

文章编号: 1006-9941(2017)01-0069-07

## 单质炸药在等离子体作用下的起爆响应

薛乐星, 王晓峰, 冯晓军, 徐洪涛, 冯博, 田轩

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为了得到单质炸药在等离子体作用下的起爆响应规律,以镍-铬(Ni-Cr)丝和钨丝电爆炸作为等离子体产生源,进行了单质炸药的等离子体起爆实验,采用示波器测定等离子体的电压和电流,以见证板判定炸药是否爆轰。结果表明,Ni-Cr丝等离子体对奥克托今(HMX)的起爆能力强于钨丝等离子体。选用粒度 21  $\mu\text{m}$  和 140  $\mu\text{m}$ ,装药密度相差 10% 的 HMX 起爆,粒度较小和装药密度较小时,HMX 的等离子体起爆响应更剧烈。单质炸药奥克托今(HMX),2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105),1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7),N-脒基脒二硝酰胺盐(FOX-12),三氨基三硝基苯(TATB)可被等离子体起爆。2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)由电爆炸产生的热作用引燃。炸药的 Ni-Cr 丝等离子体感度顺序为: HMX>LLM-105 $\approx$ FOX-7>FOX-12>TATB。推断等离子体起爆炸药的机理为混合起爆。提出了基于等离子体的颗粒燃烧模型。

**关键词:** 等离子体; 电爆炸; 单质炸药; 起爆; 感度

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.012

### 1 引言

高能不敏感化一直是炸药的发展趋势,随之而来也表现出难起爆、能量释放不完全等问题。为了解决这些问题,等离子体起爆作为一种高能不敏感的起爆方式发展起来。等离子体起爆利用在金属丝中加载脉冲大电流,在焦耳热作用下金属丝快速熔化、汽化、电离,产生高温高压的等离子体,作用于炸药从而实现起爆。

早在 20 世纪 80 年代初,潘邦金<sup>[1]</sup>以金丝作为等离子体源,起爆了多种炸药。其中双(2,2,2-三硝基乙基)硝酸(HOX 炸药)和太安(PETN)易被电爆炸等离子体起爆,而奥克托今(HMX)和黑索今(RDX)则难以起爆。这是因为其研究中所用的爆炸丝尺寸较小,储能电容器中的能量不足 3J,因此爆炸丝所激发的等离子体能量和密度较小,导致等离子体对高能炸药的起爆可靠性较低。此外 HOX 炸药颗粒越大爆轰增长所需时间越长,径向爆速也越小。

虽然炸药的等离子体起爆研究较早,但是重点主

要集中在太安等高感度药在等离子体起爆下的应用研究。日本熊本大学<sup>[2-5]</sup>利用爆炸丝等离子体技术起爆粉状太安从而得到了平面、会聚和发散三种类型的爆轰波。Hiroe 等<sup>[6]</sup>利用三股铜爆炸丝作为等离子体源起爆太安,研究了起爆位置对圆筒实验的影响,发现沿圆筒中轴放置的爆炸丝比偏心放置和中轴中心放置起爆效果好,得到的圆筒膨胀速率最大。汤铁钢等<sup>[7]</sup>和张振涛等<sup>[8]</sup>利用太安在等离子体起爆下轴向同步性高的特点设计了爆炸膨胀环装置,用以研究材料在高应变率拉伸加载时的动态性能。马鹏等<sup>[9]</sup>通过对比最小全发火电压得到起爆药的等离子体感度顺序为苦味酸铅>叠氮化铅>斯蒂芬酸铅>硝酸胂。

尽管等离子体起爆技术作为一种安全可靠的起爆方法,在太安、起爆药等高感度炸药领域得到了广泛的研究和应用,但是,一方面受限于等离子体发生装置中储能电容器的大小,电爆炸激发的等离子体虽然功率很大,但是总能量较低;另一方面电爆炸与炸药之间采用传统的端面装配方法,使得等离子体与炸药的能流交换区较小。这两方面原因导致等离子体起爆单质高能炸药的可靠性较差。等离子体直接起爆高能炸药作为一种新兴的无起爆药起爆技术,对于不敏感武器系统的发展具有重要意义。

为此,本课题组搭建了理论储能可达 3.6 kJ 的脉冲等离子体发生装置,采用金属丝贯穿炸药的装配方

收稿日期: 2016-07-05; 修回日期: 2016-09-16

基金项目: 国防重大基础科研项目(004040205)

作者简介: 薛乐星(1991-),男,硕士研究生,主要从事军用混合炸药研究。e-mail: xue\_l\_x@163.com

通信联系人: 王晓峰(1963-),男,博士,博士生导师,研究员,主要从事炸药及装药技术研究。e-mail: wangxf\_204@163.com

式以增大等离子体与炸药的能量交换区,以镍-铬丝(Ni-Cr)和钨丝(W)电爆炸作为等离子体产生源,以典型二代炸药奥克托今(HMX),常见不敏感炸药2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪-1-氧化物(LLM-105),1,1-二氨基-2,2-二硝基乙烯(FOX-7),*N*-脒基脒二硝酰胺盐(FOX-12),三氨基三硝基苯(TATB)和常用含能载体2,4-二硝基苯甲醚(DNAN)为对象,研究了装药密度、粒度和金属丝材质对等离子体起爆HMX的影响规律,得到了单质炸药的等离子体感度顺序,对等离子体起爆低密度炸药的机理作了合理推断。

## 2 实验部分

### 2.1 实验装置

起爆实验装置如图1所示,等离子体由脉冲功率源经同轴电缆对金属丝放电产生。脉冲功率源起爆电压10~35 kV可调,其中储能电容器电容6  $\mu\text{F}$ ,示波器采用Tektronix DPO 7104C。

### 2.2 实验样品及方法

HMX: 由805厂生产,粒度为140  $\mu\text{m}$ 和21  $\mu\text{m}$ ; TATB: 575厂生产; LLM-105, FOX-7和FOX-12由西安近代化学研究所合成; DNAN: 湖北东方化工有限公司生产。TATB、LLM-105、FOX-7、FOX-12和DNAN的粒度为100~120目(可通过100目筛,但不能通过120目筛)。

金属丝材质为Ni-Cr丝(80:20)和钨丝,直径0.3 mm,长120 mm。装药管材质为有机玻璃管,外径10 mm,内径6 mm,长50 mm。见证板材质为铝,尺寸150 mm  $\times$  150 mm  $\times$  2 mm。

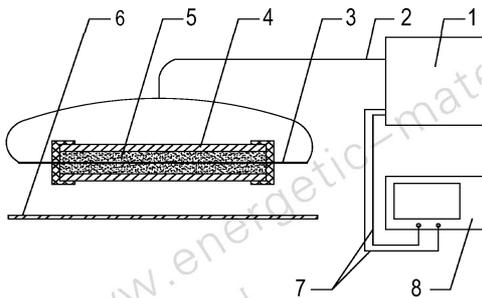


图1 起爆实验装置图

1—脉冲功率源,2—同轴电缆,3—金属丝,4—有机玻璃管,5—炸药,6—见证板,7—信号线,8—示波器

Fig.1 The initiation experiment setup

1—pulse power supply, 2—coaxial cable, 3—metal wire, 4—organic glass tube, 5—explosive, 6—witness plate, 7—signal line, 8—oscilloscope

实验时,将散装炸药装填到有机玻璃管中,金属丝沿有机玻璃管中轴穿过炸药,有机玻璃管两端用胶带密封。金属丝与脉冲功率源的同轴电缆相连,保持试样管水平,距离见证板中心30 mm。装配完成后,对脉冲功率源设定所需的起爆电压,按下放电开关实现起爆。起爆过程中利用罗氏线圈和电容分压器测定流过金属丝的电流和金属丝两端的电压。实验后以见证板表面凹痕判定炸药是否爆轰。

## 3 结果与讨论

### 3.1 电爆炸等离子体表征

等离子体强度对炸药起爆响应至关重要, $\Phi 0.3 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$ 的Ni-Cr丝电爆炸时的电压电流曲线如图2所示,其电流曲线中均出现了二次峰,这一

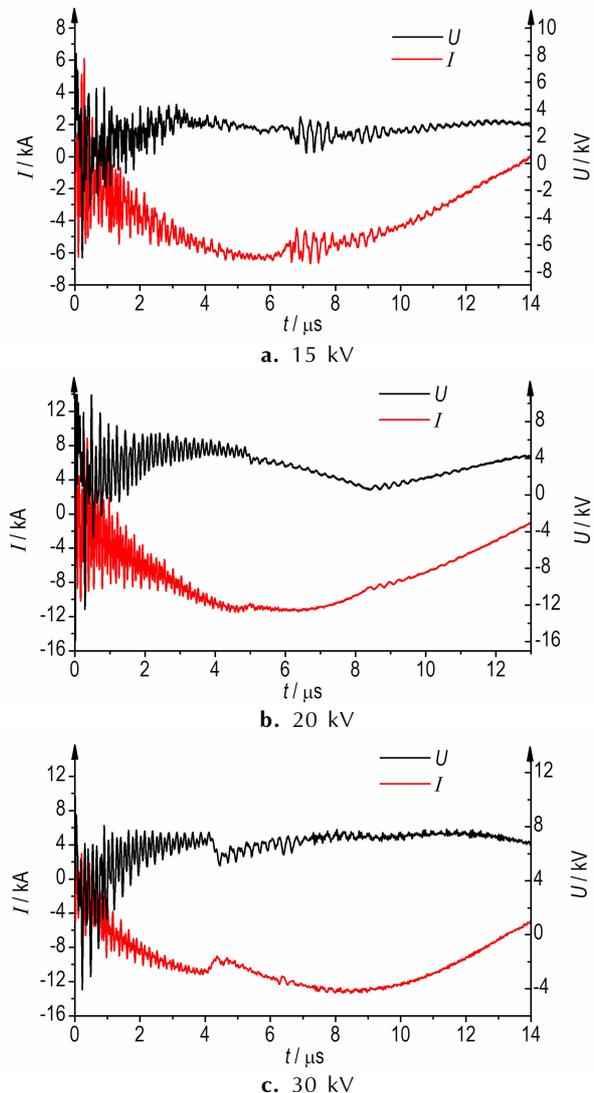


图2 不同起爆电压下Ni-Cr丝电压/电流-时间曲线

Fig.2 Curves of Ni-Cr wire voltage/current vs time for different initiation voltage

现象与文献[7]中所述相符。电流曲线中的二次峰可作为等离子体产生的充分条件,二次峰起始位置为等离子体产生的时刻。

裸金属丝在起爆电压大于等于 15 kV 的实验中均捕捉到了电流二次峰现象,因此可以断定在此电压范围内的电爆炸均产生了等离子体。对比图 2a、图 2b、图 2c 不同起爆电压下金属丝电爆炸时的电压、电流曲线,可以发现随着起爆电压由 15 kV 上升至 30 kV,放电周期几乎不变,峰值电流逐渐上升,分别是 -6.5, -11.5 kA 和 -13.2 kA,而二次峰位置逐渐提前,产生等离子体的时刻分别是 6.7, 5.0  $\mu\text{s}$  和 4.5  $\mu\text{s}$ 。由图 2 可见,随着起爆电压的升高,产生等离子体所需的时间逐渐缩短,相应的等离子体存在的时间延长,注入到等离子体中的能量逐渐升高。

### 3.2 结果与讨论

#### 3.2.1 等离子体起爆炸药的影响因素研究

为了研究炸药装药密度、粒度和金属丝材质对炸药等离子体起爆响应的影响,设定脉冲功率源起爆电压 20 kV,采用  $\Phi 0.3 \text{ mm} \times 120 \text{ mm}$  的 Ni-Cr 丝和钨丝作为等离子体源,以粒度 140  $\mu\text{m}$  和 21  $\mu\text{m}$  的 HMX 为起爆对象,进行起爆实验,实验详细配置参数和金属丝中电流数据见表 1。

表 1 HMX 等离子体起爆实验参数和电流数据

Table 1 Experiment parameters and current data of HMX plasma initiation

sample	particle size/ $\mu\text{m}$	density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	metal wire	$I_m$ / $\text{kA}$	$T_p$ / $\mu\text{s}$
1 <sup>#</sup>	140	1.0944	Ni-Cr	-6.99	3.83
2 <sup>#</sup>	140	0.9840	Ni-Cr	-7.23	3.80
3 <sup>#</sup>	21	0.7120	Ni-Cr	-7.32	3.83
4 <sup>#</sup>	21	0.7182	W	-4.38	2.11

Note:  $I_m$  is the crest current value;  $T_p$  is the time of first crest.

##### 3.2.1.1 炸药状态对等离子体的影响

等离子体起爆 HMX 过程中金属丝上的电流曲线如图 3 所示,与图 2 相比可以发现,当存在炸药介质时,电爆炸等离子体的电流信号有如下特点:(1)电流曲线均没有振荡,一个波峰之后电流曲线即归零;(2)图 3 中试样 1<sup>#</sup>、试样 2<sup>#</sup>和试样 3<sup>#</sup>均没有明显的二次峰现象。

裸金属丝电爆炸时之所以会出现电流曲线振荡,是因为等离子体中的能量需多次振荡后才能释放完全。而有炸药时,金属丝激发等离子体后,由于其有很

高的反应活性会迅速被周围的炸药颗粒捕获,导致等离子体能量快速消耗而不会出现电流振荡。通常以电流曲线中的二次峰作为形成等离子体的标志,图 3 中试样 1<sup>#</sup>、试样 2<sup>#</sup>和试样 3<sup>#</sup>均没有二次峰,但是在一次峰之后有一个明显的拐点(图 3 红圈标记处),此时金属蒸汽电离产生等离子体后回路电阻增大速率变慢,电流下降速度会有明显减缓。因此图 3 中试样 1<sup>#</sup>、试样 2<sup>#</sup>和试样 3<sup>#</sup>电流曲线下降沿的拐点即为等离子体产生的时刻。

炸药对金属丝电爆炸过程有着明显的影响。图 2b 中裸金属丝电爆炸时的峰值电流为 -11.5 kA,对应的峰值时刻为 5.0  $\mu\text{s}$ ,图 3 中试样 1<sup>#</sup>、试样 2<sup>#</sup>和试样 3<sup>#</sup>的峰值电流分别为 -6.99, -7.23 kA 和 -7.32 kA,对应的峰值时刻分别为 3.83, 3.80  $\mu\text{s}$  和 3.83  $\mu\text{s}$ 。可以发现,当有炸药存在时,金属丝电爆炸时的峰值电流明显小于裸金属丝,但是峰位置明显提前,这是因为等离子体与炸药反应导致回路电阻增大所致。

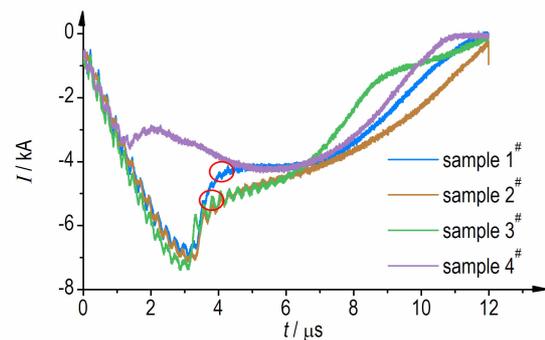


图 3 HMX 起爆实验电流曲线

Fig. 3 Current curves of HMX initiation experiments

Note: The red circle mark is the moment when plasma is generated

虽然炸药对放电过程有显著影响,但是炸药状态对金属丝放电的影响较小。由图 3 中试样 1<sup>#</sup>、试样 2<sup>#</sup>和试样 3<sup>#</sup>可见,对于同一规格的 Ni-Cr 丝,炸药不同装药密度(图 3 中试样 1<sup>#</sup>、试样 2<sup>#</sup>)和粒度(图 3 中试样 1<sup>#</sup>、试样 3<sup>#</sup>)下对应的放电曲线基本相同,表 1 中三者的峰值电流强度和一次峰时刻也基本相同。

金属丝材质对等离子体的产生有明显影响。钨丝作等离子体源时的电流曲线如图 3 中试样 4<sup>#</sup>所示,与 Ni-Cr 丝相比,钨丝的电流曲线有明显的二次峰,且二次峰强度大于一次峰,但是钨丝的峰值电流明显较小,约为 Ni-Cr 丝峰值电流的 60%。分析原因可能是钨丝的汽化温度较高,在这个温度下钨原子已经开始离

子化,所以在一次峰之后电流迅速重新增大形成二次峰,而 Ni-Cr 丝汽化温度较低,仍需一定的能量注入才能电离。

### 3.2.1.2 密度、粒度和金属丝材质对炸药等离子体起爆响应的影响

等离子体起爆 HMX 的见证板照片如图 4 所示。可以发现,图 4b 见证板有少量凹痕较深,而图 4a 见证板的凹痕较浅,深凹痕的数量也少于图 4b 见证板。根据炸药爆轰理论,爆轰性能与装药密度紧密相关,装药密度越低,爆轰增长的时间和反应区宽度越大,而装药密度越大则爆轰性能如爆速、爆压等越大。样品 1<sup>#</sup>装药密度比样品 2<sup>#</sup>大 10%,但其见证板痕迹较小,即爆压较小,这与炸药爆轰理论不符,说明在此实验条件下见证板更多的反映了炸药的等离子体起爆过程,而非炸药本身的爆轰反应。对比样品 1<sup>#</sup>和样品 2<sup>#</sup>,发现相同的等离子体起爆下,低密度装药的炸药对等离子体起爆的响应更为剧烈,爆轰效果也更好。

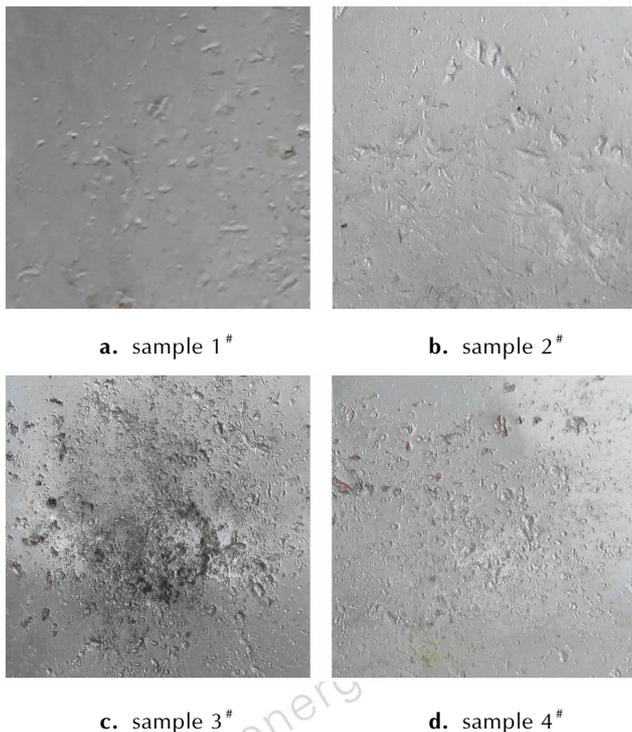


图 4 HMX 起爆实验见证板

Fig. 4 Witness plates of HMX initiating experiments

样品 3<sup>#</sup>采用 21  $\mu\text{m}$  HMX 为起爆对象,图 4c 见证板中凹痕的面积和深度均明显大于见证板 a 和 b,凹痕也更为密集的存在于见证板中心,同时见证板整体有较为明显的变形。对比样品 2<sup>#</sup>比样品 3<sup>#</sup>可以发现粒度对 HMX 的等离子体起爆响应影响很大,颗粒尺

寸小的 HMX 更易起爆。

由图 4c 和图 4d 可见,见证板 c 中的凹痕分布密度和深度均明显大于见证板 d,表明在相同炸药和起爆条件下 Ni-Cr 丝的起爆能力明显强于钨丝,说明金属丝材质对炸药等离子体起爆响应有显著影响。对比图 4a、图 4c 与图 4d 可以发现,见证板 d 的毁伤程度介于见证板 a 和见证板 c 之间,表明炸药粒度的影响比金属丝材质更为显著,粒度越细起爆响应越剧烈。

### 3.2.2 五种炸药等离子体起爆实验

选择单质不敏感炸药 LLM-105, FOX-7, FOX-12, TATB 和含能载体 DNAN 为起爆对象,装药密度为 50% 理论密度, Ni-Cr 丝起爆。进行炸药在等离子体起爆下的响应实验,实验结果见表 2,见证板照片如图 5 所示。

表 2 炸药在等离子体起爆下的响应实验

Table 2 Response experiments of explosives initiated by plasma

explosive	voltage/kV		
	10	15	20
FOX-7	×	√	-
FOX-12	×	√	-
LLM-105	×	√	-
DNAN	△	△	√
TATB	×	×	√

Note: ×: no detonation; △: ablation; √: detonation; -: no experiment.

由图 5 可见,起爆电压 10 kV 时所有炸药均不能实现爆轰,只能将有机玻璃管中的炸药炸散, DNAN 发生了一定程度的烧蚀,在见证板上留下了黑色粘着物;起爆电压 15 kV 时, FOX-7、FOX-12 和 LLM-105 起爆后见证板上有明显凹痕,即三者均实现了爆轰,而 DNAN、TATB 仍然只能将散装炸药打散,见证板上也没有明显凹痕。DNAN 的烧蚀程度相比 10kV 更为显著,见证板上残留大量黑色粘着物;起爆电压 20 kV 时, DNAN、TATB 也实现了爆轰,在见证板上留下了显著的凹痕。

在上述实验的基础上以最小全发火电压确定不敏感炸药的等离子体感度,实验条件与上文相同,实验结果见表 3。大量的裸金属丝实验表明,起爆电压小于等于 10kV 时电爆炸不会产生等离子体,因此 DNAN 虽然在 10kV 时可以全发火,但是并非等离子体的作用,可以认为是电爆炸的热作用点燃。综合可得低密度装药时炸药的 Ni-Cr 等离子体感度顺序为 HMX > LLM-105  $\approx$  FOX7 > FOX-12 > TATB。

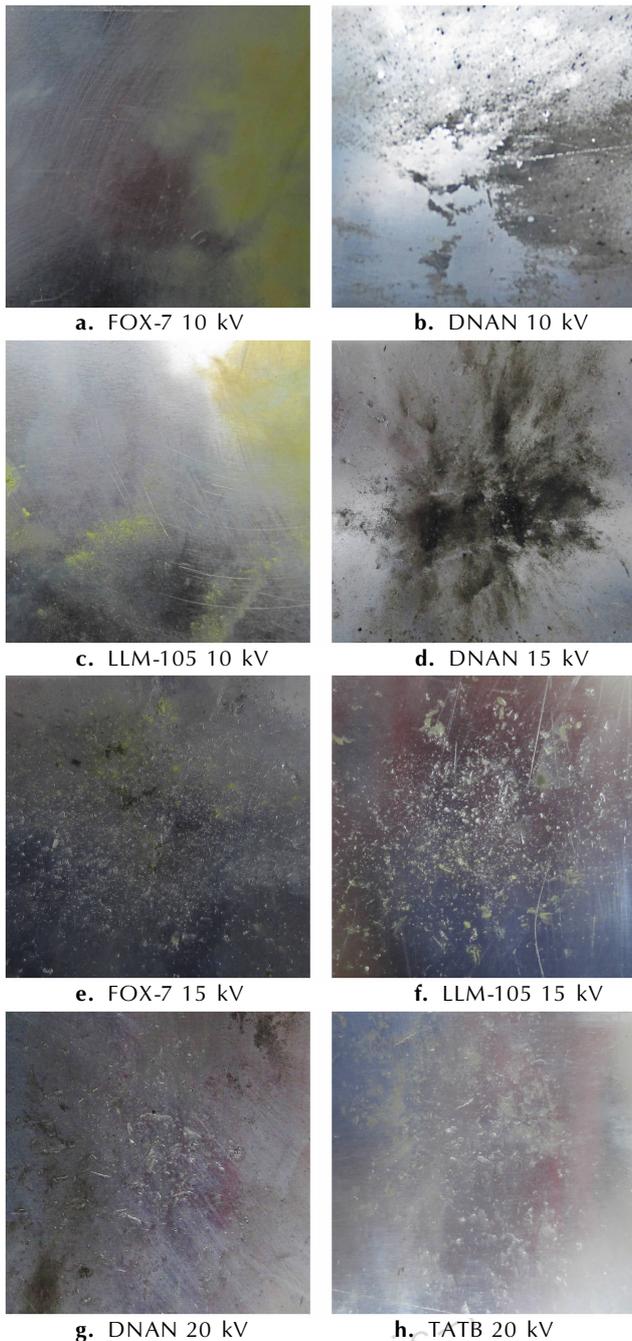


图5 炸药起爆实验见证板

Fig.5 Witness plates of explosives initiating experiments

表3 炸药的等离子体感度数据

Table 3 Plasma sensitivity data of explosives

explosive	100% ignition voltage/kV
FOX-7	15
FOX-12	16
LLM-105	15
DNAN	10
TATB	21
HMX	14

### 3.3 起爆机理探究

目前对电爆炸等离子体起爆太安的机理研究较多,普遍认为属于冲击起爆机理。Lee<sup>[10]</sup>认为电爆炸产生等离子体时会激发高达 1.5 GPa 的冲击波,而同等条件下太安爆轰增长距离只需 10 μm。潘邦金<sup>[1]</sup>基于冲击起爆机理中的颗粒燃烧理论,定量研究了 HOX 炸药颗粒尺寸与反应时间的关系。

表 4 列出了 HMX、LLM-105、FOX-7、FOX-12 和 TATB 的等离子体感度、热感度和机械感度<sup>[11-17]</sup>。由表 4 可见,与热起爆、机械起爆和冲击起爆不同,等离子体起爆表现出优秀的起爆能力,分析原因可能是金属丝电爆炸产生的等离子体温度可达数千摄氏度<sup>[1]</sup>,等离子体的膨胀速度达到数千米每秒<sup>[10]</sup>,并伴随产生可达数十兆帕的冲击波压力<sup>[18]</sup>,这些都会作用到炸药上,因此推断电爆炸等离子体起爆低密度炸药是冲击波和热共同作用的结果,应属于混合起爆机理。

传统冲击起爆机理和颗粒燃烧理论认为等离子体起爆过程中,炸药颗粒主要受到冲击波作用而发生燃烧形成热点,忽略了等离子体颗粒的作用。从电爆炸过程来看,电爆炸本身会产生纳米级<sup>[19]</sup>的等离子体颗粒,对于空隙率大于等于 50% 的小尺寸装药,等离子体颗粒可以穿过表层炸药颗粒,其与炸药颗粒的相互作用不可忽略。

表4 炸药的活化能和感度<sup>[11-17]</sup>Table 4 Activation energy and sensitivity of some explosives<sup>[11-17]</sup>

explosive	activation energy /kJ · mol <sup>-1</sup>	explosion temperature /°C	impact sensitivity /cm	shock wave sensitivity /mm	plasma sensitivity /kV
HMX	278.8	335	32	-(2)	14
LLM-105	257.55	367	117	3.65(4)	15
FOX-7	249.89	215	126	6.22(-)	15
FOX-12	258.25	192	>159	-	16
TATB	221	384	170	-(5.5)	21

Note: “-” represents no available data. The values in brackets are shock wave sensitivity in GPa.

综合以上信息提出基于等离子体颗粒碰撞的颗粒燃烧模型,如图 5 所示。金属丝电爆炸时首先会激发冲击波作用于炸药分子,随后电爆炸产生的等离子体射流也会轰击到炸药颗粒上,由于等离子体颗粒温度高、富含活性粒子,有很高的反应活性,可迅速引燃炸药颗粒。电爆炸等离子体具有很高的轴向同步性,因此轴向炸药可实现同步引燃并向深层炸药传播。与此同时,高达 50% 的空隙率导致一部分等离子体经过炸

药颗粒间的空隙直接进入炸药深处,碰撞并引燃深层炸药,近轴线炸药和深层炸药燃烧释放能量后迅速使炸药由燃烧增长为爆轰。

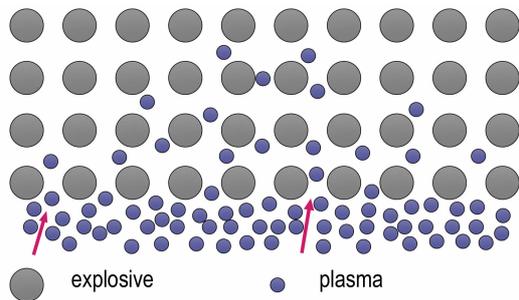


图6 炸药等离子体起爆模型

Fig.6 Plasma initiating model of explosives

这一模型可以较好的解释前文的实验结果。在 HMX 起爆实验中可以发现,炸药装药密度和炸药粒度对炸药起爆响应有影响,装药密度决定着炸药装药的空隙率,空隙率决定了炸药中可用于等离子体穿梭的空隙多少,而粒度表征了炸药颗粒的大小,决定着炸药与等离子体相互作用的面积。当装药密度较小时,炸药颗粒间空隙较多,这样等离子体可以扩展到距离轴线更远的炸药颗粒中,实现更大范围的炸药引燃,从而缩短炸药燃烧转爆轰所需的时间和距离,炸药更易被等离子体起爆,爆轰效果也更好。炸药粒度较小时,炸药颗粒的比表面积更大,这样可以更充分的与等离子体发生反应,引燃单颗炸药颗粒所需的等离子体数量也更少,这样等离子体中的能量就可以更高效的输入到炸药中,炸药也就更易被起爆。这也解释了 HMX 与不敏感炸药 LLM-105、FOX-7、FOX-12 的等离子体感度相近的现象。而 TATB 感度低可能是因为苯基炸药性质稳定,与等离子体颗粒的反应活性低所致。

## 4 结论

针对等离子体起爆高能炸药可靠性差的问题,搭建了高能脉冲等离子体发生装置,基于 Ni-Cr 丝和 W 丝电爆炸产生的等离子体,采用金属丝贯穿的装配方法,研究了炸药在等离子体起爆下的响应,拓宽了高能不敏感炸药的可靠起爆途径,得到如下结论:

(1) 金属丝电爆炸产生等离子体时受起爆电压的影响,起爆电压由 15 kV 上升至 30 kV 时,峰值电流由 6.5 kA 上升至 13.2 kA,产生等离子体所需的时间由 6.7  $\mu\text{s}$  缩短至 4.5  $\mu\text{s}$ 。电爆炸周围的介质对峰值电

流有显著影响,峰值电流由裸金属丝的 11.5 kA 降至炸药存在时的 6.99 kA;

(2) 单质炸药的等离子体起爆响应受装药密度、炸药粒度和金属丝材质的影响。装药密度  $1.0 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  时 HMX 起爆响应优于  $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、粒度  $21 \mu\text{m}$  优于  $140 \mu\text{m}$ 。相同起爆电压和炸药装药状态下, Ni-Cr 丝等离子体对 HMX 的起爆能力明显优于钨丝等离子体;

(3) 相同等离子体源和炸药状态下,单质炸药的等离子体感度随炸药种类的不同而变化。50% 理论密度装药下的 Ni-Cr 丝等离子体感度顺序为  $\text{HMX} > \text{LLM-105} \approx \text{FOX-7} > \text{FOX-12} > \text{TATB}$ , DNAN 由电爆炸的热作用引燃。

(4) 推断等离子体起爆低密度炸药属于混合起爆机理,基于电爆炸过程提出了等离子体颗粒碰撞炸药颗粒的颗粒燃烧模型。

## 参考文献:

- [1] 潘邦金. 爆炸线起爆猛炸药时颗粒尺寸的实验研究[J]. 火炸药, 1980, 2(6): 11-21.  
PAN Bang-jin. Experimental studies on particle size effects in initiating high energy explosion by exploding bridge wire[J]. *Explosives and Propellants*, 1980, 2(6): 11-21.
- [2] Hiroe T, Matsuo H, Fujiwara K, et al. A study on generation of plane detonation and strong imploding shocks by wire-row explosion[J]. *Journal of the Japan Explosive Society*, 1996, 57(2): 49-54.
- [3] Abe T, Yoshida M, Hiroe T, et al. Explosive-driven cylindrical imploding shocks in solid initiated with an exploded etched copper mesh[C] // Proceeding of International Conference AIRAPT-16 and HPCJ-38 on High Pressure Science and Technology, Kyoto, Japan, 1998: 912-914.
- [4] Hiroe T, Matsuo H, Fujiwara K, et al. Spall in metals induced by explosive shock loadings and protective measures using momentum traps[J]. *Transactions of Japan Society of Mechanical Engineers A*, 1996, 62: 2026-2031.
- [5] Hiroe T, Matsuo H, Fujiwara K, et al. Uniform expansion of cylinders at high strain rates using an explosive loading[C] // Proceeding of International Conference on Condensed Matter under High Pressures, National Institute of Science Communication, New Delhi, 1998: 458-465.
- [6] Hiroe T, Fujiwara K, Hata H, et al. Deformation and fragmentation behaviour of exploded metal cylinders and the effects of wall materials, configuration, explosive energy and initiated locations[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2008, 35: 1578-1586.
- [7] 汤铁钢, 刘仓理. 一种新型爆炸膨胀环实验装置[J]. 实验力学, 2013, 28(2): 247-254.  
TANG Tie-gang, LIU Cang-li. A novel experimental setup for explosively loaded expanding ring test[J]. *Journal of Experimental Mechanics*. 2013, 28(2): 247-254.
- [8] 张振涛, 郭昭亮, 蒲国红, 等. 爆炸丝线起爆装置研制及应用[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(3): 269-273.  
ZHANG Zhen-tao, GUO Zhao-liang, PU Guo-hong, et al. De-

- velopment and application of exploding wire initiation system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26(3): 269–273.
- [9] 马鹏, 朱顺官, 张全, 等. 起爆药等离子体敏感度研究[J]. 含能材料, 2010, 18(1): 72–75.  
MA Peng, ZHU Shun-guan, ZHANG Lei, et al. Plasma sensitivities of different kinds of primary explosion[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(1): 72–75.
- [10] Lee E A, Drake R C, Richardson J. A view on the functioning mechanism of EBW detonators-part 2: bridgewire output [C]// *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2014, 500(5): 052024.
- [11] Dobratz B M, Handbook L E. UCRL-52997[R]. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, 1981.
- [12] 张超, 张晓宏, 马亮, 等. LLM-105 研究新进展[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(23): 75–86.  
ZHANG Chao, ZHANG Xiao-hong, MA Liang, et al. The new progress of 2, 6-diamino-3, 5-dinitro pyrazine-1-oxide [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(23): 75–86.
- [13] 王阳, 邱瑞, 王琦, 等. 新型含能材料 NOG<sub>2</sub>Tz 对 HMX 热分解行为的影响[J]. 含能材料, 2014, 22(1): 22–25.  
WANG Yang, QIU Rui, WANG Qi, et al. Effects of novel energetic material NOG<sub>2</sub>Tz on thermal decomposition behavior of HMX[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(1): 22–25.
- [14] Maienschein J L. An Integrated Look at Insensitive High Explosives-Why Are They Insensitive? [R]. Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Livermore, CA, 2014.
- [15] Akhavan J. The chemistry of explosives[M]. 3rd, Royal Society of Chemistry, . 2011: 39–49.
- [16] 王伯周, 刘愆, 张志忠, 等. 新型含能材料 FOX-12 性能研究[J]. 含能材料, 2004, 12(1): 38–39.  
WANG Bo-zhou, LIU Qian, ZHANG Zhi-zhong, et al. Study on properties of FOX-12[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2004, 12(1): 38–39.
- [17] 王友兵, 葛忠学, 王伯周, 等. 细颗粒 LLM-105 的制备及其热性能[J]. 含能材料, 2011, 19(5): 523–526.  
WANG You-bing, GE Zhong-xue, WANG Bo-zhou, et al. Preparation and thermal properties of fine LLM-105 with different crystal for[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(5): 523–526.
- [18] 伍俊英, 陈朗, 王飞, 等. 金属桥箔电爆炸等离子体流程实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(1): 1–4.  
WU Jun-ying, CHEN Lang, WANG Fei, et al. Experimental study of plasma evolution produced by metal bridge foil exploding[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(1): 1–4.
- [19] Krishnan S, Hsdeeb A, Johan M R. One dimensional CuO nanocrystals synthesis by electrical explosion: A study on structural, optical and electrical properties[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 586: 360–367.

## Initiation Response of Explosive Compound under Action of Plasma

XUE Le-xing, WANG Xiao-feng, FENG Xiao-jun, XU Hong-tao, FENG Bo, TIAN Xuan

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** To obtain the initiation response rule of explosive compound under the action of plasma, the plasma initiation experiments of explosive compound were performed using electrical exploding of nickel-chromium (Ni-Cr) and tungsten (W) wires as a plasma generating source, the voltage and current of plasma were measured by oscilloscope, and whether explosive detonation was judged by witness plates. Results show that the ability of octogen (HMX) initiated by Ni-Cr wire plasma is stronger than that of HMX initiated by W wire plasma. When the initiation of HMX with particle size of 140 μm and 21 μm and of 10% charge density difference is selected, and lower charge density and smaller particle size are used, the plasma initiation response of HMX is more intense. HMX, 1, 1-diamino-2, 2-dinitroethylene (FOX-7), N-guanylureadinitramide (FOX-12), 2, 6-diamino-3, 5-dinitropyrazine-1-oxide (LLM-105) and triaminotrinitrobenzene (TATB) can be initiated by plasma. 2, 4-dinitroanisole (DNAN) is ignited by heat of electrical exploding wire. The order of Ni-Cr wire plasma initiation sensitivity is HMX > LLM-105 ≈ FOX7 > FOX-12 > TATB. The mechanism of explosive initiated by plasma is inferred as mixed initiation mechanism. A particles combustion model based on plasma is proposed.

**Key words:** plasma; electrical exploding; explosive compound; initiation; sensitivity

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.012