

文章编号:1006-9941(2023)05-0425-06

## 基于反向撞击法的RDX基含铝炸药冲击起爆实验研究

裴红波,李淑睿,郭文灿,张旭,郑贤旭

(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川绵阳621999)

**摘要:** 为了研究铝粉对黑索今(RDX)基含铝炸药冲击起爆性能的影响,采用基于反向撞击法的炸药冲击起爆性能测试方法,对铝粉含量分别为0,15%和30%的3种RDX基含铝炸药(RDX/Al)的冲击起爆性能进行了对比研究。该方法通过火炮加载平台驱动炸药撞击LiF窗口,利用光子多普勒测速仪测量炸药与窗口界面粒子速度的变化历程。实验结果表明,该方法具有较高的测试精度(3%)和时间分辨率(5 ns),且对炸药样品的制备要求较低。在相同加载条件下,铝粉含量越高,含铝炸药冲击起爆反应增长越慢,与RDX炸药相比,铝粉含量为30%的RDX基含铝炸药的界面粒子速度达到峰值所需的反应时间增加了47%,表明铝粉的加入使得炸药冲击波感度明显降低,铝粉在含铝炸药冲击起爆过程中主要起到能量稀释的作用。

**关键词:** 反向撞击法;含铝炸药;冲击起爆;冲击波感度;铝粉含量

中图分类号:TJ55;O381

文献标志码:A

DOI:10.11943/CJEM2021285

### 0 引言

炸药冲击起爆性能是武器战斗部爆轰序列设计及安全性评估中十分关键的参数。关于非均质炸药的冲击起爆性能各国研究者已经开展了大量研究<sup>[1-3]</sup>,一般认为非均质炸药的冲击起爆过程主要由热点导致,非均质炸药中热点形成的机制有很多,如微空洞塌缩、微小气泡绝热压缩、晶体之间的摩擦、晶体的位错运动等<sup>[1,4]</sup>。为了提高战斗部的毁伤威力,各种武器战斗部广泛使用含铝炸药,相比于非含铝炸药,含铝炸药的冲击起爆过程更加复杂,一方面铝粉的加入进一步加剧了炸药的非均匀性,增加了炸药中热点的数量,使得炸药的机械感度提高<sup>[5-7]</sup>,与机械感度密切相关的冲击波感度也可能提高;另一方面由于铝粉点火温度较高,主要与爆轰产物发生反应,在炸药冲击起爆过程中铝粉基本不参与反应<sup>[8-9]</sup>,因此铝粉的加入对炸药的能量有一定的稀释作用,从而使得含铝炸药的冲击波感度

降低,关于这2种机制,到底哪一种占主导作用,目前尚缺乏明确的结论。已有含铝炸药冲击起爆性能的研究,主要集中在对某些特定配方的含铝炸药开展冲击起爆试验,进而通过数值模拟拟合得到炸药的反应速率模型参数<sup>[10-13]</sup>,有关铝粉对炸药冲击波感度的影响研究还鲜有公开报道,因此开展本研究以提升对含铝炸药冲击起爆过程的认识,为含铝炸药配方设计与应用提供支撑。

在炸药冲击起爆性能测试方面,目前常用的测试方法主要有隔板法<sup>[14-17]</sup>、楔形药方法(POP关系测量)<sup>[18-19]</sup>、拉格朗日计方法<sup>[13,20-22]</sup>。这几种方法各有优缺点,隔板法相对简单,但难以对炸药冲击起爆过程进行动态测量;楔形药方法可以获得炸药不同压力下的爆轰距离,但加载过程需要使用平面波透镜,测试过程使用高速扫描相机,实验系统较为复杂,实验成本较高;拉格朗日计方法可以对炸药冲击起爆过程中不同拉格朗日点的压力或粒子速度进行动态测量,但测量中需要使用楔形药或薄片药,对待测炸药样品的制备要求较高。近年来快速发展的激光干涉测速技术因具有响应速度快、测试精度高等优点,被广泛应用于各类爆炸冲击测试<sup>[8-9,23]</sup>,为进一步提高炸药冲击起爆性能的测试精度,有必要基于这类高精度测试技术发展新的冲击起爆测试方法。

收稿日期:2021-10-27;修回日期:2021-12-06

网络出版日期:2022-07-15

基金项目:国家自然科学基金资助(11602248)

作者简介:裴红波(1987-),男,副研究员,主要从事炸药爆轰性能测试研究。e-mail:hongbo2751@sina.com

通信联系人:李淑睿(1996-),女,助理研究员,主要从事爆炸与冲击动力学研究。e-mail:shurui\_li@foxmail.com

引用本文:裴红波,李淑睿,郭文灿,等.基于反向撞击法的RDX基含铝炸药冲击起爆实验研究[J].含能材料,2023,31(5):425-430.

PEI Hong-bo, LI Shu-rui, GUO Wen-can, et al. Shock Initiation Measurement of RDX-based Aluminized Explosives with Reverse-impact Method[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(5):425-430.

本研究利用 57 mm 口径火炮加载平台和光子多普勒速度测试技术(PDV),发展并建立基于反向撞击法的炸药冲击起爆性能测试方法及实验测试系统,对铝粉含量分别为 0, 15% 和 30% 的 3 种 RDX 基含铝炸药(RDX/Al)的冲击起爆反应增长过程进行了测试,对比分析铝粉对 RDX 基含铝炸药冲击起爆性能及冲击波感度的影响。

## 1 实验方法

### 1.1 实验原理

本研究基于反向撞击法和光子多普勒速度测试技术(PDV)建立的炸药冲击起爆测试系统如图 1 所示。实验过程中将待测炸药样品作为飞片安装在弹托上,利用 57 mm 口径的火炮加载平台,驱动弹托和待测炸药以一定速度平面撞击静止的光学测试窗口,并设置 1 个 PDV 测速探头测量待测炸药的撞击速度。同时,在测试窗口背面布置 3 个 PDV 测速探头,测量待测炸药与窗口撞击面上不同位置处的界面粒子速度变化历程,降低测试不确定度。

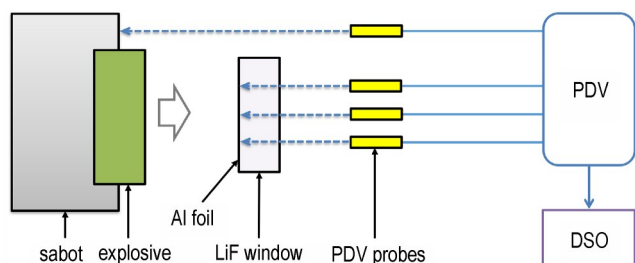


图 1 基于反向撞击法的炸药冲击起爆实验测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of shock initiation measuring system based on the reverse-impact

以炸药撞击时刻作为时间零点,该测试系统获得的速度测试结果示意图如图 2 所示,其中绿色直线为测量炸药撞击速度  $W$  的激光探头信号。当待测炸药与测试窗口发生撞击后,若撞击压力  $p_0$  低于炸药的临界起爆压力  $p_{cr}$ ,炸药不会发生反应,则窗口背面的激光探头测得的界面粒子速度不会发生变化,其速度信号应如图 2 中的蓝色直线所示,该类测试结果可用于测量炸药的冲击 Hugoniot 关系<sup>[23]</sup>。若撞击压力  $p_0$  高于炸药的冲击起爆临界压力  $p_{cr}$ ,炸药将会发生化学反应,使得界面处的压力和粒子速度显著增长,则窗口背面激光探头测得的界面粒子速度信号应如图 2 中的红色曲线所示,其波后界面粒子速度的增长速率、界面粒子速度峰值  $u_{pk}$  及峰值出现时间  $t_{pk}$  等信息均可用于评估被测炸药的冲击起爆特性。

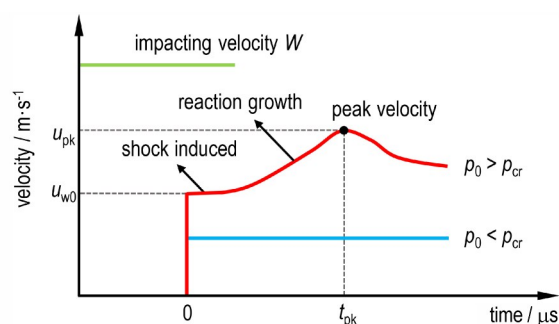


图 2 反向撞击实验的速度测试结果示意图

Fig.2 Schematic diagram of measured velocity for reverse-impact experiment

利用实验测得的波阵面粒子速度  $u_{w0}$  可以得到炸药的撞击加载压力,炸药以速度  $W$  撞击静止窗口材料时,炸药和窗口中将分别产生左行和右行冲击波,使得它们中的压力、粒子速度等状态由初始的  $p_{0s}$ 、 $u_{0s}$ 、 $p_{0w}$ 、 $u_{0w}$  突变为  $p_{s0}$ 、 $u_{s0}$ 、 $p_{w0}$ 、 $u_{w0}$ 。根据冲击波阵面守恒关系<sup>[4]</sup>,撞击压力  $p_0$  满足式(1)

$$p_0 = \rho_{0w}(a_w + b_w u_{w0})u_{w0} \quad (1)$$

式中,  $\rho_{0w}$  为窗口材料的密度,  $g \cdot cm^{-3}$ ,  $a_w$  和  $b_w$  为窗口材料的 Hugoniot 参数。根据界面连续条件,撞击时刻炸药的波后粒子速度  $u_{s0}$  和冲击波速度  $D_{s0}$  可以根据式(2)和式(3)计算得到<sup>[23]</sup>

$$u_{s0} = W - u_{w0} \quad (2)$$

$$D_{s0} = \frac{\rho_{0w}(a_w + b_w u_{w0})u_{w0}}{\rho_{0s}(W - u_{w0})} \quad (3)$$

式中,  $\rho_{0s}$  为炸药的初始密度,  $g \cdot cm^{-3}$ 。由于撞击时刻炸药的反应程度较低,利用式(2)和式(3)得到的  $D_{s0}-u_{s0}$  数据可以作为被测炸药的一组冲击 Hugoniot 数据。

### 1.2 实验装置

实验装置实物图如图 3 所示。实验所用弹托由铝材料制成,为了降低火炮发射过程中待测炸药受到的过载,弹托采用中空结构设计,待测炸药样品以嵌入方式安装在弹托上,待测炸药样品均为  $\Phi 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$  的圆柱形药柱。LiF 测试窗口的尺寸为  $\Phi 20 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ , 其与待测炸药的撞击面上镀有一层厚度约  $0.7 \mu\text{m}$  的铝膜, LiF 材料的阻抗与炸药相近。实验采用的 PDV 测速探头的直径为  $3.2 \text{ mm}$ , 探头输出激光的焦斑直径小于  $0.3 \text{ mm}$ , 窗口背面的 3 个 PDV 测速探头与窗口撞击面的距离约为  $35 \text{ mm}$ , 均依靠图 3d 所示的探头靶架进行定位。

实验在 57 mm 口径火炮加载平台上进行,炸药样品、测速窗口和探头靶架等均放置在爆炸罐中,激光测

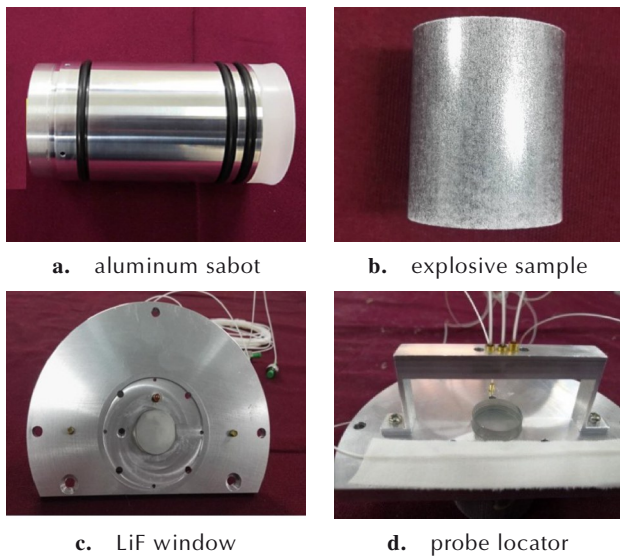


图3 实验装置实物图  
Fig.3 Photographs of experimental devices

速探头通过爆炸罐上的光纤法兰与罐外仪器设备相连。实验前需对爆炸罐抽真空,实验过程中爆炸罐内压强小于 400 Pa。实验所用仪器为光子多普勒测速仪(PDV)及其配套数字示波器(DSO),均由中国工程物理研究院流体物理研究所研制。PDV测速仪的型号为CAEP-PDV-3,该测速仪为全光纤结构,结构较为紧凑,使用的激光波长为 1550 nm。数字示波器的带宽为 12.5 GHz,实验时采样频率设置为  $20 \text{ Gs}\cdot\text{s}^{-1}$ ,记录时长设置为  $50 \mu\text{s}$ 。

采用压装工艺制备了 3 种不同铝粉含量的 RDX 基炸药配方,分别为 R0、RA15 和 RA30,如表 1 所示,这 3 种炸药的铝粉质量分数分别为 0、15% 和 30%。制备过程中所用铝粉均为球形,其中位径为  $10 \mu\text{m}$ 。3 种配方炸药的孔隙率相近,实际装药密度约为最大理论密度的 95%。

表 1 3 种 RDX 基炸药配方

Table 1 Formulations of three RDX-based explosives

explosive	mass fraction/ %			$\rho_0$ / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$	detonation velocity <sup>[8]</sup> / $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
	RDX	Al	binder		
R0	95	0	5	1.709	$8214\pm 41$
RA15	80	15	5	1.804	$8086\pm 40$
RA30	65	30	5	1.908	$7850\pm 39$

## 2 结果与讨论

### 2.1 试验结果

利用上述实验方法,对 3 种铝粉含量不同的 RDX

基含铝炸药的冲击起爆特性进行研究,令撞击加载速度基本不变,测量每种炸药与窗口界面粒子速度时程曲线,获得炸药的反应增长过程。实验测得的典型原始频谱信号如图 4 所示,其中图 4a 是窗口背面测速探头测得的界面粒子速度变化信号,图 4b 是炸药撞击速度信号。原始信号曲线均较为光滑,受干扰程度较小,表明测试系统的稳定性较高。

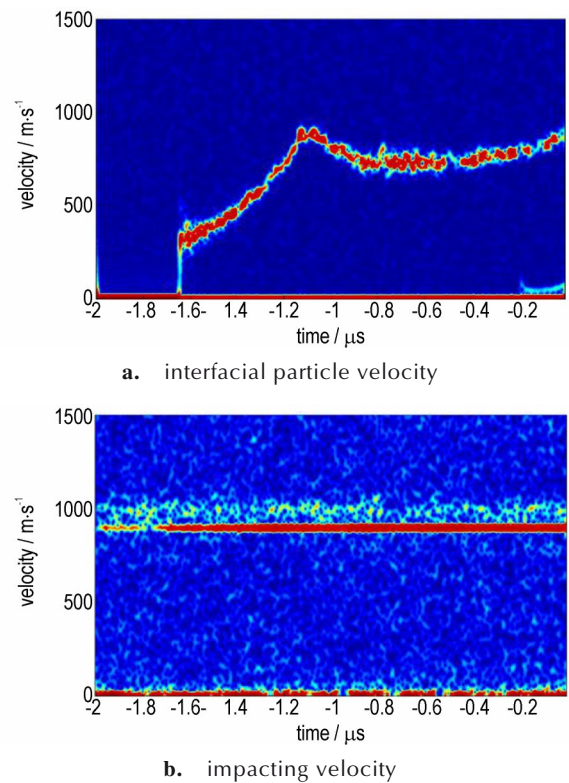


图4 实验测得的典型原始频谱信号  
Fig.4 Measured original spectrogram signals

利用傅里叶变换,可将实验测得的原始频谱信号转换为相应的速度时程曲线,3 种 RDX 基含铝炸药的撞击速度和界面粒子速度时程曲线如图 5 所示。由图 5 可知,同一实验中窗口背面不同测速探头的测试结果一致性较高,测试结果之间的差异小于 2%,表明实验过程受边侧稀疏波或反射波的影响较小,测试结果的可靠性较高。

对图 5 所示的 3 种 RDX 基含铝炸药的界面粒子速度实验曲线分别取平均并进行对比,结果如图 6 所示。读取曲线上的波阵面粒子速度  $u_{w0}$ 、界面粒子速度峰值  $u_{pk}$  和时间  $t_{pk}$ ,结果如表 2 所示,利用实验测得的炸药撞击速度  $W$ ,即可根据式(1)~(3)计算得到对应的撞击压力  $p_0$ 、撞击时刻炸药的波后粒子速度  $u_{s0}$  及其冲击波速度  $D_{s0}$ ,结果如表 2 所示。计算所用的 LiF 窗口材料参数分别为  $\rho_{ow}=2.641 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 、 $a_w=5176 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $b_w=1.353$ <sup>[24]</sup>。

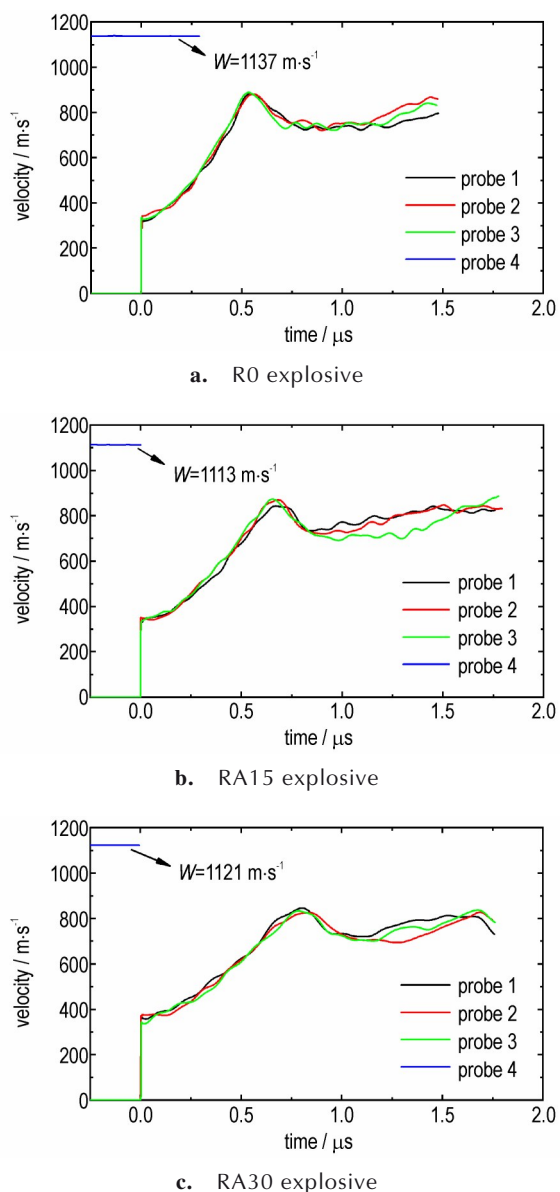


图5 3种RDX基含铝炸药的速度测试结果

Fig.5 Measured velocities of three RDX-based aluminized explosives

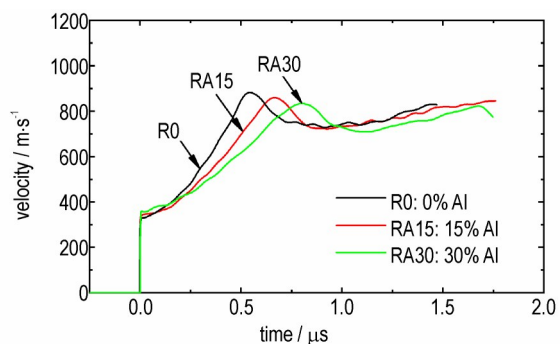


图6 3种RDX基含铝炸药界面粒子速度曲线的对比

Fig.6 Comparison of interfacial particle velocities of three RDX-based aluminized explosives

表2 实验撞击速度与界面粒子速度曲线特征值

Table 2 Experimental impacting velocities and characteristic values of interfacial particle velocity profiles

explosive	$W$ /m·s <sup>-1</sup>	$u_{w0}$ /m·s <sup>-1</sup>	$u_{pk}$ /m·s <sup>-1</sup>	$t_{pk}$ /μs	$p_0$ /GPa	$u_{s0}$ /m·s <sup>-1</sup>	$D_{s0}$ /m·s <sup>-1</sup>
R0	1137	324	881	0.547	4.805	813	3459
RA15	1113	342	856	0.667	5.095	771	3663
RA30	1121	355	832	0.805	5.305	766	3630

Note:  $W$  is impact velocity,  $u_{w0}$  is particle velocity on shock front,  $u_{pk}$  is peak particle velocity,  $t_{pk}$  is time of peak particle velocity,  $p_0$  is impact pressure,  $u_{s0}$  is explosive particle velocity and  $D_{s0}$  is shock velocity at impact time.

## 2.2 讨论分析

3种炸药撞击速度的平均值为 $(1123.7 \pm 13.3) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,波动范围在1.2%以内,可以认为其撞击速度基本一致。由表2可知,在相同加载速度下,铝粉含量最高的RA30炸药的撞击加载压力最高,为5.305 GPa,不含铝粉的R0炸药的撞击加载压力最低,为4.805 GPa,而结合图6可知,R0炸药波后粒子速度的增长速率最大,界面粒子速度最先达到峰值,用时仅 $0.547 \mu\text{s}$ ,且粒子速度峰值 $u_{pk}$ 也最大,为 $881 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这表明R0炸药的冲击起爆反应增长最快,冲击波敏感度最高。随着铝粉含量的增加,波后粒子速度的上升速率逐渐变缓,界面粒子速度达到峰值所需要的时间不断增加,与R0炸药相比,RA30炸药粒子速度达到峰值所需的时间 $t_{pk}$ 增加了47%,由此可见,铝粉含量越高,含铝炸药的冲击波敏感度越低。

分析认为可能有2方面原因造成含铝炸药的冲击波敏感度随铝粉含量增加而下降:一方面,在冲击波作用下热点形成的初期阶段,热点化学反应与热传导之间存在相互竞争的关系,而铝粉较高的热传导系数,会加快局部热点的热扩散速度,使得热点温度快速降低,导致含铝炸药内部有效热点的数量减少。另一方面,由于含铝炸药冲击起爆过程中铝粉的反应度很低<sup>[8-9]</sup>,可以认为铝粉是惰性的,不参与炸药的化学反应,且铝粉的添加使得单位质量内的炸药量减少,炸药能量密度降低,导致含铝炸药的冲击起爆反应增长速度变慢。

在发射药和弹托质量不变的前提下,反向撞击试验中撞击加载速度的相对测量不确定度在2%以内,撞击速度测试的相对测量不确定度约为1%,界面粒子速度测试的相对测量不确定度约为3%,撞击时刻界面粒子速度的上升前沿小于5 ns。通过总结评估不同类型的炸药冲击起爆试验数据,可得各类炸药冲击起爆性能测试方法的相对测量不确定度、时间分辨率

等信息,如表 3 所示。隔板法的测量不确定度主要根据试验过程中隔板厚度的变化步长及试验总数评估确定;楔形药法的测量不确定度基于最小二乘法根据多发试验结果拟合确定,时间分辨率主要由扫描相机的转速决定;电磁粒子速度计法和锰铜压力计法的测量

不确定度由 A 类不确定度评估方法确定,时间分辨率主要根据电压信号前沿上升时间及传感器厚度评估确定。由表 3 可见,反向撞击法具有较高的测试精度和时间分辨率,且对待测样品的制备要求较低,可以利用常见的圆柱状炸药开展实验。

表 3 不同炸药冲击起爆性能测试方法对比

Table 3 Comparison of different shock initiation measuring methods

measuring method	physical quantity	relative uncertainty / %	time resolution / ns	explosive
gap test	gap thickness of 50 % detonation	5-10	-	cylindrical sample
wedge test	distance to detonation	10	~20	wedged sample
electromagnetic velocity gauge	particle velocity profiles	4	20	set of wedged samples
manganin pressure gauge	pressure profiles	5-10	30	set of thin discs
reverse impact	interfacial particle velocity profiles	3	5	cylindrical sample

### 3 结论

建立了基于反向撞击法的炸药冲击起爆实验测试系统,获得了 3 种铝粉含量不同的 RDX 基含铝炸药 R0、RA15 和 RA30 的冲击起爆界面粒子速度变化历程,对比研究了铝粉对含铝炸药冲击波感度的影响,并得到以下结论:

(1) 反向撞击炸药冲击起爆实验测试系统具有较高的测试精度(3%)和时间分辨率(5 ns),且对炸药实验样品的制备要求较低,为炸药的冲击起爆性能测试提供了新的技术途径。

(2) 在相同加载条件下,铝粉含量越高,RDX 基含铝炸药冲击起爆反应增长越慢,波后界面粒子速度达到峰值所需的时间越长,炸药冲击波感度越低。由于铝粉在冲击起爆过程中反应度很低,其对炸药能量的稀释作用以及较强的导热能力会对热点的形成和成长过程产生较大影响,从而影响含铝炸药的冲击起爆性能及冲击波感度。

#### 参考文献:

- [1] HANDLEY C A, LAMBOURN B D, WHITWORTH N J, et al. Understanding the shock and detonation response of high explosives at the continuum and meso scales[J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5: 011303.
- [2] 段卓平, 白志玲, 黄风雷. 非均质固体炸药冲击起爆与爆轰研究进展[J]. *火炸药学报*, 2020, 43(3): 237-253.  
DUAN Zhuo-ping, BAI Zhi-ling, HUANG Feng-lei. Advances in shock initiation and detonation of heterogeneous solid explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2020, 43(3): 237-253.
- [3] BURNS M J, CHIQUETE C. Shock initiation of the HMX-based

explosive PBX 9012: Experiments, uncertainty analysis, and unreacted equation-of-state [J]. *Journal of Applied Physics*, 2020, 127(215107): 1-11.

- [4] 孙成伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.  
SUN Cheng-wei, WEI Yu-zhang, ZHOU Zhi-kui. *Applied Detonation Physics*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2000.
- [5] 封雪松, 姚李娜, 赵省向, 等. 不同制备工艺对含纳米铝粉炸药机械感度的影响[J]. *火工品*, 2013, 2: 33-35.  
FENG Xue-song, YAO Li-na, ZHAO Sheng-xiang, et al. Influence of preparation method on mechanical sensitivity of nanometer aluminum containing explosive [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2013, 2: 33-35.
- [6] 王彩玲, 陈松, 赵省向, 等. Al 粉对 RDX 机械感度的影响[J]. *火工品*, 2010, 1: 32-34.  
WANG Cai-ling, CHEN Song, ZHAO Sheng-xiang, et al. Influence of Al powder on mechanical sensitivity of RDX [J]. *Initiators and Pyrotechnics*, 2010, 1: 32-34.
- [7] 郑亚峰, 常海, 张修博, 等. RDX 基含铝炸药的特性落高能热爆发参数的关系[J]. *含能材料*, 2012, 20(6): 754-757.  
ZHENG Ya-feng, ZHANG Hai, ZHANG Xiu-bo, et al. Relationship between drop energy and heat explosion parameters of RDX-based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(6): 754-757.
- [8] 裴红波, 钟斌, 李星瀚, 等. RDX 基含铝炸药圆筒试验及状态方程研究[J]. *火炸药学报*, 2019, 42(4): 403-409.  
PEI Hong-bo, ZHONG Bin, LI Xing-han, et al. Study on the cylinder tests and equation of state in RDX based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2019, 42(4): 403-409.
- [9] 李淑睿, 段卓平, 郑保辉, 等. 2,4-二硝基苯甲醚基熔铸含铝炸药圆筒试验及爆轰产物状态方程[J]. *兵工学报*, 2021, 42(7): 1424-1430.  
LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, ZHENG Bao-hui, et al. Cylinder tests and equation of state for detonation products of DNAN-based aluminized melt-cast explosive [J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(7): 1424-1430.
- [10] ZHAO P, CHEN L, YANG K, et al. Effect of temperature on shock initiation of RDX-based aluminized explosives [J]. *Pro-*

- pellants, Explosives, Pyrotechnics, 2019, 44: 1562-1569.
- [11] CAO T T, ZHOU L, ZHANG X R, et al. Shock initiation characteristics of an aluminized DNAN/RDX melt-cast explosive [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2016, 35(4): 430-442.
- [12] 王虹富,白帆,刘彦,等.爆炸冲击波作用下黑索今基含铝炸药的冲击点火反应速率模型[J].兵工学报,2021,42(2):327-339. WANG Hong-fu, BAI Fan, LIU Yan, et al. Ignition reaction rate model of RDX-based aluminized explosives under shock waves[J]. *Acta Armamentarii*, 2021, 42(2): 327-339.
- [13] 李淑睿,段卓平,高天雨,等.2,4-二硝基苯甲醚基钝感熔铸含铝炸药的冲击起爆特性[J].含能材料,2021,29(2):88-95. LI Shu-rui, DUAN Zhuo-ping, GAO Tian-yu, et al. Shock initiation characteristic of insensitive DNAN based aluminized meltcast explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(2): 88-95.
- [14] 黄明,李洪珍,徐容,等.高品质RDX的晶体特性及冲击波起爆特性[J].含能材料,2011,19(6):621-626. HUANG Ming, LI Hong-zhen, XU Rong, et al. Evaluation of crystal properties and initiation characteristics of decreased sensitivity RDX [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(6): 621-626.
- [15] 梁晓勇,吕春玲,张俊,等.CL-20基PBX炸药冲击波感度数值模拟[J].装甲兵工程学院学报,2016,30(4):68-72. LIANG Xiao-yong, LV Chun-ling, ZHANG Jun, et al. Numerical simulation on the shock wave sensitivity of CL-20 based PBX explosive [J]. *Journal of Academy of Armored Force Engineering*, 2016, 30(4): 68-72.
- [16] 赵娟,冯晓军,徐洪涛,等.FOX-7和RDX基含铝炸药的冲击起爆特性[J].火炸药学报,2016,39(4):42-50. ZHAO Juan, FENG Xiao-jun, XU Hong-tao, et al. Shock initiation characteristics of FOX-7 and RDX based aluminized explosive [J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2016, 39(4): 42-50.
- [17] JETTE F-X, YOSHINAKA A C, HIGGINS A J. Effect of scale and confinement on gap tests for liquid explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2003, 28(5): 240-248.
- [18] LEE J, LEE K, HWANG E, et al. Numerical modelling of shock initiation of a HNIW-based explosive [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45: 814-822.
- [19] ELIA T, CHUZEVILLE V, BAUDIN G, et al. Review of the wedge test and single curve initiation principle applied to aluminized high explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45: 1541-1553.
- [20] GUSTAVSEN R L, GEHR R J, BUCHOLTZ S M, et al. Shock initiation of the tri-amino-tri-nitro-benzene based explosive PBX 9502 cooled to 55 °C [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(7): 074909.
- [21] 谭凯元,文尚刚,韩勇.常温附近温度变化对炸药冲击起爆特征的影响(英文)[J].含能材料,2016,24(9):905-910. TAN Kai-yuan, WEN Shang-gang, HAN Yong. Shock initiation characteristics of explosives at near-ambient temperatures [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2016, 24(9): 905-910.
- [22] ZHANG X, WANG Y F, HUANG W B, et al. Reaction build-up of PBX explosives JOB-9003 under different initiation pressures [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2017, 35(2): 197-212.
- [23] 裴红波,刘俊明,张旭,等.基于反向撞击法的JB-9014炸药Hugoniot关系测量[J].爆炸与冲击,2019,39(5):052301. PEI Hong-bo, LIU Jun-ming, ZHANG Xu, et al. Measurement of hugoniot relation for unreacted JB-9014 explosive with reverse-impact method [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(5): 052301.
- [24] 赵万广,周显明,李加波,等.LiF单晶的高压折射率及窗口速度的修正[J].高压物理学报,2014,28(5):571-576. ZHAO Wan-guang, ZHOU Xian-ming, LI Jia-bo, et al. Refractive index of LiF single crystal at high pressure and its window correction [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2014, 28(5): 571-576.

## Shock Initiation Measurement of RDX-based Aluminized Explosives with Reverse-impact Method

PEI Hong-bo, LI Shu-rui, GUO Wen-can, ZHANG Xu, ZHENG Xian-xu

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

**Abstract:** A new shock initiation measuring system is developed with the reverse-impact method, in which the explosive sample was driven by a gas gun and impacted the LiF window at a certain speed. The photonic Doppler velocimetry (PDV) was used to measure the interfacial particle velocity profile between the explosive sample and the LiF window. This measuring system has higher accuracy (3%), higher time resolution (5 ns) and lower requirement of explosive samples than previous shock initiation measuring methods. Moreover, to explore the effect of aluminum powder, the shock initiation characteristics of three RDX-based aluminized explosives (RDX/Al) with different contents of aluminum powder (0, 15% and 30%) were investigated by this measuring system. The experimental data indicates that with the same impacting speed, the shock initiation reaction growth becomes slower with a higher content of aluminum powder. The interfacial particle velocity of the RDX-based aluminized explosive with 30% aluminum powder requires more time to arrive at a peak value, which is 47% longer than that of the RDX explosive. The aluminum powder makes the shock sensitivity significantly decrease and it plays a dilute role in explosive energy during the shock initiation process of aluminized explosives.

**Key words:** reverse-impact method; aluminized explosive; shock initiation; shock sensitivity; content of aluminum powder

**CLC number:** TJ55; O381

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2021285

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (No. 11602248)

(责编:王馨逸)