

基于 MEMS 工艺的微起爆器性能研究

薛 艳, 刘 卫, 解瑞珍, 任小明, 刘 兰, 苏 谦

(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: 针对 MEMS 火工品低能化、集成化技术要求, 设计了一种基于 MEMS 工艺的微起爆器, 通过仿真计算获得了基体材料、换能元材料、火工药剂与微起爆器起爆性能的影响规律, 确定了微起爆器的结构参数; 通过 MEMS 工艺完成微起爆器一体化集成制作, 对结构参数以及起爆性能进行了测试, 结果表明结构尺寸与设计尺寸误差小于 6%; 微起爆器发火电压小于 3V, 装药直径 1mm、装药量 2.0mg 时, 可以可靠起爆 CL-20 炸药, 实现了低能化、集成化的要求, 为 MEMS 火工品提供技术支撑。

关键词: 微起爆器; MEMS 技术; Ni-Cr 换能元; 仿真计算; 性能测试

中图分类号: TJ45⁺2.3 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2020.01.004

Research on Performance of Micro-detonator Based on MEMS Technology

XUE Yan, LIU Wei, XIE Rui-zhen, REN Xiao-ming, LIU Lan, SU Qian

(Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics
and Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061)

Abstract: Aiming at the requirements of low energy and integrated technology of MEMS pyrotechnics, a micro-detonator was designed. The influence of matrix materials, transducer materials and pyrotechnics on the detonation performance of micro-detonator was obtained through simulation, and the structural parameters of the micro-detonator were determined. The micro-detonator was integrated by MEMS process and the performance test was carried out. The results show the structure size is consistent with the design size, and the error is less than 6%. The critical ignition voltage of the micro-detonator is less than 3V, under the critical charge diameter of 1mm and charge mass of 2.0mg, the micro-detonator can initiate CL-20 reliably. It provides technical support for MEMS pyrotechnics to achieve the requirements of low energy and integration.

Key words: Micro-detonator; MEMS technology; Ni-Cr transducer element; Simulation; Performance testing

为适应信息化武器装备和各类微型武器的发展需要, 火工品开始向功能多元化、换能元信息化、结构微型化、序列集成化的 MEMS 火工品方向发展^[1-4]。MEMS 火工品的特点为换能结构和药剂结构尺度为微米量级, 核心器件尺度为亚毫米量级, 系统尺度为毫米量级^[5]。21 世纪初, 以美国为首的发达国家对 MEMS 火工品展开了广泛研究, 其中, 2004 年美国报导了一种用于 MEMS 引信安保装置中的微型起爆

器, 制造工艺采用 MEMS 工艺, 初始装药量约为 3mg, 器件尺寸为 1mm×1mm×0.5mm^[6]; 2007 年法国 Carole Rossi 研制了 MEMS 发火装置, 将换能元、MEMS 开关及含能材料一体化集成, 实现了保险功能^[7]; 2008 年美国采用 MEMS 技术, 研制替代 M100 电雷管的微型平面雷管, 全发火电压 3V, 100μF, 并应用于手榴弹等常规弹药^[8]。2012~2018 年国内陕西应用物理化学研究所开展了微结构换能元、硅基微平面雷管

[9-11] 研究, 获得了微结构换能元构效关系以及发火电压小于 5V 的微型雷管。然而实现火工品低能化、集成化仍是 MEMS 火工品技术发展的方向。

本文主要针对 MEMS 火工品低能化、集成化技术要求, 设计了一种基于 MEMS 工艺的微起爆器件, 通过仿真计算优化了结构参数, 采用 MEMS 工艺完成一体化集成制作, 并对性能进行测试分析。

1 微起爆器仿真计算

1.1 物理模型

微起爆器主要由微结构换能元层、微结构装药腔体层、初始起爆药装药组成。采用 ANSYS 软件对微起爆器的起爆性能进行仿真计算, 其中影响微起爆器起爆性能的主要有基体、换能元材料、装药等因素。

微起爆器起爆过程为瞬态过程, 微起爆器件起爆性能受器件基体、微结构换能元材料、装药等性能影响, 因此选取与微结构换能元接触部分的装药、换能元材料和基体为研究对象, 其物理模型如图 1 所示。

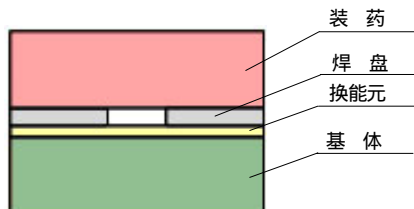


图 1 微起爆器物理模型

Fig.1 Physical model of micro-detonator

1.2 仿真计算

1.2.1 基体材料对起爆性能的影响规律

基体材料应与微起爆器结构、制作工艺相兼容; 并且需要考虑基底材料的热传导、电阻率物理性能参数, 因此选择 Pyrex7740 玻璃和硅作为微起爆器的基体材料, 进行仿真计算和发火性能验证, 结果如表 1、图 2 所示。

实验测试值和仿真计算结果吻合, 微起爆器的基体材料为 Pyrex7740 玻璃时, 平均发火电压比硅基体微起爆器平均发火电压降低 50%。热导率越低则导热性能越差, 热量散失越小, 换能元热量积累越多越快; 换能元的温度越高, 传递到初级装药的温度越高, 越有利于形成热点。因此, 为了实现微起爆器低能化,

基体选用低热导率的 Pyrex7740 玻璃材料。

表 1 不同基体材料微起爆器件发火电压参数
Tab.1 Ignition voltage of micro-detonator with different material type of substrates

基体	样品/发	电容/ μF	平均发火电压/V
玻璃	15	33	5.28
硅	15	33	11

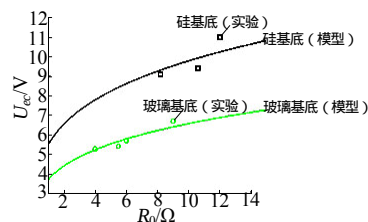


图 2 不同基体材料的起爆性能规律和验证

Fig.2 Validation of ignition performance with different material type of substrate

1.2.2 换能元材料对起爆性能的影响规律

微结构换能元材料常选用包括 Ni-Cr、Pt、Wu、Cu、Al 等金属材料, 因此对常用金属换能元材料的发火性能的变化规律进行了仿真计算, 同时结合 MEMS 工艺、微起爆器等兼容性要求, 选择 Ni-Cr、Pt、Al 金属换能元进行发火性能验证, 结果如表 2、图 3 所示。

表 2 不同换能元材料微起爆器件发火电压参数

Tab.2 Ignition parameters of micro-detonator with different material type of micro-heaters

	Ni-Cr				Pt		Al
	1	2	3	4	1	2	1
电阻/ Ω	1.2	2.2	3.2	8.1	7.2	5.5	5.3
电压/V	3.0	4.1	4.3	5.1	5.5	5.2	6.8

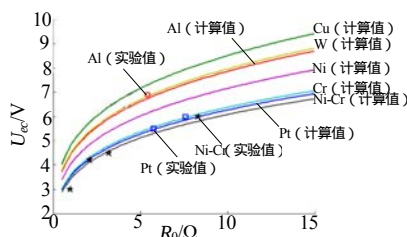


图 3 不同换能元材料的起爆性能规律和验证

Fig.3 Validation of ignition performance with different material type of micro-heaters

由图 3 可见实验测试值和仿真计算结果吻合, 随着换能元电阻的增加, 换能元的临界发火电压呈幂函数形式增加; 比较发现, 在换能元电阻相同时, Ni-Cr、Pt、Cr 3 种材料的发火电压较低, 同时采用换能元发火实验进行了验证。综合工艺难度、材料造价、性能等问题, 在微起爆器的设计和集成制作中, 选择 Ni-Cr 金属薄膜作为微起爆器的换能元材料。

1.2.3 火工药剂对起爆性能的影响规律

不同药剂需要的发火能量不同, 针对微起爆器含

能材料的需求,以 Ni-Cr 换能元引发斯蒂芬酸铅、叠氮化铅和叠氮化铜药剂,计算相同换能元下,不同药剂与临界发火电压的关系,结合火工药剂的特性,选择斯蒂芬酸铅和叠氮化铜进行起爆性能验证,结果如图 4 所示。

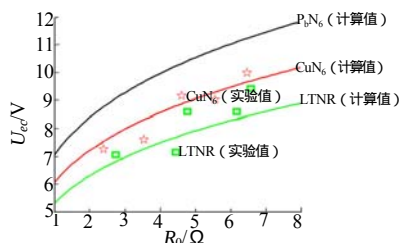


图 4 不同药剂时发火电压随换能元电阻的变化规律

Fig.4 Relationship between ignition voltage and resistances of the micro-heater with different charge

由图 4 可见,实验测试值和仿真计算规律趋势吻合。仿真计算表明,随着换能元电阻值的增加,发火电压呈幂函数的形式不断增加。比较不同药剂的发火电压变化曲线,可以发现当换能元初始电阻值相同,采用斯蒂芬酸铅作为药剂时,换能元的临界发火电压最低,叠氮化铅的临界发火电压最高,叠氮化铜的临界发火电压居于二者之间。起爆性能验证试验中, Ni-Cr 换能元不能直接起爆叠氮化铅,起爆斯蒂芬酸铅的发火电压低于起爆叠氮化铜的发火电压,为满足微起爆器起爆能力的要求,选择原位叠氮化铜装药,可以降低微起爆器的起爆电压。综合微起爆器工艺兼容性和性能要求,确定了微起爆器件结构材料:Pyrex 7740 玻璃作为基体材料, Ni-Cr 为换能元材料,叠氮化铜为火工药剂材料。

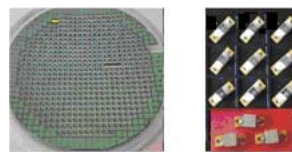
2 微起爆器集成及表征分析

2.1 一体化集成制作

分析微起爆器件一体化集成及与 MEMS 工艺兼容性要求,装药腔体不同于传统装药壳体(金属壳体)的加工,采用深硅刻蚀(ICP)工艺在硅基体材料加工而成,形成微型平面结构装药腔体;同时采用 MEMS 工艺完成微结构换能元的制作,通过键合工艺在硅玻界面上加压,使玻璃/硅界面形成了良好的封接;通过划片工艺形成小的单元结构。

在微起爆器件装药腔体内实现叠氮化铜的原位

制备,完成了微起爆器件一体化集成,形成的微起爆器件如图 5 所示。



(a) 一体化集成 (b) 单个器件

图 5 微起爆器一体化集成及单个器件结构

Fig.5 The integrated wafer and micro-detonator samples

2.2 性能表征

通过奥林巴斯激光共聚焦显微镜 5100、安捷伦 5500 原理力显微镜、DEKTAK150 台阶仪对微起爆器件关键原件进行测试,结果如图 6~7 所示。



图 6 微结构换能元形貌分析

Fig.6 The morphology analysis on transducer element

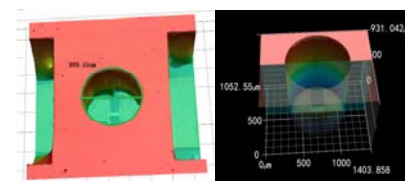


图 7 微结构装药腔体形貌分析

Fig.7 The morphology analysis on micro-cavity with charge

图 6~7 表明:微结构换能元图形清晰,边缘规整,致密性高;表面粗糙度最小几个纳米,最大小于 35nm,具有较好的表面粗糙度特性;平均厚度为 0.954 μm ,装药腔体厚度 988.5 μm ,直径 990.5 μm ,结构尺寸与设计尺寸吻合,误差小于 6%。

3 微起爆器性能测试

3.1 临界发火电压测试

采用兰利法测试微起爆器的发火性能。理论上,在某一确定的储能电容条件下,能使器件发火的最小初始激励电压为临界发火电压。由于微起爆器制作、装药等工艺偏差,导致了临界发火电压存在一个分布区间,综合微起爆器的产品状态和性能,临界发火电压的中值应该接近或者等于临界发火电压的理论值,所以在实验中认定微起爆器 50%的发火电压为其临

界发火电压。采用兰利法对微起爆器发火性能进行测试, 1[#]、2[#]样品装药叠氮化铜(2.0mg, 2.32g/cm³), 3[#]、4[#]样品装药斯蒂芬酸铅(1.0mg, 1.18g/cm³)。发火性能测试结果如表3所示。实验测得1[#]、2[#]的临界发火电压均值分别为2.57V、2.33V, 高于3[#]、4[#]的临界发火电压均值2.05V、2.12V, 表明微起爆器的临界发火电压与药剂有关。

表3 微起爆器件发火性能测试结果

Tab.3 Ignition property test results of micro-detonator

序号	装药	样品量 /发	发火电压/V			
			均值	标准差	99%	0.1%
1 [#]	CuN ₆	16	2.57	0.16	2.99	2.15
2 [#]		16	2.33	0.28	2.79	1.63
3 [#]	LTNR	16	2.05	0.14	2.35	1.62
4 [#]		17	2.12	0.12	2.58	1.79

3.2 输出性能测试

对微起爆器不同厚度、不同直径、不同装药量进行了输出性能测试, 发火电压: 5V, 起爆 1mm 松装层 CL-20, 药量: 3.7~4.2mg, 测试结果如表4所示。

表4 微起爆器输出性能测试结果

Tab.4 Output property test results of micro-detonator

装药高度: 1mm			装药高度: 1.5mm		
直径 /mm	装药量 /mg	发火数/样 品量	直径 /mm	装药量 /mg	发火数/样 品量
1.6	3.2	10/10	1.6	5.2	10/10
1.4	2.7	10/10	1.4	4.1	10/10
1.2	2.2	10/10	1.2	3.4	10/10
1	1.8	10/10	1	2.3	10/10
0.8	1.4	8/10	0.8	2.0	10/10
0.6	0.8	2/10	0.6	1.0	4/10
0.4	0.5	0/10	0.4	0.7	0/10

从表4测试结果可以看出, 对于1mm装药高度的微起爆器, 直径1mm、药量1.8mg条件下, 100%起爆CL-20装药, 直径0.8mm、装药量1.4mg条件下, 起爆成功率只有80%; 对于1.5mm装药高度的微起爆器, 直径0.8mm、装药量2.0mg条件下, 100%起爆CL-20装药, 因此, 微起爆器的起爆CL-20的临界装药直径范围为0.8~1.0mm之间, 装药直径大于等于1mm, 装药量大于等于1.8mg, 可以可靠起爆CL-20装药。

4 结论

(1) 设计了一种基于MEMS的微起爆器, 通过仿真计算获得了基体材料、换能元材料、火工药剂对微起爆器起爆性能的影响规律, 确定了微起爆器的结

构参数。(2) 通过MEMS工艺一体化集成制作了微起爆器, 结构尺寸与设计尺寸相吻合, 误差小于6%。

(3) 微起爆器临界发火电压2.57V, 99%发火电压小于3V, 装药直径大于等于1mm、装药量大于等于1.8mg时, 可靠起爆CL-20, 本研究实现了低能化、集成化的要求, 为MEMS火工品提供技术支撑。

参考文献:

- [1] Peter Barke.XM1156 precision guidance kit (pgk)-“smart fuzing - adding intelligence to fuzing solutions[C]/NDIA’s 52th Annual Fuze Conference.US AFMO,2008.
- [2] Philip T. Gorman,Jr. ARDEC fuze S&T and acquisition[C]/56th Annual Fuze Conference,2012.
- [3] Charles H. Robinson, Potomac, Robert H. Wood, Laurel, Mark R. Gelak, Columbia.etc. Ultra-miniature lectro-mechanical safetyand arming device:US, 8,276,515 B1[P].2012-10-02.
- [4] John Hendershort. Navy overview[C]/NDIA’s 54th Annual Fuze Conference. NAVSEA Indian Head Division,2010.
- [5] 褚恩义,贺爱锋,任西,薛艳.火工品集成技术的发展机遇与途径[J].含能材料,2015,23(3):205-207.
- [6] John Hendershort. Safety & arming technology programs overview NSWC[C]/NDIA 48th Annual Fuze Conference. Indian Head Division,2004.
- [7] Pierre Pennarun, Carole Rossi, et al. Single use, robust, MEMS based electro-thermal microswitches for redundancy and system reconfiguration[J]. Sensors and Actuators A, 2007 (136): 273-281.
- [8] Chopin Hua. Low-cost MEMS initiators[C]/NDIA 54th Annual Fuze Conference, 2010.
- [9] 褚恩义,刘卫,薛艳,等.微结构换能元参数化设计及阻值构效关系研究[J].火工品,2017(6):1-5.
- [10] 薛艳,刘卫,褚恩义,等.微含能器件设计和性能研究[C]/兵工学会第十届青年学术交流会. 陕西 西安:中国兵工学会火工烟火分会,2018.
- [11] 解瑞珍,薛艳,等.硅基微雷管的设计与工艺研究[C]/智能火工品技术年会,陕西 西安:陕西应用物理化学研究所,2012.