文章编号：1000-5773(2013)04-0587-05

实验条件对水下爆炸实验结果的影响*

张兴明[1]，徐 森[1]，高 欣[2]，林 辉[2]，张建新[3]

(1.南京理工大学化工学院，江苏南京 210094；
2.四川雅化事业集团股份有限公司，四川攀枝花 625000；
3.国家民用爆破器材质量监督检验中心，江苏南京 210094)

摘要：为获得实验条件对水下爆炸实验结果的影响，实验研究了测点位置、实验深度与冲击波峰值压力、比冲击波能、气泡脉动周期、比气泡能之间的关系。结果表明：冲击波峰值压力和比冲击波能随测点与爆心距离的增加而降低；炸药的实验深度越深，气泡脉动周期越小，比气泡能越大。测点与爆心的距离应至少大于两倍的气泡半径，炸药的实验深度应为水池深度的 1/3～3/4。

关键词：水下爆炸；冲击波超压；气泡脉动

中图分类号：O382.1；O384 **文献标识码**：A

1 引 言

水下爆炸法是测量炸药能量的常用方法，主要通过测量炸药在水下爆炸时的冲击波参数和气泡脉动周期，计算得到炸药的冲击波能和气泡能[1-2]。由于冲击波能和气泡能的理论计算公式是基于无限水域导出的，而大量水下爆炸实验都是在有限水域中进行，导致边界效应对水下爆炸实验结果产生较大的影响。确定合适的实验条件，对实验结果进行修正，使实验条件接近无限水域，是屏蔽边界效应的有效方法[3-4]。王建灵等人[5]研究了试样入水深度对水下爆炸结果的影响，确定了合适的试样入水深度；苏华等人[6]针对传感器几何尺寸的影响，对冲击波能的计算方法进行了修正；饶国宁等人[7]对小水池中测得的炸药输出能量所受边界效应的影响进行了修正。本工作系统研究爆炸深度及测点位置对水下爆炸实验结果的影响，探讨水下爆炸实验条件的选择原则。

2 实 验

2.1 实验装置

爆炸水池的直径和深度均为 8 m，池壁和底部由钢板焊接而成，并固定在钢筋混凝土底座上。压力传感器为 PCB W138A10。将样品和传感器用钢丝绳和重锤固定在水池中，并保持药柱爆心和传感器敏感元在同一水平高度，实验装置示意图见图 1。

2.2 实验样品

实验样品为 160 g 的 Pentolite 药柱(TNT 炸药与 PETN 炸药的质量比为 1∶1)，长径比为 1∶1，密度为 1.60 g/cm^3。

* **收稿日期**：2011-10-11；**修回日期**：2011-11-25
基金项目：工业和信息化部基础研究项目
作者简介：张兴明(1967－)，男，博士，工程师，主要从事含能材料研究. E-mail：zxm-nj@sohu.com
通讯作者：徐 森(1981－)，男，博士，主要从事含能材料研究. E-mail：xusen_345@sohu.com

2.3 实验方案

设水池深度为 H，将 Pentolite 药柱置于水面以下 $H/3$、$H/2$、$2H/3$ 及 $3H/4$ 深度处，在距爆心不同位置处放置压力传感器，分别测量冲击波参数和气泡脉动周期。所有实验均平行测定 2 次。

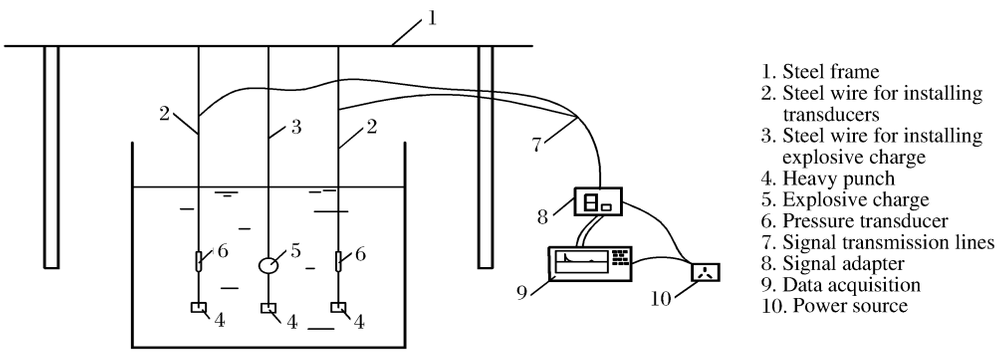


图 1 水中爆炸测试示意图

Fig. 1 Sketch of underwater explosion

3 结果与讨论

3.1 对冲击波峰值压力测试结果的影响

表 1 为在不同测点位置测得的 Pentolite 药柱在不同实验深度条件下的冲击波峰值压力，其中 p 为冲击波峰值压力，s 为测点距爆心的距离。对表 1 中不同实验深度条件下相同测点测得的冲击波峰值压力求平均值，拟合得到冲击波超压平均值 $\bar{p}$ 与对比距离 r 之间的拟合曲线，见图 2，拟合关系为

$$\bar{p} = 53.953 r^{-1.13} \tag{1}$$

式中：$\bar{p}$ 为冲击波超压平均值(单位为 MPa)；$r = s/m^{1/3}$，其中 m 为 Pentolite 药柱质量(单位为 kg)，s 为测点距爆心的距离(单位为 m)。(1)式的相关系数 $R^2 = 0.9924$。

由图 2 可知，Pentolite 药柱在 $H/3$、$H/2$、$2H/3$ 及 $3H/4$ 深度条件下，不同测点位置测得的冲击波峰值压力基本一致，但随着测点距离的增加，冲击波峰值压力逐渐降低。

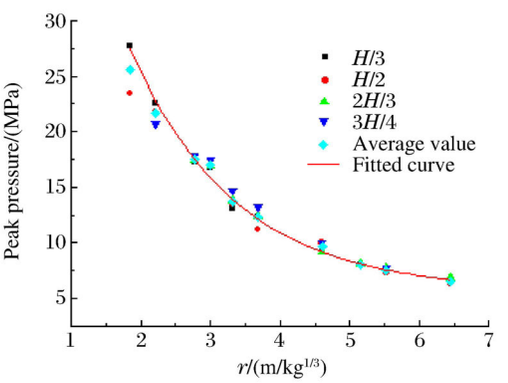


图 2 在不同测点位置测得的 Pentolite 药柱的冲击波峰值压力

Fig. 2 Peak pressure of shock wave of Pentolite explosive measured at different positions

表 1 在不同测点位置测得的 Pentolite 药柱的冲击波峰值压力

Table 1 Shock overpressure of Pentolite explosive measured at different positions

s/(m)	p/(MPa)				s/(m)	p/(MPa)			
	$3H/4$	$2H/3$	$H/2$	$H/3$		$3H/4$	$2H/3$	$H/2$	$H/3$
1.0	27.67	23.42	—	—	2.0	12.32	11.22	12.41	13.28
1.2	22.56	21.77	—	20.73	2.5	9.50	9.99	9.19	10.03
1.5	17.31	—	17.47	17.81	2.8	8.00	—	8.14	—
1.6	16.75	—	16.92	17.37	3.0	7.62	7.30	7.72	7.69
1.8	13.05	13.46	13.81	14.70	3.5	6.52	6.27	6.87	—

3.2　对比冲击波能的影响

比冲击波能 e_s 的理论计算公式[8]为

$$e_s = 8.548\frac{s^2}{m}\int_0^{6.7\theta} p^2(t)\mathrm{d}t \tag{2}$$

式中:e_s 为比冲击波能(单位为 J/kg),s 为测点距爆心的距离(单位为 m),m 为装药质量(单位为 kg),p 为冲击波峰值压力(单位为 Pa),θ 为冲击波时间常数(单位为 s)。根据实验测得的冲击波衰减曲线,利用(2)式,计算得到 Pentolite 药柱在不同实验深度、不同测点位置的比冲击波能,实验结果见图 3。

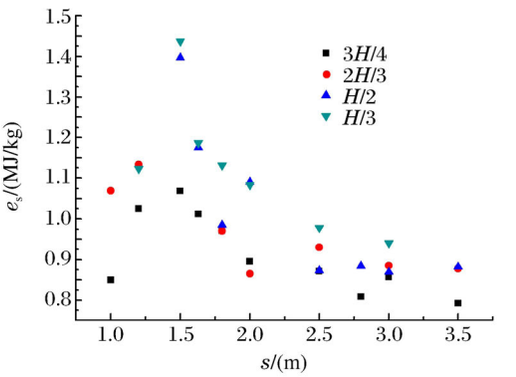


图 3　在不同测点位置测得的 Pentolite 药柱的比冲击波能

Fig. 3　Shock wave energy per unit mass of Pentolite explosive measured at different positions

药柱最大气泡半径 a_m 的估算公式[9]为

$$a_m \approx \left(\frac{1.3Qm}{1+0.1h}\right)^{1/3} \tag{3}$$

式中:a_m 为气泡最大半径(单位为 m),Q 为炸药爆热(单位为 MJ/kg),m 为装药质量(单位为 kg),h 为实验深度(单位为 m)。根据(3)式,计算得到本研究所用 Pentolite 药柱的最大气泡半径(实验深度为 $H/3$ 时,气泡半径最大),为 0.94 m。

由图 3 的结果可知,在相同实验深度条件下:当测点距爆心的距离大于 1.5 m 时,随着测点距离的增加,比冲击波能逐渐降低,这是由于测点距离爆心越远,冲击波在水中的能量损失越大;当测点与爆心的距离小于 1.5 m 时,测得的比冲击波能反而较小,这可能是因为(2)式是在大量实验结果(远距离)基础上拟合得到的,与测点距离的平方成正比,当测点距离小于两倍的气泡半径时,(2)式将不再适用。

3.3　对气泡脉动周期的影响

当 Pentolite 药柱处于不同实验深度时,不同测点位置测得的气泡脉动周期如表 2 和图 4 所示。由图 4 中的测试数据点可知,实验深度为 $H/2$ 和 $2H/3$ 时,不同测点位置的气泡脉动周期基本一致,表明不同测点位置对气泡脉动周期无明显影响。由表 2 的数据可知,当实验深度为 $H/3$、$H/2$、$2H/3$ 及 $3H/4$ 时,在不同测点处测得的气泡脉动周期的平均值分别为 143.68、142.27、136.57 和136.69 ms。结合图 4 的数据点可知:随着实验深度的增加,气泡脉动周期逐渐变小;当实验深度为 $H/3$ 和 $3H/4$ 时,气泡脉动周期的测试结果变化较大,可能是由于爆心距水面和水池底部太近所致。

表 2　在不同测点位置测得的 Pentolite 药柱的气泡脉动周期

Table 2　Bubble pulsation period of Pentolite explosive measured at different positions

s/(m)	Bubble pulsation period/(ms)				s/(m)	Bubble pulsation period/(ms)			
	$3H/4$	$2H/3$	$H/2$	$H/3$		$3H/4$	$2H/3$	$H/2$	$H/3$
1.0	136.41	136.15	—	—	2.0	136.66	136.50	142.40	143.19
1.2	136.26	137.23	—	143.19	2.5	137.07	136.30	142.21	143.14
1.5	136.89	—	142.10	143.77	2.8	137.66	—	142.30	—
1.6	137.27	—	142.21	145.09	3.0	136.39	136.71	142.28	142.71
1.8	135.83	136.55	142.21	144.68	3.5	135.85	136.55	142.43	—

3.4　对比气泡能的影响

比气泡能的计算公式为

$$e_b = 21\,695(p_i + 0.0098h)^{2.5}t_b^3 m^{-1} \tag{4}$$

式中:e_b 为比气泡能(单位为 MJ/kg),p_i 为实验时的大气压强(单位为 MPa),h 为实验深度(单位为 m),m 为装药质量(单位为 kg),t_b 为实测气泡脉动周期(单位为 s)。

根据表 2 数据，利用(4)式计算得到 Pentolite 药柱在不同实验深度和测点位置的比气泡能，实验结果见图 5。由图 5 中的数据点可知：随着实验深度的增加，药柱的比气泡能逐渐增加；但在同一实验深度条件下，不同测点位置的比气泡能基本一致。由此可见，在水下爆炸过程中，实验深度对比气泡能有显著影响，而测点位置对比气泡能无明显影响。

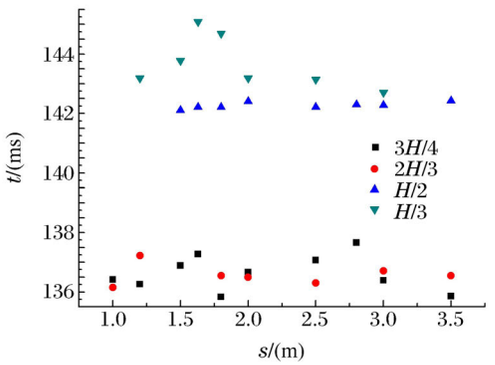


图 4 在不同测点位置测得的 Pentolite 药柱的气泡脉动周期

Fig. 4 Bubble pulsation period of Pentolite explosive measured at different positions

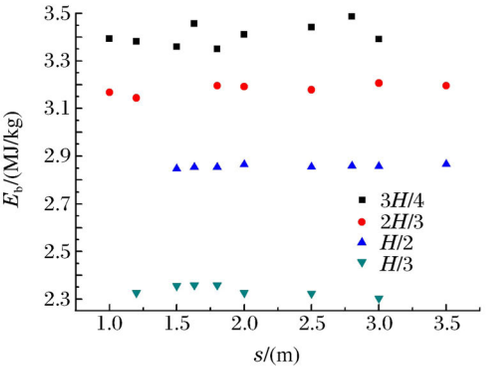


图 5 在不同测点位置测得的 Pentolite 药柱的比气泡能

Fig. 5 Bubble energy per mass of Pentolite explosive measured at different positions

4 结 论

(1) 为降低边界效应对水下爆炸实验结果的影响，测点与爆心的距离应至少大于两倍的气泡半径，实验深度应为水池深度的 1/3～3/4；

(2) 随着测点与爆心距离的增加，冲击波峰值压力和比冲击波能逐渐降低；

(3) 随着实验深度的增加，气泡脉动周期逐渐减小，比气泡能逐渐增大。

References:

[1] Mu J L, Zhu X, Li H T, et al. Experimental research on underwater explosion energy output of explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(2): 88-92. (in Chinese)
牟金磊，朱 锡，李海涛，等. 炸药水下爆炸能量输出特性试验研究 [J]. 高压物理学报，2010，24(2)：88-92.

[2] Li P. Study on energy output characteristic of non-ideal explosives [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006. (in Chinese)
李 澎. 非理想炸药水下爆炸能量输出结构研究 [D]. 北京：北京理工大学，2006.

[3] Shi R, Xu G G, Liu D R, et al. Underwater test and analysis for explosion energy of explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008, 31(4): 1-5. (in Chinese)
史 锐，徐更光，刘德润，等. 炸药爆炸能量的水中测试与分析 [J]. 火炸药学报，2008，31(4)：1-5.

[4] Li J, Rong J L, Xiang D L. Effects of charge mass and water depth on dynamic behaviors of an underwater explosion bubble [J]. Explosion and Shock Waves, 2010, 30(4): 342-348. (in Chinese)
李 健，荣吉利，项大林. 装药量及水深对水下爆炸气泡动态特性的影响 [J]. 爆炸与冲击，2010，30(4)：342-348.

[5] Wang J L, Zhao D K, Guo W, et al. Determination of the reasonable depth of explosives in water to measure underwater explosive energy [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2002, 25(2): 30-31. (in Chinese)
王建灵，赵东奎，郭 炜，等. 水下爆炸能量测试中炸药入水深度的确定 [J]. 火炸药学报，2002，25(2)：30-31.

[6] Su H, Chen W H, Wu T, et al. Amendment of shock wave parameters of underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2004, 27(3): 46-48. (in Chinese)

苏　华,陈网桦,吴　涛,等.炸药水下爆炸冲击波参数的修正 [J].火炸药学报,2004,27(3):46-48.

[7] Rao G N,Chen W H,Hu Y T,et al. Experimental study on underwater energy output characteristics of different explosives [J]. Explosive Materials,2007,36(1):9-11. (in Chinese)
饶国宁,陈网桦,胡毅亭,等.不同炸药水下能量输出特性的实验研究 [J].爆破器材,2007,36(1):9-11.

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

[9] Li P,Xu G G. Approximate calculation of underwater explosion shock wave propagation [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2006,29(4):21-24. (in Chinese)
李　澎,徐更光.水下爆炸冲击波传播的近似计算 [J].火炸药学报,2006,29(4):21-24.

Effect of Experimental Conditions on the Experimental Results of Underwater Explosion

ZHANG Xing-Ming[1],XU Sen[1],GAO Xin[2],LIN Hui[2],ZHANG Jian-Xin[3]

(1. *School of Chemical Engineering,Nanjing University of Science and Technology,Nanjing* 210094,*China*;
2. *Sichuan Yahua Industrial Group Co.,Ltd.,Panzhihua* 625000,*China*;
3. *National Quality Supervision Testing Center for Industrial Explosive Materials,Nanjing* 210094,*China*)

Abstract:In order to obtain information about the influence of experimental conditions on the results of underwater explosion,the relationships between measure position,explosion depth and explosion parameters,which contain shock overpressure,shock wave energy per unit mass,bubble pulsation period and bubble energy per mass,were studied by experiments. The results show that the peak pressure of shock wave and shock wave energy per unit mass decrease with the increment of distance between measuring position and explosive sample,the bubble pulsation period increases and bubble energy per mass decreases with the increasing of the explosion depth. The distance between the measuring position and explosion position are at least greater than twice of the bubble radius,and the explosion depth should be 1/3 to 3/4 of the tank depth.

Key words:underwater explosion;shock overpressure;bubble pulsation