

文章编号:1006-9941(2023)03-0235-08

## 温度对半导体桥电爆性能影响研究

王成爱<sup>1,2</sup>,许建兵<sup>1,2</sup>,沈云<sup>1,2</sup>,王悦昕<sup>1,2</sup>,沈瑞琪<sup>1,2</sup>,叶迎华<sup>1,2</sup>

(1. 南京理工大学化学与化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 微纳含能器件工信部重点实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了研究温度对半导体桥(SCB)电爆和点火的影响,采用电容放电激励的方式,研究了SCB在环境温度分别为25℃和-40℃的电爆特性,建立数学模型并探讨了环境温度对SCB电爆的影响;开展了以Al/CuO纳米铝热剂为点火药剂的SCB点火感度实验,在环境温度为25℃和-40℃测试了Al/CuO纳米铝热剂的点火温度,并采用Neyer D最优化法测试SCB点火感度。结果发现,当充电电压由30V增加至50V时,电爆延迟时间差值由0.47 μs降低至0.25 μs,电爆所需能量的差值由0.16 mJ增加至0.65 mJ,表明随着充电电压的增加,环境温度对电爆延迟时间的影响减小,对电爆所需能量的影响增大;并发现不同温度下Al/CuO纳米铝热剂点火温度没有显著差异,为740.7℃;-40℃时的SCB临界发火电压比25℃时高0.6V。

**关键词:** 半导体桥;温度;电爆炸;点火

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2021226

## 0 引言

半导体桥(SCB)火工品<sup>[1]</sup>是利用半导体膜或者金属-半导体复合膜作为发火元件的火工品,具有高瞬发度、高安全性、低发火能量等特点,已经应用于灵巧或智能武器、卫星推进<sup>[2]</sup>、弹药、安全气囊和爆破工程等。SCB火工品的应用前景越来越广泛,其面临的应用环境越来越复杂。面对的环境主要有电磁环境、力学环境、高温和低温环境等<sup>[3]</sup>。

关于电磁环境问题,郭晓荣<sup>[4]</sup>和李静等<sup>[5]</sup>研究了不同SCB桥型和SCB桥区面积的抗静电能力,发现桥区面积越大SCB的抗静电能力越强,SCB边缘光滑的抗静电能力更好。周彬等<sup>[6-8]</sup>究了压敏电阻、瞬态电压抑制二极管(TVS二极管)以及肖特基二极管对SCB的

抗静电性能和发火性能的影响,发现压敏电阻、TVS二极管以及肖特基二极管均可有效提高SCB的静电安全性。王军<sup>[9]</sup>设计并研究了平面集成TVS二极管型SCB换能元的静电防护能力发现TVS二极管击穿电压越小,对SCB的静电防护性能越好,同时对SCB电爆性能影响越大。关于力学环境问题,主要利用空气炮、霍普金森压杆模拟实验以及仿真实验开展研究<sup>[10-11]</sup>。关于温度环境问题,1997年Robert W Bickes等<sup>[12]</sup>在报告中提到了SCB火工品在-18℃下点火性能,但是未提及其它温度条件。

针对SCB火工品的环境适应性问题,近年来国内外学者主要开展了电磁加固和过载失效方面的研究,但是温度环境以及气压环境问题鲜有报道。主要原因是,通常情况下SCB的应用环境主要面临的是电磁环境和力学过载问题,很少涉及极端温度和气压问题。然而,随着SCB应用前景愈发广泛,温度环境和气压环境问题日益突出。例如SCB集成在微推冲器阵列<sup>[2]</sup>并应用于微纳卫星姿态调整时,随着微纳卫星绕地飞行,其必然面临极端温度环境,当SCB暴露在太空环境时将面临低气压环境。

由于SCB密封在微推冲器阵列内,气压环境稳定,因此主要考虑温度环境问题。为此,本研究以1ΩV型SCB作为研究对象,采用电容放电激励方式开展

收稿日期:2021-08-24;修回日期:2021-11-03

网络出版日期:2022-09-26

基金项目:航天进入减速与着陆技术实验室开放基金资助(EDL1909213-2)

作者简介:王成爱(1990-),男,博士研究生,主要从事环境气压和温度对半导体桥电爆特性影响及机理研究。

e-mail:317103010086@njjust.edu.cn

通信联系人:叶迎华(1962-),女,研究员,主要从事MEMS火工技术、微推进系统以及含能材料应用技术研究。

e-mail:yyinghua@njjust.edu.cn

引用本文:王成爱,许建兵,沈云,等.温度对半导体桥电爆性能影响研究[J].含能材料,2023,31(3):235-242.

WANG Cheng-ai, XU Jian-bing, SHEN Yun, et al. Effects of Temperature on the Electrical Explosion of SCB[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(3):235-242.

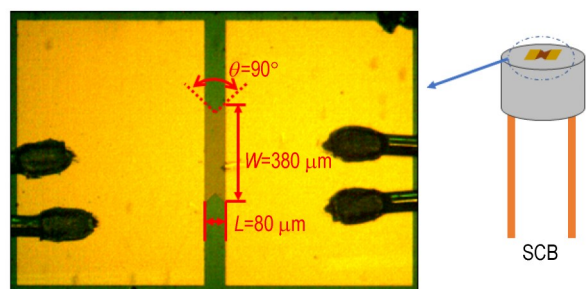
了温度对 SCB 的电爆性能影响实验, 并在此基础上建立了 SCB 电爆数学模型, 通过分析温度对 SCB 和导线阻值的影响, 探讨了温度对 SCB 的电爆性能影响, 最后通过 SCB 点火感度实验, 验证了温度对 SCB 点火性能的影响。

## 1 实验部分

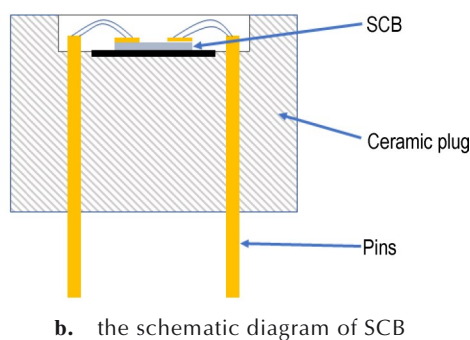
### 1.1 原料与 SCB 试件

纳米铝粉 (Al, 平均粒径 100 nm, 纯度 99.9%) 和纳米氧化铜 (CuO, 平均粒径 40 nm, 纯度 99.9%), 皓锡纳米科技有限公司。

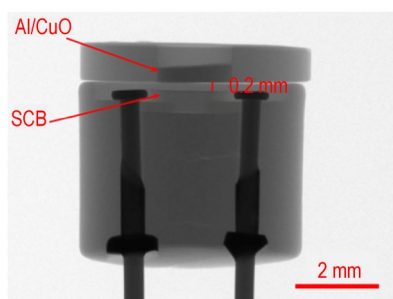
研究所用的 SCB 结构与形貌如图 1 所示。图 1a 为 SCB 形状, 中间的桥区结构为双 V 型, 其 V 型角度为  $90^\circ$ , 尺寸为  $80\ \mu\text{m} \times 380\ \mu\text{m}$ , 厚度为  $2.5\ \mu\text{m}$ , 电阻阻



a. the dimension diagram of SCB



b. the schematic diagram of SCB



c. the internal morphology of SCB

图1 SCB 结构和内部形貌

Fig.1 Schematic diagram and internal morphology of SCB

值为  $1\ \Omega$ , 两边为 Au 焊盘。图 1b 为 SCB 封装示意图, SCB 采用陶瓷塞封装。图 1c 为高分辨微振动三维测量系统拍摄的点火样品内部结构形貌, Al/CuO 纳米铝热剂与 SCB 有  $\sim 0.2\ \text{mm}$  间隙。其中 Al/CuO 纳米铝热剂采用静电喷射的方式制备。

### 1.2 仪器

高分辨微振动三维测量系统, nano Voxel-2700, 三英精控(天津)仪器设备有限公司; 低温箱, DW-60, 沧州市瑞发中兴仪器设备有限公司; 电容器,  $47\ \mu\text{F}$  固体钽电容, 中国振华(集团)新云电子元器件有限责任公司; 示波器, Tektronix DPO 5054B, 泰克有限责任公司; 高速摄影机, Phantom VEO 710L, Vision Research, Inc.。

### 1.3 电爆实验

SCB 电爆测试装置示意图如图 2 所示。分别在环境温度为  $25\ ^\circ\text{C}$  和  $-40\ ^\circ\text{C}$  条件下测试 SCB 的电爆特性, 充电电压分别为 30, 40 V 和 50 V, 平行实验不少于 3 次。实验时, 将 SCB 样品置于低温箱中并且接入电路, 闭合开关 S2 给电容器充电, 之后闭合放电回路开关 S1 使 SCB 电爆, 同时使用示波器记录 SCB 电爆时的电流、电压曲线, 并用高速摄影机拍摄 SCB 的电爆过程, 高速摄像机的采样速率为  $10^5\ \text{fps}$ , 曝光时间为  $8.6\ \mu\text{s}$ 。

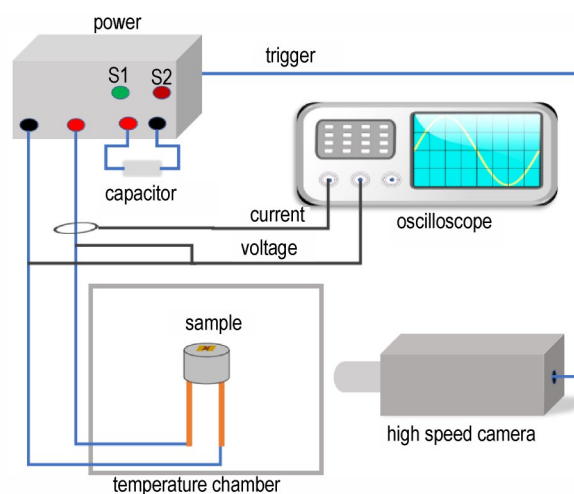


图2 SCB 电爆及点火测试装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of the electrical explosion and ignition system for SCB

### 1.4 点火实验

采用电爆实验相同的装置及条件进行 SCB 的点火实验, 并基于 Neyer D-最优化法测试 SCB 点火感度, 测试时设置预估上限为 30 V, 预估下限为 25 V, 标准偏差为 0.5 V, 仪器分辨率为 0.1 V。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温度对SCB电爆性能的影响

为分析温度对SCB电爆性能的影响,研究建立了SCB电爆数学模型,通过测试不同温度下SCB和导线阻值,分析温度对SCB和导线阻值影响,继而探讨温度对SCB电爆性能的影响,并结合SCB电爆特性参数的实验结果进行验证。

#### 2.1.1 SCB的电爆特性参数

SCB的电压、电流随时间变化的电爆曲线典型曲线如图3所示。SCB在电爆过程中,多晶硅经历熔化、汽化、产生等离子体阶段<sup>[13-15]</sup>,为了明确环境温度对SCB电爆的各个阶段的影响程度大小,将SCB的电爆曲线划分为SCB发生电爆前和电爆后2个阶段。图3中, $t_0$ 为开始给SCB通电的时刻, $t_1$ 为SCB开始熔化的时刻, $t_2$ 为SCB开始汽化的时刻, $t_3$ 为SCB硅蒸汽在电场的作用下产生等离子体从而电爆炸的时刻, $t_4$ 为SCB电爆炸过程结束的时刻。电爆延迟时间( $t_c$ )是 $t_0$ 时刻到 $t_3$ 时刻的时间段,此时间段SCB所消耗的能量称作电爆所需能量( $E_c$ ),作为电爆前的特性参数,由式(1)计算得到。电爆持续时间( $t_e$ )是SCB发生电爆后至电爆结束所耗时间,即 $t_3$ 时刻到 $t_4$ 时刻的时间段。电爆能量( $E_e$ )是 $t_e$ 内SCB所消耗的能量,由式(2)计算得到。SCB电爆前对应参数为 $t_c$ 和 $E_c$ ,电爆后为 $t_e$ 和 $E_e$ 。

$$E_c = \int_{t_0}^{t_3} UI dt \quad (1)$$

$$E_e = \int_{t_3}^{t_4} UI dt \quad (2)$$

式中, $U$ 为电压,V; $I$ 为电流,A。

据此,研究得到充电电压分别为30,40 V和50 V、环境温度分别为25 °C和-40 °C时,SCB的电爆特性参数的柱状图,如图4所示。由图4a可以看出,3种充电

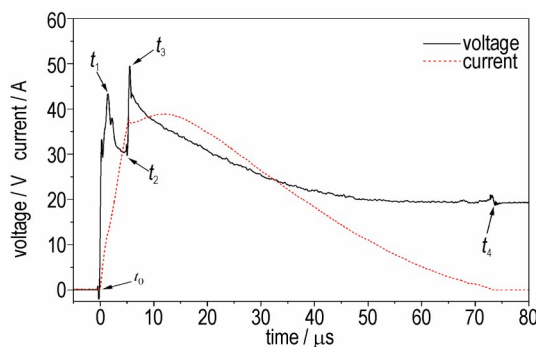
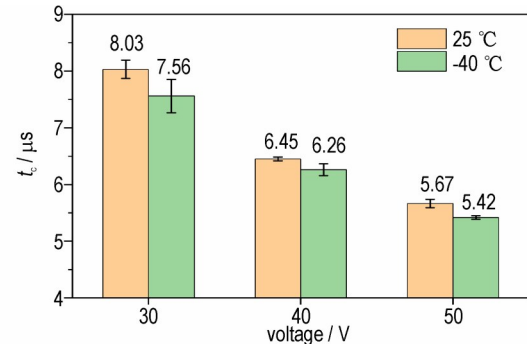


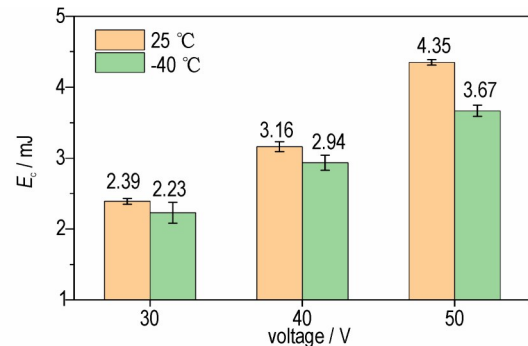
图3 SCB的典型电爆曲线

Fig.3 Typical electrical explosion curves of SCB

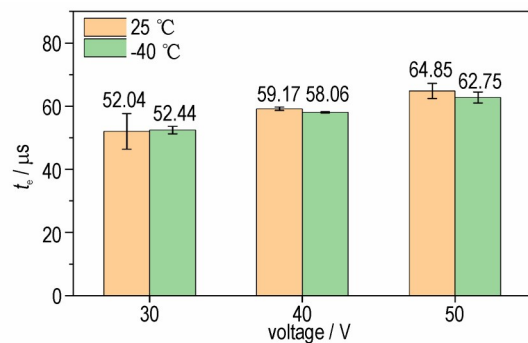
电压条件下,在环境温度为25 °C时的 $t_c$ 与-40 °C时的差值分别为0.47,0.19 μs和0.25 μs,可知随着充电电压的增加,环境温度对 $t_c$ 影响越来越小,与杨贵丽等<sup>[16]</sup>



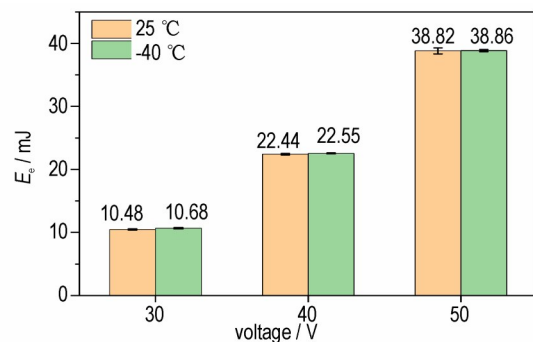
a. critical initiation time ( $t_c$ )



b. critical initiation energy ( $E_c$ )



c. electric explosion time ( $t_e$ )



d. electric explosion energy ( $E_e$ )

图4 SCB的电爆特性参数

Fig.4 Electrical explosion characteristics of SCB



的研究结论相同;由图 4b 可以看出,3 种充电电压条件下,25 °C 时的  $E_c$  与 -40 °C 时的差值分别为 0.16, 0.22 mJ 和 0.65 mJ,表明随着充电电压的增加,环境温度对  $E_c$  影响越来越大。可见,随着充电电压的增加,  $t_c$  逐渐减小,  $E_c$  不断增加,即在相同的激励条件下,环境温度 -40 °C 时比 25 °C 时的  $t_c$  短,  $E_c$  小。出现此现象的原因是降低环境温度后电爆试验的回路中导线电阻降低,导致 SCB 的分压增加从而降低  $t_c$  和  $E_c$ 。结果表明,环境温度 SCB 电爆前的特性参数有显著影响。

由图 4c 和图 4d 可以发现,电爆后,随着充电电压的增加,  $t_e$  和  $E_e$  均随之增大。当充电电压为 30, 40 V 和 50 V 时,环境温度为 25 °C 时的  $t_e$  与 -40 °C 时的差值分别为 -0.4, 1.11  $\mu$ s 和 2.1  $\mu$ s;环境温度 25 °C 时的  $E_e$  与 -40 °C 时的差值分别为 -0.2, -0.11 mJ 和 -0.04 mJ。

为了确定温度对  $t_e$  和  $E_e$  的影响程度,采用方差分析方法分析实验数据的差异显著性。在显著性水平  $\alpha=0.05$  的条件下,  $t_e$  的 F 值为 0.99144, 概率为 0.33756;  $E_e$  的 F 值为 1.21216, 概率为 0.29441。表明,环境温度对  $t_e$  和  $E_e$  没有明显影响,即环境温度对 SCB 电爆后的特性参数没有明显影响。

为了进一步证实环境温度对 SCB 电爆后的特性参数没有明显影响的试验结果,选取充电电压为 50 V, 采用高速摄像机拍摄在环境温度分别为 25 °C 和 -40 °C 时 SCB 电爆过程,结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,SCB 电爆所形成的等离子体形状均由初始的球状向棒状演变,最后逐渐消散,表明不同环境温度下等离子体演变过程基本没有区别,可见,与图 4c 和 4d SCB 电爆后特性参数的结果一致。

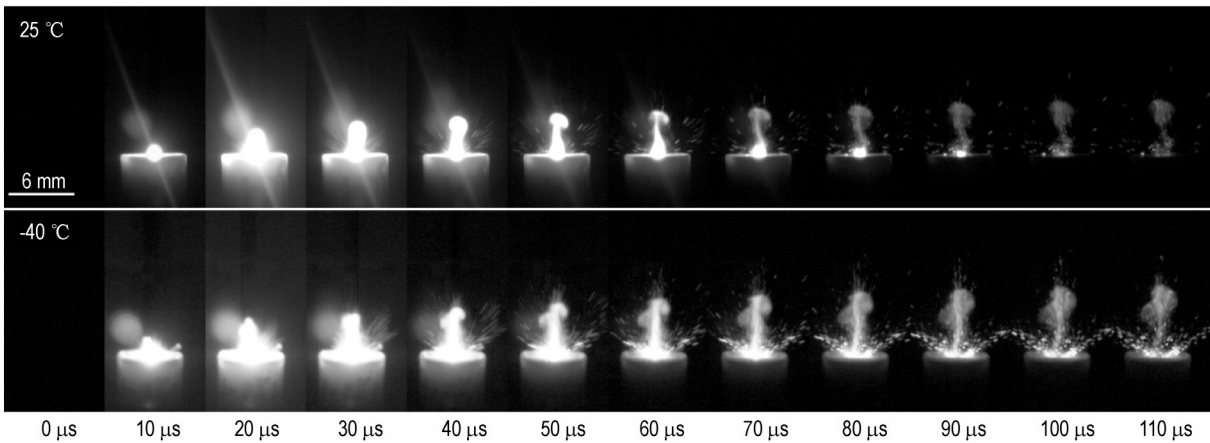


图 5 不同环境温度下 SCB 电爆过程高速摄像结果

Fig.5 High-speed photography of SCB's electric explosion at different ambient temperatures

### 2.1.2 SCB 电爆数学模型

由图 4 可知,环境温度对 SCB 电爆之前有影响,电爆之后没有显著影响。为此研究拟建立数学模型模拟环境温度对 SCB 电爆之前的电爆特性参数的影响。

由于在脉冲电流(电容放电)作用下 SCB 达到电爆时主要是多晶硅凝聚相加热至汽化过程,在整个过程中存在 SCB 被加热所消耗的能量  $\Phi_{SCB}$  (单位:J)、SCB 向环境空气散失的能量  $\Phi_{air}$  (单位:J) 以及向基底传热所消耗的能量  $\Phi_{base}$  (单位:J),则 SCB 的能量守恒方程<sup>[17]</sup> 见式(3),其中  $\Phi$  (单位:J) 为 SCB 输入的能量。

$$\Phi + \Phi_{SCB} + \Phi_{air} + \Phi_{base} = 0 \quad (3)$$

由于电容放电功率随时间发生变化,为了使研究问题简化,作出如下假设:SCB 输入功率采用电容放电输出方式,SCB 的阻值不变。模型简化后 SCB 传热过程可视为一维平板导热,传热模型示意图如图 6 所示。多晶硅层(SCB)不考虑厚度,作为一个发热边界。

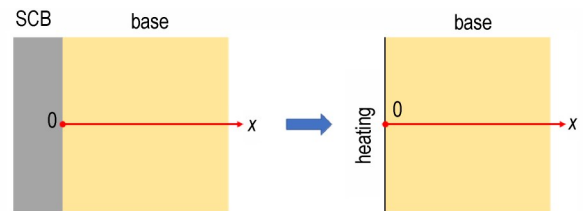


图 6 SCB 一维传热示意图

Fig.6 The one dimensional heat transfer diagram of SCB

当不考虑空气热损失时,则 SCB 散热的数学描述和边界条件为:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} &= a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} (0 < x < \delta, \tau > 0) \\ T(x, 0) &= T_{\infty} (0 \leq x \leq \delta) \\ -\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \eta \frac{U^2}{AR} \exp\left(-\frac{2\tau}{RC}\right) \\ \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$  是热扩散率,  $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $T$  是温度,  $\text{K}$ ;  $T_\infty$  是环境温度,  $\text{K}$ ;  $\delta$  是基底传热厚度,  $\text{m}$ ;  $\tau$  是时间,  $\text{s}$ ;  $\eta$  是有效能量系数;  $A$  是 SCB 的传热面积,  $\text{m}^2$ ;  $U$  是输入电压,  $\text{V}$ ;  $R$  是点火电路的电阻值,  $\Omega$ ;  $C$  是钽电容的电容值,  $\text{F}$ 。

解方程可得 SCB 桥区温度变化为:

$$T(0, \tau) = T_\infty + \eta \frac{U^2}{A\lambda R} \exp\left(-\frac{2\tau}{RC}\right) \int_0^\tau \exp\left(\frac{2t}{RC}\right) \sqrt{\frac{a}{\pi t}} dt \quad (5)$$

对式(5)中的  $\exp\left(\frac{2t}{RC}\right)$  在  $t = 0$  点进行泰勒展开,

取一次项, 可得 SCB 温度随时间变化的模型:

$$T(\tau) = T_\infty + \eta \frac{2U^2}{A\lambda R} \sqrt{\frac{a}{\pi}} \exp\left(-\frac{2\tau}{RC}\right) \left(1 + \frac{2\tau}{3RC}\right) \quad (6)$$

### 2.1.3 温度对 SCB 与导线的阻值影响

SCB 的电爆试验中, 点火回路中包含导线、电容、开关元件以及 SCB。由于本研究的 SCB 阻值为  $1 \Omega$ , 导线阻值约  $0.3 \Omega$ , 导线阻值不可忽略。导线为芯径为  $2.5 \text{ m}^2$  的无氧铜导线, SCB 和铜导线的电阻率均与温度成正相关, 且在一定温度范围内呈线性关系; 因而, 通过文献和物理化学手册获得了 SCB 和铜导线分别在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时的电阻率<sup>[18-19]</sup>, 如表 1 所示。

表 1 SCB 和铜导线的电阻率参数<sup>[18-19]</sup>

Table 1 Resistivity parameters of SCB and copper wires<sup>[18-19]</sup>

	$T / \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho / \Omega \cdot \text{m}$
Cu wires	25	$1.712 \times 10^{-8}$
	-40	$1.295 \times 10^{-8}$
SCB	25	$1.048 \times 10^{-8}$
	-40	$0.976 \times 10^{-8}$

Note:  $T$  is ambient temperature,  $\rho$  is the electrical resistivity.

电阻的计算公式

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (7)$$

式中,  $l$  是导线长度,  $\text{m}$ ;  $s$  是导线横截面积,  $\text{m}^2$ ;  $\rho$  是与材料特性有关的常数, 称为电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ 。

由式(7)可知, SCB 和铜导线的长度与横截面积均已确定, 因此, SCB 和铜导线分别在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时的电阻比值 ( $\gamma_{\text{SCB}}, \gamma_{\text{Cu}}$ ) 为:

$$\gamma = \frac{R_{-40^\circ\text{C}}}{R_{25^\circ\text{C}}} = \frac{\rho_{-40^\circ\text{C}}}{\rho_{25^\circ\text{C}}} \quad (8)$$

式中,  $R_{25^\circ\text{C}}$  和  $R_{-40^\circ\text{C}}$  分别是环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时 SCB (或导线) 的阻值,  $\Omega$ ;  $\rho_{25^\circ\text{C}}$  和  $\rho_{-40^\circ\text{C}}$  分别是环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时 SCB (或导线) 的电阻率,  $\Omega \cdot \text{m}$ 。

$$\frac{\gamma_{\text{SCB}}}{\gamma_{\text{Cu}}} = \frac{\left(\frac{R_{-40^\circ\text{C}}}{R_{25^\circ\text{C}}}\right)_{\text{SCB}}}{\left(\frac{R_{-40^\circ\text{C}}}{R_{25^\circ\text{C}}}\right)_{\text{Cu}}} = \frac{\left(\frac{R_{\text{SCB}}}{R_{\text{Cu}}}\right)_{-40^\circ\text{C}}}{\left(\frac{R_{\text{SCB}}}{R_{\text{Cu}}}\right)_{25^\circ\text{C}}} = \frac{0.93}{0.76} = 1.22 \quad (9)$$

式中,  $\gamma_{\text{SCB}}$  和  $\left(\frac{R_{-40^\circ\text{C}}}{R_{25^\circ\text{C}}}\right)_{\text{SCB}}$  是 SCB 在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时的

电阻比值;  $\gamma_{\text{Cu}}$  和  $\left(\frac{R_{-40^\circ\text{C}}}{R_{25^\circ\text{C}}}\right)_{\text{Cu}}$  是铜导线在  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$

时的电阻比值;  $\left(\frac{R_{\text{SCB}}}{R_{\text{Cu}}}\right)_{-40^\circ\text{C}}$  和  $\left(\frac{R_{\text{SCB}}}{R_{\text{Cu}}}\right)_{25^\circ\text{C}}$  分别是环境温

度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时 SCB 与铜导线的电阻比值。

将表 1 中参数代入式(8)中可得, SCB 的电阻比值  $\gamma_{\text{SCB}} = 0.93$ , 铜导线的电阻比值  $\gamma_{\text{Cu}} = 0.76$ 。由式(9)可知,  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时线路中 SCB 的阻值与铜导线的比值

$\left(\frac{R_{\text{SCB}}}{R_{\text{Cu}}}\right)_{-40^\circ\text{C}}$  高于  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时的比值  $\left(\frac{R_{\text{SCB}}}{R_{\text{Cu}}}\right)_{25^\circ\text{C}}$ 。

通过电爆实验获得 SCB 电爆时的电流、电压曲线可计算出 SCB 阻值随时间变化 (动态电阻)。图 7 是环境温度分别为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  和  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下 SCB 在电爆之前的动态电阻, 可以发现电阻的变化趋势和数值大小均相似, 最大值约  $2.35 \Omega$ , 最小值约  $0.38 \Omega$ 。通过计算可得 SCB 的平均阻值 ( $R$ ) 约为  $0.91 \Omega$ 。结果表明: 降低环境温度后 SCB 的初始阻值降低, 但是动态阻值没有明显变化。

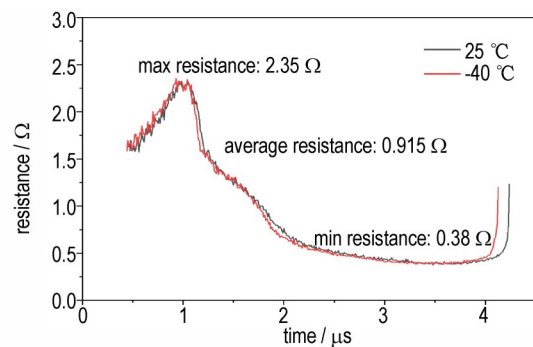


图 7 SCB 阻值随时间变化结果

Fig.7 Dependence of  $R_{\text{SCB}}$  on time

铜导线阻值随环境温度变化表达式为:

$$R_{\text{Cu}} = 0.2196 + 0.000736T \quad (10)$$

在环境温度为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  时导线的阻值为  $0.24 \Omega$ , 由式(10)可知, 环境温度为  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  时铜导线阻值降低至  $0.19 \Omega$ , 则铜导线的阻值降低了  $0.05 \Omega$ 。

### 2.1.4 温度对电爆延迟时间的影响分析

由图 7 可知, 环境温度对 SCB 动态电阻无显著影

响,对铜导线的阻值有影响。结合SCB电爆的数学模型(式(6))和2.1.3节结果(图7和式(10)),绘制充电电压为50 V时SCB的温度随着时间变化趋势和 $t_c$ 随环境温度变化趋势,结果如图8所示。此结果仅考虑环境温度对SCB的影响的理想情况,不考虑铜导线的阻值。由图8可以看出,在-40~25 °C范围内, $t_c$ 随着环境温度增加而降低,-40 °C时 $t_c$ 比25 °C时高0.23  $\mu\text{s}$ 。

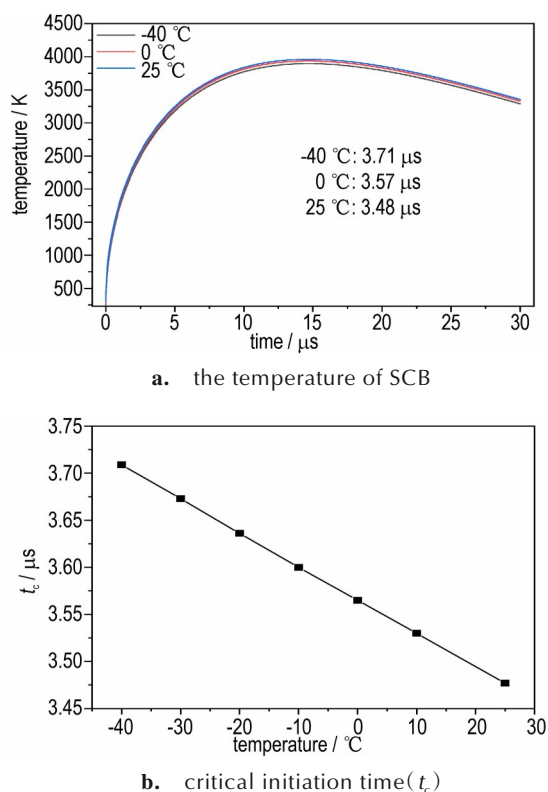


图8 不考虑线阻时SCB温度随时间变化和 $t_c$ 随环境温度变化趋势

Fig.8 Temperature of SCB vs time and critical initiation time vs ambient temperature without consideration of the resistance of the conductor

SCB的平均阻值为0.91  $\Omega$ ,25 °C时铜导线的阻值为0.24  $\Omega$ ,-40 °C时铜导线的阻值降低至0.19  $\Omega$ 。基于此,当考虑导线电阻时,假设环境温度为25 °C时 $R$ 为1.15  $\Omega$ ,环境温度为-40 °C时 $R$ 为1.10  $\Omega$ 。将参数代入式(6)可得SCB的温度随时间变化曲线(图9a),将式(10)与式(6)结合可计算出 $t_c$ 与环境温度的关系(如图9b所示)。由图9a结果可以发现,SCB的温度随着时间的增加先急剧上升,达到最大值之后呈现缓慢下降的趋势。当环境温度分别为25 °C和-40 °C时,SCB的温度达到电爆温度(2607 °C)的时间分别为6.04  $\mu\text{s}$ 和5.82  $\mu\text{s}$ ,此结果与图4a的实验结果相似

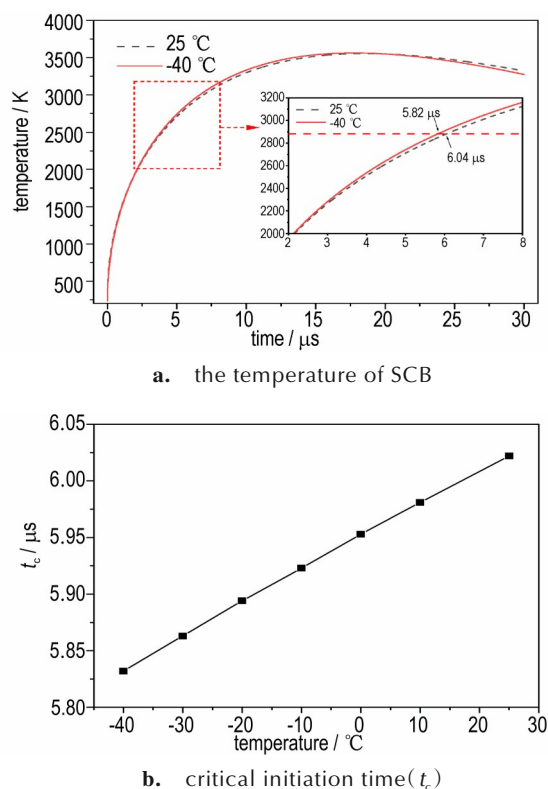


图9 考虑线阻时SCB温度随时间变化和 $t_c$ 随环境温度变化趋势

Fig.9 Temperature of SCB vs time and critical initiation time vs ambient temperature without consideration of the resistance of the conductor

(充电电压为50 V时, $t_c$ 在25 °C和-40 °C时分别为5.67  $\mu\text{s}$ 和5.42  $\mu\text{s}$ )。由图9b可知,环境温度在-40~25 °C范围内, $t_c$ 随着环境温度增加而增加。

## 2.2 温度对SCB点火温度影响

为验证环境温度对SCB点火性能的影响,研究开展了SCB点火感度实验,首先采用Pt丝测试了Al/CuO纳米铝热剂的点火温度<sup>[20]</sup>;接着,以Al/CuO纳米铝热剂为点火药剂,采用Neyer D最优化法对SCB点火感度进行了研究;最后,从理论分析了环境温度对SCB点火感度的影响。其中表2为Al/CuO纳米铝热剂的点火温度,表3为SCB分别在环境温度为25 °C和-40 °C下的点火感度,由于储能放电仪的分辨率为0.1 V,因此表3实验结果均保留一位小数。

由表2结果可知,在环境温度为-40 °C和25 °C时的平均点火温度分别为747.9 °C和731.1 °C,两者的温度差仅为16.8 °C。在显著性水平 $\alpha=0.05$ 的条件下,采用单因素方差分析可得F值为2.59513,概率为

表2 Al/CuO纳米铝热剂在不同温度下点火温度

Table 2 Ignition temperatures of Al/CuO nanothermites at different temperatures

ambient temperature / °C	ignition temperature / °C	mean value / °C	$\delta$ / °C
25	738.6	747.9	10.6
	760.9		
	752.2		
	739.9		
-40	738.6	731.1	17.1
	711.6		
	743.3		

表3 SCB在不同环境温度下的点火感度

Table 3 Ignition sensitivity data of SCB at different ambient temperatures

ambient temperature / °C	amount of sample	50% firing voltage / V	$\delta$ / V
25	9	25.2	0.5
-40	8	25.8	0.5

Note:  $\delta$  is standard deviation.

0.16811 > 0.05, 结果表明环境温度为25 °C和-40 °C时Al/CuO纳米铝热剂的点火温度没有显著差异, 平均点火温度740.7 °C, 标准偏差14.2 °C。

从理论上分析可知, SCB需要将Al/CuO纳米铝热剂加热到点火温度才能使其自持燃烧, Al/CuO纳米铝热剂达到点火温度时所需能量 $Q$ 可由式(11)计算得到:

$$Q = \rho_{\text{Al/CuO}} c V (T - T_{\infty}) \quad (11)$$

式中,  $\rho_{\text{Al/CuO}}$ 是Al/CuO纳米铝热剂的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $c$ 是Al/CuO纳米铝热剂的比热容,  $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;  $V$ 是Al/CuO纳米铝热剂的体积,  $\text{m}^3$ ;  $T$ 是Al/CuO纳米铝热剂的点火温度,  $\text{K}$ ;  $T_{\infty}$ 是环境温度,  $\text{K}$ 。

由于SCB电爆后的参数( $t_e$ 和 $E_e$ )分别在环境温度为25 °C和-40 °C时均没有显著差异, 因此可以推断相同充电电压条件下SCB分别在25 °C和-40 °C时输出的能量没有显著差异。然而表3结果显示, 环境温度为-40 °C时50%发火电压比25 °C时高0.6V, 表明环境温度降低导致SCB点火感度降低, 即点火能力下降。由式(11)可知, 当环境温度由25 °C降低至-40 °C时, Al/CuO纳米铝热剂被加热到点火温度所需的能量更多。因此SCB点火感度降低的原因是由于环境温度降低导致Al/CuO纳米铝热剂达到点火温度时需要更多的能量。

### 3 结论

(1)在相同激励条件下, SCB在环境温度-40 °C时的电爆延迟时间与电爆所需能量均比25 °C时小, 并且随着充电电压的增加, 电爆延迟时间差异越来越小, 电爆所需能量差异越来越明显。在相同充电电压条件下, SCB在25 °C和-40 °C条件下的电爆持续时间和电爆能量没有显著差异。表明环境温度对SCB电爆之前( $t_0 \sim t_3$ )影响显著, 对电爆之后( $t_3 \sim t_4$ )影响不明显。

(2)理论上, 电爆延迟时间随着环境温度增加而降低。由于环境温度对SCB及其放电回路上导线的阻值有显著影响, 尤其导线电阻影响更显著。环境温度由25 °C降低至-40 °C时SCB阻值降低了7%, 导线阻值降低了24%。这导致实验时, 电爆延迟时间随着环境温度升高而增加。

(3)环境温度为25 °C和-40 °C时Al/CuO纳米铝热剂的点火温度没有显著差异, 然而SCB在-40 °C时的临界发火电压比25 °C时高0.6 V, 原因是环境温度降低导致铝热剂达到点火温度时需要更多的能量。

#### 参考文献:

- [1] 叶迎华. 火工品技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 181-185.  
YE Ying-hua. Technology of pyrotechnics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014: 181-185.
- [2] DAI Ji, WANG Fei, RU Cheng-bo, et al. Ammonium perchlorate as an effective additive for enhancing the combustion and propulsion performance of Al/CuO nanothermites[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2018, 122(18): 10240-10247.
- [3] 张醒, 张修科, 杨树彬, 等. 空间使用环境对火工装置性能的影响[J]. 火工品, 2013(5): 1-4.  
ZHANG Xing, ZHANG Xiu-ke, YANG Shu-bing, et al. Influence of the aerospace environment on the performance of pyrotechnics devices[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2013(5): 1-4.
- [4] 郭晓荣. 半导体桥火工品静电危害特性研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
GUO Xiao-rong. Study on the damage characteristics of semiconductor bridge under electrostatic discharge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [5] 李静, 张文超, 秦志春, 等. 半导体桥芯片静电加固的研究[J]. 火工品, 2015(1): 14-17.  
LI Jing, ZHANG Wen-chao, QIN Zhi-chun, et al. Research of electrostatic reinforcement for semiconductor bridge chip [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015(1): 14-17.
- [6] 刘德虎, 周彬, 左成林. 压敏电阻用于SCB火工品静电安全性研究[J]. 爆破器材, 2016, 45(5): 62-64.  
LIU De-hu, ZHOU Bin, ZUO Cheng-lin. Research on the electrostatic safety of semiconductor bridge (SCB) explosive device with varistor [J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(5): 62-64.



- [7] 黄亦斌,周彬,王军.肖特基二极管防护后SCB静电安全性研究[J]. 爆破器材, 2019, 48(3): 33-36.  
HUANG Yi-bin, ZHOU Bin, WANG Jun. Research on the electrostatic security of SCB with schottky barrier diodes[J]. *Explosive Materials*, 2019, 48(3): 33-36.
- [8] 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.  
ZUO Cheng-lin, ZHOU Bin, DU Wei-qiang. Electrostatic safety of semiconductor bridge with external TVS diodes[J]. *Explosive Materials*, 2016, 45(3): 62-64.
- [9] 王军,李勇,卢兵,等.瞬态电压抑制二极管对半导体桥换能元电爆特性影响的模拟[J]. 含能材料, 2019, 27(10): 837-844.  
WANG Jun, LI Yong, LU Bing, et al. Simulation of the influence of transient voltage suppression diode on the electro-explosive performance of semiconductor bridge initiator[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2019, 27(10): 837-844.
- [10] 张蕊,付东晓,都振华,等.基于空气炮和分离式霍普金森压杆的火工品高加速度力学过载模拟试验等效方法研究[J]. 含能材料, 2013, 23(2): 178-183.  
ZHANG Rui, FU Dong-xiao, DU Zhen-hua, et al. Equivalent overload simulation test method of high acceleration mechanics for pyrotechnics based on air cannon and split hopkinson pressure bar[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 23(2): 178-183.
- [11] 刘虎,张蕊,付东晓,等.半导体桥火工品力学过载下的结构失效研究[J]. 火工品, 2012(1): 30-33.  
LIU Hu, ZHANG Rui, FU Dong-xiao, et al. Study on structure failure of SCB initiator under high overload[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(1): 30-33.
- [12] BICKES R W J, WACKERBARTH D E, MOHLER J H. Semiconductor bridge, SCB, ignition studies of Al/CuO thermite [J]. *Office of Scientific & Technical Information Technical Reports*, 1997.
- [13] ZHU Peng, JIAO Jian-she, SHEN Rui-qi, et al. Energetic semiconductor bridge device incorporating Al/MoO<sub>x</sub> multilayer nanofilms and negative temperature coefficient thermistor chip [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(19): 194502.
- [14] XU Jian-bing, TAI Yu, RU Cheng-bo, et al. Characteristic of energetic semiconductor bridge based on Al/MoO<sub>x</sub> energetic multilayer nanofilms with different modulation periods [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121(11): 113301.
- [15] XU Jian-bing, TAI Yu, RU Cheng-bo, et al. Tuning the Ignition Performance of a Microchip Initiator by Integrating Various Al/MoO<sub>3</sub> Reactive Multilayer Films on a Semiconductor Bridge [J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(6): 5580-5589.
- [16] 杨贵丽,焦清介,金兆鑫,等.半导体桥爆发临界性实验研究[J]. 火工品, 2010(1): 1-5.  
YANG Gui-li, JIAO Qing-jie, JIN Zao-xing, et al. The Experiment research on the critical characteristics of semiconductor bridge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2010(1): 1-5.
- [17] 杨世铭,陶文铨. 传热学(第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 70-73.  
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer (Fourth Edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 70-73.
- [18] 杨贵丽,焦清介. 双V型半导体桥电阻计算方法研究[J]. 火工品, 2009(3): 1-5.  
YANG Gui-li, JIAO Qing-jie. Study on calculation method for resistance of double v-shaped semiconductor bridge[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(3): 1-5.
- [19] W.M. H. CRC Handbook of Chemistry and Physics, 97th Edition [M]. Boca Raton: Chemical Rubber company Press, 2016: 12-42.
- [20] WANG Cheng-ai, XU Jian-bing, SHEN Yun, et al. Thermodynamics and performance of Al/CuO nanothermite with different storage time [J]. *Defence Technology*, 2021, 17(3): 741-747.

## Effects of Temperature on the Electrical Explosion of SCB

WANG Cheng-ai<sup>1,2</sup>, XU Jian-bing<sup>1,2</sup>, SHEN Yun<sup>1,2</sup>, WANG Yue-ting<sup>1,2</sup>, SHEN Rui-qi<sup>1,2</sup>, YE Ying-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of chemistry and chemical engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Micro-Nano Energetic Devices Key Laboratory of MIIT, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To investigate the effects of temperature on the electrical explosion and ignition of semiconductor bridge (SCB), the electrical explosion characteristics and ignition performance of SCB with the ambient temperature of 25 °C and -40 °C were studied by a capacitive discharge method, and a mathematical model was established. The ignition temperature of Al/CuO nanothermite was tested at ambient temperature of 25 °C and -40 °C, respectively. The ignition sensitivity of SCB was measured by the D-optimization method. When the charging voltage increases from 30 to 50V, the difference of critical initiation time reduced from 0.47 to 0.25 μs. The difference of critical initiation energy increased from 0.16 to 0.65 mJ. Results shown that with the increase of charging voltage, the influence of ambient temperature on the critical initiation time decreased, and the influence on the critical initiation energy increased. Both the ignition temperatures of Al/CuO nanothermite at 25 °C and -40 °C are 740.7 °C. The 50% ignition voltage at ambient temperature of 25 °C is 0.6 V lower than that at -40 °C.

**Key words:** semiconductor bridge; low temperature; electric explosion characteristics; ignition performance

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021226

**Grand support:** Open Foundation for Laboratory of Aerospace Entry, Descent and Landing Technology(No. EDL1909213-2)

(责编:姜梅)