



SCB 电极塞包括电极塞和 SCB 芯片两部分。试验用 SCB 电极塞所嵌入的 SCB 芯片为桥路电阻为  $1\ \Omega$  的 3-2 型 SCB 芯片,该芯片包含一个二氧化硅和硅基底,基底上覆有一个蝴蝶结图形的掺磷多晶硅。在蝴蝶结的两个端面上附加了一个铝层(焊盘),采用超声焊接方式用硅铝丝将焊盘和外部的脚线连接起来。为了增加牢固性和保护焊点不被氧化,通常在焊接好的焊点上均匀电镀上一层银。该蝴蝶结图案的狭窄区域是半导体桥(SCB),一旦加载合适的电能,桥箔爆发产生等离子体,进而激发炸药。焊接后的芯片如图 2b 所示。

试验使用的温湿度试验设备为重庆五环生产的 HT201 型低温恒温恒湿试验箱;电阻测试使用泰克公司生产的 Tektronix DMM4050 六位半高精度电阻测试仪;扫描电镜为捷克 TESCAN 公司生产的 VEGA TS5136 型设备;能谱分析仪为英国牛津公司生产的 INCA-300 型设备。

## 2.2 试验条件及试验项目

### (1) 单一温度条件的加速寿命试验

依据 GJB736.8-1990《71 °C 试验法》中规定的试验环境,贮存环境温度为 71 °C。

### (2) 温湿度条件下的模拟贮存试验

在保证 SCB 电极塞失效机理不变的前提下,同时加速获得试验结果,选择贮存环境条件为 80 °C,相对湿度(RH)95%。

### (3) 含氯温湿度条件下的模拟贮存试验

贮存环境条件为 80 °C, RH95%。试验前,配置浓度为 30% 的 NaCl 溶液,并利用蘸取 NaCl 溶液的棉签接触 SCB 电极塞的桥区(含芯片和焊点)部分,以模拟在产品制作过程中可能引入的氯离子对 SCB 电极塞的贮存性能的影响。并在常温干燥后进行模拟贮存试验。

### (4) 电阻、扫描电镜和能谱测试

每种条件下的试验样品为 5 发,试验周期 70 天。每 14 天取出试验样品进行电阻测试,形貌检查和能谱分析。样品取出后,样品在常温干燥器内放置 24 h 后进行相关测试。测试完毕后,样品重新放入温湿度试验箱中继续试验。

具体的试验方案见表 1。

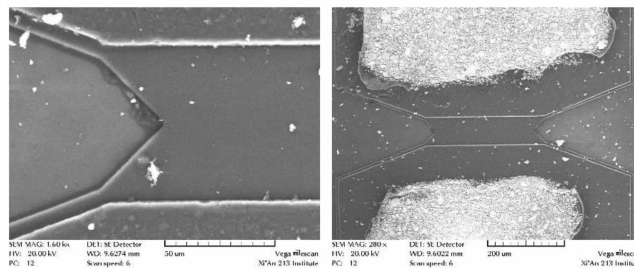
表 1 SCB 电极塞腐蚀效应试验条件

No.	temperature/°C	relative humidity(RH)/%	salt water
1	71	-	-
2	80	95	-
3	80	95	30% NaCl

## 3 试验结果及分析

### 3.1 单一温度应力条件下试验结果及分析

图 2 和表 2 给出了 71 °C 条件下贮存 70 天后 SCB 桥区形貌变化情况和电阻测试结果。从图 2 可以看出,贮存后 SCB 桥区和焊区表面光洁,没有腐蚀的现象发生。表 2 的电阻测试结果也表明贮存前后电阻没有发生明显的变化。说明单一温度应力对 SCB 电极塞的性能没有影响。



a. bridge zone

b. welding point

图 2 贮存 70 d 后 SCB 电极塞的桥区和焊点扫描电镜照片

Fig. 2 SEM photograph of SCB bridge zone and welding point stored after 70 days

表 2 71 °C 下不同贮存时间的电阻测试结果

Table 2 Resistance test results under different storage time at 71 °C

storage time/d	mean resistance/ $\Omega$	standard difference/ $\Omega$
0	1.108	0.004
14	1.102	0.004
28	1.11	0.007
42	1.116	0.009
56	1.106	0.011
70	1.118	0.008

### 3.2 温湿度条件下试验结果及分析

经 80 °C, RH95% 条件贮存 70 天后,随着贮存时间的增加,试验的 5 发 SCB 电极塞的脚线的腐蚀程度随贮存时间增加而腐蚀点增多,说明脚线的腐蚀程度随贮存时间增加而加深。图 3 给出了 SCB 电极塞的脚线腐蚀情况。

对试验各阶段的 5 发 SCB 电极塞进行了电阻测试,结果显示,一发 SCB 电极塞的电阻在 56 ~ 70 d 贮存过程中由  $1.17\ \Omega$  急剧增加到  $3\ \Omega$ ; 其余 SCB 电极塞的电阻仅增加  $0.2\ \Omega$  左右。对该 5 发 SCB 电极塞的电镜分析结果表明,5 发电极塞的桥区无腐蚀,而焊点除一发发现有严重腐蚀外,一发焊点出现轻微腐蚀,

其余无明显腐蚀。其中电阻由  $1.17 \Omega$  急剧增加到  $3 \Omega$  的该发 SCB 电极塞的桥区和焊点情况如图 4 所示。

表 3 给出了各贮存时间段电阻的测试结果。

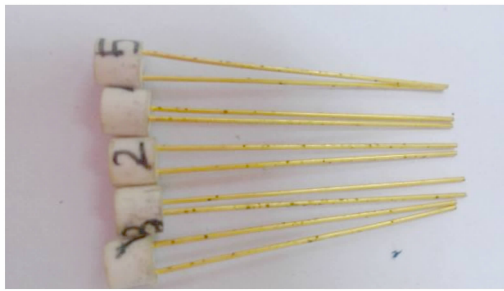


图 3 80 °C, RH95% 条件下贮存 70 d 后脚线的腐蚀情况

Fig. 3 Corrosion situation of leading wire after 70 d storage under the conditions of 80 °C and RH 95%

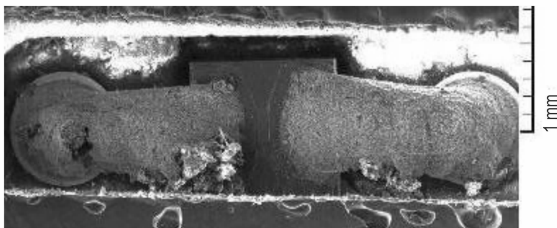


图 4 严重腐蚀样品的桥区和焊点腐蚀情况

Fig. 4 Bridge zone and soldering zone corrode situation of the badly corroded sample

表 3 80 °C, RH=95% 条件下不同贮存时间的电阻测试结果

Table 3 Resistance test results at different storage time under the conditions of 80 °C and RH 95%

storage time/d	mean/ $\Omega$	standard difference / $\Omega$
0	1.078	0.017
14	1.064	0.014
28	1.070	0.012
42	1.110	0.031
56	1.107	0.031
70	1.225	0.418

从表 3 可以看出,随着贮存时间的增加,电阻贮存前期呈现缓慢增加的趋势,至贮存 70 天时,电阻均值有了一个明显的增大。分析其原因,贮存前期由于 SCB 桥区和焊点未发生明显的腐蚀,主要是电极塞脚线的缓慢腐蚀导致电阻发生了缓慢增加;随着贮存时间的增加,有一发电极塞的焊点出现严重腐蚀引起了该发电阻的急剧增大,从而导致了电阻的均值和标准差发生了较大的变化。

对图 4 所示的出现严重腐蚀的电极塞的腐蚀点和

未腐蚀点进行了能谱分析,结果见图 5 和表 4。在腐蚀点发现有少量的氯离子存在,但含量很低,0.2% 左右。在未被腐蚀的地方没有氯离子出现。分析其原因,由于焊点的表面覆盖有一层金属银起保护作用,潮湿情况下,极易在电镀银层的空隙处形成缓慢的电化学腐蚀,但这种腐蚀速度很慢,短期内不会有明显的现象,而氯离子则对这种缓慢的电化学腐蚀起了加速作用。

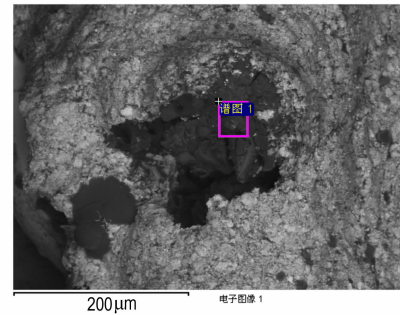


图 5 严重腐蚀样品的测试点及能谱的谱图

Fig. 5 Test point and energy spectrum of the badly corroded sample

表 4 严重腐蚀样品测试点的元素含量

Table 4 Element content of test point for the badly corroded sample

element	spectrum (graph 1)	%
C	12.49	
O	52.85	
Al	31.17	
Si	0.74	
Cl	0.24	
Ag	2.50	
total	100.00	

### 3.3 沾有 NaCl 溶液的 SCB 电极塞在温湿度条件下试验结果及分析

SCB 电极塞采用超声焊接,且 SCB 火工品属于危险品,在加工过程中,湿度要求在 50% 以上,且其加工过程为手工制造,不可避免地会接触到手汗或空气中的污染物。为了模拟 SCB 火工品在生产制造过程中所经历的这种状态,并研究湿度和空气及潜在的氯离子对 SCB 电极塞的失效模式是否有影响,设计了本试验。

试验结果显示,经 80 °C, RH95% 条件贮存 70 天后,随着贮存时间的增加,脚线的腐蚀点增多;而 5 发样品的焊点随着贮存时间的增加,均出现了不同程度的腐蚀,桥区无明显变化,与仅有湿度作用相比,该条件下样品的腐蚀程度更为严重。图 6 给出了贮存 70 天后出现严重腐蚀的 3 号、4 号以及发生轻微腐蚀

的 5 号 SCB 电极塞的桥区和焊点的腐蚀情况。

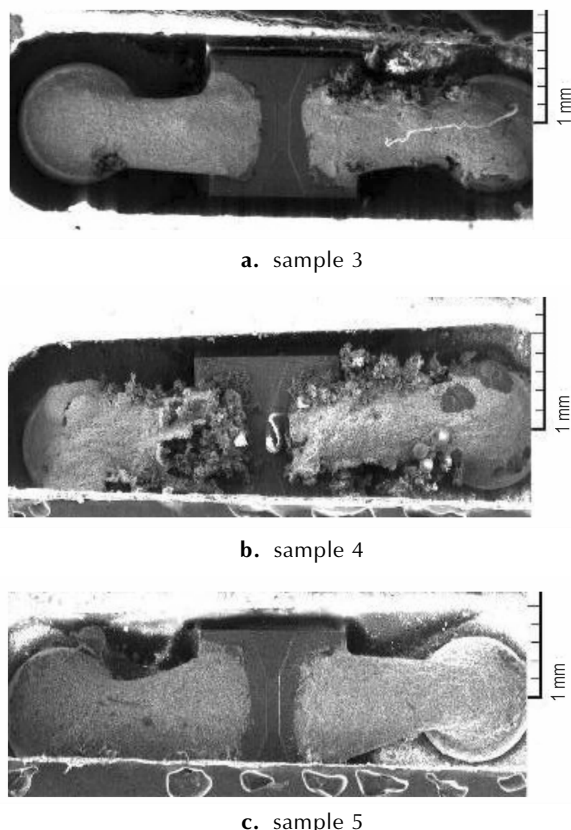


图 6 不同样品桥区和焊点的腐蚀情况

Fig.6 Bridge zone and soldering zone for different sample

表 5 给出了 80 °C, RH95% 条件下沾有 NaCl 溶液的 SCB 电极塞各贮存时间段电阻的测试结果。

表 5 各贮存时间 SCB 电极塞电阻测试结果

**Table 5** Resistance test results at different storage time  $\Omega$

No.	storage time/d				
	0	14	28	42	56
1	1.06	1.09	1.11	1.12	1.13
2	1.08	1.12	1.08	1.10	1.12
3	1.07	1.10	2.69	+	+
4	1.07	1.14	1.13	+	+
5	1.07	1.09	1.10	1.12	1.13

从表 5 可以看出,当含氯成份引入后,在 80 °C, RH95% 贮存条件下,与不引入含氯成分的试验结果相比,电极塞的电阻阻值增大得更快。结合图 6 各 SCB 电极塞的腐蚀情况发现,电阻的变化与桥区和焊点的腐蚀程度成正比关系。如 3 号和 4 号电极塞焊点发生了严重腐蚀,直接导致了电阻急剧增大至无穷; 5 号电极塞焊点部分完好,其电阻没有发生显著增大。

对 3 号、4 号和 5 号电极塞的腐蚀点和未腐蚀点进行了能谱分析,结果表明,在腐蚀较为严重的地方氯离子含量通常都大于 1%,有的超过了 3%。图 7 和表 6 给出了 4 号样的能谱测试结果。

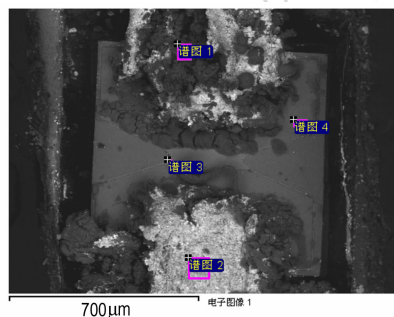


图 7 4 号样的测试点及能谱谱图

Fig.7 Test point and energy spectrum for sample 4

表 6 4 号样各测试点的元素含量

**Table 6** Element content of test point for sample 4 %

element	spectrum (graph 1)	spectrum (graph 2)	spectrum (graph 3)	spectrum (graph 4)
C	10.21	24.80	10.34	4.04
O	56.20	15.46	3.85	3.62
Al	28.69			91.95
Si	0.63		85.81	0.40
S		1.42		
Cl	3.01			
Ag	1.25	58.31		
total	100.00	100.00	100.00	100.00

几种环境条件下 SCB 电极塞的电阻和腐蚀情况的关系表明,在 SCB 火工品的贮存监测过程中,如发现 SCB 电极塞的电阻在两个监测时间点之间发生明显增大(通常超过 0.5  $\Omega$ )时,预示着桥区和焊点发生了腐蚀;当 SCB 电极塞的电阻增大不明显时,可认为桥区和焊点受腐蚀的可能性较小,此时脚线的腐蚀是导致电阻增加的主要因素。因此,可通过监测电阻的变化对 SCB 火工品的换能元的腐蚀情况进行检测。

#### 4 结 论

(1) 单一温度不会引起 SCB 电极塞焊点和脚线的腐蚀,不会引起 SCB 电极塞失效;潮湿会引起 SCB 电极塞焊点和脚线的缓慢腐蚀,是导致 SCB 电极塞失效的一个因素;湿度和氯离子共同存在引起 SCB 电极塞焊点的严重腐蚀,且氯离子的存在对 SCB 电极塞的腐蚀起了加速作用,是导致 SCB 电极塞快速失效的主要因素。

(2) 脚线的腐蚀仅能导致电阻的缓慢增加, 而焊点的腐蚀则会导致电阻明显变大, 因此, 电阻测试可以作为 SCB 换能元完好性的一个无损检测手段。

(3) SCB 桥区性能稳定, 不易发生腐蚀; 湿度的存在会导致 SCB 电极塞的脚线发生腐蚀, 并易引起 SCB 焊点的空隙处发生缓慢腐蚀。因此, 应加强生产流程控制, 杜绝生产过程中湿度的引入, 以免在 SCB 火工品的贮存过程中导致焊点的缓慢腐蚀。

(4) 氯离子对 SCB 电极塞的焊点腐蚀有加速作用。因此, 在 SCB 芯片的制造工艺和 SCB 产品的生产过程中, 应采取措施严格控制氯离子和潮湿的引入。

#### 参考文献:

- [1] Strohm G, Son S. Performance Characterization of Nanoscale Energetic Materials on Semiconductor Bridges (SCBs) [C] // 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2010.
- [2] 祝逢春, 徐振相, 陈西武, 等. 半导体桥火工品研究的新进展 [J]. 兵工学报, 2003(1): 106-110.  
ZHU Feng-chun, XU Zhen-xiang, CHEN Xi-wu, et al. Study new progression on SCB initiator[J]. *Acta Armamentarii*, 2003 (1): 106-110.
- [3] Jongdae Kim, Tae Moon Roh, Kyoung-IK Cho, et al. Optical characteristics of semiconductor bridge under high current density condition[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2001, 48(5): 852-857.
- [4] 李黎明, 尹国福, 王静雅, 等. 微小型半导体桥电容抗静电加固技术研究[J]. 兵工学报, 2012(增刊): 73-77.  
LI Li-ming, YIN Guo-fu, WANG Jing-ya, et al. Research on the antistatic capacitance reinforcement in micro semiconductor bridge[J]. *Acta Armamentarii*, 2012(Supplement): 73-77.
- [5] Marx K D, Ingersoll D, Bickes R W. Electrical modeling of semiconductor bridge (SCB) BNCP detonators with electrochemical capacitor firing sets[M]. USDOE, Washington, DC, 1998.
- [6] Bickes R W Jr. Wackerbarth D E. SCB thermite igniter studies semiconductor bridge[R]. AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 33rd, Seattle, WA, July 6-9, 1997.
- [7] 卢斌, 洪志敏, 任小明, 等. SCB 换能元应用于微型固体推进器中的研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 305-307.  
LU Bin, HONG Zhi-min, REN Xiao-ming, et al. Research on SCB energy exchange device in microsolid propellant[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 305-307.
- [8] Klassen Sandra E, Sorensen N Robert. An investigation of corrosion in semiconductor bridge explosive devices[R]. Sandia National Laboratories. 2007.

## Failure Mechanism of SCB Electrode Plugs under Different Storage Conditions

LI Fang<sup>1</sup>, ZHANG Rui<sup>1</sup>, DU Zhen-hua<sup>1</sup>, CUI Fei-fei<sup>2</sup>, ZHOU De-xin<sup>2</sup>, WANG Sheng<sup>2</sup>, FU Dong-xiao<sup>1</sup>, LI Geng<sup>1</sup>

(1. Shaanxi Applied Physics-Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. Equipment Department of PLA Navy, Beijing 100841, China)

**Abstract:** To acquire the failure mode and failure mechanism of semiconductor bridge (SCB) initiator in the process of long-term storage, the changes in resistance and appearance of SCB electrode plugs before and after storage in various environment stress were studied by accelerated life test, resistance test and scan electron microscope test. Results show that a single temperature (71 °C) stress does not cause the corrosion of SCB electrode plugs and accretion of resistance. Temperature and humidity (80 °C, RH=95%) stress can cause slow corrosion of leading wire of SCB electrode plugs and resistance adding slightly. Under the temperature and humidity(80 °C, RH=95%) stress, SCB electrode plugs with salt water after storage appear serious corrosion phenomenon. A conclusion of accelerating the corrosion of SCB electrode plugs by chlorine ion and corrosion degree of judging the soldering joints by resistance size of SCB electrode plugs is obtained. Namely the greater the resistance of SCB electrode plug, the deeper the corrosion degree of bridge or soldering joints

**Key words:** initiator; semiconductor bridge (SCB) electrode plugs; accelerated life test; corrosion

**CLC number:** TJ55; O64

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.02.012