

文章编号:1006-9941(2009)02-0218-04

## 装药参数对爆炸箔起爆器性能的影响

同红海,褚恩义,任西,钱勇

(中国兵器工业第二一三研究所 火工品安全性可靠性技术国防科技重点实验室,陕西西安 710061)

**摘要:**为研究 HNS-IV 装药参数对爆炸箔起爆器 (EFI) 性能的影响,测试了不同装药参数的 EFI 在不同放电电压下的作用时间。结果表明,装药密度为理论最大密度 (TMD) 的 90% 时,EFI 起爆感度最高,作用时间最短,当装药密度为 60% TMD 和 98% TMD 时,EFI 的起爆感度很低;装药密度为 90% TMD 时,装药直径在一定范围内对 EFI 起爆感度及作用时间基本没有影响。

**关键词:**军事化学与烟火技术;爆炸箔起爆器;装药参数;感度;作用时间

中图分类号:TJ450

文献标识码:A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.02.022

### 1 引言

爆炸箔起爆器 (exploding foil initiator, EFI) 诞生于 20 世纪 60 年代,其作用原理是:在陡脉冲大电流作用下,EFI 的金属桥箔迅速汽化,产生高温高压等离子体驱动飞片高速撞击炸药装药,当飞片撞击炸药产生的冲击脉冲压力和持续时间满足非均质炸药窄脉冲起爆判据时<sup>[1]</sup>,引起炸药爆轰。由于 EFI 不含起爆药,仅使用高密度钝感猛炸药,装药与换能元之间有加速腔间隙隔离,并且起爆条件苛刻,所以 EFI 对人体静电、杂散电流、射频等具有很强的耐受能力,在生产装配、运输、贮存、使用过程中具有很高的安全性,适用于直列式起爆序列,在钝感弹药中也有广阔的应用前景,已应用于包括美国“狱火”、“长弓”等反坦克弹药在内的多种武器弹药<sup>[2]</sup>。

在确保安全性和可靠性的前提下,低能化和小型化一直是 EFI 的主要发展趋势<sup>[3-4]</sup>。装药对 EFI 的起爆感度、输出、作用时间等性能有关键影响,合适的装药参数可以降低 EFI 的发火能量,保证输出可靠性,提高作用时间精度,对于 EFI 的低能化和小型化具有一定的意义。EFI 所用炸药应具有较高的高压窄脉冲冲击感度,而具有较低的机械感度。六硝基芪 (HNS) 是一种机械感度低、耐高温的钝感炸药,超过 200 °C 时,仍具有良好的热稳定性,广泛应用于航空航天等军事领域以及油田、采矿等民用领域<sup>[5]</sup>。细化 HNS 的高压窄脉冲冲击感度较高<sup>[6]</sup>,是美军标 MIL-STD-1316E《引信安全设计准则》规定的直列式传爆序列许用传

爆药<sup>[7]</sup>。HNS-IV 是现阶段 EFI 的主要始发装药<sup>[8-9]</sup>,但是有关 HNS-IV 装药参数对 EFI 性能影响的报道较少,鉴于装药参数对 EFI 低能化和小型化的意义,本文主要研究了 HNS-IV 装药参数对 EFI 起爆感度及作用时间的影响规律。

### 2 实验

#### 2.1 装药

实验所用炸药为 HNS-IV,平均粒径为 1.4 μm,比表面积 20 m<sup>2</sup> · g<sup>-1</sup>,理论最大密度 (theoretical maximum density, TMD) 为 1.74 g · cm<sup>-3</sup>。装药密度与 EFI 起爆感度及作用时间实验中,将 HNS-IV 压制成 Φ4 mm × 5 mm 的药柱,密度分为 60% TMD (1.044 g · cm<sup>-3</sup>)、70% TMD (1.218 g · cm<sup>-3</sup>)、80% TMD (1.392 g · cm<sup>-3</sup>)、85% TMD (1.479 g · cm<sup>-3</sup>)、90% TMD (1.566 g · cm<sup>-3</sup>)、95% TMD (1.653 g · cm<sup>-3</sup>) 和 98% TMD (1.705 g · cm<sup>-3</sup>) 七组。压药压力和药柱密度关系如图 1 所示,当超过 95% TMD 后,随着压药压力的增加,药柱密度变化不大。

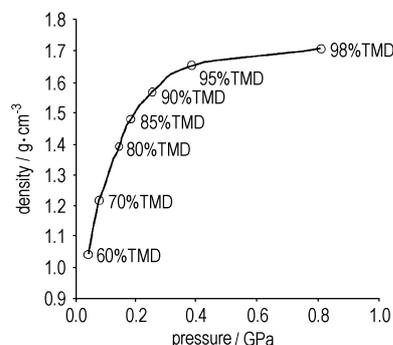


图 1 压药压力与 HNS-IV 药柱密度关系

Fig. 1 Relationship between pressure and HNS-IV pellet density

收稿日期:2008-09-11;修回日期:2009-01-07

作者简介:同红海(1976-),男,在读硕士研究生,从事先进火工技术研究。e-mail: thh1998@163.com

装药直径与 EFI 起爆感度及作用时间实验中, HNS-IV 药柱密度选择 90% TMD, 药柱高度为 5 mm, 药柱直径分别为  $\Phi 2$  mm、 $\Phi 3$  mm、 $\Phi 4$  mm、 $\Phi 5$  mm、 $\Phi 6$  mm、 $\Phi 7$  mm 六组。

2.2 实验装置及原理

实验装置主要由高压脉冲功率源、数字高压表、0.22  $\mu\text{F}$  电容、示波器、高压开关等组成。实验所用 EFI 的爆炸桥箔为铜箔, 桥区尺寸为 0.5 mm  $\times$  0.5 mm  $\times$  5  $\mu\text{m}$ , 飞片材料为聚酰亚胺, 厚度为 25  $\mu\text{m}$ , 加速膛尺寸为  $\Phi 0.6$  mm  $\times$  0.5 mm。实验放电回路电感  $L$  为 20 ~ 60 nH, 回路电阻  $R \leq 100$  m $\Omega$ 。先对电容高压充电, 开关触发使电容瞬间对爆炸桥箔放电, 在陡脉冲大电流作用下爆炸桥箔颈缩桥区电流密度极高, 瞬间汽化产生高温、高压等离子体, 通过加速膛剪切并驱动飞片高速撞击药柱, EFI 输出端底部粘接的离子探针接入示波器, 记录从开关触发至药柱爆轰输出使离子探针接通的作用时间, 实验电路如图 2 所示。

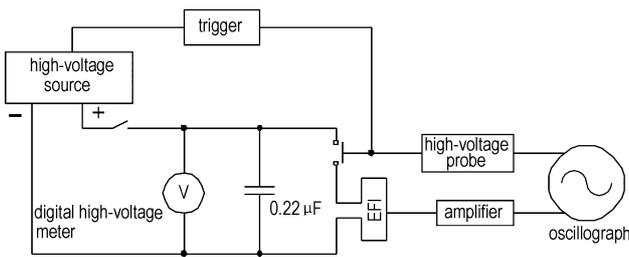


图 2 EFI 作用时间测试电路图

Fig. 2 Experimental circuit for the function time of EFI measurement

2.3 实验方法

在装药密度与 EFI 起爆感度及作用时间实验中, 按 2.1 所述不同药柱密度将 EFI 分为七组, 对每组试样, 电容放电电压按从高到低顺序进行实验, 测得每个放电电压对应的 EFI 作用时间, 当同一放电电压连续三发试样不发火时终止该组实验, 该放电电压称为最高不发火电压, 可以用来比较不同装药密度 EFI 的起爆感度。实验采用铅板法间接判断 EFI 是否完全爆轰, 在 EFI 输出端粘接的离子探针下部用快速胶粘剂粘接 2 mm 厚的铅板, 若 EFI 作用后, 铅板炸出一外径大于 EFI 输出端直径的炸孔, 则 EFI 为完全爆轰, 否则不能判定为爆轰。

在装药直径与 EFI 起爆感度及作用时间实验中, 按 2.1 所述不同药柱直径将 EFI 分为六组, 实验方法与装药密度与 EFI 起爆感度及作用时间实验相同。

3 结果与讨论

3.1 装药密度与 EFI 起爆感度及作用时间的关系

七组不同装药密度的 EFI 放电电压与作用时间见表 1。

表 1 不同装药密度的 EFI 放电电压与作用时间  
Table 1 The function time of the EFI's with different charge densities

HNS-IV pellet density /% TMD	discharge voltage /kV	function time / $\mu\text{s}$	detonation	
60	4.5	-	no	
	5.0	1.24	yes	
	4.5	1.38	yes	
	4.2	1.49	yes	
70	4.0	-	no	
	4.0	1.28	yes	
	3.5	1.42	yes	
	80	3.0	1.56	yes
	2.5	1.88	yes	
80	2.4	-	no	
	4.0	1.14	yes	
	3.5	1.26	yes	
	85	3.0	1.44	yes
	2.5	1.68	yes	
	2.3	1.88	yes	
90	2.1	-	no	
	4.0	1.02	yes	
	3.5	1.16	yes	
	3.0	1.34	yes	
	90	2.5	1.62	yes
	2.35	1.84	yes	
	2.1	2.01	yes	
2.0	-	no		
95	4.0	1.14	yes	
	3.7	1.24	yes	
	3.5	1.27	yes	
	3.0	1.42	yes	
	2.8	-	no	
98	4.5	-	no	

由表 1 可见, 装药密度为 60% TMD 和 98% TMD 的 EFI 在放电电压为 4.5 kV 时, 连续三发试样未发火, 这两组都没有继续升高电压进行实验。各组试样的最高不发火电压: 70% TMD 为 4.0 kV, 95% TMD 为 2.8 kV, 80% TMD 为 2.4 kV, 85% TMD 为 2.1 kV, 90% TMD 为 2.0 kV。装药密度与 EFI 最高不发火电压关系如图 3 所示, 由图 3 可见, 随着装药密度的增加, 最高不发火电压降低, 当装药密度大于 90% TMD 后, 最高不发火电压升高, 说明七组试样中装药密度为 90% TMD 的 EFI 起爆感度最高, 装药密度大于或小于

90% TMD, EFI 的起爆感度均降低。

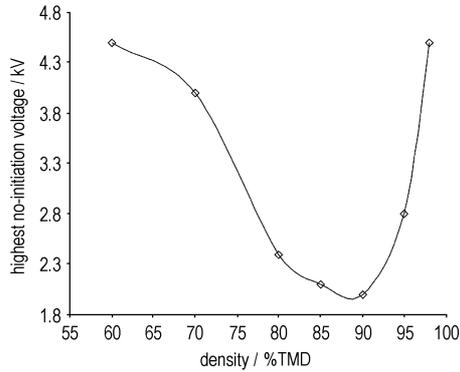


图3 HNS-IV装药密度与EFI的最高不发火电压

Fig. 3 HNS-IV pellet density vs highest no-initiation discharge voltage

飞片起爆 HNS-IV 药柱属于冲击波起爆,冲击波引发炸药爆轰本质上属于热起爆机理<sup>[10]</sup>。飞片撞击炸药柱端面后,存在背面稀疏和侧向稀疏,飞片撞击压力激发炸药化学反应所产生的压力增长与稀疏所造成的压力下降之间的竞争决定了炸药爆轰与否以及爆轰程度<sup>[11]</sup>。实验中 EFI 产生的飞片直径约为  $\Phi 0.6$  mm,厚度  $25 \mu\text{m}$ ,直径与厚度比值为 24,所以背面稀疏是造成炸药中压力下降的主要因素,而侧向稀疏的影响可以忽略不计。

HNS-IV 药柱密度较低时,如实验中的 60% TMD,炸药颗粒之间存在大量体积较大的空隙,当飞片撞击药柱时,有效热点数量较少,由于飞片背面稀疏波造成的能量损失,较低压力下局部热点温度不够高,炸药的热分解反应无法传播持续,不能产生自持热分解反应,需要更高的冲击压力才能使炸药形成爆轰。随着药柱密度的增加,炸药颗粒之间的空隙体积减小,颗粒接触紧密性较好,飞片撞击药柱时,有效热点数量增加,当冲击压力达到一定值时,虽然存在飞片背面稀疏波影响,局部热点周围炸药发生热分解反应放出的热量可以使炸药内部的化学反应持续并传递,炸药产生自持热分解反应,只要药柱高度足够,最终能形成稳定爆轰。药柱密度达到 90% TMD 附近时,炸药颗粒之间空隙的体积进一步减小,飞片撞击药柱时,有效热点数量多,在较低压力下局部热点引发的化学反应很快就能形成自持热分解反应,炸药比较容易形成稳定爆轰,其飞片起爆感度最高。当药柱密度超过 95% TMD 后,密度接近理论最大密度,炸药颗粒之间的空隙体积变得非常小,药柱的冲击阻抗和颗粒之间摩擦阻力很大,在飞片冲击压力作用下,空隙受到的压缩程度不够,有效

热点数量减少,在飞片背面稀疏波的影响下,局部热点温度不够高,热分解反应很难持续并传播,要形成爆轰,必须有足够高的飞片冲击压力,也就是需要很高的放电电压。

表 1 中不同装药密度的 EFI 放电电压和作用时间实验数据点及其拟合曲线见图 4,由图 4 可见,放电电压相同时,装药密度为 90% TMD 的 EFI 作用时间最短,装药密度为 95% TMD 和 85% TMD 的 EFI 作用时间基本相同,装药密度为 70% TMD 的 EFI 作用时间最长。这是因为放电电压相同时,开关延时、桥箔爆炸时间及飞片运动时间基本不变,EFI 作用时间差别主要表现在药柱作用时间上,而密度为 90% TMD 的药柱飞片起爆感度最高,其对应的冲击转爆轰时间相对较短,所以在相同的放电电压下,装药密度为 90% TMD 的 EFI 作用时间最短。密度高于或低于 90% TMD 时, HNS-IV 药柱的飞片起爆感度降低,对应的冲击转爆轰时间增加,所以 EFI 作用时间增加。由图 4 拟合曲线可见,同组 EFI 的作用时间随放电电压的升高而减少,这是因为放电电压越高,爆发电流越大,桥箔爆炸时间越短<sup>[12]</sup>,产生的等离子体能量更高,飞片通过加速膛所用时间变短,撞击药柱端面的速度变大,冲击转爆轰时间缩短,所以 EFI 作用时间减少。

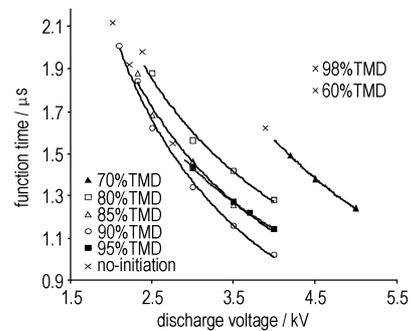


图4 不同装药密度 EFI 的作用时间与放电电压拟合曲线

Fig. 4 Fitting curves of discharge voltage vs function time of EFI

### 3.2 装药直径与 EFI 起爆感度及作用时间的关系

装药密度为 90% TMD,药柱高度为 5 mm,不同装药直径的 EFI 作用时间实验结果如图 5 所示。由图 5 可以看出,六组 EFI 的最高不发火电压均在 2.0 kV 附近,相同放电电压下,六组 EFI 的作用时间差别不大。这是因为炸药存在装药极限直径  $d_1$  和临界直径  $d_c$ ,当  $d_c < d < d_1$ ,对一定密度的装药,爆速随直径增大而增大,当超过极限直径时,影响爆速的只有炸药成分和装药密度。EFI 所用的 HNS-IV 炸药是细化炸药,炸药颗粒度减小,有利于化学反应的进行,化学反应时间缩短,化学反

应区变窄,相对削弱了径向能量损失,极限直径变小。由于受到压药密度、压药条件的限制,实验中最小装药直径为 $\Phi 2$  mm,从实验结果分析,该直径已经大于HNS-IV炸药的极限直径。因此,装药直径在一定范围内,其对EFI的起爆感度及作用时间影响不大。

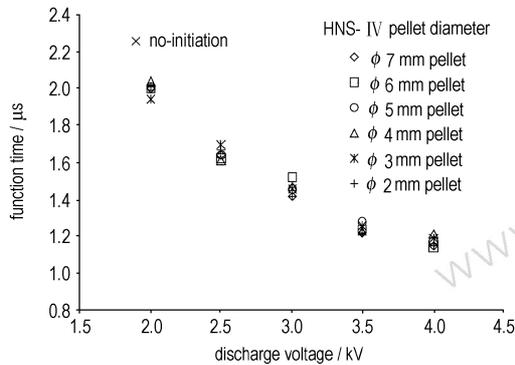


图5 不同装药直径的EFI放电电压与作用时间

Fig. 5 Discharge voltage vs the function time of the EFI's with different charge diameters

## 4 结论

(1) HNS-IV装药密度为90% TMD时,EFI起爆感度最高,装药密度高于或低于90% TMD时,EFI起爆感度均降低。

(2) 装药为HNS-IV的EFI装药密度相同时,其作用时间随电容放电电压的升高而减少;发火条件相同时,90% TMD装药的EFI作用时间最短,装药密度高于或低于90% TMD时,作用时间增加。

(3) HNS-IV装药直径在一定范围内时,其对EFI的起爆感度及作用时间影响很小。

## 参考文献:

- [1] Walker F E, Wasley R J. Critical energy for shock initiation of heterogeneous explosives[J]. *Explosivstoffe*, 1969, 17(1): 9-13.
- [2] Barry T Neyer, John T Adams, James C Edwards, et al. A low cost, reliable, hermetically sealed, chip slapper detonator suitable for various aerospace applications[R]. AIAA 99-2555, 1999.
- [3] 尹强, 耿春余. 冲击片雷管研究与发展[J]. 探测与控制学报, 2005, 27(4): 8-11.  
YIN Qiang, GENG Chun-yu. Research and development of slapper detonator[J]. *Journal of Detection & Control*, 2005, 27(4): 8-11.
- [4] Wim Prinse, Gert Scholtes. A development platform for a microchip EFI[C]//52nd Annual Fuze Conference, Sparks, NV, 2008.
- [5] Barry T Neyer, Lloyd Cox, Terry Stoutenborough, et al. HNS-IV explosive properties and characterization tests[R]. AIAA 2003-5138, 2003.
- [6] 王晶禹, 黄浩, 王培勇, 等. 高纯纳米HNS的制备与表征[J]. 含能材料, 2008, 16(3): 258-261.  
WANG Jing-yu, HUANG Hao, WANG Pei-yong, et al. Preparation and characterization of high purity nano HNS[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2008, 16(3): 258-261.
- [7] MIL-STD-1316E. Fuze safety design criteria[S]. 1998.
- [8] MIL-E-82903(OS). Explosives, HNS-IV and HNS-V[S]. 1999.
- [9] Steven M H, Sandra E K. Development of an ultrafine HNS for use in modern slapper detonators[R]. AIAA 2003-240, 2003.
- [10] Karo A M, Hardy J R, Walker F E. Theoretical studies of shock-initiated detonations[J]. *Acta Astron*, 1978(5): 1041-1050.
- [11] 周之奎, 卫玉章. 凝聚炸药的短脉冲冲击起爆[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(1): 77-82.  
ZHOU Zhi-kui, WEI Yu-zhang. Short duration shock initiation of condensed explosives[J]. *Explosion and Shock Wave*, 1992, 12(1): 77-82.
- [12] 褚恩义, 任西, 钱勇, 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, QIAN Yong, et al. Study on the design parameters of exploding foil initiation[J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2008(3): 26-27.

## Effect of Charge Parameters on the Performance of Exploding Foil Initiator

TONG Hong-hai, CHU En-yi, REN Xi, QIAN Yong

(The National Defense Key Laboratory of Pyrotechnical Safety & Reliability Research,  
213th Research Institute of China Ordnance Industry, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** To study the effect of HNS-IV charge parameters on the performance of exploding foil initiator (EFI), the function time of EFI with different charge parameters was measured. Results show that EFI with charge density of 90% theoretical maximum density (TMD) has the shortest function time and maximum initiation sensitivity. The initiation sensitivity of EFI with charge densities of 60% and 98% TMD is very low. When the charge density is 90% TMD, charge diameter has little effect on the initiation sensitivity and function time of EFI.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; exploding foil initiator; charge parameter; sensitivity; function time