

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0217

## RDX 基含铝炸药爆轰波结构实验研究\*

丁彤<sup>1</sup>, 裴红波<sup>1</sup>, 郭文灿<sup>1</sup>, 张旭<sup>1</sup>, 郑贤旭<sup>1</sup>, 刘仓理<sup>2</sup>

(1. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为了获得含铝炸药爆轰反应区附近铝粉的反应情况, 对两种 RDX/Al 炸药和一种 RDX/LiF 炸药的爆轰波结构进行了测量。实验过程中, 利用火炮加载产生一维平面波, 通过光子多普勒测速仪测量炸药/LiF 窗口的界面粒子速度。结果表明: 含铝炸药爆轰波的结构与理想炸药的差异较大, 其界面粒子速度曲线没有明显的拐点; 反应初期, 由于气相产物与添加物之间温度的非平衡性, RDX/Al 界面的粒子速度低于 RDX/LiF 炸药的; 随后, 由于铝粉反应放能, RDX/Al 界面的粒子速度高于 RDX/LiF 炸药的; 微米尺度铝粉在 CJ 面前几乎不发生反应; 2、10  $\mu\text{m}$  等两种粒度铝粉的反应延滞时间小于 0.8  $\mu\text{s}$ ; 在本文中, 两种粒度铝粉的反应度为 16%~31%。

**关键词:** 含铝炸药; 爆轰反应区; 光子多普勒测速仪; 反应延滞时间; 界面粒子速度

中图分类号: O381

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

### Experimental study on detonation wave profiles in RDX-based aluminized explosives

DING Tong<sup>1</sup>, PEI Hongbo<sup>1</sup>, GUO Wencan<sup>1</sup>, ZHANG Xu<sup>1</sup>, ZHENG Xianxu<sup>1</sup>, LIU Cangli<sup>2</sup>

(1. Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China;

2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to evaluate the reaction of the aluminum powder in detonation products of aluminized explosives, experimental measurements of the detonation wave profiles in RDX/Al and RDX/LiF explosives using photon Doppler velocimetry (PDV) were performed. Planar detonations were produced by impacting the explosives with sapphire flyers in a gas gun. LiF windows with very thin vapor deposited aluminum mirrors were used in the experiments. The original data obtained in the experiments were processed by the window Fourier transform method, then the pressure in the detonation reaction zone was calculated using the impedance matching formula. The initial reaction times were compared between the Al powders with the Al particle sizes of 2 and 10  $\mu\text{m}$  by averaging the interface particle velocities at multiple locations measured in each experiment. Simultaneously, the isentropic equation of state of LiF was used as the reference line to construct the equation of state of the aluminized explosives and to analyze the reaction degrees of the Al powders. The results show that the detonation wave profiles in the aluminized explosives are different from those in ideal explosives. And measurements show no distinct end to the reaction zone indicating a CJ point. At the beginning, the interface particle velocity in the RDX/Al explosive is lower than that in the RDX/LiF explosive due to the temperature disequilibrium between the Al particles and gas detonation products. Subsequently, the interface particle velocity in the RDX/Al explosive is higher than that in the RDX/LiF explosive due to the energy released by the reaction of aluminum. Micron-sized Al particles hardly react before the CJ front. And for the Al particles with the sizes of 2 and 10  $\mu\text{m}$ , the Al reaction delay time is less than 0.8  $\mu\text{s}$ . At the end of the measurements, the evaluated Al reaction degree was about 16% to 31%.

\* 收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(11602248)

第一作者: 丁彤(1995—), 男, 博士研究生, [dt1209@mail.ustc.edu.cn](mailto:dt1209@mail.ustc.edu.cn)

通信作者: 裴红波(1987—), 男, 博士, 副研究员, [hongbo2751@sina.com](mailto:hongbo2751@sina.com)

**Keywords:** aluminized explosive; detonation reaction zone; photon Doppler velocimetry (PDV); reaction delay time; interface particle velocity

含铝炸药有较高的爆热和较强的作功能力, 成为含能材料领域的研究热点。含铝炸药能量释放特性与理想炸药较大的不同主要在于, 铝粉通常在 CJ 面后与气相产物发生二次反应, 且随着铝粉含量的增加, 含铝炸药的爆速降低<sup>[1-3]</sup>。铝粉的表面被一层氧化铝薄膜所覆盖, 厚度通常为 3~5 nm<sup>[4]</sup>, 铝粉反应通常发生在氧化铝膜破裂后。含铝炸药中铝粉的反应延滞时间为爆轰波到达后铝粉氧化膜发生破裂且与气相产物发生反应所需要的时间, 而铝粉氧化膜的破裂与多种因素有关(如铝核升温、熔化导致的热应力, 氧化铝膜晶变、熔化, 冲击波的作用导致的颗粒变形等)。研究含铝炸药中铝粉的反应起始时间, 可以加深认识含铝炸药中铝粉的反应过程, 为含铝炸药配方设计及应用提供参考。

低压下的铝粉燃烧实验表明, 铝粉的燃烧时间与铝粉粒度之间满足  $d^n$  关系<sup>[5]</sup>。由于含铝炸药爆轰时的高温、高压, 很难直接测量产物中铝粉的反应情况, 通常通过宏观爆轰性能测试, 反推炸药中的铝粉反应情况。含铝炸药中铝粉的反应速率的实验研究主要有光谱法<sup>[6-8]</sup>、圆筒实验法<sup>[9-10]</sup>、飞片撞击法<sup>[11-12]</sup>、水下爆炸法等<sup>[13-14]</sup>, 由以上方法已得到一些定性认识(如铝粉的反应与约束条件, 炸药组分, 铝颗粒的尺寸、形状等相关), 而对于炸药中铝粉反应的时间尺度, 目前尚未形成较统一的认识。对铝粉二次反应起始时间已进行了一定的研究。曾亮等<sup>[15]</sup>利用电导率方法, 对 TNT/Al 炸药中铝粉的反应起始时间进行了测量, 结果表明粒径 2、10  $\mu\text{m}$  铝粉的反应起始时间分别为 0.4、1.5  $\mu\text{s}$ 。Tao<sup>[16]</sup>利用激光速度干涉仪, 分别测量了 PETN 和 TNT 含铝炸药与窗口的界面粒子速度, 并依此标定了炸药的点火增长模型参数, 进而计算了炸药的反应速率, 并通过计算结果推断, 粒径 5 或 18  $\mu\text{m}$  铝粉会在 1.5  $\mu\text{s}$  内与 PETN 炸药的爆轰产物完全反应。Manner 等<sup>[17]</sup>对 HMX/Al(粒径 3.2  $\mu\text{m}$ )和 HMX/LiF 炸药进行了圆筒实验, 结果表明 2  $\mu\text{s}$  内铝粉发生了显著的反应。Chan<sup>[18]</sup>对含铝炸药中铝粉的反应起始时间进行理论分析, 认为当铝颗粒表面温度超过高压下铝的熔点时铝粉开始反应, 则 10  $\mu\text{m}$  铝粉的反应起始时间为 0.1  $\mu\text{s}$ 。以上大部分研究表明, 微米级铝粉的反应起始时间在 2  $\mu\text{s}$  以内, 但不同研究者给出的铝粉反应的具体起始时间差异较大, 还有待进一步研究。

利用激光干涉法测量炸药与窗口的界面速度, 可以获得炸药的爆轰波结构, 进而可以分析反应区附近铝粉的反应情况, 相比飞片法、圆筒实验法等, 界面粒子速度法的结构响应更快(纳秒级)。本文中, 将测量两种 RDX/Al 炸药和一种 RDX/LiF 炸药的爆轰波结构, 分析爆轰产物中铝粉的反应延滞时间及反应区附近铝粉的反应情况, 拟为爆轰产物环境下铝粉的反应动力学建模提供参考。

## 1 实 验

测试系统主要由火炮、蓝宝石飞片、待测炸药、LiF 光学窗口、光纤测速探头和光子多普勒测速仪 (photon Doppler velocimetry, PDV) 等组成, 如图 1 所示。利用口径 57 mm 的火炮发射蓝宝石飞片撞击炸药产生一维平面波。在炸药背面安装  $\varnothing 20 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$  的 LiF 窗口, LiF 窗口与炸药接触面有厚约 0.7  $\mu\text{m}$  的铝镀膜。如图 2 所示, 在背部靶架上安装 3 个光纤探头 P1、P2 和 P3(在图 1 中仅示意 P1), 其中 P1 探头焦点正对炸药中心, P2 和 P3 对称分布在 P1 两侧, 与中心距离均为 3.8 mm。在实验记录的时间内, 被测区域不受侧向稀疏波的影响, 始终为一维平面爆轰波。实验前, 将炸药安装在爆炸罐中的炮管正前方, 通过爆炸罐上的光纤法兰连接测试用探头与罐外仪器, 最后对爆炸罐抽真空。光子多普勒测速仪为中国工程物理研究院流体物理研究所研制, 测速范围上限可达 9 km/s。

采用窗口傅里叶变换方法处理数据, 速度时间分辨率为 3 ns。不确定度主要由 PDV 测试的不确定度、窗口和探头安装导致的不确定度、炸药不均匀导致的不确定度 3 方面决定, 速度的相对合成标准不确定度为 2%。

由于炸药与 LiF 的阻抗有差别, 实验测得的界面粒子速度并非炸药稳定爆轰时的波后粒子速度。

因此, 可利用冲击阻抗匹配公式计算炸药反应区内的压力<sup>[19]</sup>:

$$p_{CJ} = \frac{1}{2}u_{CJ}(\rho_0(c_0 + \lambda u_{CJ}) + \rho D_{CJ}) \quad (1)$$

式中:  $p_{CJ}$  为待测炸药的爆压,  $u_{CJ}$  为 CJ 点对应的界面粒子速度,  $\rho_0$  为窗体材料初始密度,  $c_0$  为窗体材料初始声速,  $\lambda$  为窗体材料冲击绝热线常数,  $\rho$  为待测炸药初始密度,  $D_{CJ}$  为待测炸药 CJ 爆速。

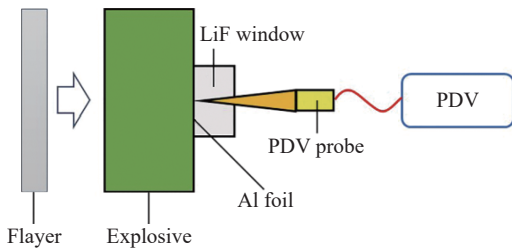


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

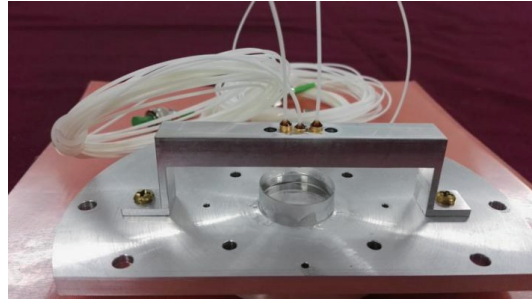


图 2 测速窗口及探头安装实物图

Fig. 2 Window of speed measurement and installation of probe

采用压装工艺, 制备了 3 种 RDX 基炸药, 配方见表 1。药柱的尺寸为  $\varnothing 40 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 。其中, 铝粉为球形, 粒径分别为 2 和  $10 \mu\text{m}$ , 纯度大于 99.8%; 氟化锂粉末平均粒径为  $2.5 \mu\text{m}$ , 纯度大于 99%。氟化锂的密度、冲击阻抗、分子量与铝比较接近, 且其化学性质较稳定, 不会与炸药气相产物发生反应, 在炸药产物中主要以惰性物质形式存在。通过含氟化锂炸药与含铝炸药的对比, 可以评估铝粉的反应情况。铝和氟化锂的主要物理参数见表 2, 表中  $T_m$ 、 $T_b$ 、 $c_V$  和  $K$  分别为熔点、沸点、比定容热容和导热系数。

表 1 三种 RDX 基炸药的配方和参数

Table 1 Components and characteristics of three kinds of explosives

炸药	w/%				粒径/ $\mu\text{m}$	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$D/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
	RDX	Al	LiF	黏合剂			
RF15	80	0	15	5	2.5	1.809	$8141 \pm 40$
RA15(2 $\mu\text{m}$ )	80	15	0	5	2.0	1.803	$8072 \pm 40$
RA15(10 $\mu\text{m}$ )	80	15	0	5	10.0	1.795	$8070 \pm 40$

表 2 铝和氟化锂的物理参数对比

Table 2 Comparison of the main characteristics of Al and LiF

材料	$\rho_0/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$T_m/\text{K}$	$T_b/\text{K}$	$c_V/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$K/(\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	$c_0/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$	$\lambda$
铝	2.700	933	2 740	1.176	210	5.325	1.338
氟化锂	2.638	1 143		1.513	11.3	5.176	1.359

## 2 结果与分析

### 2.1 界面粒子速度

对 3 种炸药均做了 1 发实验。实验中, 测量了蓝宝石飞片速度, 结果为  $(1\ 256 \pm 30) \text{ m/s}$ ; 根据蓝宝石和待测炸药冲击绝热线, 计算可得炸药中的输入压力约为 8 GPa; 该压力下炸药的到爆轰距离约为 3 mm, 可得到炸药稳定爆轰的传播距离约为 27 mm。图 3 为实验测得的炸药爆轰波界面速度, 每发实验均获得了 3 个数据。同一炸药不同探头之间的速度曲线差异较小, 表明测试精度较高。

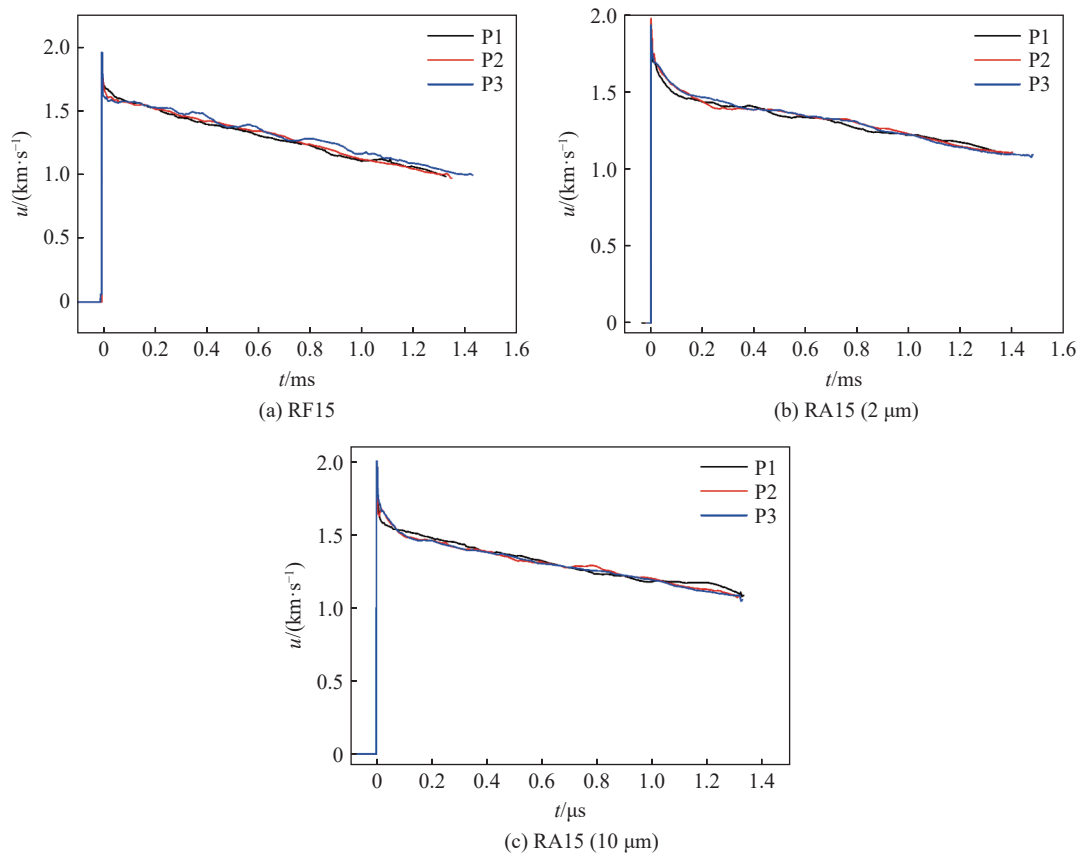


图 3 三种炸药的界面粒子速度曲线

Fig. 3 Interface particle velocity curves of three explosives

### 2.2 铝粉反应起始时间

每发实验 3 个位置的界面粒子平均值如图 4 所示。单个探头速度的相对不确定度为 2%，多个探头速度平均值的相对不确定度约为 1%。由图 4 可见，在 CJ 点前的反应区内，3 种炸药的界面粒子变化趋势较一致，为了更清晰地呈现这个变化趋势，对 CJ 点附近的曲线进行了放大，如图 5 所示。由图 5 可见，von Neumann 峰处 3 种炸药的界面粒子速度为 1.8~1.9 km/s，在随后的 15 ns 内速度迅速下降到约 1.6 km/s，该过程对应着 RDX 的分解反应。Pei 等<sup>[20]</sup>对 RDX 基 PBX 炸药的爆轰反应区进行了测量

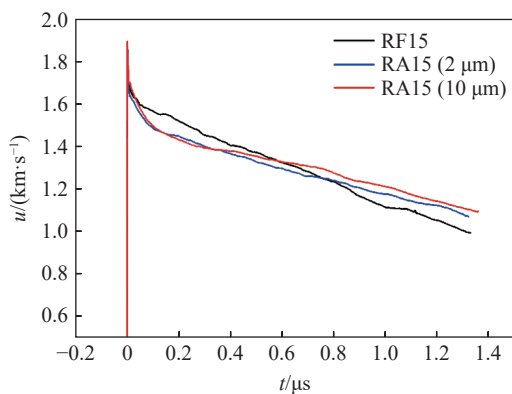


图 4 三种炸药的平均界面粒子速度曲线

Fig. 4 Average interface particle velocity curves of three explosives

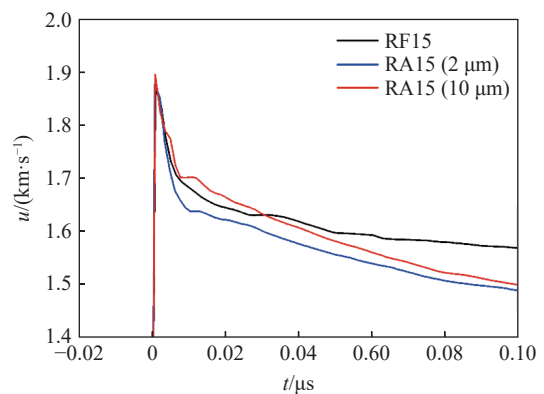


图 5 CJ 点附近三种炸药的平均界面粒子速度曲线

Fig. 5 Average of interface particle velocity curves of three explosives near the CJ point

(见图 6), 得到稳态爆轰条件下 RDX 基 PBX 炸药的爆轰反应时间为  $(14 \pm 3)$  ns, 与本文含铝炸药的测试结果基本一致。由于铝粉与气相爆轰产物间的反应属于分子间的反应, 在如此短的时间内, 铝粉难以发生反应, 可以认为 RDX 完全分解的点即为 CJ 点; 考虑测试误差, 可以认为 3 种炸药 CJ 点的速度均为  $(1\ 640 \pm 20)$  m/s, 可计算 3 种炸药的爆压为 27.6 GPa, 对应 CJ 点等熵绝热指数为 3.26。CJ 点后到  $0.5\ \mu\text{s}$ , 含 LiF 炸药的界面粒子速度始终高于含铝炸药的, 这是因 LiF 粉末与铝粉间的热力学性质差异导致。

在 CJ 点附近, 气相爆轰产物与固体添加物之间会发生动量和热量的交换<sup>[21]</sup>。动量的交换主要与固相产物的冲击阻抗相关, 因此, 铝粉和 LiF 粉末之间的差异较小。而热量的交换主要与添加物的导热系数及颗粒粒径相关, 铝的导热系数为  $210\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 远大于 LiF 的导热系数  $11.3\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 因此, 在反应区附近, LiF 粉末吸收的热量更少, 对应的产物动能更大, 相应的产物界面粒子速度也更高。含铝炸药和含 LiF 炸药界面粒子速度差最大出现在  $170\ \text{ns}$ , 此时, 含 LiF 炸药的界面粒子速度为  $1\ 544\ \text{m/s}$ , 比含铝炸药的界面粒子速度  $1\ 455\ \text{m/s}$  高 7%。

随后, 含铝炸药与含 LiF 炸药的界面粒子速度差越来越小, 在  $0.6\ \mu\text{s}$  时含  $2\ \mu\text{m}$  铝炸药的界面粒子速度开始超过含 LiF 炸药的, 在  $0.8\ \mu\text{s}$  时含  $10\ \mu\text{m}$  铝炸药的界面粒子速度开始超过含 LiF 炸药的。这表明, 该时间段内, 铝粉已经发生了反应。在  $0.4\ \mu\text{s}$  时含  $2\ \mu\text{m}$  铝炸药的界面粒子速度开始超过含  $10\ \mu\text{m}$  铝炸药的, 两者速度差最大出现在  $0.72\ \mu\text{s}$  时, 此时含  $2\ \mu\text{m}$  铝炸药的界面粒子速度为  $1\ 308\ \text{m/s}$ , 比含  $10\ \mu\text{m}$  铝炸药的界面粒子速度 ( $1\ 257\ \text{m/s}$ ) 高 4%。这表明, 铝粉粒径越小, 炸药反应延滞时间越短。综合以上, 两种粒度含铝炸药反应延滞时间为  $0.4\sim 0.8\ \mu\text{s}$ 。在  $1.3\ \mu\text{s}$  时含  $2$  和  $10\ \mu\text{m}$  铝炸药的界面粒子速度分别为  $1\ 110$  和  $1\ 082\ \text{m/s}$ , 比含 LiF 炸药的界面粒子速度  $1\ 004\ \text{m/s}$  分别提高了 11% 和 8%, 这时反应已经比较显著。

### 2.3 铝粉反应度

在铝粉反应的初始阶段, 含铝炸药与含 LiF 炸药的主要成分相似, 因此以含 LiF 炸药的等熵形式状态方程作为参考线, 构建含铝炸药的状态方程<sup>[22]</sup>:

$$p(e, v) = p_{s, \text{RF15}}(v) + \frac{\Gamma(v)}{v} (e - e_{s, \text{RF15}}(v)) = p_{s, \text{RF15}}(v) + \frac{\Gamma(v)}{v} Q\lambda \quad (2)$$

式中:  $Q$  为铝粉与气相爆轰产物反应释放的总能量,  $\lambda$  为铝粉的反应度,  $\Gamma(v)$  为爆轰产物 Grüneisen 系数,  $v$  为爆轰产物相对比容。

为了分析铝粉的反应情况, 需要联系界面粒子速度与炸药的状态方程。在反应区, 铝粉反应产生的压力变化为弱扰动波, 该条件下, 以含 LiF 炸药为参考, 铝粉反应产生的压力变化与界面粒子速度有关系:

$$\Delta p = p(e, v) - p_{s, \text{RF15}}(v) = \rho c \Delta u \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为炸药产物的密度,  $c$  为产物的声速,  $\Delta u$  为因铝粉反应导致的界面粒子速度变化。

联立式 (2)~(3), 可得:

$$\lambda = \frac{c \Delta u}{\Gamma(v) Q} \quad (4)$$

产物的压力同时受比容(决定冷压)和内能(决定热压)的影响, 为便于分析内能对产物压力的影响, 并分析铝粉的反应放能情况, 本文中选择的比容相同的时刻, 以排除产物比容对产物压力的影响。为此,

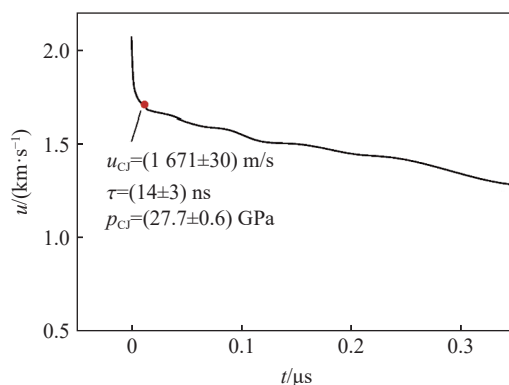


图 6 RDX 炸药爆轰界面粒子速度曲线<sup>[20]</sup>

Fig. 6 Detonation interface particle velocity curve of RDX explosive<sup>[20]</sup>



对炸药的界面粒子速度进行积分, 如图 7 所示。选取界面粒子速度位移相同的时刻(比容相同): 炸药 RA15 (10  $\mu\text{m}$ ) 与 RF15 比容相同的时刻为 1.1  $\mu\text{s}$ , 对应的界面粒子速度差为 81 m/s; 炸药 RA15 (2  $\mu\text{m}$ ) 与 RF15 比容相同的时刻为 1.3  $\mu\text{s}$ , 对应的界面粒子速度差为 74 m/s。为了获得上述时刻产物的密度、比容, 针对本文的实验模型进行了数值模拟, 其中炸药 RF15 的状态方程数据通过圆筒实验<sup>[9]</sup>拟合获得, 数值模拟的炸药界面粒子速度如图 8 所示。初期, 数值模拟的界面粒子速度与实验结果有一定差异, 这是因数值模型中没有考虑炸药的反应过程而仅采用了产物的状态方程; 在 150 ns 后, 数值模拟结果与实验结果一致性较好。通过数值模拟, 获得在 1.1 和 1.3  $\mu\text{s}$  时产物的相对比容  $v$  分别为 0.86 和 0.89。

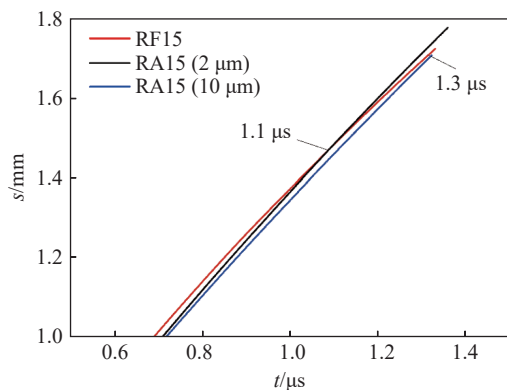


图 7 三种炸药的界面位移曲线

Fig. 7 Interface displacement curves of three explosives

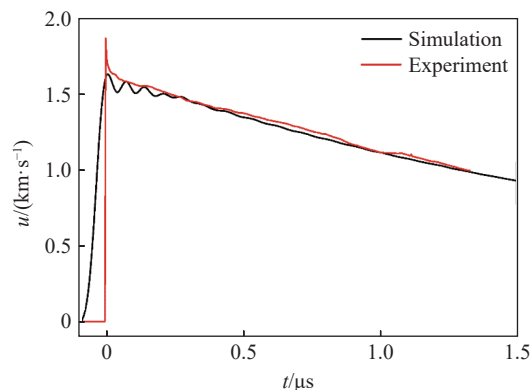


图 8 实验和模拟的炸药 RF15 界面粒子速度曲线

Fig. 8 Experimental and simulated interface particle velocity curves of explosive RF15

爆轰产物的声速为:

$$c = \sqrt{\frac{\partial p}{\partial \rho}} = \left( \frac{\rho_0}{\rho^2} (AR_1 \exp(-R_1 V) + AR_2 \exp(-R_2 V) + C(1 + \omega)V^{-(2+\omega)}) \right)^{1/2} \quad (5)$$

在 1.1 和 1.3  $\mu\text{s}$  时,  $c$  分别为 5 444 和 5 277 m/s,  $Q$  为 1.8 ~ 3.0 MJ/kg, 则炸药 RA15 (2  $\mu\text{m}$ ) 在 1.1  $\mu\text{s}$  时的反应度为 18.4%~30.6%, 炸药 RA15 (10  $\mu\text{m}$ ) 在 1.3  $\mu\text{s}$  时的反应度为 16.3%~27.1%, 两者的差距较小。由低压下铝粉燃烧实验, 铝粉的燃烧时间  $t$  与铝粉的初始粒度  $d$  之间满足  $t=d^n$  关系,  $n$  通常为 1~2。取  $n$  为 1, 由该公式, 2 和 10  $\mu\text{m}$  铝粉炸药的反应度应有显著差异。而本文的结果与之不同, 这说明爆轰产物环境下铝粉的反应机制与低压下铝粉的燃烧过程有较大差异。Li 等<sup>[23]</sup> 利用圆筒实验研究了铝粉粒度对铝粉反应速率的影响, 结果表明, 因爆轰产物中铝颗粒的破碎, 铝粉颗粒大小对反应速率影响较小。本文的结果与圆筒实验结果<sup>[23]</sup> 基本一致。

### 3 结 论

(1) 含铝炸药爆轰波结构与理想炸药有较大差异, 其界面粒子速度曲线没有明显的拐点, 反应初期因气相产物与添加物之间温度、速度的非平衡性, RDX/Al 炸药的界面粒子速度低于 RDX/LiF 炸药的, 随后因铝粉反应放能, 使 RDX/Al 炸药的界面粒子速度高于 RDX/LiF 炸药的。

(2) 微米铝粉在 CJ 面前不发生反应, 2、10  $\mu\text{m}$  铝粉 RDX/Al 炸药的爆轰波结构没有明显差异, 二者的反应延滞时间小于 0.8  $\mu\text{s}$ 。

(3) 爆轰产物环境下铝粉的反应机制与低压下有较大差异, 反应速率受铝粉粒度的影响不明显, 在本文中, 两种粒度铝粉炸药的反应度为 16%~31%。结果可提升对含铝炸药中铝粉反应过程的认识, 为爆轰产物环境下铝粉的反应动力学建模提供参考。

## 参考文献:

- [1] TRZCIŃSKI W A, CUDZIŁO S, SZYMAŃCZYK L. Studies of detonation characteristics of aluminum enriched RDX compositions [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2007, 32(5): 392–400. DOI: 10.1002/prop.200700201.
- [2] GOGULYA M F, DOLGOBORODOV A Y, BRAZHNIKOV M A, et al. Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurements) [C] // Proceeding of the 11th International Detonation Symposium. Snowmass: Office of Naval Research, 1998: 979–988.
- [3] 裴红波, 聂建新, 覃剑峰. 基于非平衡多相模型的含铝炸药爆速研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2013, 33(3): 311–314. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)03-0311-04.  
PEI H B, NIE J X, QIN J F. Investigation on detonation velocity of aluminized explosives based on disequilibrium multiphase model [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(3): 311–314. DOI: 10.11883/1001-1455(2013)03-0311-04.
- [4] CAMPBELL T J, ARAL G, OGATA S, et al. Oxidation of aluminum nanoclusters [J]. *Physical Review B*, 2005, 71(20): 205413. DOI: 10.1103/PhysRevB.71.205413.
- [5] BECKSTEAD M W. Correlating aluminum burning times [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2005, 41(5): 533–546. DOI: 10.1007/s10573-005-0067-2.
- [6] YE S, WU J H, XUE M A, et al. Spectral investigations of the combustion of pseudo-nanoaluminized micro-cyclic- $[\text{CH}_2\text{N}(\text{NO}_2)]_3$  in a shock wave [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(23): 235501. DOI: 10.1088/0022-3727/41/23/235501.
- [7] CARNEY J R, MILLER J S, GUMP J C, et al. Time-resolved optical measurements of the post-detonation combustion of aluminized explosives [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77(6): 063103. DOI: 10.1063/1.2200766.
- [8] LEWIS W K, RUMCHIK C G, BROUGHTON P B, et al. Time-resolved spectroscopic studies of aluminized explosives: chemical dynamics and apparent temperatures [J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 111(1): 014903. DOI: 10.1063/1.3673602.
- [9] 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. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2019.04.015.  
PEI H B, ZHONG B, LI X H, et al. Study on the cylinder tests and equation of state in RDX based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2019, 42(4): 403–409. DOI: 10.14077/j.issn.1007-7812.2019.04.015.
- [10] 沈飞, 王辉, 袁建飞, 等. 铝含量对 RDX 基含铝炸药驱动能力的影响 [J]. *火炸药学报*, 2013, 36(3): 50–53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.012.  
SHEN F, WANG F, YUAN J F, et al. Influence of Al content on the driving ability of RDX-based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2013, 36(3): 50–53. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7812.2013.03.012.
- [11] 陈朗, 张寿齐, 赵玉华. 不同铝粉尺寸含铝炸药加速金属能力的研究 [J]. *爆炸与冲击*, 1999, 19(3): 250–255.  
CHEN L, ZHANG S Q, ZHAO Y H. Study of the metal acceleration capacities of aluminized explosives with spherical aluminum particles of different diameter [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1999, 19(3): 250–255.
- [12] 黄辉, 黄亨建, 黄勇, 等. 以 RDX 为基的含铝炸药中铝粉粒度和氧化剂形态对加速金属能力的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2006, 26(1): 7–11. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)01-0007-05.  
HUANG H, HUANG H J, HUANG Y, et al. The influence of aluminum particle size and oxidizer morphology in RDX-based aluminized explosives on their ability to accelerate metals [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2006, 26(1): 7–11. DOI: 10.11883/1001-1455(2006)01-0007-05.
- [13] 胡宏伟, 严家佳, 陈朗, 等. 铝粉含量和粒度对 CL-20 含铝炸药水中爆炸反应特性的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(1): 157–161. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0157-05.  
HU H W, YAN J J, CHEN L, et al. Effect of aluminum powder content and its particle size on reaction characteristics for underwater explosion of CL-20-based explosives containing aluminum [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(1): 157–161. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0157-05.
- [14] 赵继波, 李金河, 谭多望, 等. 铝氧比对水中爆炸近场冲击波的影响 [J]. *含能材料*, 2009, 17(4): 420–423. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.011.

- ZHAO J B, LI J H, TAN D W, et al. Effects of ratios of aluminum to oxygen on shock wave of cylindrical charge at underwater explosive close-field [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2009, 17(4): 420–423. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.011.
- [15] 曾亮, 焦清介, 任慧, 等. 含铝炸药二次反应起始时间实验研究 [J]. *火工品*, 2011(2): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2011.02.006.
- ZENG L, JIAO Q J, REN H, et al. Experimental study on the secondary reaction time of aluminized explosive [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2011(2): 19–23. DOI: 10.3969/j.issn.1003-1480.2011.02.006.
- [16] TAO W C. Understanding composite explosive energetics: IV. reactive flow modeling of aluminum reaction kinetics in PETN and TNT using normalized product equation of state [C] // The Tenth Symposium (International) on Detonation. 1993.
- [17] MANNER V W, PEMBERTON S J, GUNDERSON J A, et al. The role of aluminum in the detonation and post-detonation expansion of selected cast HMX-based explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2012, 37(2): 198–206. DOI: 10.1002/prop.201100138.
- [18] CHAN S K. Reaction delay of aluminum in condensed explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(6): 897–903. DOI: 10.1002/prop.201400093.
- [19] 张宝钺, 张庆明, 黄凤雷. 爆轰物理学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001: 151.
- [20] PEI H B, HUANG W B, ZHANG X, et al. Measuring detonation wave profiles in plastic-bonded explosives using PDV [J]. *AIP Advances*, 2019, 9(1): 015306. DOI: 10.1063/1.5057879.
- [21] PEI H B, NIE J X, JIAO Q J. Study on the detonation parameters of aluminized explosives based on a disequilibrium multiphase model [J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2014, 11(4): 491–500.
- [22] 孙承纬. 应用爆轰物理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 304.
- [23] LI X H, PEI H B, ZHANG X, et al. Effect of aluminum particle size on the performance of aluminized explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45(5): 807–813. DOI: 10.1002/prop.201900308.

(责任编辑 丁峰)