

文章编号: 1006-9941(2010)01-0102-05

# 高速摄影技术在水下爆炸气泡脉动研究中的应用

汪斌, 张光升, 高宁, 王彦平

(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实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 利用 APX-RS 数字式高速相机拍摄了 PETN 炸药水下爆炸气泡自由场脉动过程、气泡与边界相互作用水射流形成过程的清晰图像。采用氙灯照明光源, 高速相机幅频可以达到  $6000\text{ s}^{-1}$ , 采用在水箱壁贴低密度材料的方法来降低反射冲击波对气泡脉动过程的影响, 由高速相机测试结果分析得到的气泡脉动参数与 8 kg 爆炸水池试验结果一致, 验证了光学测试结果的真实性。

**关键词:** 爆炸力学; 水下爆炸; 高速摄影; 气泡脉动; 水射流

**中图分类号:** TJ55; O389; TB853.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.025

## 1 引言

炸药水下爆炸产生的气泡能约占炸药水下爆炸总能量的一半左右, 其对水下目标主要产生两种破坏作用: 鞭状振荡响应 (whipping) 和水射流 (jetting)。目前, 水下兵器对舰船目标的毁伤作用还仅依靠冲击波能。随着非理想炸药在水下兵器战斗部中的广泛使用, 气泡能占炸药水下爆炸总能量的比例越来越高, 如何充分利用炸药水下爆炸产生的气泡能对舰船目标进行毁伤打击, 已经成为越来越关心的问题<sup>[1]</sup>。获得炸药水下爆炸气泡脉动过程的直观图像, 是开展相关研究的基础。鉴于水介质的特殊性, 目前水下爆炸气泡脉动相关现象研究主要在水箱中开展, Lauterborn<sup>[2]</sup>、Chahine G L<sup>[3]</sup>、Suresh Menon<sup>[4]</sup> 等利用高速摄影技术研究了激光、电火花、可燃气体的玻璃球等爆炸源水下爆炸产生的气泡脉动现象。国内洪江波<sup>[5]</sup>、朱锡等<sup>[6]</sup> 利用高速摄影技术研究了 TNT 炸药水下爆炸现象, 但相机幅频只能达到  $500\text{ s}^{-1}$ 。由于气泡脉动中最关键的收缩再膨胀过程时间小于 1 ms, 采用低幅频的拍摄方法不能捕捉到清晰的气泡二次脉动演变过程图像。本工作利用持续发光的短弧氙灯作为照明光源, 为高速摄影提供了充足的光源, 相机幅频可达  $6000\text{ s}^{-1}$ , 试验得到了清晰的气泡自由场脉动过程和

气泡与边界相互作用水射流形成过程图像, 为水下爆炸气泡动力学研究提供了直观丰富的试验数据。

## 2 试验装置与仪器

### 2.1 试验装置

试验在  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$  的水箱中进行, 试验装置平面布置如图 1 所示。

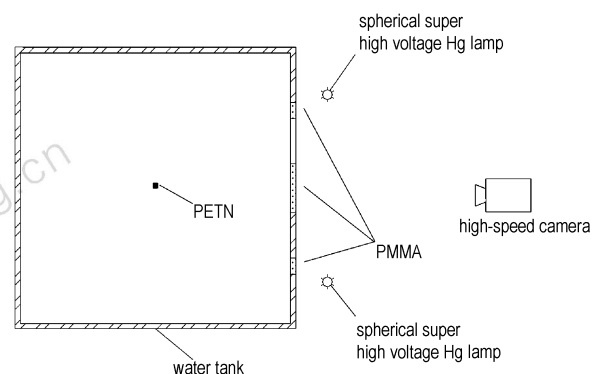


图 1 试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

炸药水下爆炸产生的冲击波在水箱壁面反射后, 会对气泡脉动过程造成明显的影响, 甚至使试验结果与理论分析结果差异很大<sup>[7]</sup>。为避免冲击波对气泡脉动过程造成影响, 在水箱壁贴有一层白色低阻抗材料。根据应力波理论分析可知: 当冲击波波阵面从高阻抗材料传入低阻抗材料时, 只会反射稀疏波, 从而消除强反射冲击波。低阻抗材料的白色同时能够增强光

收稿日期: 2009-06-09; 修回日期: 2009-08-02

基金项目: 国家安全重大基础研究项目 (51335010202); 中国工程物理研究院面上基金项目 (20060101)

作者简介: 汪斌 (1980-), 男, 助理研究员, 主要从事水下爆炸气泡动力学研究。e-mail: wbin98221@163.com

线在水中的反射和折射,增加水箱中水的清晰度,能够进一步提高相机的幅频。

## 2.2 试验样品

试验样品为 PETN 炸药柱,质量分别为 1.5 g、3.0 g 和 4.5 g,炸药密度为  $1.68 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,长径比为 1.1 : 1。由于炸药尺寸较小,炸药采用端面起爆,试验用雷管为 26 号电雷管。

## 2.3 高速相机参数

试验使用 APX-RS 数字式高速相机,通过高速 CMOS 传感器对运动物体进行记录,并将记录转化为数据存储在相机存储器中,以人眼能分辨的速度回放,便可观察到高速运动中肉眼观测不到的情况。APX-RS 相机系统由主机、控制计算机、同步器、电源、控制器等部件组成。其主要的技术特征是采用了高感光灵敏度、高分辨率传感器技术,具有“重点关注区域”的功能。在高速摄影中,最重要的环节是减少高速运动物体的运动模糊,使拍摄得到的图像更接近于物体的真实形状,对后续图像分析具有重要作用。减少运动模糊的关键是使运动物体在相邻两幅图像的间距时间内运动的距离尽量接近其真实尺寸,这需要综合考虑物体的运动速度、相机设置的幅频、快门曝光时间等因素<sup>[8]</sup>。APX-RS 相机在  $5000 \text{ s}^{-1}$  的幅频以内,既可以保证高分辨率,又可以达到较高的拍摄速度。本试验中,气泡收缩膨胀过程的速度在百米量级,相机幅频控制在  $4000 \sim 5000 \text{ s}^{-1}$  即可满足要求。由于水对光线的强烈吸收,造成普通照明光源发出的光线在水箱内衰减很快,试验采用常照明球形超高压短弧氙灯作为外照明光源,其发出的光线具有亮度高、显色性好等优点,能够满足试验要求。

## 3 测试原理

炸药水下爆炸产生的气泡尺寸远大于炸药自身尺寸,以 4.5 g PETN 为例,其炸药尺寸仅有  $\phi 15 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ ,在水深 1 m 的条件下,水下爆炸后产生的气泡直径可达 0.5 m。因此,在水下爆炸试验时,首先根据炸药质量、水深等参数,估算出气泡最大直径,再放入与之位置和尺寸相对应的标志物。通过调整高速相机镜头位置和相机幅频、曝光时间等相关参数,使相机能够完整清晰地拍摄到整个标志物。根据文献[9]提供的数据,气泡脉动中最关键的收缩再膨胀过程约 1 ms,以幅频  $4000 \text{ s}^{-1}$  拍摄时,在 1 ms 内能够得到 4 幅气泡脉动的详细图像。由于光线在水介质、有机

玻璃测试窗口、空气之间传播时存在折射现象,需要对高速相机拍摄的气泡图像进行数据分析,得到水下爆炸气泡的实际尺寸<sup>[5]</sup>。虽然在试验前,采用了与气泡产生位置和气泡尺寸基本相同的标志物进行了静止像拍摄,理论上讲,通过判读气泡的尺寸,再与高速相机得到的静止像已知的实际尺寸进行标定,就可以得到气泡的实际尺寸。实际上,从高速相机图像判读得到的气泡尺寸并非实际气泡尺寸,由于受相机镜头的影响,高速相机拍摄得到的图像仅是一个球冠,如图 2 所示。

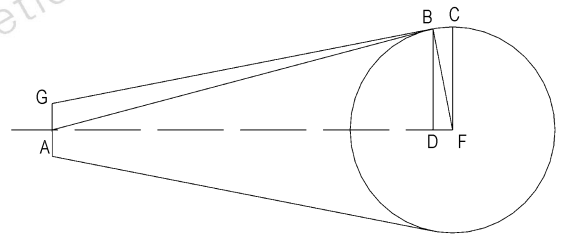


图 2 气泡图像判读方法

Fig. 2 Analyzed method of bubble picture

受相机镜头尺寸  $AG$  的限制,通过相机拍摄得到的气泡半径为  $BD$ ,而实际气泡半径为  $BF$ 。此次试验中,相机到炸药的距为  $AF$  为 3 m,  $BD$  能够通过试验结果判读得出,通过简单的三角变换公式(1)和(2)就可以计算得到实际气泡半径  $BF$ 。

$$DF = \frac{AF \pm \sqrt{AF^2 - 4BD^2}}{2} \quad (1)$$

$$BF = \sqrt{BD^2 + DF^2} \quad (2)$$

## 4 试验结果与分析

### 4.1 气泡自由场脉动试验结果及分析

高速相机拍摄得到的 4.5 g PETN 爆炸产生的气泡脉动过程如图 3 所示。炸药起爆以后,高温高压的爆炸产物压缩周围流体,迅速向外膨胀,形成一爆炸气泡,并持续膨胀。当气泡内气体压力和周围流体静压相等时,由于惯性水流作用,气泡还会继续过度膨胀,在  $t = 22.5 \text{ ms}$  时气泡膨胀至最大半径 26.9 cm。此时气泡内气体压力已远低于周围流体静压,于是又开始收缩过程。同样,惯性水流作用会过度压缩气泡,从而产生再次膨胀过程。

根据气泡最大半径  $R_{\max}$  和周期  $T$  的经验公式<sup>[9]</sup>:

$$R_{\max} = 3.3825 \times \left( \frac{W}{D+10} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$T = 2.064 \frac{W^{1/3}}{(D+10)^{5/6}} \quad (4)$$

式中,  $W$  为炸药当量,  $D$  为水深。在 1 m 水深条件下, 三种规格 PETN 炸药水下爆炸的最大气泡半径和脉动周期试验数据与经验公式计算结果的对比如表 1 所示。

由于经验公式 (3) 和 (4) 的相关拟合系数是由 TNT 炸药水下爆炸得到, 而 PETN 与 TNT 的冲击波能、气泡能并不相同, 因此造成试验结果与经验公式计算结果存在一定的差异。表中同时给出了在 8 kg TNT 当量爆炸水池中, 采用相同药量 PETN 进行的水下爆炸气泡脉动参数的验证试验结果<sup>[10]</sup>。从表 1 中可以看出, 水箱试验和水池试验方法得到的测试结果误差最大仅有 5.1%, 说明光学测试结果真实可信。

#### 4.2 气泡二次脉动演变过程图像

在气泡动力学研究中, 最关心的是气泡收缩再膨胀时的气泡演变过程图像。图 4 给出了高速相机得到

的试验结果, 从图 4 中可以看出:  $t=44$  ms 时, 气泡形状仍然保持球形,  $t=44.75$  ms 时, 由于下表面收缩速度更快, 开始向气泡内部凹陷形成涡状结构, 在图上可以看到气泡底部爆炸产物随水自下而上流动留下的清晰迹线。 $t=45$  ms 时, 气泡上表面开始向上凸起, 间接证明下表面的径向收缩水流到达上表面, 此时气泡体积收缩至最小, 气泡内气体压力远高于周围流体静压, 于是又产生再次膨胀过程。

#### 4.3 气泡脉动水射流试验

当气泡在边界附近脉动时, 会与边界相互作用产生水射流现象。图 5 给出了 1.5 g PETN 在距离水平放置的钢板 0.2 m 处爆炸后, 气泡与边界相互作用过程图像, 相机幅频为 6000 fps。炸药水下爆炸产生的气泡在膨胀过程中其形状没有明显变化, 但是随着气

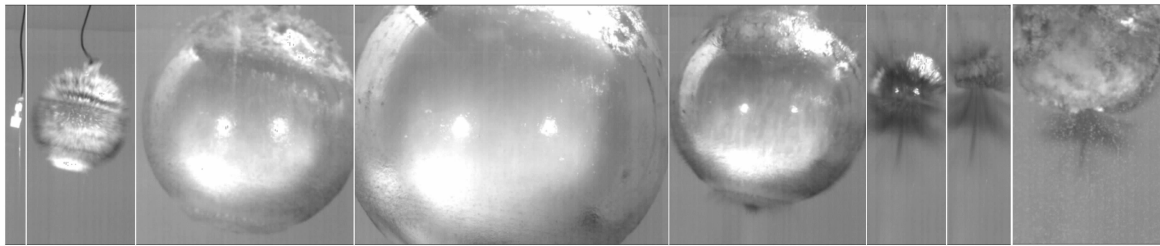


图 3 4.5 g PETN 气泡脉动图像, 从左至右分别为  $t=0, 1, 5, 22.5, 40, 44, 44.75, 47.25$  ms

Fig. 3 Experimental picture of a 4.5 g PETN underwater explosion, the bubble shape (from left to right) at  $t=0, 1, 5, 22.5, 40, 44, 44.75, 47.25$  ms

表 1 试验结果与计算结果对比

Table 1 Comparison of experimental and calculated results

$m_{\text{PETN}}/\text{g}$	radius/cm		$T_c/\text{ms}$	$T_m/\text{ms}$	
	calculated	experimental		water tank	8 kg test pound <sup>[10]</sup>
1.5	0.197	0.195	35	33	33.52
3.0	0.248	0.241	44	40	41.46
4.5	0.284	0.269	50	45	46.95

Note:  $T_c$  is calculated period,  $T_m$  is experimental period.

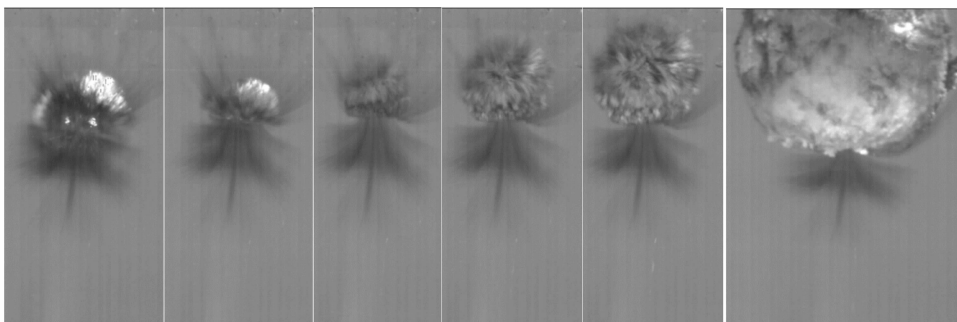


图 4 气泡收缩再膨胀过程, 从左至右分别为  $t=44, 44.25, 44.5, 44.75, 45, 45.5$  ms

Fig. 4 Contracted and expanded picture of bubble oscillation, the bubble shape (from left to right) at  $t=44, 44.25, 44.5, 44.75, 45, 45.5$  ms

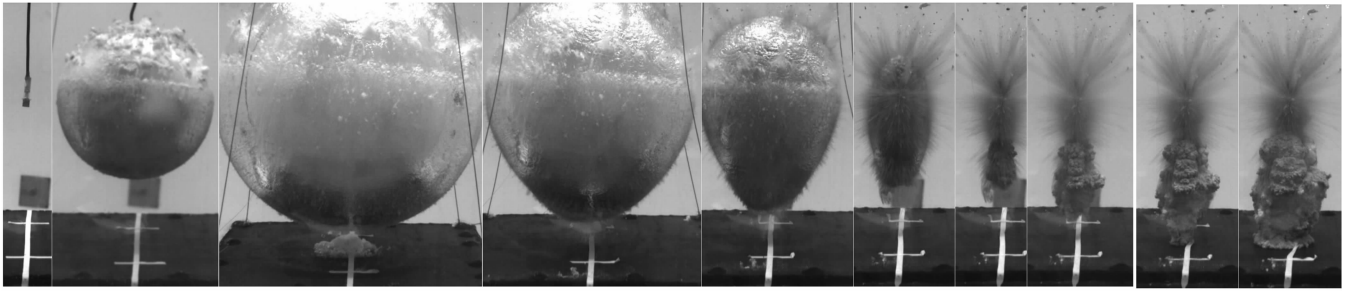


图5 气泡脉动水射流图像,从左至右分别为  $t=0, 2.5, 15.5, 26.1, 29.8, 31.8, 32.5, 32.8, 33.1, 34$  ms

Fig. 5 Experimental picture of bubble oscillation formed water jet, the bubble shape (from left to right) at  $t=0, 2.5, 15.5, 26.1, 29.8, 31.8, 32.5, 32.8, 33.1, 34$  ms

泡的逐渐收缩,受 Bjerknes 力<sup>[11]</sup>的影响,气泡形状发生明显变化。当其收缩到最小时,在浮力、Bjerknes 力和界面不稳定性影响下,形成垂直向下的水射流。通过高速相机测试结果初步估算的水射流速度在  $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右<sup>[12]</sup>,水射流对水底边界施加了巨大的冲击力。因此,水下兵器战斗部水下爆炸产生的气泡与舰船壳体相互作用产生的水射流能够对舰船目标产生一定的毁伤作用。

## 5 结 论

(1) APX-RS 数字式高速相机可用于水下爆炸气泡脉动过程图像拍摄,采用合适的照明光源后,相机幅频可以达到  $6000 \text{ s}^{-1}$ ,满足气泡脉动测试要求。

(2) 对高速相机拍摄的气泡脉动图像进行分析,在得到气泡脉动半径、脉动周期等基本参数的同时,又能够捕捉到气泡二次脉动的收缩再膨胀演变过程,气泡水射流演变过程以及射流速度等气泡关键参数。

(3) 1.5 g PETN 炸药水下爆炸产生的气泡与边界相互作用产生的水射流速度就可以达到  $120 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,需要在此方面深入开展研究工作,以充分利用炸药水下爆炸产生的气泡能对舰船目标进行毁伤打击。

### 参考文献:

- [1] 刘建湖. 船舶非接触水下爆炸动力学的理论与应用[D]. 无锡: 中国船舶科学研究中心博士论文,2002: 2-4.
- [2] Lauterborn W, Bolle H. Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighborhood of a solid boundary[J]. *J Fluid Mech*,1975,72(2): 391-399.
- [3] Chahine G L, Frederick G S, Lambrecht C S, et al. Spark-generated bubbles as laboratory scale models of underwater explosions and their use for validation of simulation tools[C] // Proc. 66th Shock and Vibration Symposium, Biloxi, MS, 1995: 265-277.
- [4] Suresh Menon, Mihir Lal. On the dynamics and instability of bubbles formed during underwater explosions[J]. *Experimental*

*Thermal and Fluid Science*,1998,16(3): 305-321.

- [5] 洪江波,李海涛,朱锡,等. 水下爆炸的高速摄影测试技术研究[J]. 武汉理工大学学报,2003,30(5): 82-86.  
HONG Jiang-Bo, LI Hai-Tao, ZHU Xi, et al. High-speed photographic investigation of bubble introduced by underwater explosion[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 30(5): 82-86.
- [6] 朱锡,牟金奎,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): 365-368.  
ZHU Xi, MU Jin-kei, HONG Jiang-bo, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(4): 365-368.
- [7] 张颖,周刚. 小当量水下爆炸试验研究[C] // 第七届全国爆轰学术会议文集,北京: 北京理工大学,2006: 222-227.  
ZHANG Ying, ZHOU Gang. Experimental study on small scale underwater explosion [C] // The 7th Detonation Symposium, Beijing. 2006: 222-227.
- [8] 赵继波,文尚刚,谭多望,等. APX-RS 相机在高速摄影中的应用[J]. 爆炸与冲击,2009,29(1): 90-94.  
ZHAO Ji-bo, WEN Shang-gang, TAN Duo-wang, et al. Application of APX-RS digital camera to high-speed photography[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009, 29(1): 90-94.
- [9] Cole P. Underwater Explosions[M]. Princeton: Princeton University Press, 1947.
- [10] 汪斌,王彦平. 有限水域气泡脉动实验方法研究[J]. 火炸药学报,2008,31(6): 32-35.  
WANG Bin, WANG Yan-ping. A method of studying bubble pulse in a confined water area[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(6): 32-35.
- [11] 张阿漫,姚熊亮. 近边界三维水下爆炸气泡动态特性研究[J]. 爆炸与冲击,2008,28(2): 124-130.  
ZHANG A-man, YAO Xiong-liang. On dynamics of underwater explosion bubble near a boundary [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008, 28(2): 124-130.
- [12] 汪斌. 炸药水下爆炸气泡动力学研究 2008 年度试验总结报告[R]. KHY-060402-ZJYS-05, 2008.  
WANG Bin. The experimental summary report of underwater explosion bubble dynamics on 2008 [R]. KHY-060402-ZJYS-05, 2008.

