

钨穿甲弹对超音速反舰导弹发动机舱的毁伤效应

姜颖资, 王伟力, 黄雪峰, 傅磊

海军航空工程学院, 烟台 264001

摘要 为研究钨穿甲弹对超音速反舰导弹发动机舱的毁伤效应, 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件, 对钨穿甲弹以 1000 m/s 着靶速度, 侵彻速度为 730 m/s 的来袭超音速反舰导弹的发动机舱进行了数值模拟, 获得钨穿甲弹入射角、偏轴距离对毁伤超音速反舰导弹发动机舱的影响规律。计算结果表明, 在钨穿甲弹能侵入发动机的前提下, 偏轴距离相同的各工况, 入射角较小的工况, 钨穿甲弹侵入发动机后的剩余质量较大, 但剩余速度较小; 入射角相同的各工况, 偏轴距离越小, 钨穿甲弹侵入发动机后的剩余质量、剩余速度和剩余动能均越大。以钨穿甲弹剩余动能为毁伤能力评估标准, 综合来看, 在较小的偏轴距离、能侵入发动机的前提下, 入射角较小的钨穿甲弹对来袭超音速反舰导弹的发动机舱毁伤效果较好。

关键词 钨穿甲弹; 超音速反舰导弹; 发动机舱; 毁伤效应; 数值模拟

中图分类号 TJ410.33

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.13.002

Research on Damage to Supersonic Anti-Ship Missile Engine Cabin by APCR

JIANG Yingzi, WANG Weili, HUANG Xuefeng, FU Lei

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China

Abstract This paper studies the damage effect of the tungsten cored armor piercing round (APCR) on the supersonic missile engine cabin. The APCR at a speed of 1000 m/s penetrating into a coming attack supersonic anti-ship missile at a speed of 730 m/s is simulated by the ANSYS/LS-DYNA software, and the rules of damage for the APCR penetrating the engine cabin of the supersonic anti-ship missile at different incidence angles and off-axis distances are acquired. On the premise that the APCR with the same off-axis distance in each condition can penetrate into the engine, the results show that the smaller incidence angle of the condition, the bigger remaining mass after the APCR penetrates into the engine, but the smaller residual velocity. On the premise that the APCR with the same incidence angle in each condition can penetrate into the engine, the results show that the smaller off-axis distance of the condition, the bigger remaining mass, residual velocity and kinetic energy after the APCR penetrates into the engine. When the residual kinetic energy of the APCR is taken as the standard for the damage ability, in general, under the condition that the APCR can penetrate into the engine, the smaller off-axis distance and incidence angle are, the better damage effect after the APCR penetrates into the engine cabin of supersonic anti-ship missile is.

Keywords Tungsten cored armor piercing round; supersonic anti-ship missile; engine cabin; damage effect; numerical simulation

超音速反舰导弹相比亚音速反舰导弹攻击威力更大、速度更快、突防能力更强, 在现代海战中正逐步取代亚音速反舰导弹成为水面舰艇的最大杀手。为提高水面舰艇的生存能力, 有效防御来袭超音速反舰导弹, 必须毁伤来袭超音速反舰导弹的关键舱段, 降低或消除超音速反舰导弹对水面舰

艇的毁伤效应^[1]。

目前, 水面舰艇最后一道防空反导武器是舰炮近防武器系统, 其利用高发射率炮弹组成的弹幕取得防空反导的效果^[2,3]。发动机是超音速反舰导弹的动力来源, 如果击中发动机使发动机壳体发生明显变形、撕裂或者毁伤元侵入发动机

收稿日期: 2013-12-03; 修回日期: 2014-03-19

作者简介: 姜颖资, 博士研究生, 研究方向为武器系统作战效能与毁伤能力, 电子信箱: jyz0625@163.com

引用格式: 姜颖资, 王伟力, 黄雪峰, 等. 钨穿甲弹对超音速反舰导弹发动机舱的毁伤效应[J]. 科技导报, 2014, 32(13): 19-22.

仍具有一定动能继续毁伤发动机,都有可能导导致发动机叶片不能正常旋转、甚至发生燃烧,从而使发动机推力迅速下降或者完全丧失,大大降低超音速反舰导弹对目标的毁伤效应。因此,研究舰炮武器系统对超音速反舰导弹发动机舱的毁伤效应意义重大。

舰炮弹丸一般采用钨穿甲弹,舰炮武器系统对超音速反舰导弹发动机舱的毁伤问题,本质上可视为钨穿甲弹对超音速反舰导弹发动机舱的侵彻毁伤问题,属于穿甲力学的研究范畴,其过程是一个复杂的物质动态相互作用的物理过程,也可认为是一个能量交换的过程^[4,5]。本研究就钨穿甲弹对来袭超音速反舰导弹发动机舱段的毁伤效应进行仿真分析,给出不同工况下的毁伤效应评估,以期获得钨穿甲弹毁伤超音速反舰导弹发动机舱的规律。

1 有限元计算模型

1.1 超音速反舰导弹发动机舱结构模型

真实超音速导弹发动机舱段结构十分复杂,在研究对其毁伤效应之前要对其进行简化,建立等效靶模型。因为在一定的毁伤手段下,用以模拟目标易损性或毁伤特性的物理模型。利用真实目标进行实弹试验,得到的试验结果是最真实可信的,但全真试验将受到各种客观条件的限制,如试验工程大、研究成本增高、研究周期延长等。建立等效模型可以克服这些障碍,使试验变得简便易行。

等效靶模型的建立原则:几何外形接近实物,模拟迎弹面积;模拟舱段抗侵彻能力,厚度的具体值由舱段的结构、实际材料和厚度决定。通常在以导弹为目标的毁伤仿真中将导弹等效成一定壁厚的圆筒。根据以上原则,建立典型超音速反舰导弹发动机舱等效靶模型,如图1所示。

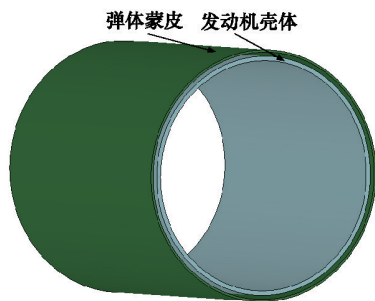


图1 发动机舱等效靶模型

Fig. 1 Model of engine cabin equivalent drone

发动机舱等效靶为双圆筒结构,外圆筒模拟弹体蒙皮,其厚度为3.5 mm;内圆筒模拟发动机壳体,其厚度为7 mm;由于弹丸侵彻问题主要为局部应力作用,建立等效靶模型时,发动机舱段截取长50 cm。

本研究采用ANSYS/LS-DYNA软件,数值模拟钨穿甲弹对超音速反舰导弹发动机舱的毁伤效应。计算模型采用Lagrange算法,使用六面体实体Solid164单元进行网格划分,钨穿甲弹与发动机舱的接触采用contact-eroding-surface-to-surface算法,在发动机舱边界处施加非反射边界。

1.2 材料模型及参数

钨穿甲弹的材料为93#钨,超音速反舰导弹发动机舱弹体蒙皮材料为TC4钛合金,发动机壳体材料为4340钢;材料模型均采用Johnson-Cook模型,状态方程采用Grüneisen状态方程。

Johnson-Cook材料模型是一个能反映应变率强化效应和温升软化效应的理想刚塑性强化模型。其von Mises流动应力表达为^[6,7]

$$\sigma_e \left[A + B(\epsilon_e^n) \right] (1 + C \ln \epsilon^*) [1 - T^{*m}] \quad (1)$$

式中, σ_e 为von Mises流动应力,也称为当前屈服应力; ϵ_e^n 为等效塑性应变; $\epsilon^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ 是在 $\dot{\epsilon}_0 = (1/s)$ 时的塑性应变率量纲,视 $\dot{\epsilon}_0$ 为准静态加载条件下的应变率; $T^* = (T - T_r) / (T_m - T_r)$ 为温度量纲,其中 T_m 、 T_r 分别表示材料的熔点及室温; A 为屈服应力, B 为应变硬化, n 为应变硬化指数, C 为应变率相关因数, m 为温度相关因数。

Grüneisen状态方程为^[7]

$$p = \frac{\rho_0 c^2 \mu \left[1 + \left(1 - \frac{r_0}{2} \right) \mu - \frac{a \mu^2}{2} \right]}{\left[1 - S_1 \mu - S_2 \mu^2 / (\mu + 1) - S_3 \mu^3 / (\mu + 1)^2 \right]^2} + (r_0 + a \mu) e \quad (2)$$

式中, p 为压力, c 为 $\mu_s - \mu_p$ 曲线的截距, S_1 、 S_2 和 S_3 为 $\mu_s - \mu_p$ 曲线斜率的因数, r_0 为Grüneisen因数, a 为对 r_0 的一阶体积修正, e 为材料内能。材料Johnson-Cook和Grüneisen参数^[8-10]见表1。

2 数值模拟与分析

2.1 不同工况下数值模拟

钨穿甲弹与超音速反舰导弹发动机舱交汇时,存在入射角和偏轴距离的差异,入射角 β 、偏轴距离设定如图2所示。

表1 材料Johnson-Cook和Grüneisen参数

Table 1 Material parameters of the Johnson-Cook and Grüneisen

材料	$\rho / (g \cdot cm^{-3})$	A / MPa	B / MPa	n	c	m	T_m / K	S_1	S_2	S_3	γ_0
93#钨	17.60	1506	177	0.12	0.016	1.00	3683	1.44	0	0	2.17
TC4钛合金	4.51	1098	1092	0.93	0.014	1.10	1941	1.147	0	0	2.04
4340钢	7.84	792	510	0.26	0.014	1.03	1793	1.49	0	0	2.17

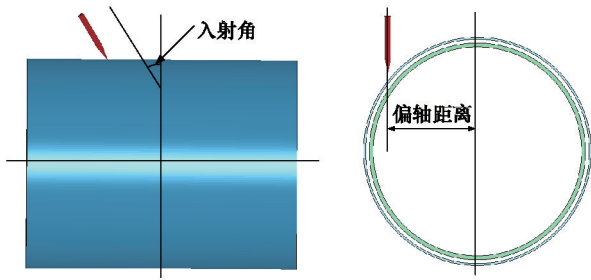


图2 入射角及偏轴距离设定示意
Fig. 2 Schematic diagram of incident angle and off-axis distance

分别对入射角为 0° 、 30° 、 60° ；偏轴距离为0、4.95 cm(1/4发动机舱蒙皮半径)、9.90 cm(1/2发动机舱蒙皮半径)的工况进行仿真分析。观察钨穿甲弹侵彻发动机舱的过程,多角度分析入射角、偏轴距离对钨穿甲弹侵彻毁伤发动机舱的影响,从而获得弹目交汇角对钨穿甲弹毁伤来袭超音速反舰导弹发动机舱影响的一般规律。

弹目交汇时,钨穿甲弹速度为1000 m/s,来袭超音速反舰导弹速度为730 m/s,计算时忽略重力和空气阻力的影响。偏轴距离为0的各仿真工况侵彻毁伤效应如图3所示,偏轴距离4.95 cm的各仿真工况侵彻毁伤效应如图4所示,偏轴距离9.90 cm的各仿真工况侵彻毁伤效应如图5所示。

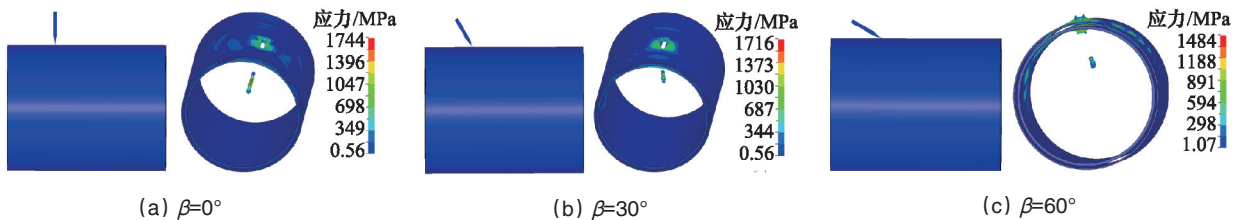


图3 偏轴为0,不同入射角时侵彻毁伤应力云图

Fig. 3 Penetration damage stress nephogram at different incident angles when off-axis distance is zero

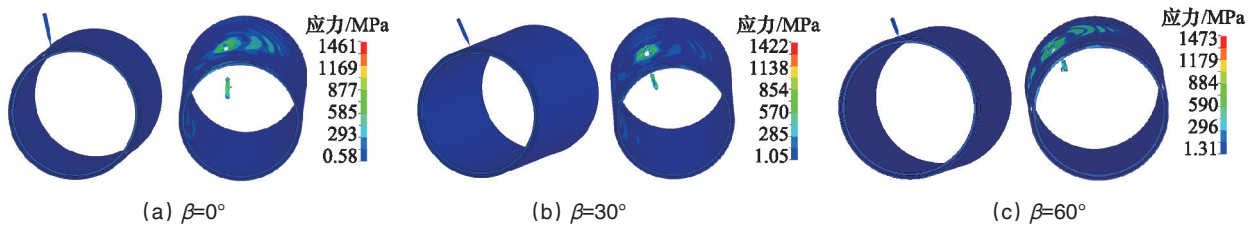


图4 偏轴4.95 cm,不同入射角时侵彻毁伤应力云图

Fig. 4 Penetration damage stress nephogram at different incident angles when off-axis distance is 4.95 cm

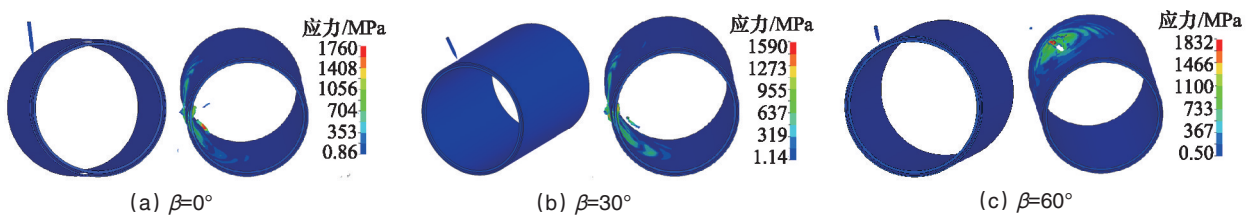


图5 偏轴9.90 cm,不同入射角时侵彻毁伤应力云图

Fig. 5 Penetration damage stress nephogram at different incident angles when off-axis distance is 9.90 cm

2.2 计算结果分析

从图3和图4可以看出,偏轴距离为0和4.95 cm时,在各种入射角工况下,钨穿甲弹均能穿透弹体蒙皮和发动机壳体,侵入发动机内部,毁伤发动机。从图5可以看出,偏轴距离为9.90 cm时,入射角为 0° 和 30° 时,钨穿甲弹均能穿透弹体蒙皮和发动机壳体;入射角为 60° 时,钨穿甲弹最终嵌在了弹体蒙皮上。

从表2数据可以看出,偏轴距离为0时,入射角为 0° 时,钨穿甲弹侵入发动机后的剩余质量 m 最大,但侵入发动机后钨穿甲弹相对发动机剩余速度 v 最小,计算得出剩余动能 E 也最小;入射角为 60° 时,钨穿甲弹侵入发动机后的剩余质量最小,但侵入发动机后钨穿甲弹相对发动机剩余速度最大;入射角为 30° 时,钨穿甲弹剩余动能最大。偏轴距离为4.95 cm时,不同入射角工况与偏轴距离为0时,结论相同。偏轴

距离为 9.90 cm 时,入射角为 0° 时,钨穿甲弹侵入发动机后的剩余质量最大;入射角为 30° 时,钨穿甲弹侵入发动机后相对发动机剩余速度最大;计算得出剩余动能入射角为 0° 时略大于入射角为 30° 时工况;入射角为 60° 时,钨穿甲弹未能侵入发动机。入射角相同,偏轴距离为 0 时,钨穿甲弹剩余质量、相对剩余速度、剩余动能均最大;偏轴距离为 9.90 cm 时,钨穿甲弹剩余质量、相对剩余速度、剩余动能均最小。

表 2 数值计算结果
Table 2 Results of numerical simulation

入射角/(°)	偏轴距离/cm	m/g	$v/(m \cdot s^{-1})$	E/J
0	0	107.5	850.8	38893.0
30	0	92.3	1152.7	61340.2
60	0	60.2	1321.6	52608.4
0	4.95	105.5	801.5	33870.7
30	4.95	92.0	1132.8	59048.1
60	4.95	48.7	1245.1	37780.2
0	9.90	91.4	622.3	17705.4
30	9.90	50.1	792.1	15745.2
60	9.90	0	0	0

综合以上分析结果,偏轴距离为 0 和 4.95 cm 的工况,在偏轴距离相同的情况下,入射角 30° 工况,钨穿甲弹剩余动能最大,对超音速反舰导弹发动机舱毁伤能力最强;偏轴 9.90 cm 的工况,入射角 0° 工况剩余动能略大于入射角 30° 工况,两种入射角下对超音速反舰导弹发动机舱毁伤能力基本相当。究其原因,虽然各入射角工况,钨穿甲弹速度大小相同,但其速度方向不同,与来袭超音速反舰导弹发动机舱速度夹角不同,入射角越大则与发动机舱速度方向夹角越小,合速度越大。仿真结果表明,并非合速度越大毁伤能力越强,钨穿甲弹速度方向与发动机舱速度方向夹角越小,其垂直于发动机舱横截面的速度分量值就越小,且钨穿甲弹实际侵入发动机舱厚度越大,因此钨穿甲弹侵入发动机后剩余质量越小;当钨穿甲弹入射角大于一定值,其垂直于发动机舱横截面的速度分量变为 0 时,仍未穿透发动机壳体,此时钨穿甲弹将会发生跳弹现象。对比相同入射角的工况,可以发现偏轴距离越小,钨穿甲弹剩余质量、相对剩余速度、剩余动能均越大,对超音速反舰导弹发动机舱毁伤效果越好,这是由于偏轴距离越小,钨穿甲弹横向侧滑越不明显。

3 结论

数值模拟和结果分析表明:

1) 在钨穿甲弹能侵入发动机的前提下,偏轴距离相同的各工况,入射角越小,钨穿甲弹剩余质量越大、剩余速度越小;入射角越大,钨穿甲弹剩余质量越小、剩余速度越大。以

钨穿甲弹剩余动能为毁伤效果评估标准,偏轴距离 0 和 4.95 cm 的工况,入射角 30° 工况毁伤效果最好;偏轴 9.90 cm 的工况,入射角 0° 和 30° 工况毁伤效果基本相当。

2) 入射角相同的各工况,偏轴距离越小,钨穿甲弹剩余质量、剩余速度、剩余动能均越大;以钨穿甲弹剩余动能为毁伤效果评估标准,偏轴距离越小,对发动机舱毁伤能力越强。

参考文献 (References)

- [1] 杜茂华, 王伟力, 黄勇. 舰载超远程反导弹药冲击引爆战斗部的研究[J]. 工程爆破, 2012, 18(2): 14-17.
Du Maohua, Wang Weili, Huang Yong. Research on impacting and igniting warhead by super close-in anti-missile ammunition on board[J]. Engineering Blasting, 2012, 18(2): 14-17.
- [2] 张春来. 近程反导武器系统[J]. 舰载武器, 2002, 1: 29-31.
Zhang Chunlai. Close-in anti-missile weapon systems[J]. Shipborne Weapons, 2002, 1: 29-31.
- [3] 宋贵宝, 孔丽, 李红亮, 等. 密集阵反导系统拦截反舰导弹模型研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(10): 2128-2130.
Song Guibao, Kong Li, Li Hongliang, et al. Research on the model of the interception of anti-ship missile by phalanx close in weapon system[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(10): 2128-2130.
- [4] Recht R F, Ipson T W J. A geometrically nonlinear theory of elastic plates applied mechanics[J]. Energetic Materials, 1963, 30(2): 384-387.
- [5] 谷长春, 石明全. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的高速碰撞过程的数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(15): 4621-4624.
Gu Changchun, Shi Mingquan. Numerical simulation of high-velocity impact with ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(15): 4621-4624.
- [6] 王向东, 肖艳文, 韩用, 等. 弹体材料参数对侵深影响规律数值模拟研究[J]. 科技导报, 2012, 30(31): 33-37.
Wang Xiangdong, Xiao Yanwen, Han Yong, et al. Numerical simulation for the effect of material parameters on penetration depth[J]. Science & Technology Review, 2012, 30(31): 33-37.
- [7] Livermore Software Technology Corporation. LS-DYNA keyword user's manual (971v)[M]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [8] 高光发, 李永池, 黄瑞源, 等. 杆弹头部形状对侵彻行为的影响及其机制[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(6): 51-54.
Gao Guangfa, Li Yongchi, Huang Ruiyuan, et al. Effect of nose shape on penetration performance of long-rod penetrator and its mechanism[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2012, 32(6): 51-54.
- [9] 刘群, 陈朗, 伍俊英. 空间碎片超高速碰撞复合板数值模拟分析[J]. 兵工学报, 2010, 31(S1): 69-73.
Liu Qun, Chen Lang, Wu Junying. Simulation for fragment debris impacting composite shield in hypervelocity[J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(S1): 69-73.
- [10] 兰彬, 文鹤鸣. 钨合金长杆弹侵彻半无限钢靶的数值模拟及分析[J]. 高压物理学报, 2008, 22(3): 245-252.
Lan Bin, Wen Heming. Numerical simulation and analysis of the penetration of tungsten alloy long rods into semi-infinite armor steel targets[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(3): 245-252.

(责任编辑 赵业玲)