

文章编号: 1006-9941(2014)06-0808-05

# 负温度系数热敏电阻对半导体桥电爆性能影响

李勇<sup>1</sup>, 李凯<sup>2</sup>, 刘恩良<sup>2</sup>, 周彬<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 航天科工六院 41 所, 内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:** 温度是影响火工品电磁防护其防护效果的主要因素, 负温度系数(NTC)热敏电阻用于半导体桥(SCB)能有效提高其射频敏感度。采用恒流激励和电容放电两种实验, 对不同环境温度下 NTC 热敏电阻对 SCB 性能的影响规律进行了研究。通过 1 A 5 min 恒流激励实验, 分析了室温(25 °C)和高温(70 °C)时 NTC 热敏电阻的并联分流情况; 25 °C 时 NTC 热敏电阻分走 59% 回路电流, 70 °C 时, 对小尺寸 SCB(S-SCB)的分流率最大达到 63%。在电容放电激励下, 探讨了并联 NTC 热敏电阻 SCB 在 25 °C 和 70 °C 时电爆性能的变化情况。结果表明, 并联 NTC 热敏电阻前后, 典型尺寸(L-SCB)在 25 °C 和 70 °C 下的爆发时间和爆发消耗能量均无显著性变化。而 S-SCB 并联 NTC 热敏电阻后, 当温度从 25 °C 升至 70 °C, 爆发时间从 5.94 μs 增长到 7.18 μs, 爆发消耗积分能量从 0.388 mJ 降低到 0.178 mJ。

**关键词:** 军事化学与烟火技术; 半导体桥(SCB); 负温度系数(NTC)热敏电阻; 电爆性能; 电磁防护

中图分类号: TJ45

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.018

## 1 引言

随着电磁环境的日益恶劣, 半导体桥(Semiconductor Bridge, SCB)火工品的静电与射频安全性设计越来越受到重视与广泛研究<sup>[1-6]</sup>。在电磁环境中, SCB 火工品耦合的杂散射频或脉冲电磁波能量, 会因焦耳效应产生热积累, 使桥的温度不断升高, 从而导致 SCB 火工品意外发火或性能改变。负温度系数(Negative temperature coefficient, NTC)热敏电阻是一类阻值随温度升高而呈指数关系降低的电子器件<sup>[7]</sup>, 用于 SCB 火工品电磁防护时, 热敏电阻感温而阻值降低, 分走射频耦合能量保护 SCB 火工品。陈飞等人<sup>[8-9]</sup>设计了一种防护封装结构, 将 NTC 热敏电阻用于 SCB 火工品电磁防护, 探讨了室温下并联 NTC 热敏电阻前后, SCB 火工品射频敏感度以及电爆性能的变化, 其研究表明 NTC 热敏电阻能有效提高 SCB 火工品的射频敏感度, 且不影响 SCB 火工品的正常使用。但是, 火工品的实际使用环境温度会在一个比较宽的范围, NTC 热敏电阻用于 SCB 电磁防护时, 不同

环境温度下对 SCB 性能影响情况的相关研究, 尚未见公开报道。因此, 根据 NTC 热敏电阻阻值与温度负相关特性, 本研究在室温(25 °C)和 70 °C 高温两种温度下, 对比探讨了 NTC 热敏电阻对 SCB 性能的影响。在恒流激励下分析了 NTC 热敏电阻的分流情况, 以及电容放电条件下测试并联 NTC 热敏电阻的 SCB 电爆性能, 为 NTC 热敏电阻在火工品电磁防护的进一步应用提供实验支撑。

## 2 样品与实验

NTC 热敏电阻是一种以锰、钴、镍、铜等金属氧化物为主要原材料制造的半导体元件, 它具有灵敏度高, 电阻值与温度性能波动性小, 对各种温度变化响应快等优点, 在温度测量、温度补偿、抑制浪涌电流等方面得到广泛的应用<sup>[10]</sup>。NTC 热敏电阻的阻值与温度之间的关系可表示为<sup>[11]</sup>:

$$R_T = R_0 \exp \left[ B \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \quad (1)$$

式中,  $T_0$  为基准温度, 通常为 298K;  $R_0$  为热力学温度为  $T_0$  时的电阻值,  $\Omega$ ;  $B$  为热敏电阻的材料系数, K, 描述的是 NTC 热敏电阻材料的物理性能参数,  $B$  值越大, 热敏电阻的灵敏度就越高。由公式(1)可知, 热敏电阻阻值( $R_T$ )随温度( $T$ )呈指数减小。

研究选用的贴片式热敏电阻外观如图 1 所示, 贴

收稿日期: 2013-12-04; 修回日期: 2014-03-04

作者简介: 李勇(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事半导体桥点火相关研究。e-mail: liyongnust@126.com

通信联系人: 周彬(1971-), 女, 副研究员, 主要从事半导体桥火工品研究。e-mail: zhoubin8266@sina.com.cn

片封装的尺寸为  $1.6 \text{ mm}(L) \times 0.8 \text{ mm}(W) \times 0.8 \text{ mm}(T)$ , 温度响应延迟时间低于  $0.1 \text{ s}$ , 工作温度范围为  $-55 \sim 350 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[9]</sup>。将选用的 NTC 热敏电阻的相关参数代入式 (1), 得到阻值随温度的变化曲线 (图 2)。由图 2 可知,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $298 \text{ K}$ ) 时, NTC 热敏电阻阻值为  $30 \text{ } \Omega$ , 与 SCB 火工品 (阻值  $1 \text{ } \Omega$  左右) 并联后分流极少, 理论上不会影响 SCB 火工品性能;  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $343 \text{ K}$ ) 时 NTC 热敏电阻阻值降至  $2 \text{ } \Omega$  左右, 并联分流效应越趋明显。

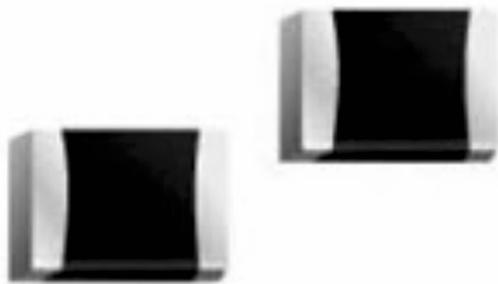


图 1 试验用 NTC 热敏电阻外观图

Fig.1 Appearance of NTC thermistor

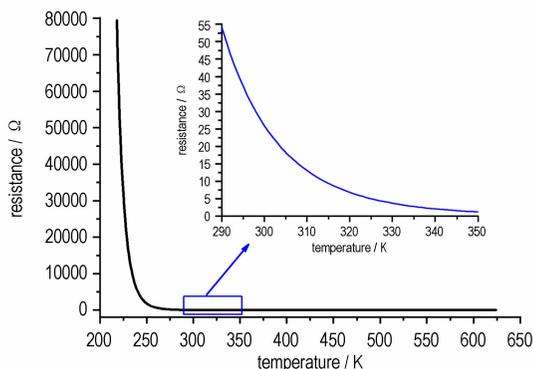


图 2 NTC 热敏电阻电阻-温度曲线及  $290 \sim 350 \text{ K}$  区段放大图

Fig.2 Resistance-temperature curve of NTC thermistor

1A5 min 恒流实验时, 在 NTC 热敏电阻的两极各焊接一根导线, 再与 SCB 脚线并联, 以便测量实验过程中各自的电流变化情况。实验线路图如图 3 所示, 电流探头 1<sup>#</sup>测得回路总电流, 电流探头 2<sup>#</sup>测得流经 NTC 热敏电阻电流, 电压探针测得两端电压变化, 通过示波器采集以上数据。为研究 NTC 热敏电阻对不同 SCB 火工品的影响, 本研究采用两种 SCB, 小尺寸 SCB (S-SCB,  $24 \text{ } \mu\text{m} \times 100 \text{ } \mu\text{m} \times 2 \text{ } \mu\text{m}$ , 实测电阻  $1.5 \text{ } \Omega$ ) 以及典型尺寸 SCB (L-SCB,  $100 \text{ } \mu\text{m} \times 380 \text{ } \mu\text{m} \times 2 \text{ } \mu\text{m}$ , 实测电阻  $1.0 \text{ } \Omega$ )。实验时将样品放置于恒温箱内, 温度  $(70 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ 。

电爆实验采用文献[9]中设计的封装结构, 将 NTC 热敏电阻封装在陶瓷塞底部凹槽内, 用导电胶固

定并使其与脚线链接, 与 SCB 芯片形成并联结构。

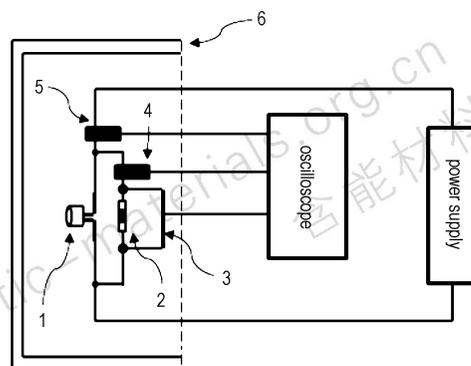


图 3 实验线路图

1—SCB 火工品, 2—NTC 热敏电阻, 3—电压探针, 4—电流探头 1<sup>#</sup>, 5—电流探头 2<sup>#</sup>, 6—恒温箱

Fig.3 Experimental circuit diagram

1—SCB initiator, 2—NTC thermistor, 3—voltage probe, 4—current probe 1<sup>#</sup>, 5—current probe 2<sup>#</sup>, 6—thermostat

### 3 分析与讨论

#### 3.1 恒流分流实验

分别测试了并联 NTC 热敏电阻的 SCB 在恒流作用下,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  时电流随时间响应情况, 电流大小  $1 \text{ A}$ , 持续时间  $300 \text{ s}$ , 测试结果如图 4 ~ 图 5 所示。

对于 S-SCB,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  下流经 NTC 热敏电阻的电流在  $19 \text{ s}$  左右升高至拐点, 并保持基本恒定, 电流值大小为  $0.59 \text{ A}$ , NTC 热敏电阻分流率为  $59\%$ ;  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  时,  $12 \text{ s}$  左右升高至拐点, 之后继续缓慢升高, 拐点处电流值  $0.55 \text{ A}$ ,  $300 \text{ s}$  时电流值  $0.63 \text{ A}$ , 分流率分别为  $55\%$  和  $63\%$ 。

L-SCB 并联热敏电阻后, 在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  下  $20 \text{ s}$  左右 NTC 热敏电阻电流升高至第一个拐点, 此时 NTC 热敏电阻电流值  $0.14 \text{ A}$ ;  $52 \text{ s}$  左右升高至第二个拐点, 之后几乎保持不变, 电流值  $0.43 \text{ A}$ , 分流率  $43\%$ ; 在  $70 \text{ }^\circ\text{C}$  温度下, NTC 热敏电阻电流在  $30 \text{ s}$  左右升高至拐点, 之后缓慢升高, 拐点处电流值  $0.40 \text{ A}$ , 最高电流值  $0.50 \text{ A}$ , 分流率分别为  $40.3\%$  和  $50\%$ 。

室温时 ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), 测得用于上述实验的 NTC 热敏电阻的静态电阻值在  $30 \text{ } \Omega$  左右 (包括外接导线), 而 SCB 的电阻在  $1 \text{ } \Omega$  左右, 因此,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时 NTC 热敏电阻理论上并联分流效果不明显 ( $2.4\%$ )。在恒流作用下, 一方面主要是热敏电阻本身因焦耳效应产生大量热量积累, 另一方面热敏电阻也会受 SCB 桥区热量的影响, 使得热敏电阻自身温度不断升高而电阻不断减小, 分流效果越趋明显。当热量积累与散失达到平衡后, 热敏电阻值在定值附近波动, 分流率也保持基本不变。

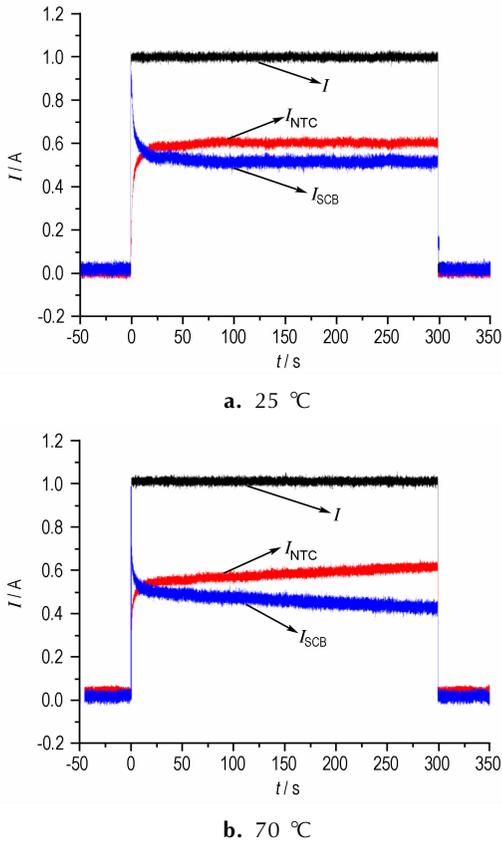


图4 并联 NTC 后 S-SCB 不同温度下电流曲线

Fig. 4 Current curves of S-SCB with NTC thermistor at different temperature

在恒温箱中随着温度升高, NTC 热敏电阻阻值减小, 70 °C 时理论上可降至 2  $\Omega$  左右, 迅速达到分流拐点; 随着恒温箱温度回升以及 NTC 热敏焦耳效应热量积累, 热敏电阻阻值缓慢减小, 分流率缓慢增加。

实验时由于 S-SCB 初始电阻 1.5  $\Omega$ , 而 L-SCB 只有 1.0  $\Omega$ , 使得同等条件下, 与 S-SCB 并联的 NTC 热敏电阻分流率相对于 L-SCB 更大一些。而且 S-SCB 尺寸较小, 相比于 L-SCB, 热积累与热散失更快达到平衡, 从而更快地实现电流平衡。

### 3.2 高温电爆实验

研究了 25 °C 和 70 °C 恒流激励下, 并联 NTC 热敏电阻的 SCB 电流变化情况, 接下来探讨温度对其电爆性能的影响。实验采用电容放电激励的方式, L-SCB 实验条件 47  $\mu\text{F}$ 、22V, S-SCB 为 22  $\mu\text{F}$ 、9 V。测得并联 NTC 热敏电阻前后 L-SCB 爆发参数随时间变化曲线, 如 6、图 7 所示。以电压曲线上第二个峰值对应的时间作为爆发时间, 以电流和电压乘积对时间积分曲线上爆发时间对应的值作为爆发消耗能量, 结果见表 1。

表 1 SCB 爆发实验结果

Table 1 Experimental results of SCB

T / °C	type	resistance / $\Omega$	time / $\mu\text{s}$	standard deviation / mJ	standard deviation	
25	L-SCB	1.23	6.61	0.28	1.533	0.164
25	L-SCB+NTC	1.02	6.63	0.30	1.487	0.126
70	L-SCB+NTC	0.95	6.72	0.42	1.421	0.139
25	S-SCB	1.57	5.55	0.21	0.395	0.034
25	S-SCB+NTC	1.36	5.94	0.39	0.388	0.022
70	S-SCB+NTC	1.33	7.18	0.34	0.178	0.032

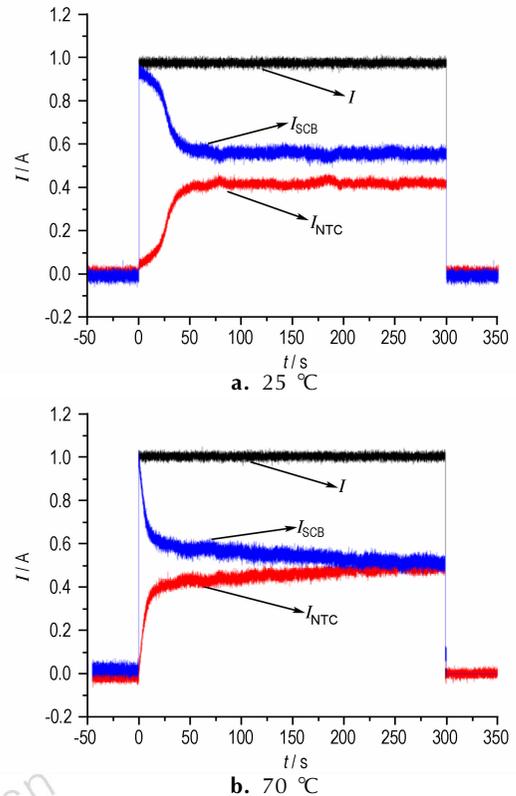


图5 并联 NTC 后 L-SCB 不同温度下电流曲线

Fig. 5 Current curves of L-SCB with NTC thermistor at different temperature

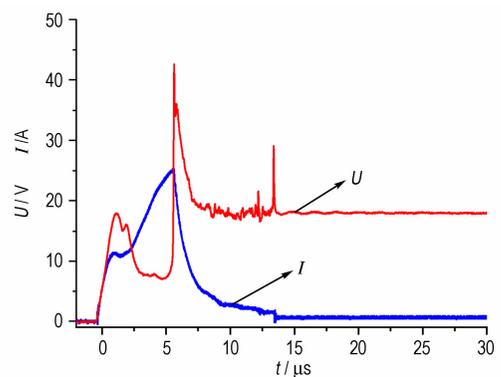


图6 25 °C 时 L-SCB 电爆性能参数曲线

Fig. 6 Current and voltage curves of L-SCB at 25 °C

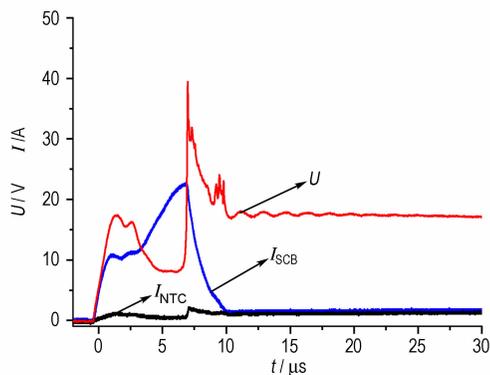


图7 70 °C 并联 NTC 之后 L-SCB 电爆性能参数曲线

Fig.7 Current and voltage curves of L-SCB in parallel with NTC thermistor under 70 °C

由表 1 可知,25 °C 时,并联 NTC 热敏电阻前后 L-SCB 的爆发时间没有明显变化,由于 NTC 热敏电阻分流导致爆发消耗积分能量有所减小。70 °C 下,并联 NTC 热敏电阻后,相比于 25 °C 时,L-SCB 爆发时间变长,积分能量进一步减小,降低 7% 左右。电容放电时,SCB 作用时间在微秒级,NTC 热敏电阻温度响应延迟,在整个 SCB 爆发过程中阻值几乎不变,25 °C 下根据初始阻值估算分流率最高不到 10%;由计算可得 47  $\mu\text{F}$  电容充电至 22 V 蕴含能量大约 11 mJ,典型 SCB 爆发仅需要不到 2 mJ 能量(25 °C 下,未并联 NTC 热敏电阻时,平均积分能量为 1.533 mJ,见表 1),即使 70 °C 时分走 50% 的能量,仍然有接近 6 mJ 能量,因此对其爆发性影响较小。

而对于 S-SCB,并联 NTC 热敏电阻后,爆发时间变长、积分能量减小,70 °C 下变化更加明显。22  $\mu\text{F}$ 、9V 实验条件计算所得能量大约为 0.9 mJ,S-SCB 爆发所需能量 0.4 mJ 左右(25 °C 下,未并联 NTC 热敏电阻时,平均积分能量为 0.395 mJ,见表 1)。25 °C 时,NTC 热敏电阻分流率 59%,70 °C 分流最高 63%。因此 NTC 热敏电阻对 S-SCB 性能的影响相对更加明显,即使 25 °C 下也会因分走部分能量使爆发时间变长;70 °C 时 NTC 热敏电阻分走更多的输入能量,致使作用于 S-SCB 上的能量冲量减小,从而使得需要更长时间的能量积累气化产生等离子体。从积分能量上看,70 °C 时并联 NTC 热敏电阻的 S-SCB 消耗的积分能量仅为 25 °C 下 45%。

对表 1 的实验结果做显著性  $t$  检验( $\alpha=0.05$ ,  $t=2.101$ ),结果如表 2 所示。由检验结果可知,L-SCB 并联 NTC 热敏电阻后,其爆发时间和爆发消耗能量均

没有显著性变化,温度对其爆发性也没有显著性影响。对于 S-SCB,25 °C 下并联 NTC 热敏电阻后,爆发性没有明显变化;但是在 70 °C 下,爆发时间和爆发消耗能量均发生了显著性变化。

由上述分析可知,引起 S-SCB 爆发性变化的主要原因是 NTC 热敏电阻分流率增大,使得用于 SCB 爆发的能量明显减小,但常规激励条件下(22  $\mu\text{F}$ 、9 V),70 °C 时爆发时间仍在数微秒,理论上不影响 S-SCB 的使用。在实际条件允许时,可以通过增大输入能量来降低这一影响。

表 2  $t$  检验结果

Table 2  $t$  Test results

$T/^\circ\text{C}$	type	$t$ -test results of time	$t$ -test results of energy
25	L-SCB	$t=0.079 < 2.101$	$t=0.256 < 2.101$
	L-SCB+NTC	no significant difference	no significant difference
70	L-SCB+NTC	$t=0.318 < 2.101$	$t=0.385 < 2.101$
	L-SCB+NTC	no significant difference	no significant difference
25	S-SCB	$t=1.510 < 2.101$	$t=0.089 < 2.101$
	S-SCB+NTC	no significant difference	no significant difference
70	S-SCB+NTC	$t=4.249 > 2.101$	$t=2.711 > 2.101$
	S-SCB+NTC	significant difference	significant difference

## 4 结 论

(1) 恒流激励实验中,25 °C 时 NTC 热敏电阻分流率随着时间增大,达拐点后几乎保持不变,与 S-SCB 并联的 NTC 热敏电阻分流率为 59%,与 L-SCB 并联的为 43%;70 °C 时,分流率迅速达到拐点,并随着时间缓慢增加,与 S-SCB 并联的 NTC 热敏电阻分流率最高达到 63%,与 L-SCB 并联的最高达到 50%。

(2) 电容放电条件下,25 °C 时 NTC 热敏电阻对 L-SCB 电爆性能几乎没有影响,70 °C 时 L-SCB 爆发时间略有增加,爆发消耗能量降低 7% 左右;而 S-SCB 在 25 °C 和 70 °C 下均受到 NTC 热敏电阻分流的影响,尤其是在 70 °C 下,爆发时间明显增长,爆发消耗能量降至室温下未并联 NTC 压敏电阻时的 45%。结果表明,在 25 °C 下,NTC 热敏电阻几乎不影响 SCB 爆发;在 70 °C 下,S-SCB 爆发时间从 5.94  $\mu\text{s}$  增长到 7.18  $\mu\text{s}$ ,但爆发时间仍在数个微秒,不影响其正常使用。

通过以上实验和分析可知,1A5min 恒流实验时,由于有足够的时间积累焦耳效应热,NTC 热敏电阻阻值能下降至较低值,对 SCB 的影响大于电容放电激

励。因此在不同环境温度下, 并联 NTC 热敏电阻前后, SCB 恒流激励电爆性能与 SCB 火工品感度的变化情况有待进一步研究。

#### 参考文献:

- [1] Baginski T A, Baginski M E. A novel RF-insensitive EED utilizing an integrated metal-oxide-semiconductor structure [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1990, 32(2): 106-112.
- [2] Baginski T A. Characterization of a novel passive RF filter for frequencies of 4-225MHz[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 1993, 35(4): 163-167.
- [3] Henderson J H, Baginski T A. An RF-insensitive hybrid electro-explosive device incorporating an integral filter[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, 32(2): 465-470.
- [4] Baginski T A. Radio frequency and electrostatic discharge insensitive electro-explosive devices having non-linear resistances: USA, 5 905 226[P]. May, 18, 1999.
- [5] Novotney D B, Welch B M, Evick D W. Semiconductor bridge development for enhanced ESD and RF immunity[R]. AIAA99-2417: 1999.
- [6] King T L, William T W. Pin-to-pin electrostatic discharge protection for semiconductor bridges[R]. SAND2002-2213: 2002.
- [7] 王为民, 赵鸣, 张慧君, 等. NTC 热敏电阻材料组成及制备工艺研究进展[J]. *材料科学与工程学报*, 2005, 4(2): 286-289.
- WANG Wei-ming, ZHAO Ming, ZHANG Hui-jun. Progress on the compositions and technique of the NTC thermistor materials [J]. *Journal of Materials Science and Engineering*, 2005, 4(2): 286-289.
- [8] 陈飞, 周彬, 秦志春. NTC 热敏电阻用于半导体桥火工品射频防护的研究[J]. *南京理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(1): 171-175.
- CHEN Fei, ZHOU Bin, QIN Zhi-chun. Protection of semiconductor bridge initiators by using NTC RF interference thermistors [J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2012, 36(1): 171-175.
- [9] CHEN Fei, ZHOU Bin, QIN Zhi-chun, et al. EMC protection of SCB explosive devices by using SMD-based NTC thermistors[J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2012, 54(6): 1216-1221.
- [10] 胡润峰. NTC 热敏电阻传感器[J]. *传感器世界*, 2001, 7(7): 26-29.
- HU Run-feng. Negative temperature coefficient resistant temperature sensors[J]. *Sensor World*, 2001, 7(7): 26-29.
- [11] 沙占友, 王彦朋, 杜之涛. NTC 热敏电阻的线性化及其应用[J]. *自动化仪表*, 2004, 25(9): 27-30.
- SHA Zhan-you, WANG Yan-peng, DU Zhi-tao. Linearization and application of NTC thermistor[J]. *Process Automation Instrumentation*, 2004, 25(9): 27-30.

## Influence of NTC Thermistors on Electro-explosive Performances of SCB

LI Yong<sup>1</sup>, LI Kai<sup>2</sup>, LIU En-liang<sup>2</sup>, ZHOU Bin<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China; 2. The Six Academy of China Aerospace Science & Industry Group 41, Hohhot 010010, China)

**Abstract:** The radio frequency (RF) sensitivity of semiconductor bridge (SCB) initiator can be improved by negative temperature coefficient (NTC) thermistors and temperature is the key factor for the protection effect. In order to analyze the influence of NTC thermistors on SCB electro-explosive performances at different environment temperature, constant current (1 A) was forced to flow through igniters for 300 s at room temperature (25 °C) and high temperature (70 °C). Results show that about 59% current of small size SCB (S-SCB) is shunted by NTC thermistor at 25 °C, and reaching the maximum (63%) at 70 °C. Furthermore, with capacitor discharge experiment, the electro-explosive performances of the SCB initiators in parallel with NTC thermistors were discussed at above temperatures. Results indicate that burst time and consumption energy of large-SCB (L-SCB) initiators have no significant change at two temperature. But, as for S-SCB, burst time grows from 5.94 μs to 7.18 μs, and consumption energy reduces from 0.388 mJ to 0.178 mJ when temperature ranges from 25 °C to 70 °C.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics technology; semiconductor bridge (SCB); negative temperature coefficient (NTC) thermistors; electro-explosive performances; electromagnetic protection

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.018