

文章编号: 1003-1480 (2020) 02-0001-04

低 G 值惯性延时 MEMS 火工品一体化设计

胡腾江¹, 任 炜^{1,2}, 赵玉龙¹

(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: 开展了具备低 G 值惯性延时解保功能的 MEMS 火工品的研究工作, 提出了 MEMS 火工品一体化设计的技术方案, 通过 ADAMS 软件与 ANSYS 软件分析了 MEMS 火工品中电热锁销机构以及延时机构的动力学模型。结果表明: 所设计的锁销机构可以在 10V 直流电压的控制下输出 57.2 μm 的位移, 满足相应的解锁要求; 所设计的延时机构可以在 10g 环境力的作用下, 实现 560ms 的延时输出, 输出位移为 1.5mm; MEMS 火工品的整体尺寸为 10mm \times 10mm \times 0.28mm。

关键词: MEMS 火工品; 一体化设计; 低 G 值惯性延时机构; 动力学分析

中图分类号: TJ450.2 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.02.001

The Integrated Design of MEMS Initiator with Low G Value Inertia Delay Mechanism

HU Teng-jiang¹, REN Wei^{1,2}, ZHAO Yu-long¹

(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: A novel kind of MEMS initiator with low G value inertia delay mechanism has been introduced in this paper, and the technical scheme of integrated design has been proposed. The dynamic models of the electro-thermal lock and delay mechanism have been established and verified by ADAMS and ANSYS. The results show that stimulated by 10V direct voltage, the electro-thermal lock will generate 57.2 μm displacement, which can satisfy the unlock requirement. Under 10g inertial force, the delay period can reach 560ms, and the displacement of the silicon barrier is 1.5mm. The MEMS initiator occupies 10mm \times 10mm \times 0.28mm.

Key words: MEMS initiator; The integrated design; Low G value inertia delay mechanism; Dynamic analysis

火工品作为控制武器系统能量传递的核心部件, 其输出性能影响着武器的安全性、可靠性以及毁伤能力。由于传统火工品在制作精度、结构尺寸、驱动方式等方面很难有所突破, 无法满足新一代武器微型化、集成化以及智能化的发展要求, 因此 MEMS 火工品的概念就应运而生^[1]。与针刺雷管、桥丝桥膜以

及半导体桥结构相比, 以 MEMS 技术为基础的第四代火工品具有以下主要特征: (1) 结构微型化: 器件结构尺寸在微米量级; (2) 机构集成化: 采用一体化设计思想, 将起爆、驱动以及隔断机构等一体化集成。由于 MEMS 火工品结构尺度更小, 功能集成度更高, 因此被认为是未来武器微型化、集成化以及智能化发

收稿日期: 2020-03-05

作者简介: 胡腾江 (1990-), 男, 助理研究员, 主要从事 MEMS 火工品的设计。

基金项目: 中国博士后科学基金面上项目 (2018M640977)。

展的重要支撑^[2-3]。在特征尺寸为微米量级的 MEMS 器件中,惯性力的作用十分有限,因此,如何在低过载场所发挥 MEMS 火工品的优势,成为目前武器装备领域研究的难点。本文针对上述技术瓶颈,开展具备低 G 值惯性延时解保功能的 MEMS 火工品的研究工作。

1 MEMS 火工品总体设计

1.1 MEMS 火工品总体结构及作用原理

本文所设计的 MEMS 火工品呈叠层结构,自底向上依次为 MEMS 起爆器、MEMS 安保装置以及盖板,三者通过金-金键合实现一体化设计,如图 1 所示。

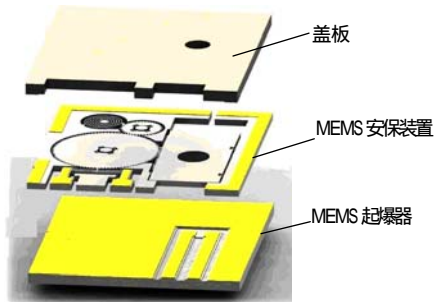


图 1 MEMS 火工品总体结构

Fig.1 The structure schematic of MEMS initiator

当器件处于安全状态时, MEMS 起爆器中的起爆桥被 MEMS 安保装置中的硅隔断阻挡,相应的发火能量无法传递到后端的含能药剂;当器件收到触发信号时, MEMS 安保装置中的硅隔断会在惯性力与延时机构的共同作用下缓慢地运动,并最终实现起爆桥、含能药剂与传爆孔的对正,此时器件处于解保状态,如图 2 所示。

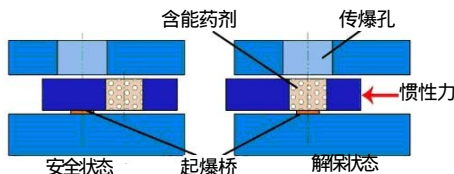


图 2 MEMS 火工品作用示意图

Fig.2 The function schematic of MEMS initiator

1.2 MEMS 起爆器结构设计

MEMS 起爆器为 MEMS 火工品能量传递的首发元件,选用半导体硅桥(Semiconductor Bridge, SCB)的形式^[4-5]。SCB 主要由衬底层、绝缘层、硅结构层

以及电极层组成,为了方便制作,可在 SOI (Silicon-on-Insulator) 硅片上进行设计,如图 3 所示。利用干法刻蚀工艺,在 SOI 硅片的结构层(厚度 $2\mu\text{m}$,电阻率为 $0.001\Omega\cdot\text{cm}$)上直接制作出相应 $380\mu\text{m}\times 100\mu\text{m}$ 的桥型结构,最后,利用磁控溅射实现金电极以及金-金键合区的制作。

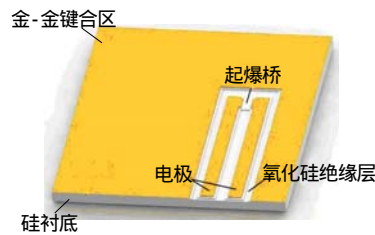


图 3 MEMS 起爆器结构

Fig.3 The structure of MEMS detonator

1.3 MEMS 安保装置结构设计

MEMS 安保装置主要由硅隔断、齿轮组、平面扭簧以及电热锁销机构组成,含能药剂以压制成药柱的形式填入对应的药剂孔中,如图 4 所示。

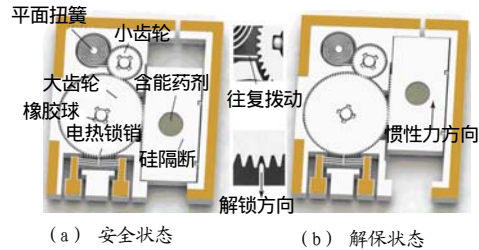


图 4 MEMS 安保装置整体结构

Fig.4 The structure of MEMS S&A device

为了减小了摩擦力对系统带来的影响,本结构设计了直径 $280\mu\text{m}$ 的橡胶球,并将其填充在齿轮与轴之间的间隙内,将运动部件之间的滑动摩擦变为滚动摩擦。MEMS 安保装置的驱动原理为:在无触发信号时,锁销机构将齿轮组锁死,从而完成了对硅隔断状态的锁定,确保了武器系统不会在勤务处理或跌落等情况下的误解保。当武器发射后,电热锁销机构在传感信号的控制下首先解除对齿轮组的约束,此时,硅隔断在惯性力的作用下开始运动。

考虑到低 G 值情况下惯性力的作用效果十分有限,因此,本设计引入了齿轮组来实现作用力的放大。平面扭簧机构与齿轮组中的小齿轮相接触,当小齿轮转动时便会拨动扭簧机构往复运动。在上述周期性扭转力的作用下,硅隔断将缓慢移动。当 MEMS 安保装置中的硅隔断对正后,电信号解除对锁销机构的激

励,在结构弹性回复力的作用下,电热锁销机构重新将齿轮组锁死,此时系统便完成了相应的解保动作。

1.4 盖板结构设计

盖板是确保 MEMS 火工品正常工作的关键部件之一,其主要由传爆孔以及金-金键合区组成,如图 5 所示。主要的功能为:(1)保护器件。保护 MEMS 器件不被外界环境破坏,由于 MEMS 安保装置由大量的可动结构组成,器件在平面向外方向的刚度较低,因此需要增加盖板来提高器件的结构刚度;(2)信号传输。为了实现起爆信号以及驱动信号与外界电路的顺利连接,需要在盖板上设计相应的电极窗。

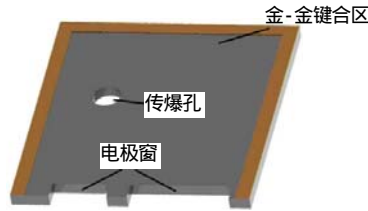


图 5 盖板结构

Fig.5 The structure of cover plate

2 MEMS 火工品性能分析

2.1 电热锁销机构性能分析

在微尺度效应的影响下,电热力的作用效果得到了大幅提升,因此基于电热原理的驱动单元常被用于微尺度下对物体的精确控制。本文设计了相应的电热锁销机构,并将其用于 MEMS 安保装置的一级解锁。在 10V 直流电压的激励下,电热锁销机构的热稳态温度分布结果如图 6 所示。

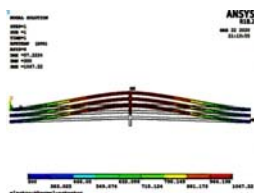


图 6 电热锁销机构稳态温度分布

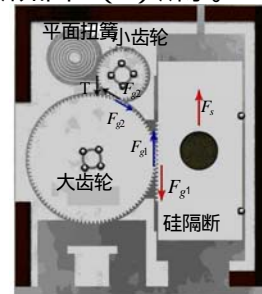
Fig.6 The temperature distribution of electro-thermal lock

由图 6 可以看出 V 型梁稳态时的温度分布呈现出良好的对称性,其最高温度为 1 047.22K,出现在 V 型梁的中部,最高温度低于硅熔点 1 683K,因此电热锁销机构可以维持正常工作。V 型梁的两端锚点处

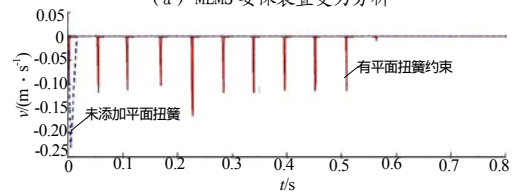
与衬底相连,故其温度与参考温度 300K 相同。V 型梁的最大变形同样出现在结构的中点,其数值为 57.2 μm ,大于锁销机构与大齿轮之间的重合长度 40 μm ,说明本文所设计的电热锁销机构在 10V 的特定电压下,可以顺利实现对齿轮组的解锁。

2.2 延时机构性能分析

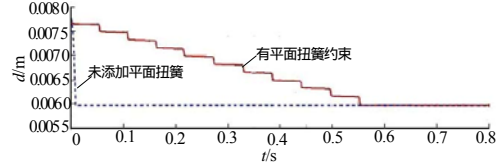
对于低 G 值的发射环境而言,若沿用平面弹簧-质量块-Z 型齿的延时模式^[6-9],则需要设计刚度系数极低的弹簧,不易实现制作。此外,在低惯性力的作用下,Z 型齿与质量块容易出现相互卡死,造成器件失效。因此,本文中 MEMS 安保装置的延时机构主要由齿轮组与平面扭簧组成,其中大齿轮分别与小齿轮以及硅隔断相啮合,平面扭簧的摆动端与小齿轮相互接触。当有惯性力作用时,硅隔断带动齿轮组运动,此时,小齿轮在平面扭簧周期性的拨动下消耗相应的能量,从而实现对硅隔断运动的延时。上述各部件进行运动分析如图 7 (a) 所示。



(a) MEMS 安保装置受力分析



(b) 硅隔断速度变化曲线



(c) 硅隔断位移曲线

图 7 MEMS 安保装置运动分析结果

Fig.7 The motion result of MEMS S&A device

将所设计的硅隔断、齿轮组以及平面扭簧导入 ADAMS 动力学仿真软件中进行分析:硅隔板与边框为滑动约束,并与齿轮组构成耦合约束;平面扭簧的圆心设置为旋转约束,并添加相应的扭转弹簧系数;平面扭簧的摆动端与小齿轮设置成碰撞约束。仿真的

结束时间为 0.8s，步数设置为 1 500 步^[10]，选取硅隔断上的点作为记录点，当器件受到 10g 环境力作用时，其速度以及位移的结果如图 7(b) 与图 7(c) 所示。

由图 7(b) 可以看出没有添加平面扭簧约束时硅隔断在 15ms 的时间内达到最大速度 0.225m/s，此后由于与器件外框碰撞，进而速度又迅速降至 0；有平面扭簧约束时硅隔断的速度呈现出明显的周期变化的特征：初始阶段，由于平面扭簧与小齿轮之间存在结构间隙，因此两者之间无接触约束，此时硅隔断呈现加速运动状态。当小齿轮与平面扭簧接触后，硅隔断的速度迅速降低，在小齿轮转至下一齿槽之前，硅隔断的运动速度近似为 0。当转至下一齿槽时，平面扭簧再次与小齿轮脱离接触，此时硅隔断又呈现加速运动状态。每个速度峰值以及峰值之间的时间间隔与平面扭簧的刚度以及小齿轮的齿形有关，具体到本文所选用的结构参数，速度峰值不超过 0.16m/s，峰值间隔为 50ms。当运动 560ms 后，硅隔断与器件外框相接触并到达所设计的解保位置。

图 7(c) 为硅隔断位移变化曲线，同样可以看出，没有平面扭簧的约束，硅隔断会迅速到达解保位置（约 1.5mm）。相反，具有平面扭簧的约束，硅隔断的位移则呈现阶梯式的下降趋势，每层阶梯之间的间距约为 40 μ m，恰好为平面扭簧与小齿轮之间的运动间隙。综合图 7 的仿真结果可以看出，平面扭簧机构的引入可以有效地提升 MEMS 安装置在低 G 值环境力作用下的延时效果，通过优化平面扭簧的刚度与小齿轮的齿形，可以实现硅隔断低速平稳的运动。

3 结论

本文介绍了具备低 G 值惯性延时解保功能的 MEMS 火工品的研究工作，即采用分离制作-最终集成的思路，实现 MEMS 起爆器、MEMS 安装置以及盖板的一体化设计；MEMS 安装置的整体尺寸为 10mm \times 10mm \times 0.28mm。通过 ADAMS 软件与 ANSYS

软件分析了电热锁销机构以及延时机构的动力学模型，结果表明，所设计的锁销机构可以在 10V 直流电压的控制下输出 57.2 μ m 的位移，满足相应的解锁要求，所设计的延时机构可以在 10g 环境力的作用下，实现 560ms 的延时输出，输出位移达到 1.5mm。

参考文献：

- [1] 孔俊峰,李兵.新一代火工技术及其应用[J].国防技术基础, 2010(7):40-51.
- [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,贺爱峰,任西,等.火工品集成技术的发展机遇与途径[J].含能材料, 2015(23):205-207.
- [4] 解瑞珍,张凡,刘兰,等.硅基平面微雷管设计研究[J].火工品, 2018(1):20-22.
- [5] 施志贵,郭菲,席仕伟,等.一种金属桥冲击片雷管集成制造方法[J].火工品, 2010(3):1-3.
- [6] Jihun Jeong, Junseong Eom, et al. Miniature mechanical safety and arming device with runawayescapement arming delay mechanism for artillery fuze[J]. Sensors and Actuators A, 2018(279): 518-524.
- [7] 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):234-244.
- [8] Yu Qin, Liangyu Chen, Yongping Hao, et al. A study on the elastic coefficients of setback micro-springs for a MEMS safety and arming device[J]. Microsystem Technologies, 2020 (26): 583-593.
- [9] Feng HZ, Lou WZ, Wang DK, 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.
- [10] 郝永平,吴小芙,刘双杰,李占旭.基于 MEMS 的钟表惯性延时机构仿真分析[J].沈阳理工大学学报, 2009(28): 1-4.