

文章编号: 1001-1455(2008)06-0572-05

# 水中爆炸气泡脉动现象的实验研究\*

汪 斌, 张远平, 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:** 在实验水箱中采用高速摄影技术获得了炸药水中爆炸气泡脉动过程图像。实验结果表明:短长径比(1.05)PETN 炸药水中爆炸产生的气泡形状近似球形,气泡脉动周期和半径随炸药质量的增加而增大。在膨胀阶段,气泡中心位置保持不变,随着体积的不断缩小,气泡上浮越来越明显。受重力影响,气泡下表面收缩速度高于上表面,在收缩至最小时下表面向上冲顶,气泡溃灭形成水射流。

**关键词:** 爆炸力学; 气泡脉动; 水中爆炸; 水射流

**中图分类号:** O383.1

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引 言

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<sup>[1]</sup>。典型水中兵器战斗部爆炸产生的气泡脉动,会使舰船产生严重的鞭状起伏运动,造成舰船总体结构和舰船上低频设备的损坏<sup>[2-3]</sup>。随着非理想炸药(含铝炸药)在水中兵器战斗部中的广泛使用,气泡能占炸药水中爆炸总能量的比例越来越高,如 RS211、PBXW-115 等炸药水中爆炸产生的气泡能已超过其总能量的一半<sup>[4]</sup>。目前水中兵器战斗部设计还仅基于冲击波能对舰船的毁伤作用,如何充分利用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。

由于水中爆炸强冲击波对高速相机的破坏作用,天然水介质存在的各种污浊物使光线在水中的散射和衰减非常严重,获得清晰的大当量炸药水中爆炸气泡脉动图像存在一定困难。水中爆炸气泡脉动研究主要在实验水箱中开展,W. Lauterborn 等<sup>[5]</sup>、G. L. Chahine 等<sup>[6]</sup>、S. Menon 等<sup>[7]</sup>采用激光、电火花、充可燃气体的玻璃球等作为气泡产生源,获得了气泡脉动过程的一些基本规律。本文中,作者在总结前人研究的基础上,试图通过数字式高速相机获得 PETN 炸药水中爆炸后气泡脉动过程图像,分析气泡脉动各阶段的主要特点,为研究气泡脉动规律及脉动压力产生机理提供一定的参考。

## 2 实验方法

实验装置如图 1 所示:水箱尺寸为 2 m×2 m×2 m,PETN 炸药长径比为 1.05,质量分别为 1.5、3.0 和 4.5 g,采用端面起爆方式。球形超高压短弧氙灯发出的光线经过两个光源窗口进入水箱内部,为高速相机提供照明;高速相机通过测试窗口拍摄炸药水中爆炸后气泡脉动过程图像,相机幅频为 4 000 s<sup>-1</sup>。为减小水箱壁反射冲击波对气泡脉动过程的影响,水箱壁

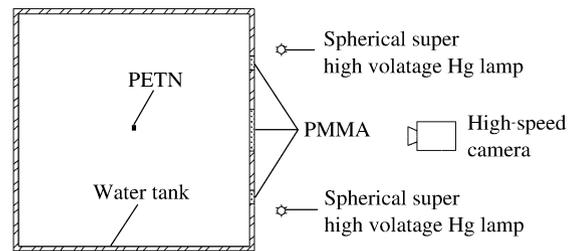


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

\* 收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-12-20

基金项目: 国家安全重大基础研究基金项目(51335010202); 中国工程物理研究院科学技术基金项目(20060101)

作者简介: 汪 斌(1980—),男,硕士,助理研究员。

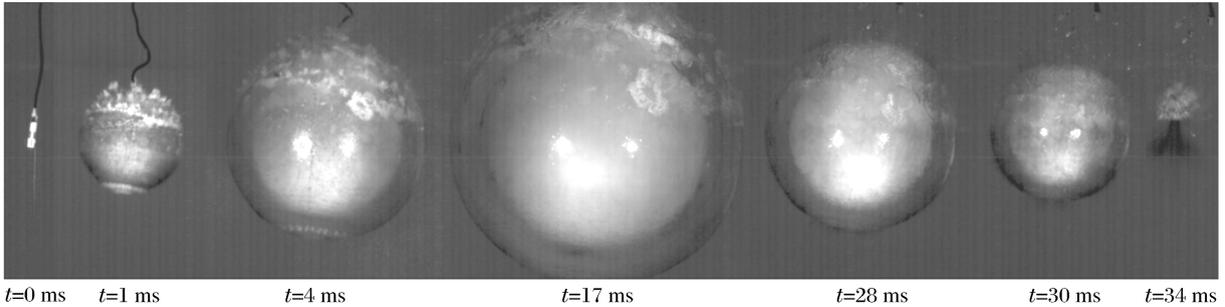
贴有一层 20 mm 厚的低密度吸能材料,实验结果表明采用此方法可以显著提高数据真实性和气泡图像质量<sup>[8]</sup>。

### 3 实验结果及分析

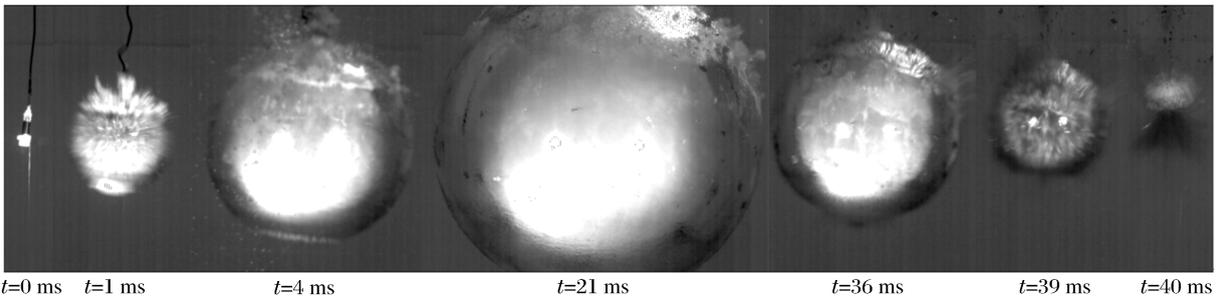
#### 3.1 气泡脉动图像

3种规格 PETN 炸药柱水中爆炸后的典型气泡脉动过程图像如图 2 所示,图中从左至右列出了气泡产生、膨胀至最大以及收缩至最小的整个脉动过程。本文中以 4.5 g PETN 炸药水中爆炸气泡脉动过程为例分析相关现象:炸药起爆时刻为  $t=0$  ms,图中黑线为起爆电缆,底部白色细线为鱼线,在固定炸药的同时可以减少外界条件对气泡脉动过程的影响。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,形成一个爆炸气泡,其上表面受雷管套等残余物影响而变得不清晰。随着气泡体积的增大,气泡内气体压力逐渐减小,膨胀速度逐渐降低,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。在整个膨胀阶段,气泡没有明显上浮,随着气泡体积的不断缩小,这种上浮变得越来越明显。

(a)  $m=1.5$  g



(b)  $m=3.0$  g



(c)  $m=4.5$  g

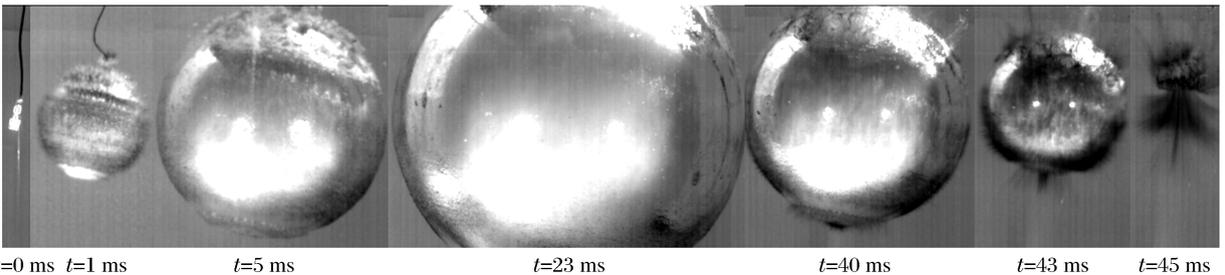


图 2 PETN 水中爆炸后气泡脉动过程图像

Fig. 2 Experimental picture of bubble pulse for PETN underwater explosion

### 3.2 气泡形状

P. Cole<sup>[1]</sup>在对气泡进行理论分析时,认为炸药中心起爆后产生的气泡形状为球形。为了更好地模拟实际水中兵器战斗部爆炸产生的气泡,本文中采用了短长径比 PETN 炸药柱和端面起爆方式,因此需要验证爆炸产生的气泡形状。表 1 列出了图 2 中 PETN 炸药水下爆炸第 2~6 幅图像的圆度误差分析结果。

表 1 气泡圆度误差分析  
Table 1 Error analyze of bubble's roundness

$m=1.5\text{ g}$		$m=3.0\text{ g}$		$m=4.5\text{ g}$	
$t/\text{ms}$	相对圆度误差/%	$t/\text{ms}$	相对圆度误差/%	$t/\text{ms}$	相对圆度误差/%
1	4.3	1	4.7	1	5.1
4	2.2	4	2.7	5	3.2
17	1.9	21	0.9	23	1.2
28	3.7	36	2.2	40	2.3
30	4.5	39	4.8	43	4.9

从分析结果可以看出:炸药端面起爆后,雷管套碎片聚集在气泡上表面,使上表面边界辨别困难,受爆炸冲击波影响,气泡形成的初始阶段圆度误差较大;随着气泡的膨胀,其内部压力逐渐趋于一致,圆度误差逐渐减小,当气泡直径最大时,圆度误差降至最低;随着气泡的收缩,圆度误差又开始逐渐增大,当气泡收缩至最小时已经失去球形形状。总的说来,气泡在脉动的大部分时间内其图像的圆度误差小于 5%,可以认为短长径比 PETN 炸药柱水中爆炸产生的气泡近似球形,为分析气泡脉动规律奠定了良好的基础。

### 3.3 结果分析

气泡脉动对水介质的作用过程与水下爆炸冲击波相比是一个低压、长时间的作用过程,可以把水当作不可压缩流体处理<sup>[1]</sup>。假定气泡只产生径向运动而无垂直位移,忽略水黏性和热传导条件。假设气泡内气体平均压力为  $p_b$ ,气泡内气体的绝热指数为  $k$ , $R_0$  为气泡的初始半径,文献[1]给出了在一定水深压力为  $p_0$ 、水的密度为  $\rho_0$  的条件下,一维球对称气泡半径  $R$  随时间  $t$  变化的二阶非线性微分方程

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

由(1)式可以得到气泡膨胀过程的解析解为

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

由(2)式可以看出,在初始时刻,气泡膨胀速度等于零。随着气泡半径的增大,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。

对炸药爆炸产生的气泡图像进行判读,得到如图 3 所示的气泡半径随时间的变化曲线,图中每个数据点的时间间隔为 1 ms。气泡膨胀初期和收缩末期各个数据点间隔比较大,膨胀和收缩速度比较快。气泡脉动的大部分时间内,数据点比较集中,特别是在最大半径附近时,气泡半径没有明显变化,膨胀和收缩速度接近零,实验结果与采用简化假设的一维理论分析结果基本一致。

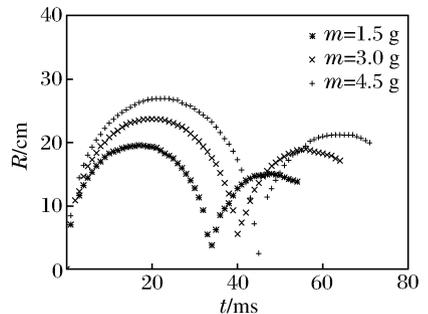


图 3 气泡半径图

Fig. 3 The evolution of the bubble radius

### 3.4 水射流现象讨论

气泡形状在收缩最后阶段发生明显变化,图4为4.5 g PETN水中爆炸气泡收缩阶段图像。从图中可以看出:当 $t=44.50$  ms时,气泡形状仍然保持球形,当 $t=44.75$  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。当 $t=45.00$  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,气泡溃灭形成水射流<sup>[9]</sup>。在形成水射流的同时,气泡体积收缩至最小,此时气泡内气体压力远高于周围流体静压,含近一半炸药总能量的气泡再次膨胀产生的压力导致有机玻璃受压不透光,高速相机通过测试窗口拍摄的照片变得模糊。

对图像结果的分析表明:重力是导致气泡收缩过程产生水射流现象的主要影响因素。以1.5 g PETN炸药水下爆炸现象分析:气泡最大直径为40 cm,在重力作用下,其上下表面的压差已达40 kPa,随着气泡的不断收缩,下表面收缩速度越来越快,导致在收缩阶段溃灭形成水射流。

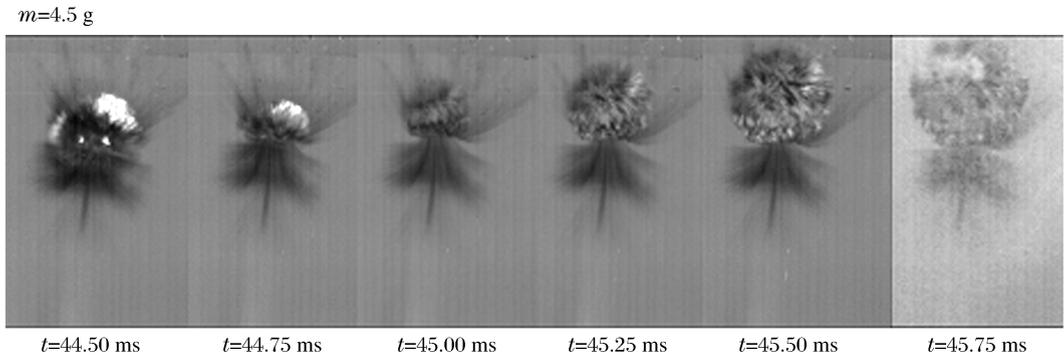


图4 气泡溃灭过程

Fig. 4 Collapse of bubble

## 4 结 论

(1) 短长径比(1.05)PETN炸药端面起爆后产生的气泡在脉动的大部分时间内保持球形;

(2) 气泡在膨胀过程中其中心位置没有发生明显变化,随着气泡的收缩其中心位置开始逐渐上浮,当体积收缩至最小时,气泡上浮明显;

(3) 气泡脉动半径和周期随炸药质量增加而增大,4.5 g PETN炸药水中爆炸产生的气泡半径为26.9 cm,膨胀初期和收缩末期气泡径向速度变化较快,在脉动的其它时间内径向速度变化缓慢;

(4) 受重力作用影响,气泡表面收缩速度不一致,在体积收缩至最小时,气泡下表面向上冲顶,导致其溃灭形成水射流,与此同时气泡再膨胀产生二次脉动压力。

参加实验的还有中国工程物理研究院流体物理研究所的池家春、何智、孙永强、肖正飞、熊学仕,在此表示感谢!

## 参考文献:

- [1] Cole P. 水下爆炸[M]. 北京:国防工业出版社,1960.
- [2] 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,2002.
- [3] 姚熊亮,陈建平. 水下爆炸气泡脉动压力下舰船动态响应研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2000,21(1):1-5.  
YAO Xiong-liang, CHEN Jian-ping. The analysis of dynamics response of ship hull subjected to gas bubble impulsive pressure of underwater explosions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000,21(1):1-5.
- [4] 周霖,徐更光. 含铝炸药水中爆炸能量输出结构[J]. 火炸药学报,2003,26(1):30-36.  
ZHOU Lin, XU Geng-guang. Configuration of underwater energy output for aluminized explosive mixtures[J].

Chinese Journal of Explosive & Propellants, 2003,26(1):30-36.

- [5] Lauterborn W, Bolle H. Experimental investigations of cavitation-bubble collapse in the neighbourhood of a solid boundary[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1975,72(2):391-399.
- [6] Chahine G L, Frederick G S. 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.
- [7] Menon S, Lal M. On the dynamics and instability of bubbles formed during underwater explosions[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1998,16(4):305-321.
- [8] 汪斌. 炸药水中爆炸气泡动力学研究 2006 年度试验总结报告[R]. GF-A0093776M, 2006.
- [9] Klaseborer E, Hung K C, Wang C. Experimental and numerical investigation of the dynamics of an underwater explosion bubble near a resilient/rigid structure[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2005,537:387-413.

## Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions

WANG Bin<sup>\*</sup>, ZHANG Yuan-ping, WANG Yan-ping

*(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

**Abstract:** Dynamics of bubble oscillation formed during underwater explosions were studied in a water tank. The expansion and collapse of the bubble pictures created by the explosion of the short length-diameter ratio(1.05) PETN were captured by a high-speed camera. The geometry of the bubble is approximately spherical. The radius and period of oscillation of the bubble increment with the charge weight. The position of the bubble is almost constant during its expansion, but when the bubble is growing smaller, the bubble rises more distinctly. The contract velocity in the bottom of bubble is faster than that of the up surface caused by the influence of gravity; a water jet was formed at the last stages of the bubble collapse.

**Key words:** mechanics of explosion; bubble oscillation; underwater explosion; water jet

---

\* Corresponding author: WANG Bin  
E-mail address: wbin98221@163.com  
Telephone: 86-816-2484115