

文章编号:1006-9941(2019)10-0837-08

## 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

王军<sup>1</sup>,李勇<sup>2</sup>,卢兵<sup>3</sup>,周彬<sup>1</sup>,陈厚和<sup>1</sup>,黄亦斌<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 中国工程物理研究院化工材料研究所, 四川 绵阳 621999; 3. 宁波振华电器有限公司, 浙江 宁波 315722)

**摘要:** 为了解决瞬态电压抑制二极管(TVS)用于半导体桥火工品抗静电设计的参数优化问题,采用电路模拟和试验相结合的方法,构建了电容放电发火测试电路等效模型和半导体桥 PSpice 电子器件模型,研究了 TVS 参数对半导体桥换能元电爆特性的影响。结果表明,当钽电容等效串联电阻为 288 mΩ,钽电容等效串联电感为 0.68 μH,导线电感为 40 nH 和回路电阻为 3.3 mΩ 时,22 μF/16 V 电容放电发火电路的等效电路模型和实际吻合。以阻抗-能量列表模型的方式创建的半导体桥 PSpice 电子器件模型模拟曲线和实际曲线吻合,且模拟电爆数据偏差小于 3%。模拟和试验结果表明,TVS 对半导体桥电爆性能的影响程度随着其击穿电压的升高而降低。当 TVS 的击穿电压在 8~12 V 之间时,即使 TVS 击穿电压低于半导体桥发火电压,半导体桥仍能正常爆发,TVS 击穿造成的分流导致半导体桥爆发延迟(2 μs),且延迟时间随着 TVS 击穿电压的降低而延长。

**关键词:** 半导体桥(SCB);瞬态电压抑制二极管;电爆特性

中图分类号:TJ45;O38

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2019007

### 1 引言

半导体桥(semiconductor bridge, SCB)作为一种钝感电火工品,具有体积小、发火能量低、高瞬发、高可靠性和高安全性等优点<sup>[1-3]</sup>。目前常规半导体桥火工品发火能量低于 5 mJ,满足 500 pF/25 kV/5000 Ω 的人体静电放电条件下不发火和安全电流要求<sup>[4]</sup>,是取代敏感型电火工品(如桥丝式火工品)的较佳选择。虽然常规半导体桥火工品已经具有较高安全性,但是在其产生、运输、检测和使用过程中仍不可避免会遭受到静电冲击。静电对半导体桥火工品的作用危害主要发生在脚-脚和脚-壳之间,脚-壳间静电对火工品的危害主要是静电在脚壳间产生击穿<sup>[5]</sup>,形成电火花并引爆药剂,造成火工品发火。通过在脚-壳间增加静电泄放通道、绝缘环和涂防静电胶等方法,可以有效提高火工

品脚-壳间的抗静电能力。而脚-脚间静电的危害主要是对火工品的发火性能造成影响(如发火钝感),从而影响火工品作用的可靠性<sup>[6]</sup>。当脚-脚间耦合的静电能量进一步加大时,甚至会造成火工品的意外发火。通过在半导体桥火工品的脚-脚间增加保护性静电泄放元件<sup>[7-8]</sup>(如齐纳二极管<sup>[9-10]</sup>、瞬态电压抑制二极管<sup>[11]</sup>、压敏电阻<sup>[12]</sup>和 ESD 静电放电二极管<sup>[13]</sup>等),分走半导体桥换能元吸收的静电能量,从而实现了对半导体桥火工品脚-脚间的静电加固。

静电泄放元件用于半导体桥火工品的静电加固时需要两方面的要求:(1)增加的静电泄放元件不能对半导体桥的电爆性能造成影响;(2)静电泄放元件能够起到静电加固效果。理论设计中一般选用击穿电压大于火工品发火电压的静电泄放元件,这样既保证了不会对火工品的电爆性能造成影响,又能够起到静电加固效果。但是研究表明<sup>[12]</sup>,当静电泄放元件击穿电压大于火工品发火电压时,可能存在静电加固效果减弱或失效的问题;而当击穿电压低于火工品发火电压时,虽然静电加固效果有所提升,但是静电泄放元件又可能会对火工品的电爆性能造成影响(如无法爆发)。因此,静电泄放器件参数的设计存在一个临界值。近

收稿日期:2019-01-08;修回日期:2019-03-25

网络出版日期:2019-05-08

作者简介:王军(1991-),男,博士研究生,主要从事半导体桥火工品电磁兼容性研究。e-mail:314103002325@njtu.edu.cn

通信联系人:周彬(1971-),女,副研究员,主要从事钝感电火工品设计研究。e-mail:zhoubinust@126.com

引用本文: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.

年来,国内外学者提出可以基于电路仿真软件模拟的方法来对火工品进行静电加固设计,但是研究主要集中在静电损伤预测、静电环境的模拟和静电加固效果的仿真等<sup>[14-18]</sup>,而对于静电泄放元件对半导体桥电爆性能的影响研究相对较少。

本研究基于PSpice仿真软件<sup>[19]</sup>,探索了电容放电发火测试电路等效模型和半导体桥 PSpice 电子器件模型的构建方法。以电容放电的方式为激励源,选用瞬态电压抑制二极管(TVS)为静电加固器件,通过模拟和试验结合的方法研究了TVS器件参数变化对半导体桥换能元电爆特性的影响规律和TVS器件参数的临界阈值。

## 2 实验部分

### 2.1 实验样品制备

试验所用半导体桥芯片结构如图1a所示,芯片由单晶硅基底、二氧化硅绝缘层、多晶硅层和电极层组成,其中桥区的长( $L$ )为72  $\mu\text{m}$ ,宽( $W$ )为250  $\mu\text{m}$ ,多晶硅掺杂浓度 $10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ,厚度为2  $\mu\text{m}$ 。为方便后续试验,还需将半导体桥芯片封装入带有凹槽的陶瓷塞中。封装过程大致如下:首先使用环氧胶将半导体桥芯片粘贴在陶瓷塞凹槽中并加热固化,随后采用超声键合的办法用键合丝将半导体桥芯片两个电极分别与陶瓷塞两个脚线相连,最后用导电胶保护键合丝,封装后的半导体桥塞如图1b所示。

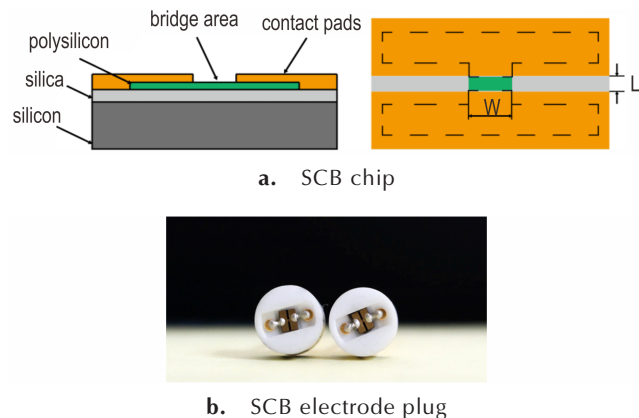


图1 半导体桥芯片及桥塞示意图

Fig.1 Schematic diagram of the SCB chip and SCB electrode plug

### 2.2 瞬态电压抑制二极管

TVS作为一种电路保护器件,具有体积小、峰值功率大、响应时间快(亚纳秒级)、双向防护和高浪涌电压

吸收能力等特点。采用Vishay公司生产的TVS(型号分别为SMDJ6.0CA、SMDJ8.0CA、SMDJ12CA和SMDJ18CA)来研究其对半导体桥电爆性能的影响规律。SMDJ表示二极管的封装类型为贴片型,可承受600 W的脉冲峰值功率,8.0代表TVS的击穿电压为8 V,CA表示TVS是双向型的,TVS基本参数如表1所示,其工作温度范围 $-65\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

表1 TVS基本参数

Table 1 The basic parameters of TVS diode

Parameter	size /mm	breakdown voltage /V	maximum clamping voltage /V	junction capacitance /pF
SMDJ6.0CA		6.6-7.3	10.3	
SMDJ8.0CA	4.06×3.30×1.99	8.8-9.8	13.6	1360
SMDJ12CA		13.3-14.7	19.9	
SMDJ18CA		20.0-22.1	29.2	

### 2.3 电容放电发火电路

电容放电是激励半导体桥火工品发火的常用激励方式。电容放电发火电路的线路图如图2所示。该测试系统包括南京理工大学研制的ALG-CN1型储能电容放电仪(0~150 V内连续可调,精度0.1 V)、22  $\mu\text{F}$  固体钽电容和瞬态数字示波器(LeCroy604Zi)。测试时,先通过储能放电仪对22  $\mu\text{F}$  钽电容充电,充电完毕后通过转换开关将钽电容的能量泄放至半导体桥,从而引起半导体桥的爆发,示波器用于记录半导体桥爆发时的电压和电流变化情况。

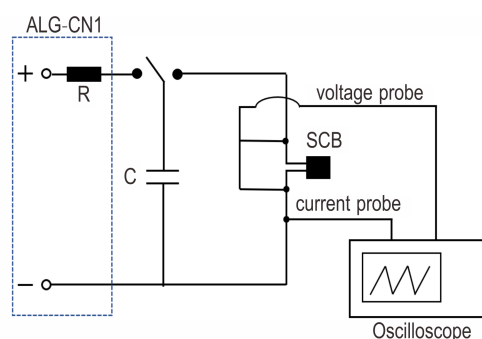


图2 电容放电发火电路原理图

Fig.2 Schematic diagram of the capacitor discharge unit

## 3 结果与讨论

### 3.1 电容放电发火等效电路

对于电容放电发火电路而言,理想情况下可将其简化为一个简单的R-C电路。但是在实际情况下,钽

电容的等效串联电阻、等效串联电感、回路中的电缆和开关元件均会对发火回路的输出能力造成一定影响<sup>[20]</sup>。考虑到上述影响因素,在PSpice中搭建电容放电发火电路等效电路模型,如图3所示。

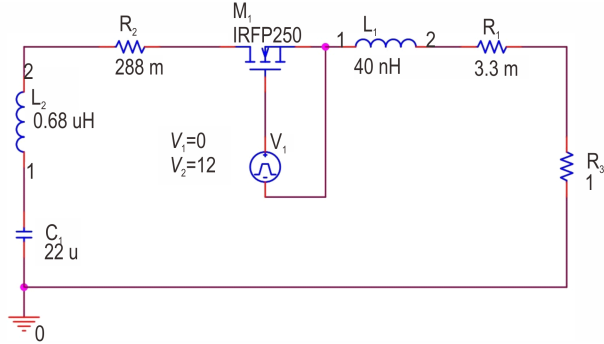
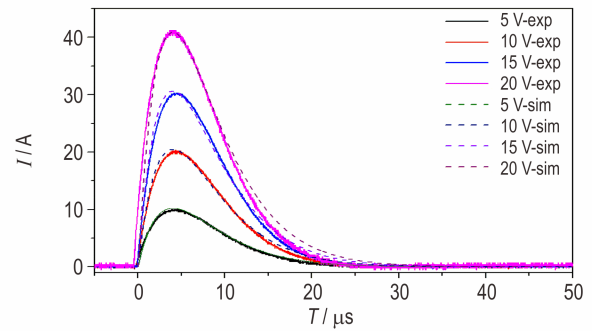


图3 电容放电发火电路等效电路模型

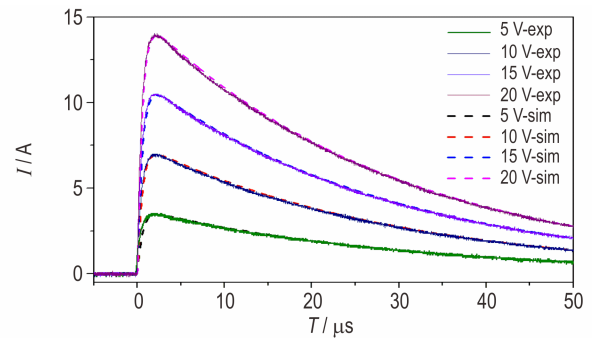
Fig.3 Equivalent circuit of the capacitor discharge unit

图3中, $C_1$ 为22  $\mu\text{F}$  钽电容, $L_2$ 为钽电容的等效串联电感, $R_2$ 为钽电容的等效串联电阻; $M_1$ 为场效应管开关(型号IRFP250,初始电压12 V); $R_1$ 代表引线电阻(3.3  $\text{m}\Omega$ );采用LCR测试仪测得钽电容的等效串联电阻、等效串联电感和引线的电感值分别为288  $\text{m}\Omega$ 、0.68  $\mu\text{H}$ 和40  $\text{nH}$ ; $R_3$ 代表半导体桥火工品。为验证所建等效电路是否和实际电路吻合,采用两种放电条件来测试电容放电发火回路的输出特性并和等效电路的模拟结果对比。(1)钽电容22  $\mu\text{F}$ ,充电电压分别为5,10,15 V和20 V,输出端用导线直接短接,采用示波器测试回路中的电流变化曲线;(2)钽电容22  $\mu\text{F}$ ,充电电压分别为5,10,15 V和20 V,仪器输出端接1  $\Omega$ 纯电阻,测试放电过程中1  $\Omega$ 纯电阻两端的电流变化曲线。

基于图3的等效电路图,首先模拟了无外接火工品(即去除 $R_3$ )条件下,钽电容放电电压分别为5,10,15 V和20 V时回路中的电流变化情况,模拟结果和实际测试结果对比如图4a所示。图4a中实线为实际测试电流曲线(5 V-exp代表电容放电电压为5 V时的实际测试曲线),虚线为模拟电流曲线(5 V-sim表示同种情况下的模拟曲线)。图4a中模拟曲线和实际曲线的电流上升时间、电流峰值和放电结束时间均保持一致。继续采用上述模拟电路,将 $R_3$ 设置为1  $\Omega$ ,用于模拟第二种测试情况,测试流经 $R_3$ 的电流,模拟结果和实际测试电流曲线对比如图4b所示。图4b中的模拟曲线和实际测试曲线在不同放电电压下均保持重合,表明当前构建的等效电路模型可用于模拟上述电容放电发火测试电路。



a. no external load



b. 1  $\Omega$  external load

图4 两种放电条件下模拟和实际测试结果对比图

Fig.4 Comparison of the simulation and actual test results under different discharge conditions

### 3.2 半导体桥换能元电爆特性模拟

典型半导体桥的电爆特性曲线如图5a所示,图5a中两条曲线分别为爆发过程的电压和电流随时间变化曲线。一般将半导体桥电压信号的起始点到电压曲线第二个峰值处( $t_2$ )定义为半导体桥的爆发时间, $t_2$ 时刻对应的为半导体桥的爆发点;根据欧姆定律,该爆发过程的动态阻抗可以通过对半导体桥上的电压和电流做比得到(式1所示),半导体桥电爆过程消耗的能量可以通过爆发功率对爆发时间的积分得到(式2)。

$$R = U/I \quad (1)$$

$$E = \int_0^t UI dt \quad (2)$$

式中, $E$ 为半导体桥电爆过程消耗的能量, $J$ ; $U$ 为半导体桥两端的电压, $V$ ; $I$ 为流经半导体桥的电流, $A$ ; $R$ 为半导体桥的动态阻抗, $\Omega$ ; $t$ 为时间, $s$ 。基于式(1)和式(2)分别得到半导体桥爆发过程的阻抗随时间变化曲线和能量随时间变化曲线,联立两条曲线,即可得到图5b所示的阻抗-能量( $R-E$ )变化曲线。

普遍认为半导体桥电爆过程经历了阻抗正温升(extrinsic)、阻抗负温升(intrinsic)、熔化(melt)、汽化

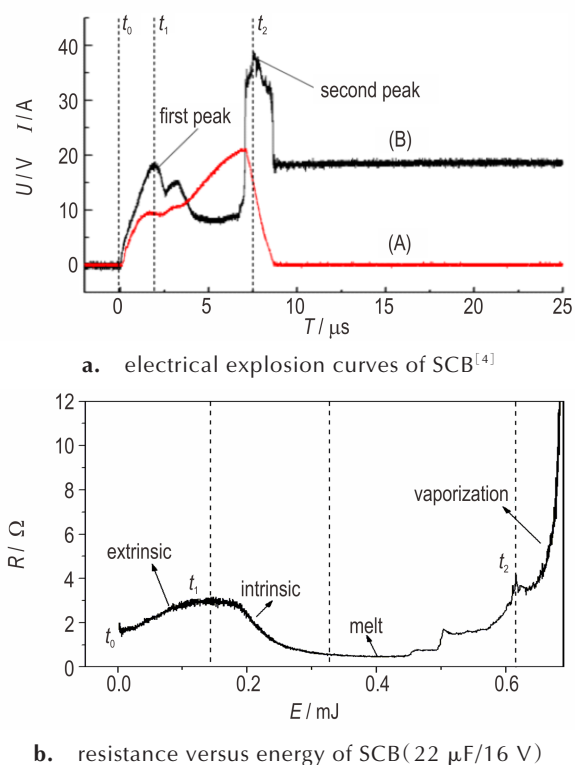


图5 半导体桥电爆曲线和R-E曲线

Fig. 5 The electric discharge characteristic curve and R-E curve of SCB

和产生等离子体(vaporization)等阶段<sup>[17]</sup>。对比图5a和图5b,半导体桥的阻抗从初始值迅速增加到第一个峰值( $t_1$ ,对应于电爆曲线(图5a)中电压曲线第一个峰值处);随后阻抗从峰值 $t_1$ 处迅速下降并经过一个缓慢上升的平台后到达拐点( $t_2$ ),此时对应电爆曲线(图5a)中电压曲线的第二个峰值处,即为爆发点;爆发后,多晶硅桥蒸发形成的导电粒子以等离子体的形式放电,阻抗随之迅速上升直至爆发结束,该阶段为爆发后的延迟放电阶段。从上述分析可知,爆发过程的阻抗-能量曲线和电爆曲线存在一一对应关系。因此,基于半导体桥的阻抗-能量曲线,采用如下步骤在Pspice仿真软件中创建半导体桥的电子器件模型:(1)以电容放电为激励方式,使用示波器采集半导体桥电爆过程的电压和电流变化数据;(2)基于欧姆定律,计算半导体桥爆发过程的动态阻抗和能量变化值,并构建相应的阻抗-能量数据表;(3)在仿真软件中采用子电路描述的办法构建半导体桥的内建电路,并将阻抗-能量数据带入内建电路中,以阻抗-能量列表模型的方式创建其器件模型<sup>[21]</sup>;(4)利用软件中自带的模型编辑器生成半导体桥的电子器件模型。

采用上述方法并以图5b中的R-E数据为建模依据,建立半导体桥在22 μF/16 V电容放电条件下的器件模型并将其加入电容放电等效电路模型中(如图6a)。获取半导体桥在22 μF/16 V条件下的电压和电流变化曲线。在Origin中作图并和实际爆发过程的电压和电流曲线对比,如图6b所示。

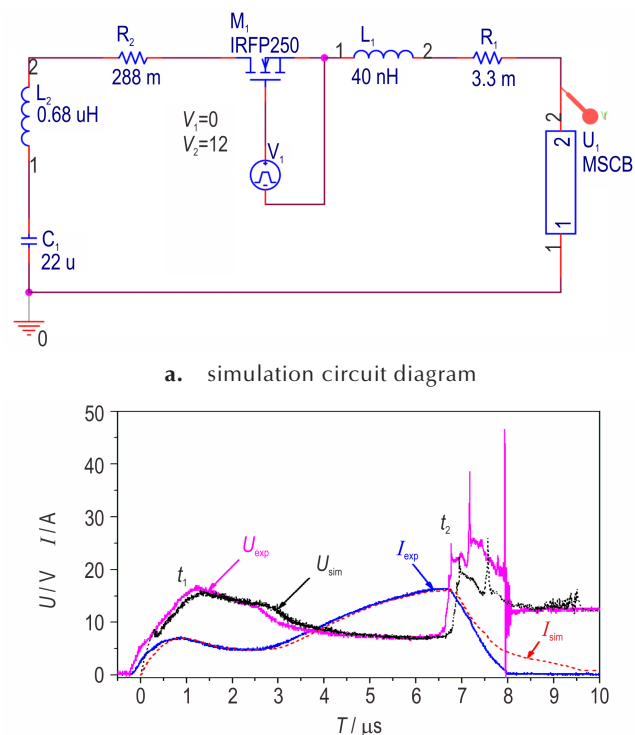


Fig. 6 Simulation circuit diagram of the capacitive discharge unit and the simulation result

图6 电容放电发火模拟电路图及电爆曲线对比

Fig. 6 Simulation circuit diagram of the capacitive discharge unit and the simulation result

对比图6b中的模拟电流曲线( $I_{sim}$ )和实际电流曲线( $I_{exp}$ ),在爆发点( $t_2$ )之前无论是时域还是值域两条曲线基本吻合,爆发点后模拟电流衰减速度略低于实际曲线。进一步观察模拟电压曲线,发现模拟电压曲线( $V_{sim}$ )存在典型的双峰结构,在爆发点( $t_2$ )之前模拟电压曲线和实际电压曲线( $U_{exp}$ )基本吻合。而在爆发点处,模拟电压曲线的尖峰低于实际值。这是源于半导体桥在爆发瞬间,半导体桥阻抗的突变造成回路感应电压的剧烈波动。由于在建立器件模型时,对部分偏差较大数据进行了剔除和平滑处理,因此造成了爆发点处模拟结果和实际结果的差异。除电爆曲线外,半导体桥的爆发时间和爆发能量也是其电爆性能的关键参数,对比模拟和实际情况下的爆发时间和爆发能量,如表2所示。由表中结果可知,模拟结果和实际测试结果的爆发时间偏差为2.6%,爆发能量偏差为

0.3%。为进一步验证模拟结果的可靠性,在 22  $\mu\text{F}/16\text{V}$  的同种放电条件下测试了 5 发半导体桥塞样品,其电爆曲线和  $R-E$  曲线如图 7 所示。

表 2 半导体桥电爆数据对比(22  $\mu\text{F}/16\text{V}$ )

Table 2 The comparison of electric discharge characteristic between the experimental and simulated results(22  $\mu\text{F}/16\text{V}$ )

data	burst time / $\mu\text{s}$	burst energy / mJ
experiment result	6.770	0.589
simulation result	6.946	0.587
difference	2.6%	0.3%

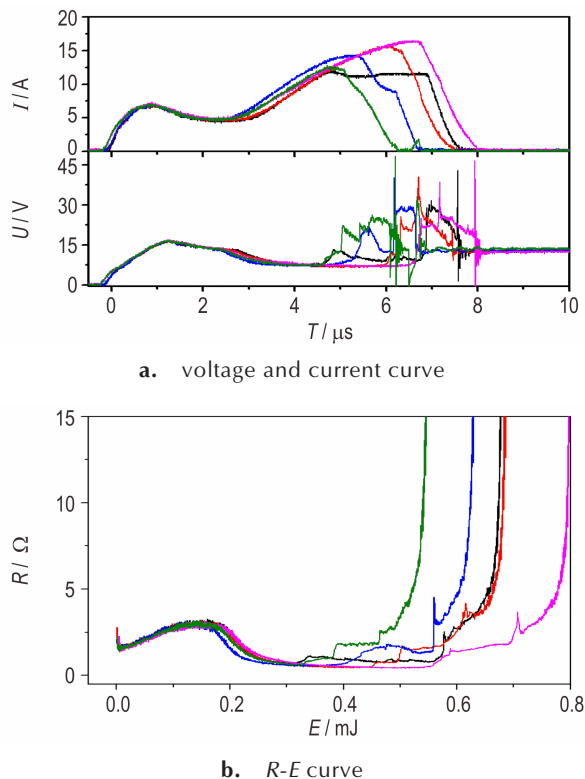


图 7 五发试验样品的电爆曲线和  $R-E$  曲线(22  $\mu\text{F}/16\text{V}$ )

Fig.7 Electrical explosion curves and the  $R-E$  curve of samples

图 7a 中,5 条电压和电流曲线在半导体桥爆发前的阶段基本重合,但是在爆发点前后会出现较大差异且并不呈现特定规律变化。从图 7b 中可以看出,5 条

表 3 半导体桥塞样品爆发时间和爆发能量(22  $\mu\text{F}/16\text{V}$ )

Table 3 The burst time and burst energy of SCB initiators(22  $\mu\text{F}/16\text{V}$ )

sapmle	burst time / $\mu\text{s}$	mean of burst time / $\mu\text{s}$	$\sigma$ / $\mu\text{s}$	burst energy/ mJ	mean of burst energy / mJ	$\sigma$ / mJ
SCB-1	6.990			0.607		
SCB-2	6.711			0.615		
SCB-3	6.177	6.470	0.468	0.560	0.576	0.038
SCB-4	6.770			0.589		
SCB-5	5.701			0.509		

$R-E$  曲线的阻抗正温升和阻抗负温升阶段基本重合,差异主要出现在熔化的后半程和汽化产生等离子体两个阶段。这源于半导体桥本身的差异,在半导体材料加工过程中,即使工艺控制很严格,但是每个换能元芯片的掺杂浓度等性质仍存在差异,也就造成电爆曲线的差异。读取五发半导体桥塞样品的爆发时间和爆发能量,如表 3 所示。

从表 3 可知,即使对于性能非常一致的半导体桥,其爆发时间和能量也会存在差异,爆发时间的  $3\sigma$  区间为 [5.066, 7.874], 爆发能量的  $3\sigma$  区间为 [0.462, 0.69]。与表 2 中模拟结果对比,发现模拟结果均处于上述区间内且偏差远低于其正常偏差。因此,采用上述方法创建半导体桥 PSpice 电子器件模型的方法是可行的,后续模拟均基于此半导体桥器件 PSpice 电子器件模型开展。

### 3.3 并联 TVS 前后半导体桥电爆特性仿真及试验

在电路软件中调取五种型号 (SMDJ8.0CA、SMDJ10CA、SMDJ12CA、SMDJ15CA 和 SMDJ18CA) 的 TVS 来研究不同型号的 TVS 参数变化对半导体桥爆发性能的影响规律。采用图 6a 中的电路,在 U1 端并联一个 TVS,放电条件设为 22  $\mu\text{F}/16\text{V}$ ,得到半导体桥并联 TVS 前后的特性曲线,如图 8 所示。图 8 中 U-SCB 为半导体桥两端电压, I-SCB 为半导体桥的电流, E-SCB 为半导体桥的能量, I-TVS 为 TVS 支路电流, E-TVS 为 TVS 支路的能量。

图 8 中可知,在 22  $\mu\text{F}/16\text{V}$  的电容放电条件下,当半导体桥两端并联击穿电压为 8 V 的 TVS 时(图 8b),其电爆过程经历了如下几个阶段:(1)在电容放电初始阶段,半导体桥两端电压迅速上升,直至到达 TVS 的击穿电压,TVS 被击穿导通。(2)击穿后的 TVS 分走大量能量,并使得半导体桥两端电压被钳制在 10 V 左右,电流呈先下降并保持稳定的趋势。此时半导体桥处于熔融阶段,TVS 的分流效应导致该阶段明显变长。(3)随着半导体桥电阻的逐渐降低,半导体桥支路电压开始下降,直至降至 TVS 击穿电压以下时,TVS 从导

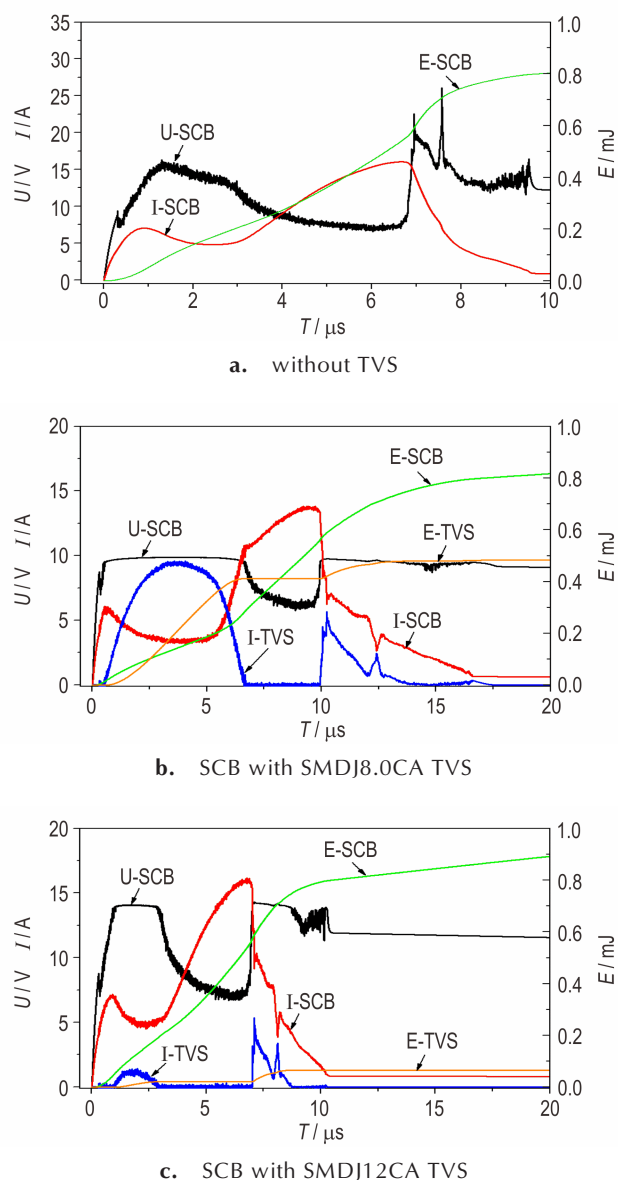


图8 并联不同型号TVS后的模拟电爆曲线  
Fig.8 Simulation results of different types of TVS diodes

通变为高阻状态,表现为TVS支路电流信号趋于0 A。(4)当半导体桥爆发时,电压迅速上升,TVS再次被击穿,电压二次峰值较并联TVS前显著降低。(5)爆发后,从半导体桥的电流曲线可以看出,TVS的分流效应使得延迟放电时间明显延长。

当半导体桥两端并联TVS的击穿电压升高至

12 V时,TVS分流效应明显减弱,TVS能量曲线远低于半导体桥能量曲线。进一步将TVS的击穿电压提高至15 V和18 V时,半导体桥电压曲线第一个峰值与TVS的击穿电压持平,TVS在爆发之前均处于开路状态。在爆发点处,随着半导体桥上电压的迅速升高,TVS被击穿,在爆发点处仅有小电流信号出现,模拟电爆曲线和未并联TVS前几乎一致。

对比并联TVS前后模拟得到的爆发时间和爆发能量(见表4),发现并联型号为SMDJ8.0CA、SMDJ10CA和SMDJ12CA的TVS后,TVS对半导体桥的爆发时间造成延迟,且延迟时间随TVS击穿电压的升高而降低,这是由于TVS被击穿后,分流造成半导体桥支路能量降低,从而延长了桥区熔化的时间,导致最终爆发时间的延迟。当并联的TVS型号变为SMDJ15CA和SMDJ18CA时,TVS在爆发前几乎不分能量,不会对半导体桥的爆发性能造成影响。

基于上述模拟结果,采用前述电容放电发火电路和半导体桥桥塞来验证模拟结果的准确性。采用TVS的型号为SMDJ8.0CA、SMDJ12CA和SMDJ18CA,将TVS通过导线与半导体桥塞的脚线连接起来,使TVS与半导体桥形成并联结构。半导体桥塞和并联TVS后的半导体桥塞在22  $\mu$ F/16 V的发火条件下各做五发,半导体桥并联TVS前后的爆发时间、爆发能量结果如表5所示。

从表中结果可以得知,并联型号为SMDJ6.0CA后的半导体桥,由于TVS分能量太多,导致半导体桥支路的能量不足以引起半导体桥的爆发;并联型号为SMDJ8.0CA后的半导体桥,其爆发时间存在2  $\mu$ s左右的延迟,爆发能量略低于正常爆发时的能量。并联型号为SMDJ12CA和SMDJ18CA的样品,其爆发时间和爆发能量和未并联二极管前基本相当;进一步对比试验和模拟结果,发现两者结论保持一致,即以电容放电方式激励半导体桥爆发时,当TVS的击穿电压低于电容的放电电压时,TVS被击穿产生分流,且TVS管的击穿电压越低,分流现象越明显。同时,由于被击穿的TVS分走了半导体桥上的能量,会造成半导体桥爆发时间的延迟。

表4 并联不同型号TVS后的模拟电爆数据  
Table 4 The electric discharge characteristic data of the simulation results

sample	SCB	SCB+SMDJ8.0CA	SCB+SMDJ10CA	SCB+SMDJ12CA	SCB+SMDJ15CA	SCB+SMDJ18CA
$T/\mu\text{s}$	6.946	10.05	7.817	7.105	6.948	6.946
$E/\text{mJ}$	0.587	0.573	0.574	0.588	0.588	0.587

表5 并联不同型号TVS后的电爆数据

Table 5 The electric discharge characteristic data of the experiment results

sample	SCB	SCB+SMDJ6.0CA	SCB+SMDJ8.0CA	SCB+SMDJ12CA	SCB+SMDJ18CA
$T/\mu\text{s}$	6.470	-	8.375	6.283	6.040
$E/\text{mJ}$	0.576	-	0.486	0.521	0.533

## 4 结论

(1)在构建电容放电发火等效电路模型中,钽电容、回路中的引线和开关元件对测试系统的输出性能的影响不可忽略,当钽电容等效串联电阻为 $288\text{ m}\Omega$ 、钽电容等效串联电感为 $0.68\text{ }\mu\text{H}$ 、导线电感为 $40\text{ nH}$ 、回路电阻为 $3.3\text{ m}\Omega$ 和开关型号为IRFP250时,电容放电等效电路模型和 $22\text{ }\mu\text{F}/16\text{ V}$ 电容放电发火测试电路最为吻合。

(2)基于PSpice软件中子电路建模的方法,通过对半导体桥电爆过程和电爆特征数据进行分析,参照阻抗-能量数据列表,建立了半导体桥在 $22\text{ }\mu\text{F}/16\text{ V}$ 放电条件下的PSpice电子器件模型。对比 $22\text{ }\mu\text{F}/16\text{ V}$ 放电条件下的实际测试电爆曲线和电爆数据,发现模拟得到的爆发时间和爆发能量与实际值偏差范围在3%以内,低于正常偏差值。

(3)TVS的击穿效应是影响半导体桥电爆性能的主要因素。当击穿电压低于半导体桥的发火电压时,TVS被击穿并产生分流效应。当TVS的击穿电压很低时( $\leq 6\text{ V}$ ),TVS被击穿分走大量的能量,使得SCB上的能量不足以汽化多晶硅材料产生等离子体,从而导致SCB无法爆发。当TVS击穿电压为 $8\sim 12\text{ V}$ 时,分流效应减弱,半导体桥电爆曲线中的双峰结构消失,爆发时间产生延迟( $2\text{ }\mu\text{s}$ 以内),但是半导体桥仍能可靠爆发。当击穿电压高于半导体桥的发火电压时,TVS无法被击穿,TVS二极管不会对半导体桥电爆性能产生影响。

### 参考文献:

- [1] 王凯民. 火工品工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] Benson D, Larsen M, Renlund A, et al. Semiconductor bridge: a plasma generator for the ignition of explosives[J]. *Journal of Applied Physics*, 1987, 62(5): 1622-1632.
- [3] Bickes J R. Explosive systems utilizing semiconductor bridge, SCB, technology[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21(3): 146-149.
- [4] 陈飞. SCB火工品静电、射频损伤机理及其加固技术的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
CHEN Fei. Research on the damage mechanism and reinforce-

- ment technology of electrostatic and RF on SCB explosive devices[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [5] 王大为. 半导体桥火工品静电损伤规律及理论模拟[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.  
WANG Da-wei. The semiconductor bridge initiators electrostatic damage and theoretical modeling[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [6] 郭晓荣, 朱顺官, 张琳, 等. 半导体桥静电作用前后点火特性[J]. 含能材料, 2012, 20(1): 99-104.  
GUO Xiao-rong, ZHU Shun-guan, ZHANG Lin, et al. Ignition characteristics of non-electrostatic discharge and electrostatic discharge on semiconductor bridge[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(1): 99-104.
- [7] 杨洁, 马宏萱, 王海. 电火工品抗电磁危害加固技术的研究[J]. 火工品, 2002, 4: 45-47.  
YANG Jie, MA Hong-xuan, WANG Hai. Research for hardening technology of EED against electromagnetic environment hazard[J]. *Initiator and pyrotechnics*, 2002, 4: 45-47.
- [8] 王军, 李勇, 周彬, 等. 电火工品电磁环境适应性的研究进展及展望[J]. 含能材料, 2017, 23(11): 1-10.  
WANG Jun, LI Yong, ZHOU Bin, et al. Research progress and prospect of electromagnetic compatibility of electro-explosive device[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2017, 23(11): 1-10.
- [9] King T L, Tarbell W W. Pin-to-pin electrostatic discharge protection for semiconductor bridges[R]. SAND2002-2213: 2002.
- [10] Hayes M J, Hayes L B, Thomas A. Detonator ignition protection and detection circuit: USP 9243877B2[P], 2016.
- [11] 任钢. 半导体桥火工品电磁兼容技术研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.  
RENG Gang. Research on the electromagnetic compatibility of semiconductor bridge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [12] 杜培康. 压敏电阻用于SCB火工品电磁防护研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2013.  
DU Pei-kang. Electromagnetic compatibility research of varistor used for SCB initiating explosive devices[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.
- [13] LV Z, YAN N, BAO B L. Pin-pin ESD protection for electro-explosive device under severe human body ESD[J]. *Microelectronics Reliability*, 2017: 37-42.
- [14] 于鸿源, 严楠, 陈树肖, 等. 基于电路仿真的桥丝式电火工品静电危害预测[J]. 含能材料, 2015, 23(7): 682-687.  
YU Hong-yuan, YAN Nan, CHEN Shu-xiao, et al. Electrostatic hazard prediction of bridge wire electro explosive device based on the circuit simulation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(7): 682-687.
- [15] 赵佳. 半导体桥火工品静电响应特性及其静电防护研究[D]. 南

- 京:南京理工大学,2014.
- ZHAO Jia. Research on the Response Characteristic and Protection to ESD of Semiconductor Bridge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.
- [16] Weinlein J, Sanchez D, Salas J. Electrostatic discharge (ESD) protection for a laser diode ignited actuator [R]. SAND2003-2100; 2003.
- [17] Marx K D, Bickes R W, Wackerbarth D E. Characterization and electrical modeling of semiconductor bridges [R]. SAND97-8246; 1997.
- [18] 左成林. SCB火工品静电防护理论模拟及实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2016.
- ZUO Cheng-ling. Research on the ESD protection theoretical simulation and experimental of semiconductor bridge initiators [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2016.
- [19] 李永平,董欣,刘浚. PSpice电路设计与实现[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
- LI Yong-ping, DONG Xin, LIU Yuan. PSpice circuit design and implementation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [20] 祝逢春. 半导体桥点火数值模拟与试验研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.
- ZHU Feng-chu. Numerical simulation and experiment study on semiconductor bridge ignition [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2004.
- [21] Peevy G R, Brigham W P, Lyons G R, et al. Computer modeling of electrical performance of detonators [C]//AIAA/SAE/ASME Joint Propulsion Conference and Exhibit, San Diego, 1995.

## Simulation of the Influence of Transient Voltage Suppression Diode on the Electro-explosive Performance of Semiconductor Bridge Initiator

WANG Jun<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2</sup>, LU Bing<sup>3</sup>, ZHOU Bin<sup>1</sup>, CHEN Hou-he<sup>1</sup>, HUANG Yi-bin<sup>1</sup>

(1. School of chemical engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621999, China; 3. Ningbo Zhenhua Electrical Equipment Co Ltd, Ningbo 315722, China)

**Abstract:** To investigate the parameter optimization problem of the transient voltage suppression diode (TVS) device used in the anti-electrostatics design of semiconductor bridge (SCB) initiator, a capacitor discharge ignition equivalent circuit and a SCB initiator model were established in the PSpice software. In the PSpice circuit simulation software, the influence law of TVS parameter variation on the electro-explosive performance of the SCB initiator was studied. The results show that for 22  $\mu\text{F}/16\text{ V}$  capacitor discharge ignition circuit, the simulation circuit was in good agreement when the wire inductance was 40 nH, while the loop resistance is 3.3 m $\Omega$ , and the equivalent series resistance and inductance of tantalum capacitor is 288 m $\Omega$  and 0.68  $\mu\text{H}$ , respectively. By comparing the electro-explosive curve and data, the SCB initiator model created by the impedance-energy list exhibited higher accuracy. There were two thresholds for the effect of TVS on the electro-explosive performance of SCB. The SCB failed to burst when the TVS breakdown voltage was less than 6 V. When the breakdown voltage of TVS was between 8–12 V, the SCB could burst normally even if the TVS breakdown voltage was lower than the voltage for the ignition of the semiconductor bridge. But the shunting effect caused by the breakdown of TVS caused the delay of burst time, and the delay time increased as the TVS breakdown voltage decreased.

**Key words:** semiconductor bridge initiator(SCB); transient voltage suppression diode; electro-explosive performance

**CLC number:** TJ45; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019007

(责编:高毅)