

文章编号: 1006-9941(2009)04-0415-05

双元复合炸药装药水下爆炸能量输出特性

牛余雷, 王晓峰, 余 然

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要:选择 GH-1 和 GUHL-1 两种炸药及内外层和上下叠加两种典型的双元装药结构, 测量了水下爆炸冲击波超压-时间历程, 研究不同双元装药水下爆炸的能量输出结构, 并与单一配方装药进行了对比。实验结果表明: 同样化学组成下, 采用双元炸药装药结构, 能够改变水下爆炸测点处的爆炸载荷, 减少冲击波在传播过程中的能量损失, 提高能量利用率; 其中采用外层高爆速炸药, 内层非理想炸药的同轴内外层双元装药结构, 比单一配方装药的比气泡能提高 22.4%, 而且两部分装药之间产生了能量耦合效应。

关键词:爆炸力学; 水下爆炸; 双元炸药装药; 能量输出; 能量耦合

中图分类号: TJ55; O389

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2009.04.010

1 引言

1987 年, 法国火炸药公司为适应不敏感弹药(IM)政策, 首先提出了双元复合炸药装药的概念^[1]。所谓双元复合炸药装药是指使用两种复合炸药采用内外层、上下叠加等装药结构形式的一种装药方法, 可以根据毁伤目标特性或弹药不敏感性要求采用不同装药结构, 有效地提高弹药的爆炸毁伤性能或降低弹药的易损性。

最初对双元装药的研究多集中在装药的低易损性方面^[2-3], 文献[2]对不同配方搭配制成内外层双元装药, 按照 MIL-STD-2105B 中关于殉爆的要求进行了试验, 筛选出多组能够满足低易损性要求的配方组合。

随着研究的逐渐深入, 国外已经在多种武器的战斗部装药中应用了双元装药结构^[4-6], 文献[4]应用内外层装药结构, 内层采用 PWX Mod 19 (Ploywax/Al/AP/RDX ~ 12/33/30/25), 外层采用 PBXN-110 (HMX/HTPB ~ 88/12), 进行了破片加速能力的实验, 并与单一装填两种炸药的试样进行对比, 结果表明, 采用双元装药结构明显提高了炸药的破片加速能力。Manfred Held^[7]对内外层双元装药的爆轰性能进行了深入研究, 分析了双元装药爆轰特性, 为装药设计提供了理论依据。近年来随着温压武器的发展, 装药结构对武器性能的影响研究受到重视^[8]。但是双元装药在水下爆炸能量输出方面的研究和应用尚未见报道。国内对于双元装药的研究还处在探索阶段, 可供参考的资料很少。

本实验测量了同轴内外层、上下叠加双元复合炸药装药水下爆炸冲击波超压-时间历程, 研究了不同双元炸药装药水下爆炸的能量输出特性。

2 实验部分

2.1 测试原理

水中爆炸冲击波能是通过测量水中冲击波压力-时间曲线得到, 忽略滞后流的影响, 在距离装药中心为 R 的测点处, 比冲击波能 e_s ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的计算公式如下^[9-10]:

$$e_s = E_s / W \quad (1)$$

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

式中, E_s 为测点处冲击波能, J; W 为装药质量; R 为测点距装药中心的距离, m; p 为测点处的冲击波压力, Pa; ρ_w 为水的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; C_w 为水中声速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为测点处的冲击波持续时间, s; θ 为冲击波衰减时间常数, s。

小水池中测量炸药的输出能量总会受到边界效应的影响, 特别是对气泡能的影响更为显著, 因此需要对气泡能的计算公式进行修正。本实验中采用不同药量的 TNT 标定方法, 消除边界效应。

修正后比气泡能 e_b ($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) 计算公式如下^[11-13]:

$$e_b = E_b / W \quad (3)$$

$$E_b = \frac{1}{8C^3 K^3} [\sqrt{1 + 4Ct_b} - 1] \quad (4)$$

$$K = 1.135 \rho_w^{1/2} p_0^{-5/6} \quad (5)$$

式中, E_b 为气泡能, J; C 为与实际水池中装药位置有关的常数, 取 $C = 3.822 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$; t_b 为第一次气泡膨

收稿日期: 2008-11-17; 修回日期: 2009-03-17

基金项目: 国家安全重大基础研究项目 (51335)

作者简介: 牛余雷 (1983-), 男, 从事混合炸药配方及工艺研究。

e-mail: nyl521@163.com

胀的周期, s ; p_0 为试样处的静水压, Pa 。

2.2 测试系统

测试系统设置了可并行工作的高速采集和低速采集两套系统,用高速采集系统记录冲击波的 $p \sim t$ 曲线,用低速采集系统测定气泡脉动周期。其中高速采集采样速率为 20 Msps ; 低速采集采样速率为 50 ksps 。测量系统有专用软件,可计算出水下冲击波能、气泡能、比冲量、能流密度,自动找出气泡脉动周期。传感器选用美国 PCB 公司的电气石水下激波传感器。

2.3 实验装置

所用爆炸水池周壁由 20 mm 厚钢板围成,直径 12 m ,水深 9.5 m ,试样入水深度 4.7 m 。传感器到试样距离 2 m 放置在试样两侧的同一直径上,如图 1 所示,并保持传感器与试样处于同一水平面。

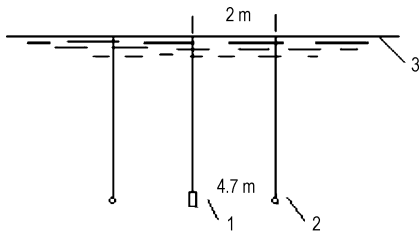


图 1 试样与传感器布局示意图

1—试样, 2—传感器, 3—水面

Fig.1 Position sketch of sample and sensor

1—sample, 2—sensor, 3—surface

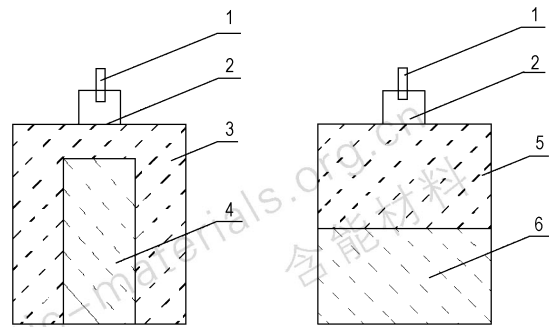
2.4 实验样品

共七组实验样品,每组测试两个平行试样,二元炸药装药的结构如图 2 所示,试样装药类型见表 1,内外层及上下层比例均为 $1:1$,其中 GH-1 为高爆速炸药,配方为 $\text{RDX}/\text{粘结剂}(80/20)$; GUHL-1 为非理想炸药,配方为 $\text{RDX}/\text{AP}/\text{Al}/\text{粘结剂}(17.6/42/26.4/14)$ 。5[#] 试样是两种炸药 $1:1$ 均匀混合后浇注而成。各样品总装药量均为 1 kg ,采用 8 号雷管及传爆药由端面中心一次引爆。

3 结果及分析

3.1 测点处能量输出结构

试样水中爆炸能量以及比冲击波能 e_s 与比气泡能 e_b 占总能量的比例见表 2,由表 2 可见,采用二元装药的 1[#]~4[#] 试样比物理均匀混合的 5[#] 试样总能量和比气泡能 e_b 都有较大提高,比冲击波能 e_s 相差不大。1[#]~5[#] 试样具有相同的化学能,测点处总能量的提高,表明冲击波在传播过程中的能量损失减少了,提高了水下爆炸的能量利用率。



a. 内外层装药结构

b. 上下叠加装药结构

a. inner/outer charge b. superstratum/underlayer charge

图 2 二元复合炸药装药样品的装药结构示意图

1—雷管, 2—传爆药, 3—外层炸药, 4—内层炸药,

5—上层炸药, 6—下层炸药

Fig.2 Schematic map of structure of the dual explosive charge

1—detonator, 2—booster, 3—outer charge, 4—inner charge,

5—superstratum charge, 6—underlayer charge

表 1 试样装药类型

Table 1 Testing samples

No.	samples
1	GH-1 (inner)/GUHL-1 (outer)
2	GUHL-1 (inner)/GH-1 (outer)
3	GH-1 (superstratum)/GUHL-1 (underlayer)
4	GUHL-1 (superstratum)/GH-1 (underlayer)
5	GUHL-1/ GH-1 (mix)
6	GUHL-1
7	GH-1

表 2 试样水中爆炸能量及 e_s 与 e_b 占总能量的比例

Table 2 Proportion of the underwater energy of samples

No.	e_s /MJ · kg ⁻¹	e_b /MJ · kg ⁻¹	$e_s + e_b$ /MJ · kg ⁻¹	$e_s/e_s + e_b$ /%	$e_b/e_s + e_b$ /%
1	1.080	2.759	3.839	28.1	71.9
2	1.131	3.053	4.184	27.0	73.0
3	1.136	2.964	4.100	27.7	72.3
4	1.080	2.998	4.078	26.5	73.5
5	1.126	2.495	3.621	31.1	68.9
6	1.209	3.988	5.197	23.3	76.7
7	1.020	1.978	2.998	34.0	66.0

从冲击波能和气泡能的分配来看,1[#]~4[#] 试样的比气泡能 e_b 在总能量中占的比例均大于 5[#] 试样。证明二元装药结构影响了测点处的爆炸载荷。

6[#] 试样由于配方中铝粉含量远高于其他试样,因此其气泡能所占比例最高,而且其气泡能与总能量都明显高于其他试样。

7[#] 试样不含铝粉,因此其气泡能明显小于其他试

样,测点处的能量分配明显与其他试样不同,冲击波能在总能量中占的比例最高。

3.2 装药方式对测点处比气泡能 e_b 、总能量的影响

采用不同装药方式的 1# ~ 4# 试样与物理均匀混合的 5# 试样的水下爆炸输出能量的比较见表 3。

表 3 二元装药水下爆炸能量与相同化学组成物理均匀混合配方的比较

Table 3 Comparison of the underwater energy of dual explosive charge with the single explosive charge

No.	e_s /MJ · kg ⁻¹	relative increment/%	e_b /MJ · kg ⁻¹	relative increment/%	$e_s + e_b$ /MJ · kg ⁻¹	relative increment/%
1	1.080	-4.1	2.759	10.6	3.839	6.0
2	1.131	0.4	3.053	22.4	4.184	15.5
3	1.136	0.9	2.964	18.8	4.100	13.2
4	1.080	-4.1	2.998	20.2	4.078	12.6
5	1.126	0	2.495	0	3.621	0

由表 3 可见, 2# 试样比 1# 试样更有利于提高装药的比气泡能 e_b 和总能量。1#、2# 试样具有相同的装药结构, 2# 试样采用外层高爆速炸药包裹内层非理想炸药, 而 1# 试样恰好相反。文献[4]认为类似 2# 试样的装药方式, 外层装药由于具有更高的爆轰速度, 首先爆轰产生高温高压的环境, 使得内层非理想炸药反应更加完全^[4]。Manfred Held^[7]对二元装药爆轰学的研究表明: 当采用高爆速装药包裹低爆速的圆柱形收敛性的装药结构时, 外层冲击波能够加快凹向中心的冲击波阵面的速度, 使爆轰波阵面在高爆速炸药中稍微落后于邻近的低爆速的炸药, 如图 3 所示^[7], 甚至当中心装药采用惰性材料时, 仍然会出现这种现象。由以上分析发现, 内外层装药结构提高能量的可能机理是: 在这种收敛性的装药结构中, 高爆速的外层装药的冲击波加快了中心冲击波阵面的速度, 使得中心非理想炸药的反应区加长, 铝粉在反应区内参加反应的量随之增加, 从而使铝粉更充分地反应并释放能量。

从表 3 中各试样比气泡能 e_b 和总能量的比较可以看出, 3# 试样对 5# 试样的增量与 4# 试样对 5# 试样的增量相差不大, 说明上下叠加的装药结构中, 采用两种配方不同组合的装药方式之间没有明显的差别。

由表 4 可见, 1# 试样比气泡能 e_b 和总能量比 6#、7# 试样的算术平均值(其物理意义是二元装药结构中两部分单独爆轰所产生的能量的加和)小, 可能的原因是: 非理想炸药临界直径较大, 而 1# 试样外层装药厚度较小, 当首先起爆外层装药时, 未能形成稳定爆轰。

2# 试样的比气泡能 e_b 和总能量都高于 6#、7# 试样的算术平均值。由于气泡能的测试误差在 1% 以内,

可以认为 2# 试样在冲击波能没有降低的情况下, 气泡能比两部分单一配方装药的算术平均值略有提高, 总能量也略有提高。说明两部分装药之间产生了能量的耦合。由于试样只有 1 kg, 增益效果并不显著, 但存在明显的增长趋势。

由表 4 可见, 3#、4# 试样的水下输出能量与 6#、7# 试样的算术平均值基本相同, 其中比气泡能 e_b 与总能量的相对误差都小于 1%。可见简单上下叠加的二元装药结构中, 两部分装药之间并未产生能量耦合效应。

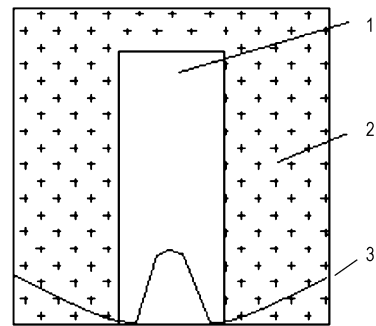


图 3 二元炸药装药中爆轰波形示意图

1—内层装药, 2—外层装药, 3—波阵面

Fig.3 Schematic map of detonation wave of the dual explosive charge

1—inner charge, 2—outer charge, 3—wavefront

表 4 二元装药水下爆炸能量与两部分单一配方装药算术平均值的比较

Table 4 Comparison of the underwater energy of dual explosive charge with the average of two parts of the single explosive charge

No.	e_s /MJ · kg ⁻¹	relative increment/%	e_b /MJ · kg ⁻¹	relative increment/%	$e_s + e_b$ /MJ · kg ⁻¹	relative increment/%
1	1.080	-3.1	2.759	-7.5	3.839	-6.3
2	1.131	1.4	3.053	2.3	4.184	2.1
3	1.136	1.9	2.964	-0.6	4.100	0.1
4	1.080	-3.1	2.998	0.5	4.078	-0.5
(E6 + E7) /2	1.115	0	2.983	0	4.098	0

Note: (E6 + E7)/2 means the arithmetic average of 6#, 7# samples.

3.3 装药方式对比冲击波能 e_s 的影响

由于受冲击波能测试精度的限制, 结合试验结果将二元装药对比冲击波能 e_s 的影响, 从两个不同角度进行分析, 得到了不同的结果。要确定哪方面的效应起主要作用, 还需要进一步研究。

一方面, 文献[10]的研究表明: 对于水下爆炸而言, 高爆压炸药冲击波在传播过程中很大一部分能量被消耗于水的加热, 冲击波能损失较多, 传播到测点处, 其冲击波能反而较低。根据这一理论, 采用低爆压

的非理想炸药包裹高爆速炸药的1#试样应该更有利于能量的传播,但由表3可见,在2 m测点处1#试样的比冲击波能 e_s 小于2#试样。这可能与1#试样外层装药的厚度较小,未能形成稳定的爆轰有关,另一个可能的原因是与起爆方式有关。

如果选择首先起爆内层装药,1#试样的比冲击波能 e_s 应该会有所提高。根据凝聚炸药的不定常爆轰理论,当用高爆速炸药起爆相对低爆速炸药时,在低爆速炸药的前部存在一段爆速高于其自身CJ爆速的不稳定爆轰区,在这种强起爆的作用下,也有利于铝粉更快更充分地参加反应。2#、3#试样虽然采用不同装药方式,但两部分装药都是采用首先起爆高爆速炸药,因此必然在其中形成不稳定爆轰区。由表2数据可见,2#、3#试样比冲击波能 e_s 相同;1#、4#试样比冲击波能 e_s 相同,并且2#、3#试样比1#、4#试样高5%,但是由于冲击波能的测试误差较大,一般认为在6%左右,因此要确定二元装药对比冲击波能 e_s 是否具有理论所预测的影响,还需要进一步研究。

另一方面,根据含铝炸药的二次反应理论^[14],单一装药中铝粉的反应主要是在CJ面之后,其反应放出的热量不能支持爆轰波阵面的传播。而文献[4]的实验结果表明,采用与2#试样相似的双元装药结构可以明显提高炸药的破片加速能力,说明内层装药中的铝粉反应提前了,其二次反应放出的能量部分用于加速破片。由图4^[15]所示的对作用效果有影响的最大化学反应时间可见,要对金属加速有贡献,则炸药的能量必须在0.1 ms内释放出来,而水下冲击波时标要大于金属加速时标,因此理论上,2#试样的装药结构应该有利于水下爆炸冲击波能的提高。

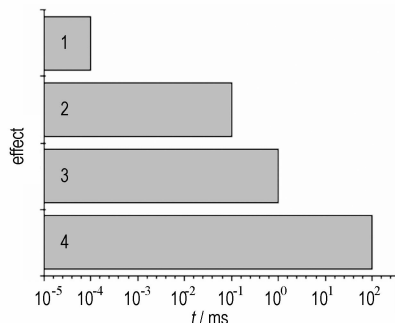


图4 对爆炸作用有贡献的最大化学反应时间

1—爆速,2—金属加速,3—水下冲击波,4—水下气泡能、空爆

Fig. 4 The maximum chemical reaction time contribution to the blast effect

1—detonation velocity, 2—fragmentation enhancing,

3—underwater shock wave, 4—underwater bubble, air explosion

实验结果显示,2#试样比冲击波能 e_s 的平均值比1#试样高5%,并且其同一支传感器测出的比冲击波能 e_s 都比1#试样高4%~7%,同样,这个差别也在误差范围以内,要确定2#试样是否比1#试样的比冲击波能 e_s 高,还需要进一步研究。

4 结论

(1) 在同样化学组成下,采用二元装药结构,能够改变水下爆炸测点处的爆炸载荷,减少冲击波在传播过程中的能量损失,提高能量利用率。

(2) 采用外层高爆速炸药,内层非理想炸药的同轴内外层二元装药结构,两部分装药之间产生了能量耦合效应。

(3) 理论分析表明,内外层二元炸药装药对于水中冲击波能有一定的提高,但是由于水中冲击波测试误差较大,还需要进一步实验证明。

参考文献:

- [1] Nouguez B. Dual formulation warheads: A mature technology [C] // Processing of Insensitive Munitions Technology Symposium, 1996.
- [2] Vittoria M, Burgess W. Sympathetic detonation testing of a dual explosive warhead concept for large diameter warheads [C] // Insensitive Munitions Technology Symposium, 1994.
- [3] Patrick Kernen. Way and methods to insensitive munitions: IM recipes version [C] // Insensitive Munitions Technology Symposium, 1994.
- [4] Arthur Spencer, John Corley. Blast and fragmentation enhancing explosive: US 5996501 [P], 1999.
- [5] Lucia Kuhns, Leonard Wilson. Penetrating dual-mode warhead: US 6135028 [P], 1998.
- [6] Jrgen Becker, Paul Wanninger. Warhead: US 6536351 [P], 2001.
- [7] Manfred Held. Detonation behaviour of adjacent high explosive charges with different detonation velocities [C] // 13th Symposium (International) on Detonation, 2006.
- [8] May Chan, Gary Meyers. Advanced thermobaric explosive compositions: US 6955732 [P], 2004.
- [9] Cole R H 著. 水下爆炸 [M]. 罗耀杰, 韩润泽, 李宝善, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1960.
- [10] 俞统昌, 王晓峰, 王建灵. 炸药水下爆炸冲击波性能 [J]. 含能材料, 2003, 14(4): 182-186.
YU Tong-chang, WANG Xiao-feng, WANG Jian-ling. Underwater shockwave performance of explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 14(4): 182-186.
- [11] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosive expansion work in underwater detonations [C] // Proceedings Sixth Symposium on Detonation. San Diego, 1976: 540-550.
- [12] 彭金华, 陈网桦, 苏华, 等. 铝粉对含铝炸药水中爆炸能量输出特性的影响研究 [J]. 安全与环境学报, 2004, (4): 177-179.
- [13] 饶国宁, 陈网桦, 胡毅亭, 等. 不同炸药水下能量输出特性的实验

研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(1): 9-11.

RAO Guo-ning, CHEN Wang-hua, HU Yi-ting, et al. Experimental study on underwater energy output characteristics of different explosives[J]. *Explosive Materials*, 2007, 36(1): 9-11.

[14] 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: 386-388.

[15] 王晓峰, 赵省向. 战术战斗部用炸药[M]. 西安: 中国兵器工业第二零四研究所, 2003: 72-73.

Characteristic of Energy Output of Underwater Explosion for Dual Explosive Charge

NIU Yu-lei, WANG Xiao-feng, YU Ran

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: By choosing two types of explosives GH-1 and GUHL-1, and two typical dual charge structures, the test samples were prepared. The characteristics of energy output of underwater explosion for dual explosive charge were studied and compared with that of the single explosive charge. The results show that under the same composition, the dual explosive charge can change the explosion load near the testing point, and decrease the energy loss of shock wave in the detonation propagation. By using dual explosive charge structure with a non-ideal explosive as an inner core surrounded by a high detonation velocity explosive, the bubble energy is increased by 22.4% compared with that of the single explosive charge, and also energy coupling exists in the two parts of the charge.

Key words: explosion mechanics; underwater explosion; dual explosive charge; energy output; energy coupling

(上接 414 页)

Temperature-humidity-load Accelerating Age Tests of PBX

YAN Xi-lin, LI Jing-ming, ZHOU Yang, LI Ming, ZHOU Xiao-yu

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: The temperature-humidity environmental tests under 5 MPa axial compression stress were applied to polymer bonded explosive (PBX). Results show that the mechanical properties of the explosive change obviously after the tests. The explosive density has no change under the conditions of 45 °C, 65% RH, 5 MPa, while it decreases obviously under the conditions of 60 °C, 80% RH, 5 MPa. In addition, the modulus and the compressive strength all decrease obviously in the early aging time after the temperature-humidity-load accelerating age tests, but they have no obvious change as the aging time goes on.

Key words: physical chemistry; polymer bonded explosive (PBX); load; multi-factor accelerating age; mechanical property