

文章编号:1006-9941(2022)04-0396-16

## 直列式爆炸箔点火及相关技术研究进展

简昊天<sup>1,2</sup>,汪柯<sup>1,2</sup>,高峰<sup>3</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. 空装驻西安地区第七军事代表室, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 从直列式点火系统构成、许用点火药硼-硝酸钾(Boron-Potassium Nitrate, BPN)的燃烧机理和新制备工艺以及国内外直列式爆炸箔点火相关标准三个方面,综述了直列式爆炸箔点火及相关技术的发展现状及应用。直列式点火系统有多功能多任务需求,因此作为控制模块的电子安全与解除安装置呈现出编程寻址、多点协同的发展趋势,系统中各元件通过小型化和低能化减少系统装置所占空间。BPN通过新制备工艺进行组分粒度微纳化,生成核壳结构,优化BPN燃烧性能、吸湿性和安定性等。总结并对比了国内外直列式爆炸箔点火相关标准。分析了直列式爆炸箔点火尚需研究的问题:冲击片直接点火BPN机理和BPN组分粒度对冲击点火感度的影响;BPN隔板点火的影响因素和规律;多种隔板点火结构的性能比较;BPN新制备方法及其对性能的优化。

**关键词:** 直列式爆炸箔点火;爆炸箔起爆器(EFI);冲击片点火;隔板点火;硼-硝酸钾

中图分类号: Tj45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021280

### 1 绪论

直列式爆炸箔点火/起爆技术是近30年来逐步成熟并得到广泛应用的一种先进火工品技术,同时因其适于智能化、小型化和多点协同作用等特点,直列式爆炸箔点火/起爆技术被认为是实现新一代点火/起爆系统的重要技术途径之一。

爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator, EFI),是实现直列式爆炸箔点火/起爆技术的关键元件,由美国Lawrence-Livemore实验室Stroud等<sup>[1]</sup>于1976年首次提出。EFI的发展历程如图1所示,经过电爆所需能量较高的第一代EFI<sup>[2-3]</sup>和利用了集成电路工艺的第二代低能量爆炸箔起爆器(Low Energy EFI, LEEFI)<sup>[4]</sup>,目前已发展到第三代微爆炸箔起爆器(Micro EFI, McEFI)<sup>[5]</sup>。McEFI的制备利用微机电(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)工艺,大幅度降低了生产成本,减小

了器件体积,降低了发火能量;同时采用低成本、扁平化的平面高压开关控制电容放电,使其更便于小型化应用。McEFI设计理念和工艺方法常用薄膜集成工艺和低温共烧陶瓷工艺<sup>[6]</sup>,近年来南京理工大学的杨智<sup>[7]</sup>使用印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB)技术,将McEFI和平面三电极开关集成在一块PCB上,进一步降低了EFI的生产成本和难度。McEFI还可以与其它先进微作动元件、传感器和微纳含能材料等集成封装,实现换能信息化、结构微型化和序列集成化的第四代火工品<sup>[8-9]</sup>。

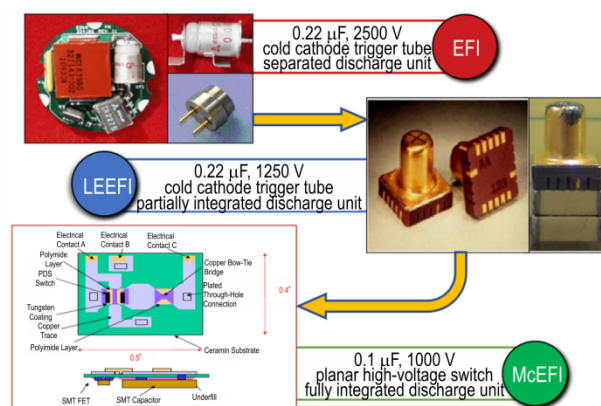


图1 爆炸箔起爆器的发展历程<sup>[5]</sup>

Fig.1 The development process of EFIs<sup>[5]</sup>

收稿日期: 2021-10-21; 修回日期: 2021-12-16

网络出版日期: 2022-02-21

作者简介: 简昊天(1997-),男,博士研究生,主要从事直列式爆炸箔点火和起爆技术研究。e-mail: jianhaotian@njust.edu.cn

通信联系人: 朱朋(1978-),男,博导,副研究员,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@njust.edu.cn

引用本文: 简昊天,汪柯,高峰,等. 直列式爆炸箔点火及相关技术研究进展[J]. 含能材料, 2022, 30(4):396-411.

JIAN Hao-tian, WANG Ke, GAO Feng, et al. Review on In-line Exploding Foil Ignition and Related Technologies[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(4):396-411.

EFI的本质安全性在于:(1)其传爆药或点火药与桥箔在空间上被加速膛和飞片层隔开;(2)桥箔爆炸需要数千安培的瞬态电流激励( $di/dt$ ),因而对静电、杂散电流、射频等电磁环境具有较高的抵抗力,能适应复杂、极端的电磁环境;(3)EFI所使用的许用传爆药和点火药较为钝感且具有较高的装药密度;(4)EFI具有非线性发火的特点。EFI的高安全性和高可靠性使得使用EFI的火工序列没有设置隔断式安保装置的必要性,故称其为“直列式”<sup>[10]</sup>。随着爆炸箔技术的进步和成熟,McEFI的先进生产工艺和优良性能符合装置小型化、低成本和高安全性的需求,直列式起爆/点火系统也越来越受到重视。

目前,国内外对EFI的起爆机理研究已经较为深入<sup>[11]</sup>,并在起爆六硝基芪(Hexanitrostilbene, HNS)方面有较为全面的研究<sup>[12]</sup>,而对冲击片直接点火的点火机理研究较少。为此,笔者基于前人的工作,着眼于国内外直列式爆炸箔点火的研究进展和应用,总结了直列式爆炸箔点火系统的控制原理、含能药剂的直列式激发方式和相关技术等,探讨了直列式爆炸箔点火需要深入研究的方向和亟待解决的问题。

## 2 直列式爆炸箔点火系统基本结构和研究现状

直列式爆炸箔点火系统一般用于固体火箭的安全点火装置(Ignition Safety Device, ISD)。ISD主要由控制模块(control module)和点火模块(fire module)构成。控制模块由电子安全与解除保险装置(Electronic Safe and Arm Device, ESAD)构成,而点火模块根据气密性等要求一般分为两种:一种称为爆炸箔爆燃点火器(Exploding Foil Deflagration Initiator, EFDI),EFDI直接用点火药硼-硝酸钾(Boron-Potassium Nitrate, BPN)作为EFI的输出药,被爆炸箔驱动飞片撞击而激发,完成点火动作;另一种称为爆炸箔隔板点火器(Exploding Foil Through Bulkhead Initiator, EFTBI),由EFI和隔板起爆器(Through Bulkhead Initiator, TBI)组成,EFI起爆后,其产生的爆轰波经TBI的隔板透射,激发受主药,受主药输出药BPN实现ISD点火功能。ISD构成示意图如图2所示。

本节将根据直列式爆炸箔点火系统的结构,综述ISD、ESAD、EFDI和EFTBI的作用特征和应用现状。

### 2.1 直列式安全点火装置(ISD)

2005年,ATK公司<sup>[13]</sup>设计了一款以LEEFI为首发

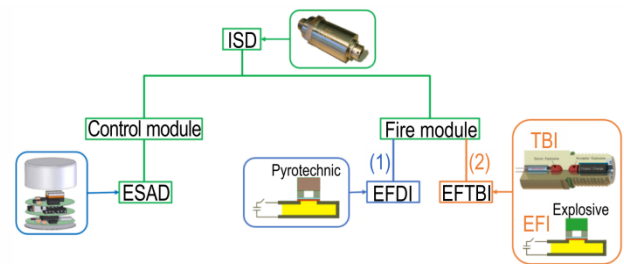


图2 ISD的两种构成方式:(1) ESAD+EFDI; (2) ESAD+EFTBI  
Fig.2 Two forms of ISD: (1) ESAD+EFDI; (2) ESAD+EFTBI

点火元件的ISD,如图3所示。图3a为ISD整体结构示意图,LEEFI与ESAD共同放置在点火器腔体内部,该LEEFI采用雷诺系统公司(Reynolds Systems, Inc., RSI)的爆炸箔起爆技术,将该LEEFI直接与输出药BPN结合,用于火箭发动机点火;图3b为ISD内部元件的分解视图,高压的电容放电单元(Capacitor Discharge Unit, CDU)和低压的ESAD被隔离元件隔开,以实现电磁屏蔽;图3c为ISD内部元件展开实物图,电路集成在柔性硬质电路卡上,可以采取手风琴式折叠放置于点火器中,尽可能地使得ISD结构更加紧凑。ESAD根据符合要求的上位机信号命令解除保险后,使高压电容充电并通过CDU将能量释放给爆炸箔使其发生电爆炸,完成起爆EFI的功能。

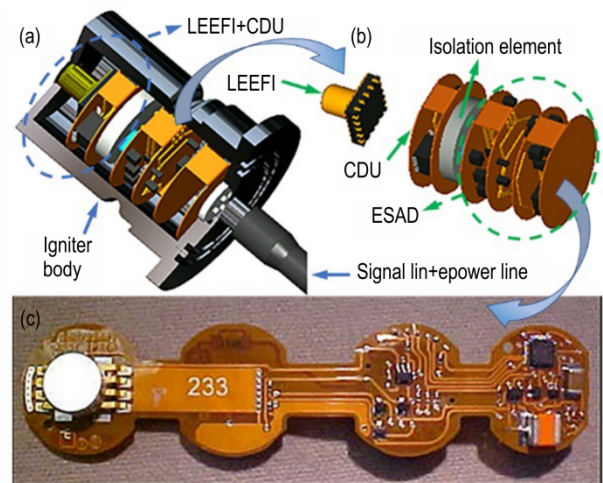


图3 ATK公司的直列式LEEFI点火器:(a) ISD整体结构示意图;(b) LEEFI和ESAD爆炸视图;(c) LEEFI和ESAD实物展开图<sup>[13]</sup>

Fig.3 In-line LEEFI igniter of ATK company: (a) overall structure diagram of ISD; (b) explosion view of the LEEFI and ESAD; (c) physical expansion drawing of the LEEFI and ESAD<sup>[13]</sup>

使用EFI的ISD具有布局灵活的优势。根据设计需要,可以灵活地通过导线或导爆索等调整控制中枢、ESAD、EFI和TBI的布局,多样化的布局选择降低了系

统设计难度。Ensign-Bickford 航空航天与防务公司<sup>[14]</sup>将 ISD 的布局方式大致分为如图 4 所示的三类:(a) ISD 包含 ESAD、EFI 和 TBI 作为一个整体进行布局,与固体发动机点火器直接相连,根据上位机的控制和动力系统的命令进行动作,启动点火器,实现固体推进剂点火;(b) ISD 被分为控制模块(ISD Control Module)和点火模块(ISD Fire Module),控制模块一般由 ESAD 组成,根据命令逻辑实现电子安保,点火模块由 DC-DC 高压转换单元和 EFI 组成,两个模块可以根据需求分别设置在不同位置,仅通过信号线和电源线连接;(c)将 ISD 中的 TBI 单独分离出来,ISD 起爆后通过柔性约束导爆索(Flexible Confined Detonation Cord, FCDCA)将爆轰传递给 TBI 的施主药,施主药的爆轰通过隔板透射激发受主药,点燃点火器。该 ISD 通过了设计鉴定,并通过了 MIL-DTL-23659E 中规定的电烤爆试验。

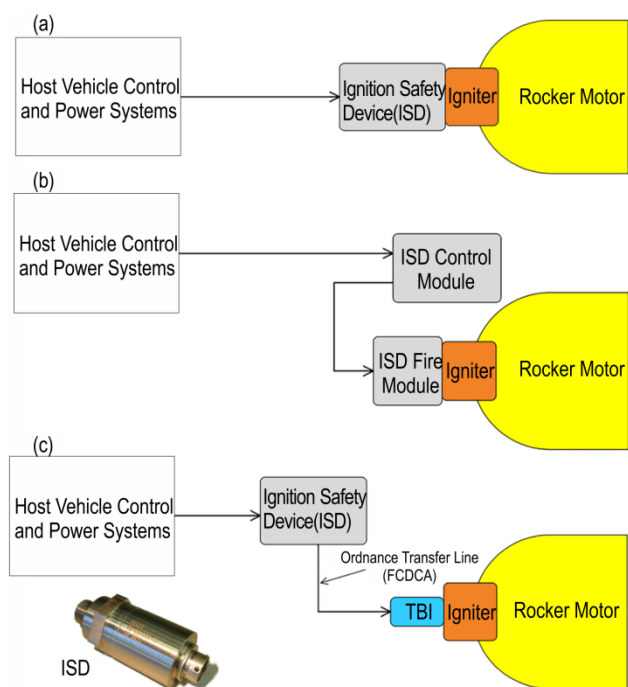


图 4 ISD 分布方式:(a)ISD 作为一个整体设置在点火器近端;(b)ISD 分离成控制模块和发火模块,分别进行设置;(c)ISD 布置在远端通过 FCDCA 起爆 TBI 并点燃点火器<sup>[14]</sup>

Fig.4 ISD distribution modes: (a) ISD set as the whole component at the proximal end of the igniter, (b) ISD which was separated and set into the control module and the fire module, respectively, (c) ISD arranged at the far end for detonating the TBI and igniting the igniter through the FCDCA<sup>[14]</sup>

2015 年, PSEMC 公司<sup>[15]</sup>公布了一款采用 ISD 的多点点火系统(Multi-Point, MPI),如图 5 所示。PSEMC 公司综合考虑了安全性和技术难度,选择采用

“一个安保控制+多个点火单元”的多点点火模式。该模式可以最大限度利用已有的 ESAD 技术和 EFI 技术,降低开发新技术风险;同时可以根据不同使用环境的设计需求,快速调整设计结构和控制逻辑,降低技术升级风险成本。ESAD 向各个 ISD 传递能源(Ordnance Power)和解除保险的命令信号。两条信号通道分别采用数字信号(INH1)和模拟交流信号(INH2)以降低出现共模问题的风险。应用数据存取组件库(Server Data Access Components, SDACs), ESAF 根据采集到的不同环境信息,发送解除安保信号给不同的 ISD,实现根据任务环境需求而有选择地进行点火。

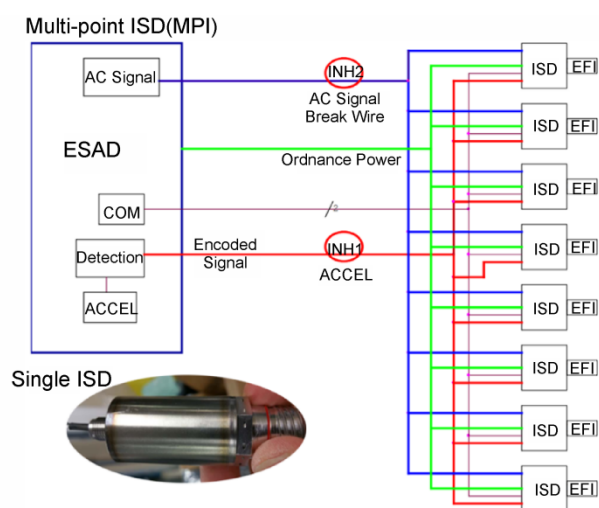


图 5 多点 ISD 点火系统构造示意图<sup>[15]</sup>

Fig.5 Structural diagram of the multipoint ISDs<sup>[15]</sup>

2021 年, Perrin<sup>[16]</sup>研究了目前应用环境对于战术导弹 ISD 的要求,认为 ISD 需要具有多功能性,可以实现多任务要求,其安全性应当与弹头引信对标。如图 6 所示, Perrin 对比了电机隔断结构、全电子 ISD 直列式结构和电机与光开关隔断结构,认为直列式结构具有应用于多脉冲点火的可能性,且适应能力强。以 JUNGHANS Defence 公司产品举例,点火方式可以采取直接点火或者与 TBI 结合使用。

ISD 系统可以满足现代先进武器多功能多任务的点火模式,具有完成多点协同点火的能力,高安全性和高可靠性可以适应复杂环境的生存需求,是构建新一代点火系统的重要技术手段。

## 2.2 全电子安全与解除保险装置(ESAD)

直列式爆炸箔点火系统由 ESAD 提供安保措施, ESAD 的原理框图如图 7 所示<sup>[17]</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。

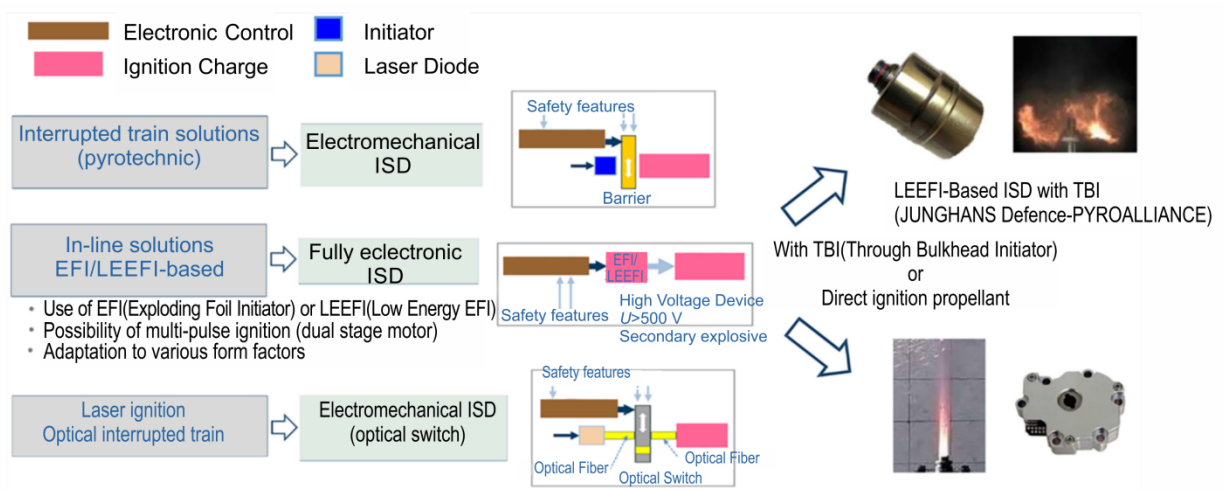


图6 ISD 安保方式对比<sup>[16]</sup>

Fig.6 Comparison of different safe and arm methods of ISD<sup>[16]</sup>

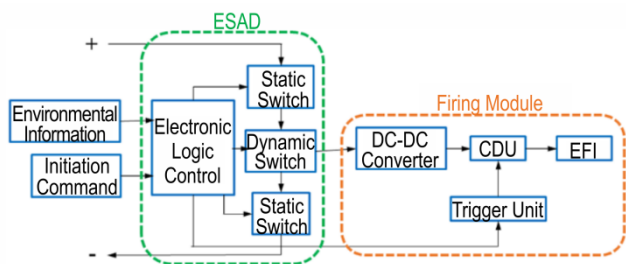


图7 ESAD 原理框图<sup>[17]</sup>

Fig.7 Functional block diagram of ESAD<sup>[17]</sup>

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。

在第48届引信年会上,Farris等<sup>[18]</sup>提出用LEEFI和

ESAD将传统点火系统进行改造升级,提高安全性和可靠性。2005年,ATK公司的ISD<sup>[13]</sup>通过使用包括嵌入式电子逻辑的独立电子元件,确保当命令以正确的顺序接收时ISD方可作用,其命令接收逻辑如图8所示。序列#1,ISD处于安全模式,此时没有外来信号输入。ISD会一直保持安全模式直到输入“ISD\_ENABLE”命令,ISD转到序列#2状态,两个定时器开始根据设置的时间窗口进行计时。此时,ISD仍未被激活。经过最小设置时间后,ISD转为序列#3所示的激活状态,准备好接受“ISD\_ARM\_FIRE”命令。当接到此命令后,处于序列#4状态时,放电回路被接通电源,发火电容开始充电。ISD会在200ms内获得序列#5解除保险状态。如序列#5所示,集成平面开关(Integrated

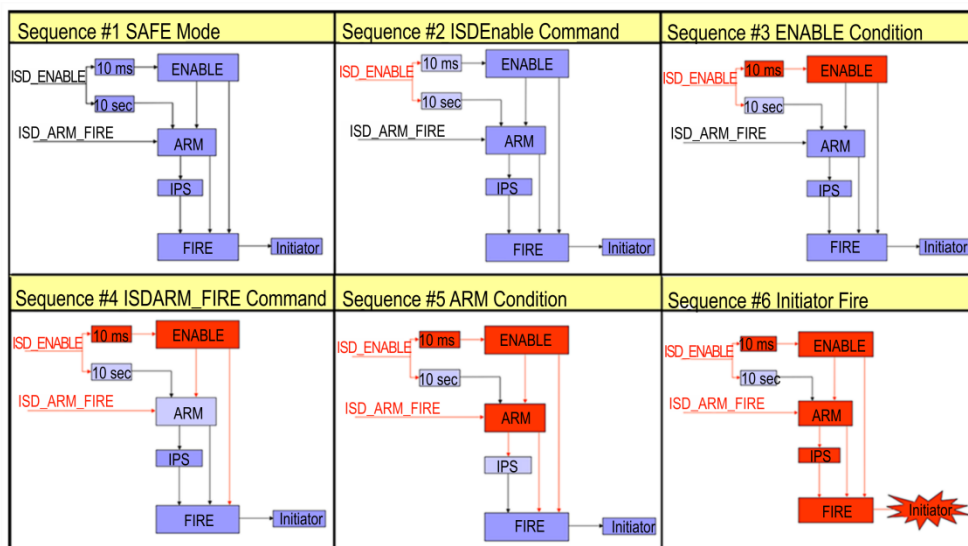


图8 ATK's ESAD的命令接受逻辑顺序与状态<sup>[13]</sup>

Fig.8 The logic sequence for accepting the order and states of ATK's ESAD<sup>[13]</sup>

Planar Switch, IPS)会限制发火电压直到电压超过 IPS 的击穿电压。序列#6,当达到 IPS 击穿电压,IPS 被击穿使发火回路导通,EFI 起爆。

在第 53 届引信年会上,美国桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratories)<sup>[19]</sup>展示了其自 20 世纪 80 年代以来,在 ESAD 和 CDU 上的成果,如图 9 所示,反映了 ESAD 微型化集成化的趋势。随着 MEMS 工艺技术的发展,出现了整体式微型电容放电单元,ESAD 微型化得到进一步的发展。

2011 年,美国海军<sup>[20]</sup>公布了其低成本微型 ESAD 的研究成果,如图 10 所示。该装置采用超低成本的高压组件和 LEEFI,体积已缩小至 1.1 in<sup>3</sup>(约 18.02 cm<sup>3</sup>),预计在采用三层重叠隔离结构后,装置可以进一步缩小体积到 0.44 in<sup>3</sup>(约 7.21 cm<sup>3</sup>)。

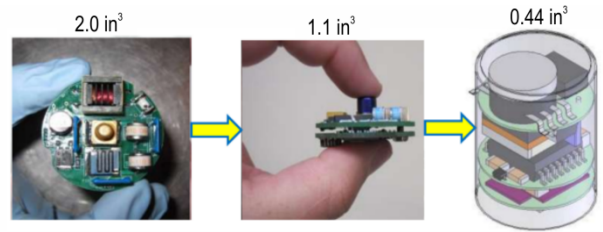


图 10 低成本微型 ESAD<sup>[20]</sup>  
Fig.10 Low cost micro ESAD<sup>[20]</sup>

第 55 届引信年会,Harward 等<sup>[21]</sup>提出对现行的 ESAD 电路进行升级。当发火电路的电压达到全发火电压时,武器系统则判定为解除保险状态。如果武器系统出现意外地或过早地进入解除保险状态,则该武器系统是不安全的。为了满足现行 ESAD 需求,大多数武器系统都配有高能量热电池,而该热电池可以快速地为 ESAD 提供发火能量。这导致一旦电路出现问题,武器系统会很快被热电池激发,进入解除保险状态,造成安全隐患。因此,Harward 等对 ESAD 电路进行了如图 11 所示的升级,其中蓝色部分覆盖的电路为改造升级的电路。升级后的 ESAD 可以使用低能量电源供电,并通过控制电流的大小,使其以恒定的速率积累。当满足发火条件时,储存的能量再通过变压器升压,使 EFI 发火。由于使用恒定电流积累能量,则可以控制能量积累达到全发火能量的时间,避免出现武器系统过早进入解除保险状态的情况。选择低能量电源要考虑当高压变压器短路时,确保电源提供的能量不足以发火。这种升级后的 ESAD 仅使用低能量电源,避免了高能量电源带来的潜在风险,并通过发火能量积累时间和发火能量低压积累提供了新的安全保护措施

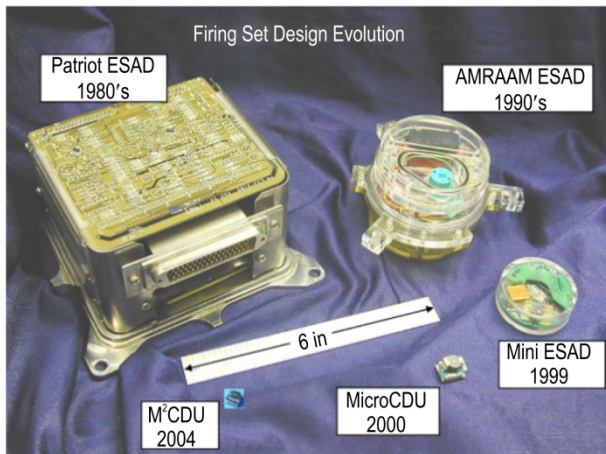


图 9 桑迪亚国家实验室 ESAD 的发展<sup>[19]</sup>  
Fig.9 The development of ESADs of Sandia National Laboratories<sup>[19]</sup>

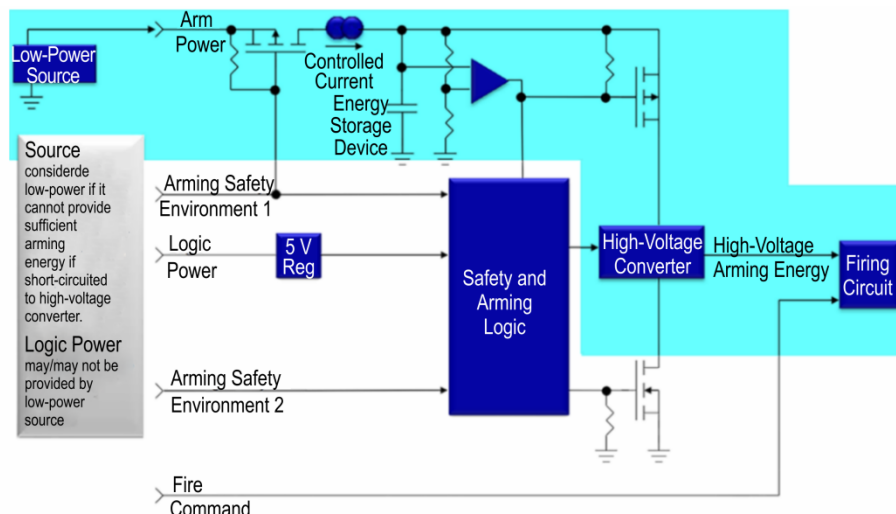


图 11 Raytheon 公司对 ESAD 的升级:蓝色覆盖部分为升级组件<sup>[21]</sup>  
Fig.11 Upgrade of ESAD from the Raytheon company. The upgrade component was indicated by blue color<sup>[21]</sup>

施,进一步提高了ESAD的安全性。

2016年,Perrin<sup>[22]</sup>总结了欧洲ESAD从20世纪90年代到2015年的发展,如图12所示,概述了ESAD具有的优势特点:含能药剂高度钝感;抗静电和抗电磁干扰能力强;可以抗高过载;电子安全管理灵活,全生命周期可检测;系统失效后可以恢复安全状态降低风险;满足“智能弹药”的多点起爆、精确发火等设计要求。

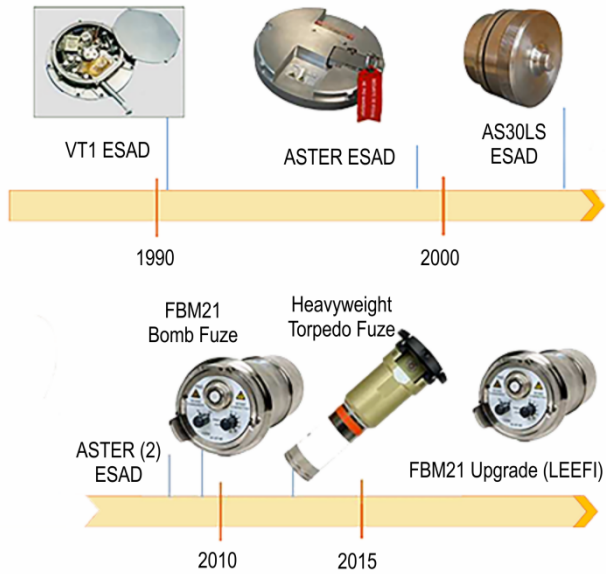


图12 欧洲ESAD发展历程<sup>[22]</sup>

Fig.12 The development process of ESADs of European companies<sup>[22]</sup>

2020年,美国桑迪亚国家实验室<sup>[23]</sup>强调小型化是先进引信技术的重要课题之一,并展示了其设计的高度集成的微型ESAD,如图13所示。参考物10美分硬币的直径为17.91 mm,厚度为1.35 mm。因此推测,图13所示的两款微型ESAD体积分别为约0.97 cm<sup>3</sup>(左一)和约1.76 cm<sup>3</sup>(右一),均小于2011年预期的0.44 in<sup>3</sup><sup>[20]</sup>。这种微型ESAD不但有利于点火或起爆装置的小型化,还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。

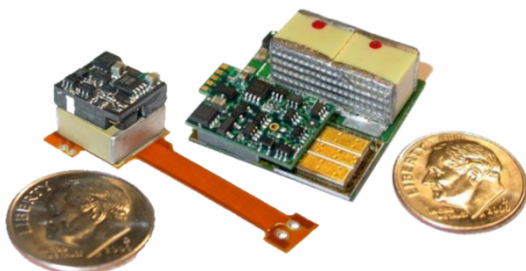


图13 桑迪亚国家实验室的微型ESAD<sup>[23]</sup>

Fig.13 micro ESAD of Sandia National Laboratories<sup>[23]</sup>

### 2.3 爆炸箔爆燃点火器(EFDI)

2005年,KDI精密器件公司<sup>[24]</sup>以1967年Forrestal航空母舰着火引起弹药殉爆,造成巨大损失和人员伤亡为背景,提出ESAD和LEEFI技术发展有利于提高ISD的安全性,并提出EFDI的概念和相关产品,如图14所示。EFDI在EFI的结构上增加了点火药BPN,使输出由HNS的爆轰转变为BPN的燃烧,从而完成ISD点火动作。

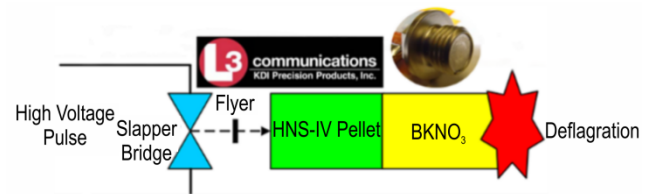


图14 EFDI示意图和L3公司的EFDI产品<sup>[24]</sup>

Fig.14 The schematic of EFDI and a EFDI product from L3 company<sup>[24]</sup>

2011年,杨振英等<sup>[25]</sup>为了降低爆炸箔点火器的发火能量,采用如图15的两级装药以构成点火器的含能药剂:一级装药为超细BPN,其硼粉的平均粒径为0.59~0.62 μm, KNO<sub>3</sub>的平均粒径<3 μm,以此提高BPN点火药的飞片点火感度,降低爆炸箔点火器的发火能量;二级装药为未经过细化处理的传统BPN钝感点火药,作为点火器的输出药。在该实验中,超细BPN的全发火能量低至55 mJ。张玉若等<sup>[26]</sup>研究了EFI桥箔形貌和BPN点火药原料粒度对于冲击片点火器所需发火能量的影响,其结果认为:致密形貌的桥箔可以增强EFI的点火能力,细化的硼粉和KNO<sub>3</sub>可以提高BPN的感度,均有利于降低冲击片点火器的发火能量。

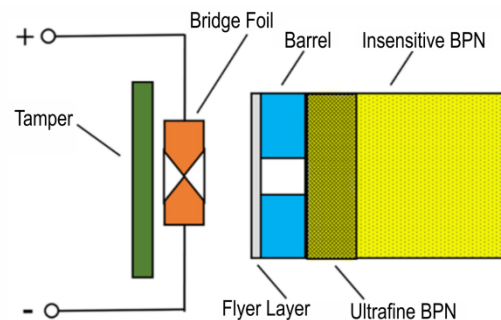


图15 爆炸箔点火器二级装药示意图<sup>[25]</sup>

Fig.15 The schematic of two-level charge in EFDI<sup>[25]</sup>

2016年,在第59届引信年会,英国e2v公司<sup>[27]</sup>展示了一款可以用于固体燃料发动机点火的直列式爆炸箔ISD,为了进一步缩小点火器结构尺寸,该ISD舍弃TBI,使用了爆炸箔飞片直接撞击BPN点火的EFDI作

为点火器,图 16 是其结构的分解视图:低压 ESAD 和高压 CDU 以及 EFDI 都装在同一个腔体中。低压 ESAD 和高压 CDU 通过隔板分离,实现电子屏蔽;爆炸箔与 CDU 用脚线相连,采用绝缘的陶瓷板隔开,实现含能药剂和高压电路分离,BPN 药柱则由固定块限制移动和金属薄片封装。

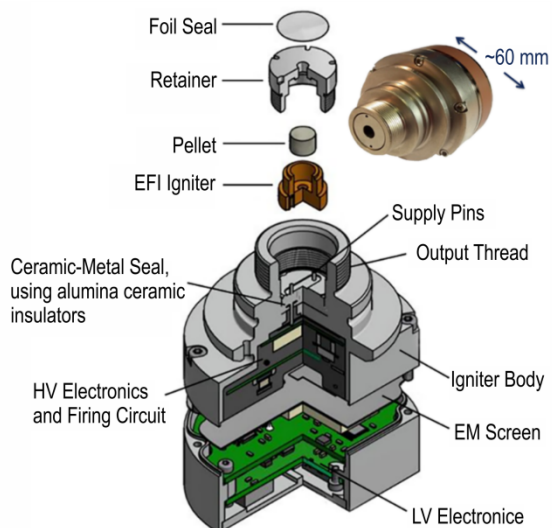


图 16 英国 e2v 公司的爆炸箔点火器结构示意图<sup>[27]</sup>

Fig.16 The structural diagram of English e2v's EFDI<sup>[27]</sup>

2021 年,Excelitas 公司<sup>[28]</sup>基于原有的蓝芯起爆器 (Blue Chip@ Initiator),开发了一种直接点火的 EFDI,如图 17 所示,与 KDI<sup>[22]</sup>同样选择了先由飞片起爆 HNS,再由 HNS 引燃 BPN 药柱。该 EFDI 的输出端预先刻出凹槽,当 BPN 燃烧时,燃烧产物在腔体内造成高压,薄弱的凹槽会成为腔体破坏的突破口,输出端根据凹槽形状呈花瓣状展开,释放燃烧产物进行点火。这种预制凹槽减小了输出端因高压燃烧产物的释放对输出端破坏的不确定性,避免了随机的输出端碎片对点火性能带来的负面影响。

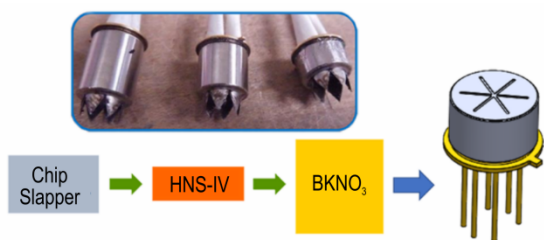


图 17 Excelitas 公司的 EFDI<sup>[28]</sup>

Fig.17 The EFDI from the Excelitas company<sup>[28]</sup>

目前国外设计生产成熟的 EFDI 产品的公司有德国 JUNGHANS Defence、英国 e2v、美国 Excelitas、Reynolds Systems、PSEMC、Ensign-Bickford、ATK、

Raytheon 和 L3 Technologies 等。总的来说,EFDI 的装药结构可以分为 Slapper-BNP 和 Slapper-HNS-BPN 两类,前者如图 15 和图 16 所示,后者如图 14 和图 17 所示。根据实践经验,Slapper-BNP 装药结构所需发火能量较小,对壳体强度要求较低。但 Slapper-BNP 装药结构往往需要采用超细化的 BPN 作为一级装药,飞片才可以用较低能量将其点燃,这使得该装药结构对 BPN 的粒度和混合均匀性有较高要求,同时 BPN 组分的超细化对药剂的安全性、可靠性和安定性带来的具体影响仍不明确。Slapper-HNS-BPN 装药结构利用 EFI 的成熟技术降低了技术风险,HNS-IV 作为直列式许用单质炸药,相对于复合点火药 BPN 具有更高的安定性,使用 HNS-IV 对短脉冲冲击做出响应,再通过 HNS-IV 的高热值和高爆轰压力共同作用点燃 BPN 药柱,增强了 EFDI 的可靠性和瞬发度。但需要注意 HNS 的反应较为猛烈,如果产生的压力过强会破坏 BPN 药柱甚至点火器壳体的结构,导致 EFDI 输出不稳定,同时该结构需要更高的发火能量确保 HNS-IV 起爆。

直列式爆炸箔点火技术以 LEEFI 和 ESAD 的高安全性、低成本和小型化等优势为核心,又在 McEFI 技术的基础上得到二次发展,目前已成为支撑钝感弹药与低易损发动机平台的一项高安全、可兼容弹道以及制导等的低功耗点火技术。

综合分析 EFDI 和 ESAD 的演变,小型化和低能化是二者最重要的发展方向,这符合直列式点火系统多点协同点火技术的需求。直列式点火系统为了完成多点作业需要更多的 EFDI 和 ESAD,因此也需要占据更多的弹体内部空间。EFDI 和 ESAD 的小型化可以减小弹内空间设计难度,有利于直列式点火系统布署多点作业。EFDI 和 ESAD 的低能化不但可以提高直列式点火系统的安全性,还降低了对 DC-DC 高压转换单元的要求,有利于该单元的小型化。为了实现直列式点火系统元器件小型化,使 EFDI 和 ESAD 结构一体化成为一条切实可行的技术路线。将 EFDI 与 ESAD 高度集成,可以缩小装置体积、降低能耗和提高能量利用率,但该方法对集成电路技术有较高要求和一定技术门槛。

#### 2.4 爆炸箔隔板点火器 (EFTBI)

固体火箭的推进剂燃烧时,产生的大量气体会对腔体产生较大的压力,而点火器结构与燃烧室连通,也会受到燃烧气体产物的作用。为了避免燃烧气体破坏前端控制系统和满足燃烧室密闭性要求,点火器需要在高温高压下提供较长时间的气密性。相比仍需要两

根脚线与前端CDU连接的EFDI,EFTBI可以更好地满足固体火箭发动机对气密性的要求。

根据EFTBI与前后器件连接方式的不同,可以分为直连式和分装式:如图18a所示,直连式EFTBI的施主药与前端起爆部分直接相连,仅有受主药部分的壳体有螺纹可与其它装配器件进行组装,这种EFTBI在生产和贮存时,往往与EFI直接连接封装在一起;分装式EFTBI,如图18b所示,TBI施主药与前端的LEEFI通过壳体外螺纹连接,当LEEFI爆炸后突破施主药的封装壳体,便可以起爆TBI的施主药,TBI的受主药受到经隔板透射的冲击波刺激而发火后,燃烧产物通过与受主药连接的传火管道对下一级点火药进行点火。分装式EFTBI在生产和贮存时可以单独封装,在使用时再进行装配。分装式EFTBI在全生命周期具有更好的安全性,便于单独进行测试。

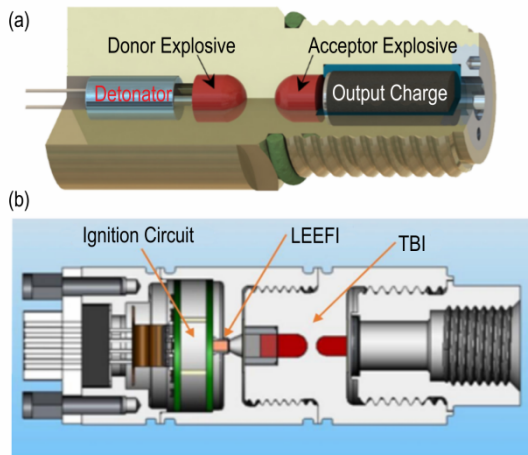


图18 EFTBI的结构:(a)直连式<sup>[29]</sup>;(b)分装式<sup>[30]</sup>  
Fig.18 The structures of EFTBI: (a) directly connected<sup>[29]</sup>, (b) separately assembled<sup>[30]</sup>

EFTBI受主药的激发有多种方式。如图19所示,Excelitas公司<sup>[31]</sup>的这款基于ESAD和EFI的ISD,EFTBI受主药由两级装药构成,第一级装药HNS在冲击波激发后发生剧烈的化学反应产生爆燃甚至爆轰,激发作为第二级输出药的BPN药柱。受主药的两级装药结构,第一级装药往往起到接受刺激引燃第二级装药的作用,而第二级装药作为输出药保证EFTBI的输出性能。该EFTBI的受主药二级装药直接接触,炸药产生的热量和冲击波直接作用在点火药柱上,因此需要考虑HNS的爆燃甚至是爆轰对BPN药柱结构的影响。

为了避免一级装药对输出药柱的结构产生破坏,从而影响EFTBI燃烧输出性能,常在一级装药和二级装药直接留有空气隙,如图20所示。空气隙会衰

减炸药爆燃产生的过高压力,避免BPN药柱因高压而发生破碎、裂纹等损伤,使得燃烧出现不均匀不稳定的现象。由于两级装药分离的缘故,装配设计时需要注意各自的限位,空气隙与隔板的约束还起到限位第一级装药的作用。值得注意的是,EFTBI的隔板结构有两种:如图20a所示,输出药室在封装受主药时,其靠近EFI的端面起到了隔板结构的功能,由于这种隔板是由可独立封装的输出药室提供的,故称其为外隔板;如图20b所示,隔板结构与EFTBI壳体成一体化,隔板属于EFTBI的内部固有结构,故称其为内隔板。

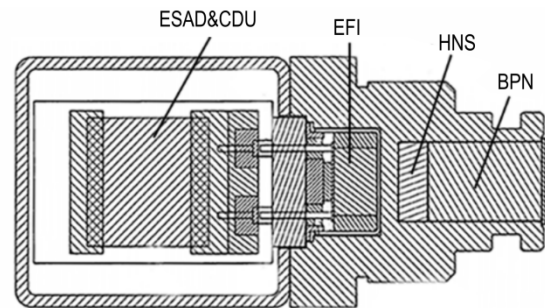


图19 Excelitas公司的直列式隔板ISD<sup>[31]</sup>  
Fig.19 The in-line thru-bulkhead ISD from the Excelitas company<sup>[31]</sup>

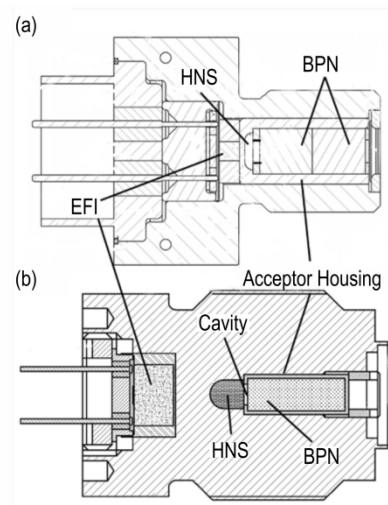


图20 两种带空气隙的二级受主药EFTBI:(a) Reynolds Systems, Inc.<sup>[32]</sup>;(b) Agency for Defense Development<sup>[33]</sup>  
Fig.20 Two EFTBIs with two-level charge and the air gap: (a) Reynolds Systems, Inc.<sup>[32]</sup>, (b) Agency for Defense Development<sup>[33]</sup>

EFTBI受主药的激发,除了使用炸药作为第一级装药点火药,还可以使用可反应箔片利用氧化还原反应放热作为引燃方式,如图21所示。Reynolds Systems公司<sup>[34]</sup>的EFTBI在隔板结构与受主药之间,除了留有空气隙,还用可反应箔片(reactable member)和



氧化物箔片(oxidizer member)组成第二个隔板。当施主药产生的爆轰波透过隔板作用在第二个隔板上,可反应箔片和氧化物箔片将受到强烈的挤压而发生氧化还原反应,放出大量热而发生燃烧,因此可以点燃EFTBI的受主药。这种受主药激发方式,根据其结构和作用特征,可称其为二阶反应性隔板点火。反应性隔板点火可以将高活性金属等材料引入EFTBI设计,从而为提高EFTBI的安全性和可靠性提供新的技术手段,值得进一步对其点火阈值、发火机理、输出性能和设计优化等进行系统性研究。

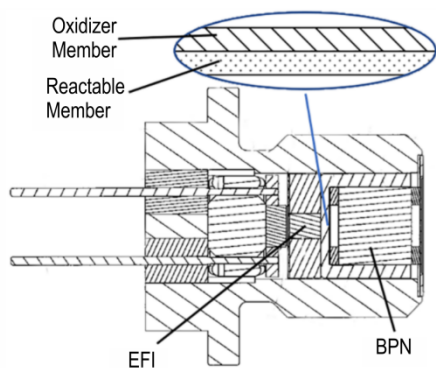


图 21 二阶反应性隔板点火结构<sup>[34]</sup>

Fig.21 Secondary reactable bulkhead igniter structure<sup>[34]</sup>

### 3 直列式许用点火药

直列式点火/起爆序列对许用含能材料有较为严格的规定,而BPN是美军标准MIL-STD-1901A中唯一许可的直列式点火药<sup>[35]</sup>。该标准规定,若直列式点火序列中使用其它点火药剂,必须证明该药剂安全性不低于BPN标准。因此,研究直列式点火技术必须了解BPN的点火机理和燃烧性能。

1998年,Wang等<sup>[36]</sup>用一级空气炮撞击铝板并引燃隔板后的BPN,使用锰铜压力计测出冲击波透过铝板传递给BPN的压力,从而获得BPN点火所需的临界点火压力。其结果为密度 $1.59\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的BPN药柱的临界点火压力为 $1.52\text{ GPa}$ ,点火延迟时间为 $3.45\text{ }\mu\text{s}$ 。在第35届联合推进会议,Risha等<sup>[37]</sup>介绍了一种可以测量燃烧固相气相质量流的装置;同时提出一个用于多相生成物的理论模型,通过“压力-时间”曲线和总燃烧质量就可以计算点火器的气相和固相生成物流量。研究表明,BPN燃烧产物主要是固相成分,但是随着初始温度升高,BPN总燃烧质量会增大,而燃烧产物中固相成分的比例会逐渐降低。

2001年,Miyata等<sup>[38]</sup>研究了BPN、硼-高氯酸钾(boron-potassium perchlorate, BPP)和硼-高氯酸铵(boron-ammonium perchlorate, BAP)三种硼系点火药的燃烧特征和反应动力学,认为其主要反应区分别在液相、燃烧表面和气相。研究认为,B和 $\text{KNO}_3$ 的熔化温度差距大,根据实验结果, $\text{KNO}_3$ 在 $606\text{ K}$ 吸热熔化,而在 $820\text{ K}$ 发生分解反应,因此BPN的主要反应区在液相。BPN在其燃烧波结构中的反应变化如图22所示:在燃烧表面有一层厚的熔融 $\text{KNO}_3$ 的液相层,B通过时发生反应生成 $\text{KBO}_2$ ,有一部分完全反应,有一部分保持反应被喷射到气相;在气相中 $\text{KBO}_2$ 分解为 $\text{B}_2\text{O}_3$ 形成氧化层,阻止B粒子进一步发生氧化反应。

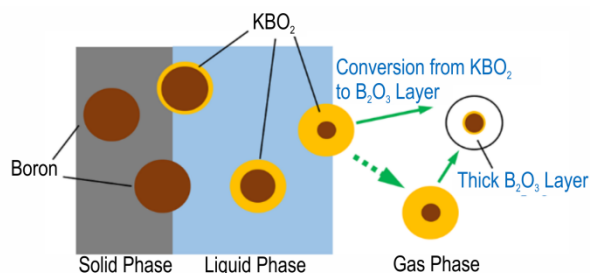


图 22 BPN在燃烧波中反应示意图<sup>[38]</sup>

Fig.22 The schematic diagram of BPN reaction in the combustion wave<sup>[38]</sup>

为了进一步提高BPN的点火能力,将BPN的组分进行细化以提高其化学反应速率和燃烧效率成为一个受到重视的方向。超细BPN的制备、配方、感度和性能都受到关注。

2010年,王蕾等<sup>[39]</sup>研究了超细BPN配方对药剂安全性的影响。通过喷射细化得到粒径为 $3\text{ }\mu\text{m}$ 左右的 $\text{KNO}_3$ ,然后与B进行机械混合,黏结剂为酚醛树脂或氟橡胶。结果认为,当B和 $\text{KNO}_3$ 的质量分数比为1:1时,静电感度最低;作为黏结剂,酚醛树脂比氟橡胶更能降低药剂的静电感度。齐海涛等<sup>[40]</sup>进一步研究了超细BPN的安全性,一方面其结果验证了王蕾的结论,另一方面对药剂的撞击感度和摩擦感度进行测试;超细BPN具有撞击感度低,摩擦感度高的特点。

2015年,Suzan Koc等<sup>[41]</sup>对比了“纳米B与微米B”、“化学计量比药剂与富燃料药剂”对BPN性能的影响。其研究表明:(1)含纳米B的BPN(nano B-BPN)燃烧速度更快,释放热量更多,升压速度更快,但压力值稍微比含微米B的BPN(micro B-BPN)小;(2)nano B-BPN的燃烧效率(93%)比micro B-BPN的燃烧效率(62%)高很多;(3)nano B-BPN的撞击感度

和摩擦感度基本上与 micro B-BPN 相当;(4)富燃料 BPN 药剂产生的热量比化学计量比 BPN 药剂高。在第 53 届联合推进会议上, Suzan Koc 等<sup>[42]</sup>又介绍了关于纳米 B 对 BPN 弹道性能影响的研究。如图 23 所示,相较于 micro B-BPN, nano B-BPN 具有更高的压力输出,更短的燃烧延迟时间,并且具有良好的均一性。同时提出,纳米 B 虽然会提高 BPN 的弹道性能,但是其在处理和运输的过程中有更高的与空气中氧化剂反应的倾向。另外,药剂粒度分布宽和黏结剂偏少会使得药剂成分不均匀,最后导致燃烧速率高度分散。

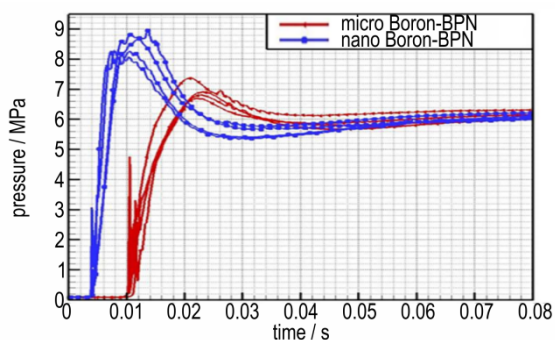


图 23 微米硼粉 BPN 和纳米硼粉 BPN 的燃烧压力<sup>[42]</sup>

Fig.23 The combustion pressures of BPN with micro boron powder or nano boron powder<sup>[42]</sup>

2016 年,施金秋<sup>[43]</sup>详细地研究了  $\text{KNO}_3$  的超细化工作,通过气流粉碎的机械超细化技术,完成超细  $\text{KNO}_3$  的制备。考虑到超细  $\text{KNO}_3$  吸湿结块的问题,研究了其表面改性:用气相和液相两种方式将十八烷胺包覆在超细  $\text{KNO}_3$  表面,极大减小了其吸湿性,并检测了它们的热分解性能;结果表明,质量分数为 1.5% 的液相十八烷胺包覆的超细  $\text{KNO}_3$  防吸湿防结块团聚效果最好,但当十八烷胺质量分数大于 1% 会导致超细  $\text{KNO}_3$  分解温度升高。制备了 3 种 BPN: 原料

$\text{KNO}_3$ -B, 超细  $\text{KNO}_3$ -B, 超细  $\text{KNO}_3/\text{B}$  复合粒子。原料  $\text{KNO}_3$ -B 和超细  $\text{KNO}_3$ -B 仅通过简单混合,超细  $\text{KNO}_3/\text{B}$  复合粒子的形貌和包覆情况经表征显示其具有核-壳结构,如图 24 所示。图 24a 显示一个明显的  $\text{KNO}_3$  粗糙层连续分布是以 B 为核心的表面,复合粒子也相对完整;图 24b 表明硼“微米壳核”与超细  $\text{KNO}_3$  薄片紧密地贴合,并完全覆盖,形成了典型的核-壳结构。研究结果显示,超细  $\text{KNO}_3/\text{B}$  复合粒子比原料  $\text{KNO}_3$ -B 和超细  $\text{KNO}_3$ -B 具有更好的低温稳定性、更低的撞击感度和摩擦感度。

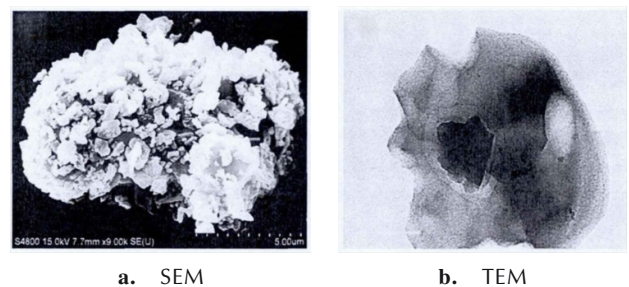


图 24 超细  $\text{KNO}_3/\text{B}$  复合粒子的 SEM 和 TEM 图<sup>[43]</sup>

Fig.24 SEM and TEM images of ultrafine  $\text{KNO}_3/\text{B}$  composite particles<sup>[43]</sup>

Zhong 等<sup>[44]</sup>在 2019 年以硝化棉纤维(NC)作为黏结剂使用静电喷雾制造了 BPN。静电喷雾制造的 BPN(S-B/ $\text{KNO}_3$ )粒度为 1~5  $\mu\text{m}$ 。 $\text{KNO}_3$  被 NC 和 B 均匀包覆,如图 25 所示,燃烧时 NC 先分解,然后  $\text{KNO}_3$  熔化并与 B 发生反应;B 与  $\text{KNO}_3$  均匀分布的 S-B/ $\text{KNO}_3$  比简单混合的不均匀的 B/ $\text{KNO}_3$  反应更完全。当  $m(\text{B}):m(\text{KNO}_3)=1:1$ , NC 量为 13% 时, S-B/ $\text{KNO}_3$  的颗粒包覆和表面状况最好;此时点火器的燃烧压力从 0.901 MPa 升高到 1.014 MPa,点火延迟时间从 2.32 s 降低至 2.18 s。

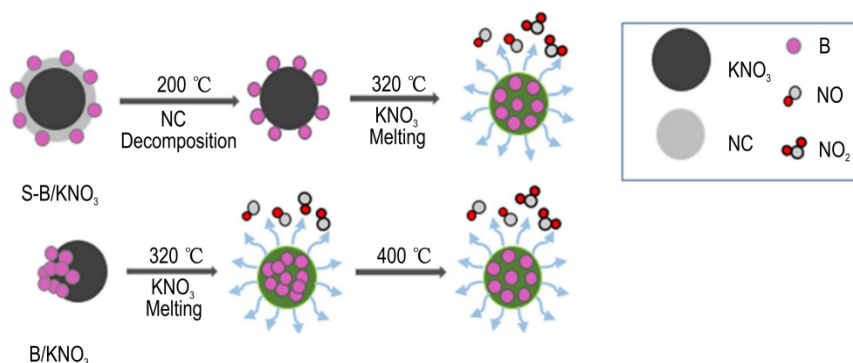


图 25 S-B/ $\text{KNO}_3$  和 B/ $\text{KNO}_3$  的反应过程<sup>[44]</sup>

Fig.25 The reaction process of S-B/ $\text{KNO}_3$  and B/ $\text{KNO}_3$ <sup>[44]</sup>

目前对于BPN的研究,多基于组分粒度的微纳米化和核-壳结构等对于BPN吸湿性、安定性和燃烧特性等性能的影响。在直列式爆炸箔点火方面,具有针对性的可参考的BPN研究不够丰富。对于直列式爆炸箔点火技术,应全面并深入地研究BPN的爆炸箔点火机理、界面能量转换形式和药剂组分(如粒度、纯度和比例等)对爆炸箔点火感度的影响因素及规律,总结BPN的爆炸箔点火判据,为直列式爆炸箔点火技术应

用提供具体详细的科学理论和实验数据支撑。

#### 4 直列式爆炸箔点火技术的相关标准

随EFI和直列式起爆/点火系统的应用和发展,美国和中国等均制定了相关的设计、生产、试验及验收过程的标准。中国兵器工业标准化研究所的伊若<sup>[45]</sup>总结了我国现有与直列式爆炸序列相关的标准,如表1所示。

表1 国内标准与美军标对照表<sup>[45]</sup>

Table 1 Comparison of domestic standard to foreign standard<sup>[45]</sup>

No.	GJB	title	foreign standard
1	GJB 344A-2005	钝感电起爆器通用规范	MIL-DTL-23659D
2	GJB 345A-2005	引信用电起爆器爆炸元件的鉴定试验	-
3	GJB 1579-1993	电起爆器的电爆分系统通用规范	-
4	GJB 373A-1997	引信安全性设计准则	MIL-STD-1316D
5	GJB 573-1998	引信环境与性能试验方法	MIL-STD-331B
6	GJB 2178A-2005	传爆药安全性试验方法	MIL-STD-1751
7	GJB 2865-1997	火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则	MIL-STD-1901
8	GJB 3194-1998	手工布型武器安全性设计准则	MIL-STD-1911
9	GJB 6217-2008	硼/硝酸钾点火药规范	-
10	GJB 6456-2008	引信电子安全与解除保险装置设计准则	WSESRB
11	GJB 7073-2010	引信电子安全与解除安保装置电子环境与性能试验方法	-

表1中有5项标准直接指导直列式爆炸序列的设计和鉴定:(1)GJB 373A-1997《引信安全性设计准则》和GJB 2865-1997《火箭和导弹固体发动机点火系统安全性设计准则》分别是引信安全设计、火箭和导弹固体发动机点火系统安全设计的顶层标准,同样适用于直列式起爆/点火序列;(2)GJB 6456-2008《引信电子安全与解除保险装置设计准则》适用于直列式ESAD的设计;(3)GJB 344A-2005(目前更新版本为GJB 334A-2020)《钝感电起爆器通用规范》规定了属于B类钝感起爆器的EFI的安全性要求;(4)GJB 573A-1998《引信环境与性能试验方法》规定了直列式起爆序列需要满足的鉴定试验要求。

这5项标准关于直列式起爆/点火系统的内容基本上由对应的美军标转化而来,但经过长时间的发展,这些标准相对国内爆炸箔技术较为滞后,与不断更新版本的对应美军标形成一定的差距。目前MIL-STD-1316D已经修订至F版,可以在ESAD满足GJB 6456-2008的基础上对其性能设计进行指导。MIL-DTL-23659D修订至F版,附录部分发生了重大调整,将原来的爆炸箔起爆器规范(exploding foil ini-

tiator certification)修改为直列式起爆器规范(in-line initiator certification),并且明确说明了直列式起爆器(In-Line Initiator, ILI)指用于起爆传爆序列的爆炸箔起爆器(Exploding Foil Initiator, EFI)和用于点火系统的直列式爆燃点火器(Deflagrating In-Line Initiator, DILI)这两种起爆或点火器件。这也说明直列式爆炸箔点火技术的应用已得到实践认可,进入装备标准化阶段。

##### 4.1 直列式点火序列设计安全标准

MIL-STD-1901A在2002年替代了10年前的旧版本,是适用于弹药、发射药等武器点火系统的设计安全标准,明确了使用直列式点火必须满足的安全条件。

MIL-STD-1901A规定了一个“500 V电压试验”,用于测试最大允许电感度和电烤爆试验无法适用于MIL-I-23659的直列式点火器;该试验要求点火器经过点火系统中可能出现的,无论是意外状况还是正常状况的,所有频率、波形和电压的电流而不发火,或发火但不造成危险。其中试验电压不仅包括点火系统在生产、储存和使用过程中可能出现的各种电压,还需附加一个500 V的电压用于安全性测试,故称为“500 V

电压试验”。该试验是一种适用于直列式点火器的特殊安全试验方法。

该标准规定了在使用直列式许用含能药剂(见4.2)的情况下,必须使用隔断机构的情况和无须使用隔断机构形成直列式点火系统的情况:

(1)当点火序列元件有使用低压装置时,点火序列至少需要一个隔断机构。低压装置定义为工作电压小于500 V或小于在“500 V电压试验”中出现的最大电压的装置;

(2)高压点火序列在满足以下条件时可以不使用隔断机构:点火器满足 MIL-I-23659 附录 A 的要求;通过“500 V电压试验”而不发火或发火但不对系统安全造成不良影响;在安装到弹药或其子系统后,应用于 ISD 的点火器不能因为任何曾在“500 V电压试验”中出现的电压而发火。

可见,“500 V电压试验”对于直列式点火器的设计安全的检测是较为重要的,能够通过“500 V电压试验”是直列式点火器安全性测试的重要环节。MIL-STD-1901A 并未明确指出将 500V 电压用于安全性测试的理由,但考虑到直列式点火器在研制、生产、检测和使用过程中会较长时间连接电源,而美国工业电压一般在 480 V 左右,因此有理由认为“500 V电压试验”是综合了直列式点火器常用环境和美国用电情况所设计的安全性测试:要求直列式点火器进行检测和调试时,即使失误直接接入工业用电,也可以保持安全状态,不可因此导致直列式点火器发火或因发火造成危险。

#### 4.2 直列式许用含能药剂标准

MIL-STD-1901A 和 MIL-STD-1316F<sup>[46]</sup> 规定直列式点火序列可以使用的含能药剂及其应符合的对应标准见表 2。

以上直列式许用含能药剂在使用时,必须遵守相关规定,不能以任何方式(如研磨、重结晶、改变密度和添加其它材料等)增加含能药剂的感度,除非经过重新鉴定。

如果要在 ISD 中使用表 2 中未列有的药剂,需要满足以下两个条件之一:

(1)药剂材料可以通过 MIL-STD-1751 的试验或通过 OD44811“传爆药合格要求”和“热桥丝点火试验”。

(2)如果药剂材料不能满足 MIL-STD-1751 或 OD44811 的试验要求,那么药剂材料可以通过对比试验,将其与合格的 BPN 处于同一试验环境中测试感

度、稳定性和老化性能。如果药剂材料的性能不劣于 BPN,则可以使用。

研究国内外 ISD 设计发现,BPN 是唯一直列式许用点火药,HNS-IV 常用来接受高速飞片撞击或隔板冲击波的刺激并引燃 BPN,因此将重点研究这两种含能药剂的相关标准。

表 2 许用含能材料<sup>[35, 46]</sup>

Table 2 Approved energetic materials<sup>[35, 46]</sup>

type	energetic material	standard	
pyrotechnic	BK <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MIL-P-46994	
	Comp A3	MIL-C-440	
	Comp A4	MIL-C-440	
	Comp A5	MIL-E-14970	
	Comp CH6	MIL-C-21723	
	PBX-9407	MIL-R-63419	
	PBXN-5	MIL-E-81111	
	PBXN-6	WS-12604	
	PBXN-7	MIL-DTL-82874	
	PBXN-9	MIL-DTL-82875	
	explosive	PBXN-11	MIL-DTL-32064
		PBXN-12	MIL-DTL-3228
		PBXN-301	MIL-E-82740
		DIPAM	WS-4660
HNS Type1 or Type 2 Grade A		WS-5003	
Tetryl		MIL-T-339	
Tetryl Pellets		MIL-P-46464	
HNS-IV		MIL-E-82903	
RSI-007		WS-35173	
EDF-11		MIL-DTL-32387	
LX-14	MIL-H-48358		

##### 4.2.1 HNS-IV 标准

HNS-IV 遵守标准为 MIL-E-82903(OS)<sup>[47]</sup>,该标准制定于 1994 年,用于取代 WS 32972A。MIL-E-82903(OS)定义 HNS-IV 材料是一种超细颗粒,比表面积为 5~25 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>。压装 HNS-IV 药柱的密度应在 (1.570±0.005) g·cm<sup>-3</sup>。HNS-IV 的物理和化学性能是影响其感度、安定性和输出性能的重要因素,是标准中应当注意的重要部分。MIL-E-82903(OS)对 HNS-IV 物理和化学性能的要求列于表 3。

MIL-E-82903(OS)制定了关于 HNS-IV 的在生产、包装、性能检测等方面的一系列标准,这里将不再一一赘述。1999 年 MIL-E-82903(OS)的 1 号修订案<sup>[48]</sup>未对 HNS-IV 的相关内容做出变动。

我国于 2013 年发布并实施了由中国工程物理研

表3 HNS-IV物理和化学性能<sup>[47]</sup>Table 3 Physical and chemical properties of the HNS-IV<sup>[47]</sup>

No. requirement	value
1 vacuum stability: <sup>1)</sup>	
a. cubic centimeter per gram( $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ ) for first 20 min	3.0 max
b. $\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ per hour for additional 2 h	1.1 max
2 surface moisture and volatiles, (percent(%) by mass)	0.05 max
3 conductivity <sup>2)</sup>	2
4 insoluble particles (% by mass)	0.1 max
5 chemical analysis (%):	
HNS	98.50% min
HNBiB or DPE <sup>3)</sup>	0.65% max
photolysis products <sup>4)</sup>	4
DMF <sup>5)</sup>	0.5% max
wash solvents <sup>6)</sup>	0.1% max
6 surface area (square meter per gram ( $\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ )) <sup>7)</sup>	7)
7 slapper test <sup>8)</sup>	8)

Note: 1) Specified values are volumes of gas at 0 °C and 760 mm pressure after evolution at  $(260 \pm 0.5)$  °C. 2) The conductivity of the HNS-IV shall be less than the equivalent conductivity of a 1.0 parts per million (ppm) sodium chloride (NaCl) solution. 3) HNBiB is hexanitrobenzyl; DPE is dipicrylthane. 4) Total are calculated for photolysis products shall not be greater than twice the area found for the reference HNS-IV material. 5) DMF is dimethylformamide. 6) Any other wash solvents (methanol dioxane, etc.) used in the HNS-IV processing shall be less than 0.1%. 7) When HNS-IV is ordered for any application, the contract shall specify the minimum and maximum surface area required for the application. Most application will use a surface area between  $10 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$  and  $15 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ . 8) Mean flyer velocity shall be between  $2.70 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$  and  $3.00 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$  with a standard deviation of less than  $0.15 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$  when tested at ambient temperature. When detonated, the pressed charge ( $1.570 \pm 0.005$ )  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$  shall produce, as a minimum, a hole through the witness plate with the back surface spalled.

究院化工材料研究所编制的 GJB 8139-2013《超细六硝基萘炸药规范》<sup>[49]</sup>, 规定了我国超细六硝基萘炸药的技术要求, 与表3基本相同, 较为明显的区别在于:

(1) GJB 8139-2013的真空稳定性测试方法与 MIL-E-82903(OS)的不尽相同, 在于测试时间上前者要求测试 140 min 而后者将 140 min 分为前 20 min 和后续 120 min 两阶段, 在释放气体体积要求上前者允许释放气体体积比后者大。

(2) 对于飞片起爆感度, GJB 8139-2013 规定 50% 发火电流不得大于 1.7 kA, 而 MIL-E-82903(OS) 规定飞片平均速度为  $2.70 \sim 3.00 \text{ mm} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ 。

GJB 8139-2013 对于超细六硝基萘的飞片起爆感度的规定基于该标准规范性附录 C《飞片起爆感度试验方法》, 该方法规定了试验 EFI 的爆炸箔桥箔、飞片、反射片、加速膛和炸药柱的参数, 因此“50% 发火电流

不得大于 1.7 kA”可以作为超细六硝基萘的短脉冲冲击感度的规定。

#### 4.2.2 BPN 标准

美国对 BPN 的生产、包装、使用和鉴定标准经过多次改版更新, 现采用 1982 年的 MIL-P-46994B<sup>[50]</sup> 和 1993 年的 4 号修订案<sup>[51]</sup>, 史春红<sup>[52]</sup> 在研究直列式点火系统及其许用药时对两项标准进行了总结。MIL-P-46994B 和 4 号修订案根据当时 BPN 在美国生产使用的情况, 依据在不同应用中 BPN 药粒形状的区别, 将 BPN 分为 9 个类型, 而每个类型又按几何尺寸的不同划分为不同级别。不同类型不同级别的 BPN 的物理性能、弹道性能和配方等方面, 都有详细的规定。对于 BPN 主要成分, 无定形硼粉应符合 MIL-B-51092 要求, 硼含量应为 90~92%, 最大粒径应  $\leq 1.5 \mu\text{m}$ ; 硝酸钾应符合 MIL-P-156, 最大粒径应  $\leq 15 \mu\text{m}$ ; 制作点火药时, 使用无水溶剂在研磨型搅拌器中均匀混合。

2008 年, 我国发布了 BPN 的国家军用标准 GJB 6217-2008<sup>[53]</sup>, 该军用标准参考美军标, 结合国内生产应用现状, 规范了 BPN 的生产、包装和质量保障等。该标准将 BPN 药粒形状分为 4 个类型, 每个类型依据尺寸分为不同级别。每个类型和级别的 BPN 的性能和配方等都有对应规定。对于 BPN 主要成分, GJB 6217-2008 对无定形硼粉的含量和最大粒径的规定与 MIL-P-46994 相同, 另外还规定无定形硼粉的过氧化氢不溶物应  $\leq 1.5\%$ , 镁含量  $\leq 8.2\%$ , 水分  $\leq 0.5\%$ ; 硝酸钾的粒度则分为 I、II 两类, 粒度 I 要求平均粒度为  $(60 \pm 20) \mu\text{m}$ , 粒度 II 要求平均粒度  $\leq 15 \mu\text{m}$ 。

随着超细 BPN 研究和应用的发展, 国内外对 BPN 标准的规范性略显不足, 滞后于技术发展。例如, 标准对 BPN 主要组分粒度的规定范围较为粗略, 在仅规定粒度上限的情况下, 硼粉和硝酸钾的粉末粒径有较大的选取范围, 这使得不同生产商提供的合格 BPN 的感度存在一定差距, 从而影响使用者对 BPN 药剂安全性和可靠性的判断。

## 5 总结和展望

综述了直列式爆炸箔点火技术的应用和发展, 并分别概述了直列式爆炸箔点火系统重要组成部分——ESAD、EFDI 和直列式隔板点火器的作用方式和技术发展, 直列式许用药 BPN 的燃烧机理和新制备工艺, 国内外直列式爆炸箔点火系统及其许用含能药剂的相关标准。

爆炸箔的材料、形貌和工艺等对EFI起爆性能的影响已有较为全面的研究,其作用机理也有较为完整深入的认识。以EFI技术为基础的直列式起爆序列正得到广泛应用。然而,目前针对直列式爆炸箔点火技术的具体研究并不常见,EFDI和ISD多以新技术产品出现,而对影响其感度和性能的因素分析却少见诸文献。直列式爆炸箔点火技术尚存在一些亟待解决的问题:

(1)冲击片直接点火BPN机理和BPN组分粒度对感度的影响。目前爆炸箔冲击片起爆HNS已有深入研究,但缺少对于冲击片直接点火BPN的机理研究和参数测定。另外,随着材料细化技术的进步和超细BPN的应用,需要系统地研究BPN组分粒度对其感度的影响,定量总结经验规律,积累超细BPN组分粒度影响感度的试验经验和数据,为制定超细BPN规范提供理论和实验基础。

(2)BPN隔板点火的影响因素和规律。含敏感药剂的隔板起爆和点火是非常成熟的技术,将其与爆炸箔起爆技术相结合,可以解决直列式爆炸箔隔板点火的施主药部分的技术门槛。然而由于直列式爆炸箔点火序列对点火药的规定和限制,目前唯一广泛许可的点火药仅有BPN。隔板点火的本质是受主药受长脉冲冲击波刺激而发生起爆或点火,因此需要研究BPN作为受主药对长脉冲冲击波响应的影响因素,如BPN组分粒度和点火端面形状等,从而研究BPN的隔板发火条件。

(3)多种隔板点火结构的性能比较。研究发现隔板点火的受主药激发方式具有空气隙二级装药结构、二阶反应性隔板点火等多种方式,对比各种方式对受主药BPN临界激发能量、点火延迟和燃烧稳定性的影响,测试其是否符合直列式爆炸箔点火系统安全标准,对直列式爆炸箔隔板点火器设计做出指导。

(4)BPN新制备方法及其对性能的优化。随着制备技术的进步,通过研究新型的易规模化的制备技术,改善BPN生产制备流程,优化成品性能,是提高直列式爆炸箔点火安全性和可靠性的重要方向。新制备方法应在不添加其它非必要添加剂的情况下,细化BPN组分,缩小BPN组分粒度分布范围,提高BPN组分分布均一性,改善BPN颗粒形貌和包覆情况,以提升BPN发火可靠性和燃烧性能。

(5)直列式爆炸箔点火技术的应用,应充分发挥其可集成、小型化以及可编程多点精确控制的优势。点火模块(CDU+EFDI或CDU+EFI+EFTBI)高度集成、

多点同步或有序点火以及点火命令的总线控制等,将是直列式爆炸箔点火技术应用的关键技术难点。直列式爆炸箔点火系统中各个器件以及整个系统的安全性规范需要在大量试验数据和实践经验的指导下制定专用标准。

#### 参考文献:

- [1] Stroud J R. A new kind of detonator-the slapper [R]. UCRL-7739, Lawrence Livermore Laboratory, Livermore, CZ, USA, 1976.
- [2] McCormick R N, Boyd M D. Bidirectional slapper detonator: US, 4471697[P]. 1984.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 汪柯, 唐科, 陈楷, 等. 基于MEMS工艺的爆炸箔芯片与高压开关研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2021(4): 95-103.  
WANG Ke, TANG Ke, CHEN Kai, et al. Research status of exploding foil initiator chip and high voltage switch based on MEMS technology [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2021(4): 95-103.
- [7] Yang Z, Zhu P, Chu Q, et al. A micro-chip exploding foil initiator based on printed circuit board technology [J]. *Defence Technology*, 2021, DOI:10.1016/j.dt.2021.06.008.
- [8] 褚恩义, 张方, 张蕊, 等. 第四代火工品部分概念初步探讨[J]. 火工品, 2018(1): 1-5.  
CHU En-yi, ZHANG Fang, ZHANG Rui, et al. Preliminary discussion of new concepts of the 4<sup>th</sup> generation pyrotechnics [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(1): 1-5.
- [9] 褚恩义, 张方, 陈建华, 等. 第四代火工品概念补充探讨[J]. 火工品, 2020(6): 1-4.  
CHU En-yi, ZHANG Fang, CHEN Jian-hua, et al. Supplementary discussion of concepts of the 4<sup>th</sup> generation pyrotechnics [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(6): 1-4.
- [10] M Y YILMAZ. Design and analysis of a high voltage exploding foil initiator for missile [D]. Middle East Technical University, 2013.
- [11] 陈清畴, 马毅, 李勇. 爆炸箔起爆器作用机理研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(1): 79-88.  
CHEN Qing-chou, MA Tao, LI Yong. Research progress in the function mechanism of exploding foil initiator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(1): 79-88.
- [12] 陈清畴. 冲击片雷管作用特征及影响规律研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016.

- CHEN Qing-chou. Function characteristic and influence of exploding foil initiators[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [13] Kesner C, Winebrenner J, Harres R. Using Safe, Proven fuze technology for rocket motor ISDs [C]//41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.
- [14] Barglowski M. Innovative MIL-STD-1901A Compliant ignition systems[C]//44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2008.
- [15] Joe Carvalho. Multi-point initiation for a SDACs system [C]//58th Annual Fuze Conference, Baltimore, MD, 2015.
- [16] Max Perrin. New fuzing solutions for improved safety and operational capabilities[C]//64th Annual Fuze Conference, 2021.
- [17] 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): 1-6.
- [18] Farris R, Johnson R N, Yates K. Enhancing dispenser system function using electronic safety and arming Technology [C]//48th Annual Fuze Conference, Charlotte, NC, 2004.
- [19] McEntire R S, Butler P. Fuzing & firing systems at sandia national laboratories [C]//53rd Annual Fuze Conference, Lake Buena Vista, FL, 2009.
- [20] Cope R. Navy Overview [C]//55th Annual Fuze Conference, Salt Lake City, UT, 2011.
- [21] Harward Thomas, Bonbrake Tim. Enhanced weapon arming safety by controlled accumulation of arming energy [C]//55th Annual Fuze Conference, Salt Lake City, UT, 2011.
- [22] Perrin Max. European LEEFI based fireset and ESAD [C]//59th Annual Fuze Conference, Charleston, SC, 2016.
- [23] Curtis Shane, Church Adam. Advanced fuzing technology [C]//63rd Annual Fuze Conference, 2020.
- [24] KDI Precision Products, Inc.. ESAD Technology Benefits to ISD's [C]//49th Annual Fuze Conference, 2005
- [25] 杨振英,梁国英,陈静,等. 低能爆炸箔点火器研究[J]. 含能材料, 2010, 18(4): 419-422.  
YANG Zhen-ying, LIANG Guo-ying, CHEN Jing, et al. Study on low energy exploding foil igniter[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(4): 419-422.
- [26] 张玉若,高艳,负妮,等. 双因素爆炸箔低能点火试验研究[J]. 火工品, 2011(3): 6-9.  
ZHANG Yu-ruo, GAO Yan, YUN Ni, et al. Dual-factor experimental study on low energy ignition of exploding foil[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(11): 6-9.
- [27] Seddon D, Weller B, Bower S, et al. Development of an in-line EFI ignition safety device (ISD) for fuzing of solid fuel motors [C]//59th Annual Fuze Conference, 2016.
- [28] Pray D. Exploding foil initiator [C]//64th Annual Fuze Conference, 2021.
- [29] Jang Seung-gyo, Hwang Jung-min, Baek Sung-Hyun. Analysis on shock wave and sensitivity of explosives in through-bulkhead initiator [J]. *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, 2017, 21(4):36-43.
- [30] Kim Dong-seong, Jang Seung-gyo, Lee Hyo-Nam, et al. Reliability prediction of electronic arm fire device applying sensitivity analysis [J]. *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 2018, 46(5):393-401.
- [31] Neyer B, Knick D R, Moore P T, et al. Initiator: US, US 9534875 B2 [P]. 2017.
- [32] Nance C J. Initiator assembly having low-energy explosion foil initiator header and cover with axially threaded portion: US, US 8726808 B1 [P]. 2014.
- [33] Hwang J, Jang S, Ryu B. Arm-fire device and method of Igniting propulsion system using the same: KR, US 2018/0058830 A1 [P]. 2018.
- [34] Hennings G N, Reynolds R K, Nance C J. Energetic material initiation device utilizing explosion foil initiated ignition system with secondary explosive material: US, US 7661362 B2 [P]. 2010.
- [35] MIL-STD-1901A, Munition Rocket and Missile Motor Ignition System Design, Safety Criteria For [S]. the Department of Defense, 2002.
- [36] Wang L, Feng C, Han C. Experimental study on boron-potassium nitrate initiated by shock [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1998, 14(4):416-420.
- [37] Risha G A, Ulas A, Kuo K K, et al. Characterization of output mass and energy fluxes of a pyrotechnic igniter [C]//35th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Los Angeles, California, 1999.
- [38] Miyata K. Combustion of boron-pyrotechnics [C]//37th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Salt Lake City, Utah, 2001.
- [39] 王蕾,徐文峥,王晶禹,等. 硼-硝酸钾点火药的制备及其性能研究[J]. 化工中间体, 2010(11): 38-41.  
WANG Lei, XU Wen-zheng, WANG Jing-yu, et al. Study on preparation and properties of boron-potassium nitrate igniter [J]. *Chemical Intermediate*, 2010(11): 38-41.
- [40] 齐海涛,张景林,潘军杰,等. 硼/超细硝酸钾点火药配方设计及工艺[J]. 含能材料, 2011, 19(2):180-183.  
QI Hai-tao, ZHANG Jing-lin, PAN Jun-jie, et al. Process technology and formulation design of ignition composition of boron/ultra-fine potassium nitrate [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(2): 180-183.
- [41] Koc S, Ulas A, Yilmaz N E. Characterization of BPN pyrotechnic composition containing micro- and nanometer-sized boron particles [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2015, 40(5):735-742.
- [42] Koc S, Kombe F E, Ulas A. Ballistic performance of BPN igniter compositions containing micron and nano-sized boron particles [C]//53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2017.
- [43] 施金秋. 超细硝酸钾粉体的制备及其性能的研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2016.  
SHI Jin-qiu. The preparation and performance research of ultra-fine potassium nitrate powder [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [44] Q Zhong, Y Li, J Chen, et al. Boron/potassium nitrate microspheres fabricated by electrostatic spraying and their combustion characteristic as pyrotechnic ignitor [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2019, 138(5):3349-3355.
- [45] 伊若,任丽萍. 直列式爆炸序列标准需求分析[J]. 火工品, 2013(1): 53-56.  
YI Ruo, REN Li-ping. The analysis on the demand of standards for non-interrupted explosive train [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013(1): 53-56.
- [46] MIL-STD-1316F, Fuze design, safety criteria for [S]. Depart-

- ment of defense design criteria standard, 2017.
- [47] MIL-E-82903(OS), Explosive, HNS-IV[S]. the Naval Sea Systems Command, Department of the Navy, 1994.
- [48] MIL-E-82903 (OS) Amendment 1, Explosive, HNS-IV and HNS-V[S]. the Naval Sea Systems Command, Department of the Navy, 1999.
- [49] 中国工程物理研究院. GJB 8139-2013: 超细六硝基芪炸药规范[S]. 北京: 中国人民解放军总装备部, 2013.
- China Academy of Engineering Physics. GJB 8139-2013: Specification of superfine particle hexanitrostilbene explosive [S]. Beijing: the General Reserve Department of PLA, 2013.
- [50] MIL-P-46994B, Pellets/granules/boron/potassium nitrate [S]. the Department of Defense, 1982.
- [51] MIL-P-46994B (AR) Amendment 4, Pellets/granules/boron/potassium Nitrate[S]. the US Army Armament, Munitions and Chemical Command, 1993.
- [52] 史春红. 直列式点火系统及其许用装药[J]. 火工品, 1997(1): 48-52.
- SHI Chun-hong. In-line ignition system and its acceptable charge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1997(1): 48-52.
- [53] 中国兵器工业标准化研究所. GJB 6217-2008: 硼/硝酸钾点火药规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2008.
- China Ordnance Industrial Standardization Research Institute. GJB 6217-2008: Specification for boron/potassium nitrate ignition pellets[S]. Beijing: Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, 2008.
- [54] 杨智, 朱朋, 徐聪, 等. 微芯片爆炸箔起爆器及其平面高压开关研究进展[J]. 含能材料, 2019, 27(2): 167-176.
- YANG Zhi, ZHU Peng, XU Cong, et al. Review on micro chip exploding foil initiator and its planar high-voltage switch [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(2): 167-176.

## Review on In-line Exploding Foil Ignition and Related Technologies

JIAN Hao-tian<sup>1,2</sup>, WANG Ke<sup>1,2</sup>, GAO Feng<sup>3</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. The Seventh Military Representative Office of the Air Force in Xi'an, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** The applications and development status of in-line exploding foil ignition and related technologies were reviewed, including the compositions of in-line exploding foil ignition system, the combustion mechanism and new preparation processes of an approved pyrotechnic-boron potassium nitrate (BPN), as well as the relevant standards of in-line exploding foil ignition at home and abroad. The in-line ignition system has the requirements of multi-function and multi-task. Therefore, the electronic safe and arm device as the control module of the ignition system device presents the development trend of programming addressing and multi-point coordination. The components of the in-line exploding foil ignition system become miniaturized and low energy consumption. The particle size of the components of BPN processed by the new preparation process was micronized and the core shell structure was generated. Hence, the combustion performance, moisture absorption and stability of BPN were optimized. The relevant standards of in-line exploding foil ignition at home and abroad were summarized and compared. The problems to be solved in the study of the in-line explosive foil ignition were analyzed, which includes the mechanism of direct ignition of BPN by slapper, the influence of BPN component particle size on impact ignition sensitivity, the influence factors and the laws of thru-bulkhead ignition of BPN, performance comparison of various thru-bulkhead ignition structures, and new preparation processes of BPN with its performance optimization.

**Key words:** in-line exploding foil ignition; exploding foil initiator (EFI); slapper ignition; thru-bulkhead ignition; boron-potassium nitrate

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021280

(责编: 王艳秀)