

基于小口径弹的硅基 MEMS 安全系统设计

孙毅^{1,2}, 娄文忠^{1,2}, 冯恒振^{1,2}, 郑学均³

(1. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学 重庆创新中心, 重庆 401120;
3. 重庆长安工业集团有限责任公司, 重庆 401120)

摘要: 基于小口径弹药设计了发射环境可识别、小型化智能 MEMS 安全系统。结合自平衡发射系统的小口径弹药的弹道环境, 建立硅基 MEMS 安全系统模型, 并针对发射环境及勤务处理环境实现 MEMS 安全系统阈值判定机构模型设计; 通过理论计算和动力学仿真完成结构设计及优化; 结合 MEMS 加工工艺完成器件加工; 为满足小口径弹药对安全系统批量化、高可靠的需求, 通过地面模拟试验完成 MEMS 安全系统性能测试。

关键词: 小口径弹药; 发射环境可识别; MEMS 安全系统; 阈值判定机构

中图分类号: TJ43+1.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2021)05-0501-06

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2020.057

Silicon Based MEMS Safety & Arming Device Design for Small-Caliber Ammunition

SUN Yi^{1,2}, LOU Wenzhong^{1,2}, FENG Hengzhen^{1,2}, ZHENG Xuejun³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. Chongqing Innovation Center, Beijing Institute of Technology, Chongqing 401120, China;
3. Chongqing Changan Industrial Group Co., LTD., Chongqing 401120, China)

Abstract: A miniaturized intelligent MEMS Safety & Arming device system was designed for small caliber ammunition, being capable of launch environment identification. Firstly, a model of silicon-based MEMS Safety & Arming device system was established based on the ballistic environment of self-balancing launch system for small-caliber ammunition. And considering the launch environment and service processing environment, a threshold-value judging mechanism model was designed for the MEMS Safety & Arming device system. Secondly, the structure design and optimization were carried out by the means of theoretical calculation and dynamic simulation. Thirdly, according to the MEMS processing technology, the device was manufactured. Finally, the performance test of MEMS Safety & Arming device system was completed through ground simulation test, so as to meet the requirements of small caliber ammunition for safety system quantification and high reliability service.

Key words: small caliber ammunition; identifiable launch environment; MEMS safety&arming device; threshold-value judging mechanism

MEMS 系统具有微型化、集成化、可大批量生产、成本低廉的特点, 尤其适合在引信中应用, 为推

动引信小型化和智能化提供了技术支撑^[1-2]。MEMS 系统具有尺寸小、重量轻、性能可靠的特点,

收稿日期: 2020-04-08

基金项目: 国家重点预研项目(995-14021006010403)

作者简介: 孙毅(1991—), 男, 博士生, E-mail: 1127597459@qq.com.

通信作者: 娄文忠(1969—), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: louwz@bit.edu.cn.

因此美国等工业发达国家高度重视其在引信系统中的应用研究。MEMS 技术应用于引信中的一个重要方向就是 MEMS 安全系统^[3]。相比非 MEMS 安全系统, MEMS 安全系统具有体积小、重量轻和作用可靠等优点, 从而大大减小了安全系统的结构尺寸, 有利于提供足够的空间以满足引信增加新功能的需求。因此, MEMS 安全系统已成为新的研究热点^[4]。其主要设计思想是, MEMS 安全系统模块化设计, 材料选用镍基或者铜基, 采用 LIGA 或 UV-LIGA 工艺, 可实现部分功能模块的集成加工。MEMS 安全系统的另一种设计思路则是机械、电子及火工品技术的一体化高密度集成, 基于硅材料, 采用 DRIE 或者 SOI 工艺, 可实现 MEMS 安全系统整体的一体化加工。近年来国内的 MEMS 安全系统发展比较迅速, 许多单位都在探索既符合 MEMS 工艺又满足引信传爆和安全性设计准则的结构^[5-7]。国内在 LIGA、UV-LIGA、DRIE 等设计工艺以及 MEMS 安全系统的研究方法上起步晚, DRIE、SOI 等工艺以及微装配技术基础薄弱, 导致加工成本高、周期长, 制约了国内硅基 MEMS 安全系统与非硅 MEMS 安全系统的批量应用。因此, 随着国内 MEMS 加工技术、集成电路技术、微装配技术以及材料制备与特征研究瓶颈的突破, 逐步应用硅基与非硅 MEMS 安全系统是引信发展的一个必然趋势。文中依据小口径弹药的发射环境及勤务处理环境, 设计了具有弹道环境阈值判定机构的 MEMS 引信, 以满足各类弹药的需求。

1 硅基 MEMS 安全系统设计

硅基 MEMS 安全系统整体结构如图 1 所示。其 MEMS 安全系统整体尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 0.4 \text{ mm}$ 。安全系统设计的依据为小口径弹所受弹道环境力, 主要包括弹药发射时的后坐力和弹药旋转时的离心力。硅基 MEMS 安全系统的简要工作原理如下: 在弹药的发射状态下, 硅基 MEMS 安全系统在后坐过载的作用下, 后坐保险机构的后坐滑块克服后坐 MEMS 弹簧迅速滑至底部并被后坐闭锁机构锁死在底部, 从而解除对隔爆滑块的约束。

当弹药出膛后, 由于小口径弹的旋转, 并持续一定时间, 安全系统的隔爆滑块绕旋转轴旋转产生离心力, 其中隔爆滑块中心距离旋转轴距离为 $r \approx 5 \text{ mm}$, 离心力大于硅基 MEMS 弹簧与离心阈值机构的最

大断裂强度, 弹簧与离心阈值机构断裂, 隔爆滑块在离心力的驱动下运动, 最终实现安全系统解除保险, MEMS 安全系统处于待发状态。另外, 为了提高设计效率, 缩短研究周期, 因此本节在保证质量和结构的惯性力与原始结构基本一致的条件下, 对阈值判定机构进行了合理的简化。其中, 简化的阈值判定机构, 其核心部件主要包括隔爆滑块, 连接节点和框架。本方案可一体化加工, 尺寸微小, 易于批量生产, 成本低。硅基 MEMS 安全系统主要包括基板、后坐保险机构、隔爆滑块、硅基 MEMS 弹簧机构、离心阈值机构、传爆孔和闭锁机构。

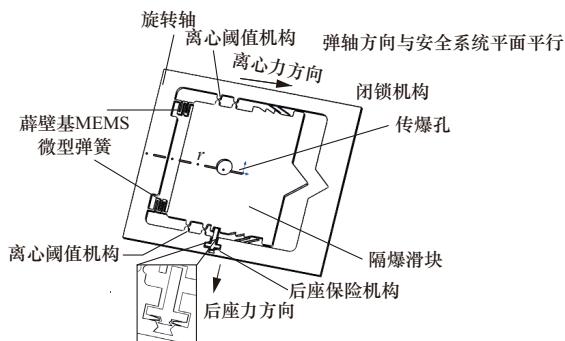


图 1 MEMS 安全系统的整体结构布局

Fig. 1 Overall structural layout of MEMS safety and arming device

硅基 MEMS 弹簧如图 2 所示, MEMS 弹簧横截面为正方形, 边长为 $d \approx 50 \mu\text{m}$; 根据设计, 隔爆滑块的体积约为

$$V_{HK} = 5 \times 5 \times 0.3 = 7.5 \text{ mm}^3 \quad (1)$$

$$m_{HK} = \rho V \quad (2)$$

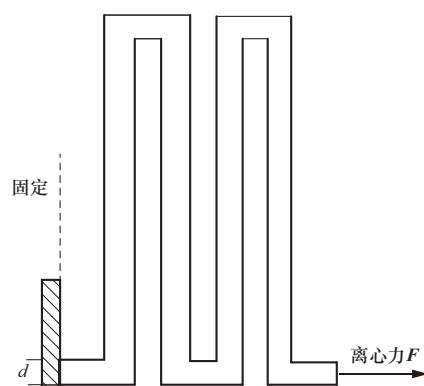


图 2 硅基 MEMS 弹簧结构图

Fig. 2 Silicon MEMS spring structure diagram

其中, 弹丸最大旋转速度达到 $n=50000 \text{ r/min}$; 而

$$\omega = 2\pi n \quad (3)$$

$$F = m_{HK}\omega^2 r \quad (4)$$

计算得到硅基MEMS弹簧所受离心力 $F \approx 2.35 \text{ N}$; 硅基MEMS弹簧横截面所受压强为 $P_{\text{弹簧}} = F/d^2 = 940 \text{ MPa}$, 远远大于硅的断裂强度 140 MPa , 因此硅基MEMS弹簧在弹药出膛后是完全可以可靠解保的.

图3所示的离心阈值机构, 属于对称结构, 当受到离心加速度过载时, 所以只需要分析一侧的受力情况即可.

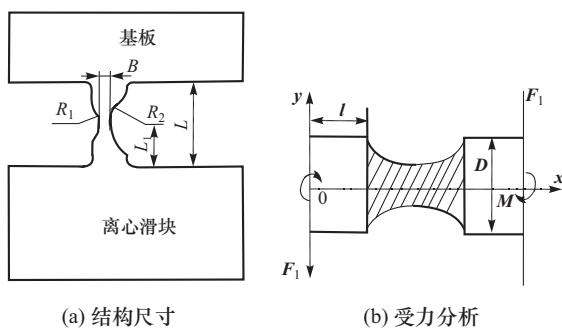


图3 MEMS安全系统后座保险机构结构图

Fig. 3 MEMS safety and arming device setback force insurance structure

假设施加的加速度为 a , 则离心力为 $F=ma$, 其中, 单个连接节点承受的力为

$$F_1 = F/4 = ma/4 \quad (5)$$

单个连接节点的结构尺寸如图3(a)所示, 其中梁的跨度为 L ; L_1 为两个圆弧的圆心距梁根部的距离; 梁的最小截面处宽度为 B ; 连接节点中圆弧的端点与基板(离心滑块)之间的梁的平均宽度为 D , 主要受两圆弧半径 R_1 和 R_2 的影响.

由图3(b)所示的连接节点的受力分析可以发现, 这是一个变截面梁的平面应力问题. 假设梁的不同截面处的宽度为 $B(x)$, 连接节点的应力分量的微分方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} = 0 \\ \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) (\sigma_x + \sigma_y) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

基于图3(b)所示的连接节点的受力分析, 并根据连接节点与基板和离心滑块连接处的力矩平衡条件, 其边界条件为

$$\begin{cases} x = 0: u = 0, v = 0, |M| = \frac{F}{2}L_1 \\ x = L_1: \sigma_x = 0, \int_{-\frac{B(x)}{2}}^{\frac{B(x)}{2}} \tau_{xy} dy = \frac{F}{2} \\ y = \pm \frac{1}{2}B(x): \sigma_y = 0, \tau_{xy} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

结合式(6)和式(7), 连接节点在不同位置所受的弯曲应力以及剪切应力可以表达为

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{F(L_1 - x)}{2I_z}y \\ \sigma_y = 0, \\ \tau_{xy} = \frac{F}{4I_z} \left(\frac{B^2(x)}{4} - y^2 \right) \end{cases} \quad (8)$$

文中, $L = 2L_1 = 0.13 \text{ mm}$, $B = 0.015 \text{ mm}$, $D = 0.045 \text{ mm}$, $l = 0.035 \text{ mm}$, $R = 0.042 \text{ mm}$, 离心滑块的质量 $m_{HK} = \rho V$. 另外, 单晶硅的屈服强度 $\sigma_s = 726 \text{ MPa}$, 由此可求得当 $\sigma_s = 726 \text{ MPa}$ 时, 节点在不同离散坐标点处发生屈服失效所需加速度 a 的临界值, 其发生屈服失效所需的临界加速度为 $a_1 = 523.2 \text{ km/s}^2$.

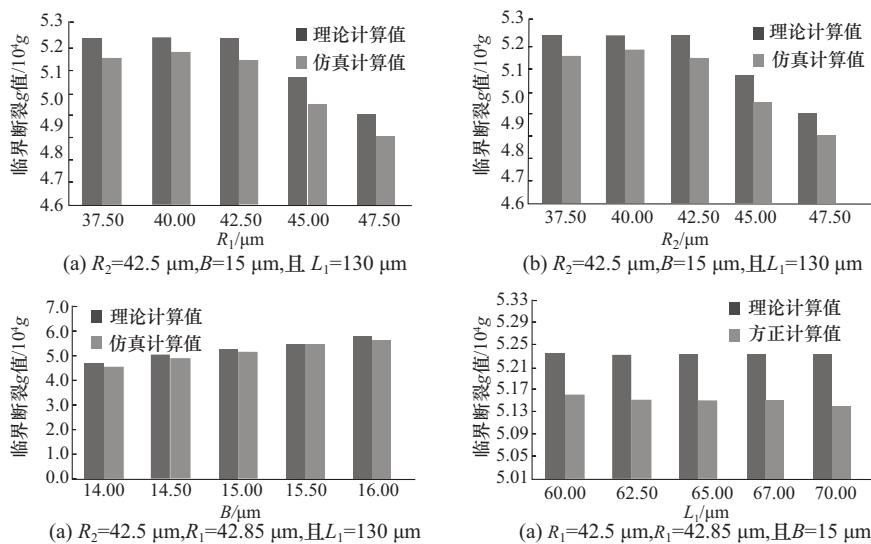
本节主要通过对比分析参数化连接节点发生断裂时所需的临界过载值的方式, 对影响离心阈值机构可靠性解保的主要参数进行了探索性研究. 首先, 针对连接节点参数化设计方案, 建立对应阈值判定结构的参数化仿真模型. 其次, 根据理论计算结果, 将 $a = 523.2 \text{ m/s}^2$ 作为加载条件对参数化的连接节点进行初步的仿真研究.

为获得各个参数化连接节点发生断裂时承受的临界过载值, 文中以 52320 g 为初始值, 100 g 为步长分别对其进行仿真计算, 同时, 基于理论计算公式分别对其进行理论计算. 由此, 通过理论和仿真计算, 并对各参数化连接节点发生断裂时所需的临界断裂 g ($g = 10 \text{ m/s}^2$) 值进行总结, 可以得到如图4所示的对比分析图.

对图4中参数化阈值判定机构连接节点临界断裂 g 值的理论和仿真计算结果进行对比分析, 可以得到如下结论:

①对于阈值判定机构的初始结构, 其临界断裂 g 值的理论计算结果和仿真计算结果分别为 52320 g 和 51500 g ;

②理论结果均比仿真结果高, 是因为在理论计算中考虑的完全是静态的, 忽略了可能存在的速度影响, 同时, 在仿真计算中, 由于建模时网格的存在而增加了模型的间隙, 从而导致了仿真模型的强度略低于实际模型的强度;

图 4 参数化连接节点临界断裂 g 值的理论和仿真计算结果对比图Fig. 4 Comparison of the theoretical and simulation results of the critical fracture g value of the parametric joint

③ 参数化连接节点临界断裂 g 值的理论结果和仿真结果具有较高的吻合度, 其误差均小于 5%;

④ 对于参数化连接节点的断裂 g 值, 其理论和仿真计算结果均呈现出随参数 R_1 和 R_2 的增加而递减, 随参数 B 的增加而递增以及随 L_1 的增加而基本维持不变的趋势。其中, 参数 R_1 和 R_2 对连接节点断裂 g 值的影响情况基本一致, 且参数 B 是影响连接节点断裂 g 值的最主要因素。

2 MEMS 安全系统的加工

本研究中硅基 MEMS 安全系统采用成熟的 MEMS 加工工艺实现器件加工, 图 5 描述了硅基 MEMS 安全系统及相关模块的微机械加工过程。

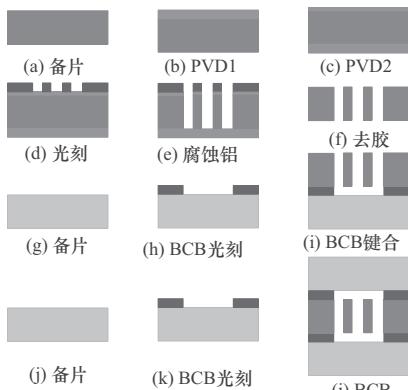


图 5 硅基 MEMS 安全系统加工工艺过程

Fig. 5 Silicon-based MEMS safety & arming device processing process

它主要包括中部的硅基 MEMS 安全系统以及器件的封装。具体的加工工艺流程如下:

① 备片。采用电阻率为 $2 \sim 4 \Omega \cdot \text{cm}$, $400 \mu\text{m}$ 厚的 4 英寸高阻硅片为基片;

② 物理气相沉积(PVD)。背面溅射 Al 层, 厚度为 $300 \sim 350 \text{ nm}$, 作用是硬掩模;

③ 物理气相沉积(PVD)。正面溅射 Al 层, 厚度为 $300 \sim 350 \text{ nm}$, 作用是硬掩模;

④ 结构光刻。结构图形化;

⑤ 腐蚀铝。正面铝图形化, 与光刻胶形成复合掩膜, DRIE 刻蚀。将硅层图形化;

⑥ 去胶。浓硫酸+双氧水彻底清洁硅片表面;

⑦ 备片。采用 $300 \mu\text{m}$ 厚的玻璃片为基片;

⑧ BCB 光刻。BCB 图形化;

⑨ BCB 键合。将已经光刻的 BCB 与图形化的硅层键合在一起。

⑩ 备片。采用 $300 \mu\text{m}$ 厚的玻璃片为基片;

⑪ BCB 光刻。BCB 图形化。

3 测 试

结合前文阈值判定机构的参数化设计方案, 对阈值判定机构进行批量加工并进行相应的试验研究。其中, 基于 MEMS 安全系统的可靠性设计原则, 本节主要对阈值判定机构进行两类试验, 其具体的试验内容如表 1 所示。

表 1 阈值判定机构的试验方案及试验内容

Tab. 1 Test scheme and content of threshold-value judging mechanism

霍普金森冲击试验	高速离心试验
初始阈值判定机构在跌落过载条件下的断裂响应特性	参数化阈值判定机构在弹药离心过载条件下的断裂响应特性

为验证阈值判定机构在运输过程中发生意外跌落时的可靠性, 文中采用如图 7 所示的本实验室自主研发的具有阈值可调、重复性好、精度高的霍普金森冲击系统对阈值判定机构进行试验研究, 该系统主要由气压发射装置发射子弹撞击压杆产生过载, 产生的冲击过载最高可达 10^5 g .



图 7 冲击试验的试验平台

Fig. 7 Test platform

通过调节通入气缸的气体压力, 实现对发射过载的控制。另外, 针对本次的试验内容, 本实验室还设计了相应的微试样的安装固定机构, 以满足 MEMS 安全系统快速测试的需求。

由前文所述的跌落过载曲线可知, 跌落过载的峰值为 $12\,000\text{ g}$, 为留有一定的余量, 因此此处施加峰值在 $12\,000\text{ g} \sim 20\,000\text{ g}$ 范围内的冲击过载对初始阈值判定机构进行试验研究。其中, 对于每个设定的冲击过载峰值, 本文均采用 4 个微试样进行重复性的试验。基于此, 对试验结果进行分析总结, 可得到如表 2 所示的试验结果。

表 2 阈值判定机构在跌落过载下的断裂情况

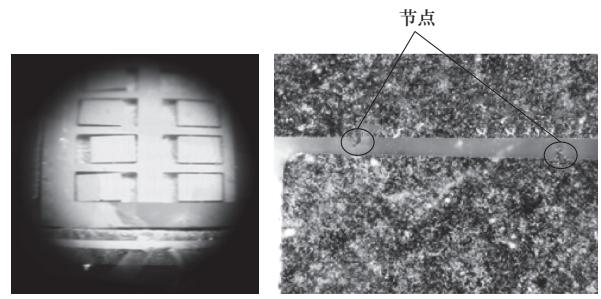
Tab. 2 Fracture of threshold-value judging mechanism under falling overload

冲击过载峰值/ g	脉宽/ μs	断裂情况
14 113	50	均未断裂
16 155	50	均未断裂
18 231	50	均未断裂
20 526	50	均未断裂

由表 2 可以发现, 当施加 $12\,000\text{ g} \sim 20\,000\text{ g}$ 范围内的峰值过载时, 阈值判定机构的所有样品均未发生断裂失效, 因而, 可以判定阈值判定机构在发生意外跌落时不会出现意外解保的情况, 其设计满足 MEMS 安全系统可靠性的设计要求。

另外, 为了验证连接节点临界断裂 g 值的理论和仿真计算结果的准确性, 文中采用的高速离心机和对应的试验工装对参数化的阈值判定机构进行了试验研究。其中, 离心机最大转速可达 30 kr/min , 试验工装上阈值判定机构安装位置的偏心距为 90 mm , 由此计算可得, 离心机所能提供的最大离心过载可达 $88\,826\text{ g}$ 。

基于前文中参数化阈值判定机构的理论和仿真分析, 为留有一定的余量, 此处以 $30\,000\text{ g}$ 的离心过载作为初始值, 并以 400 g 作为控制步长, 分别对不同参数化阈值判定机构进行 4 组重复性的试验, 以探索参数化连接节点的断裂 g 值。其中, 参数化阈值判定机构的一组试验结果的电镜图如图 7 所示。



(a) 试验结果

(b) 断裂的连接节点

图 7 参数化阈值判定机构的试验结果
Fig. 7 Test results of parameterized threshold-value judging mechanism

对每个参数化连接节点重复性的试验结果进行总结可以发现, 相同加工批次、同种设计参数的连接节点临界断裂 g 值具有较大的离散性, 说明硅的材料特性具有一定的离散性, 在设计中应该予以考虑。另外, 对试验结果取平均值, 并结合理论和仿真计算结果, 可以得到参数化连接节点的理论计算值、仿真计算值和试验平均值的对比分析结果, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 对于连接节点的初始结构, 其临界断裂 g 值的理论计算结果、仿真计算结果和试验结果分别为: $52\,320\text{ g}$ 、 $51\,500\text{ g}$ 和 $53\,700\text{ g}$, 因此, 可以认为所设计的阈值判定机构在 $53\,700\text{ g}$ 的离心过载下能够可靠的解保。由此可以发现, 对于 35 mm 口径弹药, 若能满足 MEMS 安全系统离心滑块的质心距弹轴的距离不小于 8.7 mm , 且弹丸的壁厚不超过 4.8 mm 时, 那么所设计的阈值判定机构则可以应用到 35 mm 口径弹药的应用平台上。另外, 所设计的阈值判定机构也适用于能够提供不小于 $53\,700\text{ g}$ 离心过载的其他武器平台。另外, 由图 8 所示的参数化连接节点临界断裂 g 值的研究结果的对比分析曲线, 可以得到如下的结论:

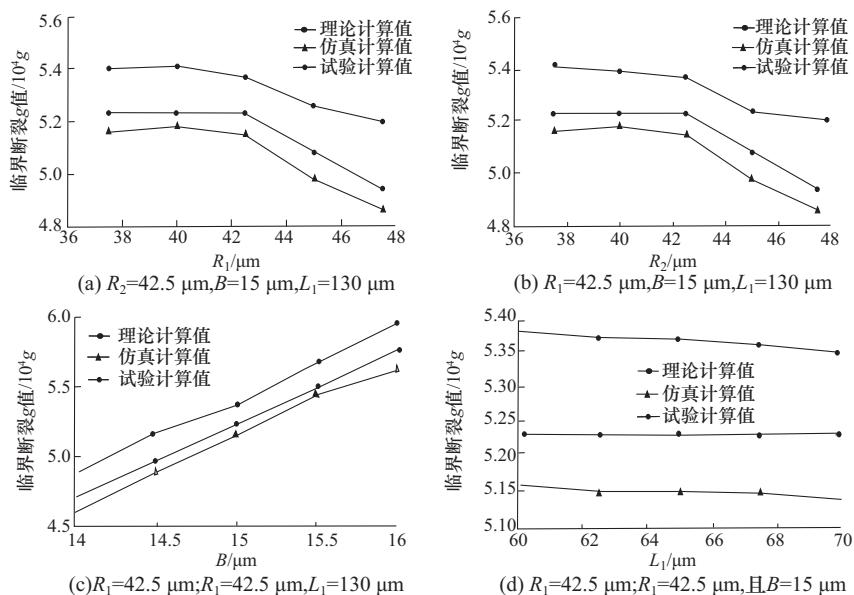


图 8 参数化阈值判定机构的分析结果

Fig. 8 The analysis results of parameterized threshold-value judging mechanism

①参数化连接节点临界断裂 g 值的试验结果的平均值均高于理论和仿真计算结果。其可能是理论计算和仿真分析中没有考虑到试验中存在的摩擦和气体阻尼引起的;

②相同结构参数下,理论计算、仿真分析与试验结果具有较高的吻合度,且其之间的误差均小于10%。因此,可知,理论和仿真分析方法是准确的、可靠的,为节省设计周期和成本,可以通过理论结合仿真的分析方法进行初期的优化设计。

③在不同的结构参数下,连接节点临界断裂 g 值的理论计算、仿真分析和试验结果随参数的变化基本呈现一致的变化规律。由此可知,结构参数 R_1 、 R_2 、 B 和 L_1 对连接节点临界断裂 g 值影响的理论和仿真分析是准确的,那么在后续的结构优化设计中需要对参数 B 进行重点考虑。

4 结束语

文中针对小口径弹药 MEMS 安全系统的应用需求,结合小口径弹药的弹道环境,建立硅基 MEMS 安全系统及其对环境状态敏感的阈值判定机构模型;通过理论计算和动力学仿真完成结构设计及优化;结合 MEMS 加工工艺完成器件加工;最终,通过地面模拟试验完成 MEMS 安全系统性能测试,以满足小口径弹药对安全系统的批量化、高可靠的需求。

参考文献:

[1] 于盈. 某仿生弹药气动特性分析及飞行过程数值模拟

[D]. 南京:南京理工大学, 2015.

YU Ying. Analysis of aerodynamic characteristics and numerical simulation of flight process of a bionic ammunition[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)

[2] LI Guozhong, SHI Gengchen, SUI Li, et al. The application of multilayer elastic beam in MEMS safe and arming system[J]. Aip Advances, 2015, 5(7): 87 - 55.

[3] ONKAR K, SUJAY G. Safety and arming mechanism (SAM) for mortar fuze[J]. International Journal for Scientific Research & Development, 2015, 3: 637 - 639.

[4] WANG Fufu, LOU Wenzhong. Parametric research of MEMS safety and arming system[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Nano/micro Engineered and Molecular Systems. [S. l.]: IEEE, 2013: 767 - 770.

[5] 何光, 石庚辰. 基于 MEMS 技术的平面 W 型微弹簧刚度特性研究[J], 北京理工大学学报, 2006, 26(6): 472 - 474.

HE Guang, SHI Gengchen. Study on stiffness characteristics of w-type microspring based on MEMS technology [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2006, 26 (6): 472 - 474. (in Chinese)

[6] LIU Fangyi, LOU Wenzhong, WANG Fufu, et al. Theoretical method research on a MEMS safety and arming device [J]. Advanced Materials Research, 2014, 901: 93 - 97.

[7] WANG Fufu. Research on the design and verification method of heterogeneous MEMS security system [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016.

(责任编辑:孙竹凤)