

文章编号:1006-9941(2023)03-0229-06

一种内置双层电热 MEMS 安保机构的微点火序列

王柯心¹,胡腾江¹,赵玉龙¹,任 炜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: 为实现点火序列的高安全性及微封装体积,研究设计并制作了一种内置双层电热 MEMS 安保机构的微点火序列,该序列包含了点火器、安保机构及点火药等核心部件,整体封装尺寸为 $\Phi 10\text{ mm}\times 3.3\text{ mm}$ 。其中安保机构为具有双稳态功能的双层结构,前端的点火器为覆盖有 Al/CuO 微装药的 NiCr 桥箔,桥箔电极采用背部无引线封装的方法来降低序列封装体积,后端的点火药采用硼/硝酸钾(Boron/potassium nitrate)点火药。采用控制 Al/CuO 装药量的方法对其安保性能进行测试,结果表明该序列在 Al/CuO 装药尺寸为 $\Phi 800\text{ }\mu\text{m}\times 30\text{ }\mu\text{m}$ 时安保机构在安全状态下能够阻隔前点火器火焰能量的传递并保持结构功能完整,在解保状态下能够使后端的点火药被点火器点燃,具备点火隔火能力。

关键词: 点火序列;安保机构;电热执行器;MEMS;BPN

中图分类号: TJ5; TJ450.2

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022211

0 引言

以微机电系统 Micro-Electro-Mechanical System (MEMS) 技术为基础的第四代火工品具有换能信息化、结构微型化和序列集成化的主要特点,可实现新一代武器装备系统向微型化、集成化与智能化方向的进一步发展^[1]。MEMS 火工品中的微点火序列可将微点火器、微安保机构和微点火药封装在有限空间内,形成具有高度集成化特征的微型化装置。其中序列前端的 MEMS 点火器通常为覆盖有纳米铝热剂的半导体桥(SCB)或金属桥箔,可在低电压刺激下产生一定高度的火焰^[2-5]。序列中部的微安保机构主要通过由可活动隔板组成的隔断机构来实现对点火或传爆序列能量的控制。现有的 MEMS 安保机构已经具有微型化的器件尺寸以及多样化的驱动机理,如惯性驱动、电热驱动、电磁驱动及烟火驱动^[6-7],但涉及安保机构与序列

结构集成的研究却相对较少^[8-10],安保机构的安保功能没有得到序列验证,实际应用困难。

王柯心^[11]提出了一种基于电热驱动安保机构的 MEMS 点火序列,采用 NiCr 桥箔点火器、电热驱动安保机构及斯蒂芬酸铅点火药。研究发现该点火序列已经具备了点火隔火能力,但由于该点火序列中输出端的点火药采用斯蒂芬酸铅为敏感序列,安保机构设置在点火器与斯蒂芬酸铅点火药之间只能有限提高序列的安全性。此外,该安保机构维持解保状态需要各执行器持续驱动以保持隔板位移,而电热执行器的长时间驱动会提高器件整体温度进而降低器件可靠性。再有,序列中点火器的 NiCr 桥箔需要紧贴安保机构装配,其桥箔电极需要延伸出安保机构遮盖范围才能从正面引出,这将增加点火器器件尺寸以及序列整体封装体积。针对此问题,本研究提出了一种内置双层电热 MEMS 安保机构的微点火序列,该序列使用 BPN 点火药作为其输出端,BPN 点火药为直列式序列的许用装药,将安保机构设置在点火器与 BPN 点火药间可显著提升其安全性。为匹配 BPN 点火药所需的火焰能量,NiCr 桥箔上 Al/CuO 含能薄膜的制备工艺由溅射镀膜方法改变至物理混合油墨滴注的方法以增加装药量,并采用控制 Al/CuO 装药量的方法对安保机构安

收稿日期:2022-08-17;修回日期:2022-10-28

网络出版日期:2023-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助(52105585)

作者简介:王柯心(1997-),男,博士研究生,主要从事 MEMS 火工品研究。e-mail:wkx741565@stu.xjtu.edu.cn

通信联系人:胡腾江(1990-),男,副研究员,主要从事 MEMS 火工品研究。e-mail:htj047@xjtu.edu.cn

引用本文:王柯心,胡腾江,赵玉龙,等.一种内置双层电热 MEMS 安保机构的微点火序列[J].含能材料,2023,31(3):229-234.

WANG Ke-xin, HU Teng-jiang, ZHAO Yu-long, et al. Design of a MEMS Ignition Device with a Double-layer Barrier Electro-thermal Safety and Arming Device [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(3):229-234.

保性能以及序列能量匹配关系进行测试。NiCr 桥箔基底选为陶瓷电路板, 陶瓷基板两端设置有焊盘结构, 可将桥箔电极引出至点火器背部, 进一步降低序列封装体积。

1 微点火序列的结构设计与制作

1.1 微点火序列总体结构设计

研究中的微点火序列是由多个组件呈线性装配而成, 其结构如图 1a 所示, 整体尺寸为 $\Phi 10\text{ mm} \times 3.3\text{ mm}$, 主要功能器件包括点火器、MEMS 双层安保机构及点火药。该序列中使用了三层电路板结构来实现各核心器件间的电路连接与器件封装, 其中上层电路板设置有圆孔来装配 BPN 点火药; 下层电路板设置有方孔可使点火器穿过下层电路板与安保机构连接; 点火器电路板可将点火器贴装在电路板上, 各组件装配完成后如图 1b 所示。两层安保机构的电极分别从两侧预留的窗口处以金丝键合的方式连接至各自的电路板上, 再从器件边缘位置处的焊盘引出。该微点火序列中心位置的剖视图如图 1c 所示, 其核心部件的相对位置关

系如图 1d 所示, 安保机构的中心位置处为双层隔板结构, 在其上方是 BPN 点火药, 下方覆盖住的是点火腔室用于连接点火器的 NiCr 金属桥箔。

1.2 安保机构结构设计

安保机构采用文献[12]设计的一种带有双稳态机制的安保机构, 如图 2 所示。该安保机构由双层 SOI 硅片组成(器件层厚度 $50\text{ }\mu\text{m}$; 埋氧层厚度 $3\text{ }\mu\text{m}$; 衬底层厚度 $400\text{ }\mu\text{m}$), 其总体尺寸为 $6.8\text{ mm} \times 6.8\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$, 在器件中心处形成了总厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的双层交叉裂缝隔板结构, 连接点火药的顶部腔室尺寸为 $\Phi 1\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$, 连接点火器的底部腔室作为点火孔尺寸为 $\Phi 0.5\text{ mm} \times 0.4\text{ mm}$, 点火总间隙为 0.9 mm 。

1.3 点火器及点火药的结构设计

MEMS 点火器为在氧化铝陶瓷基底上制备的 NiCr 合金桥箔, 其上覆盖有 Al/CuO 微装药, 尺寸为 $4.4\text{ mm} \times 2.2\text{ mm} \times 0.5\text{ mm}$, 结构如图 3 所示。点火器中央的 NiCr 桥箔为 $300\text{ }\mu\text{m} \times 800\text{ }\mu\text{m}$ 的矩形桥区。Al/CuO 含能材料填装在药腔中置于 NiCr 桥箔上方, 装药量通过药腔尺寸来控制。陶瓷基底两侧通过焊盘

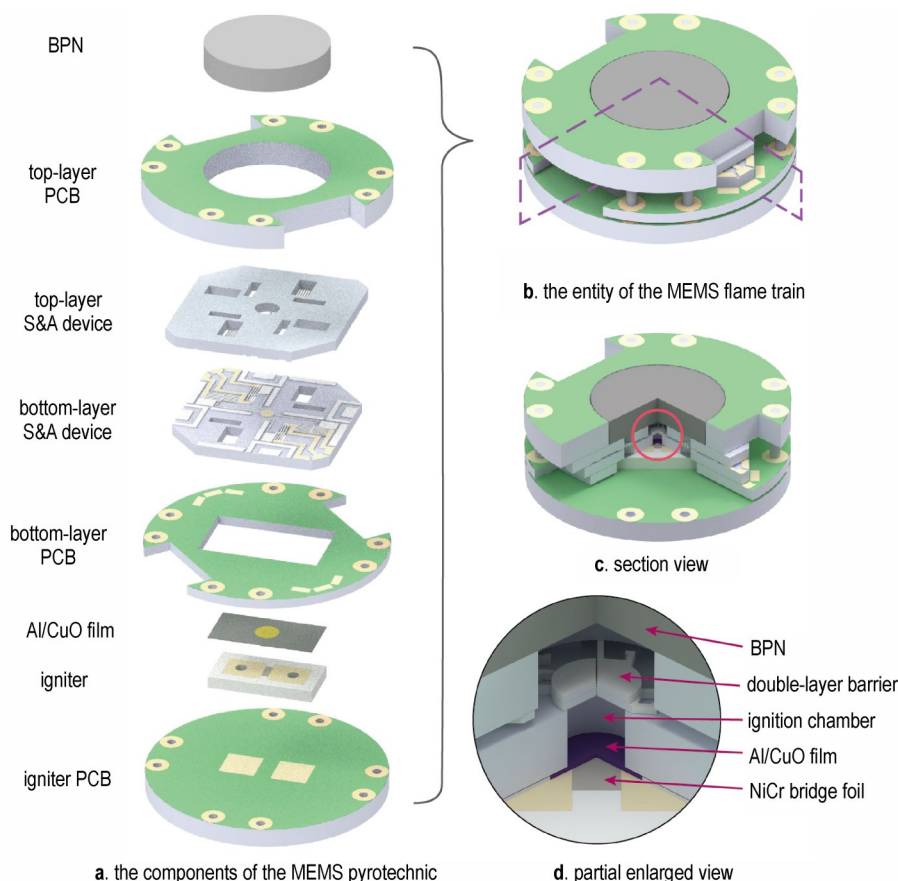


图1 微点火装置结构示意图

Fig.1 Structure of the MEMS pyrotechnic

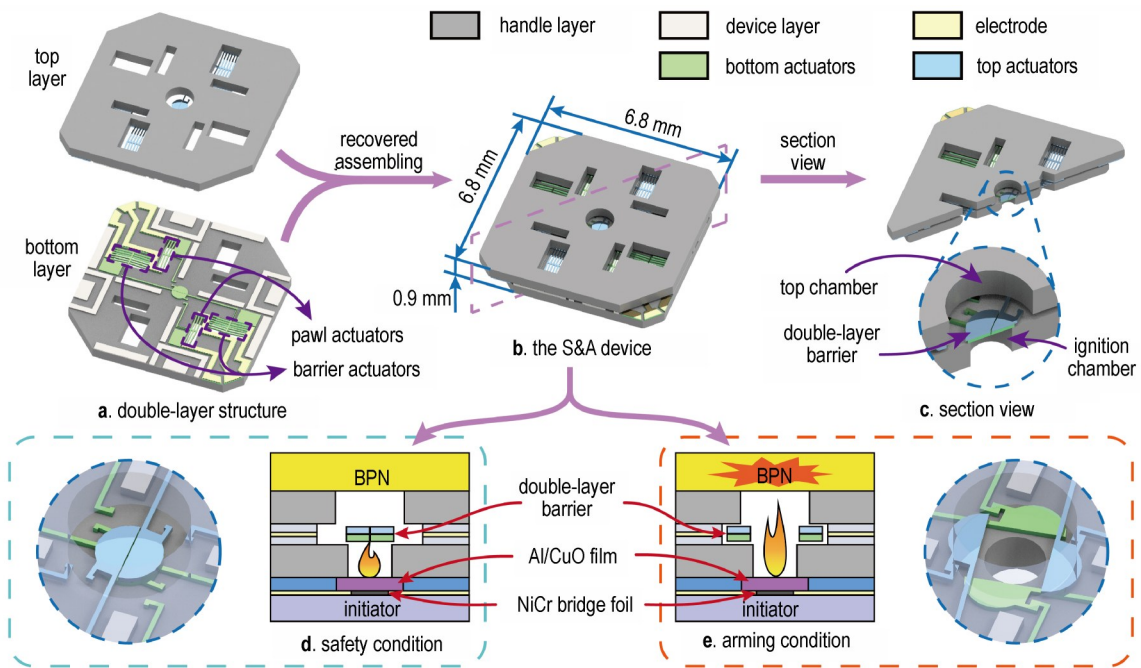


图2 安保机构结构示意图^[9]

Fig.2 Structure of the S&A device^[9]

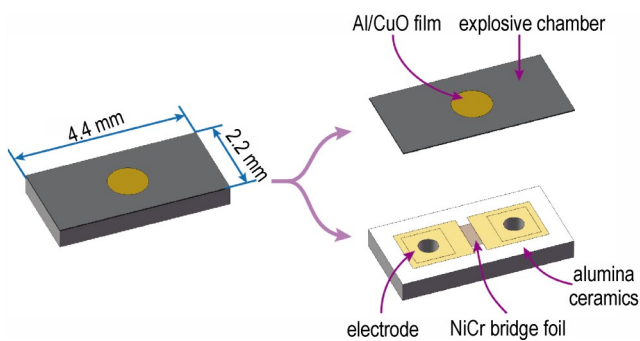


图3 MEMS 点火器结构示意图

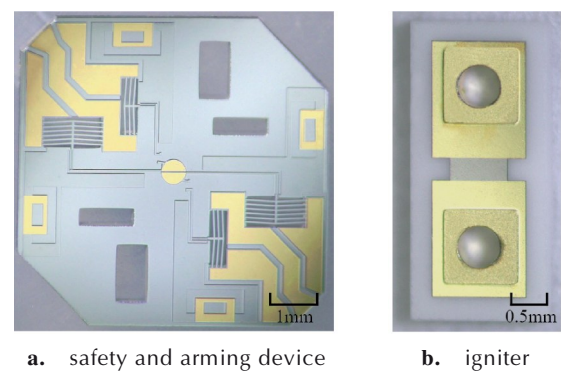
Fig.3 Structure of the MEMS igniter

结构可将点火器的电极从正面引出到背面,进而降低序列封装体积。当激励电压施加在 NiCr 桥箔两端,桥箔会产生高温点燃其上端的 Al/CuO 微装药产生火焰。Al/CuO 微装药可有效增加 NiCr 桥箔的输出能量,使其更有利于实现间隙点火。

点火药采用国军标 (GJB 6217-2008) D 型 BPN 点火药,药柱尺寸为 $\Phi 5 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。

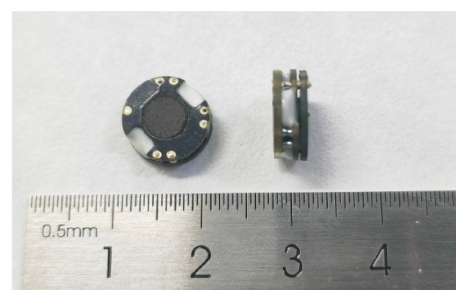
1.4 微点火序列的制作

该点火序列采用各部件分体制作再装配的制备路线,其中安保机构采用常规工艺流程制备^[11-15],利用深反应离子刻蚀 (Deep Reactive Ion Etching) 工艺对 SOI 硅片的正面和背面结构分步进行刻蚀,并利用磁控溅射工艺制备电极,最后利用氢氟酸腐蚀 SiO₂ 牺牲层来释放可活动部件,制备得到安保机构如图 4a 所示。点火



a. safety and arming device

b. igniter



c. MEMS pyrotechnic

图4 微点火序列实物图

Fig.4 MEMS pyrotechnic

器的基底为氧化铝陶瓷基底,基底上的焊盘结构采用电路板制板工艺制备,再在基底上利用磁控溅射工艺逐层镀膜形成金属桥箔及电极结构,制备得到的点火器如图 4b 所示。Al/CuO 含能材料的药腔采用不同厚度的不锈钢带激光切割成型再装配至 NiCr 桥箔的上方。

Al/CuO 微装药的制备工艺如下:选取粒径 1~3 μm 的 Al 粉粒与氧化铜超声物理混合得到微米铝热剂^[16],而后选取羟丙基甲基纤维素(HPMC)作为粘结剂,选取 *N,N*-二甲基甲酰胺(DMF)作为有机溶剂,混合得到铝热剂油墨,将油墨滴注在药腔中使其在 NiCr 桥箔上方成型。BPN 点火药药柱利用压药模具压制成型,得到药柱密度为 $(1.47\pm 0.21) \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。各部件独立加工完成后,通过耐高温环氧树脂胶逐层连接形成微点火序列,如图 4c 所示。

2 序列安保功能实验

研究采用控制 Al/CuO 装药量的方法对安保机构安保性能以及序列能量匹配关系进行测试。其中点火器采用 GJB5309.9-2004 电发火感度试验的电容放电发火方法进行点火实验,实验条件为 100 μF 容量钽电容,电容充电电压 25 V。Al/CuO 微装药的药腔直径固定为 800 μm ,通过调控药腔厚度来控制装药量,药腔厚度分别设置为 30, 50, 80 μm 和 100 μm ,每种装药厚度测试八组(四组安全状态;四组解保状态)。

3 结果与讨论

研究对安保机构进行了驱动性能实验,结果如

图 5a 及图 5d 所示^[9],安保机构可在 17 V 驱动电压下实现在安全状态与解保状态间的切换。研究对点火器进行了点火实验, NiCr 桥箔的电阻为 1 Ω ,可在 25 V 电压 100 μF 电容的电容放电方式下实现可靠点火激发 Al/CuO 微装药。

研究对点火序列在不同的 Al/CuO 装药量下分别进行了点火隔火性能实验,得到其测试结果如表 1 所示,由测试结果可以看出点火序列在 Al/CuO 装药厚度为 30 μm 及 50 μm 时均取得了所设计的安保功能;在 Al/CuO 装药厚度为 80 μm 及 100 μm 时隔板难以在隔火测试中阻隔点火器的火焰引燃点火药。

隔板在安全状态下阻隔 30 μm 装药厚度 Al/CuO 火焰能量后的状态如图 5b 所示,下层隔板发生轻微打开,点火腔室边缘处产生小面积烧灼痕迹,隔板结构保持完整可正常运动。隔板在安全状态下阻隔 50 μm 装药厚度 Al/CuO 火焰能量后的状态如图 5c 所示,下层隔板产生大面积打开,上层隔板张开轻微缝隙,点火腔室周围沿下层隔板打开方向产生大面积烧灼痕迹,隔板结构保持完整但下层隔板运动受到了燃烧残留物的阻碍无法恢复至安全位置。因此,该点火序列在 Al/CuO 装药厚度为 30 μm 时取得隔火效果明显优于厚度为 50 μm 的效果。

点火序列解保状态下进行点火测试,结果如图 5e

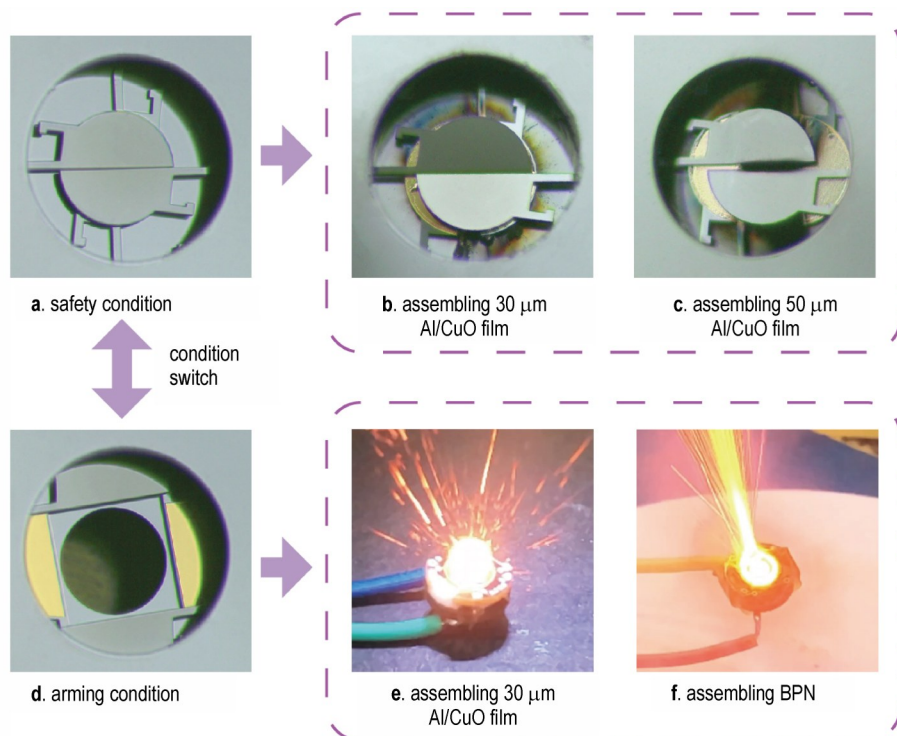


图 5 微点火装置安保功能测试

Fig.5 Results of the ignition test

表 1 微点火序列安保机构测试结果

Table 1 Test result of the safety and arming function

thickness of Al/CuO film / μm	charge quantity of Al/CuO film / mg	ignition test on safety condition	charge quantity of Al/CuO film / mg	ignition test on arming condition
30	0.15	safety	0.13	ignition
	0.16	safety	0.20	ignition
	0.14	safety	0.15	ignition
	0.18	safety	0.17	ignition
50	0.27	safety	0.25	ignition
	0.24	safety	0.28	ignition
	0.26	safety	0.23	ignition
	0.25	safety	0.26	ignition
80	0.44	ignition	0.40	ignition
	0.41	ignition	0.43	ignition
	0.39	safety	0.43	ignition
	0.39	ignition	0.42	ignition
100	0.50	ignition	0.51	ignition
	0.53	ignition	0.49	ignition
	0.52	ignition	0.53	ignition
	0.53	ignition	0.55	ignition

所示, 30 μm 装药厚度 Al/CuO 火焰能量可以顺利的穿出安保机构, 且具备一定点火高度。在装配上 BPN 点火药后, 结果如图 5f 所示, 点火药也可以被顺利引燃。因此, 点火序列在 Al/CuO 装药厚度采用 30 μm 时实现了序列能量的匹配, 即在安全状态下, 火焰能量可被安保机构阻隔; 解保状态下, 火焰能量可引燃输出端点火药。

4 结论

(1) 研究设计的微点火序列利用了点火器背部无引线封装方法以及多层电路板的封装结构设计, 实现了在 $\Phi 10 \text{ mm} \times 3.3 \text{ mm}$ 的封装尺寸内集成了覆盖有 Al/CuO 微装药的 NiCr 桥箔点火器、电热驱动双稳态 MEMS 安保机构以及 BPN 点火药等核心部件, 具备点火隔火的核心功能。

(2) 点火药所需的间隙点火能量以及安保机构的隔板隔火强度, 在点火器 Al/CuO 药腔尺寸设计为 $\Phi 800 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$ 时形成了合适的能量匹配, 即安全状态下, 隔板隔火后仍能保持完整的结构与功能; 解保状态下, 点火药可以被可靠点火。

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, 01: 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, 01: 1-5.

- [2] LIU W, SU Q, XUE Y, et al. Design and performance of NiCr-based micro-heater with lower excitation energy [C]. *Journal of physics: Conference series*, 2020, 1507: 22015.
- [3] AHN J Y, KIM S B, KIM J H, et al. A micro-chip initiator with controlled combustion reactivity realized by integrating Al/CuO nanothermite composites on a microhotplate platform[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2015, 26 (1): 15002.
- [4] 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.
- [5] DAI J, WANG C, WANG Y, et al. From nanoparticles to on-chip 3D nanothermite: electrospray deposition of reactive Al/CuO@NC onto semiconductor bridge and its application for rapid ignition[J]. *Nanotechnology*, 2020, 31(19): 195712.
- [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, 27(10): 3599-3610.
- [8] 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.
- [9] ZHU P, HOU G, WANG HY, 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.
- [10] YOUNG TT. DoD MEMS fuze reliability evaluation [C]//59th Annual Fuze Conference, 2016.
- [11] WANG K, HU T, ZHAO Y, et al. Research on a MEMS pyrotechnic with a double-layer barrier safety and arming device [J]. *Defence Technology*, 2021, 18(11): 2034-2044.
- [12] WANG K, HU T, ZHAO Y, et al. Design of a double-layer electrothermal MEMS safety and arming device with a bistable mechanism [J]. *Micromachines*, 2022, 13(7): 1076.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] FANG K, HU T, JIANG X, et al. Research on a MEMS based encrypted rotary safety and arming device[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2020, 301: 111781.
- [16] XU J, CHEN Y, ZHANG W, et al. Direct ink writing of nAl/pCuO/HPMC with outstanding combustion performance and ignition performance[J]. *Combustion and Flame*, 2022, 236: 111747.

Design of a MEMS Ignition Device with a Double-layer Barrier Electro-thermal Safety and Arming Device

WANG Ke-xin¹, HU Teng-jiang¹, ZHAO Yu-long¹, REN Wei²

(1. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physical Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to achieve the high safety of ignition device and micro package volume, a MEMS ignition device has been designed with a double-layer barrier electro-thermal safety and arming device in this work. The device is of three core components including an igniter, a safety and arming device, and an ignition powder, all of which are assembled linearly within an overall size of $\Phi 10$ mm \times 3.3 mm. The S&A device has a double-layer structure with bistable function. The frontend initiator, which is fabricated on a ceramic circuit board, is a NiCr bridge foil to be covered with an Al/CuO energetic film. The two pads from the circuit board lead the bridge foil electrode to the backend device, there by reducing the package volume of the sequence. BPN is selected as the ignition powder in the device. According to the safety and arming function test, the ignition device can prevent the igniter from lighting the ignition powder in safety condition, when the size of the Al/CuO is set to $\Phi 800$ μ m \times 30 μ m. Otherwise, the BPN ignition powder can be ignited in arming condition.

Key words: pyrotechnics; safety and arming device; electro-thermal actuator; MEMS; BPN

CLC number: TJ5; TJ450.2

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2022211

Grant support: National Natural Science Foundation of China (No.52105585)

(责编:姜梅)