

文章编号: 1001-1455(2012)01-0061-06

空气隔层对水中冲击波的衰减特性*

贾 虎^{1,2}, 沈兆武²

(1. 南阳师范学院土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061;

2. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 采用波动理论, 提出了水下爆炸冲击波防护的设计原则。在此基础上针对水下爆破工程安全防护的实际情况, 对提出的空气隔层衰减冲击波设想进行了实验研究, 发现空气隔层能有效衰减冲击波峰值压力。为了对空气隔层衰减冲击波能量特性进行研究, 提出了基于小波包分析水下爆炸冲击波能量分布规律的方法, 发现水下爆炸冲击波能量分布频率比较广, 在空气隔层作用下, 各频率段的冲击波能量都有很好的衰减作用, 空气隔层对绝大部分频率段的冲击波能量衰减都在 50% 以上。研究表明, 空气隔层能在水下爆破工程安全防护中发挥积极作用, 可以有效降低水下爆炸冲击波的破坏效应, 具有实用价值。

关键词: 爆炸力学; 能量分布; 小波包分析; 空气隔层; 水下爆炸

中图分类号: O382.1

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

近年来, 随着水下爆破工程数量的增多, 水下爆破安全问题日益受到重视。由于水可压缩性小, 产生的爆炸冲击波具有峰值压力大、冲量高、作用范围广等特点, 对水中建筑物、船只、水下生物等的安全都构成了威胁。为了减小水中冲击波的影响, 目前常用的方法主要有两种: 一是采用微差爆破技术, 减少一次起爆药量, 但一次起爆药量不可能无限制减少; 二是在药包与保护对象之间加设气泡帷幕, 阻隔冲击波传播^[1-2], 但采用气泡帷幕衰减冲击波时, 需要花费大量的时间和精力布设多排高压气管, 这大大限制了它在水下爆破防护工程中的应用。为了克服这两种方法的缺点, 寻找新的水下冲击波削减方式就显得尤为重要。本文中, 针对实际情况, 提出空气隔层衰减冲击波的设想, 并对提出的空气隔层衰减冲击波的特性进行研究。

1 衰减原理

水的可压缩性小, 自身变形耗能少, 水下爆炸冲击波的传递效率高, 对水下结构物的破坏作用十分明显。在设计水下爆炸防护结构时, 必须弄清楚防护材料的性质, 否则就可能事与愿违。根据波动理论, 在选取水下爆炸防护结构时, 必须考虑材料波阻抗的匹配问题。为了说明这个问题, 以一维弹性波为例。

假设一维弹性波在水中传播过程中垂直传入介质 1, 根据连续条件、牛顿第三定律以及波阵面动量守恒条件可知入射压力 σ_I 、反射压力 σ_R 、透射压力 σ_T 之间的关系为^[3]

$$\frac{\sigma_I}{\rho_w c_w} - \frac{\sigma_R}{\rho_w c_w} = \frac{\sigma_T}{\rho_1 c_1} \quad (1)$$

$$\sigma_I + \sigma_R = \sigma_T \quad (2)$$

式中: ρ_w 为水介质的密度, c_w 为水中的波速, $\rho_w c_w$ 为水介质的波阻抗; ρ_1 为介质 1 的密度, c_1 为介质 1 中的波速, $\rho_1 c_1$ 为介质 1 的波阻抗。

* 收稿日期: 2010-10-13; 修回日期: 2011-03-25

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助项目(201003799);

河南省教育厅自然科学研究计划项目(2011B130002);

安徽高校省级自然科学研究重大项目(KJ2010ZD003)

作者简介: 贾 虎(1980—), 男, 讲师, 博士。

由式(1)~(2)可得

$$\sigma_T = T\sigma_1, \quad \sigma_R = F\sigma_1 \quad T = \frac{2}{1+n}, \quad F = \frac{1-n}{1+n}, \quad n = \frac{\rho_w c_w}{\rho_1 c_1} \quad (3)$$

式中: T 和 F 分别为透射因数和反射因数, n 为波阻抗比。

当水中的一维弹性波通过介质 1 再透射到水中时, 透射波 σ_{T1} 的强度为

$$\sigma_{T1} = T_1\sigma_T = \frac{2}{1+1/n} \frac{2}{1+n}\sigma_1 = \frac{4}{2+n+1/n}\sigma_1 \quad (4)$$

由式(4)可以看出, 透射应力仅与两种介质的波阻抗比值有关, 当介质 1 的波阻抗与水的波阻抗不匹配程度越大, 衰减效果就越明显。

以上分析均是以弹性波为例, 需要说明的是波在两种介质交界面上的透、反射的规律从定性的角度讲对任何类型的波(如流体中的波、爆轰波等, 包括连续波以及冲击波)也都是成立的, 因此这对水下爆炸冲击波同样适用。

据此在设置水下防护结构时, 就要考虑波阻抗比值的问题。根据以上分析, 可以提出水下爆炸冲击波防护设计原则:

(1) 在被保护物与爆源之间适当位置设置防护层时, 防护层介质的波阻抗应与水的波阻抗不匹配程度高, 以保证水下爆炸冲击波通过防护层后, 能够起到很好的衰减作用; 而为了提高衰减效果, 可布设多层防护结构, 以满足工程实践的需要;

(2) 为了进一步保护被保护物, 可在被保护物表面设置保护层, 保护层的波阻抗应大于被保护物, 以进一步衰减冲击波对被保护物的破坏, 保证工程安全。

2 实验研究

设置水下防护层时, 必须保证防护层的波阻抗与水的波阻抗不匹配程度高, 同时还要考虑经济适应和方便操作。空气的波阻抗明显小于水的波阻抗, 而且经济方便, 据此提出空气隔层衰减水下爆炸冲击波的方法。

2.1 实验方法

实验装置和测试系统如图 1 所示, 水池为圆筒形, 规格为 $\varnothing 5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$, 壁厚 30 mm, 由钢板加工而成, 水深 4.4 m。

测试系统主要有长型 ICP 电气石水下激波压力传感器 W138A25、恒流源 482A22 和示波器 DPO7054。采用圆柱形黑索金药包, 药量为 20 g, 中心起爆, 药包入水深度为 1.2 m。空气隔层采用塑料管, 管内为空气, 捆扎成一排(如图 2 所示), 形成 $100 \text{ cm} \times 80 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 的空气隔层, 空气隔层中点处固定在水池的中轴线下 1.2 m 的位置, 传感器固定在直径为 1 mm 的尼龙线上, 尼龙线的下端挂配重垂直放入水下, 传感器入水深度 1.2 m, 与空气隔层中点放在相同的水深。

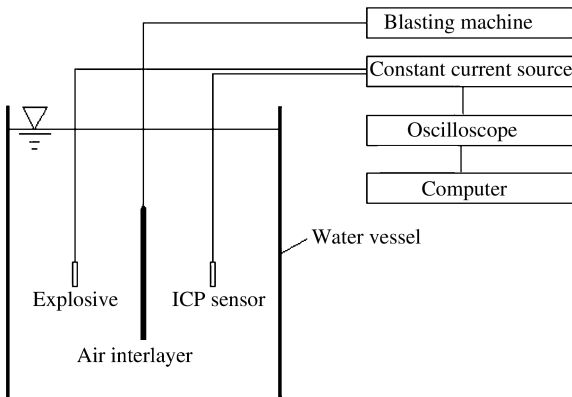


图 1 水下爆炸实验装置



图 2 塑料管空气隔层设置

2.2 实验结果

药包中心与传感器距离 $r=1.5\text{ m}$ ，在无空气隔层时测得的压力波形如图 3(a)所示。同样条件下，在距离药包 0.7 m 位置处设置空气隔层后，测得的压力波形如图 3(b)所示。

从图 3(a)看出，测点处冲击波压力峰值为 9.6 MPa ，压力由零上升到峰值的时间为 $4.6\text{ }\mu\text{s}$ ，随后冲击波压力以指数形式衰减，由峰值衰减到零的时间为约 $42.0\text{ }\mu\text{s}$ 。从图 3(b)看出，设置空气隔层后，冲击波压力峰值为 8.6 MPa ，由零上升到峰值的时间为约 $18.0\text{ }\mu\text{s}$ ，由峰值衰减到零的时间为 $63.0\text{ }\mu\text{s}$ 。对

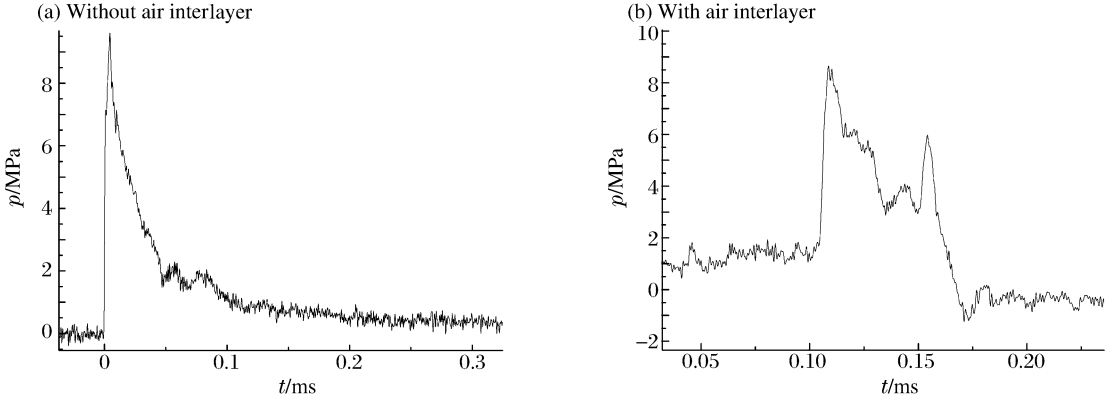


图 3 20 g 黑索金冲击波曲线

Fig. 3 Curve of shock wave produced by 20 g RDX

比发现，空气隔层对冲击波有一定的衰减效果，冲击波峰值压力衰减了 10.4% ，冲击波上升时间延长了约 3.9 倍。但衰减效果不理想，这一方面是由于采用塑料管布设的空气隔层厚度不够，另一方面是因为布设塑料管时管与管之间空隙较大。

为改变空气隔层厚度，采用普通板车内胎，充气后捆扎成一排，组成 $90\text{ cm}\times 50\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ 的空气隔层，设置方式如图 4 所示。传感器与药包在同一水平线上，入水深度为 1.2 m ，药包与压力传感器的距离为 0.7 m 。在无空气隔层情况下测得的冲击波压力波形如图 5(a)所示，在距药包为 0.4 m 距离处设置空气隔层后，测得的压力波形如图 5(b)所示。



图 4 气胎空气隔层设置

Fig. 4 Air interlayer of pneumatic roller

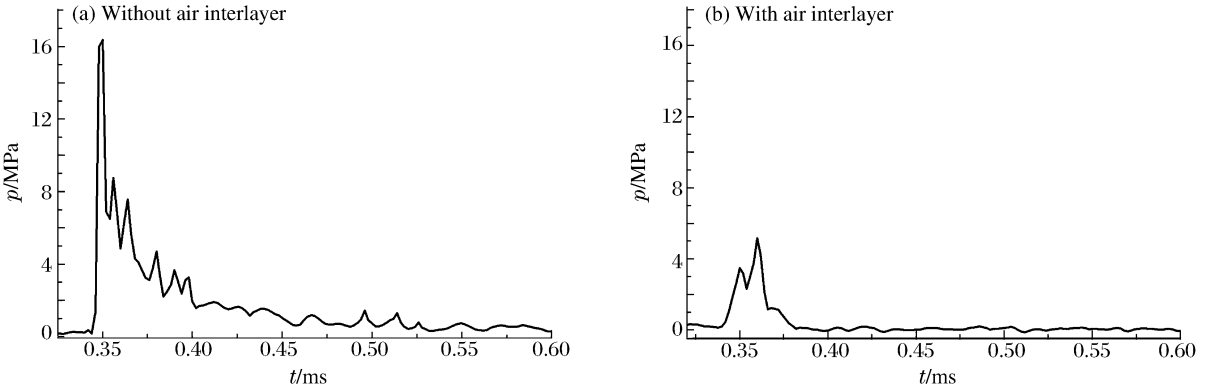


图 5 10 g 黑索金冲击波曲线

Fig. 5 Curve of shock wave produced by 10 g RDX

从图 5 可以看出,在无空气隔层时测点处冲击波压力峰值为约 16.8 MPa,压力由零上升至峰值的时间为 6.0 μs ,从峰值降至零的时间为约 36.0 μs 。在空气隔层作用下,冲击波压力峰值为约 5.1 MPa,压力由零上升至峰值历时为 20.0 μs ,从峰值降至零历时为约 18.0 μs 。冲击波峰值压力衰减了 70%,上升时间延长了 3.3 倍,总体作用时间减短了 9%。可见空气隔层对冲击波具有很好的衰减效果,具有一定的工程应用价值。

在图 3(b)和图 5(b)中,可以明显地看到两个压力峰值,这可能是由于空气隔层宽度太小,当透过空气隔层的冲击波在传感器位置卸载时,绕射过空气隔层的冲击波作用到了压力传感器上。

3 能量分布

水下爆炸压力信号的分析经历了傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波和小波包变换过程,目前小波分析仍是非平稳态数据分析最有效方法之一。小波包分析的基本思想是对小波分析中没有分解的高频部分同样分解为高频和低频部分,依次类推进行多层次划分^[4-6]。小波包分解是一种比小波分解更精细的分解方法,具有更高的时频特性。

小波包分解时用到的小波基函数不是唯一的,也不是任意的,小波基的选取是小波包分析的一个基本问题。研究者们在这方面做了大量的工作,目前对于非平稳信号小波包分析时应用比较多的是 db8 小波基函数^[7],在工程问题分析中也取得了比较好的效果。本文中对水下爆炸压力信号进行小波包分析时采用 db8 小波基函数。而在对水下爆炸压力信号进行小波包分析时,还必须确定小波包分解的深度。小波包分解深度必须与测试系统的最小工作频率相匹配,否则将导致分析信号失真,不能真实反映原始信号。实验中所用测试系统的最小工作频率为 5 Hz,采用的信号采样频率为 500 kHz,根据采样定理,分析频率为 250 kHz,可将水下爆炸压力信号分解到第 16 层,对用的最低频带为 0~3.815 Hz。

由小波包分解得到了各频带范围内的分量,各频带内的压力分量仍为关于时间变化的曲线。将水下爆炸信号分析到第 16 层,则各层对应的能量为

$$E_i = \int |S_i|^2 dt = \sum_{j=1}^m |x_{ij}|^2 \quad (5)$$

$$E_0 = \sum_{i=1}^{2^n-1} |E_i|^2 \quad (6)$$

式中: n 为小波包分解的层数, $n=16$; E_i 为第 i 频率带信号对应的能量; E_0 为分析信号的总能量; S_i 为第 i 频率带的小波分解信号; x_{ij} 为信号 S_i 的离散点幅值; 其中 $i=1,2,\dots,2n$; $j=1,2,\dots,m$, m 为信号的离散采样点。

各频带能量占总能量的比例

$$\eta_i = \frac{E_i}{E_0} \quad (7)$$

对实验测试得到有、无空气隔层的水下爆炸冲击波压力信号进行小波包分解,得到在布设空气隔层前后分析信号的总能量,发现布设空气隔层后冲击波能量衰减了 53.4%,可见空气隔层对冲击波能量的衰减非常明显。

由公式(5)~(7)得到小波变换分层重构信号布设空气隔层前后不同频带上水下爆炸能量分布的情况,如图 6~7 所示。

从图 6 可以看出,水下爆炸冲击波压力含有丰富的频率成分,在各频率段都有一定的能量。未布设空气隔层时,0~100 kHz 范围内能量最大,布设空气隔层后,在 0~50 kHz 范围内能量最大。布设空气隔层前后冲击波能量相差很大,可见空气隔层对各频率段的能量都有很好的衰减作用,尤以 30~45、55~95 kHz 频段最明显,说明空气隔层对该频段范围内的信号能量衰减能力强。从图 7 可以看出,除了个别频段,绝大部分频段能量衰减都在 50%以上,说明空气隔层对各频率段的冲击波能量都有较好的衰减效果。

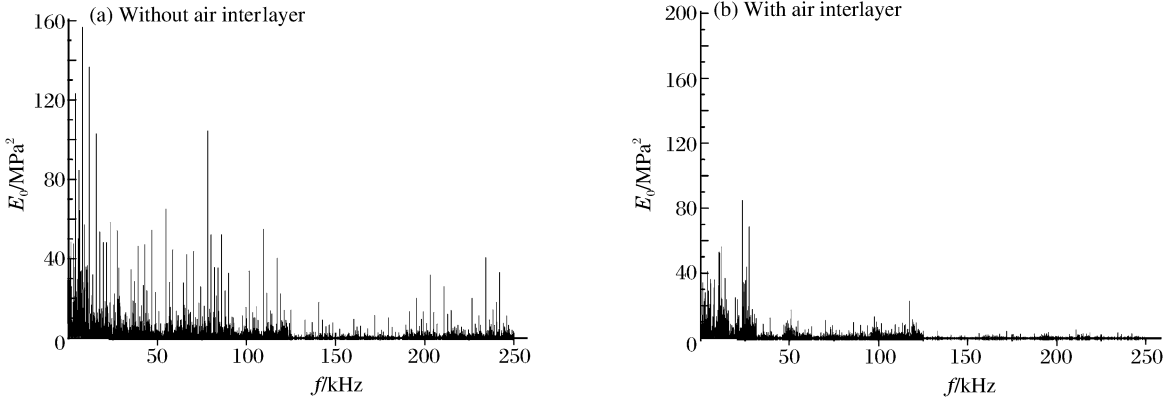


图 6 水下爆炸冲击波能量分布
Fig. 6 Shock waves' energy distribution

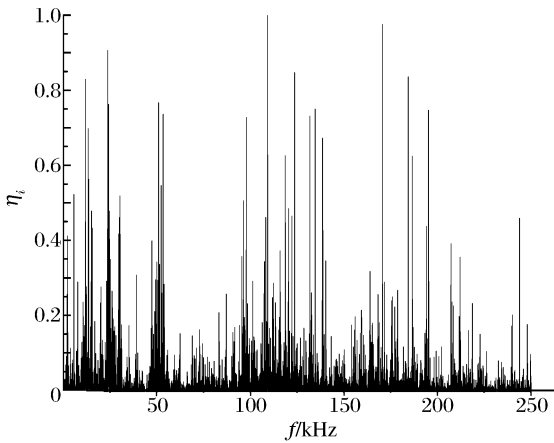


图 7 空气隔层对水下爆炸冲击波能量的衰减
Fig. 7 Shock waves' energy decay
by air interlayer

4 结 论

基于水下爆破工程防护安全的迫切需要,对提出的

(1)采用波动理论,提出了水下爆炸冲击波防护的设计原则,这对水下爆破工程实践中选用合适的防护材料具有一定的指导意义;

(2)对提出的空气隔层衰减冲击波设想进行了实验研究,发现空气隔层能有效衰减冲击波峰值压力,且衰减效果随空气隔层厚度增加而明显提高;

(3)采用小波包方法对实验测试结果进行了分析,发现水下爆炸冲击波能量分布频率较广,在空气隔层作用下,各频率段的冲击波能量都有很好的衰减作用,空气隔层对绝大部分频率段的冲击波能量衰减都在 50%以上。

研究表明,空气隔层能够在水下爆破工程安全防护中达到良好的效果,具有一定的实践价值。可进一步进行这方面的研究,并应用到工程中,提高水下爆炸安全防护水平。

参考文献:

[1] 张志波,李春军,李红勇,等. 气泡帷幕在水下爆破减震工程中的应用[J]. 爆破, 2003, 20(2): 75-76.
ZHANG Zhi-bo, LI Chun-jun, LI Hong-yong, et al. Application of air bubble purdah in the damping measure in the underwater blasting[J]. Blasting, 2003, 20(2): 75-76.

[2] 周睿,冯顺山. 气泡帷幕对水中冲击波峰值压力衰减特性的研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(2): 13-17.
ZHOU Rui, FENG Shun-shan. Study on weakening peak pressure of underwater shock wave by bubble curtain[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(2): 13-17.

[3] 王礼立. 应力波基础[M]. 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 45-47.

[4] 温华兵,张健,尹群,等. 水下爆炸船舱冲击响应时频特征的小波包分析[J]. 工程力学, 2008, 25(6): 199-203.
WEN Hua-bing, ZHANG Jian, YIN Qun, et al. Wavelet packet analysis of time-frequency characteristic of cabin shock response due to underwater explosion[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(6): 199-203.

[5] 李夕兵,张义平,刘志祥. 爆破震动信号的小波分析与 HHT 变换[J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(6): 528-535.
LI Xi-bing, ZHANG Yi-ping, LIU Zhi-xiang. Wavelet analysis and Hilbert-Huang transform of blasting vibration signal[J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(6): 528-535.

- [6] 凌同华,李夕兵.多段微差爆破振动信号频带能量分布特征的小波包分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(7):1117-1122.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. Analysis of energy distributions of millisecond blast vibration signals using the wavelet packet method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(7):1117-1122.
- [7] 胡昌华,张军波,夏军.基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M].西安:西安电子科技大学出版社,2004:265-266.

An investigation into attenuation of underwater shockwave by air interlayer^{*}

JIA Hu^{1,2}, SHEN Zhao-wu²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal University,
Nanyang 473061, Henan, China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China,
Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: Based on the wave theory, this paper puts forward the design principles of the protection against underwater explosion shockwave. Besides, in light of the actual situation of safety protection in underwater blasting practices, experimental studies are carried out to test the hypotheses regarding the attenuation of underwater shockwave by the air interlayer. It is found that the air interlayer can effectively attenuate the shockwave peak pressure. In order to study the energy distribution characteristics of the attenuation of underwater shockwave by the air interlayer, the paper proposes a way of approaching the energy distribution of underwater explosion shockwaves from wavelet analysis. Given that the energy distribution of underwater explosion shockwaves is widely ranged in frequency, the paper finds out that under the impact of the air interlayer, the shockwave energy in each frequency range has desirable attenuating capability, and that the attenuated shockwave energy in the majority of frequency ranges can amount to 50% of the original. The research results show that, the air interlayer plays a positive role in strengthening the safety protection in underwater blasting and effectively reduce the destructive effects of underwater explosion shockwaves, and hence has a practical value.

Key words: mechanics of explosion; energy distribution; wavelet analysis; air interlayer; underwater explosion

* Received 13 October 2010; Revised 25 March 2011

Supported by the China Postdoctoral Science Foundation (201003799)

Corresponding author: JIA Hu, jiahu@mail.ustc.edu.cn