

文章编号: 1003-1480 (2024) 03-0014-08

低成本全电子安全与解除保险装置研究现状

汪柯, 施长军, 郭莎, 郑监, 任新联, 胡宏伟

(西安近代化学研究所, 陕西 西安, 710065)

摘要: 随着全电子引信技术的不断成熟和快速发展, 对全电子引信及安保险装置的低成本化提出了新的要求, 以便进一步扩展其应用领域。本文重点介绍了全电子安保险装置高压元器件 (高压变压器、高压电容、高压开关、爆炸箔起爆器) 的低成本化发展现状, 同时分析了全电子安保险装置低成本化发展的影响因素; 指出新材料、新工艺、新原理是实现全电子安保险装置低成本化发展的根本方法, 利用 MEMS 等先进工艺技术实现全电子高压器件的批量化生产是降低成本的重要手段之一。

关键词: 全电子安保险装置; 低成本; 高压器件; MEMS

中图分类号: TJ430.3⁺3 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.03.003

Research Status of Low Cost Electronic Safety and Arm Device

WANG Ke, SHI Chang-jun, GUO Sha, ZHENG Jian, REN Xin-lian, HU Hong-wei

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065)

Abstract: With the continuous maturity and rapid development of all-electronic safety and arming device (ESAD) technology, new requirements have been put forward for the low-cost of safety and arming(S&A) devices in order to further expand its application field. The development status of low-cost development of key high-voltage components of all-electronic fuze devices (high-voltage converters, high-voltage capacitors, high-voltage switches, explosive foil initiators) were mainly introduced, the influential factors of low-cost development of ESAD were also analyzed. The study proposes that new materials, new processes and new principles are the fundamental methods to achieve the low-cost development of all-electronic security devices, and the use of advanced technology such as MEMS to achieve mass production of all-electronic high-voltage devices is an important means to reduce costs.

Key words: Electronic safety and arming device; Low cost; High-voltage electronic components; MEMS

全电子安保险系统是继第一代机械安保险系统和第二代机电安保险系统之后的新型引信安保险系统, 其利用电子保险开关取代传统机械安保险结构, 并采用不含敏感药剂的直列式起爆器作为发火元件, 在保证安全性的前提下简化了机电安保险装置复杂的结构, 促进了引信技术的进一步发展。国内全电子引信 (Electronic Safety & Arm Fuze, ESAF) 以及全电子安全与解除保

险装置 (Electronic Safety & Arm Device, ESAD) 日益成熟, 当前正朝着小型化、抗高过载、低成本等方向发展。

ESAD 的低成本发展基于作战的需要、武器系统发展的趋势、军队的需求以及相关企业对利润和成本的考量, 同时也是新材料、新工艺、新理论和新技术应用的平台。ESAD 的低成本化有利于实现其在陆、

收稿日期: 2023-10-23

作者简介: 汪柯 (1995-), 男, 工程师, 主要从事引信配合技术研究。

通讯作者: 胡宏伟 (1982-), 男, 研究员, 主要从事高效毁伤技术研究。

基金项目: 装发预研项目。

引用本文: 汪柯, 施长军, 郭莎, 等. 低成本全电子安全与解除保险装置研究现状[J]. 火工品, 2024(3): 14-21.

海、空、天等多型装备和低成本弹药领域的应用,对于提高整个武器装备系统的可靠性、安全性和先进性具有重要意义。本文主要从低成本的方向对ESAD的发展现状和发展方向进行介绍。

1 全电子安全与解除保险装置介绍

ESAD的原理图如图1所示。

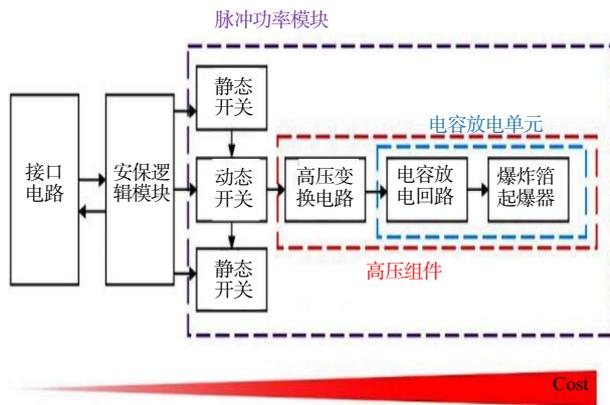


图1 全电子安装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of ESAD

ESAD的主要结构包括接口电路、安保逻辑模块、高压转化单元、电容放电单元。接口电路接收控制系统的供电和解保信号或指令,并发送给安保逻辑模块进行处理。安保逻辑模块识别解保信号或指令后,发送解保信号。静态开关和动态开关接收解保信号后闭合,高压变压器开始工作,电容电压在短时间内升高至指定电压。当控制系统判定最佳起爆时刻到来后,发送起爆信号,高压开关闭合,高压电容放电,爆炸箔起爆器作用引爆后级装药。

全电子安装置是由一系列各种类型和功能的电子元器件组成的安保系统。接口电路、安保逻辑控制模块为由低压电子元器件组成的电路单元,高压转换单元和电容放电单元(Capacitor Discharge Unit, CDU)为由高压电子元器件组成的电路单元。如图1所示,高压电子元器件对ESAD成本的影响极大,这也是当前ESAD电子元器件研究的主要领域。ESAD高压器件主要包括用于实现高压转化的高压变压器、高压电容、高压开关和爆炸箔起爆器(冲击片雷管)。因此,本文主要就国内外在高压电子元器件领域的研

究进展进行介绍。

2 关键低成本元器件研究

2.1 高压变压器

高压变压器是全电子引信DC-DC升压的核心器件,它的性能直接影响了高压电路的输出能力。传统ESAD用高压变压器以成熟的绕线式变压器为主,随着先进工艺的发展,出现了基于印刷工艺、LTCC工艺和增材制造工艺的平面变压器。桑迪亚实验室^[1-3]于2009年报道了基于LTCC工艺的高压变压器,通过在陶瓷基底上印刷金属线圈形成原边、副边绕组结构,通过在线圈上印刷低磁导率介质形成高磁阻通道避免变压器饱和,各层绕组通过陶瓷基底上的金属化过孔实现电气连,升压能力达到2000V以上,完全可以满足ESAD的使用要求,同时其体积小于 $10\text{ mm}(L)\times 10\text{ mm}(W)\times 2\text{ mm}(H)$,如图2所示。

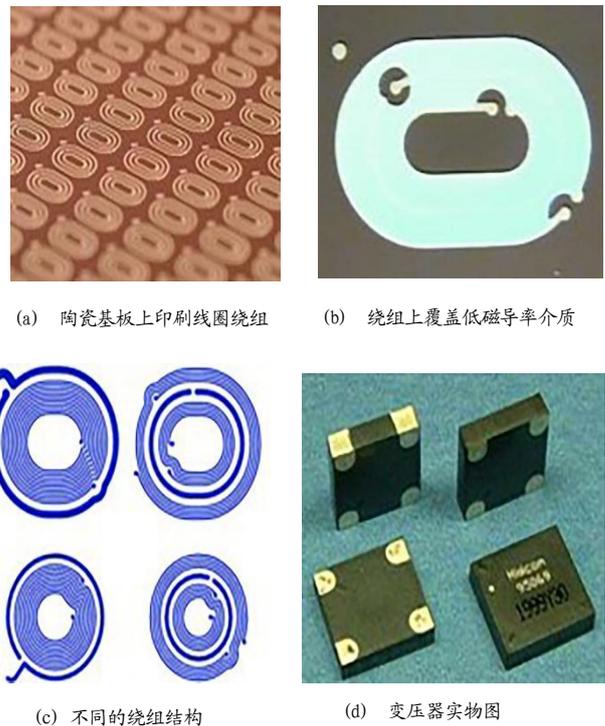


图2 LTCC变压器绕组及实物图

Fig.2 Windings and physical diagram of LTCC transformer

第64届引信年会海军水面作战中心报道了ESAD专用元器件高压电子元器件在高温环境条件下的性能研究进展,基于多层陶瓷工艺的一体式变压器

实物^[4]如图3所示。根据报道,LTCC变压器已经在小型化ESAD中实现了应用。



图3 美海军引信第64届年会公开报道的LTCC变压器
Fig.3 LTCC transformer reported at the 64th Fuze Annual Conference

国产LTCC变压器也取得了很大发展,目前国内相关厂商产品已经可以实现2500V以上的升压能力,可靠性、小尺寸和成本等方面已经达到较高水平,规模化应用后成本可进一步下降。图4为某国产LTCC变压器实物图,尺寸不大于10mm×10mm×3mm,其质量小于3g。

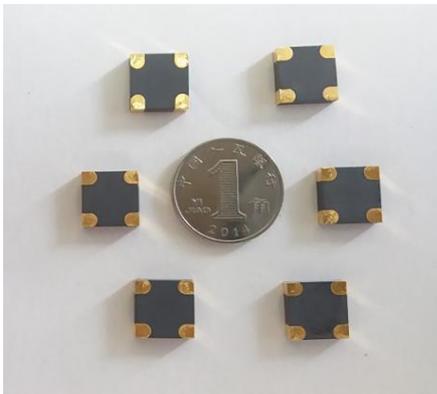
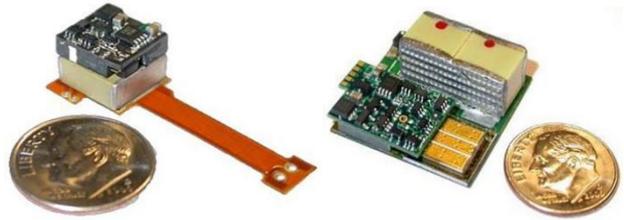


图4 国产LTCC变压器实物图
Fig.4 Domestic LTCC transformer

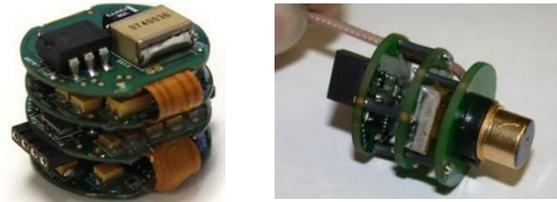
2.2 高压电容

高压电容是ESAD中爆炸箔起爆器的发火能量来源,其耐压水平、放电性能等参数是影响爆炸箔起爆器发火性能的重要因素。当前,国内外在ESAD中使用最广泛和成熟的仍然是陶瓷电容。陶瓷电容在体积、成本、脉冲放电性能、耐压能力等方面的总体性能优于聚合物、石英等电容。国外几款ESAD普遍采用陶瓷电容作为发火电容^[5-6],如图5所示。国内厂商如福建火炬和成都宏明在脉冲功率陶瓷电容领域陶瓷粉材料和工艺成熟,耐压水平、电流能力、使用寿

命均可以满足使用要求^[7]。



(a) Sandia实验室基于陶瓷电容的两型小型ESAD



(b) 美海军和空军报道的ESAD

图5 基于陶瓷电容的ESAD

Fig.5 ESAD based on high-voltage ceramic capacitor

当成本为第一考虑要素时,聚合物(薄膜电容)、云母等电容也能满足使用要求。即使放电性能相比陶瓷电容略差,聚合物电容在一定范围内具有自修复能力,抗过载能力强于陶瓷电容,也是全电子ESAD可考虑使用的电容之一^[4,8]。韩克华等^[9]对比了陶瓷电容、云母、有机薄膜、纸介/油介这几种电容的综合性能,研究表明作为冲击片雷管发火的储能元件高压脉冲电容器,陶瓷电容器的性能最优,体积小、便于集成;云母电容器性能参数次之,体积却相对较大,但能够满足目前的爆炸箔起爆器的储能元件使用要求。

1998年,O'Brien等^[10]介绍了一种采用薄膜沉积技术实现高压电容、平面高压开关和爆炸箔起爆器一体化集成的全固态电容放电单元,其中高压电容由交替沉积的金属层和电介质层组成。2017年,引信年会美空军试验室报道了在柔性基底上沉积金属层制备的高压电容,如图6所示。

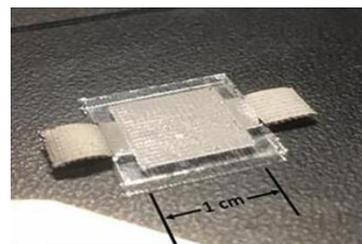


图6 基于柔性基底印刷金属层的高压电容
Fig.6 High voltage capacitor prepared by printed metal films on flexible substrates

图6所示的这种印刷高压电容的耐过载性能一般^[11]。从当前趋势看,这种基于MEMS或印刷工艺的高压电容短时间内暂无应用的可能性,成熟度和可靠性较低,还需进一步研究。

2.3 高压开关

2.3.1 气体开关和半导体开关

冷阴极触发管(Cold Cathode Trigger, CCT)开关和Mos控制晶闸管开关(Mos Controlled Thyristor, MCT)如图7所示,是当前ESAD商用级别的高压开关,能够重复使用、稳定性高、成熟度高且经过市场检验,在军民领域内都有所应用。

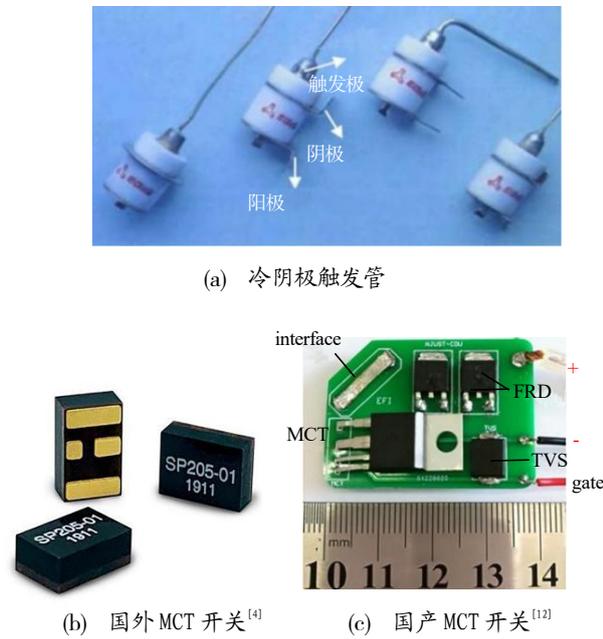


图7 冷阴极触发管和MCT开关

Fig.7 Commercial CCT and MCT switches

半导体MCT开关采用低电平触发和表贴封装形式。相比传统的CCT开关在成本、体积、稳定性方面都有一定优势,而且低电平的触发方式相比CCT开关在电路结构上更为简化,外围元器件数量较少。国外关于MCT开关的研究和应用较早,成本也更低。国内功率半导体产业正蓬勃发展,多家厂商在MCT等半导体开关领域具有成熟技术,半导体高压开关在ESAD中的应用将会更加广泛。

除此之外,刘鹏等^[13]设计、制作了基于串联陶瓷气体放电管的低成本高压开关,并通过短路放电试验,掌握了低成本高压开关的电气特性。电爆炸试验和起

爆试验验证了该开关的可行性。然而,这种串联形式带来的问题在于其较大的空间体积,并且其工作的可靠性还需进行验证。

2.3.2 平面高压开关

近年来,基于MEMS等工艺技术的平面高压开关蓬勃发展,借助于成熟工艺的批量化生产,在小型化和平面化的同时,极大降低了元器件成本。

(1) 单触发开关

单触发开关(平面介质开关、平面电爆炸开关)是针对小型化、低成本化ESAD研究的专用开关,相比冷阴极触发管和MCT开关成本降低明显。平面电爆炸开关和平面介质开关的导通原理分别如图8(a)~(b)所示。

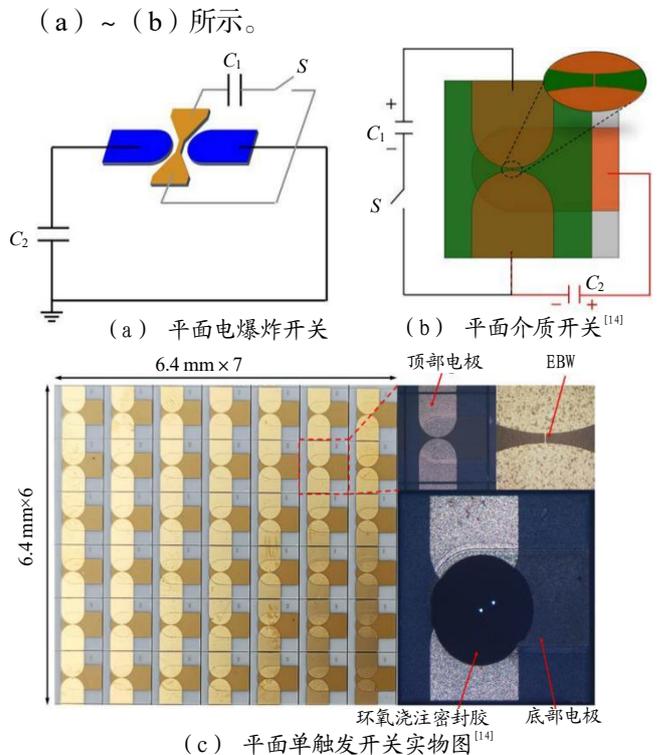


图8 平面单触发开关的作用原理图及实物图

Fig.8 The function principle diagram and physical diagram of single-shot switch

单触发开关的工作原理是利用触发放电回路 C_1 放电产生的大电流导致触发元件(二极管、金属桥丝等)爆炸产生等离子体,等离子体击穿开关主电极之间的介质层(空气、绝缘介质),从而实现导通,导致电容 C_2 放电。对于平面电爆炸开关和平面介质开关,其触发方式都是依赖于金属或半导体元件的电爆炸击穿主开关的介质层实现回路导通,所以触发回

路需要引入额外的高压电容 C_1 和开关 S ，一定程度上又增加了电路复杂度。

对比单触发开关和商用开关，单触发开关的突出特点是其单次作用特性，这虽然不影响 ESAD 的实战使用，但是不利于日常维护和检测，可能会影响其在高价值武器中的应用。平面单触发开关实物如图 8(c) 所示，可以明显看到利用 MEMS 等工艺技术制备平面高压开关，能够实现批量化制备，相比传统工艺能够极大降低材料和生产成本。

(2) 平面三电极开关

平面三电极开关是冷阴极触发管的平面化发展，其作用原理、触发方式和商用冷阴极触发管的触发方式相同，因此实用性强，能够兼容现有的引信电路^[15-16]，如图 9 所示。

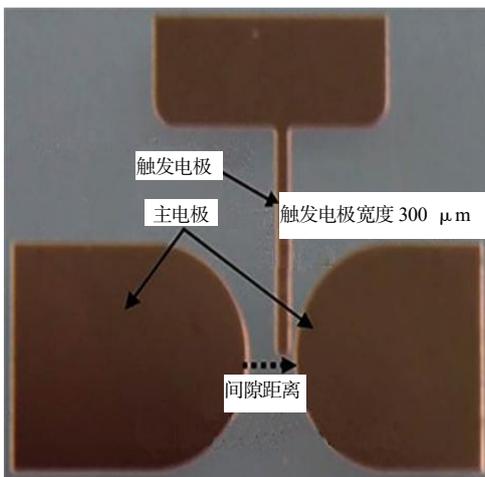


图 9 平面三电极开关实物图^[16]

Fig.9 Physical diagram of planar three electrode switch

相比冷阴极触发管，其通过在绝缘介质上沉积微米厚度的二维金属电极代替冷阴极触发管的三维半球形电极，实现开关的平面化。

和单触发开关相比，平面三电极开关可以多次使用，当前主要是工作的稳定性和可靠性仍需提升。一方面是由于平面三电极开关工作环境暴露在空气中，工作气氛不稳定，电极易受温度、湿度、污染物等影响。另一方面相比冷阴极触发管 500 次以上的工作寿命，平面三电极开关的寿命较短（几十次左右），工作电压或击穿电压不稳定，这限制了其进一步应用。当前，研究人员正通过采取封闭式结构^[17]、惰性气体保护、耐烧蚀的电极材料等方法来解决以上问题，

如若提高平面三电极开关的使用寿命和可靠性，平面三电极开关将很有可能取代冷阴极触发管。

2.4 爆炸箔起爆器

2.4.1 爆炸箔芯片及起爆器

爆炸箔起爆器的核心组件是爆炸箔芯片，爆炸箔芯片的设计和制备工艺经历了从手工或机器组装工艺向硅半导体工艺、微机电系统工艺（Micro-Electro-Mechanical System, MEMS）、低温共烧陶瓷工艺（Low Temperature Cofired Ceramic, LTCC）和印制电路板工艺（Printed Circuit Board, PCB）的发展历程。爆炸箔起爆器实物图如图 10 所示。

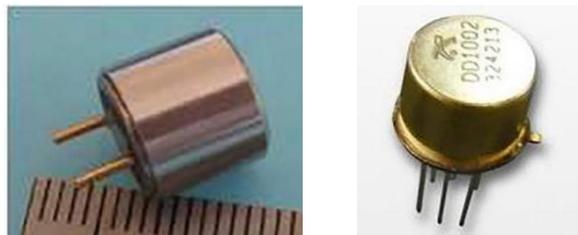


图 10 爆炸箔起爆器实物图^[18-19]

Fig.10 Physical diagram of exploding foil initiator

相比传统手工组装分立组件，先进工艺的采用实现了爆炸箔芯片的批量、一体化集成制备，同时极大地提高了芯片的成品率，促进了爆炸箔起爆器的低成本化。近年来，基于 PCB 工艺的爆炸箔芯片，由于工艺和材料极其成熟，相较 MEMS 工艺和 LTCC 工艺具有明显的成本优势^[20]。PCB 工艺相比 MEMS 工艺在材料和工艺成本都明显下降，其劣势在于对微米、纳米量级尺寸的控制能力较弱。

2.4.2 开关集成爆炸箔芯片及起爆器

近几年来，通过将高压开关和爆炸箔芯片一体化集成制备，缩短了工艺流程，有效降低了材料和生产成本。同时，开关和爆炸箔芯片集成缩短了回路长度，有利于降低发火能量，促进爆炸箔起爆器的低能化。开关集成爆炸箔芯片根据高压开关的种类可以分为 2 类：单触发开关集成爆炸箔芯片和平面三电极开关集成爆炸箔芯片。

2005 年，Baginski 等申请了平面三电极开关集成爆炸箔起爆器的专利，并以平面三电极开关集成爆炸箔起爆器为基础提出了全集成 CDU 的构想。国内，陕西应用物理化学研究所、北京理工大学、南京理工大学等基于 MEMS、LTCC、PCB 等多种工艺开展了

多类高压开关和爆炸箔芯片的集成设计和制备,包括基于单触发开关集成爆炸箔芯片、平面三电极开关集成爆炸箔芯片等。

美国第60届引信年会美国海军报道了集成击穿开关的爆炸箔起爆器^[21-22],如图11所示。国内周密等^[23]为降低冲击片雷管的体积和成本,在陶瓷基板的正面和背面分别制备爆炸桥箔和高压平面开关,经组装制备冲击片雷管,如图12所示。试验结果表明该集成平面三电极开关的冲击片雷管与使用火花隙分立开关的冲击片雷管放电参数基本相同。

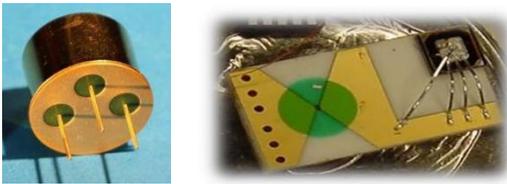


图11 美国第60届引信年会报道的开关集成芯片及起爆器
Fig.11 Switch integrated chip and initiator reported at the 60th Fuze Annual Conference



图12 集成平面三电极开关的冲击片雷管实物图
Fig.12 Physical diagram of exploding foil initiator with integrated planar three-electrode switch

韩克华等^[24]采用磁控溅射等工艺制备了微爆炸桥箔平面放电开关集成爆炸箔芯片,如图13所示,并在此基础上封装得到开关集成爆炸箔起爆器。发火试验结果表明该开关集成爆炸箔起爆器50%发火电压为1.191 kV/0.2 μ F,99%发火电压为1.269 kV/0.2 μ F。

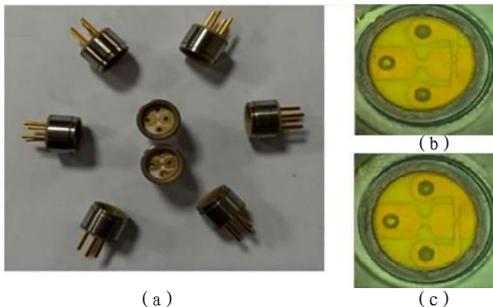


图13 集成微爆炸桥箔平面放电开关的爆炸箔起爆器
Fig.13 Exploding foil initiator integrated with micro-explosion bridge foil planar switch

从平面高压开关、爆炸箔起爆器以及开关集成爆

炸箔起爆器的发展现状和趋势来看, MEMS 技术今后将在全电子安保装置及引信中起到关键作用。褚恩义等^[25]认为 MEMS 工艺开创了火工系统低成本制造的新纪元,未来火工品的制备技术必须具备良好的 MEMS 工艺系统兼容性。

3 其他影响因素

3.1 应用场景

全电子引信的搭载平台和作战对象不同,对全电子引信的性能要求也不同,这对引信在高过载、高温、强电磁辐射等恶劣工作环境下的安全性和可靠性提出了巨大挑战。因此,直列式引信必须采取相关措施满足力学性能、环境适应性、电磁兼容性等方面的指标要求。随着全电子引信元器件的逐渐小型化、固态化,引信内部自身的电磁环境也变得复杂。另一方面,当前作战战场环境将更加复杂,伴随着新型的电磁脉冲武器、无人机携带的微波武器等出现,引信面对的电磁环境将更加严峻,因此引信的抗电磁设计必须加强^[26-27]。

此外,近年来随着对打击地下掩体、工事和航母的作战需求愈发强烈,对全电子引信在硬目标侵彻过程中的抗过载能力和生存能力提出了极高的要求。研究人员必须从元器件焊接方式、封装和灌封工艺、元器件的布局、结构设计和保护等方面进行抗过载设计,并且依靠先进材料和工艺的支持,这无疑增加了技术成本。

3.2 国产化要求

全电子引信中电子元器件的全国产化对于维护国防安全具有重要意义。国产化包括材料、器件以及相应制备工艺的国产化,材料的国产化和规模化生产是低成本的前提。对于短时间未能实现国产化的材料,应寻找可替代材料。

目前,虽然在高压电容、开关、高压变压器等重要元器件上已经有了很大发展,但是部分低成本元器件还未实现广泛应用。另一方面,根据文献报告国外 ESAD 的发火能量小于 1J (~0.5 J),这表明在高性

能脉冲功率电容等器件领域可能还和国外存在一定差距。

全电子引信中的安保逻辑控制模块是以 MCU、CPLD 以及 FPGA 为核心的电子电路,当前国内在先进半导体芯片制造领域与国外存在一定差距,较低的成品率也导致了成本的上升。除此之外,在 ESAD 用高性能陶瓷材料、光刻胶材料、绝缘材料等领域,仍需要加强国产化研究。

3.3 可靠性及冗余要求

对于导弹等高价弹药而言,为了保证起爆的可靠性以及引信的安全性,成本的考虑处于其次,要求起爆序列冗余设计,而起爆序列中的高压变压器、高压开关、高压电容、爆轰箔起爆器本身就是 ESAD 中的高成本元器件。例如,ESAD 在美空军 AAM、AGM 等中已经广泛应用,而与之相反,陆军武器一方面对成本的限制比较严格,同时陆军引信的功能相比导弹引信功能较少,且多为低价值弹药,因此陆军对于低成本 ESAD 的需求更加紧迫,美陆军将低成本 ESAD 以及多点低成本 ESAD 作为其发展的重要方向之一。

3.4 先进起爆技术的需求

智能化、新概念毁伤或战斗部技术的发展往往需要多点起爆系统的支持。伴随着 ESAD 的不断成熟,其在分布式、组网式(协作式)、定向和多模等多点起爆系统或装置中的应用将会愈加广泛。直列式多点起爆系统的应用是低成本化的驱动力之一,相比于传统基于导爆索网络的多点起爆装置,直列式起爆装置在安全性、结构复杂度、同步性、可检测性等领域都具有较大优势。美军在多点直列式起爆装置领域研究较多,包括定向破片战斗部、多模聚能战斗部等领域。

基于 ESAD 的多点起爆系统,起爆点数进一步增加,装置体积进一步增大,对高压转化的能力要求进一步提升。除此之外,对多点爆炸箔起爆器的低阻抗连接、多路高压安全控制与隔离提出了更高要求。多种因素综合影响导致多点起爆系统的成本进一步提升,因此,实现 ESAD 的低成本化也会进一步推动多点起爆系统的应用。

3.5 低成本与小型化(集成化)、低能化之间的关系

当前,全电子安保装置的发展趋势是小型化(集

成化)、低能化和低成本。小型化或集成化减小了器件尺寸,降低了材料成本,都有利于推进其低成本化发展,其前提是以 MEMS 技术为代表的材料、工艺技术的成熟和批量化生产能力。同时,ESAD 小型化的过程也是其低能化的发展过程,爆炸箔起爆器的低能化降低了对高压元器件的性能要求,例如高压转换单元的升压能力、高压电容和高压开关的工作条件,在降低成本的同时又提高了自身工作的安全性。

除此之外,当前虽然通过采用部分较低性能的低成本器件等手段降低 ESAD 的成本,但是又不可避免地对体积或发火能量等方面造成了影响,反而对 ESAD 元器件提出更高指标要求。

4 结论

低成本的根本影响因素是材料成本和工艺成熟度,低成本化离不开先进工艺的支持。低成本不应以牺牲元器件的可靠性和安全性为代价,而是采用新原理、新技术的新型低成本器件。先进且成熟的制备工艺除了有利于 ESAD 的低成本发展,同时也有利于 ESAD 的小型化、集成化以及低能化。随着国内相关工艺的愈发成熟,依托先进工艺进一步实现 ESAD 的低成本和小型化是今后的重点发展方向,这对于 ESAD 在分布式引信、战斗部多点定向和多模起爆、抗高过载领域中的应用意义重大。

参考文献:

- [1] Alexander W R, Joshua M S, Glass S J, et al. Planar LTCC transformers for high voltage flyback converters[R]. SAND 2007-2 591, 2007.
- [2] Joshua M S, David A, George S, et al. Planar LTCC transformers for high voltage fly back converters part II [R]. SAND 2009-0434, 2009.
- [3] Alexander W R, Joshua M S, Glass S J, et al. Planar LTCC transformers for high-voltage flyback converters[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technology, 2010, 33(2): 359-372.

- [4] Cao C. High voltage fireset component behavior at elevated temperatures [C]// 64th Annual NDIA Fuze Conference, 2021.
- [5] Shane C, Adam C. Advanced fuzing technology Sandia national laboratories[R]. SAND 2020-7592C, 2020.
- [6] Michael D. Naval surface warfare center Dahlgren division[R]. NSWCDD/PN-22/00081, 2022.
- [7] 2021 选型指南火炬牌军用电容器[Z]. 福建: 福建火炬电子科技股份有限公司, 2021.
- [8] Shane C, Adam C. Advanced fuzing technology Sandia national laboratories[C]//63th Annual NDIA Fuze Conference, 2020.
- [9] 韩克华, 任西, 周密, 等. 高压脉冲电容器性能参数优选实验方法研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(3): 22-25.
- [10] O'Brien D W, Druce R L, Johnson G W, et al. Method and system for making integrated solid-state firesets and detonators: US, 5731538A[P]. 1998-03-24.
- [11] Amanda S. Shock testing of 3D printed multi-material circuits[C]//60th Annual Fuze Conference, 2017.
- [12] 覃新, 朱朋, 徐聪, 等. 基于 MOS 控制晶闸管的高压电容放电特性[J]. 含能材料, 2019, 27(5): 417-425.
- [13] 刘鹏, 汪柯, 朱朋, 等. 低成本爆炸箔起爆系统技术研究[J]. 爆破器材, 2020, 49(4): 13-20.
- [14] Xu C, Zhu P, Zhang Q, et al. A shock-induced pulsed power switch utilizing electro-explosion of exploding bridge wire[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(10): 10 770-10 777.
- [15] 周镇威, 杨卓青, 丁桂甫, 等. 微型平面式气体火花开关的设计和制作[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(5): 1 256-1 260.
- [16] Lv J, Zeng Q, Li M. Metal foil gap switch and its electrical properties[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84(4): 150-154.
- [17] 杨智, 朱朋, 初青芸, 等. PCB 基密封并联平面触发火花隙开关的设计及性能[J]. 含能材料, 2021, 29(6): 543-551.
- [18] Perrin M. European LEEFI based fireset and ESAD[C]//59th Annual NDIA Fuze Conference, 2016.
- [19] Pray D. Exploding foil initiator development[C]//64th Annual NDIA Fuze Conference, 2021.
- [20] Yang Z, Zhu P, Chu Q Y, et al. A micro-chip exploding foil initiator based on printed circuit board technology[J]. Defence Technology, 2022, 18(8): 1 435-1 444.
- [21] Jolly G. Fuze science and technology[C]//60th Annual NDIA Fuze Conference, 2017.
- [22] Cincinnati, O H. Navy S&T Strategy[C]//60th Annual NDIA Fuze Conference, 2017.
- [23] 周密, 同红海, 任西, 等. 集成高压平面开关的冲击片雷管设计研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(4): 626-630.
- [24] Han K H, Zhao W J, Zeng X, et al. Enhanced performance of series micro-exploding bridge planar discharge switch integrated with exploding foil[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(3): 3 375-3 384.
- [25] 褚恩义, 贺爱锋, 任西, 等. 火工品集成技术的发展机遇与途径[J]. 含能材料, 2023, 23(3): 205-207.
- [26] 汪仪林, 马秋华. 电和电磁环境对引信全电子安全系统的影响[J]. 探测与控制学报, 2022, 44(3): 1-10.
- [27] 陈瑾, 李明, 彭志凌, 夏禹. 强电磁干扰下全电子引信通信孔的可靠性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2022, 43(8): 135-139.