

文章编号: 1001-1455 (2000)04-0359-05

# 半导体桥起爆炸药的实验研究<sup>\*</sup>

王治平<sup>1</sup>, 费三国<sup>2</sup>, 龚晏青<sup>1</sup>, 何 智<sup>1</sup>, 张 旭<sup>1</sup>

(1. 中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900;

2. 中物院电子工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 介绍了用电爆炸半导体桥起爆炸药的实验: 被起爆装药是重结晶泰安, 装药尺寸  $\phi 5.6\text{mm} \times 14\text{mm}$ , 密度  $1.0 \sim 1.3\text{g}/\text{cm}^3$ ; 装药壳体是直径  $6.2\text{mm}$  的紫铜管, 壁厚  $0.3\text{mm}$ ; 采用快速放电的电容器放电装置(CDU)作为半导体桥起爆炸药的能源。用这种新型半导体桥雷管起爆密度  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$  的泰安装药所需能量为  $290\text{mJ}$ , 雷管的外观尺寸是  $\phi 6.2\text{mm} \times 20\text{mm}$ , 作用时间  $t = 3.27\mu\text{s}$ , 初始装药的到爆轰距离  $\Delta r = 6.31\text{mm}$ 。这种新型半导体桥雷管能可靠起爆密度为  $1.64\text{g}/\text{cm}^3$  的钝化(含 5% 石蜡)泰安传爆药柱。

关键词: 半导体桥; SCB 起爆装置; 冲击起爆

中图分类号: O381 文献标识码: A

## 1 引 言

80 年代中期出现了一种用来点燃各种含能材料的新型桥式电点火装置——半导体桥点火装置(Semiconductor Bridge (SCB) igniter)<sup>[1~2]</sup>。它的作用元件是一薄层半导体膜, 其作用过程是: 来自储能系统的电流脉冲流经半导体桥使其加热、汽化直至击穿, 形成高温高压等离子体; 灼热的硅等离子体颗粒通过微对流运动渗入到与其相邻的烟火剂如高氯酸盐中, 并在烟火剂颗粒上凝结、把能量传递给烟火剂颗粒进而诱发化学反应, 使其点燃。

由于半导体材料在常温下的电阻较大, 因此半导体桥点火装置在静电、杂散电流、电磁辐射、尤其是射频辐射方面的安全性比金属桥好; 且随着温度的增加, 半导体桥的电阻减小, 电流更容易通过, 因此桥的尺寸可以做得很小而不会发生类似保险丝融断的现象, 可以显著节省能量。用半导体桥点火装置点燃烟火剂如 THKP, 消耗的能量仅几个毫焦; 由于灼热的硅等离子体通过微对流热交换把能量传递到烟火剂中, 比热丝雷管的热传导要快得多, 因此其作用时间只需数十微秒。

D. A. Benson 等<sup>[1]</sup>及 R. W. Bickes Jr<sup>[2]</sup>曾用半导体桥引爆奥索金(HMX)和泰安(PETN)等高能炸药, 被引爆炸药采用高密度-低密度-高密度三段装药, 为了保证初始装药能够通过燃烧转爆轰(DDT)过程发展成爆轰, 装药壳体是很厚的钢壳。M. C. Grubelich 等<sup>[3]</sup>用半导体桥通过燃烧转爆轰(DDT)过程起爆单一密度的泰安炸药, 装药壳体仍然是外径  $25.4\text{mm}$ 、长  $25.4\text{mm}$  的钢壳, 介绍了原理性实验装置。

\* 收稿日期: 1999-11-30; 修回日期: 2000-05-23

基金项目: 国防科技重点实验室基金项目(97JS75. 1. 1 ZS7501)

作者简介: 王治平(1940—), 男, 副研究员。

在本文中,介绍在半导体桥雷管研制过程中所作的半导体桥起爆与之紧密接触的重结晶泰安初始装药的实验情况,包括 SCB 起爆不同装药密度的能力、初始装药稳态爆轰的形成过程、雷管的作用时间和输出能力等的观测。

## 2 实验装置

用掺杂浓度(P)约  $10^{20}\text{cm}^{-3}$ 、掺杂层厚度  $2\mu\text{m}$  的多晶硅半导体薄膜通过微电子光刻工艺制成如图 1 所示的“H”形的桥图形。“H”形的“桥墩”上表面喷涂一薄层铝膜(厚约  $2\mu\text{m}$ )构成铝焊盘;把制成的硅晶片再切割成  $2\text{mm}\times 2\text{mm}$  的半导体桥芯片,每个芯片有一个桥图形。桥的尺寸可根据需要选择,大部分实验所用的桥尺寸是  $100\mu\text{m}\times 300\mu\text{m}\times 2\mu\text{m}$ ,也用其它尺寸的桥。半导体桥芯片封装在一个带有两根电极的陶瓷点火头上,用超声焊技术把细铝线的两端分别焊到半导体桥的铝焊盘与点火头的电极上,使 SCB 与电容器放电回路相联(见图 2)。初始装药是重结晶泰安,装药密度  $1.0\sim 1.4\text{g}/\text{cm}^3$ ,有效装药尺寸  $\phi 5.6\text{mm}\times 14\text{mm}$ 。装药壳体是直径  $6.2\text{mm}$  的紫铜管,壁厚  $0.3\text{mm}$ 。雷管的外观尺寸  $\phi 6.2\text{mm}\times 20\text{mm}$ ,质量约  $50\text{g}$ 。

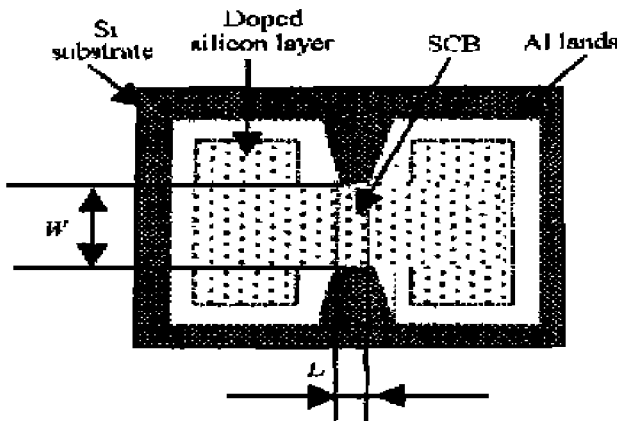


图 1 SCB 芯片(桥图形)

Fig.1 SCB chip (bridge graph)

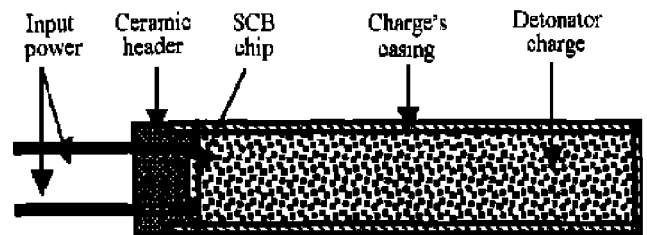


图 2 半导体桥雷管结构示意图

Fig.2 The construction of SCB detonator

脉冲电容器放电装置的主要参数:储能电容  $C = 0.199 \sim 0.244\mu\text{F}$ , 放电回路电阻  $R \approx 50\text{m}\Omega$ , 电感  $L \approx 80\text{nH}$ , 电容器初始充电电压  $V_0 = 2.4 \sim 3.6\text{kV}$ 。

典型的实验装置如图 3 所示。在同一块厚度为  $5\text{mm}$  的 LY12 硬铝验证板上同时装有两个半导体桥雷管:一个直接插入铝验证板上的  $\phi 7\text{mm}$  通孔内,以观测雷管的爆炸效果;另一个插入内孔为  $\phi 7\text{mm}$  的铝套内,铝套的侧面可装有不同的数量的电探针,以观测初始装药稳态爆轰的形成过程。铝套的端部装有一个密度为  $1.64\text{g}/\text{cm}^3$  的钝化泰安传爆药柱,再粘贴到铝验证板上,以观测半导体桥雷管引爆泰安传爆药柱的情况。传爆药柱的上、下表面也各装有一对游离式电探针,以验证其是否被瞬时引爆。

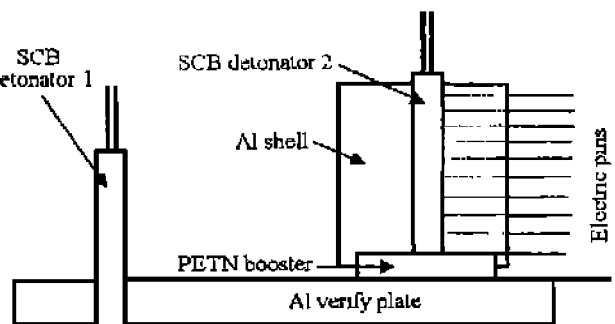


图 3 半导体桥雷管性能检验装置

Fig.3 The experimental dives of SCB detonator

实验过程中根据需要可同时用两个雷管做实验,也可只用其中的一个雷管做初始装药起爆性能实验(图中右边的装置)或雷管输出效果实验(左边的装置)。

为了准确测定雷管的作用时间(即从电容器开始放电到初始装药稳态爆轰形成所经历的时间),电容器放电电流波形与电探针信号用同一台示波器记录,用这种记录方法可以把不同测点的特征时间与电容器开始放电的时间关联起来。

### 3 实验结果及分析

用图3所示的实验装置研究了初始装药密度对SCB引爆性能的影响,结果列于表1。当初始装药密度为 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ 时,只用右边一个半导体桥雷管做实验,结果表明初始装药从第一根电探针开始就达到稳态爆轰;保持装药密度、储能电容和雷管数量不变,充电电压减至 $3.4\text{kV}$ ,则初始装药从第二根电探针开始达到稳态爆轰;当装药密度降至 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ 时,采用两个SCB雷管并联,由回收的铝验证板可以看到两个雷管装药都被可靠引爆:第一个雷管实现了正常起爆,原来 $\phi 7\text{mm}$ 的通孔扩大到 $\phi 10\text{mm}$ ;第二个雷管正常引爆了泰安传爆药柱,原来 $\phi 20\text{mm}$ 的钝化泰安传爆药柱在铝验证板上炸出一个直径约 $24\text{mm}$ 的通孔。

表1 装药密度对SCB引爆性能影响的实验结果

Table 1 The effects of filled density on the SCB initiated functions

$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	能源参数			实验结果			备注
	$C/\mu\text{F}$	$V_0/\text{kV}$	$E_0/\text{J}$	$t/\mu\text{s}$	$\Delta r/\text{mm}$	$D/(\text{km}/\text{s})$	
1.30	0.242	3.6	1.60	$\leq 1.84$	$\leq 3.44$	6.81	一个雷管
1.31	0.242	3.4	1.10	$\leq 2.02$	$\leq 4.68$	7.07	一个雷管
1.0	0.199	2.4	0.58	$\leq 3.27$	$\leq 6.31$	6.11	两个雷管并联

由图4所示的示波器记录可以看出,半导体桥的爆炸时间(近似为电流峰值出现的时间)是 $0.23\mu\text{s}$ ,爆轰波通过 $5\text{mm}$ 厚钝化泰安传爆药柱的时间(电探针10和11的时间差)是 $0.64\mu\text{s}$ ,相应的爆速是 $7.8\text{km}/\text{s}$ ,说明钝化泰安传爆药柱被半导体桥雷管瞬时引爆并达到了稳定爆轰。

将图4的电探针信号作处理,可得到如图5所示的初始装药中反应冲击波传播的轨迹。由此可以清楚地看出初始装药稳态爆轰的形成过程:半导体桥爆炸,在初始装药中产生一个反应冲击波;反应冲击波一开始比较弱,不足以使第一根电探针导通;随着反应的进行,反应冲击波的强度增强,使第二根电探针导通,但还没有增长成稳态爆轰;当反应冲击波到达第三根电探针时已经增长成稳态爆轰波。

由图5可以得到:初始装药的稳态爆速 $D=6.11\text{km}/\text{s}$ ,雷管的作用时间 $t=3.27\mu\text{s}$ ,初始装药的到爆轰距离 $\Delta r=6.31\text{mm}$ 。相应的点火装置储能 $E_0 \approx 0.58\text{J}$ ,即每个半导体桥雷管可靠起爆密度为 $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ ,泰安装药的能量为 $290\text{mJ}$ 。

在稳态爆轰波形成并继续沿着未反应炸药向前传播的同时,又沿着反应产物传播一个反向爆轰波。正是这个反向爆轰波使原来没有导通的第一对电探针导通,因此第一对电探针的导通时间比第三对电探针还要滞后,这个现象称为“回爆”。“回爆”是炸药燃烧转爆轰(DDT)过程中的一种常见现象,由此可以看出,半导体桥对初始装药的起爆应当是一个DDT过程。

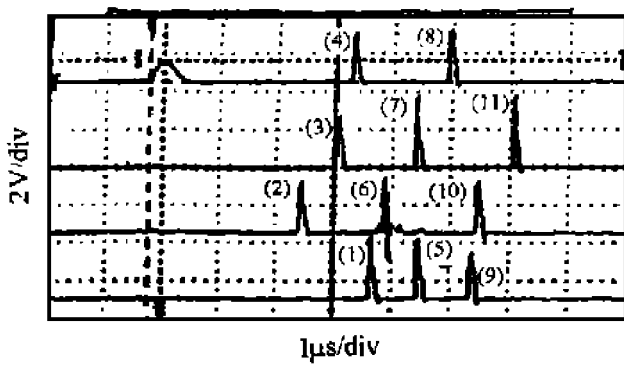


图 4 典型的示波器记录

Fig.4 Typical oscilloscope records

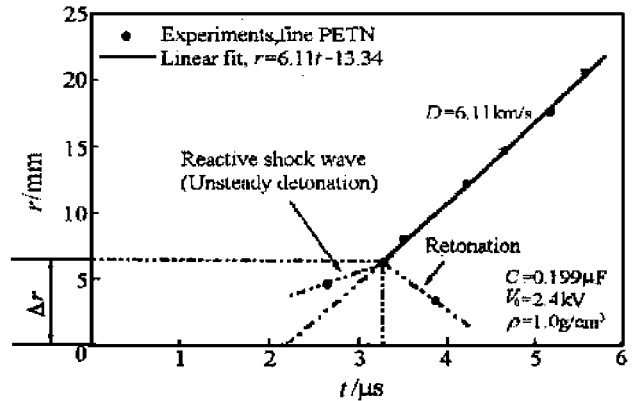


图 5 初始装药稳态爆轰的形成过程

Fig.5 Build up to detonation in original charge

### 4 结果讨论

D.A. Benson 等<sup>[1]</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,并且明确指出:如果电流脉冲的持续时间小于  $3\mu\text{s}$ ,则等离子体加热阶段就不能出现,因此不能点燃含能材料。而我们点火系统的放电周期不到  $1\mu\text{s}$ ,SCB 的爆炸时间约为  $200\text{ns}$ 。因此多数实验测得的电压曲线没有看到 SCB 爆炸存在的上述两个阶段,个别实验的电压波形虽有双峰出现,等离子体加热时间也不到  $100\text{ns}$ 。

M.C.Grubelich 等<sup>[3]</sup>用 SCB 点火装置起爆密度为  $1.67\text{g}/\text{cm}^3$  的高密度泰安炸药的结果列于表 2。当点火装置的储能从  $30\text{mJ}$  增加到  $500\text{mJ}$  时,作用时间仅从  $54\mu\text{s}$  减小到  $26\mu\text{s}$ ;保持点火装置的储能不变,装药长度略减  $3.2\text{mm}$ ,作用时间又增加到  $48\mu\text{s}$ 。由此可见要缩短点火装置的作用时间是非常困难的。虽然我们的半导体起爆装置对泰安炸药的引爆仍然是 DDT 过程,但是由于采用了快速放电的 CDU 点火系统,使得雷管的作用时间缩短到几个微秒,雷管装药的密度降到与电爆炸丝(EBW)雷管相同的水平,其效果是去掉了笨重的钢壳,使得这套新起爆装置具有了实际应用的可能。

表 2 本文的 SCB 实验参数与 Grubelich 等实验数据

Table 2 The comparison of our detonator's parameters with Grubelich's data

来源	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	装药尺寸 /(mm×mm)	壳体外径 /mm	$C/\mu\text{F}$	$V_0/\text{kV}$	$E_0/\text{mJ}$	$t/\mu\text{s}$
	1.67	$\phi 6 \times 25.4$	25.4	0.12	0.7	30	54
文献[3] <sup>1)</sup>	1.67	$\phi 6 \times 25.4$	25.4	1	1	500	26
	1.67	$\phi 6 \times 22.2$	25.4	0.25	2	500	48
本文 <sup>2)</sup>	1.0	$\phi 5.6 \times 14$	6.2	0.199	2.4	580	3.27

1)已将原文单位由英制换算为国际单位;2)两个 SCB 雷管并联。

## 参考文献:

- [1] Benson D A, Larsen M E, Renlund A M, et al. Semiconductor Bridge: A Plasma Generator for the Ignition of Explosives [J]. J Appl Phys, 1987, 62 (5): 1622—1632.
- [2] Bickes R W Jr. Semiconductor Bridge (SCB) Development Technology Transfer Symposium [R]. SAND86-2211 UC-13 (DE87005620), 1987.
- [3] Grubelich M C, Bickes R W Jr. Ignition and Deflagration-to-Detonation Characteristics of HMX and PETN Columns Employing SCB Ignition [R]. SAND95-2579C (DE96012949), 1996.

## The Experimental Research on the Initiation of Explosives by Semiconductor Bridge

WANG Zhi-ping<sup>1</sup>, Fei San-guo<sup>2</sup>, GONG Yan-qing<sup>1</sup>, HE Zhi<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>

(1. *Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,  
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China;*

2. *Institute of Electronic Engineering, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China*)

**Abstract:** The experimental results of the initiation of explosives by electrical exploding semiconductor bridge (SCB) were described in this paper. The initiated explosive is re-crystallized pure PETN filled in a copper shell with diameter 6.2mm and thickness 0.3mm; Its size is  $\phi 5.6\text{mm} \times 14\text{mm}$  and its density is  $1.0 \sim 1.3\text{g}/\text{cm}^3$ . The SCB detonator is exploded by the capacitor discharge unit (CDU); The detonator's total size is  $\phi 6.2\text{mm} \times 20\text{mm}$ . The energy required to initiate the PETN with density  $1.0\text{g}/\text{cm}^3$  reliably by this SCB detonator is about 290mJ. The function time (the time from the start of the capacitor discharge to steady detonation formation in the PETN) of this detonator is  $t \leq 3.27\mu\text{s}$ , and the distance run to detonation of the initiated explosive is 6.31mm. This SCB detonator can reliably initiate the inert PETN booster (PETN/wax=95/5) with density  $1.64\text{g}/\text{cm}^3$ .

**Key words:** semiconductor bridge; SCB detonator; shock initiation