

文章编号: 1006-9941(2008)05-0603-03

## 具有脉动燃烧效应的烟火药水中燃烧声频特性

欧阳的华<sup>1</sup>, 潘功配<sup>1</sup>, 关华<sup>1</sup>, 侯伟<sup>1</sup>, 范磊<sup>1,2</sup>, 杜雪峰<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094; 2. 解放军理工大学工程兵学院, 江苏南京 210006)

**摘要:**为研究一种新型的水声无源干扰材料,采用水声测试系统,对具有脉动燃烧效应的烟火药的水中燃烧进行了试验研究,测试了所形成的声频特性,并探讨了其形成的原因。结果表明,15 g 具有脉动燃烧效应的烟火药水中燃烧时能形成声压最高为 340 Pa,对应的声压级为 51 dB,燃烧持续时间为 18.5 s,频率主要为 0~2000 Hz 之间的低声频。

**关键词:**军事化学与烟火技术;烟火药;水中燃烧;声频

**中图分类号:** TJ5

**文献标识码:** A

### 1 引言

烟火药通常是几种物质的机械混合物<sup>[1]</sup>。法国拉克鲁瓦公司利用烟火药研制出了一种“烟火-声发射器”声诱饵<sup>[2]</sup>,通过它产生的“强力”噪声来对付被动声自导装置,或者通过干扰主动装置的信号来诱骗或干扰鱼雷。许多实验研究发现<sup>[3]</sup>,某些烟火药,在外界条件恒定的情况下进行燃烧时,会出现周期性的脉动燃烧现象(某些烟火药在燃烧时会产生一定量的固体、液体残渣,当它们覆盖到下一层药剂的表面上时,能够造成下一层的药剂在尚未引燃的瞬间处于低温辐射——“熄灭”状态,当下一层药剂被低温辐射引燃后又产生高温进行燃烧,接着又产生固体、液体残渣覆盖到再下一层药剂,从而又会出现“熄灭”,以此传递燃烧,这样周期性燃烧的现象即是烟火药的脉动燃烧或振荡燃烧)。文献[3-5]对烟火药在空气中脉动燃烧的现象进行了测试研究,本文就不再赘述。陈宁<sup>[6-7]</sup>对现役的反鱼雷软杀伤技术的局限性进行了分析总结,结合烟火药能够自供氧进行持续燃烧的原理<sup>[1]</sup>和声纳、声自导鱼雷工作的特点等,提出了利用具有脉动燃烧效应的烟火药在水中进行燃烧形成一定的声频作为反鱼雷声纳诱饵的设想,相关的进一步研究尚未见报道。

为此,我们将具有脉动燃烧效应的烟火药在水中进行了燃烧试验,并对其形成的声频特性进行了探讨与分析,该研究对探索与鱼雷智能化、低频化发展趋势

相适应的新型水声对抗器材具有一定的参考价值。

### 2 试验

#### 2.1 试样的制备

本试验采用氧化剂(40%~50%,质量含量,下同)、可燃剂(30%~40%)以及频率调节剂(20%~30%)组成的具有脉动燃烧效应的烟火药反应体系(周期约为 0.6 s),将各组分混合均匀过筛后,压制成密度为  $1.8 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 、直径为 18 mm、质量为 15 g 的药柱,用于水下燃烧试验。

#### 2.2 试验仪器及装置

实验仪器主要有水听器(是一种压电式传感器,型号为 B&K-715A8;灵敏度为  $1 \text{ Pa}/0.362 \text{ pC}$ )、电荷放大器(型号为 B&K-2610;具有多个放大值选择,本实验选  $1 \text{ mV}/\text{Pa}$ )、信号采集分析系统(DEWESoft-2501,量程为 0~100 kHz)等,试验装置示意图如图 1 所示。

#### 2.3 测试方法

实验在  $12 \text{ m} \times 7 \text{ m} \times 5.6 \text{ m}$  的水池中进行,燃烧药柱与水听器之间的距离即测试距离为 1 m,药柱和水听器的水深都为 2.7 m。水听器采集到的信号经电荷放大器,再由信号采集系统记录下来,在计算机中使用 DEWE-Soft 6.5 分析软件进行分析,将数据导入 FlexPro7 数据处理软件中进行处理。

### 3 结果与讨论

测试的燃烧时压力( $p$ )随时间( $t$ )变化的关系曲线如图 2 所示。从图 2 中可以看出,具有脉动燃烧效应的烟火药在水中燃烧时能够形成一定的声压,最高接近 340 Pa 左右,并且燃烧能够持续一定的时间,15 g 药剂在水中能够持续燃烧 18.5 s 左右。不像水中爆炸那样,

收稿日期: 2008-05-12; 修回日期: 2008-07-21

作者简介: 欧阳的华(1983-),男,在读博士研究生,主要从事军事化学与烟火技术研究。e-mail: oydh2010@yahoo.com.cn

通讯联系人: 潘功配(1945-),男,教授,博士生导师,主要从事军事化学与烟火技术研究。

持续时间很短,单发爆炸只能持续  $100\ \mu\text{s}$  左右<sup>[8]</sup>。

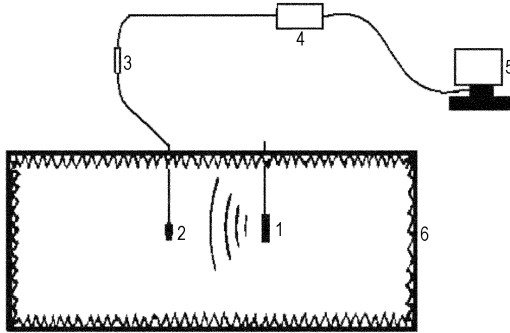


图1 试验装置示意图

1—烟火药, 2—水听器, 3—电荷放大器,  
4—信号采集系统, 5—计算机, 6—消声池

Fig.1 Sketch of experimental set-up

1—pyrotechnic composition, 2—hydrophone, 3—charge amplifier,  
4—signal sampling system, 5—computer, 6—anechoic tank

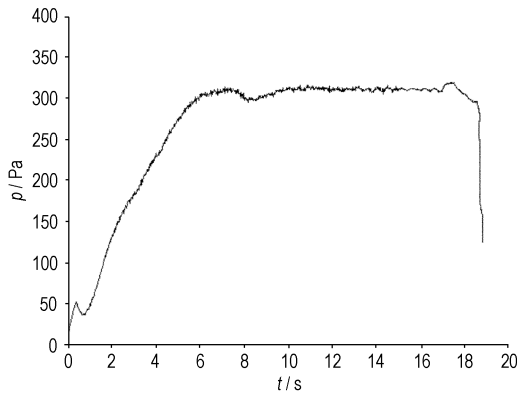


图2 具有脉动燃烧效应的烟火药  
水中燃烧时的压力与时间曲线

Fig.2 The pressure-time curve of pyrotechnic composition  
pulsating combustion underwater

图3是以  $1\ \mu\text{Pa}$  为参考级,经过 FlexPro7 中自带的谱图转化功能进行处理后所得的频谱图。为了看得更加清楚,将图3对应的前200 Hz的频谱图进行放大就可以得到图4所示的频谱图。

从图3可以看出,具有脉动燃烧效应的烟火药在水中燃烧时会形成一定的频率和声压级。其中频率主要在  $0\sim 2000\ \text{Hz}$  之间的低频段,对应的声压级最高接近  $51\ \text{dB}$ 。分析表明,频率、声压和声压级都比较低的主要原因是由于具有脉动燃烧效应的烟火药在水中燃烧时形成声频的主要原理是该类烟火药燃烧时能够周期性地产生大量气体和高温残渣,气体溶解于水中被分散,溢出时就会在水中形成大量的气泡;气泡在上升的过程中由于周围存在压力的改变和表面张力的作用,形状会由扁平状态逐渐变为球形状态,而这种改变

是通过振荡的方法达到的,在这个过程中每个气泡都是微小的声源<sup>[9]</sup>,另外这些气泡的破裂和消失也会辐射出一定的声能<sup>[10]</sup>。

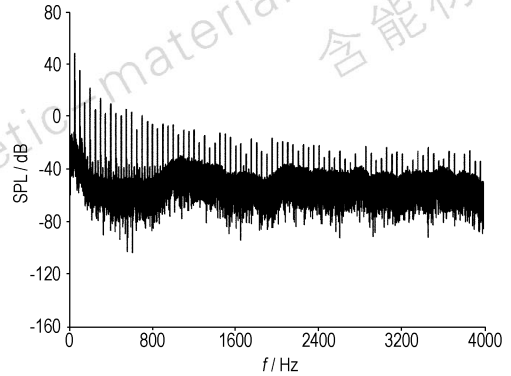


图3 具有脉动燃烧效应的烟火药水中燃烧的频谱图

Fig.3 Spectrum of pyrotechnic composition  
pulsating combustion underwater

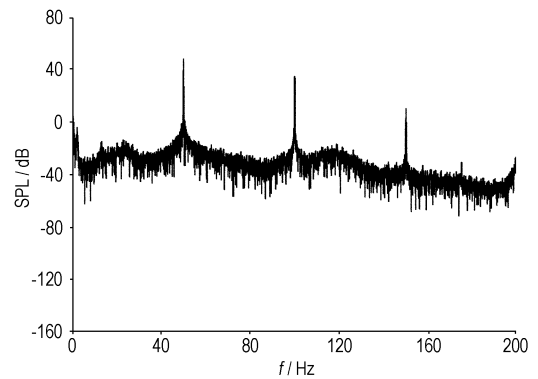


图4 前200 Hz的频谱图

Fig.4 Spectrum of first 200 Hz

与此同时,燃烧生成的高温残渣与水作用,使水发生热膨胀,当温度足够高时甚至会使水发生汽化从而形成二次声频。但是整个过程相对于水中爆炸来说是一个持续的、不太剧烈的过程,存在一定的作用时间,其在水中形成的压力与水中初始的静压力相比相差不大。不像水中爆炸那样,所有的能量是在一瞬间释放的,从而能够在水中形成巨大的冲击波,冲击波波阵面压力和速度在传播过程中下降很快,从而能够迅速衰减成强声波。

## 4 结论

采用水声测试系统对具有脉动燃烧效应的烟火药在水中燃烧时形成的声频特性进行了初步研究。试验结果表明,  $15\ \text{g}$  具有脉动燃烧效应的烟火药在水中燃烧时形成的频率主要在  $0\sim 2000\ \text{Hz}$  之间的低频段、声压最高为  $340\ \text{Pa}$ ,对应的声压级最高为  $51\ \text{dB}$ ,燃烧持

续时间为 18.5 s。随着鱼雷、声纳的低频化发展,其有望成为一种新型的对利用低频段工作的声自导鱼雷和声纳等水生设备进行干扰和诱骗的无源诱饵材料。

#### 参考文献:

- [1] 潘功配,杨硕. 烟火学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997: 42-44.
- [2] Massimo Annati. Anti-torpedo defence systems [J]. *Military Technology*,1995(10): 10-16.
- [3] 冯长根,曾庆轩. 化学振荡混沌与化学波[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004: 148-164.
- [4] 冯长根,刘赵森,曾庆轩,等. 反应  $\text{NH}_4\text{ClO}_4 + \text{Mg} + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  的非线性化学动力学: 固相振荡燃烧的实验现象[J]. *化学学报*,1999,57(3): 229-235.
- FENG Chang-gen, LIU Zhao-miao, ZENG Qing-xuan, et al. The nonlinear chemical reaction kinetics of  $\text{NH}_4\text{ClO}_4 + \text{Mg} + \text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  system I. Experimental phenomenon of solid-phase oscillatory combustion [J]. *Acta Chimica Sinica*,1999,57(3): 229-235.
- [5] 张蕊,刘赵森,曾庆轩,等. 烟火剂中的振荡燃烧现象[J]. *火工品*,1999(4): 9-13.
- ZHANG Rui, LIU Zhao-miao, ZENG Qing-xuan, et al. The phenomenon of the oscillation burning in the pyrotechnic composition [J]. *Initiators & Pyrotechnics*,1999(4): 9-13.
- [6] 陈宁,潘功配,陈昕,等. 现役反鱼雷软杀伤技术局限性分析[J]. *舰船科学技术*,2006,28(3): 78-82.
- CHEN Ning, PAN Gong-pei, CHEN Xin, et al. Analysis of limitation on active anti-torpedo soft-damaged technology [J]. *Ship Science and Technology*,2006,28(3): 78-82.
- [7] 陈宁,潘功配,关华. 一种烟火型反鱼雷用声纳诱饵剂技术[J]. *火工品*,2005(1): 39-41.
- CHEN Ning, PAN Gong-pei, GUAN Hua. A pyrotechnical-type anti-torpedo decoy technology [J]. *Initiators & Pyrotechnics*,2005(1): 39-41.
- [8] 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): 507-510.
- 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): 507-510.
- [9] 蒋兴舟,陈喜,张静远. 鱼雷气幕屏蔽和降噪的实验研究[J]. *海军工程学院学报*,1994(4): 62-67.
- JIANG Xing-zhou, CHEN Xi, ZHANG Jing-yuan. The experimental research on noise screen and noise attenuation by using air-bubble curtain in torpedo [J]. *Journal of Naval Academy of Engineering*,1994(4): 62-67.
- [10] D·罗斯. 水下噪声原理[M]. 北京:海洋出版社,1983: 92-94.

## Experimental Study on Acoustic Frequency Property of Pulsating Combustion Underwater for Pyrotechnic Composition

OUYANG De-hua<sup>1</sup>, PAN Gong-pei<sup>1</sup>, GUAN Hua<sup>1</sup>, HOU Wei<sup>1</sup>, FAN Lei<sup>1,2</sup>, DU Xue-feng<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China;

2. Engineering Institute of Engineering Corps., PLA Univ. of Sci. & Tech, Nanjing 210006, China)

**Abstract:** In order to investigate one kind of new underwater acoustical passive jamming materials, the underwater burning of pyrotechnic composition having pulsating combustion effect was studied. The acoustic frequency characteristic formatted from the underwater burning of pyrotechnic composition was also studied with the testing system for underwater acoustic. The reasons for its formation were discussed. Results show that 15 g pyrotechnic composition having pulsating combustion effect can form the sound pressure as high as 340 Pa. Its corresponding acoustic pressure level is 51 dB. The time of burning can last 18.5 s. The acoustic frequency is mainly between 0-2000 Hz in the band of low-frequency.

**Key words:** military chemistry and pyrotechnics; pyrotechnic composition; underwater burning; acoustic frequency