

炸药水下爆炸能量输出特性试验研究^{*}

牟金磊, 朱 锡, 李海涛, 黄晓明

(海军工程大学船舶与海洋工程系, 湖北武汉 430033)

摘要: 为了解炸药水中爆炸能量的输出特性, 特别是冲击波能随距离的衰减规律, 对有效比冲能进行了研究。经过理论推导发现, 传统的有效比冲能计算公式仍然满足相似律。TNT炸药水下爆炸试验结果表明, 炸药的有效比冲能、气泡能和总能量的测量结果与经验公式计算结果吻合较好。通过对试验结果进行分析, 拟合得到了有效比冲能随距离变化的趋势线。对比经验公式结果, 发现在小药量试验中冲击波能随距离的衰减更明显。

关键词: 炸药; 水下爆炸; 冲击波能; 气泡能

中图分类号: O383.1 **文献标识码:** A

1 引言

炸药在水中爆炸时, 能量会以冲击波能和气泡能的形式释放出去, 并分别对目标产生毁伤。冲击波载荷峰值压力高, 持续时间短; 气泡载荷峰值压力低, 但持续时间长。因此, 两种载荷对目标的毁伤机理是不相同的。研究炸药水下爆炸的能量输出特性, 对于设计抗水下爆炸的舰艇结构, 研制用于水下兵器的炸药配方等都具有重要意义。

20世纪70年代末, 国外相继开展了炸药水下爆炸能量测定的研究工作, 取得了许多成果^[1]。近年来, 国内也陆续开展了这方面的工作。颜事龙等人^[2]以TNT炸药水下爆炸冲击波参数为基础, 根据能量相似原理推导出了工业炸药水下爆炸能量的计算公式。而应用更广泛的方法则是利用冲击波压力-时间曲线计算冲击波能, 由气泡脉动周期计算气泡能。例如: 赵琳等人^[3]利用水下爆炸方法, 通过测量冲击波的压力-时间曲线, 计算了多种工业炸药的输出能量; 俞统昌等人^[4]重点对水下爆炸冲击波能的计算进行了研究, 并对水下爆炸冲击波能与炸药的爆压、爆速之间的关系进行了研究; 苏华等人^[5]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; 周霖等人^[6]提出了冲击波能损失系数与超压计算公式中 k 、 α 的关系; 饶国宁等人^[7]对小水池中测量炸药的输出能量受到的边界效应的影响进行了修正。但是, 这些研究都没有涉及冲击波能随距离衰减的定量关系。

本研究从评估炸药爆炸威力的角度, 对有效比冲能的计算和试验测试方法等进行研究, 分析小药量试验条件下有效比冲能随距离变化的关系。

2 基本理论

2.1 有效比冲能

冲击波在水中传播时会有部分能量耗散, 并且压力越高, 能量损耗越快, 直至衰减为水中声波。因此炸药爆炸后的能量在爆点附近衰减很快, 传播一定距离后衰减很慢。耗散掉的能量无法对结构产生破坏作用, 剩余的能量称为有效冲击波能。而单位质量炸药产生的有效冲击波能就称为有效比冲能。

^{*} 收稿日期: 2009-04-12; 修回日期: 2009-05-28

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(51335020103)

作者简介: 牟金磊(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事舰船结构水下抗爆抗冲击研究. E-mail: mj11007@163.com

从炸药能量的角度看,传播过程中耗散掉的能量不能忽略,但是从炸药产生的毁伤能力来看,则可以只关注有效比冲能。尤其是对于各种新型炸药,不用测量爆轰压力等参数,通过有效比冲能就可以评估其威力,大大简化了计算和测量冲击波总能量的难度。

有效比冲能可以表达为^[6]

$$e_e = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w c_w} \int_0^{6.7\theta} p^2(t) dt \quad (1)$$

式中: e_e 为有效比冲能(J/kg), R 为测量点到爆心的距离(m), W 为装药量(kg), ρ_w 为水的密度(kg/m^3), c_w 为水的声速(m/s), θ 为冲击波衰减的时间常数(s), $p(t)$ 为测量点处压力随时间变化的函数(Pa)。 $p(t)$ 、 θ 可以根据炸药水下爆炸相似律确定^[8],即

$$p(t) = p_m \exp(-t/\theta) \quad (2)$$

$$p_m = K \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^\alpha \quad (3)$$

$$\theta = K_\theta W^{1/3} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{\alpha_\theta} \quad (4)$$

式中: p_m 为冲击波压力峰值, K 、 K_θ 、 α 、 α_θ 为炸药水中爆炸相似常数和系数^[8]。对于 TNT 炸药, $K = 52.4 \text{ MPa}$, $\alpha = 1.13$, $K_\theta = 0.084 \text{ ms}$, $\alpha_\theta = -0.23$ 。将(2)式~(4)式代入(1)式,可以推导出有效比冲能的表达式。对于 TNT 炸药,有效比冲能为

$$e_e = \frac{2\pi R^2 \theta p_m^2}{W\rho_w c_w} = \frac{2\pi K^2 K_\theta}{\rho_w c_w} \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{2\alpha + \alpha_\theta - 2} = K_e \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{\alpha_e} \quad (5)$$

式中: $K_e = \frac{2\pi K^2 K_\theta}{\rho_w c_w}$, $\alpha_e = 2\alpha + \alpha_\theta - 2$ 。

由此可以看出,在(1)式~(4)式成立的前提下,有效比冲能也满足相似律。对于 TNT 炸药, $K_e = 0.966 \text{ kJ/g}$, $\alpha_e = 0.03$ 。

2.2 有效比冲能试验测定方法

根据水中爆炸相似律,测量位置处单位炸药水下爆炸的冲击波能(简称比冲能,J/kg)为^[6]

$$e'_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_w c_w} \int_0^{6.7\theta} p'^2(t) dt \quad (6)$$

式中: $p'(t)$ 为测量点处压力随时间变化的函数(Pa)。若考虑传感器几何形状对测量波形的影响,炸药的比冲能表示为^[5]

$$e_s = K_e e'_s \quad (7)$$

$$K_e = 1 + 0.29\gamma + 0.016\gamma^2 \quad (8)$$

$$\gamma = d/c_w\theta \quad (9)$$

式中: d 为压力传感器的直径(m)。

冲击波在传播过程中会有部分能量转化为热能等其它能量而耗散。设 μ 为冲击波衰减系数,一般认为它只与炸药的爆轰压力有关^[5](见图 1),即

$$\mu = 1 + 1.3328 \times 10^{-1} p_{CJ} - 6.5775 \times 10^{-3} p_{CJ}^2 + 1.2594 \times 10^{-4} p_{CJ}^3 \quad (10)$$

式中: p_{CJ} 为爆轰压力(GPa)。

2.3 气泡能计算

气泡能的计算相对比较简单,可以用炸药在水下爆炸时生成的气体产物克服静水压第一次膨胀达到最大值时所做的功来度量^[3]。单位质量炸药释放的气泡能 e_b (简称比气泡能,J/kg) 为

$$e_b = \frac{4\pi r_{\max}^3 p_0}{3W} \quad (11)$$

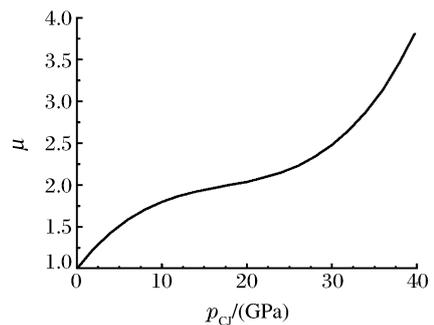


图 1 冲击波衰减系数与爆轰压力的关系
Fig. 1 Dependence of the shock wave decay factor on explosive pressure

式中: r_{\max} 为气泡第一次膨胀到最大时的半径(m), p_0 为爆心处的静水压力(Pa)。由于气泡最大半径可以根据药量、周期及爆深等参数计算,因此比气泡能也可以用这些参数表示。

2.4 总能量计算

炸药的比冲能和比气泡能求出后,就可以很方便地计算炸药的总能量

$$e_t = K_f(\mu e_s + e_b) \quad (12)$$

式中: K_f 为炸药的形状系数。对于球形, K_f 取 1.00, 对于非球形取 1.02~1.10。

3 试验过程及试验结果

3.1 试验实施

试验在大型室内水下爆炸容器中进行。使用 TNT 炸药, 药量为 110 g 和 55 g, 药包为柱状装药(如图 2 所示), 详细的试验工况见表 1。试验中, 利用压力传感器对炸药辐射出的冲击波压力变化进行测量。试验 1# 中, 只测量了 1 个位置的压力-时间曲线, 试验 2#~试验 4# 中同时测量了 2 个位置的压力-时间曲线。利用高速摄影机(见图 3)记录气泡的运动过程, 同时测量水下爆炸气泡的最大半径^[9]。

表 1 试验工况及试验结果

Table 1 The experimental operating conditions and results

No.	Charge / (g)	Depth / (m)	Stand-off Distance / (m)	Peak pressure			e_c			e_b			e_t	
				Exp.	Theor.	Error	Exp.	Theor.	Error	Exp.	Theor.	Error	Exp.	Error
				/(MPa)	/(MPa)	/(%)	/(kJ/g)	/(kJ/g)	/(%)	/(kJ/g)	/(kJ/g)	/(%)	/(kJ/g)	/(%)
1#	110	0.85	1.30	16.4	16.9	2.8	0.896	0.938	-4.4	1.833	1.741	5.3	3.988	-4.8
2#	55	0.70	1.20	13.0	14.2	9.2	0.933	0.933	0.0	1.780	1.744	2.0	4.011	-4.3
			2.00	7.5	8.0	6.8	0.865	0.919	-5.9				3.861	-7.9
3#	55	0.70	1.25	12.8	13.6	6.3	0.918	0.932	-1.5	1.692	1.744	-3.0	3.881	-7.4
			1.45	11.0	11.5	4.3	0.867	0.928	-6.5				3.769	-10.1
4#	55	0.75	0.85	19.6	21.1	7.7	0.980	0.943	3.9	1.879	1.743	7.8	4.223	0.8
			1.22	13.5	14.0	3.7	0.925	0.932	-0.8				4.102	-2.1

Note: For TNT explosive, the theoretical reference value of e_t is 4.19 kJ/g.



图 2 药包照片

Fig. 2 Charge picture



图 3 高速摄影机

Fig. 3 High speed camera

3.2 试验结果

图 4(a) 为试验 1# 中 110 g TNT 炸药在 1.30 m 处的自由场压力-时间曲线, 图 4(b) 为气泡第一次膨胀到最大时的图像。由图 4 可知, 试验 1# 的峰值压力为 16.4 MPa。按照上述方法, 由峰值压力的试验结果, 即可获得有效比冲能、比气泡能和总能量, 结果列于表 1。对比经验公式计算结果, 可以看出,

冲击波峰值压力、有效比冲能、比气泡能和总能量与经验公式的计算结果吻合较好。

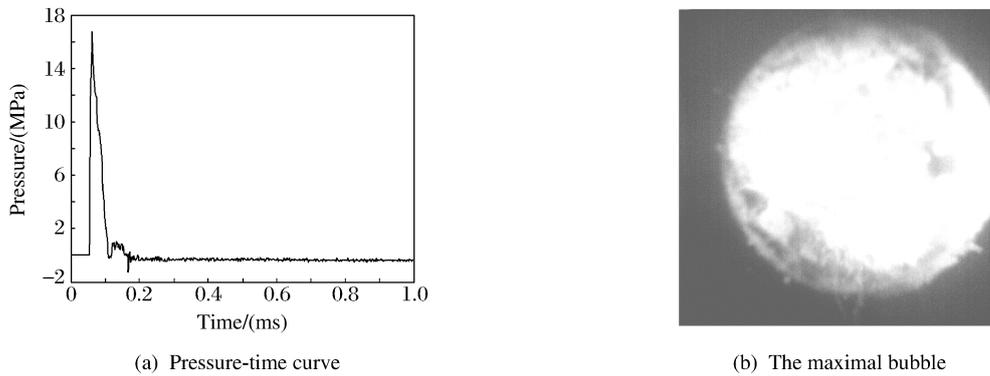


图 4 试验 1# 的测量结果

Fig. 4 The results of experiment 1#

4 试验结果分析

从表 1 中可以看出,试验测量结果与传统相似律经验公式计算结果吻合较好,相对误差都不大。冲击波峰值压力均小于经验公式计算结果,这是由于试验中采用柱状装药,而经验公式则多是建立在球状药包基础上。所以可以认为在本试验中各测量参数仍然满足相似律。按照相似律的思想,定义 $R/W^{1/3}$ 为比例距离。下面分析有效比冲能与比例距离之间的关系。

对表 1 中列出的有效比冲能的试验结果与比例距离之间的关系进行拟合,可以得到

$$e_e = 1.069 \left(\frac{W^{1/3}}{R} \right)^{0.13} \quad (13)$$

(13)式可以很好地反映试验结果的变化趋势。对(13)式与经验公式推导的(5)式以及试验结果进行详细比较,如图 5 所示。随着比例距离的增加,有效比冲能降低,并且试验得到的趋势线衰减更快。在近距离时,拟合结果大于经验公式计算结果;在远距离处,情况相反。这说明有效比冲能随比例距离的衰减规律与药量有关。传统的经验公式多是通过大药量(几十千克量级)试验获得的,在本研究的小药量(百克量级)试验中相似常数会有所差别。对于本试验,若与传统经验公式计算结果的相对误差小于 2.4%,则可以认为它只与爆轰压力有关;但是相对误差却超过了 10%,所以可以认为在小药量试验中,有效比冲能随距离的衰减更为严重。

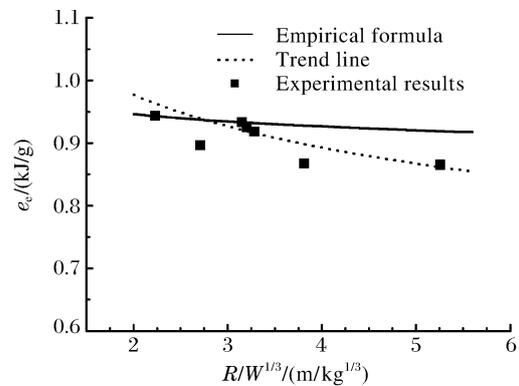


图 5 有效比冲能与比例距离之间的关系

Fig. 5 Variation of the efficient shock wave energy per unit mass with scale distance

5 结 论

对小药量 TNT 炸药水下爆炸能量进行了测量,通过实验数据拟合得到了考虑冲击波能量随距离衰减时的有效比冲能计算公式。与传统经验公式相比,表述形式是一致的,只是相似常数有所不同。

(1) 有效比冲能满足相似律。由于炸药在水中爆炸耗散的能量很难测量,可以利用有效比冲能来评估炸药威力。

(2) 冲击波能随距离的衰减与药量有关,在利用小药量炸药进行水下爆炸机理研究时,更需要考虑冲击波能随距离的衰减。

References:

- [1] Bjarnholt G. Explosive Expansion Works in Underwater Detonations [A]//Proceedings of the 6th Symposium (International) on Detonation [C]. San Diego, 1976:540-550.
- [2] Yan S L, Zhang J C. Energy Estimation of Industrial Explosives in Underwater Blasting [J]. Explosive Materials, 1993, (2): 1-4. (in Chinese)
颜事龙, 张金城. 工业炸药水下爆炸能量估算 [J]. 爆破器材, 1993, (2): 1-4.
- [3] Zhao L, Li B, Yan J J, et al. A Method of the Blast Energy Measurement by Underwater Explosion [J]. Technical Acoustics, 2003, 22(2): 72-76. (in Chinese)
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, 22(2): 72-76.
- [4] Yu T C, Wang X F, Wang J L. Underwater Shockwave Performance of Explosives [J]. Energetic Materials, 2003, 11(4): 182-186. (in Chinese)
俞统昌, 王晓峰, 王建灵. 炸药的水下爆炸冲击波性能 [J]. 含能材料, 2003, 11(4): 182-186.
- [5] Su H, Chen W H, Wu T, et al. Amendment of Shock Wave Parameters of Underwater Explosion [J]. Chinese Journal of Explosive & 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.
- [6] Zhou L, Xu S H, Xu G G. Research on Energy Output Characteristics for Underwater Explosion of Explosives [J]. Acta Armamentarii, 2006, 27(2): 235-238. (in Chinese)
周霖, 徐少辉, 徐更光. 炸药水下爆炸能量输出特性研究 [J]. 兵工学报, 2006, 27(2): 235-238.
- [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] Yun S R, Zhao H Y. Explosion Mechanics [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2005: 233-236. (in Chinese)
恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 233-236.
- [9] 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. (in Chinese)
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.

Experimental Research on Underwater Explosion Energy Output of Explosive

MU Jin-Lei, ZHU Xi, LI Hai-Tao, HUANG Xiao-Ming

(Department of Naval Architecture & Ocean Engineering,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: In order to understand the energy output characteristics for underwater explosion of explosive, especially the decay law of shock wave energy along with the distance, the efficient shock wave energy per unit mass was researched. In traditional empirical formulas, it satisfies the similarity law. The underwater explosion experimental results show that the shock wave energy, bubble energy and total energy per unit mass of TNT explosive are all in agreement with the empirical results. By analyzing the experimental results, the trend line of the efficient shock wave energy per unit mass decayed with the scale distance was obtained. Compared with the empirical results, it is found that the efficient shock wave energy decays more rapidly in small charge experiment.

Key words: explosive; underwater explosion; shock wave energy; bubble energy