

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.03.006

水中爆炸的殉爆试验方法*

胡宏伟^① 鲁忠宝^② 郭 炜^① 宋 浦^① 张立建^①

①西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

②水下信息与控制国防科技重点实验室(陕西西安,710075)

[摘 要] 为了研究弹药水中爆炸的安全性,依据水中爆炸的特点,建立了一种利用冲击波峰值压力和气泡周期判断水中殉爆的试验方法,可以确定炸药的殉爆距离、殉爆安全距离以及被发装药的殉爆反应程度,通过水中爆炸试验进行了验证。结果表明:主发装药为带壳 1.5 mm 铝壳的 GUHL-1 装药、被发装药为带壳 1.0 mm 铝壳的 RS211 装药时,殉爆距离 L_{100} 约为 60 mm,殉爆安全距离 L_0 约为 120 mm。根据水中爆炸的冲击波压力和气泡周期可以可靠地判断被发装药是否发生殉爆,并可以定量估算被发装药的反应程度。

[关键词] 水中爆炸;殉爆;殉爆距离;反应程度;冲击波;气泡周期

[分类号] TQ56;O383

引言

殉爆反映了弹药在爆轰产物、冲击波和破片等作用下的安全性。随着反鱼雷武器的发展,殉爆成为了摧毁水中兵器的作用方式之一^[1-2],因此,如何判断战斗部水下爆炸时导致另一水中兵器发生殉爆,对于反鱼雷和水中兵器战场环境的安全性设计具有重要的意义。

空气介质中,判断被发装药殉爆的方法主要是依据被发装药放置地点有无残药或残留外壳、见证板的破坏情况以及冲击波压力来确定。

水下殉爆试验可以通过水箱法及水中爆炸法来实现。采用水箱法时,殉爆可以使用空气介质中殉爆试验的判别方法^[3-5],即被发装药放置地点有无残药或残留外壳、见证板的破坏情况来确定;但水箱法操作复杂、试验费用昂贵。利用爆炸水池进行殉爆试验是一种较为经济、可行的方法,然而依然存在被发装药的残药或残留外壳、见证板难以回收的问题;虽然可以利用冲击波峰值压力判断被发装药的殉爆情况,但被发装药发生半爆或爆燃时的可靠性不高。而且上述两种方法只能进行定性的判断,被发装药反应程度无法量化。

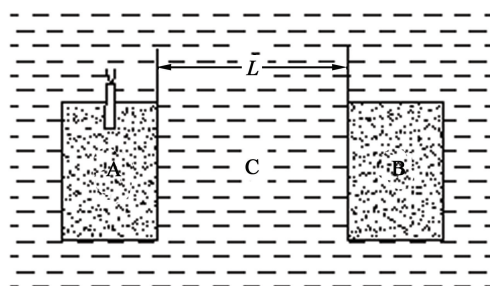
本文依据水中爆炸的特点,建立了一种采用水下爆炸冲击波峰值压力和气泡周期来判断弹药殉爆现象的试验方法,并通过试验进行了验证。该方法费用较低、操作简单、可靠性较高,不仅可以判断被

发装药是否发生殉爆,还可定量估算被发装药的反应程度。

1 试验原理

1.1 水中殉爆的判别方法

炸药装药水中爆炸殉爆示意图如图 1 所示。



A - 主发装药; B - 被发装药; C - 水

图 1 炸药装药水中爆炸殉爆示意图

Fig. 1 Sympathetic detonation diagram of explosive charge blasting in water

图 1 中, L 为两个装药的边距。殉爆距离为主发装药爆轰时使被发装药 100% 发生殉爆的两装药间的最大距离,以 L_{100} 表示;殉爆安全距离为主发装药爆轰时,使被发装药 100% 不发生殉爆的最小距离,以 L_0 表示。

当两个装药与测点的距离相同时,单个主发炸药水中爆炸的冲击波峰值压力为 p_{m1} ,气泡周期为 t_{b1} ;当被发装药殉爆时,水中爆炸的冲击波峰值压力为 p_{m2} ,气泡周期为 t_{b2} ;当被发装药 B 半爆(即被发

* 收稿日期:2013-10-16

基金项目:水下信息与控制国防科技重点实验室基金项目(705JHC2012-6.1)

作者简介:胡宏伟(1982~),男,硕士,工程师,主要从事爆炸力学和战斗部技术研究。E-mail:hhw505@163.com

通信作者:宋浦(1973~),男,研究员。主要研究方向为爆炸力学和战斗部技术研究。E-mail:songpu73@163.com

装药未完全爆轰、熄爆的现象)时,测量到冲击波峰值压力 p_{m3} 和气泡脉动周期为 t_{b3} 。殉爆现象的判据如下:

- 1) 殉爆: $p_{m2} > p_{m1}, t_{b2} > t_{b1}$;
- 2) 半爆: $p_{m2} > p_{m3} > p_{m1}, t_{b2} > t_{b3} > t_{b1}$;
- 3) 未殉爆: $p_{m2} = p_{m1}, t_{b2} = t_{b1}$ 。

1.2 殉爆反应程度的计算

两个装药很近时,忽略气泡融合对气泡周期的影响,被发装药殉爆的反应程度(即被发装药发生熄爆时,发生反应的炸药质量占被发装药总质量的比例)可通过气泡周期来确定,气泡周期的计算公式如下:

- 1) 无限水域气泡周期的计算公式^[6]:

$$t_b = km^{1/3} / (h + p_i / 101.325 \times 10.33)^{5/6} \quad (1)$$

- 2) 有边界效应水域气泡周期的计算公式^[7]:

$$t_b = k_1 m^{1/3} + k_2 m^{2/3} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: m 为炸药质量,kg; t_b 为气泡周期,ms; h 为装药深度处静水压力,Pa; p_i 为试验时的大气压,kPa; k 是与炸药种类和装药位置有关的常数; k_1 、 k_2 为根据试验水池、装药量和装药位置确定的常数。

对于无限水域,式(1)中 k 值只与炸药的种类有关,以主发装药的气泡周期为基础,可计算出式(1)中 k 值。

将 k 值代入式(1)中,即可估算被发装药发生反应的质量,即反应率。

对于有边界效应水域,通过试验确定 k_1 、 k_2 ,依据测量的气泡周期即可估算被发装药的反应程度。

不同种类炸药可使用主发装药的爆炸当量(D_w)来表示:

$$D_w = Q_j / Q_i \quad (3)$$

式中: Q_i 为主发装药的爆热,kJ/kg; Q_j 被发装药的爆热,kJ/kg。

被发装药的反应率可通过下式计算:

$$m_f = (m - m_1) D_w; \quad (4)$$

$$\eta = m_f / m_2 \quad (5)$$

式中: m 为炸药质量,kg; m_1 为主发装药的质量,kg; m_2 为被发装药的质量,kg; m_f 为发生反应的被发装药质量,kg; η 为被发装药反应程度,%。

2 试验条件

2.1 试验样品

主发装药为 GUHL-1 药柱,配方组分为 RDX/AP/Al/HTPB,密度 1.817 g/m^3 ,尺寸 $\varnothing 90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$,质量 1.0 kg ,包裹 1.5 mm 的铝壳;被发装药为 RS211,配方组分为 RDX/TNT/Al/Wax,密度 1.637

g/m^3 ,尺寸 $\varnothing 90 \text{ mm} \times 90 \text{ mm}$,质量 1.0 kg ,包裹有 1.0 mm 的铝壳。主发装药采用 8 号铜壳电雷管端面起爆。

2.2 试验布局

试验水池 $\varnothing 12 \text{ m} \times 10 \text{ m}$,池底和池壁衬有钢板。试验时,用固定支架将主、被发装药之间的距离确定为 L ,然后使用 2 mm 的钢丝绳将主发装药、被发装药悬吊在水池中心,入水深度 5.0 m ,可近似为无限水域^[8]。在同一水平面内距主发装药和被发装药距离(R)均为 2.5 m 处布放 2 个水下压力传感器。采用兰利法^[9-12] 调整两个装药之间的距离,用于获得其殉爆距离和殉爆安全距离^[13-16]。水下殉爆试验布局如图 2 所示。

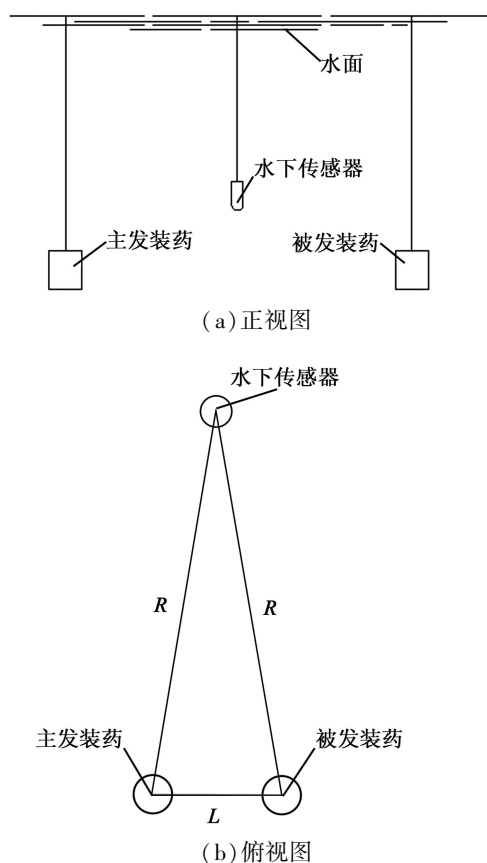


图 2 水下殉爆试验布局图

Fig. 2 Layout of sympathetic detonation test in water

2.3 测试系统

测试系统包括美国 PCB 公司的 138A 型水下激波传感器和 482A 型信号适配器,国产微测公司的高速采集仪。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 。

3 试验结果与讨论

通过水中爆炸后记录得到的压力—时间波形,由软件处理得到冲击波峰值压力和气泡周期,即可分辨出被发装药是否发生了殉爆。

水中爆炸的压力—时间波形见图 3,气泡脉动周期波形见图 4。

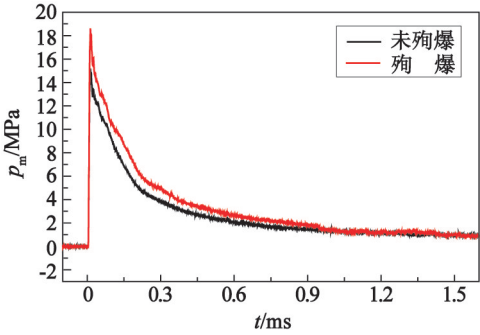


图 3 冲击波压力—时间曲线

Fig. 3 Pressure-time curve of shock wave

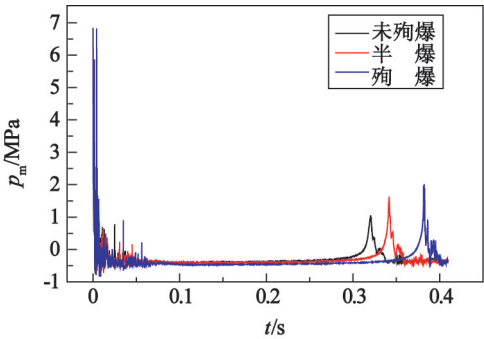


图 4 气泡脉动周期与冲击波压力的关系

Fig. 4 Relationship between period of bubble pulsation and shock wave pressure

水中殉爆的试验结果见表 1。试验时大气压 99.6 kPa,冲击波峰值压力和气泡周期值为 3 发试验的平均值。

表 1 水中殉爆的试验结果

Tab. 1 Experimental data of sympathetic detonation in water

装药	L/mm	p_m/MPa	t_b/ms	状态
GUHL-1	—	16.27	322.9	空白试验
RS211	160	16.32	323.6	否
RS211	120	16.33	323.4	否
RS211	100	16.46	341.6	半爆
RS211	80	15.71	345.1	半爆
RS211	60	24.62	381.7	爆
RS211	40	23.58	385.4	爆

由表 1 可知,被发装药为 RS211,两个装药的间距为 160 mm 和 120 mm 时,测点处的冲击波峰值压力和气泡周期与单个 1 kg 的 GUHL-1 装药一致,RS211 炸药没有殉爆;两个装药的间距为 80 mm 和 100 mm 时,测点处的冲击波峰值压力与单个 1 kg 的 GUHL-1 装药的冲击波峰值压力基本一致,但气泡周期大于单个 1 kg 的 GUHL-1 装药,被发装药发

生了半爆;两个装药的间距为 40 mm 和 60 mm 时,测点处的冲击波峰值压力和气泡周期都大于单个 1 kg 的 GUHL-1 装药的冲击波峰值压力和气泡周期,被发装药发生了殉爆。

由表 1 可以看出,主发装药为 GUHL-1 炸药时,在水介质中,RS211 的殉爆距离为 60 mm,当距离 ≤ 60 mm 时,被发装药 100% 发生爆轰;殉爆安全距离为 120 mm,当距离 ≥ 120 mm 时,被发装药 100% 不发生爆轰;60 ~ 120 mm 的范围为一个临界区域,被发装药可能未完全爆轰,产生熄爆现象;半爆的区域较大可能是因为主发装药和被发装药壳体与装药匹配精度的影响,裸装药的试验效果应该更好。

以主发装药的气泡周期为基础,可计算出式 (1) 中 k 值等于 3.096。当两个装药之间的距离为 80 mm 时,被发装药发生了半爆现象。GUHL-1 的爆热 8142 kJ/kg,RS211 的爆热 6197 kJ/kg。依据式 (1) 计算,可得其试验炸药质量相当于 1.256 kg 的 GUHL-1,其中主发装药 1.0 kg,被发装药 RS211 发生反应的炸药质量约为 $0.256 \times 1.31 = 0.335$ kg,约 335 g 的 RS211 发生了反应,被发装药的反应率为 33.5%。被发装药完全殉爆时,通过计算可得,相当于 1.728 kg GUHL-1 爆炸,其中主发装药 1.0 kg,被发装药 RS211 发生反应的炸药质量大约为 $0.728 \times 1.31 = 0.953$ kg,大约 953 g 左右的 RS211 发生了反应,被发装药的反应率为 95.3%,误差仅为 4.7%。因此,水中爆炸的冲击波压力和气泡周期不仅能够可靠地判别被发装药是否殉爆,还可以定量估算被发装药的反应程度。

4 结论

1) 主发装药为带壳 1.5 mm 铝壳 GUHL-1 装药时,被发装药为带壳 1.0 mm 铝壳的 RS211 装药时,二者的殉爆距离 L_{100} 约为 60 mm,安全距离 L_0 约为 120 mm。

2) 水中爆炸的冲击波压力和气泡周期不仅能够可靠地判别被发装药是否殉爆,还可以定量估算被发装药的反应程度。

参 考 文 献

[1] 崔绪生. 国外鱼雷技术进展综述[J]. 鱼雷技术, 2003, 11(1):6-11.
Cui Xusheng. A Summary of progress in torpedo technology over the world [J]. Torpedo Technology, 2003, 11(1):6-11.
[2] 崔贵平. 国外反鱼雷鱼雷技术发展及趋势[J]. 舰船科学技术. 2013, 35(3): 138-141.
Cui Guiping. Foreign anti-torpedo torpedo development and trend analysis [J]. Ship Science and Technology,

- 2013,35(3): 138-141.
- [3] 郑孟菊,俞统昌,张银亮. 炸药的性能及测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1990.
- [4] 惠君明,陈天云. 炸药爆炸理论[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1995.
- [5] 王晨,伍俊英,陈朗,等. 壳装炸药殉爆实验和数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2010,30(2): 152-158.
- Wang Chen, Wu Junying, Chen Lang, et al. Experiments and numerical simulations of sympathetic detonation of explosives in shell [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(2): 152-158.
- [6] 科尔 R H. 水下爆炸[M]. 罗耀杰,等,译. 北京:国防工业出版社,1960: 195-196, 202-205.
- Cole R H. Underwater explosions [M]. Beijing: National Defense Industry Press,1960: 195-196, 202-205.
- [7] 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.
- [8] 王建灵,赵东奎,郭炜,等. 水下爆炸能量测试中炸药入水深度的确定[J]. 火炸药学报,2002,25(2): 30-31, 44.
- Wang Jianling, Zhao Dongkui, Guo Wei, et al. Determination of reasonable depth of explosives in water to measure underwater explosive energy [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(2): 30-31, 44.
- [9] 袁俊明,张庆明,刘彦. 炸药感度测试兰利法与升降法比较研究[J]. 含能材料, 2008, 16(1): 86-89.
- Yuan Junming, Zhang Qingming, Liu Yan. Comparison study on langlie method and up-and-down method for sensitivity test of explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(1): 86-89.
- [10] 黄兴中,王志军. 水下爆炸气泡脉动的数值研究[J]. 爆破器材,2013,42(6): 19-23.
- Huang Xingzhong, Wang Zhijun. Numerical study of underwater explosion bubble pulse [J]. Explosive Materials, 2013, 42(6): 19-23.
- [11] 李静,王伯良,赵新颖,等. 高含铝炸药爆炸过程的能量分析[J]. 爆破器材,2013,42(2): 10-13.
- Li Jing, Wang Boliang, Zhao Xinying, et al. Energy analysis in the explosion process of high aluminized explosive[J]. Explosive Materials, 2013, 42(2): 10-13.
- [12] 王振雄,顾文彬,秦入平,等. 水下深孔爆破间隔装药起爆时差影响的数值模拟[J]. 爆破器材,2012,41(3): 8-11, 15.
- Wang Zhenxiong, Gu Wenbin, Qin Ruping, et al. Numerical simulation of the effect of initiation time difference on underwater deep-hole compartment blasting [J]. Explosive Materials, 2012, 41(3): 8-11, 15.
- [13] 徐豫新,王树山,李园. 水下爆炸数值仿真研究[J]. 弹箭制导学报,2009,29(6): 95-97.
- Xu Yuxin, Wang Shushan, Li Yuan. Study on numerical simulation of the underwater explosive[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(6): 95-97.
- [14] 汪斌,张远平,王彦平. 水中爆炸气泡脉动现象的实验研究[J]. 爆炸与冲击,2008,28(6): 572-576.
- Wang Bin, Zhang Yuanping, Wang Yanping. Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 572-576.
- [15] 胡毅亭,贾宪振,饶国宁,等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究[J]. 舰船科学技术,2009,31(2): 134-140.
- Hu Yiting, Jia Xianzhen, Rao Guoning, et al. Numerical study of underwater explosion shock wave and bubble pulse[J]. Ship Science and Technology, 2009, 31(2): 134-140.
- [16] 恽寿榕,赵衡阳. 爆炸力学[M]. 北京:国防工业出版社,2005.

The Method of Sympathetic Detonation Experiment in Water

HU Hongwei^①, LU Zhongbao^②, GUO Wei^①, SONG Pu^①, ZHANG Lijian^①

①Xi'an Modern Chemistry Research Institute(Shaanxi Xi'an, 710065)

②National Key Laboratory of Science and Technology on Underwater Information and Control (Shaanxi Xi'an, 710075)

[ABSTRACT] In order to study the safety of ammunition explosion in water, according to the characteristics of underwater explosion, a novel use of shock wave peak pressure and bubble period from underwater explosion tests can determine transmission distance, safety distance of sympathetic detonation and reaction degree of sympathetic detonation. The results indicate that the donor charge with 1.5 mm aluminum shell GUHL-1 and the acceptor charge with 1.0 mm aluminum shell RS211 result in about 60 mm transmission distance (L_{100}) and about 120 mm safety distance of sympathetic detonation (L_0). Not only the sympathetic detonation could be determined reliably, but also the reaction degree of acceptor charge be estimated quantitatively, by shock wave pressure and explosive bubble period of underwater explosion.

[KEY WORDS] underwater explosion; sympathetic detonation; transmission distance; extent of reaction; shock wave; bubble period