

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.01.005

# 封装材料对单触发开关的性能影响研究\*

胡 博 朱 朋 沈瑞琪 叶迎华 吴立志 胡 艳  
南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

[摘 要] 针对单触发开关高导通电流和高导通速率的要求,本文在制备肖特基二极管(SBD)单触发开关的基础上,采用环氧类树脂胶、有机硅胶以及端羟基聚丁二烯(HTPB)橡胶 3 种不同类型的材料封装单触发开关,分析比较其对开关峰值电流、延迟时间和上升时间的影响。试验结果表明,对于 3 种封装材料,单触发开关的峰值电流大小的顺序为:AB 胶 > HTPB 橡胶 > 704 胶;同时,AB 胶封装的开关延迟时间最短,分析原因是其能够约束住肖特基二极管电爆炸产生的电弧。封装材料对开关的上升时间没有显著影响。

[关键词] 单触发开关;封装材料;开关性能;爆炸箔起爆器

[分类号] TM833;TJ5

## 引言

爆炸箔起爆系统是一种具有高安全性和可靠性的直列式火工装置,在核武器和常规武器中都具有广泛应用前景<sup>[1]</sup>,主要包括脉冲功率单元和爆炸箔起爆单元两部分,其中脉冲功率单元主要由高压电源、电容器、高压开关、扁平电缆和控制电路组成。随着爆炸箔起爆技术向低能化、微型化、集成化的方向发展,其关键技术之一是高导通电流和高导通速率的触发开关技术<sup>[2]</sup>。2009 年,Baginski 等首次提出了一种利用肖特基二极管(schottky barrier diode, SBD)电爆炸击穿绝缘电介质层,使处于断开状态的上下电极导通的 SBD 单触发开关<sup>[3]</sup>,该开关具有阻抗低、触发电压小、结构简单、适用于爆炸箔起爆器一次性使用的特点。本课题组采用原子发射光谱等技术研究了单触发开关的 SBD 电爆炸特性,并且分别以聚酰亚胺(PI)和聚氯代对二甲苯(Parylene C)为绝缘电介质层,成功制备了 SBD 单触发开关<sup>[4-5]</sup>。研究发现,在同一充电电压下,基于 Parylene C 的单触发开关性能优于基于 PI 的单触发开关,但是与文献<sup>[3]</sup>中提到的开关性能仍有一定差距。

封装是单触发开关的重要组成部分,虽然单触发开关的封装与半导体类分立元件的封装大体一样,具有保护芯片不受外界环境影响等功能,但是其更重要的作用是提高能量利用效率,实现开关的高导通电流和高导通速率。目前,在单触发开关封装的应用场合,尚没有固定的封装形式,仅有的几篇关

于单触发开关的文献中没有针对这一问题做具体的讨论。因此,本文以试验方法讨论封装对单触发开关性能的影响。电子封装用胶的基本技术要求是:对基材的黏结力高;黏度低,适合灌封操作;适用期长;凝胶固化放热峰低;材料疏水;材料电气绝缘性能高<sup>[6]</sup>。在前期研究制备单触发开关的基础上,分别选用环氧类树脂胶、有机硅胶以及端羟基聚丁二烯(HTPB)橡胶 3 种类型的电子胶进行封装,利用电气性能测试平台对比研究了开关的峰值电流、延迟时间、上升时间等电气特性,分析了封装材料对开关性能的影响。

## 1 试验

### 1.1 单触发开关的制备

制备单触发开关的工艺流程如图 1 所示。I 分别用丙酮、酒精、去离子水清洗陶瓷基覆铜板(铜厚 100  $\mu\text{m}$ ,尺寸 15 mm  $\times$  7 mm)30 min,去除基片的油污、有机杂质等,陶瓷基覆铜板上的铜作为开关底电极,无需图形化;II 采用化学气相沉积设备(PTP-3,百腾科技)真空涂敷 Parylene C 薄膜(25  $\mu\text{m}$ ),底电极上与外部连接部分采用胶带保护,不涂敷 Parylene C;III 采用金属掩模板形成上电极形状,磁控溅射上电极金属材料,均采用直流电源恒定功率模式,本底真空度达  $8.0 \times 10^{-4}$  Pa,工作气体为氩气,金属 Ti、Cu、W 的工作气压分别选定为 0.5、0.5、2.8 Pa,功率分别为 200、150、150 W,Cu 和 W 的厚度分别约为 1.5  $\mu\text{m}$  和 200 nm。Ti 为黏结层,起提

\* 收稿日期:2015-06-10

基金项目:江苏省自然科学基金面上项目,BK20151486

作者简介:胡博(1987~),男,博士研究生,主要从事新型火工品技术研究。E-mail:huhowf@163.com

通信作者:沈瑞琪(1963~),男,博导,教授,主要从事 MEMS 技术、火工技术研究。E-mail:rqshen@mail.njust.edu.cn

高金属 W 与电介质层连接的作用,厚度为 30 ~ 50 nm。W 作为防烧蚀材料,起降低 Cu 金属烧蚀的作用;IV 将 SBD(制备过程和结构见文献[4]) 阳极朝下与下电极金属 Cu 层连接,漆包线与 SBD 负极连接,用铜带分别与上下电极连接,连接材料均为导电银浆。

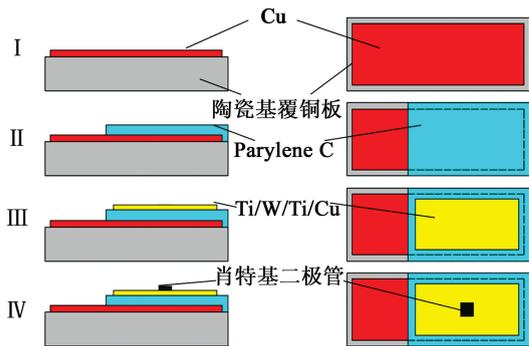


图1 制备单触发开关的工艺流程

Fig. 1 Preparation process of one-shot switch

### 1.2 封装材料及其封装条件

封装材料选择了环氧树脂 AB 胶(简称 AB 胶),工业品,泉州金固胶业有限公司;704 导热硅橡胶(简称 704 胶),工业品,南京大学化学化工学院监制;HTPB 橡胶,由试验室自行配制,其主要原料为 HTPB,工业品,沈阳黎明化工厂。3 种封装材料主要的性能参数如表 1 所示。

表 1 封装材料性能参数

Tab. 1 Performance parameters of the packaging material

封装材料	耐温/ ℃	绝缘强度/ (kV · mm <sup>-1</sup> )	硬度 (邵氏 A)	拉伸强度/ MPa
AB 胶	<100	>30	70	15.30
704 胶	<250	14	25 ~ 35	1.00
HTPB 橡胶	—	>18	68 ~ 84	0.65

3 种封装材料的固化工艺条件如下:AB 胶,将 A 组分环氧树脂 E-44 型(6101)与 B 组分聚酰胺树脂(低分子 650) 固化剂按照质量比 1 : 1 混合均匀,固化后呈半透明(浅黄色);704 胶,直接将胶体涂敷在待封装物体表面,常温下吸收空气的水气固化,使用方便安全;HTPB 橡胶,将黏合剂 HTPB、增塑剂己二酸二辛酯(DOA)、固化剂异佛尔酮二异氰酸酯(IPDI)、固化催化剂 2-乙基己酸亚锡(TIN)按照合适的配比混合均匀使用。混合搅拌过程中需将试样放置于真空罐中,以免混入气泡。固化条件为 36 ℃ 保温 23 h,60 ℃ 保温 2 h,固化完成后为透明状。由于刚配好的 HTPB 橡胶黏度较低,试验采用 3D 打印塑料壳体对其进行约束。不同封装材料的

开关样品如图 2 所示。

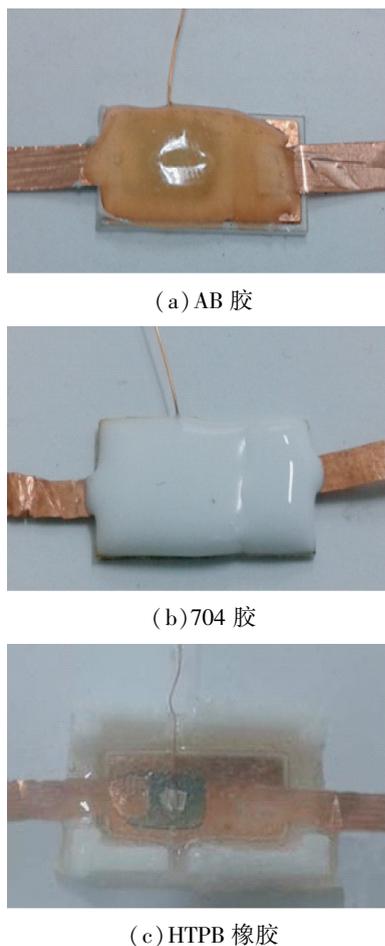


图 2 不同封装材料的开关样品图

Fig. 2 Switch samples with different packaging materials

### 1.3 开关性能测试方法

开关性能测试原理如图 3 所示。测试电源为 WMHT45C 特种测试电源,电流和电压分别用罗果夫斯基线圈(PEM, CWT30B)、高压探头(LeCroy, PPE 1 000 ×)测量,数据采集用 4 通道数字示波器(LeCroy104 Xi-A)记录。高压主回路外接电容器 C<sub>1</sub>(4 kV,0.22 μF),低压触发回路外接电容器 C<sub>2</sub>(100 V,2 200 μF),高压回路和低压触发回路共地。在测试电气性能的同时,用高速摄影(型号 HG-100K)记

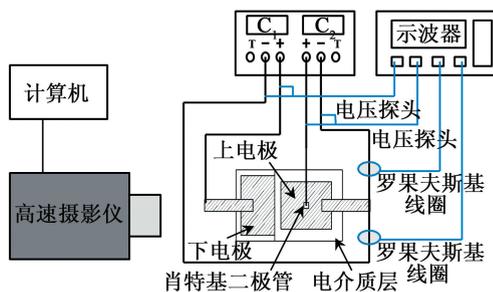


图 3 开关性能测试原理

Fig. 3 Test principle of switch characteristics

录开关作用过程的电弧发展过程,图像采集速率为 50 000 s<sup>-1</sup>,图像间隔为 20 μs。

### 2 结果与讨论

图 4、图 5、图 6 分别给出了不同封装材料下单触发开关的峰值电流、延迟时间和上升时间。

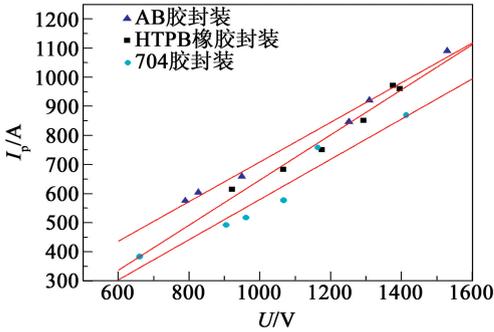


图 4 不同封装材料下单触发开关的峰值电流

Fig. 4 Peak current of one-shot switch with different packaging materials

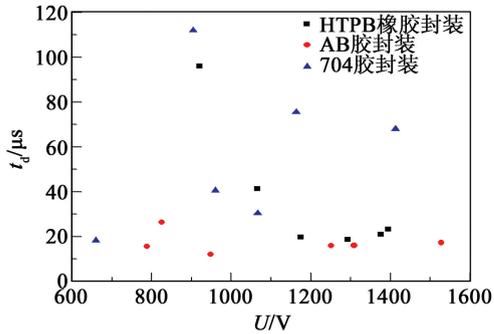


图 5 不同封装材料下单触发开关的延迟时间

Fig. 5 Delay time of one-shot switch with different packaging materials

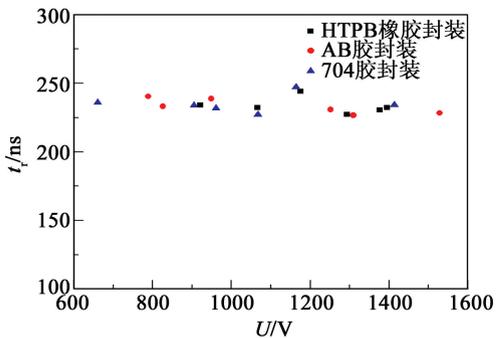
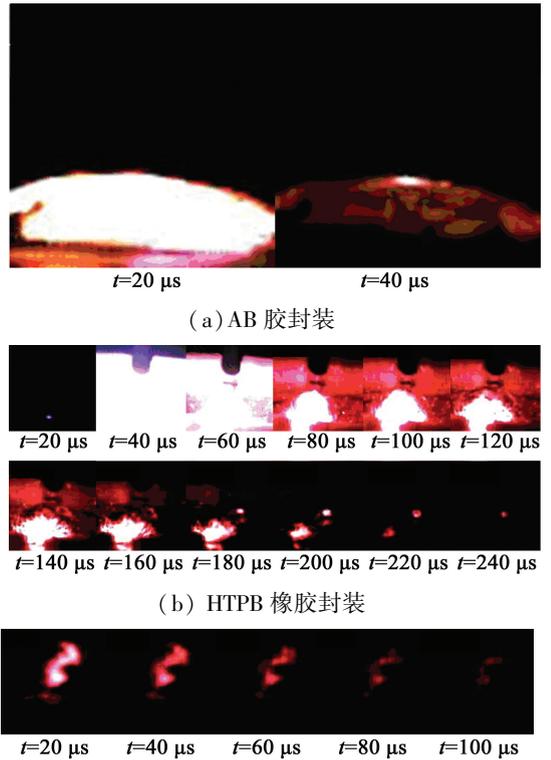


图 6 不同封装材料下单触发开关的上升时间

Fig. 6 Rise time of one-shot switch with different packaging materials

由图 4 可知,3 种胶封装的单触发开关峰值电流均随着外加电压的升高不断增大,并且峰值电流值随外加电压呈线性正比关系。采用 AB 胶封装的开关峰值电流略高于其余 2 种胶封装。分析认为是 3 种胶固化后的结构差异造成的影响。固化以后,

AB 胶和 HTPB 橡胶的硬度比 704 胶大。硬度较大的材料能够约束 SBD 电爆炸产生的电弧,将其全部用于电介质层的击穿;而 704 胶由于硬度较小和良好的导热性,能量比较容易扩散到外界环境中;HTPB 橡胶具有连贯的三维网状结构,其弹性结构同样能够约束住 SBD 电爆炸产生的电弧,但是胶体会吸收部分能量而膨胀。如图 7 所示。



(c) 704 胶封装

图 7 不同封装材料下单触发开关作用时的高速摄影图像

Fig. 7 High speed camera observation of one-shot switch with different packaging materials

由图 5 可知,AB 胶封装的开关延迟时间约为 20 μs,704 胶封装的开关延迟时间分布不规律,HTPB 橡胶封装的开关样品大部分延迟时间在 20 μs 左右,少量样品的延迟时间较长并且随机分布。原因同样是封装材料能否约束住 SBD 电爆炸产生的电弧。

由图 6 可知,几种封装材料的单触发开关的上升时间都在 240 ns 左右,可见封装材料对开关的上升时间没有显著影响。

图 7 为不同封装材料下单触发开关作用的高速摄影图像。

由图 7(a)可知,采用 AB 胶封装时,在 20 μs 时随着 SBD 受反向击穿电压激发而电爆炸,封装开关的胶体内产生了明亮的白光,随着电爆炸过程的结

束,在 40  $\mu\text{s}$  时,光强迅速减弱消失。

由图 7(b) 可见,采用 HTPB 橡胶封装时,在 20  $\mu\text{s}$  时,观察到初始等离子体的产生,之后强度迅速增大;40  $\mu\text{s}$  时,产生耀眼的白光;在 80 ~ 180  $\mu\text{s}$  阶段内,白光直径减小至约 3 mm,可观察到 HTPB 橡胶在 SBD 电爆炸冲击应力的作用下隆起了一个小圆包,随着白光直径的减小,隆起的胶体没有恢复原状,继续保持隆起状态;在 180  $\mu\text{s}$  后,可观察到有少量的亮斑溢出胶体外。

由图 7(c) 可见,采用 704 胶封装时,由于 704 胶固化后不透明,无法记录到 SBD 在固化胶体内的作用过程,但是可以观察到有火花冲出封装材料。

图 7 显示的完全约束住 SBD 电爆炸电弧的情况下,测得的开关延迟时间与图中强烈白光持续时间基本一致,而在有火花溢出的情况下,延迟时间因为火花溢出时间长短不一而分布不规律。在无封装结构的情况下,SBD 电爆炸产生等离子体的持续时间长达 1 400  $\mu\text{s}$ <sup>[4]</sup>,并且开关没有成功作用过。与之相比,封装结构大大缩短了等离子体的持续时间,使能量更加集中利用,从而保证开关的可靠作用。

### 3 结论

采用环氧类树脂 AB 胶、HTPB 橡胶、704 胶 3 种不同封装材料对开关进行包覆,对比分析了封装材料对开关性能的影响。

结果表明,对于 3 种封装材料,单触发开关的峰值电流大小的顺序为:AB 胶 > HTPB 橡胶 > 704 胶;同时,AB 胶封装的开关延迟时间最短,分析原因是其能够约束住 SBD 电爆炸产生的电弧;封装材料对

开关的上升时间没有显著影响;采用 HTPB 橡胶封装便于观察开关作用过程,后期可以对其改性,使其硬度加大,降低受 SBD 电爆炸影响而产生的膨胀程度。

### 参考文献

- [1] MINK S S. Microelectromechanical systems (MEMS) interrupter for safe and arm devices [R]. Air Force Inst of Tech Wright-Patterson AFB on Dept Electrical and Computer Engineering, 2006.
- [2] 王凯民. 火工品工程 [M]. 北京:国防工业出版社, 2014.
- [3] BAGINSKI T A, THOMAS K A. A robust one-shot switch for high-power pulse applications [J]. Power Electronics, IEEE Transactions, 2009, 24(1): 253-259.
- [4] HU B, JIAO J S, ZHU P, et al. Characterization of electrical explosion of Schottky diode for one-shot switch applications [J]. The European Physical Journal-Applied Physics, 2014, 68(3): 30801-30809.
- [5] 胡博, 李杰, 朱朋, 等. 基于 Parylene C 的单触发开关性能实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 064103(1-5).  
HU B, LI J, ZHU P, et al. Experimental investigation of one-shot switch based on Parylene C [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(6): 064103(1-5).
- [6] 曹振杰. 一种电子传感器封装用聚氨酯凝胶的研制 [J]. 粘接, 2014(9): 53-55.  
CAO Z J. Preparation of polyurethane gel for electronics sensor [J]. Adhesion, 2014(9): 53-55.

## Experimental Study on the Effect of the Packaging Material on Switch Characteristics of One-shot Switch

HU Bo, ZHU Peng, SHEN Ruiqi, YE Yinghua, WU Lizhi, HU Yan

School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] For the requirements of one-shot switch which have high turn-on current and high conductivity rate, based on the production of Schottky diodes, the switch have been fabricated by three different packaging materials including epoxy resin, silicone and HTPB rubber. In the experiments, the peak current, delay time and rise time of switch were analyzed. Results show that the peak current of epoxy resin is the highest and that of silicon is lowest. Delay time is the shortest when the packing material is epoxy resin which could completely bound the arc of electrical explosion of SBD. The packing material has no significant effect on the rise time of the switch.

[KEY WORDS] one-shot switch; packaging material; switch characteristics; exploding foil initiator