

文章编号: 1001-1455(2013)03-0325-05

# 不同边界条件下炸药水中爆炸的能量输出结构\*

金 辉, 李 兵, 权 琳, 宋敬利  
(91439 部队, 辽宁 大连 116041)

**摘要:** 针对不同边界条件下, 炸药水下爆炸的能量输出结构, 设置自由场、沉底、近水底和近水面等不同边界条件下水下爆炸实验。结果表明, 炸药在距水底、水面一定距离时爆炸, 边界条件对冲击波影响较小, 对气泡脉动影响较大; 当炸药与水底距离小于 1 倍最大气泡半径处爆炸时, 由于水底边界影响, 不能形成完整的气泡脉动; 当炸药在距水面小于 1 倍最大气泡半径处爆炸时, 气泡直接溢出水面, 不能形成气泡脉动压力; 当炸药在距水面 1~1.5 倍最大气泡半径处爆炸时, 部分气泡溢出水面, 气泡脉动压力较自由场爆炸时小; 气泡在膨胀和收缩过程中, 由于气泡不断上升, 水面对气泡脉动的影响范围要大于水底。

**关键词:** 爆炸力学; 能量结构; 边界条件; 水下爆炸

**中图分类号:** O383

**国标学科代码:** 13035

**文献标志码:** A

炸药在水中爆炸的输出能量是各类目标冲击响应的激励源, 研究炸药在水中不同边界条件下的能量输出结构对分析水中兵器毁伤机理、研究目标冲击响应等都具有重要意义。炸药在水中爆炸时, 通常是以冲击波超压、衰减常数、气泡脉动压力、脉动周期、冲击波能等参数来表征炸药在水中爆炸的性能, 同时这些参数也是水中目标冲击响应分析的重要基础<sup>[1-3]</sup>。由于水与空气介质特性差异, 炸药在水中爆炸与在空中爆炸相比要复杂得多。常规球形炸药在空中爆炸时, 炸药快速形成的爆轰气体产物, 在周围空气介质中产生强冲击波, 冲击波压力快速下降, 对目标的破坏作用主要包括冲击波、爆轰产物等<sup>[4]</sup>。炸药在水中爆炸后, 同时在水介质中产生强冲击波、二次气泡脉动和滞后流等多种杀伤模式。水中爆炸的能量作用过程及对目标的毁伤机理与空中爆炸相比存在本质差别, 相同当量炸药水中爆炸对舰艇等目标的破坏威力远大于空中爆炸。

目前, 对炸药在水中自由场状态下的能量输出特性研究比较充分<sup>[5]</sup>, 对不同边界条件下水下爆炸特性研究较少。本文中拟对炸药在水中自由场、沉底、近水底及近水面等不同边界条件下的能量输出结构进行实验研究以期深入揭示炸药水下爆炸毁伤机理, 提高水中兵器毁伤效能及舰船抗毁伤能力。

## 1 炸药水中自由场爆炸能量输出

在理想状况下, 炸药水中爆炸后, 在水介质中形成冲击波, 同时因爆炸产物膨胀收缩引起气泡脉动压力<sup>[4-6]</sup>。水中冲击波的初始参数主要取决于炸药和水的特性, 描述冲击波最主要的表征量是冲击波压力峰值。质量为  $W$  的炸药在水中爆炸时, 距爆心距离为  $R$  的测点处压力峰值  $p_m$  可表示为

$$p_m = f(W, \rho, E, \alpha_v, \rho^{(w)}, \beta, \alpha_v^{(w)}, R) \quad (1)$$

式中:  $W$  为炸药量,  $\rho$  为炸药密度,  $E$  为炸药质量化学能,  $\alpha_v$  为炸药的体膨胀系数,  $\rho^{(w)}$  为水的密度,  $\beta$  为压力系数,  $\alpha_v^{(w)}$  为水的体膨胀系数,  $R$  为爆距。

对于球形 TNT 炸药<sup>[6]</sup>, 当参数  $W$ 、 $R$  和  $p_m$  的单位分别为 kg、m 和 Pa 时, 利用量纲分析, 最大压力峰值  $p_m$  可简化为

$$p_m = k (W^{1/3} / R)^\alpha \quad (2)$$

在工程应用上, 当  $6 \leq R/R_0 < 12$  时,  $k = 449, \alpha = 1.5$ ;  $12 \leq R/R_0 \leq 240$  时,  $k = 533, \alpha = 1.13$ ,  $R_0$  为炸

\* 收稿日期: 2012-03-15; 修回日期: 2012-11-13

作者简介: 金 辉(1971—), 男, 博士, 高级工程师。

药球半径。对于爆炸气泡脉动压力,当炸药深度为  $h$  时,球形 TNT 炸药的首次气泡脉动压力峰值  $p_m^{(1)}$ 、最大半径  $R_m$  和脉动周期  $T$  可分别表示为

$$p_m^{(1)} = 72.4W^{\frac{1}{3}}/R + p_0 \quad (3)$$

$$R_m = 3.5W^{\frac{1}{3}}/(h + 10.3)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$T = 2.11W^{\frac{1}{3}}/(h + 10.3)^{\frac{5}{6}} \quad (5)$$

式中:  $p_0$  为测点处的静水压力。

## 2 炸药沉底及近水底爆炸能量输出

### 2.1 实验工况设置

实验爆源为 1.5 g 球型 TNT 炸药,水底为硬质沙底,实验水深为 1.5 m;自由场压力传感器布设在爆源正上方 0.5 m 处。根据公式(4),在自由场工况下,1.5 g 球型 TNT 炸药在 1~1.5 m 水深爆炸时的气泡最大半径约为 0.18 m。实验共设 8 个工况,如表 1 所示。具体位置,如图 1 所示。

设  $A = D/R_m$ , 即  $A$  为爆源到水底的距离  $D$  与自由场工况下爆源在该深度时首次脉动的气泡最大半径  $R_m$  的量纲一比值;  $C = p_m^{(1)}/p_m$ , 同一次测量中首次脉动压力峰值  $p_m^{(1)}$  与冲击波峰值压力  $p_m$  的量纲一比值;同时设工况 7 为标准自由场爆炸实验工况,  $B = C_i/C_7, i=1,2,3\cdots 8$ , 即  $B$  为各种实验工况与自由场爆炸标准工况首次脉动压力峰值量纲一比值;  $\delta$  为冲击波峰值测量误差,即为冲击波测量峰值与理论值的差除以理论值。

### 2.2 测量结果分析

炸药在近水底和沉底爆炸时,由于水底边界的存在,使冲击波在水底出现了反射;由于改变了炸药周围流场特性,使气泡脉动也变得十分复杂。在工况 1 中,由于水底边界条件的影响,绝大部分气泡能被水底吸收,没有形成脉动压力;随着爆源与水底距离的增加,逐渐出现了气泡脉动压力,并且脉动压力峰值也逐渐增加;前 4 个工况中,由于爆源与水底距离小于最大气泡脉动半径,气泡脉动受水底影响较大。工况 2 中的首次脉动峰值量纲一比值  $A$  为 0.13;工况 3 的首次脉动峰值量纲一比值  $A$  为 0.52,第 1 个脉动周期为 33 ms,与公式(5)计算值 32 ms 相接近,同时还出现三次波;在工况 4 中,炸药到水底的距离与最大气泡脉动半径相同,水底对气泡脉动影响较小;工况 5 时,水底对气泡脉动的影响基本可以忽略。水底对首次脉动峰值的影响如图 2 所示。

表 1 近水底实验工况

Table 1 Near water bottom experiment conditions

工况	A	B	$\delta/\%$
1	0.0	0.00	11.79
2	0.4	0.13	-4.39
3	0.7	0.52	-1.27
4	1.0	0.88	-3.02
5	1.3	0.94	-3.90
6	1.6	0.97	1.56
7	2.0	1.00	-2.07
8	2.5	1.01	1.27

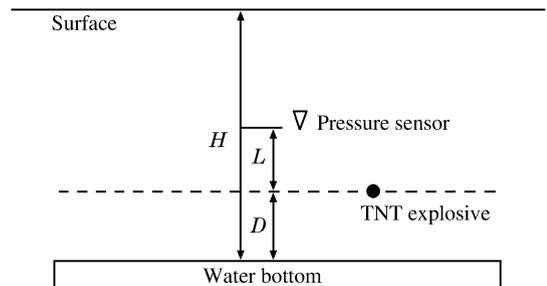


图 1 炸药在近水底实验中布设图

Fig. 1 Experiment layout in near water bottom test

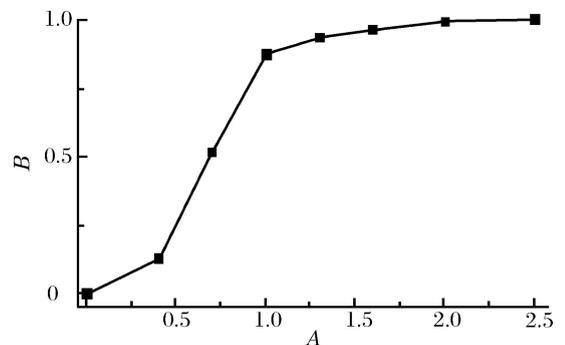


图 2 水底对首次脉动峰值的影响

Fig. 2 Pulse peak affected by water bottom

在水下自由场条件下,1.5 gTNT 炸药爆炸在 0.5 m 处的冲击波最大压力峰值为 10.26 MPa<sup>[4]</sup>,实验工况 2~8 的最大峰值均在 9.8~10.5 MPa 之间,与理论计算结果吻合较好;在工况 1 沉底爆炸中,由于水底冲击波反射叠加效应,冲击波压力峰值达 11.47 MPa,较其自由场工况高约 10%;同时由于水底边界作用,冲击波后还出现了多个反射信号。典型的自由场压力时程曲线如图 3 所示。

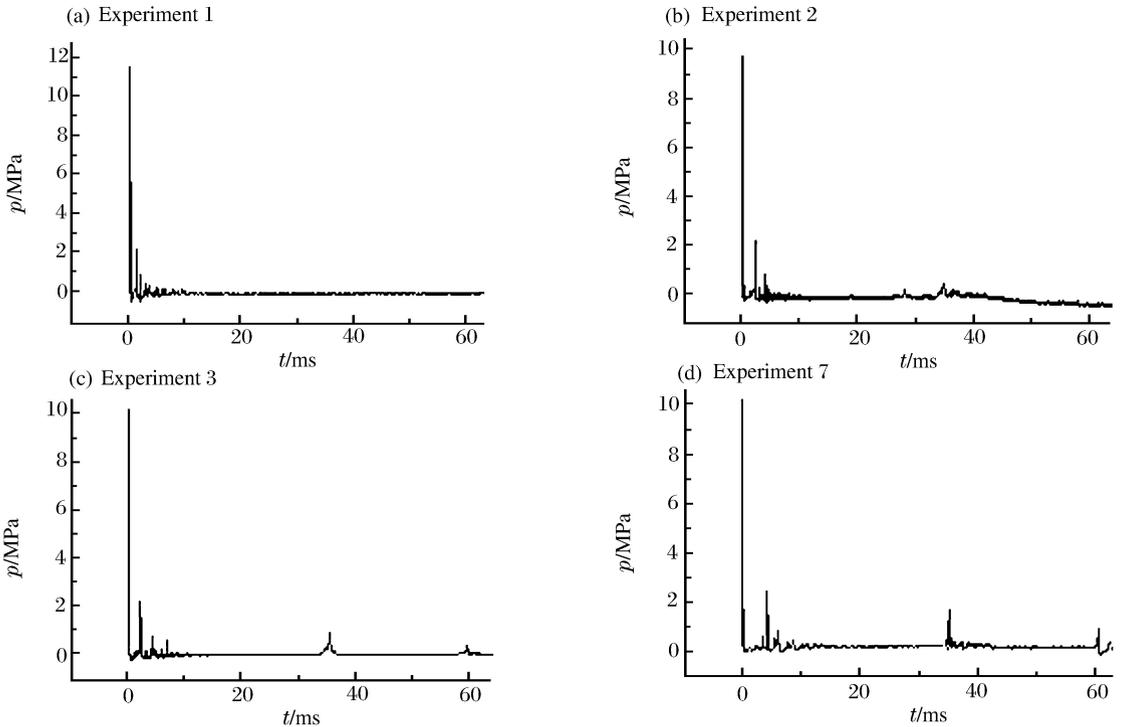


图 3 近水底实验中典型的自由场压力时程曲线

Fig. 3 Typical shock wave pressure histories in near water bottom test

### 3 炸药近水面爆炸能量输出

#### 3.1 实验工况设置

实验爆源为 200 g 球形 TNT 炸药,实验水深为 8 m。自由场压力传感器位于水下 2 m、距爆源中心水平距离 2.5 m 处。根据公式(4),在自由场条件下,200 g 球形 TNT 炸药在 0.7~2.0 m 水深爆炸时的气泡最大半径约为 0.90 m。实验共设 10 个工况,如表 2 所示,具体位置,如图 4 所示。

设  $h$  为爆源到水面的距离, $A' = h/R_m$ ,即为爆源到水面的距离  $h$  与自由场工况下爆源在该深度时首次脉动的气泡最大半径  $R_m$  的量纲一比值;设工况 9 为标准自由场爆炸实验工况,其他量纲一比值参数  $B$ 、 $C$ 、 $\delta$  定义和近水底工况相同。

#### 3.2 测量结果分析

实验中爆源与水面、水底都有一定距离,200 g TNT 炸药在工况 1~10 中测点处理论计算的冲击波压力峰值为 9.23~10.53 MPa<sup>[4]</sup>,实验测量值为 9.07~10.48 MPa,实验测量值与理论计算的误差均小于 5%,吻合较好。水面对首次脉动峰值的影响如图 5 所示,典型冲击波时程曲线如图 6 所示。

表 2 近水面实验工况

Table 2 Near water surface experiment conditions

工况	$A'$	$B$	$\delta/\%$
1	0.8	0.00	-1.78
2	1.0	0.08	-1.16
3	1.2	0.33	2.21
4	1.3	0.54	-4.42
5	1.4	0.66	-4.13
6	1.5	0.85	-2.57
7	1.6	0.95	-2.29
8	1.8	0.95	-2.67
9	2.0	1.00	-2.10
10	2.2	0.98	-2.59

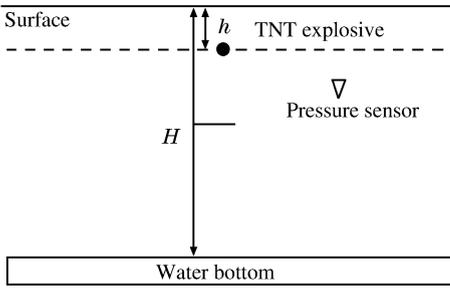


图 4 炸药在近水面实验中布设图

Fig. 4 Experiment layout in near water surface test

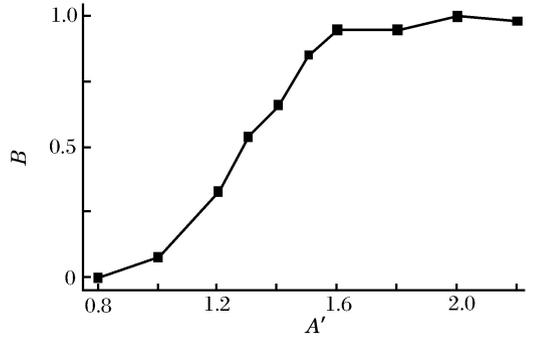


图 5 水面对首次脉动峰值的影响

Fig. 5 Pulse peak affected by water surface

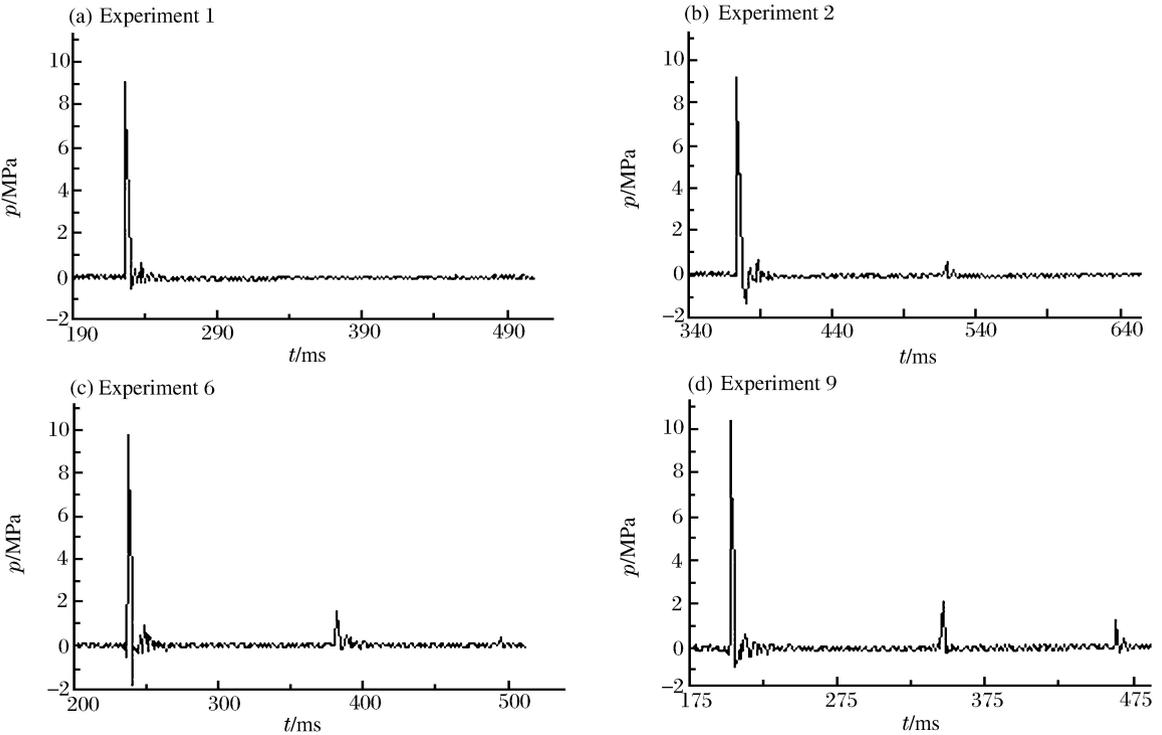


图 6 近水面实验中典型的自由场压力时程曲线

Fig. 6 Typical shock wave pressure histories in near water surface test

在工况 1 中,爆源布设深度为 0.72 m,小于气泡最大半径,气泡在膨胀过程中就开始溢出水面,因此不能完成气泡脉动;在工况 2 中,爆源布设深度与气泡最大半径相同,由于气泡膨胀过程中不断上升,气泡在达到最大半径前已溢出水面,因此也不能完成气泡脉动。随着爆源布设深度增加,逐渐出现了气泡脉动压力且压力峰值也逐渐增加。在工况 3~6 中,爆源布设深度大于气泡最大半径,但气泡在膨胀和收缩过程中不断上升,气泡在收缩到最小半径前部分气泡溢出水面,所以不能完成完整的气泡脉动,首次压力波峰值较自由场时小。当爆源布设深度大于 1.5 倍气泡最大半径时,水面对气泡脉动基本不产生影响,因此在工况 7~10 中都形成完整的气泡脉动,并出现了三次波。

### 4 结 论

(1)炸药在距水底、水面近距离爆炸时,边界对冲击波压力峰值影响较小,但对气泡脉动影响较大,大部分气泡能被水底吸收或溢出水面,不能形成气泡脉动压力。

(2)当炸药距水底距离小于 1 倍最大气泡半径时爆炸,气泡脉动受水底影响较大,不能完成完整的气泡脉动;当炸药距水底距离大于 1 倍最大气泡脉动半径时爆炸,水底对气泡脉动影响较少。

(3)当炸药距水面距离小于1倍最大气泡脉动半径时爆炸,气泡直接溢出水面,不能形成气泡脉动压力;当炸药距水面距离在1~1.5倍最大气泡脉动半径时爆炸,气泡脉动溢出水面,不能形成完整的气泡脉动;当炸药距水面距离大于1.6倍最大气泡脉动半径时爆炸,水面对气泡脉动的影响可以忽略。

(4)气泡在膨胀和收缩过程中,气泡不断上升,因此水面对气泡脉动的影响范围要大于水底。

## 参考文献:

- [1] 刘建湖. 舰船非接触水下爆炸动力学的理论与应用[D]. 无锡:中国船舶科学研究中心,2003.
- [2] 徐培誉. 水下爆震对结构之冲击[D]. 台北:国立台湾大学,2004.
- [3] Nokes D S. Analysis of prolate spheroidal shell under undex load[C]//Defense Nuclear Agency, DNA-TR-90-171, 1992
- [4] Cole R H. Underwater explosion[M]. Princeton: Princeton University Press,1948.
- [5] 金辉,张庆明,高春生,等. 不同边界条件下水下爆炸气泡脉动对比的实验研究[J]. 兵工学报,2009,30(2):213-218.  
Jin Hui, Zhang Qing-ming, Gao Chun-shen, et al. Experimental study on the comparison of bubble's pulse with different boundaries[J]. Acta Armamentarii, 2009,30(2):213-218.
- [6] 谈庆明. 量纲分析[M]. 北京:国防工业出版社,2007.

## Configuration of explosive energy output in different underwater boundary conditions<sup>\*</sup>

Jin Hui, Li Bing, Quan Lin, Song Jing-li  
(91439 Unit, Dalian 233010, Liaoning, China)

**Abstract:** A series of experiments were carried out to explore the energy output characteristics of the explosive in the different underwater boundary conditions: free field, water bottom, near water bottom and near water surface. The experimental results show that when the explosive is near the water bottom and surface, the boundary conditions weakly affect the explosion-induced shock waves and strongly influence the bubble pulsation. When the distance from the explosive to the water bottom is less than the maximum radius of the bubbles, the underwater explosion of the explosive fails to form an integrated bubble pulsation resulted from the water bottom boundary. When the distance from the explosive to the water surface is less than the maximum radius of the bubbles, the air bubbles overflow the water surface and fail to form the bubble pulsation pressure. When the distance from the explosive to the water surface is 1—1.5 times as great as the maximum radius of the bubbles, partial air bubbles overflow the water surface and the corresponding bubble pulsation pressure is lower than that induced by the explosion in the free field. Because of the air bubble rising in its expansion and contraction processes, the influenced range by the water surface on the bubble pulsation is larger than that by the water bottom.

**Key words:** mechanics of explosion; configuration of energy; boundary condition; underwater explosion

<sup>\*</sup> Received 15 March 2012; Revised 13 November 2012

Corresponding author: Song Jing-li, bluesea7181@126.com