

文章编号:1006-9941(2023)06-0606-29

## 基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列技术研究进展

刘卫,褚恩义,刘兰,任小明,解瑞珍,任炜,李蛟

(陕西应用物理化学研究所重点实验室,陕西西安710061)

**摘要:** 弹药信息化、智能化、小型化发展,对火工品提出了换能信息化、结构微型化、序列集成化的要求,微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)火工品技术孕育而生。近年来,随着微小型无人平台技术的发展,形成了新型微毁伤形式,对微起爆序列这一系统级MEMS火工品的应用提出了迫切的需求。本文侧重于微起爆序列的应用及要求,在微换能元设计及能量控制、微起爆能量控制及器件化、微传爆能量传递与隔爆控制、微起爆序列设计与集成及序列可靠性评估5个方面,对基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列研究进展进行了总结。在此基础上,讨论了微起爆序列进一步发展的建议:深化微起爆传爆机理的基础研究;推进数字化工程,提升正向设计能力;加强大批量生产能力;加强微起爆序列样机的应用验证,提升技术成熟度。通过对微起爆序列技术现状的分析和未来发展的建议,以为同行继续深入系统地开展微起爆序列技术研究、推动其应用进程提供有益参考。

**关键词:** MEMS火工品;微起爆序列;能量控制;微起爆器;传爆药;飞片;可靠性

中图分类号: TJ450; O64; O38

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023043

### 0 引言

火工品是指装有火药或炸药,能在外界机械、热能或电能的激发下,发生燃烧或爆炸,用以获得化学物理效应或机械效应的一次性使用元件和装置的总称。火工品是武器装备首发元件和最敏感部件,具有敏感性、瞬发性和一次性的特征。火工品的安全性、可靠性和作用精度直接影响武器弹药的安全性、可靠性和效能。火工品发展不仅受到武器弹药发展需求的牵引,也在一定程度上支撑了武器弹药的发展。

从技术发展的角度,弹药信息化、智能化、小型化发展,对火工品提出了换能信息化、结构微型化、序列集成化的要求,推动火工品技术发展至第四代。通过微机电技术、微纳米含能材料、微结构爆轰学的技术集成,出现了微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)火工品,实现了火工品部件微型化、结

构集成化、功能灵巧化,易于形成通用的标准化起爆模块<sup>[1]</sup>。从应用需求的角度,城市反恐、单兵作战用微型弹药的发展也对MEMS火工品提出了迫切需求, MEMS技术提供了质量与体积降低的优势,适用于火工品的微型化、轻量化设计。通过采用信息控制、序列隔断等技术,实现了火工品的自主安全控制,具备了功能可选择的能力,并逐渐在智能弹药、超高速弹药中得到应用,支撑了高可靠性子弹药、微小型智能弹药的发展<sup>[2]</sup>。

MEMS技术与火工品技术的结合,使MEMS火工品在设计方法、研究途径乃至概念内涵上都产生了革命性的变化<sup>[3-4]</sup>。近二十年来,国外在MEMS火工品技术的理论、设计、仿真、制造、试验与评估等方面取得了快速发展,已经从探索研究发展到型号应用。2001年,美国海军水面武器中心提出了微发火序列、微爆轰控制概念,研究了MEMS火工品引发作用机理,采用原位生成薄膜药剂,研制了平面芯片式结构的微起爆器<sup>[5-6]</sup>。目前,国外的MEMS火工品已经在多种武器平台上进行了应用验证,并形成了成熟的产品<sup>[7-8]</sup>。

MEMS火工品包括元件级的微换能元、微纳装药,部件级的微起爆器、安全控制单元、传爆单元,以及由元件、部件集成而形成的系统级的微起爆序列、微点火

收稿日期:2023-03-10;修回日期:2023-04-23

网络出版日期:2023-06-05

作者简介:刘卫(1986-),男,高级工程师,主要从事MEMS火工品技术研究。e-mail:peony1303@126.com

通信联系人:褚恩义(1965-),男,研究员,主要从事高新火工品技术研究。e-mail:enyichu@126.com

引用本文:刘卫,褚恩义,刘兰,等.基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列技术研究进展[J].含能材料,2023,31(6):606-634.

LIU Wei, CHU En-yi, LIU Lan, et al. Review on Micro Fire-train based on Flyer Impact Initiation[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(6):606-634.

序列等。从冲击起爆传爆装药方式的角度,微起爆序列的能量传递原理有多种形式,包括飞片冲击起爆形式、冲击波起爆形式、爆轰波起爆形式等<sup>[9-12]</sup>。本文重点针对基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列,侧重于微起爆序列的应用及要求,从微换能元设计及能量控制、微起爆能量控制及器件化、微能量传递与隔爆控制、微起爆序列设计与集成、序列可靠性评估等方面,对微起爆序列的国内外研究进展进行了归纳总结,以期为同行继续深入系统地开展微起爆序列技术研究、推动其应用提供有益参考。

### 1 微起爆序列结构与作用原理

基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列主要由控制电路、微起爆器、MEMS安全保险机构(Safety and Arming device, S&A)、直写传爆药等组成,如图1所示,其中,微起爆器包括微换能元、微纳结构起爆药及附属的装药腔体。微起爆序列作用过程为:安全状态下,微起爆器与传爆药之间是安全保险机构隔爆滑块,

即安全保险机构上的传爆空腔与起爆器、传爆药错位,实现了起爆器与传爆药之间的物理隔离。在解除保险状态下,安全保险机构隔爆滑块完成设计位移,微起爆器、安全保险机构传爆空腔、传爆药对准,形成爆轰通道<sup>[13]</sup>。作用时,微起爆器爆轰剪切并驱动飞片经安全保险机构上的传爆空腔加速形成高速飞片,高速飞片冲击起爆传爆药,传爆药爆轰完成序列功能。安全状态和解除保险状态的微起爆序列传爆结构示意图如图2所示。

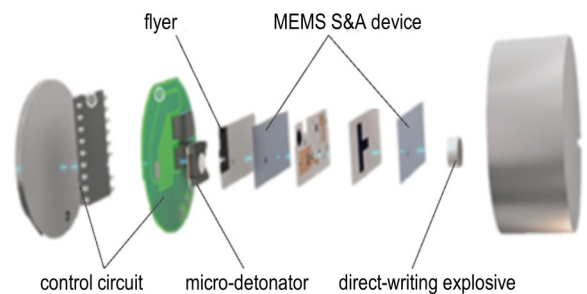


图1 微起爆序列结构示意图<sup>[13]</sup>  
Fig.1 Structure diagram of micro fire-train<sup>[13]</sup>

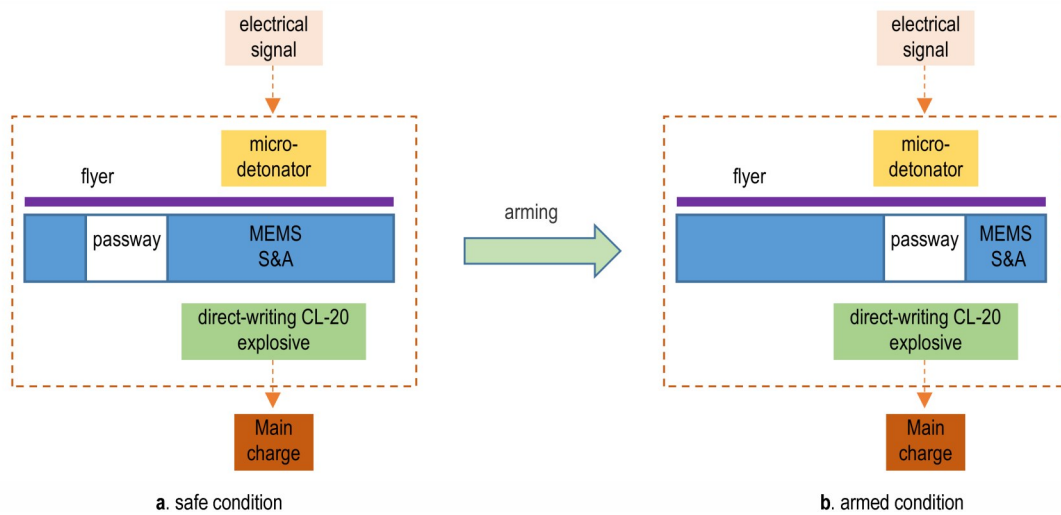


图2 微起爆序列传爆结构示意图<sup>[13]</sup>  
Fig.2 Booster structure of micro fire-train<sup>[13]</sup>

### 2 微换能元效能设计与温度测试

换能元是火工品能量转换器件,即将电能转换成热、等离子体等形式的能量,进而引发火工药剂产生燃烧或爆炸的器件。微换能元是一种采用MEMS工艺制作、特征尺寸在微米量级的换能元,一般具有平面多层结构,易于进行大批量自动化制造。相比于桥丝换能元仅能从材料和尺寸(直径和长度)2个维度进行效能调控,微换能元由于具有平面结构,可以从材料、形

状、尺寸(包括长度、宽度和厚度)、薄膜微观颗粒特性等更多维度进行效能调控。例如,在微纳尺度下微换能元电阻率具有尺度效应<sup>[14]</sup>,电阻率随微换能元厚度变化存在拐点;微换能元的形状有V形、矩形、蛇形等,可从形状上对其电阻进行调控<sup>[15]</sup>,这些特殊的特性对微换能元性能设计提供了更多的技术途径。

国外从20世纪60年代开始研究火工品薄膜微换能元,早期关注的材料有Ni基材料,如Ni<sub>3</sub>P-Ni,发火电压在29V以上<sup>[16]</sup>。从20世纪70年代起开始探索

NiCr 薄膜材料<sup>[17-19]</sup>,主要用于电子电路行业作为薄膜电阻器,面向火工品发火需求进行性能改进后形成了系列化的微换能元产品。21世纪以来,Pt、Al、TaN 等更多的微换能元材料相继出现,目前各种不同材料、不同结构的薄膜微换能元被应用于常规电雷管、MEMS 火工品及固体化学微推进阵列<sup>[20-23]</sup>。

微换能元作为微起爆序列的能量起始单元,决定了微起爆序列的发火指标和安全特性,进而影响武器弹药的作战性能。从微起爆序列的要求的角度来说,微换能元发火过程中的能量要求主要包括低能化和钝感化2个方面,以满足武器系统不同点火能量的需求。微换能元在使用过程中会面临诸如静电、射频、过载等环境影响,为了避免微换能元在上述环境下发生意外作用,需要提高微换能元安全性,包括静电安全性、本质安全性、耐过载安全性等。微换能元的主要作用是执行电热转换,其通电后产生的热量或温度的高低是衡量其性能的重要参数,因此本节最后介绍了微换能元温度测试的研究进展。

### 2.1 微换能元能量设计技术

在低能化设计方面,1999年,瑞士EMS公司<sup>[24]</sup>研制了薄膜微换能元以代替金属桥丝换能元,制备的薄膜

微换能元具有非常小的发火能量,普遍小于100  $\mu\text{J}$ ,典型发火能量40  $\mu\text{J}$ 。2003年引信年会上,美国装备研发中心(Armament Research and Development Engineering Center, ARDEC)的Neha Mehta<sup>[25]</sup>介绍了ARDEC/Tanner研究机构研制的四代微换能元(Micro Energetic Initiators, MEI),并比较了各代之间发火电压的变化趋势,总体朝着低能发火方向发展,如图3所示。

Micro Assembly Technologies 公司的Chopin Hua<sup>[26]</sup>介绍了低成本MEMS微换能元,包括基于金属薄膜换能元和硅桥换能元的2种换能元。金属薄膜换能元用于M100电雷管的改进型,先后发展了四代,其中前三代的结构如图4所示,通过Neyer测试可知,第三代微换能元的平均发火电压为1.6088 V( $\sigma = 0.0966$  V)、全发火电压为2.0 V、不发火电压为1.2 V,第四代微换能元的平均发火电压为1.2097 V( $\sigma = 0.0220$  V)、全发火电压为1.6 V、不发火电压为0.7 V,这两代微换能元具有较低的寄生电阻和较高的能量分布特性,可应用在40 mm榴弹上。硅桥换能元通过产生的等离子体点燃斯蒂芬酸铅/叠氮化银药片,进而驱动飞片,可起爆0.3~1 mm厚度的EDF-11装药,适用

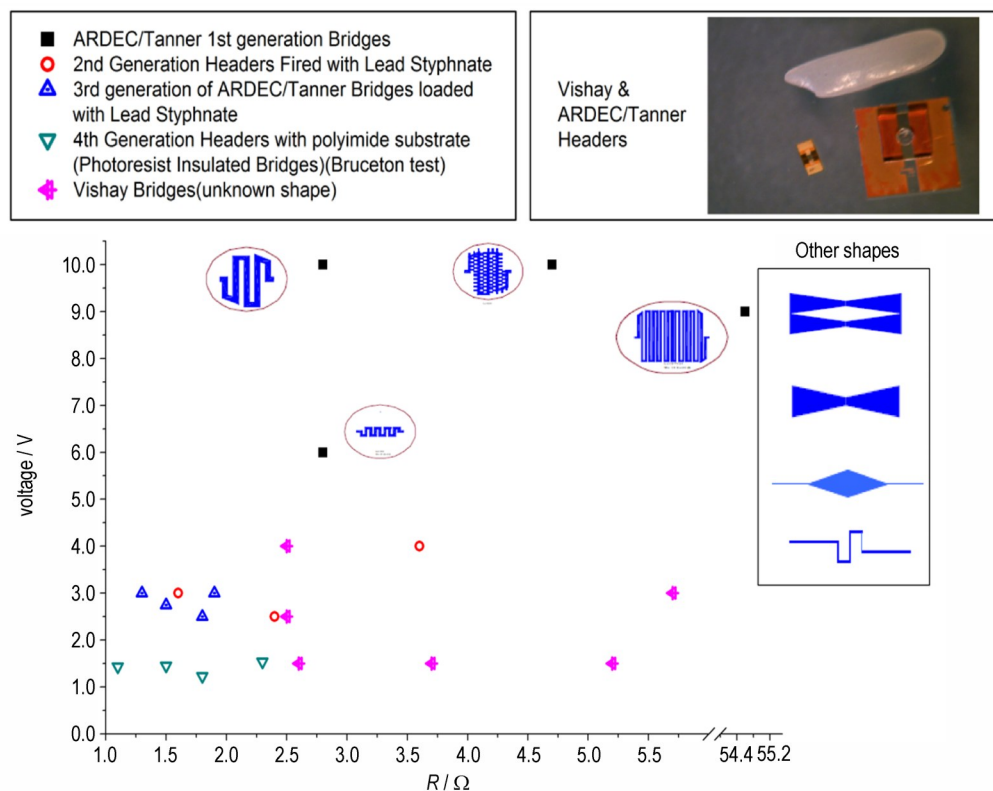


图3 ARDEC/Tanner及Vishay公司的薄膜换能元发火电压对比<sup>[25]</sup>

Fig.3 Comparison on fire voltage of the micro-heater between ARDEC/Tanner and Vishay<sup>[25]</sup>



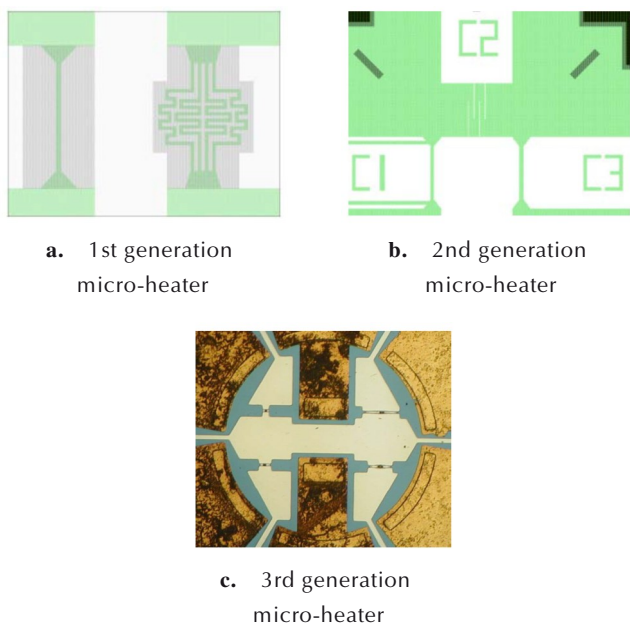


图4 M100用第一、二、三代换能元结构示意图<sup>[26]</sup>

Fig.4 The first, second and third micro-heaters for M100 displacement<sup>[26]</sup>

于海军水面武器中心(NSWC)Indian Head分部研制的MEMS火工品。

Vishay公司开发了NiCr换能元和TaN换能元产品,包括EPIC(Electro-Pyrotechnic Initiator thin film Chips)和MEPIC(Massive Electro-Pyrotechnic Initiator Chips)2个产品系列<sup>[27]</sup>,结构如图5,总体性能参数如表1。EPIC系列基于TaN薄膜技术,薄膜沉积在陶瓷基底上,以实现最佳耗散目的;采用电子元件行业常用的表面贴装工艺(Surface Mounted Devices, SMD),其发火能量低至50 μJ,发火时间低至50 μs。土耳其Aselsan公司的Berkay Akyapi<sup>[28]</sup>使用Vishay公司的MEMS换能元对桥丝电雷管进行改进设计,形成了一种低能电雷管,最小全发火电流350 mA,发火能量小于1 mJ,5 min不发火电流为150 mA,能够耐受-54~71 °C的高低温环境,使用寿命15年,满足美军标MIL-DTL-23659F要求,可应用于40 mm高速智能榴弹、35 mm空爆弹。

微换能元的材料、形状及其尺寸参数决定了发火

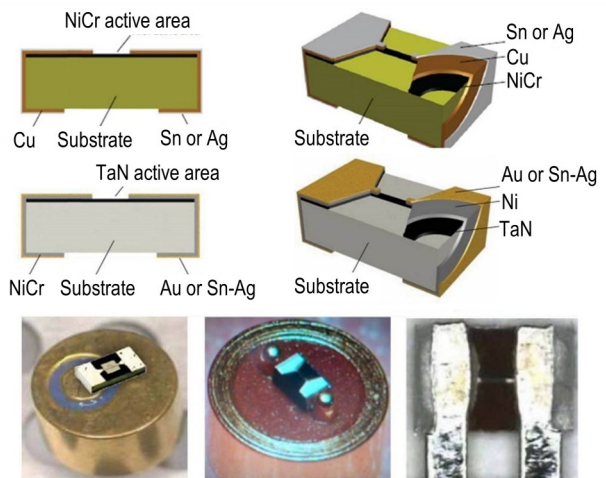


图5 Vishay公司NiCr和TaN薄膜换能元<sup>[27]</sup>

Fig.5 NiCr and TaN micro-heaters of Vishay Corporation<sup>[27]</sup>

性能。从材料的角度,薛艳<sup>[29]</sup>对NiCr、Pt、W、Cu、Al、Cr、Ni 7种不同材料的微换能元发火性能进行了理论计算,并选择NiCr、Pt、Al 3种进行发火性能验证,结果表明Ni-Cr、Pt、Cr的发火电压相对较低,如图6所示。任炜<sup>[30]</sup>优选以金属Pt和Pyrex7740玻璃作为换能元薄膜材料及基底材料,发火性能达5 V/33 μF。陈建华<sup>[31]</sup>将NiCr微换能元直接溅射集成到电极塞上,形成了一体化集成的电极塞换能元,在15 V/10 μF条件下能够可靠起爆斯蒂芬酸铅。从微换能元形状效应的角度,李慧<sup>[32]</sup>基于MEMS技术设计、制备了8种不同桥区中心角度的V形薄膜换能元,当V形结构桥区桥膜厚度一定,通过减小桥区面积,缩短桥区中心宽度以及选择合适的桥区中心角度可实现低化发火,当V形桥区中心角度在50°到90°之间时,最小全发火电压可降低至2.2 V/100 μF。

由于TaN薄膜微换能元具有负的温度系数(TCR),在微换能元温度升高过程中电阻值降低,根据焦耳定律,电阻降低和温度增加呈现出正反馈效应,瞬态电热转换过程中会提供更多的输出热量,更加有利于低能化设计<sup>[33]</sup>。任小明<sup>[33-36]</sup>设计制作了不同薄膜厚度、不同桥区尺寸、不同桥区形状的TaN薄膜换能元,依据GJB/z 377A-94感度试验用兰利法,对其进行了发火感度测试。结果表明:当桥区尺寸、形状一定

表1 Vishay公司NiCr换能元和TaN换能元总体性能<sup>[27]</sup>

Table 1 The performance of NiCr and TaN micro-heaters of Vishay<sup>[27]</sup>

samples	resistance / Ω	all fire energy / μJ	ignition time / μs	no fire current / A	no fire duration / s	all fire current / A
NiCr	2-8	down to 1000	down to 250	0.5-1.2	2-10	down to 1
TaN	2-10	down to 50	down to 50	0.3-0.8	2-5	down to 0.8

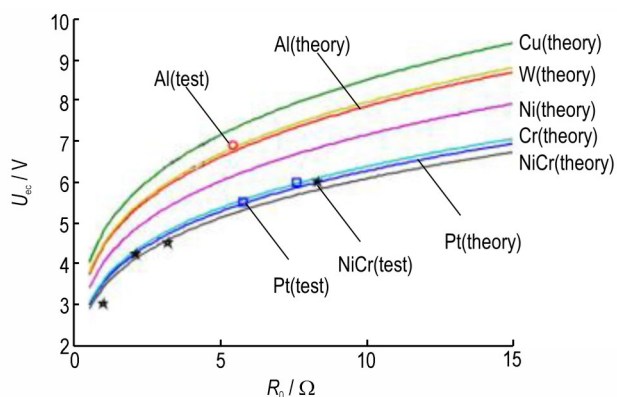


图6 不同换能元材料的发火性能变化<sup>[29]</sup>

Fig.6 Validation of ignition performance with different material type of micro-heaters<sup>[29]</sup>

时,随着桥膜厚度的增加,换能元的发火电压先减小后增加,当桥膜厚度为  $0.9 \mu\text{m}$  时,发火电压最小。通过优化桥区尺寸和桥区形状,获得的 TaN 薄膜换能元最小平均发火电压低于  $5 \text{ V}$ 。

为满足钝感起爆/点火的需求,在 TaN 微换能元钝感化设计方面,Zhang 和 Ren 等<sup>[37]</sup>面向 1A1W5min 设计要求,采用 COMSOL 和 MATLAB 软件计算了 TaN 微换能元的温升特性,在激励时间  $300 \text{ s}$  时,4 种形状 TaN 微换能元的温度没有显著性差异,但 C 形状样品的温度相对最低,如图 7 所示。任小明<sup>[34]</sup>参照国军标 GJB 5309.10-2004 对制作完成的 TaN 微换能元的不发火电流、发火电流进行了测试,结果表明 TaN 微换能元可满足直流  $5 \text{ A}$  发火、3A9W5min 不发火要求。

在 NiCr 微换能元钝感化设计方面,王科伟<sup>[38]</sup>采用磁控溅射技术加工了一种满足钝感电火工品的 NiCr 金属薄膜桥换能元,电阻为  $(1 \pm 0.1) \Omega$  时,在相同散热条件下,NiCr 换能元安全性较半导体桥和桥带式 2 种换能元裕度大,作用时间、断桥时间介于二者换能元之

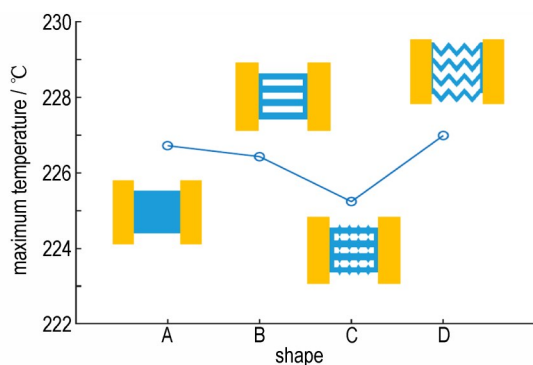


图7 在 1A1W5min 激励下 4 种形状 TaN 微换能元的最高温度<sup>[37]</sup>

Fig.7 Comparison on maximum temperature of four shapes of micro-heaters at 1A1W5min<sup>[37]</sup>

间,桥区尺寸为  $400 \mu\text{m} \times 380 \mu\text{m} \times 2.8 \mu\text{m}$  的 NiCr 微换能元满足钝感火工品  $5 \text{ A}$  发火、1A1W5min 不发火的要求,且发火电流和安全电流裕度较大。杨腾龙<sup>[39]</sup>制备了 NiCr@Al/CuO 钝感含能元件,满足 1A1W5min 安全性要求;  $50 \text{ ms}$  临界发火电流为  $3.08 \text{ A}$ ,最小全发火电流为  $3.18 \text{ A}$ ,最大不发火电流为  $2.98 \text{ A}$ ,安全裕度较高。

微起爆序列采用基于电热换能原理的薄膜材料制作微换能元,微换能元的薄膜材料、结构及基底材料等参数决定了其发火能量水平。低能化和钝感化设计是薄膜换能元能量设计的主要目的,需要从材料、结构等多角度进行微换能元参数设计以实现低能化和钝感化,分析认为微换能元的厚度决定了发火能量的数量级,二维形状决定了发火能量的倍数区间,再结合薄膜材料和基底材料的不同组合,能够实现微换能元发火能量的精确调控。

## 2.2 微换能元安全性设计技术

静电无处不在,对火工品的安全性带来了极大隐患。Berkay Akyapi<sup>[28]</sup>根据 MIL-DTL-23659F、STAN-AG 4157 和 AOP-20 标准,对研制的基于 Vishay 微换能元制作的电雷管进行了性能测试,结果表明,采用微换能元研制的电雷管可耐受  $>10 \text{ kV}$  的静电。为了增强 NiCr 换能元抗静电能力,刘卫<sup>[40]</sup>通过将换能元集成到基于瞬态电压抑制二极管 (Transient Voltage Suppressor, TVS) 的衬底上,设计并制造了一种新型 TVS-mNiCr 换能元(如图 8 所示),击穿电压  $3.5 \sim 5 \text{ V}$ ,TVS-mNiCr 换能元在  $2 \text{ A}$  恒流条件下可以起爆涂覆的斯蒂芬酸铅起爆药。根据 GJB 5309.14-2004 的方法,在  $25 \text{ kV}$ 、 $500 \text{ pF}$ 、 $5000 \Omega$  条件下进行了静电性能测试,静电测试后换能元的显微结构没有明显变化,表明 TVS-mNiCr 换能元具有一定的静电保护能力。

为了增强换能元的本质安全性,南京理工大学沈瑞琪团队<sup>[41]</sup>研究了具有安全控制功能的微换能元,在结构组成上主要分为点火桥和微电子解除安全点火

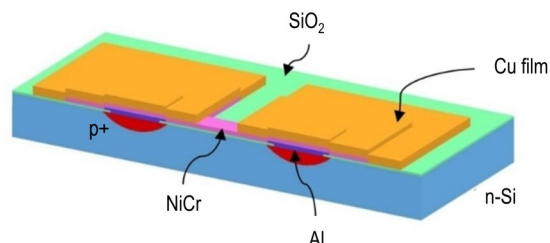


图8 TVS-mNiCr 换能元三维结构及剖面<sup>[40]</sup>

Fig.8 Schematic diagram of TVS-mNiCr micro-heater<sup>[40]</sup>

桥2个部分,试验证实微电子解除安全点火桥施加1.5 A、3 ms的恒流激励下,成功炸断铝线,实现了解除安全功能。薛艳<sup>[42]</sup>设计了一种MEMS安全换能芯片,包括NiCr薄膜层、绝缘层、导线控制层等(如图9所示),利用MEMS平面开关进行通断转换,实现对起爆换能元安全保护,提高安全换能芯片的安全性。测试表明,安全换能芯片的全发火电流为0.8 A,全发火电压7 V,作用时间22 μs。

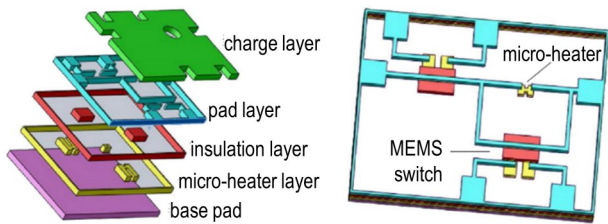


图9 安全换能芯片结构示意图<sup>[42]</sup>  
Fig.9 Schematic diagram of the safe micro-heater chip<sup>[42]</sup>

由于微换能元采用薄膜工艺,与基底接触紧密,相比于桥丝换能元,具有更高的抗力学过载能力。EMS公司<sup>[24]</sup>针对特殊环境下的起爆需求,研制的薄膜微换能元环境适应性符合MIL-STD 331 & 810标准要求。通过抛光、气相沉积等工艺将薄膜微换能元集成到电极塞上,制作了DM1267和DM1461 2种电雷管,相比于桥丝电雷管,质量一致性好,在高过载和高转速下可靠性高,经受了超过50000 g的力学过载试验验证,截至当年这2种电雷管累计制造了超过70万发,已经被应用于铁拳(Panzerfaust)多管火箭筒弹药、27毫米毛瑟(Mauser)航炮弹药。

微换能元的安全性设计需要根据应用要求采用的不同的设计结构,一种方式是通过集成安全控制功能的芯片,使微换能元具备本质安全性,可以避免任何的意外电流的危害,能够增强抵抗杂散电流、静电脉冲等的影响。虽然这种方式具有抵抗多种意外刺激的能力,但由于采用点火药炸断导线实现开关功能,未来还需要进一步研究点火药点火过程的安全特性。通过一体化集成TVS等元器件可以提高静电安全性,是微换能元抗静电技术的主要发展趋势。另外,在耐高过载方面,由于采用薄膜沉积技术,微换能元本身就比较桥丝具有更高的耐过载能力。

### 2.3 微换能元电热换能温度测试

金属薄膜微换能元引发火工药剂发火过程主要基于热起爆机理,火工药剂能否起爆与微换能元的温度密切相关,因此作为火工药剂热能量的来源,微换能元

温度的大小至关重要<sup>[43]</sup>。见诸报道的微换能元温度测试方法主要分为接触式和非接触式测试,其中非接触式测试方法采用较多,有红外热波测量、瞬态高温计等方式。

北京理工大学 Bao Bingliang<sup>[44]</sup>采用光纤传感器测试了NiCr换能元桥区温度分布(如图10a所示),该微换能元桥区尺寸为180 μm×180 μm×0.3 μm(长×宽×厚)、电阻为4.5 Ω的(玻璃基底,尺寸为500 μm×500 μm),据此通过计算分析得到理想状态下引发斯蒂芬酸铅药剂的临界发火电流约为182 mA。张方<sup>[45]</sup>利用红外热波测试装置获得了NiCr微换能元传热特性,如图10b所示,当输入电压为3 V时,桥区温度以热传导等方式传递给基底和金属焊盘,通过基底和焊盘表面向周围散热,当桥区产生的焦耳热与散失的热量相等时,桥区温度保持不变,进入稳态传热阶段。输入电压为5 V时,热积累进一步增加,导致动态平衡温度值出现阶跃或平衡状态不稳定情况。

为研究氮化钽薄膜换能元在不同激励条件下的温

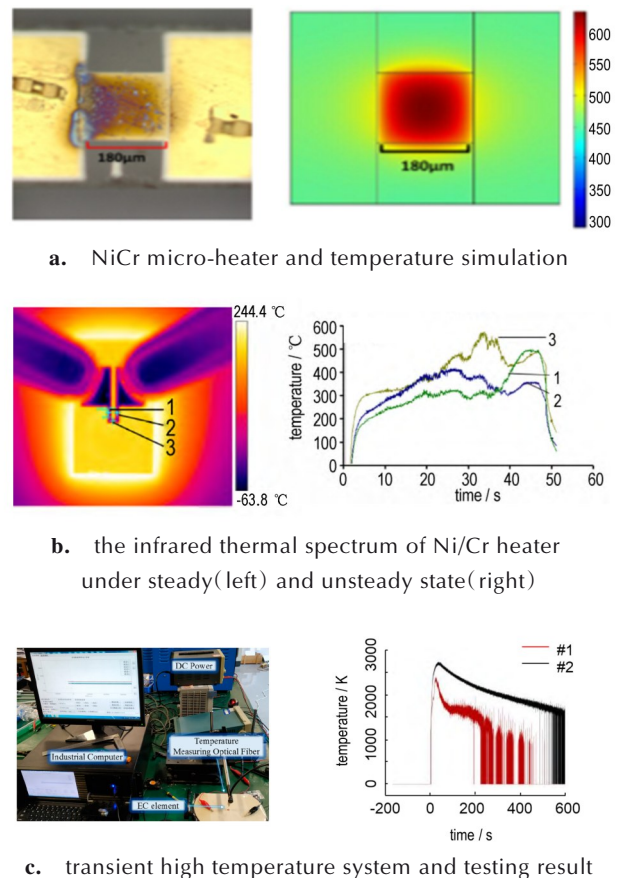


图10 NiCr换能元结构及温度仿真与测试<sup>[44-46]</sup>  
Fig. 10 The simulation and test on temperature of NiCr micro-heater<sup>[44-46]</sup>



度响应特性, 阚文星<sup>[46]</sup>、Zhang Yun<sup>[37]</sup>先后利用瞬态光学高温计, 如图 10c 所示, 分别在恒定电压激励和电容激励下对不同结构尺寸的氮化钽薄膜换能元进行瞬态响应温度测试。结果表明, 相同尺寸时, 在电容激励下换能元可在几十微秒内达到最高温度, 而在恒压激励下需要 100 多微秒。

为了解决红外辐射测温等非接触式测量结果易受被测表面发射率的影响, 张一中<sup>[47]</sup>采用接触式测量方法, 将铂材料的温度传感器与微换能元集成, 通过测量铂的阻值变化来获得微换能元温度变化。薄膜 Pt 电阻在 100~500 °C 内具有良好的线性度, 多次测量结果重复性比较好, 最大相对偏差不超过 2.4%, 在 900 mA (20 s) 直流激励下薄膜微换能元点火温度达到 500 °C, 高于常见起爆药和点火药的发火温度。

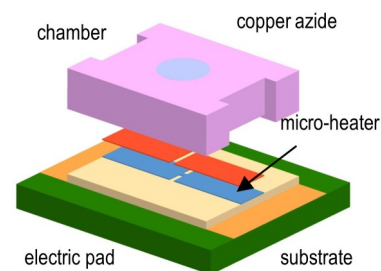
微换能元的温度响应过程快, 响应时间在微秒量级, 同时还要兼顾百微米量级的桥区尺寸, 目前很难同时获得微秒量级的时间、百微米量级的空间条件下微换能元的温度响应。在测试过程中, 只能分别测试微换能元时间或空间条件下的高瞬态温度响应特性。目前红外辐射测温等非接触测量方法的测试精度受到发射率设定等因素的影响, 测试结果的准确性难以判定。而采用温度传感器的接触式测量方法会导致换能元温度传导到传感器上, 测量得到的温度小于微换能元的实际温度。因此, 微换能元电热换能瞬态响应温度的测试仍然是难点之一, 未来仍然需要探索高精度高瞬态温度测试技术。

### 3 微起爆能量控制及器件技术

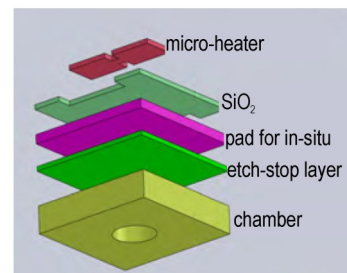
由于微起爆器尺寸微小, 其装药量在毫克量级, 同时必须具备可靠爆轰输出的能力, 因此对起爆药提出了高能量输出、低极限起爆药量等要求。另一方面, 微起爆器要求药剂的制备工艺与 MEMS 工艺相兼容, 以满足高精密、高一一致性装药等要求。目前, 主要采用原位装药方法来制备叠氮化铜装药以满足 MEMS 火工品对工艺、性能等要求。原位装药技术, 使含能材料直接生长在 MEMS 火工品的换能元上, 不仅减少了压装含能材料时带来的浪费和安全问题, 更实现了装药过程与 MEMS 工艺兼容, 使实现大规模工业生产成为可能。目前国内外对微纳结构装药及其原位装药方法、测试和效能计算等方面开展了大量的研究工作<sup>[43, 48-51]</sup>, 也有相关的综述文章<sup>[52-53]</sup>, 在此不多赘述。本节重点面向微起爆序列的应用要求, 探讨及分析微

起爆器件的集成方法及性能。

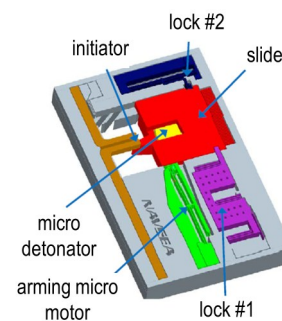
从微起爆器的一体化集成方式上, 有 2 种主要方式, 一种是原位装药与 MEMS 安全保险机构一体化集成, 形成带有安全控制功能的微起爆器 (micro-detonator on S&A), 或称为安保集成式结构; 另一种是原位装药仅与微换能元进行集成, 形成独立式的微起爆器 (independent micro-detonator)。对于独立式的微起爆器, 根据原位装药与微换能元的相对位置, 又可以分成 2 种基本构型: 一种是换能元与装药在基底的同一面, 称之为同侧构型 (independent micro-detonator of in-same-side); 另一种是换能元与装药分布在基底的两侧, 即异侧构型 (independent micro-detonator of in-opposite-side), 这需要借助于特定的结构设计实现, 如图 11 所示。对于同侧构型,



a. independent micro-detonator of in-same-side



b. independent micro-detonator of in-opposite-side



c. micro-detonator on S&A

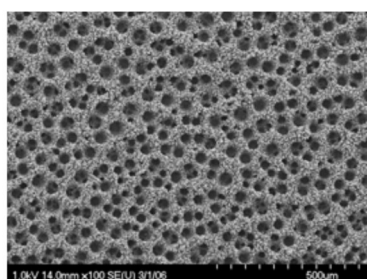
图 11 微起爆器结构<sup>[29, 54-55]</sup>

Fig.11 Different structure of the three kinds of micro-detonator<sup>[29, 54-55]</sup>

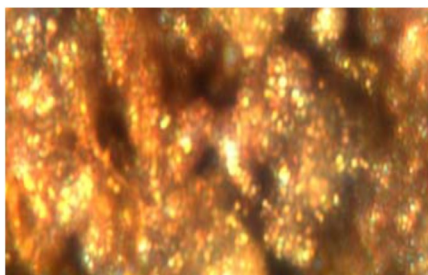
微换能元电热转换后产生的热量通过传导、辐射的方式直接加热起爆药;而对于异侧构型,微换能元产生的热量要通过特定结构传热后,通过热传导方式间接加热起爆药。

带有安全控制功能的微起爆器是美国海军水面武器中心 Indian Head 分部发明的一种结构,该中心也是最早开展微纳结构起爆药原位装药方法研究的机构。在 2004 年的引信年会上,John Hendershot<sup>[9]</sup>介绍了将含能材料原位集成到安保机构上的方法(如图 12 所示),研究了集成方法与 MEMS 技术的兼容性,形成的微起爆器的技术成熟度 3 级。在 2007 年,原位装药形成的微起爆器的技术成熟度达到了 4 级,完成了与第二代安保机构的集成,同时验证了起爆 RSI-007、PBXN-5 等下一级装药的能力<sup>[56]</sup>。

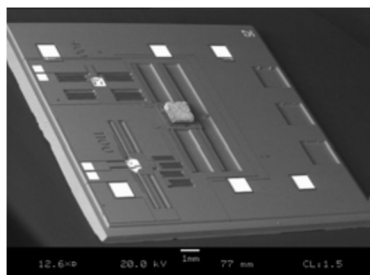
国内目前主要开展了独立式结构的微起爆器的设



a. porous Cu



b. in-situ primary explosive



c. micro-detonator integrated onto S&A

图 12 原位装药及其与 S&A 集成<sup>[9]</sup>

Fig.12 The in-situ explosive and its integration with S&A<sup>[9]</sup>

计、制作与性能研究。在同侧构型微起爆器方面,解瑞珍等<sup>[57]</sup>采用原位生成多孔叠氮化铜的方法,初步探索形成了硅基微起爆器。依据 GJB/Z 377A-1994 感度试验用兰利法测试微起爆器的发火感度,当充电电容为 33  $\mu\text{F}$  时,硅基微起爆器的平均发火电压为 7.89 V,输出威力可以起爆六硝基杂异伍兹烷(CL-20)装药。为了实现微起爆器的低能化,薛艳<sup>[29]</sup>通过仿真计算获得了基体材料,换能元材料,火工药剂与微起爆器起爆性能的影响规律,确定了微起爆器的结构参数。通过 MEMS 工艺完成微起爆器一体化集成制作,对结构参数以及起爆性能进行了测试。通过优化,微起爆器发火电压小于 3 V,当装药直径 1 mm、装药量 2.0 mg 时,可以可靠起爆 CL-20 炸药。

在异侧构型的微起爆器方面,解瑞珍<sup>[54]</sup>利用 SOI (Silicon On Insulator) 片特有的三层结构,开展了硅基平面微起爆器的设计研究。以 SOI 片的外延硅作为平面微起爆器原位装药用专用电极,以提升了微起爆器结构与原位装药工艺的兼容性。利用 SOI 片的本体硅作为装药腔体层,以减少了微起爆器的轴向尺寸,提高集成度。在 33  $\mu\text{F}$  电容下,50% 发火电压为 12.95 V,可起爆下级 CL-20 传爆装药。张方<sup>[45]</sup>采用微控直写法,在微装药腔体内部写入一种具有多孔性质的纳米铜墨水前驱体(如图 13 所示),经过气固原位叠氮化反应后,形成叠氮化铜 MEMS 微起爆器。该微起爆器平均电阻为 4  $\Omega$ ,作用时间为 8.44  $\mu\text{s}$ ,50% 发火电压为 14.29 V,发火能量为 0.33 mJ,装药量平均值 5.18 mg,质量相对标准偏差 2.6%,能够起爆 CL-20 炸药。

无论是同侧构型还是异侧构型的微起爆器,面临的主要问题就是原位装药裸露,进而会在抗过载性能、与空气相容性以及开放环境下的安全性等方面存在弱点,这就需要解决微起爆器的封装技术。国外有报道采用封装方法形成一种同侧构型的微起爆器(如图 14 所示),以应用于代替 M100 电雷管<sup>[26]</sup>。

为了增强微起爆器的点火和输出能力,美国水面武器中心 India Head 分部的 Daniel Pines<sup>[58]</sup>提出了 2 种技术途径,一是使用可反应(reactive material bridge)复合半导体桥换能元,二是用大输出的装药,研制的高性能微起爆器可为分布式多点起爆系统提供紧凑、安全、低能的解决方法,微起爆器的激励作用时间小于 2  $\mu\text{s}$ ,点火功率小于 1 mJ。

综上所述,由于微起爆器采用原位装药技术,使含能材料直接生长在 MEMS 火工品的换能元上,使装药过程与 MEMS 工艺互相兼容。微起爆器是微起爆序



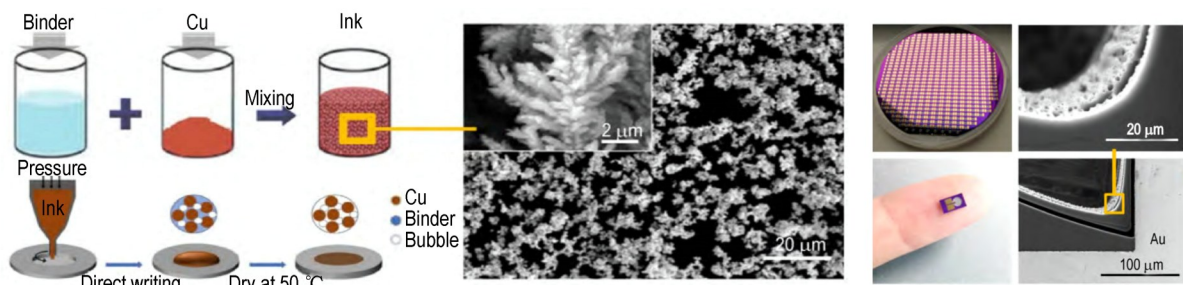


图13 微起爆器先驱体墨水直写过程及微观结构<sup>[45]</sup>

Fig.13 Direct-writing process of precursor ink and microstructure of micro-detonator<sup>[45]</sup>

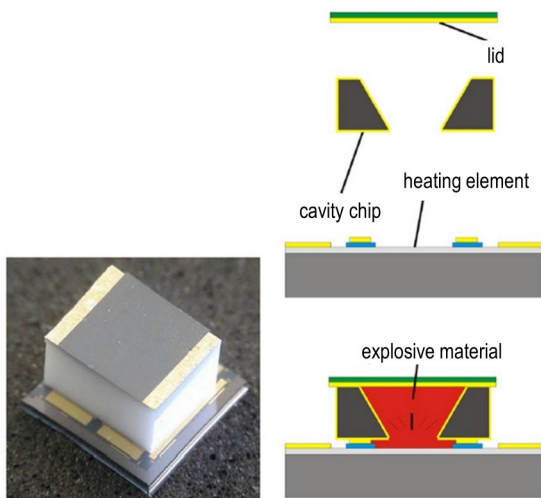


图14 封装后的同侧构型微起爆器<sup>[26]</sup>

Fig.14 The packaged independent micro-detonator of in-same-side<sup>[26]</sup>

列的初始起爆单元,微起爆器的型式有安保集成式和独立式2种结构,目前国外2种结构都有研究,国内研制的主要是独立式的微起爆器。对于微起爆器来说,一方面要解决原位装药自动化、批量化问题,提升批次间装药的稳定性;还需要解决封装问题,以消除在抗过载性能、与空气相容性以及开放环境下安全性等方面的隐患。

#### 4 微爆轰能量传递与隔爆控制技术

采用基于飞片冲击起爆原理的微起爆序列的能量传递过程包括爆炸驱动飞片的形成与运动、飞片冲击起爆微尺度传爆装药2个过程。第一过程需要考虑微纳结构起爆药的装药量及尺寸、飞片材料和厚度等参数对飞片形成的影响;第二个过程主要考虑飞片速度对冲击起爆能力的影响,同时为了满足与MEMS工艺的兼容性,微尺度传爆装药需要特殊的制备方法。在安全状态下,为避免飞片动能或者前级微起爆器的冲击波能起爆下一级微尺度传爆装药,还需要考虑安全

机构的隔爆特性。

##### 4.1 微尺度传爆装药制备方法与性能调控

为了与MEMS的工艺相兼容,微起爆序列中的传爆药需要采用直写技术实现装药。1979年,通过国防高级研究计划局(DARPA)计划,直写技术(direct-writing technology)被开发用于电子电路的快速原型制作,提供了能够精确图案化的高通量处理能力。1999年,DARPA在直写技术上投资了4000万美元<sup>[59]</sup>。美国基于直写技术发明了EDF-11直写装药,EDF-11是一种基于六硝基六氮杂异伍兹烷(CL-20)的炸药,已经成为美国陆军的许用(qualified)传爆药<sup>[60]</sup>。本节从油墨配方制备方法及油墨流变特性,临界能量特性、转晶问题、力学性能和感度调控等方面介绍微尺度传爆直写装药研究进展。

直写传爆药配方目前有悬浮式油墨和全溶性油墨2种,相比于悬浮式油墨炸药,全溶性油墨炸药是将炸药和黏结剂及其他助剂一起溶解到有机溶剂中,形成一种澄清透明的溶液,由于油墨中不含固体,可以用尺寸较小的喷头,采用喷墨打印的形式进行装药,从而更精确地控制炸药线的宽度和精度。直写传爆药制作过程首先是对炸药进行细化,并以细化后的炸药作为主体炸药,与不同的溶剂和助剂混合,制得悬浮式和全溶性炸药墨水,用于制成可以喷、注的墨水装药。

2010年,斯蒂文斯理工学院 Andrew Ihnen 与美国装备研发工程中心 Brian Fuchs 等<sup>[60]</sup>合作开发了一种喷墨打印方法,以沉积和图案化具有微尺寸的黑索今(RDX)和EDF-11(如图15所示),并利用常规雷管起爆EDF-11,再由EDF-11起爆RDX;但是结果表明,致密的RDX结构可以燃烧,但在500 μm的厚度以下无法被引爆,特别是如果没有纳米尺寸的RDX,维持爆轰的亚毫米临界厚度也无法实现。所使用的“一步”工艺利用蒸发组装生产纳米复合含能材料,通过调整各种工艺参数,可以生产出各种形态的材料。

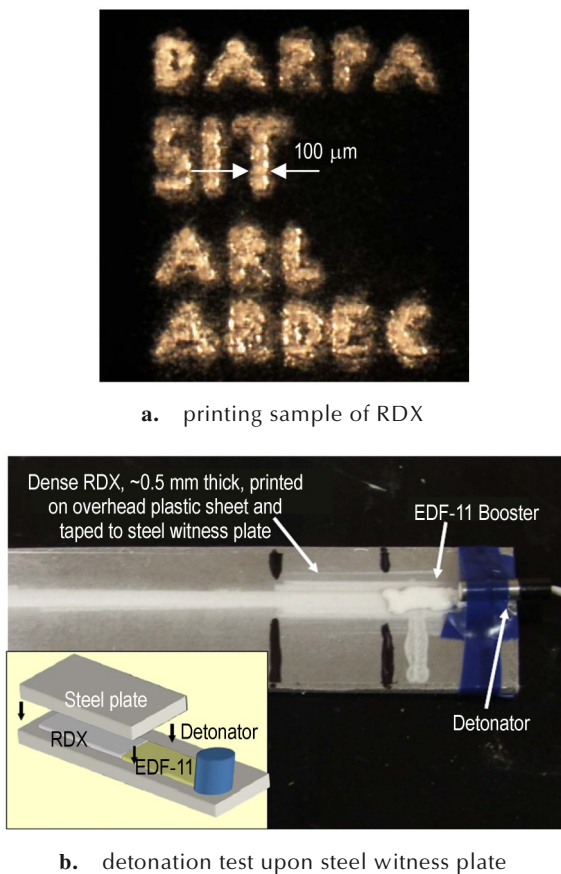


图 15 直写传爆药及其输出性能测试<sup>[60]</sup>

Fig. 15 Direct-writing explosive/polymer nanocomposite and detonation test<sup>[60]</sup>

对于直写技术,油墨的流变特性至关重要,而炸药颗粒的粒度级配对炸药油墨的流变性能有着十分明显的影响。郭浩<sup>[61]</sup>制备了粒径分别为 400 nm 和 4 μm 的 CL-20 样品,以及 7 种不同粒度级配的 CL-20 基炸药油墨,采用流变仪对炸药油墨进行了黏度测试。结果表明,随着粒径为 4 μm 的 CL-20 含量的增多,炸药油墨表观黏度出现先减小后增大的现象,当炸药油墨中粒径分别为 400 nm 和 4 μm 的 CL-20 质量比为 1:2 时,炸药油墨的非牛顿指数为最大值 0.41,屈服值和触变指数均达到最小值,分别为 26.73 和 8.74,炸药油墨具有更好的流变性能。

在微小尺寸条件下,CL-20 直写装药的传爆性能调控需要重点关注其能量传递过程中的临界厚度、极限厚度等临界特性,且临界特性受材料及工艺特性等因素影响。

从材料对临界能量特性影响的角度,朱国豪<sup>[62]</sup>以高能叠氮胶 3,3-二叠氮甲基氧丁环-四氢呋喃共聚醚(PBT)和紫外光(UV)固化树脂为复合黏结剂,以

CL-20 为主体炸药,设计了一种 UV 光辅助固化的 CL-20 基含能油墨,并采用 3D 打印平台装置(如图 16 所示)对油墨进行了直写成型,成型样品可实现 90° 拐角传爆,在 1.2 mm 装药宽度下,其传爆临界尺寸为 0.387 mm。朱自强<sup>[63]</sup>采用球磨方法细化了 CL-20 炸药,结合聚乙烯醇(PVA)/水/乙基纤维素(EC)/异丙醇(IPA)的复合黏结剂体系,获得了一种书写性能良好的炸药油墨复合物  $\epsilon$ -CL-20/PVA/H<sub>2</sub>O/EC/IPA。通过楔形狭缝装药炸痕法,测得装药厚度为 0.54 mm 时,炸药油墨复合物的爆轰临界尺寸为 0.36 mm。Wang Dunju<sup>[64]</sup>通过球磨方法制备亚微米 CL-20,然后与由 GAP 和多异氰酸酯(N100)组成的含能粘合剂混合,亚微米 CL-20 基油墨表现出良好的润湿性和均匀性,没有裂缝、孔隙和空隙,直写沉积到凹槽中的样品可以提供尺寸小于 0.4 mm×0.4 mm 的稳定爆轰。宋长坤<sup>[65]</sup>以水性聚氨酯(WPU)和 EC 组成双组份粘结分散体系,制备了适用于微笔直写沉积装药工艺的 CL-20 基炸药油墨,利用楔形装药炸痕法测试了不同粒度 CL-20 炸药油墨样品在装药宽度为 1 mm 时的临界传爆厚度,成型油墨样品在装药宽度为 1 mm 时的临界传爆厚度随着 CL-20 粒度的减小而减小,最小可达 69 μm,表明减小 CL-20 炸药的粒度能够显著增强其临界传爆性能。

从工艺对临界能量特性影响的角度,郭浩<sup>[66]</sup>采用炸药油墨直写技术和光固化技术对炸药油墨进行了装药成型,成型样品的临界传爆厚度为 0.078 mm(装药宽度为 1 mm),极限厚度在 1 mm 以下(装药宽度为 1 mm),爆速为 7357 m·s<sup>-1</sup>(装药宽度为 1 mm,装药密度为 1.6745 g·cm<sup>-3</sup>);起爆能力上,光固化炸药油墨装药能够成功直线传爆并起爆下级装药 PBXN-5,但不能成功起爆 PBXN-7,同时,当该炸药油墨装药在装

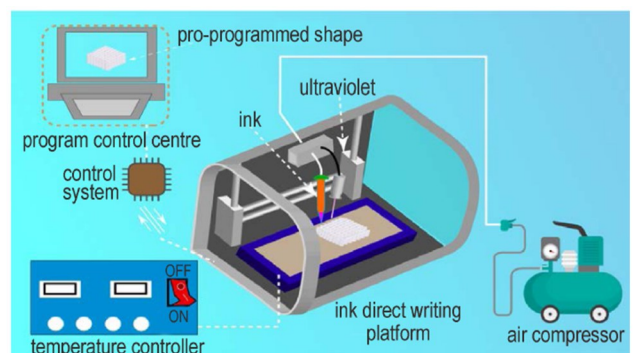


图 16 光固化油墨三维微笔直写平台<sup>[62]</sup>

Fig. 16 Diagram of micro direct-writing platform of UV-curing ink<sup>[62]</sup>



药尺寸为  $1\text{ mm} \times 1\text{ mm}$  时,能够在具有连续  $90^\circ$  拐角的沟槽内成功传爆。Li Qianbing<sup>[67]</sup> 将 CL-20 含能油墨直写到在微尺寸凹槽,通过楔块试验结果表明,  $1.0\text{ mm}$  固定宽度下的临界爆轰厚度约为  $11\ \mu\text{m}$ , 临界爆轰尺寸(横截面)约为  $0.3\text{ mm} \times 0.3\text{ mm}$ , 爆轰波可在多个  $90^\circ$  角附近继续传播。在临界爆轰尺寸研究方面, Wang Jingyu<sup>[68]</sup> 使用直写技术制备了 CL-20 基含能材料, 颗粒亚微米级, 单层厚度为  $2.4\ \mu\text{m}$ , 其临界爆轰尺寸约为  $1\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$ 。Zhang Lei<sup>[69]</sup> 设计并制备了一种用于直接书写的新型 CL-20 基爆炸性油墨配方(如图 17 所示), 临界厚度为  $0.153\text{ mm}$ , 平均爆速为  $8088.9\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

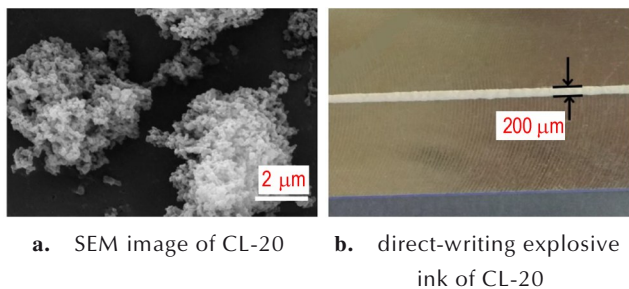


图 17 CL-20 炸药 SEM 照片和直写药条<sup>[69]</sup>

Fig. 17 SEM image of CL-20 and direct-writing explosive ink<sup>[69]</sup>

在常温条件下,有 4 种晶体类型的 CL-20 可稳定存在,分别为  $\alpha$ -、 $\gamma$ -、 $\beta$ -和  $\varepsilon$ -型。转晶问题是全溶性油墨配方的直写 CL-20 应用面临的主要问题之一,如 CL-20 会由  $\varepsilon$  晶型转变为  $\beta$  晶型<sup>[70-71]</sup>(如图 18a), 转晶过程会直接导致 CL-20 感度变化。 $\varepsilon$ -CL-20 的转晶峰分成 2 个峰, 峰温分别为  $135\text{ }^\circ\text{C}$  和  $153\text{ }^\circ\text{C}$ , 2 个峰的出现与粒度分布宽有一定关系; 粒度大小对 CL-20 转晶开始温度与持续时间的影响显著, 粒度越大, 转晶开始温度越低, 转晶过程持续时间越长<sup>[72]</sup>。相反, 使用悬浮式油墨配方体系, 可以有效抑制直写 CL-20 装药转晶现象的发生。当以聚乙烯醇(PVA)水溶液为水相, FEVE 乙酸酯溶液为油相形成水包油乳液型黏结体系, 并加入亚微米  $\varepsilon$ -CL-20 颗粒, 配制 CL-20 基炸药悬浮式油墨进行直写技术打印, 晶型仍为  $\varepsilon$  型<sup>[73]</sup>, 如图 18b 所示。以含氟橡胶/PVA 乳液为粘合剂的悬浮式油墨, 以亚微米 CL-20 为主要炸药形成的 CL-20 基复合材料中 CL-20 晶型没有改变<sup>[67]</sup>。当采用 PVA 水溶液为水相、GAP 乙酸酯溶液为油相、吐温 80 和 SDS 组合为乳化剂、BPS 作为 GAP 的固化剂, 制备的 CL-20 炸药悬浮式油墨晶型没有改变<sup>[74]</sup>。

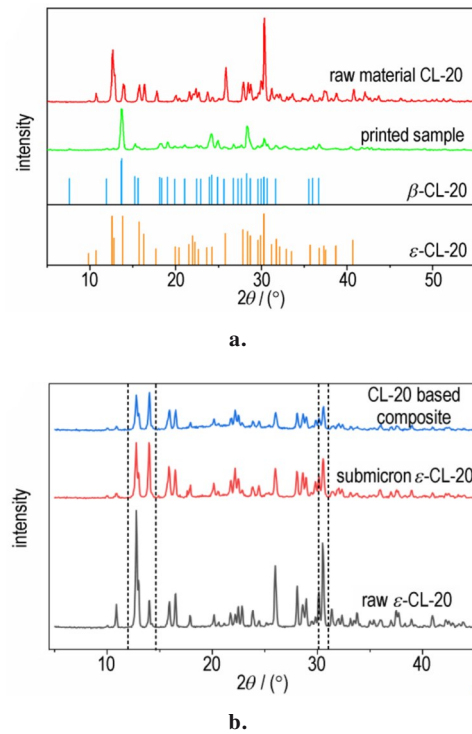


图 18 CL-20 直写装药的转晶现象(a)原料是  $\varepsilon$  型、成型样品是  $\beta$  型<sup>[70]</sup>(b)原料和成型样品均是  $\varepsilon$  型<sup>[73]</sup>

Fig. 18 Crystal transition of CL-20 ink (a) raw materials is  $\varepsilon$ -type, printed sample is  $\beta$ -type<sup>[70]</sup> (b) raw materials and printed sample are all  $\beta$ -type<sup>[73]</sup>

为了增强直写装药的力学性能, 廖东桀<sup>[70]</sup> 以 CL-20 为主体炸药, 以端羟基聚醚(HTPE)/硝化纤维素(NC)为复合黏结体系, 以乙酸乙酯为共溶剂, 加入一定量的甲苯二异氰酸酯(TDI)设计出一种全溶式炸药油墨, 利用喷墨打印技术实现了装药成型。打印样品实测密度为  $1.70\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 可达最大理论密度的  $88.54\%$ , 弹性模量可高达  $10.47\text{ GPa}$ , 硬度为  $0.22\text{ GPa}$ , 展现了良好的力学性能。Li Chunyan<sup>[75]</sup> 使用 CL-20 作为含能材料, 氧化石墨烯(GO)作为功能填料, 前体溶液作为聚合物基质, 制备的 CL-20 基油墨炸药具有低于  $10\%$  的孔隙率, 弹性模量提高了  $131\%$ 。

在直写 CL-20 装药感度调控方面, 以 PVA 水溶液为水相、FEVE 乙酸酯溶液为油相形成水包油乳液型黏结体系, 并加入亚微米  $\varepsilon$ -CL-20 颗粒, 配制 CL-20 基炸药油墨进行直写, 样品的撞击能和摩擦力分别为  $216\text{ N}$  和  $4.5\text{ J}$ , 相比原料  $\varepsilon$ -CL-20 撞击感度和摩擦感度分别降低了  $125\%$  和  $200\%$ <sup>[73]</sup>。以 GAP/NC/乙酸乙酯, 加入  $\varepsilon$ -CL-20 形成的油墨配方, 直写成型后样品的撞击感度为  $23.0\text{ cm}$ , 而原料  $\varepsilon$ -CL-20 撞击感度为



13.0 cm<sup>[68]</sup>。当采用不饱和聚酯为粘合剂、苯乙烯为活性单体、三甲苯基甲酰基-二苯基氧化磷为光引发剂,制备可快速固化CL-20油墨配方,成型样品撞击感度可达到39.8 cm<sup>[76]</sup>。

为了满足与MEMS工艺的兼容性,微尺度传爆装药需要采用直写技术。借助直写成型技术,可以实现微尺度传爆装药微型化、图案化的有序沉积和按需定制。从基础研究的角度,目前的研究大多聚焦于临界尺寸、感度等宏观特性的研究,未来需要加强针对微尺度条件下冲击起爆机理的研究,包括微观颗粒特性对冲击起爆的影响、考虑微孔隙的冲击起爆模型等方面。从应用的角度,目前国外CL-20基直写装药EDF-11已经完成了鉴定审查,国内在微尺度直写传爆装药的油墨配方制备方法和性能调控规律方面开展了大量的研究工作,已完成了关键技术攻关,下一步亟待开展鉴定试验工作。

#### 4.2 微起爆药爆炸驱动飞片特性

微起爆序列采用微纳结构起爆药爆炸形成的冲击波剪切飞片、驱动飞片,当飞片运动达到一定速度后,通过高速冲击作用起爆下一级装药。在微纳结构起爆药爆炸驱动飞片过程中,飞片速度是衡量其起爆能力的重要指标。目前,飞片速度的计算和测试方法主要有理论或经验公式计算、仿真软件计算和试验测试3种方法。其中,理论或经验公式计算主要采用Gurney公式<sup>[77]</sup>、Yadav模型<sup>[78]</sup>等模型或公式;仿真软件计算方法主要采用LS-DYNA、AUTODYN等显式动力学软件计算起爆药驱动飞片的完整过程;试验测试主要包括光子多普勒测速系统(Photonic Doppler Velocimetry, PDV)<sup>[79-81]</sup>、激光干涉测速(Velocity Interferometer System for Any Reflector, VISAR)<sup>[82-83]</sup>等方法。本节主要从这3个方法角度介绍微起爆药爆炸驱动飞片特性的进展情况,并总结加速腔、微起爆器装药量及尺寸和飞片材料对飞片速度的影响规律。

在飞片速度理论计算方面,张凡<sup>[84]</sup>在采用Gurney公式计算叠氮化铜爆轰驱动飞片速度的基础上,利用PDV技术测量了微起爆器驱动飞片的速度历程,根据测量结果并结合微起爆器的结构设计对飞片速度计算公式进行了修正,提出了质量修正因子并得到了微起爆器驱动飞片的速度计算公式,经实验验证计算误差在7%以内。但是,该计算方法存在一定限制,炸药的质量修正因子 $\alpha$ 会随着硅基微起爆器的装药尺寸变化而变化,需要根据具体结构设计以及实验结果进行确定。此外,原位装药过程中出现的叠氮化程度不够、装药密度一致性较差且装药密度较低等问题,对速度测

量结果和修正因子的确定有一定影响。

利用数值计算方法仿真起爆药原位装药驱动飞片特性的过程中,需要解决的首要问题是原位装药JWL(Jones-Wilkins-Lee)状态方程<sup>[85]</sup>参数的标定。JWL参数的获取方法主要有基于显含化学反应的状态方程拟合(如BKW<sup>[86]</sup>、VLW<sup>[87]</sup>等)、基于 $\gamma$ 律方程拟合<sup>[88]</sup>、基于圆筒试验拟合<sup>[89]</sup>等方法。由于圆筒试验对药剂的药量和直径有要求,原位装药很难满足试验要求,目前还没有原位装药JWL方程试验标定方面的报道,只能采用半试验、半理论计算来拟合原位装药的JWL状态方程参数。曾庆轩<sup>[90]</sup>采用电探针法测定了叠氮化铜微装药尺寸下的爆轰速度,根据叠氮化铜的密度和测定的爆轰速度,运用 $\gamma$ 律状态方程拟合出了JWL状态方程参数,如表2所示,数值模拟结果与实验值相吻合,偏差在5%以内。Peng Yue<sup>[87, 91]</sup>使用Explo5热力学程序计算并拟合叠氮化铜爆轰产物的爆速、爆压和JWL状态方程参数(如表2所示),通过计算基于叠氮化铜原位装药的微起爆器驱动钛飞片的形成过程,比较了VLW、VHL、VPL 3种状态方程对叠氮化铜爆轰参数的影响(如图19所示),结果表明VPL状态方程的仿真结果与试验结果吻合度最好。

表2 叠氮化铜JWL状态方程拟合参数

Table 2 The coefficients of JWL EOS of copper azide

No.	$\rho$ /g·cm <sup>-3</sup>	A /GPa	B /GPa	$R_1$	$R_2$	$\omega$	Calibration method	Ref.
1	2.29	410	4.5	4.90	1.3	0.3	$\gamma$ EOS	[90]
2	1.1465	50.04	-0.1338	5.01	0.37	0.899	VLW EOS	[87]
3	1.1465	31.6	1.45	3.63	1.08	0.26	Explo5	[87]
4	2.215	147.83	1.735	3.12	0.733	0.6	VLW EOS	[91]
5	2.215	224.2	2.157	3.79	0.93	0.7	VHL EOS	[91]
6	2.215	173.3	0.625	3.53	0.816	0.6	VPL EOS	[91]

Note:  $\rho$  is density of the explosive. A, B,  $R_1$ ,  $R_2$  and  $\omega$  are constant parameters of the JWL equation of state.

在飞片速度测试方面,解瑞珍<sup>[92]</sup>采用PDV系统装置测试了基于叠氮化铜原位装药的微起爆器爆炸驱动飞片的速度特性(如图20所示),获得了优化的设计参数,微起爆器优化装药直径为1.0 mm,加速腔优化尺寸为 $\Phi 1.0$  mm $\times$ 1.0 mm,最佳飞片厚度为30  $\mu$ m。贺翔<sup>[93]</sup>利用PDV系统测试了氮化铝微装药驱动飞片特性,飞片形成过程包括:飞片加速过程,飞片经过约0.5  $\mu$ s加速后速度达到最大;飞片稳定飞行过程,飞片速度在2~3  $\mu$ s内保持稳定,这段速度作为飞片起爆能力的一个重要判据。收集飞片残骸和剪切后的飞片材

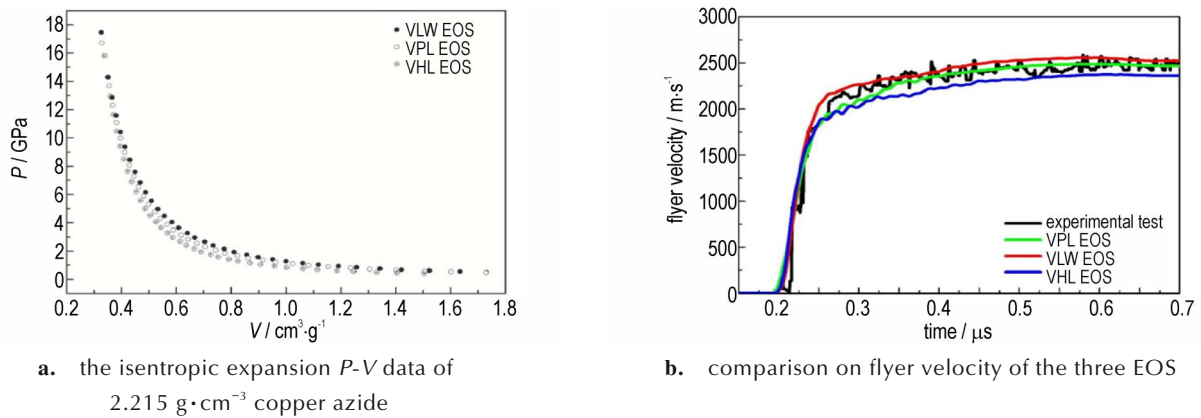


图 19 叠氮化铜原位装药状态方程曲线及飞片速度计算结果对比<sup>[87, 91]</sup>

Fig.19 The equation of state (EOS) of in-situ copper azide and comparison on flyer velocity<sup>[87, 91]</sup>

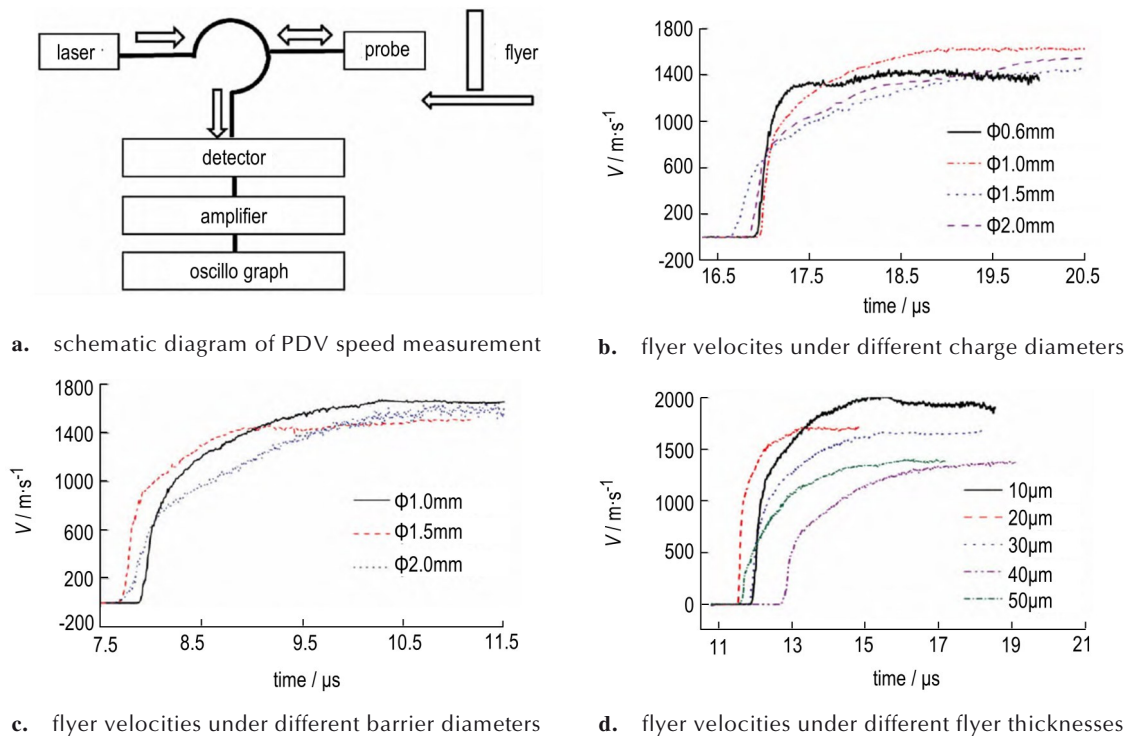


图 20 叠氮化铜驱动钽飞片的 PDV 测试<sup>[93]</sup>

Fig.20 Velocity experimental test through PDV of flyer driven by copper azide<sup>[93]</sup>

料,结果表明钽飞片形状基本不变,质量损失较少。

在微纳结构起爆药爆炸驱动飞片过程中,飞片的速度受多种因素影响。从加速膛对飞片影响的角度,简国祚<sup>[94]</sup>采用 ANSYS/LS-DYNA 流固耦合算法对叠氮化铜爆轰驱动飞片的作用过程作了数值模拟,研究了加速膛长度对飞片的平整性和完整性的影响,结果表明加速膛的长度对飞片的完整性、平整性和速度具有重要影响,在过长的加速膛中飞片飞行时易发生破碎,加速膛过短,飞片的驱动速度不能达到最佳。在加速膛直径方面,当飞片厚度一定时,存在一个最优加速膛

直径使飞片的稳定速度最大;当加速膛直径一定时,飞片厚度越小,其平整度越好<sup>[95]</sup>。在加速膛与装药直径匹配方面,加速膛直径不宜过大大于装药直径,此时飞片能量不足以起爆下级装药;加速膛直径也不能过小,不能低于飞片起爆下级装药的飞片临界直径<sup>[93]</sup>。

从微起爆器装药量及尺寸的角度分析,在相同装药直径、相同约束下,飞片速度随着飞片材料密度的增大而减小;在相同装药直径、相同约束、相同飞片材料下,飞片速度随着飞片厚度的增大而减小,且最大飞片速度出现位置发生前移<sup>[96]</sup>。如图 21 所示,在叠氮化铜

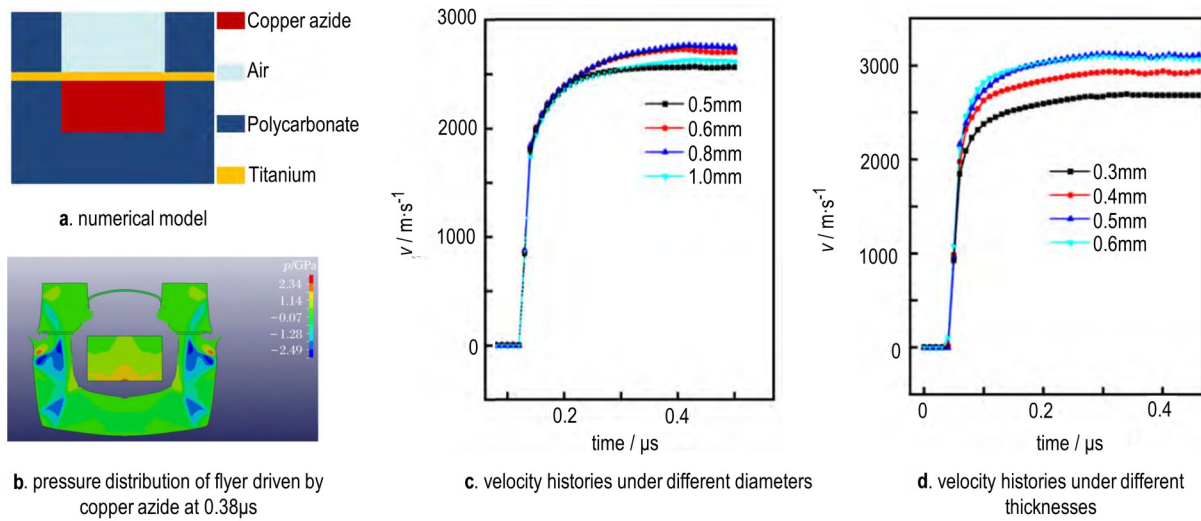


图 21 叠氮化铜装药驱动飞片特性<sup>[97]</sup>

Fig.21 Numerical model and the velocity histories of Ti flyer driven by copper azide<sup>[97]</sup>

基微起爆器装药直径一定的情况下,随着装药厚度的增加,钛飞片速度增加;当装药厚度为0.5 mm,装药直径大于0.7 mm时,增加装药直径不能进一步增加飞片速度,微装药的直径存在一个最佳值<sup>[97]</sup>。

飞片材料对起爆药驱动飞片有显著影响,叠氮化铜起爆后形成的爆轰波在叠氮化铜药柱内以球面波的形式传播,爆轰波阵面率先到达飞片层中心轴附近,进而剪切并形成圆弧状飞片<sup>[97]</sup>。当铜叠氮化物微装药驱动飞片时,钛适合作为飞片材料,而铜、铝、聚酰亚胺不适合作为飞片材料。飞片形貌与材料的力学性能密切相关,金属飞片的完整性主要取决于有效塑性失效应变,而非金属飞片的完整性则主要取决于杨氏模量<sup>[98]</sup>。从能量转化效率的角度,飞片单位面积动能随着飞片材料密度增加而增大,飞片材料密度越大,微装药内能转化为飞片动能的效率越高<sup>[95]</sup>。

采用光子多普勒测速系统、激光干涉测速仪等试验测试方法能够获得飞片的速度-时间历程曲线,但无法获得飞片的形貌变化特征。采用理论或经验公式进行计算得到的仅是单个数据,无法获得爆炸驱动飞片整个过程中飞片的速度-时间历程数据。采用仿真软件计算能够获得飞片的速度-时间历程曲线,特别重要的是,可以获得微纳结构起爆药驱动飞片剪切、加速过程和形貌变化,对于研究飞片形成机理至关重要。后2种方法得到的结果准确性依赖于选用正确的模型、准确的参数,特别是在微纳尺度条件下,构建准确的模型、获取准确的参数尤其重要。从参数匹配角度方面,加速腔、微起爆器装药量、装药尺寸和飞片材料对飞片

速度有显著影响,对于微起爆序列来说,最优的飞片材料是钛,加速腔、微起爆器装药量、装药尺寸之间需要进行合理的适配,以实现最优的飞片效能。

### 4.3 微能量可靠传递与隔爆控制

安全保险机构是MEMS火工品的重要组件,通过接收环境(如发射过载等)或电等信号,驱动解锁机构动作,实现微起爆或点火序列中能量传递通道打开或闭合,满足起爆或隔爆的需求。安全保险机构隔爆滑块将微起爆器与传爆药柱隔开,在能量传递过程中需要考虑在解除保险状态下飞片能量能够通过滑块上的间隙可靠起爆下一级传爆装药;在安全状态下,隔爆滑块能够完全隔离微起爆器的爆轰能量和飞片的冲击动能,以避免意外引起下一级传爆装药爆轰。

在能量可靠传递研究方面,滑块厚度、微起爆器装药量等均影响能量传递过程。从滑块厚度角度,在45#钢和聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)约束下,爆轰波衰减压力与滑块上空气隙厚度呈指数型衰减规律,衰减系数随着直径的增大而减小,可以通过调整空气间隙控制装药的爆轰性能<sup>[96]</sup>。微起爆序列安全保险机构传爆空腔高度在0.65~1.50 mm,序列均能正常传爆<sup>[13]</sup>。从滑块上传爆腔直径角度,当安全保险机构传爆空腔直径在1.0~2.0 mm范围时,微起爆序列均实现了正常传爆。从微起爆器的装药量角度,当装药量小于7 mg时,微起爆序列未正常传爆;装药量大于7.5 mg时,微起爆序列正常传爆;装药量为7.0~7.5 mg之间时,微起爆序列部分正常传爆,部分未正常传爆<sup>[13]</sup>。



在安全状态下,微起爆序列的安全保险机构要能可靠隔爆,临界隔爆厚度表征了隔爆能力的大小,安保机构厚度小于临界隔爆厚度,则下一级装药会被飞片动能或冲击波能起爆,无法实现完全隔爆。从隔爆材料设计的角度,李慧<sup>[99]</sup>采用有限元分析方法,计算得到CL-20起爆JO-9C装药时,不锈钢和镍材料的临界隔爆厚度分别为1.6,1.4 mm,材料镍的隔爆能力优于不锈钢。理论计算表明<sup>[100]</sup>,对比镍和铜隔离钛飞片,使用镍或铜隔离钛飞片与CL-20装药时,临界隔爆厚度随飞片速度的增加呈近似对数函数的形式增加,随飞片厚度的增加呈近似对数函数的形式增加;相同速度下,材料镍的临界隔爆厚度小于铜,即材料镍的隔爆能力略优于铜,如图22所示。从安保机构设计的角度,在微起爆序列设计参数为起爆药装药直径为2.0 mm、高度为1.5 mm,装药密度为 $1.67 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,安全保险机构传爆空腔直径为2.0 mm条件下,当安全保险机构滑块厚度大于等于0.3 mm时,微起爆序列能够正常隔爆<sup>[13]</sup>。从药柱尺寸设计的角度,通过不同大小CL-20药柱对JO-9C药柱的起爆能力的仿真研究,得到了密度为 $1.84 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的CL-20起爆JO-9C的临界间隙:一级药柱尺寸分别为 $\Phi 2 \text{ mm}\times 2 \text{ mm}$ 、 $\Phi 1.5 \text{ mm}\times 1.5 \text{ mm}$ 、 $\Phi 1.0 \text{ mm}\times 1.0 \text{ mm}$ 时,其对应的临界起爆间隙分别为2.0,1.6,1.0 mm<sup>[101]</sup>。

微起爆序列既要确保在安全状态下能量的可靠隔爆,又要实现解保状态下能量的可靠传递。从能量可靠传递角度,滑块厚度、传爆孔直径是主要考虑因素,从隔爆安全控制角度,滑块厚度、微起爆器爆炸能力是主要考虑因素,通过研究获得的微起爆器及飞片、安全机构的隔爆机构材料和厚度等对能量控制的影响规律和阈值参数,可作为安全保险机构结构设计的部分输入参数。微能量可靠传递与隔爆控制是微起爆序列的

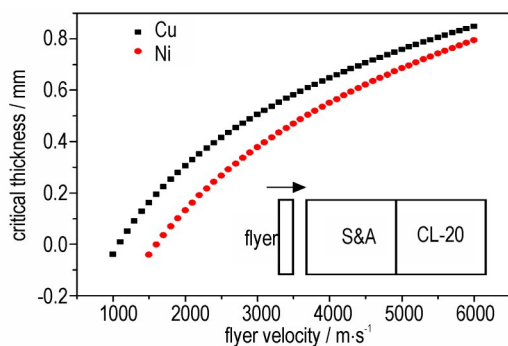


图22 镍和铜材料的临界隔爆厚度<sup>[100]</sup>

Fig.22 Critical exploding isolation thickness of copper and nickel materials<sup>[100]</sup>

最重要的功能,也是其技术的难点之一,必须开展大量的试验测试,以保证微起爆序列的作用可靠性。

## 5 微起爆序列设计与集成技术

微起爆序列有非硅基和硅基2种结构型式,2004年引信年会上美国海军水面武器中心Indian Head分部的John Hendershot<sup>[9]</sup>介绍了鱼雷用MEMS起爆序列技术,包括基于DRIE工艺的硅基和基于LIGA工艺的非硅基2种安保机构的起爆序列。非硅基采用LIGA工艺,制作一片需要1000美元(2000年),解保时间大于5 ms,无法与起爆器集成;硅采用基DRIE工艺,制作一片需要200美元,解保时间小于0.5 s,可与起爆系统集成;硅基机构技术成熟度在2004年达到了TRL6+级。基于MEMS技术的微起爆序列包括微起爆器、安保芯片等,技术成熟度在2004年达到3级。硅基和非硅基安保机构在制造的表面尺寸和深度方面有所差异,硅基可以实现更加精细的加工,如图23所示。

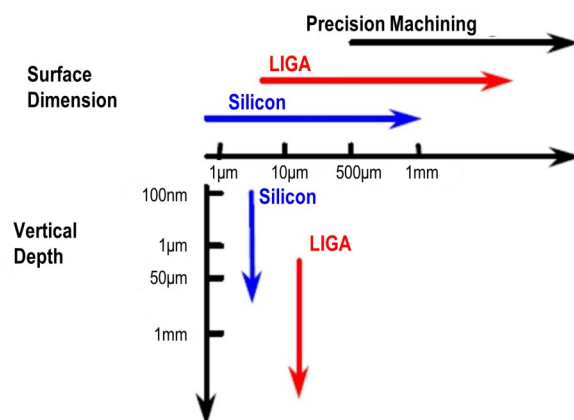


图23 硅基和非硅基安保机构制造工艺特性的对比<sup>[102]</sup>

Fig.23 Fabrication performance comparison of silicon and non-silicon safe and arming devices<sup>[102]</sup>

在多次引信年会上,美国海军水面武器研究中心India Head分部的Taylor T Young<sup>[103-104]</sup>介绍了海军用和陆军用2种MEMS微起爆序列,2016年技术成熟度达到了6级。陆军MEMS微起爆序列采用含能油墨驱动飞片起爆EDF-11,该MEMS微起爆序列有两次90°爆轰转向,如图24所示。海军MEMS微起爆序列采用叠氮化银驱动飞片起爆EDF-11次级装药,进而输出爆轰直接起爆或者通过飞片起爆下一级RSI007装药,该微起爆序列爆轰过程有一次90°转向,如图25所示。

国内外对MEMS安全保险机构开展了大量的研究工作<sup>[105-110]</sup>,相关的综述文章也有发表<sup>[111-112]</sup>,在此

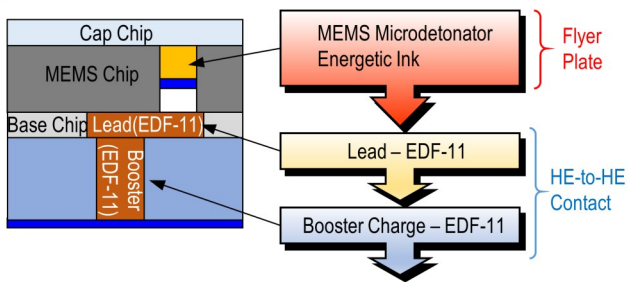


图 24 NSWC IHEODTD 研制的陆军用 MEMS 微起爆序列<sup>[104]</sup>  
 Fig. 24 MEMS based micro fire-train developed by NSWC IHEODTD for Army<sup>[104]</sup>

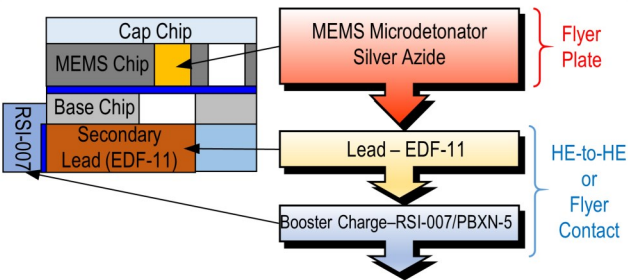


图 25 NSWC IHEODTD 研制的海军用 MEMS 微起爆序列<sup>[103]</sup>  
 Fig. 25 MEMS based micro fire-train developed by NSWC IHEODTD for Navy<sup>[103]</sup>

不再赘述。本节侧重于从 MEMS 安全保险机构与 MEMS 火工品集成的角度介绍研究工作进展情况。

### 5.1 非硅基微起爆序列

非硅基微起爆序列主要是指基于非硅基安全保险机构(或称为安全执行机构)实现安全控制而形成的微起爆序列。非硅基安全保险机构主要基于非硅基材料,其中一种非硅基机构是基于镍以及铜材料,加工工艺一般采用 LIGA 或者 UV-LIGA(紫外光刻-微电铸) MEMS 工艺制造,以实现微起爆序列中传爆/隔爆状态的切换。

Kaman 公司的 Robert Renz<sup>[7]</sup> 研制了一种 MEMS 引信用非硅基微起爆序列,结构组成包括起爆器、安保机构和传爆药,如图 26 所示。该微起爆序列的能量传递组成包括薄膜桥及涂覆的斯蒂芬酸铅、安保机构上的叠氮化物(Lead Azide)、飞片、HNS-IV 传爆药;该微起爆序列显著特点是将叠氮化物放置在安保机构上,并且飞片与安保机构的滑块是一体的。微起爆序列在 2000 g 后坐力、3000 r·min<sup>-1</sup> 下可解保,解保时间 80 ms,点火能量 300 μJ,满足 MIL-STD 1316E,技术成熟度达到 TRL6 级。目前,Kaman 公司的微起爆序列已经形成了 FireAnt 产品,可以应用于 20 mm 及更大尺寸的榴弹、迫击炮和火炮,以满足小型化的应用需求<sup>[8]</sup>。

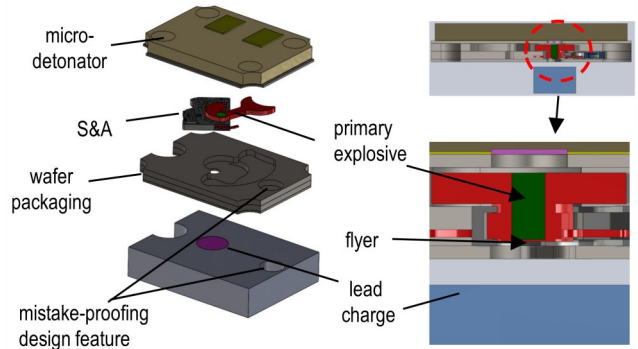


图 26 Kaman 公司的微起爆序列<sup>[7]</sup>  
 Fig. 26 MEMS based micro fire-train of Kaman Corporation<sup>[7]</sup>

美国海军水面武器中心 China Lake 分部的 Randall D Cope<sup>[113]</sup> 介绍了分布式组网的微起爆序列(如图 27),主控单元感知解保命令,发送唯一的解保命令给受主微起爆序列,每个微起爆序列包含机械锁以防止意外解保;微起爆序列直径 13 mm,基于电磁驱动控制的方法,可实现错位安全、对位起爆功能。

美国海军水面武器中心 Indian Head 分部<sup>[9, 11-12]</sup> 研制了一种反鱼雷弹药用基于光控实现安全控制的微起爆序列,如图 28 所示。微起爆序列包含 3 个附加的 MEMS 部件。其中一个为加速度传感器,用于检测实际发射时产生的力,另外两个是内部测量装置和流量传感器,用于确保与发射平台的安全分离。光控安全控制功能的实现方式是,2 条光纤电缆(源光纤和接收器光纤)用于传播光能,使用 MEMS 隔断驱动器解耦从源光纤到接收光纤之间的能量传递来确保安全。一旦解除保险后,光路经 45°斜边反射后形成完整回路,进而启动光电池,光电池给微起爆器供电,如图 29 所示。采用基于 LIGA 工艺制造镍基反射材料,这种方法

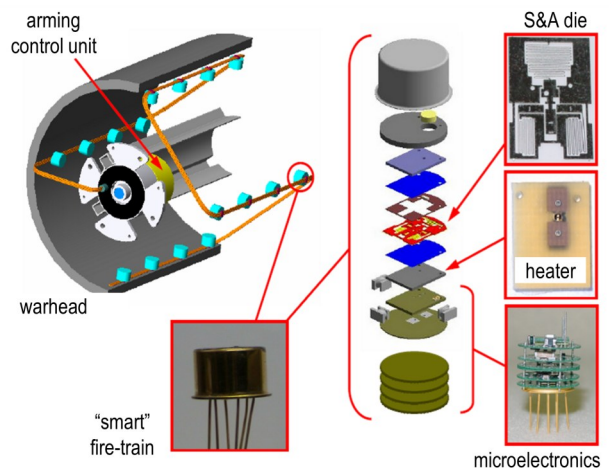


图 27 分布式微起爆序列<sup>[113]</sup>  
 Fig. 27 Distributed micro fire-train<sup>[113]</sup>

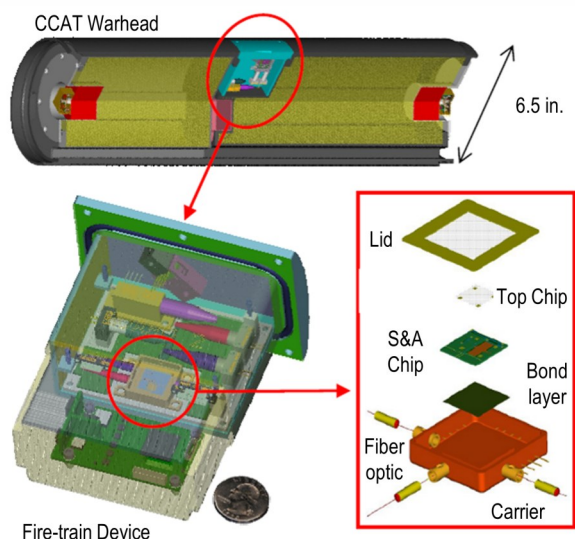


图 28 战斗部、微起爆序列及其光学安全控制单元<sup>[9, 11]</sup>

Fig.28 Relative size comparison between CCAT warhead, micro fire-train, and MEMS S&A device<sup>[9, 11]</sup>

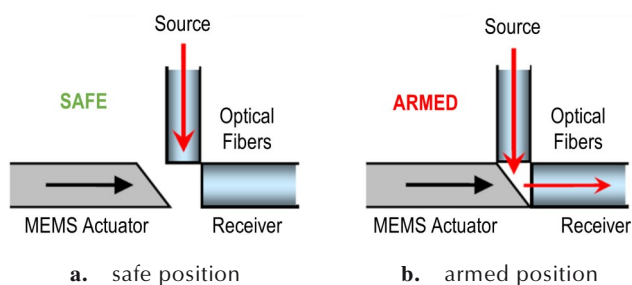


图 29 45°斜边反射式光开关安全状态和解除保险状态<sup>[12]</sup>

Fig.29 Design concept of the 45° edge reflector as an optical switch in safe and armed position<sup>[12]</sup>

提供了相对简单的安全驱动设计与控制,测量的光能传递效率达到了80%。

2010年,法国国家研究中心(CNRS)系统结构分析实验室(LAAS)提出了一种分层式PyroMEMS微起爆序列<sup>[114-115]</sup>,如图30所示。顶层是逻辑电路层(厚度8.21 mm);中间层为由烟火驱动器和微起爆器组成的硅基起爆器(厚度400 μm);底层为机械解保模块(厚度3 mm)。安全机构的滑块采用陶瓷材料,基体采用铝加工而成。在安全状态下,机械解保模块中的惯性锁将隔爆板滑块固定,爆炸序列被隔断;接收到解除保险指令后,惯性锁感知到环境力(后坐力或离心力)后运动到预定位置,起爆器被触发并产生气体,气体推动隔爆板滑块使爆炸序列对正。

国内21世纪初就开展了非硅基微起爆序列的探索研究工作。2009年,蒋小华<sup>[116]</sup>基于微机电起爆器的原理及构成,对微起爆序列涉及的换能元、微小尺寸

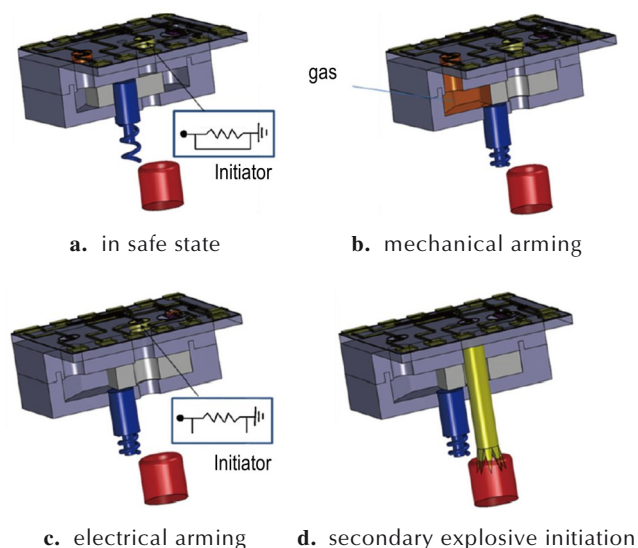


图 30 PyroMEMS微起爆序列作用过程及分层示意图<sup>[114-115]</sup>

Fig.30 Working process and layer structure of the PyroMEMS based micro fire-train<sup>[114-115]</sup>

爆炸序列、微机电混合装配等关键技术进行了研究,表明微小尺寸爆炸驱动飞片能够可靠起爆许用传爆药,突破了传统极限起爆药量的观念。任小明<sup>[117]</sup>依照国军标GJB736.4-89对装药直径为1 mm的CL-20装药起爆聚黑14药柱的情况进行了试验研究,当CL-20的装药高度为8 mm,装药量为12 mg时,起爆聚黑14药柱,可使其达到稳定爆轰。相关的研究工作,为微起爆序列设计奠定了基础。

近几年,陕西应用物理化学研究所对非硅基微起爆序列开展了集成与性能验证工作。2017年,解瑞珍<sup>[118]</sup>初步集成了设计了具有安全与解除保险及发火功能的微起爆序列,体积为3 cm<sup>3</sup>。序列包括底层、中间层和顶层,其中底层包括隔断单元和传爆药装药,中间层由微起爆器和硅基烟火微驱动器构成,顶层为信息控制电路。测试结果表明,微小型起爆序列实现了解除保险、安全隔爆与可靠传爆的功能,平均输出爆轰压力为10.85 GPa。

2021年,解瑞珍等<sup>[13, 92, 119]</sup>设计了由微起爆器、飞片、MEMS安全保险机构等构成的微起爆序列,采用表面微加工工艺、深硅刻蚀等工艺完成了微起爆器的制作,采用UV-LIGA工艺完成了安全保险机构的制作,一体化集成形成了微起爆序列样机,样机和具体工艺步骤分别如图31和图32所示。微起爆序列优化设计参数为微起爆器装药密度为1.67 g·cm<sup>-3</sup>、装药直径为2.0 mm、装药高度为1.5 mm,安全保险机构传爆空腔直径为1.0~2.0 mm、高度为0.65~1.50 mm,在发射



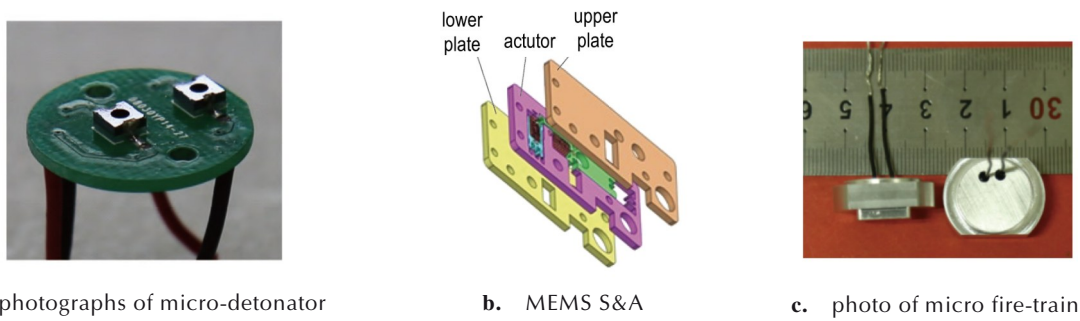


图 31 微起爆序列及其关键部件<sup>[13, 118]</sup>

Fig.31 Micro fire-train and its key elements<sup>[13, 118]</sup>

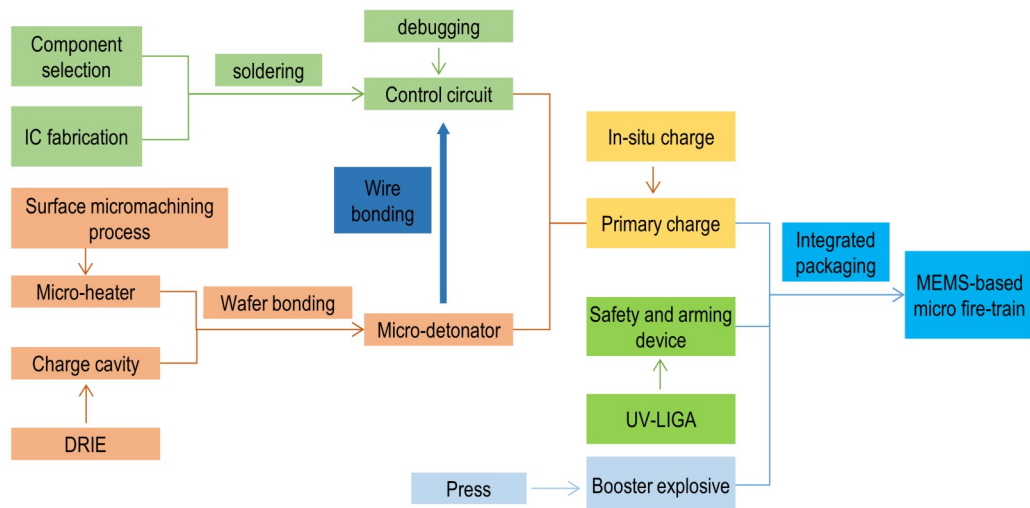


图 32 微起爆序列制作集成流程<sup>[92]</sup>

Fig.32 Fabrication flow chart of micro fire-train<sup>[92]</sup>

过载 21000 g、转速 6000 r·min<sup>-1</sup> 条件下序列正常解除保险。由于采用微起爆器驱动飞片冲击起爆下一级装药的爆轰能量放大方式,实现了序列传爆、隔爆、解除保险功能,有效减少了起爆序列初级装药量和轴向尺寸。目前,该微起爆序列已在某弹药平台和微小型机载平台完成了功能验证,可完成预定任务。

### 5.2 硅基微起爆序列

硅基微起爆序列是指基于硅基安全保险机构实现安全控制而形成的微起爆序列,硅基安全保险机构采用微纳加工方式制作,在硅片上集成驱动机构与隔断机构。

美国海军装备中心(NAVSEA Warfare Centers)研制了一种硅基微起爆序列<sup>[120]</sup>(如图 33 所示),使用半导体工艺在 SOI 晶片上制造的所有非爆炸组件。根据美军标 MIL-STD 331 和 JOTP-052 企业标准对微起爆序列进行了性能测试,以确定其是否能够用于必须满足 99% 可靠性要求的引信系统。开展的考核试验主要包括温湿度(-54~71 °C, 95% 湿度, 28 个循环)、振

动、12 m 跌落、高 g 值过载等项目。结果表明,经历温湿度环境后,未填充环氧树脂在测试后显示出裂纹,而填充环氧树脂似乎未受影响;微起爆序列能够通过严苛的振动测试。

2020 年以来,陕西应用物理化学研究所联合西安交通大学<sup>[121-122]</sup>,采用 MEMS 工艺制备了一种内置 MEMS 隔断机构的微起爆序列(如图 34 所示),其中隔断机构为电热执行器,起爆器采用 Al/CuO 含能复合薄膜的 NiCr 合金起爆桥。考虑到控制信号(低电流)与发火信号(大电流)之间的差异,采用直径 25 μm 的金线实现 MEMS 安执机构与 PCB 板之间的连接, MEMS 换能元通过焊接与 PCB 板连接。经测试, MEMS 安执机构被设置在传爆序列中,在 11 V 的电压驱动下,安执机构的输出位移可达到 1 mm(大于传火孔直径 600 μm),将装置从安全状态转变为发火状态。在发火状态下,64 V 脉冲电压可引发 MEMS 换能元爆炸,火焰高度可达 8 mm;而在安全状态下,即使

换能元意外发火,产生的火焰也无法通过传火孔。

为了保证微起爆/点火序列的安全性,可以在微换能元及其下一级含能药剂间设置安全执行机构,通过安执机构的动作实现微起爆/点火序列的能量安全隔

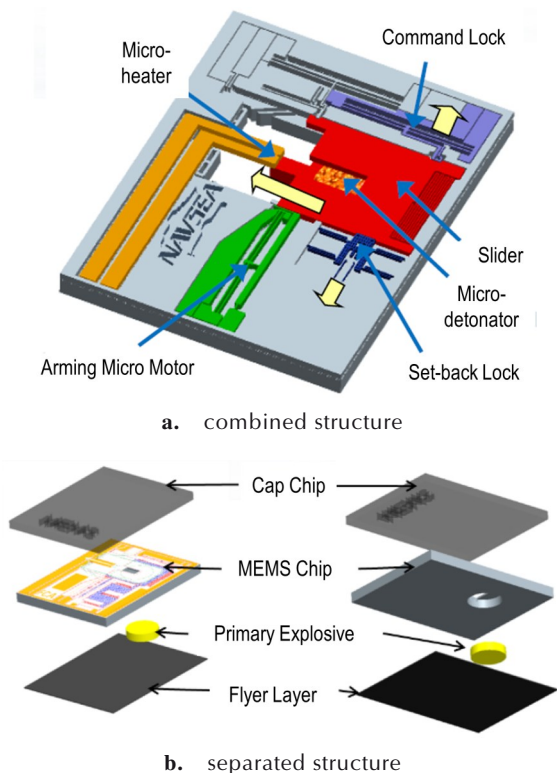


图 33 基于微起爆器与安保集成的硅基微起爆序列<sup>[120]</sup>  
Fig. 33 Silicon-based micro fire-train integrated from micro-detonator and S&A<sup>[120]</sup>

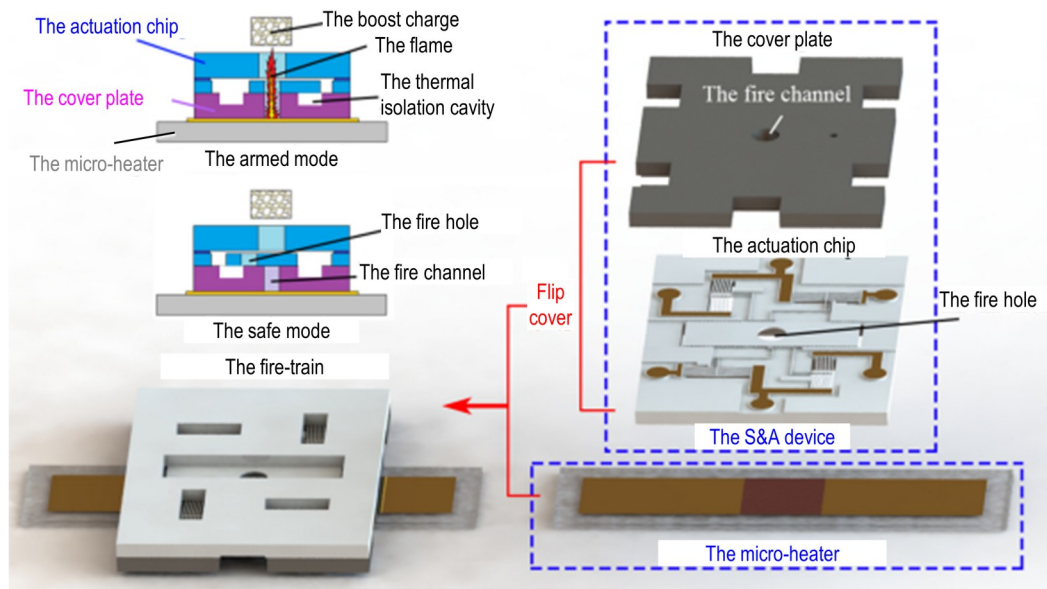


图 34 内置 MEMS 安执机构的微起爆序列<sup>[122]</sup>  
Fig.34 A micro fire-train built-in MEMS safety and arming device<sup>[122]</sup>

断与可靠传递,实现序列自主安全控制功能。阚文星等<sup>[123]</sup>研究了具备可恢复安全功能的 MEMS 火工品,将含能薄膜与 MEMS 安执机构内置集成,形成的具备可恢复安全功能的 MEMS 火工品,结构尺寸为  $\Phi 15 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ ,如图 35 所示。在 13~15 V 的驱动电压下,安执机构产生的最大位移可达  $800 \mu\text{m}$ ,系统响应时间为 20.2 ms,系统恢复时间为 20.5 ms。在下一级装药为 B/ $\text{KNO}_3$  点火药的条件下,可在 2 mm 的间隙距离下可靠点燃装药;该 MEMS 火工品可以安全隔断换能元产生的能量,并且可以传火传爆。

为了实现硅基和非硅基的微起爆序列的批量化应用,需要提高自动化、批量化生产能力,特别是要提高系统级集成微装配能力。美国陆军研究工程中心<sup>[124]</sup>建设了微起爆序列自动化的装配系统,可实现柔性智能装配控制和静电安全控制,下一步将实现薄膜换能元、部分输入装药和全部输出装药的装配。该系统在 3 个正交方向上具有  $1 \mu\text{m}$  的轴向分辨率,装配能力达到了 100 个/小时。目前,国外 MEMS 微起爆序列已在多种武器弹药上实现了应用验证,如 NEXTER Munitions 公司采用 MEMS 技术对 MR251 引信中的微起爆序列进行了改进设计,已在 40 mm 空爆弹上完成验证<sup>[125]</sup>;Kaman 公司的 MEMS 引信用微起爆序列已于 2015 年在 40 mm 低速枪弹 (low-velocity gun) 上完成了验证<sup>[7]</sup>;ARDEC 利用 MEMS 技术对 M762A1/M767A1 引信的起爆序列进行了改进,形成了 MEMS 基微起爆序列(如图 36 所示),并于 2008 年完成了空

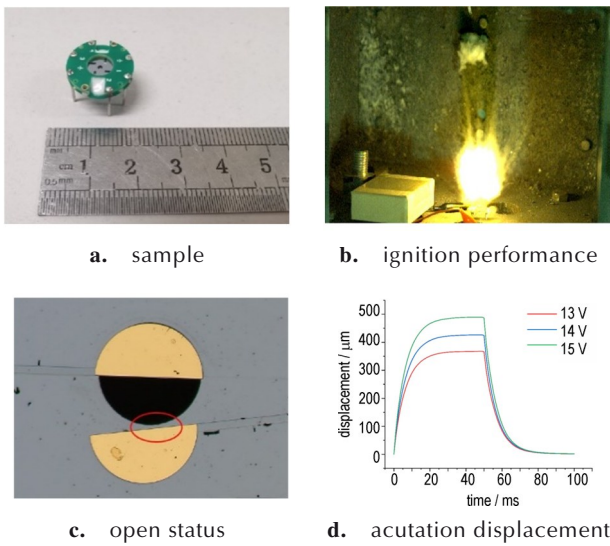


图 35 具备可恢复安全功能的 MEMS 微序列<sup>[123]</sup>  
 Fig.35 MEMS based fire-train with resettable MEMS S&A device<sup>[123]</sup>

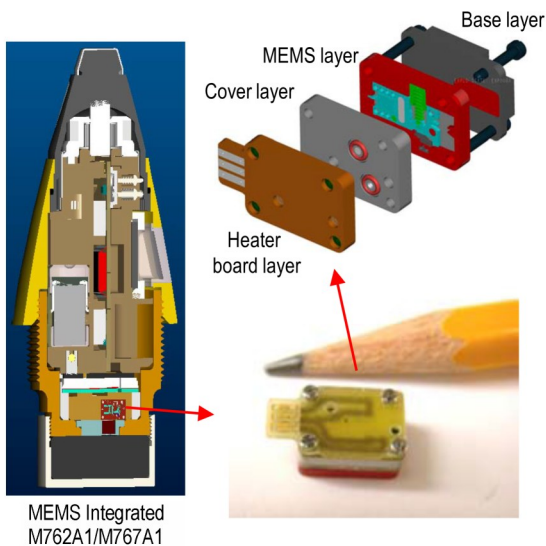


图 36 集成到 M762A1/M767A1 引信的微起爆序列<sup>[126]</sup>  
 Fig.36 Micro fire-train integrated into M762A1/M767A1 fuze<sup>[126]</sup>

气炮测试与 YPG 155 mm 炮测试<sup>[126]</sup>。目前,国内完成了 MEMS 起爆序列在某炮弹、某微小型机载平台上完成了性能验证。

综上所述,硅基和非硅基微起爆序列各有优势,硅基微起爆序列由于采用 ICP(深硅反应离子刻蚀)工艺,与微电子工艺有很好的兼容性,可实现与微电子以及微火工品一体化加工。特别是结合传感器技术,可实现基于电驱动信号控制的主动驱动方式,在微小型无人机等无或极弱环境力的应用场景下使用。而非硅基微起爆序列,由于采用可塑性变形的金属作为材料,容易实现卡定操作,在环境力响应设计方面具有显著

优势,在小口径弹药等可产生离心、过载等环境力的条件下具有较大应用需求。

## 6 微起爆序列传爆可靠性评估技术

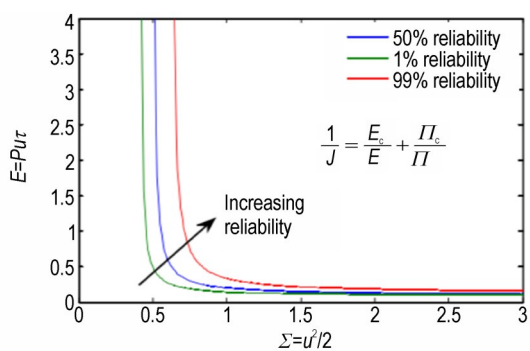
微起爆序列利用飞片进行能量传递,飞片冲击起爆过程可靠性评估主要基于传统的  $p^n-\tau$  判据<sup>[97]</sup>,但该判据在低强度、长脉冲时偏离了样本数据,出现了较大的误差。微起爆序列的结构平面化、装药微型化等特点决定了其爆轰能量传递方式,即含能芯片驱动飞片冲击起爆次级装药,有别于传统起爆序列,因此传统的可靠性评估方法不再适用<sup>[127]</sup>。

国外发展了一种基于 James 判据的微起爆序列可靠性评估方法<sup>[128-129]</sup>。其核心思想是基于热点起爆理论,利用 James 判据实现在样本量较小的情况下对受主装药的响应进行统计分析,根据分析结果对起爆序列传爆的可靠性做出有效评估。该方法主要通过对飞片速度时间曲线的分析,获得起爆能量  $E_c$  和质点比动能。对于给定的炸药,起爆能量  $E_c$  和质点比动能的临界值  $E_c$  和  $\Sigma_c$  是常数,它们确定了能引起炸药爆轰的冲击脉冲和不能引起炸药爆轰的冲击脉冲的边界,如图 37 所示。James 起爆判据基本不受飞片压力范围和炸药药剂种类的限制,在很宽的压力范围内都能应用。除此之外,James 判据对多变量参数下的适应性比较强, Kim Seokpum<sup>[130]</sup>通过适当的改进 James 判据,评估了炸药粒径等参数对传爆可靠性的影响,对于 Class 3(平均粒径为 358  $\mu\text{m}$ )和 Class 5(平均粒径为 6.7  $\mu\text{m}$ )2 种粒径的炸药,在较高的功率通量下粒径大小对临界起爆能量  $E_c$  有着十分显著的影响,临界起爆能量随着粒径的减小而减小,如图 38 所示。

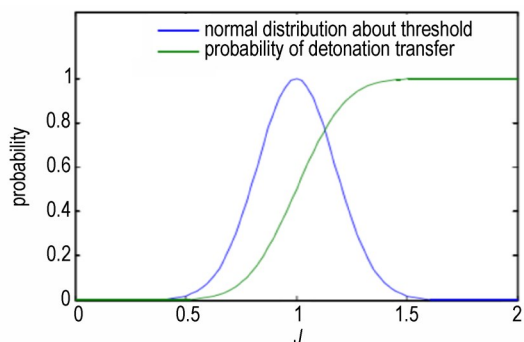
采用 James 判据进行微起爆序列传爆的可靠性评估技术研究中还有一个重要的内容,就是飞片参数对评估结果的影响。Young Taylor 等<sup>[104]</sup>用 PDV 测量不同参数下飞片的速度,通过对比分析表明飞片厚度是影响飞片速度的关键参数。他们用不同厚度的飞片进行试验,将所得结果绘制在 EDF-11 的起爆阈值图中,得到不同飞片厚度所对应的 James 判据测试路径,选出最具代表性的飞片厚度值作为评估方法中的标准参数,从而得到相应 EDF-11 的 James 起爆判据测试路径,如图 39 所示。

上述的起爆阈值分析都是在基于  $J=1$ (冲击载荷下发火率为 50%)的基础上进行的,为了研究其他不同  $J$  值(不同冲击载荷条件对应不同的发火率)下的冲





a. James initiation criterion of 1%, 50% and 99% reliability



b. normal distribution and probability curves

图 37 James 判据及可靠度计算<sup>[128-129]</sup>

Fig.37 James initiation criterion and its computation on reliability<sup>[128-129]</sup>

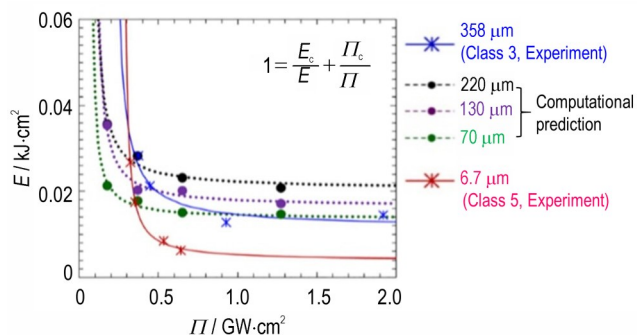


图 38 试验组与仿真组的 James 起爆判据阈值对比图<sup>[130]</sup>

Fig.38 The tested and simulated critical value of James initiation criterion<sup>[130]</sup>

击起爆阈值, Gresshoff 和 Hrousis<sup>[131]</sup>对 James 公式进行了修正, 用不同的  $J$  值进行拟合, 给出了  $J=0.75, 1.0$  和  $1.30$  时的 3 条起爆判据线, 其匹配的发火率分别为 10%, 50% 和 90%, 如图 40 所示。

国内在 James 冲击起爆判据研究方面, 首先开展了 HNS-IV 的 James 判据研究, 明确了公式参数<sup>[132-133]</sup>, James 判据应调整为  $0.215/\Sigma + 0.108/E < 1$ , 调整后的起爆判据与数值模拟结果相一致。对于微起爆序列用的 CL-20 直写传爆装药 James 判据可靠性评估方法,

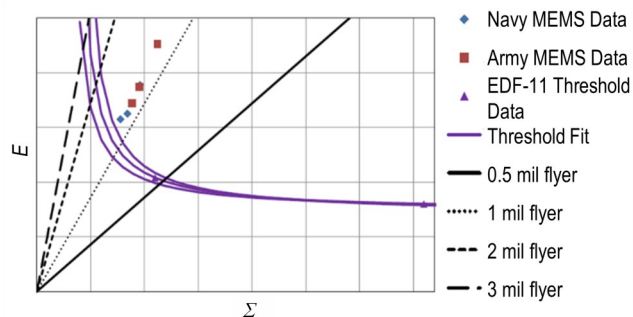


图 39 不同飞片厚度下的 James 起爆判据测试路径<sup>[104]</sup>

Fig.39 James initiation criterion under the condition of different thickness of flyers<sup>[104]</sup>

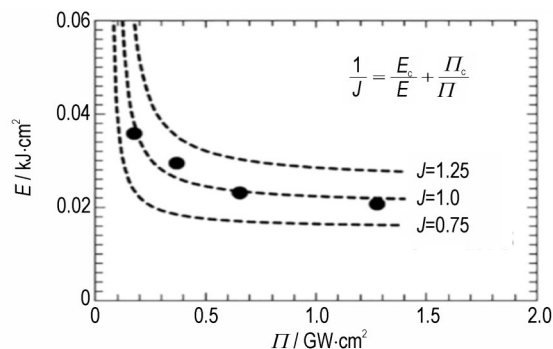
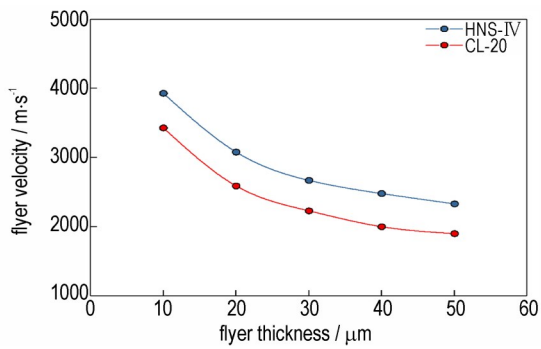


图 40 不同  $J$  值所对应的起爆阈值<sup>[131]</sup>

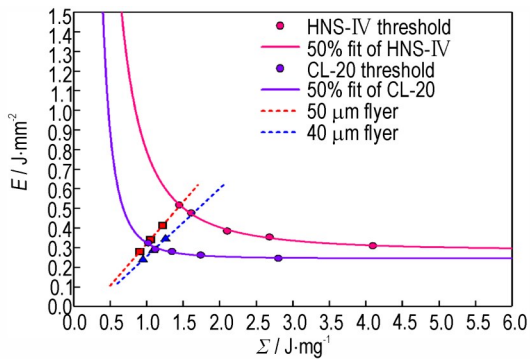
Fig.40 Critical value of James initiation criterion under different  $J$  values<sup>[131]</sup>

张凡<sup>[134]</sup>通过对炸药冲击起爆速度阈值的数值模拟, 得到了不同厚度飞片冲击起爆 HNS-IV 和 CL-20 临界起爆速度阈值, 拟合得到基于 James 判据的 CL-20 临界起爆阈值曲线:  $0.2429/E + 0.3718/\Sigma = 1$ , 如图 41 所示。沿  $40 \mu\text{m}$  和  $50 \mu\text{m}$  2 种飞片厚度的测试路径计算 CL-20 临界冲击起爆速度阈值, 测试路径与 50% 临界起爆阈值曲线的交叉点即临界起爆点, 结合飞片速度计算方法对临界点数据行反推导得到 CL-20 直写装药在  $50 \mu\text{m}$  路径下的临界速度阈值为  $1902 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; 在  $40 \mu\text{m}$  路径的临界速度阈值为  $2014 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

James 判据能够较好拟合大尺寸飞片冲击起爆, 但仍然难以描述小尺寸、弯曲或者其他形貌飞片的临界起爆数据。Mu Yunfei<sup>[135]</sup>通过对比冲击过程中的波结构与炸药稳定爆轰波结构, 以冲击过程中炸药反应所释放的化学能为阈值, 提出了一种新型冲击起爆判据。结合飞片冲击起爆系统测试数据, 拟合得到了 HNS 的冲击起爆判据 (如图 42 所示), 并对比评估了 HNS、PETN 等炸药冲击起爆敏感性。与现有的判据相比, 该判据可以削弱界面材料属性对判据的影响, 实现判据参数的统一; 对于相同性质的炸药, 该判据能够

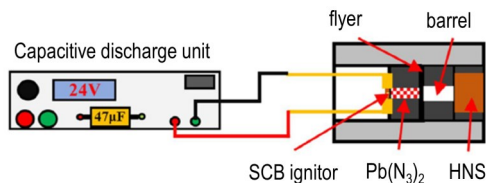


a. threshold of flyer for direct-writing CL-20 and HNS-IV explosive

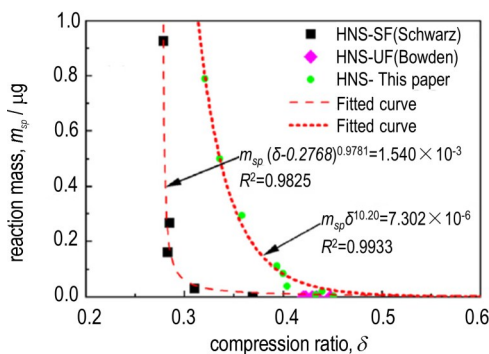


b. James criterion of direct-writing CL-20 and HNS-IV explosive

图 41 CL-20直写装药与常规HNS-IV药剂的飞片冲击起爆阈值<sup>[134]</sup>  
Fig. 41 Threshold on flyer impact initiation of direct-writing CL-20 explosive and HNS-IV explosive<sup>[134]</sup>



a. desktop micro-flyer test system



b. reaction mass as a function of compression ratio for HNS

图 42 微飞片冲击起爆测试系统及HNS冲击起爆判据<sup>[135]</sup>  
Fig. 42 Impact initiation test system of micro flyer and impact initiation criterion for HNS<sup>[135]</sup>

利用单一拟合曲线来描述不同形貌和材料撞击体的阈值数据,可为微起爆序列传爆可靠性评估提供新途径。

在微起爆序列故障评估方法研究方面,刘卫<sup>[136]</sup>初步探索了基于模糊多层次分析法进行微起爆序列故障评估,根据微起爆序列结构特点及容易出现的故障现象,确定两级故障评判指标,并划分故障等级作为综合评判集,编制了计算软件MDSFault 1.0,如图43所示。在几种典型故障设定条件下,通过专家评价法获得故障因素权重,将相关数据带入模糊多层次故障分析计算模型,得到了故障程度,故障等级为第4级,即在所述样机状态条件下,故障的影响很小,相关方法可为微起爆序列故障评估的后续研究提供借鉴。

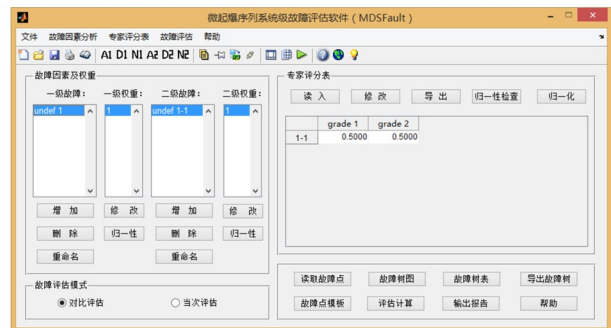


图 43 微起爆序列系统级故障评估程序界面<sup>[136]</sup>

Fig. 43 Graphical user interface of Micro Detonation fire-train System-level Fault assessment program (MDSFault)<sup>[136]</sup>

综上所述,对于微起爆序列的可靠性评估及其方法,目前国内研究还处于起步阶段,但这是微起爆序列应用必须要考虑的问题。 $p^n - \tau$ 判据和James判据均是在平面假设下获得的飞片冲击起爆判据,有研究表明微小尺度下飞片呈现出非平面特性<sup>[137]</sup>,此时采用基于化学反应能的判据可以获得更加准确的评估效果。后续不仅需要针对微起爆序列自身能量传递特性开展起传爆可靠性评估,还需要针对典型的应用场景或使用环境进行系统全面的可靠性评价,为加快微起爆序列的应用奠定基础。

## 7 总结与展望

弹药信息化、智能化、小型化发展,对火工品提出了换能信息化、结构微型化、序列集成化的要求, MEMS火工品技术孕育而生。MEMS技术与火工品技术的结合,使MEMS火工品在设计方法、研究途径乃至概念内涵上都产生了革命性的变化。本文着重于从应用及要求的角度,梳理和总结了国内外微起爆序列

研究进展,得出以下结论:

(1)受限于微尺度条件下高瞬态测试方法的缺乏,微尺度爆炸特征参量难以准确测量,导致对起爆机理掌握地还不充分。如微纳结构原位装药是多孔结构,骨架与孔隙特征尺寸相近,表现出非连续结构特征,这种结构对爆速的影响还需要量化。

(2)国外形成的硅基微起爆序列可以满足MIL-STD 331和JOTP-052等标准要求,目前国内的硅基安保机构开展了大量的研究,形成了多种不同结构、不同控制方式的机构,但还需从设计、制造等方面综合考虑加大研发力度,以满足行业相关设计准则的基本要求。

(3)无论是设计与制造,还是集成与测试表征,MEMS技术与生俱来就带有数字化、自动化,甚至智能化的优势与特征。国外已经建设了微起爆序列自动化的装配生产线,具有微米级的装配精度,可实现柔性智能装配控制和静电安全控制,具备连续化生产能力,但国内部分关键工序依赖手工操作。

基于研究现状分析,建议未来对于微起爆序列研究重点关注以下几个方面:

(1)深化微起爆传爆机理的基础研究。针对解决微起爆序列技术难点,深度挖掘设计、工艺、集成、测试与可靠性等方面问题,深化多尺度、多场等分析方法运用,构建基础理论与方法,加深对规律与机理认识,提升微起爆序列性能。这些问题包括薄膜中原子迁移、多孔结构对微爆轰的影响、非平面飞片冲击起爆、微爆轰多尺度关联、热引发仿真数值模型构建等。

(2)推进数字化工程,提升正向设计能力。重视推动数值仿真设计在微起爆序列设计中的作用,积极开展微起爆序列基础模型、基础算法研究。面向实际应用,研究制定标准、规范,解决工程仿真设计“无依据、无人信”的问题,以指导具体产品设计开发;聚焦基础模型,针对微尺度起爆传爆的特点,建立计算模型及测参方法,回答当前模型“适应性、准确性”的问题;在底层构建仿真算法与代码,实现计算过程由“知其然”到“知其所以然”的转变,为微起爆序列正向设计提供技术支撑。

(3)加强制造工艺自动化技术研究,提升批量制造能力。当前国内微起爆序列工艺技术水平不高,制约了技术指标提升和批量生产能力提高。需要构建微起爆序列系统级自动装配系统,实现装配过程人机隔离与安全控制;构建装配过程中工艺参数实时监控及反馈等系统,实现在药制造过程实时质安控制。

(4)加强微起爆序列样机的应用验证,提升微起爆序列技术成熟度。国外微起爆序列已在多种武器弹药上实现了应用验证,如40 mm空爆弹、40 mm低速枪弹、YPG 155 mm炮弹等。国内微起爆序列应用验证还需要统筹考虑,增加验证平台数量质量,为推动微起爆序列的早日应用奠定坚实的基础。

#### 参考文献:

- [1] 李维, 蒋小华, 蒋道建. 微机电灵巧起爆器研究[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 50-52, 58.  
LI Wei, JIANG Xiao-hua, JIANG Dao-jian. Review on research of MEMS initiator[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2011, 32(4): 50-52, 58.
- [2] 牛兰杰, 施坤林, 赵旭, 等. 微机电技术在引信中的应用[J]. 探测与控制学报, 2008, 30(6): 54-59.  
NIU Lan-jie, SHI Kun-lin, ZHAO Xu, et al. Application of MEMS on fuzes[J]. *Journal of Detection & Control*, 2008, 30(6): 54-59.
- [3] 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 4th generation pyrotechnics [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(6): 1-4.
- [4] 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 4th generation pyrotechnics [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(1): 1-5.
- [5] DUONG A N. Ordnance fuzing/safety & arming programs overview [C]//NDIA 45th Annual Fuze Conference, Long Beach, CA, April 16-18, 2001.
- [6] FOWLER S E. Naval Air Systems Command fuzing overview [C]//NDIA 45th Annual Fuze Conference, Long Beach, CA, April 16-18, 2001.
- [7] RENZ R. Kaman MEMS based fuzing technology [C]//NDIA 58th Annual Fuze Conference, Baltimore MD, July 7-9, 2015.
- [8] KAMAN Corporation. Engineering and manufacturing capabilities bomb and missile fuzing experts[Z]. <https://kaman.com/brands/kaman-fuzing/engineering-and-manufacturing-capabilities/>, 2022.
- [9] HENDERSHOT J. Weapon fuzing/safety & arming technology programs overview [C]//NDIA 48th Annual Fuze Conference, Charlotte, NC, April 27-28, 2004.
- [10] BEAMESDERFER M. Analysis of an optical energy interrupter for MEMS based safety and arming systems[A]//Proceedings of the SPIE Conference on MEMS Reliability for Critical and Space Applications, SPIE, September 21, 1999, pp. 101-111.
- [11] ROBBINS J. United States Navy overview [C]//NDIA 49th Annual Fuze Conference, Seattle, WA, April 5-7, 2005.
- [12] COCHRAN K R, FAN L, DEVOE D L. Moving reflector type micro optical switch for high-power transfer in a MEMS-based safety and arming system[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14: 138-146.
- [13] 解瑞珍, 褚恩义, 戴旭涵, 等. 微起爆序列设计及传爆与隔爆性



- 能[J]. 兵工学报, 2021, 42(6): 1178-1184.
- XIE Rui-zhen, CHU En-yi, DAI Xu-han, et al. Design and detonation transfer/explosion interruption performance of micro initiation train [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(6): 1178-1184.
- [14] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. 厚度对MEMS换能元薄膜电阻率的影响研究[J]. 火工品, 2018(1): 49-53.
- ZHANG Bin, CHU En-yi, REN Wei, et al. Effect of film thickness on resistivity of MEMS energy conversion components[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(1): 49-53.
- [15] 褚恩义, 刘卫, 薛艳, 等. 微桥膜换能元结构设计及电阻计算方法[J]. 火工品, 2017(6): 1-5.
- CHU En-yi, LIU Wei, XUE Yan, et al. Study on parametrized structural design of micro-heater and its resistance calculation [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2017(6): 1-5.
- [16] BOYD J M. Thin-film electric initiator: Application of explosive and performance tests [R]. US Army Materiel Command Harry Diamond Laboratory, AD686281, 1969.
- [17] NENADOVIĆ T M, ĆOTIRIĆ Z B, DIMITRIJEVIĆ T S, et al. Some characteristic properties of NiCr thin films[J]. *Thin Solid Films*, 1972, 10(1): 45-56.
- [18] Hardy W R, MURTI D K. Electrical and structural properties of NiCr thin film resistors reactively sputtered in O<sub>2</sub>[J]. *Thin Solid Films*, 1974, 20(2): 345-362.
- [19] NAHAR R K, DEVASHRAYEE N M. Electrical properties of rf sputtered NiCr thin film resistors with cu contacts [J]. *Electro-component Science & Technology*, 1983, 11(1): 43-51.
- [20] SHEN Yun, XU Jian-bing, LI Na, et al. A micro-initiator realized by in-situ synthesis of three-dimensional porous copper azide and its ignition performance [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2017, 326(326): 1116-1124.
- [21] SHEN Yun, XU Jian-bing, WANG Cheng-ai, et al. Ignition characteristics of energetic nichrome bridge initiator based on Al/CuO reactive multilayer films under capacitor discharge and constant current conditions [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 313: 112200.
- [22] JIANG Hong-chuan, Wang Chao-jie, ZHANG Wan-li, et al. Influences of film thickness on the electrical properties of TaNx thin films deposited by reactive dc magnetron sputtering [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2010, 26(7): 597-600.
- [23] ZHANG Kai-li, CHOU S K, ANG S S. Investigation on the ignition of a MEMS solid propellant microthruster before propellant combustion [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2007, 17(2): 322-332.
- [24] JOOST M. Detonator technology for special environments [C]//NDIA 43rd Annual Fuze Conference, Tampa FL, 1999.
- [25] MEHTA N. Design and development of micro energetic initiators [C]//NDIA 47th Annual Fuze Conference, 2003.
- [26] HUA C. Low-cost MEMS initiators [C]//NDIA 54th Annual Fuze Conference, Kansas City MO, May 11-13, 2010.
- [27] CAURO R. A guide to using EPIC/MEPIC igniters in pyrotechnic applications [R]. Vishay Corporation, Document Number: 53078, May 29, 2019.
- [28] AKYAPI B. Development of low energy electric initiator [C]//NDIA 61st Annual Fuze Conference, San Diego Ca, May 15, 2018.
- [29] 薛艳, 刘卫, 解瑞珍, 等. 基于MEMS工艺的微起爆器性能研究 [J]. 火工品, 2020(1): 14-17.
- XUE Yan, LIU Wei, XIE Rui-zhen, et al. Research on performance of micro-detonator based on MEMS technology [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(1): 14-17.
- [30] 任炜, 赵玉龙, 褚恩义, 等. 微机电火工品薄膜结构换能元 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2319-2325.
- REN Wei, ZHAO Yu-long, CHU En-yi, et al. Film structure energy conversion components for MEMS initiators [J]. *Optic and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2319-2325.
- [31] 陈建华, 刘兰, 任小明, 等. 基于MEMS工艺的电极塞换能元一体化集成技术 [J]. 火工品, 2020(6): 18-20.
- CHEN Jian-hua, LIU Lan, REN Xiao-ming, et al. Integrated technology of electrode plug and micro-heater based on MEMS process [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(6): 18-20.
- [32] 李慧, 任炜, 骆建军, 等. 微结构换能元的低能化设计与性能研究 [J]. 火工品, 2022(1): 20-23.
- LI Hui, REN Wei, LUO Jian-jun, et al. Study on the low energy design and performance of MEMS energy transducer element [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022(1): 20-23.
- [33] 任小明, 刘兰, 余可馨, 等. 氮化钽薄膜换能元低能化研究 [J]. 火工品, 2021(1): 5-8.
- REN Xiao-ming, LIU Lan, YU Ke-xin, et al. Study on the energy reduction of TaN thin film transducers [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2021(1): 5-8.
- [34] 任小明, 苏谦, 解瑞珍, 等. 氮化钽换能元的制备工艺研究 [J]. 火工品, 2020(1): 26-28.
- REN Xiao-ming, SU Qian, XIE Rui-zhen, et al. Study on preparation technology of TaN energy transducer [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(1): 26-28.
- [35] REN Xiao-Ming, REN Wei, CHEN Jian-Hua, et al. Study on the effect of TaN bridge film transducer structure on DC firing sensitivity [J]. *Modern Physics Letters B*, 2022, 36(13): 2250066.
- [36] REN Xiao-Ming, YU Ke-Xin, REN Wei, et al. Study on ignition performance of tantalum nitride film energy exchangers based on new bridge area [J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35(28): 2140020.
- [37] ZHANG Yun, XIAO Zong-lin, LIU Lan, et al. Research on the output characteristics of energy conversion elements under external excitation [J]. *Micromachines*, 2023, 14: 549.
- [38] 王科伟, 杨正才, 刘海旭, 等. 钝感Ni-Cr金属桥膜换能元的制备及性能 [J]. 含能材料, 2014, 22(6): 819-823.
- WANG Ke-wei, YANG Zheng-cai, LIU Hai-xu, et al. Preparation and characterization of insensitive Ni-Cr metal film igniting component [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(6): 819-823.
- [39] 杨腾龙, 沈云, 代骥, 等. 一种Ni-Cr@Al/CuO钝感含能元件的制备及性能 [J]. 含能材料, 2019, 27(10): 830-836.
- YANG Teng-long, SHEN Yun, DAI Ji, et al. Fabrication and characterization of a Ni-Cr@Al/CuO insensitive energetic element [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(10): 830-836.
- [40] LIU Wei, REN Xiao-ming, XIE Rui-zhen, et al. Fabrication and performance of a nickel-chromium (NiCr) igniter integrated with TVS diode for ESD protection [J]. *AIP Advances*, 2023, 13: 035207.

- [41] 沈瑞琪,叶迎华. 含能材料特种效应与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2020.  
SHEN Rui-qi, YE Ying-hua. Special effects and applications of energetic materials [M]. National Defence Industry Press, 2020.
- [42] 薛艳,任小明,解瑞珍,等. MEMS安全起爆芯片技术研究[J]. 传感技术学报, 2021, 34(12): 1591-1596.  
XUE Yan, REN Xiao-ming, XIE Rui-zhen, et al. Research on safe detonation chip technology based on MEMS technology [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(12): 1591-1596.
- [43] LIU Wei, WANG Yan-lan, XUE Yan, et al. Theoretical calculations on critical temperature of hot-spot initiation for in-situ  $\text{Cu}(\text{N}_3)_2$  micro-charge [A]. //Feng, Woodley, Li, Proceedings of 2018 International Conference on Defence Technology, The Publishing House of Ordnance Industry, Beijing, China, October 21-25, 2018, pp. 159-163.
- [44] BAO Bing-liang, YAN Nan, JIANG Yi, et al. Temperature measurements and multi-physical field simulations of micro-sized metal film bridge [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 104: 121-128.
- [45] 张方,陈建华,王燕兰,等. MEMS平面微起爆器的原位构筑及性能[J]. 含能材料, 2022, 30(4): 356-362.  
ZHANG Fang, CHEN Jian-hua, WANG Yan-lan, et al. In-situ construction and performance study of MEMS detonator [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(4): 356-362.
- [46] 阙文星,刘卫,任小明,等. 氮化钽薄膜换能元微秒量级瞬态响应温度研究[J]. 火工品, 2022(1): 24-28.  
KAN Wen-xing, LIU Wei, REN Xiao-ming, et al. Research on transient response temperature of TaN film energy transducer in microsecond [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022(1): 24-28.
- [47] 张一中,韦学勇,张国栋,等. 薄膜微结构换能元温度测量技术研究[J]. 传感技术学报, 2022, 35(8): 1011-1017.  
ZHANG Yi-zhong, WEI Xue-yong, ZHANG Guo-dong, et al. Study on temperature measurement of film microstructure energy conversion components [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2022, 35(8): 1011-1017.
- [48] ZHANG Fang, WANG Yan-lan, BAI Ying-wei, et al. Preparation and characterization of copper azide nanowire array [J]. *Materials Letters*, 2012, 89: 176-179.
- [49] WANG Qian-you, FENG Xiao, WANG Shan, et al. Metal-organic framework templated synthesis of copper azide as the primary explosive with low electrostatic sensitivity and excellent initiation ability [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28: 5837-5843.
- [50] 王燕兰,张方,张蕾,等. 原位反应法制备填充叠氮化铜的碳纳米管阵列[J]. 含能材料, 2016, 24(4): 386-392.  
WANG Yan-lan, ZHANG Fang, ZHANG Lei, et al. In-situ preparation of carbon nanotubes array confined with copper azide [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(4): 386-392.
- [51] 闫振展,李龙,杨利,等. 低静电感度叠氮化铜起爆薄膜的制备及其性能[J]. 兵工学报, 2022, 43(2): 279-286.  
YAN Zhen-zhan, LI Long, YANG Li, et al. Preparation and properties of copper azide initiating film with low electrostatic sensitivity [J]. *Acta Armamentarii*, 2022, 43(2): 279-286.
- [52] 刘旭文,胡艳,叶迎华,等. 叠氮化铜含能材料研究进展[J]. 含能材料, 2021, 29(5): 444-459.  
LIU Xu-wen, HU Yan, YE Ying-hua, et al. Review on copper azide energetic materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(5): 444-459.
- [53] ROSSI C, ZHANG Kai-li, ESTEVE D, et al. Nanoenergetic materials for MEMS: a review [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems: A Joint IEEE and ASME Publication on Microstructures, Microactuators, Microsensors, and Microsystems*, 2007, 16(4): 919-931.
- [54] 解瑞珍,张凡,刘兰,等. 硅基平面微雷管设计研究[J]. 火工品, 2018(1): 20-22.  
XIE Rui-zhen, ZHANG Fan, LIU Lan, et al. Study on the design of Si-based chip type micro-detonator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(1): 20-22.
- [55] STEWART B. NAVY S&T strategy overview [C]//NDIA 61st Annual Fuze Conference, San Diego Ca, May 16, 2018.
- [56] COPE R. United States Navy overview [C]//NDIA 51st Annual Fuze Conference, Baltimore, MA, 2007.
- [57] 解瑞珍,刘兰,任小明,等. 硅基微雷管的原位装药及性能研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 1972-1977.  
XIE Rui-zhen, LIU Lan, REN Xiao-ming, et al. Research on in-situ charge and performance of Si-based micro-detonator [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(12): 1972-1977.
- [58] PINES D. Enhanced performance of MEMS electric initiators [C]//NDIA 55th Annual Fuze Conference, Salt Lake City, UT, 2011.
- [59] PIQUE A, DOUGLAS B C. Direct-write technologies for rapid prototyping applications [M]. San Diego, California: Academic Press, 2002.
- [60] IHNEN A, LEE W, FUCHS B, et al. Inkjet printing of nanocomposite high-explosive materials [C]//NDIA 54th Annual Fuze Conference, Kansas City, MO, 2010.
- [61] 郭浩,安崇伟,徐传豪,等. 粒度级配对CL-20基炸药油墨流变性能的影响[J]. 火炸药学报, 2021, 44(1): 55-59, 100.  
GUO Hao, AN Chong-wei, XU Chuan-hao, et al. Effect of particle size gradation on rheological properties of CL-20 based explosive ink [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2021, 44(1): 55-59, 100.
- [62] 朱国豪,叶宝云,安崇伟,等. CL-20基爆炸网络装药的UV光辅助直写成型及性能[J]. 含能材料, 2021, 29(4): 293-299.  
ZHU Guo-hao, YE Bao-yun, AN Chong-wei, et al. Direct writing prototyping with ultraviolet and performance of CL-20 based explosive network charging [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(4): 293-299.
- [63] 朱自强,陈瑾,谯志强,等. CL-20基直写炸药油墨的制备与表征[J]. 含能材料, 2013, 21(2): 235-238.  
ZHU Zi-qiang, CHEN Jin, QIAO Zhi-qiang, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20 [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(2): 235-238.
- [64] WANG Dun-ju, ZHENG Bao-hui, GUO Chang-ping, et al. Formulation and performance of functional sub-micro CL-20-based energetic polymer composite ink for direct-write assembly [J]. *RSC Advances*, 2016, 6(113): 112325-112331.
- [65] 宋长坤,安崇伟,叶宝云,等. 粒度对CL-20基炸药油墨临界传爆特性的影响[J]. 含能材料, 2018, 26(12): 1014-1018.

- SONG Chang-kun, AN Chong-wei, YE Bao-yun, et al. Influence of particle size on critical detonation performance of CL-20 explosives ink[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(12): 1014-1018.
- [66] 郭浩. CL-20 基光固化炸药油墨设计与 3D 直写成型技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2020.
- GUO Hao. The design of ultraviolet curing explosive ink and the study of 3D direct ink writing[D]. Taiyuan: North University of China, 2020.
- [67] LI Qian-bing, AN Chong-wei, PENG Jin-yu, et al. Formulation of CL-20-based explosive ink and its detonating transfer performance in micro-size charge[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2019, 44(11): 1432-1439.
- [68] WANG Jing-yu, XU Chuan-hao, AN Chong-wei, et al. Preparation and properties of CL-20 based composite by direct ink writing [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2017, 42(10): 1139-1142.
- [69] ZHANG Lei, ZHANG Fang, WANG Yan-lan, et al. Preparation and characterization of direct write explosive ink based on CL-20 [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2019, 1209: 012016.
- [70] 廖东桀, 徐传豪, 孔胜, 等. 高强度 CL20/HTPE 基微尺度传爆药的打印成型及性能表征[J]. 含能材料, 2022, 30(9): 920-926.
- LIAO Dong-jie, XU Chuan-hao, KONG Sheng, et al. Inkjet printing and performance characterization of CL-20/HTPE based microscale booster with high strength [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(9): 920-926.
- [71] 黄荣慧, 闫石, 王现锋, 等. 静电喷雾法制备超细 CL-20 基复合含能微球及其性能研究[J]. 火炸药学报, 2017, 40(6): 49-54.
- HUANG Rong-hui, YAN Shi, WANG Xian-feng, et al. Fabrication of ultrafine CL-20-based composite energetic microspheres by electrostatic spray method and study on the performance[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2017, 40(6): 49-54.
- [72] 高红旭, 牛诗尧, 曲文刚. 粒度对  $\epsilon$ -CL-20 $\rightarrow$  $\gamma$ -CL-20 转晶温度的影响[C]//中国化学会第十九届全国化学热力学和热分析学术会议, 沈阳, 辽宁, April 20-22, 2018.
- Gao Hong-xu, Niu Shi-yao, Qu Wen-gang. Effect of particle radius on the crystalline transformation temperature from  $\epsilon$ -CL-20 to  $\gamma$ -CL-20[C]//CTTA 2018, April 20-22, 2018.
- [73] 韩凯, 丁任琪, 李连强, 等. PVA/FEVE/CL-20 炸药油墨设计, 直写成型及其微尺度传爆特性[J]. 含能材料, 2022, 30(9): 911-919.
- HAN Kai, DING Ren-qi, LI Lian-qiang, et al. Explosive ink design, direct ink writing, and micro-scale detonation transmission characteristics of PVA/FEVE/CL-20[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(9): 911-919.
- [74] XIE Zhan-xiong, AN Chong-wei, YE Bao-yun, et al. 3D direct writing and micro detonation of CL-20 based explosive ink containing O/W emulsion binder [J]. *Defence Technology*, 2022, 18(8): 1340-1348.
- [75] LI Chun-yan, LIU Song-jin, XIE Zhan-xiong, et al. Design and fabrication of CL-20-based composites with an ordered close-packing structure by inkjet printing[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2022, 639: 128331.
- [76] KONG Sheng, LIAO Dong-jie, JIA Yu-meng. Performances and direct writing of CL-20 based ultraviolet curing explosive ink[J]. *Defence Technology*, 2022, 18(1): 140-147.
- [77] 孙承伟, 文尚刚, 赵峰. 多级炸药爆轰高速驱动技术的 Gurney 模型优化分析[J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(4): 299-304.
- SUN Cheng-wei, WEN Shang-gang, ZHAO Feng. An optimal analysis of multi-stage explosive accelerated high velocity flyers with the improved Gurney model[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2004, 24(4): 299-304.
- [78] YADAV H S. Effect of flyer plate velocity and rate of crater expansion on performance of explosive reactive armour [J]. *Defence Science Journal*, 2002, 52(4): 429-438.
- [79] 朱生华, 吴立志, 陈少杰, 等. 激光驱动含能复合飞片速度特性 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(1): 011006.
- ZHU Sheng-hua, WU Li-zhi, CHEN Shao-jie, et al. Preparation and characteristics of laser-driven energetic composite flyer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(1): 011006.
- [80] CHEN Shao-jie, WU Li-zhi, SHEN Rui-qi, et al. Laser-driven performance of the Al/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al multi-layer flyer[J]. *Laser Physics*, 2013, 23(12): 125002.
- [81] 覃文志, 王猛, 陈清畴, 等. 基于激光驱动的复合飞片参数与性能[J]. 含能材料, 2015, 23(2): 173-177.
- QIN Wen-zhi, WANG Meng, Chen Qing-chou, et al. Parameters and characteristics of multi-flyers driven by laser [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(2): 173-177.
- [82] 邓向阳, 彭其先, 赵剑衡, 等. VISAR 测量电爆炸箔驱动飞片速度的实验研究[J]. 火炸药学报, 2007, 30(2): 45-48.
- DENG Xiang-yang, PENG Qi-xian, ZHAO Jian-heng, etc. Experimental studies on velocity measurement of mylar flyer driven by exploding metal foils with VISAR [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(2): 45-48.
- [83] 何碧, 蒋小华, 李泽仁, 等. 用双灵敏度 VISAR 测试爆炸箔起爆器的飞片速度[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(1): 31-34.
- HE Bi, JIANG Xiao-hua, LI Ze-ren, etc. Flyer velocity measurement of a exploding foil initiation system using a double-sensitivity VISAR [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2005, 25(1): 31-34.
- [84] 张凡, 张蕊, 解瑞珍. 硅基微雷管驱动飞片的速度计算研究[J]. 火工品, 2018(1): 57-60.
- ZHANG Fan, ZHANG Rui, XIE Rui-zhen. Study on velocity calculation of flyer driven by Si-based micro-detonator [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2018(1): 57-60.
- [85] 赵铮, 陶钢, 杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报, 2009, 23(4): 277-282.
- ZHAO Zheng, TAO Gang, DU Chang-xin. Application research on jwl equation of state of detonation products [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009, 23(4): 277-282.
- [86] 赵艳红, 张弓木, 张其黎, 等. HMX 炸药爆轰产物物态方程研究[J]. 计算物理, 2017, 34(2): 155-159.
- ZHAO Yan-hong, ZHANG Gong-mu, ZHANG Qi-li. Equation of state of detonation products for HMX explosive [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2017, 34(2): 155-159.
- [87] PENG Yue, LONG Xin-ping, JIANG Xiao-hua, et al. Only numerical modeling of detonation properties for some metal azides [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45



- (4): 600-606.
- [88] 刘文祥,李捷,钟方平.组合 $\gamma$ 状态方程在数值计算上的应用及分析[J].爆炸与冲击,2009,29(2):209-212.  
LIU Wen-xiang, LI Jie, ZHONG Fang-ping. Application and analysis of a combinational  $\gamma$  equation of state for detonation products [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29 (2) : 209-212.
- [89] 沈飞,王辉,袁建飞,等.RDX基含铝炸药不同尺寸的圆筒试验及数值模拟[J].含能材料,2013,21(6):777-780.  
SHEN Fei, WANG Hui, YUAN Jian-fei, et al. Different diameter cylinder tests and numerical simulation of RDX based aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 777-780.
- [90] 曾庆轩,简国祚,李兵,等.叠氮化铜JWL状态方程参数拟合[J].火工品,2014(6):28-31.  
ZENG Qin-xuan, JIAN Guo-zuo, LI Bing, et al. The fitted parameters of JWL equation of state for copper azide [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2014(6): 28-31.
- [91] PENG Yue, YU Qing-xia, YIN Qiang, et al. Performance investigation of a copper azide micro detonator using experiments and simulations [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2022, 47(4): e202100343.
- [92] 解瑞珍,陈建华,刘卫,等.基于MEMS工艺的起爆序列设计研究[J].传感技术学报,2021,34(11):1451-1457.  
XIE Rui-zhen, CHEN Jian-hua, LIU Wei, et al. Design of explosive train based on MEMS technology [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(11): 1451-1457.
- [93] 贺翔,严楠,曾祥涛,等.微尺寸叠氮化铅驱动飞片重要结构参数与飞片速度和能量的关系[J].兵工学报,2021,42(7):1363-1371.  
HE Xiang, YAN Nan, ZENG Xiang-tao, et al. Relation among important structural parameters flyer velocity and energy of flyer driven by micro-size lead azide [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1363-1371.
- [94] 简国祚,曾庆轩,郭俊峰,等.叠氮化铜微装药爆轰驱动飞片的数值模拟[J].爆炸与冲击,2016,36(2):248-252.  
JIAN Guo-zuo, ZENG Qing-xuan, GUO Jun-feng, et al. Simulation of flyers driven by detonation of copper azide [J]. *Explosion And Shock Waves*, 2016, 36(2): 248-252.
- [95] 穆云飞,沈瑞琪,张伟,等.微装药驱动飞片速度及形态研究[J].火工品,2022(6):9-13.  
MU Yun-fei, SHEN Rui-qi, ZHANG Wei, et al. Study on velocity and shape of micro-charge-driven flyer [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2022 (6): 9-13.
- [96] 张少明.微小直径装药起爆与传爆特性研究[D].太原:中北大学,2009.  
ZHANG Shao-ming. Study on charactersitics of initiation and detonation transfer for micro-diameter charge [D]. Taiyuan: North University of China, 2009.
- [97] 郭俊峰,曾庆轩,李明愉,等.叠氮化铜驱动飞片起爆HNS-IV的研究[J].火工品,2015(6):1-4.  
GUO Jun-feng, ZENG Qing-xuan, LI Ming-yu, et al. Study on HNS-IV initiated by flyer driven by cupric azide [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(6): 1-4.
- [98] 郭俊峰,曾庆轩,李明愉,等.飞片材料对微装药驱动飞片形貌的影响[J].高压物理学报,2017,31(3):315-320.  
GUO Jun-Feng, ZENG Qing-Xuan, LI Ming-Yu, et al. Influence of flyer material on morphology of flyer driven by micro charge [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2017, 31 (3): 315-320.
- [99] 李慧,任炜,褚恩义,等.微序列隔板对MEMS火工品传爆性能的影响[J].爆破器材,2016,45(6):11-15.  
LI Hui, REN Wei, CHU En-yi, et al. Effect of gap in micro sequence on detonation performance of MEMS [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(6): 11-15.
- [100] LIU Wei, XIE Rui-zhen, XUE Yan, et al. Critical thickness calculation of MEMS safety-and-arming devices [C]//13th International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics in Commemoration to the 95th Birthday of Prof. Ding Jing, Beijing, China, October 13-16, 2019.
- [101] 罗德宏,李慧,张晶鑫,等.微起爆序列界面间隙对其传爆性能影响的仿真研究[J].火工品,2016,(6):17-20.  
LUO De-hong, LI Hui, ZHANG Jing-xin, et al. The simulation on the effect of interface clearance of micro explosive train on detonation [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2016, (6): 17-20.
- [102] RASMUSSEN J, BONIVERT W, KRAFCIK J. High aspect ratio metal MEMS (LIGA) technologies for rugged, low-cost fire-train and control components [C]//NDIA 47th Annual Fuze Conference, New Orleans, LA, April 8-10, 2003.
- [103] YOUNG T. DoD MEMS fuze explosive train evaluation & enhancement [C]//NDIA 61st Annual Fuze Conference, San Diego CA, May 16, 2017.
- [104] YOUNG T, SMYTH J. DoD MEMS fuze reliability evaluation [C]//NDIA 59th Annual Fuze Conference, Charleston SC, May 5, 2016.
- [105] 任炜,白颖伟,商弘藻,等.火工序列内置MEMS安全隔离装置原理研究[C]//中国兵工学会学术年会,苏州,2011:226-231.  
REN Wei, BAI Yin-wei, SHANG Hong-zao, et al. Research on the principle of MEMS safety isolation device embedded in initiating explosive device sequence [C]//The annual meeting of China ordance Society, Suzhou Jiangsu, 2011: 226-231.
- [106] HU Teng-jiang, ZHAO Yu-long, LI Xiu-yuan, et al. Integration design of MEMS electro-thermal safety-and-arming devices [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(4): 953-958.
- [107] HU Teng-jiang, Fang Kuang, ZHANG Zhi-ming, et al. The research on MEMS S&A device with metal-silicon composite structure [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, 28(6): 1088-1099.
- [108] LI Xiu-yuan, ZHAO Yu-long, HU Teng-jiang. Design of a large displacement thermal actuator with a cascaded V-beam amplification for MEMS safety-and-arming devices [J]. *Microsystem Technologies*, 2015, 21(11): 2367-2374.
- [109] YANG Yu-sheng, LIN Yu-hsin, HU Yi-chiuen, et al. A large-displacement thermal actuator designed for MEMS pitch-tunable grating [J]. *Journal of Micromechanics & Micro-engineering*, 2009, 19(1): 015001.
- [110] KHAZAAI J, Haris M, KHIR M, et al. Design and fabrication of a low power electro-thermal V-shape actuator with large displacement [C]//Electronics, Devices, Fabrication, MEMS, Fluidics and Computational - Technical Proceedings of the 2010 NSTI Nanotechnology Conference and Expo, NSTI-Nanotech 2010, 2010: 681-684.
- [111] 阚文星,褚恩义,刘卫,等.微起爆系统用MEMS安全保险装置研究现状与展望[J].含能材料,2022,30(1):78-94.

- KAN Wen-xing, CHU En-yi, LIU Wei, et al. A review on MEMS safety and arming devices for micro-initiation system [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2022, 30(1): 78-94.
- [112] LI Mei, HU Teng-jiang. Research status and development trend of MEMS S&A devices: A review[J]. *Defence Technology*, 2021, 17(2): 450-456.
- [113] COPE R D. NAVAIR Fuze Overview [C]//NDIA 48th Annual Fuze Conference, Charlotte, NC, April 27-28, 2004.
- [114] PEZOUS H, ROSSI C, SANCHEZ M, et al. Fabrication, assembly and tests of a MEMS-based safe, arm and fire device [J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2010, 71(2): 75-79.
- [115] PEZOUS H, ROSSI C, SANCHEZ M, et al. Integration of a MEMS based safe arm and fire device [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 159(2): 157-167.
- [116] 蒋小华, 尹强, 田勇, 等. 微机电起爆器研究[J]. *火工品*, 2009(6): 11-13.  
JIANG Xiao-hua, YIN Qiang, TIAN Yong, et al. Study on MEMS initiators[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(6): 11-13.
- [117] 任小明, 解瑞珍, 刘兰, 等. 小尺寸CL-20装药的起爆性能研究 [C]//陕西省兵工学会第17届学术年会, 西安, 2013.  
REN Xiao-ming, XIE Rui-zhen, LIU Lan, et al. Ignition performance of CL-20 explosive charge under small diameter condition [C]//The 17th Annual Conference of Ordnance Society of Shaanxi province, Xi'an, China, 2013. 46-48.
- [118] 解瑞珍, 李黎明, 刘兰, 等. 微小型起爆序列初步设计与性能研究[J]. *兵工学报*, 2017, 38(3): 460-465.  
XIE Rui-zhen, LI Li-ming, LIU Lan, et al. Study of design and performance of micro initiation train [J]. *ACTA ARMAMENTARIA*, 2017, 38(3): 460-465.
- [119] 刘兰, 解瑞珍, 刘卫, 等. 带有保险锁的MEMS安保护装置设计与性能测试[J]. *传感技术学报*, 2021, 34(5): 587-590.  
LIU Lan, XIE Rui-zhen, LIU Wei, et al. The design and performance testing of a MEMS safety and arming device with an insurance lock [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2021, 34(5): 587-590.
- [120] MAY C, KRAFT S H, JOHNSON A G. Survivability and reliability of silicon MEMS components [C]//NDIA 62nd Annual Fuze Conference, Buffalo, NY, May 13-15, 2019.
- [121] 王柯心, 胡腾江, 褚恩义, 等. 内置MEMS隔断机构的微起爆装置[J]. *火工品*, 2020(6): 5-9.  
WANG Ke-xin, HU Teng-jiang, CHU En-yi, et al. A micro-detonated device built-in MEMS safety and arming device [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(6): 5-9.
- [122] HU Teng-jiang, ZHAO Yu-long, WANG Ke-xin, et al. The development of an on-chip microinitiator with a built-in safety-and-arming device [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2021, 92(2): 025007.
- [123] 阚文星. 具备可恢复隔断功能的MEMS火工品技术研究[D]. 西安: 陕西应用物理化学研究所, 2022.  
KAN Wen-xing. Research on MEMS pyrotechnics with resettable MEMS S&A device [D]. Xi'an: Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, 2022.
- [124] ROBINSON C H, HOANG T Q, GELAK M R, et al. Materials, fabrication and assembly technologies for advances MEMS-based safety and arming mechanisms for projectile mu-
- nitions [R]. Adelphi, MD, OMB No. 0704-0188, 2006.
- [125] LAFONT R. Pyro-MEMS Technological breakthrough in fuze domain [C]//NDIA's 55th Annual Fuze Conference, Salt Lake City, UT, 24-25 May 2011.
- [126] BURKE P, PERGOLIZZI T. XM1156 precision guidance kit (PGK) [C]//52nd Annual Fuze Conference, Sparks NV, 13-15 May 2008.
- [127] 张凡, 张蕊, 解瑞珍, 等. 凝聚态炸药冲击起爆判据的分析与评价[J]. *北京理工大学学报自然版*, 2017, 37(s2): 21-24.  
ZHANG Fan, ZHANG Rui, XIE Rui-zhen, et al. Analysis and assessment on shock initiation criterion for condensed explosives [J]. *Transactions of Beijing institute of Technology*, 2017, 37(s2): 21-24.
- [128] JOHNSON C E. James space performance characterization of a DAAF-based explosive [R]. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-11-56034, 2011.
- [129] JOHNSON C E. James space performance characterization of an interaction detonator [R]. Los Alamos National Laboratory, LA-UR-12-00421, 2012.
- [130] KIM S, MILLER C, HORIE Y, et al. Computational prediction of probabilistic ignition threshold of pressed granular octahydro-1, 3, 5, 7-tetranitro-1, 2, 3, 5-tetrazocine (HMX) under shock loading [J]. *Journal of Applied Physics*, 2016, 120(11): 115902-21.
- [131] GRESSHOFF M, HROUSIS C A. Probabilistic shock threshold criterion [C]//13th International Detonation Symposium, Coeur d'Alene ID, United States, April 11-16, 2010.
- [132] 钱石川, 甘强, 任志伟, 等. HNS-IV炸药一维冲击起爆判据的研究[J]. *含能材料*, 2018, 26(6): 495-501.  
QIAN Shi-chuan, GAN Qiang, REN Zhi-wei, et al. Study on one-dimensional shock initiation criterion of HNS-IV explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(6): 495-501.
- [133] 郭俊峰, 曾庆轩, 李明愉, 等. HNS-IV炸药的短脉冲冲击起爆判据[J]. *高压物理学报*, 2018, 32(2): 025101.  
GUO Jun-feng, ZENG Qing-xuan, LI Ming-yu, et al. Short pulse shock initiation criteria for HNS-IV explosive [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2018, 32(2): 025101.
- [134] 张凡. 微起爆序列传爆可靠性评估技术[D]. 西安: 陕西应用物理化学研究所, 2018.  
ZHANG Fan. Reliability assessment of micro explosive train [D]. Xi'an: Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, 2018.
- [135] MU Yun-fei, ZHANG Wei, SHEN Rui-qi, et al. A chemical reaction insight of shock initiation criterion [J]. *Applied Physics Letters*, 2022, 121: 064102.
- [136] 刘卫, 解瑞珍, 刘兰, 等. 微起爆序列系统级故障评估方法初探 [C]//陕西省兵工学会2022年学术年会, 陕西, 西安, 2022.  
LIU Wei, XIE Ruizhen, LIU Lan, et al. Fault Accessment Method on System Level of Micro Fire Train [C]//The Annual Conference of Ordnance Society of Shaanxi province, Xi'an, China, 2022.
- [137] 陈清畴, 刘刚, 马骏. 飞片初始形状对雷管起爆能力的影响[J]. *火工品*, 2020(1): 6-9.  
CHEN Qing-chou, LIU Gang, MA Tao. Effects of the flyer shape on detonator output [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(1): 6-9.

## Review on Micro Fire-train based on Flyer Impact Initiation

LIU Wei, CHU En-yi, LIU Lan, REN Xiao-ming, XIE Rui-zhen, REN Wei, LI Jiao

(*Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China*)

**Abstract:** As information, intelligence and miniaturization progresses in ammunitions, Micro-Electrical-Mechanical System (MEMS) based initiator was derived to meet the need of the information of energy-transferring, miniaturization on structure and integration of energy sequence. As one kind of a system-level MEMS initiator, the present micro fire-train was integrated based on initiation detonation mechanism of the flyer impacting the next booster explosive. By focusing on the application and technical requirements of micro fire-train, the state-of-art of the fire-train was reviewed from five aspects, including the micro-heater design and firing energy control, microscale detonation energy control and devitrization, energy transmission and safety control, micro fire-train design and integration, and reliability evaluation of the fire-train. Based on the analysis of state-of-art of micro fire-train, some suggestions for future development were proposed, and the key points for the further development of micro fire-train are discussed: strengthen the basic research of initiation and detonation mechanism under micro scale; promote digital engineering and improve forward-design capability; build mass production capacity including element-level, component-level and system-level of the micro fire-train; enhance the qualification and improve technology maturity of micro fire-train. It is vital useful for the peers to pay more attention on the design, fabrication, test and evaluation of the micro fire-train.

**Key words:** MEMS initiator; micro fire-train; energy control; micro-detonator; booster explosive; flyer; reliability

**CLC number:** TJ450; O64; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023043

(责编:王馨逸)