

文章编号: 1006-9941(2012)04-0391-06

# 半导体桥对含能材料的点火特性研究

杨贵丽, 朱顺官, 沈瑞琪

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 在 10  $\mu\text{F}$  钽电容放电激励下, 对两种阻值相当质量不同的半导体桥 (SCB) 和细化的发火药剂斯蒂芬酸铅 (LTNR) 和叠氮化铅 ( $\text{PbN}_6$ ) 所组成的发火件进行了实验研究, 根据发火件的电特性变化和发火现象发现半导体桥存在电热发火、电爆发火和等离子体发火三种情况, 测试了 SCB/LTNR 和 SCB/ $\text{PbN}_6$  发火件的 50% 发火电压和发火时间。结果表明半导体桥的发火电压阈值不仅与发火药剂有关, 还与半导体桥换能元有关, 所以半导体桥的设计存在最佳质量, 通过对比得知 LTNR 比  $\text{PbN}_6$  感度高,  $\text{PbN}_6$  比 LTNR 的燃速高。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 半导体桥; 发火药剂; 临界发火电压; 发火时间

**中图分类号:** TJ450

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.002

## 1 引言

半导体桥 (以下简称 SCB) 作为以电能输入的第三代火工品已经得到广泛应用, 于 1968 年由美国的 Hollander 发明<sup>[1]</sup>, 美国圣迪亚实验室对其进行了研究和完善, 并分别于 1987 年和 1990 年获得专利<sup>[2-3]</sup>。它与传统桥丝式火工品相比具有体积小、发火能量低、响应快等特点<sup>[4]</sup>。国内外许多学者对 SCB 产生等离子体的行为进行了若干研究, 普遍认为 SCB 的工作原理为, 桥一旦熔化并且完全气化后, 电流通过硅蒸汽即产生等离子体<sup>[5]</sup>, 由此认为 SCB 点火属于等离子体点火, 即脉冲电流使 SCB 熔化、气化爆发后形成等离子体, 等离子体引燃压装在 SCB 上药剂<sup>[6]</sup>, 而 Jongdae Kim 等<sup>[7]</sup>发现加载临界爆发电压时, SCB 可以爆发形成蒸汽, 但并不一定产生等离子体, 当高于某一电压时 SCB 才能爆发产生等离子体。关于降低 SCB 的发火能量方面, David W. Ewick 等<sup>[8]</sup>在低能 SCB 装置桥/药剂界面的优化研究中发现药剂粒径会影响点火能量。徐禄<sup>[9]</sup>通过对药剂的敏化可以降低半导体桥的发火能量, 周彬<sup>[10]</sup>对半导体桥长宽比对发火性能的影响方面做了研究。本文对 SCB 与细化的发火药剂斯蒂芬酸铅 (LTNR) 和叠氮化铅 ( $\text{PbN}_6$ ) 所组成的发火件进行研究, 通过 10  $\mu\text{F}$  钽电容放电, 利用

示波器采集不同激励电压时发火件的电压、电流和电阻信号, 分析发火件的发火现象, 得出 SCB 的发火原理, 利用 D-最优化法测试不同发火件的 50% 发火电压, 得出影响 SCB 发火能量的因素。

## 2 实验装置与实验现象

### 2.1 实验元件和装置

选用两种 SCB 作为实验对象, 桥区结构见图 1, 两种样品的厚度均为 2  $\mu\text{m}$ , 分别对 100 发 1# 样品和 100 发 2# 样品利用显微镜 (OLYMPUS BX51) 和多用表 (Agilent 34405A) 进行测量, 经统计, 其中 1# 样品桥区平均长度  $l$  为 21  $\mu\text{m}$ , 平均宽度  $w$  为 50.5  $\mu\text{m}$ ,  $\theta$  为  $60^\circ$ , 平均电阻为 4.27  $\Omega$ , 取多晶硅的密度 2323  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 经计算得知 SCB 有效区质量为  $3.15 \times 10^{-9}$  g; 2# 样品桥区平均长度  $l$  为 30.5  $\mu\text{m}$ , 平均宽度  $w$  为 75.5  $\mu\text{m}$ ,  $\theta$  为  $60^\circ$ , 平均电阻为 3.97  $\Omega$ , SCB 有效区质量为  $6.96 \times 10^{-9}$  g, 陶瓷塞直径为 4.4 mm, 两种换能元样品见图 2。发火药剂选用 LTNR 和  $\text{PbN}_6$ , 粒径均值分别为 15  $\mu\text{m}$  和 5  $\mu\text{m}$ , 装药量为 20 mg, 装药压力为 20 MPa, 用铝管壳封装, 发火件样品见图 3。

能量加载方式选用电容放电激励, 测试原理见图 4 和图 5, 实验装置包括 10  $\mu\text{F}$  钽电容、ALG-CM 储能放电起爆仪 (南京理工大学自主研制)、LeCroy Wavepro 960 瞬态数字示波器 (400 MHz、2.5 Gs/s)、CP150 电流探头 (150 AMP、10 MHz)、光电二极管

收稿日期: 2011-06-29; 修回日期: 2011-08-28

作者简介: 杨贵丽 (1981-), 女, 博士后, 主要从事火工系统原理与技术方面的研究。e-mail: yangguili0001@163.com

等。主要操作过程为: 先将 SCB 换能元接入电路, 闭合点开关 2, 为电容充电, 然后闭合点开关 4 起爆。用高速数字存储示波器记录 SCB 爆发过程中的电压、电流信号和光信号, 触发模式选择自动, 然后通过示波器运算功能得出电阻信号。

## 2.2 实验

首先用 D-最优化法测试发火件的 50% 发火电压和标准偏差, 然后计算出不发火电压和全发火电压, 再测试不同电压激励时的发火时间, 最后按照激励电压由低到高, 对所有实验样品的电特性曲线进行分析。

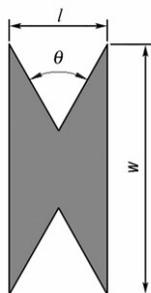


图 1 SCB 桥区结构

Fig. 1 Structure of SCB



图 2 SCB 样品

Fig. 2 A sample of SCB

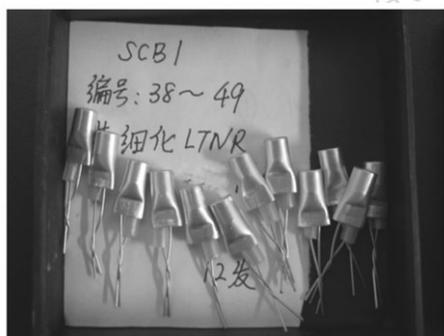


图 3 发火件样品

Fig. 3 Firing device sample of SCB

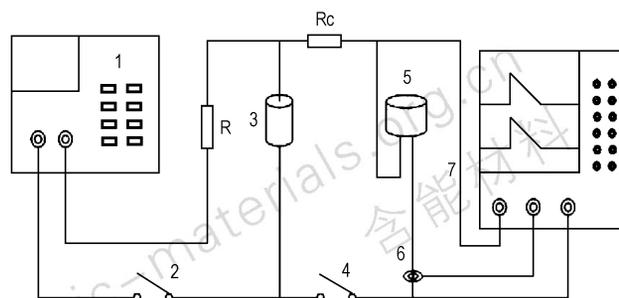


图 4 电容放电激励时测试电路原理图

1—稳压源, 2—充电开关, 3—钽电容, 4—放电开关, 5—SCB, 6—电流探头, 7—电压探头

Fig. 4 Experimental device of SCB employing a capacitor discharge firing set

1—power, 2—charging switch, 3—tantalum capacitance, 4—discharging switch, 5—SCB, 6—current probe, 7—voltage probe

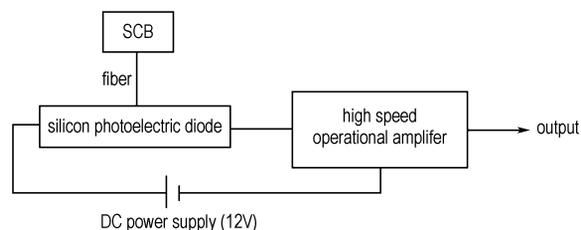


图 5 SCB 发火时间的测定装置原理图

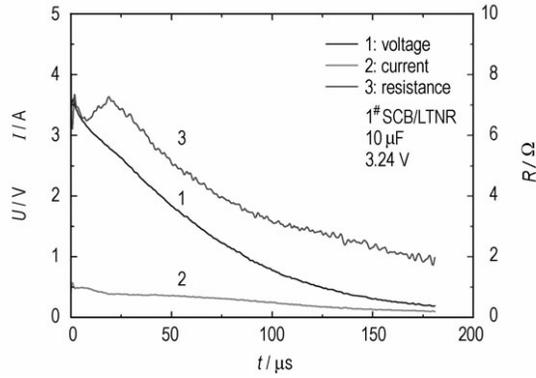
Fig. 5 Firing time measurement system of SCB

## 3 结果与讨论

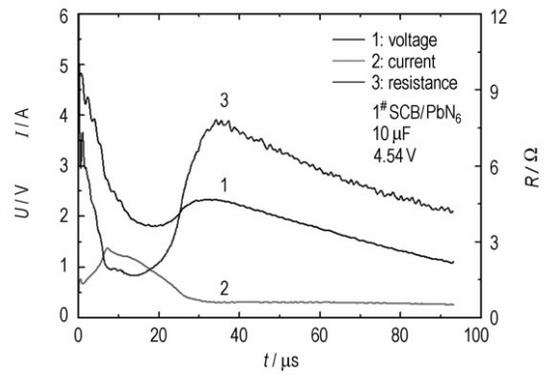
### 3.1 基本实验现象与分析

SCB/LTNR 和 SCB/PbN<sub>6</sub> 发火件的典型电特性曲线分别示于图 6 ~ 图 8。

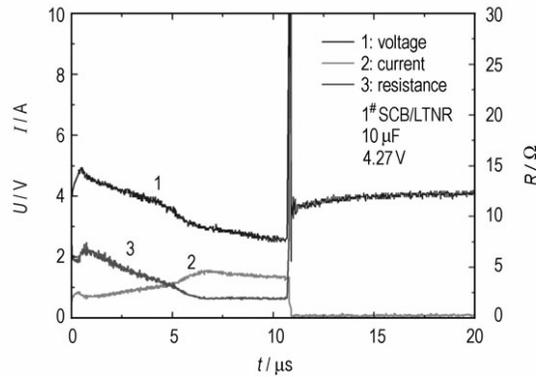
图 6 为 1<sup>#</sup> SCB/LTNR 发火件的典型电特性曲线, 当激励电压低于发火电压时, 电特性变化如图 6a, 药剂不发火, 电容放电完毕, SCB 电阻先上升后下降。根据 SCB 电阻与温度之间的关系<sup>[11]</sup> 可知桥温无法升至熔点, 使桥区熔化, SCB 产生的热量以热传导的方式传递给药剂, 在电容放电完毕前, 药剂积累的热量低于其发火点。随着激励电压增大, 电特性变化如图 6b, SCB 的电阻变化经历了上升阶段、下降阶段和稳定阶段。SCB 爆发, 药剂未发火。这是由于 SCB 质量较小, SCB 蒸汽的能量不足以激发药剂作用, 所以极易出现桥爆发而药剂未发火的现象。



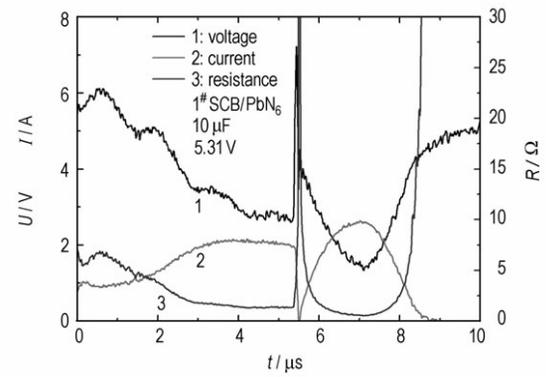
a. SCB without exploding and LTNR without firing



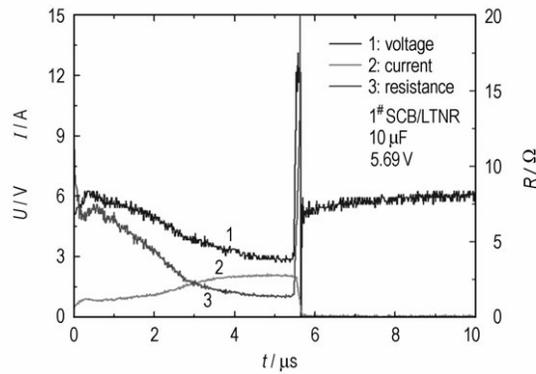
a. SCB without exploding and PbN<sub>6</sub> fired



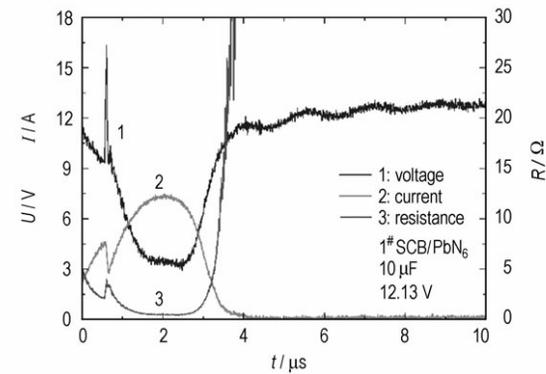
b. SCB exploded and LTNR without firing



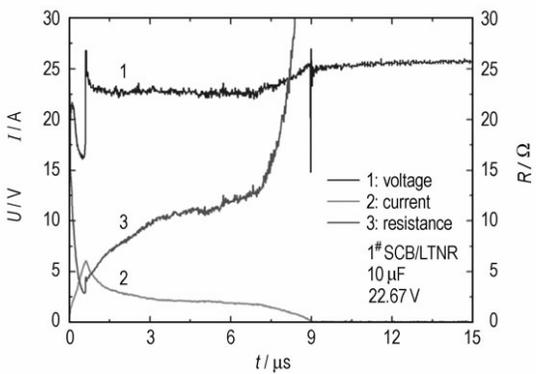
b. SCB exploded and PbN<sub>6</sub> fired



c. SCB exploded and LTNR fired



c. SCB exploded and PbN<sub>6</sub> fired



d. SCB ionized and LTNR fired

图 6 1# SCB/LTNR 发火电特性曲线

Fig.6 Electricity characteristics of 1# SCB/LTNR

图 7 1# SCB/PbN<sub>6</sub> 发火电特性曲线

Fig.7 Electricity characteristics of 1# SCB/PbN<sub>6</sub>

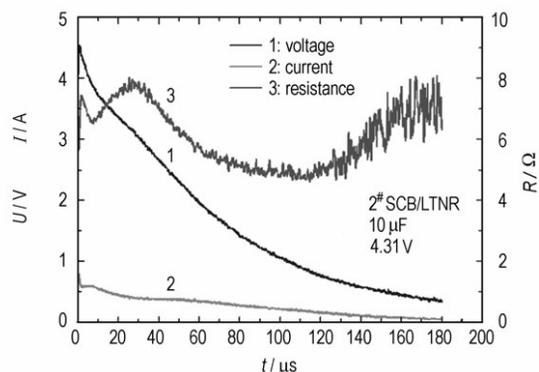
当激励电压继续增大时,电特性变化如图 6c, SCB 的电阻变化经历了上升阶段、下降阶段和稳定阶段。SCB 爆发,药剂发火。通过 SCB 电阻曲线可判断 SCB 爆发形成蒸汽,但是不足以继续电离形成等离子体,蒸汽侵入药剂,以对流的方式向药剂传递热量,使药剂发火。电压曲线第二峰值出现的时刻定义为爆发时间,通过测试结果得知桥爆发时间短于 20 μs,而光电二极管采集到的药剂发火时间在 60 ~ 160 μs 之间。当激励电压较高时,电特性变化如图 6d, SCB 电阻由

最大值迅速下降到极小值,然后逐渐增大而趋于无穷,表明 SCB 经历固态温升和液态温升的过程极其短暂,爆发时刻硅蒸汽瞬间被电离。高温高压的等离子体侵入药剂,使药剂反应而导电,随着化学反应完毕,电流无法持续,电阻急剧增大。通过实验结果得知加载电压越大,SCB/LTNR 发火件的爆发时间越短,都在微秒级,但是光电二极管采集到的药剂发火时间在  $60 \mu\text{s}$  左右。

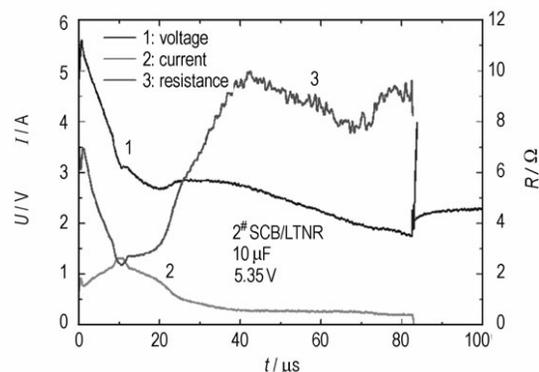
图 7 为 1<sup>#</sup> SCB/PbN<sub>6</sub> 发火件的电特性曲线,当激励电压低于发火电压时电特性变化如图 7a,SCB 电阻变化与图 6a 类似,桥未爆发,药剂未发火。当激励电压较高时电特性变化如图 7b,SCB 爆发前电阻变化与图 6b 类似,爆发后高温蒸汽侵入药剂,经过很短时间延期,引发药剂反应而导电,同时伴随电流重新出现。当药剂反应完毕,电阻趋于无穷,电流消失。光电二极管检测到桥面处药剂的反应时间约为  $5 \mu\text{s}$ ,发火件的发火时间在  $10 \mu\text{s}$  左右。随着激励电压继续提高,电特性变化如图 7c,SCB 的电阻在很短的时间内从一个较高的值下降到最低值,然后瞬间发生一个明显的小突跃。SCB 爆发,电流由爆发时的极小值迅速上升到最大值。发火层药剂经历短时间延迟发火,光电二极管检测到发火件的发火时间短于  $10 \mu\text{s}$ ,这表明 PbN<sub>6</sub> 的燃速很高。

图 8 为 2<sup>#</sup> SCB/LTNR 发火件的电特性曲线,当激励电压低于发火电压时,电特性变化如图 8a,与图 6a 类似,电容放电完毕,桥未爆发,药剂未发火。当较高电压激励时,电特性变化如图 8b,电阻先上升后下降,然后再上升,最后趋于稳定,桥在  $82 \mu\text{s}$  时断开。药剂发火,而 2<sup>#</sup> SCB 换能元的爆发时间一般在十几微秒<sup>[12]</sup>,所以 SCB 在作用过程中并没有被汽化而爆发,而是因为药剂发火使电路断开。当激励电压继续提高时,电特性变化如图 8c,SCB 电阻先上升再下降,然后进入稳态阶段,在爆发时刻趋于无穷。与图 6c 类似,发火药剂因为硅蒸汽的侵入而发火。当激励电压高于电离电压时电特性变化如图 8d,SCB 电阻由最大值迅速下降为最小值,在爆发时刻突升,然后趋于无穷,表明 SCB 经历固态温升和液态温升的过程极其短暂,爆发时刻硅蒸汽瞬间被电离,等离子体侵入药剂使药剂发火。此发火情况与 1<sup>#</sup> SCB/LTNR 在高电压激励时类似。

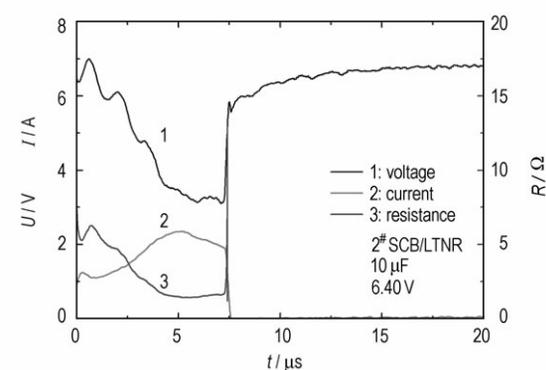
由实验现象可知,不同激励能量下 SCB 会出现电热、电爆和电爆等离子体三种情况,所以当 SCB 与发火药组成发火件时,药剂的发火存在以下三种情况。



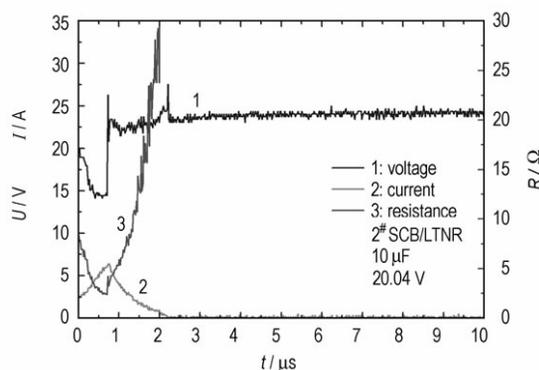
a. SCB without exploding and LTNR without firing



b. SCB without exploding and LTNR fired



c. SCB exploded and LTNR fired



d. SCB ionized and LTNR fired

图 8 2<sup>#</sup> SCB/LTNR 发火电特性曲线

Fig. 8 Electricity characteristics of 2<sup>#</sup> SCB/LTNR

① 如果 SCB 不发生爆发而保持凝聚态,则热量以热传导方式传入药剂,与桥面相邻的发火层药剂经过一段延迟期后发生热爆炸。引起药剂发火的特征参量是 SCB 桥面温度,这种发火情况定义为电热发火。

② 如果 SCB 爆发后未发生电离,则蒸汽侵入到药剂中使药剂瞬间加热,发火层内的药剂经过一段延迟期后发生热爆炸,爆炸延迟期短于 SCB 凝聚态加热时间。引起药剂发火的特征参量是 SCB 硅蒸汽温度和蒸汽压力,这种发火情况定义为电爆发火。

③ 如果 SCB 爆发并电离,则带电等离子体瞬间侵入到药剂中瞬间使发火层药剂发火。引起药剂发火的特征参量是等离子体温度和压力,这种情况定义为等离子体发火。

### 3.2 临界发火电压

理论上,在某一确定的储能电容下,能使发火装药发火的最小初始激励电压称为临界发火电压。由于制作过程中存在尺寸、原料组分、器件性能等诸多工艺偏差,导致了临界发火电压存在一个分布,这种分布是各种工艺参数和工艺偏差分布的综合结果,因此,即使多数工艺偏差符合正态,综合到发火件产品上,也不一定符合正态分布,但是分布的中值应该接近或者等于理论值(或称名义值),即 50% 发火的值,所以在实验中定义 SCB 发火件的 50% 发火电压为产品的临界发火电压。用 D-最优化法测试 SCB 发火件的 50% 发火电压和标准偏差,实验结果如表 1 所示。

表 1 SCB 发火件发火电压阈值

Table 1 Critical firing voltage of SCB device

SCB device	sample value	50% of the ignition voltage ( $\hat{\mu}_0$ )/V	standard deviation ( $\hat{\sigma}_0$ )/V
1# SCB/LTNR	10	4.22	0.10
1# SCB/PbN <sub>6</sub>	10	4.88	0.15
2# SCB/LTNR	12	4.81	0.32

实验测得 1# SCB/PbN<sub>6</sub> 发火件的临界发火电压 4.88 V,略高于 1# SCB/LTNR 发火件的临界发火电压 4.22 V,而 1# SCB 的临界爆发电压为 4.08 V<sup>[12]</sup>,表明 1# SCB 在临界发火时属于电爆发火,LTNR 比 PbN<sub>6</sub> 对电爆硅蒸汽敏感。说明临界发火电压与药剂有关。

2# SCB/LTNR 发火件的临界发火电压为 4.81 V,而 2# SCB 的临界爆发电压为 5.24 V<sup>[12]</sup>,表明 2# SCB 在临界发火时属于电热发火,高于 1# SCB/LTNR 发火件的临界发火电压,表明临界发火电压不仅与发火药剂有关,还与桥的质量有关。

### 3.3 发火时间

发火件的发火时间指从能量加载时刻到出光所需要的时间,由发火药剂加热时间、爆炸延迟期和装药的燃速三部分构成。SCB 发火时间与激励电压之间的关系所图 9 所示。由图 9 可知,随着激励电压增大,发火时间缩短,对于 SCB/LTNR 和 SCB/PbN<sub>6</sub> 发火件,当激励电压分别增大到 20 V 和 10 V 时,发火时间趋于不变,PbN<sub>6</sub> 的发火时间远远短于 LTNR 的发火时间,表明 PbN<sub>6</sub> 比 LTNR 的反应速率高、燃速快,使发火件的整体发火时间短接近一个量级。

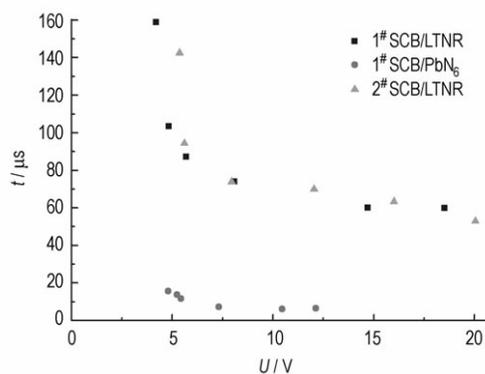


图 9 SCB 发火时间与激励电压之间的关系

Fig. 9 The ignition time of SCB vs voltage

## 4 结论

(1) 在发火药剂及装药条件确定的情况下,SCB 质量决定了临界发火状态的换能性质。当 SCB 质量较大时,一般药剂在 SCB 的凝聚相阶段导致发火,此时临界发火属于电热发火;当 SCB 质量较小时属于电爆或等离子体发火。

(2) 电热发火时间较长,而 SCB 能够产生等离子体的门槛电压又较高,所以对于追求低能量发火的 SCB,最佳设计其临界发火电压为电爆发火,即 SCB 存在最佳质量。

(3) LTNR 比 PbN<sub>6</sub> 的感度高,但是 PbN<sub>6</sub> 比 LTNR 的反应速率高、燃速快,使得发火件的整体发火时间短。

(4) 对于电热发火,作用过程中 SCB 换能元只是以热传导的方式将热量传递给药剂,SCB 一直保持凝聚态,此过程可用热传导模型描述发火件的温度变化规律;对于电爆发火,将 SCB 发火件的发火过程分为两个阶段,第一: SCB 加热至爆发阶段,此阶段可建立热传导模型描述发火件的温度变化规律;第二:

SCB 爆发后硅蒸汽或等离子体与药剂的作用阶段, 此阶段可建立两相流模型和数值解法得到药剂的温度变化规律。

#### 参考文献:

- [1] Hollander Jr L E. Semiconductor explosive igniter: US Patent 3366055[P]. 1968-01-30.
- [2] Bickes Jr R W, Schwarz A C. Semiconductor bridge (SCB) igniter: US Patent 4708060[P]. 1987-11-24.
- [3] Benson D A, Bickes Jr R W. Tungsten bridge for the low energy ignition of explosive and energetic materials: US Patent 4976200 [P]. 1990-12-11.
- [4] Bickes R W Jr, editor. Semiconductor bridge (SCB) development technology transfer symposium [R]. SAND 86-2211, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, January, 1987.
- [5] Kim J, Nam K S, Jungling K C. Plasma electron density generated by a semiconductor bridge as a function of input energy and land material[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, 44 (6): 1022-1026.
- [6] 刘明芳, 张小兵. 半导体桥点火模型的建立及数值模拟[J]. *火炸药学报*, 2008, 31(5): 87-90.  
LIU Ming-fang, ZHANG Xiao-bing. Establishment of semiconductor bridge ignition model and its numerical simulation[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(5): 87-90.
- [7] Kim J, Roh T M, Cho Kyoung-IK, et al. Optical characteristics of silicon semiconductor bridge under high current density conditions[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(5): 852-857.
- [8] Ewick D W, Walsh B M. Optimization of the bridge/powder interface for a low energy SCB device[R]. 97-2831; 1997.
- [9] 徐祿, 张琳, 冯红艳, 等. 降低药剂 SCB 点火能量的研究进展[J]. *含能材料*, 2008, 16(5): 639-646.  
XU Lu, ZHANG Lin, FENG Hong-yan, et al. Review on decreasing the ignition energy by semi-conductor bridge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 639-646.
- [10] 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(自然科学版)*, 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 (Natural Science)*, 2009, 33(2): 235-237.
- [11] 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(3): 1-5.  
YANG Gui-li, JIAO Qing-jie. Calculating the resistance of double V-shaped semiconductor bridge[J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2009(3): 1-5.
- [12] YANG Gui-li, JIAO Qing-jie, JIN Zhao-xin, et al. Electrothermal energy conversion mechanism of micro-scale semiconductor bridge[J]. *Journal of Beijing Institute of Technology*, 2011, 20(1): 23-29.

## Ignition Properties of Energetic Material by Semiconductor Bridge

YANG Gui-li, ZHU Shun-guan, SHEN Rui-qi

(School of Chemical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** Capacitive discharge SCB initiation of energetic materials was discussed at different firing voltage levels. Both of SCB are the same resistance and difference mass. The energetic materials are LTNR and  $PbN_6$ . For the SCB device, there are three modes of igniting energetic materials, electrothermal ignition, electrical explosive ignition and plasma ignition, respectively. To understand further the behavior of SCB ignition, we measured the critical ignition voltage and ignition time of SCB/LTNR and SCB/ $PbN_6$  device. As a result the critical ignition energy is not only related with energetic materials, but also the comparable mass of the SCB bridge, so there is an optimal design mass about SCB bridge. Besides, the LTNR was more sensitive than  $PbN_6$ , however, the burning rate of  $PbN_6$  is higher than that of LTNR.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnic technology; semiconductor bridge (SCB); reagent; ignition voltage; ignition time

**CLC number:** TJ450

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.04.002