文章编号：1003-1480（2025）05-0037-07

集成化直列式多点同步起爆系统设计及性能研究

宁 政[1,2]，鲍立荣[3]，陈 楷[4]，曲展龙[4]，胡振兴[4]，朱 朋[1,2]

（1. 南京理工大学 化学与化工学院，江苏 南京，210094；2. 微纳含能器件工业与信息化部重点实验室，江苏 南京，210094；
3. 南京理工大学工程技术研究院有限公司，江苏 南京，210014；4. 北京宇航系统工程研究所，北京，100076）

摘 要：为实现战斗部毁伤效能精准调控与工程爆破的定向控制，设计了一种基于电子安全与解除保险装置（ESAD）的集成化直列式多点同步起爆系统。通过组建测试平台，系统研究了 6 通道爆炸箔同步/延时起爆特性。采用多通道光子多普勒测速技术（MPDV）实时获取飞片运动轨迹，结合钢凹法测试了各起爆点的输出性能。结果表明：随着电压的升高，多点起爆同步性差异减小；集成化直列式多点起爆系统可以实现多路延时起爆；6 路飞片离开加速膛口时的平均速度为 4 143 m·s^{-1}，速度偏差为 2.6%，时间同步性极差为 7 ns；钢凹深度分布在 0.56~0.64 mm。验证了集成化直列式多点起爆模式的可行性。

关键词：爆炸箔起爆器；多点同步；电子安全装置；多通道光子多普勒测速技术；集成化

中图分类号：TJ450.2 **文献标识码：**A **DOI：**10.3969/j.issn.1003-1480.2025.05.004

Design and Performance Study of Integrated In-line Multi-point Synchronous Detonation System

NING Zheng[1,2]，BAO Li-rong[3]，CHEN Kai[4]，QU Zhan-long[4]，HU Zhen-xing[4]，ZHU Peng[1,2]

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering，Nanjing University of Science and Technology，Nanjing，210094；2. Micro Nano Energetic Devices Key Laboratory，Ministry of Industry and Information Technology，Nanjing，210094；3. Nanjing University of Science and Technology Engineering Technology Research Institute Co. Ltd.，Nanjing，210014；4.Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering，Beijing，100076)

Abstract： To address the requirements of precise damage control in advanced warheads and directional blasting in civil engineering, an integrated in-line multi-point synchronous detonation system based on electronic safety and arming device (ESAD) was developed. A test platform was established to investigate the synchronous/delayed initiation characteristics of six-channel exploding foil initiators (EFIs). The multiplexed photon Doppler velocimetry (MPDV) was employed to capture real-time flyer kinematics, complemented by steel dent tests for comprehensive output evaluation. The results show that: as the voltage increases, the difference in multi-point detonation synchronization decreases; the integrated in-line multi-point detonation system can achieve multi-channel delayed detonation; the average velocity of the six-channel flyer as leaving the acceleration chamber is 4 143 m·s^{-1}, with a velocity deviation of 2.6% and a maximum time synchronization difference of 7 ns; the depth distribution of the steel concave is between 0.56 mm and 0.64 mm. The feasibility of the integrated in-line multi-point detonation mode has been verified.

Key words： Exploding foil initiator；Multi-point synchronization；Electronic safety device；Multiplexed photon Doppler velocimetry；Integration

随着战斗部对毁伤效能精准化需求的不断增长，以及民用工程领域对复杂结构定向爆破要求的日益

收稿日期：2025-03-03

作者简介：宁政（1999-），男，博士研究生，从事直列式多点起爆技术研究。

通讯作者：朱朋（1978-），男，研究员/博士生导师，主要从事爆炸箔点火与起爆微系统、微流控芯片和微化学反应系统等研究。

引用本文：宁政，鲍立荣，陈楷，等. 集成化直列式多点同步起爆系统设计及性能研究[J]. 火工品, 2025(5):37-43.

严苛，传统的单点起爆模式已逐渐显现出其局限性，如能量释放不均衡以及爆轰波传播方向的不可控性。多点起爆技术因其可以通过时空协同调控多个起爆点以优化爆轰波传播路径和提升能量利用率，已成为起爆控制领域的研究焦点。起爆点的数量、位置以及同步性等关键性能参数对战斗部的毁伤效果有显著影响[1-8]。目前，多点起爆技术主要通过爆炸网络实现[9-10]，但该方法通常采用沟槽装药或导爆索连接各起爆点，这限制了起爆点布置的灵活性。爆炸箔起爆器（Explosion Foil Initiator, EFI）作为一种适用于直列式点火与起爆的火工品，具有作用时间短、精度高、起爆阈值重现性好等特性，满足了多点起爆技术的要求。随着 EFI 技术的集成化和低能化发展趋势[11-14]，单个 EFI 的体积减小和发火能量降低，为构建直列式多点起爆技术提供了可能。

2003 年，杨振英等[15-16]基于爆炸箔起爆技术，设计了 3 点环形同步起爆冲击片雷管。该设计通过 3 点同步起爆环形药片，实现了爆轰波在药片间等距离传播，进而引爆 6 个输出药柱，转化为 6 点环形同步起爆，形成直列式 6 点起爆装置。2013 年，韩克华等[17]提出了针对定向战斗部的直列式多点起爆系统，该系统以爆炸箔为基底，利用导爆索将起爆能量传递至指定的起爆点。2015 年，AMRDEC 公布了一种多点起爆设计[18]，其主要创新在于将 EFI 与高压模块集成，使得传输电缆仅需传递控制信号。2020 年，韩克华等[19]对基于爆炸网络技术与基于EFI技术的多点同步起爆系统进行了同步性对比研究，结果表明基于 EFI 技术的多点起爆系统同步性更佳。目前，关于直列式爆炸箔多点起爆技术的研究主要集中在多个起爆点共用同一电容放电回路的模式，而对能够精确控制每个起爆点的集成化直列式多点起爆技术研究相对较少。同时，多点起爆的同步性是研究的重点之一[20-21]。

本研究构建了一套基于电子安全与解除保险装置（Electronic Safety and Arming Device, ESAD）的集成化直列式多点起爆系统，并搭建了相应的测试平台，以评估该系统在电爆炸同步性和延时性方面的性能。通过采用多通道光子多普勒测速仪（Multiplexed Photon Doppler Velocimeter，MPDV）对 6 路飞片从加速膛中脱离的时间及速度的一致性进行了测量。最后，利用钢凹法对各个起爆点的输出威力进行了评估。此外，本研究分析了影响集成化直列式多点起爆同步性的多种因素，并对系统的可行性进行了验证。

1 设计

1.1 设计思路与原理

集成化直列式起爆技术是基于电子安全与解除保险装置（ESAD），利用爆炸箔起爆器（EFI）实现输出的起爆方式。ESAD 的原理框图如图 1 所示。

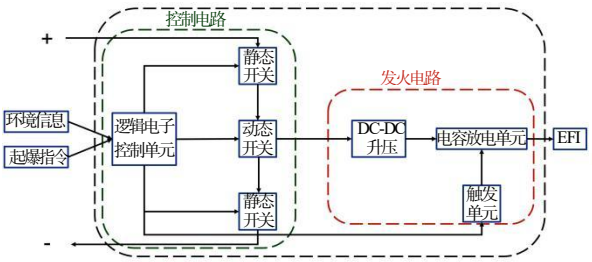

图 1 ESAD 原理框图

Fig.1 ESAD principle schematic diagram

ESAD 装置包含 2 个静态开关和 1 个动态开关：静态开关依据环境信息及起爆指令，通过逻辑电子控制单元的识别后闭合；动态开关则负责控制解除安保的时间窗口。若在预定时间窗内逻辑电子控制单元未能触发发火回路，动态开关将自动断开回路，确保 ESAD 装置恢复至安全状态。一旦所有保险被解除，变压器将启动工作以提升电压，给电容器充电，并通过反馈电路监测电容器电压。当电容器电压达到预定的起爆电压时，变压器将停止对电容器充电。随后，当触发单元接收到触发信号，高压开关闭合，电容器迅速放电，产生上千安培的脉冲电流。该电流通过桥箔时，桥箔经历加热、熔化、液化、气化直至等离子体化；在加速膛的约束下，等离子体剪切并驱动飞片冲击起爆炸药。

起爆单元由 ESAD 和 EFI 组成。ESAD 内部含有 2 片专用集成电路（ASIC），负责驱动 3 个电保险元件：2 个静态开关（SW1、SW2）和 1 个动态开关（SWD），实现 ESAD 的保险解除。保险解除后，在接收到起爆信号的情况下，ESAD 将输出起爆电流，进而起爆冲

击片雷管，其结构如图 2 所示。

基于 ESAD 与 EFI 技术的综合优势，本研究提出了一种集成化的直列式多点起爆系统架构。以“一个控制单元+多个起爆单元”为核心设计思想，控制单元集成了 6 组平行的控制模块，分别对应 6 个起爆单元。起爆通道的选择在控制单元内实现，有效简化了起爆单元的结构设计。控制模块与起爆单元之间通过低压信号线连接，其工作原理如图 3 所示。

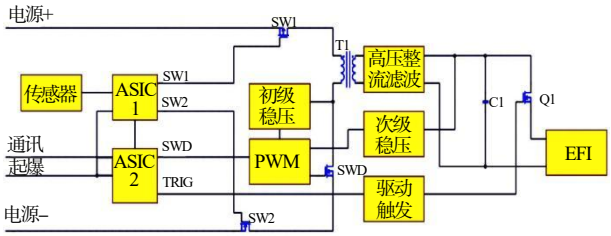

图 2　起爆单元原理框图

Fig.2　Principle block diagram of detonation unit

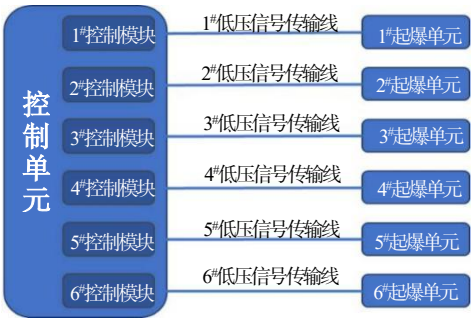

图 3　集成化直列式多点起爆原理示意图

Fig.3　Schematic diagram of integrated in-line multi-point detonation principle

相较于多个 EFI 通过串并联连接至同一电容放电回路的多点起爆模式，集成化直列式多点起爆技术实现了控制端与起爆点之间无需高电压大电流传输，使得起爆点的布置更为灵活，在远距离传输方面展现出显著优势。此外，每个起爆单元均保持独立性，可以对每一个起爆点进行单独精确控制。

1.2　集成化直列式多点起爆系统样机

集成化直列式多点起爆系统由控制单元和起爆单元两部分组成，两者之间通过低压信号传输线连接。起爆单元为体积 24.6 cm^3 的圆柱形结构。集成化直列式多点起爆系统的样机如图 4 所示。

起爆单元集成了信号识别、姿态感知、DC-DC 升压、电压反馈以及起爆等多项功能。为确保输出时间的一致性，本系统选用 MCT 开关。输出端配置了装药量为 130 mg HNS 的爆炸箔起爆器。控制单元具备对最多 6 路起爆单元进行独立控制的能力，通过对每一路设定特定的起爆参数，能够实现安全解除锁定以及多路同步或延时起爆的精确控制。

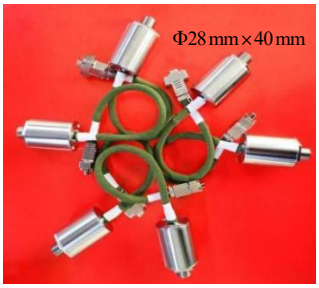

图 4　集成化直列式多点起爆系统样机

Fig.4　Physical integrated in-line multi-point detonation system

2　试验

2.1　同步性测试平台

为评估集成化直列式多点起爆系统的同步性，本研究设计了一套用于表征多点爆炸箔电爆炸及飞片速度的测试系统。该测试系统主要由示波器（TELEDYNE LECROY wavesurfer 510）、多通道光子多普勒测速仪（Multiplexed Photon Doppler Velocimeter，MPDV）以及高压探针（Tektronix P6015A, 1000X）组成。高压探针负责记录爆炸箔两端的电压曲线和触发电压曲线，通过分析这些曲线，可以精确确定爆炸箔的“爆发点”时刻。通过对各路爆炸箔“爆发点”时刻进行对比分析，可以评估各路爆炸箔芯片电爆炸的同步性。光子多普勒测速技术用于记录飞片从起始状态至离开加速膛的整个速度变化历程，通过各路飞片离开加速膛的时刻和速度，可以评估各点飞片冲击起爆药柱的同步性。测试平台示意图如图 5 所示。

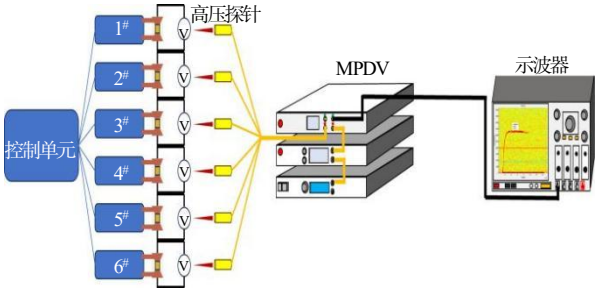

图 5　测试平台示意图

Fig.5　Schematic diagram of testing platform

2.2　多通道多普勒测速仪（MPDV）

多普勒测速仪由光学系统与信号处理系统两部分组成，其测试原理示意图如图 6 所示。

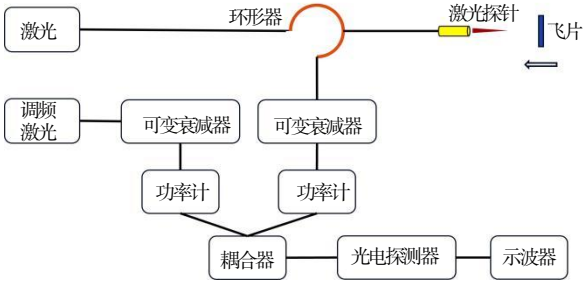

图 6　多普勒测速仪原理示意图

Fig.6　Schematic diagram of Doppler velocimeter principle

光学系统包括单频激光器(波长 1 550 nm)、调频激光器、环形器、光纤、光纤探针、能量监测仪、能量衰减器、二合一光纤耦合器、光电探测器等部件；信号处理部分包括高带宽示波器和后续计算处理单元等。其工作原理：单频激光通过光纤探针照射到测试目标表面，反射光被探针收集并经能量衰减器、能量监测仪处理后与调频激光进行混频干涉，随后由光电探测器转换为高频电信号，由示波器记录。通过软件将示波器数据进行处理，即可获得测试目标的速度——时间曲线。多通道光子多普勒测速技术（Multi-plxed Photonic Doppler Velocimetry，MPDV）基于光子多普勒测速技术原理，通过将多个通道的多普勒信号合波至单一通道，并利用频复分技术（Frequency Division）与时复分技术（Time Division）来还原和解算出对应通道的速度信息，实现了一种多路复用测速技术，能够同步记录多个目标的速度历程。

3　结果与讨论

3.1　多点电爆炸时间特性

3.1.1　多点同步电爆炸特性

本研究随机选取 4 路爆炸箔芯片，固定电容容值，并将控制端设定为 4 点同步起爆。采用高压探针同步记录 4 个爆炸箔芯片在 1 000，1 200，1 400，1 600 V 4 个不同电压条件下，各芯片两端的电压变化。定义各点电爆炸响应时间为触发电压施加的起始时刻到芯片两端电压达到峰值的“爆发点”时刻。通过分析 4 路爆炸箔芯片的延时情况，评估 4 路电爆炸的同步性。不同电压条件下的爆炸箔芯片电爆炸电压曲线如图 7 所示。

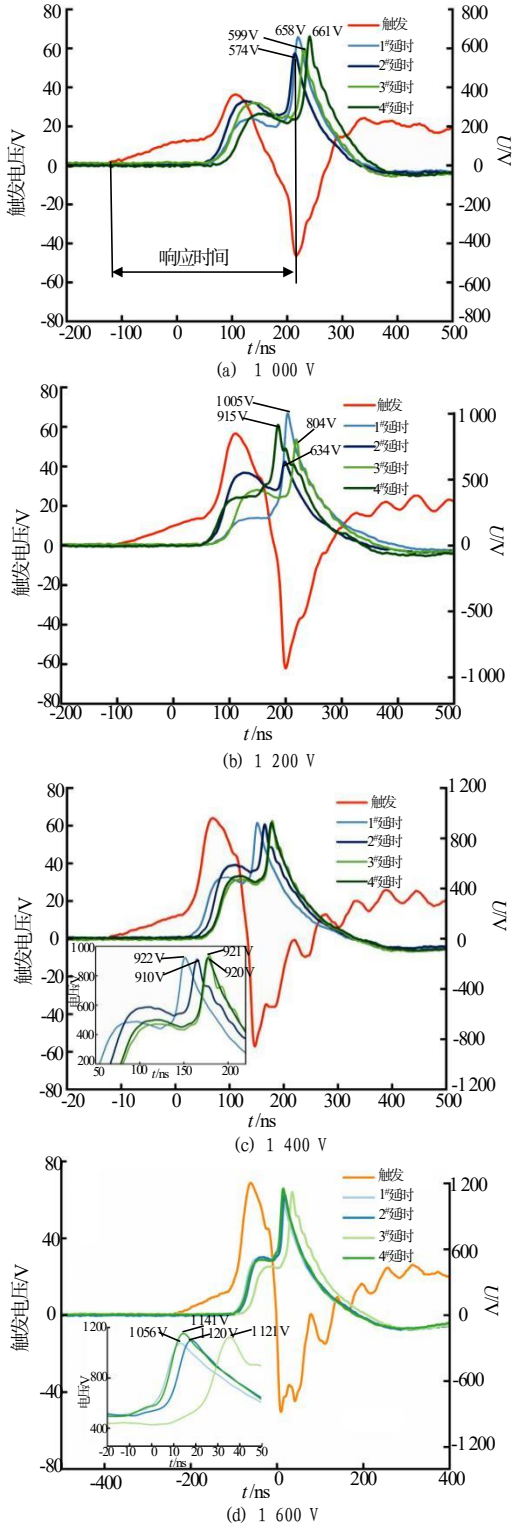

图 7　不同电压下 4 路爆炸箔芯片同步电爆炸电压曲线图

Fig.7　Synchronous electrical explosion voltage curve of four explosive foil chips under different voltages

由图 7 得到 4 路爆炸箔电爆炸同步性数据，如表

1 所示。

表 1　4 路爆炸箔电爆炸同步性测试结果

Tab.1　Four channels explosion foil electrical explosion synchronization test results

电压	延时/ns				延时	极差
/V	1#	2#	3#	4#	均值/ns	/ns
1 000	360.2	354.2	371.3	391.2	369.2	37.0
1 200	308.3	303.5	323.9	291.3	306.7	32.6
1 400	279.8	293.4	305.7	306.9	296.5	27.1
1 600	245.0	250.0	267.6	246.5	252.3	22.6

由表 1 可见，在 1 000，1 200，1 400，1 600 V 4 个不同电压水平下，4 路爆炸箔的电爆炸延时平均值分别为 369.2，306.7，296.5，252.3 ns，时间同步极差分别为 37.0，32.6，27.1，22.6 ns。随着电压的增加，4 路爆炸箔的电爆炸延时平均值呈现下降趋势，同时时间同步性极差也减小，说明电压的提升有助于改善 4 路爆炸箔电爆炸的时间同步性。此外，从图 7 可以看出，随着电压的升高，各路爆炸箔芯片电爆炸电压曲线的一致性得到增强，说明在较高的电压下，4 路爆炸箔电爆炸不仅在时间同步性方面表现更佳，而且在能量沉积的一致性方面也有更好的表现。

3.1.2　多点延时电爆炸特性

集成化直列式多点起爆系统具备对各起爆通道独立设置延迟时间的能力。通过设置不同的时间间隔，可实现多个起爆点的有序起爆。为验证所述起爆模式的有效性，本研究随机选取了 3 路起爆模块，并在控制端设定相邻两通道的延时间隔为 1 μs。在起爆电压为 1 600 V 的条件下，记录并分析了 3 个通道的电压曲线，如图 8 所示。

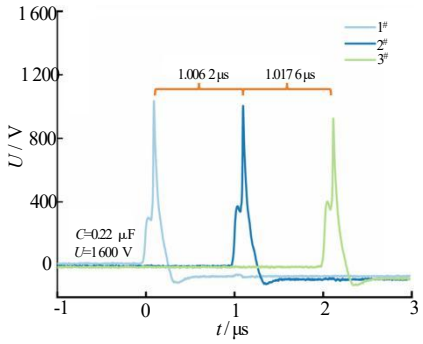

图 8　3 路爆炸箔芯片延时电爆炸电压曲线图

Fig.8　Delay electrical explosion voltage curve of three channels explosive foil chip

经计算，3 个爆炸箔芯片的触发时刻分别为 0.090 2，1.096 4，2.114 0 μs，相邻两通道的间隔延迟时间依次为 1.006 2 μs 和 1.017 6 μs，与设定的延迟时间有较高的吻合度。

3.2　多点飞片速度一致性及时间同步性分析

在直列式多点起爆系统中，飞片对炸药药柱的冲击是起爆过程中的关键环节。确保多点飞片离开加速膛时的速度一致性和时间同步性，对于实现集成化直列式多点起爆系统的同步性至关重要。为研究多点飞片的运动规律，本研究采用 MPDV 技术，同步记录 6 路飞片的飞行历程，并据此绘制出各路飞片的速度——时间曲线。

通过软件对 6 路飞片速度——时间曲线进行数据点提取和处理，通过对时间进行积分运算，进而获得飞片的位移——时间曲线。在已知加速膛高度的前提下，可以得到飞片离开加速膛的时刻及其对应速度。6 路飞片在 1 600 V 电压下的速度——时间曲线和位移——时间曲线如图 9 所示。为更清晰地观察各飞片飞出加速膛出口时（即位移为 200 μm 时）的速度分布，对相应区域进行了局部放大处理。

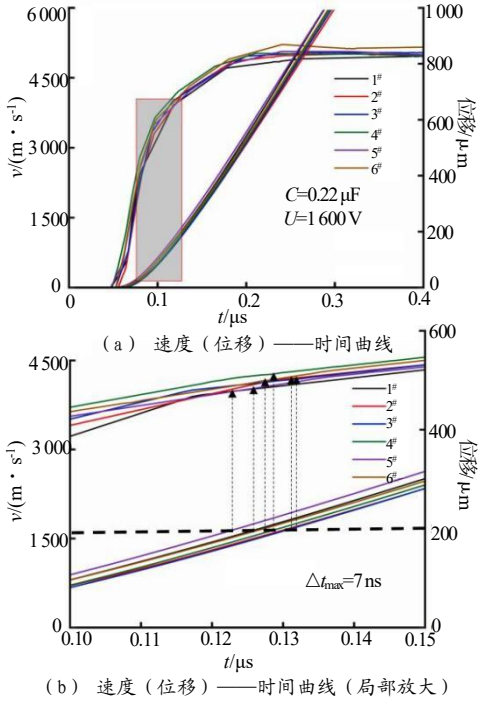

图 9　6 路飞片速度（位移）——时间曲线

Fig.9　Six channels flyer speed and displacement *vs* time curves

为实现对飞片脱离加速膛时速度一致性的定量描述，本文定义了飞片出口速度的相对标准偏差 v_{RSD}（Relative Standard Deviation of Velocity）作为衡量飞

片出口速度一致性的指标，并依据公式（1）进行计算。

$$v_{\mathrm{RSD}}=\frac{S}{v}\times 100\%=\frac{\sqrt{\dfrac{\sum_{i=1}^{n}(v_i-\bar{v})^2}{(n-1)}}}{\bar{v}}\times 100\% \quad (1)$$

式（1）中：S 为飞片出口速度的标准偏差；$\bar{v}$ 为飞片出口速度的平均值；v_i 为 1#~6#每个飞片的出口速度，且 n=6。由式（1）可知，v_{RSD} 值越小，表明飞片速度的一致性越高。集成化直列式多点起爆系统 6 路同步作用下，各路飞片离开加速膛时的时刻及其对应速度见表 2。

表 2 6 路飞片出口时刻及速度

Tab.2 Time and speed of the six channels flyer leaving the exit

	1#	2#	3#	4#	5#	6#	平均	极差
出口时刻/ns	126	131	130	129	124	126	-	7
出口速度/(m·s^{-1})	4 034	4 198	4 180	4 292	4 000	4 155	4 143	-

飞片出口的平均速度达到 4 143 m·s^{-1}，依据公式（1）计算得出飞片出口速度的标准偏差为 2.6%，时间极差为 7 ns。研究表明多点飞片具有较好的速度和时间同步性。

3.3 输出威力验证

在本研究中，输出端采用低能发火设计的爆炸箔起爆器。通过对 EFI 芯片、装药结构以及 HNS 药剂的形貌和粒径进行优化匹配后，在 0.22 μF 电容条件下，利用兰利法测得输出端爆炸箔起爆器的全发火电压为 1 162.3 V。该爆炸箔起爆器采用二级装药结构，HNS 装药量为 130 mg。为验证集成化直列式多点起爆系统的输出威力，在电容容值为 0.22 μF、起爆电压为 1 250 V 条件下进行了 30 组重复测试。测试结果表明，起爆后钢块的凹痕深度范围为 0.56 ~0.64 mm，具体凹痕情况如图 10 所示。

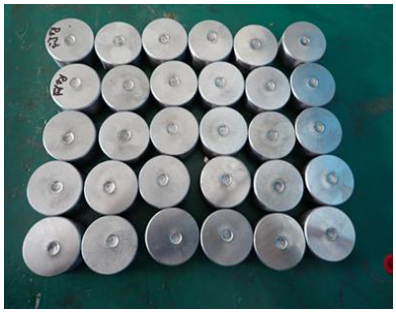

图 10 起爆后钢块凹痕

Fig.10 Dent on steel block after detonation

4 结论

本研究设计了一种基于 ESAD 的集成化直列式多点起爆系统，实现了信号识别、升压及起爆功能的集成化，形成了一个圆柱体起爆单元，并通过低压信号传输线与控制单元连接。针对多点爆炸箔电爆炸的同步性、多点飞片的时间同步性和速度一致性进行了系统的表征与研究，得出以下结论：

（1）集成化直列式多点起爆系统中，控制单元与起爆单元通过低压信号传输线相连，实现了对各起爆单元的独立控制，从而能够实现最多 6 路的同步或延时起爆。

（2）多点爆炸箔电爆炸同步性测试结果表明，随着电压的升高，多点电爆炸的同步性差异呈现减小趋势。在多点延时起爆过程中，各起爆点之间的实际延时与设定延时保持较高的一致性。

（3）利用 MPDV 测量技术，测试得到集成化直列式多点起爆系统在 6 路同步起爆时，6 路飞片离开加速膛口时的平均速度为 4 143 m·s^{-1}，速度偏差为 2.6%，时间同步性极差为 7 ns。

（4）通过钢凹法得到各起爆点作用后的钢凹深度分布在 0.56 ~0.64 mm 范围内，从而验证了集成化直列式多点起爆模式的可行性。

本研究构建的集成化直列式多点起爆系统在同步性、灵活性、精确控制以及输出威力稳定性等方面克服了传统单点起爆模式的多项缺陷，为新型战斗部及复杂结构定向爆破等高精度起爆应用场景提供了具有显著潜力的解决方案，具备重要的应用价值和广阔的发展前景。

参考文献：

[1] 刘建青, 顾文彬, 徐浩铭, 等. 多点起爆装药结构参数对尾翼 EFP 成型的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(5): 594-599.

[2] 沈慧铭, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 多点起爆方式对 EFP 侵彻能力增益的研究[J]. 弹道学报, 2017, 29(3): 49-55.

[3] 吴海军, 王可慧, 柯明, 等. 多点同步起爆条件下环形射流

成型及侵彻过程的数值模拟[J]. 现代应用物理, 2018, 9(2): 77-84.

[4] X Wang, C Zhao, X Li, et al. Numerical simulation of jet formation and penetration characteristics in multi-point initiation mode[J]. Vibroengineering Procedia,2021(37):86.

[5] 郭美芳, 范宁军. 多模式战斗部与起爆技术分析研究[J]. 探测与控制学报, 2005(1): 31-34, 61.

[6] 李婷婷.冲击片雷管多级选发射孔系统设计与研究[D].太原: 中北大学, 2016.

[7] Bender D, Fong R, Ngw, et al. Dual mode warhead technology for future smart munitions[C]//19th International Symposium of Ballistics. Interlaken, Switzerland, Casino Kursaal Congress Center, 2001.

[8] 李元, 赵倩, 熊诗辉, 等. 一种异面棱柱战斗部威力特性的数值模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(2): 97-103.

[9] 沈慧铭, 李伟兵, 王晓鸣, 等. 多点起爆网络结构参数设计及其同步性误差分析[J]. 含能材料, 2016, 24(3): 238-243.

[10] 郑宇, 王晓鸣, 黄寅生, 等. 多点同步起爆网络的设计及试验研究[J]. 火工品, 2008(1): 1-4.

[11] Mccormick R N, Boyd M D. Bidirectional slapper detonator：US, 4471697 [P]. 1984-09-18.

[12] 只永发, 邓志国, 聂福德. 炸药颗粒度对冲击片起爆感度的影响[J]. 含能材料, 2002, 10(3): 139-141.

[13] O`brien D W, Druce R L, Johnson G W, Et al. Method and system for making integrated solid-state fire-sets and detonators: US, WO 98/37377[P]. 1998-03-24.

[14] 徐聪. 平面介质高压开关及其在微芯片爆炸箔起爆器中的应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.

[15] 杨振英,马思孝,褚恩义,等. 爆炸箔多点起爆装置研究[J]. 火工品, 2001(4): 9-11.

[16] 杨振英, 褚恩义, 谢高第. 爆炸箔多点环形同步起爆技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2003(23): 47-51.

[17] 韩克华, 任西, 张玉若, 等. 定向战斗部直列式多点起爆系统设计[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(6): 78-81.

[18] Etheridge Mark. A low voltage command-arm system for distributed fuzing[C]// NDIA’s 58th Annual Fuze Conference, 2015.

[19] 韩克华, 焦清介, 褚恩义, 等. 基于爆炸同步网格技术和冲击片雷管技术的两种多点同步起爆系统设计方法及性能[J]. 兵工学报, 2020, 41(S2):102-110.

[20] 梁车平, 张玉若, 金丽, 等. 基于冲击片雷管的多点同步起爆系统研究[J]. 爆破器材, 2018, 47(3): 31-36.

[21] QIN G, WANG K, CAO H，et al. Study on the functional rule of exploding foil multi-point synchronous explosive[J]. Journal of Physics: Conference Series,2020,1 507(2):1-9.

.