

文章编号: 1006-9941(2014)05-0688-05

## 活塞式微作动器结构与仿真

严楠<sup>1</sup>, 王刚<sup>1,2</sup>, 耿万钧<sup>3</sup>, 张良<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学机电学院爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081; 2. 中国航天科工集团 8511 研究所, 江苏 南京 210007; 3. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为满足小口径弹药引信安全系统用微作动器结构和性能要求, 利用 ANSYS/LS-DYNA 动力学有限元软件模拟分析了活塞式作动器的结构, 研究了结构形式和尺寸参数对其性能的影响, 并设计改进一种活塞式作动器, 测试了不同结构参数的止推力和止退力, 得到了不同装药量下活塞式微作动器的输出推力与推程的关系曲线和表达式。结果表明, 台阶高度为 0.03 mm 时, 止推力为 142 N, 止退力为 38.5 N; 推程为 2.0 mm 时, 最小推力不小于 20 N。试验结果与模拟结果比较吻合, 偏差在 15% 以内, 说明该数值方法可用于微作动器作用过程研究。

**关键词:** 火工品; 火工装置; 作动器; 数值模拟; 推力

**中图分类号:** TJ55; TJ450.3

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.021

### 1 引言

活塞式作动器是一种输出作动类火工装置, 体积小、重量轻、做功迅速, 能够实现多种预定功能, 适用于弹药的引信安全系统<sup>[1-2]</sup>。火工作动器的安全性和可靠性是引信安全系统保险解除的关键, 也是弹药系统实现高效毁伤的重要步骤, 目前微机电系统 (MEMS) 安全与解锁保险装置已在小口径武器弹药 (20 mm 单兵枪榴弹、集束弹药子弹药、M231 手榴弹等)、鱼雷等武器系统的引信中应用, 最小 (含爆炸序列) 的体积为 12 mm×15 mm×1 mm。传统典型的活塞式作动器<sup>[3-6]</sup>是利用桥丝式电起爆器发火, “O”型密封圈密封, 将药剂压装填装在电起爆器内, 止推设计为剪切销结构, 因此, 尺寸较大, 难以应用于小尺寸引信安全系统。对传统活塞式作动器结构进行改进, 才能使其满足小口径弹药用 MEMS 引信安全系统的要求<sup>[7-10]</sup>。为此, 本研究设计改进了一种活塞式作动器, 其原理是不依靠发射时的后座力完成解除保险功能, 而通过将火工药剂的化学能转换为机构的机械能, 实现其预定的作动功能, 可实现小型化、止推和止退功能, 满足引信安保机构小型化和可靠解除保险的要求, 适用于不同发射环境的弹药系统, 可为小口径弹药引信保险机构设计提供参考。

收稿日期: 2013-08-27; 修回日期: 2014-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助 (11172042)

作者简介: 严楠 (1960-), 男, 教授, 主要从事火工系统理论与设计研究。e-mail: yn@bit.edu.cn

通信联系人: 王刚 (1988-), 男, 研究生, 主要从事换能元和发火件结构设计研究。e-mail: wg19882012@163.com

### 2 活塞式作动器结构组成与工作原理

所设计的活塞式作动器由发火元件、装药、活塞、外壳等部分组成, 结构如图 1 所示。活塞材料为硬铝, 外壳为不锈钢, 起支承所有零部件和密封的作用; 发火元件勤务处理时需安全, 且在外界发火电信号刺激下能可靠发火、向活塞提供作用动力。其工作原理为: 微作动器的发火元件接收外界刺激点燃火工药剂, 火工药剂的气体产物推动活塞沿着某一方向运动, 活塞作为能量传递机构, 将药剂的化学能传递给引信安全系统的隔爆件或安全锁, 使隔爆板运动到保险解除位置实现解除保险的功能。

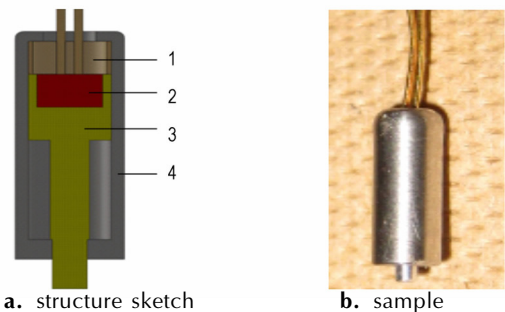


图 1 活塞式微作动器结构与实物

1—发火件, 2—装药, 3—活塞, 4—外壳

Fig.1 Structure and sample of the piston micro-actuator

1—firing device, 2—charge, 3—piston, 4—shell

小口径弹药系统空间有限, 引信安保机构尺寸不得大于  $\varnothing 30 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ , 系统中各个功能部件尺寸

需满足小型化要求,重要尺寸指标为:作动前整体高度、整体外径、活塞行程。综合考虑小口径弹药引信安保机构的结构特点<sup>[11-12]</sup>,本研究所设计的活塞式微作动器应满足尺寸不大于  $\Phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ 。

综合国内外典型作动器的结构和设计思想,结合小口径弹药引信安保系统设计特点,本研究设计加工了三种不同台阶高度的活塞式微作动器 1<sup>#</sup>~3<sup>#</sup>,相关参数见表 1。

表 1 活塞式微作动器参数

Table 1 Dimensions of the designed piston micro-actuator

sample	step height /mm	step area /mm <sup>2</sup>	diameter /mm	length /mm
1 <sup>#</sup>	0.03	0.38	2.5	7.5
2 <sup>#</sup>	0.05	0.63	2.5	7.5
3 <sup>#</sup>	0.07	0.88	2.5	7.5

### 3 活塞式微作动器试验测试装置

#### 3.1 止推力和止退力测试装置

止推力和止退力是微作动器的重要参数,测试装置主要由模具、冲头、高精度伺服压机等组成,见图 2 和图 3。止推结构是为了保证勤务处理和作用前活塞

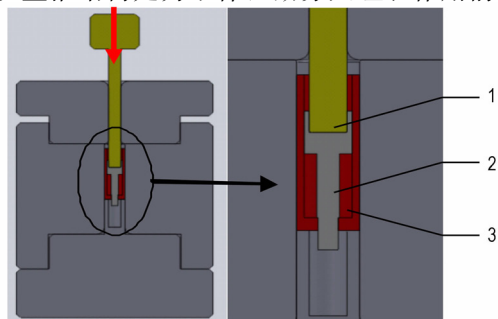


图 2 活塞式微作动器止推力测试系统

1—冲头, 2—活塞, 3—外壳

Fig.2 Anti-thrust force test system of the piston micro-actuator

1—punch, 2—piston, 3—shell

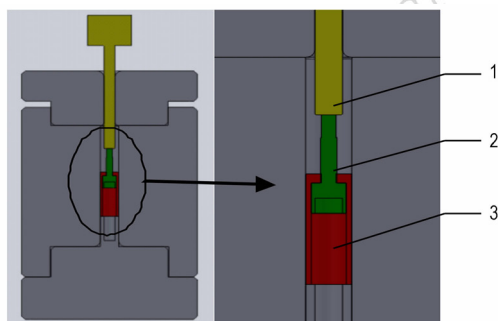


图 3 活塞式微作动器止退力测试系统

1—冲头, 2—活塞, 3—外壳

Fig.3 Setback force test system of the piston micro-actuator

1—punch, 2—piston, 3—shell

不运动,而止退结构是为了保证活塞作用完成后不退回。止推力测试时,高精度伺服压机在冲头上方加载压力,当压力逐渐增大到某一值时,活塞克服止推结构的阻力和摩擦力向前运动,其最小压力即为活塞作动器的止推力(见图 2)。止退力的测试装置与止推力测试装置类似,测试方法与止推力测试相同(见图 3)。止退力测试时,将作用后的活塞作动器反向装入测试模具,向活塞退回的方向加载压力,当压力逐渐增大到某一值时,活塞克服止退结构的阻力和摩擦力开始运动,加载的最小压力即为活塞的止退力。

#### 3.2 活塞式作动器推力测试装置

为了准确测量微作动器不同条件下推力的变化,本研究采用了一个推力测试系统(见图 4),该系统由 4 部分组成:支架、支撑套、固定螺钉和推力传感器。其中支撑套和支架、推力传感器和支架均有细牙螺纹连接,圆心处于对正状态,保证推力测试时微作动器的推力施加在传感器中心敏感位置。试验测试时,通过调整传感器与微作动器之间的初始距离,测试推力与装药量之间的关系。

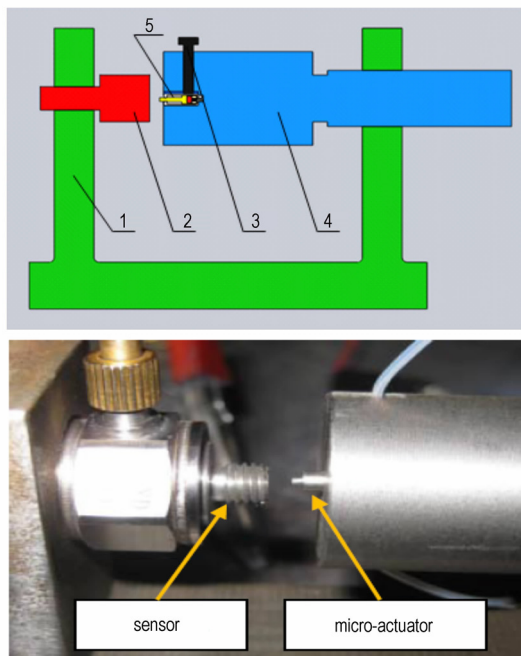


图 4 活塞式微作动器推力测试系统

1—支架, 2—传感器, 3—固定螺钉, 4—支撑套, 5—活塞式微作动器

Fig.4 System of the thrust force test for the piston micro-actuator

1—trestle, 2—sensor, 3—fixed screw, 4—support sleeve,

5— piston micro-actuator

### 4 活塞式微作动器数值模拟

#### 4.1 物理建模与材料参数

研究利用 ANSYS<sup>[13]</sup> 作为前处理软件生成有限元模型,同时施加边界及载荷条件,利用 LS-DYNA 求解器

进行求解计算, LS-PREPOST 进行后处理查看计算结果。

(1) 几何模型。考虑到模型的对称性, 建模采用 1/4 简化三维模型, 按实际尺寸建立的计算模型如图 5 所示, 采用 164 号 8 节点单元模型 (3Dsolid); 限制外壳沿活塞滑动方向的位移自由度。

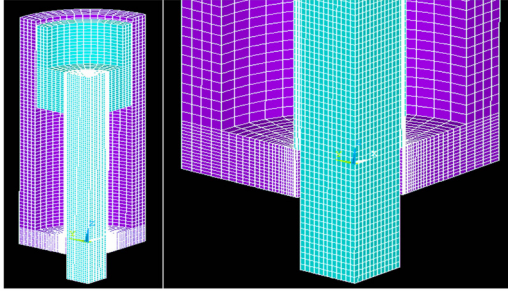


图 5 模型有限元网格划分  
Fig. 5 Finite element mesh model

(2) 材料模型。数值模拟中采用塑性随动强化模型, 单元删除法对有限元网格进行调整, 单元删除法根据一定的断裂准则, 将已达到断裂临界值的单元删除, 取其相邻单元的边作为新的边界, 模拟中将材料的失效应变作为断裂准则。塑性随动模型与应变率相关, 不仅与当前的应变率相关而且与应变率历史相关, 模型中包含了随动硬化和各向同性硬化两种硬化影响。文献研究<sup>[14]</sup>表明: 铝合金为应变率无关材料, 模型的材料参数见表 2, 单位为  $\text{cm}\cdot\mu\text{s}\cdot\text{g}$ 。

表 2 仿真模型基本参数

Table 2 Basic parameters of the simulation model

materials	elastic modulus /Mbar	density / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	poisson ratio	yield stress /Mbar	shear modulus /Mbar
aluminum alloy	0.72	2.78	0.33	0.003	0.0148
steel	2.06	7.83	0.28	0.0031	0.7938

(3) 活塞与外壳之间配合选择侵蚀接触。

(4) 在活塞靠近底座装药槽的一侧施加恒定推力载荷, 考察活塞能够运动到位时临界推力值, 即活塞式微作动器的止推力。

#### 4.2 数值计算分析

止推力的大小直接影响着活塞式微作动器的输出性能, 相同装药量情况下, 止推力越小, 活塞式微作动器的输出能力越大, 装药的利用率就越高。图 6 是 1<sup>#</sup> 活塞式微作动器作用过程的应力分布图, 包括活塞开始运动时刻、活塞运动过程中和活塞撞击底部时刻的截图以及台阶配合处的局部放大图。

由图 6 可见, 1<sup>#</sup> 活塞式微作动器作用过程中的应力集中

在活塞与底部通孔的台阶配合部分, 载荷足够大时, 活塞的台阶结构会发生剪切破坏, 活塞材料开始失效, 失效材料的网格此时会被删除; 活塞运动到位时, 活塞对外壳的底部有一定冲击作用, 整个底部需要有一定的承受冲击的能力。

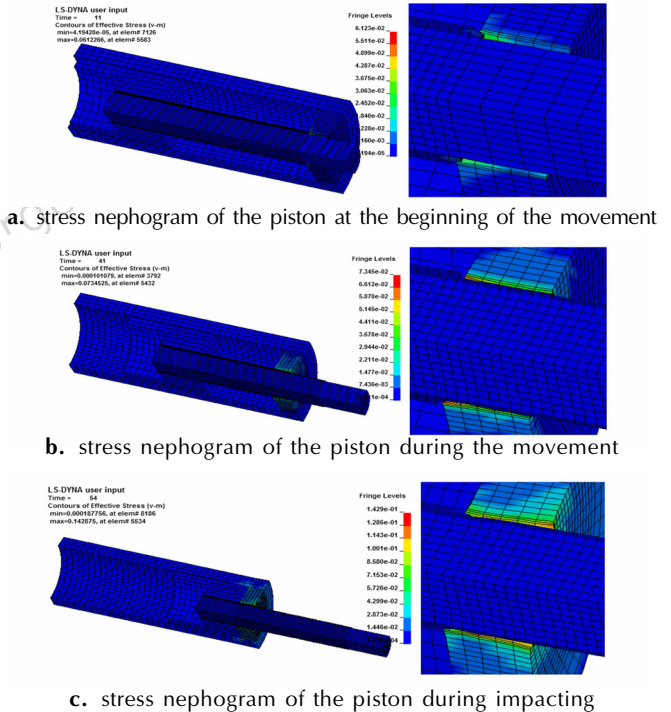


图 6 1<sup>#</sup> 活塞式微作动器作用过程的应力分布

Fig. 6 Stress distribution of the piston micro-actuator sample 1<sup>#</sup> during the interaction process

## 5 微作动器试验与数值模拟结果讨论

### 5.1 止推力和止推力设计参数影响因素分析

为了研究活塞式微作动器的止推力、止退力与台阶高度的关系, 采用止推力、止退力试验测试装置对所加工的 1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup> 微作动器进行了止推力和止退力试验 (图 2 和图 3)。试验样品的样本量为 8 发。表 3 为止推力和止推力试验测试的平均值以及数值模拟计算的结果, 图 7 为活塞式微作动器的止推力与台阶高度的关系曲线, 图 8 为活塞式微作动器的止退力与台阶高度的关系曲线。

表 3 微作动器试验测试与数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation and test results of micro-actuator

sample	step height /mm	anti-thrust force			setback force experimental value/N
		experimental value/N	numerical simulation value/N	relative error /%	
1 <sup>#</sup>	0.03	142	126	11.3	38.5
2 <sup>#</sup>	0.05	243	249	-2.5	37.9
3 <sup>#</sup>	0.07	393	406	-3.3	38.3

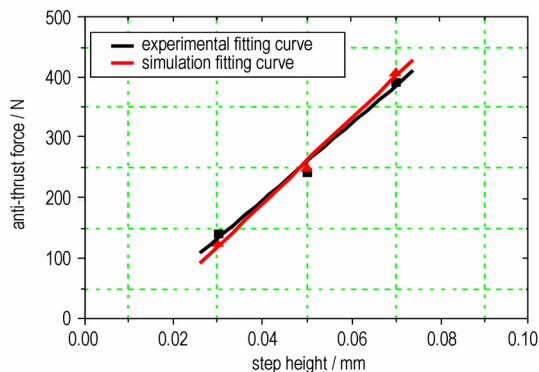


图7 活塞式微作动器止推力与台阶高度的关系  
Fig.7 Relationship of piston micro actuator anti-thrust force and step height

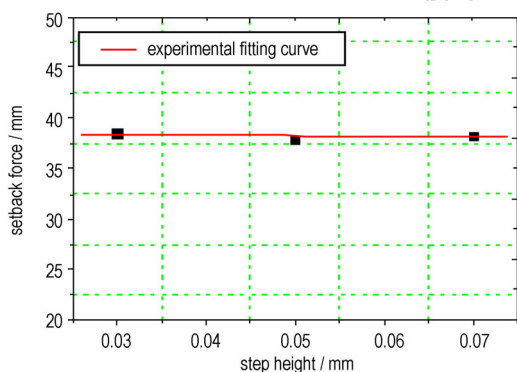


图8 活塞式微作动器止退力与台阶高度的关系  
Fig.8 Relationship of the piston micro actuator setback force and step height

由表3可得,活塞式微作动器的止推力数值计算值和试验测试均值的最大偏差小于15%。分析认为这是由于材料模型、材料参数、网格大小和计算步长等因素影响造成的,但也说明采用数值模拟方法计算微作动器作用过程是可靠的。

由图7可得,台阶高度对活塞式微作动器的止推力有明显的影 响,台阶高度增加,微作动器的止推力呈线性增加。通过数据拟合可得微作动器的止推力  $F$  与台阶高度  $H$  的关系为:  $F = -54.4 + 627.5H$ , 相关系数 0.9937。对比台阶高度为 0.03 mm 和 0.07 mm, 台阶高度增加 0.04 mm 时,活塞和外壳底部台阶配合的接触面积增加  $0.5 \text{ mm}^2$ , 止推力增加 251 N, 这是由于活塞的台阶高度越大,活塞和外壳底部的台阶配合的接触面积也就越大。活塞所用材料为硬铝, 可视 为剪切强度、摩擦系数等特性参数相同, 即活塞够抵抗的剪切应力相同, 当接触面积增大时, 达到相同的剪切应力所需止推力必然增大。

由图8可得,活塞式微作动器的止退力随台阶高度变化不大,基本保持不变。通过数据拟合可得微作动器的止退力  $F$  与台阶高度  $H$  的关系:  $F = 38.5 - 5H$ , 相关

系数 0.9921。由于止退力的设计是靠侧壁挤压产生的摩擦力锁定在解锁位置,实现活塞推出作功后的止退功能,台阶高度的变化对摩擦力的影响不大,因此止退力基本保持不变。

综合以上研究分析,结合止推力、止退力的设计以及引信安全系统解除保险的要求,在满足止推功能的前提下,设计中应尽量考虑降低止推力,提高推力。结合表3结果,1#样品的台阶高度为 0.03 mm 时,其止推力试验均值为 142 N,可满足活塞式作动器在作用前不解除引信安全系统要求,即在勤务处理时满足 12 m 跌落时最小止推力要求(引信环境与性能试验方法 GJB 573A-1998 中关于跌落的要求),且其对应的止退力为 38.5 N。因此,设计选择活塞式微作动器止推结构的台阶高度为 0.03 mm,对其进行推力试验研究。

### 5.2 推力设计参数影响因素分析

为了研究微作动器的装药量与做功能力的关系,采用推力测试装置,试验测试了 2, 3, 4 mg 不同装药量下 1#微作动器的推力,测试结果如图9所示。由图9可以得出:不同装药量下,随推程增大,推力都明显下降,不同装药量的推力变化趋势比较一致,不同装药量的活塞式作动器的整体规律一样。由此得到台阶高度为 0.03 mm、最小药量为 2 mg,活塞式作动器在推程为 2.0 mm 时,其推力为 27.6 N,满足小口径弹药 MEMS 引信安全系统用微作动器推力性能要求。

对测试数据进行拟合,得到了不同装药量下推力  $F$  与推程  $S$  的关系:

- 装药量 2 mg 时,  $F = 81.0 - 25.8S$ , 相关系数 0.9957;
- 装药量 3 mg 时,  $F = 117.6 - 37.7S$ , 相关系数 0.9956;
- 装药量 4 mg 时,  $F = 149.4 - 46.3S$ , 相关系数 0.9962。

综合各方面因素考虑,1#活塞式微作动器能够满足小口径弹药引信安全系统对保险机构的性能要求,即尺寸不大于  $\phi 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ ,推程不小于 2.0 mm,推力不小于 20 N。

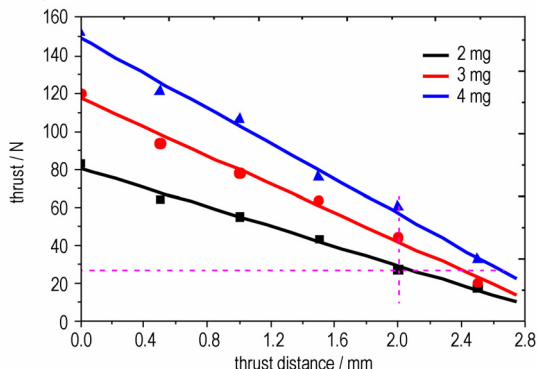


图9 1#活塞式微作动器推力与推程的关系  
Fig.9 Relationship of the piston micro actuator thrust and thrust distance(1#)

## 6 结 论

通过试验测试与数值仿真相结合的方法, 研究了一种适合于小口径弹药引信保险机构用活塞式微作动器结构。利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对活塞式微作动器的结构进行了优化, 得到不同结构尺寸参数对其止推力的影响关系。

(1) 测试了不同结构尺寸参数活塞式微作动器的止推力和止退力, 获得了止推力和止退力与台阶高度的关系曲线。当台阶高度为 0.03 mm 时, 止推力为 142 N, 止退力为 38.5 N, 可以实现活塞式微作动器的止推和止退功能。试验结果与仿真计算结果(止推力为 126 N)比较吻合, 偏差在 15% 以内。

(2) 测试了台阶高度为 0.03 mm 活塞式微作动器的推力, 获得了不同装药量下活塞式微作动器在不同推程下的输出推力曲线, 当推程为 2.0 mm 时, 推力不小于 20 N。

### 参考文献:

- [1] Briand D, Dubois P, Bonjour L, et al. Large deformation balloon micro-actuator based on pyrotechnics on chip[J]. *Micro Electro Mechanical System*, 2008: 535-538.
- [2] 李华, 石庚辰. MEMS 平面微弹簧弹性系数的研究[J]. *探测与控制学报*, 2005, 27(4): 41-43.  
LI Hua, SHI Geng-chen. Study on the elastic coefficient of MEMS planar micro spring[J]. *Journal of Detection & Control*, 2005, 27(4): 41-43.
- [3] 王晓霞, 牛兰杰, 赵旭. 火箭弹引信 MEMS 后坐保险机构[J]. *科学技术与工程*, 2011, (11): 2479-2482.  
WANG Xiao-xia, NIU Lan-jie, ZHAO Xu. MEMS setback arming device for rocket fuze[J]. *Science Technology and Engineering*, 2011, (11): 2479-2482.
- [4] Helene Pezous, Carole Rossi, Marjorie Sanchez, et al. Fabrication, assembly and tests of a MEMS-based safe[J]. *Journal of*

- Physics and Chemistry of Solids Volume*, 2010, 71(2): 75-79.
- [5] Camilo A. MEMS based safe & srm development for the XM29 (OICW) weapon system update[J]. *Joint Services Small Arms Section Symposium*, 2003: 50-55.
- [6] Briand D, Dubois P, Bonjour L, et al. Large deformation balloon micro-actuator based on pyrotechnics on chip[J]. *Micro Electro Mechanical Systems*, 2008: 535-538.
- [7] 王成, 江兆平, 陈明能. 一种止退型电点火活塞[J]. *火工品*, 2001(3): 32-33.  
WANG Cheng, JIANG Zhao-ping, CHEN Ming-neng. An electrical explosive-actuated piston with locking its fired position[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2001(3): 32-33.
- [8] 魏巧兰, 阎娟娟. 小型敏感抗静电动力源火工品[J]. *火工品*, 1996(1): 23-26.  
WEI Qiao-lan, YAN Juan-juan. A small anti-static sensitive explosive actuated device[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1996(1): 23-26.
- [9] 崔卫东, 关翔云, 惠蕾. 拔销器的小型化设计[J]. *火工品*, 2006(2): 17-19.  
CUI Wei-dong, GUAN Xiang-yun, HUI Lei. Design of the small-sized piston actuator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2006(2): 17-19.
- [10] 鲁建存, 张瑞巧, 崔卫东, 等. 活塞作动器输出参数的计算与试验[J]. *火工品*, 1996(1): 13-16.  
LU Jian-cun, ZHANG Rui-qiao, CUI Wei-dong, et al. Output parameters calculations and tests of piston actuator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 1996(1): 13-16.
- [11] 冯鹏洲, 朱继南, 吴志亮. 美国典型 MEMS 引信安全保险装置分析[J]. *探测与控制学报*, 2007, 29(5): 26-30.  
FENG Peng-zhou, ZHU Ji-nan, WU Zhi-liang. Analysis of US typical MEMS fuze safety & arming device[J]. *Journal of Detection & Control*, 2007, 29(5): 26-30.
- [12] 王士伟, 郝永平, 张德智, 等. 基于 MEMS 的引信保险机构综合分析[J]. *探测与控制学报*, 2006, 28(06): 55-58.  
WANG Shi-wei, HAO Yong-ping, ZHANG De-zhi, et al. The comprehensive analysis of MEMS-based fuze safety and arming device[J]. *Journal of Detection & Control*, 2006, 28(06): 55-58.
- [13] ANSYS/LS-DYNA 使用指南[M]. ANSYS 软件公司, 2000.  
ANSYS/LS-DYNA Guide[M]. ANSYS Software Company, 2000.
- [14] 宫能平. LY12cz 铝合金棒料的拉伸实验研究[J]. *淮南工业学院学报*, 2002, 22(1): 62-65.  
GONG Neng-ping. Tensile mechanics property of aluminium LY12cz under different strain rate[J]. *Journal of Huainan Institute of Technology*, 2002, 22(1): 62-65.

## Structural Design and Numerical Simulation on the Piston Micro-actuator

YAN Nan<sup>1</sup>, WANG Gang<sup>1,2</sup>, GENG Wan-jun<sup>3</sup>, ZHANG Liang<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, School of Mechatronical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. No. 8511 Research Institute of CASIC, Nanjing 210007, China; 3. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to meet the piston micro-actuator used in the small-caliber Ammunition Fuze Safety System structural and functional requirements, ANSYS/LS-DYNA finite element software was applied to analyze the structure design of the piston micro-actuator, and the structure and size parameters which affect its performance were determined. The anti-thrust force and setback force of different structural size parameters piston micro-actuators was obtained through the piston micro-actuator performance experimental test. With step height of 0.03 mm, anti-thrust force is 142 N, and the setback force was 38.5 N. The fitting curve and expression of the piston micro-actuator and thrust distance were got under different charges. With thrust distance of 2.0 mm, the minimum thrust is greater than 20 N. Results show that the deviation of the numerical simulation results with experiment values with 15%, indicating that the numerical simulation method can be applied to research micro-actuator function process.

**Key words:** pyrotechnics; pyrotechnics device; actuator; numerical simulation; thrust

**CLC number:** TJ55; TJ450.3

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.021