

组合式 MEFP 战斗部的正交优化设计*

付璐¹, 尹建平¹, 王志军¹, 何晓楠²

(1 中北大学机电工程学院, 太原 030051; 2 65042 部队, 沈阳 110000)

摘要:以多爆炸成型弹丸(MEFP)为计算模型,应用显式有限元程序 LS-DYNA,分析了相邻子装药间距、填充物密度和起爆延迟时间三种因素对 MEFP 发散角的影响规律。结果表明:随着子装药间距的增加以及填充物密度、起爆延迟时间的减小,MEFP 的发散角在减小。在此基础上以 MEFP 发散角为命中概率和毁伤概率指标,应用正交优化方法针对三种因素对 MEFP 发散角影响的主次关系进行了分析研究。结果表明起爆延迟时间是 MEFP 发散角的主要影响因素,并得到了影响 MEFP 发散角的三种因素各水平的最优组合。

关键词:多爆炸成型弹丸;发散角;正交优化;数值模拟

中图分类号:TJ410.33 **文献标志码:**A

Orthogonal Optimization Design for Combined MEFP Warhead

FU Lu¹, YIN Jianping¹, WANG Zhijun¹, He Xiaonan²

(1 School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2 No. 65042 Unit, Shenyang 110000, China)

Abstract: With multiple explosively formed projectile (MEFP) simulation model, the influence laws of MEFP space, filler material's density and delay time of initiation on divergence angle of MEFP were analyzed using the explicit finite element program LS-DYNA in this paper. It showed that divergence angle of MEFP decreased with the increasing of MEFP space and decreasing of filler material's density and delay time of initiation. Regarding divergence angle of MEFP as index of damage probability on this basis, orthogonal optimization method was applied to analyze the primary and secondary relations of the three factors influencing the divergence angle of MEFP. The results indicate that delay time of initiation is the main influential factor, and an optimum combination of every level of three factors affecting the divergence angle of MEFP has been gained.

Keywords: multiple explosively formed projectile(MEFP); divergence angle; orthogonal optimization; numerical simulation

0 引言

在未来战争中,面对大规模坦克装甲车辆的进攻,如何有效阻碍并摧毁它们已成为地面战场胜负的关键。专为反直升机与装甲车而研究的多爆炸成型弹丸(MEFP)技术日趋成熟^[1],针对此类目标,要提高 MEFP 的命中概率,必须使 MEFP 具有较小的发散角。文中以 MEFP 的发散角为研究对象,计算分析了子装药间距、填充材料密度和起爆延迟时间三种因素对 MEFP 发散角的影响规律。在此基础上,应用正交优化^[2]的方法针对三种因素对 MEFP 发散角影响的主次关系进行了分析研究。

三个相互分离的单个 EFP 装药,子装药之间填充有硬质聚氨酯泡沫塑料,保证子装药间不发生干扰。每个子装药爆炸后,形成单一的 EFP。图 1 所示组合式 MEFP 战斗部结构,左图是 MEFP 战斗部 120° 旋转剖视图,右图是装药的排列阵式正视图。装药为 OC-TOL 炸药,药型罩为等壁厚钢罩,挡板为钢材料,战斗部横截面简图如图 2 所示。选择三点起爆,起爆点在各子装药底面圆心处。

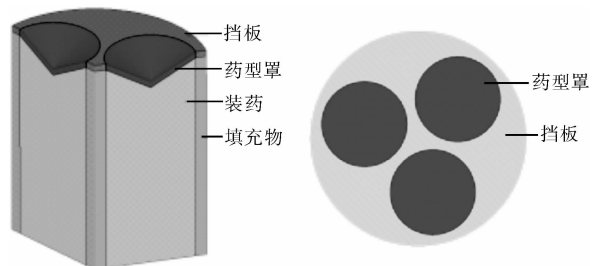


图 1 组合式 MEFP 战斗部几何示意图

1 计算模型

采用组合式 MEFP 战斗部结构,在战斗部中有

* 收稿日期:2010-12-22

作者简介:付璐(1986-),男,黑龙江齐齐哈尔人,助理工程师,硕士研究生,研究方向:弹箭仿真技术。

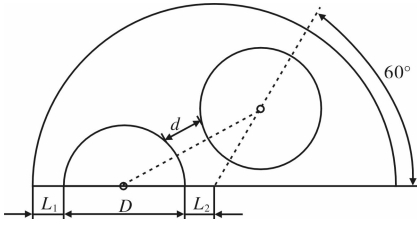


图 2 组合式 MEFP 战斗部结构横截面

2 多爆炸成型弹丸发散角影响因素分析

组合式 MEFP 战斗部的实质就是进行单一 EFP 的结构设计和 EFP 子装药间的隔爆设计,同时应考虑 EFP 子装药爆炸后爆轰波的相互影响^[3]。影响爆轰波形以及爆轰波对药型罩表面作用的因素有很多。为了能够更好的掌握爆轰波形对 MEFP 发散角的影响规律,文中从相邻子装药间距、填充物密度和装药的起爆延迟时间三因素出发,对各因素分别进行了数值模拟研究。

2.1 相邻子装药间距对 MEFP 飞行发散角的影响

为清楚的了解子装药间距对 MEFP 发散角的影响规律,本节对计算模型中各子装药的位置进行移动。对子装药间距为 6mm、8mm、10mm、12mm、14mm、16mm 这 6 种情况分别进行数值模拟。具体模拟结果如表 1 所示。

表 1 MEFP 战斗部发散角影响因素设计及数值模拟结果

序号	因素			
	d/mm	$\rho/(g/cm^3)$	t/ μs	$\alpha/(^\circ)$
1	6	0.96	0	0.120
2	8	0.96	0	0.065
3	10	0.96	0	0.052
4	12	0.96	0	0.046
5	14	0.96	0	0.038
6	16	0.96	0	0.032

由图 3 可以看到,随着战斗部各子装药间距的增大,MEFP 的发散角在减小。子装药间距的增大有利于提高命中目标的概率。产生这一趋势的原因在于子装药间距的增大延缓了炸药爆轰波对相邻药型罩作用的影响。

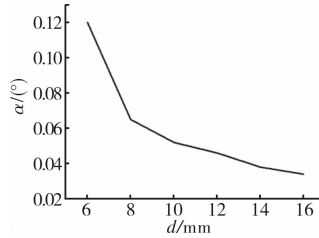


图 3 同时起爆下 MEFP 发散角随子装药间距变化趋势

2.2 填充物密度对 MEFP 飞行发散角的影响

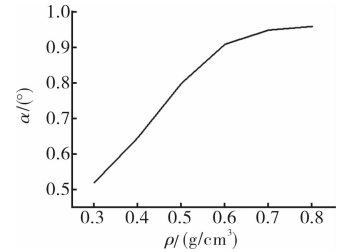
为清楚的了解填充物密度对 MEFP 发散角的影响规律,本节对填充物密度为 0.3g/cm³、0.4g/cm³、

0.5g/cm³、0.6g/cm³、0.7g/cm³、0.8g/cm³ 6 种情况分别进行数值模拟。具体模拟结果如表 2 所示。

表 2 MEFP 战斗部发散角影响因素设计及数值模拟结果

序号	因素			
	d/mm	$\rho/(g/cm^3)$	t/ μs	$\alpha/(^\circ)$
1	12	0.3	0	0.520
2	12	0.4	0	0.647
3	12	0.5	0	0.800
4	12	0.6	0	0.910
5	12	0.7	0	0.950
6	12	0.8	0	0.960

由图 4 可以看到,随着填充物密度的增加,MEFP 的飞行发散角增大。产生这一趋势的原因与爆轰波在填充物中产生的冲击波波速



和填充物的压力随密度变化的比值有关。填充物密度的增加使得材料的可压缩性降低,进而达到一定密度所需要的压力增大,导致冲击波波速随之变大。冲击波通过一定距离的填充物的时间就会减小,从而加强了爆轰波对相邻装药爆轰的影响,使 MEFP 的发散角变大。可见,填充物密度的降低有利于提高 MEFP 战斗部的命中概率,但并不意味着填充物的密度可以任意的减小,它的变化存在一个合理的范围,超出了这个范围,填充物将不能很好的起到隔爆作用,爆轰波的叠加、干扰会使 MEFP 的发散角增大。

2.3 起爆延迟时间对 MEFP 飞行发散角的影响

为清楚的了解起爆延迟时间对 MEFP 发散角的影响规律,本节对单个药型罩延迟 1.5 μs 、2.0 μs 、2.5 μs 、3.0 μs 、3.5 μs 、4.0 μs 6 种情况分别进行数值模拟。具体模拟结果如表 3 所示。

表 3 MEFP 战斗部发散角影响因素设计及数值模拟结果

序号	因素			
	d/mm	$\rho/(g/cm^3)$	t/ μs	$\alpha/(^\circ)$
1	12	0.7	1.5	0.285
2	12	0.7	2.0	0.470
3	12	0.7	2.5	0.630
4	12	0.7	3.0	0.710
5	12	0.7	3.5	0.820
6	12	0.7	4.0	0.840

从表 5 中可以看出,随着起爆延时时间的增加,延时点所对应的药型罩形成 MEFP 的发散角逐渐增大。产生这一变化趋势的原因主要在于爆轰波作用

的相互叠加、干扰,使得爆轰波不对称的作用在药型罩上,造成药型罩承载的时间和空间不对称,引起 MEFP 沿轴线方向向外发散。

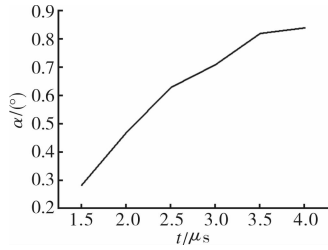


图 5 非同时起爆下 MEFP 发散角随延迟时间变化趋势

3 多爆炸成型弹丸发散角影响因素的正交优化设计

正交优化设计是在传统专业设计的基础上发展起来,以统计的方法定量的分析各种参数组合与目标特性之间的关系,从而求出最佳参数组合的一种方法。通过正交优化方法^[4]设计出组合式 MEFP 战斗部发散角的各影响因素不同水平组合,对战斗部形成 MEFP 的全过程进行数值仿真,然后通过数据处理获得 MEFP 发散角影响因素的最优组合,具体优化设计步骤如下。

3.1 正交设计因素水平

为了解各因素变化对 MEFP 飞行发散角的影响,确定考核指标(根据试验目的而选定的用来衡量试验效果的量值)为 MEFP 的飞行发散角,选取的因素为子装药间距 d 、填充物密度 ρ 和起爆延迟时间 t ,水平为三水平,各因素水平表如表 4 所示。

表 4 正交优化因素水平表

序号	因素		
	d	ρ	t
1	10	0.6	2.0
2	12	0.7	2.5
3	14	0.8	3.0

3.2 正交设计仿真方案及结果

由于该设计为三因素三水平设计,选用 $L_9(3^4)$ 正交表,根据 MEFP 发散角影响因素的具体参数,设计了三因素三水平的正交设计仿真方案,各因素水平组合如表 5 所示。运用 LS-DYNA 软件进行仿真计算,得到了不同因素组合下 MEFP 飞行发散角的大小。

K_1 所在行对应的第一个数表示因素 1 在水平为 1 时对应各指标值之和,记为 K_{11} ,下标中第一数为水平数,第二个数代表因素; \bar{K}_1 所在行对应的第一个数记为 \bar{K}_{11} , $\bar{K}_{11} = K_{11}/3$,其它类推;极差 $R_i = \max\{\bar{K}_{ji}\} - \min\{\bar{K}_{ji}\}$,式中 \bar{K}_{ji} 为 i 因素 j 水平的指标平均值。

3.3 正交试验数据分析

从表 5 可以看出,在 9 次仿真中,第 4 次仿真得

到的 MEFP 偏转角最小。但是,还不能确定这一方案是 A、B、C 各因素水平的最理想组合。为了寻找最

表 5 正交设计仿真方案及结果

序号	A	B	C	$\alpha / (^\circ)$
	d / mm	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$t / \mu\text{s}$	
1	10	0.6	2.0	0.44
2	10	0.7	2.5	0.24
3	10	0.8	3.0	0.81
4	12	0.6	2.5	0.10
5	12	0.7	3.0	0.69
6	12	0.8	2.0	0.60
7	14	0.6	3.0	0.52
8	14	0.7	2.0	0.20
9	14	0.8	2.5	0.40
K_1	1.490	1.060	1.240	
K_2	1.390	1.130	0.740	
K_3	1.120	1.810	2.020	
\bar{K}_1	0.497	0.353	0.413	
\bar{K}_2	0.463	0.377	0.247	
\bar{K}_3	0.373	0.603	0.673	
R	0.124	0.250	0.426	

优的影响因素,还需要进行分析。表 5 的每一列下面分别给出了 K_1 、 K_2 、 K_3 以及它们的平均值 \bar{K}_1 、 \bar{K}_2 、 \bar{K}_3 和极差 R 的计算结果。比较 \bar{K}_i 值的大小,可以看出各因素最好结果的条件。

对于因子 1(相邻子装药间距): $\bar{K}_{31} < \bar{K}_{21} < \bar{K}_{11}$ 。因此,子装药间距 d 取 14mm 为最佳水平。

对于因子 2(填充物密度): $\bar{K}_{12} < \bar{K}_{22} < \bar{K}_{32}$ 。因此,填充物密度 ρ 取 $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 为最佳水平。

对于因子 3(起爆延迟时间): $\bar{K}_{23} < \bar{K}_{13} < \bar{K}_{33}$ 。因此,延迟起爆时间 t 取 $2.5\mu\text{s}$ 为最佳水平。

同时,从极差结果 $R_C > R_B > R_A$ 可以看出,起爆延迟时间是所有参数中影响最主要的因素,相邻子装药间距对 MEFP 发散角影响最小。综合分析,组合式 MEFP 战斗部发散角影响因素取最佳组合方案 $A_3B_1C_2$,即相邻子装药间距为 14mm、填充物密度为 $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 、延迟起爆时间为 $2.5\mu\text{s}$ 时,经仿真计算其对应的 MEFP 发散角为 0.25° ,能够保证 MEFP 具有较小的发散角,从而有效地提高了战斗部的命中率;在 MEFP 成型方面,在 $t=100\mu\text{s}$ 时,优化后的战斗部形成的 MEFP 具有良好的气动外形,长径比的增益为 16.8%,飞行姿态如图 6 所示。

4 结论

1) 运用有限元程序对组合式 MEFP 的成型过程

(下转第 82 页)

$h=t[i+1][0]-t[i][0];$ //两相邻横坐标的距离

$e=e-(c+d) * h/2;$ //第 i 个点时所对应的速度或者加速度的值

$dxita0[i]=e;$ //将 e 以一维数组的方式存储起来

第一次积分时,程序中 e 表示速度,起始值为着靶速度;第二次积分时 e 表示位移,起始值为 0。通过两次积分可得到位移信息。

按照以上方法对试验测试数据积分得到其位移时间曲线,并将仿真位移曲线与其在同一坐标系下绘制,如图 10 所示。

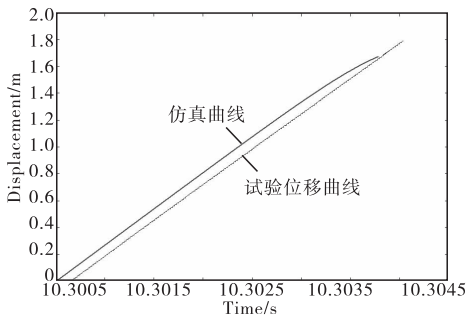


图 10 位移曲线

4 结论

将过载信号经过滤波消除加速度计所敏感到的结构响应,通过积分程序对滤波之后的信息进行位移积分得到位移信息,能够为侵彻深度的确定提供方法,具有实用意义。

参考文献:

- [1] 韩丽,高世桥. 混凝土靶体尺寸对过载影响的数值研究[J]. 计算机仿真,2007,24(6):17-19.
- [2] 姜华,王君杰. 弹体侵彻混凝土数值模拟失效指标研究[J]. 振动与冲击,2009,28(18):30-34.
- [3] 聂明飞,李玉龙. 卵形头部弹侵彻多层混凝土靶板有限元仿真[J]. 探测与控制学报,2009,31(4):78-83.
- [4] 石云波,刘晓鹏,仝晓刚,等. 垂直侵彻深度计算算法研究[J]. 电子设计工程,2009,17(8):87-89.

(上接第 75 页)

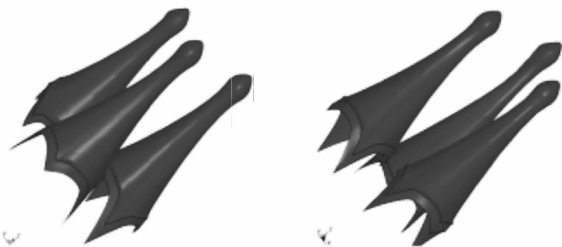


图 6 正交优化前后 MEFP 的飞行姿态

进行了数值模拟,分析了相邻子装药间距、填充物密度和起爆延迟时间三种因素对 MEFP 发散角的影响规律,即随着子装药间距的增加以及填充物密度、起爆延迟时间的减小,MEFP 的发散角在减小。

2)采用正交优化的方法,以 MEFP 发散角为命中和毁伤概率指标,对正交表给出的九种各因素不同水平的搭配方案分别进行了计算,最后得到了相邻子装药间距、填充物密度和起爆延迟时间三种因素对 MEFP 发散角影响的主次关系,结果表明起爆延迟时间对 MEFP 发散角影响最大,填充物密度影响居中,相邻子装药间距影响较小。

3)对于口径 120mm 的组合式 MEFP 战斗部而

言,应用正交优化方法得到了影响 MEFP 发散角的三种因素的最佳水平组合,即相邻子装药间距为 14mm、填充物密度为 $0.6g/cm^3$ 、延迟起爆时间为 $2.5\mu s$ 。该组合得到的 MEFP 发散角为 0.25° 。

参考文献:

- [1] 王志军,尹建平. 弹药学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [2] 北京大学数学力学系数学专业概率统计组. 正交设计:一种安排多因素试验的数学方法[M]. 北京:人民教育出版社,1976.
- [3] 李裕春,程克明. 多爆炸成形弹丸技术研究[J]. 兵器材料科学与工程,2008,31(3):74-76.
- [4] 唐蜜,柏劲松,李平,等. 爆炸成形弹丸成型因素的正交设计研究[J]. 火工品,2006(5):44-46.
- [5] 尹建平,王志军,常变红. 智能雷发射初始条件的正交优化设计[J]. 沈阳理工大学学报,2009,28(5):82-86.
- [6] 周翔,龙源,余道强,等. 多弹头爆炸成形弹丸数值仿真及发散角影响因素[J]. 兵工学报,2006,27(1):23-26.
- [7] 时党勇,李裕春,张胜明. 基于 ANSYS/LS-DYNA 8.1 进行显示动力分析[M]. 北京:清华大学出版社,2005.