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 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。

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.025

15.0rg.cr

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^[1]。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^[2]、 Chahine G L^[3]、Suresh Menon^[4]等利用高速摄影技 术研究了激光、电火花、充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^[5]、朱锡 等^[6]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 s>。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 s⁻¹,试验得到了清晰的气泡自由场脉动过程和

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 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 m × 2 m × 2 m 的水箱中进行,试验装置 平面布设如图 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^[7]。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 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1.5g、 3.0g和4.5g,炸药密度为1.68g・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人眼观测不到的情况。 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^[8]。APX-RS相机在 5000 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 4000~5000 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4.5gPETN为例,其炸药尺寸仅有 *Φ*15 mm × 15 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 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^[5]。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,而实际气泡半为 BF。此次试验中, 相机到炸药的距离 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。

$$DF = \frac{AF \pm \sqrt{AF^2 + 4BD^2}}{2} \tag{1}$$

$$BF = \sqrt{BD^2 + DF^2} \tag{2}$$

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 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^[9]:

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

$$\Gamma = 2.064 \frac{W^3}{(D+10)^{\frac{5}{6}}}$$
(4)

含能材料

式中,W为炸药当量,D为水深。在1m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^[10]。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

104

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 _{PETN} /g	radius/cm		C T /ms	T _m /ms	
	calculated	experimental		water tank	8 kg test pound ^[10]
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=44,44.25,44.5,44.75,45,47.5 ms

Fig. 4 Contracted and expanded pictute of bubble oscillation, the bubble shape(from left to right) at t = 44, 44.25, 44.5, 44.75, 45, 45, 5 ms

含能材料



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^[11]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 和界面不稳定性的影响下,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 m·s⁻¹左右^[12],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 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 m·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 cavitationbubble 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 photo-

graphic investigaion of bubble introduced by underwater explosion[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2003, 30 (5): 82-86.

- [6] 朱锡,牟金垒,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-lei, 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 [月].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

Application of High-speed Photography in Bubble Oscillation at Underwater Explosion

WANG Bin, ZHANG Guang-sheng, GAO Ning, WANG Yan-ping

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The explicit pictures of bubble oscillation at free field and water jet formed during bubble and boundary interaction at underwater explosion was captured by APX-RS digital high-speed camera with the frame rate of camera of 6000 s⁻¹ by using Xe lamp. The wall of the water tank was equipped with a layer of acoustic-impedance materials, and the bubble oscillation was not influenced by shock waves reflected from the wall of water tank. The experimental data obtained by high speed camera agree with the experimental results of 8 kg test pound.

 Key words: explosion mechanics; underwater explosion; high-speed photography; bubble pulse; water jet

 CLC number: TJ55; O389;TB853.1

 Document code: A

 DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.01.025

************ * 读者·作者·编者 * *******

《含能材料》征稿启事

一、征稿内容

(1)炸药的合成与应用;装药、成型、加工及其相关技术;(2)炸药、推进剂、火工药剂、烟火剂及其应用技术;(3)含能材料用聚合物、增塑剂及其相关物的合成与应用;(4)含能材料的配方研制及相关技术;(5)含能材料的性能检测技术(包括理化性能、爆轰性能、安全性能及其相容性);(6)含能材料的储存寿命研究;(7)爆炸技术及其应用;(8)含能材料的环境适应性和力学性能;(9)与含能材料有关的安全防护和环境保护技术;(10)与本学科相关的科研动态、会议简讯、获奖信息、书评或新书介绍等报道性文章;(11)有关科研机构的简要介绍。

二、来稿注意事项

- 1. 摘要包含目的、方法、主要结果与结论四要素,应具有独立性和自含性。中文摘要不超过100~300字,英文摘要应尽量详细,要反映文章的主要内容。选取3~8个关键词,第一关键词为来稿所属二级学科名称,学科体系采用国家技术监督局发布的学科分类与代码(国标 GB/T13745-92),如无机化学,物理化学等。
- 图准确、清晰,提供中文和英文图题(英文论文只需英文图题),有分图时,请给出分图题目。标清纵轴和横轴代表的物理量和单位名称。 所有的图都用阿拉伯数字依次编号,图中注释用中英文对照标注。
- 5. 表格采用三线表,表题采用中英文对照,表中内容采用英文,尽量精炼。注意表中有效数据的处理。
- 6. 物理量及单位一律使用我国法定的计量单位,以 CB3100~CB3102-93 为准,不使用已废止的量和单位符号。
- 7. 化学类论文应注意:(1)正确书写元素符号大小写,注意上下角标,电荷的位置、单键多键的连接位置,可用 Me、Pr、Et、Bu、Ph (不能用),Ac,Ar等缩写。不同取代基用 R,R¹,R²表示。(2)对于已知化合物,其来源(或合成方法)、结构表征数据的参考 文献都应提供。只提供文献中未报道的谱图数据。化合物的分析结果表达顺序为产率、熔点(沸点)、旋光度、折光率、紫外、核 磁光谱、红外,质谱和元素分析(或高分辨质谱)。(3)请用 ChemDraw 或 Chemsketch 绘制化学结构式及反应式,字号用 7pt,字体 用 Time New Roma 加粗。(4)晶体结构原子编号采用 C(2),O(3)。
- 图文摘要用英文表述,不同于正文摘要,不要大详细,也不要总结结果。图(一幅,最多两幅)的选取,以能反映全文要点的简图或示意性 说明(如公式、反应式、线条图等)为佳(没有图也可),
- 9. 参考文献在中文论文应中英文对照,在英文论文中应为英文。英文论文请附中文摘要(包括题名、作者单位及关键词)。第一作者简介、标准基金全称及批准号一律以脚注注于首页。国家自然基金、重点攻关项目论文,可提前安排发表。中图分类号请参考《中国图书馆分类法》第四版。

三、稿件审理

- 来稿请推荐3~5位非本单位同行专。编辑部在收到论文保密审查证明后,才开始受理论文。从此计时,3个月内通知作者稿件 审理情况。稿件审理阶段,作者可通过网上查询。半年后返回的修改稿,按新稿处理,提前说明情况者除外。
- 2. 作者须自留底稿及电子文件,文稿在3个月内未在网上查到信息,可自行处理,但须告知编辑部。
- 3. 本刊现已加入《中国学术期刊(光盘版)》、"中国期刊网"、"万方数据资源系统(ChinaInfo)数字化期刊群"、"中文科技期刊数据 库"、"CEPS 中文电子期刊",凡不愿意加入的作者,请来稿时声明;本刊所付稿酬已包含刊物内容上网服务的报酬,不再另付。

请通过本刊网址 www. energetic-materials. org. cn 进行投稿,相关信息可通过网站查询。欢迎您的投稿!