

文章编号: 1001-4888(2011)01-0067-06

水下爆炸气泡脉动测量及分析^{*}

张颖, 赵生伟, 王占江, 周刚

(西北核技术研究所, 西安 710024)

摘要: 水下爆炸气泡破坏效应是水中兵器的重要毁伤模式之一。为研究水下爆炸气泡脉动现象, 建立了小当量水下爆炸实验系统, 并进行了爆炸当量分别为 0.125g、1.0g、3.375g 和 8g TNT 的水下爆炸实验。采用球形 PETN 装药并中心起爆, 产生球形对称的气泡和冲击波载荷, 并利用高速摄像系统记录水下爆炸气泡脉动过程, 以及布置压力传感器测量水中冲击波压力。实验获得了清晰的水下爆炸气泡脉动过程图像, 得到了冲击波和气泡脉动压力曲线。对数字化图像进行判读, 得到气泡脉动直径和周期。另外根据冲击波曲线测量了气泡脉动周期, 对比分析了气泡脉动相关参数。结果表明, 高速摄像数据测量的气泡直径与经验公式较接近, 高速摄像测量的气泡周期与冲击波曲线测量的气泡脉动周期以及经验公式结果具有较好的一致性。本文提出的实验技术安全、经济、可靠, 气泡脉动参数判读精确, 满足水下爆炸气泡脉动研究需求。

关键词: 水下爆炸; 气泡脉动; 高速摄像系统

中图分类号: TB122 **文献标识码:** A

0 引言

随着对水下爆炸研究的深入, 水下爆炸气泡脉动现象越来越受到重视, 研究认为水下爆炸对结构的破坏主要分为冲击波和气泡脉动毁伤两大类^[1]。目前对于水中冲击波破坏效应研究较多, 且仿真计算比较成熟, 而关于气泡脉动破坏研究相对较少, 炸药水中爆炸以后, 爆炸产物以气泡的形式在水中连续膨胀收缩, 称为气泡脉动。气泡脉动压力只有冲击波峰值压力的 15%~20%, 但由于脉动时间很长, 产生的冲量高于冲击波^[2]。水中兵器战斗部爆炸产生的气泡脉动, 会造成舰船总体结构和舰船上低频设备的损坏。

光学测量技术是开展水下爆炸实验研究的重要手段, 其优点是在测量过程中不影响研究对象, 并且比较直观。目前关于水下爆炸光学测量主要分为两个部分: 冲击波光学测量, 由于其传播速率快, 对拍摄速率要求较高, 要求至少上万帧拍摄速率, 而且光源要求也比较严格, 需要建立昂贵的专用光源和精确的同步触发系统; 气泡脉动测量, 其脉动过程相对较慢, 对拍摄速率要求较低, 通常要求 2000~6000 帧即满足要求, 对光源要求也较低, 普通光源即可。

美国的 Naval Weapons Center 建立了一套双照相系统来进行水下爆炸研究^[3], 该系统主要用来研究水下爆炸冲击波传播规律和气泡脉动规律, 在一次实验中利用二套照相系统, 分别记录不同的现象。其中 CORDIN 照相系统拍摄速率为 10000 至 5 百万帧每秒, 用来记录冲击波传播过程, 并专门为其配备了光源; FASTAX 照相系统拍摄速率 15003000 帧每秒, 用来记录气泡脉动过程; 澳大利亚的 Defence Science and Technology Organization(DSTO)也建立了类似的照相系统进行水下爆炸研究^[4]; 国内中

^{*} 收稿日期: 2010-04-13; 修回日期: 2010-06-30

通讯作者: 张颖(1981—), 男, 博士研究生, 助理研究员。主要研究领域: 冲击动力学。E-mail: yzhang_nint@yahoo.com.cn

国科学技术大学进行了水中电爆炸气泡脉动研究和相关高速摄影技术研究^[5,6];海军工程大学开展了水下爆炸气泡脉动实验研究,建立了实验平台、光学测量系统和载荷测量系统^[7];中国工程物理研究院开展了水下爆炸气泡脉动现象实验研究^[8],在爆炸水箱里进行了小当量圆柱形装药水下爆炸实验,利用高速摄像系统测量气泡脉动过程,获得了气泡膨胀、收缩、溃灭和气泡射流形成等过程图像。本文主要利用数字化高速摄像系统来测量水下爆炸气泡脉动过程,获得气泡脉动过程相关参数,研究结果加深了对水下爆炸气泡脉动过程的理解。

1 实验方案

水下爆炸实验准备周期长、费用高、安全性差、测量难度大、系统复杂。为了保证安全、准确、可靠地获取实验数据,必须对整个实验过程进行精心的设计。爆炸水箱是水下爆炸实验研究的重要设备之一^[9],实验用爆炸水箱如图 1,直径 1.5m,高度 1.2m,能够进行<10gTNT 当量的实验室水下爆炸实验,为了满足光学测量需求,设计了大尺寸照相窗口。

实验布局如图 3,容器注入一定深度水,装药固定在钢架上,调整到合适深度,高速摄像系统对准照相窗口,调整合适位置使视场满足要求,即最大气泡能够出现在视场内,布置专用水中冲击波压力传感器测量水中冲击波压力。为得到球形对称的初始状态,实验采用小型球形 PETN 装药(图 2),利用直径 1mm 的柔爆索中心起爆装药^[10,11],从而产生球形对称冲击波和爆轰产物。



图 1 爆炸水箱

Fig. 1 Underwater explosion tank

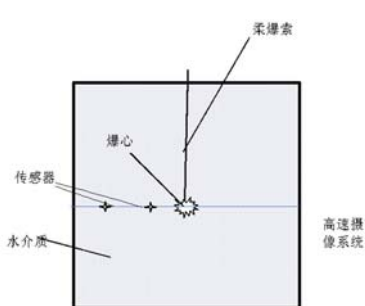


图 2 实验布局示意图

Fig. 2 Sketch of experiment



图 3 球形装药图

Fig. 3 Spherical explosives



图 4 高速摄像系统

Fig. 4 High-speed imaging system

实验使用数字化高速摄像系统(图 4)拍摄气泡脉动过程,对水下爆炸现象进行直观的纪录。考虑安全性,实验在户外进行,利用太阳光源可以满足摄像系统对光源的要求,为了防止意外情况,在高速摄像系统前端放置一防护设施,以保护设备。

2 结果分析

2.1 气泡脉动过程

进行了 0.125gTNT、1gTNT、3.375gTNT、8gTNT 不同当量的爆炸实验,并成功利用高速摄像系统记录了气泡脉动过程,获得了一批较有价值的实验数据,加深了对水下爆炸气泡脉动的理解,下面列出几种典型的气泡脉动过程数据。

图 5 为 0.125gTNT 当量的爆炸实验,爆心距水面 60cm,爆炸后气泡在水中脉动多次,最终爆轰产物溶解在水介质中,气泡脉动过程中,基本上没有发生垂直移动,气泡在膨胀阶段形状近似球形,在收缩阶段,渐渐偏离球形状态。

图 6 为 1gTNT 当量爆炸后气泡脉动过程,爆心距水平面 60cm。气泡脉动多次,第三次脉动结束

后,气泡已经移出高速摄像系统视场之外,可以推断,气泡最终移动到容器底部并破灭。随着当量增加,并且受到边界条件的影响,气泡逐渐向容器底部移动。

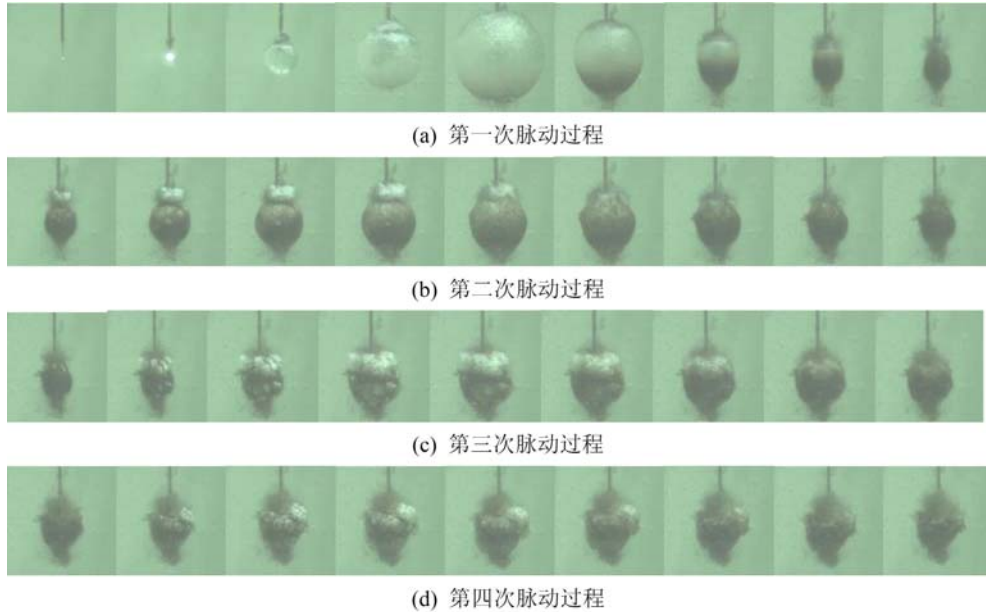


图5 0.125gTNT 当量爆炸气泡脉动过程

Fig. 5 0.125gTNT explosion bubble pulsation

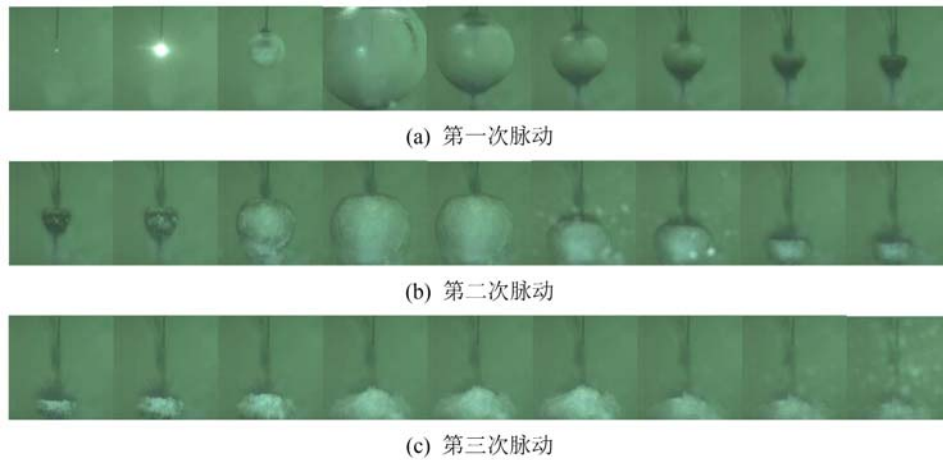


图6 1gTNT 当量爆炸气泡脉动过程

Fig. 6 1gTNT explosion bubble pulsation

2.2 气泡特征尺寸判读

气泡脉动周期和最大半径分别由经验公式(1)和(2)给出^[2]:

$$\text{气泡周期: } T = K_5 \times W^{1/3} / [(D + 9.8)^{5/6}] \quad (1)$$

$$\text{气泡最大半径: } R_m = K_6 \times W^{1/3} / [(D + 9.8)^{1/3}] \quad (2)$$

公式的系数 $K_5 = 2.11$, $K_6 = 3.50$; $T(\text{s})$ 为气泡脉动周期; $R_m(\text{m})$ 为气泡最大半径; $W(\text{kg})$ 为爆炸当量; $D(\text{m})$ 为爆心深度。

气泡脉动相对于水中冲击波是一个低压、长时间的作用过程,可以把水当作不可压缩流体处理。假定气泡只产生径向运动,可忽略水黏性和热传导条件。气泡内气体平均压力为 p_b , 气泡内气体的绝热指数为 k , R_0 为气泡初始半径,文献[2]给出了在一定水深压力为 p_0 、水的密度为 ρ_0 的条件下,球对称气泡半径解析解为:

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3\rho_0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \left\{ \frac{p_b}{k-1} \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3(k-1)} \right] + \left[1 - \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \right] \right\} p_0} \quad (3)$$

通过高速摄像数据测量气泡脉动周期,设气泡脉动周期为 T ,拍摄速率为 n 幅/秒,对应气泡脉动过程的电子图片幅数为 N ,则脉动周期为:

$$T = \frac{N}{n} \quad (4)$$

通过测量的冲击波压力数据可获得气泡脉动周期,如图 7 所示为测量的冲击波压力曲线,爆炸当量 1gTNT,爆心距离 30cm,曲线中显示了初始冲击波和二次脉动压力波的峰值,两次峰值之间的时间差即是气泡第一次脉动周期。

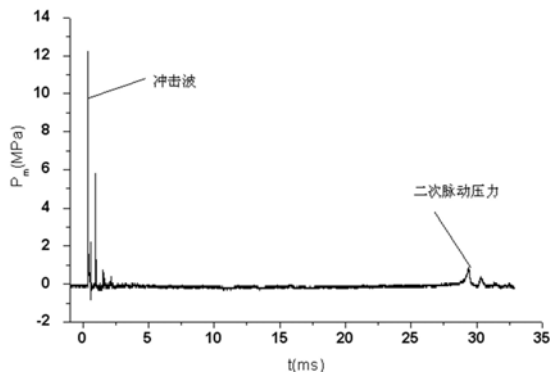


图 7 冲击波和二次脉动压力曲线

Fig. 7 Profile of measured shock-wave and bubble pressure

表 1 为通过高速摄像数据测量的气泡脉动周期、压力数据测量的气泡脉动周期与经验公式计算结果。

表 1 气泡第一次脉动周期对比

Tab. 1 Comparison of period of first pulsation

当量(gTNT)	经验周期(ms)	压力测量周期(ms)	光学测量周期(ms)
0.125	15.1	15.2	16.0
1.0	30.2	28.7	29.5
3.375	45.4	41.0	41.3
8.0	60.4	54.5	55.3

通过高速摄像数据判读气泡周期,不考虑主观判读因素,系统误差为 $1/n$ 秒,对于实验用 2000~6000 帧/秒的拍摄速率,误差为 0.17ms~0.5ms,相对于气泡脉动周期来说已经足够小,因而对周期判读的误差影响较小。

由于高速摄像系统和气泡之间距离相对气泡尺寸足够大,因而气泡直径可根据高速摄像系统拍摄的照片测量及近似计算得出。设实际气泡直径为 D ,图片上气泡直径像素坐标差为 ΔD ,药球初始直径像素坐标差为 ΔD_1 ,药球实际直径为 D_1 ,则气泡直径为:

$$D = \frac{\Delta D}{\Delta D_1} \times D_1 \quad (5)$$

利用公式(5)求出气泡脉动过程中直径随各时间变化关系曲线(图 8)。可以看出,气泡直径随时间变化与理论预估一致,曲线呈开口向下抛物线形式。由于像素是离散的,在气泡膨胀初始阶段,气泡直径较小,影响气泡直径的判读;另外,初始阶段,气泡膨胀速度较快,图像边缘模糊,也影响了尺寸的判读。总体来说,气泡在膨胀的初始阶段,尺寸判读误差相对较大。表 2 为通过高速摄像数据测量的气泡半径和理论计算结果。

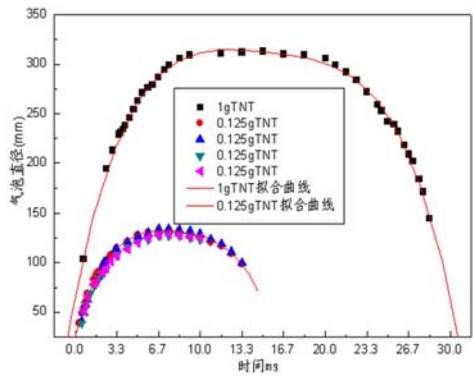


图 8 气泡脉动过程中气泡直径随时间变化图
Fig. 8 The evolution of the bubble diameter

表 2 气泡半径对比

Tab. 2 Comparison of bubble radius

当量 (gTNT)	经验公式半径 (cm)	光学测量半径 (cm)
0.125	7.8	7.3
1.0	15.7	17.5
3.375	23.6	23.0
8.0	31.4	30.7

由公式(3)和图 8 可以看出,在初始时刻,气泡膨胀速度等于零,随着爆轰波达到装药边界,气泡运动速度迅速增加到最大值,然后缓慢下降,当气泡膨胀到最大值时,速度降为零。气泡膨胀初期和收缩末期运动速度比较快。膨胀到最大半径附近时,在相对较长时间内气泡半径没有明显变化,实验结果与采用简化假设的一维理论分析结果基本一致。

由表 1 和表 2 可以看出,实验测量结果和经验公式计算值差别较小,具有较好的一致性,通过压力曲线测量脉动周期是比较精确的,压力测量周期和光学测量周期比较接近。实验数据分析表明使用高速摄影图片数据获得的气泡直径及气泡脉动周期数据是可靠的,能够满足实验要求。

3 结论

在爆炸水箱里开展了小当量水下爆炸实验,利用高速摄像系统获得了水下爆炸气泡脉动过程图像,结论如下:

- 1) 本文建立的实验系统是有效的,具有经济、安全、高效等优点,能够满足水下爆炸气泡脉动研究需求;
- 2) 实验测量的气泡脉动参数与经验公式具有较好的一致性;
- 3) 数字化图片对于气泡半径判读更加方便准确,研究结果可加深对气泡脉动周期和半径变化的理解。

参考文献:

[1] Michael M, Swisdak J R. Explosion effects and properties: Part II — explosion effect in water[R]. AD-A056694, 1978.

[2] Cole R H 著, 罗耀杰, 韩润泽 等译. 水下爆炸[M]. 国防工业出版社, 1960. 11 (Cole Robert H. Underwater explosions[M]. Princeton University Press, 1948)

[3] John Pearson, Lawrence N Cosner, Rolland Gallup. A two-camera system to study underwater explosions[R]. AD743089, 1972.

[4] John M Brett, Michael Buckland, Terry Turner, et al. An experimental Facility for Imaging of Medium Scale Underwater Explosions[R]. DSTO-TR-1432.

[5] 张寒虹, 陈志福, 张弛. 水中电爆炸的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 363—368 (ZHANG Hanhong, CHEN Zhifu, ZHANG Chi. Experimental Reserches on Underwater Wire Exploding[J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(4): 363—368 (in Chinese))

[6] 张寒虹, 陈志福. 水中电爆炸的高速摄影研究[J]. 光子学报, 2001, 30(7): 889—892 (Zhang Hanhong, Chen Zhifu. Underwater Wire Exploding by High Speed Photography[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(7): 889—8923 (in Chinese))

- [7] 朱锡,牟金磊,洪江波 等. 水下爆炸气泡脉动特性的试验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2007, 28(4):365—369 (ZHU Xi, MU Jinlei, HONG Jiangbo, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(4):365—369(in Chinese))
- [8] 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—577(WANG Bin, ZHANG Yuanping, WANG Yanping. Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2008,28(6):572—577(in Chinese))
- [9] 赵生伟,张颖,王占江 等. 小当量水中爆炸冲击波实验及数值模拟[J]. 实验力学,2009,24(3):259—264(ZHAO Sheng-wei, ZHANG Ying, WANG Zhan-jiang, et al. Experiment and Numerical Simulation Investigation of Small Scale Underwater Explosions[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2009,24(3):259—264(in Chinese))
- [10] Hantel L W, Davis W C. Spherical Explosions in Water[R]. LA-4635, 1971.
- [11] 王占江,李孝兰,张若棋 等. 固体介质中球形发散波的实验装置[J]. 爆炸与冲击,2000,20(2):103—110(WANG Zhanjiang, LI Xiaolan, ZHANG Ruo-qi, et al. A Experimental Apparatus for Spherical Wave Propagation in Solid [J]. Explosion and Shock, 2000, 20(2):103—110 (in Chinese))

Underwater Explosion Bubble Pulsation Measurement and Analysis

ZHANG Ying, ZHAO Sheng-wei, WANG Zhan-jiang, ZHOU Gang

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Bubble demolition effect induced by underwater explosion loads is one of the most important lethality of naval weapons. In order to study bubble pulsation of undwater explosion, a set of small scaled experimental system was establised, a series of underwater explosion (Explosion equivalent is 0.125g, 1.0g, 3.375g and 8.0g TNT, respectively) tests were carried out in water tank. Spherical PETN chargers were adopted and center ignition was used to produce spherical symmetrical bubble and shock waves. High-speed camera system was used to capture the bubble impulsion and pressure gauges were mounted to measure the pressure of shock waves. Clear images of underwater explosion bubble pulsation and pressure curves of shock waves and bubble pulsation were obtained. Bubble diameter and its pulsation period were analyzed, baesd on the interpretation of digital images recorded by high-speed camera system. Otherwise, bubble pulsation period was measured from shock wave curves, bubble pulsation related parameters were compared ans analyzed. Results show that the bubble diameter measured from digital images are close to empirical formula. Results also show that the bubble pulsation period measured from digital images is in agreement with that measured from shock wave curves and that calculated by empirical formula. So the experimental technique presented in this paper is safe, economical and reliable. The measured parameters of bubble pulsation are accurate and useful for studying underwater explosion bubble pulsation.

Keywords: underwater explosion; bubble pulsation; high-speed camera system