

# 舰载垂直发射系统中相邻两导弹间 殉爆问题的数值模拟

刘晓夏, 王伟力, 吕鹏博, 苗 润

(海军航空工程学院, 山东 烟台 264001)

**摘要:**以某型护卫舰垂直发射系统为研究对象,探究一枚舰载导弹被引爆后与之相邻导弹战斗部的安全性。利用LS-DYNA软件建立了相邻舰载导弹的爆炸和侵彻有限元模型,对战斗部爆炸后,爆炸冲击波和爆炸破片对相邻导弹战斗部的毁伤过程采用Lee-Tarver点火增长模型进行数值模拟。结果表明,垂直发射系统内的一枚导弹爆炸后,其产生的爆炸冲击波足以殉爆其相邻导弹战斗部。由于垂直发射系统的结构和功能特性决定了不能通过改变导弹间的距离防止殉爆,可通过增加发射箱体的厚度提高舰载导弹的安全性,箱体厚度达14 mm以上时,安全性有较大提高。

**关键词:**爆炸力学;殉爆;爆炸冲击波;破片;数值模拟

**本文引用格式:**刘晓夏,王伟力,吕鹏博,等.舰载垂直发射系统中相邻两导弹间殉爆问题的数值模拟[J].兵器装备工程学报,2017(9):36-40.

**Citation format:**LIU Xiaoxia, WANG Weili, LYU Pengbo, et al. Sympathetic Detonation About Adjacent Missiles in Vertical Launch System[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017(9):36-40.

中图分类号:TJ410.3

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2017)09-0036-05

## Sympathetic Detonation About Adjacent Missiles in Vertical Launch System

LIU Xiaoxia, WANG Weili, LYU Pengbo, MIAO Run

(Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China)

**Abstract:** Some frigate vertical launch system was chosen as the object of study, and the security safety of adjacent missile was analyzed when a missile was detonated. The finite element model of explosion and penetration was made about missile with LS-DYNA. The blast and fragment initiating warhead was simulated by using ignition and growth model. The result shows that the adjacent missile will be detonated when a missile was detonated, regardless of explosion or penetration initiating warhead. The distance of missiles cannot be changed for avoiding sympathetic detonation because of the structure and functional properties about the vertical launch system. Increasing the thickness of the launch container can be used for improving security of the missile. When the thickness of the launch container is bigger than 14mm, the security of the missile will be improved.

**Key words:** mechanics of explosion; sympathetic detonation; explosion blast; fragment; numerical simulation

收稿日期:2017-03-11;修回日期:2017-04-20

基金项目:中物院安全弹药开放基金重点项目(RMC2014A01)

作者简介:刘晓夏(1993—),男,硕士研究生、主要从事毁伤效能分析。

通讯作者:王伟力(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事战斗部设计与毁伤评估研究。

随着舰载导弹垂直发射系统技术的愈渐成熟,舰载导弹的发射方式从斜架式向垂直发射转变已成必然,垂直发射系统业已成为现代舰船导弹武器系统的重要组成部分<sup>[1]</sup>。舰载导弹垂直发射系统具有诸多优点,如:(1)系统反应时间短;(2)系统实现全方位发射,无发射盲区;(3)导弹储存密封性好;(4)火力强,发射效率高;(5)使水面舰艇的隐身能力提高等。垂直发射系统一般采用集中配置的模块式结构,这种结构造成舰载导弹的密集程度较大,使得两相邻导弹存在殉爆的可能。

战争中,舰艇因遭受敌方攻击导致弹药殉爆是舰艇沉没的主要因素之一<sup>[2]</sup>。如二战期间的“中途岛海战”,日本损失的四艘航母中的三艘都是由于甲板上堆积的弹药在美军飞机轰炸下被引爆而导致航母沉没的。通过上述描述可知,在作战时期,舰载弹药所处环境更加恶劣,可能受到的威胁也更多,舰载导弹被引爆的概率也较大。而当发射舱中的一枚导弹被引爆后,是否可能会引起殉爆连锁反应会严重影响舰船的生命力,因此相邻导弹的安全性必须引起重视。

本文以某型驱护舰垂直发射系统为研究对象,探究一枚舰载导弹被引爆后,产生的爆炸冲击波和破片对与之相邻导弹的安全性。战斗部的安全性分析是导弹安全性分析的重要组成部分,因此着重对其进行分析。

## 1 数值模拟模型及软件

以国内某型垂直发射系统为研究对象,导弹贮运发射箱为长方体,导弹采用箱贮的方式直接存放在发射架上。

为简化计算模型,截取包含战斗部在内的发射箱进行研究。考虑到导弹战斗部并不直接裸露在空气中,它是导弹的一部分,前后端分别为电子舱和发动机舱,会影响冲击波的传播过程,因此在建模过程中,不能简单忽略。为使数值模拟结果尽可能真实,同时考虑不使运算量过大,将战斗部前后端的电子舱和发动机舱分别考虑为刚体。战斗部为本体悬挂式结构,长度为高 486 mm,外径 340 mm,主装药采用了低感度的 B 炸药(TNT/RDX 40/60)。具体结构如图 1 所示。

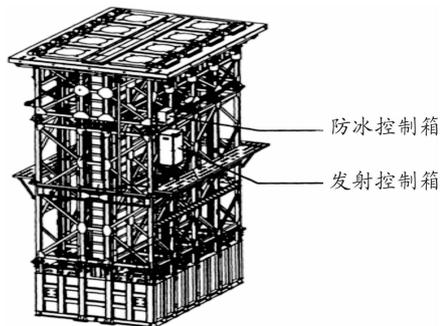


图 1 垂发系统标准单元示意图

数值模拟采用 ANSYS/LS-DYNA 软件,因为 LS-DYNA 的显示算法特别适合于各种非线性结构冲击动力学问题,如爆炸、结构碰撞等,可用于处理流固耦合问题,可设置多种接

触分析方式。本文即采用 ALE 算法进行模拟,在接触方式上采用 CONTACT\_ERODING\_SURFACE\_TO\_SURFACE 面面侵蚀接触。

## 2 爆炸冲击波作用下相邻导弹的安全性

### 2.1 有限元结构模型

由于发射箱和炸药的对称性,并考虑减少运算成本,建立发射箱、战斗部、空气的 1/2 模型。计算时在对称面上施加对称约束,将空气边界设置为无反射边界。

发射箱建模时,充分考虑其实际结构,以及加强筋之间、板与板之间的连接情况,采用实体单元建立了发射箱箱体、环向加强筋、纵向加强筋。焊缝的处理采用 ANSYS 中的固定连接失效接触(TSTS)方式,设置固定连接失效应力。考虑所研究战斗部类型为聚焦-大分散战斗部,炸药采用凸凹结合的复合曲线装药结构。网格划分全部采用共节点映射网格,均为八节点六面体单元,计算精度较高。其中发射箱、目标战斗部为拉格朗日网格,空气与炸药为欧拉网格,采用流固耦合算法。在炸药内部设置从 A 到 E 共 5 个观测点,其中 A、B、C 和 E 为炸药表面,D 为炸药中心,同时 C、D 和 E 间距 80 mm,沿炸药径向方向分布,具体模型见图 2。

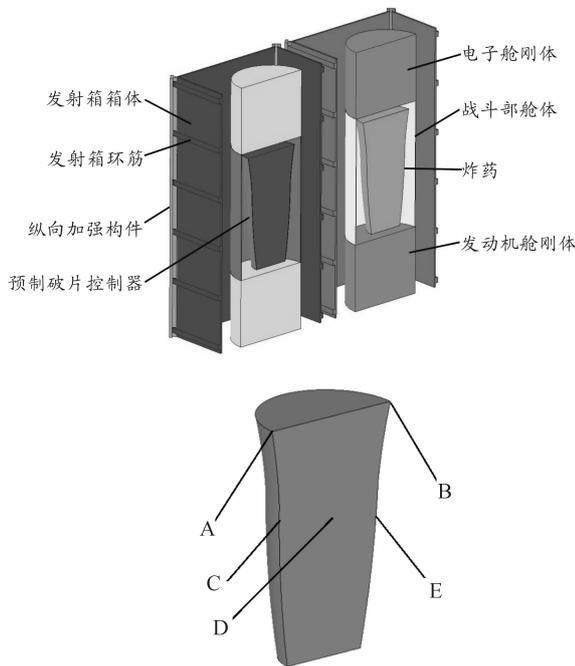


图 2 相邻导弹及战斗部结构模型

### 2.2 材料本构模型和参数

贮运发射箱本体以及发射箱环筋均为玻璃纤维增强复合材料,材料模型采用带损伤的 Composite Damage Model 复合材料模型<sup>[3-4]</sup>。为了增强贮运发射箱的整体强度,在箱体的外缘设有 4 条加强筋结构,材料为铝合金。目标战斗部装药模拟采用弹塑性动力学本构模型和 Lee-Tarver 三项式点火增长状态方程<sup>[5-6]</sup>。

破片控制器薄壁和舱体均为铝合金材料,选用 Johnson-Cook 材料模型。材料参数见表 1。空气采用 Null 流体动力模型,参数见表 2。炸药采用 MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 模型,力学性能参数和材料参数见表 3 和表 4<sup>[7]</sup>。通过炸药内部各点压力及  $\alpha$  值变化判定炸药是否被引爆<sup>[8]</sup>。

表 1 铝合金材料参数

$A/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$
420	426	0.26	0.014	1.0

表 2 空气参数

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_4$	$C_5$	$e_0/\text{MPa}$	$V$
0.001 293	0.4	0.4	0.25	1.0

表 3 装药的力学性能参数

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$E/\text{GPa}$	$\nu$	$\sigma_0/\text{GPa}$
1.686	3.18	0.32	$1.58 \times 10^{-2}$

表 4 装药材料特性参数

$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$\omega$
524.2	7.678	4.2	1.1	0.34

## 2.3 结果分析

爆炸破坏过程较为复杂,这里主要从爆炸毁伤过程和引爆发射箱内战斗部的机理进行分析。分别选取了战斗部体开始发生形变、发射箱箱体撕裂、相邻战斗部内炸药形成局部高压、相邻战斗部内炸药形成爆轰等具有代表性的时刻进行分析,其毁伤效果如图 3 所示,可以分析发射箱的破坏模式,以及此种破坏模式下对箱内战斗部的影响。

在战斗部爆炸后,冲击波以球面波的形式向外传播,在爆炸 48  $\mu\text{s}$  时,战斗部舱体靠近爆点的部分产生应力集中。随着爆炸载荷的持续作用,战斗部舱体继续向外膨胀,当应力大于战斗部舱体的断裂强度时,战斗部舱体被冲击波撕裂。

当爆炸后时间达到 240  $\mu\text{s}$  时,冲击波还未到达相邻导弹战斗部,但爆炸战斗部所在的发射箱发生较大的变形和破坏,并对相邻导弹发射箱产生挤压。随着冲击波的继续传播,当爆炸后时间达到 336  $\mu\text{s}$  时,受到冲击波作用的箱体面板直接撞击到相邻导弹战斗部上,在撞击部位形成高压。观测点的压力变化曲线如图 4,在观察点 E 形成高压区,压力为 11.56 GPa,超过了 B 炸药的临界起爆压力 5.63 GPa<sup>[9-10]</sup>,此后,以此高压区为中心高压区迅速在装药中传播,高压区装药的压力也在传播中迅速上升。显然,此时相邻导弹战斗部装药发生了爆轰,初始高压区为起爆点。

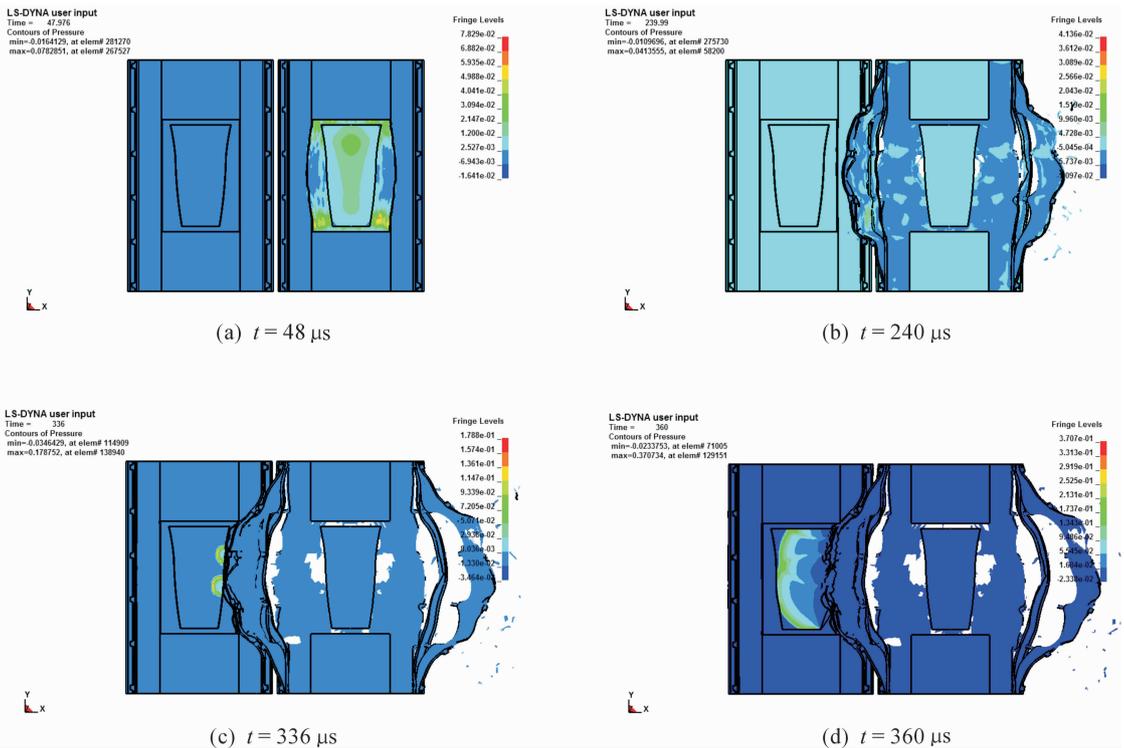


图 3 战斗部爆炸在不同时刻的毁伤过程

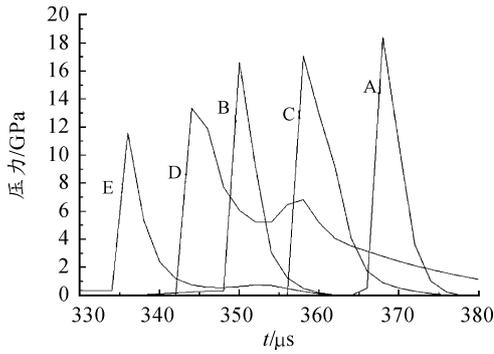


图4 相邻战斗部内部各观察点压力变化曲线

内存,在建模时选取与破片直接作用的局部进行分析,并采用1/4有限元建模。炸药的尺寸为40 mm×40 mm,炸药长80 mm,在炸药内部沿径向每隔20 mm设置一个观测点,设置从A到D共4个观测点,具体模型如图5所示。

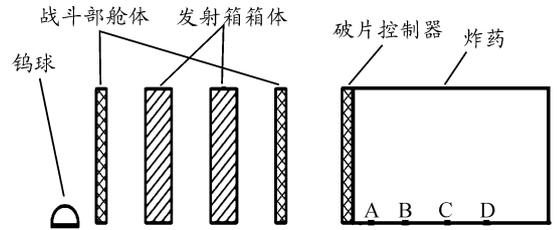


图5 破片侵入相邻导弹战斗部的模型

### 3 爆炸破片作用下相邻导弹的安全性分析

#### 3.1 有限元模型

所研究战斗部类型为聚焦战斗部,预制破片为 $\phi 6$  mm钨球,主装药采用了低感度的B炸药(TNT/RDX 40/60),破片最大速度为2 580 m/s。考虑破片的尺寸较小,破片易出现单元严重丢失的现象,因此分别建立破片侵入靶板和破片侵入战斗部的有限元模型,确定预制破片引爆战斗部的临界速度。将破片侵入靶板后的剩余速度与之对比,分析破片作用下相邻导弹战斗部的安全性。由于两相邻导弹发射箱的距离较近,因此不考虑破片速度在空气中的衰减。

爆炸冲击波对结构的毁伤是面载荷作用,穿甲作用是点载荷作用,或称为局部载荷作用,这两种载荷作用下结构的动响应具有本质差异<sup>[11-12]</sup>。考虑到破片的毁伤主要为点载荷作用,同时破片的尺寸较小,为减小运算时间和运算所需

#### 3.2 结果分析

图6分别是破片速度为1 700 m/s和1 740 m/s时撞击相邻导弹战斗部的仿真结果。从图7可以看到,当到达相邻导弹战斗部处的破片速度为1 700 m/s时,破片和相邻导弹战斗部接触处形成高压,炸药的反应度达0.2,但随着破片继续侵入,炸药内部压力逐渐降低,未能引起爆轰。而破片速度为1 740 m/s时,各观察点处炸药的反应度逐渐增大,最后到达1.0,说明此时炸药完全发生爆轰。破片殉爆相邻导弹战斗部的速度阈值为1 740 m/s。破片经过战斗部舱体和发射箱箱体后,产生冲塞破坏效应,吸收破片的冲击能量,破片速度不断衰减,由2 580 m/s衰减到1 200 m/s,此数值小于殉爆相邻导弹战斗部的速度阈值,可认为单破片作用下,相邻导弹战斗部不易殉爆。但此时破片的剩余速度仍较大,多破片作用下仍可能对相邻导弹战斗部造成威胁。

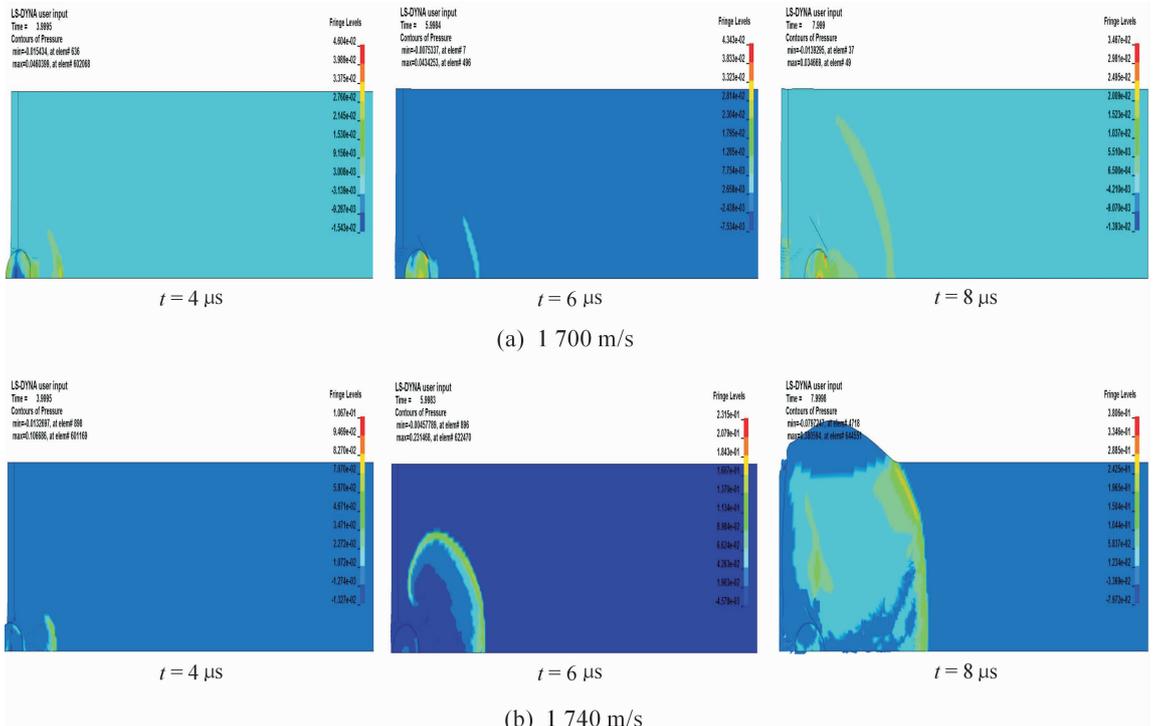


图6 不同速度破片撞击战斗部的仿真结果

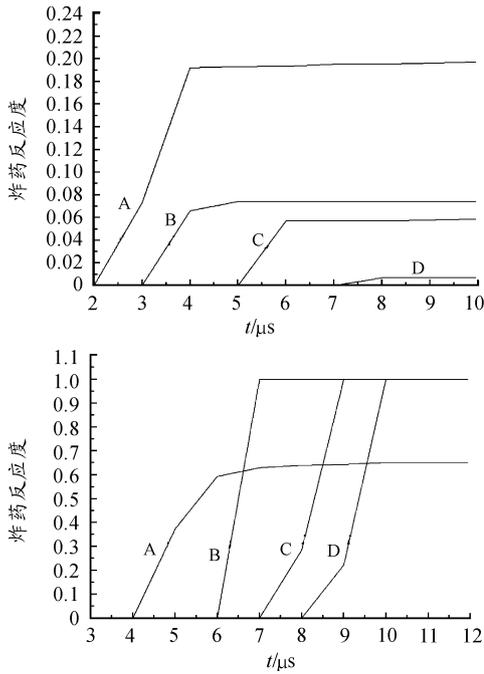


图7 炸药内各观察点处的反应度曲线

## 4 防护措施

通过上述数值模拟分析得到,导弹战斗部爆炸产生的冲击波足以殉爆相邻导弹战斗部。为提高舰载导弹的安全性,同时考虑方案实施可行,采用增加发射箱体厚度的方式,对不同箱体厚度下舰载导弹殉爆安全性进行数值模拟,找到合适的箱体厚度。

图8为冲击波到达相邻战斗部时,不同厚度下发射箱及箱内战斗部的压力云图。从图中可以看出,随着发射箱厚度的增加,箱体的结构强度增加,对冲击波的抵抗能力增强。导弹战斗部内最大初始压力曲线如图9所示,从图中可以看出,随着发射箱箱体厚度的增加,作用在导弹战斗部上的入射压力逐渐降低。不同厚度下战斗部内炸药的最大初始压力值分别为9.76 GPa、5.27 GPa、2.10 GPa、1.65 GPa,当发射箱体厚度为14 mm时,导弹战斗部内炸药对应的最大初始压力为2.01 GPa,小于B炸药的临界起爆压力5.63 GPa,因此可以满足安全性需求。

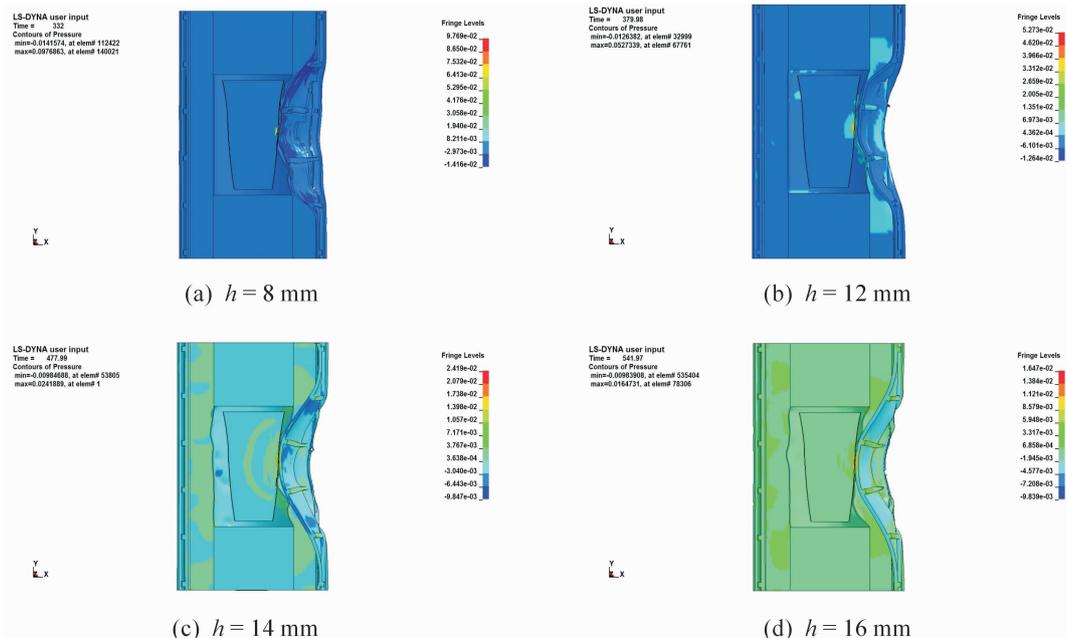


图8 不同厚度下发射箱及箱内战斗部的压力云图

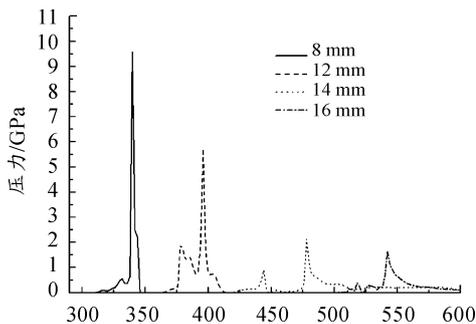


图9 不同厚度下相邻战斗部内炸药的最大初始压力曲线

## 5 结论

1) 利用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了相邻舰载导弹的爆炸和侵彻模型,分别模拟了一枚导弹战斗部爆炸后,爆炸冲击波和爆炸破片对相邻导弹战斗部的毁伤过程。通过数值模拟分析得到,一枚导弹战斗部爆炸后,其产生的爆炸冲击波足以引爆其相邻导弹战斗部,爆炸破片殉爆相邻导弹战斗部的临界速度为 1 740 m/s。从爆炸开始到引爆相邻导弹战斗部,时间大约为 360  $\mu$ s,如果考虑冲击波(下转第 57 页)

### 3 结论

建立了本回转闭锁自动机开锁过程有限元计算模型,计算获得的零部件危险部位与实弹射击零部件破损情况基本一致,验证了模型的正确性。数值计算表明,开锁过程中枪机最大动应力出现在与开闭锁导柱配合的圆孔处,在第 40  $\mu\text{s}$  时达到最大应力值,为 1 200 MPa;枪机框最大动应力出现在枪机框与开闭锁导柱直接碰撞的部位,在第 65  $\mu\text{s}$  时达到最大应力值,为 780 MPa;开闭锁导柱最大动应力出现在与枪机框碰撞的部位,在第 75  $\mu\text{s}$  时达到最大应力值,为 800 MPa。本文计算揭示了该回转闭锁自动机开锁过程关键部件的损坏机理,为该自动机零部件结构改进提供了科学依据,也为类似自动机开锁过程动强度研究提供了分析方法。

### 参考文献:

- [1] ZHOU Yan, WANG Yaping, LUO Shaomin, et al. Experiment and numerical research of transient response under Inertia effect of firearm cocking handle[C]//2015 2nd International Conference on Simulation and Methodologies, Technologies and Applications(SMTA 2015).
- [2] 王永娟,赵军,唐竹秀. 压力载荷与温度场作用下弹壳弹

膛系统的动态响应[J]. 兵工学报, 2010, 31(6): 669-673.

- [3] 刘国庆,徐诚. 狙击步枪弹准静态弹头挤进力研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(10): 1528-1535.
- [4] 景银萍,杨臻. 有限元仿真在枪械击发中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2007(3): 48-49.
- [5] 张克,袁点. 微后坐冲锋枪全枪有限元仿真研究[J]. 四川兵工学报, 2015, 36(12): 1-5.
- [6] 白金泽. LS-DYNA3D 理论基础与实例分析[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 赵海欧. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.
- [8] 王裕安,徐万和,薄玉成. 自动武器构造[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994.
- [9] 欧学炳,殷仁龙,王学颜. 自动武器结构设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1994.
- [10] JOHNSON G R, COOK W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperature[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands: IBC, 1983: 541-526.

(责任编辑 周江川)

(上接第 40 页)和破片的耦合作用,时间可能会更少,弹库安全系统可能无法及时作出反应。

2) 由于垂直发射系统的结构和功能特性决定了不能通过改变导弹间的距离防止殉爆,可通过增加发射箱厚度提高舰载导弹的安全性,经数值模拟分析,箱体厚度为 14 mm 时,可以满足安全性需求。本文的研究成果可为垂直发射系统内舰载导弹的防护提供参考。

### 参考文献:

- [1] 李伟波,徐海峰,曹延杰,等. 舰载导弹垂直发射系统技术及发展研究[J]. 飞航导弹, 2012(9).
- [2] 于满文,何顺禄,关世义. 舰船毁伤图鉴[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [3] 李爽,王天运,江大志. 多层复合防护板抗侵彻数值模拟分析及实验研究[J]. 防护工程, 2009, 31(2): 51-55.
- [4] 蒋美蓉,金丰年. 爆炸载荷作用下纤维复合材料加固混凝土拱的动力响应分析[J]. 防护工程, 2015, 37(2): 27-32.
- [5] 章猛华,王鹏新. 冲击起爆弹丸内装药延迟起爆数值模

拟[J]. 爆炸与冲击, 2015, 36(5): 728-733.

- [6] 陈忠富,梁斌,陈刚. 不同几何形状弹丸对撞击起爆阈值速度的影响[J]. 绵阳师范学院学报(自然科学版), 2009, 28(11): 1-4.
- [7] 江增荣,李向荣. 预制破片对战斗部冲击起爆数值模拟[J]. 弹道学报, 2009, 21(1): 9-13.
- [8] 孙承纬译. 爆炸物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- [9] ZHANG Xian-feng, CHEN Hui-wu, ZHAO You-shou. Numerical simulation of shelled explosive initiated by EFP[J]. Journal of ballistics, 2006, 18(1): 90-92.
- [10] 章冠人,陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991: 90-109.
- [11] 李茂,朱锡,侯海量,等. 冲击波和高速破片对固支方板的联合作用数值模拟研究[J]. 中国舰船研究, 2015, 10(6): 60-67.
- [12] 李典,朱锡,侯海量,等. 近距爆炸破片作用下芳纶纤维夹心复合舱壁结构毁伤特性实验研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(8): 1436-1442.

(责任编辑 周江川)