

起爆方式对定向多爆炸成型 弹丸成型性能的影响

王芳¹, 周末¹, 纪刘奇²

(1. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081;

2. 中国兵器工业第二〇三研究所, 西安 710065)

摘要:采用 AUTODYN-3D 数值仿真软件模拟了不同起爆方式对定向多爆炸成型弹丸成型性能的影响, 并进行了验证。结果表明, 当采用单点起爆时, 弹丸的长径比最接近球形, 但速度较低且飞散角较大; 采用两点和三点起爆时, 随着起爆间距的增加, 弹丸的速度增加、飞散角降低、长径比增加, 三点起爆大间距下有弹丸头部碎裂、长径比过大等问题; 采用线起爆时弹丸速度最高, 同时具有较好的飞散角和长径比。当采用两点起爆, 起爆点间距为 60 ~ 80 mm 时, 弹丸的综合性能最好。

关键词:定向多爆炸成型弹丸(MEFP); 起爆方式; 数值模拟; 爆炸力学; 药型罩

本文引用格式:王芳, 周末, 纪刘奇. 起爆方式对定向多爆炸成型弹丸成型性能的影响[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(8): 5-9.

Citation format: WANG Fang, ZHOU Mo, JI Liuqi. Effect of Detonation Mode on Directional MEFP Warhead[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(8): 5-9.

中图分类号: TJ410.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)08-0005-05

Effect of Detonation Mode on Directional MEFP Warhead

WANG Fang¹, ZHOU Mo¹, JI Liuqi²

(1. Beijing Institute of Technology State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing 100081, China;

2. No. 203 Research Institute of China Ordnance Industries, Xi'an 710065, China)

Abstract: The influences of different detonation methods on the forming process of directional MEFP was simulated by AUTODYN-3D numerical simulation software. When single-point detonation was used, the length-diameter ratio of the projectile was the closest to the spherical shape, but the speed was lower and the flying angle was larger. When the two-point and three-point detonations were used, the velocity of the projectile increased with the increase of the detonations spacing. The flying angle was reduced, the length-diameter ratio was increased. The projectile head has fragmentation and excessive length-diameter ratio at a large spacing three-point detonation; The line detonated has the highest speed and good flying angle and length-diameter ratio. When using two-point detonations, detonations spacing is 60 ~ 80 mm, the overall performance of the projectile is best.

Key words: directional MEFP warhead; detonation mode; numerical simulation; explosive mechanics; liner

收稿日期: 2018-12-24; 修回日期: 2019-01-20

作者简介: 王芳(1972—), 女, 副教授, 主要从事战斗部设计与毁伤研究。

通讯作者: 周末(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事战斗部高效毁伤研究。

多爆炸成型弹丸(MEFP)是由爆炸成型弹丸(EFP)发展而来,李鹏等^[1]对周向 MEFP 进行了成型和毁伤的研究;赵长啸等^[2]对整体式 MEFP 的成型进行了研究;尹建平^[3]对网栅切割式 MEFP 进行了设计和优化。而这些 MEFP 战斗部通常为轴对称结构,药型罩分布于端面或周向,毁伤元的利用率较低,面对精确制导弹药的威胁,需要进一步提高反导弹药的命中精度和毁伤效果,这对打击的精确性和战斗部效能提出了更高的要求^[4]。想要增强战斗部的杀伤力,一是通过增加装药量、EFP 的数量,提高 EFP 的初速,增加战斗部的杀伤力;二是进行战斗部结构的创新设计与优化,提高 EFP 的利用率。

影响 EFP 成形性能的关键因素有装药性能、装药结构和结构参数等,而装药结构是 EFP 战斗部优化设计中的关键部件。在进行弹药设计时,装药质量受到战斗部整体结构的制约,因此通过增加装药质量来提高战斗部的威力方法受到了限制^[5]。为提高对导弹目标的拦截杀伤能力,又能保证一定的杀伤效率,本文针对一种定向多爆炸成型弹丸技术进行研究,利用 AUTODYN-3D 软件,数值模拟了起爆方式对定向 MEFP 成型的影响,进而得到毁伤元成型参数随起爆方式的变化规律,为定向 MEFP 的进一步研究提供了参考。

1 战斗部结构设计

本文设计的定向 MEFP 战斗部的原理样机结构如图 1 所示。其中柱形炸药装药的横截面形状为 D 形;9 枚变壁厚半球缺式药型罩在 D 形装药的轴向平面上等距离均匀分布,并通过铝扣板与带壳体的装药结构固连。战斗部原理样机的具体结构参数:战斗部口径:140 mm;药型罩材料:Ta2.5W;药型罩口径,30 mm;药型罩质量,24.76 g;药型罩数量:9 枚;药型罩间距:3 mm。装药采用 Octol,起爆点位置位于 D 形装药的圆周外侧面与轴向平面相对的位置。

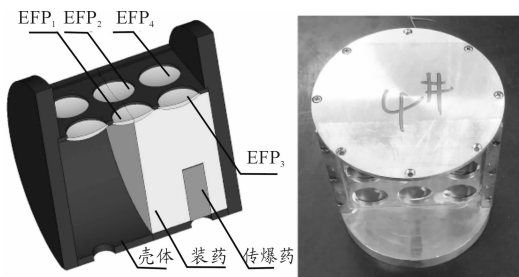


图 1 定向战斗部原理样机 1/2 结构和实验图

当单点起爆时,起爆点位于中心位置;两点起爆时,起爆点沿着轴线方向相对中心对称布置;三点起爆时,中心起爆点固定在中心对称面位置,其余两点和两点起爆时布置方式相同,三点共线排布;线起爆时,导爆药柱延轴线方向布置在横截面最大直径处。

图 2 为药型罩结构示意图,药型罩外曲率半径 R_1 取 28 mm,内曲率半径 R_2 取 46 mm,药型罩中心厚度 h_1 取 3 mm,

药型罩整体厚度 h_2 取 5.2 mm。

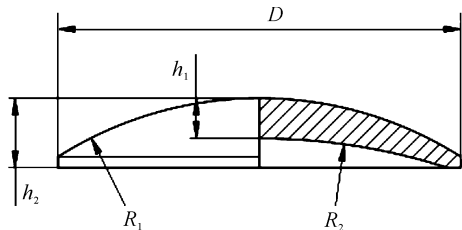


图 2 药型罩结构示意图

2 定向 MEFP 战斗部成型数值模拟

2.1 仿真模型和成型过程模拟

本文中,采用爆炸动力学分析软件 AUTODYN-3D 进行数值模拟,计算中假设炸药和药型罩均为连续均匀介质,装药起爆后的整个爆炸过程为等熵绝热过程。在 EFP 的成型过程中均不考虑空气阻力及重力作用的影响。炸药材料为 Octol,密度 $1.821 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,爆速 $8480 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;药型罩材料为 Ta2.5W,密度 $16.654 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$;壳体材料为 LY12 铝合金,密度为 $2.785 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。仿真计算模型中使用的材料参数及本构模型已经经过试验验证,具体详见文献[6]。有限元模型如图 3 所示。

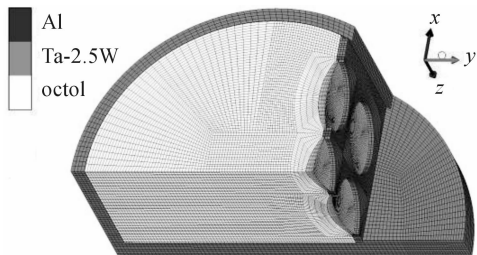


图 3 有限元模型

模型的每个药型罩口部和中心各设置 3 个拉格朗日观察点,以确定爆轰加载结束时药型罩在此处的微元的速度,起爆方式为两点起爆,起爆点间距为典型值 70 mm,位于径向对称面的 2 号药形罩的 EFP 成型过程如图 4 所示。罩口罩底部微元速度变化曲线如图 5 所示。

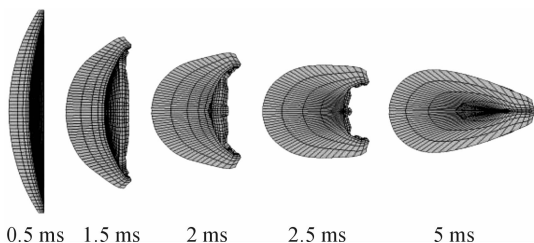


图 4 EFP 成型过程

由图 4 可以看出,爆轰加载结束后,药型罩各微元存在速度梯度,药型罩在爆轰波作用下快速合拢,1.5 ms 时开始

向前合拢,在 2.5 ms 时合拢并发生口部撞击;5.0 ms 合拢形成水滴形 EFP,头部尖,质量集中在较圆的后部;由于不同位置的药型罩受到冲击波加载的角度和波形不同,产生不同的成型形状,不同编号的药型罩形成 EFP 的成型结果如图 6 所示。

本文每个 EFP 对应的药型罩编号从左到右分别是 1、2、3、4。

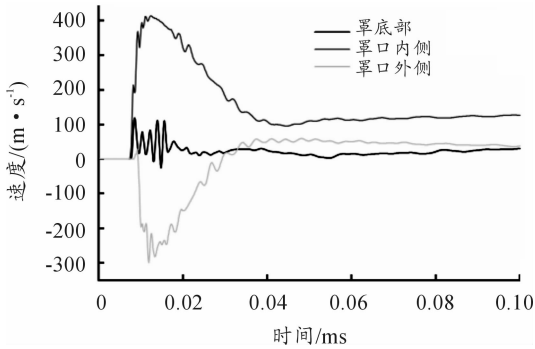


图 5 2 号药型罩不同位置微元的速度变化曲线

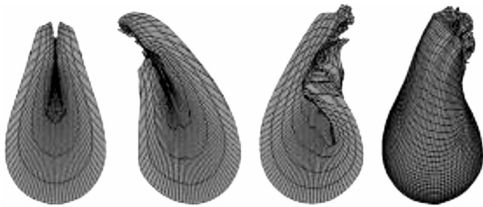


图 6 不同位置药型罩成型结果

由图 4、图 6 可以看出,由于每个药形罩位置的不同,爆轰波作用在药型罩上的角度均不相同,使得不同位置的药型罩的成型性能有着较大的差距,2~4 号药型罩由于偏心起爆的原因导致药型罩各个微元之间产生了横向速度差,在向前闭合的成型过程中,药型罩获得了一定的侧向速度。由 Blachel 等^[7]的研究表明,相对于长杆型弹丸,球形弹丸的气动性能更优秀。本文的研究目标就是对影响 EFP 成型性能和飞散方向的主要因素进行分析,以期得到速度较快、线密度大、长径比小的多个 EFP。

2.2 起爆方式对 MEFP 战斗部成型的影响

本文采用点起爆和线起爆,起爆点数量和间距的变化主要改变的是爆轰波波形,不同起爆点数量和间距产生的爆轰波对药型罩的加载角度会不同,这对药型罩的成型性能和速度有较大的影响,也会改变 EFP 的飞散角,飞散角为 EFP 速度矢量和战斗部中心朝向的法线夹角,影响在一定距离内定向 MEFP 战斗部的打击面积和弹丸的线密度,这对目标的命中率和打击效果有重要影响,本文根据起爆方式的和起爆点间距不同设置了不同的仿真计算工况,两点起爆的起爆点间距 40~90 mm,每个工况增加 10 mm,三点起爆的起爆点间距 20~45 mm,每个工况增加 5 mm。

2.2.1 单点起爆

图 7 为单点起爆时各弹丸的成型效果。EFP 的各项成形参数见表 1。

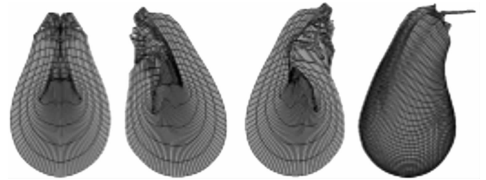


图 7 单点起爆时各弹丸的成型效果

表 1 单点起爆时各 EFP 成型参数

EFP 序号	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	飞散角/($^{\circ}$)	长径比
1	1 521	0	1.64
2	1 518	3.00	1.75
3	1 515	2.58	1.77
4	1 512	3.62	1.82

由表 1 可以看出,在单点起爆时,各个位置的 EFP 速度相差不大,总体保持稳定在 $1\,515\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右;除中心 1 号 EFP 外,各个位置的 EFP 飞散角均在 2.5° 以上;从图 7 来看,各 EFP 较为接近准球形,重心集中,其中 1 号药型罩的长径比最小,其他 EFP 均有一定的头部歪斜,其中 2 号药型罩口部出现了一定程度的碎裂,长径比最大为 1.82。

2.2.2 两点起爆

图 8 是不同起爆点间距下的药型罩参数曲线。

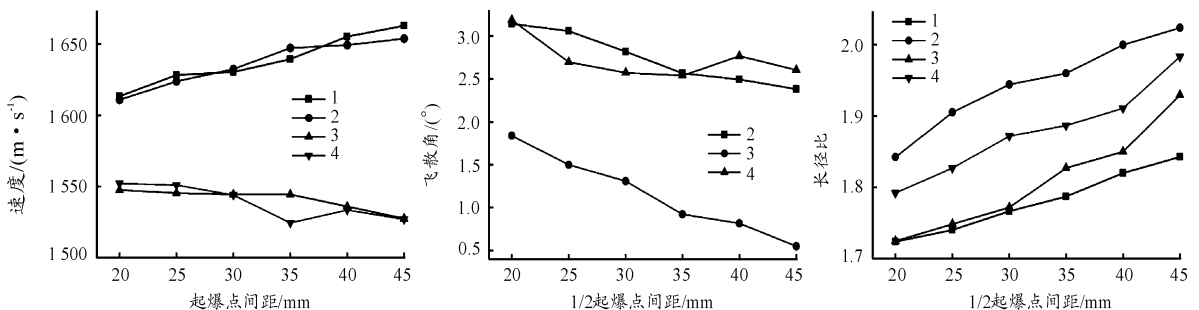


图 8 定向 MEFP 成型参数随两起爆点间距变化曲线

由图 8 可知,随着起爆点间距的增加,1、2 号的药型罩的 EFP 速度呈线性增加,总计速度增幅达到了 6.1%,而 3、4 号外围药型罩的 EFP 速度保持稳定且略微下降,降幅最大 3%,受起爆点间距的影响较小;随着起爆点间距的增加,除了中心 1 号药型罩的 EFP 外,飞散角度都随着起爆点间距的增加而降低,其中 2 号和 4 号药型罩的 EFP 的降幅较小,分别为 24.2% 和 18.4%,而 3 号药型罩的 EFP 飞散角降幅较大,达到了 70.1%;随着起爆点间距的增加,EFP 的长径比整体呈线性上升趋势,1 号 EFP 的长径比最小,3、2、4 号 EFP 长径比依次增加,1 号 EFP 增幅最小,约为 7%,其余 EFP 长径比增幅均在 12% 左右;可见两点起爆时起爆点间距的影响主要体现在 EFP 的飞散程度和长径比上。

图 9 为两点起爆时,不同起爆点间距下各弹丸的成型效果,每个 EFP 对应的药型罩编号从左到右分别是 1、2、3、4。可以看出,随着起爆点间距的增加,EFP 的长径比逐渐增加,头部被拉长,成型质量有所下降。因此,综合图 8、图 9 考虑,

两点起爆的最佳的起爆间距取值范围为 60 ~ 80 mm。

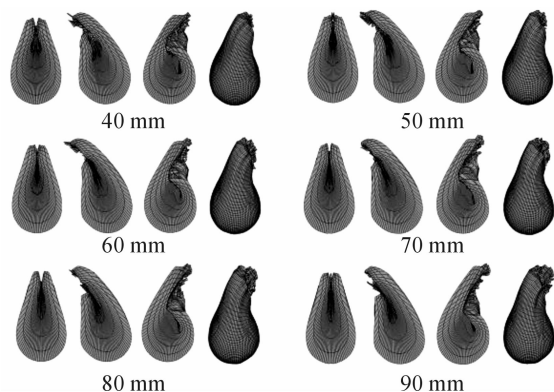


图 9 两点起爆时不同起爆点间距下各弹丸的成型效果

2.2.3 三点起爆

图 10 是三点起爆时不同起爆点间距下的药型罩参数曲线。

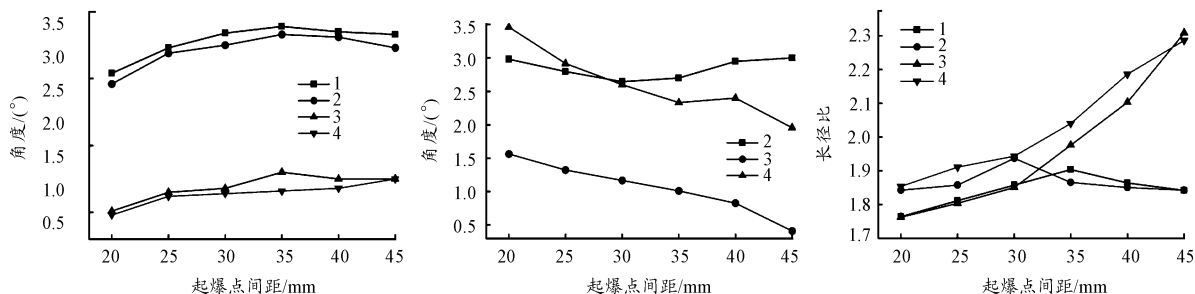


图 10 定向 MEFP 成型参数随三起爆点间距变化曲线

由图 10 可知,随着起爆点间距的增加,1、2 号药型罩的 EFP 速度先增加后下降,由图 11 可以看出,这是因为 EFP 合拢时罩口部侧向速度过大造成了一定的碎裂,导致 EFP 的速度下降,而 3、4 号外围药型罩的 EFP 速度保持稳定;随着起爆点间距的增加,除了中心 1 号 EFP 外,3、4 号 EFP 的飞散角度都随着起爆点间距的增加而降低,降幅分别为 73.6% 和 38%,而 2 号 EFP 的飞散角保持稳定。随着起爆点间距的增加,EFP 的长径比整体呈线性上升趋势,在起爆间距为 40 mm 和 45 mm 时,1、2 号 EFP 同样是因为碎裂导致长径比急剧下降,而 3、4 号 EFP 急剧拉长变形,长径比迅速增加。

图 11 为三点起爆时,不同起爆点间距下各弹丸的成型效果,可以看出,随着起爆点间距的增加,1 号药型罩的 EFP 变化不明显;2 号药型罩的 EFP 逐渐产生了一定程度的拉断,成型质量下降;3 号 EFP 的长径比逐渐增加,头部被拉长,成型质量下降明显,因此,综合图 10、11 考虑,两点起爆的最佳的起爆间距取值范围为 25 ~ 35 mm。

2.2.4 线起爆

图 12 为线起爆时各弹丸的成型效果。EFP 的各项成形参数见表 2。

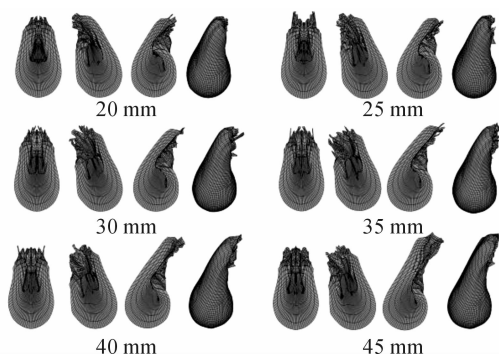


图 11 三点起爆时不同起爆点间距下各弹丸的成型效果

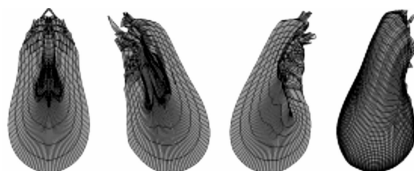


图 12 单点起爆时各各弹丸的成型效果

表2 线起爆时各 EFP 成型参数

EFP 序号	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	飞散角/($^{\circ}$)	长径比
1	1 720	0	1.92
2	1 692	2.84	1.94
3	1 595	0.72	1.98
4	1 578	1.66	2.12

由表2可以看出,在线起爆时,处于径向对称面上的1、2号EFP速度较高,而3、4号EFP的速度较低,两组有8%的差距,均速较大;各个位置的EFP飞散角均低于 3° ,飞散特性表现优异;从图12来看,各EFP均有一定程度的拉长,EFP均有一定的头部歪斜,其中1、2号药型罩口部出现了一定程度的碎裂,长径比最大为2.12;对比三点起爆的EFP参数,在保证一定程度的长径比的情况下,提高了EFP速度,减小了飞散角,具有一定的优势。

3 验证

基于上述仿真计算结果,设计了一种定向MEFP战斗部,为了检验优化的战斗部结构能否满足设计标准以及仿真结果的可靠性,对该战斗部进行静爆试验,战斗部摆放和脉冲X光摄影的布置如图13所示。

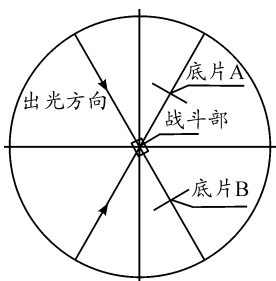


图13 实验现场布置

选取单点起爆和起爆点间距为70 mm的两点起爆进行试验,图14、图15为仿真计算中获得的EFP和试验中EFP的形态,表3列出了实验速度和仿真测速的数据,在误差允许范围内,仿真计算中的EFP和脉冲X光照片中的EFP的形状,长径比较为吻合;由于实验设备和材料的加工及装配精度,仿真计算精度和空气阻力以及底片和出光方向的垂直度等不可抗因素的影响,仿真计算的EFP速度、姿态等和实验中测得的数据存在一定差距。

表3 仿真和实验的3号EFP的速度和长径比

EFP	速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	长度/mm	直径/mm	长径比
实验1	1 250	23.9	13.2	1.81
仿真1	1 521	21.1	12.87	1.90
实验2	1 487	24.2	12.7	1.91
仿真2	1 679	21.8	12.2	1.79

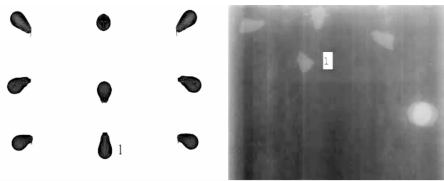


图14 单点仿真和实验A相EFP成型形状

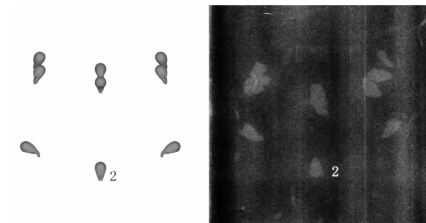


图15 两点仿真和实验B相EFP成型形状

4 结论

1) 采用单点起爆时,中心弹丸长径比最小,但是整体速度较低、飞散角较大;当两点和三点起爆时,起爆点间距对弹丸成型的影响主要体现在形状上,对速度影响相对较小,随着起爆点间距的增加,飞散角减小,长径比增加;线起爆时,EFP的速度最大,飞散角较小,长径比大,具有较强的侵略性但气动性能下降。

2) 对于定向MEFP战斗部,当采用两点起爆,起爆点间距为60~80 mm时,形成的EFP速度、线密度、气动性能和侵略能力等综合性能较优。

3) 静爆试验结果表明,所设计的战斗部成型效果和仿真结果吻合良好,验证了仿真计算模型的有效性。

参考文献:

- [1] 李鹏,袁宝慧,孙兴昀,等. 偏心起爆周向多爆炸成型弹丸战斗部实验研究[J]. 兵工学报,2017,38(3):447-453.
- [2] 赵长啸,冉东岳,刘凯,等. 装药参数对整体式多爆炸成型弹丸成型的影响[J]. 含能材料,2017,25(11):882-887.
- [3] 尹建平,付璐,王志军. 网栅切割式多爆炸成型弹丸战斗部正交优化设计[J]. 弹箭与制导学报,2012,32(2):69-72.
- [4] 张蓬蓬,张俊宝,宋琛. 定向战斗部在空空导弹上的应用分析[J]. 电光与控制,2015,22(3):93-96.
- [5] 尤杨. 多点偏心起爆战斗部的旋转定向及杀伤效应研究[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [6] 郭子涛,舒开鸣,高斌,等. 基于J-C模型的Q235钢的动态本构关系[J]. 爆炸与冲击,2018,38(4):804-810.
- [7] BLACHE A, WEIMANN K. Multi-EFP-charge for light-weight armor defeat[C]//18th International Symposium on Ballistics. CRC Press,1999:419.