

文章编号: 1006-9941(2012)02-0198-04

## 两种粒度叠氮化铅半导体桥点火特性研究

马鹏, 张琳, 朱顺官, 陈厚和

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 用半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)研究了点燃两种不同粒度(细化 5~15  $\mu\text{m}$  和结晶 300  $\mu\text{m}$ )的叠氮化铅(Lead Azide, LA)所需的电压、电流和光信号。结果表明:细化 LA 被 SCB 点燃时,其出光时间早于 SCB 二次峰结束时间,而结晶 LA 出光时间要晚于 SCB 二次峰结束时间。随 SCB 点火电压增加,SCB 二次峰的持续时间以及出光时间均缩短。由 D-最优化法所得两种 LA 点火数据显示:细化 LA 的最小发火电压是结晶 LA 的 50%。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 半导体桥; 叠氮化铅; 点火时间; 最小点火电压

**中图分类号:** TJ55; O69

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.013

### 1 引言

半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)是用半导体膜或金属-半导体复合膜作为发火元件的灵巧点火器,具有抗静电,抗射频,安全性高,作用迅速等诸多传统火工品无法比拟的优势,可以在复杂的环境中应用<sup>[1-3]</sup>。目前国内外对半导体桥进行了相关的研究,研究发现 SCB 产生等离子同时电压曲线将出现两个峰值,其中第一个峰值对应 SCB 汽化前的硅桥加热,第二个峰值对应于 SCB 等离子体的产生<sup>[4]</sup>,不同的硅材料制成的 SCB 产生的等离子体有所不同<sup>[5]</sup>,并测量了 SCB 等离子体的温度,以及 SCB 的电热性能<sup>[6-7]</sup>。

叠氮化铅是一种起爆能力较强的起爆药,目前应用仍很广泛。David W. Ewick<sup>[8]</sup>等在较小压药压力下,用 SCB 对糊精叠氮化铅等几类起爆药进行点火研究,发现 SCB 较难起爆叠氮化铅。为使 SCB 在较小能量下可靠起爆叠氮化铅,我们结合本课题组之前的研究成果<sup>[9]</sup>,对细化(5~15  $\mu\text{m}$ )和结晶(300  $\mu\text{m}$ )两种不同粒度的叠氮化铅的点火电压、出光时间以及点火能量进行了探索。

### 2 实验部分

#### 2.1 实验装置与点火机理

实验装置如图 1 所示,主要由三部分组成:电能输入

装置、SCB 点火装置和数据采集系统。电容充电完毕后,打开开关,电容对 SCB 释放能量,在电容电能作用下 SCB 激发形成等离子体,将药剂点燃。在该过程中,电容放电的电压信号、SCB 两端的电压信号和整个回路的电流信号将通过示波器记录。图 2 则为 SCB 装药桥的结构图。

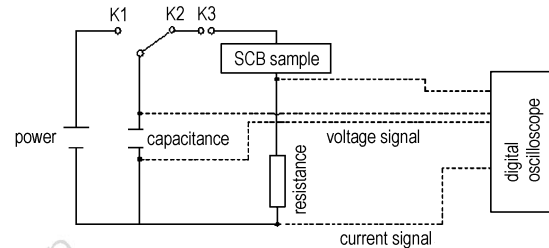


图 1 发火电路图

Fig. 1 Ignition circuit diagram

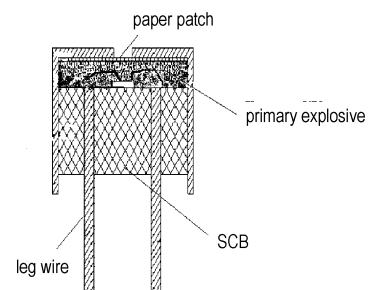


图 2 装药结构示意图

Fig. 2 Charge structure of SCB

图 3 是半导体桥产生等离子体时的电压曲线,在等离子体激发过程中,半导体桥的主要组分硅在不同的时刻发生了不同的变化,A 点是电脉冲作用的起始

收稿日期: 2011-05-16; 修回日期: 2011-09-16

作者简介: 马鹏(1985-), 博士研究生, 从事半导体点火相关研究。

e-mail: mpcctv@163.com

点, A-B 阶段是桥的加热阶段, 热量主要来自于电流通过桥时产生的焦耳热; B-D 阶段是桥的熔化阶段, 熔化桥的能量主要来自放电电容提供的能量, 在 C 点时桥材料没有完全熔化, 在 D 点时桥材料全部熔化; D-E 阶段是桥材料的气化过程, 在 E 点, 桥材料气化完全。在电容能量的激发下, 气态的硅被电离为等离子体。由于等离子体的冲击作用和热作用, 起爆药被点燃。

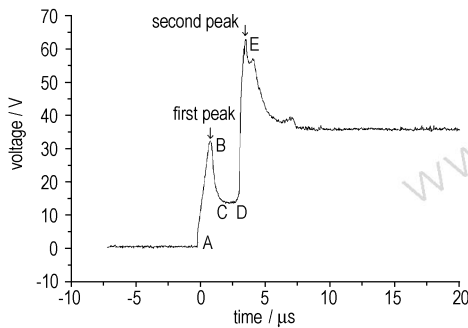


图 3 典型等离子体产生时的电压曲线  
Fig. 3 Typical voltage curve when plasma generated

### 2.2 实验仪器及药剂

叠氮化铅 (LA), 南京理工大学制备; ALG-CN1 储能放电起爆仪, 南京理工大学制造; 44XS 通道数字示波器, Lecroy 公司产品。

N 型重掺杂 SCB: 尺寸为  $80 \mu\text{m}(\text{L}) \times 360 \mu\text{m}(\text{W}) \times 2 \mu\text{m}(\text{T})$ , 电阻为  $(1 \pm 0.1) \Omega$ , 实验用电容为  $4.4, 22, 47 \mu\text{F}$ 。SCB 装药桥装药为 LA, 装药量为  $20 \text{mg}$ , 压力为  $40, 80, 120 \text{MPa}$ 。细化叠氮化铅粒度范围  $5 \sim 15 \mu\text{m}$ , 结晶叠氮化铅粒度范围  $300 \mu\text{m}$ 。

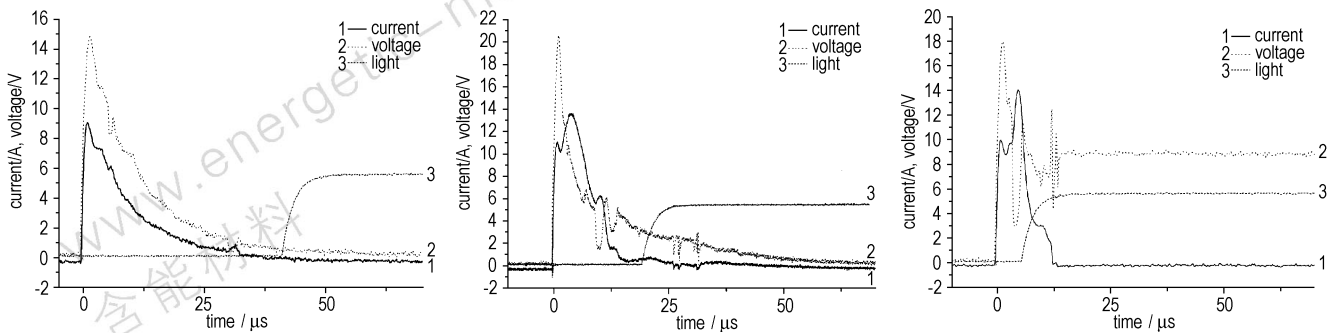
### 3 结果与讨论

#### 3.1 三种不同的点火形式及讨论

在本实验中采集到叠氮化铅三种典型的点火电

压、电流和光信号, 如图 4 所示。由图 4 中的光信号曲线可以看出, 三种情况下 LA 均被点燃。三种情况的不同之处在于 (1) 光出现的时刻不同: 图 4c 中光信号在电压和电流未作用完时即出现, 而在图 4a 和图 4b 则是在电压和电流作用完后出现; (2) 图 4a 中电压曲线与图 4b 和图 4c 明显不同。以三幅图中的电压曲线可以看出图 4a 电压曲线只有一个峰值, 而图 4b 和图 4c 中电压曲线则出现两个峰值。根据等离子体点火的判据, 若电压曲线多于两个峰值, 则该点火形式是等离子体点火。由此可以说明图 4b 和图 4c 是等离子体点火, 而图 4a 则不是等离子体点火。

由图 4a 和图 4b 可以看出, 在相同的外部条件下 (电容及压药压力相同), 不同粒度的 LA 其点火形式是不同的: 在 4a 图中的电压曲线只有一个峰, 说明其点火是非等离子体点火, 即由于桥的热作用导致其发火, 而在 4b 图中的电压曲线中有多于两个的峰值, 说明这是半导体桥等离子体形式的点火。对于这两种不同形式的点火过程, 是由于药剂粒度的不同造成的。半导体桥的升温过程中电能首先转化成热能, 在此过程中由于细颗粒粒径较小, 与桥面的接触面积较大, 较多的吸收了桥升温过程中释放的热量, 与桥面接触的部分药剂首先达到其发火点, 引起整个药剂的爆炸。而对于大颗粒的药剂, 由于其空隙率较大, 半导体桥升温过程中热量较容易散失, 达不到其发火点, 故而需要桥产生等离子体时释放的能量将其点燃。对于图 4b 和图 4c, 两者的不同之处在于压药压力的不同, 其余条件 (电容, 充电电压, 药剂粒度) 均相同。这两种情况的明显不同在于药剂点燃的时刻不同即出光时间不同。在大压力条件下的出光时间较短 (图 4c), 小压力条件下出光时间较长 (图 4b), 这是由于在大压力条件下药剂之间孔隙率较小, 当半导体桥产生等离子体之后,



a.  $4.7 \mu\text{F}, 40 \text{MPa}, 25 \text{V}$  (LA,  $5 \sim 15 \mu\text{m}$ )    b.  $4.7 \mu\text{F}, 40 \text{MPa}, 32 \text{V}$  (LA,  $300 \mu\text{m}$ )    c.  $4.7 \mu\text{F}, 120 \text{MPa}, 32 \text{V}$  (LA,  $300 \mu\text{m}$ )  
图 4 三种典型的电压、电流和光信号

Fig. 4 Three kinds of typical voltage, current and light signal

孔隙率小的吸收了较多的能量, 药剂较快发火。另外, 图 4b 和图 4c 中电压在作用完后维持在一个较高的值是由于半导体桥断开后, 电压作用在断开的脚线两端, 没有形成回路导致的。由此可以说明图 4a 中的半导体桥并没有断开, 图 4b 和图 4c 已断开。

### 3.2 两种氮化铅点火特性对比

图 5 为细化 LA 在 40 MPa 条件下高电压放电时的电压电流和光信号曲线, 与图 4b 结晶 LA 的信号曲线对比可以看出, 细化 LA 光信号的出现时间较快, 对此可以认为: (1) 药剂的粒度较小, 与桥面的接触面积大, 可以较高地利用桥释放的能量; (2) 桥在此过程中产生等离子体<sup>[4]</sup>, 药剂与等离子体充分接触, 同时由于药剂在等离子体产生之前吸收了部分能量, 使药剂较快地发生爆炸反应。

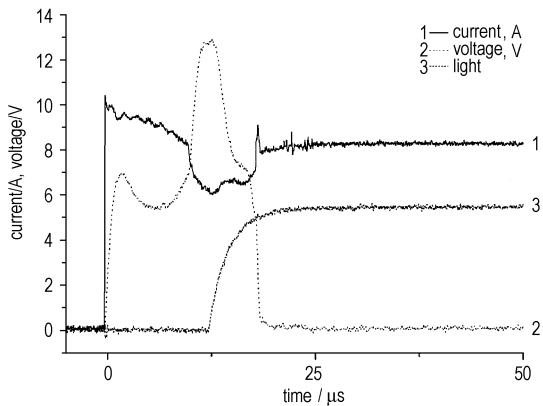


图 5 细化 LA 电压、电流和光信号曲线

Fig.5 Curves of voltage, current and light signal for superfine LA

由 1 表数据可以看出: (1) 随着充电电压的升高, 二次峰的持续时间缩短; (2) 结晶 LA 其二次峰持续时间比出光时间短, 即二次峰结束后光出现, 如图 4b 所示; (3) 细化 LA 二次峰持续时间比光出现时间长, 即光在二次峰结束之前出现, 如图 5 所示。电压加载在桥两端时, 在提供相同的能量保证桥汽化前提下, 高电压可以在较短的时间内提供汽化的能量, 故随着输入电压的升高, 二次峰持续时间较短; 在相同的压力条件下, 大颗粒之间的空隙比小颗粒的要大, 较大的空隙会使药剂不能充分吸收等离子体释放的能量, 即药剂对等离子体能量的利用率不同。细化的药剂利用率较结晶 LA 的要高。故在二次峰未作用完时, 细化的 LA 已经被点燃, 出现光信号。

对于两种粒度的 LA, 随着充电电压的提高, 二次峰的持续时间及出光时间均在缩短, 充电电压提高后,

相同的放电时间内释放的能量较低电压的要多, 单位时间内的能量密度高, 所以半导体桥的 LA 的点燃时间缩短, 即出光时间缩短。对于结晶 LA, 二次峰持续时间比出光时间短 (图 4b)。对于细化 LA, 二次峰持续时间比出光时间长, 即光在二次峰结束之前已经出现。

D 最优化实验是一种实验样本较少但可以得到较准确实验结果的一种实验方法。为了进一步研究电容和压力对结晶和细化 LA 的影响, 对细化和结晶 LA 进行了 D 最优化实验, 结果见表 2。

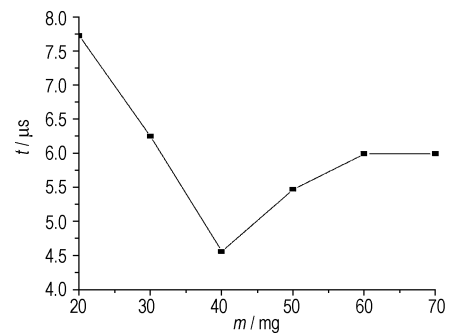


图 6 细化 LA 不同药量下出光时间

Fig.6 The appearance time of light for different amounts of superfine LA

表 1 结晶与细化 LA 的二次峰持续时间及出光时间比较

Table 1 Comparison of the duration time of second peak and appearance time of light of common and superfine LA

LA	voltage /V	duration time of second peak/μs	light time /μs
common	30.3	13.6	15.6
	32.5	11.9	12.7
	33.8	11.2	13.5
	34.0	10.6	11.5
superfine	14.7	28.7	12.2
	15.3	27.8	10.3
	16.7	21.9	5.84
	18.0	15.1	9.13

表 2 两种不同粒度药剂的 D 最优化实验

Table 2 D-optimization data of two kinds of LA

sample	capacitance /μF	pressure /MPa	firing voltage /V
superfine	22	40	16.27
		80	13.70
LA	47	40	11.66
		80	10.14
common	22	40	34.73
		80	24.94
LA	47	40	21.50
		80	19.73

由表2可以看出,在相同电容和相同的压力下,细化LA的全发火电压只有结晶LA的50%,说明细化的LA更容易被点燃,这是由于细化的LA能有效地利用等离子体的能量,结晶LA由于颗粒之间存在较大的空隙而导致等离子体能量的散失。相同电容下,压力越大发火电压越低,这是由于大压力下桥面与药剂接触得更充分,同时药剂之间接触得更紧密。

由于细化LA可以较快地被等离子体点燃,故在电容47  $\mu\text{F}$ ,电压15V条件下研究了细化LA的出光实验与装药量的关系,结果如图6所示。在图6中可以明显地看出,40 mg装药量的情况下LA可以很快被点燃。装药量少于或多于40 mg时出光时间较慢,并且当装药量大于60 mg以后出光时间基本保持不变。当药量少于40 mg时,药柱较短,爆轰速度比较小,出光时间短,另外可能由于等离子体的渗透距离超过了药柱的长度,部分等离子体的能量被管壳吸收,药剂不能全部吸收其释放的能量。当药量大于40 mg时,药柱长度足够,达到了其爆燃转爆轰的最短距,药剂达到稳定爆轰后引爆后面的装药,在爆轰作用下,后面装药的长度对出光时间没有太大的影响。

#### 4 结 论

SCB点燃不同粒度的LA时,其点火方式是不同的,主要体现在:

(1) SCB以非等离子体点火的形式将细化LA点燃,以等离子体点火的形式将结晶LA点燃。

(2) 在相同条件下(电容,电压相同时),细化LA的点火时间比结晶LA的要短;细化LA的点火电压是结晶LA的50%。

(3) 细化LA由于其比表面积大,与桥面的接触面积大,在桥的加热阶段即可以被点燃,即是半导体桥的非等离子体点火。当电容储能较高,半导体桥产生

等离子体时,细化LA点燃时间比等离子体的持续时间要短。结晶LA是由半导体桥等离子体点燃,点火电压升高时,二次峰持续时间缩短,点火时间缩短。

#### 参考文献:

- [1] Kim J, Navn K S, Jungling K C. Plasm electron density generated by a semiconductor bridge as a function of input energy and landmateria1. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 1997, 44 (6): 1022 - 1026
- [2] Ewick David W, Walsh Brendan M. Optimization of the Bridge/Powder Interface for a Low Energy SCB device, 97-2831 [R], 1997.
- [3] Msrtinze M J, Baer M R. Microconvective heating of granular explosives by a semiconductor bridge. SAND89-2033 (DE90-005710) [R].
- [4] Kye-Nam Lee, Myung-II Park, Sung-Ho Choi, et al. Characteristics of plasma generated by polysilicon semiconductor bridge (SCB) [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002(96): 252 - 257.
- [5] Myung-II Park, Hyo-Tae Choo, Suk-Hwan Yoon. Comparison of plasma generation behaviors between a single crystal semiconductor bridge (single-SCB) and a polysilicon semiconductor bridge (poly-SCB) [J]. *Sensors and Actuators A*, 2004 (115): 104 - 108.
- [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 method and its numerical simulation [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2008 31(5): 87 - 90.
- [7] 冯红艳, 朱顺官, 张琳, 等. 原子发射光谱双谱线法测量SCB等离子体温度[J]. *含能材料*, 2007 15(2): 134 - 136.  
FENG Hong-yan, ZHU Shun-guan, ZHANG Lin, et al. Measurement of the semiconductor bridge (SCB) plasma temperature by the double line of atomic emission spectroscopy [J]. *Chin J Energ Mater*, 2007 15(2): 134 - 136.
- [8] Ewick David W, Walsh Brendan M. Optimization of the Bridge/Powder Interface for a Low Energy SCB device [R], 97-2831: 1997.
- [9] MA Peng, ZHANG Lin, ZHU Shunguan, et al. Non-plasma ignition of lead styphnate by a semiconductor bridge and its comparison with plasma ignition [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2011, 47(1): 103 - 109.

### Ignition Character of the Common and Superfine Lead Azide by Semiconductor Bridge

MA Peng, ZHANG Lin, ZHU Shun-guan, CHEN Hou-he

(Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The signal of voltage, current and light required to ignite the common and superfine lead azide (LA) were studied by semiconductor bridge (SCB). Results show that the appearance time of light is shorter than the end time of the second peak, but for the common LA, it is opposite. With increasing the ignition voltage, the duration time of the second peak and appearance time of light for two kinds of samples are short. The ignition data of the two kinds of LA obtained by D-optimization show that the minimum firing voltage of superfine LA is about 50% less than that of the common LA.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; semiconductor bridge; lead azide; firing time; minimum firing voltage

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.02.013