文章编号:1000-5773(2010)06-0443-06

烟火药水下燃烧及其有效作用时间研究*

欧阳的华[1],关 华[1],潘功配[1],杜雪峰[1],肖贵林[2]

(1.南京理工大学化工学院,江苏南京 210094;
2.长沙机电产品研究开发中心,湖南长沙 410100)

摘要:提出了烟火药水下燃烧有效作用时间的概念,分析了当前烟火药水下燃烧和水下爆炸等声辐射特性的测试手段和处理方法的不足。基于 Pulse Labshop 软件平台,结合实验结果,采用图形切片方法,获得了有效作用时间,解决了烟火药水下燃烧或水下爆炸等声源有效作用时间的评价问题,为工程应用和性能评价提供了一种方法。

关键词:烟火药;水下燃烧;有效作用时间;声源
中图分类号:O35;TJ530 **文献标识码**:A

1 引 言

烟火药水下燃烧和炸药水下爆炸等过程都是复杂的高压物理与化学变化过程。目前开展烟火药水下燃烧[1]或炸药水下爆炸[2-3]声辐射特性研究的工作,主要是采用水声测试系统测试烟火药在水下燃烧或爆炸时的整个过程(即燃烧时间内)中,不同时刻所对应的能量时域曲线,再对该数据进行傅里叶变换,得到其相应的频域曲线或直接测试得到其频域曲线。这样处理只能给出能量与燃烧时间或能量与频率的对应关系,而无法同时给出能量、时间以及频率的关系,从而无法对作用的有效时间进行评估。然而,烟火药水下燃烧的有效作用时间如同烟幕有效作用时间一样,是衡量其作用效能的一项重要性能参数,关系到它的实际应用,所以对其进行研究具有重要的实际意义。

为此,本研究基于丹麦 B&K 公司的 PULSE Labshop 软件分析平台,对所测试的数据进行处理得到声能、时间以及频率的三维关系图,同时为了更加精确直观地评估有效作用时间,采用切片的处理方法,得到不同频率所对应的整个燃烧过程中的声能变化或某一个频率段内所对应的整个燃烧过程中的声能变化,根据实际要求对有效作用时间进行评估。

2 有效作用时间的定义

作为一个声源,在实际应用过程中,不仅要满足一定的能量要求,同时还要满足一定的频率要求,才可以达到使用要求,才具有应用价值。本研究所指的有效作用时间(t_{eff})是指既能满足应用所规定的能量要求,同时又能满足频率要求的烟火药水下燃烧时间。有效作用时间并不等同于烟火药的水下燃烧时间,应该将两者区别开来。燃烧时间是指从药剂被引燃到燃烧停止的时间,这个过程在燃烧产物与水作用所形成的噪声中,并不是所有噪声的能量和频率都能同时满足应用要求的,就像烟幕弹从爆炸形成烟幕云团到最终的扩散消失会存在一个有效遮蔽面积、有效作用时间的问题一样,所以燃烧时间应该大于或等于有效作用时间。

* **收稿日期**:2010-01-25;**修回日期**:2010-03-25
基金项目:2009 年江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CX09B_105Z)
作者简介:欧阳的华(1983—),男,博士研究生,主要从事烟火技术研究. E-mail:oydh2010@yahoo.com.cn
通讯作者:潘功配(1945—),男,教授,主要从事军事化学与烟火技术研究. E-mail:pangongp@163.com

有效作用时间(t_{eff})的性质如下：

(1) 有效作用时间(t_{eff})与药剂的燃烧时间有关，燃烧时间越长从某种意义上来说，有效作用时间(t_{eff})也越长，但是并不一定成正比关系；

(2) 有效作用时间(t_{eff})与药剂燃烧所形成噪声的性质有关，能量强度大，频率覆盖越宽，满足应用的部分多，则有效作用时间(t_{eff})就长；

(3) 有效作用时间(t_{eff})与实际应用的要求有关，实际应用要求的频率宽或能量低时，一般有效作用时间(t_{eff})长。

从以上分析可知，有效作用时间(t_{eff})是与药剂自身的性质及使用要求都有关的物理量，是影响烟火药水下燃烧能否实际应用的关键因素。

3 实 验

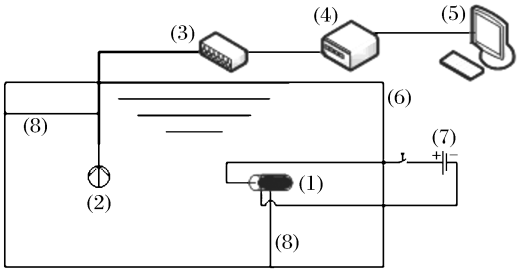
3.1 试样的制备

本实验采用氧化剂、可燃剂和粘合剂组成的烟火药反应体系，将各组分混合均匀过筛后，压制成密度为 1.8 g/cm^3、直径为 18 mm、质量为 15 g 的药柱，分别装于自行设计的壳体中，接上电点火头，即可用于水下燃烧实验。

3.2 实验仪器及装置

实验仪器主要有水听器(B&K-8104)、电荷放大器(B&K-2610，1 mV/Pa)、信号采集分析系统等，由它们组成的 20 Hz～100 kHz 宽带水下噪声源测试装置示意图如图 1 所示。其中，消声水池的规格为：50 m×15 m×10 m(杭州应用声学研究所的)，其内注满自来水，燃烧药柱与水听器之间的距离即测试距离为 1.17 m(本研究给出的结果都已折算为 1 m 处的)，药柱和水听器的水深都为 4 m。

另外，本次测试的噪声频带声压级及噪声声压谱密度级的测量不确定度为：10 Hz～2 kHz，U=2.0 dB；2～40 kHz，U=1.5 dB。



(1) Pyrotechnic composition; (2) Hydrophone;
(3) Charge amplifier; (4) Signal sampling system;
(5) Computer; (6) Anechoic tank;
(7) Ignition circuit; (8) Sent

图 1 实验装置图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental set-up

3.3 测试方法

实验参照《声学 水声换能器测量》(GB/T 7965－2002) 和《水下噪声测量》(GB/T 5265－85)，水听器采集到的信号经放大器，再由信号采集系统记录下来，以 1 μPa 为参考声压，在计算机中采用丹麦 B&K 公司提供的 PULSE Labshop 软件进行分析和处理。

4 结果与讨论

4.1 测试结果

采用上述水声测试系统测试烟火药水下燃烧整个过程中所辐射的噪声，两种不同配方的结果分别如图 2 和图 3 所示。

图 2(a)和图 3(a)为两种配方烟火药水下燃烧时所测得的时域波形图，其中图中的一个大峰值是由于点火着火时的小段时间内，点火药和过渡药的快速燃烧冲破防水层与水作用而形成的。由图 2(a)和图 3(a)可知，烟火药水下燃烧相比水下爆炸来说，燃烧时间较长，且在波形上也明显不一样，是一个持续变化的过程。这主要是由于燃烧时形成一定量的高温、高压气体和高温残渣，以较大的速度喷入到水下，会和周围低速流动的水发生湍流混合，使水的稳定状态受到破坏而发生扰动，从而形成一定的湍流噪声。同时，通过水下燃烧的高速摄影研究[4]发现，烟火药在水下燃烧时会产生大量的气泡，这些气泡

大小不等,其演变过程与水下排气过程[5-9]类似,可分为气泡的形成、上浮、破裂成气泡云以及气泡云的水面破裂喷涌 4 个阶段。这 4 个阶段由于都存在气泡体积的膨胀、收缩和崩溃破裂,故整个过程都会向外辐射声能。同时由于气泡大小不等,受力的作用程度不同,故体积演变的剧烈程度也不尽相同,所以向外所辐射出来的噪声曲线就不会呈现一定的规律性,而是形成时高时低的噪声。图 2(b)和图 3(b)是通过傅里叶变换得到的相应的频谱图,由图 2(b)和图 3(b)可知,烟火药在水下燃烧所辐射的噪声能量主要位于低频部分。

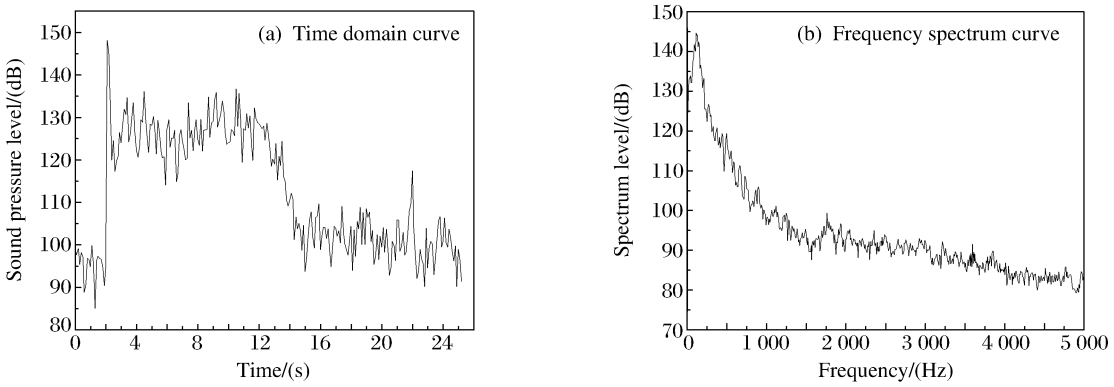


图 2　实验 1 的时域与频域图

Fig. 2　Time domain and frequency spectrum curve of first experiment

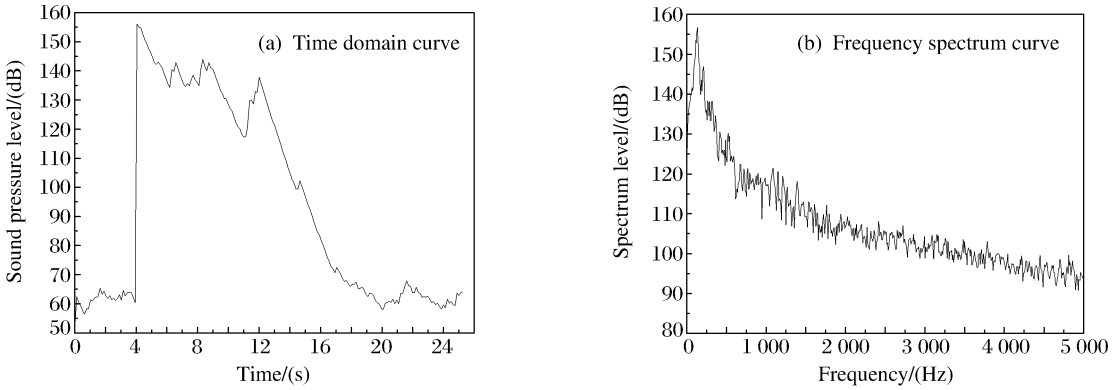


图 3　实验 2 的时域与频域图

Fig. 3　Time domain and frequency spectrum curve of second experiment

结合图 2 和图 3 的结果,由时域图能得到声能与时间的关系,可以知道满足一定声能要求的时间段,但是无法确定满足一定频率要求的时间段。反过来,由两个频域图可知满足一定能量要求的频率段,但是无法确定满足相应条件的时间段,即存在无法确定有效作用时间的问题。

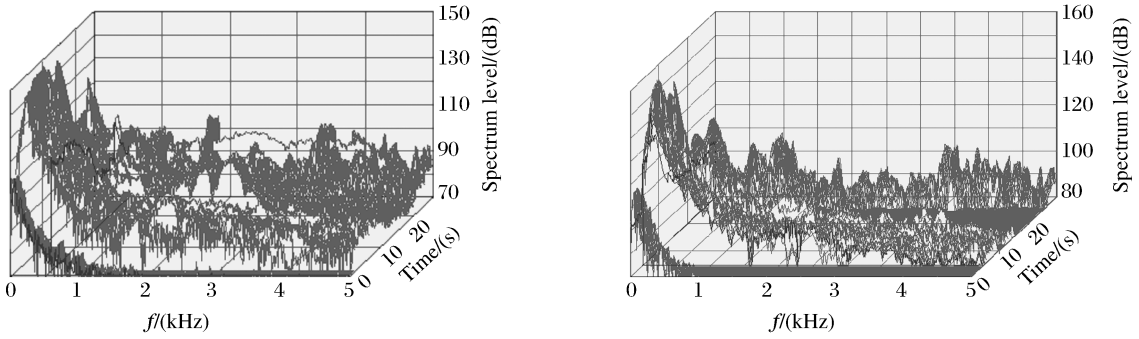
4.2　基于 Pulse Labshop 软件的有效作用时间分析

Pulse Labshop 软件是丹麦 B&K 公司开发的一种用于振动、声学等方面的先进测试分析软件。测试之前通过函数设置,可以得到所要测试两种配方所形成信号的三维关系(时间、频率以及能量)图,如图 4 所示。

虽然得到了噪声信号的时间、频率以及能量关系图,但是对于实际的分析来说,还无法很好地确定出满足某一频率和能量的有效时间,特别是满足某一段频率和能量的声能有效时间。为此采用 Pulse Labshop 软件自身带有的切片处理功能,对图 4 进行切片处理。

具体步骤如下:首先右击“Autospectrum(Signal 1)-Input”,选择“Insert”再选择“Slice”,在出现的“Autospectrum(Signal 1)-Input-Slice”上再右键选择“属性 Property”就会弹出一个切片设置对话框,右

键单击对话框中的“Slice”选择“Insert Group”，就会出现一个“Slice Group”图标，再右键单击该图标选择“Insert Slice”，就会出现“Start /Stop”和“Centre/Width ”两种切片方式的选择框，前者为切取某一宽度频率的图形，后者是以某一频率为中心切取图形，当宽度设置为零时，即可获得某一频率的波形图。



(a) Experiment 1　　(b) Experiment 2

图 4　时间-频率-能量的三维关系图

Fig. 4　Three dimensionl curve of time-frequency-energy

图 5 和图 6 分别是实验 1 和实验 2 在频率为 100 Hz 处，整个燃烧过程声能随时间变化的曲线图。实际应用时，比如要求声源在处于该频段处的声能在 125 dB 以上，则可以以纵坐标上“125 dB”那个点为起点画平行于时间轴的直线，如两图中的虚线所示，则该虚线与声能曲线的两个交点（A 点和 B 点）之间的时间间隔即为所要求解的有效作用时间，即：$t_{\mathrm{eff}}=t_{AB}=12.40$ s（实验 1），$t_{\mathrm{eff}}=t_{AB}=8.62$ s（实验 2）。同理，对确定要求满足某一段频率（如 800～1 200 Hz）和能量（97.5 dB 以上）的声能有效作用时间，也可以采用同样的切片方法和处理方法，其结果如图 7 和图 8 所示，由此可知，满足要求的有效作用时间为两段

$$t_{\mathrm{eff}}=t_{AB}+t_{\mathrm{CD}}=11.00+4.58=15.58\ \mathrm{s}\ (\text{实验 1}) \qquad t_{\mathrm{eff}}=t_{AB}=10.78\ \mathrm{s}\ (\text{实验 2})$$

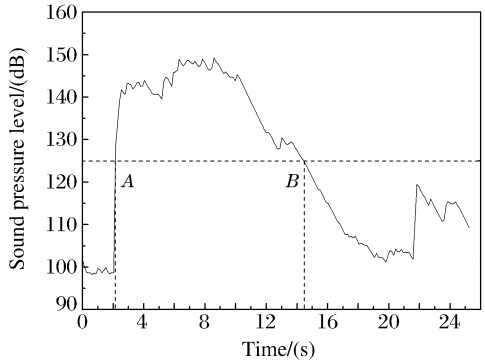


图 5　频率为 100 Hz、能量为 125 dB 的切片图（实验 1）

Fig. 5　Section graph of 100 Hz and energy 125 dB (Experiment 1)

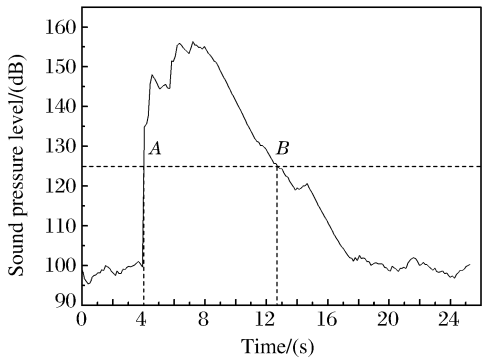


图 6　频率为 100 Hz、能量为 125 dB 的切片图（实验 2）

Fig. 6　Section graph of 100 Hz and energy 125 dB (Experiment 2)

由图 5 和图 7 可知，通过切片所得的两幅图相差较大，主要是由于所选取的切片频率不同形成的。说明即使是同样的一个声源信号由于形成噪声的复杂性，在不同的频率段或是某个频率所具有的能量特性是不同的，这可以从三维图的起伏不定看出。说明在实际使用时，对声源的要求不同，其有效作用时间则不同。例如，对于图 7，如果实际使用要求为声能在 125 dB 以上，则其有效作用时间为零。

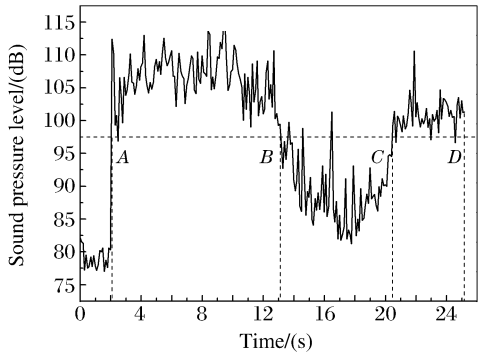


图 7　频率为 800～1 200 Hz、能量为 97.5 dB 的切片图

Fig. 7　Section graph of 800～1 200 Hz and energy 97.5 dB

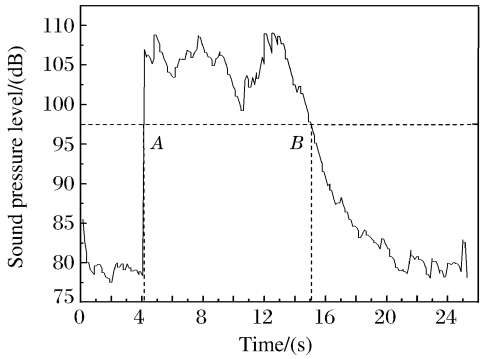


图 8　频率为 800～1 200 Hz、能量为 97.5 dB 的切片图

Fig. 8　Section graph of 800～1 200 Hz and energy 97.5 dB

5　结　论

(1) 不同的烟火药配方水下燃烧所形成的声源,相同的使用要求(能量和频率),其有效作用时间一般不会相同,即使是同一种配方产生的噪声源,如果使用要求不同,其有效作用时间也不尽相同;

(2) 通过基于 PULSE Labshop 软件平台,结合切片处理方法来获取有效作用时间的方法简单易行,为分析和评价烟火药水下燃烧性能提供了一种手段,该方法也可用于其它的水下声源(如水下爆炸、电火花水下放电等)信号的有效作用时间的评估以及相关分析和处理。

References:

[1] Ouyang D H, Pan G P, Guan H, et al. Experimental Study on Acoustic Frequency Property of Pulsating Combustion Underwater for Pyrotechnic Composition [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008, 16(5): 603-605. (in Chinese)
欧阳的华,潘功配,关　华,等. 具有脉动燃烧效应的烟火药水中燃烧声频特性 [J]. 含能材料, 2008, 16(5): 603-605.

[2] Wu C, Liao S S, Liu H X, et al. An Investigation and Analysis on the Acoustic Characteristics of Three Types of Explosive Charges by Underwater Explosion [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2009, 29(1): 1-4. (in Chinese)
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.

[3] Pan Z W, Jiao S W, Gu X H. 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. (in Chinese)
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.

[4] Ouyang D H, Pan G P, Guan H, et al. Experimental Study of Bubbles by Pyrotechnic Composition Combustion Underwater [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 24(4): 347-352. (in Chinese)
欧阳的华,潘功配,关 华,等. 烟火药水下燃烧气泡的实验研究 [J]. 实验力学, 2009, 24(4): 347-352.

[5] Miyahara T, Terakado H, Takahashi T. Transition from Bubbling to Jetting at Single Orifice [J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1983, 16(6): 454-458.

[6] Wraith A E. Two Stage Bubble Growth at a Submerged Plate Orifice [J]. Chem Eng Sci, 1971, 26: 1659-1671.

[7] Anagbo P E, Brimacombe J K, Castillejos A H. A Unified Representation of Gas Dispersion in UpwardlyInjected Submerged Gas Jets [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1989, 28(4): 323-330.

[8] Moody F J. Dynamic and Thermal Behavior of Hot Gas Bubble Discharged into Water [J]. Nuclear Engineering and Design, 1986, 95: 47-54.

[9] Zhang W P, Zhang T Y, Liu Z G, et al. The Two-Phase Flow Pattern of Submerged Exhaust of Diesel Engine [J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1996, 17(3): 14-18. (in Chinese)
张文平, 张天元, 刘志刚, 等. 柴油机水下排气口气液两相流动状态研究 [J]. 内燃机工程, 1996, 17(3): 14-18.

Research on Pyrotechnic Composition Combustion Underwater and Its Effective Acting Time

OUYANG De-Hua[1], GUAN Hua[1], PAN Gong-Pei[1], DU Xue-Feng[1], XIAO Gui-Lin[2]

(1. *School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing* 210094, *China*;
2. *Center of Electromechanical Products Research and Development, Changsha* 410100, *China*)

Abstract: The defining of effective acting time for pyrotechnic composition combustion underwater was put forward. The main problems of current methods for testing and processing the acoustic radiation characteristics of pyrotechnic composition combustion underwater and explosion underwater were analyzed. And then, based on Pulse Labshop software platform and experimental results, the effective acting time for pyrotechnic composition combustion underwater was obtained, with graphic slicing technique. This new method can be used to assess the effective acting time of pyrotechnic composition combustion underwater and explosion underwater sound source, and so on. It also provides a reference for the engineering application and performance evaluation.

Key words: pyrotechnic composition; combustion underwater; effective acting time; sound source