

文章编号: 1006-9941(2006)03-0200-05

## 火工品感度测试动态斜坡法与升降法比较研究

白颖伟<sup>1,2,3</sup>, 蒋庄德<sup>1,2</sup>, 赵玉龙<sup>1,2</sup>, 褚恩义<sup>3</sup>

(1. 西安交通大学机械工程重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 西安交通大学精密工程研究所, 陕西 西安 710049;

3. 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)

**摘要:** 对动态斜坡法与升降法测试原理优缺点进行了比较, 在动态斜坡法测试敏感和钝感型电火工品发火感度试验的基础上, 结合与升降法试验结果的对比, 对动态斜坡法进行了研究。通过改变试件压药条件, 利用动态斜坡法能得到火工品发火感度临界值的特性, 探讨了压药压力和发火感度之间的关系。结果证明, 该方法所需试件数量相对减少, 能满足感度试验的要求。初步探索了解决动态斜坡法与现有火工品验收试验之间矛盾的方法。

**关键词:** 爆炸力学; 动态斜坡法; 升降法; 发火感度; 电火工品

**中图分类号:** TJ45; O389

**文献标识码:** A

### 1 引言

火工品是武器系统的始发元件, 在武器系统中承担着点火、传火、做功、干扰及起爆、传爆等重要作用。随着兵器工业和航天工业的发展, 人们对火工系统的安全性、可靠性要求越来越高。

发火感度是火工品设计、生产验收过程中的重要参数, 通常需要进行如下检测: 确定可靠传递爆轰需要的初始激发能; 测量产品性能的均一性; 测定贮存后火工品性能衰变。火工品发火感度与其药剂安全性和可靠性有着密切的关系<sup>[1]</sup>。对电火工品来说, 在火工品试制中要测量临界电刺激水平, 在生产验收中要检验在规定能量水平火工品全发火概率。我国从20世纪70年代初就在火工品领域开展了发火感度试验的研究工作, 1987年将升降法列入国家军用标准<sup>[2]</sup>, 1990年将步进法列入部标准<sup>[3]</sup>; 1994年将兰利法、升降法、完全步进法、概率单位法和最大似然估计法列入国家军用标准<sup>[4]</sup>。以上统计方法虽各有优缺点<sup>[5]</sup>, 但从试验结果来说, 每一发火件只在一个电流水平上进行试验, 通过实验的试件虽然有发火或者不发火两种状态, 但试件发火并不能证明其在更低的水平是否发火, 试件不发火也不能证明其在更高电流水平能否发火。以常用的升降法来说, 不发火或发火的试件约占

试验总数量的一半, 对未发火的试件不能再进行二次试验, 而得到的试验数据又只是给出了外侧极限值, 未能表示出各试件的临界发火电流。因此, 欲获得有效的试验结果, 则要进行大量试验, 每次少则20余发, 多则100余发, 通过这些试验得到试件的平均发火电流及其标准偏差, 然后根据假定的分布函数, 从统计数据推出全发火和不发火电流。这种方法, 如不进行大量试验, 所取得的数据就不具备统计的有效性。1974年, Dreitzler等人<sup>[6]</sup>申请了美国专利“动态斜坡法测发火感度”, 介绍了一种利用动态斜坡发生器进行电爆装置发火感度测试的方法。1979年和1981年, 美国火工品专家G. L. O'BARR.<sup>[7,8]</sup>连续在第十次和第十一次美国国际烟火药和炸药会议上发表论文, 倡导运用动态斜坡法进行桥丝式电火工品的发火感度试验, 并且利用此方法进行了一定数量火药桶试验, 证明了动态斜坡试验方法是可行的。在文献[9]中, 作者利用自行设计的动态斜坡发生器系统进行了初步试验, 也证明了动态斜坡法的可行性。该方法的实际应用尚未报道, 本文比较了动态斜坡法与升降法试验结果, 对动态斜坡法的优缺点进行了进一步研究。

### 2 试验方法比较

#### 2.1 试验方法

##### 2.1.1 动态斜坡法

动态斜坡试验是将一个随时间增加而增大的呈斜坡上升的电流加在试验用火工品上, 直至其发火, 发火时的电流即为该火工品的临界发火电流。利用临界发火电流值, 通过式(1)~(4)可得到火工品的平均发火电流 $\bar{x}$ 、标

收稿日期: 2005-12-07; 修回日期: 2006-02-20

基金项目: 火工品安全性可靠性技术国防科技重点实验室基金 (No. 51452010105ZS3901)

作者简介: 白颖伟(1972-), 高级工程师, 从事火工烟火、火工品安全性可靠性评估与试验测试技术研究。e-mail: baiyw@126.com

准偏差  $\sigma$ 、全发火电流  $I_{100\%}$  和全不发火电流  $I_0$  [10]。

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

$$\sigma = \left( \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right)^{1/2} \quad (2)$$

$$I_{100\%} = \bar{x} + \sigma [t/(n)^{1/2} + \mu \cdot (F)^{1/2}] \quad (3)$$

$$I_0 = \bar{x} - \sigma [t/(n)^{1/2} + \mu \cdot (F)^{1/2}] \quad (4)$$

式中,  $t$  为在选定置信度下,  $(n - 1)$  个自由度的  $t$  分布的单侧分位数;  $F$  为在选定置信度下的显著性水平;  $\mu$  为在要求可靠度下的正态分位数。

动态斜坡法测试原理如图 1 所示。启动器启动系统总电源。将火工品装配到位后,当爆炸箱门闭合时门开关闭合,系统处于待发状态。闭合触发开关后,斜坡发生器将一个随时间增加而增大的呈斜坡上升的电流加在试件上,直至其发火并记录发火临界电流。

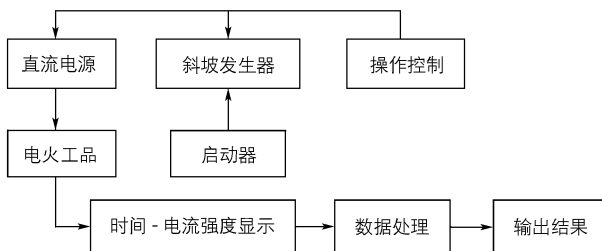


图 1 动态斜坡法试验原理图

Fig. 1 Diagram of the ramp current method

### 2.1.2 升降法

目前电雷管发火方式主要有三种：电容器放电发火、恒定电流发火和恒定电压发火。本文采用恒定电流发火方式进行升降法试验,测试原理如图 2 所示,其中模拟负载电阻与电雷管阻值相等。升降法主要用于经过大量的试验而确定的符合正态分布的系统,首先根据经验或初步试验结果确定试验刺激量的均值和标准差,确定初始刺激值  $x_0$  和步长  $d$ 。试验中,在  $x_0$  时发火则减小刺激量  $d$  (不发火增加  $d$ ) 继续试验,直至不发火增加刺激量  $d$  (发火减小  $d$ ),其特点是围绕着 50% 发火或不发火的刺激水平进行。按式(5)~(7)计算临界刺激量平均值  $\bar{x}$ 、标准偏差  $\sigma$  和发火率  $P$  对应的刺激量  $x_p$  [2,10]。

$$\bar{x} = x_0 + d \left( \frac{A}{N} \pm \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

$$\sigma = 1.62(M + 0.029)d \quad (6)$$

$$x_p = \bar{x} \pm \mu\sigma \quad (7)$$

式中,  $A = \sum in_0$ ,  $N = \sum n_0$ ,  $M = \frac{NB - A^2}{N^2}$ ,  $B = \sum i^2 n_0$ ,  $n_0$

为在某刺激水平下的不发火数,  $\mu$  是要求可靠度  $P$  对应的正态分位数。式中“ $\pm$ ”号选取原则是：如果发火率随刺激量增加而增加,  $P > 50\%$  时取“ $+$ ”号,  $P < 50\%$  时取“ $-$ ”号；如果发火率随刺激量增加而降低,  $P > 50\%$  时取“ $-$ ”号,  $P < 50\%$  时取“ $+$ ”号。

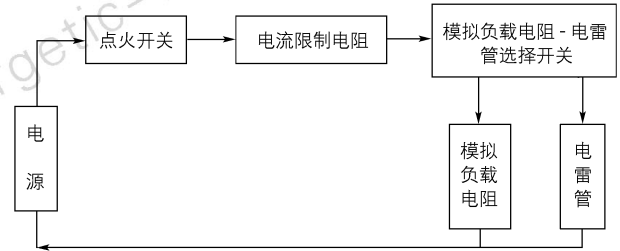


图 2 恒定电流试验原理图

Fig. 2 Diagram of the constant current method

### 2.2 试验方法优缺点比较

不管采用哪种方法进行试验,电火工品受到电刺激时的响应都与桥丝及其四周装药的温度分布以及许多难以量化的电热参数有关。

对于升降法采用的恒定电流试验,如果能量输入速率低,桥丝可能正好在低于起爆临界温度的水平上达到热平衡,这样即使传给电火工品输入端的总能量达到或超过了临界起爆能量也不能起爆。另外,由于雷管激发过程中桥丝电阻变化很大(有时相差 2~4 倍),实际得到的并不是恒定电流。

动态斜坡法试验成功的关键是电流斜升率,如果斜升率太快,桥丝周围的温度变化可能会明显滞后于电流的变化,试验得到的就可能是虚假的电流值(扩散效应);如果斜升率太慢,点火药就可能在接近于发火点的温度下保持相当长的时间,使点火药在发火前性能就发生化学变化(高温变质效应),也就改变了试件所需的真实发火电流 [10,11]。对桥丝式火工品进行动态斜坡试验方法的难度在于电流斜升率的确定,如选择不合理则可能引起瞎火或爆燃,这就需要选择不同的斜升率进行实验。

## 3 试验过程

### 3.1 敏感电发火管感度试验

首先对某敏感型电点火头进行了升降法试验,根据初步试验(5 发)确定始刺激值  $x_0$  为 270 mA,步长  $d$  为 5 mA,用 37 发产品进行正式试验,试验中发火数为 18 发,不发火数为 19 发,根据式(5)~(7)计算发火感度平均值、标准偏差、90% 置信度下 99.99% 全发火

电流和不发火电流。

用46发产品进行动态斜坡法试验,试验电流斜升率分别为 $0.3, 1, 2, 5, 15 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ ,试验试件数分别为10发、9发、8发、7发和6发,试验数据分布曲线如图3所示。

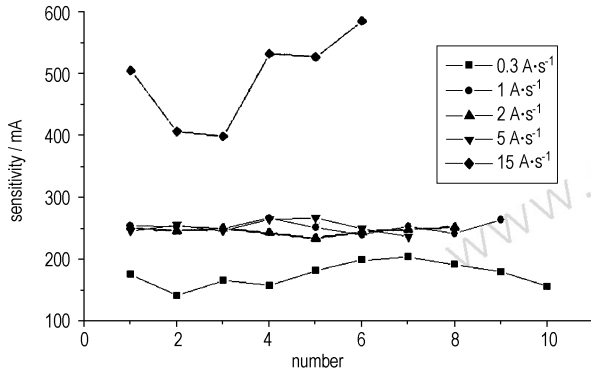


图3 敏感型火工品动态斜坡法试验结果曲线

Fig. 3 Curves of ramp current method for sensitive initiating device

从试验曲线分布可看出,当电流斜升率为 $0.3 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,测得发火电流明显偏小,可以肯定存在高温变质效应,使得药剂的发火感度变小;当电流斜升率为 $15 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,测得发火电流明显偏大,这是由于扩散效应得到的虚假电流值;在 $1, 2, 5 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ 的情况下,发火电流没有明显的变化,在此范围内,试验的扩散效应和高温变质效应的程度与升降法同一效应的程度相比是相当的,用该范围内的所有数据作为有效试验数据处理。在99.99%可靠度(0.9置信度)时,查GB4889-85统计用表可得 $t$ 为3.767, $\mu$ 为3.68, $F$ 为1.55,根据式(1)~(4)计算发火感度平均值、标准偏差、90%置信度下99.99%全发火电流和不发火电流,计算结果见表1。

表1 敏感电发火管升降法与动态斜坡法测试结果对比

Table 1 Testing results of up-and-down method and ramp current method for sensitive initiating device

content	up-and-down method	ramp current method
the number of samples	37	46
function samples	18	0
no-fire samples	19	0
average firing current	272.22 mA	254.28 mA
the standard deviation	6.06	8.95
99.99% percent firing current at 90% confidence	294.76 mA	298.43 mA
maximum no-fire current at 90% confidence	249.69 mA	202.65 mA

比较动态斜坡法和升降法的试验结果可以看出,动态斜坡法测得的临界发火电流值较升降法测得的临

界平均发火电流值小,对标准偏差的估计较升降法高,相同置信度和可靠度情况下全发火电流高,不发火电流值小。由于升降法恒定电流发火未考虑桥丝电阻激发过程中的电阻变化,而动态斜坡法的测试值与电阻变化有关,因此更接近真实值。

### 3.2 钝感电发火管感度试验

首先对某通过 $1 \text{ A}/1 \text{ W}$ 而 $5 \text{ min}$ 不发火的钝感电点火头进行了摸底试验,从试验结果来看,钝感电点火头在 $0.3, 1, 2, 5, 15 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ 斜升率下的试验值分别为 $2.450 \text{ A}, 2.138 \text{ A}, 2.149 \text{ A}, 2.349 \text{ A}$ 和 $3.022 \text{ A}$ ,这与敏感的电火工品试验结果稍有不同。为了进一步探索动态斜坡法在钝感型火工品中应用的可能性,本文采用自制某钝感发火管进行对比试验。

首先用25发发火管进行升降法试验,其中始刺激值 $x_0$ 为 $1.8 \text{ A}$ ,步长 $d$ 为 $0.01 \text{ A}$ ,试验中12发发火,13发未发火,根据式(5)~(7)计算,结果见表2。

对于动态斜坡法试验,首先用10发产品在不同斜升率进行试验,从初步试验结果来看,钝感电火工品试验也是在斜升率为 $1, 2, 5 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ 的情况下发火感度没有明显变化。在参考升降法试验结果的基础上,选择斜升率为 $2 \text{ A} \cdot \text{s}^{-1}$ 对13发钝感发火管进行试验,试验数据曲线见图4曲线1。为了进一步研究动态斜坡法和升降法试验结果的差异,利用动态斜坡法对升降法未发火的试件进行试验,试验数据曲线见图4曲线2。根据式(5)~(7)计算,动态斜坡法试验结果见表2。

表2 钝感电发火管升降法与动态斜坡法测试结果对比

Table 2 Testing results of up-and-down method and ramp current method for insensitive initiating device

content	up-and-down method	ramp current method	no-fire samples by up-and-down method
the number of samples	25	13	13
function samples	12	13	13
no-fire samples	13	0	0
average firing current	1.813 A	1.74 A	1.812 A
the standard deviation	0.02349	0.0216	0.0311
99.99% firing current at 90% confidence	1.886 A	1.867 A	1.995 A
maximum no-fire current at 90% confidence	1.740 A	1.613 A	1.629 A

钝感电发火管的试验结果进一步证明了动态斜坡法的可信性,尤其是升降法未发火试件在动态斜坡法试验时全部发火,只是试验感度值比正常试验的测试值偏高,考虑到该试件受到电流冲击后性能已经变得更加敏感,其真实的发火感度应该比测得值更高。因此,升降

法测得的发火感度其实是该批产品中比较敏感产品的感度,而不是该批产品的感度值。

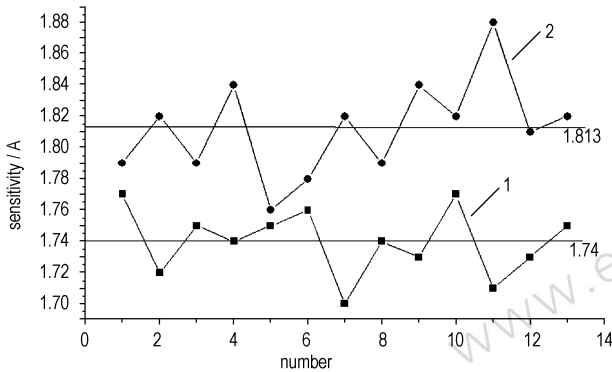


图 4 钝感型火工品动态斜坡法试验结果曲线

Fig. 4 Curves of ramp current method for insensitive initiating device

#### 4 试验结果分析及应用可能性研究

从试验结果来看,斜升率在一定范围的情况下,动态斜坡法的实验数据稳定,测得数据为该斜率下的临界发火电流,具有很强的规律性,可以测试火工品临界发火感度。

但目前火工品生产验收试验中,主要检验在规定的能量水平上电雷管能否全发火,通常以作用时间来判定是否达到要求。动态斜坡法与其它发火感度试验不同,其作用时间与其它方法在测试的作用时间上没有可比性。要利用该方法进行生产验收,可以从产品的感度性能一致性方面着手。假定一批产品发火感度在一定范围内,如果试验中出现发火感度超出允许范围的产品,可认为该产品不符合感度性能指标。

本文利用不同压药条件的样品进行了初步试验,压药压力分别为 98,196,490,784,980,1176 MPa,不同压力在不同斜升率下各作两发产品,发火感度结果见表 3。

表 3 不同压药条件下钝感型火工品动态斜坡法发火感度试验结果

Table 3 Testing results of ramp current method for insensitive initiating device under different charging conditions

ramp current /A · s <sup>-1</sup>	charging conditions and testing results / A											
	98 MPa		196 MPa		490 MPa		784 MPa		980 MPa		1176 MPa	
0.3	1.56	1.54	1.62	1.64	2.15	1.94	1.96	1.97	1.78	1.85	2.16	1.98
1	1.66	1.58	1.60	1.64	1.78	1.78	2.02	1.89	1.78	1.85	1.96	1.90
2	1.68	1.72	1.61	1.59	1.81	1.78	1.84	1.87	1.78	1.78	1.89	1.89
5	1.75	1.70	1.70	1.58	1.95	1.92	1.67	2.00	1.88	1.85	1.96	1.87
15	1.84	1.84	1.85	1.80	2.04	2.08	2.20	2.14	1.94	2.16	2.10	2.16

从试验结果来看,压药压力比较小时,发火感度明显较低,在 400 MPa 以后,发火感度没有明显变化。在

火工品生产中,由于漏装药、塞子与管壳的过盈配合等原因,很可能出现相对压药压力小的情况,从动态斜坡法发火感度实验结果能清楚的判别出该产品装药性能与其它产品的差异。以发火斜升率 5 A · s<sup>-1</sup> 时的第 7 发产品为例,试验感度值明显小于相似压力条件的产品,可判定该产品本身有缺陷。

动态斜坡法对每发产品都精确地测试出了产品的临界发火电流,对于一批产品贮存后的性能指标变化,可以根据历史试验记录曲线和贮存后记录曲线的对比判定产品感度有无变化。

#### 5 结论

从以上实验可以看出,动态斜坡法完全满足火工品发火感度试验目的要求。利用动态斜坡法进行试验较升降法有以下优点:测得数据为临界发火点而不是一个范围,测试更加准确;使用试件较升降方法少;即使一个试件有缺陷或不同于其它试件,也可探查出来,并可测出差异的量值,本文对升降法试验中未发火产品进行动态斜坡法试验时,有些产品的发火感度已接近升降法的 99.99% 可靠度(90% 置信度)的发火电流,与其它产品的差别是很明显的;从产品的统一性方面着手,也可用于产品的生产验收,尤其适用于存贮后产品的性能比较。

对造价昂贵的电火工品,采用动态斜坡法可利用较少的产品得到较好的试验结果,从而减少试件数量,降低消耗,增加经济效益,提高火工品感度评估的可信度。

由于本试验是在小样本情况下得出的初步结论,要将该方法推广应用,还必须经过大样本验证和进一步完善。

#### 参考文献:

- [1] 李国新,程国元,焦清介. 火工品实验与测试技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,1998.
- [2] GIB377-87. 感度试验用升降法[S].
- [3] WJ1975-90. 火工品感度试验用步进法[S].
- [4] GJB/Z 377A-94. 感度试验用数理统计方法[S].
- [5] 花成,张盛国,汤业朋. 炸药作用可靠度估计与研究[J]. 含能材料,2004(增刊): 548-550.  
HUA Cheng, ZHANG Sheng-guo, TANG Ye-peng. Study on the evaluation of explosive reliability[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2004(Supplement): 548-550.
- [6] Dreitzler, David R (Huntsville, AL), Moore, et al. Ramp current apparatus and method of sensitivity testing[P]. USP535324. December, 23, 1974.
- [7] G L O'Barr. The dynamic ramp test[A]. 10th International Explosive and Propellant Seminar[C], USA, 1979.

- [8] G L O'Barr. All-fire/no-fire determinations for electric using the dynamic ramp method[A]. 11th International Explosive and Propellant Seminar[C], USA, 1981.
- [9] 白颖伟, 蒋庄德, 褚恩义. 电火工品发火感度动态斜坡法测试技术研究[J]. 含能材料, 2004(增刊): 434 - 437.  
BAI Ying-wei, JIANG Zhuang-de, CHU En-yi. Ramp current method of sensitivity testing for electrical initiating explosive system [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2004 (Supplement): 434 - 437.
- [10] 艾鲁群. 国外火工品手册[M]. 国家机械工业委员会兵器标准化研究所, 1988.
- [11] 王魁全译. 含有爆炸元件电路的设计和使用原则[S]. OB S/04/91. 美英火工品及相关专业资料译文集. 全国军用火工品标准化技术委员会, 1998.

## Study on Ramp Current Method and Up-and-down Method for Sensitivity Testing of Initiating Device

BAI Ying-wei<sup>1,2,3</sup>, JIANG Zhuang-de<sup>1,2</sup>, ZHAO Yu-long<sup>1,2</sup>, CHU En-yi<sup>3</sup>

(1. State Key Lab for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an JiaoTong University, Xi'an 710049, China;

2. Institute of Precision Engineering, Xi'an JiaoTong University, Xi'an 710049, China;

3. State Key Lab of Applied Physics-Chemistry Research, Shaanxi Applied Physics-Chemistry Institute, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** By comparing the advantage and disadvantage of ramp current with other methods, ramp current method and up-and-down method are used to test sensitivity of bridge-wire Electrical Initiating Device. As the ramp current method can get the critical sensitivity of Electrical Initiating Device, the testing samples are designed under different charging conditions to study the relationship between charging pressure and sensitivity. The testing results show that the ramp current method can meet the sensitivity testing purpose. It can be used to detect disfigurement and difference of the Electrical Initiating Device. It can be used to evaluate the system's fire characteristic during designing stage. Because each sample testing result can be used, fewer samples are needed in ramp current method.

**Key words:** explosion mechanics; dynamic ramp method; up-and-down method; sensitivity test; electrical initiating explosive system



### 关于2007年《推进剂研究论文专辑》的征稿启事

推进剂是战术导弹、战略火箭和航天飞行的动力能源,是军用含能材料研究中最活跃的部分,科技水平发展最快的一个学科,受到含能材料工作者密切地关注。为使有关研究成果得到更好的交流,促进推进剂技术的发展,本刊将于2007年组织出版《推进剂研究论文专辑》。

专辑内容包括:固体(液体)推进剂的配方、性能、工艺技术、安全特性等理论研究、实验设计,新材料在推进剂中的应用、推进剂的发展前景与发展方向。本专辑特别欢迎与高能含硼富燃料推进剂、高能量密度物质(HEDM,如GAP、CL-20)推进剂、无毒或低毒绿色推进剂、金属化胶体推进剂、高密度碳氢燃料、吸热型碳氢燃料等有关内容的学术论文。

请各位作者积极撰稿,来稿请注明“推进剂研究论文专辑”。