

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.03.006

基于冲击片雷管的多点同步起爆系统研究^{*}

梁车平 张玉若 金 丽 何 强 魏增强 韩克华
陕西应用物理化学研究所(陕西西安,710061)

[摘 要] 针对 EFP 战斗部多点同步起爆系统所使用的常规电雷管安全性低和爆炸网络同步性差的问题,基于爆炸箔起爆技术固有的高安全特性,以 2 发或 3 发冲击片雷管串联为多点起爆系统的基本单元,设计了 3 点、4 点、6 点和 9 点同步起爆系统,并进行了多点起爆同步性测试。试验结果表明:3 点、4 点同步起爆同步性时间均小于 100 ns,最大同步性时间散布较小,满足设计要求;6 点和 9 点同步起爆同步性时间都超过了 100 ns,并且最大同步性时间散布较大。经分析,每组雷管之间等效电阻和等效电感等参数具有差异,造成不同组别的雷管发火回路性能有差别,故引起各起爆支路的电流不一致,导致桥箔的爆发电流和爆发电流密度的差异,从而影响起爆的同步性。

[关键词] 爆炸箔起爆器;EFP 战斗部;多点同步起爆系统;同步性

[分类号] TD235.2⁺2;TQ565⁺.2

Research on a Multi-point Simultaneous Initiation System Based on EFI

LIANG Cheping, ZHANG Yuruo, JIN Li, HE Qiang, WEI Zengqiang, HAN Kehua
Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710061)

[ABSTRACT] Due to the low safety of conventional electric detonator used in multi-point simultaneous initiation system of EFP warhead and bad synchronization of explosive network, three-point, four-point, six-point and nine-point synchronized detonation systems were designed based on high safety characteristics of explosion foil initiation (EFI) technology, and using two or three EFI in series as the basic unit. Multi-point synchronization trials were carried out. The results show less than 100 ns synchronization time and concentrated distribution of the maximum synchronization time for three-point and four-point systems, which meets the design requirements, and more than 100 ns synchronization time and dispersed distribution of the maximum synchronization time for six-point and nine-point system. According to the analysis, the difference in parameters of resistance and equivalent inductance between each group of detonators equivalent causes the variation in their detonator firing circuit performances. As a result, the affected current of each initiation branch will create difference in burst current and burst current density of bridge foil which finally affects synchronization.

[KEYWORDS] explosion foil initiator (EFI);EFP warhead;multi-point simultaneous initiation system;synchronism

引言

EFP(explosively formed projectile)战斗部可以依据目标特点,采用相应的中心单点起爆、平面起爆、环形起爆和多点同步起爆等不同起爆方式,形成不同速度的杆式弹丸,产生不同的毁伤效果和毁伤模式^[1-3]。起爆点数和多点起爆同步时间对 EFP 有很大影响,随着起爆点数的增加,不仅可以形成具有良好气动外形的 EFP,并且能增加 EFP 的速度,提

高毁伤效果;多点同步起爆时间散布越小,EFP 飞行越稳定,破片密集度越好^[4-5]。利用不同的多点起爆组合方式,使高效毁伤战斗部技术向多功能化、多用途化发展,可实现武器弹药系统的多目标、多模式作用效果^[6-8]。目前,国内 EFP 战斗部多点同步起爆方式采用的都是多发常规电雷管或爆炸同步网络技术^[9-10]。常规电雷管作用时间长,同步性散布较大,在起爆点数较多的情况下无法满足同步性散布较小的要求;另外,大量常规电雷管的使用导致武器系统安全性下降,爆炸同步网络传爆序列在实际使用中

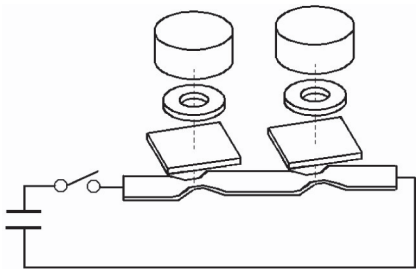
^{*} 收稿日期:2017-12-05
作者简介:梁车平(1983 -),男,硕士研究生,工程师,从事直列式起爆/点火系统设计研究。E-mail:liangche ping@163.com

的能量匹配问题、传爆线路可靠性等问题也较难控制。基于爆炸箔起爆技术固有的高安全特性,笔者设计了基于冲击片雷管(又叫爆炸箔起爆器,exploding foil initiator,EFI)的多点同步起爆系统。

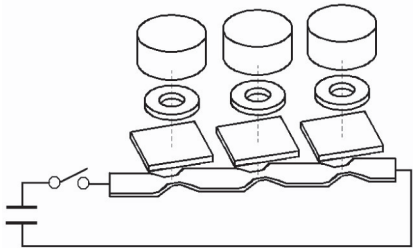
1 多点同步起爆系统设计

冲击片雷管需要在特定的强电流、窄脉冲(峰值电压 1~3 kV,峰值电流 2~4 kA,电流上升速率 $di/dt \geq 1\,000\text{ A/s}$)条件下才能可靠起爆^[11-12]。在多点同步起爆系统设计时,如果使用多个起爆电路来起爆多个冲击片雷管,会存在一些问题:1)使用多个起爆电路,会导致系统体积较为庞大;2)多个起爆电路的导通时间散布较大,会影响多点同步起爆系统的时间同步性;3)所使用的分立电子器件和起爆单元较多,会影响系统可靠性。

以 2 发或者 3 发冲击片雷管串联的形式作为多点起爆系统的基本单元,进行多点同步起爆系统设计,可以在保证冲击片雷管起爆裕度的基础上,提高系统同步性及可靠性,并有效地减小系统电路体积。起爆回路基本单元原理如图 1 所示。



(a) 2 点串联基本单元



(b) 3 点串联基本单元

图 1 起爆回路基本单元原理图

Fig. 1 Principle chart of the basic unit of electric ignition circuit

2 多点同步起爆系统试验

2.1 试验方法及设备

试验中使用到了中国兵器工业第二一三研究所生产的某型号冲击片雷管、自制高压脉冲功率源、自

制多通道时间记录仪以及瑞典 Scandiflash AB 公司的 300 kV 闪光 X 射线系统。

利用高压脉冲功率源进行多点起爆试验,利用多通道时间记录仪进行同步性测试,该设备可以记录每一个起爆点的作用时间,每 2 点作用时间差即为同步性时间,其中同步性时间数据里最大值为最大同步时间。

2.2 同步性测试

2.2.1 3 点同步性测试

实现基于冲击片雷管的 3 点同步起爆时,对 3 发冲击片雷管串联起爆同步性进行测试,进行了 6 组试验,同步性测试数据如表 1 所示。

表 1 3 点同步起爆试验

Tab. 1 Three-point simultaneous initiation test

| 组别 | 电阻/ mΩ | 电感/ nH | 起爆电压/ kV | 最大同步 时间/ns |
|----------------|-----------|-----------|-------------|---------------|
| 1 [#] | 126.1 | 101.2 | 2.6 | 42.7 |
| 2 [#] | 121.7 | 93.7 | 2.6 | 41.1 |
| 3 [#] | 119.8 | 97.1 | 2.6 | 38.9 |
| 4 [#] | 130.0 | 104.2 | 2.6 | 47.6 |
| 5 [#] | 119.2 | 99.4 | 2.6 | 38.1 |
| 6 [#] | 127.4 | 107.1 | 2.6 | 44.2 |

2.2.2 4 点同步性测试

实现基于冲击片雷管的 4 点同步起爆时,先将 2 发冲击片雷管进行串联,再将串联后电阻相近的两组进行并联,得到 4 点同步起爆系统。对 4 发冲击片雷管起爆同步性进行测试,进行了 6 组试验,同步性测试数据如表 2 所示。

表 2 4 点同步起爆试验

Tab. 2 Four-point simultaneous initiation test

| 组别 | 电阻/ mΩ | 电阻离 差/mΩ | 电感/ nH | 电感离 差/nH | 起爆电 压/kV | 最大同步 时间/ns |
|----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|---------------|
| 1 [#] | 41.6 | 6.9 | 57.8 | 11.5 | 2.6 | 84.8 |
| 2 [#] | 39.7 | 5.6 | 59.4 | 7.6 | 2.6 | 42.0 |
| 3 [#] | 41.3 | 6.0 | 58.1 | 6.8 | 2.6 | 40.8 |
| 4 [#] | 42.2 | 5.9 | 59.8 | 7.5 | 2.6 | 48.0 |
| 5 [#] | 39.5 | 5.5 | 57.9 | 7.2 | 2.6 | 39.7 |
| 6 [#] | 40.4 | 6.5 | 58.6 | 7.4 | 2.6 | 45.3 |

2.2.3 6 点同步性测试

实现基于冲击片雷管的 6 点同步起爆时,先将 3 发冲击片雷管进行串联,再将串联后电阻相近的两组进行并联,得到 6 点同步起爆系统。对 6 发冲击片雷管起爆同步性进行测试,进行了 6 组试验,同步性测试数据如表 3 所示。

表 3 6 点同步起爆试验

Tab. 3 Six-point simultaneous initiation test

| 组别 | 电阻/ mΩ | 电阻离 差/mΩ | 电感/ nH | 电感离 差/nH | 起爆电 压/kV | 最大同步 时间/ns |
|----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|---------------|
| 1 [#] | 56.2 | 7.9 | 99.5 | 14.8 | 3.2 | 113.8 |
| 2 [#] | 63.3 | 6.6 | 95.1 | 11.5 | 3.2 | 89.0 |
| 3 [#] | 59.2 | 9.0 | 104.3 | 16.6 | 3.2 | 117.2 |
| 4 [#] | 60.0 | 8.9 | 98.6 | 12.4 | 3.2 | 107.0 |
| 5 [#] | 56.8 | 8.5 | 101.5 | 11.9 | 3.2 | 97.9 |
| 6 [#] | 60.5 | 8.5 | 103.0 | 10.5 | 3.2 | 86.3 |

2.2.4 9 点同步性测试

实现基于冲击片雷管的 9 点同步起爆时,先将 3 发冲击片雷管进行串联,再将串联后电阻相近的 3 组进行并联,得到 9 点同步起爆系统。对 9 发冲击片雷管起爆同步性进行测试,进行了 4 组试验,同步性测试数据如表 4 所示。

表 4 9 点同步起爆试验

Tab. 4 Nine-point simultaneous initiation test

| 组别 | 电阻/ mΩ | 电阻离 差/mΩ | 电感/ nH | 电感离 差/nH | 起爆电 压/kV | 最大同步 时间/ns |
|----------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-------------|---------------|
| 1 [#] | 39.4 | 8.4 | 98.0 | 13.8 | 3.8 | 137.9 |
| 2 [#] | 38.9 | 9.4 | 98.7 | 10.0 | 3.8 | 96.4 |
| 3 [#] | 40.2 | 10.2 | 99.2 | 15.9 | 3.8 | 188.2 |
| 4 [#] | 38.6 | 8.5 | 98.3 | 11.4 | 3.8 | 102.5 |

根据文献[4]和文献[6]的结论可知,EFP 战斗部的多点同步起爆时间应控制在 100 ns 以内。从表 1 和表 2 测试数据可以看出,冲击片雷管 3 点、4 点起爆同步性较好,3 点同步起爆同步性均小于 50 ns;4 点同步起爆除了 1 组同步性为 84.8 ns 之外,其余 5 组起爆同步性均在 50 ns 以内。测试结果说明,基于冲击片雷管的 3 点、4 点同步起爆系统设计方案是合理可行的。通过对金属桥箔制作、雷管装配工艺、系统结构设计等方面加强质量控制,提高冲击片雷管的一致性,将冲击片雷管 4 点起爆阵列爆炸同步性控制在 50 ns 之内是能够实现的。

但是从表 3 和表 4 测试数据可以看出,基于冲击片雷管的 6 点同步起爆数据中,最大同步性时间里的峰值为 117.2 ns,最小值为 86.3 ns,6 组里的最大同步时间平均值为 101.87 ns;而基于冲击片雷管的 9 点同步起爆数据中,最大同步性时间里的峰值为 188.2 ns,最小值为 96.4 ns,4 组里的最大同步时间平均值为 131.25 ns,9 点同步起爆试验数据较少,还需进一步进行试验验证。以上这两种设计同步性时间都超过了 100 ns,并且最大同步性时间散

布较大。

影响单发冲击片雷管作用时间的主要因素是桥箔电爆时间、飞片速度、药柱作用时间以及壳体的厚度。在规定的发火能量条件下,同批次的产品,其作用时间散布较小,在多点同步起爆时,以上条件对同步性影响因素较小。影响多点同步起爆同步性时间的主要因素是每组雷管之间等效电阻和等效电感等参数的差别。由于每发冲击片雷管电阻和电感参数的不同,导致了每组雷管之间等效电阻和等效电感等参数的差异,造成不同组别的雷管发火回路性能有差别,故而影响各起爆支路的电流不一致,导致桥箔的爆发电流和爆发电流密度的差异,从而影响了同步性。通过对其发火回路与等效参数进行优化设计,以及冲击片雷管的参数设计,可以控制多点同步起爆同步性时间的散布。

2.3 爆炸过程拍摄

利用闪光 X 射线拍摄冲击片雷管多点同步起爆系统的照片如图 2 所示。

图2(a)是3点同步起爆过程,是从起爆回路瞬

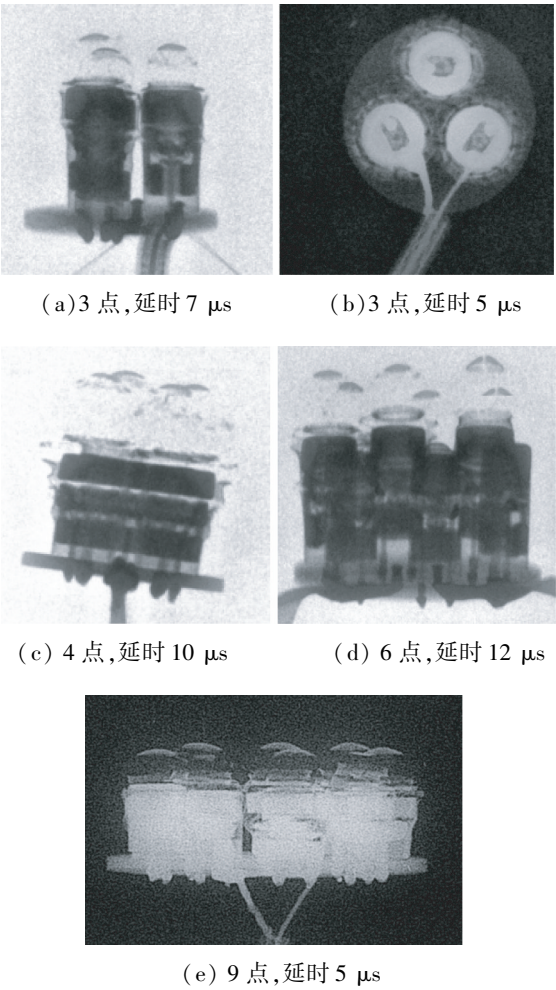


图 2 冲击片雷管多点同步起爆过程

Fig. 2 Multi-point simultaneous initiation of EFI

间导通、窄脉冲形成时刻起,延时 7 μs 时刻的起爆过程。从图 2(a)可以看出,雷管爆炸后底部金属壳体形成的破片高度较为一致。图 2(b)是 3 点同步起爆的横向拍摄照片,是从起爆回路瞬间导通、窄脉冲形成时刻起,延时 5 μs 时刻的爆炸过程。由图 2(b)可以看出,雷管爆炸后周围有一圈小破片,形成一个圆环状,这 3 个圆环直径几乎一样,说明 3 点作用过程一致,爆炸同步性较好。图 2(c)是 4 点同步起爆、延时 10 μs 时刻的爆炸过程。图 2(d)是 6 点同步起爆、延时 12 μs 时刻的爆炸过程。图 2(e)是 9 点同步起爆、延时 5 μs 时刻的爆炸过程。

从图 2 可以看出,在延时 5 μs 时刻时,雷管完全爆炸,雷管金属壳体形成的破片已经飞出一定的高度,证明了冲击片雷管的作用时间短、瞬发度高;其次在延迟一定的时间后,雷管爆炸后底部破片飞出高度较为一致,说明冲击片雷管多点同步起爆同步性较好,符合同步性测试数据,基于冲击片雷管的多点同步起爆系统满足 EFP 战斗部的多点同步起爆设计要求。

由于闪光 X 射线拍摄速度快,时间短(10^{-8}s),图 2 图片上雷管底部破片高度不太一致,这是由于在实物放置时,高度不是水平原因造成的,属于拍摄角度引起的拍摄误差,可以忽略。

3 分析

3.1 起爆回路特性

将冲击片雷管作为负载接入高压脉冲功率源输出端,整个起爆回路从原理上可以等效成为一个 RLC 串联电路,如图 3 所示。

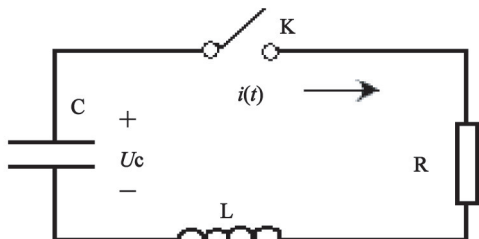


图 3 起爆回路等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of the electric ignition device

根据基尔霍夫电压定律(KVL)可列出回路方程

$$LC \frac{d^2 i(t)}{dt^2} + RC \frac{di(t)}{dt} + i(t) = 0. \quad (1)$$

解方程(1),可得放电电流公式

$$i(t) = \frac{U_c}{\omega L} e^{-\delta t} \sin \omega t. \quad (2)$$

其中

$$\delta = \frac{R}{2L}; \omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}.$$

根据爆发电流效应定义

$$G_b = \int_0^{t_b} i^2(t) dt. \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得

$$G_b = \int_0^{t_b} \left[\frac{U_c^2}{L^2 \omega^2} e^{-2\delta t} \sin^2 \omega t \right] dt = \frac{U_c^2}{L^2 \omega^3} \left[\frac{\omega t_b}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\omega t_b \right].$$

因 $g_b = \frac{G_b}{A^2}$, 则

$$g_b = \frac{U_c^2}{(LA)^2 \omega^3} \left[\frac{\omega t_b}{2} - \frac{1}{4} \sin 2\omega t_b \right] \cong \frac{U_c^2}{(LA)^2 \omega^3} \cdot \frac{\omega^3 t_b^3}{3} = \frac{U_c^2 t_b^3}{3(LA)^2}.$$

爆发电流密度为

$$J_b = \frac{I_b}{A} = \frac{U_c}{L\omega A} e^{-\delta t_b} \sin \omega t_b. \quad (4)$$

对式(4)两边立方后得

$$J_b^3 = \frac{U_c^3}{L^3 \omega^3 A^3} e^{-3\delta t_b} \sin^3 \omega t_b \cong \frac{U_c^3}{L^3 A^3} e^{-3\delta t_b t_b^3} = \frac{3U_c \cdot t_b^3 U_c^2}{3LA \cdot (LA)^2} \cdot (e^{-\delta t_b})^3;$$

可得出

$$J_b = e^{-\delta t_b} \sqrt[3]{\frac{3U_c g_b}{LA}}. \quad (5)$$

式(1)~式(5)中: C 为储能电容容量; L 为发火回路系统总等效电感,包括高压脉冲功率源回路等效电感 L_0 和负载等效电感 l ,即 $L = L_0 + l$; R 为发火回路系统总等效电阻,包括高压脉冲功率源回路等效电阻 R_0 和负载等效电阻 r ,即 $R = R_0 + r$; A 为桥箔截面积。

冲击片雷管起爆机理:在高压脉冲功率源产生的窄脉冲大电流下,冲击片雷管内部的金属桥箔迅速发生电爆炸,爆炸形成的等离子体推动其上覆盖的聚酰亚胺薄膜,在加速膛剪切和约束下形成高速飞片,撞击钝感炸药将其引爆。在此过程中,金属桥箔需要在短时间内得到足以使其产生汽化的能量,这就要求高压脉冲功率源输出的窄脉冲能量在电流峰值 I 和时间 T 上都能满足要求。在起爆回路状态不变的情况下,整个放电回路电流波形以及电流峰值是固定的,但是起爆回路中电压分布是随着电阻

和电感的分布不同而发生变化;由式(2)可以得出,影响回路脉冲电流 i 和时间 t 的关键因素是起爆回路中的等效电阻 R 、等效电感 L 以及电容容量 C 。故当储能电容确定后,冲击片雷管作为起爆回路负载时,其电阻参数与电感参数的大小对其响应时间有较大影响。

3.2 多点同步起爆性能

冲击片雷管作用时,在桥箔发生电爆炸过程中,对应电压最大时刻的电流叫爆发电流,通过爆发电压可以准确地确定爆发电流,而爆发电流密度是影响桥箔电爆性能的主要因素。从式(3)、式(4)和式(5)可以得出,起爆回路中的等效电阻、等效电感对爆发电流以及爆发电流密度有影响,特别是等效电感,对爆发电流密度有较大影响。在多点同步起爆系统设计时,如果采用一个起爆点对应一个脉冲功率源的方式,即使同批次的冲击片雷管作用时间散布很小,但是起爆电路的响应时间很难满足同步性要求,并且体积也很难满足使用要求。根据冲击片雷管的起爆机理以及同批产品作用时间散布较小、可达纳秒级的特点,可以采用同一个高压脉冲功率源,为一定组合方式的多个冲击片雷管提供强电流、窄脉冲起爆能量。当高压脉冲功率源输出强电流、窄脉冲时,所有的冲击片雷管回路同时导通,桥箔爆炸,雷管起爆。

从串、并联电路特点可知,串联电路回路中电流一致,只要起爆回路中的窄脉冲能量的电流峰值 I 与时间 T 的关系满足一个冲击片雷管的起爆要求时,就可以满足多个冲击片雷管串联的起爆要求,故可将多个冲击片雷管进行串联接入起爆回路。根据起爆回路特性分析结果,起爆回路等效电阻和等效电感影响着脉冲功率源输出的回路电流;特别是等效电感,对爆炸桥箔电爆时的爆发电流密度和爆发电流有较大影响。并且,冲击片雷管的电阻参数与电感参数的大小对发火感度也有较大影响。随着冲击片雷管串联起爆点数的增加,起爆时回路等效电阻与等效电感也随之增加,回路电流、桥箔爆炸时的爆发电流和爆发电流密度明显降低。所以,在多点同步起爆系统设计时,要严格考虑到系统的等效电阻和等效电感。

从冲击片雷管的结构特性可知,其电阻和电感参数都较小,都在毫欧和纳亨级范围之内;并且同批次的产品,其电阻参数和电感参数的精度都可以控制在 $10\text{ m}\Omega$ 以及 10 nH 范围之内。在保证冲击片雷管起爆裕度前提下,同一发火回路中通过串联方式实现冲击片雷管多点同步起爆的桥箔数量不超

过3个,采用2发或3发冲击片雷管先串联、再多组并联的设计模式,在系统等效电阻与等效电感参数设计上,尽可能地保持与单点的参数接近,这样其串联等效参数不会影响窄脉冲能量的电流峰值 I 与时间 T 的关系。

4 结论

本文中,对冲击片雷管起爆回路的特性、桥箔爆发电流和爆发电流密度进行了分析,以2点或者3点冲击片雷管串联为多点起爆系统的基本单元,设计了基于冲击片雷管的4点、6点和9点同步起爆系统,并进行了多点起爆同步性测试。

试验结果表明:3点、4点同步起爆同步性时间均小于 100 ns ,最大同步性时间散布较小,满足设计要求;6点和9点同步起爆同步性时间都超过了 100 ns ,并且最大同步性时间散布较大。经分析,由于每组雷管之间等效电阻和等效电感等参数的差异,造成不同组别的雷管发火回路性能有差别,故而影响各起爆支路的电流不一致,导致桥箔的爆发电流和爆发电流密度的差异,从而影响了同步性。基于冲击片雷管的多点同步起爆系统的起爆能量降低、小型化设计、工程化设计以及起爆系统的电磁兼容性等大量的技术细节还需要从理论和实践上认真地加以研究和试验验证。

参考文献

- [1] 李成兵,裴明敬,沈兆武,等.起爆方式对杆式弹丸成型和穿甲的影响[J].火炸药学报,2006,29(3):47-52.
LI C B, PEI M J, SHEN Z W, et al. Influence of initiation way on the formation and armor-piercing performance of the rod projectile [J]. Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2006,29(3):47-52.
- [2] 亓秀泉,龙源,万文乾,等.爆轰波形对EFP性能影响的数值模拟[J].弹箭与制导学报,2008,28(3):115-117.
QI X Q, LONG Y, WAN W Q, et al. Numerical simulation of effect of blasting wave on EFP performance [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2008,28(3):115-117.
- [3] 龙源,毛振兴,刘健峰,等.曲率半径对双层药型罩EFP战斗部成形及侵彻的影响[J].爆破器材,2016,45(3):5-10.
LONG Y, MAO Z X, LIU J F, et al. Influence of curvature radius on the formation and penetration of explosively

- [illegible]