

文章编号: 1001-1455(2009)02-0172-05

# 炸药水中爆炸的冲击波性能\*

李金河, 赵继波, 谭多望, 王彦平, 张远平

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理国防科技重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 采用 PCB138 压力传感器测量了 TNT、RS211、HLZY-1 和 HLZY-3 等几种炸药水中爆炸冲击波远场的压力时间历程, 计算得到了这几种炸药水中爆炸冲击波性能参数及其相似常数。研究表明, 含铝炸药水中爆炸冲击波远场的传播服从指数变化的相似律, 其冲击波性能比标准炸药 TNT 优越。含铝炸药 HLZY-1 具有较好的水中爆炸冲击波性能。

**关键词:** 爆炸力学; 冲击波性能; 水中爆炸; 炸药; 相似律; 含铝炸药

**中图分类号:** O382.1

**国标学科代码:** 130 · 3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

炸药水中爆炸是水中兵器设计技术、破坏效应研究的基础问题。水中爆炸大体可分为 3 个阶段: 炸药的爆轰、冲击波的产生和传播、气泡的形成和脉动。不同炸药在水中爆炸后, 冲击波能和气泡能所占比例是不同的, 冲击波和气泡都对目标的破坏作用具有重要意义。研究炸药水中爆炸冲击波性能对水中兵器战斗部装药的选择具有重要的参考价值。P. 库尔<sup>[1]</sup>系统归纳了二战以来的相关研究成果, 对冲击波的产生、传播规律的理论和实验研究方法进行了综合性论述, 对炸药水中爆炸的研究产生了深远的影响。L. Hammond<sup>[2]</sup>对柱形炸药的研究表明, 在近距离范围内, 炸药的形状对水中爆炸冲击波性能有很大影响, 在大于一半炸药长度后, 柱形炸药产生的冲击波可以用等质量的球形炸药近似, 这与 H. M. Sternberg 等<sup>[3]</sup>的数值计算结果一致。G. Bjarnholt<sup>[4]</sup>提出了水中爆炸压力测试和数据评估方法。俞统昌等<sup>[5]</sup>研究了炸药水中爆炸冲击波性能与炸药爆速、爆压的关系, 说明水中兵器除接触爆炸外, 炸药的爆速和爆压不宜太高。

目前, 普遍采用含铝炸药作为水中兵器战斗部的装药, 这是因为炸药中铝粉在后期的放热反应能明显提高爆炸威力。相同质量装药的条件下, 在与爆点相同距离的测点处, 含铝炸药的冲击波参数明显优于非含铝炸药的<sup>[6-7]</sup>。G. Bocksteiner 等<sup>[8]</sup>研究了 25 kg PBXW-115 的水中爆炸性能, 结果表明 PBXW-115 具有比其他炸药更好的冲击波性能。

本文中拟利用 PCB138 压力传感器测量 kg 级球形 TNT 炸药、复合炸药 RS211、新型含铝炸药 HLZY-1 和 HLZY-3 水中爆炸冲击波传播过程中的远场压力-时间历程, 分析炸药水中爆炸的冲击波性能参数。

## 2 水中爆炸冲击波的主要性能参数与相似律

M. M. Swisdak<sup>[9]</sup>综合了大量水中爆炸实验数据, 将炸药水中爆炸冲击波传播归纳成统一公式

$$P_{ar} = K(m^{1/3}/r)^\alpha \quad (1)$$

式中:  $P_{ar}$  对应水中爆炸的 4 个主要性能参数: 峰值压力  $p_m$ , MPa; 比时间常数  $\theta/m^{1/3}$ , ms/kg<sup>1/3</sup>; 比冲量  $I/m^{1/3}$ , kPa · s/kg<sup>1/3</sup>; 比能流密度  $E/m^{1/3}$ , kPa · m/kg<sup>1/3</sup>。其中  $m$  为炸药装药质量, kg;  $r$  为离爆心的距离, m;  $\theta$  为时间常数, 压力从  $p_m$  衰减到  $p_m/e$  所需的时间, ms;  $K$  和  $\alpha$  为相似常数。

对式(1)取对数, 可得

$$\ln P_{ar} = \ln K + \frac{\alpha}{3} \ln m - \alpha \ln r \quad (2)$$

式(2)表明,  $p_m$ 、 $\theta/m^{1/3}$ 、 $I/m^{1/3}$ 、 $E/m^{1/3}$  的对数是关于  $\ln r$  的斜率为  $-\alpha$  的直线。而  $K$  则可由直线与  $y$  轴(即  $\ln P_{ar}$  代表的数轴)的截距(设为  $b$ )求得, 即

$$K = \exp(b - (\alpha \ln m)/3) \quad (3)$$

\* 收稿日期: 2007-10-31; 修回日期: 2008-04-15

基金项目: 国家重大安全基础研究基金项目(51335010201)

作者简介: 李金河(1979—), 男, 学士, 助理研究员。

### 3 实验布局

实验在 8 kg TNT 当量爆炸水池中进行,采用 12 个 PCB138 压力传感器测试了 TNT、RS211、HLZY-1 和 HLZY-3 等 4 种球形炸药水中爆炸的压力-时间历程,分别对每种炸药进行了 2 发同样条件的实验。其中,TNT 作为标准炸药,用于标定传感器灵敏度并与含铝炸药的冲击波性能进行比较。实验炸药的相关参数见表 1,其中  $m$  为炸药质量, $\rho$  为炸药密度。实验时,将炸药放置于水深 12 m 的爆炸水池的中心。传感器与炸药中心处于同一水平线上,其中最近的传感器离炸药球心 1.5 m,最远的离炸药球心 13 m,实验测试布局示意图见图 1。

表 1 实验炸药及其相关参数

Table 1 Parameters of the experimental explosives

炸药	序号	$m/\text{kg}$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	成份	炸药	序号	$m/\text{kg}$	$\rho/(\text{g}/\text{cm}^3)$	成份
TNT	1	4.900	1.566	TNT	RS211	1	5.254	1.638	RDX/TNT/Al/WAX
	2	4.913				2	5.248		
HLZY-1	1	3.023	1.798	RDX/Al/AP/粘结剂	HLZY-3	1	3.038	1.796	RDX/Al/AP/粘结剂
	2	3.031				2	3.036		

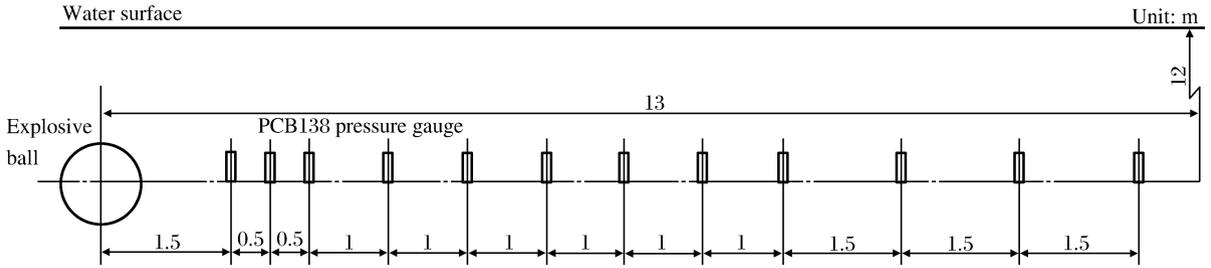


图 1 实验测试布局

Fig. 1 Layout of the experimental test

### 4 实验结果与讨论

#### 4.1 压力测试结果

典型的在不同距离处的压力-时间历程见图 2。由图 2 可知,冲击波在传播过程中,随着距离的增大,峰值压力呈下降趋势,但是下降的幅度逐渐减小,而同一位置处的压力也呈指数规律下降。

#### 4.2 峰值压力及其相似常数

峰值压力  $p_m$  是炸药水中爆炸的重要参数,是计算其他参数的基础。由实验记录的压力-时间历程得到炸药爆炸后距离爆心不同位置处的峰值压力(只取了前 8 个传感器的记录结果)。按照相似律,对炸药的峰值压力和距离分别取对数,得到  $\ln p_m$  与  $\ln r$  的双对数曲线,见图 3。由此可以根据式(2)~(3)得到对应峰值压力  $p_m$  的相似常数  $K_p$  和  $\alpha_p$ ,见表 2。为便于比较,图 4 给出了单位质量的 4 种炸药的峰值压力随距离的变化情况。可以看出,RS211 的峰值压力最大,TNT 的最小,主要是由于 RDX 含量的增加,提高了炸药的峰

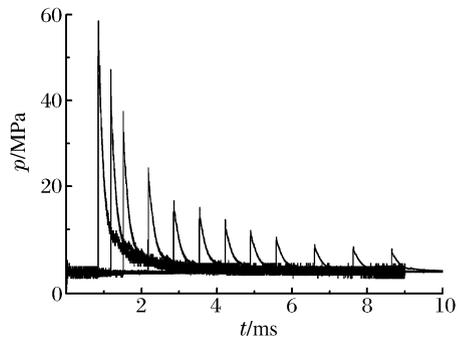


图 2 不同距离处压力-时间曲线

Fig. 2 Pressure-time curves at different positions

力随距离的变化情况。可以看出,RS211 的峰值压力最大,TNT 的最小,主要是由于 RDX 含量的增加,提高了炸药的峰

表 2 炸药的相似常数

Table 2 Similarity constants for different explosives

炸药名称	$K_p$	$\alpha_p$	$K_\theta$	$\alpha_\theta$	$K_I$	$\alpha_I$	$K_E$	$\alpha_E$
TNT	52.5	1.13	0.094	-0.18	4.91	0.95	88.3	2.07
HLZY-1	49.0	1.11	0.132	-0.22	6.46	0.91	109.5	2.02
HLZY-3	56.2	1.17	0.110	-0.22	5.90	0.91	113.7	2.08
RS211	59.6	1.17	0.101	-0.23	5.99	0.93	122.6	2.09

值压力。但是,随着距离的增加,各种炸药峰值压力越来越接近,说明峰值压力越高,其衰减速率越大。HLZY-1 峰值压力衰减最慢,可以预计,在一定距离后,其峰值压力相对较高,这主要是由于 HLZY-1 的铝含量相对较高,铝的反应相对较慢,铝的后期反应使压力衰减变慢。

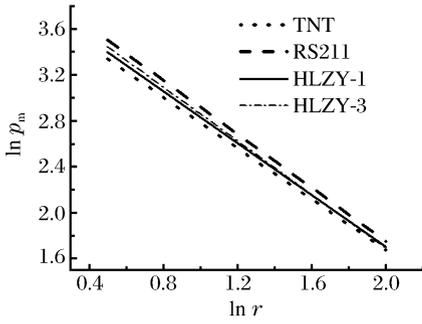


图 3 峰值压力双对数曲线

Fig. 3 Double logarithmic plots of peak pressure versus distance

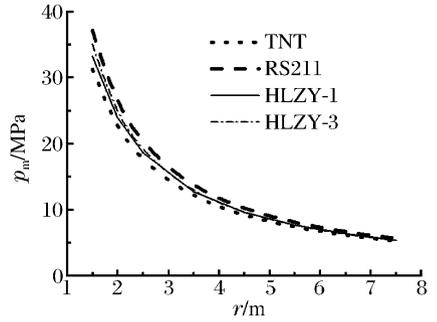


图 4 单位质量炸药峰值压力随距离的变化

Fig. 4 Variations of peak pressure of 1-kg explosives with distance

### 4.3 时间常数及其相似常数

时间常数直接反映了压力随时间衰减的快慢,是表征炸药水中爆炸的重要参数。根据定义和压力-时间曲线,可以得到炸药时间常数随距离的变化曲线。根据相似律,将炸药的比时间常数和距离分别取对数,得到  $\ln(\theta/m^{1/3})$  和  $\ln r$  的双对数曲线,见图 5。由此可以得到关于时间常数的相似常数  $K_\theta$  和  $\alpha_\theta$ ,见表 2。与峰值压力类似,为便于比较,图 6 给出了单位质量炸药时间常数随距离的变化曲线。由图 6 可知,随着距离的增大,时间常数增大,表明压力衰减变慢。对于不同的炸药,在相同距离处,HLZY-1 的时间常数最大,TNT 的最小,说明了铝的反应可以降低炸药水中爆炸冲击波的衰减速率。时间常数与炸药中铝含量及铝的反应情况有关。

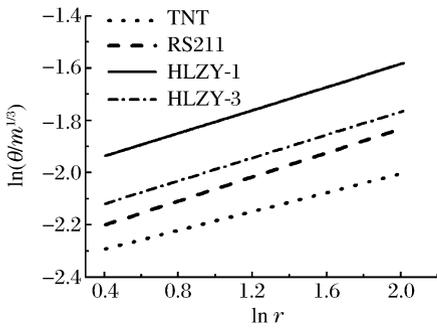


图 5 比时间常数双对数曲线

Fig. 5 Double logarithmic plots of specific time constant versus distance

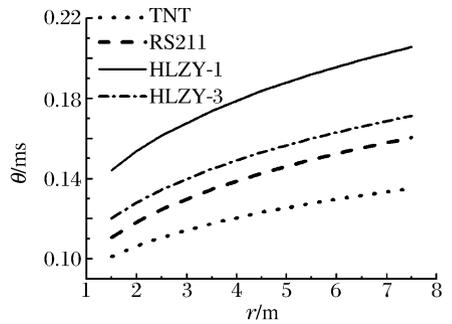


图 6 单位质量炸药时间常数随距离的变化

Fig. 6 Variations of time constant of 1-kg explosives with distance

### 4.4 冲量及其相似常数

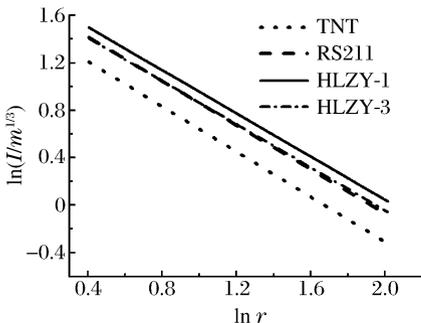


图 7 比冲量双对数曲线

Fig. 7 Double logarithmic plots of specific impulse versus distance

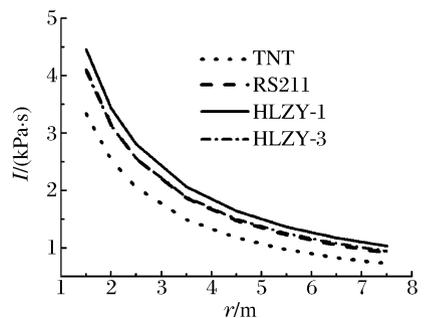


图 8 单位质量炸药冲量随距离的变化

Fig. 8 Variations of impulse of 1-kg explosives with distance

炸药的水中爆炸冲量是冲击波压力对时间的积分,即

$$I(t) = \int_0^t p(t) dt \tag{4}$$

式中:  $p(t)$  为实验记录的压力,  $p(0)$  为传感器放置在水中的初始压力。一般地, 初始压力比冲击波压力小得多, 可以忽略不计。由于随着时间的增长, 压力降低, 压力的积分对冲量的贡献减小; 另外, 在有限水域中进行的实验, 后期冲击波可能受到边界条件的影响, 因此, 分析中, 积分时间一般取  $5\theta^{[1]}$ 。根据相似律, 图 7 给出了炸药比冲量和距离的双对数曲线, 由此可以得到关于冲量的相似常数  $K_I$  和  $\alpha_I$ , 见表 2。图 8 给出了单位质量炸药的冲量随距离的变化曲线。由图 8 可知, HLZY-1 的冲量最高, TNT 的最小, 说明含铝炸药具有更高的冲量。

### 4.5 能流密度及其相似常数

能流密度是另一个衡量冲击波能量输出的重要参数。与冲量类似, 一般将能流密度定义为在 5 倍时间常数时间内对  $p^2(t)$  的积分<sup>[1]</sup>, 即

$$E \propto \int_0^{5\theta} p^2(t) dt \tag{5}$$

考虑水的蠕变流动, 对式(5)进行修正, 可得

$$E = \frac{1}{\rho_0 c_0} (1 - 2.422 \times 10^{-4} p_m - 1.031 \times 10^{-8} p_m^2) \int_0^{5\theta} p^2(t) dt \tag{6}$$

式中:  $\rho_0 c_0$  为水的声学阻抗, MPa/(m/s)。

根据式(6)可得炸药水中爆炸冲击波的能流密度。由相似律, 图 9 给出了炸药比能流密度和距离的双对数曲线, 由此得到关于能流密度的相似常数  $K_E$  和  $\alpha_E$ , 见表 2。单位质量炸药能流密度随距离的变化见图 10。由图 10 可知, 能流密度与冲量的变化较一致, 几种含铝炸药的能流密度较接近, TNT 的能流密度最低。

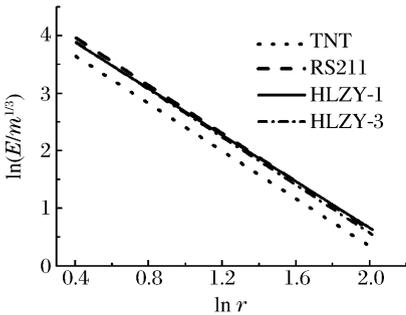


图 9 比能流密度双对数曲线

Fig. 9 Double logarithmic plots of specific energy flow density versus distance

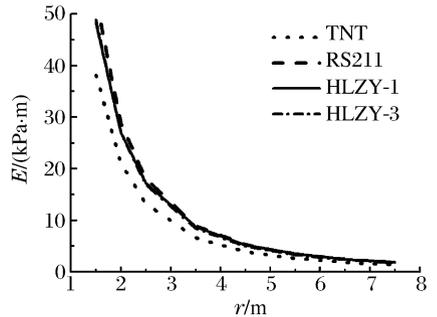


图 10 单位质量炸药能流密度随距离的变化

Fig. 10 Variations of energy flow density of 1-kg explosives with distance

### 4.6 炸药水中爆炸冲击波性能的比较

表 2 为几种炸药水中爆炸对应各参数的相似常数。结合图 3~10 可知, 炸药的相似常数反映了炸药水中爆炸冲击波性能由炸药本身决定, 如炸药的组分、配比及颗粒度等。K 值的大小影响炸药冲击波的幅度, K 值越大, 幅度越高。α 则反映了冲击波在传播过程中变化的快慢程度, α 值越大, 说明冲击波衰减越快。因此, 为水中兵器选取装药时, 应选择具有合适的 K 值, 而 α 值尽量较小的炸药。设计者应选择合适的炸药组分, 应用不同的配比, 设计不同的炸药以满足不同水中兵器的需求。通过对比可知, 实验中的几种含铝炸药的冲击波性能都比 TNT 的优越。HLZY-1 的峰值压力相对较低, 但时间常数大, 压力衰减慢, 其冲量和能流密度都较高, 其冲击波性能在几种炸药中相对较好。

## 5 结 论

通过炸药水中爆炸压力测试实验, 获得了 TNT、HLZY-1、HLZY-3 和 RS211 等炸药水中爆炸冲击波远场的压力-时间历程, 得到了 4 种炸药单位质量的冲击波参数随距离变化的曲线图以及与各参数相对应的相似常数, 比较了 4 种炸药的水中爆炸冲击波性能。

研究表明, 含铝炸药水中爆炸冲击波远场的传播服从指数变化的相似律, 含铝炸药的水中爆炸冲击波时间常数大, 比冲量和比能流密度较高, 其冲击波性能比 TNT 的优越。HLZY-1 的冲量和能流密度都较高, 且衰减较慢, 在几种含铝炸药中冲击波性能相对较好, 说明了铝含量及其反应情况对炸药的冲击波性能有较大影响。

## 参考文献:

- [1] 库尔 P. 水中爆炸[M]. 罗耀杰, 译. 北京: 国防工业出版社, 1965.
- [2] Hammond L. Underwater shock wave characteristics of cylindrical charges[R]. Defence Science and Technology Organisation, AMRL, DSTO-GD-0029.
- [3] Sternberg H M. Underwater detonation of pentolite cylinders[J]. Physics of Fluids, 1987, 30(3):761-769.
- [4] Bjarnholt G. Suggestions on standards for measurement and data evaluation in the underwater explosion test[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1980, 5(2/3):67-74.
- [5] 俞统昌, 王晓峰, 王建灵. 炸药的水中爆炸冲击波性能[J]. 含能材料, 2003, 11(4):182-186.  
YU Tong-chang, WANG Xiao-feng, WANG Jian-ling. Underwater shock wave performance of explosives[J]. Energetic Materials, 2003, 11(4):182-186.
- [6] Guiruis R H, Miller P J. Time-dependent equations of state for aluminized underwater explosives[C]//Proceedings of the 10th International Symposium on Detonation. Boston, Massachusetts, 1993:675-682.
- [7] Goldstein S, Johnson J N. Aquarium tests on aluminized ANFO[C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Detonation. Dahlgren, Virginia, 1980:1016-1023.
- [8] Bocksteiner G. Evaluation of underwater explosive performance of PBXW-115(AUST)[R]. Defence Science Technology Organisation, AMRL, DSTO-TR-0297.
- [9] Swisdak M M. Explosion effects and properties: Part II—Explosion effect in water[R]. Naval Surface Weapons Center Technical Report, NSWC/NOLTR76-116.

## Underwater shock wave performances of explosives

LI Jin-he\*, ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wang, WANG Yan-ping, ZHANG Yuan-ping  
(National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

**Abstract:** Underwater explosion tests were conducted in a water tank withstanding the explosion of a 8-kg-TNT equivalent charge. The far-field pressure-time curves of TNT, RS211, HLZY-1 and HLZY-3 were measured with the PCB138 pressure gauges. The shock wave performance parameters and the respective similarity constants of various explosives were calculated. It is suggested that the underwater shock wave propagation of the aluminized explosives follows an exponential similarity rule, the shock wave performance of the aluminized explosives is better than that of TNT explosive, and the shock wave performance of HLZY-1 is best in the aluminized explosives researched in this paper.

**Key words:** mechanics of explosion; shock wave performance; underwater explosion; explosive; similarity rule; aluminized explosive

\* Corresponding author: LI Jin-he  
Telephone: 86-816-2490559

E-mail address: lijnhe2000@sohu.com