

文章编号: 1006-9941(2008)05-0547-03

## 桥丝式电火工品射频敏感度试验研究

陈明华, 张国安, 陆瑞卿, 邢立平

(军械工程学院军械技术研究所, 河北 石家庄 050000)

**摘要:** 为了研究射频对电火工品的影响, 利用传导方法分别测定了三种不同的桥丝式电火工品试样的敏感频率, 然后在敏感频率条件下根据升降法对试样的射频敏感度进行了测定和计算。对三种各 30 发电火工品进行了敏感频率探测试验, 确定射频敏感频率均为 0.4 GHz; 在敏感频率条件下, 利用升降法对三种各 30 发电火工品的射频敏感度进行了测试, 射频敏感度随桥丝电阻增加而降低, 计算得到 50% 发火功率分别为 2.818 W、0.428 W 和 0.897 W。

**关键词:** 军事化学; 桥丝式电火工品; 射频; 敏感度; 升降法

**中图分类号:** TJ55; TQ567; TQ562.1

**文献标识码:** A

### 1 引 言

现代武器广泛使用电火工品, 完成各种点火和控制功能<sup>[1]</sup>。电火工品以及相连的电路和部件都可能成为接收天线, 将环境中电磁场的射频能量引入桥丝产生电流, 因而可能导致电火工品意外发火或者使之失效, 影响其安全性和可靠性。关于电磁辐射对军械系统危害问题, 最早于 1932 年提出<sup>[2]</sup>; 在对电火工品的危害方面, 国内外进行了比较长时间的研究, Koucherng Willie<sup>[2-3]</sup> 等人测试了电雷管的射频敏感度, 在 1 GHz 以下频率, 其射频敏感度接近于直流发火敏感度; 马宏萱等人<sup>[4]</sup> 研究了射频对桥丝式电火工品性能的影响, 确定了经射频能量作用后, 桥丝式电火工品发火功率降低、作用时间变长, 甚至可能造成瞎火; 陈明华等<sup>[5]</sup> 数值模拟了射频电流对桥丝电雷管安全性与可靠性影响。

在上述工作基础上, 本研究选用了三种桥丝式电

火工品, 利用试验频率和输出功率可调的射频源, 将电磁辐射能量耦合到电火工品中, 通过发火试验确定其敏感频率和射频敏感度。研究中首先通过探测试验确定了三种电火工品敏感频率, 然后在敏感频率下利用升降法对其射频敏感度进行了测定, 最后通过计算得到了不同条件下发火功率。

### 2 测试原理与方法

#### 2.1 试验原理

电磁辐射能量的传输分为传导和辐射两种方式, 传导是沿着辐射源和电火工品间的连接电路传递到电火工品中, 辐射是以电磁波的形式耦合到电火工品上。本研究是采取频率和功率可调的射频源, 通过传导的方式, 经过匹配装置, 将射频源输出的功率直接注入电火工品脚线, 测定电火工品的射频敏感度<sup>[6]</sup>。试验测试框图见图 1。

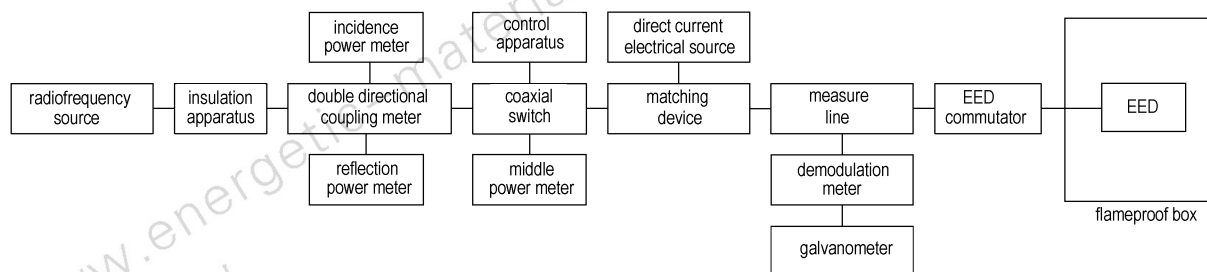


图 1 试验测试框图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

#### 2.2 电火工品的结构及性能

试验所用样品均为桥丝式电火工品, 其中 EED1 和 EED2 为单桥丝式电火工品, EED3 为双桥丝式电火工品, 性能参数见表 1。

收稿日期: 2008-07-07; 修回日期: 2008-09-12

作者简介: 陈明华(1965-), 男, 高级工程师, 博士, 从事发射药与火工品方向研究。

表 1 样品的性能参数  
Table 1 Properties of samples

name	technical performance		
	electric resistance /Ω	safety electric current/mA	fire electric current/mA
EED1	2.5 - 4.5	≤50	≥400
EED2	0.7 - 1.4	≤100	≥700
EED3	1.0 - 2.0	≤300	≥1000

2.3 试样敏感频率测试

试验中射频频率分别选择在 0.001, 0.1, 0.4, 0.6, 0.5, 0.9, 2.0, 5.6, 8.9, 18.0 GHz。仪器设备调整完毕后,将射频源的输出功率置为 1.0 W,通电 10 s,记录试样是否发火。若试样发火,更换试样,降低射频源输出功率,直至试样不发火;若试样不发火,则增加射频源输出功率,直至试样发火。依次改变试验频率,得到不同频率条件下试样的最低发火功率,取发火功率最小值所对应的频率为敏感频率。

2.4 试样 50% 发火射频功率的确定

选取 30 发试验样品,在试样的敏感频率条件下利用升降法确定射频感度,测试过程与 2.3 中相同。如果试样发火,则降低射频功率进行下一次试验;如果试样不发火,则增加射频功率进行下一次试验。对试验结果进行处理,得到试样的 50% 发火射频功率。

3 试验结果与分析

3.1 电火工品敏感频率测试结果

利用射频感度测试装置对电火工品进行了测试,射频频率分别选择在 0.001 ~ 18.0 GHz 之间共 9 个点,射频功率在 1.0 ~ 5.0 W 之间,表 2 给出了电火工品 EED1 的试验结果。

从表 1 可以看出,与其他射频频率条件下发火功率相比较,当射频频率在 0.4 GHz 时,电火工品 EED1 接收射频后最容易发火,因此该频率即为电火工品的射频敏感频率。同样对其他两组试验结果进行分析,得到电火工品 EED2 和 EED3 的敏感频率也均为 0.4 GHz。

3.2 电火工品射频感度试验结果

试验前首先要确定电火工品的初始射频刺激功率和步长,根据该电火工品的最低发火功率,选定初始射频刺激功率  $x_0$ ,变换  $y_0 = \log x_0$ ,取:

$$y_i = y_0 + id, \\ (i = 0, \pm 1, \pm 2, \dots), \quad x_i = 10^{y_i}$$

式中,  $x_i$  为第  $i$  次的射频功率, W;  $x_0$  为初始射频功率, W;  $i$  为顺序号;  $d$  为步长。

选取 30 发样品,将射频固定在 0.4 GHz 的敏感频率下,在  $x_0 = 2.8$  W 和  $d = 0.01$  条件下对电火工品 EED1 施加射频功率,利用升降法测试电火工品的射频感度,试验结果见表 3。

表 2 电火工品 EED1 敏感频率测试结果

Table 2 Test results of sensitive frequency for electric explosive device EED1

frequency/GHz	power/W					
	1.0	2.0	2.5	2.8	3.0	5.0
0.001					0, 0	
0.1					0, 0	
0.4	0, 0	0	0	1	0, 1, 0, 1	
0.6	0, 0		0	0	0, 0	1
0.9					0, 0	
2.0	0				0	
5.6					0	
8.9					0	
18.0					0	

Note: 1—fire; 0—misfire.

表 3 电火工品 EED1 射频感度试验结果

Table 3 Test results of radiofrequency for EED1

$i$	$x_i/W$	$y_i$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	2.93	0.467												1			1
1	2.86	0.457												0		0	1
0	2.80	0.447	1										0				
-1	2.74	0.437	0	1					1	0							
-2	2.67	0.427			1			0	0								
-3	2.61	0.417					0										

$i$	$x_i/W$	$y_i$	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
2	2.93	0.467					1		1							1	1
1	2.86	0.457	1		0		0		1					0		0	
0	2.80	0.447	0		0						1		0				
-1	2.74	0.437											0				
-2	2.67	0.427															
-3	2.61	0.417															

3.3 分析与讨论

根据表 3 电火工品 EED1 以及其它两种电火工品的射频感度试验结果,即可计算出 50% 发火功率、标准偏差以及不同刺激量下发火功率等参数<sup>[7]</sup>。表 4 给出了计算中所用的计算因子以及各参数的计算公式。

试探数的判断准则为：当总的发火次数大于不发火次数时， $n_i$  取不发火次数做为试探数，否则取发火次数做为试探数。在本研究中由于总的发火次数小于不发火次数时，所以  $n_i$  取发火次数做为试探数。

根据表 4 数据处理中的计算因子和计算公式对试验结果进行处理与计算，三种电火工品的计算结果见表 5。

表 4 数据处理中的计算因子和计算公式

Table 4 Calculation factors and equations in data processing

name	equation
calculation factor	$A = \sum_{i=-2}^2 in_i, \quad M = \frac{nB - A^2}{n^2}$ $B = \sum_{i=-2}^2 i^2 n_i, \quad b = 1 - \left  \frac{A}{n} - \frac{1}{2} \right $
50% fire power	$\mu = x_0 + \left( \frac{A}{n} \pm \frac{1}{2} \right) d$
standard deviation	$\sigma = 1.620(M + 0.029)$
fire power	$x_p = \mu + \mu_p \sigma$

Note:  $i$ , order number;  $n_i$ , fire times of electric explosive device corresponding to  $i$ ;  $n$ , total fire times of electric explosive device.

表 5 电火工品射频敏感度试验结果统计表

Table 5 Statistics for test results of radiofrequency sensitivity

name	calculation factor				standard deviation/W	50% fire power	10% fire power	90% fire power
	A	B	M	b				
EED1	11	33	1.740	0.714	0.029	2.818	2.588	3.070
EED2	2	18	1.265	0.643	0.105	0.428	0.314	0.583
EED3	4	14	0.918	0.786	0.046	0.897	0.783	1.027

桥丝式电火工品通入电流后，在桥丝上产生热量，桥丝升温进而加热药剂，药剂发生氧化还原反应，产生的热量使药剂继续升温，加速反应直至发火。

当桥丝式电火工品处于电磁场中时，未短路的金属脚线起偶极天线的作用，短路的金属脚线起环形天线的作用，在桥丝上产生射频电流。电流较低时，如低于表 1 中的安全电流，桥丝产生的热量不足以使药剂发生加速的氧化还原反应，电火工品不会发火；电流足够高时，如高于表 1 中的发火电流，电火工品就能发火。

由于桥丝式电火工品接收射频能量产生感应电流与其结构，如脚线以及桥丝性质等密切相关，而研究中所用的样品结构类似，因此其敏感频率均为 0.4 GHz；由于电火工品桥丝、脚线以及药剂性能的不同，使其发火所接收射频能量也具有较大差异，比较表 1 和表 5 中的数据，桥丝电阻越大，接收射频发火能量也越大，即射频敏感度越低。

## 4 结 论

(1) 在不同频率条件下，一定的射频能量能够引起电火工品的发火；频率不同，发火能量也不同。电火工品存在一个敏感频率，在该频率下，发火所需射频能量最低。

(2) 利用传导法分别在 0.001, 0.1, 0.4, 0.6, 0.5, 0.9, 2.0, 5.6, 8.9, 18.0 GHz 条件下测定了三种桥丝式电火工品的发火能量，根据试验结果，由于结构相似，三种电火工品的敏感频率分别均为 0.4 GHz。

(3) 在敏感频率条件下，利用升降法分别测定了三种电火工品的射频敏感度，并对试验结果进行了统计分析，三种电火工品的 50% 发火功率分别为 2.818 W、0.428 W 和 0.897 W；10% 发火功率分别为 2.588 W、0.314 W 和 0.783 W；90% 发火功率分别为 3.070 W、0.583 W 和 1.027 W；桥丝的电阻越大，射频敏感度越低。

### 参考文献：

- [1] 王凯民, 温玉全. 军用工火品设计技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
WANG Kai-min, WEN Yu-quan. Design of Initiators and Pyrotechnics for Weapon System[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [2] Koucherng Roger Lee, John E Bennett. New method for assessing EED susceptibility to electromagnetic radiation[C] // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. Dept. of electr. & Comput. Eng., Clemson Univ., SC, USA, 1991, 33(4): 328-333.
- [3] Willie R C Bogan. Comparison of EMP and Hero programs[R]. AD-A203924, 1992.
- [4] 马宏萱, 杨洁, 刘天新. 射频对桥丝式电火工品性能的影响[J]. 火工品, 2003(3): 15-17.  
MA Hong-xuan, YANG Jie, LIU Tian-xin. Influence of RF on properties of hot-bridge EED[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2003(3): 15-17.
- [5] 陈明华, 高敏, 卢斌, 等. 射频电流对桥丝式电雷管安全性与可靠性影响数值计算[J]. 火工品, 2007(4): 22-25.  
CHEN Ming-hua, GAO Min, LU Bin, et al. Numerical calculation for influence of RF current on security and reliability of hot-bridge electric detonator[J]. Initiators & Pyrotechnics, 2007(4): 22-25.
- [6] GJB736.2-89. 中华人民共和国国家军用标准. 火工品试验方法—电火工品射频敏感度测定[S].  
GJB736.2-89. National Military Standard of People's Republic of China. Method of initiating explosive device test—Electric initiating explosive determining radiofrequency sensitivity[S].
- [7] GJB 377-87. 中华人民共和国国家军用标准. 敏感度试验用升降法[S].  
GJB 377-87. National Military Standard of People's Republic of China. The up and down method for sensitivity tests[S].

(下转 552 页)

从表 2 可以看出,所试验产品的可靠性都达到了指标要求,并且有一定的裕度;采用 GJB6478 与大样本步进法评估结果一致,且前者得到的  $M$  值略小,符合可靠性评估应略微保守的原则。

## 5 结 论

(1) 有裕度的高可靠性火工品的可靠性试验,在失败数  $f=0$  时,可靠性试验信息量等于可靠性试验信息熵。

(2) GJB6478 规定的方法为满足可靠性试验信息量等值,验证试验必须要求失效数  $f=0$ 。

(3) 验证试验结果证明,按 GJB6478 和大样本步进法对比评估结果一致,求得的裕度略小于大样本方法的结果,符合可靠性评估原则,表明 GJB6478 - 2008 《火工品可靠性计量-计数综合评估方法》可用于火工品可靠性评估。

## 参考文献:

- [1] 李贤平. 概率论基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] 蔡瑞娇, 柳维旗, 董海平. 关于试验信息熵[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 204 - 207.  
CAI Rui-jiao, LIU Wei-qi, DONG Hai-ping. Study on test information entropy [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(6): 204 - 207.
- [3] 陈向新, 孙薇薇. 简析信息熵[J]. 宜春学院学报(自然科学), 2002, 12(6): 13 - 14.  
CHEN Xiang-xin, SUN Wei-wei. Parsing information entropy [J]. *Journal of Yichun University (Natural Science)*, 2002, 12(6): 13 - 14.
- [4] 中国兵器科学技术报告. 火工品小样本可靠性评估方法试验验证研究[R]. 北京理工大学, 2007.  
China Ordnance Science Technology Report. Test verification study on method of assessing reliability of initiating devices with small samples [R]. Beijing Institute of Technology, 2007.
- [5] GJB6478 - 2008. 火工品可靠性计量-计数综合评估方法宣贯讲义[S]. 北京理工大学火工燃爆产品可靠性与失效分析中心. 2008.

## Reliability Test Information Entropy under the Special Condition

CAI Rui-jiao, DONG Hai-ping

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

**Abstract:** Reliability test information entropy of pass-fail product and particularity of high reliability product with margin were studied. Results show that reliability test information entropy is equivalent to reliability test information quantity under the condition of zero failure. The assessment results of 20 kinds of initiating devices with GJB6478 are consistent with those with run-down method.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics technique; reliability test information entropy; information quantity; pass-fail product; margin

(上接 549 页)

## Radiofrequency Sensitivity of Hot-bridge Electric Explosive Device

CHEN Ming-hua, ZHANG Guo-an, LU Rui-qing, XING Li-ping

(Ordnance Institute of Technology, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** The effect of radiofrequency on three different hot-bridge electric explosive devices was studied by experiment and calculation. The sensitive frequency were measured using conduction method, and the radiofrequency sensitivity was tested and calculated in the condition of sensitive frequency based on the up-down method. The sensitive frequencies are 0.4 GHz through detection test of 30 samples for each electric explosive device; the fire powers are 2.818 W, 0.428 W and 0.897 W at 50% fire/no fire through radiofrequency sensitivity test of 30 samples for each electric explosive device, and the radiofrequency sensitivity decreases along with the increase of electric resistance of hot-bridge.

**Key words:** military chemistry; hot-bridge electric explosive device; radiofrequency; sensitivity; up-down method