

文章编号: 1003-1480 (2020) 06-0005-05

内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置

王柯心¹, 胡腾江¹, 褚恩义², 赵玉龙¹, 薛 艳²

(1. 西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安, 710049; 2. 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: 针对现代武器弹药中火工品微型化的问题, 提出了一种内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置, 采用 MEMS 工艺进行制备, 其中隔断机构为电热执行器驱动, 起爆器为 Al/CuO 含能复合薄膜的镍铬合金起爆桥。经测试隔断机构在 11V 电压驱动下能够较好地实现双向位移, 位移距离为 1mm, 起爆器在 64V 恒压激励下可产生高度约为 9mm 的火焰。联合测试结果表明, 在安全状态下隔断机构能够较好地隔绝火焰的传递; 在解保状态下起爆器产生的火焰可以顺利地通过隔断机构。该微起爆装置拥有较高集成化程度的起爆序列, 能够实现大批量生产, 对我国火工品研究具有一定的探索性意义。

关键词: 微起爆装置; 隔断机构; 起爆器; 微机电系统

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.06.002

A Micro-Detonated Device Built-in MEMS Safety and Arming Device

WANG Ke-xin¹, HU Teng-jiang¹, CHU En-yi², ZHAO Yu-long¹, XUE Yan²(1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049;
2. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: Aiming at the problem of the pyrotechnics miniaturization in modern ammunition, a micro-detonated device built-in MEMS safety and arming device was proposed, and fabricated by MEMS technology. The safety and arming device is driven by an electric actuator, and the detonator is a nickel-chromium alloy detonating bridge with an Al/CuO energetic composite film. It has been tested that the safety and arming device can achieve a large displacement under the driving of 11V voltage, the displacement distance is 1mm. The detonator can generate a 9mm height flame under 64V constant voltage excitation. After the joint test, the safety and arming device can block the flame in the safe condition, and the flame can pass through the safety and arming device in the arming condition. The micro-detonated device has a high integration of the explosive train, which can realize mass production and has an exploratory significance for the pyrotechnic research.

Key words: Micro-detonated device; Safety and arming device; Detonator; MEMS

为满足新一代武器装备系统在现代战争中的智能化、信息化和微型化的重点发展需要, 火工品已经发展到以换能信息化、结构微型化和序列集成化为主要特点的第四代火工品^[1]。第四代火工品主要以

MEME 技术为基础, 其序列集成化的特点是指火工品中微起爆序列采用 MEMS 工艺及一体化的设计, 将微结构换能元、微含能芯片和微安保机构结合在一起, 形成具有高度集成化程度的微型装置。

收稿日期: 2020-08-28

作者简介: 王柯心(1997-), 男, 博士研究生, 主要从事 MEMS 火工品的设计制作研究。

微起爆序列中的微结构换能元与微含能芯片经常共同组成微起爆器^[2-4]，微起爆器可在电能等刺激能量下释放能量来引爆后端的起爆药，以形成能量增长的爆炸序列。为保证爆炸序列使用过程的安全性及可靠性，需设置安保机构在起爆器与起爆药之间，通过控制隔断机构隔板的位移来切换装置的安全状态与解保状态。根据隔板驱动方式的不同，常见的 MEMS 安保机构的结构类型有惯性驱动^[5]、电热执行器驱动^[6]、烟火驱动^[7]等。

近几年国内外已经开展大量有关基于 MEMS 技术的起爆器与安保机构的研究，但是很少有研究将二者结合起来。针对此问题，本研究提出了一种内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置。该微起爆装置包括起爆器部分及安保机构部分，起爆器由镍铬合金起爆桥及 Al/CuO 含能复合薄膜组成；安保机构为由电热执行器驱动的隔断机构，可实现隔板的双向大位移运动，在安全状态下能够较好地隔绝火焰的传递，在解保状态下能够使火焰透过隔断机构传递给起爆药。

1 微起爆装置结构设计

设计的内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置整体尺寸为 $16.4 \times 13.8 \times 2.5 \text{ mm}^3$ ，主要由起爆器、盖板、隔断机构及 PCB 板组成，如图 1 所示，其中主要功能部件为起爆器与隔断机构。盖板由双面氧化硅片通过 DRIE 工艺刻蚀而成，其作用为封装及连接起爆器与隔断机构，其点火腔室可使起爆器产生的火焰通过腔室传递到隔断机构上方，盖板两面的氧化硅绝缘层可保证器件各电极间相互绝缘；PCB 板的作用为封装及器件电路连接。

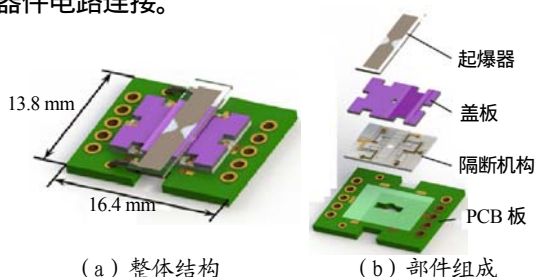


图 1 内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置结构示意图

Fig.1 The structure schematic of the micro-detonated device built-in MEMS safety and arming device

该内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置的基本原

理如图 2 所示。当装置处在安全状态下，隔断机构上隔板的点火孔与起爆器的起爆桥区处于不对正的状态，起爆器作用产生的火焰通过盖板中心的点火腔室传递到隔板，隔板将完全覆盖住点火腔室，以隔绝火焰的传递；当隔断机构处于解保状态下，隔断机构中隔板的点火孔与起爆器的起爆桥区处于对正的状态，起爆器产生的火焰可以通过盖板中心的点火腔及隔断机构的点火孔传递到 PCB 板引燃起爆药。因此该内置隔断机构的微起爆装置可通过控制隔断机构中隔板的位移进行点火孔的对正与偏移，来切换装置的安全状态与解保状态。

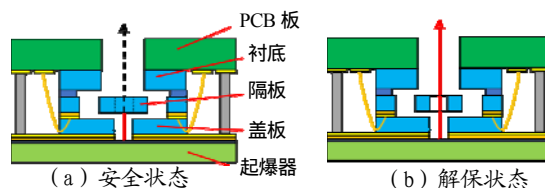


图 2 微起爆装置基本原理示意图

Fig.2 The basic principle of the micro-detonated device

该微起爆装置中的隔断机构利用硅基的电热执行器来实现。该硅基隔断机构仅可在多路电极间按设计顺序交替输入驱动电压，才能实现多个电热执行器间的相互配合来完成解保动作，且利用 MEMS 工艺可实现器件的大批量生产，相比较于金属基的惯性驱动隔断机构，硅基电热执行器隔断机构的集成化、微型化、批量化、智能化程度更高；相比较于同为硅基的静电执行器，电热执行器的输出位移及输出力更大，抗电磁干扰能力更强，更适合应用于火工品中。

基于电热执行器的隔断机构结构及原理示意图见图 3。

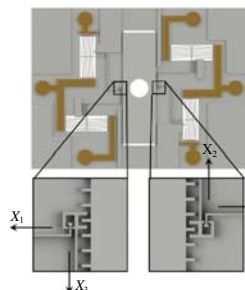


图 3 隔断机构结构及原理示意图

Fig.3 The structure and basic principle of the safety and arming device

本研究的隔断机构由 4 个电热执行器形成对称的 2 组驱动单元，以实现隔板的双向位移，通过 4 路驱动电压来分别控制 4 个棘爪的位移 $X_1 \sim X_4$ ，通过多

个周期的往复驱动,使隔板可以进行大位移运动^[8]。针对单个 V 型热执行器,利用 Comsol 有限元仿真软件,得到该电热执行器在 8V 电压下可产生 9.86 μm 的位移及 711K 最高温度。该仿真模型充分考虑了衬底与盖板间的空气层对梁散热的影响,部分几何及材料参数如表 1 所示,可通过多个热执行器的串联增加驱动力以提高器件可靠性。

表 1 电热执行器几何及材料参数表

Tab.1 The parameters of the thermal-electrical actuator

参数	数值	参数	数值
梁宽 $w/\mu\text{m}$	38	热容 $c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	700
梁长 $L/\mu\text{m}$	2 130	电阻率 $\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	0.02
梁高 $h/\mu\text{m}$	50	杨氏模量 E/MPa	169
角度 $/\circ$	5	泊松比 ν	0.28
热膨胀系数 $\times 10^{-6}/\text{K}^{-1}$	2.6 ~ 4.1	导热系数 k	146 ~ 42
	[300 ~ 800K]	$/(W \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	[300 ~ 800K]
上表面距离 $d_1/\mu\text{m}$	150	下表面距离 $d_2/\mu\text{m}$	400

该微起爆装置中起爆器的结构为基于 Al/CuO 复合含能薄膜的镍铬合金起爆桥。该镍铬合金桥区采用正方形桥区形状,如图 4 所示,长宽均为 380 μm 。当镍铬合金电桥两端通入激励电压时,由于桥区处电阻较大,电流产生欧姆热效应使桥区温度升高,当温度升高到一定程度后,镍铬合金中的镍元素与铬元素产生合金反应,使电阻降低产生正反馈效应,进而使得桥区温度进一步快速升高,直至电桥以等离子体形态飞射而出,产生电爆炸效果。为进一步增强起爆电桥的点火能量,可将 Al/CuO 含能复合薄膜设置在起爆桥区上方,当起爆桥区的温度不断升高时,热量会通过热传导效应或等离子体冷凝散热传递给含能薄膜,当含能薄膜的温度达到一定后可引起自发扩散的铝热反应,放出大量热量,并产生一定高度的火焰。

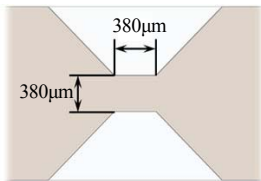


图 4 起爆桥区尺寸示意图

Fig.4 The size of the detonating bridge

2 制作工艺

该内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置分为 4 部分:起爆器、盖板、隔断机构及 PCB 板,4 个部分可独立制作后利用环氧树脂胶粘连的方式装配在一起,最后通过金丝键合工艺连接关联电路完成封装。盖板

采用 500 μm 厚的双抛氧化硅片,利用 DRIE 刻蚀工艺进行正反双面的刻蚀,一面在电热执行器对应位置处开有绝热空腔,以提高执行器的热效率,并且在隔断机构电极对应位置处设有槽口将电极暴露出来,以利于进行金丝键合工艺。PCB 板采用常规制板工艺,在 6 个电极附近设有焊盘。

隔断机构利用 SOI 硅片制作,其顶硅厚度 50 μm 为器件层,用于设置主要运动构件及隔板,其底硅为衬底层,厚度为 400 μm ,其上设置有空腔,用于对顶硅器件层的运动构件的释放,其工艺流程如图 5 所示。工艺流程为:(a) SOI 硅片顶硅上溅射 50nmCr 与 300nmAu,用于引出电极;(b) 顶硅上利用 CVD 工艺沉积 100nmSiO₂,用于对电极的保护;(c) 正反面分别溅射 200nmAl,用于 DRIE 工艺的掩蔽;(d) DRIE 工艺刻蚀底硅,刻蚀深度 400 μm ,用于对顶硅运动部位进行释放;(e) DRIE 刻蚀顶硅,刻蚀深度 50 μm ;(f) 去掉铝掩蔽,使用 HF 湿法腐蚀 SiO₂ 牺牲层进行释放工艺,使可活动底硅部位与底硅脱离。

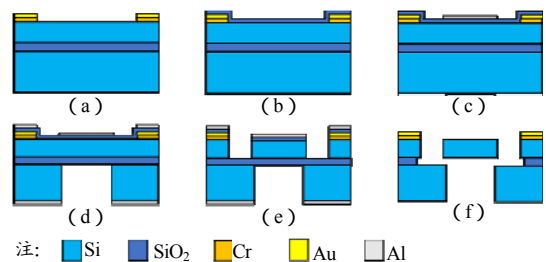


图 5 隔断机构的工艺流程示意图

Fig.5 The fabrication process of the safety and arming device

起爆器为平面基底上的薄膜结构,所有薄膜均采用磁控溅射工艺在 300 μm 厚的玻璃片绝缘基底上进行溅射制作,而后利用剥离工艺将薄膜图形化。其工艺流程如图 6 所示。工艺流程为:(a) 溅射 800nm 镍铬合金的起爆电桥;(b) 溅射 50nmCr 与 300nmAu 在镍铬合金桥区两端,用于引出电极;(c) 溅射 100nm 二氧化硅绝缘层,保证 Al/CuO 含能薄膜不会影响镍铬合金的导电,由铝与铜的反应方程式及研究得到 Al 与 CuO 的溅射比例应为 1 : 2,单个周期溅射 Al 的厚度为 25nm,溅射 CuO 厚度为 50nm,共溅射 30 个周期,得到含能薄膜总厚度为 2.25 μm 。将制作完成的 4 部分器件进行装配封装,得到器件的实物图如图 7 所示。

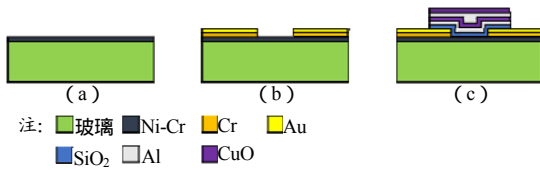
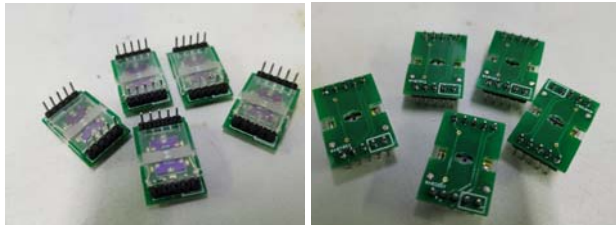


图 6 起爆器的工艺流程示意图

Fig.6 The fabrication process of the detonator



(a) 微起爆装置正面图 (b) 微起爆装置背面图

图 7 微起爆装置实物图

Fig.7 The entity of the micro-detonated device

3 性能测试

对该内置 MEMS 隔断机构的微起爆装置进行性能测试, 包含 3 个部分: 隔断机构的运动性能测试, 起爆器的起爆性能测试及二者间的联调测试。

该装置的隔断机构能够通过对 6 路信号源的控制实现中间隔断隔板的双向往复位移, 驱动电压为 11V, 隔板位移距离为 1mm, 能够实现装置在安全状态与解保状态间的往复切换。其解保状态与安全状态的对比如图 8 所示。

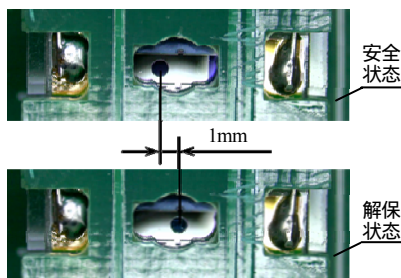


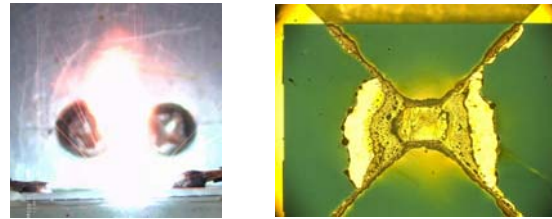
图 8 隔断机构安全与解保状态对比图

Fig.8 The condition contrast of the safety and arming device

对起爆器的电爆性能测试采用恒压起爆方式, 在起爆器两端接通直流电源, 在 64V 的恒压激励下起爆器作用, 产生的火焰高度约 9mm, 如图 9 (a) 所示。起爆器起爆前的均值电阻为 3.4 Ω , 起爆后的桥区情况如图 9 (b) 所示。

由图 9 可以看出, 该起爆器起爆产生火焰明亮, 并向四周散射高温等离子体。桥区上方的含能薄膜反应较为完全, 并沿电极向两边有一定程度的扩散; 在

电极边缘处, 由于边缘处的层断使得铝/氧化铜的接触面积更大, 故 Al/CuO 复合含能薄膜沿电极边缘反应剧烈。

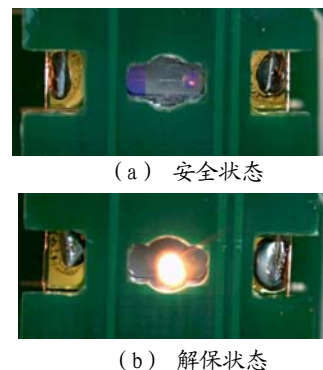


(a) 起爆器作用产生火焰 (b) 起爆后桥区

图 9 起爆器作用后火焰及桥区

Fig.9 The flame and bridge area of detonator after initiation

将隔断机构与起爆器集成为微起爆装置进行联合调试, 在 64V 恒压激励下进行起爆测试。安全状态下其结果如图 10 (a) 所示, 可见在隔板错位的情况下, 隔板能够较好地阻隔火焰, 并能通过缝隙观察到火焰产生的余光。解保状态下其结果如图 10 (b) 所示, 在隔板对正情况下, 可以看到火焰较好地穿过隔板, 并且具备一定的点火高度。



(a) 安全状态

(b) 解保状态

图 10 微起爆装置起爆过程对比图

Fig.10 The contrast of the detonation process of micro-detonated device

4 结论

(1) 设计的隔断机构由电热执行器进行驱动, 经仿真及实验验证, 其在 11V 电压驱动下通过 4 个电热执行器间的相互配合实现隔板 1mm 的双向往复移动。(2) 设计的起爆器由镍铬合金起爆桥及 Al/CuO 含能复合薄膜组成, 可在 64V 恒压刺激下起爆, 产生高度约为 9mm 的火焰。(3) 联合测试结果表明, 该火工品中的隔断机构在安全状态下能够较好地隔断起爆器产生的火焰, 且在解保状态下能够使火焰顺利

通过隔断机构。(4) 该微起爆装置整体尺寸较小, 具有较高的集成化程度, 且与 MEMS 技术的兼容性较好, 可实现批量化生产, 对我国火工品研究具有一定的探索性意义。

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.
- [2] 赵学伟. 激光起爆引信 MEMS 安全系统设计研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [3] 曹始发. 爆炸箔起爆器的结构设计与性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2016.
- [4] 贾昕. Al/CuO 复合半导体桥设计及发火性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- [5] Robinson C H, Hoang T Q, Gelak M R, et al.. Materials, fabrication and assembly technologies for advanced MEMS-based safety and arming mechanisms for projectile munitions [Z]. Army Research Development and Engineering Centerduse Div, 2006.
- [6] LI X, ZHAO Y, HU T, et al.. 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): 2 367-2 374.
- [7] 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.
- [8] 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): 1 088-1 099.

第六届“纳米结构含能材料及其应用技术”研讨会在西安隆重召开

2020 年 11 月 14 日至 15 日, 第六届全国“纳米结构含能材料及其应用技术”学术研讨会(NSEMs WORKSHOP 2020)在陕西西安隆重召开。本次大会由陕西应用物理化学研究所国防科技重点实验室、南京理工大学微纳含能器件工业和信息化部重点实验室、中国工程物理研究院化工材料研究所联合主办, 陕西应用物理化学研究所、西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室、中北大学和北京理工大学联合承办。会议旨在促进纳米结构含能材料及含能器件的基础研究和技术应用, 并为国内相关研究团队提供交流和合作的平台。

北方特种能源集团有限公司党委书记、董事长、陕西应用物理化学研究所所长蒲加顺博士在大会开幕式致欢迎词。蒲董事长指出“纳米结构含能材料及其应用技术”学术研讨会已成为展示 MEMS 火工品行业技术前沿、汇聚行业发展优势力量的新舞台, 在“十四五”战略规划的谋局开篇之际, 面向“十四五”及科技强国、强军建设需求, 围绕 MEMS 火工品技术领域的发展急需, 以此次会议为契机, 共同围绕“纳米结构含能材料及其应用”的后续发展方向, 凝聚力量, 积极作为, 勇于创新, 促进 MEMS 火工品产学研的高效转化, 有效带动火工品学科发展。

本次会议由陕西应用物理化学研究所褚恩义研究员担任会议主席, 大会包括特邀报告和技术交流两部分, 分别由沈瑞琪教授、张志铭研究员、赵玉龙教授、杨利教授、张文超教授、安崇伟教授、朱朋教授主持。6 名专家进行了微起爆技术、叠氮化物薄膜的制备及性能调控、微火工系统集成中的关键技术、含能微系统内涵及典型应用、典型 MEMS 火工品微执行器研究及性能测试、微纳结构传爆药设计与装药技术的特邀专题报告, 26 名学者围绕纳米结构含能材料及含能器件的制备、表征及应用等内容做了大会交流报告。

各位专家学者的报告引起了与会人员的广泛关注, 与会专家一致认为本次会议各研究团队展示的研究成果, 代表了本研究领域的技术前沿, 充满创新活力, 洋溢探索激情, 达到了提供交流平台、共促技术发展的目的。

薛艳报道