

文章编号: 1006-9941(2008)05-0639-08

降低药剂 SCB 点火能量的研究进展

徐 禄, 张 琳, 冯红艳, 刘丽娟, 朱顺官

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 半导体桥(SCB)点火技术研究中, 点火能量的降低是一个重要的研究部分。影响 SCB 点火能量的因素很多, 本文主要从 SCB 结构、SCB 药剂点火机理、药剂装药等几个方面分析总结了降低药剂 SCB 点火能量的方法。认为, 从以下几个方面可以有效地降低 SCB 点火能量: (1) 小截面 SCB ($23 \mu\text{m}(L) \times 67 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$); (2) 斯蒂芬酸铅(LTNR)作为 SCB 点火药剂; (3) 药剂粒度在 $5 \mu\text{m}$ 以下; (4) 压药压力不小于 30 MPa ; (5) 掺加微米级的 Zr 粉; (6) 选用导电导热差的 G10 管壳装药。

关键词: 军事化学与烟火技术; 半导体桥(SCB); 点火技术; 药剂; 点火能量

中图分类号: TJ45

文献标识码: A

1 引言

半导体桥(SCB)是一种灵巧点火器, 它利用半导体膜(或金属-半导体复合膜)做发火元件, 进而发展为利用微电子集成技术, 使火工品具有逻辑功能, 具有抗射频、电磁和静电的能力, 可以用于复杂环境下使用的弹药和爆破作业^[1-2]。

降低药剂 SCB 点火能量, 不仅有利于实现半导体桥在武器弹药、火箭、卫星、飞船、飞行员救生以及民用工程爆破、火药动力等装置中的广泛应用, 更能够提高相同能量输入条件下装药作用的可靠性, 对此国内外进行了大量的研究。郝建春^[3]认为小截面的 SCB 可以实现药剂的低能量点火; David W. Ewick 等^[4]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; 杨振英等^[5]证实了桥的致密性(SCB 致密性)对点火的重要性; R. W. Bickes 等^[6]对比了不同材料管壳的药剂装药点火, 认为导热导电差的管壳可以在更低电容、更低能量下点火; 本课题组对不同起爆药 SCB 点火进行了研究, 确定了适合 SCB 点火的起爆药。然而, 与国外研究得到的最低点火能量相比, 国内现有条件下的 SCB 点火能量还高许多, 为进一步探索降低 SCB 点火能量的方法, 本文从 SCB 结构、SCB 药剂点火机理、药剂装药和放电电容四个方面综述了国内外近期的研究状况。

2 半导体桥(SCB)

2.1 SCB 等离子体产生过程

等离子体是由大量的带电粒子组成, 基本粒子是相互“自由”的带正负电的粒子(电子、离子)。SCB 在通以电流脉冲时, 硅材料因焦耳热(指电流流过电阻时产生的热)迅速气化, 形成等离子体。国内外研究主要是在 SCB 通电后, 分析 SCB 相变, 总结产生等离子体的过程。

Myung-II Park 等^[7]比较了尺寸为 $20 \mu\text{m}(L) \times 90 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$ 的 single-SCB 和 poly-SCB, 根据通电后桥上电压与光输出的特点, 分析了两种 SCB 的放电快慢特性。当输入能量为 7.8 mJ 时, single-SCB 产生两个电压峰的时间分别为 200 ns 和 500 ns , 同样 7.8 mJ 能量输入 poly-SCB 时, 产生电压两个峰的时间分别是: 250 ns 和 600 ns 。

Jong-Uk Kim 等^[8]对 poly-SCB ($20 \mu\text{m}(L) \times 90 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$) 在输入能量为 8 mJ 时分析电压、电流随时间的变化曲线, 得到电流和电压的最大值分别为 30 A 、 55 V ; 电压两个峰的出现时间分别为: 250 ns 和 600 ns ; 认为两个电压峰是由于硅的相变引起: 硅由固体变为液体或气体出现第一个峰; 由液体或气体变为高温的等离子体出现了第二个峰。

Kye-Nam Lee 等^[9]研究了 poly-SCB ($20 \mu\text{m}(L) \times 90 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$) 的电压、电阻随时间变化的特征, 认为硅熔化使第一次电压升高, 气化使第一次电压下降, 产生的等离子体使第二次电压升高。

D. A. Benson 等^[10]对 poly-SCB ($100 \mu\text{m}(L) \times 380 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$) 用高分辨率的电子照相机拍

收稿日期: 2008-04-18; 修回日期: 2008-07-17

作者简介: 徐禄(1985-), 男, 硕士, 研究方向为半导体桥点火技术。

e-mail: bingzhixl@163.com

通讯联系人: 朱顺官, e-mail: zhushg@mail.njust.edu.cn

摄其作用过程,并对相应的电压、时间曲线进行分析,认为开始电阻的缓慢上升是由于硅受热,下降是因为气化,再升高是由于产生了等离子体。

Jongdae Kim 等^[11]在电容 0.24 F、电压 5.0 V 时对 n 型 SOS-SCB ($47 \mu\text{m}(L) \times 140 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$) 放电,得到电流、电压、光对时间的曲线,进一步计算得到电阻、功率、能量对时间的曲线,分析认为电阻第一次下降是由于硅熔化,之后第一次小的上升是因为气化,第二次大的上升是因为产生的等离子体。

以上根据 SCB 两端电压、电流等随时间变化的曲线分析了 SCB 相变过程,一致认为电压(或电阻)二次峰出现时,等离子体形成。

2.2 SCB 结构

典型的 SCB 结构^[11]由“H”型 silicon-on-sapphire (SOS) 薄膜和连接外部电路的金属电极组成,如图 1 所示。其中, SOS 薄膜掺杂磷原子的浓度约为 10^{20} 个/ cm^3 ,称作 n^+ 型硅膜。金属电极是在 n^+ 型硅膜上沉积形成的铝电极。SCB 用长(L)、宽(W)、厚(t)来描述,长宽比决定 SCB 的电阻。

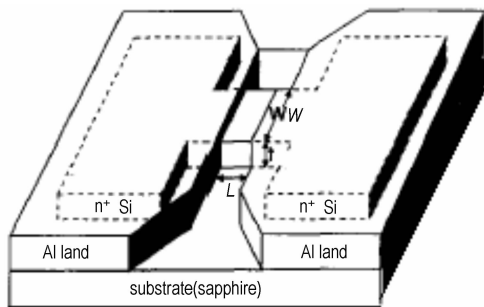


图 1 SCB 结构示意图^[11]

Fig. 1 The sketch map of SCB structure

David W. Ewick 等^[4]在桥质量不变的情况下,选择长宽比平均为 0.3,厚度分别为 $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1 \mu\text{m}$ 、 $2 \mu\text{m}$ 的桥,药剂选择球磨 BNCP,进行一系列点火试验(见表 1)。既然桥质量不变,厚度不同时,截面积(长 ×

宽)不同。厚度大的桥,单位面积上产生的等离子体多,对应等离子体密度高,点火可靠;厚度小的桥,等离子体密度小,点火的可靠性相对要低。此外,球磨 BNCP 粒度一定,而桥厚度不同,则桥的厚度与颗粒大小的比例也就不同,得出桥厚度与药剂粒度匹配对点火的重要性。

周彬等^[12]在 SCB 微对流模型的研究中得出结论:(1)桥厚度增加使等离子体密度增加,进而药剂表面温度显著升高,有利于点火;(2)硅蒸汽在气相中初始含量增大时有利于炸药点火;(3)等离子云半径减小,可使炸药表面温度显著升高。

郝建春^[3]通过药剂 KHTP ($\text{TiH}_{1.65}/\text{KClO}_4$) 的 SCB 点火,研究了 SCB 截面积与一定粒度 KHTP 全发火能量的关系(见表 2)。表 2 中热桥丝的点火能量大,点火时间长,这是因为热桥丝与 SCB 作用机理不同,热桥丝是热作用,SCB 是等离子体作用,后者作用更快。此外,对比热桥丝和 SCB 的点火,SCB 具有比热桥丝更好的点火特性。相比不同尺寸 SCB 的 KHTP 点火,截面积小,则全发火能量低,作用时间长。

表 1 桥(SCB)厚度对发火的影响^[4]

Table 1 Effect of the thickness of SCB film on ignition

bridge film thickness/ μm	relative firing energy	fire/no fire (X/O)	function time / μs
2	5.76	X	8.1
2	2.56	X	loss
2	2.56	X	6.2
2	1.44	X	9.8
2	1.00	X	10.7
2	0.64	O	-
1	2.56	X	6.8
1	1.44	X	9.6
1	1.00	X	8.8
1	0.64	X	11.2
1	0.36	O	-
0.5	1.44	O	-
0.5	1.96	O	-
0.5	2.56	O	-

表 2 热桥丝和不同尺寸 SCB 对 KHTP 的点火^[3]

Table 2 Ignition results of KHTP by bridge wire and SCB

	hot bridge wire	SCB32	SCB33	SCB34	SCB36
SCB size/ μm	diameter 48	width 380	width 140	width 100	width 67
SCB size/ μm	length 1000	length 100	length 47	length 35	length 23
firing energy/mJ	32.6 ± 1.0	2.72 ± 0.03	0.45 ± 0.18	0.31 ± 0.07	0.23 ± 0.04
1 ms no fire current/A	-	4.0	2.0	1.6	1.1
5 min no fire current/A	1.1	1.39 ± 0.03	1.3 ± 0.1	1.0 ± 0.1	-
static electric discharge test	pass	pass	pass	-	-
function time/ μs	3400	60	100	125	150

周蓉等^[13]从 SCB 结构上发现,兼有 Si 桥区倒圆点和 Ti、Al 金属导体倒圆点两大特点的 SCB,其点火能量可降到 3~5 mJ,作用时间可降到 5 μs 。

杨振英等^[5]对爆炸箔起爆技术与 SCB 雷管技术各自优点进行综合,形成不含起爆药和松装药的 SCB 冲击片起爆技术。在 SCB 芯片桥区多晶硅致密性及起爆实验中,SCB 芯片多晶硅为 10 μm 厚时,40 发试验几乎都不能起爆晶形六硝基芪(HNS-IV),通过扫描电镜观察,10 μm 厚的多晶硅致密性非常差。而多晶硅致密性较好的芯片,其厚度虽只有 2 μm ,却可以较好地起爆 HNS-IV。说明 SCB 芯片桥区多晶硅的致密性是影响起爆性能的重要因素。

Kye-Nam Lee 等^[9]认为就 SCB 本身而言,桥的大小(质量)决定了产生等离子体所需的能量水平。而等离子体才是能够使含能材料被起爆的关键。

综上所述,SCB 具有 Si 桥区倒圆点和 Ti、Al 金属导体倒圆点两大特点,同时减小 SCB 截面积可以降低药剂 SCB 点火能量;减小 SCB 的质量可以降低产生等离子体所需的能量水平;提高硅的致密性、改善多晶硅的厚度与药剂粒度的匹配性可以提高 SCB 点火的可靠性。

3 SCB 药剂点火机理

D. A. Benson 等^[10]实验得到 SCB 发火过程中电压、功率、能量的变化曲线,认为 SCB 的起爆机理为:一个快速上升的电流脉冲通过 SCB 时,首先使材料气化,进而加热形成硅等离子体,以致含能材料内部充满热硅蒸汽,并凝固在含能材料上,再由其凝固热使含能材料被加热到点火温度。

在分析 SCB 作用机理时,Jongdae Kim 等^[11]认为除了硅蒸汽的凝固热用来加热含能材料外,还需要考虑等离子体迅速扩散产生的冲击作用。但是 Jong-Uk Kim 等^[8]研究了 single-SCB 产生等离子体的电压、电阻随时间变化的特征,以及等离子体随时间变化的照片,得到等离子体横向和纵向膨胀速度分别是 $1.15 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.55 \times 10^5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。所以认为等离子体迅速扩散产生的冲击不足以实现点火。

然而,胡建书等^[14]解释 SCB 的作用机理为:一方面,在高温下,重掺杂的 SCB 容易形成高温等离子体放电,产生高能冲击波引爆炸药;另一方面,硅材料气化后形成的蒸汽在加热的过程中不断扩散到炸药颗粒的空隙中,并凝结在其表面使炸药的温升升高。因此,SCB 的药剂点火既有高能冲击波作用又有加热作用。

此外,D. A. Benson 等^[10]通过试验研究了 SCB 点火可能的热转换机理:(1)热传导,(2)热辐射,(3)振动引爆,(4)光激发引爆,(5)桥气化产物通过热对流渗透到炸药中实现点火。通过试验数据和理论计算排除了前四种作用的可能,最终确定了 SCB 只有在形成后期放电(LTD)时才可以形成等离子体,进而实现药剂点火,并且 SCB 的点火能量是输入电流的脉冲时间的函数,脉冲时间越短,点火能量越低。

David W. Ewick^[4]在桥质量不变的情况下,对 0.5 μm 、1 μm 、2 μm 三种厚度的 SCB 进行了“裸桥”试验,结果发现它们均能在基本相等的能量水平下转变为等离子态。对同样的 SCB(材料、质量、厚度和形状均相同)通电得到功率-时间特性曲线,在输入电能足够大如 35 V 条件下,在特征曲线上出现两个峰,即硅熔化造成的峰和等离子体造成的峰;但在输入电能不够大如 30 V 条件下,特征曲线上只出现了一个峰,即硅熔化造成的峰。由此认为,SCB 在输入电能足够大时,等离子体使药剂点火;SCB 在输入电能较小时,熔化硅在药剂表面的冷凝放热,使药剂点火。

本课题组研究的 SCB 尺寸为 100 μm (L) \times 400 μm (W) \times 2 μm (t),在放电电容 68 μF 的 LTNR 点火实验中,电压 15 V 左右时有电压二次峰(见图 2),即出现等离子体;12 V 左右时没有电压二次峰(见图 3),即没有产生等离子体。由此认为:较高电压下,等离子体使药剂点火;较低电压时,没有等离子体出现,电流在桥上的焦耳热使药剂点火。

Jongdae Kim 等^[8]认为当 SCB 通过的电流密度不小于 $10^6 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 时,产生的等离子体可以对炸药实现点火。

D. A. Benson^[10]分析了单一的等离子体热对流起爆机理;Jongdae Kim^[5]和 Jong-Uk Kim^[6]分别分析了等离子体膨胀对药剂的简单冲击作用;胡建书^[14]分析了等离子体放电形成的高能冲击波和微对流理论。结合本课题组的实验结论,推测 SCB 作用机理为:在输入电能足够高(68 μF , 15 V)时,SCB 点火是靠等离子体与药剂作用,或产生高能冲击波使药剂引爆;在输入电能不够高(68 μF , 12 V)时,SCB 产生的低能等离子体或热的硅蒸汽,不断扩散到药剂颗粒的空隙中,并凝结在表面使药剂温度升高,最终实现点火。

4 药剂装药

作为 SCB 点火技术,其所用药剂主要为火工药剂,有单质和混合药剂之分。单质药剂又以弱起爆药为首

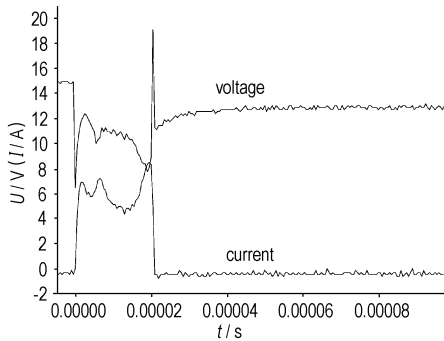


图2 电压15 V时电压、电流信号图

Fig. 2 Voltage, current signals under 15 V input

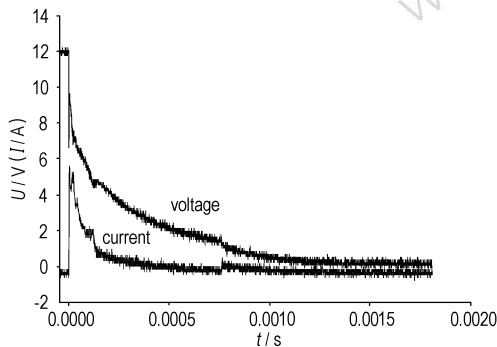


图3 电压12 V时电压、电流信号图

Fig. 3 Voltage, current signals under 12 V input

选,混合药剂有 Zr 系和 B 系点火药代表。由于药剂自身特性的不同,它们对 SCB 作用的敏感程度肯定不同。而在装药形式上,有蘸药(或涂药)和压药两种方式,根据文献[4]所述,桥-界面接触特性对点火可靠性有着重大影响,其中包括了药剂粒度、装药密度和约束状况。本节主要总结这些因素对降低点火能量的影响。

4.1 药剂

D. A. Benson 等^[6]进行了烟火剂、铝热剂和金属互化物的 SCB 点火,发现 Al/CuO 可以在酯醛树脂制成的管壳、压药密度 $2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、放电电容 $1000 \mu\text{F}$ 、电压 4.5 V 时,以 2.0 mJ 的能量实现点火。B/BaCrO₄、Zr/BaCrO₄、Zr/Fe₂O₃、Zr/KClO₄ 都可以在钢制管壳、压药密度 $2.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、以 $20 \mu\text{F}$ 电容、 2.8 V 电压实现点火。

Dirk Cegiël 等^[15]发现 Zr/KClO₄/粘合剂的 SCB 点火低输入能量 ($< 1 \text{ mJ}$) 下的作用时间只有几十微秒 ($< 40 \mu\text{s}$)。点火器的作用时间从 $1000 \mu\text{s}$ 减少到了 $300 \mu\text{s}$ (相比热丝点火)。

王治平等^[16]用半导体桥点火装置点燃烟火剂 THKP (TiH_{1.65}/KClO₄),消耗的能量仅几个毫焦,作用时间只需数十微秒。

上述研究都已经在较小能量下实现了点火,但是,对起爆药的 SCB 点火研究还很少,在含能材料中,起爆药相对其他类药剂敏感度更高,更容易被点火引爆,所以认为起爆药应该可以在更低的能量输入下实现 SCB 点火。

本课题组在起爆药 SCB 点火试验中,选用了斯蒂芬酸铅(LTNR)、新型起爆药硝酸胍镍(NHN)、新型起爆药叠氮胍镍(NHA)^[17-19]、叠氮化铅(LA)四种起爆药;选用了铝制管壳;SCB 为 $100 \mu\text{m} (L) \times 400 \mu\text{m} (W) \times 2 \mu\text{m} (t)$ 的 n 型重掺杂 poly-SCB。上述几种药剂最低点火能量结果见表 3。从表 3 可见,火焰感和静电火花感度都比较高的 LTNR 点火能量最低,其次是同样火焰感度高而静电感度低的 NHA,最后是各种感度都低的 NHN 和机械感度高的 LA。因此,选择火焰感和静电火花感度高的起爆药 LTNR,有利于实现低能量下的 SCB 点火。

表 3 300 目下、20 MPa、47 μF 不同起爆药 SCB 最低点火能量
Table 3 The lowest ignition energy of different primary explosives under 300 mesh sieve at 20 MPa and 47 μF

LA	NHN	LTNR	NHA
high mechanical sensitivity	low sensitivity	high flame sensitivity and high static spark sensitivity	high flame sensitivity and low static spark sensitivity
no fire	14.50 mJ	1.07 mJ	1.65 mJ

至此,关于 SCB 点火的药剂,国外最低点火能量是对 B/BaCrO₄、Zr/BaCrO₄、Zr/Fe₂O₃、Zr/KClO₄ 的 SCB 点火,最小 0.078 mJ ($20 \mu\text{F}$ 电容、 2.8 V 电压);本课题组在起爆药的 SCB 点火中,最低点火能量是对 LTNR 的点火,最低达到 1.07 mJ 。与国外相比,本课题组点火能量高的原因是:选用的 SCB 质量较大,桥本身发火需要的能量水平较高;SCB 厚度均为 $2 \mu\text{m}$,但药剂颗粒度(最细过 300 目筛, $35 \mu\text{m}$ 左右)比国外 $5 \mu\text{m}$ 大许多,比表面积相对要小,导致无法有效利用等离子体。

4.2 药剂粒度

D. A. Benson 等^[10]在用于炸药点火的 SCB 研究中发现:给 SCB 输入一个电流脉冲,产生的高温等离子体对粒状炸药的作用很有效。

David W. Ewick 等^[4]在较小压药压力下,用 $2 \mu\text{m}$ 厚的 SCB 对糊精叠氮化铅、RD1333 叠氮化铅、球磨 DXN-1、球磨 DDNP、Zr/KClO₄ 点火比较(见表 4)。由此

发现,即使被公认为敏感起爆药的叠氮化铅,在较小压药压力下采用相对较低能量的 SCB 也很难被起爆。因此,颗粒大小是影响 SCB 点火的关键参数。此外,David W. Ewick 等通过 30 V 和 35 V 时电压二次峰情况判断是否产生等离子体,进而得出桥自身的全发火能量 ($<100 \mu\text{J}$)。综上认为,选用合适的起爆药以及与 SCB 厚度匹配的起爆药颗粒,SCB 的点火作用很可靠,所用的能量基本上就是 SCB 桥自身的全发火能量。

表 4 药剂的 SCB 点火感度^[4]

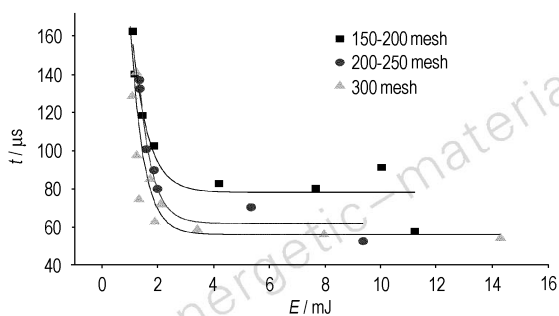
Table 4 Sensitiveness of several agents to the SCB ignition

energetic material	approximate particle size/ μm	relative energy
dextrinated LA	25	no fire
RD1333 LA	35	3.00
DXN-1	50 - 100	4.00
ball-milled DXN-1	<5	1.00
DDNP	50 - 100	no fire
ball-milled DDNP	<15	no fire
Zr/KClO ₄	<5	1.44
Zr/KClO ₄ (slurry)	<5	5.76

Note: Relative energy is the ratio of each fire energy to the lowest energy.

祝明水等^[20]在关于降低 SCB 发火能量的理论探讨中分析了 SCB 的截面大小的设计应以与装药颗粒的匹配为主。

王文^[21]在半导体桥等离子体点火特性研究试验中,固定压力(10 MPa),将不同粒度下 NHN 的点火能量对点火时间作曲线得到图 4,分析得到:同样能量输入,粒度越小(300 目下)点火越快。

图 4 68 μF 、10 MPa 不同粒径 NHN 点火能量-点火时间关系^[21]Fig. 4 The $E-t$ curves of NHN ignition in different granulate sizes with 68 μF at 10 MPa

总之,SCB 的点火适宜选用粒状药剂,当 SCB 厚度为 2 μm 时,选择药剂粒度大小在 5 μm 左右;其他厚度的 SCB 选用相匹配粒度的药剂,这样可以有效地降低点火能量,提高相同能量输入下药剂作用的可靠性。

4.3 压药压力

David W. Ewick 等^[4]在低能 SCB 装置桥/药剂界面的优化研究中发现,在结构适宜时,可在低能水平下实现对药剂的点火,而且基本上不会受到压药压力大小的影响。但是在起爆药一定时,如对球磨 BNCP(粒径相对小)和重结晶的细粒 BNCP(粒径相对大)的 SCB 点火试验中,球磨 BNCP 在低压药压力下可以实现可靠点火,而重结晶 BNCP 必须在较高压药压力下才能实现点火(见表 5)。说明在同样的 SCB 点火装置下,颗粒较大的药剂必须在较高压力下才能可靠点火,此时压药压力对点火的作用不可忽略。

表 5 不同压药压力点火实验^[4]

Table 5 Ignition tests under different compaction pressures of charge

particle size	compaction pressure	relative energy	function time/ μs
ball-milled	low	5.76	8.1
ball-milled	low	2.56	6.2
ball-milled	low	1.44	9.8
ball-milled	low	1.00	1.07
fine	low	16.00	no fire
fine	medium	16.00	5.3
fine	medium	5.76	5.1
fine	medium	2.56	no fire
fine	high	5.76	5.5
fine	high	2.44	5.7

周彬等^[12]在 SCB 微对流作用的研究中得出结论:空隙率增大,有利于炸药着火,这是由于空隙率增大,填充的炸药的透气性增强,气体流动阻力减小,对流传质、传热系数增大,高温高压气体迅速向炸药中扩散,产生强对流传质传热,使炸药温度较高。

王文^[21]在半导体桥等离子体点火特性研究试验中,相同粒径(150~200 目),不同压药压力 NHN 的点火能量对点火时间作曲线得到图 5,分析得到:同样能量输入,压力越大(30 MPa)点火越快。

压药压力影响装药密度和装药空隙率,进而影响等离子体对药剂的作用,所以可以通过改变压药压力调整空隙率来改善点火条件。

4.4 管壳

圣迪亚国家实验室 D. A. Benson 等^[6]在用 SCB 对烟火剂、金属-燃料/金属-氧化剂混合物(铝热剂)和放热的合金混合剂(金属间互化物)进行点火的研究中,发现平均全发火阈值明显受装药管壳的热导率的影响。如用黄铜装药管壳全发火装置电容器的充电电压

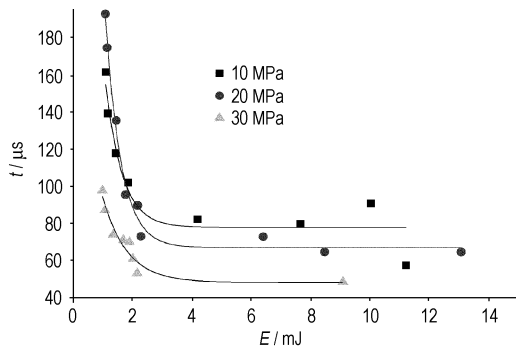


图 5 150~200 目 NHN、68 μF 不同压力
点火能量-点火时间关系^[21]

Fig. 5 The $E-t$ curves of NHN ignition under different
pressing pressures with 150-200 mesh sieve at 68 μF

50 V 时,要求 30.1 μF 电容器。但 G10 材料管壳(G10 是一种非导电,纤维-玻璃环氧树脂复合材料)全发火电容器是 2.0 μF 。

由此,管壳在点火试验中作用明显,管壳的导热性非常重要。此外,由于 SCB 等离子体中高温、高速的带电粒子,管壳的导电性也会产生一定的影响。

4.5 掺杂物

等离子体中存在电离出来的自由电子和带电离子,可以从静电的角度进行敏化。微米级锆粉与许多氧化剂混合药剂的静电感度是非常敏感的,最小 50% 发火能量在 10 μJ 以下^[22]。所以,可以考虑掺杂一定比例的微米级锆粉,降低 SCB 点火能量。

David W. Ewick 等^[4]在研究中发现:药剂热导率高有助于热的传递,却会降低药剂对点火的敏感性,尤其是处在恒流发火状态下。如果将较好热导性的材料添加到药剂中,那么就必须考虑药剂浓度的降低是否会带来负面影响。而且,在向药剂中添加任何物质时,都要考虑均一性问题。

总之,选用 LTNR 作为点火药剂、药剂粒度不大于 5 μm 、压药压力不小于 30 MPa、导热导电性差的管壳和静电感度高的掺杂物如:微米级锆粉等,可以降低药剂 SCB 点火能量。

5 放电电容

能量输入 SCB 的形式,会影响到 SCB 对药剂的点火性能。放电电容是放电电路的主要元件,王文^[21]对 200~250 目的 LTNR 在电压 39 V、压力 20 MPa 条件下 SCB 点火,得到 10 μF 、22 μF 、47 μF 、68 μF 、100 μF 放电电容下的点火时间(见图 6),随着电容增大,点火

时间变短,68 μF 的点火时间最短,100 μF 时点火时间突然增长。本课题组对 300 目下 NHA 在压药压力 60 MPa,以 22 μF 、47 μF 、68 μF 三个放电电容点火,作电压-点火时间曲线(见图 7),发现 47 μF 点火最快。由此说明,药剂与放电电容的匹配,对药剂 SCB 的点火性能有重要影响,每种药剂都有相匹配的放电电容,过大或过小都不利于药剂的点火。

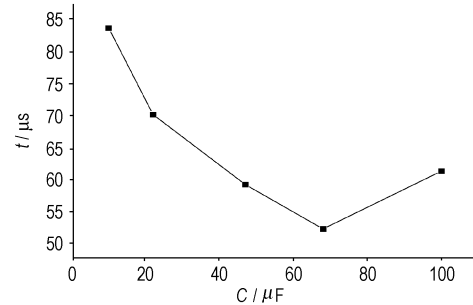


图 6 39 V 电压下不同电容的点火时间^[21]

Fig. 6 The ignition time duration of different capacitances
under 39 V^[21]

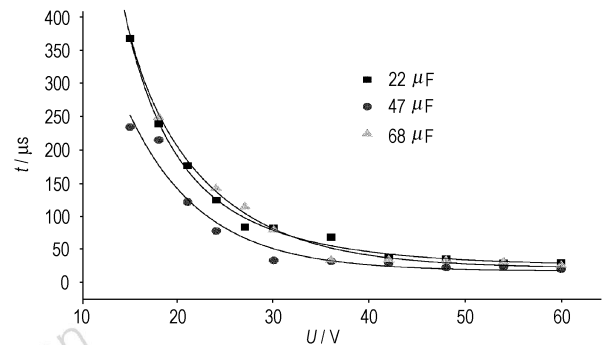


图 7 300 目下、60MPa 不同电容电压-点火时间

Fig. 7 The $v-t$ curves of LTNR ignition under different
capacitances with 300 mesh sieve at 60 MPa

6 展 望

综上所述,国外对降低 SCB 药剂点火能量进行了大量研究,最低点火能量达到 0.078 mJ,但国内在现有条件下的点火能量与国外相比还有很大差距,本课题组对 LTNR 的 SCB 点火最低能量达到 1.07 mJ。为此,进一步降低药剂 SCB 点火能量,不仅有利于 SCB 在武器弹药、火箭、卫星、飞船等得到更广泛的应用,而且可以提高同样能量输入下药剂作用的可靠性。从 SCB 药剂点火的过程出发,今后降低点火能量的实验研究可以从 SCB 结构、SCB 药剂点火机理、药剂装药和放电电容四方面进行,具体如下:(1)选用小尺寸 SCB 如:2 $\mu\text{m}(t) \times 23 \mu\text{m}(L) \times 67 \mu\text{m}(W)$,保证 SCB 可以在小

能量下激发;(2)相比其他药剂,LTNR 作为 SCB 点火药剂更能实现低能点火;(3)为使药剂粒度与 SCB 厚度(2 μm)匹配,控制药剂的粒度在 5 μm 以下;(4)压药压力不小于 30 MPa,使药剂与 SCB 截面良好接触;(5)掺杂 Zr 粉提高静电火花感度;(6)热导率低、导电性低的 G10 管壳装药,减少等离子能量的损失;(7)针对药剂选择合适的放电电容,使点火时间短,点火能量低,如 NHA 在 47 μF 为最佳点火电容。

参考文献:

- [1] Bickes R W, Grubelich M C, Merson J A, et al. An overview of semiconductor bridge, SCB, applications at Sandia National Laboratories [R]. 95-2549: 1995.
- [2] Bickes Jr. Smart explosive ignitor: USP 4843964 [P], 1989.
- [3] 郝建春. 使用半导体桥(SCB)以极低的能量点燃烟火剂[J]. 爆破器材, 1993, 23(2): 34-37.
HAO Jian-chun. Using semi-conductor bridge to ignite pyrotechnical composition in a extreme low energy [J]. *Explosive Materials*, 1993, 23(2): 34-37.
- [4] Ewick David W, Walsh Brendan M. Optimization of the bridge/powder interface for a low energy SCB device [R]. 97-2831, 1997.
- [5] 杨振英, 杨树彬, 王新才, 等. 半导体桥(SCB)冲击片起爆技术研究[J]. 含能材料, 2007, 15(2): 131-133.
YANG Zhen-ying, YANG Shu-bin, WANG Xin-cai, et al. Study on the SCB slapper initiating technique [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 131-133.
- [6] Benson D A, Bickes Jr, Robert W, et al. Tungsten bridge for the low energy ignition of explosive and energetic materials: USP 4976200 [P], 1990.
- [7] Park Myung-II, Choo Hyo-Tae, Yoon Suk-Hwan, et al. 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.
- [8] Kim Jong-Uk, Park Chong-Ook, Park Myung-II, et al. Characteristics of semiconductor bridge (SCB) plasma generated in micro-electromechanical system (MEMS) [J]. *Physics Letters A*, 2002, 305: 413-418.
- [9] Lee Kye-Nam, Park Myung-II, Choi Sung-Ho, et al. Characteristics of plasma generated by polysilicon semiconductor bridge (SCB) [J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, 96: 252-257.
- [10] Benson D A, Larsen M E, Renlund A M, et al. Semiconductor bridge (SCB): A plasma generator for the ignition of explosive [J]. *J Appl Phys*, 1987, 62: 1622-1632.
- [11] Kim Jongdae, Schamiloglu Edl, Jungling Kenneth C, et al. Temporal measurement of plasma density variations above a semiconductor bridge (SCB) [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1995, 44: 843-846.
- [12] 周彬, 徐振相, 刘西广, 等. SCB 对粒状炸药的微对流传热数值模拟[J]. 南京理工大学学报, 1996, 20(6): 493-496.
ZHOU Bin, XU Zhen-xiang, LIU Xi-guang, et al. Numerical simulation of thermal micro-convection to granular explosives initiation by SCB [J]. *Journal of Nanjing University of Science & Technology*, 1996, 20(6): 493-496.
- [13] 周蓉, 岳素格, 秦卉芊, 等. 半导体桥(SCB)的研究[J]. 半导体学报, 1998, 19: 857-860.
ZHOU Rong, YUE Su-ge, QIN Hui-qian, et al. Research on the semiconductor bridge (SCB) [J]. *Journal of Semi-Conductor*, 1998 (19): 857-860.
- [14] 胡建书, 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: 4-6.
HU Jian-shu, JIAO Qing-jie. The electro-heat character research of "V" film semi-conductor bridge under a constant current [J]. *Mining Blasting*, 2005 (4): 4-6.
- [15] Cegielski Dirk, Krone Uwe. Method to produce pyrotechnical igniting mixtures: USP6783616 [P], 2004.
- [16] 王治平, 费三国, 龚晏青, 等. 半导体桥起爆炸药的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 359-363.
WANG Zhi-ping, FEI San-guo, GONG Yan-qing, et al. Experimental research on the initiation of explosives by SCB [J]. *Explosion and Shock*, 2000, 20(4): 359-363.
- [17] 刘瞻, 朱顺官. 叠氮胍镍(II)的化合与结构[J]. 火工品, 2000(2): 16-19.
LIU Zhan, ZHU Shun-guan. Synthesis and its structure of nickel hydrazine azide (II) [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2000(2): 16-19.
- [18] 吴幼成, 朱顺官, 宋敬埔. 两种工业雷管中有应用前景的起爆药剂[J]. 爆破器材, 1996, 25(2): 18-21.
WU You-cheng, ZHU Shun-guan, SONG Jing-pu. Two kinds of primary explosives with application prospects in commercial detonator [J]. *Explosive Materials*, 1996, 25(2): 18-21.
- [19] 朱顺官, 徐大伟, 曹仕瑾, 等. 高威力配合物起爆药: 叠氮胍镍 [J]. 爆破器材, 2005, 34(5): 17-19.
ZHU Shun-guan, XU Da-wei, CAO Shi-jin, et al. High power coordination compound primary explosive: Nickel hydrazine azide [J]. *Explosive Materials*, 2005, 34(5): 17-19.
- [20] 祝明水, 何碧, 费三国, 等. 关于降低 SCB 发火能量的理论探讨[J]. 火工品, 2007(1): 35-37.
ZHU Ming-shui, HE Bi, FEI San-guo, et al. The theoretical research on the reducing firing energy of SCB [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2007(1): 35-37.
- [21] 王文. 半导体桥等离子体点火特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
WANG Wen. The ignition characteristics research of plasma generated by semi-conductor bridge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2007.
- [22] 黑田英司, 永石俊幸. Zr 粉在各种氧化剂混合药剂的静电感度 [J]. 火工情报, 1997(1): 82-88.
黒田英書, 幸いなことに. Static electrical sensitivity of powder Zr mixing with various oxidizers [J]. *Pyrotechnics Information*, 1997(1): 82-88.

Review on Decreasing the Ignition Energy by Semi-Conductor Bridge

XU Lu, ZHANG Lin, FENG Hong-yan, LIU Li-juan, ZHU Shun-guan

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

Abstract: Several effective routes to decrease the ignition energy of semi-conductor bridge (SCB) were summarized based on the analysis of the characteristics of SCB, the ignition mechanism, the properties of charge and the charge conditions. These routes will be: (1) choosing small size SCB ($23 \mu\text{m}(L) \times 67 \mu\text{m}(W) \times 2 \mu\text{m}(t)$); (2) choosing lead 2,4,6-trinitroresorcinate (LTNR) as ignition charge of SCB; (3) controlling the size of granule below $5 \mu\text{m}$; (4) pressing the charge at a pressure above 30 MPa; (5) adding the fine Zr powder; (6) using G10 as the shell material of charge.

Key words: military chemistry and pyrotechnic technology; semi-conductor bridge (SCB); ignition technique; reagent; ignition energy

(上接 587 页)

Electric Spray Ionization Mass Spectrum of Tetrazene

LIU Jun-wei, ZHANG Jian-guo, ZHANG Dan-dan, ZHANG Tong-lai, YANG Li

(School of Aerospace Science and Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Tetrazene was analyzed by electric spray ionization mass spectrometry (ESI-MS) to study its fragmentation pathways and mechanism. Fragments and structurally informative spectra of tetrazene were obtained. Results show that the atom N is most likely to dissociate in neutral fragment forms of NH_2 , HCN, HCN_2 , N_3 and N_4 , while the fragmentation mechanisms are the cleavage of C—N and N—N and the rearrangement. The relatively strong peak at m/z 68.9 indicates that tetrazole cycle is stable in the molecule. The presence of strong peaks at m/z 68.9 and m/z 95.8 suggests that the cleavages of C(5)—N(1) bond and N(2)—N(3) bond are ready to form tetrazole radical, amino-guanidiny radical and molecular nitrogen.

Key words: analytical chemistry; tetrazene; electrospray ionization mass spectrometry; fragmentation mechanism

(上接 591 页)

- ZHANG Zeng-fu, LUO Guo-hua, FAN Zhuang-jun, et al. Complex permittivity and permeability spectra of different kinds of carbon nanotubes [J]. *Acta Phys-Chim Sin*, 2006, 22(3): 296–300.
- [10] 王红霞, 刘代志, 翟为刚. 不同碳纳米材料的微波衰减性能研究 [J]. *含能材料*, 2007, 15(2): 148–151.
- WANG Hong-xia, LIU Dai-zhi, ZHAI Wei-gang. Studies on microwave attenuation performance of different carbon nano-materials [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 148–151.
- [11] 朱长纯, 邓宁. 碳纳米管薄膜对电磁波的吸收特性的研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2000, 34(12): 102–104.
- ZHU Chang-chun, DENG Ning. Electro-magnetic wave absorption characteristics of carbon nano-tube films [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2000, 34(12): 102–104.
- [12] 张立德, 牟季美. *纳米材料和纳米结构* [M]. 北京: 科学出版社, 2001.

Infrared Images Shielded Characteristics of Carbon Nano-Materials

WANG Hong-xia, LIU Dai-zhi, SONG Zi-biao

(Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710025, China)

Abstract: Carbon nano-materials is a new kind of materials with good qualities such as small dimension, light weight, good characteristic of electrical conductivity and electromagnetic wave absorption etc. To explore the applications of carbon nano-materials on interference the imaging IR guidance weapons, using large smoke chamber, the shielded extinction performance for IR images of carbon nanotubes, carbon nanofibers, nano-graphite were tested in the wavelength range of 8–12 μm . Results show that carbon nano-materials smoke has excellent far infrared extinction capacity, the minimum and the maximum of far infrared extinction coefficients are $0.8884 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ and $2.6226 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ respectively.

Key words: inorganic nonmetallic materials; infrared extinction; infrared smoke; nano-graphite; carbon nanotube; carbon nanofiber; smoke interference