

# CL-20 基炸药水中爆炸气泡脉动实验研究\*

冯 淞<sup>1</sup>, 饶国宁<sup>1</sup>, 彭金华<sup>1</sup>, 汪 斌<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094;

2. 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重点实验室, 四川 绵阳 621999)

**摘要:** 为研究 CL-20 基炸药、CL-20 基含铝炸药水下爆炸气泡脉动情况, 在 2 m×2 m×2 m 的实验水箱中开展小当量实验, 采用高速摄影技术, 得到炸药水中爆炸冲击波传播曲线, 同时清晰地观测到气泡的产生、膨胀和收缩过程。拟合得到气泡脉动过程中气泡半径、速度、加速度对时间的变化曲线, 对比分析了 CL-20 含铝与非含铝炸药水下爆炸气泡脉动规律。在实验条件下, 首次直观地拍摄到 CL-20 含铝炸药水下爆炸的二次反应放热现象。实验表明: CL-20 基含铝炸药的气泡半径、脉动周期都明显升高, 半径增大 13.7%, 周期增大 6.9%; 冲击波峰值压力略有下降; 水下爆炸测试技术以及高速摄影技术是研究观测含铝炸药二次反应的有效手段。

**关键词:** 气泡脉动; 高速摄影; CL-20; 含铝炸药; 二次反应

**中图分类号:** O381

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 是一种高能量密度炸药<sup>[1]</sup>, 其爆压、爆速等参数均优于奥克托今 (HMX)<sup>[2]</sup>, 在 CL-20 炸药中加入金属粉 (铝粉) 可以大幅度提高其爆炸能量<sup>[3-5]</sup>。随着当代水下武器的发展, 提高炸药的水中爆炸威力一直是各国科研人员的研究热点。目前, CL-20 基及其含铝炸药已经陆续应用到水下武器战斗部中<sup>[6]</sup>。

炸药水中爆炸后, 首先在水介质中产生初始冲击波并向四周传播, 随后爆炸产物在水介质中形成气泡, 开始不断的收缩与膨胀<sup>[7]</sup>。冲击波载荷与气泡脉动载荷对于水下舰船、潜艇将产生一定程度的损害, 但二者引起的毁伤却并不相同。虽然气泡脉动的压力要远小于冲击波压力, 但其作用时间却远大于冲击波, 尤其当爆炸中心距离附近目标物较近时, 会产生“鞭状效应”<sup>[8]</sup>, 造成目标物结构的破坏, 这对于研究炸药水中气泡脉动过程具有重要的战略意义。在实验室条件下, 汪斌等<sup>[9]</sup>采用高速摄影技术得到 PETN 水下爆炸的气泡脉动过程以及水射流过程。王树山等<sup>[11]</sup>利用高速录像技术得到 RDX 水下爆炸气泡脉动过程与水幕形成过程。马坤等<sup>[12]</sup>采用 1.2 m 爆炸容器模拟深水爆炸过程, 利用高速相机拍摄小当量 TNT 深水下爆炸气泡脉动过程, 拟合得到气泡脉动周期与气泡最大半径随爆炸深度增大的衰减系数。然而, 前人的研究主要针对理想炸药气泡脉动情况, 关于含铝炸药的气泡脉动实验鲜有报道。在此基础上, 本文中利用高速摄影技术, 观测 CL-20 基炸药和 CL-20 基含铝炸药水中爆炸气泡脉动过程, 对比分析二者水下爆炸气泡运动时的不同现象; 分析铝粉对于气泡脉动过程的影响规律, 为计算炸药的能量输出规律提供实验数据, 为水下爆炸武器、水下爆炸气泡动力学提供数据研究基础。

## 1 实验部分

### 1.1 实验样品

实验样品包含 2 种配方圆柱形压装药柱, 每种配方 2 发, 共 4 发, 实验药柱的具体状态如表 1 所示。图 1 为水中爆炸实验时所用药柱。

\* 收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(11102091); 高等学校博士学科点专项科研博导类基金项目(20113219110010)

第一作者: 冯 淞(1989—), 男, 博士; 通信作者: 饶国宁, njraoguoning@163.com。

表 1 实验药柱参数

Table 1 Parameters of explosive grain

| 工况 | 炸药公式                | 炸药尺寸/(mm×mm) | 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) |
|----|---------------------|--------------|--------------------------|
| 1  | CL-20/Estane/G/W    | ∅15×14.68    | 1.929                    |
| 2  | 95/3.5/0.5/1        | ∅15×14.68    | 1.929                    |
| 3  | CL-20/Al/Estane/G/W | ∅15×14.21    | 1.993                    |
| 4  | 80/15/3.5/0.5/1     | ∅15×14.20    | 1.994                    |



图 1 实验药柱

Fig. 1 Charge column

拍摄频率为  $10\,000\text{ s}^{-1}$ , 在  $1\text{ ms}$  内能够得到 10 幅气泡脉动图像, 实验采用 LED 冷光源作为外照明光源, 其发出的光线亮度高、显色好, 满足实验要求。

炸药在水箱中爆炸时, 为了避免来自界面处反射波对冲击波以及气泡脉动信号的影响<sup>[13]</sup>, 实验设计时, 在水箱内壁周围粘贴一层白色吸波材料, 当冲击波波阵面传至水箱界面时, 消除强反射冲击波, 保证测量数据不受干扰<sup>[14]</sup>, 装置如图 2 所示。

### 1.3 实验过程

如图 3 所示, 实验中以同步脉冲发生器为高压起爆台, 由高速摄影机及示波器提供触发信号, 以实现实验控制台和各类数据的记录同步。药柱起爆后, 高速摄影机获得气泡脉动图像, PCB 传感器测得冲击波压力。

### 1.2 实验装置

实验在  $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$  的水箱中进行, 水箱由  $5\text{ mm}$  厚的钢板焊接而成, 内装自来水, 水面高度为  $1.6\text{ m}$ , 炸药位于水箱水平面的中心位置, 实验时利用细线将装配好的待测药柱悬挂在水中, 药柱距离水箱底部的距离为  $0.8\text{ m}$ , 距离水面的距离也为  $0.8\text{ m}$ 。药柱中心、压力传感器和高速摄像机处于同一条水平直线上, 实验选用 PCB138 系列水下爆炸压力传感器, 传感器的灵敏度为  $0.1445\text{ V/MPa}$ , 传感器敏感部位与炸药中心位于同一高度, 药柱中心与传感器的距离为  $0.7\text{ m}$ , 与高速摄像机的距离为  $1.4\text{ m}$ , 高速摄像机为 APX-RS 数字式高速相机,

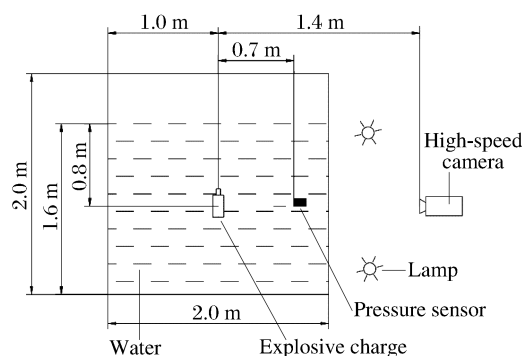


图 2 爆炸水箱示意图

Fig. 2 Illustration of explosion water tank

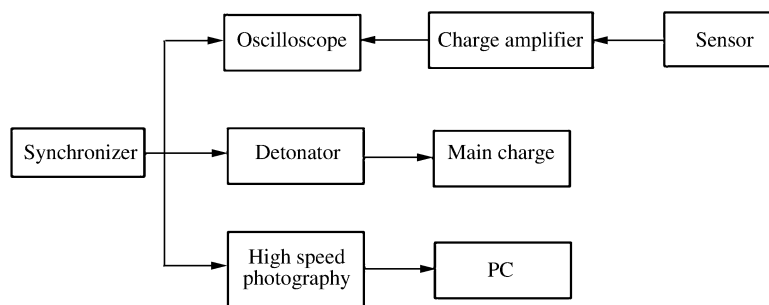


图 3 测试系统示意图

Fig. 3 Illustration of the test system

## 2 结果与讨论

### 2.1 CL-20 基理想炸药气泡脉动

1号药柱与2号药柱,为平行实验,实验结果重复性较好,此处我们以2号药柱为例。实验得到的CL-20基理想炸药气泡脉动过程,如图4所示,从图中可以清晰地观测到2号药柱水下爆炸气泡的产生、膨胀和收缩过程。炸药起爆后,高温高压的爆炸产物剧烈压缩周围水介质,并迅速向外膨胀,形成爆炸气泡,此时气泡内压力最大,且不均匀分布,气泡内有少量的爆轰产物从气泡表面溢出( $t=0.2\text{ ms}$ );随着气泡膨胀增大,气泡内部压力逐渐减小,由于惯性的作用,气泡过度膨胀, $t=22.5\text{ ms}$ 附近时,气泡膨胀到最大半径为 $59.9\text{ cm}$ ,此时气泡内压力最小,气泡膨胀过程基本呈球形,膨胀过程中气泡的中心位移很小,几乎保持不动。由于气泡的过度膨胀,气泡在静水压力作用下收缩,气泡半径迅速减小; $t=41.0\text{ ms}$ 时,气泡仍为球形; $t=45.1\text{ ms}$ 时,气泡下表面收缩速度更快,底部先开始坍塌,向气泡内部凹陷,产生竖直向上的射流; $t=46.4\text{ ms}$ 附近时,气泡收缩至最小半径并迅速上浮,从气泡收缩过程开始,

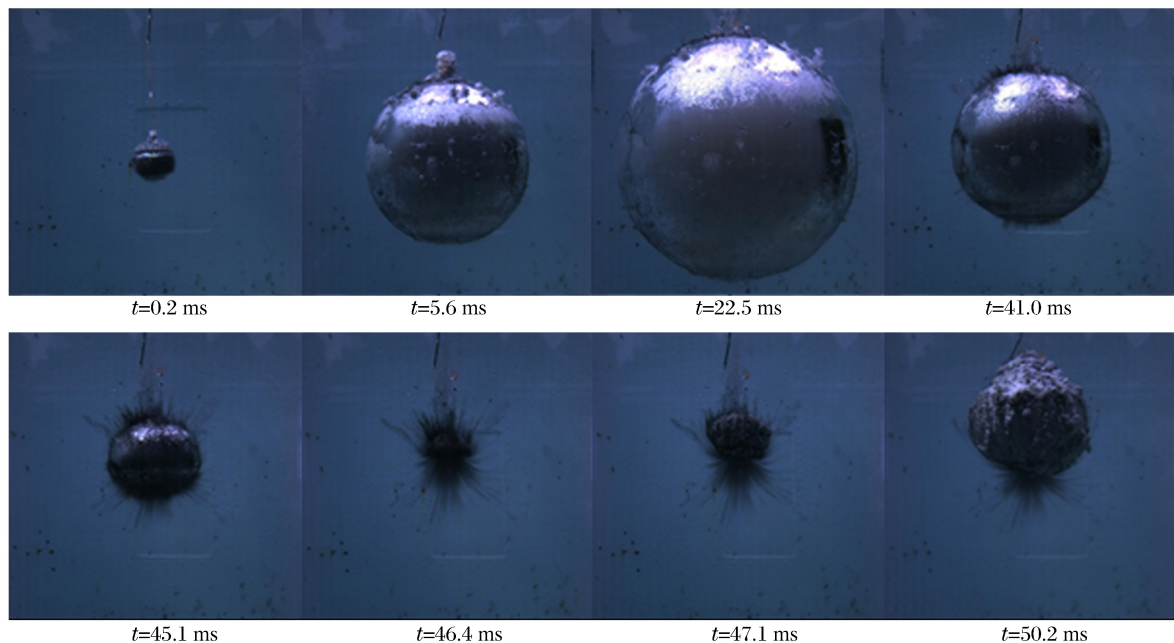


图4 2号药柱水中爆炸后气泡脉动过程图像

Fig. 4 Experimental pictures of bubble pulse for case 2 underwater explosion

气泡表面爆炸产物溢出时产生清晰迹线,此时气泡内的压力远高于周围流体压力,气泡将再次膨胀; $t=47.1\text{ ms}$ 时,气泡上表面开始向上凸起; $t=50.2\text{ ms}$ 时,气泡继续膨胀,同时不再是规则的球形,随着爆炸产物的溢出,气泡表面也不再是光滑的表面。随后,气泡又开始新一轮的脉动,随着脉动过程中能量的消耗,各气泡脉动周期和气泡半径极大值逐渐减小,直至气泡能量被消耗殆尽。

实验得到距药柱 $0.7\text{ m}$ 处压力时程曲线,如图5所示。从图5中可以清晰地分辨出冲击波、第一次气泡脉动、第二次气泡脉动压力及周期,实验数据没有明显的干扰信号。由图5可知,首先传播的是初

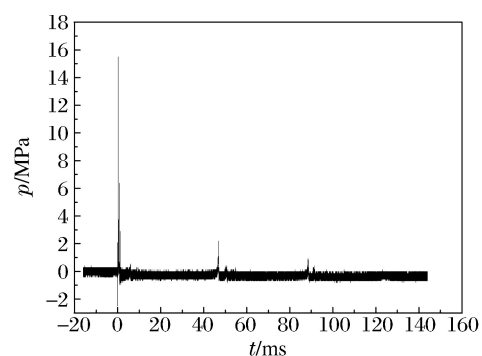


图5 距离2号药柱 $0.7\text{ m}$ 处压力时程曲线

Fig. 5 Pressure histories of shock wave at  $0.7\text{ m}$  of case 2 charge column

始冲击波,冲击波峰值压力高,压力为 15.49 MPa,持续时间短,波形陡峭。冲击波过后,当气泡半径达到最大值时开始收缩,水中压力将低于静水压力,出现负压;而后当气泡半径邻近最小值时,水中的压力又逐渐上升,出现二次压力波,二次压力波的峰值压力虽远低于冲击波的峰值压力,但持续时间长,基本呈对称形状。因此其作用不容忽视,如图 6 所示。二次压力波之后还会出现三次压力波,二次压力波和三次压力波之间也会出现负压,但是二次压力波过后的气泡能量所剩无几,其作用可忽略不计,在此不作相关讨论。

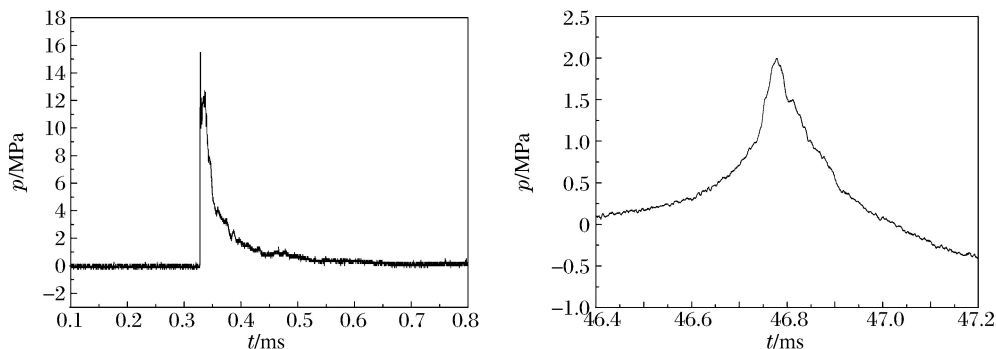


图 6 距离 2 号药柱 0.7 m 处冲击波压力与气泡第一次脉动压力时程曲线

Fig. 6 Pressure histories of shock wave and bubble pulses at 0.7 m of case 2 charge column

## 2.2 CL-20 基含铝炸药气泡脉动

实验得到的 CL-20 基含铝炸药气泡脉动过程如图 7 所示。以 3 号药柱为例,与理想炸药相比,二者的气泡脉动规律大体一致。当  $t=25.3$  ms 附近时,气泡膨胀到最大(半径为 68.1 cm); $t=50.2$  ms 附近时,气泡半径收缩至最小。对于含铝炸药, Cook 等<sup>[15]</sup>提出了二次反应理论,首先是单质炸药和其他组分的爆轰,其次是在 C-J 面之后,铝粉与爆轰产物间的二次氧化反应。二次反应放热发生时刻为炸药爆轰后的十几到几十微秒,铝粉相对于炸药是惰性物质,在反应动力学上对反应物的浓度起稀释作用,因而导致爆速、爆压及波阵面上的化学能降低。CL-20 基含铝炸药达到气泡半径最大的时间以及气泡半径都比理想炸药大一些,这些都充分说明了含铝炸药二次反应放热的特点。图 8 反映了含铝炸药二次

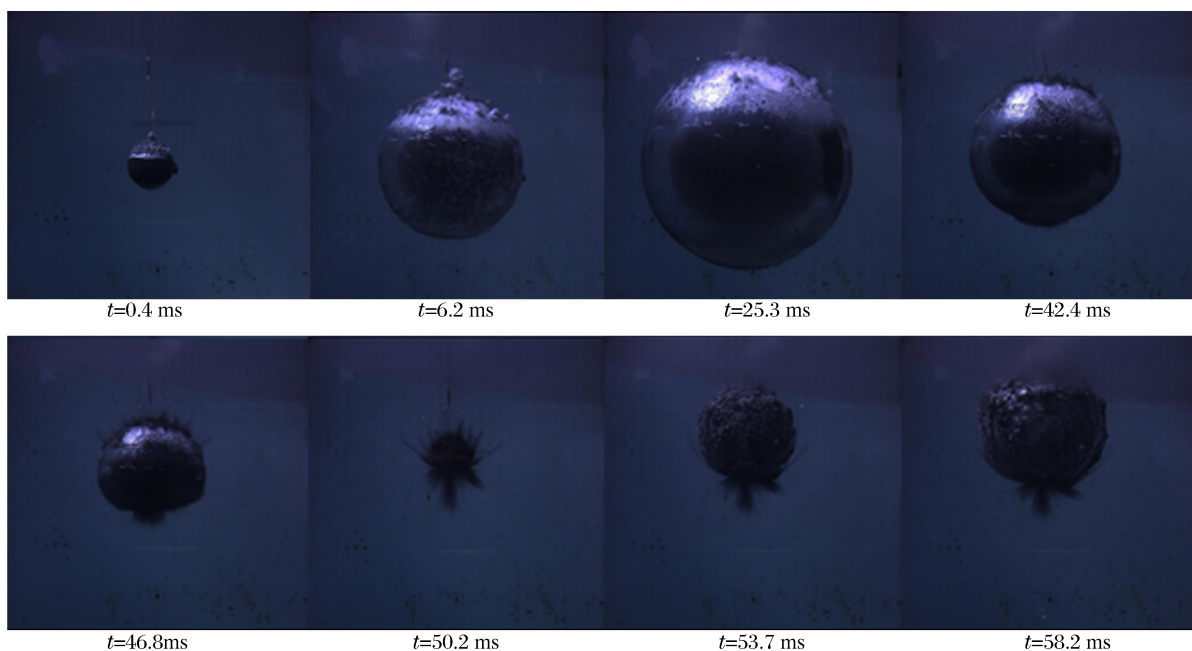


图 7 3 号药柱水中爆炸后气泡脉动过程图像

Fig. 7 Images of bubble pulse for case 3 underwater explosion

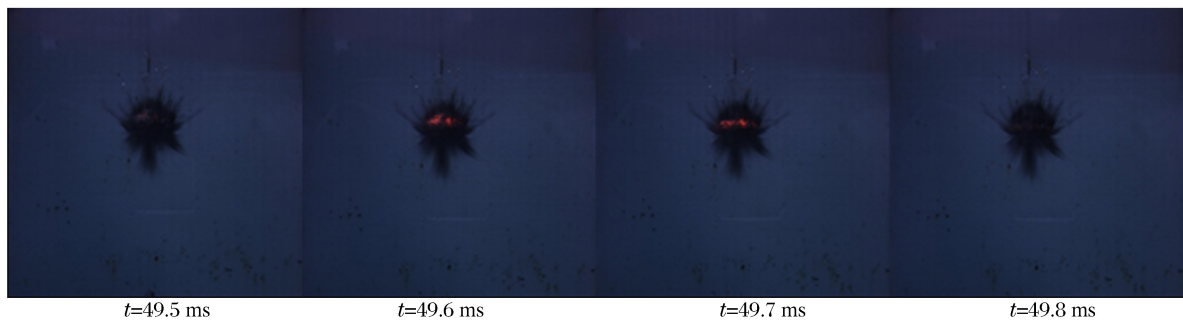


图 8 3 号药柱水中爆炸后气泡脉动过程铝粉二次反应图像

Fig. 8 Bubble pulse for case 3 secondary reaction process of aluminum underwater explosion

反应放热的现象,炸药爆轰结束后,铝粉与爆炸产物的二次反应放出大量的热,使气泡内的反应产物温度不断升高;在气泡收缩至最小半径时,此时气泡内压力最大,在持续的高压与高温作用下,气泡内部高温的二次反应产物产生火球。摄像机以幅频  $10\,000\text{ s}^{-1}$  拍摄,在  $1\text{ ms}$  内能够得到 10 幅气泡脉动图像,而气泡内部捕捉到  $49.5\sim 49.8\text{ ms}$  四张图片,时间间隔只有  $0.4\text{ ms}$ ,这也充分体现了高幅频摄像机在观测水下爆炸气泡实验中的优势。

实验得到距 CL-20 基含铝炸药  $0.7\text{ m}$  处压力时程曲线,如图 9~10 所示。对比图 5,CL-20 基含铝炸药与 CL-20 基理想炸药水下爆炸冲击波传播规律大体相同,峰值压力为  $15.20\text{ MPa}$ ,略低于 CL-20 基理想炸药;此外,从 2 幅图中可以直观地看出,2 种炸药的脉动周期、二次压力波的大小及区别。4 发实验水下爆炸参数如表 2 所示,1 与 2,3 与 4 为平行实验,从实验结果来看,重复性较好。

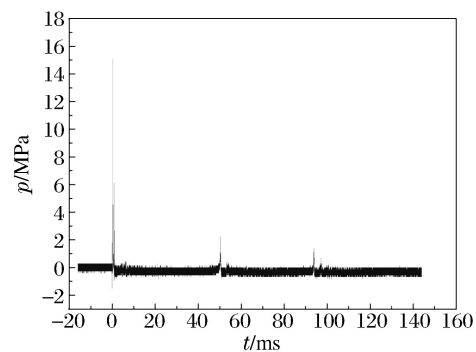


图 9 距离 3 号药柱  $0.7\text{ m}$  处压力时程曲线  
Fig. 9 Pressure histories at  $0.7\text{ m}$  of case 3 charge column

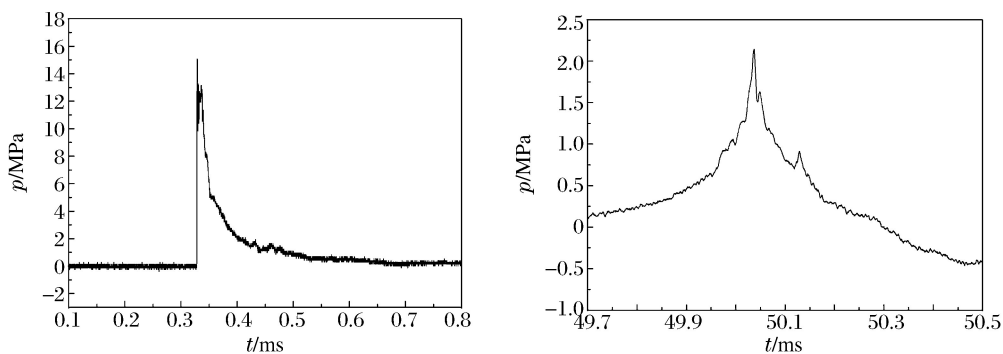


图 10 距离 3 号药柱  $0.7\text{ m}$  处冲击波压力与气泡第一次脉动压力时程曲线  
Fig. 10 Pressure histories of shock wave and bubble pulses at  $0.7\text{ m}$  of case 3 charge column

表 2 实验药柱参数

Table 2 Parameters of explosive grain

| 工况 | 脉动周期/ms | 气泡半径/cm | 压力峰值/MPa |
|----|---------|---------|----------|
| 1  | 46.75   | 60.6    | 15.52    |
| 2  | 46.76   | 59.9    | 15.49    |
| 3  | 49.97   | 68.1    | 15.20    |
| 4  | 50.43   | 67.6    | 15.12    |

### 2.3 CL-20 基理想炸药与含铝炸药气泡脉动对比

由图4和图7可以看出,气泡在膨胀阶段基本为球形,气泡收缩阶段为不规则球形,为了对比CL-20基理想炸药(2号药柱)与含铝炸药(3号药柱)的气泡脉动情况,对气泡半径进行近似处理。图11为2号药柱与3号药柱水下爆炸气泡半径随时间的变化曲线。与理想炸药相比,含铝炸药爆轰后气泡脉动周期较长,气泡半径较大:对于2号药柱非含铝炸药,气泡的脉动周期为46.76 ms,气泡最大半径为59.9 cm,3号药柱含铝炸药,气泡的脉动周期为49.97 ms,气泡最大半径为68.1 cm;CL-20基含铝炸药的气泡半径、脉动周期都明显升高,半径增大13.7%,周期增大6.9%。

将气泡脉动过程中的直径-时间变化关系对时间微分,可以得到气泡膨胀、收缩速度随时间变化的关系曲线<sup>[16]</sup>(图12)。图12中纵坐标为正值曲线段对应气泡膨胀过程,炸药爆轰结束后,对应气泡膨胀速度最大,2号药柱起始膨胀速度约为132 m/s,3号药柱起始膨胀速度约为138 m/s,随着时间的推移,气泡膨胀速度逐渐减小直至零,此时对应气泡最大半径,气泡停止膨胀;纵坐标为负值的曲线段对应气泡收缩过程,随着时间增大收缩速度绝对值逐渐增大,2号药柱气泡收缩最大速度约109 m/s ( $t=44.1$  ms),3号药柱气泡收缩最大速度约为105 m/s ( $t=48.0$  ms),达到最大收缩速度后,气泡继续收缩同时收缩速度逐渐减小,当收缩速度为零时,气泡达到最小半径,此后气泡继续下一轮的膨胀和收缩。由于气泡脉动过程中抵抗水的阻力消耗了部分能量,气泡的起始膨胀速度大于收缩阶段的最大速度。从图12可以看出,速度纵坐标为正值代表气泡膨胀阶段,3号药柱气泡曲线段在2号药柱曲线段上方,说明含铝炸药气泡膨胀速度大于非含铝炸药,由于铝粉与爆炸产物的二次反应放热,使气泡内的压力升高导致膨胀速度加快;速度纵坐标为负值即气泡收缩阶段,3号药柱气泡曲线段在2号药柱曲线段上方,说明2号药柱非含铝炸药气泡收缩速度大于3号药柱含铝炸药,因为气泡收缩过程由流场中周围流体静压力驱动,当周围水的静水压力相同时,3号药柱含铝炸药气泡收缩速度小,表明3号药柱含铝炸药气泡内压力比2号药柱非含铝炸药气泡大,这从侧面反应了铝粉的二次反应放热特点。

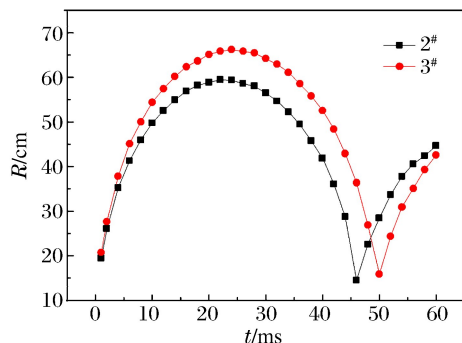


图11 脉动过程中气泡半径随时间的变化  
Fig. 11 Variation of bubble radius with time in pulse process

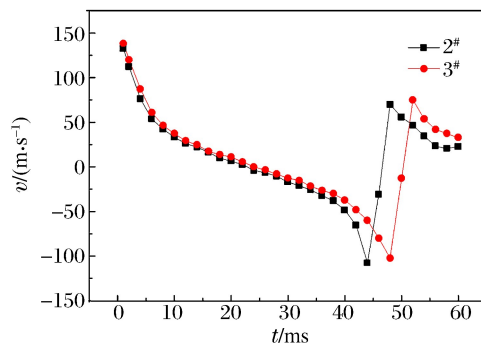


图12 脉动过程中气泡膨胀、收缩速度随时间的变化  
Fig. 12 Variation of expanding and contracting velocities of the bubble with time in the pulse process

将气泡脉动速度时间关系曲线对时间微分,拟合得到气泡脉动加速度随时间变化关系<sup>[16]</sup>,如图13所示。气泡膨胀过程中加速度的绝对值逐渐减小,即膨胀速度变化逐渐减慢,对应图12中速度曲线逐渐平缓以及图11中气泡半径逐渐增大;气泡收缩过程加速度绝对值逐渐增大,即速度变化加快,对应图12中速度曲线逐渐陡峭以及图11中气泡半径逐渐变小。从图13中可以看出,气泡刚开始膨胀阶段,2号药柱非含铝炸药气泡加速度绝对值要大一些,随着气泡的继续膨胀,3号药柱含铝炸药气泡加速度绝对值慢慢超过2号药柱非含铝炸药直至气泡最大半径处,加速度绝对值接近于零;随后气泡开始收缩,2号药柱非含铝炸药气泡加速度绝对值大于3号药柱含铝炸药,这都是含铝炸药中铝粉二次反应的缘故,释放的热量继续支持气泡的脉动过程。

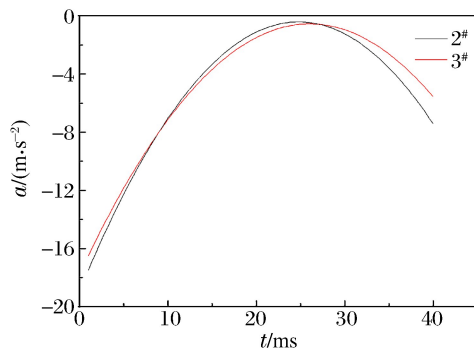


图 13 脉动过程中气泡膨胀、收缩加速度随时间的变化  
Fig. 13 Variation of expanding and contracting accelerations of a bubble with time in the pulse process

### 3 结 论

为研究 CL-20 基及其含铝炸药水下爆炸气泡脉动过程规律,采用水箱实验及高速摄影技术,基于小当量炸药水中爆炸试验,得到结论如下:获得 CL-20 基及其含铝炸药气泡脉动过程的图片,水中爆炸冲击波传播曲线;拟合得到气泡半径、速度、加速度与时间的变化曲线,对比分析发现,CL-20 基含铝炸药的气泡半径、脉动周期都明显升高,半径增大 13.7%,周期增大 6.9%,冲击波峰值压力略有下降,CL-20 基含铝炸药气泡膨胀速度快,收缩速度慢;在实验条件下,通过高速照相技术,捕捉到 CL-20 基含铝炸药中铝粉与爆炸产物的二次反应放

热,致使反应产物产生火球现象,可为今后的含铝炸药爆炸机理的研究提供了有效的实验手段。

感谢中国工程物理研究院化工材料研究所聂福德研究员和杨志剑助理研究员提供的实验样品。

### 参考文献:

- [1] 王昕,彭翠枝. 国外六硝基六氮杂异伍兹烷的发展现状[J]. 火炸药学报,2007,30(5):45-48.  
WANG Xin, PENG Cuizhi. Development of hexanitrohexaazaisowurtaitane at abroad[J]. Chinese Journal Explosives & Propellant, 2007,30(5):45-48.
- [2] 宋振伟,李笑江. 高能密度化合物 HNIW 的最新研究进展及其应用前景[J]. 化学推进剂与高分子材料,2011,9(1):40-45.  
SONG Zhenwei, LI Xiaojiang. Recent research progress and application prospect of high energy density compound HNIW[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2011,9(1):40-45.
- [3] 周正青,聂建新,覃剑锋,等. 铝氧比对含铝炸药性能影响的数值模拟[J]. 爆炸与冲击,2015,35(4):513-519.  
ZHOU Zhengqing, NIE Jianxin, QIN Jianfeng, et al. Numerical simulations on effects of Al/O ratio on performance of aluminized explosives[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(4):513-519.
- [4] 裴红波,聂建新,覃剑锋. 基于非平衡多相模型的含铝炸药爆速研究[J]. 爆炸与冲击,2013,33(3):311-315.  
PEI Hongbo, NIE Jianxin, QIN Jianfeng. Investigation on detonation velocity of aluminized explosives based on disequilibrium multiphase model[J]. Explosion and Shock Waves, 2013,33(3):311-315.
- [5] 周正青,聂建新,郭学永,等. 一种以 RDX 为基含铝炸药状态方程的研究[J]. 兵工学报,2014,35(2):338-342.  
ZHOU Zhengqing, NIE Jianxin, GUO Xueyong, et al. Studies on equation of state of detonation product for RDX-based aluminized explosive[J]. Acta Armamentarii, 2014,35(2):338-342.
- [6] 胡宏伟,严家佳,陈朗,等. 铝粉含量和粒度对 CL-20 含铝炸药水中爆炸反应特性的影响[J]. 爆炸与冲击,2017,37(1):157-161.  
HU Hongwei, YAN Jiajia, CHEN Lang, et al. Effect of aluminum powder content and its particle size on reaction characteristics for underwater explosion of CL-20-based explosives containing aluminum[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):157-161.
- [7] 李健,荣吉利,杨荣杰,等. 水中爆炸冲击波传播与气泡脉动的实验及数值模拟[J]. 兵工学报,2008,29(12):1437-1443.  
LI Jian, RONG Jili, YANG Rongjie, et al. Experiment and numerical simulation of shock wave propagation and bubble impulse of underwater explosion[J]. Acta Armamentarii, 2008,29(12):1437-1443.
- [8] LI Yujie, PAN Jianqiang, LI Guohua, et al. Experimental study of ship whipping induced by underwater explosive bubble[J]. Journal of Ship Mechanics, 2001,5(6):78-83.
- [9] 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):572-576.  
WANG Bin, ZHANG Yuanping, WANG Yanping. Experimental study on bubble oscillation formed during under-

- water explosions[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2008,28(6):572-576.
- [10] 汪斌,张远平,王彦平. 一种水中爆炸气泡脉动实验研究方法[J]. *高压物理学报*, 2009,23(5):332-337.  
WANG Bin, ZHANG Yuanping, WANG Yanping. An experimental method of studying underwater explosion bubble oscillation[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2009,23(5):332-337.
- [11] 王树山,李梅,马峰. 爆炸气泡与自由水面相互作用动力学研究[J]. *物理学报*, 2014,63(19):231-240.  
WANG Shushan, LI Mei, MA Feng. Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014,63(19):231-240.
- [12] 马坤,初哲,王可慧,等. 小当量炸药深水爆炸气泡脉动模拟实验[J]. *爆炸与冲击*, 2015,35(3):320-325.  
MA Kun, CHU Zhe, WANG Kehui, et al. Experimental research on bubble pulse of small scale charge exploded under simulated deep water[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2015,35(3):320-325.
- [13] 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论文集. 北京:北京理工大学,2006:222-227.
- [14] 汪斌,张光升,高宁,等. 高速摄影技术在水下爆炸气泡脉动研究中应用[J]. *含能材料*, 2010,18(1):102-106.  
WANG Bin, ZHANG Gangsheng, Gao Ning, et al. The application of high-speed photography in the study of underwater explosion bubble pulsation[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010,18(1):102-106.
- [15] COOK M A, FILLER A S, KEYES R T, et al. Aluminized explosives[J]. *The Journal of Physical Chemistry*, 1957,61(2):189-196.
- [16] 赵生伟,周刚,王占江,等. 小当量水中爆炸气泡的脉动现象[J]. *爆炸与冲击*, 2009,29(2):213-216.  
ZHAO Shengwei, ZHOU Gang, WANG Zhanjiang, et al. Bubble pulses of small-scale underwater explosion[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009,29(2):213-216.

## Experimental study of bubble pulsation by underwater explosion of CL-20-based explosives

FENG Song<sup>1</sup>, RAO Guoning<sup>1</sup>, PENG Jinhua<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>

(1 *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science  
and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;*

2 *National key Laboratory for Shock Waves and Detonation Physics Institute of Fluid Physics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

**Abstract:** In this study, we investigated the effect of underwater explosion of CL-20-based explosive and CL-20-based aluminized explosive, by examining the dynamics of the bubble pulses generated by CL-20-based explosives charge underwater explosions in a 2 m×2 m×2 m water tank, with the pressure history of the shock wave measured. The process of the generation, expansion and contraction of the air bubble was observed clearly using the high-speed photo technology. The variation of the bubble radius, its expanding and contracting velocities, and its expanding and contracting accelerations with time was achieved in the bubble pulse process under the given experimental conditions. The bubble pulsation of the CL-20-based explosive and CL-20-based aluminized explosive were analyzed and compared. For the first time, secondary reaction process of the aluminum for the CL-20-based aluminized explosive underwater explosion was captured by the high-speed photo technology under the experimental conditions. The results show that the bubble radius and bubble periods of CL-20-based aluminized explosive went through an obvious increase, the bubble radius going up by 13.7% and the bubble period by 6.9%, respectively. The peak pressure of the shock wave exhibited a slight decrease. The technology of underwater explosion test and high-speed photography can be used to study the secondary reaction of aluminized explosive effectively.

**Keywords:** bubble impulsion; high speed photography; CL-20; aluminized explosive; secondary reactions

(责任编辑 王小飞)