

文章编号: 1006-9941(2015)10-1010-05

一种预估无限水域爆炸气泡脉动周期方法

邵建军¹, 张姝红¹, 李家波¹, 张永坤¹, 赵红光¹, 穆春国²

(1. 中国人民解放军 91439 部队, 辽宁 大连 116041; 2. 中国人民解放军 65589 部队, 辽宁 大连 116041)

摘要: 为真实评估水中爆炸气泡能、准确计算气泡脉动周期, 根据水中爆炸已有研究成果和相似理论提出了水中爆炸气泡脉动周期的预估方法。通过 3 次 TNT 海中爆炸标定试验, 得到 TNT 炸药气泡脉动周期预估公式, 用该公式算得水中 TNT 爆炸的气泡脉动周期值与实测值的误差为小于 1.34%; 通过 3 次 Al/RDX/TNT 海中爆炸标定试验, 得到 Al/RDX/TNT 炸药气泡脉动周期预估公式, 用该公式算得水中 Al/RDX/TNT 炸药的气泡脉动周期值与实测值的误差为小于 1.45%。气泡脉动周期与炸药当量 1/3 次方成正比, 与大气压力折算深度及爆炸深度之和的 5/6 次方成反比; 气泡脉动周期受炸药种类严重影响。炸药的化学特征与脉动周期计算公式具有强关联。采用海中标定的方法, 能够精确预估水中爆炸气泡脉动周期, 预估值与实测值的误差为小于 2.54%, 适用于炸药水中爆炸的气泡脉动周期估算。

关键词: 水中爆炸; 气泡脉动周期; 预估方法; TNT

中图分类号: TJ55; O383

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.017

1 引言

水中爆炸对目标的毁伤主要是冲击波能和气泡能作用的结果^[1-9]。同冲击波相比, 气泡脉动压力远小于冲击波峰值压力, 但作用时间更长, 当气泡脉动的频率与目标的固有频率接近时, 会使目标产生共振而毁伤。由于水中爆炸气泡能是气泡脉动周期的函数, 气泡脉动周期的精确计算或测量是科学评估水中爆炸气泡能的关键环节。因此, 对气泡脉动的研究引起了国内外的广泛关注, 取得了部分成果^[10-12], 这些成果更偏重于仿真计算^[13-18]。已有描述气泡脉动现象的仿真方法都是基于对气泡脉动机理的诸多假设, 还不能完全客观描述水中爆炸气泡脉动周期现象, 开展水中爆炸气泡脉动规律的试验研究更能真实反映水中爆炸气泡脉动周期特性, 意义更加显著。从已有的研究报道可知, 无限水域条件水中爆炸气泡脉动周期计算公式都采用与 willis^[17,19,20-30] 公式相同的函数关系, 存在着引用前人研究成果, 但并未阐述获得方法、未考虑大气压力折算、只能在确知炸药化学参数的条件下实现脉动周期计算等问题。由于忽略了炸药脉动周期固

有常数、大气压力折算、炸药密度等物理特征的影响, 气泡脉动周期估算值必然与气泡脉动周期值发生偏离, 进而导致气泡能评估的失真。基于上述原因, 误差较小的炸药水中爆炸气泡脉动周期估算公式应该通过试验标定获得。

为了预估炸药水中爆炸气泡脉动周期, 本研究拟通过炸药水中爆炸气泡脉动理论分析, 对工程中气泡脉动周期估算公式进行推导, 并明确各变量的物理意义; 拟通过开展 TNT 炸药、Al/RDX/TNT 海中爆炸标定试验, 给出一种水中爆炸气泡周期的估算方法。

2 气泡脉动周期计算的理论公式

常规装药水中爆炸冲击波向外传播的同时, 爆轰产物以气泡形式继续膨胀、推动周围水介质向四周流动。在气泡收缩、膨胀的循环过程中能量损失较大。原因在于, 每振动一次, 就要有一定能量在气泡压缩至最小时消耗于产生紊流和音辐射中, 通常对目标具有毁伤作用的只有第一次脉动过程^[19]。水中爆炸气泡周期性振动过程中气泡能量释放形式主要由从气泡表面扩散的径向流动能、气泡内能及气泡膨胀过程中反抗流体静压所做的功组成。由于气泡膨胀的大部分过程中内能较小, 当气泡扩散到最大时从气泡表面扩散的径向流动能全部消耗且气泡在无限水域中球形膨胀, 假设气泡膨胀过程中没有上浮运动, 则在某爆炸深

收稿日期: 2015-02-05; 修回日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助(51479204)

作者简介: 邵建军(1967-), 男, 工程师, 主要从事水中爆炸毁伤评估理论论研究。e-mail: sjj05@126.com

度气泡膨胀过程中克服流体静压所消耗的总能量即气泡能可表示为^[19]:

$$E_b = \frac{4}{3} \pi R_{\max}^3 \rho_l \quad (1)$$

$$\rho_l = \rho_h + \rho_{h_0} \quad (2)$$

式中, E_b 为气泡能; R_{\max} 为气泡膨胀最大半径; ρ_l 为爆炸深度处流体静压, 压力值为水面上大气压 ρ_{h_0} 与水深压力 ρ_h 之和。

气泡膨胀过程中, 在忽略了炸药尺寸条件下, 气泡膨胀至最大时的时间相当于振动周期的 1/2。气泡脉动周期与膨胀最大半径的关系可表示为^[19]:

$$T = \frac{2}{3} R_{\max} B_r \left(\frac{3\rho_0}{2\rho_l} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中, T 为气泡脉动周期; B_r 为气泡振动特征函数, 当气泡膨胀至最大时, 函数值为 2.24; ρ_0 为初始密度。式(3)经计算得:

$$R_{\max} = 0.5468 \rho_w^{-1/2} \rho_l^{1/2} T \quad (4)$$

式(1)、(4)联立得:

$$T = 1.135 \rho_0^{1/2} \rho_l^{-5/6} E_b^{1/3} \quad (5)$$

式(5)就是国内外普遍采用的无限水域爆炸气泡脉动周期的理论关系式, 被称为 willis 公式。式(5)的正确性已被后来多次水中爆炸试验所证实^[19]。

在水中爆炸实际试验中, 能够实现的是称量炸药的质量, 而无法确认其能量, 需将式(5)变换为水中爆炸试验中可实施的形式。由于爆炸产生气泡能与炸药的质量成正比、炸药的气泡能与总能有了一定的比例系数, 炸药的气泡能与炸药质量的关系可表示为:

$$E_b = k_1 \mu m \quad (6)$$

式中, k_1 为能量与质量关系固有常数, μ 为炸药能量中气泡能比例系数, m 为炸药质量。由于 k_1 、 μ 为特定炸药的固有常数, 式(6)可进一步简化为:

$$E_b = k_2 m \quad (7)$$

由于流体静水压力与水深成正比、水面上大气压力可以按试验水深折算, 式(2)可表示为:

$$\rho_l = \rho_w g (h + h_0) \quad (8)$$

式中, ρ_w 为流体密度, g 为重力加速度常数。将式(5)、(7)、(8)联立得:

$$T = 1.135 \rho_0^{1/2} \rho_w^{-5/6} g^{-5/6} k_2^{1/3} m^{1/3} (h + h_0)^{-5/6} \quad (9)$$

由于式(9)中对于确定试验炸药及试验环境下, ρ_0 、 ρ_w 、 g 、 k_2 均为常数, 式(9)可简化为:

$$T = k_x m^{1/3} (h + h_0)^{-5/6} \quad (10)$$

式中, k_x 就是 x 炸药对应的气泡脉动周期固有常数; 不同的炸药 k_x 值不同; T 为气泡脉动周期, ms; h 为

炸药布放深度, m; h_0 为水面大气压换算的海深, m; m 为炸药质量, kg。式(10)就是由式(5)变换的无限水域条件下爆炸气泡脉动试验计算通式。试验时, 通过测量气泡脉动周期 T , 便可得到试验炸药的气泡脉动固有常数 k_x 。方法是, 按式(10)对被试炸药通过小当量标定试验获取脉动周期固有常数。试验前必须测量试验水面大气压及试验水域密度, 进行大气压力折算。

3 实验部分

3.1 爆源的制备

采用熔铸法制备 TNT 爆源, 均为球形。制备 TNT 药球, 质量分别为 0.11, 0.11, 0.10, 0.99 kg。

采用熔铸法制备特定比例的梯黑铝爆源, 均为球形。制备 Al/RDX/TNT 药球质量分别 0.10, 0.11, 0.10, 1.01 kg, 为被评估炸药。所有药球都带有 7.2 mm×60 mm 的雷管孔。用尼龙网兜包裹爆源, 用软细绳将爆源连接于爆源支架上, 爆源固定可靠后, 在爆源下部用线绳悬挂 1 kg 的重力锚。

3.2 爆源入水位置的确定

试验前, 根据式(11)计算不同药量的最大气泡脉动半径。对于被评估的梯黑铝炸药, 采用放大为 2 倍 TNT 当量的苛刻条件计算气泡脉动最大半径。爆源距水面及水底的距离应不小于两倍气泡最大半径。

$$R_m = 3.5 \left(\frac{W}{h+10.01} \right)^{1/3} \quad (11)$$

式中, W 为 TNT 当量, kg; h 为炸药布放深度, m。

3.3 气泡脉动周期估算方法

试验在海上进行, 海平面上为标准大气压。标准大气压为 1.013×10^5 Pa, 海水密度为 $1,032 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, g 为 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。按式(8)算得海平面气压折算海深 h_0 为 10.01 m。式(10)在海中无限水域气泡脉动计算公式则表示为:

$$T = k_x m^{1/3} (h+10.01)^{-5/6} \quad (12)$$

式中各量意义同式(10)。

3.4 海上试验工况

试验海区海底底质均为平坦泥沙底质, 水深约 6~9 m, 海水流速小于 1 节, 海面无风浪、无波浪; 试验爆源采用两种炸药分别为 TNT 熔铸炸药和特定比例的梯黑铝熔铸炸药。试验的测量设备为水中爆炸威力测量系统, 设备采样频率 1 MHz, 采样时间约为 4 s; 试验时测量设备布放在岸基; 压力传感器通过支

架或浮标布放到水中,至爆源的距离大于气泡最大半径;传感器为 PCB138 系列。试验布设如图 1 所示,试验工况列于表 1。

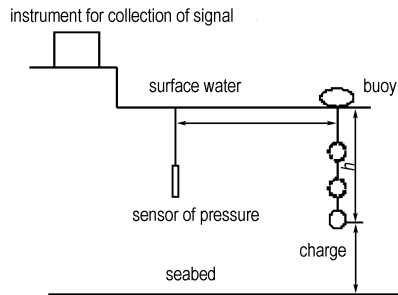


图 1 试验布设示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental arrangement

表 1 试验工况

Table 1 Experimental condition

number	explosive	explosive mass/kg	depths of explosion/m	depths of sea/m
1	TNT	0.11	2.00	6
2	TNT	0.11	3.00	6
3	TNT	0.10	3.00	6
4	TNT	0.99	4.00	9
5	Al/RDX/TNT	0.10	2.30	9
6	Al/RDX/TNT	0.11	2.30	9
7	Al/RDX/TNT	0.10	2.50	9
8	Al/RDX/TNT	1.01	4.00	9

4 结果与讨论

4.1 测量结果

试验采用了多路压力传感器采集爆炸压力信号,冲击波起始点到二次脉动最大值两点之间的时间差为气泡二次脉动的周期。图 2 为工况 4 于水中爆炸水面照片,相应的水中爆炸时程曲线如图 3 所示,各工况条件下试验气泡脉动周期测量值、估算值、固有常数及估算误差列于表 2。

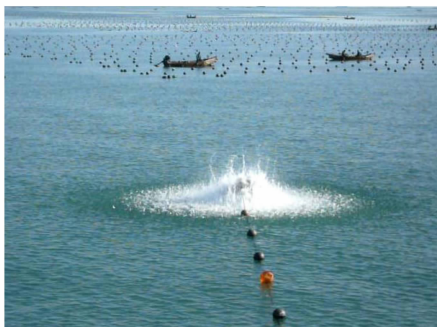


图 2 TNT 炸药水中爆炸图片(No. 4)

Fig. 2 Underwater explosion photo of TNT explosive (No. 4)

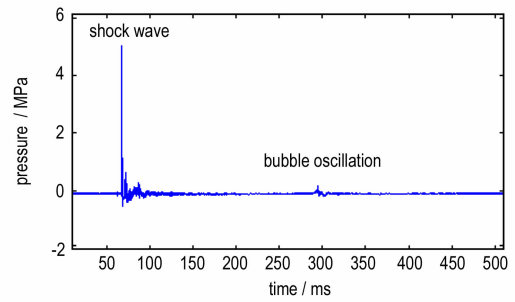


图 3 TNT 炸药水中爆炸压力曲线(No. 4)

Fig. 3 Explosion pressure curve of TNT explosive(No. 4)

表 2 气泡脉动情况统计分析

Table 2 Statistic analysis of bubble oscillation situation

number	measured period /s	intrinsic constants	average of intrinsic constants	estimated period /s	error of estimated period /%
1	0.118	1.96	2.00	0.121	2.54
2	0.115	2.03	2.00	0.113	-1.74
3	0.110	2.01	2.00	0.110	0
4	0.224	2.03	2.00	0.221	-1.34
5	0.146	2.54	2.52	0.144	-1.37
6	0.146	2.47	2.52	0.149	2.05
7	0.144	2.55	2.52	0.142	-1.39
8	0.276	2.48	2.52	0.280	1.45

4.2 气泡脉动周期分析

从图 3 可见,0.99 kg TNT 炸药爆炸形成了气泡脉动。工况 1、2 为相同当量不同深度的试验,但工况 2 的气泡脉动周期小于工况 1 的气泡脉动周期,说明爆炸深度对气泡脉动周期产生影响。这是因为水中爆炸气泡能一定,随着深度的增加,气泡脉动克服静水压力增大,势必导致膨胀体积减小,进而导致气泡脉动周期减小。

炸药质量同样会对气泡脉动周期产生影响。工况 1、2、3 与工况 4 比较发现,工况 4 虽然深度大于工况 1、2、3,但因其炸药质量大于工况 1、2、3 的炸药质量,工况 4 的气泡脉动周期明显大于工况 1、2、3 的各个脉动周期。按工况 1、2、3 试验标定的气泡脉动周期固有常数平均值估算工况 4 的脉动周期准确度非常高,只产生-1.34%的误差;用被估算梯黑铝炸药工况 5、6、7 标定的气泡脉动周期固有常数平均值估算工况 8 的脉动周期,试验误差为 1.45%。

炸药种类不同,气泡脉动周期固有常数差别较大。工况 4 与工况 8 相同,但工况 8 的气泡脉动周期是工况 4 的 1.23 倍,这说明铝粉及黑索金的加入大大提高了炸药的气泡能。其中,由于铝粉在爆炸中具有典型的后燃效应,可有效提高含铝炸药的水中爆炸能力,

尤其能够提高炸药的气泡能^[31-32],能量的区别直接导致气泡脉动周期的不同。由于复合炸药中,组分不同会对炸药的脉动周期固有常数产生更大的影响,若想实现准确预估某种炸药的气泡脉动周期,必须对预估炸药进行小当量标定,以得到气泡脉动周期固有常数。8种工况爆炸实测脉动周期与根据式(12)估算脉动周期近似一致,最大误差只有2.54%,说明水中气泡脉动周期符合相似律,预估式(12)可用于不同种类炸药的海中爆炸试验脉动周期估算。

5 结论

通过3次AI/RDX/TNT海中爆炸标定试验,得到AI/RDX/TNT炸药气泡脉动周期预估公式。将试验标定的AI/RDX/TNT炸药气泡脉动周期固有常数带入式(12),计算AI/RDX/TNT水中爆炸气泡脉动周期与实测值误差为1.45%。通过对不同爆炸当量、工况的TNT炸药及特定比例AI/RDX/TNT炸药的海上爆炸试验发现,采用试验标定的方法实现了TNT炸药及AI/RDX/TNT炸药海中爆炸气泡脉动周期的准确预估,最大误差只有2.54%。

(1)水中爆炸气泡脉动周期受炸药当量、爆炸深度影响。气泡脉动周期与炸药当量 $1/3$ 次方成正比,与大气压力折算深度及爆炸深度之和的 $5/6$ 次方成反比。

(2)炸药水中爆炸气泡脉动周期受炸药的固有化学性质影响较大。采用本研究给出的炸药水中爆炸气泡脉动周期计算方法,可实现气泡脉动周期的预估。

参考文献:

- [1] Wang Gaohui, Zhang Sherong, Yu Mao. AporInvestigation of the shock wave propagation characteristics and cavitation effects of underwater explosion near boundaries[J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 46: 40-53.
- [2] 俞统昌, 王晓峰, 王建灵. 炸药的水下爆炸冲击波性能[J]. 含能材料, 2003, 11(4): 182-185.
YU Tong-chang, WANG Xiao-feng, WANG Jian-ling. Under water shock wave performance of explosives[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2003, 11(4): 182-185.
- [3] 常艳, 张奇. 含铝炸药爆炸能量预估[J]. 含能材料, 2012, 20(6): 770-774.
CHANG Yan, ZHANG Qi. Explosion energy prediction of aluminum explosive[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)* 2012, 20(6): 770-774.
- [4] WANG Hao, ZHU Xi, CHENG Yuan-sheng, et al. Experimental and numerical investigation of ship structure subjected to close-in underwater shock wave and following gas bubble pulse[J]. *Marine Structures*, 2014, 39: 90-117.
- [5] LI Jian, RONG Ji-li. Experimental and numerical investigation of the dynamic response of structures subjected to underwater explosion[J]. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2012, 32: 59-69.
- [6] 王晓峰, 陈鲁英. 炸药的水下爆炸威力[J]. 兵工学报, 1995(1): 30-34.
WANG Xiao-feng, CHEN Lu-ying. The power of underwater explosion over explosive[J]. *Acta Armamentarii*, 1995(1): 30-34.
- [7] 张阿漫, 汪玉, 闻雪友, 等. 水下爆炸气泡动态特性研究综述[J]. 船舶力学, 2009, 13(5): 828-836.
ZHANG A-man, WANG Yu, WEN Xue-you, et al. Review of the dynamics of the underwater explosion bubble[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2009, 13(5): 828-836.
- [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, (2): 30-31.
WANG Jian-ling, ZHAO Dong-kui, GUO Wei, et al. Determination of the reasonable depth of explosives in water to measure underwater explosive energy[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002, (2): 30-31.
- [9] 汪斌, 王彦平, 张远平. 有限水域气泡脉动实验方法研究[J]. 火炸药学报, 2008, 31(3): 32-35.
WANG Bin, WANG Yan-ping, ZHANG Yuan-ping. A method of studying bubble pulses in a confined water area[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(3): 32-35.
- [10] Brujan E A, Pearson A, Blake J R. Pulsating, buoyant bubbles close to a rigid boundary and near the null final Kelvin impulse state[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2005, 31: 302-317.
- [11] Suresh Menon, Mihir Lal. On the dynamics and instability of bubbles formed during underwater explosions[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1998, 16: 305-321.
- [12] LI Yu-jie, PAN Jian-qiang, LI Guo-hua, et al. Experimental study of ship whipping induced by underwater explosive bubble[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2001, 5(6): 75-81.
- [13] Kamran K, Rossi R, Oñate E, et al. A compressible Lagrangian framework for the simulation of the underwater implosion of large air bubbles[J]. *Comput Methods Appl Mech Engrg*, 2013, 255: 210-225.
- [14] Miller S T, Jasak H, Boger D A. A pressure-based, compressible, two-phase flow finite volume method for underwater explosions[J]. *Computers & Fluids*, 2013, 87: 132-143.
- [15] HSU Ching-yu, LIANG Cho-chung, NGUYEN Anh-tu, et al. A numerical study on the underwater explosion bubble pulsation and the collapse process[J]. *Ocean Engineering*, 2014, 81(1): 29-38.
- [16] Yang Yuan Xiang, Wang Qian Xi, Keat T S. Dynamic features of a laser-induced cavitation bubble near a solid boundary[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20: 1098-1103.
- [17] 张志江, 徐更光, 王廷增. 炸药水中爆炸气泡脉动分析计算[J]. 爆破, 2007, 24(1): 17-20.
ZHANG Zhi-jiang, XU Geng-guang, WANG Ting-zeng. Analysis and Calculation on Bubble-oscillation by Underwater Explosion[J]. *Blasting*, 2007, 24(1): 17-20.
- [18] 宗智, 何亮, 孙龙泉. 水下爆炸气泡对水面船舶载荷的数值研究[J]. 船舶力学, 2008, 12(5): 733-738.
ZONG Zhi, HE Liang, SUN Long-quan. Numerical study of loading on the surface ship near an underwater explosion bubble[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2008, 12(5): 733-738.
- [19] Cole R H. Underwater Explosion[M]. 1 Princeton, Princeton university press, 1948: pp260-360.
- [20] 朱锡, 张振华, 梅志远, 等. 舰船结构毁伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 24-31.
ZHU Xi, ZHANG Zhen-hua, MEI Zhi-yuan, et al. Damage me-

- chanics of warship structure subjected to explosion [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013:24-31.
- [21] 姚熊亮, 汪玉, 张阿漫. 水下爆炸气泡脉动力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2012: 22-76.
YAO Xiong-liang, WANG Yu, ZHANG A-man. Underwater explosion bubble dynamics [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2012: 22-76.
- [22] 金辉, 李兵, 权琳, 等. 不同边界条件下炸药水中爆炸的能量输出结构[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 325-328.
JIN Hui, LI Bing, QUAN Lin, et al. Configuration of explosive energy output in different underwater boundary conditions[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2013, 33(3): 325-328.
- [23] 张姝红, 周华, 权琳, 等. 水下爆炸气泡脉动试验研究[J]. 爆破, 2014, 31(1): 106-109.
ZHANG Shu-hong, ZHOU Hua, QUAN Lin, et al. Experimental study for bubble impulsion in underwater explosion[J]. *Blasting*, 2014, 31(1): 106-109.
- [24] Barras G, Souli M, Aquelet N, et al. Numerical simulation of underwater explosions using an ALE method. The pulsating bubble phenomena[J]. *Ocean Engineering*, 2012, 41: 53-66.
- [25] Rajendran R, Narasimhan K. Deformation and fracture behaviour of plate specimens subjected to underwater explosion—a review[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2006, 32: 1945-1963.
- [26] 李洪涛, 赵琳, 宁永成. 球形装药海底裸爆压力测试与分析[J]. 工程爆破, 2005, 11(1): 16-21.
LI Hong-tao, ZHAO Lin, NING Yong-cheng. Testing and analyzing pressure produced by submarine explosion with spherical charges[J]. *Engineering Blasting*, 2005, 11(1): 16-21.
- [27] Zhang N, Zong Z. The effect of rigid-body motions on the whipping response of a ship hull subjected to an underwater bubble [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2011, 27: 1326-1336.
- [28] 李琛. 利用第一次和第二次气泡脉动周期估算水下爆炸深度和当量[J]. 水雷战与舰船防护, 2011, 19(4): 72-75.
LI Chen. An estimation method of detonation depths and explosion yields by the periods of the first two bubble oscillation[J]. *Mine Warfare & Ship Self-defence*, 2011, 19(4): 72-75.
- [29] 周霖, 谢中元, 陈勇. 炸药水下爆炸气泡脉动周期工程计算方法[J]. 兵工学报, 2009, 30(9): 1202-1205.
ZHOU Lin, XIE Zhong-yuan, CHEN Yong. An Engineering Calculation Method on the Bubble Pulse Period of Underwater Explosion[J]. *Acta Armamentarii*, 2009, 30(9): 1202-1205.
- [30] 方正, 李世海, 乔继延, 等. 水中爆炸气泡脉动周期的试验研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(2): 29-33.
FANG Zheng, LI Shi-hai, QIAO Ji-yan. Study on period of bubble impulsion induced by underwater explosion[J]. *Engineering Blasting*, 2001, 7(2): 29-33.
- [31] 曹威, 何中其, 陈网桦, 等. 水下爆炸法测量含铝炸药后燃效应[J]. 含能材料, 2012, 20(2): 229-233.
CAO Wei, HE Zhong-qi, CHEN Wang-hua, et al. Measurement of afterburning effect of aluminized explosives by underwater explosion method[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2012, 20(2): 229-233.
- [32] Peaker J M, Krier H, Glumal N, et al. Environment effects on the blast and overpressure enhancement in aluminized explosives[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(2): 2205-2212.

A Method of Estimating the Bubble Oscillation Period of Underwater Explosion in Indefinite Water

SHAO Jian-jun¹, ZHANG Shu-hong¹, LI Jia-bo¹, ZHANG Yong-kun¹, ZHAO Hong-guang¹, MU Chun-guo²

(1. No. 91439 Unit of PLA, Dalian 116041, China; 2. No. 65589 Unit of PLA, Dalian 116041, China)

Abstract: For the real evaluation of the bubble energy and the accurate calculation of bubble oscillation period of underwater explosion, according to the existing research payoffs of underwater explosion and the similarity law, a method of accurately estimating the bubble oscillation period of underwater explosion was presented. The formula estimating the bubble oscillation period of TNT explosive was obtained via three calibration experiments of TNT explosion in sea, and the error of calculated and the experimental one is smaller than -1.34%. The formula estimating the bubble oscillation period of Al/RDX/TNT explosive was obtained via three calibration experiments of Al/RDX/TNT explosion in sea, and the error of calculated and the experimental one is smaller than 1.45%. The bubble oscillation period is proportional to the 1/3 powers of explosive equivalent and is inversely proportional to the 5/6 powers of summation of the converted water depth of atmospheric pressure and water depth over explosion. The bubble oscillation period is badly affected by the types of explosives. The chemical characteristics of explosive and formulas used to calculate the bubble oscillation period have strong correlation. Use of calibration method in sea can accurately estimate the bubble oscillation period of underwater explosion. The error of the estimated value and the experimented one is smaller than 2.54%. The method is suitable for estimation of the bubble oscillation period value of underwater explosion of explosive.

Key words: underwater explosion; bubble oscillation period; estimating method; TNT

CLC number: TJ55; O383

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.10.017