

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.02.002

轴向预制破片战斗部的设计研究^{*}

臧立伟 尹建平 王志军
中北大学机电工程学院(山西太原,030051)

[摘 要] 为了研究壳体厚度、炸药爆速、起爆点距离 3 种因素对轴向预制破片战斗部平均飞散角的综合影响,利用 LS-DYNA 动力有限元程序,采用 Lagrange 算法对轴向预制破片战斗部的加速过程进行了数值模拟。以破片平均飞散角为指标,应用正交优化方法针对 3 种因素对破片平均飞散角影响规律和主次关系进行了分析。结果表明,壳体厚度是主要影响因素,炸药爆速次之,起爆点距离影响最小;并得到了影响破片平均飞散角的 3 种因素各水平的最优组合,优化之后对应的破片平均飞散角为 4.520°。

[关键词] 爆炸力学 预制破片 飞散角 正交优化 数值模拟

[分类号] TJ413+.2

引言

轴向预制破片战斗部是战斗部结构中的主要类型之一,它通过首先起爆辅助装药,驱动弹体变形,使更多的破片对准目标方向;一定延时后起爆主装药,驱动定向后的破片飞散,形成对目标的能量聚焦,达到毁伤目标的目的^[1]。相对于普通周向均匀的战斗部而言,轴向预制破片战斗部能显著提高目标方向上破片的分布密度,并且能有效提高目标方向上破片的飞散速度,使炸药的能量利用率得到极大的提高。除用于杀伤人员外,轴向预制破片战斗部可以应用在破坏无装甲或轻型装甲防护的车辆、飞机、雷达以及导弹等武器。在一些特殊应用场合,轴向预制破片战斗部还可以与其它结构形式的战斗部如成型装药战斗部联合作用,对目标实行联合毁伤^[2]。

龚柏林等^[1]在试验的基础上结合有限元计算软件 LS-DYNA,采用 Lagrange 算法对 D 型战斗部破片飞散及破片毁伤靶板的过程进行了数值模拟,得出了采用 Lagrange 算法模拟预制破片战斗部的破片飞散过程更具合理性和有效性。时党勇等^[2]对单点、对称两点和三点起爆方式下爆轰波传播特性、多层预制破片飞散形态、破片初速和飞散角进行计算和比较,得出了多层预制破片的飞散规律。周家胜等^[3]以可视化仿真评估平台就某轴向增强型弹药对 ARM 导弹目标的毁伤效果进行了仿真,提供了非试验条件下战斗部的设计依据。

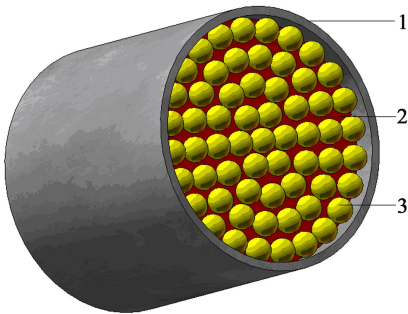
这些研究并未对壳体厚度、炸药爆速、起爆点距

离 3 种因素对破片平均飞散角的影响规律和主次关系进行分析。本文在参考文献[3]战斗部结构的基础上对轴向预制破片战斗部做了数值模拟,分析了壳体厚度、炸药爆速、起爆点距离 3 种因素对破片平均飞散角的影响规律,并应用文献[4]中正交优化的方法,针对 3 种因素对破片平均发散角这一指标影响的主次关系进行了分析研究。

1 战斗部结构及仿真参数

本文研究的轴向预制破片战斗部结构(主要由炸药、壳体、破片组成)设计见图 1。图 2 为轴向预制破片战斗部结构剖视图。

由于战斗部起爆驱动破片飞散过程包含大变形问题,因此其数值模拟采用流固耦合算法^[5-6]。计算时壳体材料选用铜,采用 JOHNSON_COOK 材料模

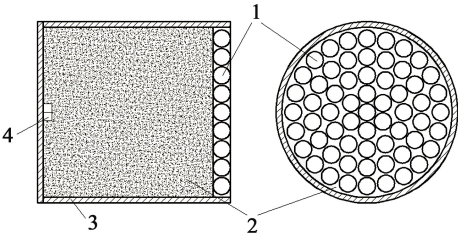


1 - 壳体;2 - 炸药;3 - 破片

图 1 轴向预制破片战斗部结构图

Fig. 1 Structure chart of axial prefabricated fragments warhead

^{*} 收稿日期:2012-08-28
基金项目:国防基础科研项目(K133040610090)
作者简介:臧立伟(1987~),男,硕士,主要研究方向:高效毁伤战斗部设计及数值仿真。E-mail:756698984@qq.com



1 - 破片; 2 - 炸药; 3 - 壳体; 4 - 起爆点

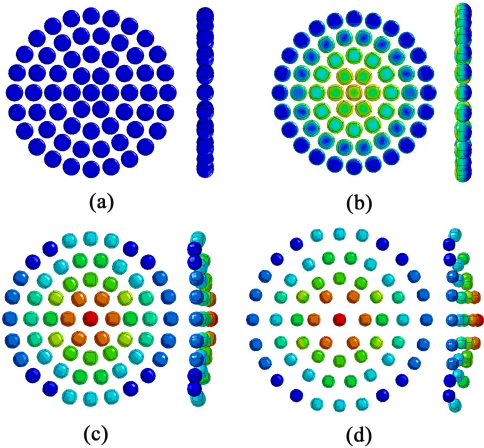
图 2 轴向预制破片战斗部剖视图

Fig. 2 Sectional view of the axial prefabricated fragments warhead

型和 GRÜNEISEN 状态方程来描述壳体在爆轰波作用下的动态响应过程和高应变条件下的材料变形问题。炸药选用 B 炸药, 采用 HIGH_EXPLOSIVE_BURN 高能炸药材料模型和 JWL 状态方程。JWL 状态方程精确描述了在爆炸驱动过程中爆轰气体产物的压力、体积、能量特性。空气材料采用 MAT_NULL 模型; 状态方程为线性多项式, 用 EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 来描述。钢球采用随动硬化材料模型。

2 轴向预制破片战斗部成型过程数值模拟

图 3 中 0 ~ 11 μs 时, 炸药起爆后, 爆轰波以球面波的形式传播, 碰到壳体内表面时发生反射, 反射波与爆轰波相叠加, 使得爆轰波阵面压力增大, 增大之后的爆轰波传到破片上端面, 如 11 μs 时刻所示。由于单点中心起爆所产生的爆轰波为球面波, 所以处于中心部位的破片最先受到爆轰压力和爆轰产物的作用, 导致速度最快的中心破片走在最前面, 如 29 μs 时刻所示, 当壳体达到屈服极限发生破裂时, 爆轰产物沿轴向和径向泻出, 战斗部内部压强逐渐



(a) 0 μs; (b) 11 μs; (c) 29 μs; (d) 50 μs

图 3 轴向预制破片战斗部典型时刻状态
(主视图及左视图)

Fig. 3 The critical moment of the axial prefabricated fragments warhead (front view and left view)

减小, 对破片的加速能力逐渐减弱。当内外大气压相等时, 破片的推动力消失, 此时破片速度达到最大, 在 50 μs 时达到稳定。

3 轴向预制破片战斗平均飞散角影响因素分析

3.1 平均飞散角概念

由图 4 可以看出, v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 50 μs 时刻破片速度沿 X 轴、Y 轴、Z 轴的分量, 可以得到任意破片速度方向与 Z 轴正向之间的夹角为:

$$\alpha_i = \arccos \frac{v_z}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}}$$

所以 50 μs 时破片平均飞散角度^[7]为:

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{61} \sum_{i=1}^{61} \alpha_i \text{ (破片总数为 61)}$$

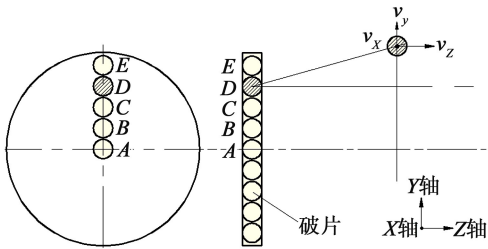


图 4 轴向预制破片战斗部平均飞散角度示意图

Fig. 4 Sketch map of the average flight angle of axial prefabricated fragments warhead

3.2 壳体厚度对破片平均飞散角的影响

表 1 为壳体厚度对破片平均飞散角的影响的数值模拟结果。装药均为 B 炸药。

表 1 壳体厚度对破片平均飞散角的影响

Tab. 1 Influence of shell thickness on the average flight angle of fragments

序号	δ/mm	h/mm	$\bar{\alpha}/^\circ$
1	0	60	14.238
2	1	60	9.104
3	2	60	6.854
4	3	60	5.820
5	4	60	5.144
6	5	60	4.730
7	6	60	4.458

从表 1 可以看出, 随着壳体厚度的增加, 破片平均飞散角逐渐减小。原因是: 壳体可以延迟径向稀疏波进入炸药的时间, 从而减少炸药不完全分解的化学损失, 提高了装药能量利用率, 这增强了爆轰产物对破片的轴向做功能量, 提高了破片的轴向速度。壳体越厚, 对爆轰产物的径向膨胀约束力越强, 在壳

体边缘处约束力达到最大,从而减少了破片的径向飞散速度。最后,随着壳体厚度的增加,破片在轴向速度逐渐增强、径向速度逐渐减少的情况下,获得越来越小的平均飞散角。

3.3 炸药种类对破片平均飞散角的影响

表 2 为几种炸药的爆速,表 3 为爆速对破片平均飞散角影响的数值模拟结果。

表 2 黑索今^[8]、8701 炸药、TNT 炸药爆速

Tab. 2 Detonation velocity of RDX, 8701 explosive and TNT

炸药种类	$U_d(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$
黑索今	0.880
8701	0.798
TNT	0.693

表 3 炸药爆速对破片平均飞散角的影响

Tab. 3 Influence of detonation velocity on the average flight angle of fragments

序号	$U_d(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	δ/mm	h/mm	$\bar{\alpha}/^\circ$
1	0.839	3	60	5.82
2	0.798	3	60	5.71
3	0.693	3	60	5.52

由表 3 可以看出,随着炸药爆速的减小,破片平均飞散角逐渐减小。原因是:炸药是破片运动的能源,炸药爆轰后将能量传递给破片,在爆炸载荷驱动下形成具有一定动能和发散角的破片集群,从而对目标进行侵彻。根据能量守恒定律,炸药的爆轰能量增大后,破片的轴向和径向速度相应增大,平均飞散角相应增大。

3.4 起爆点位置对破片平均飞散角的影响

成型装药结构采用圆柱形装药,如图 5 所示。起爆方式采用中心点起爆,分别设定起爆点 1、2、3、4、5、6、7,通过 7 种起爆方案来研究起爆点与中心破

片顶端的轴向距离对其平均飞散角的影响,每种方案的起爆点之间相隔 10mm。对起爆点距离为 0mm、10mm、20mm、30mm、40mm、50mm、60mm 7 种情况分别进行数值模拟,见表 4。装药均为 B 炸药。

表 4 起爆点位置对破片平均飞散角的影响

Tab. 4 Influence of initiation point position on the average flight angle of fragments

序号	h/mm	δ/mm	$\bar{\alpha}/^\circ$
1	0.0	3	7.260
2	10.0	3	7.018
3	20.0	3	6.604
4	30.0	3	6.198
5	40.0	3	5.900
6	50.0	3	5.800
7	60.0	3	5.760

由表 4 可以看出,随着起爆点与中心破片顶点距离的增加,破片飞散角逐渐减小。模拟结果表明:主装药中心点 7 起爆破片受到的爆轰压力峰值远大于中心破片顶点 1 起爆受到的爆轰压力峰值,这导致了中心点 7 起爆所形成的破片集群径向平均速度和轴向平均速度较 1 点起爆大。顶点 1 起爆爆轰波最大压力区较大,多个破片同时受到压力,因此内圈破片与外圈破片轴向速度差较小。中心点 7 起爆球面波首先传到中心破片,引起内圈破片与外圈破片轴向速度差较大。这导致了中心点 7 起爆破片集群的中央部分较顶点 1 起爆飞行得远。

当起爆点距离很小时,破片平均飞散角很大,而且速度较低,毁伤目标能力弱,但其破片束接近于平行,增加了击中目标的有效破片数。起爆点距离增大虽然使得破片速度有所提高,侵彻目标能力增强,破片平均发散角减小。但其各圈破片速度差较大,破片束不平行,这又减少了击中目标的有效破片数。

起爆点距离的过大或过小都会影响破片的打击面积与侵彻能力。因此,起爆点距离应在 40 ~ 60mm 的范围内变动。

4 破片平均飞散角影响因素的优化设计

4.1 正交优化设计概念

正交优化设计是利用正交表来安排与分析多因素试验的一种设计方法。它是由试验因素的全部水平组合中,挑选部分有代表性的水平组合进行试验的,通过对这部分试验结果的分析,了解全面试验的情况,找出最优的水平组合。

4.2 因素水平表的确定

选取因素为壳体厚度 δ 、炸药爆速 U_d 、起爆点位

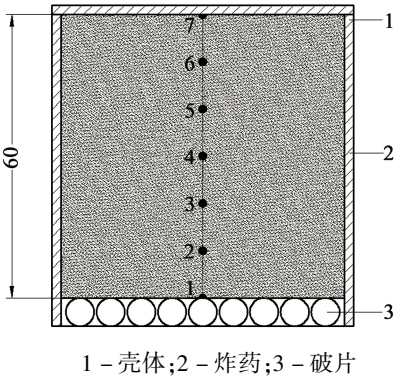


图 5 成型装药结构及起爆点分布

Fig. 5 Formed charge structure and initiation point layout

置 h , 水平为 3 水平。因素水平如表 5 所示。

表 5 因素水平表
Fig. 5 Factors and levels table

因素	A δ/mm	B $U_D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	C h/mm
水平一	3	0.693	40
水平二	4	0.798	50
水平三	5	0.839	60

4.3 正交优化设计仿真方案及结果

将仿真计算得到的破片平均飞散角作为优化设计评定指标。用 $L_9(3^4)$ 正交表来安排 3 个因素所对应的 3 个水平, 得到表 6 所示的 9 个数值计算方案。

表 6 正交设计仿真方案及结果
Fig. 6 Orthogonal design method and result

序号	A δ/mm	B $U_D/(\text{km} \cdot \text{s}^{-1})$	C h/mm	D $\bar{\alpha}/^\circ$
1	3	0.693	40	5.540
2	3	0.798	50	5.760
3	3	0.839	60	5.762
4	4	0.693	50	4.922
5	4	0.798	60	5.102
6	4	0.839	40	5.414
7	5	0.693	60	4.520
8	5	0.798	40	5.038
9	5	0.839	50	4.884
T_1	17.062	14.982	15.992	
T_2	15.438	15.900	15.566	
T_3	14.442	16.060	15.384	
R	2.620	1.078	0.608	

本文考察的是破片平均飞散角的大小, 要求平均飞散角越小越好。从表 6 中可以看出, 方案 7 得到的平均飞散角最小, 但是该仿真条件只是这 9 次当中最好的, 3 个因素各有 3 个水平总共可以 27 次仿真, 通过直观比较只能找到这 9 次试验当中最好的仿真条件, 还不能确定这一方案是 A、B、C 各因素水平的最理想组合。要找出更好的仿真条件就需要通过极差分析。

T_1 所在行对应的第一个数表示因素 A 在水平一下对值之和, 记为 T_{11} , 下标中第一个数为水平数, 第二个数代表因素; 其它类推; 则极差 $R = \max(T_{ij}) - \min(T_{ij})$ 。因为 $R_1 > R_2 > R_3$, 所以各因素对试验结果的影响程度从主到次分别是 A、B、C, 即壳体厚度对破片散布密度影响最明显, 炸药爆速次之, 起爆

点距离影响最小。

对于因素 A, 由于 $T_1 > T_2 > T_3$, 所以在因素 A 的 3 个水平的指标和中, 第 3 水平的指标和最小, 也就是第 3 水平的破片平均飞散角最小, 所以因素 A 应该取第 3 水平。同理, 因素 B 应该选取第 1 水平, 因素 C 应该选取第 3 水平。

综上所述, 可使破片散布面积指标达到最大的仿真条件是 A_3, B_1, C_3 , 即壳体厚度为 5mm, 炸药为 TNT, 爆速为 0.693km/s, 起爆点距离为 60mm。由此得出第 7 次仿真为 27 次试验中最好方案, 破片平均飞散角为 4.520°。

4 结论

1) 通过数值模拟研究了壳体厚度、炸药爆速、起爆点位置对破片散布密度的影响, 得出随着壳体厚度和起爆点距离的增加、炸药爆速的减小, 破片平均飞散角逐渐减小。

2) 采用正交设计的方法, 以破片平均飞散角为指标, 对正交表给出的 9 种各因素不同水平的搭配方案分别进行了仿真计算, 最后得到了壳体厚度、炸药爆速、起爆点距离 3 种因素对破片散布密度影响的主次关系。结果表明, 壳体厚度对破片散布密度影响最明显, 炸药爆速的影响次之, 起爆点距离影响最小。

3) 得到了影响破片散布密度 3 种因素的最佳水平组合, 即壳体厚度为 5mm, 炸药为 TNT, 爆速为 0.693km/s, 起爆点距离为 60mm。其对应的破片平均飞散角为 4.520°。

参 考 文 献

[1] 龚柏林, 卢芳云, 李翔宇. D 型预制破片战斗部破片飞散过程的数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(1): 88-94.
Gong Bailin, Lu Fangyun, Li Xiangyu. Simulation and study on the fragment ejection process of premade D-shape warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2010, 30(1): 88-94.

[2] 时党勇, 张庆明, 夏长富. 多层预制破片战斗部数值仿真方法及起爆方式影响[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2009, 10(6): 553-558.
Shi Dangyong, Zhang Qingming, Xia Changfu. Numerical simulation method and different initiation modes for pre-fabricated multilayer fragment warhead[J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2009, 10(6): 553-558.

[3] 周家胜, 钱建平, 张健. 轴向增强型战斗部对导弹目标毁伤评估的可视化仿真研究[J]. 沈阳理工大学学报, 2007, 26(4): 10-13.
Zhou Jiasheng, Qian Jianping, Zhang Jian. Research on

damage assessment of warhead projectile with axial field enhanced to missile with visualization simulation[J]. Transactions of Shenyang Ligong University, 2007, 26(4):10-13.

[4] 唐蜜, 柏劲松, 李平, 等. 爆炸成型弹丸成型因素的正交设计研究[J]. 火工品, 2006(5):38-40.

Tang Mi, Bai Jingsong, Li Ping, et al. Orthogonal design research of shaping factors of explosively formed projectile [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2006(5):38-40.

[5] 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.

Wu Hongbin, Chen Zhigang, Pei Sixing, et al. Simulation and study on the focusing and directional premade fragment of warhead[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(3):497-500.

[6] 梁争峰, 袁宝慧, 孙兴昀, 等. 定向战斗部破片能量增益的数值模拟[J]. 火炸药学报, 2005, 25(2):52-55.

Liang Zhengfeng, Yuan Baohui, Sun Xingyun, et al. Numerical simulation on the kinetic energy increase of aimed warhead[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2005, 25(2):52-55.

[7] 张志春, 强洪夫, 孙新利. 杀伤战斗部破片飞散特性的数值模拟[J]. 解放军理工大学学报: 自然科学版, 2008, 9(6):671-675.

Zhang Zhichun, Qiang Hongfu, Sun Xinli. Numerical simulation for fragments flight characteristics of high explosive projectile [J]. Journal of PLA University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2008, 9(6):671-675.

[8] 张国伟, 韩勇, 苟瑞君. 爆炸作用原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.

Zhang Guowei, Han Yong, Gou Ruijun. Explosion action principle[M]. Bei Jing: National defence industry press, 2006.

Optimizing Design of Axial Prefabricated Fragments

ZANG liwei, YIN Jianping, WANG Zhijun

School of Mechatronic Engineering, North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] In order to study the influence of shell thickness, detonation velocity, and initiation point position on the average flight angle of axial prefabricated fragments, numerical simulation of the accelerated process of the axial prefabricated fragments was carried out with the Lagrange method using LS-DYNA. Regarding average flight angle of fragments as index, orthogonal optimization method was applied to analyze the primary and secondary relations of the three factors influencing the average flight angle. The result indicates that shell thickness is the dominant factor, explosive detonation velocity comes second, and initiation point distance impact is minimal. An optimum combination of every level of three factors affecting the average flight angle is gained, through which the corresponding fragments average flight angle is 4.520°.

[KEY WORDS] explosion mechanics, prefabricated fragments, flight angle, orthogonal optimization, numerical simulation

文 摘

1 起爆药的结构和炸药性质的关系

《爆破器材》2001, 30(3), 10~14(中文)

文中评述了起爆药的晶体结构、分子结构和炸药性质之间的关系以及新型配位化合物起爆药的发展。

2 粉状工业炸药配方的数学模型

《爆炸与冲击》2001, 21(3), 210~214(中文)

研究了含有 C、H、O、N、Al 的粉状工业炸药配方设计的数学模型。研究了不含 TNT 的硝酸铵炸药、含 TNT 和燃料油的硝酸铵炸药、含铝粉和 TNT 的硝酸铵炸药的配方设计和最佳的数学模型。给出以上炸药配方设计的数学模型的计算结果, 也给出了由理论计算配方制出的炸药的爆炸性能, 从而肯定了数学模型的可靠性。

钟一鹏译自美国《化学文摘》
Vol. 136, No. 1(2002)