

文章编号: 1003-1480 (2009) 05-0008-05

破片与冲击波耦合作用下巡航导弹发动机 毁伤实验研究

曹兵, 何勇, 李向东

(南京理工大学智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京, 210094)

摘要: 为了提高我导弹对抗生存能力和我拦截弹药摧毁来袭导弹的毁伤概率, 以巡航导弹发动机舱为研究对象进行了巡航导弹的易损性和毁伤效应研究。在建立巡航导弹发动机舱模拟等效靶的基础上, 利用模拟战斗部对巡航导弹发动机舱模拟等效靶进行了冲击毁伤作用实验, 研究了发动机舱在破片与冲击波耦合作用下的毁伤模式, 分析了其毁伤机理, 得到了其在破片与冲击波耦合作用下的毁伤判据。

关键词: 巡航导弹; 发动机; 等效靶; 破片; 冲击波; 毁伤实验

中图分类号: TJ761.6 **文献标识码:** A

Experimental Investigation on Damage to Engine of Cruise Missile by Fragments and Shock Waves

CAO Bing, HE Yong, LI Xiang-dong

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, NUST, Nanjing, 210094)

Abstract: In order to improve the antagonizing viability of our missiles and the lethality probability for our heading off ammunition to destroy the arriving attacking missile of enemy, the paper takes the cruise missile engine as research object, studies the vulnerability and lethality of the cruise missile. On the basis of establishing the simulative equivalent target of the engine of the cruise missile, the impact damage experiments with the simulative equivalent target of the engine of the cruise missile have been carried out by use of simulative warheads. The damage phenomena and damage mechanism of the simulative equivalent target of the engine of the cruise missile are investigated while impacted by fragments and shock waves through experiments. At the meantime, the impact damage criterion of the simulative engine of the cruise missile while impacted by fragments and shock waves is given out.

Key words: Cruise missile; Engine; Equivalent target; Fragment; Shock wave; Damage experiment

近期的几次局部战争表明, 各种战术导弹、精确制导炸弹发挥着极其重要的作用, 这些战术导弹是否能有效毁伤预定攻击目标和是否能被拦截已成为影响、制约甚至是决定战争进程和结局的重要因素。特别是巡航导弹, 由于其良好的低空飞行突防性能、高机动性、小反射面积、较强的防护和强大的毁伤性能, 在近几次战争中均发挥了巨大作用, 被认为是常规威

胁和远距离精确打击的重要武器和空袭的首选弹药^[1]。

美国、俄罗斯等对武器系统对目标的毁伤机理及效能评估已进行了大量的研究^[1-4], 而本文所研究的内容在国内尚属首次。本文的研究成果不仅有益于实现对敌战术导弹、巡航导弹的有效拦截, 提高与优化战斗部的毁伤效能, 还有益于提高我军战术导弹、巡航

收稿日期: 2009-05-11

作者简介: 曹兵(1967-), 男, 副教授, 主要从事弹药工程与爆炸技术研究。

导弹在弹药作用下的对抗生存能力而采取合理设计，为研制新型武器系统和改进已定型的武器系统指明方向。对于提高我国战术导弹、巡航导弹及防空反导系统的总体研制水平和毁伤效能具有重要的军事意义。

1 等效靶的建立

由于巡航导弹价值很高，其易损性和毁伤效应研究通常采用等效实验法。进行等效实验的前提是正确建立目标等效靶。建立等效靶首先要确定等效靶的材料，等效靶材料的选取原则是^[1,4-8]：以部件壳体或蒙皮的材料作为等效靶材料，或者选择对其抗侵彻性能研究比较透彻的某种材料，如硬铝，作为等效靶材料。

其次是确定等效靶的厚度，等效靶厚度的确定既要考虑不同材料之间的等效关系，又要考虑间隔靶与单层靶之间的等效关系，首先将不同于等效靶的材料等效为等效靶材，然后再将同一种材料的间隔靶等效成最终的等效靶。另外，如果条件许可，也可采用目标自身的材料及结构布局建立目标等效靶。关于不同材料靶板抗弹性能的等效理论，目前采用最多的是强度等效理论^[1,4-5,9-10]。

典型巡航导弹发动机主要由进气口、前风扇、轴流压气机、外涵道、内涵道、离心压气机、燃烧室、轴流式涡轮、排气喷管、壳体及壳体上密布的油管和及其它附件、蒙皮等几部分构成，如图 1 所示。

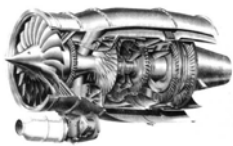


图 1 典型巡航导弹发动机
Fig.1 The engine of typical cruise missile

由于导弹发动机舱段结构复杂、材料昂贵，难以采用自身材料及结构布局建立其等效靶，适宜采用某一种材料作为其等效靶的材料，依据等效理论建立其等效靶。根据上述等效靶建立方法，建立巡航导弹发动机舱毁伤效应模拟等效靶，如图 2~3 所示。燃油舱模拟等效靶左端配重 74kg，右端等效体重 10kg，等效靶总重 84kg。主要用来考察巡航导弹发动机舱在爆炸冲击波和破片耦合作用下的机械毁伤效应。

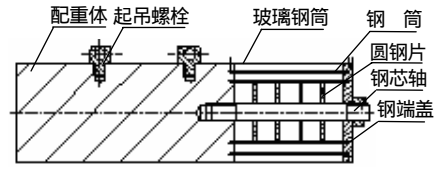


图 2 发动机舱 1 : 3 配重等效靶
Fig.2 1 : 3 equivalent target of the engine



图 3 发动机舱 1 : 3 配重等效靶照片
Fig.3 Photo of the 1 : 3 equivalent target of the engine

发动机表面的输油管路等效靶如图 4~5 所示。模拟燃油管道由 8mm × 1mm 的无缝钢管组成，内装 RP-3 航空煤油。用来考察巡航导弹发动机输油管路在爆炸冲击波和破片耦合作用下的冲击引燃效应。

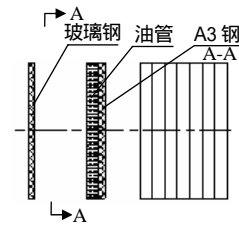


图 4 油路管道冲击引燃等效靶
Fig.4 Equivalent target of the fuel pipelines used for the impact inflame damage experiment



图 5 油路管道冲击引燃等效靶照片
Fig.5 Photo of the equivalent target of the fuel pipelines used for the impact inflame damage experiment

2 模拟战斗部

模拟预制破片战斗部结构如图 6 所示。

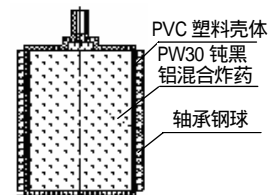


图 6 模拟预制破片战斗部
Fig.6 Simulative prefabricated fragment warhead

战斗部炸药装药采用 PW30 钝黑铝混合炸药，装药量 1kg，其 TNT 当量为 1.3kg；预制破片采用质量

为1g的6.35mm轴承钢球,单层布置,数量903个,用来模拟反导战斗部近距爆炸的作用效果。

3 实验方法及实验布置

利用预制破片战斗部对巡航导弹发动机舱模拟等效靶进行近距离静爆毁伤效应实验,根据实验现象及结果建立其毁伤规律,为后续研究提供基础数据和理论支撑。首先通过静爆实验测试模拟战斗部破片速度、破片分布密度和爆轰波压强,以确定模拟战斗部性能。然后以典型交汇角度 30° 和 60° 及典型脱靶距离0.3m、0.5m、1.0m和1.5m布置战斗部与燃油舱等效靶的相对位置,通过静爆实验确定战斗部对等效靶的毁伤效应。

为了测试模拟战斗部性能,分别在距离爆心0.3m、0.5m、1.0m和1.5m处挂置45#钢板(尺寸 $2000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 1\text{mm}$),并在上面布置测速靶和压力传感器。模拟战斗部吊高0.8m。装置布置如图7所示。



图7 模拟战斗部性能测试实验布置

Fig.7 Experimental facility arrangement used for testing the performance of the simulative warhead

在典型交汇条件下,模拟战斗部对巡航导弹燃油舱等效靶毁伤实验的实验布置分3种情况,涵盖冲击波先作用、冲击波后作用和冲击波与破片同时作用3种作用模式。战斗部吊高0.8m。装置布置如图8所示。



图8 战斗部对发动机舱等效靶毁伤实验布置

Fig.8 Experimental facility arrangement used for the damage experiment to the engine

4 实验结果

4.1 模拟战斗部性能实验测试结果

模拟战斗部性能测试结果如表1及图9~11所示。

表1 模拟战斗部性能测试结果
Tab.1 Results of the performance testing of the simulative warhead

炸距/m	0.3	0.5	1.0	1.5
冲击波超压/MPa	9.68	5.26	0.99	0.47
冲击波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3102.8	2299	1044	762
破片分布密度/($\text{个} \cdot \text{m}^{-2}$)	1983	1666	866	550
破片初速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1850			

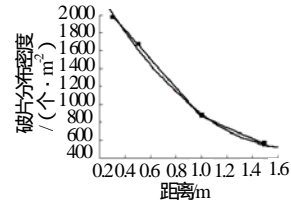


图9 破片分布密度随距离的变化曲线

Fig.9 The change curve of fragment distribution density along with distance

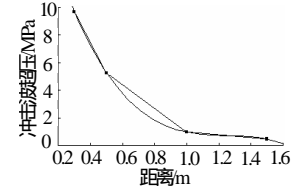


图10 冲击波超压随距离的变化曲线

Fig.10 The change curve of shock wave pressure along with distance

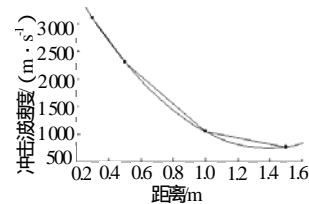


图11 冲击波速度随距离的变化曲线

Fig.11 The change curve of shock wave velocity along with distance

典型实验现象照片如图12所示。



图12 模拟战斗部破片典型分布照片

Fig.12 Typical fragment distribution photo of the simulative warhead

4.2 模拟战斗部对巡航导弹发动机舱等效靶毁伤实验结果

模拟战斗部对巡航导弹发动机舱模拟等效靶毁伤实验结果如表2所示。

典型实验现象照片如图13~15所示。



图13 等效靶破坏及冲击引燃现场

Fig.13 The scene of the mechanical damage and impact inflame damage to the equivalent targets of the engine

表2 模拟战斗部对巡航导弹发动机舱模拟等效靶毁伤实验结果
Tab.2 Results of damage experiments for the simulative warhead to equivalent targets of the engine

炸距/m	0.3	0.5	1.0	1.5
交汇角度(°)	60和30	60和30	60和30	60和30
作用方式	冲击波先作用破片后作用	冲击波先作用破片后作用	破片和冲击波同时作用	破片先作用冲击波后作用
机械毁伤等效靶	严重变形 功能丧失 命中破片 分布密度 1 356 个/m ²	重度变形 功能丧失 命中破片 分布密度 1 131 个/m ²	中度变形 功能部分丧失 命中破片 分布密度 677 个/m ²	轻微损伤 功能完好 命中破片 分布密度 415 个/m ²
油管	浓黑烟, 破片密度 2 个/100mm	浓黑烟, 破片密度 1 个/100mm	大火, 破片密度 3 个/100mm	无发烟和燃烧现象, 破片密度 1 个/100mm



图14 发动机舱等效靶典型机械毁伤结果

Fig. 14 The typical damage result of the equivalent target of the engine



图15 油管引燃毁伤结果

Fig.15 The impact inflame damage result of the fuel pipelines

5 实验现象分析及数据处理

5.1 发动机舱输油管路冲击引燃等效靶毁伤实验结果分析

对于布置在距离爆心 0.3m 处的油管和油箱组件, 实验现场升起浓黑烟, 表明油管和油箱组件在冲击载荷作用下产生了浓烟, 而没有被引燃。分析认为, 由于它们处在爆轰产物作用区, 在爆轰产物笼罩下周围氧气较少, 加上冲击波后的强负压区作用不利于煤油的燃烧, 故难以形成持续燃烧。

对于布置在距离爆心 0.5m 处的油管和油箱组件, 从远处观察实验场, 可见先有大火产生, 随后转为浓烟。分析认为, 由于冲击波强负压区的作用, 使得被冲击引燃的油管和油箱组件燃烧性能降低, 并由燃烧转变为发烟。

对于布置在距离爆心 1.0m 处的油管和油箱组件, 整个实验现场火光冲天。分析认为, 油管和油箱组件在破片冲击作用下被引燃, 同时到达的冲击波助燃火势, 使油管和油箱持续燃烧。

对于布置在距离爆心 1.5m 处的油管和油箱组件, 油管和油箱组件无熏黑和燃烧的迹象。油管组件是先受破片作用, 然后再受冲击波超压作用。分析认为, 由于距离爆心较远, 破片速度衰减, 作用到油管和油箱组件上的累积破片比冲量值达不到油管和油箱组件冲击引燃所需临界比冲量值, 故不能被冲击引燃。

5.2 发动机舱输油管路冲击引燃判据

从上述分析结果可以看出, 距离爆心 1.0m 以内的油管组件均能被战斗部破片冲击引燃, 但只有当破片和冲击波几乎同时到达的位置附近才能形成持续燃烧。根据前面的统计结果, 作用在油管上的等效总比冲量为: 84 249.2 kg · m⁻¹ · s⁻¹。

根据爆炸相似率^[5-9], 在距离爆心 1.0m 处相似变量:

$$\frac{\sqrt[3]{w}}{r} = 1.09 \tag{1}$$

式(1)中: w 为战斗部装药重量, kg; r 为距离爆心的距离, m。

从而可得到: 在爆炸冲击波和破片耦合作用下, 巡航导弹发动机舱输油管路模拟等效靶冲击引燃临界条件为^[8-13]:

$$\begin{cases} \text{破片着靶累积比冲量: } \geq 84\ 249.2\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\ \frac{\sqrt[3]{w}}{r} \leq 1.09 \end{cases} \tag{2}$$

5.3 机械毁伤等效靶毁伤实验结果数据处理

机械毁伤可通过破片与冲击波在等效靶上产生的变形情况进行考核。等效靶变形破坏结果如表3所示。相同交汇角度下等效靶变形容积、最大凹进深度与所受比冲量的关系如图16~17所示。

表3 发动机舱等效靶毁伤实验结果

Tab.3 Damage experiment results of the engine equivalent targets

炸距/m	交汇角/°	冲击波超压/MPa	冲击波比冲量/(N · s · m ⁻²)	破片比冲量/(N · s · m ⁻²)	总比冲量/(N · s · m ⁻²)	变形容积 × 10 ⁻⁵ /m ³	最大凹进深度 × 10 ⁻³ /m
0.3	30	9.68	972.8	2 478.8	3 451.5	5.4	11.20
0.3	60			2 537.0	3 510	4.42	9.20
0.5	30			2 176.5	2 713.5	3.60	9.94
0.5	60	5.26	537	2 006.4	2 543.4	1.81	5.04
1.0	30			1 096.3	1 353.3	0.83	1.73
1.0	60	0.99	257	1 408.3	1 665.3	0.83	1.73
1.5	30	0.47	155.6	0	155.6	0	0
1.5	60			240.3	395.9	0	0

破片与冲击波耦合作用下发动机舱机械毁伤的模式主要是：壳体变形、穿孔及内部结构破坏导致功能丧失。

当破片的比冲量 $> 58\ 416.35\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 且接近垂直入射时，破片可穿透发动机内外涵道进入发动机内部，击碎涡扇使发动机功能失效；当综合量 $B_2 = \Delta P \times F_2 \times \rho_{p2}$ 983 131 时（这里 F_2 发动机所受破片总冲量： $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ， ρ_{p2} 破片分布密度： $\text{个}/\text{m}^2$ ， P 冲击波超压： MPa ），可造成发动机舱段壳体大变形、连接处翘曲开裂。

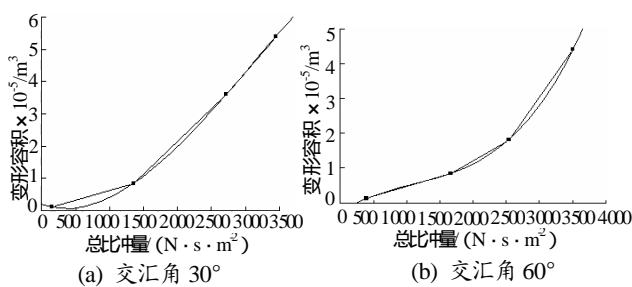


图 16 变形容积与所受比冲量关系

Fig.16 The relation curve of the transfiguration cubage and the specific impulse

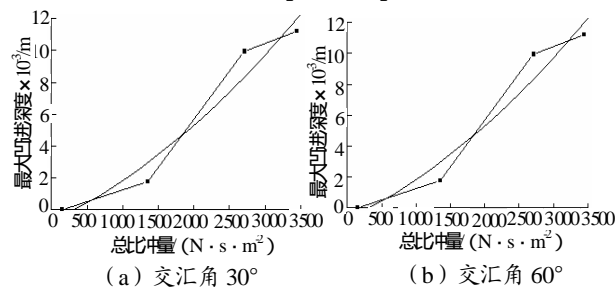


图 17 最大凹进深度与所受比冲量关系

Fig.17 The relation curve of the biggest concave depth and the specific impulse

6 结论

模拟战斗部在典型交汇角度下对发动机舱的毁伤实验，反映了目标要害舱段毁伤的真实情况，这对目标毁伤判据的确定和毁伤准则的建立具有实用价值。

通过实验建立的发动机舱冲击引燃和功能毁伤临界条件反映了破片与冲击波耦合作用下发动机舱

的毁伤规律，这对防空反导战斗部的合理设计具有指导意义。在爆轰产物流场作用区域，不能造成供油系统有效的冲击引燃，这种现象在产品的设计时应加以考虑和重视。本文所进行的实验研究在国内尚属首次，初步探索出一些毁伤规律，今后尚需进一步开展理论和实验研究。

参考文献：

- [1] 胡景林. 离散杆战斗部对典型歼击机毁伤效应研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2001.
- [2] 孙景文, 李志民. 导弹防御与空间对抗[M]. 北京: 原子能出版社, 2004.
- [3] 王颂康, 朱鹤松. 高新技术弹药[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1997.
- [4] 林光宇, 宋笔锋. 飞机作战生存力分析与设计基础[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998.
- [5] 张国伟. 终点效应及其应用技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [6] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(上册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [7] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用(下册)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [8] 美国陆军装备部编著. 终点弹道学原理[M]. 王维和, 李惠昌, 译. 北京: 国防工业出版社, 1988.
- [9] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [10] 赵国志. 穿甲工程力学[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [11] Lemire M.J. Battlefield damage assessment and repair[R]. AD-A262563, 1993.
- [12] Roach L.K. A methodology for battle damage repair analysis[R]. AD-A276083, 1994.
- [13] Dvorscak B.J. and H.G. Smith. C-5B battle damaged aircraft recovery methods in combat environments[R]. AIAA-88-445 6, 1988.