doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2023.06.004

基于 PSpice 软件的半导体桥换能元电爆特性的模拟仿真*

袁玉红[①②] 张 胜[③] 韩保良[④] 周 彬[①] 黄寅生[①]
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安徽军工集团控股有限公司(安徽合肥,231135)
④陆军装备部驻合肥地区军事代表室(安徽合肥,231135)

[摘 要] 将电路仿真软件用于半导体桥火工品的电磁兼容性设计时,仿真准确程度取决于发火电路和半导体桥器件模型的精度。通过在电路软件中建立电容放电发火电路和半导体桥火工品电子器件模型来实现半导体桥的电爆过程仿真。研究结果表明:在电容放电发火仿真电路中,当回路电感为 0.62 μH、回路电阻为 3.3 mΩ 时,仿真电路可用于模拟实际电容放电发火电路;对比半导体桥火工品爆发过程的仿真和试验结果发现,子电路建模方法建立的半导体桥器件模型能够有效模拟出半导体桥的电爆特性曲线,且模拟电爆参数均在误差范围内。

[关键词] 半导体桥;火工品;电爆特性
[分类号] TJ45

Simulation of the Electro-Explosive Characteristics of Semiconductor Bridge Exchange Elements Based on PSpice Software

YUAN Yuhong[①②], ZHANG Sheng[③], HAN Baoliang[④], ZHOU Bin[①], HUANG Yinsheng[①]
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)
③Anhui Military Industry Group Holding Co., Ltd. (Anhui Hefei, 231135)
④Military Representative Office in Hefei Region, Army Equipment Department (Anhui Hefei, 231135)

[ABSTRACT] When circuit simulation software is used for the electromagnetic compatibility design of the semiconductor bridge (SCB) initiator, the accuracy of the simulation depends on the accuracy of the firing circuit and semiconductor bridge device model. A capacitor discharge ignition circuit and a SCB initiator electronic device model were established in the circuit software to achieve the simulation of the electro-explosive process of the SCB initiator. The results show that, in the simulation circuit of capacitor discharge and ignition, when the circuit inductance is 0.62 μH and the circuit resistance is 3.3 mΩ, the simulation circuit can be used to simulate the actual capacitor discharge and ignition. After comparing the simulation and experimental results of the explosion process of SCB initiator, it is found that the SCB initiator model established by the subcircuit modeling method can effectively simulate the electro-explosive characteristic curve of the SCB, and the simulated electro-explosive data are all within the error range.

[KEYWORDS] semiconductor bridge; initiator; electro-explosive characteristic

0 引言

作为影响电火工品安全性的主要因素之一,静电存在于电火工品的全寿命周期内。通常,在武器系统的生产、组装、测试、存放和搬运等过程中,都有可能使静电累积在人体或武器系统中。当人体与武器系统中的带电体接触时,瞬间产生高电压、大电流

* 收稿日期:2023-06-11
第一作者:袁玉红(1985 -),男,博士研究生,高级工程师,主要从事火工品应用技术的研究。E-mail:28891855@qq.com
通信作者:周彬(1971 -),女,副研究员,博导,主要从事新型火工品技术的研究。E-mail:zhoubinnust@126.com

信号,就有可能使武器系统中的电火工品遭到静电放电的冲击而意外发火[1-2]。

火工品作为一种钝感换能元,半导体桥(semiconductor bridge, SCB)具有小体积、低发火能量、高瞬发、高可靠性和高安全性等优点[3],是未来取代桥丝式火工品的较佳选择。虽然半导体桥火工品本身已经具有较高的安全性,但是随着电磁环境的日益恶化,半导体桥火工品面临的静电环境也越来越恶劣。越来越多的学者将关注点放在半导体桥火工品的抗静电环境能力研究[4]。从研究现状可知,将分立式防护器件集成入半导体桥火工品的结构中是一种较容易实现的抗静电方式。国内外学者使用了诸如齐纳二极管、瞬态电压抑制二极管[5]和压敏电阻[6-7]等静电加固器件对半导体桥火工品进行静电加固。但是,这些研究方法均基于试验的方式来检验防护器件的有效性。而防护器件的防护效果取决于静电加固器件的各项参数。由于静电加固器件种类和规格繁多,导致实际试验过程比较费时、费力。因此,有研究者提出,将电路仿真软件用于电火工品的静电损伤研究和抗静电设计[8-12]。一方面,可利用软件来模拟不同的静电环境;另一方面,由于防护器件的参数在电路软件中可以任意更改,这方便了防护器件的参数选型。

本文中,基于 PSpice 电路仿真软件,搭建了电容放电发火装置的等效电路模型。研究了在 PSpice 仿真软件中建立半导体桥火工品的电子器件模型。并基于电容放电发火仿真电路,模拟了半导体桥火工品的电爆特性曲线,通过与实际发火条件下的电爆曲线及试验数据进行对比,证明了器件模型的有效性和准确性。这为后续火工品的抗静电设计提供了建模方法的参考。

1　电容放电发火测试电路的建立

电容放电发火是激励半导体桥火工品发火的常用方式。在建立半导体桥器件模型前,需要在 PSpice 仿真软件中搭建相应的电容放电发火装置,用以模拟电容放电时的作用效果。电容放电发火电路可以简化为一个简单的电阻-电容(R-C)电路,即充电至一定电压的电容通过开关将电容上的能量施加到半导体桥火工品上,如图 1 所示。C_1 为已设定初始电压的放电电容;回路中的损耗包括电感 L_1 和线路电阻 R_2;R_1 表示外接负载(即火工品)。由于电容放电是个快速放电过程,因此,回路中电感和电阻的参数会对仿真的精确程度造成一定的影响。加

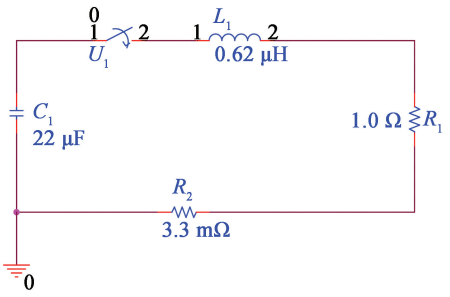

图 1　电容放电发火装置原理图

Fig. 1　Schematic diagram of capacitor discharge and ignition device

之在半导体桥电爆过程中,电阻变化较为复杂;所以,首先对放电电容和回路电感等参数进行测试,并在 PSpice 仿真软件中建立具有相应参数的等效电路图。随后,在模拟电路中,采用 1.0 Ω 标准电阻进行放电模拟,获得模拟放电曲线。最后,对比同等条件下的实际放电曲线和模拟放电曲线,从而验证等效电路的准确性。

首先,对电容放电仪及其回路电缆进行测试。采用 22 μF 钽电容,充电电压分别为 5、10、15 V 和 20 V,仪器输出端接 1.0 Ω 纯电阻,测试放电过程中 1.0 Ω 纯电阻两端的电压和电流变化曲线。回路电流测试结果如图 2 所示。

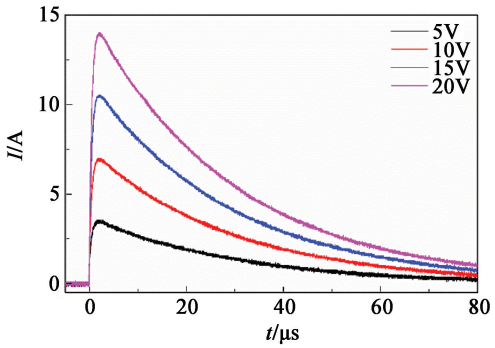

图 2　1.0 Ω 电阻在不同放电条件下的电流曲线

Fig. 2　Current curves of 1.0 Ω resistor under different discharge conditions

由图 2 可知,输出端接 1.0 Ω 纯电阻负载后,整个电路放电时间约为 80 μs。根据欧姆定理,在理想条件下,当电容两端的放电电压为 5、10、15 V 和 20 V 且外接 1.0 Ω 纯电阻时,电阻上的峰值电流应为 5、10、15 A 和 20 A;但是实际测试结果显示,峰值电流只有理论值的 70%。这是由于钽电容放电时,能量除了被 1.0 Ω 纯电阻吸收外,部分能量还消耗在电路的接触电阻和电缆电阻上。

采用安捷伦 34410A 数字万用表测得回路电缆的电阻约为 3.3 mΩ,采用 LCR 测试仪测得回路和

钽电容的总电感为 0.62 μH。因此,将图 1 中的 L_1 设置为 0.62 μH,R_2 设置为 3.3 mΩ,R_1 设置为 1.0 Ω,模拟得到该电路图在上述同种电压条件下回路的电流曲线。模拟结果和实际测试结果如图 3 所示。图 3 中,实线为实际测试的电流曲线,虚线为模拟的电流曲线。例如:5V-exp 代表电容放电电压为 5 V 时的实际测试曲线;5V-sim 表示同种情况下的模拟曲线。对比模拟曲线和实际测试曲线可知,两种曲线基本吻合,峰值电流及电流上升时间几乎一致。因此,当前模拟电路基本能够表现电容放电仪器的输出性能。

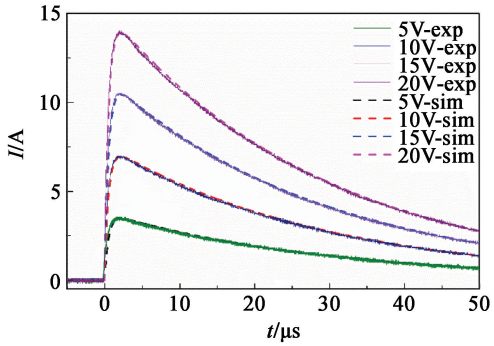

图 3 电容放电模拟和试验结果对比

Fig. 3 Comparison of simulation and test results of capacitor discharge

2 半导体桥器件的建模方法

作为电路仿真软件,PSpice 软件数据库中涵盖了很多常用电子器件的符号及对应模型,如电阻、电容和电感等。在电路仿真过程中,只需调用相应的电子器件模型即可实现相应器件的电学特性仿真。但对于非标准元器件而言,一般无法在 PSpice 软件的数据库内找到一个满足相应电学特性的模型。因此,常常需要使用者在 PSpice 软件中利用一定的建模方法,建立具有相应电学特性的元器件模型,从而实现非标元器件的仿真模拟。对于半导体桥火工品这种非标元件而言,选择采用自建子电路的形式来建立半导体桥的器件模型。

在建立半导体桥火工品的器件模型之前,首先对半导体桥爆发时的电爆特性曲线进行分析。对于典型半导体桥,使用电容放电条件激励半导体桥发火时,电阻在初始阶段波动很剧烈。这是由于放电瞬间仪器及线路中电感的影响,并不是半导体桥的真实电阻。在多晶硅桥到达本征温度之前,电阻特性为正温升,随着多晶硅温度的上升,电阻率也不断上升。当温度达到本征温度之后,由于半导体材料的特性,阻抗特性呈现负阻效应,电阻率随着温度的上升而下降。因此,半导体桥爆发前,电阻呈现先增长、后降低的变化规律;爆发后,电阻迅速上升,直至兆欧级。在半导体桥爆发的过程中,电学参数有电压、电流、功率、电阻和能量等。半导体桥爆发时桥区部分消耗的能量是个定值,与外界施加的能量关系不大。因此,在上述参数中,选择能量和电阻作为建模的基础。基于欧姆定律,半导体桥在电爆过程中的动态电阻可以用半导体桥电极及两端电压 U 与电流 I 的比值得到。半导体桥上消耗的能量 E 可以用积分的方式计算出来,即

$$E = \int UI\mathrm{d}t。 \tag{1}$$

利用电爆过程,示波器采样的电压和电流数据进行计算,可以得到一条电阻随能量变化的曲线,如图 4 所示。

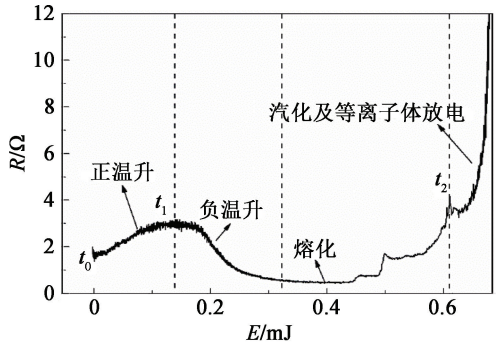

图 4 半导体桥电爆过程 *R-E* 的变化曲线

Fig. 4 *R-E* curve during electro-explosive process of the semiconductor bridge

Furnberg 等[13]采用阻抗-能量曲线构建了爆炸桥丝和爆炸箔换能元的器件模型,并成功用于换能元的参数优化设计。基于 Furnberg 等的思路,对于给定条件下的半导体桥火工品,采用该实测曲线的数据,就可以建立具有同样 *R-E* 电学特性的半导体桥模型。

3 PSpice 软件中半导体桥器件模型的建立

首先,设定 22 μF/16 V 的典型电容放电发火条件。基于该条件下示波器采样得到的数据,计算出电爆过程中半导体桥电阻和能量的变化值,并建立电阻和能量的一一对应关系。将 *R-E* 数据带入半导体桥模型的子电路中,构造出元器件模型(MSCB),并将元器件模型添加入图 5 所示的电容放电发火仿真电路中。运行该电路,读取半导体桥

上的电压和电流,并在 Origin 中作图,与实际电爆曲线对比。对比结果如图 6 所示。

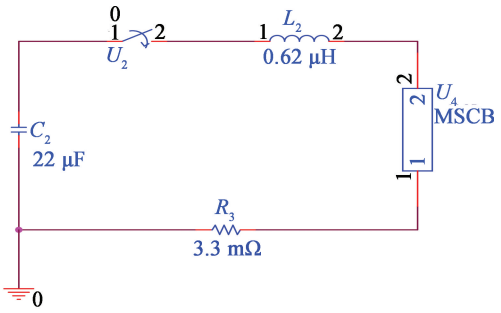

图 5　电容放电发火仿真电路

Fig. 5　Simulation circuit for capacitor discharge and ignition

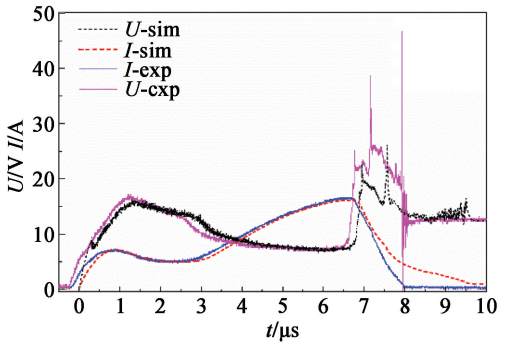

图 6　电爆曲线模拟和试验结果对比

Fig. 6　Comparison of simulation and test results of electro-explosive curves

图 6 中,实线为实际测试的电爆曲线,虚线为模拟的电爆曲线。首先,对比电压曲线:在爆发点之前,两条电压曲线无论是时域还是值域上都基本吻合;仅在爆发点处存在差异,模拟电压曲线尖峰低于实际电压曲线,但是存在典型的双峰特征。对比电流曲线的模拟和实际结果可知,两条曲线在爆发点前也基本吻合,爆发点后模拟电流衰减速度略低于实际情况。上述差异源于半导体桥爆发瞬间的汽化作用,此时桥区阻抗迅速升高,电流迅速降低。根据楞次定律,回路中的寄生电感阻碍电流迅速下降,并释放能量;寄生电感产生的感应电压迅速上升,并超过电容初始放电电压。因此,峰值电压的大小不取决于模型数据,而是受电容放电测试装置电感的影响较大。同时,在建立器件模型时也对部分偏差较大的数据进行了剔除、平均。这两点共同造成模拟结果和实际结果的差异。

图 7 为模拟 *R-E* 曲线,可知模拟曲线也经历了正温升、负温升、熔化、汽化和产生等离子体等阶段。对半导体桥而言,爆发时间和爆发能量是其爆发性能的关键参数。分别读取模拟爆发时间和爆发能量,并和实际结果对比,如表 1 所示。

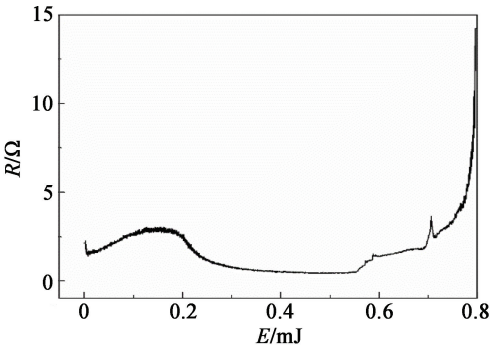

图 7　模拟 *R-E* 曲线(22 μF/16 V)

Fig. 7　Simulated *R-E* curve (22 μF/16 V)

表 1　模拟和实际电爆参数的对比

Tab. 1　Comparison of simulated and actual electro-explosive parameters

参数	实际	模拟	两者偏差/%
爆发时间/μs	6.770	6.946	2.6
爆发能量/mJ	0.589	0.587	0.3

半导体桥的爆发过程非常迅速,爆发时间和爆发能量一般为微秒量级和毫焦耳级。研究显示,实际测试和模拟的爆发时间和爆发能量的最大偏差可达 20%[14-15]。对比表 1 结果可知,爆发时间偏差约为2.6%,爆发能量偏差约为 0.3%,远低于平均偏差。为进一步验证模型的偏差在合理范围内,在 22 μF/16 V 的同种电容放电条件下,测试了 5 发样品(编号为 A1~A5),5 发样品的电压、电流及 *R-E* 变化曲线如图 8 和图 9 所示。

从图8和图9可知,对于同一批样品而言,电压和电流曲线在半导体桥爆发前的一段时间基本重

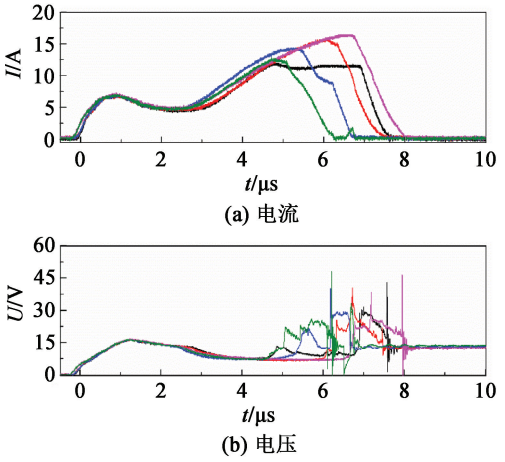

图 8　5 发样品电压和电流的变化

Fig. 8　Changes in voltage and current of the five samples

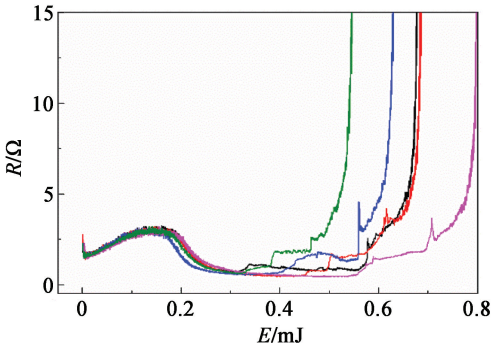

图 9　5 发样品的 *R-E* 曲线

Fig. 9　*R-E* curves of the five samples

合,但是在爆发点前、后出现较大差异,且并不呈现特定规律。图 9 中,5 发样品 *R-E* 曲线的正温升和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。这是源于半导体桥本身的差异。半导体桥以重掺杂多晶硅桥区形成换能元,在加工过程中,即使工艺控制很严格,每个换能元芯片仍然会在掺杂浓度等方面存在差异。这在宏观上表现为每一个换能元芯片的电阻存在微小差异。爆发时,这种天然存在的差异就会造成参数和曲线的偏差。读取 5 个样品的爆发时间和爆发能量,如表 2 所示。表 2 中:t 为爆发时间;E 为爆发能量;σ、σ'分别为爆发时间和爆发能量的标准差。

表 2　5 发样品实际测试电爆特性参数

Tab. 2　Test electro-explosive characteristic parametens of the five samples

编号	t/μs	$\bar{t}$/μs	σ/μs	E/mJ	$\bar{E}$/mJ	σ'/mJ
A1	6.99			0.60		
A2	6.71			0.61		
A3	6.17	6.47	0.46	0.56	0.57	0.03
A4	6.77			0.58		
A5	5.70			0.50		

从表 2 中数据可知,即使对于性能非常一致的半导体桥换能元,电爆特性参数也不完全相同。爆发时间的 3σ 区间为[5.066,7.874] μs,和平均值比较,最大偏差为 11%;爆发能量的 $3\sigma'$ 区间为[0.462,0.690] mJ,和平均能量比较,最大偏差为 11%。将上述参数与模拟结果对比,模拟结果均处于上述区间内,且偏差远低于正常偏差,证明了仿真结果的合理性。因此,可以判定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,且和实际情况吻合,精度较高。

4　结论

1)在 PSpice 仿真软件中建立了电容放电发火仿真电路。分析标准 1.0 Ω 纯电阻在 22 μF 放电电容下的测试结果发现,电容放电电路中影响较大的因素为回路电感和回路电阻。对回路电感和回路电阻的参数进行了仿真。仿真结果表明,当回路电感为 0.62 μH、回路电阻为 3.3 mΩ 时,仿真得到的放电曲线与实际测试结果最为吻合。

2)基于 PSpice 软件中子电路建模的方法,首先建立了半导体桥在定电容放电条件下的器件模型,并带入电容放电发火仿真电路中。将仿真结果和试验结果对比发现,采用该方法建立的半导体桥器件模型具有较高的准确性,能够有效仿真出半导体桥爆发前的电爆特性曲线。

3)采用上述方法建立的半导体桥器件模型可用于半导体桥的电磁兼容性设计中。一方面,可用于预测电容放电发火条件下防护器件参数对电爆性能造成的影响规律;另一方面,也可以用于预测静电条件下不同防护器件的静电加固效果。基于仿真软件强大的计算能力,能够快速获取器件的最佳参数,并为后续抗静电设计提供参考。

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]　李志鹏, 张攀军, 吕子剑, 等. 爆炸桥丝火工品的高压静电放电响应[J]. 含能材料, 2015, 23(6): 578-582.
LI Z P, ZHANG P J, LÜ Z J, et al. Response to high voltage electrostatic discharge for exploding bridgewire detonators [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(6): 578-582.

[3]　BENSON D A, LARSEN M D, RENLUND A M, et al. Semiconductor bridge: a plasma generator for the ignition of explosives [J]. Journal of Applied Physics, 1987, 62(5): 1622-1632.

[4]　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 D W. The semiconductor bridge initiators electrostatic damage and theoretical modeling [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

[5]　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.

(下转第 33 页)

sives in production process[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2010, 36(3): 15-16.

[16] 蒋大勇, 王煊军, 白云, 等. 利用废弃 HTPB 推进剂制备民用炸药的可行性探讨[J]. 火炸药学报, 2010, 33(1): 46-49, 52.
JIANG D Y, WANG X J, BAI Y, et al. Feasibility analysis on preparation of civil explosives with obsolete HTPB propellant [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2010, 33(1): 46-49, 52.

[17] 吴国群, 黄文尧, 王晓光, 等. 二级煤矿许用乳化炸药爆轰参数的理论计算[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2008, 28(1): 78-80.
WU G Q, HUANG W Y, WANG X G, et al. Theoretical calculation of detonation parameters of emulsified explosive materials of class Ⅱ use permissibility in coal mine [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 28(1): 78-80.

[18] 郑恒威, 郭子如, 张显丕. 工业炸药爆轰参数理论计算[J]. 煤矿爆破, 2007(4): 1-4.
ZHENG H W, GUO Z R, ZHANG X P. Theory calculation of detonation parameters for industrial explosive [J]. Coal Mine Blasting, 2007(4): 1-4.

[19] 刘丽梅, 倪欧琪, 刘永, 等. 粉状乳化炸药爆温的理论计算[J]. 爆破器材, 2010, 39(4): 1-4.
LIU L M, NI O Q, LIU Y, et al. Theoretical calculation for the explosion temperature of powdery emulsion explosives [J]. Explosive Materials, 2010, 39(4): 1-4.

[20] 刘丽梅, 杨林, 夏建才. 膨化硝铵炸药爆温的理论计算分析[J]. 爆破, 2011, 28(3): 97-100.
LIU L M, YANG L, XIA J C. Theoretical calculation for the explosion temperature of expanded ammonium nitrate explosives [J]. Blasting, 2001, 28(3): 97-100.

(上接第 26 页)

REN G. Research on the electromagnetic compatibility of semiconductor bridg [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[6] 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.

[7] 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 F. Research on the damage mechanism and reinforcement technology of electrostatic and RF on SCB explosive devices [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.

[8] 于鸿源, 严楠, 陈树肖. 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 H Y, YAN N, CHEN S X, et al. Electrostatic hazard prediction of bridge wire electro explosive device based on the circuit simulation [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(7): 682-687.

[9] 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 J. Research on the response characteristic and protection to ESD of semiconductor bridge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.

[10] WEINLEIN J, SANCHEZ D, SALAS J. Electrostatic discharge (ESD) protection for a laser diode ignited actuator: ASND2003-2100 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratorys, 2003.

[11] KING T L, TARBELL W W. Pin-to-pin electrostatic discharge protection for semiconductor bridges: SAND2002-2213 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratorys, 2002.

[12] MARX K D, BICKES R W, JR WACKERBARTH D E. Characterization and electrical modeling of semiconductor bridges: SAND-97-8246 [R]. Albuquerque, NM, US: Sandia National Laboratorys, 1997.

[13] FURNBERG C M. Computer modeling of detonators [C]//Proceedings of the 37th Midwest Symposium on Circuits and Systems. Lafayette, LA, US, 1994: 646-649.

[14] 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 P K. Electromagnetic compatibility research of varistor used for SCB initiating explosive devices[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013.

[15] 贾昕. Al/CuO 复合半导体桥设计及发火性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
JIA X. Study on design and explosive characteristics of Al/CuO composite SCB [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2014.