DOI: 10.11883/1001-1455-(2015)03-0320-06

小当量炸药深水爆炸气泡脉动模拟实验*

马 坤,初 哲,王可慧,李志康,周 刚
(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 为在实验室内开展深水爆炸气泡脉动规律研究,通过增加水面大气压强来模拟水中静水压的方法,建立可模拟深水环境的爆炸容器。开展不同模拟水深条件下的 3 种当量炸药的水下爆炸实验,得到了气泡脉动过程图像,验证小当量深水爆炸模拟实验与自由场实验的等效性,分析气泡脉动周期与最大半径同模拟水深的关系。实验结果表明:容器壁面反射效应对气泡脉动过程的影响可以忽略不计,模拟实验可等效为自由场实验;深水爆炸气泡脉动周期及最大半径随流体静力深度增加的衰减系数分别为−0.83 和−0.364。

关键词: 爆炸力学;气泡脉动周期;衰减系数;水下爆炸;深水模拟
中图分类号: O383.1 **国标学科代码**: 1303520 **文献标志码**: A

潜艇一般活动在高静水压的深海中,而水下爆炸载荷(冲击波载荷及气泡脉动载荷)在深水条件下将产生一定的变化。国外开展深水爆炸相关研究较早,J. P. Slifko[1]通过大量的海上实验对深水爆炸载荷的特性进行了细致的研究,给出了各类炸药深水爆炸冲击波压力、气泡脉动压力的特征参数与水深、比距离等参数的关系,数据详实,具有重要的参考意义。R. H. Cole[2]著作中包含了深水爆炸实验研究工作,给出了 260 m 深度内的气泡脉动周期与水深关系的实验结果。这些实验均在海上试验场完成,需要具备实验场地、配套设备和实验经费等较多苛刻条件。

在实验室水箱或容器中开展水下爆炸实验具有经济性和方便性,然而水下爆炸冲击波在水箱/容器的壁面反射后会对整个流场产生持续的影响,使实验结果不能真实的反映无限水域中气泡的运动特性。王建灵等[3]在有限水域进行水下爆炸实验研究过程中,利用气泡脉动周期和实验药量的线性关系判断水域边界对气泡脉动过程的影响,对有边界水域水下爆炸实验中药量上限的界定提供了参考。汪斌等[4]在 2 m×2 m×2 m 的实验水箱内壁贴 20 mm 厚的吸能材料,实验得到的气泡脉动周期结果与近似无限水域中的实验结果基本一致,4.5 g 药量最大误差为 4.8%。以上研究结果表明,在实验室水箱/容器中开展小当量炸药的水下爆炸实验研究是可行的。

在深水爆炸研究中,国内已开展了使用 AUTODYN、DYTRAN、ABAQUS 等商业软件或采用自编程序进行深水爆炸载荷演变及其与各类结构相互作用的数值模拟研究[5-8],而在深水爆炸模拟实验方面较少。钟帅[9]、孙跃光[10]开展了水下爆破方面的研究工作,研究表明可以通过增加水面大气压强的方法提高水中静水压,达到模拟深水环境的目的,在洪江波等[11]的研究工作中也可以得到证实。目前,国内关于模拟深水下炸药爆炸气泡脉动规律的实验研究鲜有报道。本文中在可模拟深水环境的实验平台上较为系统地开展小当量深水爆炸模拟实验,验证小当量深水爆炸模拟实验的等效性,研究深水爆炸气泡脉动规律,结果表明:爆炸气泡脉动周期与模拟水深之间呈现出衰减趋势,并拟合出相关衰减系数。

1 气泡脉动量纲一分析

为简化力学方程组,得到影响气泡脉动的关键因素。忽略热传导和粘滞性等因素的影响,将水介质简化为理想不可压缩流体。假设气泡以球形运动,设气泡半径为 a,中心上浮速度为 u,“流体静力”深度(实际水深加 10 m)为 z,水密度为 ρ_0,冲击波传播至水中后爆轰产物的总能为 Y,对应的内能为 $E(a)$。

* **收稿日期**: 2013-10-17; **修回日期**: 2014-02-28
第一作者: 马 坤(1986—),男,硕士研究生,助理研究员,makun@nint.ac.cn。

则通过推导[2]得到气泡的动量方程和能量方程为：

$$u=-\frac{\mathrm{d}z}{\mathrm{d}t}=\frac{2g}{a^3}\int_0^t a^3\,\mathrm{d}t \tag{1}$$

$$2\pi\rho_0 a^3\left(\frac{\mathrm{d}a}{\mathrm{d}t}\right)^2+\frac{\pi}{3}\rho_0 a^3u^2+\frac{4\pi}{3}\rho_0 a^3gz=Y-E(a) \tag{2}$$

无限水域中炸药爆炸气泡的运动特性由当地静水压力及最初爆轰产物的尺寸、内压决定，其中静水压由水的重力效应决定，而爆轰产物的性质由炸药种类、尺寸决定。对于 2 个不同尺寸炸药水下爆炸的气泡脉动过程，若要保持两者运动相似，由于长度比例尺不同，时间比例尺也要相应变化，并使重力（流体静压力）的影响在任何系统内部都相同。即量纲为 $[L/T^2]$ 的重力加速度 g 这一常量要求时间比例尺的增加为长度比例尺增加的平方根。假设长度比例尺用特征长度 L 来表示，将方程化为量纲一形式。设 t、a、z 的量纲一变量分别为 t'、a'、z'，关系式为：$t=\sqrt{\frac{L}{g}}t'$，$a=La'$，$z=Lz'$，则式(1)～(2)化为：

$$-\frac{\mathrm{d}z'}{\mathrm{d}t'}=\frac{2}{a'^3}\int_0^{t'}a'^3\,\mathrm{d}t' \tag{3}$$

$$2\pi a'^3\left(\frac{\mathrm{d}a'}{\mathrm{d}t'}\right)^2+\frac{\pi}{3}a'^3\left(\frac{\mathrm{d}z'}{\mathrm{d}t'}\right)^2+\frac{4\pi}{3}a'^3z'=\frac{Y}{L^4\rho_0 g}\left(1-\frac{E}{Y}\right) \tag{4}$$

式(3)已经完全化为量纲一方程，而式(4)中等号左边也已经化为量纲一形式，则等式右边必为量纲一形式，故可以取：

$$L=\left(\frac{Y}{g\rho_0}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{5}$$

$$\frac{a}{a'}=\frac{z}{z'}=\left(\frac{Y}{\rho_0 g}\right)^{\frac{1}{4}} \tag{6}$$

$$\frac{t}{t'}=\left(\frac{Y}{\rho_0 g^5}\right)^{\frac{1}{8}} \tag{7}$$

在炸药密度不变的情况下，总能 Y 与炸药线性尺寸的立方成正比。式(6)～(7)可得出结论：对不同比例尺下同一物理过程进行等效换算时，所有长度比例尺的变化应该与药包线性尺寸的 3/4 次方成正比；与此同时，时间比例尺的变化应该与药包线性尺寸的 3/8 次方成正比。

对于 TNT 装药水下爆炸，R. H. Cole[2] 提出了气泡脉动周期 T 和最大半径 R_m 的经验公式：

$$T=2.064\,\frac{w^{\frac{1}{3}}}{(H+10)^{\frac{5}{6}}} \tag{8}$$

$$R_\mathrm{m}=3.3825\left(\frac{w}{H+10}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{9}$$

式中：w 为装药质量，H 为装药所处水深。可以看出，水下爆炸气泡脉动的周期和最大半径的经验公式符合量纲一分析得出的比例关系。

2　实验情况简介

采用内径 1.2 m 的爆炸容器，该容器可承受 4 MPa 静水压，密封性能良好，实验平台布置如图 1 所示。该平台使用自主研发的小当量球形精密爆炸源[12]，可形成球对称性良好的冲击波和气泡。装药实物图如图 2 所示，用直径 1 mm 的柔爆索中心起爆装药，柔爆索另一端与雷管底部相连。雷管引线经法兰转接与容器外部起爆线路相连，从而实现雷管/柔爆索/药球系统的起爆。在容器内部不同爆心距处安装有冲击波压力传感器，传感器传输线穿过法兰并做密封处理后，接至外部适配器再与示波器相连，避免了水中转接所可能出现的漏电情况。在容器外部设置光源，采用逆光的拍摄方式，使采光具有较强的表现力，被摄物体轮廓线清晰。高速相机拍摄频率可达 6 000 s^{-1}，能够拍摄到气泡的脉动过程。

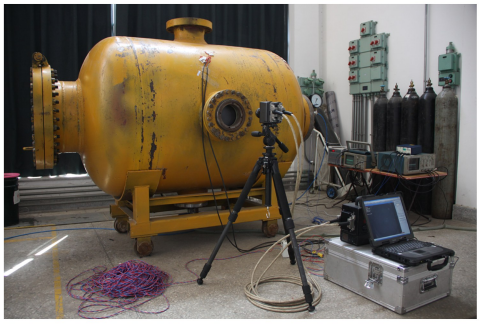

图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

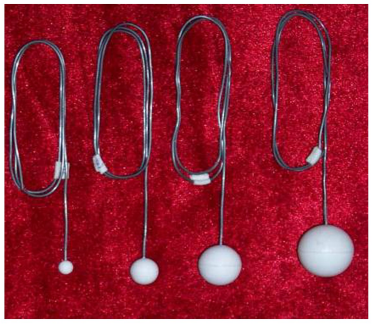

图 2 药球实物图

Fig. 2 Explosive spheres

在进行深水爆炸模拟实验时,实验前向容器中注水,水位保证容器内留有一定空间即可。实验时先将雷管/柔爆索/药球系统经法兰固定在水域中并密封容器,然后使用空气压缩机经法兰转接口向容器中充入高压空气。水深每增加 10 m 静水压力上升 1 个大气压,故可将需要模拟的水深换算为实验所需达到的静水压。容器侧面法兰与药球同等水位处安有压力表,当压力表示数达到实验所需压强时,关闭加压转接口处的高压球阀,空气压缩机停止工作。最后进行起爆线路的连接,确保一切工况正常后起爆药球。互感器在起爆脉冲电流作用下感生触发信号使示波器触发并记录冲击波压力信号,高速摄影采用人工触发的方式记录药球爆炸后气泡的脉动过程。

3 深水爆炸气泡脉动规律分析

3.1 实验结果及气泡脉动现象

开展了 0.125、0.5 和 1 g TNT 当量药球不同模拟水深下的爆炸实验。利用高速摄影技术获得了气泡的脉动过程,并通过图像处理得到气泡脉动周期和最大半径的数据。图 3 所示为 0.6 MPa 静压下 1 g TNT 当量药球爆炸气泡脉动过程。气泡球对称性良好,轮廓清晰。直观结果显示,气泡脉动过程与一般水下爆炸气泡脉动相似:炸药爆轰产物在原有空间处形成最初的气泡,随后气泡由快至慢的膨胀,当膨胀至最大后,开始由慢至快的收缩,直至气泡内气体压力的减速作用使得气泡表面水介质速度为零,然后重新膨胀。表 1 所示为实验得到的各当量药球在不同模拟水深下爆炸气泡脉动的周期及最大半径。由于实验光源调节不当,部分实验没有获得清晰的气泡最大半径的图像,丢失实验结果。

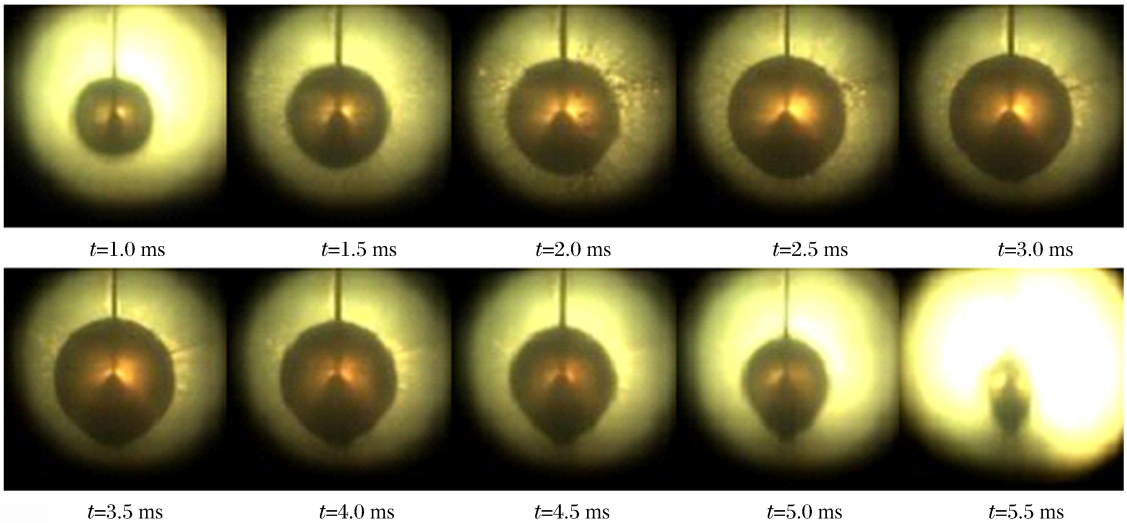

图 3 药球爆炸气泡脉动过程

Fig. 3 Bubble pulse process in water area

表 1　不同药量不同模拟水深气泡脉动周期及最大半径实验值

Table 1　Experimental data of bubble period and maximum radius at different charge weight and water depth conditions

w/g	p_s/MPa	T/ms	R_m/mm	w/g	p_s/MPa	T/ms	R_m/mm
0.125	0	16.5	79.7	0.500	0.4	6.5	71.1
0.125	0.2	6.5	54.2	0.500	0.6	4.8	63.7
0.125	0.3	5.0	—	1.000	0	27.0	—
0.125	0.4	3.8	42.9	1.000	0.2	11.5	103.3
0.125	0.6	3.2	38.7	1.000	0.4	8.0	87.3
0.125	1.0	2.3	36.4	1.000	0.6	6.0	79.1
0.500	0	22.5	—	1.000	0.9	4.5	69.3

3.2　气泡脉动周期实验结果分析

与大水域中进行的水下爆炸实验不同，实验在容器中完成，气泡脉动过程中不可避免的要受到冲击波在容器内部来回反射的影响。为验证影响程度的大小，对每种模拟深度下气泡脉动周期与炸药的 TNT 当量的关系进行分析，结果如图 4 所示。

由式(8)可知，在深度保持不变的情况下，气泡脉动周期与炸药质量的立方根呈线性关系。对于有边界反射效应的容器内水下爆炸实验，随着实验药量的增大，冲击波在边界反射后对气泡脉动过程的影响将越来越强，最终使气泡脉动周期偏离与炸药质量立方根的线性关系。而从图 4 中可以看出，对于每种模拟深度，气泡脉动周期随 TNT 当量的立方根的增加均呈线性变化趋势。因此认为，容器边界对气泡脉动过程的影响可以忽略不计，实验结果能够与无限水域下的实验结果保持一致。

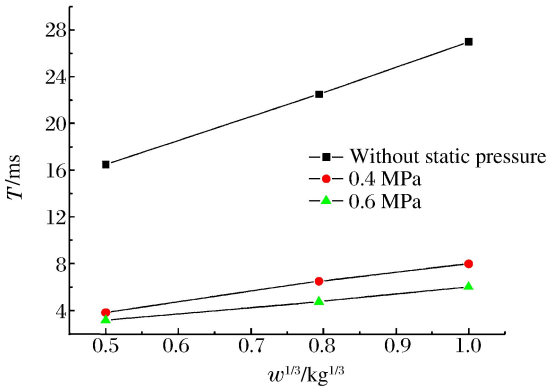

图 4　相同模拟深度下气泡脉动周期与 TNT 当量立方根的关系

Fig. 4　Relation between bubble period and cube root of TNT equivalent charge at the same simulated depth

将每种当量炸药水下爆炸气泡脉动周期与模拟水深之间的关系进行拟合，结果如图 5 所示。图中可见，每种当量下实验数据点均在拟合曲线上，反映出在某种当量下实验结果的准确性。不同的拟合曲线均呈现出相同的衰减趋势，实验数据能够一致体现气泡脉动周期随水深增加的规律性。为了有效利用所有实验数据，获得深水爆炸气泡脉动周期随水深增加的衰减系数，对气泡脉动周期与 TNT 当量立方根之比和水深的关系用曲线拟合，结果如图 6 所示。

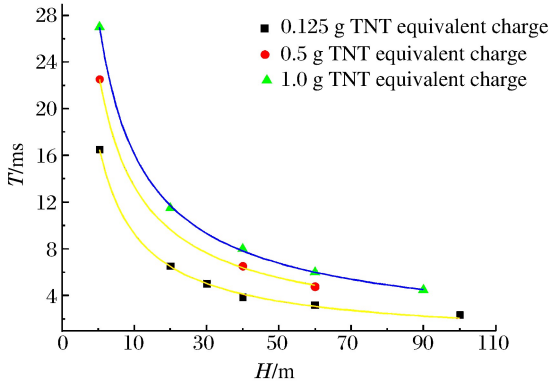

图 5　不同当量炸药下气泡脉动周期与水深的关系

Fig. 5　Relation between bubble period and water depth under different TNT equivalent charges

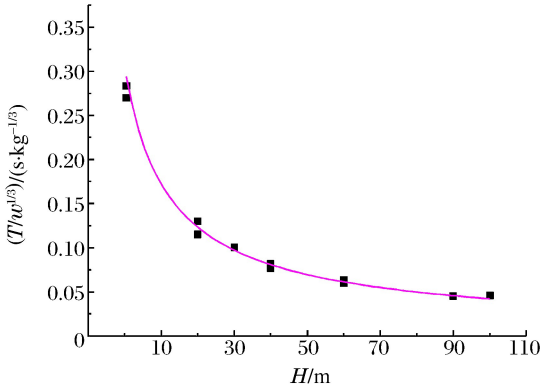

图 6　气泡脉动周期与 TNT 当量立方根之比随水深增加关系

Fig. 6　Relation between ratio of bubble period and cube root of TNT equivalent charge and water depth

图 6 中大部分数据点偏离拟合曲线较小。拟合曲线的衰减系数为−0.83，与量纲一理论分析得到的结果−5/6 吻合较好，说明了实验能够得到准确的气泡脉动周期随水深变化的衰减规律。实验数据拟合得到的气泡脉动周期公式：

$$T=2.046\frac{w^{\frac{1}{3}}}{(H+10)^{0.83}} \tag{10}$$

式中：T 为气泡脉动周期，单位为 s，w 为药量，单位为 kg，H 为水深，单位为 m。

3.3 气泡脉动最大半径实验结果分析

将不同当量炸药水下爆炸气泡脉动最大半径与水深之间的关系进行拟合，如图 7 所示。0.125、1 g TNT 当量下，实验点与拟合曲线吻合良好，均符合气泡脉动最大半径随水深的曲线走势。0.5 g TNT 当量药球对应数据点只有 2 个，不进行拟合，与其他两条曲线比较，数据点符合曲线的走势。将所有数据拟合至 1 条曲线上，气泡脉动最大半径与 TNT 当量立方根之比随水深变化的拟合曲线如图 8 所示。

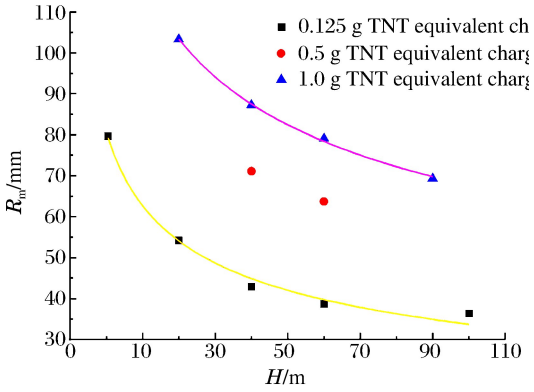

图 7 气泡脉动最大半径与水深的关系

Fig. 7 Relation between maximum bubble radius and water depth

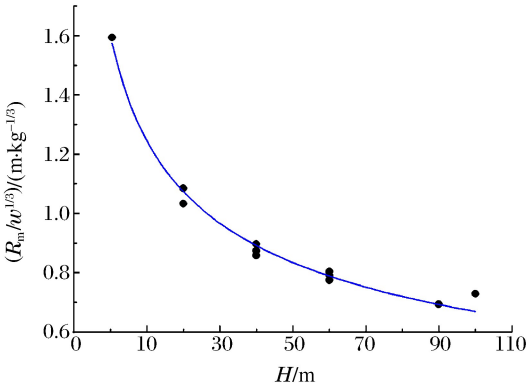

图 8 气泡脉动最大半径与 TNT 当量立方根之比随水深增加关系

Fig. 8 Ratio of maximum bubble radius and cube root of TNT equivalent charge varied with water depth

图中大多数点都能与拟合曲线保持一致，表明不同当量炸药的实验结果一致性较好，3 种当量药球在不同水深爆炸均能得到符合客观实际的气泡脉动最大半径实验结果。曲线中有一个数据点偏离稍大，该数据是在调试实验中得到的，引入了较大的实验误差。图中拟合得到的衰减系数为−0.364，与无量纲理论分析得到的结果−1/3 比较接近，说明了实验得到的气泡脉动最大半径随水深变化的规律是准确的。实验数据拟合得到的气泡脉动最大半径公式：

$$R_m=3.697\frac{w^{\frac{1}{3}}}{(H+10)^{0.364}} \tag{11}$$

式中：R_m 为气泡脉动最大半径，单位为 m，w 为药量，单位为 kg，H 为水深，单位为 m。

4 结 论

为研究深水爆炸气泡脉动规律，基于小当量炸药深水爆炸模拟实验平台，开展了 0.125、0.5、1 g TNT 当量药球不同模拟水深下的爆炸实验，得出结论如下：(1)容器壁面对气泡脉动过程影响可以忽略，在该容器内实验得到的气泡脉动过程与无限水域情况下是一致的。(2)每种当量炸药水下爆炸气泡脉动周期及最大半径符合随水深增大而不断减小的规律，不同当量之间气泡脉动周期及最大半径与水深的关系曲线走势一致。(3)根据所有数据的拟合结果，深水爆炸气泡脉动周期及最大半径随流体静力深度增加的衰减系数分别为−0.83 和−0.364，与量纲一分析的结果相近。

参考文献：

[1] Slifko J P. Pressure-pulse characteristics of deep explosions as functions of depth and range[R]. AD-661804, 1967.

[2] Cole R H. Underwater explosion[M]. New Jersey: LISA, Princeton University, 1948.

[3] 王建灵，胡宏伟，郭炜，等. 池壁和水中障碍物对气泡脉动影响研究[C]//第五届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集. 2008：300-305.

[4] 汪斌，王彦平，张远平. 有限水域气泡脉动实验方法研究[J]. 火炸药学报，2008，31(3)：32-35.
Wang Bin，Wang Yan-ping，Zhang Yuan-ping. A method of studying bubble pulses in confined water area[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants，2008，31(3)：32-35.

[5] 胡毅亭，贾宪振，饶国宁，等. 水下爆炸冲击波和气泡脉动的数值模拟研究[J]. 舰船科学与技术，2009，31(2)：134-140.
Hu Yi-ting，Jia Xian-zhen，Rao Guo-ning，et al. Numerical study of underwater explosion shock wave and bubble pulse[J]. Ship Science and Technology，2009，31(2)：134-140.

[6] 荣吉利，李健. 基于 Dytran 软件的三维水下爆炸气泡运动研究[J]. 兵工学报，2008，29(3)：331-336
Rong Ji-li，Li Jian. Research on the motion of three-dimensional underwater explosion bubble with Dytran software [J]. Acta Armamentarii，2008，29(3)：331-336.

[7] 贾宪振. 基于通用程序的水下爆炸及其对结构作用的数值模拟研究[D]. 南京：南京理工大学，2007.

[8] 张阿漫，姚熊亮. 水深和药量的变化对水下爆炸气泡射流的影响研究[J]. 工程力学，2008，25(3)：222-229.
Zhang A-man，Yao Xiong-liang. The effect of charge and water depth on the underwater explosion bubble[J]. Engineering Mechanics，2008，25(3)：222-229.

[9] 钟帅. 模拟深水爆炸装药输出能量的研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2007.

[10] 孙跃光. 模拟深水装药爆炸作功能力研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2008.

[11] 洪江波，李海涛，朱锡，等. 水下爆炸的高速摄影测试技术研究[J]. 武汉理工大学学报，2008，30(5)：82-86.
Hong Jiang-bo，Li Hai-tao，Zhu Xi，et al. High-speed photographic investigation of bubble induced by underwater explosion[J]. Journal of Wuhan University of Technology，2008，30(5)：82-86.

[12] 王占江. 岩土中填实与空腔解耦爆炸的化爆模拟实验研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2003.

Experimental research on bubble pulse of small scale charge exploded under simulated deep water

Ma Kun，Chu Zhe，Wang Ke-hui，Li Zhi-kang，Zhou Gang

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

Abstract：For investigating bubble pulse of small scale charge exploded under deepwater in the laboratory，an experiment platform of charge exploded under simulated deepwater is established by means of adding atmospheric pressure over the water surface to increase the hydrostatic pressure. Experiments of 3 small scale charges exploded under different simulated deepwater environments are conducted. Images of bubble pulse process are gained. The equivalence between experiments of small scale charge exploded under simulated deepwater and experiments under free-field is validated. The variations of the period and the maximum radius of bubble pulse depending on the water depth are analyzed. Passing through these experiments，the reflection effect from the containment vessel shell can be neglected for the bubble pulse process，and the simulated deepwater environment can be regarded as real free-field deepwater environment. When increasing the hydrostatic water depth，the attenuation coefficients of the period and the maximum radius of bubble pulse of small scale charge exploded under deepwater are −0.83 and −0.364，respectively.

Key words：mechanics of explosion；bubble pulse period；attenuation coefficient；underwater explosion；simulated deep water

（责任编辑　王易难）