

# RDX 基含铝炸药水中爆炸近场冲击波特性

胡宏伟, 王建灵, 徐洪涛, 郭 炜, 任松涛

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘 要:**通过水中爆炸试验,得到了RDX基含铝炸药在不同比例距离( $\bar{R}$ )处的水中冲击波峰值压力、冲量和冲击波能。结果表明,在测试范围内, $\bar{R} < 1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ , Al的质量分数为10%~20%时,冲击波峰值压力基本不变; $\bar{R} \geq 1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,Al的质量分数为0~30%时,冲击波峰值压力基本不变。测试范围内,Al的质量分数为20%~30%时,冲量基本不变;Al的质量分数小于20%,冲量随Al含量的增加不断增大。 $\bar{R} < 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,冲击波能随比例距离的增加而不断衰减; $\bar{R} \geq 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,冲击波能随比例距离的增加基本保持不变。 $\bar{R} = 0.79 \text{ m/kg}^{1/3}$ (药柱18倍半径处)时,冲击波能量利用率只有25%左右,初始冲击波能损失了近1/2~3/5。

**关键词:**爆炸力学;水中爆炸;近场冲击波;含铝炸药;柱形装药

**中图分类号:** TJ55;O383

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-7812(2009)02-0001-05

## Underwater Shock Wave Characteristics of RDX-based Aluminized Explosives in Near-field Range

HU Hong-wei, WANG Jian-ling, XU Hong-tao, GUO Wei, REN Song-tao

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 71065, China)

**Abstract:** Shock wave peak pressure, impulse and shock wave energy of RDX-based aluminized explosives were obtained at different scaled distance by underwater explosion test. The result indicated that shock wave peak pressure was not influenced with Al contents of 10%–20% in the scaled distance range smaller than  $1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ . Shock wave peak pressure was nearly constant by Al contents up to 30% in the scaled distance range larger than  $1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ . Impulse was not influenced with Al contents of 20%–30% in the measured scaled distance range. Shock wave energy decreased with the increase of scaled distance in the scaled distance range smaller than  $1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ . Shock wave energy was nearly constant in the scaled distance range larger than  $1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ . The utilization ratio of shock wave energy was only about 25% in the scaled distance  $0.79 \text{ m/kg}^{1/3}$  (18 times radii of charge), initial shock wave energy lost nearly 1/2–3/5.

**Key words:** explosion mechanics; underwater explosion; near-field shock wave; aluminized explosives; cylindrical explosives

## 引 言

由于现代舰船的主动防御能力越来越强,在空中打击变得越来越困难的情况下,采用隐蔽性较好的水中兵器(如水雷)攻击舰船最重要也是最薄弱的水下部分日显重要。高效毁伤水中、水面舰艇目标,近场冲击波是水中兵器毁伤效应的重要作用方式,因此,对爆炸近场冲击波特性的研究尤为重要。

由于球形炸药(中心起爆)产生的冲击波各向均

匀性较好,早期的研究都是把球形炸药作为一种理想试验样品,各种理论模型也是在此基础建立起来的,如Swisdak给出相似方程<sup>[1]</sup>。然而,对于多数水中兵器,常常采用不规则的装药,也非中心起爆,其爆炸场的几何特点非常复杂,而柱形炸药是这些不规则装药形状中最简单的一种。Rice和Ginell<sup>[2]</sup>的研究表明,在距爆心较近的范围,圆柱形炸药冲击前沿的最大峰值压力基本上是按无限长的圆柱形分布的,当爆心到传感器的水平距离为圆柱形炸药长度的一半( $R \approx L/2$ )时,冲击波前沿形状由圆柱形演变

收稿日期:2008-11-26; 修回日期:2009-02-27

基金项目:国家基础研究项目

作者简介:胡宏伟(1982—),男,硕士研究生,主要从事含能材料爆炸性能测试与评估工作。

为球形。Sternberg<sup>[3]</sup>研究了不同长径比的Pentolite柱形炸药水中爆炸压力情况,结果表明,在近距离范围内,随着长径比的变化和偏离轴线角度的不同,冲击波峰值压力差异很大;长径比接近于1:1的炸药,在相同比例距离处,其冲击波峰值压力与球形装药的峰值压力基本一致,而柱形轴线两端压力差别较大。因此,研究Al圆柱形RDX基含铝装药的近场冲击波特性对含铝炸药配方的优化设计和水中兵器的设计都具有重要的指导意义。

## 1 试验

### 1.1 水中冲击波参数和能量计算公式

#### (1) 水中爆炸冲击波的相似律

$$\text{冲击波参数} = K(W^{1/3}/R)^\alpha = K(\bar{R})^\alpha \quad (1)$$

式中:  $W$  为装药的质量, kg;  $R$  为测点距爆心的距离, m;  $K$  和  $\alpha$  为与炸药相关的常数;  $\bar{R}$  为比例距离,  $\bar{R} = R/W^{1/3}$ , m/kg<sup>1/3</sup>; 冲击波参数为峰值压力  $p_m$ 、比冲量  $I/W^{1/3}$  和比能流密度  $E/W^{1/3}$ 、比时间常数  $\theta/W^{1/3}$ 。

#### (2) 比冲击波能

$$e_s = 4\pi R^2 / (\rho_w C_w) \int_0^t p(t)^2 dt \quad (2)$$

式中:  $e_s$  为比冲击波能, MJ/kg;  $R$  为测点距装药中心的距离, m;  $p(t)$  为测点处的冲击波压力, Pa;  $\rho_w$  为水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $C_w$  为水中声速, m/s;  $t$  为测点处的冲击波持续时间, s。

#### (3) 初始冲击波能

$$e_j = Q_v - e_b \quad (3)$$

式中:  $e_j$  为炸药-水界面的冲击波能, MJ/kg;  $e_b$  为比气泡能, MJ/kg;  $Q_v$  为炸药的爆热, MJ/kg。当冲击波从炸药传入水中时,两个界面由于阻抗失配,冲击波能会损失一部分,所以,这里只是一种近似计算。

#### (4) 冲击波能量利用率

冲击波能量利用率为测点处的冲击波能占总化学能的比例,即:

$$\eta = e_s / Q_v \quad (4)$$

式中:  $\eta$  为冲击波能利用率。

### 1.2 试验样品

圆柱形压装RDX基含铝炸药,配方组成见表1。药柱的长径比为(1.0~1.2):1.0,一端带雷管孔。Al粉为球形,直径为4.5~5.5 μm,黏结剂的组分(质量分数)为1.5%F<sub>2603</sub>、3%蜡和0.5%石墨。试样质量均为25g,采用8号铜电雷管端面起爆。

表1 RDX基含Al炸药的配方和爆热

Table 1 Formulation and detonation heat of RDX-based aluminized explosives

样品 序号	w/%			$\rho/$ (g·cm <sup>-3</sup> )	$Q_v/$ (MJ·kg <sup>-1</sup> )
	RDX	Al	黏结剂		
1	95	0	5	1.663	5.637
2	85	10	5	1.727	6.167
3	75	20	5	1.792	6.956
4	65	30	5	1.846	7.441

### 1.3 试验范围

目前,国内外对水中爆炸近场和远场并没有一个明确的定义。从毁伤的角度来看,水中兵器的破坏半径大都在 $\bar{R} \leq 2.0$  m/kg<sup>1/3</sup>的范围内,而且随着现代导航技术的发展,各种水中兵器的制导精度越来越高,使水中兵器对目标的高精度打击成为可能。另外,随着人们对气泡撞击(Whipping)和水射流(Jetting)两种新的毁伤手段的认识和深入研究,使水中兵器的作用方式、作用机理和毁伤模式不断多样化。因此,把气泡第一次脉动膨胀到最大时的气泡半径作为远场和近场的分界点。但是,不同种类炸药水中爆炸所产生的气泡半径是不同的,结合上面对近场的定义,将本研究范围固定在 $0.8$  m/kg<sup>1/3</sup>  $\leq \bar{R} \leq 2.0$  m/kg<sup>1/3</sup>。

### 1.4 试验条件和装置

试验水池Φ3.2 m×2.6 m,水深2.4 m,池底和池壁均由8mm钢板焊接而成,入水深度1.6 m,为总水深的2/3(满足冲击波和气泡的测试要求,可以消除边界效应的影响<sup>[4]</sup>),主要测量炸药柱中心处的径向冲击波,试验布局见图1(图中水面上的数字为比例距离,2.73和3.08两个点是为了对比近场和中远场而布放)。

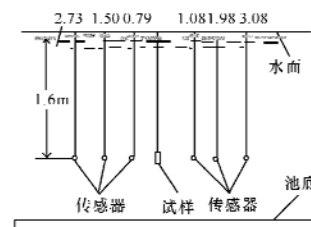


图1 试验布局示意图

Fig. 1 Schematic drawing of the experimental layout

测试系统包括美国PCB公司的138型ICP压电式电气石水下激波传感器和482A型信号适配器,国产微测公司的高低频数据记录仪。冲击波信号的采样频率为20 MHz,气泡脉动信号的采样频率为100 kHz。

## 2 结果与分析

### 2.1 峰值压力

峰值压力  $p_m$  是炸药水中爆炸最直观的一个参数,也是计算其他参数的基础。表2为RDX基含铝炸药在不同比例距离处的峰值压力,图2为峰值压力与比例距离的关系,图3为不同比例距离处的峰值压力与Al含量的关系。

表2 RDX基含铝炸药在不同比例距离处的冲击波峰值压力  
Table 2 Shock wave peak pressure of RDX based aluminized explosives at different scale distance

$\bar{R}/(m \cdot kg^{-1/3})$	$p_m/MPa$			
	样品1	样品2	样品3	样品4
0.79	68.70	71.07	71.09	67.82
1.08	45.38	47.38	47.24	46.68
1.50	29.90	29.49	28.64	29.54
1.98	21.83	22.06	22.35	22.46
2.73	17.24	17.62	17.60	16.04
3.08	15.39	16.18	16.15	14.96

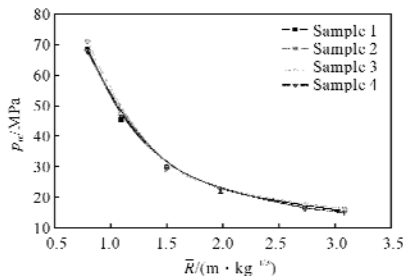


图2 峰值压力与比例距离的关系

Fig. 2 The relation of shock wave peak pressure and scaled distance

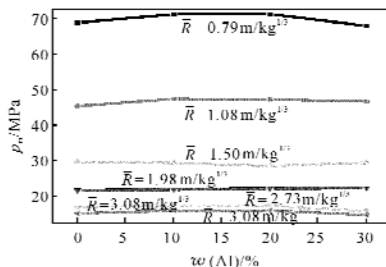


图3 不同比例距离处峰值压力与Al含量的关系

Fig. 3 The relation of shock wave peak pressure and Al content at different scaled distance

从图2可以看出,RDX基含铝炸药水中爆炸的冲击波峰值压力随比例距离的变化趋势基本一致,

但近场的( $\bar{R} \leq 2.0 m/kg^{-1/3}$ )峰值压力衰减很快,在比例距离  $0.79 \sim 1.98 m/kg^{-1/3}$ 时,峰值压力衰减了66.2%~69.0%。远场的峰值压力衰减较慢,在比例距离  $1.98 \sim 3.08 m/kg^{-1/3}$ 时,峰值压力衰减了6.7%~10.7%。从图3可以看出,当  $\bar{R} < 1.5 m/kg^{-1/3}$ ,Al的质量分数为10%~20%时,峰值压力基本不变;当Al的质量分数为0和30%时,峰值压力有所降低;当  $\bar{R} \geq 1.5 m/kg^{-1/3}$ ,Al的质量分数为0~30%时峰值压力基本不变。

出现上述现象,是由于当Al的质量分数小于10%时,主炸药的含量较高,炸药的能量释放速率较快,大部分Al在C-J面内就已反应完毕,支持了爆速和爆压,使炸药-水界面有较高的输出压,所以冲击波压力在水介质中的衰减也快。随着Al粉含量的增加,主炸药的含量逐渐降低,由于Al粉的惰性稀释作用,炸药的非理想性更加突出,爆轰反应区不断加宽,使炸药的爆压也逐渐降低<sup>[5]</sup>,进而降低了炸药-水界面的输出压,减弱了冲击波压力在水介质中的衰减速度。此外,由于大部分Al在C-J面后才进行反应,减缓了炸药的能量释放速率,Al的后燃烧效应使前沿冲击波不断得到补偿。当Al的质量分数大于30%时,冲击波的峰值压力较低,这是由于当Al含量超过某一极限时(不同炸药,此值不同),Al与爆炸产物的反应时间加长,二者反应释放的能量已不能赶上冲击波波头,从而降低了冲击波的峰值压力。

### 2.2 冲量

冲量是冲击波压力对时间的积分,是表征炸药水中爆炸性能的另一个重要参数。表3为RDX基含铝炸药在不同比例距离处的冲量,图4为冲量与比例距离关系,图5为不同比例距离处冲量与Al含量关系。

表3 RDX基含铝炸药在不同比例距离处的冲量  
Table 3 Impulse of RDX-based aluminized explosives at different scaled distance

$\bar{R}/(m \cdot kg^{-1/3})$	$I/(kPa \cdot s)$			
	样品1	样品2	样品3	样品4
0.79	2.50	2.93	3.12	3.10
1.08	1.77	1.91	2.09	2.13
1.50	1.34	1.45	1.54	1.54
1.98	0.98	1.07	1.17	1.25
2.73	0.74	0.81	0.89	0.89
3.08	0.69	0.76	0.83	0.78

从图4和图5中可看出,在测试范围内,当Al的质量分数为20%~30%时,冲量基本不变;当Al的质量分数为10%时,冲量有一定的降低;当Al的质

量分数为0时,冲量最低,近场与远场也基本一致。

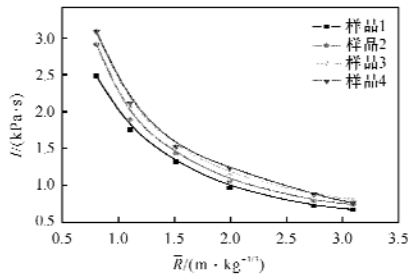


图4 冲量与比例距离的关系

Fig.4 The relation of impulse and scaled distance

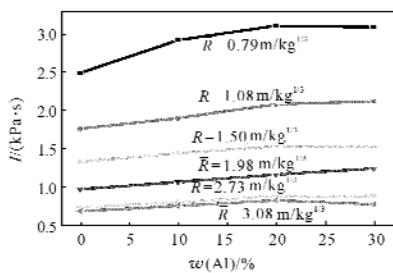


图5 不同比例距离处冲量与Al含量的关系

Fig.5 The relation of impulse and Al content at different scaled distance

冲量仅与峰值压力和时间常数有关,前文已分析过峰值压力随比例距离的变化。随着Al粉含量的增加,由于Al粉的后燃烧效应,炸药的爆轰反应时间也在逐渐增大。Al的质量分数为0~20%时,随着峰值压力的增加和爆轰反应时间的加长,冲量逐渐加大;Al的质量分数为20%~30%时,虽然压力有所降低,但爆轰反应时间还在增长,此冲量基本恒定是峰值压力和反应时间耦合作用的结果;Al的质量分数小于10%时,冲量稍低是因为其Al含量较少,后燃烧效应对时间常数的贡献不大所致。

### 2.3 比冲击波能

水中爆炸冲击波能是通过测量水中冲击波压力-时间曲线而计算得到的,比冲击波为一定距离处单位质量炸药所具有的冲击波能。RDX基含铝炸药在不同比例距离处的比冲击波能见表4。

由表4可以看出,当 $\bar{R} < 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,RDX基含Al炸药的比冲击波能变化较大, $\bar{R}$ 为0.79~1.08  $\text{m/kg}^{1/3}$ 时,RDX基含铝炸药的比冲击波能衰减了10.7%~20%;当 $\bar{R} \geq 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,RDX基含铝炸药的比冲击波能基本不变。Al的质量分数为20%时冲击波能达到最大值,与文献[1,6,9]的研究结果一致。

表4 RDX基含铝炸药在不同比例距离处的比冲击波能  
Table 4 Scale shock wave energy of RDX-based aluminized explosives at different scaled distance

$\bar{R}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$e_v/(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1})$			
	样品1	样品2	样品3	样品4
0.79	1.31	1.54	1.63	1.52
1.08	1.17	1.26	1.35	1.31
1.50	1.15	1.25	1.35	1.23
1.98	1.03	1.11	1.27	1.29
2.73	1.11	1.21	1.28	1.19
3.08	1.13	1.24	1.34	1.27

### 2.4 相似常数

根据表2和表3的试验结果,拟合出了RDX基含铝炸药的相似常数,见表5。

表5 RDX基含铝炸药的冲击波参数相似常数

Table 5 Shock wave parameters similar constant of RDX-based aluminized explosives

样品序号	$K_p$	$\alpha_p$	$K_I$	$\alpha_I$
1	51.2	1.19	6.73	0.98
2	52.7	1.21	7.63	1.05
3	52.7	1.21	8.19	1.03
4	51.1	1.19	8.22	1.02

注: $k_p$ 和 $\alpha_p$ 分别表示 $p_m$ 的相似常数和相似指数; $k_I$ 和 $\alpha_I$ 分别表示 $I/W^{1/3}$ 的相似常数和相似指数。

相似常数 $K$ 和 $\alpha$ 由炸药本身的性质决定,相似系数 $K$ 体现了冲击波传播过程中各性能参数幅度的大小,相似指数 $\alpha$ 表明了冲击波在传播过程中参数变化的快慢程度。表5中拟合出的相似常数和相似指数所表达的规律与前文对峰值压力和冲量的分析是一致的。

### 2.5 能量利用率

RDX基含铝炸药的能量利用率见表6。

由前文分析可知,当 $\bar{R} \geq 1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,不同Al含量的冲击波能几乎不变,本研究只选用 $\bar{R} = 0.79 \text{ m/kg}^{1/3}$ 和 $\bar{R} = 2.43 \text{ m/kg}^{1/3}$ 两个点来进行对比。

从表6中可以看出,在 $\bar{R} = 2.73 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处,不同Al含量的比冲击波能占总化学能(爆热)的比例为16.0%~19.7%;在 $\bar{R} = 0.79 \text{ m/kg}^{1/3}$ 处,不同Al含量的比冲击波能占总化学能的比例为20.4%~24.6%,说明在测试范围内,虽然冲击波能仍有一定的衰减,但衰减幅度不大。然而,从炸药-水界面到测点处冲击波能却逸散较多,即使在18倍药柱半径处( $\bar{R} = 0.79 \text{ m/kg}^{1/3}$ ),冲击波能的利用率也仅有25%左右,初始冲击波能传到测点处已损失了近1/2~3/5。

表6 RDX基含铝炸药水中爆炸的冲击波能量利用率  
Table 6 The utilization ratio of shock wave energy  
of RDX-based aluminized explosives

$\bar{R}/(\text{m} \cdot \text{kg}^{-1/3})$	$\eta/\%$			
	样品1	样品2	样品3	样品4
0.79	23.2	24.6	23.4	20.4
1.08	20.7	20.1	19.4	17.6
1.50	20.3	20.0	19.3	16.0
1.98	18.2	17.8	18.2	17.3
2.73	19.7	19.3	18.5	16.0
3.08	20.0	19.8	19.3	16.9

众所周知,气泡能与传感器的布放位置无关,在相当大的范围内(铝氧比达到1.0时)<sup>[6]</sup>,随着Al含量的增加而增加。所以在近场,如果冲击波、气泡撞击和水射流等毁伤方式联合作用,将大大提高水中兵器对目标的毁伤效果。

### 3 结 论

(1)  $\bar{R} < 1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ , Al的质量分数为10%~20%时,冲击波峰值压力基本不变; $\bar{R} \geq 1.5 \text{ m/kg}^{1/3}$ , Al的质量分数为0~30%时,冲击波峰值压力基本不变。

(2) 在测试范围内,Al的质量分数为20%~30%时,冲量达到最大值;Al的质量分数小于20%时,冲量随Al质量分数的增加不断增大。

(3) 在 $\bar{R} \geq 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,RDX基含铝炸药的比冲击波能随比例距离的增加基本不变;当 $\bar{R} < 1.0 \text{ m/kg}^{1/3}$ 时,不同Al含量的RDX基含铝炸药的比冲击波能随比例距离增加而不断衰减; $\bar{R} = 0.79 \text{ m/kg}^{1/3}$ (炸药半径18倍距离处)时,冲击波能的利用率也仅有25%左右,炸药-水界面的初始冲击波能损失了近1/2~3/5。

### 参考文献:

- [1] Swinsdak M M. Explosion effects and properties (Part I): Explosion effects in water, AD-A056694 [R]. Springfield: NTIS, 1978.
- [2] Hammond L. Underwater shock wave characteristics of cylindrical charges, DSTO-GD-0029 [R]. Melbourne: AMRL, 1995.
- [3] Sternberg H M. Underwater detonation of pentolite cylinders [J]. Phys, Fluids, 1986, 30(3): 761-769.
- [4] 俞统昌, 王建灵, 王晓峰. 炸药水下爆炸能量测试方法研究 [C] // 国防军工技术交流会论文集. 北京: 国防军工技术交流会组委会, 2001: 1043-1049.
- [5] 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: 419-422.
- [6] 王晓峰. NEPE水下炸药配方设计原则研究 [D]. 西安: 西安近代化学研究所, 2007.  
WANG Xiao-feng. The formulation design principle of NEPE explosives for underwater application [D]. Xi'an: Xi'an Modern Chemistry Research Institute, 2007.
- [7] Keicher T, Kretsch A H A. Influence of Aluminium/ammonium perchlorate on the performance of underwater explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1999, 24: 140-143.
- [8] Stromsoe E, Feiksen S W. Performance of high explosives in underwater applications. Part 2: aluminized explosives [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1990, 15: 2-53.
- [9] 周霖, 徐更光. 含铝炸药水中爆炸能量输出结构 [J]. 火炸药学报, 2003, 26(1): 30-36.  
ZHOU Lin, XU Geng-guang. Configuration of underwater energy output for aluminized Explosive Mixtures [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2003, 26(1): 30-36.

## 本刊重要通知

根据保密管理制度要求,作者在网上投稿前务必由所在单位对稿件进行保密审查,合格后方可投稿,同时将保密审查证明原件邮寄给编辑部。编辑部在收到原件后将进入审稿程序。若作者投稿后15日内,编辑部未收到保密审查证明原件,将对稿件作退稿处理,敬请广大作者谅解,并感谢您的密切配合。

本刊编辑部