

文章编号: 1006-9941(2014)05-0678-06

# 铝薄膜含量对 RDX 基铝薄膜炸药水下爆炸性能影响

林谋金, 马宏昊, 沈兆武, 余勇

(中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

**摘要:** 将传统含铝炸药中的铝粉用铝薄膜代替, 得到铝薄膜炸药。用水下爆炸对比实验得到了铝薄膜含量为 10%~40% 的混合炸药与黑索今(RDX)在不同位置的应力-时程曲线。经过分析与计算得到了不同铝薄膜含量混合炸药的应力峰值、冲量、比冲击波能、比气泡能。结果表明: 铝薄膜含量为 10% 时, 铝薄膜炸药冲击波冲量相对于 RDX 提高了 9%~9.5%, 铝薄膜炸药比冲击波能相对于 RDX 提高了 9%~12%。铝含量对铝薄膜炸药水下爆炸性能的影响不同于传统含铝炸药, 主要由铝薄膜炸药的药柱结构与铝薄膜反应程度引起。

**关键词:** 爆炸力学; 铝薄膜炸药; 铝薄膜含量; 冲量; 比冲击波能; 比气泡能

**中图分类号:** TJ55; O381

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.019

## 1 引言

含铝炸药是一种典型的非理想炸药, 炸药的组分、铝粉形状和尺寸、约束条件、炸药尺寸、铝含量等对含铝炸药爆轰性能影响显著, 国内外已在这些方面进行了大量研究, 但对含铝炸药爆轰反应机理的解释还没有一个统一的理论。Vadhe<sup>[1]</sup>阐述了含铝炸药发展现状与未来的趋势, Tao 等<sup>[2]</sup>通过 Fabry-Perot 激光干涉仪分析了铝粉尺寸对炸药热释放影响, Gogulya 等<sup>[3]</sup>讨论了铝含量与铝粉尺寸的改变对 HMX/Al 含铝炸药的应力与压力-时程曲线影响, ZHU<sup>[4]</sup>分析了铝粉尺寸对 RDX 热分解影响, Stromsoe<sup>[5]</sup>认为含铝炸药的气泡能高于相应的非含铝炸药; 黄辉等<sup>[6]</sup>认为铝粉的颗粒尺寸对含铝炸药的爆轰性能有显著影响, 在以 RDX 为主体的炸药中, 加入 20% 粒径为 50 nm 的超细铝粉, 其爆轰性能和做功能力明显高于含 20% 粒径为 5, 50  $\mu\text{m}$  铝粉的混合炸药。上述研究成果主要集中在铝粉上, 传统含铝粉炸药在提高炸药的爆热与爆轰威力的同时也提高了含铝炸药的机械感度<sup>[7]</sup>。另

外, 铝粉的细度粒径要求在微米或纳米量级, 加工工艺较为复杂, 而且粉尘对环境的污染严重, 还存在粉尘爆炸的危险, 同时铝粉活性随着储存时间增加而降低。针对传统含铝粉炸药的缺陷, 廖学燕<sup>[8]</sup>通过空中爆炸实验, 研究了铝纤维对炸药的爆轰能量输出影响, 结果表明铝纤维能提高炸药的爆热, 增强炸药力学性能。

为提高含铝混合炸药力学性能及药柱成型性, 本研究用铝薄膜包裹黑索今(RDX), 得到铝薄膜炸药, 然后将不同铝薄膜含量(10%~40%)的混合炸药与基体炸药 RDX 进行水下爆炸实验, 得到它们在不同位置的应力时程曲线, 分析计算得到不同铝薄膜含量的混合炸药在不同位置的冲击波应力峰值、冲量、比冲击波能、比气泡能, 研究了铝薄膜含量对铝薄膜炸药水下爆炸能量输出的影响, 为含铝炸药的发展提供参考。

## 2 药柱制备与实验设备

根据实验需要设计了 5 种配比的炸药配方, 见表 1。根据表 1 取 10 g 药量在模具中压制成长径比相近的圆柱形药柱, 具体方法及过程参考专利<sup>[9]</sup>, 其中铝薄膜厚度为 8~10  $\mu\text{m}$ , 药柱直径为 20.02 mm。

Barnes 等<sup>[10]</sup>认为小型爆炸水池能测量炸药爆轰冲击波能、气泡能, 为评价炸药的爆轰能量提供了一条新的技术途径。张立等<sup>[11]</sup>为了消除边界效应, 在水池内壁设置一种气泡帷幕, 从而使所测炸药总能量更接近炸药爆热。池家春<sup>[12]</sup>认为对难以从爆热弹试验中得到准确爆热数据的炸药(钝感炸药、含铝炸药), 可通过

收稿日期: 2013-08-26; 修回日期: 2013-11-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51134012); 国家自然科学基金面上项目(51174183)

作者简介: 林谋金(1985-), 男, 博士研究生, 主要从事含能材料及爆炸力学相关领域研究。e-mail:

通信联系人: 马宏昊(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事爆破器材与工业安全及爆炸力学相关领域研究。e-mail: hhma@ustc.edu.cn

水下爆炸实验评估炸药能量。故本研究选择在水下爆炸塔中进行水下爆炸实验,塔直径  $D$  为 5 m,水深  $H$  为 5 m,测试装置包括泰克示波器 (TEKDSO8064A)、恒流源 (482A22)、水下压力传感 (PCB, ICP W138A25),为了满足冲击波和气泡脉动的测试要求将药柱和传感器置于水面下 2 m 处。为了全面对比研究不同铝薄膜含量的混合炸药与 RDX 水下能量输出的差异,在离药柱的距离 ( $R$ ) 为 0.7, 0.9, 1.2, 1.5 m 处安放传感器,可测得 4 个不同位置处的压力时程曲线。一次实验在两个不同的位置安装传感器,同等条件下重复测试 3 次,如图 1 所示。

表 1 混合炸药的不同配方设计

Table 1 Different formulation design of composite explosives

No.	content / %			density / $g \cdot cm^{-3}$
	RDX	wax	Al film	
1	95	5	0	1.56 ~ 1.57
2	85.5	4.5	10	1.65 ~ 1.67
3	76	4	20	1.71 ~ 1.72
4	66.5	3.5	30	1.79 ~ 1.80
5	57	3	40	1.85 ~ 1.87

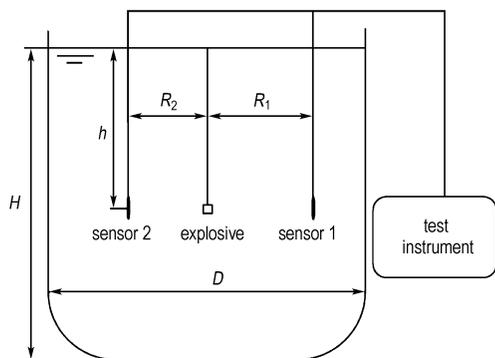


图 1 水下爆炸实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of underwater explosion experimental system

### 3 实验结果及分析

将不同铝薄膜含量的铝薄膜炸药与 RDX 进行水下爆炸对比实验,得到不同位置 ( $R/R_0$ ) 的压力时程曲线,其中,铝薄膜含量为 20% 的铝薄膜炸药在  $R = 0.7$  m 处时的一组压力时程曲线如图 2 所示。

分析不同铝薄膜含量混合炸药在不同位置的压力时程曲线,得到压力峰值如图 3 所示。为了对不同位置的峰值进行曲线拟合,将药柱离传感器的距离  $R$  无量纲化为  $R/R_0$ ,其中,  $R_0$  为药柱半径 (m)。

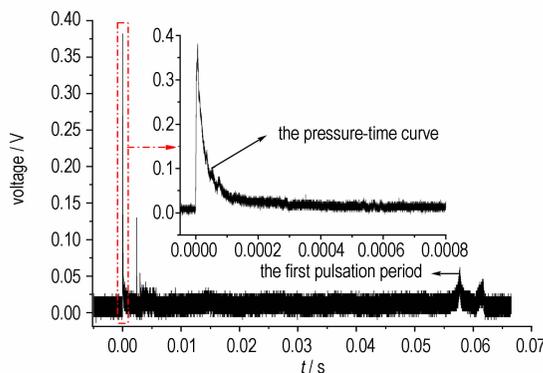


图 2 压力-时程曲线

Fig. 2 Pressure-time curves at distance of 0.7 m from the charge

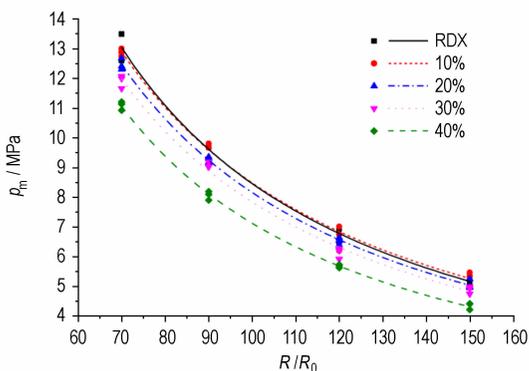


图 3 不同铝薄膜含量的混合炸药  $p_m-R/R_0$  曲线

Fig. 3 Peak pressure  $p_m-R/R_0$  curves of composite explosives with different aluminum film content

由图 3 可得: 铝薄膜含量为 10% 的铝薄膜炸药压力峰值在不同位置都与 RDX 相当,其它含量的铝薄膜炸药压力峰值在不同位置都小于 RDX,且压力峰值随着铝薄膜含量增加而减小。

炸药在水中爆炸时冲击波压力峰值可用(1)式描述<sup>[13]</sup>:

$$p_m = A \left( \frac{R}{R_0} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中,  $p_m$  为冲击波压力峰值, MPa;  $R_0$  为药柱半径, m;  $R$  为药柱离传感器的距离, m;  $A, \alpha$  为待拟合的系数。实验数据的拟合曲线如图 3,其拟合系数见表 2。

表 2 不同铝薄膜含量的混合炸药压力峰值拟合系数

Table 2 Fitted coefficient of peak pressure of composite explosives with different aluminum film content obtained from Equation(1)

No.	1	2	3	4	5
$A/MPa$	2255.10	1884.95	1935.16	1857.18	2088.89
$\alpha$	-1.212	-1.173	-1.187	-1.187	-1.233

Note:  $A$  and  $\alpha$  is fitted coefficient.

## 4 炸药水下爆炸参数计算

### 4.1 冲击波冲量

炸药在水下爆炸冲击波冲量可用(2)式计算<sup>[14]</sup>:

$$i = \int_0^{6.7\theta} \Delta p(t) dt \quad (2)$$

式中,  $i$  为冲击波冲量,  $\text{MPa} \cdot \text{s}$ ;  $\Delta p(t)$  为冲击波压力随时间变化曲线;  $\theta$  为衰减时间常数, 指时程压力从峰值  $p_m$  衰减到  $p_m/e$  所需的时间,  $\text{s}$ 。由(2)式计算得到不同铝薄膜含量的铝薄膜炸药与 RDX 在水中不同位置的冲击波冲量如图 4 所示。

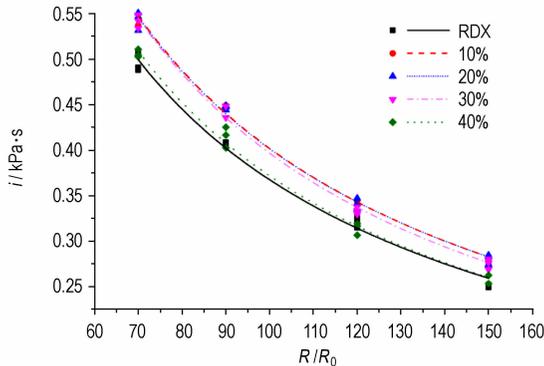


图 4 不同铝薄膜含量的混合炸药的  $i-R/R_0$  曲线

Fig. 4 Impulse- $R/R_0$  curves of composite explosives with different aluminum film content

由图 4 可得: 实验数据重复性较好, 不同铝薄膜含量的混合炸药与 RDX 的冲击波冲量都随着距离  $R$  增大而减小。相对于 RDX, 铝薄膜含量分别为 10%、20%、30% 的铝薄膜炸药冲击波冲量得到提高, 但含量为 40% 的铝薄膜炸药冲击波冲量与 RDX 相当。铝薄膜含量为 10% 时, 铝薄膜炸药的冲击波冲量相对于 RDX 提高了 9% ~ 9.5%。

炸药在水中爆炸时的冲击波冲量可用(3)式描述:

$$i = e \left( \frac{R}{R_0} \right)^g \quad (3)$$

式中,  $i$  为冲击波冲量,  $\text{MPa} \cdot \text{s}$ ;  $R_0$  为药柱半径,  $\text{m}$ ;  $R$  为药柱离传感器的距离,  $\text{m}$ ;  $e$ 、 $g$  为待拟合的系数。实验数据的拟合曲线如图 4 所示, 其拟合系数见表 3。

表 3 方程(3)拟合系数

Table 3 Fitted coefficient of impulse of composite explosives with different aluminum film content obtained from Equation(3)

No.	1	2	3	4	5
$e/\text{MPa} \cdot \text{s}$	0.01933	0.0219	0.02158	0.02418	0.02157
$g$	-0.86044	-0.86811	-0.86511	-0.89244	-0.88174

Note:  $e$ ,  $g$  is fitted coefficient.

### 4.2 比冲击波能

水下爆炸比冲击波能可用(4)式计算<sup>[14]</sup>:

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w C_w} \int_0^{6.7\theta} \Delta p^2(t) dt \quad (4)$$

式中,  $E_s$  为比冲击波能,  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $R$  为药柱离传感器的距离,  $\text{m}$ ;  $W$  为装药量,  $\text{kg}$ ;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $C_w$  为水的声速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\theta$  为衰减时间常数,  $\text{ms}$ ;  $\Delta p(t)$  为冲击波压力随时间变化的曲线。根据式(4)对不同铝薄膜含量的混合炸药在不同位置的的压力时程曲线进行计算, 得到比冲击波能如图 5 所示。

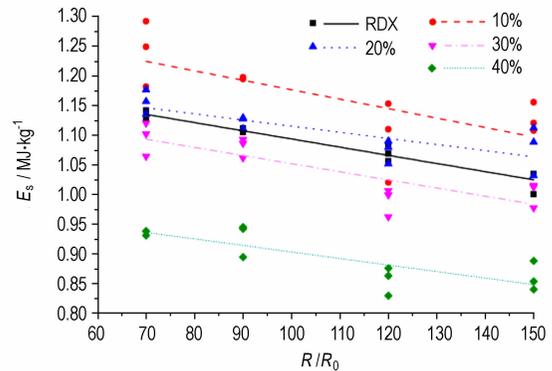


图 5 不同铝薄膜含量的混合炸药  $E_s-R/R_0$  曲线

Fig. 5 Specific shock wave energy  $E_s-R/R_0$  curves of composite explosives with different aluminum film content

由图 5 可得: 铝薄膜炸药与 RDX 的比冲击波能都随着距离增大而减小。相对于 RDX, 铝薄膜含量分别为 10% 与 20% 的铝薄膜炸药比冲击波能都得到提高, 且含量为 10% 的铝薄膜炸药比冲击波能提高量大于含量为 20% 的铝薄膜炸药, 该结论不同于传统含铝炸药 (铝含量为 20% 时比冲击波能最大), 与铝薄膜炸药药柱的装药结构有关。铝薄膜炸药中铝薄膜含量为 10% 时, 铝薄膜炸药比冲击波能相对于 RDX 提高了 9% ~ 12%。铝薄膜含量分别为 30% 与 40% 的铝薄膜炸药比冲击波能小于 RDX, 其中铝薄膜含量为 40% 的铝薄膜炸药比冲击波能降低幅度要大于含量为 30% 的铝薄膜炸药, 可能与铝薄膜反应不充分有关。

### 4.3 比气泡能

水下爆炸比气泡能计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$E_b = (\sqrt{1+4CT_b} - 1)^3 / 8C^3 k_1^3 W \quad (5)$$

$$k_1 = 1.135\rho_w^{1/2} / P_h^{5/6} \quad (6)$$

$$T_b = aW^{1/3} + bW^{2/3} \quad (7)$$

$$C = \frac{b}{a^2} \quad (8)$$

式中,  $E_b$  为比气泡能,  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $T_b$  是气泡第一次脉

动周期, s;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $W$  为装药量, kg;  $P_b$  是测点处流体总静水压, Pa;  $a, b$  为使用水池和一定静水压力试验条件下的固有常数, 可根据  $(T_b, W^{1/3})$  数据进行最小二乘法近似拟合计算,  $C$  是边界效应校正系数。为了确定本实验的  $C$  值, 取不同质量的 RDX (6 ~ 10 g) 在同等条件下进行实验, 并将实验结果根据式 (7) 进行拟合, 如图 6 所示。

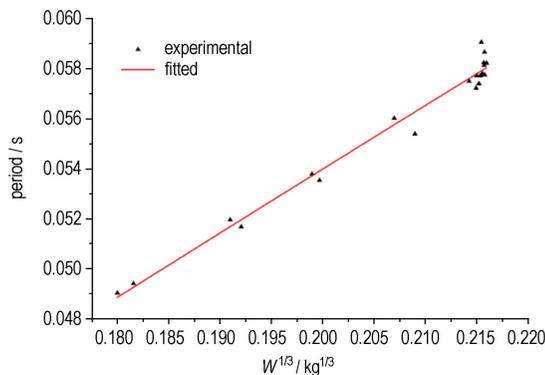


图 6  $T_b - W^{1/3}$  拟合曲线

Fig. 6 Fitting curve of  $T_b - W^{1/3}$

拟合曲线近似为直线是由于试验药柱的质量区间较小引起的, 拟合结果为:  $a=0.28489, b=-0.07463$ , 故由式 (8) 可得:  $C=-0.9195 \text{ s}^{-1}$ 。实验中得到不同铝薄膜含量的混合炸药与 RDX 在不同位置的比气泡能, 如图 7 所示。

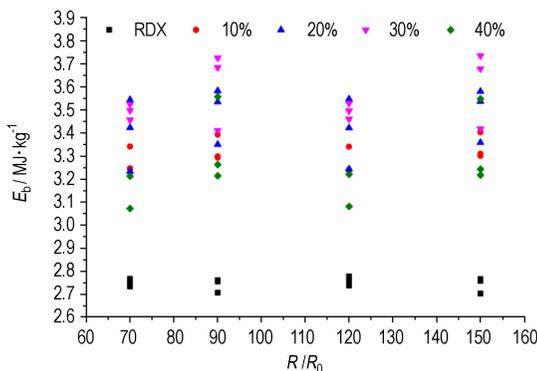


图 7 不同铝薄膜含量的混合炸药  $E_b - R/R_0$  曲线

Fig. 7 Specific bubble energy  $E_b - R/R_0$  curves of composite explosives with different aluminum film content

由图 7 可得: 不同铝薄膜含量混合炸药与 RDX 的比气泡能不随着距离的变化而变化。当铝薄膜含量小于 30% 时, 铝薄膜的加入能提高混合炸药的比气泡能。含量为 40% 的铝薄膜炸药比气泡能低于含量为 10% 的铝薄膜炸药比气泡能, 这与传统含铝炸药中比气泡能随着铝含量的增加而增加的结论不同。另外,

实验数据重复性相对较差, 说明铝薄膜参与反应的程度不稳定。

#### 4.4 比爆炸能

炸药比爆炸能计算公式为<sup>[14]</sup>:

$$E = K_f (\mu E_s + E_b) \quad (9)$$

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-1} p_{CJ} - 6.5775 \times 10^{-3} p_{CJ}^2 + 1.2594 \times 10^{-4} p_{CJ}^3 \quad (10)$$

$$p_{CJ} = \frac{1}{4} \rho_0 D^2 \quad (11)$$

式中,  $E$  为比爆炸能,  $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;  $\mu$  为冲击波损失系数;  $K_f$  为炸药的形状参数, 对于球形取 1.00, 对于非球形取 1.02 ~ 1.10, 本文采用的药柱为长径比相近的圆柱形药柱, 且测点离药柱距离较远, 故形状参数  $K_f$  取为 1;  $\rho_0$  为药柱的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $D$  为炸药的爆速,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $p_{CJ}$  为 C-J 压力, Pa; 式 (11) 中  $p_{CJ}$  单位为 GPa, 式 (11) 适用于单质炸药的  $p_{CJ}$  的计算。传统的含铝炸药的  $p_{CJ}$  可用 (12) 式计算<sup>[7]</sup>:

$$p_{CJ} = \frac{1}{4} \beta \rho_{e,w} D^2 \quad (12)$$

由于铝薄膜炸药药柱结构为 RDX 与铝薄膜在轴向上独立贯通, 这种结构有利于降低混合炸药中添加物对基体炸药爆轰波传播的影响, 故假定其  $p_{CJ}$  的计算公式为:

$$p_{CJ} = \frac{1}{4} \rho_{e,w} D^2 \quad (13)$$

式中,  $\beta$  为装药密度与最大理论密度的比值, 即  $\beta = \rho_0 / \rho_T$ ,  $\rho_T$  为药柱的最大理论密度,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\rho_{e,w}$  为除去金属铝后的炸药与石蜡的基体密度  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。爆速实验采用的爆速仪为 2BS-110, 时基为  $0.1 \mu\text{s}$ , 探针的间距为药柱的高度, 实验药柱如图 8 所示。实验得到不同铝薄膜含量的铝薄膜炸药爆速见表 4。

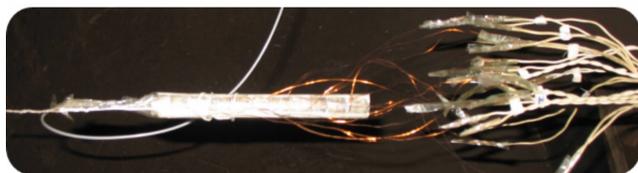


图 8 不同铝薄膜含量的混合炸药爆速实验

Fig. 8 Experiment of detonation velocity for composite explosives with different aluminum film content

由表 4 可得: 铝薄膜炸药的爆速随着铝薄膜含量增加而减小, 与铝薄膜二次反应放出的能量未能支持爆轰波阵面的传播有关。

表4 不同铝薄膜含量的铝薄膜炸药爆速

Table 4 Detonation velocities of composite explosives with different aluminum film content

No.	1	2	3	4	5
$D/m \cdot s^{-1}$	7986	7857.3	7803	7706.72	7504.55

理论上铝薄膜炸药爆热应等于相应配比的铝粉炸

药爆热,因此假定文献[7]中不同含量的铝粉炸药爆热为相应含量的铝薄膜炸药爆热。综合上述计算,将不同铝薄膜含量铝薄膜炸药水下爆炸能量输出的相关参数列于表5,如比冲击波能 $E_s$ 、比气泡能 $E_b$ 、比爆炸能 $E$ 、冲击波损失系数 $\mu$ 与气泡第一次脉动周期 $T_b$ 等,其中 $\mu E_s$ 为初始比冲击波能, $E_b/E$ 为比气泡能与比爆炸能的比值, $E/Q_v$ 为比爆炸能与爆热的比值。

表5 不同铝薄膜含量混合炸药水下爆炸能量输出的相关参数

Table 5 Energy output parameters of composite explosives with different aluminum fiber content at underwater explosion

No.	$R/R_0$	$T_b$ /ms	$E_s$ /MJ·kg <sup>-1</sup>	$\mu$	$\mu E_s$ /MJ·kg <sup>-1</sup>	$E_b$ /MJ·kg <sup>-1</sup>	$E$ /MJ·kg <sup>-1</sup>	$(E_b/E)$ /%	$Q_v^{[7]}$ /MJ·kg <sup>-1</sup>	$(E/Q_v)$ /%
1	70	59.39	1.142	2.181	2.491	2.753	5.244	52.50%	5.378	97.50
	90	59.41	1.106	2.181	2.412	2.756	5.168	53.33%	5.378	96.10
	120	59.39	1.082	2.181	2.360	2.753	5.113	53.84%	5.378	95.07
	150	59.41	1.001	2.181	2.183	2.756	4.939	55.80%	5.378	91.84
2	70	63.12	1.249	2.177	2.719	3.341	6.060	55.13	-	-
	90	62.86	1.195	2.177	2.601	3.291	5.893	55.85	-	-
	120	63.1	1.153	2.177	2.510	3.338	5.848	57.08	-	-
	150	62.89	1.121	2.177	2.440	3.297	5.737	57.46	-	-
3	70	64.321	1.157	2.164	2.504	3.544	6.048	58.60%	6.443	93.87
	90	63.66	1.128	2.164	2.441	3.424	5.865	58.38%	6.443	91.03
	120	64.32	1.09	2.164	2.359	3.544	5.902	60.04%	6.443	91.62
	150	63.65	1.079	2.164	2.335	3.424	5.759	59.46%	6.443	89.38
4	70	64.17	1.102	2.142	2.360	3.524	5.884	59.89%	7.046	83.52
	90	65.16	1.087	2.142	2.328	3.684	6.012	61.27%	7.046	85.33
	120	64.17	1.007	2.142	2.157	3.524	5.681	62.03%	7.046	80.63
	150	65.16	0.978	2.142	2.095	3.684	5.779	63.75%	7.046	82.02
5	70	62.70	0.946	2.104	1.990	3.263	5.253	62.11%	-	-
	90	64.31	0.939	2.104	1.976	3.548	5.524	64.23%	-	-
	120	62.70	0.876	2.104	1.843	3.263	5.106	63.90%	-	-
	150	64.31	0.854	2.104	1.797	3.548	5.345	66.38%	-	-

Note: The data are average values of experimental results.  $R_0$  is the charge radius (m),  $R$  is the distance between explosives and sensor (m),  $E_s$  is the specific shock energy,  $\mu$  is the shock loss factor,  $\mu E_s$  is the initial shock wave energy,  $E_b$  is the specific bubble energy,  $E$  is the specific explosion energy,  $Q_v$  is the heat of explosion of aluminum powder explosive.

从表5可得:铝薄膜含量为10%的铝薄膜炸药相对于RDX显著提高了第一次脉动周期和比气泡能。含量分别为20%、30%、40%铝薄膜炸药的第一次气泡脉动周期和比气泡能与含量为10%铝薄膜炸药相当,说明铝薄膜炸药的比气泡能不随着铝薄膜含量增加而显著增加。铝薄膜含量分别为10%、20%、30%的铝薄膜炸药比爆炸能( $E$ )相当,而含量为40%的铝薄膜炸药比爆炸能相对于其它含量的铝薄膜炸药(10%、20%、30%)有所降低。上述结论不同于传统含铝炸药,可能与铝薄膜反应不充分有关。另外,含量为30%铝薄膜炸药的比爆炸能与爆热比值( $E/Q_v$ )低于85%,也说明混合炸药中铝薄膜未充分反应。

## 5 结论

(1) 铝薄膜含量为10%铝薄膜炸药的比冲击波能在不同位置最大,其相对于RDX提高了9%~12%。铝薄膜含量为10%的铝薄膜炸药冲击波冲量与含量为20%的铝薄膜炸药相当,其相对于RDX提高了9%~9.5%。铝薄膜含量为10%的铝薄膜炸药相对于RDX显著提高了比气泡能,但含量分别为20%、30%、40%的铝薄膜炸药比气泡能与含量为10%的相近,说明铝薄膜炸药的比气泡能不随含量增加而显著增大。综上所述,铝薄膜炸药水下爆炸性能与传统含铝炸药有所不同,可能与铝薄膜反应不充分有关。

(2) 铝薄膜含量为 30% 的铝薄膜炸药的  $E/Q_v$  小于 85%, 也说明混合炸药中铝薄膜未充分反应, RDX 与铝薄膜可能混合不均匀, 故需进一步研究铝薄膜炸药的成型工艺, 为含铝炸药的发展提供一条参考途径。

#### 参考文献:

- [1] Vadhe P P, Pawar R B, Sinha R K, et al. Cast aluminized explosives (Review) [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2008, 44: 461–477.
- [2] Tao W C, Tarver C M, Kury J W, et al. Understanding composite explosive energetic: IV. Reaction flow modeling of Al reaction kinetics in PETN and TNT using normalized product equation of state [C] // Proc 10th Int. Detonation Symp Boston 1993: 628–636.
- [3] Gogulya M F, Dolgoborodov A Yu, Brazhnikov M A, et al. Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurement) [C] // Proc. 11th Int. Detonation Symp. Snowmass, Colorado. 1998: 979–988.
- [4] ZHU Y L, HUANG H, REN H, et al. Influence of aluminum particle size on thermal decomposition of RDX [J]. *Journal of Energetic Materials*, 2011, 31: 178–191.
- [5] Stromose E, Eriksen S W. Performance of high explosives in underwater application. part2: aluminized explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1990, 15: 52–53.
- [6] 黄辉, 黄勇, 李尚斌. 含纳米级铝粉的复合炸药研究 [J]. *火炸药学报*, 2002 (2): 1–3.  
HUANG -HUI, HUANG-Yong, LI Shang-bin. Research on composite explosive with Nano-aluminum [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002 (2): 1–3.
- [7] 孙业斌, 惠君明, 曹欣茂. 军用混合炸药 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1995: 388–403.  
SUN Ye-bin, HUI Jun-ming, CAO Xin-mao. Mixture explosives for military purposes [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995: 388–403.
- [8] 廖学燕, 沈兆武, 姚保学. 含铝薄膜复合炸药的能输出和力学性能 [J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(4): 424–428.  
LIAO Xue-yan, SHEN Zhao-wu, YAO Bao-xue. Energy output and mechanical strength of aluminum fiber reinforced composite explosives [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(4): 424–428.
- [9] 沈兆武, 廖学燕, 樊自建. 高能薄膜复合型火炸药及其制备方法: CN, 101544525A [P]. 2009–09–30.  
SHEN Zhao-wu, LIAO Xue-yan, FAN Zi-jian. Thin film high explosive and its preparation method: CN, 101544525A [P]. 2009–09–30.
- [10] Barnes R A, Hetherington J G, Smith P D. The design and instrumentation of a simple system for demonstrating underwater explosive effects [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1988, 13: 13–16.
- [11] 张立, 汪大立. 水下爆炸炸药能测量消除边界效应的研究 [J]. *爆破器材*, 1995, 24(2): 1–6.  
ZHANG Li, Wang Da-li. A study on elimination of the boundary effect in underwater explosion testing of explosive [J]. *Explosive Materials*, 1995, 24(2): 1–6.
- [12] 池家春, 马冰. TNT/RDX(40/60)炸药球水中爆炸波研究 [J]. *高压物理学报*, 1999, 13(3): 199–204.  
CHI Jia-chun, MA Bing. Underwater explosion wave by a spherical charge of composition B-3 [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, 13(3): 199–204.
- [13] 奥尔连科. 爆炸物理学 [M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011: 608–609.  
Л. И. ОПИЕВКО. Explosion physics [M]. SUN Cheng-wei. Beijing: Science Press, 2011: 608–609.
- [14] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosives expansion works in underwater detonations [C] // Proceedings of 6th Symposium (international) on Detonation. San Diego, 1976: 540–550.

## Effect of Aluminum Film Content on Underwater Explosion Performance of RDX-based Aluminum Film Explosive

LIN Mou-jin, MA Hong-hao, SHEN Zhao-wu, YU Yong

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

**Abstract:** Aluminum film explosive was obtained by replacing aluminum powder in traditional aluminized explosives with aluminum film. The pressure-time curves at different position for composite explosives with aluminum film content of 10%–40%, and RDX were obtained by underwater explosion contrast experiments. The peak pressure, impulse, specific shock wave energy and specific bubble energy were obtained via analysis and calculation of the curves. When aluminum film content is 10%, the impulse of aluminum film explosive relative to RDX increases by 9%–9.5% and the specific shock wave energy relative to RDX increases by 9%–12%. The effect of aluminum film content on underwater explosion performances of aluminum film explosive is different from that of traditional aluminized explosive, which is caused by the grain structure of aluminum film explosive and the reaction extent of aluminum film.

**Key words:** explosion mechanics; aluminum film explosive; aluminum film content; impulse; specific shock energy; specific bubble energy

CLC number: TJ55; O381

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.05.019