

文章编号: 1006-9941(2014)06-0828-06

高压脉冲功率源等效参数对桥箔电爆性能影响规律

韩克华¹, 周俊², 任西¹, 刘甜¹, 奥成刚¹, 同红海¹

(1. 陕西应用物理化学研究所应用物理化学国家级重点实验室, 陕西 西安 710061; 2. 南通大学电气工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要: 为了降低冲击片雷管起爆能量, 优化高压脉冲功率源等效参数, 研究了高压脉冲功率源等效参数如等效电感、等效电阻、电容量、电压等参数对金属桥箔电爆特性规律的影响, 测试了金属桥箔在不同的等效参数条件下, 其电爆性能的变化规律参数, 计算了金属桥箔的能量利用率, 实验结果表明: 当高压脉冲功率源储能电容容量为 0.2 μF , 放电回路等效电感为 57 nH, 等效电阻为 68 m Ω 时, 在加载电压为 2.0 kV 放电条件下, 桥区厚度为 5.0 μm , 尺寸为 0.5 mm \times 0.5 mm 的铜箔其爆发性能最优, 有效能量利用率达到最高, 为 54.8%, 此时桥箔的爆发时间与峰值时间最为接近, 时差最小。

关键词: 爆炸箔起爆器; 高压脉冲功率源; 桥箔; 等效参数; 电爆性能; 能量利用率

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.022

1 引言

在冲击片雷管起爆过程中, 由于其换能源金属桥箔(Foil bridge)在高压脉冲功率源输出的窄脉冲大电流通过时, 桥箔的桥区部分由于焦耳效应产生大量的热, 瞬间经历固态-液态-气态-等离子体的相变过程, 发生电爆炸, 产生大量的高温高压等离子体, 剪切薄膜材料形成飞片, 并推动飞片在加速膛内加速后撞击并起爆钝感炸药。在此过程中, 金属桥箔要在短时间内得到足以使其产生等离子体的能量, 高压脉冲功率源输出的窄脉冲大电流必须在幅度和时间特性上都能满足要求^[1-4], 其放电回路等效参数直接影响着金属桥箔的电爆性能和能量利用率, 是冲击片雷管能否起爆的关键因素。从 1980~2012 年引信年会的资料可以看出, 国外的高压脉冲功率源技术发展迅速, 其发火能量从 1980 年的 7.8 J 降到 1990 年的 0.68 J, 再降到 2006 年的 0.05 J^[5-7], 发火电容量从 0.22 μF 下降到 0.1 μF , 耐压从 3.0 kV 下降到 1.0 kV, 体积也大幅度缩减^[8-11], 其高压脉冲功率源的输出效率也不断提

高, 在 1994 年 LLNL (Lawrence Livermore National Laboratories) 实验室研制的高压脉冲功率源输出效率可达 80%^[12], 在 2008 年 52 届引信年会报道的脉冲功率源输出效率可达 90%^[13-14]。国内关于冲击片雷管的参数优化设计文献较多, 而在高压脉冲功率源等效参数优化设计、输出性能参数以及对金属桥箔电爆性能影响规律等方面的报道较少。为了降低冲击片雷管起爆能量, 优化高压脉冲功率源等效参数, 本课题组研究了高压脉冲功率源等效参数如等效电感、等效电阻、电容量、电压等参数对金属桥箔电爆特性规律的影响, 测试了金属桥箔在不同的等效参数条件下, 其电爆性能的变化规律参数, 计算了金属桥箔的能量利用率, 对于爆炸箔起爆器(EFI)的优化设计、以及冲击片雷管低能化、小型化、集成化设计以及提高冲击片雷管的性能有重要意义。

2 实验部分

2.1 实验装置

实验装置测试原理框图如图 1 所示, 高压脉冲功率源系统主要由型号规格为 CT41L/0.1 μF /3.0 kV 的陶瓷电容器、型号规格为 RQ-8001 的火化隙高压开关, 以及规格型号为 RC4.720.150 小型脉冲变压器组成, 测试设备包括采样速率不低于 1 GS \cdot s⁻¹ 的数字存储示波器(DSO)、测量精度为 1% 的高压数字表、型号规格为 5008C 的 Rogofiski 电流测量线圈、以及桥区厚度为 5.0 μm , 尺寸 0.5 mm \times 0.5 mm 的铜箔, 其

收稿日期: 2013-12-31; 修回日期: 2014-03-10

基金项目: 国防基础科研计划项目(JCKY2013208C002)和“十二五”预研资助项目(51305100101)

作者简介: 韩克华(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高新火工系统技术研究。e-mail: kehuahan@126.com

通信联系人: 韩克华(1981-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高新火工系统技术研究。e-mail: kehuahan@126.com

电阻范围为(45±5) mΩ,电感为(30±5) nH。

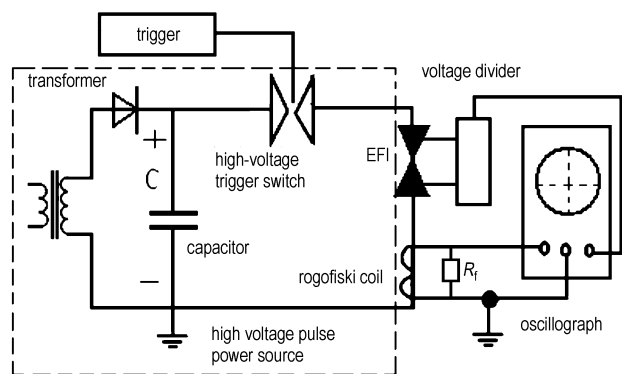


图1 实验测试装置原理框图

Fig.1 Set-up diagram of experimental

脉冲变压器将 27 V 低电压转换成 3 kV 高电压,经整流后给高压脉冲功率源中高压脉冲电容器充电,用高压数字表检测充电电压;当高压开关经过触发电路触发时,高压开关导通,高压脉冲电容器上的高电压经过高压开关对爆炸桥箔或者短路负载进行放电,回路中的电流用电流测量线圈进行测量,电压用分压器测试,用数字示波器进行记录。

2.2 实验方法

高压脉冲功率源系统整个电路从原理上可以等效成一个 RLC 串联电路^[15]。美军标 MIL-DTL-23659D 规定其负载为短路线时,所测试放电回路电流曲线应包含至少 5 个等间隔减幅振荡电流^[16],如图 2a 所示。利用此振荡波形参数可以进行系统等效电阻,系统等效电感等性能参数的计算。

平均周期计算公式为:

$$\bar{T} = \frac{\sum_{j=1}^n T_j}{n} \quad (1)$$

系统总电感推导公式为:

$$L = \frac{\bar{T}^2}{4\pi^2 C} \quad (2)$$

系统电阻推导公式为:

$$R = \frac{2L}{\bar{T}} \ln \xi, \text{ 其中 } \xi = \frac{\sum_{j=1}^n \lambda_j}{n}, \lambda_j = \frac{I_j}{I_{j+1}} \quad (3)$$

高压脉冲功率源等效电感为: $L_0 = L - l$, 高压脉冲功率源等效电阻为: $R_0 = R - r$, 式中 L 为系统回路等效电感, nH; l 为负载电感, nH; R 为系统回路等效电阻, mΩ; r 为负载电阻, mΩ; \bar{T} 为振荡平均周期, μs;

I_{j+1}, I_j 是正向振荡电流峰值, kA; ξ 为电流衰减平均系数。

高压脉冲功率源输入总能量为:

$$E_{in} = \frac{1}{2} C U^2 \quad (4)$$

式中, C 为脉冲功率源储能电容器容量, μF; U 为加载电压, kV。

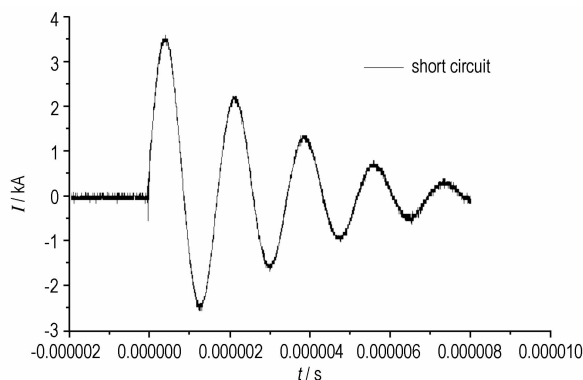
脉冲功率源对金属桥箔进行放电时, 金属桥箔利用的能量为:

$$E_0 = \int_0^t u i dt \quad (5)$$

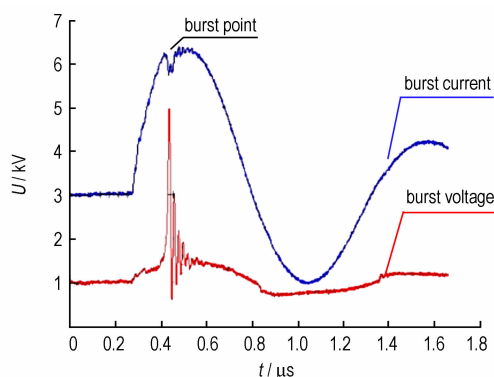
式中, u 为金属桥箔的爆发电压, kV; i 为爆发电流, kA。

桥箔爆发能量利用率为:

$$\delta = \frac{E_0}{E_{in}} \times 100\% \quad (6)$$



a. short circuit



b. exploding foil

图2 不同等效负载放电曲线

Fig.2 Discharge curves of various loads

脉冲功率源对负载为金属桥箔放电时, 所测试的爆发电流和爆发电压曲线如图 2b 所示。由图 2b 可见, 爆发电压为最大值时所对应爆发电流曲线上的凹点, 为金属桥箔发生电爆炸时刻, 称其为爆发点。利用 $P = U \times I$, 将爆发电压与爆发电流曲线相乘先得到功率曲线, 再对功率曲线进行积分, 即得到加载在金属桥箔上的能量。根据文献[17], 冲击片雷管飞片加速过

程约为 200 ns, 因此可将桥箔爆发点后 200 ns 这一时刻作为区分有效能量的时间节点, 故在数据处理中将爆发电流曲线、爆发电压曲线起爆点后 200 ns 以后的数据截去, 不计入桥区消耗的能量。

3 实验结果及分析

3.1 电容量的影响

高压电容器为高压脉冲功率源主要的储能器件, 其容量大小会影响金属桥箔的电爆性能。采用不同的储能电容容量, 对金属桥箔进行放电, 金属桥箔的爆发电流曲线如图 3 所示。

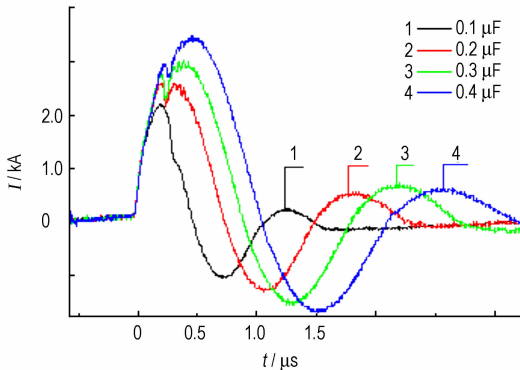


图 3 不同储能电容容量时金属桥箔的爆发电流曲线

Fig.3 Burst current curves of foil bridge under various capacitances

从图 3 可见, 随着高压储能电容容量的增加, 峰值电流、爆发电流、脉冲宽度增加、周期延长、峰值时间后移, 这是由于目前的储能电容器, 随着电容容量的增加, 相应的地增加脉冲功率源的回路电感和电阻的缘故。由公式(4)和公式(5)计算得到金属桥箔消耗的有效能量值, 从而计算能量利用率。表 1 为不同储能电容容量时金属桥箔的有效能量利用率。

表 1 不同电容容量的能量利用率

Table 1 Energy efficiency for foil bridge under various capacitors

voltage /kV	capacitance / μF	effective energy /J	ignition energy /J	efficiency /%
2.0	0.1	0.101	0.2	50.5
2.0	0.2	0.219	0.4	54.8
2.0	0.3	0.298	0.6	49.7
2.0	0.4	0.351	0.8	43.9

从表 1 可以看出, 随着电容容量的增加, 金属桥箔所利用的有效能量不断的增加, 在储能电容器为 0.2 μF 时能量利用率最大为 54.8%, 在储能电容器为

0.3 μF 和 0.4 μF 时能量利用率却分别下降为 49.7% 和 43.9%。从实验数据可以看出, 有效能量高, 但是能量利用率却不一定高, 这是因为随着储能电容容量的增加, 实验用桥箔的爆发性能达到稳定, 总能量却不断增大, 爆发电流的振荡周期也在变大的缘故。从以上实验数据和结果分析可以得出, 在 2.0 kV 放电条件下, 容量为 0.2 μF 时, 桥箔的厚度为 5.0 μm 时其爆发性能最优, 桥箔有效能量利用率达到最高, 为 54.8%。

3.2 加载能量的影响

针对实验用金属桥箔, 利用同一个等效参数状态下的高压脉冲功率源, 在不同加载能量的实验条件下, 对其进行放电实验, 测试其爆发性能。图 4 是不同加载电压下金属桥箔爆发电流曲线。

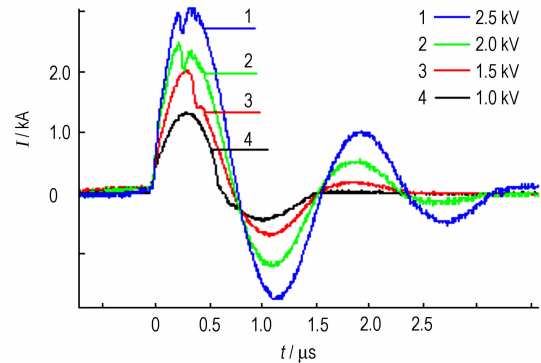


图 4 不同加载电压下的爆发电流曲线

Fig.4 Burst current curves under various load voltage

从图 4 可以看出, 随着加载电压的升高, 桥箔爆炸时的峰值电流、爆发电流、爆发电压都在增加, 爆发时间却随着加载电压的升高而缩短。不同的加载电压下, 其金属桥箔的有效能量利用率见表 2。

表 2 不同加载电压的能量利用率

Table 2 The energy efficiencies foil bridge under various load voltages

voltage /kV	capacitance / μF	effective energy /J	ignition energy /J	efficiency /%
1.0	0.2	0.041	0.100	41.0
1.5	0.2	0.117	0.225	52.0
2.0	0.2	0.219	0.400	54.8
2.5	0.2	0.311	0.625	49.8

从表 2 可以看出, 在不同加载能量的实验条件下, 在 2.0 kV 的加载电压实验条件下, 金属桥箔爆发的能量利用率最高为 54.8%, 随着加载电压的增加, 金属桥箔爆发的有效能量也不断增加, 但是金属桥箔相对

于总能量的利用率却有所下降。从以上实验数据根结果分析可以得出,在容量为 0.2 μF 时,2.0 kV 放电条件下,桥箔厚度为 5.0 μm 的其爆发性能最优,桥箔有效能量利用率达到最高,为 54.8%。

3.3 回路等效电感的影响

按公式(1)、(2)测试和计算方法计算了高压脉冲功率源的等效电感为 57 nH,在此基础上给高压脉冲功率源的起爆回路中分别增加了电感量分别为 30, 60 nH 的两种无阻电感,分别对金属桥箔进行放电,爆发电流曲线如图 5 所示。

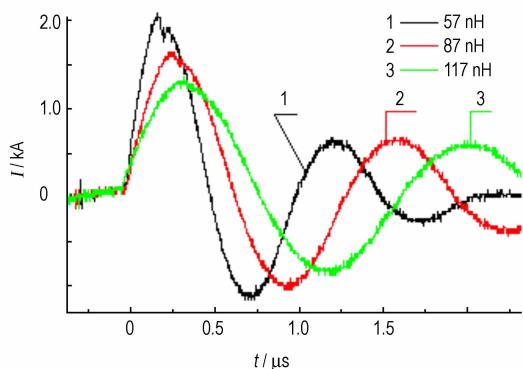


图 5 不同电感量时金属桥箔的爆发电流曲线

Fig. 5 Burst current curves for foil bridge under various equivalent inductances

从图 5 可以很明显地看出,随着放电回路电感量的增加,桥箔的爆发电流、峰值电流均减小,爆发时间、峰值时间及周期增大,电流脉冲前沿较平缓,放电回路等效电感对放电周期的影响较明显,在等效电感为 117 nH 时爆发点已经不明显。不同等效电感实验条件下金属桥箔有效能量利用率见表 3。

表 3 不同等效电感实验条件下金属桥箔的能量利用率

Table 3 Energy efficiency for foil bridge under various equivalent inductances

voltage /kV	effective inductance/nH	capacitance / μF	effective energy/J	ignition energy/J	efficiency /%
2.0	57	0.2	0.219	0.4	54.8
2.0	87	0.2	0.151	0.4	37.8
2.0	117	0.2	0.107	0.4	26.8

从表 3 可以看出,在 2.0 kV 加载电压条件下,放电回路等效电感为 57 nH 时,有效能量最高为 0.219 J,有效能量利用率最高为 54.8%。从等效电感参数对爆发电流和能量利用率的影响规律来看,高压脉冲功率源的等效电感参数越小,越有利于桥箔的爆发性能。

3.4 回路等效电阻的影响

按公式(3)测试和计算方法计算了高压脉冲功率源的等效电阻为 68 Ω ,在此基础上以 10 m Ω 为步长不断给高压脉冲功率源的起爆回路增加无感电阻参数,在加载电压为 2.0 kV 时分别对金属桥箔进行放电,测试高压脉冲功率源在不同等效电阻参数条件下,金属桥箔的电爆性能参数如表 4 所示。

表 4 不同等效电阻时金属桥箔的电爆性能参数

Table 4 Exploding performance of foil bridge under various equivalent resistances

effective resistance /m Ω	peak current /kA	burst current /kA	burst voltage /kV	burst time /ns	peak time /ns	periods /ns
68	3.07	2.84	2.51	204	180	764
68	3.10	2.76	2.51	213	181	776
78	2.42	2.03	1.93	247	183	770
78	2.40	2.10	1.88	263	179	772
88	1.78	1.42	1.12	298	182	770
88	1.78	1.38	1.09	303	179	768
98	1.49	1.10	0.84	364	181	770
98	1.47	1.05	0.88	371	184	772

从表 4 可以看出,高压脉冲功率源的回路等效电阻越小,峰值电流和爆发电流越大,回路等效电阻增大,峰值电流、爆发电流、爆发电压变小,爆发时间增长,即爆发点的时间与峰值时间较远。在不同等效电阻实验条件下,金属桥箔的有效能量利用率如表 5 所示。

表 5 不同等效电阻参试条件下金属桥箔的能量利用率

Table 5 Energy efficiency foil bridge under various equivalent resistances

voltage /kV	effective resistance /m Ω	capacitance / μF	effective energy /J	ignition energy /J	efficiency /%
2.0	68	0.2	0.219	0.4	54.8
2.0	78	0.2	0.140	0.4	35.0
2.0	88	0.2	0.112	0.4	28.0
2.0	98	0.2	0.071	0.4	17.8

从表 5 可以看出,在 2.0 kV 加载电压条件下,放电回路等效电阻为 68 m Ω 时,有效能量最高为 0.219 J,有效能量利用率最高为 54.8%。从等效电阻参数对爆发电流和能量利用率的影响规律来看,高压脉冲功率源的等效电阻参数越小,越有利于桥箔的爆发性能。

3.5 讨论

从以上桥箔电爆性能实验结果可以看出,在相同

桥区尺寸的参数条件下,当高压脉冲功率源储能电容容量为 $0.2 \mu\text{F}$,放电回路等效电感为 57 nH ,等效电阻为 $68 \text{ m}\Omega$ 时,在加载电压为 2.0 kV 放电条件下,桥箔厚度为 $5.0 \mu\text{m}$ 时其爆发性能最优,爆发能量利用率达到最高,为 54.8% ,此时桥箔的爆发时间与峰值时间最接近,时差最小。

从实验数据和放电波形可以看出,随着高压脉冲功率源等效参数不断的变化,金属桥箔发生电爆时的能量利用率和桥箔爆发时间,以及爆发时间与峰值时间的时差都随着变化,即在某一参数条件下,桥箔的爆发时间超前于峰值时间,随着高压脉冲功率源等效参

数的变化,爆发时间会滞后于峰值时间,其电爆波形如图 6 所示。如在电容量为 $0.4 \mu\text{F}$,发火电压为 2.0 kV 时,爆发时间为 128 ns ,峰值时间为 256 ns ,爆发时间超前于峰值时间,计算桥箔有效能量利用率较低,其电爆波形如图 6a 所示。在以上实验中,当电容量为 $0.2 \mu\text{F}$ 时,加载电压为 2.0 kV 时,桥箔爆发时间与峰值时间时差最小,计算桥箔有效能量利用率最高,如图 6b 爆发时间超前与峰值时间波形曲线。当等效电感或等效电阻不断变大时,桥箔爆发时间与峰值时间时差不断增大,爆发时间滞后于峰值时间,其电爆波形如图 6c 所示,桥箔有效能量利用率也随之降低。

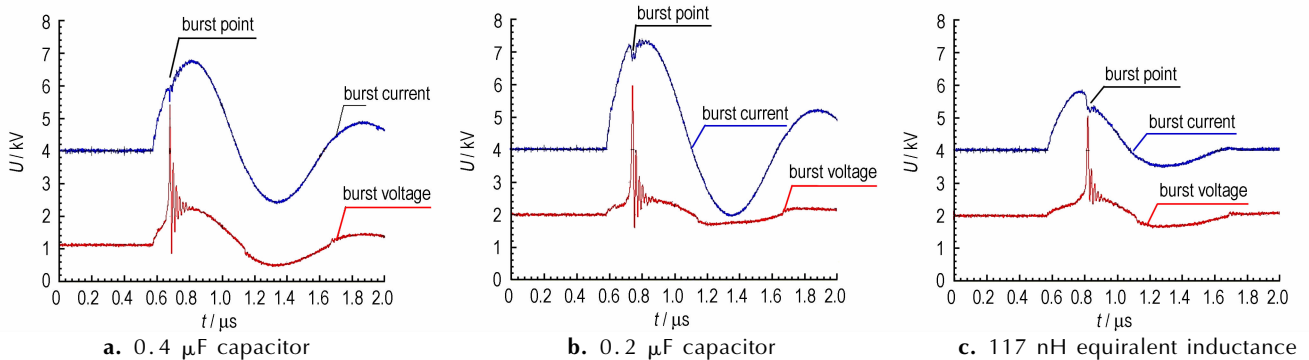


图 6 桥箔电爆波形对比

Fig. 6 Discharge curves under the different equivalent parameters of exploding foil

通过桥箔电爆曲线和测试数据可以看出,桥箔在发生电爆时,爆发时间越接近峰值时间,其发生电爆时的有效能量利用率越高,桥箔电爆性能越好。

4 结论

(1) 对于厚度为 $5.0 \mu\text{m}$,桥区尺寸为 $0.5 \text{ mm} \times 0.5 \text{ mm}$ 的铜箔,当高压脉冲功率源储能电容容量为 $0.2 \mu\text{F}$,放电回路等效电感为 57 nH ,等效电阻为 $68 \text{ m}\Omega$ 时,在加载电压为 2.0 kV 放电条件下,其电爆性能最优,爆发能量利用率达到最高,为 54.8% 。

(2) 高压脉冲功率源的等效电感与等效电阻参数越小,越有利于桥箔的电爆性能;桥箔在发生电爆时,爆发时间越接近峰值时间,其发生电爆时的有效能量利用率越高,桥箔电爆性能越好。

参考文献:

- [1] 褚恩义,任西等. 爆炸箔冲击片起爆设计参数研究[J]. 火工品, 2008(3): 26-27.
CHU En-yi, REN Xi. Study on the design parameters of exploding foil initiator[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008, (3): 26-27.

- [2] HAN Zhi-wei, CHU En-yi, WANG Ke-xuan. Study on the relationship between the thickness of exploding foil and its electrical performance & sensitivity of EFI [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2009(6): 8-107.
- [3] 王桂吉, 邓向阳. 爆炸箔起爆器小尺寸飞片速度测试[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(1): 28-32.
WANG Gui-ji, DENG Xiang-yang. Velocity measurement of the small size flyer of an exploding foil initiator [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(1): 28-32.
- [4] 韩克华, 王丽萍, 任西, 等. 高压脉冲功率源与冲击片雷管发火能量匹配关系特性试验方法[J]. 火工品, 2012(3): 45-49.
HAN Ke-hua, WANG Li-ping, REN Xi, et al. Study on the detonable energy matching experiment methods and accordant connection characteristic for high voltage pulse power source with slapper [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2012(3): 45-49.
- [5] Nickolin Tom. To develop a highly integrated firing module [C] // 43rd Annual Fuze Conference and Munitions Technology Symposium VI. Downtown Tampa. FI 1999.
- [6] Mike Sowder. Electronic safety and arming fuzes (ESAF) for conventional bomb weapons "technology in bomb fuzeing" [C] // 48th Annual NDIA Fuze conference. 2004.
- [7] Cuong Q Nguyen. High-G mortar electronic S&A development and flight test [C] // 50th Annual Fuze Conference, Norfolk, VA. 2006.
- [8] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives [J]. *Explosive Stoffe*, 1969, 17(1): 9-14.
- [9] Stroud J R, Ornellas D L. Fly-plate detonator using a high-density high explosive: US, 4788913 [P], 1988.

- [10] Nickolin Tom. Highly integrated firing module[C]//43rd Annual Fuze Conference, 1999.
- [11] Dave Grilliot, Cory Hatch. Multiple launch rocket system (MLRS) fuzing evolving to meet end user requirements[C]//51st Annual NDIA Fuze Conference, 2007.
- [12] Cutting J L, Lee R S, Hodgins R L. Slapper detonator performance [R]. UCRL-ID-117787, 1994.
- [13] TNO Kennis voor zaken . A development platform for a micro-chip EFI[C]//52nd Annual Fuze Conference, 2008. Vim Prinse Gert Scholtes, 2008 Fuze Conf, Sparks, NV. May, 13-15, 2008.
- [14] Todd C Monson, Chris B Diantonio, Michael R. Winter. Development of low-cost, compact, reliable, High energy density ceramic nanocomposite capacitors[C]//53th Annual Fuze Conference. 2010.
- [15] 韩克华, 任西, 秦国圣, 等. 高压脉冲功率源输出特性[J]. 探测与控制学报, 2012, 34(4): 24-29.
HAN Ke-hua, REN Xi, QIN Guo-sheng, et al. Output performance of high voltage pulse power source[J]. *Journal of Detection & Control*, 2012, 34(4): 24-29.
- [16] MIL-DTL-23659D. 电起爆器通用设计规范[S]. 2003.
- [17] 韩克华, 任西, 周密, 等. 脉冲电容器优选试验方法研究[J]. 爆破器材, 2011, 40(3): 22-25.
HAN Ke-hua, REN Xi, ZHOU Mi, et al. Study on the characteristics parameters optimization experiment with measurement method for high voltage pulsed power capacitor[J]. *Explosive Materials*, 2011, 40(3): 22-25.

Effect of High Voltage Pulse Power Source Equivalent Parameter on Exploding Performance of Foil Bridge

HAN Ke-hua¹, ZHOU Jun², REN Xi¹, LIU Tian¹, AO Cheng-gang¹, TONG Hong-hai¹

(1. National Key Laboratory of Applied Physics and Chemistry, Shaanxi Applied Physics and Chemistry Research Institute, Xi'an 710061, China; 2. School of electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China)

Abstract: In order to reduce the ignition energy of exploding foil initiator (EFI), and optimize the performance and the parameter of high voltage pulse power source, and the effects of the high voltage pulse power source equivalent parameter on the exploding performance of the foil bridge were investigated with 0.5 mm×0.5 mm×5.0 μm copper foil bridge. By calculating the performance parameter including the equivalent inductance, equivalent resistance, capacitance of pulsed power capacitor and load voltage according to the oscillation waveform parameters from the experimental, the energy efficiency was obtained, and the change rules were studied. Results show that when the capacitance is 0.2 μF, equivalent inductance is 57 nH, the equivalent resistance is 68 mΩ and the load voltage is 2.0 kV of high voltage pulse power source, the exploding performance of the foil bridge is the best, that energy efficiency is 54.8%, reaching the highest, and the time difference of the burst time and the peak time are the shortest.

Key words: exploding foil initiator (EFI); high voltage pulse power source; foil bridge; equivalent parameter; exploding performance; output efficiency of effective energy

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2014.06.022