

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2021.01.020

炸药的不完全起爆对其水下爆炸特性的影响*

孟龙¹,黄瑞源¹,王金相¹,秦健^{1,2},刘亮涛¹

(1.南京理工大学瞬态物理国家重点实验室,江苏210094;2.海军研究院,北京100161)

摘要: 在2 m×2 m×2 m水箱中分别采用两种引爆方式对2.5 g、5 g和10 g圆柱形装药TNT进行了水下爆炸实验,得到了不同工况下冲击波和气泡脉动的压力时程曲线以及相应的气泡脉动过程。实验结果表明:使用电雷管对主装药进行引爆时,炸药并未完全起爆,冲击波峰值压力均小于经验公式计算得到的理论值,二者间平均误差为25.92%;而使用电雷管以及传爆药柱对主装药进行引爆后,炸药完全起爆,冲击波峰值压力与经验公式间的平均误差降低至4.37%,且整体较为稳定。在此基础上,对比两种引爆方式下的各项爆炸特性,发现炸药的不完全起爆会导致其爆炸后的气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径有所减小,冲击波峰值压力、冲击波能以及气泡能明显降低,但对气泡脉动峰值压力的影响并不明显。

关键词: 水下爆炸;引爆方式;冲击波;气泡脉动;传爆药柱

中图分类号: TQ560.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2021)01-0124-10

Effect of Incomplete Detonation of Explosives on its Underwater Explosion Characteristics

MENG Long¹, HUANG Rui-yuan¹, WANG Jin-xiang¹, QIN Jian^{1,2}, LIU Liang-tao¹

(1. National Key Laboratory of Transient Physics, Nanjing University of
Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Naval Research Academy, Beijing 100161, China)

Abstract: In a 2 m×2 m×2 m water tank, two detonation methods were used to conduct underwater explosion experiments on 2.5 g, 5 g and 10 g cylindrical TNT charges. The pressure-time history curves with corresponding responses of shock wave and bubble pulsation under different working conditions were obtained. The experimental results showed that when the main charge was detonated by an electric detonator, the explosive was not completely detonated, and the peak pressure of the shock wave was less than the theoretical value calculated by the empirical formula, with the average error of 25.92% among them. After the main charge detonated by an electric detonator and a booster grain, the explosive was completely detonated, and the average error between of the peak shock pressure obtained from the experiment and the empirical formula was reduced to 4.37%, which was relatively stable overall. Comparing the data of the two detonation methods, it is found that when the explosive is not fully detonated, the bubble pulsation period and the maximum bubble expansion radius are reduced, and the peak wave pressure, shock wave energy and bubble energy are decreased obviously, but the effect on the peak pressure of bubble pulsation is not obvious.

Key words: underwater explosion; detonation method; shock wave; bubble pulsation; booster grain

收稿日期:2020-10-08

作者简介:孟龙(1995-),男,硕士研究生,主要从事水下爆炸及冲击动力学研究,(E-mail)18205177651@163.com。

通讯作者:黄瑞源(1984-),男,博士、讲师,主要从事水下爆炸及冲击动力学研究,(E-mail)ryhuang@njust.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金(11402266,11672138,11802001);装备预研基金项目(61426040403162604005、614260404021801);中国空气动力研究与发展中心超高速碰撞研究中心开放基金(20190303)

水下爆炸可分为装药爆轰、冲击波的产生与传播和气泡脉动三个阶段^[1-3]。国内外的许多专家学者围绕水中爆炸现象、传播规律、结构破坏效应、实验技术及应用等方面开展了大量的研究工作^[4-7]。

在实验方面,炸药能够稳定的完全起爆是探究

爆炸机理和载荷规律的前提。由于水和空气两种介质间存在较大的差异,炸药在不同介质中的引爆方式也有所不同^[8-10]。对于小当量炸药在空气中一般采用电雷管引爆主装药就可以使炸药完全起爆^[11-13],而在水下条件下则需要传爆药柱和电雷管共同引爆主装药才能实现炸药的完全起爆。汪斌等在 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的水箱中,采用高速摄影技术得到 1.5 g 、 3.0 g 和 4.5 g PETN 水下爆炸的气泡脉动过程以及水射流过程^[14]。冯淞等同样在 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的水箱中对 5 g CL-20 基炸药和 CL-20 基含铝炸药进行了水下爆炸实验,对其冲击波压力历程、气泡周期和气泡脉动图像进行了探究^[15]。王秋实等使用电雷管和传爆药柱,对 1.2 kg 左右 CL-20 基浇注含铝炸药进行了大量的水下爆炸实验,探究了冲击波峰值压力、冲击波能和气泡能等爆炸特性的规律^[16]。赵继波等则在 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的水箱中使用 PETN 传爆药柱对 0.3 kg TNT 炸药进行了水下爆炸实验,通过对高速摄影图像进行数字化分析,得到了柱形装药 TNT 近场的轴向压力衰减规律^[17]。而对于大当量炸药,在水下条件下往往难以实现完全起爆^[18]。通常在大当量水下爆炸实验前人们会采用相同的引爆方式和引爆条件对传感器的灵敏度系数进行标定,并依据标定系数对后续的实验结果进行规律性探究和分析,而对某一引爆方式下炸药的起爆效率和爆轰程度缺乏进行相应的讨论。同时由于炸药不完全起爆后其爆轰程度存在一定的随机性,使得实验人员在对实验结果的有效性进行判断时变得更加困难。

因此,探究小当量炸药在水下条件下的不完全起爆对其各项爆炸特性的影响,不仅可以为大当量炸药水下爆炸实验的有效性验证提供参考,同时对实际的工程应用也具有重要的借鉴意义。

通过对不同当量的 TNT 炸药展开两种不同引爆方式的水下爆炸实验,得到炸药在不同工况下爆炸后的各项特性参数,通过对比两种引爆方式下的冲击波峰值压力与经验公式间的误差,判断炸药是否能够完全起爆。并在此基础上,将炸药未完全起爆和完全起爆时的各项特性参数进行对比,分析炸药的不完全起爆对不同当量炸药爆炸后的气泡脉动峰值压力、冲击波能、气泡能、气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径等水下爆炸特性的影响。

1 炸药及水下爆炸实验条件

水下爆炸实验是在江苏永丰机械有限责任公司 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的水箱中进行的,水箱壁面厚度为

1 cm ,壁面材料为 Q235 钢,实验炸药采用工业 8 号电雷管进行引爆,主发药柱为 TNT 炸药,具体尺寸及参数见表 1,其中装药误差小于 0.02 g 。传爆装置外部使用 3M 防水胶带进行缠结,在固定药柱的同时可实现短时间段的防水。水箱内水的表面的高度为 1.8 m ,炸药悬挂在水箱中心,距水面 1.0 m 。在炸药 0.3 m 、 0.4 m 、 0.5 m 、 0.6 m 、 0.7 m 处沿直线放置 5 个 PCB 公司生产的 138A06 水下爆炸压力传感器(位置误差小于 1 cm),量程为 34.475 MPa ,并在每个传感器正下方悬挂配重为 1.5 kg 的秤砣,高速摄像机距炸药 1.3 m 。实验装置原理图如图 1 所示。

表 1 炸药尺寸

Table 1 Size of explosives

炸药	当量/g	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	直径/mm	高度/mm
	2.5			11.5
TNT	5.0	1.654	15.0	18.0
	10.0			20.4

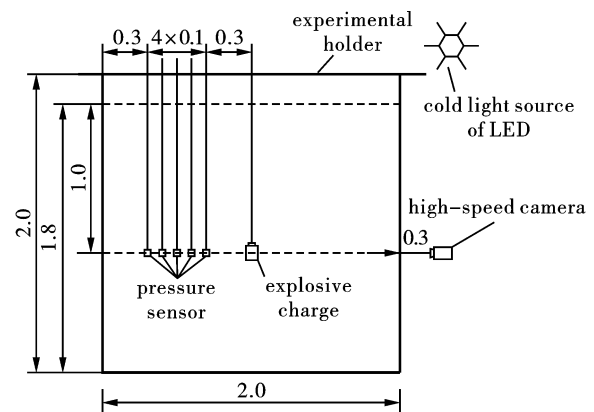


图 1 实验装置原理图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of experimental equipment(unit:m)

2 水下爆炸实验

2.1 采用电雷管对主装药直接进行引爆

首先采用 8 号工业电雷管对 3 种不同当量的 TNT 炸药直接进行引爆。其中,为防止冲击波压力超出量程范围从而破坏传感器,在 5 g 和 10 g 炸药实验时撤去了距爆源 0.3 m 处的水下压力传感器,具体实验安排见表 2。

以 3 号实验中 2.5 g TNT 炸药水下爆炸为例,图 2 显示了距爆源不同距离处的水下压力传感器测得的压力时程曲线。从图中可以看到,冲击波传播至传感器后,压力迅速达到峰值然后迅速衰减; 37.7 ms 时,气泡第一次脉动结束,传感器受气泡脉动波作用出现小的峰值。 68.9 ms 时,第二次气泡

脉动结束,气泡脉动峰值压力较第一次气泡脉动有所减小。95.82 ms时,第三次气泡脉动结束,气泡脉动峰值压力再次减小,几乎可以忽略不计。

表2 实验安排

Table 2 Experimental arrangement

序号	炸药当量/g	传爆药柱/g	传感器位置/m
1	2.5	-	0.3/0.4/0.5/0.6/0.7
2	2.5	-	0.3/0.4/0.5/0.6/0.7
3	2.5	-	0.3/0.4/0.5/0.6/0.7
4	2.5	-	0.3/0.4/0.5/0.6/0.7
5	2.5	-	0.3/0.4/0.5/0.6/0.7
6	5.0	-	0.4/0.5/0.6/0.7
7	5.0	-	0.4/0.5/0.6/0.7
8	10.0	-	0.4/0.5/0.6/0.7
9	2.5	0.3	0.3/0.4/0.5/0.6/0.7
10	5.0	0.3	0.4/0.5/0.6/0.7
11	10.0	0.3	0.4/0.5/0.6/0.7

图3为距爆源不同距离处冲击波的压力时程曲线。从图中可以看到,从冲击波到达0.3 m处的传感器时开始计时,0.069 ms后冲击波到达距爆源0.4 m处的传感器,因此冲击波在水中的传播速度约为1450 m/s。对比不同爆距下各测点处的冲击波峰值压力,发现随着爆距的增加,冲击波的峰值压力呈指数衰减。

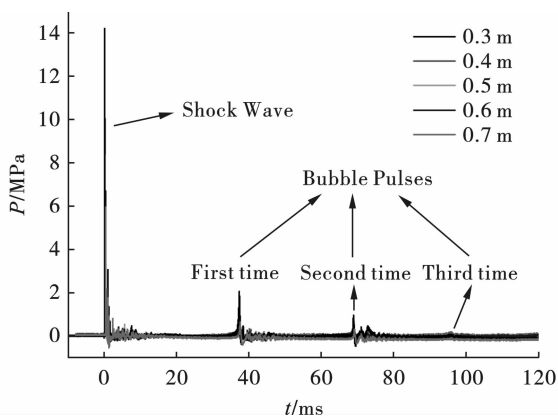


图2 传感器测得的压力时程曲线

Fig. 2 Pressure histories measured by sensor

对于自由场中水下爆炸冲击波的传递,Cole在早期通过对大量实验数据的整理,总结了水下爆炸冲击波经验公式^[19],并得到广泛认可,Zamyshlyayev在其基础上改进为^[20]

$$P(t) = P_{m1} e^{-t/\theta} \quad (1)$$

$$P_{m1} = \begin{cases} 44.1 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{1.5}, & 6 \leq r \leq 12 \\ 52.4 \times \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{1.13}, & 12 \leq r \leq 240 \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta = \begin{cases} 0.45 R_0 r^{0.45} \times 10^{-3}, & r \leq 30 \\ 3.5 \frac{R_0}{c_w} \sqrt{1gr - 0.9}, & r > 30 \end{cases} \quad (3)$$

$$I = 5768 \times \sqrt[3]{W} \left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right)^{0.89} \quad (4)$$

式中: W 为炸药当量,kg; θ 为冲击波的指数衰减时间常数,指冲击波压力峰值 P_{m1} 衰减到 P_{m1}/e 所需的时间,s; R 为测点到爆心的距离,m; R_0 为炸药初始半径,m; C_w 为水的声速,常温淡水一般取1460 m/s; r 为 R/R_0 ; I 为比冲量, $N \cdot s/m^2$ 。

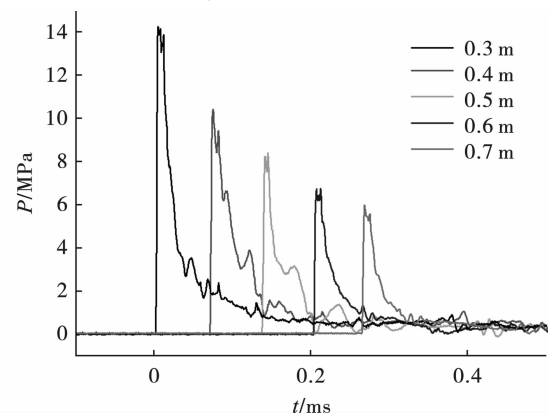


图3 冲击波压力时程曲线

Fig. 3 Pressure histories of shock wave

表3给出了实验测得的冲击波峰值压力 P_{m1} 与经验公式之间的误差。从表中可以看到,用电雷管对主装药直接进行引爆时,3种不同当量TNT水下爆炸后测得的冲击波峰值压力均小于使用经验公式计算得到的理论值,且二者间误差为8.51%~50.45%。同时,对比炸药当量为2.5 g的5次实验,发现实验的平均误差波动较大,其中1~3号实验平均误差在30%左右,而4、5号实验的平均误差为20%左右;炸药当量为5 g的2次实验的平均误差分别为11.95%和47.22%;炸药当量为10 g时,平均误差为19.45%。

2.2 采用电雷管加传爆药柱对主装药进行引爆

由于使用电雷管对主装药直接进行引爆会导致炸药起爆不完全,所以为了使得炸药完全起爆,在之前实验的基础上改变炸药的引爆方式,增设0.3 g直径为5 mm的RDX-8701传爆药柱(装药误差小于0.02 g),利用电雷管和传爆药柱共同对主装药进行引爆。其中,对3种当量的TNT炸药各进行一次水下爆炸实验,具体实验安排见表2(序号9~11)。

表3 实验测得 P_{m1} 与经验公式之间的误差

Table 3 Error between experiment and empirical formula of P_{m1}

序号	R/m	实验值/ MPa	经验公式/ MPa	误差/%	平均 误差/%
1	0.3	16.08	21.38	24.79	31.16
	0.4	9.91	15.45	35.86	
	0.5	7.96	12.01	33.72	
	0.6	6.67	9.77	31.73	
	0.7	5.77	8.21	29.72	
2	0.3	15.40	21.38	27.97	27.55
	0.4	11.05	15.45	28.48	
	0.5	8.60	12.01	28.39	
	0.6	6.91	9.77	29.27	
	0.7	6.27	8.21	23.63	
3	0.3	14.21	21.38	33.54	31.03
	0.4	10.39	15.45	32.75	
	0.5	8.37	12.01	30.31	
	0.6	6.73	9.77	31.12	
	0.7	5.96	8.21	27.41	
4	0.3	16.53	21.38	22.68	19.93
	0.4	12.04	15.45	22.07	
	0.5	9.87	12.01	17.82	
	0.6	7.99	9.77	18.22	
	0.7	6.66	8.21	18.88	
5	0.3	18.26	21.38	14.59	19.19
	0.4	11.53	15.45	25.37	
	0.5	9.53	12.01	20.65	
	0.6	7.83	9.77	19.86	
	0.7	6.94	8.21	15.47	
6	0.4	16.64	20.06	17.05	11.95
	0.5	13.92	15.59	10.71	
	0.6	11.61	12.69	8.51	
	0.7	9.43	10.66	11.54	
	7	0.4	9.94	20.06	
0.5		8.35	15.59	46.44	
0.6		6.72	12.69	47.04	
0.7		5.87	10.66	44.93	
8		0.4	19.25	26.04	26.08
	0.5	16.05	20.24	20.70	
	0.6	13.92	16.47	15.48	
	0.7	11.67	13.84	15.68	
	9	0.3	21.85	21.38	2.20
0.4		13.07	15.45	15.40	
0.5		11.44	12.01	4.75	
0.6		9.15	9.77	6.35	
0.7		8.38	8.21	2.07	
10	0.4	18.96	20.06	5.48	3.32
	0.5	15.55	15.59	0.26	
	0.6	13.18	12.69	3.86	
	0.7	11.05	10.66	3.66	
	11	0.4	24.31	26.04	
0.5		20.09	20.24	0.74	
0.6		16.54	16.47	0.43	
0.7		14.52	13.84	4.91	

表3(序号9~11)给出了增设传爆药柱后实验测得的冲击波峰值压力 P_{m1} 与经验公式之间的误差。可以看到,相较于直接使用电雷管进行引爆,增加传爆药柱后实验各测点处测得的冲击波峰值压力与经验公式计算得到的理论值间的误差较小,平均误差为4.37%。

炸药在不完全起爆的情况下,由于其爆轰作用不完全会导致冲击波峰值压力明显小于经验公式计算得到的理论值,并且其爆轰程度存在一定的随机性,因此,判断炸药完全起爆的标准是:(1)在同种工况下需进行多次实验,且实验测得炸药的冲击波峰值压力与经验公式计算值间的平均误差小于10%;(2)各实验值间较为稳定且没有较大的波动。对比两种工况下的实验数据可以发现,炸药在使用电雷管直接引爆时冲击波峰值压力会明显小于经验公式计算得到的理论值,二者间误差均大于10%,并且在同种工况下的多次实验中冲击波峰值压力的波动较大,炸药未能完全起爆;而使用传爆药柱和电雷管共同引爆主装药后,其冲击波峰值压力与经验公式计算得到的理论值间的误差均小于10%,并且同种工况下的各次实验测得的爆炸特性参数相对稳定,炸药已完全起爆。

3 实验结果及分析

3.1 实验结果

表4给出了使用电雷管引爆主装药以及使用传爆药柱引爆主装药的11发实验的冲击波峰值压力 P_{m1} 、气泡脉动峰值压力 P_{m2} 、冲击波能 E_s 、气泡能 E_b 、气泡脉动周期 T 和气泡膨胀最大半径 R_{max} 的实验结果。其中,水下爆炸距离炸药中心 R 处的冲击波能量 E_s 按公式(5)计算,气泡能 E_b 按公式(6)计算^[11]。

$$E_s = \frac{4\pi R^2}{\rho_w c_w W \times 10^6} \int_{t_a}^{\tau} P^2(t) dt \quad (5)$$

$$E_b = \frac{0.6842 P_h^5 \rho_w^{-3/2} T^3}{W \times 10^6} \quad (6)$$

式中: E_s 为距离装药中心 R 处的比冲击波能, MJ/kg; E_b 为比气泡能, MJ/kg; T 为气泡脉动周期, s; ρ_w 为水的密度, 常温淡水一般取 1000 kg/m³; t_a 为冲击波到达时间, s; τ 为水中冲击波的时间衰减常数, 为冲击波时程曲线上从峰值压力下降到其 1/e 的时间, s; P_h 为炸药中心处静水压和试验时当地大气压之和, Pa。

表 4 实验结果

Table 4 Experimental result

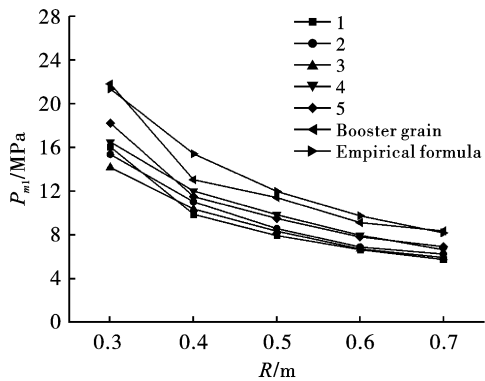
序号	R/m	P_{m1}/MPa	P_{m2}/MPa	$E_s/(MJ \cdot kg)$	$E_b/(MJ \cdot kg^{-1})$	T/ms	R_{max}/cm
1	0.3	16.08	2.30	0.92	1.76	37.00	19.37
	0.4	9.91	1.66	0.87			
	0.5	7.96	1.25	0.49			
	0.6	6.67	1.01	0.69			
	0.7	5.77	0.84	0.68			
2	0.3	15.40	2.16	0.94	1.82	37.40	19.57
	0.4	11.05	1.69	1.00			
	0.5	8.60	1.21	0.67			
	0.6	6.91	0.97	0.79			
	0.7	6.27	0.78	0.78			
3	0.3	14.21	2.05	0.81	1.86	37.70	19.50
	0.4	10.39	1.56	0.91			
	0.5	8.37	1.17	0.62			
	0.6	6.73	0.92	0.73			
	0.7	5.96	0.78	0.74			
4	0.3	16.53	2.25	0.95	1.66	36.30	18.98
	0.4	12.04	1.70	0.97			
	0.5	9.87	1.23	0.66			
	0.6	7.99	0.98	0.80			
	0.7	6.66	0.81	0.84			
5	0.3	18.26	2.14	1.04	1.80	37.30	19.55
	0.4	11.53	1.63	1.07			
	0.5	9.53	1.22	0.70			
	0.6	7.83	0.96	0.86			
	0.7	6.94	0.80	0.89			
6	0.4	16.64	1.58	1.17	1.41	43.30	25.12
	0.5	13.92	1.18	0.80			
	0.6	11.61	0.93	0.85			
	0.7	9.43	0.79	0.89			
7	0.4	9.94	1.73	0.45	0.83	36.33	23.51
	0.5	8.35	1.25	0.25			
	0.6	6.72	1.04	0.37			
	0.7	5.87	0.85	0.37			
8	0.4	19.25	1.68	0.76	1.07	49.82	28.29
	0.5	16.05	1.26	0.68			
	0.6	13.92	0.97	0.61			
	0.7	11.67	0.87	0.66			
9	0.3	21.85	2.03	1.51	2.10	39.20	21.39
	0.4	13.07	1.64	1.29			
	0.5	11.44	1.20	1.10			
	0.6	9.15	0.95	1.17			
	0.7	8.38	0.78	1.24			
10	0.4	18.96	1.60	1.41	1.52	44.40	25.77
	0.5	15.55	1.24	1.06			
	0.6	13.18	0.92	1.04			
	0.7	11.05	0.78	1.08			
11	0.4	24.31	1.62	1.20	1.11	50.41	28.33
	0.5	20.09	1.10	0.94			
	0.6	16.54	0.90	0.92			
	0.7	14.52	0.68	0.94			

3.2 炸药的不完全起爆对水下爆炸特性的影响

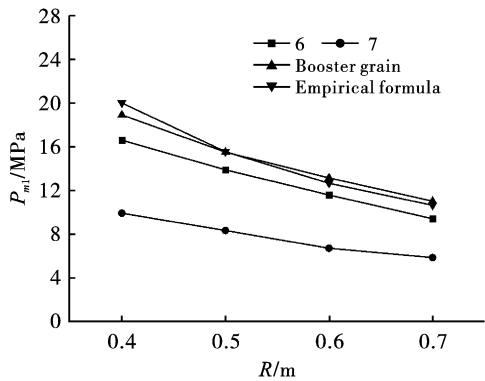
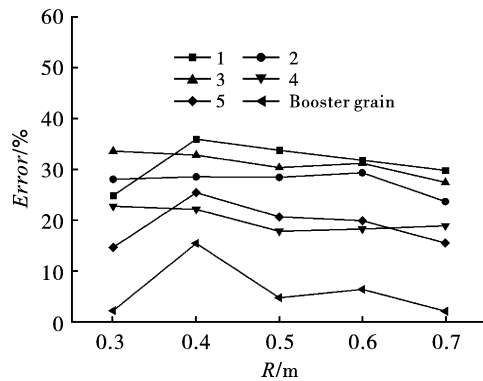
3.2.1 冲击波峰值压力与气泡脉动峰值压力

图 4 给出了 2.5 g、5 g 和 10 g TNT 水下爆炸后距爆源不同距离处水下压力传感器测得的冲击波峰值压力与经验公式的对比及二者之间的误差。从图中可以看到, 当炸药当量为 2.5 g 时, 实验 1 ~ 5 为使用电雷管引爆主装药, 其冲击波峰值压力均小于

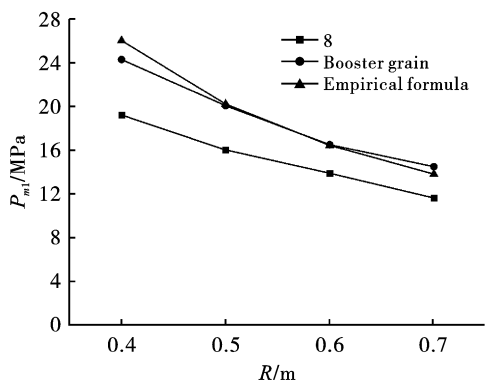
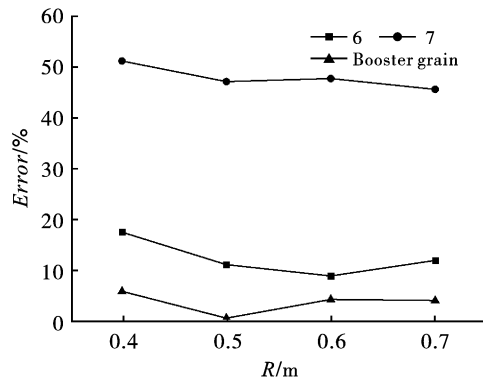
经验公式计算得出的理论值, 且误差为 15% ~ 37%, 但采用传爆药柱对 TNT 炸药进行引爆时(实验 6), 冲击波峰值压力与经验公式吻合较好, 二者之间误差约为 6%。同样, 当炸药当量为 5 g 和 10 g 时, 相较于直接用电雷管引爆主装药, 增设传爆药柱后对主装药进行起爆, 测得的冲击波峰值压力与经验公式吻合的更好, 误差更小。



(a) 2.5 g



(b) 5 g



(c) 10 g

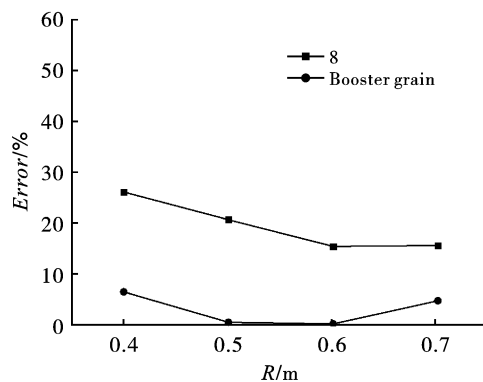


图 4 冲击波峰值压力对比

Fig. 4 Comparison of shock wave peak pressure

图 5 给出了不同当量 TNT 水下爆炸后距爆源不同距离处水下压力传感器测得的气泡脉动峰值压力。从图中可以看到, 气泡脉动峰值压力随爆距的增加而减少。当炸药当量为 2.5 g 时, 相较于直接

用电雷管引爆主装药, 增设传爆药柱后气泡脉动峰值压力没有明显的增加或减小; 同样, 当炸药当量为 5 g 和 10 g 时, 增设传爆药后气泡脉动峰值压力的变化并不明显。

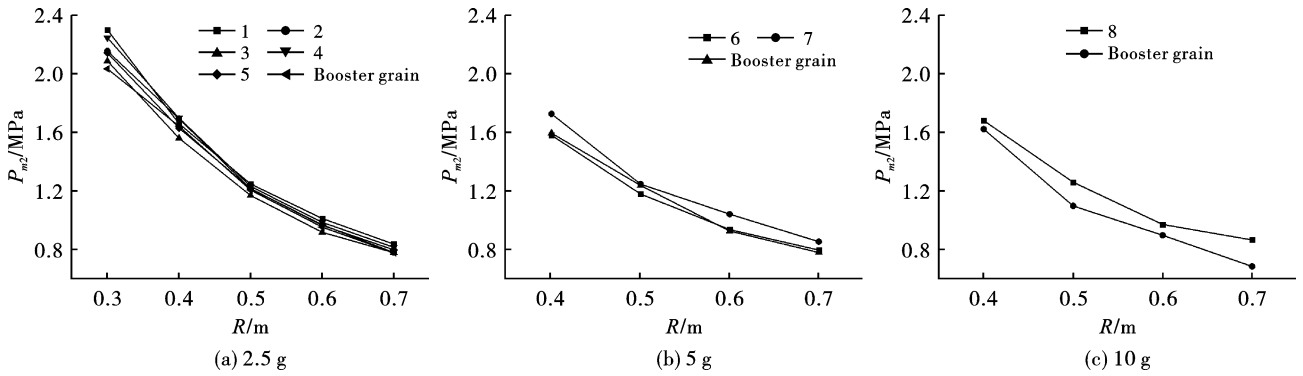


图5 气泡脉动峰值压力对比

Fig. 5 Comparison of bubble pulsation peak pressure

因此,对于小当量 TNT 水下爆炸,冲击波峰值压力对炸药是否完全起爆较为敏感,且炸药未完全起爆时冲击波峰值压力会明显降低,而炸药是否完全起爆对气泡脉动峰值压力的影响较小。

3.2.2 冲击波能和气泡能

图6和图7给出了使用电雷管或传爆药柱对不同当量的 TNT 进行引爆时,炸药爆炸后的冲击波能和气泡能的对比。其中,黑色点划线以及黑点分别是使用电雷管进行引爆的情况下利用公式(5)、(6)

计算得到的冲击波能和气泡能,而红色点划线和红点分别为使用传爆药柱进行引爆得到的冲击波能和气泡能。对比两种引爆方式下得到的冲击波能和气泡能,发现在3种炸药当量下,使用雷管直接引爆所产生的冲击波能和气泡能均小于使用传爆药柱进行引爆时产生的冲击波能和气泡能。所以对于小当量 TNT 水下爆炸,其爆炸后产生的冲击波能和气泡能的大小取决于炸药是否完全起爆,当炸药不完全起爆时,冲击波能和气泡能会相应地减小。

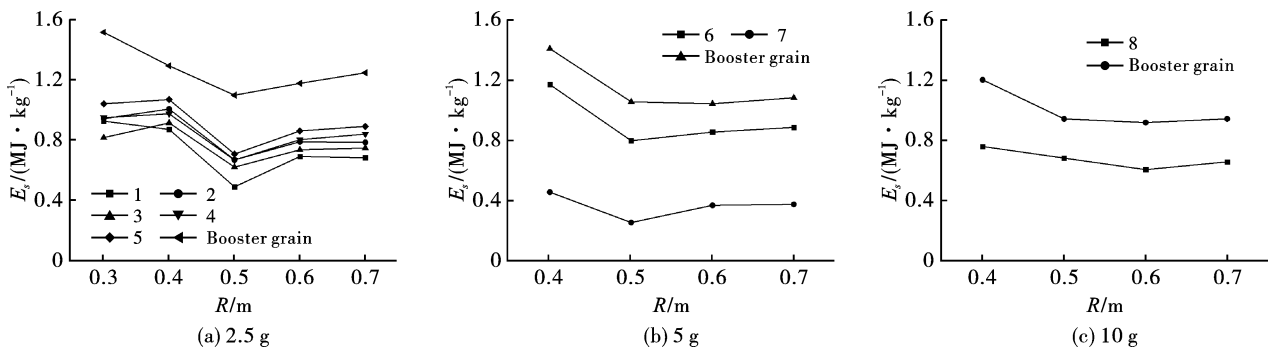


图6 冲击波能对比

Fig. 6 Comparison of shock wave energy

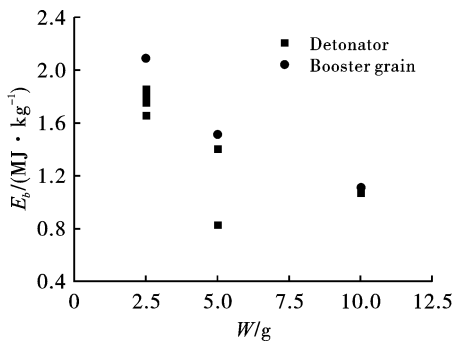


图7 气泡能对比

Fig. 7 Comparison of bubble energy

3.2.3 气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径

图8显示了3号实验的气泡生成、膨胀和收缩

过程。当气泡半径达到最大值($t = 19.7 \text{ ms}$, $R_{\text{max}} = 19.50 \text{ cm}$)时,气泡内压力最小,气泡半径在 $t = 37.7 \text{ ms}$ 时最小,在整个气泡运动过程中,爆炸产物从气泡表面逸出。

图9显示了增加传爆药后 2.5 g TNT 水下爆炸后气泡的生成、膨胀和收缩过程。当 $t = 20.2 \text{ ms}$ 时,气泡半径达到最大值($R_{\text{max}} = 21.39 \text{ cm}$),气泡内压力最小;当 $t = 39.2 \text{ ms}$ 时第一次气泡脉动结束。对比图8中直接采用电雷管进行起爆可以发现,增设传爆药柱对主装药进行起爆后,气泡的脉动周期和气泡膨胀最大半径有所增大。

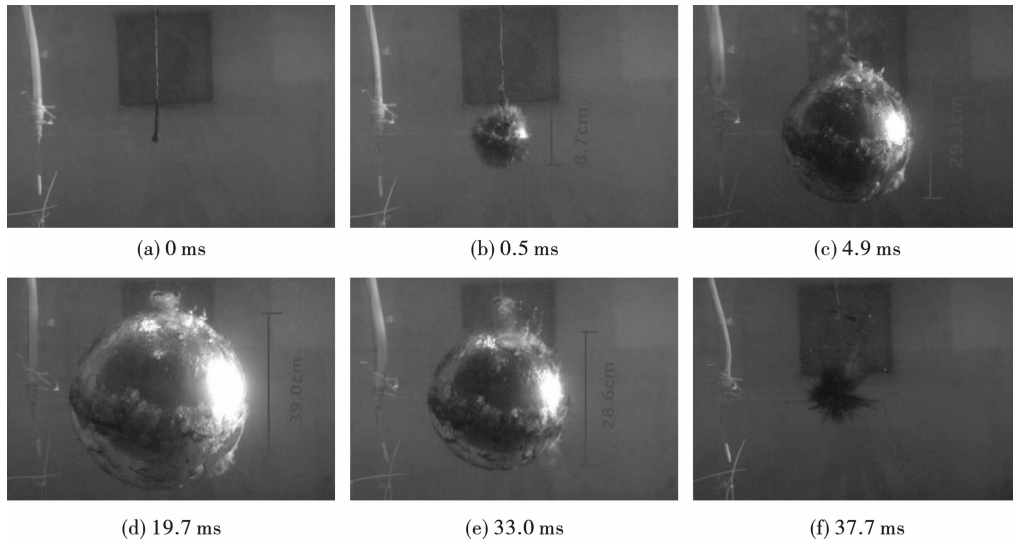


图 8 电雷管实验气泡脉动图像

Fig. 8 Electric detonator experimental pictures of bubble pulse

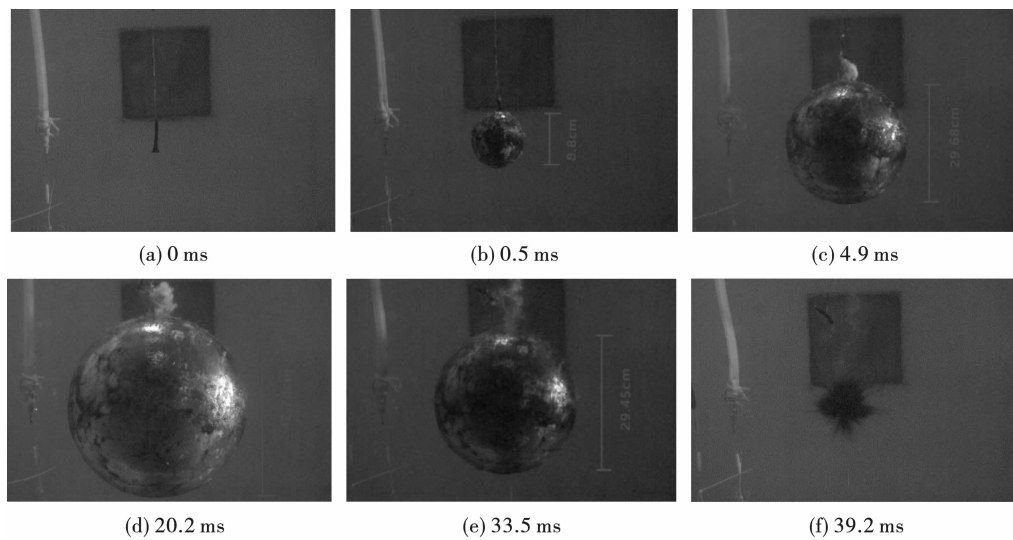


图 9 传爆药柱实验气泡脉动图像

Fig. 9 Booster grain experimental pictures of bubble pulse

在 TNT 炸药的水下爆炸中,对于气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径有以下经验公式^[21]

$$T = 2.11 \times \frac{W^{\frac{1}{3}}}{(h + 10)^{\frac{5}{6}}} \quad (7)$$

$$R_{\max} = 3.5 \times \left(\frac{W}{h + 10} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

式中: h 为水深, m 。

图 10 和图 11 分别给出了不同当量 TNT 水下爆炸实验测得的气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径与经验公式间的对比以及实验值与经验公式间的误差,其中,黑点为电雷管引爆主装药时的实验值,红色为使用传爆药柱引爆主装药时的实验值,而蓝点

为经验公式计算得到的理论值。从图中可以看到,当炸药当量为 2.5 g 时,用电雷管直接引爆主装药,气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径与经验公式间误差分别在 5% 和 9% 左右,而采用传爆药柱对 TNT 炸药进行引爆时,气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径与经验公式之间误差分别为 0.85% 和 0.14%;当炸药当量为 5 g 和 10 g 时,相较于直接用雷管引爆主装药,采用传爆药柱进行引爆时,气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径有所增加,与经验公式间的误差减小。但从整体来看,随着炸药当量的增加,炸药的不完全起爆对气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径的影响逐渐减少,而实验值与经验公式间误差逐渐

变大。通过分析可知,由于经验公式的适用范围是无限水域,而实验是在 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 2\text{ m}$ 的有限水域中进行的,气泡的脉动会受到四周壁面反射的冲击

波的影响,导致气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径的实验值小于理论值。

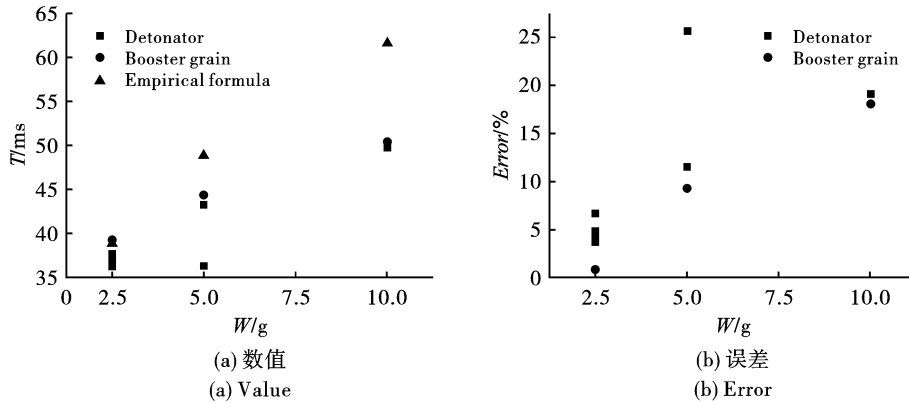


图 10 气泡脉动周期对比

Fig. 10 Comparison of bubble pulsation period

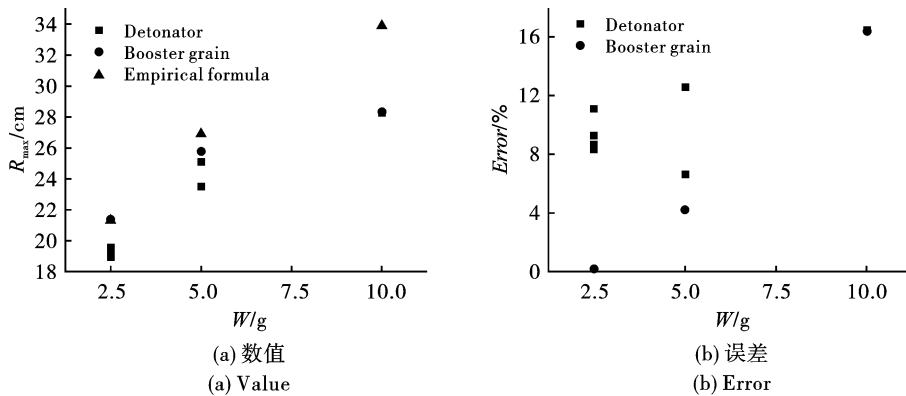


图 11 气泡膨胀最大半径对比

Fig. 11 Comparison of maximum radius of bubble expansion

4 结论

通过对 2.5 g、5 g、10 g 圆柱形装药 TNT 开展两种引爆方式的水下爆炸实验,得到了炸药在不同工况下的冲击波和气泡脉动压力时程曲线以及气泡脉动过程,对比两种引爆方式下的各项参数,得到以下结论:

(1) 对于小当量 TNT 水下爆炸,使用电雷管直接引爆主装药会导致炸药的起爆不完全,而使用电雷管加传爆药柱共同引爆主装药可以达到完全起爆的效果。

(2) 炸药的不完全起爆会导致其爆炸后的冲击波峰值压力、冲击波能以及气泡能明显降低,但对气泡脉动峰值压力的影响较小。

(3) 炸药的不完全起爆会导致其爆炸后的气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径变小。同时,随着炸

药当量的增加,炸药的不完全起爆对气泡脉动周期和气泡膨胀最大半径的影响逐渐减小。

参考文献 (References)

- [1] LIU M B, LIU G R, LAM K Y, et al. Smoothed particle hydrodynamics for numerical simulation of underwater explosion[J]. Computational Mechanics, 2003, 30(2): 106-118.
- [2] CHEN M, HUNG K C, CHONG O Y. Numerical study of water mitigation effects on blast wave[J]. Shock Waves, 2005, 14(3): 217-223.
- [3] HSU C Y, LIANG C C, NGUYEN A T, et al. A numerical study on the underwater explosion bubble pulsation and the collapse process[J]. Ocean Engineering, 2014, 81: 29-38.
- [4] 姚熊亮, 陈建平, 任慧龙. 水下爆炸气泡脉动压力下舰船动态响应分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2000,

- 21(1):1-5.
- [4] YAO Xiong-liang, CHEN Jian-ping, REN Hui-long. The analysis of dynamic response of ship hull subjected to gas bubble impulsive pressure of underwater explosions[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2000, 21(1): 1-5. (in Chinese)
- [5] 熊 苏, 张 立, 李雪交, 等. 雷管起爆能力测定方法探讨[J]. 爆破, 2013, 30(1): 100-103.
- [5] XIONG Su, ZHANG Li, LI Xue-jiao, et al. Discussion on determination method of detonator initiating capability [J]. BLASTING, 2013, 30(1): 100-103. (in Chinese)
- [6] 胡亮亮, 黄瑞源, 李世超, 等. 水下爆炸冲击波数值仿真研究[J]. 高压物理学报, 2020, 34(1): 102-114.
- [6] HU Liang-liang, HUANG Rui-yuan, LI Shi-chao, et al. Shock wave simulation of underwater explosion [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2020, 34(1): 102-114. (in Chinese)
- [7] JU W, LIU Y, DING J. A numerical study on shock wave characteristics for the underwater explosion [J]. Advanced Materials Research, 2012, 594-597: 2680-2683.
- [8] 赵 琳, 李 兵, 闫吉杰, 等. 炸药能量测试的水下爆炸方法[J]. 声学技术, 2003(2): 72-75.
- [8] ZHAO Lin, LI Bing, YAN Ji-jie, et al. A method of the blast energy measurement by underwater explosion [J]. Technical Acoustics, 2003(2): 72-75. (in Chinese)
- [9] HUNG K C, WANG C, KLASEBOER E, et al. A numerical study on bubble structure interaction in underwater explosions [C] // Recent Advances in Computational Science and Engineering, 2002: 223-226.
- [10] 宋 浦, 肖 川, 梁安定, 等. 不同起爆方式对 TNT 水中爆炸作用的影响[J]. 火炸药学报, 2008(2): 75-77.
- [10] SONG Pu, XIAO Chuan, LIANG An-ding, et al. Effect of different initiating mode on TNT underwater explosion [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2008(2): 75-77. (in Chinese)
- [11] 张志江, 徐更光. 高能炸药水中爆炸能量输出特性数值分析[J]. 含能材料, 2008(2): 171-174.
- [11] ZHANG Zhi-jiang, XU Geng-guang. Numerical analysis on energy output of underwater explosion for high energetic explosives [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008(2): 171-174. (in Chinese)
- [12] WANG L, WANG N, ZHANG L. Study on key factors affecting energy output of emulsion explosives in underwater explosion [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2012, 37(1): 83-92.
- [13] 徐豫新, 王树山, 李 园. 水下爆炸数值仿真研究 [J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(6): 95-97.
- [13] XU Yu-xin, WANG Shu-shan, LI Yuan. Study on numerical simulation of the underwater explosive [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(6): 95-97. (in Chinese)
- [14] 汪 斌, 张远平, 王彦平. 水中爆炸气泡脉动现象的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 572-576.
- [14] WANG Bin, ZHANG Yuan-ping, WANG Yan-ping. Experimental study on bubble oscillation formed during underwater explosions [J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(6): 572-576. (in Chinese)
- [15] 冯 淞, 饶国宁, 彭金华. CL-20 基含铝炸药水下爆炸实验研究与数值模拟 (英文) [J]. 含能材料, 2018, 26(8): 686-695.
- [15] FENG Song, RAO Guo-ning, PENG Jin-hua. Experimental study and numerical simulation of CL-20-based aluminized explosive in underwater explosion [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2018, 26(8): 686-695. (in Chinese)
- [16] 王秋实, 聂建新, 焦清介, 等. 不同铝氧比六硝基六氮杂异伍兹烷基含铝炸药水下爆炸实验研究[J]. 兵工学报, 2016, 37(S2): 23-28.
- [16] WANG Qiu-shi, NIE Jian-xin, JIAO Qing-jie, et al. Experimental research on underwater explosion of CL-20-based aluminized explosives with different Al/O ratios [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(S2): 23-28. (in Chinese)
- [17] 赵继波, 谭多望, 李金河, 等. TNT 药柱水中爆炸近场压力轴向衰减规律 [J]. 爆炸与冲击, 2008(6): 61-65.
- [17] ZHAO Ji-bo, TAN Duo-wang, LI Jin-he, et al. Axial pressure damping of cylindrical TNT charges in the near underwater-explosion field [J]. Explosion and Shock Waves, 2008(6): 61-65. (in Chinese)
- [18] PRIOR M K, BROWN D J. Estimation of depth and yield of underwater explosions from first and second bubble-oscillation periods [J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(1): 103-112.
- [19] COLE R H. Underwater explosions [M]. New York: Dover Publications, INC. 1965.
- [20] ZAMYSHLYAEV B V, Yakovlev Y S. Dynamic loads in underwater explosion: AD757183 [R]. Suitland: Naval Intelligence Support Center, 1973.
- [21] 周 霖, 徐更光. 含铝炸药水中爆炸能量输出结构 [J]. 火炸药学报, 2003(1): 30-32.
- [21] ZHOU Lin, XU Geng-guang. Configuration of underwater energy output for aluminized explosive mixtures [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003(1): 30-32. (in Chinese)