DOI: 10.11858/gywlxb.20251185

水下爆炸气泡多次膨胀–收缩运动特性光学试验研究*

盛振新 1,2,3，王海坤 1,2,3，陈继平 1,2,3，张显丕 1,2,3，余俊 1,2,3，杲涛 1,2,3

（1. 中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082；
2. 深海技术科学太湖实验室，江苏 无锡 214082；
3. 船舶结构安全全国重点实验室，江苏 无锡 214082）

摘 要：水下爆炸气泡的膨胀-收缩运动会持续多次，在此过程中将发生能量的相互转换。在爆炸水池内开展了 20、40 和 60 g RS211 装药的气泡运动光测试验，采用高速相机拍摄了气泡多次脉动的演化过程，对图像进行智能化识别处理后得到了气泡脉动周期和最大半径。在此基础上，理论分析了气泡多次脉动过程中势能、内能的转换机制。结果表明：第二次气泡脉动相对于第一次气泡脉动的余能率为 0.31；气泡内能占总能的比例为 5.4%~6.6%，工程计算时可忽略气泡内能，以气泡势能来表征气泡能。

关键词：水下爆炸；气泡多次脉动；光学测量；能量转换

中图分类号：TJ6；O38；O521.9　　　**文献标识码**：A

水下爆炸导致气泡的产生，气泡会膨胀和收缩若干次，直到耗尽能量，气泡来回收缩和膨胀的过程称为脉动。对于水下爆炸气泡脉动特性的研究，最直接的方式就是采用光学测量方式获取气泡运动演化过程图像。Klaseboer[1]在一个 9m×9m×7.5m 的水箱中开展了 55g Hexocire 炸药（三次甲基三硝基胺+石蜡）的水下爆炸试验，药包布置在水下 3.5m，通过高速摄像判读气泡半径和上浮位移等参数。Hung[2]进行了多组小当量水下爆炸实验，观察了气泡在多种不同边界附近的运动特征。Zhang[3]用小当量装药研究了爆炸气泡在不同初始条件和边界条件下运动规律。朱锡[4]进行了自由场中水下爆炸试验，记录了气泡脉动图像、周期和压力等数据。王海坤[5]、盛振新[6]等人在小型观测水槽内开展水下爆炸气泡射流的机理性试验研究，采用高速相机捕捉到了近壁面气泡膨胀、收缩、失稳溃灭形成气泡射流的过程。目前对于水下爆炸气泡脉动的研究主要通过压力测量得到的脉动周期，对于气泡脉动过程中气泡尺寸的光学测量较少，主要是因为目前没有满足水密、抗爆和拍摄速度要求的水下高速相机，只能在陆上水箱中开展 g 级装药试验，将高速相机布置在水箱外一定距离处，通常水箱尺寸不大，边界效应会对气泡运动过程产生影响。盛振新[7]在爆炸水池内开展了多组 TNT 装药的水下爆炸试验，通过高速相机观测了气泡在一次脉动过程中的上浮运动。

上述研究重点关注第一次气泡脉动，气泡每脉动一次，就要有一定能量在气泡压缩至最小时消耗于产生紊流和声辐射[8]，因此第二次气泡脉动载荷的破坏作用仍然不能忽略。1948 年，ARONS 等人[9-10]在总水深 650 ft 的水域开展了 TNT 柱形装药的深水爆炸试验，装药质量分别为 0.505 lb.，2.507 lb.和 12.01 lb.，装药水深分别为 250 ft 和 500 ft。根据试验测得气泡多次脉动周期，分析得到余能率为 0.38。Cole[8]在其《Underwater Explosions》一书中，对多次脉动周期和能量消耗进行了

*收稿日期：2025-09-03；修回日期：2025-12-09
基金项目：中国船舶科学研究中心稳定支持项目（WDZC70202030301）
作者简介：盛振新（1986－），男，博士，研究员，主要从事舰船毁伤与防护研究. E-mail：shengzx@cssrc.com.cn

分析，根据 200 磅（91 千克）TNT 药包的爆炸试验数据，得到余能率为 0.34，两者结果基本一致。目前国内对水下爆炸多次气泡脉动的研究甚少。

本文的工作主要包括以下几个方面：（1）开展了水下爆炸气泡运动光测试验方法研究，在直径 Φ85m，最大水深 15m 的爆炸水池内开展了 20g、40g 和 60g RS211 的水下爆炸试验，减弱了边界效应对水下爆炸气泡运动的影响，同时提高了试验药量；（2）采用高速相机拍摄了 RS211 装药水下爆炸气泡多次膨胀-收缩运动图像，采用开发的智能化图像处理软件，对高速摄像图片进行批量化处理，获取了水下爆炸气泡第一次、第二次脉动的半径变化规律；（3）建立了 RS211 装药水下爆炸气泡多次脉动能量分析方法，揭示了气泡势能、内能等能量的转换机制。

1 水下爆炸气泡运动光测试验方法

1.1 试验布置

本试验在中国船舶科学研究中心的爆炸水池进行，其水域面积为 Φ85m，最大水深为 15m，可承受 8kg TNT 当量，如图 1 所示。

图 1 爆炸水池

Fig.1 Explosion pool

试验总体布置如图 2 所示，高速相机布置在爆炸水池的观测室内，通过有机玻璃观测窗（图 3）对气泡运动过程进行高速摄像。试验地点的水深为 4.7m，药包布放于水深 3m 处，距观察窗的水平距离为 3m。

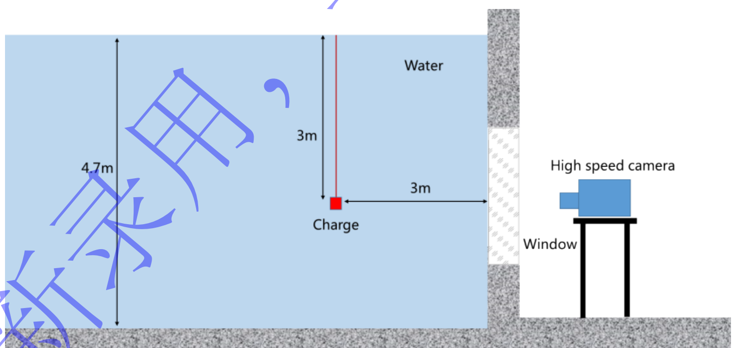


图 2 试验总体布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of overall experiment layout

图 3 观测窗

Fig.3 Observation window

1.2 高速摄像处理方法

鉴于高速摄像图片数量较多，为了提高图像处理效率，开发了智能化图像处理软件批量处理高速摄像图片。该气泡图象处理软件采用基于卷积神经网络的深度学习模型研发。首先，对装药水下爆炸的高速摄像图像进行逐帧检测与分割，组成训练集；然后，采用深度学习模型基于此训练集进行神经网络训练；之后，采用训练的神经网络对装药水下爆炸气泡进行检测与分割；最后，根据目标分割的结果对气泡等效中心、面积、等效半径、中心上浮位移和周期进行计算和统计。经 TNT 水下爆炸试验验证[7]，如表 1 所示，图像判读结果与经典水下爆炸理论计算结果的偏差≤3.95%。

表 1 TNT 气泡最大半径试验值与 Cole 理论值对比

Table 1 Comparison of TNT bubble maximum radius between experiment results and Cole theoretical results

Charge mass/g	Water depth/m	Maximum radius		
		Experiment results/mm	Theoretical results/mm	Deviation/%
20	3.01	413.2	401.8	2.76
40	3.02	526.9	506.1	3.95
60	3.01	579.7	579.4	0.05

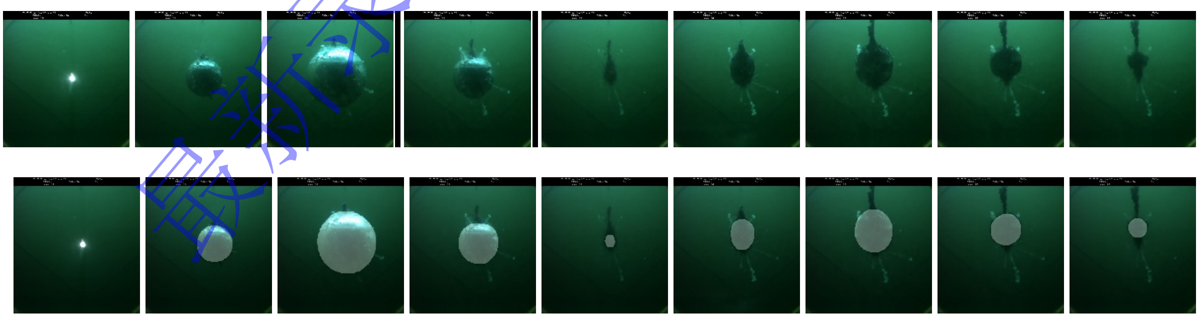
2 水下爆炸气泡多次膨胀-收缩运动光测试验结果

2.1 图像智能化处理结果

高速相机拍摄的 20g RS211 装药气泡运动过程如图 4 所示，拍摄速度为 1000 帧/秒，同时给出采用图像处理软件智能化识别处理后的气泡轮廓。气泡从 0ms 开始膨胀，到 43ms 气泡膨胀至最大，然后收缩，到 83ms 收缩至最小；然后开始第二次膨胀，到 109ms 膨胀至最大，然后收缩，到 139ms 收缩至最小。

40g RS211 装药气泡运动过程如图 5 所示，拍摄速度为 1000 帧/秒，同时给出采用图像处理软件智能化识别处理后的气泡轮廓。气泡从 0ms 开始膨胀，到 51ms 气泡膨胀至最大，然后收缩，到 103ms 收缩至最小；然后开始第二次膨胀，到 138ms 膨胀至最大，然后收缩，到 172ms 收缩至最小。

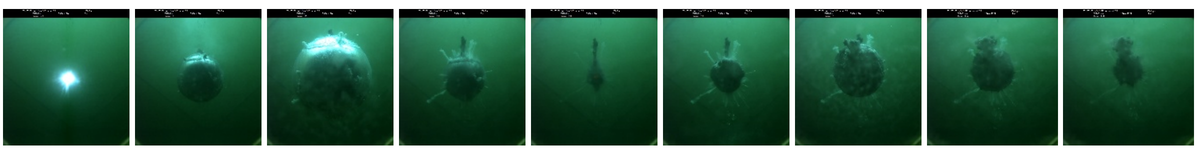
60g RS211 装药气泡运动过程如图 6 所示，拍摄速度为 1000 帧/秒，同时给出采用图像处理软件智能化识别处理后的气泡轮廓。气泡从 0ms 开始膨胀，到 58ms 气泡膨胀至最大，然后收缩，到 117ms 收缩至最小；然后开始第二次膨胀，到 158ms 膨胀至最大，然后收缩，到 198ms 收缩至最小。

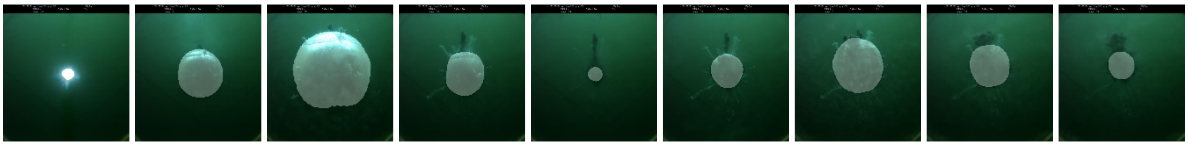


(a) 0ms (b)7ms (c)43ms (d)73ms (e)83ms (f)90ms (g)109ms (h)129ms (i)139ms

图 4 20g RS211 装药爆炸气泡运动过程图像

Fig.4 Bubble motion images for aluminized charge of 20 g

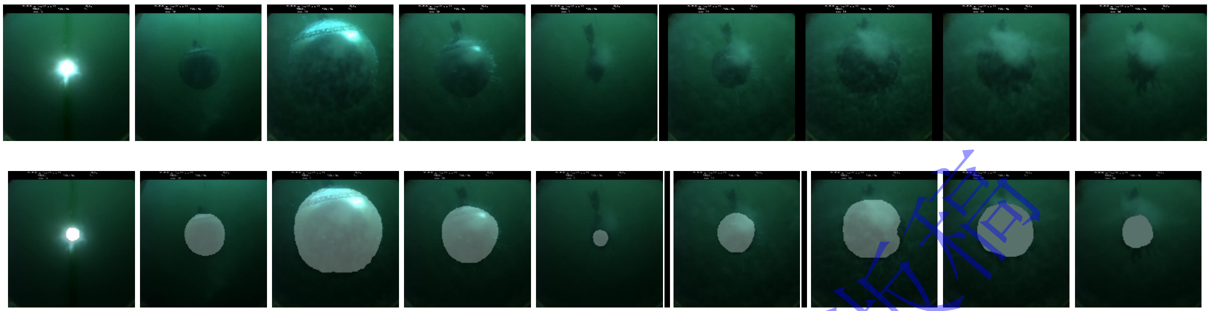




(a)0ms (b)8ms (c)51ms (d)96ms (e)103ms (f)110ms (g)138ms (h)162ms (i)172ms

图 5 40g RS211 装药爆炸气泡运动过程图像

Fig.5 Bubble motion images for aluminized charge of 40 g



(a)0ms (b)5ms (c)58ms (d)105ms (e)117ms (f)124ms (g)158ms (h)178ms (i)198ms

图 6 60g RS211 装药爆炸气泡运动过程图像

Fig.6 Bubble motion images for aluminized charge of 60 g

经过气泡图像处理软件对高速摄像结果进行智能化识别处理，得到 20g、40g 和 60g RS211 装药的气泡边界和中心位置随时间的变化曲线，分别如图 7、图 8 和图 9 所示。将 RS211 装药水中爆炸气泡第一次和第二次脉动的周期和最大半径列于表 2 中。

从图 7 可知，20g RS211 装药水下爆炸气泡第一次膨胀到最大时半径为 505.9mm，第二次膨胀到最大时半径为 337.7ms。

从图 8 可知，40g RS211 装药水下爆炸气泡第一次膨胀到最大时半径为 666.6mm，第二次膨胀到最大时半径为 449.0ms。

从图 9 可知，60g RS211 装药水下爆炸气泡第一次膨胀到最大时半径为 726.1mm，第二次膨胀到最大时半径为 509.8ms。

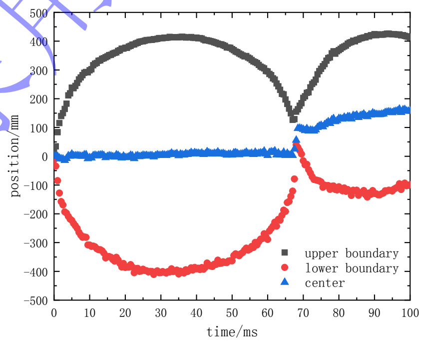


图 7 20g RS211 装药爆炸气泡边界和中心的位移时程曲线

Fig.7 Position-time curves of boundary and center of bubble for an aluminized charge of 20 g

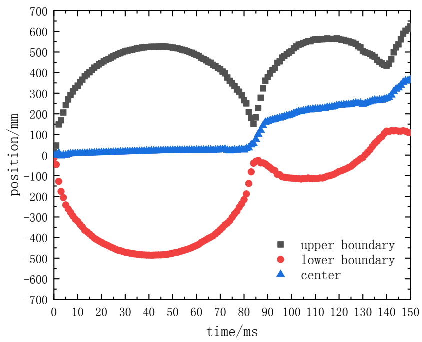


图 8 40g RS211 装药爆炸气泡边界和中心的位移时程曲线

Fig.8 Position-time curves of boundary and center of bubble for an aluminized charge of 40 g

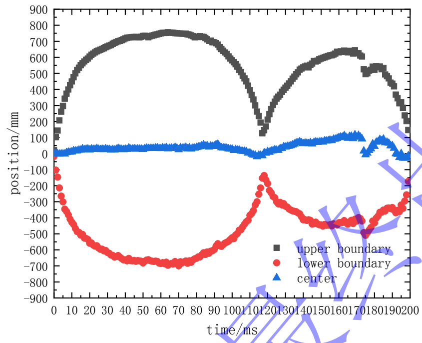


图 9 60g RS211 装药爆炸气泡边界和中心的位移时程曲线

Fig.9 Position-time curves of boundary and center of bubble for an aluminized charge of 60 g

表 2 RS211 装药气泡运动参数

Table 2 Parameters of bubble motion for aluminized charge

Charge mass/g	Water depth/m	The first pulsation		The second pulsation	
		Period/ms	Maximum radius/mm	Period/ms	Maximum radius/mm
20	3	83	505.9	56	337.7
20	3	84	507.9	56	335.0
20	3	84	502.4	56	338.5
20	3	84	510.3	56	335.8
40	3	103	666.6	69	449.0
40	3	104	655.2	70	432.5
40	3	104	654.7	71	440.9
40	3	104	657.9	71	444.6
60	3	117	726.1	81	537.8
60	3	117	726.4	81	532.5
60	3	118	722.0	81	534.0

2.2 边界对气泡运动影响分析

根据本人之前开展的 TNT 水下爆炸试验中开展了自由水面和刚性水底对气泡运动的影响分析[7]。将 TNT 装药气泡脉动周期的试验结果与 Cole 理论计算结果进行对比，结果列于表 3 中，从表中可以看出气泡脉动周期的试验值与理论值偏差 1.67%~2.35%，说明边界对气泡脉动周期的影响较小。

表 3 TNT 气泡脉动周期试验值与 Cole 理论值对比

Table3 Comparison of TNT bubble pulse period between experiment results and Cole theoretical results

Charge mass/g	Water depth/m	Period		
		Experiment results/ms	Theoretical results/ms	Deviation/%
20	3.01	68.00	66.4	2.35
40	3.02	85.33	83.6	2.03
60	3.01	97.33	95.7	1.67

将TNT装药气泡最大半径的试验结果与Cole理论计算结果进行对比，结果列于表4中，从表中可以看出气泡脉动周期的试验值与理论值偏差0.05%~3.95%，说明边界对气泡最大半径的影响较小。

表 4 TNT 气泡最大半径试验值与 Cole 理论值对比

Table4 Comparison of TNT bubble maximum radius between experiment results and Cole theoretical results

Charge mass/g	Water depth/m	Maximum radius		
		Experiment results/mm	Theoretical results/mm	Deviation/%
20	3.01	413.2	401.8	2.76
40	3.02	526.9	506.1	3.95
60	3.01	579.7	579.4	0.05

将TNT装药气泡中心位移的试验结果与Cole的无限水域气泡上浮位移理论模型计算结果进行对比，结果列于表5中，从表中可以看出气泡上浮位移脉动周期的试验值与理论值偏差-11.7%~8.2%，说明边界对气泡最大半径的影响较大。鉴于本文主要关注气泡脉动周期和半径，而根据表3和表4结果认为本试验中边界对气泡的影响可以忽略。

表 5 TNT 气泡上浮位移试验值与 Cole 理论值对比

Table5 Comparison of TNT bubble migration between experiment results and Cole theoretical results

Charge mass/g	Theoretical results/mm	Experiment results/mm	Deviation/%
20	254.3	56.0	-5.7
40	349.3	44.1	8.2
60	420.7	37.6	-11.7

2.3 测量误差分析

影响气泡最大半径测量的主要因素包括：

（1）装药质量误差：≤4%；

（2）装药布放距离误差：≤0.9%，引起高速摄像图像与实际气泡大小比例关系误差；

（3）图像处理的判读误差：≤4%，由图像处理软件判读气泡半径与实际气泡半径的差别引起。

上述几项因素引起的综合误差为：$\sigma_m=\sqrt{0.04^2+0.009^2+0.04^2}=5.7\%$

3 气泡多次脉动能量转换机制分析

3.1 气泡多次脉动余能率分析

根据表2中气泡脉动周期和最大半径，按照式（1）计算第一次和第二次气泡脉动周期系数k_{T_n}的平均值分别为2.61和1.77，按照式（2）计算第一次和第二次气泡最大半径系数k_{a_n}的平均值分别为4.47和3.04。

$$T_n = k_{T\_n}\frac{W^{1/3}}{z_0^{5/6}} \quad (s) \tag{1}$$

$$a_{\mathrm{m}\_n} = k_{a\_n}\times\left(\frac{W}{z_0}\right)^{1/3} \quad (m) \tag{2}$$

式中，T_n 为第n次气泡脉动周期，单位秒（s）；k_{T_n} 为第n次气泡脉动周期系数；a_{m_n} 为第n次气泡脉动最大半径，单位米（m）；k_{a_n} 为第n次气泡脉动最大半径系数；W 为装药质量，单位千克（kg）；z_0 为装药所处位置流体静压力的等效水深，单位米（m）。

根据Cole提出的余能率计算方法[8]，由此可计算得出RS211装药第二次气泡脉动相对第一次气泡脉动的余能率为

$$\eta = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^3 = \left(\frac{k_{T\_2}}{k_{T\_1}}\right)^3 = \left(\frac{1.77}{2.61}\right)^3 = 0.31 \tag{3}$$

3.2 气泡多次脉动能量转换机制

Cole[8]认为，气泡的运动可以用气泡与周围介质的能量平衡方程来描述

$$\frac{3}{2}\left(\frac{4\pi}{3}\rho_0 a^3\right)\left(\frac{da}{dt}\right)^2 + \frac{4\pi}{3}P_0 a^3 + E_a = Y \tag{4}$$

式中，第一项为从气泡表面扩散的径向流的动能，第二项等于反抗流体静压所做的功，即气泡势能 E_p，第三项为气泡内能 E_a，Y 为气泡总能量。

气泡在达到最大半径 a_m 时，$da/dt = 0$，则式（4）第一项动能为零。

此时，气泡势能 E_p 为：

$$E_p = \frac{4\pi}{3}P_0 {a_m}^3 \tag{5}$$

式中，P_0 为装药所处位置流体静压力，单位帕（Pa）。

若爆炸生成物可视为比热比 γ 为常数的理想气体，而且其状态的变化是按绝热律进行的，则压力与体积间的关系为

$$P\left(\frac{V}{W}\right)^\gamma = k \tag{6}$$

结合式（6），得到气泡内能 E_a 为：

$$E_a = \int_{V(a)}^{\infty} PdV = \frac{kW}{\gamma-1}\left(\frac{W}{V(a)}\right)^{\gamma-1} = \frac{P_a V(a)}{\gamma-1} \tag{7}$$

式中，W 为爆炸产物的质量，单位千克（kg）；V 为气泡体积，单位立方米（m³）；P 为气泡内压力，单位帕（Pa）；γ 为爆炸产物比热比，参考TNT装药，取1.25；k 为爆炸产物常数。

根据表2中数据，利用式（5）和（7），计算得到气泡第一次最大半径时的势能 E_{p_1}、内能 E_{a_1}、总能 E_{S_1}，气泡第二次最大半径时的势能 E_{p_2}、内能 E_{a_2}、总能 E_{S_2}，结果列于表6中，同时得到第一次气泡脉动到第二次气泡脉动过程中的能量损失。

从表 6 中可以看出，第一次气泡脉动周期内，内能占总能的比例为 5.4%~6.4%，第二次气泡脉动周期内，内能占总能的比例为 5.5%~6.6%，因此工程计算时通常将气泡内能忽略，以气泡势能来表征气泡能，其本质是气泡最大半径。气泡最大半径和脉动周期均仅与装药质量和水深相关，而脉动周期便于测量获取，因此工程计算时以气泡脉动周期来表征气泡能。

表 6 第一次气泡最大半径和第二次气泡最大半径时刻能量分配

Table6 Energy distributions at time of the first and the second maximum bubble radius

Charge mass/g	Water depth/m	The first pulsation				The second pulsation				Energy dissipated/kJ
		E_{p_1}/kJ	E_{a_1}/kJ	E_{S_1}/kJ	E_{a_1}/E_{S_1}	E_{p_2}/kJ	E_{a_2}/kJ	E_{S_2}/kJ	E_{a_2}/E_{S_2}	
20	3	70.8	4.8	75.6	6.3	21.1	1.5	22.6	6.6	53.0
40	3	162.0	9.2	171.2	5.4	49.5	2.9	52.4	5.5	118.9
60	3	209.4	14.3	223.7	6.4	72.5	4.3	76.8	6.6	146.9

4 结 论

为了研究RS211装药水下爆炸气泡多次膨胀-收缩运动特性，本文开展了水下爆炸气泡运动光测试验方法研究，在直径φ85m，最大水深15m的爆炸水池内开展了20g、40g和60g RS211装药的水下爆炸试验，减弱了边界效应对水下爆炸气泡运动的影响，同时提高了试验药量。采用高速相机拍摄了RS211装药水下爆炸气泡多次膨胀-收缩运动图像，采用开发的智能化图像处理软件，对高速摄像图片进行批量化处理，获取了水下爆炸气泡第一次、第二次脉动的半径变化规律。建立了RS211装药水下爆炸气泡多次脉动能量分析方法，揭示了气泡势能、内能等能量的转换机制。得到如下结论：

（1）第一次和第二次气泡脉动周期系数分别为2.61和1.77，第一次和第二次气泡最大半径系数分别为4.47和3.04，第二次气泡脉动相对第一次气泡脉动的余能率为0.31；

（2）气泡内能占总能的比例为5.4%~6.6%，因此工程计算时通常将气泡内能忽略，以气泡势能来表征气泡能。

参考文献

[1] Klaseboer E, Khoo B C, Hung K C. Dynamics of an oscillation bubble near a floating structure [J]. Journal of Fluids and structures, 2005, 21(4): 395-412

[2] Hung C, Hwangfu J. Experimental study of the behavior of mini-charge underwater explosion bubbles near different boundaries [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2010, 651:55-80.

[3] Zhang A M, Wang S P, Huang C, et al. Influences of initial and boundary conditions on underwater explosion bubble dynamics [J]. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2013, 42:69-91.

[4] 朱锡,牟金磊,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 X, MU J L, HONG J B, et al. Experimental study of characters of bubble impulsion induced by underwater explosions [J].Journal of Harbin Engineering University, 2007, 28(4):365-368.

[5] 王海坤,刘建湖,毛海斌,等. 水下爆炸气泡及其射流的光电联合测量研究[J]. 防护工程, 2015,37(4):36-42.
Wang H K, LIU J H, MAO H B, et al. Photoelectric Combined Measurements of Underwater Explosion Bubble and Jet [J]. Protective Engineering, 2015, 37(4):36-44.

[6] 盛振新,刘建湖,张显丕,等. 水下爆炸气泡射流载荷阵列测量技术探索[J]. 爆炸与冲击, 2021,41(3):031405.

SHENG Z X, LIU J H, ZHANG X P, et al. On an array-sensor technology for measuring bubble jet load generated by underwater explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2021, 41(3):031405.

[7] 盛振新,刘建湖,王海坤,等. 自由水面和刚性水底联合作用下水下爆炸气泡上浮运动特性研究[J]. 振动与冲击, 2023,42(12):1-7.

SHENG Z X, LIU J H, WANG H K, et al. A study on migration characteristics for underwater explosion bubble under combined action of a free surface and a rigid bottom [J]. Journal of vibration and shock, 2023, 42(12):1-7.

[8] Cole R H. Underwater Explosions [M]. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1948.

[9] Arons A B, Slifko J P, Carter A. Secondary pressure pulses due to gas globe oscillation in underwater explosions. I. Experimental data [J]. J. Acoust. Soc. Am., 1948, 20 (3), 271 – 276.

[10] Arons A B. Secondary pressure pulses due to gas globe oscillation in underwater explosions. Ⅱ. Selection of adiabatic parameters in the theory of oscillation [J]. J. Acoust. Soc. Am.,1948,20 (3), 277 – 282.

Optical Experimental Study on the Multiple Expansion-Contraction Motions Characteristics of Underwater Explosion Bubbles

SHENG Zhenxin[1,2,3], WANG Haikun[1,2,3], CHEN Jiping[1,2,3], ZHANG Xianpi[1,2,3], YU Jun[1,2,3], GAO Tao[1,2,3]

(1. *China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, Jiangsu, China;*
2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Wuxi 214082, Jiangsu, China;
3. National Key Laboratory of Ship Structural Safety, Wuxi 214082, Jiangsu, China)

Abstract: The underwater explosion bubbles expand and contract several times until it runs out of energy, during the pulsations, the mutual conversion of energy occurs. At present, there is insufficient attention paid to multiple pulsations characteristics and energy conversion of underwater explosion bubbles. In this paper, the underwater explosion experiments of 20g, 40g, and 60g aluminized charges were carried out, and the evolution process of the bubbles multiple pulsations were photographed with a high-speed camera, then pulsation period and maximum radius of the bubbles were obtained after intelligent processing. On this basis, the theoretical analysis was conducted on the conversion mechanism of the potential energy, internal energy during the multiple pulsations. The results show that: (1) the residual energy rate of the second bubble pulsation relative to the first bubble pulsation was 0.31; (2) the proportion of internal energy of the bubbles to total energy is 5.4%-6.6%, so the internal energy could be ignored, and energy of the bubbles could be represented by the potential energy in the engineering application.

Keywords: underwater explosion; bubble multiple pulsation; optical measurement; energy conversion