

# 空空导弹爆炸冲击波对导弹类目标毁伤数值模拟\*

严翰新, 姜春兰, 王超

(北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

**摘要:**为了得到定量装药的爆炸冲击波对目标有效毁伤的临界距离。基于 LS/DYNA 软件,把导弹类目标简化成一定厚度的圆柱壳体,对定量炸药爆炸冲击波毁伤不同距离处的圆柱壳体进行了三维数值模拟,分析了不同距离处爆炸冲击波对壳体毁伤的作用方式和壳体的响应特征,得出了壳体不同的毁伤程度,得到了一定装药下爆炸冲击波毁伤目标的临界距离,为战斗部设计、毁伤评估及目标防护设计等提供参考。

**关键词:**战斗部;冲击波;圆柱壳体;数值模拟;毁伤

**中图分类号:** O383; TJ760.31 **文献标志码:** A

## Numerical Simulation for the Damage Effect of Air Target Subjected to Blast Wave

YAN Hanxin, JIANG Chunlan, WANG Chao

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The non-linear dynamical finite element method was applied to simulate the damage effect of air target subjected to blast wave. The missile target was simplified as a cylindrical shell. Blast wave in air generated and the cylindrical shell damaged by blast wave at different distance was simulated using commercial FEM program LS/DYNA. The methods of the blast wave damaging the cylindrical shell were discussed, and then the dynamic responses and damage degree of cylindrical shell subjected to blast wave were studied. The simulation results provide important reference for warhead design of and damage evaluation.

**Keywords:** warhead; blast wave; air target; cylindrical shell; numerical simulation; damage efficiency

### 0 引言

海湾战争、科索沃战争和美国对阿富汗的军事打击过程中,因杀伤威力大、命中精度高、攻击距离远,同时又属自杀性进攻性武器,巡航导弹已成为各国空袭作战的首选武器,并被广泛应用于第一轮空袭作战中。采用分层处理可有效对付巡航导弹的攻击。在预警捕获目标之后,首先用携带空空导弹的战斗机实施外层耗性打击;其次采用地面或舰队区域防空实行第二层拦截;最后由密集阵和制导炮弹拦截,拦截的同时还可采用烟幕和 GPS 干扰,以及伪装隐蔽与欺骗等技术措施。随着科学技术的进步,空空导弹的制导精度在不断提高,主要体现在脱靶量越来越小。因此需要考虑战斗部在空中爆炸时冲击波对目标结构的毁伤效应。有关冲击波对目标的毁伤判断都是通过理论分析建立毁伤计算模型,进行缩比实验得出毁伤参数<sup>[1-2]</sup>。对实际空中目标的毁伤还没有文献提

供具体的目标结构毁伤参数,要用试验获得空中目标结构毁伤的判据则需要考虑时间和经济性因素。文中针对空空导弹战斗部拦截巡航导弹,采用 LS-DYNA 三维数值仿真软件研究战斗部爆炸后冲击波对目标壳体的毁伤。

### 1 物理模型

空空导弹拦截巡航导弹目标时,战斗部爆炸后冲击波对目标毁伤效果如图 1 所示。

导弹类目标的蒙皮和隔框等效厚度为 4~5mm<sup>[3]</sup>,现采用 6mm 厚 2A12 硬铝作为模拟目标的壳体厚度,把目标壳体等效成  $\Phi 450\text{mm} \times 2600\text{mm}$  的圆柱壳体,具体布置如图 2 所示,圆柱壳体与战斗部装药之间的距离为  $R$ ,为

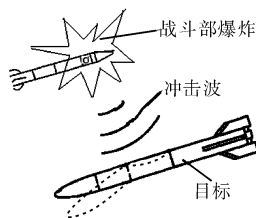


图 1 冲击波对目标的毁伤效果

\* 收稿日期:2010-06-02

作者简介:严翰新(1979-),男,江苏常州人,博士研究生,研究方向:常规弹药技术及仿真。

了便于建立模型采用立方形装药,等效 TNT 质量为 4.5kg<sup>[4]</sup>,起爆点位于立方形炸药底端面中心;改变距离 R,模拟战斗部装药爆炸后冲击波对圆柱壳体的毁伤效应。

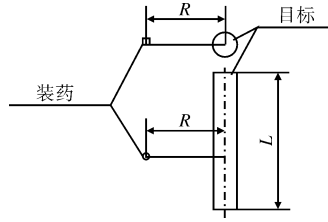


图 2 装药爆炸毁伤壳体示意图

## 2 数值仿真模型

壳体采用拉格朗日网格建模,炸药和空气采用欧拉网格建模<sup>[5-7]</sup>。本算例取 HMX 为基的高分子粘结炸药<sup>[8]</sup>,密度 1.81g/cm<sup>3</sup>,爆速  $D=8800\text{m/s}$ ,CJ 压力  $P_{\text{CJ}}=0.37\text{Mbar}$ ,采用的 JWL 状态方程参数为:  $A=7.524\text{Mbar}$ ,  $B=0.1102\text{Mbar}$ ,  $R_1=3.6$ ,  $R_2=100$ ,  $\omega=0.31$ ,  $E_0=0.15\text{Mbar}$ ,建立四分之一模型,壳体和炸药建立的有限元模型如图 3 所示。

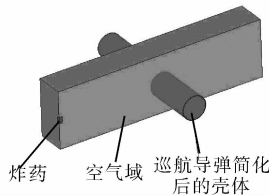


图 3 数值计算模型

计算采用的材料状态方程、强度模型和主要输入参数如表 1 所示;空气材料的模型参数取值:  $\rho_0=1.225 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$ ,  $e_0=2.5 \times 10^5\text{J/m}^3$ ,  $\gamma=1.4$ ; 2A12 铝的材料参数取值:  $\rho_0=2.8\text{g/cm}^3$ ,  $E=70\text{Pa}$ ,  $\sigma_Y=0.274\text{GPa}$ ,  $\gamma=0.33$ 。

表 1 材料参数

材料	密度/ (g/cm <sup>3</sup> )	状态方程	材料模型
HMX (高分子 粘结 炸药)	1.81	JWL	MAT_HIGH_EX- PLOSIVE_BURN
空气	$1.225 \times 10^{-3}$	NULL	LINEAR_POLYNO- MIAL
铝合金 (2A12)	2.8	GRUNELSON	JOHNSON COOK

## 3 计算结果及壳体毁伤分析

### 3.1 冲击波传播过程

冲击波波形随时间变化图如图 4 所示。

由图 4 可以看出爆炸冲击波向四周传播时以球形波阵面的形式向外传播,冲击波压力越大时波阵面的速度也越快,由于装药为立方体形状,起爆点在立方体装药的底部,因此图中出现冲击波向外传播时波

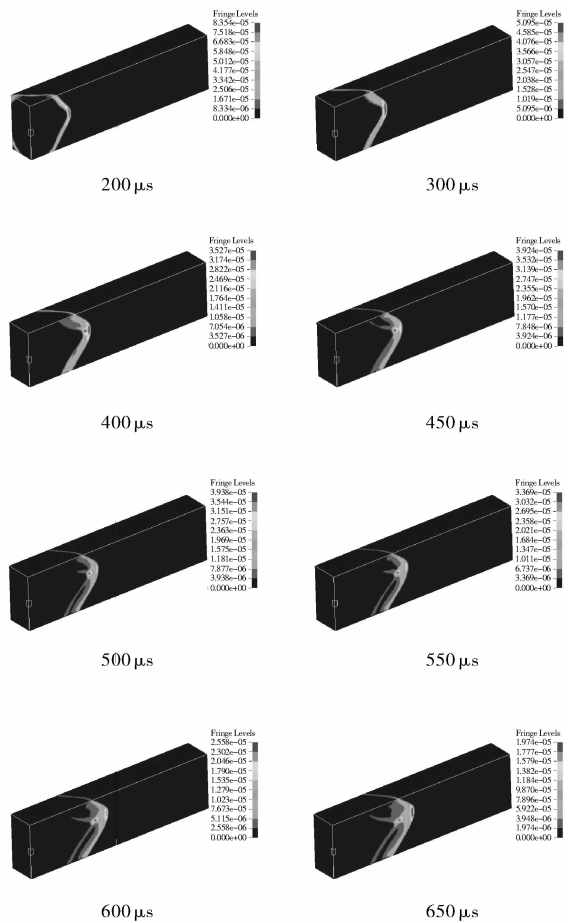


图 4 不同时刻爆炸冲击波波形

阵面的压力梯度;刚开始时,冲击波波阵面压力较大,随着时间的增加,冲击波作用距离也增大,波阵面的压力也迅速减小,400 $\mu\text{s}$ 以后,出现波阵面后正压区的压力大于波阵面的压力,压力最大,450 $\mu\text{s}$ 至 550 $\mu\text{s}$ 这一段时间内都出现了此种情况;当随着时间的增加,冲击波传播距离继续增加时,波阵面的压力也迅速衰减,出现波正面压力和波阵面后的压力一致的情形,图中 600 $\mu\text{s}$ 至 650 $\mu\text{s}$ 出现两小部分区域,此两小部分压力基本相同;同时在冲击波波阵面向外传播的过程中,波阵面压力迅速减小,由图中看出在相同的时间内,冲击波传播的距离也越来越小,即反映冲击波在向外传播过程中速度也迅速减小。由以上冲击波的传播可以分析冲击波的毁伤作用过程,在离炸点距离较远处,冲击波压力较大,冲击波在短时间内直接对目标产生作用;离炸点距离增大时,冲击波压力减小,形成正压区,冲击波压力会持续一段时间,冲击波对目标的毁伤将是连续的压力作用于目标,即以冲量的形式毁伤圆柱壳体;离炸点的距离再增大时,冲击波压力迅速衰减,传播速度也迅速减小,传播距离也基本不再增加,冲击波不能对目标进行有效毁伤。因此冲击波对目标的毁伤是由距离来判定,该距

离由战斗部等效装药质量和目标特征决定。

冲击波超压随距离的变化关系如图 5 所示,距离装药 1.7m 范围内,冲击波压力较大,但是冲击波衰减也较快,此时可以考虑冲击波压力对圆柱壳体的毁伤作用;由于冲击波压力经过 1.7m 的急剧衰减后,距离大于 1.7m 时,冲击波压力减小,此时衰减也较缓慢。

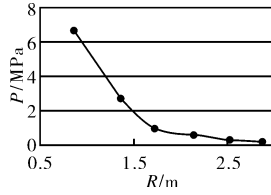


图 5 冲击波超压随距离变化关系

### 3.2 不同距离处壳体的毁伤效果

#### 1) R=1m

R=1m 处壳体变形效果如图 6 所示,圆柱壳体中间迎爆面向内凹陷,壳体变形呈漏斗状,图中显示为一小部分深色区域的壳体部分变形最大,分布面积较小;深色区域的四周向外壳体变形逐渐减小。取壳体上的不同单元其位移变化如图 7 所示,由图 6、图 7 可以看出,壳体上的最大变形量与炸药最短距离相对应,最大变形量为 7.0cm,变形量分别沿轴向两端和周向两端减少,壳体变形量呈梯度分布。在 R=1m 处,壳体变形比较严重。由冲击波的传播过程可以认为,圆柱壳体离炸点距离为 1m 处时,此处冲击波的压力较大,冲击波是以较大的动载荷作用在壳体目标表面,形成小面积的大变形量,即以力的形式毁伤圆柱壳体。

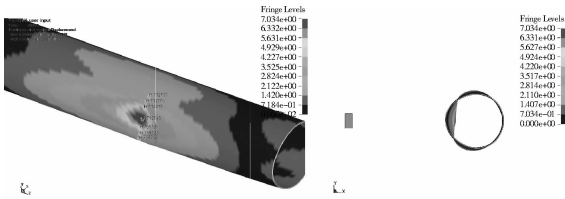


图 6 R=1m 处圆柱壳体的变形效果

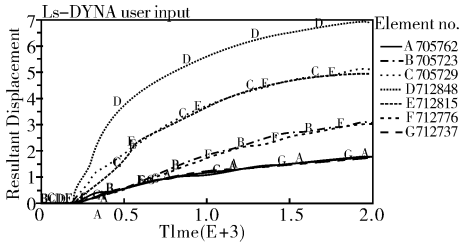


图 7 R=1m 处不同壳体单元的变形位移随时间变化曲线

#### 2) R=1.5m

R=1.5m 处壳体变形效果如图 8 所示,圆柱壳体中间迎爆面向内凹陷,壳体变形呈凹坑状,图中显示为一片深色区域的部分,壳体变形最大,壳体最大变形的面积较大(相对于 1m 处的壳体变形),最大变形四周向外壳体变形逐渐减小。取壳体上的不同单

元其位移变化如图 9 所示,由图 8、图 9 可以看出,壳体的最大变形量约为 2.0cm,壳体离炸点的距离对壳体的最大变形量影响较小,变形量分别沿轴向两端和周向两端减少,壳体变形量呈梯度分布。在 R=1.5m 处,壳体变形较弱,变形区域较大。由冲击波的传播过程可以认为,圆柱壳体离炸点距离为 1.5m 处时,此处冲击波的压力较小,冲击波是以较小的压力持续不断作用在壳体目标表面,形成较大面积的小变形量,即以冲量的形式毁伤圆柱壳体。

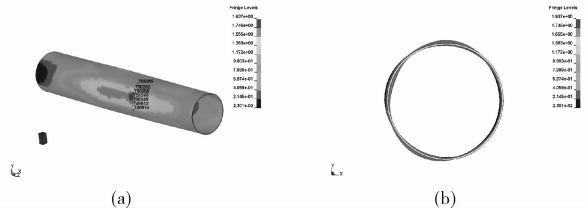


图 8 R=1.5m 处圆柱壳体的变形效果

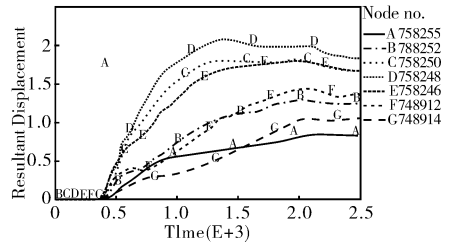


图 9 R=1.5m 处不同壳体单元的变形位移随时间变化曲线

#### 3) R=2m

R=2m 处壳体变形效果如图 10 所示,圆柱壳体中间迎爆面显示为一大片深色区域,壳体变形面积较大,但是壳体的最大变形为 0.85cm,基本看不出壳体的变形效果。此处同样是冲击波压力持续作用于壳体,即以冲量的形式作用于圆柱壳体,只是冲击波压力经过一段距离的衰减以后,压力值太小,即使经过长时间的作用也不能使圆柱壳体产生明显变形。

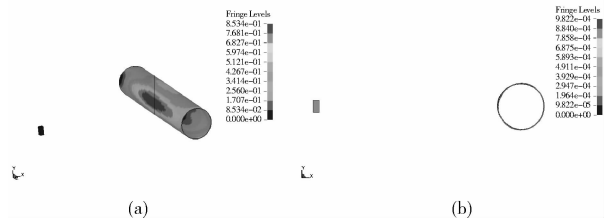


图 10 R=2.0m 处圆柱壳体的变形效果图

## 4 结论

文中对导弹战斗部在空中爆炸后,对冲击波在空气中的传播以及冲击波超压对圆柱壳体的毁伤进行了数值模拟,圆柱壳体的损伤破坏特征和圆柱壳体与炸点之间的距离有关,冲击波对整个壳体的损伤呈现局部破坏特征,爆炸载荷对壳体迎爆面造成较大损

伤,且破坏以圆柱壳体凹陷的形式存在,而对变形壳体周围区域的影响很小;小药量装药对导弹类目标壳体的冲击波毁伤以壳体变形凹陷为主,而且冲击波对目标的有效作用距离较小,要使目标结构解体或者增大冲击波有效作用距离只有增大装药质量。

数值仿真方法可模拟和预测壳体在爆炸冲击下的非线性动态响应,进行壳体的毁伤分析和判断;模拟冲击波对简化的目标壳体的毁伤,给出了冲击波对目标有效毁伤的距离范围,为导弹壳体的冲击波毁伤评估提供重要的参考。

**参考文献:**

[1] 孙韬,冯顺山.自由圆柱壳体在侧向非对称脉冲载荷下的塑性破坏[J].爆炸与冲击,1998,18(2):103-109.  
 [2] 李向荣,王国辉,俞为民.导弹弹体空中结构解体毁伤研

究[J].装甲兵工程学院学报,2007,21(3):18-23.  
 [3] 陈文,张庆明.爆炸冲击波下导弹结构动力分析模型初步研究[J].爆炸与冲击,2009,29(3):194-199.  
 [4] 隋树元,王树山.终点效应学[M].北京:国防工业出版社,2000.  
 [5] 邓荣兵,金先龙,陈向东,等.爆炸冲击波作用下桥梁损伤效应的数值仿真[J].上海交通大学学报,2008,42(11):1927-1931.  
 [6] 卢红琴,刘伟庆.空中爆炸冲击波的数值模拟研究[J].武汉理工大学学报,2009,31(19):105-108.  
 [7] 时党勇,李裕春.基于 ANSYS/LS-DYNA8.1 进行显式动力分析[M].北京:清华大学出版社,2005.  
 [8] 吴宏斌,陈智刚,裴思行,等.聚焦式定向预制破片战斗部数值模拟研究[J].弹箭与制导学报,2005,25(3):497-500.

(上接第 70 页)

已经提取不到任何真实弹头的微动特征。经计算得,弹头锥旋和进动的干信比分别为 4.3980dB, 4.5231dB。

**3.5 与噪声压制干扰的对比**

给真实弹头的锥旋、进动这两种微动的雷达信号分别加入信噪比为 -9dB 和 -12dB 的高斯白噪声后转发,经过数据处理后雷达接收端获得的微多普勒如图 7 所示。

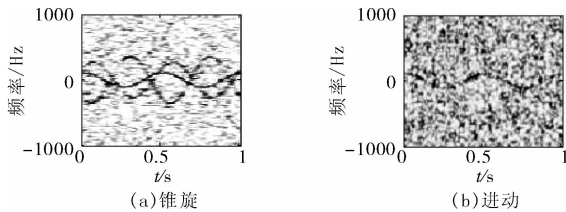


图 7 加入高斯白噪声干扰后的 Gabor 变换结果

从图 7 可以看到,加入信噪比为 -9dB 的高斯白噪声时,经过时频分析得到的锥旋微多普勒曲线变得非常模糊,增大高斯白噪声功率,当信噪比降为 -12dB 后,进动引入的微多普勒曲线已经被所加的高斯白噪声淹没,通过时频分析几乎无法获取任何有用的信息。很明显,加噪压制干扰方法要达到对敌方雷达实施有效干扰所需的噪声功率较基于微多普勒效应的欺骗式干扰要高得多。

普勒效应产生机理的基础上,对基于微多普勒效应的欺骗式干扰方法进行了探讨,与加噪压制干扰方法相比,该欺骗干扰方法可在较低干信比条件下有效干扰敌方雷达识别目标的能力。基于微多普勒效应的欺骗干扰方法简单易行,在对抗反导系统对导弹目标的识别拦截、提高导弹的突防生存能力等军事领域将发挥重要作用。

**参考文献:**

[1] 程传浩,王瑞臣,路德信.弹道导弹的突防与拦截[J].现代防御技术,2002,22(2):20-23.  
 [2] 陈行勇.微动目标雷达特征提取技术研究[D].长沙:国防科技大学,2006.  
 [3] 庄钊文,刘永祥,黎湘.目标微动特性研究进展[J].电子学报,2007,35(3):520-525.  
 [4] V C Chen, F Y Li, S-S Ho, et al. Micro-Doppler effect in radar: Phenomenon, model and simulation study[J]. IEEE Trans. on AES, 2006, 42(1): 2-21.  
 [5] 孙照强,李宝柱,鲁耀兵.弹道目标章动特性及其微多普勒研究[J].现代雷达,2009,31(4):24-27.  
 [6] 高红卫,谢良贵,文树梁,等.基于微多普勒分析的弹道导弹目标进动特性研究[J].系统工程与电子技术,2008,30(1):50-52.  
 [7] 高红卫,谢良贵,文树梁,等.摆动锥体目标微多普勒分析和提取[J].电子学报,2008,36(12):2497-2502.

**4 结束语**

文中在分析弹道中段导弹弹头微动引入的微多