

文章编号: 1006-9941(2013)05-0624-05

爆炸载荷下装甲车辆的动态响应分析

鲁向辉^{1,2}, 周春桂¹, 王志军¹, 张明^{1,3}, 段嘉庆¹

(1. 中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051; 2. 62195 部队, 河南 灵宝 472533; 3. 93159 部队, 辽宁 大连 11603)

摘要: 为研究装甲车辆在爆炸载荷下的动态响应, 用 AUTODYN 软件对 4340 钢和橡胶构成的装甲车辆模型进行了三维模拟。计算了 8701 炸药不同装药量下的爆炸过程。得到了侧钢板上 3 个观测点的响应参数: 超压、位移、加速度。分析了各观测点的动态响应规律。结果表明, 离爆源位置越近或装药量越大, 车辆的响应时间越早、节点振荡越激烈、振荡幅值越大、持续时间越短。

关键词: 爆炸力学; 装甲车辆; 动态响应; 数值模拟

中图分类号: TJ417; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.013

1 引言

在当前地区性冲突、反恐维和等非对称战争中, 装甲车辆面临的主要威胁已不再是敌方直瞄大口径重武器的火力打击, 而是战斗人员采用火箭筒、地雷及简易爆炸装置 (IEDS)^[1-3] 等手段对车辆进行近距离、全方位伏击, 造成大量人员伤亡。为提高装甲车辆应对非对称手段攻击的防护性能, 国外许多学者都对车辆的动态响应进行研究。Rolc S 等^[4-5] 对斯考特和悍马车辆在路边炸弹袭击下的动态响应特性进行了研究分析。Cendon A 等^[6] 基于有限元方法对简化后的车底结构防雷性能进行了仿真分析。目前国内对该课题的研究还主要是进行试验, 耗资巨大, 效费比不高。

随着计算机技术的迅速发展, 数值模拟^[7] 在爆炸冲击研究中应用广泛, 逐渐替代了昂贵危险的实验, 并能获得具体而完整的信息。为了更加全面的分析动态响应规律, 本研究则利用 AUTODYN0 软件对不同装药量炸药爆炸作用装甲车辆的过程进行了仿真模拟。

2 仿真计算与方法

2.1 计算模型

针对所要研究的问题, 结合车辆的实际结构和尺寸大小, 建立了 8 × 8 轮式装甲车辆和炸药的模型。

车辆长 8.07 m、宽 3.17 m、高 2.94 m, 车体钢板厚 2 cm。炸药为球体, 位于车辆侧面 1 m 处。在车辆侧钢板上依据距离爆源由近至远依次等间距设置 3 个观测点 (间距为 1.6 m), 分析时, 以 3 个观测点为代表来分析车辆的的压力响应、加速度响应、位移响应和速度响应。车辆和炸药模型如图 1 所示, 整个计算模型简化为钢、橡胶、炸药和空气四种材质, 选用流固耦合算法, 单位为: mm-mg-ms。

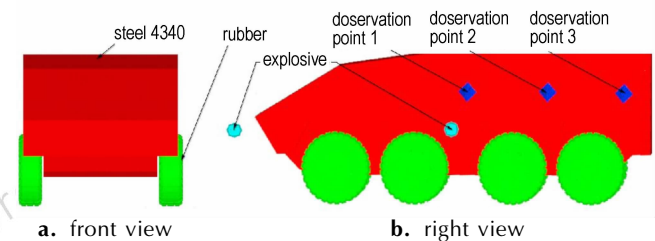


图 1 车辆和炸药的模型图

Fig. 1 Model diagram of vehicle and explosive

2.2 车辆材料模型

车体材质选用 4340 钢, 用 Johnson-Cook 模型 Gruneisen 状态方程^[8] 来描述其动态响应过程。该模型是一个考虑温度及热软化效应的模型, 适用于模拟高应变下的材料变形问题, 材料参数见表 1^[8]; 轮胎材质选用橡胶, 橡胶的材料参数选用 AUTODYN 软件材料库里自带参数, 在计算时进行等效处理。

2.3 炸药材料模型及状态方程

炸药选用 * MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料模型和 JWL 方程。JWL 状态方程能够精确地描述炸药爆轰驱动过程中爆炸气体产物的压力、体

收稿日期: 2013-03-12; 修回日期: 2013-06-15

基金项目: 兵科院预研基金

作者简介: 鲁向辉 (1987 -), 男, 硕士研究生, 主要从事弹箭动态仿真技术研究。e-mail: 461395163@qq.com

积和能量特性,表达式^[8]为:

$$p_{eos} = A[1 - \frac{\omega}{R_1 V}] \exp(-R_1 V) + B[1 - \frac{\omega}{R_2 V}] \exp(-R_2 V) + \frac{\omega E}{V}$$

$$p = F p_{eos}(V, E)$$

式中, p_{eos} 为来自于状态方程的炸药爆轰产物压力, GPa; p 为任意时刻炸药单元释放的压力, GPa; F 为炸药燃烧质量分数; V 为相对体积; E 为单位体积的内能密度, $J \cdot mm^{-3}$; A, B, R_1, R_2 和 ω 为输入参数。炸药采用 8701 炸药, 参数见表 2^[8]。

2.4 空气材料模型及状态方程

空气材料选用流体模型: MAT_NULL, 状态方程为线性多项式: EOS_LINEAR_POLYNOMIAL, 在边界点上施加压力流出边界条件, 车底面设置反射面。材料参数见表 3^[9]。

表 1 4340 钢材料参数

Table 1 The material parameters of 4340 steel

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	G/GPa	A	B	C	m
7.83	77	792	510	0.014	1.03

表 2 8701 炸药材料参数

Table 2 The material parameters of 8701 explosive

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$D/m \cdot s^{-1}$	ρ_{C_0}/GPa	E/GPa	A/GPa
1.70	8315	29.5	8.5	854.5
B/GPa	R_1	R_2	ω	
20.49	4.6	1.35	0.25	

表 3 空气材料参数

Table 3 The material parameters of air

$\rho/g \cdot cm^{-3}$	$C/m \cdot s^{-1}$	$E_0/kJ \cdot cm^{-3}$	V_0/cm^3
1.293	394	0	1

3 模拟验证

本研究课题进行试验测试消耗量太大, 由于无法支撑试验研究, 为确保仿真结果的正确性与合理性, 下面笔者用空气爆炸例子和 2 节的材料模型来进行验证。

模拟一方块炸药在空气中的爆炸。炸药边长 10 cm, 等效质量为 1.79 kg, 起爆位置为中心点起爆, 空气计算区域取边长为 4 m 的立方体, 在边界处设置无反射流出条件来模拟空气无限域。由于问题具有对称性, 研究中只对八分之一模型进行计算。建立欧拉网格空气域, 采用多物质流固耦合算法。网格划分采

取文献^[10]中推荐的比例进行划分, 单元网格尺寸统一取 2.5 cm。模型及各观测点如图 2 所示。

图 3 为各观测点的超压时程曲线。可以看到, 距离爆源中心越远的观测点, 其超压峰值越小, 且冲击波传到该点的时间越晚, 符合冲击波的传播规律。

图 4 为本例模拟的超压峰值与 Henrych 经验公式^[11]计算得到的结果对比图。可以看到, 数值模拟与经验公式的结果吻合较好, 模型得到合理验证。

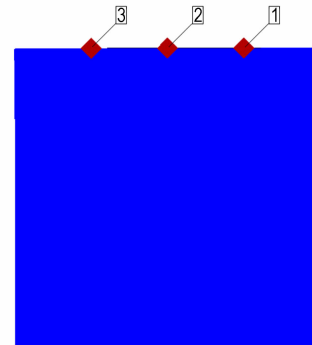


图 2 模型及观测点位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the model and observation points

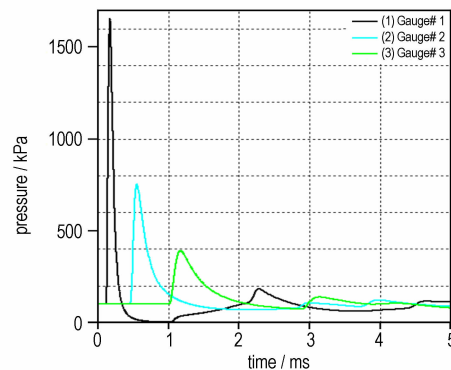


图 3 观测点超压时程曲线

Fig. 3 Overpressure time-history curves of the observation points

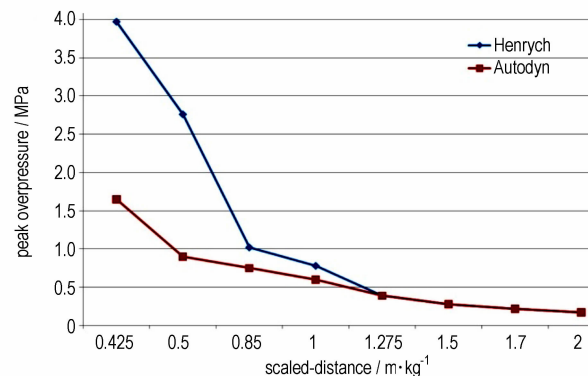


图 4 模拟结果与经验公式结果对比图

Fig. 4 Comparison of the simulation results with the empirical formula ones

4 方案设计及仿真结果分析

为使得出的结论更加全面,文中分固定条件(炸药装药为 20 kg)和不同装药量(10,20,40,60 kg)两种情况来分析仿真结果。

4.1 固定条件下的动态响应分析

4.1.1 压力响应

图 5 为装甲车辆在 0.05, 0.10, 0.15, 0.60 ms 时刻的冲击波压力云图。可见,冲击波遇到车辆前,其波阵面呈球形(图 5a),在遇到车辆后,冲击波被反射而得到局部加强,并产生复杂的入射(图 5b)、反射(图 5c)、绕射效应(图 5d),对车辆造成一定程度破坏。

随着时间的推移和传播距离的增加,爆炸冲击波压力作用至整个车体,冲击波在经历多次反射后其峰值逐渐降低,如图 6 所示。

4.1.2 位移响应

对于不同的构件,根据其构造特性应分析不同方向上的位移。比如,对于观测点 1、2、3,主要分析其 X 方向的位移。由图 7 可见,随着爆炸冲击波的传播,各观测点都发生了位移响应,距离爆源越近,其位移响应越早,峰值越大。此外,观测点 1、2、3 由于直接经受爆炸冲击波的作用,其响应程度比较大,在实际情况中则表现为车体结构一定程度变形。在设计中,应在这些部位采取抗爆、加固措施,如加强肋、焊接内支撑架等,尽量杜绝出现大面积均质钢板。

4.1.3 加速度响应

加速度是衡量冲击波做功的重要指标。由图 8 可以看出,各观测点的加速度响应与距离爆源的位置紧密相关,距离爆源越近,响应时间越早,节点振荡越激烈,加速度峰值越大。

4.2 不同炸药装药量下的动态响应分析

4.2.1 压力响应

图 9 为各观测点所受的压力时程曲线。可以看到,一方面随着炸药量的增加,同一位置处的节点振荡越早、超压峰值明显增大、振荡更为激烈;另一方面,3 个观测点随着离爆源距离的增加,超压峰值逐渐衰减。总的看来,随着传播距离的增加,冲击波的入射和反射超压都呈逐级衰减趋势。这与冲击波的传播特征吻合。

4.2.2 位移响应

在不同装药量情况下,观测点 1 在响应初始时刻产生了水平向里(X 负方向,即钢板变凹)的水平位移,而观测点 2 和 3 则在响应初始时刻产生了水平向外(X 正方向,即钢板变凸)的水平位移。随着冲击波

作用时间持续增加时,观测点 1、2、3 则都发生了水平向里的位移响应。且随着炸药量的增加,各观测点的位移响应程度不断增大,具体数据如表 4 所示。以观测点 1 为例,在 4 种装药量下,观测点 1 达到的位移极值分别 0.27107,0.33314,0.39939,0.53132 mm,此后则出现一定程度的反弹。

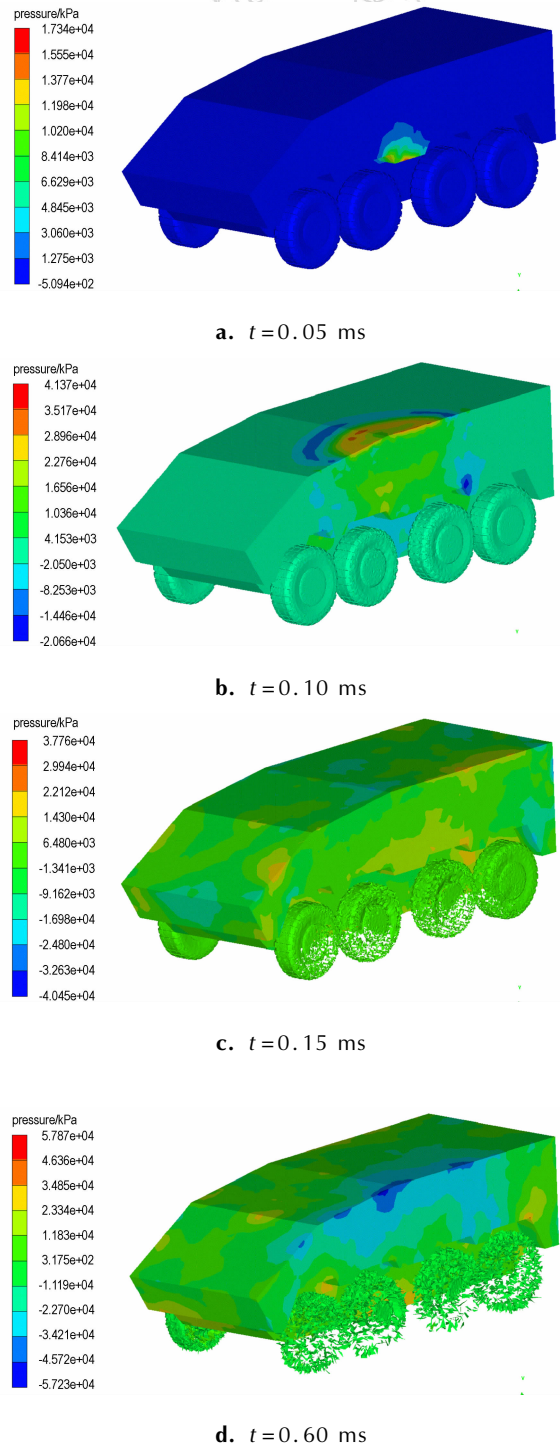


图 5 不同时刻的压力云图

Fig. 5 Pressure contours at different time

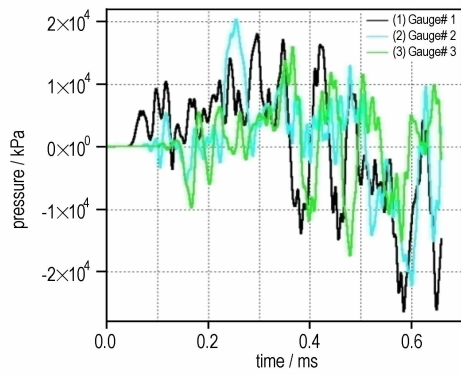


图 6 各观测点超压时程曲线

Fig. 6 Overpressure time-history curves of the observation points

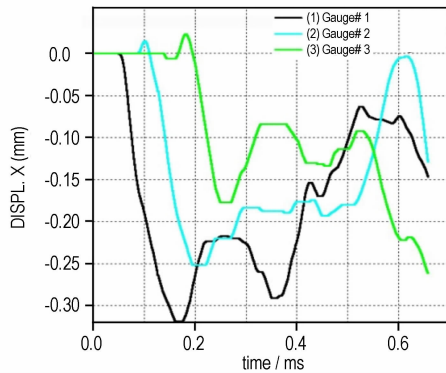


图 7 各观测点的位移时程曲线

Fig. 7 Displacement time-history curves of the observation points

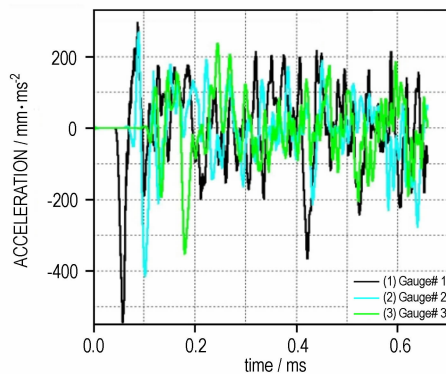


图 8 各观测点加速度时程曲线

Fig. 8 Acceleration time-history curves of the observation points

总结表 4 中的数据可以得到,炸药量越大,车辆的等效变形区域也就越大(即车体发生位移变形幅度越大)。钢板通过变形吸收了部分能量,缓冲了车辆的震动冲击,既有利于提高承载力,又减轻了车内结构的损害。

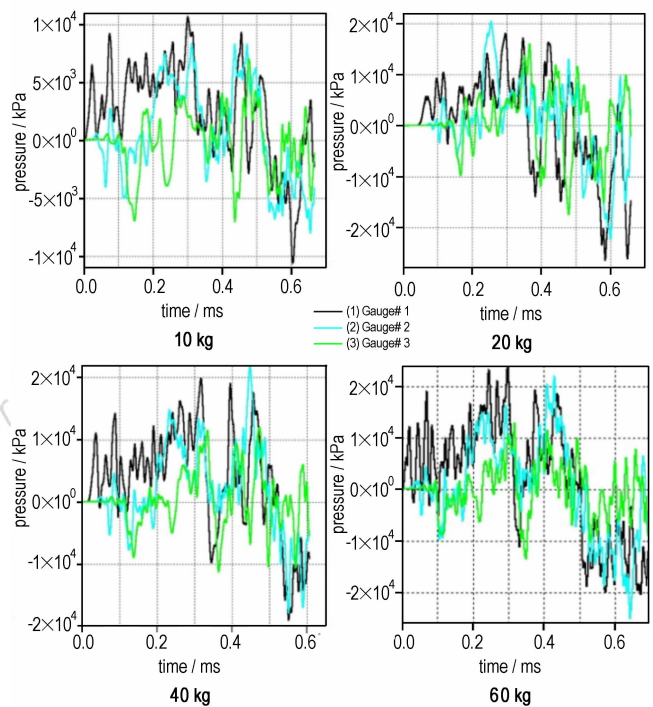


图 9 各观测点压力时程曲线

Fig. 9 Displacement time-history curves of the observation points

表 4 不同装药量下的 X 向位移峰值

Table 4 The peak displacement of X direction under different charge quantities

observation point	charge/kg			
	10	20	40	60
1	0.27107	0.33314	0.39939	0.53132
2	0.17043	0.25799	0.28890	0.32763
3	0.13877	0.21050	0.27105	0.38057

4.2.3 加速度响应

由于爆炸冲击波的连续入射反射作用,加速度时程曲线出现多次连续振荡。随着距离爆源位置的增加,各观测点加速度最大值逐渐减小,且达到最大值的时间依次增长。以距离爆源位置最近的车体侧观测点 1 为例,其在炸药量为 10, 20, 40, 60 kg 时加速度响应的峰值分别为 510.25, 548.60, 907.83, 1191.10 mm·ms⁻²。

图 10 为炸药装药量与加速度的关系。由图 10 可以看到,同一观测点,随着装药量的增加,其加速度依次增加,即装药量与加速度成正比;不同的观测点,距离爆源位置越近,其加速度越大,即与距离成反比。

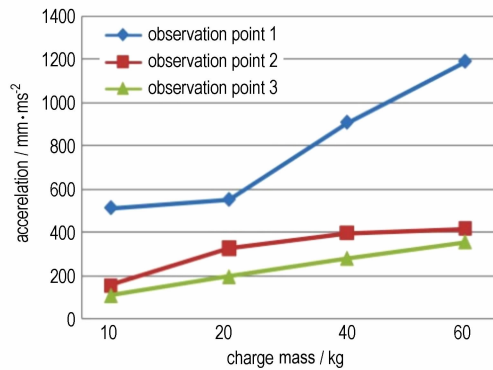


图 10 装药量与加速度关系

Fig. 10 Relationship between charge mass and acceleration

5 结束语

模拟炸药在装甲车辆侧边的爆炸效应,分析了车辆的动态响应,验证了利用数值模拟的方法研究车辆应对简易爆炸装置(IEDS)的可行性和有效性。从分析结果可以看出,装甲车辆的应力、加速度、位移响应与炸药装药量有着紧密关系。在实际设计中,为提高装甲车辆的防护性能,减少爆炸冲击波对车体造成的损害,应尽量提高车辆离地距离、增大车辆轴距、添加加强肋、焊接内支架等。本研究结果可为装甲车辆的安全防护设计提供理论参考。

参考文献:

- [1] 方文. 简易爆炸装置及其反制措施[J]. 国外坦克, 2009(11): 14-15.
FANG Wen. Improvised explosive device and its countermeasures [J]. *Foreign Tank*, 2009(11): 14-15.
- [2] 韩辉, 焦丽娟, 徐平. 战车底部防雷技术研究[J]. 四川兵工学报, 2007, 28(3): 11-13.

- HAN Hui, JIAO Li-juan, Xu Ping. Research on lightning protection technology of tank bottom [J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2007, 28(3): 11-13.
- [3] 李明杰, 杨定福, 苏晓亮. 军用汽车防护技术发展现状和趋势[J]. 汽车运用, 2008(1): 14-16.
LI Ming-jie, YANG Ding-fu, SU Xiao-liang. Development of military vehicle protection technology status and trends [J]. *Automobile Application*, 2008(1): 14-16.
- [4] Rolc S, Buchar J, Kratky J, et al. Armoured vehicle response to the roadside mine threat [C] // 26th International Symposium on Ballistics, Miami, September 2011.
- [5] Rolc S, Buchar J, Kratky J, et al. Numerical simulation of the response of the armoured vehicles to the landmines [C] // 25th International Symposium on Ballistics, Beijing, MAY 2010.
- [6] Cendon D A, Galvez F, Enfadaque A J, et al. Analysis of armoured vehicles blast protection by using finite element codes [C] // 23th International Symposium on Ballistics, Tarragona, April 2007.
- [7] 王熊高. 数字模拟——一种军用车辆防护设计的工具[J]. 国外坦克, 2010(7): 36-39.
WANG Xiong-gao. Digital simulation of a military protection design tool [J]. *Foreign Tank*, 2010(7): 36-39.
- [8] 高靖, 王志军. 中心孔对聚能装药成形的影响[J]. 弹箭与制导学报, 2011, 31(1): 110-112.
GAO Jing, WANG Zhi-jun. Influence on formation of shaped charge with a center-hole [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2011, 31(1): 110-112.
- [9] 高永宏, 刘天生, 顾晓辉, 等. 聚能射流侵彻装甲钢的计算分析[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(1): 84-86.
GAO Yong-hong, LIU Tian-sheng, GU Xiao-hui, et al. Calculation and analysis of shaped jet penetrating steel target [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(1): 84-86.
- [10] GONG Shun-feng, LU Yong, JIN Wei-liang. Simulation of air blast and its effect on RC structures [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2006(12): 165-170.
- [11] 胡秋韵. 典型地铁站结构在内部爆炸作用下的动力响应分析 [D]. 上海: 同济大学, 2009.
HU Qiu-yun. A typical subway station structure in dynamic response analysis under the action of an internal explosion [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.

Dynamic Response Analysis of an Armored Vehicle under Explosive Loading

LU Xiang-hui^{1,2}, ZHOU Chun-gui¹, WANG Zhi-jun¹, ZHANG Ming^{1,3}, DUAN Jia-qing¹

(1. School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan, 030051, China; 2. No. 62195 Unit, Lingbao 472533, China; 3. No. 93159 Unit, Dalian, 116034, China)

Abstract: To study the dynamic responses of armored vehicle to explosive loading, three-dimensional simulation of an armored vehicle model composed of 4340 steel and rubber was performed by an AUTODYN software. The explosion process of 8701 explosive with different charge mass condition was calculated. The response parameters of three observation points on the side of steel plate such as overpressure, displacement and acceleration were obtained. The regularity of dynamic response for the observation points was analyzed. Results show that the closer from the explosion source location or the greater the loading charge, the earlier the response time of the vehicles, the more intense the node oscillation, the larger the oscillation amplitude and the shorter the duration.

Key words: explosive mechanics; armored vehicle; dynamic response; numerical simulation

CLC number: TJ417; O389

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.013