

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.01.005

# 半导体桥火工品的防静电与防射频设计\*

袁玉红<sup>①②</sup> 李军福<sup>③</sup> 周彬<sup>①</sup> 黄寅生<sup>①</sup>

①南京理工大学化学与化工学院(江苏南京,210094)

②安徽红星机电科技股份有限公司(安徽合肥,231135)

③南京军事代表局驻蚌埠地区军事代表室(安徽蚌埠,233000)

[摘要] 为提高半导体桥(SCB)火工品的防静电与防射频的双防能力,将静电加固器件瞬态电压抑制(TVS)二极管和射频加固器件负温度系数(NTC)热敏电阻同时集成入SCB火工品的结构中,并研究了上述组合器件对SCB火工品发火性能和抗电磁性能的影响规律。结果表明:集成防护器件后,SCB火工品的安全电流从1.2 A升至1.5 A;抗静电性能满足500 pF/500 Ω/25 kV条件下不发火;在22 μF/16 V的电容发火条件下,集成SCB火工品的平均爆发时间较SCB火工品增加了1.77 μs。因此,该组合型防护器件可以在不改变SCB发火性能的基础上有效提高SCB的抗静电和抗射频的能力。

[关键词] 火工品;电磁防护;集成半导体桥;瞬态电压抑制二极管;射频加固器件;负温度系数热敏电阻

[分类号] TJ45

## Anti-Static and Anti-RF Design of the Semiconductor Bridge Initiator

YUAN Yuhong<sup>①②</sup>, LI Junfu<sup>③</sup>, ZHOU Bin<sup>①</sup>, HUANG Yinsheng<sup>①</sup>

①School of Chemistry and Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

②Anhui Hongxing Electrical Polytron Technologies Co., Ltd. (Anhui Hefei, 231135)

③Military Representative Office in Bengbu Region, Nanjing Military Representative Bureau (Anhui Bengbu, 233000)

[ABSTRACT] In order to improve the anti-static and anti-RF capability of semiconductor bridge (SCB), transient voltage suppression (TVS) diodes (electrostatic reinforcement device) and negative temperature coefficient (NTC) thermistors (RF reinforced device) were integrated into the SCB initiator. The influence of these combined devices on the ignition performance and electromagnetic resistance of the integrated SCB was studied. The results show that, after integrating protective devices, the safety current of SCB increases from 1.2 A to 1.5 A, and the anti-static performance meets the requirement of no ignition under 500 pF/500 Ω/25 kV conditions. Under the condition of 22 μF/16 V, the average explosion time of integrated SCB increases by 1.77 μs compared to that of SCB. Therefore, this combined protective device can effectively improve the anti-static and anti-RF capabilities of SCB without changing its ignition performance.

[KEYWORDS] initiator; electromagnetic protection; integrated semiconductor bridge; transient voltage suppression diode; RF reinforced device; negative temperature coefficient thermistor

## 0 引言

半导体桥(semiconductor bridge, SCB)火工品是指利用半导体膜或金属-半导体复合膜作为发火元件的火工品<sup>[1]</sup>,具有可靠性高、成本低及安全性高等特点。近年来,战场信息化程度越来越高,无线电设备、电磁脉冲武器、雷达等使得战场电磁环境日

趋复杂<sup>[2]</sup>。研究表明,武器装备中的电火工品通过电路引线可拾取空间电磁环境中的能量,引起武器装备的意外起爆、瞎火或性能降低,从而造成非常严重的后果。

为提高现有SCB火工品的防电磁干扰性能,研究人员做了大量工作。

针对静电环境,将具有抗静电能力的二极管并联到火工品脚-脚或脚-壳间是一种有效的静电加固

\* 收稿日期:2023-05-17

第一作者:袁玉红(1985—),男,博士研究生,高级工程师,主要从事钝感起爆器材的研究设计。E-mail:28891855@qq.com

通信作者:周彬(1971—),女,副研究员,主要从事钝感电火工品的设计研究。E-mail:zhoubinmst@126.com

方法。二极管可以采用齐纳二极管<sup>[3-4]</sup>、压敏电阻<sup>[5]</sup>和瞬态电压抑制(transient voltage suppressor, TVS)二极管<sup>[6-7]</sup>等。防护原理为:二极管并联于被保护器件;常态下的二极管处于开路状态;当二极管两端经受瞬间高能量冲击时,二极管会瞬间响应,由高阻值开路状态转为低阻值通路状态,此时,形成一个泄放通道,使得大量能量被旁路,从而实现被保护器件的安全。

针对射频环境,当火工品暴露在射频环境中时,电磁能量有可能从火工品的脚线上耦合进入火工品中,在火工品中产生热量,从而引起火工品的意外发火<sup>[8]</sup>。射频防护方法主要是采用滤波器<sup>[9]</sup>、电容<sup>[7]</sup>、铁氧体磁珠<sup>[10]</sup>和负温度系数(negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻。作为最早用于火工品电磁加固的器件,滤波器能够有效提高火工品的抗电磁能力,但是尺寸限制了其应用。King等<sup>[3]</sup>在SCB火工品两端并联电容,利用电容在高射频环境下的低阻抗效应实现SCB火工品的电磁加固。陈飞<sup>[11]</sup>将NTC热敏电阻用于SCB火工品的射频加固,试验发现,当受到射频能量作用时,SCB火工品温度升高,具有负温度系数特性的NTC热敏电阻的大小会迅速减小,此时SCB火工品中的大部分感应电流被热敏电阻分走,从而抑制了SCB火工品温度的进一步上升。

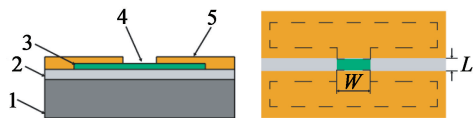
从国内外各种电磁加固方式可以看出,目前对SCB的防护研究局限于对射频或静电的单一防护,且只研究和证明了器件对SCB的防护效果,并没有公开报道具有实用性的能保持原有SCB火工品体积和形状不发生明显变化的器件集成方法。

本文中,为了同时提高SCB火工品对静电、射频和杂散电流的防护能力,同时使用TVS二极管和NTC热敏电阻对SCB火工品进行防护,并对组合器件防护后SCB火工品的发火性能和电磁安全性能进行了研究。

## 1 试验样品

SCB芯片以硅衬底为基底,表面有一层二氧化硅绝缘层,表层为磷掺杂形成的多晶硅层,多晶硅层上为淀积金属电极层;桥区尺寸由电极层和多晶硅层共同决定。制备好的芯片电阻范围为 $(1.00 \pm 0.15) \Omega$ ,芯片示意图如图1所示。

将制备好的SCB芯片封装入带有凹槽的陶瓷塞中。陶瓷塞外径为6 mm,内部有凹槽,凹槽两边



1 - 硅基底;2 - 二氧化硅;3 - 多晶硅;4 - 桥区;5 - 电极。

图1 SCB芯片示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SCB chip

为间距一定的金属插针。封装过程大致如下:首先,将SCB芯片粘帖在陶瓷塞凹槽内;接着,采用超声键合的方式将SCB芯片2个电极分别与陶瓷塞2个金属电极相连;然后,将NTC热敏电阻和TVS二极管通过热固胶封装在陶瓷塞底部凹槽内,并使用导电胶与陶瓷金属电极连接,使得上述2种器件与SCB芯片形成并联结构;最后,将陶瓷塞装入外径约为8 mm的铝壳中。在SCB芯片表面涂覆斯蒂芬酸铅(LTNR)作为初级点火药,并使用 $\text{KClO}_4$ 药剂模拟较钝感的次级点火药。将带有SCB芯片和LTNR的陶瓷塞和 $\text{KClO}_4$ 药剂依次放入铝制管壳,并使用油压机进行压药,压药质量为100 mg,压药压力为30 MPa。封装过程如图2所示。

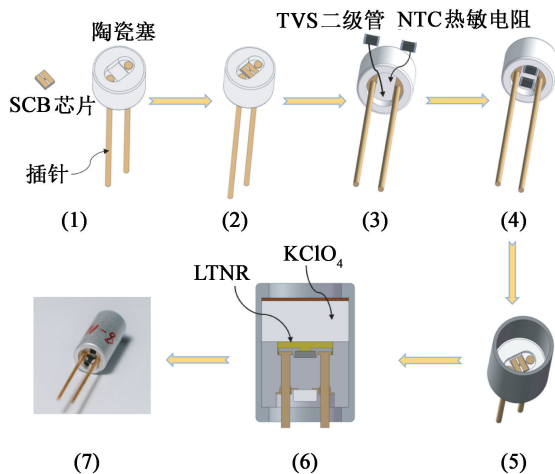


图2 集成型SCB火工品制备过程

Fig. 2 Fabrication process of the integrated SCB initiator

样品等效电路如图3所示。

等效电路包括1个TVS二极管、1个NTC热敏电阻和1个SCB电阻桥。

为了保证火工品在静电条件下的安全性,采用TVS二极管进行静电加固。当静电脉冲作用于火工品时,TVS二极管被击穿,从高电阻降至低电阻,静电能量通过旁路放掉,从而保证SCB电阻桥的安全。

为了保证火工品在射频环境下的安全性,采用NTC热敏电阻进行射频加固。当外界能量通过脚线耦合进入半导体时,SCB产生热量,并通过陶瓷塞

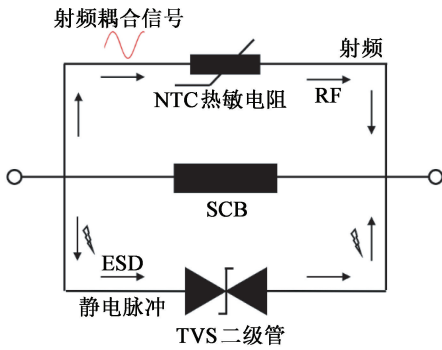


图 3 集成型 SCB 火工品等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of the integrated SCB initiator

传递到 NTC 热敏电阻上,NTC 热敏电阻受热,电阻大小从高降至低,分走 SCB 上的能量,从而形成射频防护。

## 2 试验装置

### 2.1 电容放电发火试验

为研究上述组合型器件对 SCB 火工品发火性能的影响,采用电容放电激励的方式分别对 SCB 火工品和集成型 SCB 火工品进行测试。试验中采用 ALG-CN1 型储能放电仪进行测试,放电电容选用精度高、漏电流小、放电快的钽电容。试验装置原理图见图 4。

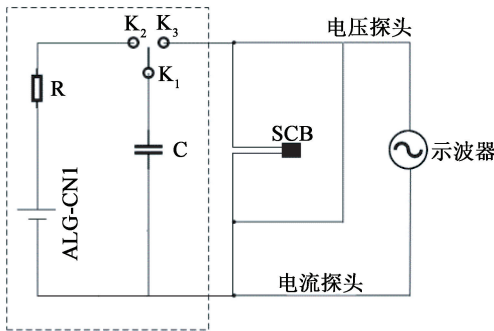


图 4 电容放电发火试验原理图

Fig. 4 Principle diagram of capacitor discharge ignition test

### 2.2 恒流安全试验

电火工品的抗射频和抗杂散电流能力是电磁安全性能的重要指标之一,该能力可以通过恒流安全试验进行间接验证<sup>[12]</sup>。为验证组合器件是否能有效提高 SCB 火工品的抗射频能力,分别对集成组合器件前、后的 SCB 火工品进行了安全电流试验。安全电流试验仪器选用 ALG-HL-15A 高速恒流起爆电源,试验过程按 GJB 5309. 11—2004<sup>[13]</sup>的要求进行,装置原理如图 5 所示。

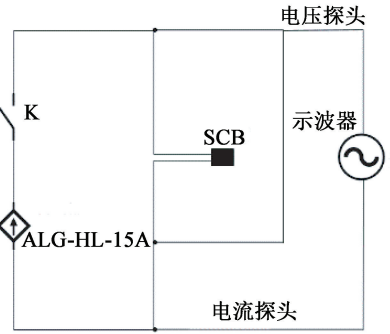


图 5 恒流安全实验原理图

Fig. 5 Principle diagram of constant current test

### 2.3 静电安全试验

根据前人研究,在 GJB 5309. 14—2004<sup>[14]</sup> 的静电(500 pF/500 Ω/25 kV)条件下,SCB 火工品具有较好的抗静电能力,不会出现意外发火;但在美军标 MIL-STD-331D<sup>[15]</sup> 对应的 500 pF/500 Ω/25 kV 的静电条件下,SCB 火工品会出现发火情况<sup>[11]</sup>。为了研究组合型防护器件是否能有效提高 SCB 火工品的静电安全性能,基于 GJB 5309. 14—2004 的相关规定,采用 500 pF 储能电容、500 Ω 的回路电阻,对 SCB 火工品的静电安全性能进行测试,试验装置原理如图 6 所示。

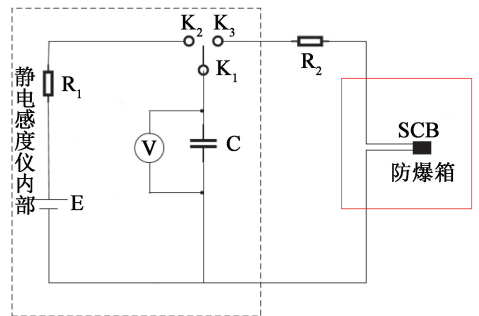


图 6 静电试验原理图

Fig. 6 Principle diagram of electrostatic discharge test

## 3 结果与讨论

### 3.1 射频防护试验结果

对集成组合器件前、后的 SCB 火工品进行试验,结果如表 1 所示。对 SCB 火工品而言,当输入电流升高至 1.3 A 时,SCB 火工品发火,表明此时已达到 SCB 火工品的临界发火电流。对集成型 SCB 火工品而言,当输入电流提高到 1.6 A 时,集成型 SCB 火工品才发火。相较于不加防护的 SCB 火工品而言,抗射频能力提升了 23%。

表1 恒流安全试验结果

Tab.1 Results of constant current test

样品	输入电流/A	样品发数	发火发数
SCB	1.0	3	0
	1.2	3	0
	1.3	2	2
集成型 SCB	1.5	10	0
SCB	1.6	1	1

### 3.2 静电防护试验结果

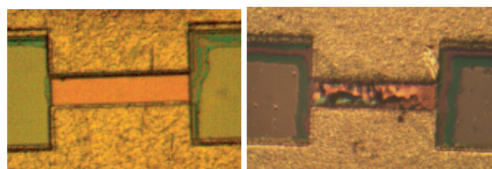
在恒流试验中,持续输入的电流在 SCB 火工品中产生大量焦耳热,这使得 SCB 火工品温度迅速升高。为验证长时间高温状态后集成型 SCB 火工品的抗静电性能是否有所改变,将恒流后未发火样品与对照样品共同在 500 pF/500 Ω/25 kV 的静电放电条件下进行静电感度试验,结果见表 2。

表2 静电安全试验结果

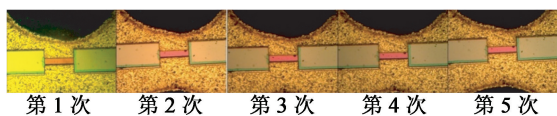
Tab.2 Results of electrostatic safety test

样品	样品发数	发火发数
SCB	10	10
集成型 SCB	10	0
恒流试验后集成型 SCB	10	0

从表 2 中结果可知:10 发 SCB 火工品均发火;而集成型 SCB 火工品均安全,表明组合器件中的 TVS 二极管有效提高了 SCB 火工品的抗静电能力。为进一步测试集成型 SCB 是否具有多次抗静电能力,将 SCB 裸桥和集成型 SCB 裸桥进行连续 5 次静电放电试验,并通过显微镜拍摄 5 次静电放电过程中桥区的变化情况,如图 7 所示。



(a) SCB 裸桥静电试验前、后



(b) 集成型 SCB 裸桥 5 次静电试验

图7 试验过程中桥区的显微放大图

Fig.7 Microscopic magnification of the bridge

area during the experiment

由试验结果可知:SCB 裸桥在第 1 次静电冲击

时即出现桥区烧蚀的情况;而集成型 SCB 裸桥在 5 次静电冲击过程中桥区均保持不变,表明 TVS 二极管具备多次抗静电冲击的能力。

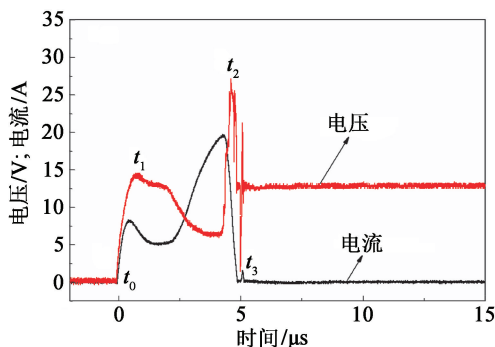
### 3.3 电容放电发火试验结果

由上述试验可知,组合器件能有效提高 SCB 火工品的抗静电和抗射频能力。进一步对集成型 SCB 火工品的发火性能进行测试。测试条件为 22 μF/16 V 的电容放电。试验结果如表 3 所示;示波器采集到的电爆曲线如图 8 所示。

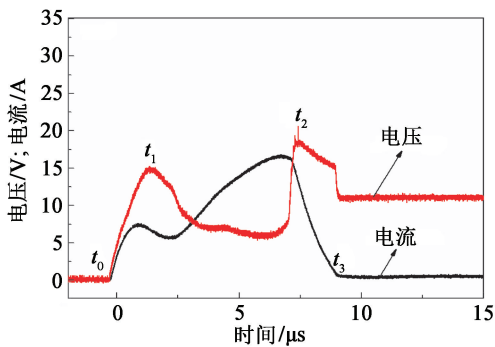
表3 电爆试验结果

Tab.3 Results of discharge explosion testing

样品	平均爆发时间/μs	平均爆发能量/mJ
SCB	4.75	0.46
集成型 SCB	6.52	0.55
恒流试验后集成型 SCB	7.00	0.47



(a) SCB



(b) 集成型 SCB

图8 SCB 和集成型 SCB 电爆试验曲线

Fig.8 Current curves and voltage curves of SCB and integrated SCB in discharge explosion test

从图 8 可知,集成型 SCB 火工品的电爆曲线和 SCB 火工品的变化趋势基本保持一致,说明增加组合器件前、后 SCB 的爆发过程未发生变化。对比爆发时间和爆发能量可知,集成型 SCB 火工品较 SCB 火工品均出现略微增加。

进一步对爆发时间和爆发能量进行  $t$  检验分析。 $t$  检验相关参数为:水平  $\alpha = 0.05$ ,  $n_1 = 5$ ,  $n_2 =$

5. 通过查表可得  $t_{1-\alpha/2} \{n_1 + n_2 - 2\} = 2.306$ 。检验结果如表 4 所示。 $t_T$ 、 $t_E$  分别为爆发时间和爆发能量的  $t$  值,均大于 2.306。

表 4  $t$  检验结果Tab. 4 Results of  $t$  test

样品	$t_T$	$t_E$
SCB 和集成型 SCB	10.690	4.192

从表 4 中可以看出,SCB 火工品并联防护器件后,相比于未集成防护器件的 SCB 火工品,发火时间和发火能量均出现了显著性差异,这可能是并联器件的分流效应引起的。为进一步明确分流效应产生的器件,将 2 种防护器件采用导线和 SCB 火工品并联,使用多个电流探头分别测量通过 TVS 二极管、NTC 热敏电阻和 SCB 的电流,得到电流-时间和电压-时间曲线,如图 9 所示。

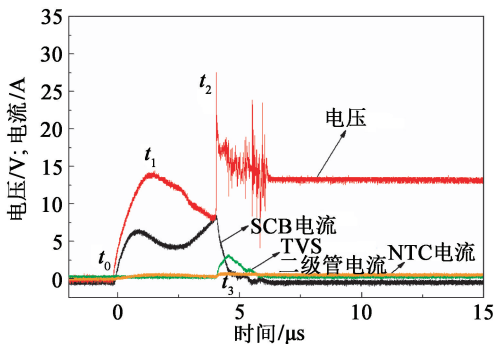


图 9 集成型 SCB 电爆试验曲线

Fig. 9 Current curves and voltage curves of integrated SCB in discharge explosion test

从图 9 可知,TVS 二极管的分流主要集中在 SCB 火工品的第 2 个峰值电压的附近。此时 SCB 处于等离子体爆发的末期,因此,对 SCB 火工品发火的影响较小。而 NTC 热敏电阻在发火全过程中存在少量分流,通过 NTC 热敏电阻的电流约为 0.5~1.0 A,因此,可以认为增加防护器件后 SCB 火工品发火性能的变化主要由 NTC 热敏电阻的分流引起。从  $t$  检验结果来看,集成的防护器件对 SCB 的发火时间有一定的影响。但是就 SCB 火工品实际应用而言,集成型 SCB 火工品的发火时间仅延迟了不到 2  $\mu\text{s}$ ,该时间量级的延迟不影响点火的可靠性。

## 4 结论

在恒流安全试验和静电安全试验下研究了集成 TVS 二极管和 NTC 热敏电阻的 SCB 火工品安全性

能的变化情况;并在电容发火条件下,研究了 SCB 火工品的发火性能的变化情况。结论如下:

1) 在 SCB 火工品中增加组合型防护器件后,在持续 300 s 的恒流作用下,临界不发火电流约为 1.5 A,相比无防护器件的 SCB 火工品,抗射频能力有明显提高,提升幅度达 23%。

2) 在 SCB 火工品中增加组合型防护器件后,在 500 pF、500  $\Omega$  的静电测试回路条件下,SCB 火工品可以实现 25 kV 下可靠的抗静电能力;恒流作用时,SCB 火工品产生的高温不会使 TVS 二极管的性能发生变化,恒流作用后的集成型 SCB 火工品仍能保持原有的抗静电性能。

3) 集成防护器件后,在相同的电容发火条件下,通过 SCB 的电流、电压特性曲线不会发生明显变化,而平均爆发时间延迟了约 2  $\mu\text{s}$ ,该爆发时间的延迟主要是由于 NTC 热敏电阻的分流作用引起。

综合以上试验和分析可得,增加组合器件的方式不仅未改变原有 SCB 火工品的装配结构,而且还显著提高了在静电、射频和杂散电流环境下的安全性,是一种易于实现的抗电磁加固手段。

## 参 考 文 献

- [1] BICKES R W, MCCAMBELL C B. Semiconductor bridge (SCB) research and development; SAND 1991-0310C [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories, 1991.
- [2] 何立萍. 战场电磁环境及其对导弹武器装备的威胁 [J]. 航天电子对抗, 2009, 25(1): 1-3.  
HE L P. Electromagnetic environment and its threat to missile weapon equipment in the battlefield [J]. Aerospace Electronic Warfare, 2009, 25(1): 1-3.
- [3] KING T L, TARBELL W W. Pin-to-pin electrostatic discharge protection for semiconductor bridges; SAND 2002-2213 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratories, 2002.
- [4] MONK D B, WOODBURY M B, HANSEN D D. Inflator initiator with zener diode electrostatic discharge protector; EP0779492A2 [P]. 1997-06-18.
- [5] 杜培康, 谭明, 李勇, 等. 压敏电阻对半导体桥火工品电爆性能的影响 [J]. 含能材料, 2015, 23(8): 781-786.  
DU P K, TAN M, LI Y, et al. Electro-explosive performances of SCB igniter with varistor [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(8): 781-786.
- [6] 左成林, 周彬, 杜伟强. TVS 二极管用于半导体桥静电安全性研究 [J]. 爆破器材, 2016, 45(3): 62-64.

