

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.05.003

# 奥托-Ⅱ推进剂的冲击波感度和能量输出特性<sup>\*</sup>

胡宏伟<sup>①</sup> 鲁忠宝<sup>②</sup> 杨 睿<sup>②</sup> 宋 浦<sup>①</sup> 吕汝信<sup>②</sup>

①西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

②水下信息与控制国防科技重点实验室(陕西西安,710075)

[摘 要] 为了研究奥托-Ⅱ [ $m(1,2$  丙二醇二硝酸酯)/ $m($ 癸二酸二丁酯)/ $m($ 邻二硝基二苯胺):76.0/23.5/0.5)]推进剂的安全性和能量输出特性,利用大隔板试验和空中爆炸压力测试系统分别测试了奥托-Ⅱ推进剂的冲击波感度和能量输出特性。结果表明:奥托-Ⅱ推进剂的临界隔板厚度( $L_{50}$ )为17.5 mm,临界起爆压力约为11.03 GPa,与铸装TNT接近,具有较好的安全性。与1.0 kg A-IX-I [ $m(RDX)/m($ 钝感剂):95.0/5.0)]炸药相比,1.0 kg的A-IX-I和1.96 kg的奥托-Ⅱ推进剂耦合爆炸产生的冲击波超压和冲量分别提高了62.8%和25.9%,主发装药和推进剂的耦合爆炸是提高鱼雷爆炸威力的一种新型设计思路。

[关键词] 奥托-Ⅱ推进剂;大隔板试验;冲击波感度;爆炸威力;耦合爆炸

[分类号] TJ55;O389

## 引言

奥托-Ⅱ推进剂是一种性能优良的单元液体鱼雷推进剂,也是目前热动力鱼雷使用较多的一种推进剂,其组成(质量分数)为1,2 丙二醇二硝酸酯(76.0%)、癸二酸二丁酯(23.5%)和邻二硝基二苯胺(0.5%)的混合物。奥托推进剂能量大、安全,所以被热动力鱼雷大量采用,美国海军一直将其用于MK-46、MK-48等鱼雷<sup>[1]</sup>。

自美国海军率先公布不敏感弹药(IM)政策以来,世界范围内弹药设计基本都要求弹药具有较好的安全性或低易损性。冲击波感度作为弹药性能评估的一项重要内容,在安全和冲击起爆方面都具有十分重要的意义。目前弹药的冲击波感度研究主要集中在炸药的冲击波感度<sup>[2-4]</sup>,然而鱼雷作为一个系统,推进剂的安全性也是必须考虑的。推进剂发生

燃烧或爆炸,可能导致弹药的主装药发生爆炸,弹药的主装药爆炸引发推进剂同时爆炸,也会增大弹药的破坏威力。

本文针对奥托-Ⅱ推进剂进行了冲击波感度试验,获得了其临界隔板厚度和爆炸能量输出性能,既能为鱼雷的安全性设计提供依据,还可为提高鱼雷威力提供一种新的设计思路。

## 1 试验

### 1.1 试验样品

主发装药为压装A-IX-I,尺寸 $\varnothing 95$  mm $\times$ 95 mm,质量1.0 kg。被发装药为奥托-Ⅱ推进剂,质量1.96 kg,奥托-Ⅱ推进剂装填在外径95 mm、内径85 mm、长280 mm的钢筒内。传爆药柱为带8#雷管孔的JH-14药柱,尺寸 $\varnothing 30$  mm $\times$ 32 mm,质量40 g。试验样品的性能参数见表1。

表1 试验样品的配方和性能参数

Tab.1 Formulations and performance parameters of test samples

炸药	配方(质量比)	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$Q_v/(kJ \cdot kg^{-1})$	$D/(m \cdot s^{-1})$
A-IX-I	RDX/钝感剂: 95.0/5.0	1.64	5 180	8 271
JH-14	RDX/黏结剂: 96.5/3.5	1.73	5 644	8 428
奥托-Ⅱ	1,2 丙二醇二硝酸酯/癸二酸二丁酯/ 邻二硝基二苯胺: 76.0/23.5/0.5	1.23	2 934	—

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-12-22

基金项目:水下信息与控制国防科技重点实验室基金项目(705JHC2012-6.1)

作者简介:胡宏伟(1982~),男,硕士,工程师,主要从事爆炸力学和战斗部技术研究。E-mail:hhw505@163.com

通信作者:宋浦(1973~),男,研究员,主要从事爆炸力学和战斗部技术研究。E-mail:songpu73@163.com

### 1.2 测试装置

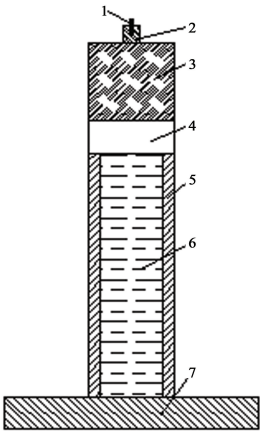
采用 $\varnothing 90$  mm 的大型隔板试验装置<sup>[5]</sup>测量奥托-Ⅱ推进剂的冲击波感度,隔板为有机玻璃板( $\varnothing 95$  mm),见证板为长 200 mm、宽 200 mm、厚 20 mm 的 Q235 钢板。主发装药爆炸产生的冲击波,经有机玻璃隔板衰减后,作用于被发装药,根据见证板的破坏情况和冲击波超压判定被发装药是否发生爆轰。利用兰利法确定出被发装药 50% 起爆的隔板厚度值( $L_{50}$ )来表征试样的冲击波感度。

临界隔板厚度( $L_{50}$ )的计算方法为:

$$L_{50} = (L_{100} + L_0)/2。$$
 (1)

式中: $L_{100}$ 为能使被发装药 100% 发生爆轰的最大隔板厚度,mm; $L_0$ 为能使被发装药 100% 不发生爆轰的最小隔板厚度,mm。

试验装置如图 1 所示。



1 - 雷管;2 - 传爆药;3 - A-IX-1;4 - 有机玻璃隔板;  
5 - 钢筒壁;6 - 奥托-Ⅱ推进剂;7 - 见证板

图 1 大隔板试验装置

Fig. 1 Schematic diagram of large scale gap test

在距离爆心水平距离 3.0 m 处,并排放置 2 个冲击波压力测量装置,冲击波压力测量装置和传感器敏感面均与地表齐平。

### 1.3 测试仪器

测试仪器包括微测公司的 VXI 1115 型多通道波形记录仪, F482A 型 ICP 传感器专用适配器, PCB113B21 壁面压力传感器。冲击波压力采集频率 1 MHz。

## 2 结果与讨论

### 2.1 奥托-Ⅱ推进剂的冲击波感度

奥托-Ⅱ推进剂的冲击波感度试验结果见表 2。见证板的破坏情况见图 2。

表 2 和图 2 可知,奥托-Ⅱ推进剂的临界隔板厚度( $L_{50}$ )为 17.5 mm。冲击波压力在有机玻璃隔板中的衰减模型<sup>[6]</sup>为:

表 2 奥托-Ⅱ推进剂的冲击波感度试验

Tab. 2 Gap test results of OTTO-Ⅱ propellant

$L/\text{mm}$	$\Delta p/\text{MPa}$	见证版	爆轰
0	0.397	破碎	是
10	0.404	破碎	是
15	0.382	破碎	是
17	0.391	破裂、弯曲	是
18	0.239	弯曲	否
20	0.245	弯曲	否



(a) 0 mm

(b) 10 mm



(c) 15 mm

(d) 17 mm



(e) 18 mm

(f) 20 mm

图 2 见证板的破坏情况

Fig. 2 Witness plate after gap tests

$$p = Ke^{ax}。$$
 (2)

式中: $p$ 为冲击波压力, GPa; $x$ 为隔板厚度, mm; $K$ 、 $a$ 为常数。

对于 $\varnothing 95$  mm 的 A-IX-1 炸药,经试验数据<sup>[7]</sup>拟合得到  $K = 15.38$ ,  $a = -0.019$ 。通过公式(2)计算得到,  $L_{50}$  为 17.5 mm 的临界起爆压力为 11.03 GPa。

表 3 对比了奥托-Ⅱ推进剂与几种典型炸药的临界起爆压力。

由表 3 可知,奥托-Ⅱ推进剂的冲击波感度与铸装 TNT 接近,较为钝感,安全性好。

### 2.2 奥托-Ⅱ推进剂的能量输出特性

2 种试样的冲击波超压和冲量见表 4。

由表 4 可知,测距为 3.0 m 时, 1.0 kg A-IX-I 炸药的冲击波超压和冲量分别为 0.242 MPa 和 145.1 Pa·s, 1.0 kg 的 A-IX-I 和 1.96 kg 的奥托-Ⅱ推进剂耦合爆炸产生的冲击波超压和冲量为 0.394 MPa 和

表 3 奥托-Ⅱ推进剂与几种典型炸药的  
临界起爆压力

Tab.3 Critical initiation pressure of OTTO-Ⅱ  
propellant and several typical explosives

试验样品	装药工艺	$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$p_c/\text{GPa}$
RDX	压装	1.74	1.50
TNT	压装	1.63	2.20
	铸装	1.62	11.50
硝化甘油	—	1.60	8.50
硝基甲烷	—	1.14	9.00
$m(\text{TNT})/$ $m(\text{RDX}):$ 50/50	压装	1.70	2.00
	铸装	1.63	3.00
奥托-Ⅱ	—	1.23	11.03

表 4 2 种试样的冲击波超压和冲量

Tab.4 Shock overpressure and impulse  
of two test samples

试验样品	$\Delta p/\text{MPa}$	$I/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
1.0 kg A-Ⅸ-I	0.242	145.1
1.0 kg A-Ⅸ-I 和 1.96 kg 奥托-Ⅱ	0.394	182.5
增益/%	62.8	25.9

182.5 Pa·s,冲击波超压和冲量分别提高了 62.8%和 25.9%,主发装药和推进剂耦合爆炸会大大提高弹药的爆炸威力。

利用刚性地面上爆炸的冲击波超压公式:

$$\Delta p_r = \frac{0.106}{\bar{r}} + \frac{0.43}{\bar{r}^2} + \frac{1.4}{\bar{r}^3}。$$

(3)

式中: $\Delta p_r$  为地面冲击波超压,MPa; $\bar{r}$  为比例距离, $\bar{r}=r/w^{1/3}$ ,m/kg<sup>1/3</sup>。

计算得到测距 3.0 m 处冲击波超压由 0.242 MPa 增大到 0.394 MPa 时,炸药质量由 1.27 kg 增加到 2.39 kg,相当于增加了近一倍的装药量。

A-Ⅸ-I 炸药和奥托-Ⅱ推进剂耦合爆炸的冲击波超压增益较高,冲量增益较低,可以用以下分析来解释:

1)奥托-Ⅱ推进剂的主成分 1,2 丙二醇二硝酸酯是爆炸性物质,奥托-Ⅱ推进剂可认为是一种均质液体炸药;

2)主发装药 A-Ⅸ-I、有机玻璃隔板与装填奥托-Ⅱ推进剂的钢管外径均相同,经过有机玻璃板后,奥托-Ⅱ推进剂相当于受到了一个平面冲击波的作用,提高了对奥托-Ⅱ推进剂的起爆能力;

3)5 mm 钢管的强约束条件以及钢管中向奥托-Ⅱ推进剂中传播的冲击波作用(钢管中的冲击波速度为 5 200 m/s,大于冲击波在奥托-Ⅱ推进剂的传播速度),增强了奥托-Ⅱ推进剂的爆轰性能。

在较强的起爆能力和强约束条件下,奥托-Ⅱ液体推进剂中产生高速爆轰(例如结构和性质与 1,2 丙二醇二硝酸酯相似的乙二醇二硝酸酯,其稳定爆轰速度可达 7 300 m/s),而不是人们通常认为的低速爆轰,导致奥托-Ⅱ推进剂的大部分爆轰能量在 C-J 面内快速释放,近似于理想炸药的爆轰,因此具有较高的冲击波超压。冲量由于超压衰减较快、持续时间较短而较低。

3 结 论

1)奥托-Ⅱ推进剂的临界隔板厚度( $L_{50}$ )为 17.5 mm,临界起爆压力约为 11.03 GPa,与铸装 TNT 接近,具有较好的安全性。

2)主发装药和推进剂耦合爆炸会大大提高鱼雷的冲击波超压和冲量,是一种提高鱼雷毁伤威力的有效途径。

致谢:衷心感谢郭炜高级工程师、任松涛工程师和高赞工程师在试验方面的帮助。

参 考 文 献

[1] 崔绪生. 国外鱼雷技术进展综述[J]. 鱼雷技术, 2003, 11(1):6-11.  
Cui Xusheng. A summary of progress in torpedo technology over the world [J]. Torpedo Technology, 2003, 11(1):6-11.

[2] 黄友梅,禹仲祥,范时俊,等. 小型隔板试验及板凹痕法测爆压[J]. 火炸药学报, 1984(2):16-21.

[3] 封雪松,赵省向,李小平. 一种重结晶黑索今的冲击波感度研究[J]. 含能材料,2007,15(6):581-582,615.  
Feng Xuesong,Zhao Shengxiang,Li Xiaoping. The shock sensitivity of a recrystallizing RDX[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2007,15(6):582-581,615.

[4] 韩勇,鲁斌,蒋志海,等. JO-9159/ECX 复合装药的冲击波感度研究[J]. 含能材料,2008,16(2):164-166.  
Han Yong, Lu Bin, Jiang Zhihai, et al. Shock sensitivity of JO-9159/ECX composite charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2008,16(2):164-166.

[5] 郑孟菊,余统昌,张银亮. 炸药的性能及测试技术[M]. 北京:兵器工业出版社,1990:51-73.

[6] 王作山,刘玉存,郑敏,等. 爆轰冲击波在有机隔板中衰减模型的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2001, 9(4):316-319.

- 械感和火焰感度的影响[J]. 火炸药学报, 2012, 35(4):15-18.
- Yao Lina, Feng Xuesong, Zhao Shengxiang, et al. Influence of nano Al on mechanical sensitivity and flame sensitivity of RDX-based explosive[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2012, 35(4):15-18.
- [10] Lin Moujin, Ma Honghao, Shen Zhaowu. Effect of aluminum fiber content on the underwater explosion performance of RDX-based explosives[J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 39(2):230-235.
- [11] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 黑索今基含铝炸药的铝氧比对爆轰性能及其水下爆炸性能的影响[J]. 兵工学报, 2013, 34(1):45-50.
- Xiang Dalin, Rong Jili, Li Jian, et al. Effect of Al/O ratio on detonation performance and underwater explosion of RDX-based aluminized explosive[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(1):45-50.
- [12] Yan Qilong, Zeman S, Sánchez Jiménez P E, et al. The effect of polymer matrices on the thermal hazard properties of RDX-based PBXs by using model-free and combined kinetic analysis [J]. Journal of Hazardous Materials, 2014, 271:185-195.
- [13] Zhu Wei, Xiao Jijun, Zhu Weihua, et al. Molecular dynamics simulations of RDX and RDX-based plastic-bonded explosives[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2-3):1082-1088.
- [14] Brill T B, Gongwer P E, Williams G K. Thermal decomposition of energetic materials 66. kinetic compensation effects in HMX, RDX, and NTO[J]. The Journal of Physical Chemistry, 1994, 98(47):12242-12247.

## Research of Thermal Decomposition Activation Energy on Al-RDX Hybrid Explosives with Different Components Ratio

ZHENG Yafeng, NAN Hai, XI Peng, LI Kun, CHEN Chunyan

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] The decomposition of different proportions of Al-RDX hybrid explosives were determined by differential scanning calorimetry (DSC), and the decomposition kinetic parameters ( $E_a$  and  $\ln A$ ) were calculated by means of Kissinger equation. The effects of Al-RDX ratio on the thermal decomposition activation energy  $E_a$  were studied. The results indicate that after initial decline the  $E_a$  values tend to rise with the decreasing of Al-RDX ratio. A good relation, which is in agreement with experiment results and can represent the correlation of  $E_a$  with the mass ratio of Al-RDX, is derived from theory. Additionally, it is found that a compensation effect exists between the DSC decomposition kinetic parameters ( $\ln A$  and  $E_a$ ) for all the Al-RDX samples.

[KEY WORDS] physical chemistry; RDX; aluminized explosives; DSC; thermal decomposition

(上接第 12 页)

Wang Zuoshan, Liu Yucun, Zheng Min, et al. Study on the attenuating model of detonation shock wave in the PMMA gap [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2001, 9(4):316-319.

[7] United Nations. Transport of dangerous goods—mannal of tests and criteria [M]. 5th ed. New York and Geneva: United Nations, 2009:185.

## Shock Sensitivity and Energy Output of OTTO-II Propellant

HU Hongwei<sup>①</sup>, LU Zhongbao<sup>②</sup>, YANG Rui<sup>②</sup>, SONG Pu<sup>①</sup>, LÜ Ruxin<sup>②</sup>

①Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

②Science and Technology on Underwater Information and Control Laboratory (Shaanxi Xi'an, 710075)

[ABSTRACT] In order to study the safety and energy output of OTTO-II propellant, the shock sensitivity and the energy output were measured by large scale gap test and air explosion pressure test system, respectively. The results show that the critical gap thicknesses  $L_{50}$  of OTTO-II propellant is 17.5 mm and the critical initiation pressure is about 11.03 GPa, that presents a similar security to cast TNT. Compared with those of A-IX-I explosive, the shock overpressure and impulse of 1.0 kg A-IX-I explosive and 1.96 kg OTTO-II propellant increase 62.8% and 25.9% independently. The main charge and propellant coupled explosion will greatly improve ammunition explosion power.

[KEY WORDS] OTTO-II propellant; large scale gap test; shock sensitivity; explosion power; coupling explosion