

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.05.003

# DNTF/AP/Al 体系炸药的能特性分析\*

杨 斐 王建灵 罗一鸣 严家佳 高 赞 李鸿宾  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 为了研究 DNTF(3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃)/AP/Al 体系炸药的能特性,选取了质量比为 DNTF/AP/Al(35/35/30)的试样进行了水下爆炸能测定和爆热测试,并将试验结果与 TNT 和 RS211 进行了对比。结果表明:试样的比冲击波能是 TNT 的 1.38 倍,与 RS211 相当;比气泡能分别为 TNT 和 RS211 的 4.56 倍和 2.91 倍;总能量为 TNT 和 RS211 的 3.56 倍和 2.26 倍。经计算发现试样的能利用率高达 98%。为了研究造成该配方试样高气泡特性和高能利用率的原因,通过分析对比试样、DNTF 和 DNTF/Al(70/30)体系的水下爆炸试验结果发现,Al 粉的加入显著提高了比气泡能,降低了热损失能;Al 粉和 AP 的联用进一步提高了比气泡能和能利用率,同时也提高了比冲击波能。

[关键词] 爆炸力学;DNTF;水下能;比冲击波能;比气泡能

[分类号] TD235.2+1

## 引言

高能密度材料是当今含能材料领域的研究热点,3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)是我国含能材料领域具有突出地位的新一代高能密度材料,具有熔点低、密度高、威力大、安定性好、感度适中、爆速高、爆发点高和综合性能良好等特点<sup>[1-2]</sup>,可替代 TNT 用作熔铸炸药中的液相载体炸药,并能大幅提高熔铸炸药的能<sup>[3]</sup>。

DNTF/AP/Al 配方体系具有突出的高能特性,理论计算其能最高可以达到 3 倍以上的 TNT 体积当量;目前已有相关研究验证了 AP、Al 与 DNTF 的相容性良好,配方制备工艺也比较成熟的结论,故该体系炸药具有广阔的应用前景。如何发挥 DNTF/AP/Al 炸药的高能特性,必须对其能特性进行深入研究。目前,国内外在这方面的研究还比较薄弱,对其能特性不太了解,限制了 DNTF/AP/Al 炸药的应用。

本文根据熔铸炸药配方设计基本原则,选取质量比为 35/35/30 的 DNTF/AP/Al 体系炸药作为典型研究对象,进行了水下爆炸试验和爆热测试,根据试验结果深入分析了试样的能特性,初步了解了 AP 和 Al 粉在体系中的有利作用,为 DNTF/AP/Al 体系炸药的深入研究提供参考。

## 1 试验方案

### 1.1 试验样品制备

配方的选取原则是先满足熔铸炸药工艺要求的条件下,选取理论计算爆热最大的一组配方作为研究样品。

先将 DNTF 炸药颗粒加热熔化,然后把配比好的 AP 与 Al 粉加入液态的载体炸药中,充分搅拌后,浇铸入已预热直径 25 mm 的模具中,冷却成型后加工成 25 g 的药柱,带 8#雷管孔,样品 DUL 配方及基本参数见表 1。

表 1 试验样品配方及基本参数

Tab.1 Formulation and essential parameters of testing samples

样品	配方 (质量比)	理论密度 $\rho_T$ / (g·cm <sup>-3</sup> )	实测密度 $\rho_0$ / (g·cm <sup>-3</sup> )
RS211	钝化 RDX/TNT/ Al:64/19/17	1.680	1.702
DNTF	DNTF:100	1.937	1.681
DL	DNTF/Al(5 $\mu$ m): 70/30	2.115	1.923
DUL	DNTF/AP/ Al(5 $\mu$ m):35/35/30	2.120	2.011

### 1.2 爆热测试

测试依据为 GJB772A—1997 方法 701.1。

### 1.3 水下爆炸试验

\* 收稿日期:2014-05-15

基金项目:国防科工委计量项目(科工计[2010]1425 号)

作者简介:杨斐(1990~),男,硕士研究生,主要从事混合炸药技术研究。E-mail:461358897@qq.com

通信作者:王建灵(1963~),女,研究员,主要从事炸药性能测试与评估研究

### 1.3.1 试验条件

本试验所用爆炸水池直径为 3.2 m,水池深度 2.6 m,池壁和池底用 8 mm 厚的钢板焊接而成。传感器测点距爆心 0.9 m,装药深度 1.6 m,为总水深的 2/3 (来自水面和池底的影响可以抵消<sup>[4]</sup>),保持传感器与装药同一平面。整个试验装置与测试系统如图 1 所示。

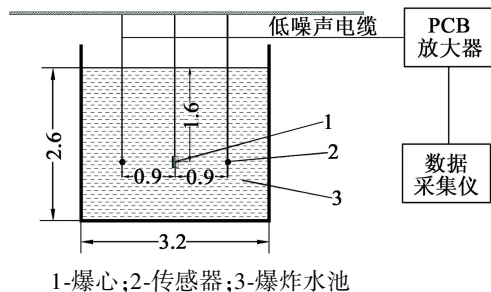


图 1 试验装置与测试系统示意图(单位:m)

Fig.1 Illustration of experiment set-up and testing system (unit: m)

试验时采用 8# 雷管由端面中心一次引爆。每组测试 2 个平行试样,每发药柱取 2 组数据。

### 1.3.2 测试系统

水下试验采用了 Gen5I 型数据采集仪,传感器采用压电式电气石水下激波传感器,型号为 PCB138A,灵敏度为 6.988 MPa/V,压力测量范围为 0~69 MPa。

## 2 试验结果与处理

### 2.1 爆热测试

样品理论爆热与实测爆热数据如表 2 所示。

表 2 样品爆热参数

Tab.2 Detonation parameters of samples

样品	理论爆热 $Q_v /$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	实测爆热 $Q /$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )
RS211	5.775	5.757
DNTF	6.087	5.286
DL	7.983	7.092
DUL	10.334	9.011

### 2.2 水下爆炸参数的计算

#### 2.2.1 比冲击波能

通过测量水中冲击波压力-时间曲线可计算得到水下爆炸的冲击波能和气泡能,在距爆心为  $R$  的测点处,比冲击波能  $e_s$  (MJ/kg) 的计算公式为<sup>[5-6]</sup>:

$$e_s = \frac{4\pi R^2}{W\rho_0 C_0} \int_0^\tau p^2(t) dt. \quad (1)$$

式中: $R$  为爆炸中心至测点的距离,m; $W$  为装药质量,kg; $\rho_0$  为水的密度,取 1000 kg/m<sup>3</sup>;  $C_0$  为水中的

音速,取 1500 m/s; $p(t)$  为测点处  $t$  时刻冲击波压力,Pa; $\tau$  为积分上限,一般取  $6.7\theta$ ,s。

#### 2.2.2 比气泡能

小水池由于边界效应的影响,水下爆炸的能量输出会存在一定偏差,其中气泡能受边界效应的影响更大,因此,需对气泡能的计算公式进行修正。修正后比气泡能  $e_b$  (MJ/kg) 计算公式如下<sup>[7]</sup>:

$$e_b = \frac{1}{8WC^3K_1} [\sqrt{1+4CT_b} - 1]^3; \quad (2)$$

$$K_1 = 1.135 \frac{\rho_0^{1/2}}{p_h^{5/6}}; \quad (3)$$

$$T_b = t_b \left( \frac{p_i + p_h}{p_0 + p_h} \right)^{5/6}. \quad (4)$$

式中: $W$  为装药质量,kg; $t_b$  为修正前的气泡周期,s; $T_b$  为修正后的气泡周期,s; $C$  为与实际水池中装药位置有关的常数,Bjarnholt 等<sup>[8]</sup>通过实验确定  $C$  值为  $-0.4464 \text{ s}^{-1}$ ;  $p_i$  为测试时水面实测大气压,Pa; $p_0$  为水面标准大气压,Pa; $p_h$  为装药深度处的静水压力,Pa; $\rho_0$  为水的密度,kg/m<sup>3</sup>。

#### 2.2.3 测点处水下爆炸总能量

测点处水下爆炸总能量  $e_t$  由比冲击波能  $e_s$  和比气泡能  $e_b$  组成,为两种能量之和,即:

$$e_t = e_s + e_b. \quad (5)$$

#### 2.2.4 热损失能

由于冲击波在传播过程中对所经之处的水产生冲击加热,致使一部分能量以热的形式损失在水中,称为热损失能  $e_r$ ;炸药水中爆炸的总能量接近于炸药爆炸所释放处的化学能,即爆热  $Q_v$ 。则由测得的  $e_s$  和  $e_b$  以及得到的爆热  $Q_v$  可以计算得到  $e_r$ ,如下式所示:

$$e_r = Q_v - (e_s + e_b) = Q_v - e_t. \quad (6)$$

结合式(1)~式(6)计算后,可得几种炸药水中爆炸试验的比冲击波能  $e_s$ 、比气泡能  $e_b$ 、测点处的水下总能量  $e_t$  以及热损失能  $e_r$ ,如表 3 所示。

## 3 分析与讨论

### 3.1 爆热结果分析

对于 DNTF/AP/Al 体系炸药,由表 2 数据可以看出,DUL 样品的理论爆热和实测爆热值均很高,实测爆热较 RS211、DNTF 和 DL 大约分别提高了 56.5%、70.5% 和 27.1%。

### 3.2 DNTF/AP/Al 炸药与常用炸药水下爆炸能量输出的差异

对比表 3 中 DUL、TNT、RS211 和 DNTF 4 组数据,从测点处的总能量来看,DUL 最高,达到 10.124 MJ/kg,分别为 TNT、RS211 和 DNTF 的 3.56 倍、2.26

表 3 炸药水下爆炸试验能量输出参数

Tab.3 Energy output parameters of explosives by underwater explosion

样品	$e_s/$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	$t_b/$ ms	$e_b/$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	$e_t/$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	$e_s/e_t$ (%)	$e_b/e_t$ (%)	$e_r/$ (MJ · kg <sup>-1</sup> )	$e_r/Q_v$ (%)
TNT	0.894 <sup>[9]</sup>	84.4 <sup>[9]</sup>	1.950 <sup>[9]</sup>	2.844 <sup>[9]</sup>	31.4	68.6	1.386	32.8
RS211	1.424	77.2	3.060	4.484	31.8	68.2	1.291	22.4
DNTF	1.126	86.8	2.048	3.174	35.5	64.5	2.913	47.9
DL	1.112	117.5	5.511	6.623	16.8	73.2	1.360	17.0
DUL	1.232	133.1	8.892	10.124	12.2	81.8	0.210	2.0

倍和 3.19 倍;从比冲击波能和比气泡能来看,到达测点时,比冲击波能的差别不太大,基本处于同一水平,但比气泡能却相差很大,DUL 的比气泡能远远高于其他炸药,分别为 TNT、RS211 和 DNTF 的 4.56 倍、2.91 倍和 4.34 倍;从气泡周期来看,DUL 修正前的气泡周期最高,达到了 133.1 ms;从水中爆炸能量输出结构来看,到达测点时,4 种炸药的能量都以气泡能为主,均超过了总能量的 60%,TNT、RS211 和 DNTF 的气泡能所占总能量比例均为 65% 左右,相差不大,而 DUL 的气泡能所占总能量比例超过了 80%,也就是说水下能量大部分是通过气泡脉动释放;从热损失能来看,在冲击波传播到测点过程中,DUL 的热损失能最低,为 0.21 MJ/kg,仅占总化学能的 2%,说明 DNTF/AP/Al 体系炸药在水下爆炸的能量利用率高达 98%。

综上所述,DNTF/AP/Al 炸药与其他 3 种常用炸药水中爆炸能量差异主要体现在气泡特性上,其比气泡能与气泡周期都很高,而冲击波特性差异不显著。这也导致 DNTF/AP/Al 炸药的水下能量输出结构也与一般水下炸药不同,气泡能所占的比例很高,同时其能量利用率也很高,因此 DNTF/AP/Al 炸药具有广阔的应用前景。

### 3.3 DNTF/AP/Al 炸药水下能量输出特性的原因

由表 3 可以看出,DNTF 单质炸药的水下能量与 TNT、RS211 的水下能量性能在同一水平上,而加入一定量的 AP 和 Al 粉后,DNTF/AP/Al 的水下能量性能特别是气泡特性非常突出,其能量输出结构也发生很大改变。本文从配方角度分析了造成试验中 DNTF/AP/Al 炸药高气泡特性的原因,通过对比 DNTF、DL、DUL 3 种炸药的水下试验数据分析 Al 粉及 AP 的加入对体系水下能量释放的影响。3 种炸药水下爆炸的压力-时间曲线如图 2 所示。

1)由图 2 可以看出,DL 的峰值压力低于 DNTF,

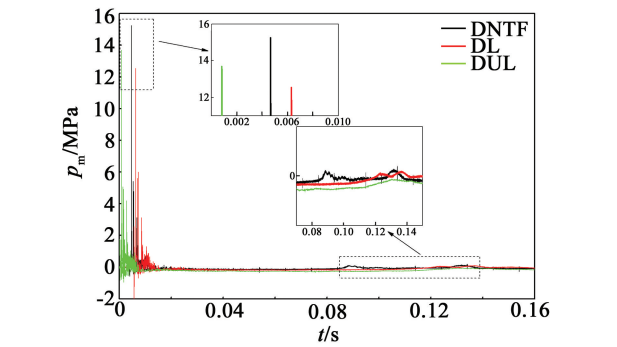


图 2 3 种炸药的压力-时间曲线

Fig.2 Pressure-time curves for three different types of explosives

在压力-时间曲线衰减阶段,DL 的衰减速度明显低于 DNTF,气泡脉动周期明显增大。对比 DNTF 和 DL 的水下试验的数据,DL 的比冲击波能有所降低,但幅度不大;而气泡周期、比气泡能和总能量均大幅提高,分别为 DNTF 的 1.35 倍、2.69 倍和 2.09 倍。同时 DL 中比气泡能占总能量的比例较 DNTF 也增加了 8.7%。

这是因为 Al 粉在爆轰反应区内只有少量参与反应,要吸热和消耗一部分能量,从而降低了爆轰波阵面的能量,故峰值压力会降低;而大部分 Al 粉反应是在炸药爆轰产物膨胀过程中完成,并释放出大量能量,该过程放出的热量对气泡脉动贡献很大,故大幅增加了比气泡能和脉动周期<sup>[10]</sup>。

2)DUL 与 DL 配方中 Al 粉的含量相同,区别是 DL 中不含 AP,由图 2 可以看出,DUL 的峰值压力介于 DNTF 与 DL 两者之间,冲击波衰减更慢,气泡脉动周期进一步增大;分析两组水下能量数据同样发现,DUL 比 DL 的比冲击波能、气泡周期、比气泡能和总能量均有所提高,分别提高了 10.8%、13.3%、61.4% 和 52.9%;同时对能量输出结构也有一定影响,比气泡能占总能量的比例较 DL 增加了 8.6%。

这可能是因为 AP 的加入改变了混合炸药体系

的氧平衡,通过混合炸药氧平衡计算公式计算得 DUL 与 DL 的氧平衡为  $-0.22$  和  $-0.41$ , DUL 更接近零氧平衡,在爆轰反应区促进了炸药颗粒和少量 Al 粉的充分反应,并使剩余 Al 粉在爆炸产物膨胀区反应更完全,故比冲击波能、比气泡能均有所提高,从而提高了炸药水下能量利用率。其中比气泡能的变化更大,能量输出结构也进一步发生改变。

综上所述,Al 粉与 AP 的加入使得 DNTF/AP/Al 炸药具有一般水下炸药没有的水下能量输出特性,如高比气泡能、高能量利用率等。在以后的研究中,将进一步研究 Al 粉和 AP 对 DNTF/AP/Al 炸药水下能量输出影响规律。

#### 4 结论

通过对 DNTF/AP/Al 体系炸药的水下爆炸的试验研究,得出以下结论:

1) 试样相比 TNT、RS211 具有很明显的能量输出优势。试样的实测气泡能分别为 TNT、RS211 的 4.56 倍和 2.91 倍;总能量分别为 TNT、RS211 的 3.56 倍和 2.26 倍;能量利用率高达 98%。

2) Al 粉的加入使比冲击波能略有降低,却大幅提高了比气泡能和总能量,并且能够减少热损失能。

3) AP 的加入改善了炸药体系的氧平衡,使爆轰反应区和膨胀区的反应更加充分,比冲击波能、比气泡能以及总能量均有所提高。

#### 参 考 文 献

- [1] 赵凤起,陈沛,罗阳,等. 含 3,4-二硝基呋喃基氧化呋喃(DNTF)的改性双基推进剂[J]. 推进技术,2004,25(6):570-572,576.
- Zhao Fengqi, Chen Pei, Luo Yang, et al. Study on the composite modified double base propellant containing 3,4-dinitrofurazanfuroxan(DNTF)[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(6): 570-572, 576.
- [2] 胡焕性,张志忠,赵凤起,等. 高能量密度材料 3,4-二

硝基呋喃基氧化呋喃性能及应用研究[J]. 兵工学报, 2004, 25(2): 155-158.

Hu Huanxing, Zhang Zhizhong, Zhao Fengqi, et al. A study on the properties and application of high energy density material DNTF[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(2): 155-158.

- [3] 王亲会. DNTF 基熔铸炸药的性能研究[J]. 火炸药学报, 2003, 26(3): 57-59.

Wang Qinhui. Properties of DNTF-based melt-cast explosives[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2003, 26(3): 57-59.

- [4] 俞统昌,王建灵,王晓峰. 炸药水下爆炸能量测试方法研究[C]//国防军工技术交流会论文集. 北京:国防军工技术交流会组委会, 2001: 1043-1049.

- [5] Cole R H. 水下爆炸[M]. 罗耀杰,韩润泽,李宝善,等译. 北京:国防工业出版社,1960.

- [6] 俞统昌,王晓峰,王建灵. 炸药的水下爆炸冲击波性能[J]. 含能材料, 2003, 11(4): 182-186.

Yu Tongchang, Wang Xiaofeng, Wang Jianling. Underwater shockwave performance of explosives[J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2003, 11(4): 182-186.

- [7] 饶国宁,陈网焯,胡毅亨,等. 不同炸药水下能量输出特性的实验研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(1): 9-11.

Rao Guoning, Chen Wanhua, Hu Yiting, et al. Experimental study on underwater energy output characteristics of different explosives[J]. Explosives Materials, 2007, 36(1): 9-11.

- [8] Bjarnholt G, Holmberg R. Explosives expansion works in underwater detonations[C]// Proceedings of 6th Symposium on Detonation. San Diego: Naval Surface Weapons Center, 1976: 540-550.

- [9] 王晓峰. NEPE 水下炸药配方设计原则研究[D]. 西安:西安近代化学研究所, 2007.

- [10] 孙业斌,惠君明. 军用混合炸药[M]. 北京:兵器工业出版社, 1995.

### Explosion Energy Characteristics of DNTF/AP/Al Explosive

YANG Fei, WANG Jianling, LUO Yiming, YAN Jiajia, GAO Zan, LI Hongbin

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

[ABSTRACT] A DNTF/AP/AL explosive sample with mass ratio of 35/35/30 was selected to measure the underwater explosion energy and explosion heat in comparison with TNT and RS211 for the study of its energy characteristics. The results show that its specific shock wave energy of sample is 1.38 times of TNT and is equivalent to RS211; its specific bubble energy can be 4.56 and 2.91 times of TNT and RS211, respectively; and its total energy is 3.56 and 2.26 times of TNT and RS211, respectively. The calculation indicates that the sample has an energy efficiency up to 98%. Underwater explosion experimental results were analyzed for DNTF and DNTF/Al (70/30) system to determine the factors responsible for the high bubble characteristic and high energy efficiency. It was found that the addition of Al powder significantly improved the specific bubble energy and reduced the heat losses. The combined usage of Al powder and AP can result in a further increase in specific bubble energy and energy efficiency, and higher specific shock wave energy.

[KEY WORDS] explosion mechanics; DNTF; underwater energy; specific shock wave energy; specific bubble energy