

# 爆炸箔起爆系统的发展

吕军军, 李明愉, 曾庆轩, 郑志猛, 冯长根

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081

**摘要** 对爆炸箔起爆系统及其零部件的发展现状进行概述, 重点分析了爆炸箔起爆系统中高压变压器、储能脉冲电容和高压开关发展现状及应用前景。同时还对国内外相关的研究水平作了简要对比, 结合国外的研究重点和发展趋势对爆炸箔起爆系统的发展进行分析, 为爆炸箔起爆系统的小型化、集成化和低能化的优化设计提供参考。

**关键词** 爆炸箔起爆系统; 脉冲功率源; 电容; 高压开关

中图分类号 TJ 45

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2011.36.011

## Development Research of Exploding Foil Initiator System

LU Junjun, LI Mingyu, ZENG Qingxuan, ZHENG Zhimeng, FENG Changgen

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081

**Abstract** The developmental progress of Exploding Foil Initiator system (EFIs) is summarized, and analyses on the development and application prospects of high-voltage transformer, pulsed power capacitor, and high-voltage switch are emphasized. In the meantime, the relevant domestic and foreign research level are briefly compared. By combining with the research and development trend of foreign research, the development of EFIs is analyzed. Some conclusions could provide the reference for the optimal design of EFIs with miniaturization, lower energy, and higher integration.

**Keywords** exploding foil initiator system; pulsed power supply; capacitor; high-voltage switch

### 0 引言

爆炸箔起爆系统(Exploding Foil Initiator system, EFIs)也称为直列式安全起爆系统(In-line Safe and Arming Apparatus), 其组成包括脉冲功率单元和爆炸箔起爆单元两部分。脉冲功率单元为爆炸箔起爆单元提供电能, 包括变压器、高压储能电容、高压开关和控制电路等。爆炸箔起爆单元也称为冲击片雷管, 主要包括金属桥箔、飞片层、加速膛和钝感装药, 图1所示为爆炸箔起爆系统结构图。脉冲功率单元能在较短的时间内通过高压变压器将直流低压转化为直流高压, 并给储能电容器充电, 通过触发高压开关, 快速在起爆回路中产生大电流脉冲。金属箔桥在高电压、大电流作用下爆炸产生高温高压等离子体, 驱动产生高速飞片, 进而起爆钝感装药。EFIs中采用钝感装药取代通常使用的较为敏感的起爆药并采用高电压脉冲功率技术, 因而在加工或勤务处理时的安全得到了本质性提高, 并能够在强辐射、杂散电流等恶劣环境下可

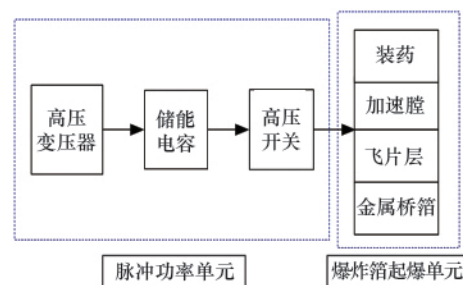


图1 爆炸箔起爆系统结构图

Fig.1 Construction scheme of exploding foil initiator system

靠的工作, 这是 EFIs 的突出优点, 并由此广泛应用于导弹、炸弹和火箭弹中<sup>[1-3]</sup>。

有关 EFIs 的研究始于 1965 年 J. R Stroud<sup>[4]</sup>提出冲击片雷管概念。近年来, 低能爆炸箔起爆系统 (Low Energy

收稿日期: 2011-12-19; 修回日期: 2011-12-23

基金项目: 总装预研基金项目(9140A05080110BQ0119)

作者简介: 吕军军, 博士研究生, 研究方向为火工系统设计与仿真, 电子信箱: b19880216@163.com; 李明愉(通信作者), 讲师, 研究方向为纳米含能材料, 电子信箱: mingyuli@163.com

Exploding Foil Initiator system, LEEFIs) 成为研究热点, 它的优点是起爆能量远低于传统的 EFIs。

## 1 爆炸箔起爆系统研究现状

20 世纪 90 年代以来, EFIs 的研究趋向成熟, 逐步实现微型化、集成化和低能化。这中间值得一提的是, 美国 KDI 公司于 2004 年公布了其电子安全与解除保险装置系列产品<sup>[9]</sup>, 其第三代产品中采用微电子技术将高压电容、半导体开关、爆炸桥箔等集成在一个固态器件上, 整个装置起爆电压降为 1250V, 起爆能量大为降低。美国 e2v 公司<sup>[9]</sup>2007 年公布的直列式起爆系统模块中采用陶瓷贴片电容、三电极触发开关, 整个模块体积得到减小, 发火能量降到 0.45J。G. Scholtes 和 W. Prinse<sup>[7-8]</sup>在 2007 年和 2008 年公布的微芯片式 EFIs, 将脉冲功率单元和爆炸箔起爆单元集成在同一芯片上, EFIs 体积降到 8cm<sup>3</sup>, 整个模块的发火能量小于 0.05J, 系统实物图如图 2 所示。从当前的趋势看, 美国致力于 EFIs 性能的提高和应用推广, 使大部分武器系统使用 EFIs, 以期提高武器系统起爆的安全性、可靠性、智能化以及设计的简单化<sup>[9]</sup>。

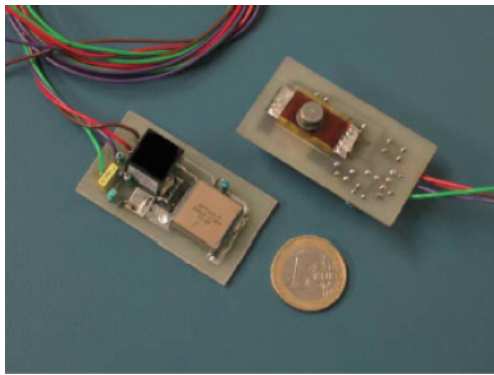


图 2 微芯片爆炸箔起爆系统

Fig. 2 Micro-chip of exploding foil initiator system

20 世纪 70 年代后期以来, 中国工程物理研究院、中国兵器工业第 213 研究所和北京理工大学等单位对 EFIs 的研究取得了一定成果。近几年微加工工艺和低温共烧陶瓷 (Low Temperature Co-Fired Ceramic, LTCC) 工艺发展以及新型材料的应用, 使得国内 EFIs 研究中, 相关元器件加工水平大大提高, EFIs 单元模块化集成设计得以实现, 系统体积和发火能量大幅度减小。

## 2 脉冲功率单元研究现状

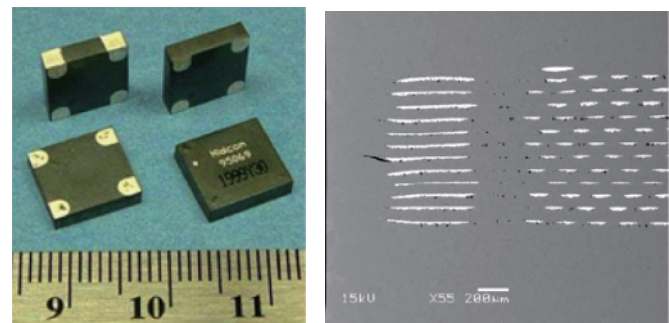
体积大是传统脉冲功率单元中变压器、高压电容和开关的弱点, 各个元器件由导线连接, 增加了系统放电时的电感, 延迟放电时间, 易受到环境冲击、高过载的影响, 降低了系统使用时的可靠性。2007 年, 这种情况有所变化, “独石”结构电容放电单元 (Capacitor Discharge Unit, CDU)<sup>[10]</sup>包括陶瓷电容、MCT 开关、LTCC 变压器和反激式充电电路, 结构高度集成,

使得放电系统体积和质量极大减小, 适应高过载环境的能力将大大提高, 十分有利于 EFIs 使用范围的拓展。这以后, 国内外都在积极寻求和研制小体积且满足使用要求的变压器、高压电容和高压开关, 以实现 EFIs 高度集成化和低起爆/发火能量。

### 2.1 高压变压器

高压变压器是脉冲功率源中占有体积较大的元器件, 磁芯绕组变压器、平面变压器和压电陶瓷变压器的简单对比见文献<sup>[11]</sup>, 接着介绍了一种新型的基于 LTCC 技术制成的变压器。用于 EFIs 中的变压器主要为立体磁芯绕组式变压器, 体积一般大于 8cm<sup>3</sup><sup>[11]</sup>, 工作频率不高, 手工绕制绕组可靠性和一致性较低, 变压器的效率较低<sup>[12-13]</sup>。基于 PCB (Printed Circuit Board) 技术产生的平面变压器体积大大减小, 具有漏感小、损耗低、工作频率高、便于散热、一致性较好等特点<sup>[11]</sup>。近年来, 随着 LTCC 技术的发展, 新型基于该技术制成的变压器具有体积小、可靠性高、参数一致性好等特点, 可应用于 DC-DC 等军用电源中<sup>[14]</sup>。2003 年, Sandia 国家实验室和 NASCEN Technology 公司合作研制用于微型引信和硬目标打击武器的 LTCC 平面变压器<sup>[15]</sup>, 其耦合系数可达 0.93, 输出电压最高可达 2000V, 体积为 0.3in×0.3in×0.08in (0.118cm<sup>3</sup>)。通过优化结构和工艺<sup>[16]</sup>, 这种 LTCC 变压器输出电压最高可到 3000V。LTCC 变压器实物图和截面图如图 3 所示。

在国内也积极开展平面变压器的研究, 梁琦<sup>[1]</sup>在 2009 年



(a) 平面开关

(a) Planar transformer

(b) 截面图

(b) Cross-sectioned picture

图 3 LTCC 平面变压器实物图和截面图

Fig. 3 LTCC planar transformer and the sectional structure

以 PCB 为基材研制的平面高压变压器, 输出电压 2000V 稳定, 整个高压模块的体积减小到 15cm<sup>3</sup>。国内基于 LTCC 技术的平面变压器的研究还处于起步阶段, 兵器 214 所、电子 2 所、电子 9 所等单位在技术和工艺方面进行了研究<sup>[14]</sup>。表 1 对三种变压器的一些参数进行了简单比较。

### 2.2 高压电容

EFIs 中用到的高压电容要求具有低电感或无感、耐压高、体积小和具有较高的能量密度等特点, 常规电容器很难满足这些要求。目前用于 EFIs 中的电容器, 额定电压为

表 1 三种变压器部分参数比较

Table 1 Comparison of three type transformers

性能	常规变压器	平面变压器 (PCB)	LTCC 平面变 压器
转换效率/%	92	98	>93
工作频率/kHz	20—500	20—2000	250—2000
基本结构	绕制线圈	多层 PCB 板	多层陶瓷
体积	>8cm <sup>3</sup>	>3cm <sup>3</sup>	<0.2cm <sup>3</sup>
重量	重	轻	很轻

1000—3000V, 额定容量 0.10—0.47 $\mu$ F, 电感小于 20nH。美国雷诺兹公司生产可用于 EFIs 的电容器<sup>[17]</sup>, Novacap 公司也生产 R2D 陶瓷电容器<sup>[18]</sup>系列化产品。总体来说 EFIs 中用到的高压电容包括纸介电容、有机薄膜电容、云母电容和陶瓷电容。其中陶瓷电容器因具有体积小、能量密度大和易于集成等特点成为研究热点。表 2 列出国外 EFIs 中电容发展情况。

表 2 EFIs 用高压电容发展情况

Table 2 Development of high-voltage capacitor with EFIs

时间	类型	容值/ $\mu$ F	耐压/kV	储能/J
1998 <sup>[19]</sup>	有机薄膜电容	0.13	3	0.59
1999 <sup>[19]</sup>	陶瓷电容	0.1	3	0.45
2002 <sup>[5]</sup>	陶瓷电容	0.2	1.25	0.16
2006 <sup>[20]</sup>	陶瓷电容	0.2	1.0	0.1
2006 <sup>[20]</sup>	陶瓷电容	0.1	1.0	0.05
2009 <sup>[21]</sup>	陶瓷电容	0.1	1.2	0.07

从表 2 可以看出, 近几年国外 EFIs 中用到的电容主要为陶瓷电容, 容值为 0.1 $\mu$ F 左右, 耐压 1kV, EFIs 起爆能量在 0.1J 以下。2009 年, J. Rogers 等<sup>[22]</sup>介绍了采用新介电材料制备的陶瓷电容器, 表面集成了一个约 500M $\Omega$  电阻, 数秒内电容两端电压可从初始值降到 EFIs 发火电压阈值以下。2010 年, T. C. Monson 等<sup>[23]</sup>提出采用纳米晶钛酸钡复合陶瓷材料作为贱金属内电极陶瓷电容器的关键材料, 以便于脉冲功率单元的集成。韩克华等<sup>[24]</sup>对国内用到的纸介电容、有机薄膜电容、云母电容和陶瓷电容进行了优选实验方法研究。实验表明: 陶瓷电容具有最小的体积、内部电感和内部电阻, 放电电流震荡周期最短, 输出能量密度较为集中, 这就有利于冲击片雷管的起爆。

### 2.3 高压开关

高压开关在导通前起到隔断高压的作用。为保证 EFIs 可靠作用, 对高压开关性能有较高要求<sup>[25]</sup>; 能耐 1—3kV 高电压; 触发瞬间, 电流脉冲上升时间约为 30—60ns, 峰值电流约 1—7kA, 峰值功率为 1—15MW; 体积小、寿命长、稳定可靠。目前用于 EFIs 中的高压开关主要有火花隙开关(包括气体开关和真空开关)和金属氧化物半导体控晶闸管(MOS Controlled

Thyristor, MCT) 开关, 可能广泛用于 EFIs 中的高压开关有平面开关和单次触发开关等。图 4 为火花隙开关和 MCT 开关外形比较<sup>[19]</sup>。

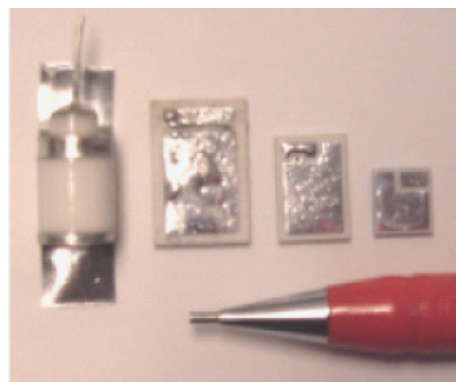


图 4 火花隙开关(左一)和 MCT 开关比较  
Fig. 4 Comparison of spark gap switch  
(first on the left) and MCT switches

Chu 和 Scott<sup>[26]</sup>对 EFIs 中气体开关、真空开关和半导体开关进行了对比研究。对于气体开关和真空开关, 开关性能受到高温、高电压因素影响较小; 真空开关的性能基本不受强辐射的影响。所以在 EFIs 中, 气体开关和真空开关的应用长期处于主要地位。这两种开关的主要缺点是: 体积都比较大; 真空开关对材料和加工工艺要求较高, 导致成本很高。MCT 开关具有体积小的优势, 在性能上具有高度的重复性, 稳定性和可靠性也远远优于气体开关和真空开关, 但 MCT 开关较适合用在温度小于 100 $^{\circ}$ C、电压低于 1500V 和弱辐射环境中。随着 EFIs 发火能量和发火电压的降低, MCT 开关将成为 EFIs 中高压开关的发展主要方向之一。1993 年, J. A. Waschl<sup>[27]</sup>提出利用刻蚀的方法在带状传输线上形成金属箔平面高压开关, 并首次将平面开关用于爆炸箔起爆系统中。后来又出现用于 EFIs 平面开关的专利<sup>[28]</sup>。美国 KDI 公司<sup>[29]</sup>也指出, 将平面开关集成于低能爆炸箔起爆器中, 可提高系统的安全性, 将平面开关和爆炸箔同时形成, 可实现高压开关的“零体积”和“零成本”。2009 年, Baginski<sup>[30]</sup>设计了一种用于 EFIs “三明治”型结构的单次触发平面开关。该开关采用了微电子技术加工, 使开关具有较高的机械强度, 提高了开关一致性和作用的可靠性。在国内, 王桂吉等<sup>[31]</sup>2006 年采用机械加工的方法研制出平面气体三电极开关。2010 年, 丁桂甫等<sup>[32]</sup>提出采用微加工技术制作微型平面式气体火花隙开关并申请专利。但这两种平面开关还不能和爆炸箔集成使用。能够满足 EFIs 低能化和小型化需求, 易于和爆炸箔集成加工的平面高压开关将成为以后研究的重点。

### 3 爆炸箔起爆单元研究现状

爆炸箔起爆单元的基本结构有基片、金属桥箔、飞片、加速腔和药柱五部分。早期的爆炸箔起爆单元中, 爆炸箔、飞片和加速腔为分立元件, 须采用手工或者机械的方式进行对准

安装,易产生错位现象,导致 EFIs 能量利用效率降低。2009 年 Desal<sup>[33]</sup>提出采用沉积、光刻手段将爆炸箔、飞片和加速膛加工在基板上形成为一体,加工过程中能够精确定位,大大提高了爆炸箔起爆单元的生产效率和能量利用率。由于降低了起爆所需的能量,EFIs 中脉冲功率单元的体积和能量要求也得到降低。国内主要在以下五个方面展开研究。冲击片雷管基片材料具有表面光洁、硬度高等特点,可用作基片的材料有蓝宝石、石英和氧化铝陶瓷。目前较多采用价格较低的高密度氧化铝陶瓷作为基片材料,将金属膜直接镀覆在陶瓷基片上形成桥箔<sup>[34]</sup>。金属桥箔采用金、银、铜、铝等电导率高、刻蚀性好、容易溅射或电镀的材料。在实际应用中,铜是综合性能最理想的材料。一般桥箔厚度为几个微米,在一定起爆条件下存在最佳起爆桥箔厚度<sup>[35]</sup>,设计时桥箔桥区区长宽相同<sup>[36]</sup>,且圆形的爆炸箔形状较为合适<sup>[37-38]</sup>。加速膛材料以蓝宝石材料最佳,但价格昂贵,为此选取金属材料作为加速膛材料,也能达到蓝宝石的效果<sup>[39]</sup>。在剪切飞片的过程中,加速膛内径的大小决定了飞片尺寸,因此在设计中要结合飞片层厚度综合考虑<sup>[36]</sup>,以降低爆炸箔起爆单元起爆阈值。目前采用的钝感药柱为 HNS-IV,药柱的密度为理论密度的 90%—95%,细化后的装药颗粒对短脉冲变得极为敏感,有利于提高冲击片雷管的安全性,降低冲击片雷管的起爆能量。EFIs 起爆回路的电感和电阻是影响 EFIs 起爆的关键参数,因此,减小回路电感和回路电阻是起爆回路优化设计的重要研究方面<sup>[40]</sup>。在爆炸箔起爆单元集成方面的初步研究有,施志贵等<sup>[41]</sup>采用 MEMS 技术,将玻璃反射片、硅桥、飞片和加速膛集成为一体,用于硅集成冲击片雷管。施志贵、郭菲等<sup>[42-43]</sup>又对集成制造方法进行了改进,一是采用金属桥替代硅桥,二是采用 SOI 材料使飞片厚度可控,为冲击片雷管集成化研究提供参考。

#### 4 结语

总体来说,美国采用的爆炸箔起爆系统起爆能量降到了 0.1J 以下,系统的体积可小于 8cm<sup>3</sup>,集成度很高,可以使用在大多数中小型常规武器当中。国内做了大量工作,并取得了不少研究成果,但是有关高压平面变压器、高压脉冲陶瓷电容、高压平面开关和脉冲功率单元的集成研究相对较少,文献报道也不多。爆炸箔起爆单元由桥箔、飞片和加速膛等分立元件组装而成,但对爆炸箔起爆单元集成技术缺乏研究。为了解决 EFIs 体积偏大和一致性不好等缺点,满足 EFIs 低能化和小型化的需求。有必要采用新材料和新加工技术设计新的 EFIs 中关键元器件,并对整个系统的优化集成技术进行研究。

#### 参考文献 (References)

- [1] 梁琦. 基于平面变压器技术的高压 DC-DC 转换器的研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2009.  
Liang Qi. Study on the high-voltage DC-DC converter based on planar transformer technology[D]. Beijing: Beijing institute of technology, 2009.

- [2] 杨正发, 杨振英. 直列式安全点火系统及其在固体火箭发动机中的应用前景[J]. 火工品, 2002, (1): 32-36.  
Yang Zhengfa, Yang Zhenying. *Initiators and Pyrotechnics*, 2002, (1): 32-36.
- [3] Neyer B T. A low cost, reliable, hermetically sealed, chip slapper detonator suitable for various aerospace applications [C]. Proceedings of 35th Joint Propulsion Conference. June, 1999.
- [4] McDaniel O K. Exploding Foil Initiator—an overview[C]. 14th Symposium on Explosives and Pyrotechnic. 1990.
- [5] Sowder M. Electronic Safety and Arming Fuzes (ESAF) for conventional bomb weapons "technology in bomb fuzing" [C]. 48th Annual Fuze Conference. April 26-28, 2004.
- [6] e2v, Inc. e2v ordnance safety and arming (OS&A) capability overview [EB/OL]. [2010-12-13]. <http://www.e2v.com/products-and-services/rf-power-solutions/safety-and-arming-devices>.
- [7] Scholtes G, Prinse W. Development of exploding foil initiators and micro chip EFIs [C]. Insensitive Munitions and Energetic Materials Technology Symposium. October 15-18, 2007.
- [8] Prinse W, Scholtes G. A development platform for a microchip EFI[C]. 52th Annual Fuze Conference. May 13-15, 2008.
- [9] McEntire R S, Butler P. Fuzing and firing systems at sandia national laboratories[C]. 53rd Annual Fuze Conference. May 19-21, 2009.
- [10] Roesler A W, Vernon G E, Hoke D A, et al. Compact monolithic capacitive discharge unit: US, 7236345 B1[P]. 2007-06-15.
- [11] 钱勇, 褚恩义, 任西, 等. 小体积脉冲功率源及 LEEFI 发展研究[J]. 火工品, 2006, (6): 42-46.  
Qian Yong, Chu Enyi, Ren Xi, et al. *Initiators and Pyrotechnics*, 2006, (6): 42-46.
- [12] 李茜. 电子变压器的小型化发展 [J]. 西南科技大学学报, 2004, 19(3): 45-48.  
Li Qian. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2004, 19(3): 45-48.
- [13] 张凯, 张凯洪, 王晓红. 平面变压器在高频开关电源中的应用 [J]. 通信电源技术, 2003, (2): 17-19.  
Zhang Kai, Zhang Kaihong, Wang Xiaohong. *Telecom Power Technologies*, 2003, (2): 17-19.
- [14] 王啸. LTCC 无源器件的应用与发展 [J]. 集成电路通讯, 2008, 26(1): 40-44.  
Wang Xiao. *Integrated Electronic Communications*, 2008, 26(1): 40-44.
- [15] Roesler A W, Schare J M, Glass S J, et al. Planar LTCC transformers for high voltage flyback converters, SAND2007-2591 [R]. Sandia National Laboratories, 2007.
- [16] Schare J M, Abel D, Slama G, et al. Planar LTCC transformers for high voltage flyback converters part II, SAND2009-0434[R]. Sandia National Laboratories, 2009.
- [17] TeledyneReynolds, Inc. High voltage capacitors[EB/OL]. [2011-02-11]. [http://www.teledynereynolds.com/product/7mica capacitor/index.asp](http://www.teledynereynolds.com/product/7mica%20capacitor/index.asp).
- [18] Novacap, Inc. Detonator and pulse energy [EB/OL]. [2011-02-11]. [http://www.novacap.com/pdfs/R2D\\_Detonator\\_PulseEnergy.pdf](http://www.novacap.com/pdfs/R2D_Detonator_PulseEnergy.pdf).
- [19] Nickolin T. Highly integrated firing module [C]. 43rd Annual Fuze Conference and Munitions Technology Symposium. April 6-8, 1999.
- [20] Nguyen C Q. High-G mortar electronic S&A demonstration [C]. 50th Annual Fuze Conference. May 09-11, 2006.
- [21] Scholtes G. Novel techniques for improved munitions development[C]. 44th annual Gun and Missile system conference. April 6-9, 2009.
- [22] Rogers J, Jiang J, Dayton G, et al. High voltage ceramic capacitors for

- high pulse current applications [C]. 53rd Annual Fuze Conference. May 20, 2009.
- [23] Monson T C, Diantonio C B, Winter M R, *et al.* Development of low-cost, compact, reliable, high energy density ceramic nanocomposite Capacitors[C]. 54th Annual Fuze Conference. May 11-13, 2010.
- [24] 韩克华, 任西, 周密, 等. 高压脉冲电容器性能参数优选实验方法研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(3): 22-25.  
Han Kehua, Ren Xi, Zhou Mi, *et al.* *Explosive Materials*, 2011, 40(3): 22-25.
- [25] Haddon M D, Soto G H. Transistorized high-voltage circuit suitable for initiating a detonator: US, 6389975 B1[P]. 2002-05-21.
- [26] Chu K W, Scott G L. A comparison of high voltage switches, SAND99-0154[R]. Sandia National Laboratories, 1999.
- [27] Waschl J A, Hatt D J. Characterization of a small-scale exploding bridge foil flyer generator [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 1993, 14(1-4): 785-796.
- [28] Hennings G N, Wild E J, Hanna B L, *et al.* Low energy exploding foil initiator chip with non-planar switching capabilities: US, 0148982 AL [P]. 2008-06-26.
- [29] KDI Precision Products Inc. ESAD technology benefits to ISD [C]. 49th Annual Fuze Conference. April 5-7, 2005.
- [30] Baginski T A, Thoma K A. A robust one-shot switch for high-power pulse applications [J]. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 2009, 24(1): 253-259.
- [31] 王桂吉, 吴刚, 赵剑衡, 等. 平面火花隙三电极开关研制及性能测试[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(2): 349-352.  
Wang Guiji, Wu Gang, Zhao Jianheng, *et al.* *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(2): 349-352.
- [32] 丁桂甫, 周镇威, 杨卓青, 等. 微型平面式火花隙开关: CN, 101814701 A[P]. 2010-08-25.  
Ding Guifu, Zhou Zhenwei, Yang Zhuoqing, *et al.* Micro planar spark gap switch: CN, 101814701 A[P]. 2010-08-25.
- [33] Desal A. Efficient exploding foil initiator and process for making same: US, 0,151,584 A1[P]. 2009-06-18.
- [34] 袁士伟, 曾庆轩, 冯长根. 新型冲击片雷管设计研究 [J]. 火工品, 2002, (2): 5-7.  
Yuan Shiwei, Zeng Qingxuan, Feng Changgen. *Initiators and Pyrotechnics*, 2002, (2): 5-7.
- [35] 付秋波, 蒋小华, 郭菲, 等. 爆炸箔尺寸对飞片速度的影响[J]. 兵工学报, 2010, 31(4): 434-436.  
Fu Qiubo, Jiang Xiaohua, Guo Fei, *et al.* *Acta Armamentarii*, 2010, 31(4): 434-436.
- [36] 杨振英, 马思孝, 褚恩义, 等. 爆炸箔起爆器的设计及影响因素试验[J]. 火工品, 1999, (4): 18-22.  
Yang Zhenying, Ma Sixiao, Chu Enyi, *et al.* *Initiators and Pyrotechnics*, 1999, (4): 18-22.
- [37] 钱勇, 褚恩义, 谢高第, 等. 三种爆炸箔桥形状的比较分析[J]. 兵工学报, 2009, 30(2): 217-220.  
Qian Yong, Chu Enyi, Xie Gaodi, *et al.* *Acta Armamentarii*, 2009, 30(2): 217-220.
- [38] Qian Y, Chu Ey, Xie Gd, *et al.* Optimization design of exploding foil bridge shape[J]. *Journal of China Ordnance*, 2010, 6(2): 140-143.
- [39] 马贵春, 谭迎新, 张景林, 等. 飞片冲击起爆试验装置中炮筒材料的研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(3): 274-277.  
Ma Guichun, Tan Yingxin, Zhang Jinglin, *et al.* *Explosion and Shock Waves*, 2000, 20(3): 274-277.
- [40] 曾庆轩, 袁士伟, 罗承沐, 等. 爆炸箔起爆系统初始电阻对爆发电流和飞片速度影响的数值模拟[J]. 火工品, 2002, (1): 43-45.  
Zeng Qingxuan, Yuan Shiwei, Luo Chengmu, *et al.* *Initiators and Pyrotechnics*, 2002, (1): 43-45.
- [41] 施志贵, 杨芳. 硅集成冲击片雷管的研制[J]. 中国机械工程, 2005, 16(z1): 469-471.  
Shi Zhigui, Yang Fang. *China Mechanical Engineering*, 2005, 16(z1): 469-471.
- [42] 郭菲, 施志贵, 蒋小华, 等. 硅集成爆炸箔组件起爆 HNS-IV 试验研究[J]. 火工品, 2009, (6): 5-7.  
Guo Fei, Shi Zhigui, Jiang Xiaohua, *et al.* *Initiators and Pyrotechnics*, 2009, (6): 5-7.
- [43] 施志贵, 郭菲, 席仕伟, 等. 一种金属桥冲击片雷管集成制造方法[J]. 火工品, 2010, (3): 1-3.  
Shi Zhigui, Guo Fei, Xi Shiwei, *et al.* *Initiators and Pyrotechnics*, 2010, (3): 1-3.

(责任编辑 马骁骁)

· 学术动态 ·

## “第十七届全国青年通信学术会议”征文



由中国通信学会主办、中国通信学会青年工作委员会承办的“第十七届全国青年通信学术会议”将于 2012 年 8 月召开。

征文范围:(1) 通信与通信工程;(2) 网络与信息安全;(3) 多媒体处理技术与应用;(4) 信号与信息处理;(5) 数字版权管理;(6) 内容安全;(7) 电子科学与技术;(8) 控制科学与工程;(9) 计算机科学与技术;(10) 其他。

全文截止日期:2012 年 1 月 10 日。

电 话:010-62262770

通信地址:北京邮电大学 287 信箱 (100876)