

文章编号: 1006-9941(2010)01-0072-04

## 起爆药等离子体敏感度研究

马鹏, 朱顺官, 张垒, 徐禄

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 半导体桥产生的等离子体起爆火工药剂时, 存在起爆难易问题, 即不同起爆药对等离子体的敏感度不同。通过研究示波器采集半导体桥引爆起爆药时的信号, 获取了半导体桥释放能量、电压-时间曲线中二次峰持续时间、光信号出现时间以及电压断开时间等数据, 并利用 D 最优化法程序对数据进行了处理。结果表明: 斯蒂芬酸铅、叠氮胍镍、硼/铅丹由半导体桥产生的焦耳热引燃; 苦味酸铅、叠氮化铅、硝酸胍镍、斯蒂芬酸钡由等离子体引燃, 其敏感度顺序是: 苦味酸铅 > 叠氮化铅 > 斯蒂芬酸钡 > 硝酸胍镍。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 等离子体点火; 敏感度; 起爆药

**中图分类号:** TJ5; TJ45

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.018

### 1 引言

半导体桥 (semiconductor bridge, SCB) 火工品是利用半导体膜或金属-半导体膜作发火元件的火工品, 微电子集成技术的应用, 使其成为具有逻辑功能的火工品<sup>[1]</sup>。

Benson 等<sup>[2]</sup>在研究 SCB 点燃烟火剂的实验中, 测量了 SCB 两端的电压曲线并发现有两个电压峰值: 第一个峰值对应 SCB 汽化前的硅桥加热, 从 SCB 开始汽化直到汽化完成, 桥区一直维持低阻抗; 在电流的持续加热下硅气开始电离, 桥区阻抗急剧上升, 直到电压曲线出现第二个峰值, 这对应于硅等离子体加热阶段开始。他们认为只有当等离子体加热阶段形成时, SCB 才能点爆炸药。

文献<sup>[3]</sup>指出, 用桥丝点燃烟火药时, 约在 1~3 ms 内产生爆炸输出, 用半导体桥时在 125 μs 内产生爆炸输出, 而且半导体桥的体积小 (只有通常桥丝的 1/30), 能量小 (小于 2 mJ)。David W. Ewick 等<sup>[4]</sup>在不同厚度 SCB 下对球磨高氯酸·四氨·双(5-硝基四唑)合钴(III)(BNCP)点火, 得出药剂粒度与桥厚度 (SCB 厚度) 的匹配对点火很重要。用 SCB 做发火元件的火工品具有发火能量低, 安全性高, 作用快, 同时具有抗射频, 抗

电磁和抗静电的能力, 可以在复杂情况下广泛应用。

王文<sup>[4]</sup>研究了半导体桥等离子点火特性, 建立了全面反映等离子体对药剂作用的模型, 说明了药剂表面处的离子浓度和离子到达药剂表面处的能量通量。刘西广<sup>[5]</sup>等对 SCB 发火做了研究, 得到了电压-时间关系, 他认为当电流很大时, 等离子体在发火过程中起主要作用。周荣<sup>[6]</sup>认为当 SCB 通过脉冲电流时, 硅材料因焦耳热迅速汽化并在电场的作用下形成 4100~6000 K 若等离子体放电, 达到了药剂的着火温度而发火。张文超等<sup>[7]</sup>采用高速数字存储示波器对电容激励下的半导体桥电爆过程的能量转换进行了测量, 得到了桥上不同电压时半导体桥区不同时刻的汽化率, 熔化率和电离率。

在上述工作基础上主要研究了不同起爆药对半导体桥点火的响应特性, 通过分析 SCB 点燃不同药剂时的电压、电流、光信号曲线, 说明不同起爆药的等离子体点火难易情况, 即药剂的等离子体点火敏感度。

### 2 实验部分

#### 2.1 实验装置

实验装置如图 1 所示。

#### 2.2 实验条件

采用的半导体桥规格是 SCB 尺寸: 100 μm(L) × 400 μm(W) × 2 μm(T), 对该尺寸的半导体桥大量实验表明, 当电容为 47 μF 时, 点火时间最快; 当电压为 60 V 时, 可以保证半导体桥全部产生等离子体。

叠氮胍镍 (NHA)、斯蒂芬酸铅 (LTNR)、叠氮化铅

收稿日期: 2009-05-21; 修回日期: 2009-09-11

作者简介: 马鹏 (1985-), 男, 硕士, 主要从事半导体桥点火研究。

e-mail: mpcctv@163.com

通讯联系人: 朱顺官, 男, 研究员, 从事新型钝感高威力火工药剂合成制备研究。e-mail: zhusg@mail.njust.edu.cn

(LA)、苦味酸铅、硝酸胍镍(NHN)和斯蒂芬酸钡、硼/铅丹,均为本实验室自己制备的药剂。

装药条件:药剂粒度 300 目;压药压力 60 MPa。

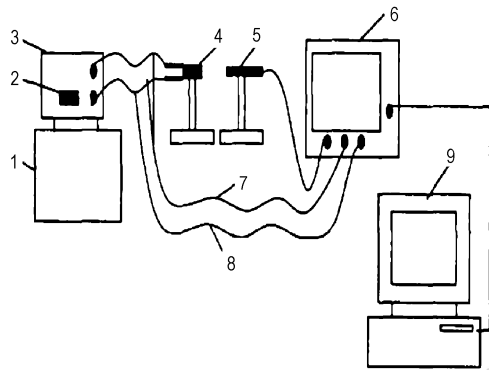


图1 实验装置图

1—稳压电源, 2—电容, 3—起爆器, 4—样品, 5—光探头, 6—示波器, 7—电压信号线, 8—电流信号线, 9—数据存储器

Fig. 1 The experimental set-up

1—regulated power supply, 2—capacitor, 3—initiator, 4—sample, 5—light, 6—oscillograph, 7—signal line of voltage, 8—signal line of current, 9—memorizer

## 2.3 实验结果与讨论

### 2.3.1 实验结果

实验获得的不同药剂点火能量-时间曲线如图2所示。

### 2.3.2 实验结果讨论

(1) 图2中的电压-时间曲线(A曲线)均出现了二次峰现象,由此可以判定所用的半导体桥均产生了等离子体,其图像和图2h裸桥的相似,即均出现了二次峰现象。

(2) 图2h裸桥的光信号(C曲线)时间和二次峰出现的时间基本一致,由此可以判定二次峰时间即为等离子体产生时间。

(3) 叠氮胍镍、斯蒂芬酸铅和苦味酸铅的光信号出现在电流断开以后,作用在药剂上的能量是SCB升温到完全产生等离子体时作用给药剂的能量,可以认为是焦耳热和等离子体对药剂的混合作用。

(4) 由LA的图像可以看出,在电流断电之前就出现了光信号,由此可以看出LA的点火由等离子体点燃。

(5) NHN、斯蒂芬酸钡、B/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>的图像中没有采集到光信号,这是由于示波器时基设置小,光出现得比较晚,超出了示波器的量程,但实际药剂已经被引燃。

在本实验中,通过示波器记录了出现二次峰的时间、断电时间、光信号时间和桥的能量,如表1所示。

断电时间表示桥熔断的时间,说明了不同装药条件下桥熔断得快慢,光信号时间是指药剂被点燃的时刻,反映了药剂被点燃的快慢,桥能量是电能转化成热和等离子体的作用,在相同的装药条件下可视桥放出的焦耳热相同。

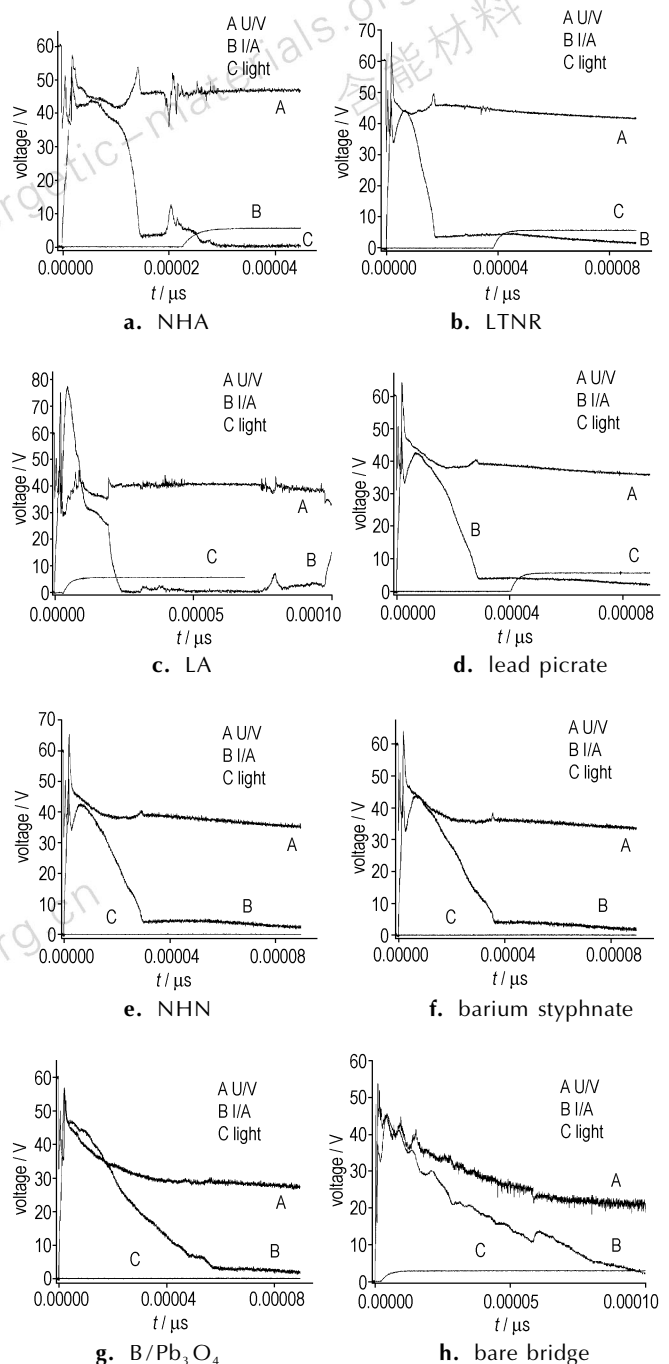


图2 不同药剂的SCB点火能量-时间曲线

Fig. 2 Curves of SCB ignition voltage vs time for different kinds of primary explosives

表 1 不同药剂二次峰, 断电时间, 光信号时间和桥能量数据

Table 1 Data of secondary crest, duration of current and light signal, energy of SCB for different kinds of primary explosives

sample	$T_p$ / $\mu$ s	$T_{current}$ / $\mu$ s	$T_{light}$ / $\mu$ s	$E_{bridge}$ /mJ
NHA	2.06	14.92	22.88	23.50
LTNR	2.09	17.52	38.79	24.77
LA	2.30	24.42	3.18	32.14
lead picrate	2.14	28.94	40.59	35.39
NHN	2.20	29.98	-	35.66
barium styphnate	2.30	33.62	-	37.29
B/Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	2.20	57.31	-	49.38
bare bridge	2.08	97.80	2.08	57.67

Note:  $T_p$  is the time of secondary crest,  $T_{current}$  is the duration of current,  $E_{bridge}$  is the energy released by the bridge,  $T_{light}$  is light signal time, “-” illustrates the time of light is out of the range of oscillograph.

在表 1 中可以看出, 硝酸胥镍 (NHN), 斯蒂芬酸钡和硼/铅丹 (B/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub>) 没有光信号, 其余药剂均产生光信号; 与裸桥相对比, 叠氮化铅 (LA) 的光信号时间与二次峰时间基本相同, 证实了上面的分析, 即 LA 是由等离子体点燃的。其余药剂的光信号时间均比二次峰信号时间要长一些, 说明这些药剂的点燃需要较长的时间。

表 2 不同药剂的 D-优化数据

Table 2 D-optimization data of different kinds of primary explosives

	LTNR	NHA	NHN	LA	lead picrate	barium styphnate	B/Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub>
50% ignition voltage	8.8	8.3	37.9	21.5	14.3	37.3	9.8
minimum ignition voltage	9.0	8.5	36	18.8	14.5	37.5	10.0
0% ignition voltage	8.5	8.0	39.9	24.3	13.3	37.0	9.5
100% ignition voltage	10.9	10.4	47.8	34.4	16.4	39.4	12.2

### 3 结论

半导体桥通过焦耳热和等离子体两种形式将药剂点燃, 在等离子体的点火中, 存在着药剂对等离子体的敏感程度, 本实验应用 D-最优化法程序计算了电压的大小, 通过比较二次峰时间、断电时间、光信号时间和桥的能量, 判断药剂由何种形式点燃, 由此判断和定性反映药剂的等离子体感度, 确定药剂药剂的半导体桥点火感度顺序为: 苦味酸铅 > LA > 斯蒂芬酸钡 > NHN。

#### 参考文献:

[1] Bickes R W Jr, McCampbell C B. Semiconductor bridge (SCB) research and development[R]. SAND 91-0310C. 1991.

为进一步比较不同药剂的最低发火电压, 最大不发火电压和最小全发火电压, 说明药剂的 SCB 点火难易, 使用 D-最优化程序进行了点火电压的预计, 通过实验比较了不同药剂的 SCB 点火的最小发火电压, 最高不发火电压和全发火电压, 如表 2 所示。

在本次实验中采用 D-最优化法程序进行点火, 得到药剂 50% 发火的电压期望和标准差估计, 进一步计算得到 99.9% 的发火电压作为全发火电压, 通过对比不同药剂半导体桥点火的 50% 发火电压和全发火电压, 可以得出不同药剂半导体桥点火的感度顺序。在大量的裸桥实验中发现, 电压低于 15 V 时, 不会产生等离子体, 通过测量发现其电阻还存在, 即 SCB 不会断开 (产生等离子体后的半导体桥电阻为无穷大, 即桥已断开)。由此可以看出 LTNR, NHA 和 B/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 是焦耳热的作用使其点火的, 这与表 1 中 LTNR 和 NHA 桥释放的能量较小相对应, B/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 桥放出的能量大是由于断电时间较长, 桥持续通电产生的焦耳热较多造成的。故不对这三类药剂进行感度比较。对于余下的三种药剂, 通过对比其最小全发火电压可以得出药剂的半导体桥点火感度顺序为: 苦味酸铅 > LA > 斯蒂芬酸钡 > NHN。

- [2] Benson D A, Larsen M E, Renlund A M, et al. Semiconductor bridge: A plasma generator for the ignition of explosives [J]. *Appl phys*, 1987, 62(5): 1622 - 1632.
- [3] 郝建春. 使用半导体桥 (SCB) 以极低的能量点燃烟火药 [J]. *爆破器材*, 1993, 2: 34 - 37.  
HAO Jian-chun. Using semiconductor bridge (SCB) to ignite pyrotechnic with low energy [J]. *Explosive Materials*, 1993, 2: 34 - 37.
- [4] 王文. 半导体桥等离子点火特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.  
WANG Wen. Study on the ignition character of plasma generated by semiconductor bridge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [5] 刘西广, 徐振相, 宋敬培, 等. 半导体桥火工品的发展 [J]. *爆破器材*, 1995, 24(4): 12 - 17.  
LIU Xi-guang, XU Zhen-xiang, SONG Jing-pu, et al. The development of semiconductor bridge [J]. *Explosive Materials*, 1995, 24(4): 12 - 17.
- [6] 周蓉, 岳素格, 秦卉芊. 半导体桥的研究 [J]. *半导体学报*, 1998,

19(11): 857–860.

ZHOU Rong, YUE Su-ge, QIN Hui-qian, et al. Study of semiconductor bridge [J]. *Chinese Journal of Semiconductor*, 1998, 19(11): 857–860.

[7] 张文超, 叶家海, 秦志春, 等. 半导体桥电爆过程的能量转换测量

与计算[J]. *含能材料*, 2008, 16(5): 564–566.

ZHANG Wen-chao, YE Jia-hai, QIN Zhi-chun, et al. Measurement and calculation for SCB electro-explosion energy conversion features [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(5): 564–566.

## Plasma Sensitivities of Different Kinds of Primary Explosives

MA Peng, ZHU Shun-guan, ZHANG Lei, XU Lu

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

**Abstract:** The plasma sensitivities of different kinds of primary explosives were studied. The voltage-time curves, current-time curves and light-time curves were obtained. The data were analyzed by using D-optimization method. Results show that lead styphnate (LTNR), nickel hydrazine azide (NHA) and B/Pb<sub>3</sub>O<sub>4</sub> are ignited by the SCB heat; lead picrate, lead azide, nickel hydrazine nitrate (NHN) and barium styphnate are ignited by the SCB plasma. The order of plasma sensitivity is: lead picrate > lead azide > barium styphnate > nickel hydrazine nitrate.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnic technology; plasma ignition; sensitivity; primary explosive

**CLC number:** TJ5; TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.018



## New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter 24 – 28 May, 2010 PARIS, France

The Biennial International Conference New Models and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter will be held 24 – 28 May, 2010 in Paris, France.

This Conference continues the sequence of last workshops (St. Petersburg, 1995; Oxford, 1997; Washington, 1999; Edinburgh, 2002; Washington, 2004; Dijon, 2006; Lisbon 2008).

It is devoted to discussions about the development of new fundamental models or methods and new experimental set-up in the field of the shock wave physics, and their implementations in hydrocodes.

The two main topics will be:

- Shock waves in metallic system: appropriate equation of states, elastic-plastic law, damage models and related experiments.
- Shock wave in explosives: equation of states of unreacted explosives and detonation products, analysis of the reaction zone (chemistry and thermodynamic properties) and related experiments.

Because the multi-scale physics is undeniably one of the key of the progress in the shock wave study, the organizers wish that all the physical spatial and temporal scales to be equally represented, emphasizing the bridges between the various scales.

It is encouraged the presentation of forward-looking theoretical, numerical and experimental methods even though they do not still present applications on real systems.

Detailed information about the Conference at the web-site: <http://www.shock2010.hebergratuit.com>