

文章编号: 1006-9941(2018)03-0267-06

基于硅双固态梁 PyroMEMS 安保机构的设计、制备及作动性能

侯刚, 朱朋, 李钰, 沈瑞琪, 叶迎华

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 为适应武器弹药安全系统微型化、高可靠性的发展要求,设计了一种基于硅双固态梁的烟火微机电系统(PyroMEMS)安全保险机构。采用 ABAQUS 软件对安保机构层中固态梁的耐压强度与耐过载强度进行了模拟仿真。根据模拟仿真结果采用微机电系统(MEMS)工艺制备了 PyroMEMS 安保机构原理样机。为研究作动性能,选用质量配比为 1:9 的硅铅丹($\text{Si}/\text{Pb}_3\text{O}_4$)作为点火药,选用质量配比为 1:1 的苦味酸钾/高氯酸钾($\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OK}/\text{KClO}_4$)作为产气药。结果表明,安保机构层中固态梁在长与宽均为 300 μm 时耐压强度为 310.03 MPa,耐过载强度为 47.31 g。设计的 PyroMEMS 安保机构可成功实现安保功能。

关键词: 烟火微机电系统(PyroMEMS); 微机电系统(MEMS); 安保机构; 硅双固态梁; 硅铅丹点火药($\text{Si}/\text{Pb}_3\text{O}_4$)

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.011

1 引言

随着武器弹药的进一步发展,传统的安全与解除保险机构难以满足新一代微型化、高可靠性武器弹药安全系统的发展要求,为提高作战效能,迫切需要发展一种新型的安全保险机构。微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)安保技术是随着高技术武器的发展而提出的,采用 MEMS 先进制造技术将武器系统中的安保机构芯片化和小型化,置于起爆器中,并与微电子线路、微传感器以及微传爆序列相结合,就能够很好地实现上述功能,不仅能使起爆装置的体积大为减小,而且能使武器装备的安全可靠性进一步提高。欧美国家从 20 世纪 90 年代开始对 MEMS 技术在安保机构方面的应用进行了大量的研究^[1-7],设计或研制出了包括弹簧锁销式、气动滑块式、电磁制动式等各种类型的 MEMS 安保机构^[8-11]。但是由于制造工艺水平的限制使得传统安保机构体积较大、成品率低、重复性不好、难以批量生产,无法满足现代武器弹药安全系统小型化、可靠性的要求。而且以电磁驱动、静电驱动或者记忆合金驱动等驱动方式的安保机构难以实现较大的驱动位移。我国对于 MEMS 安

保机构的研究相比于欧美各国起步较晚,经过长期努力,在安保机构关键技术上了有了长足的进步^[12-13]。烟火微机电系统(Pyrotechnical Micro Electro Mechanical System, PyroMEMS)是一种基于 MEMS 技术,装载固体含能材料作为功能燃料的微型火工烟火装置。烟火药剂由于具有能量密度高,单位体积提供的动力更强等特点,以烟火药剂燃烧分解产生的气体作为动力的安保机构可以实现较大的驱动位移^[14]。

本研究设计并制备了一种基于硅双固态梁的 PyroMEMS 安保机构,该安保机构依靠烟火药剂燃烧分解产生的气体作为动力来完成解除保险功能。对 PyroMEMS 安保机构层中固态梁的耐压和耐过载强度模拟仿真,根据模拟仿真结果制作了样机并进行作动性能和可行性实验,实验验证了 PyroMEMS 安保机构能够实现解除保险功能。

2 硅双固态梁 PyroMEMS 安保机构结构与仿真模拟

2.1 硅双固态梁 PyroMEMS 安保机构结构与工作原理

所设计的硅双固态梁 PyroMEMS 安保机构为错位式安保机构,既能保证传爆序列的错位隔断,实现安全保险功能,又能依靠含能材料燃烧分解产生的气体作为动力来实现解除保险功能。图 1 为 PyroMEMS 安保机构整体结构示意图(图 1a)和分层结构示意图(图 1b),从下至上依次为点火电路层、输入装药层、安

收稿日期: 2017-05-31; 修回日期: 2017-07-22

基金项目: 江苏省自然科学基金资助(BK20151486)

作者简介: 侯刚(1992-),男,硕士研究生,主要从事 MEMS 火工品技术研究。e-mail: hougang@njust.edu.cn

通信联系人: 朱朋(1978-),男,副研究员,博导,主要从事先进火工品技术研究。e-mail: zhupeng@njust.edu.cn

保机构层和输出装药层。点火电路层中两个半导体桥 (SCB) 换能元, 分别用于激发输入装药层的点火药和起爆药。

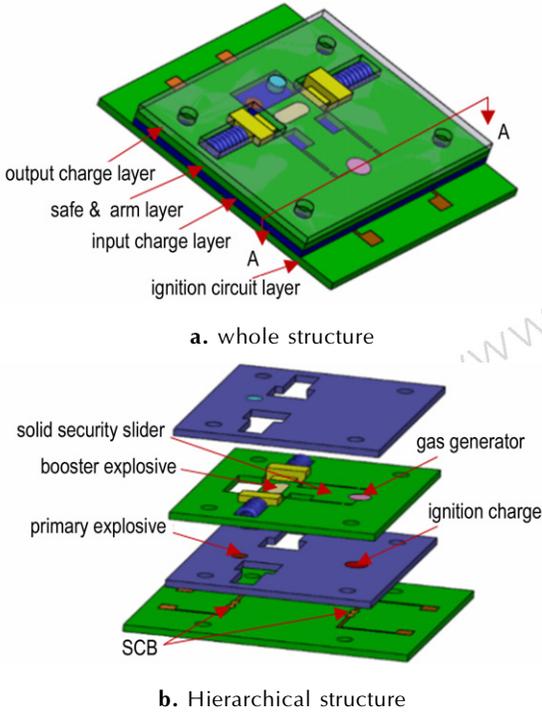


图 1 PyroMEMS 安保机构示意图
Fig.1 Schematic diagrams of the PyroMEMS S & A (Safe and Arming) mechanism

图 2a 为 PyroMEMS 微驱动器沿 A-A 方向简易剖面图, PyroMEMS 微驱动器是整个安保机构中的重要组成部分, 主要由半导体桥、点火药和产气药组成。图 2b 为安保机构作用原理示意图, 其作用原理为: 安全状态下, 输入装药层中起爆药与输出装药层中装药处于错位状态, 保证初始状态传爆序列的错位隔断, 防止因点火电路层意外发火导致安保机构失效; 当收到解除保险指令时, 在外界输入电压的作用下, SCB 换能元发火点燃输入装药层中的点火药, 点火药点燃安保机构层中的产气药, 产气药燃烧分解产生局部高压气体, 高压气体作为动力源驱动安保滑块, 完成传爆序列的对正, 从而使安保机构由安全状态转为解除保险状态。

安保机构层为 PyroMEMS 安保机构的核心部分, 其作用是实现输入装药层中起爆药与输出装药层装药能量传递通道的隔断与对正, 提高传爆序列的安全性和可靠性。图 3 为未装填药剂时安保机构层处于安全状态和解保状态下的结构示意图。安保机构层的厚度为 0.5 mm, 基板的长和宽分别为 16 mm 和 13 mm。安保滑块通过分布在底部的两个固态梁与基板相连, 安

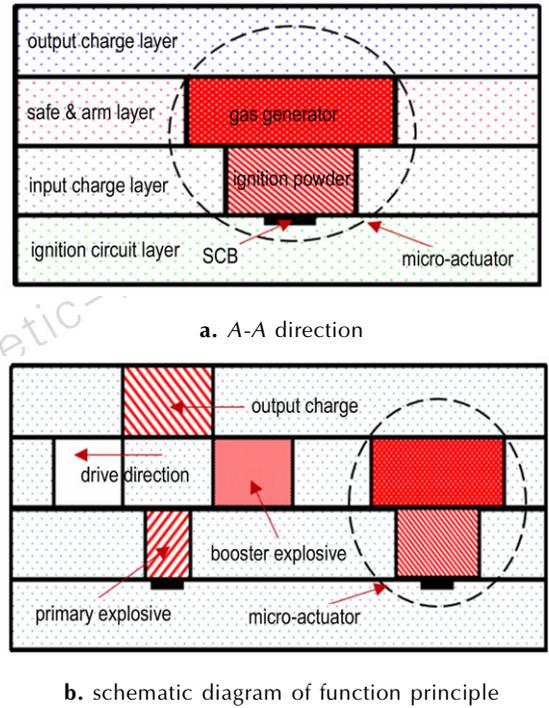


图 2 PyroMEMS 微驱动器剖面图与安保机构作用原理示意图
Fig.2 The profile of PyroMEMS micro actuator and Schematic diagram of function principle of S & A mechanism

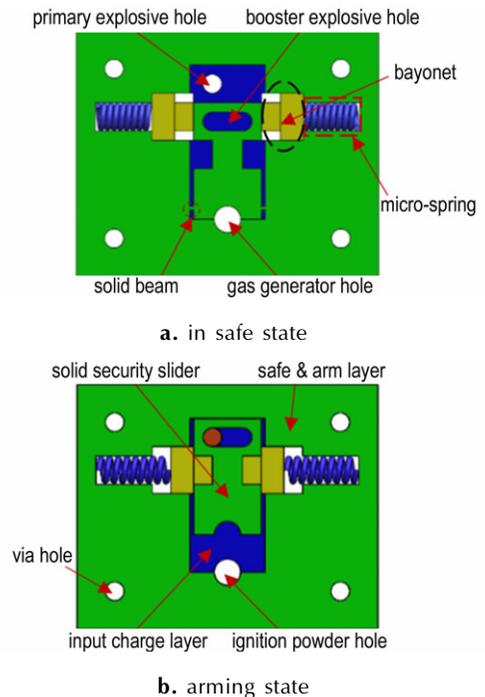


图 3 未装填药剂状态安保机构层结构示意图
Fig.3 Schematic diagrams of S & A layer without loading charge

保滑块上有一个传爆药孔。安保层基板中有两个刻透的 T 型槽, 该 T 型槽处安装有限位微弹簧和卡销。限

位弹簧及卡销主要有两个作用：(1) 安保状态下，卡销在弹簧和 T 型槽的作用下固定在安保滑块的顶端，从而防止安保机构在受弹簧轴向方向过载时，滑块震动导致固态梁的断裂失效。(2) 滑块运动到空腔顶端后，卡销会在弹簧恢复力的作用下，卡入安保滑块的凹槽中，保证传爆序列的对正。

PyroMEMS 安保机构的作动模式示意图如图 4 所示。安全模式下(图 4a)，输入装药层起爆药与输出装药层装药处于错位状态，防止因点火电路层意外发火导致安保机构失效，双固态梁和限位微弹簧用于保证安保机构层能够耐受轴向和径向冲击过载，亦即安保机构层经受可能的最大过载值而不能失效，保证传爆序列的安全性。解除保险模式下(图 4b)，点火电路层中 SCB 换能元点燃输入装药层点火药，产气药受点火药的激发发生燃烧分解反应，释放出局部高压气体。当产生气体作用于双固态梁上的力超过其内应力时，固态梁将会发生弹性变形、塑性变形直至脆性断裂。固态梁断裂后，安保滑块从基板中脱离成为自由滑块，气体继续推动安保滑块运动到空腔顶端。此时，限位弹簧与卡销将滑块固定，从而使原来错位的传爆序列对正。固态梁对安保机构实现解除保险功能有着重要影响，确定合适的固态梁尺寸有助于安保机构实现解除保险功能。

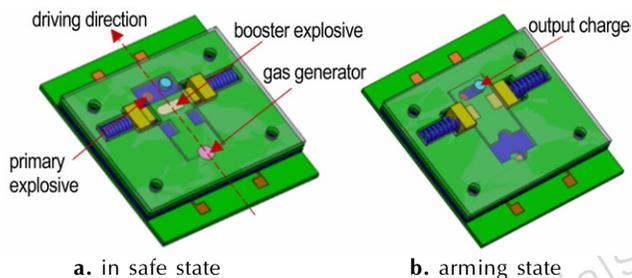


图 4 PyroMEMS 安保机构作动模式示意图

Fig.4 Schematic diagrams of the actuating mode of PyroMEMS S & A mechanism

2.2 安保机构层中硅双固态梁模拟仿真

由于固态梁的尺寸对安保机构实现解除保险功能有着重要作用，因此为了确定安保机构层中固态梁的加工尺寸，需要对所设计固态梁的耐压强度与耐过载强度进行模拟仿真。本研究采用 ABAQUS^[15] 软件对所设计 8 种不同尺寸的双固态梁安保机构进行了耐压强度、过载强度模拟仿真。模拟主要包括两个方面：(1) 模拟每种尺寸固态梁发生断裂时气室的最大压强；(2) 模拟滑块在受到与驱动方向(见图 4a)相同的

过载时，每种尺寸固态梁能够承受的最大过载。步骤如下：对安保机构层进行简化处理，去除 T 型槽，缩小安保机构层的面积，减少计算量；导入模型后，定义材料的属性，采用 Si 材料(弹性模量 190 GPa，泊松比 0.078，密度 2328.3 kg · m⁻³)；由于断裂位置多集中在梁上，因此需要在全模型考虑断裂的同时，重点考虑梁的断裂情况，在梁上进行网格加密和加密形式单元生死设置；对于气室压强的模拟，将载荷施加在产气药孔的上半个弧面；采用循环判别准则和失效准则，设置两个分析步骤，第一个为循环步骤，使压强或过载不断的增加，第二个为失效步骤，只要压强或过载增加到可以发生断裂的应变时刻，系统自动执行第二步骤，启动单元生死设置，发生断裂，模型失效。

对 8 种不同尺寸固态梁的安保机构层进行仿真模拟后，得到相应的云图并生成仿真报告。图 5 为固态梁尺寸为 300 μm × 300 μm 时安保机构层受气室压强下的受力云图。图 6 为固态梁尺寸为 300 μm × 300 μm 时安保机构层受过载条件下应力云图。从图 5 和图 6 可以看出应力最大的位置在固态梁与安保滑块相连部位。

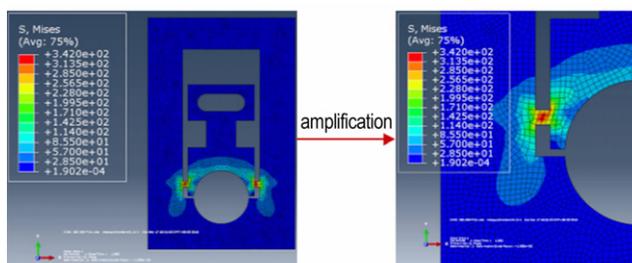


图 5 气室压强下的受力云图

Fig.5 Force nephogram under the pressure of the air chamber

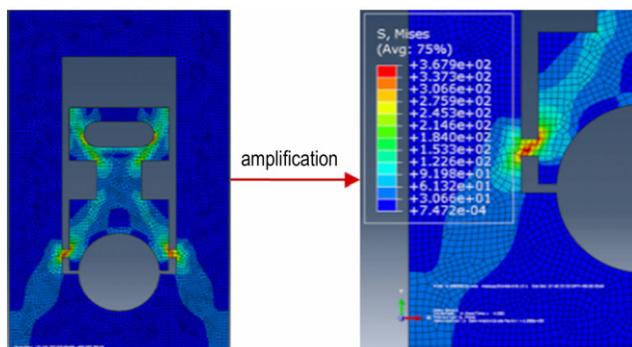


图 6 过载条件下应力云图

Fig.6 Stress nephograms under the overload

为了得到所设计固态梁能够承受的最大气室压强以及承受沿驱动方向最大过载，采用 ABAQUS 软件进

行动力方程求解, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 固态梁断裂承受的气室压强和过载仿真结果

Table 1 Simulation results of gas chamber pressure and overload under the fracture of solid beam

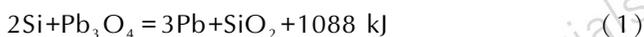
sample	solid beam size length×width/ μm	stress /MPa	overload /g
1 [#]	300×200	279.39	41.22
2 [#]	300×300	310.03	47.31
3 [#]	400×200	177.36	37.56
4 [#]	400×300	198.49	40.19
5 [#]	400×400	237.08	41.97
6 [#]	500×200	103.50	34.17
7 [#]	500×300	134.88	35.52
8 [#]	500×400	167.04	37.07

由表 2 仿真结果得: (1) 对比 1[#]和 2[#], 3[#]、4[#]和 5[#], 6[#]、7[#]和 8[#]可得固态梁长度一定时, 增大其宽度, 固态梁断裂时所承受的气室压强和过载都逐渐增大; 对比 1[#]、3[#]和 6[#], 2[#]、4[#]和 7[#]可得固态梁在宽度一定时, 增大其长度, 固态梁断裂时所承受的气室压强和过载都逐渐减小; (2) 当固态梁尺寸为 300 μm ×300 μm 时, 其脆性断裂时所承受的气室压强最大, 为 310.03 MPa, 承受的过载最大, 为 47.31 g。故选择 2[#]尺寸作为固态梁加工尺寸, 对安保机构层进行加工制备。

3 PyroMEMS 安保机构样机制备与作动性能实验

3.1 输入装药层中点火药剂的选择

输入装药层中的点火药采用硅/铅丹, 硅/铅丹初始反应温度为 520 $^{\circ}\text{C}$, 在 625 $^{\circ}\text{C}$ 时达到主反应阶段^[16]。硅和铅丹燃烧时的化学反应方程式为:

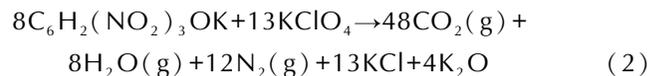


根据化学反应方程式(1), 按照负氧平衡将硅和铅丹质量比设定为 1:9。由于输入装药层中点火药孔的直径只有 1.0 mm, 故选择喷墨沉积技术^[17]进行点火药的装药。喷墨沉积属于微笔直写技术的一种方式, 其工艺原理是使用喷墨打印喷嘴以可控或者连续的方式沉积到基板上, 其特点是经济、直接写入、快速和柔性制造以及高集成精度。将点火药配制成含能油墨, 选择硝化棉(NC)作为粘结剂, 含氮量为 12.5%, 粘结剂是含能油墨的重要组成部分, 其含量对含能材料的性能也会产生影响, 配制的含能油墨中将硝化棉含量设定为硅/铅丹总质量的 4%, 同时采用乙酸丁酯作为溶剂。称取 120 mg 硝化棉加至 4 mL 乙酸丁酯

中, 配制浓度为 30 $\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 NC-乙酸丁酯溶液, 磁力搅拌 30 min。取 2.7 mL 的 NC-乙酸丁酯溶液, 并加入总质量为 2 g、质量比为 1:9 硅/铅丹, 然后磁力搅拌 12 h。含能油墨配制完成后, 通过 Ultra2400 型点胶机进行装药, 装药管针头的内径采用 0.34 mm, 通过三路继电器控制板控制点胶机工作, 通过旋转点胶机上的旋钮, 将气管内的压力调节为 35 kPa 进行装药, 装药完成后置于烘箱内烘干。

3.2 安保机构层中产气药剂的选择

产气药是 PyroMEMS 驱动器的重要组成部分, 其性能直接影响了固态安保滑块的作动性能。因此选用燃烧分解速度极快的 $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OK}/\text{KClO}_4$ 混合药剂作为产气药, 也被称为 K_1K 药^[18], 该药的优点在于高氯酸钾的有效含氧量极高, 为 46.21%, 并且这些有效氧量容易被释放, 有利于增大可燃剂的药量, 从而提高燃烧热, 有利于气体膨胀, 该药的另一优点还在于产气速率极快, 这对于固态梁的脆性断裂是有利的。产气药的化学反应方程式^[17]为:



基于化学方程式(2), 选择产气药 $\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OK}/\text{KClO}_4$ 的质量配比为 1:1, 采用密闭爆发器实验验证 K_1K 药的产气能力。实验仪器及用品包括: 质量为 50 mg 的 K_1K 药; 空腔体积为 12 cm^3 的密闭爆发器; 型号为 JF-YD-205 的压电式压力传感器; 点火头; 恒流源; 多通道电荷放大器; 示波器。经过实验得到 K_1K 药的 $p-t$ 曲线, 如图 7 所示。

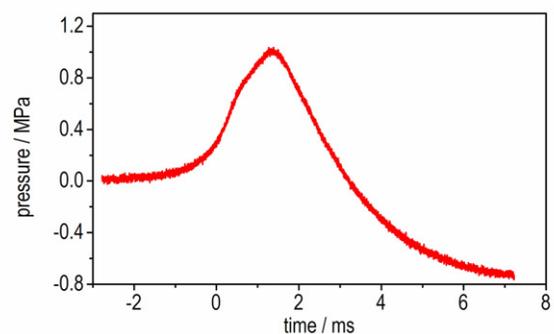


图 7 K_1K 药的 $p-t$ 曲线

Fig.7 The $p-t$ curve of K_1K charge

由图 7 可知, 实验所用 K_1K 药的压力峰值为 1.1 MPa, 且 K_1K 药从开始分解至达到压力峰值仅需 2 ms; 由于安保机构中有移动部件, 不可避免地会有气体的泄露, 假设体积和环境的变化不影响 K_1K 的

应过程,将上述密闭爆发器体积缩小至安保机构层中产气药孔体积,当 K_1K 药的装药量为 7.5 mg ($\rho = 2.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$),可以计算安保机构层中产气药孔的气室压强为 410.5 MPa ,该值大于硅固态梁仿真能够承受的最大压强(表 1 仿真能够承受的最大压强为 310.03 MPa),因此当 K_1K 药装药密度为 $2.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,质量为 7.5 mg 时, K_1K 药完全燃烧产生高压气体可使安保机构层解除保险。实验时采用压药装药方式将 K_1K 药装填于产气药孔中。

3.3 PyroMEMS 安保机构样机制备及作动性能实验结果

根据上文的模拟仿真结果,选择 $2^\#$ 固态梁尺寸制备安保机构样机。其中点火电路层以单晶硅片为基底,通过热氧化生长出一层 SiO_2 ,该层作为绝缘层,之后通过低压化学气相沉积(LPCVD)在 SiO_2 上沉积了一层多晶硅,最后得到方块电阻为 $3.8 \ \Omega$,接着用光刻胶做掩膜,经过紫外光刻曝光显影之后留下部分光刻胶保护预定的桥形区域,通过等离子体刻蚀法,刻蚀掉桥形区域外的多晶硅,再将光刻胶去除,即得到多晶硅桥,最后在芯片上层通过磁控溅射沉积一层金膜作为引线,并与桥区的焊盘相接触,完成点火电路层的制备,经实验测得半导体桥阻值为 $1.1 \ \Omega$;输入装药层用不锈钢片制作,表面经过光滑处理,尺寸与安保机构层的尺寸相同;安保机构层材料为硅,采用干法刻蚀进行加工,具体为采用感应耦合等离子体刻蚀(ICP, Inductively Couple Plasma Etch)技术对安保机构层进行一体化加工,利用干法刻蚀加工的安保机构层具有较高的深宽比;输出装药层由不锈钢制作,尺寸与输入装药层和安保机构层的尺寸相同;限位弹簧的外径为 1.5 mm ,原长为 4 mm ,采用弹簧钢来制作,微型卡采用锰钢制作,表面经过光滑处理。

将点火电路层、输入装药层、安保机构层和输出装药层依次装配后,得到 PyroMEMS 安保机构样机。图 8a 和图 8c 为装配完成的 PyroMEMS 安保机构实物图,图 8b 为未装配输出装药层的 PyroMEMS 安保机构的实物图,黄色装药为 K_1K 产气药。采用 $40 \text{ V}/47 \ \mu\text{F}$ 的电容放电激发,PyroMEMS 安保机构顺利解除保险,而且产气药驱动安保滑块的位移达到 2 mm ,实现传爆序列对正,实验结果如图 8d 所示。由实验结果可知,设计的硅双固态梁 PyroMEMS 安保机构能够完成解除保险功能。

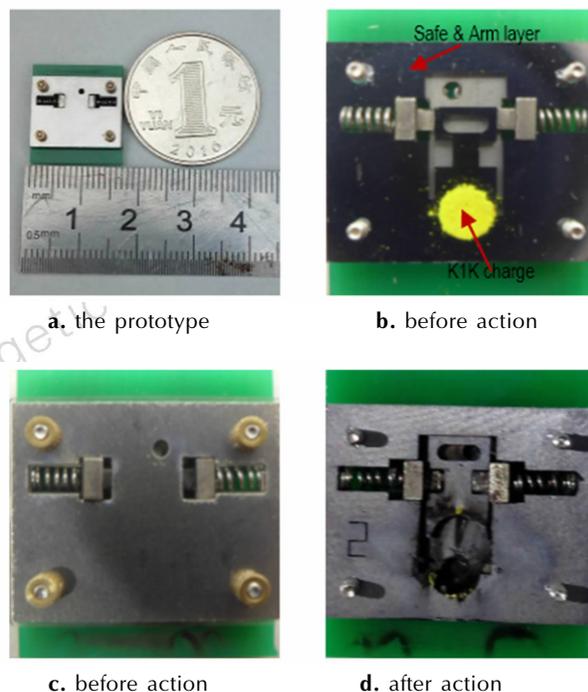


图 8 PyroMEMS 安保机构实物图

Fig.8 Physical maps of PyroMEMS S & A mechanism

4 结 论

(1) 设计并制备了一种全新结构形式的 PyroMEMS 双固态梁安保机构,其特点是不需要利用惯性力解除保险;该安保机构利用烟火药剂的燃烧分解产生了较强的驱动力,可以实现 MEMS 器件的大位移驱动。

(2) 通过对所设计的 PyroMEMS 安保机构层中固态梁的耐压强度与过载强度模拟仿真,得到 $2^\#$ 安保机构层固态梁断裂时所承受的气室压强为 310.03 MPa ,承受的过载为 47.31 g 。

(3) 采用等离子体干法刻蚀技术以及精密机械加工的方法制备了 $2^\#$ PyroMEMS 安保机构样机,并对样机进行了实验,其中换能元采用 SCB,点火药选用质量配比为 $1:9$ 的硅铅丹,产气药使用质量配比为 $1:1$ 的苦味酸钾/高氯酸钾 ($\text{C}_6\text{H}_2(\text{NO}_2)_3\text{OK}/\text{KClO}_4$),并采用 $40 \text{ V}/47 \ \mu\text{F}$ 的电容放电激发,实验结果表明所设计的 PyroMEMS 双固态梁安保机构成功解除保险,验证了 PyroMEMS 安保机构设计的可行性,进而为安保机构应用到微尺度传爆序列,制备具有安保内置功能的 MEMS 起爆器奠定了基础。

参考文献:

- [1] Sandia National Laboratories Annual Report 2004-2005 [R]. USA: Sandia National Laboratories, 2005.
- [2] Last H R, Deeds M, Garvick D, et al. Nano-to-millimeter scale integrated systems[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 1999, 22(2): 338-343.
- [3] Robbins, John. "United States Navy Overview." Report to 49th Annual Fuze Conference (April 2005)[R]. Navy Energetics Enterprise. 2005: 2-11.
- [4] Salem A, Hamada T, Asahina J K, et al. Detection of unexploded ordnance (UXO) using marine magnetic gradiometer data[J]. *Exploration Geophysics*, 2005, 36(1): 97-103.
- [5] Robinson C H. Miniature, planar, inertially-damped, inertially-actuated delay slider actuator: U.S.5705767[P].1998.
- [6] Pennarun P, Rossi C, Esteve D, et al. Design, fabrication and characterization of a MEMS safe pyrotechnical igniter integrating arming, disarming and sterilization functions[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2006, 16(1): 92-100.
- [7] Beamesderfer M A, Chen S, DeVoe D L, et al. Analysis of an optical energy interrupter for MEMS-based safety and arming systems[C]//Symposium on Micromachining and Microfabrication. International Society for Optics and Photonics, 1999: 101-111.
- [8] David R, Koehler, Darren A Hoke. Micro-electro-mechanical safing and arming apparatus: US7051656B1[P].2006.
- [9] Last H R, Deeds M, Garvick D, et al. Nano-to-millimeter scale integrated systems[J]. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 1999, 22(2): 338-343.
- [10] Robert R Kaman. MEMS Based Fuze Technology[C]//The 58th Annual NDIA Fuze Conference, 2015.
- [11] 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.
- [12] 黄中雨.火工品内嵌电子微安保技术及其制备工艺研究[D].南京:南京理工大学,2015.
HUANG Zhong-yu. Study on the technology of pyrotechnical ignition system embedded electronic micro S&A devices and its preparation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015.
- [13] 邹振游.火工品安保一体化设计及制备方法研究[D].南京:南京理工大学,2016.
ZOU Zhen-you. Design of initiator-S & A device and its preparation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [14] David de Koninck. PyroMEMS: Improved Fabrication Methods and Ignition Reliability[D]. Switzerland,2012.
- [15] Namara J F M, Gilroy J P, Sorensen E P, et al. ABAQUS/AQUA application to offshore risers and pipelines[J]. *Maritime Simulation*,1985: 191-202.
- [16] 刘晓文.延期药燃烧性能及表征方法的研究[D].安徽:安徽理工大学,2011.
LIU Xiao-wen. Study on combustion property and characterization method of delay composition[D]. Anhui:Anhui University Of Science And Technology, 2011.
- [17] 姚艺龙, 吴立志, 唐乐, 等. 纳米 CL-20 炸药含能墨水直写规律研究[J].*火炸药学报*,2016, 39(1): 39-42.
YAO Yi-long, WU Li-zhi, TANG Le, et al. Direct writing rule of nano CL-20 explosive energetic ink[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2016, 39(1): 39-42.
- [18] 成一, 陈守文. 点火药点火性能的研究[J]. *火工品*, 2001(4): 22-23, 32.
CHENG Yi, CHEN Shou-wen. Study on ignition characteristics of ignition compositions [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001(4): 22-23,32.

Design, Fabrication and Actuation Performance of PyroMEMS Safe and Arm Device Based on Silicon Double Solid Beams

HOU Gang, ZHU Peng, LI Yu, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To meet the development requirements of miniaturization and high reliability of weapon and ammunition safety system, a safe and arming device of pyrotechnical micro-electro-mechanical system (PyroMEMS) based on silicon double solid beams was designed. The compressive strength and overload strength of the solid beam in the safe and arming mechanism layer were simulated by using ABAQUS software. The principle prototype of safe and arming device of PyroMEMS was fabricated using micro-electro-mechanical system (MEMS) technology according to the simulation results. In order to study its actuation performance, the Si/Pb₃O₄ mixture of mass ratio as 1 : 9 was selected as ignition powder and the C₆H₂(NO₂)₃OK/KClO₄ mixture of mass ratio as 1 : 1 was selected as gas generator. Results show that the compressive strength is 310.03 MPa and the overload strength is 47.31 g as the boh length size and width size of silicon double solid beams in the safe and arming device are 300 μm. The designed PyroMEMS S & A device can successfully realize safe and arming functions.

Key words: pyrotechnical micro-electro-mechanical system (PyroMEMS); micro-electro-mechanical system (MEMS); safe and arm device; silicon double solid beams; Si/Pb₃O₄ ignition powder

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2018.03.011