

文章编号: 1001-1455(2011)04-0428-05

金属导爆索的爆炸水声特性*

贾 虎^{1,2}, 沈兆武¹

(1. 中国科学技术大学近代力学系, 安徽 合肥 230027;

2. 南阳师范学院土木建筑工程学院, 河南 南阳 473061)

摘要: 为了研究金属导爆索的水声特性, 进行了水下爆炸压力测试和气泡脉动实验, 获得了金属导爆索水下爆炸冲击波传播和衰减特性及气泡脉动特性。研究了金属导爆索水下爆炸的声压级、声持续时间、混响效应和功率谱特性, 结果表明: (1) 金属导爆索水下爆炸声压级较高, 具有很强的声功率; (2) 金属导爆索水下爆炸后产生的气泡脉动和随后产生的大量小气泡持续时间长, 能够显著提高水下爆炸的混响效应和持续时间; (3) 金属导爆索水下爆炸声的频率范围非常广, 在各频率范围内都有很强的能量, 尤以低频段能量最高。可见, 金属导爆索具有声压级高、频率范围广、混响效应强和声持续时间长的特点。

关键词: 爆炸力学; 水声特性; 水下爆炸; 金属导爆索; 声压级; 功率谱; 气泡脉动

中图分类号: O389

国标学科代码: 130·3599

文献标志码: A

第二次世界大战以来, 人们对水下爆炸进行了系统研究, R. H. Cole^[1]在有关研究成果的基础上, 系统阐述了水下爆炸的主要现象和基本规律, 建立了比较完整的水下爆炸理论, 但这些研究的重点主要是水下爆炸对目标的破坏效应。而上世纪 80 年代以来, 随着声纳探测技术和鱼雷制导技术等不断发展, 水声对抗受到高度重视, 开始对鱼雷对抗技术进行广泛研究。作为软杀伤式有效手段的水声干扰器材, 由于电声效率低, 存在空化现象和近场效应, 无法增加发射声功率、实现很高的辐射声功率。为了解决这一问题, 必须大力发展深水炸弹或引爆式声诱饵等硬杀伤性对抗技术, 而这类技术还不成熟^[2]。

为了探索更有效的水声干扰源, 进行了含能材料水下爆炸实验和声波特性参数测试的研究。D. E. Weston^[3]研究了水下爆炸作为水下声源在不同含能材料与装药量情况下的声学特性, 并给出了实验结果。潘正伟等^[4]也对炸药水中爆炸水声特性进行了初步研究, 证明炸药水下爆炸是高功率、宽频带的水声干扰源。吴成等^[5]测试了 3 种炸药(TNT, RS211 和 RS3-4)的水下爆炸特性, 比较了不同炸药水下爆炸的声波特性。由于现代舰艇的水中通讯、鱼雷自导广泛采用声信号, 因此可采用炸药水下爆炸方法作为一种新的噪声干扰源, 对水中声探测设备实现强噪声压制性干扰, 对水下武器的制导系统产生威胁。但是炸药水下爆炸持续时间短, 不具有实际作战意义, 因此有必要研究水下连续爆炸声信号。

沈兆武等利用具有自主知识产权的新型金属导爆索生产工艺, 生产出的金属导爆索侧向约束力强、药芯密度较高、装药均匀、线装药密度低、爆速稳定, 具有广泛的发展前景^[6]。在前期预研中, 发现它能在水下产生连续爆炸声信号, 有望在水声对抗中发挥作用。

本文中, 为了探求高功率、宽频带、连续性的水声干扰源, 以水下爆炸理论为基础对金属导爆索水下爆炸水声特性进行研究, 以期得到有效连续水声干扰源, 为水下对抗提供新的对抗手段。通过水下爆炸压力测试和气泡脉动实验, 获得金属导爆索水下爆炸冲击波传播和衰减特性及气泡脉动特性, 研究金属导爆索水下爆炸的声压级、声持续时间、混响效应和功率谱特性。

* 收稿日期: 2010-04-13; 修回日期: 2010-09-05

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, 博士研究生。

1 金属导爆索水下爆炸实验

实验在 $\varnothing 5\text{ m}\times 5\text{ m}$ 的水下爆炸塔中进行。采用外径 1.8 mm 、长 2.0 m 、线装药量 1.5 g/m 的金属导爆索作为爆炸声源。金属导爆索中点固定在水池的中轴线水下 2.9 m 的位置,传感器固定在直径 1 mm 的尼龙线上,尼龙线的下端挂配重物垂直放入水下,传感器入水深度 2.9 m ,距离金属导爆索 1.0 m 。信号采样频率为 5 MHz 。

从图1可以看出,冲击波压力在 $3\text{ }\mu\text{s}$ 时间内从零上升到峰值压力 $p_m=5.21\text{ MPa}$,可见压力幅值呈跳跃状上升,随后成指数近似衰减。定义从 p_m 衰减到 p_m/e 所需时间为特征时间^[7], $\theta=42\text{ }\mu\text{s}$,在 θ 之后,冲击波的衰减缓慢多了。

金属导爆索气泡脉动周期可以通过水下爆炸实验获得的压力曲线获得,图2是实验中测得的第1次气泡脉动压力曲线。由图2可以精确确定气泡脉动周期为约 15 ms ,虽然气泡脉动压力峰值为 0.47 MPa ,不到冲击波压力峰值的 10% ,但比冲击波峰值压力持续时间长很多。

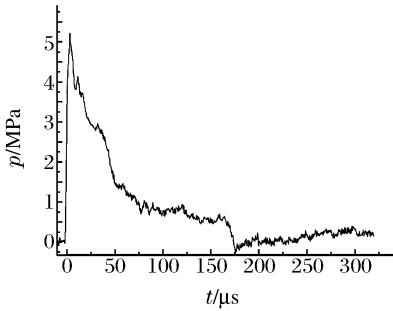


图1 金属导爆索水下爆炸冲击波压力

Fig. 1 Shockwave pressure-time curve of metal-clad detonating cord

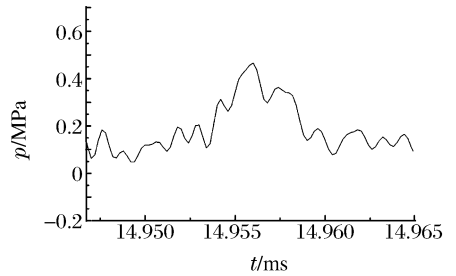


图2 金属导爆索气泡脉动压力

Fig. 2 Specific energy of shockwave-time curve of metal-clad detonating cord

2 水下爆炸声持续时间

2.1 水下爆炸声压级

一定时间间隔内的最大瞬时声压称为峰值声压,也叫声压振幅,用 p_m 表示。在一定时间间隔内,瞬时声压的均方根值称为有效声压

$$p_e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt} \quad (1)$$

式中: T 为所取的时间间隔; p 为瞬时声压。

水下爆炸时有效声压与声压振幅之间的关系为^[8-10]

$$p_e = p_m / \sqrt{2} \quad (2)$$

声源级(单位为dB)的定义^[8-10]为

$$l_s = 20 \lg(p_e / p_{\text{ref}}) \quad (3)$$

式中: p_{ref} 为基准瞬时声压。

如果选取 $1\text{ }\mu\text{Pa}$ 为参考级,则水下爆炸声压级(p_m 的单位为 μPa)

$$l_s = 20 \lg(p_m / \sqrt{2}) \quad (4)$$

由于水介质不是理想介质,爆炸声波能量在水中传播时会发生转换而被水吸收,因此在计算水下爆炸声压级时,必须考虑扩散损耗 l_t (单位为dB)。

根据水下声源传播损失定义可得^[8-10](r 的单位为m)

$$l_t = 10 \lg(I_1 / I_r) = 20 \lg r \quad (5)$$

式中: r 为目标点距离水下爆炸声源的距离; I_1 为距离水下爆炸声源 1 m 处的声强; 在水声工程中, I_r 为距离水下爆炸声源 r 处的声强。

以距离爆炸点 1 m 处的声压作为声源级, 则目标点的声压级 l_{sp} (单位为 dB) 为

$$l_{sp} = l_s - l_1 = 20 \lg(p_m / \sqrt{2}) - 20 \lg r \quad (6)$$

图 3 为金属导爆索水下爆炸声压级时域图。从图中可以看出, 金属导爆索水下爆炸声压级完全可以达到 200 dB 以上, 在持续 15 ms 以后时金属导爆索的爆炸声压级仍在 200 dB 上下摆动, 说明金属导爆索水下爆炸具有很强的声功率。

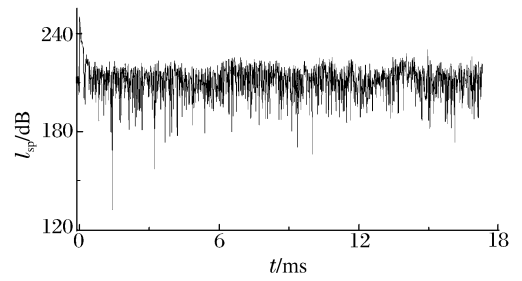


图 3 金属导爆索水下爆炸声压级

Fig. 3 Sound pressure level of metal-clad detonating cord

2.2 水下爆炸声持续时间

气泡脉动是水中爆炸的现象之一^[11-12]。有限长金属导爆索水下爆炸时, 爆轰持续时间非常短, 爆炸冲击波压力呈指数快速衰减。由图 1 可以看出, 冲击波压力的脉冲宽度仅为 170 μs 左右, 但金属导爆索水下爆炸, 会产生气泡脉动, 随后产生大量气泡, 增加爆炸声的持续时间。

采用高速摄影(拍摄幅频为 2 000 s^{-1})记录的金属导爆索水下爆炸的气泡运动规律, 如图 4。

由图 4 看出, 金属导爆索水下爆炸时第 1 次气泡脉动过程基本上是柱型轴对称的, 在 150 ms 左右时气泡脉动仍然非常明显, 说明金属导爆索水下爆炸脉冲压力波的宽度和持续时间比较长。在经历 3 次脉动后, 气泡逐渐溃灭, 变成大量的小气泡, 在水下爆炸 1 s 之后水中仍有大量的小气泡。虽然产生的气泡脉动压力峰值和随后产生的大量小气泡的压力与冲击波压力相比微乎其微, 但是这些现象却能显著增加水下混响效应。当声纳发射信号与气泡脉动以及气泡脉动过后产生的大量小气泡相遇时, 会在接收点迭加而形成无规则的声散射, 提高水下的混响效应。

2.3 水下爆炸声混响效应

从图 4 中可以看出, 金属导爆索作为水下爆炸声源所产生的声压信号波形近似为一个平稳、连续的波, 水下爆炸声压级在 200 dB 左右摆动, 持续时间可达 15 ms 以上。从图 4 中可以看出, 气泡脉动和随后产生的大量小气泡持续时间较长, 在 1 s 左右时水中仍有大量气泡, 这些气泡可以对声波产生强烈的反射和散射作用, 能显著增加水下混响效应, 形成一定宽度的遮声屏障。可见金属导爆索水下爆炸会产生强烈的混响效应, 水下爆炸声持续时间较长。

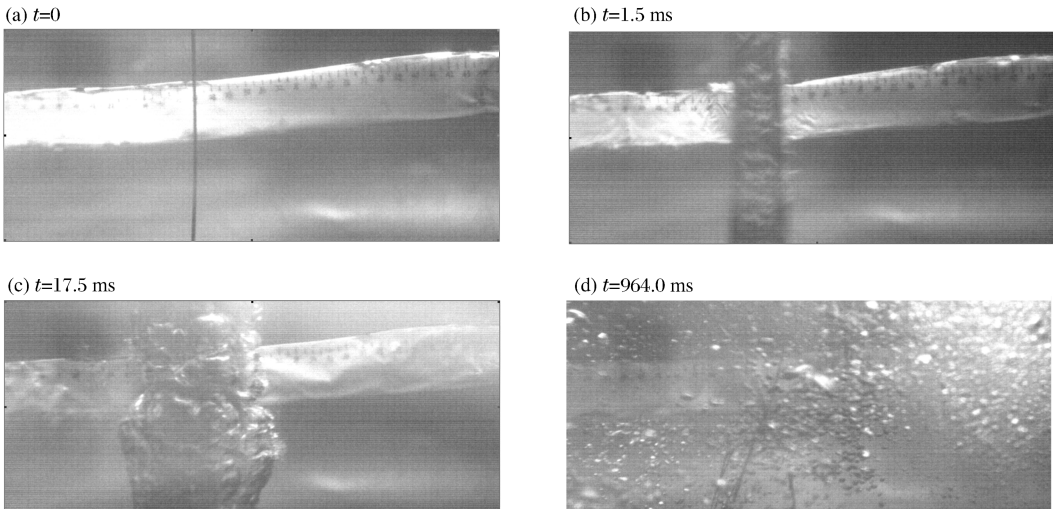


图 4 金属导爆索水下爆炸气泡脉过程典型图像

Fig. 4 Pictures of bubble pulses of metal-clad detonating cord

3 水下爆炸声功率谱

在水下爆炸压力信号分析中,功率谱密度并不代表真正物理意义上的功率或能量,但功率谱密度可以看成是一定频率谐波分量能量的相对大小。采用 Matlab 工具,运用 Welch 方法的海明窗函数^[13]对金属导爆索水下爆炸声信号进行分析,功率谱变化曲线如图 5 所示。

从图 5 可以看出,金属导爆索水下爆炸功率谱随频率的衰减变化规律为:在 0~20 kHz 迅速衰减,在 20~1 000 kHz 范围内在 200 dB 上下摆动,随后在 1 000~1 500 kHz 范围内急速下降,1 500 kHz 以上部分降至 123 dB 附近,近似成平台。金属导爆索在 100 kHz 以下声功率谱的相对能量可达到 230 dB 以上,在 10 kHz 以下的相对能量最高达到 290 dB,说明在低频段能量最高。金属导爆索水下爆炸声的频率范围非常广,1 000 kHz 范围内都有很强的能量。

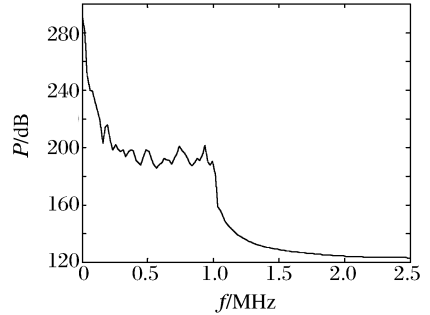


图 5 金属导爆索水下爆炸功率谱

Fig. 5 Power spectrum of metal-clad detonating cord

4 结 论

通过对金属导爆索水下爆炸水声特性的研究,得出如下结论:

(1)金属导爆索作为水下爆炸声源所产生的声压信号波形近似为一个平稳、连续的波,与单发弹药相比可明显提高水下爆炸脉冲宽度,水下爆炸声压级较高,完全可以达到 200 dB 以上,金属导爆索的爆炸声压级在持续 15 ms 后仍在 200 dB 上下摆动,具有很强的声功率;

(2)金属导爆索水下爆炸时冲击波持续时间非常短,但冲击波过后产生的气泡脉动和随后的大量小气泡持续时间非常长,能显著提高水下爆炸的混响效应和 underwater 爆炸声持续时间;

(3)金属导爆索水下爆炸声的频率范围非常广,在 1 000 kHz 范围内都有很强的能量,特别是在 10 Hz 以下低频段能量最高。

参考文献:

- [1] Cole R H. Underwater explosions[M]. New York: Dover Publications, 1965.
- [2] 赵媛媛. 水下爆炸对鱼雷声纳换能器作用与干扰的研究[D]. 北京:北京理工大学,2006.
- [3] Weston D E. Underwater explosions as acoustic source[J]. Proceedings of the Physical Society, 1960,76(2):233-249.
- [4] 潘正伟,焦善武,顾晓辉. 水下爆炸-高功率宽频带的水声干扰源[J]. 南京理工大学学报,1999,23(6):507-509.
PAN Zheng-wei, JIAO Shan-wu, GU Xiao-hui. Underwater explosion is an acoustic interference source with high power and wide band[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1999,23(6):507-509.
- [5] 吴成,廖莎莎,李华新,等. 3 种炸药水下爆炸的声波特性测试及其对比分析[J]. 北京理工大学学报,2009,29(1):1-4.
WU Chen, LIAO Sha-sha, LI Hua-xin, et al. An investigation and analysis on the acoustic characteristics of three types of explosive charges by underwater explosion[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2009,29(1):1-4.
- [6] 梅群. 低能量导爆索关键技术及应用研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2007.
- [7] 廖学燕,沈兆武,马宏昊,等. 新型复合炸药 KD-1 的能量输出特性和力学性能[J]. 火炸药学报,2008,31(4):14-17.
LIAO Xue-yan, SHEN Zhao-wu, MA Hong-hao, et al. Energy output and mechanical characteristics of composite explosive KD-1[J]. Chinese Initiators & Pyrotechnics, 2008,31(4):14-17.

- [8] Adushkin A V, Khristoforov B D. Seismic, hydroacoustic, and acoustic action of underwater explosion[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2004,40(6):707-713.
- [9] Adushkin A V, Khristoforov B D. Hydroacoustic disturbance in nuclear explosion[J]. *Combustion Explosion and Shock Waves*, 2004,40(6):694-698.
- [10] 顾金海,叶学千. 水声学基础[M]. 北京:国防工业出版社,1981.
- [11] 赵生伟,周刚,王占江,等. 小当量水中爆炸气泡的脉动现象[J]. *爆炸与冲击*, 2009,29(2):213-216.
ZHAO Sheng-wei, ZHOU Gang, WANG Zhan-jiang, et al. Bubble pulses of small-scale underwater explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2009,29(2):213-216.
- [12] 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.
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.
- [13] 伊鑫,曲爱华. 基于 Welch 算法的经典功率谱估计的 Matlab 分析[J]. *现代电子技术*, 2010,17(3):7-9.
YI Xin, QU Ai-hua. Matlab Simulation analysis of power spectrum estimation based on welch method[J]. *Modern Electronics Technique*, 2010,17(3):7-9.

Underwater sound characteristics of metal-clad detonating cords*

JIA Hu^{1,2}, SHEN Zhao-wu¹

(1. *Department of Modern Mechanic, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;*

2. *School of Civil Engineering and Architecture, Nanyang Normal University, Nanyang 473061, Henan, China)*

Abstract: Underwater explosion pressure test and gas bubble pulsation experiment were conducted to obtain the transmission and attenuation properties as well as the gas bubble pulsation properties for the underwater explosion shockwaves of the metal-clad detonating cords. And some underwater explosion performances for the metal-clad detonating cords were explored such as the sound pressure level, sound duration, reverberation effect, and power spectrum. Results show that the metal-clad detonating cords display a high level of sound pressure and sound power; that the gas bubble pulsations following the underwater explosion of the metal-clad detonating cords and the ensuing huge amount of small bubbles will persist for a long time, which can observably increase the reverberation effect and sound duration of the underwater explosion; and that the underwater explosion sound of the metal-clad detonating cords covers a wide range of frequencies, the energy in each of which is powerful, and the energy in the low frequency range is the highest.

Key words: mechanics of explosion; underwater sound characteristics; underwater explosion; metal-clad detonating cords; sound pressure level; power spectrum; gas bubble pulsation

* Received 13 April 2010; Revised 5 September 2010

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