

文章编号:1006-9941(2024)01-0102-14

## 多点起爆技术及应用研究进展

宁政<sup>1,2</sup>,陈楷<sup>3</sup>,简昊天<sup>1,2</sup>,钱江<sup>1,2</sup>,朱朋<sup>1,2</sup>,沈瑞琪<sup>1,2</sup>

(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. 北京宇航系统工程研究所,北京 100076)

**摘要:** 综述了爆炸网络多点起爆技术和直列式多点起爆技术的发展,介绍了爆炸网络多点起爆技术的多点同步爆炸网络和多点逻辑爆炸网络的应用现状,分析了两者的优势及不足;对比了直列式多点起爆技术的国内外研究现状,讨论了多点起爆点数、起爆方位参数对多点起爆系统性能的影响,指出多点起爆技术未来研究方向为:多点起爆精确控制方法研究,多点起爆装置模块化与集成化研究,低成本多点起爆技术研究,复杂环境下多点起爆系统安全性与可靠性研究。

**关键词:** 多点起爆;爆炸网络;爆炸箔起爆器;直列式多点起爆系统

中图分类号: TJ5; TJ45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023128

### 0 引言

多点起爆技术是在空间维度上布置不少于2个起爆点、在时间维度上精确控制多个起爆点作用时间,以达到多点同步或逻辑起爆的技术,广泛应用于战术战略武器、航空航天系统以及民用爆破领域。已报道的多点起爆技术主要有激光多点起爆技术、灵巧起爆器多点起爆技术、爆炸网络多点起爆技术和直列式多点起爆技术4种。

激光多点起爆技术通过光纤传递起爆信号,避免了电导线与药剂之间的直接接触,屏蔽了静电和电磁脉冲的干扰,具有安全性以及同步性优势<sup>[1]</sup>,但存在激光器体积和质量大、价格高、激光能量传递损失以及高能激光损坏光纤等问题。灵巧起爆器是将微安保内置在起爆器中,促使隔板滑块位移,解除保险<sup>[2]</sup>。灵巧起爆器多点起爆技术的优势是体积小、布置灵活、发火能

耗低,可实现自适应起爆控制,但由于低能发火造成的低瞬发度又使多个灵巧起爆器的同步性散差大。爆炸网络多点起爆技术是利用非理想爆轰现象,通过控制小尺寸炸药线的爆轰能量和结构对炸药网络进行逻辑控制起爆,从输出形式上可以分为多点同步起爆网络和多点逻辑起爆网络;从载体上分为沟槽网络装药法的刚性爆炸网络和导爆索组网法的柔性爆炸网络。直列式多点起爆技术是以电子安全与解除保险装置(Electronic Safety and Arming Device, ESAD)为基础,通过爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator, EFI)实现输出的多点起爆技术。

目前,激光多点起爆技术及灵巧起爆器多点起爆技术相关报道较少,应用案例也较少,常用的多点起爆技术主要是爆炸网络多点起爆技术和直列式多点起爆技术。为此,在现有研究的基础上,本研究重点介绍了爆炸网络多点起爆技术与直列式多点起爆技术的进展,分析两种多点起爆方式的特性,探讨了亟待解决的问题和研究的方向,以为多点起爆技术的研究提供参考。

### 1 爆炸网络多点起爆技术研究现状

爆炸网络是一种由爆炸元件构成,通过特定爆炸线路传递爆轰信号,实现单点输入、多点输出功能的火

收稿日期: 2023-06-09; 修回日期: 2023-08-07

网络出版日期: 2023-12-08

基金项目: 应用物理化学重点实验室开放课题基金(6142602220101)

作者简介: 宁政(1999-),男,博士研究生,主要从事直列式多点起爆技术研究。e-mail: ningzheng@njjust.edu.cn

通信联系人: 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。e-mail: zhupeng@njjust.edu.cn

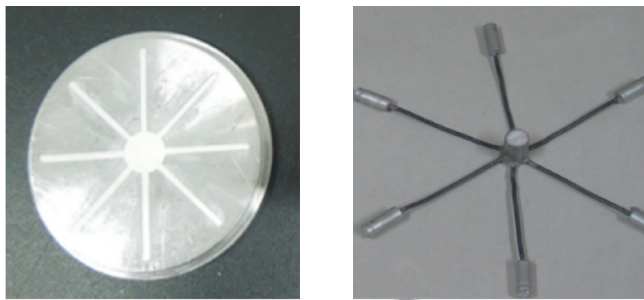
引用本文: 宁政,陈楷,简昊天,等. 多点起爆技术及应用研究进展[J]. 含能材料,2024,32(1):102-115.

NING Zheng, CHEN Kai, JIAN Hao-tian, et al. Review on Multi-point Initiation Technology and its Applications[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2024, 32(1):102-115.

工系统<sup>[3]</sup>,从输出功能上可分为多点同步爆炸网络和多点逻辑爆炸网络。多点同步网络是爆轰信号输入后,经过传递同时到达多个输出点;多点逻辑网络是爆轰信号输入后,经过线路设计及爆炸逻辑元件作用,再选择性地到达输出点。本节将分别综述2种多点爆炸网络的研究与应用现状,对比分析两者的作用特点和作用效果的影响因素。

### 1.1 多点同步爆炸网络

多点同步爆炸网络是目前实现多点同步输出最常用的一种装置。按照载体可分为刚性同步爆炸网络和柔性同步爆炸网络2类<sup>[4-5]</sup>,图1a为典型刚性同步爆炸网络,图1b为典型柔性同步爆炸网络。刚性同步爆炸网络由刻有沟槽的刚性基板和沟槽装药组成,多道沟槽装药作用后产生爆轰波,传递信号和能量,实现多点输出功能;柔性同步爆炸网络主要由导爆索和分束转接头构成,导爆索串、并联构成爆炸网络的骨架,分束转接头将单点输入转化为多点输出,实现起爆。



a. the rigid multi-point synchronous network<sup>[4]</sup>      b. the flexible multi-point synchronous network<sup>[5]</sup>

图1 刚性、柔性两种载体多点同步爆炸网络实物图

Fig.1 Photos of the rigid and flexible multi-point synchronous explosive network

#### 1.1.1 多点同步爆炸网络结构设计

##### (1) 刚性多点同步爆炸网络设计

温玉全等<sup>[6]</sup>研究了刚性面同步起爆网络的一般结构、特征参数及设计方法,为保证输入点到输出点之间的距离相等,输出点在平面上分布均匀,提出了一种由“工”字形网络通道相连、正方形点阵结构作为输出端的面同步起爆网络,正方形点阵的外接圆直径为面同步起爆网络能可靠起爆的最小装药直径,其结构示意图如图2a所示。

许碧英等<sup>[7]</sup>对平面多点同步起爆网络输出时间特性进行了分析,对比研究了以正方形、长方形、等边三角形等几何形状为基础布置起爆点的方案,发现以等边三角形的各顶点为起爆点可布置平面上的多点起

爆,并据此设计了以等边三角形为基本单元的27点同步起爆网络(图2b),结果显示27点输出同步时间小于理论值 $0.6\ \mu\text{s}$ ,爆轰输出时间最小值出现在距网络中心最近的3个点,最大值出现在最外围的点。

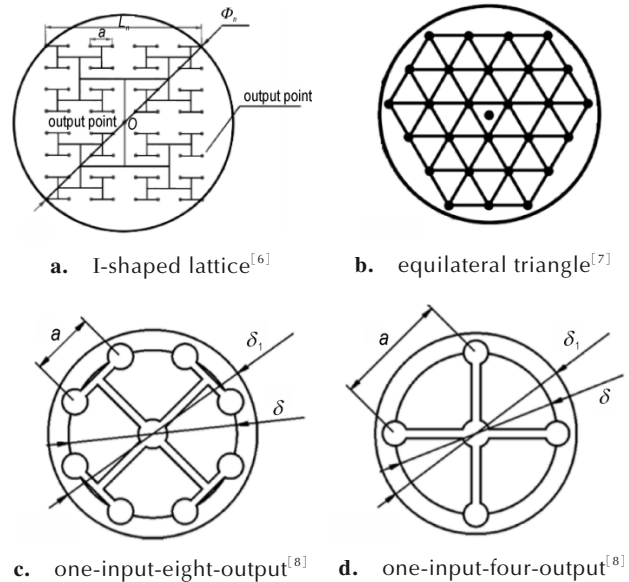


图2 4种刚性多点同步起爆网络结构示意图<sup>[6-8]</sup>

Fig.2 Schematic diagram of four types of rigid multi-point synchronous explosive network structures<sup>[6-8]</sup>

邵玲等<sup>[8]</sup>提出了将刚性多点起爆网络用于环锥形传爆药装药结构的方案,设计了“一入四出”和“一入八出”2种刚性同步起爆网络,结构示意图如图2c、2d所示。2种起爆网络整体布局呈“十”字形,输入点位于圆心,起爆网络的直径为传爆药柱环形截面内径和外径之和的一半,输出点对称、均匀、等距离分布在环形截面的内径和外径的中间直径上。实验发现在相同输出能力下,多点起爆相比单点中心起爆节省大约15%的药量。

施春成等<sup>[9]</sup>结合破甲弹的实际需要,设计了一种“一入八出”的刚性多点同步起爆网络,起爆装置为哑铃型(图3),经由收口颈部汇聚,输入的爆轰波从中心点输出,避免了起爆雷管的偏心输出对于爆炸网络同步性的影响。沟槽装药为亚微米奥克托金(HMX)/3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)基熔铸炸药,传爆孔装药为JO-11C传爆药,2种材料的爆速高、爆轰传播稳定,有利于提高输出同步性。测试表明八点输出同步性误差不超过100 ns,鉴定钢块凹坑深度分布均匀也表明多点起爆同步性较好。

沈慧铭等<sup>[4]</sup>设计了一种用于聚能战斗部的八点环

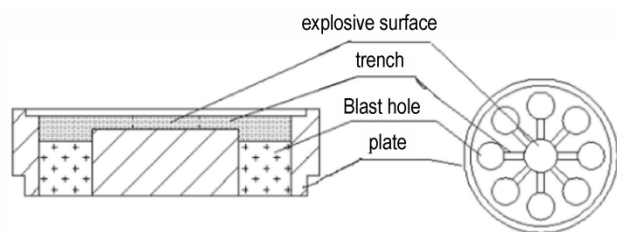


图3 “一入八出”刚性多点同步起爆网络<sup>[9]</sup>

Fig.3 One-input-eight-output rigid multi-point synchronous explosive network<sup>[9]</sup>

形同步起爆网络,以黑索今(RDX)、HMX、含能粘结剂的质量分数分别为45%、45%、10%,炸药颗粒直径小于100 nm的新型纳米颗粒炸药为传爆药,采用手工挤抹法将其压入沟槽。制备方法操作简单,但装药密度低,爆轰波在沟槽中传播速度不均匀,输出同步性的最大偏差可达210 ns。解文辉等<sup>[10]</sup>为满足多模式爆炸成型弹丸战斗部(Explosively Formed Projectile, EFP)在爆炸成型弹丸和聚能杆式射流2种模式下转换的需要,设计了一种具有点、环2种可选择起爆模式的起爆装置,中心一点起爆形成爆炸成型弹丸,环向八点起爆形成聚能杆式射流,加工过程中该设计对工艺精度和装药密度均匀性都有较高要求。试验表明两种起爆模式之间互不干扰,装置八点同步起爆同步性小于0.185  $\mu\text{s}$ 。

综上,刚性多点同步起爆网络的设计思路大致分为2种:一种是以“工”字型、等边三角形等特定几何形状为基础布置起爆点,尽量布满整个端面,用于多点起爆产生平面波;另一种是将输出点均布在输出端的环形截面,用于EFP战斗部。为了输出的同步性,两种设计思路的输入端到输出端的传爆路线长度一致,网络图形多为规则的对称图形。刚性多点同步起爆网络结构相对简单,输入输出点和传爆路径位于同一平面,传爆路径多为直线,距离较短。由于刚性基板使刚性爆炸网络只能在一个平面上的多点输出,因此,刚性多点同步起爆网络的布局灵活性较低。

## (2) 柔性多点同步爆炸网络设计

吴艳萍等<sup>[11]</sup>设计了一种“一入八出”的柔性多点同步起爆装置(图4a),为保证输入同步性,以引信轴向起爆集束盘8根导爆索,因导爆索输出威力不足以起爆下级装药,输出端采用压合螺母-雷管-JH-14C扩爆药柱组成的爆炸单元对爆轰波能量进行放大。同步性测试结果表明该柔性多点同步起爆装置8点输出的时间同步性极差不大于0.6  $\mu\text{s}$ 。

胡华权等<sup>[12]</sup>在传统柔性导爆索爆炸网络基础上,在输入雷管和导爆索之间增加一级刚性爆炸网络,组

成一种“八爪鱼”状刚柔结合的多点同步起爆网络。在爆炸网络输入与输出点之间额外增加一根导爆索,以两条导爆索中传爆时间较短的一条作为该输出点的输出时间。试验结果表明,该设计使得12点起爆同步性标准偏差从0.6  $\mu\text{s}$ 提高到0.3  $\mu\text{s}$ 。

郭洪卫等<sup>[13]</sup>为小型化,对柔性同步起爆网络输入、输出及转换接头进行优化,输入接头采用“雷管-传爆药柱-导爆索”结构,输出接头采用导爆索,传爆药柱采用同一装药密度,组成“导爆索-传爆药柱-战斗部装药”的传爆结构,转换接头采取侧向连接方式,实现一点输入两点输出。侧向连接输出方向布置较为灵活,且连接时不需要对导爆索做弯折处理,利于保证爆炸网络输出同步性。在此基础上研究者还设计了“一入二出”的柔性同步起爆网络模块,并以此为基本模块进行多点输出组网(图4b)。

张郑伟等<sup>[14]</sup>设计了将柔性导爆索直接贯穿转换接头的连接方法。该设计使得转换接头与导爆索间爆轰波传递界面减少了一半,提高并保证爆轰波输出同步性。郑宇等<sup>[5]</sup>设计了一种由中心输入端、导爆索和扩爆头组成的“一入六出”的柔性同步起爆网络,得到外形对称、气动性能良好的聚能杆式射流,其中心输入端、导爆索和扩爆头的传爆药均为钝化RDX。上弹测试表明,“一入六出”柔性同步起爆网络可得到长径比较大的聚能杆式射流,但形状不完全对称,头部已有断裂迹象,还需提高起爆网络的同步性及药型罩加工工艺。李元等<sup>[15]</sup>设计了六分位网络结构的多点柔性爆炸网络,目标方位确定后,起爆背向目标的一列或者两列起爆序列,使具有较高速度的破片群飞向目标。多点同步起爆序列的选择由起爆分位控制器和爆炸逻辑网络的逻辑功能实现。起爆系统两列8点起爆的输出同步性误差不大于800 ns。

张新华等<sup>[16]</sup>为实现直线多点同步起爆多爆炸成型弹丸战斗部(Multi Explosively Formed Projectile, MEFP),在引信和MEFP战斗部间,设计了一种在直线上依次均布六点的柔性多点起爆装置,该装置用于5层周向MEFP战斗部的多点同步起爆(图4c)。相邻的2个起爆点产生的爆轰波在传播过程中发生碰撞叠加,压垮周向多个药型罩,得到多点爆炸成型弹丸的输出。通过探针法和X光照片测试可以推断出该同步起爆装置起爆时间偏差小于1.9  $\mu\text{s}$ 。

综上,结构设计上,柔性多点同步起爆网络基本遵循对称式设计,导爆索的可弯曲性可使输出点分布在三维空间,而非只局限于一个平面,拓展了定向战斗

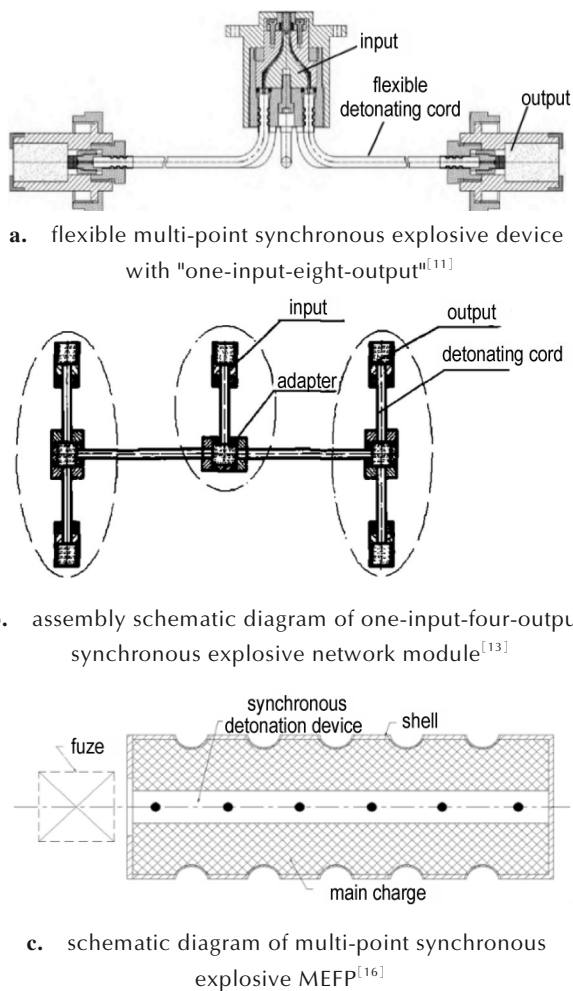


图4 三种柔性多点同步起爆网络结构示意图  
 Fig.4 Schematic diagram of three flexible multi-point synchronous explosive network structures

部、MEFP战斗部等实际应用的场景;但在输出点较多时,需要设置复杂的传爆路线,装置的可靠性因此有所降低,传爆路径增长同时也放大了各传爆节点的时间误差,输出同步性有所下降。

1.1.2 多点同步爆炸网络同步性分析

针对刚性和柔性两种多点同步起爆网络的诸多设计和实际应用需求,多点输出的同步性是学者们的关注重点,也是评价多点起爆网络的重要参数。因此,学者对影响多点同步爆炸网络输出同步性的因素开展了相关研究。温玉全等<sup>[6]</sup>用误差分析的方法对多点爆轰波输出时间同步性进行了分析,得到了同步起爆网络的作用时间及多点同步起爆的时间偏差表达式,认为提高爆炸网络基板的加工精度、增强装药密度一致性和使用高爆速装药,是减小刚性同步起爆网络同步性误差的重要技术途径。梁安定等<sup>[17]</sup>研究了沟槽内布

药的线同步爆炸网络的爆轰传播时间误差和输出同步性,认为影响爆轰传播时间误差的主要因素是网络刻槽长度误差、装药爆速误差和拐角效应误差,其中刻槽长度误差对同步性影响最为显著。白颖伟等<sup>[18]</sup>研究了柔性爆炸网络输入输出及传爆线路的同步性误差,得到了从药柱开始作用到导爆索起爆这段过程中的时间误差公式,并考虑到实际起爆点与几何起爆中心的位置偏差带来的时间误差,在传爆线路的设计中重点考虑了传爆线路曲度和拐点对传爆网络同步性的影响,并未将传爆距离的一致性作为多点输出同步性的唯一影响因素。

由以上可以看出,影响多点同步爆炸网络输出同步性的主要因素是输入点到输出点距离的一致性、传爆路径中装药爆速的一致性和爆速高低。在结构设计时要保证输入端到输出端传爆路径长度的一致,同时考虑拐角、连接处等对同步性的影响。在实际应用时提高加工精度、优化装配工艺,采用模块化装配方式在一定程度上提升输出同步性。

1.2 多点逻辑爆炸网络

爆炸逻辑网络由爆炸逻辑元件和炸药等连接组成,并按一定逻辑和预定传爆时间传爆,实现逻辑网络的预定输出功能<sup>[19]</sup>,不同的输入条件可以得到不同的多点输出模式。

1.2.1 爆炸逻辑元件

爆炸逻辑元件是逻辑网络的重要组成部分,其中最基本的逻辑元件是爆炸逻辑零门。复杂的爆炸逻辑网络都是以单个爆炸逻辑零门为基本单元,通过一定的分布组合而成。爆炸逻辑零门是一种能够切断或破坏爆炸网络通道装药、关闭爆轰通道的爆炸逻辑元件。爆炸逻辑零门的装药通道一般是“T”形<sup>[20]</sup>。基本原理是当A点输入的爆轰波传递至O点时会切断B与C之间爆轰传递通道,爆轰波从而不能由B传至C(图5a)。当A端没有爆轰输入时,爆轰波可由B稳定传递到C,同时不会绕过装药直角传递到A端(图5b)。

文献[21]中给出了几种典型爆炸逻辑零门为基础的简单逻辑控制装置,如图6所示。图6a是无控爆炸二极管,爆轰波只能从A<sub>1</sub>点传到A点。A点输入的爆轰波通过狭窄区传向F点时,装药被破坏,爆轰波通道在此切断。图6b是可控爆炸二极管,如果装药C不作用,该装置可视为无控二极管,爆轰波只能从A<sub>1</sub>点传向A点;如果C处装药先发生爆轰,会在F<sub>1</sub>点处发生断路,此时允许爆轰波从A点传递到A<sub>1</sub>处。图6c是一种转换开关,通过控制C装药是否作用实现输出通道

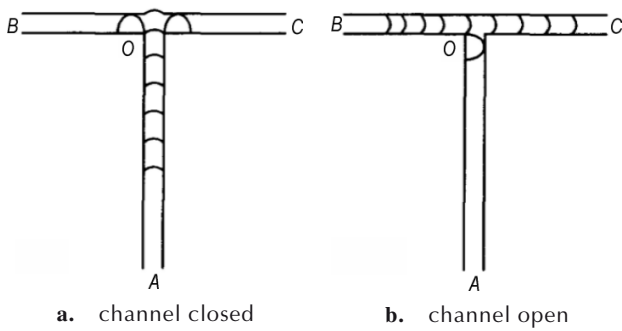


图5 爆炸逻辑零门基本作用原理<sup>[20]</sup>  
Fig.5 The basic principles of explosive logic null gate<sup>[20]</sup>

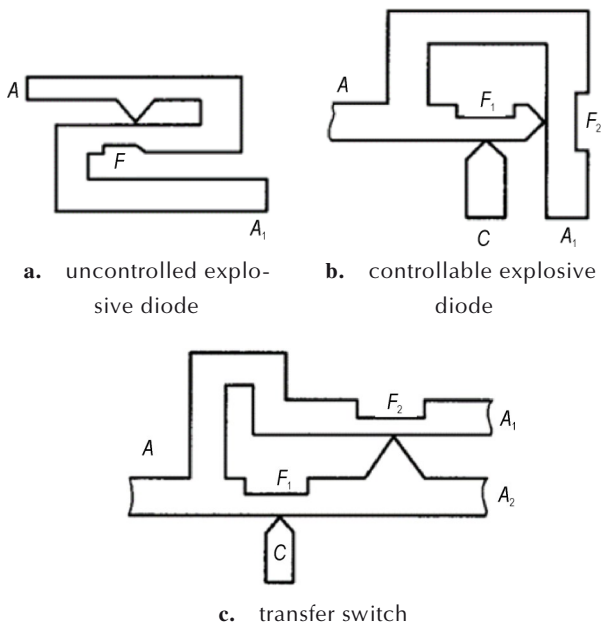


图6 几种典型爆炸逻辑控制装置<sup>[21]</sup>  
Fig.6 Several typical explosive logic control devices<sup>[21]</sup>

的选择,当C装药完好时,A<sub>2</sub>点输出爆轰;当C点装药先作用时,A<sub>1</sub>点输出爆轰波。

1.2.2 多点逻辑爆炸网络应用

蒋德春等<sup>[22]</sup>研究了定向战斗部用六分圆多点起爆系统,该系统由目标探测装置、逻辑电路、安全保险、六分圆爆炸逻辑网络和多点起爆器等组成,如图7所示。工作时目标探测装置捕捉目标,逻辑电路进行判断,决定起爆模式。目标位于4#方位时,需要1#区引爆,逻辑电路使雷管A解除保险并起爆,爆轰波通过A<sub>0</sub>、爆炸与门及延期线路使1#区多点起爆器起爆。当目标在5#方位、在2#区引爆时,逻辑电路使雷管A和B同时解除保险并起爆,爆轰波通过A<sub>0</sub>、B<sub>0</sub>处的爆炸二极管,同时到达A<sub>0</sub>B<sub>0</sub>处,再经爆炸与门起爆2#区的多点起爆器。试验验证了该爆炸逻辑网络内各爆炸逻辑

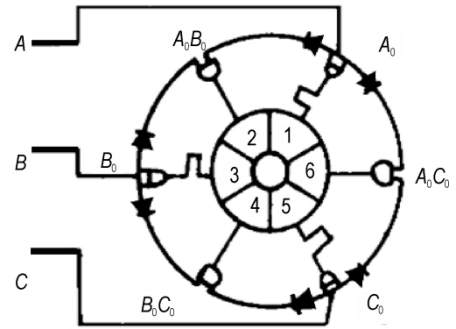


图7 定向战斗部用六分圆多点起爆系统示意图<sup>[22]</sup>  
Fig.7 Schematic diagram of the six point circle multi-point explosive system for directional warheads<sup>[22]</sup>

元件均能正常工作,元件间无干扰影响。通过多点爆炸逻辑网络和战斗部引信系统的合理匹配,可以实现随机定向战斗部的六分圆起爆控制,为提高定向战斗部威力及输出准确性提供了技术基础。

温玉全等<sup>[23]</sup>以2个爆炸零门组成的通道转换器为基础元件,叠加组成了一种“二入四出”的爆炸逻辑网络(图8),其中N<sub>1</sub>~N<sub>6</sub>表示爆炸零门,I<sub>1</sub>、I<sub>2</sub>表示输入点,O<sub>1</sub>、O<sub>12</sub>、O<sub>21</sub>、O<sub>2</sub>表示输出点,C<sub>1</sub>~C<sub>9</sub>表示拐角。当只有I<sub>1</sub>端起爆时,N<sub>1</sub>、N<sub>2</sub>两个零门作用分别将C<sub>4</sub>-C<sub>3</sub>、C<sub>2</sub>-C<sub>3</sub>通道切断,I<sub>1</sub>经C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub>通道,由N<sub>4</sub>、N<sub>3</sub>至C<sub>5</sub>分路,向上N<sub>5</sub>作用切断C<sub>8</sub>-O<sub>12</sub>的爆轰通道,向右O<sub>1</sub>输出。当只有I<sub>2</sub>起爆时,零门N<sub>3</sub>作用切断C<sub>9</sub>-C<sub>5</sub>通道,I<sub>2</sub>经C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub>通道,通过N<sub>2</sub>至C<sub>3</sub>分路,向右N<sub>4</sub>切断C<sub>9</sub>-C<sub>6</sub>通道,向左通过N<sub>1</sub>至C<sub>4</sub>分路,向上N<sub>6</sub>零门作用切断C<sub>7</sub>-O<sub>21</sub>的爆轰通道,向左得到O<sub>2</sub>输出。当两端皆有输入时,则输入次序和延迟时间的长短成为决定因素。输入端在规定时间内按次序输入,才会有相应输出。以5个“二入四出”爆炸逻辑网络模块为基础,可以组成“三入十三出”的多点逻辑爆炸网络,此时,对于输入端的时序控制精度有较高要求。以此通道转换器为基本模块,可以丰富多点爆逻辑爆炸网络的设计方法,同时在定向战斗部中,该设计可以实现方位选择、增加输出威力的效果。

定向战斗部用柔性同步起爆网络常规设计中,实现对某个方位的定向输出,需要相邻或相间的2个输入端同时起爆,这就需要双倍的柔性爆炸网络与起爆方位数量一一对应。郭洪卫等<sup>[24]</sup>提出了一种可控爆炸结设计,可以使柔性同步起爆网络的数量减半,如图9所示。其作用原理为一个端口输入爆轰信号时,利用爆炸结的单向导通功能,在向下级输出爆轰信号的同时,炸断另一个输入端的柔性导爆索,切断爆轰波反向输出通道。理论上该逻辑网络具有实现定向战斗

部定向输出的可能,但爆炸结的作用可靠性并未得到实验验证。

多点逻辑爆炸网络可实现选择性多点输出,为战斗部提供简单、多功能、低成本、高精度的起爆控制方

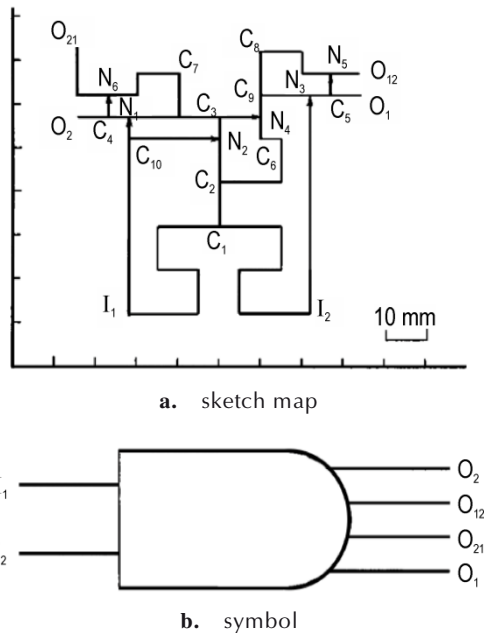


图8 “二入四出”爆炸逻辑网络关系示意图<sup>[23]</sup>  
 Fig. 8 The sketch map of two-input-four-output explosive logic network and its symbol<sup>[23]</sup>

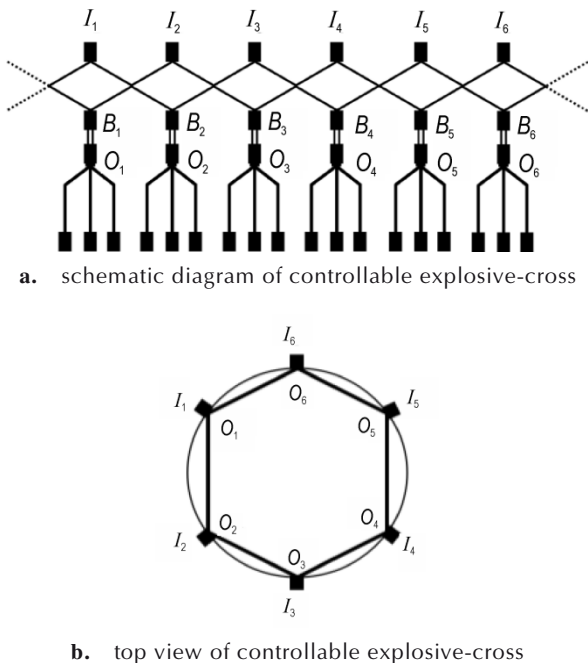


图9 六分位可控爆炸结网络间位起爆结构示意图<sup>[24]</sup>  
 Fig. 9 Structure diagram of the six modular controlled explosive-cross when initiated at inter-phase points<sup>[24]</sup>

法。在一些不太复杂的逻辑功能应用场景下,多点逻辑爆炸网络体现出较为明显的经济性和安全可靠。但如需实现复杂的逻辑功能,或将多个功能组合叠加,就需要用到多个爆炸逻辑元件并将其合理布局,同时需要设计复杂的输入时序,这对爆炸逻辑网络的设计及加工提出了较高要求。

可靠的多个输出点、精确的控制贯穿爆炸网络多点起爆技术发展始终。从爆轰信号输入到最终多点输出,要经历多个环节,每个环节中产生的误差都会累加并影响最终多点输出的精确性。在多点爆炸网络设计时应尽量简洁可靠,避免因复杂线路造成的低可靠性问题,也可以使用模块化设计提高爆炸网络的一致性。爆炸网络加工时应尽可能提高工艺精度,保证输入、输出点之间线路的一致性和作用可靠性。

## 2 直列式多点起爆技术

### 2.1 直列式多点起爆系统基本结构

直列式多点起爆技术是以电子安全与解除保险装置(Electronic Safety and Arming Device, ESAD)为基础,通过爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator, EFI)实现输出的多点起爆的技术,ESAD的原理框图如图10所示<sup>[25]</sup>。一般ESAD有两个静态开关和一个动态开关:静态开关分别根据环境信息和起爆指令,经电子逻辑控制组件识别之后闭合;动态开关控制解除安保的时间窗。当在预设时间窗内电子逻辑控制组件未触发发火回路,则动态开关将重新断开回路,使ESAD回到安全状态。

EFI是直列式多点起爆的关键元件。EFI只含有钝感六硝基芪(hexanitrostilbene, HNS)炸药,HNS不与桥箔直接接触,在千安级短脉冲大电流下才能发火,由电信号控制升压、触发、电爆全过程,作用时间在纳秒量级,具有极高的瞬发度,非常适合与ESAD结合组成直列式起爆系统。EFI的发展历程如图11所示,第一代爆炸箔起爆器采用分立器件,手工装配,其体积大、发火能量高<sup>[26-27]</sup>;第二代爆炸箔起爆器(Low Energy EFI, LEEFI)融入了集成电路(Integrated Circuit, IC),实现了部分元器件集成,减小了体积和发火能量,降低了制造成本、提高了制造效率<sup>[28]</sup>;第三代微爆炸箔起爆器(Micro chip EFI, McEFI)<sup>[29]</sup>采用低成本、平面化的高压开关控制高压电容放电,减小了器件体积,降低了制造成本的同时进一步减小体积和发火能量。

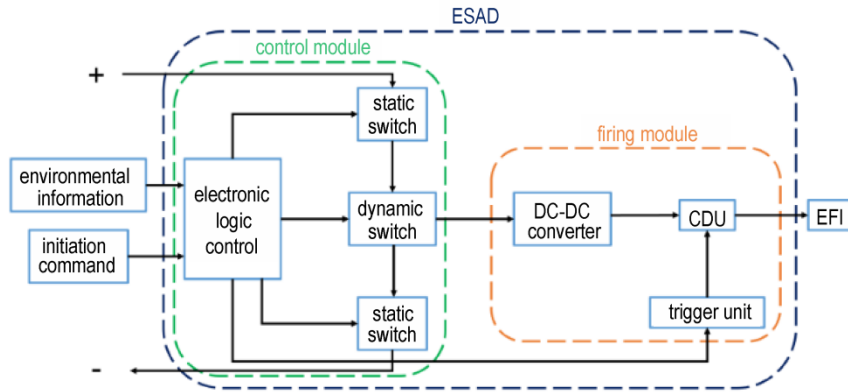


图 10 ESAD 原理框图<sup>[25]</sup>

Fig.10 Functional block diagram of ESAD<sup>[25]</sup>

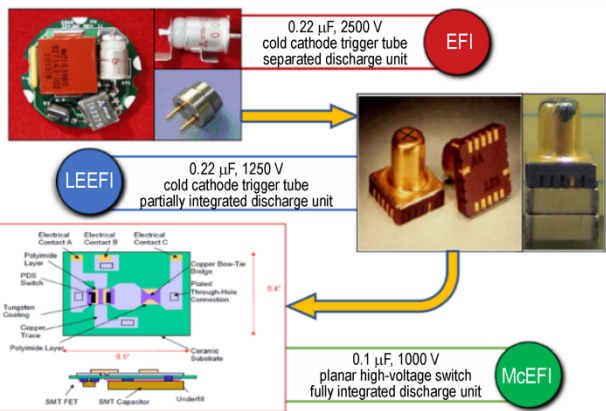


图 11 爆炸箔起爆器的发展历程<sup>[29]</sup>

Fig.11 The development process of EFI<sup>[29]</sup>

## 2.2 直列式多点起爆技术研究现状

### 2.2.1 直列式多点起爆技术发展现状

直列式多点起爆技术发展的早期,单个 EFI 发火能量较高,电容放电单元(Capacitor Discharge Unit, CDU)中所使用的高压开关、电容等功率器件体积较大,辅助元器件集成度较低,因此直列式多点起爆技术采用多个起爆点共用一套 CDU,EFI 与 CDU 之间为扁平铜带连接的分体式设计。第 48 届引信年会<sup>[30]</sup>,介绍了一种分体式设计的 LEEFI 多点起爆系统,多个起爆点通过扁平电缆串联后,与升压控制模块连接,通过扁平电缆中的高压信号实现多点起爆控制,如图 12 左上角所示。第 50 届引信年会<sup>[31]</sup>,介绍了一种适应性微型起爆系统技术,也是采用分体式设计。分体式设计起爆时,扁平电缆瞬间通过千安级的电流,回路中能量的损耗不可忽视,需要升压模块提供更高的电压,匹配更大容值的高压电容,以保证多点可靠起爆,但导致直列式多点起爆系统体积增大。

随着 EFI 发火能量的降低,表贴式功率器件、辅助元器件的发展,直列式多点起爆技术由分体式向 EFI 与高

压模块合为一体的集成化设计转变。2014 年,文献[32]介绍用于电子安全和解除保险模块(Electronic Safety & Arming Units, ESAUs)的几种类型的爆炸箔起爆器及其应用发展趋势:一种类型为高压模块与 EFI 通过扁平电缆连接的分离式起爆装置,通过多套装置的叠加实现多点起爆,如图 12 左下角所示;同时也提出了将高压模块与 EFI 集成,去掉扁平电缆连接的方法,此时控制模块与起爆模块之间仅需传输低压信号。2015 年,AMRDEC 公布了一种分布式的低压解保系统<sup>[33-34]</sup>,该系统的最大改进是将 EFI 与高压模块集成,传输电缆中只传递控制信号。分布式多点起爆系统是指在整个武器系统中,分布一个或多个安保的关键功能模块,将用于低成本战术增程导弹,联合多效战斗部系统,以及高可靠性引信体系<sup>[35-37]</sup>。第 59 届引信年会, JUNG-HANS<sup>[38]</sup>介绍了一种基于 ESAD 的 LEEFI 多点起爆技术,如图 12 右上角所示。介绍的 2 种 ESAD 配置,其中一个带有 6 个 Fireset 模块,即 6 个起爆点,用于战斗部的多点起爆;另一个带有 4 个 Fireset 模块,其中 2 个用于战斗部的起爆,另外 2 个用于火箭发动机的点火。两种基于 LEEFI 的 ESAD,均实现高压模块与 EFI 的集成。由图 12 的直列式多点起爆装置的集成化发展趋势可以看到,直列式多点起爆技术集成化过程中最突出的变化是控制模块与 EFI 之间从传输大于 1000 V 的高压信号变为只传输低压控制信号,相比于分体式设计,集成后信号传输过程中能量损耗大幅度降低,仅传输低压控制信号有利于更多输出点的控制,实现远距离的信号传输与起爆控制,因此集成化是直列式多点起爆技术发展的必经之路。

直列式多点起爆技术的集成化推动了其小型化、低成本的发展,ESAD 作为直列式多点起爆装置的主体部分,它的小型化与低成本发展是直列式多点起爆装置实现小型化的重要基础。美国的军工科研机构尤

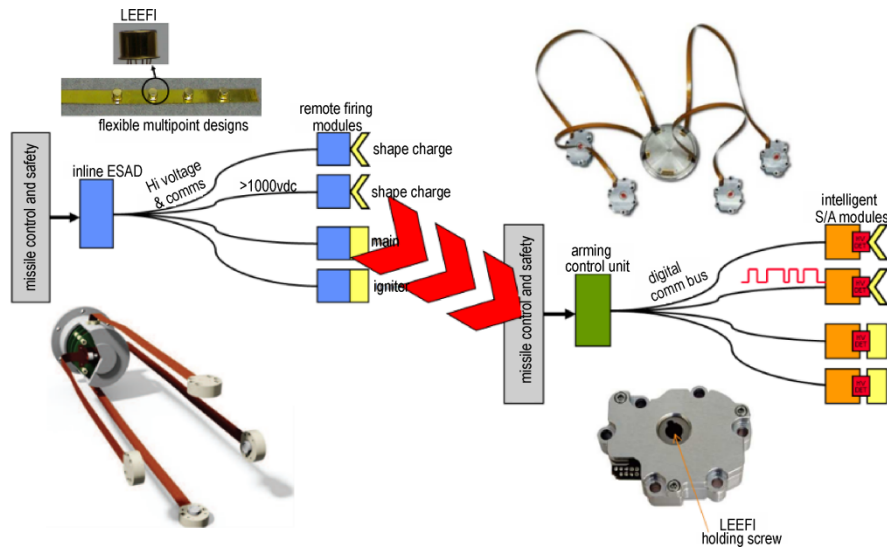


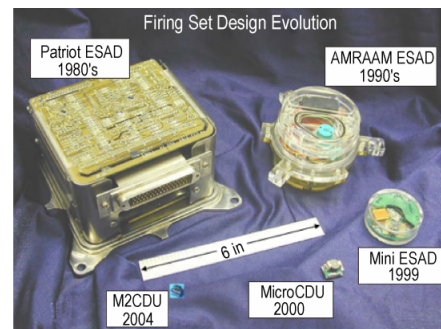
图 12 直列式多点起爆装置的集成化发展趋势<sup>[30,38]</sup>

Fig.12 The integrated development trend of in-line multipoint initiation devices<sup>[30,38]</sup>

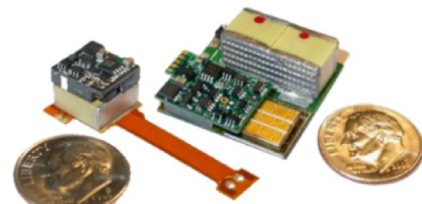
其注重直列式多点起爆装置的小型化研究。美国桑迪亚国家实验室强调小型化是先进引信技术的重要课题,图 13a 展示了美国桑迪亚国家实验室<sup>[39]</sup>自 20 世纪 80 年代以来在 ESAD 和 CDU 的微型化和集成化上取得的成果;图 13b 为 2020 年其设计的高度集成的微型 ESAD,推测图 13b 所示的两款微型 ESAD 体积分别约为 0.97 cm<sup>3</sup>(左)和 1.76 cm<sup>3</sup>(右),这种微型 ESAD 是点火或起爆装置实现多点作业和嵌入弹药等功能的重要基础<sup>[40]</sup>。2011 年,美国海军<sup>[41]</sup>研制的低成本微型 ESAD 装置采用超低成本的高压组件和 LEEFI,体积已缩小到约 18.02 cm<sup>3</sup>,预计在采用三层重叠隔离结构后,装置体积可以进一步缩小到约 7.21 cm<sup>3</sup>。此外,美国陆军航空和导弹研究开发和工程中心(AMRDEC)近年来也一直致力于基于低成本 EFI 的多点起爆系统研究,使用商用表贴元器件代替军用定制直插元器件,装置整体成本得以进一步下降<sup>[42]</sup>。

2.2.2 国外直列式多点起爆技术应用

直列式多点起爆技术在实际应用中展现出多模式且各模式之间可转化的优势。2002 年美国雷神公司为陆军研制的 XM982 GPS 制导弹药,其起爆系统采用基于 EFI 的多点起爆引信系统,定向战斗部采用多点起爆方式,沿战斗部径向设置 4~8 点起爆输出点,基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的逻辑控制实现延时等多种功能,可根据导弹与遭遇目标的相对位置来控制相应的起爆点、起爆战斗部<sup>[43]</sup>。2005 年美国空军研究室报道了采用 EFI 多点起爆作为定向起爆系统的先进起爆技术。分布于



a. achievements of Sandia National Laboratories since the 1980s



b. highly integrated miniature ESAD

图 13 ESAD 小型化发展历程<sup>[39-40]</sup>

Fig.13 The miniaturization development process of ESAD<sup>[39-40]</sup>

战斗部侧面的六列冲击片雷管既能够采用序贯起爆,控制战斗部爆炸后破片飞散的方位角,还能采用几列冲击片雷管同步起爆的方式控制战斗部爆炸后破片集中向弹体的某一侧向飞散,每列雷管均由触发电路控制起爆,可根据目标信息设定起爆方式<sup>[44]</sup>。第 50 届引信年会<sup>[45]</sup>,介绍了一种适应性微型起爆系统技术(Adaptable Miniature Initiation System Technology, AMIST),并研制出 2 种起爆配置,每种配置都能控制



单个起爆点。配置 I 仅提供非自主功能(每个起爆点均连接到模式控制器);配置 II 的发火点连成网状且发火点独立于模式控制器。该起爆技术以 LEEFI 为基础,其优势是增加了弹头杀伤力,减少附带损害,支持多种杀伤机制,满足了多功能弹药的需求。在第 52、54 届引信年会,AMRDEC<sup>[46-47]</sup>提出了基于 3×3 阵列的多点起爆概念,在不改变装药结构的条件下,通过改变起爆方式,实现战斗部多种不同毁伤元之间的转换,提高多用途和多模式弹头的能力,如图 14 所示。该多点起爆系统以 ESAD 技术为基础,利用起爆位置的不同,改变聚能装药射流的形成过程,使多模式聚能装药战

斗部既可获得对重型装甲目标的深侵彻,也可打击轻型装甲目标、地面设施和各种掩体目标。

第 44 届枪支和弹药年会<sup>[48]</sup>上,荷兰 TNO 公司将 EFI 作为起爆器用于 ESAD 中并制作成一个包括高压电源在内的小型发火单元(图 15a),并将其应用在一种多模战斗部结构中,通过改变起爆点的位置获得 4 种模式:爆炸成型弹丸模式、杆式射流、破片杀伤和定向战斗部<sup>[49]</sup>。如图 15b 所示,起爆模式包括前方 EFI 起爆点起爆(红色)、后方 EFI 起爆点起爆(绿色)、两点同步起爆以及两点分时起爆(蓝色),可配于多种类型的战斗部。

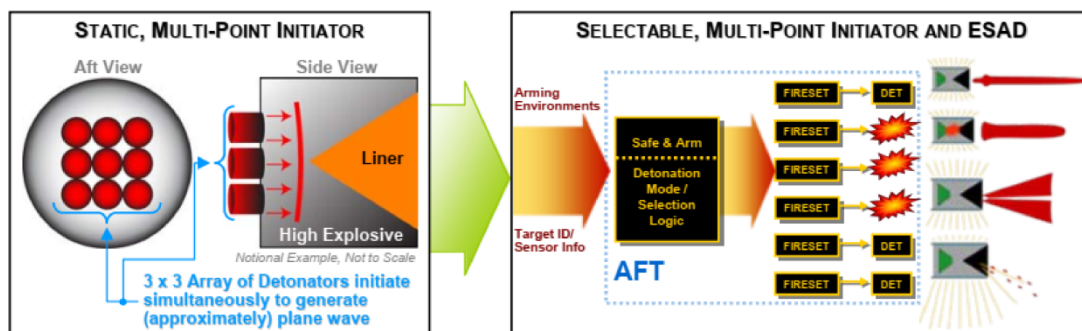
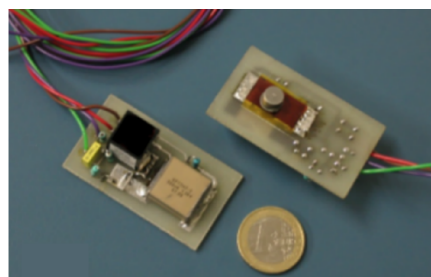
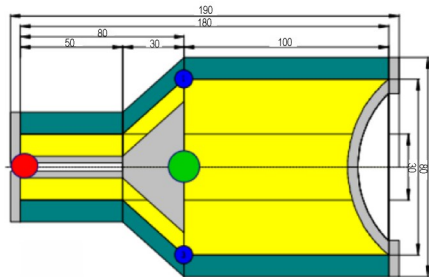


图 14 3×3 阵列的多点起爆示意图<sup>[47]</sup>

Fig.14 Schematic diagram of multi-point initiation of the 3×3 array<sup>[47]</sup>



a. mini firing unit based on EFI



b. multiple detonation methods for warheads

图 15 多模式起爆示意图<sup>[48]</sup>

Fig.15 Schematic diagram of multi-mode initiation<sup>[48]</sup>

综合分析国外直列式多点起爆技术的应用情况,呈现出“一机多用”的多模式发展趋势。直列式多点起爆技术具有对每一个起爆点进行精确控制的优势,一套装置可以通过改变起爆点的数量和位置,实现多种输出模式的转换,通过与战斗部的配合,使得原本单一功能的战斗部在应对不同的目标时转化为更合适的输出模式,提高了毁伤效率。

### 2.2.3 国内直列式多点起爆技术研究现状

国内关于爆炸箔起爆器的发展和应用相比国外要晚很多,对直列式多点起爆技术的研究处于起步阶段。2003年,杨振英等<sup>[50-51]</sup>根据爆炸箔起爆器设计

了三点环形同步起爆冲击片雷管,用三点同步起爆环形药片,爆轰波通过药片等距离传播引爆六个输出药柱,转化为六点环形同步起爆,形成直列式六点起爆装置。2013年,韩克华<sup>[52]</sup>设计了用于定向战斗部的直列式多点起爆系统,如图 16 所示。该系统是以 ESAD 为基础,以导爆索将起爆能量传递至对应起爆点的多点起爆系统。

2018年,梁车平等<sup>[53]</sup>以二点或三点串联爆炸箔起爆器作为基本单元,设计出 2 点、3 点、4 点、6 点及 9 点多点起爆系统。对以上 5 组多点起爆系统进行同步性测试,结果表明点数较少时(3 点、4 点),多点起爆同步

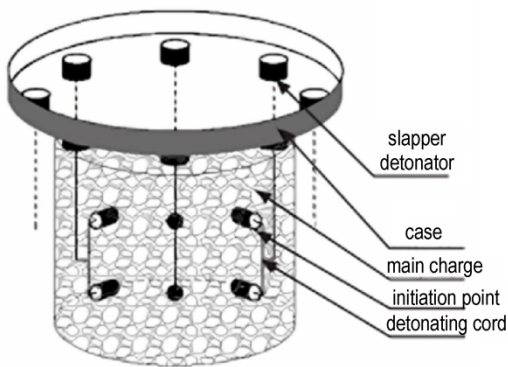


图 16 冲击片雷管多点起爆系统分布示意图<sup>[52]</sup>

Fig.16 Distribution diagram of multi-point initiation system for slapper detonator<sup>[52]</sup>

性小于 100 ns,当同步起爆点数超过 4 点后,最大同步性时间散布增大较为明显。2020 年,韩克华等<sup>[54]</sup>对比了基于爆炸网络技术及基于 EFI 技术的多点同步起爆系统的同步性,相比之下基于 EFI 的多点起爆系统同步性更佳。图 17 展示的是基于 EFI 的多点起爆阵列。Qin 等<sup>[55]</sup>对爆炸箔进行了 2 点串联和 2 点并联电爆炸、3 点串联和 3 点并联电爆炸试验。结果表明:串联起爆可以提高多点起爆的同步性,但是随着起爆点数的增多,能量损耗增大,不利于电源能量的充分释放。并联起爆在能量供给不充分时同步性较差,随着能量的提高这一现象会得到缓解。因此,在多点起爆设计中,合理的串-并联组合会兼顾能量利用效率及起爆同步性。

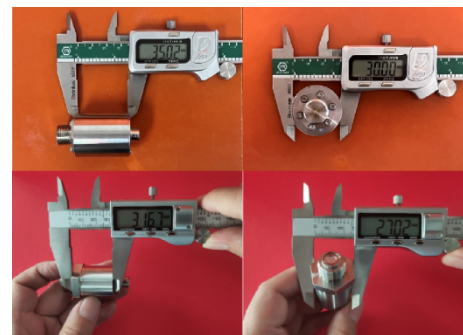
南京理工大学朱朋团队<sup>[56-57]</sup>设计了一套基于 ESAD 的直列式多点起爆、点火系统,其中控制、升压、发火等核心功能采用模块化、集成化设计。对于每一路进行单独控制,可实现最多 6 点的同步或延时起爆。同时整套系统发挥出直列式可检可测的优势,具备升压反馈、负载检测、自动泄放等功能,保证发火过程中的安全性。集成化点火、起爆模块及直列式多点起爆系统如图 18 所示。

对比国内外研究现状可以发现,国内的直列式多点起爆技术,在设计理念和研究进度上与国外相比都有一定差距,目前存在发火能量高、集成度低、成本高等问题。直列式多点起爆技术是一项系统工程,涉及到火工品、引信、炸药、弹药等多个行业,以及微电子、通信工程、软件工程、微机电工程等多个科学技术领域,各行业必须要协调发展才能促进直列式多点起爆技术的进步。



图 17 基于冲击片雷管的多点同步起爆系统<sup>[54]</sup>

Fig.17 EFI-based multi-point synchronous initiation circuits<sup>[54]</sup>



a. integrated ignition and initiation module



b. physical diagram of control module

图 18 直列式六点起爆系统<sup>[56-57]</sup>

Fig.18 In-line 6-point initiation system<sup>[56-57]</sup>

### 3 多点起爆参数对战斗部输出性能的影响

多点起爆技术与战斗部技术发展相辅相成,起爆点数量、位置以及起爆同步性对战斗部输出性能有着直观的影响。多点起爆技术在战斗部同步起爆技术、定向起爆技术、多模起爆技术、可寻址起爆技术(或分布式起爆技术)、多点超压起爆技术中有着广泛的应用。本节通过介绍战斗部视角下的不同多点起爆参数对战斗部输出性能的影响,以期对多点起爆设计及应用提供参考。

#### 3.1 起爆点数量

刘建青等<sup>[58]</sup>采用 LS-DYNA 建立多点起爆 EFP 装

药数值模型,模拟计算结果表明,起爆点的数量与所形成的尾翼的数量相同。随着起爆点数的增加,药型罩材料初始的速度梯度增大,拉伸变形的过程变长,EFP达到稳定状态的时刻也相应后移,发生断裂的风险大大增加。沈慧铭等<sup>[59]</sup>在研究多点环形起爆形成EFP侵彻过程中得出,多点起爆爆轰波相互碰撞会在药型罩顶部形成马赫爆轰波,提高炸药潜能而且能形成喇叭形爆轰波,改善爆轰波的结构。相比中心点起爆方式,多点起爆方式形成的2个EFP的速度、长径比、密度、侵彻深度均有相应提升。吴海军等<sup>[60]</sup>运用LS-DYNA软件分析了起爆点数对环形射流侵彻能力的影响,设置了环向4,6,8,10,12,14点以及16点同步起爆模式,发现随着起爆点数的增加,爆轰波前沿更加接近平面,药型罩压垮同步性更好,环形射流的侵彻能力更强。但当起爆点数大于10后,随着起爆点的增加,侵彻深度增幅会明显减小。Wang等<sup>[61]</sup>数值模拟计算了起爆点数及起爆半径对聚能射流形成的影响,结果表明,射流的尖端速度随起爆点数的增加而增加,与单点起爆相比,射流尖端速度最大增幅可达15.63%;起爆半径的增大有助于爆轰波在碰撞前的充分增长,能有效提高射流速度。在8点起爆方式下,全尺寸起爆的射流头速度比单点起爆提高了14.2%。

综合来看,起爆点数量会影响形成EFP的侵彻能力,同时也会增大EFP发生断裂的风险。战斗部多点起爆相较于单点起爆,在弹丸速度、长径比、侵彻深度等方面均有明显提升,随着起爆点数的增多,增幅先快速增加到一定阈值后逐渐减缓,表现出明显的边际效应,因此在多点起爆设计时,要根据战斗部性能进行合理的起爆点数布置。

### 3.2 起爆点位置

多点可选择起爆技术是多模式战斗部首先突破的重要关键技术<sup>[62]</sup>。Bender D等<sup>[63]</sup>提出了一种多模式爆炸成型弹丸战斗部技术,以提高单个弹头对多类目标的应对能力。通过改变起爆点的位置,可以得到3种不同类型的EFP以应对不同的目标,短粗的类球形EFP用于打击轻装甲目标,带有尾翼稳定的EFP用于增程交战,有较大长径比的EFP用于击溃厚装甲。李元等<sup>[64]</sup>设计了一种平面与凸面交错布置的异面棱柱战斗部,研究了不同起爆方式对战斗部破片速度及飞散方向角的影响。对比了端面中心起爆,偏心一线、两线起爆,侧向一线、两线、三线起爆六种模式下该异型战斗部的作用模式,结果表明:偏心多点起爆相较于端面中心起爆,可以使平面破片束平均速度提高21.68%,

减少平面破片束飞散角 $3.38^\circ$ ;侧向两线起爆在保证破片速度不降低的情况下可获得 $4.94^\circ$ 的平面破片束偏转角,而偏心一线可以得到 $2.10^\circ$ 的偏转角。多点起爆技术的应用使得“一弹多用”成为可能,目前多点起爆技术尤其是直列式多点起爆技术与多模式战斗部的匹配是未来研究的一大重点。

## 4 总结与展望

本文综述了爆炸网络多点起爆技术和直列式多点起爆技术的发展和现状,并总结了不同类型的爆炸网络多点起爆技术的特点,得出以下几点结论:

(1) 刚性多点同步起爆网络输入输出点一般位于同一平面,简化结构设计的同时限制了布局的灵活性。柔性多点同步起爆网络得益于导爆索的可弯折,布局较为灵活,但随着输出点的增加整体结构会过于复杂。

(2) 多点逻辑爆炸网络通过爆炸元件及逻辑网络的组合实现对输出点的控制,实现有选择地输出,但面对复杂逻辑时,需要较为复杂的逻辑设计及时序控制。多个输出点的可靠、精确控制贯穿爆炸网络多点起爆技术发展始终,这要求合理的设计和精细的加工工艺互相配合。

(3) 国内外在直列式多点起爆技术上存在一定的差距,国外关于直列式多点起爆技术研究较早,目前已处于实际应用阶段,而国内直列式多点起爆技术仍处于发展初期,针对直列式多点起爆技术的系统研究较少。

(4) 起爆点数量与位置会影响战斗部的输出性能,战斗部多点起爆相较于单点起爆,在弹丸速度、长径比、侵彻深度等方面均有明显提升,且多点起爆技术的应用使得“一弹多用”成为可能,目前多点起爆技术尤其是直列式多点起爆技术与多模式战斗部的匹配是未来研究的一大重点。

未来对于爆炸网络多点起爆技术和直列式多点起爆技术的研究重点包括:

(1) 多点起爆输出精确控制研究。对于多点同步爆炸网络,传爆路径中装药输入点到输出点距离的一致性、爆速的一致性和爆速高低是影响其输出同步性的主要因素,同时也要考虑到拐角、连接处等的影响。而对于直列式多点起爆技术,功率器件的作用特性、放电回路的电学特性、爆炸箔作用及炸药爆轰成长的时间等因素都会对直列式多点起爆输出同步性产生影

响。从输入点到输出点之间需经历多个环节,每个环节的作用时间误差都会体现到最终输出时间,多点输出的精确控制将是多点起爆技术发展的关键技术和难点。

(2) 多点起爆装置模块化、集成化研究。为适应高安全、低能化、小型化的发展要求,模块化、集成化成为未来多点起爆技术的发展方向。多点爆炸网络可将输入输出装置、传爆装置和爆炸逻辑元件等分离器件集成为一个模块,以单一模块为基础进行多点组网以保证各部分的一致性。

(3) 低成本多点起爆技术研究。较高成本是目前制约直列式多点起爆技术大规模应用的原因之一,可在功率器件、低成本EFI等方面寻找降低成本的途径。

(4) 多点起爆装置安全性、可靠性研究。多点起爆装置应用场景的日益复杂对多点起爆装置的安全性提出了更高的要求。复杂电磁环境、高过载、高低温等极端环境下的多点起爆系统安全性、可靠性还有待研究。

#### 参考文献:

- [1] GOUJON J, MUSSET O, MARCHAND A, et al. Synchronous initiation of optical detonators by Q-Switched solid laser sources[C]//Technologies for Optical Countermeasures V, Cardiff, Wales, 2008, 7115: 71150P.
- [2] COPE R D. NAVAIR Fuze Overview[C]//NDIA 48th Annual Fuze Conference, Charlotte, NC, April 27-28, 2004.
- [3] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 201  
WANG Kai-min. Engineering of initiators & pyrotechnics[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2014: 201
- [4] 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.  
SHEN Hui-ming, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Design and synchronization analysis of structural parameter of a multi-point explosive circuit[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(HannengCailiao)*, 2016, 24(3): 238-243.
- [5] 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.  
ZHENG Yu, WANG Xiao-ming, HUANG Yin-sheng, et al. Design and experimental investigation on multi-point synchronous explosive logic circuit[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(1): 1-4.
- [6] 温玉全, 焦清介, 李国新, 等. 刚性面同步起爆网络设计及同步时间分析[J]. 兵工学报, 2001(1): 45-47.  
WEN Yu-quan, JIAO Qing-jie, LI Guo-xing, et al. Structural design and time analysis of synchronous explosive circuit in a rigid surface[J]. *Acta Armamentarii*, 2001(1): 45-47.
- [7] 许碧英, 李公法, 袁大鹏, 等. 平面同步传爆网络多点输出时间特性分析[J]. 火工品, 2010(6): 5-9.  
XU Bi-ying, LI Gong-fa, YUAN Da-peng, et al. Analysis on the output performance of plane multi-point simultaneous detonation transfer circuit[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(6): 5-9.
- [8] 郇玲, 胡双启, 曹雄. 环锥形传爆药的多点同步起爆网络的设计[J]. 火工品, 2004(2): 30-32.  
TAI Ling, HU Shuang-qi, CAO Xiong. Multi-point synchronous explosive circuit of the annular-conical propagating charge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2004(2): 30-32.
- [9] 施春成, 王保国, 陈亚芳, 等. 聚能装药用多点同步起爆网络设计[J]. 火工品, 2014(6): 1-4.  
SHI Chun-cheng, WANG Bao-guo, CHEN Ya-fang, et al. Design of multi-point synchronous initiation circuit for shaped charge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014(6): 1-4.
- [10] 解文辉, 刘保拴. 一种多模式起爆装置研究[J]. 火工品, 2010(4): 1-4.  
XIE Wen-hui, LIU Bao-shuan. Study on a multimode initiation device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(4): 1-4.
- [11] 吴艳萍, 魏华男, 薛润华, 等. 柔性多点同步起爆装置设计与试验研究[J]. 火工品, 2022(3): 14-17.  
WU Yan-ping, WEI Hua-nan, XUE Run-hua, et al. Design and experimental study of flexible multipoint synchronous initiation device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022(3): 14-17.
- [12] 胡华权, 裴明敬, 张德志, 等. 曲面多点同步起爆网络研制[J]. 火工品, 2008(6): 5-8.  
HU Hua-quan, PEI Ming-jing, ZHANG De-zhi, et al. Design on multi-point simultaneous initiating circuit for curved surface[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(6): 5-8.
- [13] 郭洪卫, 温玉全. 柔性同步起爆网络模块化设计方法研究[J]. 火工品, 2010(4): 5-9.  
GUO Hong-wei, WEN Yu-quan. Study on modularization design of flexible synchronous explosive circuit[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(4): 5-9.
- [14] 张郑伟, 李晓刚, 温玉全, 等. 一种柔性线同步起爆网络的设计与实验研究[J]. 含能材料, 2014, 22(3): 401-405.  
ZAHNG Zheng-wei, LI Xiao-gang, WEN Yu-quan, et al. Design and tests of a flexible linear synchronous explosive circuit[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(HannengCailiao)*, 2014, 22(3): 401-405.
- [15] 李元, 熊诗辉, 李晓刚, 等. 基于爆炸网络的定向战斗部试验及数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(S1): 9-16.  
LI Yuan, XIONG Shi-hui, LI Xiao-gang, et al. Experimental and numerical studies of aimable warhead using explosive circuit[J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(S1): 9-16.
- [16] 张新华, 赵家其, 石晋. 直线多点同步起爆MEFP战斗部技术研究[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(3): 88-91.  
ZHANG Xin-hua, ZHAO Jia-qi, SHI Jin. Research on the technology of simultaneously detonating the MEFP warhead[J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2021, 41(3): 88-91.
- [17] 梁安定, 孙兴昀, 李广嘉. 线同步爆炸网络爆轰输出同步性偏差估算[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(5): 237-240.  
LIANG An-ding, SUN Xing-yun, LI Guang-jia. Estimation of detonation output synchronization deviation on the linear synchronous explosion circuit[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2019, 40(5): 237-240.
- [18] 白颖伟, 张蕊, 李哲, 等. 柔性多点同步爆炸网络设计技术研究[J]. 含能材料, 2009, 17(2): 225-228.  
BAI Ying-wei, ZHANG Rui, LI Zhe, et al. Design on mild multi-point synchronous explosive circuit[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(2): 225-228.
- [19] 闻泉, 刘宣, 王雨时, 等. 爆炸逻辑网络安全引爆技术综述[J].

- 探测与控制学报, 2016, 38(4): 1-8.
- WEN Quan, LIU Xuan, WANG Yu-shi, et al. Summary on explosive logic network safe initiating technique [J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(4): 1-8.
- [20] SILVIA D A, RAMSEY R T, SPENCER J H. Explosive Gate, Diode and Switch: US, 3430564[P], 1969-03-04.
- [21] 叶迎华. 火工品技术[M]. 南京: 北京理工大学出版社, 2007: 176.
- YE Ying-hua. Initiating explosive device technology[M]. Nanjing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 176.
- [22] 蒋德春, 孙承纬, 曾凡群, 等. 六分圆爆炸逻辑网络研究[J]. 爆炸与冲击, 1997(3): 37-45.
- JIANG De-chun, SUN Cheng-wei, ZENG Fan-qun, et al. Studies on explosive logic network of six partite circle [J]. *Explosive and shock waves*, 1997(3): 37-45.
- [23] 温玉全, 焦清介, 蔡瑞娇, 等. 一种“二入四出”爆炸逻辑网络研究[J]. 含能材料, 2005, 13(1): 22-25.
- WEN Yu-quan, JIAO Qing-jie, CAI Rui-jiao, et al. Study on an explosive logic circuit with two-input-four output [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2005, 13(1): 22-25.
- [24] 郭洪卫, 温玉全. 柔性爆炸网络组网技术研究[J]. 火工品, 2010(3): 8-10.
- GUO Hong-wei, WEN Yu-quan. Study on network technology of flexible explosive circuit [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(3): 8-10.
- [25] 李东杰, 李华梅, 谭亮, 等. 引信电子安全与解除保险装置发展现状及趋势[J]. 探测与控制学报, 2015, 37(2): 2-6.
- LI Dong-jie, LI Hua-mei, TAN Liang, et al. Overview on fuze electronic safety and arming device development [J]. *Journal of Detection & Control*, 2015, 37(2): 2-6.
- [26] MCCORMICK R N, BOYD M D. Bidirectional slapper detonator: US, 4471697[P]. 1984.
- [27] 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.
- ZHI Yong-fa, DENG Zhi-guo, NIE Fu-de. Effect of granular size of explosive on initiation sensitivity of slapper [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002, 10(3): 139-141.
- [28] 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.
- [29] 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.
- XU Cong. Planar dielectric high-voltage switch and its application in micro-chip exploding foil initiator [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [30] Randall D Cope. Naval surface warfare center-China Lake Overview [C]//48th Annual Fuze Conference, 2004.
- [31] TIMOTHY Tobik. Air force fuze technology [C]//50th Annual Fuze Conference, 2006.
- [32] BOWER S, COAKER B M. Recent developments in Exploding Foil Initiator (EFI) based electronic safety, arming and initiation systems [J]. *Explosives Engineering*, 2014.
- [33] ETHERIDGE Mark. A low voltage command-arm system for distributed fuzing [C]//NDIA's 58th Annual Fuze Conference, 2015.
- [34] ETHERIDGE Mark. A low voltage command-arm system for distributed fuzing [C]//NDIA's 61th Annual Fuze Conference, 2018.
- [35] SOTO Gabe. NAVY overview [C]//NDIA's 59th Annual Fuze Conference, 2016.
- [36] DEEDS Michael. NAVY S&T strategy [C]//NDIA's 60th Annual Fuze Conference, 2017.
- [37] STEWART Brandon. NAVY S&T strategy overview [C]//NDIA's 61th Annual Fuze Conference, 2018.
- [38] CHARLESTON S C. European LEEFI based Fireset and ESAD [C]//NDIA's 59th Annual Fuze Conference, 2016.
- [39] MCENTIRE R S, BUTLER P. Fuzing & firing systems at sandia national laboratories [C]//53rd Annual Fuze Conference, Lake Buena Vista, FL, 2009.
- [40] SHANE Curtis, ADAM Church. Advanced fuzing technology [C]//63rd Annual Fuze Conference, 2020.
- [41] COPE R. Navy Overview [C]//55th Annual Fuze Conference, Salt Lake City, UT, 2011.
- [42] MILTON E H. U.S. Army aviation and missile research, development, and engineering center fuze Overview [C]//52nd Annual Fuze Conference, 2008.
- [43] ROBERT Hertlein. EXCALIBUR: A multi-function fuze for a multi-purpose warhead [C]//46th Annual Fuze Conference, 2002.
- [44] TIMOTHY Tobik. Air force fuze technology overview [C]//49th Annual Fuze Conference, 2005.
- [45] TIMOTHY Tobik. Air force fuze technology [C]//50th Annual Fuze Conference, 2006.
- [46] MILTON E. U.S. Army aviation and missile research, development, and engineering center (AMRDEC) overview [C]//52nd Annual Fuze Conference, 2008.
- [47] SHANNON H. Army aviation and missile research, development, and engineering center overview [C]//54th Annual Fuze Conference, 2010.
- [48] GERT Scholtes. Novel techniques for improved munitions development [C]//44th Annual Gun and Missile System Conference, 2009.
- [49] ROBERT N J, Evan Y. Electronic safety and arming device for the 105 mm STAR ATO demonstration [C]//56th Annual Fuze conference, 2012.
- [50] 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.
- YANG Zhen-ying, MA Si-xiao, CHU En-yi, et al. Study on the exploding foil multi-point initiation device [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001(4): 9-11.
- [51] 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.
- YANG Zhen-ying, CHU En-yi, XIE Gao-di. Study on exploding foil initiator multi-point ring-like simultaneous initiation technique [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2003(23): 47-51.
- [52] 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.
- HAN Ke-hua, REN Xi, ZHANG Yu-ruo, et al. The design of in-line multi-spot initiation system for directional warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2013, 33(6): 78-81.
- [53] 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.
- LIANG Che-ping, ZHANG Yu-ruo, JIN Li, et al. Research on

- a multi-point simultaneous initiation system based on EFI[J]. *Explosive Materials*, 2018, 47(3): 31-36.
- [54] 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.  
HAN Ke-hua, JIAO Qing-jie, CHU En-yi, et al. Two design methods and performance of multi-point synchronous initiation systems based on synchronous explosive circuit and exploding foil initiator technologies [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(S2): 102-110.
- [55] 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, 1507(2): 022018
- [56] 张秋. 爆炸箔超压芯片的性能表征与多点起爆规律研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.  
ZAHNG Qiu. Performance characterization of exploding foil overpressure chip and research on multi-point initiation regularity [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [57] 杨智. 高压开关和爆炸箔芯片的设计、制造与发火性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2021.  
YANG Zhi. Design, fabrication and firing properties of high-voltage switches and exploding foil chips [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2021.
- [58] 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.  
LIU Jian-qing, GU Wen-bin, XU Hao-ming, et al. Effects of multi-point initiation charge configuration parameters on EFP with fins formation [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(5): 594-599.
- [59] 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.  
SHEN Hui-ming, LI Wei-bing, WANG Xiao-ming, et al. Study on the penetration ability of EFP by annular multi-point initiation [J]. *Journal of Ballistics*, 2017, 29(3): 49-55.
- [60] 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.  
WU Hai-jun, WANG Ke-hui, KE Ming, et al. Numerical simulation on formation and penetration processes of the annular jet with multi-points synchronous explosive circuit [J]. *Modern Applied Physics*, 2018, 9(2): 77-84.
- [61] 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: 86-92.
- [62] 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.  
GUO Mei-fang, FAN Ning-jun. The study on a multimode warhead and the initiation technology [J]. *Journal of Detection & Control*, 2005(1): 31-34+61.
- [63] BENDER D, FONG R, NGW, et al. Dual mode warhead technology for future smart munitions [A]. 19th International Symposium of Ballistics [C]//Interlaken, Switzerland, Casino Kursaal Congress Center. 2001. 679-684.
- [64] 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.  
LI Yuan, ZHAO Qian, XIONG Shi-hui, et al. Numerical modeling on lethality of a faceted prismatic warhead [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(2): 97-103.

## Review on Multi-point Initiation Technology and its Applications

NING Zheng<sup>1,2</sup>, CHEN Kai<sup>3</sup>, JIAN Hao-tian<sup>1,2</sup>, QIAN Jiang<sup>1,2</sup>, ZHU Peng<sup>1,2</sup>, SHEN Rui-qi<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** This review summarizes the development and application status of explosive network multi-point initiation technology and in-line multi-point initiation technology. The application status of multi-point synchronous explosive network and multi-point logical explosive network were introduced respectively, and their advantages and disadvantages were analyzed. The research status of in-line multi-point initiation technology at home and abroad was compared, and the gaps in the current in-line multi-point initiation technology were pointed out. The influence of parameters such as the number of initiation points, initiation position on the output of the multi-point initiation system were summarized. The future research directions of multi-point initiation technology were pointed out: precise control of multi-point initiation, modularization and integration of multi-point initiation devices, low-cost multi-point initiation technology, and safety and reliability of multi-point initiation devices in complex environments.

**Key words:** multi-point initiation; explosive network; exploding foil initiator; in-line multi-point initiation system

**CLC number:** TJ5; TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023128

**Grant support:** Open Project Fund for Key Laboratory of Applied Physical Chemistry (No. 6142602220101)

(责编: 卢学敏)