

文章编号:1006-9941(2022)01-0078-17

微起爆系统用 MEMS 安全保险装置研究现状与展望

阚文星,褚恩义,刘卫,任炜,任小明

(陕西应用物理化学研究所 应用物理化学重点实验室, 陕西 西安 710061)

摘要: 火工品是武器系统的首发元件,火工品的安全性和可靠性直接影响着武器系统的安全性和可靠性。为了满足弹药微型化、集成化的发展要求,需要将引信与火工品进一步融合,形成具有高安全性、高可靠性、多功能一体化集成特点的微起爆系统,微机电系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)安全与解除保险装置是其中的关键技术之一。总结了近年来微小型引信与微起爆系统中 MEMS 安全与解除保险装置的发展概况,从装置材料、装置尺寸、驱动原理、驱动条件、输出效能、应用平台等多个方面进行对比分析,并结合火工品起爆系统结构、尺寸情况,提出“内置 MEMS 安保装置”的作用原理。这种具有内置安全保险装置的 MEMS 火工品符合下一代火工品的发展要求,也是火工品未来的主要发展方向之一。

关键词: 微机电系统;火工品;微起爆系统;安全保险装置**中图分类号:** TJ45; TJ5**文献标志码:** A**DOI:**10.11943/CJEM2021084

1 引言

火工品是指装有点火药、起爆药、烟火药剂、炸药等含能材料,受外界刺激后产生燃烧或爆炸,以引燃火药、引爆炸药或做机械功的一次性使用的元器件和装置的总称。火工品是武器系统的首发元件和最敏感部件,火工品的安全性、可靠性直接影响武器系统的安全性、可靠性。火工品技术不只受到武器系统发展需求的牵引,也对武器系统的发展有着推动作用。

受武器系统微型化、智能化等发展需求,结合微机电系统(MEMS)技术,火工品的主要发展方向是以信息化、集成化和微型化为主要特点的第四代火工品,即 MEMS 火工品。MEMS 火工品采用微机电的设计思想和制造技术,将微结构换能元、微装药组件、微含能器件、控制电路、微作动机构等集成在一片基片上,形成具有功能可选择、信息可识别和内置安保机构的火工品或火工芯片^[1-2]。为了保证微起爆系统中的微结构

换能元与下一级起爆药之间的安全性,需要在两者之间设置安全保险装置,通过安保装置的动作实现微起爆系统的隔爆与传爆功能。

利用 MEMS 技术在微纳米级的高制造精度, MEMS 安全与解除保险装置(MEMS S&A devices)的概念应运而生。MEMS 安保装置是研究 MEMS 火工品需要解决的关键技术之一,是保障 MEMS 火工品安全性和可靠性的关键部件。火工品内嵌 MEMS 安保装置是在引信 MEMS 安保装置的基础上将 MEMS 安保装置与火工品更进一步进行集成,实现火工品与引信功能的融合发展。

作为新一代微起爆系统的关键组成部分, MEMS 安全保险装置的发展将对其功能集成、安全控制设计产生重大影响。针对 MEMS 集成火工品序列的安全性问题,本文从现有的 MEMS 安保装置的制造材料、装置尺寸、驱动原理、驱动条件、输出效能、应用平台等多个方面进行了归纳整理,并探讨了其与火工品的集成与发展重点方向。

2 基于不同驱动原理的 MEMS 安保装置

MEMS 工艺技术主要解决安保装置小型化、集成化制造问题,但是其应用原理特别是驱动方式应与典

收稿日期:2021-04-12;修回日期:2021-05-10

网络出版日期:2021-11-11

作者简介:阚文星(1997-),男,硕士研究生,主要从事先进火工品技术研究。e-mail:1044298589@qq.com

通信联系人:任炜(1982-),男,研究员,主要从事高新火工品技术研究。e-mail:rw0192@163.com

引用本文: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.

型弹药平台环境力相匹配或采取专门设计。MEMS 安保装置按照解除保险的微作动机构的不同可分为机械环境力驱动、火药力驱动、电磁力驱动、电热力驱动和压电原理驱动等。微作动机构是指 MEMS 安保装置中使用的作动器,主要为安保装置的隔板提供推力或位移。微作动机构是 MEMS 安保装置中重要组成部分,担负着安保装置内的能量转换、运动和力的传递以及对系统信息进行响应等功能^[2]。

2.1 机械环境力驱动

机械环境力驱动的 MEMS 安保装置,保险滑块通过感应环境力,如后坐力、离心力,当环境力满足预设条件后,保险滑块移动至发火位置,将装置由安全状态转变为发火状态。

美国陆军武器研发中心 (ARDEC) 的 Charles H. Robinson^[3-4] 在 2001 年提出了一种由惯性力驱动的 MEMS 安保装置 (图 1),并将其应用于美国理想单兵武器 (OICW) 20 mm 高爆榴弹定距空炸引信中^[5]。该装置的尺寸为 12 mm×15 mm×0.8 mm。该装置由后坐机构、旋转机构及延时机构组成。其中后坐机构与销钉机构相互形成垂直布局,可实现联锁功能。在运输或储存状态下,弹簧力将 MEMS 安保装置保持在安全的位置,从而避免误操作造成的解除保险;当武器发射时,后坐滑块将在惯性力的作用下向下移动,解除对销滑块的限制。在适当的离心力作用下,旋转滑块将移动并完成爆炸序列的校准。为了扩大炮口的安全距离,在该装置中还引入了由曲折槽组成的延时机构。

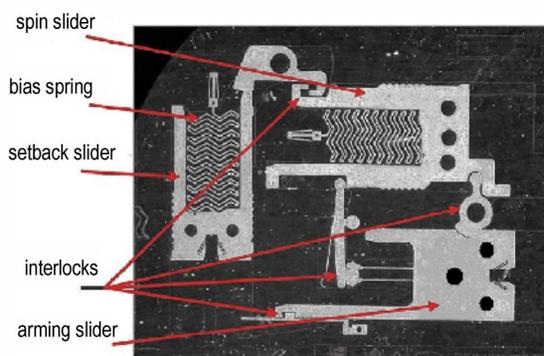


图 1 惯性力驱动的安保装置^[3-4]

Fig.1 Inertial driven MEMS S&A device^[3-4]

Charles H. Robinson^[3-4] 采用 LIGA 技术制备了此 MEMS 安保装置的所有部件,最后通过微组装平台组装。由于需要对各部件进行微组装,生产效率将大大降低;随着装配误差的增加,各器件的性能一致性难以保证^[6-7]。

为了降低制造难度, Jihun Jeong^[8-9] 采用湿法刻蚀

制备了一种具有金属结构并具备惯性延迟功能的 MEMS 安保装置,如图 2 所示。该装置由不锈钢框架、后坐保险机构、离心保险机构、齿轮卡盘减速机构以及隔板组成。当武器发射时,后坐力将驱动惯性滑块向下移动,解除第一道保险。由于惯性滑块的底部被设计成一个圆形,这个部件最终会卡入上部外壳,这将防止惯性锁返回安全模式。之后,在离心力的作用下旋转锁被移开,解除第二道保险。在解除后坐锁和自旋转锁限制的情况下,隔板可以在齿轮卡盘减速机构的控制下移动,最终使爆炸序列对齐,实现延迟功能。该 MEMS 安保装置不仅可以应用于大口徑火炮中,还可以应用于一般小口径弹药^[9]。

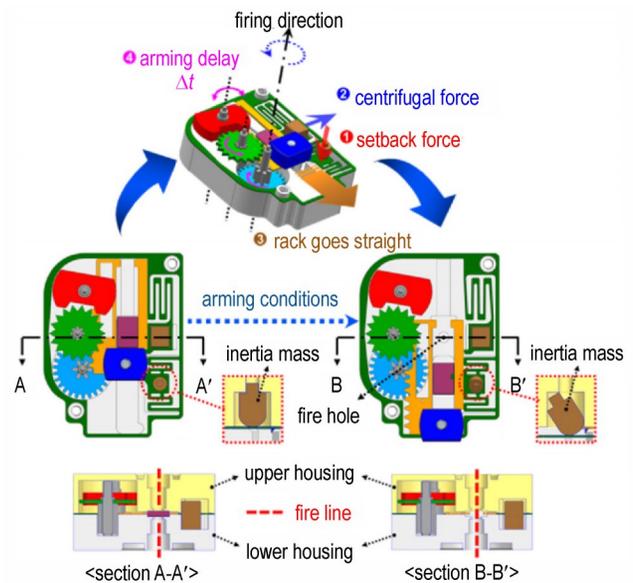


图 2 惯性力驱动的安保装置^[8-9]

Fig.2 Inertial driven MEMS S&A device^[8-9]

为了解决 UV-LIGA 技术制造中的误差问题, YU QIN 等^[10] 提出了一种由慢走丝电火花线切割加工技术 (low-speed wire electrical discharge machining, EDM) 制造的 MEMS 安保装置 (13.3 mm×7 mm×0.65 mm), 如图 3 所示。该 MEMS 安保装置主要用于中大型榴弹中。当武器正常发射时,在后坐力的作用下,后坐滑块克服微弹簧的弹力以及滑块与框架之间的摩擦力向下运动,直到头锁被盒式插销锁定,第一道保险解除;当弹丸高速旋转时,安保装置将会受到离心力的作用,当离心力达到阈值后,旋转锁在离心力的作用下逆时针旋转特定角度,解除对隔爆滑块的第一个限制;当弹丸飞行距离超过炮口安全距离后,电推杆在延迟电路的控制下运行,剪断剪切销,解除对隔爆滑块的第二个限制,在持续不断的离心力作用下隔爆滑块继续向右移

动,直到被盒式插销锁定,解除安保护装置的第二道保险。此时系统中的爆炸序列对正,武器系统处于待发状态。相比于UV-LIGA技术,采用慢走丝电火花线切割加工技术制造的MEMS安保护装置加工成本更低,并很大程度上提高了器件加工精度和成品率。

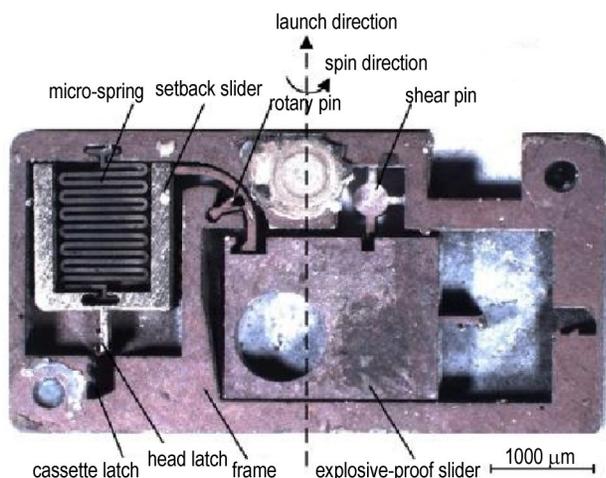


图3 EDM技术制造的MEMS安保护装置^[10]

Fig.3 MEMS S&A device manufactured by EDM^[10]

2012年,Wang Wei^[11]等设计了一种用于旋转弹的MEMS安保护装置,其设计图如图4所示。MEMS安保护装置由后锁、保险滑块和弹簧锁构成,这些结构都可在基板上运动,并且受限制于基板上的框架。通过两个机械锁控制保险滑块的运动,机械锁的作动由武器的后坐加速度和旋转离心力依次控制。后坐加速度的阈值被设定为12000 g,从而防止引信因冲击、碰撞等意外动作而解保;如果后坐加速度或旋转离心力不超过阈值,或它们作用的顺序错误,保险滑块都不会移动。

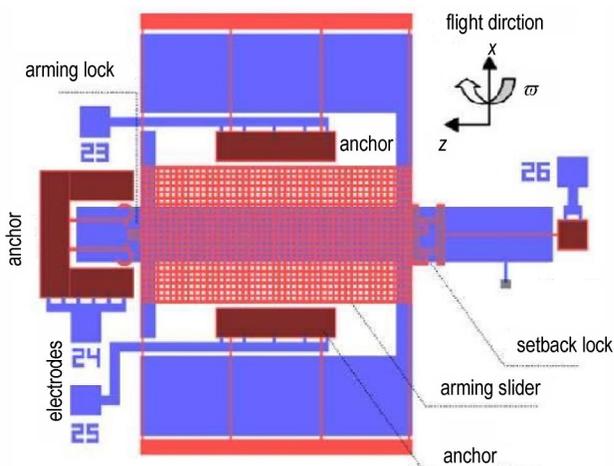
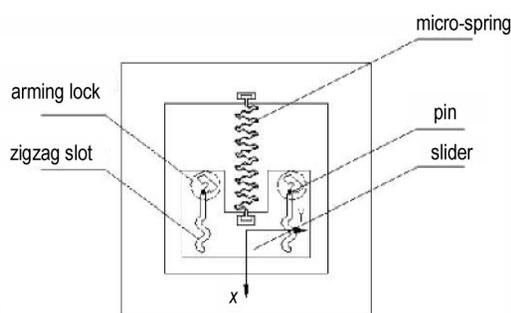


图4 用于旋转弹的MEMS安保护装置设计图^[11]

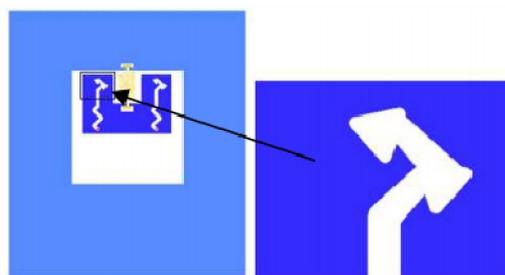
Fig.4 Layout design for MEMS S&A device^[11]

可移动保险滑块需要有一定的厚度才可成功阻隔爆轰能力,并且滑块的侧面具有较高的深宽比,因此Wang Wei^[11]等选择了北京大学微/纳米制造技术国家重点实验室的体硅工艺(bulk silicon process)制造该器件。

2014年,Wang Fufu等^[12]提出了一种用于MEMS安保护装置的新型锁定机构,如图5所示。这种带有新型锁定机构的MEMS安保护装置与Wang^[13]于2013年提出的装置相比,高度减少了6 mm。通过集成技术将滑块与新型锁定机构制作为一个整体,这样可以保证滑块在发射过载条件下能顺利滑到底部,并且在过载减弱或消失后滑块不会被拉回。



a. MEMS S&A device



b. locking mechanism

图5 MEMS安保护装置及锁定机构^[12]

Fig.5 MEMS S&A device and a novel locking mechanism^[12]

2016年,史春景等^[14]设计了一种可用于子母弹的MEMS安保护装置,如图6所示,该装置可在后坐力、离心力和抛撒力三种环境力下作用。当弹丸发射时,由于加速度的存在,安保护装置受到后坐力的作用,后坐滑块向下运动并被闭锁机构锁死在基板底端;弹丸飞行时,由于弹丸的旋转产生离心力,当离心力达到设定值后,转销逆时针旋转解除对隔爆滑块的第一道限制。同时在离心力的作用下,离心滑块克服阻力向基板右端运动。当母弹开始抛撒后,拨销在抛撒力的作用下克服S型悬臂梁的拉力进而可以解除对隔爆滑块的第二道限制。此时隔爆滑块可因离心力的作用向右运动

到发火位置,爆炸序列对正。

史春景等^[14]利用 ADAMS 软件对设计的 MEMS 安保险装置进行了仿真分析,结果表明,装置可以在后坐力、离心力和抛撒力的作用下可靠运作,并且在勤务处理时装置安全可靠。

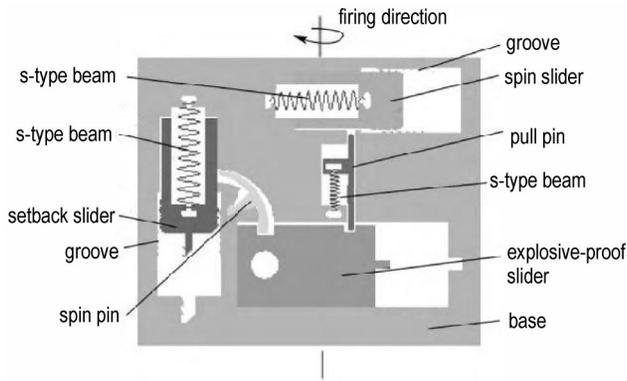


图 6 3 种环境力下作用的 MEMS 安保险装置^[14]
Fig.6 MEMS S&A device under triple environment forces^[14]

2017 年, Dakui Wang 等^[15]提出了一种适用于小口径火炮的 MEMS 安保险装置,如图 7 所示。该装置有两个独立的保险机构,一个是离心保险机构(the centrifugal assurance mechanism),另一个为由电推器(electric thruster)推动的锁定簧片(latching reed)。在安全状态下,两种保险机构将隔爆滑块(explosive-proof slider)锁定在安全位置,传爆序列被隔断;接收到发射命令后,在离心力的作用下,离心保险机构解除对隔爆滑块的限制,随后电推器将锁定簧片向下推动。此时隔爆滑块可以克服微弹簧的弹力,移动 2 mm 到发火位置,传爆序列对正,完成解保动作。

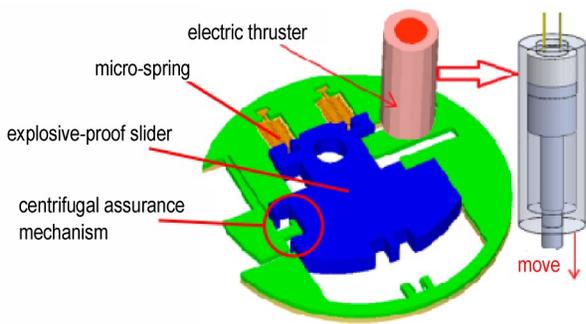


图 7 适用于小口径火炮的 MEMS 安保险装置^[15]
Fig.7 A MEMS S&A device for small caliber projectile^[15]

2018 年,刘章等^[16]提出了一种硅基 MEMS 悬臂梁支撑的离心驱动隔离装置,如图 8 所示。该装置由隔爆滑块、悬臂梁支撑结构、卡头、卡锁、固定质量块

成。在安全状态下,隔爆滑块被电启动保险和后坐保险锁定在安全位置,爆炸序列被隔断;当处于发射环境时,电启动保险和后坐保险解除对滑块的限制,在离心力的作用下,悬臂梁结构发生弯曲,滑块克服悬臂梁的拉力向 y 方向运动,直到滑块的上端卡头锁定在卡槽中,完成解保动作,爆炸序列对正。

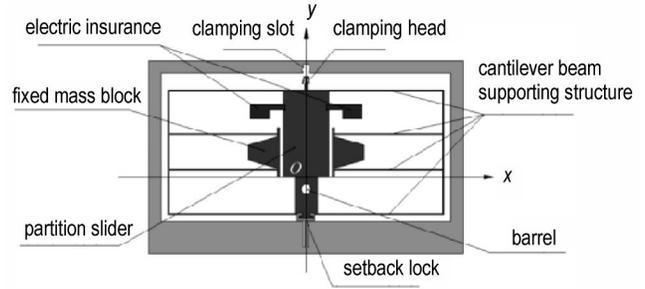


图 8 悬臂梁支撑的离心驱动隔离装置^[16]
Fig.8 Centrifugal drive isolation device supported by cantilever beam^[16]

机械环境力驱动的 MEMS 安保险装置大多是平行于弹轴放置,这使得在微传爆序列中产生的爆轰能量在传递时会改变方向造成能量的损失,甚至会导致无法引爆下一级装药进而造成“哑弹”现象;并且安保险装置中闭锁机构易发生塑性形变。

徐娜等^[17]为了解决上述问题,利用 UV-LIGA 技术制作了一种应用于中大口径榴弹且垂直于弹轴放置的 MEMS 安保险装置用离心隔爆滑块闭锁机构。该闭锁机构由 L 型闭锁梁、锁头、刚性定位块组成,如图 9 所示。该闭锁机构具有闭锁功能以及定位功能,可以在弹丸离心力的作用下实现可靠闭锁,并且 L 型闭锁梁不发生塑性变形。

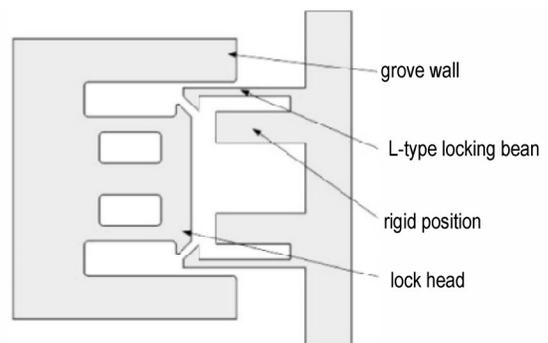


图 9 闭锁机构结构示意图^[17]
Fig.9 Structure of blocking mechanism^[17]

目前大多数机械环境力驱动的 MEMS 安保险装置基于金属基板(镍或铜),由于金属材料具有良好的防爆性能^[18],这些金属装置可以大大提高武器系统的安

全性。但是此类金属装置的制造工艺(LIGA或EFAB)成本昂贵,且制造精度不理想^[6-7]。

2.2 火药力驱动

火药力驱动的MEMS安保装置通过烟火药剂产生高温高压气体推动装置内的滑块,使爆炸序列对正,装置由安全状态转变为发火状态。

2010年法国国家研究中心(CNRS)系统结构分析实验室(LAAS)^[19-20]提出了一种分层式PyroMEMS安保装置,如图10所示。顶层是整体装置的逻辑电路层(8.21 mm厚);中间层为由烟火驱动器和微起爆器组成的硅基安全起爆器(400 μm厚);底层为机械解保模块(3 mm厚)。安全状态下,机械解保模块中的惯性锁将隔板滑块固定,爆炸序列被隔断;接收到发火指令后,惯性锁因环境力(后坐力或离心力)被移开,起爆器被触发并产生气体,气体推动隔板滑块使爆炸序列对正。

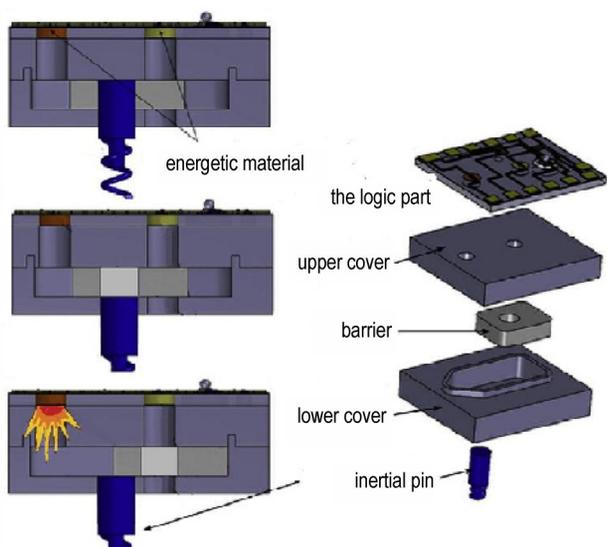


图10 CNRS-LAAS提出PyroMEMS安保装置的发火过程及分层示意图^[19-20]

Fig.10 Schematic diagram of the ignition process and layering of the PyroMEMS S&A device proposed by CNRS-LAAS^[19-20]

该装置通过低压化学气相沉积(low-pressure chemical vapor deposition)、反应离子刻蚀(reactive ion etching)、等离子体增强化学气相沉积(plasma-enhanced chemical vapor deposition)和深反应离子刻蚀(deep reactive ion etching)制作而成。装置整体基于硅基底,整体尺寸为8.4 mm×7.4 mm×3 mm(不含电路层),触发起爆器的电流为53 mA。为了降低热损失,起爆器与敏感药剂间仅用400 nm SiO₂薄膜隔开,这增大了制造工艺的难度。

南京理工大学的朱朋等^[21]在2018年提出了一种由平面点火器组成的PyroMEMS安保装置,如图11所示。该装置由三层构成:LTCC(Low-Temperature Co-fired Ceramic,低温共烧陶瓷)基底,安保装置层(safe&arm layer)和输出装药层(output charge layer)。在安全状态下,安保装置层中的传火药B/KNO₃与LTCC基底中的点火药Si/Pb₃O₄处于错位位置,爆炸序列被隔断,保证了点火器的意外发火不会导致输出装药层的意外发火。当接收到解保命令后,基底中的点火药Si/Pb₃O₄及安保装置层中的产气药C₆H₂(NO₂)₃OK/KClO₄被先后点燃,产气药产生的气体使固定滑块的两个固态梁断裂,气体将滑块推动到发火位置后,滑块被弹性梁固定,使爆炸序列对正;再次接收到发火命令后,安保装置层中的传火药B/KNO₃被引燃,进而触发输出装药层中的B/KNO₃,完成发火。

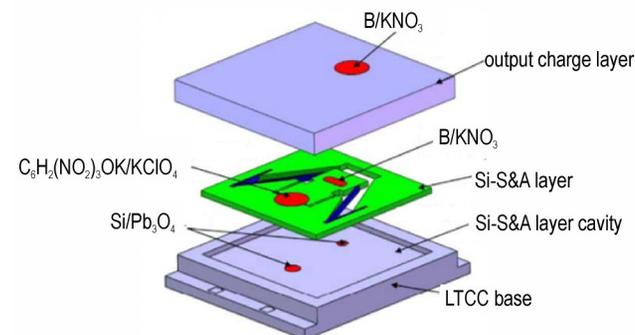


图11 PyroMEMS安保装置^[21]

Fig.11 PyroMEMS S&A device^[21]

2018年,南京理工大学的侯刚^[22]等设计了一种基于硅双固态梁烟火驱动的安保装置。所设计的硅双固态梁烟火驱动安保装置为错位式安保装置,既能保证在未解除保险状态下传爆序列的错位隔断,保证了隔爆的安全可靠,又能在接收到解除保险信号后,通过激发含能药剂燃烧分解产生的气体作为动力来实现解除保险的功能。该安保装置由点火电路层(ignition circuit layer)、输入装药层(input charge layer)、安保装置层(safety & arming layer)和输出装药层(output charge layer)组成,如图12所示。该装置的工作过程与上述朱朋提出的PyroMEMS安保装置的工作过程相似。该装置的产气药使用质量配比为1:1的苦味酸钾/高氯酸钾,使用40 V、40 μF的电容放电激发,产生的气体可驱动滑块产生2 mm的位移。

2016年,李国中^[23]提出了一种适用于小口径弹药的微小型火药驱动器,如图13所示。当武器处于待发状态时,微小型火工作动器内部的滑动销插入隔爆

滑块的凹槽内,将隔爆滑块锁定在安全位置;武器发射后,当满足预设条件时,微小型火工作动器点火并迅速燃烧产生压力,使火工作动器内部的滑动销向上运动,解除对隔爆滑块的限制,同时滑动销向上推动拨轮,驱动后续机构动作,直到运动到发火位置。该装置的体积仅为 $4.7\text{ mm}\times 4.7\text{ mm}\times 2\text{ mm}$,工作电压为 $4\sim 5\text{ V}$,并且可在 1.5 ms 内完成工作。

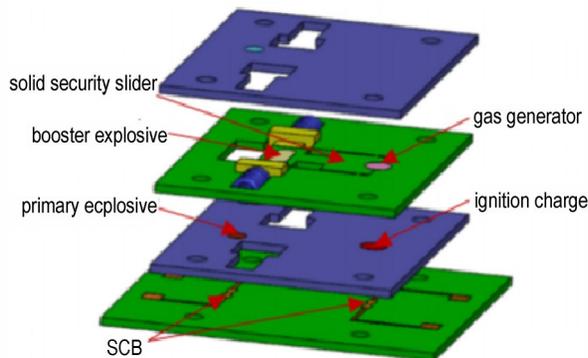


图 12 硅双固态梁烟火驱动安保险装置示意图^[22]

Fig.12 Schematic diagram of the PyroMEMS S&A device^[22]

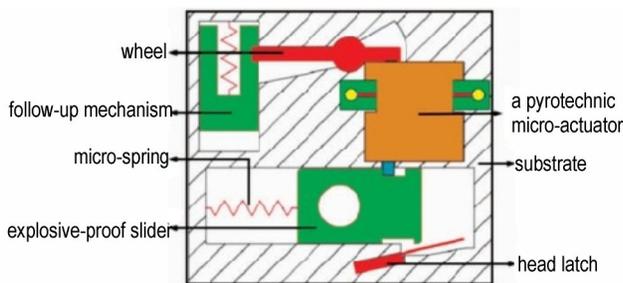


图 13 适用于小口径弹药的微小型火药驱动器结构图^[23]

Fig.13 Structure diagram of the pyrotechnic micro-actuator suitable for small-caliber ammunition^[23]

2021年,耿万钧等^[24]针对小口径弹药引信系统中依靠环境力解保的传统保险装置具有的适用性局限问题,提出了一种小口径弹药引信用滑块作动器,如图14所示。该滑块作动器由发火元件(ignition element)、发火药(pyrotechnic composition)、顶盖(cover)、滑块(slides)和底座(base)组成,整体尺寸为 $18\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。当武器弹药处于勤务处理情况时,滑块处于安全位置,将微型雷管(micro detonator)与受主装药(acceptor)隔断,可以防止微型雷管意外发火造成弹药意外发火;弹药发射后,发火元件点燃发火药,发火药产生的气体推动滑块到发火位置,使微型雷管与受主装药对正,弹药可正常发火。

该滑块作动器的止推、止退结构为过盈配合结构。在作用前,过盈结构可以将滑块锁定在安全位置;作用

后,气体产物对滑块的推力大于过盈结构的摩擦力时,滑块可被压缩变形“进入”过盈结构部分,滑块运动到发火位置后,过盈结构的摩擦力又可防止滑块重新“返回”安全位置。

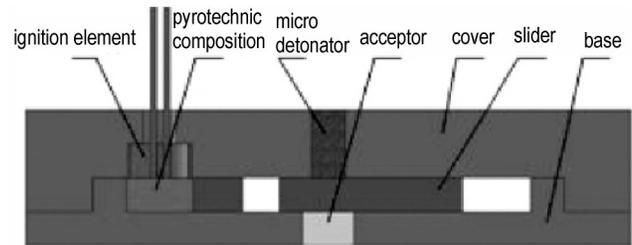


图 14 滑块作动器结构^[24]

Fig.14 Structure of the slider actuator^[24]

火药力驱动的安保险装置有如下优点:(1)与传统机械环境力驱动的 MEMS 安保险装置相比,火药力驱动的 MEMS 安保险装置中更多使用硅材料并采用 MEMS 技术制造,因此具有更小的体积和更轻的质量;(2)不受环境力约束;(3)小尺寸可实现大位移。但是由于微/纳含能材料的制备工艺与 MEMS 技术不兼容,通常在器件制造完成后才能进行含能材料的填充^[25-26]。

2.3 电磁力驱动

电磁力驱动的 MEMS 安保险装置通过装置内的电磁线圈产生电磁力使隔板滑块位移,解除保险,装置由安全状态转变为发火状态。

Walter H. Maurer^[27-28]在 2006 年提出了一种电磁驱动的 MEMS 安保险装置,如图 15 所示。该装置主要由预压弹簧、隔板、滑块和磁力锁组成。在发射状态下,传感器将获得武器速度和加速度的数据变化。当参数满足发火要求时,电磁线圈将被启动并将磁力锁拉出。在不受磁力锁限制的情况下,预压弹簧将隔板向下推动(约 $800\text{ }\mu\text{m}$),使爆炸序列对正。该装置的尺寸为 $12\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 0.8\text{ mm}$ 。

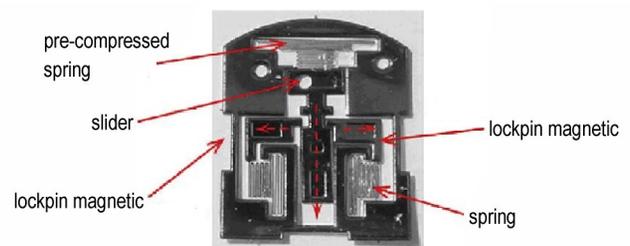


图 15 电磁驱动的安保险装置^[27-28]

Fig.15 Electro-magnetic MEMS S&A device^[27-28]

2009年,Zhanwen XI等^[29-30]提出了一种用于现代武器系统的电磁驱动 MEMS 安保险装置,如图 16 所示,装置的尺寸为 $20\text{ mm}\times 18\text{ mm}$ 。当武器发射时,引

信中的加速度传感器将对相应信号(the backseat impact acceleration environment)进行检测和处理, 如果信号特征满足设定条件, 控制单元将发出指令, 启动一侧锁销执行器, 锁销执行器与磁铁相互作用, 使侧锁销从安全槽中退出, 解除第一道保险。当第二个环境信号出现, 如弹丸离开炮口时信号被同样检测和处理, 如果第二个环境信号正确, 则控制电路将向另一边的锁定销执行器发送指令, 从而使锁销从其安全槽中退出。当引信定时电路设置的延迟时间结束时, 滑块被拉动 3 mm 到发火位置。当装置处于发火状态后, 锁销执行器被关闭, 两个锁销因弹簧弹力恢复到初始位置, 滑块被锁定在发火位置。(stainless steel)。高冲击环境下的测试结果表明, MEMS 安保装置的结构能保持稳定, 即 MEMS 安保装置的结构具有较强的抗冲击能力, 该 MEMS 安保装置在引信安全系统中具有较好的应用前景。

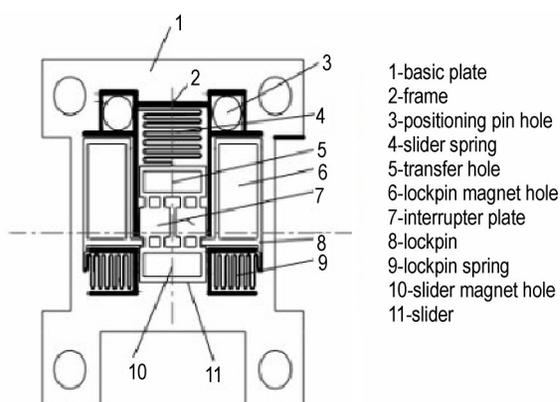


图 16 用于现代武器系统的电磁驱动 MEMS 安保装置^[29-30]
Fig.16 Electromagnetic driven MEMS S&A device for modern weapon system^[29-30]

在 Walter^[27-28]的研究基础上, 南京理工大学的吴志亮^[31]在 2010 年以某型小口径单兵武器采用的空炸榴弹为背景, 对 Walter 提出的装置进行了改进, 如图 17 所示。该装置与 Walter 提出的装置基本相同。不同之处在于, 吴志亮提出的 MEMS 安保装置的隔板由电磁线圈驱动(位移可达到 3 mm), 而不是释放预压缩弹簧。因此, 整个机构需要引入 3 个电磁线圈, 大大增加了封装尺寸。该装置的尺寸为 13 mm×13 mm×20 mm。

上述电磁驱动安保装置的体积过大, 不易于集成。为解决这一问题, 北京理工大学 Sun Yi 等^[32]设计了一种电磁线圈更小且输出力更大的新型电磁驱动安保装置, 如图 18 所示。该装置的尺寸为 15 mm×9 mm×0.5 mm。该电磁驱动安保装置具有更大的驱动电磁力

(17~40 mN), 更小的电磁线圈尺寸(2.5 mm×6 mm×0.8 mm), 更低的驱动电压(5 V)。

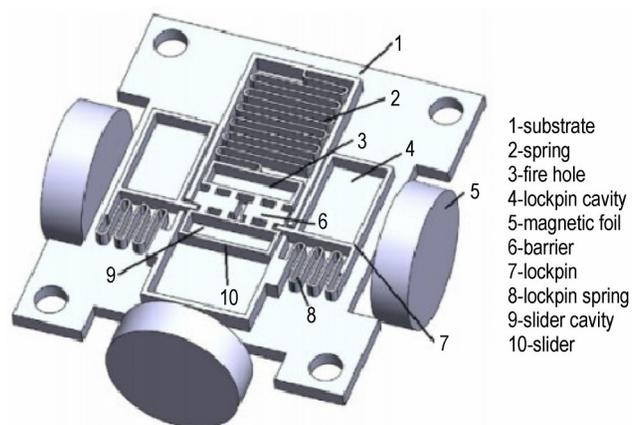


图 17 电磁驱动的安保装置^[31]
Fig.17 Electro-magnetic MEMS S&A device^[31]

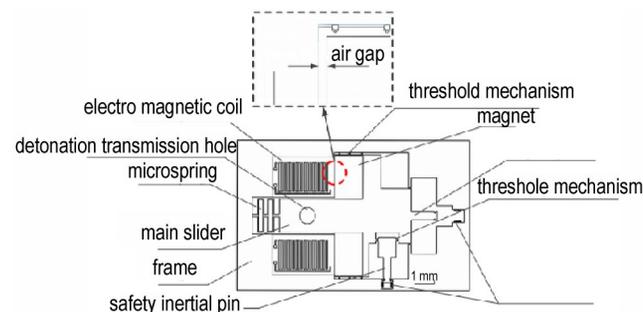


图 18 新型电磁驱动安保装置^[32]
Fig.18 Electro-magnetic MEMS S&A device^[32]

上述三种电磁力驱动的安保装置都需要在装置中引入电磁线圈, 这不能满足微起爆系统微型化的技术要求, 因此需要寻找一种新的电磁微驱动器, 对其进行结构优化或改良, 并尝试将其应用于 MEMS 安保装置中。

Xingdong Lv^[33]在 2015 年提出了一种大位移 MEMS 电磁驱动器, 如图 19 所示。该 MEMS 驱动器由折叠梁(由铝和二氧化硅构成)和一个可移动平台构成。当磁场垂直于折叠梁平面, 电流通过折叠梁时, 产生的洛伦兹力会驱动平台在 xy 平面上位移。洛伦兹力与磁场和驱动电流成正比, 因此可通过改变电流轻松地控制横向位移的大小。通过优化驱动器的结构, 当磁感应强度为 0.14 T, 电流为 8 mA 时, 实现了大于 55 μm 的横向位移。这种电磁驱动器体积更小, 但是输出位移有限, 无法满足安保装置的需求。

磁流变液(Magnetorheological Fluid, 简称 MR 流体)是一种独特的智能材料, 一般是微米级或纳米级的铁磁颗粒(一般为羰基铁颗粒)沉浸在非磁性载液中

所形成的悬浮液,同时还有少量的其他辅助溶液。根据载液的不同可以分为磁流变液和磁流变脂^[34]。

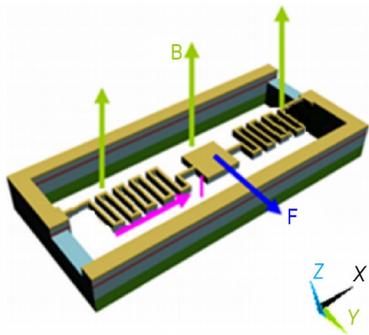


图 19 大位移 MEMS 电磁驱动器^[33]

Fig.19 MEMS electromagnetic actuator with large displacement^[33]

2018年, Jiajia Zheng 等^[35]提出了一种利用磁流变脂(magnetorheological grease, MRG)且适用于旋转弹的 MEMS 安保险装置,如图 20 所示。作为一种特殊的 MR 流体, MRG 能够在内径为 75~1000 μm 的微通道内畅通,并且还具有独特的磁流变效果和强大的沉降稳定性^[36]。利用磁流变脂的 MEMS 安保险装置的解保流程如图 21 所示。武器发射时,由于后坐力的作用,连接在弹簧上的后坐锁被释放,解除对旋转底座(rotator)的第一道保险;同时,永磁体(PM)切断剪切销并脱离,由于没有磁场的作用,MRG 在数毫秒内从半固态转变为液态。由于动态质量不平衡,旋转底座将以预旋转角度移动到与活塞的接触位置,如图 21b 所示。由于没有磁场的作用,MRG 在离心力的作用下通过收缩通道,活塞也可以开始运动,如图 21c 所示。在 MRG 完全流出壳体后,在弹体离心力的作用下,旋转底座将完全旋转至发火位置,此时,安保险装置完成解保,进入发火状态,如图 21d 所示。

在适当的弹丸旋转速度($>20000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$)下,该安保险装置的解保延迟时间可视为 MRG 流出通道所消耗的时间。因此,该安保险装置的解保延迟时间与弹体的旋转速度成反比。Jiajia Zheng 的研究表明,通过调整 MRG 粒子浓度、弹体旋转速度、通道直径等物理参数,可以有效地控制延迟时间。

为使引信或安保险装置能够通过外部供电电路和判断电路判别电磁保险的安全状态和解保状态,王海龙等^[37]提出了一种具有状态识别特征的引信用电磁拔销器,其主要由电源线、信号输入/输出部件、励磁线圈、动铁芯、保险销、衔铁等组成。该电磁拔销器在安全状态下,动铁芯在弹簧弹力的作用下,保险销伸出壳

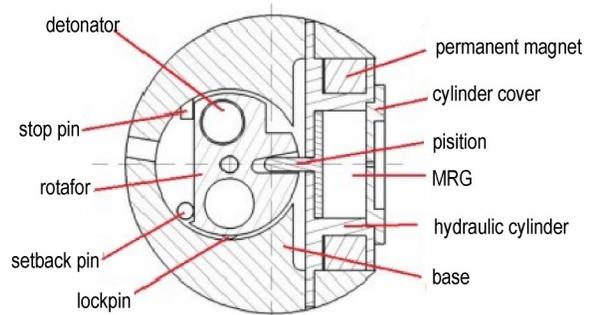


图 20 利用磁流变脂的 MEMS 安保险装置^[35]

Fig.20 MEMS S&A device using magnetorheological grease^[35]

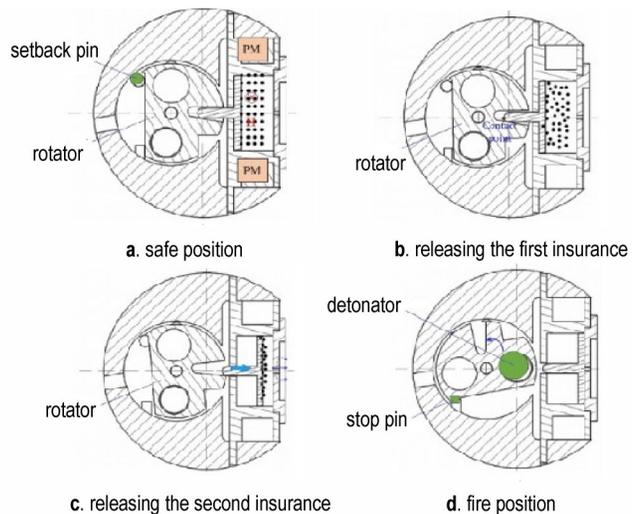


图 21 MRG MEMS 安保险装置的工作流程^[35]

Fig.21 Work flow of MRG MEMS S&A device^[35]

体,用于锁定安保险机构的滑块等。当电路接通后,励磁线圈中通过电流,产生电磁力将保险销吸附,使其克服弹簧弹力向上运动,直至保险销完全没入壳体,此时装置处于解锁状态。当弹药攻击异常时,引信指令接收处理模块将发出恢复指令,电磁拔销器断电,励磁线圈产生的电磁力消失,保险销因弹簧弹力重新返回到初始位置,装置恢复到安全状态。当加载的电压大于 28 V 时,电磁拔销器的最短响应时间为 3 ms。

磁力驱动的安保险装置几乎不受发射环境的影响,这可以很大程度地提高武器系统的环境适应性^[38-39]。但是这类安保险装置的缺点也非常明显:受驱动原理和基底材料的限制, LIGA 工艺是唯一可行的制造方法,这将提高生产成本;此外,系统中还需要引入电磁线圈,这会增加器件的整体尺寸^[6-7]。

2.4 电热力驱动

电热微作动器是基于材料的焦耳热效应和热膨胀原理进行工作的,是一种典型的电-热-机耦合系统^[40]。V 型电热微作动器的基本结构为两端固定在基底并且

呈V字型的悬臂梁,如图22所示。通常用V型电热微作动器的阵列形式并配有微杠杆,当电压施加在两端的锚点上,可实现大位移直线输出。

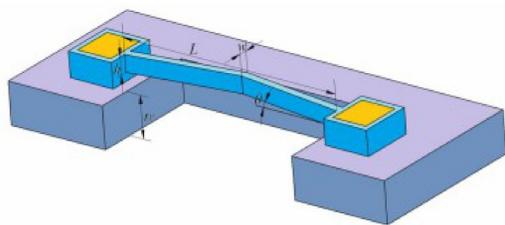


图22 V型电热微作动器示意图^[40]

Fig.22 V-shaped electro-thermal micro-actuator^[40]

2016年, Xiuyuan Li等^[41]提出了一种用于MEMS安安装置的线性高速电热微作动器,装置由微弹簧、隔板及四个带有微杠杆放大机构的V型电热作动器构成,微作动器芯片的面积为 19.20 mm^2 。其隔板从安全状态转变到发火状态的过程可分为四个子步骤,如图23所示。图23a为装置的初始(安全)状态,当检测到发射命令后,一个短时间的电压脉冲被施加在第一个作动器上(the first actuator),完成第一步运动(图23b);随后,其余三个作动器被一系列的电压脉冲激发,推动隔板到发火位置(图23c)。该高速电热微作动器可在 23 V 的电压下产生 5.27 mN 的输出力,并将隔板以 $35.66\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度推动 $500\text{ }\mu\text{m}$ 。通过DRIE(深反应离子蚀刻, Deep Reactive Ion Etching)技术将装置制作在绝缘硅(SOI, Silicon on Insulator)晶圆上,该晶圆具有 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的硅器件层, $4\text{ }\mu\text{m}$ 的二氧化硅掩埋层和 $430\text{ }\mu\text{m}$ 的硅衬底层,从而可以满足MEMS安安装置对驱动力和机械强度的要求。

西安交通大学的胡腾江^[42]于2017年提出了一种由4个电热微作动器及微杠杆组成的电热驱动安安装置,如图24所示。以空腔为中心将4个带有微杠杆的V型电热作动器轴对称地放置,这种布局不仅可以提高装置的输出性能,还便于形成连锁机构。在每个微杠杆的末端分别设计了四个滑块(每个滑块具有相同的齿和槽),通过与相邻作动器的接触,可以实现连锁的功能,从而形成隔断。当装置在高加速度情况下工作时,连锁机构将收缩变形,并保持滑块覆盖在空腔上。当 17 V 的驱动电压同时施加在4个电热作动器上时,装置将在 16 ms 内共产生 $402.18\text{ }\mu\text{m}$ 的位移,安安装置从安全状态转变为发火状态。

2017年, Xiaodong Zhou等^[43]设计了一种利用电热作动器驱动的MEMS安安装置,并应用于爆炸序列

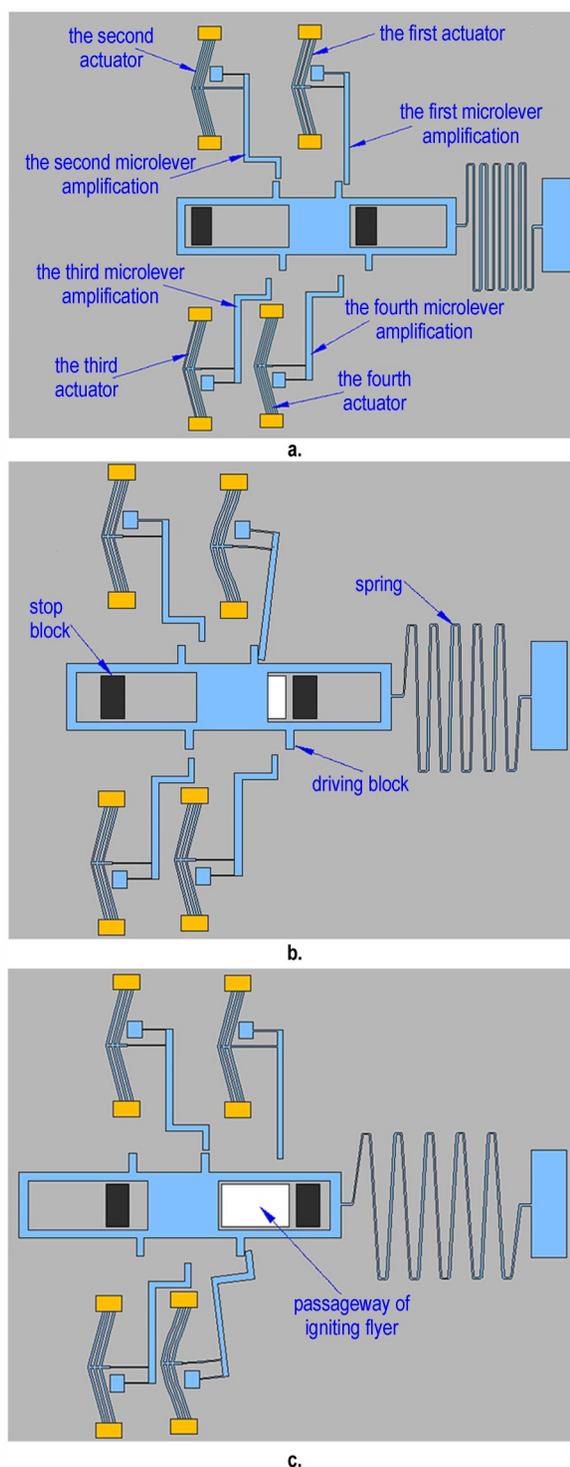


图23 高速电热微作动器驱动过程^[41]

Fig.23 High-speed electrothermal micro-actuator driving process^[41]

中的激光断路器,该安安装置主要由电热作动器和光纤构成,如图25所示。此装置通过DRIE技术被制作在SOI晶圆上。电热作动器与光纤直接耦合,在安全状态下,光纤的两端不对齐,激光能量无法传输;当接收到发火命令后,电压加载在电热作动器上,电热作动

器因热膨胀原理将光纤的输入端与输出端对正,激光能量可成功传输,进而可以引发下一级含能药剂。从安全状态转变为发火状态需要 19 ms,装置再次返回安全状态仅需要 10 ms。

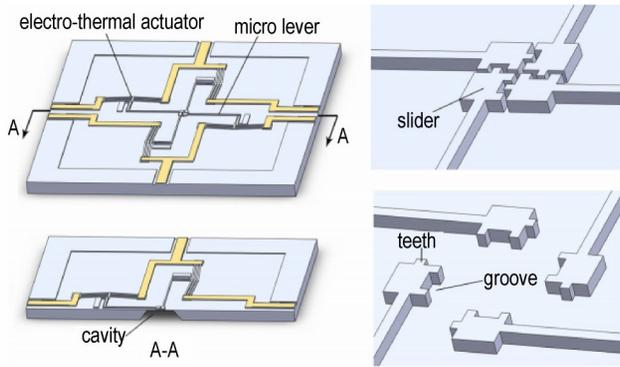


图 24 电热驱动安保装置^[42]

Fig.24 Electro-thermal MEMS S&A device^[42]

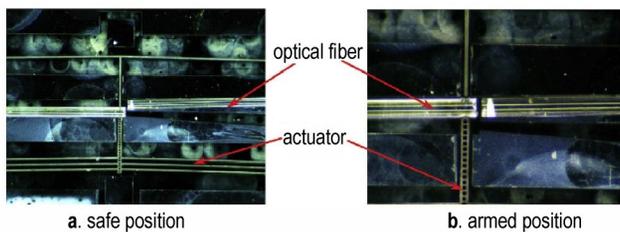


图 25 电热作动器驱动的激光断路器^[43]

Fig.25 Laser interrupter driven by electrothermal actuator^[43]

胡腾江^[44]在 2019 年提出了一种大位移电热驱动安保装置,如图 26 所示。两个可分别驱动滑块的棘爪被轴对称地放置在机构中。棘爪由一个水平电热作动器和一个垂直电热作动器组成。水平电热作动器用来拉动滑块;垂直电热作动器用来实现棘爪与滑块间的啮合与分离。棘爪和滑块上的轮齿不仅可以实现互锁的功能,还可以在工作时实现线性位移。该电热驱动安保装置的尺寸为 8.5 mm × 8.5 mm × 0.8 mm。

20 世纪 90 年代,美国桑迪亚国家实验室(Sandia National Laboratories)^[45-46]设计了一种由多晶硅制作的 MEMS 安保装置,该装置利用静电微引擎驱动抗干涉齿轮(counter-meshing gears),实现了 24 位密码强度的微机械密码锁。装置解锁后,可实现能量传递,一旦输入错误的解码信号,装置将会立即锁死。但是制作该装置使用的多晶硅薄膜(1~2.5 μm)强度较低,且装置的结构和制造工艺都较为复杂,不利于大规模生产、应用。

为了解决上述装置的缺陷,同时减少强电磁环境对 MEMS 安保装置的影响,获得更微型化、具有“密码

锁定”功能,且易于与微起爆序列集成的 MEMS 安保装置,中国工程物理研究院化工材料研究所的房旷^[47]提出了一种利用 V 型电热微作动器驱动的具有加密功能的 MEMS 安保装置,如图 27 所示。该安保装置由隔断盘(interrupter)、控制单元(clutch unit)、驱动单元(drive unit)、V 型梁构成,整体尺寸为 13.4 mm × 9.3 mm × 0.454 mm。控制单元由垂直电热作动器和微杠杆组成,用于控制棘爪与隔断盘之间的分离与啮合;驱动单元由水平电热作动器和微杠杆组成,用于拉动隔断盘进而使其可在基底上旋转;V 型梁可楔入隔断盘上轮齿间的齿槽,用于固定隔断盘的位置。转盘的轮齿分为正常轮齿和陷阱轮齿,棘爪上设置有独特的锁定沟槽,当输入错误的解码电压时可与陷阱轮齿中的簧片形成咬合锁定,整个装置被锁死。

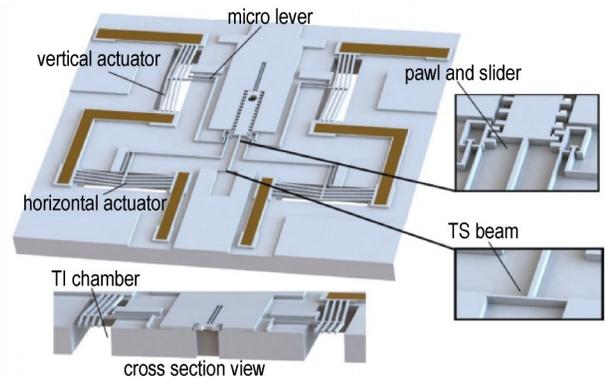


图 26 大位移电热驱动安保装置^[44]

Fig.26 Electro-thermal S&A device with large displacement^[44]

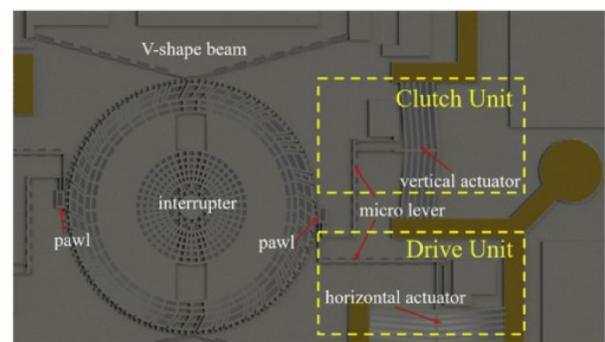


图 27 单齿轮隔断 MEMS 安保装置^[47]

Fig.27 MEMS S&A device based on interrupter^[47]

2020 年, Yuecen Zhao 等^[48]设计了一种基于 PD-MS(聚二甲基硅氧烷, Polydimethylsiloxane)的新型电热驱动 MEMS 安保装置,如图 28 所示,该装置可以在解除安全状态后再次恢复到安全状态。该装置主要由基板、惯性安全机构、惯性安全卡锁、防爆滑块、V 型电热微作动器、位移放大机构以及盖板等组成。在安全状态下,隔爆滑块被位移放大机构锁住,系统中的爆

炸序列被隔断;当武器系统发射后,惯性安全机构在离心力的作用下,释放隔爆滑块,并被锁定机构锁定;当弹丸超出炮口安全距离后,电热微作动器在5 V电压的作用下开始输出位移,并通过位移放大机构将隔爆滑块推动约2 mm到发火位置,使爆炸序列对正,武器处于发火状态。当需要将装置再次恢复到安全状态时,通过停止施加在电热微作动器的电压,电热微作动器冷却后可返回到初始位置,同时隔爆滑块也回到安全位置,爆炸序列被隔断,系统重新回到安全状态。

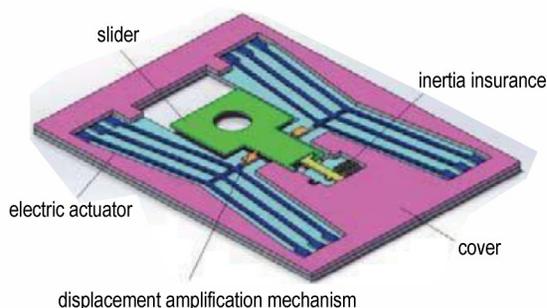


图28 基于柔性材料的MEMS安保装置^[48]

Fig.28 MEMS S&A device based on flexible material^[48]

电热原理驱动的MEMS安保装置基于硅基,这使得这类安保装置具有低成本、可批量生产、易于制造等特点^[49]。然而,因硅的热膨胀系数低的限制,整个系统需引入位移放大机制(微杠杆或微弹簧),这将增加整体结构的复杂性^[50]。

硅基安保装置具有小型化和集成化的特点,然而受硅材料性质(脆性)^[51]的限制,器件在阻挡爆轰时几乎不能保持完整。为了提高器件的结构强度,胡腾江提出了一种硅/金属复合隔断^[52]。为了验证复合隔断的抗爆轰能力,将一个微雷管集成在器件中。试验结果表明,复合隔断在爆轰后仍能保持完整,表明硅/金属复合隔断可提升安保隔断的阻隔能力。

2.5 压电原理驱动

压电微作动器是利用压电材料(如陶瓷)具有逆压电效应而制成的作动器。压电材料在受到外力作用后,其内部会产生极化现象,同时在它的两个相对表面上出现正负相反的电荷,这种现象称为压电效应;相反,当在电介质的极化方向上施加电场,这些电介质也会发生变形,电场去掉后,电介质的变形随之消失,这种现象称为逆压电效应。压电微作动器具有结构简单、快速响应、重量轻、功耗小、在断电状态可以自锁及受电磁干扰小等优点^[53]。

2020年,Dong Sun^[54],Jiong Wang等^[55]设计了一

种使用H型线性压电作动器的MEMS安保装置,该装置由H型压电作动器(H-shaped piezoelectric motor),底座,弹簧和陶瓷块组成,如图29所示。其中,H型压电作动器由H型金属底座及六块PZT(锆钛酸铅压电陶瓷)板组成,其中包括两片纵振压电陶瓷和四片弯振压电陶瓷。

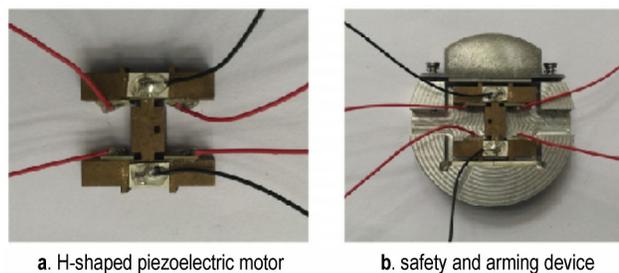


图29 压电驱动的MEMS安保装置^[54-55]

Fig.29 MEMS S&A device driven by piezoelectric actuator^[54-55]

该H型压电作动器的工作原理示意图如图30所示,当交流信号施加到纵振压电陶瓷片上时,H型压电作动器激励产生一阶对称纵振,此时驱动足在水平方向上产生伸缩运动;当交流信号施加到弯振压电陶瓷片上时,H型压电作动器激励产生二阶对称弯,此时驱动足在垂直方向上上下运动。当相位差为90°的交流信号分别施加到纵振与弯振压电陶瓷片上,在驱动足上形成相位差为180°椭圆运动。若在H型压电作动器的两侧施加平行导轨,在驱动足与导轨之间摩擦力的作用下,驱动足的椭圆运动将驱动H型压电作动器前行。

在120 V的交变电压驱动下,H型压电作动器可

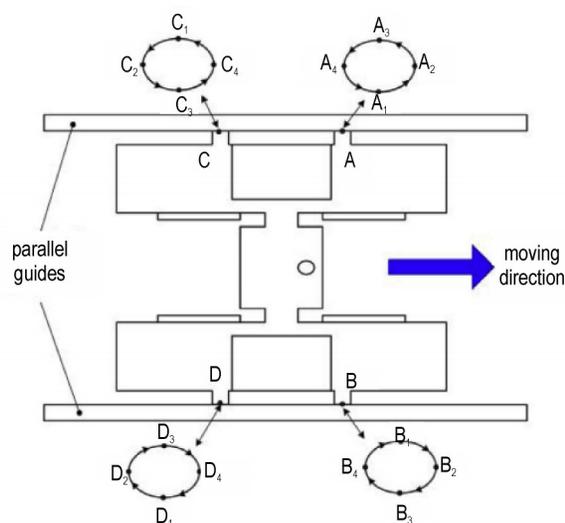


图30 H型压电作动器的工作流程示意图^[54-55]

Fig.30 Schematic diagram of the working principle of the H-type piezoelectric actuator^[54-55]

在 25 ms 内实现 3 mm 的固定位移,使传火通道与传火孔对正,完成解保;当输入相反的信号时,装置可重新返回安全状态,传火通道与传火孔再次错位。解除保险的最大速度与恢复保险的最大速度分别为 $120.6 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $130.1 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.6 多原理共同驱动

在微米级尺寸下,惯性力的作用受到限制,在非旋转或无后坐力的武器中无法将通过机械环境力解保的方式应用于 MEMS 安保装置。针对此技术难点,将机械环境力与其他解保方式结合,如电热力解保,形成多原理共同驱动的 MEMS 安保装置。

Taylor T. Young^[56]在 2016 年提出了一种由机械环境力和电热力共同驱动的 MEMS 安保装置,如图 31 所示。该装置由 SOI(Silicon-On-Insulator, 绝缘衬底上的硅)制作。装置分为两层,保险层和输出层。保险层由命令锁、后坐锁、滑块、电热微作动器和点火器组成;输出层由含能药剂和起爆器组成。在安全状态下,点火器与含能药剂处于错位位置,装置被命令锁、后坐锁及电热微作动器锁定;当武器发射后,后坐锁、微作动器和命令锁依次解除保险,滑块因离心力产生位移,滑块上的起爆器与点火器对正,武器处于发火状态。这种硅基的 MEMS 安保装置已应用于 40 mm 口径的手榴弹。

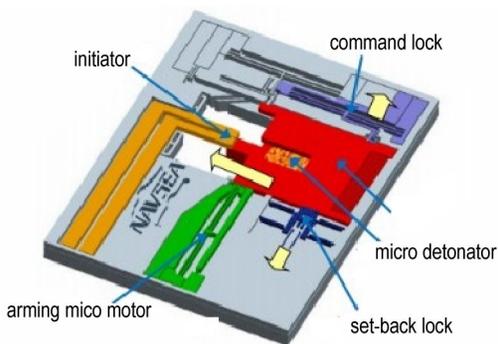


图 31 多原理驱动 MEMS 安保装置基本结构示意图^[56]

Fig.31 Structure of multi-principle driven MEMS S&A device^[56]

2020 年,胡腾江等^[57-58]针对 MEMS 安保装置解除保险方式单一且不易感知低环境力的技术难点,将机械环境力解保与电热力解保相结合,提出了低 g 值惯性延时电热安保装置,如图 32 所示。该装置主要由硅隔板、平面扭簧、大小齿轮、滑块及电热锁销机构组成。在安全状态下,齿轮组被锁销机构锁定,硅隔板无法移动,保证了武器系统不会意外发火;当接收到解保信号后,电热锁销机构在电信号(10 V 直流电压)的控制下解除对齿轮组的锁定,此时,硅隔板可在惯性力的作用下移动。此装置

中齿轮组的作用为将低 g 值下的惯性力放大;小齿轮的转动拨动平面扭簧往复运动,硅隔板将缓慢移动。当硅隔板移动到发火位置后,电热锁销机构将重新锁死齿轮组,此时系统完成解保动作,从安全状态转变为发火状态。该装置可以在 10 g 环境力(持续时间约 700 ms)的作用下,实现 560 ms 的延时输出,输出位移可达 1.5 mm。装置的尺寸为 $10 \text{ mm}\times 10 \text{ mm}\times 0.28 \text{ mm}$ 。

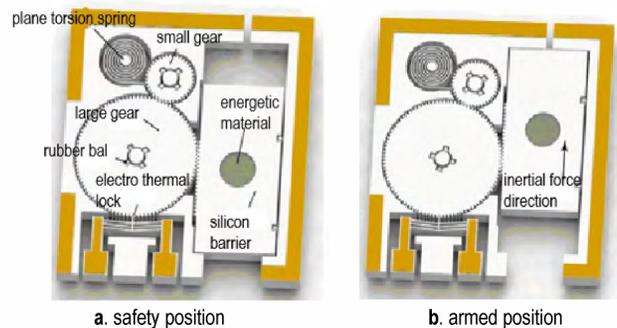


图 32 低 g 值惯性延时电热安保装置^[57]

Fig.32 Structure of electro-thermal MEMS S&A device with low g value inertia delay^[57]

上述两种由多原理共同驱动的 MEMS 安保装置融合了电热力驱动和机械环境力驱动的优点,为武器系统增加了发火信号的多样性,扩展了其在复杂战场环境下的应用前景^[6],为未来 MEMS 安保装置的设计提供了新的思路——将其他不同的驱动原理相结合,制造出安全性更高、可靠性更强的 MEMS 安保装置。

3 火工品与 MEMS 安保装置集成设计研究

3.1 MEMS 安保装置的特性概述

基于不同驱动原理的 MEMS 安保装置可总结如表 1。

通过对以上不同驱动方式的 MEMS 安保装置进行对比总结,可按制造材料类型将其分为非硅基类和硅基类。非硅基安保装置可通过感应环境力的改变,实现解除保险的功能。但是非硅基安保装置体积大、智能化控制程度低,无法满足现代武器系统微型化、智能化的发展需求。而硅基安保装置,如电热安保装置,易于电信号输入控制,结合传感器技术,利用电热驱动器实现保险的解除,将通过环境力的被动解保方式转变为由电信号控制的主动解保方式,具有更强的设计可拓展性;并且在电控条件下,安保装置的输出更精准,输出位移可达 $0.5\sim 2 \text{ mm}$ 。硅基安保装置与微电子加工工艺有很好的兼容性,可实现与 MEMS 火工品的一体化集成,为 MEMS 火工品增添在复杂作战环境

表 1 部分典型 MEMS 安装置总结对比

Table 1 Summaries and comparisons of some typical MEMS S&A devices

driven principle	authors(year)	driven parameters	output displacement / mm	device size / mm ³	main material
inertia	Charles H. Robinson ^[3-4] (2001)	not explained	not explained	12×15×0.8	nickel
	Wang ^[15] (2017)	spin condition: >36000 rpm	2	14×14×15	nickel, beryllium bronze
	Jihun Jeong ^[8-9] (2018)	set-back force: 1000~20000 Gs spin condition: 2000~20000 rpm	z-direction: 0.68 x-direction: 0.94	20×40×5	stainless steel
pyro-technic	CNRS-LAAS ^[19] (2010)	current :53 mA	not explained	8.4×7.4×3	silicon, aluminum
	Zhu ^[21] (2018)	constant voltage: 20 V	1.5	20×17×5.5	silicon, LTCC
	Hou ^[22] (2018)	capacitor: 40V、40μF	2	Not explained	silicon
electro-magnetic	Walter H. Maurer ^[27] (2006)	not explained	0.8	12×12×0.8	nickel
	Wu ^[31] (2010)	tantalum capacitor: 25 V、100 μF	3	13×13×20	nickel
	Sun ^[32] (2020)	driven voltage: 5 V	not explained	15×9×0.5	silicon, zinc-aluminum
electro-thermal	Hu ^[42] (2017)	driven voltage: 17 V	0.402	8×8×0.5	silicon
	Hu ^[44] (2019)	driven voltage: 11V	>0.5	8.5×8.5×0.8	silicon
	Fang ^[47] (2019)	driven voltage: 13.9V/17 V	rotation angle> 360°	13.4×9.3×0.454	silicon
piezoelectric	Sun ^[54] (2020)	AC voltage: 120 V	3	not explained	metal, PZT
multi-principle	Taylor T. Young ^[56] (2016)	inertial and electro-thermal	0.5	not explained	silicon
	Hu ^[57] (2020)	inertial force: 10 g direct voltage: 10 V	1.5	10×10×0.28	silicon

中信息识别及发火控制的功能。

3.2 MEMS 安装置与火工品内置集成探讨

根据爆炸序列中实现隔断的结构不同,可将爆炸序列分为直列式爆炸序列和错位式爆炸序列。其中直列式爆炸序列是指序列中的爆炸元件或含能药剂一直处于对正位置,序列主要依靠爆炸元件自身的感度满足安全性要求,进而保证勤务状态下的安全性,若初始元件或药剂的感度过高,会导致整体系统的安全性较差;而错位式爆炸序列是指在勤务状态下,将敏感爆炸元件产生的能量与下一级的爆炸元件或药剂隔断,保证初始元件意外发火不会引爆下一级装药^[59]。因此爆炸序列通常使用错位式结构。

但是随着高新技术的出现和快速发展,爆炸序列中可以不含敏感元件或药剂,序列的安全性通过安全保险装置得到保证。这种内置安全保险装置的爆炸序列,在保证安全性和可靠性的同时又很大程度上简化了序列的结构,减小了序列的体积,符合武器系统微型化的发展需求^[60]。微电子技术与 MEMS 技术的发展以及其在军工领域的应用,进一步推动了内置安装置的微起爆序列的发展与进步。

MEMS 火工品是采用微细加工技术和微装药技术

将多个含能单元、微机械系统和微电子系统集成成为具有多功能的含能模块或芯片。MEMS 火工品具有微型化、集成化、多功能化、高精度和高可靠性的特点,与传统火工品相比,其具备更高的安全性和可靠性。MEMS 安全保险装置能够与含能复合薄膜换能元集成,形成具有高度集成化、高安全可靠特点 MEMS 火工品。这种 MEMS 火工品将微结构换能元、微纳含能药剂与微安全机构进行了一体化集成设计,可实现起爆、传爆、隔爆等功能,提高了火工品的安全性与可靠性,符合下一代火工品的发展方向^[2]。

这种内置安全保险装置的 MEMS 火工品主要由起爆器、盖板、安装置及 PCB 板组成,如图 33 所示。其中主要功能部件为起爆器和安装置。起爆器由含能复合薄膜换能元组成;安装置为由微执行器驱动的隔断机构,可实现隔板的大位移运动。作用原理如图 34 所示,在安全状态下,安装置中的隔板将起爆器与传爆孔隔断,起爆器产生的火焰无法通过传爆孔引爆下一级装药;当接收到解保指令后,隔断机构中的隔板打开,使起爆器与传爆孔对正,起爆器产生的火焰可成功引发下一级装药。

2021 年,胡腾江等^[62]提出了一种具有内置安装置

置的 MEMS 火工品,如图 35 所示。该火工品由 MEMS 换能元及 MEMS 安保装置构成,尺寸为 $11\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 1.2\text{ mm}$ 。Al/CuO 多层反应薄膜被沉积在 MEMS 换能元的 Ni-Cr 桥上,用来增加能量输出;MEMS 安保装置被设置在传爆序列中,在 11 V 的电压驱动下,安保装置的输出位移可达到 1 mm (大于传火孔直径 $600\text{ }\mu\text{m}$),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。

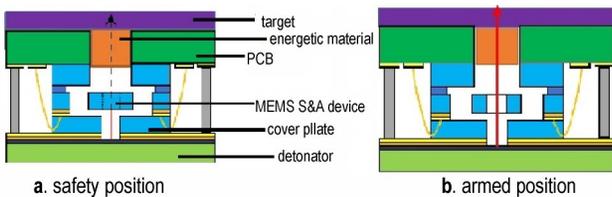


图 34 内置安全保险装置的 MEMS 火工品作用原理^[61]

Fig.34 The principle of the MEMS initiator with built-in S&A device^[61]

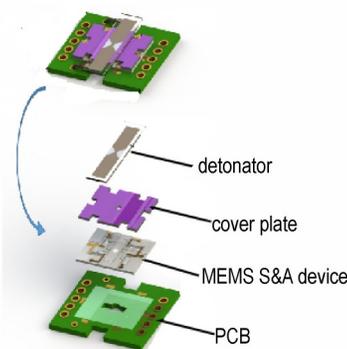


图 33 内置安全保险装置的 MEMS 火工品结构示意图^[61]

Fig.33 Structure of the MEMS initiator with built-in S&A device^[61]

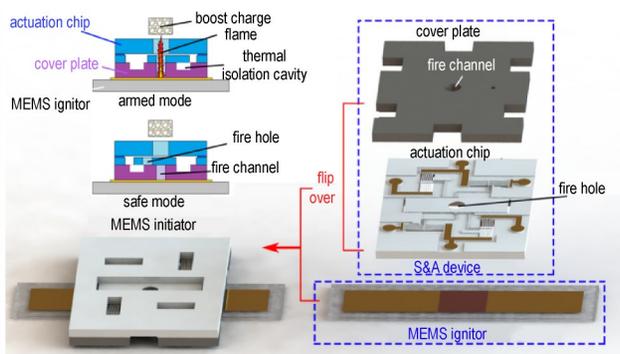


图 35 内置 MEMS 安保装置的 MEMS 火工品^[62]

Fig.35 The basic structure of the MEMS initiator^[62]

通过装配平台,将 MEMS 安保装置中的传火通道与涂有环氧胶 EPO 330 的 MEMS 换能元中的镍铬桥对准。在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 和 0.1 MPa 的条件下, MEMS 换能元

和 MEMS 安保装置紧密结合在一起,形成具有内置安保装置的 MEMS 火工品。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 $25\text{ }\mu\text{m}$ 的金线实现 MEMS 安保装置与 PCB 板之间的连接, MEMS 换能元通过焊接与 PCB 板连接。

内置安全保险装置的 MEMS 火工品,即将 MEMS 安保装置与 MEMS 火工品集成,在火工品层面上实现安全保险控制的功能。通过电信号主动控制保险机构动作,可实现微起爆序列的隔断与对正,有效地提高了火工品的安全性和可靠性,结合微尺度传爆序列技术、MEMS 技术及先进微机械加工技术实现其微型化智能化设计,符合下一代火工品的发展要求,为新型火工品的设计提供了参考。

4 总结与展望

20 世纪初提出了 MEMS 安保装置的概念,经过近二十年的发展,其集成化、小型化和智能化的器件特性已经得到广泛应用。目前, MEMS 安保装置的发展趋势可总结为以下三点:

(1) 增加输出位移。微含能材料的输出能量密度远高于传统的宏观含能材料,因此需要 MEMS 安保装置提供更大的输出位移,以保证器件的整体安全性能。目前可达到微米级的输出位移。

(2) 主动的驱动方式。早期的 MEMS 安保装置只能在特定的惯性环境下驱动,这种被动驱动方式很难满足当前复杂的战场环境要求。而主动驱动方式,例如电热驱动,能更好地满足下一代武器系统智能化的发展需求。

(3) 精密的结构。MEMS 安保装置的制造方法逐渐由 LIGA 工艺转变为硅工艺,使制造出体积更小、结构更复杂、功能高度集成的装置成为可能。通过集成设计,实现检测、驱动、隔爆、传爆功能的一体化。

通过以上对 MEMS 安保装置的总结,可以发现存在的不足,目前的 MEMS 安保装置尚不具备隔断自恢复功能。为了拓展火工品的安全设计,提高火工品的安全性和可靠性,未来发展需要一种具备隔断自恢复功能的 MEMS 火工品,即武器系统断电后安保装置可自主恢复并锁定在安全位置。具备隔断自恢复功能的 MEMS 火工品在解决未爆弹等武器装备的安全问题上有着关键作用。作为武器系统中的关键部件,具备可恢复隔断功能的 MEMS 火工品将会提高武器系统整体的安全性与可靠性,这也是火工品未来的主要发展

方向之一。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Robinson C H, Wood R. Ultra-miniature, monolithic, mechanical safety-and-arming (S&A) device for projected munitions: U.S. Patent 6,167,809[P]. 2001-1-2.
- [4] Robinson C H, Wood R H, Hoang T Q. Miniature MEMS-based electro-mechanical safety and arming device: U.S. Patent 6,964,231[P]. 2005-11-15.
- [5] Robinson C H, Wood R H, Hoang T Q. Development of inexpensive, ultra-miniature MEMS-based safety and arming(S&A) device For small-caliber munition fuzes[M]. US: Army Tank Automotive Command (TACOM) Armament Research, Development and Engineering Center (ARDEC) Fuze Division.
- [6] Li M, Hu T. Research status and development trend of MEMS S&A devices: A review [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(2):450-456.
- [7] Rehan M, Mansoor M. Application of MEMS in safety and arming devices: An overview [J]. *Microsystem Technologies*, 2021: 1-12.
- [8] Jeong J, Eom J, Lee S S, et al. Miniature mechanical safety and arming device with runaway escapement arming delay mechanism for artillery fuze [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 279: 518-524.
- [9] Seok J O, Jeong J, Eom J, et al. Ball driven type MEMS SAD for artillery fuze [J]. *Journal of Micromechanics & Microengineering*, 2016, 27(1):015032.
- [10] Qin Y, Chen L, Hao Y. Optimization of a fuze MEMS setback arming device based on the EDM process [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 84741-84752.
- [11] Wang W, Liu W G, Zou J L, et al. A MEMS safe and arm device for spin stabilized ammunition fuze [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 403-408:4593-4597.
- [12] Fufu W, Wenzhong L, Ying W, et al. Design and analysis of a novel locking mechanism of MEMS safety and arming device [J]. *Key Engineering Materials*, 2014, 609-610:856-859.
- [13] Wang F, Lou W, Yue F, et al. Parametric research of MEMS safety and arming system [C]//IEEE International Conference on Nano/micro Engineered & Molecular Systems. IEEE, 2013.
- [14] 史春景,邓炬锋,郝永平,等.三种环境力下MEMS保险机构的设计与分析[J].纳米技术与精密工程,2016,14(6):453-459.
SHI Chun-jing, DENG Ju-feng, HAO Yong-ping, et al. Design and analysis of MEMS safety and arming device under triple environment forces [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2016, 14(6): 453-459.
- [15] Wang D, Lou W, Feng Y, et al. Design of high-reliability micro safety and arming devices for a small caliber projectile [J]. *Micromachines*, 2017, 8(8): 234.
- [16] 刘章,牛兰杰,赵旭,等.硅基MEMS悬臂梁支撑的离心驱动隔离装置[J].兵器装备工程学报,2018,39(7):162-165,174.
LIU Zhang, NIU Lan-jie, ZHAO Xu, et al. Centrifugal drive isolation device for silicon based MEMS cantilever support [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(7): 162-165, 174.
- [17] 徐娜,聂伟荣,席占稳,等.MEMS离心隔爆滑块闭锁机构[J].探测与控制学报,2019(4):15-19.
XU Na, NIE Wei-rong, XI Zhan-wen, et al. MEMS centrifugal flameproof slider locking mechanism [J]. *Journal of Detection & Control*, 2019(4):15-19.
- [18] Zhang J, Li D. Failure analysis of set-back arming process of MEMS S&A device [J]. *Sensors and Transducers*, 2014, 166(3):66-72.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhu P, Hou G, Wang H, et al. Design, preparation, and performance of a planar ignitor inserted with PyroMEMS safe and arm device [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, 27(6): 1186-1192.
- [22] 侯刚,朱朋,李钰,等.基于硅双固态梁PyroMEMS安保机构的设计、制备及作动性能[J].含能材料,2018,26(3):267-272.
HOU Gang, ZHU Peng, LI Yu, et al. Design, fabrication and actuation performance of PyroMEMS safe and arm device based on silicon double solid beams [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2018, 26(3):267-272.
- [23] 李国中.微小型安全系能关键技术研究[D].北京:北京理工大学,2016.
LI Guo-zhong. Research on Micro Safe and Arming System [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.
- [24] 耿万钧,孙兴昀,严楠.小口径弹药引信用滑块作动器[J].探测与控制学报,2020,42(4):7-12.
GENG Wan-jun, SUN Xing-yun, YAN Nan. Slider actuator applied to small-caliber ammunition fuze [J]. *Journal of Detection & Control*, 2020, 42(4):7-12.
- [25] Bao B, Yan N, Geng W, et al. Simulation and experiment investigation on structural design and reinforcement of pyrotechnical sliding micro-actuators [J]. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2016, 88(3):431-441.
- [26] Rossi C, Estève D. Micropyrotechnics, a new technology for making energetic microsystems: Review and prospective [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2005, 120(2): 297-310.
- [27] Maurer W H, Soto G H, Hollingsworth D R. Method for utilizing a MEMS safe arm device for micro-detonation: U.S. Patent 7,007,606[P]. 2006-3-7.
- [28] Maurer W H, Soto G H, Hollingsworth D R. MEMS safe arm device for microdetonation: U.S. Patent 7040234[P]. 2006-05-08.
- [29] Zhan-wen XI, Nie W, Qi-lei Li. A MEMS interrupter mechanism for fuze safety & arming device [C]//International Conference on Mechanical Engineering & Mechanics. 2009.
- [30] Wei-rong NIE, Zhan-wen XI, Shi-qi WANG. A MEMS movable mechanism and its manufacturing technology [C]//International Conference on Mechanical Engineering & Mechanics. 2009.

- [31] 吴志亮. 特种小型机电引信设计及关键技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2010.
WU Zhi-liang. Design and Research on the key technologies for small electro-mechanical fuze[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010.
- [32] Sun Y, Lou W, Feng H, et al. Study on characteristics of electromagnetic coil used in MEMS safety and arming device[J]. *Micromachines*, 2020, 11(8): 749.
- [33] Lv X, Wei W, Mao X, et al. A novel MEMS electromagnetic actuator with large displacement[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2015, 221: 22-28.
- [34] 李凯权, 代俊, 常辉, 等. 磁流变材料的应用综述[J]. 探测与控制学报, 2019, 41(1):6-14.
LI Kai-quan, DAI Jun, CHANG Hui, et al. Review of magnetorheological materials application [J]. *Journal of Detection & Control*, 2019, 41(1):6-14.
- [35] Zheng J, Li Y, Hu M, et al. Feasibility study of a miniaturized magnetorheological grease timing trigger as safety and arming device for spinning projectile[J]. *Smart Materials and Structures*, 2018, 27(11): 115030.
- [36] Whiteley J, Gordaninejad F, Wang X. Magnetorheological fluid flow in microchannels [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2010, 77(4):041011.
- [37] 王海龙, 姚文. 具有状态识别特征的引信用电磁拔销器[J]. 航空工程进展, 2019, 10(3):418-422.
WANG Hai-long, YAO Wen. Electromagnetic actuator with state recognition feature used in fuze[J]. *Advances in aeronautical science and Engineering*, 2019, 10(3):418-422.
- [38] Hu H, Wang J, Bi S. Design and simulation of an electromagnetic microactuator of fuze safety and arming device [C]//2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments. IEEE, 2009: 1-72-1-77.
- [39] Du Li-quan, Jia Sheng-fang, Nie Wei-rong, et al. Fabrication of fuze micro-electro-mechanical system safety device[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24 (5) : 836-841.
- [40] Zhao Y L, Hu T J, Li X Y, et al. Design and characterization of a large displacement electro-thermal actuator for a new kind of safety-and-arming device[J]. *Energy Harvesting and Systems*, 2015, 2(3-4): 143-148.
- [41] Li X, Zhao Y, Hu T, et al. Design of a high-speed electrothermal linear micromotor for microelectromechanical systems safety-and-arming devices[J]. *Micro & Nano Letters*, 2016, 11 (11): 692-696.
- [42] Hu T, Zhao Y, Li X, et al. Integration design of MEMS electro-thermal safety-and-arming devices [J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(4): 953-958.
- [43] Zhou X, Shan T, Qi X, et al. Analysis and design of a high power laser interrupter for MEMS based safety and arming systems[J]. *Microsystem Technologies*, 2017, 23(8):3175-3184.
- [44] Hu T, Ren W, Zhao Y, et al. The research on actuation performance of MEMS safety-and-arming device with interlock mechanism[J]. *Micromachines*, 2019, 10(2): 76.
- [45] Garcia E J, Sniagowski J J. Surface micromachined microengine [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1995, 48 (3) : 203-214.
- [46] Polosky M A, Garcia E J, Allen J J. Surface-micromachined counter-meshing gears discrimination device[C]//Smart Structures and Materials 1998: Smart Electronics and MEMS. International Society for Optics and Photonics, 1998, 3328: 365-373.
- [47] Fang K, Hu T J, Jiang X H, et al. Research on a MEMS based encrypted rotary safety and arming device[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 301: 111781.
- [48] Zhao Y, Lou W, Feng H, et al. Designing a MEMS safety-and-arming device based on flexible materials [C]//2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS). IEEE, 2020: 152-157.
- [49] Mink S S. Microelectromechanical systems (MEMS) interrupter for safe and arm devices[R]. Air Force Institute of Technology Wright-patterson afb on Dept of Electrical and Computer Engineering, 2006.
- [50] Iqbal S, Malik A. A review on MEMS based micro displacement amplification mechanisms[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, 300: 111666.
- [51] Hu T, Zhao Y, Zhao Y, et al. Integration design of a MEMS based fuze[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2017, 268: 193-200.
- [52] Hu T, Fang K, Zhang Z, et al. The research on MEMS S&A device with metal-silicon composite structure[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, 28(6): 1088-1099.
- [53] Sabarianand D V, Karthikeyan P, Muthuramalingam T. A review on control strategies for compensation of hysteresis and creep on piezoelectric actuators based micro systems [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 140: 106634.
- [54] Sun D, Tang Y, Wang J, et al. Design of an H-shaped linear piezoelectric motor for safety and arming device [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 303: 111687.
- [55] 王昊, 芮苏媛, 孙栋, 等. 一种 H 形压电超声驱动器及安装置 [P]. 江苏省:CN110380640A, 2019-10-25.
- [56] Young T T. DoD MEMS fuse reliability evaluation [C]//Proceedings of the 59th Annual NDIA Fuze Conference, Charleston, SC, USA. 2016, 5.
- [57] 胡腾江, 任炜, 赵玉龙. 低 g 值惯性延时电热 MEMS 安全与解除保险装置[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(5):21-26.
HU Teng-jiang, REN Wei, ZHAO Yu-long. Electro-thermal MEMS S&A device with low g value inertia delay mechanism [J]. *Journal of Detection & Control*, 2020, 42(5):21-26.
- [58] 胡腾江, 任炜, 赵玉龙. 低 G 值惯性延时 MEMS 火工品一体化设计[J]. 火工品, 2020(2): 1-4.
HU Teng-jiang, REN Wei, ZHAO Yu-long. The integrated design of MEMS initiator with low g value inertia delay mechanism[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2020(2): 1-4.
- [59] 王雨时, 何莹台. 弹药爆炸序列中直列爆炸元件火炸药装药的感受度问题——关于弹药安全性设计的认识与思考(下)[J]. 现代引信, 1997(3):55-65.
- [60] 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]//2011 年中国兵工学会学术年会. 2011.
- [61] 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.
- [62] HU T, ZHAO Y, WANG K, 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.

A Review on MEMS Safety and Arming Devices for Micro-initiation System

KAN Wen-xing, CHU En-yi, LIU Wei, REN Wei, REN Xiao-ming

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

Abstract: Initiating explosive devices are the first component of the weapon system, their safety and reliability directly affect the safety and reliability of the weapon system. In order to meet the development requirements of miniaturization and integration of ammunition, the fuze is needed to integrate with initiator to form a micro-initiation system with high safety, high reliability, and multi-functional integration. MEMS (Micro-Electro-Mechanical System) safety and arming device (S&A device) is one of the key technologies. The development of MEMS S&A device used in micro-fuze and micro-initiation system in recent years was summarized, and the device material, device size, driven mechanisms, driven conditions, output efficiency, application platforms, and other aspects were compared and analyzed. Combined with the structure and size of the initiating device, the working principle of micro-initiation system with built-in MEMS S&A device was proposed. This MEMS initiator with built-in S&A device meets the development requirements of the next generation initiator, and it is also one of the main development directions of initiator in the future.

Key words: micro-electro-mechanical system(MEMS); pyrotechnics; micro-initiation system; safety and arming (S&A) device

CLC number: TJ45; TJ5

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2021084

(责编: 王艳秀)