

文章编号: 1003-1480 (2024) 03-0001-06

# 微起爆序列用硅基作动机构隔断特性研究

胡腾江<sup>1</sup>, 赵玉龙<sup>1</sup>, 谭明<sup>1,2</sup>, 何亚新<sup>2</sup>, 刘运斌<sup>2</sup>, 屈萍<sup>1,3</sup>

(1. 西安交通大学 精密微纳制造技术全国重点实验室, 陕西 西安, 710049; 2. 四川华川工业股份有限公司 技术中心, 四川 成都, 610100; 3. 陕西应用物理化学研究所, 陕西 西安, 710061)

**摘要:** 针对 MEMS 火工品的内置安全控制设计需求, 在硅基 MEMS 作动机构的基础上, 重点开展了硅基作动机构与微起爆传爆序列的集成化设计与能量匹配研究。该序列主要由微起爆器、微作动机构及传爆药组成。其中微起爆器的叠氮化铜装药尺寸为  $\Phi 0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 装药量为 1.5 mg; 微作动机构在 11 V 直流电压驱动下, 可以实现传爆通道的开启与闭合, 隔断位移为 743.06  $\mu\text{m}$ ; 传爆药为油墨直写方式制备的 CL-20 传爆药, 装药尺寸为  $\Phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , 装药密度为 1.66  $\text{g/cm}^3$ , 装药量约为 35 mg。研究表明该序列具备可靠起爆、传爆以及隔爆功能。

**关键词:** 微起爆传爆序列; 微起爆器; 微作动机构; 传爆药

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2024.03.001

## Research on the Blocking Character of the Silicon Actuator Using in the MEMS Pyrotechnics

HU Teng-jiang<sup>1</sup>, ZHAO Yu-long<sup>1</sup>, TAN Ming<sup>1,2</sup>, HE Ya-xin<sup>2</sup>, LIU Yun-bin<sup>2</sup>, QU Ping<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049; 2. Technical Center, Sichuan Huachuan Industries Co.Ltd., Chengdu, 610100; 3. Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

**Abstract:** In response to the technological needs of internal safety control of MEMS pyrotechnic devices, the integrated design and energy matching research of silicon-based MEMS actuators and micro detonation transmission sequences was focused based on silicon-based MEMS actuators. The sequence is mainly constituted by micro initiator, micro actuator and booster. The size of the copper azide charge for the micro initiator is  $\Phi 0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , with a charge mass of 1.5 mg; under the driving of 11V DC voltage, the micro actuator can achieve the opening and closing of the detonation channel, with a partition displacement of 743.06  $\mu\text{m}$ ; the CL-20 booster explosive is prepared by ink direct writing method, with a charge size of  $\Phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ , a charge density of 1.66  $\text{g/cm}^3$  and a charge mass of approximately 35 mg. The study show that the sequence has reliable initiation, detonation transmission, and explosion-proof functions.

**Key words:** Micro detonation transmission sequence; Micro initiator; Micro actuator; Booster

MEMS 火工品是包含微结构换能元、微装药以及微作动机构的第四代火工品<sup>[1-3]</sup>。其中微作动机构设置于含能器件与输出装药之间, 用于控制序列的能量传递。该作动机构可在特定驱动信号下实现能量传递通

道的开启与闭合, 是区别第三代火工品本质安全与第四代火工品自主安全的重要特征<sup>[2-3]</sup>。目前, 微作动机构主要采用 MEMS 工艺制作, 其机构中的隔板通常由硅或较薄的金属 (厚度为几十微米) 材料制作<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2024-02-17

作者简介: 胡腾江 (1990-), 男, 副研究员, 主要从事 MEMS 火工品、MEMS 安保装置技术研究。

通讯作者: 赵玉龙 (1968-), 男, 教授, 主要从事微纳特种器件设计研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52105585); 中国兵器装备集团基金项目 (EJ20-4019)。

引用本文: 胡腾江, 赵玉龙, 谭明, 等. 微起爆序列用硅基作动机构隔断特性研究[J]. 火工品, 2024(3): 01-06.

美国在 20 世纪 90 年代率先开展该领域的研究工作，从最初的独立器件研究逐步向集成化系统研究发展<sup>[5-8]</sup>。相对而言，国内对微作动机构的研究起步较晚，大多处于独立样件的研究<sup>[9-14]</sup>，序列集成与匹配方面的研究较少。

针对国内 MEMS 火工品领域的技术亟需，本文在硅基 MEMS 作动机构的基础上，重点开展了硅基作动机构与微传爆序列的集成化设计与能量匹配研究，提出了可适配于传爆序列的微作动机构原理样机。

## 1 微起爆传爆序列结构设计

### 1.1 微起爆传爆序列设计

微起爆传爆序列的总体方案如图 1 所示，器件由微作动机构、微起爆器及传爆药组成。

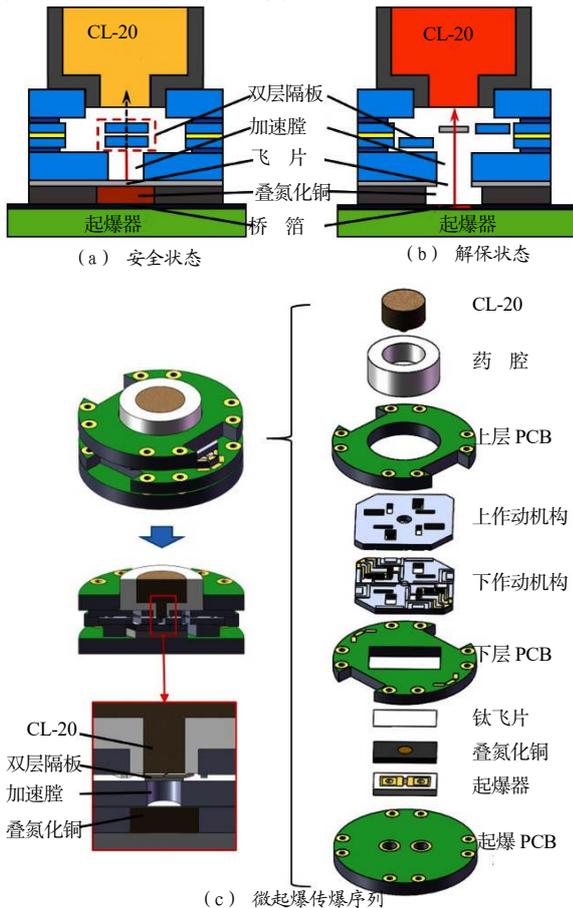


图 1 微起爆传爆序列总体方案

Fig.1 The scheme of micro detonation transmission sequence

图 1 中，微起爆器采用叠氮化铜驱动钛飞片的形式；微作动机构设计在微起爆器与传爆药之间，通过控制微作动机构中隔板的开启与闭合，来实现序列解

保与安全状态的可靠切换；传爆药为油墨直写方式制备的 CL-20 传爆药，装药尺寸为  $\Phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ，装药密度为  $1.66 \text{ g/cm}^3$ ，装药量约为  $35 \text{ mg}$ 。

该微起爆传爆序列的工作原理为：在安全状态下，微作动机构中的隔板位于在加速腔上方，飞片无法与后端的 CL-20 发生直接碰撞；当器件收到解保信号时，微作动机构中的驱动单元驱动隔板位移，当隔板移开时，器件处于解保状态，此时飞片可直接撞击并引爆 CL-20，完成爆轰能量的传递与放大。

### 1.2 微起爆器设计

MEMS 起爆器的结构由叠氮化铜药腔、Au 电极、NiCr 桥箔换能元以及陶瓷基底组成，如图 2 所示。

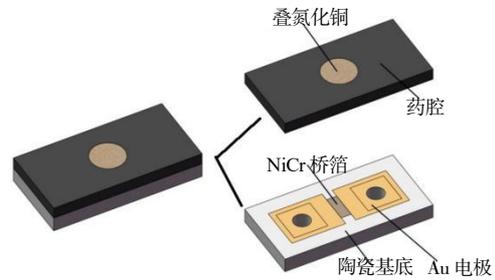


图 2 微起爆器基本结构组成

Fig.2 The scheme of the micro initiator component

图 2 中，陶瓷基底具备低导热、电绝缘等性能，是换能元的优良载体。NiCr 桥箔换能元是电学能量转换与爆轰能量引发的关键元件，其通常具备 H 型桥区结构<sup>[15]</sup>。当电流流过换能元时，由于桥区宽度急剧缩小，H 型桥区中心温度会迅速超过 NiCr 熔点，此时桥区材料转变为高温等离子体，并引发覆盖其表面的叠氮化铜产生爆轰。

### 1.3 微作动机构设计

微作动机构需要在电信号的控制下实现对传爆通道的快速开启，并且需要具备一定的结构强度来实现对爆轰能量的可靠隔断。考虑到上述基本特性，提出一种双层四隔板隔断机构。该隔断机构由双层 SOI 硅片组成（器件层厚度  $50 \mu\text{m}$ ；埋氧层厚度  $3 \mu\text{m}$ ；衬底层厚度  $400 \mu\text{m}$ ），芯片总体尺寸为  $8.5 \text{ mm} \times 8.5 \text{ mm} \times 0.9 \text{ mm}$ ，其结构如图 3 所示。

该隔断机构将两片 SOI 器件层相对布置，形成器件层朝内、衬底层朝外的结构形式。在衬底层中设计了直径为  $0.7 \text{ mm}$  的传爆孔，用于实现 MEMS 起爆器爆轰能量的轴向传递。

每层隔断机构包含两对结构相互对称的隔板驱动器,隔板驱动器主要由V型电热执行器、柔性杠杆、隔板组成,如图4所示。

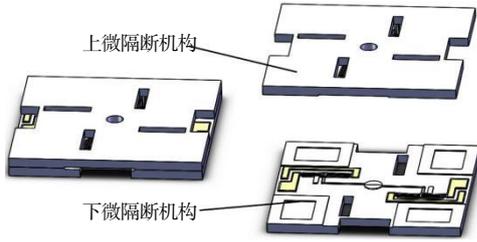
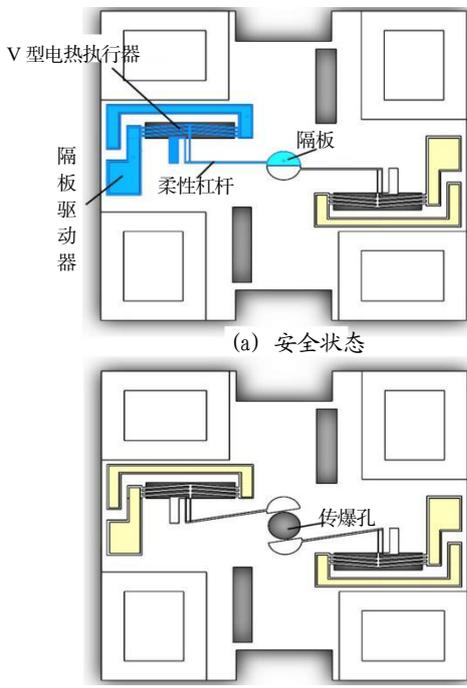


图3 微作动器  
Fig.3 Micro actuator



(a) 安全状态  
(b) 解保状态  
图4 微隔断机构  
Fig.4 Micro barrier

作动机构中的隔板驱动器采用电热原理。当电流通过V型电热执行器时,在焦耳效应与热膨胀效应的共同作用下,V型梁的中点会产生相应的位移变形。由于硅材料的热膨胀系数较小,V型电热执行器的输出位移十分有限,因此,设计了柔性杠杆来实现对微小位移的放大。经计算,放大后的隔板位移可以达到370 μm,如图5所示。

由于整体结构呈对称布局,因此最终的输出位移约为2倍的隔板运动位移,即740 μm,大于传爆孔的直径(700 μm),说明在11 V驱动电压下,作动机构可以实现传爆孔的完全开启,满足传爆的功能要求。

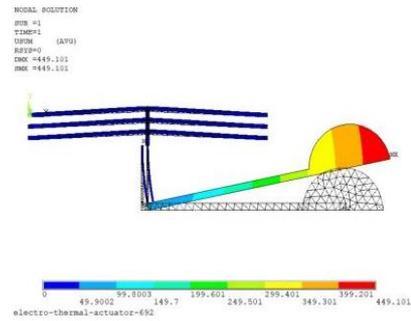


图5 隔板驱动器稳态输出位移  
Fig.5 The stable output displacement of the bulkhead actuator

## 2 微起爆传爆序列组件的MEMS制作与集成

### 2.1 微起爆器的加工制作

微起爆器主要在陶瓷片上进行制作,通过磁控溅射以及剥离工艺实现相应的金属箔的制作;桥区两侧的电极及含能薄膜均可通过磁控溅射工艺逐层图形化。微起爆器的制作流程如图6所示。

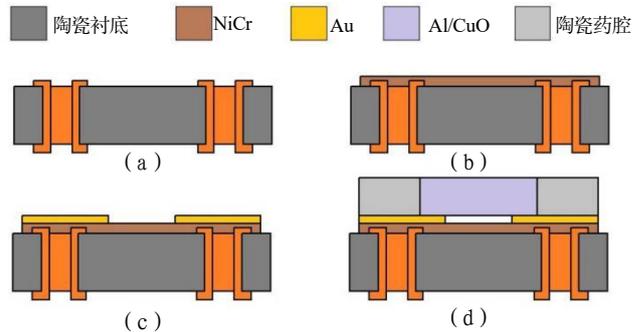


图6 微起爆器制作流程  
Fig.6 The fabrication process of the micro initiator

图6(a)为利用常规PCB制造工艺在氧化铝陶瓷基底上制备Cu焊盘,通过该焊盘可将微起爆器的电极从器件正面引出到背面来降低封装尺寸,并提高系统集成化程度。图6(b)为通过磁控溅射工艺制作溅射1.2 μm NiCr合金桥箔,并利用光刻胶作为掩蔽,通过腐蚀工艺对其进行图形化;图6(c)为通过磁控溅射工艺制作溅射50 nm Cr与300 nm Au,并利用光刻胶作为掩蔽,通过剥离工艺对其进行图形化。图6(d)为将填充好叠氮化铜药剂的陶瓷药腔,通过粘接工艺,实现与换能元陶瓷衬底的连接,完成微起爆器装配,如图7所示。

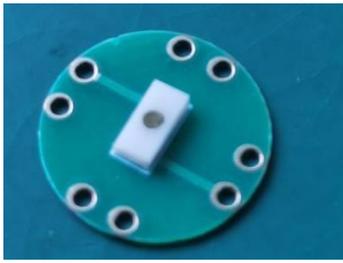


图7 微起爆器

Fig.7 The micro initiator

## 2.2 微作动机构的加工制作

微作动机构是整体器件的关键组成部分,本研究利用 SOI 硅片的特殊性质来简化可动件的制作工艺。为了保证器件的结构强度,选用了  $50\ \mu\text{m}$  厚器件层,  $3\ \mu\text{m}$  厚绝缘层,以及  $400\ \mu\text{m}$  厚衬底层的 SOI 硅片,具体工艺流程如图 8 所示。

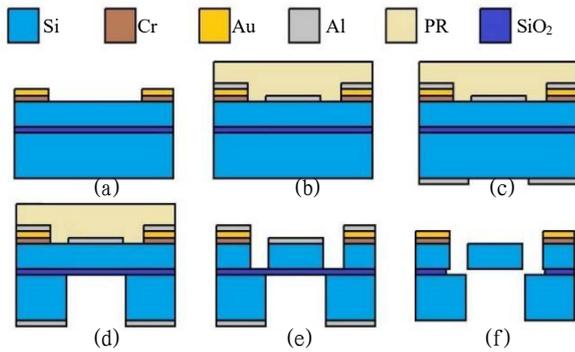


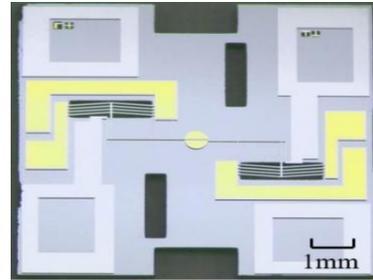
图8 微作动机构制作工艺流程

Fig.8 The fabrication process of the micro actuator

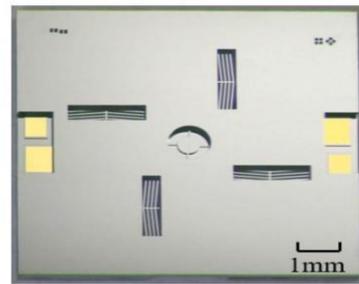
图 8 (a) 为在 SOI 器件层上制作  $50\ \text{nm}$  Cr 膜与  $300\ \text{nm}$  Au 膜作为电极材料,并用剥离的方式完成电极图形的转移;图 8 (b) 为利用溅射剥离的方式在上步工艺表面制作一层  $400\ \text{nm}$  的 Al,并实现驱动器结构图形的转移;图 8 (c) 为对 SOI 器件层用光刻胶进行保护,并在 SOI 衬底层上溅射剥离出  $400\ \text{nm}$  Al 膜;图 8 (d) 为利用 ICP 深干法刻蚀工艺在 SOI 衬底层上刻蚀出相应工艺深腔,背腔深度为  $400\ \mu\text{m}$ ,该部分深腔结构既可以提高电热驱动器的热效率,又有利于可动结构的释放;图 8 (e) 为利用丙酮去除 SOI 器件层的光刻胶保护,利用 ICP 工艺完成 SOI 器件层的干法刻蚀;图 8 (f) 为将刻蚀好的硅片放入  $\text{H}_3\text{PO}_4$  溶液中去除金属 Al 掩蔽层,清洗并烘干,利用激光划片工艺实现芯片的分离。将芯片放入 BHF 缓冲液中,去除 SOI 硅片的中间绝缘层,完成对可动部件的

释放。

将 2 个制备完成的单层微作动机构组装,可形成双层结构,如图 9 所示。



(a) 单层作动机构



(b) 双层作动机构

图9 微作动机构

Fig.9 The micro actuator

## 2.3 微起爆传爆序列装配

将独立加工完成的各部件按照系统设计方案逐层装配到一起,其中叠氮化铜采用原位生长的方式填装,CL-20 采用直写打印的方法填装。各层之间采用耐高温环氧树脂胶连接,电路采用金丝球焊法连接。装配完成的微起爆传爆序列如图 10 所示。

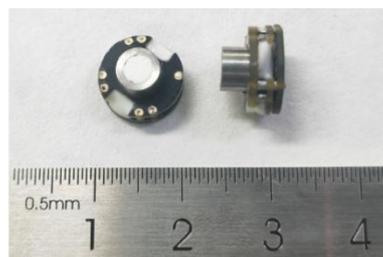


图10 微起爆传爆序列

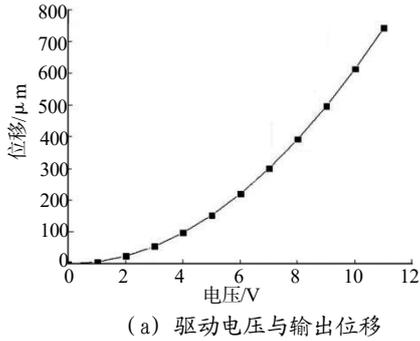
Fig.10 The micro detonation transmission sequence

## 3 微作动机构隔断性能测试与序列匹配验证

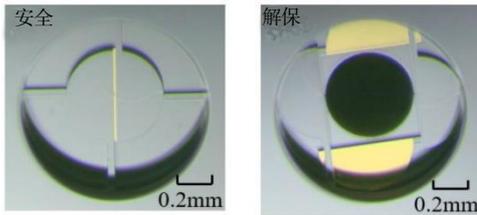
### 3.1 微作动机构输出位移测试

在起爆测试前,微作动机构需要在相应电压驱动

下，完成隔板的完全开启，因此，需要先对微作动机构输出位移进行测试。测试过程中，驱动电压从 2~11 V 共 10 组（每组间隔 1 V）进行测试，结果如图 11 所示。由图 11 可以看出，微作动机构的稳态输出位移随着驱动电压的升高而升高，当驱动电压达到 11 V 时，隔板的总位移达 743.06  $\mu\text{m}$ ，传爆孔可以完全开启（孔径为  $\Phi 700 \mu\text{m}$ ）。



(a) 驱动电压与输出位移



(b) 工作状态

图 11 微作动机构输出位移测试结果

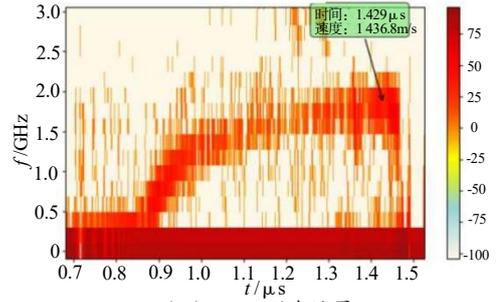
Fig.11 The output displacement result of micro actuator

### 3.2 微起爆器飞片速度测试

在起爆传爆序列中，微起爆器主要通过叠氮化铜推动 Ti 飞片来实现起爆。为了确保起爆的可靠性，需要对 Ti 飞片的速度进行测试。飞片测速条件为：起爆电压 15 V，起爆电容 47  $\mu\text{F}$ ，叠氮化铜装药尺寸  $\Phi 0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ，装药量约 1.5 mg，Ti 飞片厚度 25  $\mu\text{m}$ ，加速膛直径 700  $\mu\text{m}$ 。飞片测速主要采用光子多普勒测速仪 PDV 来实现，Ti 飞片速度测试结果如图 12 所示。



(a) 钛飞片



(b) PDV 测速结果

图 12 Ti 飞片测速结果

Fig.12 The speed of the Ti flyer

由图 12 可以看出，起爆后的 Ti 飞片被成功剪切出来，切口整齐。Ti 飞片速度在 1.43  $\mu\text{s}$  的时间内可以达到最大速度，数值约为 1436 m/s，满足最低起爆速度要求<sup>[16-18]</sup>。

### 3.3 微序列传爆隔爆测试

将微起爆器、微作动机构、CL-20 传爆药进行轴向装配，形成完整的起爆传爆序列，如图 13 所示。



图 13 装配完成的起爆传爆序列

Fig.13 The assembled detonation transmission sequence

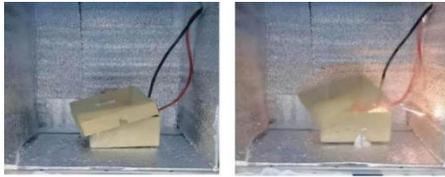
在隔爆测试中，将起爆条件设置为 15 V、47  $\mu\text{F}$ 。测试结果表明，当微作动机构处于安全状态时，即隔板将传爆通道阻挡，即使前端叠氮化铜被激发，后端的 CL-20 也不会被起爆。测试后，将起爆序列拆解，可以发现微起爆器正常作用，Ti 飞片被完整剪切出来。微作动机构中的隔板受到飞片冲击后，会出现结构破碎，无法保持结构完整。同时，被隔板阻挡的 Ti 飞片速度也会大幅下降，且出现变形与翻转。剩余的飞片会在 CL-20 表面留下小凹坑，凹坑的尺寸与飞片尺寸一致，直径约为 700  $\mu\text{m}$ ，如图 14 所示。



图 14 隔爆测试结果

Fig.14 The blocking result

在传爆测试中,保持 15 V、47  $\mu$ F 的起爆条件。测试结果表明,微作动机构处于解保状态时,即隔板将传爆通道打开,微起爆器可以将 CL-20 可靠起爆,如图 15 所示。



(a) 起爆前 (b) 起爆后  
图 15 起爆测试结果

Fig.15 The detonation result

## 4 结论

本文在硅基 MEMS 作动机构的基础上,开展了硅基作动机构与微起爆传爆序列的集成化设计与能量匹配研究,完成了微起爆器、微作动机构等关键部件的分析、制备、测试等工作,得出结论如下:

(1) 微起爆传爆序列主要由微起爆器、微作动机构及传爆药组成。其中微起爆器的叠氮化铜装药尺寸为  $\phi 0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ ,装药量为 1.5 mg;微作动机构在 11 V 直流电压驱动下,可以实现传爆通道的开启与闭合,隔断位移为 743.06  $\mu\text{m}$ ;传爆药为油墨直写方式制备的 CL-20 传爆药,装药尺寸为  $\phi 3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,装药密度为 1.66  $\text{g/cm}^3$ ,装药量约为 35 mg;

(2) 微起爆传爆序列的起爆条件为:起爆电压 15 V,起爆电容 47  $\mu\text{F}$ 。当序列中的微作动机构处于安全状态时,激发起爆器,Ti 飞片受到隔板阻挡会大幅降低速度并改变飞行姿态,CL-20 传爆药不能起爆;当序列中的微作动机构处于解保状态时,激发起爆器,CL-20 传爆药起爆。

### 参考文献:

- [1] 褚恩义,刘卫,韩瑞山,等. MEMS 火工品设计方法探讨[J]. 火工品, 2023 (6): 1-7.
- [2] 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.
- [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.
- [4] 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.
- [5] Chris Cao. High shock modeling of fuze components [C]//64th Annual Fuze Conference, 2021.
- [6] Dick Seddon. Development of an in-line EFI ignition safety device (ISD) for fuzing of solid fuel motors[C]//58th Annual Fuze Conference, 2015.
- [7] Robert Renz. MEMS based fuze technology[C]//58th Annual Fuze Conference, 2015.
- [8] Young TT. DoD MEMS fuze reliability evaluation[C]//59th Annual Fuze Conference, 2016.
- [9] 薛艳,刘云,任炜,等. 基于 MEMS 工艺的安全起爆芯片[J]. 火工品, 2020(6): 10-13.
- [10] 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(04): 356-362.
- [11] 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(05): 444-459.
- [12] Wang K X, Hu T J, Zhao Y L, et al. Research on a MEMS pyrotechnic with a double-layer barrier safety and arming device[J]. Defence Technology, 2022, 18(11): 2 034-2 044.
- [13] Hengzhen Feng, Wenzhong Lou, et al. Design, test and analysis of a threshold-value judging mechanism in silicon-based MEMS safety and arming device[J]. Journal of Micro-Mechanics and Microengineering, 2019(29):065 006-065 019.
- [14] 孔胜. CL-20 基含能薄膜的微喷涂直写成型及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
- [15] 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): 2 320-2 326.
- [16] 耿万钧,孙兴响,严楠,等. MEMS 引信安全系统用火工作动器特性分析[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(1):103-107.
- [17] 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.
- [18] 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): 1 363- 1 371.