

文章编号:1006-9941(2018)12-1056-05

## 不同桥形微结构换能元的仿真设计与实验研究

张彬<sup>1</sup>,任炜<sup>1,2</sup>,褚恩义<sup>1</sup>,赵玉龙<sup>2</sup>,尹明<sup>1</sup>,李慧<sup>1</sup>

(1. 陕西应用物理化学研究所 应用物理化学国家级重点实验室, 陕西 西安 710061; 2. 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 710054)

**摘要:** 微结构换能元是微机电系统(Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS)火工品的关键器件,其桥区微结构设计对MEMS火工品的输出性能和能量利用率具有显著影响。为完善MEMS火工品微结构换能元设计理论,设计制作了8种不同桥形微结构换能元,采用仿真研究与红外测试等手段进行微结构换能元桥形结构优选与微结构效应研究,获得了V-50和L-1两种优选桥形结构换能元,揭示了不同桥形结构对换能元输出性能的影响规律,其中V-50桥形微结构换能元平均发火电压达到了100  $\mu$ F/3.5 V,能量利用率为46.6%。

**关键词:** 微机电系统(MEMS)火工品;微结构换能元;桥形结构;桥区熔断电流

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2018270

### 1 引言

火工品是武器系统中实现起爆、点火和作功的一次性使用元器件,具有功能首发、作用敏感、使用广泛等特点。随着微机电系统(Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS)技术的研究与发展,近年来发展的新一代MEMS火工品逐渐成为火工品领域的研究热点<sup>[1]</sup>。MEMS火工品是指基于MEMS技术或与MEMS工艺兼容的火工品技术,其尺寸特点为换能器件和药剂结构尺度在微米量级,核心器件尺度在亚毫米量级,系统尺度在毫米量级。该类火工品采用MEMS技术,可将信息控制、安执机构和起爆单元集成一体,具备信息化、微小型、多功能等特征,是信息化、智能弹药的关键基础技术<sup>[2-4]</sup>。

微结构换能元作为MEMS火工品中实现能量转换功能的核心器件,一般为采用金属薄膜材料或半导体材料制作的平面电阻,并通过电阻发热等形式实现与

含能药剂的能量传递与放大。针对微结构换能元的研究也是目前MEMS火工品研究的重点,国内外多家研究单位都开展了广泛的研究,重点涉及换能元的基底材料<sup>[5-6]</sup>、桥区结构<sup>[7-10]</sup>、材料影响<sup>[11-12]</sup>以及与序列能量的匹配等。研究指出理想的微结构换能元应该具有较低的发火能量,同时具有较高的能量转换效率<sup>[13]</sup>。

目前,关于微结构换能元的研究相对较多,但并未形成系列化,例如在桥区结构对换能元性能的影响研究方面,多数研究是针对某一桥形结构换能元的,并未对不同桥形结构换能元性能进行综合对比。基于此,本研究设计了8种不同桥形结构的换能元,开展不同桥形微结构换能元性能研究,获得较优桥形结构及不同微结构对换能元性能的影响规律。

### 2 微结构换能元桥形设计研究

#### 2.1 微结构换能元桥形设计

目前,微结构换能元桥形设计主要包括方形、倒“V”形、蛇形等,考虑到金属薄膜电阻率尺度效应,本研究设计了8种桥形微结构换能元,如图1所示,桥区材料采用NiCr合金,桥膜厚度确定为800 nm,基底材料采用Pyrex7740玻璃。

上述设计桥形以方形桥(150  $\mu$ m  $\times$  150  $\mu$ m,

收稿日期: 2018-09-21; 修回日期: 2018-10-10

网络出版日期: 2018-11-01

作者简介: 张彬(1992-),男,助理工程师,主要从事MEMS火工品技术的研究。e-mail: 15289375652@163.com

通信联系人: 任炜(1982-),男,高级工程师,主要从事高新火工品技术的研究。e-mail: rw0192@163.com

引用本文: 张彬,任炜,褚恩义,等. 不同桥形微结构换能元的仿真设计与实验研究[J]. 含能材料, 2018, 26(12):1056-1060.

ZHANG Bin, REI Wei, CHU En-yi, et al. Simulation Design and Experimental Study for Microstructure Energy Conversion Components with Different Bridge Shapes [J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2018, 26(12):1056-1060.

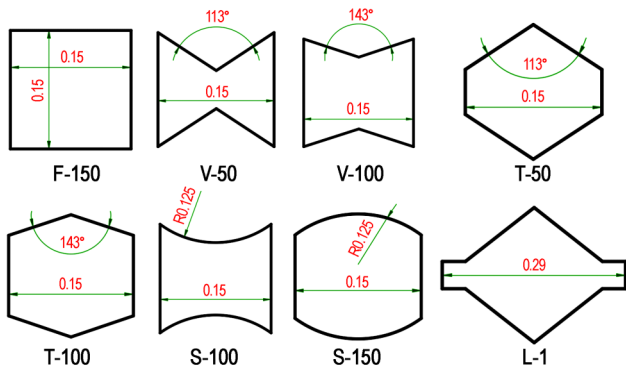


图1 换能元桥形设计结构(单位:mm)

Fig.1 Design structures of bridge shapes for energy conversion components(units: mm)

F-150)为基础桥形进行结构变换,其中倒“V”结构,桥区两侧保持150 μm,将桥区中心分别缩小至50,100 μm,得到两种不同的倒“V”结构,命名为V-50和V-100;梯形结构,桥区中心宽度保持150 μm,将桥区两侧分别缩小至50,100 μm,得到两种不同的梯形结构,命名为T-50和T-100;曲线结构,桥区两侧保持150 μm,将桥中心缩小至100 μm,得到一种双曲线结构,命名为S-100;桥区中心宽度保持150 μm,将桥区两侧缩小至100 μm,得到一种类似椭圆结构,命名为S-150;菱形结构,桥区中心宽度保持150 μm,极距变为290 μm,菱形边长为150 μm,菱形两侧各延伸15 μm长、50 μm宽的结构,命名为L-1。

2.2 微结构换能元仿真研究

2.2.1 模型建立与仿真方法

仿真研究基于ANSYS Workbench平台,采用DesignModeler建立换能元的几何模型,如图2所示,采用ANSYS Meshing对几何模型划分网格,建立有限元模型。首先采用ANSYS Mechanical进行电路模型在通电下的焦耳热计算,提取各材料单位体积下的发热功率,进而采用ANSYS Fluent进行流体热力学分析,流体力学模型需考虑周边空气的散热作用,所以流体仿真模型在结构模型上包围空气域。流体仿真考虑固体的融化与凝固、多相流模型。

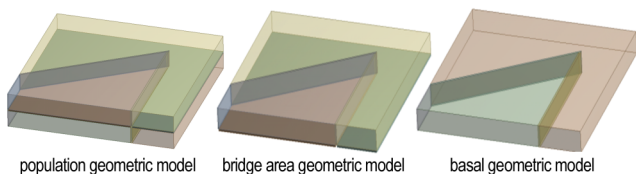


图2 微结构换能元1/4几何模型

Fig.2 1/4 geometric models of microstructure energy conversion components

微结构换能元桥区初始为固态,随着换能元通电时间的增加,桥区温度逐渐增加,当桥区温度超过桥区材料熔点时,固态逐渐变为液态,从而发生流动,即桥区熔断。因此,针对设计的不同桥形换能元,主要进行电热及流固换热的仿真分析,获得不同输入条件下的温升曲线、桥区最高温度及流固换热区域分布情况,通过对比分析获得较优桥形结构。

仿真研究采用恒流和电容放电两种激励方式,恒流激励100~600 mA,梯度100 mA,换能层NiCr合金及基底层Pyrex7740玻璃的热力学参数见表1。

表1 两种材料的热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of two kinds of materials

materials	density / kg·m <sup>-3</sup>	melting point / K	specific heat / J·(kg·K) <sup>-1</sup>	thermal conductivity / W·(m·K) <sup>-1</sup>
Pyrex7740	2500	1525	753	1.4
NiCr	8400	1673	460	15

2.2.2 仿真结果分析

恒流激励条件下(200 mA),不同设计桥形微结构换能元仿真计算的温升速率曲线如图3所示。由图3可知,在200 mA恒流激励条件下,不同设计桥形微结构换能元温升速率具有明显差异,其中V-50和L-1桥形换能元温升速率明显高于其他桥形,且其输出温度也相对较高。

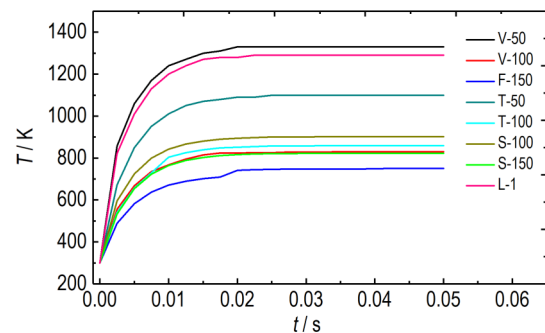


图3 不同桥形换能元恒流(200 mA)激励下的温升速率

Fig.3 Temperature rise rate under the constant current excitation of 200 mA for energy conversion components with different bridge shapes

随后,对比分析8种桥形换能元的流固换热区域,如图4所示。由图4可知,除F-150、S-150和L-1桥形之外,其它桥形均在拐角处优先发生流固热交换,即热量集中的地方,也就是最易断桥的位置。其中,以V-50桥形为例,桥区中心最窄,通电过程中电流密度

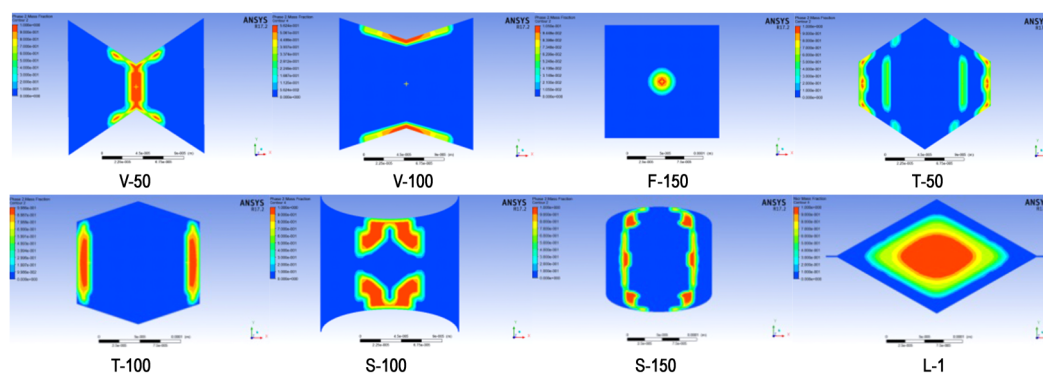


图4 不同桥形微结构换能元流固换热对比

Fig.4 Comparison of the fluid-solid heat transfer for microstructure energy conversion components with different bridge shapes

最大,产生热量多且相对集中,故最易断桥。F-150桥形流固换热发生在桥区中心位置,是由于桥区结构简单,未做局部结构,整个桥区热量分布均匀,热量叠加导致桥区中心温度最高,故最先发生流固热交换;L-1桥形仿真流固热交换区域在中心区域,而非两侧,分析认为与最初设计的两侧 $15\ \mu\text{m}$ 长的线宽有关;S-150桥形流固热交换既不在桥区两侧,也不在桥区中心处,这是由于该桥形特点造成的,S-150桥形首先在桥区中心上下两侧热量集中产热,随着通电时间的增加,热量累积叠加导致桥区中心位置温度最高。通过对8种桥形流固换热过程的仿真分析研究,不仅能够有效判断桥区点火后断桥位置,更重要的是可以根据发火性能要求,进一步改善MEMS换能元的设计结构。

### 2.3 微结构换能元红外测试

为了获得换能元的恒流响应特性,同时验证仿真研究结果,采用红外测试仪ThermaCAM SC3000在恒流(200 mA)激励条件下,对8种桥形换能元进行了红外测试,其温升曲线如图5所示。由图5可见,在相同恒流激励条件下,L-1桥形换能元温升速率最高,

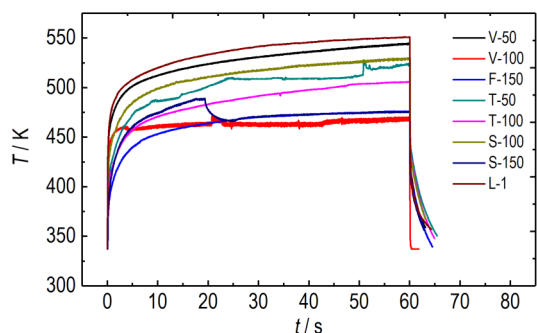


图5 不同桥形换能元恒流激励下的温升(200 mA)

Fig.5 Temperature rise under the constant current excitation of 200 mA for energy conversion components with different bridge shapes

F-150桥形换能元温升速率最慢。红外测试结果与仿真测试结果略有差异,但V-50和L-1桥形换能元温升速率依旧在最前列。

不同桥形微结构换能元桥区临界熔断电流值见表2。由表2可知,8种不同桥形换能元的桥区临界熔断电流值不同,这说明在微结构换能元桥区材料相同条件下,桥区临界熔断电流值与其设计桥形结构密切相关。因此,在微结构换能元桥形结构设计时需要综合考虑桥区熔断电流、温升速率等因素。

表2 不同桥形微结构换能元桥区临界熔断电流值

Table 2 Bridge area fusing current of microstructure energy conversion components with different bridge shapes

bridge	bridge fusing current / mA
V-50	250
V-100	300
F-150	325
T-50	225
T-100	250
S-100	225
S-150	300
L-1	225

### 3 微结构换能元发火性能测试

针对8种桥形微结构换能元,进行电容发火性能试验,发火电路如图6所示,电容为 $100\ \mu\text{F}$ ,试验同时采用示波器采集电流、电压随时间变化的曲线,试验在隔爆间里进行。其中换能层材料采用NiCr合金,火工药剂为史蒂芬酸铅,试验样品如图7所示,将换能元粘贴到设计的印制电路板(Printed Circuit Boards, PCB)上,利用超声波焊接将换能元与PCB板实现电导通,便于施加电激励进行发火性能试验。

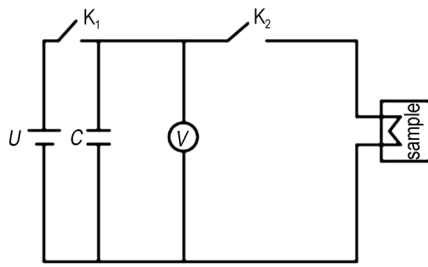


图6 微结构换能元测试发火电路图

Fig.6 Firing circuit diagram of testing microstructure energy conversion components

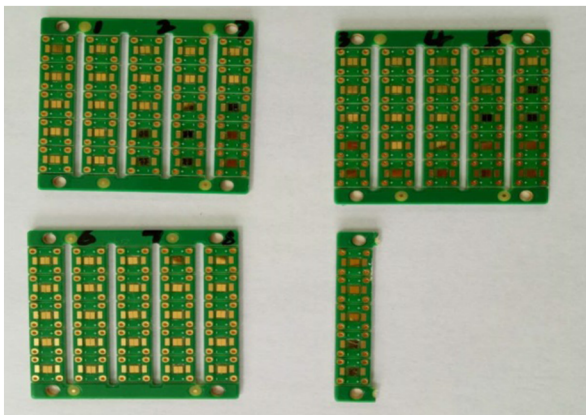


图7 微结构换能元试验样品

Fig.7 The testing samples of microstructure energy conversion components

不同换能元样品电压随时间变化的曲线经过处理得到典型  $P(t)-t$  曲线,如图8所示,随后进行积分获得桥区输入能量( $Q$ ),再根据式(2)计算电源输入电能( $E$ ),最后根据式(3)计算换能元能量利用率( $\eta$ )。

$$Q = P(t) \cdot t = I^2(t) \cdot R_0 \cdot t \quad (1)$$

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (2)$$

$$\eta = \frac{Q}{E} \quad (3)$$

式中, $Q$ 为换能元输入能量, $P$ 为功率, $t$ 为作用时间, $R_0$ 为初始电阻, $E$ 为电源输入能量, $C$ 为电容, $U$ 为输入电压, $\eta$ 为能量利用率。

试验获得不同桥形微结构换能元的发火性能参数见表3。表3结果表明:(1)8种微结构换能元中,V-50桥形换能元性能最好,平均发火电压达到100  $\mu\text{F}/3.5\text{ V}$ ,并且其能量利用率最高,达到46.6%。(2)当电阻值小于某一临界值(10  $\Omega$ )时,电阻值对发火电压的影响无明显的规律关系,分析认为小电阻( $\geq 10\ \Omega$ )下,微结构换能元发火性能主要受桥区设计结构、桥区质量以及桥区散热面积等因素影响。(3)不

同桥形微结构换能元发火试验结果与仿真研究、红外测试结果一致,即V-50发火性能最好。

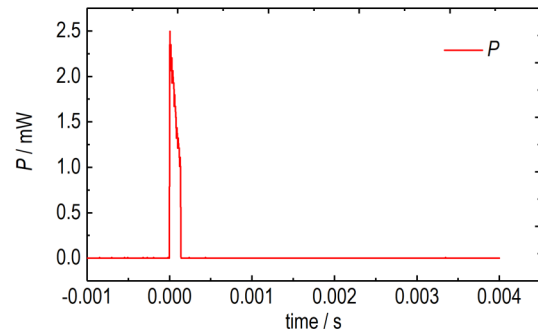


图8 微结构换能元典型  $P(t)-t$  曲线

Fig.8 The typical  $P(t)-t$  curve for microstructure energy conversion components

表3 不同桥形微结构换能元发火性能参数(电容100  $\mu\text{F}$ )

Table 3 The firing performance parameters of microstructure energy conversion components  $t$  with different bridge shapes (capacitance 100  $\mu\text{F}$ )

bridge	$R / \Omega$	$U / \text{V}$	$t / \mu\text{s}$	$E / \text{mJ}$	$Q / \text{mJ}$	$\eta / \%$
V-50	6.57	3.5	138	0.61	0.286	46.6
V-100	5.57	4.5	160	1.01	0.367	36.3
F-150	5.23	5.5	143	1.51	0.601	39.7
T-50	8.65	5	150	1.25	0.555	44.4
T-100	6.58	5	139	1.25	0.353	28.2
S-100	9.17	5	198	1.25	0.548	43.9
S-150	8.14	6	176	1.8	0.779	43.3
L-1	8.66	4.5	181	1.01	0.334	33

Note:  $R$  is test resistance.  $U$  is firing voltage.  $t$  is ignition time.  $E$  is the input energy of power supply.  $Q$  is the input energy of energy conversion components.  $\eta$  is Energy utilization.

#### 4 结论

微结构换能元作为MEMS火工品中实现能量转换功能的核心器件,其桥形结构对换能元作用性能具有显著影响。针对8种设计桥形微结构换能元开展仿真、红外测试和发火性能试验研究,初步获得了微结构换能元优选桥形以及桥形微结构对换能元发火性能的影响规律。

(1)微结构换能元的不同设计桥形对输出性能具有显著影响,“缩颈”结构有利于提高发火性能,体现在V-50桥形换能元输出温度最高,温升速率最快;此外,在桥区拐角处优先发生流固热交换,即桥区热量集中的地方最易断桥的位置。

(2)当电阻值小于某一临界值(10  $\Omega$ )时,电阻值

对发火电压的影响无明显的规律关系,分析认为小电阻( $>10\ \Omega$ )下,微结构换能元发火性能主要受桥区设计结构、桥区质量以及桥区散热面积等因素影响。

#### 参考文献:

- [1] 张彬, 褚恩义, 任炜, 等. MEMS 火工品换能元的研究进展[J]. 含能材料, 2017, 25(5): 428-436.  
ZHANG Bin, CHU En-yi, REN Wei, et al. Research progress in energy conversion components for MEMS initiating explosive device [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 25(5): 428-436.
- [2] 杨文茂, 刘艳文, 徐禄祥, 等. 溅射沉积技术的发展及其现状[J]. 真空科学与技术学报, 2005, 25(3): 204-210.  
YANG Wen-mao, LIU Yan-wen, XU Lu-xiang, et al. Review of film growth by sputtering technology [J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 2005, 25(3): 204-210.
- [3] 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): 40-43.  
KONG Jun-feng, LI Bing. A new generation of initiation technique and application [J]. *Technology Foundation of National Defence*, 2010(7): 40-43.
- [4] 沈瑞琪, 叶迎华, 戴实之. 数字化火工技术的概念和应用[J]. 火工品, 2000(2): 37-39.  
SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, DAI Shi-zhi. Conception and application of digital initiation technique [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2000(2): 37-39.
- [5] Zhang K L, Chou S K, Ang S S. Fabrication, modeling and testing of a thin film Au/Ti microheater [J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2007, 45(6): 580-588.
- [6] Chopin Hua. Low-cost MEMS initiators [C]//MicroAssembly Technologies [C]//Kansas City, MO, NDIA 54th Annual Fuze Conference, 2010.
- [7] Neha Mehta. Chemical engineer, design and development of micro energetic initiators (MEI) [C]// Dahlgren, NDIA 47th Annual Fuze Conference, 2003.
- [8] 解瑞珍, 薛艳, 任小明, 等. 桥区参数对 Ni-Cr 薄膜换能元发火性能的影响[J]. 火工品, 2012(1): 18-20.  
XIE Rui-zhen, REN Xiao-ming, WANG Ke-xuan, et al. Effect of bridge parameters on the firing sensitivity of Ni-Cr alloy thin film transducer elements [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(1): 18-20.
- [9] Lee J, Kim K, Kwon S. Design, fabrication, and testing of MEMS solid propellant thruster array chip on glass wafer [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2010, 157(1): 126-134.
- [10] Lee J, Kim T. MEMS solid propellant thruster array with micro membrane igniter [J]. *Sensors & Actuators A Physical*, 2013, 190(2): 52-60.
- [11] 任炜, 赵玉龙, 褚恩义, 等. 微机电火工品薄膜结构换能元[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2319-2325.  
REN Wei, ZHAO Yu-long, CHU En-yi, et al. Film structure energy conversion components for MEMS initiators [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(9): 2319-2325.
- [12] REN W, ZHANG B, ZHAO Y, et al. Study on film resistivity of Energy conversion components for mems initiating explosive device [J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2018, 986(1): 004-012.
- [13] 胡艳, 叶迎华, 沈瑞琪, 等. 铝-氧化铜可反应性桥膜的制备及表征[J]. 含能材料, 2010, 18(3): 339-342.  
HU Yan, YE Ying-hua, SHEN Rui-qi, et al. Preparation and characterization of Al-CuO reactive bridge film [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(3): 339-342.

## Simulation Design and Experimental Study for Microstructure Energy Conversion Components with Different Bridge Shapes

ZHANG Bin<sup>1</sup>, REN Wei<sup>1,2</sup>, CHU En-yi<sup>1</sup>, ZHAO Yu-long<sup>2</sup>, YIN Ming<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>

(1. Science and Technology on Applied Physical Chemistry Laboratory, Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China;  
2. The State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Microstructure energy conversion components are the key components of micro-electro-mechanical-system (MEMS) initiating explosive device, its bridge area microstructure design has a significant effect on the output performance and energy utilization rate of MEMS initiating explosive device. To perfect the design theory of microstructure energy conversion components of MEMS initiating explosive device, 8 kinds of microstructure energy conversion components with different bridge shapes were designed and fabricated. The bridge-shaped structure optimization and microstructure effect of microstructure energy conversion components were studied by means of simulation research and infrared test. Two kinds of energy conversion components with V-50 and L-1 optimization bridge-shaped structure were obtained, and the influence law of different bridge-shaped structure on the output performance of energy conversion components was revealed, in which, the average ignition voltage of V-50 bridge-shaped microstructure energy conversion components reaches  $100\ \mu\text{F}/3.5\ \text{V}$ , and the energy utilization rate is 46.6%.

**Key words:** micro-electro-mechanical-system (MEMS) initiating explosive device; microstructure energy conversion component; bridge-shaped structure; bridge area fusing current

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018270