DOI: 10.11883/bzycj-2016-0272 文章编号: 1001-1455(2018)03-0501-08

三点起爆控制参数对尾翼爆炸成型弹丸成型的影响*

李 瑞,李伟兵,王晓鸣,李文彬
(南京理工大学智能弹药技术国防重点实验室,江苏 南京 210094)

摘要: 针对三点起爆控制参数(起爆直径、起爆同步误差)对尾翼爆炸成型弹丸(explosively formed projectile, EFP)成型的影响问题,理论分析了三点起爆条件下爆轰波的马赫碰撞,计算获得了不同起爆直径下马赫波的相关参数,利用 LS-DYNA 有限元软件通过数值模拟研究了不同起爆直径下三点起爆同步误差对 EFP 尾翼成型及飞行速度的影响规律。结果表明,起爆直径越大,马赫波在药型罩上的作用面积越小,马赫超压越大,形成的 EFP 长径比和速度越大;起爆直径为 30、40、50 mm 三点起爆成型装药形成较佳尾翼 EFP 应满足的最大起爆同步误差分别为 50、100、150 ns;此外,尽量使中间起爆点起爆同步误差约为最大同步误差的一半,有利于降低尾翼 EFP 的侧向分速度,提高飞行稳定性。

关键词: 三点起爆;起爆同步误差;起爆直径;尾翼爆炸成型弹丸
中图分类号: O385;TJ410.51 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

尾翼爆炸成型弹丸(explosively formed projectile,EFP)是一种呈星形布置多个鳍状尾翼的特殊 EFP,具有良好的飞行稳定性和侵彻性能,研究表明采用多点起爆是形成尾翼 EFP 一种简单可行的方式[1-2]。关于多点起爆控制参数对尾翼 EFP 成型影响的研究已有不少。Bouet 等[3]、Cardoso 等[4]研究了起爆点数和起爆点位置对 EFP 成型的影响,但没有对多点起爆下爆轰波相互作用及其对药型罩的作用过程进行分析。在实际中,多点起爆网络存在同步误差,对尾翼 EFP 的成型有着重要的影响。罗健等[5]在研究多点起爆对尾翼 EFP 的影响时,提出起爆同步性对 EFP 的飞行稳定性影响较大;Li 等[6]研究了起爆精度对 EFP 成型参数的影响,该研究基于单一起爆直径,并未研究不同起爆直径下起爆精度对 EFP 成型的影响。本文中,对三点起爆形成的马赫波作用于药型罩及尾翼 EFP 成型的过程进行理论分析,利用 LS-DYNA 软件研究不同起爆直径下起爆同步误差对尾翼 EFP 成型性能的影响,找出不同起爆直径下形成较佳 EFP 尾翼应满足的最大同步起爆误差。

1 三点起爆爆轰波传播及相互作用过程

1.1 装药结构及计算模型

采用文献[7]中形成尾翼 EFP 的成型装药结构,如图 1 所示,其装药直径 $D_c=65$ mm,装药长度 $L_c=32.5$ mm,药型罩外曲率半径 $R_{out}=70$ mm,内曲率半径 $R_{inn}=78$ mm,罩顶厚度 $\delta=2.8$ mm,起爆直径为 D_{ini}。采用

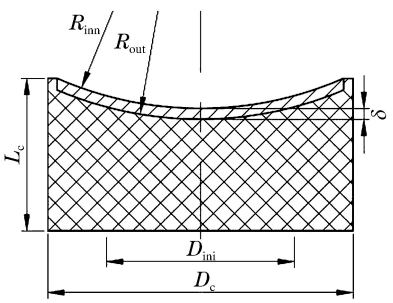


图 1 装药结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of charge

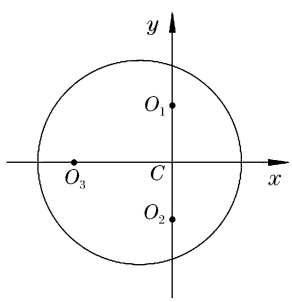


图 2 起爆点分布
Fig. 2 Detonation point distribution

* 收稿日期: 2016-09-01; 修回日期: 2017-03-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(11202103);江苏高校"青蓝工程"项目;
江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16_0481)
第一作者: 李 瑞(1987—),男,博士研究生; 通信作者: 李伟兵,njustlwb@163.com。

端面三点起爆,起爆点分布如图 2 所示。采用 LS-DYNA 软件进行数值模拟,建立的有限元全模型如图 3 所示。炸药为 JH-2,用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述,紫铜药型罩用 Johnson-Cook 本构模型和 Grüneisen 状态方程描述,具体计算参数见文献[7]。

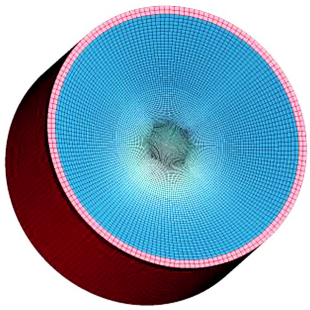


图 3 有限元模型

Fig. 3 The finite element model

1.2 数值模拟与试验对比

刘建青等[7]对此成型装药在端面三点同时起爆形成的尾翼 EFP 进行了试验研究。图 4 为尾翼 EFP 在成型过程中以不同的攻角着靶时,数值计算结果与纸靶上穿孔外形的对比情况。对此时刻下数值计算的 EFP 长度 l、直径 d 和翼展 d_w 进行统计并与试验对比,如表 1 所示。

从图 4 可以看到,此时的 EFP 头部较尖锐,中部主体粗大,主体和尾部之间有一定径向收缩,尾翼外张等外形特点在纸靶穿孔和数值模拟中均得到很好地反映,说明数值计算结果和试验结果吻合较好。从表 1 可以看出,此时的 EFP 成型参数的数值模拟结果与试验结果吻合较好,进一步说明建立的有限元模型能有效反映此装药结构尾翼 EFP 的成型过程。

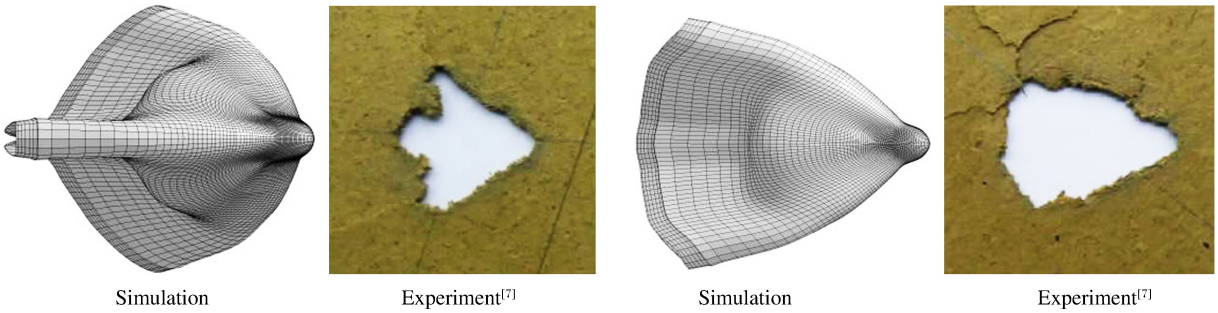


图 4 不同攻角时,EFP 的外形

Fig. 4 EFP shapes at different angels of attack

表 1 数值计算和试验结果的比较

Table 1 Comparison between numerical and experimental results

l/mm		d/mm		d_w/mm	
模拟	试验[7]	模拟	试验[7]	模拟	试验[7]
49.6	>40.0	26.2	26.5	33.2	35.8

1.3 三点起爆爆轰波作用过程分析

当成型装药在 O_1、O_2、O_3 等 3 个起爆点同时起爆后,从起爆点传出的爆轰波分别以相同的爆速、各自独立地向炸药内部传播。当从两相邻起爆点传出的爆轰波传至两起爆点对称平面处时,两爆轰波随着波阵面间夹角的增大将发生正碰撞、正规斜碰撞、马赫碰撞过程。为此,选取图 2 中 O_1、O_2 起爆点形成的爆轰波的相互作用进行分析。如图 5 所示,O_1 为起爆点,O 为马赫碰撞起始点,I 为爆轰波波阵面,OS、药性罩内侧与 z 轴围成的区域为马赫波区。计算中作如下假设:(1)忽略次级马赫碰撞的影响;(2)马赫杆是垂直于刚性壁面的平直面;(3)马赫波后视为稳定状态,不考虑稀疏波的影响。

爆轰波马赫碰撞形成的三波点轨迹计算方法如下[8]。参照文献[9]选取 44.5°作为爆轰波发生马赫碰撞的临界角 φ_{Mach},根据几何关系,有:

$$z_O = r_{CO_1}\tan\varphi_{\mathrm{Mach}}, \qquad y_O = 0 \tag{1}$$

令 $z_{n+1} = z_n + \Delta h$,Δh 为迭代步长;S_n 点处的爆轰波入射角 φ_n,根据几何关系,有:

$$\tan\varphi_n = \frac{z_n}{r_{CO_1} - y_n} \tag{2}$$

对于 S_n 点处的马赫增长角 χ_n，根据几何关系，有：

$$\tan\chi_n=\frac{y_{n+1}-y_n}{z_{n+1}-z_n} \tag{3}$$

利用 Whitham 规则[10]，有：

$$\tan\chi_n=\frac{A_w}{Ma_w}\sqrt{\frac{Ma_w^2-Ma_0^2}{A_0^2-A_w^2}} \tag{4}$$

式中：Ma_0、Ma_w 分别为 C-J 爆轰波和马赫波的马赫数，$Ma_0=(1+\gamma)/\gamma$，$\gamma=3$；A_w 和 A_0 为截面面积，有：

$$A_w=A_0\left(\frac{Ma_0^2-1}{Ma_w^2-1}\right)^{1/K},K=0.4+0.1Ma_w^{-2} \tag{5}$$

穿过马赫干流团转角 θ 有：

$$\tan\theta=\frac{\sqrt{Ma_w^2-Ma_0^2}\sqrt{A_0^2-A_w^2}}{A_wMa_w+A_0Ma_0} \tag{6}$$

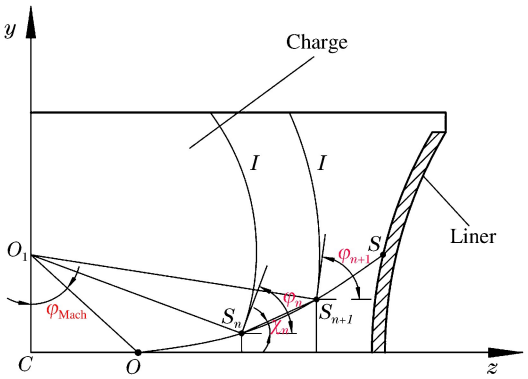


图 5　爆轰波传播示意图

Fig. 5　Diagram of detonation wave propagation

$$\varphi_n=\frac{\pi}{2}-\theta \tag{7}$$

两相邻起爆点形成的爆轰波发生马赫碰撞时，马赫碰撞区压力 p 有：

$$\frac{p}{p_{CJ}}=\frac{\sin^2\beta}{\sin^2\varphi_n}\left(1+\sqrt{1-\frac{\eta\sin^2\varphi_n}{\sin^2\beta}}\right) \tag{8}$$

式中：β 为马赫杆前的流团速度方向与马赫杆切向方向的夹角，基于马赫杆垂直刚性壁面的假设，$\beta=90°$；η 为过度压缩系数，文献[11]中指出：

$$\eta=0.8+0.2\frac{\sin^2\beta}{\sin^2\varphi_n} \tag{9}$$

1.4　马赫参数计算及验证

为了验证上述理论计算的可靠性，采用 LS-DYNA 软件对起爆直径 $D_{ini}=20,30,40,50$ mm 下两相邻起爆点相互作用时的马赫碰撞起始点坐标(z_O，y_O)、药型罩处马赫杆高度 h 及马赫超压 p/p_{CJ} 进行数值计算，并与理论计算结果对比，如表 2 所示。可以看出理论计算结果与数值计算结果基本吻合。

表 2　马赫波区计算结果

Table 2　Results in Mach domain

D_{ini}/mm	z_O/mm		y_O/mm		h/mm		p/p_{CJ}	
	理论	模拟	理论	模拟	理论	模拟	理论	模拟
20	8.36	8.27	0	0	2.16	1.98	1.52	1.41
30	12.50	11.70	0	0	1.11	1.08	1.72	1.64
40	16.70	15.90	0	0	0.56	0.50	2.22	2.17
50	20.90	19.80	0	0	0.26	0.23	2.69	2.51

2　三点起爆形成尾翼 EFP 数值模拟

2.1　不同起爆直径下尾翼 EFP 成型

图 6 为起爆直径 $D_{ini}=20,30,40,50$ mm 三点同时起爆尾翼 EFP 外形稳定时刻的正视图和俯视图，对成型稳定时的尾翼 EFP 速度和长径比进行统计，如图 7 所示。由图 6 可以看出，EFP 尾部形成 3 个翼长较长的外侧尾翼和 3 个翼长较短的内侧尾翼，且随着起爆直径的增大，内侧尾翼褶皱厚度变小，翼长变长。由图 7 可以看出，起爆直径从 20 mm 增大到 50 mm，EFP 的速度增高 5.1%，长径比增大 83.2%，尾翼 EFP 随起爆直径的增大变得细长。因此，增大起爆直径能够有效提高 EFP 侵彻能力，提高装药利用率。

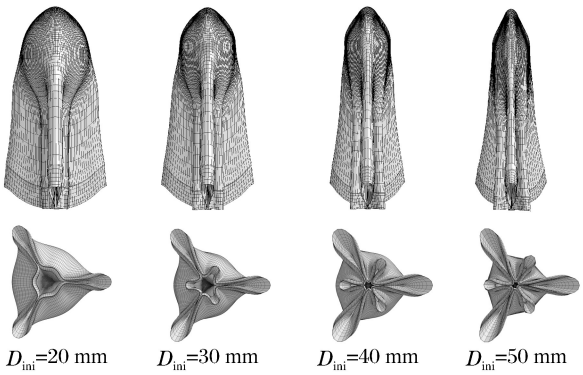


图 6 不同起爆直径下形成的 EFP 外形

Fig. 6 Shapes of EFPs formed at different initiation diameters

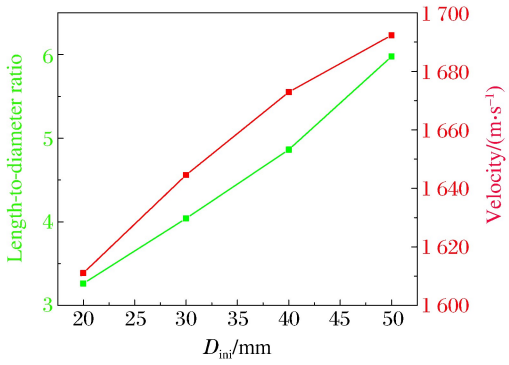


图 7 EFP 速度、长径比与起爆直径的关系曲线

Fig. 7 Length-to-diameter ratio and velocity of EFP varied with initiation diameter

2.2 不同起爆直径下尾翼 EFP 形成过程理论分析

由 1.3 节式(1)～(7)迭代求解计算出在起爆直径 D_{ini}=20,30,40,50 mm 下三波点轨迹的空间分布,进而得到马赫波对药型罩表面的作用范围,如图 8 所示。由式(8)～(9)计算出两两起爆点相互作用时的马赫超压,如图 9 所示。从图 8 可以看出,三点起爆形成的马赫杆作用于药型罩表面形成一个“人”字形的三叉高压区,对药型罩产生压垮,药型罩发生突起翻转。两两相邻起爆点形成的马赫杆在药型罩顶点中心发生叠加,形成中心超高压区,药型罩在中心超高压区作用下发生拉伸。同时,C-J 爆轰波作用区处的药型罩尾群向中心轴线压合,而处于三叉高压区处的药型罩在尾群向中心轴线压合过程中,三叉高压区阻止药型罩尾群向中心轴线压合,形成 3 个翼长较长的尾翼,即外侧尾翼,C-J 爆轰波作用区域处的药型罩向中心轴线压合过程中在 C-J 爆轰波作用区对称轴位置处形成 3 个翼长较短的尾翼,即内侧尾翼。从图 8 可以看出,起爆环直径越大,三叉高压区面积越小,C-J 爆轰波作用区面积越大,进而形成的 3 个内侧尾翼翼长越长。从图 9 可以看出,起爆直径越大,马赫超压越高,三叉高压区的压力越高,使得三叉高压区处的药型罩更难向中心轴线压合,进而加剧了 C-J 爆轰波作用区处药型罩向中心轴线压合,形成的 3 个内侧尾翼褶皱厚度减小,翼长增长。同时,起爆直径增大,马赫波叠加形成的三叉中心超高压区压力也增高,使得形成的尾翼 EFP 被拉伸得更加细长、长径比增大、速度增高。

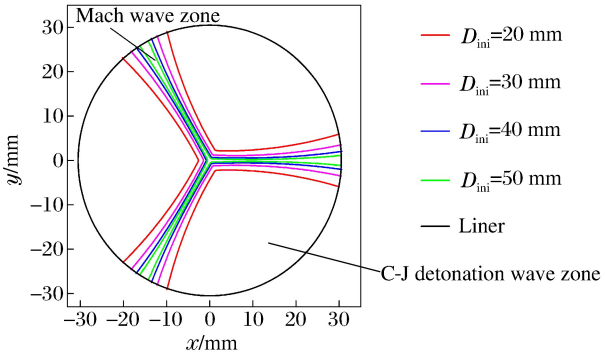


图 8 不同起爆直径下爆轰波对药型罩的作用范围

Fig. 8 Mach domain at metal liner by different initiation diameters

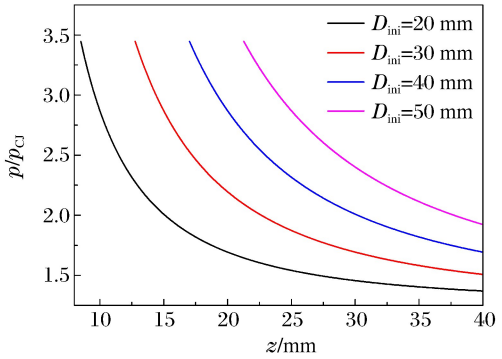


图 9 马赫波区的压力

Fig. 9 Pressure in Mach domain

3 同步误差对尾翼 EFP 成型性能的影响

3.1 计算方案设计

在实际中多点起爆网络起爆同步误差有一定的随机性,为了找出起爆同步误差对尾翼 EFP 成型的影响规律,将延迟起爆时间 Δt 分别设定为 0、50、100、150、200 和 300 ns,按起爆点分配得到 21 种工况,如表 3 所示,起爆点 O_1、O_2、O_3 的延迟时间分别为 Δt_1、Δt_2、Δt_3。

表 3　三点起爆同步误差分布

Table 3　Distribution of three-point initiation synchronization error

工况	Δt_1/ns	Δt_2/ns	Δt_3/ns	工况	Δt_1/ns	Δt_2/ns	Δt_3/ns	工况	Δt_1/ns	Δt_2/ns	Δt_3/ns
0	0	0	0	7	0	50	150	14	0	200	200
1	0	0	50	8	0	100	150	15	0	0	300
2	0	50	50	9	0	150	150	16	0	50	300
3	0	0	100	10	0	0	200	17	0	100	300
4	0	50	100	11	0	50	200	18	0	150	300
5	0	100	100	12	0	100	200	19	0	200	300
6	0	0	150	13	0	150	200	20	0	300	300

3.2　同步误差对 EFP 尾翼成型的影响

对表 3 所示的三点起爆偏差依次进行数值模拟，数值模拟过程中发现起爆同步误差对 EFP 尾翼的成型影响较大。为了研究起爆同步偏差对药型罩成型影响规律，考虑 2 种延迟起爆方案：方案 1，取工况 0、1、3、6、10、15；方案 2，取工况 0、2、5、9、14、20。对不同起爆直径下，不同方案所形成的尾翼 EFP 的 3 个外侧尾翼和 3 个内侧尾翼翼长进行测量，测量示意图如图 10 所示，3 个外侧尾翼翼长分别为 A_1、A_2、A_3，3 个内侧尾翼翼长分别为 a_1、a_2、a_3。对测量获得的 3 个外侧尾翼和 3 个内侧尾翼翼长进行标准差分析，结果如图 11 所示。

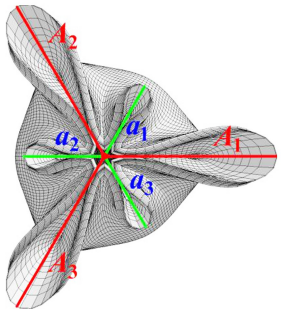


图 10　EFP 尾翼翼长测量示意图

Fig. 10　Schematic diagram of lengths of EFP fins

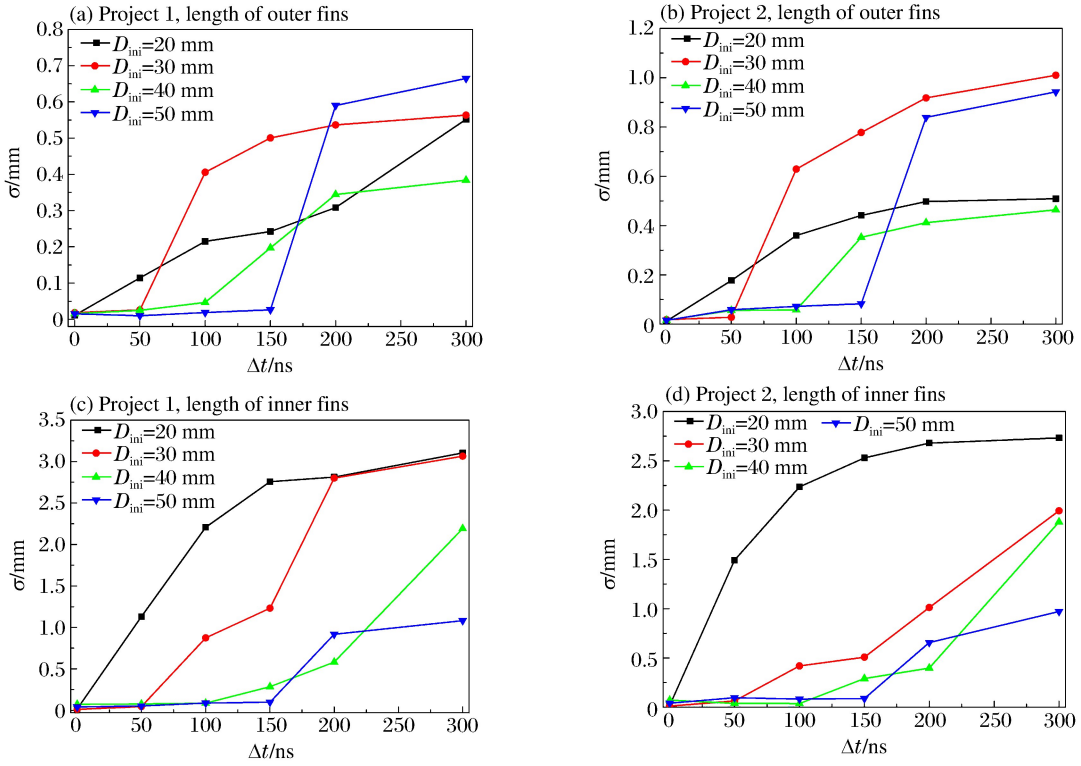


图 11　不同起爆直径下形成的 EFP 尾翼翼长偏差随延迟起爆时间的变化

Fig. 11　Deviations of fin lengths of EFPs formed under different initiation diameters varying with delay in time to initiation of detonation

从图 11 可以看出，2 种方案的内、外侧尾翼翼长偏差随起爆同步误差的变化规律基本一致。起爆直径 $D_{\mathrm{ini}}=30,40,50$ mm，延迟起爆时间 Δt 在 50、100、150 ns 以内，形成的 EFP 内、外侧尾翼翼长偏差比较小，说明形成的 EFP 尾翼较规则。随着延迟起爆时间增长，内、外侧尾翼翼长偏差增大，EFP 的尾翼变的不规则。而起爆直径 $D_{\mathrm{ini}}=20$ mm 时，只有延迟起爆时间 $\Delta t=0$ ns，即三点同时起爆，形成尾翼 EFP 的内、外侧尾翼翼长偏差较小，形成规则的 EFP 尾翼。因此，随着起爆直径的增大，形成规则 EFP 尾翼的最大起爆偏差在增大。

3.3 同步误差对 EFP 飞行速度影响

形成的尾翼 EFP 的飞行速度在空间坐标系分成 2 个分速度：沿装药轴线的轴向分速度 v_z，垂直于装药轴线的侧向分速度 v_{xy}。轴向分速度 v_z 保证 *EFP* 向前飞行，而侧向分速度 v_{xy} 会使 EFP 偏离预定轨道，对远距离攻击目标不利。分别对不同起爆直径下在表 3 所示的 21 种工况下尾翼 EFP 成型稳定后的侧向分速度 v_{xy} 进行统计，如图 12 所示。可以看出，随着最大延迟时间增长，v_{xy} 增大，不利于 EFP 远距离飞行。在图 12 中，Δt_2 在 $0\sim\Delta t_3$ 范围内，v_{xy} 呈抛物线规律变化，当 $\Delta t_2\approx\Delta t_3/2$ 时，v_{xy} 取最小值。因此，三点起爆成型装药形成的尾翼 EFP，当中间起爆点延迟时间约为最长延迟时间的一半时，侧向分速度 v_{xy} 最低。

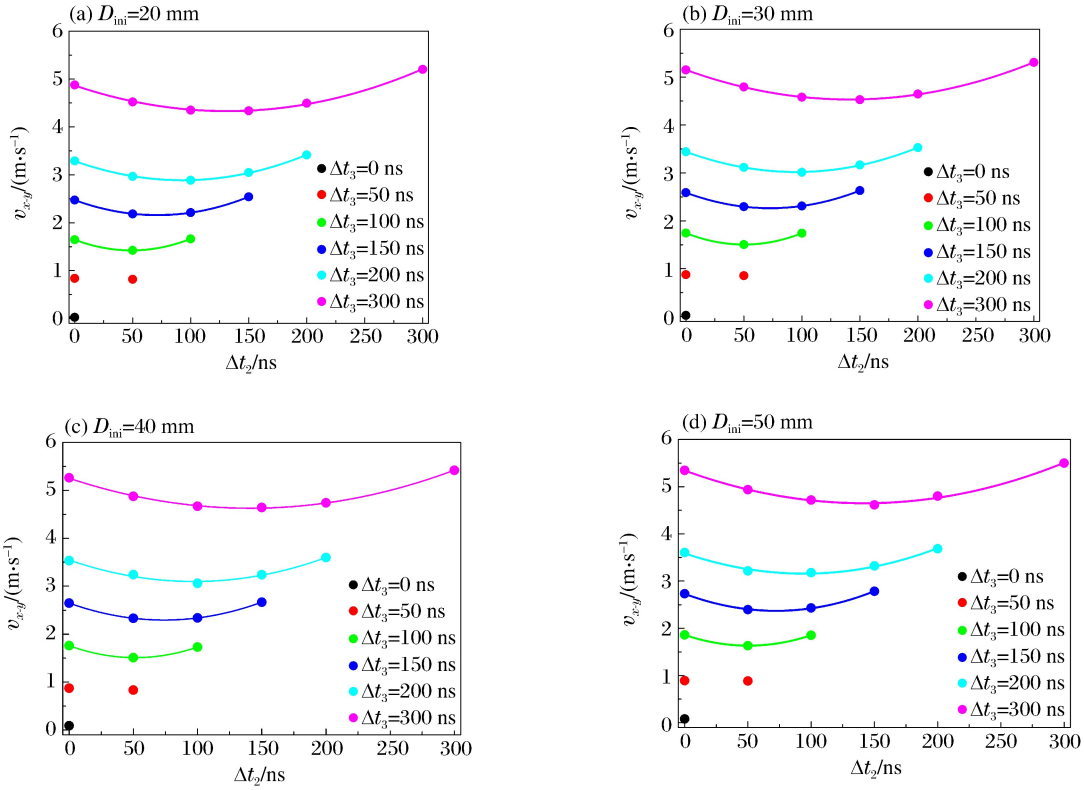


图 12 不同起爆直径下尾翼 EFP 的侧向分速度随中间起爆点起爆误差的变化

Fig. 12 Lateral velocity of the EFPs with fins under different initiation diameters varying with initiation synchronization error of the second initiation point

对轴向分速度 v_z 进行统计，如图 13 所示。可以看出，起爆直径一定的条件下，当 Δt_2 在 $0\sim\Delta t_3/2$ 范围内，v_z 略有降低；而当 Δt_2 在 $\Delta t_3/2\sim\Delta t_3$ 范围内，v_z 降低幅度较大。结合同步误差对 EFP 侧向分速度 v_{xy} 的影响分析，在实际中，应尽量使中间起爆点误差为最大误差的一半，这样可以降低水平分速度，提高尾翼 EFP 远距离飞行的稳定性，同时保证侵彻能力。

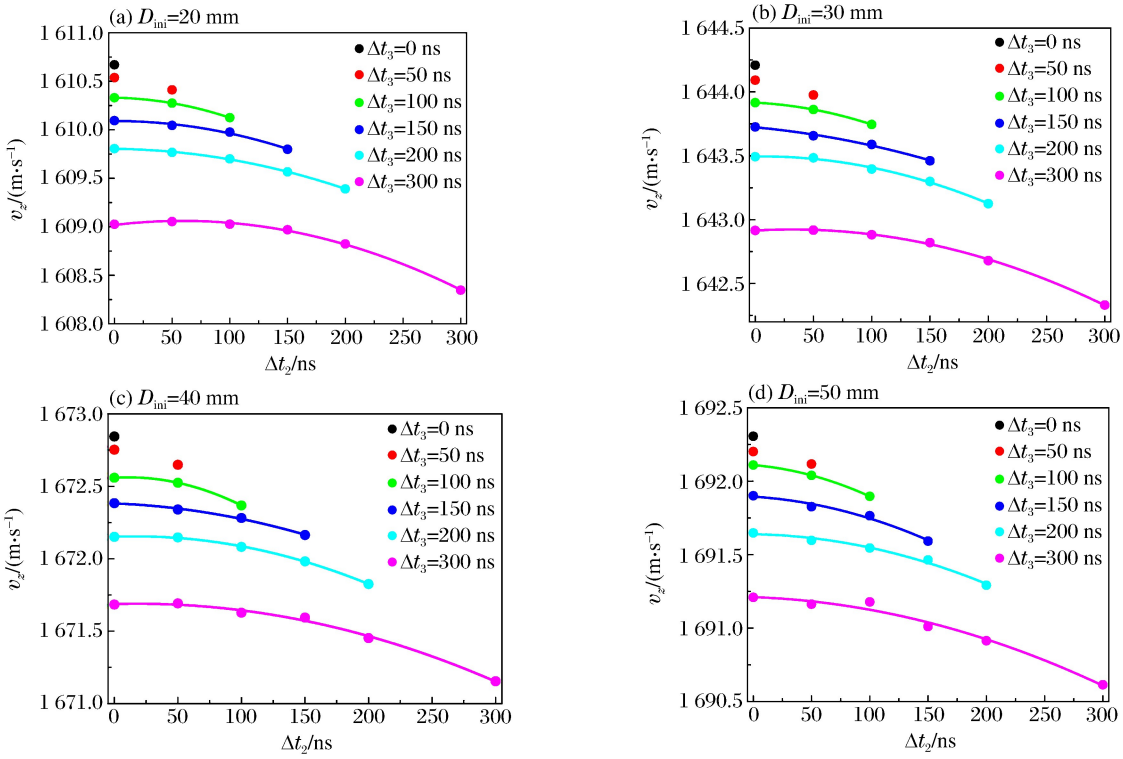


图 13　不同起爆直径下尾翼 EFP 的轴向分速度随中间起爆点起爆误差的变化

Fig. 13　Axial velocity of EFP with fins under different initiation diameters varying with initiation synchronization error of the second initiation point

4　结　论

(1)理论分析了三点起爆爆轰波马赫碰撞过程，计算获得了不同起爆直径下马赫超压及马赫波在药型罩上的作用范围，并进行了数值模拟验证，数值计算结果与理论计算结果基本吻合。随着起爆直径的增大，马赫波对药型罩的作用面积减小，马赫超压增高，形成的尾翼 EFP 的速度和长径比增大。

(2)对三点起爆直径 D_{ini}=30，40，50 mm，起爆同步误差分别在 50、100、150 ns 以内，内、外侧尾翼翼长偏差都较小，形成的 EFP 的尾翼较规则。随着同步误差增大，内、外侧尾翼翼长偏差不断增大，形成的 EFP 的尾翼不规则，影响 EFP 飞行的稳定性。

(3)随着起爆延迟时间增长，侧向分速度升高，不利于形成的尾翼 EFP 远距离飞行，因此，要控制起爆同步误差。实际过程中，尽量使中间起爆点起爆误差约为最大起爆误差的一半，这样有利于降低尾翼 EFP 的水平分速度。

参考文献：

[1]　BENDER D, CHHOUK B, FONG R, et al. Explosively formed penetrators (EFP) with canted fins[C]// 19th International Symposium on Ballistics. Interlaken, Switzerland, 2001:755-762.

[2]　于川，董庆东，孙承纬，等. 带尾翼翻转型爆炸成形弹丸试验研究[J]. 爆炸与冲击，2003，23(6)：561-564. DOI：10.3321/j. issn:1001-1455. 2003. 06. 013.
YU Chuan, DONG Qingdong, SUN Chengwei, et al. The experimental studies of explosively formed projectile with star shaped tail[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6):561-564. DOI: 10. 3321/j. issn:1001-1455. 2003. 06. 013.

[3]　BOUET T, TARAYRE P, GUILLON J P. Study of a multi-point ignition EFP[C]// 15th International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Israel, 1995:159-166.

[4]　CARDOSO D, TEIXEIRA D F. Modelling the formation of explosively formed projectile (EFP)[J]. International

Journal of Impact Engineering, 2016,93:116-127. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2016.02.014.

[5] 罗健,蒋建伟,朱宝祥. 多点起爆对 EFP 形成的影响研究[J]. 弹箭与制导学报,2004,24(2):27-29. DOI:10.3969/j.issn.1673-9728.2004.02.009.
LUO Jian, JIANG Jianwei, ZHU Baoxiang. The effect of multi-point initiation on the explosively formed penetrator formation[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004,24(2):27-29. DOI:10.3969/j.issn.1673-9728.2004.02.009.

[6] LI Weibing, WANG Xiaoming, LI Wenbin. The effect of annular multi-point initiation on the formation and penetration of an explosively formed penetrator[J]. International Journal of Impact Engineering, 2010,37(4):414-424. DOI:10.1016/j.ijimpeng.2009.08.008.

[7] 刘建青,郭涛,顾文彬,等. 三点起爆形成尾翼 EFP 的数值模拟和实验研究[J]. 爆炸与冲击,2013,33(1):38-46. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.01.005.
LIU Jianqing, GUO Tao, GU Wenbin, et al. Numerical simulation and experimental investigation of EFPs with fins formed by three point initiation[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(1):38-46. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2013.01.005.

[8] 王力,韩峰,陈放,等. 偏心对称起爆战斗部破片初速的增益[J]. 爆炸与冲击,2016,36(1):69-74. DOI:10.11883/1001-1455(2016)01-0069-06.
WANG Li, HAN Feng, CHEN Fang, et al. Fragments' velocity of eccentric warhead with double symmetric detonators[J]. Explosion and Shock Waves, 2016,36(1):69-74. DOI:10.11883/1001-1455(2016)01-0069-06.

[9] MULLER F. Mach-reflection of detonation waves in condensed high explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1978,3(4):115-118. DOI:10.1002/prep.19780030403.

[10] 王继海. 二维非定常流和激波[M]. 北京:科学出版社,1994:38-146.

[11] ZHU Chuansheng, HUANG Zhengxiang, ZU Xudong, et al. Mach wave control in explosively formed projectile warhead[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014,39(6):909-915. DOI:10.1002/prep.201400106.

Effects of three-point initiation control parameters on formation of explosively-formed projectiles with fins

LI Rui, LI Weibing, WANG Xiaoming, LI Wenbin

(*Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing* 210094, *Jiangsu, China*)

Abstract: Effects of the three-point initiation control parameters on the formation of an explosively-formed projectile (EFP) with fins were studied, including initiation diameter and initiation synchronization error. The Mach wave parameters (pressure and Mach wave domain area) at the metal liner were calculated theoretically at different initiation diameters. The fin formation and stable-flight velocity of EFP caused by the synchronization error at different initiation diameters were investigated by employing the LS-DYNA software. Results indicate that the Mach wave domain area decreases, but the pressure, final velocity and length-to-diameter ratio of the EFP increase, as the initiation diameter increases. It is noted that a better empennage formation can be approached when the initiation synchronization errors at the initiation diameters of 30, 40, 50 mm are less than 50, 100, 150 ns, respectively. In addition, the lateral velocity of the EFP is lower and the flight stability is higher when the delay time of the middle detonation point is about half the maximum delay time of the three initiation points.

Keywords: three-point initiation; initiation synchronization error; initiation diameter; EFP with fins

(责任编辑 张凌云)