转移的趋势, 装甲车内弹药的整体运动趋势呈斜坡状。

2) 装药比近似相等的情况下, 毁伤源的长径比越大, 装甲车内弹药底部位置与颈部位置受到的冲击载荷越大。由于弹药底部位置先受冲击载荷作用, 所以仿真1中装甲车内弹药壳体底部位置所受载荷分别比仿真2和仿真3高46%和68%, 而弹药壳体颈部位置所受载荷分别比仿真2和仿真3高22%和31%; 仿真1中装药部底部位置所受载荷分别比仿真2和仿真3高27%和33%, 而装药部颈部位置所受载荷分别比仿真2和仿真3高21%和26%。

3) 弹药的壳体可对装药部起到保护作用, 弹药装药部比弹药壳体所受的冲击载荷下降一个数量级, 机械刺激可能成为装药部点火的主控机制。

参考文献:

- [1] GUO Maolin, MA Zhongliang, HE Liming, et al. Effect of varied proportion of GAP-ETPE/NC as binder on thermal decomposition behaviors, stability

- and mechanical properties of nitramine propellants [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 130(2): 909-918.
- [2] BORONSKI D, KOTYK M, MACKOWIAK P, et al. Mechanical properties of explosively welded AA2519-AA1050-Ti6Al4V layered material at ambient and cryogenic conditions [J]. *Materials & Design*, 2017, 133(5): 390-403.
- [3] HANG Guiyun, YU Wenli, WANG Tao, et al. Comparative studies on structures, mechanical properties, sensitivity, stabilities and detonation performance of CL-20/TNT cocrystal and composite explosives by molecular dynamics simulation [J]. *Journal of Molecular Modeling*, 2017, 23(10): 281-290.
- [4] HUSSEIN A K, ELBEIH A, ZEMAN S. Thermal decomposition kinetics and explosive properties of a mixture based on cis-1, 3, 4, 6-tetranitrooctahydroimidazo-[4, 5-d]imidazole and 3-nitro-1, 2, 4-triazol-5-one (BCHMX/NTO) [J]. *Thermochimica Acta*, 2017, 655(9): 292-301.
- [5] GARGANO A, PINGKARAWAT K, BLACKLOCK M, et al. Comparative assessment of the explosive blast performance of carbon and glass fibre-polymer composites used in naval ship structures [J]. *Composite Structures*, 2017, 171(7): 306-316.
- [6] 王硕, 卢芳云, 陈荣. 约束 PBX 炸药中心点火反应烈度演化实验研究 [J]. *火炸药学报*, 2021, 44(5): 623-630.
WANG Shuo, LU Fangyun, CHEN Rong. Experimental study on intensity evolution of central ignition reaction of confined PBX explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(5): 623-630. (in Chinese)
- [7] 屈可朋, 肖玮, 韩天一, 等. RDX 基 PBX 炸药的力学行为和损伤模式 [J]. *火炸药学报*, 2012, 35(5): 38-40.
QU Kepeng, XIAO Wei, HAN Tianyi, et al. Mechanical behavior and damage mode of RDX-based PBX explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2012, 35(5): 38-40. (in Chinese)
- [8] 屈可朋, 沈飞, 王世英, 等. RDX 基 PBX 炸药在不同应力率下的撞击安全性 [J]. *火炸药学报*, 2014, 37(6): 40-43.
QU Kepeng, SHEN Fei, WANG Shiyong, et al. Research on impact safety of a RDX-based PBX explosive at different stress rate [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(6): 40-43. (in Chinese)
- [9] 王一鸣, 刘睿, 陈鹏万, 等. 损伤累积下 PBX 炸药低速撞击点火行为的数值仿真 [J]. *火炸药学报*, 2023, 46(5): 456-464.
WANG Yiming, LIU Rui, CHEN Pengwan, et al. Numerical simulation on low-velocity impact ignition behavior of PBXs with damage accumulation [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2023, 46(5): 456-464. (in Chinese)
- [10] 石啸海, 戴开达, 陈鹏万, 等. 毁伤源侵入过程中 PBX 装药动态损伤数值仿真 [J]. *中国测试*, 2016, 42(10): 138-142.
SHI Xiaohai, DAI Kaida, CHEN Pengwan, et al. Numerical simulation of dynamic damage of PBX chargeduring the warhead penetration process [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(10): 138-142. (in Chinese)
- [11] 张馨予, 吴艳青, 黄风雷. PBX 装药弹体侵彻混凝土薄板的数值仿真 [J]. *含能材料*, 2018, 26(1): 101-108.
ZHANG Xinyu, WU Yanqing, HUANG Fenglei. Numerical simulation on the dynamic damage of PBX charges filled in projectiles during penetrating thin concrete targets [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2018, 26(1): 101-108. (in Chinese)
- [12] 谷鸿平, 张立建, 畅博, 等. 侵彻载荷下两种结构装药动态响应数值分析 [J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(8): 41-44.
GU Hongping, ZHANG Lijian, CHANG Bo, et al. Numerical simulation on dynamic response of two charge structures subjected to penetration load [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2020, 41(8): 41-44. (in Chinese)
- [13] 刘沫言. 带壳装药的破片撞击和冲击波敏感度研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2020.
- [14] 黄垂艺. 爆炸冲击环境下车载 PBX 炸药损伤特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2021.
- [15] 张广华, 沈飞, 屈可朋, 等. 壳体厚度对装药响应特性的影响 [J]. *兵器装备工程学报* 2019, 40(8): 14-17.
ZHANG Guanghua, SHEN Fei, QU Kepeng, et al. Influence of cover thickness on response characteristics of shelled charge [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(8): 14-17. (in Chinese)
- [16] 张广华, 韩秀凤, 沈飞, 等. 带壳装药在不同材质破片撞击下的响应特性 [J]. *兵器装备工程学报*, 2022, 43(8): 1-6.
ZHANG Guanghua, HAN Xiufeng, SHEN Fei, et al. Reaction characteristic of covered charge

- impacted by different material fragments[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2022, 43(8): 1-6. (in Chinese)
- [17] MARTYNENKO G, AVRAMOV K, MARTYNE NKO V, et al. Numerical simulation of warhead transportation [J]. *Defence Technology*, 2021, 2(17): 478-494.
- [18] DOBRATZ B M, CRAWFORD P C. LLNL explosives handbook: properties of chemical explosives and explosive simulants: UCRL-52997-Chg. 2[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985.
- [19] 张丘, 黄交虎. 炸药切削数值模拟研究[J]. *含能材料*, 2009, 17(5): 583-587.
ZHANG Qiu, HUANG Jiaohu. Numerical simulation of explosive machining [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(5): 583-587. (in Chinese)
- [20] 陈刚, 陈小伟, 陈忠富, 等. A3钢钝头弹撞击45钢板破坏模式的数值分析[J]. *爆炸与冲击*, 2007, 27(5): 390-397.
CHEN Gang, CHEN Xiaowei, CHEN Zhongfu, et al. Simulations of A3 steel blunt projectiles impacting 45 steel plates [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 27(5): 390-397. (in Chinese)
- [21] 曾志银, 高小科, 刘朋科, 等. 炮钢材料动态本构模型及其验证[J]. *兵工学报*, 2015, 36(11): 2038-2044.
ZENG Zhiyin, GAO Xiaoke, LIU Pengke, et al. Dynamic constitutive model of gun steel material and its verification [J]. *Acta Armamentarii*, 2015, 36(11): 2038-2044. (in Chinese)