

文章编号:1006-9941(2019)02-0144-05

## 氧化钌点火桥电爆及点火性能

徐威,代骥,许建兵,沈云,叶迎华,沈瑞琪

(南京理工大学 化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了简化氧化钌( $\text{RuO}_2$ )点火桥制作工艺,提高输出能量,并能满足低能发火及快速响应的要求,采用低温共烧陶瓷技术设计并制作了30种不同结构尺寸的V型氧化钌点火桥,研究了点火桥在恒压激励下的电爆性能,根据 $\text{B/KNO}_3$ 点火药的点火试验结果,评估其点火能力。结果表明,V型结构设计有利于提高桥区电流密度,在V型桥的最窄处容易形成热点,有利于降低电爆所需能量;V型氧化钌点火桥的夹角、长宽比以及最窄处宽度对其电爆性能影响较大。在40 V恒压激励下,V型氧化钌点火桥夹角为 $60^\circ$ ,长宽比为0.43,最窄处宽度为 $100\ \mu\text{m}$ 时,电爆所需输入能量小为1.47 mJ,输出能量最大为8.46 mJ,可以点燃 $\text{B/KNO}_3$ 点火药。

**关键词:** 氧化钌( $\text{RuO}_2$ )点火桥;电爆性能;点火性能;低温共烧陶瓷

中图分类号:TJ45

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2018112

### 1 引言

微纳卫星具有成本低、质量轻、机动性好、易于空间组网等优势,近年来发展迅猛。由于微纳卫星均不具备姿态调整和轨道控制能力,因此,用于微纳卫星姿轨控制的微推进系统成为研究热点。固体化学微推进器能够提供小而精确的冲量,其工作原理是通过电能、激光等激发能量使储存在微燃烧室内的推进剂燃烧,从而对外界做功,完成姿态控制、重力补偿等精确空间任务<sup>[1-3]</sup>。点火桥是微推进器的发火元件,其性能直接影响微推进器的作用可靠性<sup>[4]</sup>。传统的半导体桥(Semiconductor bridge, SCB)输出能量较小,为提高SCB的输出能量,保证点火桥在真空环境能可靠点燃推进剂,现阶段常使用磁控溅射或电泳沉积方法将含能复合薄膜集成到SCB上,但制作工艺较为繁琐<sup>[5-7]</sup>。

低温共烧陶瓷(Low-temperature co-fired ceramic, LTCC)技术可以实现分层布线功能,所用的陶瓷基板抗折强度高(320 MPa),可以耐受点火冲击,导热率

低( $3.3\ \text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),隔热性能好,有利于微推进器的大规模集成与控制,也适合其他多种点火、起爆电路的设计与应用。LTCC行业广泛使用的氧化钌( $\text{RuO}_2$ )电阻浆料因其具有工艺重复性好、阻值范围宽、阻值稳定、性价比高等特点,成为普遍使用的电阻浆料<sup>[8]</sup>。 $\text{RuO}_2$ 电阻可以通过丝网印刷技术直接印制并一起烧结而成,还可以通过激光调阻工艺,确保制作的 $\text{RuO}_2$ 电阻阻值的精度。国外曾研究过 $\text{RuO}_2$ 点火桥的电热式发火,设计了“蛇形” $\text{RuO}_2$ 点火桥,阻值约为 $100\ \Omega$ ,在37 V恒压激励方式下,发火延迟时间 $2.076\ \text{s}$ <sup>[9]</sup>。

为了降低 $\text{RuO}_2$ 点火桥发火延迟时间,本研究结合V型半导体桥(SCB)设计经验<sup>[10-12]</sup>,改变桥区夹角、长宽比及最窄处宽度,设计了V型 $\text{RuO}_2$ 点火桥。测试了V型 $\text{RuO}_2$ 点火桥的电爆特性,并初步开展了点火桥点燃 $\text{B/KNO}_3$ 的试验,以期得到V型 $\text{RuO}_2$ 点火桥的最佳结构尺寸。

### 2 实验部分

#### 2.1 样品制备

图1为V型 $\text{RuO}_2$ 点火桥结构示意图,其中: $l$ 为桥区长度, $\mu\text{m}$ ;  $w$ 为桥区宽度, $\mu\text{m}$ ;  $l_2$ 为桥区扩展长度, $\mu\text{m}$ ;  $d_n$ 为最窄处宽度, $\mu\text{m}$ 。

参照V型半导体桥电阻计算方法<sup>[13]</sup>,得出 $\text{RuO}_2$ 点火桥阻值计算公式:

收稿日期:2018-04-26; 修回日期:2018-9-10

网络出版日期:2018-09-18

基金项目:航天创新基金资助(CASC150710)

作者简介:徐威(1994-),男,硕士研究生,主要从事微点火研究。

e-mail: xuwei@njust.edu.cn

通信联系人:叶迎华(1962-),女,研究员,主要从事先进火工品研究。

e-mail: yyinghua@njust.edu.cn

引用本文:徐威,代骥,许建兵,等.氧化钌点火桥电爆及点火性能[J].含能材料,2019,27(2):144-148.

XU Wei, DAI Ji, XU Jian-bing, et al. Electro-explosion and Ignition Performance of the  $\text{RuO}_2$  Ignition Bridge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(2): 144-148.

$$R = \frac{R_s \cdot \omega}{2} \left[ 1 + \frac{1}{1 - \omega \cdot \cot(\theta/2)} \right] \quad (1)$$

式中,  $R_s$ 为方块电阻,  $\Omega$ ;  $\omega=l/w$ 为长宽比;  $\theta$ 为夹角, ( $^\circ$ )。由式(1)可知, 选用方块电阻一定的电阻材料, 设计电阻值只与长宽比以及夹角有关。

结合 LTCC 工艺要求, 分别设计了最窄处宽度为  $100 \mu\text{m}$  和  $200 \mu\text{m}$ , 夹角为  $30^\circ$ 、 $60^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $120^\circ$ 、 $150^\circ$ , 以及不同长宽比的桥型, 表 1 为 V 型  $\text{RuO}_2$  点火桥的设计参数,  $R_j$ 为电阻计算值,  $\Omega$ ;  $R_c$ 为电阻测试值,  $\Omega$ 。

表 1 V 型  $\text{RuO}_2$  点火桥的设计参数

Table 1 Design parameters of the V-type  $\text{RuO}_2$  ignition bridges

$d_n / \mu\text{m}$	$\theta / (^\circ)$	$\omega$	$l / \mu\text{m}$	$w / \mu\text{m}$	$l_2 / \mu\text{m}$	$R_j / \Omega$	$R_c / \Omega$
100	150	1.93-2.30	400.0-600.0	207.2-260.8	0	29.71-41.62	32.3-41.7
	120	1.21-1.34	400.0-600.0	330.9-446.4	0	26.11-36.85	27.8-35.7
	90	0.75-0.83	300.0-500.0	400.0-600.0	50.0	18.79-29.27	17.0-27.3
	60	0.43-0.48	173.2-288.7	400.0-600.0	113.4-155.7	14.24-19.94	14.6-20.8
	30	0.20-0.23	80.4-137.9	400.0-600.0	159.8-233.0	10.36-14.37	10.6-15.2
200	150	1.30-1.66	400.0-600.0	307.2-360.8	0	16.52-23.34	15.4-23.3
	120	0.87-1.10	346.4-600.0	400.0-546.4	0-26.8	13.69-20.52	13.2-22.1
	90	0.5-0.67	200.0-400.0	400.0-600.0	100.0	10.42-15.18	10.4-15.1
	60	0.29-0.38	115.5-230.9	400.0-600.0	142.3-184.5	8.87-11.46	8.7-10.7
	30	0.13-0.18	53.6-107.2	400.0-600.0	173.2-246.4	8.00-9.12	7.8-10.1

$\text{RuO}_2$  点火桥采用低温共烧陶瓷技术设计并制作。制作流程如图 2 所示, 具体制作步骤主要包括: (1) 将 Dupont951PT 带膜生瓷片贴入钢框待打孔, 整个基板共用 10 层生瓷片, 其中单层生瓷片的厚度为  $0.114 \text{ mm}$ , 尺寸为  $170 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$ ; (2) 将贴好的生瓷片利用模块打孔, 在生瓷片上冲出叠压对位孔; (3) 利用丝网印刷技术对表层电极部分进行导体印刷, 其中电极材料为金; (4) 待表层电极层湿膜烘干后, 印制  $\text{RuO}_2$  薄膜电阻, 型号为 DupontCF011, 方阻为  $10 \Omega$ , 印刷完成后将其烘干; (5) 将所有印制完成的生瓷片根据图层顺序, 依次叠压好, 放入等静压力机热压; (6) 将热压好的产品, 放入共烧炉烧结, 烧结温度为  $850 \text{ }^\circ\text{C}$ , 烧

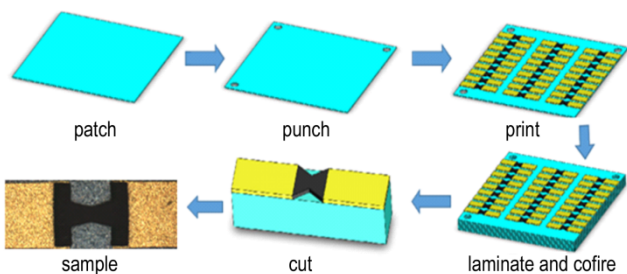


图 2 V 型  $\text{RuO}_2$  点火桥制作流程图

Fig.2 Flow chart of fabricating the V-type  $\text{RuO}_2$  ignition bridge

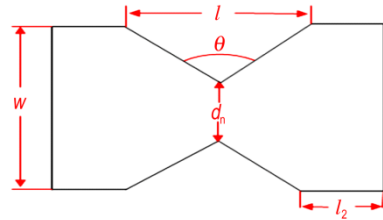


图 1 V 型  $\text{RuO}_2$  点火桥结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the V-type  $\text{RuO}_2$  ignition bridge structure

后  $\text{RuO}_2$  薄膜电阻厚度为  $20 \mu\text{m}$ ; (7) 利用激光划片机, 将整版产品切成单体。

## 2.2 电爆与点火试验

### 2.2.1 电爆试验

实验装置示意图如图 3 所示。其中安捷伦电源型号为: Agilent E3634A, 作为点火桥点火激发源; 数字示波器型号为: Tektronix DPO 5054B, 带宽  $500 \text{ MHz}$ , 采样率  $5 \text{ GS} \cdot \text{s}^{-1}$ , 电压探头型号为: TPP0500B C054549, 电流探头型号为: TCP0150 C015564, 光纤探头型号为: DET02AFC, 采集并记录点火桥发火时电压、电流以及光信号随时间的变化曲线; 高速摄影仪型

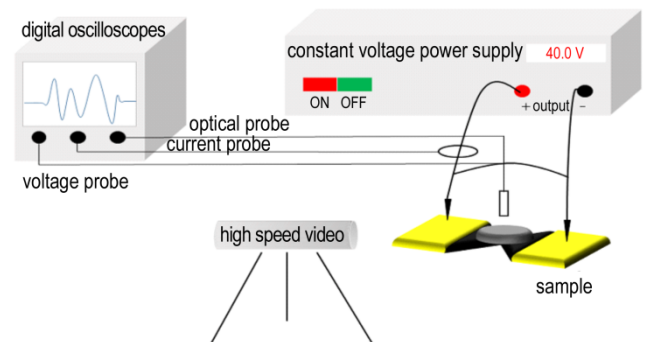


图 3 实验装置示意图

Fig.3 Schematic diagram of the experimental device

号为:HG-100K,记录点火桥发火影像。

分别对表1所列的V型RuO<sub>2</sub>点火桥进行电爆测试。为了和文献[9]报道的“蛇形”RuO<sub>2</sub>点火桥发火延迟时间进行对比,采用恒压点火方式,初步探索了V型RuO<sub>2</sub>点火桥在35 V和40 V条件下的电爆情况,发现在35 V条件下部分桥型电爆不完全,所以设定激励电压40 V。根据高速摄影仪记录的点火桥电爆影像,可测得点火桥电爆的火焰面积,由数字示波器记录的电压、电流以及光信号随时间变化的曲线,可获得点火桥电爆延迟时间和等离子体加热时间,进而可以得到各种桥型的电爆所需能量和输出能量,筛选出性能较好的桥型用于点火试验。

### 2.2.2 点火试验

点火试验所用药剂为B/KNO<sub>3</sub>点火药,B/KNO<sub>3</sub>是美军标MIL-STD-1901A中规定的火箭发动机直列式点火系统用典型点火药,具有热值高、点火能量强以及安全钝感等优异的性能<sup>[14]</sup>。选用国营第二〇四厂生产的GJB6217-2008硼/硝酸钾点火药,规格为80~120目,用于V型RuO<sub>2</sub>点火桥和SCB点火试验,评定两种点火桥的点火能力。将适量的酒精加入10 mg B/KNO<sub>3</sub>粉末中,配成油墨形式后,滴在点火桥上,待溶液挥发,B/KNO<sub>3</sub>均匀紧密的附着在点火桥表面,分别对两种点火桥进行40 V恒压激励,通过B/KNO<sub>3</sub>点火药的燃烧状况,评定两种点火桥的点火能力。

## 3 结果与讨论

### 3.1 V型RuO<sub>2</sub>点火桥结构对电爆性能的影响

图4为激励电压40 V时,V型RuO<sub>2</sub>点火桥电爆的典型电压、电流、光信号随时间的变化曲线。其中,U为电压信号,V;I为电流信号,A;L为光信号,mV。为

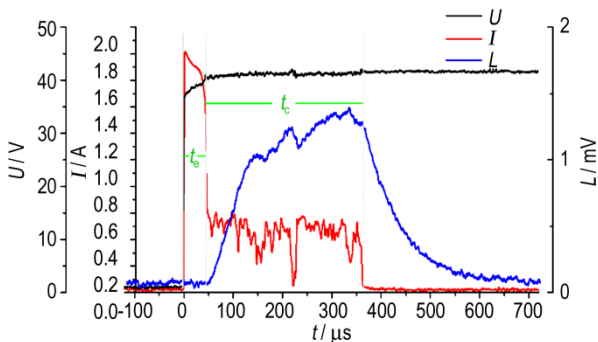


图4 V型RuO<sub>2</sub>点火桥电爆过程特征曲线

Fig.4 Characteristic curves of the electro-explosion process for the V-type RuO<sub>2</sub> ignition bridge ( $t_d$  is the electro-explosion delay time.  $t_c$  is the plasma duration time.)

了方便描述,定义电爆延迟时间 $t_d$ 为RuO<sub>2</sub>点火桥通电至产生等离子体时间,等离子体加热时间 $t_c$ 为产生光信号至电流变为零时间,电爆所需输入能量 $E_c$ 为 $t_c$ 时间段内电流与电压乘积的积分。

从图4可以看出,V型RuO<sub>2</sub>点火桥的电爆过程为:在 $t_d$ 阶段,桥区迅速升温,达到RuO<sub>2</sub>点火桥的熔化温度,在 $t_c$ 阶段,熔融态的RuO<sub>2</sub>在电能的作用下汽化,产生高温等离子体,并伴随火花。 $t_c$ 阶段电流曲线抖动可能是熔融态的RuO<sub>2</sub>以及汽化产生的高温等离子体分布不均匀,导电性质不稳定造成的<sup>[15]</sup>。

图5为30种V型RuO<sub>2</sub>点火桥电爆所需输入能量的试验结果。从图5可以发现: $d_n$ 为200  $\mu\text{m}$ 的RuO<sub>2</sub>点火桥电爆所需输入能量明显大于 $d_n$ 为100  $\mu\text{m}$ 的RuO<sub>2</sub>点火桥,说明最窄处宽度越小越有利于能量的集中,而且最窄处宽度越大,电爆所需输入能量 $E_c$ 散布也越大;当 $d_n$ 和夹角一定时,长宽比 $\omega$ 对电爆所需的输入能量 $E_c$ 也有影响,主要是因为长宽比越小其点火桥的电阻值也越小,在相同电压激励下,流经桥区的电流越大,桥区升温速率越快,越容易电爆;从图5还可以发现, $d_n$ 为100  $\mu\text{m}$ 时,点火桥的电爆规律随 $\omega$ 变化的规律更明显, $\omega$ 越小 $E_c$ 越小。因此,进一步研究了 $d_n$ 为100  $\mu\text{m}$ , $\omega$ 为最小时,5种不同夹角的V型RuO<sub>2</sub>点火桥(对应编号为1#~5#)的电爆性能,通过高速摄影记录了点火桥的电爆过程,比较电爆产生的等离子体面积大小和等离子体加热时间长短,评估5种点火桥的输出能力<sup>[16-17]</sup>,结果如图6所示。

图6为1#~5#不同夹角的V型RuO<sub>2</sub>点火桥电爆过程高速摄影图,高速摄影采样率为20000帧/s。结果表明,夹角为60°的4#点火桥,电爆延迟时间 $t_d=12.93 \mu\text{s}$ ,等离子体加热时间 $t_c=547.43 \mu\text{s}$ ,电爆所需能量 $E_c=1.47 \text{ mJ}$ 。电爆等离子体面积最大为6.82 mm<sup>2</sup>,持续时间最长为1.5 ms,该点火桥输出能量最大。

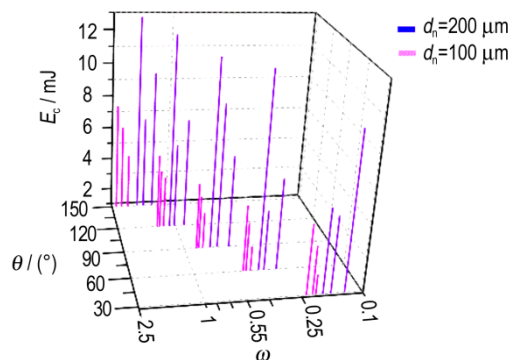


图5 输入能量随桥型变化趋势

Fig.5 The change trend of input energy with bridge type

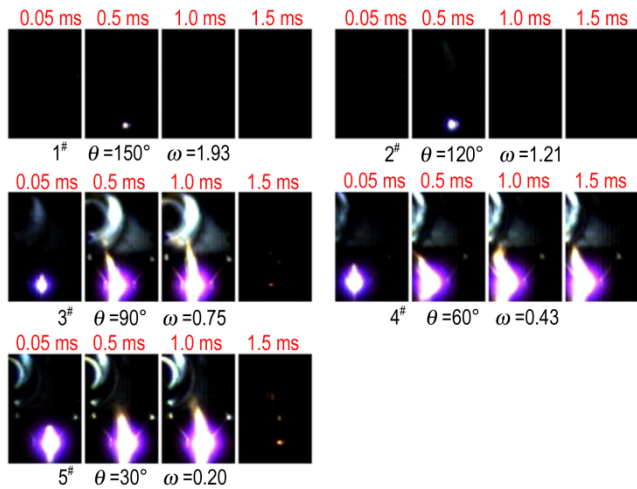


图6 不同夹角V型RuO<sub>2</sub>点火桥电爆过程高速摄影图  
Fig.6 High-speed photographic maps of the electro-explosion process for V-type RuO<sub>2</sub> ignition bridges with different angles

### 3.2 4#点火桥点火试验结果

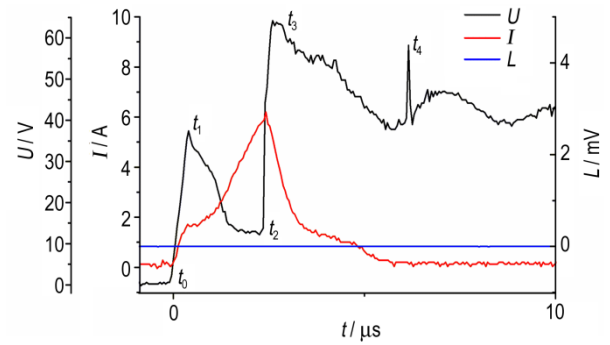
选用电爆性能最好的4#点火桥进行点火试验,并将其与SCB对比。用于和4#点火桥点火性能作对比的SCB尺寸为120 μm×60 μm,电阻为14 Ω,在40 V恒压激励下,两种点火桥点火特征曲线如图7所示。图7a为SCB点火特征曲线,整个过程可以分为SCB升温(t<sub>0</sub>~t<sub>1</sub>)、融化(t<sub>1</sub>~t<sub>2</sub>)、汽化(t<sub>2</sub>~t<sub>3</sub>)和等离子体加热(t<sub>3</sub>~t<sub>4</sub>)4个阶段<sup>[18]</sup>。t<sub>4</sub>时刻桥区完全断开,定义为电能作用于桥区的终止时刻,此时刻对应电流曲线降至零值时刻,SCB电爆时间为6.15 μs。根据电流与电压的乘积在t<sub>0</sub>~t<sub>4</sub>时间段内的积分,可以得到整个电爆过程中电能作用于SCB上的总能量为0.45 mJ。

图7b为V型RuO<sub>2</sub>点火桥点火特征曲线,在t<sub>c</sub>阶段,桥区迅速升温,达到RuO<sub>2</sub>点火桥的熔化温度,在t<sub>c</sub>阶段,熔融态的RuO<sub>2</sub>在电能的作用下汽化,产生高温等离子体,热量的累积使B/KNO<sub>3</sub>点火药发火,发火延迟时间t<sub>1</sub>为273.1 μs,优于文献[9]的“蛇形”RuO<sub>2</sub>点火桥。整个电爆过程中电能作用于RuO<sub>2</sub>点火桥上的总能量为8.46 mJ。

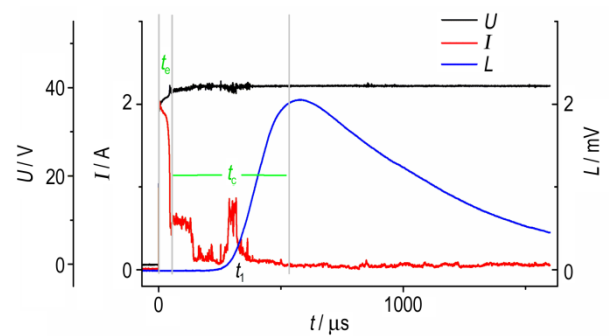
V型RuO<sub>2</sub>点火桥发火延迟时间小于文献[9]的“蛇形”RuO<sub>2</sub>点火桥的原因主要有以下两方面:一方面“蛇形”RuO<sub>2</sub>点火桥阻值比V型RuO<sub>2</sub>点火桥大,在恒压方式激励下,功率随电阻值的增大而减小,所以阻值小的V型RuO<sub>2</sub>点火桥的升温速率更快。另一方面,V型点火桥更容易在最窄处形成热点,产生高温等离子体,作用于药剂,响应速度明显快于“蛇形”RuO<sub>2</sub>点火桥设计。

图8为两种点火桥点燃B/KNO<sub>3</sub>点火药的高速摄影

图片。图8a显示4#点火桥可以点燃B/KNO<sub>3</sub>并且能自持燃烧,图8b中SCB不能成功点燃B/KNO<sub>3</sub>,说明了V型RuO<sub>2</sub>点火桥较SCB具有更高的点火能力。SCB未能成功点燃B/KNO<sub>3</sub>点火药的原因主要有:桥区面积小,对B/KNO<sub>3</sub>点火药的传热面积小,不利于点火;作用时间短,不利于热量的积累;与4#点火桥相比输出能量小。



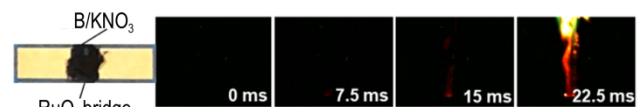
a. SCB igniter



b. RuO<sub>2</sub> igniter

图7 两种点火桥点火特征曲线

Fig.7 Characteristic curves of ignition for two kinds of igniters



a. RuO<sub>2</sub> bridge-B/KNO<sub>3</sub>



b. SCB-B/KNO<sub>3</sub>

图8 两种点火桥对B/KNO<sub>3</sub>点火对比

Fig.8 Comparison of the B/KNO<sub>3</sub> ignition by two kinds of igniters

## 4 结论

(1)桥区最窄处宽度为100 μm的V型RuO<sub>2</sub>点火桥电爆所需输入能量小于桥区最窄处宽度为200 μm的V型RuO<sub>2</sub>点火桥;最窄处宽度为100 μm,夹角相同

的桥型,电爆所需输入能量随长宽比的减小而减小;最窄处宽度为 100  $\mu\text{m}$ ,长宽比为 0.43,夹角为  $60^\circ$  的 V 型  $\text{RuO}_2$  点火桥电爆及点火性能最好,可以点燃  $\text{B/KNO}_3$ 。

(2) V 型点火桥的设计更有利于能量的集中,响应速度明显快于“蛇形”设计;V 型  $\text{RuO}_2$  点火桥的电爆输出能量大于用于对比的 SCB。

#### 参考文献:

- [1] Rossi C, Briand D, Dumonteil M, et al. Matrix of  $10 \times 10$  addressed solid propellant microthrusters: Review of the technologies[J]. *Sensors and Actuators A*, 2006, 126(1): 241–252.
- [2] Lewis D H, Janson S W, Cohen R B, et al. Digital micropropulsion[J]. *Sensors and Actuators A-Physical*, 2000, 80(2): 143–154.
- [3] ZHANG K, CHOU S, Angb S. A solid propellant microthruster with metal igniter[J]. *Proceeding of Powermems*, 2004, 28(1): 129–132.
- [4] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2014:181–184.  
YE Ying-hua. Pyrotechnics Technology [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 181–184.
- [5] XU Jian-bing, TAI Yu, RU Cheng-bo, et al. Tuning the ignition performance of a microchip initiator by integrating various  $\text{Al/MoO}_3$  reactive multilayer films on a semiconductor bridge [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(6): 5580–5589.
- [6] ZHU Peng, SHEN Rui-qi, YE Ying-hua, et al. Energetic semiconductor bridge device incorporating  $\text{Al/MoO}_x$  multilayer nanofilms and negative temperature coefficient thermistor chip [J]. *J Appl Phys*, 2014, 115(19): 194502.
- [7] ZHANG Dai-xiong, XIANG Qing, FAN Xing, et al. Electrophoretic assembly of B-Ti nanoenergetic coating for micro-ignitor application[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2016, 301(1):58–64.
- [8] 陆冬梅, 王要东, 王大林, 等. 用于片式电阻浆料的二氧化钨粉的制备[J]. 微电子学, 2014, 44(5): 696–700.  
LU Dong-mei, WANG Yao-dong, WANG Da-lin, et al. Preparation of ruthenium dioxide powder for chip resistor slurry [J]. *Microelectronics*, 2014, 44(5): 696–700.
- [9] ZHANG K, CHOU S, Angb S. Development of a low-temperature co-fired ceramic solid propellant microthruster [J]. *J Micro-mech Microeng*, 2005, 15(5): 944–952.
- [10] 周彬, 毛国强, 秦志春, 等. 半导体桥上尖角、圆孔对其电爆性能的影响(英)[J]. 含能材料, 2009, 17(3): 349–352.  
ZHOU Bin, MAO Guo-qiang, QIN Zhi-chun, et al. Effect of V-type angle and hole of semiconductor bridge on electro-explosive performance [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(3): 349–352.
- [11] 周彬, 秦志春, 毛国强. 半导体桥长宽比对其发火性能的影响 [J]. 南京理工大学学报, 2009, 33(2): 235–237.  
ZHOU Bin, QIN Zhi-chun, MAO Guo-qiang. Influence of ratio of length to width of semiconductor bridge on its firing performance [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology (Nature Science)*, 2009, 33(2): 235–237.
- [12] 胡剑书, 焦清介. 恒流作用下 V 型半导体桥电热特性研究 [J]. 煤矿爆破, 2005, 4(71): 4–6.  
HU Jian-shu, JIAO Qing-jie. A Study on the galvanothermy of V-Type semiconductor bridge under constant current [J]. *Chinese Journal of Coal Mine Blasting*, 2005, 4(71): 4–6.
- [13] 杨贵丽, 焦清介. 双 V 型半导体桥电阻计算方法研究 [J]. 火工品, 2009, 6(3): 1–5.  
YANG Gui-li, JIAO Qing-jie. A study on calculation method for resistance of double V-shaped semiconductor bridge [J]. *Initiator and Pyrotechnics*, 2009, 6(3): 1–5.
- [14] MIL-STD-1901A. Munition rocket and missile motor ignition system design, safety criteria for [S]. Department of Defense Design Criteria Standard, 2002.
- [15] RU Cheng-bo, DAI Ji, XU Jian-bin, et al. Design and optimization of micro-semiconductor bridge used for solid propellant microthrusters array [J]. *European Physical Journal Applied Physics*, 2016, 74(3): 301103.
- [16] DAI Ji, XU Jian-bing, WANG Fei, et al. Facile formation of nitrocellulose-coated  $\text{Al/Bi}_2\text{O}_3$  nanothermites with excellent energy output and improved electrostatic discharge safety [J]. *Materials & Design*, 2018, 143(1): 93–103.
- [17] XU Jian-bing, TAI Yu, RU Cheng-bo, et al. Characteristic of energetic semiconductor bridge based on  $\text{Al/MoO}_x$  energetic multilayer nanofilms with different modulation periods [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 21(11): 113301.
- [18] 付帅, 朱朋, 叶迎华, 等. 基于  $\text{Al/MoO}_x$  纳米复合含能薄膜的含能半导体桥研究 [J]. 爆破器材, 2013, 6(1): 1–6.  
FU Shuai, ZHU Peng, YE Ying-hua, et al. Characterization of energetic semiconductor bridge realized by integrating  $\text{Al/MoO}_x$  nano multilayer films [J]. *Explosive Materials*, 2013, 6(1): 1–6.

## Electro-explosion and Ignition Performance of the $\text{RuO}_2$ Ignition Bridge

XU Wei, DAI Ji, XU Jian-bing, SHEN Yun, YE Ying-hua, SHEN Rui-qi

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To simplify the production process of ruthenium oxide ( $\text{RuO}_2$ ) ignition bridge, improve the output energy and meet the requirements of low energy ignition and rapid response, the 30 kinds of V-type  $\text{RuO}_2$  ignition bridges with different structure size were designed and manufactured by a low-temperature co-fired ceramic (LTCC) technology. The electro-explosion properties of the bridge under constant-voltage excitation were investigated. The ignition ability of  $\text{B/KNO}_3$  mixture was evaluated according to the ignition test results of  $\text{B/KNO}_3$  mixture. The results show that the design of V-type structure is conducive to improving the current density in the bridge area and forming hot points in the narrowest part of the V-type bridge, which is conducive to reducing the energy required by electro-explosion. The angle, length/width ratio and width of the V-type  $\text{RuO}_2$  ignition bridge have great influence on electro-explosion performance. Under 40 V constant-voltage excitation, when the angle, length/width ratio and width of the narrowest place of V-type  $\text{RuO}_2$  ignition bridge are  $60^\circ$ , 0.43 and 100  $\mu\text{m}$ , respectively, the input energy required by electro-explosion is small, its value is 1.47 mJ, the output energy is maximum, its value is 8.46 mJ, which can ignite  $\text{B/KNO}_3$  mixture.

**Key words:** ruthenium oxide ( $\text{RuO}_2$ ) ignition bridge; electro-explosion performance; ignition performance; low-temperature co-fired ceramic

CLC number: TJ45

Document code: A

DOI: 10.11943/CJEM2018112