

文章编号: 1006-9941(2016)04-0393-05

低能量导爆索水中爆炸气泡的脉动现象

贾虎¹, 沈兆武²

(1. 南阳师范学院土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061; 2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 为了推动爆炸气泡帷幕减震技术的研究, 揭示低能量导爆索水下爆炸气泡脉动规律, 采用高速摄影系统对水平和竖向放置的单根及两根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动特性进行了实验研究, 得到了其不同放置方式下的气泡脉动特性。结果表明, 水平放置单根低能量导爆索水下爆炸首次气泡脉动形状保持圆柱形, 第一次气泡脉动周期为 11.5 ms, 最大直径为 6.9 cm; 水平放置两根低能量导爆索第一次气泡脉动周期为 14 ms, 22 ms 时两气泡开始相互融合, 形成一气泡帷幕层, 比单根水平放置低能量导爆索第一次气泡脉动周期长。竖向放置两根低能量导爆索第一次气泡脉动周期为 27.5 ms, 比单根低能量导爆索第一次气泡脉动周期长, 79.5 ms 时形成完全融合的气泡帷幕, 323 ms 时该气泡帷幕仍清晰可见。将低能量导爆索竖向布置缠成网状, 气泡脉动持续时间较长, 有利于爆炸气泡帷幕的形成。

关键词: 低能量导爆索; 水下爆炸; 气泡脉动; 高速摄影

中图分类号: TJ45+7

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.04.014

1 引言

高速摄影是当前研究水下爆炸气泡脉动特性最有效的实验手段^[1-3]。国内外学者对球形药包水下爆炸气泡脉动特性进行了大量研究, 取得了重要的研究成果^[4], 但是对柱形药包水下爆炸气泡脉动特性的研究并不充分。Menon^[5]研究发现导爆索水下爆炸为非球形坍塌, 形成对碰射流; 颜事龙^[6]获得了条形药包水下爆炸冲击波参数和气泡脉动参数; 黄超^[7]计算获得了端面起爆柱形装药产生的初始气泡和气泡运动状态。从上述研究成果可以看出, 柱形装药水下爆炸气泡的动态特性与球形装药水下爆炸气泡存在明显不同, 但国内外这方面的研究甚少, 很不系统, 还有许多问题没有解决。

贾虎^[8]研究了竖向放置单根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动特性, 获得了气泡脉动周期、脉动直径等特征, 发现气泡脉动的最大直径可达 11.2 cm。文献^[10]在传统气泡帷幕减震技术的基础上, 将低能量导爆索缠成网状, 利用其爆炸产生柱状气泡的特性, 提出

了爆炸气泡帷幕削能新理念, 并对爆炸气泡帷幕削能设想进行了实验研究。为了解低能量导爆索放置方式对气泡脉动特性及爆炸气泡帷幕削能特性的影响, 对水平放置的低能量导爆索和竖向及水平放置的两根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动特性进行了研究, 揭示了低能量导爆索气泡脉动的特性, 以指导爆炸气泡帷幕削能研究。

2 实验情况简介

水下爆炸实验在 $\Phi 2\text{ m} \times 2.5\text{ m}$, 壁厚 26 mm 的钢制圆筒形试验装置中进行, 在距离地面 1.2 m 处开设有拍摄窗口, 便于高速摄影拍摄气泡脉动规律。光测系统布设如图 1 所示, 采用 CamRecord 1000 高速摄像机, 拍摄频率 1000 ~ 200000 fps, 最高分辨率 1280 × 1024 像素。



图 1 水下爆炸实验光测系统

Fig. 1 Optical measurement system of underwater explosion test

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2015-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(11202109; 11304168); 河南省高等学校青年骨干教师资助计划(2013GGJS-157); 河南省教育厅自然科学研究计划项目(2011B130002); 南阳师范学院高层次人才资助项目
作者简介: 贾虎(1980-), 男, 博士, 副教授, 主要从事工程力学方面的研究。e-mail: jjahu@mail.ustc.edu.cn

由于文献[8]已经研究了竖向放置单根低能量导爆索的气泡脉动特性,所以本工作主要研究水平放置单根低能量导爆索、竖向及水平放置相邻两根低能量导爆索的气泡脉动现象。

选用的低能量导爆索为 RDX 装药,铝制外壳,课题组采用柔性金属工艺,利用新型导爆索轧制工艺方案和生产设备生产,线装药密度 $1.8 \text{ g} \cdot \text{m}^{-1}$,直径 1.8 mm ,爆速为 $7900 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,长度均为 1.2 m 。

为了方便低能量导爆索的布设,将单根及两根低能量导爆索固定在边长为 1 m 的正方形钢圈上,如图 2 所示。

由于拍摄窗口的限制,只能选取低能量导爆索中间的一部分作为拍摄对象,将正方形钢圈的中心位置保持在水深 1.2 m 处(即拍摄窗口的中心的位置),以保证拍摄到低能量导爆索和标尺。同时,将试样放置在摄像机的最佳视场范围内,保证最佳的成像效果。由于低能量导爆索水下爆炸冲击波和气泡脉动呈现较好的轴对称性^[9],选取的拍摄段能反映低能量导爆索的气泡脉动特性。

为了判读气泡直径,采用平均值法,即在拍摄所得图像上,从上到下等距离选取 10 个测点,对 10 个测

点进行测量,然后取平均值作为判读直径。由于受到摄像机镜头尺寸的限制,镜头拍摄到的气泡图像所显示的大小并非气泡的真实尺寸^[11]。图像显示的气泡尺寸仅为圆柱形气泡直径长度的一部分,气泡实际直径计算公式可参考文献[8]。

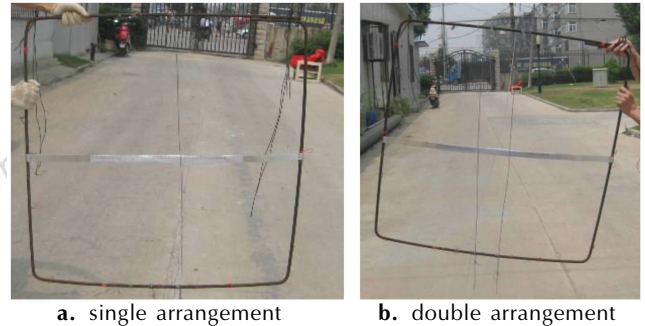


图 2 低能量导爆索布设方式

Fig. 2 Layout way of low energy detonating cord

3 实验结果分析

3.1 水平放置单根低能量导爆索气泡脉动

水平放置单根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动现象如图 3 所示。

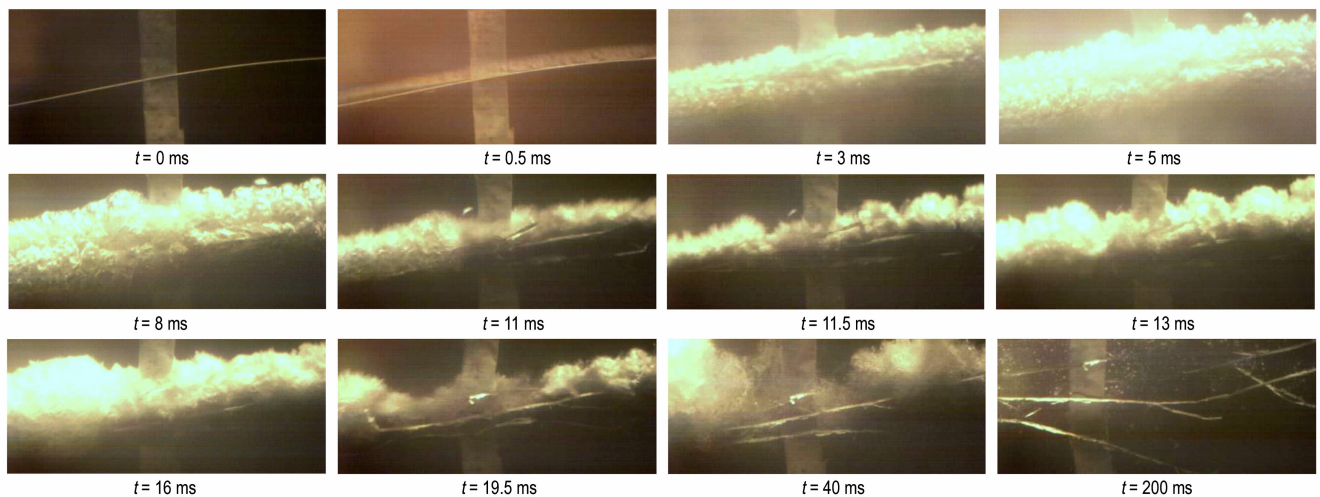


图 3 水平放置单根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动过程的典型图像

Fig. 3 Typical images of the pulsation process of underwater explosion bubble for single horizontal low energy detonating cord

由图 3 可以清晰观察到拍摄段两次气泡脉动的过程。拍摄段水下爆炸起爆后初始产生较为规则的柱形气泡并迅速膨胀,在 8 ms 时气泡直径达到最大值 6.9 cm ,接着在内外压的作用下,气泡迅速收缩,在 11.5 ms 时达到最小直径 3.0 cm 。随后气泡再次膨胀和收缩,第二次气泡脉动过程中,气泡边界不再清晰,这主要是由于低能量导爆索爆炸后残留的金属外

壳形成的大量碎片在第一次气泡收缩时击穿气泡。第二次气泡脉动过程中,浮力作用明显,气泡整体上浮。水平放置时低能量导爆索水下爆炸气泡脉动持续时间长, 200 ms 时仍可见大量小气泡。其第一次和第二次气泡脉动直径随时间变化的规律如图 4 所示。

3.2 竖向放置两根低能量导爆索气泡脉动

采用图 2 所示的方法竖向布设两根低能量导爆

索,两导爆索的间距设置为 10 cm,一发雷管同时起爆两根低能量导爆索。其拍摄段水下爆炸气泡脉动过程如图 5 所示。

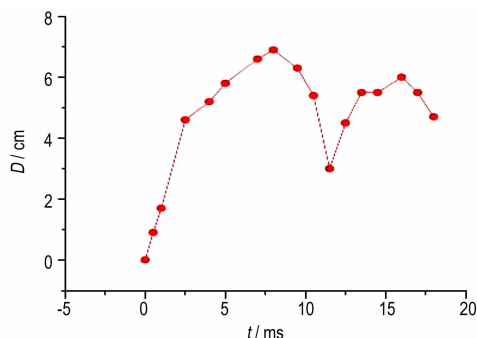


图 4 水平放置单根低能量导爆索前两次脉动过程中气泡直径随时间变化

Fig. 4 Change in bubble diameter with time in the first two pulsation process of single horizontal low energy detonating cord

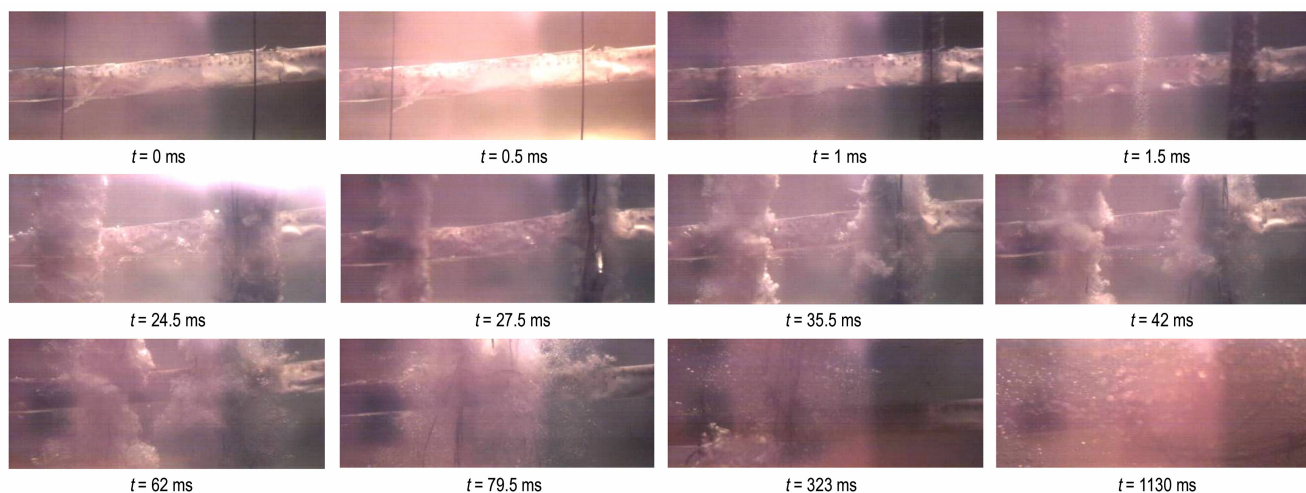


图 5 竖向放置两根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动过程的典型图像

Fig. 5 Typical images of the pulsation process of underwater explosion bubble for two vertical low energy detonating cords

62 ms 之后两气泡开始相互融合,79.5 ms 时完全融合成图近似规则的气泡帷幕,该气泡帷幕持续时间长,323 ms 时仍清晰可见,但气泡帷幕的厚度伴随着气泡的膨胀和收缩逐渐变薄。水下爆炸 1130 ms 后,该区域仍有大量的小气泡,这些小气泡的存在能显著增加水下爆炸混响效应。

3.3 水平放置两根低能量导爆索气泡脉动

采用图 2 的布置方式,将两根低能量导爆索间距 10 cm 并布置在正方形钢圈上,放置在水中时,保持两根低能量导爆索水平放置,由一发雷管同时起爆,气泡脉动过程如图 6 所示。

由图 5 可以看出,竖向放置两根低能量导爆索同时起爆后,两导爆索产生的水中冲击波在两导爆索形成的平面中间相遇;拍摄段由于高温高压的爆轰产物压缩周围流体迅速膨胀而形成两个圆柱形气泡。

竖向放置两根低能量导爆索水下爆炸第一次气泡脉动周期是 27.5 ms,比文献[8]中观察到的竖向放置单根低能量导爆索第一次气泡脉动周期(21.5 ms)长,究其原因主要是由于两气泡间距小,膨胀阶段相互排斥,收缩阶段互相吸引,阻止双方的膨胀和收缩,从而抑制气泡的运动,延长气泡的脉动周期。图 5 中看出,拍摄段的两根低能量导爆索气泡膨胀初期保持圆柱形,而随着脉动半径的逐渐增大,气泡外轮廓不再保持标准的圆柱形($t=24.5$ ms 及其以后的图像中可以看出),这一方面是因为相邻两圆柱形气泡间距过小,相互之间阻力的影响,另一方面是爆后导爆索爆炸碎片到达气泡边缘,击穿气泡。

从图 6 可以看出,拍摄段水平放置两根低能量导爆索第一次气泡脉动周期(14 ms)要比水平放置单根(11.5 ms)长,原因在于两柱形气泡间距 10 cm 布设,二者膨胀阶段相互排斥,收缩阶段相互吸引,互为对方膨胀和收缩的阻力,抑制两气泡的运动,导致第一次气泡脉动周期变长。从 14 ms 时两气泡为边缘非光滑的近似柱形气泡,此时对应气泡直径最小,第一次气泡脉动周期为 14 ms。在 19.5 ms 时气泡直径达到第二次脉动的最大值,随后收缩,21 ms 时直径达到最小值。

在 22 ms 时,两气泡逐渐融合在一起,形成一

泡帷幕层,该气泡帷幕层持续时间长,在 67.5 ms 前共经历 5 次膨胀和收缩的过程,随后气泡帷幕层厚度

逐渐变薄,并慢慢分散成数量众多的小气泡,在 541.5 ms 时仍可见大量小气泡。

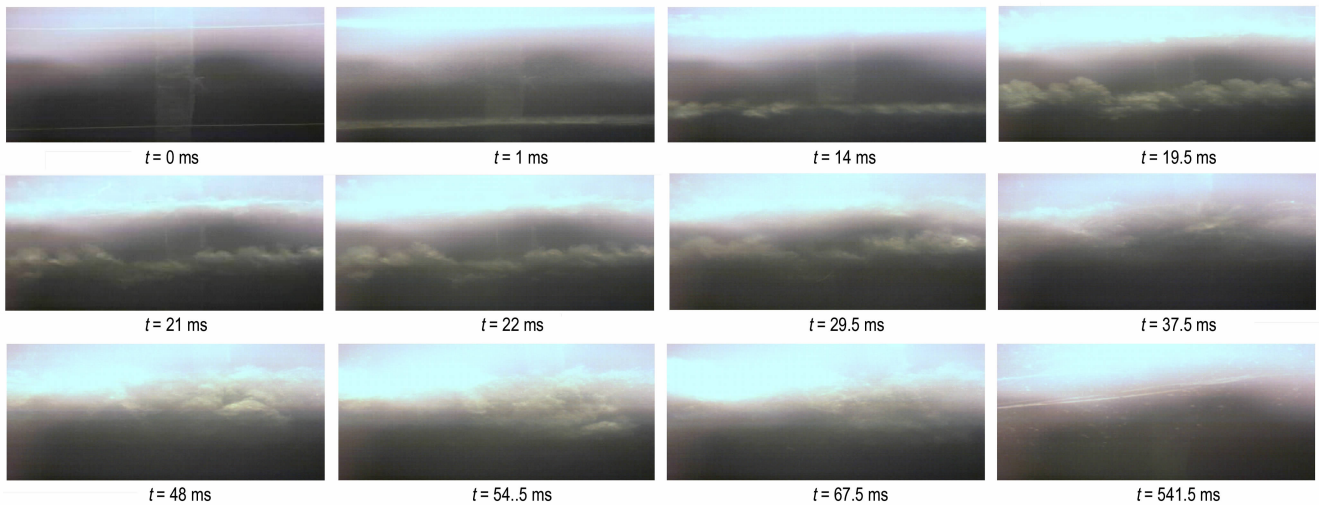


图 6 水平放置两根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动过程的典型图像

Fig. 6 Typical images of the pulsation process of underwater explosion bubble for two horizontal low energy detonating cords

4 结 论

用高速摄影系统对水平和竖向放置的单根及两根低能量导爆索水下爆炸气泡脉动特性进行实验研究,得出结论如下:(1)拍摄段水平放置单根低能量导爆索水下爆炸首次气泡脉动形状保持圆柱形,第一次气泡脉动的周期为 11.5 ms,最大直径为 6.9 cm;(2)竖向放置两根低能量导爆索第一次气泡脉动周期长,第一次气泡脉动周期为 27.5 ms,62 ms 后两气泡开始相互融合,79.5 ms 时形成完全融合的气泡帷幕;(3)水平放置两根低能量导爆索第一次气泡脉动周期为 14 ms,第二次气泡脉动周期为 7 ms,22 ms 时两气泡开始相互融合,形成一气泡帷幕层。

参考文献:

- [1] 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 Ke-hui, 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.
- [2] 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): 239-248.
WANG Shu-shan, LI Mei, MA Feng. Dynamics of the interaction between explosion bubble and free surface[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(19): 239-248.
- [3] 王诗平, 张阿漫, 吴超. 对称边界条件下气泡脉动特性实验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(20): 118-122.
WANG Shi-ping, ZHANG A-man, WU Chao. Experimental

study on characteristics of bubble pulsation near symmetric boundary[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 33(20): 118-122.

- [4] 倪宝玉, 张阿漫. 气泡高速摄影和载荷测试技术综述[J]. 力学与实践, 2013, 35(6): 11-18.
NI Bao-yu, ZHANG A-man. The review of high-speed imaging and load test technologies for bubble dynamics[J]. *Mechanics in Engineering*, 2013, 35(6): 11-18.
- [5] Menon S. Experimental and numerical studies of underwater explosions. Annual Report for the Office of Naval Research[R]. Atlanta, Georgia, 1996.
- [6] 颜事龙. 集中药包与条形药包水下爆炸能量测试[J]. 爆破器材, 2003, 32(5): 23-27.
YAN Shi-long. Measurement of the explosion energy of the centralized charge and the linear charge underwater explosion[J]. *Explosive Materials*, 2003, 32(5): 23-27.
- [7] 黄超, 汪斌, 张远平, 等. 柱形装药自由场水中爆炸气泡的射流特性[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(3): 263-267.
HUANG Chao, WANG Bin, ZHANG Yuan-ping, et al. Behaviors of bubble jets induced by underwater explosion of cylindrical charges under free-field conditions[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2011, 31(3): 263-267.
- [8] LIN Jia-jian, JIA Hu. Experimental research on underwater explosion bubble pulsation characteristics of low energy detonating Cord[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(4): 372-375.
- [9] 贾虎, 沈兆武. 低能量导爆索水下爆炸冲击波特性实验研究[J]. 实验力学, 2011, 26(3): 297-302.
JIA Hu, SHEN Zhao-wu. Experimental research on underwater explosion shockwave characteristics of low energy detonating cord[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2011, 26(3): 297-302.
- [10] 贾虎, 郑伟花, 罗强, 等. 爆炸气泡帷幕对水中冲击波能量的衰减特性[J]. 含能材料, 2015, 23(10): 1015-1019.

JIA Hu, ZHENG Wei-hua, LUO Qiang, et al. Attenuation characteristics of underwater explosion bubble curtain on the shock [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(10): 1015–1019.

[11] 汪斌, 张光升, 高宁, 等. 高速摄影技术在水下爆炸气泡脉动研

究中的应用[J]. 含能材料, 2010, 18(1):102–106.

WANG Bin, ZHANG Guang-sheng, GAO Ning, et al. Application of high-speed photography in bubble oscillation at underwater explosion [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(1):102–106.

Pulsation Phenomena of Underwater Explosion Bubble with Low Energy Detonating Cord

JIA Hu¹, SHEN Zhao-wu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, China; 2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: To promote the research on curtain damping technology of explosion bubble and reveal the pulsation rule of underwater explosion bubble with low energy detonating cord (LEDC), an experimental research on the pulsation characteristics of underwater explosion bubble with single or two horizontal and vertical placed LEDC was carried out by a high-speed photography system. The pulsation characteristics of bubble under different placement of LEDC were obtained. The results show that the shape of the bubble pulsation at the first time is cylindrical when the single horizontal LEDC is exploded under water. The first period of the bubble pulsation is 11.5 ms, and the maximum diameter reaches to 6.9 cm. Under the conditions of two horizontal LEDC, the first period of the bubble pulsation is 14 ms and two bubbles begin to merge with each other and form a bubble curtain layer at 22 ms. The first period of the bubble pulsation of two horizontal LEDC is longer than that of one horizontal LEDC. Under the conditions of two vertical LEDC, the first period of the bubble pulsation is 27.5 ms. The first period of the bubble pulsation of two vertical LEDC is also longer than that of one vertical LEDC and a fully integrated bubble curtain is formed at 79.5 ms which is still visible at 323 ms. When the vertical placed LEDC are wrapped into a network, the bubble pulse duration is longer, and it was conducive to the formation of the explosion bubble curtain.

Key words: low energy detonating cord (LEDC); underwater explosion; bubble pulsation; high speed photography

CLC number: TJ45⁺7

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.04.014