

文章编号: 1001-1455(2009)02-0213-04

# 小当量水中爆炸气泡的脉动现象\*

赵生伟, 周刚, 王占江, 张颖, 梁志刚

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 为研究水中爆炸气泡的脉动现象, 设计了用于小当量( $\leq 10$  g TNT)水中爆炸研究的爆炸水箱, 在爆炸水箱装置中进行了多次 0.125、1.000、3.370、8.000 g TNT 当量的 PETN 球形炸药水中爆炸试验。采用高速摄影系统获得了气泡脉动图片; 给出试验范围内气泡脉动过程中气泡直径、速度及加速度随时间变化的拟合曲线。对气泡脉动直径和周期数据进行了分析, 这些数据基本符合爆炸相似律。

**关键词:** 爆炸力学; 气泡脉动; 爆炸水箱; 水中冲击波

**中图分类号:** O382.1

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

近些年来, 随着水中兵器的发展, 需要研究炸药水中爆炸后的各种物理现象和过程。气泡脉动是水中爆炸诸现象之一<sup>[1-6]</sup>, 从各报道文献看, 多采用间隙式高速摄影、转镜式高速摄影或狭缝式高速摄影方式进行研究, 虽然拍摄速度高(数百万帧/秒), 但拍摄时间短(约几十微秒)。本文中采用电子高速摄影系统, 完整记录试验中气泡脉动过程并进行分析。

## 1 试验原理及方法

水中气泡脉动过程的记录采用 FASTCAM-ultima APX 电子高速相机系统, 该系统由相机镜头、记录主机和笔记本电脑等组成。高速摄影拍摄气泡脉动过程的实物布置如图 1 所示。

使用高速摄影系统拍摄球形炸药包水中爆炸后气泡膨胀过程时, 边界会影响拍摄效果。在无限水域中, 只要气泡足够大且不被溶解, 就可以清晰拍摄出气泡从爆轰产物阶段膨胀到最大, 再从最大收缩到最小的第 1 次脉动过程及随后的脉动过程; 在存在边界的水域中, 能否拍摄到完全的气泡脉动过程, 取决于壁面反射和水面反射影响的大小。另外, 光源也是影响拍摄效果的一个因素。一般爆炸水箱或水池中的浅水爆炸, 如水箱中的 g 级小当量试验和大水池中 1 kg 炸药在 10 m 左右水深处爆炸, 只要水足够清澈, 太阳光能够满足拍摄要求; 但对上百米的深水爆炸, 必需使用必要的照明手段。

水中爆炸试验中, 0.125、1.000 g TNT 当量的 PETN 球形炸药爆炸后的气泡脉动过程受壁面影响较小, 第 1 次脉动中圆形气泡完整不破裂, 随后多次脉动过程圆形气泡破裂但存在膨胀收缩趋势; 3.370、8.000 g TNT 当量的试验, 由于首次脉动气泡最大直径较大, 从而受到壁面和水面影响也较大, 第 1 次脉动的膨胀过程能够很好完成, 气泡不破裂, 但收缩过程效果不佳。

## 2 试验装置

PETN 球形炸药水中爆炸试验在爆炸水箱中完成, 爆炸水箱是为进行小当量( $\leq 10$  g TNT)炸药水中爆炸试验而设计的。试验测量的数据包括水中冲击波压力脉冲和气泡脉动过程, 因此水箱设计主要考虑 2 个因素, 既能抵抗最大设计当量炸药水中爆炸冲击波脉冲作用, 也能够便于高速摄影系统拍摄气泡脉动发展过程。爆炸水箱整体为 16MnR 钢制圆筒, 底部为碟形法兰, 直径为 1.5 m, 高度为 1.3 m, 筒壁厚度为 10 mm; 筒壁上焊接内径为 70 cm 的法兰, 在法兰上压装 30 mm 厚有机玻璃作为观看窗口。实物结构如图 1 中所示。

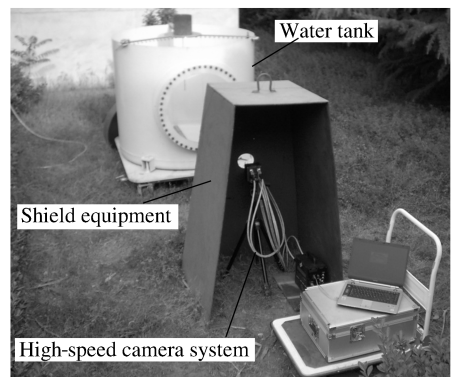


图 1 高速摄影拍摄气泡脉动过程的实物布置  
Fig. 1 Layout of the high-speed camera system

\* 收稿日期: 2007-10-19; 修回日期: 2008-01-09

作者简介: 赵生伟(1978—), 男, 硕士, 助理研究员。

### 3 试验结果及分析

共进行 0.125、1.000、3.370、8.000 g TNT 当量 PETN 球形炸药水中爆炸试验数次。0.125 g 药球直径为 5 mm, 1.000 g 药球直径为 10 mm, 3.370 g 药球直径为 15 mm, 8.000 g 药球直径为 20 mm。采用起爆互感触发方式, 起爆器 1 部, 互感线圈 1 个, SYV-50-3 同轴电缆数根, 高速摄影系统 1 套。

1.000 g TNT 当量的 PETN 药包爆炸后的 30~40  $\mu\text{s}$  之间, 气泡膨胀速度约为 200 m/s<sup>[7]</sup>。因此, 使用电子高速摄影系统拍摄药包爆炸后气泡脉动过程时, 设定拍摄速度为 6 000 s<sup>-1</sup>, 拍摄中没有使用辅助光源, 依靠自然太阳光照明。

对高速摄影系统拍摄的电子图片进行测量分析, 可得出气泡膨胀收缩过程中直径及气泡脉动周期。设气泡脉动周期为  $T$ , 高速摄影系统拍摄速度为  $n$ , 对应气泡脉动过程的电子图片幅数为  $N$ , 则脉动周期  $T = N/n$ 。

PETN 水中爆炸后气泡最大半径经验计算公式和气泡周期经验计算公式<sup>[3]</sup>分别为

$$R = 3.439m^{1/3}/(d+9.8)^{1/3}, \quad T = 2.098m^{1/3}/(d+9.8)^{5/6}$$

式中:  $R$  为第一次脉动气泡膨胀最大半径, m;  $T$  为气泡第一次脉动周期, s;  $m$  为炸药质量, kg;  $d$  为药包距水面距离, m。

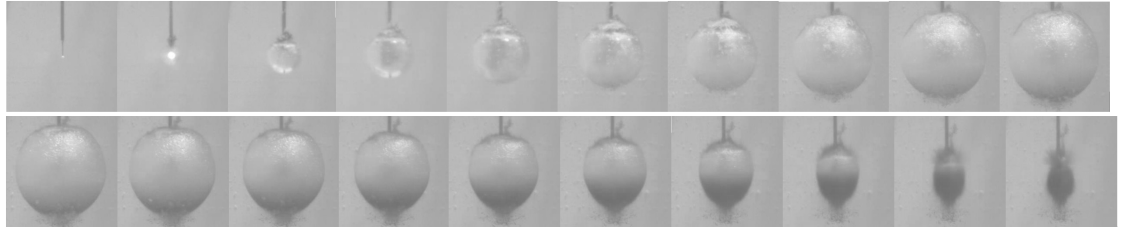
PETN 药球水中爆炸后气泡最大直径数据及脉动数据的测量值和经验公式计算值如表 1 所示, 其中  $m$  为 PETN 药球的 TNT 当量值,  $h$  为水深,  $D_{\max}$  为气泡最大直径,  $\varphi_1$  为气泡最大直径的测量值和经验值的误差,  $T$  为气泡的脉动周期,  $\varphi_2$  为气泡的脉动周期的测量值和经验值的误差。气泡膨胀、收缩脉动过程如图 2 所示。

表 1 PETN 药球水中爆炸气泡脉动数据

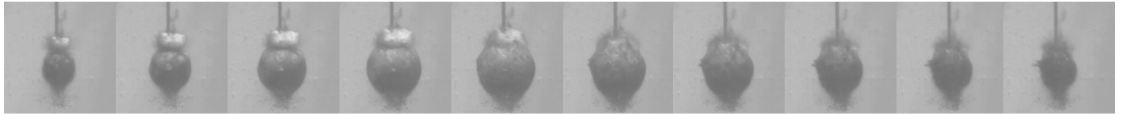
Table 1 Data of the bubble pusles for underwater explosion of the PETN charge

$m/\text{g}$	$h/\text{cm}$	$D_{\max}/\text{cm}$		$\varphi_1/\%$	$T/\text{ms}$				$\varphi_2/\%$
		经验值	测量值		经验值	测量值	膨胀段	收缩段	
0.125	61	15.6	15.2	2.6	14.65	16.00	8.00	8.00	9.20
1.000	60	30.9	31.3	1.3	29.30	29.50	15.00	14.50	0.68
3.370	48	44.8	46.2	3.1	42.80	41.50	20.00	21.50	3.03
8.000	45	62.2	61.0	1.9	59.20	56.00	28.00	28.00	5.40

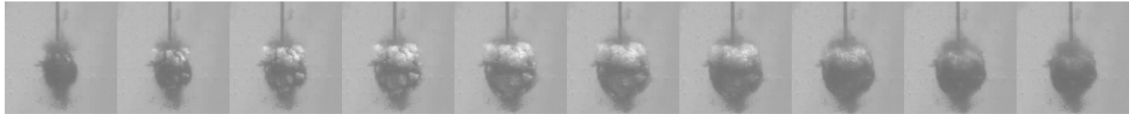
(a) The first bubble pusle for the interval of 0.833 ms between two neighbouring pictures



(b) The second bubble pusle for the interval of 1.167 ms between two neighbouring pictures



(c) The third bubble pusle for the interval of 1.167 ms between two neighbouring pictures



(d) The fourth bubble pusle for the interval of 1.000 ms between two neighbouring pictures

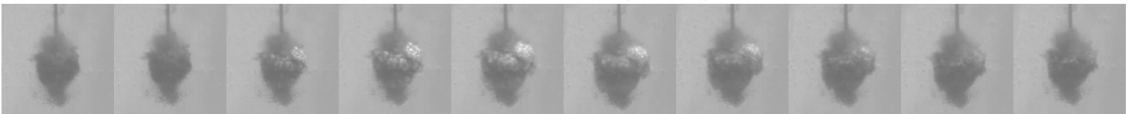


图 2 0.125 g TNT 当量的 PETN 药球在距水面 60 cm 处爆炸后的气泡脉动过程

Fig. 2 Pictures of the bubble pusles after explosion of a 0.125-g-TNT equivalent PETN charge at the depth of 60 cm in the water

试验中药球爆炸当量较小, 爆炸水深较浅, 因此在忽略水深对试验结果的影响的条件下, 试验所得气泡直径数据及脉动数据应该符合爆炸相似律, 即当量比值的立方根应该等于对应气泡直径比或脉动周期比。比较表 1 中的试验数据, 可以发现, 1.000、3.370 和 8.000 g TNT 当量的 PETN 药球水中爆炸的气泡最大直径和脉动周期分别近似为 0.125 g

TNT 当量的 PETN 药球对应数据的 2、3 和 4 倍。这与爆炸相似律的分析结果是一致的。从表 1 中的试验数据还可以看出，气泡脉动过程中，膨胀阶段与收缩阶段相互对应，膨胀时间与收缩时间基本相等；另外，经验公式计算值与实际测量值相对误差 < 10%，因此可认为使用高速摄影图片数据获得气泡直径及气泡脉动周期数据是可靠的。从图中 2 可以看出，气泡脉动过程包括膨胀过程和收缩过程，即先从最小直径膨胀到最大直径，然后再收缩到最小。

设实际气泡直径为  $D$ ，图片上气泡直径坐标差为  $\Delta D$ ，药球初始直径坐标差为  $\Delta D_1$ ，药球实际直径为  $D_1$ ，则气泡直径  $D = (\Delta D / \Delta D_1) D_1$ 。用该式可求出气泡脉动过程的直径变化，拟合数据可得如图 3 所示的气泡在第一脉动周期内气泡直径随时间的变化曲线。在气泡脉动过程中，首先是高温高压的爆轰产物开始膨胀，膨胀至内部气压与外部静压相等时，由于惯性气泡继续膨胀到最大；随后是收缩阶段，当收缩至内部气压与外部静压相等时，同样由于惯性气泡继续收缩到最小。图中曲线上升段对应气泡膨胀过程，下降段对应收缩过程，曲线呈开口向下抛物线形状。

用量纲一方法归一化处理气泡直径数据，可得出 0.125、1.000 g TNT 当量的 PETN 炸药球气泡折合直径随折合时间的变化关系，如图 4 所示。图中的纵坐标  $R' = R/R_0$  是以气泡半径  $R$  与炸药球半径  $R_0$  之比表示的折合直径，横坐标  $t' = t/t_0 = tu_0/R_0$  是以药球中心起爆时刻算起的时间  $t$  与炸药球爆炸时间  $t_0 = R_0/u_0$  之比表示的折合时间，其中  $u_0 = 7.45 \text{ km/s}$  是所用炸药的爆速<sup>[8]</sup>。根据爆炸相似律，经过归一化处理后的折合曲线应该重合。图 4 中 2 条拟合曲线较接近，符合相似律，但不是完全重合，这是由爆炸水深的影响及数据读取误差所致。

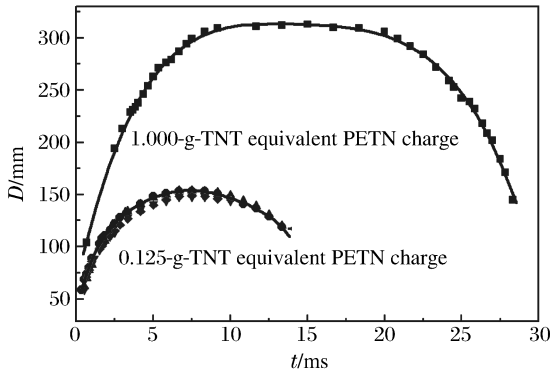


图 3 气泡脉动过程中气泡直径随时间的变化  
Fig. 3 Relation between bubble diameter and time in the pulse process

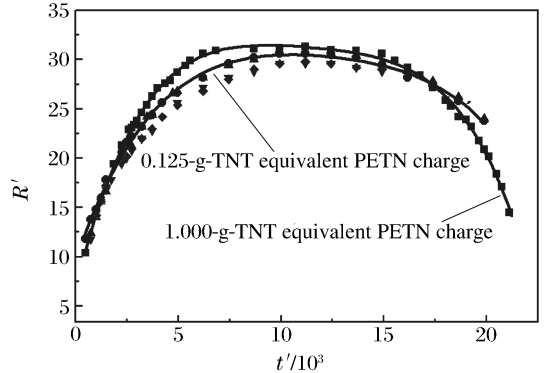


图 4 气泡脉动过程气泡折合直径随折合时间的变化  
Fig. 4 Relation between converting bubble diameter and convertin time in the pulse process

与 0.125 g TNT 当量的药球相比，1.000 g TNT 当量的药球爆轰后气泡脉动周期较长，当气泡达到最大值附近时，其直径变化不大，膨胀速度变化缓慢。图 3 中 1.000 g TNT 当量的药球脉动过程中气泡直径达最大值附近持续约 10 ms，是第一个脉动周期时间的 1/3；比较图 4 中归一化处理后的曲线，1.000、0.125 g TNT 当量的药球对应的曲线在折合直径最大值附近基本一致。因此，气泡脉动过程中直径达最大值附近持续时间较长符合爆炸相似律。

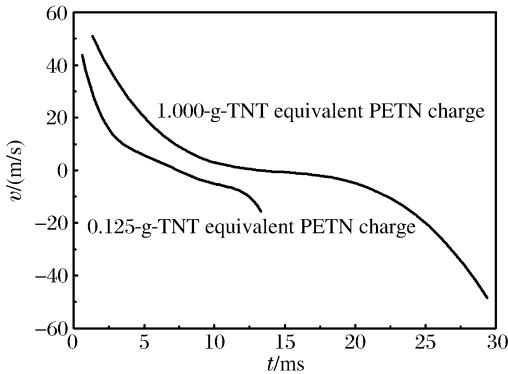


图 5 脉动过程中气泡膨胀、收缩速度随时间的变化  
Fig. 5 Variation of expanding and contracting velocities of a bubble with time in the pulse process

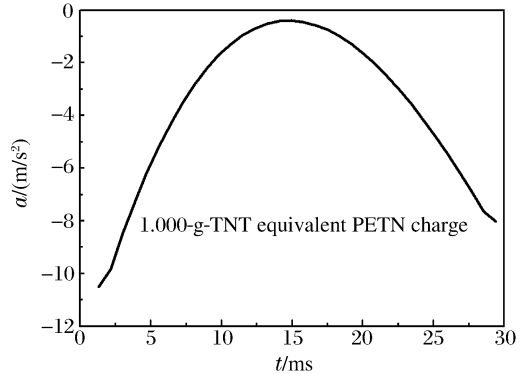


图 6 脉动过程中气泡膨胀、收缩加速度随时间的变化  
Fig. 6 Variation of expanding and contracting accelerations of a bubble with time in the pulse process

将气泡脉动过程中的直径-时间变化关系对时间微分，可得气泡膨胀、收缩速度随时间变化的关系曲线，如图 5 所示。图中纵坐标为正的曲线段对应气泡膨胀过程，随时间增大膨胀速度绝对值逐渐减小直至到零，即停止膨胀；纵坐标为负值的曲线段对应收缩过程，随时间增大收缩速度绝对值逐渐增大。可以发现，图中 1.000 g TNT 当量的药球膨

胀过程对应时间和收缩阶段对应时间基本相等,这与表1中测量所得数据结果是一致的;对0.125 g TNT当量的药球,由于爆炸当量小,气泡受周围影响较大,在第一次脉动收缩阶段后期气泡发生崩塌溶解,因此获得的气泡直径数据不完全,也使曲线的收缩阶段不完整。另外,由于气泡在脉动过程中消耗了部分爆轰能量,气泡在脉动过程中膨胀阶段的起始膨胀速度大于收缩阶段的最终速度。

将气泡脉动速度-时间变化关系对时间微分,可得气泡脉动加速度随时间变化关系,如图6所示。气泡脉动膨胀阶段加速度绝对值逐渐减小,说明此阶段速度变化逐渐减慢,对应速度曲线逐渐平缓;而气泡脉动收缩阶段加速度绝对值逐渐增大,说明此阶段速度变化逐渐加快,对应速度曲线逐渐陡峭。

## 4 结论

采用高速摄影系统获得了气泡脉动过程的图片,通过对气泡脉动图片的分析,得出气泡脉动过程中气泡直径、速度及加速度与时间的拟合曲线,对气泡脉动周期进行了分析并对气泡脉动直径进行了归一化处理,这些数据能够较好地符合爆炸相似律。因爆炸当量较小,与气泡脉动时间相比,气泡受水浮力作用在垂直方向的位移是一个缓慢的过程,在测试时间内其位移量也很小。受高速摄影拍摄精度限制,无法进一步研究试验中小当量药球水中爆炸后气泡在垂直方向的位移过程。

## 参考文献:

- [1] Cole R P. 水下爆炸[M]. 北京:国防工业出版社,1965.
- [2] 北京工业学院八系. 爆炸及其作用[M]. 北京:国防工业出版社,1980.
- [3] Reid W D. The response of surface ships to underwater explosions[R]. DSTO-GD-0109, 1996.
- [4] Brett J M, Buckland M, Turner T, et al. An experimental facility for imaging of medium scale underwater explosions[R]. DSTO-TR-1432, 2003.
- [5] Chung M, Kinsey T. Investigation into the effects of underwater shock waves on simple structures, shielded and bare explosive materials[R]. ADA-355823, 1998.
- [6] Burch I A, Mouritz A P. Analysis of responses of a small shock platform subjected to underwater explosions[R]. ADA-373203, 1999.
- [7] 王占江. 岩土中填实与空腔解耦爆炸的化爆模拟试验研究[D]. 长沙:国防科技大学,2003.
- [8] Lee E, Finger M, Collins W. JWL equation of state coefficients for high explosives[R]. UCID-16189, 1973.

## Bubble pulses of small-scale underwater explosion

ZHAO Sheng-wei\*, ZHOU Gang, WANG Zhan-jiang,  
ZHANG Ying, LIANG Zhi-gang

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

**Abstract:** A water tank was designed to explore bubble pulses of underwater explosion. In the designed water tank, small-scale underwater explosion tests were conducted for different TNT-equivalent PETN charges of 0.125, 1.000, 3.370, 8.000 g. After explosion of the PETN charge, bubble pulses were obtained by a high-speed camera system. Variation of the bubble diameter, expanding and contracting velocities, and expanding and contracting accelerations with time was achieved in the bubble pulse process under the given experimental conditions. The data of the bubble diameter and pulse period were analyzed. These data for bubble pulse obtained in this research accord approximately with a similarity rule.

**Key words:** mechanics of explosion; bubble pulse; explosion water tank; underwater shock wave

\* Corresponding author: ZHAO Sheng-wei

E-mail address: nintzhao@163.com